資料 7－1

「高温超電導実用化促進技術開発」

研究開発項目：電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発
【交流】・【直流】
研究開発項目：高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発
研究開発項目：高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発
【磁場特性改善】・【生産性向上】

事業原簿【公開版】

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 省エネルギー部

「高温超電導実用化促進技術開発」事業原簿【公開版】

～目次～

事業原簿概要
用語集
Ⅰ．事業の位置づけ・必要性について 1-1
1. 事業の背景・目的・位置づけ 1-1
1.1 背景 1-1
1.2 目的 1-1
2. ＮＥＤＯの関与の必要性・制度への適合性 1-1
2.1 ＮＥＤＯが関与することの意義 1-1
2.2 実施の効果（費用対効果） 1-2

Ⅱ．研究開発マネジメントについて 2-1
1. 事業の目標 2-1
1.1 研究開発目標 2-1
1.2 研究開発項目毎の目標 2-1
1.2.1 電力送電用超電導ケーブルシステムの実用化開発【交流】 2-1
1.2.2 電力送電用超電導ケーブルシステムの実用化開発【直流】 2-3
1.2.3 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発 2-4
1.2.4 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【磁場特性改善】 2-7
1.2.5 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【生産性向上】 2-7
2. 事業の計画内容 2-8
2.1 研究開発の内容 2-8
2.1.1 電力送電用超電導ケーブルシステムの実用化開発【交流】 2-8
2.1.2 電力送電用超電導ケーブルシステムの実用化開発【直流】 2-13
2.1.3 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発 2-15
2.1.4 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【磁場特性改善】 2-17
2.1.5 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【生産性向上】 2-19
2.2 研究開発の実施体制 2-19
2.3 研究開発の運営管理 2-20
2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性 2-20
3. 情勢変化への対応 2-22
4. 評価に関する事項 2-23

Ⅲ．研究開発成果について 3-1
1. 事業全体の成果 3-1
1.1 電力送電用超電導ケーブルシステムの実用化開発【交流】 3-1
1.2 電力送電用超電導ケーブルシステムの実用化開発【直流】 3-13
1.3 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発 3-16
1.4 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【磁場特性改善】 3-22
1.5 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【生産性向上】 3-27
2. 研究開発項目毎の成果 3-29

2.1 電力送電用超電導ケーブルシステムの実用化開発【交流】 3-29
2.2 電力送電用超電導ケーブルシステムの実用化開発【直流】 3-163
2.3 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発 3-324
2.4 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【磁場特性改善】 3-363
2.5 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【生産性向上】 3-480

Ⅳ. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて 4-1
1. 電力送電用超電導ケーブルシステムの実用化開発【交流】 4-1
2. 電力送電用超電導ケーブルシステムの実用化開発【直流】 4-7
3. 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発 4-9
4. 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【磁場特性改善】 4-11
5. 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【生産性向上】 4-11

【添付資料】

- **添付資料１ プロジェクト基本計画**
- **添付資料２ 事前評価関連資料（パブリックコメント募集の結果）**
- **添付資料３ 特許リスト**
- **添付資料４ 論文・発表リスト**

概　要

最終更新日	２０１９年7月３０日

プログラム（又は施策）名			
プロジェクト名	高温超電導実用化促進技術開発	プロジェクト番号	Ｐ１６００６
担当推進部/ＰＭまたは担当者	省エネルギー部 菱谷　清（２０１６年４月～２０１６年４月）プロジェクトマネージャー、 岩坪　哲四郎（２０１６年５月～現在）プロジェクトマネージャー、 木下　晋（２０１６年４月から現在）、中原　裕司（２０１６年４月から現在）、 赤城　協（２０１９年５月から現在）		
０．事業の概要	本プロジェクトでは、これまで実施してきた高温超電導の要素技術開発の成果を、実用化へ向けた開発へ移行させるための研究開発を行う。高温超電導技術の適用により、大きな省エネルギー効果、我が国の送配電システムの高度化、ヘリウム供給リスクへの対応及び大きな市場創出等が期待される送配電並びに高磁場コイル分野において、事業化に近い段階のものから原理実証、フィージビリティスタディ（ＦＳ）開発を総合して実施、各実施内容が事業化に進むための適切な技術開発を行う。		
１．事業の位置付け・必要性について	我が国の成長戦略の鍵として、科学技術イノベーション総合戦略の推進が挙げられている。超電導送電技術は、その科学技術イノベーション総合戦略において取り組むべき課題、スキームの中で「革新的エネルギー変換・貯蔵・輸送技術の高度化」の一つとして位置付けられており、温室効果ガスの排出を極力抑えたクリーンなエネルギー利用を達成した社会の確立に必要な技術とされている。また、エネルギー基本計画（２０１８年７月）においても、２０３０年に向けた政策対応で、「徹底した省エネルギー社会の実現」がうたわれており、高温超電導技術による省エネルギーが寄与できる。		

２．研究開発マネジメントについて

事業の目標	**研究開発項目①「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発」** 今後、超電導ケーブルシステムを電力系統へ導入するために、通常時の信頼性だけでなく、ケーブルに対する外部からの電気的・機械的な損傷等による不測の事故（地絡・短絡・外傷等）時に生じる現象と影響を把握し、その結果を踏まえて安全性、信頼性を検討する必要がある。また、冷却システムの大きさ、効率と耐久性及びコストを更に改善する必要もある。加えて、事故・故障等を早期に検知するとともに、その影響を最小限に抑える等、実用性を向上させるための対策も重要である。本プロジェクトの開発目標を以下のとおり定める。 【最終目標（２０１８年度）】 １）安全性評価試験による影響検証に係る最終目標 ・送電用及び配電用超電導ケーブル仕様案の決定 ・超電導ケーブルシステム安全性評価試験方法の作成 ・作成した安全性評価試験方法の国際標準化活動への反映 ・安全性評価の対象となる事象による超電導ケーブルシステムへの影響を、実用上信頼できる評価を行うためのシミュレーション技術の完成 ２）早期復旧等の実用化のための対策検討に係る最終目標 ・リスク低減及び早期復旧の観点から、超電導ケーブル及び冷却システムに付加するべき要素の決定 ・復旧方法等の検討結果を反映した、運転管理に係るガイドライン作成 ３）超電導ケーブルの侵入熱低減技術の開発に係る最終目標 ・実運用を想定した条件で、直線部でのケーブル長さ当たりの熱侵入量を１．８Ｗ／ｍ／条以下 ４）冷却システムの高効率化技術の開発に係る最終目標 ・系統連系試験の実施・実運用を想定した条件で、冷却システム全体のＣＯＰを０．１１以上とすること、及び冷凍機本体並びに主な冷却システム構成機器の保守 ・点検間隔を４０，０００時間以上とすること ５）超電導直流送電システムの実用化開発に係る最終目標 ・実用線路での運転試験を実施 ・設計、運用、保守ガイドライン作成等 **研究開発項目②「高温超電導高磁場マグネットシステム開発」**

	将来の今後永久電流モードでの安定高磁場生成のため、超電導接続技術の実現に向けた研究開発として、開発目標を以下のとおり定める。 【最終目標（２０１８年度）】 １）超電導接続の性能、歩留り、信頼性向上技術開発 ・１Ｔの磁場中で、10^{-13}Ω台の接続抵抗の実現 ・歩留り 50%達成 ２）MRI コイルへの実装を考慮した超電導接続部の形態の開発 ・機械的応力下での特性評価 ・超電導接続の保護方法の開発 ３）MRI 製造を想定した現場環境での超電導接続の実施およびその技術の確立 **研究開発項目③「高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発」** 高温超電導線材（Ｙ系線材）はコスト面、材料面また冷媒としての液体ヘリウムレスの観点からも超電導コイル応用分野への適用が期待されている。しかし、低価格化実現が遅れており、超電導応用機器開発を推進する上で大きな課題となっている。加えて、更なる高磁場特性の向上が求められている。この課題を解決するため、高磁場条件下での高電流密度性能を安定的に得るための特性改善と、工法改善による生産性向上を実現するための研究開発が必要である。以上を踏まえて、本プロジェクトの開発目標を以下の通り定める。 【最終目標（２０１８年度）】 １）高磁場コイル用線材として、以下を開発目標とする。 ・Ｙ系線材の場合、温度３０Ｋ、磁場７Ｔ条件にて平均電流密度４００Ａ／ｍｍ^{2}以上。 ・１ｋｍにおける臨界電流の低下率（（全長の臨界電流平均値－臨界電流最小値）／全長の臨界電流平均値）を０．１５未満 ２）生産性向上目標として、完成品の単位時間当たり生産長を５０ｍ／ｈｒ以上

事業の計画内容	主な実施事項		2016 年度	2017 年度	2018 年度
	電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発	交流超伝導ケーブルシステム	安全性評価、冷却システム、系統連系		設計仕様、評価基準作成
		直流超伝導ケーブルシステム	設計・運用ガイドライン作成		
	高温超電導高磁場マグネットシステム開発	超電導接続技術	超伝導接続技術の開発（10^{-12}Ω以下）		
	高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発	磁場特性改善	高磁場特性改善（平均電流密度 400A/mm^{2}以上@30K、7T）		
		生産性向上	生産性向上技術開発（50m/hr 以上）		

開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位:百万円)	会計・勘定	2016 年度	2017 年度	2018 年度
	一般会計	－	－	－
	特別会計（電源）	６８１．２	６９３．３	４２８．２
	開発成果促進財源	－	－	－
	総 NEDO 負担額	６８１．２	６９３．３	４２８．２
	（委託）	２７９．３	５２０．３	３２７．６
	（助成） ：助成率１／２	５８９．０	３２１．６	２１０．３

開発体制	経産省担当原課	産業技術環境局 研究開発課　エネルギー・環境イノベーション戦略室

		プロジェクトリーダー	岡田 道哉 （国立研究開発法人産業技術総合研究所 TIA 推進センター　副センター長）
		助成先・委託先	【助成先】 ・東京電力ホールディングス ・住友電気工業 （共同研究：早稲田大学） ・古河電気工業 ・前川製作所 ・石狩超電導・直流送電システム技術研究組合 （中部大学、住友電気工業、千代田化工建設、サクラインターネット） ・フジクラ 【委託先】 ・古河電気工業 （再委託先：国立研究開発法人　物質・材料研究機構、ジャパン スーパーコンダクタ テクノロジー） ・フジクラ （共同実施：九州大学） ・国立研究開発法人産業技術総合研究所 （再委託：京都大学）
	情勢変化への対応	ＭＲＩ用高磁場コイルおよびＹ系線材の高性能化技術については、海外ＭＲＩメーカーの動向（学会発表・展示会）の注視。	
	中間評価結果への対応	－	
	評価に関する事項	事前評価	2016 年度（採択審査委員会）
		中間評価	2019 年度
		事後評価	2021 年度（予定）
３．研究開発成果について		**研究開発項目①「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発【交流】」** （１）「超電導ケーブルシステムの安全性評価方法の開発」 ・長距離超電導ケーブルにおける、事故時シミュレーションを行い、その影響や対策を完成。 ・送電用超電導ケーブルの仕様案ならびに安全性評価試験方法を作成。 （２）「早期復旧等の実用性向上のための対策検討」 ・復旧方法等の検討結果を、運転管理に係るガイドラインとして完成。 （３）「超電導ケーブルの侵入熱低減技術の開発」 ・熱侵入量が 1.8W/m/条以下を達成。 （４）「冷却システムの高効率化技術の開発」 ・大容量・高効率のブレイトン冷凍機を旭変電所の超電導ケーブルと接続した上で、実系統実証運転を行い、長期信頼性の検証を完了。 ・冷却システム全体のＣＯＰが０．１１、並びに、冷凍機本体及び主な冷却システム構成機器の保守・点検間隔を４０，０００時間以上の見通しを得た。 **研究開発項目①「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発【直流】」** （１）直流超電導送電システムの総合的な信頼性・安全性の評価 本研究では長距離・高効率送電の実証とシステムの安定性の評価を主目的として北海道石狩市に建設された高温超電導直流送電システム（回線２）を用いて、下記の①～⑤を実施した。いずれも開発目標を達成し、実運用における経済性等を考慮した場合に要求される冷却ステーション間隔 20km 以上及び送電効率 99.9%以上の見通しを得るとともに、ロードサイクル試験等によりシステムの安定性が実証された。 ①長尺時を模擬した液体窒素循環冷却性能の評価 シールド付き配管において約 0.9 W/m 以下の性能および 20 km 長の長尺模擬試験について 3.9 L/min の流量で、ケーブル管入口～リターン管出口（2 km）の温度差約 15 K を確認。 ②超電導ケーブルシステムの通電特性の評価 定格電流：2.5 kA 連続通電（3 時間）で発生電圧： 0.1 μV/cm 以下の変動、冷凍機出口温度変動：±1 K 以内、送電効率（電流リードを含む送電線路の電圧降下）99.96 %であった。 ③過酷試験による評価	

定格通電限界試験にて液体窒素温度 83K において I_c＝2542 A@0.1μV/cm を確認するとともに、過電流の限界値については短尺を用いた試験結果より約 6 kA-2 秒、耐電圧試験ではケーブルコア、ジョイント、電流リード、端末容器に ついて、20kV-5min の耐電圧を確認した。

④長期運転特性の評価

70K、40L/min での 40 日間の無負荷（電流 0）運転及び ロードサイクル試験（1kA@8h+0A@16h）×20 日 を実施し、システムの安定性を確認。

⑤残存性能確認試験

上記試験の前後での電気、冷却性能の変化なし。

（2）設計、運用、保守ガイドラインの作成

上記直流超電導送電システムの総合的な信頼性・安全性の評価に関する成果および過年度の実証試験において実施した工事・評価手法や抽出した課題や本プロジェクトで実施した故障時を含めた多様なケースでの運転検証結果を踏まえ、超電導ケーブル送電システムの設計、製造、工事、評価の手法や、運転管理や保守を行うための電気事業法・保安規定に沿った点検項目や運転基準をガイドラインとしてまとめた。策定にあたっては、超電導直流ケーブルシステムの社会実装をターゲットとして総合的に検討し、電力分野の有識者によるアドバイスも反映した。

研究開発項目②「高温超電導高磁場マグネットシステム開発」

２本の RE 系線材の超電導層を露出して超電導物質を塗布して両面を合わせて熱処理を施すことで、Ic= 100 A 以上、$10^{-13}\Omega$の超電導接続を得ることができた。接続の再現性（歩留り）の検討において、線材の超電導層の膜厚による幅方向のたわみが特性に影響することを発見し、たわみ矯正より歩留りの向上をして、50%以上の歩留まりを達成した。また、超電導接続の保護として、エポキシモールドを行い、一年間経過しても劣化しないことを確認した。

超電導接続の特性評価を磁場中で実施した。その結果、50K, 1T の実用化環境において、$10^{-13}\Omega$以下の接続抵抗を確認した。コイル内での超電導接続の可能性を知るために、MRI マグネットの励磁磁場となる高磁場中での Ic 測定を実施して、有用なデータを取得した。さらに、耐フープ力として、液体窒素中での接続部の強度試験を行い 60 N まで劣化しないことを確認した。応力は 182 MPa に相当する。

超電導接続の実用化のために、コイル製造環境での超電導接続の実施を考えて、スプレーコートにより超電導層の形成を行った。この方法による接続においても、72A の超電導接続ができることを確認した。また、新規開発のテープ線自動巻線機を導入し、自動巻線機試験用に 6mm 幅線材にて要素コイルを作製した結果、熟練者の手作業による巻線調整と同レベルの巻線ができ、作業時間は 1/2 程度になった。

超電導接続技術の実コイルへの適用の検討として、小型コイルでの超電導接続を実施した。そのため、小型コイル、ＰＣＳを製造して、その間の超電導接続を実際のＭＲＩコイルの接続を考慮して実施た。小型コイルの製作後、通電試験で超電導接続の抵抗測定を行い、小型コイルの接続において、超電導接続が抵抗ゼロであることを確認した。一方で、小型コイルの永久電流試験において、超電導接続を劣化させるあらたな課題が判明し、その原因究明をおこなった。さらに、その対策となる技術について知見を得ることができた。

研究開発項目③「高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【磁場特性改善】」

（1）高磁場コイル用超電導線材の臨界電流密度向上技術の開発

磁場中高臨界電流密度特性 J_e>400A/mm^2(30K,7T)を高線速製造条件において達成するため、ホットウォール式 PLD 装置にて人工ピンニングセンターの導入を実施した。充分な膜厚を得る高速成長条件にて、ロッド状人工ピン材料の形状や密度に留意した最適化を進めた。適切な蒸着条件を選択することにより充分な特性を発揮できることがわかり、高い Jc（～3.8×10^{4}A/mm^2）と 膜厚（2.0μm）を共に保った状態で均一に高速成長させることに成功した。その結果、最大 J_eとして目標値を越える 527A/mm^2(30K,7T)を 50m/h の高線速条件にて達成することに成功した。

（2）長尺線材性能の均一性向上技術開発

目標である「1km における臨界電流の低下率（(全長の臨界電流平均値－臨界電流最小値)／全長の臨界電流平均値)を 0.15 未満」を実現するにあたり、特性低下因子を解明するため導入した高精度均質性検出装置を活用し、特定された要因の排除を進めた結果、目標をほぼ達成し、大きな局所的特性低下部を 1km 当たり 1 か所程度に抑えることに成功した。また、機械的信頼性について、弱点とされる膜面垂直方向の引張応力に着目した故障率評価を実施した結果、均一性改善に伴う強度向上が見られると共に、低温環境に於ける疲労定数は極めて大きく、超電導膜の経時的強度低下がほとんど進展しないことを確認した。さらに、実際の使用環境を考慮した含浸コイル巻線について充分なヒートサイクルに耐えることを確認した。

（3）高磁場コイル用低損失構造線材の研究開発

履歴損失、結合損失を 1/10 以下とする目標を達成するべく、スクライブ加工線材開発に関しては、超電導細線が電磁結合のある場合のシミュレーションを行うとともに、Plane-plume PLD 法を導入し、人工ピン有線材における Ic 特性の均一性を向上させると共に、レーザーのデュア

	ルビーム化を行い、2本の加工において高速加工時の深さや幅の均一性を確認した。これらにより均一性の高い細線化線材が得られ、磁化損失を測定した結果、損失１／１０以下を達成した。また、撚り線構造については、薄膜線材を集合化して丸い形状にしたCORC導体を主な対象として、シミュレーションにて損失の下限を評価するとともに、交流損失の実験的評価を行い、高磁場領域では磁化損失が支配的であることを明らかにした。 **研究開発項目③「高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【生産性向上】」** Y系線材の製造工程全体を見渡し、現状の律速工程の課題を抽出し目標値として全工程で50m/hrを設定した。超電導層成膜工程については、高線速時における基板温度の安定性を更に向上するために熱シミュレーションを行うと共に、一層の高い均熱性を実現する改良を実施した。その結果、スループット線速50m/hr以上においてもJe>400A/cm^2(30K, 7T)をクリアすることが出来た。基板表面処理、安定化層の品質についても50m/hrにて安定した品質実現が可能なことを確認し、全工程50m/hrをクリアして300m長製作に成功し、委託事業磁場特性目標をクリアしていることを確認した。また長尺に渡って高精度に特性欠陥部の抽出を行えるよう、二次元的に磁化測定が可能な「高速高精度連続磁化測定装置」の設計製作を実施し、素子部を多チャンネル化する技術開発により、線速64.8m/hrで測定することに成功した。
	投稿論文：「査読付き」２５件、「その他」２件 特　　許：「出願済」２１件 その他の外部発表（プレス発表等）：学会発表・講演１６５件、雑誌等５件、プレス発表１件、新聞取材２件、展示会・見学会開催１件、展示会８件
４．実用化の見通しについて	**研究開発項目①「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発【交流】」** ○東京電力ホールディングス ・実系統連系試験を踏まえた運用技術確立 ・将来電化による需要増加等系統増強時に備えた検討準備 ○住友電気工業 ・需要が見込まれる米、中国など海外の動向調査、展開検討 ・ケーブル適用を踏まえた線材低コスト化促進 ・鉄道用ケーブル、データセンター用ケーブル、消磁ケーブル等の動向を注視 ○古河電気工業 ・超電導でなければ解決できない箇所への導入を念頭に、商業化を目指す ・他国が未到達である高電圧超電導ケーブルの早期実現を果たす ・国際標準化において日本の技術先行性をベースに市場拡大を目指す ○前川製作所 ・ブレイトン冷凍機は、2018年に成果を反映し営業販売開始済み ・本実証試験で高効率・高信頼化の検証を行ったことで実用化加速を見込む ・冷凍機小型化・低コスト化による市場拡販を目指す **研究開発項目①「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発【直流】」** 超電導直流ケーブルシステムの最大の利点は大容量の電力をコンパクトな形状で、低損失、低電圧で長距離にわたって送電できることである。本事業および過年度の実証試験での送電/冷却システムのコスト・安全性、実用化の課題等の検証から、従来の交流給電と比較して超電導直流送電の優位性が確認されるなど、事業化への取り組みが大きく前進した。そこで、事業化に向けてのより実際的な検討を行うため、本事業終了時に、石狩超電導・直流送電システム技術組合が中心となって、ユーザーのニーズ把握やシステム設計、コスト検証等を行う研究会等の設立等を計画し、現在、研究会を活用して、石狩での実証データに基づいた長距離システム（～100km）の設計、導入費用と経済効果の試算等、事業化シナリオの検討等を進めているところである。 **研究開発項目②「高温超電導高磁場マグネットシステム開発」** 超電導接続は、それ単体で商品になるものでないために、本開発テーマにおける実用化・事業化の定義は、本テーマで開発された超電導接続を超電導マグネット、超電導MRI、超電導NMR等の試作品や商品に使用されること、超電導接続技術を社会的に利用（ユーザへのライセンス提供等）が開始されることとである。本研究開発においては、事業化を念頭にした開発を意識して、内容的にはコイル製造現場で線材接続ができるプロセスを考え、その方法で目標の接続特性を得ることができた。 超電導接続は、コイル製造現場で使われるもので、その実施者はコイルメーカーになる。そのために、開発した超電導接続を、コイルメーカーに提供していくことになる。が、コイルメーカーとしては、もう一段高い超電導接続の信頼性、安定性の確立が必要となる。また、現

	状では高温超電導線材も500mが流通しているが最も長い長さであり、MRIマグネット製作には数ｋｍの長さが必要と考えられている。そのために、線材メーカー、コイルメーカーにおける数年の信頼性確立研究の継続が求められる。 **研究開発項目③「高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【磁場特性改善】」** 本研究開発では従来線材の約２倍となる高電流密度の線材を開発すると共に、「高温超電導実用化促進技術開発／高磁場マグネットシステム開発／高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」にて進める３Ｔ級高温超電導ＭＲＩマグネット使用者向けに、従来仕様と合せ線材量で１００ｋｍ以上の供給を担い、単長１㎞を見通した競争力のあるＹ系高温超電導線材を安定して市販提供し得る量産技術力が世界トップレベルに達した。さらに、本研究開発を通じてＹ系高温超電導線材の低温下での各種機械応力挙動、電磁力耐性等を明らかにすると共に、コイル形状において１００回以上の繰返しヒートサイクルにおいても特性に何ら影響がないことを明確にした。３Ｔ級高温超電導ＭＲＩマグネットシステムを実現するにあたり、実用性能並びに長期信頼性の観点から有益な評価結果を得た。本技術開発を通じてＭＲＩマグネットに要求されるコイル平均電流密度２００Ａ／ｍｍ^2（７Ｔ）を実現することにより、ＭＲＩ分野を含む各種小型高性能高磁場機器の開発需要に応える充分な競争力を得られることが期待される。今後、本技術開発成果に基づいて各種機器使用者に応じたカスタマイズによって、様々な応用機器への展開が可能となり、高温超電導機器市場の発展に貢献することが期待される。 **研究開発項目③「高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【生産性向上】」** 本技術開発は、既に製造販売されているＹ系高温超電導線材の生産性向上改良を進めるものであり、従来比２倍以上の生産性を得た成果は、実用化のための製品化に適用される計画である。また「高温超電導実用化促進技術開発／高磁場マグネットシステム開発／高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」への線材提供により、安定した特性のＹ系高温超電導線材を提供する量産技術力としても世界トップレベルの水準が達成された。今後、更に本成果に基づいて一層の研究開発および量産投資を行えば、線材の需要量増加に伴い、低温超電導線材に比べた通電性能価格比（円／Ａｍ比）を現状の２０倍近くから２０２５年頃には１０倍～数倍程度まで下げ、高温超電導ＭＲＩマグネットの市場投入に貢献することが期待される。さらに、２０２６年以降、ＭＲＩシステムの１０％以上が高温超電導ＭＲＩシステムに置き換わり、その浸透が加速すればその大幅な増産効果により２０２６年以降も通電性能価格比（円／Ａｍ比）数倍以下も視野に入れることが出来る。
５．基本計画に関する事項	作成時期	制定：２０１６年3月　作成
	変更履歴	改訂：２０１９年2月

用語集

索引	項目	解説
A	A/cm-w	線材の単位幅（ｃｍ）あたりに換算した電流値
	ab 面	結晶格子の *a* 軸と *b* 軸を含む面。Ｙ系超電導体では *c* 軸の鉛直面に相当する。
B	BaMO	金属（M）を含むバリウム酸化物の総称。
	BHO	バリウム（Ba)とハフニウム（Hf）を含むペロブスカイト型構造の酸化物（$BaHfO_3$）。Y 系超電導物質の人口ピンとして利用される。
	Bi 系（ビスマス系）線材	ビスマス(Bi)、ストロンチウム（Sr）、カルシウム（Ca）、銅（Cu）のペロブスカイト構造の酸化物である超電導物質を用いた高温超電導線材。臨界温度が 110 ケルビンの $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{11-\delta}$（Bi2223）および 80 ケルビンの $Bi_1Sr_1Ca_2Cu_1O_{9-\delta}$（Bi2212）が有る。Bi2223 を銀中に複合した多芯線材が低磁場用途で市販されている。
	BJR	磁場(*B*)の中で、半径 *R* の円筒コイルに一様な電流密度 *J* の電流を流した際の、コイル周方向の引張応力。B×J×R で見積ることができる。
C	$CeZrO_3$	セリウム（Ce）、ジルコニウム（Zr）、酸素からなる絶縁体の酸化物
	CIGRE	国際電力大会議
	COP	成績係数（Coefficient Of Performance)。COP=（冷凍能力／所要動力）で表される。
	CORC®線材	Conductor on Round Core の略称。Advanced Conductor Technologies LLC 社が開発したテープ線材を円筒面に螺旋巻きした導体。
	CRUNCH CFD	CRUNCH CFD はマルチフィジックス･シミュレーションのための非構造格子流体ソルバーで、商品名。 超音速や超臨界圧での燃焼、極低温流体のキャビテーション、液体の圧縮性を伴うフラッシング流とチョーキング現象など、一般的な流体解析ソフトでは扱うことが難しい現象を解析することが可能。
	ＣｕＯ$_2$平面	ペロブスカイト系銅酸化物の結晶格子における銅原子と酸素原子で構成される層状の二次元平面。
	CV ケーブル	Cross linked polyethylene Vinyl cable。架橋ポリエチレンを絶縁体とし、外側に遮蔽層と防食層を設けた乾式ケーブル。
D	DC 課電試験	直流課電試験に同じ
	DI-BSCCO 線材	従来の焼結工程を見直し、高圧焼結することにより臨界電流、歩留まり、製作単長などを飛躍的に向上させた Bi2223 高温超電導線材の商品名。
E	$EuBa_2Cu_3O_y$	Y 系高温超電導物質のうち、Y 原子を Eu（ユーロピウム）原子に置換したものの略称。EuBCO とも表記される。
F	FRP ブッシング	端末などの電流導入部（電流リードなど）の絶縁に用いられる管状絶縁物のこと。絶縁材料として FRP を採用しており、極低温雰囲気での耐久性に優れる。
G	GdBCO	Y 系高温超電導物質のうち、Y 原子を Gd（ガドリニウム）原子に置換したものの略称。$Gd_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$

	GdYBCO	GdBa2Cu3O7x、ＲＥ系超電導線材の一種で、YBCO 線材より磁場特性が良い。
	GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastics の略称。ガラス繊維で強化された樹脂。
	GM 冷凍機	蓄冷材がシリンダ内部を往復運動し，冷媒ガスを断熱膨張し，寒冷を発生させる機械式冷凍機．ギフォード（Gifford）とマクマホン（McMahon）によって発明された冷凍機で構造が簡単で低温部に駆動部がないことから小型で信頼性が高いとされている．
	Goldacker 法	Dr. Wilfried Goldacker 氏によって提唱された超電導線材の機械的曲げ試験特性評価のための手法および装置。
H	Hot-Wall 式 PLD 法	蒸着エリア全体を加熱チェンバで覆った PLD 蒸着法。Cold-Wall 式の反対語。
	HTS	高温超電導（High-Temperature-Superconductivity）
I	IBAD	イオンビームアシスト蒸着法（Ion Beam Assisted Deposition）。1991 年に(株)フジクラで発明された蒸着薄膜の結晶配向制御技術。金属基板等の無配向基板上に三軸配向した Y 系超電導薄膜を形成できる。
	Ic	ある条件下で超電導状態が維持され、常伝導転移しない上限の電流。超電導体において、抵抗ゼロで流せる最大の電流値。抵抗ゼロを特定するのは困難なので、実際には電流/電圧特性の測定を行い、ある電圧基準（Ic 電圧基準）を規定して決定する。臨界電流、Critical current、Ic などと呼ばれる。
	Ic 電圧基準	Ic を定義する超電導線で発生する電圧。一般に超電導線の電圧（電界）が 1μV/cm となる直流電流を Ic と定義している。
	IEC	国際電気規格
	I-V 特性	Ic 測定を実施する際、電流を単調増加させた際に得られる超電導線の発生電圧の特性カーブ
	IV 波形	電流-電圧波形
J	J_c-B-θ 特性	磁場中（B）の臨界電流密度（J_c）の磁場角度（θ）依存性。
K	Kr-F レーザー	クリプトン(Ｋｒ)とフッ素（F)の混合ガスをレーザー媒質に用いる紫外線（UV）エキシマレーザ（波長 248nm)。
M	MgB_2 線材	2001 年に発見された AlB2 型の層状構造を有する二硼化マグネシウム（MgB_2）を用いた高温超電導線材。臨界温度 39 ケルビン。粉末加工法を中心に線材化研究が進められている。
	MLI	多層断熱材に同じ
	MO	磁気光学（Magneto-opitc）の略。
	MOD	有機金属錯体塗布分解法（Metal Organic Decomposition）
	MO センサー	磁気光学効果(Magneto-opitc Effect)を検出するセンサー
	MPa	圧力の単位。10^6Pa
	MRI	核磁気共鳴画像法（magnetic resonance imaging）、強磁場と電波により生じる核磁気共鳴（nuclear magnetic resonance, NMR）現象を利用して生体内の内部の情報を画像にする方法
	mT	ミリテスラ、1 テスラ(T)の 1/1000 磁束密度

	Multi-layer insulator	多層断熱材に同じ
N	NbTi 線材	Nb-Ti 合金を用いた超電導線材。典型的な金属系低温超電導線材で塑性加工法で極細多芯構造の長尺線材が製造されている。臨界温度が 9 ケルビンのため極低温でのみ使用可能。
	Ni	ニッケルの元素記号。
	NJ	Normal joint の略。中間接続部で接続したコアを容器に固定しない構造であり、ケーブルコアは中間接続部内でも可動となる。
	NMR 装置	RF 電磁波の照射によって引き起こされる磁界中の原子核の磁気モーメントの共鳴歳差運動に伴う電磁波の吸収によって物質の原子配列, 及び電子構造を解明する装置
	n 値	超電導線材の電流－電圧特性を、電流を横軸として両対数グラフ化した場合の傾き。 n 値が大きいほど、電流の増加に伴う電圧の発生が急激に起こる。
O	OD/ID	コイル外径（OD）の内径（ID）に対する比
	OF ケーブル	Oil-Filled cable。導体上に絶縁紙を巻き、外側に金属シースと防食層を設けたケーブル。金属シース内部に低粘度の絶縁油を脱気脱湿状態で充填して使用する。
	Overall J_c	超電導線の臨界電流密度（J_c）の表記のひとつで、一般的には絶縁層を除く、安定化銅やマトリクス材を含む超電導線の断面積あたりの臨界電流密度を指す。
P	Pb-Sn 合金	鉛（Pb）とスズ（Sn）からなる合金でハンダとも呼ばれる。共晶組成は融点が低く（183℃）、電気配線の高導電性ろう付け材として普及した。
	PCS	永久電流スイッチ persistant current switch
	PLD	パルスレーザ蒸着法。Pulsed Laser Deposition の略。
	POF ケーブル	パイプタイプ OF ケーブル。一般的に鋼管などのパイプに OF ケーブルを引き込み、絶縁油を充填、循環させる電力ケーブル。
	PPLP	溶融押出ポリプロフィレン(PP)フィルムの両側をクラフト紙でサンドイッチした構造をしている。その優れた絶縁破壊特性と低誘電率、低 tanδ により低誘電損失特性を有し、数多くの AC および DC 超高圧ケーブル用絶縁材料として採用されている。
	PQ テスト	Prequalification test の略。事前資格審査とも呼ばれ、1 年を通じモデル線路による長期試験、解体調査などを実施しシステムに異常の無いことを確認する。
R	REBCO	REBa2Cu3Ox（RE：希土類元素）であらわされるイットリウム（Y）系高温超電導体の総称。Re（レニウム）元素と混同しないよう大文字の RE が用いられる。
	Reel-to-reel	線材のように一方向が他のすべての方向に対して著しく長い物質を巻いたリールから送り出された線材を別のリールに巻き取る方式
	RE 系超電導	Re(レアアース)-Ba(バリウム)-Cu(銅)-O（酸素)で構成される高温超電導体で、希土類系高温超電導体とも呼ばれる。レアアースとして、イットリウム、ガドリニウム、サマリウムが使われている。

S	s.f.	Self-field の略、自己磁場。通電によって自己の導体周囲に発生する磁場。
	SEM	走査型電子顕微鏡。Scanning Elecron Microscope の略。電子線を絞って電子ビームとして対象に照射し、対象物から放出される二次電子等を検出する事で対象を観察する。
	SHPM	走査型ホール素子顕微鏡（Scanning Hall Probe Microscopy ： SHPM）の略称。走査型プローブ顕微鏡の一種で、ホール素子を用いてサンプルをスキャンすることでサンプルの面内磁場分布を計測する。
T	T	テスラ（Tesla）。磁束密度の単位（1T=1Wb/m^2=10,000Gauss）。
	tanδ	電気機器に使用する絶縁物に交流電圧を印可すると、絶縁体の漏れ電流による損失、誘電分極にもとづく損失及び部分放電にもとづく損失などが生ずる。このような損失分の電流位相は、理想的な絶縁物に流れる無損失電流より遅れる。その遅れ角δの正接を tanδ（誘電正接）とよぶ。tanδ値は絶縁物の寸法や、形状に無関係の誘電体損失の大小を表す指標として、絶縁物の吸湿、乾燥、汚損、ボイドの状態などの絶縁の性状、あるいは劣化の程度を判断する値として使用されており、tanδ試験は絶縁材料、特に電力機器の絶縁試験の重要な試験項目である。
	Technical Committee 20	国際電気標準会議（International Electrotechnical Commission）内に設置される CV ケーブルなどの既存ケーブルの標準化を議論する委員会。TC20。超電導関連の標準化委員会は TC90。
Y	Y 系高温超電導体	$REBa_2Cu_3O_x$（RE：希土類元素）で表される銅酸化物系高温超電導物質群。1987 年 Y(イットリウム)で 92K の臨界温度が初めて報告された後、Gd(ガドリニウム)や Eu(ユーロピウム)など多くの RE 元素を Y サイトに置換しても同様の高温超電導現象が発現するため、広く Y 系と呼ばれている。
あ	アークエネルギー	アーク放電時に発生するエネルギー。アーク放電は、電極に電位差が生じることにより、電極間にある気体に持続的に発生する絶縁破壊（放電）の一種。負極・正極間の気体分子が電離しイオン化が起こり、プラズマを生み出しその中を電流が流れる。
	アウトガス	真空環境下において断熱層内の構成材料（有機材料等）から放出されるガスであり、ポンプの排気速度、系の排気コンダクタンスとともに真空槽の到達真空度を決める要素のひとつ。
	アキシャル	軸方向（またはスラストともいう）。
	アラミド繊維	主鎖に芳香族環をもつ、ポリアミドの合成繊維の商品名。強度・弾性率・耐熱性にすぐれ、ゴム・プラスチック・セメントなどの補強材料として、またロープ・織物・不織布として用いる。
	アンビル法	膜状構造体の密着強度測定法の一種。一般的に行われているスタッドピン型垂直引張試験法より広い面積で密着力強度を測定する。
	圧力センサー	システム各部の状態のひとつである、圧力の状態を確認するためのセンサー。圧力変化による管の変形や変位を利用して計測するブルドン管、ダイアフラムの差圧変化を歪みゲージで読み取り計測する方式などがある。

	圧力損失	流体が配管を通過する際に管路の摩擦や曲がり部で発生する渦などでエネルギーを消費し、流体の運動エネルギーが低下することにより圧力が低下する現象。
	安全弁	ガスや蒸気などの配管や容器において爆発を防ぐための安全機構を有する弁。密閉した容器などで内圧が上がりそのまま圧力上昇すると内圧のため容器が破損する。このような爆発をさけるために安全弁が使用され、容器の内圧が上がり過ぎないようにする治具。
い	イットリウム系（Y系）線材	$REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$（RE：希土類元素）で表される高温超電導体を金属テープ上に薄膜として形成した線材。液体窒素温度を越す臨界温度が初めてイットリウム（元素記号 Y）で報告されたことから Y 系の呼称が一般的となった。頭文字を取って REBCO 線材と表記されることがある。
	インターロック	誤動作やヒューマンエラーなどにより、正常な運転条件を逸脱した時に自動的にシステムの運転を停止するなどの制御をおこなう機構。
	インダクタンス	コイルを流れる電流を変化させたとき電磁誘導によりそのコイル，あるいはほかのコイルに発生する起電力の大きさを表わす量
	インパルス	電力系統、おもに送電線に雷撃が印可された場合異常電圧が送電線内を伝搬し、発送配電システムに異常をきたす可能性がある。この異常電圧を模擬したものをインパルスと呼ぶ。
	インペラー	気体・液体用の遠心ポンプの羽根。
	インライン評価設備	製造設備に組み込まれ製品ワークの評価を製造中に実施する評価設備
	移動式端末	超電導ケーブルの熱収縮に対応して端末がケーブル張力方向に移動できるようにしたもの。これによりケーブル部の熱応力を緩和することが出来る。
う	ウィーデマン・フランツ則	様々な金属の電気伝導率と熱伝導率がほぼ比例するという経験則で、報告したスタフ・ヴィーデマンとルドルフ・フランツの名前による。Wiedemann-Franz law。
	受入試験	出荷製品が「形式試験供試品と同等の製造・品質管理状態であることを確認」するために行うもの。出荷試験と同義。 ここで形式試験とは、ある形式製品の設計・製造および施工方法を「認定」するために行うものである。
え	エッジワイズ曲げ	平角線やテープをエッジ側（短辺側）の曲がりにくい方向に曲げたること
	エリプソメータ	2 種類の偏光の反射光の差を用いて膜厚や光学定数を求める測定装置
	エンタルピー	熱力学における示量性状態量のひとつ。エンタルピーはエネルギーの次元をもち、物質の発熱・吸熱挙動にかかわる状態量である。等圧条件下にある系が発熱して外部に熱を出すとエンタルピーが下がり、吸熱して外部より熱を受け取るとエンタルピーが上がる。
	永久電流	長い時間にわたって変化しないで流れ続ける閉回路中の直流電流
	永久電流スイッチ　(PCS)	超電導回路の開閉に用いる熱的，光学的又は磁気的に制御する超電導材料で作ったスイッチ
	液体窒素含浸積絶縁方式	超電導ケーブルの電気絶縁方法のひとつ。PPLP やクラフト紙などで構成された電気絶縁部に液体窒素を浸漬させ所定の耐電圧特性を得る。

	液体窒素循環ポンプ	超電導ケーブルシステムへ、冷却された液体窒素を供給するためのポンプ。単に窒素循環ポンプ、あるいは循環ポンプと記載している場合がある。
	液体窒素循環冷却	被冷却体を冷却する 1 手法。冷凍機などで冷却された液体窒素を循環ポンプにより被冷却体に圧送し、液体窒素と被冷却体で熱交換を行うことにより冷却を行う。熱交換により温度の上昇した液体窒素は再び冷凍機などに圧送され、その温度は再び低下する。この循環サイクル回路を形成することにより、冷媒は蒸発することなく閉ループ循環を続けることができ、液の補給が不要であるという特徴を有する。
	液体冷媒冷却	超電導ケーブルを敷設した配管内に極低温液体を流し、配管全長を冷却する方式
	遠心型ポンプ	回転軸に取り付けられた羽根車（インペラー）を回転させ、液体に運動エネルギーを与えることで揚程（圧力差）を生じさせる方式の非容積型ポンプ。
お	往復動型ポンプ	ピストンやベローを膨脹、圧縮させることにより液の吸い込み、吐き出しを行い、揚程（圧力差）を生じさせる方式の容積型ポンプ
	温度センサー	システム各部の状態の一つである、温度の状態を確認するためのセンサー。異種金属の接合点で発生する熱起電力を用いる熱電対、合金や半導体の抵抗温度依存性を利用する測温抵抗型温度計などが一般に用いられる。
か	ガイドライン	システムの設計、製造、工事、試験、運用、保守などに対し関係者が取り組むことが望ましいとされる指針や、基準となる目安などを示したもの。
	ガウシアン成分	正規分布(ガウス分布)成分を有する分布状態
	ガス冷媒冷却	超電導ケーブルを布設した配管内に極低温ガスを流し、配管全長を冷却する方式
	カラーチェック	浸透探傷検査に同じ
	仮焼	粉末（原料粉末）の予備的な熱処理。焼結体の作製における焼結前熱処理や、TFA-MOD 法における超電導相形成熱処理（本焼）前に行う、前駆体形成のための熱処理
	架空線	主に空気を絶縁体とした送電線路で、雷撃により雷サージの発生する可能性のある線路。
	荷重	機械や構造部分に加わる力。
	課電試験	耐電圧試験、雷インパルス試験などの総称
	過電圧	常規商用周波運転電圧を超えて発生する電圧。雷過電圧と開閉過電圧がある。
	過電流通電性能	過電流による導体の限界性能を確認するための通電試験。今回は定格の 2 倍相当の 5 kA を 5 秒間（一般的な電力用遮断器の最大許容遮断時間を考慮し過電流継続時間を最長 2 秒間と想定。余裕を見て 5 秒間とした）での特性を確認した。
	過負荷	定格容量を超えた負荷。
	過負荷電流	定格電流を超えた電流。

	過飽和条件	ある温度、圧力で決定される溶解限度よりも濃度が高い状態を作り出す条件のこと
	過飽和度	ある量が飽和量を超えた状態を過飽和といい，飽和量を超えた部分の飽和量に対する割合を過飽和度という。
	過冷却	過冷却（sub-cool)とは沸点と凝固点の間の液体の状態を指す。液体窒素では大気圧下で 77K から 63K の間となる。
	回線	電力輸送を行う単位となる導体または導体系。例えば、三相交流では、３つの導体を１回線という。
	回線延長	回線ごとの起点から終点までの線路長の合計。
	回転数制御	冷凍機の出力（冷凍能力）のコントロール。
	碍子	電線とその支持物とのあいだを絶縁するために用いる冶具。
	核磁気共鳴装置（NMR）	核磁気共鳴（Nuclear Magnetic Resonance）現象を応用した分析装置。磁場中の原子核の核スピンの共鳴現象を観測することで物質の分子構造を原子レベルで解析するために極めて高い磁場を利用する。
	監視設備	超電導ケーブルシステム運転に際し、その運転状況を確認すること、運転時に発生する可能性のある異常の有無を常時監視し、異常が発生した場合にはすみやかに警報を発信し、重大な故障の場合には運転停止処置など適切な対応を自動で実施する設備。
	管摩擦係数	流体力学のダルシー・ワイスバッハの式（損失水頭式）に使われる、摩擦による圧力損失の程度を表す。無次元数であり、管路の表面粗度やレイノルズ数により変化する。
	管路	主に地中に埋設されて活用される、ケーブルを収容するための管状の部材。ケーブルの引き入れや引き抜きを容易にし、布設後は外傷防止の役目を果たす。
	間接冷却方式	冷却システムにおいて、冷媒がブラインと呼ばれる不凍液を冷却し、これを介して目的物を冷却する方式。
	型式試験	最低限度の技術要件・安全性を満たしているかを確認する試験
き	基板	ＲＥ１２３系超電導線材作製プロセスにおいて用いられる厚さ数十から 100 ミクロン程度のテープ状金属基板のこと
	機械強度	材料が持つ連続体としての力学的特性の総称。引張り・圧縮・せん断などの外力に対する耐久性の指標全般を指す。
	気密検査	高圧ガス保安法、冷凍保安規則などで定められた規定に則り、設計圧力を印可し漏洩等の異常がないことを確認する試験。
	極性反転	直流送電で電力潮流の反転を行うため、電流の方向はそのままにして送電線の電圧の極性を反転させること
く	クエンチ	通電中の超電導導体が熱的および電磁気的な擾乱により超電導状態から常電導状態に遷移する際、温度上昇を伴い常電導状態が急激に導体を伝播し超電導に復帰しない現象。状況により超電導線が損傷することがある。
	クッション層	多層巻の超電導線材間にて相互の接触を緩和するための緩衝層。
	クライオスタット	超電導コイルなど被冷却物を収納して、その重さと発生する力などを支持できる断熱支持構造を持った開放又は密閉構造の所定の低温を保持する装置。

	クラフト紙	OF ケーブルの主絶縁材料として通常は絶縁油を含浸して使用する電気絶縁強度の高い絶縁紙。超電導ケーブルにおいて液体窒素含浸条件下で使用しても高い絶縁強度を有する。
	クリープ試験	一定の温度と応力において、時間経過とともに材料の変形が進行する変化する現象をクリープといい、この性質を調べるための試験をクリープ試験という。
	空孔	結晶の格子点で原子があるべきところなのに原子が存在しないところ。Vacancy。
	ケーブル	一般的には、電力用ケーブル、通信用ケーブル等の総称だが、前後の文脈から明らかな場合は、超電導ケーブルを単にケーブルと表記している場合がある。
	ケーブルコア	超電導ケーブルの断熱管内に挿入され、主にフォーマー、導体層、絶縁層、シールド層から構成される。
	ケーブル接続間隔	ケーブルの１区間長は、その製造・輸送条件で制約をうける。これにより決まる中間接続部間のケーブル長を表す。
	ケーブル保護リレー(Ry)	旭変電所の実証ケーブルシステム内での電気的故障を検出するための電流差動式リレー。
	ゲル化	ゾルがゲルになるときに、分散質が繋がってネットワークを作る現象を架橋と言う。ゲルは架橋の方法により、化学ゲル(共有結合)、 物理ゲル(それ以外の分子間力など)に分かれる。物理ゲルの結合は弱く可逆的で、温度変化や応力などでゾルに戻る。化学ゲルの共有結合は安定している。分散質が高分子で、架橋により網目構造となったゲルを高分子ゲルという。
	系統事故	地絡事故、短絡事故、断線、またはそれらが複合したことにより、線路または機器が送電不能に陥ること。通常、事故区間が遮断され系統全体は保護される。
	蛍光紙	紫外領域のレーザービームの形状を可視化するため蛍光材料を塗布した紙
	警報	システムの異常を知らせるための手段。異常を検知した場合ランプやブザーのほか、リレー回路による信号伝達やインターネット送信などを用いてそれを周知、伝達する。
	警報しきい値	圧力、温度などの数値情報で監視されている状態に対し､警報と判定される条件となる設定値。
	結合損失	外部磁場変動により発生する超電導線の損失のひとつで、超電導体に生じる遮蔽電流が常電導母材金属を横切る際に発生するジュール熱損失
	結晶配向性	超電導層、中間層等の結晶軸の揃い方の程度を配向性という。基板面に垂直な方向（膜厚方向，c-軸方向）への配向と、線材の長手方向の結晶の並びである面内配向（a,b-軸方向）の２つが超電導特性、線材特性に重要な因子となる。
こ	コア引入張力	予め布設された断熱管内に超電導ケーブルコアを引き入れる際に発生する張力。引きいれ先頭部は引入ルート各部での発生張力が積算される。
	コア固定ジョイント（CSJ）	中間接続部で接続したコアを容器に固定する構造であり、ケーブルコアの動きを止める役割がある。Core stop joint の略。

	コイル電圧	コイル両端の電極間で観測される電圧。常電導遷移にともなう電圧および磁場変動に伴うインダクタンス誘導電圧等をいう。
	コイル内平均電流密度	コイル巻線に鉛直な単位断面積あたりの電流値。
	コールドヘッド	GM、スターリング冷凍機などの低温発生部。形状が円筒形のためコールドヘッドと呼ばれ、このヘッド部に循環側液体の熱交換器を取り付け、冷却を行う。
	コールドボックス	低温環境で使用される熱交換器などを内蔵した容器で、内部を真空に保ち、外気からの熱侵入を防ぐ容器。
	コラム状	円柱形状、column。
	コリオリ流量計	コリオリ力を用いて管内を流れる流体の質量流量を測定する機器
	格子	結晶中で規則正しく配列している粒子の三次元的配列を表したものを結晶格子といい格子とも呼ぶ。結晶格子の最小となる単位を単位格子という。
	格子比熱	結晶中の原子の振動による比熱。通常の温度では物質の比熱の大部分を占める。アインシュタインの比熱式およびそれを改良したデバイの比熱式で説明される。
	後備保護リレー	何らかの原因により主保護継電器で事故線路の遮断ができなかった場合に動作する保護継電器。事故による停電範囲は主保護よりも拡大するので、動作時間は主保護よりも遅れるように整定される。
	極低温	絶対零度にきわめて近い低温とされるがその温度範囲を含め明確な定義はなく、通常は液体ヘリウム温度である 4.2K 以下の温度をいう。液体窒素温度領域でもこの表現が使われることがある。
	交流損失	交流電流を流した時に超電導線材・導体に発生する損失。超電導状態であれば直流通電による抵抗がゼロであるため、ジュール損失は発生しないが、交流通電（交流磁界）では、ヒステリシス損失、渦電流損失、結合損失などの電気的な損失が発生する。これらの損失をまとめて交流損失と呼んでいる。
	工学的臨界電流密度（J_e）	臨界電流値を線材の断面積で除すことで求める臨界電流密度のうち、線材の断面積に基板、安定化層、絶縁体など超電導特性を示さない断面積も含むもの。
	更新需要	電力ケーブルなどにおいて、その寿命が近づいてきたことにより、新規ケーブルと代替する必要がある。その需要をさす。
	高圧ガス保安法	高圧ガスによる災害を防止するため、高圧ガスの製造、貯蔵、販売、輸入、移動、消費、廃棄等を規制するとともに、民間事業者及び高圧ガス保安協会による高圧ガスに関する自主的な活動を促進し、公共の安全を確保することを目的とした法律。
	高温超電導	一般的に約 25 K 以上の 臨界温度（T_c ）を有する物質が示す超電導現象。特に液体窒素の沸点(77K)以上の温度で実用化が実現され得る超電導を指すことが多い。

	高温超電導体	1986 年以降に発見された銅酸化物を中心とした超電導材料の総称。それ以前の超電導体の使用が液体ヘリウム温度で行われていたことに対して、高温超電導材料は液体窒素温度にて超電導特性を示すことから、相対的な意味で「高温」と名づけられた。国際標準(International Standard)および JIS 規格では 25K 以上の超電導臨界温度をもつ物質と定義される。
	亘長	電線路の指定された区間の距離を言い、例えば発電所～変電所間、２変電所間などで用いられる。
さ	サージ	電力系統において雷や開閉器動作の影響で発生する過渡的な異常電圧・電流
	サーマルオシレーション	極低温液体の存在する配管系で発生する振動現象
	サブクール度	液体窒素飽和温度と過冷却液体窒素温度の差
	サブクール度	ある圧力で存在する液体の飽和温度（沸点）Ts と、そのときの液体温度 T との差、△T=T s －T のこと。△T が大きいほど沸騰しにくい状態を表している。
	再送電	短絡あるいは地絡事故が発生した際に、事故点を遮断した後に再び送電を開始すること。
	最高使用電圧	運用時にケーブルにかけられる電圧の最大値。
	最小曲げ直径	コア、ケーブルなどの機械特性、電気特性などが維持される最小の曲げ径。ケーブルコアの最小曲げ直径についてはコア外径 d に対し 20 倍までとなる。
	最大経験磁場	電磁石の通電時に巻線部に発生する最も高い磁場。
	作製ウインドウ	試料を作る際の条件範囲のこと
	三心一括型	３つのケーブルコア（導体、絶縁体、シールド等からなる）が一つの断熱管の中に収納された超電導ケーブルの構造
	三相短絡（事故）	交流三相線路で、三相の導体が短絡する事故
	残存性能	長期試験などを経験したケーブルが最終的に示す性能。初期との性能比較で、経年による劣化の有無を確認する。
	残存性能確認試験	長期試験などを実施した超電導ケーブルシステムの個々の特性を、単体運転調査や、解体調査、解体後のサンプル試験などにより確認し、初期からの性能低下の有無を確認する。主な確認内容は、（ア）Ic 特性（イ）静電容量（ウ）絶縁抵抗（エ）熱侵入量確認試験（オ）圧力損失確認試験（カ）冷凍機性能確認試験（キ）ポンプ性能確認試験（ク）ペルチェ電流リード（PCL）フランジ解体調査　などがある。
し	シートパイル	鋼製の細長い板。鋼矢板。両側線は結合に便利なように加工してある。土木・建築工事の際に地面に連続的に打ち込んで、土がくずれるのを防ぐのに用いる。
	シート電流密度	面状に流れる電流の電流密度
	シールド	導体層に通電した際に発生する磁場を外部に漏らさないように、導体層と逆位相の電流を誘起させる層のこと。
	ジュール損失	電気抵抗×（電流の２乗）であらわされる発熱量。
	シュラウド翼	翼周りを覆い、流れ漏れを抑える。

	ジョイント	中間接続部と同意。
	シリンドリカルレンズ	シリンダ(円筒)形状の一部を切り出した形状のレンズ。主にレーザー光断面を矩形に変換するための光学系で使われる
	事故点	線路に発生した絶縁破壊点、もしくはその点を含む切り離し可能な線路区間。早期の事故復旧に関わるものは後者である。
	事故電流	系統事故に伴って流れる異常電流。短絡電流と地絡電流に大別される。
	磁化損失	外部磁場の変動にともなって物質の磁気ヒステリシスにより生ずる損失。
	磁化法臨界電流測定	非接触で超電導体の磁化を測定することにより臨界状態モデルを仮定して計算により臨界電流を求める測定方法。
	磁気共鳴画像装置	核磁気共鳴（nuclear magnetic resonance, NMR）現象を利用して生体内の内部の情報を画像にする装置。MRI（Magnetic Resonance Imaging）装置と一般的に呼ぶ。
	磁気光学効果	磁場内の物質を通る光に対し磁場に起因して透過光や反射光の偏光状態が変化する現象
	磁気軸受(AMB)	モーターなどの駆動回転軸をベアリングなどではなく、磁気浮上させることにより支持する軸受。摩耗部品がなく、潤滑油なども不要であり、軸受そのものの寿命は半永久的である。
	磁束	磁場中の各点にはたらく力の様子を示す磁束線（磁束密度のベクトルが接線になる曲線）の集まり。単位はウェーバ（Wb）。
	磁束ピンニング	磁束が第二種超伝導体の内部にあるひずみや不純物などの常伝導部分に捕らえられ、ピンで止めたように動かなくなる現象。
	磁束ピンニング力	磁束密度 B の混合状態にある第二種超電導体に電流密度 J_t を流したとき、単位体積に含まれているピンがローレンツ力密度 $F_L=J_tB$ に抗して量子化磁束をピン止めできる最大の力を巨視的ピン止め力密度($F_p=J_cB$)と呼ぶ。これに対し、1個のピンが量子化磁束格子をピン止めできる最大の力を要素的ピン止め力と呼び f_p で表す.単位体積当たりに含まれている N_p 個のピンについてピン止め力を加え合わせたものを $F_p = \varepsilon f_p N_p$ と表し ε をピン止め効率と呼ぶ。
	実系統	実際に電力が送電されている電力系統
	実証（用）ケーブルシステム	旭変電所に設置された超電導ケーブル、中間接続部、終端接続部、監視システム等の総称。
	実証システム	旭変電所における超電導ケーブル実証に使用される設備全体を指し、主要構成要素は実証ケーブルシステム、冷却システム、および付帯機器である。
	実用線路	実際に電力が送配電されている商用電力系統。
	遮断器	電力系統において、負荷電流や事故電流を遮断する能力を有する開閉器で、遮断方式により、ガス遮断器、空気遮断器などの種類がある。
	遮蔽電流	下部臨界磁場(H_{c1})までは超電導体内部には磁束が侵入できないため、外部磁界を打ち消すよう超電導体表面に誘起される電流を遮蔽電流という
	主保護リレー	電力系統は何重にも組み合わせた保護継電器（リレー）によって保護されている。主保護継電器は、ある保護区間内に発生した事故に対し、一番目に動作するよう整定された保護継電器。

	樹脂含浸コイル	巻き線に樹脂を含浸して線材を固定したコイル
	終端接続部	ケーブルの端が気中リード線と接続できるように接続端子を備えた接続箱。ケーブルヘッド。CH。超電導分野での通称は、「端末」。ただし、「端末」はケーブルの切断面に施す防水キャップの意で使用されることもあるので注意が必要。
	従来ケーブル	既に実用化されている電力ケーブル。ＣＶケーブル、ＯＦケーブル、ＰＯＦケーブルなどがある。
	出荷ドラム	超電導ケーブルを出荷する際にケーブルを巻き付けるもの。巻き付ける胴部分はケーブルの最小曲げ径以上の径を有し、輸送時の外傷防止の鍔はケーブル巻付長さ、ターン数などにより外径を定める。
	出荷試験	出荷製品が「形式試験供試品と同等の製造・品質管理状態であることを確認」するために行うもの。受入試験と同義。ここで形式試験とは、ある形式製品の設計・製造および施工方法を「認定」するために行うものである。
	瞬停	おおむね１秒未満の瞬間的な停電或いは定格電圧の 10%以上の電圧降下。
	竣工試験	システム全体の健全性を確認し、ユーザーに引き渡すために必要な各種試験を実施し、自家用電気工作物として工事計画図書や法令等に合致した設備が建設され、必要な能力を有していることを点検、試験等により確認するもの。
	循環ポンプ	液体窒素を超電導ケーブル系統内で循環させるため、移動式端末近傍の系統内に設置するポンプ。型式としては、非容積型（遠心型など）、容積型（往復動式など）に大別される。
	昇温	冷却を停止し、系内の温度を上昇させること。
	焼結体	固体粉末の集合体を融点よりも低い温度で加熱し、粉末を焼き固めた物体
	冗長化	機器の信頼性を高める方策のひとつ．冗長とは複数の機器を用意しておくことであり、待機冗長と切り替え冗長がある．待機冗長は機器が故障した際に予備機を稼動し、この間に故障機を整備する方式。切り替え冗長は定期的に運転する機器を切り替え、停止機を整備しておく方式である。
	常磁性	外部磁場が無いときには磁化を持たず、磁場を印加するとその物質の磁化率に比例して磁場の方向に弱く磁化する磁性のこと、Paramagnetism
	常電導	通常の金属など、有限の抵抗をもつ導体。超電導が電気抵抗ゼロであることに対する単語。
	常電導シールド層	銅などの常電導材料を用いて超電導シールド層に対して並列に設けられる層。事故電流が流れた際のバイパス回路の役割を担う。
	蒸着	希薄な気相から固体状に物質が堆積すること。
	蒸着速度	単位時間あたりに対象物上に蒸着する物質の厚さ
	信頼性	アイテムが与えられた条件で規定の期間中、要求された機能を果たすことができる性質。一定の条件下で、安定して期待される役割を果たすことのできる能力、と定義されることもある。

	侵入熱	超電導ケーブルの断熱管外部（室温部）から内部に侵入する熱。超電導ケーブルでは侵入熱を抑えるため、二重の SUS コルゲート管の間を真空引きし、伝熱を抑えるとともに、スーパーインシュレーションと呼ばれる熱絶縁体を巻き付けて、輻射に伴う侵入熱の低減を行なう。
	侵入熱試験	超電導ケーブルシステムの熱負荷を測定する試験。循環する液体窒素の質量流量を M(kg/sec)、定圧比熱を Cp(J/kg/K)、測定区間の温度差を dT(K)とすると、熱負荷 W は、W=Cp x M x dT (W)と表される。
	浸漬冷却	液体窒素等の冷媒中に冷却対象物をそのまま浸して冷却すること。
	浸透探傷検査	溶接部の非破壊検査の方法。カラーチェックとも呼ばれ、表面に開口した傷の有無を調査できる。表面に赤色の浸透液を塗布し、傷に浸透した液を現像液によりにじみ出させ、目視判定する。
	真空ポンプ	真空断熱槽を所定の真空度に到達させるための排気装置の総称。動作方法、原理によりメカニカルブースターポンプ、ターボ分子ポンプ、ロータリーポンプなどがあり、使用する圧力領域、排気特性にそれぞれ特長がある。
	真空リーク	接続部の溶接不良箇所の他、計測配線のフィードスルー部、計測機器・真空排気系の接続箇所等の施工ミスで真空槽と大気側、冷媒側が導通し、真空度が悪化する現象。
	真空断熱	熱の伝導のうち気体の対流熱伝導を抑制するため、断熱層を真空状態にする断熱方式。一般的には放射熱伝導を抑制するためのスーパーインシュレーション（多層断熱材）と組み合わされて利用される。
	真空封じ切り	真空断熱槽の真空度を維持するため、ベークアウトや真空排気を実施した後は排気装置と切り離した状態で運用する状態。
	真空法	ヘリウムリークテストを行う方法のひとつ。リークを確認する容器内を真空排気し、その排気経路にヘリウムリークディテクタを取り付ける。容器外部の漏れを確認したい場所にヘリウムを吹きつけ、漏れ箇所から容器内に侵入したヘリウムガスを検知する方法。おもに真空層などの漏れ検査で用いられ、1e-10Pam3/sec オーダーの高精度の検査が可能。
	人工ピンニングセンター（人工ピン）	超電導体内に意図的に分散させた微細な非超電導物質であり、超電導状態において磁束を捕獲（ピン止め効果）するもの。人工ピンともいう
	常電導状態	超電導を示さないときの超電導体の熱力学的状態。電気抵抗を持つ。
	真空含浸	コイル巻線内の空間を真空引きによって，エポキシ，ワックスなどの材料で充てん(又は含浸)して導体を固定する方法
す	スケール則	二つの量の間の比例関係を主張する法則。ある範囲では正しいことが知られているとき、範囲が甚だしく異なる場合でも関係が成り立つとして，量の推測に用いられる方法。スケーリング則。
	スターリング冷凍機	冷凍機の一種．空間の常温側端に断熱圧縮を行うピストン，中間に蓄熱器，他端の低温側に断熱膨張を行うピストンを有する．両端のピストンが位相をずらして駆動されることで冷凍サイクルを構成する．理論的な効率は理想サイクルといわれるカルノーサイクルと等しく高効率であり，小型化が容易である。

	スタッドピン法	表面にスタッドピンを接着し、面に鉛直方向の力をピンに加え剥離強度を測定する試験法。、
	ストイキオメトリ	化学量論組成。
	スニファー法	ヘリウムリークテストを行う方法のひとつ。リークを確認する容器内にヘリウムを充填し、容器外部の漏れを確認したい場所にリークディテクタに接続した「スニファプローブ」をあて、容器内から大気側に漏れ出たヘリウムを検出する方法。内部にコアなどのアウトガス発生源がある液体窒素槽など高真空に排気することが難しい箇所の検査で用いられる。大気に存在するヘリウムガス濃度 1e-6Pam3/sec オーダーの感度となる。
	スピンコート	高速回転する円盤状に試料をのせ、そこに原料を滴下して遠心力で薄膜を塗る方法
	スプレーコート	溶液をスプレー上にして、試料に塗布する方法
	スペーサー	二つの近接した物体の接触を避けるための部材。 コイル又はケーブルにおいて，線間，巻線の層間，又は分割したコイル間の熱と電気的接触を避けるために一般にスペーサーが置かれる
	スラスト	軸方向（またはアキシャルともいう）。
	スループット	製造線速を含む生産性のこと。完成品の単位時間あたり生産長を指す。
	水頭	揚程と同じ
	水力直径	等価直径と同意
せ	ゼーベック係数	金属や半導体の両端に温度差を与えると温度差に比例した電圧が生じ、その温度差と電圧の比例係数をゼーベック係数という
	セルノックス温度センサー	100mK～420K を計る負温度係数の薄膜抵抗センサーで、温度応答時間が速く 熱サイクルや強い磁場、放射線の照射といったストレスに高い耐性があある
	ゼロ抵抗	超電導状態において電気抵抗が消失した状態
	製造線速	単位時間あたりに製造装置から製出される線材の長さ。
	静的負荷	応力や歪みなどの負荷が経時変化しない状態
	静電シールド	帯電している物体が、周囲の帯電していない物体に静電誘導が起こるのを妨ぐため用いられる治具。
	静電容量	絶縁された導体において、どのくらい電荷が蓄えられるかを表す量。単位はファラド［F］を用い、 1 ボルトの電圧を与えたとき、1 クーロンの電荷を蓄えたならば、そのときの静電容量は 1 ファラドと定義される。
	静疲労特性	一定応力下で進展するセラミクス材料の劣化現象
	接続抵抗	導体、シールド導体同士を接続する際に発生する電気的な抵抗
	接地方式	高圧ケーブルのしゃへい層の接地方式には、片端接地と両端接地があり、一般的には片端接地で施工される。ただしケーブル亘長が長い場合は大地間の誘導電圧上昇を防止するため両端接地が採用される。
	設計圧力	設備を使用することができる最高の圧力として設計された圧力をいい、設備の強度を決定するために使用される。
	絶縁材料	機器を絶縁するために使われる材料
	絶縁層	超電導線材を電気的に絶縁するために形成される層
	絶縁耐圧	物質が破壊せずに耐えることができる最大の電圧

	絶縁耐力	絶縁破壊電圧を絶縁体の厚さで除した値。単位は通常 kV/mm と表される。
	絶縁抵抗試験	絶縁性能を確認するための試験であり、抵抗値を測定することにより絶縁不良判定を行うもの。規定された直流電圧を印加し、流れる電流値から抵抗値を測定する。
	線材の負荷率	超電導線材の臨界電流（Ic）と通電電流（Ｉｔ）の比（It/Ic）によって定義される値。交流通電時には、電流のピーク値（Ip）を用いて、Ip/Ic で定義される。
	線路インピーダンス	送配電線のケーブル種類、相間距離などから決定される電気定数。抵抗、インダクタンス、キャパシタンス、漏れ抵抗の関数で表される。
そ	ソレノイド コイル	円筒状のコイルであり，通常軸方向の長さが横方向の長さより大きいもの。線材をコイルフォーマに一列で横方向に巻いていき、端部で上段に乗りあがる構造。
	外管表面温度	超電導ケーブルの表面温度。ほぼ断熱二重管の室温側配管の温度に相当し、真空断熱層の熱負荷の増減に影響する。
	塑性変形	物体に外力を加えて変形させ、その後、外力を取り去っても残る変形。外力の大きさが弾性限界を超えた場合に生じる。
	相間距離	単心三相ケーブルにおいて、各ケーブル(各相)の離隔距離。
	相分離母線	IPB(Isolated Phase Bus)とも呼ばれ、主に発電所引き出し線に用いられる。相毎に独立した金属外被（アルミニウム製）で密封されており相間短絡を起こさない。外被内の導体は碍子で支持され、電流が大きい場合内部は強制風冷されることもある。
	相離隔	3 相交流送電の、各相ケーブル間の距離。
	送電距離	発電所から需要家まで電力を供給する距離。その区間には送電線、変電所（変換所）、配電線などが設置される。
	送電効率	発電所からの送電電力と、送電電力から送配電により発生する電気的な損失を差し引いたものの比で表される。送電効率 η ＝（1-(電気損／定格送電電力)）×100 となる。
	送電損失	電力ケーブルが電力を輸送する際に発生する損失。超電導ケーブルの場合、ケーブルの交流損失、絶縁体の誘電損失、断熱管の侵入熱などが上げられる。また、それらの損失は極低温で発生するが、それを冷却するための動力が必要。一般に、その損失をＣＯＰで割った値を送電損失としている。
	送電方式	電力の送電に対する方式は現在主流である交流送電方式と、長距離線路に向く直流送電方式がある。
	送電容量	送電線が常時継続して送電できる最大送電電力をいう。送電容量は電線路の許容電流と、交流送電の場合系統安定度で主に決まる。
	測温抵抗体	温度特性の判った物質の抵抗を測定（四端子法）することで、温度を得るもの

た	ターボブレイトン冷凍機	動作ガス（一般的にはヘリウム)の圧力を高めるタービン式圧縮機、高圧ガスをタービンにより断熱膨張させて低圧低温のガスを生成する膨張機、2次側流体（液体窒素）と低温ガスを熱交換させる熱交換器、圧縮後の常温ガスと2次側との熱交換を終えた低温ガスの間で熱交換を行う熱交換器、などで構成される冷凍機。大型の冷凍機に適し多段圧縮化により効率の向上が見込める。
	タッチダウンベアリング	磁気軸受の保護用のボールベアリング。通常は非接触で停止状態。
	多元系酸化物	物質の組成の中に2以上の金属が含まれる酸化物
	多層断熱材	多層断熱法により熱放射を抑えるもので、一般にポリエステルのような薄いプラスティックフィルムに片面、もしくは両面にアルミニウムを蒸着して作られた反射膜をスペーサー―と呼ばれる不織布等の熱伝導の悪い層を介して幾重にも積み重ねたものである（スペーサーを用いず皺加工やディンプル加工等で熱接触を減らす場合もある）。
	対向試験	すべての警報監視条件に対し、正しく警報が発報されるかを１対１で確認する試験。模擬的な警報を入力する場合や、特に重要な故障などの警報に対しては実機で動作確認を行う場合もある。
	対流	気相、液相などにおいて相内に温度差が生じる場合、気体、液体の密度が変化し比重差により生じる流れ。
	耐圧検査	高圧ガス保安法、冷凍保安規則などで定められた試験の規定に則り、試験圧力：（設計圧力＋大気圧）×1.25 の圧力のガスを印可し、漏洩等の異常がないことを確認する試験。
	耐圧特性	耐圧力特性。容器、ケーブルなどが、内部圧力に対して示す特性。
	耐張力	布設時、冷却時の張力をケーブルコアの銅フォーマーが負担する設計とし、1 mm2 あたりの抗張力にフォーマー断面積を乗じた値が設計上の耐張力となる。
	耐電圧設計	超電導ケーブルにおいて送配電電圧が印加されるケーブルコア、電流リード、ジョイント、端末部などの電気絶縁部の設計を行うこと。
	単心型	超電導ケーブルの構造において、一つのケーブルコアが、一つの断熱管の中に収納されているもの。
	短絡事故	交流３相送電、直流バイポーラ送電などで、２相が導通して起こる電気事故。
	短絡電流	電力系統の任意の地点において短絡事故が発生した場合に流れる事故電流。
	短絡発電機	短絡事故を模擬した大電流を発生するための試験設備。
	端末	断熱二重管の終端部であり、超電導ケーブルコアの室温部への電流リード部、冷媒の出入り口およびケーブルコア端部の把持部など備えた容器。液体窒素を内蔵する容器と、液体窒素を内蔵した容器を真空断熱するために密封する容器の2重構造となる。
	端末容器	液体窒素を内蔵する容器と、液体窒素を内蔵した容器を真空断熱するために密封する構造を有した容器からなる２重容器のこと。

	弾性限界	物体に外力を加えたときの弾性を保つ限界の応力で、外力を取り除いたあとにもとに戻らなくなる限界点
	断熱管	ケーブル外部から液体窒素槽への熱侵入を防ぐ役割を担う。一般に、金属製の二重管の間にスーパーインシュレーションなどを用いた断熱層を設け、さらに高真空に保つことで熱侵入を低減する。
	断熱効率	損失を含んだ実際のターボ圧縮機またはターボ膨張機の仕事と断熱変化時の理想的な仕事の比。
	断熱層（槽）	液体窒素への入熱を低減するための熱的な絶縁を行う部分。
	断熱二重管	ケーブル外部から液体窒素槽への熱侵入を防ぐ役割を担う。一般に、金属製の二重管の間にMLIなどを用いた断熱層を設け、さらに高真空に保つことで熱侵入を低減する。
ち	チップクリアランス	ロータのインナーとアウターの先端部の隙間。
	チラー	冷凍機を用いて所定の温度の冷却水を生成する装置。冷却塔のように外気温度や湿度の影響を受けず安定した温度での冷却水供給が可能である反面、冷凍機作動電力を必要とする、冬季は冷却水が凍結する場合がある。
	地絡	送電中の充電部とアース部が導通して起こる電気事故。一般に、短絡電流より電流値は小さい。
	地絡事故	送電中の充電部とアース部が導通して起こる電気事故。一般に、短絡電流より電流値は小さい。
	地絡電流	地絡により系統に発生する事故電流。
	逐次的結晶組織制御	長尺の積層多結晶体等の結晶軸方位や粒径、析出相、双晶界面といった組織を一定にコントロールするにあたり、全長、全層一括処理でなく、各層ごとに端部から順に処理して目的構造を構成し ていくこと
	窒素循環ポンプ	冷却に用いる液体窒素は冷凍機を出て超電導ケーブル内を通って冷凍機に戻り、再び系内を循環する。このためのポンプを窒素循環ポンプと称する。脈動を防ぐため遠心式ポンプが用いられ、駆動のためのモーターは熱侵入を低減するため長軸でポンプ本体と接続される。
	中間接続部	電力送電線路として長尺のケーブルシステムでは製造面・輸送面よりケーブル長に制約がある場合が多くそこで数百ｍおきにケーブルを接続する必要がある。そのために必要となる超電導ケーブル同士をマンホール内にて接続するための機器。
	中間層	二つの物質が相互に熱拡散や剥離等を生じないよう、中間に配置する介在層のこと。高温超電導テープ線材ではハステロイ™金属基板の表面にベッド層、配向制御層、キャップ層などのセラミックス薄膜中間層を配置する。
	抽気	気体などの一部を外部に取り出すこと。
	超電導	ある条件の下で直流電気抵抗がゼロであり完全反磁性とみなされる物質又は材料の性質
	超電導シールド	導体層に通電した際に発生する外部磁場を打ち消すように導体層と逆位相の電流を誘起させる層のこと。超電導をもちいることで誘起される磁界の逆位相はπに近くなり、磁界の大きさも導体部のそれに近づくため、コア外周に漏えいする磁界の大部分をキャンセルすることができる。

	超電導マグネット	超電導線又は超電導ケーブルを用いた，外部磁界を発生させることを目的とした機器
	超電導層	基板上に形成済みの中間層の上に蒸着された超電導体薄膜
	超電導層工程	超電導体を中間層の上に蒸着するための工程。蒸着された超電導体薄膜を超電導層と呼ぶため、これを形成するための工程の名称。
	超電導導体	ある条件の下で電気抵抗がゼロとなる物質。ある条件とは臨界温度、臨界磁場、臨界電流密度を超えない範囲を指す。超電導体は，完全導電性、完全反磁性（マイスナー効果）、磁束の量子化、ジョセフソン効果などの他に類を見ない特性を示すため，省エネルギー技術など様々な応用が期待されている。また，高温超電導は 25 K（ケルビンは絶対温度の単位で、0K=-273℃）以上に臨界温度をもつ物質で，主に銅酸化物系材料である。
	直管タイプの断熱管	断熱管の形状の一種。冷媒配管が直管であるため、管路摩擦係数が波付管よりも小さく、循環冷媒の圧力損失が小さくできポンプの小型化や循環距離が長く取れるなどの利点がある反面、長尺の輸送が困難であるため現地での溶接施工が必要となるなど工事面での作業負荷が増加する。
	直接冷却方式	冷却システムにおいて、冷媒が直接被冷却物を冷やす方式。
	直流課電試験	直流電圧を用いた高電圧試験。直流用途の電力機器や、交流用途でも電力ケーブルなど静電容量が大きな場合、課電トランスの充電電流、すなわち電源容量が大きく、試験が困難な場合は直流電圧での試験を実施する。
	直流四端子法	電気抵抗を正確に測る方法のひとつで、二つの電流端子の内側に電圧端子を設け一定の直流電流における電圧を測定し電気抵抗を求める方法。二端子法で測定誤差として含まれる測定用配線の抵抗、および試料との接続部の接触抵抗を回避することが出来る
	直流送電	発電した電力を直流で送電する方式。交流送電では送電線路に抵抗以外のリアクタンスが存在し無効電力の増加や系統安定度の低下が問題となるが、直流では送電抵抗のみのためそれらの考慮は必要ない。一方、半導体素子による交直変換にコストがかかることや、直流の大電流遮断が困難であることなどから、その用途は諸島間の長距離送電など特殊なケースに限定されてきた。
	直流抵抗	導体に直流電流を流した場合の実効抵抗。
	直流破壊電界	電気絶縁体に直流電圧を印加した際、絶縁破壊を起こしたときの電界（＝破壊電圧/絶縁体厚み)
つ	ツイスト・ピッチ	ツイスト加工において捻られた超電導フィラメントが一周し線材断面の元の位置に戻る単位長さ。
	ツイスト加工	変動磁場下の交流損失低減のため、金属系超電導線の丸線に施される長手方向の捻り加工。超電導フィラメント間の結合電流の減衰速度を速める。
	通電試験	線材に電気を流して実施する試験。
	通電性能限界試験	冷却システムの故障時運転を想定し、循環液体窒素の温度が運転上限に到達した際の通電特性を評価する試験。
	通電損失	超電導線材に交流通電電流を流したときに発生する損失。

て	△T 法	循環冷却の流量を変えた場合の 2 点間の温度差を計測し、流量の逆数と温度差でプロットした直線が本来原点を通ることを利用し、温度差測定誤差をキャンセルするための手法。
	ディップコート法	原料溶液中にワーク（塗布対象物）を浸漬し、液中の粘性力、表面張力等による力と速度を調整して引上げ、乾燥、焼成により余分な溶剤を除去し、均一な薄膜を形成する方法
	テストピース	ケーブルもしくはケーブルコアを管路、もしくは断熱管に引き込む試験で製作される、短尺のケーブルもしくはケーブルコア。
	テスラ(T)	磁束密度を表す SI 系単位、Tesla。CGS 単位系換算では 1T = 10^4Gauss
	テンションメンバ	ケーブルやコアに高張力の金属線などを取り付けることなどにより、管路、断熱管に引きいれる際の引入張力によりコアがダメージを受けないようにする構造体。
	定格通電試験	送電システムに対し電力会社が定めた定格電流を通電し、運転特性を確認する試験。
	定格電流	設計で定められた規定条件下で作動する機器、装置等の電流範囲。
	鉄損	モーターなどの鉄芯部分で生じる損失。
	伝導冷却方式	液体ヘリウムや液体窒素などの冷媒によらず、冷凍機によって熱伝導で冷却する方法。
	伝熱パス	熱が伝達する経路
	電圧タップ	Ic 測定において電気的 4 端子法を用い発生電圧を測定する際、超電導線材表面に取り付けられた電圧測定用の電極。
	電気的四端子法	試料に対して電流を流した際に、ある区間に発生する電位差を測定する方法。電流リードと電圧リードに別々の線を用いる方法。一般に、二端子法と四端子法があるが、低抵抗の資料の測定に際しては精度の高い四端子法が用いられる。
	電子比熱	金属の極低温における比熱は実測によれば T^3 に比例する部分と T に比例する部分の和になる(T は絶対温度)。前者を格子振動による比熱，後者を金属に特有な伝導電子に由来する電子比熱と呼ぶ。
	電磁気的異方性	超電導物質の電気的特性や磁気的特性が測定する方向により異なること。
	電磁力	アンペアが右ネジの法則に関連して電流の流れている２導線間に働く力について、両導線に流れる電流の積に比例し、両導線の間隔に反比例する力が働くことを発見した。両導線に流れる電流の向きが同方向のときは吸引力に反対方向のときは反発力になる。
	電流リード	室温の電源から極低温の超電導ケーブルコアに温度差をまたいで電流を供給する装置。
	電流掃引速度	Ic 測定などで I-V カーブを測定する際の電流上昇速度(A/sec)。掃印速度が低いと常伝導部の温度上昇が測定誤差になるが、掃印速度が速いと通電回路のインダクタンス成分により電源電圧が上昇するため、試験環境に応じ最適にバランスさせる。
	電流密度	電気導体に電界が与えられたときに、単位面積に垂直な方向に単位時間に流れる電気量（電荷）のこと。

	低温超電導体	一般的に約 25 K 以下の臨界温度をもつ超電導体。金属系超電導体とも呼ばれる。
と	ドライブモード	超電導マグネットの励磁における通電法のうち、外部電源から電流を流し続ける運転方法を、永久電流モードに対しドライブモードという。。
	トリップ	事故電流を遮断するための遮断器開放動作。
	トレンドグラフ	循環冷却運転を実施している時の温度、圧力、流量、真空度、液面、送電電圧、送電電流などのデータをグラフ化し、リアルタイムで表示させること。
	等価直径	流体工学で使用される、ある形状の流路の断面と等価な円管の直径のこと。 等価直径 De は、De=4A/L（A：流路断面積(m2)、L：濡れ断面長(m)）で表される。
	到達真空度	断熱真空槽の真空引き、ベーキング、封止、または冷却運転中などの各状態で得られる真空度。
	動疲労試験	一定の条件で応力が変化する状況下において実施される耐久試験
	動疲労特性	変化する応力下で進展する疲労特性
	動力盤	冷凍機、ポンプなどのモーター駆動や、制御盤や電灯への電源を供給する盤。
	同軸	導体層、シールド層、アース層などが同軸円筒状に配置される構造。特に交流送電での３心一括型、３心同軸型を区別する際に用いられる。
	洞道	地中に構築する暗きょ（トンネル）。床上あるいは棚上にケーブルを布設することになる。
	銅シールド層	超電導導体、シールド層近傍に設置され、端末部や接続部にて超電導導体および超電導シールドとそれぞれ電気的に接続された銅導体を指す。超電導ケーブルにて短絡事故などが発生した場合、定格電流を超え超電導導体が常伝導化するが、このとき銅保護層に分流することにより超電導導体を保護する。
	銅フォーマー	フォーマーに同じ。
	銅安定化層	通電中の超電導線が磁気的・熱的に不安定になった際、一時的に電流を分流させ超電導に復帰させるための低抵抗金属層。Y 系超電導線では銀薄膜を介した銅層が一般的である。
	銅酸化物系高温超電導線材	酸化銅を含み超伝導現象を示す化合物。YBCO や Bi2212 や Bi2223 系超電導線材がこれに該当する。
	銅編組リード線	超電導ケーブルと端末部電流リードとを接続する電気回路に、銅編組線を用いたもの。
な	ナノロッド	ナノメーター（nm）オーダーの直径と長さを有するロッド（棒）状の周囲と異なる成分や結晶構造を有する組織。
	長手方向	線材のように 1 方向が他のすべての方向に対して著しく長い物質における著しく長い方向のこと。
ね	熱サイクル試験	超電導ケーブルシステムが室温～LN2 温度までの経時的な大きな温度勾配を受ける際の機械特性、電気特性などへの影響について検証する試験。

	熱シールド	冷媒管の周囲に､別の冷凍機、冷媒などから伝導冷却された金属シールドを設けることで周囲の高温端温度を下げ、断熱性能を向上させる方式。性能向上分の熱負荷は別の冷凍機、冷媒側の熱負荷となる。
	熱緩和	断熱法に対し、試料と熱浴を熱接触させ、試料に熱を与えたとき、または与えていた熱を絶った際の試料温度の緩和現象から熱容量を求める方法。
	熱磁気不安定性	第二種超電導体において、局所的な発熱や磁束跳躍に起因して急激に常電導に遷移する状態。
	熱収縮	室温と液体窒素温度の温度差約 300 度により発生するケーブルなどの熱機械的な収縮。金属で収縮率は約 0.3%となる。
	熱収縮対策	ケーブルコアを室温から液体窒素温度まで冷却する際に生じる約 0.3%の熱収縮相当の引張歪みを緩和させ、ケーブル抗張力以下になるよう対応する方策。
	熱侵入	低温容器内に室温領域から熱伝導、熱輻射などで侵入してくる熱量。熱浸入とも表記する。
	熱損失	超電導ケーブルシステムにおいて発生するジュール損や交流損失に伴う熱や侵入熱に伴う損失。これら損失に伴う熱により、冷媒の温度が上昇するため、必要な温度に冷却する必要がある。
	熱伝導率	温度勾配により生じる伝熱のうち、熱伝導による熱の移動のしやすさを規定する物理量である。熱伝導度や熱伝導係数とも呼ばれる。
	熱電対	異種金属の 2 接点間の温度差によって熱起電力が生じる現象（ゼーベック効果）を利用した温度センサー。
	熱負荷	冷媒に対し、クライオスタットの外部から侵入するガス対流、放射、熱伝導に起因する熱負荷、ケーブルの課通電により発生する交流損失、ジュール損失、誘電損失などの総和。
	熱放射	熱の伝わりの原理のひとつ。熱が電磁波として輸送される現象、または物体が熱を電磁波として放出する現象をさす。
	熱放射率	熱放射のしやすさを表す無次元数で０から１の値を取る。黒体で１となる。多層断熱材では熱放射による伝熱を低減するため、アルミ蒸着膜など放射率の小さい材料が選定される。
	熱容量	物体の温度を単位温度 1K 上げるのに必要な熱量。熱量の単位にジュールまたはカロリーを用いるのに応じて，熱容量の単位は J/K または cal/K が用いられる。
	熱輻射シールド	熱輻射は熱放射とも言い、物体から熱エネルギーが電磁波（波長により赤外線、可視光線、紫外線、x 線、γ線）として放出される現象のこと。その電磁波を遮る部材を示す。
の	ノズル	流体の流れる方向を定める部品。
は	バイパス回路	信頼性の不確かな回路や実験的な回路等と並行に設置した回路で、前者を切り離した場合に運用し、信頼度を確保するもの。本プロジェクトでは、CV ケーブルによる線路がこれに該当する。
	バイパス管路	循環冷却回路において、冷却機器や超電導ケーブルの循環ルートを切り替えるための付帯管路。機器のメンテナンスや冷却系の構成、冷却システムの単体運転を行うために設計・設置される。

	バイポール	直流送電のうち、送電線もしくはケーブルが＋極、－極の２極で構成される方式。双極とも呼ばれる。
	バイヨネット継手	冷却配管同士を接続する際、接続部での熱侵入を低減するためにオス・メスの鞘構造を取り高温側、低温側の熱伝導距離を多く取れるようにした継ぎ手。
	ハステロイ™基板	ヘインズ社が商標登録しているNi基の合金（ハステロイ™）製の金属テープのうち、超電導線材の基板として用いられるもの
	バックアップ	信頼性から、ある機器が故障してもシステム的にその機能を支えてシステムの運転に支障が及ばないようにすること。該当する機器を複数用意しておく場合は冗長化と証する。
	バルク	薄膜でない一定の厚みを持つ形態を指す
	パルスレーザ蒸着(PLD)法	パルスレーザをエネルギー源として原材料を気層中に放出させ、それを目的とする基板上へ堆積させることを特徴とする薄膜の蒸着方法。
	パンケーキコイル	テープ状の線材を巻枠リールに積層巻線した形状の単層コイル。巻枠最内層から、線材端から巻き始めるシングルパンケーキ構造と、線材中央部から巻き始めるダブルパンケーキ構造がある。
	パンケーキ状磁束	Y系高温超電導物質は二次元性が強いため、混合状態の磁束量子の挙動は、1本の糸状の磁束線とそれを取り巻く一連の渦電流ではなく、薄い円盤状の渦電流が積み重ねられているというパンケーキ状の磁束量子モデルとなる。
	破壊電界	絶縁耐力に同じ。
	破断応力	物質が破断するために必要な最小応力
	排気コンダクタンス	排気系の2点間の断面を流れる気体流量をその圧力差で割ったもの。コンダクタンスは配管の幾何学的構造による他、気体の種類、温度状態などによって変化する。
	排気速度	排気系から単位時間当たりに取り去られる体積で定義され、真空ポンプの性能を表す指標のひとつ
	配向制御	酸化物の多結晶体において、構成する粒子の結晶方位を同一方向にそろえること。
	配電盤	送電される高圧の電気を受けるための設備
	剥離応力	密着した複数の物質を剥離させるために必要な最小応力
	剥離試験	接合した2つ以上の物質を引きはがすために必要な最低限の引っ張り応力を測定する試験
	発生電界	超電導線材に通電した際、長手方向の単位長さあたりに発生する電圧。超電導線の場合発生電圧が小さいことから、μV/cmなどの単位が一般的に用いられる。
	発電機引出線	発電機出力端と昇圧用変圧器間を接続するケーブル。一般的に低電圧、大電流となるため相分離母線などが用いられる。
	反磁性	磁場をかけたとき、物質が磁場の逆向きに磁化され、磁場とその勾配の積に比例する力が磁石に反発する方向に生ずる磁性のこと。反磁性体は自発磁化をもたず、磁場をかけた場合にのみ反磁性の性質が表れる。
	反射率スペクトラム	反射率の波長もしくは振動数依存性

	薄膜導体	金属基板／中間層／多結晶超電導層／安定化層を基本構造とする長いテープ状の薄膜
ひ	ヒートサイクル	異なる温度を繰り返し経験させること
	ヒートパルス法	熱容量測定において、断熱状態測定系に既知の熱量（ΔQ）を加えたときの系の温度上昇（ΔT）を測定する方法
	ビームプロファイラ	レーザーのビーム径や空間的な強度分布を測定する機器
	ヒステリシス	ある系の状態が、現在加えられている力だけでなく、過去に加わった力に依存して変化すること。履歴現象、履歴効果とも呼ぶ。
	ヒステリシス損失	磁性体や超電導体において、交番磁場を印加した際に生ずる磁気ヒステリシスにより発生する損失。履歴損失とも呼ぶ。
	ビスマス線材	主に $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+d}$ を用いた超電導線材。超電導臨界温度は-163℃（110K）。
	ひずみゲージ	ひずみ（材料に加わる外力に比例して材料が伸びたり縮んだりする変形の量）を電気信号として検出するセンサー
	ピンニングセンター（ピンニング点）	超電導状態の第二種超電導体の外部磁場が臨界磁場 Hc_1 と Hc_2 の間にあるとき、磁束が内部にあるひずみや不純物などの常伝導部分に捕らえられ、ピンで止めたように動かなくなるピンニング現象において、磁束ピンニングに寄与する常伝導析出物や転位などの不均質部分や欠陥をピンニングセンターという。
	光干渉式膜厚計	分光干渉法を利用した非接触の膜厚測定装置
	被覆材	導体を保護する目的で導体外部に形成される材料
	標準化	ケーブルなどの製品や部品の品質、形状、寸法、施工手順、試験方法などを標準に従って統一すること。これに伴って効率化・合理化ができ、互換性も高まる。
ふ	ファニング摩擦係数	「配管内などを流れる流体の圧力損失⊿P や摩擦損失」と「流速や配管の長さや内径など」の関係を表したファニングの式の中で使われる摩擦係数
	ファラデー効果	光の偏光面が通過する空間の磁界の影響をうけて回転すること
	フープ応力	円周の接線方向に作用する引張応力を、周方向応力（circumferential stress）あるいはフープ応力（hoop stress）と呼ぶ。コイル巻線では通電した際に、磁力とコイルに流れる電流と導体曲率半径によって決まる応力。
	フォーマー	平角型導体をらせん状に巻き付けるために配置される円筒状の支持材。コア引き込み特性、可撓性、事故時の電流分担特性を考慮し、銅の撚り線が用いられることが多い。
	ブッシング	端末容器を貫通する電流リードを通す通路をもち、容器から電流リードを絶縁するために用いる。
	フライアレイレンズ	レンズを複数枚使用し、蝿の目のように縦横マトリクス状に配列したレンズ体のこと。イングレータレンズともいう
	プルーム	エキシマレーザ蒸着法において、レーザー光が照射されアブレーションにより発生するターゲット材料がプラズマ化した羽毛(plume)形状の領域。

	ブレイトンサイクル	動作ガス（一般的にはヘリウム)の圧力を高める圧縮機、高圧ガスと低圧ガスの間で熱交換を行う熱交換器、高圧ガスを断熱膨張させて低圧低温のガスを生成する膨張機などで構成される冷凍機。大型の冷凍機に適す。
	不可逆応力	線材に加えられた応力によって変化した Ic が応力を除去しても応力印可前の Ic に戻らなくなる最低限応力
	布設	送配電ケーブルを管路、トラフなどに設置する工事のこと。
	負荷状況	電力系統において、最大許容電力に対して、実際に使用されている電力の割合の状況。
	負荷率	ある期間中の負荷の平均需要電力と最大需要電力の割合であり、次式で定義される。 負荷率[%]=(平均需要電力[W]/最大需要電力[W])×100 負荷率が高いほど設備が有効利用されているということになる。
	部分放電	電極間に電圧を加えたとき、その間の絶縁物中で部分的に発生する放電をいい、電極間を完全に橋絡する放電は含まない状態。
	風損	回転に伴い生じる損失。
	複合絶縁方式	２つ以上の絶縁体を併用した絶縁方式。本プロジェクトでは、絶縁紙 PPLP に液体窒素を含浸させた絶縁となっている。
	沸騰熱伝達	液体の中にある加熱された固体の表面で、沸騰が起きる際の伝熱過程を「沸騰熱伝達」という。
	輻射	放射に同じ
	輻射率	放射率に同じ
へ	ヘッド	揚程に同じ
	ヘリウムリーク検査	発泡試験やカラーチェックなどでは確認できない、微小漏れを検知するための検査で、ヘリウムガスの漏れの有無を判定することにより検査を実施する。ヘリウムガスは大気中濃度が 1ppm と低く、誤検知が少ないこと、四重極型質量分析計による高精度測定が可能であること、ヘリウムガスは分子サイズが小さく微小漏れ箇所での透過が容易であることなどが採用理由である。
	ヘリウム冷媒	冷却用として用いられる液体ヘリウムのこと。液体ヘリウムは大気圧で沸点が 4.2K と物質中で最も低いことから臨界温度の低い金属系超電導線材を利用する機器の冷却に用いられる。
	ヘリカル変形	超電導ケーブルの冷却・昇温の際発生する熱収縮対策への一方策。ケーブルコアを管路に布設後一旦液体窒素にて冷却、熱収縮させた状態で両端固定後、昇温伸長させることにより、常温状態でケーブルコアに螺旋状の緩みが生まれ、液体窒素冷却時の張力発生、コアの移動を緩和する。
	ペルチェ効果	2 種類の金属または半導体の接合部に電流を流すと、片方の金属または半導体からもう片方へ熱が移動するという現象。直流電流を流すと、一方の面が吸熱し、反対面に発熱が起こる。
	ペルチェ素子	ペルチェ効果を利用した半導体素子。
	ペルチェ電流リード（PCL）	ペルチェ効果により低温部（極低温側）の熱を高温部（室温側）に汲み上げることにより、低温部への熱侵入を低減する効果を用いた電流リード。
	偏光フィルタ	特定の偏向方向以外の光を制限もしくは遮断するフィルタ

	偏流	ケーブルコアを構成する超電導線材ごとの幾何学的要因によるインダクタンスの差異、接続抵抗等のばらつきなどによりインピーダンスに差異が生じ、線材に流れる電流が偏よる現象。
	変電所バンク	変電所に設置された変圧器を指す。
	変電設備	一般的には、電力系統において電圧を変換するための設備の総称であるが、本事業原簿においては、文脈上誤解の恐れがない場合は、「実証ケーブルシステムの付帯機器」と同義として、旭変電所における超電導ケーブル実証に必要な変電設備に限定して表記している場合がある。
ほ	ボア径	マグネットの内径。bore(穴をあける)が源語。
	ホール素子	ホール効果を使って磁界強度を測定するセンサー
	ホットウォール型成膜チェンバ	薄膜を成膜する容器（チェンバ）のうち、成膜部の空間全体を加熱する方式。Hot-Wall 型。
	ホモジナイザ	円形や矩形の不均一な強度分布(ガウシアン分布など)をもつレーザー光のビーム領域内に均一な光強度分布をつくる光学素子。単レンズを並べて組合せたフライアイレンズ(fly-eye lens)や、非球面レンズ、透過型回折格子(グレーティング)で均一化を行う。
	ポンプヘッド	揚程に同じ。
	保圧弁	圧力容器内の圧力をある範囲に維持するための弁。設定圧力以上に上昇した場合に保圧弁が開となり、内圧を設計圧以下に維持する。
	保安規程	電気事業法第４２条でさだめられた規定。事業用電気工作物を設置する者は、事業場又は設備ごとに電気工作物の工事・維持及び運用に関する保安を確保するため、保安規程を策定し、遵守する必要がある。
	保護リレー	継電器の一種で、電流や電圧の急激な変化から電気回路を保護するための装置。
	保護層	超電導層表面を物理的および化学的な影響から保護するため、超電導層の周りに密着して形成される保護のための薄膜層。超電導層と反応性が低く酸素を透過する銀が主に使われる。
	保守	点検などでシステムが運用可能な状態に維持すること。また運用可能な状態に戻すための補修などの処置。
	母線	発電所や変電所で、電源から全電流を受け、外線に供給する幹線。 ブス。
	放射	熱放射に同じ。
	放射率	熱放射率に同じ。
	飽和温度	ある圧力の下で液体が沸騰する、 または蒸気が凝縮する温度。
	本焼	焼結体の作製における（粒成長や酸素制御などを伴った）焼結工程、あるいは MOD 法における、前駆体からの超電導相形成を目的とした熱処理工程
ま	マトリックス	母相、Matrix。超電導にならない構成部材。
	マルチジョイント	同一線路に、NJ、CSJ など接続方式の異なるジョイントを採用した形態。
	巻き付けギャップ	絶縁紙、MLI などをコア、管路などにらせん状に巻きつける際、巻きつけられずに出来る空隙部分の幅。
	巻き付けピッチ	絶縁紙、MLI などをコア、管路などにらせん状に巻きつける際の１ターン当たりの長手方向距離。

	曲げ試験	ケーブル、コアなどの輸送時や布設時の機械特性・電気特性の劣化の有無を判定するため、それぞれのサンプルを許容曲げ径に対して所定の回数、方向で曲げを印可する試験。曲げの後外観目視検査、課電試験や通電試験などで劣化の有無を判定する。
め	面プルーム法	基板をプルーム内部に配置し、二次元的なマルチプルーム法を用い、かつ、多くのプルーム数にすることで、高速成膜にも対応する PLD 成膜法
も	モノポール	直流送電のうち、送電線もしくはケーブルが＋極、－極どちらかのみで構成される方式。単極とも呼ばれる。
	もらい事故	保護リレーによる保護区間外で短絡事故が起きた場合で、短絡事故電流が流れた直後も課通電のある場合の系統事故。
	疑似負荷ヒーター	循環冷却システム単体で冷却試験を実施する際、ケーブルなどの熱負荷を模擬するため設置された電気ヒーター（仮設設備の一種）。
や	ヤング率	縦弾性係数の俗称、イギリスの物理学者トマス・ヤングに由来する。フックの法則が成立する弾性範囲における、同軸方向のひずみと応力の比例定数。
ゆ	有限要素解析	有限要素法に基づく解析
	有限要素法	対象となる系を離散的な結節点に分割することを特徴とした近似計算法。
	誘電損失	ケーブルの絶縁物（誘電体）に電圧をかけた際に発生する損失。
よ	予冷	超電導ケーブルシステムを液体窒素温度に冷却する際、温度を徐々に下げることにより急激な熱機械力の発生を抑制する方法。
	予冷器	液体窒素を用いた予冷で用いられる装置。液体窒素を蒸発させる蒸発器、蒸発ガスの温度を調整するヒーターなどから構成され、所定の冷却温度、冷却流量の低温ガスを生成し、超電導ケーブルの予冷を行う（仮設設備の一種）
	容量制御	冷凍機の出力(冷凍能力)のコントロール。
	揚程	ポンプが液を押し上げる高さ。水頭やポンプヘッド、単にヘッドとも呼ばれる。
	溶接	金属部材の接合部に、熱や圧力を加え、接合する方法。ステンレスの突き合わせ溶接では一般にタングステン電極のアーク放電を用いた TIG 溶接がもちいられる。
ら	ライナー	隙間に挟み込み、隙間を調整するプレート。
	ラジアル	軸に垂直方向。
	ラップ巻線	超電導線材に絶縁のために絶縁性を有するテープを巻きつける際にテープ間に隙間が空かないようにテープが重ねあうように巻き付けた超電導線材
	雷インパルス	インパルスに同じ。
	雷サージ	雷撃に起因して線路に発生し進行する、異常電圧または異常電流。
	乱流	流体の流れの状態を示すものは、乱流と層流がある。レイノズル数が大きいものを乱流と呼ぶ。
り	リーク	配管や機器のシール部や溶接部から何らかの不具合により冷媒（液体窒素）が漏れること。真空層の場合には真空リークと言う。

	リザーバタンク	液体窒素は系内への不純物侵入を防ぐため閉サイクルで用いられる。しかし窒素温度が 77 k から 63K まで変化すると液体の膨張･収縮が 7%程度生じる。この膨張・収縮変化を吸収するのがリザーバタンクと呼ばれる真空断熱容器である。さらにリザーバタンクを窒素圧力が最も低くなる窒素循環ポンプ吸入側に設置することで、その最低圧力を保持する圧力制御機能を持たせることで超電導ケーブル内での気泡の発生を防止し部分放電を防ぐ機能を付加している。
	リターン管	循環冷却システムにおいて、ケーブルコアを冷却した後の冷媒を冷却システムに戻すための断熱配管。
	リリーフ弁	保圧弁に同じ。
	履歴損失	ヒステリシス損失を参照
	粒界弱結合	超電導現象において、電子のコヒーレンス長が短いことにより生ずる超電導結晶粒界での低 Jc 特性
	量子化磁束線	第二種超電導体の混合状態で、磁束量子Φ_0の単位に量子化された磁束のこと。超電導電流が量子化磁束の中心の周りを渦状に流れることから、量子化磁束を渦糸（vortex）、混合状態を渦糸状態（vortex-state）ともいう。
	臨界温度（T_c）	超電導状態であることできる最大の温度のこと。個々の超電導体に固有の温度で、その電流密度と周囲の磁界の影響を受ける。
	臨界磁場（H_c）	超電導状態であることできる最大の磁場のこと。個々の超電導体に固有の磁場（磁束密度）で、周囲の温度と電流密度の影響を受ける。
	臨界電流（I_c）	超電導状態であることできる最大の電流密度のこと。個々の超電導体に固有の電流密度で、周囲の温度と磁界の影響を受ける。
	臨界電流密度（J_c）	超電導状態で流すことができる最大の電流値を導体の断面積で除した電流密度のこと。超電導体の温度と冷却環境、周囲の磁界等の影響を受ける。
	臨界特性	臨界電流、臨界温度、臨界磁場の総称
る	累積破壊確率	低強度側から破壊した頻度を累積させて得られる破壊確率
れ	レイノズル数	流体力学において慣性力と粘性力との比で定義される無次元量である。流れの中でのこれら２つの力の相対的な重要性を定量している。
	レーザー顕微鏡	レーザーを光源に用いる顕微鏡。レーザー光スポットで測定試料を走査しながら照射し、透過光もしくは後方散乱光の強度もしくは共焦点法により像を得る。
	レギュレータ	圧力容器内の圧力をある範囲に維持するための弁。設定圧力に上昇させるために外部加圧（＞設定圧力）の圧力を調整する弁、設定圧力を超えた場合に圧力を逃がす弁で構成される。
	冷却システム	超電導ケーブルの冷却維持に必要な設備の総称で、特に断りのない限り、旭変電所に設置された冷却システムを指す。主要構成要素は、冷凍機、液体窒素循環ポンプ、リザーバタンク、動力盤、制御盤等である。
	冷却ステーション	循環冷却システムの運転に必要な設備を収納した建屋。
	冷却ステーション設置間隔	冷却ステーションの能力に応じ、ケーブル長手方向に対し、冷却ステーションを設置する間隔。

	冷却水	冷凍機内の冷媒ガスの圧縮行程で発生する圧縮熱や、モーターの発熱などを冷却するために使用される水。
	冷却塔	水の気化熱を用い、冷却水の冷却をおこなうための熱交換器。
	冷却能力	液体窒素の温度変動から算出した値、主に冷却システムとしての能力を表すために使用している。
	冷凍機	対象となる物質から熱を奪い、それを水や空気などに移送する機械または装置の総称。対象物の温度を下げる働きをする。熱の輸送に使用すされる冷媒の種類、それを圧縮する方法、膨張により吸熱作用を発生させる工程などによっていくつかの冷凍方式に分類される。液体窒素温度冷却においては、スターリング方式、GM 方式がよく用いられる。
	冷凍機の効率	動作温度において発熱量 Q[W]を汲出すに必要な冷凍機の効率で、冷凍機所要動力 W[W]とすると COP=Q/W で表される。COP(Coefficient of Performance)とも表記する。
	冷凍機伝導冷却	冷凍機など低温端を超電導線材に接触させ、熱伝導冷却を行う方式。
	冷凍機冷却超電導マグネット	冷凍機と熱良導体とを用いて熱伝導によって冷却する超電導マグネット
	冷熱サイクル	ここでは、超電導ケーブルが室温と液体窒素温度を繰り返し経験するサイクルをさす。
	冷媒	冷却に使用されるガスまたは液体。冷却温度でその熱容量が大きいこと、粘性が小さく圧損が小さく出来ることが望ましい。
	励消磁速度	マグネットを励磁または消磁する際の単位時間あたりの電流値（A/sec）または発生磁場（T/sec）。
ろ	ロードサイクル試験	所定の負荷、無負荷の日間パターンを繰り返し系に印可し、ケーブルシステム、冷却システムの運転特性、安定性などを評価する試験。
	ロードセル	荷重を電気信号に変換する装置。歪みゲージ式が一般に用いられ、荷重により弾性体に取り付けたひずみゲージの抵抗値が変化することをブリッジ回路により電気的に検出する。
	ロバスト性	ある系が応力や環境の変化といった外乱の影響によって変化することを阻止する内的な仕組み、または性質。
	漏洩電流	電路以外に流れる電流のこと。絶縁体の内部や表面を通じ、線間や大地間に流出する電流。ここでは、高圧部に直流高電圧が印加され、絶縁部を経て、接地部に流れ出す電流のこと。
わ	ワイブル解析	システムはそれを構成する最も弱い部分から故障するというモデル（最弱リンクモデル）のもとに、物体の強度を統計的に記述するために W.ワイブル（Waloddi Weibull）によって提案された確率分布（ワイブル分布）を用いた解析手法。
	ワイブル平均	ワイブル分布における平均値
	ワンターンループ	導体を一重の輪で構成した閉回路

Ⅰ．事業の位置付け・必要性について

1. 事業の背景・目的・位置付け

1.1 背景

再生可能エネルギー利用を更に向上させるため分散化する発電所から集中化傾向にある需要地にエネルギーロス無く送電を行う送電技術や、都市部を中心とした鉄道輸送力を電圧降下させることなく高めるための送電技術を確立することは重要な課題である。これらの課題解決のために、大電流・高磁場を発生可能で、電気抵抗による損失なく電気を送れる超電導技術が期待されている。このような背景のもと、エネルギー基本計画（２０１４年４月閣議決定）では超電導技術などの基盤技術の開発を加速することが必要とされている。

一方で、２０１２年末、超電導状態にするために冷媒として用いられるヘリウムが世界的に供給不足となる「ヘリウムショック」により、磁気共鳴画像装置（以下「ＭＲＩ」（MagneticResonanceImaging）という。）、核磁気共鳴装置（以下「ＮＭＲ」（NuclearMagneticResonance）という。）等の停止を余儀なくされた。世界の商用ヘリウムの約８割を生産する米国では、２０１５年までの期限付きでの民間へのヘリウム放出抑制を２０２０年まで延長することとなったが、それまでに備蓄が底をつく可能性があると言われている。そのためヘリウムの供給不足リスクに備え、液体ヘリウムを必要としない超電導応用技術開発を行うことが資源セキュリティの観点からも急務となっている。

1.2 目的

これまで実施してきた高温超電導の要素技術開発の成果は、実用化へ向けた開発へ移行可能な段階にある。本プロジェクトでは高温超電導技術の適用により、大きな省エネルギー効果、我が国の送配電システムの高度化、ヘリウム供給リスクへの対応及び大きな市場創出等が期待される送配電並びに高磁場コイル分野において、事業化に近い段階のものから原理実証、フィージビリティスタディ（ＦＳ）開発を総合して実施、各実施内容が事業化に進むための適切な技術開発を行う。このため本プロジェクトにおいては、ａ．高温超電導送配電技術開発、ｂ．高温超電導高磁場マグネットシステム技術開発を総合的に推進する。

2. ＮＥＤＯの関与の必要性・制度への適合性

2.1 ＮＥＤＯが関与することの意義

超電導技術は科学技術イノベーション総合戦略において取り組むべき課題、スキームの中で「革新的エネルギー変換・貯蔵・輸送技術の高度化」の一つとして位置づけられている。

また、２０２０年以降に急増すると考えられている大都市の老朽化した地中ケーブルのリプレース需要への対応及び再生可能エネルギー電源の大量導入による系統影響への対応のため、信頼性の高い次世代送電システムの開発が不可欠である。

しかしながら超電導ケーブルを実際に電力系統に適用するためには、不測の事故（地絡・短絡等）が発生した際の現象を把握し、リスクの内容、程度の検証と安全対策のための手段の検討を実施することが最終的な課題として存在する。しかし、安全性、信頼性の

検証は評価方法の検討から始める必要があり、個別の企業の活動では達成し得ない。ユーザーである電気事業者や複数の開発者、大学等の英知を集めた研究が不可欠である。ＮＥＤＯのプロジェクトとして、本プロジェクトをマネージメントする事により、我が国の技術を結集した研究開発が可能となり、効率的にプロジェクトを推進する事で、的確に成果を挙げる事ができる。

また、超電導ケーブル開発は、ＮＥＤＯの中期目標において省エネルギー分野中の横断分野で、「次世代送配電ネットワークの構築（高温超電導線材を活用した高機能電力機器等を含む）に不可欠な「熱・電力の次世代ネットワーク」等に係る技術開発に取組んでいく。」と記されている。本技術は実用化直前の段階にあって、普及期には至っていない。従って本プロジェクトはＮＥＤＯのミッションに沿うものであり、ＮＥＤＯの関与が必要とされるプロジェクトである。

加えて、電力分野での省エネ化あるいはCO_2削減を今後進めていく中で、発電分野だけで対策を行うことには限界があり、送配電分野における対策も必要となるが、既存の送配電技術は成熟しており、具体的な対応策を見つけることは困難な状況にある。

更に、海外においても、超電導ケーブルに係る技術開発は、韓国や欧州を中心に熱心に実施されており、今後の送配電関連技術における世界市場を考察すると、日本と同様に、都市中心部での老朽化した地中ケーブルの代替として超電導ケーブルが活用される可能性は十分にある。現状、日本の超電導ケーブル技術は、高温超電導線材の性能（臨界電流値等）では世界トップクラスを維持し、実用化に向けて長期実証試験も実施しているが、他国でも匹敵する性能の線材が開発されつつあり、同様の実証試験も実施されるなど、技術レベルは肉迫してきている。このため、本プロジェクトを実施しない場合、実用化が遅れるだけでなく、諸外国と比較して優位性を失い、市場参入が遅れ、国際競争力を失う可能性が高い。

2.2 実施の効果（費用対効果）

高温超電導送配電技術開発

大都市圏での局所的な電力需要の伸びや電力インフラ機器の経年による置き換えが予想される中、電力インフラの拡充・ケーブル交換には、共同溝の使用制約や送電網の用地買収条件を考慮すると、従来の銅ケーブルに比べ、高効率で送電容量の大きい超電導ケーブルの実用化が必要である。超電導ケーブルは、導入初期時には、揚水発電所の発電機引出線や都市部の地中ケーブルへの適用が見込まれている。超電導ケーブルは、従来の地中ケーブルに対して送電損失を１／２程度に抑えられることから、例えば、１１０ｋＶ以上２７５ｋＶ以下の地中ケーブルのうち２０％が超電導ケーブルに置き換わり、ケーブルの年間平均利用率を５０％と仮定した場合、年間５１ＧＷｈ省エネルギー効果が得られると見込まれる。なお、超電導ケーブルを用いた送電システムの国内の市場規模は、２０３０年において首都圏を中心に年間１０５億円程度見込まれる。

高温超電導高磁場マグネットシステム技術開発

ＭＲＩ用途を主眼とした高温超電導マグネットは３０Ｋ程度での運転を想定する。現行の低温超電導ＭＲＩマグネットの温度が４．２Ｋであるため、消費電力は３０％低減（２ｋＷ/台）。年間１７ＭＷｈ/台の省エネ効果が期待できる。２０３０年度において年間６５ＧＷｈ省エネルギー効果が得られると見込まれる。

また、高温超電導ＭＲＩマグネットは、現行の低温超電導マグネットと同一サイズでの高磁場化が可能となる。これにより、現在広く医療現場で使用されている。１．５Ｔ低温超電導ＭＲＩシステムの寿命によるシステム置き換えの際、３Ｔ高温超電導マグネットが採用される可能性が高くなる。この３Ｔ高温超電導ＭＲＩシステムが医療現場に浸透することにより、現行よりも高解像度な医療画像取得が可能になり、脳梗塞などの微小領域疾患の診断が期待できる。さらに、高磁場ＭＲＩシステムの実現により、神経系や細胞レベルでの診断に向けた医療情報の提供が可能になることも期待されている。また、いち早く世界市場に高温超電導技術による小型３Ｔマグネットを浸透させることができれば、これまで立ち後れていた我が国のＭＲＩの世界シェアを拡大することができる。なお、高温超電導マグネットを用いたＭＲＩの国内の市場規模は、２０３０年において年間９６５億円程度見込まれる。

Ⅱ．研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

1.1 研究開発目標

「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発」はこれまでの研究開発成果を基に、実証を通して実用化への仕上げを実施する実用化促進実証技術開発として、「運輸分野への高温超電導適用基盤技術開発」、「高温超電導高安定磁場マグネットシステム開発」及び「高温超電導高磁場コイル用超電導線材の実用化技術開発」は実用への基盤技術を確立するため研究開発を実施する実用化促進基盤技術開発として実施する。

1.2 研究開発項目毎の目標

1.2.1 電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発【交流】

1.2.1.1 安全性評価試験による影響検証

(1) 研究開発の必要性

超電導ケーブルの実用化には、地絡・短絡・外傷事故等を想定して、その影響を検証しておくことが必要である。また、検証試験を世界に先駆けて実施することにより、世界市場での優位性を確保できる。そのため、事故・故障発生時の超電導ケーブルや冷媒の挙動と現象を把握し、超電導ケーブルシステムに及ぼす影響を検証する。

(2) 研究開発の具体的な内容

発電機引き出し線を想定した 22kV 級単心型超電導ケーブル、都市部の地下送電線を想定した 66kV 級三心一括型超電導ケーブル、および大容量送電線を想定した 275kV 級単心型超電導ケーブルを対象として、短絡事故（超電導ケーブル以外での事故を想定）、地絡事故（超電導ケーブル内の絶縁破壊を想定）、液体窒素漏洩事故に対する損害レベルを考慮して、安全性評価試験に関わる細目を決定し、試験を実施する。また、各種安全性試験の検証結果をもとに、安全対策に重要な仕様案の取り纏めを実施する。

(3) 達成目標

最終目標（２０１８年度）

- ・超電導ケーブルに系統事故（短絡・地絡等）、外傷事故が生じた場合を想定し、試験項目・内容を決定、検証用装置を開発する。
- ・事故模擬試験による冷媒挙動や外部への影響について測定・分析によるシミュレーションの精度向上を図る。これを用いて、長距離超電導ケーブルにおける、事故時シミュレーションを行い、その影響や対策を完成する。
- ・送電用超電導ケーブルの仕様案ならびに安全性評価試験方法を作成する。
- ・試験方法・成果について、国際学会・CIGRE 等への発信国際標準化活動に反映する。

1.2.1.2 早期復旧等の実用化ための対策検討

(1) 研究開発の必要性

超電導ケーブルの実用化に向けては、前述の不測事故時の安全性検証に加え、その被害低減と早期に復旧することは社会インフラの構成要素として重要である。また、超電導ケーブルシステムとしてこのような研究開発は行われておらず、実用化に向けて検討と検証を行う必要がある。

(2) 研究開発の具体的な内容

研究開発項目 1.2.1.1 で検討した超電導ケーブルの安全性、信頼性に関する各検証試験結果から抽出した課題への対策を検討し、これを反映したケーブルシステム及び冷却ステムの設計検討を行う。これにより、超電導ケーブルシステムとしての損害の低減、並びに、事故・故障からの復旧方法等を検討、超電導ケーブルに付加するべき要素を明確にする。

また、復旧方法等の検討結果を、運転管理に係るガイドラインとして取りまとめる。

(3) 達成目標

最終目標（２０１８年度）

・超電導ケーブルシステムとしての、損害の低減、並びに、事故・故障からの復旧方法等を検討する。

・復旧方法等の検討結果を、運転管理に係るガイドラインとして完成する。

1.2.1.3 超電導ケーブルの侵入熱低減技術の開発

(1) 研究開発の必要性

「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」における実系統連系試験を通じて、超電導ケーブルへの侵入熱の低減が課題として明らかとなった。当該プロジェクトの実績が 2～3 W/m（旭実証・直線部）程度であるため、常電導ケーブルの送電損失（100W/m）に比して超電導ケーブルの送電損失が 50%になるには、交流損失 1W/m/ph、侵入熱 2W/m、冷却システム COP=0.1 が条件である。この侵入熱 2W/m を確固たるものにする必要がある。

(2) 研究開発の具体的な内容

超電導ケーブル用断熱管に係る構造・材質を改良して、２種類以上の電圧階級について超電導ケーブル用断熱管を試作する。その効果を実験によって確認する。

(3) 達成目標

最終目標（２０１８年度）

・実運用を想定した条件で、直線部でのケーブル長さあたりの熱侵入量が 1.8W/m/条以下となること。

1.2.1.4 冷却システムの高効率化技術の開発

(1) 研究開発の必要性

ブレイトン冷凍機の性能に関しては、「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」の 5kW 級冷凍機において、COP=0.1、メンテナンス間隔 30,000 時間の目途が得られている。超電導ケーブルの実用化に向けてはさらなる性能向上が必要である。

(2) 研究開発の具体的な内容

ブレイトン冷凍機を超電導ケーブルと接続した上で、実系統連系した長期実証運転を行い、冷却システムの長期的な性能及び運転安定性を評価する。

長期実証運転後、冷却システムの限界性能および信頼性を検証するために、過負荷試験や信頼性加速試験を行うとともに、超電導ケーブルシステム全体の残存性能検証および解体調査・撤去を行う。

(3) 達成目標

最終目標（２０１８年度）

・大容量・高効率のブレイトン冷凍機を旭変電所の超電導ケーブルと接続した上で、実系統実証運転を行い、長期信頼性を検証する。
・実運用を想定した条件で、冷却システム全体のＣＯＰが０．１１以上となること、並びに、冷凍機本体及び主な冷却システム構成機器の保守・点検間隔を４０，０００時間以上とすることが可能なこと。

1.2.2 電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発【直流】

本研究開発では、直流超電導送電システムの総合的な信頼性・安全性の実証研究、及び設計、運用、保守ガイドラインの策定、実施する。本事業期間（２０１６年度）における開発目標を以下に示す。

1.2.2.1 直流超電導送電システムの総合的な信頼性・安全性の実証研究

項目	開発目標
(1) 長尺時を模擬した液体窒素循環冷却性能の評価	・ 20km毎に20kWの冷凍機を設置することを前提に(*1)、熱侵入量を1W/m以下とする ・ 液体窒素の循環流量40L/minにて20km長での温度差（⊿T）を20K以内(*2)とするために、今回の1km設備における等価試験（4L/min）で、⊿T≦10Kとする
(2) 超電導ケーブルシステムの通電特性の評価	・ 定格電流：2.5kA 連続通電（3時間）で発生電圧及び運転温度の安定（超電導ケーブルコア両端電圧：発生電圧の0.1μV/cm以下の変動、冷凍機出口温度変動：±1度以内）を確認する ・ 送電効率：99.9%以上 （電流リードを含む送電線路の電圧降下）
(3) 過酷試験による評価	・ 定格通電限界：液体窒素温度83Kにおける安定通電 ・ 過電流：短尺での限界性能評価 ・ 耐電圧：要素試験結果からの性能検討
(4) 長期運転特性の評価	・ 無負荷での長期運転（1ヶ月程度） ・ ロードサイクル試験（通電8時間＋無負荷16時間、を２０サイクル）
(5) 残存性能確認試験	・ 超電導ケーブルシステムの一部に対し解体調査を行い、得られた結果から今後の課題などについて検討する。

*1： 実運用における経済性等を考慮し、冷凍機は20km毎の設置と想定する。
*2： リターン管を含んだ温度上昇、ケーブル管のみでは⊿T≦1Kとなる。

1.2.2.2 設計、運用、保守ガイドラインの作成

直流超電導送電システムの総合的な信頼性・安全性の実証研究の結果から得られた初期冷却手順、実送電に向けた液体窒素の運用温度及び運用流量、非常時対応等の研究成果と、過年度実施の「高温超電導直流送電システムの実証研究」及び「高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業」における研究開発成果を総合的に検討することで、超電導直流ケーブルシステムの設計・建設方法、保安規定における点検項目や運転基準、平常時運用や事故時運用、および一部設備の障害時における復旧方法などの設計・運用・保守に関わるガイドラインを策定する。

1.2.3 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発

(1) 研究開発目標

現在、 MRI の国内稼働台数は 5000 台近くに達するとされ、 多くの病院で、診断・臨床用のイメージング装置として不可欠なものになっている。10 年前には 0.5T の低磁場であったものが、現在では 1.5T が主流であり、さらに 3T コイルが使われるようになり、高磁場化により鮮明で短い撮像時間でのイメージングが可能となっている。現用の MRI は、NbTi の低温超電導線を用いたコイルが用いられ、液体ヘリウム（He）による冷却により絶対零度に近い 4.2 K で運転されている。He の市場動向に関しては、４年前には、中国等の新興国での He 消費量の急増と、He の最大生産国である米国の設備の故障による生産量低減で、深刻な He 不足がおきた。危機的な He 不足は、最近は解消されているとはいえ、長期的な観点からは He 不足問題が起きると心配する向きもあり、希少資源である He に頼る事業形態自身への不安も拭い去れない。He の供給不足は、He 価格の高騰を招くことになり、MRI の維持コストアップにより、病院経営への影響や、さらに光ファイバー製造など他の He を使う産業への影響が予想される。そのため、He を 100%海外に頼っている日本において、早期に脱 He の MRI の開発を進めることで、恒久的な He 不足時代に対応し、さらに本 MRI を他国に先駆けて開発することで、MRI の設置台数が増える中国や新興国への輸出製品として期待できる。

高温超電導線は、液体 He 冷却を必要としない温度で超電導になることから、He を使わずに超電導機器として運転することができる。それゆえに、高温超電導 MRI が開発され商品化されれば、He の枯渇に影響しない医療用のイメージング装置を得ることができる。また、高温超電導の運転温度は 30K～50K であり、4.2K 運転に比べて冷却するためのエネルギーを小さくすることができ、その消費電力は試算によると約 1/10 にすることが可能である。省エネルギーに通じるものであり、運転コストの低減を図ることも可能となる。このように高温超電導線を用いた MRI の開発は、将来の高齢化社会、健康志向社会に貢献するだけでなく、金属系 MRI の市場において、外国企業に９０％近いシャアを取られた状況に対してシェア奪還のチャンスとなるものである。

高温超電導 MRI は、高温超電導線を用いたコイル開発が必要で、高温超電導マグネットを用いたイメージングの確認が開発として進められている。その一方で、将来の実用化を考えた場合、電源を必要としない永久電流モードでの運転も強く望まれる。高温超電導線で現在商用化されて線材としては、Bi2223 および Bi2212 の Bi 系線材と、YBCO などのイットリウム系線材である。どちらも超電導接続は困難であり、高温超電導 MRI の永久電流モードによる運転は不可能と言われていた。そのために、高安定な電源による電源駆動が考えられているが、電源内部の電力損失があること、コイルの励減磁のための超電導コイルの交流損失による冷却負荷増加による冷却コストの増加、従来病院での画像診療において撮影技師はイメージングに加えてコイルの運転作業が求められること、定期的な電源のメンテナンスの必要性など、現用の低温超電導 MRI に比べて不利となる可能性がある。本研究開発の超電導接続は、高温超電導 MRI マグネットに対して、永久電流運転を可能とし、それにより損失のほとんどない低運転コストの MRI を実現でき、さらにマグネット運転および保守の労務の軽減、電源設置スペースの省略、高稼働率の実現など病院経営の面からもメリットがある。

古河電工では、この永久電流運転を可能とする技術として、時間変動 1ppm/h 以下の高温超電導マグネットを実現するための高温超電導線の低抵抗（超電導）接続技術の開発を

行う。超電導接続の目標としては接続一か所あたり $10^{-12}\Omega$ 以下として、実用化として歩留り、施工時間、施工方法を、MRI マグネットメーカーが MRI マグネット製造として容認できるレベルの目途をつけることを目指すものとした。また、超電導接続技術は、MRI 以外にも NMR や磁気浮上列車などの永久電流モードが望まれる超電導マグネットに適用でき、高温超電導の応用範囲を広げることができるコア技術となる。そのため、超電導接続技術の汎用化も目指していく。

(2) 研究開発の概要

研究対象とする高温超電導材料としては、現在商用化されている高温超電導線材中、高磁場での性能が良い希土類系超電導線材（YBCO, REBCO, 薄膜超電導、2G-HTS 線、イットリウム系超電導線、Y 系線材などいろいろな呼称があるが本書では「ＲＥ系線材」で統一する。）を対象として接続技術の開発を進める。ＲＥ系超電導線材の超電導接続を行う場合、

①銅層、銀層の除去
②超電導層の張り合わせ
③熱処理による超電導層の界面での結晶成長
④超電導接続部の保護

の手順で行う。ＲＥ系超電導線材は、金属基板上に中間層を介して結晶配向させた超電導層が蒸着して形成され、さらにその上に電気的、化学的保護を目的として銀層、銅層が超電導層を覆うように形成されている。そのため、超電導層自身の接続には、これら銅層、銀層の除去が必要となる。また、ＲＥ系超電導線材（銅酸化物系高温超電導線材）は、ペロブスカイト構造を基礎とした結晶構造をしていて、2 次元正方格子 CuO_2 面に電流が流れることが知られており、CuO_2 面に垂直な方向には電流が流れにくいという強い異方性を持つ。そのため、その接続には結晶的な秩序が必要であり、これまでの超電導接続が困難であった要因も結晶構造がうまくつながらないことに起因している。古河電工では、２つの超電導線の接続について、超電導線材同士の間に高温超電導材料を介在して、熱処理により結晶成長させることにより、結晶的に超電導組織がつながるようにして、$10^{-12}\Omega$ 台の抵抗を実現した。（2016 年 4 月 27 日プレスリリース）　$10^{-12}\Omega$ 台の抵抗を評価するうえで、小型のダブルパンケーキコイルと永久電流スイッチと超電導接続して、閉ループを作り流れる電流の減衰量を、ホール素子を用いて磁場測定から行った。また、組織的な超電導層の成長の確認のために、接合部断面をＸ線等で組織分析も行い、組織的な超電導接続の確認を行った。

このように実験室レベルでの超電導接続の実現の確認はできているが、これを実際の MRI マグネットに適用することが、超電導 MRI の実用化促進に寄与すると考えている。そのため、本開発テーマの延長上の最終目標は、$10^{-12}\Omega$ 以下の超電導接続技術を完成させ、その超電導接続技術を MRI コイルメーカに技術移転して、MRI マグネットに適用可能な形態とすることである。

今回、MRI マグネットに適用するための接続条件の検討を行い、これまでの低温超電導 MRI マグネットで採用されているソレノイドコイルの適用を検討している。ソレノイドコイルのメリットは、コイルボビン数がダブルパンケーキコイルに比べて少なく済むことによるコストダウン、およびコイルの巻線密度を高くすることができることでコイルをコンパクトにすることができ、より軽量・小型の MRI コイルが開発できると考えてい

る。それゆえ、超電導接続の適用として、従来のダブルパンケーキコイルから、ソレノイドコイルに範囲を拡大して、永久電流の評価をすることにした。

そのため、本研究開発では、２０１６年度～２０１８年度において、超電導接続技術の開発、MRI マグネットを考慮した接続部の評価、実用化を考慮した接続方法の検討を進めることで、以下の項目の技術確立を目指す。

① 超電導接続の性能、歩留り、信頼性向上技術開発
② MRI コイルへの実装を考慮した超電導接続部の構造の開発
③ MRI 製造を想定した現場環境での超電導接続の実施およびその技術の確立

それぞれの項目における目標を以下にに示す。

高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発の開発目標

項目	2016年度	2017年度	2018年度 （最終目標）
①超電導接続の性能、歩留り、信頼性向上技術開発	・10^{-13}Ω以下の接続抵抗の実現	・1T の磁場中で 10^{-13}Ω以下の接続抵抗測定の準備	・1T の磁場中で 10^{-13}Ω以下の接続抵抗の実現。 ・歩留り 50%達成 ・劣化防止技術の確立
②MRI コイルへの実装を考慮した超電導接続部の構造の開発	・機械的な応力下での超電導接続の特性評価法開発	・超電導接続の保護方法の開発 ・機械的な応力下での超電導接続の特性評価法の確立	・超電導接続部構造を構築する。 ・機械的な応力下での超電導接続の確認 ・最終目標の超電導接続の特性を確認する。
③MRI 製造を想定した現場環境での超電導接続の実施およびその技術の確立	・MRI マグネットの仮設計 ・要素試験コイル試作と評価 ・小型コイルの設計	・小型コイル用線材調達 ・要素試験コイル（ソレノイド型要素コイル）の試作と評価 ・ソレノイドコイルのリード部の設計 ・小型コイルの開発	・小型コイル用線材調達 ・要素試験コイルによる試作と評価 ・小型コイルシステムの構築 ・コイル施工の劣化要因の調査と対策 ・コイル線材での超電導接続の実施と、永久電流測定

1.2.4 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【磁場特性改善】

Ｙ系高温超電導線材はコスト面、材料面また冷媒としての液体ヘリウムレスの観点からも超電導コイル応用分野への適用が期待されている。このためには、更なる高磁場特性の向上が求められている。この課題を解決するため、高磁場条件下での高電流密度性能を安定的に得るための特性改善のための研究開発が必要である。以上を踏まえて、具体的研究内容として本プロジェクトの開発目標を以下の通り定めた。

高磁場コイル用Ｙ系高温超電導線材の特性改善の開発目標として、以下を設定した。

・温度３０Ｋ、磁場７Ｔ条件にて平均電流密度４００Ａ／ｍｍ^{2}以上。

・１ｋｍにおける臨界電流の低下率（（全長の臨界電流平均値－臨界電流最小値）／全長の臨界電流平均値）を０．１５未満

・安定化磁場発生用線材として交流損失の低減（高い磁場中臨界電流を持ったうえで無加工と比較して、交流損失が１/１０）

項目	2016年度	2017年度	2018年度 (最終目標)
①高磁場コイル用超電導線材の臨界電流密度向上技術の開発 (フジクラ)	・人工ピン等の超電導層構造因子把握 ・基板、保護層、絶縁層の構造因子把握	・磁場特性最適化開発 J_e≧300A/mm^2 (30K、7T)、(線速40m/hr) ・基板、保護・絶縁層断面積低減開発	・J_e≧400A/mm^2 (30K,7T)、(線速≧50m/hr)
②長尺線材性能の均一性向上技術開発 (フジクラ、九州大学共同実施)	・磁化観察による特性不均質要因解析 ・静的疲労特性評価技術開発 ・動的疲労特性評価技術検討	・工程改善/インライン評価技術開発 ・動的負荷試験評価技術開発 ・特性分布測定技術開発	・1km の臨界電流低下率 ((全長の臨界電流平均値－臨界電流最小値)/全長の臨界電流平均値)＜0.15 ・特性分布測定評価技術開発
③高磁場コイル用低損失構造線材の研究開発 (産業技術総合研究所、京都大学再委託)	・安定化磁場発生用線材のため課題の抽出と対策の原理検証 ・細線化加工線材における損失のシミュレーション	・細線化加工による線材性能の性能変化の克服と撚り線形状の検証 ・撚り線形状の最適化、および損失のシミュレーション	・安定化磁場発生用線材として交流損失の低減を達成 (高い磁場中臨界電流を持ったうえで無加工と比較して、交流損失が 1/10)

1.2.5 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【生産性向上】

Ｙ系高温超電導線材はコスト面、材料面また液体ヘリウムレスの観点からも超電導コイル応用分野への適用が期待されているが、このためには低価格化の実現が必要である。この課題を解決するため、製造各プロセス改善により、スループットを上げる生産性向上のための研究開発が必要である。以上を踏まえて、本プロジェクトの開発目標を以下の通り定める。

・生産性向上目標として、完成品の単位時間当たり生産長を５０ｍ／ｈｒ以上

項目	2016年度	2017年度	2018年度 (最終目標)
生産性向上への課題抽出(フジクラ)	・各律速工程の技術課題抽出	―	―
生産性改善技術開発(フジクラ)	・J_e=250A/mm^{2}以上(30K, 7T)の線材について、超電導層工程線速 30m/hr 以上を達成(現状 20m/hr) ・基板表面品質および安定化層品質の生産性検討 ・連続非破壊高精度特性測定工程の高速化検討	・J_e=300A/mm^{2}以上(30K, 7T)の線材について、超電導層工程線速 40m/hr 以上を達成 ・基板表面品質および安定化層品質工程にて 50m/hr を達成 ・連続非破壊高精度特性測定工程の高速化検討	・J_e=400A/ mm^{2}以上(30K, 7T)の線材について、超電導層工程線速 50m/hr 以上を達成 ・全工程にて線速 50m/hr を達成、試作
生産性改善線材の特性評価及び解析 (1)連続非破壊特性測定の高速高精度化技術の開発(九州大学共同研究) (2)生産性を向上した高温超電導線の超電導諸特性の評価解析(東北大学共同研究)	・連続非破壊特性測定の高精度化および高速化技術課題抽出 ・連続非破壊高精度特性測定技術調査・概念設計 ・強磁場における Y 系超電導線材の諸特性測定評価の現状調査解析	・連続非破壊特性測定の高精度化および高速化技術の開発 ・「高速高精度連続磁化測定設備」設計・製作 ・強磁場における Y 系超電導線材の諸特性測定評価解析	・「高速高精度連続磁化測定設備」にて、高速測定技術開発を行い、幅方向分解能 1 ㎜以下において 50m/hr 達成 ・生産性を向上した Y 系超電導線材の強磁場における諸特性測定評価解析

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

2.1.1 電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発【交流】

(1) 安全性評価試験による影響検証

発電機引き出し線を想定した 22kV 級単心型超電導ケーブル、都市部の地下送電線を想定した 66kV 級三心一括型超電導ケーブル、および大容量送電線を想定した 275kV 級単心型超電導ケーブルを対象として、短絡事故（超電導ケーブル以外での事故を想定）、地絡事故（超電導ケーブル内の絶縁破壊を想定）、液体窒素漏洩事故に対する損害レベルを考慮して、安全性評価試験に関わる細目を決定し、試験を実施する。また、各種安全性試験の検証結果をもとに、安全対策に重要な仕様案の取り纏めを実施する。

（ｉ）短絡電流事故評価

(a) 22kV 級超電導ケーブル

検証可能な試験装置として、22kV/12kA 級、単心ケーブル、長さ 10m を想定した短絡試験装置の開発を行う。

短絡試験に関しては、超電導ケーブル以外の箇所で事故が発生した場合の事故電流通過を前提としているので、通過時に超電導ケーブルが損傷しないことはもとより、冷媒の温度・圧力変化が起こった後、超電導ケーブルが再送電できる状態になるまでの回復時間の

把握も重要となる。従って、超電導ケーブルの冷却方法としては、実用化時の形態に近いサブクール液体窒素の循環冷却方式で行うこととする。

ケーブル長さについては、発電機引き出し線の長さが 100m 程度であること、通電装置、冷却システムの容量等を考慮し、必要があれば長さを変更することとする。

装置の設置及び試験場所としては、既存の冷却システム、課電、通電システムを利用することが可能な住友電工の試験場で実施する。

試験方法としては、通電電流・時間をパラメータに、液体窒素の温度、圧力の変化を測定し、システムへの影響を調査する。また、再送電可能となるまでの復帰時間を確認するため、通電後に静電容量の測定も実施する。また、試験後に臨界電流（Ic）測定を行い、超電導ケーブルへの損傷がないことも確認する。

(b) 66kV 級超電導ケーブル

住友電工の試験場に構築済みである、66kV/2kA 級、三心一括型ケーブル、長さ 40m の短絡試験装置を用いて、短絡電流値をパラメータとした試験を行う。本試験結果を後述するシミュレーションコードに反映させて長尺ケーブルへの影響について推定できるようにする。

本試験も(a)と同じ考え方であり、短絡電流通過時に超電導ケーブルが損傷しないこと、超電導ケーブルが再送電できる状態になるまでの回復時間の把握が重要となる。従って、超電導ケーブルの冷却方法としては、実用化時の形態に近いサブクール液体窒素の循環冷却方式で行うこととする。

試験方法、評価項目としては、(a)に準じる。

尚、本試験に必要な、交流電源装置のメンテナンスを実施する。

(c) 275kV 級超電導ケーブル

275kV/3kA 級、単心型ケーブルの短絡電流試験を行う。試験結果をシミュレーション等により評価・検討を行う。試験は古河電工（三菱電機）の試験場で実施する。

(d) シミュレーション技術の開発

実用化時を想定し、数 km 長さの超電導ケーブルにて、短絡電流が流れた場合の冷媒の温度、圧力の変化をシミュレーションできるコードの開発を行う。で行う短絡試験の結果を予め計算にて予想し、実際の試験結果と比較することで、シミュレーションコードにフィードバックさせ、計算精度の向上を図る。

（ⅱ）地絡事故評価

(a) 66kV 級超電導ケーブル

検証可能な試験装置として、66kV/2kA 級、三心一括型ケーブル、長さ数 m を想定した地絡試験装置の開発を行う。

地絡試験に関しては、超電導ケーブル自身の絶縁破壊を想定しているので、超電導ケーブルが損傷することが前提であり、その損傷度合、外部への影響の有無を確認することが課題になる。また、絶縁破壊は局所的に起こるため、試験装置としては数mレベルでよいと考える。

冷却方法としては、事故前の状態が実形態に近い状態である必要があるが、地絡電流によるケーブル温度上昇は小さく、事故後の再冷却特性の把握は必ずしも必要はないと考え、液体窒素の浸漬冷却方式とする。

装置の設置及び試験場所としては、短絡発電機が利用できる日新電機株式会社、あるいは電力中央研究所の試験場を借用することとする。試験の方法については、上記試験ケー

ブルに絶縁異常個所を設けておき、発電機から通電することで、絶縁破壊を起こさせる。発生するアークエネルギーや電流の分流等を測定する。また、試験後に試験ケーブルを解体し、地絡時の試験ケーブルの破壊程度を確認する。評価項目としては、アークエネルギー、電流の分流ケーブル損傷程度、等があげられる。

尚、22kV 級超電導ケーブルの地絡試験については、66kV 級と地絡電流値が同レベルであるため、66kV 級の試験で統合する

(b) 275kV 級超電導ケーブル

検証可能な試験装置として、275kV/3kA 級、単心型ケーブル、長さ数 m を想定した地絡試験装置の開発を行う。

地絡試験においては、(a)と同様、その損傷度合、外部への影響の有無を確認することが課題になる。冷却方法としては、液体窒素の浸漬冷却方式とする。

尚、275kV 系統は直接接地系であり、地絡電流として大電流が流れる可能性があるので、その条件を事前に検討するものとし、試験場所としては、短絡発電機が使用できる電力中央研究所等の試験場を借用する。

上記試験ケーブルにおいて、地絡時に生じる内部圧力上昇をセンサで捉えて、そのデータを元に地絡時の圧力挙動をシミュレーションする。

試験方法、評価項目については、アーク電圧、電流の分流、ケーブルの損傷程度、液体窒素の蒸発、等があげられる。

また、2018 年度に実施を予定している地絡試験は 1Q の早い時期に実施する予定の為、準備は 2017 年度内に開始する。

(c) 液体窒素漏洩評価

(ｱ) 地下マンホールを模擬した漏洩試験

地下マンホール内で液体窒素が漏えいしたことを想定し、外部あるいはマンホール内での影響を確認するための試験方法、評価項目について検討する。検討結果をもとに、試験装置を構築する。

構築した試験装置を用い、外傷事故等により液体窒素がマンホール内に漏えいしたことを想定し、マンホール内・外への影響を検討する。

評価項目としては、温度や圧力の変化、蒸発ガスの流れ、マンホール内他設備への影響等を検討する。

(ｲ) 地下管路を模擬した漏洩試験

地下管路内に布設された超電導ケーブルに外傷事故が起こり、液体窒素が漏えいした場合の外部への影響度合いについて、試験方法、評価項目を検討する。検討結果をもとに試験装置を構築する。

構築した試験装置に加圧液体窒素を充填させ、外傷事故を模擬して断熱管が破損した状況を作り、液体窒素が地上に噴出した時の土壌温度への影響、蒸発ガスの流れ等の測定・調査を行う。

(ｳ) 洞道内での窒素漏洩の影響評価

洞道内での地絡等のケーブル事故や経年化によって、液体窒素が漏えいした場合の外部への影響をシミュレーション等により評価・検討（漏洩窒素の拡散による洞道内の窒素濃度分布や温度分布の把握による酸欠被害およびケーブル周辺設備への被害等の評価）を行う。

(d) 国際標準化に向けた活動

上記で検討した超電導ケーブルの安全性・信頼性に係る試験項目、試験内容について、国内での有識者への説明、国際学会・CIGRE 等への発信および国際的な研究者との議論を実施する。安全対策仕様案の作成を通じて、国際的エキスパートの意見収集を行う。

2016 年度は米国で開催される ASC2016、CIGRE、IEC 等に、2017 年度はスイスで開催される EUCAS2017、CIGRE、IEC 等に、2018 年度は米国で開催される ASC2018、CIGRE、IEC 等に参加し、開発成果の発信を積極的に行う。

(2) 早期復旧等の実用化ための対策検討

上記の 22kV、66kV、275kV 級超電導ケーブルの安全性、信頼性に関する各検証試験結果から抽出した課題への対策を検討し、これを反映したケーブルシステム及び冷却ステムの設計検討を行う。これにより、超電導ケーブルシステムとしての損害の低減、並びに、事故・故障からの復旧方法等を検討する。検討の結果、事故 検討の結果、事故 ・故障発生頻度及び損害の低減ために超電導ケーブルに付加するべき要素が明確なった場合は、安全性評価試験におけるケーブルサンプルの試作に反映する 。

また、復旧方法等の検討結果を、運転管理に係るガイドラインとして取りまとめる。

(3) 超電導ケーブルの侵入熱低減技術の開発

66kV 級超電導ケーブル用断熱管を想定した短尺サンプルにて 1.8W/m 以下の熱侵入を持つ断熱管を設計・作製し、測定・検証を行う。50～100m 級の断熱管を作製し、断熱管の熱侵入について測定を行う。尚、冷却方法としては、サブクール液体窒素の循環冷却方式を検討する。

275kV 級超電導ケーブル用断熱管を想定した 100m サンプルを作製し、そこから切り出した 10m 級の断熱管にて侵入熱の測定・検証を行い、1.8W/m 以下の侵入熱を確認する。さらに、50～100m 級の断熱管を作製し、室温と液体窒素のヒートサイクルによる真空度をモニタリングして、長期の真空断熱性能の測定、検証を行う。

(4) 冷却システムの高効率化技術の開発

NEDO 事業「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」、「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」にて、大容量・高効率ブレイトン冷凍機を用いた冷却システムの開発・製造および工場での性能評価を終え、東京電力の旭変電所への移設を完了した。また、同冷却システムを旭変電所の超電導ケーブルに接続するための事前検証として、冷却システムの単体性能試験、および冷凍機故障時を想定したバックアップ装置との組合せ試験、冷凍機の耐久性確認を実施してきた。本プロジェクトでは、同冷却システムを超電導ケーブルと接続した上で、実系統連系した長期実証運転を行い、冷却システムの長期的な性能及び運転安定性を評価する。

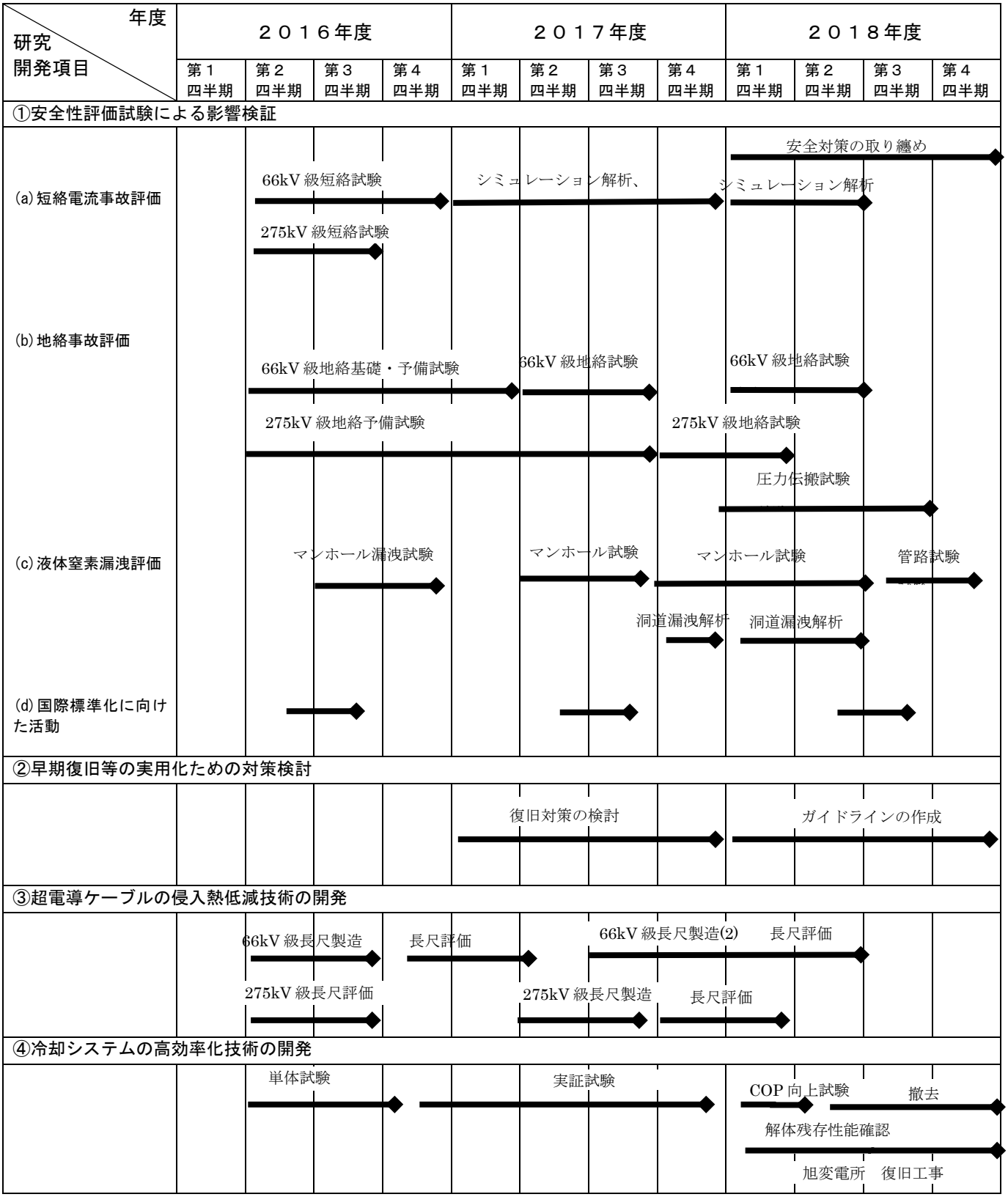
長期実証運転後、冷却システムの限界性能および信頼性を検証するために、過負荷試験や信頼性加速試験を行うとともに、超電導ケーブルシステム全体の残存性能検証および解体調査・撤去を行う。また、旭変電所の超電導ケーブル試験場の復旧工事を行い、「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」以前の状態に復旧させる。

高性能化に関する開発目標達成のために、以下の研究開発を実施する。

・ターボ圧縮機・膨張機の断熱効率向上を目指した改良
・冷凍システム内の熱損失および圧力損失低減のための改良

全体スケジュールを表 2.1.1-1 に示す。

表 2.1.1-1 研究開発スケジュール



2.1.2 電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発【直流】

2.1.2.1 直流超電導送電システムの総合的な信頼性・安全性の実証研究

(1) 長尺時を模擬した液体窒素循環冷却性能の評価

直流超電導送電システムにおいては将来の実用化を考えると冷却システムの亘長は数km～十数kmになると予想され、長尺時の液体窒素循環特性を把握しておくことが重要となる。今回敷設した1km長高温超電導直流送電システムを用い、これらの検証を行う。実システムにおける液体窒素の循環流量を30～40L/minと設定し、本研究開発では長尺循環を模擬するために、流量を1/3～1/10に落とした低流量での運転を行い、長尺における長手方向の液温分布や圧力損失、通電特性に与える影響などを調査する。得られた結果から課題の抽出、対策の検討などを行い、更なる長尺の液体窒素循環の実現性を検証し、ガイドラインに反映することにより長距離送電の実用化に資する。

(2) 超電導ケーブルシステムの通電特性の評価

1km長高温超電導直流送電システムに対する基本特性を調査するため、液体窒素循環特性、熱特性、超電導ケーブルシステムの通電特性などの評価試験を実施することにより、基本的な運転信頼性を確認する。評価試験を通じて初期冷却手順、液体窒素の運用温度及び運用流量等の運用に関する基準を定めガイドラインに反映する。また線路の電圧降下を測定し、システムの送電効率についての評価も実施する。

(3) 過酷試験による評価

送電中に想定される、冷却システムの故障などによる流量低下や液体窒素温度上昇などに伴う冷却性能低下により、超電導ケーブルシステムの通電特性にどのような影響があるかを調査するため、模擬的に循環流量の低下などを発生させた試験を計画する。また送電系統での予期せぬ過電流や、系統電圧の上昇などに対して今回敷設したシステムがどの程度の耐性を有するかを確認しておくことも安全性を検証する上で重要である。これらを確認するため、設計値以上の電流、電圧をシステムに印加した試験を計画する。過酷試験による評価結果からシステム運用可能範囲を確認しガイドラインに反映する。

(4) 長期運転特性の評価

無負荷での長期運転（1ヶ月程度）および、ロードサイクル試験（通電8時間＋無負荷16時間、を２０サイクル）を行う。

(5) 残存性能確認試験

初期冷却、循環冷却などの液体窒素温度で冷却した際の超電導ケーブルコアに対する影響、もしくは課電、通電した際の影響などについて評価を行うため、超電導ケーブルシステムの一部に対し解体調査を行い、得られた結果から今後の課題などについて検討する。

2.1.2.2 設計、運用、保守ガイドラインの作成

実証試験及び過酷試験の結果から得られる、初期冷却手順、実送電に向けた液体窒素の運用温度及び運用流量、非常時対応等の試験結果と、過年度実施の「高温超電導直流送電システムの実証研究」及び「高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業」における成果を総合的に検討することで、直流超電導送電システムの設計・建設方法、保安規程における点検項目や運転基準、平常時運用や事故時運用及び一部設備の障害時における復旧方法などの設計･運用･保守に関わる以下の項目に沿ったガイドラインを作成する。作成にあたっては、直流送電システムを社会実装することをターゲットとする。また、電力分野の有識者によるアドバイスを反映する。

研究開発項目	２０１６年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q
直流超電導送電システムの総合的な信頼性・安全性の実証研究				
（１）長尺時を模擬した液体窒素循環冷却性能の評価		→		
（２）超電導ケーブルシステムの通電特性の評価		→	→	
（３）過酷試験による評価			→	
（４）長期運転特性の評価			→	→
（５）残存性能評価		計画立案		評価
設計、運用、保守ガイドラインの策定				
		→	→	→

2.1.3 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発

(1) 超電導接続の性能、歩留り、信頼性向上技術開発

超電導接続の性能向上に関しては、２０１６年度末までに 10^{-13}Ω以下の超電導接続の完成をめざし、２０１７年度末までに１Ｔの磁場環境で 10^{-13}Ω以下の接続抵抗を達成する。歩留り向上においては、２０１８年度末までに歩留り５０％以上を達成する。信頼性については、品質の劣化メカニズムを明らかにして、そのメカニズムの仮説のもとで長期試験等により劣化がないことを確認する。

最終目標としては、ＭＲＩコイルで超電導接続部が配置される環境となる 50K、1T の条件で、100A 級の電流値と 10^{-12}Ω以下の接続抵抗の実現することを目指す。歩留りについては、超電導接続の実用化を考えるうえで性能の安定化が重要であり、目標値を決めて同一条件で多数の接続を行い、その合格率を 50%以上とすることを目指す。これは、一度超電導接続を行った後、不良が出た場合、再度もしくは再再度接続をすることで、高い確率で成功するための閾値と考え 50%と設定した。劣化防止技術の確立としては、本来製品の寿命である５年、１０年の期間での検証が必要であるが、本プロジェクトが３年プロジェクトであることから、今回は確立した製造方法によるサンプルを用いて１年間大気中に保持して、劣化が無いかの調査を行う。

(2) ＭＲＩコイルへの実装を考慮した超電導接続部の構造の開発

製作した超電導接続の試料の評価は、無磁場、77K 環境下での特性評価に加えて、ＭＲＩマグネットが運転される 50K での特性評価、さらに超電導接続が置かれる磁場環境１Ｔでの特性評価が必要となる。そのため、磁場・温度可変の条件で Ic 測定を行い、超電導接続の温度、磁場をパラメータとした性能評価を行う。また、電磁力による影響を調査するために、治工具を製作して試験の準備を行う。

また、コイルと超電導接続をつなぐ引き出しのところも接続技術として重要である。RE 系超電導線はテープ形状なために、３次元的な線材の引き回しを行う場合、曲げ、ひねりなどが加わり、それらは超電導線の特性劣化を引き起こす要因と言われている。そこで、コイルからの口出しの方法を開発する。

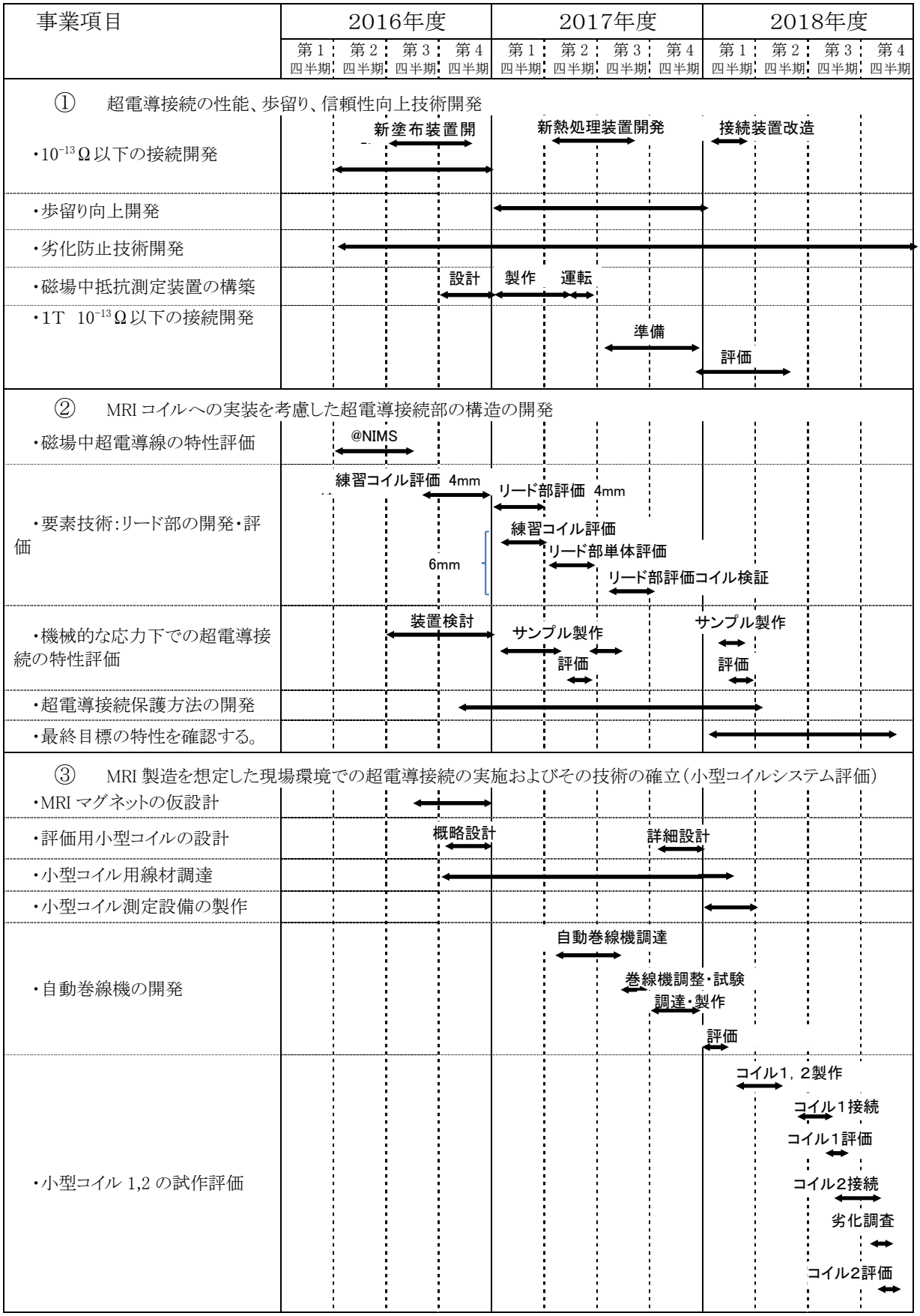
(3) ＭＲＩ製造を想定した現場環境での超電導接続の実施およびその技術の確立

これまでの超電導接続の開発およびその評価は、１から２本の短尺線を用意して、それを接続してサンプルを液体窒素や、冷凍機で冷却して通電試験、抵抗測定が行われていた。しかし、実際のＭＲＩマグネットの場合、コイルから引き出された線材同士、もしくはコイルからの線と永久電流スイッチ（PCS）との接続が行われる。その場合、線材はコイル等から長く引き出され、また片端はコイルで固定されていることから、制約のある中で超電導接続を行わなければならない。また、接続は超電導コイルの製造現場で行われることから、装置も小型化することが必要となる。

そこで、超電導コイルの製作をして、コイル線を用いて別場所で超電導接続を行うことで、実際のＭＲＩ製造と同じと想定される現場環境で接続を実施する。これには、単なる接続だけでなく、接続時の線材の固定方法、接続後の余分な線材の収納方法、電磁力にたいする対策など実用化に要求される項目の開発を実施することになる。また、その評価としては、小型コイル、永久電流スイッチからなる永久電流システムを構築して、永久電流試験にて永久電流になることを確認する。

２０１６年度から２０１８年度までの研究開発スケジュールを、表 2.1.3-1 に示す。

表 2.1.3-1 研究開発スケジュール



2.1.4 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【磁場特性改善】

（１）高磁場コイル用超電導線材の臨界電流密度向上技術の開発

３Ｔ級無冷媒ヘリウムレス小型ＭＲＩへの適用を狙う高温超電導高安定磁場マグネットシステムでは、コイル内平均電流密度として２００A/㎟が必要とされるが、小型設計となる関係でマグネット内部において最大７Ｔの経験磁場が発生する。安全マージンを確保して、これだけの大電流を通電するためには高温超電導線材の平均臨界電流密度（臨界電流値を線材全体の断面積で除した工業的臨界電流密度；Ｊｅ）として、従来の液体ヘリウム冷却(４．２Ｋ)コイルで用いられるＮｂ-Ｔｉ線材の２倍近いＪｅである４００Ａ/ｍｍ^2（７Ｔ）がマグネットの運転温度において必要となる。運転温度は、液体ヘリウムレスＭＲＩとして安定に無冷媒冷却により冷却し得る温度として、熱容量を大きくとれ、冷却に必要なエネルギーを抑えられる３０Ｋとした。これらの観点から、線材性能の開発目標として３０Ｋ、７ＴにおいてＪｅ≧４００Ａ/ｍｍ^{2}とした。このとき、単純に製造線速を遅めて膜厚を厚くすれば臨界電流値Ｉｃが厚さに比例して上昇しＪｅも増大するが、それでは線材の生産性が低下してしまう。このため、本研究開発では、従来の２倍以上に相当する製造線速５０ｍ/ｈｒを達成することを前提として上記Ｊｅの達成を目標とした。

（２）長尺線材性能の均一性向上技術開発

通常のＭＲＩ用マグネットシステムに於いては、安定した高い精度を達成するために外部電源を繋げずにコイル全体をゼロ抵抗状態として運転する永久電流モードが多用されているが、近年は精度の高い安定化電源が市販されており、電源駆動による所謂ドライブモードにおいても充分な精度が期待出来るようになっている。このため、これまでに高温超電導コイルとして開発例の多い低抵抗常電導接続部を含む積層パンケーキコイル巻線方式を採用することが可能であり、この場合のヒト全身撮像用ホールボディＭＲＩコイルが設計出来る線材単長として1ｋｍが設定された。

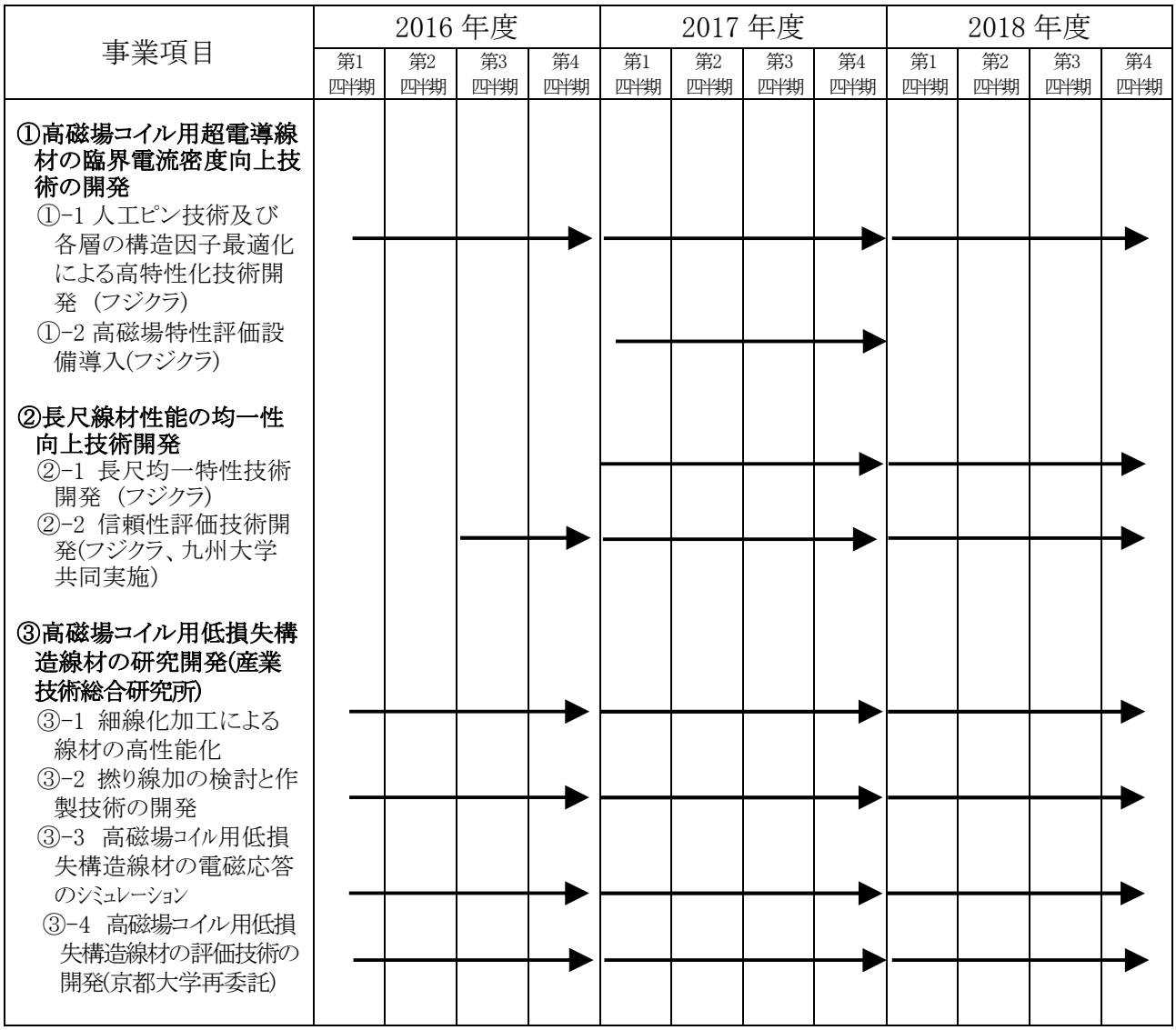
このとき、コイルの臨界電流値（Ｉｃ（Ｃｏｉｌ））は、巻線されたコイル内部の磁場分布において、線材に存在する最も低い臨界電流値（Ｉｃ）で決まってしまうので、臨界電流が不均一な線材ではコイル設計が不可能となる。現状の線材長手方向の臨界電流特性分布は、全長の平均値に対して±１０％程度の緩やかな変動を有していることが多いが、局所的に大きなＩｃ低下部が存在するとコイルの臨界電流値がその位置で一義的に制約されてしまい、線材臨界電流値に対するコイル運転電流値設計が容易でない。本研究開発で目標とするコイル運転温度は３０Ｋであり、従来の液体ヘリウム温度での高磁場コイルと比較して充分高温であるために、常電導転移時の熱暴走は発生し難いが、このような局所的特性低下部分で臨界電流を超えて通電し続けると、熱伝搬速度が非常に低いことから発熱による局所的な熱歪発生等の要因になる。このため、このような局所低下部を排除した分布目標として、「臨界電流の低下率((全長の臨界電流平均値－臨界電流最小値)／全長の臨界電流平均値)を０．１５未満」とした。また低温で長期間の使用環境下における線材の機械的長期信頼性評価に繋がる知見を得るため、線材単体ならびにコイル状に巻線加工した状態で、主に弱点とされる超電導膜面垂直方向の引張応力に着目した故障率評価・疲労定数評価を熱的・動的負荷試験等により実施した。

（３）高磁場コイル用低損失構造線材の研究開発

Ｙ系高温超電導線材には、超電導線に加わる外部磁場により線材内部に発生する遮蔽

電流のため、超電導コイルの励消磁における超電導コイルの発熱や超電導線材の焼損リスク、および超電導コイル発生磁場の空間的並びに時間的不安定性、個体ごとの巻き線精度に係る不整磁場の再現性向上などの課題がある。

遮蔽電流の抑制法として、スクライブ（分割）線材を用いる手法と撚線導体化する手法があるが、テープ線材の幅方向と長さ方向の超電導特性を高いレベルで均一化する事が必要となり、細線化による遮蔽電流の抑制と磁場中における高臨界電流密度特性を両立させる必要がある。このため、スクライブ線材及び撚線用細幅線材に対応した、テープ線材の２次元的組織・特性均一化技術開発、特性低下の原因となる特性不均質部の除去技術等を開発する必要がある。加えて、ＭＲＩ用導体に求められる安定磁場発生用線材の導体構造仕様をシミュレーション及び実測により決定することが重要である。ＭＲＩマグネット用途に向けた技術的課題の抽出を行うとともに、その解決に向けた検証を行い、最終的に、安定化磁場発生用線材として交流損失の低減（高い磁場中臨界電流を持ったうえで無加工と比較して、交流損失が１/１０）を目標とした。



2.1.5 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【生産性向上】

事業項目	2016 年度				2017 年度				2018 年度			
	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
高磁場コイル用超電導線材の生産性向上技術開発												
生産性向上への課題抽出(フジクラ)	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
生産性改善技術開発(フジクラ)	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
生産性改善線材の特性評価及び解析				→	→	→	→	→	→	→	→	→

2.2 研究開発の実施体制

本プロジェクトはＮＥＤＯによるプロジェクト公募で実施され、それぞれ、研究開発項目：電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発【交流】については東京電力ＨＤ／住友電工・古河電工・前川製作所のチームが、研究開発項目：電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発【直流】については石狩超電導・直流送電システム技術研究組合が、研究開発項目：高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発については古河電工が、研究開発項目：高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【磁場特性改善】についてはフジクラと産業技術総合研究所のチームが、研究開発項目：高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【生産性向上】についてはフジクラが応募し、採択されたものである。

また、ＮＥＤＯは研究全体を統括するために、産業技術総合研究所　岡田　道哉氏をプロジェクトリーダー（PL）とし、PL との間で密接な連携をとりながらプロジェクトの舵取りを行っている。研究開発体制を図 2.2-1 に示す。

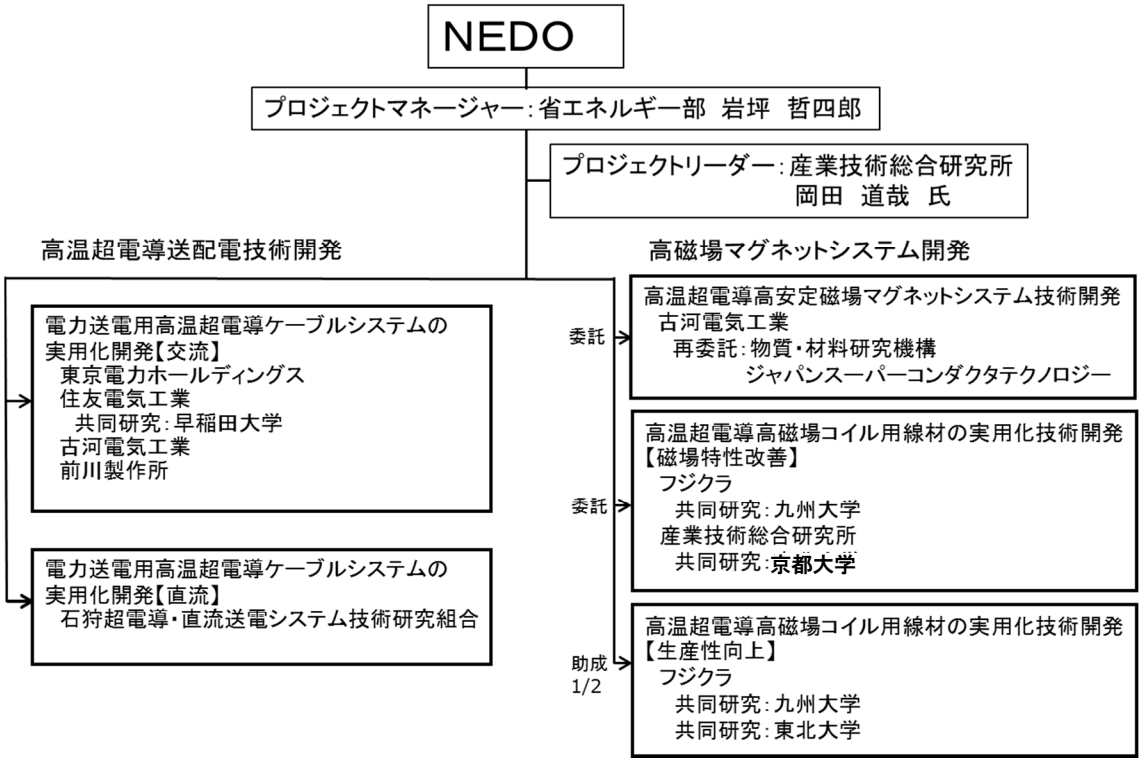


図 2.2-1　研究開発体制

2.3 研究開発の運営管理

プロジェクトの成果について評価をいただくために、ＮＥＤＯが主催する超電導技術委員会に定期的に進捗を報告し、その方向性の修正、課題解決のための助言、開発加速のための協議等を実施いただいている。

(1) 超電導技術委員会

これまで、ＮＥＤＯ内には産官学の有識者による超電導技術委員会（委員長：【送配電】大久保　仁　愛知工業大学教授、【MRI】大崎　博之　東京大学教授）が設けられ、ＮＥＤＯの個々の超電導技術開発及び全体に関する研究方針審議、成果のレビュー、問題解決のための方策の検討、並びに技術情報の共有化を進めており、そこで得られた助言等をもとにＮＥＤＯ超電導技術開発の効率的、効果的運営が図られてきた。本プロジェクト開始にあたり、これまでの超電導技術委員会を超電導技術委員会（送配電）とするとともに、新たに超電導技術委員会（ＭＲＩ）を設置した。これらの超電導技術委員会において、定期的な研究方針審議と成果のレビューは言うに及ばず、ＮＥＤＯが行った基本計画見直しに対する大所高所からの審議を行う等、研究開発の効率的かつ効果的な実施に結びついている。

2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

(1) 実用化につなげる戦略

電力送電用超電導ケーブルシステム【交流】の実用化・事業化をすすめるためには、最終ユーザーである電力会社の積極的関与が必要不可欠である。このため、電力会社がプロジェクトリーダーを務めることで、実適用時までを見通したプロジェクト運営に努めた。超電導ケーブルの実用化・事業化をはかる手段の一つとして、旭変電所の超電導ケーブル実証システムの見学・説明会を積極的に開催した。特に、最終ユーザーである電力事業者

や、海外展開を見据え海外来訪者を対象とした見学・説明会に注力した。その結果、電力事業者は 8 件 51 名、海外来訪者は 5 件 38 名が見学に訪れ、その他の見学者も含めると、合計 22 件 182 名が旭変電所を訪れている。高温超電導ケーブル実証プロジェクトから累計すると、来訪者は計 1,222 人となる。

高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発においては、実用化・事業化につなげる戦略として、線材メーカーの古河電工だけでなく、マグネットメーカーの JASTEC を再委託事業者、マグネットのユーザーである NIMS を再委託業者としたチームとしての研究開発を行っている。

高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【磁場特性改善】・【生産性向上】においては、高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発（本中間評価の対象外）で MRI 用高磁場マグネット開発システム開発を実施中である三菱電機および産業技術総合研究所と、フジクラ・産業技術総合研究所の成果と課題を共有議論する「MRI 技術検討会」を設置し、線材性能やコイル化における課題解決や、ユーザーが線材開発に求める事項等について相互の情報共有と意見交換、課題の整理等を実施し、技術開発計画にフィードバックするなど、効率的かつ効果的な技術開発の実施に努めた。

(2) 実用化につなげる知財戦略・標準化戦略

電力送電用超電導ケーブルシステムの実用化開発【交流】においては、超電導ケーブルの基本構造やシステムについては、これまでの開発で既知の技術であるが、超電導ケーブルの安全対策に必要な、設計技術、アイデアを考案し、特許化を行う方針で、プロジェクトを進めた。標準化については、CIGRE WG D1-64 にて 2016 年春より極低温中の電気絶縁システムの調査をスタート、その中で Cable protection at ground fault の調査を行っている。2018 年５月の中国上海で開催された会議においては、古河電工より、本研究の成果の一部として、地絡・短絡試験の結果を報告し、それに対する安全対策の必要性について、CIGRE メンバーと共有した。IEC（国際電気標準会議、International Electrotechnical Commission）のなかの TC(Technical Committee) 20 における超電導ケーブルの試験法に関する規格化を検討する WG（PT63075）が 2016 年に立ち上がった。PT63705 では、4 回の会議が開催され、試験法に関して議論がなされた。本会議では、このプロジェクトでの成果も紹介しつつ、日本の意見を主張した。種々議論のあと、試験法規格の最終版となる FDIS（20/1858/FDIS)が 2019 年 1 月に発行され、投票の結果、可決され、IS（国際規格、IEC63075）として、2019 年 2 月 5 日に発行された

高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発では、超電導接続技術は工場内部で実施される方法であり、知財の侵害状況が外部から不明であることを考慮して、特許侵害が証明できないものは、技術を公開せずノウハウとして非公開することが良いと判断している。開発技術をノウハウとすることで、研究開発の成果としての技術要素を模倣されないように守ることに加えて、その技術がノウハウとして秘密に管理されている場合には、特定の相手に対して有償ライセンスを得て（ノウハウ提供契約を締結して）技術開示することができる。表 2.4.3-1 に、上記知財戦略をもとにした技術として特許化するもの・ノウハウとする区分けを示す。

表 2.4.3-1 開発技術で特許とするもの・ノウハウとするもの

	特許	ノウハウ
技術内容	・超電導接続構造 ・超電導接続を用いた応用製品 ・超電導接続の評価装置（方法）	・超電導接続の設備 ・超電導接続の原料、材料 ・超電導接続の条件 （温度、時間、圧力、濃度等）
技術料	特許の実施料	ライセンス料

3. 情勢変化への対応

高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【磁場特性改善】・【生産性向上】においては、技術委員会、ＭＲＩ技術検討会、ＰＭとの協議等を通じ、マグネットシステム側のニーズを重視して線材の信頼性の現状性能の把握と改善を図ることが重要となった。これに対し、テーマを補強し、加速により信頼性評価技術確立のための評価装置類の追加導入等を通じて技術開発内容を拡充した。

4. 評価に関する事項

	採択審査委員会（事前評価）
①評価の実施時期	２０１６年度
②評価手法	外部評価
③評価事務局	省エネルギー部
④評価項目・基準	①提案内容の評価（公募目的・目標との整合性及び既存技術との優位差、提案の実現性、関連分野に関する実績） ②提案者の評価（関連分野に関する実績、開発体制の整備、必要設備の保有、人材の確保） ③成果の実用化（社会や他の技術への波及効果）
⑤評価委員	表 4-1　採択委員会委員

表 4-1　採択委員会委員リスト

	氏名	所属		役職
1	大久保　仁	学校法人 名古屋電機学園 愛知工業大学	工学部電気学科	教授
2	春山　富義	国立大学法人 東京大学	カブリ数物連携宇宙研究機構	特任教授
3	下山　淳一	学校法人 青山学院大学	理工学部 物理・数理学科	教授
4	馬場　旬平	国立大学法人 東京大学	大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻	准教授
5	濱島　高太郎	国立大学法人 東北大学		名誉教授
6	秋田　調	一般財団法人 電力中央研究所		理事
7	竹村　文男	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	エネルギー技術研究部門	副研究 部門長
8	渡津　章	国立研究開発法人 産業技術総合研究所	構造材料研究部門　軽量金属設計グループ	主任研究員

Ⅲ．研究開発成果について

1 事業全体の成果

1.1 電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発【交流】

1.1.1 超電導ケーブルシステムの安全性評価方法の開発

1.1.1.1 短絡電流事故評価

(1) 22kV 級ケーブル短絡電流事故評価

超電導ケーブルの適用先のひとつとして発電機引出線(発電機～昇圧変圧器間)への適用を検討している。このケーブルを実系統へ適用し、系統事故が発生した場合、ケーブルに定格を大きく超える事故電流が流れるが、その際、液体窒素のガス化によるシステム内の急激な圧力上昇やケーブルコアの焼損が生じることが懸念される。このため、22kV/12kA、10m の超電導ケーブルシステムを開発し、短絡事故を模擬した過電流試験を実施し、超電導ケーブルへの影響を評価した。尚、試験に用いたケーブルは単心型である。

22kV 級発電機引出線において想定される短絡電流は､最大で AC63kA-0.6sec であるが、設備の関係上、過電流としては DC40kA までの電流を流すこととし、発生エネルギーが想定値と等価となる時間を通電することとした。実際には、DC38kA-5sec の過電流をケーブルシステムに通電した｡想定したエネルギー193kJ に対して、実際は 252kJ のエネルギーが発生したことが実測より確認でき、より過酷な試験条件での試験となった。

試験時のケーブルシステムの液体窒素圧力上昇は最大 18kPa 程度であり､大きな圧力上昇は確認されなかった。液体窒素の温度上昇は 0.5K 程度とわずかであった。また、試験前後において、試験ケーブルの臨界電流値（Ic）を測定したが変化が無いことを確認した。

これらの結果より、試験ケーブルに想定する短絡電流が流れても、圧力、温度の上昇は軽微で、システムにダメージを与得るものではなく、実際にケーブルの臨界電流値に低下がないことを確認した。

実規模級の発電機引出線では最大 100m 程度と長くなるが､温度上昇は小さく､圧力変化は冷却システムのリザーバタンクの気相体積の調整により抑制できるものであり､実規模においても短絡電流通過による超電導ケーブルへの影響はないものと推定される。

(2) 66kV 級ケーブル短絡電流事故評価

66kV 級超電導ケーブルを実系統に導入した場合､系統事故により､定格を超える過大な電流がケーブルに流れる｡本超電導ケーブルは､km 級の長尺ケーブルを想定しているが､長尺ケーブルを用いて短絡試験を行うことは､設備的に非常に困難なため､現象を模擬するような解析コードを開発するもとし､そのために必要な基礎特性を取得するため、66kV 級、40m 超電導ケーブルシステムを開発し、短絡電流模擬試験を行い、温度や圧力特性を取得した。

試験ケーブルは、66kV/2kA 級超電導ケーブルで、構造は三心一括型である。本試験では、短絡事故を模擬するために短絡電流を二相往復で通電した。液体窒素は一方の端末側から注入され、ケーブル内を流れ、他方の端末から冷却システムへ戻っていく循環冷却方式とした。短絡電流は、66kV 級系統で、最大 31.5kA-2sec であるが、設備的な理由から、発生エネルギーが同等となる 16kA-8.4sec の電流を流すこととした。本電流を通電した結果、液体窒素の圧力については、第一ピークと第二ピークが観測され、それぞれ圧力上昇は 225kPa、75kPa であった。また、液体窒素の温度については、最大温度上昇は、16K 程度であった。温度の変化については、事前に開発したシミュレーションでの計算値と傾向が一致する結果が得られた。

一方、圧力については、第二ピークについては、概ねシミュレーションと合う傾向であったが、第一ピークに関しては、計算ではあらわれていない。これは、第一ピークがケーブルの発熱により瞬間的に液体窒素がガス化した影響であるためと考えられる。シミュレーションはこの蒸発を計算できるようにはなっていないからである。尚、第一ピークについては、数十秒で納まる傾向にあり、一旦蒸発した窒素ガスが、回りの液体窒素により再凝縮したもののと類推される。

第二ピークに関しては、液体窒素の温度上昇にともなう体積膨張によるものと推測しており、シミュレーションとも一致している。

なお、短絡試験前後でケーブルコアの Ic を測定し、変化が無いことを確認した。

シミュレーション結果は、圧力の第一ピークは別として、圧力、温度の変化をよくシミュレートできており、長尺ケーブルでの短絡時の温度、圧力の挙動を計算するツールを得ることができた。尚、第一ピークに関しては、液体窒素の圧力を大きくし沸点をあげ、液体窒素の蒸発を防ぐことが可能である。あるいは第一、第二のピークに共通であるが、冷却システムのリザーバタンクの気相体積を増やすことで、それぞれピーク値を抑制できると考えられる。

(3) 66kV 級超電導ケーブルのシミュレーション

40m ケーブルでの短絡試験にて得られたシミュレーションコードを用いて、3km 超電導ケーブルに 31.5kA/2sec の短絡電流が流れた場合の温度、圧力の解析を行った。解析モデルは、実線路をイメージした 66kV/200MVA 級の 3km システムで、ケーブル常予備の２回線で送電するシステムで、それぞれの回線は、各冷却システムにて冷却されるとした。液体窒素は、各回線を巡回し、共通のリターン管にて冷却システムに戻ってくるものとした。

計算では、どちらか片側の回線に短絡電流(三相短絡)が流れた場合を想定し、ケーブル入口から出口までの温度、圧力分布を計算した。尚、圧力については、コードが蒸発現象は計算できないため、第一ピークについては、すぐに元に戻ることもあり、システムに影響しないと判断し、計算の適用外とした。

計算に用いたリザーバタンクの気相体積は旭変電所での実績の 5500L である。計算結果より、温度は最大 112K、圧力は最大 3MPa まで上昇する結果となった。温度的には、2kA の臨界温度 92K を超えており、すぐの再送電は不可能で、実系

統からの切離しが必要となる。

圧力については、3MPaG まで達する結果となったが、コルゲート管の耐圧力は 15MPaG 以上であり、破裂や漏れは起こらないレベルであるが、弾性限界が 2MPaG 程度であるので、管の変形を起こすレベルとなり好ましくない。この圧力を抑える方策として、リザーバタンクの気相を大きくすることが考えられる。リザーバタンクの気相体積が 10000L の場合、計算では、最大圧力は約 1.7MPaG となり、2MPaG 以下に抑えられる。

ここで、すぐに再送電可能な事故電流の継続時間を検討した。ケーブルの設計から、シールド導体の温度上昇が大きく、このシールド導体が臨界温度＠2kA を超えるまでの事故電流継続時間を各電流において計算した。その結果、31.5kA では 0.09sec となり、この継続時間以下で遮断できれば、臨界温度に達せず、すぐの再送電が可能と思われる。275kV 級以上の実系統で採用されいる高速遮断器が適用できれば実現は可能である。

(4) 275 kV 超電導ケーブルへの影響評価

前プロジェクトにおいて 275kV 級の単心 20m 超電導ケーブルシステムを開発して短絡通電事故評価を行い、温度や圧力特性を取得した。短絡電流は、275kV 級系統での最大値 63kA-0.6sec と等価な 7.77kA-30sec の電流を流して実施している。本プロジェクトでは同システムを用いてケーブル終端容器内の接続部における発熱量評価を目的とし、終端容器に収まる短尺試料に対して通電を行った。その結果、電圧降下は十分小さく、ケーブル部での発熱量換算で 1m 相当程度であることを確認した。

20m ケーブルでの短絡試験結果を再現するシミュレーションコードを用いて、275kV 級 3km 超電導ケーブルに 63kA/0.6sec の短絡電流が流れた場合の解析を行った。超電導ケーブル以外で短絡事故（例えば CV ケーブルラインの R 相と S 相の間の短絡事故）が発生し短絡電流が一時的に超電導ケーブルへ流入するもらい短絡事故を対象とし、事故ケースとして、主保護回路は不動作、後備保護回路は動作する場合（ケース１）と主保護回路が動作する場合（ケース２）の２つについて検討した。尚、事故後の状態を考慮して、事故電流は全て銅層部分に転流することを前提としている。

その結果、ケース１では、導体層最大温度は 86.9 K（常時からの⊿T は 7.9 K）となり、許容温度 82 K を超えるため、超電導ケーブルを継続運転できず、系統から切り離し冷却して温度の回復を待つ必要がある。それに対し、ケース２では導体層最大温度は 79.9 K（常時からの⊿T は 0.9 K）となり、許容温度以下のため超電導ケーブルは継続運転可能である。

最後に、ガイドラインへの反映事項として、短絡事故時のケーブルの状態と復帰の条件、系統からの切離しの判定機能の必要性、事故時の冷却システムへの指令についてまとめた。

1.1.1.2 地絡電流事故評価

(1) 66kV 級ケーブル地絡事故評価

超電導ケーブルの内部で地絡事故（絶縁破壊）が起こった場合、どのような事象が起こるかの探索と周囲等への影響を最小にする対策を検討した。尚、66kV 級の地絡電流条件は最大 1.5kA@2sec である。

まず有識者・関係者と協議を行い、従来ケーブルの地絡試験の実施方法や評価方法を参考にし、シートを用いた基礎試験で保護材料の選定や構成の基礎検討を行った。その後、選定した材料を用いて、ケーブルコア形状での試験において保護層の形状、施工方法を検討し、断熱管貫通の有無の確認等を実施した。また、実験から得られたアークエネルギーを元に、内管が貫通しない場合の断熱管内の圧力上昇と圧力伝播についてシミュレーションを実施した。

まず、前プロジェクトの試験結果をレビューした。シート試験では地絡により、断熱管を貫通するまでは至らない保護シートの構成でも、ケーブルコア状では、断熱管を貫通する結果となった。これは、地絡点では、地絡エネルギーにより、構成物が気化されてプラズマ状のガスが作られるが、ケーブルコアでは、このガスが貫通方向に向かい、断熱管に到達し、管を貫通したものと考えられた。

これから、このプラズマガスを貫通方向に抜けにくい保護シートの構成が望ましいと考え、ガスの透過性が低い紙を利用することを検討した。紙自体は薄く、熱容量が小さく、熱で溶けやすいため、これまでの熱容量の大きい繊維と組み合わせる方向で保護シートの構成を検討した。シート試験の結果、アラミド繊維とアラミド紙を組合せたものが最も性能が良い結果が得られた。

この保護シートを用いて、ケーブルコアでの地絡試験を行ったところ、前回プロジェクトより性能は向上したことが確認できたが、断熱管を貫通させないためには、保護シートの厚みは 10mm 以上必要であることが判った。この結果から、この厚みの保護層では、ケーブルのコンパクト性を確保できないことから、ある程度大きな地絡エネルギーの場合は、断熱管の内管が貫通することはやむを得ないと判断し、保護層の厚みを薄くする方向とした。

ケーブルのコンパクト性を失わない範囲のアラミド繊維とアラミド紙の複合構造(厚み 3.6mm 程度)において、電流をパラメーターに内管が貫通するまでの時間を調べた。地絡電流、継続時間は場所や運転状況によりまちまちであるが、断熱管が貫通する条件を得、断熱管の真空低下や液体窒素漏洩の対策が必要となる、目安の地絡電流条件を得ることができた。

次に、地絡発生時に超電導ケーブルの内管が貫通しない場合の液体窒素中の圧力上昇とその圧力伝播について解析を行った。計算の結果、地絡点の圧力上昇は約 1.8MPa であり、10m 程度離れた場所で圧力は半分程度に減衰することが判った。これにより、圧力による影響は限定的であり、長手方向に大きな影響は与えないと推測される。

事故点を同定するための手段として、三心集合の中心にセットされた光ファイバーで地絡時の温度上昇を計測できるかを検証し、温度上昇を測定できることを確認した。これにより、光ファイバーを事故点の同定に使用できると思われる。

(2) 275kV 級ケーブル地絡事故評価

地絡事故時に周囲に影響を及ぼさないために、超電導ケーブルの外管の損傷を抑えることを目指して、前プロジェクトより縦置き型 1 m 短尺ケーブル試料を用いて、地絡模擬試験を行った。防護対策なしでは AC5 kA-3 サイクルでも地絡事故時に生じるアーク放電により外管まで穿孔してしまう。アーク放電を絶つ目的で防護対策として、断熱内管の外周部へポリエチレン不織布からなる保護層を導入し、AC20 kA-3 サイクルでも穿孔を防止できることを確認した。

続いて、商用ケーブルの状況に近づけるために、2.5 m 長の 275 kV 級超電導ケーブルコアを断熱管と終端容器に収納した横置き型ケーブル試料を作製して地絡模擬試験を実施した。終端容器の上部は密閉していない。試験の結果、AC20kA-3 サイクルまでの条件では断熱外管には地絡電流は流れず、ケーブル外管、内管保護層の外周部に損傷は見られなかったが、AC30kA では 1 サイクルで断熱外管に地絡電流が流れて穿孔した。ケーブル外管は熱による溶損と圧力による変形が生じ、アーク熱以外に圧力による損壊を観測した。

地絡により生じる圧力の大きさを調べるために、横置き型 AC20 kA 地絡模擬試験において、イメージファイバで地絡時に生じるガスの気液界面の進行速度を観測し、終端容器に設けた圧力計で地絡時の液体窒素圧力挙動を測定した。得られたデータより試験状況を再現するコードを作成して商用長尺ケーブルを想定した AC20 kA 地絡時の圧力挙動シミュレーションを行った。その結果、地絡点における最大圧力は 35 MPa を超えることがわかった。

ケーブル外管が損傷しない構造を目指したが、地絡模擬試験を重ねる中で、地絡エネルギーによる穿孔防止は困難であることがわかった。SUS テープ補強により AC30 kA-3 サイクルでも外管が損傷しない様に強化できることも確認したが、封じ込める圧力が大き過ぎて断熱管サイズが大きくなる。穿孔は回避できないので他設備への影響検討、洞道内での安全面（酸欠）の検証を行った。

保護対策していないケーブルを試験体とし、地絡点の下方、外管表面から 150mm の位置に 6 mm 厚さの防護板を配置して AC40kA-3 サイクルの地絡試験を実施した。その結果、防護板に穴は開かず、防護板の効果が確認できた。地絡事故が他設備へ影響するのを防止するために、防護板設置が有効である。洞道内での安全面（酸欠）の検証については次節に示す。

最後に、ガイドラインへの反映点として、地絡時のケーブルの状態、事故点の同定方法、事故時の冷却システムへの指令についてまとめた。

1.1.1.3 液体窒素漏洩評価

(1) マンホール内漏えい模擬試験

超電導ケーブルは冷媒として液体窒素を使用しており、断熱管の内部を流れている。このため、超電導ケーブルで地絡事故が発生し、断熱管が破壊された場合、ケーブルから液体窒素が外部へ漏洩する。また、掘削工事などでケーブルを外部

から損傷させた場合も同様に液体窒素が外部へ漏洩する。

ここでは、マンホール内で事故が起こり、液体窒素が漏洩した場合の現象について検討した。マンホール内に液体窒素が漏洩した場合、液体窒素の蒸発により、周囲温度の低下や、酸欠、内圧の上昇といった現象が起こると考えられる。これらの現象はマンホールのサイズや周辺環境に大きく依存するが、これらは設置場所によって千差万別である。このため、漏洩現象を模擬するための解析コードを開発することを考え、①コンクリート製小容器での冷却試験、②小型マンホールを用いた要素試験、③実規模級マンホールを用いた検証試験、とステップを踏み、漏えい試験を行い、解析コードの構築を行った。

③の実規模級マンホールを用いた試験においては、実規模マンホールの構造を模擬した、内寸 2m×3m×2m のマンホールを構築し、漏えい試験を実施した。実際のマンホールを模擬するために側面部には管路を設け、CV ケーブルを配置した上で防水処理を施した。この試験装置を用いて、床面の温度分布の測定、マンホール内部の酸素濃度変化や液溜まりの有無の確認、CV ケーブルの表面の温度変化等を測定した。

試験時の液体窒素の注入量は平均 31.7L/min と、実際の事故時に想定される漏洩量と同規模とした。液体窒素の液面を確認するための熱電対の温度変化から、液体窒素が床面に貯液されることが確認された。酸素濃度に関しては、液体窒素注入開始から数分で 18%を下回り、すぐに酸欠状態になることが確認された。試験時に測定した CV ケーブル表面温度は、マイナス 20℃程度まで低下する様子が確認されたが、試験後に CV ケーブルを調査したが、被覆部のクラックなどの異常は確認されなかった。

試験結果の解析模擬を検討し、液体窒素の液面レベルを示す温度変化はシミュレーションとよく一致することを確認した。また、床面部の温度分布についても、実測値とよく一致することを確認した。

以上の結果を用いて、内寸 3m×6m×3m の実規模マンホールにおいて、漏えい時の温度、内部圧力の変化等のシミュレーションを行った。漏洩量が 50L/min の時、マンホールの内圧が 3 気圧に達するのは、漏洩発生から 5 分後と計算された。マンホールの蓋が吹き飛ぶような爆発事故に比べて、非常に緩やかな圧力変化であることから、蓋が吹き飛ぶようなことはなく、ガスが漏れ出す程度と考えられる。

(2) 地下管路内での漏洩模擬試験

液体窒素の漏洩現象は、地絡事故による断熱管の破損の他、掘削事故中のケーブルの外傷によっても発生する。特に掘削事故中の漏洩現象は地表からケーブルの損傷点までの土壌が掘削されていることから、液体窒素が地表から外部へ直接噴き出す可能性がある。このため、このような掘削事故中の漏洩現象を簡易的に模擬する試験を行った。

シートパイルによるケーブルの破断を簡易的に模擬する試験装置を考え、地下の破断部から液がシートパイルに沿って、地上部に吹き上がる様子を観察した。

吹き出し高さは漏洩部から 1.6m、地表から 1m 程度であった。噴き出し時、周囲の土壌を跳ね飛ばし、拡散させる様子も確認された。試験終了後にシートパイル模擬部を確認したところ、土壌が大きく崩れているとともに土壌が凍結している様子が確認された。シートパイルによるケーブル破断は地絡や短絡事故を引き起こすため、検知が容易である。液体窒素漏洩時の噴き出しは、ケーブル部の液体窒素圧力と地表部の大気圧との差圧が大きいほど影響が大きくなると予想される。このため、事故検知後に即座に液体窒素を大気開放とすることで地表への液体窒素の噴き出しを抑えることが可能と考えられる。

ガイドラインへの反映事項として、MH 内での液体窒素漏洩現象、地下管路での漏洩現象、事故点の同定方法としてファイバーの活用、被害の最小化の方策についてまとめた。

(3) 洞道内での漏洩事故

地絡事故において地絡点近傍では内部圧力上昇に伴いケーブルに地絡孔が生じる可能性があり、穿孔した場合、洞道内において地絡点近傍では酸素濃度が低下する。そこで、漏えい点からの距離に対する酸素濃度分布の挙動（時間変化）をシミュレーションで解析した。距離は 3km、漏洩液体窒素量は 3km ケーブル内の全量とし、漏洩時間を 1 時間、2 時間、3 時間の 3 水準で検討した。

その結果、（１）洞道内で自然換気だけが行われている場合には、酸欠エリア（酸素濃度＜18%）が存在するが、（２）地絡事故直後から強制換気が行われる場合には、0.8 m/s の強制換気では洞道内には酸欠エリアは存在せず、（３）地絡事故から 2 時間後に強制換気（0.6 m/s、0.8 m/s）が開始される場合には、地絡事故から 4 時間後には酸欠エリアがなくなることがわかり、ガイドラインへ反映した。

1.1.1.4 国際標準化に向けた活動

(1) 安全性に関する CIGRE での活動

CIGRE（国際大電力システム会議）では、SC B1,（絶縁ケーブル）と SC D1（電力用材料と先進試験技術）の中に、超電導ケーブルに関連する WG B1-31（終了）と WG D1-64（継続中）が設立され、本研究の実施者がメンバーとして参加し、超電導ケーブルの国際標準の参考となるレポート作成を行ってきた。

WG D1-64 は、2016 年春より極低温中の電気絶縁システムの調査をスタートし、その中で超電導ケーブルについては、Superconducting devices and systems のうち、AC and DC liquid cooled cables, Gas cooled cables という項目の中で、Cable protection at ground fault の調査を行っている。2018 年５月の中国上海で開催された会議においては、古河電工より、本研究の成果の一部として、地絡・短絡試験の結果を報告し、それに対する安全対策の必要性について、CIGRE メンバーと共有した。

学会活動においては、ASC や EUCAS などの国際学会で、積極的に成果を報告した。

超電導ケーブルは冷媒として液体窒素を使用しており、断熱管の内部を流れている。このため、超電導ケーブルで地絡事故が発生し、断熱管が破壊された場合、ケーブルから液体窒素が外部へ漏洩する。また、掘削工事などでケーブルを外部から損傷させた場合も同様に液体窒素が外部へ漏洩する。

(2) IEC での活動

IEC（国際電気標準会議、International Electrotechnical Commission）のなかの TC(Technical Committee) 20 における超電導ケーブルの試験法に関する規格化を検討する WG(PT63075)が 2016 年に立ち上がった。PT63075 への参加国は、ドイツ、フランス、オランダ、ロシア、中国、カナダ、ベルギー、日本の 8 か国。日本からは、住友電工のエキスパートが参加した。

PT63705 では、4 回の会議が開催され、試験法に関して議論がなされた。本会議では、このプロジェクトでの成果も紹介しつつ、日本の意見を主張した。

種々議論のあと、試験法規格の最終版となる FDIS (20/1858/FDIS)が 2019 年 1 月に発行され、投票の結果、可決され、IS（国際規格、IEC63075）として、2019 年 2 月 5 日に発行された。

1.1.2 早期復旧等の実用化のための対策検討

66kV 級超電導ケーブルは管路、275kV 級超電導ケーブルは洞道への布設を前提とし、3km 級の超電導ケーブルシステムの設計と運転方法の概要と汎用的な検討ポイントの整理を実施した。これら超電導ケーブルシステムを基に、システム設計、通常運転方法・管理、事故時の対策・対応、早期復旧方法についてそれぞれ検討を行い、『超電導ケーブルシステムにおける運転管理・早期復旧のためのガイドライン』を作成した。

1.1.3 超電導ケーブルの侵入熱低減技術の開発

1.1.3.1 66kV 級の断熱管の低損失化

超電導ケーブルの熱損失の要因の中でも、長尺ケーブルの場合においては、断熱管の侵入熱が主要因となるため、これを低減することが重要である。断熱管の損失を従来の約 3W/m から 1.8W/m 以下（ケーブルコア内在、直線状）にすることを目標に、断熱材の検討、短尺断熱管評価、長尺断熱管評価のステップで開発を進めた。

(1) 短尺断熱管の評価

熱伝導による侵入熱を低減させるため、断熱管内部の収納された多層断熱材の内、熱絶縁材料に関して、従来材料 A と新規材料 B について、短尺断熱管の侵入熱評価を行った。測定の結果、サンプルＡは 1.7W/m で目標である 1.8W/m 以下をクリアしたが、サンプル B においては、2.0W/m であり、目標到達には、構成の見直しが必要であった。

これまで試作した、直管の自重と短尺評価から算出した熱伝導率の関係が、重

量に比例関係であることが判り、これらの結果から長尺断熱管の構造として、構造 A と構造 B を設計した。

長尺断熱管を製作する時の設備を用いた構造 A と構造 B の短尺サンプルの侵入熱測定結果は、先の特性曲線から大きく外れていない事が確認出来た。また、このずれを反映した長尺断熱管の侵入熱は、構造 A と構造 B でそれぞれ約 1.3W/m であり、目標の 1.8W/m 以下となることが期待された。

(2) 長尺断熱管での評価

上記、構造 A と構造 B の長尺断熱管（40m）を製造し、長尺断熱管の侵入熱評価を行った。冷却方式はサブクール液体窒素の循環冷却方式であり、液体窒素の流量と温度差から各断熱管の侵入熱を算出した。その結果、構造 A、構造 B ともに侵入熱は 1.3W/m であり、目標の 1.8W/m 以下を、長尺断熱管で達成することができた。

1.1.3.2 275kV 級の断熱管の低損失化

275 kV 級 1 m 断熱管サンプルを製作して構造検討を行った。真空断熱層のスーパーインシュレーションを 30 層積層し、真空封止で評価して、熱損失 1.2 W/m である構造を見出した。目標値 1.8 W/m を達成しており、断熱構造に問題がないことを確認して、100m 級断熱管を製作した。

製作した断熱管から 10m 級サンプルを 2 本切り出して評価を行った。まず真空引きを継続した状態で評価を行い、断熱管の熱損失は 1.5W/m で目標値 1.8W/m を達成していることを確認した。次に、真空封止しても 1.5W/m と目標値を達成していることを確認した。

続いて、サンプルのヒートサイクル試験を行い、サイクルを繰り返すと真空度が悪くなり、侵入熱が大きくなった。真空封止後 3 回目の測定で 2.5W/m となった。この状態での真空層のガス分析の結果、H_2 シグナルだけに変化が見られたため、H_2 の発生が侵入熱の悪化を招いたと考えられる。真空封止後 3 回目の冷却状態で真空引きして真空層の真空度を挙げて再真空封止(2×10^{-2} Pa)することで、侵入熱は回復した。これまでに 500 m 超電導ケーブルを冷却後半年間に亘り真空封止した状態で健全に保持できる知見を得ていることから、超電導ケーブル運用においては、昇温しない限り真空引きは不要と考えられる。しかしながら、メンテナンスなどでケーブルを昇温する場合には、極力真空引きを行うことが有効である。室温はもとより、低温状態でも有効であることが確認できた。

また、従来別の機会に行った 10 m 超電導ケーブルと 500 m 超電導ケーブルとで同じ侵入熱を得られていることから、今回の 100 m ケーブルも同様に 3 km への適用もできると考えている。

1.1.4 冷却システムの高効率化技術の開発

1.1.4.1 ブレイトン冷凍機の冷却試験

(1) ブレイトン冷凍機単体性能試験

旭変電所に設置した冷却システムを超電導ケーブルに接続するための事前検証として冷却システムの単体試験を行った。

冷凍能力測定の結果、冷却能力は前回実証試験のスターリング冷凍機より高く、効率を示す COP も 0.09 と高いため、超電導実証ケーブルが求める液体窒素を供給できる能力を十分もつことを確認した。そして、本プロジェクトで目標としている高効率・大容量冷凍機であることが確認できた。

また、前回の「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」で課題が見つかったターボ圧縮機・膨張機の磁気軸受周辺部品へ施した対策の効果を確認するため開放点検を行い、対策が有効であることを確認した。

(2) 超電導ケーブルとの組合冷却試験

超電導ケーブルシステムにブレイトン冷凍機を組み込んで運転試験を実施し、システムが運用できることを確認した。試験方法は以下の通りである。

まず、冷却システムからの液体窒素の入口および出口のバルブを閉じた状態で、超電導ケーブルに液体窒素をタンクローリーから供給し、超電導ケーブルの初期冷却を実施した。液体窒素の供給は超電導ケーブルに液体窒素が貯液されるまで実施した。

次に、冷却システムの液体窒素圧力と循環量を下げ、超電導ケーブルへの供給バルブを開け、超電導ケーブル内の液体窒素圧力が上昇した後に冷却システムへの戻りバルブを開けて、超電導ケーブルが冷却システムにより循環冷却されることを確認した。

最後に、系統接続に備えて警報試験、停電模擬試験、ポンプ故障切替え試験を行い、正常に動作することを確認した。

(3) 超電導ケーブル性能

初期冷却が完了した超電導ケーブルに対し Ic 測定試験、直流耐電圧試験をそれぞれ実施した。

各相の Ic は、液体窒素温度が 77.3K において、6300～6400A であり、過去に測定した値と大きく変化していないことを確認した。

DC 耐電圧試験においても、ケーブル高圧部とアース間に DC151.8kV、10 分間の課電を行い、特に異状がないことを確認した。

1.1.4.2 実系統接続での実証試験

ケーブルシステム、冷却システムそれぞれに関して所定の性能を有することを確認したのち、系統接続を実施することとした。2017 年 3 月 31 日に超電導ケーブルシステムを東京電力 66kV 実系統線路に接続し、1 年間の長期運転が実施された。1 年間の運転では、超電導ケーブル、冷却システムでのトラブル等で送電を止めることもなく良好に行えた。2018 年 4 月 2 日に系統から切離された。

(1) ケーブル性能

2012 年の前回の実証運転では、途中でケーブル B の真空度が低下する現象が起こり、真空引きを実施した。今回は、1 年間の真空度のデータを収集するため、真空度の変化があっても途中で真空引きすることなく、封切りの状態での真空度データの収集を行った。

ケーブル A については、真空度は 10-5～10-6（torr）の高真空が維持されており、夏場で多少真空度がわるくなったが、冬場では初期に戻っている。侵入熱も初期値と比べて大きな変化はなかった。一方、ケーブル B については、真空度は徐々に悪化し、最終的には,10-3 torr に近くなるほどに真空度が低下した。侵入熱についても、夏場で大きくなり、冬場で多少小さくなったが、初期値に比べて、150W 程増加している。この差の要因は、ケーブル B には地上布設の U の字曲り部分があり、冷却時は大きな側圧が曲り部にかかった状態で、日射により温度が上がりやすくなっており、この部分での断熱管内部のアウトガスの影響と考えている。実際に送電線路に適用される場合は、今回のようなU の字部分は存在せず、またケーブルは地下管路に布設されることから、ケーブルＡの断熱管の真空状態に近くなると推測され、長期間、高真空が維持できるものと考えられる。

(2) 冷凍機性能

１年間にわたる実証試験を通して、冷却システムは液体窒素を温度、圧力、流量が一定の状態で超電導ケーブルに供給し続けることができた。

運転中は冷却システムの性能変化に起因するような COP 低下は見られず、安定した運転を継続した。特に今回の試験で注目していた磁気軸受の荷重および変位については変化が見られず、また冷凍機・循環ポンプのメンテナンスや冷媒であるネオン・液体窒素の補充を実施しなかった。その結果から、今回のもう一つの目標であるブレイトン凍機のメンテナンス間隔の長期化を達成できる見込みを得た。

1.1.4.3 実証試験後の性能確認

(1) 冷凍機

１年間にわたる実証試験前後での冷凍機の冷却能力変化を確認するため、冷却能力の各パラメーターを比較した。

COP については試験前後で同等であることから冷凍機効率は低下していないことが確認できた。しかし、最大冷却能力は実証試験前より低下していた。原因を

確認したところ、冷媒であるNeのタンク圧力低下によりNe充填量が減少したためであることが分かった。

したがって40,000時間経過後も最大冷却能力を維持するには、初めにNeタンクへこの低下分を見越した量を充填する方法が挙げられる。

(2) 超電導ケーブル

実証試験後に、ケーブル全長のIc測定を実施した。過去のIc値と比較して、Icの劣化や低下がないことを確認した。

その後、実証ケーブルを昇温し、旭変電所から解体・撤去し、住友電工の試験場にて、短尺サンプルでのIc測定、交流損失測定、課電試験を実施した。

(i) Ic測定

導体については、使用された線材のIc総和は6850Aに対して、各相はほぼ同程度のIc値を示した。シールド層についても線材のIc総和の7330Aに対し、各相、それ以上のIc値であることが確認された。

以上のことから、導体、シールドはそれぞれ初期と同程度のIc値を有していることが確認できた。

(ii) 交流損失測定

導体＋シールドの一体での交流損失を測定し、出荷試験と同レベルである、0.82 W/m/ph@2kAであることを確認した。

(iii) 課電試験

短尺サンプルの課電試験を出荷試験と同じ条件で実施した。AC課電では、対地AC90kV@3時間、対地AC110kV@10分間を行い、良好であることを確認した。インパルス試験では、Imp±385kV、3回の試験を良好に行うことができた。

以上のIc測定、交流損失測定、課電試験の結果、初期性能と同等の性能であることが確認でき、超電導ケーブルの長期特性が良いこを証明するデータを得ることができた。

1.1.4.4 COP向上方策

実証試験後の性能確認で液体窒素供給温度77Kにおいて、COP0.09が得られた。目標であるCOP0.11以上とするために様々な方法を検討した結果、下記3項目を実施することで達成できる見込みを得た。

① 圧縮機の組み合わせ変更
② モータ効率改善
③ 熱交換器効率改善

各対策の詳細については3.2研究開発項目毎の成果の記載の通りである。

1.2 電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発【直流】

2018 年度に石狩超電導・直流送電システム技術研究組合（千代田化工建設、住友電気工業、中部大学、さくらインターネット）は電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発（直流送電）に資するため、「直流超電導送電システムの総合的な信頼性・安全性の実証研究」を北海道石狩市に建設された高温超電導直流送電システム（回線２）を用いて実施するとともに、「設計、運用、保守ガイドラインの作成」を行った。

1.2.1 直流超電導送電システムの総合的な信頼性・安全性の実証研究

本研究開発においては直流超電導送電システムの総合的な信頼性・安全性の評価のため、(1)長尺時を模擬した液体窒素循環冷却性能の評価、(2)超電導ケーブルシステムの通電特性の評価、(3)過酷試験による評価、(4)長期運転特性の評価、(5)残存性能確認試験の５項目の実証研究を実施した。各項目について、開発目標とそれに対する結果及び達成可否をまとめる。いずれの項目についてもプロジェクト目標を達成し、冷却システムに関しては、実運用における経済性等を考慮した場合に要求される冷却ステーション間隔 20km 以上の見通しを得るとともに、実証試験の実施において検討した評価手法や抽出した課題を、研究開発項目②「設計、運用、保守ガイドラインの作成」に反映した。

表 1.2.1-1 開発目標と結果及び達成可否

項目	2018 年度開発目標	開発結果	達成可否
(1)長尺時を模擬した液体窒素循環冷却性能の評価	20 km 毎に 20 kW の冷凍機を設置することを前提に(*1)、熱侵入量を 1 W/m 以下とする。	シールド付き配管において約 0.9 W/m の性能を確認。	達成
	液体窒素の循環流量 40 L/min にて 20 km 長での温度差（ΔT）を 20 K 以内(*2)とするために、今回の 1 km 設備における等価試験（4 L/min）で、ΔT≦10K（リターン管を含めΔT≦20 K）とする。	3.9 L/min の流量で、ケーブル管入口～リターン管出口（2 km）の温度差 約 15 K　を確認。	達成
(2)超電導ケーブルシステムの通電特性の評価	定格電流：2.5 kA 連続通電（3 時間）で発生電圧及び運転温度の安定（超電導ケーブルコア両端電圧：発生電圧の 0.1 μV/cm 以下の変動、冷凍機出口温度変動：±1K 以内）を確認する	発生電圧： 0.1 μV/cm 以下の変動、 冷凍機出口温度変動： ±1 K 以内　を確認。	達成
	送電効率：99.9 %以上 （電流リードを含む送電線路の電圧降下）	送電効率 99.96 %を確認。	達成

(3)過酷試験による評価	定格通電限界： 液体窒素温度 83K における安定通電	液体窒素温度 83K において I_c＝2542 A@0.1μV/cm を確認。	達成
	過電流：短尺での限界性能評価	短尺を用いた試験結果より、過電流の限界値は 約 6 kA-2 秒	達成
	耐電圧：要素試験結果からの性能検討	ケーブルコア、ジョイント、PCL 電流リードについて、20 kV−5min の耐電圧を確認。	達成
(4)長期運転特性の評価	無負荷での長期運転（1ヶ月程度）	27 日間連続運転を実施し、侵入熱の変化に対する冷却システムの応答が良好であり、圧力・流量が安定していることを確認。	達成
	ロードサイクル試験（通電 8 時間＋無負荷 16 時間）を２０サイクル）	電流値 1 kA にて実施し、通電電流の繰り返しの変化に対する冷却システムの応答が良好であり、圧力・流量が安定していることを確認。また、通電時の HTS 導体電圧の安定性を確認。	達成
(5)残存性能確認試験	超電導ケーブルシステムの一部に対し解体調査を行い、得られた結果から今後の課題などについて検討する。	以下について確認試験を行い、何れも試験の前後で劣化の無いことを確認した。 ・電気特性確認試験 ・熱侵入量確認試験 ・冷凍機性能確認試験 ・ポンプ性能確認試験 ・ペルチェ電流リード（PCL）フランジ解体調査	達成

*1： 実運用における経済性等を考慮し、冷凍機は 20km 毎の設置と想定する。
*2： リターン管を含んだ温度上昇、ケーブル管のみでは ΔT≦1 K となる。

1.2.2 設計、運用、保守ガイドラインの作成

本研究開発の結果から得られた、初期冷却手順、実送電に向けた液体窒素の運用温度及び運用流量、非常時対応等の研究成果と、過年度実施の「高温超電導直流送電システムの実証研究」及び「高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業」における研究開発成果を総合的に検討することで、超電導直流ケーブルシステムの設計・建設方法、保安規定における点検項目や運転基準、平常時

運用や事故時運用、および一部設備の障害時における復旧方法などの設計・運用・保守に関わるガイドラインを策定した。策定にあたっては、超電導直流ケーブルシステムを社会実装することをターゲットとした。また、電力分野の有識者によるアドバイスも反映した。

ガイドラインの記載項目を表 1.2.2-1 にまとめる。

表 1.2.2-1 超電導直流ケーブルシステムガイドライン記載項目

	大項目	中（小）項目
建設	1.仕様	1.1 法規、1.2 用地、1.3 線路仕様
	2. 設計 コンセプト、考え方、注意点など	2.1 超電導ケーブルコア、2.2 断熱二重管設計 2.3 端末容器、2.4 電流リード、2.5 ジョイント 2.6 送電システム（電気・制御・監視設備） 2.7 液体窒素循環システム （冷凍機・ポンプ、冷却システム設計） 2.8 型式試験
	3. 製造 工場でどのようなチェック、試験を行ったか	3.1 超電導ケーブルコア、 3.2 送電システム（電気・制御・監視設備） 3.3 断熱二重管、3.4 端末容器 3.5 電流リード 3.6 液体窒素循環システム(冷凍機・ポンプ・配管)
	4. 工事 工事工法の考え方、チェック内容、竣工試験など	4.1 断熱二重管 4.2 超電導ケーブルコア 4.3 端末容器、4.4 ジョイント 4.5 液体窒素循環システム(冷凍機・ポンプ・配管) 4.6 竣工試験(機械試験、電気試験、警報確認試験)
運転	5. 運用 通常時の運用方法、制御方法、異常の検知、異常時の対応等	5.1 システム運転要領 （スタートアップ、 定常運転・監視、 運転停止・休止） 5.2 異常時対応（重・軽故障リスト）
	6. 保守	6.1 保安規定（日常点検、定期点検）

1.3 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発

1.3.1 超電導接続の性能、歩留り、信頼性向上技術開発

1.3.1.1 超電導接続方法の開発

本研究で開発した超電導接続は、２本の RE 系線材の銅被覆、銀被覆を除去して超電導層を露出する工程、露出した超電導層に超電導になる物質を塗布する工程、超電導物質を仮焼する工程、超電導層同士を面接触させ熱処理して超電導層を結晶化する工程から構成される。この工程での超電導接続を実施しながら各工程の適正条件を詰めていくことで、高い性能の超電導接続を実現した。

超電導接続の一つとして、接続部が超電導状態を維持する最大電流を測定する Ic 測定を実施した。超電導接続部を液体窒素中で浸漬冷却し、外部磁場 0T で測定した結果、本研究において 155 A の Ic を得ることができた。目標として 100A 級の通電特性を目指していたことより、目標達成することができた。155A は、また RE 系線材の平均的な Ic が 200A であることから、線材 Ic からみても高い通電特性である。

1.3.1.2 超電導接続の温度、磁場をパラメーターとした接続抵抗測定結果

本研究では、MRI マグネットの永久電流モード運転を実現するため、超電導接続の抵抗は $1\times10^{-12}\Omega$ 以下に抑えることを目指している。$10^{-12}\Omega$ の抵抗では、100A の電流で抵抗として発生電圧として 0.1nA となり、現在市販される電圧計では測定不可能であり、四端子法での抵抗測定はできない。そこで、超電導接続の抵抗測定は、RE 系線材で超電導接続したワンターンループを作製して、そこに電流を流して磁場を捕捉させ、その減衰を測定することで、接続抵抗を評価した。試験は、NIMS 所有の冷凍機伝導冷却型 12-T 超電導マグネットを使用して磁場環境下で行い、また温度は GM 冷凍機を用いて 77K 以下の低温にすることで測定を行った。

超電導接続を１か所持つワンターンループに、100A の電流を誘導させて、温度は 35K と 50K、磁場は自己磁場（Self-Field）、0,5T、1.0T で測定を行った。その結果、50K、1.0T で $1\times10^{-13}\Omega$ 以下の抵抗を達成できた。この結果より、本研究の $10^{-12}\Omega$ 以下の抵抗を達成したことに加えて、内部目標として付け加えて 100A、1T、50K での条件下で $10^{-13}\Omega$ 以下の抵抗を達成すること、目標を大幅に超えた成果となった。

1.3.1.3 超電導接続の性能向上検討

超電導接続の最適条件を見出すために、超電導接続を作成して、超電導特性の評価を行ってきた。プロジェクト開始当初は、歩留まりが 50%であったが、その後 Superpower 社が高性能線材として性能を向上させた 6mm 幅 200A 級の線材を提供したロットから歩留まりが 7.5%まで低下した。本研究で原因調査を行い、超電導層が厚くなったことで線材がたわみ、２本の線の接触が不十分になったことが性能低下の要因であることを突き止めた。その対策として、接触面積を十分とるエッチング法、矯正法の２つの方法を開発し、その結果を**図 1.3.1.3-1** に示

すように、最終的には 80%の歩留まりを達成した。

開発当初は、100A 級の接続サンプルもできた一方で、測定前に接続部が剥離したり Ic=0A のものもあったり、品質的にばらつきが大きかった。歩留り改善により、チャンピョンデータは出ないものの、最低でも 30A の接続ができ、50A～60A の幅で性能が一定化している。実用化の観点からは、高い性能と低い性能のばらつきが大きく不安定なものより、ばらつきが小さく性能が安定している方が、超電導製品の運転や設計を変えることで対応することができ、製品の安定にもつながる。

それゆえに、歩留まりの目標値達成だけでなく、より実用化レベルにレベルアップした超電導接続が開発できた。

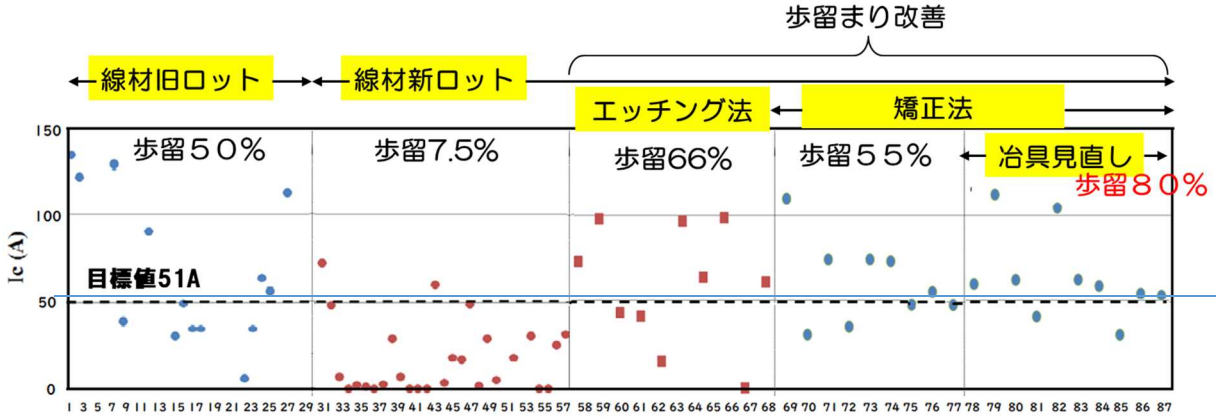


図 1.3.1.3-1　短尺サンプル接続実験、Ｉｃの推移と歩留まり

1.3.1.4　劣化防止技術の確立

信頼性について懸念されるのは、接続部にかかる外力と水分侵入で超電導特性が機械的、化学的に劣化することである。当初においては、超電導接続したサンプルで液体窒素による測定の後に接続部が取れてしまったり、２回目の測定でＩｃ値が低下したりするものがあった。そのため接続部を保護する目的で、接続後に接続部を収納部材に入れ、エポキシ樹脂埋めを行った。このサンプルを室温で保管し定期的に測定を行った結果、300 日を経過しても劣化が見られず長期信頼性が維持されていることが分かった。超電導接続後、超電導接続部をエポキシ樹脂で保護することを標準作業として実施している。

1.3.2 MRI コイルへの実装を考慮した超電導接続部の構造の開発

1.3.2.1　磁場および機械的な応力下での超電導接続

(1) 超電導接続部構造の開発

MRI マグネットに、RE 系超電導線を適用することを想定した場合、現在商用化している超電導線の線長は 500m であることから、コイル形成には超電導線の接続が必要となる。MRI マグネットで要求される接続としては、事前に２本以上の線を接続して長尺の線材をコイル内部に巻き込む方式と、コイル巻線を行いそれら複数のコイルを接続する方式である。前者は、２本の線材を「突合せ」で接続して接続部も線材幅、線材厚さと同等にすることになる。後者は、２本の線材

を「拝合せ」で接続する方法で、こちらは接続部分をケース等に入れて保護するなどが可能である。本研究では、突合せ接続と拝合せ接続の両方を行い、どちらも 100A 級の接続を得ることができている。

(2) 超電導接続の磁場中特性評価

線材をコイル内部で接続することは、巻線工程よる機械応力、コイルが発生する高磁場、磁場と電流から線材にかかる電磁力など過酷な環境に置かれることになる。本研究では、現在の超電導接続が高磁場、高強度下でどのような特性を持つかの測定を実施した。

測定は、NIMS の高磁場マグネットを用いて行い、磁場中にサンプルを入れて Ic 測定を実施し、0 から 6T まで、また 77K から 4K までに温度範囲で超電導接続の特性を測定した。評価結果から、77K で Ic53A の接続と Ic107A の接続でどちらも超電導線材と同様に温度を下げると通電電流があがり、また磁場を上げると通電電流が下がる特性を持つことが分かった。超電導接続の温度依存性、磁場依存性をデータとして蓄積することで、77K での線材の特性から、磁場環境、温度環境を想定して、MRI コイルの設計ができることになった。

(3) 耐フープ応力に対する検討

超電導コイルの線材は、磁場と電流により電磁力を受け、コイル内においてはコイルの半径方向の力となる。コイル中に超電導接続がある場合には、超電導接続部分は半径方向の電磁力により円周方向にフープ力が発生し、接続部を伸ばそうとする力がかかる。超電導接続の耐フープ応力の評価として、超電導接続部を引張試験機にセットして、液体窒素温度で冷却しながら、通電試験を実施した。試験は NIMS の装置を用いて、接続サンプルをセットして、77K 温度中で応力をゼロから加えて Ic の変化を確認した。その結果、引張り力 60 N まで Ic, n 値とも変化はなく、61 N 印加時に破断音（プツッというような小さな音）が発生し、劣化（Ic 測定では 1 A 未満でオーミックな抵抗発生）が起きた。しかし外観に変化はない。線材サイズ（6 mm 幅×55 μm 厚）で考えると、引張り力 60 N での応力は 182 MPa に相当する。現状、182MPa は線材の強度の 1/4 しかないことから、接続はコイルから引き出してコイル外で実施することが必要であり、コイル内部で接続する場合には何らかの強度サポートが必要なことが分かった。

1.3.2.2 RE 系超電導線材のリード線の引き出し検討

MRI コイルへの実装を考慮した超電導接続部の構造として、コイルから引き出した超電導線の超電導接続部への引き回しが重要な技術である。特に RE 系超電導線はテープ上であるために、エッジワイズ方向への曲げができないことや、極端な曲げ、捩じりで性能劣化することが知られていて、引き出し部の 3 次元的な設計が必要となる。本研究は JASTEC が実施して、3 種類の引き出し方法（無誘導巻き型(NI)、捻り曲げ型(bend)、テーパー型(taper)）の検討を行った。線材も 4mm 幅と 6mm 幅を用意して、4mm 幅線材で無誘導巻き型(NI)、捻り曲げ型

(bend)、6mm 幅線材で無誘導巻き型(NI)、テーパー型(taper)を設計した。評価は、NIMS 所有の超電導コイルにリード部を入れて、温度変化、磁場変化の中での Ic 測定を行った。その結果、どの方法も性能劣化はなく、極端な曲げや捻りを加えない方法をとることでリード線の引き出しができることが確認できた。本研究においては、部品構造が最も汎用的な「無誘導型」リード部を、評価用小型コイルの Type1 に採用した。

1.3.3 MRI 製造を想定した現場環境での超電導接続の実施およびその技術の確立

1.3.3.1 現場適用可能な接続装置での超電導接続の実施

現場環境での超電導接続を行うためには、汎用的な設備で、かつコイル製造現場に置けるサイズの装置が要求される。そこで、本プロジェクトでは、スプレーコート装置と小型焼成炉の２つの設備を導入して、それを用いた超電導接続の実現性の評価を行った。その結果、従来の設備での超電導接続と同等の 87A の超電導接続ができることが確認できた。研究後半のサンプル製作は、２つの設備で実施した。

(1) スプレーコート

コイルから引き出される超電導線の接続に超電導物質を塗布する方法において、開発当初は超電導物質を線材上に薄く均一に塗布するためにスピンコートによる原料塗布行っていた。しかしながら、コイルからでてくる線材の接続のために、重量のあるコイルを高速で回すことは困難であり、スピンコートに代わる代替えの方式を開発する必要があった。検討の結果、カスタマイズしたスプレーコート装置で超電導原料溶液を均一に塗布が可能であることがわかった。スプレーコートの各種条件を適正化したところ、Ic 70 A の超電導接続が実現できた。本プロジェクトで後半のサンプル製作は、このスプレーコートで実施している。

(2) 小型焼成炉

超電導接続の超電導層の配向、結晶成長を行う本焼成は、開発当初は大型の管状炉で行ってきた。しかし、現場作業等を考慮した場合、可搬型の小型の炉が必要と考え、小型管状炉の導入を行った。昇温パターンや、ガス供給はプログラミングでき、接続条件を適正化したのちには、プログラムで本焼成を行い、72A の接続が実現できている。

(3) 現場適用を考慮した長尺線の超電導接続

MRI マグネットを現場環境での超電導接続を実施する場合、コイルから線材は引き出されて、その先端で接続を行うことになる。コイル接続の場合、装置外から線材を引き入れていることで、条件が変わる可能性もあり、検討が必要とされた。また、接続作業をするハンドリングについても注意が求められる。小型コイルの接続の実現性として、長尺のテープを用いた模擬的な超電導接続を行い、

87A の超電導接続が達成できた。

1.3.3.2 評価用小型コイルの設計と要素コイル評価

(1) 小型コイルの設計

コイルを用いた超電導接続の実験を行うために、４種類の超電導コイルを製作し、その背知能評価を行った。製作した小型コイルの仕様を表 1.3.3.2-1 にまとめる。

表 1.3.3.2-1 MRI 製造を模擬するために試作した試験コイルの諸元

	名称	寸法（外径、長さ）	目的
1	要素コイル（短尺）	73mm, 42mm 線材長 43m	ソレノイドコイルの巻線の可能性確認、巻線劣化の有無
2	要素コイル（長尺）	67mm, 121mm 線材長 36m	ソレノイドコイルの巻線の可能性確認、巻線劣化の有無
3	小型コイル Type1 （ソレノイドコイル）	120mm, 200mm 線材長 500m	永久電流コイルの構成の確認と、永久電流試験 （無誘導型リード）
4	小型コイル Type2 （補正コイル＋ソレノイドコイル）	147mm, 200m 線材長 826m	永久電流試験の実施，コイル間接続の実施

(2) 自動巻線機の導入

従来高温超電導線材を用いたコイルは、線材がテープ形状であることからパンケーキコイルでコイル製作して、それを積層する方法で実施されてきた。しかしながら、ソレノイドコイルの方が、コイル密度を高めることができ、巻線も一度にできるためにパンケーキコイルに比べて経済性のよいコイルが実現できる。しかしながら、ソレノイドコイルは横方向の線材の押し付けなど熟練者の技術を必要としていた。そこで、自動巻線機を導入してコイル巻線を行ったところ、半自動で巻線ができ、巻線作業も 1/2 の時間でできるようになった。

(3) 要素コイルの特性評価

要素コイルの評価においては、77K、66K の温度環境では、コイル Ic と線材 Ic が比較的よく一致していることから、巻線による劣化が無いものと考える。50K 以下では、線材の固有性能、磁場方向依存性が強く出るために、コイル Ic と線材 Ic の関係性を説明することは難しいが、概して線材の Ic の低い部分で電圧発生があると推測される。

1.3.3.3 小型コイルの永久電流試験用評価装置

減衰率による接続抵抗測定のための小型コイルシステム評価系の設計・製作を NIMS において実施した。評価用クライオスタット（NIMS 既存設備）に、本測定のために設置用ステージおよび小型ＧＭ冷凍機を調達し、コイルステージが設

計の温度まで冷却されることを確認した。また、評価用小型コイルのための要素試験として、永久電流スイッチ（PCS）の単独試験を実施し、PCS の ON/OFF、および PCS ヒータの加熱による各部への熱的な影響がないことを確認した。

1.3.3.4　小型コイルの永久電流試験の課題

これまで報告してきた練習コイル等の検討、サンプルでの超電導接続の検討で培ったコイル技術、接続技術を用いて小型コイルの永久電流試験に着手した。試験システムの構築のために、コイル製作、超電導接続、永久電流スイッチ製作、引き出し線の固定を行い、永久電流試験を行った。しかしながら、永久電流モードにならない事象が生じた。それについて、原因調査を行ったところ、エポキシモールドで劣化することが分かった。この対策を行い、小型コイルの永久電流試験を行い、永久電流を達成した。

(1) 小型コイルの作製

巻線終了した小型コイルから引き出した超電導線の端部を、銅被覆、銀被覆を除去して超電導層を露出させ、その上に、超電導原料を塗布して仮焼を行う。仮焼後、超電導層を向き合わせて固定して本焼して超電導接続をする。超電導接続部は、保護のためにエポキシ保護をして超電導接続が終了する。

(2) 永久電流試験

製作した小型コイルを用いて永久電流試験を行った。試験は、超電導コイルを 4.2K まで冷却し、PCS のヒータを焚いて PCS を OFF、 電源よりコイルに通電して励磁、その後、PCS のヒータを切り PCS が冷えるのを待機、ゆっくり電源電流を下げて永久電流モードにするところ、電源電流値と同じで磁場がゼロとなってしまった。これは、回路図から見て、電極の左側の PCS 側に電流が流れていないことを示しており、PCS 回路側に高抵抗の部分が存在すると推測された。

(3) 不具合箇所の特定と原因調査

PCS 回路側で抵抗発生があることで永久電流にならなかったことから、小型コイルの抵抗測定を行い、不具合箇所の特定を行った。抵抗発生の特定は、小型コイルを液体窒素に浸漬して超電導状態として電流（1A）を流して、タップ間の電圧測定を行った。測定した結果、抵抗発生個所としては，PCS 回路側の超電導接続部、PCS であることが分かった。一方で、同様に製作したコイル側の２つの超電導接続部は抵抗発生無く超電導特性を維持していることがわかった。調査の結果、ある特定の条件でエポキシモールドしたことで、線材が劣化した可能性があることが判明した。

(4) 永久電流の問題に対する対策

コイルリード線をエポキシモールドしない方法を用いることで、線材の劣化を防止して、コイルの通電試験で永久電流を達成した。

1.4 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【磁場特性改善】

1.4.1 高磁場コイル用超電導線材の臨界電流密度向上技術の開発

1.4.1.1 磁場中高特性目標及び達成のための課題の抽出・整理

本技術開発では、医療機器としての小型化・ヘリウムフリー化のニーズに鑑み社会実装を目指せる３Ｔ級高温超電導ＭＲＩマグネットシステムを実現するにあたり、コイル巻線として必要とされるＹ系超電導線材が満たすべき性能面の開発目標として、高磁場条件下での高電流密度性能、1㎞程度の長さ及びその特性均一性、発生磁場の安定性に関連する交流損失の低減技術の確立、の３つを設定している。このうち、高磁場条件下での高電流密度性能については、求められる小型３Ｔ級マグネットシステムにおけるコイル内最大経験磁場が７Ｔに達する可能性があり、かつ線材断面全体にわたる平均臨界電流密度（J_e）として従来システムの２倍に相当する 400A/ｍｍ^{2}以上が必要とされている。更に、冷却エネルギー消費が充分低くかつ熱的に安定な温度として、運転温度 30K が望ましいとされている。

これに対し、現在普及している MRI 装置に用いられる金属系低温超電導線材（NbTi 線材）は臨界温度が９K のため３０K の高い運転温度領域では超電導にならず使用できない。また、過去に市販されてきた Y 系線材の当該温度磁場領域での平均臨界電流密度（J_e）は 250A/ｍｍ^{2}程度にとどまり、かつ、その製造スループットが 20m/hr 程度と生産性が低いことが問題となってきた。競争力ある商品として上記の MRI システムを実現するためには、性能と同時に線材の生産性を大きく向上する必要があり、本プロジェクト中で生産性の改善に焦点を当てた課題設定型産業技術開発費助成事業として併行して実施している「高磁場コイル用超電導線材の生産性向上技術開発」に於いて、完成品の単位時間あたり生産長の目標値として 50m/hr を設定している。本技術開発では、この生産性向上目標と両立する形で、性能目標として平均臨界電流密度 400A/ｍｍ^{2}以上(30K、7T)を設定した。

この目標を達成するためには、抜本的な性能向上を生産性を落とさすことなく達成する必要であり、超電導層の臨界電流値の向上と共に、線材構成の見直しによる線材断面積低減の可能性を検討した。前者については、近年材料開発が進んでいる人工ピンニングセンター（人工ピン）導入技術を、基板加熱条件が安定したホットウォール式 PLD 装置において作製する超電導層にて初めて検討することとし、その際の磁場中での高特性ならびに高スループットを同時に実現出来る製造条件の確立を期すものとした。後者については、線材を構成する各部材のうち、寄与し得る厚さ低減の可能性ある各層についてそのリスクを検討した結果、金属基板の厚さについて機械特性に影響を与えない範囲で変更を行うことが可能であることが判り、これによって 20%程度の J_e 向上が可能であることがわかった。絶縁層や低抵抗金属の安定化層については、それぞれ製造プロセス上の理由及び安定化保護の観点から一定の必要な厚さを確保するべきであることから現状のまま据え置くこととした。

1.4.1.2 高蒸着速度条件による人工ピン導入線材の合成

Ｙ系高温超電導線材の臨界電流密度特性については、結晶構造に起因する材料固有の特性の異方性が非常に強い上に、気相合成薄膜については成長に伴う微小な結晶格子欠陥が適切なピンニングセンターとして機能しているとされている。一方、Y 系線材に於いても意図的に導入する人工ピンの開発が近年盛んに進められており、とくに気相法においてナノロッド状に形成したＢＭＯ（B=Ba，Ｍ＝Ｚｒ，Ｈｆ等）組成のペロブスカイト構造酸化物の導入が効果的である。これまでに大幅な臨界電流密度の向上が多く報告されているが、磁場角度に対する異方性が非常に大きいこと、成膜速度を非常に遅くする必要があり生産性が低いこと、成膜条件パラメーターが増える結果条件のコントロールが難しく長手方向に均一な連続合成が難しい、等の課題があり市販の線材の多くは意図的な人工ピンの導入が行われていない。

一方、長尺市販線材の量産にあたっては、超電導層成膜条件の制御性に優れる PLD 法（Pulsed Laser Deposision 法）が多く使われているが、長尺にわたる安定合成を実現するために金属テープ基板加熱方法の最適化が進められてきており、近年は超電導層成長部分全体を電気炉のように囲った構成であるホットウォール式成膜室を用いた方法が、安定的な量産製造技術として実績を上げてきている。そこで、本技術開発に於いては、人工ピン導入にあたって成膜パラメーターが増えることで狭くなる成膜条件の最適化について、ホットウォール式 PLD 法により精緻に制御することにより、より高速な蒸着条件において、異方性が少なく、かつ長手方向に均一な高特性を有する線材の実現を期した。

そこで本技術開発において磁場中特性評価装置を導入し、これを活用し開発線材の評価とフィードバックを進めた結果、BMO 添加によってロッド状の非超電導相のペロブスカイト酸化物が形成され、強く c 軸配向に相関した磁束ピンニング特性が得られ、磁場中の通電特性が明確に上昇することを実現すると共に、臨界電流密度 J_c の磁場角度依存性が蒸着速度向上に伴いピーク特性は低下するが、電磁気的に異方性の少ない特性が幅広い温度領域で得られることがわかった。このときの BMO ナノロッドの構造は短く、分散した構造となっていることが電子顕微鏡観察で明らかになった。このようにして得られた高速蒸着条件においても、高磁場コイル設計上で重要な指標となる磁場角度依存性において、特性が最低値を示す磁場角度に於いて、適切な蒸着条件を選択することにより充分な特性を発揮できることがわかった。

更に蒸着速度を速めることで、J_cのピーク特性が低下するものの、更に蒸着速度を速めていった場合に於いても、30K、7T における J_c 値（約３．８×１０^{4}Ａ／ｍｍ^2）程度を維持しており、超電導層の膜厚を共に保った状態で均一に高速で成長させることに成功した。その結果、製造線速を上昇させても高い特性を維持することが可能となり、併行して進めた助成事業成果の水平展開と併せて、最終的に 50m/hr の製造線速にて、Je=406A/mm2(30K、7T)を、更に基板厚さを低減した試料により Je=527A/mm^2(30K、7T)と目標値をクリアすることに成功した。その条件において 300m 長の線材を作製し Je=489A/mm^2 (30K、7T)を達成

し、高速かつ高特性の長尺線材の製造が可能であることを実証することが出来た。

1.4.2 長尺線材性能の均一性向上技術開発

1.4.2.1 長尺均一特性技術開発

超電導線材として求められる線材の単長は用途によって異なるが、所謂ドライブモードにおいても充分な精度が期待出来る設計として、高精度の電源で励磁する積層パンケーキコイル巻線方式においては、コイル内の線材接続箇所を排除出来る最小単長として１ｋｍ長が設定されている。このとき、全長の特性平均値から局所的に大きく下がった特性低下部において発生し得る熱損失が、一定の運転電流における発熱や変形の要因になる可能性を排除するべく、「１ｋｍにおける臨界電流の低下率（(全長の臨界電流平均値－臨界電流最小値）／全長の臨界電流平均値）を０．１５未満」を目標と設定した。

この目標値を達成するにあたり、先ず特性低下因子を解明するため導入した高精度均質性検出装置を活用した画像解析を実施し、長尺線材の I_c低下率のネックとなる局所低下箇所について、様々な要因により製造プロセス中のコンタミネーションやセラミックス膜の応力破壊が生じることを特定した。抽出・整理された要因の排除、及び製造プロセスにおける長尺で均一な品質維持に寄与する要素技術開発として、製造プロセス中に生ずる各種のコンタミネーション等を低減するべく、クリーン化等の方策を施しプロセスの改善を実施した。この結果、1㎞級長の線材に於いて、臨界電流低下率が０．１５に相当する局所低下部が１か所程度となる線材の作製に成功した。

1.4.2.2 線材信頼性評価技術開発

長尺線材の均一性では、特に局所的特性低下部が機械的強度と相関がある可能性があることから、その評価の一環として機械強度の長手方向分布に関する知見と長期信頼性に関する知見を得ることを検討した。応力が加わる方向については、テープ平面に平行な長手方向、垂直な方向、幅方向等があり、総合的に調査を実施した。とくに基板長手方向と基板垂直方向の引張歪と応力依存性については、長手方向強度分布を把握する基礎特性評価として、引張強度バラツキの評価をワイブル解析によって行うと共に、長期信頼性試験に繋がる繰り返し疲労試験を検討した。

その結果、長手方向引張については基板の強度と蒸着後の圧縮応力を反映して極めてバラツキが少ないことがわかり、長尺強度試験として、コイル形状に巻線して通電した状態における外部磁場中機械特性評価を実施した結果、本技術開発で想定されるMRIコイルで発生する可能性のあるフープ力180MPaを大きく上回る334MPaを印加した状態まで特性劣化は生じないことを確認した。

これに対し、垂直方向については含浸コイル形状の巻線サンプルを冷却する方法によって長尺線材の試験を実施し、アンビル法による短尺サンプル測定結果とのバラツキの相関を評価した。その結果、垂直方向引張については一般的なセラ

ミックスと同等の大きなバラツキが観測され、長尺になるにつれ低強度での破壊可能性が増えるが、製作年次の異なる試作線材の信頼性評価の結果、プロセス改善の進展に伴い線材信頼性が向上していることが確認された。

長期信頼性を意識した疲労試験としては、先ず垂直引っ張り方向について、短尺サンプルの剥離強度の静疲労及び動疲労試験を実施し、疲労定数として常温でN=22～23 が共通して得られた。また液体窒素温度中と-10℃において動疲労試験を実施した結果、N=150～167 と非常に大きな値となり、ほとんど経時的疲労破壊が進展しないことが解った。

次に長尺線材の垂直引張方向強度の信頼性評価試験として、含浸コイル巻線の長時間冷却による静的疲労、並びにヒートサイクルによる繰り返し応力試験を実施した結果、9.6MPa の垂直引張剥離応力が膜面にかかった状態で、1700 時間の連続負荷並びに 20K/min の速度で 100 回のヒートサイクルで劣化が生じないことを確認した。

一方、長手方向引張力については、繰り返し引張強度試験を実施した結果、550MPa の引張応力に於いて百万回の繰り返し応力負荷に耐えられることがわかった。繰り返し強度の応力依存性が確認され、低応力においては更に高繰り返しに耐えることが明らかになったが、複合材料であるために金属基板の繰り返し疲労現象の影響が考えられる。

また、コイル形状での信頼性評価試験の一環として、ホール素子をスキャンさせる方法を用いた 2 次元的磁化測定の応用を検討し、含浸コイル形状の巻線サンプルの側面を非接触でホール素子にてスキャンすることにより、冷却負荷によって劣化した巻線中に発生した特性低下箇所を見出すことに成功し、線材機械強度の長手方向分布とコイル内分布の把握に指針を得た。

1.4.3 高磁場コイル用低損失構造線材の研究開発

1.4.3.1 目標設定

本テーマではアスペクト比の大きい平角テープ線材形状に起因する課題として、多芯化・撚り線構造に着目した低損失化線材構造の検討を実施した。従来ＭＲＩ等の高精度機器に用いられる超電導素線については、極細多芯構造の丸線断面形状とすると共に、適度なツイスト（捻り）構造、および撚り線構造を構成し、磁場変動に伴う交流損失を下げると共に、遮蔽電流の重畳を最小限に留め、極めて空間均一性の高い磁場を長時間安定して維持出来るとされている。一方現在量産されているＹ系線材は、平角テープ状の単芯構造であるため、大きな遮蔽電流が減衰し難く、高磁場コイルとして磁場が安定するまでに相応の時間が必要である。また、励磁などの電流通電時に発生する電磁気的な履歴損失と結合損失が大きいことが、ＭＲＩ用高磁場コイル開発にあたって課題となる可能性がある。そこで、交流損失１／１０を目標と設定し、アプローチとして、スクライブ（分割）線材と撚り線構造を選定し、その課題解決を図った。

1.4.3.2 基礎物性測定及び交流損失シミュレーション

先ず、様々な超電導線材の基礎物性を測定し、その磁気的、および、熱物性について、それらの特徴を把握し、今後の熱物性のシミュレーションやマグネット設計に有用な情報を得た。これらの情報に基づき、撚り線構造並びに細線化構造について交流損失の電磁シミュレーションを実施した。撚り線化テープ線材については、Y系線材を集合化して丸い断面形状にしたＣＯＲＣ®導体を主な対象として、シミュレーションにて損失の下限を評価した。その結果、平坦テープよりも磁化損失が小さくなることを明らかにするとともに、螺旋巻きの円筒形を小さくすることでさらに損失を低減させることができることを明らかにした他、高磁場領域では磁化損失が支配的であることを明らかにした。細線化した線材の撚り線化テープ線材については、超電導細線が電磁結合のある場合のシミュレーションを行った。その結果、超電導細線間の電磁結合における境界条件をシミュレーションから明らかにした。

1.4.3.3 細線化加工技術開発

スクライブ加工線材開発に関しては、マルチビームレーザによるスクライブ加工高速化技術開発、およびＰＬＤ線材における特性均一化技術開発等を行った。先ず加工の高速化を目的として、レーザ光のデュアルビーム化を行い、２本の加工において加工深さや幅の均一性を確認した。ホモジナイザ導入によって複数のビーム照射によるマルチビームスクライビングが可能であることを示し、スクライビング加工速度を向上に成功した。

次に面プルームＰＬＤ法(plane-plume PLD method)を導入し、人工ピン導入線材における I_c 特性の均一性を向上させた。即ち、金属基板の改良と中間層の洗浄及び面プルーム PLD 法の開発により I_c のばらつきを抑制することが可能となり、EuBCO + BHO 線材の I_c 分布の均一性の向上を確認した。 フィラメント I_c バラツキは従来の 10.4%から 4.3%に改善した。また磁場中特性に関して従来の EuBCO + BHO 線材よりも異方性の少ない J_c-B-θ 特性を得た。また、超電導層の細線化へ向けた幅方向特性均一化検討として、MOD-$GdZrO_3$ 平坦化＋拡散防止層用原料溶液を開発し、平坦化とともに金属元素の拡散防止を同時に達成した。MOD-$GdZrO_3$ 層上に更なる中間層、超電導層を成膜し、高い超電導特性（I_c = 294 A/cm-w、J_c = 4.9×10^4A/mm^2）を得たことにより、MOD 層が幅方向の特性均一化及び低コスト化への可能性の目処を得た。

1.4.3.4 損失測定

細線化線材の測定から、分割数に依存した交流損失の低減を実験的に明らかにし、最終的には、3m 長の 16 分割 EuBCO-BHO 線材において、交流損失 1/16 以下を得た。また、分流用金属層付マルチフィラメント線材を撚り線化することにより、MRI の励磁のようなゆっくりした磁場変化に対しては、充分交流損失を低減し、磁化を低減できる見込みがあることを実験的に確認した。これにより均一性の高い分割細線化線材を得ることに成功し、磁化損失を測定した結果、損失が目

標値である１/１０以下を達成したことを確認した。

1.5 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【生産性向上】

1.5.1 生産性向上への課題抽出

IBAD 法および PLD 法に基づく Y 系高温超電導線材の製造工程全体を見渡し、スループットに影響する律速工程の洗い出しを行い、現状の課題を抽出し目標値として全工程で 50m/hr を設定した。

1.5.1.2 生産性改善技術開発

超電導層成膜工程については、既に開発していた基板加熱技術により高い均熱性を実現していたが、高線速時における基板温度の安定性を更に向上するために一層の高い均熱性を実現する改良を実施した。その結果、スループット 50m/hr 以上においても成膜可能温度条件が確保され、委託事業である「高磁場コイル用超電導線材の臨界電流密度向上技術の開発」の成果である高速蒸着条件における人工ピン導入超電導膜成膜技術の水平展開により、委託事業目標値である J_c =400A/cm^2（30K、7T）を上廻り、かつ線速 50m/hｒでの成膜を実現することが出来た。

基板表面品質に於いては、品質に影響を与える処理パラメーターを抽出し最適化した結果、50m/hr にて安定した品質実現が可能なことを確認した。

安定化層品質に於いては、一定の寸法精度を保った状態で高速処理を行うべく検討を実施し、良好な条件を選択して均一な品質を維持した状態で、12mm 幅当りに於いて 50m/hr（4mm 幅に於いて 150m/hr 相当)の線速を達成した。

連続非破壊高精度特性測定工程に於いては、長尺に渡って高精度に特性欠陥部の抽出を行えるよう、二次元的で磁化測定が可能な「高速高精度連続磁化測定装置」の設計製作を実施した。

以上の成果に加え、次項の高速特性評価技術を適用することで、従来律速であった工程の製造線速を全て 50m/hr を越す条件で通貫試作を実施し、300m 長の線材長に於いて、委託事業の性能向上目標である平均臨界電流密度値 400A/mm^2(30K、7T）を達成していることを確認した。

1.5.1.3 生産性改善線材の特性評価及び解析

生産性改善線材の特性評価及び解析として、連続非破壊高精度特性測定工程に於いて、単チャンネルである従来の走査ホール素子顕微鏡(SHPM)の磁化検出素子部を多チャンネル化する技術開発により、従来の製造線速 12m/hr で得られていた精度(長手方向精度 1mm)を維持し、かつ、線速 64.8m/hr で測定する大幅な高速化に成功した。

また、委託事業で開発した高速蒸着条件における人工ピン導入線材の長手方向均一性を評価するにあたり、自己磁界下で確認されている優れた長手方向均一性が、高磁場中に於いても維持されているかを長手方向に連続的に確認した。すなわち、高速の製造線速で製作した長尺線材について、2.0 T までの外部磁場中に

於いて、液体窒素温度で長手方向特性分布の測定を高分解能で実施した結果、数mm 長のオーダーで磁場中で数%程度臨界電流密度が上昇あるいは低下する箇所が認められたが、全体としては磁場依存性は極めて少ないことがわかり、人工ピンが長手方向に均一に導入されていることを示唆していることがわかった。

次に広い温度と磁場の領域に於いて、高速製造線速で作製した線材サンプルの臨界電流密度特性を測定した結果、コラム状の人工ピン材料を導入して高磁場中の超電導特性が向上しているにも関わらず、高速製造線速に於いては c 軸相関性が顕著ではなく、各測定温度における最大ピン力密度を与える磁場が一般的なスケール則で近似可能なことを見出した。本技術開発により実現した人工ピンニングセンター導入線材においても、量産線材として高磁場超電導特性の把握が容易であるメリットを確認することが出来た。

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 電力送電用高温超電導用ケーブルシステムの実用化開発【交流】

2.1.1 超電導ケーブルシステムの安全性評価方法の開発

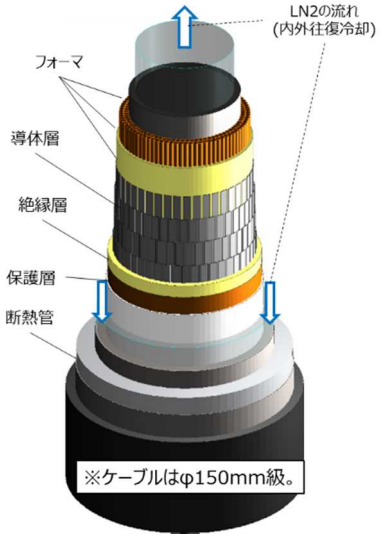
2.1.1.1 短絡電流事故評価

(1) 22kV 級ケーブル短絡電流事故評価

超電導ケーブルの適用先のひとつとして発電機引出線(発電機～昇圧変圧器間)への適用を検討してきた。発電機引出線を超電導化することにより、省スペース化による建設費削減や、送電損失の削減などのメリットが期待される。
超電導ケーブルの実系統へ適用し、系統事故が発生した場合、ケーブルに定格を大きく超える事故電流が流れるが、その際、液体窒素のガス化によるシステム内の急激な圧力上昇やケーブルコアの焼損が生じることが懸念される。このため、22kV/12kA 級の約 10m の超電導ケーブルシステムを開発し、短絡事故を模擬した過電流試験を実施した。

図 2.1.1.1.(1)-1 に超電導ケーブルの概略図を示す。金属管フォーマを用いた単心型コアであり、液体窒素はフォーマ内部とコア外側の流路を往復して、ケーブルを冷却している。また、単心三相の配置において、相間距離を十分大きく取れることを想定すると、他相からの磁場がコアに印加されたとしてもコア Ic 低下などの影響は生じない。よって、本ケーブルは超電導シールドを設けない構造とした。

22kV 級発電機引出線において想定される短絡電流は、最大で AC63kA-0.6sec であるが、設備の関係上、過電流としては DC40kA までの電流を流すこととし、事前解析予想及びサンプルコアを用いた検証試験より、発生エネルギーが想定値となる時間を通電することとした。



	層	諸元
ケーブルコア	フォーマ	SUSパイプ 銅保護導体
	導体層	4層 DI-BSCCO® (Ic:19kA@77K)
	絶縁層	PPLP®
	保護層	銅テープ クラフト紙
断熱管	内管	SUSコルゲート管
	断熱層	SIの積層
	外管	SUSコルゲート管

図 2.1.1.1.(1)-1　22kV/12kA 級超電導ケーブルの構造

図 2.1.1.1.(1)-2 にケーブルシステムの概略図を示す。また、図 2.1.1.1.(1)-3 にシステム外観写真を示す。ケーブルシステムは離隔 1m の往復通電とし、往路に超電導ケーブル、復路にアルミブスバーを用いた。ケーブルシステムに接続した DC 電源に外部制御信号を投入し、電流値や時間を調整した DC 電流を通電した。冷却条件は、ケーブル出入り口の平均温度 77K、流量 42.5L/min、圧力 0.2MPaG とした。さらに、試験時の発生電圧や温度・圧力、流量の変化を測定するために、各計測素子・機器をケーブルシステムに取り付けた。V1 は両端末部の電流リード間の電圧を測定するため、発生電圧には常電導抵抗成分が含まれる。T1、T2 はそれぞれケーブルの入口及び出口温度、P1、P2 はケーブルの入口及び出口の圧力である。Q は流量である。

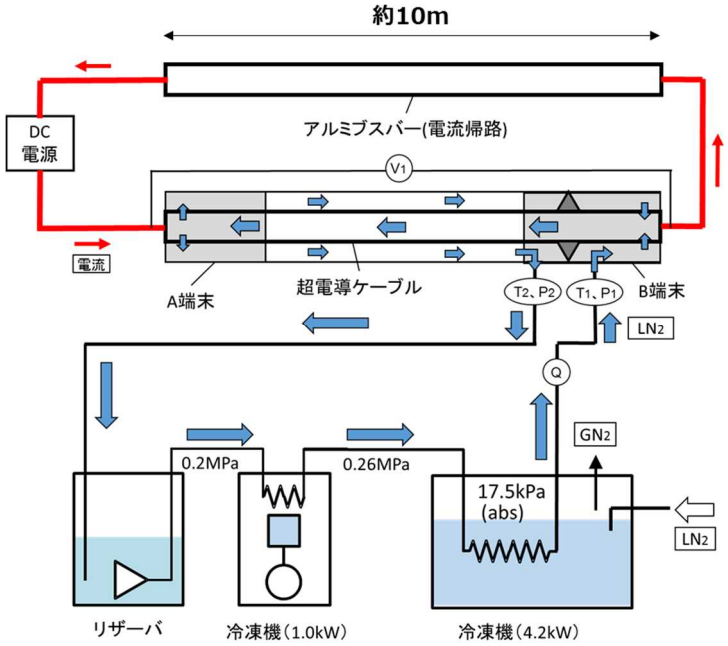


図 2.1.1.1.(1)-2　試験システム構成図

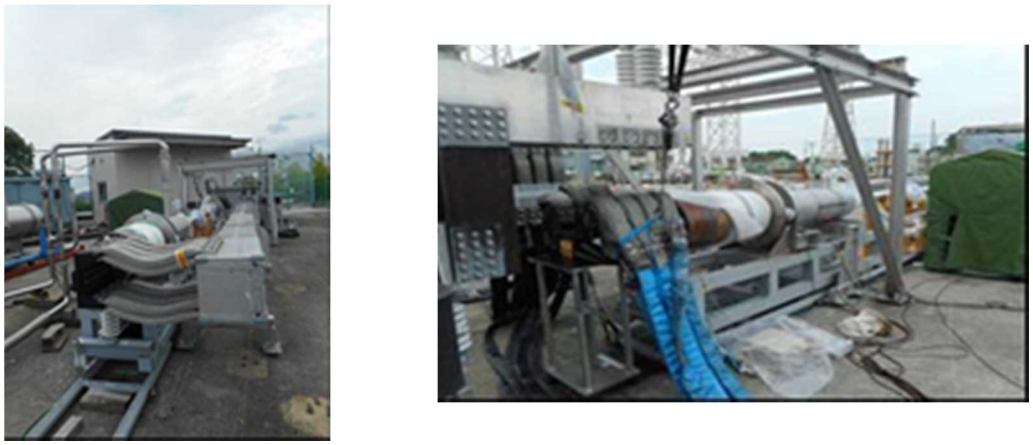


図 2.1.1.1.(1)-3　試験システム外観写真

AC63kA/0.6sec 時の発生エネルギーについて、過電流試験前に測定したケーブルコア臨界電流値（Ic）なども用いて解析導出したところ、193kJ となった。よって、このエネルギー値と同等以上のエネルギーが発生するよう電流値と通電時間を調整し、最終的に DC38kA-5sec の過電流をケーブルシステムに通電した。図 2.1.1.1.(1)-4 に測定した電流・電圧波形を示す。なお、DC 過電流は台形波で投入した。図より、19kA 付近で電圧が急激に立ち上がる様子が確認された。これは、通電電流がケーブルコアの Ic 値 19.5kA 以上となり、電圧が発生したためである。また、電流値がピークに達した後、電圧が上昇している。これは、ジュール損失によりケーブル温度が上昇し、抵抗成分が大きくなったためである。得られた電流・電圧波形より、発生エネルギーを計算したところ、252kJ と目標としたエネルギーである 193kJ よりも大きくなり、より過酷な条件での試験となった。他の試験条件と併せて、過電流試験時の投入エネルギーの特性を図 2.1.1.1.(1)-5 に示す。

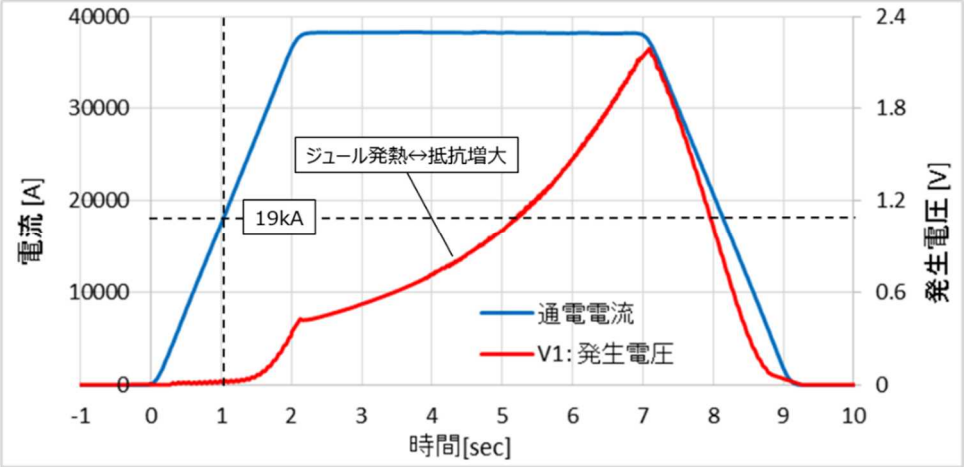


図 2.1.1.1.(1)-4　38kA/5sec 時の電圧、電流波形

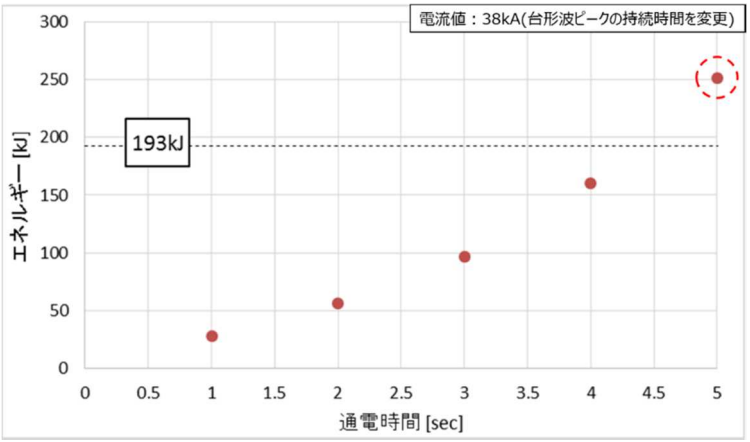


図 2.1.1.1.(1)-5　通電試験の投入エネルギーの特性

図 2.1.1.1.(1)-6、7 に DC38kA-5sec の通電試験前後におけるケーブルシステムの圧力・温度の挙動をそれぞれ示す。過電流試験時、ケーブルシステムの圧力上昇は最大 18kPa 程度であり、過度な圧力上昇は確認されなかった。また、上昇した圧力はいったん復帰し、その後緩やかに再度上昇する様子が確認された。ここでは通電直後の圧力上昇を第 1 ピーク、その後緩やかに上昇する様子を第 2 ピークと呼ぶ。図 2.1.1.1.(1)-6 の温度挙動と併せると、通電時の急激な圧力上昇は、コア内部のジュール発熱により、液体窒素の一部がガス化し、その後すぐに再凝縮したためと考えられる。図 2.1.1.1.(1)-8 に各試験条件におけるフォーマや導体層の温度の解析結果を示す。図より、DC38kA-5sec を通電した場合、導体層の温度が 90K 程度に達する可能性があること、試験時の液体窒素圧力である 0.2MPaG における液体窒素の沸点が同様に 90K 程度であることから、導体層の表面で少量の液体窒素がガス化したものと考えられる。その後の緩やかな圧力上昇はケーブルシステム内の液体窒素温度が上昇し、体積膨張が生じたためと考えられる。ケーブルシステムは液相と気相を内部に含む閉ループであることから、液体窒素が体積膨張を起こすことで気相部の収縮が生じ、圧力が上昇したと考えている。よって、第 1 ピークの要因は液体窒素の蒸発、第 2 ピークの要因は液体窒素の体積膨張と推測した。

短絡電流試験後のケーブルコア Ic は、試験前と同等な値であり、ケーブルに劣化はなかったと判断される。Ic 測定時の I-V 波形を図 2.1.1.1.(1)-9 に示す。尚、試験前の Ic 測定を行った翌日に DC38kA-5sec 通電試験を実施した。その後、数回の通電試験を実施し、その次の日に、十分冷却できていることを確認したあと、試験後の Ic 測定を行っている。

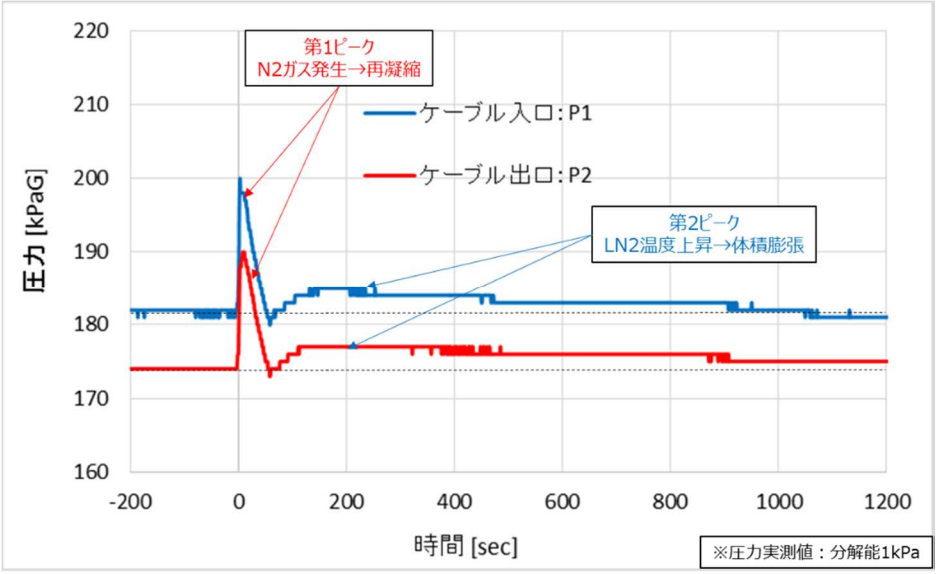


図 2.1.1.1.(1)-6　通電試験時の圧力変化の様子

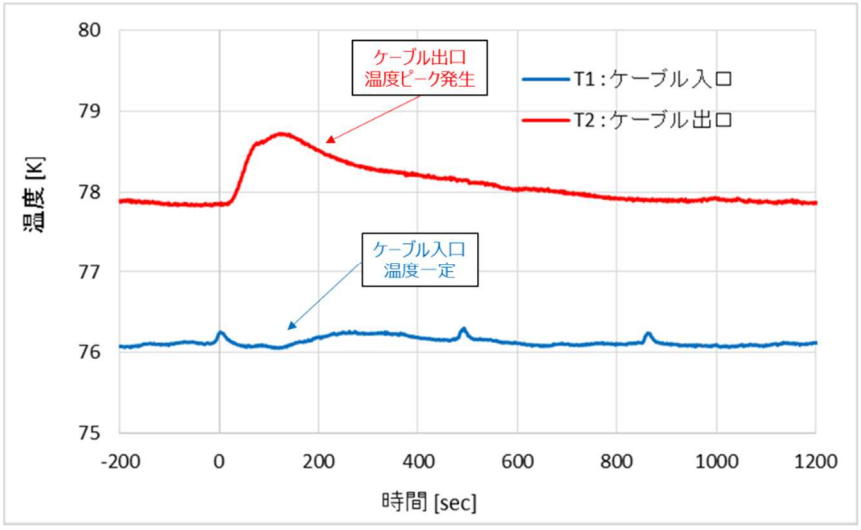


図 2.1.1.1.(1)-7　通電試験時の温度変化(T1, T2)

試験 No	通電条件
①	40kA-0.7sec
②	30kA-1sec
③	38kA-1sec
④	38kA-2sec
⑤	38kA-3sec
⑥	38kA-4sec
⑦	38kA-5sec

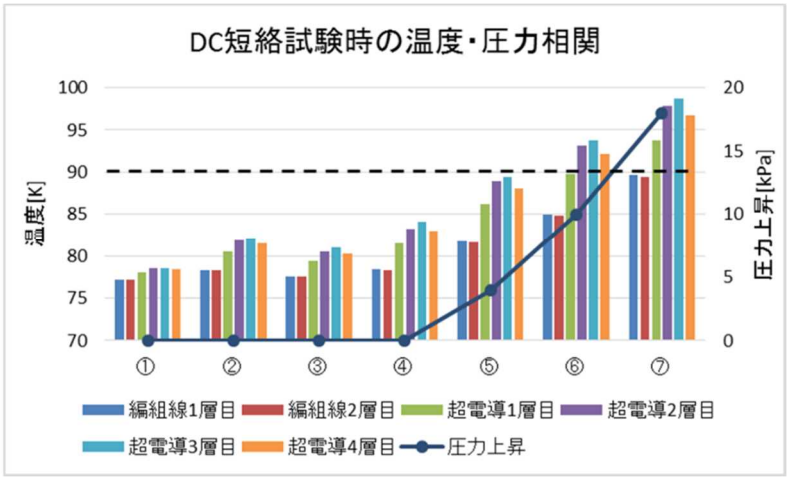


図 2.1.1.1.(1)-8　各試験条件における温度・圧力上昇

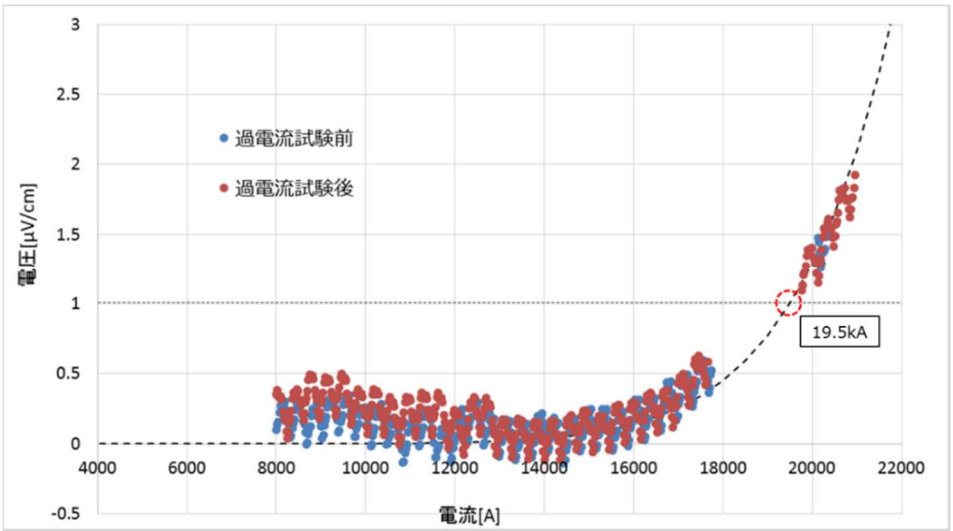


図 2.1.1.1.(1)-9　過電流通電前後の I—V カーブ

2.1.1.1.(2)や 2.1.1.1.(3)に示すような 66kV 級超電導ケーブルシステムにおける検討と同様に、実験結果をもとに第 2 ピークの圧力変化の計算模擬を試みた。計算に使用した液体窒素の体積や流量の条件などを表 2.1.1.1.(1)-1 に示す。実験結果をもとに計算したケーブル部及びリザーバタンク部の液体窒素の体積変化及び気相体積の変化の様子を図 2.1.1.1.(1)-10 に示す。本ケーブルシステムはケーブル長が短いことから、リザーバタンク部の液体窒素の体積変化が支配的となる。さらに気相体積変化から第 2 ピークの圧力変化を導出した。ケーブル入口部における圧力変化について、実測結果と解析結果を比較したものを図 2.1.1.1.(1)-11 に示す。図より、液体窒素の蒸発に起因する第 1 ピークは模擬できないものの、第 2 ピークについては、実測結果と計算結果がよく一致した。

表 2.1.1.1.(1)-1　各部の液相・気相体積

ケーブル部液相	4L/m
リザーバタンク液相	253L
リザーバタンク気相	40L

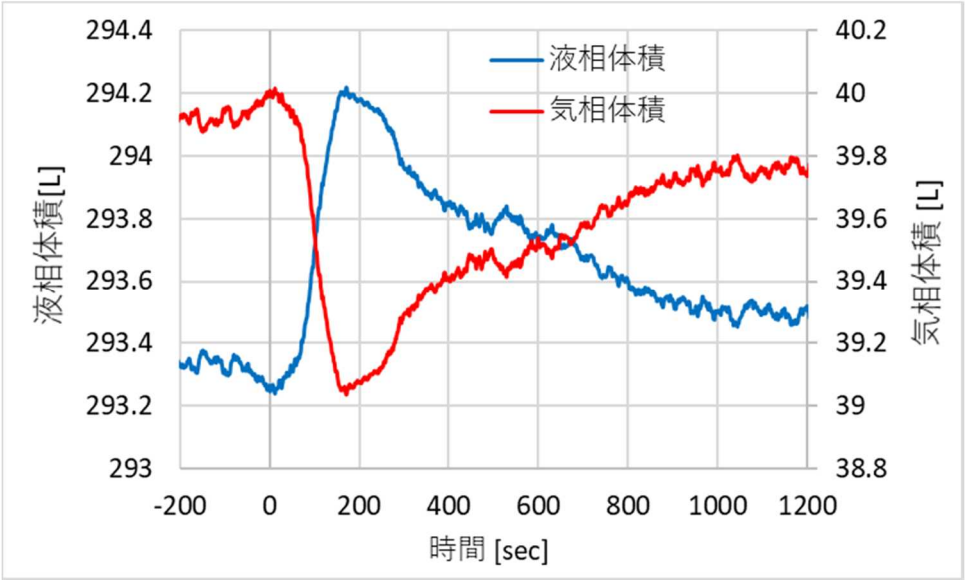


図 2.1.1.1.(1)-10　過電流試験時の液相・気相体積変化

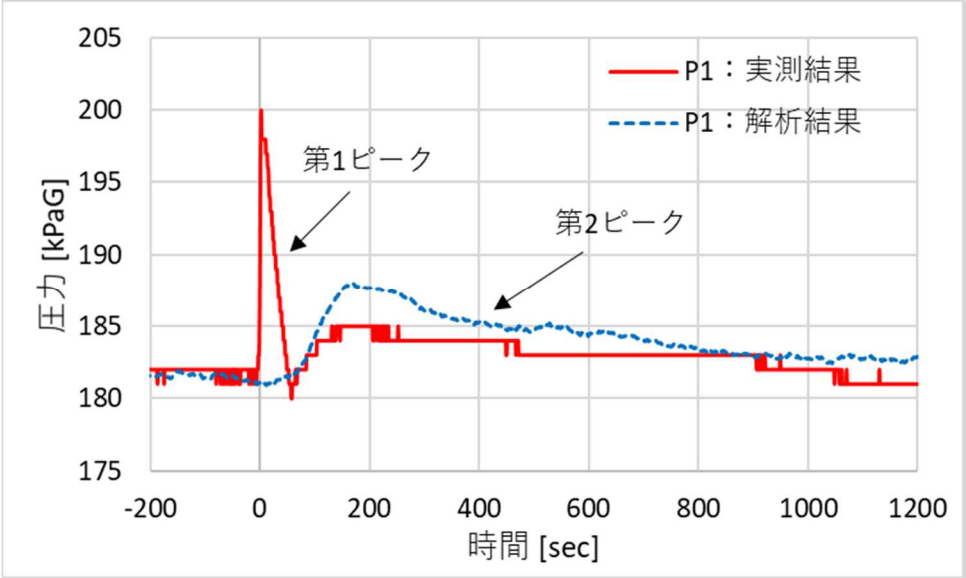


図 2.1.1.1.(1)-11　ケーブル入口部における圧力上昇の様子

本試験は 10m 級の短尺ケーブルシステムの試験結果である。実規模級の発電機引出線で想定されるケーブル長は最大 100m 程度である。よって、本試験結果から実規模級ケーブルにおける圧力変化について考察する。

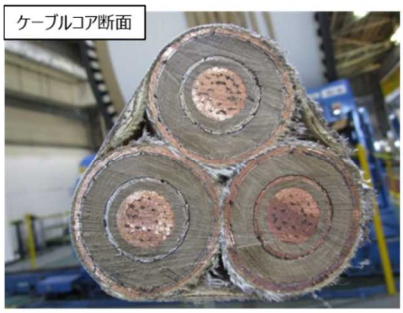
初めに第 1 ピークについて考える。第 1 ピークは液体窒素が少量蒸発し、ガス化したことが要因である。ガス化する液体窒素量はケーブル長に依存するが、実際の短絡電流条件である AC63kA-0.6sec を通電した場合、今回の試験における通電条件である DC38kA-5sec の試験に比べてエネルギーが若干小さくなる。よって、導体層の温度が低くなることに加え、液体窒素の圧力を大きくすることで液体窒素の沸点が大きくなり、蒸発が生じなくなる。よって、第 1 ピークの圧力変化を抑制することは本試験結果から対策立案が比較的容易であると考えられる。次に第 2 ピークについて考える。第 2 ピークは液体窒素の体積膨張によって気相体積が収縮することが要因である。ケーブル長が長いほど液体窒素の体積膨張の総量が大きくなるが、実際のケーブルシステムに備え付けられる冷却システム、特にリザーバタンクの気相体積の方がより大きくなると想定される。よって、液体窒素の体積膨張が気相部に吸収され、第 2 ピークの圧力変化は本試験と同等以下となると予想されるため、冷却システム設計においては液体窒素、ガスの総量を踏まえるべきである、という知見を得た。

以上より、22kV 超電導ケーブルシステムにおける短絡事故を模擬した過電流試験を実施し、圧力上昇が軽微かつ抑制が容易であること、ケーブルの Ic 特性に変化が無く健全性が保たれることを確認した。

(2) 66kV 級ケーブル短絡電流事故評価（住友電工）

66kV 級超電導ケーブルを実系統に導入した場合においても通常銅ケーブルと同様に、系統事故発生時には定格電流を超える過大な電流がケーブルに流れる。特に都市部における変電所間を結ぶようなケーブルは発電機引出線とは異なり、km 級の長尺ケーブルであり、短絡事故時の温度や圧力変化がより大きくなることが想定される。km 級の超電導ケーブルにおける短絡事故を試験により検証することは非常に困難なため、現象を模擬するような解析コードの開発が必要である。ここでは、解析コードの開発に向けた基礎特性の取得のため、66kV 級の40m 超電導ケーブルシステムの短絡電流模擬試験を行い、温度や圧力特性を取得した。また、ケーブルシステム全体の構成を加味した短絡事故の解析コードを用いて試験結果の模擬に取り組んだ。

図 2.1.1.1.(2)-1 に試験に用いた 66kV 級超電導ケーブルの構成を示す。ケーブルは三心一括型であり、磁場の漏洩を防ぐために超電導シールド層を有している。本試験では、短絡事故を模擬するために短絡電流を二相往復で通電した。このため、3 本のコアのうち、1 本は超電導線の代わりに銅ダミー線で構成された電流が印加されないダミーコアとした。



	層	諸元
ケーブルコア	フォーマ	銅撚り線
	導体層	2層 DI-BSCCO® (Ic:4240A)
	絶縁層	PPLP®
	シールド層	1層 DI-BSCCO (Ic:5060A)
	保護層	銅テープ クラフト紙
断熱管	内管	SUSコルゲート管
	断熱層	SIの積層
	外管	SUSコルゲート管

図 2.1.1.1.(2)-1　ケーブル構造

試験に向けて構築した 40m 級超電導ケーブルシステムの外観写真を図 2.1.1.1.(2)-2、システム構成の概略図を図 2.1.1.1.(2)-3、各部のセンサー取り付け位置を図 2.1.1.1.(2)-4 に示す。試験は二相往復通電で行うため、端末 A 側でケーブルコアを電源と接続し、端末 B 側でケーブルコアを短絡している。液体窒素は端末 B 側から注入し、ケーブル内を流れ、端末 A 側から冷却システムへ戻っていく循環冷却方式とした。冷却条件は、入口側液体窒素温度を 70K、流量を 43.2L/min、リザーバ圧力を 0.2MPaG とした。短絡電流は様々な条件で実施し、31.5kA-2sec とエネルギーが同等となる 16kA-8.4sec を最大条件とした。

短絡電流試験時の温度や圧力の変化をケーブル内に配置した測温抵抗体や端末部に取り付けた圧力計で測定した。



図 2.1.1.1.(2)-2　66kV 試験システム外観写真

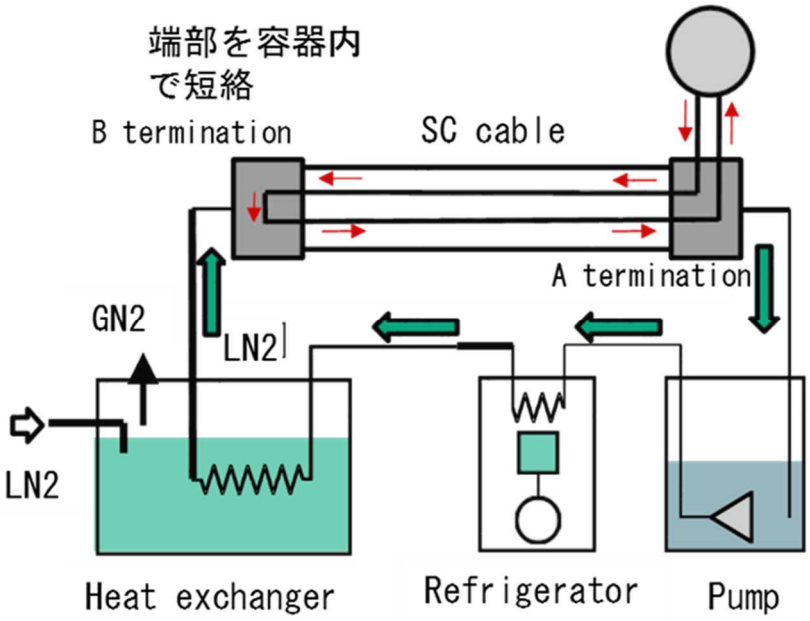


図 2.1.1.1.(2)-3　66kV 試験システム外観構成図

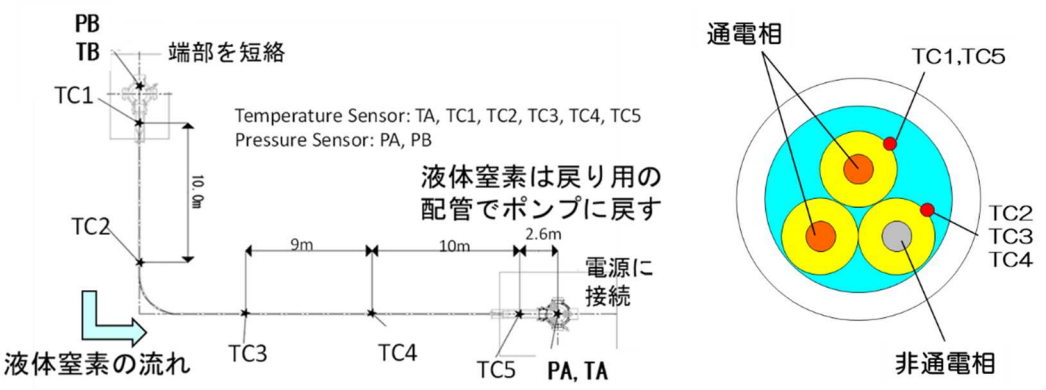


図 2.1.1.1.(2)-4　センサー等配置図

16kA-8.4sec を通電した際の試験結果の内、ケーブル内各部の温度変化の様子を図 2.1.1.1.(2)-5 に示す。また、2.1.1.1.(3)に示す解析コードを用いた解析結果も図に記載している。ケーブル各部の液体窒素温度は入口側から出口側に向かって徐々にピーク値が現れ、その値も大きくなる。液体窒素が流れていき、ケーブル部で発生した熱を受け取っていくためである。解析結果について、ピーク値は多少ずれているが、実測結果を概ね模擬できている。

試験結果の内、入口部と出口部で測定した圧力を図 2.1.1.1.(2)-6 に示す。実測した圧力では、通電直後の急激な圧力上昇と時間経過後の緩やかな圧力上昇の 2 種類が確認された。これらをそれぞれ第 1 ピーク、第 2 ピークと呼ぶ。これらの圧力上昇について考える。

第 1 ピークはケーブルコア通電直後に発生していることから、液体窒素の蒸発が要因と考えられる。短絡電流が流れることで導体層やシールド層が発熱し、温度が上昇する。0.2MPaG 下における液体窒素圧力が 90K 程度であることから、これらの通電層の温度が 90K を超える場合、液体窒素が蒸発するためである。図 2.1.1.1.(2)-7 に各試験条件における圧力の実測値と導体層及びシールド層の温度の計算値を示す。図より、特にシールド層の温度が 90K を超えたところから、圧力の実測結果が上昇していることが判る。これより、短絡電流が流れた際に一部の液体窒素が蒸発したことが圧力上昇の要因である。

一方、第 2 ピークに関しては、通電時から遅れて発生している。試験から時間が経過すると液体窒素がケーブル部の熱を吸収し、その温度が上昇する。液体窒素の温度が上昇すると体積が膨張するが、ケーブルシステムは液相と気相を含む閉ループであることから、液相の体積膨張の分、気相の体積が収縮する。よって、ケーブルシステムの圧力が上昇する。また、ケーブルシステム内に冷凍機が存在することから、温度が上昇した液体窒素が冷却され、再び液体窒素の体積が収縮する。しばらく時間が経過すると液体窒素の温度が試験前の初期状態に復帰することから、圧力も初期状態に復帰する。これらの様子が第 2 ピークの様

子と一致することから、液体窒素の体積膨張が第 2 ピークの圧力上昇の要因と推定される。

図 2.1.1.1.(2)-6 に、2.1.1.1.(4)に示す手法で求めた圧力変化の解析結果を併せて示す。解析では第 1 ピークを十分は模擬できていないものの、第 2 ピークについては圧力がゆっくりと上昇し、その後初期状態に復帰する様子を模擬できた。なお、短絡試験前後でケーブルコアの Ic を測定し、変化が無いことを確認した。測定した IV 波形を図 2.1.1.1.(2)-8 に示す。

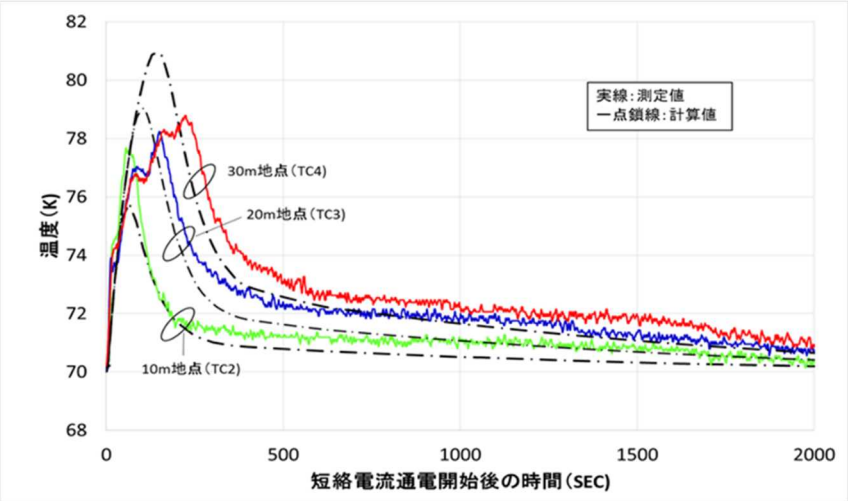


図 2.1.1.1.(2)-5　温度編の実測値とシミュレーション結果

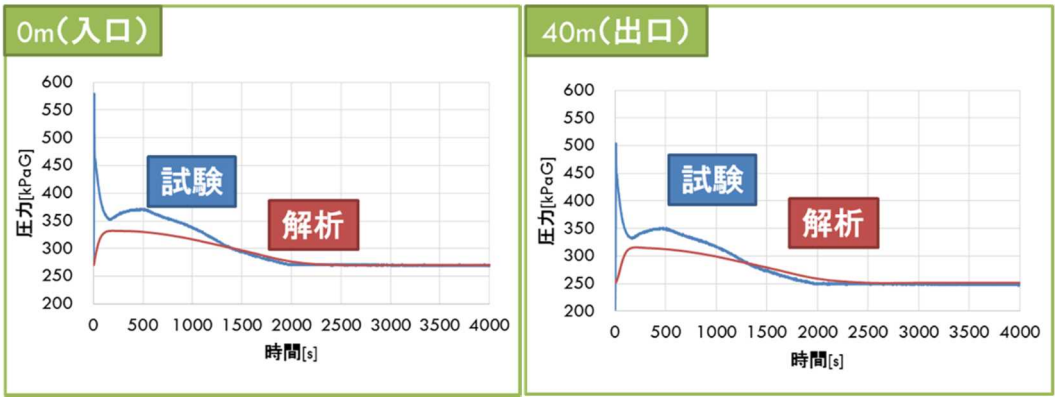


図 2.1.1.1.(2)-6　圧力変化の実測値とシミュレーション結果
（左：入口側、右：出口側）

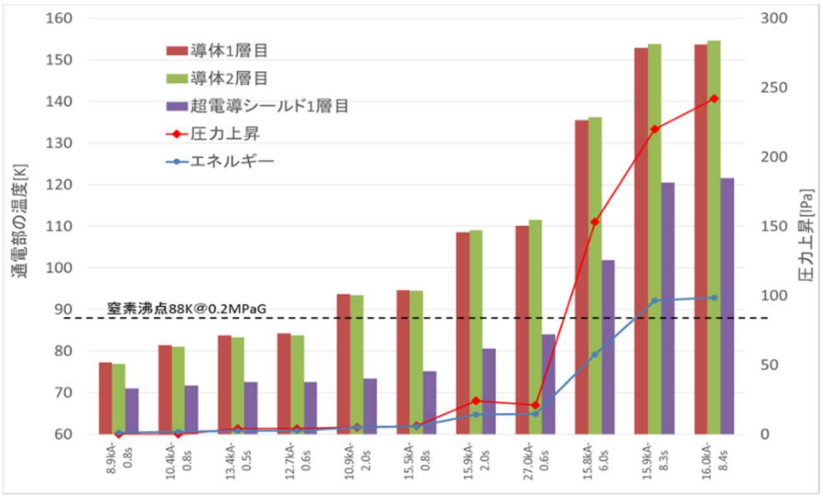


図 2.1.1.1.(2)-7　各試験電流での実測圧力とシールド部温度

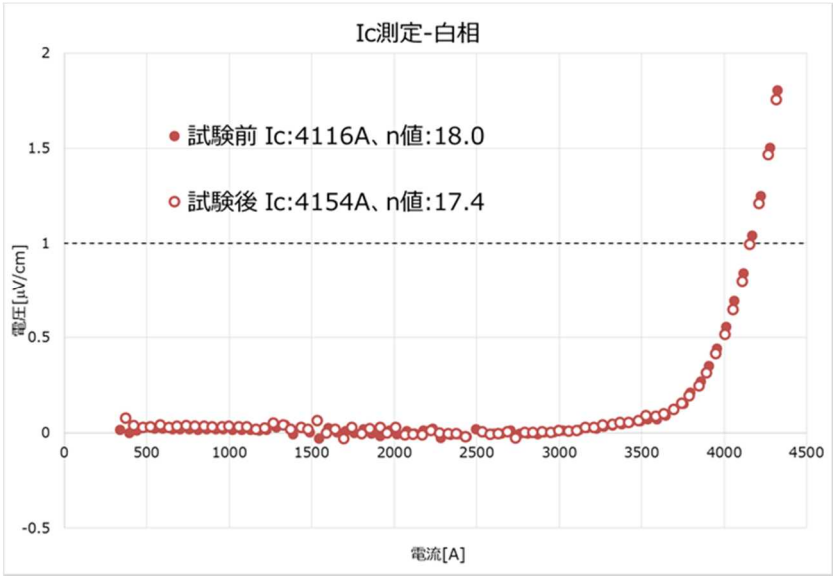


図 2.1.1.1.(2)-8　短絡試験前後の Ic 特性

圧力上昇の第 2 ピークについて、実測結果と解析結果のピーク値が異なるのは、実測結果には第 1 ピーク発生時に生じた窒素ガスの影響が残存しているためと考えられる。このため、第 1 ピークの発生を抑制することでその後の第 2 ピークの圧力上昇も抑制できると考えられる。これは、液体窒素を加圧することで沸点を高くするか、通電層のうち、特にシールド層における銅ダミー層の断面積を大きくし、ジュール発熱を抑制すればよい。前者は機器や断熱管などの耐圧の関係で圧力値の上限が存在すること、後者はケーブルコアの断面積が大きくなり、超電導ケーブルのコンパクト性が低下することが課題である。

(3) 66kV 級超電導ケーブルのシミュレーション（住友電工、早稲田大学）

km 級の超電導ケーブルシステムにおける短絡事故の影響を評価するため、短絡事故時の温度や圧力変化を模擬する解析コードの開発が必要である。ここでは 66kV 級超電導ケーブルの温度と圧力の解析手法を記載した後、3km のケーブルシステムで短絡事故が発生した場合の解析検討を実施し、その解析結果を考察することで安全性ガイドラインへの反映事項としてまとめた。

66kV 級超電導ケーブルの温度と圧力の解析手法を示す。

（ｉ）温度解析手法

66kV 超電導ケーブルは三心一括型構造を採り、真空断熱管内に挿入されている。ケーブルコアは中心から順に、銅フォーマ、超電導導体層(以下、「HTS 導体層」)、絶縁層、超電導シールド層(以下、「HTS シールド層」)、銅シールド層、保護層を持つ。絶縁層には polypropylene laminated paper(以下、「PPLP」)、保護層にはクラフト紙を使用している。なお、過去の短絡電流試験結果より、銅フォーマは液体窒素が浸み込まない構造とした。

解析に際して構造・物性を細分化して設定すると、計算が煩雑となるため、構造や各部の物性値などを考慮し、以下の 3 つの仮定を設けることで計算を簡略化した。

(a)．銅フォーマ/HTS 導体層、及び HTS シールド層/銅シールド層をそれぞれ銅層 1 層の導体、シールド層と見なす。

(b)．銅の熱伝導率が十分大きいとし、導体層及びシールド層の温度は径方向で一様とする。

(c)．絶縁層・保護層の熱伝導率は銅に比べて極めて小さいとして長手方向の伝熱を無視する。

モデルケーブルの断面図について、仮定(a)と併せて図 2.1.1.1.(3)-1 に示す。

温度解析はケーブルを長手方向に分割し、各要素で半径方向と長手方向の 2 次元で実施した。図 2.1.1.1.(3)-2 にケーブル長手方向の断面図と熱の流れを示す。また、表 2.1.1.1.(3)-1 に使用した値を示す。横軸が長手方向、縦軸が半径方向であり、添え字の r、l はそれぞれ半径方向と長手方向の熱の流れを示す。c、p、s、wは、それぞれ導体層、PPLP、シールド層、ケーブルコア壁面を示し、jは短絡事故によるジュール熱を示す。Q_hはコルゲート管外部からの侵入熱、Q_{ht}はケーブルコア壁面から冷媒液体窒素に伝わる熱伝達を表している。

表 2.1.1.1.(3)-1　短絡解析のパラメータ

記号	項目	値
r_0	導体層の半径	12.38 mm
r_1	絶縁層の半径	19.95 mm

r_2	シールド層の半径	22.09 mm
r_3	保護層の半径	23.00 mm
r_4	断熱管内管の内径	53.50 mm
k_p	PPLP の熱伝導率	0.05 W/m/K
f	ファニングの摩擦係数	0.0175

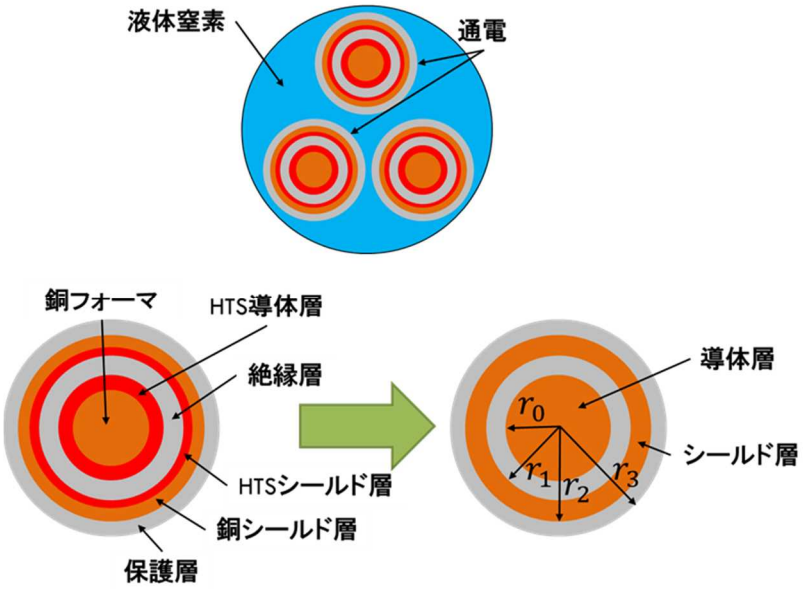


図 2.1.1.1.(3)-1　超電導ケーブルの断面図

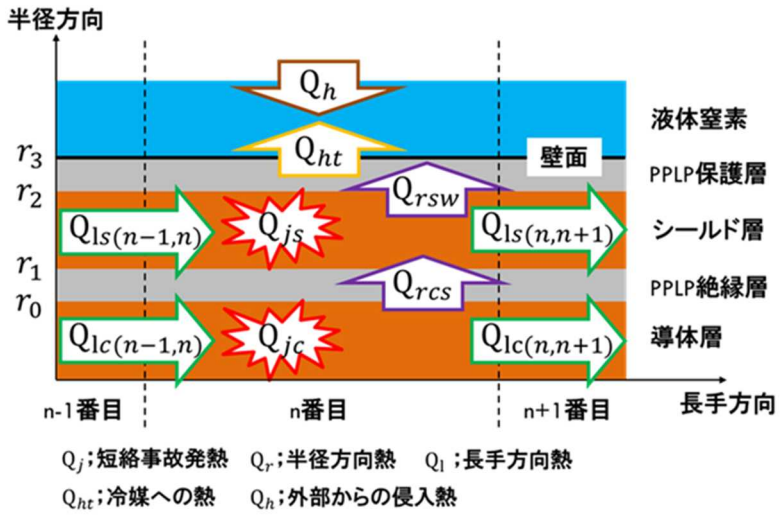


図 2.1.1.1.(3)-2　ケーブル内の熱の流れ

図 2.1.1.1.(3)-2 における各熱量を求めるために、以降の式を計算する。式(1)、(2)はそれぞれ短絡電流通過時の導体層、シールド層の熱伝導方程式である。

$$\rho_{cu} c_{cu} \frac{\partial T_c}{\partial t} = k_{cu} \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + Q_{jc} - Q_{rcs} + Q_{lc} \tag{1}$$

$$\rho_{cu} c_{cu} \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_{cu} \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + Q_{js} + Q_{rcs} - Q_{rsw} + Q_{ls} \tag{2}$$

式中の T は温度、ρ は密度、c は比熱、k は熱伝導率を示す。式(1)、(2)の熱伝導方程式は、径方向の熱のやり取りは外部からの熱量として式に挿入し、周方向に温度分布は無いと仮定し、長手方向一次元の非線形熱伝導方程式とみなす。有限差分法でこれを解くことで各部の温度を導き出すことができる。また、図 2.1.1.1.(3)-2 の各熱量は以下の式で導かれる。ただし、Q_{jc}、Q_{js}、Q_h はそれぞれ導体層の発熱、シールド層の発熱、断熱管の侵入熱であることから、定数として与える。

$$Q_{rcs}|_{t-\Delta t}^{n} = \frac{2\pi k_p (T_c|_{t-\Delta t}^{n} - T_s|_{t-\Delta t}^{n})}{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)} \tag{3}$$

$$Q_{rsw}|_{t-\Delta t}^{n} = \frac{2\pi k_p (T_s|_{t-\Delta t}^{n} - T_w|_{t-\Delta t}^{n})}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} \tag{4}$$

$$Q_{lc}|_{t}^{n} = \frac{S_c}{dl} k_{cu} \{(T_c|_{t-\Delta t}^{n-1} - T_c|_{t-\Delta t}^{n}) - (T_c|_{t-\Delta t}^{n} - T_c|_{t-\Delta t}^{n+1})\} \tag{5}$$

$$Q_{ls}|_{t}^{n} = \frac{S_s}{dl} k_{cu} \{(T_s|_{t-\Delta t}^{n-1} - T_s|_{t-\Delta t}^{n}) - (T_s|_{t-\Delta t}^{n} - T_s|_{t-\Delta t}^{n+1})\} \tag{6}$$

$$Q_{ht} = 2\pi r_3 h_t (T_w - T_{LN2}) \tag{7}$$

dl は要素長、T_w はケーブルコア表面温度、T_{LN2} は冷媒液体窒素の温度を示す。r_0~r_3 は表 2.1.1.1.(3)-1 の通りである。h_t はケーブルコア表面から冷媒液体窒素への熱伝達係数を示す。冷媒の流れは乱流であるため h_t は式(8)で導かれる。

$$h_t = \frac{0.023 Pr^{0.4} Re^{0.8} k_{LN2}}{De} \tag{8}$$

Pr、Re はそれぞれプラントル数、レイノルズ数を示し、De は水力直径を示す。

ケーブルコア壁面温度は、保護層における半径方向熱流速が壁面における冷媒への強制熱伝達による熱流速と等しいと仮定して導き出す。冷媒の物性値は流体の特性を計算するコンピュータプログラムである GASPAK を用いて計算した。GASPAK は二つのパラメータ（圧力、温度、エンタルピー等）を入力することで、その他の物性値を出力するものであり、本研究ではエンタルピーと圧力を入力パラメータとした。事故発生から t 時間後の n 番目の要素におけるエンタルピーH及び圧力 P を導く式をそれぞれ示す。

$$H|_t^n = H|_{t-\Delta t}^n + \frac{2Q_{ht}|_{t-\Delta t}^n + Q_h}{V_{LN2}\,\rho_{LN2}\big|_{t-\Delta t}^n}\Delta t + \frac{v|_{t-\Delta t}^n}{dl}\Delta t(H|_{t-\Delta t}^{n-1} - H|_{t-\Delta t}^n) \quad (9)$$

$$P|_t^n = P\big|_t^{n-1} - \frac{2f\,\rho_{LN2}\big|_t^{n-1}(v|_t^{n-1})^2 dl}{De} \quad (10)$$

V_{LN2} は冷媒液体窒素の要素体積、ρ_{LN2} は冷媒の密度、v は流速、f はファニング摩擦係数、De は水力直径をそれぞれ表す。

（ⅱ）圧力解析手法

式(10)はケーブル長手方向における圧力損失を示すものである。しかし、実際のケーブルシステムでは、長手方向に対する圧力変化の他、システム全体のベース圧力が変化することが考えられる。これは、ケーブルシステムは閉ループ内に液相部と気相部を有すること、短絡事故時に液相部の温度が上昇し体積膨張を起こすことで閉ループ内の気相部が逆に圧縮され、圧力が上昇し得るためである。このような圧力計算はケーブル部だけではなく、端末部や冷却システムの構成も考慮する必要がある。

図 2.1.1.1(3)-3 に端末部や冷却システムを考慮したケーブルシステムの概略図を示す。ケーブル入口部の冷媒圧力 P_{in} を求めた後、式(10)を長手方向に順次適用することでケーブル全体の圧力を求めることができる。よって、式(11)を用いて入口部の冷媒圧力を求める。

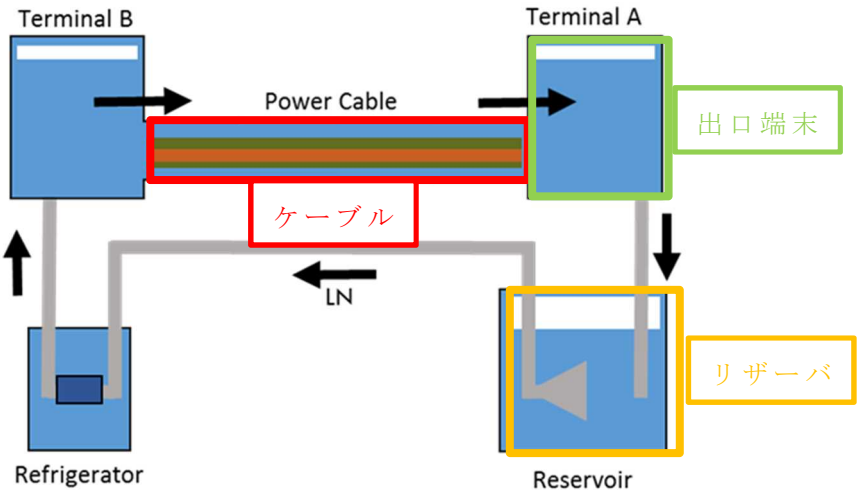


図 2.1.1.1.(3)-3　ケーブルシステム概略図

$$P_{in} = \frac{P_0(1 + \frac{\Delta V_{Gas}}{V_0})}{1 - \Delta V_{Liq}/V_0} \tag{11}$$

ΔV_{Liq}と ΔV_{Gas}は初期状態を基準としたときの冷却システム全体における液体体積変化量と気体体積変化量、V_0 は初期状態での冷却システム全体における気体体積を表している。

まず、ΔV_{Liq}を求めるために、図 2.1.1.1.(3)-3 で示した部分の冷媒の温度変化を算出し、そこから冷媒の密度変化を求めた。また、蒸発や凝縮による冷媒の物質量の変化が存在しないと仮定し、密度変化から体積変化を求めた。このとき、入口端末（Terminal B）は初期条件で冷媒温度一定のため考慮していない。

出口端末の冷媒温度は、ケーブル部出口地点の冷媒が流量分だけ出口端末部に流れ込み、端末内からは流量分だけ流れ出て、端末内で流れ込んだ冷媒が瞬時に混ざり温度は均一になるという仮定のもと以下の式を用いて計算した。

$$T_{LN2}|_t^A = \frac{T_{LN2}|_{t-\Delta t}^A \times (V_{LN2}|_{t-\Delta t}^A - V_L) + T_{LN2}|_{t-\Delta t}^{1500} \times V_L}{V_{LN2}|_{t-\Delta t}^A} \tag{12}$$

ただし、添え字 A は出口端末（Terminal A）を表し、V_Lは刻み時間での流量を示す。これにより、求めた冷媒温度と冷媒圧力を使って GASPAK より出口端末の冷媒密度をそれぞれ算出している。ただし、冷媒圧力はケーブル部出口地点の値をどちらにおいても使っている。そして、求めた冷媒密度から以下の式でそれぞ

れの冷媒体積を求めている。また、ケーブル部の n 番目の要素での冷媒体積の求め方も示す。

$$V_{LN2}|_t^A = V_{LN2}|_{t-\Delta t}^A \times \frac{1/\rho_{LN2}|_t^A}{1/\rho_{LN2}|_{t-\Delta t}^A} \tag{13}$$

$$V_{LN2}|_t^n = V_{LN2}|_{t-\Delta t}^n \times \frac{1/\rho_{LN2}|_t^n}{1/\rho_{LN2}|_{t-\Delta t}^n} \tag{14}$$

(iii)長尺ケーブルのシミュレーション

実規模級のシステムに関する解析として、3km の超電導ケーブルシステムに関する解析を行った。なお、短絡事故は通電電流が流れている状態を初期状態として発生する。2.1.1.1.(2)に示した無負荷状態を初期状態とした 40m 級ケーブルシステム試験とは異なるため、事前に通電による損失発生を考慮した温度解析を実施した。解析時に用いたパラメータを表 2.1.1.1.(3)-2 に示す。超電導ケーブルは単長を 500m とし、6 本使用する。ケーブル部の侵入熱や交流損失、誘電損失などの他、ケーブル間ジョイントで発生するジュール損失と外径増大に伴う侵入熱の増加も考慮した解析とした。解析した温度分布を図 2.1.1.1.(3)-4 に示す。図より、通電損失や誘電損失を考慮しなかった場合に比べてケーブル出口部の温度は、5.3K 高くなると計算された。なお、事故後に遮断を行ったとして短絡事故後の電流をゼロ(無負荷状態)としている。

表 2.1.1.1.(3)-2　3km ケーブル解析の条件

項目	値
ケーブル部入口温度	67 K
液体窒素の流量	60 L/min
断熱管の侵入熱（Q_h）	2.0 W/m
短絡時の導体層発熱（Q_{jc}）	73.97 kW/m/ph
短絡時のシールド層発熱（Q_{js}）	88.62 kW/m/ph
通常運転時の導体層交流損失	0.6 W/m/ph
通常上運転時のシールド層交流損失	0.3 W/m/ph
誘電損失	0.1 W/m/ph
ジョイント部のジュール損失	10 W/unit
ジョイント部の侵入熱	50 W/unit

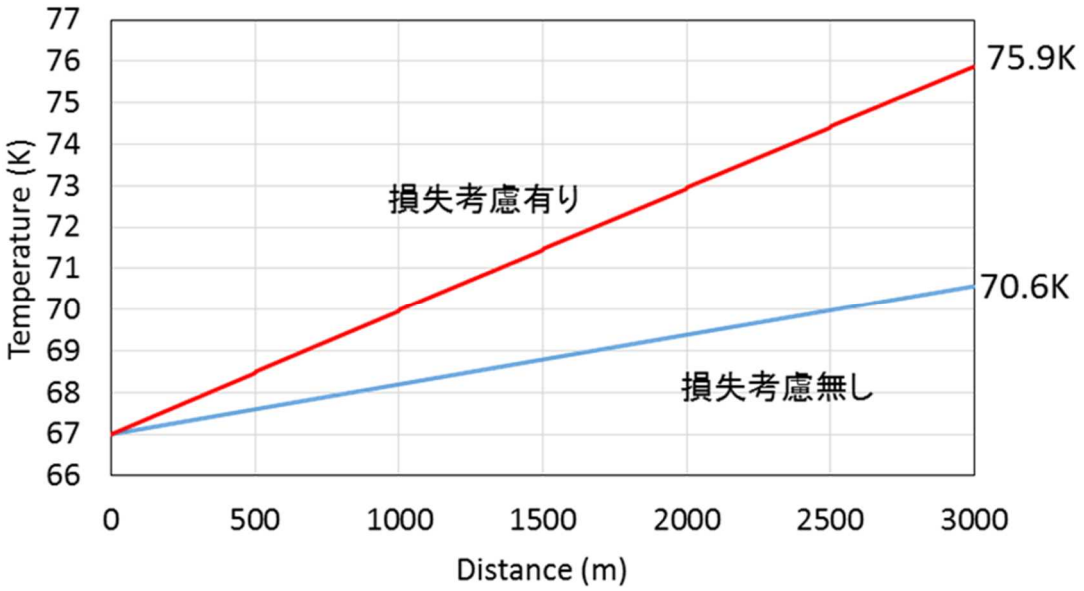


図 2.1.1.1.(3)-4　3km ケーブルの通常運転時の温度分布

3km ケーブルに 31.5kA-2sec の短絡電流が流れた際の温度、圧力の解析を行った。解析時の条件については、導体層とシールド層の発熱量を予め計算し、定数として与えている。この値を表 2.1.1.1.(3)-2 に示す。ここで、気相体積は液体窒素の体積膨張による気相部の体積収縮の割合に影響を与え、気相体積が大きいほど、気相部の体積変化の割合が小さく、圧力変化が生じにくい系となる。一方、短絡事故発生時の液体窒素の蒸発を抑制するためには、液体窒素の圧力を大きくし、沸点を上昇させることが考えられる。しかし、圧力をあげすぎると断熱管の弾性限界を超え、塑性変形や破損を引き起こす可能性がある。このため、液体窒素の蒸発を抑制する程度に初期圧力を大きくし、かつ短絡事故時の圧力変動が断熱管の変形に影響を与えないような気相体積の組み合わせを選定する必要がある。ここでは表 2.1.1.1.(3)-3 に示すように、圧力と気相体積をパラメータとし、３パターンの解析を実施した。

表 2.1.1.1.(3)-3　3km ケーブル短絡解析時の圧力・気相体積

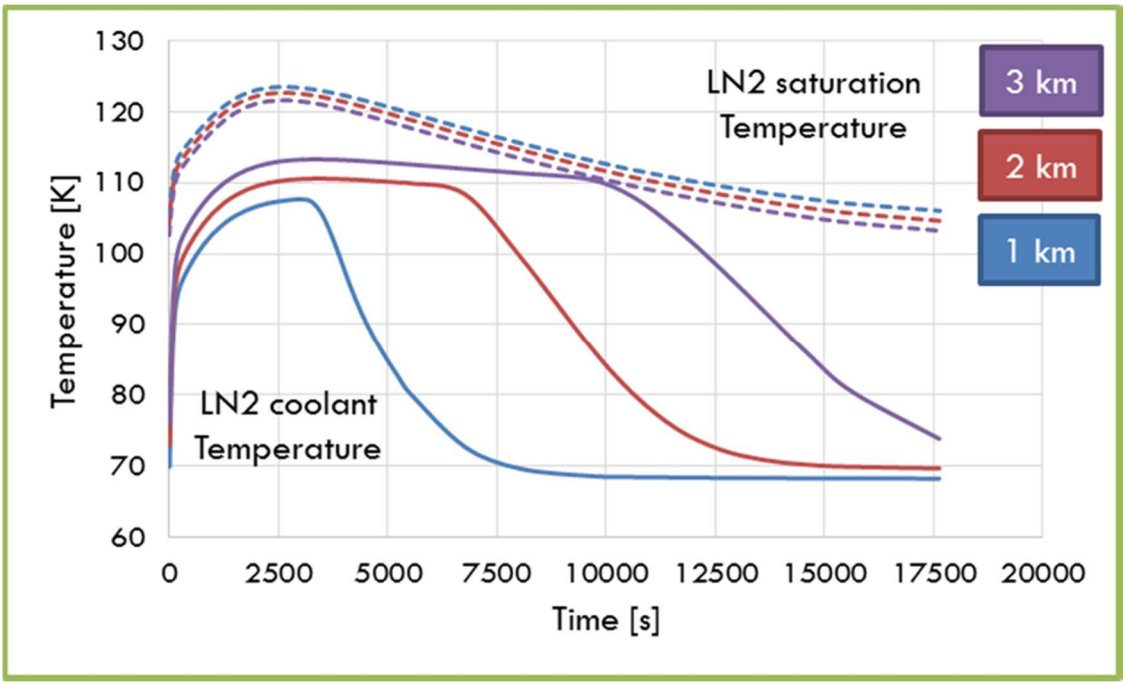
番号	初期圧力［kPaG］	初期気相体積［L］
①	1100	5500
②	1500	6500
③	1500	10000

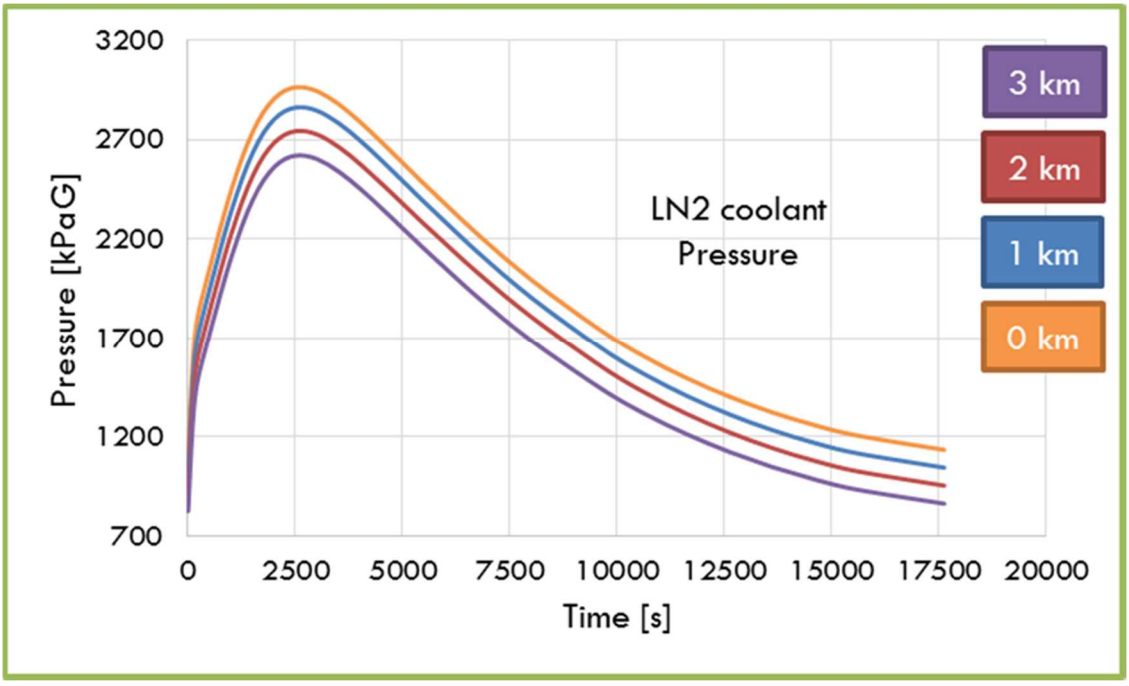
表 2.1.1.1.(3)-3 に示す条件①～③について、それぞれの条件で解析した温度、圧力変化の様子を図 2.1.1.1.(3)-5(a)～(c)に示す。初めに温度解析結果について考察する。温度解析の結果には、ケーブル各部の温度変化の他、液体窒素の飽和温度の変化も点線で同時に示している。条件①～③全てにおいて液体窒素温度が飽和温度を下回っており、液体窒素の蒸発は生じない。ただし、飽和温度に対する裕度は①～③それぞれの条件で異なる。液体窒素温度が最も上昇し、かつケーブル長手方向で最も圧力が低下し、飽和温度が低下するのはケーブル出口部（@3000m）であるので、この点で比較すると、表 2.1.1.1.(3)-4 に示す通り、各部の裕度は、①は約 0.5K、②は約 4.5K、③は約 2.0K となる。

表 2.1.1.1.(3)-4 各ケースにおけるケーブル液体窒素温度と飽和温度（@3000m, 9630sec）

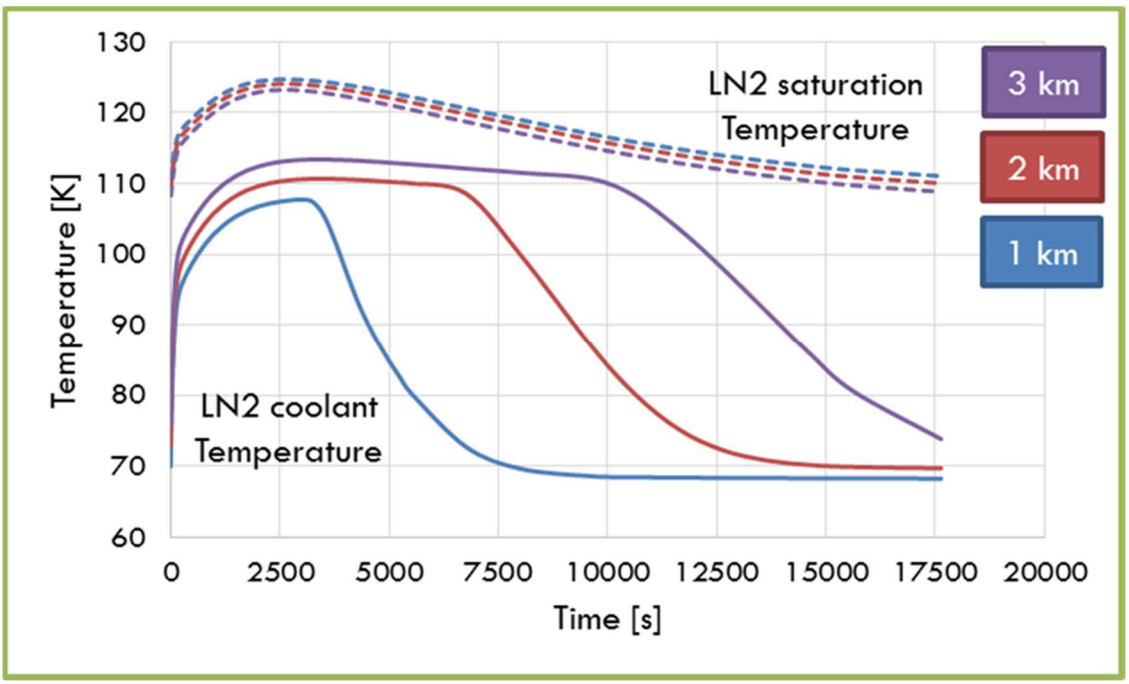
ケース番号	液体窒素温度（計算値）	飽和温度@圧力	温度差（裕度）
①	110.5 K	111 K@1.45MPaG	0.5 K
②	110.5 K	115 K@1.84MPaG	4.5 K
③	110.5 K	112.5K@1.59MPaG	2.0 K

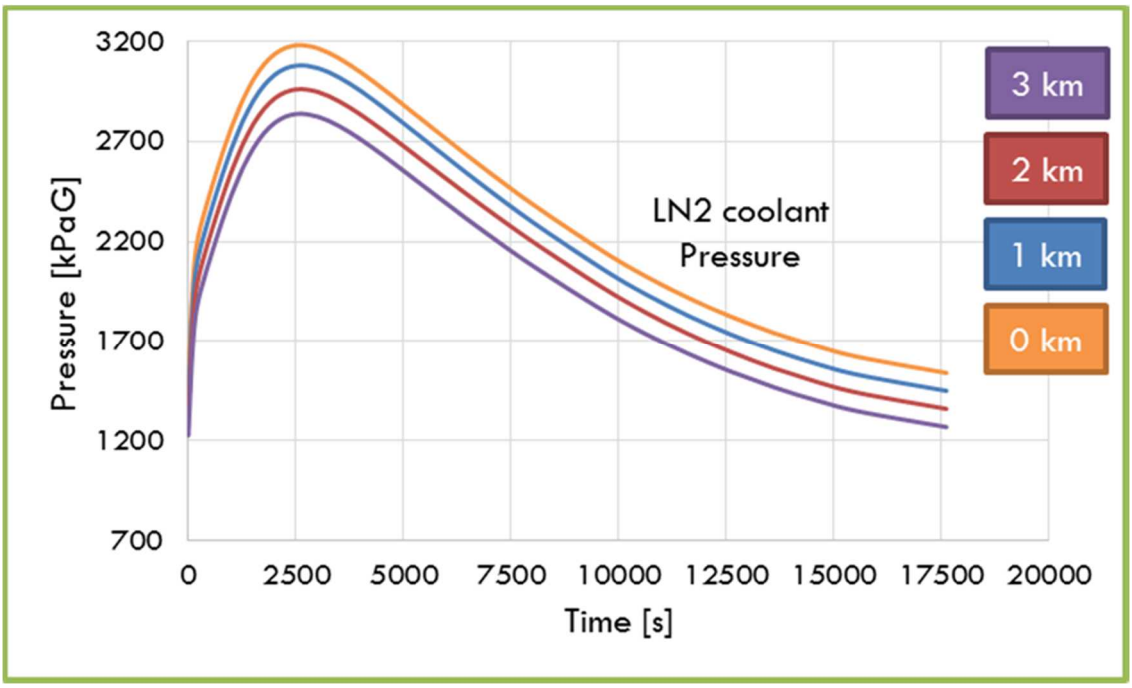
次に、圧力の解析結果について考察する。圧力の最大値はケーブル入口部であり、短絡電流が流れた後、ケーブル内の液体窒素の体積が最大となる時間で圧力がピーク値を取る。圧力ピーク値は①は約 3,000kPaG(3.0MPaG)、②は約 3,200kPaG(3.2MPaG)、③は約 2,400kPaG(2.4MPaG)となる。特に②と③では、初期圧力は同一であるが、③の方が初期気相体積は大きく、③の圧力変化が緩やかで、圧力ピーク値は下がるが、飽和温度が上昇しにくくなるため、液体窒素温度と飽和温度の差が小さくなっている。このことから、初期圧力を大きくし、かつ初期気相体積を大きくする方が、液体窒素の蒸発による圧力上昇を抑制する効果があるといえる。


130
120
110
100
90
80
70
60
Temperature [K]
0
2500
5000
7500
10000
12500
15000
17500
20000
Time [s]
LN2 saturation
Temperature
LN2 coolant
Temperature
3 km
2 km
1 km

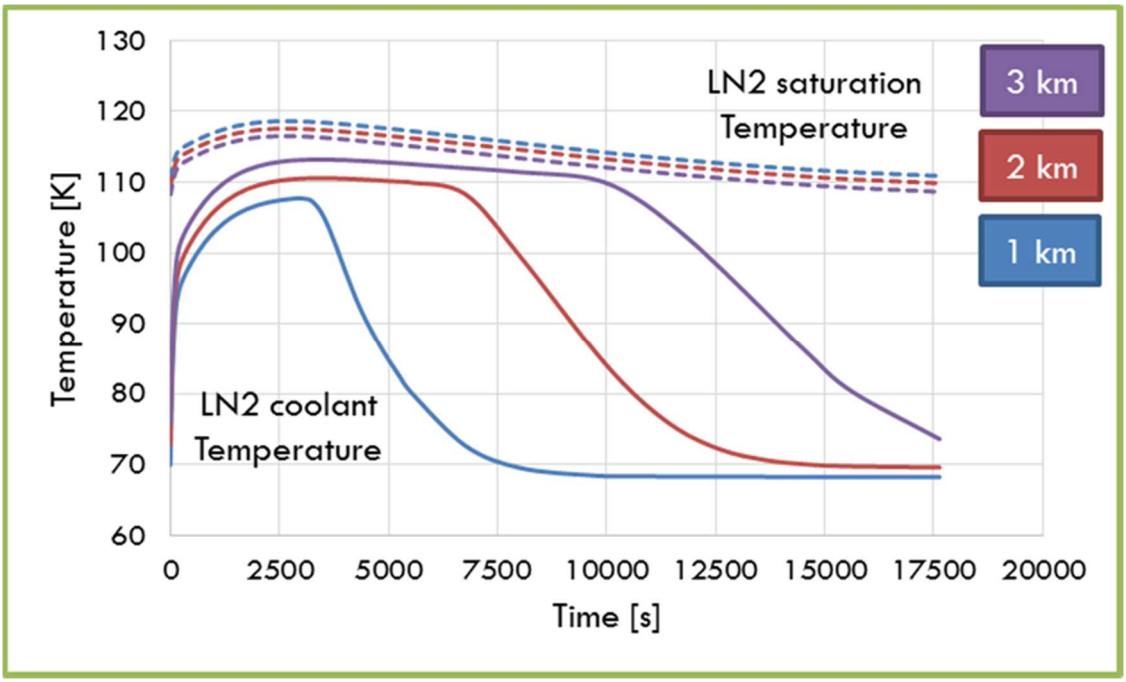

3200
2700
2200
1700
1200
700
Pressure [kPaG]
0
2500
5000
7500
10000
12500
15000
17500
20000
Time [s]
LN2 coolant
Pressure
3 km
2 km
1 km
0 km

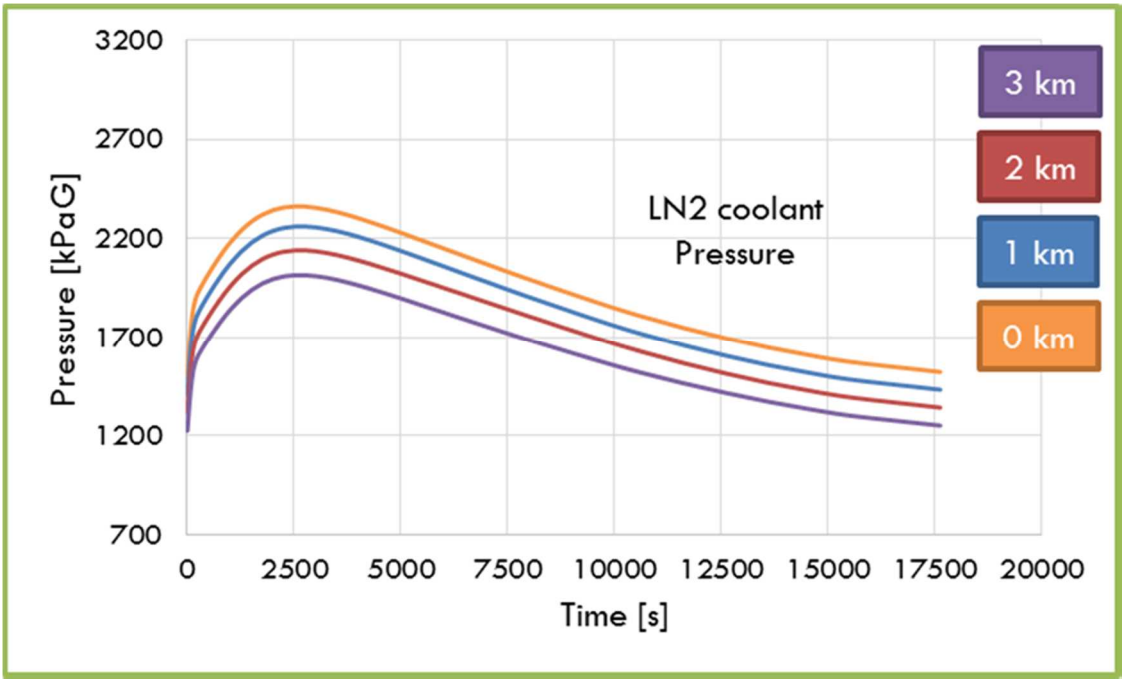
(a) 条件①


130
120
110
100
90
80
70
60
Temperature [K]
0
2500
5000
7500
10000
12500
15000
17500
20000
Time [s]
LN2 saturation
Temperature
LN2 coolant
Temperature
3 km
2 km
1 km


3200
2700
2200
1700
1200
700
Pressure [kPaG]
0
2500
5000
7500
10000
12500
15000
17500
20000
Time [s]
LN2 coolant
Pressure
3 km
2 km
1 km
0 km

(b) 条件②





(c)条件③

図 2.1.1.1.(3)-5　3km ケーブルにおける短絡解析の結果

（上：液体窒素温度、下：圧力）

(iv)3km システムの温度、圧力計算例

実線路をイメージした 66kV/200MVA 級の 3km システムについて、長手方向の温度、圧力の計算を行った。計算モデルについては、図 2.1.1.1.(3)-6 に示すシステムを考えた。ケーブル常予備の２回線で送電するシステムで、それぞれの回線は、各冷却システムにて冷却される。液体窒素は、各回線を巡回し、共通のリターン管にて冷却システムに戻ってくるものとした。この場合、ケーブル 1 回線がトラブルにより送電停止しても、残り 1 回線で電力を送電することができる。

尚、計算では、どちらか片側の回線に短絡電流（二相短絡）が流れた場合を想定した計算を行い、ケーブル入口から出口までの温度、圧力分布を計算した。計算条件を表 2.1.1.1.(3)-4 に示す。尚、計算にはリターン管部の熱損は考慮していない。また、冷凍機の容量は十分あるとして、常にケーブル入口温度は一定に保たれるものと仮定した。

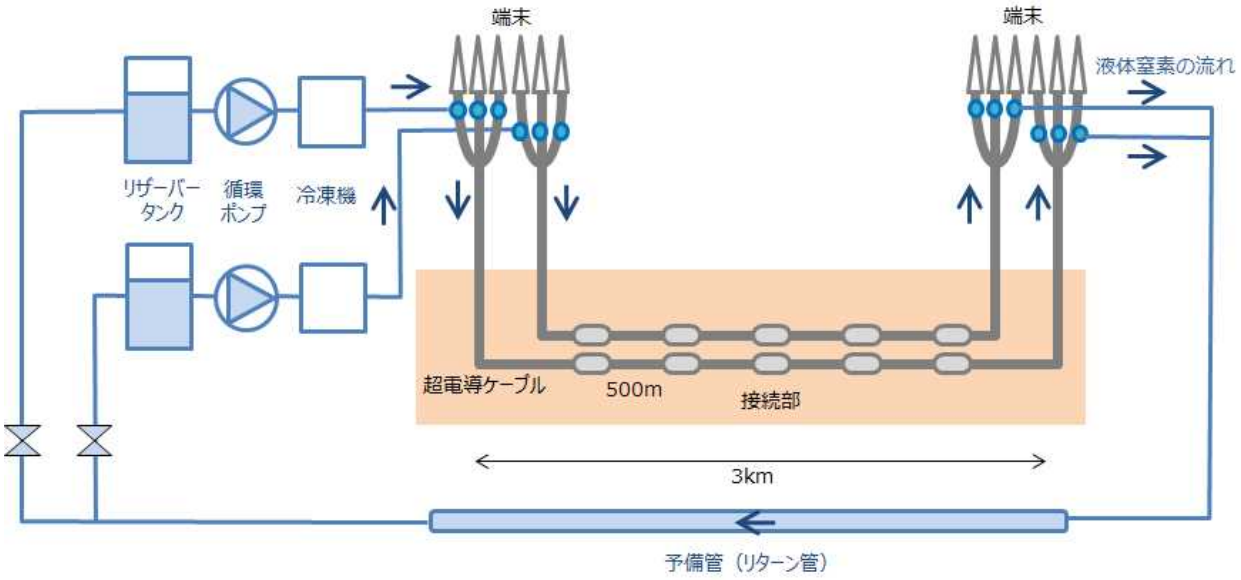


図 2.1.1.1.(3)-6　66kV 超電導ケーブルシステム概要図

表 2.1.1.1.(3)-4　3km システム計算条件

項目	諸元	備考
ケーブル入口温度	69K	
リザーバ圧力	0.8 MPaG	(3)の検討よりガス化しない圧力を選択
流量	60L/min	
交流損失	1W/m/ph	誘電損含む
断熱管侵入熱	2 W/m	
ジョイント損失	60W/箇所	

(a)31.5kA/2sec 時の温度、圧力計算例

超電導ケーブルとは別箇所で短絡事故が起こり、超電導ケーブルに31.5kA/2sec の短絡電流が二相に流れた場合（もらい事故）の温度、圧力の時間変化を図 2.1.1.1.(3)-7、図 2.1.1.1.(3)-8 に示す。短絡通過時の発熱を表2.1.3.1-2 に記載する。尚、計算に用いたリザーバタンクの気相体積は旭変電所での実績（リザーバ＋端末の気相）の 5500L である。計算結果より、入口温度は最大 112K、圧力は最大 3MPa まで上昇する結果となった。温度的には、導体部の2kA 通電時の臨界温度 92K を超えており、すぐの再送電は不可能で、本回線は系統からの切り離しが必要となる。

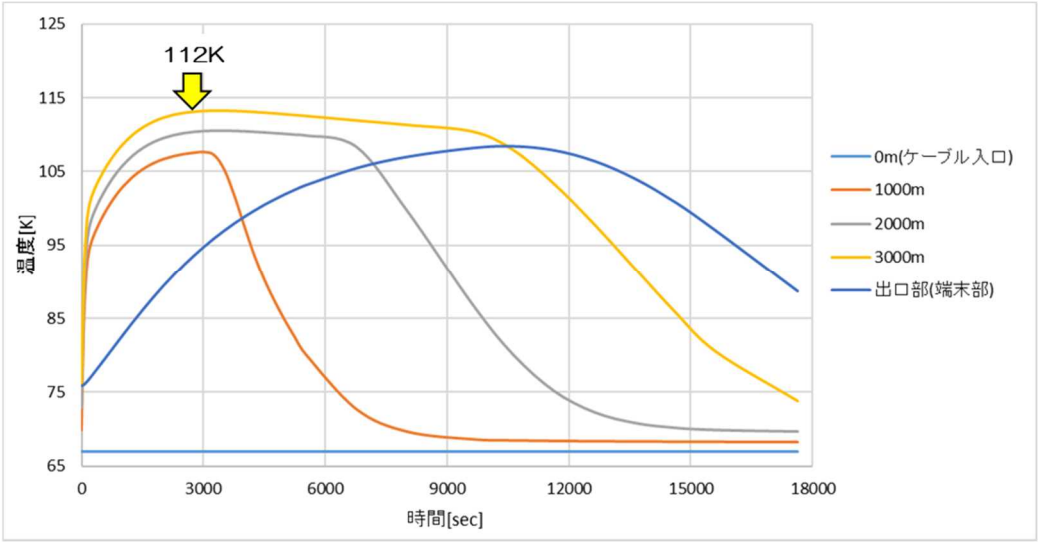


図 2.1.1.1.(3)-7　31.5kA/2sec 時のケーブル各部の温度変化

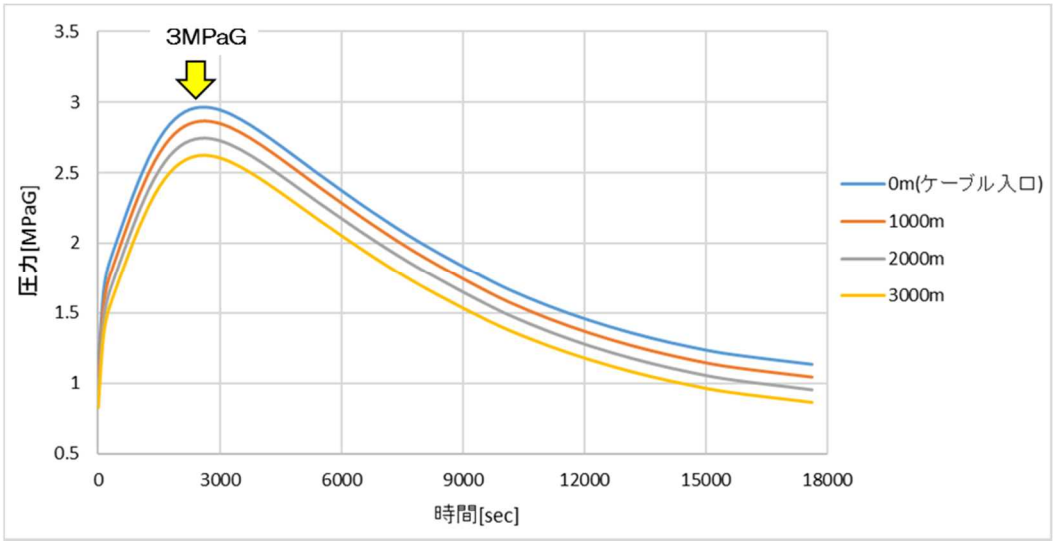


図 2.1.1.1.(3)-8　31.5kA/2sec 時のケーブル各部の圧力変化

表 2.1.1.1.(3)-5　31.5kA/2sec 時の計算条件

項目	諸元
短絡時の導体発熱量	74.0kW/m/ph
短絡時のシールド発熱量	88.6kW/m/ph

圧力については、3MPaG まで達する結果となった。これまで作製したコルゲート管の耐圧力は 15MPaG 以上であり、漏れに関しては問題ないが、弾性限界が 2MPaG 程度であるので、最大圧力は 2MPaG 以下に抑えるべきと思われる。

対策として、リザーバタンクの気相を大きくすることで、圧力の低減することができる。計算結果を図 2.1.1.1.(3)-9 に示す。図のように、リザーバタンクの気相の体積を大きくすることで、最大圧力を小さくなり、10000L では約 1.7MPaG で、弾性限界の 2MPAG 以下に抑えられる。

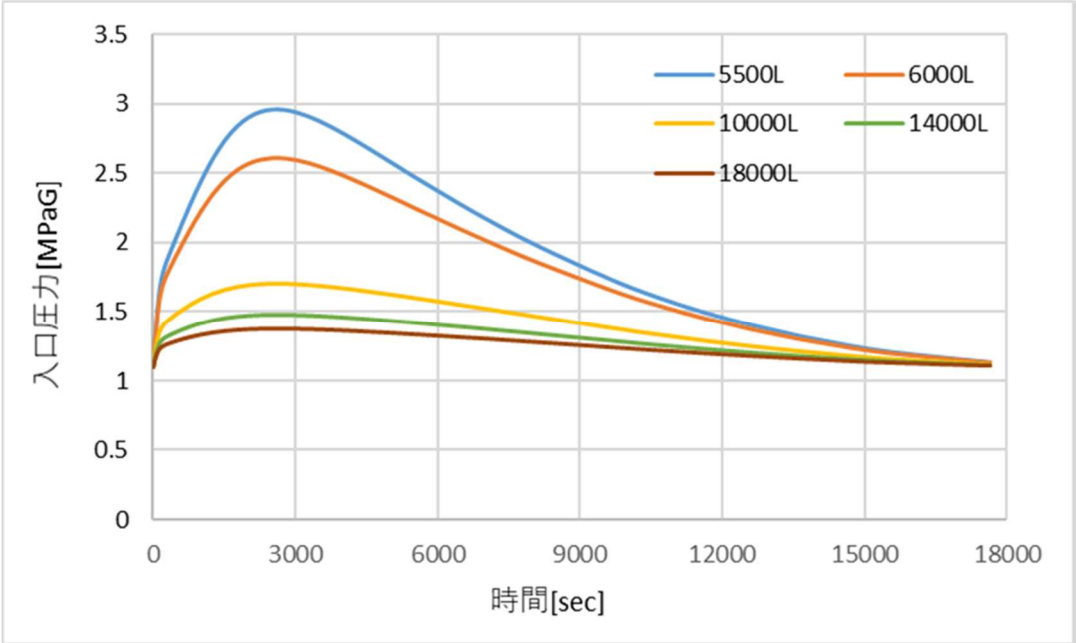


図 2.1.1.1.(3)-9　リザーバタンク気相体積と最大圧力

(b)10kA/2sec 時の温度、圧力計算例

(a)と同じく、超電導ケーブルに 10kA/2sec の短絡電流が二相に流れた場合(もらい事故) の温度、圧力の時間変化を図 2.1.1.1.(3)-10、図 2.1.1.1.(3)-11 に示す。短絡通過時の発熱は、表 2.1.1.1.(3)-6 に記載する。尚、計算に用いたリザーバタンクの気相体積は 5500L である。計算結果より、入口温度は最大 77K、圧力は最大 1.1MPa の計算結果となった。温度、圧力ともに、大きな変化はなく、すぐの再送電が可能であると考えられる。

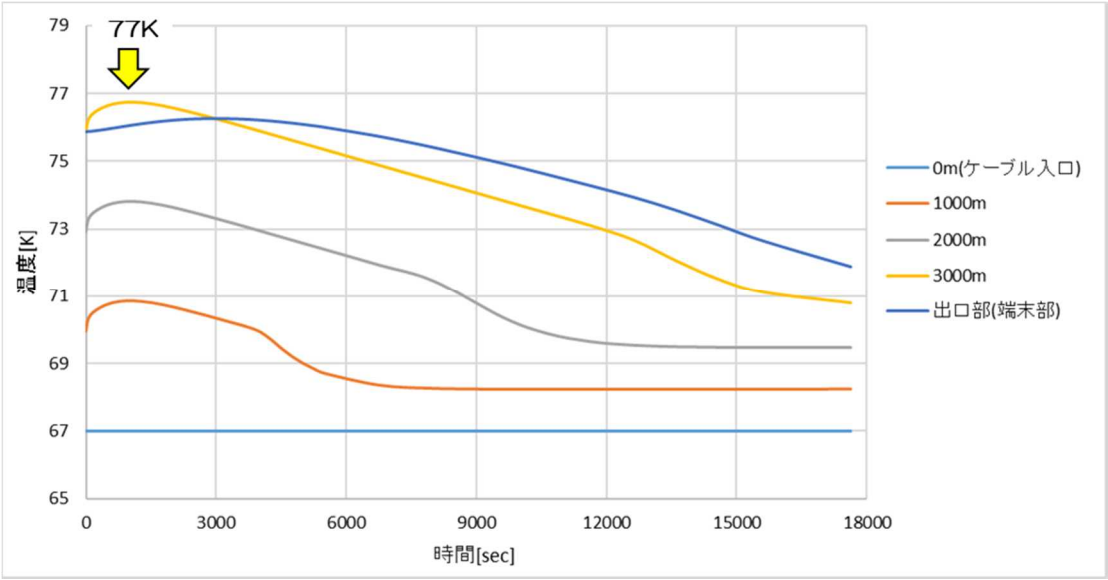


図 2.1.1.1.(3)-10　10kA/2sec 時のケーブル各部の温度変化

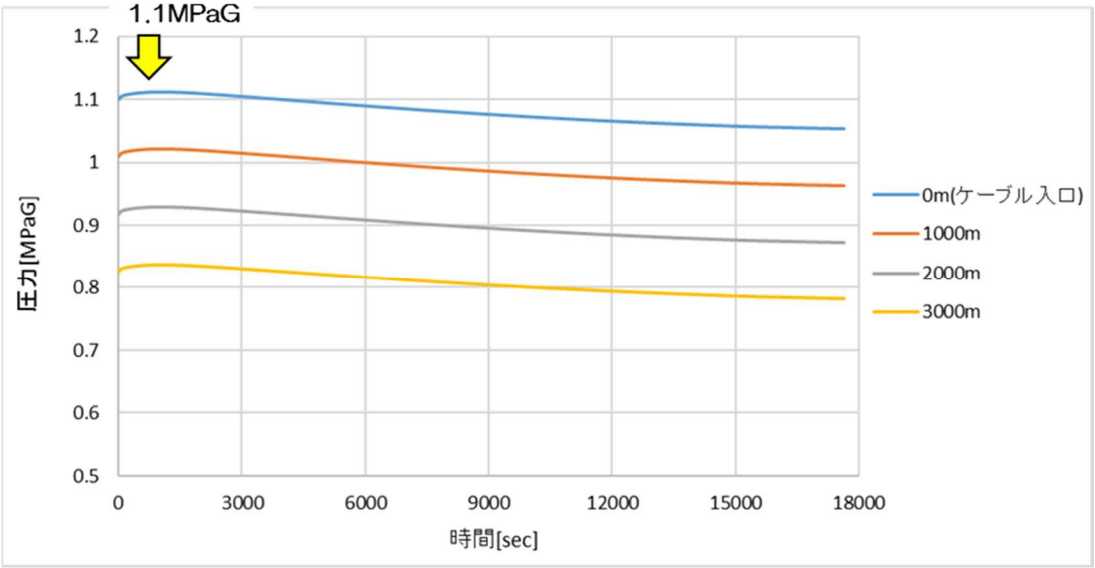


図 2.1.1.1.(3)-11　10kA/2sec 時のケーブル各部の圧力変化

表 2.1.1.1.(3)-6　10kA/2sec 時の計算条件

項目	諸元
短絡時の導体発熱量	3.4 kW/m/ph
短絡時のシールド発熱量	0.8 kW/m/ph

(c)再送電可能な条件の検討

ここで、すぐに再送電可能な事故電流、継続時間条件を検討した。ケーブルの設計から、シールド導体の温度上昇が大きく、このシールド導体が臨界温度@2kA を超えるまでの事故電流継続時間を各電流において計算した。計算結果を図 2.1.1.1.(3)-12 に示す。これから、31.5kA であっても、0.09sec 以下の継続時間であれば、すぐの再送電が可能であると思われる。尚、275kV 級以上のケーブルの遮断器には高速で遮断されるものも採用されており、0.09sec 以内の遮断は十分実現可能である。

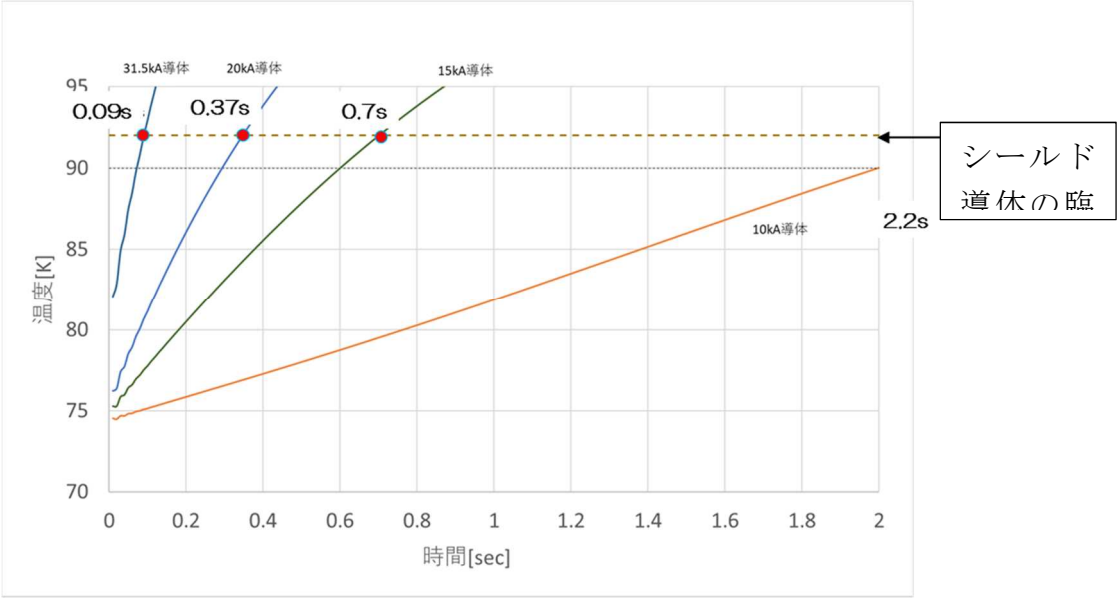


図 2.1.1.1.(3)-12　すぐに再送電可能な短絡電流条件

(ｖ)ガイドラインへの反映事項

項目	内容	備考
ケーブルの状態と復帰の条件	・事故電流の大きさ、継続時間により、すぐの再送電が可能な場合と不可能な場合*あり。 →すぐの再送電が NG の場合は、超電導ケーブルを系統から切り離す。温度の回復を待って送電再開 ・事故電流が大きいと圧力上昇大で設備へのダメージ懸念 →タンクの気層を増やすなど圧力低減対策**を行う。	*大容量送電のため高速遮断器が適用できれば、すぐの復帰が期待できる。 **安全弁で圧力を解放してもよい。(液の補充が必要)
判定機能	・再送電可否を判定する機能***が必要 →通過電流の大きさ、時間で判定する ・温度、圧力センサーにて回復を確認	***判定後指令所に系統からの切り離しを要請
冷却システムへの指令	短絡電流通過時は、早急に温度を回復させる必要があるので、冷凍能力、流量を最大にして冷却する。	

(補足) 短絡時に発生する第一ピークの長尺ケーブルへの影響について

(2)節において、40m ケーブルの圧力発生において、第一ピークと第二ピークの発生があり、第一ピークはシールド部付近の液体窒素のガス化が影響するが、すぐに終息することから、液温の上昇による第二ピークの方が、長尺ケーブルへの影響が大きいと考え、(3)節でシミュレーション検討を行った。

ここでは、第一ピークの長尺への影響について、考察を加えることとする。

まず、40m ケーブルでの第一ピーク圧力の発生について定量的な解析を行う。ここでは、シールド付近の液体窒素がガス化し、液を押しのけ、端末及びタンク気相部をその液が押し上げて、圧力上昇するものと考える。

第一ピーク圧力：475kPaG、初期圧力：250kPaG、気相部体積：98L

であるので、これから、蒸発ガス体積を以下のように計算できる。

98L×(1-350/575)=38L

40m ケーブルの至る所で蒸発が起こったとすると、メートル当たり、38L/40m =0.95L/m のガスが発生する。

次に、3km ケーブルで同様な第一ピークが起こった場合の圧力計算を実施する。
3km では、0.95L/m×3000m=2850L のガスが発生。

気相部の体積を 10000L（注）とした時、第一ピークで発生したガス 2850L による圧力上昇は、ベース圧力を 1MPaG とすると
１.１×10000/(10000-2850)=1.5MPa=1.4MPaG
ピーク圧力は 1.4MPaG となり、断熱管の弾性限界内（2MPaG)に抑えられる。

このように、第二ピークにおいても、タンク容量をかえて気層部の体積を大きくとれば、圧力の抑制は可能であることが示された。
尚、この第一ピークで蒸発したガスは、すぐさま周囲の液により、再凝縮されるものと考えられ、ピークは数十秒で納まっている。したがって、後に発生する第二ピークとは重畳しないものと推測される。

(注)図 2.1.1.1.(3)-9 参照

(4) 実規模 275 kV 超電導ケーブルへの影響評価（古河電工）
もらい短絡事故とは、超電導ケーブル以外で短絡事故（例えば CV ケーブルラインの R 相と S 相の間の短絡事故）が発生した場合に短絡電流が一時的に超電導ケーブルへ流入する事故のことである。図 2.1.1.1.(4)-1 に 275 kV 超電導ケーブルの系統図を示す。系統内には主保護回路と後備保護回路が備えてあり、短絡電流が流れた場合に動作して電流を遮断する。主保護回路は 0.06 s で動作し、後備保護回路は 0.6 s で動作する。

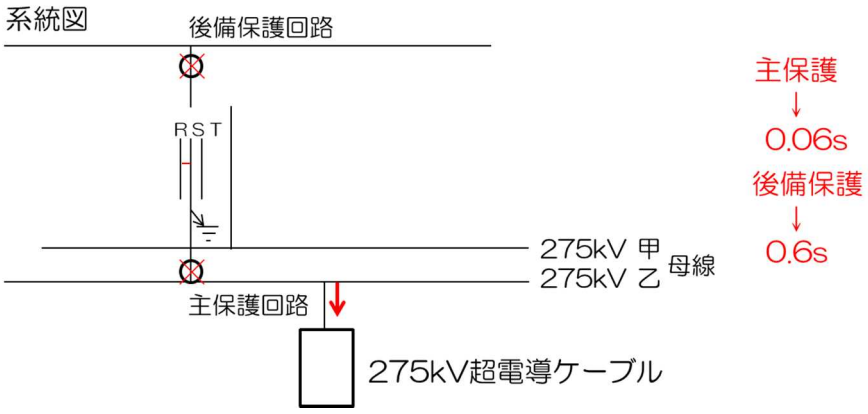


図 2.1.1.1.(4)-1　275 kV 超電導ケーブルの系統図

事故ケースとして、主保護回路は不動作、後備保護回路は動作する場合（ケース１）と主保護回路が動作する場合（ケース２）が考えられる。電圧階級 275 kV では最大で 63 kA 程度の短絡電流が流れる設計となっており、ここでは最大電流が流入するとした。検討内容はこれら２つの事故ケースで超電導導体層が許容温度を超えてしまうか否かである（表 2.1.1.1.(4)-1）。

表 2.1.1.1.(4)-1　検討した事故ケース

	回路動作	事故電流
ケース１	主保護回路は不動作 後備保護回路は動作	最大で 63 kA, 0.6 s の電流が流れる
ケース２	主保護回路は動作	最大で 63 kA, 0.06 s の電流が流れる

275 kV 超電導ケーブルの構造、仕様を図 2.1.1.1.(4)-2、表 2.1.1.1.(4)-2 に示す。解析モデルのベースは前節までの短絡解析モデルと同じである。ケーブル構造の違いによる計算モデルの相違点を挙げる。表 2.1.1.1.(4)-3 に短絡解析のパラメータを、図 2.1.1.1.(4)-3 に径方向のケーブル断面模式図を示し、解析における仮定を以下に示す。

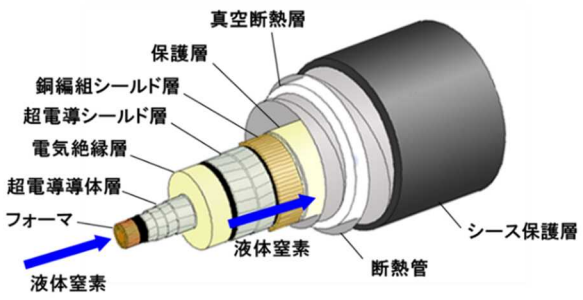


図 2.1.1.1.(4)-2　275kV
超電導ケーブルの構造

表 1.1.1.1.(4)-2　275kV
超電導ケーブルの仕様

Structure	Specification	Diameter (mm)
Former	400 mm² hollow stranded copper	35.4
HTS conductor	2-layer YBCO	
Insulation	PP laminated paper	81.0
HTS Shield	1-layer YBCO	
Cu Protective	210 mm² copper tape	88.0
Protection	Insulation paper	
Cryostat pipe	SUS and PVC sheath	110

A) 銅導体層と HTS 導体層について、また、銅シールド層と HTS シールド層について、熱伝導率が高いため、それぞれ銅層一層とみなす。（以下、それぞれ導体層、シールド層と呼ぶこととする。）
B) 銅と導体層及びシールド層は金属であり、有機物からなる絶縁層と比較し、熱伝導率が十分大きいと考え、内各温度は径方向断面内で一様とする。
C) 絶縁層の長手方向は PPLP の熱伝導率が非常に小さいと考え、無視できるとする。
D) 入口の冷媒の温度と圧力は境界条件として与える。
E) 外側流路と内側流路での圧力損失は互いに同値とし、それを元に流量比を出

す。

F) 質量保存則よりケーブル内での冷媒の質量流量(入口部体積流量)は一定とする。冷媒の質量流量は一定とする。

表 2.1.1.1.(4)-3　短絡解析のパラメータ

記号	項目	値
r_{00}	内側流路の半径	7.0 mm
r_0	導体層の半径	17.7 mm
r_1	絶縁層の半径	40.5 mm
r_2	シールド層の半径	44.0 mm
r_3	保護層の半径	44.5 mm
r_4	断熱管内管の内径	55.0 mm

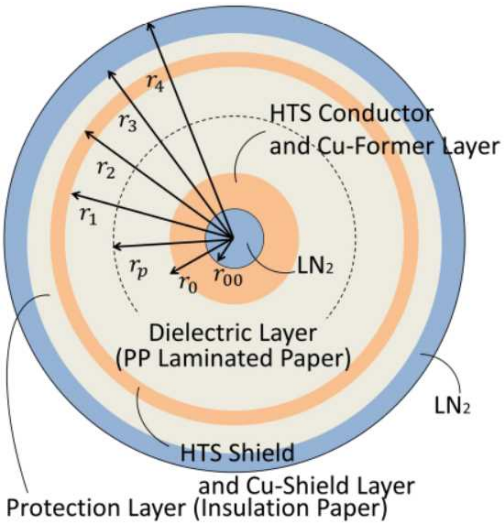


図 2.1.1.1.(4)-3　径方向のケーブル断面模式図

これらの仮定を踏まえたうえで、長手方向の断面図は図 2.1.1.1.(4)-4a、b のように描ける。図 2.1.1.1.(4)-4a は通常運転時の熱の流れを、図 2.1.1.1.(4)-4b は短絡事故時の熱の流れを示している。なお、事故後の状態を考慮して、事故電流は全て銅層部分に転流することを前提とした。

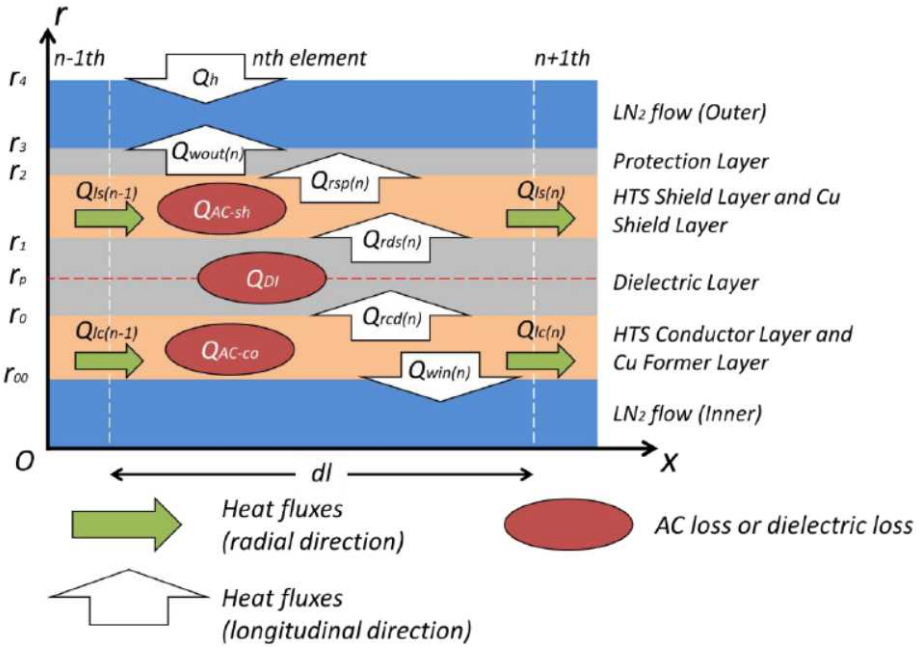


図 2.1.1.1.(4)-4a　通常運転時のケーブル内の熱の流れを記した長手方向の断面図

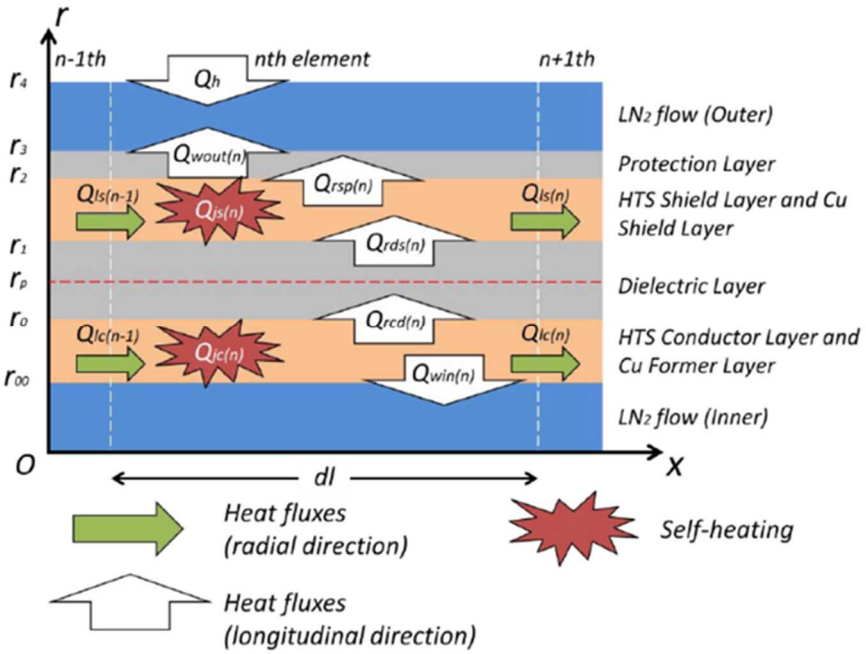


図 2.1.1.1.(4)-4b　短絡事故時のケーブル内の熱の流れを記した長手方向の断面図

本シミュレーションの詳細については下記添付文献をご参照下さい。

IEEE Transactions on Applied Superconductivity (Volume: 28, Issue: 4, June 2018), Yokoo *et al*

タイトル「Safety Verification of a 275-kV HTS Cable System Under Short-Circuit Current Accidents」

REBCO ケーブルの温度－I_c特性曲線を図 2.1.1.1.(4)-5 に示す。ケーブルの設計において運転電流は It（定格電流相当直流電流）／I_c を 50%で設定している。It を常時流せる温度は 82 K であり、この上限温度が、「許容温度」となる。

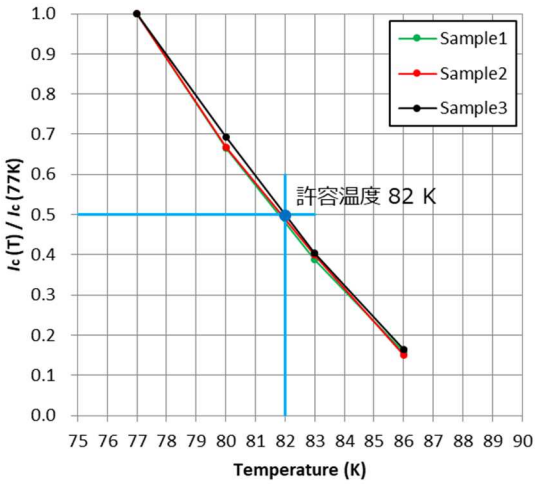


図 2.1.1.1.(4)-5　REBCO ケーブルの温度－I_c特性曲線

3 kA 定常運転時の電流波形及び解析条件を図 2.1.1.1.(4)-6、図 2.1.1.1.(4)-7 に示す。ケーブルに導入する冷媒は過冷却液体窒素で温度 70 K、圧力 0.8 MPa、流量 30 L/min である。

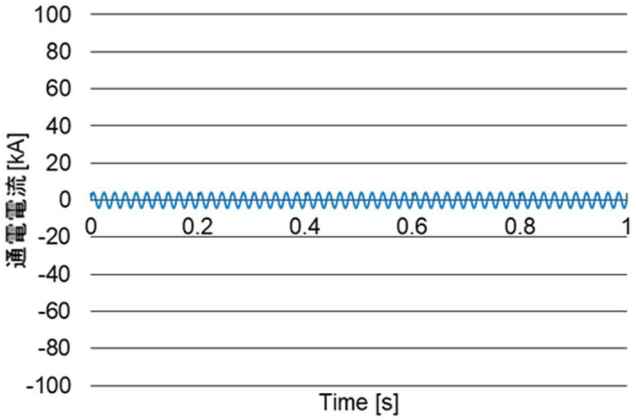


図 2.1.1.1.(4)-6　3 kA 定常運転時の電流波形



図 2.1.1.1.(4)-7　3 kA 定常運転時の解析条件

計算結果の 3 kA 定常運転時のケーブル内温度分布を図 2.1.1.1.(4)-8 に示す。横軸はケーブルの位置を、縦軸は冷媒の温度を表す。冷媒がケーブル入口から出口へ進むに連れて管外からの侵入熱及び交流損失の発生を受け、内外側流路共に冷媒温度が上昇していく様子が伺える。ケーブル内で最も温度が上昇するのはケーブル出口の内側流路の冷媒温度で 79 K となる（早稲田大学と古河電工とで各々解析を実施し、両者で 5 %以内の一致を確認している)。

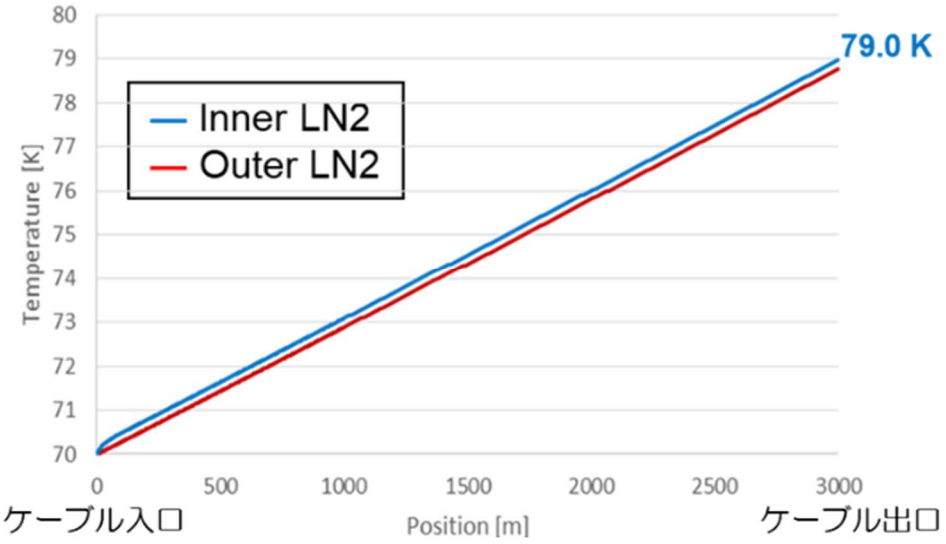


図 2.1.1.1.(4)-8　3 kA 定常運転時のケーブル内温度分布

本解析プログラムを用いて、瀋陽での短絡通電試験結果の再現を試みた。まず、試験について説明する。瀋陽 275 kV 超電導ケーブルシステムに 20 m ケーブルを接続し、一方の端末の導体層とシールド層を短絡して短絡事故時に流れる電流 63 kA と等価な矩形の直流電流をもう一方の端末から流して短絡模擬試験を行った（図 2.1.1.1.(4)-9)。流した矩形の直流電流波形を図 2.1.1.1.(4)-10 に示し、出口側端末における温度測定位置を図 2.1.1.1.(4)-11 に示す。

シミュレーション結果を図 2.1.1.1.(4)-12 に示す。図中の実線がケーブル出

口の内側と外側の冷媒温度の実測値で、破線が計算値であり、両者の一致が確認できた。特に、ケーブルの発熱と熱容量から決定される通電時の温度上昇の傾きは良く一致しており、本解析コードで瀋陽通電実験の冷媒温度を再現することができた。シミュレーションにおける冷却期間の温度低下が実測結果よりも遅いのは、実験では両流路内部でガス化が生じており潜熱による影響と考えられる。

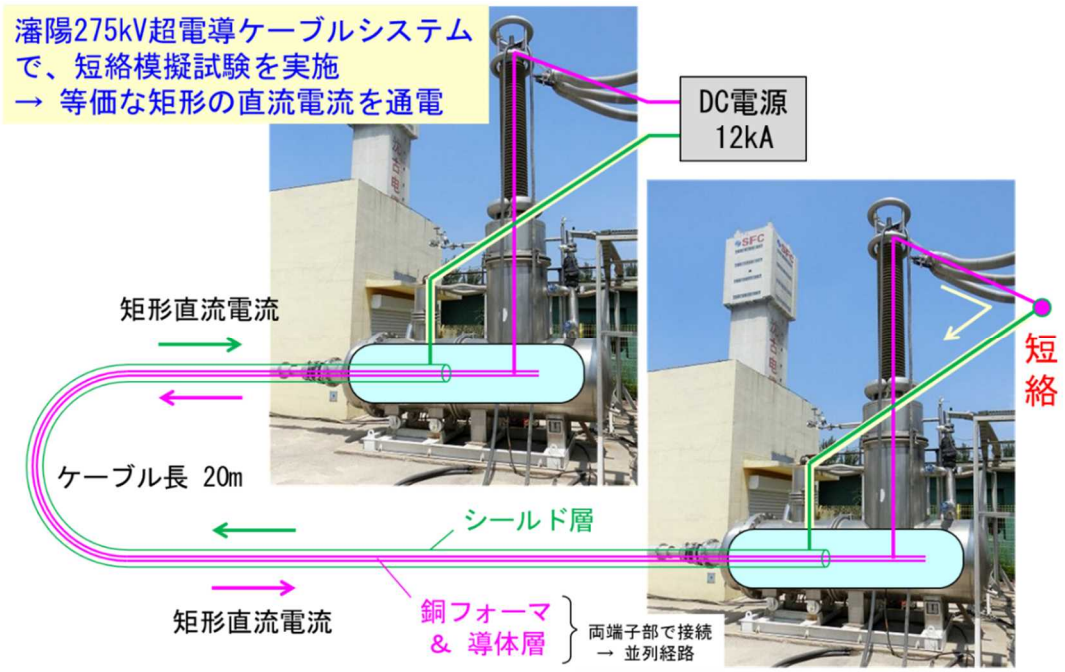


図 2.1.1.1.(4)-9　瀋陽 275 kV 超電導ケーブルシステムでの 20 m ケーブル短絡模擬試験

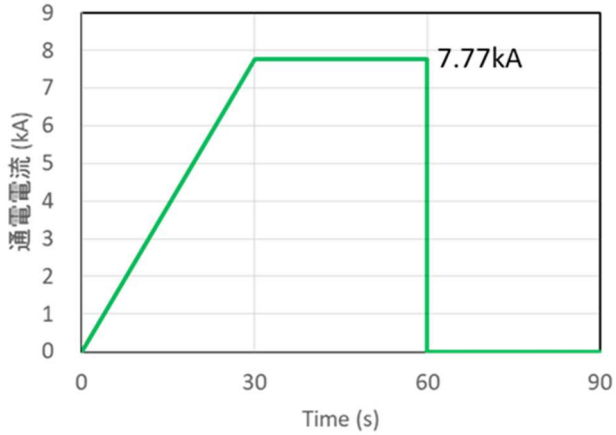


図 2.1.1.1.(4)-10　短絡模擬試験時の矩形直流電流波形

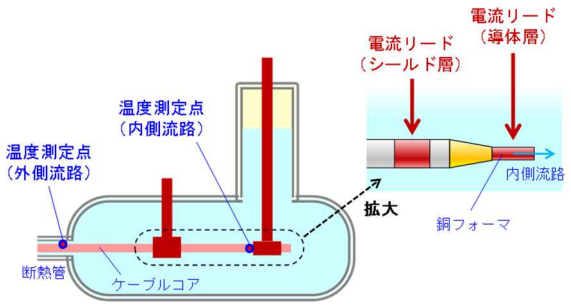


図 2.1.1.1.(4)-11　出口側端末における温度測定位置直流電流波形

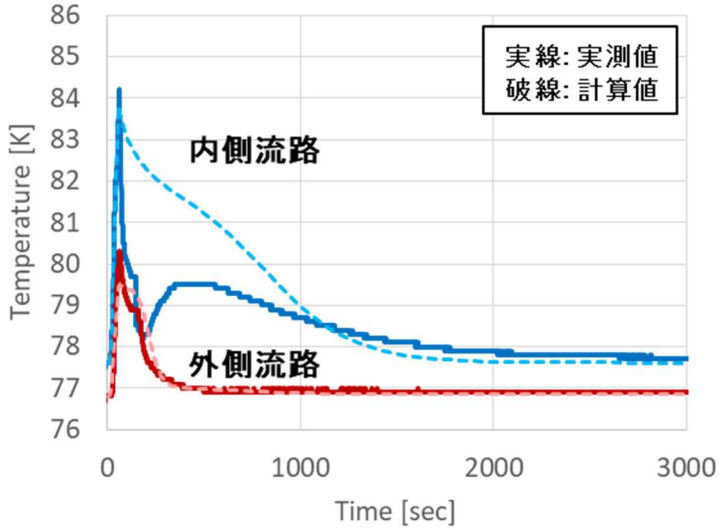


図 2.1.1.1.(4)-12　短絡模擬試験時の温度実測値とシミュレーション結果

続いて、本解析プログラムを用いて本節初めに述べたもらい短絡事故の２つのケースについて実規模級長尺ケーブル(3　km)の数値解析を行った。短絡電流の流れる事故中の解析条件は図 2.1.1.1.(4)-13 に示す通り、全電流がフォーマ、導体層、シールド層の銅領域に流れてジュール熱が生じるとする最も厳しい（発熱の多い）側の条件を採用した。その前後の定常運転時の解析条件には図 2.1.1.1.(4)-7 を用いた。

事故中の解析条件
○短絡電流通電条件　:AC275kV, 63kA
○発熱条件　:全電流によるジュール熱
　フォーマ＋導体層の銅領域
　シールド層の銅領域

図 2.1.1.1.(4)-13　事故中の解析条件

●もらい短絡事故ケース１（主保護回路は不動作、後備保護回路は動作）

ケース１のもらい短絡事故では 63 kA（最大振幅 63×√2 = 89 kA）の短絡電流が 0.6 s 間(50 Hz で 30 サイクル)流れる。この時の電流波形を図 2.1.1.1.(4)-14 に示す。事故後に温度が最も高くなるのはケーブル出口部で、内側流路の液体窒素温度と導体層温度の解析結果は図 2.1.1.1.(4)-15 となる。導体層最大温度は 86.9 K（常時からの⊿T は 7.9 K）となり、許容温度 82 K を超えるため超電導ケーブルは継続運転できない。この場合、超電導ケーブルを系統から切り離し冷却して温度の回復を待つ必要がある。

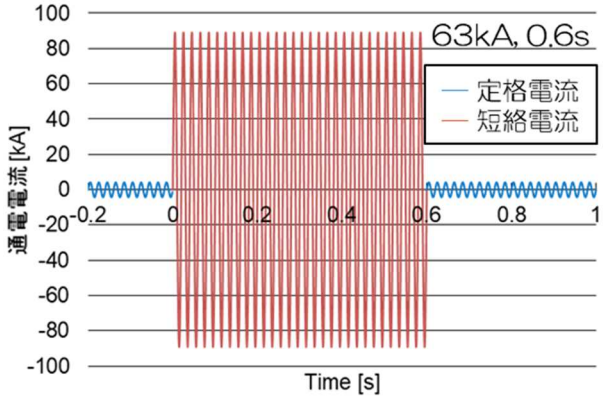


図 2.1.1.1.(4)-14　ケース１のもらい短絡事故時の電流波形

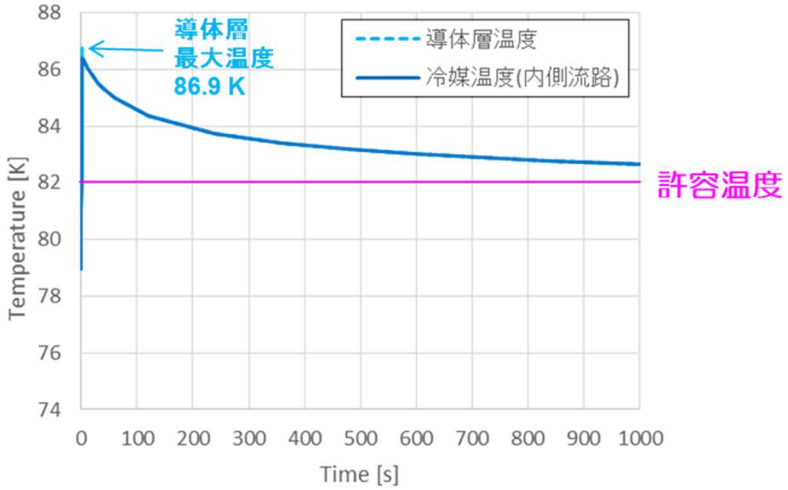


図 2.1.1.1.(4)-15　ケース１のもらい短絡事故後の出口での内側流路の液体窒素温度と導体層温度

●ケース２（主保護回路は動作）

ケース２のもらい短絡事故では 63 kA（最大振幅 63×√2 = 89 kA）の短絡電流が 0.06 s 間(50 Hz で 3 サイクル)流れる。この時の電流波形を図 2.1.1.1.(4)-16 に示す。事故後に温度が最も高くなるのはケーブル出口部で、内側流路の液体窒素温度と導体層温度の解析結果は図 2.1.1.1.(4)-17 となる。導体層最大温度は 79.9 K（常時からの⊿T は 0.9 K）となり、許容温度以下のため超電導ケーブルは継続運転できる。

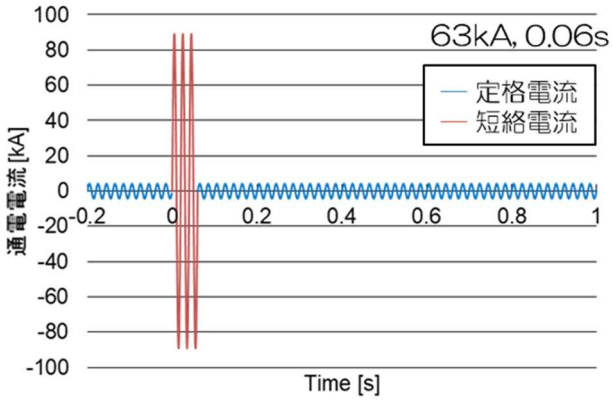


図 2.1.1.1.(4)-16　ケース２のもらい短絡事故時の電流波形

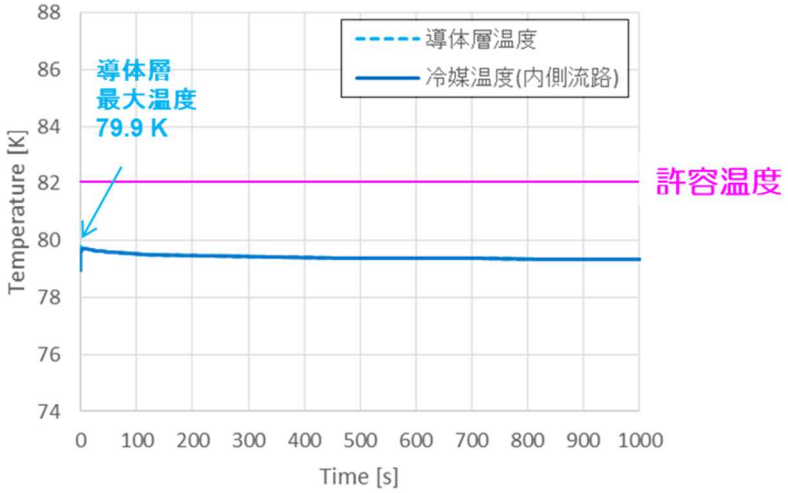


図 2.1.1.1.(4)-17　ケース２のもらい短絡事故後の出口での内側流路の液体窒素温度と導体層温度

2.1.1.2 地絡事故評価

(1) 66kV 級ケーブル地絡事故評価（住友電工）

超電導ケーブルの内部で地絡事故（絶縁破壊）が起こった場合、どのような事象が起こり、周囲等への影響を最小とするにはどのような対策を打てばよいのか、現状のところ、このような課題に対して試験や検討された例がなく、本プロジェクトで取組むことになった。

超電導ケーブルの地絡模擬試験を実施するにあたり、まず有識者・関係者と協議を行い、従来ケーブルの地絡試験の実施方法や評価方法を参考に、超電導ケーブルの地絡事故評価の進め方を図 2.1.1.2.(1)-1 のように決めた。尚、66kV 級の地絡条件は最大 1.5kA@2sec であるとした。

まず、ケーブル形状での試験の前に、シートを用いた基礎試験で保護材料の選定や構成の基礎検討を実施した。その基礎試験をもとに、ケーブルコアを用いた試験において、保護層の形状、施工方法を検討し、断熱管の内管貫通の有無の確認、外管貫通有無の確認、隣接相への影響確認を実施した。また、実験から得られたアークエネルギーを元に内管が貫通しない場合の断熱管内の圧力上昇と圧力伝播についてシミュレーションを実施した。これらの結果を、ガイドラインへの反映事項としてまとめた。

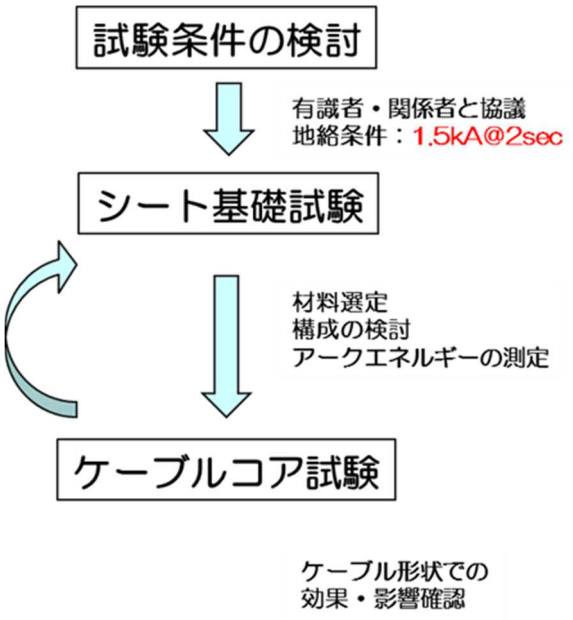


図 2.1.1.2.(1)-1　地絡試験の進め方

(ⅰ)前プロジェクトのレビュー

まずは、地絡時の様相と保護層の構成を検討するにあたり、シート試験①を行った。シート試験の概要を図 2.1.1.2.(1)-2 に示す。また、試験したシートの構

成諸元を表2.1.1.2.(1)-1、試験結果を表2.1.1.2.(1)-2に示す。表に示す通り、ケーブル構造を見立てたシート層+保護層のサンプルで⑤以外は、断熱管内管を模擬した SUS 板を貫通しており、断熱管にダメージを与えることが判ったが、繊維（アラミド繊維）8 枚では、SUS 板は貫通せず、保護層としては繊維 8 枚程度が必要であることが判った。

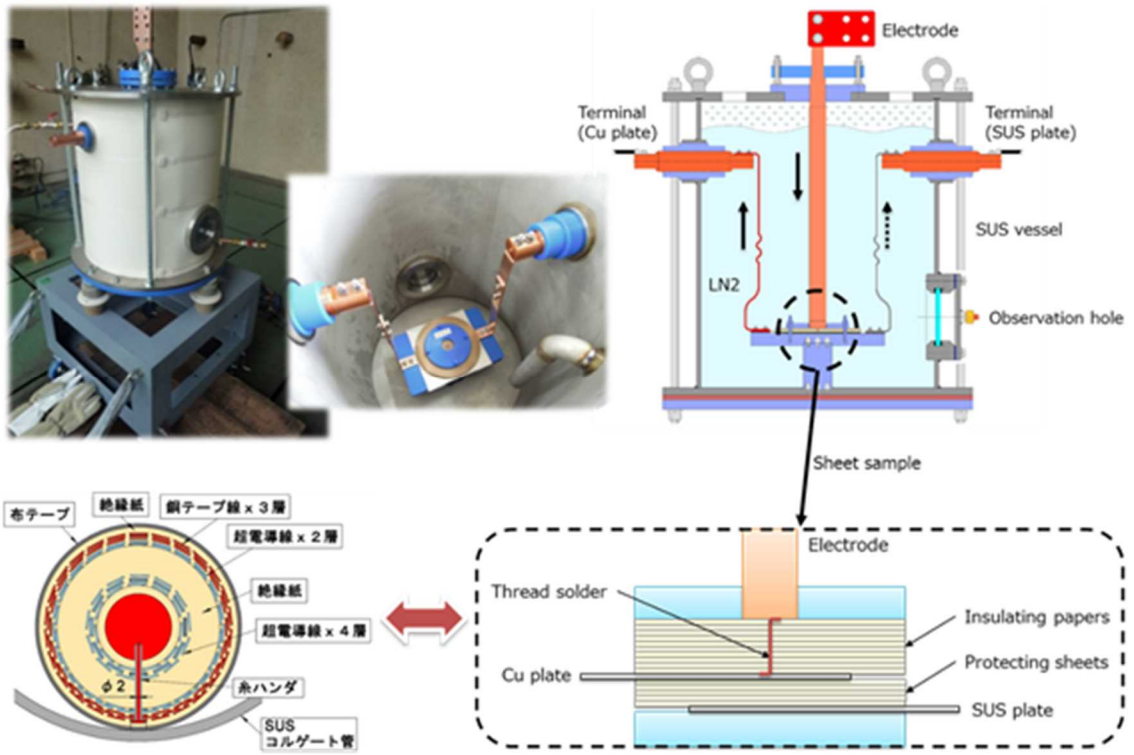


図 2.1.1.2.(1)-2　シート試験①装置概要

表 2.1.1.2.(1)-1　シート試験①サンプルの諸元

		①	②	③	④	⑤	⑥
絶縁層	PPLP	7mm^{t}					
シールド層	銅板	1.2mm^{t}					
保護層	内層	クラフト 5 枚	クラフト 5 枚	クラフト 5 枚	PPLP5 枚	PPLP5 枚	クラフト 5 枚
	外層	布 2 枚	繊維 1 枚	布 2 枚	繊維 4 枚	繊維 8 枚	繊維 4 枚
断熱内管	SUS 板	0.8mm^{t}					

表 2.1.1.2.(1)-2　SUS 板に電流が流れ始めるまでの時間

		保護層（内層）	
		クラフト紙（5 枚）	PPLP（5 枚）
保護層（外層）	布テープ×2 枚	①3 サイクル ③5 サイクル	-
	繊維シート×1 枚	②3 サイクル	-
	繊維シート×4 枚	⑥5 サイクル	④15 サイクル
	繊維シート×8 枚	-	⑤分流なし

次に、ケーブルコア形状での試験（ケーブルコア試験①）を行った。試験概要を図 2.1.1.2.(1)-3、サンプル構成、試験条件、試験結果を表 2.1.1.2.(1)-3 に示す。表に示す通り、シート試験では繊維 8 枚でも SUS 板に影響はなかったが、ケーブルコア形状では繊維 20 枚でもコルゲート管を貫通し、シート形状と大きく異なる結果となった。

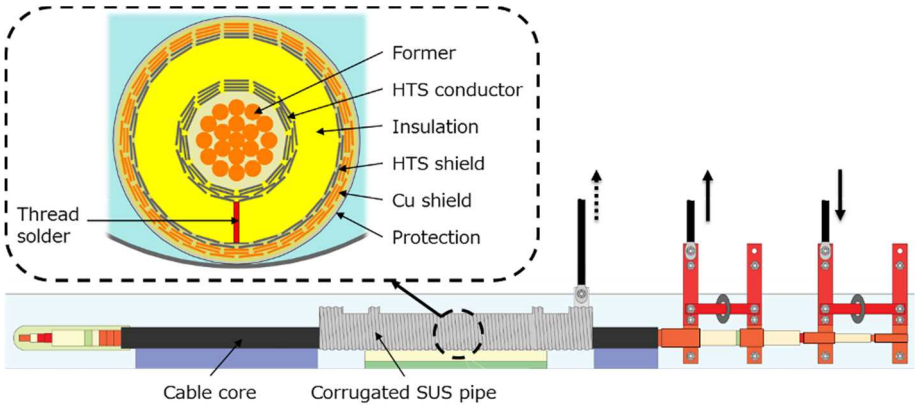


図 2.1.1.2.(1)-3　ケーブルコア試験①概要図

表 2.1.1.2.(1)-3　ケーブルコア試験①のサンプル構造、試験条件と試験結果

	①	②	③	④
電流（kA）	1.5			
時間（sec）	2			0.04
冷却条件	LN2			

フォーマ	円圧縮銅撚り線導体（200sq）			
超電導導体	2 層（1 層目：TypeHT、2 層目：TypeACT）			
絶縁層	PPLP（7mm^{t}）			
超電導シールド	1 層（TypeHT）			
銅シールド	3 層（4.5mm^{w}×0.32mm^{t}）			
PPLP	5 枚			
繊維シート	10 枚	10 枚	20 枚	8 枚
SUS 板	コルゲート管（0.8mm^{t}）			
試験結果	管貫通	管貫通	管貫通	管貫通

このように課題としては、シート試験①とケーブルコア試験①との結果の乖離の要因、理由を究明することである。

（ⅱ）ケーブルコア試験②

前プロジェクトから引き継いだシート試験とケーブルコア試験との結果の乖離を調査するために、地絡対策用の保護層をケーブルコアと縦添えに挿入（シート状に近づける）し、試験を行った。試験の概要を図 2.1.1.2.(1)-4、サンプル構成、試験条件、試験結果を表 2.1.1.2.(1)-4 に示す。図に示すように、保護層をコアに縦添えに沿わせ、コアと断熱管内管との間に配置した。試験結果としては、ケーブルコア試験①の結果よりは、断熱管を貫通する時間に遅れがあったが、シート試験①ほどではなかった。

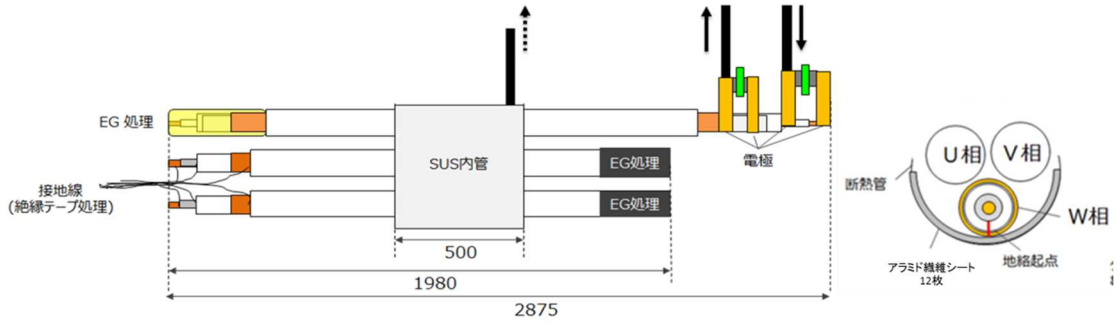


図 2.1.1.2.(1)-4　ケーブルコア試験②の構成

表 2.1.1.2.(1)-4 ケーブルコア試験②の試験条件と結果

試験番号	試験①	試験②	試験③
サンプル構造	三心コア	三心コア	三心コア
地絡コア	超電導コア	超電導コア	超電導コア
電流条件	1.5kA-2sec	1.5kA-2sec	1.5kA-2sec
保護層	断熱管上に繊維 12 枚	断熱管上に繊維 6 枚	断熱管上に繊維 24 枚
断熱管	半割れ断熱管（上下で挟み込み）	半割れ断熱管（上下で挟み込み）	半割れ断熱管 上側開放
試験結果	0.45sec で断熱管貫通	0.07sec で断熱管貫通	断熱管貫通せず。繊維 10 枚目まで貫通

これまでの試験結果を図 2.1.1.2.(1)-5 に示すとともに、判った知見を以下にまとめる。

・シート試験①は、導体電極先端が溶けていることや貫通孔のコア側が大きいことから、絶縁層の水平方向もしくは導体電極側に爆風が吹き出していたと思われる。

・ケーブルコア試験①は、コアに保護層を全周巻き付けて爆風を閉じ込めており、爆風を閉じ込めていないシート試験とは顕著に結果が異なっていた。

・ケーブルコア試験②では、前プロジェクトのコア試験より、貫通時間が遅く効果があった。

これらのことから、地絡エネルギーにより、構成物が気化され、プラズマ状のガスを貫通方向から逃がす方が、貫通されにくいと考えられる。

今後は、より貫通しにくい保護層の材料、構成の探索と、コア保護には、縦添えの方が有効であり、その形状での試験が必要になると考えられる。

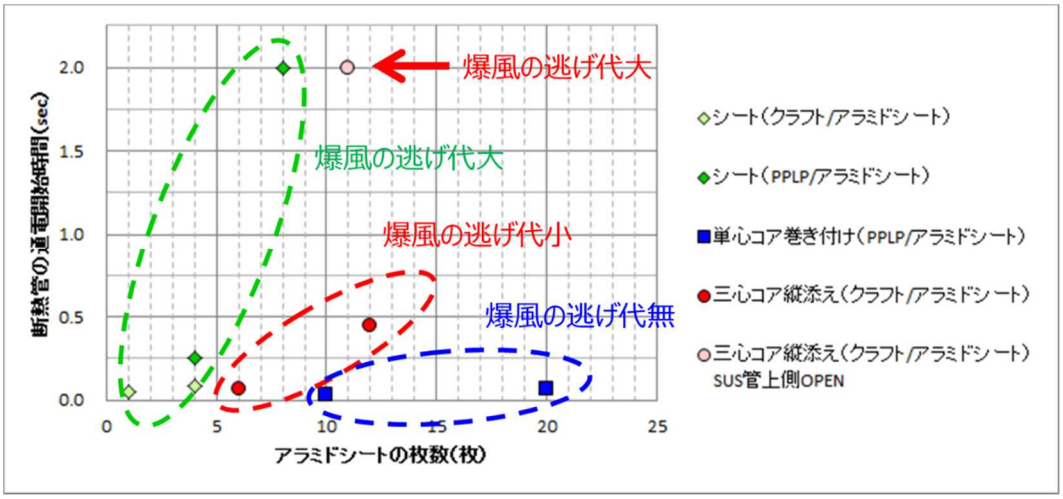


図 2.1.1.2.(1)-5　これまでの試験結果のまとめ

（iii）シート試験②

さらなる保護性能がよい保護材料や構成を求めて、シート試験②を実施した。試験装置や、シートと電極との関係は、図 2.1.1.2.(1)-2 に示すものと同じである。シートの絶縁部には地絡を誘導する細線が埋め込まれており、シールドを模擬する銅板と保護シート、断熱管を模擬するステンレスの波板を配置した。

用意したサンプルと試験結果を表 2.1.1.2.(1)-5 に示す。シートはアラミド繊維を主とする A（厚み 0.6mm）、B（厚み 0.15mm）とアラミド紙を主とする C（厚み 0.08mm）の 3 種類用意し、各サンプルの組合せ合計の厚みが 6mm に近くなるように構成した。

試験の結果、サンプル④の貫通厚みと発生エネルギーが最も小さくなった。

表 2.1.1.2.(1)-5　シート試験の構成と試験結果

サンプル No.	①	②	③	④	⑤
シート構成	シート A 10 枚	シート B 40 枚	(シート A+シート C×3)×7 層	シート A+(シート A+シート C3 枚)×３層＋シート A５枚	シート A3 枚+(シート A+シート C6 枚)×３層＋シート A２枚
合計厚み	6mm	6mm	5.9mm	6.1mm	6.2mm
貫通厚み	4.2mm	6mm	5.0mm	3.7mm	4mm
発生エネルギー	394kJ	413kJ	427kj	340 kJ	379kJ

(iv) ケーブルコア試験③

(3)のシート試験②で検討した保護材料・構成を中心に、三相コアの外周（縦添え）に適用したサンプルの内管貫通有無について検証をした。

試験サンプルは、半割れの断熱管の中に三心コアを入れた状態で固定させ、コアと断熱管との間には、アラミド繊維やアラミド繊維とアラミド紙の複合構造を敷く構造とした。試験サンプルの構成は、図 2.1.1.2.(1)-4 に示すものと同じで、試験装置の外観写真を図 2.1.1.2.(1)-6 に示す。

試験の結果を表 2.1.1.2.(1)-6 に示す。試験結果から、繊維と紙の組合せは、繊維だけの構成と比べて、シート試験②の結果のように、より抑制の効果は強いものとなったが、断熱管を貫通させないとすると、保護層厚みは最低でも 10mm 以上が必要であることが判った。

ケーブルのコンパクト性を確保する観点から、ある程度大きな地絡エネルギーの場合は、断熱管の内管が貫通することはやむを得ない状況と判断する。

また、ケーブルのコンパクト性を失わない範囲のアラミド繊維とアラミド紙の複合構造として、3.6mm 厚と 7.2mm 厚を選び、地絡電流をパラメータに内管が貫通するまでの時間を調べた。その結果を図 2.1.1.2.1-7 に示す。地絡電流、継続時間は場所や運転状況によりまちまちであるが、試験の結果から、それぞれの特性曲線の上側は断熱管が貫通する領域であり、断熱管の真空低下や液体窒素漏洩の対策が必要な目安を得ることができた。

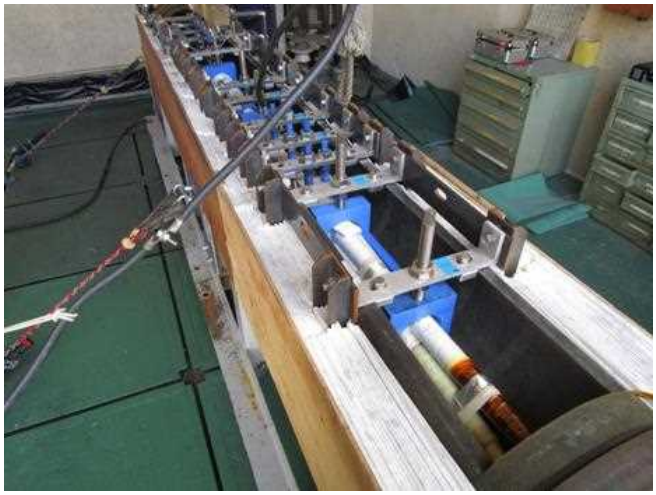


図 2.1.1.2.(1)-6　試験サンプル、装置写真

表 2.1.1.2.(1)-6　コア試験（内管貫通確認）の試験結果（@1.5kA、2sec）

保護層構造	保護層の貫通有無
アラミド繊維（3.6mm）	0.1sec 後貫通
アラミド繊維（7.2mm）	0.5sec 後貫通
アラミド繊維（14.4mm）	1.4sec 後貫通
アラミド繊維＋紙（7.2mm）	0.4sec 後貫通
アラミド繊維＋紙（14.4mm）	貫通せず

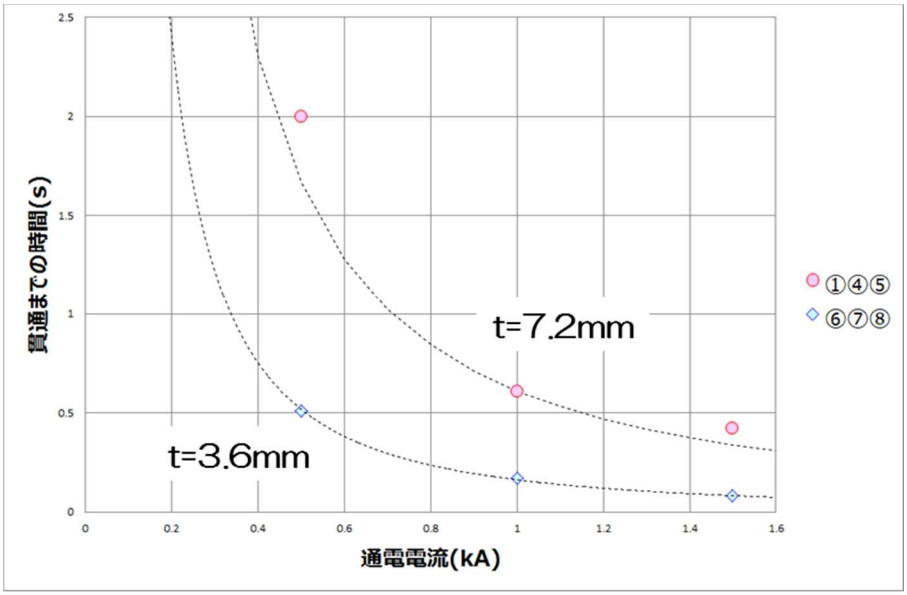


図 2.1.1.2.(1)-7　地絡電流と断熱管貫通までの時間の関係

（ｖ）ケーブルコア試験④

本試験では、地絡時に地絡相が隣接相への影響を確認することを目的とした。

試験サンプルは、断熱管の中に三心コアを入れた状態で固定させ、地絡コア（W 相）と隣接コア（U 相）との間には、19.6mm 厚のアラミド繊維を挟み込む構造とした。地絡コア（W 相）の絶縁層に細線をいれた地絡点は、U 相に破壊が向く様に調整した。試験サンプルの構成を図 2.1.1.2.(1)-8 に示す。

1.5kA、2sec 時の地絡条件での試験の結果、相間に挟んだ保護層は 8.4mm 厚が貫通したものの、隣接コア（U 相）のシールド層に損傷は見られなかった。

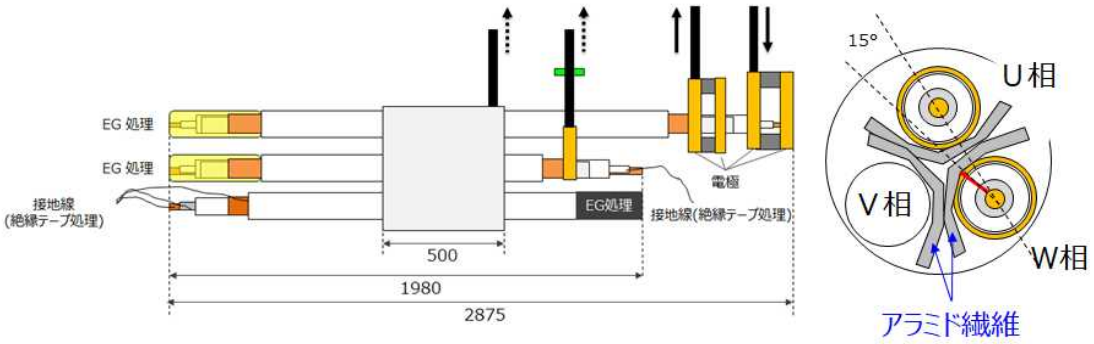


図 2.1.1.2.(1)-8　コア試験（隣接相の影響確認）の地絡試験構成

（vi）ケーブルコア試験⑤

これまでのケーブルコア試験では、地絡時に断熱管内管までを模擬して、貫通の有無を確認していたが、断熱管の外管までを貫通するのかを確認するために本試験を行った。また、本試験では、三心コア中央に引き通している全長温度測定用の光ファイバーが地絡点近傍の温度上昇を検知可能かの確認についても合わせて行った。

試験サンプルの構成を図 2.1.1.2.(1)-9 に示す。試験サンプルは断熱管（テンションメンバー付）が超電導ケーブルコア三相を内包している。コアサンプルの地絡点は、シート試験と同様、細線を絶縁層に埋め込み、シールド層と導体層が導通した状態にした。

試験後の断熱管表面写真を図 2.1.1.2.(1)-10 に示す。断熱材が巻かれた内管は貫通しており、外管内部も損傷しているものの、外管の表面には貫通孔がみられなかった。また、光ファイバーで計測した地絡前後の温度分布を図 2.1.1.2.(1)-11 に示す。光ファイバーは地絡時の温度上昇を検知出来ており、事故点の同定に使用できると思われる。

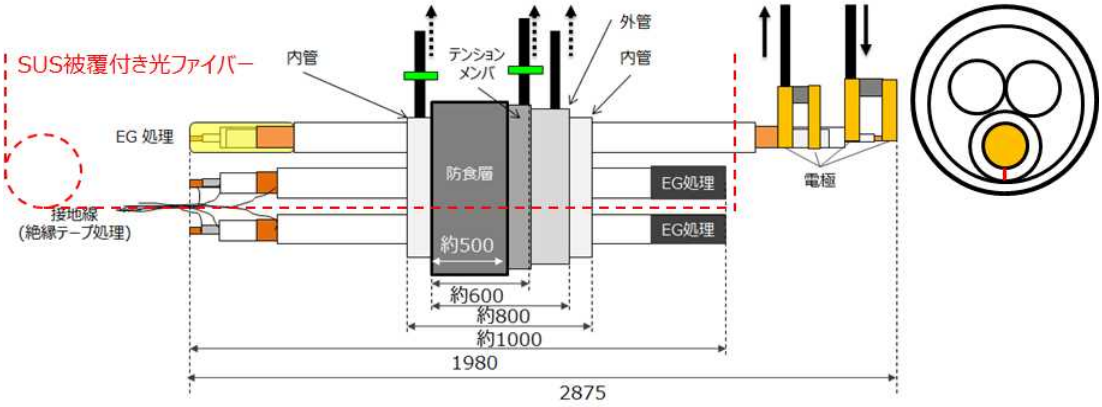


図 2.1.1.2.(1)-9　ケーブルコア試験⑤の試験構成

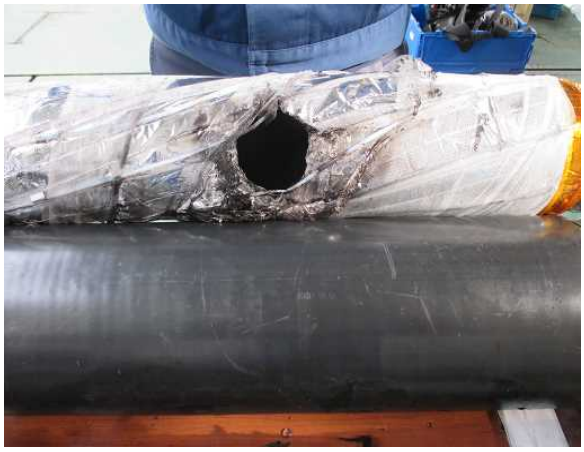


図 2.1.1.2.(1).1-10　試験後の断熱管表面写真

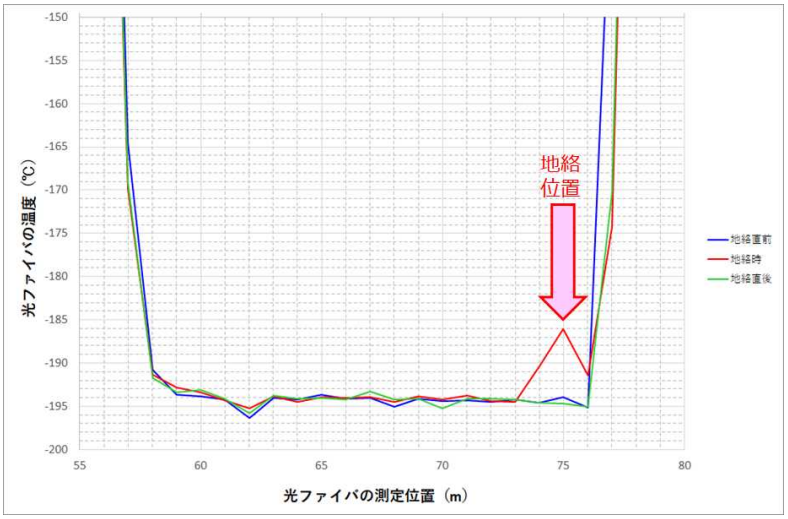


図 2.1.1.2.(1)-11　地絡前後に測定した光ファイバーの温度分布

(vii) 地絡事故時のシミュレーションについて

これまでの検証結果より地絡時には、内管貫通することを許容せざるをえないことが判明したが、地絡電流が小さい場合には貫通せず、内管内圧力が上昇したままになることが想定される。この場合のリスクを評価するため、地絡時に内管が貫通しない場合の液体窒素中の圧力上昇とその圧力伝播についてシミュレーションを行った。

シミュレーションをする前の液体窒素基礎特性の確認として、液体窒素中の初期圧をパラメータにした圧力伝搬速度を He ガス試験で測定した。He ガス試験の試験装置概要図を図 2.1.1.2.(1)-12 に示す。高圧源（高圧 He ガス）と液体窒素との間に金属薄板を設けており、液体窒素中の初期圧は約 0.2、0.5、0.8kPaG で管理した。液体窒素中の平均圧力伝播速度は図 2.1.1.2.(1)-12 の圧力計①と圧力計②で計測した圧力波形の反応時間の差異から算出した。その結果を表 2.1.1.2.(1)-7 に示す。液体窒素の初期圧が 0.2～0.8MPaG の範囲で変化しても、LN2 中の圧力平均伝播速度は 851～889m/s であり、大気圧飽和状態の LN2 中の音速約 850m/s と大きく変わらない事を確認した。

次に、地絡発生時に超電導ケーブルの内管が貫通しない場合の液体窒素中の圧力上昇とその圧力伝播について解析を行った。解析コードは気液の相変化が考慮でき、印加エネルギーの保存性が良い CRUNCH　CFD を採用した。解析モデルは軸対称モデルを採用しており、イメージ図を図 2.1.1.2.(1)-13 に示す。解析条件は、内管が貫通しないエネルギーとして 50kJ/0.5sec（約 0.5kA/0.5sec 相当）を地絡点に印加し、初期条件として液体窒素温度を 77K、初期圧を 0.2MPaG とした。解析の結果を図 2.1.1.2.(1)-14 に示す。長尺モデルでの解析の確からしさについては、引き続き確認していく必要性があるものの、地絡点の圧力上昇は約 1.8MPa であり、10m 程度離れた場所で圧力は半分程度になる解析結果となったことから、圧力による影響は限定的だと思われる。

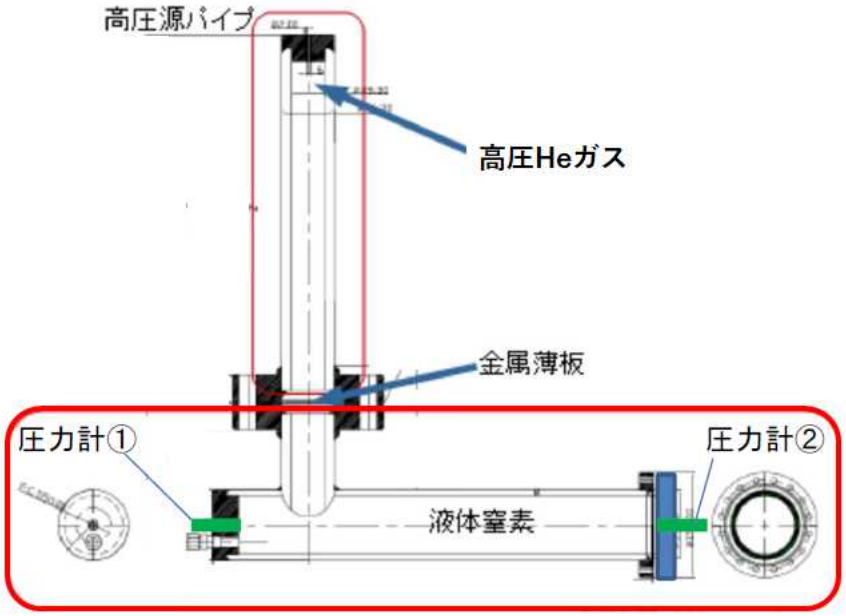


図 2.1.1.2.(1)-12　高圧 He ガス試験

表 2.1.1.2.(1)-7　高圧 He ガス試験結果

試験No.	LN2 初期圧	He 印加圧	平均伝播速度
1	0.2MPa	0.6MPa	869m/s
2	0.5MPa	1.9MPa	889m/s
3	0.8MPa	1.1MPa	851m/s

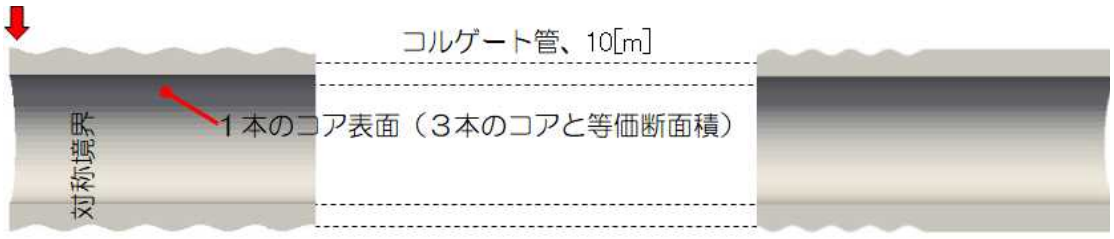


図 2.1.1.2.(1)-13 解析モデルのイメージ図

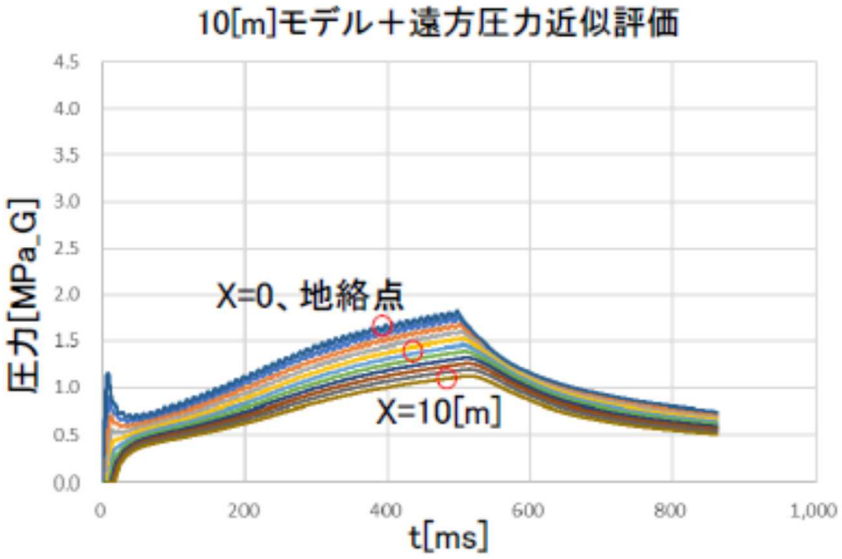


図 2.1.1.2.(1)-14 解析結果

(viii)ガイドラインへの反映点

項目	内容	備考
ケーブルの状態	・事故電流大、継続時間長い*場合 断熱管が穿孔し、真空破れ、LN2 漏えいが起こる。 →液体窒素漏えい量を少なくする対策要 ・事故電流小、継続時間短い場合 断熱管は穿孔せず、内部の圧力上昇が起こるが、数気圧、数mの範囲で、他設備へ影響を及ばさないレベル。	*試験では外管が貫通試験結果であったが、対策としては漏れた場合を検討。 *高速遮断器が適用できれば、電流大でも漏えいを防ぐことができる。
事故点の同定	漏えい事故を想定し、早期の場所の同定要 ・光ファイバー温度計の活用 ・PD 測定器の活用**	**常時 PD 計測を行い、両端センサーの応答差から場所を推定
冷却システムへの指令	事故検知***後、漏えい量の低減、早期の昇温のため、冷凍機、ポンプを停止させる。	***通常の保護リレーで検知可

(2) 275kV 級ケーブル地絡事故評価（古河電工）

地絡事故時に周囲に影響を及ぼさないために、超電導ケーブルの外管の損傷を抑えることを目指して、前プロジェクト「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」では縦置き型 1 m 短尺ケーブル試料を用いて地絡模擬試験を行ってきた。防護対策なしでは AC5 kA-3 サイクルで（地絡事故時に生じるア

ーク放電により）外管まで穿孔してしまうのに対し、防護対策として図 2.2.2-1 に示す様に断熱内管の外周部へポリエチレン不織布からなる保護層を設けることで（アーク放電が絶たれて）AC20 kA-3 サイクルでも穿孔を防止できることを確認した。



図 2.1.1.2.(2)-1　断熱内管への保護層巻付の様子

本プロジェクトでは、さらに商用ケーブルの状況に近い模擬試験を行うために、2.5 m 長の 275 kV 級超電導ケーブルコアを断熱管と終端容器に収納した横置き型ケーブル試料を作製して地絡模擬試験を行った。断熱管の上端面が開放されている縦置き型ケーブルに比べて、冷媒圧力挙動とその影響に関して実際の地絡事故に近い知見が期待される。横置き型地絡試験試料の構造図を図 2.1.1.2.(2)-2 に示す。人工地絡点は縦置き型と同様ケーブルコア側面にドリルで穴を開け、その中に鉄ピンを挿入して導体層とシールド層を短絡させることで作製した。人工地絡点の位置は、ケーブル長手方向に関してケーブル試料中央部、周方向に関して鉛直下側とした。両終端容器の上部には電流リードを保持するための部材が渡してあるのみで、密閉はされていない。

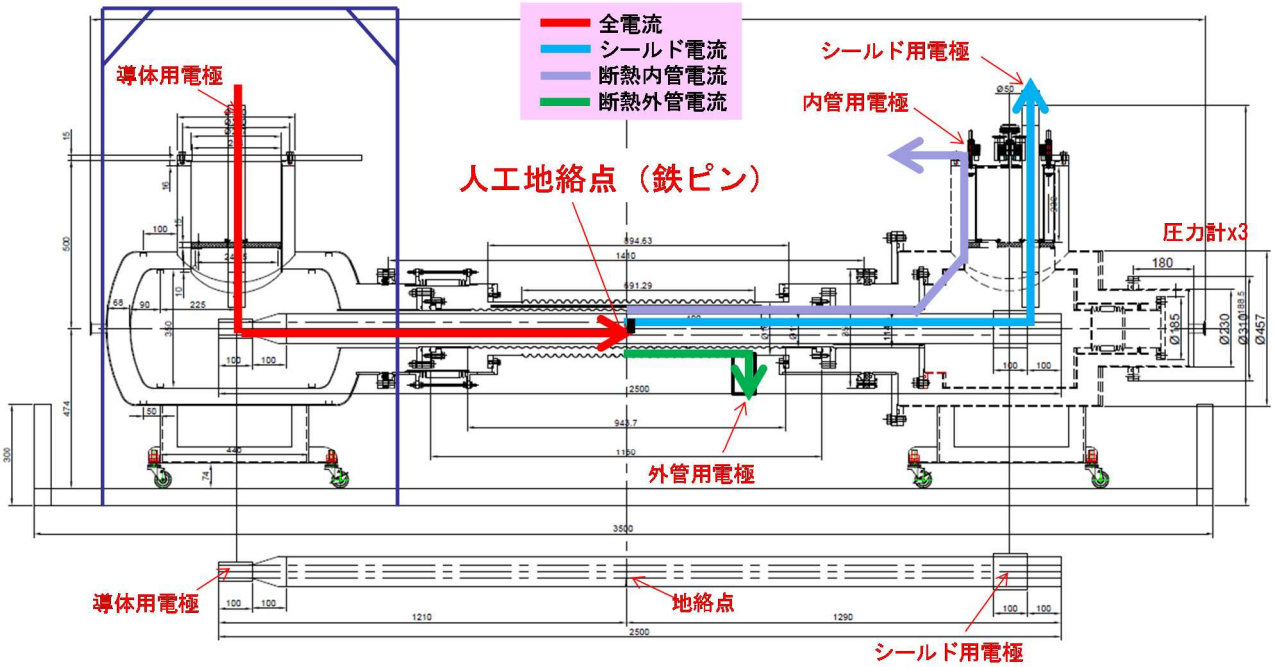


図 2.1.1.2.(2)-2　横置き型地絡試験試料の構造図

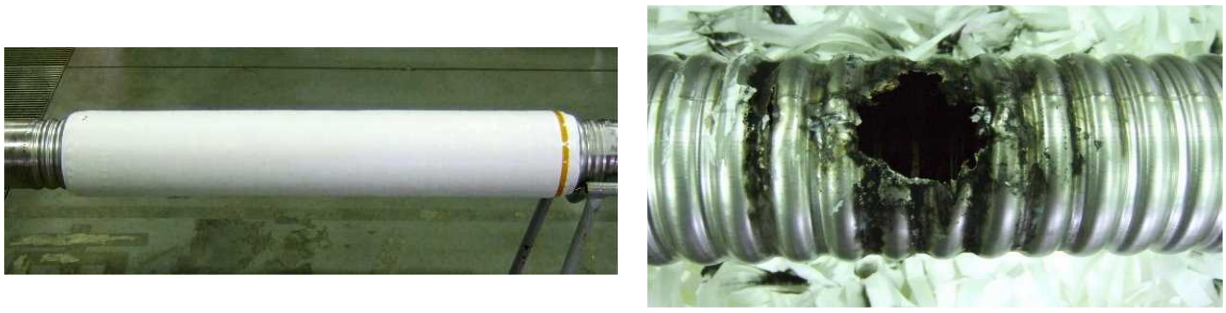
地絡模擬試験では、終端容器の主円筒部を満たす程度に液体窒素を注入して

冷却し、AC10kA-3 サイクルの地絡模擬通電を行った。セッティングされ、地絡模擬通電される直前の試料の様子を図 2.1.1.2.(2)-3 に示す。試験結果は、従来の縦置き型試料と同じような電流挙動を示した。すなわちシールド層と断熱内管に地絡電流が流れた一方、断熱外管には地絡電流が流れなかった。この横置き型試料でも断熱内管外周部に地絡保護層を設けていたが、この結果から横置きの構成であっても断熱内管外周部に地絡保護層が効果的にアーク放電を遮断することが確認された。



図 2.1.1.2.(2)-3　組み立てられた横置き型地絡試料の様子

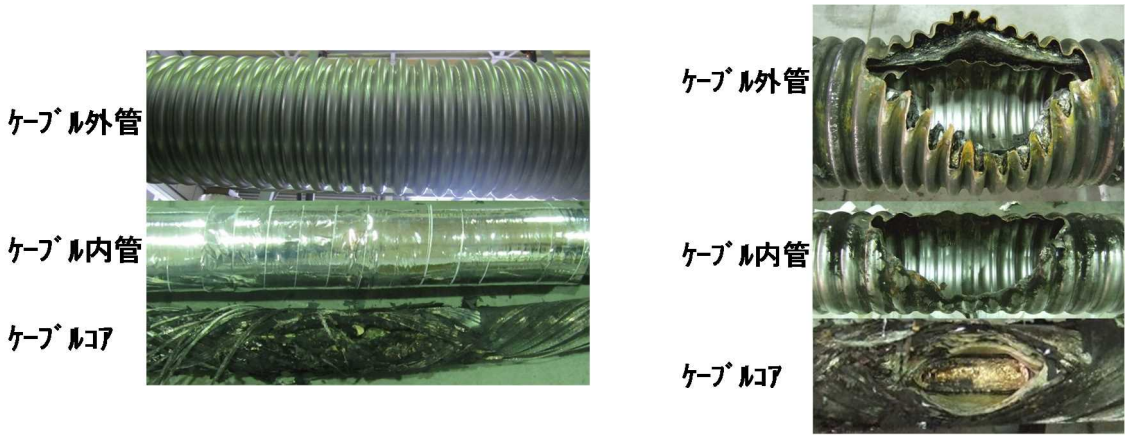
地絡模擬試験を実施した後の横置き型試料を解体調査したところ、ケーブルコアは縦置き型試料のもの同様激しく損傷していた一方、断熱管と両終端容器に明らかな損傷は見られなかった。ただし断熱管をさらに解体調査したところ、やはり縦置き型試料のもの同様内管（SUS 製コルゲート管）には大きな穴が開いており、また地絡保護層もその内径側は熱による損傷を受けていた。損傷していない外径側の地絡保護層を纏った断熱内管、むき出しにされた断熱内管の様子を図 2.1.1.2.(2)-4 に示す。



(a) MLI 除去後、地絡保護層を残した状態　(b) コルゲート管がむき出しになった状態

図 2.1.1.2.(2)-4　地絡模擬試験による断熱内管の損傷の様子

同様に液体窒素浸漬状態で 30 kA までの地絡模擬試験を実施した（終端容器の上部は密閉していない)。結果を表 2.1.1.2.(2)-1 及び図 2.1.1.2.(2)-5 に示す。AC10 kA-3 サイクル及び AC20 kA-3 サイクルの試験条件では断熱外管には地絡電流は流れず、ケーブル外管、内管保護層の外周部に損傷は見られなかった（ケーブルコアは損傷)。しかし、電流値を上げた AC30kA では 1 サイクルで変形・損傷が発生し、断熱外管にも地絡電流が流れた。ケーブル内管は熱により溶損し、ケーブル外管は熱による溶損と圧力による変形が生じた。アーク熱以外に圧力による損壊が観測された。



(AC20 kA 地絡試験)　　(AC30 kA 地絡試験)

図 2.1.1.2.(2)-5　275 kV 地絡模擬試験結果

表 2.1.1.2.(2)-1　275kV 級ケーブル地絡模擬試験結果

通電条件 (3ｻｲｸﾙ)	AC10kA		AC20kA	AC30kA
ｱｰｸｴﾈﾙｷﾞｰ (MJ)	0.37	0.32	1.04	0.45*
外管損傷	なし	なし	なし	あり
内管保護層 損傷層数(枚)	39	16	31	100

*0.5ｻｲｸﾙで破断

また、20 kA 地絡模擬試験にてイメージファイバで地絡時に生じるガスの気液界面の進行速度を観測し、終端容器に設けた圧力計で地絡時の液体窒素圧力挙動を測定し、この測定データよりコードを作成して商用長尺ケーブルを想定した 20 kA 地絡時の圧力挙動シミュレーションを行った。対象ケーブル長を 5 m として、中央に設けた地絡点から 0 m 地点, 1.25 m 地点、2.5 m 地点の圧力の時間推移について解析を行った。その結果を図 2.1.1.2.(2)-6 に示す。図より地絡点における最大圧力は 35 MPa を超えることがわかる。ケーブル外管が損傷しない構造を目指したが、地絡模擬試験を重ねる中で、地絡エネルギーによる穿孔防止は困難であることがわかった。SUS テープ補強により AC30 kA-3 サイクルでも外管が損傷しない様に強化できることも確認したが、封じ込める圧力が大き過ぎて断熱管サイズが大きくなる。穿孔は回避できないので他設備への影響検討、洞道内での安全面（酸欠）の検証を行った。

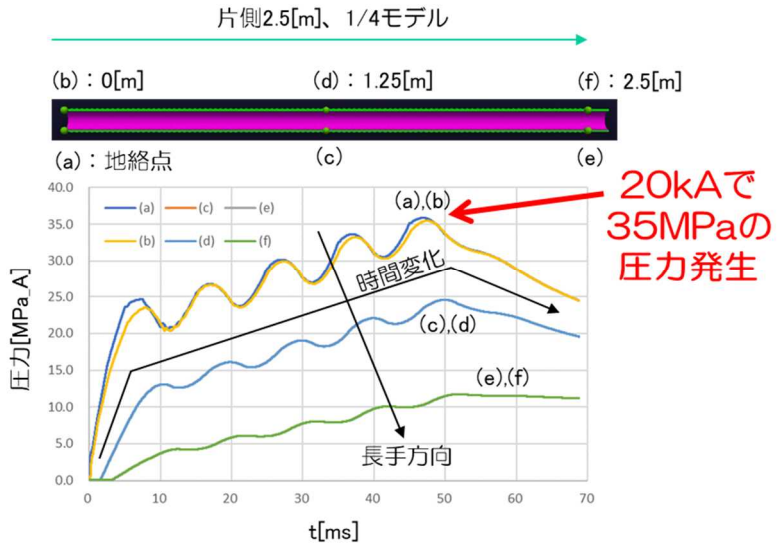


図 2.1.1.2.(2)-6　5 m ケーブルの圧力挙動シミュレーション結果

保護対策していないケーブルを試験体とし、地絡点の下方、外管表面から150mm の位置に通常の銅ケーブルの防護対策にも用いられる 6 mm 厚さの防護板を配置して地絡試験を実施した。試験結果を図 2.1.1.2.(2)-7 に示す。防護板に穴が開かなかったため、他設備への影響防止効果が確認できた。この結果により、通常銅ケーブル防護方法で用いられる防護板を用いて他設備の影響防止対策の見通しを得た。



図 2.1.1.2.(2)-7　防護対策してない試験体を用いた防護板の
効果確認試験結果

2.1.1.3 液体窒素漏洩評価

(1) マンホール内漏えい模擬試験（住友電工）

超電導ケーブルは冷媒として液体窒素を使用しており、断熱管の内部を流れている。このため、2.1.1.2 で検討したように超電導ケーブルで地絡事故が発生し、断熱管が破壊された場合、液体窒素が外部へ漏洩する。また、掘削工事などでケーブルを外部から損傷させた場合も同様に液体窒素が外部へ漏洩する。

まず、地絡事故が原因となった場合の漏洩現象について考える。地絡事故が生じる箇所としては、マンホールや地下管路が考えられる。液体窒素が外部へ漏洩して蒸発した場合、蒸発に伴う吸熱により周囲の温度を低下させることに加え、多量の窒素ガスが発生することによる影響が懸念される。ここではマンホール内で事故が起こり、液体窒素が漏洩した場合の現象について検討し、対策を立てることとした。

マンホール内に液体窒素が漏洩した場合、液体窒素の蒸発による周囲温度への影響や窒素ガスの発生により、マンホール内が酸欠になることや、内部の圧力が上昇するといった現象が考えられる。これらの現象はマンホールのサイズや

周辺環境に大きく依存するが、これらは千差万別である。このため、漏洩現象を模擬するための解析コードが必要となる。本プロジェクトでは、以下のようなステップを踏むことで漏洩現象を模擬する基礎的な解析コードを構築し、対策を検討した。

①コンクリート製小容器の冷却試験

マンホールを形成するコンクリートは、液体窒素による冷却により、熱収縮を起こし、割れなどを起こす可能性がある。特に漏えい時に液体窒素が多量に接触する床面部でコンクリートの割れが生じた場合、液体窒素が即座に土壌へ流れ出すことが想定されるため、周囲環境への影響が大きくなる。このため基礎試験として、コンクリート製小容器に液体窒素を貯液し、割れの有無を確認したところ、コンクリートの割れが生じないことを確認した(詳細は後述)。

②小型マンホールを用いた要素試験

実規模級マンホールで液体窒素漏洩試験を実施する前に、内寸が 1m×1m×1m 程度の小型マンホール容器で要素試験を実施し、温度分布や内圧変化など、漏洩現象の基礎的な特性を取得した。

③実規模級マンホールを用いた本試験

実際に起こりうる現象を検証する目的で、管路口部などの構造も模擬した内寸が 2m×3m×2m 程度の実規模級マンホールを構築し、本試験を実施した。要素試験と同様に温度分布を測定した他、マンホール内部の酸素濃度変化や液溜まりの発生状況を確認した。さらに、液体窒素漏えい時の管路口部の気密性を確認した。

④解析コードの構築

上記の②と③の結果などを元に、要素試験や本試験を模擬する基礎的な解析コードを構築した。また、作成した解析コードを使用し実規模級マンホールの液体窒素漏洩試験データの解析を行い、想定される現象や対策を検討した。

以下、①～④のそれぞれの検討結果について記述する。

① コンクリート製小容器の冷却試験

図 2.1.1.3.(1)-1 に示すように内寸が 600㎜×600㎜×400㎜ 程度のコンクリート製小容器に液体窒素を貯液し、コンクリートの割れの有無などを確認した。約 3 時間の貯液により液体窒素が容器の 8 割程度たまった状態を維持する管理を行ったが、割れなどによる液体窒素の漏れは発生しなかった。液体窒素を蒸発

させ、十分温度が上昇した後に再度状態を確認したが、異常は確認されなかった。よって、以降の漏洩試験実施時にマンホールの割れなどは発生しないと考え、②小型マンホールを用いた要素試験に移行した。



図 2.1.1.3.(1)1-1　コンクリート製小容器の冷却試験

② 小型マンホールを用いた要素試験

内寸が 1m×1m×1m のマンホール内で液体窒素が漏洩した場合の温度、圧力の挙動を調べた。図 1.1.1.3.(1)-2 に要素試験装置のイメージ、図 1.1.1.3.(1)-3 に試験装置の写真を示す。要素試験は外部の液体窒素供給部から配管を通じてマンホール内に液体窒素を注入することで、ケーブル破損時の漏洩現象を模擬した。マンホール内に取り付けた熱電対や蓋に取り付けた圧力計から温度、圧力を測定した。図 1.1.1.3.(1)-4 にマンホール内に取り付けた熱電対の位置を示す。液体窒素の注入量は配管の途中に取り付けたコリオリ流量計で測定した。

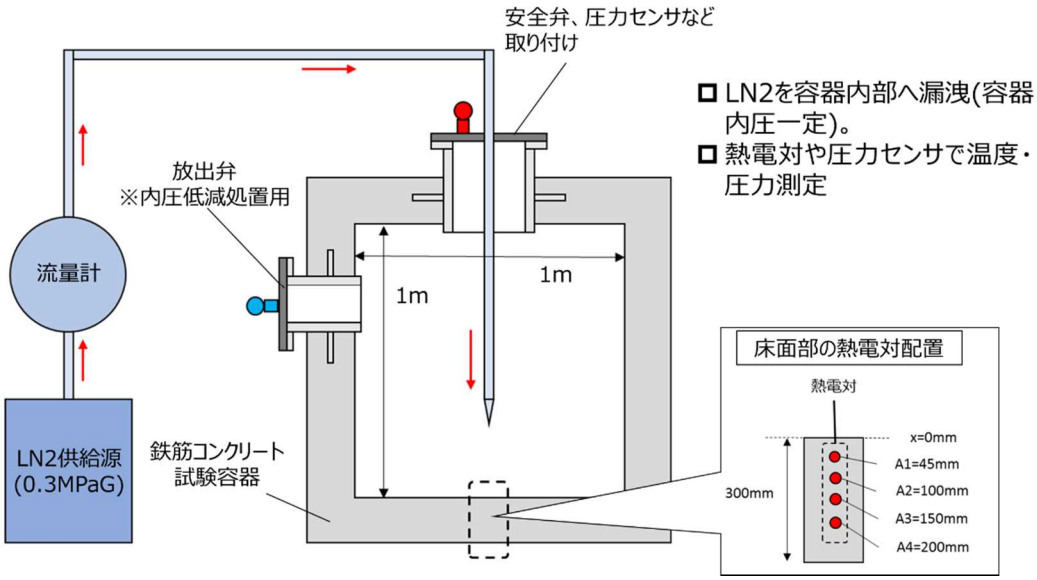


図 2.1.1.3.(1)-2　要素試験イメージ図



図 2.1.1.3.(1)-3　1m×1m×1m マンホール外観写真

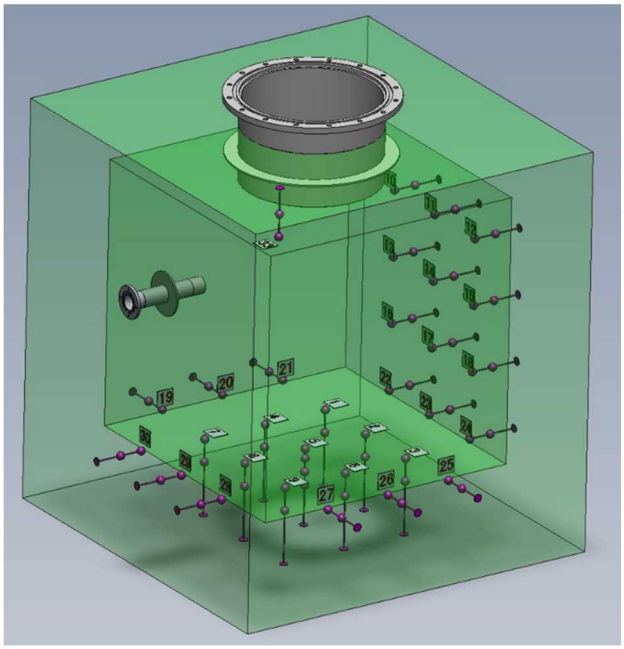


図 2.1.1.3.(1)-4　温度センサー取り付け位置

試験の際の液体窒素の注入量と圧力の挙動を図 2.1.1.3.(1)-5 に示す。図より、注入した液体窒素が蒸発し、容器の内圧が上昇する様子が確認された。また、液体窒素の注入量から簡易的に導出した圧力の解析結果が実測結果とよく一致した。図 2.1.1.3.(1)-6 に配管直下のマンホール床面部の温度分布を示す。A1、A2、A3、A4 と内表面側の熱電対から順に温度が低下しており、液体窒素が床面表面部と接触し、蒸発することで温度低下する様子が確認された。さらに、マンホール床面部の過渡的な熱解析結果が実測結果とよく一致した。これらより、液体窒素漏洩時の温度、圧力変化の基礎特性を取得することができた。

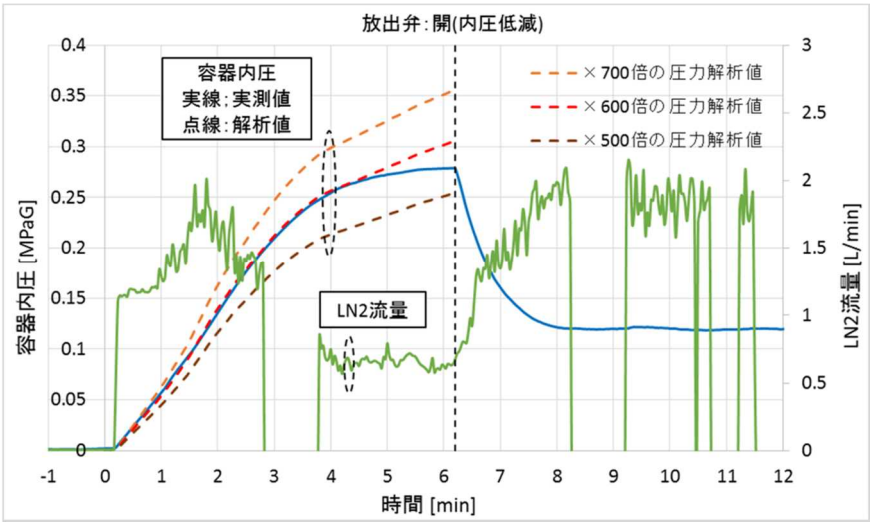


図 2.1.1.3.(1)-5　要素試験時の圧力変化の様子

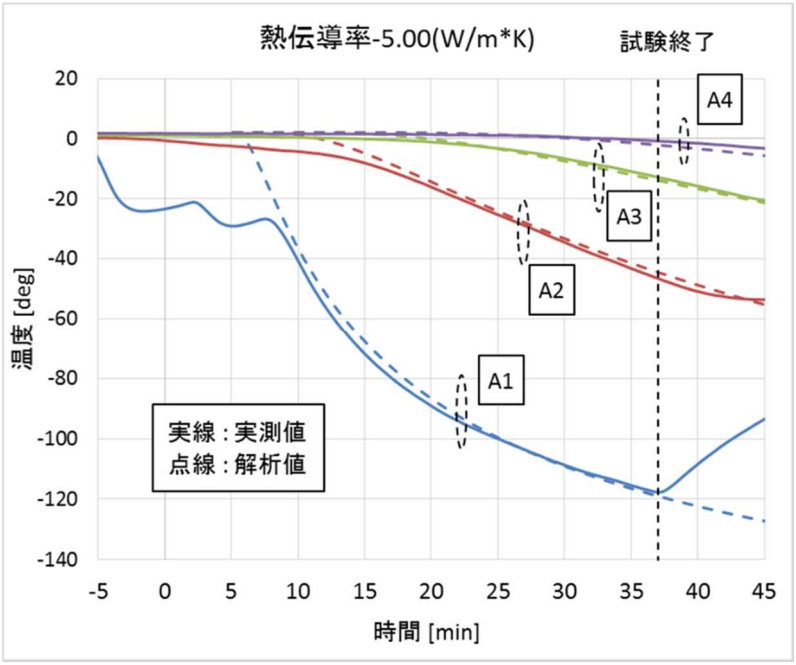


図 2.1.1.3.(1).1-6　要素試験時の温度変化の様子

③ 実規模級マンホールを用いた本試験

実際に起こりうる現象を検証する目的で管路口部などの構造も模擬した内寸が 2m×3m×2m の実規模級マンホールを構築し、本試験を実施した。尚、試験実施は 6 月で、外気温 25℃の条件であった。

要素試験と同様に温度分布を測定した他、マンホール内部の酸素濃度変化や液溜まりの発生状況を確認した。図 2.1.1.3.(1)-7 に試験装置のイメージ、また図 2.1.1.3.(1)-8 に試験装置の写真を示す。実際のマンホール状況を再現するためにマンホール側面部には管路を設け、複数本の CV ケーブルを配置した上で防水処理を実施した。さらに、CV ケーブルのうち、1 本はマンホール内に引き込み、CV ケーブルのオフセット部を模擬した。これは、液体窒素の蒸発により発生した低温ガスが吹き付けられることで CV ケーブル表面被覆のクラックやオフセット異常の有無を検証するためのものである。尚、CV ケーブルの表面には熱電対を配置し、表面の温度変化を測定した。また、漏えいした液体窒素の大部分はマンホール床面部と接触し蒸発することから、マンホール床面部の温度変化を確認するために熱電対を取り付けた。熱電対と液体窒素注入部の位置関係を図 2.1.1.3.(1)-9 に示す。熱電対 7 番が注入口の直下近傍となる。

液体窒素供給部から配管を通じてマンホール内に液体窒素を注入した。流量については液体窒素注入量の時間変化を測定することで求めた。また、液体窒素が内部に溜まった場合を想定し、簡易の液面計として、マンホール床面から 20mm と 50mm の高さの位置に熱電対を配置した。さらに、マンホール内部に酸素濃度

計を配置し、試験時の酸素濃度を測定した。側面部には開口部を設け、試験時に開放することで換気状態を模擬した。

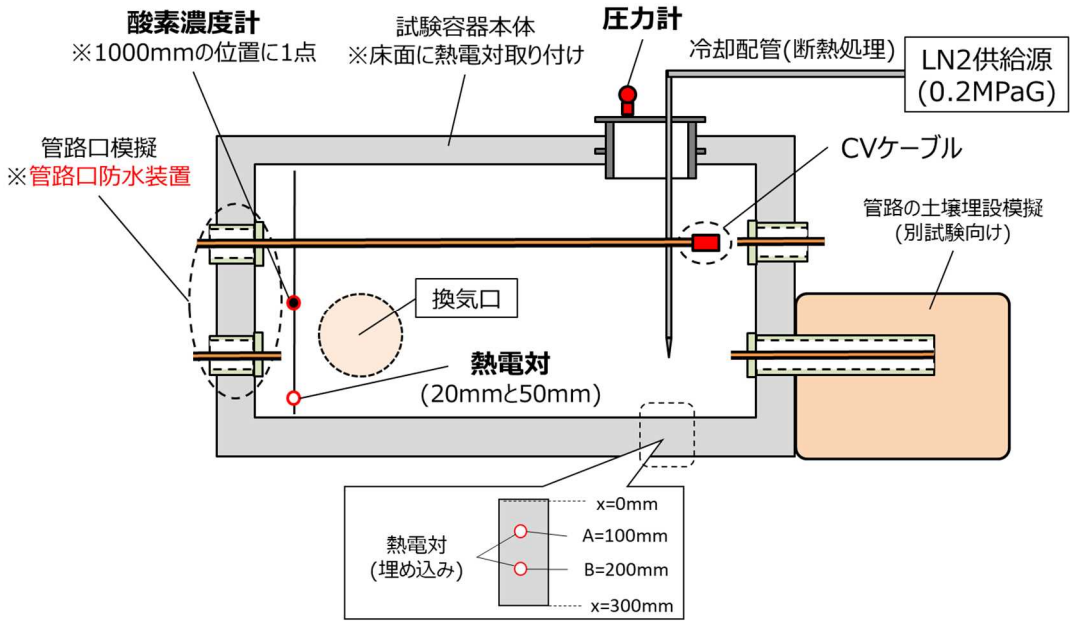


図 2.1.1.3.(1)-7　漏洩本試験のイメージ図

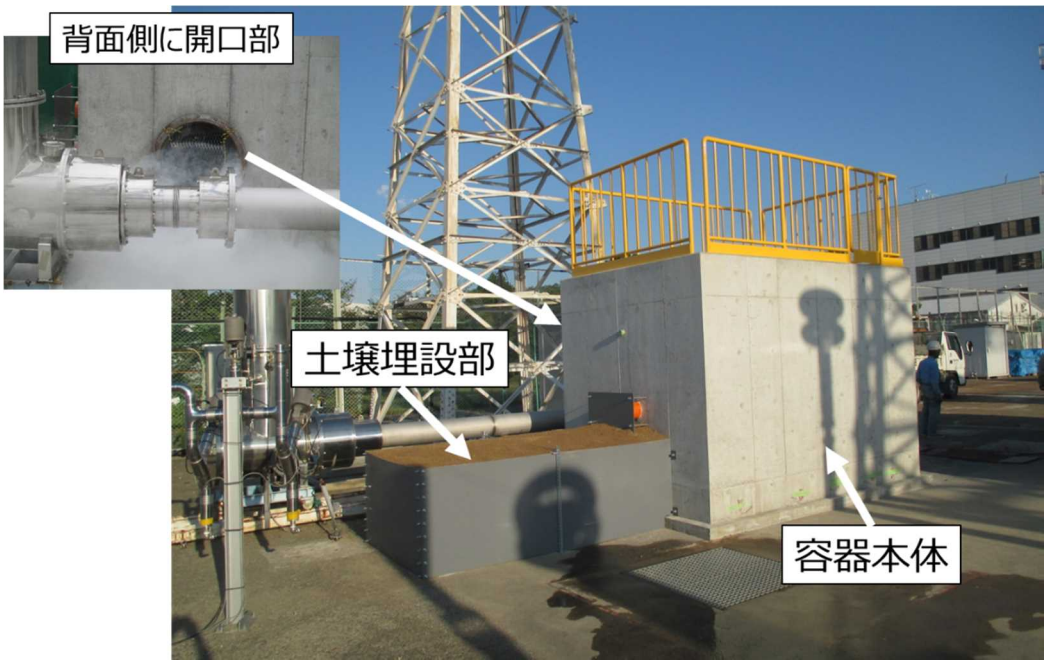


図 2.1.1.3.(1)-8　漏洩本試験の試験装置外観

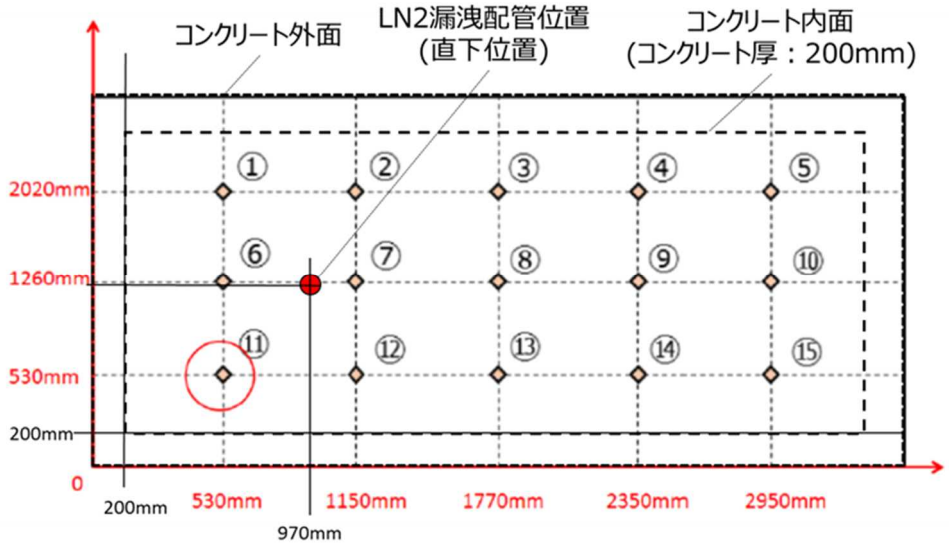


図 2.1.1.3.(1)-9　床面部の熱電対位置

試験における液体窒素注入量は平均 31.7L/min となり、実際の漏洩事故時に想定される期待窒素漏洩量と同規模とした。液面計として取り付けた熱電対の温度変化を図 2.1.1.3.(1)-10 に示す。図より、液体窒素注入開始から温度が低下し、ある時間が経過すると液体窒素温度に達する様子が確認された。さらに、熱電対の温度が十分安定したことを確認したのち、液体窒素注入を停止しても、しばらくの間、熱電対は液体窒素温度を保持し、その後ゆっくりと温度が上昇する様子が確認された。これは、マンホール床面に液が溜まり、注入停止後もしばらく液が残存したことを示している。液体窒素漏洩時の各部温度や圧力変化は液体窒素の蒸発が主要因となることから、このような液溜まりは、漏洩現象停止後も各特性値に影響を与えるものであり、漏洩現象解析時に考慮すべきものと認識した。

図 2.1.1.3.(1)-11 に液体窒素注入口直下の 7 番の位置における床面部の温度変化を示す。マンホール床面に近い部分から温度が低下していることに加え、液体窒素の注入停止後もしばらくの間温度が低下する様子が確認された。マンホール床面部の温度上昇が生じる時間が、液溜まりが消失した時間と同時刻であることから、マンホール内に生じた液溜まりの蒸発によって引き起こされたものである。

また、図 2.1.1.3.(1)-12 にマンホール内の酸素濃度変化を示す。初期値 21%程度であったが、液体窒素注入開始から数分で 18%を下回った後、最低で 5%程度に達した。液体窒素が容器内に残存する間は 5%程度を維持していたが、液体窒素が完全に蒸発した後は、緩やかに上昇し、約 60 分後に酸素濃度が初期値 21%に復帰した。試験はマンホール側面を開放した状態で実施しており、強制換気な

どの処置は取っていない。このため、自然換気の場合、容器内の液体窒素が完全に蒸発してから 1～2 時間程度で換気が行われると考えられる。

試験時に測定した CV ケーブル表面の温度変化を図 2.1.1.3.(1)-13 に示す。CV ケーブルの被覆である架橋ポリエチレンの低温脆化温度であるマイナス数十度程度まで表面温度が低下する様子が確認されたものの、試験後に内部の CV ケーブルを調査したが、被覆部のクラックなどの異常は確認されなかった。

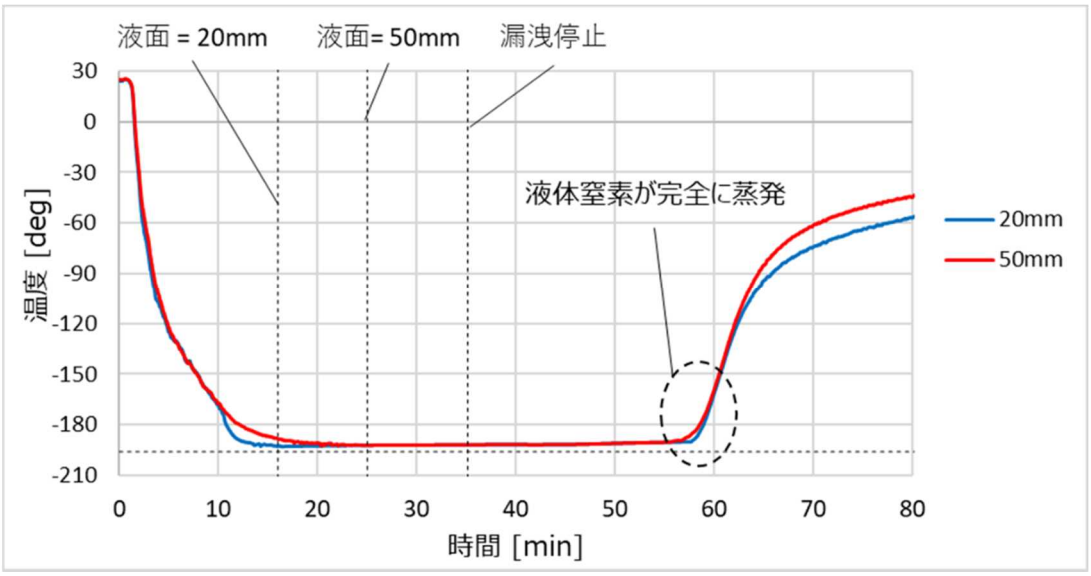


図 2.1.1.3.(1)-10　液面レベル測定用熱電対の温度変化

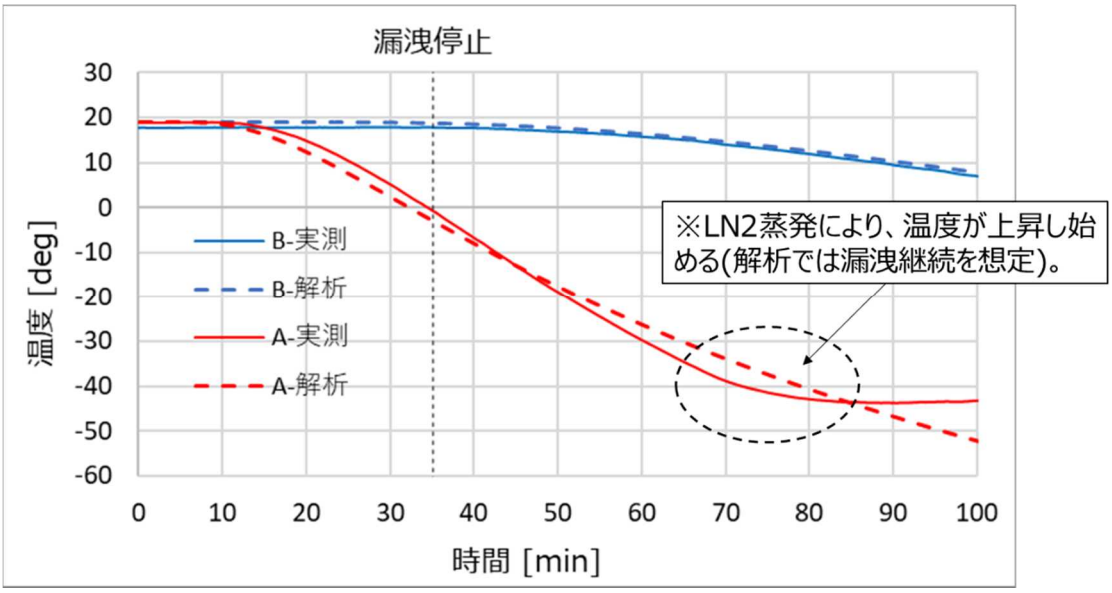


図 2.1.1.3.(1)-11　マンホール床面部の温度変化

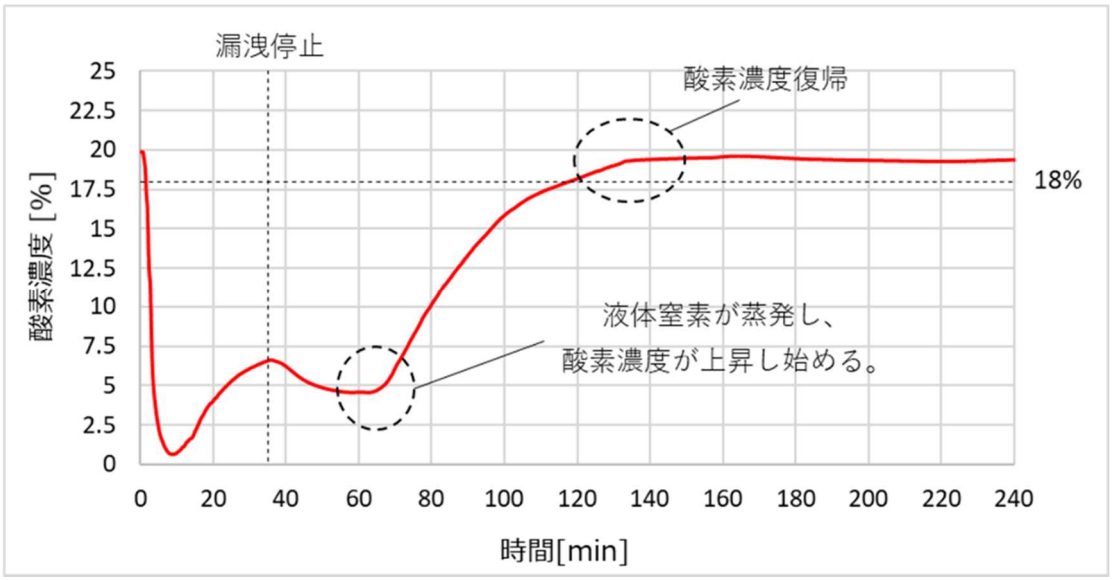


図 2.1.1.3.(1)-12　温度センサー取り付け位置

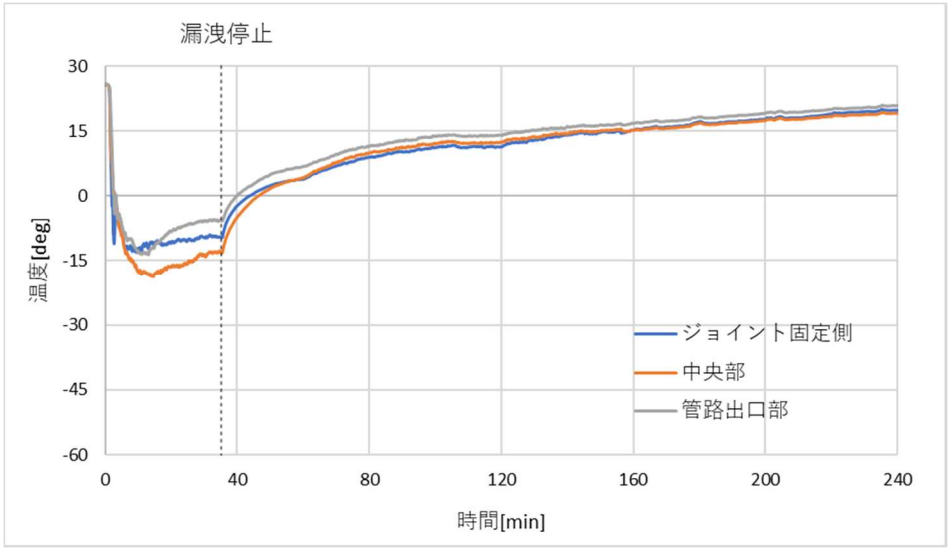


図 2.1.1.3.(1)-13　CV ケーブル表面の温度変化

次にマンホール容器と管路口部の気密性の確認試験を実施した。図 2.1.1.3.(1)-14 にマンホール本体部の気密性確認試験のイメージ、図 2.1.1.3.(1)-15 に管路口部の気密性確認試験のイメージを示す。試験では窒素ガスを注入し、注入量と圧力変化などから気密性を確認した。

マンホール本体部の気密性確認試験における窒素ガス注入量と圧力変化を図 2.1.1.3.(1)-16 に示す。時間ゼロ時点でマンホール内圧を 25kPaG とし、ガス注入を停止したところすぐにマンホール内圧が低下する様子が確認された。マンホール内部からのガス漏れを意味する結果であり、マンホール周囲を調査した

ところ、管路とマンホールの接続部からのガス漏れを確認した。リークチェックの様子を図 2.1.1.3.(1)-17 に示す。管路とマンホール接合部はモルタルを使用しており、マンホールで一般的な構造である。従って、実際のマンホールも、気密性が低く比較的早くにガスが拡散すると考えられる。また、図 2.1.1.3.(1)-18 に管路口部の気密性確認試験における窒素ガス注入量と圧力変化を示す。マンホール本体部試験と同様に、管路内圧を最大 40kPaG とし、ガスの注入を停止したところ、内圧が低下する様子が確認された。

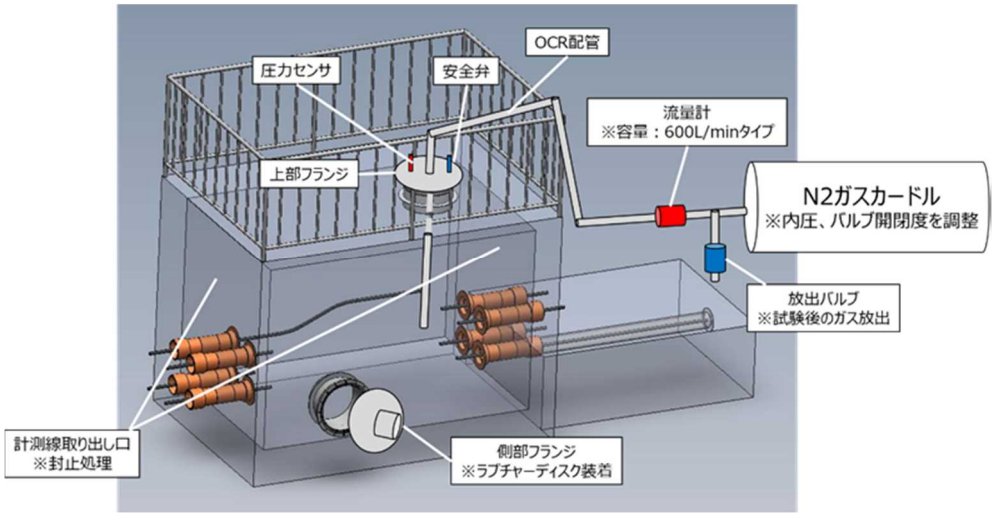


図 2.1.1.3.(1)-14　マンホール全体の気密試験イメージ図

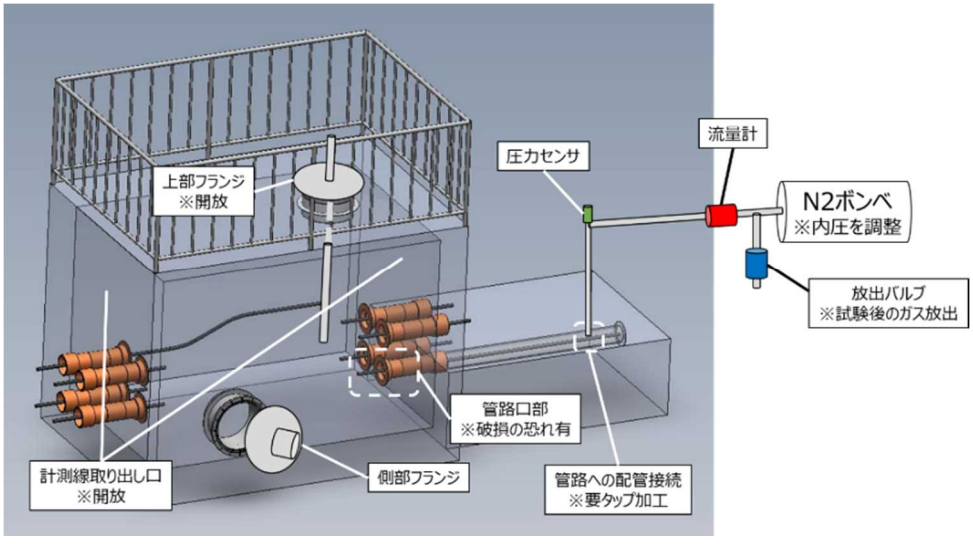


図 2.1.1.3.(1)-15　管路部の気密試験イメージ図

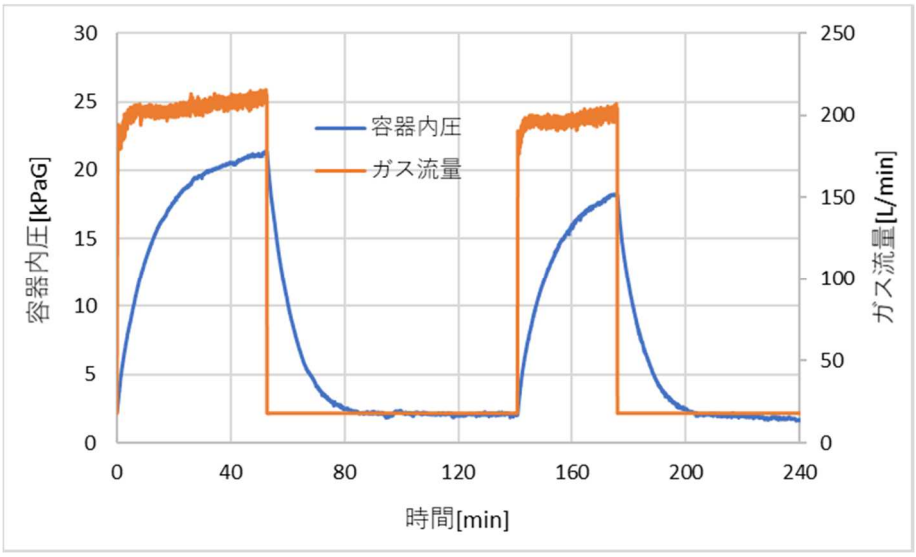


図 2.1.1.3.(1)-16　マンホール全体の気密試験の結果



図 2.1.1.3.(1)-17　管路模擬部のリークチェック

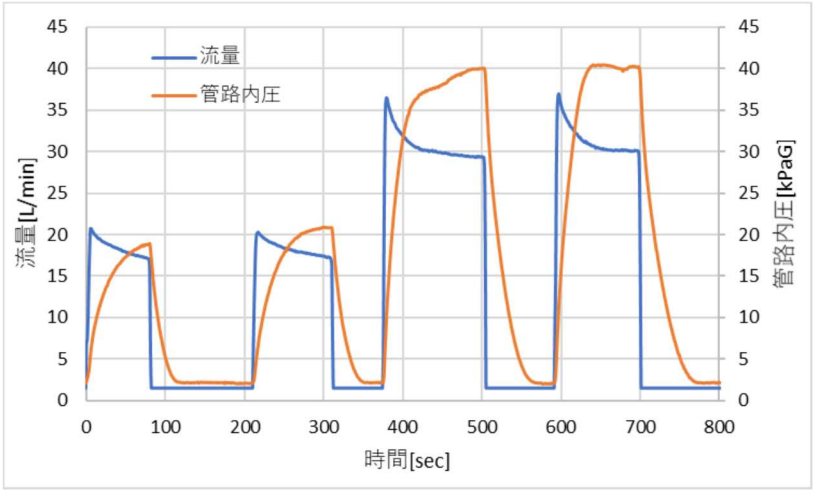


図 2.1.1.3.(1)-18　管路部の気密試験の結果

液体窒素の液面レベルの解析には、液体窒素の注入量と蒸発量の解析が必要であり、マンホール床面部と液体窒素の接触による蒸発の状態に依存することから、液体窒素蒸発量と温度変化を連成解析することで求めた。図 2.1.1.3.(1)-19 に液面レベルの推移を示す。図より、試験開始から 16 分、25 分時点での液面レベルが一致している。

以上より、実規模級マンホールを模擬した本試験を行い、より実際の形態に近い漏洩現象の特性を取得できた。

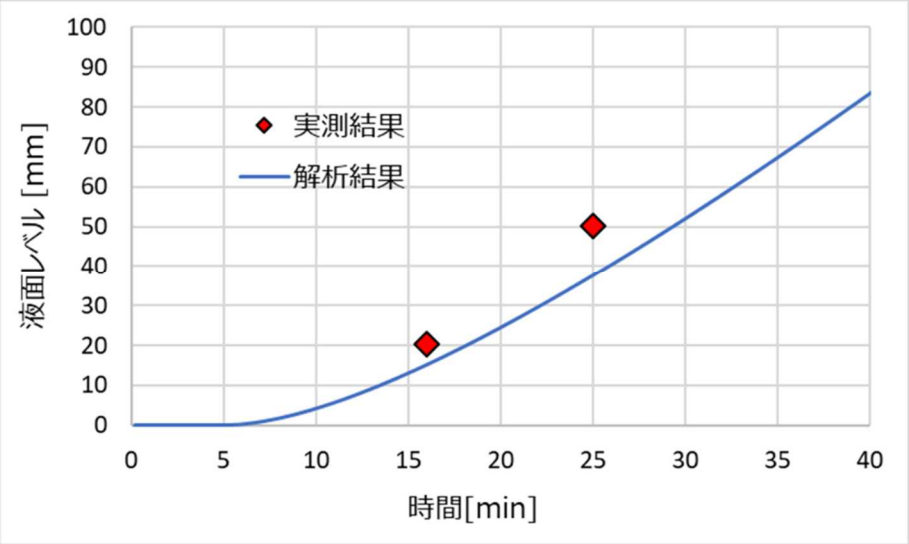


図 2.1.1.3.(1)-19　液面レベル変化の実測結果と解析結果

④ 解析コードの構築

②要素試験と③本試験を実施し、マンホール内での液体窒素漏洩による温度変化や圧力変化、酸素濃度変化などの特性を取得した。解析コードを構築するにあたり、マンホール床面における液体窒素の液溜まり発生は、液体窒素の漏洩を停止した後も各特性への影響が継続する要因となることから解析コードへ反映する必要がある。解析において考慮すべき液体窒素の液溜まり状況は、液体窒素の漏洩量と蒸発量に依存することから、液体窒素漏洩量に対する蒸発量の解析とマンホール床面部の過渡的な温度解析を連成した。

漏洩した液体窒素は、主としてマンホール床面部と接触することでマンホール本体から吸熱し、そのために液体窒素が蒸発する。液体窒素の漏洩量を既知の値とすると、液体窒素の物性から漏洩量に対する蒸発熱 Q1 を定めることができる。液体窒素とマンホール床面部の境界では沸騰熱伝達が生じている。液体窒素の沸騰熱伝達特性とマンホール床面積、床面部の温度から限界吸熱量 Q2 が計算できるが、蒸発量 Q1 に対して、Q1<Q2 の場合は漏洩した液体窒素が全量蒸発し、

Q1>Q2 の場合は Q2 に相当する分の液体窒素が蒸発し、残りが液体窒素の状態でマンホール内に残存する。残存する液体窒素の体積と、既知のマンホール床面積から、液面レベルの推移を計算することができる。液体窒素漏えい時の蒸発と液溜りのイメージを図 2.1.1.3.(1)-20 に示す。

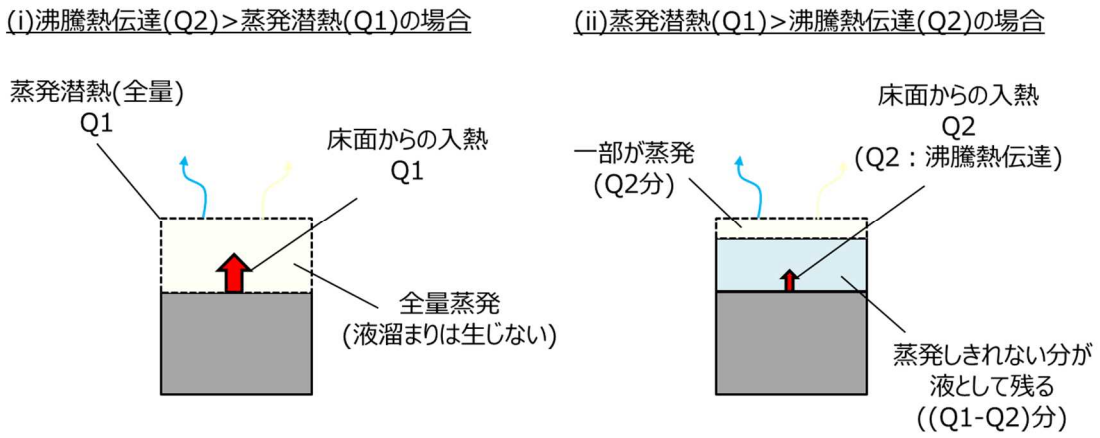
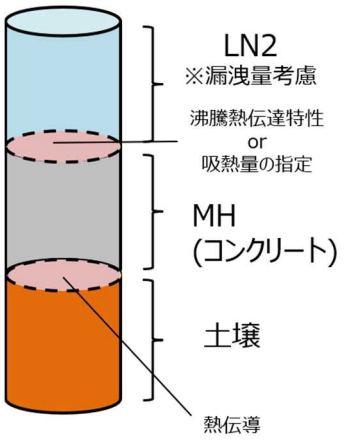


図 2.1.1.3.(1)-20　液体窒素の漏洩と蒸発、液溜まりのイメージ

漏洩した液体窒素の蒸発は主としてマンホール床面部からの吸熱によって生じることから、マンホール床面を切り取った簡易的な 1 次元モデルの過渡解析を行うこととした。解析モデルを図 2.1.1.3.(1)-21 に示す。液体窒素とマンホール床面部の境界は、蒸発熱 Q1、限界吸熱量 Q2 とし、マンホール部はコンクリートの物性値を与えた。マンホールとそれより下部の土壌の境界部については熱伝導解析とし、熱伝達特性は考慮しないこととした。



熱伝導方程式

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2}$$

α=f(k,ρ,c)　k：熱伝導率　ρ：密度　c：比熱

沸騰熱伝達特性

$$q = f(\Delta T)$$

q：熱流束
ΔT：界面温度差

	熱伝導率 [W/m/K]	比熱 [J/kg/K]	密度 [kg/m3]	断面積 [m2]	長さ [m]
LN2	0.007	2040	800	6 (※1)	0.2
MH容器 (コンクリート)	2.56 (※2)	1050	2300		0.3
土壌	0.7	1700	1340		～10

※1　想定するMHの床面サイズを考慮。
※2　コンクリートの熱伝導率は土木学会示方書の値を使用。

図 2.1.1.3.(1)-21　温度分布解析のイメージ図

これらの解析コードを用いた計算結果は要素試験や本試験での実測結果とよく一致しており、この解析コードが妥当なものと判断した。

液体窒素の蒸発によるマンホール内の圧力変化は、気化した液体窒素（窒素ガス）の体積から導出した。この際、液体窒素が気化した場合の体積変化を 600 倍とすることで、実測値とよく一致する結果を得られた。尚、ここではマンホール内での窒素ガス対流の影響は考慮していない。

これまでに開発した解析コードを使用し、内寸 3m×6m×3m、側面部には 3×3 の管路口を設けた実規模のマンホールについて、液体窒素漏洩現象の解析を行った。解析モデルを図 2.1.1.3.(1)-22 に示す。解析では漏洩量が 5L/min、及び 50L/min で一定とした場合の圧力変化を図 2.1.1.3.(1)-23 に示す。図より、マンホールの内圧が 3 気圧(300kPaG)に達するのは漏洩発生から 5 分後である。非常に緩やかな圧力変化が示されており、マンホールの蓋から窒素ガスが漏れ出してくる程度と考えられる。

また、漏洩事故発生後に大気開放*とすれば、液体窒素の圧力を小さくすることで漏洩量はさらに低下すると考えられる。(*リザーバタンクの圧力開放弁を遠隔操作で開放する、あるいは人が駆けつけ手動で開放するなどの手段が考えられる。)

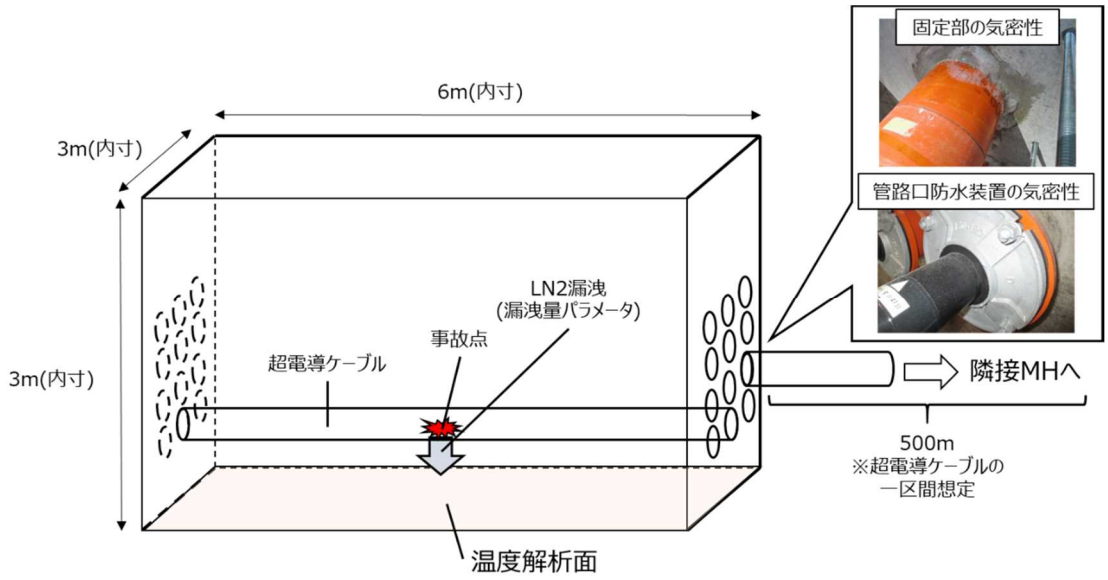


図 2.1.1.3.(1)-22　実規模級マンホールの漏洩解析モデル

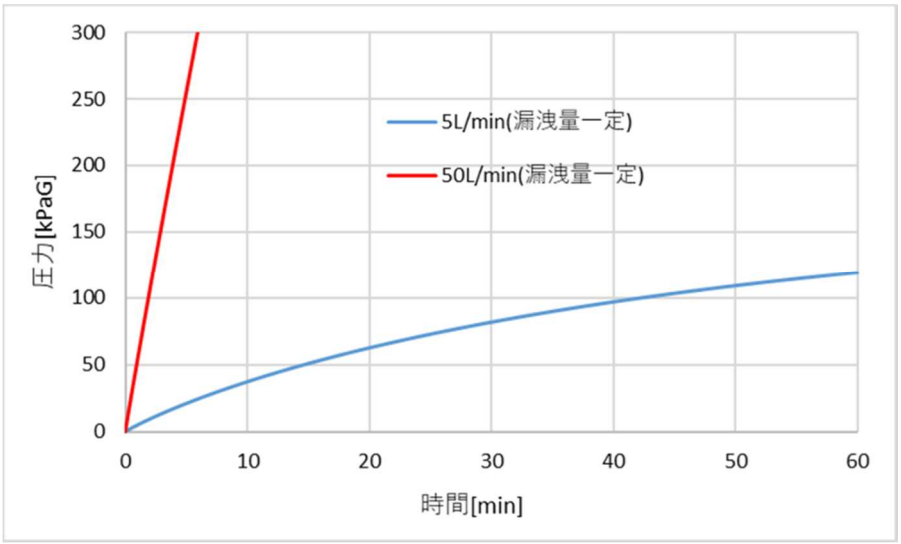


図 2.1.1.3.(1)-23　実規模級マンホールの圧力変化

(2) 地下管路内での漏洩模擬試験

地下管路内での液体窒素の漏洩現象は、地絡事故による断熱管破損の他、地面掘削中の事故によるケーブル外傷によっても発生する。特に掘削中の事故による液体窒素漏洩はケーブル損傷点までの土壌が掘削され、通り道が形成されていることから、液体窒素が地表から外部へ直接噴き出す可能性がある。このため、地下管路での液体窒素漏洩での危険度が大きいと想定する掘削事故での漏洩現象を模擬する試験を行った。

図 2.1.1.3.(2)-1 に試験装置のイメージを、図 2.1.1.3.(2)-2 に試験装置の写真を示す。ここでは地面掘削工事の際に用いられる鋼矢板(シートパイル)によるケーブル断熱管の破断状況を簡易的に模擬した。図 2.1.1.3.(2)-1 に示すように模擬シートパイルと模擬配管を配置した後、その周辺に土壌として真砂土を充填した。ケーブルを模擬した配管から噴き出した液体窒素はシートパイルに衝突し、その表面を伝って土壌の地表に噴き出すことが考えられる。模擬配管から流出させる液体窒素は、実際のケーブルシステムと同様に過冷却状態にするため、冷却システムと接続した試験とした。

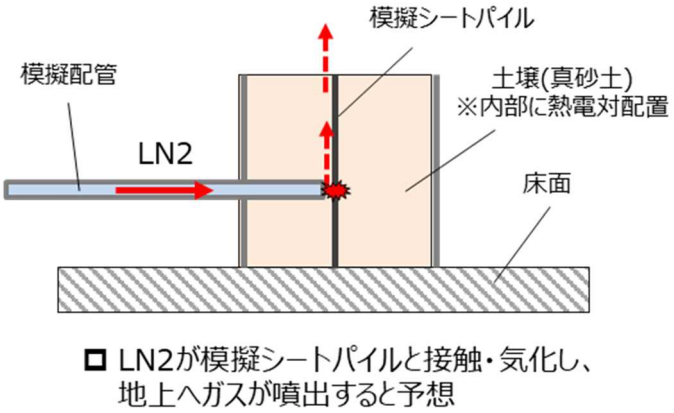


図 2.1.1.3.(2)-1　管路模擬漏洩試験のイメージ図

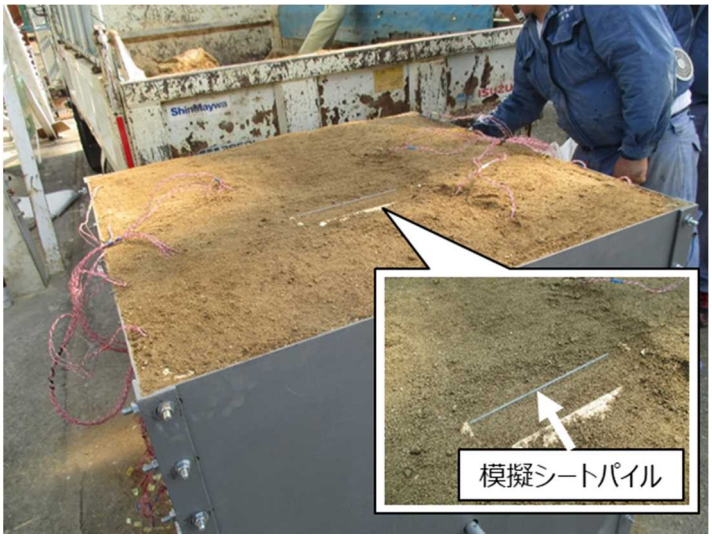


図 2.1.1.3.(2)-2　試験装置の写真

図 2.1.1.3.(2)-3 に液体窒素を流出させる圧力を 220kPaG とした試験時の写真を示す。漏洩試験の開始直後、土壌表面から液体窒素飛沫と窒素ガスが噴き出す様子が確認された。窒素ガスの吹き出し高さは漏洩から 30 秒後には、地表から 1.2m 程度であった。また、噴き出し時には周囲の土壌を跳ね飛ばし、拡散させる様子も確認された。試験終了後にシートパイル模擬部を確認したところ、土壌が大きく抉れているとともに土壌が細かく凍結している様子が確認された。試験後の状況を図 2.1.1.3.(2)-4 に示す。地面掘削時の事故でシートパイルによるケーブル損傷で液体窒素が漏洩すれば周辺へ与える影響が大きいことがわかった。

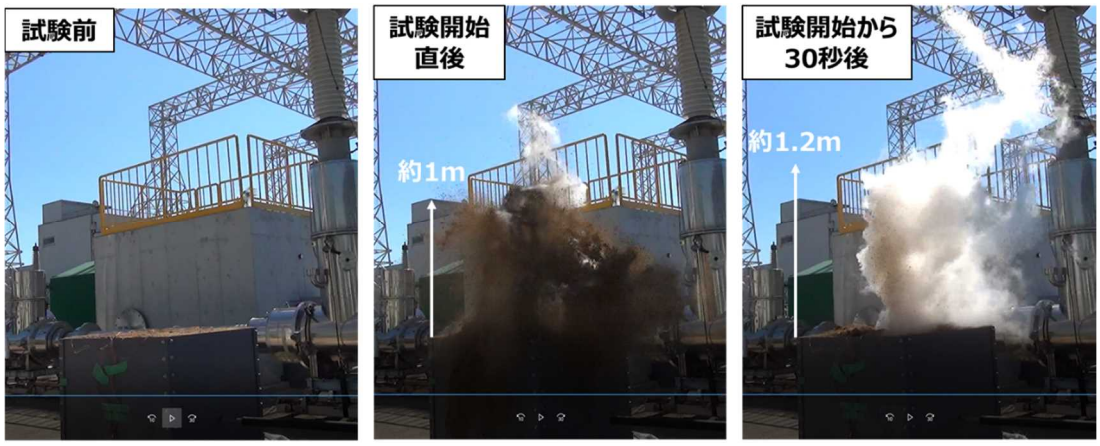


図 2.1.1.3.(2)-3　管路模擬漏洩試験の様子

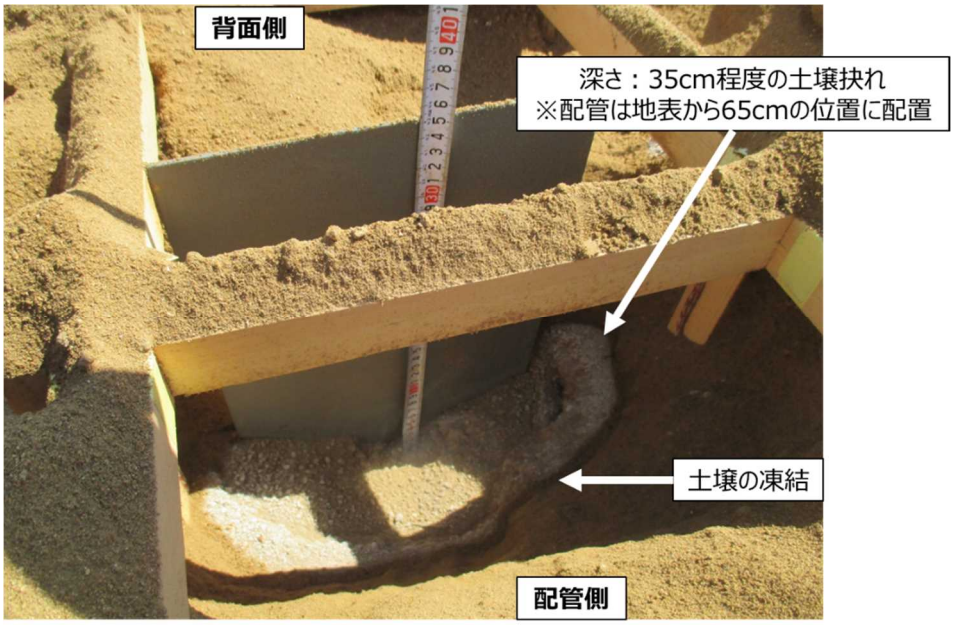


図 2.1.1.3.(2)-4　管路模擬漏洩試験後の土壌の様子

シートパイルによるケーブル破断は地絡や短絡事故を引き起こすため、検知が容易である。液体窒素漏洩時の噴き出しは、ケーブル部の液体窒素圧力と地表部の大気圧との差圧が大きいほど影響が大きくなると予想される。このため、事故検知後に即座に液体窒素を大気開放とすることで地表への液体窒素の噴き出しを抑えることが可能と考えられる。

以上より、地絡事故や掘削事故による液体窒素の漏洩現象が発生した際には、液体窒素を大気開放とすることで影響の拡大を抑制する可能性がある。

(3) ガイドラインへの反映事項

項目	内容	備考
MH 内での液体窒素漏洩	・模擬 MH 試験等でデータを収集、温度、圧力を計算するシミュレーションを開発 ・実規模 MH(3m×3m×6m)のシミュレーション 漏れ量が多い場合*、液が溜まり、圧力が上昇 →事象が遅く、MH の蓋が躍る程度で飛ぶことはない。	*～５０L/min 実線路での最大漏えい量（推定）
地下管路での漏洩	土壌とともに N2 ガスが地表へ噴出 シートパイル付近では土壌の凍結あり。	
事故点の同定	・光ファイバー温度計の活用 ・部分放電（PD）測定器の活用	
被害の最小化	・漏えい量の最小化：冷凍機、ポンプの停止。 ＳＪ**による冷媒流路の遮断 ・事故現場への急行、周囲の安全確保 ・近隣作業者の非難指示	**ストップジョイント ジョイント内部で液止めを作り、流路を外部に取り出す。 図 2.1.1.3.1-28 参照

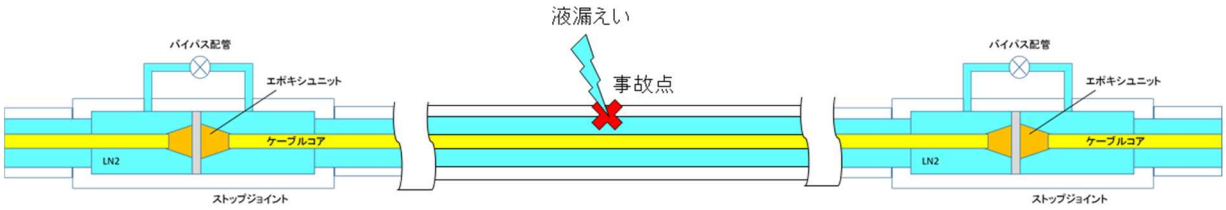


図 2.1.1.3.(2)-5　ストップジョイントイメージ図

事故点で液体窒素の漏えいが起きた場合、図両サイドのストップジョイントのバルブを閉めることにより、漏えいする液体窒素量がジョイント間に限定される。

(4) 洞道内での漏洩事故（古河電工）

地絡事故において地絡点近傍では内部圧力上昇に伴いケーブルに地絡孔が生じる可能性がある。地絡孔が開き窒素が漏えいした場合、洞道内において地絡点近傍では酸素濃度が低下する。この際超電導ケーブルの地絡現象特有のリスク検討項目となるが、窒素ガスは無臭であるがため、窒素ガスの蒸発量によっては地絡点から離れた場所でも酸素濃度欠乏の可能性がありうる。このため漏えい点からの距離に対する酸素濃度分布の挙動（時間変化）をシミュレーションで解

析する。シミュレーション概要を以下に示す。

シミュレーション概要
①液体窒素の漏えい量（その場ですぐにガス化すると想定）と換気量を定める。
②換気と液体窒素のガス化による風の効果（気体分布の押し出し）と拡散の効果を計算する。
③特定時間分だけ②の計算を繰り返し、酸素濃度分布の挙動を見る。

洞道内での液体窒素漏えい検討モデル、及び、検討したケーブル寸法をそれぞれ図 2.1.1.3.(3)-1、図 2.1.1.3.(3)-2 に示す。洞道サイズはφ4 m、ケーブル長は 3 km で、窒素ガス発生位置を 0 m とし、窒素ガスは洞道内では定常的に行われている自然換気と同じ方向に流れるとした。この自然換気の速度を 0.2 m/s とし、液体窒素漏えい後は地絡点にて自然換気による空気が混ざりながら窒素ガスを押し出して広がっていく。

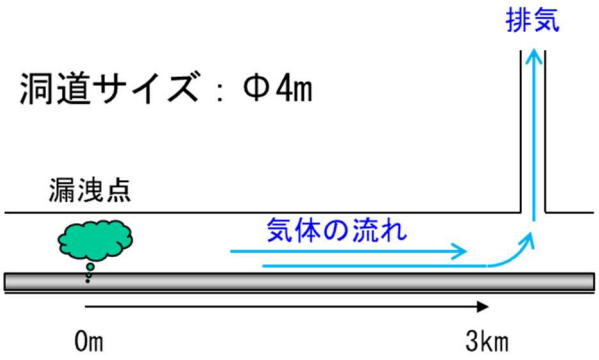


図 2.1.1.3.(3)-1　洞道内での液体窒素漏えい検討モデル

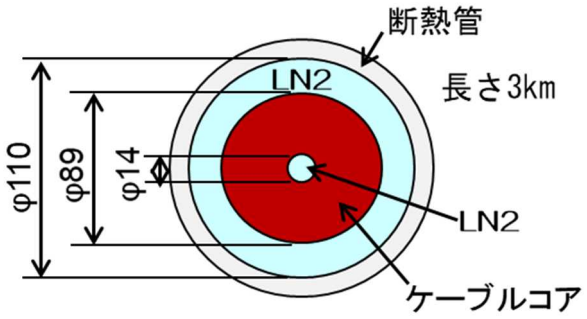


図 2.1.1.3.(3)-2　ケーブル寸法

続いて、気体組成の変化をシミュレートするための計算手順とシミュレーシ

ョンモデル（図 2.1.1.3.(3)-3）を示す。用いた解析のパラメータは表 2.1.1.3.(3)-1 である。

気体組成の変化をシミュレートするための計算手順

0. トンネルの寸法（φ4 m）、窒素ガスの発生量（表 2.1.1.3.(3)-2）、換気速度（後述）を与える。
1. 窒素ガスの発生しているセグメントの大気に発生した窒素ガスを加える。
2. 発生した窒素ガスが周囲の空気を押し出す形で、空気の流れが生まれる。
   （流れの向きは図 2.1.1.3.(3)-3 内では青矢印の向き）
3. （換気がある場合）その分の空気の流れが風速に加えられる。
4. 風速に応じて上流セグメントの空気が流入、等量が風下に流出する。
   窒素ガスは一方向に流れるとしているため、地絡点では常に空気が流入する。
5. 隣接セグメント間の濃度勾配等に応じて生じるガスの拡散の効果をフィックの第二法則より計算する。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$ （D ：拡散係数，c ：濃度）

6. 規格化処理を行う。

→ 微小時間 Dt が進行して 1 に戻る。

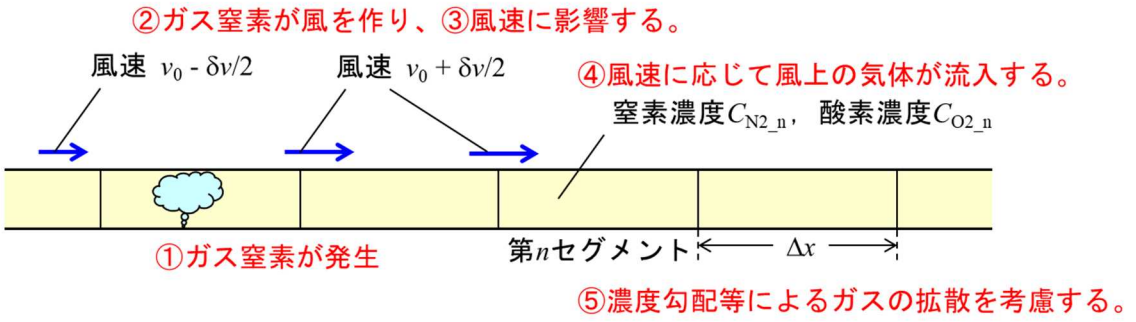


図 2.1.1.3.(3)-3　シミュレーションモデル

表 2.1.1.3.(3)-1　解析のパラメータ

項目	値
内側流路の半径	7.0 mm
保護層の半径	44.5 mm
断熱管内管の内径	55.0 mm
ケーブル長さ	3000 m

表 2.1.1.3.(3)-2　地絡点から漏えいした窒素ガス（GN2）の発生量

	LN2量	GN2量	GN2量
1hで全量流れ出る場合	171.8 (L/min)	103084 (L/min)	1718 (L/s)
2hで全量流れ出る場合	85.9 (L/min)	51542 (L/min)	859 (L/s)
3hで全量流れ出る場合	57.3 (L/min)	34361 (L/min)	573 (L/s)

計算手順 0.にて、窒素ガスの発生量を与えるが、表 2.1.1.3.(3)-2 に示した 3 水準を仮定して計算を行った。一方、換気については、（ｉ）自然換気だけが行われている場合、（ii）地絡事故直後から強制換気（0.6 m/s、0.8 m/s）が行われる場合*、（iii）地絡事故から 2 時間後に強制換気（0.6 m/s、0.8 m/s）が開始される場合**の３つのケースについて検討した。以下に順に結果を示す。

*地絡事故発生を自動検出して直ちに強制換気が開始されるシステムを想定した。

**地絡事故発生後、作業員が現場に駆けつけてから強制換気が開始される状況を想定した。

（ｉ）自然換気だけが行われている場合

図 2.1.1.3.(3)-4～6 に示す様に、洞道内には酸欠エリア（酸素濃度＜18%）が存在する。

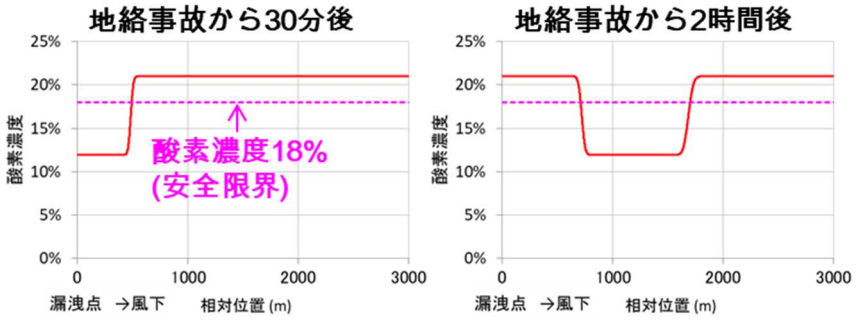


図 2.1.1.3.(3)-4　自然換気のみ、1 h で液体窒素が流出した時の酸素濃度分布の時間変化

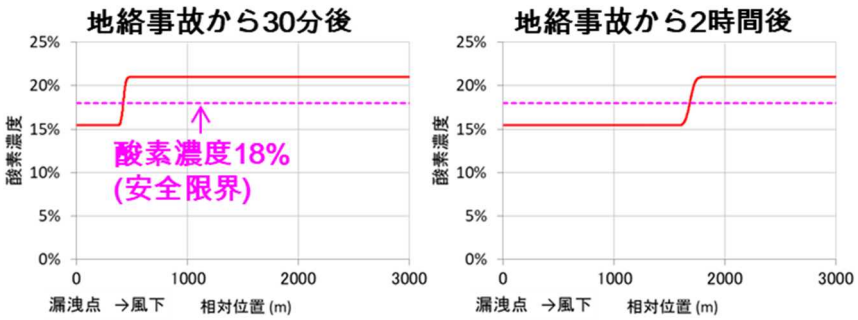


図 2.1.1.3.(3)-5　自然換気のみ、2 h で液体窒素が流出した時の

酸素濃度分布の時間変化

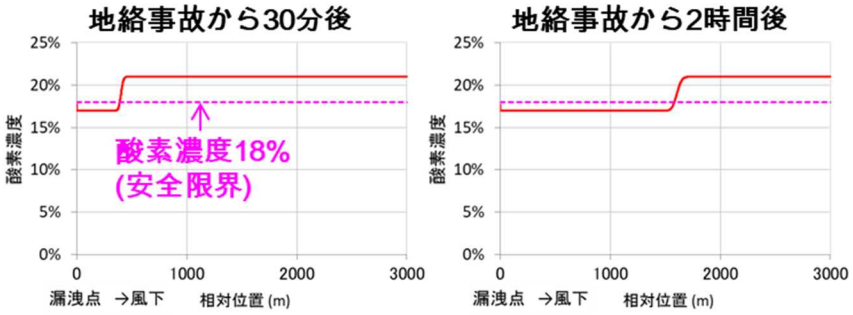


図 2.1.1.3.(3)-6　自然換気のみ、3 h で液体窒素が流出した時の
酸素濃度分布の時間変化

（ⅱ）地絡事故直後から強制換気（0.6 m/s、0.8 m/s）が行われる場合

図 2.1.1.3.(3)-7～9 に示す様に、0.8 m/s の強制換気が地絡事故直後から開始される場合は、洞道内には酸欠エリア（酸素濃度＜18%）は存在しないが、0.6 m/s では 1 h で液体窒素が流出する場合に一部で酸欠エリア（酸素濃度＜18%）が存在する。

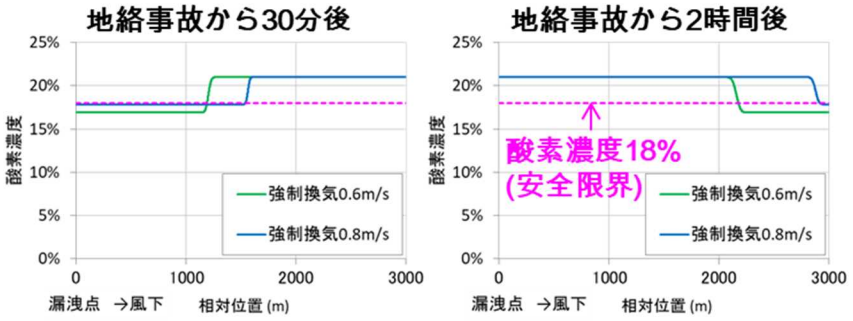


図 2.1.1.3.(3)-7 事故直後から強制換気、1h で液体窒素が流出した時の
酸素濃度分布の時間変化

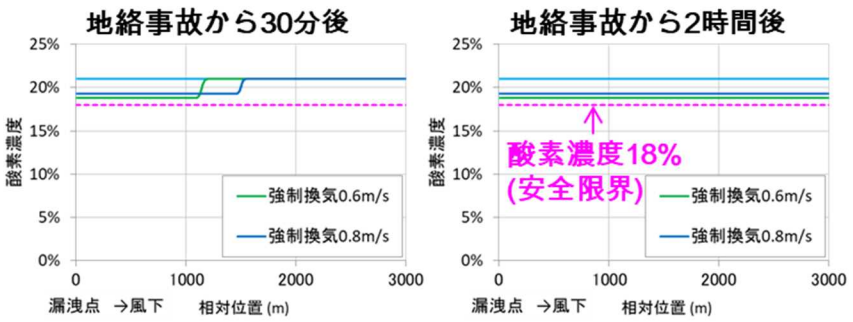


図 2.1.1.3.(3)-8 事故直後から強制換気、2h で液体窒素が流出した時の
酸素濃度分布の時間変化

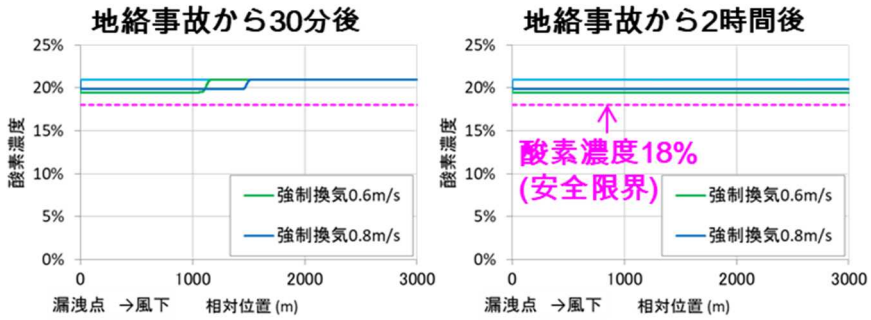


図 2.1.1.3.(3)-9 事故直後から強制換気、3h で液体窒素が流出した時の
酸素濃度分布の時間変化

（iii）地絡事故から 2 時間後に強制換気（0.6 m/s、0.8 m/s）が開始される場合

図 2.1.1.3..(3)-10～12 に示す様に、この場合には地絡事故から 4 時間後には、洞道内には酸欠エリア（酸素濃度＜18%）がなくなることがわかる。つまり、いずれも一時的に酸欠エリアが生じるが、強制換気開始後 2 時間で酸素濃度は安全限界である 18%以上となる。

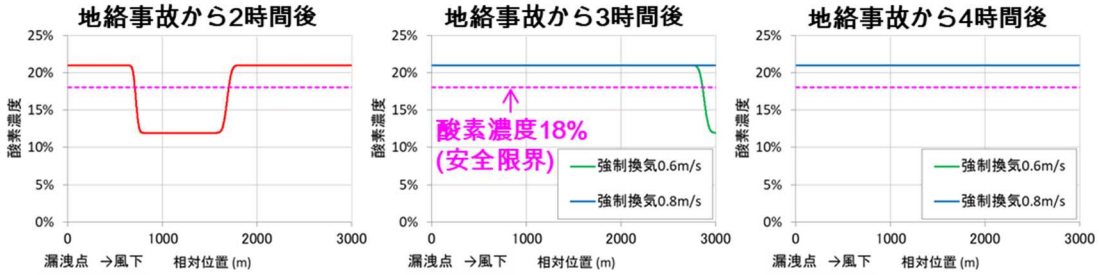


図 2.1.1.3.(3)-10　事故から 2 時間後に強制換気を開始、
1 h で液体窒素が流出した時の酸素濃度分布の時間変化

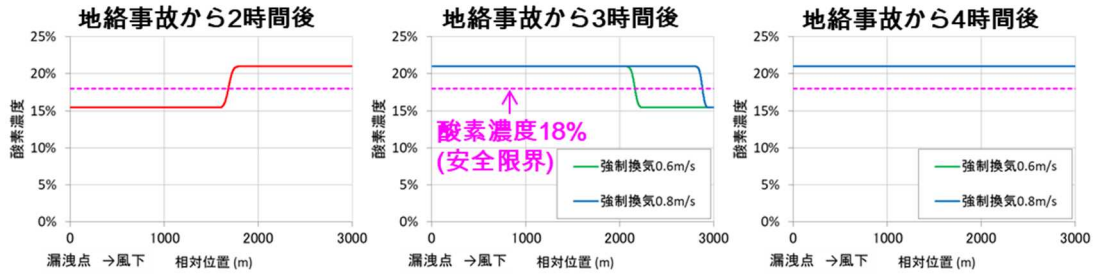


図 2.1.1.3.(3)-11　事故から 2 時間後に強制換気を開始、
2 h で液体窒素が流出した時の酸素濃度分布の時間変化

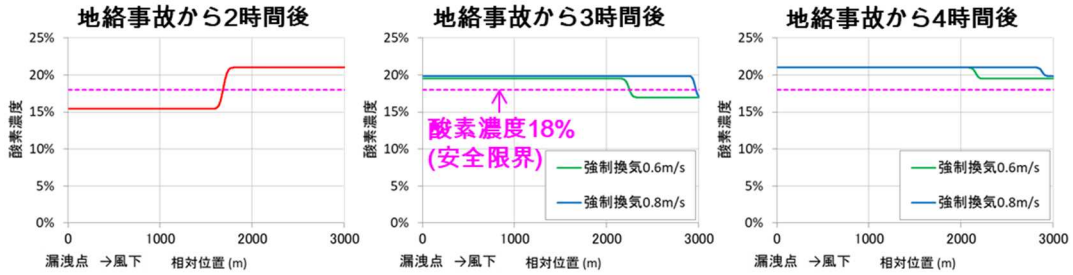


図 2.1.1.3.(3)-12　事故から 2 時間後に強制換気を開始、
3 h で液体窒素が流出した時の酸素濃度分布の時間変化

2.1.1.4 国際標準化に向けた活動（住友電工、古河電工）

(1) 安全性に関する CIGRE での活動

1921 年に設立された CIGRE（国際大電力システム会議）は、技術開発の進展が著しい送変電分野での技術的諸問題を議論することを基本として、研究委員会（Study Committee: SC）をテーマごとに設置して調査研究をして、レポートを発行している。超電導ケーブル分野においては、SC B1,（絶縁ケーブル）と SC D1（電力用材料と先進試験技術）の中に、WG B1-31（終了）と最 WG D1-64（継続中）が本研究の受託メンバーが参加して、それぞれ超電導ケーブルの国際標準の参考となるレポート作成を行ってきた。

2010 年から 2012 年まで活動してきた、WG-B1-31 は、2012 年に、TB538「RECOMMENDATIONS FOR TESTING OF SUPERCONDUCTING CABLES」を発行した。このレポートは、電圧階級 AC170kV までの超電導ケーブルに関して、主に、Type test, Factory test, After laying test の試験項目、内容について作成した。試験方法については、欠陥のあるケーブルを系統に出さないという意味で、安全性に寄与する活動である。

WG D1-64 は、2016 年春より極低温中の電気絶縁システムの調査（Electrical Insulation Systems at Cryogenic Temperatures）をスタートして、その中で超電導ケーブルについては、Superconducting devices and systems (long-length materials behavior)のうち、AC and DC liquid cooled cables, Gas cooled cables という項目の中で、Cable protection at ground fault の調査を行っている。2018 年５月の中国上海で開催された会議においては、古河電工より、本研究の成果の一部として、地絡・短絡試験の結果を報告して、それに対する安全対策の必要性について、CIGRE メンバーと共有した。

学会活動においては、ASC や EUCAS などの国際学会で、積極的に成果を報告した。海外においては、安全性の検証や事故時対策の検討を十分することなく、系統にて実証試験を行っていることが分かった。ただし、これまで超電導ケーブルの運転において、大きな事故の報告もなく、技術的には高いレベルにあることが

研究者との情報交換で分かった。さらに、日本における信頼性や事故に対する報告には、高い関心をもち、本テーマの遂行が有効であることが研究者との意見交換で分かった。

(2) IEC での活動

IEC（国際電気標準会議、International Electrotechnical Commission）は、電気工学、電子工学、および関連した技術を扱う国際的な 標準化団体である。この IEC のなかの TC(Technical Committee) 20 における超電導ケーブルの試験法に関する規格化を検討する WG（PT63075）が 2016 年に立ち上がった。PT63075 への参加国は、ドイツ、フランス、オランダ、ロシア、中国、カナダ、ベルギー、日本の８か国。日本からは、住友電工のエキスパートが参加している。

PT63705 では、4 回の会議が開催され、試験法に関して議論がなされた。本会議では、このプロジェクトでの成果も紹介しつつ、日本の意見を主張した。
2017 年には、試験法の国際規格案 CD（20/1767/CD）が作成された。本 CD は、各国に回覧され、60 ものコメントが寄せられた。

その後、2018 年 3 月に東京にて国際会議が開催され、コメントに対する対処方法が協議された。結論として、修正した CD が作成されることになり、2018 年 8 月に、投票用の CDV(20/1807/CVD)が各国に回覧された。その投票の結果、賛成多数で可決された。尚、７つのコメントが寄せられ、一部修正された。

最終版となる FDIS （20/1858/FDIS)が 2019 年 1 月に発行され、投票の結果、可決され、IS（国際規格、IEC63075）として。2019 年 2 月 5 日に発行された。

IEC 63075:2019
“HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING POWER CABLES AND THEIR ACCESSORIES FOR RATED VOLTAGES FROM 6 kV (Um = 7,2 kV) UP TO 500 kV (Um = 550 kV) - TEST METHODS AND REQUIREMENTS”

(3)学会活動

学会活動においては、ASC や EUCAS などの国際学会で、積極的に成果を報告した。海外においては、安全性の検証や事故時対策の検討を十分することなく、系統にて実証試験を行っていることが分かった。ただし、これまで超電導ケーブルの運転において、大きな事故の報告もなく、技術的には高いレベルにあることが研究者との情報交換で分かった。さらに、日本における信頼性や事故に対する報告には、高い関心をもち、本テーマの遂行が有効であることが研究者との意見交換で分かった。

2.1.2 早期復旧等の実用化のための対策検討（東電ＨＤ）

現在のケーブル布設を参考にした場合、その特性から図 2.1.2-1 に示すように 66kV 級超電導ケーブルは管路、275kV 級超電導ケーブルは洞道への布設が想定される。これを前提として 3km 級の超電導ケーブルシステムの設計と運転方法の概要と汎用的な検討ポイントの整理を実施した。この検討における要求項目と諸元を表 2.1.2-1、2 に、システム概要図を図 2.1.2-2、3 に示す。

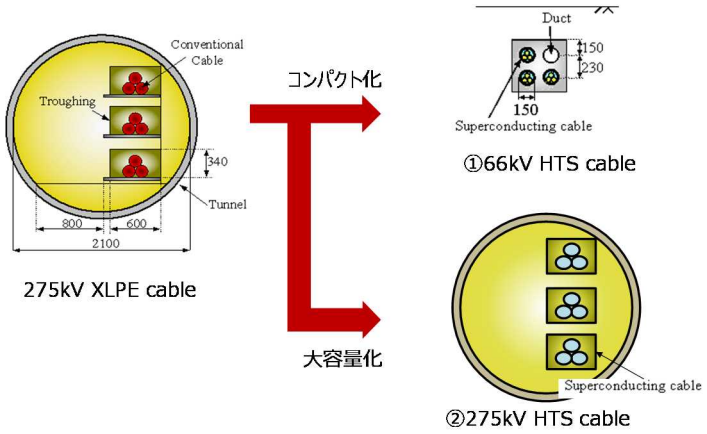


図 2.1.2-1 ケーブルシステム（現在）→HTS ケーブル（66kV、275kV）

表 2.1.2-1　66kV 級ケーブルに対する要求項目と諸元

大項目	小項目	諸元	備考
系統	電圧	66kV	
	電流	~2kA	66kV バンクの一般的容量
	容量	200MVA	66kV バンクの一般的容量
	回線数	２	常・予備線路
	接地	シールド相は両端で三相短絡させ、接地する	抵抗接地系
	短絡電流条件	31.5kA / 2sec	66kV 系統の最大電流
	地絡電流条件	1.5kA / 2sec	66kV 系統の一般的電流
ルート	布設形態	ケーブル：地下管路 ジョイント:地下マンホール	
	長さ	3km 級	
	ジョイント間隔	500m	

表 2.1.2-2　275kV 級ケーブルに対する要求項目と諸元

大項目	小項目	諸元	備考
系統	電圧	275kV	
	電流	~3kA	275kV バンクの一般的容量
	容量	1420MVA	275kV バンクの一般的容量
	回線数	1	回線ごとに独立
	接地	シールド相を直接接地する	直接接地系
	短絡電流条件	63kA / 0.6sec	275kV 系統の最大電流
	地絡電流条件	63kA / 0.6sec	275kV 系統の最大電流
ルート	布設形態	ケーブル：洞道 ジョイント：洞道	
	長さ	3km 級	
	ジョイント間隔	500m	

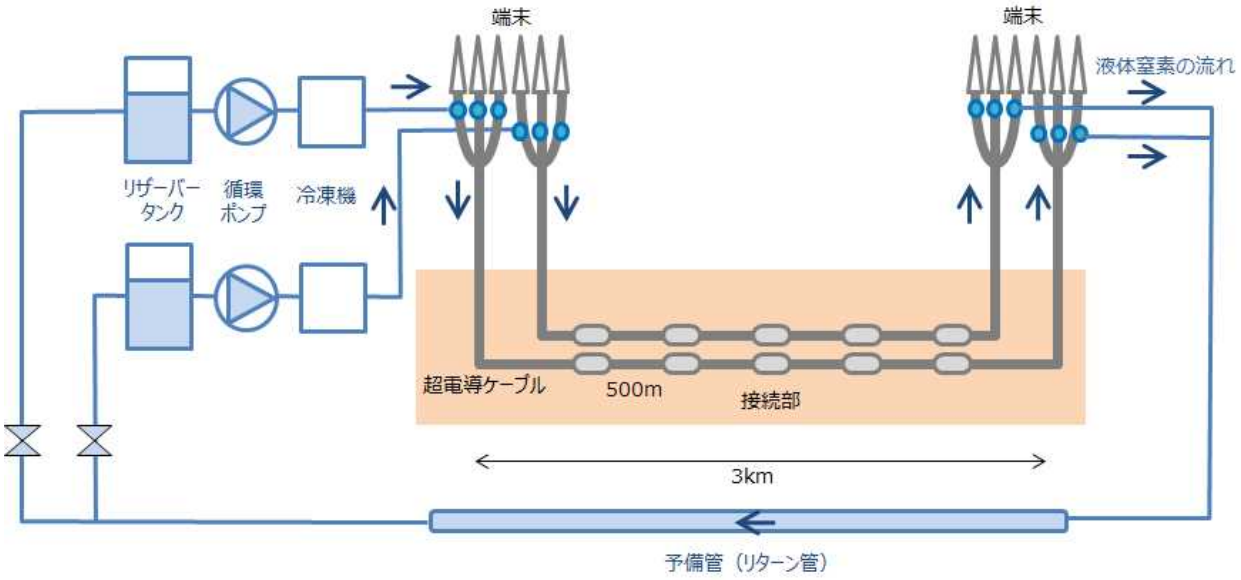


図 2.1.2-2　66kV 超電導ケーブルシステム概要図

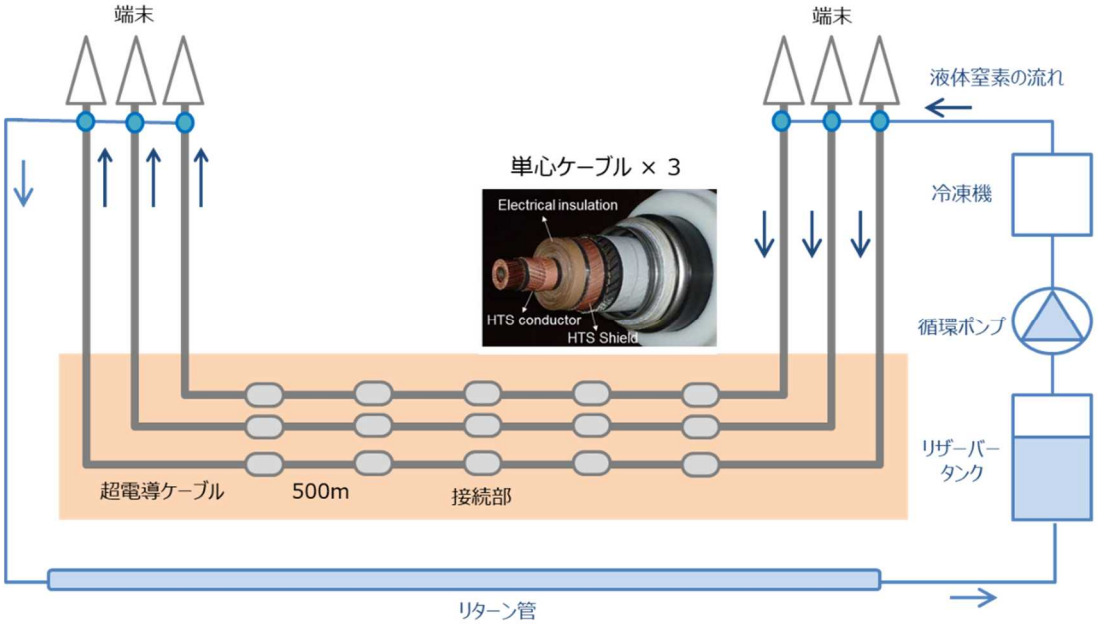


図 2.1.2-3　275kV 級ケーブルシステム概要図

前述した超電導ケーブルシステムを基に、システム設計、通常運転方法・管理、事故時の対策・対応、早期復旧方法についてそれぞれ検討を行い、『超電導ケーブルシステムにおける運転管理・早期復旧のためのガイドライン』として取り纏めを実施した。（ガイドラインは本報告書に添付。）

2.1.3. 超電導ケーブルの侵入熱低減技術の開発

2.1.3.1 66kV 級の断熱管の低損失化（住友電工）

超電導ケーブルの熱損失の要因の中でも、長尺ケーブルの場合においては、断熱管の侵入熱が主要因となるため、これを低減することが重要である。断熱管の損失を従来の約 3W/m から 1.8W/m 以下（ケーブルコア内在、直線状）にすることを目標に、図 2.1.3.1-1 の進め方に従って開発を進めた。

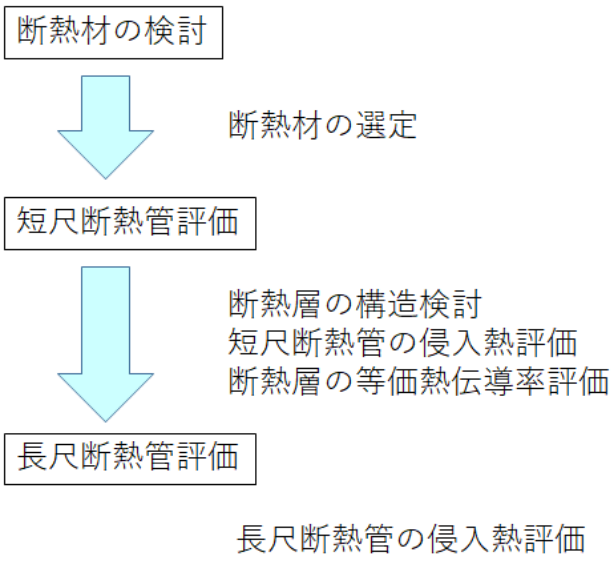


図 2.1.3.1-1 断熱管開発の進め方

(1)短尺断熱管の評価

最初に、断熱材の検討として、熱伝導による侵入熱を低減させるため、熱絶縁材料を従来材料 A だけでなく新規材料 B も評価することにした。次に、短尺断熱管の侵入熱を評価するため、図 2.1.3.1-2 に示す試験装置を製作した。本装置は液体窒素の蒸発量を測定することで短尺断熱管の侵入熱を評価する仕様であり、2m の直管に SI と絶縁材料 A を巻き付けたサンプル A と SI と絶縁材料 B を巻き付けたサンプル B を評価した。また、ケーブルコアの重量変化についても検討するため、直管の肉厚を変化させたサンプルでの評価も行った。

サンプルの構造と評価結果について表 2.1.3.1-1 に示す。この結果では、サンプルＡは 1.7W/m で目標である 1.8W/m 以下をクリアしている。一方、サンプル A においても、2.0W/m であり、構成を見直せば、目標を達成できるものと考える。



図 2.1.3.1-2　短尺断熱管試験装置

表 2.1.3.1-1 試験結果

サンプル	サンプルＡ	サンプルＢ
断熱材構成	（S/I＋絶縁材 A）10 層	（S/I＋絶縁材 B）10 層
侵入熱	1.7W/m	2.0W/m

これまで試作した、直管の自重と短尺評価から算出した熱伝導率の関係を図 2.1.3.1-3 に示す。手巻きで試作した上記、サンプル A とサンプル B の結果を・で示しており、これらの結果から長尺断熱管の構造として、表 2.1.3.1-2 で示す構造 A と構造 B を設計した。構造 A と構造 B の断熱層の模式図と旭実証ケーブルの断熱管断熱層の模式図を図 2.1.3.1-4 に示す。

長尺断熱管を製作する時の設備を用いた構造 A と構造 B の短尺サンプルの評価結果を図 2.1.3.1-3 中の×で示す。機械巻き結果の×は手巻き結果の近似線上から大きく外れていない事が確認出来た。また、手巻き結果の近似線と機械巻き結果の差を反映した長尺断熱管の設計熱伝導率である□を用いて、ケーブルコアが内蔵された場合の自重 20kg/m 時での熱伝導率から、断熱管の侵入熱を計算すると、構造 A と構造 B の侵入熱は下記計算で示す通り、約 1.3W/m であり、目標の 1.8W/m 以下が期待できる。また、図 2.1.3.1-3 に示すように、旭実証ケーブルの熱伝導率と比べて、構造 A、構造 B の熱伝導率は 1/2 と、断熱性能がよくなっていることが判る。

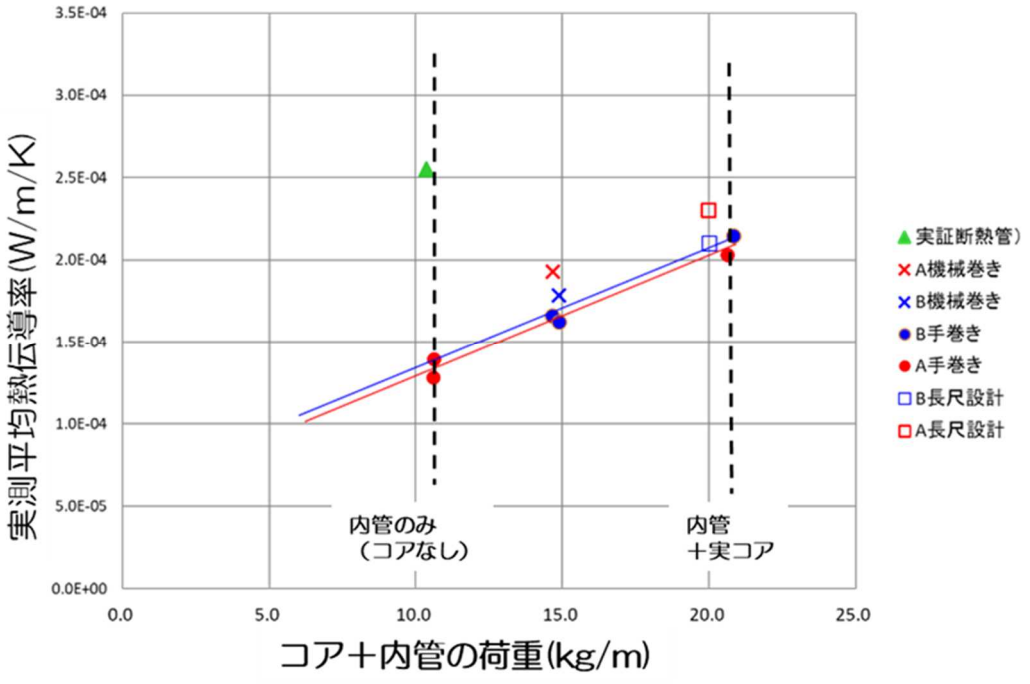


図 2.1.3.1-3　自重と熱伝導率の関係

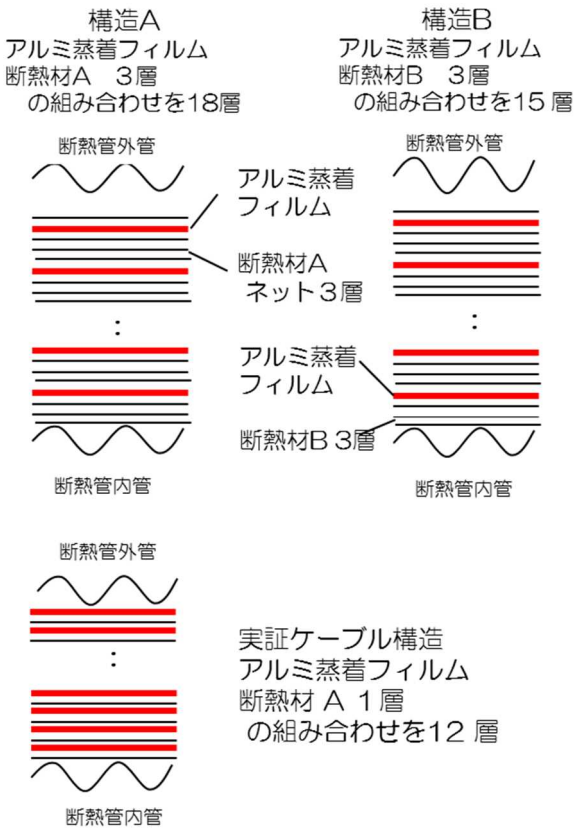


図 2.1.3.1-4　構造 A,B と旭実証ケーブルの断熱層の模式図

表 2.1.3.1-2　長尺断熱管の構造（A, B）

項目	長尺断熱管(66kV/2kA 用)	
No.	構造 A	構造 B
導体コア	66kV/2kA 級（重量：12kg/m、外径：45.0 mm）	
内管	内径　90 mm	
断熱材	(S/I＋絶縁材 A)×15 層	(S/I+絶縁材 B)×18 層
外管	外径 140 mm	
コア＋内管の重量	20kg/m	
短尺断熱管からの想定侵入熱	1.3W/m	1.3W/m

(侵入熱 W(W/m)の計算)

W=2πk×△T／ln(Rout/Rin)

算出に用いたパラメータを表 1.1.3.1-3 に示す。

表 1.1.3.1-3 断熱管の侵入熱を求めた際のパラメータ

パラメータ	断熱管 A	断熱管 B
K：熱伝導率(W/m/K)	2.33e-4（@赤□）	2.18e-4（@青□）
△T：断熱層の高温部と低温部の温度差	226K（高温部 303K、低音部 77K）	同左
Rout：断熱層外径(mm)	129	128
Rin：断熱層内径(mm)	100	100
W:侵入熱(W/m)	1.30	1.26

(2) 長尺断熱管での評価

上記、構造 A と構造 B の長尺断熱管（40m）を製造し、長尺断熱管の侵入熱評価を行った。試験構成を図 2.1.3.1-5 に、試験状況の写真を図 2.1.3.1-6 に示す。冷却方式はサブクール液体窒素の循環冷却方式であり、液体窒素の流量と温度差から各断熱管の侵入熱を算出した。その結果を図 2.1.3.1-7 に示す。結果は、構造 A と構造 B ともに侵入熱は 1.3W/m であった。尚、長尺断熱管の侵入熱（W/m）の算出式は k×C÷L÷60 であり、k は図 2.1.3.1-7 のグラフの傾き、C は液体窒素の比熱 2060J/(kg*K)、Ｌは断熱管長さ 38m である。

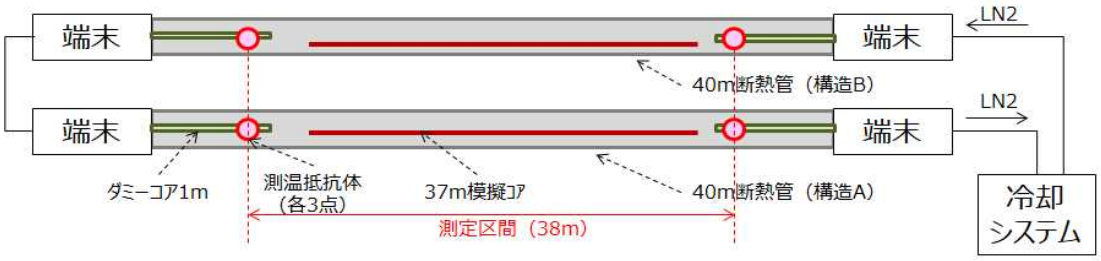


図 2.1.3.1-5　長尺断熱管の試験構成



図 2.1.3.1-6　長尺断熱管の試験状況

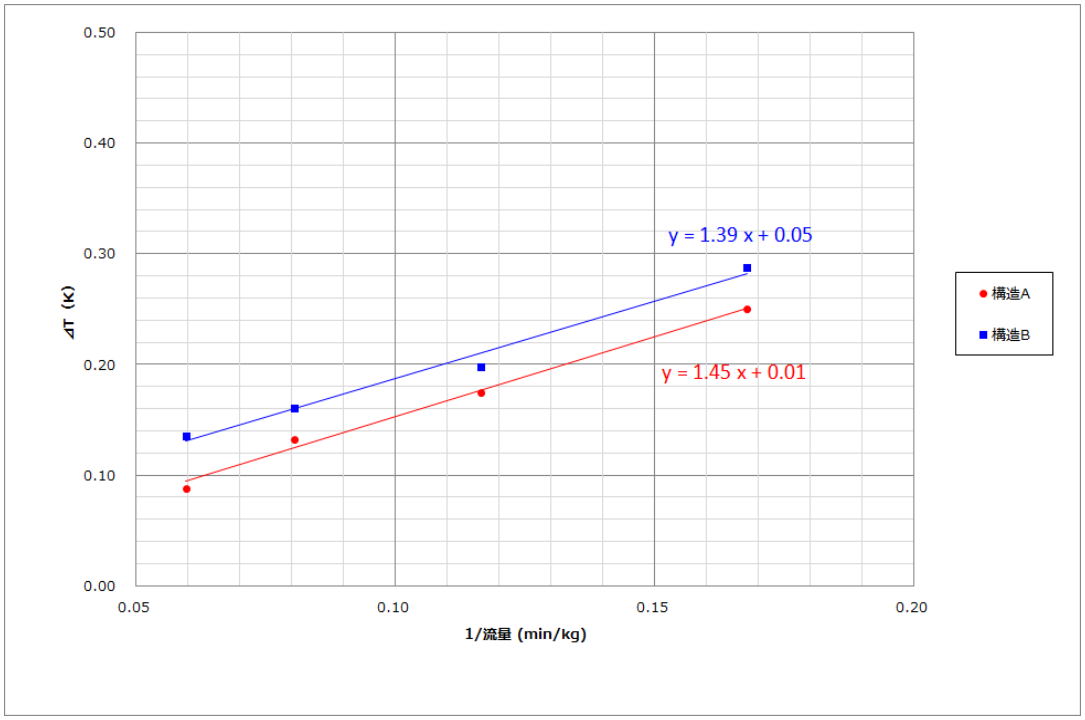


図 2.1.3.1-7　液体窒素の流量と断熱管の温度差の関係

2.1.3.2 275kV 級の断熱管の低損失化（古河電工）

(1) 1m 断熱管を用いた試験法評価

275 kV 級 1 m 断熱管サンプルを製作して構造検討を行った。1 m 断熱管サンプルの構造を表 2.1.3.2-1 に示し、1 m 断熱管サンプルの試験システム模式図を図 2.1.3.2-1 に示す。真空断熱層のスーパーインシュレーションを 30 層積層して断熱構造を確認する。

表 2.1.3.2-1　1m 断熱管の構造

構造	仕様
内コルゲート管	内径 φ75、外径 φ91.3、板厚 0.6 mm
真空断熱層	スーパーインシュレーション（SI） SI ： 30 層、外径 97.8
外コルゲート管	内径 136.4、外径 150、板厚 0.8 mm

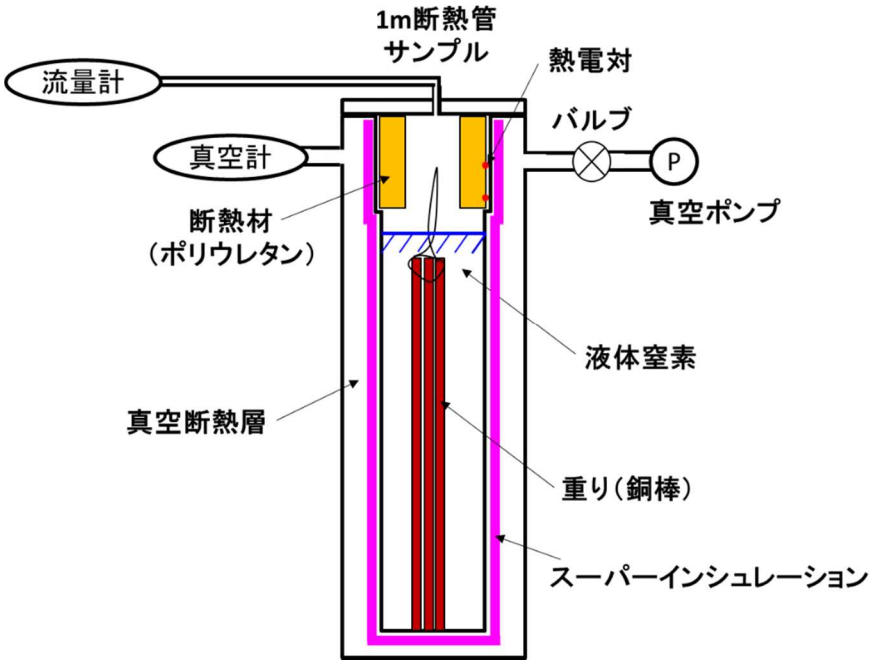


図 2.1.3.2-1　試験システム模式図

図 2.1.3.2-2、図 2.1.3.2-3 に各々試験システム断面模式図、試験システム外観写真を示す。1m 断熱管サンプルの内管と外管を接合する上部フランジには長穴を設けてあり、外管に対して内管を並行移動させられる構造となっている。それにより、内管を外管に寄せてケーブル布設時を模擬する片寄配置を実現できる。また、サンプル内部にはケーブルコアの導電体の重量の 1.4 倍の銅棒を入れてあり、片寄配置したサンプルを寄せた側に斜め 45° 傾けることでケーブルコア自重の押し付け効果を想定した構成としている。

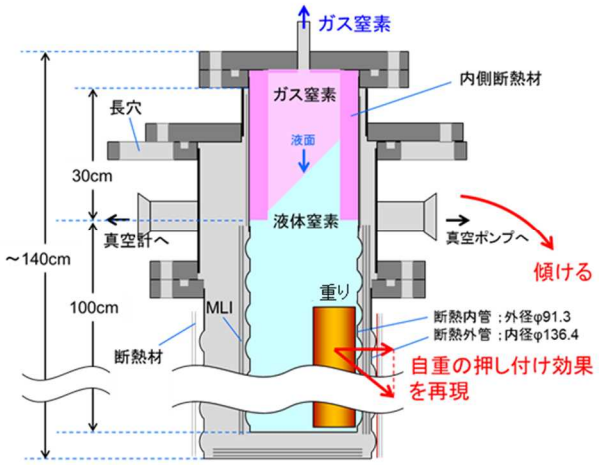


図 2.1.3.2-2　試験システム断面模式図



図 2.1.3.2-3　試験システム外観写真

試験方法としては、サンプルの中に液体窒素を入れて、その蒸発量を流量計で測定してサンプルの全熱損失（Qtotal）を捉える。そこから端末部からの熱損失（上部に付けた熱電対で測定;Qend）を差し引いて断熱管の熱損失を算出した。図 1.1.3.2-4 に、熱計算に必要な構成と熱侵入に係わる材料の熱伝導率を示す。

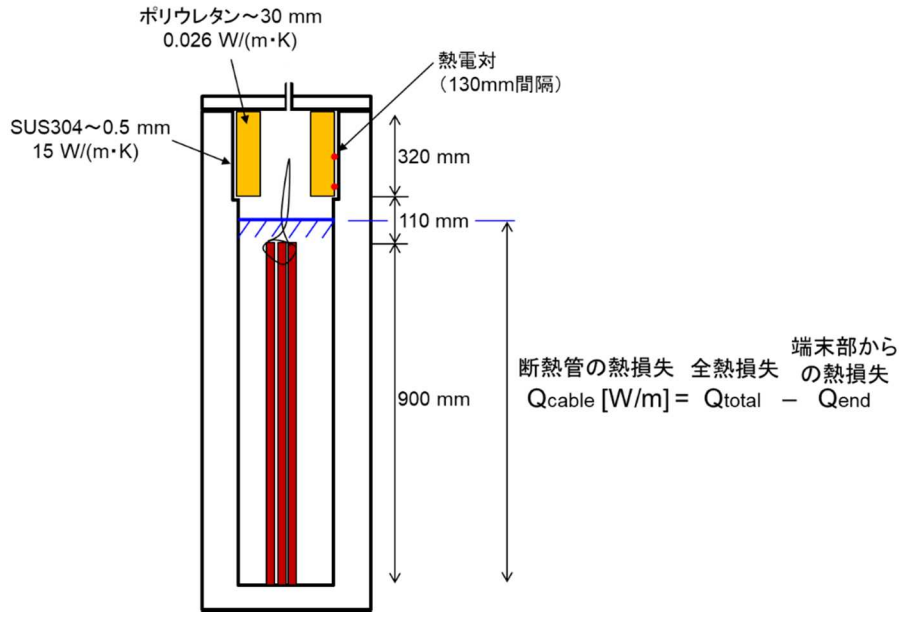


図 2.1.3.2-4　断熱管の熱損失

端末部からの熱損失には、SUS304 直管部からの伝導による入熱 Qsus、ポリウレタンの伝導による入熱 Qpoly、端末部での輻射熱 Qrad、蒸発した窒素ガスが奪う蒸発顕熱 Qev があり、それらの合計が端末の部の Qend となる。それぞれの端末の熱損失のオーダを解析した結果、図 2.1.3.2-5 に示すように Qsus を 1 とした時に、Qpoly は約 1/10、Qrad は約 1/6、Qev は約 1/30 である。

		スケール
SUS304直管部からの入熱	Qsus	1
ポリウレタンからの入熱	Qpoly	1/10
輻射熱（入熱）	Qrad	1/6
蒸発顕熱（抜熱）	Qev	1/30
合計	Qend	

図 2.1.3.2-5　Qend の考え方

Qsus が主な熱損失であるため、サンプル端部に設けた熱電対で SUS304 直管部の温度を計測して SUS304 直管部からの入熱 Qsus を端末部の熱損失として用いた、伝導による熱侵入は、下式により求められる。

$$Qsus = \frac{S}{L}\int_{T_L}^{T_H} \lambda(T)dT$$

（S: SUS 直管部の断面積、L:直管部の長さ、T_H:高温側の温度、T_L:低温側の温度、 λ:SUS304 の熱伝導率）

試験結果を表 2.1.3.2-2、図 2.1.3.2-6 に示す。実験では、片寄配置からスーパーインシュレーション（SI）の押し付けの効果として、縦置き（傾斜 0°）から傾けて（傾斜 45°）で重りの自重をかけた状態での測定を行った。その結果を、図 2.1.3.2-6 で実験番号#1 は荷重なし（A 点）、#2 は荷重あり（図 2.1.3.2-6 の B 点）で、それぞれ断熱管の熱損失は 1.0 W/m、1.2 W/m であり、ケーブルコアの自重の影響については考慮する必要があることが分かった

表 2.1.3.2-2　1m 断熱管の試験結果

実験番号	位置設定	傾斜	ベーキング	窒素ガスパージ	真空引き	真空度 (Pa)	測定開始から読取までの経過時間	気温	サンプルの全熱損失 (Avg.)	温度K（上）	温度K（下）	端末からの熱損失（上-下）	断熱管の熱損失 (W/m)
#1	片寄	0	あり	あり	封止	2.9E-04	20h	24.2	1.60	168	117	0.60	1.0
#2	片寄	45	あり	あり	封止	3.5E-04	25h	27.0	1.90	171	116	0.66	1.2

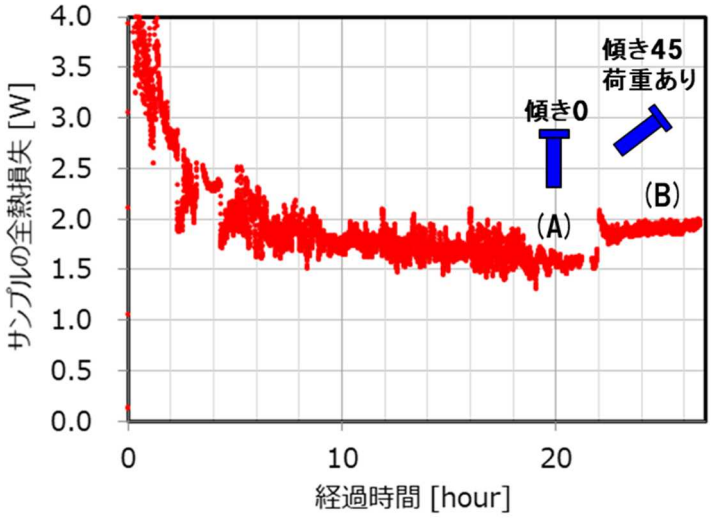


図 2.1.3.2-6　サンプルの全熱損失の時間推移（熱損失評価範囲）

(2) 10m 断熱管を用いた試験

ガス流量から侵入熱を測定する方法を確認したことから、長尺断熱管の侵入熱評価もガス流量測定で行った。長尺断熱菅としては、100m 長の断熱管を図 2.1.3.2-7 で示ように製造した。評価は、100m 断熱管から 10 m のサンプルを 2 本切り出して評価を行った。



図 2.1.3.2-7　製作した 275 kV 級 100 m 級断熱管

(3) 10 m 級切出サンプル①試験

サンプル①の外観と温度センサーの取付位置を図 2.1.3.2-8 に示す。サンプル内部にはケーブルコアの導電層に相当する重り（銅棒）を入れてある。サンプル外観で黒色に見えているのはベーキングで使用したヒータ線を巻き付けて固定するためのシートであり、本サンプルは断熱外管外面からヒータで 90℃に加熱し、内面からも温風を吹き入れて約 2 週間ベーキングを行った。また、試験中サンプルは、真空ポンプで真空引きを継続した状態で行った。

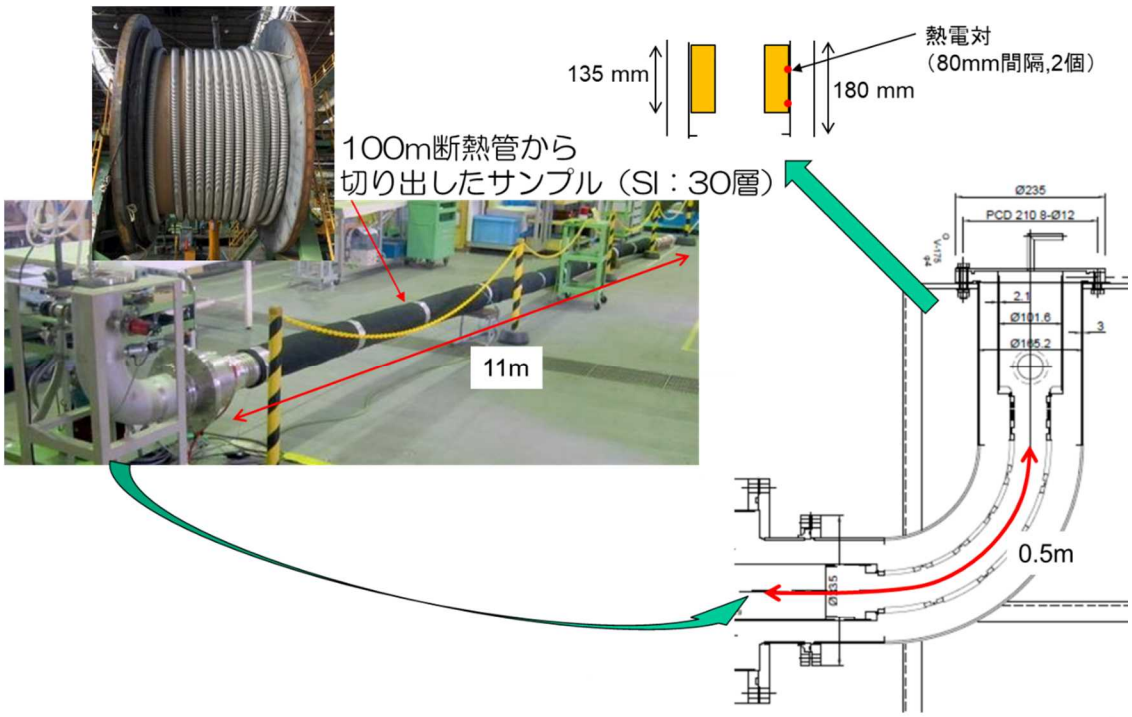


図 2.1.3.2-8　10m 級切出サンプル①の外観と温度センサーの取付位置

試図 1.1.3,2-9 に、ガス流量から求めたサンプルの全熱損失 Qtotal を示す。また、端末部の SUS 直管部（外径 101.6mm, 肉厚 2.1mm）に取り付けた熱電対（80mm 間隔）から、下式で求めた侵入熱を同図に示す。熱電対は、蒸発ガスによる冷却を避けるために、熱伝導率の悪いポリウレタンの内側に取り付けている。

$$Q_{sus} = \frac{S}{L}\int_{T_L}^{T_H} \lambda(T)dT$$

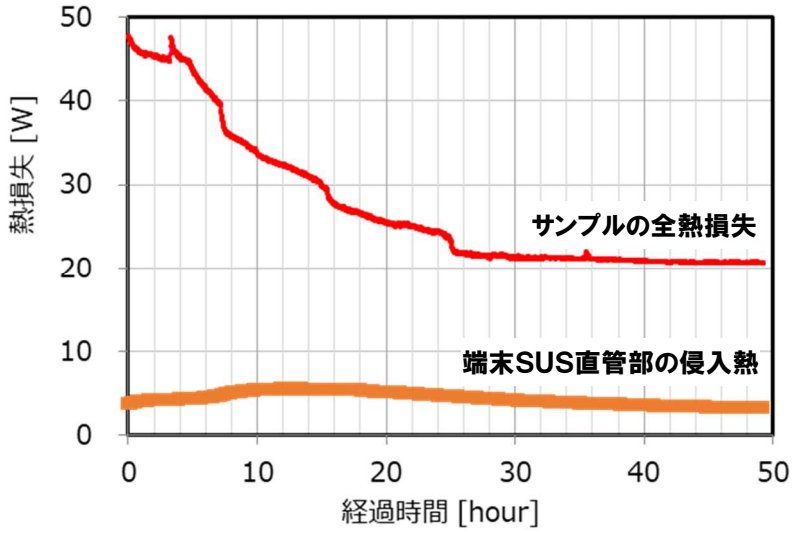


図 2.1.3.2-9　10 m 級切出サンプル①の全熱損失、SUS 円筒の侵入熱の時間推移

図 2.1.3,2-9 より開始から 40 時間地点におけるサンプルの全熱損失 Qtotal は 20.8 W、サンプル端部の熱電対で捉えた SUS304 直管部の温度から求めた侵入熱 Qsus は 3.47 W である。熱損失の生じる長さは、サンプル長 11 m と端末及び接続部の長さ 0.5 m の計 11.5 m であるため、次式より算出して断熱管の熱損失は 1.5 W/m で目標値の 1.8 W/m を達成していることを確認した。その他、試験に係わる測定データを表 2.1.3.2-3 に示す。また、同様にもとめた熱損失の時間変化を図 2.1.3.2-10 に示す。

$$\frac{Qtotal - Qsus}{Length} = \frac{20.8 - 3.47}{11.5} = 1.5\ [W/m]$$

表 2.1.3.2-3　10 m 級切出サンプル①の試験結果

実験番号	ベーキング	窒素ガスパージ	真空引き	真空度 (Pa)	測定開始から読取までの経過時間	気温	サンプルの全熱損失 (Avg.)	温度K (上)	温度K (下)	端末からの熱損失 (上-下)	断熱管の熱損失 (W/m)
#1	あり	あり	継続	6.6E-04	40h	27.0	20.8	257	226	3.47	1.5

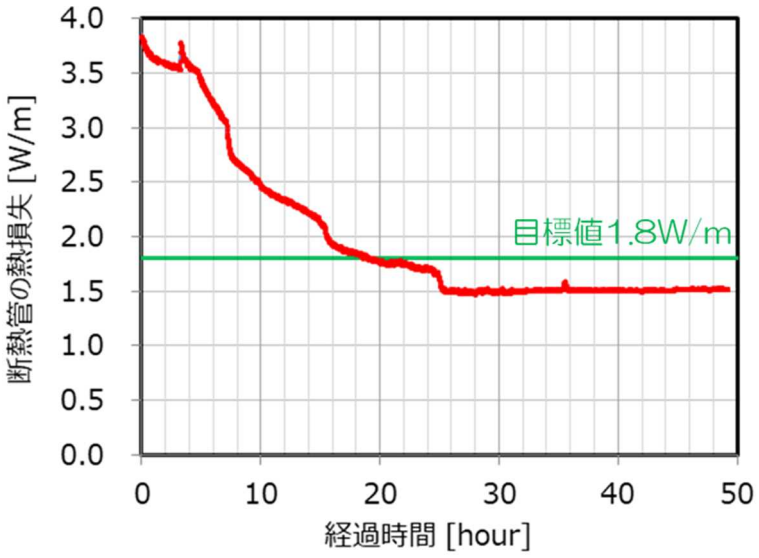


図 2.1.3.2-10　10 m 級切出サンプル①の侵入熱の時間推移

(4) 10 m 級切出サンプル②試験

サンプル②の外観と温度センサの取付位置を図 2.1.3.2-11 に示す。今回は、km 級のケーブルの運用でベーキングが困難、さらに真空ポンプで常時真空排気が不可能という状況を考えて、サンプルをベーキングせず、真空封止して評価を行った。また、断熱管内部にはケーブルコアに相当する重量の重り（銅棒 5.6kg/m）を入れて、断熱層（スーパーインシュレーション）に圧縮力がかかる状態で、熱損失の測定をおこなった。

熱損失の算出方法は、サンプル①と同様の手順で求めた。表 2.1.3.2-4 に示すように、開始から 40 時間地点におけるサンプルの全熱損失 Qtotal は 18.0 W、サンプル端部の熱電対で捉えた SUS304 直管部の温度から求めた入熱 Qsus は 3.47 W で、熱損失の生じる長さは、サンプル長 9.1 m と端末及び接続部の長さ 0.5 m の計 9.6 m であり、次式より算出して断熱管の熱損失は 1.5 W/m を求めた。この結果は、目標値の 1.8 W/m 以下であり、目標とする低熱侵入断熱管が達成できたことを確認した。また、熱損失の時間変化を図 2.1.3.2-12 に示す。

$$\frac{Q_{total} - Q_{sus}}{Length} = \frac{18.0 - 3.47}{9.6} = 1.5\ [W/m]$$

表 2.1.3.2-4　10m 級切出サンプル②の試験結果

実験番号	ベーキング	窒素ガスパージ	真空引き	真空度 (Pa)	測定開始から読取までの経過時間	気温	サンプルの全熱損失 (Avg.)	温度K (上)	温度K (下)	端末からの熱損失 (上-下)	断熱管の熱損失 (W/m)
#1	なし	あり	封止	2.6E-01	40h	4.2	18.0	254	223	3.47	1.5

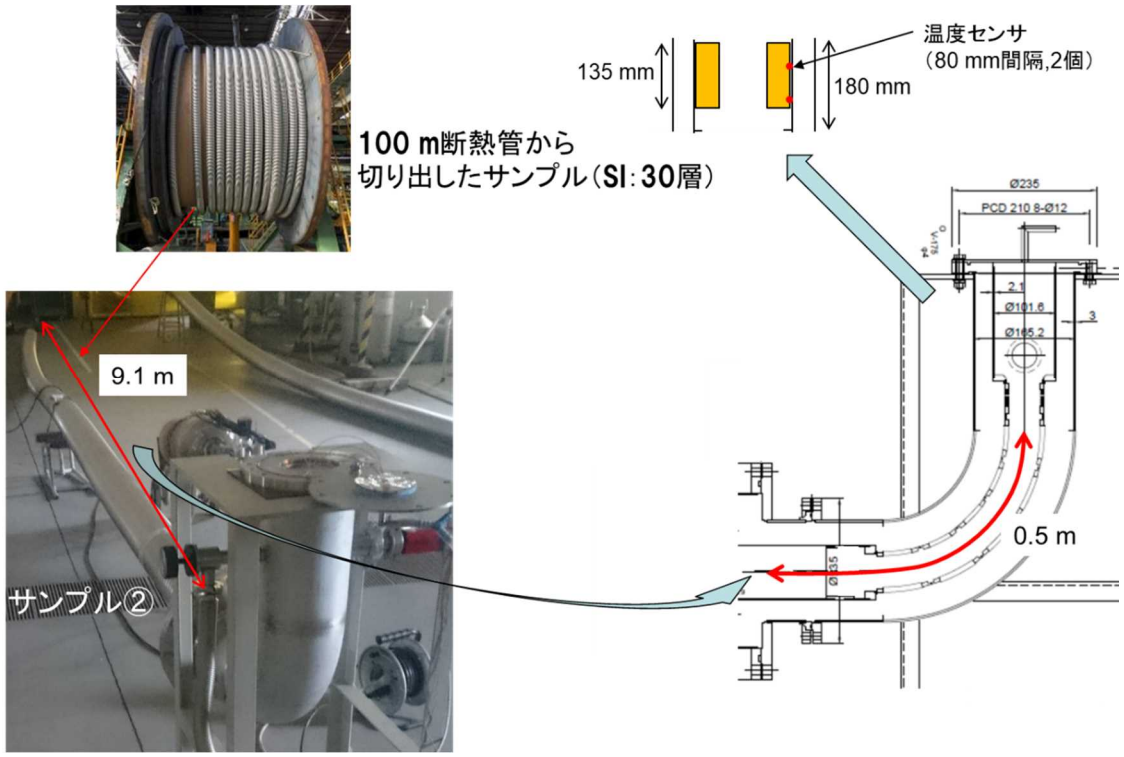


図 2.1.3.2-11　10m 級切出サンプル②の外観と温度センサーの取付位置

試験結果を表 2.1.3.2-4、図 2.1.3.2-12 に示す。開始から 40 時間地点におけるサンプルの全熱損失 Qtotal は 18.0 W、サンプル端部の熱電対で捉えた SUS304 直管部の温度から求めた入熱 Qsus は 3.47 W である。熱損失の生じる長さは、サンプル長 9.1 m と端末及び接続部の長さ 0.5 m の計 9.6 m であり、次式より算出して断熱管の熱損失は 1.5 W/m で目標値の 1.8 W/m を達成していることを確認した。

$$\frac{Q_{total} - Q_{sus}}{Length} = \frac{18.0 - 3.47}{9.6} = 1.5\ [W/m]$$

表 2.1.3.2-4　10m 級切出サンプル②の試験結果

実験番号	ベーキング	窒素ガスパージ	真空引き	真空度 (Pa)	測定開始から読取までの経過時間	気温	サンプルの全熱損失 (Avg.)	温度K (上)	温度K (下)	端末からの熱損失 (上-下)	断熱管の熱損失 (W/m)
#1	なし	あり	封止	2.6E-01	40h	4.2	18.0	254	223	3.47	1.5

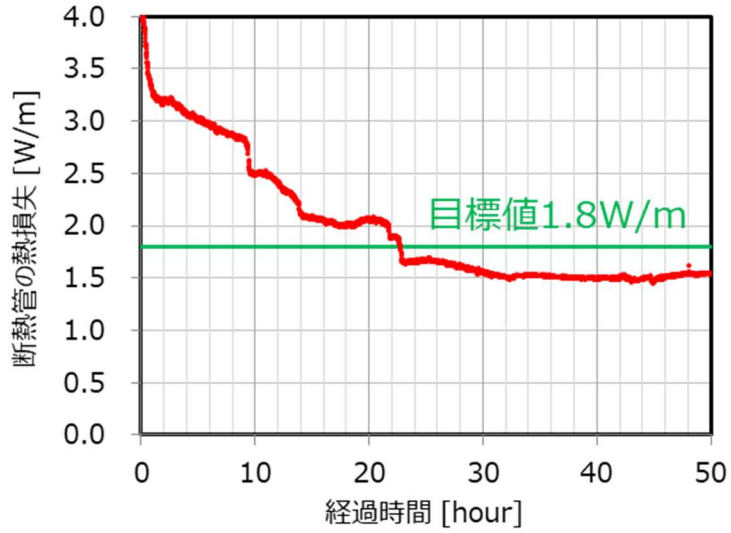


図 2.1.3.2-12　10m 級切出サンプル②の侵入熱の時間推移

(5) ヒートサイクル試験

真空封止した状態のまま 10m 級切出サンプル②を室温に戻した後、再び侵入熱測定を行うヒートサイクル試験を実施した。試験結果を図 2.1.3.2-13 に示す。測定データの推移を矢印で示している。プロットのスタートは常時真空引きを継続した結果であり、真空封止 1 回目が先に示したサンプル②の結果である。その後、ヒートサイクルを繰り返すたびに真空度が悪くなり、侵入熱は増加した。

原因調査のため、真空封止 3 回目の途中で、真空層のガス分析を行った。サンプル②の真空層のバルブに配管を接続して、配管の真空引きを行い、測定系を封止した状態でガス分析を開始した。サンプル②の真空層のバルブを開けると H_2 シグナルだけに変化が見られて増加した。つまり、ヒートサイクル試験を繰り返す中で、H_2 が発生し、侵入熱の悪化を招いたと考えられる。

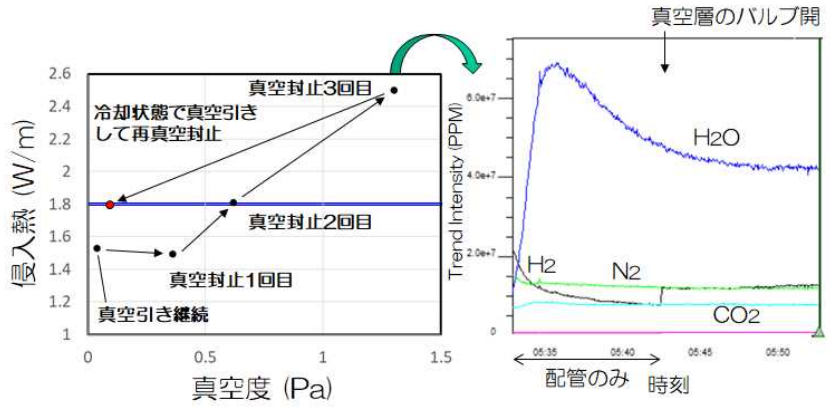


図 2.1.3.2-13　ヒートサイクル試験結果と真空封止後 3 回目に
おけるガス分析結果

続いて、ヒートサイクルで悪化したケーブルを冷却状態で真空引きして再真空封止して侵入熱が回復するかどうかの確認を行った。真空封止 3 回目の測定結果を図 2.1.3.2-14 に示す。

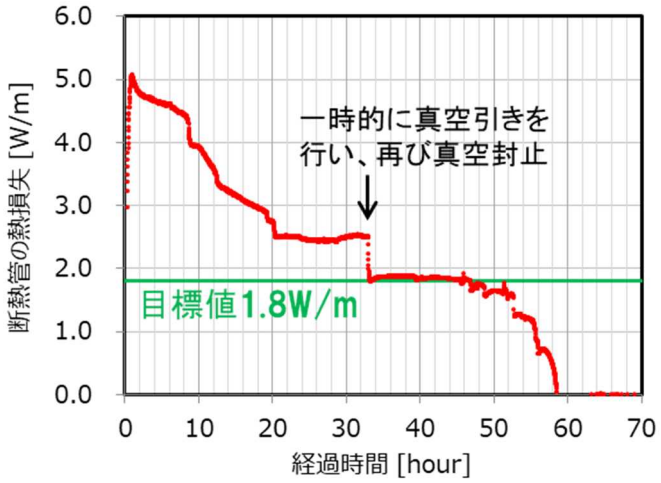


図 2.1.3.2-14　10m 級切出サンプル② 真空封止後 3 回目の侵入熱の時間推移

図より冷却状態で真空引きして真空層の真空度を挙げて再真空封止（2×10^{-2} Pa）することで、侵入熱の回復が確認された。

これまでに 500 m 超電導ケーブルを冷却後半年間に亘り真空封止した状態で健全に保持できる知見を得ていることから、超電導ケーブル運用においては、昇温しない限り真空引きは不要と考えられる。しかしながら、メンテナンスなどでケーブルを昇温する場合には、極力真空引きを行うことが有効である。室温はも

とより、低温状態でも有効であることが、ヒートサイクル試験を通して確認された。

また、従来別の機会に行った 10 m 超電導ケーブルと 500 m 超電導ケーブルとで同じ侵入熱を得られていることから、今回の 100 m ケーブルも同様に 3 km への適用もできると考えている。

2.1.4. 冷却システムの高効率化技術の開発

旭変電所の既設超電導ケーブルとブレイトン冷凍機を用いて、ブレイトン冷凍機単体性能試験、超電導ケーブルとの組合冷却試験、超電導ケーブル性能試験を行った。その後実系統接続での実証試験、実証試験後の性能確認、COP 向上方策試験を行った。冷却システム撤去後に解体調査として、冷凍機熱交換器と LN_2 配管の温度計の確認を実施した。

2.1.4.1 ブレイトン冷凍機の冷却試験

(1) ブレイトン単体性能試験（前川製作所）

図 2.1.4.1.(1)-1 にブレイトン冷凍機外観、図 2.1.4.1.(1)-2 にブレイトン冷凍機フロー、図 2.1.4.1.(1)-3 に冷却システムフロー、図 2.1.4.1.(1)-4 に旭変電所でのシステムレイアウトを示す。冷却システムは、開発したブレイトン冷凍機、循環ポンプ、冷凍機のバックアップのサブクーラ等で構成される。冷却システムの単体試験は、冷凍機性能を確認するため超電導ケーブルのかわりに模擬負荷ヒータを使用した試験である。なお、バックアップのサブクーラについては実系統運転中に運転はされなかった。

前プロジェクトで、開発したブレイトン冷凍機を含めた旭変電所に設置した冷却システムで単体試験を実施した際、累計 1,700 時間程度の運転で冷凍機磁気軸受け（AMB）の警報で停止した。要因究明の結果、本来回転することのないタッチダウンベアリング（TDB）の共回りが確認され、この共回りによる TDB のベアリング玉の摩耗・TDB 滑落による主軸との接触が原因とされた（図 2.1.4.1.(1)-5)。工場試験で TDB の起動トルクを増やすことにより共回りが止まることが分かり、TDB の共回り対策として TDB に起動トルク増加を施した。

本プロジェクトでは、旭変電所の冷凍機に前プロジェクトで対策した TDB を組み込み、対策した TDB の長期運転での効果確認を実施した。事前の工場での予備試験にて得られた共回りによる摩耗の痕跡が見られた 500 時間という実績値よりも長い、900 時間程度の運転を継続し検証試験と位置づけた。この運転後に TDB 目視点検と重量測定から摩耗がなく、共回りしていないことが確認でき、対策が有効であると結論付けた。

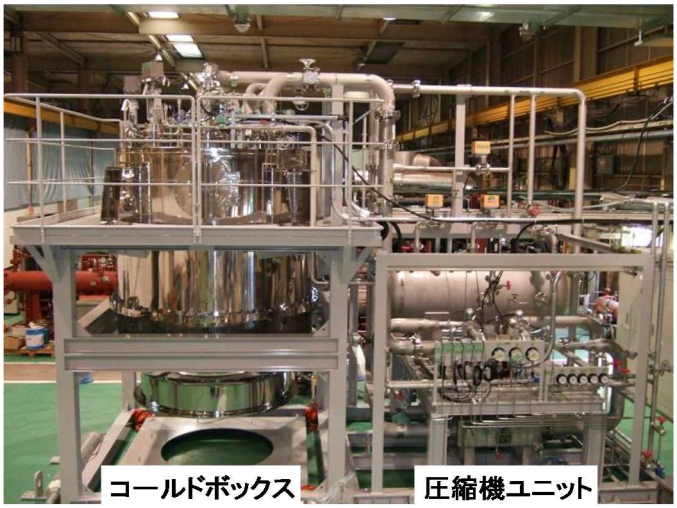


図 2.1.4.1.(1)-1　ブレイトン冷凍機

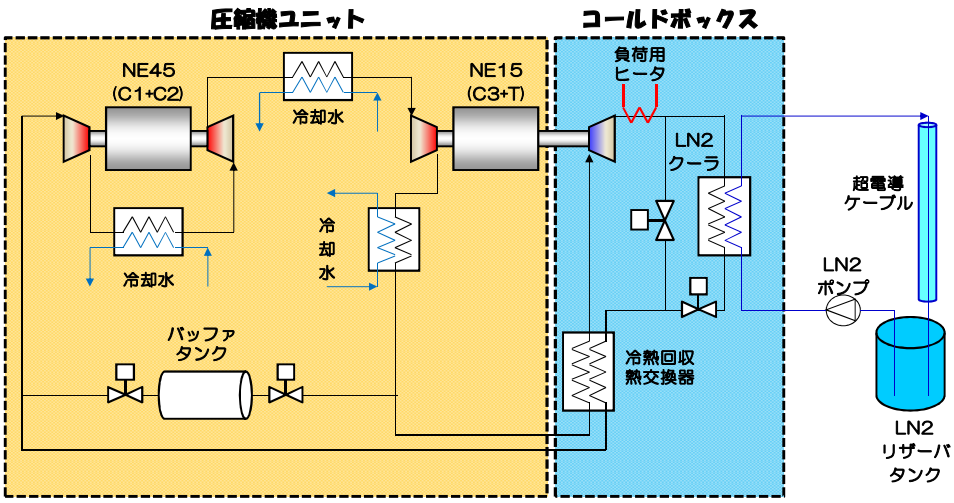


図 2.1.4.1.(1)-2　　大容量・高効率ブレイトン冷凍機フロー

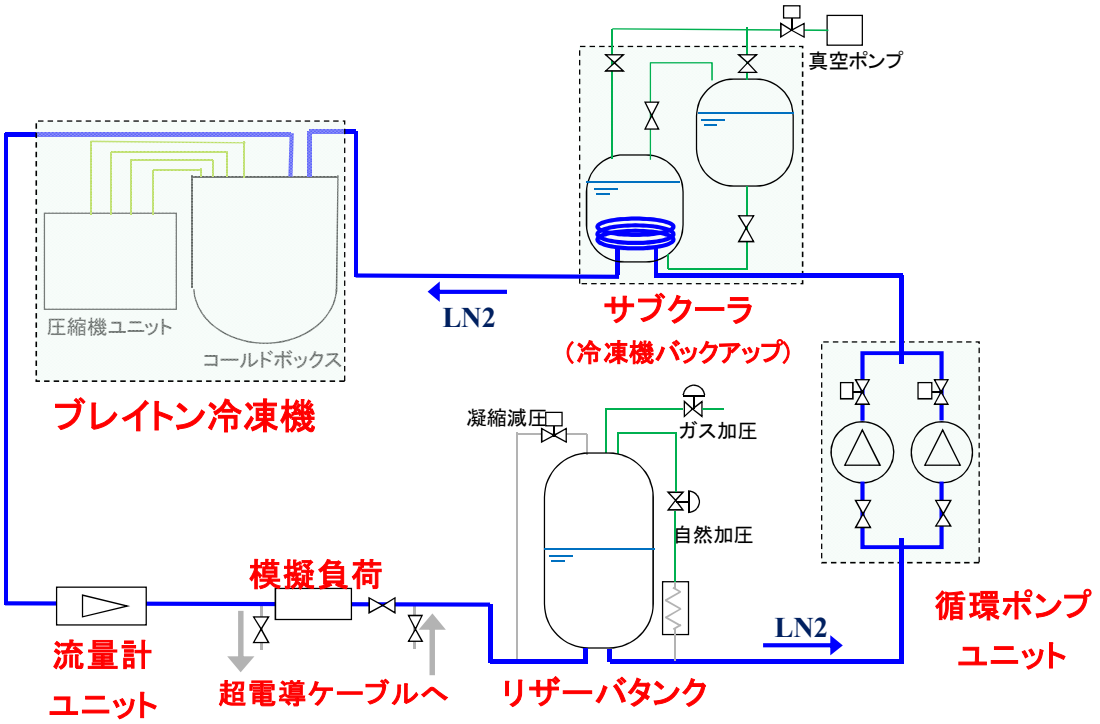


図 2.1.4.1.(1)-3　冷却システム概略フロー

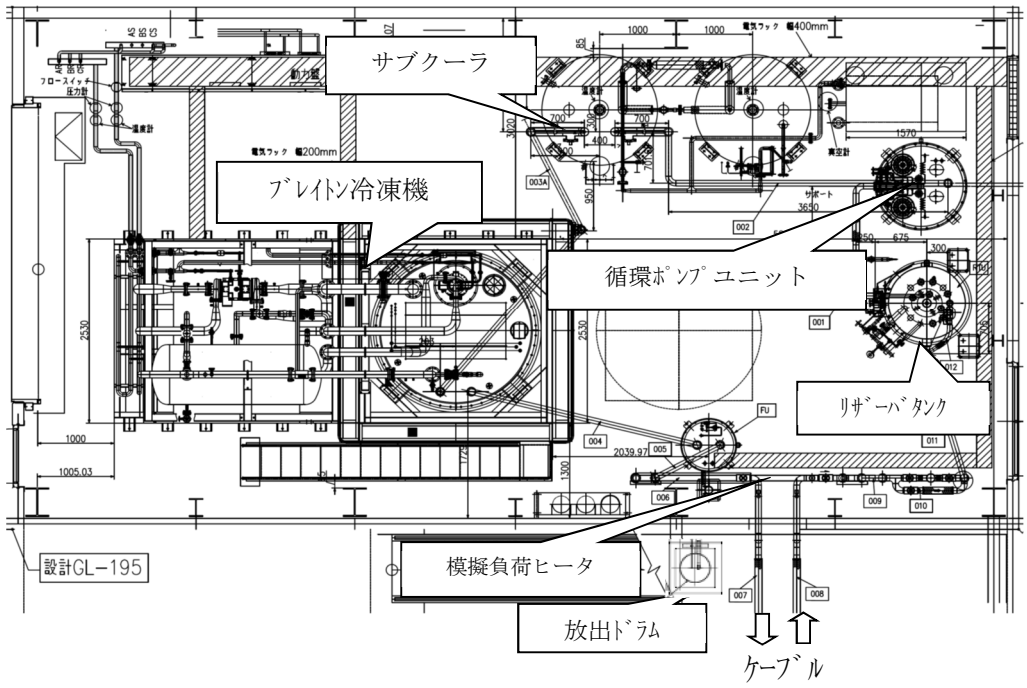


図 2.1.4.1.(1)-4　旭変電所／冷凍機室のブレイトン冷凍機設置レイアウト

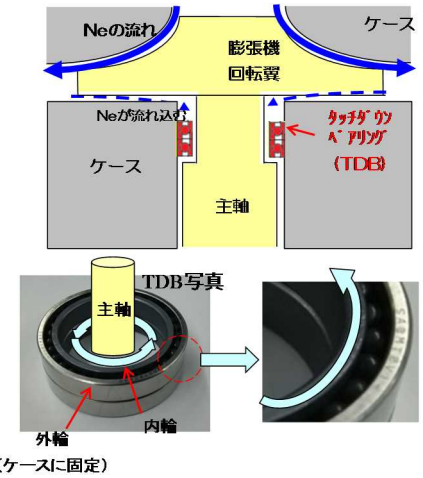


図 2.1.4.1.(1)-5　TDB 共回り概略図

TDB 対策後冷凍機性能に変化がないことと実証試験中の超電導ケーブルが冷却可能であるかを確認するために、冷却能力測定を実施した。図 2.1.4.1.(1)-6 に今回のブレイトン冷凍機の冷却システムの冷却能力測定結果と参考に前回実証試験中のスターリング冷凍機の冷却能力を示す。なお、冷却システム冷却能力は、冷却システム内の機器（循環ポンプ、配管等）の熱負荷の分だけ冷凍機の冷却能力より小さくなる。図に示すようにブレイトン冷凍機の冷却システム冷却能力は、前回実証試験中のスターリング冷凍機の能力よりも高いことが分かった。効率（COP）は 0.09 で、スターリング冷凍機の 0.06 に対して高く、目標としていた高効率・大容量冷凍機であることが確認できた。また、超電導ケーブルの最大負荷電流（1750A）における冷却負荷 4250W が入った場合であっても冷凍機出口温度 71K 程度で液体窒素を供給することができる。

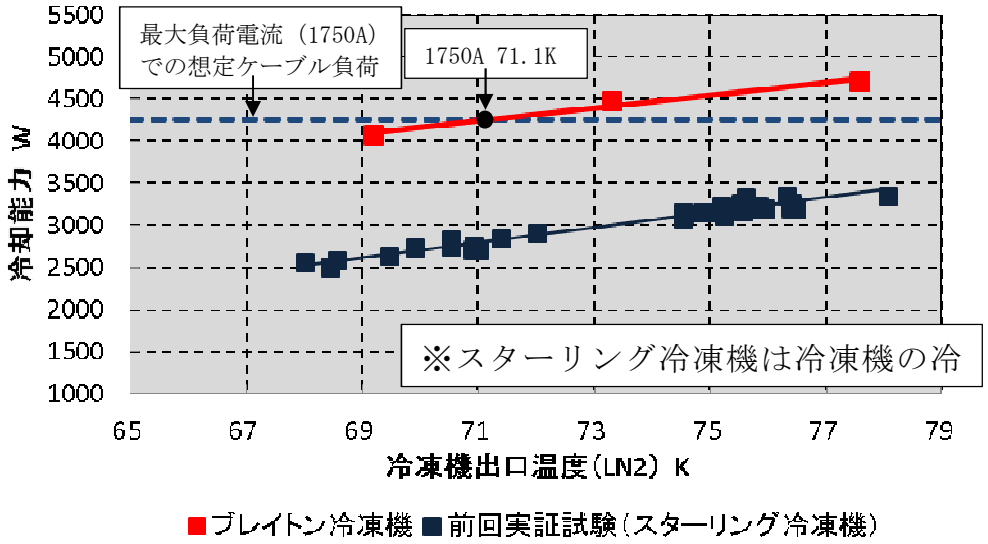


図 1.1.4.1.(1)-6　ブレイトン冷凍機の冷却システム冷却能力確認結果

(2) 超電導ケーブルとの組合冷却試験（住友電工、前川製作所）

超電導ケーブルとの結合は、「NEDO 超電導ケーブル実証プロジェクト」と同様の方法で実施した。冷却システムは単独で循環運転を行ない、超電導ケーブルも単独で予冷と液体窒素の貯液を行い、それぞれの冷却が完了後に接続させる方法で実施した。接続作業開始時の冷却システム側の運転状態は以下の通り。

○接続作業開始時冷却システム運転状態

リザーバタンク液面：80%、

リザーバタンク内圧力：130kPaG

循環液体窒素流量：25L/min

リザーバタンクの圧力（通常運転時 200kPaG）と循環液体窒素流量（通常運転時 40L/min）を通常運転時よりも下げているのは、ケーブル側との差圧を小さくすることで、接続中のケーブル側への、液体窒素流入量を抑えるためである。

図 2.1.4.1.(2)-1 に接続作業中の、液面、圧力、流量の推移を示す。均圧までのケーブル側への液体窒素流入量が前回実施の際よりも多かったため、前回よりも接続完了までに時間はかかったが問題なくケーブルとの接続を完了することができた。

ケーブル接続後の循環運転では、循環温度（69K）、圧力(0.2MPa)、流量(40L/min)を所定の値に維持できることを確認した。ケーブル循環運転後に超電導ケーブルの Ic 測定などのデータ取得を行い、この際に設定温度を 77K へ変更を行ったが、変更後も変わらず温度、圧力、流量は制御されていた。

組合せ試験として警報試験、停電模擬試験、ポンプ故障切替え試験などを行った。警報試験では、設計通りに警報が発報されることを確認した。停電試験は、60 分以内の停電は自動で再起動する制御となっている。再起動時は、系内の温度が上昇しているためすぐに最大冷却能力の指令が入る。最大能力とするためには、最大回転数かつ系内のネオンを最大量にする必要がある。しかし、回転数上昇中にネオン量が多いと磁気軸受の荷重が大きくなるため最大回転数となった後に充填する必要がある。そこで、系内のネオン量は再起動直後に回収を行い最小量にした後、冷凍機起動後一定時間はネオンを充填しない制御を組み込んでいる。制御確認のために 55 分の模擬停電試験を行い、復電後に制御通りの再起動が行なわれ、ケーブル供給 LN2 が冷却再開されることを確認する（図 2.1.4.1.(2)-2）と共に再起動中の軸受過重も上限値 1100 を超えていないことを確認した。各試験で、ケーブル接続後も運用可能であることを確認した。

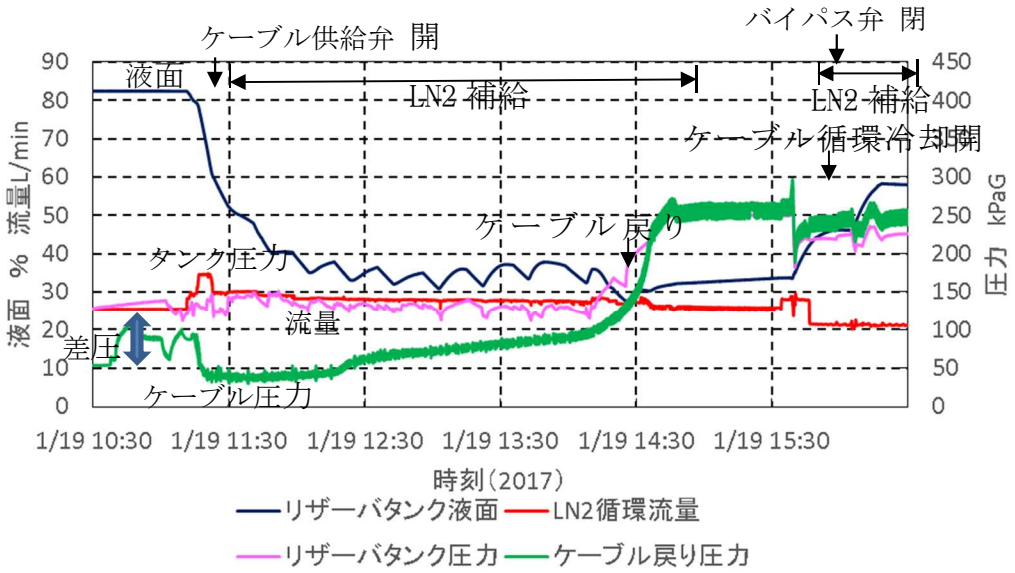


図 2.1.4.1.(2)-1　ケーブル接続作業中液面、圧力、流量推移

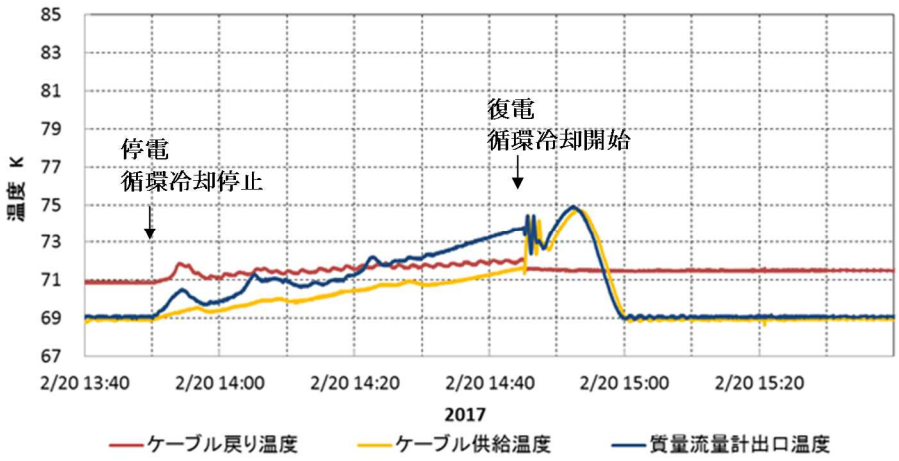


図 2.1.4.1.(2)-2　ケーブル接続 55 分停電試験結果

図 2.1.4.1.(2)-3 にケーブルシステムの初期冷却時の全長温度推移を示す。まず-100℃、-150℃の低温窒素ガスにより全長を徐々に冷却した後液体窒素の供給に切り替え貯液を実施した。要した日数はこれまでの冷却作業と同じく約 4 日間であった。図 2.1.4.1.(2)-4 に初期冷却中のケーブルコア絶縁部の静電容量 C、誘電正接 tan δ の変化を、図 2.1.4.1.(2)-5 に初期冷却作業時の様子を示す。

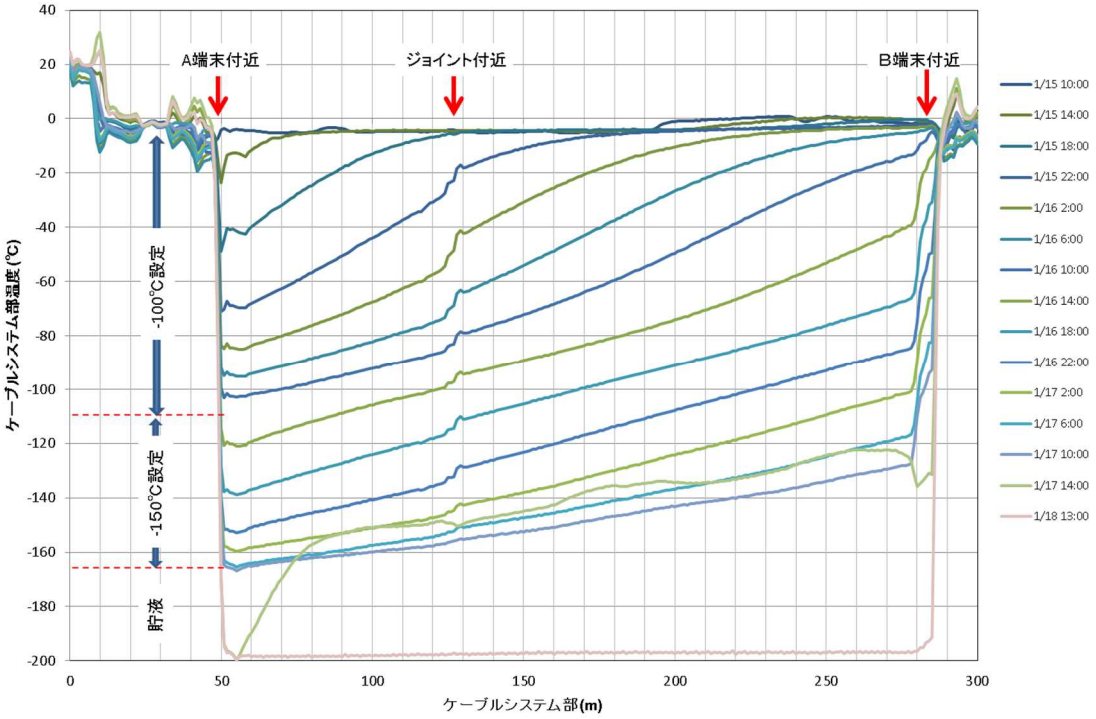


図 2.1.4.1.(2)-3　ケーブルシステム初期冷却時の全長温度分布推移

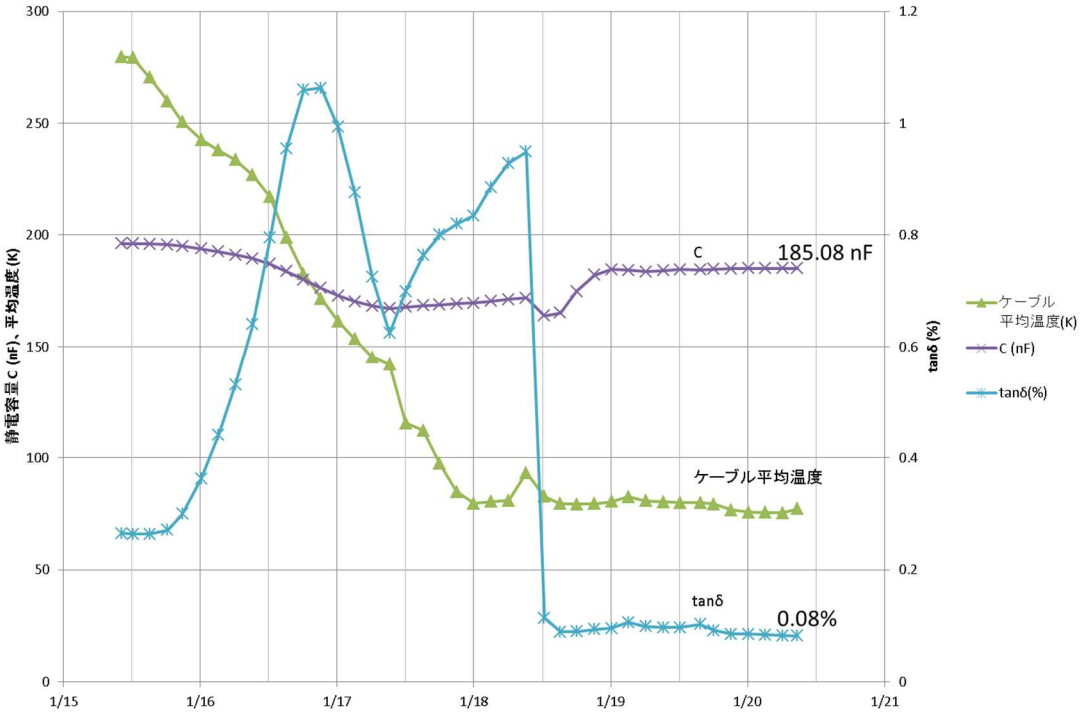


図 2.1.4.1.(2)-4　初期冷却中のケーブルコア C、tan δ の推移



タンクローリからの冷媒補給　　ガス冷却時の排ガス

図 2.1.4.1.(2)-5　ケーブル初期冷却作業

(3) 超電導ケーブル性能（住友電工）

初期冷却が完了した超電導ケーブルに対し Ic 測定試験、直流耐電圧試験をそれぞれ実施し、ケーブル通電特性に変化が無いこと、絶縁特性が規格を満たすことを確認した。

（ｉ）Ic 測定試験

実証ケーブルシステムの臨界電流(Ic)特性を測定し、これまでの測定結果と比較することで、実系統運転再開前のケーブル健全性を確認する。液体窒素循環系は前回と同様ケーブル部平均温度 77.3+/-0.1 K、流量 40+/-1 L/min の条件とし、Ic の定義電界は、1μV/cm とした。

通電方式は図 2.1.4.1.(3)-1 に示す通り往復通電方式とする。試験結果を表 2.1.4.1.(3)-1 に示す。また各相の Ic 値ついては今回が 77.3K においては 6 回目の測定となったが、過去 1～5 回で測定した値と大きく変化しておらず（図 2.1.4.1.(3)-2)、大きな劣化はないと判断される。

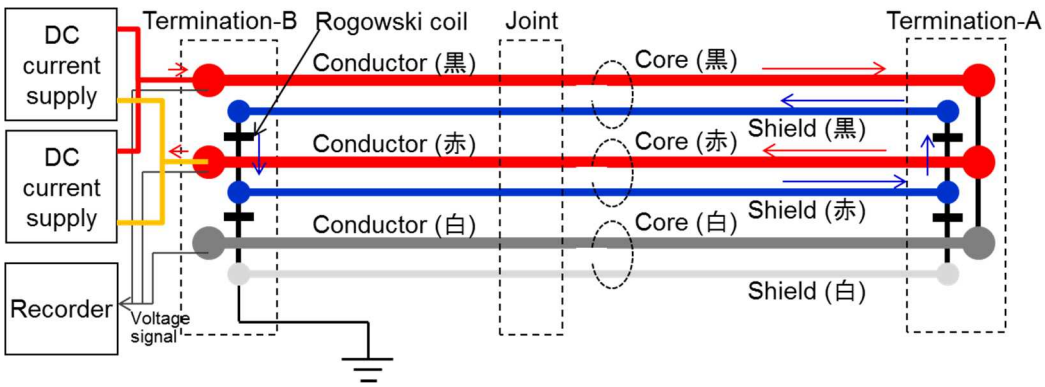


図 2.1.4.1.(3)-1　往復通電時の回路図および配線図

（黒→赤相往復通電の場合。白相は電圧タップとして使用）

表 2.1.4.1.(3)-1　測定結果まとめ（@77.3K）

	Ic			n 値		
	黒	赤	白	黒	赤	白
1 回目	6302	6273	6397	18	16	15
2 回目	6345	6472	6328	15	18	18
平均値	6324	6373	6363	16	17	17

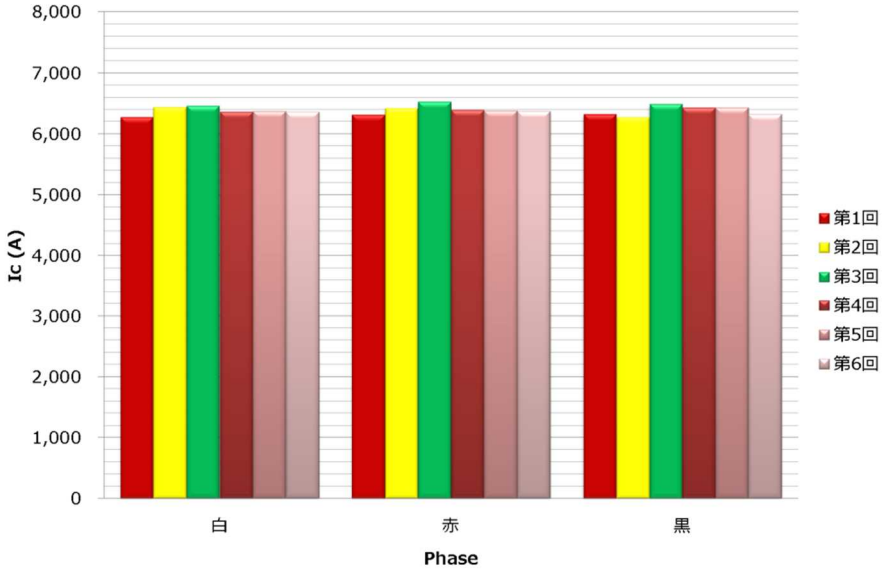


図 2.1.4.1.(3)-2 臨界電流(Ic)の推移(今回は第 6 回)

（ⅱ）DC 耐電圧試験

系統課電前に超電導ケーブル線路の絶縁が健全であることを確認するため、DC 耐電圧試験を実施した。また DC 耐電圧試験の前後では、絶縁抵抗測定も実施した。各試験方法、試験結果を以下でまとめる。

（ⅱ-1）DC 耐電圧試験

図 2.1.4.1.(3)-3 に示す回路のようにケーブル 1 相の上部高圧部に直流高圧発生装置（ＤＣ課電トランス）を接続する。その他の 2 相には接地を取り付けた後、DC 電圧を印加し、漏れ電流を計測する。印加電圧、時間および確認項目は表 2.1.4.1.(3)-2 の通りである。この試験を各相に対して実施する。

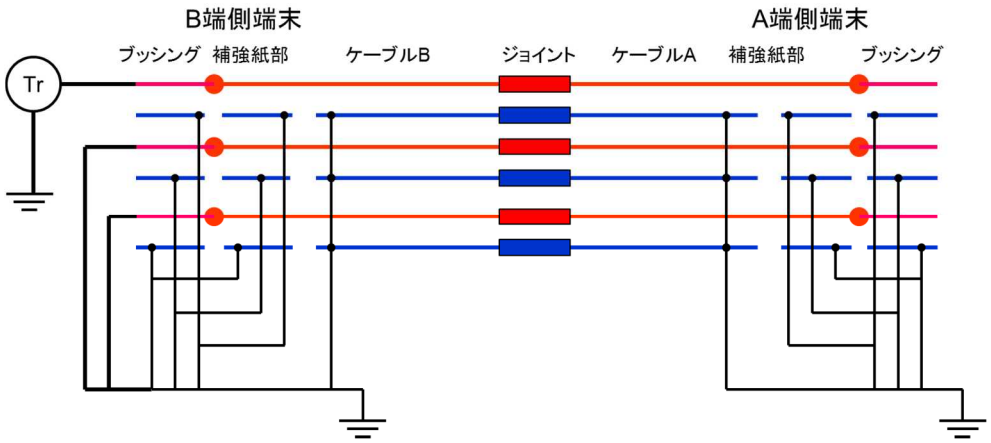


図 2.1.4.1.(3)-3　DC 耐電圧試験回路

表 2.1.4.1.(3)-2　DC 耐電圧試験条件、確認項目

項目	数値、確認項目
印加電圧(※)	151.8 kV
印加時間	10 分間
確認項目	漏洩電流が変化しないこと(1 分間隔で確認)

(※)印加電圧については、「電気設備の技術基準の解釈　第 1 章 総則　第 3 節 電路の絶縁および接地 第 15 条 二」により決定した。

耐圧試験結果を表 2.1.4.1.(3)-3 にまとめる。各相に対して 151.8 kV－10 分間の課電に問題が無いこと、漏洩電流が安定していることを確認し、良好な試験結果となった。

表 2.1.4.1.(3)-3　DC 耐電圧試験結果
(151.8VkV－10 分間印加時の 1 分毎の漏れ電流推移)

経過時間	漏洩電流／線路亘長(μA)			経過時間	漏洩電流／線路亘長(μA)		
	黒	赤	白		黒	赤	白
1分	2.0	1.0	1.0	6分	2.0	1.0	1.0
2分	3.0	1.0	1.0	7分	2.0	1.0	1.0
3分	2.0	1.0	1.0	8分	2.0	1.0	1.0
4分	2.0	1.0	1.0	9分	2.0	1.0	1.0
5分	2.0	1.0	1.0	10分	2.0	1.0	1.0

(計測器セットリーク 0.2μA 以下を含んだ値)

（ⅱ-2）絶縁抵抗測定試験

図 2.1.4.1.(3)-3 に示す回路により各部の絶縁抵抗を計測する。測定相以外は接地した状態で行った。メガーによる印加電圧は 1,000V とし、各相の絶縁抵抗が 2,000MΩより大きいことを確認する。

試験結果を表 2.1.4.1.(3)-4、5 に示す。DC 耐電圧試験前後で 2000MΩ以上の絶縁抵抗をそれぞれ有していることが確認された。

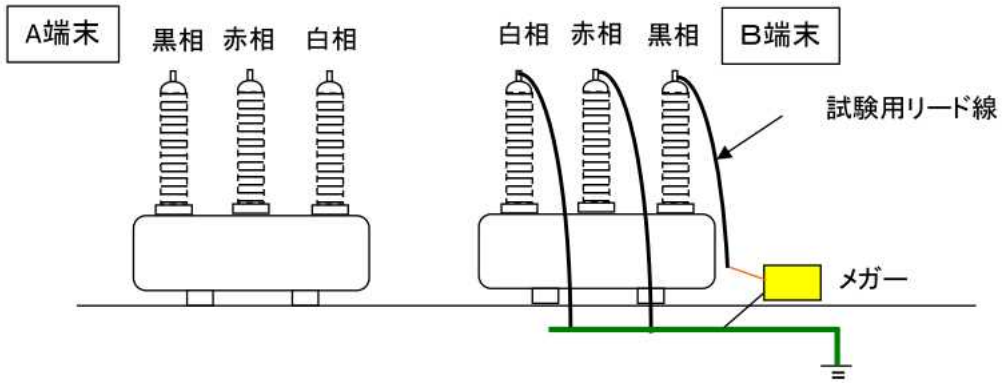


図 2.1.4.1.(3)-3　絶縁抵抗測定試験回路

表 2.1.4.1.(3)-4　DC 耐電圧試験前の各相絶縁抵抗測定結果

測定相	MΩ・線路亘長	摘　　要
黒相対大地	2000以上	
赤相対大地	2000以上	
白相対大地	2000以上	
試験時間	10時55分～11時01分	

表 2.1.4.1.(3)-5　DC 耐電圧試験後の各相絶縁抵抗測定結果

測定相	MΩ・線路亘長	摘　　要
黒相対大地	2000以上	※耐電圧試験後に測定。
赤相対大地	2000以上	
白相対大地	2000以上	
試験時間	12時05分～12時08分	

2.1.4.2 実系統接続での実証試験（東電ＨＤ、住友電工、前川製作所）

2.1.4.1.(2)の組合せ冷却試験、2.1.4.1.(3)の超電導ケーブル性能確認試験などによりケーブルシステム、冷却システムそれぞれに関して所定の性能を有することを確認した。この結果を踏まえ、系統接続を実施することとした。2017年3月31日､超電導ケーブルシステムは東京電力66kV実系統線路に接続され、1年間の長期運転を実施した。

実系統連系した超電導ケーブルシステムの系統図および機器配置図を図2.1.4.2-1、図2.1.4.2-2に示す。

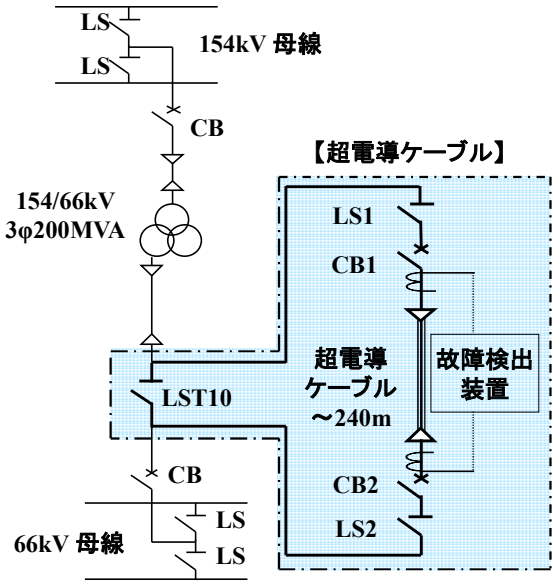


図2.1.4.2-1　系統図

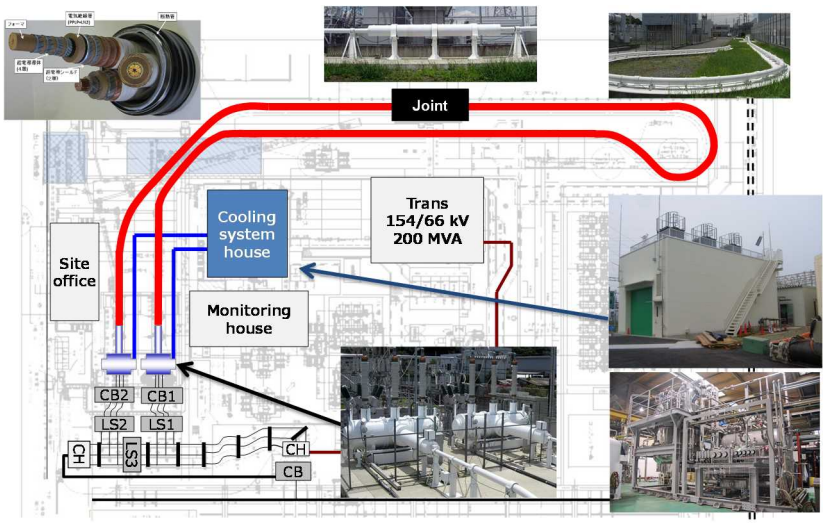


図2.1.4.2-2 機器配置図

(1) ケーブル性能（住友電工）

実系統運転時の系統電流、ケーブル入口温度、入口圧力、液体窒素の流量の変化を図 2.1.4.2.(1)-1 に示す。1 年間の運転は、ケーブル、冷却システム特に異状なく、安定に運転できることを確認した。2018 年 4 月 2 日に、系統から切り離された。

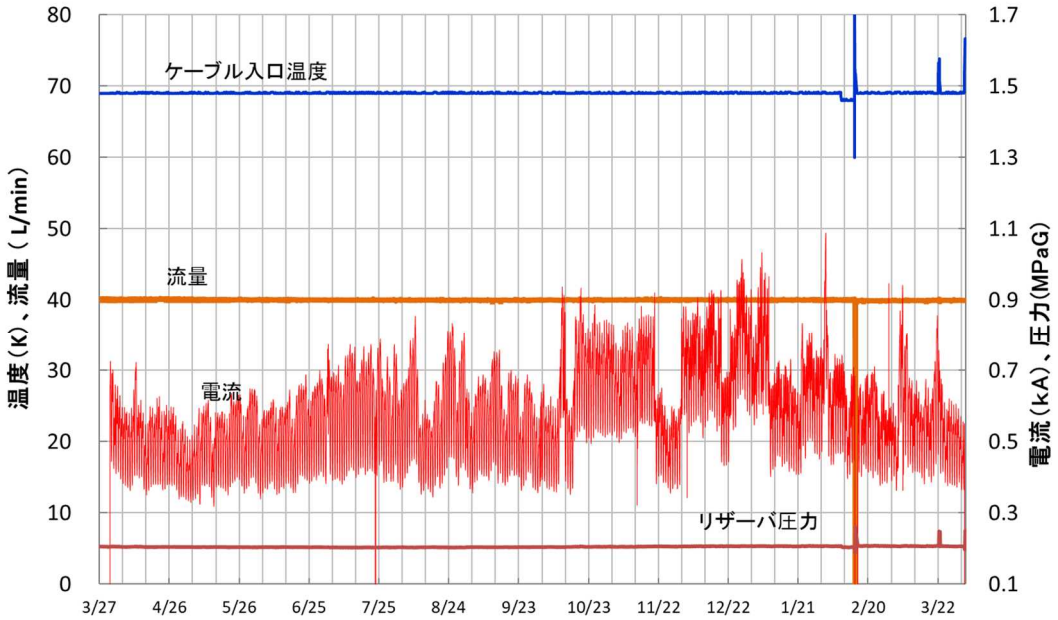


図 2.1.4.2.(1)-1　2017/3/31～2018/4/2 の実系統運転

ケーブルが、冷却時に安定に運転できることは、2012 年からの実証運転で既に実証済みである。前回の実証運転では、運転中にケーブル B の真空度が徐々に低下する現象が起こり、途中で真空引きを実施した。今回は、1 年間の真空度のデータを収集するため、真空度の変化があっても途中で真空引きすることなく、封じ切りの状態での真空度データの収集を行った。

ケーブル A､B の断熱管真空度の変化と侵入熱の変化を図 1.1.4.2.(1)-2 に示す。

ケーブル A については、真空度は-5～-6 乗オーダー（torr）の高真空が維持されており、夏場で多少真空度が悪化したが、冬場では初期に戻っている。侵入熱も初期値と比べて大きな変化はない。一方、ケーブル B については、真空度は徐々に悪化し最終的には,-3 乗に近くになるほど真空度が低下した。侵入熱についても、夏場で大きくなり冬場で多少戻ったが、初期値に比べて 150W 程、増加している。尚、この状況であっても運転には支障がなかった。

この差の要因については、以下のように考える。ケーブルBには地上布設のU字曲り部分（図1.1.4.2.(1)-3）があり、冷却時は大きな側圧が曲り部にかかった状態である。また、この部分は日射により温度が上がりやすくなっている。したがって、このU字部分では侵入熱が大きくなり、断熱層の温度が高くなった結果アウトガスが出やすくなったためと推測する。

試験終了後、室温で断熱管内部の残留ガスを調べると、図1.1.4.2.(1)-4の残留ガス成分が示すようにHC成分が大きくなっていることが判る。この成分については、断熱管を温めると発生することが判っており、断熱管Bの真空度の低下はアウトガスの影響と推定できる。ただし、断熱管AについてもHC成分が見られるが、断熱管Aに顕著な真空度悪化は見られない。HCの数量の差によるものと推測されるが、定量的にはさらなる検討が必要と考える。

実際に送電線路に適用される場合は、今回のようなU字部分は存在せず、またケーブルは地下管路に布設されることから、ケーブルA断熱管の真空状態に近くなると推測され、長期間、高真空が維持できるものと期待される。尚、断熱管の真空度はセンサーにてモニターでき、また真空度が悪くなるとケーブルを運転しながらでも真空引きは可能である。



図2.1.4.2.(1)-3　ケーブルBの曲り部

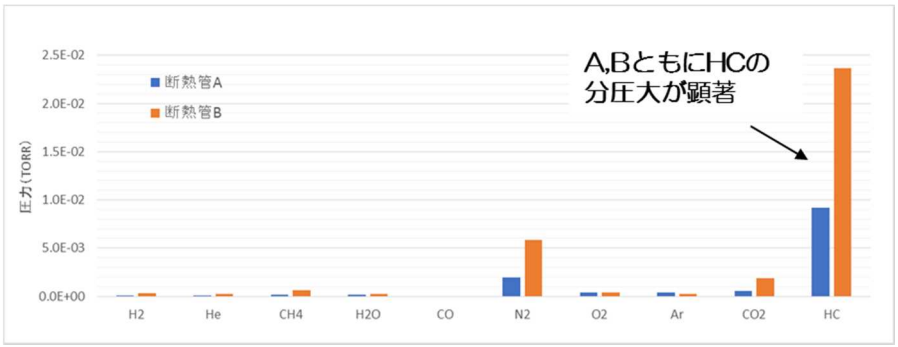


図2.1.4.2.(1)-4　試験終了後の断熱管残留ガス成分（室温）

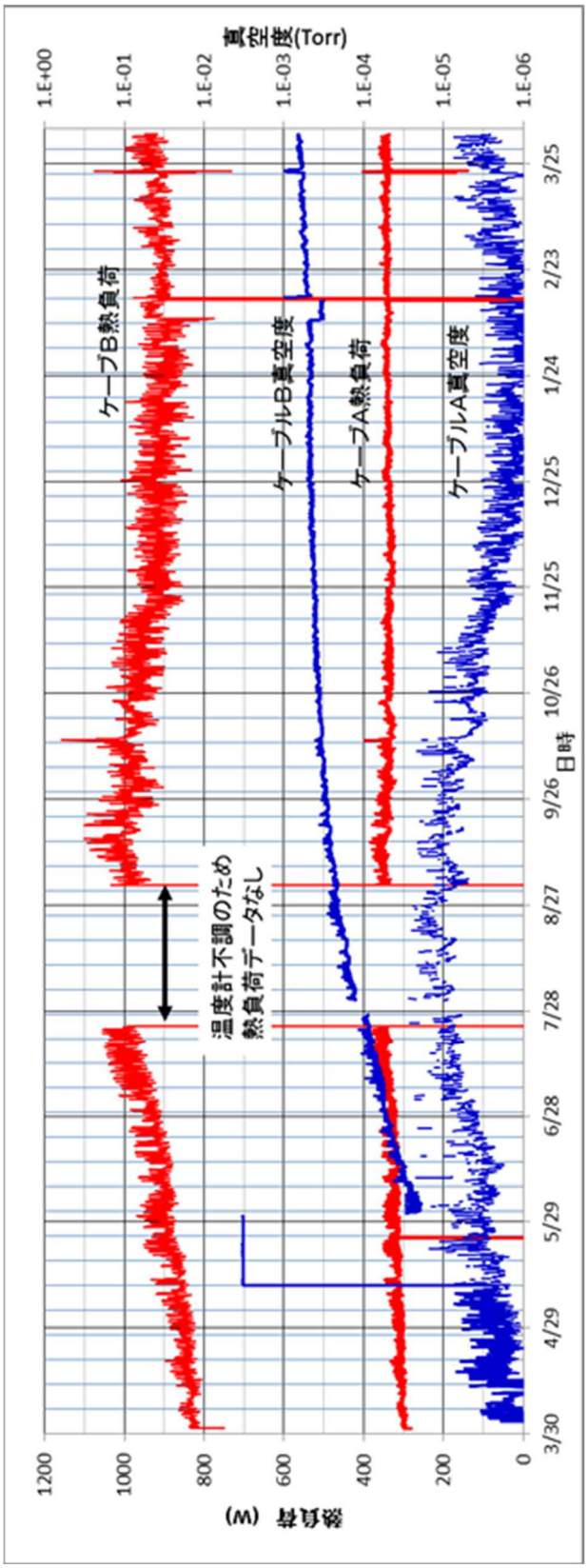


図 2.1.4.2.(1)-2　ケーブル A,B の断熱管の真空度と侵入熱

(2) 冷凍機性能（前川製作所）

（ｉ）実証試験中の運転状況

系統連系試験中の１年間での季節変動などによってケーブル負荷が変化（下図ケーブル熱損失）しても、ケーブル内を循環する供給液体窒素の状態（温度、圧力）をほぼ一定で、循環流量も安定して運転できることを確認した（図 1.1.4.2.(2)-1）。なお、図 1.1.4.2.(2)-1 では供給液体窒素の温度を冷凍機出口温度、リザーバタンク内圧力が液体窒素の圧力を示している。実証期間中にキュービクル点検による停電と系統連系中の冷凍機停止試験実施のため、冷凍機を停止させた。この間は冷凍機出口温度が上昇したが、端末の液体窒素保有などにより、ケーブル温度に影響はほとんどなく、冷凍機再起動後まもなく所定の温度に戻った。

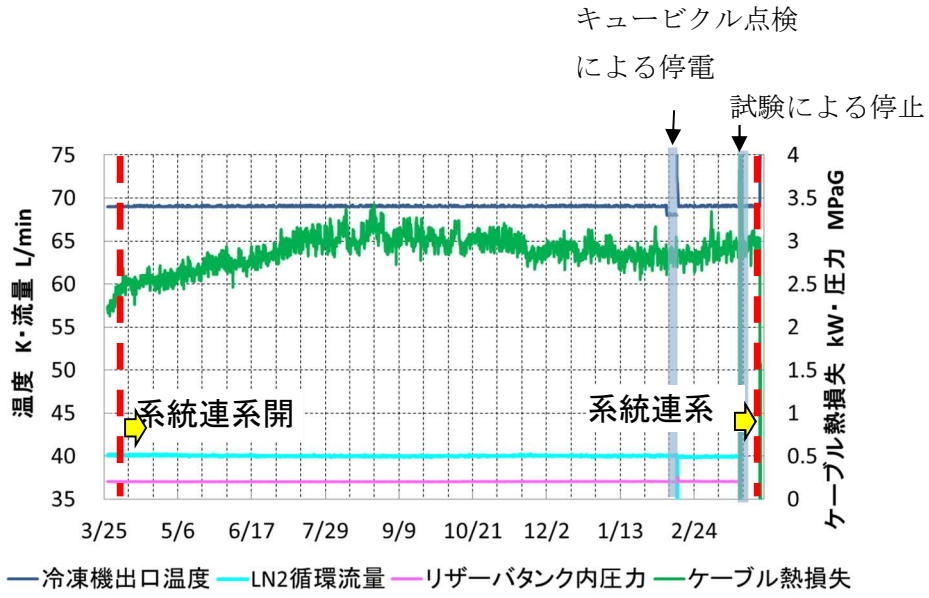


図 2.1.4.2.(2)-1　系統連系状況

実証試験中の外的要因として、発電所内系統操作実施で、ケーブル電流値が急激にゼロとなったが、液体窒素の供給は、冷凍機の温度制御やリザーバタンクの圧力制御で一定に制御された。(図 2.1.4.2.(2)-2　図 2.1.4.2.(2)-3)

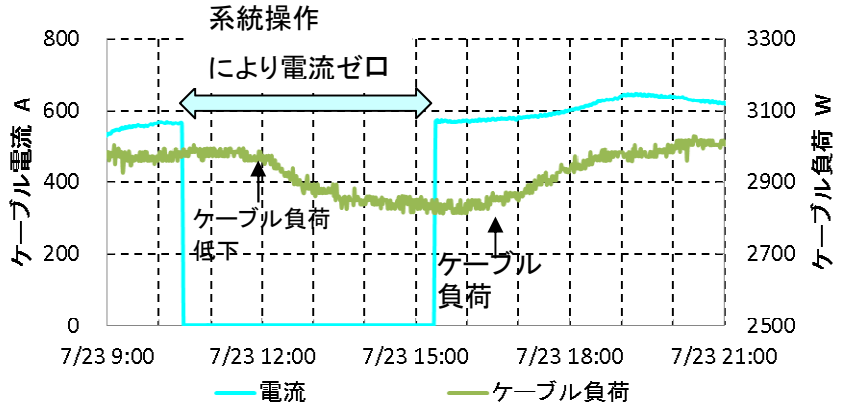


図 2.1.4.2.(2)-2　外的要因による状態

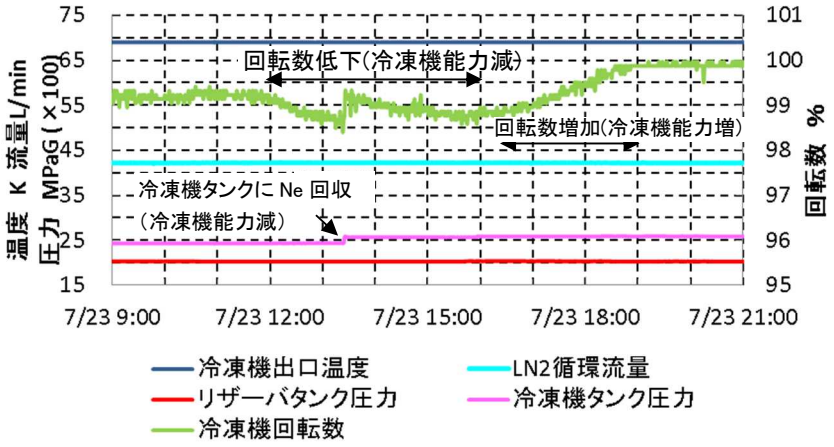


図 2.1.4.2.(2)-3　冷却システム運転状態

図 2.1.4.2.(2)-4(a)にブレイトン冷凍機 COP を示す。実証開始後に夏季は水温上昇により COP が少し下がるが、秋以降に水温が下がると共に COP も上昇しており、水温変動に合わせて COP が変化している。１月下旬から２月中旬にかけて COP が低下したが、これはコールドボックス内の真空度確認試験によるためである。ブレイトン冷凍機は、冷却システム単体運転も含めて 14,600 時間運転したが、この間冷凍機はメンテナンスなしで運転を継続しメンテナンスが必要な COP 低下はなかった。一方、前プロジェクトでの実証でのスターリング冷凍機は COP 低下（図 2.1.4.2.(2)-4(b)）が発生しており、COP を維持するためにメンテナンス対応を頻繁に行う必要があった。前プロジェクトの冷凍機の課題が対応できたことを確認した。

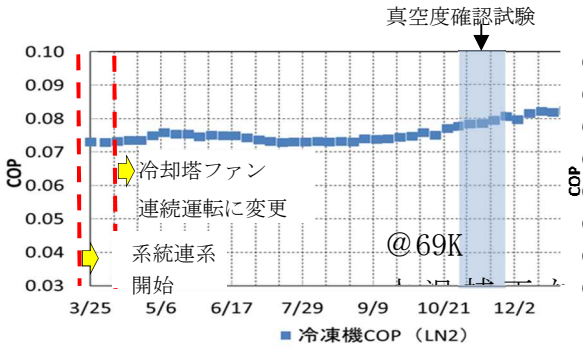


図 2.1.4.2.(2)-4(a) ブレイトン冷凍機

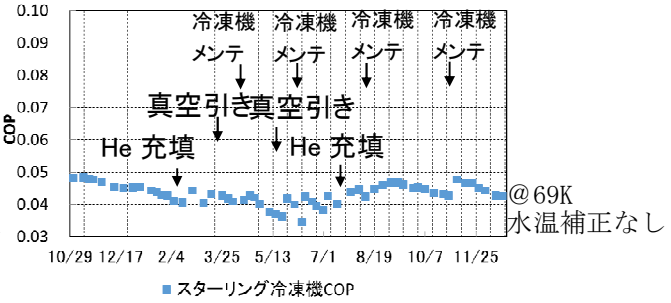


図 2.1.4.2.(2)-4(b) スターリング冷凍機（前プロジェクト結果）

1 年間以上の継続運転によって得られた磁気軸受（AMB）などのデータ評価を実施した（図 2.1.4.2.(2)-5、図 2.1.4.2.(2)-6、図 2.1.4.2.(2)-7）。ラジアル変位、スラスト変位及び荷重は平坦である。 1 年間の運転で AMB に変化は見られず、上下限に対して十分な尤度があった。

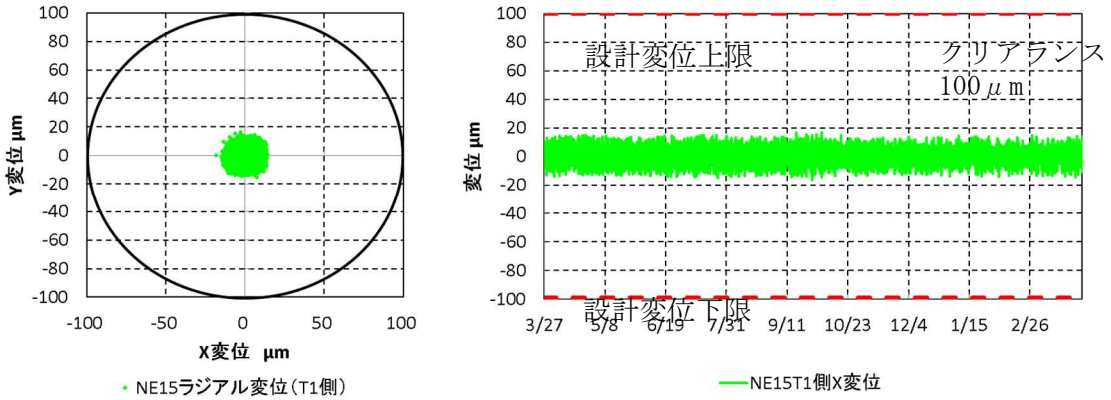


図 2.1.4.2.(2)-5 NE15 ラジアル変位推移（X、Y 変位）

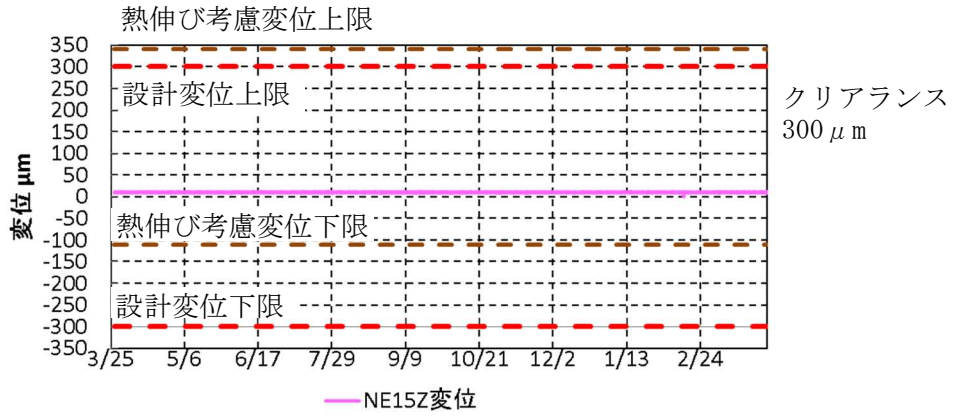


図 2.1.4.2.(2)-6　NE15 スラスト変位推移（Z 変位）

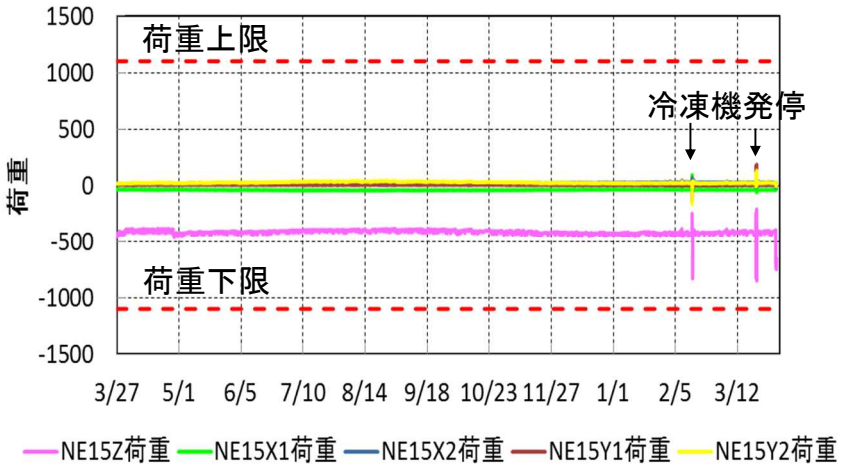


図 2.1.4.2.(2)-7　NE15AMB 荷重推移

（ⅱ）メンテナンス間隔

(a) 実証試験中のメンテナンス

実証試験中のメンテナンスは、冷凍機、循環ポンプ共に実施していない（表 1.1.4.2.(2)-1)。冷凍機冷媒のネオン、循環冷却の液体窒素は、補充を実施していない。結果として、ブレイトン冷凍機はメンテナンスなしで長期間の運用が可能であることが確認できた

表 2.1.4.2.(2)-1　実証試験中の機器保守内容

機器	
冷凍機	14,600時間　メンテナンス無し
循環ポンプ(1台)	10,960時間　メンテナンス無し
冷却塔	2017年4月～2018年3月　冷却塔清掃　3回
冷媒	
液体窒素	実証試験中　補充無し
ネオン	実証試験中　補充無し

(b) メンテナンス間隔確認項目

メンテナンス間隔を確認するための項目として以下のものがあげられる。

部品寿命：摺動部を持つ部品の寿命確認　⇒　電動弁

尤度：制御限界に対する尤度確認　⇒　磁気軸受

初期故障対応：試験開始初期に発生した故障対策の確認　⇒　TDB

温度制御の影響：スターリング冷凍機の制御方法を変更　⇒　制御状況　の確認

(ON-OFF 制御⇒冷却量制御)

これらの確認項目の内、電動弁については、運転中の動作回数とメーカー推奨交換回数からメンテナンス期間を評価することとし、他の項目に関しては、1 年間以上の運転の間に徐々に変化がなかったか？あるいは解体時に試験前と大きな変化がなかったか？といった観点から検証を行うこととした。

結果として、部品寿命としては、冷凍機で摺動部がある電動弁について評価した。冷凍機には複数の電動弁が取り付けられているが、この中で能力制御に使用され、稼働頻度が多い、バッファタンクの出入口弁（図 1.1.4.2.(2)-8）について、実証試験中の開閉回数を評価した。電動弁開閉の累計回数は多いほうで 1,100 回程度である（図 1.1.4.2.(2)-9)。メーカ推奨の電動弁開閉回数の寿命は 20 万回である。よって、実証試験中と同様のペースで開閉を続けたとしても 4 万時間は十分な部品寿命を有していると考えられる。

尤度、初期故障、温度制御に関しては、前項で説明した試験の中で長期間の

運転においても問題がないことが確認できた。

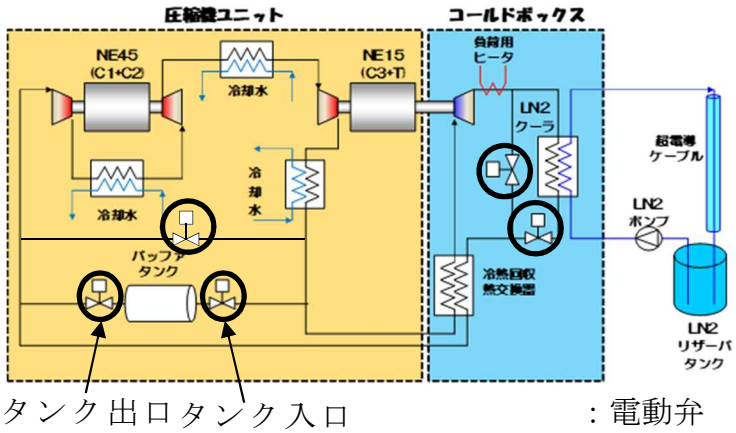


図 2.1.4.2.(2)-8　冷凍機電動弁位置

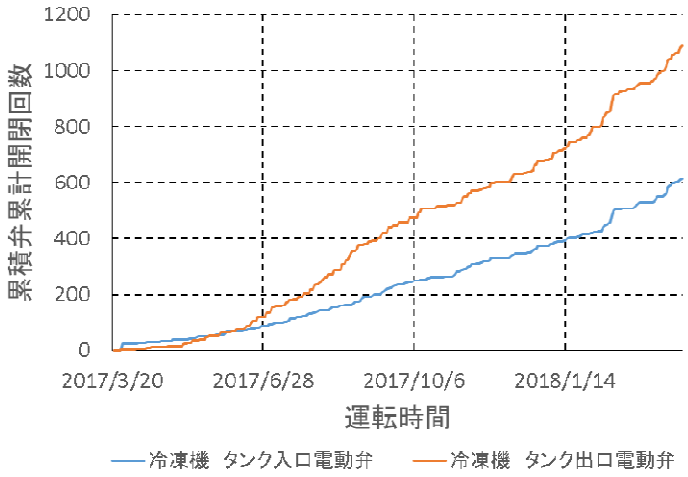


図 2.1.4.2.(2)-9　実証試験中電動弁開閉回数

1.1.4.3 実証試験後の性能確認

(1) 冷凍機（前川製作所）

(ｉ) 冷却能力測定結果

冷凍機の性能が維持していることを確認するために実証試験後（2018）の冷凍機冷却能力を測定し、実証試験前(2016)と比較した。(図 1.1.4.3.(1)-1)

実証試験前後で COP は同等であり冷凍機効率は低下していない。しかしながら、冷凍機の最大冷却能力は実証試験前と比較して低下していた。この原因分析について、まず実証試験前と実証試験後及び Ne 補充後の冷凍機 Ne タンク圧力を表 1.1.4.3.(1)-1 に示す。表中のタンク圧力は、冷凍機停止時に冷媒をタンクに回収した時の数値である。実証試験前と実証試験後を比較すると圧力が低下している。ブレイトン冷凍機では、Ne タンクを介して Ne 循環量を調整することで冷却能力を調整している。そのため、タンクの最大圧力は Ne 最大充填量と冷凍機最大冷却能力に影響を与える。何等かの理由でタンクの最大圧力が試験中に低下したと仮定すれば、通常の熱負荷で高効率冷却を実現しているものの最大冷却能力が低下することが説明可能と考えられる。この検証を行うため、冷凍機の Ne 冷媒を補充したところ、最大能力は実証試験前と同等の数値となった。

以上の仮説ならびに検証結果から、実証試験後の最大冷却能力が低下していた原因は、Ne タンク圧力が低下し、Ne 最大充填量が減少したためと想定される。この検討結果から冷却最大能力を維持するためには、従来より 40,000 時間経過中の圧力低下量の 159kPa（(373－315）×40,000/14,600）高い圧力とする設計にすることが必要である。また、しきい値を定めた上での警報対応により管理を行う運用とすることも視野に入れるべきである。

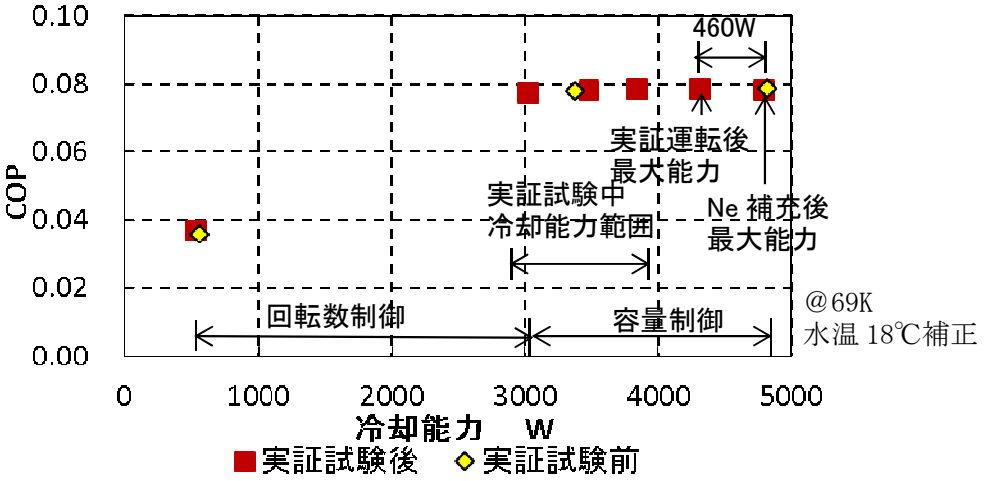


図 2.1.4.3.(1)-1　実証試験前後冷却能力測定結果

表 2.1.4.3.(1)-1　冷凍機 Ne タンク圧力変化

2016 年 9 月 （実証試験前）	2018 年 5 月 （実証試験後）	2018 年 5 月 （Ne 補充後）
373kPaG	315kPaG	373kPaG

（ⅱ）　磁気軸受信頼性確認試験

磁気軸受の信頼性確認のために、悪条件試験（想定運転条件の中で磁気軸受荷重が大きくなる冷凍機発停試験）を実施した。結果として、発停時は特に Z 荷重が大きく変動するが、磁気軸受（AMB）荷重が許容範囲内であることを確認した（図 2.1.4.3.(2)-2)。また、2.1.4.2.(2)項で説明した通り、通常運転中の荷重はほぼ一定で推移し、かつ許容荷重内で運転していた。このことから、劣化項目はなく、長時間運転での制御性に問題がないと考えられる。

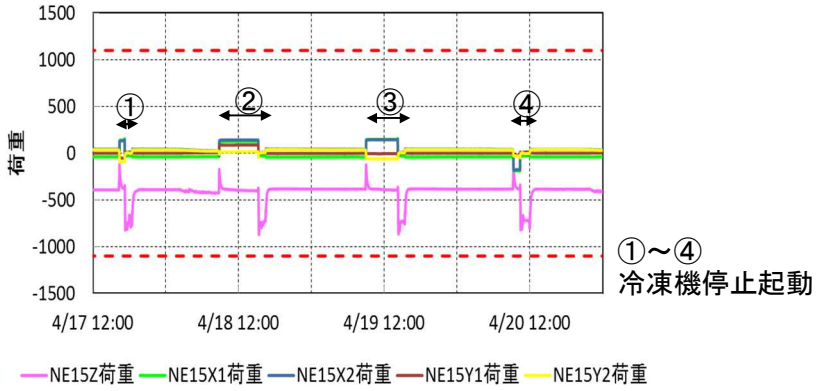


図 2.1.4.3.1.(2)-2　冷凍機発停時の NE15AMB 荷重変化

（ⅲ）解体調査結果

長期間の運転で初期状態から劣化が考えられるものに、熱交換器内部と温度計取り付け状態を上げた。そこで冷却システム撤去後に、解体調査として冷凍機熱交換器と LN2 配管の温度計取り付け状態を解体調査した。熱交換器の調査は、熱交換器を切断し目視もしくはファイバースコープで確認した。結果として、熱交換器は Ne および LN2 が流れているところは堆積物や汚れは確認されなかった。冷却水が流れているところには、多少錆が存在していたが、熱交換器表面には腐食等は確認されなかった。

温度計取り付け状態は、7 年前に設置したものと今回の旭移設の際に設置したものを確認した。確認は、配管を切断し温度計を目視確認と大気圧での LN2 の温度を測定することで確認を実施した。どちらの温度計についても、大幅に測定値がずれていないことが確認された。調査の結果、熱交換器と温度計に関して劣

化の傾向は確認されなかった。

さらに、試験開始初期に発生したタッチダウンベアリング（TDB）共回りによる故障の対策確認のため、実証試験前と同様に開放点検を行い、TDB の目視点検と重量測定を実施した。結果として、重量（表 2.1.4.3.(1)-2）の変動がなく、目視でも摩耗の痕跡が認められなかったことから、実証試験中も共回りがなかったと考えられ、TDB の共回り対策が有効であることを確認できた。

表 2.1.4.3.(1)-2　TDB 重量測定結果

	合計重量（g）
実証試験前	45.857
実証試験後	45.857

(2) 超電導ケーブル（住友電工）

(ｉ)ケーブル全長 Ic 測定

実証試験後に、ケーブル全長の Ic 測定を実施した。試験結果を表 2.1.4.3.(2)-1 に示す。

また、過去の Ic 値と比較したグラフを図 2.1.4.3.(2)-1 に示す。これから、2 回目の 1 年間の実証試験を終えた各相の Ic 値は、初期のものと同じレベルであり、全期間において劣化、低下はないと考える。

表 2.1.4.3.(2)-1　測定結果まとめ（@1μV/cm、77.3K）

	Ic			n 値		
	黒	赤	白	黒	赤	白
1 回目	6375A	6305A	6481A	16	12	14
2 回目	6324A	6313A	6427A	16	12	16
平均値	6349A	6309A	6459A	16	12	15

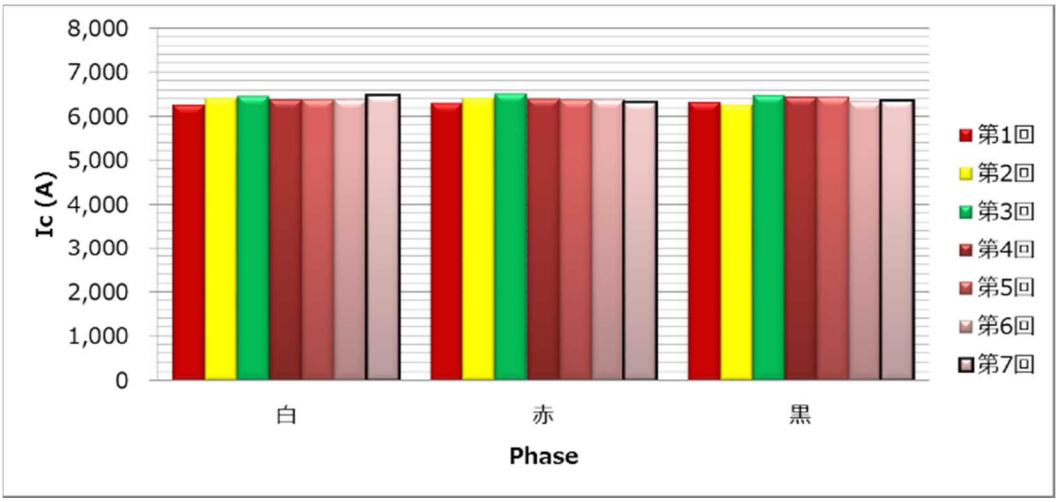


図 2.1.4.3.(2)-1　ケーブル Ic 測定結果（全期間）
第 1 回 2012 年 4 月、第 2 回 2012 年 7 月、第 3 回 2012 年 9 月、
第 4 回 2013 年 7 月、第 5 回 2014 年 1 月、第 6 回 2017 年 4 月、
第 7 回 2018 年 4 月

（ⅱ）ケーブル撤去後のサンプル試験

ケーブル B の U の字曲り部から５m程度のサンプルを切り出し、以下の試験を行った。

(a) Ic 測定

試験結果を表 2.1.4.3.(2)-2 に示す。

導体については、使用された線材の Ic 総和は、6850A であり、各相はほぼ同程度の Ic 値を示している。旭変電所での全長 Ic は、このサンプル試験結果より少し小さな値を示す。これは、電流を通電するのに、例えば、黒相と赤相を使うが、２相が近接しているため、それぞれの発生磁場が他相へ影響し、Ic が下がるためである。

また、全長 Ic の n 値が、サンプル Ic の n 値よりも低くなるのでは、全長 Ic 測定にジョイント部の常電導抵抗が含まれており、その影響を受けるためである。

シールド層については、出荷前検査以降、旭変電所では測定できていない（構造上不可）ので、今回初めての確認となるが、線材の Ic 総和は 7330A であり、各相、それ以上の Ic 値であることが確認された。

以上のことから、導体、シールドはそれぞれ初期と同程度の Ic 値を有していることが確認できた。

表 2.1.4.3.(2)-2　測定結果まとめ（@1μV/cm、77.3K）

	Ic			n 値		
	黒	赤	白	黒	赤	白
導体	6850A	6770A	6850A	30	25	28
シールド	7550A	7550A	7620A	25	24	25

(b)交流損失測定

同じくサンプル(別箇所)の AC ロスの測定を行った。測定結果を図 2.1.4.3.2-3 に示す。

測定は、導体とシールドをシリーズに流し、導体＋シールドの一体での損失を、交流端子法にて測定した。測定結果は出荷試験と一致し、0.82W/m/ph@2kA であった。AC ロスについても初期性能を有していることが確認できた。

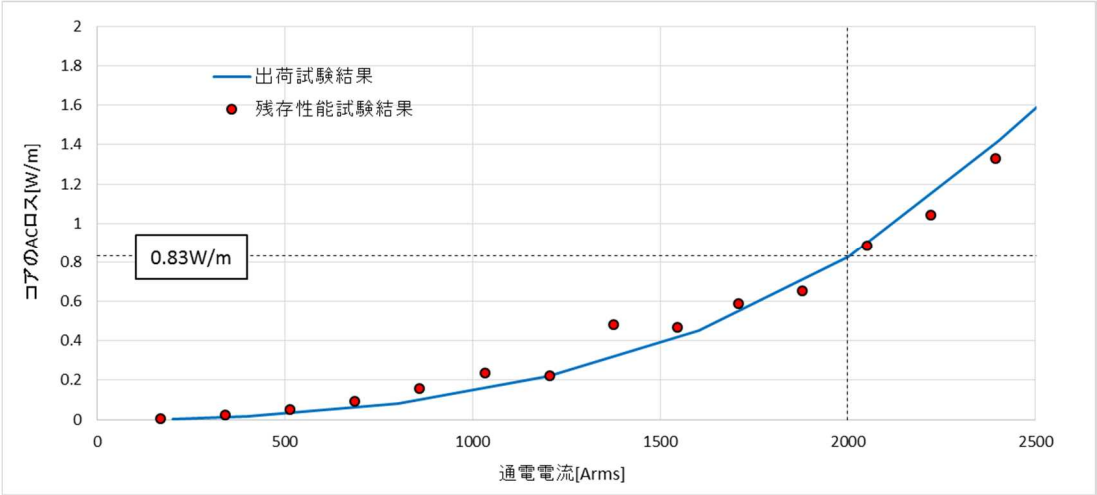


図 2.1.4.3.(2)-3　サンプルの交流損失測定結果

(c)課電試験

同じくサンプル（別箇所）の課電試験を行った。課電条件を表 2.1.4.3.(2)-3 に示す。2012 年に行った出荷試験と同じ条件で試験を実施した。試験構成図を図 2.1.4.3.(2)-4 に示す。図に示すように、サンプルは、5m 課電試験容器内に納められ、片側のブッシング部から高圧が取り出され、AC トランスあるいはインパルス発生装置に接続されている。また、サンプルの冷却は冷却システムにて液体窒素が循環されて行われている。

冷却条件については、入口温度 77K、リザーバ圧力 0.2MPa とした。

表 2.1.4.3.(2)-3　課電試験条件

試験名	試験条件
①AC 課電試験	対地 AC90kV、3 時間
	対地 AC110kV、10 分間
②インパルス試験	Imp±385kV、３回

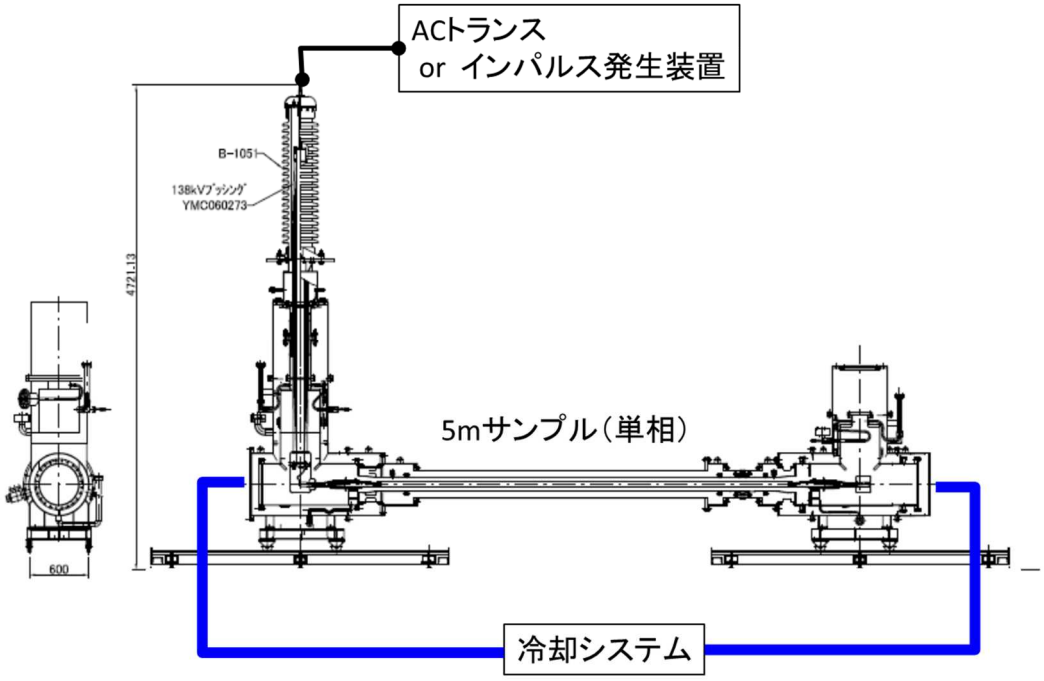


図 2.1.4.3.(2)-4　課電試験システム構成

① AC 課電試験

AC90kV を 3 時間印加し、絶縁破壊しないことを確認した。また、AC110kV、10 分間の課電も良好であった。図 2.1.4.3.(2)-5 に AC90kV 課電時の電圧を示す。

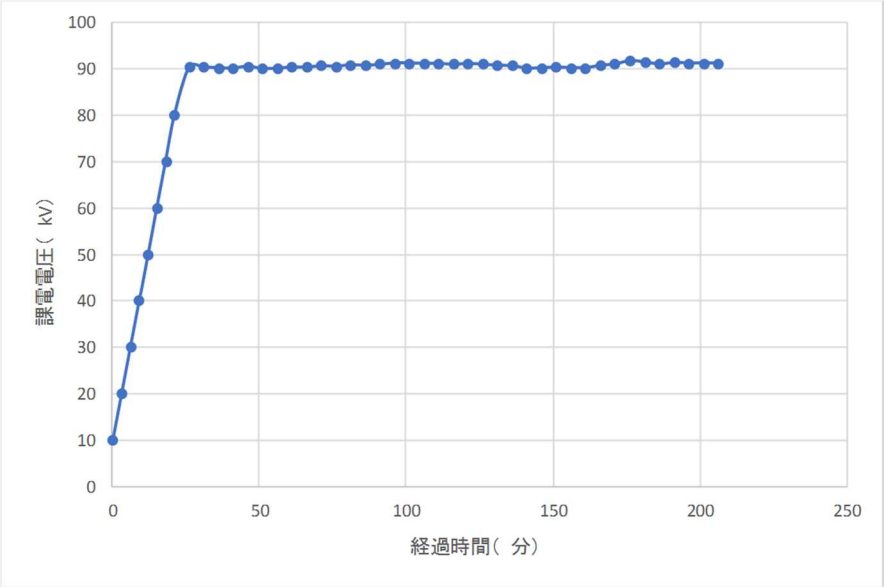


図 2.1.4.3.(2)-5　AC90kV、3 時間　課電試験

② インパルス試験

インパルス試験は、表 2.1.4.3.(2)-4 に示すように 310kV から電圧を上げていき、±385kV、3 回の課電を行うことができた。さらに、電圧を上昇させ、-475kV 印加時に BD した。385kV、475kV の時のインパルス波形を図 2.1.4.3.(2)-6、図 2.1.4.3.(2)-7 に示す。

このように、サンプルは出荷時と同じ課電試験を行うことができ、電気絶縁性能が低下あるいは劣化していないことが確認できた。尚、試験後解体した結果、ケーブルコアは破壊しておらず、試験用ブッシング部が破壊しており、ケーブルはそれ以上の絶縁性能で有していると考えられる。

表 2.1.4.3.(2)-4 インパルス課電試験印加電圧

電圧	試験結果（○は良好、×はＢＤ）
＋310kV	○　○　○
－310kV	○　○　○
－350kV	○　○　○
＋350kV	○　○　○
＋385kV	○　○　○
－385kV	○　○　○
－400kV	○　○　○
－415kV	○　○　○
－430kV	○　○　○
－445kV	○　○　○
－460kV	○　○　○
－475kV	×



図 2.1.4.3.(2)-6
－385kV 印加時のインパルス波形

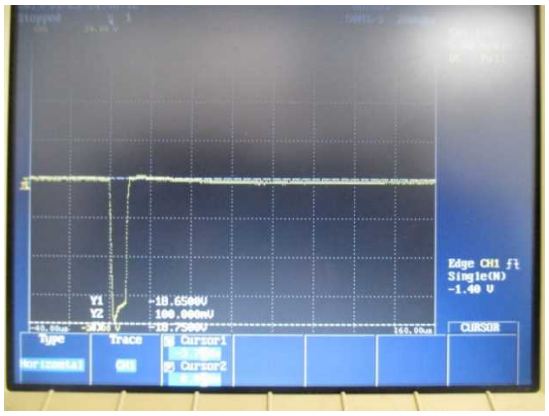


図 2.1.4.3.(2)-7
－475kV 印加時のインパルス波形

2.1.4.4 COP 向上方策（前川製作所）

(1) COP 向上方策検討

ブレイトン冷凍機の COP=0.11 以上とする向上方策検討のため、設定目標と測定結果を比較した（表 2.1.4.4.(1)-1）。設定目標と測定結果の差異が大きい膨張機（T1）の断熱効率向上が、COP 向上方策のポイントと考えた。

表 2.1.4.4.(1)-1　冷凍機設定目標と測定結果の比較

@77K

項目			設定目標	旭 測定結果 H28/9	項目			設定目標	旭 測定結果 H28/9
質量流量		kg/s	0.3269	0.3328	モータ入力電力	NE45+NE15	kW	51.4	60.4
圧力比	C1	—	1.4	1.395					
	C2	—	1.4	1.427	熱交換器	LN2クーラー	W	6235	5557
	C3	—	1.4	1.417					
断熱効率	C1	—	0.8	0.771	COP			0.121	0.092
	C2	—	0.8	0.775					
	C3	—	0.8	0.817					
	T1	—	0.8	0.695					
圧力損失		kPa	4	13					

断熱効率が設定目標よりも低い原因としては、インペラに有効に流れていない冷媒（漏れ）が存在することが推定される。そこで、この冷媒の漏れを減少させるため、次の 2 項目の方策を検討した。

方策①：クリアランス（漏れ隙間）の最適化。

方策②：膨張機(T1)の翼の流れ漏れを低減させるためにシュラウド付き翼を採用する（図 2.1.4.4.(1)-1)。

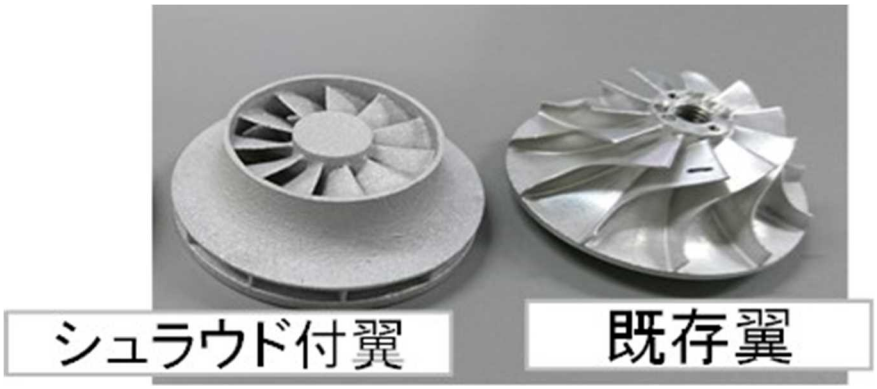


図 2.1.4.4.(1)-1　COP 向上方策例

(2) COP 向上方策確認試験

前項で検討した、COP 向上方策を実際に回転機に組み込み冷却能力測定を実施し、効果を確認した。結果は、COP 向上は確認できなかった。（図 2.1.4.4.(2)-1）また、ポイントとしていた膨張機断熱効率も表 2.1.4.4.(2)-1 に示すように実証試験後の数値から向上は見られていなかった。

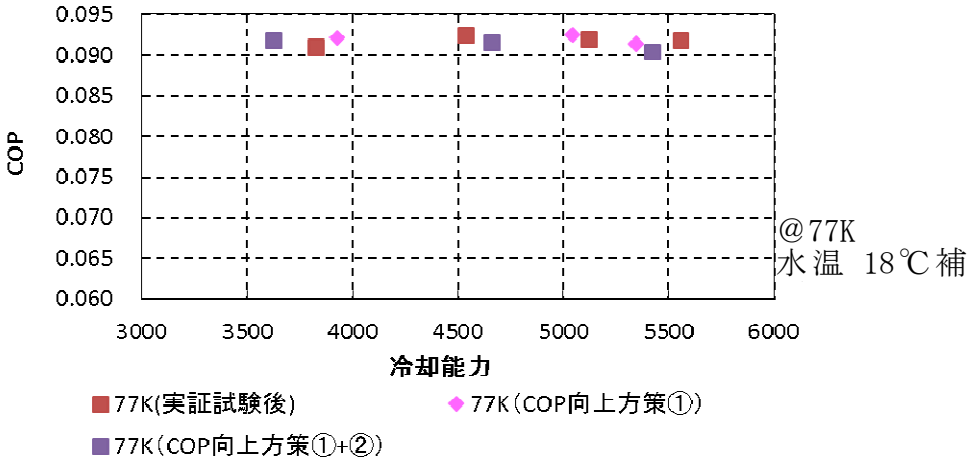


図 2.1.4.4.(2)-1　COP 向上方策確認試験結果

表 2.1.4.4.(2)-1　断熱効率推移

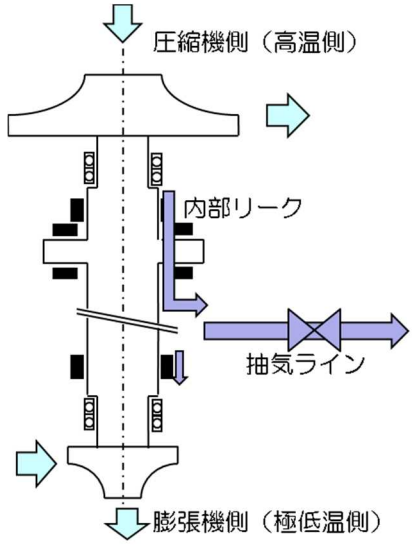
項目			実証試験前測定	実証試験後測定	COP向上方策①	COP向上方策①+②
断熱効率	C1	—	0.737	0.741	0.756	0.757
	C2	—	0.799	0.802	0.822	0.826
	C3	—	0.817	0.816	0.823	0.856
	T1	—	0.695	0.697	0.699	0.693

実施した向上方策について、期待していた効果が出なかった理由として、クリアランスはすでに最適であったこと、シュラウド翼についてはT1で膨張されないNeによる効率低下よりも、C3側からの冷媒内部漏れによる熱侵入が予想以上に大きく支配的であったことが考えられた。

前項で示した向上方策以外にも（ｉ）冷媒内部漏れ低減、（ii）モータ効率改善、（iii）熱交換器効率改善の方策について詳しく効果について検討を行った。

（ｉ）冷媒内部漏れ低減

冷媒の内部漏れ低減は、三段目圧縮機(C3)の高圧の温度の高いネオンガスが、膨張機（T1）の低温で低圧の部分に流れ込み、これによりT1に温度の高いガスによる熱ロスが生じるためにC3からT1に冷媒漏れをなくすことでロスをなくすことである。既設のC3－T1の回転機は、C3からT1側への冷媒流入を抑えるために、中間から低圧側へ流す抽気ラインが設けられている（図 2.1.4.4.(2)-2)。内部漏れによるCOPと断熱効率への影響を確認するため抽気量を変更する試験を実施した。抽気量を多くすることで断熱効率が向上し、COPが上昇していることが確認された（図 2.1.4.(2)-3)。この結果から、内部漏れを低減させることでCOPを向上させられると考えられる。内部漏れを低減させる方法として、膨張機と圧縮機の組み合わせを変え、圧力差を小さくする方法を考えた。組み合わせを変更した冷凍機で測定したT1断熱効率は0.765と実証試験機の0.697に対して上昇した。この上昇した断熱効率を使用してCOPを推定すると現状のCOPから0.0124向上する。



圧力差により圧縮機吐出側の高温Neガスが膨張機出口の低温側に流れる。抽気は流れるガスを中間からC1入口の低圧側に抜く。

図 2.1.4.4.(2)-2　抽気説明概要図

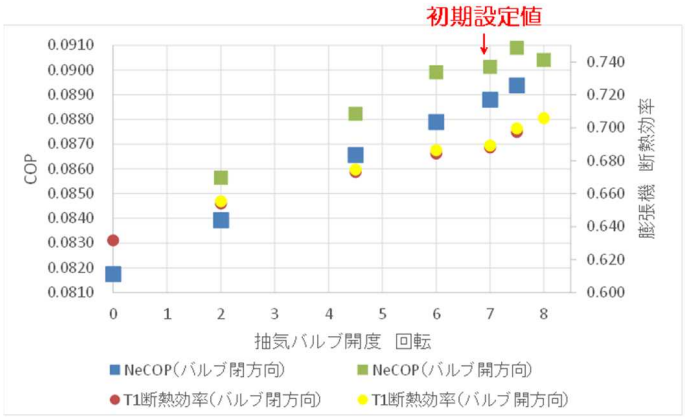


図 2.1.4.4.(2)-3　抽気量調整結果

（ⅱ）モータ効率改善（机上）

アキシャルディスクの小型化で風損を低減、電磁鋼板の薄型化で鉄損を低減することで、モータの効率を向上させる。それぞれ、風損は 487W、鉄損は 548W 低減され、COP に換算すると合計で 0.0015 向上する。

（ⅲ）熱交換器効率改善（机上）

回収熱交換器の伝熱面積を増やし、温度差を 5K から 4K にすることで熱交換器効率を向上させる。表 2.1.4.4.(2)-2 に示すように、長さが 700 ㎜長くなる。シミュレーションでは、ΔT が 5K で 5758W、4K で 6005W となり、熱交換量は 247W 向上する。COP に換算すると 0.0033 向上する。

表 2.1.4.4.(2)-2　熱交換器大きさ

	現行　温度差 5K			検討　温度差 4K		
	W	H	L	W	H	L
高温側	400mm	569mm	1800mm	400mm	508mm	2500mm
低温側	400mm	549mm	1800mm	400mm	508mm	2500mm

上記の（ｉ）（ii）（iii）の COP 向上割合を表 2.1.4.4.(2)-3、現状の COP と向上後の到達 COP を表 2.1.4.4.(2)-4 に示す。表に示す通り、新たに検討した向上方策でほぼ目標の COP0.11 を達せする見通しが得られた。

表 2.1.4.4.(2)-3　COP 向上割合

	COP 向上分
(1) 組み合わせ変更（内部漏れ低減）	0.0124
(2) モータ効率改善	0.0015
(3) 熱交換器効率改善	0.0033

表 2.1.4.4.(2)-4　到達 COP

	COP
現状（実証試験終了後）	0.0923
検討結果（現状+向上分）	0.1095

※77K　水温 18℃補正（実証期間年間平均）

2.2 電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発【直流】

高温超電導直流送電システムを電力分野に社会実装するためには、経済性の向上、信頼性・安全性の検証、設計、運用、保守するためのガイドラインが整理されている必要がある。そこで、本研究開発では、①直流超電導送電システムの総合的な信頼性・安全性の実証研究、及び②設計、運用、保守ガイドラインの策定、を実施した。

2.2.1 直流超電導送電システムの総合的な信頼性・安全性の実証研究

2.2.1.1 研究項目、使用設備及び試験工程

高温超電導直流送電システムの経済性検討、信頼性・安全性の検証、および将来の長距離化のための指針を得るため、本研究では下記の項目についての実証試験を実施した。

（1）長尺時を模擬した液体窒素循環冷却性能の評価
（2）超電導ケーブルシステムの通電特性の評価
（3）過酷試験による評価
（4）長期運転特性の評価
（5）残存性能確認試験

本研究開発に使用した設備（石狩回線 2）の概要と現地試験工程（実績）を以下に示す。

ア．設備概要

長尺超電導直流ケーブル実現のため以下の技術を組み込んだ構成となっている。

①低侵入熱
- 直管タイプの断熱管構造
  熱シールド付は 1W/m 以下
- ペルチェ素子による電流リード
  送電時侵入熱の低減

②熱収縮対策
- ヘリカル変形による熱収縮代吸収
- 移動式端末

③マルチジョイント
- コア固定タイプ（CSJ）
- コア移動タイプ（NJ）

ケーブル仕様	
定格電流	2500A
送電容量	50MW
長さ	1000m

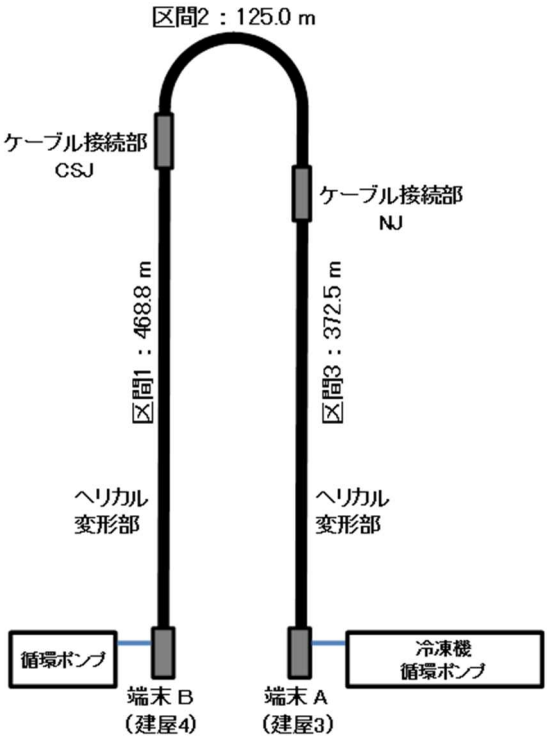
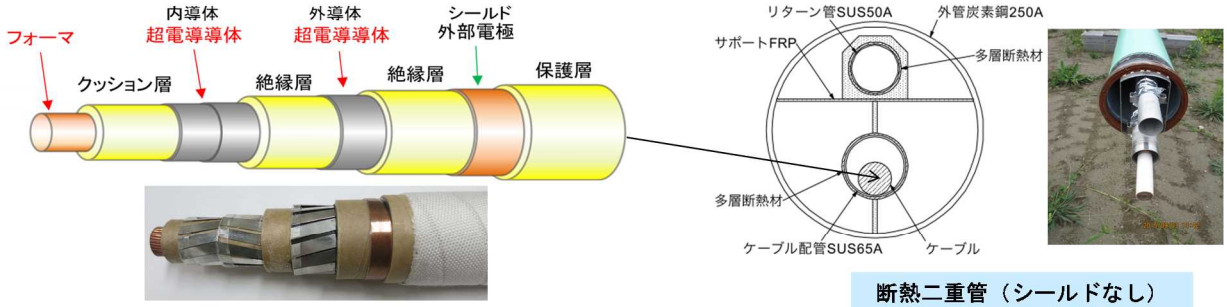


図 2.2.1.1- 1　設備概要（石狩回線 2）



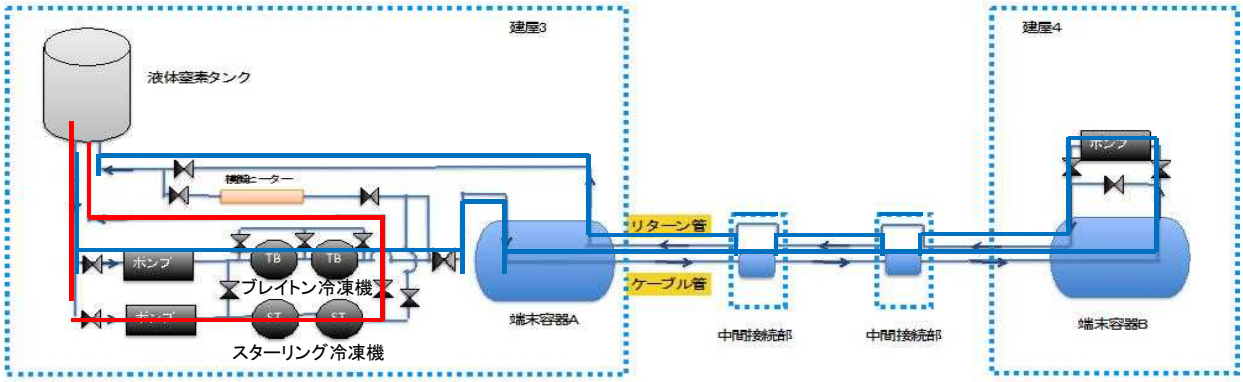
図 2.2.1.1- 2　設備外観（石狩回線 2）

本設備に使用するケーブルコアと断熱管の構造及び冷却システム構成を以下に示す。



項目	諸元
フォーマ	Cu撚線タイプ
内導体	BSCCO線材、２層(24本) Ic=4.3kA@77K
絶縁層	PPLP®
外導体	BSCCO線材、１層(15本) Ic=3.3kA@77K
絶縁層	PPLP®
シールド	Cuテープ
保護層	布テープ
外径	Φ40mm

図 2.2.1.1- 3　ケーブルコアと断熱管構造



冷凍機	冷凍能力	台数
ターボブレイトン冷凍機	2 kW 以上(66K)	2 台
スターリング冷凍機	1 kW 以上(77K)	2 台

循環ポンプ	揚程	最大回転数	台数
遠心型ポンプ	100kPa 以上@40L/min	6000rpm	3 台

図 2.2.1.1- 4　冷却システムの仕様、構成

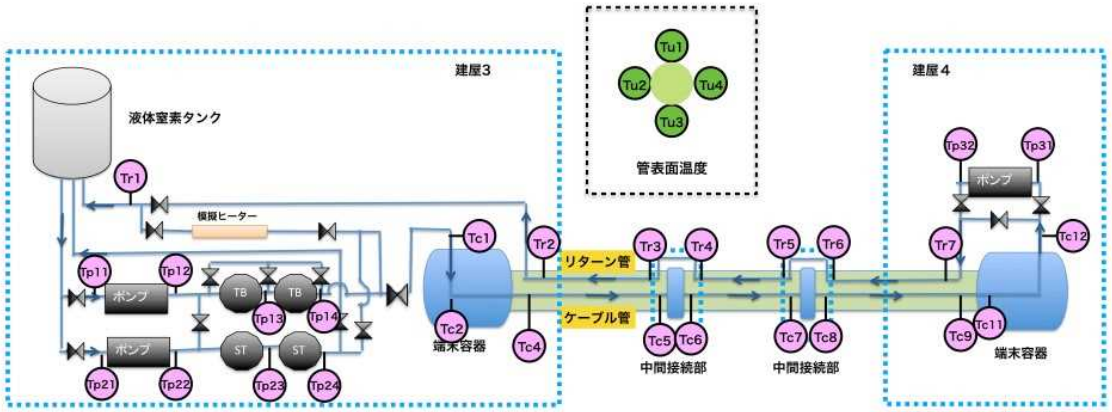


図 2.2.1.1- 5　主な温度センサーの配置図

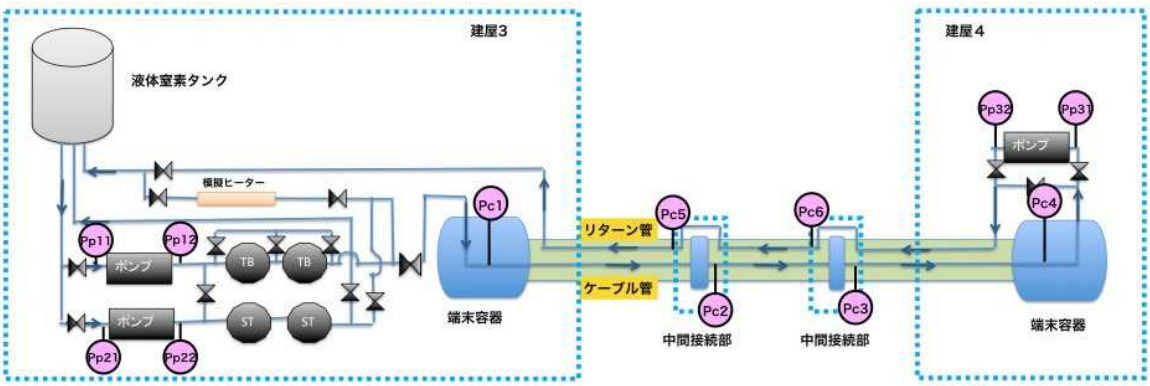


図 2.2.1.1- 6　主な圧力センサーの配置図

イ．試験工程

現地試験の実績工程を以下に示す。

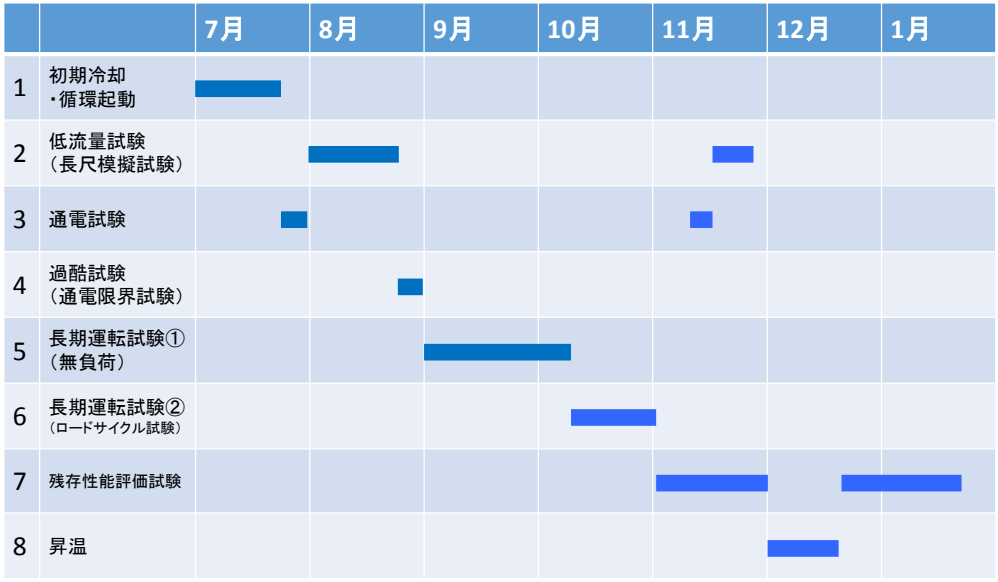


図 2.2.1.1− 7　現地実績工程

2.2.1.2 長尺時を模擬した液体窒素循環冷却性能の評価

ア．低流量循環試験

将来の実用システムの冷却システムの亘長を 20 km、また液体窒素循環流量を 40 L/min と仮定し、その際の液体窒素循環特性を把握するため、1 km 長の本システムを用いて検証を行った。本システムの冷却システムの液体窒素循環距離は約 2 km（ケーブル管入口～リターン管出口間距離）であることから、流量を 1/10 の 4 L/min として循環を行うことで 20 km を模擬し、長尺における長手方向の液温分布、通電特性に与える影響などを調査し、実用時の運転信頼性などを検証した。

試験は低流量循環が可能な往復動型ポンプを仮設し 4 L/min で窒素循環を行った。図 2.2.2.2.1.に低流量試験で測定した液体窒素温度、流量、外管表面温度の時間変化を示す。液体窒素流量は 3.9 L/min であった。16/12.2.1.まで液体窒素温度及び流量に現れている周期的なスパイクはバルブの閉め忘れによるサーマルオシレーションが原因であり、バルブ閉止により収まった。流量を 3.9 L/min に変更してから約二日後に液体窒素温度は定常に達しており、外管温度に応じた温度になっている。この時、システムの入口出口間の温度差は約 15 K であり、目標であった全長 2 km のケーブル管入口とリターン管出口の温度差が 20 K 以下（ΔT (1 km)が 10 K 以下）であること、及びその条件における安定循環冷却が確認でき、この結果は冷却ステーション間隔 20 km までの長尺化が可能であることを意味する。なお、図 2.2.1.1-3 に示すように、本システムにおいて、区間 1 はシールドあり断熱二重管、区間 2・3 はシールドなし断熱二重管と異なる構造となっており、それぞれでの熱侵入量（リターン管＋ケーブル管の合計）は、前者では約 1W/m、後者では約 1.4W/m と異なっている。また、実際には、ケーブル管での温度上昇が問題となるため、ケーブル管の熱侵入量が極めて小さいシールドあり配管の方が長尺システムに適していると考えられる。これら、さらなる長尺化に向けて得られた課題や対策についてはガイドラインに反映した。

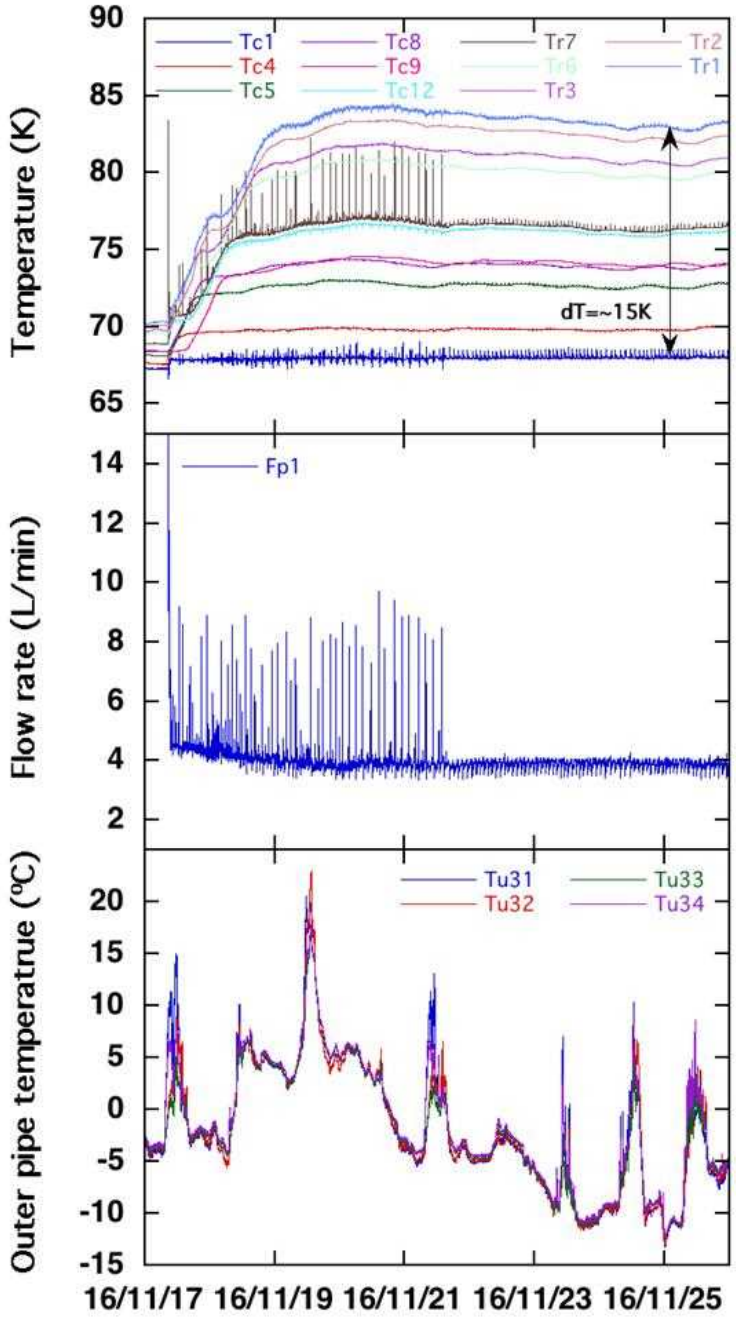
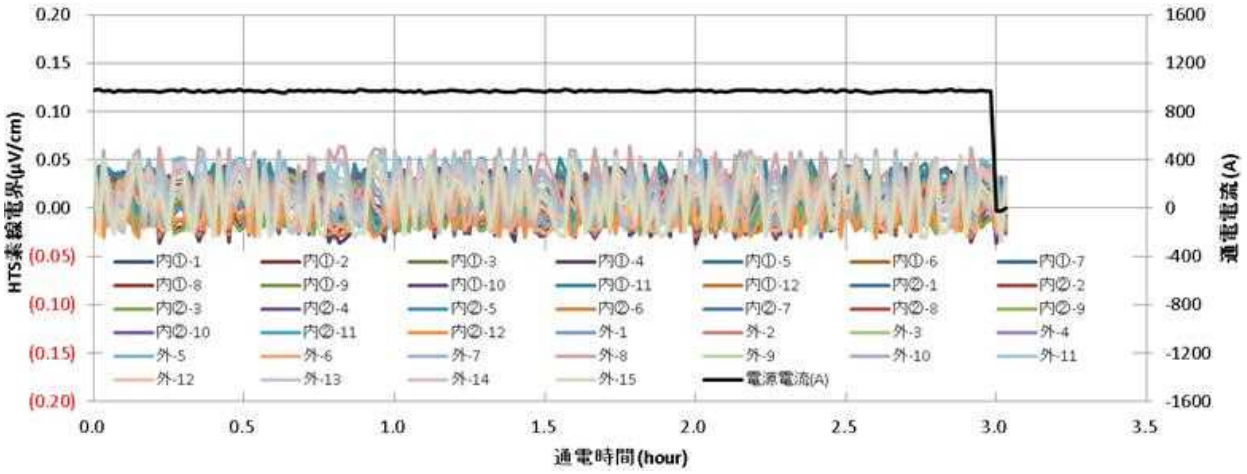


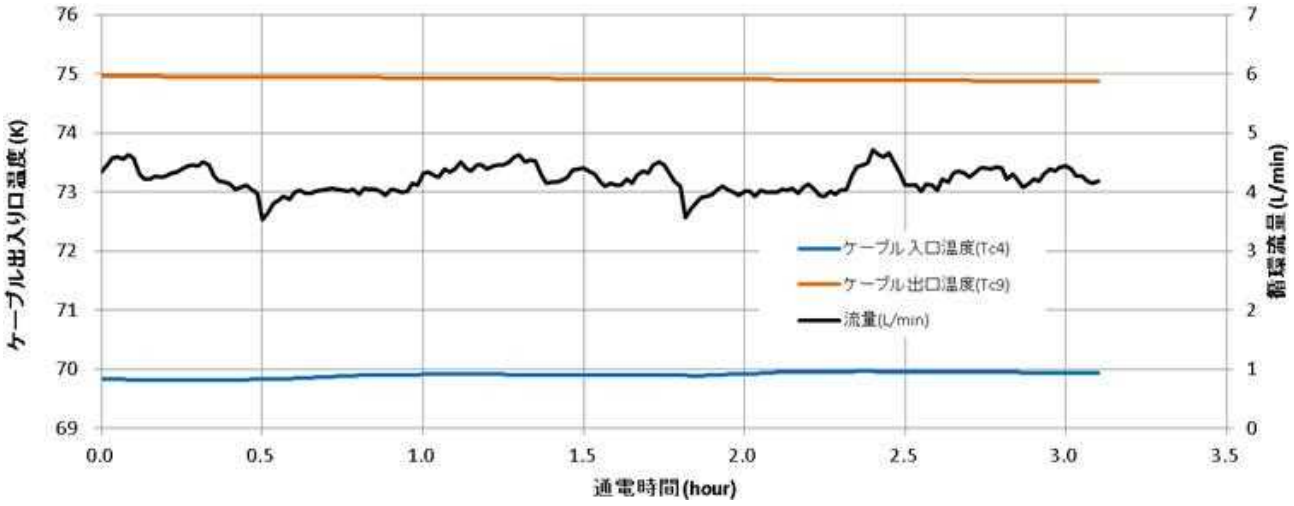
図 2.2.1.2-1 低流量循環試験時の液体窒素温度と流量、外管表面温度の時間変化

イ．低流量循環時通電試験

低流量運転時の通電試験(1 kA-3 hour)を実施し、通電時の発生電圧及び運転温度の変動を測定した。結果を図 2.2.1.2-2 にまとめる。図 2.2.1.2-2 (a)に各超電導導体の発生電界を示すが、内導体で最大約 0.05 μV/cm(1 km 全長で約 5 mV の発生電圧)、外導体で最大約 0.06 μV/cm(同約 6 mV)であり一般的な I_c 定義の 1 つである 1 μV/cm(全長電圧換算で 100 mV)よりも十分小さな値となった。また、導体電圧の時間的な増加傾向も見られず、安定した通電を行えることを確認した。運転温度については図 2.2.1.2-2 (b)よりケーブル入口温度(Tc４)は約 70K、ケーブル出口温度(Tc9)は約 75 K で通電試験を通じて安定していた。以上から低流量運転においても安定した通電、冷却が行えることを確認した。



(a) 通電時の HTS 導体電圧の推移



(b) 通電時のケーブル部温度の推移

図 2.2.1.2-2 低流量運転時の連続通電試験結果（1 kA -3 hour）

2.2.1.3 超電導ケーブルシステムの通電特性の評価

ア． I_c 測定試験

ケーブル導体についてはその製造、現地での断熱管引き入れ布設工事、及びジョイント・端末接続工事を経た後の性能を確認するため、現地冷却完了後に I_c 測定試験を実施した。

図 2.2.1.3-1 に測定回路を示す。建屋 3 側に端末 A、建屋 4 側に端末 B が設置されているが、端末 A 側の外導体と内導体を短絡させ、端末 B 側にて DC 電源の＋側を外導体に、－側を内導体にそれぞれ接続し、外導体→内導体方向への往復電流を流す回路を形成した。また、電圧は、端末 A と端末 B の超電導ケーブルコアの外導体および内導体それぞれの両端に取り付けた電圧タップ間の電圧を測定した。

I_c 試験は最大電流 4300 A(電流掃引速度：70 A/s)まで電流を印加し、ケーブルコア両端電圧を測定した。また、I_c 電圧基準として 0.1 μV/cm を用いて行った。（1 km での発生電圧は 10 mV となる）なお、解析においては、ジョイント部の接続抵抗があるため、I_c より十分に低い電流値までの I-V 特性より見積もったジョイント部の発生電圧を差し引いて評価を行った。

ケーブル部平均温度 69.7 K、循環流量 35 L/min(ポンプ 1 台運転)における I_c 試験結果を図 2.2.1.3-2 に示す。I_c 通電試験を 2 回実施し、その 2 回結果において外導体での I_c 値はそれぞれほぼ同一の 4246 A、4255 A となり、69.7 K での外導体予想平均 I_c である、約 4090 A 以上の通電特性を確認した。内導体の設計 I_c は表 2.2.1.3-1 に示す通り外導体に比べ約 30%大きいため、外導体が I_c に到達した電流値ではまだ I_c に到達していないが、約 4200 A 以上の I_c を有することは確認出来、定格通電 2500 A に対し十分裕度のある性能を有することが確認された。

表 2.2.1.3- 1　石狩回線 2　コアの設計 I_c

導体	設計 I_c (A) @77K
内導体	4320
外導体	3300

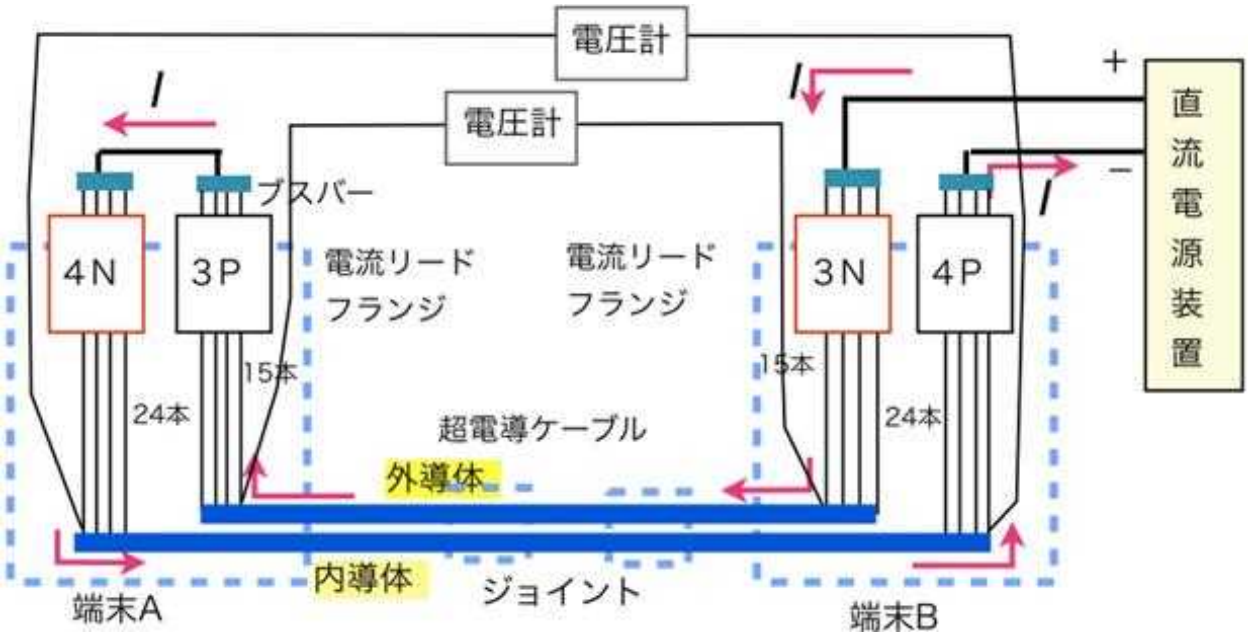
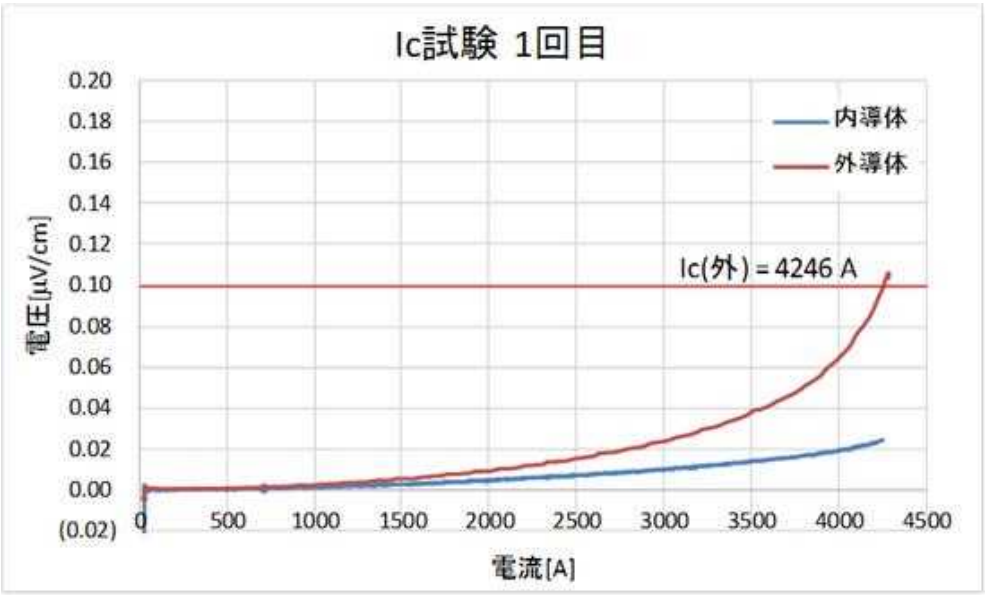


図 2.2.1.3-1　I_c 測定回路



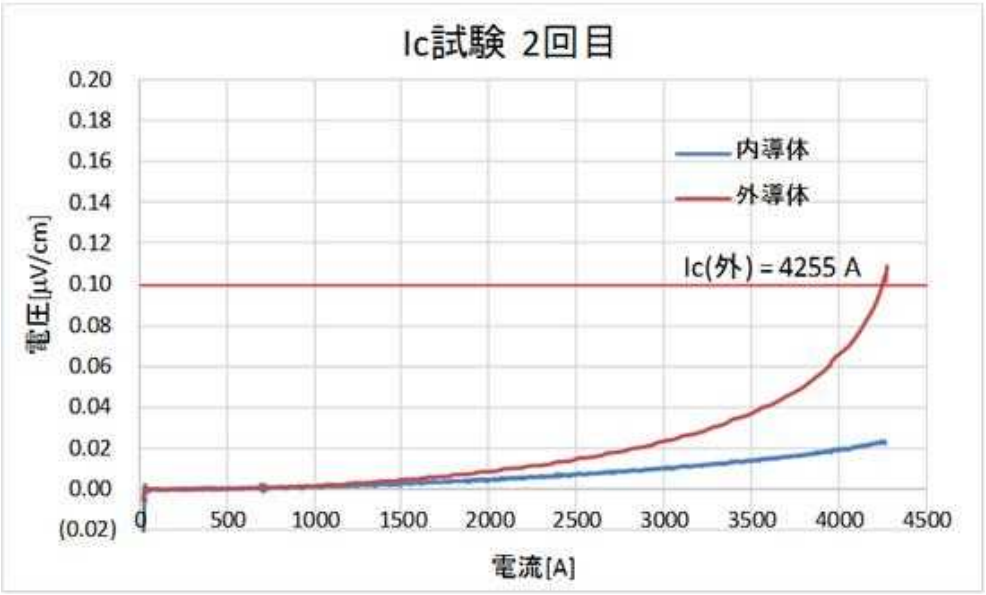


図 2.2.1.3- 2　回線２　I_c測定試験結果
（ケーブル平均温度 69.7 K、流量 35 L/min）

イ．定格通電試験

I_c測定試験を実施したのち定格通電試験(2.5 kA-3 時間)を実施した。定格長時間通電においては発生電圧及び運転温度の変動を測定した。図 2.2.1.3-3 に各超電導導体の発生電界を示すが、内導体で最大約 0.06 μV/cm(1 km 全長で約 6 mV の発生電圧)、外導体で最大約 0.08μV/cm(同約 8 mV)であり一般的な I_c定義の１つである 1 μV/cm(全長電圧換算で 100 mV)よりも十分小さな値となった。また、導体電圧の時間的な増加傾向も見られず、安定した通電を行えることを確認した。冷却システムの安定性については冷凍機入口出口温度を観測し、図 2.2.1.3-4 に示すようにその変動が±1K 以内であることを確認できた。以上より通電により超電導ケーブルコアにおいて異常な発熱が生じず、冷却システムの運転安定性にも問題が無いことが検証された。

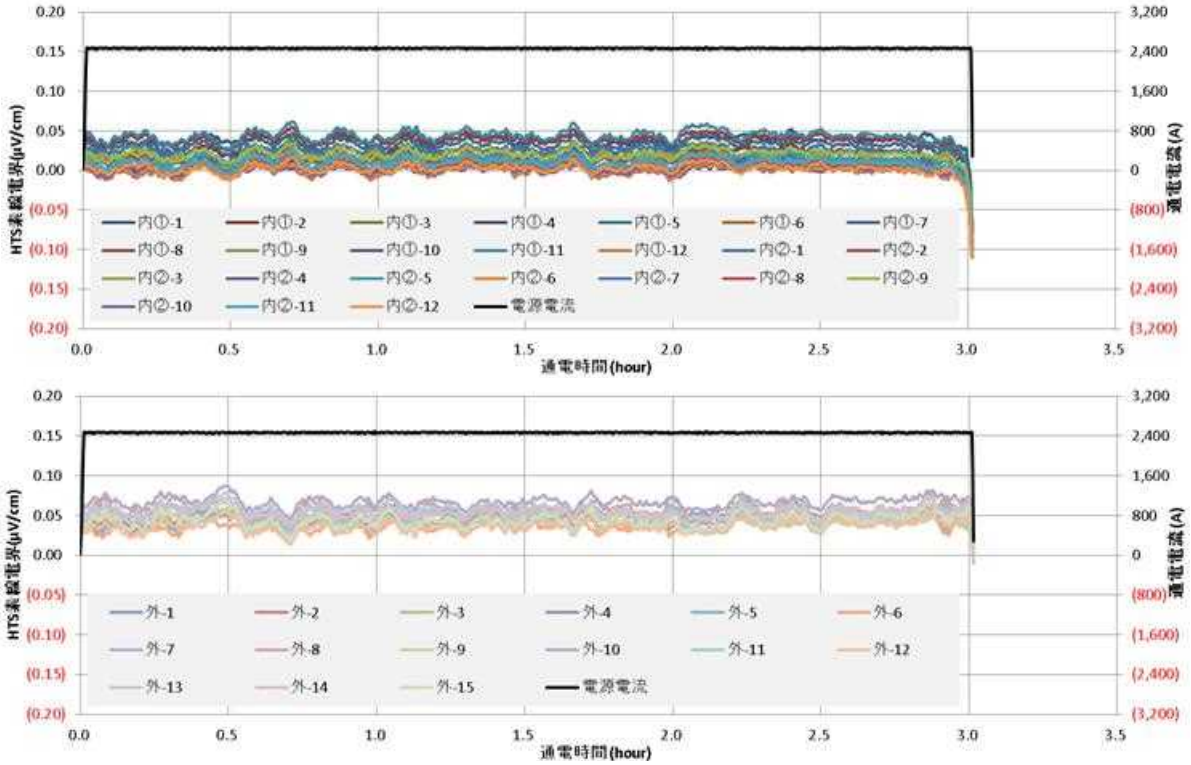


図 2.2.1.3- 3　定格通電試験（2.5 kA5 試時間）時の超電導導体発生電圧
（上段：内導体、下段：外導体）

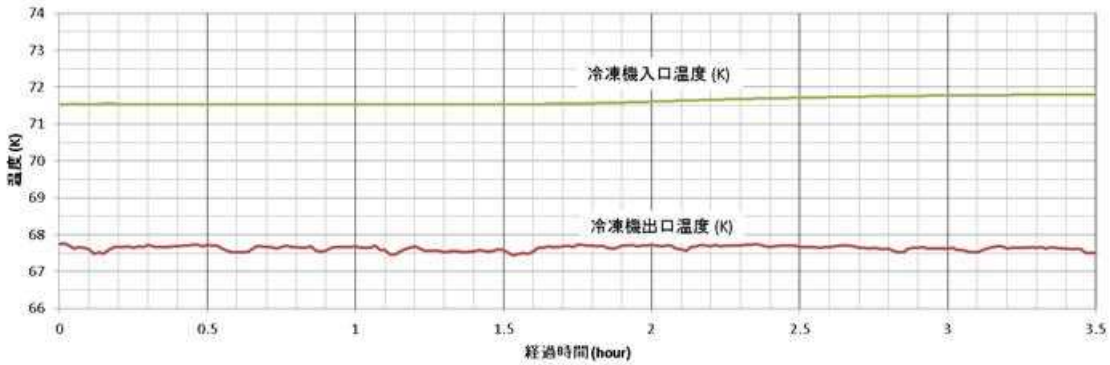


図 2.2.1.3- 4　定格通電試験（2.5 kA-3 時間）時の冷凍機入口・出口温度変化

ウ．送電効率測定

定格通電試験を実施した際の送電効率を評価した。図 2.2.1.3-5 に内導体両端電圧（ペルチェ電流リード（PCL）＋HTS 導体）、外導体両端電圧（同）を示すが、これらの合計より通電時の電圧降下は全体で約 0.74 V と試算され、このときの電気損 W_{loss} は、

$$W_{loss} = I \times V = 0.74 \times 2500 = 1850 \ (W)$$

である。運転効率 η は、定格送電電力 W_R = 50 MW とすると、

$$\eta = (1-(\text{電気損}／\text{定格送電電力}))\times 100 = (1-(W_{loss}／W_R))\times 100$$
$$= 99.996 \ (\%)$$

と試算される。

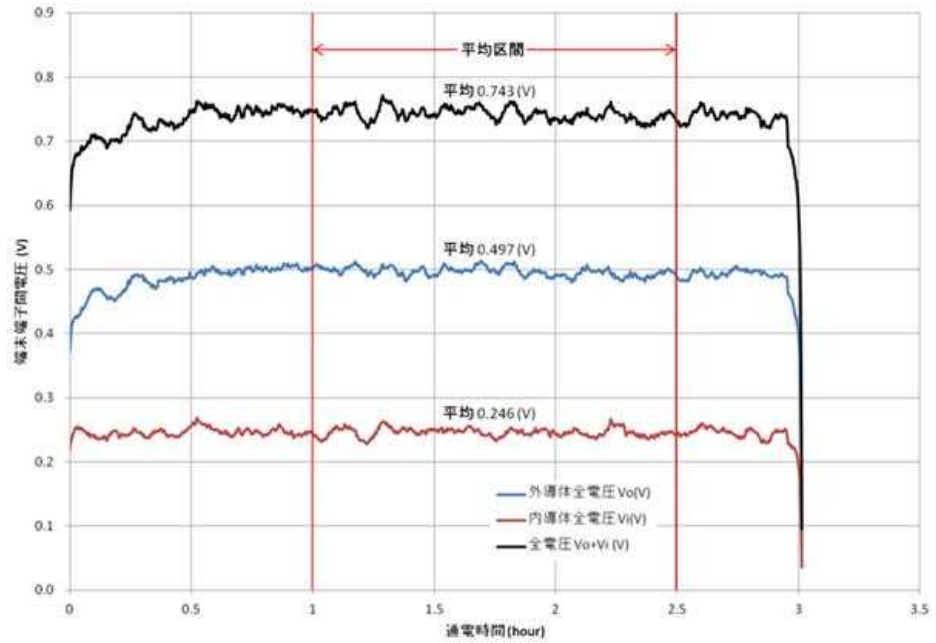


図 2.2.1.3- 5　定格通電時の導体電圧

エ．通電時熱侵入測定

定格通電試験において、1 kA、2 kA 及び 2.5 kA をそれぞれ 3 時間通電した際の各部の通電による熱負荷を液体窒素温度差(K)、質量流量(kg/sec)から求めた。通電による熱負荷　＝　(通電時の合計熱負荷　-無負荷時熱負荷) の時間平均値とした。通電による熱負荷の変化を図 2.2.1.3-6 に、結果を表 2.2.1.3-2 にまとめる。損失の小さい箇所では誤差の影響も見受けられ、ジョイント部ではマイナス表示になっている箇所もあるが、本システムの大部分の損失は端末部で発生していることがわかる。

表 2.2.1.3- 2　通電による各部電気損失(W)

	端末 A Tc4-Tc1	区間 3 Tc5-Tc4	ジョイント B Tc6-Tc5	区間 2 Tc7-Tc6	ジョイント A Tc8-Tc7	区間 1 Tc9-Tc8	端末 B Tc12-Tc9
1 kA	24.4	7.6	0.2	1	0.9	0.7	16.6
2 kA	130.6	10	0.8	-0.7	-0.1	-0.2	128.5
2.5 kA	253	25.5	1.4	3.5	0.2	0.2	248.3

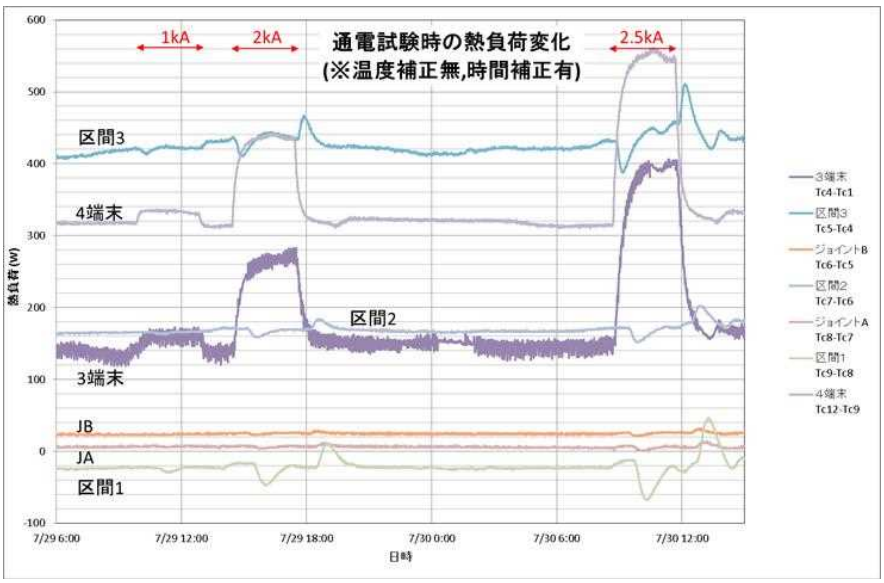


図 2.2.1.3-6　2.5 kA-３時間通電試験時の熱負荷変化

本システムにおいては、端末部にペルチェ電流リード（PCL）を用いており図 2.2.1.3-7 に示すように超電導ケーブルコアの各素線は銅編組リード線、窒素フランジの電流端子を介してペルチェ電流リードに接続されている。従って、通電による端末部の熱損失は、主に①超電導ケーブルコアに接続された銅編組リード線によるジュール損失および②)電流リードからの熱侵入によると考えられる。

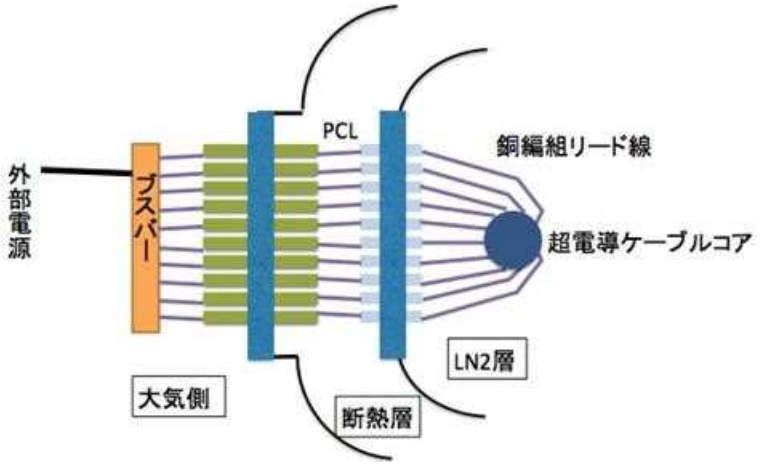


図 2.2.1.3-7　石狩システムにおける超電導ケーブルコアと
ペルチェ電流リード（PCL）の結線概要図

図 2.2.1.3-7 の超電導ケーブルコアに接続された銅編組リード線によるジュール損失は、銅編組リード線の抵抗値と通電電流値から見積もることができる。図 2.2.1.3-8 に各 PCL にとりつけた計測線の配置を示すが、銅編組リード線の液体窒素中の抵抗値は U3 の電流依存性から求められ、外導体用は 0.10mΩ、内導体用は 0.09mΩであった。この値を用いて計算した各通電電流における一端末あたりの窒素中銅編組リード線でのジュール損失を表にまとめる。なお、石狩のシステムでは外導体は１５本、内導体は２４本であり、計算においては各導体に均一に電流が分配されると仮定している。銅編組リードのジュール損失と温度差から求めた各端末の熱侵入量の値との差が電流リードからの熱侵入と考えられ、定格電流 2.5 kA 通電時の値は端末 A、B それぞれ

187.9W および 183.2W であった。この値は PCL の単体試験から見積もった値 175W より、やや大きい値となった。

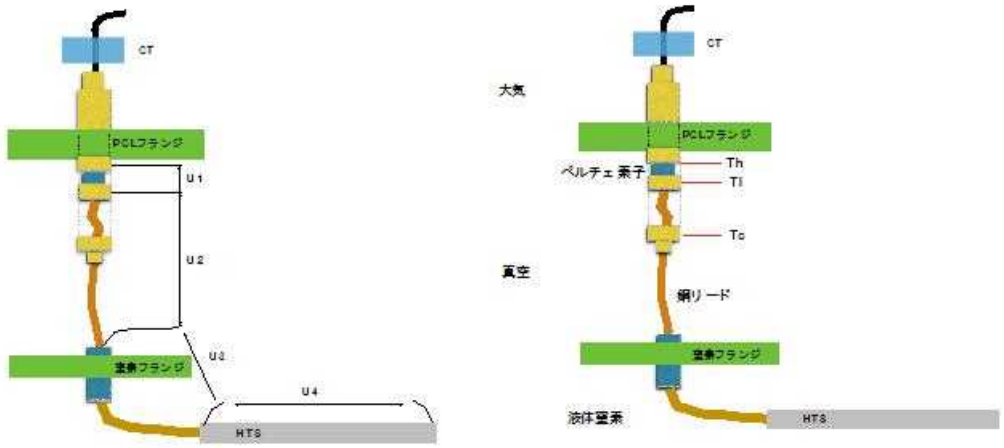


図 2.2.1.3-8　ペルチェ電流リードの電圧測定箇所（左）
および温度測定箇所（右）

表 2.2.1.3-3　端末における通電損失の内訳

通電電流	導体１本あたりの電流値(A)		熱損失（W）				
	内導体	外導体	端末 A A	端末 B B	銅編組リード C	A-C	B-C
1kA	41.7	66.7	10.4	24.4	16.6	14.0	6.2
2kA	83.3	133.3	41.7	130.6	128.5	88.9	86.8
2.5kA	104.2	166.7	65.1	253	248.3	187.9	183.2

PCL からの熱侵入に関して、2.5kA-3 時間通電時の PCL 各部の温度の測定結果を図 2.2.1.3-9 に示す。比較のため、同タイプの PCL を用いて単体通電試験(図中に pretest と示す)を行ったときの結果も合わせて示す。PCL においては単体通電試験結果に示すように、通電時にはペルチェ素子のペルチェ効果により低温側の熱が汲み上げられるため、ペルチェ素子部で大きな温度勾配（Th＞Tl）が生じる。また Tl と Tc の温度差は小さい。しかしながら、今回の通電試験においては、内導体用 PCL は単体通電試験時とほぼ同じ温度分布を示すのに対し、外導体用 PCL において、ペルチェ素子部で十分な熱の汲み上げがされず、銅編組リードとの接続部に向かって温度上昇する異常（Th＜Tl＜Tc）がみられた。このことは外導体用 PCL において温度計 Tc 付近で大きな熱発生があることを示唆する。また、これが通電試験において、熱侵入量が大きくなった原因であると考えられる。

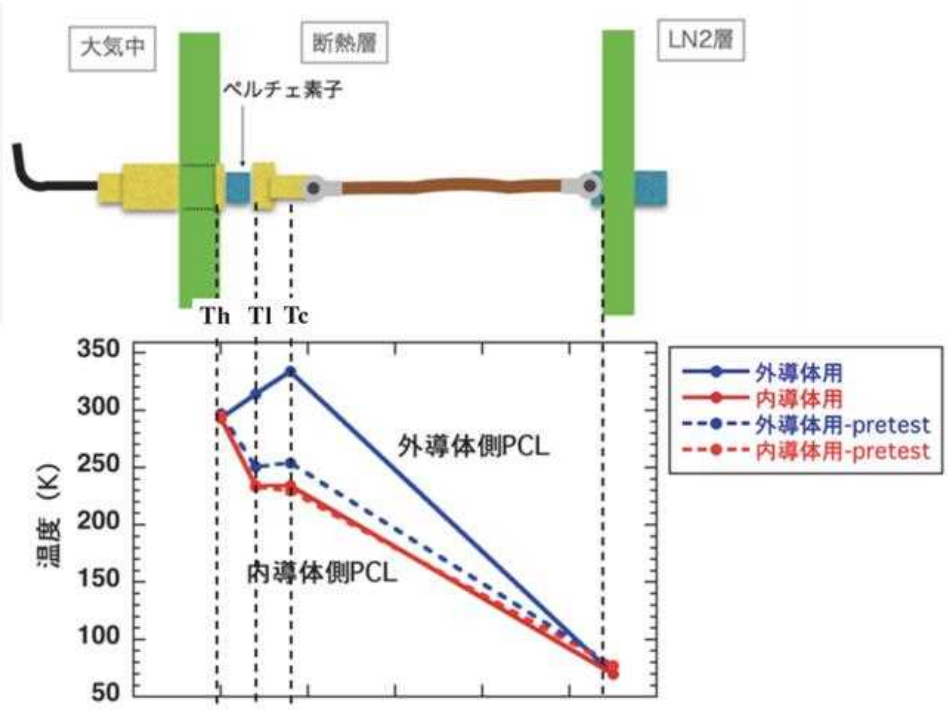


図 2.2.1.3- 9　2.5kA-３時間定格通電試験時の PCL の各部の温度分布

この原因について調べるため、通電測定における U2 の値から PCL の銅リード部の抵抗を求めた。結果を図 2.2.1.3-10 にまとめる。回線２においては、前述のように外導体の本数が１５本、内導体が２４本のため、外導体用 PCL には内導体用の 1.６倍の電流が流れる。そのため、PCL 銅リード部の断面積は内導体用は 14 mm^2 であるのに対し外導体用は 28 mm^2 とした。すなわち外導体用の銅リード部の抵抗は内導体用の半分となっている筈である。しかし、図に示すように、外導体用の銅リード部の抵抗は内導体用よりも大きな値となっており、ばらつきも大きい。このことは外導体用の銅リード部になんらかの異常があることを示唆する。図 2.2.1.3-10 に I_c 測定試験において最大電流 4300A 通電した時の内導体用および外導体用各 PCL に流れた電流値（貫通型電流センサーによる計測値）を銅リード部の抵抗に対してプロットする。内導体用 PCL ではほぼ一定の電流値であるのに対し、外導体用 PCL の電流値はばらついている。このとき電流値と抵抗値の間に緩やかな相関があることが見て取れる。このことから、外導体においては銅リード部の抵抗のばらつきにより、偏流が生じていることがわかる。また、この偏流のため最大で PCL の定格電流（外導体用：167A）の倍以上の電流が印加されており、それによる影響の有無が懸念される。

これらについて試験終了後、端末容器から PCL フランジを取り外し、解体調査を行ったところ、一部の電流リードの銅リード部の圧着不良があり、それが高抵抗の原因であったことが判明した。また、上述の定格電流の倍以上の通電の影響はみられなかった。端末組立工事の各段階において電流リードの各部の抵抗測定や目視検査等は実施していたものの、圧着部がチェックリストから漏れていたことが不良箇所を見逃す原因となった。この反省をガイドラインに反映した。

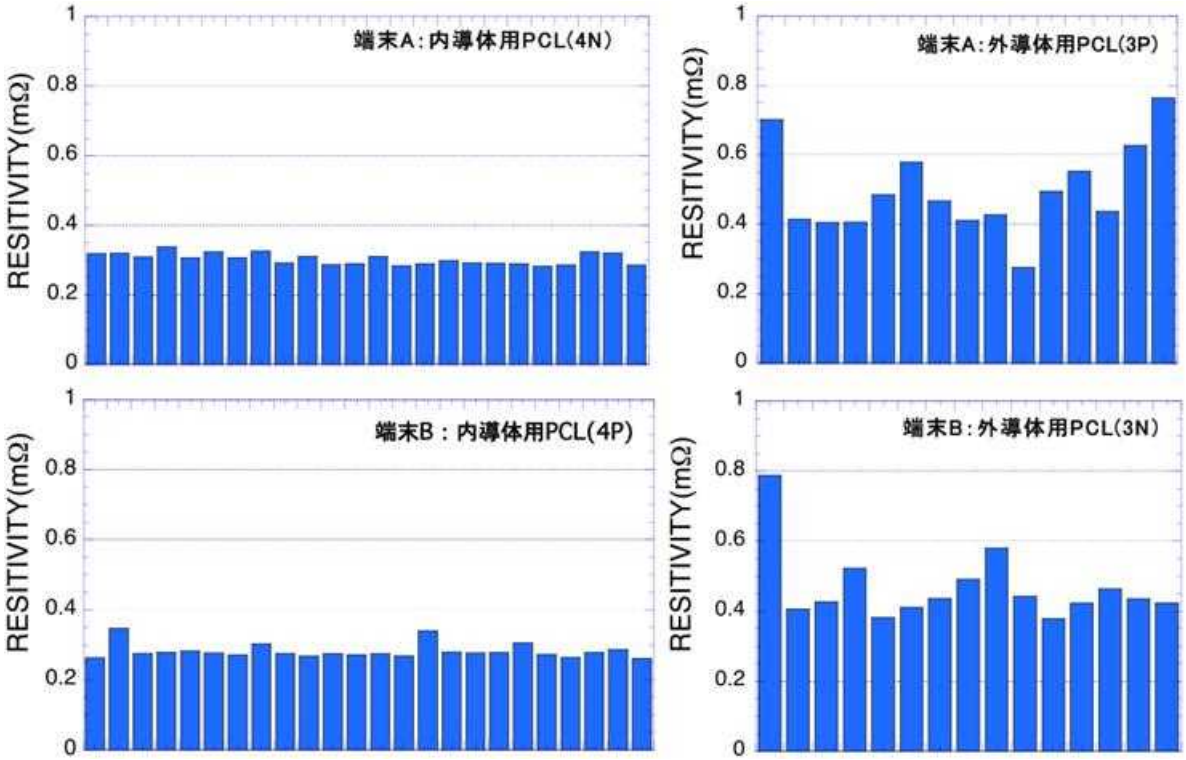


図 2.2.1.3-10　PCL の銅リード部（真空層）の抵抗値（冷却時）

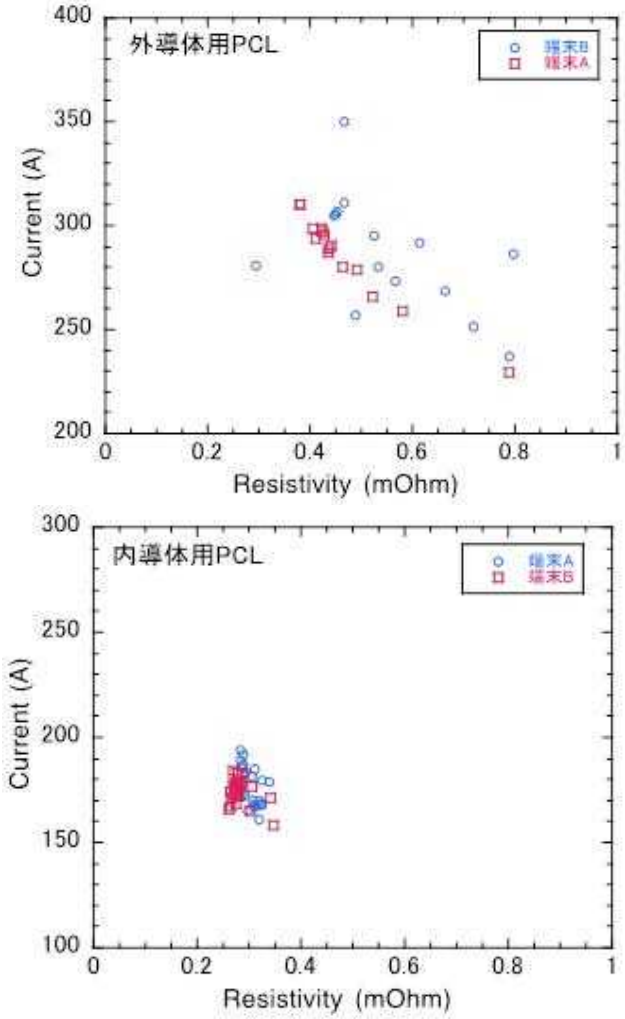


図 2.2.1.3-11　各 PCL に流れた電流値と PCL 銅リード部抵抗の相関
（4300A 通電時）

2.2.1.4 過酷試験による評価

ア．通電性能限界試験

冷却システムの故障時運転を想定し、循環液体窒素の温度が運転上限として設定した 83 K に到達した際の通電特性を評価した。この温度となるよう冷却システムを制御し I_c 測定試験を実施した。図 2.2.1.4-1 に I-V 特性を示す。試験の結果、83 K における外導体 I_c は 2542 A となり、本システムは液体窒素温度が 83 K までは定格である 2500 A 通電が可能であることを確認した。

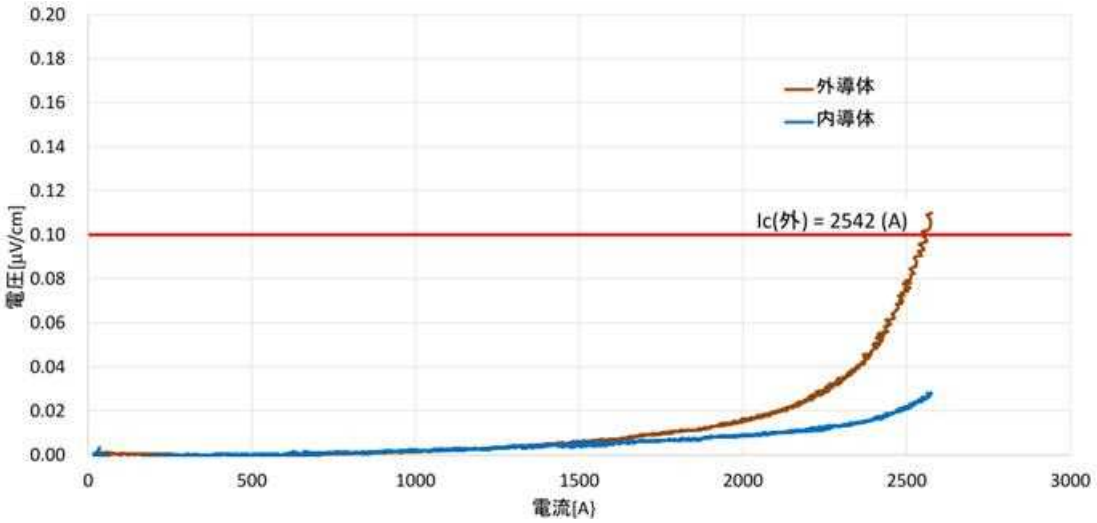


図 2.2.1.4- 1　83K における I_c 測定試験　（I-V 特性）

イ．過電流通電性能の検討

過電流による導体の限界性能を確認するための通電試験を実施した。図 2.2.1.4-2 に示す約 3 m 長の回線 2 コアサンプル（定格 2.5 kA@77 K）の内導体→外導体方向に I_c 以上の電流を一定時間流し、その後 I_c 測定を実施し超電導導体への影響を確認した。試験結果を図 2.2.1.4-3 に示す。定格の 2 倍相当の 5 kA を 5 秒間（一般的な電力用遮断器の最大許容遮断時間を考慮し過電流継続時間を最長 2 秒間と想定。余裕を見て 5 秒間とした）印加しても I_c の変化はなかった。この後電流値を 6 kA にし通電時間を徐々に増加させ試験したところ、2.4 秒通電により外導体の I_c 特性が劣化した。これにより、本コアにおいては 77 K にて 6 kA-2 秒程度の短絡に耐えられることを確認した。



図 2.2.1.4-2　過電流試験用短尺サンプル

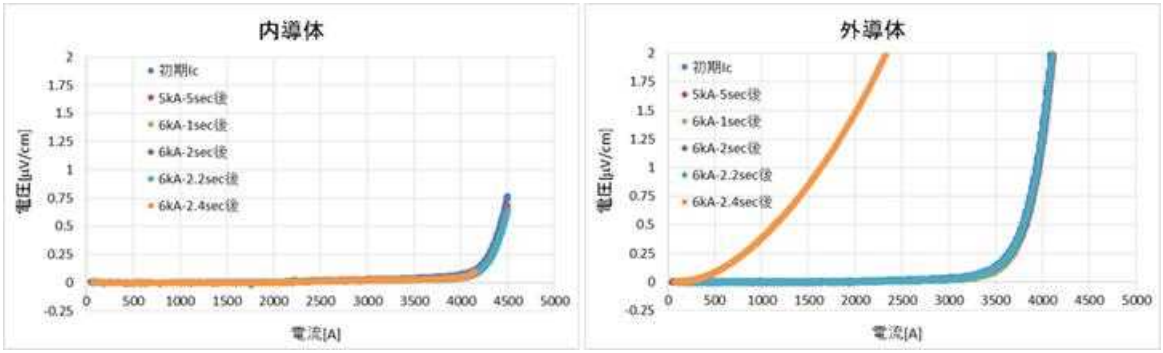


図 2.2.1.4-3　過電流試験後の Ic 変化

ウ．耐電圧性能の検討

超電導ケーブルコアサンプル、同コアを用いたジョイント構造試作（NJ、CSJ）及びペルチェ電流リード（PCL）出荷試験に対してそれぞれ課電試験を実施している。下記の結果から、石狩向超電導ケーブルシステムは直流 20kV の耐圧を設計通り有することが確認された。超電導コア、ジョイントについては製造後のサンプル及び組立試作品を用い、図 2.2.1.4-4 に示す課電装置に組み込み、液体窒素温度 77.3 K 以上、内部圧力 0.2 MPaG 以下のサブクール環境下に置いた状態で想定される線路定格電圧 V = 10 kVDC の 2 倍である 20 kV の電圧を 5 分間印加する課電試験を行い、絶縁破壊が無いことを確認した。印加電圧については論文「紀伊水道横断 DC ± 500 kV 海底 OF ケーブル」を参考とした。また、印加時間については電気設備の技術基準の解釈・第 46 条第 1 項 6 号（太陽電池発電所等の電線等の施設における完成品検査）を参考とした。



図 2.2.1.4- 4　石狩向け超電導コアサンプル、ジョイントの課電試験の様子

PCL に対しては図 2.2.1.4-5 に示す現地据付端末構造を模した試験容器を用いて実施した。GFRP 製フランジにペルチェ電流リードを全数取付け、静電シールドを取り付け、容器内を 10^{-2} Pa 以下の真空度にした状態で課電試験を実施した。結果、20 kV× 5 min で各部は絶縁破壊することなく、リーク電流も観測されなかった。

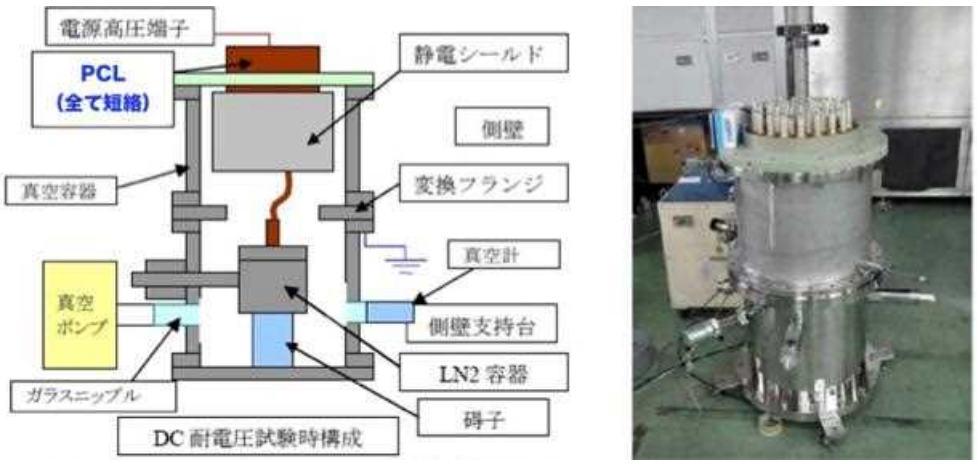


図 2.2.1.4-5　ペルチェ電流リード直流耐電圧試験実施状況

2.2.1.5 長期運転特性の評価

超電導ケーブルシステムの運転性、安定性については、実用運転時に必要な特性であり、システムの時間経過に対する性能変化や、気温による侵入熱変化や負荷変動による通電損失の変化による冷却システムの応答性・制御性を確認する必要がある。その検証を行うために、本システムでの長期性能試験を行った。

試験は無負荷時長期運転試験（通電なし）を 2016 年 9 月 14 日から 10 月 11 日まで、ロードサイクル試験（8 時間通電＋16 時間無通電を 20 サイクル）を 10 月 12 日から 11 月 2 日まで実施した。試験期間中のターボブレイトン冷凍機 2 台(TB1、TB2)の設定温度は共に 70 K とし、40 L/min での循環を行った。循環は 2 台のポンプ(CP1、CP3)を直列運転し、それぞれの回転速度は 6000 rpm(CP1)と 4000 rpm(CP3)に設定した。以下各試験結果をまとめる。

ア．無負荷時長期運転試験

1km システムにて、以下の条件にて無負荷時の長期試験を実施した。

- 冷凍機出口温度：70K、循環流量：40L/min（ポンプ 2 台直列運転）
- 運転期間：27 日間

図 2.2.1.5-1 に試験期間中の冷凍機入口出口温度および各部の温度変化、流量変化、液体窒素圧力変化を示す。リターン管出口温度は外管表面温度変化による侵入熱の変化に対して、冷却システムの制御の応答性が良く、温度は追随して変動しているものの安定していることが確認できた。また、圧力、流量は変動が少なく一定に制御されていることが確認できた。

無負荷時長期運転試験中の熱負荷の変動および冷却設備の消費電力等は、ロードサイクル試験時のものと合わせて本節のウにまとめて記載する。

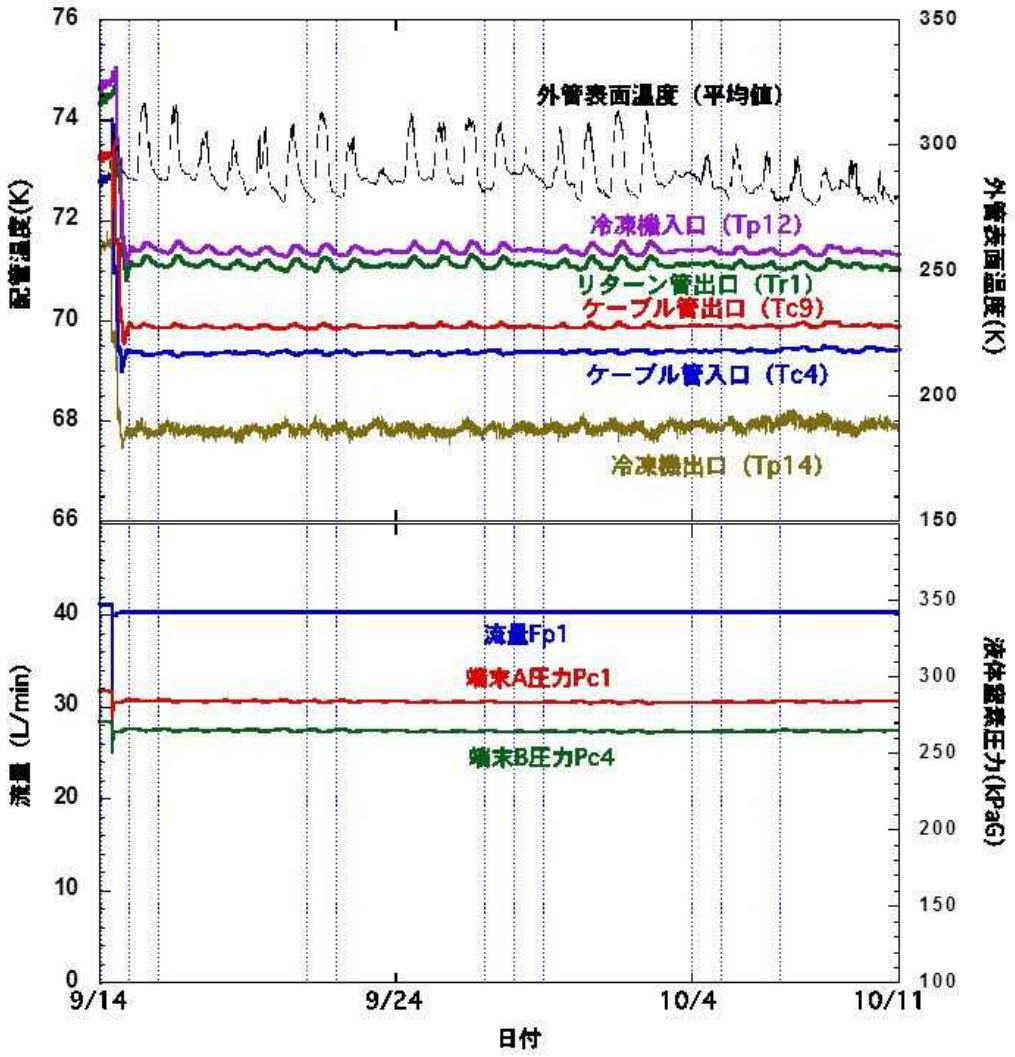


図 2.2.1.5-1　無負荷時（非通電）長期循環試験時の温度、流量、圧力の推移

イ．ロードサイクル試験

通電条件に関しては CIGRE でのロードサイクル試験条件を参考に、8 時間通電、16 時間無通電のパターンを合計 20 日間サイクル的に実施した。通電電流はペルチェ電流リード部の通電時の発熱の影響を考慮し、1kA とした。図 2.2.1.5-2 に結果を示すが、通電時の HTS 導体電圧は 0.06 μμV/cm 以下で安定し、図 2.2.1.5-3 に示すように温度、圧力、流量の擾乱も認められなかった。

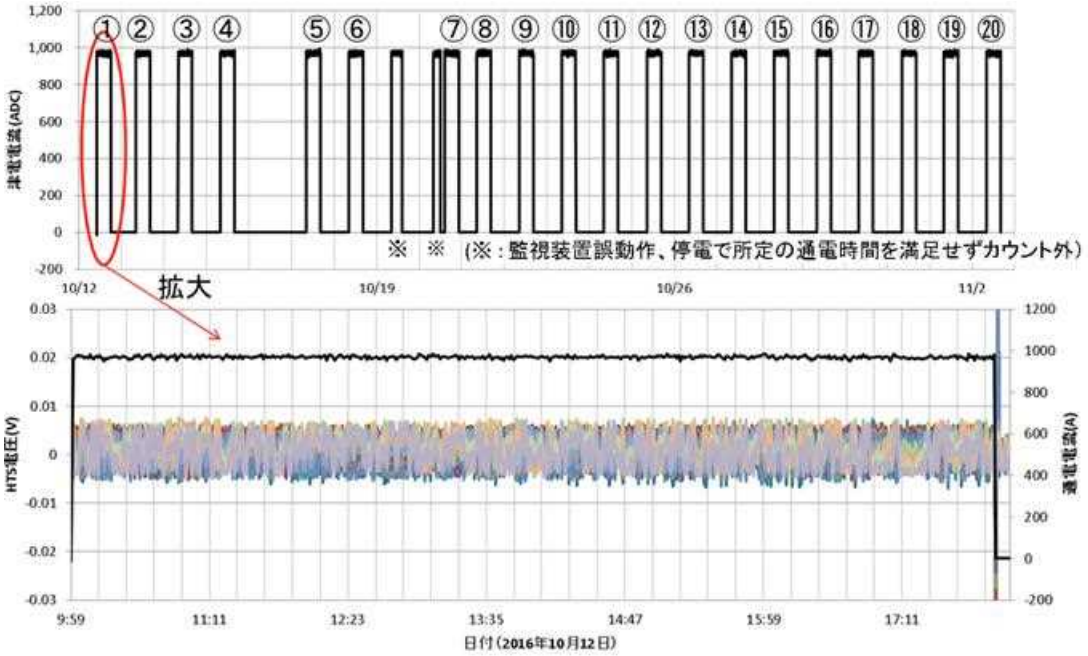


図 2.2.1.5-2　ロードサイクル中の超電導導体両端電圧の推移

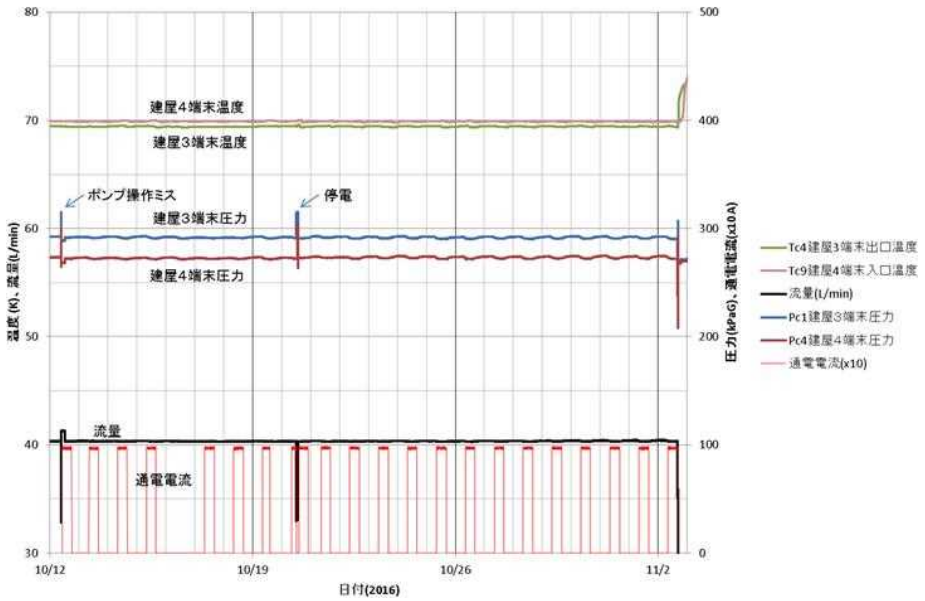


図 2.2.1.5-3　ロードサイクル試験時の温度、流量、圧力の推移

ロードサイクル中の熱負荷変動について図 2.2.1.5-4 に示す。区間１では放射シールドの効果によりケーブル管は外気温の変動を受けにくく安定傾向であったが、区間２、３は外管表面温度(外気温＋日射)の影響を受け変動している。またケーブル部、ジョイント部は通電の影響による変動は少ないが端末部は通電により約 40W 熱負荷が増加していると思われる。

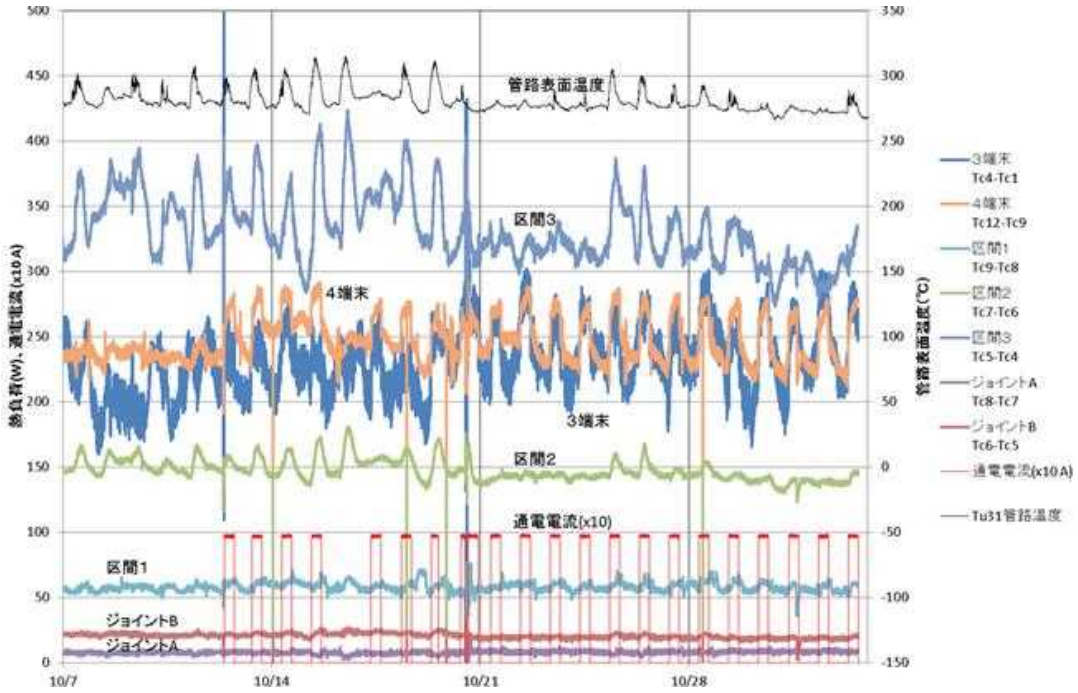


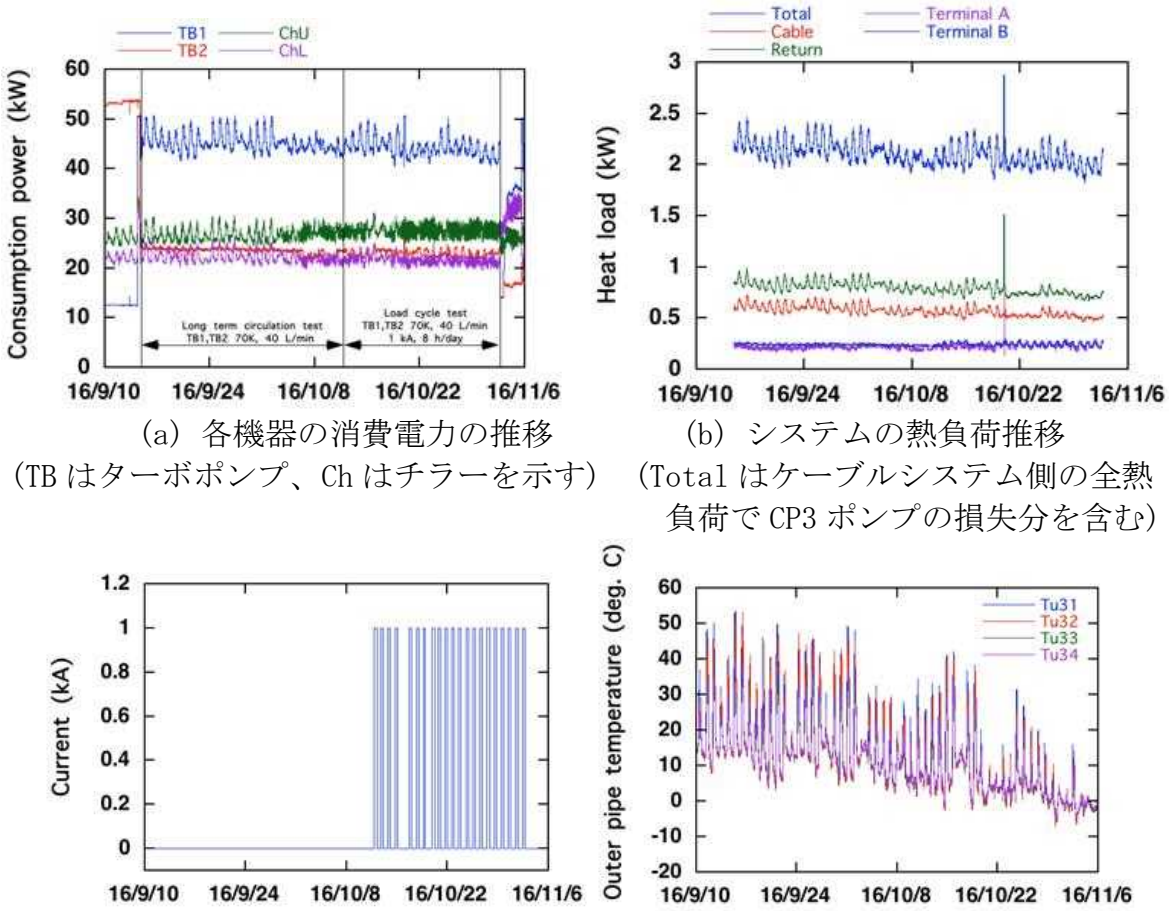
図 2.2.1.5- 4　ロードサイクル試験時の各部熱負荷の推移

ウ．消費電力測定

無負荷時長期運転試験時と、ロードサイクル試験時に測定したターボブレイトン冷凍機（TB）とチラーの消費電力、システムの熱負荷、通電電流、外管温度のそれぞれの時間推移を図 2.2.1.5-5 に示す。消費電力の測定はターボブレイトン冷凍機及びチラーの電源入力側に電力計を取り付け測定した。試験期間中のターボブレイトン冷凍機 2 台(TB1、TB2)の設定温度は共に 70K とし、40L/min での循環を行った。2 台の循環ポンプ(CP1、CP3)を直列運転し、それぞれの回転速度は 6000rpm(CP1)と 4000rpm(CP3)に設定した。熱負荷の図には、長期循環試験とロードサイクル試験の期間外は循環条件が異なるので表示していない。熱負荷の横軸の時間は冷凍機に液体窒素が入る時間を基準としており、全熱負荷は冷凍機に入る前約 160 分の間に環境により変動する熱侵入量の積分値で、その他は全熱負荷中のそれぞれの内訳である。全熱負荷には熱侵入量測定時と異なり CP3 ポンプの損失分が加わっている。

長期循環試験の各機器の消費電力には外管温度の変化に対応したピークが現れている。外管温度上昇による断熱配管での熱侵入量増加により、熱負荷が増加し冷凍機への負荷が増加していることによる。全熱負荷の変化は 1 日の外管温度変化約 46℃に対して 20%程度で、その時の消費電力の増加は約 14%である(2016 年 9 月 21 日のデータより)。全熱負荷は気温に依存して徐々に減少しており、それに応じて消費電力も徐々に減少している。

1 kA、8 時間の通電を行ったロードサイクル試験中も消費電力には同様のピークが現れているが、通電は昼間に行い、外管温度が上がるタイミングと同じなので、通電の影響は明確ではない。しかし、端末においては、通電によるわずかな熱負荷増加が見て取れる。この増加から通電の消費電力へのインパクトは 4-5 kW 程度と推測される。



(a) 各機器の消費電力の推移
(TB はターボポンプ、Ch はチラーを示す)

(b) システムの熱負荷推移
(Total はケーブルシステム側の全熱負荷で CP3 ポンプの損失分を含む)

(c) 通電電流

(d) 外管温度の推移

図 2.2.1.5- 5　長期循環・ロードサイクル時の消費電力、熱負荷、通電電流、外管温度の推移

チラーの消費電力が 10/4 頃から細かく振動している。丁度この時期に気温低下のためにチラーの出口水温がチラーの設定温度の 15℃を下回るようになった。この振動はチラーの温度制御の影響であると推測している。

表 2.2.1.5-1 に長期循環試験中の消費電力の平均値を Case1、ロードサイクル試験中の消費電力の平均値を Case2 としてまとめた。今回ポンプの消費電力の測定は行なっていないが、ポンプ性能試験中に行った CP1 の回転速度に対する消費電力の測定の結果から消費電力を推定した。また、参考値として、各試験期間の Tr1-Tc1 の差の平均値から求めたケーブルシステム側の熱負荷を冷凍システムの冷凍能力(表中 CLP)と見なして COP を求めた結果も示す。Case3、4 に 9/14 から 11/2 の全期間で消費電力最大の時と最小の時の結果をまとめた。各機器の消費電力には制御機器等の付属機器に必要な電力も含まれている。期間の消費電力の最大と最小は 132.3kW と 108.6kW で、平均で 117kW 前後の値である。冷凍機システムの効率 COP は約 0.018 であり、冷凍機の 70K での COP が 0.039 の半分以下となっている。チラーを用いない 15℃程度の冷却水の準備は、システムの効率を向上させる。参考までに Case1 に対してチラーを用いない場合(消費電力=0 とする)の消費電力及び COP を Case5 として示す。COP は 0.018 から 0.032 へ改善する。

表 2.2.1.5-1　消費電力のまとめ

Case	TB1	TB2	Ch1	Ch2	CP1	CP3	合計	CLP	COP
1	45.3	23.6	26.7	22.2	0.23	0.10	118.1	2.2	0.019
2	44.3	23.1	27.4	21.5	0.23	0.10	116.7	2.1	0.018
3	50.7	24.3	30.4	26.5	0.23	0.10	132.3	2.4	0.018
4	41.4	22.0	25.3	19.6	0.23	0.10	108.6	1.9	0.017
5	45.3	23.6	0	0	0.23	0.10	69.2	2.2	0.032

COP 以外の単位は kW、TB はターボブレイトン冷凍機、Ch はチラー、CP はポンプを表す。CLP、COP は参考値。CLP には CP3 の損失分も含む。COP の計算には冷凍機だけでなく、チラー、循環ポンプ、それらのコントローラー等の付属機器駆動に必要な電力も含む。消費電力が 2016/9/16 15:05 で最大、2016/10/31 06:06 で最小となり、Case3 と Case4 にそれぞれその結果をまとめた。

2.2.1.6 残存性能確認試験

ア．電気特性確認試験

通電限界性能試験、ロードサイクル試験を実施後、I_c 測定、耐電圧試験などを実施し、試験の前後で電気的な特性に変化が無いことを下記の通り確認した。

（ア）I_c 特性

初期冷却後、液体窒素温度約 70K で 測定した外導体 I_c 特性は 4256A であった。その後ロードサイクル試験を実施後温度約 83K での通電限界性能試験を実施し、この際の I_c が 2542A であることが確認された。その後引き続いて温度を 80K とした際の I_c 測定試験も実施し、2943A という結果を得た。これらを横軸温度、縦軸外導体 I_c としてプロットし、出荷時の各素線 I_c から予想される各温度でのケーブルコア I_c 予想値と比較した。この結果、各プロットはほぼ計算で予想される最大 I_c 値と同じ値となっており、ロードサイクル試験、通電限界性能試験などにより導体通電性能に変化がないことを確認した。

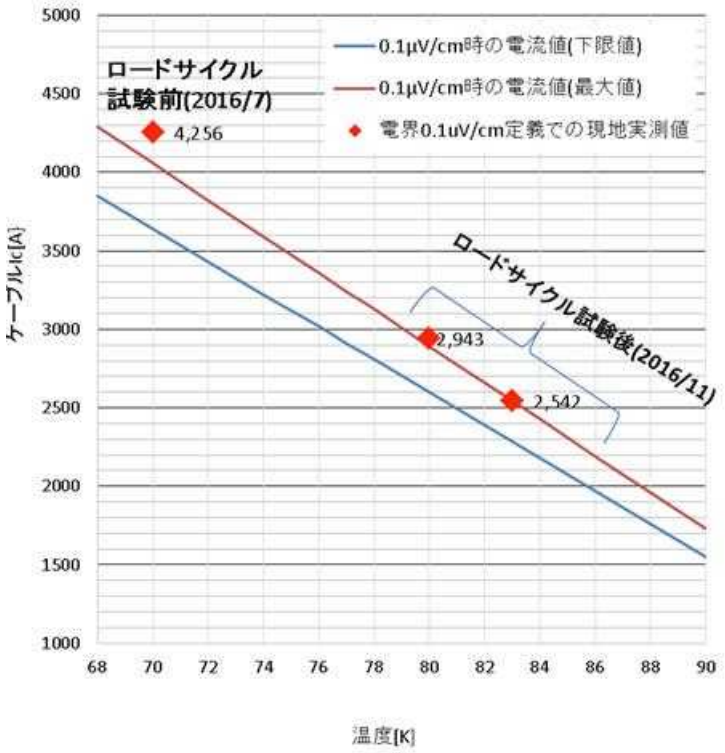


図 2.2.1.6- 1　各温度における外導体 I_c 予想値と実測値の比較(0.1μV/cm 定義)

（イ）静電容量

ケーブル絶縁部の静電容量についても同様にロードサイクル前後での測定を実施した。測定回路を図 2.2.1.6-2 に示す。ケーブルの内導体、外導体、外部電極（シールド層）に接続されている高圧配線または接地配線を建屋３、建屋４共に外し、端末容器の接地は接続されていることを確認したのちケーブル外導体のペルチェ端末導体ブスバー部に LCR メータ（A）、（B）２台分の高圧側配線を接続する。続いてケーブル内導体のペルチェ端末導体ブスバー部に LCR メータ（A）の接地側配線を接続し、外部電極接地端子に LCR メータ（B）の接地側配線を接続する。この状態で内導体－外導体間と外導体－外部電極間の静電容量を測定する。

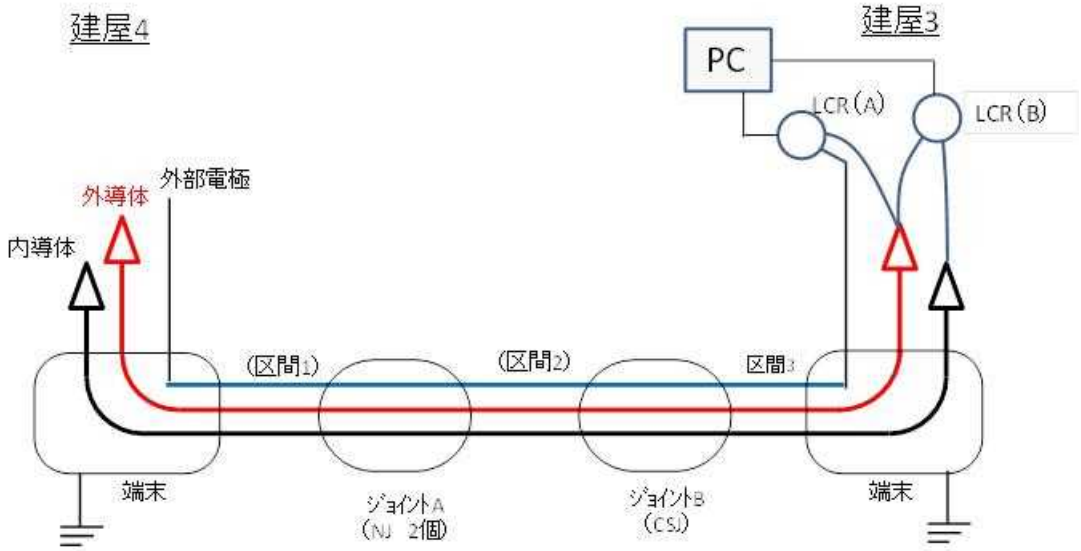


図 2.2.1.6- 2 静電容量測定回路

測定結果は表 2.2.1.6-1 に示すとおり内導体－外導体間、外導体－シールド間それぞれの前後値に大きな違いは見られず設計値ともほぼ同一であることから、特性に変化が見られないことを確認した。

表 2.2.1.6- 1　C・tanδ測定試験結果

	内導体-外導体	外導体-シールド
ロードサイクル前 (2016/7)	729 nF	1030 nF
ロードサイクル後 (2016/11)	728 nF	1029 nF
設計値	781 nF	1060 nF

また、参考値としてインダクタンスの測定結果を示す。DC 通電時の 70A/sec 電流掃引時の HTS 両端電圧 V は内導体で約 4～5 mV、外導体で約 0.5～0.6 mV であった。V = L ＊ (dI/dt)よりそれぞれのインダクタンスを求めると、内導体は約 57～71 μH、外導体は約 7～9 ・H であった。電流掃引速度が 70 A/sec の時の HTS 導体発生電圧の例を図 2.2.1.6-3 に示す。

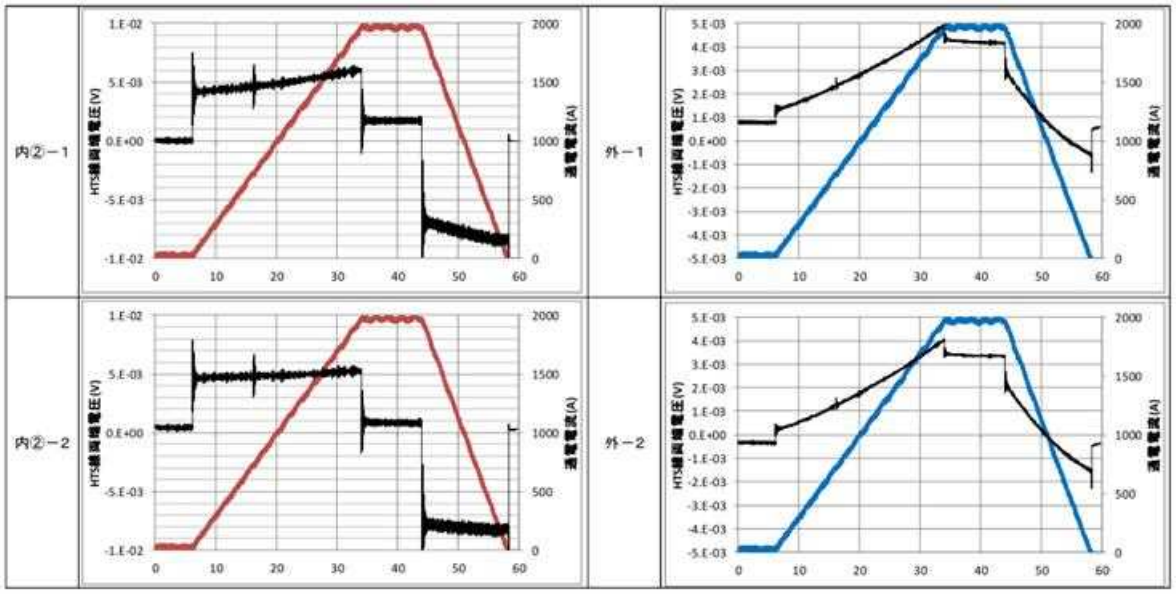


図 2.2.1.6- 3　電流掃引速度が 70A/sec の時の HTS 導体発生電圧の例

（ウ）絶縁抵抗

ケーブル絶縁部の絶縁抵抗についても同様にロードサイクル前後での測定を実施した。表 2.2.1.6-2 に示すとおり内導体－外導体間、外導体－シールド間に 500 V (DC) を印加した際の絶縁抵抗は規格以上の性能を有することを確認した。

表 2.2.1.6- 2　絶縁抵抗試験結果

	内導体-外導体	外導体-シールド
ロードサイクル前 (2016/7)	0.4MΩ以上 1mA 以下 10 分間異常無	0.4MΩ以上 1mA 以下 10 分間異常無
ロードサイクル後 (2016/11)	同上	同上

イ．熱侵入量確認試験

システムの各部の熱侵入量の評価において、ターボブレイトン冷凍機（TB）の設定温度を 75　K とし、液体窒素流量を 15 L/min から 35 L/min の範囲で変化させ Tc1, Tc4, Tc5, Tc6, Tc7, Tc8, Tc9, Tc12, Tr7, Tr6, Tr5, Tr4, Tr3, Tr2, Tr1 の温度を記録した。各温度測定点は図 2.2.1. 1 -5 に示す。熱侵入量 q(W)は液体窒素の質量流量 m (kg/s)、比熱 C(J/(kg K))、測定点間の液体窒素の温度差 dT(K)として、q=mCdT で求めた。

液体窒素がある測定点から次の測定点に到達するまでの時間を考慮して温度上昇を評価した。即ち、ある区間での温度差 dT は、区間出口で測定された温度から到達に必要な時間だけ前に区間入口で測定された温度を引くことで求めた。液体窒素の到達時間は昨年度の循環試験で測定した値を用いた。表 2.2.1.6-3 に Tc1 からの液体窒素の到達時間を示す。

図 2.2.1.6-4 に熱侵入測定時の液体窒素温度と液体窒素流量と外管表面の温度の時間変化を示す。液体窒素温度の階段状の大きな変化は流量を変えたことに起因している。また、１日の中でも時間帯により 20℃近く外管温度が変化することが分かる。液体窒素温度は外管温度の影響を受けるため、測定点間を液体窒素が移動する間の外管温度変化は液体窒素温度測定の不確かさの大きな原因となる。外管温度はコントロー

ルできないため、可能なかぎり外管温度が同じで、長時間安定する朝方のデータを選択的に用いることとした。熱侵入量解析に用いたデータの測定時の外管温度は-2.4±2.7℃である。

表 2.2.1.6- 3 43.66L/min 時に液体窒素の到達時間（2015 年度循環試験時の測定）

測定点	時間（min）	測定点	時間（min）
Tc1	0	Tr4	151
Tc4	7	Tr3	152
Tc5	40	Tr2	174
Tc6	42	Tr1	175
Tc7	54	Tt3	187
Tc8	54	Tp11	187
Tc9	95	Tp12	187
Tc12	106	Tp13	190
Tr7	107	Tp14	190
Tr6	142	Tc1	188
Tr5	143		

※３～６分の見積もり誤差が見込まれる

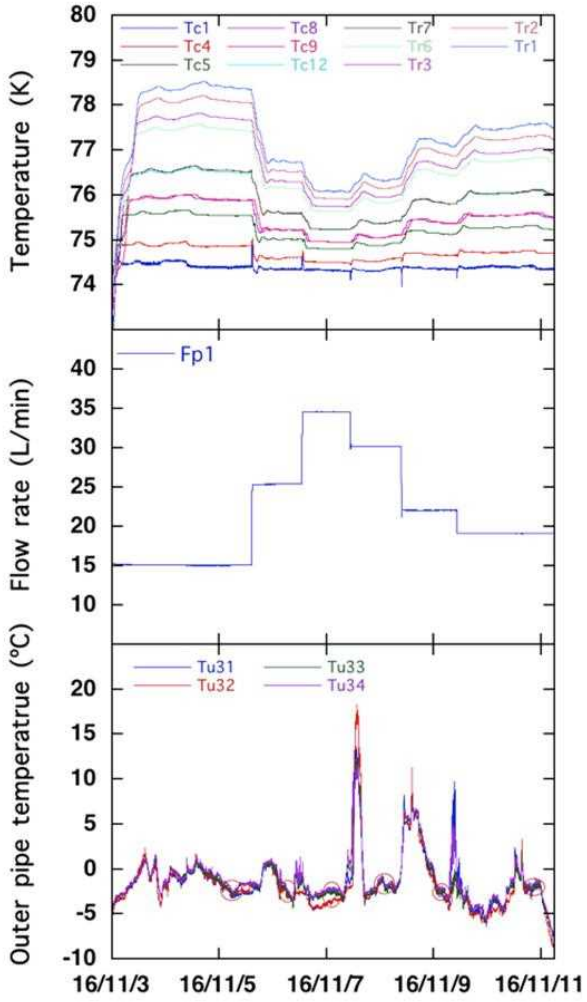


図 2.2.1.6- 4　熱侵入測定時の液体窒素温度と流量

図 2.2.1.6-5 に各流量で熱侵入評価に用いた液体窒素と外管温度のデータを示す。液体窒素温度のデータは液体窒素の各測定点への到達時間分ずらし、重なる部分のみ用いる。用いた液体窒素温度の範囲は 76.4±2.1K の範囲である。

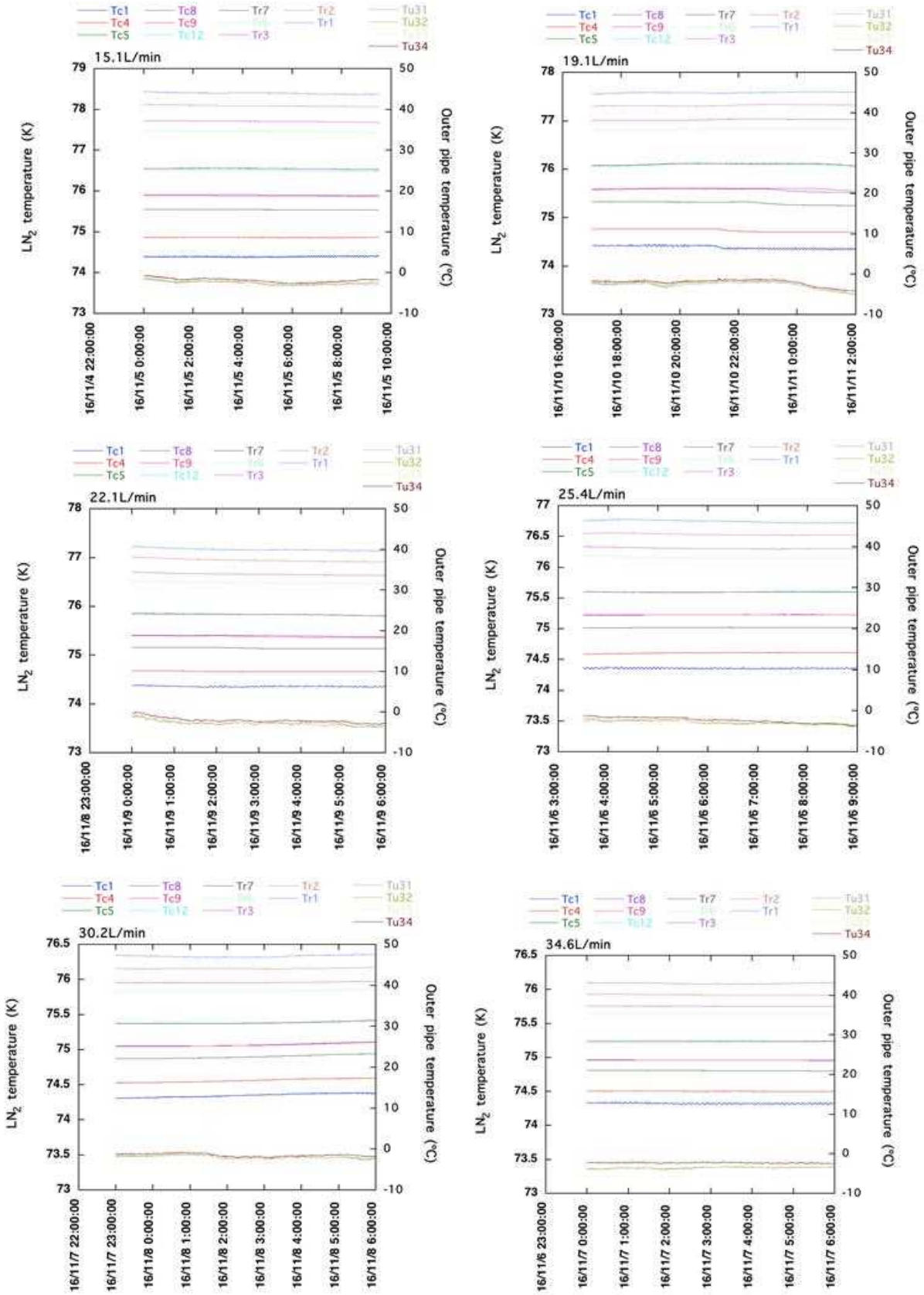


図 2.2.1.6- 5　熱侵入評価に用いたデータ

図 2.2.1.6-6 に流量の逆数に対する測定点間の温度差を示す。データは外管温度が-2.4±2.7 ℃、液体窒素温度が 76.4±2.1 K の時のデータである。データの不確かさとして、解析に用いたデータの散らばりによる不確かさ、温度センサーの不確かさ、外管温度と液体窒素温度の不確かさ等を考慮した。図中の実線はデータ点に対して直線をフィットした物であり、直線の傾きからある流量の時の温度差を求めた。配管に沿って温度分布があるので、熱侵入量を求める際比熱として 74 K と 79 K の値の平均値 2.062 kJ/(kg K)を用い、不確かさとして差±0.006 kJ/(kg K)を見込んだ。これらの結果から求めた熱侵入量を表 2.2.1.6-4 と表 2.2.1.6-5 にまとめる。表中カッコ内の数値は熱侵入量の不確かさである。

表 2.2.1.6-6 と表 2.2.1.6-7 に 2015 年度の測定結果を纏める。外管温度は今期-2.4±2.7 ℃に対して-3.0±3.5 ℃であり、液体窒素温度も今期 76.4±2.1 K に対して 76.8±2.0 K で環境条件はほぼ同じである。侵入熱量も不確かさの範囲でほぼ一致している。シールド付き断熱配管である区間１において往復で 0.865(50) W/m の熱侵入量であり、目標の熱侵入量１ W/m 以下を達成した。

また外気温の影響について、外管温度 17.4±2.6 ℃で同様の測定を行った結果を表 2.2.1.6-8、表 2.2.1.6-9 に参考データとして示す。液体窒素温度は 71.7±2.5 K である。外管温度に依存して侵入熱量は増加しており、-2.4±2.7 ℃の結果と比較して 30 %ほど増加している。

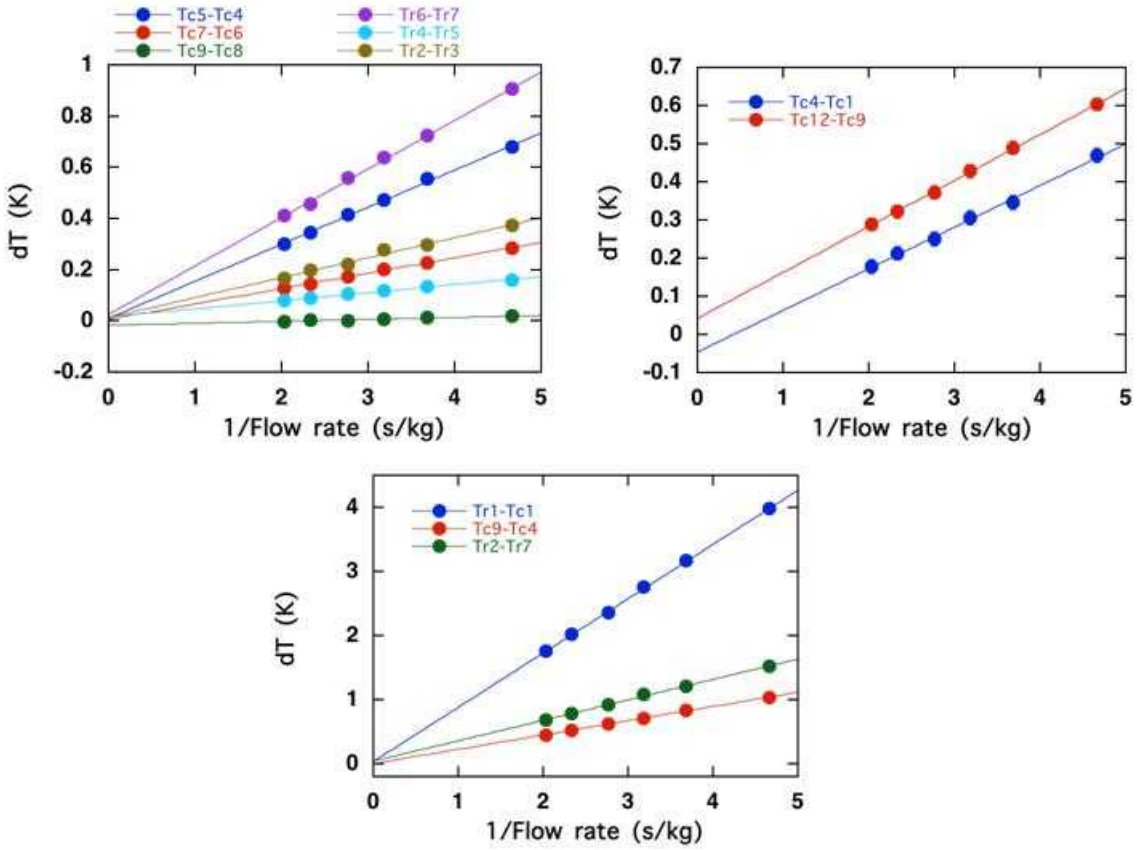


図 2.2.1.6- 6　流量の逆数に対する温度差

表 2.2.1.6- 4　断熱配管の熱侵入測定のまとめ（外管温度-2.4±2.7℃）

場所	区間１		区間２		区間３	
配管	ケーブル	リターン	ケーブル	リターン	ケーブル	リターン
測定位置	Tc9-Tc8	Tr6-Tr7	Tc7-Tc6	Tr4-Tr5	Tc5-Tc4	Tr2-Tr3
熱侵入(kW)	0.016(17)	0.391(17)	0.124(18)	0.064(17)	0.298(17)	0.161(18)
距離(m)	474	470	135	127	377	373
熱侵入(W/m)	0.033(35)	0.832(36)	0.92(13)	0.51(14)	0.792(45)	0.431(46)
熱侵入計(W/m)	0.865(50)		1.42(19)		1.222(65)	

表 2.2.1.6- 5　熱侵入測定のまとめ（外管温度-2.4±2.7℃）

場所	端末 A	端末 B	配管		全体
			ケーブル	リターン	
測定位置	Tc4-Tc1	Tc12-Tc9	Tc9-Tc4	Tr2-Tr7	Tr1-Tc1
熱侵入(kW)	0.225(18)	0.248(17)	0.459(17)	0.658(18)	1.746(20)
距離(m)	-	-	990	990	-
熱侵入(W/m)	-	-	0.464(17)	0.665(18)	-

表 2.2.1.6- 6　昨年度断熱配管の熱侵入測定のまとめ（外管温度-3.0±3.5℃）

場所	区間１		区間２		区間３	
配管	ケーブル	リターン	ケーブル	リターン	ケーブル	リターン
測定位置	Tc9-Tc8	Tr6-Tr7	Tc7-Tc6	Tr4-Tr5	Tc5-Tc4	Tr2-Tr3
熱侵入(kW)	0.016(16)	0.400(16)	0.128(16)	0.067(16)	0.308(16)	0.172(16)
距離(m)	474	470	135	127	377	373
熱侵入(W/m)	0.034(33)	0.851(33)	0.95(12)	0.52(13)	0.818(42)	0.462(42)
熱侵入合計(W/m)	0.886(47)		1.47(17)		1.280(59)	

表 2.2.1.6- 7　昨年度熱侵入測定のまとめ（外管温度-3.0±3.5℃）

場所	端末 A	端末 B	配管		全体
			ケーブル	リターン	
測定位置	Tc4-Tc1	Tc12-Tc9	Tc9-Tc4	Tr2-Tr7	Tr1-Tc1
熱侵入(kW)	0.199(17)	0.233(16)	0.461(16)	0.676(16)	1.690(23)
距離(m)			990	990	
熱侵入(W/m)			0.465(16)	0.683(17)	

表 2.2.1.6- 8　異なる外管温度での測定結果との比較（参考値）

区間	外管温度-2.4±2.7℃			外管温度 17.4±2.6℃			b/a
	ケーブル (W/m)	リターン (W/m)	合計 (往復分) (W/m) a	ケーブル (W/m)	リターン (W/m)	合計 (往復分) (W/m) b	
1	0.033(35)	0.832(36)	0.865(50)	0.024(34)	1.204(38)	1.228(51)	1.42(11)
2	0.92(13)	0.51(14)	1.42(19)	1.34(13)	0.63(17)	1.96(21)	1.38(23)
3	0.792(45)	0.431(46)	1.222(65)	1.021(45)	0.535(63)	1.556(77)	1.273(92)

表 2.2.1.6- 9　異なる外管温度での熱侵入測定結果との比較（参考値）

場所	端末 A	端末 B	配管		全体
			ケーブル	リターン	
熱侵入(外管温度-2.4±2.7℃) (kW)	0.225(18)	0.248(17)	0.459(17)	0.658(18)	1.746(20)
熱侵入(外管温度 17.4±2.6℃) (kW)	0.226(18)	0.249(17)	0.600(17)	0.901(20)	2.091(22)

ウ．圧力損失確認試験

圧力損失確認試験は循環流量を 15L/min から 36L/min の範囲で変化させ Pr1，Pc1，Pc4，Pp32，Pp11，Pp12 で測定された液体窒素圧力を記録した。ケーブル側全体の圧力

損失は差圧計で測定された Pr1 から求めた。その他の圧力損失は各ポイントの圧力計で測定された圧力差から求め、ケーブル配管の圧力損失は Pc1-Pc4、リターン管の圧力損失は Pp32-(Pc1-Pr1)、冷凍機システムを含めたシステム全体の圧力損失は Pp12-Pp11 とした。それぞれの圧力計は異なる高さに取り付けられているため、圧力損失評価の際には、そのヘッド分を考慮した。データは循環が安定している部分から 120 分間分切り出して用いた。流量計で液体窒素密度として 853.2g/L を用い質量流量から体積流量に変換されているため、本報告書では液体窒素の温度に合わせて 36L/min のデータについては 75K の値 819.0g/L、16L/min のデータについては 77K の値 810.4g/L それ以外のデータについては 76K の値 815.0g/L を用いて体積流量を計算し直した。

図 2.2.1.6-7 に圧力損失の測定結果を示す。表 2.2.1.6-10 に各部での各流量においての圧力損失の値を示す。流量においては密度の補正、圧力損失については圧力計取り付け高さの違いによるヘッド差の補正が入れてある。カッコ内は不確かさで、統計による不確かさ、測定システムによる丸めによる不確かさ、測定機器の不確かさ、密度評価の不確かさを含む。圧力計取り付け位置での液体窒素の液面の不確かさは液面位置がどこにあるか不明なため、不確かさの見積もりにおいて考慮していない(1m の高さの不確かさは約 8kPa の圧力の不確かさに対応する)。流量と共に圧力損失は増加し、ケーブル側全体で 36.03L/min において 42.80kPa に到達している。その時、システム全体の圧力損失は 98.4kPa である。冷凍機システムでほぼケーブル側 2000m での圧力損失(ケーブル管＋リターン管)より大きい圧力損失が生じている。

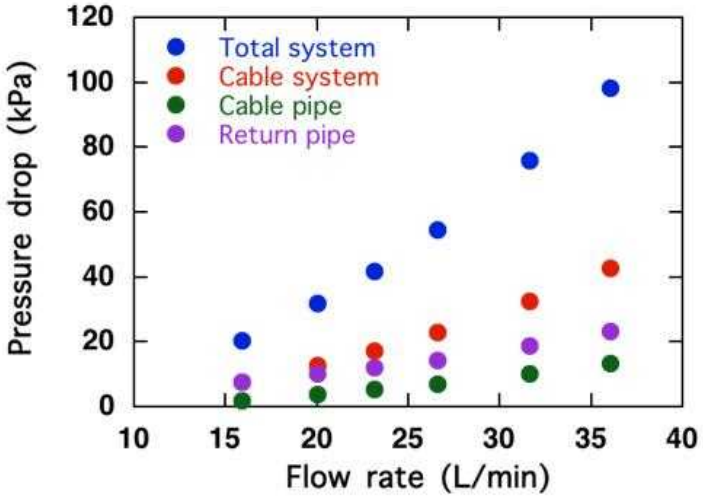


図 2.2.1.6- 7　圧力損失の測定結果。Total system は冷凍機システム側を含めた圧力損失、Cable system はケーブルシステム側で、端末入口からリターン管出口までの圧力損失。

表 2.2.1.6- 10　圧力損失の測定結果のまとめ

流量 (L/min)	システム全体 (kPa)	ケーブル全体 (kPa)	ケーブル管 (kPa)	リターン管 (kPa)
15.89	20.5(1.5)	7.67(13)	2.0(1.5)	7.8(1.5)
20.02	31.9(1.5)	12.86(13)	3.8(1.5)	10.1(1.5)
23.13	41.9(1.5)	17.36(14)	5.4(1.5)	2.2.1.(1.5)
26.59	54.7(1.5)	22.97(14)	7.2(1.5)	14.4(1.5)
31.63	75.9(1.5)	32.57(15)	10.1(1.5)	18.8(1.5)
36.03	98.4(1.5)	42.80(16)	13.3(1.5)	23.4(1.5)

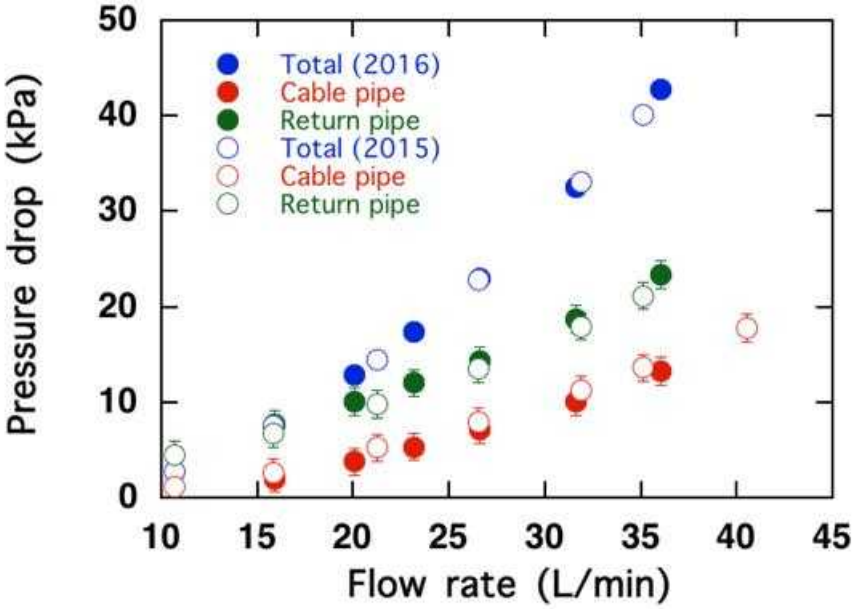


図 2.2.1.6- 8　前年度測定の圧力損失との比較。Total はケーブルシステム側の全圧力損失

図 2.2.1.6-8 に昨年度測定した圧力損失の結果との比較を示す。両者は不確かさの範囲で一致しており、断熱配管の圧力損失に関わる性能の変化は確認されなかった。

エ．冷凍機性能確認試験

長期試験前後での冷凍機の性能変化を確認するために 70K と 77K 周辺の温度で TB2 の冷凍能力、消費電力及び COP の測定を行った。Tp13, Tp14 の温度差、流量、その温度での比熱より冷凍能力を求めた。ケーブルシステム側を切り離し、冷凍機システム側のみで循環させ、負荷として模擬負荷ヒーターにより 3500W で液体窒素に熱を与えた。70K の測定では TB1 を 71K に設定し、77K の測定では TB1 を 78K に設定した。いずれの場合も TB2 の冷凍機の温度は 63K に設定し、最大冷凍能力運転で、温度コントロールがなされないようにした。なお、各年度の性能確認試験時点における累計運転時間は表 2.2.1.6-11 の通りである。

表 2.2.1.6- 11　ターボブレイトン冷凍機累計運転時間

	2015 年度試験時	2016 年度試験時
機器設置完了からの累計運転時間	150 h	3170 h

図 2.2.1.6-9 に冷凍能力、消費電力、COP の昨年度の測定結果との比較を示す。横軸の温度は TB2 の入口出口の温度(TI611,TI612)の平均値とした。データの誤差には、冷凍能力と COP については温度の測定結果のばらつき、温度計の不確かさ、比熱の不確かさが、消費電力については測定結果のばらつきが考慮されている。表 2.2.1.6-12 に測定結果をまとめる。

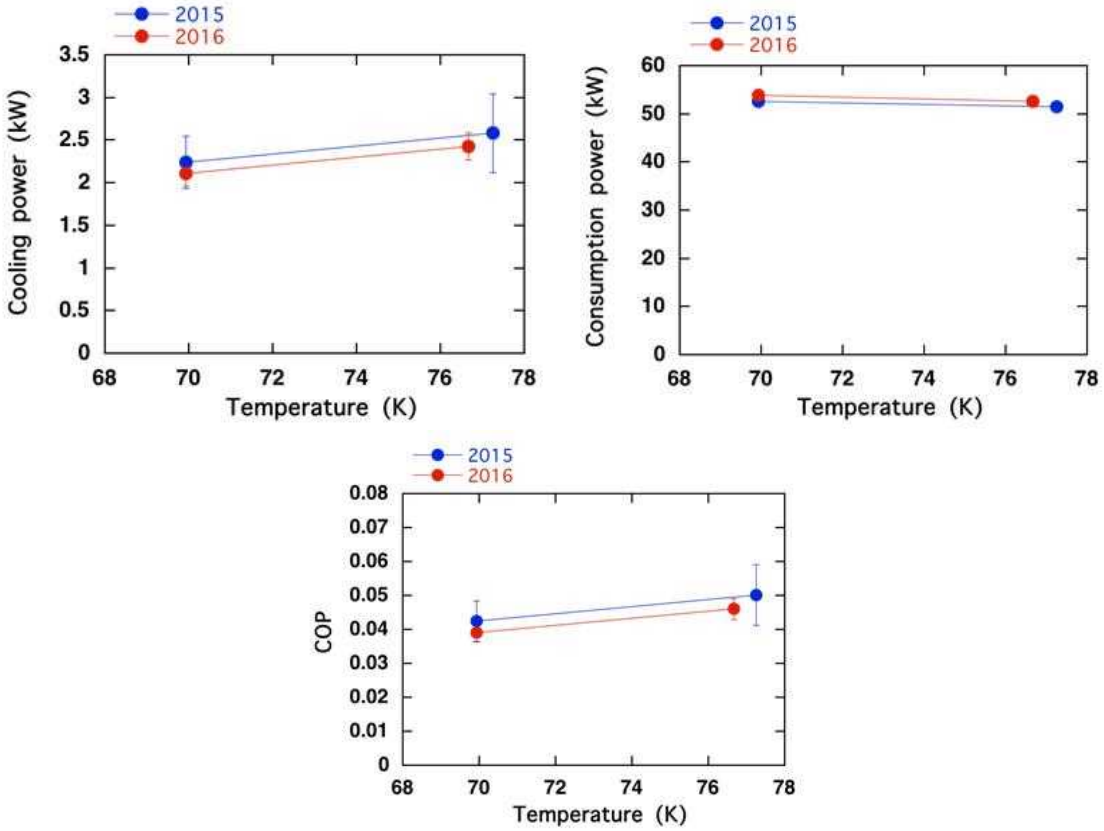


図 2.2.1.6- 9　ターボブレイトン冷凍機 TB2 の冷凍能力（上左)、
消費電力（上右)、COP（下）
(70K の測定では TB2 を 71K に設定し、77K の測定では TB2 を 78K に設定した)

表 2.2.1.6- 12　ターボブレイトン冷凍機（TB2）　性能測定結果のまとめ

冷凍機	温度(K)	冷凍能力(kW)	消費電力(kW)	COP
TB2	69.9	2.11(16)	54.02(1)	0.039(3)
	76.7	2.43(16)	52.74(1)	0.046(4)

冷凍能力は昨年度と比べ有意な差は無いが、消費電力については僅かに増加している。COP については、冷凍能力の不確かさが大きいこともあり昨年度と比べ有意な差は無く、冷凍機の冷凍機性能について大きな変化は無かった。

オ．ポンプ性能確認試験

長期試験前後の循環ポンプの性能変化を確認するためにポンプの回転数を変え、ポンプの出口側バルブを絞り流量を変化させることで Q-H 性能を測定した。また、同時に軸動力を測定し水動力からポンプ効率を求めた。試験では、ケーブルシステム側を切り離し、模擬負荷ヒーターを介し、冷凍機システム側のみで循環させた。

なお、各年度の性能確認試験時点における累計運転時間は以下の通りである。

表 2.2.1.6- 13　液体窒素循環ポンプ累計運転時間

	2015 年度試験時	2016 年度試験時
機器設置完了からの累計運転時間	170h	2140h

図 2.2.1.6-10 に Q-H 性能、軸動力、冷凍機システム側とケーブルシステム側を合わせた全システムの抵抗曲線を示す。ポンプの吐出圧力はポンプ入口出口に取り付けられている圧力計 Pp12 と Pp11 の圧力差から求めた。圧力計の取付け高さの差(1.115m)による圧力差の補正も入れている。流量計での質量流量から体積流量への換算には 853.2g/L が用いられているため、流量は循環している液体窒素の温度での密度を用い計算し直した。Q-H 性能の図中の数字はポンプの回転速度（コントローラー読取値）を表す。液体窒素温度はポンプにおいて 74.6K-75.4K の範囲で行った。

図 2.2.1.6-11 に昨年度と今回測定の Q-H 特性、軸動力、ポンプ効率の比較を示す。Q-H 特性およびポンプ効率は大きな変化はなく、昨年度に比べ循環ポンプの性能の劣化はみられなかった。

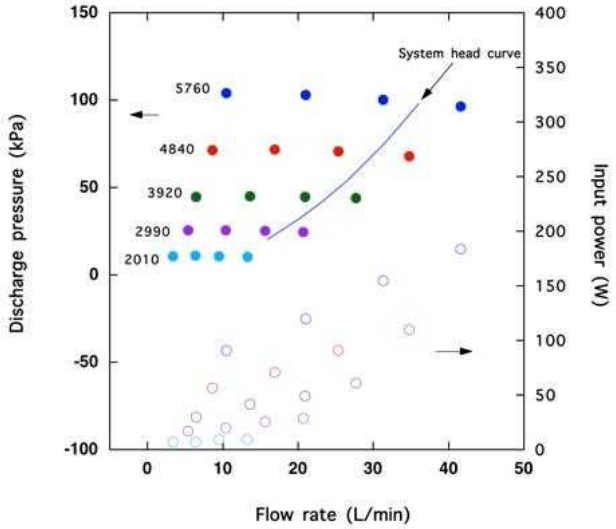


図 2.2.1.6- 10　TB 側ポンプの Q-H 特性と軸動力と効率

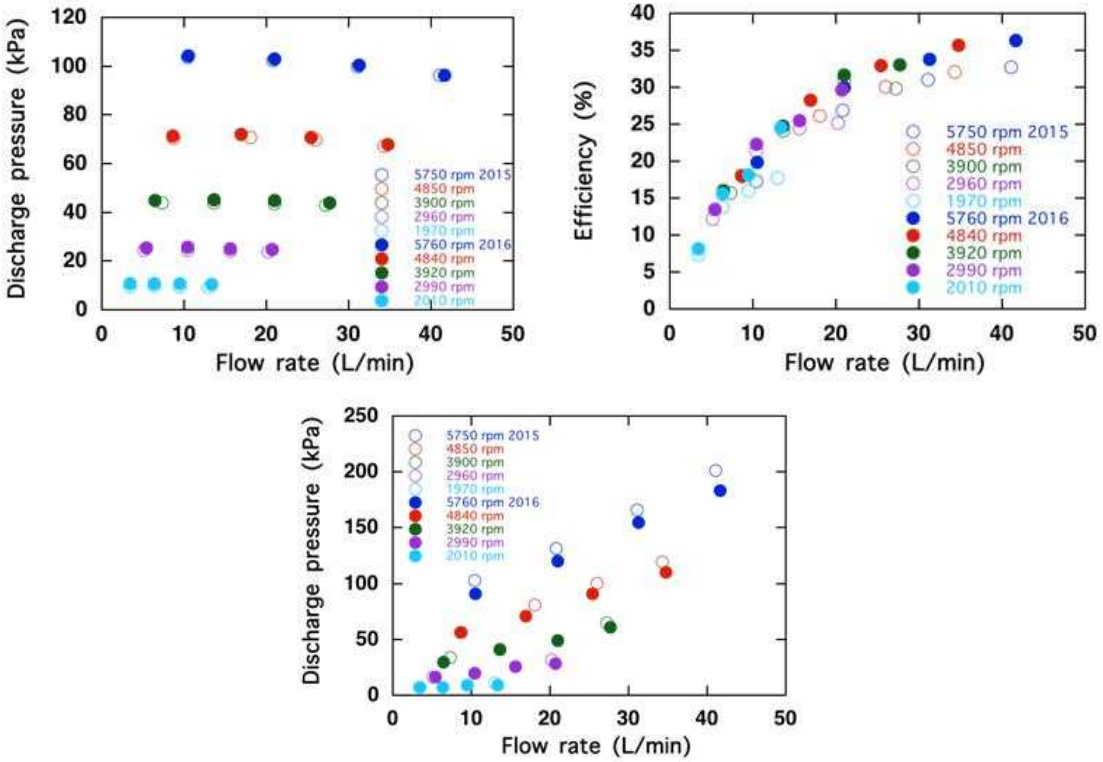


図 2.2.1.6- 11　2015 年度測定と 2016 年度測定の Q-H 特性(上左)と軸動力（上右）と効率（下）の比較

カ．ペルチェ電流リード（PCL）フランジ解体調査

2.2.1.３エ項で述べたように通電試験において、外導体に取り付けた PCL 銅リード部において設計値以上の温度上昇が観測されたこと、また定格電流以上の電流が流れた可能性があることから、解体調査を行い、PCL の劣化の有無と確認した。まず、解体調査に先立ち、ロードサイクル試験後に PCL の各部の抵抗測定を行ったが、ロードサイクル試験前と抵抗値の変化がないことが確認された。

次に PCL フランジ解体時の外観写真（端末 A）を図 2.2.1.6-12 に示す。端末 B もほぼ同様であり、外観検査において、通電時の局所的な温度上昇等による溶融・溶断等の損傷がないことが確認された。



図 2.2.1.6- 12　PCL フランジ解体後の銅リード部の外観写真（端末 A）

2.2.2 設計、運用、保守ガイドラインの作成

2.2.2.1 はじめに

(1) 本指針の必要性及び構成

発電所から家庭や工場までの送電によるロスで発電量の６％の電力が失われている。2012 年の日本の総発電量は 10,300 億 kWh であり、100 万 kW 級の原子力発電所６基分の損失ということになる。その送電ロスを抑えるためには超電導直流送電が有効であり、同送電システムを社会インフラとして実装するためには、設計、建設に関するガイドラインは必要不可欠である。

ここでは、平成 24 年度経済産業省委託事業「高温超電導直流送電システムの実証研究」及び平成 25 年度経済産業省委託事業「高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業」並びに本事業「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発」（以下、「石狩プロジェクト」という）で得られた知見等をガイドラインとして取り纏める。

本ガイドラインは石狩プロジェクトで得られた成果より、実用線路の仕様の一例として以下を想定した。

送電距離	200 km 以上
ケーブル送電容量	5 kA-100 MVA
ケーブル冷却管仕様	断熱二重管（直管）／埋設
ケーブル冷却方式	液体窒素浸漬冷却
冷却ステーション設置間隔	20 km 以上
ケーブル接続間隔	500 m

なお、本指針において超電導直流ケーブル特有の内容を含む項目について★印をつけた。

(2)本指針で適用する単位系

原則として以下を含むSI 単位系を使用する。

・ゲージ圧力 ：MPa またはkPa
・絶対圧力 ：MPa A またはkPa A
・仕事、エネルギー、熱量 ：J、kJ またはkW･h
・仕事率、動力、熱交換量 ：kJ/h またはkW
・応力 ：N/mm^2
・真空度 ：Pa （1 Torr = 133.322 Pa）

2.2.2.2 仕様

(1)法規

ア．公道使用の法的対応

超電導ケーブルの布設は、多くの場合、公道への埋設又は地上布設を伴う。
このため設置者は、道路管理者（国、各都道府県、又は各市町村）に対して道路占用許可申請*1を行い、許可を受ける必要がある。
設置者が電気事業者である場合は「道路法第 33 条」の道路占用の許可基準に適合する必要がある。

（＊1）道路に一定の物件や施設などを設置し、継続して道路を使用することを「道路占用」という。道路を占用しようとする場合には、道路を管理している「道路管理者」の許可が必要になる。

（参考：石狩プロジェクトの例）
市道使用の許可に際して、石狩市より埋設物との離隔条件として以下の指示を受けた。調査の結果、水道管の一部を移設する必要があり、これを条件に道路使用許可が下りた。

表 2.2.2.2- 1　既設埋設物との離隔条件

下水道配管	500 mm 以上
工業用水配管	500 mm 以上
ガス配管	隣接するガス配管の管径以上
NTT 通信、電力ケーブル、上水道	特に指示なし（300 mm 以上確保する）

なお、超電導ケーブルの埋設深さは、電気設備技術基準に則り、1.2 m 以上とした。

イ.送電システムの適用法規

石狩プロジェクトでは、関係省庁と協議の結果、超電導ケーブルシステムについては冷却システムを含め電気事業法で一元的に扱うこととなった。今後の実送電においても同様の方針で実施されるものと予想されるが、現時点では超電導送電に関する関連法規が整備されていないため、実施の都度、関係者間での協議が必要となる。

（参考：石狩プロジェクトの例）

北海道産業保安監督部と協議し、「電気主任技術者の選任」と、「保安規程の届出」で、電気事業法での自家用電気工作物として取り扱うことが了解された。
保安規程の詳細に関しては、別項に記載の通り。

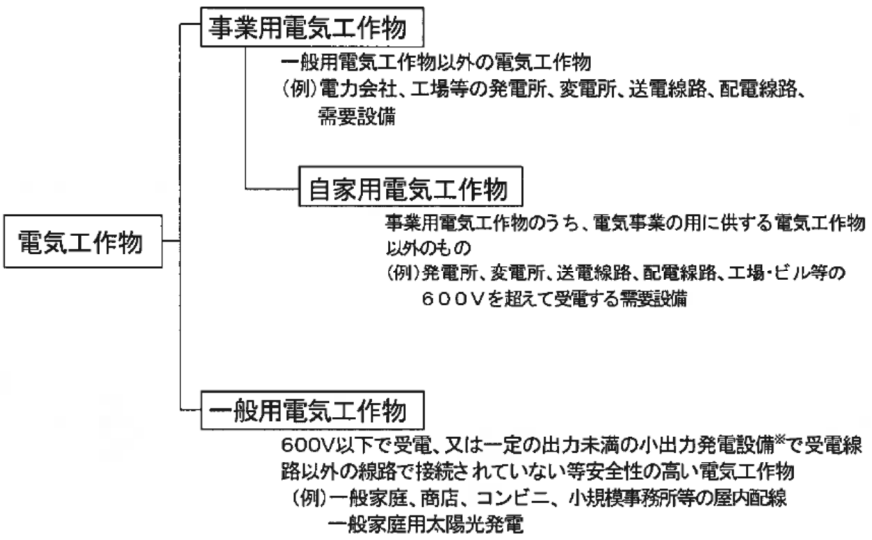


図 2.2.2.2- 1　電気工作物の分類

高圧ガス保安法については同法第三条六号の規定により、適用除外扱いとなる。ただし、冷却システムには加圧液体窒素等の高圧ガスが使用されることから、これらの技術的取り扱い等に関しては、高圧ガス保安法に規定される技術基準に準拠することとし、冷凍保安規則における冷凍設備に対する技術基準を満たすよう各機器の設計、製作ならびに気密・耐圧試験などの検査を実施している。

石狩プロジェクトでは、電気事業法適用、高圧ガス保安法準拠での技術取り扱いという判断になったが、超電導ケーブルシステムを運用する場所での各都道府県レベルの関係省庁との折衝が必要となり、場合によっては高圧ガス保安法での運用となる可能性もあることが現状である。全国で統一した運用見解が得られるよう体制を整えていくことが今後の課題である。

(2)用地
ア．ルート選定
超電導直流ケーブルステムにおけるケーブルのルート選定の要点は以下の通りである。
① 基本的に埋設であること
（既設設置物との干渉がないこと）
② できるだけ直線ルートとし、曲り部は曲率半径が十分であること
（可能であれば、できるだけ高低差を少なくすること）
③ 冷却ステーションの用地が確保できること

①に関して、外気温及び日射による熱侵入を抑え、安定した循環冷却を維持するためには埋設（あるいはトレンチ内設置）が望ましい。地形や立地環境等により一部或いは全部が地上布設になる場合は、設計段階で断熱二重管の気象条件による伸縮対策や熱侵入量を慎重に検討する必要がある。
なお、埋設の場合は事前に試掘調査を行い、既設設置物との干渉の有無を調査する必要がある。

②に関して、ケーブル管路の圧力損失はポンプの能力に影響するため、できるだけ

直線とし、圧力損失を少なくするのが望ましい。更に、断熱二重管の曲り部は外管と内管との間のサポートが増えるため熱侵入を増加させる要因になる。以上のことから曲り部は極力少なくするべきである。ここで、曲り部の曲率半径はケーブルコア布設に対して十分に支障のないものとする必要がある。
また、ケーブル管路の高低差はポンプの揚程に影響するため、できるだけ高低差を少なくするのが望ましい。
なお、公道に埋設するルート選定された場合には、道路管理者に道路占用許可申請を行い、許可を受ける必要がある。
③に関して、超電導ケーブルルート上には、一定区間毎に冷却ステーションが必要となるため、用地を確保する必要がある。

（参考：石狩プロジェクトの例）
①石狩プロジェクトでは回線 1（500 m）は埋設、回線 2（1000 m）は地上布設となった。埋設の回線 1 は日射の影響を受けず、液体窒素の日々の温度変化は少ないが、地上布設の回線 2 は日射の影響を受けて、液体窒素の日々の温度変化が大きい。但し、十分な冷却能力があるため、周期的な温度変化があるのみで、循環は安定している。
なお、回線 2 は当初公道（道道）への埋設が計画されており、道路管理者の許可を受けて現地の試掘調査を行った。道路管理者との協議については、1.2.2 項に記載する。
②石狩プロジェクトのケーブル布設は、断熱二重管内に現地にてケーブルコアを引き込む布設方法であり、布設強度の観点から曲率半径に 7 m の制限を設けた。
また、石狩プロジェクトで使用した液体窒素循環ポンプの揚程は 100 kPa である。従って、許容できる高低差は最大でも 10 m 程度（流速による圧損を考慮しない場合）であるため、配管ルートに高低差を設けないよう端末クライオスタットをピット内（地下）に設置する等の配置設計を行った。
③地権者との協議については、次の項に記載する。

イ．関係者との調整
用地に関してはいくつか関係者との協議が必要となる。
（ア）試掘調査
ルートが仮決定した段階で、埋設の場合は道路管理者に試掘調査の許可申請を行い、許可を受けた上で、現地にて試掘調査を行い、既設設置物との干渉の有無を調査する必要がある。干渉物がある場合は、ルート変更等を検討する必要があるため、事前に十分に余裕のある工程を策定しなければならない。

（イ）道路占用許可申請
埋設或いは地上布設どちらの場合でも、ルートが決定したら、道路管理者に道路占用許可申請を行い、許可を受ける必要がある。

（ウ）地権者
ルートが民地に掛かる場合は地権者との調整が必要となる。特に冷却ステーション等の建物を建設する用地は民地の買収又は借用にて確保することが予想される。

（参考：石狩プロジェクトの例）
・回線 1（500 m）について
一部市道への埋設箇所があったため、道路管理者である石狩市に対し道路占用申請を行い、許可された。その際、事前に石狩市と協議を重ね、特に安全性の検討を実施し問題の無いことを説明している。

管路の大部分と冷却ステーションは本プロジェクトに協力的な民間法人からの借地を使用した。

・回線 2（1000 m）について

最初に仮決定されたルートは公道（道道）の沿道への埋設（2000 m）であった。まず、道路管理者である北海道空知総合振興局札幌建設管理部に対し、試掘調査の許可申請を行った。その際、①道道を占用する理由（他の市道、国道等も検討し道道となった見解書） ②埋設配管の安全性の説明書 ③工事工程 ④設備概要等の書類を準備し、説明し、許可を受けた。その上で試掘調査を行ったが、既設埋設物が多く、当初ルートは断念。その後、道路管理者といくつかのルート案を協議し、試掘調査を繰り返し、最終的に道道の中央分離帯に埋設するルートについて了承された。本件に関する道路管理者との協議はおよそ 1 年間行われ、その間に 10 回以上の打合せを実施した。

また、ルートの途中で民地を横断する箇所があり、冷却ステーション建設用地も道道近傍の民地となることから、地権者との協議も検討された。

しかしながら、最終的には本ルート案はプロジェクトの計画変更により破棄され、道道とは離れた本プロジェクトに協力的な民間法人からの借地に地上布設することとなった。

ウ．周囲への安全性

配管が周囲に対して安全であることは必須事項である。道路管理者との協議の中でも、断熱二重管の外管又は内管が破損した場合の圧力上昇に対する安全性の説明が求められており、それを説明し、了解してもらうことで、道路占用の許可を受けている。

石狩プロジェクトでは(7)イ項に示す安全設計がなされている。

(3)線路仕様　★

超電導直流送電の線路仕様を決めるに当たって、考慮すべき項目を表 2.2.2.2-2 にまとめる。詳細についてはア～キに各項目毎に記述する。

表 2.2.2.2- 2　線路仕様を決める上で考慮すべき項目

項目	考慮すべきこと
・送電容量 　電圧 　電流 ・送電方式 ・線種 ・電力調整速度 ・高調波 ・接地方式 ・事故電流	・客先の要求仕様 　耐電圧設計（ケーブルコア、電流リード、ジョイント、端末） 　超電導導体・電流リード・接続部設計 ・モノポール／バイポール（極性反転の有無） ・同軸／単心構造 ・線路インピーダンス ・交流損失の影響検討 ・両端／片端接地設計 ・短絡／地絡設計
・亘長 　ジョイント間距離 　冷却ステーション間隔 ・増設 ・電力変換器	・客先仕様、線路レイアウト設計 　製造単長、輸送限界、引込張力 　熱侵入量、圧力損失、冷却・ポンプ能力 ・将来需要予測、容量裕度 ・変換器効率、事故電流設計

ア．電圧、電流　★

通常の交流送電では発電所で発生した約 10～20 kV の電力を、送電時の抵抗ロスを低減するため変圧器を用いて 275 kV や 500 kV 等の高電圧に変換し送電される。超電導送配電技術では超電導の大電流低抵抗である特性を活かし、出来るだけ低圧・大電流で送配電することが好ましい。直流送配電を交流送配電に変換する IGBT などのパワー・スイッチング素子の高性能化に伴い 10 kV/素子程度の耐電圧特性が得られるようになってきたこと、日本の電力会社の需要家へ供給する交流電圧区分の１つである特別高圧(20 kV 以上、2 MW 以上)の規格などを考慮し。送電電圧 V = 20 kV とする。この数値は今後の電力変換器などの性能向上によりさらに低電圧・高電流化を目指すものと期待される。

送電電圧 V = 20 kV とすると、送電電流 I = 100 MW / 20 kV = 5 kA となる。現状の Bi 系超電導線材 1 本当たりの許容通電電流値(=I_c, Critical Current)は約 200 A 程度であるので、モノポールの往復導体それぞれに対しおおよそ 25 本程度（裕度を見込めば＋α）となり、十分導体設計が可能な範囲に収まる。

（参考：石狩プロジェクトの例)

超電導技術を用いた送配電システムは低電圧・大電流による送電を行うことが可能であるため、大規模太陽光発電システムに適用しエネルギー輸送を行うことが有効と考えられている。本プロジェクトでは 100 MVA クラスの太陽光発電システムに対しての線路仕様で検討を進めることにした。

実際の石狩での試験は、さくらインターネット(株)の太陽光発電設備(200 kW)を用い、この設備により発電された電力をさくらインターネット(株)の石狩データセンター２号棟へ直流超電導線路を用いて送電して、建屋内直流給電ネットワークへ直流

のまま供給される。設備仕様により、実際に送電される電力の仕様は 400 V、500 A となる。

石狩データセンターでの送電方式は直流・モノポールであり、この条件で検討する。この条件での送電電力は以下の式で表される。

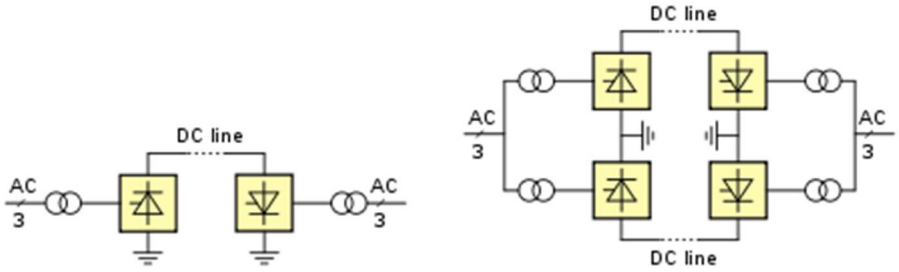
送電電力　$W = V \times I$ (W)　、ここに V：送電電圧 (V)、I：送電電流 (A)

イ．極性反転の有無　★

直流送電のうち、送電線もしくはケーブルが＋極、－極の２極で構成される方式をバイポール（双極）、＋極または－極のみで構成される方式をモノポール（単極）方式と呼んでいる。モノポール方式の場合は電流の帰路は地中もしくは海水を利用して行う場合もあるが、この時地下埋設物の電蝕や地磁気の乱れが発生するため、人口密度が高く地下埋設設備が多い場所での使用は好ましくない。このような場合には帰路電流を別途設けた導体に流す方式が採用される。これを導体帰路方式という。バイポール方式は大地に対し導体が２条使用され、それぞれの導体が大地に対して高い電位を持っており、反対の極性となっている。電流はこの導体を双方向に流れることから、大地に流れる電流を低く抑制することが出来るため、単極で問題となった電蝕や地磁気の乱れなどがない。一方、双極導体それぞれが大地に対して高電圧となるため、それぞれに電気絶縁を施工する必要がある。

直流送電の場合は、電力潮流の反転を行うためには電流の方向はそのままにして送電線の電圧の極性を反転させることで行うことが出来る。ただし反転を行うと、絶縁体内部に変歪電界が生じ電気絶縁性能に影響を及ぼす恐れがあるため、これを考慮したケーブル絶縁体の設計、および極性反転試験などによる性能確認が必要となる。

なお、石狩プロジェクトでは太陽光発電による片方向送電方式で検討を進めたため、極性反転に関する検討は実施していない。



モノポール　　バイポール

図 2.2.2.2- 2　バイポール、モノポール方式の比較

ウ．亘長、ジョイント間距離

冷却ステーションの間隔は長いほど経済的に有利であり（次項参照）、200 km の送電では、冷却ステーション間隔を 20 km 以上とすることで、常電導交流送電に対して、建設コスト上のメリットがあることが試算されている。超電導ケーブルシステムの 1 亘長はこの冷却ステーション間隔と同じく 20 km と考えられる。超電導ケーブル 1 本の長さは下記で示す通り制約があるため、ジョイントを用い超電導ケーブル同士を接続する必要がある。これがジョイント間距離となる。

ジョイント間距離については、まず超電導ケーブルの単長による制限を考慮する必要がある。超電導ケーブルの単長を制限するのは各構成要素である銅フォーマー、超電導導体巻、絶縁紙巻、超電導シールド巻、保護層巻などの各製造装置および出荷用

ドラムサイズや輸送車両の制限によるものが考えられる。製造設備の規模や仕様により定まるため一概に定義が難しい。しかしながらユーザーの要求仕様により設備の設計変更、もしくは新設による対応は可能であるため、検討を進める候補系統の布設形態、単長をまず確認することが重要である。

これら製造面からの制約に加え、陸送によりケーブルを輸送する際には道路交通法による制限も考慮する必要がある。道路は一定の構造基準により作られており、道路交通法により道路を通行する車両の大きさや重さを制限している。この制限を「一般的制限」という。これを超える場合には特別許可を受ける必要がある。表 2.2.2.2-3 に一般的制限、および特別許可実施例をまとめる。

表 2.2.2.2- 3 ケーブル出荷ドラムの輸送制限例

		車両寸法（m）			総重量（t）
		長さ	幅	高さ	
法令による制限(一般的制限)		１２	２．５	３．８	２０
特別許可実施例	昼間輸送	１６	３．０	４．１	３５
	夜間輸送	１６	３．５※	４．２	４５

※車両幅は３．０ｍ

これにより陸送においては特にケーブルを輸送するためのドラムのサイズ、重量が問題となることがわかる。

さらに石狩プロジェクトで採用された、既設の断熱管にケーブルコアを引き入れる方式においては、長尺コアの引き入れ張力が許容張力を超えないよう単長を決める必要がある。

エ．冷却方式と冷却ステーション間距離　★

（ア）　冷却の必要性

超電導送電の通電を担う導体として、高温超電導線材を想定する。代表的な高温超電導線材には Bi 系、Y 系、MgB_2 があり、超電導状態（抵抗ゼロ）で使用するためには、表 2.2.2.2-4 に示す超電導状態となる転移温度、すなわち超電導臨界温度(T_c : critical temperature)以下に冷却して使用する必要がある。

このため、超電導ケーブルシステムを運転するためには、超電導ケーブルコアが収納される断熱管内全長を T_c 以下に維持する必要がある。

表 2.2.2.2- 4　代表的な高温超電導線材材料の臨界温度

高温超電導線材材料	T_c(K)
Bi 系 ($Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_8$)	～110
Y 系　($YBa_2Cu_3O_y$ 及び $REBa_2Cu_3O_y$ (RE:Nd,Sm,Gd 等の希土類元素))	～93
MgB_2	39

（イ）　冷却方式

超電導ケーブルコア全長を臨界温度以下に維持するための冷却方式としては、冷凍機を用いて極低温を生成し、これを線材と接触させることにより伝導冷却を行う冷凍

機伝導冷却方式、極低温ガスを冷媒として用いるガス冷媒冷却、極低温液体を冷媒として用いる液体冷媒冷却などが考えられる。それぞれの冷却方式の概要、長所、課題を表 2.2.2.2-5 にまとめるが、超電導ケーブルシステムにおいては、長手方向を安定して T_c 以下に維持し続ける必要があること、また絶縁特性などの観点から、極低温液体による冷却が好ましいと考えられる。

表 2.2.2.2- 5 冷却方式の比較

	概要	利点	課題
冷凍機伝導冷却	冷凍機を超電導線材に接触させ、熱伝導冷却を行う	冷凍機の種類により 4～100K など幅広い温度選択が可能	長尺冷却の場合遠端温度を T_c 以下にすることが困難
ガス冷媒冷却	長手方向に極低温ガスを流し、全長を冷却	冷媒の選択(H_2、He、Ne、N_2 等)により 4～100 K 程度の温度選択が可能	・熱容量が小さいため、侵入熱によるガス温度上昇が大きい ・高電圧絶縁設計が困難
液体冷媒冷却	長手方向に極低温液体を流し、全長を冷却	・冷媒の選択(H_2、He、Ne、N_2 等）により 4～100K 程度の温度選択が可能 ・熱容量が大きく、長手方向の温度上昇が小さいため長尺冷却が可能	・ガス化しないようサブクール度を維持する運転が必要

表 2.2.2.2-5 の比較検討より、本ガイドラインにおいては、冷却方式として液体冷媒冷却を採用することとする。また表 2.2.2.2-6 に代表的な冷媒の物性値をまとめるが、本ガイドラインでは、Bi 系超電導線材等の銅酸化物系高温超電導線材を用いた超電導ケーブルコアを用いることを念頭に、冷媒としてこれらの T_c より沸点が約 15 K 以上低く、比熱や潜熱が比較的大きく安価な液体窒素を使用することとする。

表 2.2.2.2- 6　代表的な冷媒の物性値（@大気圧 0.101325 MPa）

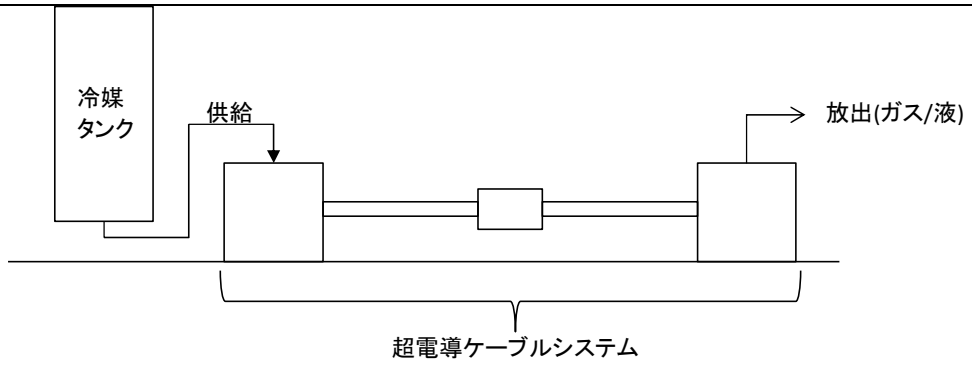
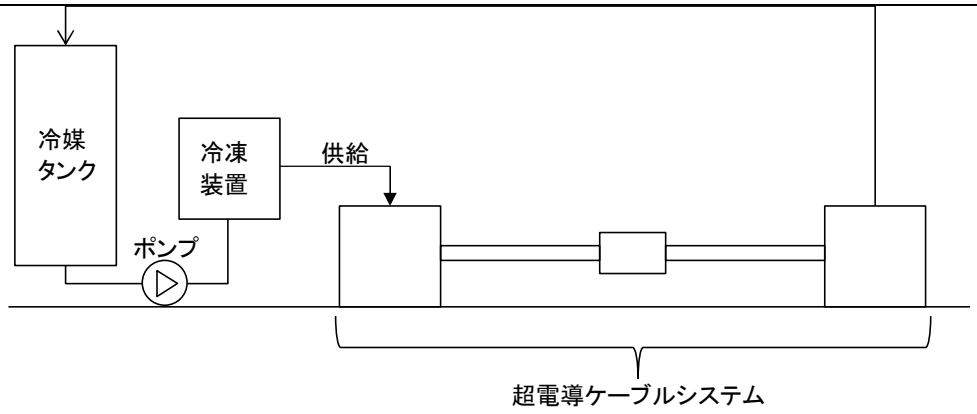
	液体ヘリウム	液体水素*	液体ネオン	液体窒素
密度（kg/m^3)@沸点	125	70.8	1205	806.8
沸点（K)	4.22	20.28	27.09	77.31
凝固点（K)	2.168	13.83	24.56	63.17
比熱（J/g/K)	4.880	9.765	1.85	2.063
潜熱（J/g)	20.416	452.0	86.98	198.64
熱伝導率（10^{-3} W/m・K）@沸点	186.6	118.5	113.2	148.5
粘度（μ Pas)	3.169	12.45	126	142.9

*パラ水素の物性値（大気圧の液体水素は平衡状態で 99.8%がパラ水素）

さて、液体冷媒冷却による超電導ケーブルシステムにおいては、常に一定温度の極低温液体を供給する必要がある。その際に、外部から常に冷媒を補給するオープン方式と、冷却に用いた冷媒を冷凍機等により再度冷却し、循環使用するクローズドサイクル方式があり、それぞれについて表 2.2.2.2-7 にまとめたような特徴、得失などがある。冷却方式の運用においてはこれらの特徴を理解した上で、初期コスト、ランニ

ングコストおよびメンテナンスコストなど経済性についても比較検討を実施したうえで選定されることになる。

表 2.2.2.2- 7　液体冷媒冷却法による超電導ケーブルコア冷却方式の比較

オープン方式	概念図	
	概要	冷媒タンクより、超電導ケーブルシステムに冷媒を常時補給する。蒸発分を補給する場合と、冷媒を圧送し遠端から放出させる方式がある。
	利点	冷凍機、ポンプなど機械を使用しなくて良いので、システムが単純で初期コスト、メンテナンス費用の削減が行える。
	課題	冷媒を常時補給する必要がある。冷媒の潜熱 L(J/kg)、冷却熱量 W(W)とすると、M=W/L (kg/sec)で補給が必要となる。冷媒タンク(CE タンクなど)を設置する。
クローズドサイクル方式	概念図	
	概要	冷凍機やサブクーラ方式による冷凍装置により冷媒を冷却してから、ポンプにより冷媒を超電導ケーブルシステムに圧送する。システム内を冷却した冷媒は冷媒タンクに戻り、再度圧送・冷却されるようにする。
	利点	冷媒を常時冷却することにより蒸発することが無くなる。このため常時冷媒を補給する必要は無い。
	課題	冷凍装置、ポンプを常時停止させることなく運転させる必要がある。それら装置の初期コスト、メンテナンス費用が発生する。

冷凍装置としては、たとえば極低温用冷凍機として Gifford McMahon (GM)、Stirling、Brayton 冷凍方式による冷凍機を用いる冷凍機冷却方式、冷媒を減圧することにより液体温度を下げ、これと循環する冷媒を熱交換させ冷却する、いわゆるサブクーラ冷却方式とに分けられる。冷凍機式の場合は冷凍方式により冷却能力、冷却効率、サイズやメンテナンス方法、期間が異なるため、設備設計時点で利用可能な冷凍機の性能確認を行った上、機種などの選定を行う。サブクール方式については冷媒の減圧装置の設計、熱交換器の設計および補給用冷媒タンクの設計などを行うとともに、冷媒を常時供給する体制などを検討することになる。

表 2.2.2.2- 8　冷媒の冷却方式の比較

	冷凍機冷却	サブクーラ冷却
概要	冷媒ガスの圧縮・断熱膨張により極低温を得、これと循環冷媒とを熱交換させ冷却する	冷媒を減圧することにより冷媒温度を下げ、これと循環冷媒を熱交換させ冷却する
実施例	GM、Stirling、Brayton などの冷凍サイクルを用いる。冷媒ガスとしては He、Ne などが用いられる	減圧・熱交換用タンク、減圧ポンプ、冷媒補給用タンクなどから構成される。
特徴	・電力により冷凍を行うため現地で冷媒を消費しない ・冷凍方式、技術の進展により冷凍効率の向上が見込まれる	・汎用排気ポンプが利用できるので、冗長化が容易 ・冷媒は循環冷媒と同じものを使用するため、窒素であれば安価
課題	・極低温用特殊冷凍機を使用する必要がある ・機械式のためメンテナンスが必要	・冷媒補給用タンク、供給体制が必要 ・機械式のためメンテナンスが必要

ここでは、液体窒素を循環冷媒とし、冷凍機冷凍方式によるクローズドサイクル冷却システムの場合について、さらに記述する。液体窒素は冷却ステーションにおいて、液体窒素用の冷凍機で冷却され、サブクール状態（実液の温度が飽和温度より低い状態）で液体窒素用のポンプにより循環される。サブクール度が大きい、つまり実液の温度と飽和温度との差が大きいほど気化しにくく、冷却状態が安定する。

従って、超電導ケーブル冷却中の温度上昇を考慮すると、液体窒素をより低温に冷却し、系内を加圧することでサブクール度を大きくすることが、重要である。

冷却ステーションの間隔は長いほど経済的に有利であり、200 km の送電では、冷却ステーション間隔を 20 km 以上とすることで、常電導交流送電に対して、建設コスト上のメリットがあることが試算されている。但し、冷却間隔が長いほど両端の温度差が大きくなるため許容できる温度差を検討した上で、冷却システムを構築する必要がある。

液体窒素の温度に関する判断基準は以下の 2 点となる。

① 高温側（ケーブル出口側）で液体窒素を気化させないこと

② 高温側（ケーブル出口側）での超電導ケーブルの臨界電流が許容できること。

運転中はこれらを常時監視する温度計等の計測装置が必要となるが、計測のばらつきや誤差を考慮した余裕のある許容値を設定する必要がある。

なお、同じ超電導線路でも、交流線路では電流負荷によって交流損失が変動し、運転中の熱負荷が変わるため、サブクール度が浅いと液体窒素が局部的に気化することが懸念される。直流線路では定格運転範囲内においては、送電による通電損失及び誘電損失が発生しないため、線路の熱負荷は外部からの熱侵入のみとなるため運転中の熱負荷変動が少なく、この点では設計し易く有利である。従って直流線路においては、上記①②による液体窒素の許容温度上昇 ΔT [K]、断熱二重管の熱侵入量 q [W/m]、冷媒流量 L [l/min]、冷媒循環の圧力損失 Δp [Pa]により、冷却ステーション間隔の上限が決まる。なお、これらについての詳細を 1.2.2.3 (2)項に記載する。

（参考：石狩プロジェクトの例）

以下の運転条件で、安定循環が可能であることが確認された。これにより、冷却ステーション間隔を 20 km とすることが可能であることが検証された。

- 液体窒素循環距離：2 km　流量：4 L/min
（＝循環距離 20 km、流量 40 L/min の模擬）
- 液体窒素温度：
冷凍機出口 66 K　→　ケーブル入口 70 K　→　リターン管出口 83 K
- 系内圧力：0.35 MPa（飽和温度：約 92 K）

以下に本検証試験の概略図を示す。

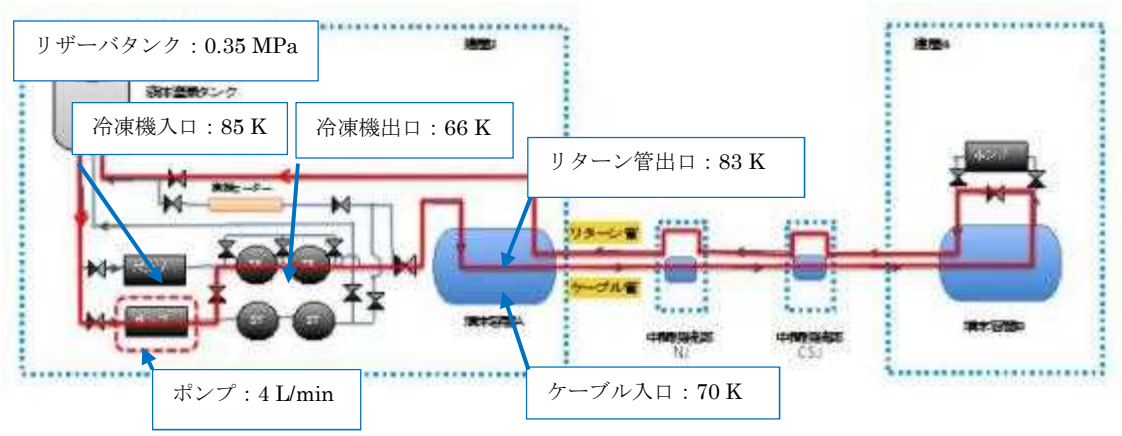


図 2.2.2.2- 3　20 km 循環検証試験概略図

オ．耐震設計の基本方針

前述の通り、電気事業法を適用するため、同法の記載と本設備を照合し、耐震設計については「火力発電所の耐震設計規定 JEAC 3605」を適用することとする。

同規定では以下の項目を決定することで、設計震度が設定される。

・重要度分類　・想定地震動　・地震動のレベルに基づく係数
・地域別補正係数　・地盤別補正係数

カ．設置環境

設計には、以下の設置環境条件を考慮する必要がある。これらの具体的な数値については、設備の設計開始前に設計条件として与えられる必要がある。

- 気象条件（気温、湿度、気圧、風速、積雪）
- 立地条件（敷地レベル、地盤条件、地下水位、凍結深度、塩害）
- 環境規制（排ガス規制、排水規制、騒音規制）

キ．運用方案　★

個々の設計を実施する前に、設備全体の基本仕様と運転方針を定めた運用方案を作成する必要がある。運用方案に含まれる内容は以下の通りとする。

- 送電方式
  - モノポール／バイポール（極性反転の有無）
- 設備構成・配置
  - 対象設備：送電設備、受電設備、機械設備、監視設備
- 操作・監視場所
  - 送電設備：送電入／切操作、データ収集・監視
  - 受電設備：データ収集・監視
  - 機械設備：発停操作、状態監視、警報発報　（送電・受電設備共通）
  - 監視設備：状態監視、警報発報　（送電・受電設備共通）

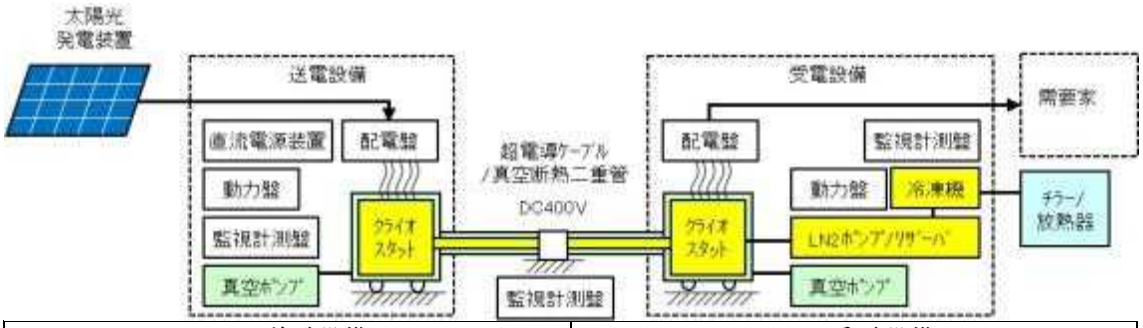
- 操作・監視体制
  - 中央操作室（又は現場）、24 時間監視（又は日勤対応）
- ユーティリティ設備
  - 電気、水、圧縮空気など
- 自動化方針
  - 遠隔発停、インターロックなど
- 冗長化
  - 予備機、計器多重化など
- 異常時対応
  - 異常時の定義と対応（連絡方法、対応要領）
- 将来対応（拡張性）
  - 将来拡張の有無、可能性

（参考：石狩プロジェクトの例）

石狩プロジェクトにおける設備構成・配置を示す。

石狩プロジェクトでは太陽光発電所から需要家への送電を行う回線 1（500 m）と試験用発電機から負荷装置への送電を行う回線 2（1000 m）があり、回線 1 の超電導ケーブルは地中埋設、回線 2 では地上布設となっている。

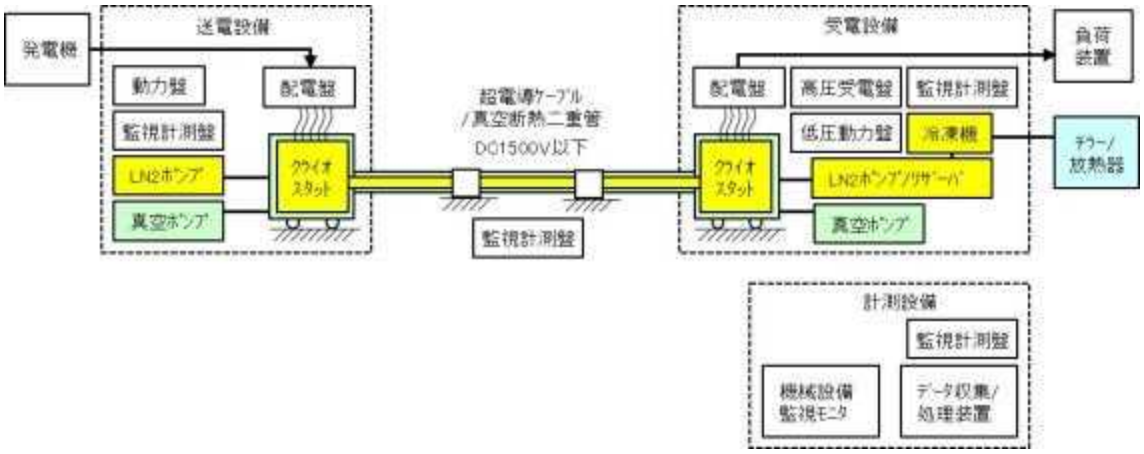
(1) 回線 1：太陽光発電所から需要家への送電



送電設備	受電設備
・ 配電盤（DC 400 V） ・ 監視計測盤 （通信機器、計測器、PLC、UPS） ・ 動力盤（AC 3φ210 V） ・ 端末クライオスタット ・ 真空ポンプ （メカニカルブースターポンプ、 ターボ分子ポンプ、ロータリーポンプ）	・ 配電盤（DC 400 V） ・ 監視計測盤 （通信機器、計測器、PLC、UPS） ・ 動力盤（AC 3φ420 V／210 V） ・ 端末クライオスタット ・ 真空ポンプ （メカニカルブースターポンプ、 ターボ分子ポンプ、ロータリーポンプ） ・ 液体窒素ポンプ ・ 冷凍機（ターボブレイトン式） ・ リザーバタンク ・ チラー／放熱器

図 2.2.2.2- 4　石狩プロジェクトの設備構成（回線 1）

(2) 回線 2：試験用発電機から負荷装置への送電



送電設備	受電設備
・ 電力変換器／配電盤（DC 1500 V） ・ 監視計測盤 （通信機器、計測器、PLC、UPS） ・ 動力盤（AC 3φ210 V） ・ 端末クライオスタット ・ 真空ポンプ （メカニカルブースターポンプ、 ターボ分子ポンプ、ロータリーポンプ） ・ 液体窒素ポンプ	・ 配電盤（DC 1500 V）／負荷装置 ・ 監視計測盤 （通信機器、計測器、PLC、UPS） ・ 高圧動力盤（AC 3φ6.6 kV／420 V） ・ 低圧動力盤（AC 3φ210 V） ・ 端末クライオスタット ・ 真空ポンプ （メカニカルブースターポンプ、 ターボ分子ポンプ、ロータリーポンプ） ・ 液体窒素ポンプ ・ 冷凍機（ターボブレイトン式） ・ リザーバタンク ・ チラー／放熱器
計測設備	
・ 監視計測盤（通信機器、UPS） ・ データ収集／処理装置 ・ 機械設備監視モニタ	

図 2.2.2.2- 5　石狩プロジェクトの設備構成（回線 2）

2.2.2.3 設計

（1）超電導ケーブルコア

本節では石狩プロジェクトを例にとり、超電導ケーブルコアの設計の要点について記載する。

ア．コア仕様：モノポール(単極)設計　★

1.2.2.2(3)項で述べた通り、直流送配電方式にはバイポール方式とモノポール方式があるが、石狩プロジェクトでは太陽光発電電力の直流送電に対応するため、モノポール方式が採用された。

1.2.2.2(3)項で検討した通り、今回検討する直流超電導導体の電気仕様は電圧 20 kV、電流 5 kA をベースとすることにした。石狩プロジェクトでは回線 1 及び回線 2 の 2 系統を試験運用しているが、回線 1 ではフルスペックの仕様でのケーブルコア設計とした。ケーブル亘長はさくらインターネット（株）の設置する太陽光発電装置と、データセンター間を結ぶ区間を考慮し、500 m とした。回線 2 は 1 km 長の地上布設となり、主に液体窒素循環特性などを評価することを主眼としたため、電流容量を 1/2 の 2.5 kA 設計とした。表 2.2.2.3-1 にそれぞれの線路でのコア要求仕様を示す。

表 2.2.2.3- 1　石狩プロジェクト　コア要求仕様

	回線 1	回線 2
コア設計電圧	20 kV	20 kV
コア設計電流	5 kA	2.5 kA
送電容量	100 MVA	50 MVA
亘長	500 m	1000 m
中間接続部	1 箇所	2 箇所

表 2.2.2.3-1 に基づいてコア設計を進めたが、それぞれの設計に対しブレークダウンし設計の詳細方針を確認した。これらを表 2.2.2.3-2 にまとめる。

表 2.2.2.3- 2 石狩プロジェクトのコア設計の主な考え方

	仕様	石狩プロジェクトでの設計コンセプト
超電導線	SEI 標準仕様で設計する	Type HT-CA 線材（Ic≧180 A）
電流設計	5 kA（@77 K）	【I_c（@0.1 μV/cm,77 K）　≧ 5 kA】
電圧設計	DC 20 kV	中部大 200 m の検証試験にて DC 課電(20 kV) 検証済み 絶縁設計は同等とする（PPLP 2 mm 厚）
超電導線の 集合条件	機械特性	コアの捻れ等を抑制するために 従来実績のある「交互撚り条件」を採用する
熱収縮対応	0.3%に耐える	熱収縮機構なしでも I_c 低下なし
曲げ特性	従来コアと同等の取扱い 出荷ドラム胴径対応	許容曲げ径：2.5 m（出荷ドラム胴径を考慮） （限界曲げ径 2 m 以上を確保）
布設対応	布設方法	実績のある布設方法で長尺布設できること

イ．電流設計（Ic）　★

表 2.2.2.3-1、表 2.2.2.3-2 に示す仕様を元に、コアの設計を行った。使用する Bi 系超電導線は住友電気工業(SEI)製 TypeHT-CA とし、I_c は 180～220 A 程度のもの、線材断面サイズは約 4.5 ㎜×0.34 ㎜のものを採用した。

線材の断面構造が薄板状のため、コア中心に円筒型のフォーマーを配置し、その周囲に超電導線材を螺旋状に巻きつける構造とする。これをモノポール導体の往路超電導導体、復路超電導導体構造として採用する。フォーマーは可撓性、コア込み時のテンションメンバとして必要な機械特性などを考慮し、銅より線構造とした。フォーマーと超電導線材間には相互の接触を緩和するためのクッション層を、往路導体と復路導体間には定格電圧 20 kV に耐えうる電気絶縁層をそれぞれ設ける。超電導線材の本数 N は、1 本当たりの許容電流(I_c)と、必要通電電流 I より式 1.2.2.3-1 のように求められる。

$$N > I / I_c \qquad \text{(式 1.2.2.3-1)}$$

なお直流超電導システムの場合、超電導線部分の抵抗はそのほかの構成導体である銅導体や半田などに比べて非常に小さい。このため、線材を接続するための端部処理を行った際、その線材ごとの処理のばらつきなどにより超電導線材に流れる電流が偏よる、いわゆる偏流が発生する可能性がある。偏流が発生すると、特定の超電導線材に多くの電流が分担されるため、設計よりも線材 I_c を超える送電電流値が小さくなり

性能を発揮できない可能性がある。このため実際の超電導コア接続に対しては、偏流の発生しないような導体の接続方法を考慮すると共に、コア I_c 試験により予想された通電特性が得られているかを確認することが重要である。

ウ．電気絶縁設計　★

超電導交流ケーブルの電気絶縁としては、絶縁紙を多層積層してこれに液体窒素を含浸させた液体窒素含浸積層絶縁方式が採用されている。直流超電導ケーブルにおいても、安定性・信頼性から，液体窒素含浸積層絶縁方式を採用することとした。

液体窒素含浸における絶縁紙多層絶縁の直流破壊電界及びインパルス破壊電界はそれぞれ約 100 kV/mm 以上であり、それぞれに対して十分な裕度を持たせるとともに、曲げなどの機械特性を考慮して、2 mm を設計絶縁厚さとした。試験電圧時の最大電界は約 10 kV/mm であり、実際に十分な裕度があることがわかる。絶縁紙材料としては OF ケーブルで実績のあるクラフト紙、PPLP 紙などが候補としてあげられるが、耐 DC 電圧、耐インパルス特性に優れる PPLP を今回採用することとした。

また、液体窒素含浸積層絶縁方式では液体窒素のサブクール度が低いと絶縁紙内で液体窒素が気化し、絶縁特性に影響を及ぼす可能性もあるため、運転温度と圧力を制御し、所定のサブクール度が得られるようにする必要がある。

エ．機械設計（耐張力、最小曲げ直径）

耐張力については、布設時、冷却時の張力をケーブルコアの銅フォーマーが負担する設計とする。1 mm^2 あたりの抗張力にフォーマー断面積を乗じた値が設計上の耐張力となる。ケーブルコアの最小曲げ直径についてはコア外径 d に対し 20 倍までとなる。

（参考：石狩プロジェクトの例）

上記により、回線 1、回線 2 それぞれの超電導コア設計を検討した。銅フォーマー断面積が 130 mm^2 であり、1 mm^2 あたりの抗張力は銅の機械特性から決まり 7 kg/mm^2 であるため、910 kg までの引張張力に耐えることが出来る。引き入時の管路摩擦係数を約 0.6 とすると、コアの布設張力が許容張力内に収まるためのケーブル単長は約 500 m と計算される。

以上の検討により、図 2.2.2.3-1、表 2.2.2.3-3 に示すような石狩プロジェクト向け超電導コアの設計を行った。

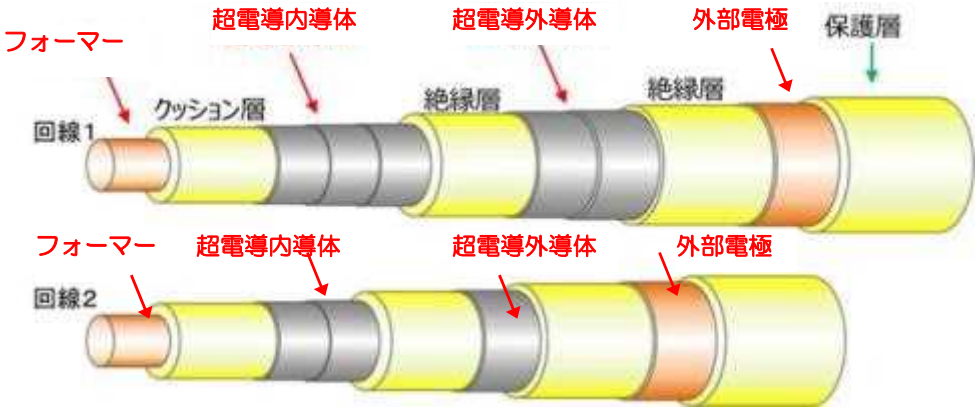


図 2.2.2.3- 1　石狩プロジェクト　コア構造（上：回線 1、下：回線 2）

表 2.2.2.3- 3　石狩プロジェクト　コア仕様

	回線 1　【5kA 仕様】	回線 2　【2.5kA 仕様】
超電導線 DI-BSCCO®	TypeHT-CA（I_c≧180A）	内導体：TypeHT-CA （I_c≧180A） 外導体：New TypeHT-CA （I_c≧220A）
フォーマー	裸銅線円形集合導体（130sq）	
クッション層	PPLP：3mm 厚	
超電導 内導体	1 層目：12 本、300mm (S) 2 層目：12 本、300mm (Z) 3 層目：13 本、300mm (S)	1 層目：12 本、300mm (S) 2 層目：12 本、300mm (Z)
内絶縁層	半導電/PPLP：2mm 厚/半導電	
超電導 外導体	1 層目：17 本、350mm (Z) 2 層目：18 本、350mm (S)	1 層目：15 本、350mm (S)
外絶縁層	半導電/PPLP 2mm 厚/半導電	
外部電極	銅テープ（100μm）	
保護層	クラフト紙：2mm 厚／布テープ：1mm 厚	
外径	42mm	40mm
重量	3.1 kg/m	2.6 kg/m
設計 I_c (1μV/cm @77K)	≧6.6 kA（内導体） ≧6.3 kA（外導体）	≧4.3 kA（内導体） ≧3.3 kA（外導体）

オ．熱収縮対策

ケーブルコアを室温から液体窒素温度まで冷却する際に生じる約 0.3%の熱収縮相当の引張歪みを緩和させ、ケーブル抗張力以下になるよう対応する必要がある。石狩プロジェクトでは緩和方法としては端末クライオスタットを前後可動とする他、ケーブルコアを断熱二重管内でヘリカル変形させる手法を適用した。

(2)断熱二重管

ア．断熱二重管の基本構造

超電導ケーブルコアは超電導状態にするために超電導臨界温度（T_c）以下に冷却する必要がある。冷却方式については、1.2.2.2(3)エ項で述べたように高温超電導送電システムにおいては、冷却効率、ガスの安全性（不燃性、絶縁性）、取り扱いの容易さ、ガス単価等から LN_2 を冷媒として用いる液体冷媒冷却方式が用いられることが多い。いずれの場合でも、断熱性能を高めていかに冷媒の温度上昇を抑えるかが技術のポイントとなる。

一般に熱は対流、伝導、放射の三つの機構により侵入する。超電導送電システムにおいては、それぞれの機構による熱侵入を以下の方法にて低減する。

１）対流：真空断熱を行う。配管を二重構造とし、ケーブルを冷却する内管と外管との間を真空排気する。

２）伝導：内管と外管の支持材等に熱伝導率の低い材料を用い、接触面積を最小限に、また伝導距離をなるべく長くとる。

３）放射（輻射）：放射による熱伝達は赤外線等の放射率が小さな金，銀，亜鉛，ア

ルミニウムなどを用いることにより低減することができる。具体的には以下の方法が用いられる。

①外管・内管の内側を鍍金処理あるいは鏡面加工を行うことにより反射膜をつける。

②内管の外側に多層断熱材（Multi-layer insulator: MLI）や放射シールドをつける

MLI は多層断熱法により熱放射を抑えるもので、一般にポリエステルのような薄いプラスティックフィルムに片面、もしくは両面にアルミニウムを蒸着して作られた反射膜をスペーサ―と呼ばれる不織布等の熱伝導の悪い層を介して幾重にも積み重ねたものである（スペーサを用いず皺加工やディンプル加工等で熱接触を減らす場合もある）。なお、放射による熱侵入量は外管温度を T_H [K]、内管温度を T_L [K]とすると、T_H^4-T_L^4 に比例するため、断熱二重管をなるべく温度が上がらない環境に布設する、あるいは外管表面に遮光塗料等を施工する等により温度上昇を抑えることも、熱侵入量の低減に極めて重要であるといえる。

さて、冷媒を長距離にわたり安定的に循環させるために断熱二重管での熱侵入を可能な限り低くすると共に、循環の圧力損失が少ない設計にする必要がある。その他、断熱二重管の設計において考慮すべきことを表 2.2.2.3-4 にまとめる。なお、断熱性能、圧力損失等については、次項以降にさらに詳細を記述する。

表 2.2.2.3- 4　断熱二重管の設計仕様概略

	項目	考慮すべきこと
全体	制度 熱侵入量 冷媒循環圧力損失 ユニット長（工場製作部）	法規、規格等 冷凍能力、システムの効率 液体窒素循環系との整合性 輸送可能サイズ、重量
外管	内径 肉厚 電磁気的性能 耐環境性 断熱層の到達真空度・高真空維持 放射率 熱収縮	排気コンダクタンス、内部構造 耐圧力、耐荷重 耐雷性、磁気遮蔽（磁性・導電性） 気象条件、土壌の性質等 アウトガス、溶接方法 表面処理、地上布設の場合には、外管表面温度上昇の防止 気象条件、凍結深度
内管	内径 肉厚 表面処理 断熱層の到達真空度・高真空維持 熱収縮・熱膨張	圧力損失、ケーブル径 耐圧力、耐荷重 圧力損失 アウトガス、溶接方法 吸収のための機構
内管サポート	耐荷重 断熱層の到達真空度・真空度維持 熱侵入量 熱収縮	材料強度、内部構造の重量 アウトガス サポート形状、熱伝導率
多層断熱材	断熱層の到達真空度・高真空維持 放射率	アウトガス 枚数、施工方法

また、断熱二重管の様式には大きく分けて、直管（平滑管）タイプとコルゲート管タイプの二つの様式がある（図 2.2.2.3-2）。それぞれの長所、短所を表 2.2.2.3-5 にまとめる。



図 2.2.2.3- 2　コルゲート管（左）と直管（右）の内管の模式図

表 2.2.2.3- 5　断熱二重管の様式と特徴

	直管（平滑管）タイプ	コルゲート管タイプ
長所	・ 熱侵入の低減が容易：外管-内管間距離大きくとれる、サポートの接触部が小さい、MLI の積層枚数増加が容易、放射シールドが組み込み可能 ・ 低冷媒循環圧力損失 ・ 真空排気のコンダクタンス大となる設計が可能	・ 布設場所の地形状況にフレキシブルに対応しやすい ・ 工場でのベーキングが比較的容易であるため、断熱層封切での運用が標準 ・ フレキシブル、かつコンパクト化が可能なため、従来地下ケーブルとの置き換えが可能 ・ 布設工事が容易（現地での溶接箇所が少ない） ・ 布設時に蛇行部を設ける等によりケーブルコアや断熱二重管の熱収縮対応が可能、
短所	・ ユニット長毎に配管の現地溶接が必要 ・ 断熱二重管施工後、ケーブルコア布設が必要 ・ 布設場所の地形状況にフレキシブルに対応することが困難 ・ 管の熱収縮対策が必要 ・ ケーブルコアの熱収縮対策必要 ・ 断面サイズが大きい	・ 相対的に熱侵入の低減化が難しい（サポートの接触面積が大きい、MLI が理想状態から外れやすい） ・ 圧力損失が大きい

（参考：石狩プロジェクトの例）

石狩プロジェクトでは、LN_2 浸漬冷却方式を採用し、将来の長尺超電導直流ケーブルシステムの実証という位置付けから、断熱性能が比較的高く、LN_2 循環の圧力損失が小さい直管タイプを採用することに決定し、設計を行った。

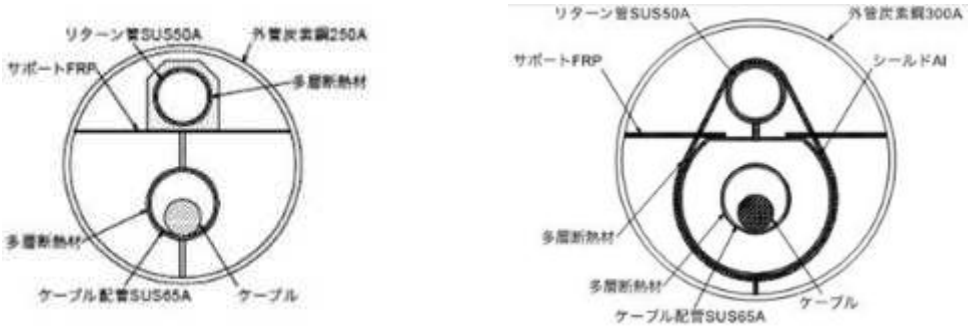
本システムでは、冷却システムを片側の端末側に設置して循環するため、ケーブルを冷却後、LN_2 を冷凍機側に戻すための配管（リターン管）が必要になる。そこで、ケーブルを冷却するケーブル管と二本の内管を一本の外管に入れる構造とした。

図 2.2.2.3-3 の左図（Type 1）に設計した断熱二重管の概略図を示す。LN_2 を流すリターン管は 50 A のステンレス管、ケーブルを入れるケーブル管は 65 A のステンレス管であり、その二本を繊維強化プラスティック（FRP）製のサポートで固定して、250 A の外管に入れている。外管はコスト削減のため、一般配管用鋼管（SGP）を用い、放

射率を下げるため、表面に溶融亜鉛メッキ処理を行った。また地下埋設時の腐食防止のため外側にポリエチレン被覆を施した。内管の外側に巻く MLI については、事前に枚数、重ね方の異なる数種類の MLI について、断熱性能評価を行い、コスト面や施工のしやすさ等も考慮に入れ、21 層又は 9 層のものを使用した。FRP サポートについては、熱伝導と強度の両面から、数値シミュレーション等を利用して検討し、長さと最適化を図った。断熱二重管は道路交通法の一般的制限を考慮して、約 12 m を１ユニットとして工場製作し、各ユニットを現地で溶接により連結して布設することとした。この時、溶接箇所については、ケーブル布設時にケーブルにダメージを与えないように内面突起のない構造とした。

Type 1 の構造の他に、さらに断熱効果を高めるために、管内に輻射シールドを設けた新たな断熱二重管構造（Type 2）を設計した。図 2.2.2.3-3 の右図に断面構造を示すが、輻射シールドを内管と外管の間に設け、リターン管で冷却することでケーブル管と輻射シールドの温度差を小さくし、ケーブル管への熱侵入を低減する。シールド付き断熱二重管はリターン管とケーブル管のサイズはそれぞれ 50 A と 65 A とシールドなしと同じであるが、シールドを入れるため外管サイズは 300 A と一周り大きいサイズになっている。

これら二種類の断熱二重管の緒元を表 2.2.2.3-6 にまとめる。



Type１：輻射シールド無し　　Type 2 ：輻射シールド付き

図 2.2.2.3- 3 断熱二重管断面概略図

設計した二種類の構造について 12 m のテスト管を試作し、熱侵入量の評価試験を行った。なお、シールド付き断熱二重管については、MLI の施工の検証も実施した。その結果、断熱二重管 1 m あたりのケーブル管、リターン管合わせた熱侵入量の測定結果は多層断熱材の施工方法に依存し、シールド無しについて 1.3～1.5 W/m、シールド有りについて 0.7～1.0 W/m であり、目標仕様を満たすことが確認された。特に、シールド付き断熱二重管では、ケーブル管への熱侵入量は 0.04 W/m 程度と、非常に小さいことが分かった。

これらの評価試験の結果を元に、コストに関する考慮を加えて、最終設計を決定した。

表 2.2.2.3- 6　断熱二重管構造の緒元

		輻射シールド無し		輻射シールド付き	
内		ケーブル管	リターン管	ケーブル管	リターン管
	材料	配管用ステンレス鋼管　JISG3459-SUS304　TPS			
	外径	φ 76.3 mm (65 A)	φ 60.5 mm (50 A)	φ 76.3 mm (65 A)	φ 60.5 mm (50 A)
	肉厚	2.1 mm	1.65 mm	2.1 mm	1.65 mm
	断熱方式	多層断熱材 (21 層又は 9 層)	多層断熱材 (21 層)	多層断熱材(21 層)、アルミ製シールド	多層断熱材 (21 層)
	支持方式	FRP 等低熱伝導性材料による支持			
	熱収縮対応	ベローズ			
	両側接合部	スリーブによる溶接構造			
	設計圧力	内圧　0.5 MPa			
	設計温度	−210～40 ℃			
外	材料	ポリエチレン被覆鋼管 JISG3452−SGP 溶融亜鉛メッキ			
	外径	φ 267.4 mm（250 A）		φ 318.5 mm(300 A)	
	肉厚	6.6 mm		6.9 mm	
	設計圧力	内圧：−100 kPa			
	設計温度	−0～40 ℃			

イ．断熱性能（熱侵入量）

超電導直流送電システムにおいては、電流負荷による損失がほとんどないため、冷却のためのエネルギーが超電導直流送電の実質的な損失になるとともに、冷却循環システムの仕様に密接に関連する。従って熱侵入量はシステムの効率に直接結び付く重要なパラメータである。

断熱二重管に侵入した熱により循環している冷媒の温度が上昇するが、その上限について下記の点に留意する必要がある。

- 浸漬冷却の場合は冷媒のガス化により、ケーブルの絶縁性能の低下が起こる。従って、ケーブル管中でのガス化を防ぐためケーブル管出口温度における冷媒の圧力が飽和圧力以下にならないこと。
- 一般に超電導ケーブルコアの臨界電流値（I_c）は温度上昇とともに低下する。従って、ケーブル管出口温度での I_c 値が定格電流値を下回らないこと。

（参考：石狩プロジェクトの例）

将来の長距離システムの冷却ステーション間隔 20 km を仮定し、ケーブル入口での LN_2 温度を 70 K、出口温度を 83 K 以下 （回線 2 において、定格電流 2500 A を流せる上限）（図 2.2.2.3-4）、液体窒素流量を 40 L/min とすると、1.44 W/m 以下にする必要がある。

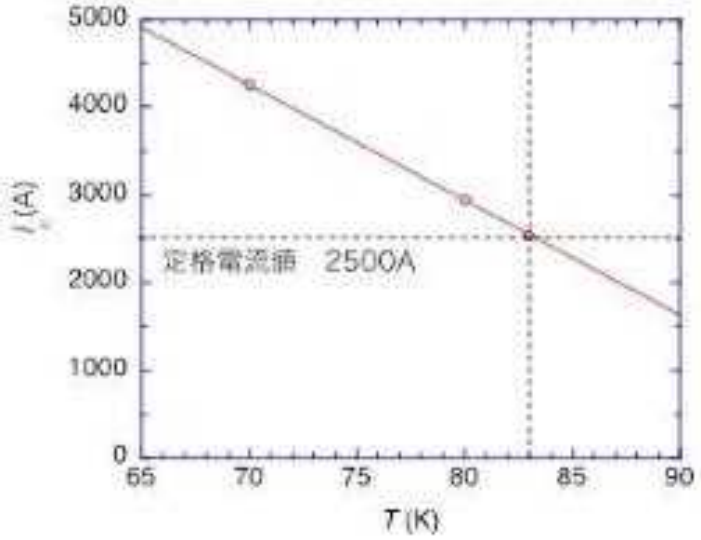


図 2.2.2.3- 4 石狩回線 2 のケーブルコアの I_c 値の冷媒温度依存性

なお、I_c 値は閾値を 0.1μV/cm として求めた

ウ．冷媒循環圧力損失

液体浸漬冷却において冷媒を長距離にわたり安定的に循環させるために断熱配管での熱侵入を可能な限り低くすると共に、循環の圧力損失が少ないシステムを構築する必要がある。冷媒の圧力損失は管摩擦係数を f、配管長を L [m]、液密度を ρ [kg/m^3]、液の速度を v [m/s]、水力直径を D_h [m]とすると

$$\Delta p = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho v^2}{2} \qquad \text{(1.2.2.3-2)式}$$

と表すことができる。配管入口出口での液温上昇 ΔT [K]は配管での熱侵入量を q [W/m]、配管断面積を A [m^2]、比熱を C_p [J/kg/K]とすると

$$\Delta T = \frac{qL}{vA\rho C_p} \qquad \text{(1.2.2.3-3)式}$$

であり、これを代入すると

$$\Delta p = f \frac{L}{D_h} \frac{\rho}{2} \left(\frac{qL}{\rho A C_p \Delta T} \right)^2 \qquad \text{(1.2.2.3-4)式}$$

と表される。C_p と ρ は物性値であり、また ΔT は冷凍機出口の冷媒温度とケーブルの仕様で決まるため大きく変えることができない。配管の設計により変えることのできるのは管摩擦係数 f、管の配管断面積 A（又は直径）、熱侵入量 q である。 (1.2.2.3-4)式より、配管の熱侵入量を減らすことは、その 2 乗で圧力損失を減らすことができるため効果的である。又、配管径のほぼ 5 乗で圧力損失は減少するため、管径を大きくすることで圧力損失を減らすことができる。但し、管径を大きくすると比表面積が増大し熱侵入を増加させる可能性があるため、設計においては、圧力損と熱侵入の双方を考慮に入れて配管径の最適化を行う必要がある。

（参考：石狩プロジェクトの例）

石狩プロジェクトにおいては、圧力損失の低い直管二重管を採用した。また、LN_2 循環系の仕様（LN_2 循環ポンプの揚程：～100 kPa、設定圧力：250 kPa、内管耐圧：500 kPa）より管路の圧力損失を 100 kPa 以下になるように設計を行った。

上述のように、管路の圧力損失はケーブルの直径、およびケーブル管の直径に依存する。同様の直管構造をもつ中部大学の 200 m システムでの実験値(内管径：57.2 mm

Φ)の測定データをもとに、20 km でΔT～10 K とした場合の、循環系の仕様との整合性を考慮して、65 A(内管径：72.2 mmΦ)とした。

本プロジェクト回線 2 で実測した流量に対する配管抵抗を図 2.2.2.3-5 にプロットする。また、得られた total system のデータから予測される配管を長距離化した場合の抵抗曲線を計算した結果も合わせて示す。この抵抗曲線と循環ポンプの Q-H 特性との交点が循環システムの運用点となる。

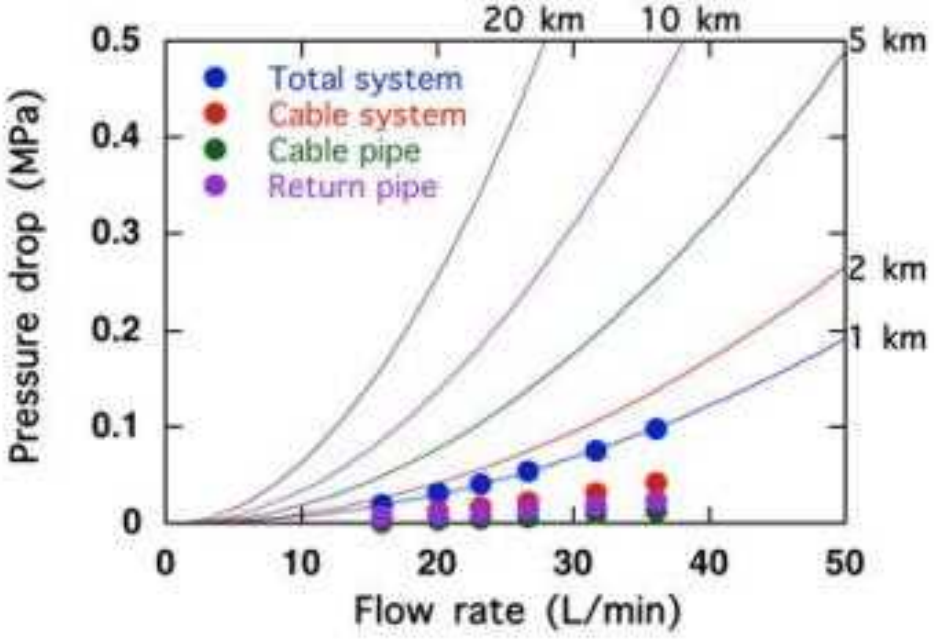


図 2.2.2.3－ 5　石狩システム（回線 2）の LN_2 循環の圧力抵抗曲線

エ．設計圧力（内管）

設計圧力は運転圧力（リザーバタンクの設定圧）に循環ポンプの揚程、循環系の圧力損失、冷媒温度と飽和圧力を考慮に入れて定める必要がある。

（参考：石狩プロジェクトの例）

石狩のシステムでは冷媒の運転圧力を 0.25 MPa とし、循環系の仕様および LN_2 の飽和圧力に対する裕度を考慮に入れ、0.5 MPa を内管の設計圧力とした。

オ．真空度

図 2.2.2.3-6 に様々な内管の形態に対する単位長さ当たりの熱侵入量の真空度依存性の例を示す。低真空の分子流領域では気体分子の移動・衝突による熱伝導が支配的であり、熱侵入量は気体分子の密度、つまり真空度に依存する。圧力が 10^{-2} Pa 以下になると、放射による熱侵入が支配的となり、圧力依存性はなくなる。従って、十分な断熱性能を得るためには、10^{-2} Pa 程度の真空の維持が必要である。

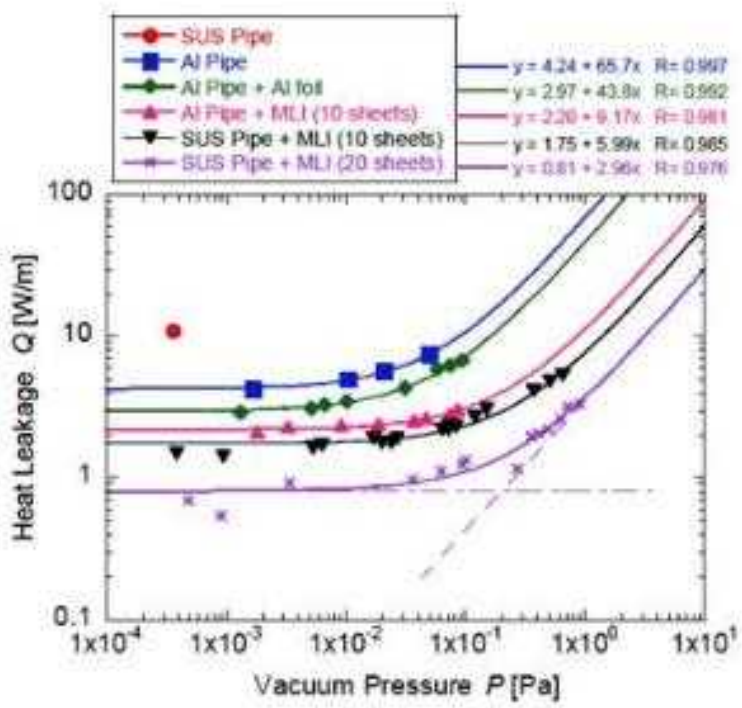


図 2.2.2.3- 6　断熱二重管への熱侵入量の真空度依存性[1]

長距離の管路における真空度の達成・維持のためには、1）排気コンダクタンス、2）ポンプの排気速度、3）アウトガス、4）リークがポイントとなる。これらの条件により、到達真空度が決まる。

1）排気コンダクタンス

内半径 a[m]、長さ l[m]の管内を流れる気体の流量を Q [Pa·m³/s]とすると排気コンダクタンス C は

$$C = Q/(P_1 - P_2) \qquad (1.2.2.3\text{-}5)\text{式}$$

で表される。ここで P_1、P_2 は管の両端の圧力である。

コンダクタンスは配管の幾何学的構造による他、気体の種類、状態などによっても異なる。排気コンダクタンスをあげるためには、十分に管径を大きくする必要がある。また長さにも依存するため、排気速度等も考慮に入れて適切な間隔でポンプを設置する必要がある。

2）排気速度

排気速度は排気系の特定の断面を流れる気体流量をその位置の圧力で割ったものである。配管のコンダクタンスにより、実質的な排気速度（有効排気速度）（S_T [m³/s]）は真空ポンプの性能による排気速度よりも小さくなる。従って、いくらポンプを大きくしても配管のコンダクタンスによる制限を受けてしまうため、真空ポンプの接続口径や真空ポンプとの接続配管についても、それを考慮した設計を行う必要がある。

3）アウトガス

真空ポンプで排気するときに到達出来る圧力限界を到達真空度という。この到達真空度は断熱層内の構成材料からのアウトガス（放出ガス）量と真空ポンプの有効排気速度によって決まる。従って、断熱二重管の場合には、管の壁面、サポート部材や

MLI 等からのアウトガスをいかに減らすかが到達真空度の決め手となる。特に MLI は表面積が非常に大きいため水分や油分等が吸着しないよう取り扱いに注意する必要がある。また配管材料や表面処理についても、アウトガスが少なくなるように留意が必要である。内管表面はほぼ冷媒温度となっているため、いわゆるクライオポンプ効果により水分や二酸化炭素等は吸着されるが、外管側は常温であるため、表面の汚染や外管材料による放出ガス量が到達真空度に影響を及ぼす。断熱層内の壁面からのガス放出量を少なくするためには、ベーキングが大変有効である。また断熱層内の真空維持のため、ガス吸着材（ゲッタ）を使用する場合もある。

配管の真空封止を行うか、真空ポンプを接続した状態で排気を続けるかによって、このアウトガスへの対処法が変わるため、設計においてはどちらの方法をとるか方針決定する必要がある。

4）リーク

リークは製作・工事において、十分な施工管理を実施していれば、本来無いかあったとしても極めて小さいものである。リーク箇所としては断熱二重管の接続部の溶接不良箇所の他、計測配線のフィードスルー部、計測機器・真空排気系の接続箇所等が考えられる。十分な施工管理を行う他、取り付ける環境の温度や真空度にあわせて適切なシール法および、バルブの選定が必要である。

（参考：石狩プロジェクトの例）

石狩プロジェクトにおいては、断熱二重管のベーキングを実施せず、アウトガスの放出による真空度の劣化にはターボ分子ポンプにより常時排気を行うことで対応することとした。

断熱二重管は排気コンダクタンスの大きい直管タイプの断熱二重管を採用し、500 m の回線 1 においては、ジョイントを挟んで約 200 m と約 300 m の 2 区間、1 km の回線 2 においては、コアストップジョイントを挟んで、約 500 m ずつの 2 区間に真空ユニットを分けて排気を行った。また　MLI 層の残留ガスの問題について、極低温での飽和蒸気圧の低い炭酸ガス置換を行い、クライオポンプ効果により対処した。真空度の監視は各ユニットの両端にて行い、上記方法により真空排気口と反対側の端部にて 1.5×10^{-3} Pa 程度の高真空を得た。

カ．熱収縮対策

断熱二重管においては、内管は冷媒温度となるため熱収縮を吸収する必要がある。また曲がり部においては、長手方向のみならず、半径方向にも側圧がかかるため、サポートの強度設計においてそれを考慮する必要がある。

また、埋設管路の場合には外管表面の温度変化がほとんどないが、地上布設を行う場合には、昼夜の気温変化による外管の伸び縮みに対応する設計が必要である。

（参考：石狩プロジェクトの例）

12 m ユニット単位で外管と内管の熱収縮差を緩和する方針で、設計を行った。具体的には、内管であるケーブル管、リターン管のそれぞれにベローズを入れ、ユニットの片端に外管との固定部を設ける設計とした。

参考文献

[1]平成 24 年度　文部科学省　私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「低炭素化社会のための超伝導直流送配電システムの研究開発」研究成果報告書

(3)端末クライオスタット

ア．端末クライオスタットの基本構造と断熱性能

端末クライオスタットは、断熱二重管の終端部であり、超電導ケーブルコアの室温部への電流リード部、冷媒の出入り口およびケーブルコア端部の把持部など備えた容器である。電流リードについては次節に記述する。

外部電源からは、電流リードを介してケーブルコアに接続されるが、浸漬冷却の場合には、ケーブルコアが冷媒に浸漬された状態を保つため、ケーブルコアを収納する部分（内槽）は冷媒を溜めることが可能であり、外部とは真空断熱されるような構造をもつことが条件である。

断熱設計についての考え方は前節の断熱二重管と同様であるが、端末クライオスタットは大型のため放射による熱侵入が多く、かつ内槽は外槽とサポートで接触している他、冷媒循環路、電流リードやケーブルの把持部と繋がるため熱伝導による熱侵入量も大きくなりやすく、設計上の工夫が必要である。

また電流リード部は高電圧・高電流となるため、電気絶縁、通電設計も重要となる。さらに、ケーブルコア端末を固定し冷却昇温時のケーブルコアの軸力が端末部にかかるため、その緩和方法についても考慮の必要がある。

これら、端末クライオスタット設計において考慮すべきことを表 2.2.2.3-7 にまとめる。

表 2.2.2.3- 7　端末クライオスタットの設計仕様概略

項目	考慮すべきこと
制度	適用法規、規格
熱侵入量	冷凍能力、システムの効率 冷媒循環系との整合性 電流リードの方式・構造
到達真空度	断熱性能、絶縁性能維持（パッシェンの法則(電流リードが真空絶縁の場合))
耐荷重	ケーブルコアの張力、自重、サポート構造
耐圧（設計圧力） 絶縁方法 課電性能	システムの設計圧力との整合性
ケーブルコア把持部の耐張力	ケーブルコアの熱収縮対応
可動機構	ケーブルコアの熱収縮対応

（参考：石狩プロジェクトの例）

熱侵入量低減のため、電流リードはペルチェ素子を用いた低熱侵入型電流リード（以下、PCL と略記）を採用することに決定し、端末クライオスタットについては、中部大学にて実証済みの 200 m 級超電導直流ケーブルシステム実験装置（CASER 2）の構造をもとに、電流リード部を除く LN_2 層への熱侵入量を一台あたり 50 W 以下として設計を行った。また内槽の設計圧力は断熱二重管や冷却循環系と同様に 0.5 MPa とした。

本システムでは超電導ケーブルコアを構成する超電導線材と PCL を一対一で接続する。従って、超電導線材 1 本毎に銅編組電流リード線（断面積 22 mm^2）を半田接続し、それを内槽フランジの電流端子を介して、断熱層側に設置した PCL と接続した。このとき、絶縁および発熱を考慮して内槽内にて電流リードが完全に LN_2 に浸漬した状態になるように、電流リードの取り出し方向を端末クライオスタット容器の水平方向にし

た。また超電導ケーブルコアの内導体と外導体とは別々のフランジに接続する。PCL 部の絶縁方法は真空絶縁とし、PCL は外槽フランジの電流端子を介して、外部の電源と接続される。

表 2.2.2.3-8 に端末クライオスタットの設計条件をまとめる。図 2.2.2.3-7 に外槽、図 2.2.2.3-8 に内槽写真を示す。また図 2.2.2.3-9 に内槽を外槽に組み込んだ状態の写真を示す。

表 2.2.2.3- 8 端末クライオスタットの設計条件（石狩プロジェクト）

①	冷媒：液体窒素
②	設計圧力：0.5 MPa（耐圧部）
③	設計温度：-210 ℃（63K）～40 ℃
④	運転温度：－203 ℃～－196 ℃
⑤	内容積 ：耐圧部 約 400 L
⑥	概略外形：横置き円筒型 外槽 内径 1200 mm × L4000 mm × 6 mm, 内槽 外径 406.4 mm × 5 mm
⑦	断熱方式：真空断熱＋多層断熱材（MLI）
⑧	主要材質：耐圧部 SUS304 相当、架台部 SS400 相当、断熱サポート部 GFRP
⑨	安全機器：耐圧部の保護に安全弁を設けること
⑩	計測 ： LN_2 用の温度計・圧力計を取付けること
⑪	電流導入部を除く LN_2 部への熱侵入量：50（W/台）以下（目標値）
⑫	電流導入部：低熱侵入型電流リード（ペルチェ電流リード）を採用
⑬	課電性能（高圧部）：DC 20 kV×5 min、インパルス 100 kV
⑭	軸方向可動距離：300 mm(500 m 用)、500 mm(1 km 用)



図 2.2.2.3- 7 端末クライオスタット外観

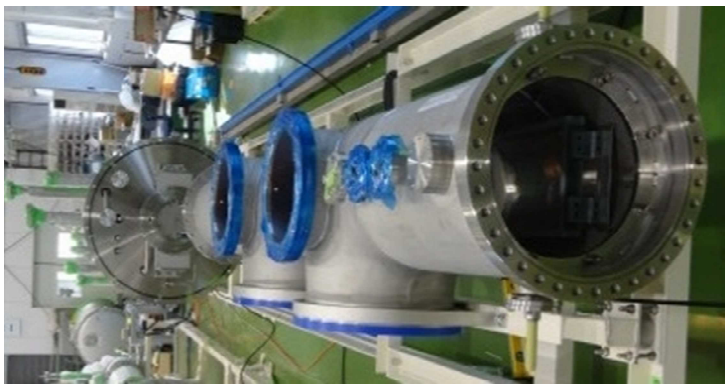


図 2.2.2.3- 8 端末クライオスタット（内槽）外観



図 2.2.2.3- 9　端末クライオスタット外槽に内槽を組み込んだ状況

イ．真空度
端末クライオスタットの断熱層の真空度についても、断熱二重管同様、十分な断熱性能を得るために、10^{-2} Pa 程度かそれ以下の高真空が必要である。

（参考：石狩プロジェクトの例）
石狩のシステムでは電流リード（PCL）は断熱層にて真空絶縁しており、ポンプで常時排気することで 10^{-3} Pa 以下に保っている。断熱性能に加え絶縁破壊防止のため、パッシェン曲線に基づき、放電しやすい真空度を避けた 10^{-2} Pa 以下の高真空を維持する必要がある。

ウ．絶縁設計
　端末クライオスタットは送電電圧・電流、ケーブルコアの端末処理方法と電流リードへの接続方法、電流リードの絶縁方法に合わせて絶縁設計する必要がある。

（参考：石狩プロジェクトの例）
　本システムでは前述のように超電導ケーブルコアを構成する超電導線材と PCL を一対一で接続するため、LN_2 層においては超電導線材 1 本毎に銅編組電流リード線（断面積 22 mm^2）を半田接続し、それを内槽フランジの LN_2 層側の電流端子に圧着端子により接続、内槽フランジの断熱側で PCL と接続した。PCL は断熱層に設置され、外槽フランジの電流端子を介して、外部の電源と接続した。（図 2.2.2.3-10 に概略図を示す）

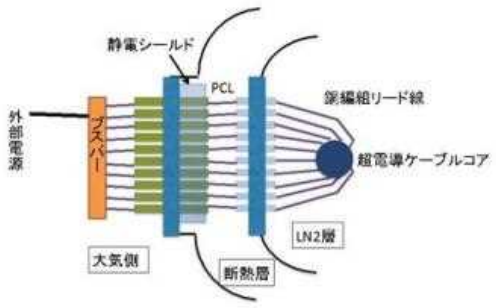


図 2.2.2.3- 10　石狩プロジェクトにおける超電導ケーブルコアと
電流リード（ペルチェ電流リード；PCL）の結線概要図

本構造における LN_2 層、断熱層の絶縁設計（DC 20 kV）は以下の通りである。

（ア）LN_2 層

LN_2 層においては、ケーブルコアおよび引き出し銅編組線は LN_2 により絶縁されることを前提に、設計を行った。内槽の内側はカプトンシートにより絶縁施工するとともに、ケーブルコアは FRP 製の台座上に設置、ケーブル終端部（把持部）には絶縁継ぎ手を入れた。　ケーブルコアの端末処理部の各相の絶縁構成は FRP 部材および補強紙で構成した。また、補強絶縁ストレスコーン最外層に接地層を設け、接地層から引き出す接地線（8 mm^2）はケーブルコア接地用電流端子に接続した。各超電導線材に接続した銅編組線はカプトンテープによって絶縁加工した。また、内槽は外槽を介して接地した。

ケーブルコア終端接続構造については、下記の試験において検証を行い、設計仕様を決定した。

①ケーブルコア終端接続構造連続通電試験

本設計のコア終端接続構造で試作コアを用いた連続通電検証サンプルを製作し、連続通電試験を実施した。5 kA-8 時間の連続通電を実施し電圧変動がないこと、通電前後で超電導線の臨界電流特性にダメージがなく良好に通電できることを確認した。

②ケーブルコア終端接続構造課電試験

本設計のコア終端接続構造で試作コアを用いた課電試験サンプルを製作し、課電試験を実施した（図 2.2.2.3-11 参照）。

試験構成としてペルチェ端末と課電試験端末を組立てオープンバス容器に入れ往路導体 37 本と復路導体 35 本編組線の離隔は端末クライオスタット構造と合わせて 830 mm とする。試験方法は「復路導体」を高電圧部、また「往路導体」および「電界遮蔽層」を接地部として LN_2 含浸状態で DC 及びインパルス（Imp）の課電試験を実施し DC 20 kV×5 min 良好、Imp±100 kV･各 3 回良好の結果を得た。

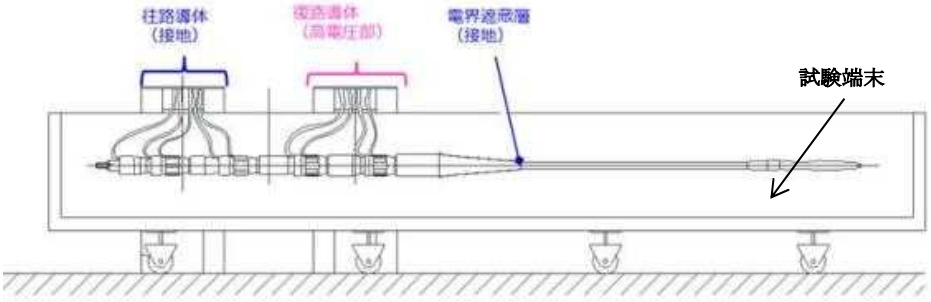


図 2. 2. 2. 3− 11　課電試験構成図

③　ケーブルコア終端接続構造機械試験

ケーブルコア終端接続構造は線材端末クライオスタットの電流端子を介してペルチェ電流リードに接続し、ケーブルコアを構成する超電導線材 1 本毎に銅編組電流リード線（断面積 22 mm^2）が半田接続で引き出される為、端末クライオスタットに引き止められるのはケーブルコアのフォーマー部を 25 トンの圧縮ホルダーと圧縮ダイスと油圧ポンプで圧縮固定したスリーブとなる。そのため圧縮スリーブが 3 トンの引張力に対して引き抜けたり破断したりしないかどうかを確認するため、試験用サンプルを作成して引張機械試験を実施した。

試験結果は良好で、常温 3 トンの引張力に対してスリーブの圧縮部やその他の部位に引き抜けや破断等の不具合が発生しないことを確認した。

（イ）断熱層

PCL は真空絶縁のため、断熱層内部はパッシェンの法則より、10^{-2} Pa 以下の高真空を維持する必要がある。断熱二重管と端末クライオスタットの断熱層間には隔壁を設けて区切り、端末クライオスタットは断熱二重管とは別系統で常時真空排気を行った。複数の PCL を用いるため、静電シールドを用いて電場が一様となるようにした。静電シールドの設計は数値解析を行い、電界絶対値が最大 0.9 kV/mm であった。またモデル試験にて DC 20 kV の耐電圧を確認した。（課電試験の詳細は 2.4 節に記述する。）

（ウ）LN_2 層/断熱層間フランジ

LN_2 と断熱層間のフランジにはセラミックス碍子付き電流導入端子（市販品）（電流容量:210 A／端子（LN_2 温度）、耐電圧 DC 20 kV）を介して接続を行った。

（エ）断熱層／大気間フランジ

FRP 製の絶縁フランジを用いて PCL と外槽容器間を電気絶縁し、十分な離隔をもって電流導入端子を配置した。取り付ける絶縁フランジの仕様は表 2.2.2.3-9 の通りである。なお、各仕様は絶縁および DC 耐電圧は PCL を取り付けた状態での仕様である。

表 2.2.2.3− 9　PCL 用絶縁フランジの仕様

項目	仕様
①気密	1×10^{-3} Pa/m^{3}sec. 以下
②絶縁	≧2000 MΩ
③DC 耐電圧	20 kV

エ．ケーブルコア熱収縮対策

室温から冷却する際、超電導ケーブルコアは熱収縮し、端末固定部のケーブルコアの軸方向に大きな張力がかかる。端末固定部はその張力によってケーブルコアが抜けないような構造にする必要があるとともに、ケーブルコアの抗張力以下になるよう対応する必要がある。

（参考：石狩プロジェクトの例）

室温から運転温度まで冷却する際、ケーブルコアの熱収縮率は約 0.3%である。これについて、石狩プロジェクトでは、端末クライオスタットをケーブルコアの軸方向に可動式にするとともに、端末においてロードセルにてケーブルコアにかかる力を監視し、一定値を越したら端末クライオスタットを移動させて力を一部緩和させる方法をとった。具体的には、端末クライオスタット全体をレールにのせ、断熱二重管との接続部にベローズを用いることで前後に移動できるようにする。なお、数百 m のケーブルコアにおいては、この方法で熱収縮分をすべて吸収すると移動距離が大きくなって現実的ではないため、本方法に加えて、1.2.2.3(1)オ項に記述するヘリカル変形を実施することにより熱収縮対応を行うこととし、ヘリカル変形による熱収縮の吸収分を

考慮にいれ、回線 1（500 m）については端末の可動距離を 300 mm、回線 2（1 km）は 500 mm とした。

オ．耐震設計

端末クライオスタットは熱収縮対応で移動後に対地固定することで耐震性を持たせる必要がある。本設備は電気事業法適用のため、耐震設計は 1.2.2.2(3)オ項に記載の通り、「火力発電所の耐震設計規定 JEAC 3605」によるものとする。

(4)電流リード

ア．電流リードの種類と特徴 ★

電流リードとは室温の電源から極低温の超電導ケーブルコアに温度差をまたいで電流を供給する装置である。電流リードは大きな温度勾配がある中で電流を輸送することになり、端末クライオスタットへの熱侵入の主な原因の一つになる。この熱侵入は、直流の場合には、電流リードを通じての熱伝導と、電流リードに通電する際のジュール発熱により発生する。それぞれについて、以下の方法で低減化する。

① 伝導熱：熱伝導率の大きい材料を使用するとともに、電流リードの断面積を小さくし、長さをできるだけ長くする。

② ジュール熱：電気抵抗率の小さい材料を使用し、電流リードの断面積を大きくし、長さを短くする。金属の場合は、電気抵抗率は温度上昇とともに増大する。ジュール熱によって、電流リード自身の温度が上昇すると、電気抵抗率が増大するため、熱暴走の恐れがある。従って、電気抵抗率の低い銅やその合金を使用するのが一般的であり、また、熱暴走を防ぐため、電流リード部に冷たいガスを流して冷却する方法がとられることもある。

一般に、電流リード材料として電気抵抗率が低く、加工性やコスト面でも良い銅やその合金が使用されている。しかし、熱伝導率が高いため、電流リードの断面積を小さく，長さを長くすればよいが，そうすると抵抗が増大しジュール熱は大きくなる。従ってこの背反する要求を考慮して最適構造を設計する必要がある。最適設計を行った場合の銅リードの熱侵入約 50 W/kA である。

近年になって、低熱侵入型電流リードとして、高温超電導電流リードやペルチェ電流リード（PCL）が提案されている。銅リード、ペルチェ電流リード、高温超電導電流リードの概略構造を図 2.2.2.3-12 に示す。ペルチェ電流リードは銅リードの上部（高温端）にペルチェ素子を挟みこんだ構造、酸化物超電導電流リードは銅リードの下部（低温端）に超電導材料を用いた構造となっている。それぞれの原理、長所、短所を表 2.2.2.3-10 にまとめる。



図 2.2.2.3- 12　主な電流リードの構造概略図

表 2.2.2.3- 10　主な電流リードの種類と特色

	銅電流リード	ペルチェ電流リード	高温超電導電流リード
侵入熱低減の原理		低熱伝導率のペルチェ素子を用いることにより、外部からの熱侵入を低減 ペルチェ効果により下部の熱の汲み上げ	抵抗 0 でかつ小断面積、低熱伝導率の高温超電導材料を用いることにより、ジュール熱と伝導による熱侵入を低減
長所	・ 技術的にほぼ確立 ・ 交流・直流問わず使用可 ・ 高い機械強度 ・ 安価	・ 低熱侵入	・ 低熱侵入
短所	・ 侵入熱が大きい	・ ペルチェ効果を利用するため、電流の極性に合わせて n 型、p 型のペルチェ素子を用いる必要があり交流や電流反転のあるシステムには不適 ・ 金属と比較して機械強度が低い ・ ペルチェ熱排熱のため、上端を強制冷却する必要がある	・ 超電導状態にするため、臨界温度以下に冷却する必要がある ・ 金属と比較して機械強度が低い ・ 現在開発されているものが超電導磁石等の直流電流用途に限られている

(参考：石狩プロジェクトの例)

石狩プロジェクトにおいては、将来の長尺システムの検証の他、超電導直流送電システムの用途の一つである大容量電力送電システム（大電流応用）を視野にいれ、低熱侵入型電流リードの PCL を採用した。

イ．電流リードの基本仕様　★

電流リードの仕様である設計電圧、設計電流、通電容量、熱侵入量は線路仕様に適合する必要がある。電流リードは断熱層を貫通するが、高電圧となるため、線路の電圧仕様により、絶縁方法を選択する必要がある。

（参考：石狩プロジェクトの例）

石狩プロジェクトのケーブルコア仕様は 1.2.2.3(1)ア項に示す通りである。それに合わせて、PCL の仕様を表 2.2.2.3-11 のように定めた。断熱層における絶縁設計は真空絶縁、また侵入熱量については 35 W/kA 以下を設計仕様とした。

表 2.2.2.3− 11　電流リード要求仕様

	回線 1	回線 2
電流リード設計電圧	20 kV	20 kV
電流リード設計電流	5 kA	2.5 kA
送電容量	100 MVA	50 MVA
熱侵入量	35 W/kA/端子以下	35 W/kA/端子以下

本システムでは超電導ケーブルコアを構成する超電導線材と PCL を一対一で接続した。石狩のケーブルコアは、複数の超電導線材を並列接続した構成となっており、超電導線材の並列回路と見なすことができる。安定した通電を行うためには、並列回路を構成する各超電導線に電流を均一に流すこと（偏流防止）が重要である。ここで、偏流の度合いは、直流ケーブルでは並列に接続された各素線の抵抗（インピーダンス）成分が支配的となる。長尺のケーブルコアにおいては、抵抗のばらつきは、ジョイント抵抗や素線の接続部分の抵抗のばらつきによるが、それらは 1 μΩ以下の低抵抗であるため、ばらつきを完全に無くすことは大変難しい。一方、PCL の抵抗は 0.5 mΩ程度と超電導線材と比較して大きいため、抵抗を制御することは比較的容易である。
従って PCL の抵抗を制御することにより、偏流を防止できる。

回線 1、2 の PCL の必要本数および PCL 単体の仕様を表 2.2.2.3-12 に示す。設計電流は定格電流値を使用 PCL の本数で除した値である。PCL に組み込むペルチェ素子は BiTe 系ペルチェ素子を用いた。

表 2.2.2.3− 12　PCL 設計仕様（石狩プロジェクト）

	回線 1		回線 2	
	外導体用	内導体用	外導体用	内導体用
使用本数	35 本	37 本	15 本	24 本
設計電流	143 A	135 A	167 A	104 A
設計電圧	20 kV	20 kV	20 kV	20 kV
端末クライオスタット A	P 型 PCL	N 型 PCL	P 型 PCL	N 型 PCL
端末クライオスタット B	N 型 PCL	P 型 PCL	N 型 PCL	P 型 PCL
絶縁設計	真空絶縁			
抵抗のばらつき	室温での抵抗のばらつきが仕様抵抗値の 10%以下（参考）			
機械設計（温度履歴等）	ヒートサイクル後（室温−LN_2温度）の抵抗変化（室温）が±4%以下			

PCL に組込むペルチェ素子のサイズ、長さについて数値計算に基づいて設計最適化を行った後、実際にモデルサンプルを試作し、熱侵入量測定を行った。図 2.2.2.3-13 に試作した PCL の外観写真を示す。実際には、銅リード取付部に銅編組リードを取付けて使用する。



4 図 2.2.2.3- 13　試作した PCL の外観写真

電流リードは図 2.2.2.3-10 に示すように、FRP 製の絶縁フランジに取り付けて、端末クライオスタットの外槽に取り付けられる。

ウ．電流リードの特性試験に関する国際規格　★

電流リードについては、2010 年 6 月に IEC 61788-14（超電導-電流リード・超電導機器用電流リードの特性試験に対する一般要求事項）として国際規格が発行されている。

表 2.2.2.3-13 にその概要を添付する。また表 2.2.2.3-14 に各特性試験項目について、JIS　H 7314：2013 による試験の実行段階をまとめる。

表 2.2.2.3- 13　　IEC 61788-14（超電導-電流リード・超電導機器用電流リードの特性試験に対する一般要求事項）の概要

適用範囲	超電導機器に用いる電流リードの特性試験に関する一般要求事項について規定する。
引用規定	IEC60050-815:（超電導関連用語）、IEC60071-1(絶縁協調)、IEC60137(交流 1 kV 以上の絶縁ブッシング)、IEC61788-3(Bi 系超電導線の臨界電流測定)、IEC61788-10(超電導線の臨界温度測定)
用語及び定義	用いる主な用語の定義は、IEC60050-815 の他に次による。 電流リード、常電導電流リード、超電導電流リード、非ガス冷却型電流リード、ガス冷却型電流リード、熱放散、熱負荷、定格電流熱負荷
原理	超電導機器への電流供給は、室温と電力機器の低温の間を電気的に接続する部品を通じて行われ、これを電流リードと呼んでいる。電流リードは温度勾配がある中で、低温機器に電流を輸送するので、クライオスタットへの熱侵入の主な原因の一つになる。電流リードは、常電導電流リードと高温超電導電流リードの二種類に分類できる。
特性試験項目	電流リードの室温及び低温における力学的、電気的並びに熱的仕様を確認するために必要な試験項目を記述する。
特性試験方法	以下の特性試験についての方法を推奨する。 一般構造・外観検査、応力・歪効果試験、熱負荷試験、定格通電試験、接触抵抗試験、電圧低下試験、耐電圧試験、ガス圧低下試験、気密試験、安全率試験（冷媒障害試験、クエンチ試験、最大圧力試験）
報告	電流リードの概要、試験条件、仕様に照らした特性試験結果、及びこれらによって得られた知見を記載しなければならない。
注意事項	特性試験に先立ち、試験設計者及び作業関係者に対して、電気試験並びに冷媒及び発生ガスの注意喚起をしなければならない。

表 2.2.2.3- 14　電流リードに関する特性試験の項目及び試験の実行段階
（JIS H 7314：2013）

特性試験区分	試験項目	特性試験の実行段階		
		R&D[a)]	カタログ[b)]	受入[c)]
機械的特性	構造検査試験		○	○
	応力/歪み効果試験	○		
熱的特性	非通電熱侵入試験	○	○	
	定格電流通電熱負荷試験	○	○	
電気的特性	定格通電試験	○	○	
	接続抵抗試験	○		
	電圧降下試験	○	○	
	耐電圧試験	○	○	
圧力特性	圧力損失試験	○	○	
	気密試験	○		
	冷媒停止試験	○	○	
安全限界特性	クエンチ試験	○		
	最大圧力試験	○	○	

注
a) “R&D”は，電流リードシステムの基礎研究，又は試作のための試験段階を意味する。
b) “カタログ”は，電流リードに関して行われた試作，又は量産のための試験段階を意味する。
c) “受入”は，電流リード設置場所での受入検査段階を意味する。

（参考：石狩プロジェクトの例）

設計、製造、組立、竣工試験の各段階で JIS H 7314：2013 にならい特性試験を行った。表 2.2.2.3-15 に示す。なお、石狩プロジェクトで用いた電流リードは非ガス冷却型のため、圧力損失試験、冷媒停止試験、クエンチ試験、最大圧力試験等はなしとした。

また送電用ケーブルのため、過電流試験を実施した。

以下、試作品を用いて実施した試験の概要を記載する。

表 2.2.2.3- 15　石狩プロジェクトにおいて実施した電流リードに関する
特性試験の項目と実行段階

特性試験区分	試験項目	特性試験の実行段階			
		設計（試作）	製造（工場）	組立（現地）	竣工試験
機械的特性	構造検査試験		○		
	応力/歪み効果試（熱サイクル試験）	○			
熱的特性	非通電熱侵入試験	○			○
	定格電流通電熱負荷試験	○			○
電気的特性	定格通電試験	○	○		○
	接続抵抗試験	○	○	○	○
	電圧降下試験	○	○		
	耐電圧試験	○	○		
圧力特性	気密試験		○	○	

（ア）熱サイクル試験

電流リードは室温～LN_2温度まで長手方向に大きな温度勾配があるため、熱履歴の影響についても検証する必要がある。そこで、設計したPCLについて熱履歴試験を実施した。20℃→−190℃→20℃を1サイクルとし、10サイクル毎に抵抗値測定（環境温度20℃～25℃）を実施した。設計した構造について、いずれも熱サイクルによる抵抗値の劣化はみられなかった。

（イ）通電試験（非通電熱侵入試験/定格電流通電熱負荷試験/定格通電試験／接続抵抗試験/電圧降下試験）

図2.2.2.3−14に試験に用いたテストベンチの概略図を示す。真空容器内に設置された液体窒素タンクに、銅製リード線を介してn型およびp型の一対のPCLが接続されている。液体窒素タンクは断熱層により外部から熱的に隔離されており、熱の侵入経路はPCLのみとなるため、PCLに通電した時に発生した窒素ガスの蒸発量よりPCLからの侵入熱を見積もることができる。

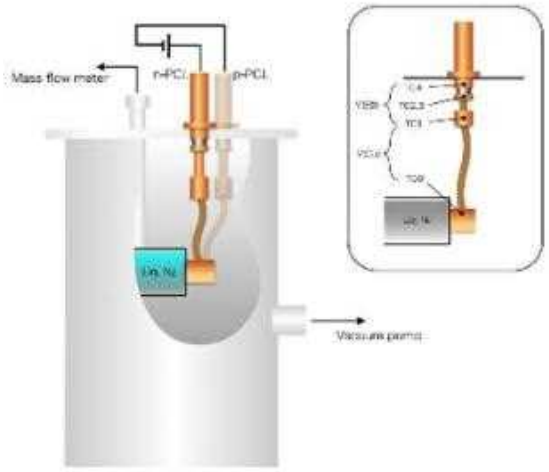


図2.2.2.3− 14　電流リード熱侵入量評価用テストベンチ概略図

またPCLの各部にT型熱電対をとりつけ、各部の温度およびT型熱電対のCuリード間の電圧を測定することにより接続抵抗および電圧降下の測定を行った。

試験はPCLに0～175 Aの電流を通電して各部の温度データ、発生電圧および熱侵入量の評価をおこなった。図2.2.2.3-15に回線2の内導体用PCLの通電特性評価例を示す。銅編組線は19.5 mm^2 × 350 mmのものを取付けて行った。また高温側温度は図2.2.2.3-14のTC4、低温側温度はTC2、TC3の温度である。$I = 0$のときの高温側と低温側の大きな温度差はペルチェ素子の熱伝導率が銅の0.3倍程度と大変低いことを反映している。ペルチェ素子の高温側温度は測定範囲においてほぼ室温一定であったが、高電流においては若干上昇傾向を示した。一方、低温側温度は、電流値とともに一旦低下した後、さらに電流値をあげると上昇に転じている。これは低電流においては、ジュール熱＜ペルチェ効果による排熱の方が大きいため、電流とともに温度が下がるが、電流増加とともに、ジュール熱の寄与が大きくなるためである。また図2.2.2.3-17に各部の両端電圧の電流依存性を示すが、設計通りの特性を示すことを確認した。

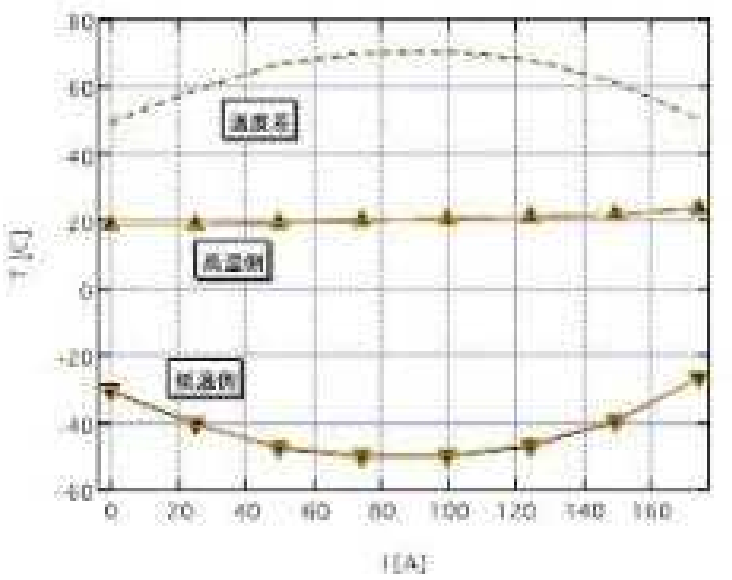


図 2.2.2.3- 15　PCL（回線 2 内導体用）について測定した各部の温度および温度差の通電電流依存性（N 型 PCL（黒)、P 型 PCL（橙））

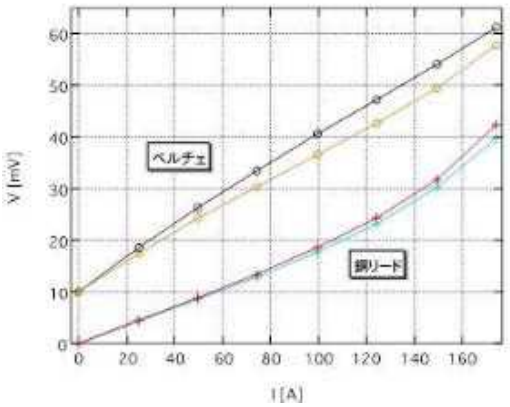


図 2.2.2.3- 16 PCL（回線 2 内導体用）について測定した各部の両端電圧の通電電流依存性（N 型 PCL（黒)、P 型 PCL（橙））

図 2.2.2.3-17 に回線 1 および 2 の内導体用および外導体用 PCL の熱侵入量（$Q_{\mathrm{total}} = Q_{\mathrm{n}} + Q_{\mathrm{p}}$ [W]）の電流依存性を示す。（回線 1 については内導体用と外導体用は同じである。）銅編組線：19.5 mm² × 350 mm 取付時の回線 1 の PCL の内導体用 PCL(定格電流 135 A)の定格電流印加時の PCL 一対あたりの熱侵入量は約 8.1 W、外導体用（定格電流 143 A）は約 8.6 W であり、どちらも約 30 W/kA/端子であった。

一方、回線 2 の内導体用 PCL の定格電流 104 A における PCL 一対あたりの熱侵入量は約 7.8 W、外導体（定格電流：167 A）は約 12 W であり、前者は約 37 W/kA/フランジ、後者は約 36 W/kA/端子であった。また、回線 1 については、銅編組線の断面積を 14 mm² にした場合についても計測し、定格電流値では内導体用約 8.8 W（約 32 W/kA/端子）、外導体用約 9.7 W（約 34 W/kA/端子）であり、低電流側では 14 mm² が低い熱侵入量、高電流側では 19.5 mm² の方が低い侵入熱となった。この結果をふまえて、銅リード部のサイズの最適化を行い、回線 1 の銅リードサイズは 14 mm² × 330 mm、回線 2 では内導体用 14 mm² × 357 mm、外導体用 28 mm² × 357 mm とした。

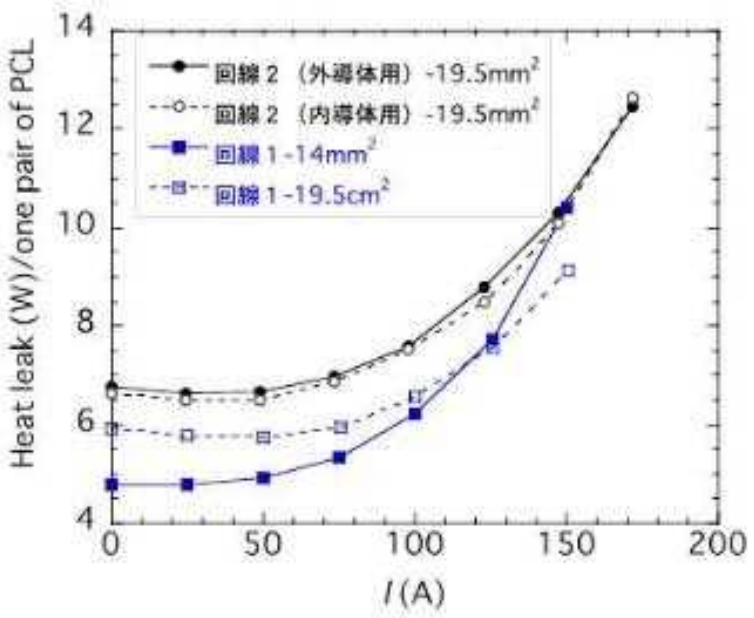


図 2.2.2.3- 17　回線 1 および回線 2 用 PCL の熱侵入量 Q [W]の通電電流依存性
（熱侵入量は P 型と N 型を対にして測定した値である。回線 2 については、19.5mm²×350mm の銅編組線を、回線 1 については 19.5mm²×350mm および 14.0mm²×350mm の二種類の銅編組線を取り付けて測定を行った。）

（ウ）直流耐電圧試験

直流耐電圧試験は PCL を GFRP 製のフランジに全数取付け、静電シールドを取り付けた状態で実施した。試験の様子を図 2.2.2.3-18 に示す。実際の状況を模するため、いずれも、容器内を 10^{-2} Pa 以下の真空度に排気し、20 kV×5 又は 10 min の条件で試験を行った。その結果、いずれの場合もリーク電流は観測されず、本構造にて耐圧条件を満たすことが確認された。

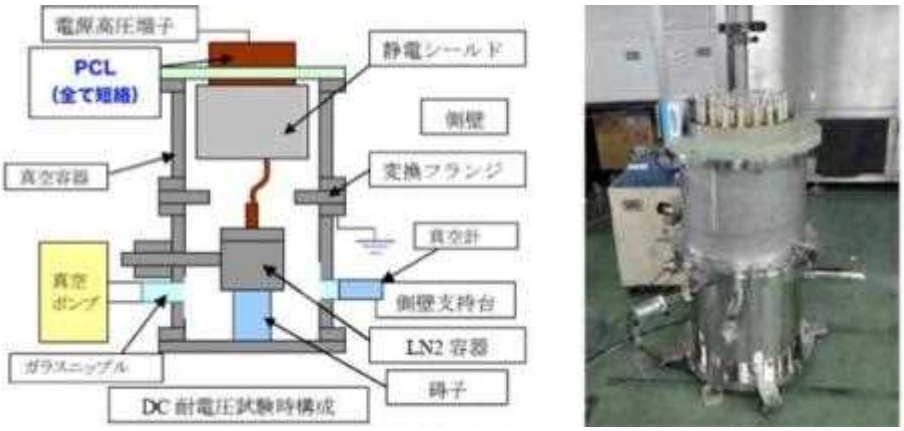


図 2.2.2.3- 18　直流耐電圧試験実施例

（エ）過電流試験

PCL には、電源故障など生じた場合定格以上の過電流が流れる場合がある。そこで、過電流に対して PCL がどこまで耐量があるか確認するための過電流試験を行った。過電流試験に用いた試験回路を図 2.2.2.3-19 に示す。V1(PCL の両端電圧)、 A1（放電電流）、A2(電源モニター電流)をオシロスコープにて測定した。回線２の PCL について、1000 A × 200 ms 通電したときの電流波形及び PCL 両端電圧の時間変化を図 2.2.2.3-20 に示す。回線 2 においては、PCL 一本あたりの定格電流は内導体で 104 A、外導体で 166 A となるが、それに対して最大 1000 A（定格電流の約 6～9.6 倍）の過電流に対して健全であることが確認された。

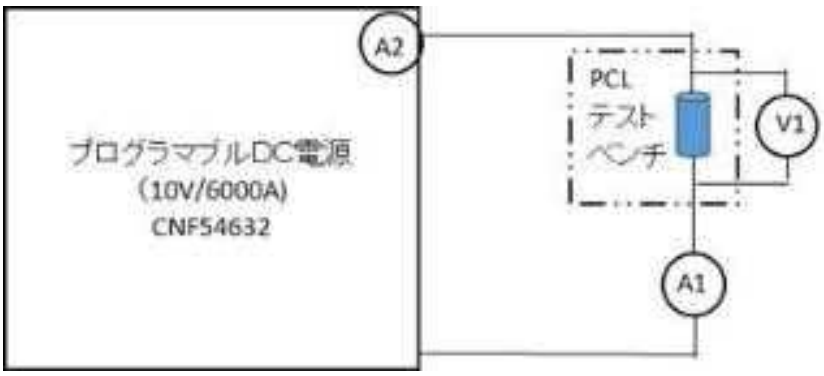


図 2.2.2.3- 19　過電流試験回路図

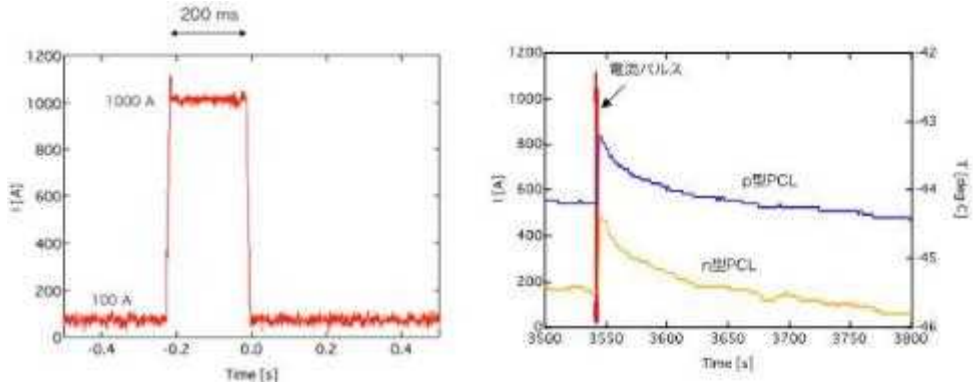


図 2.2.2.3- 20　過電流試験の通電波形及び PCL 部両端電圧推移
（1000A × 200ms 通電時）

(5)ジョイント（接続部）
本節では 1.2.2.3（１）節に示した超電導ケーブルコア仕様に相当するジョイントの設計について記載する。

ア．機械設計　設計張力(CSJ)、移動量(NJ)　★
　接続部には、ケーブルコアを固定しないノーマルジョイント（NJ）タイプと、ケーブルコアを固定するコアストップジョイント（CSJ）タイプがある。表に中間接続構造の設計仕様と、NJ タイプと CSJ タイプの適正を示す。
石狩プロジェクトでは回線 1 には NJ タイプを、回線 2 では NJ タイプと CSJ タイプを選定した。表 2.2.2.3-16 に中間接続部の設計仕様を示す。

表 2. 2. 2. 3- 16　中間接続構造の設計仕様

	仕様	CSJ タイプ（固定）	NJ タイプ（非固定）
通電特性	DC5kA/2.5kA	○	○
接続部損失	≦1μΩ/導体	○（◎）	◎
課電特性	DC20kVx5 分間 Imp±100kV 各３回	○	○
機械特性	引張：３tonf 圧縮：1.5tonf	○	○
熱挙動対応	冷却・昇温時のコアの動きに対応要	○	△
容器圧力設計	0.6Pa+G	○	○
事故電流対応	コア特性以上を許容	○	○
接地線接続	両側コアで接続	○	○
光ファイバ接続	融着部を収納	○	△
コンパクト．施工性	現地マンホール内で施工	○	◎

（ア）NJ 構造
　中間接続 NJ 構造はケーブルコアのフォーマーを銅スリーブで圧着し内導体、外導体のケーブルコアの超電導線材上に別に用意した超電導線材を橋渡しさせて半田モールド接続させた。内導体と外導体の間には絶縁補強紙を巻き付け、橋渡しする超電導線材を機械的に補強する為に半割れ銅管に超電導線材をモールド接続させた。外導体の外側には電界遮蔽処理をおこなった。図 2.2.2.3-21 に NJ 構造を示す。

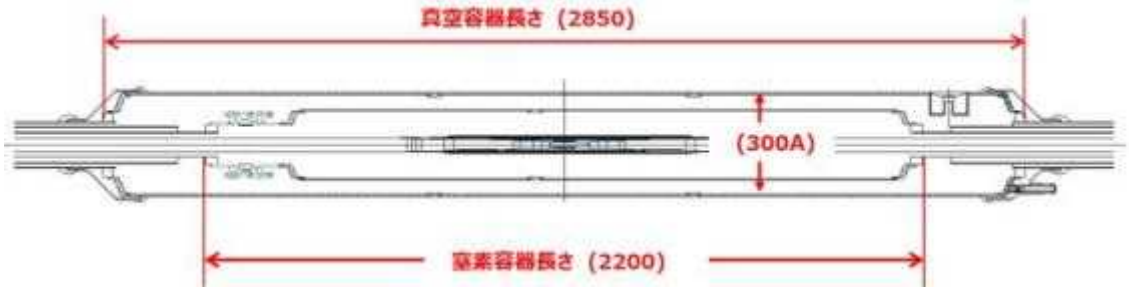


図 2.図 2. 2. 2. 3- 21　NJ 構造

（イ）CSJ 構造

CSJ タイプはコアを容器に固定するもので、コアの動きを止める役割がある。長尺ケーブルではコアの動きを固定する必要も出てくる場合があり、回線 2 への適用を念頭に置き、本構造の検討を行った。本設計の CSJ 構造はケーブルコアのフォーマーを中心ユニットの銅スリーブで圧着し内導体、外導体のケーブルコアの超電導線材上に、別に用意した超電導線材を中心ユニットを貫通させて橋渡しし半田モールド接続させた。内導体と外導体の間には絶縁補強紙を巻き付け、橋渡しする超電導線材を機械的に補強する為の半割れ銅管に超電導線材を樹脂接着させた。外導体の外側には電界遮蔽処理をおこなった。図 2.2.2.3-22 に CSJ 構造を示す。

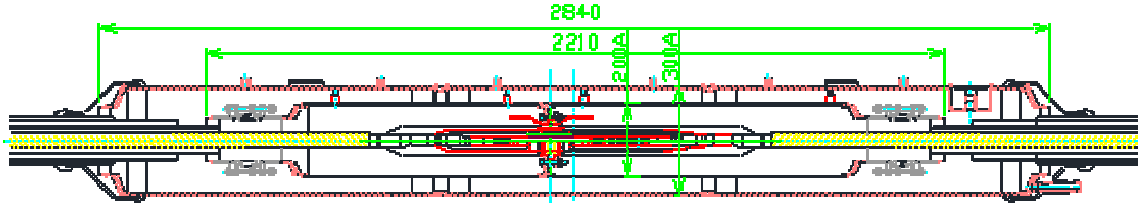


図 2. 2. 2. 3− 22　CSJ 構造

イ．電気絶縁設計　★

内導体と外導体の間には絶縁補強紙を巻き付け、ケーブルコア部の電気絶縁層と同等の性能を有するよう設計する。

ウ．通電特性　★

ジョイント部には上述の通り、接続抵抗を低減させるために接続部に別途用意した超電導線材を渡し部にとりつける構造とした。事前にモデルを製作しその特性を確認した結果を図 2.2.2.3-23、図 2.2.2.3-24 にそれぞれ示す。ジョイント部の接続抵抗は約 4〜30 nΩ であり、5 kA 通電時のジョイント部での発熱は最大で約 0.75 W 程度と試算され、安定した通電が行える発熱レベルであることが確認されている。

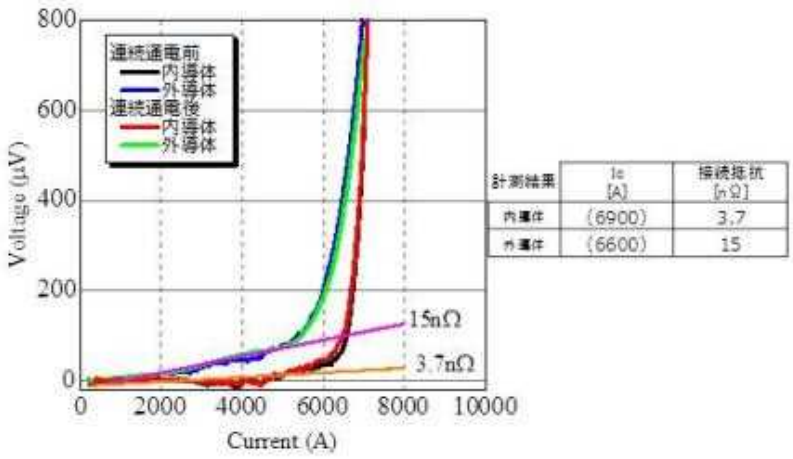
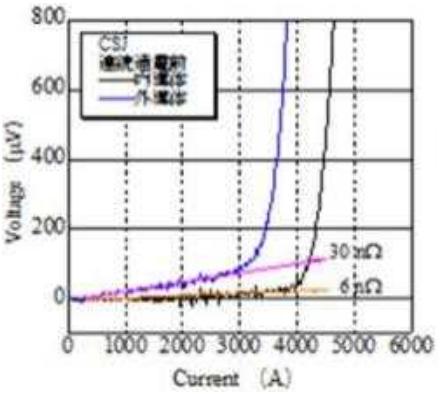


図 2. 2. 2. 3− 23　NJ 通電試験結果



Ic、接続抵抗測定結果(@77K)

導体	設計Ic*	実測Ic	接続抵抗
内導体	4320 A	4460 A	6 nΩ
外導体	3300A	3680 A	30 nΩ

*線材Icの総和

図 2.2.2.3- 24　CSJ 通電試験結果

本設計の中間接続 NJ 構造の試作コアを用いたサンプルによる連続通電試験では、5 kA@8 時間の連続通電を実施し温度上昇動がないこと、通電前後で超電導線の臨界電流特性にダメージがなく良好に通電できることが確認されている。（図 2.2.2.3-25 参照）

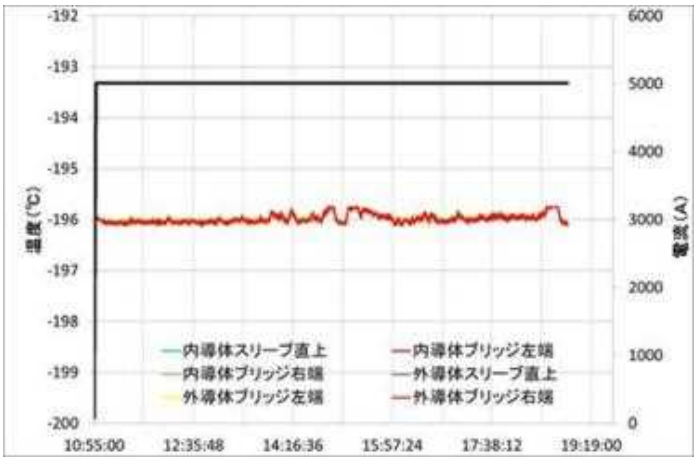


図 2.2.2.3- 25　NJ 連続通電試験結果

本設計の中間接続 CSJ 構造についても、試作コアを用いたサンプルによる連続通電試験において、2.5 kA@8 時間及び 3 kA@8 時間の連続通電を実施し、電圧変動、温度変動がなく、安定に通電できること、及び通電前後で超電導線の臨界電流特性にダメージがないことが確認されている。（図 2.2.2.3-26 参照）

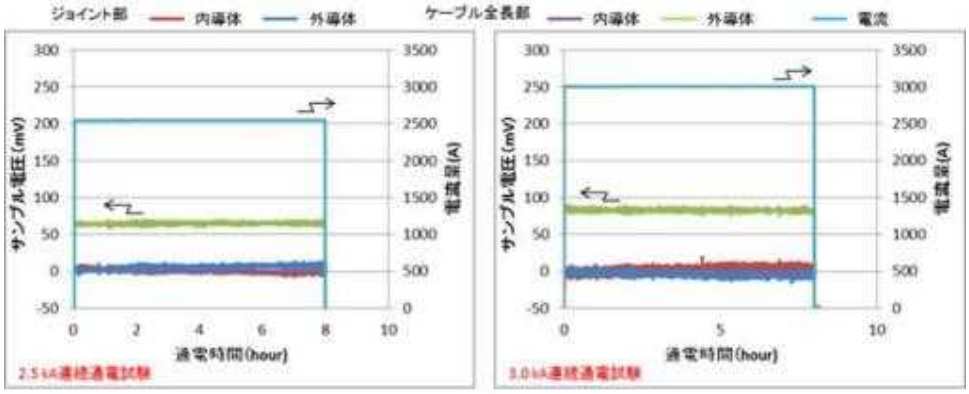


図 2.2.2.3- 26　CSJ 連続通電試験結果

エ．容器圧力設計

ジョイントに使用した容器は、高圧ガス保安法・冷凍保安規則に準拠した材料、強度計算及び溶接方法の適用、並びに、組立後の外観試験、気密試験が必要となる。

(6)送電システム

ア．電気・制御・監視設備設計

超電導ケーブルシステム運転に際し、その運転状況を確認すること、運転時に発生する可能性のある異常の有無を常時監視し、異常が発生した場合にはすみやかに警報を発信し、重大な故障の場合には運転停止処置など適切な対応を自動で実施することが重要である。また、運転に関する各部状況について把握するための各種計測センサーなどの情報及び冷凍機などの運転状況を示す接点情報などを集約し、これらを記録する機能もシステムの性能を解析する上で重要な機能である。

これらの監視、計測記録などの機能をもつ、計測監視盤の仕様などを以下に示す。

（ア）インターロック設計

超電導ケーブルによる送配電を実施する際には、超電導コアが超電導状態に適切に維持されていることが必要である。この状態が適切でないと判断された場合には送配電開始できないようにする機能、また超電導送配電中に運転に適切でないと条件判断された場合には送電を停止する、または別系統に切り替える等の判断・制御が必要である。表 2.2.2.3–17 に、送配電停止となる主な条件の例についてまとめる。表 2.2.2.3–17 の条件が判定された場合には、送配電できないよう遮断器や配電盤リレーが動作しないようなインターロック機構を設ける必要がある。

7 表 2.2.2.3– 17　送配電停止となる主な条件例

項目	判定条件
液体窒素温度	*Ic-T* 特性から系統容量以下となる運転温度以上となった場合
液体窒素圧力	循環液体窒素が沸騰し、紙－液体窒素電気絶縁の課電特性に影響があると判断される場合
液体窒素流量	循環ポンプ故障・停止などにより超電導ケーブルシステムに液体窒素が補給されなくなった場合
液体窒素量	漏れ、蒸発などにより循環液体窒素量が所定量以下に低下した場合
監視装置異常	システム監視装置が故障し、遠隔で適切な状態監視が出来なくなった場合
超電導ケーブル異常	絶縁不良などにより短絡、地絡が発生し、リレー検出器等により超電導ケーブル自身の異常が検出された場合
非常停止	人的に送電停止に至る異常と判断された場合

（イ）監視設備

(i) 監視機能

計測監視盤の主な機能は以下の通りである。測定したセンサー情報の収集・記録、しきい値判定による重軽故障自動判定、接点情報の記録・表示による設備運転状況の状況表示及びこれらの情報をネットワークにより関係者に転送し、例えば故障発生時の状況をすみやかに共有し迅速な対応を可能とする機能も必要である。また故障判定に基づく接点情報出力も行えることや、故障発生時に自動的に機器を停止することも必要である。

① 冷却システム、ならびに、ケーブル監視用センサー類の情報収集
② 測定情報の記録
③ 測定情報のしきい値超過判定（上下各 2 段階による重軽故障判定）
④ しきい値超過判定、及び接点情報の発生／復帰の履歴記録
⑤ 接点情報の入力に応答する接点出力
⑥ 設備の運転状況表示
⑦ ネットワークを経由したメールによる外部情報発信
⑧ 表示装置での収集情報の表示

(ii) 監視項目

超電導ケーブル運用時の監視項目は、「（ア）インターロック設計」で示したように、超電導ケーブル送配電システムのインターロック関係を監視する項目が中心となる。それらは液体窒素循環温度、流量、圧力、循環量及び超電導ケーブルのリレー状態などである。また、これ以外にも冷凍機や循環ポンプの機器運転状態、断熱性能を維持するために必要な断熱層真空度の状態や、送配電電力、電圧、電流などの送電運用情報などの監視、計測も行われる。図 2.2.2.3-27 に監視項目の表示例を示す。また、図 2.2.2.3-28、図 2.2.2.3-29 に監視盤で収集・監視・表示される情報の提供例を示す。

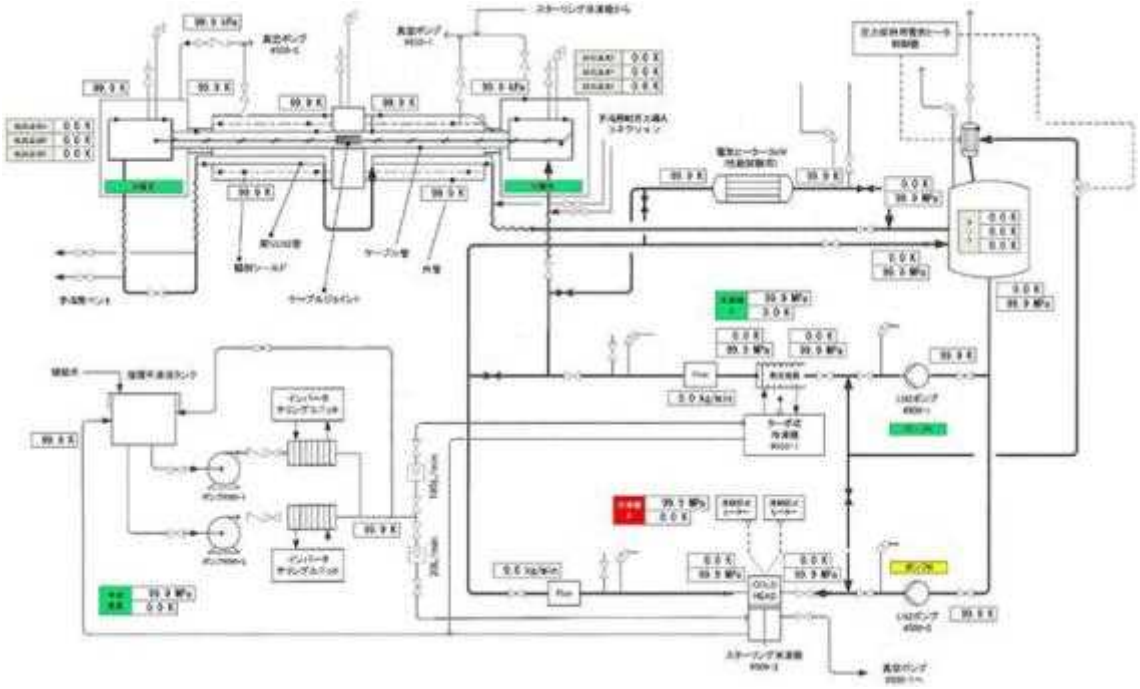


図 2. 2. 2. 3− 27　監視項目の表示例



図 2.2.2.3- 28　運転状況情報表示例（温度、圧力一覧）



図 2.2.2.3- 29 運転状況情報表示例（流量、液面、真空度、電源電圧、電流）

（iii）重・軽故障分類

「（ア）インターロック設計」で示したように、超電導送配電中に運転に適切でないと条件判断された場合にはインターロックにより送電を停止する、又は別系統に切り替える等の判断・制御を行う必要がある。これらの条件を満たすものを「重故障」と定義する。重故障は、ケーブル異常や非常停止など接点信号により動作するものと、温度や圧力などしきい値を指定してそれを超えた場合に動作するものに分けられる。

しきい値判定の例として温度で説明すると、常時運転温度範囲 *Top*(K)に対し、重故障判定温度 *Ts*(K)が定義される。ここで運転温度が *Ts* に達する前に、その異常現象を事前に検知できれば、重故障に至る前に未然に故障を防止できる。このように前駆的な判断をするため軽故障値 T_L を別途定める。つまり、これら温度の関係は $Ts > T_L > Top$ となる。T_L を定める際には、軽故障と判定される値の妥当性とともに、誤判定を防止するために *Top* とのバランスを良く考える必要がある。図 2.2.2.3-30 に監視装置におけるしきい値の設定画面の例を示す。ここでは下限、上限が軽故障、下下限、上上限が重故障となりうる。



図 2.2.2.3- 30　しきい値設定画面
（各センサーの測定値に対する上上限／上限、下限／下下限の値を設定）

（iv）監視装置仕様・設計

これまで説明した情報処理を行うための計測・監視盤の構成及び情報処理フローの例を図 2.2.2.3-31 にまとめる。超電導ケーブルシステムの運転中の物理量、接点信号などは各機器付近に設置した監視盤で収集され、全体の情報はデータ収集 PC で記録されると共に、監視処理 PC により重・軽故障条件を満たすかどうかの常時監視を行う。監視盤が故障を検知した場合には画面表示を行うと共に関係者にメール等で情報が配信される。重故障を検知した場合は同様の表示・配信を行うと共に、送配電を停止するための接点信号を系統の開閉器等に送信する機能も必要である。

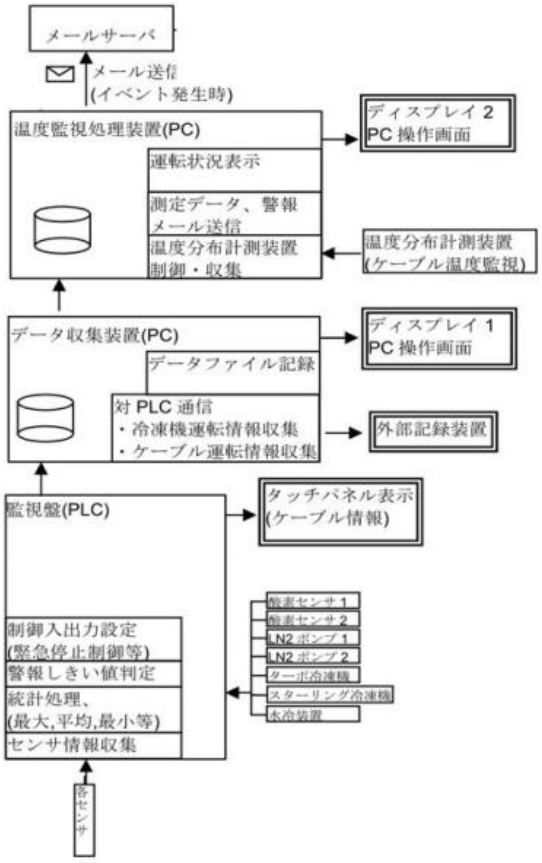


図 2.2.2.3- 31 監視装置情報処理フロー図例

(7)液体窒素循環システム
ア．冷凍機・ポンプ設計
（ア）冷凍機

直流超電導送電システムに使用されている冷凍機には、主にターボブレイトン冷凍機とスターリング冷凍機の 2 種類がある。それぞれの冷凍機の仕様及び設定・監視項目を比較すると以下のようになる。
実送電を考えるとメンテナンス周期が長いことが重要であり、この点ではターボブレイトン冷凍機が有利（3 年）である。ただ、COP については十分とは言えず（約 0.04）、将来的な長距離送電に向けては COP の向上が望まれる。

表 2.2.2.3- 18　直流超電導送電システムに使用される冷凍機の仕様例

名称	ターボブレイトン冷凍機 （大陽日酸社製）	スターリング冷凍機 （アイシン精機社製）
冷媒	ネオンガス	ヘリウムガス
冷凍能力	2000 W／台@66 K	1000 W／台@77 K
電源仕様	3φ AC 400 V	3φ AC 200 V
電源容量	60 kW	15 kW
所要冷却水	195 L/min（32℃以下）	20 L/min（32℃以下）
制御方式	自動冷凍出力制御 （圧縮機能力可変型）	ヒーターによる制御 （冷凍出力一定）
COP	約 0.04 @70 K	約 0.06 @70 K
質量	約 5380 kg	約 1500 kg
外形寸法	W3200×D2400×H2600	W1000×D1200×H2100
メンテナンス周期	3 年	8,000 時間（約 11 か月）

表 2.2.2.3- 19　各冷凍機の設定・監視項目

	ターボブレイトン冷凍機	スターリング冷凍機
設定	・　冷凍機出口温度 （サブクール工程）	・　コールドヘッドヒーター温度
監視	・　運転／停止 ・　運転モード （クールダウン工程 or サブクール工程） ・　LN_2 入口温度／出口温度 ・　トリップ	・　運転／停止 ・　トリップ

（参考：石狩プロジェクトの例）
超電導ケーブル管路を冷却する主冷凍機としてターボブレイトン冷凍機を使用し、リザーバタンク内の液温維持のための補助冷凍機としてスターリング冷凍機を使用している。具体的な冷却システム設計については後述する。



図 2.2.2.3- 32 ターボブレイトン冷凍機



図 2.2.2.3- 33 スターリング冷凍機

（イ）ポンプ

直流超電導送電システムに使用されている主な液体窒素循環ポンプの仕様等は以下の通り。

アイシン精機社製ポンプは磁気軸受を使用することによりメンテナンス周期が長くなっている（60,000 時間）のが利点である。但し、揚程が低い（100 kPa）という欠点も併せ持っており、将来の長距離実送電向けには揚程を高くする等の改良も必要である。現状仕様のまま実送電に適用するためには、ケーブル布設ルートの高低差を無くすなどの工夫が必要となる。逆に、バーバーニコルス社製ポンプは揚程が高い点は有利だが、ベアリング軸受のためメンテナンス周期が約 1 年と短いため、実送電ではメンテナンス性において不利である。

また石狩プロジェクトの低流量循環試験にて使用した往復動型液体窒素ポンプも比較のため表に掲載した。往復動型の特徴として高揚程が得られる、メンテナンス周期が長いことがあげられる一方、脈動が生じやすいという欠点もある。

表 2.2.2.3- 20　液体窒素循環ポンプ仕様例

名称	液体窒素循環ポンプ（アイシン精機）	液体窒素循環ポンプ（Barber Nichols）	液体窒素サーキュレータ（イーグル工業）
型式	縦型遠心式	縦型遠心式	ベローズ式（往復動型）
軸受	磁気軸受	ベアリング軸受	（アクチュエータ）
揚程	100 kPa 以上（＝12.5 mLN_2）	～500 kPa（＝62.5 mLN_2）	～1MPa（=125mlLN_2）
流量	40 L/min 以上	～50 L/min	1～40L/min
電源仕様	2φ AC 200 V	3φ AC 200 V	3 φ AC 200V
電源容量	1 kW	1 kW	1.5kW
回転速度	1,800～6,000 rpm	～5000 rpm	3cpm-300cpm
重量(クライオスタット含)	約 300 kg	約 300kg	約 300kg
外形寸法	φ880×H830	φ880×H830	φ880×H1310
メンテナンス周期	60,000 時間（約 82 ヶ月）：コントローラ内ファンの寿命	9000 時間（約 12 ヶ月）：ベアリングの寿命	約 2～3 年（ギアモータの交換）

表 2.2.2.3- 21　液体窒素循環ポンプ 設定・監視項目例

	液体窒素循環ポンプ（アイシン精機）	液体窒素循環ポンプ（Barber Nichols）	液体窒素サーキュレータ（イーグル工業）
設定	・　回転数調整	・　回転数調整	・　往復動回数調整
監視	・　運転／停止 ・　回転数 ・　トリップ	・　運転／停止 ・　回転数 ・　インバータトリップ	・　運転／停止 ・　往復動回数 ・　トリップ



図 2.2.2.3- 34 液体窒素循環ポンプ

(ウ)耐震・強度

機器の耐震設計については、電気事業法に定める通り「火力発電所の耐震設計規定 JEAC 3605」を適用する。冷却関連機器については、同規定「第 9 章　高圧ガス設備の耐震設計」を適用する。

機器の強度設計については、電気事業法では冷却関連機器（冷凍機、ポンプ等）の設計規準が定められていないため、高圧ガス保安法の冷凍保安規則に準拠する。

（参考：石狩プロジェクトの例）

① 設計震度

- 重要度分類　：重要度 III
- 想定地震動　：レベル 1
- 地震動のレベルに基づく係数　：1.0
- 地域別補正係数　：0.6（B 地区）
- 地盤別補正係数　：2.0（第 4 種地盤）
- 耐震設計手法　：静的震度法
- 静的震度（重要度 III より水平震度のみ）　：0.2

② 強度計算

高圧ガス保安法 特定設備に関する通達「特定設備検査規則の機能性基準の運用について」に付随する「技術基準の解釈」に基づき、冷凍機の熱交換器等の強度計算を行った。

イ．冷却システム設計　★

（ア）プロセスフロー

- 冷却システムは、冷凍機、液体窒素循環ポンプ、リザーバタンク、冷却水設備、真空ポンプ、真空断熱配管、超電導ケーブル管路（断熱二重管）等によって構成される。主要機器リストは表 2.2.2.3-22 の通り。
- 冷凍機の選定に際しては、系全体の入熱量を算出し、十分に余裕のある冷凍能力を確保する必要がある。

・なお、直流送電にステムに於いては、送電時の電流による発熱が無いため、「外部からの侵入熱量＋機器からの入熱量＝系全体の入熱量」とすることができ、入熱量に見合った効率の良い機器選定が可能である。この点は、送電時の電流による負荷変動の大きい交流送電システムに比べて有利である。
・ポンプの選定に際しては、設計流量での配管の圧力損失を算出し、十分に余裕のある揚程を確保する必要がある。
・冗長化のために各冷凍機及びポンプが 2 台以上並列設置される場合は、偏流を考慮する必要がある。
・超電導ケーブル管路（断熱二重管）及び端末クライオスタットの断熱層の真空度維持のために真空ポンプが必要となる。但し、実運用で数 km 毎に真空ポンプを常設することに関しては電源の確保等の課題があるため、真空封じ切りについても検討する必要がある。
・冷凍機システムの各機器類を接続する配管は封じ切りの真空断熱配管（バイヨネット継手使用）を使用する。そのため真空ポンプの常設は不要となる。但し、その場合も真空度に関しては定期的なメンテナンスが必要となるため、運転計画にその旨を盛り込まなければならない。
・メンテナンス等を考慮すると、冷却システムは超電導ケーブル管路を切り離して、冷凍機システム単独で循環性能試験を実施できる回路になっていることが望ましく、その場合は、試験用に超電導ケーブル管路の入熱及び圧力損失を模擬するヒーター等の設備が接続されている必要がある。
・超電導送電に於いて、冷凍機システムの各機器のトラブルは送電停止に直結するため、冗長化を考慮する必要がある。重要機器である冷凍機及び液体窒素循環ポンプは、予備機を設け、機器停止トラブルや運転中のメンテナンスに対応する必要がある。

表 2.2.2.3- 22　冷却システム主要機器リスト

機器名称	用途
ターボブレイトン冷凍機	超電導ケーブル管路の冷却
スターリング冷凍機	リザーバタンク内液体窒素の冷却（*1）
液体窒素循環ポンプ	①　超電導ケーブル管路～ターボ冷凍機の循環 ②　リザーバタンク～スターリング冷凍機の循環（*1）
リザーバタンク	系内圧力保持と温度変化時の液体窒素体積増減への対応
冷却水設備 （チラー又は冷却塔）	ターボブレイトン冷凍機及びスターリング冷凍機用冷却水の供給
真空ポンプ	超電導ケーブル管路（断熱二重管）及び端末クライオスタットの断熱層の真空引き
疑似負荷ヒーター	冷凍機側単独循環性能試験用

（＊1）ターボブレイトン冷凍機のみで冷却能力が十分であれば、スターリング冷凍機によるリザーバタンク内の冷却は必ずしも必要ではない。但し設置されていればメンテナンス時やターボ冷凍機トリップ等のトラブル時の対応が容易になる。

（参考：石狩プロジェクトの例）
ターボブレイトン冷凍機に付帯している温度調節機能により冷凍機出口の液温を一定温度に調整することができる。このため、液温に関して余計な制御装置を必要としない。
液体窒素循環ポンプは、磁気軸受を使用することによりメンテナンス期間の延長及び長寿命化が図られている一方、設計揚程が 100 kPa と小さいため、可能な限り圧力

損失を小さくする設計とした。ケーブルを冷却する断熱二重管に直管（SUS304TP）を使用したことはそのことに最も寄与している。

断熱層の真空維持は真空ポンプの常時運転により行った。長距離実用化に向けた真空封じ切りについては今後の課題である。

熱侵入及び圧力損失に関わる設計条件は以下の通り。なお、回線 2 は冗長化を考慮した設計となっているため、必要な能力に対しかなり余裕のある能力を有する。

表 2.2.2.3- 23 設計熱侵入及び圧力損失（回線 1：500 m）@70 K、40 L/min

	断熱二重管 (ケーブル管)	断熱二重管 (リターン管)	端末×2	冷凍機 システム	全体	冷凍機/ポンプ 能力
設計熱侵入量	500 W	290 W	900 W	750 W	2440 W	2800 W
設計圧力損失	15 kPa	8 kPa	63 kPa		86 kPa	100 kPa

表 2.2.2.3- 24 設計熱侵入及び圧力損失（回線 2：1000 m）@70 K、40 L/min

	断熱二重管 (ケーブル管)	断熱二重管 (リターン管)	端末×2	冷凍機 システム	全体	冷凍機/ポンプ 能力
設計熱侵入量	620 W	1100 W	900 W	1060 W	3680 W	5600 W
設計圧力損失	31 kPa	17 kPa	100 kPa		148 kPa	200 kPa

以下に、石狩プロジェクトにおけるプロセスフロー図を示す。

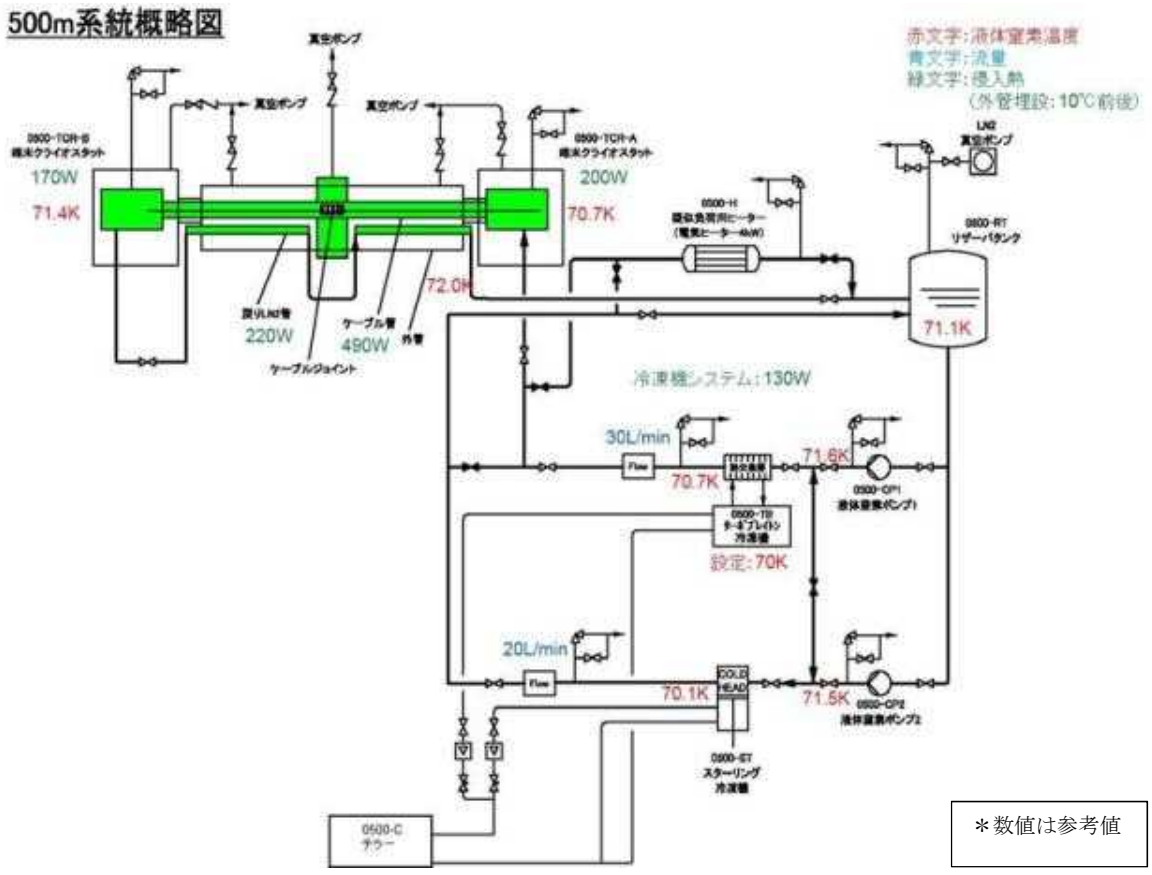


図 2.2.2.3- 35 回線 1　プロセスフロー図

表 2.2.2.3- 25　回線 1　主要機器リスト

機器名称	数量	用途
ターボブレイトン冷凍機	1	超電導ケーブル管路の冷却
スターリング冷凍機	1	リザーバタンク内液体窒素の冷却
液体窒素循環ポンプ	2	①　超電導ケーブル管路～ターボ冷凍機の循環 ②　リザーバタンク～スターリング冷凍機の循環
リザーバタンク	1	系内圧力保持と温度変化時の体積増減への対応
チラー	1	ターボブレイトン冷凍機及びスターリング冷凍機用冷却水の供給
真空ポンプ	4	超電導ケーブル管路（断熱二重管）及び端末クライオスタットの断熱層の真空引き（常時運転）
疑似負荷ヒーター	1	冷凍機側単独循環性能試験用

なお、石狩プロジェクトでは冷却水設備としてチラーを使用したが、消費電力が大きいため、実送電設備においては他の消費電力の小さい設備（冷却塔等）に置き換えるのが望ましい。

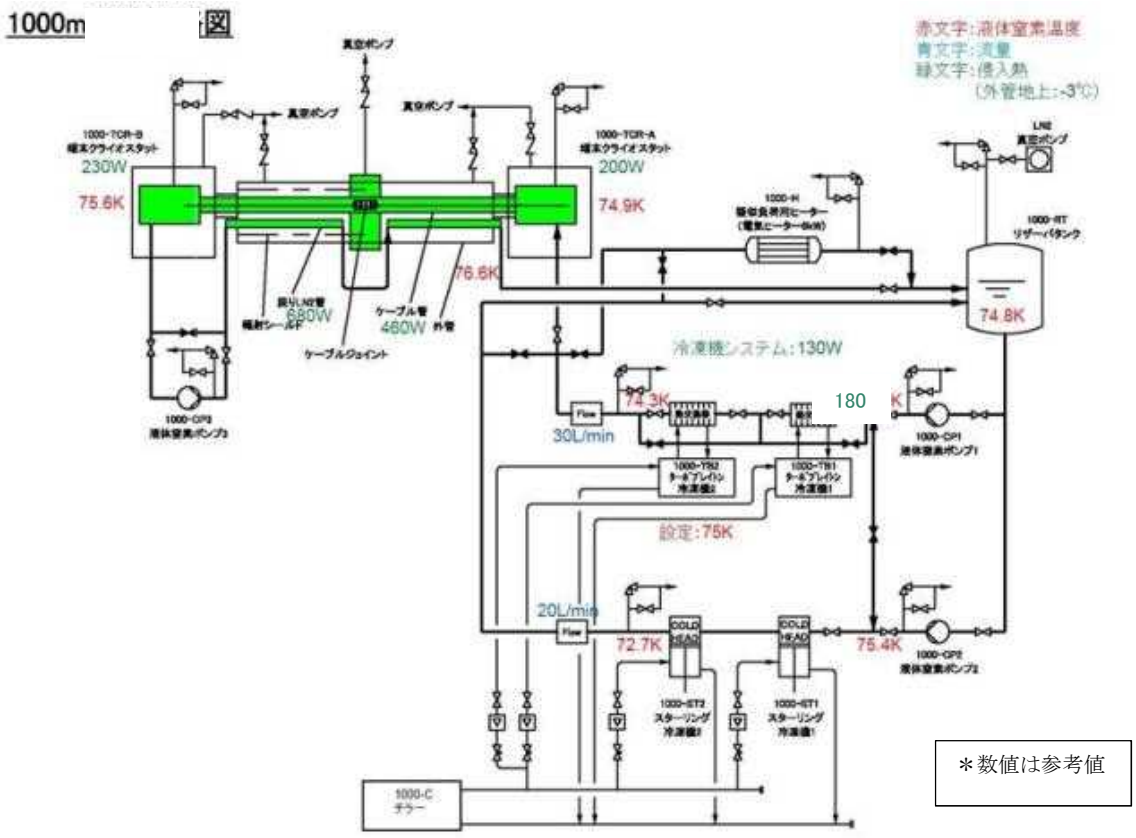


図 2.2.2.3- 36 回線 2　プロセスフロー図

表 2.2.2.3- 26　回線 2　主要機器リスト

機器名称	数量	用途
ターボブレイトン冷凍機	2	超電導ケーブル管路の冷却
スターリング冷凍機	2	リザーバタンク内液体窒素の冷却
液体窒素循環ポンプ	2	①　超電導ケーブル管路～ターボ冷凍機の循環 ②　リザーバタンク～スターリング冷凍機の循環
リザーバタンク	1	系内圧力保持と温度変化時の体積増減への対応
チラー	2	ターボブレイトン冷凍機及びスターリング冷凍機用冷却水の供給
真空ポンプ	4	超電導ケーブル管路（断熱二重管）及び端末クライオスタットの断熱層の真空引き（常時運転）
疑似負荷ヒーター	1	冷凍機側単独循環性能試験用

本システムではターボ冷凍機を直列接続し、バイパス管路を設けることで、1 台停止時の循環冷却を可能にしている。

（イ）システム圧力保持設計

冷却システムは、配管内の液体窒素の温度上昇による気化を防止し、安定した循環を得るために、加圧してサブクール状態を維持する必要がある。加圧の方法は種々あるが、系内に設置されるリザーバタンク内の液体窒素の自然気化による圧力上昇を加圧源とする方法が、設備も最小限となり、管理も容易である。

（参考：石狩プロジェクトの例）

リザーバタンクに 2 個のレギュレータを設置している。一方は「保圧弁」で、ある一定の圧力を超えないように弁が開き系外にガスが放出されるように調整され、もう一方は「減圧供給弁」で、ある一定の圧力を下回らないように弁が開き系内に加圧ガスが供給されるように調整されている。放出側は低温になるため、フィン式昇温器が設置されている。系統図は以下のようになる。

標準的な設定圧力は 0.20 MPa（下限）～0.25 MPa（上限）とした。このときの液体窒素の飽和温度は 87 K～89 K となる。

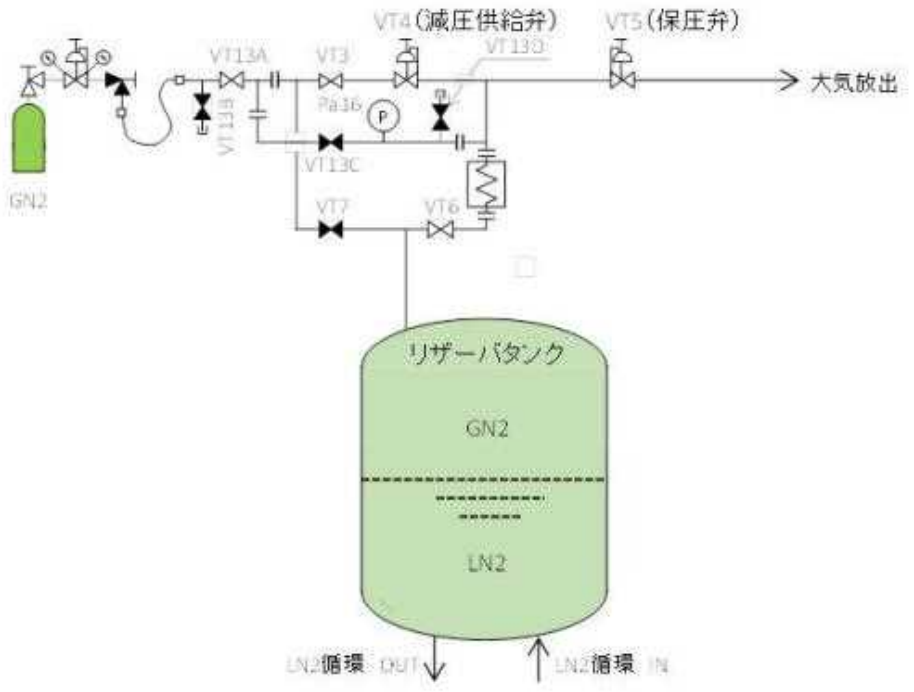


図 2.2.2.3- 37　システム圧力保持機構

（ウ）リザーバタンク設計
リザーバタンクは上記（イ）項に示された圧力保持及び液体窒素の減少分を補うための液体窒素をあらかじめ保持しておくために必要となる。従って、以下の液体窒素減少の要因を考慮した容量とする必要がある。
・ 熱膨張変化
・ 保圧弁から大気への放出
また、容器設計の一般事項である以下の量も考慮しなければならない。
・ 最低液量
・ 最低気相容積
・ 製造誤差による容量減

（参考：石狩プロジェクトの例）
① 回線 1
液体窒素循環量：3.67 m^3
→熱膨張変化（5%）+最低液量（10%）+最低気相容積（10%）+製造誤差（2%）
＝1.00 m^3
② 回線 2
液体窒素循環量：6.54 m^3
→熱膨張変化（5%）+最低液量（10%）+最低気相容積（10%）+製造誤差（2%）
＝1.96 m^3

なお、石狩プロジェクトでは 1 回の運転期間が 3～4 ヵ月程度であったため、保圧弁からの大気放出に伴う減少量は考慮していない。実運用ではメンテナンス期間と液体窒素の追加時期を考慮し容量を決定する必要がある。

（エ）安全設計
超電導ケーブルの布設は公道に埋設或いは地上布設することが基本となるため、周囲に対して安全性が確保されなければならない。以下の 2 ケースにおいて検討する必要がある。

ケース 1 ：断熱層の真空悪化時に、内管の液体窒素への入熱上昇に伴い内圧が上昇する。
ケース 2 ：内管が破損し、断熱層に液体窒素が漏えいすることで圧力が上昇する。

何れの場合も安全弁を設置することで対応するのが一般的であるが、安全弁の設置場所は冷却ステーション内に限定されるため、設置する安全弁が十分に機能し、安全性が確保できるかについて解析等により検証する必要がある。

（参考：石狩プロジェクトの例）
ケース 1：端末クライオスタットに安全弁を設置することで安全性を確保。
断熱層が大気圧になったときの入熱による液体窒素の蒸発量が安全弁の吹き出し能力を超えないことを解析により検証した。なお、安全弁の設定圧力は設計圧力である 0.5 MPa（リザーバタンクの設定圧（0.25 MPa）の 2 倍）とした。
必要な安全弁の座口の径と台数は以下の通りとなった。

	安全弁座口の径	
	16 mm	19.5 mm
回線 1（500 m）	4 台	0 台
回線 2（1000 m）	2 台	4 台

ケース 2：外管両端に設置される真空タイトの圧力逃がし板（安全弁）により安全性を確保。
漏えい流量の主体は液体窒素循環ポンプからの流量（40 L/min）であり、これを所要吹き出し量として、安全弁の吹き出し能力が十分であるかを検討した。
必要な安全弁の座口の径と台数は以下の通りとなった。

	圧力逃がし板（安全弁）座口の径
	85.9 mm
回線 1（500 m）	2 台（外管両側各 1 台）
回線 2（1000 m）	2 台（外管両側各 1 台）

（オ）配管・配置設計
冷　却システムの配管・配置設計は冷却ステーション（建屋）の寸法に影響する。コストへの影響も大きいため、以下を考慮した上で可能な限り省スペースとする必要がある。
・ 循環に支障のない、効率の良い配管ルートとなっていること。・・・(A)
・ 各機器のメンテナンススペースが確保されていること。
・ 運転時の作業範囲、操作場所、動線が考慮されていること。
・ 初期冷却／液張り時に必要な予冷器及びローリーが配置できること。
・ 断熱配管の特殊な取り合い構造（バイヨネット継手）が考慮されていること。

上記(A)に関して、計測等に伴う分岐管及び弁類が多く設置された複雑な配管系統では、温度勾配に伴う局所的なガス化とそれによる液振動が発生しやすく、ポンプの安定運転を阻害する要因となる。ポンプが不安定になると、流量が頻繁に変動し、この結果、冷凍機の温度制御も不安定になり、系全体の安定性に支障を来たす。
計測等に伴う分岐管及び弁類の設置はできるだけ最小として、液振動の発生しにくい配管配置を検討する必要がある。

（参考：石狩プロジェクトの例）
上記を考慮した石狩プロジェクトにおける冷却ステーション内の機器及び配管の配置は図 2.2.2.3–38 及び図 2.2.2.3–39 の通り。なお、同プロジェクトは実証設備であるため、多数の計測機器が取り付けられ、それに伴う分岐も多い。このため循環を妨げるほどではないが、定期的な液振動が観測されている。

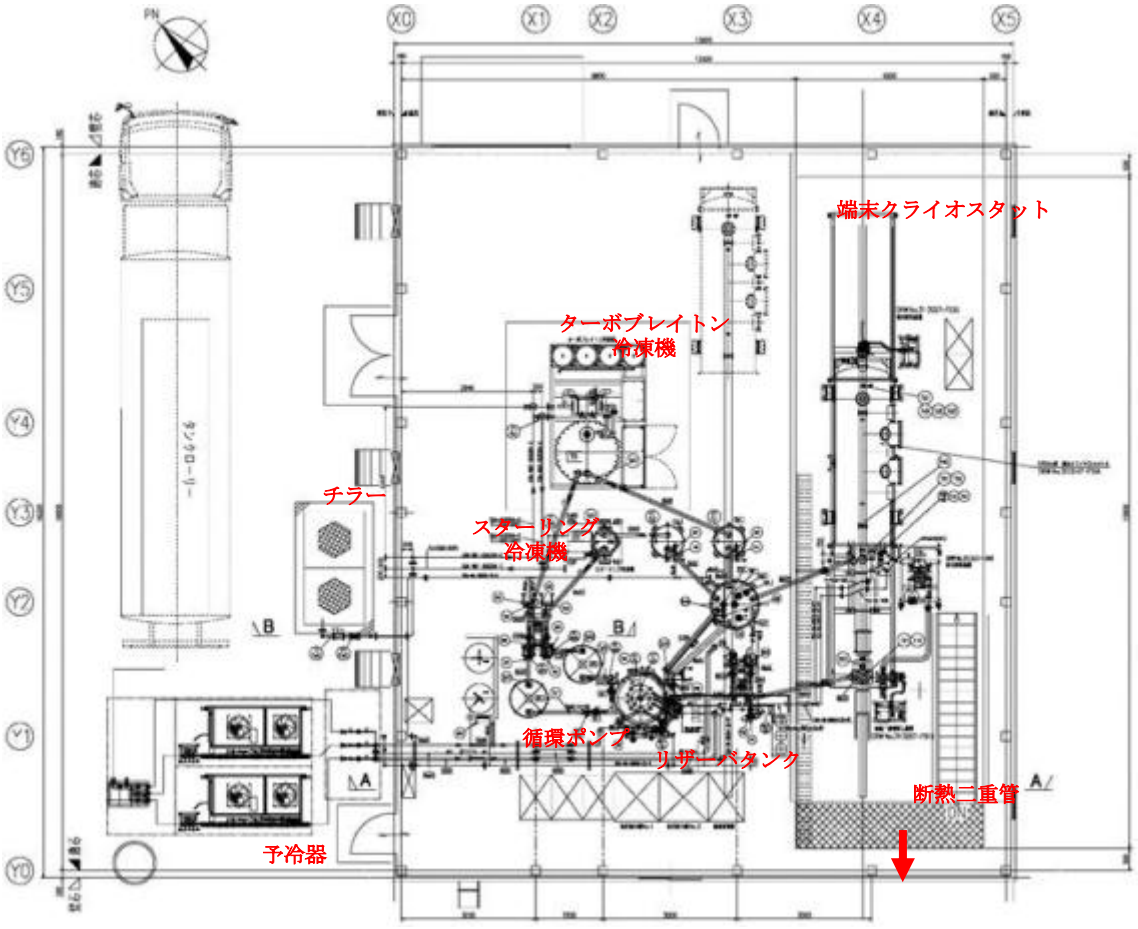


図 2.2.2.3- 38 回線 1 冷却ステーション配置図

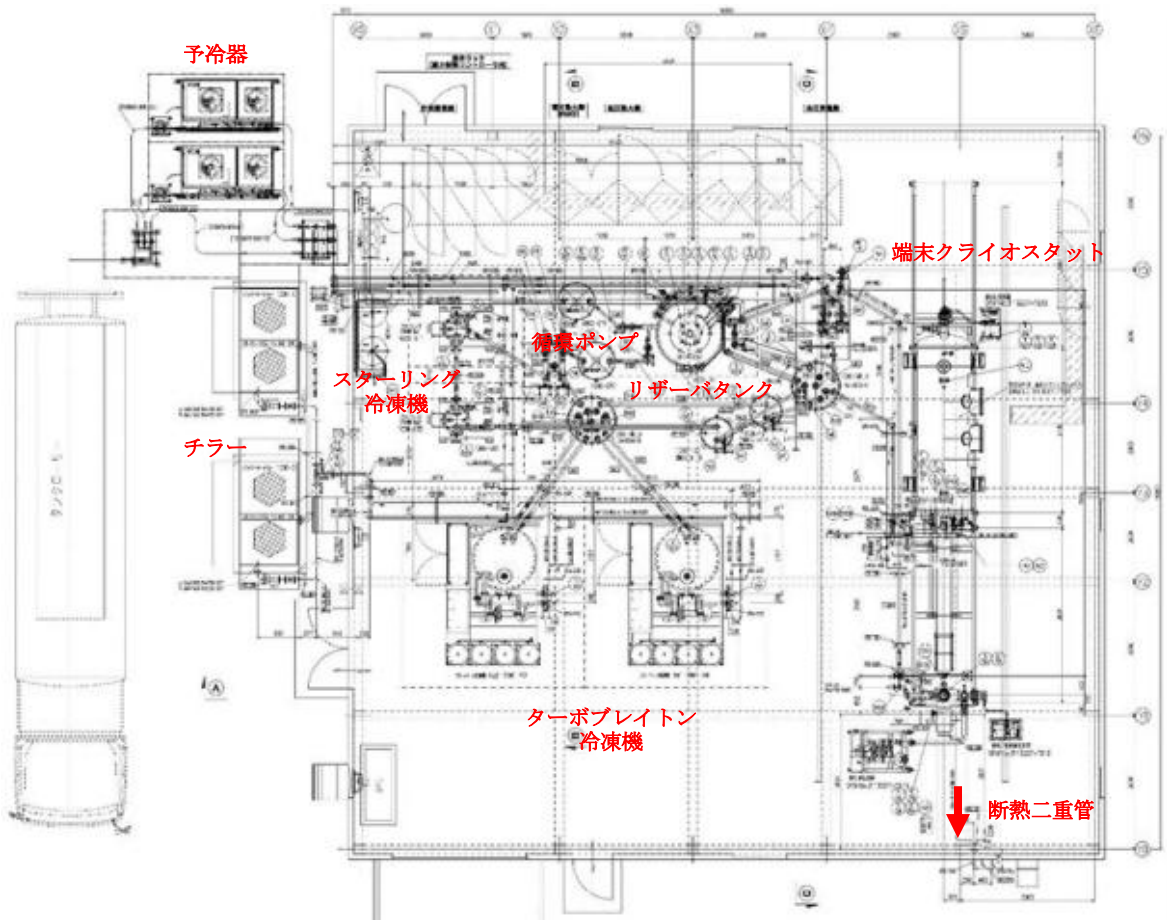


図 2.2.2.3- 39 回線 2 冷却ステーション配置図

(8)型式試験

電力ケーブルはその電圧階級、絶縁方式、単芯や多芯など構造などそれぞれの仕様の違いによりそれぞれ特定の型を持つ。このように同一の型のものが多数生産される電力製品については、その製品の型式を承認する試験制度があり、その試験に合格すれば当該型式の製品についてメーカーは届出製造事業者として承認され、当該製品を生産するための一定水準の製造・品質管理能力があると認められることになる。

直流送配電用超電導ケーブル自身には現在の所同様の型はないが、この考え方に準拠してケーブルの技術基準を満足する設計、試験を実施することが将来的に必要となる。

試験の仕様について電力ケーブルにおいては、IEC（ International Electrotechnical Commission, 国際電気標準会議）にてその電気試験方法や用品規格が規定されており、これに基づいて日本国内では JEC（電気規格調査会）規定や電力会社による独自の規定が採用されている。超電導ケーブルも IEC もしくは JEC に準拠した電力ケーブルと同等の性能を有することが必要であるとともに、超電導特有の性能である、超電導通電特性(*Ic*)、低温電気絶縁性能、断熱性能などの特性についても別途規定する必要がある。これらの内電気的な特性については IEC の中で 1989 年に TC（Technical Committee, 専門委員会）の 90 番目の組織として TC90 : Superconductivity が発足し、超電導に関わる世界標準の策定が進められている。

電気絶縁に関しては交流用途では、今回のような液体窒素含浸紙絶縁方式では、OF ケーブルの高電圧試験法(JEC-3401-2006)、もしくは経産省省令に基づく「電気設備の技術基準の解釈　第 1 章 総則　第 3 節 電路の絶縁および接地」などに準拠した設計・試験が行われている。

（参考：石狩プロジェクトの例）

石狩プロジェクトでは、現地でのロードサイクル試験などに対する規格については、CIGRE Working Group B1.32 の'Recommendations for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated Voltage up to 500 kV'に準拠した試験で対応することとした。

ア．DC 耐電圧・Imp 試験(雷、サージ重畳)

DC 耐電圧試験、Imp 試験などについてはたとえば CIGRE ワーキンググループ WG 21.02 の'Recommendations for tests of power transmisssion DC cables for a rated voltage up to 800 kV (ELECTRA 72, 1980-REVISION)'を参考に実施することとなる。

これに従えば耐電圧試験に関しては、常時使用電圧の 1.8 倍を導体－シース間に 15 分印加すること、サージ重畳試験については定格課電を 2 時間実施した後 IEC230 に規定された、想定されるサージ電圧の 1.15 倍の負電圧を 10 回印加し、放電させることなく正電圧を続けて 10 回印加しその後元の電圧に復帰させること、雷インパルス試験については 2 時間負極性で定格電圧を印加した後正電圧のインパルス電圧を 10 回重畳し、放電の後今度は 2 時間正極性で定格電圧を印加した後負電圧のインパルス電圧を 10 回重畳する（雷インパルス電圧については最大雷インパルス保護レベル(LIPL)に対して 1.15 倍の電圧で実施することとなる）こと、などを参考にして試験条件を決めることになる。

（参考：石狩プロジェクトの例）

石狩プロジェクト向けコアでは上記規格に依らず、耐電圧試験は 20 kV-5 分、Imp 試験については+/-100 V を 3 回実施した。また、回線 1 においては、太陽光発電の定

格電圧が 400 V であり、【高圧又は特別高圧の電路の絶縁性能】（省令第 5 条第 2 項）第 15 条　高圧又は特別高圧の電路の 7000 V 以下の電路で規定されている通り、最大使用電圧の 1.5 倍の直流電圧で試験することになり、600 V での耐圧試験を現地で実施している。この条項においてはインパルス試験については定義されていないため実施しておらず、モノポール設計であるためサージ重畳などの極性反転試験も実施していない。

イ．I_c 測定

設計表に基づいて製作された超電導導体コアの通電特性を確認するため、I_c 測定試験を実施する。I_c 測定方法については TC90 において線材に対する規格化を進めているが、コア形状の導体に対してはまだないのが現状であり、国際規格会議などを利用して各メーカーの測定方法、解析方法など比較し、規格化を進めることが必要となる。

（参考：石狩プロジェクトの例）

石狩プロジェクトでの測定方法を参考に説明する。

図 2.2.2.3-40 に示す通り建屋 1 側に端末 A、建屋 2 側に端末 B が設置されており、この 2 つの端末はジョイントを介して 500 m 長の超電導コアで接続されている。コアには通電用の内導体、外導体が同軸に配置されており、ここでは端末 A 側の外導体と内導体を短絡させ、端末 B 側にて DC 電源の＋側を外導体に、－側を内導体にそれぞれ接続する。このようにして、外導体→内導体方向への往復電流を流す回路を形成する。端末 A と端末 B の超電導コアの両端には、今回電圧タップを取り付けており、通電の際この電圧を図 2.2.2.3-41 のように観測することにより通電時の超電導状態の変化を観測することが出来る。

超電導状態であることの指標としては、導体 1 cm 当たりの発生電圧を用いて定義することが現在一般的である。定義としては、導体電圧（電界）が 0.1 μV/cm もしくは 1 μV/cm を超えた時点の通電量を臨界電流 *Ic* とする。すなわち、今回の回路においては 500 m 区間での発生電圧がたとえば 1 μV/cm 定義においては 1 μV/cm × 50000 = 50 mV の電圧が発生した時点で臨界電流に到達したことになる。実際の解析においては、ジョイント部に最大 30 nΩの接続抵抗があるため、この常伝導による発生電圧を差し引くことにより超電導コアそのものの特性を評価することが出来る。

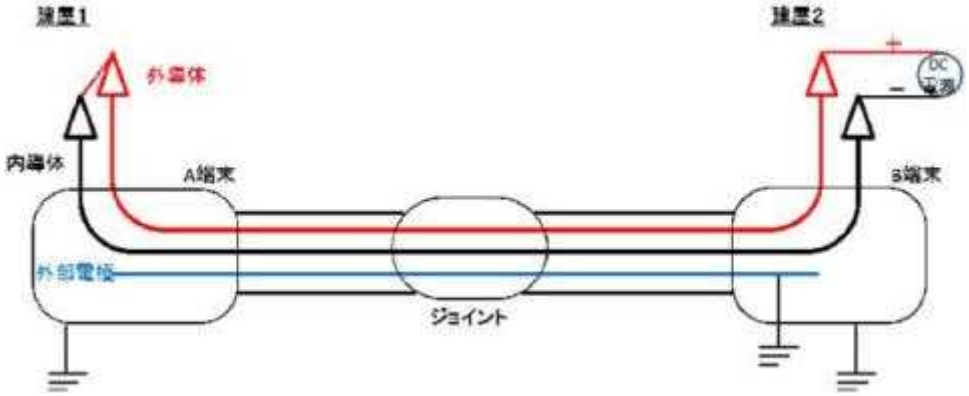


図 2.2.2.3－ 40　*Ic* 測定回路例（石狩）

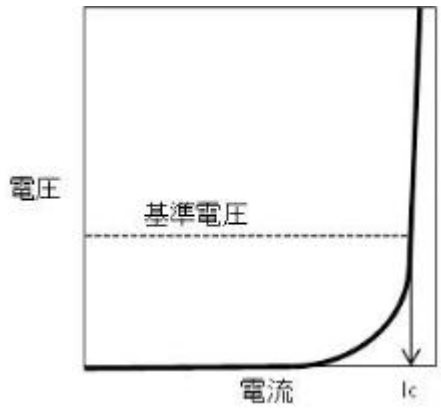


図 2.2.2.3- 41 通電－電圧特性(*I*－*V*カーブ)

ウ．極性反転試験

極性反転試験条件としては CIGRE ワーキンググループ WG 21.02 の 'Recommendations for tests of power transmisssion DC cables for a rated voltage up to 800 kV (ELECTRA 72, 1980-REVISION)'を参考に実施することとなる。試験条件を以下にまとめる。

1) 8 時間通電を行い、U_{TP1}(=対大地間定格電圧 U_0×1.45)の電圧を印加する。
4 時間毎に印加電圧極性を反転させる。
2) 16 時間課通電を停止する。
3) この条件で 10 日間試験を行う。

なお、石狩プロジェクトではモノポール運用であるため、これに関連する試験は実施していない。

エ．侵入熱試験

負荷時など超電導ケーブルシステムの各部熱負荷が安定している状態で測定し、ベースとなる熱負荷を求める。これに基づいて課通電や日間温度変化、液体窒素の循環状態などの変化に伴う熱負荷変動の予測を行える様にする。

熱負荷測定に際しては、流量をたとえば 3 点(*Q1*、*Q2*、*Q3* L/min）と変化させ、各部温度差を校正する「△T 法」を用い、精度向上を図る。

校正後の温度差 *dT'*(K)を用い、循環質量流量 *M*(kg/sec)、体積流量 *Q*(L/min)、液体窒素密度 ρ(kg/L)、液体窒素定圧比熱 *Cp*(J/kg/K)から各部熱浸入量 *W*(W)を(1.2.2.3-6)式の通り求める。

$$W = Cp \times M \times dT'(Q)$$
$$= Cp \times Q \times (\rho/60) \times dT' \quad (\mathrm{W}) \qquad -(1.2.2.3\text{-}6)\text{式}$$
$$\text{ここで、} \quad dT'(\mathrm{Q}) = dT(\mathrm{Q}) - \delta \ (\mathrm{K})$$

ある区間の流量 *Qi* における温度差を *dT(Qi)*とすると、流量を 3 点変化させると *dT(Q)*、*dT(Q2)*、*dT(Q3)*が得られる。液体窒素の圧力損失を無視すると、横軸を 1/*Qi*、縦軸を *dT(Qi)*とした場合、この 3 点を結ぶ直線は理論的には同一直線上を通り、温度計に誤差が無い場合は原点を通る（*dT(∞)*=0 のため）はずである。

誤差がある場合には原点から δ(K)ずれた点を通るため、実験結果より直線近似式を求め、δ を評価する。補正して熱負荷を計算する。またその傾きは *Q*×*dT(Q)*であり、熱負荷に比例するため、δ を用いずに得られた傾きを用いて計算しても同様の熱負荷計算となる。

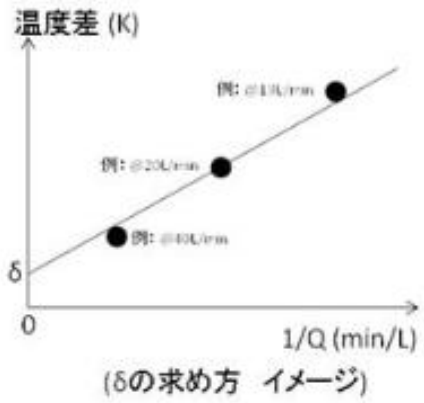


図 2.2.2.3- 42 △T 法による温度差校正のイメージ

オ．ロードサイクル試験

布設後、定格通電状態で一定の期間通電 ON、OFF を繰り返すことにより、通電による発熱等によりシステムに異常が無いかを確認する。この模擬試験により、長期の送電負荷変動を経験するケーブルシステムの健全性を確認する。ロードサイクル試験条件としては CIGRE ワーキンググループ WG 21.02 の'Recommendations for tests of power transmisssion DC cables for a rated voltage up to 800 kV (ELECTRA 72, 1980-REVISION)'が参考になる。この Recommendation によれば、以下の 1)、2)を合計 20 日間実施することとなる。

1) 正極 U_T（=対大地間定格電圧 U_0×1.85)を印加した状態で 8 時間通電、16 時間非通電を 10 日間実施
2) 負極 U_T（=対大地間定格電圧 U_0×1.85)を印加した状態で 8 時間通電、16 時間非通電を 10 日間実施

（参考：石狩プロジェクトの例）
石狩プロジェクトでは、回線 2（1 km） にて以下の条件にてロードサイクル試験を実施した。

- 冷凍機出口温度：70 K、循環流量：40 L/min（ポンプ 2 台直列運転）
- 電流変化：（通電 8 時間＋通電なし 16 時間）×20 サイクル
- 電流値：1 kA

試験の結果、通電電流の繰り返しの変化に対して、冷却システムの制御の応答性が良く、温度、圧力、流量が安定していることを確認した。また、通電時の HTS 導体電圧の安定性（0.06μV/cm）を確認した。

カ．PQ テスト

PQ テスト(Prequalification test)は事前資格審査とも呼ばれ、たとえば IEC62067 や CIGRE recommendations for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 500 kV などで規定されている方法により実施される。この試験は対象となるケーブル、機器などのモデル線路を布設・組立し、それを用いて 365 日間の課電、サージ重畳試験（正極、負極それぞれ 10 回）、その語の解体調査による異常のないことの確認を実施するなど、長期に及ぶ各項目の試験を実施するものである。

石狩プロジェクトでは本試験を実施しなかったが、将来的に実用化の段階では実施を検討する必要がある。

2.2.2.4　製造

（1）超電導ケーブルコア

ア．コア設計書

1.2.2.3（1）節で示したコア設計に基づき、コア設計書を作成する。設計書には各構成材の材料、寸法、単位重量などが記されており、超電導導体や紙絶縁紙などについてはそれらの幅や厚み、巻き付けピッチ・ギャップ、積層枚数などが記述されている。製造工程毎にその設計書に記載された仕様で製造が進められる。表 2.2.2.4-1 に設計書の元となる主な設計仕様を再掲する。

表 2.2.2.4- 1　超電導ケーブルコア　主な設計仕様

	回線 1　【5kA 仕様】	回線 2　【2.5kA 仕様】
超電導線 DI-BSCCO®	TypeHT-CA（I_c≧180A）	内導体：TypeHT-CA （I_c≧180A） 外導体：New TypeHT-CA （I_c≧220A）
フォーマー	裸銅線円形集合導体（130sq）	
クッション層	PPLP：3mm 厚	
超電導 内導体	1 層目：12 本、300mm (S) 2 層目：12 本、300mm (Z) 3 層目：13 本、300mm (S)	1 層目：12 本、300mm (S) 2 層目：12 本、300mm (Z)
内絶縁層	半導電/PPLP：2mm 厚/半導電	
超電導 外導体	1 層目：17 本、350mm (Z) 2 層目：18 本、350mm (S)	1 層目：15 本、350mm (S)
外絶縁層	半導電/PPLP 2mm 厚/半導電	
外部電極	銅テープ（100μm）	
保護層	クラフト紙：2mm 厚／布テープ：1mm 厚	
外径	42mm	40mm
重量	3.1 kg/m	2.6 kg/m
設計 I_c (1μV/cm)	≧6.6 kA（内導体） ≧6.3 kA（外導体）	≧4.3 kA（内導体） ≧3.3 kA（外導体）

イ．製造手順、管理項目

型式試験などをへて設計を完了した超電導ケーブルについて、製造を進めることとなる。図 2.2.2.4-1 に一般的な超電導ケーブルの製造工程の概略としてケーブルコアの製造手順を示す。フォーマーの外周に超電導導体を集合したのち絶縁処理をおこない、超電導シールド層の施工を行う。過電流保護対策として、超電導シールド層上に銅導体を併せて施工する場合もある。コアを保護するクラフト紙等を巻き付けた段階で、超電導ケーブルコアが完成する。石狩プロジェクトのように現地に別途断熱管が施工される場合にはこの状態でサンプルによる出荷試験を経て、ドラムに巻き付けて現地に輸送される。

なお、3 心一括型の場合は、コアを集合機により 3 心より合わせる工程が入り、場合によってはさらにより合わせた 3 心コアを断熱管内に収納したのち、PVC もしくはポリエチレンによる防食層処理を行い、ケーブルの製造を行う場合もある。

ケーブルコア製造の後、サンプルによる出荷試験を実施すると共にドラムに巻きつけ出荷を行う。

製造中の主な管理項目は、各工程での外径、導体や紙巻き工程でのピッチ、巻き乱れや変形がないことの構造検査等である。

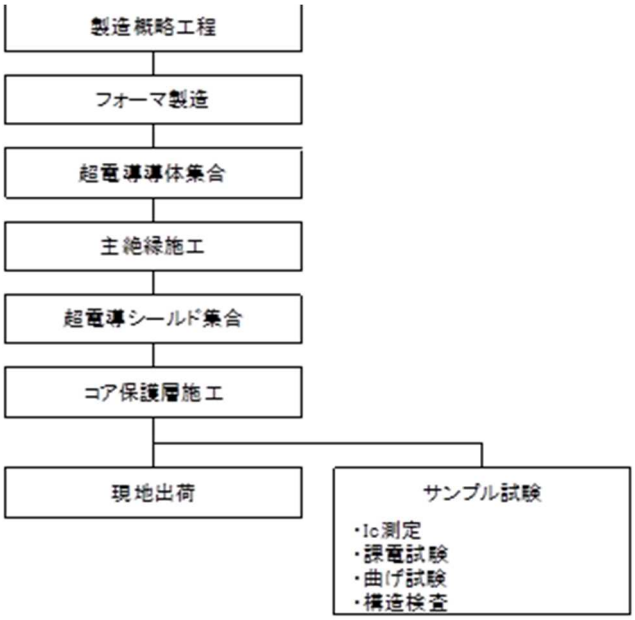


図 2.2.2.4- 1　超電導ケーブル（コア）製造工程の例

ウ．サンプル試験（曲げ試験、*Ic* 試験、課電試験、インパルス試験）　★

製造の各工程で正しく超電導ケーブルが製作されているかを確認するために、出荷前のケーブルコアを抜き取り、電気的、機械的、構造的なサンプル試験を実施する。

（参考：石狩プロジェクトの例）

石狩プロジェクトでのサンプル試験結果の例を示す。図 2.2.2.4-2 に示すように回線 1 向けに製作した 220 m 長と 320 m 長の 2 本のケーブルからサンプリングを行い、表 2.2.2.4-2 に示す試験を実施しそれぞれ良好な結果を得た。



図 2.2.2.4- 2　ケーブルコアの写真（回線 1　220 m ケーブル、320 m ケーブル）

表 2.2.2.4- 2　ケーブル出荷試験項目、結果

試験	評価対象	条件	結果	判定
外観検査	ケーブル全長	外傷・巻き乱れ等の異常なきこと	外傷・乱れ等の異常なし	良好
構造検査	短尺サンプル	サンプル解体により、構造に異常なきこと	外傷・乱れ等の異常なし 本数・巻きピッチに異常なし	良好
導体抵抗試験	ケーブル全長	フォーマーの直流電気抵抗を計測 設計値：0.14 mΩ/m	0.143 mΩ/m (220 m,320 m)	良好
臨界電流試験	短尺サンプル	*Ic* ≧ 設計値（線材 *Ic* の総和、@77 K、1 μV/cm 定義）	220 m 往路：7350 A (*Ic*2:6770 A) 復路：7020 A (*Ic*2:6360 A) 320 m 往路：7360 A (*Ic*2:6780 A) 復路：7040 A (*Ic*2:6470 A)	良好
曲げ試験	短尺サンプル	Φ2500（出荷ドラム胴径）両曲げ 2 往復で 超電導に劣化なきこと	φ1750 曲げまで劣化なし	良好
課電試験	短尺サンプル	DC 20 kV×5 分間 Imp ±100 kV/各 3 回 各条件で絶縁破壊なきこと	絶縁破壊なく電圧を保持することを確認	良好

表に示す各試験項目について以下で補足する。

(ア)　導体抵抗試験

製作したケーブル全長を用いて、室温中でフォーマー部に直流電流を通電し、フォーマー両端部の電圧を計測し、電気抵抗が設計値と同等（20℃換算）であるかを確認した。

ケーブルコアの出荷巻き完了後に、全長で導体抵抗の計測を実施した。結果、単位長さ当たりの抵抗値は 0.143 mΩ/m となり設計値 0.140 mΩ/m と同等であることを確認した。

(イ)　出荷ケーブル *Ic* 測定

製造したケーブルコアよりサンプルを 2 m 切り出し、*Ic* 特性を確認した。サンプルをオープンバス中の液体窒素に浸漬して通電し、発生電圧より *Ic* 値を求めた。測定結果を図 2.2.2.4-3、図 2.2.2.4-4 に示す。それぞれのケーブルコアの往路導体、復路導体の *Ic* は共に設計 *Ic* 相当の値を示し、良好であることを確認した。

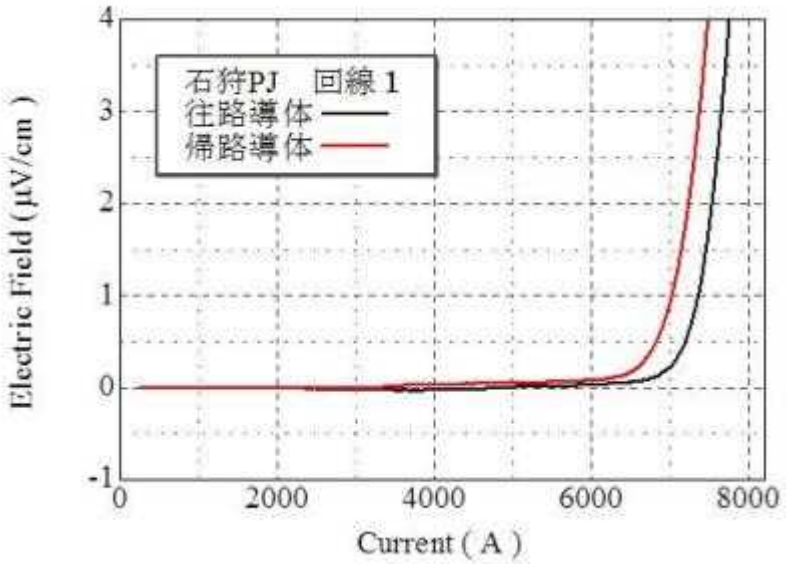


図 2. 2. 2. 4− 3　*Ic* 測定時の *I-V* 曲線（220 m コアサンプル）

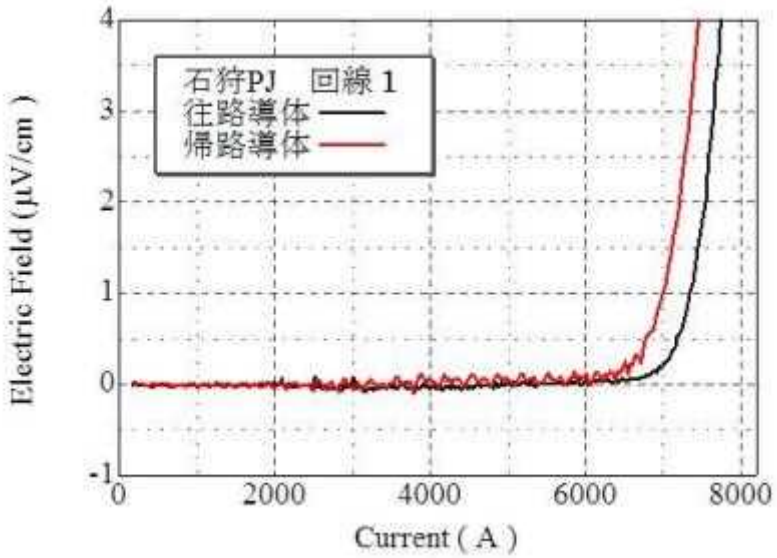


図 2. 2. 2. 4− 4 *Ic* 測定時の I-V 曲線（320 m コアサンプル）

(ウ)　曲げ試験

製造したケーブルコアより 3 m 長のサンプルを切り出し、曲げ試験を行った。曲げ条件は曲げ直径がφ2500、φ2000、φ1750 の 3 条件を実施した。曲げ操作ののちサンプルを冷却して臨界電流を評価し、曲げによる *Ic* 特性の変化を評価した。図 2.2.2.4–5 の通り曲げによる *Ic* の低下は確認されず、ケーブル曲げ許容条件よりも小さい曲げにおいても特性良好であることを確認した。

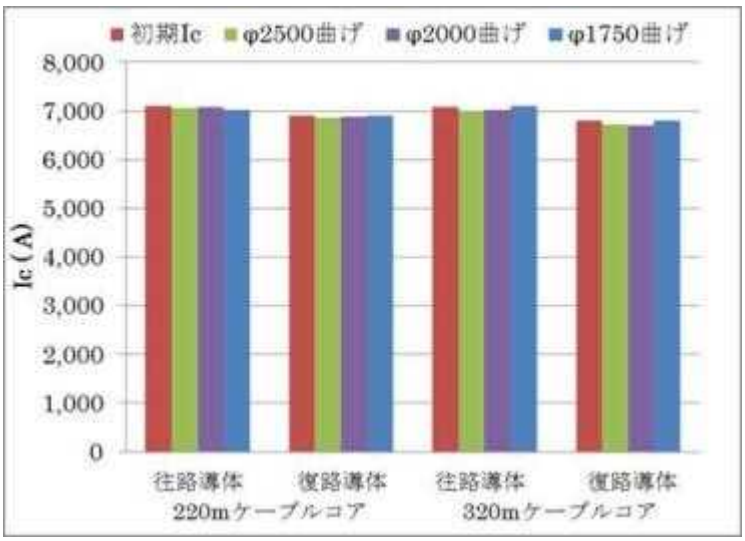


図 2. 2. 2. 4− 5 曲げ試験前後の *Ic* の変化

(エ)　課電試験

製造後のサンプルを図 2.2.2.4-6 に示す課電装置に組み込み、液体窒素温度 77.3 K 以上、内部圧力 0.2 MPaG 以下のサブクール環境下に置いた状態で DC 20 kV-5 分間、および+/-100 kV のインパルス課電試験を行い、絶縁破壊なきことを確認した。



図 2.2.2.4- 6　課電試験実施の写真

(2)送電システム

本節では送電システムとして現地出設置・運用される電気、制御及び監視設備装置の製造、検査について記載する。一般的には工事については事業者が制定する基本設計条件書などに従い実施され、現地で建設業法上必要な場合は、現場代理人等の監理技術者資格を有するものが工事監理することなどが盛り込まれる。

適用法規については、日本工業規格(JIS)、日本電機工業会標準規格(JEM)、電気設備技術基準などが該当する。

ア．電気・監視設備製造

受電盤、配電盤の一般的な製造、検査、据付工程は以下の①～⑦の通りである。

① ラック製造
② 機器取付
③ 配線作業
④ 銅バー取付作業
⑤ 仕上げ作業
⑥ 工場内検査（機能試験）立合検査含む
⑦ 現地機器調整（組込み、配線接続、動作確認）

監視設備の一般的な製造、検査、据付工程は以下の①～⑦の通りである。

① 工場内製作（機器）
② ラック部材取付け
③ 屋外計測器用筐体製作
④ 計測機器設置
⑤ 工場内製作（ソフトウェア）
⑥ 工場内検査（機能試験）立合検査含む
⑦ 現地機器調整（組込み、配線接続、動作確認）

（ア）受電盤、配電盤：機能確認試験

完成した受電・配電盤について外観・構造検査、動作試験、絶縁試験、耐電圧試験を実施し、設計通りの性能、仕様を有することを確認する。表 2.2.2.4-3 にこれら試験の検査基準、検査要領および判定基準例をまとめる。

表 2.2.2.4- 3　受電・配電盤の試験項目

<table>
<tr><th>検査項目</th><th>検査内容</th><th>検査基準</th><th>検査要領</th><th>判定基準</th></tr>
<tr><td>外観構造検査</td><td>盤外形寸法</td><td>仕様書により JIS C 4620、JEM1459 の外形寸法による。</td><td>スケールにより寸法測定。(JIS 1 級)</td><td>JEM1459 の許容範囲で有れば合格とする。（JEN 日本電機工業会規格）
<table><tr><th rowspan="2">外形寸法</th><th colspan="2">許容差</th></tr><tr><th>一般許容</th><th>組合せ許容</th></tr><tr><td>120 を超え 400 以下</td><td>±2.0</td><td>±3.0</td></tr><tr><td>400 を超え 1000 以下</td><td>±2.0</td><td>±4.0</td></tr><tr><td>1000 を超え 2000 以下</td><td>±3.0</td><td>±6.0</td></tr><tr><td>2000 を超え 4000 以下</td><td>±4.0</td><td>±8.0</td></tr><tr><td>4000 を超過</td><td>−</td><td>±10.0</td></tr></table>尚、材料の材質、サイズが仕様書通りで有れば合格。</td></tr>
<tr><td></td><td>構　造</td><td>当社基準
JIS C 4620 による。
※
SPHC の厚さ許容差は JIS G 3131 による。</td><td>目視、感触
※
1.60mm 以上 2.00mm 未満 ±0.16mm
2.00mm 以上 2.50mm 未満 ±0.17mm
3.15mm 以上 4.00mm 未満 ±0.21mm</td><td>下記項目を満足すれば合格とする。
1．扉と本体の隙間は基準通りか。
2．天盤での隙間は基準通りか。
3．溶接不良が無く、補強が充分で必要な強度は保たれているか。
4．扉の開閉動作は容易で、ガタが無く、開度は充分か。
5．換気孔及び換気扇は適正か。
6．防そなどの処置として直径 10mm 以上の丸棒の入る穴、又は隙間は無いか。
7．開閉装置の操作、機器の点検が、安全、容易に出来るか。
8．締付け確認をする。（スプリングワッシャーが完全に潰れている事、端子部の電線が手の力で動かない事、締付けチェックマークがしてある事。）</td></tr>
<tr><td></td><td>塗装色確認</td><td>指定色</td><td>基準色見本を盤表面にあて目視する。</td><td>基準とおおむね相違ない時、合格とする。</td></tr>
<tr><td></td><td>塗装平滑度</td><td></td><td>塗装面を各方面から目視し確認する。</td><td>極端な凸凹やうねり、キズ、シワ、タレが無い時合格とする。</td></tr>
<tr><td></td><td>塗装状態</td><td></td><td>目視により確認。</td><td>外面、内面を総合的に目視し、塗り残し、折り曲げの内側等の塗り残し、塗り重ね、不足等が無い時合格とする。</td></tr>
<tr><td></td><td>塗膜厚</td><td>JSIA-T1020</td><td>膜厚計にて測定</td><td>当社基準・屋内屋外形 60 ミクロン以上・屋外耐塩塗装 90 ミクロン以上
・屋外重耐塩塗装 110 ミクロン以上</td></tr>
<tr><td></td><td>員数定格</td><td>仕様書による</td><td>目視により確認</td><td>仕様書通りの機器を取付けてある時合格とする。</td></tr>
<tr><td></td><td>機器配置</td><td>仕様書による</td><td>目視又は測定により確認</td><td>各機器が仕様書通りに配置、取付けてある時合格とする。</td></tr>
<tr><td></td><td>入力、出力端子位置</td><td>仕様書による</td><td>目視又は測定により確認</td><td>仕様書通りの端子位置でしかも外線絞り込みに支障が無ければ合格とする。</td></tr>
<tr><td></td><td>盤内配線</td><td>JIS C 4620
JIS C 8480</td><td>目視又は測定により確認</td><td>最小絶縁距離が、JIS C 4620、JIS C 8480 を満足していれば合格とする。</td></tr>
<tr><td>動作試験</td><td>シーケンス試験</td><td>仕様書による</td><td>動作フロー通りであるか実際に動作させ確認する。
必要で有れば、模擬回路にて確認する。</td><td>下記項目を満足すれば合格とする。
1．手元操作の確認。
2．遠方操作の確認。
3．盤内部、外部とのインターロック確認。
4．故障の確認。
5．各表示（ランプ表示）の確認。
運転・停止・故障・フリッカー。</td></tr>
<tr><td></td><td>計　器
耐電器試験</td><td>メーカー管理値</td><td>定負荷試験</td><td>電圧、電流を通電し、計器の動作が適正で有る事を確認。
メーカー管理値の範囲で有れば合格とする。</td></tr>
<tr><td></td><td>機　構
動作試験</td><td>仕様書による</td><td>手動及び実際に動作させ確認</td><td>引出し機構、操作装置、インターロック機構が正常に動作している事を確認。</td></tr>
<tr><td>絶縁試験</td><td>絶　縁
抵抗試験</td><td>JIS C 4620
JIS C 8480</td><td>絶縁抵抗計にて測定。
耐電圧試験の前後に測定</td><td>下記表の絶縁抵抗値以上を合格とする。
<table><tr><th>測定個所</th><th>絶縁抵抗値</th><th>測定器</th></tr><tr><td>高圧回路一括対地間</td><td>30MΩ以上</td><td>1000V 絶縁抵抗計</td></tr><tr><td>低圧回路一括対地間</td><td>5MΩ以上</td><td>500V 絶縁抵抗計</td></tr></table></td></tr>
<tr><td>耐電圧試験</td><td>耐電圧試験</td><td>※1
JIS C 4620
※2
JIS C 8480
※3
JEM1460</td><td>耐電圧試験器にて印加</td><td>下記表の商用周波数耐電圧を所定の個所に 1 分間印加しても異常が無ければ合格とする。
<table><tr><th colspan="2">電圧印加箇所</th><th>商用周波数耐電圧値</th></tr><tr><td colspan="2">高圧回路一括と対地間※1</td><td>22000V（1 分間）</td></tr><tr><td rowspan="3">高圧回路一括と対地間※1</td><td>60V 以下</td><td>1000V（1 分間）</td></tr><tr><td>60V～250V 以下</td><td>1500V（1 分間）</td></tr><tr><td>250V～600V 以下</td><td>2000V（1 分間）</td></tr><tr><td rowspan="2">低圧回路一括と対地間※2</td><td>60V 以下</td><td>1000V（1 分間）</td></tr><tr><td>60V～300V 以下</td><td>2000V（1 分間）</td></tr><tr><td rowspan="3">低圧回路一括と対地間※3</td><td>60V 以下</td><td>1000V（1 分間）</td></tr><tr><td>60V～250V 以下</td><td>1500V（1 分間）</td></tr><tr><td>250V～1000V 以下</td><td>2E+1000V 最低 2000V（1 分間）</td></tr></table></td></tr>
</table>

(イ) 監視盤：機能確認試験

製造の完了した監視盤について、工場出荷前に動作確認試験を実施する。表 2.2.2.4-4 に石狩プロジェクトで用いた監視盤の試験項目をまとめる。

表 2.2.2.4- 4　監視盤動作確認試験（石狩プロジェクトの例）

試験項目		試験方法及び判定方法
1	アナログ情報収集及びしきい値超過警報試験	各センサーに模擬入力した各種アナログ情報が正しく表示されることを確認する。またしきい値を超えた値の場合、警報が発報されることを確認する。
2	センサー故障および運転接点情報収集試験	各センサー（模擬入力）故障情報および運転接点情報等が表示されることを確認する。
3	警報しきい値設定	警報しきい値を変わることでき、さらにしきい値を超える値を入力することで、警報が出ることを確認する。
4	制御入力設定	制御の入出力設定により、機器の運転情報を確認する。
5	統計処理	収集した各センサーの情報についての統計情報が表示されることを確認する。
6	データファイル記録 冷凍機運転情報収集 ケーブル運転情報収集	PC のデータファイルの確認 冷凍機またケーブルの運転情報の表示確認
7	トレンドグラフ表示確認試験	運転状況のトレンドグラフの表示確認

(3)断熱二重管

ア．製作時の環境管理

1.2.2.3（２）節に示したように、断熱二重管の断熱性能の達成のためには、製造時に断熱層の汚染を防ぐよう環境管理が必要である。防塵・防湿の他、脱脂洗浄を行うとともに作業時には油脂の付着を防ぐため、手袋等を用いて作業を行うように留意する必要がある。

イ．内管の工場検査項目

内管（ケーブル管、リターン管）は冷媒を流し、内部が高圧となるため、所定の耐圧をもつこと、また断熱層に対して十分気密が保たれている必要がある。

（参考：石狩プロジェクトの例）

検査は高圧ガス保安法の冷凍保安規則の技術基準に準拠し、表 2.2.2.4-5 に示す項目を実施した。

表 2.2.2.4- 5　内管の工場検査項目例（石狩プロジェクト）

名称	内容
材料納入検査	材料証明書による確認
肉厚検査	設計圧力に対する必要最小肉厚以上を満たす 設計圧力 0.5 MPa の場合の必要最小肉厚 60.5 mmφ：0.34 mm 76.3 mmφ：0.38 mm
溶接部の浸透探傷検査	冷凍保安規則関係例示基準 28. 溶接部の非破壊試験に準拠 欠陥指示模様の無い事
耐圧検査	冷凍保安規則関係例示基準５ 耐圧試験の規定に準拠。 試験圧力：（設計圧力＋大気圧）×1.25（窒素ガス） 試験時間：5 分 ふくらみ、伸び、漏洩等の異常なしで合格 ベローズについては設計圧力の４倍の耐圧試験を実施
気密検査	冷凍保安規則関係例示基準６ 気密試験の規定に準拠 加圧スニファー法でリークを判定 試験圧力：設計圧力＋大気圧（ヘリウムガス） 試験時間：15 分 漏洩等の異常なし、ヘリウムの検知なしで合格

ウ．外管の検査項目

外管の検査項目を表 2.2.2.4-6 に示す。主に外観検査とピンホール検査を実施した。なお、ヘリウムリーク試験は内管を組み込んだ後に実施する。

表 2.2.2.4- 6　外管の工場検査項目例（石狩プロジェクト）

名称	内容
材料納入検査	材料証明書による確認
溶接部の目視検査	溶接部の割れ、ピンホール、アンダーカット等、溶接欠陥がない事
防食試験（ライニング部）	ピンホール試験

エ．多層断熱膜（MLI）の施工

MLI の断熱性能は MLI の層間の真空度および熱接触の度合いに大きく依存する。その指標となるのが、層密度（N/L；N は MLI の積層枚数、L は MLI の積層厚さ）である。そのため、N/L を適正値になるように施工法を管理する必要がある。また、MLI の施工に際しては、防湿・防塵に細心の注意を払う必要がある。

（参考：石狩プロジェクトの例）

N/L が適正値になるように、MLI メーカー指導のもとで、テスト配管を用いた施工試験を行い、MLI の端部の重ね合わせ距離（管理値）や端部の処理法等の確認を行い、施工要領書を作成した。

また防塵、防湿のため作業時には以下のことに留意した。

1） 施工前に内管の外表面をアルコール等で洗浄する
2） MLI の取り扱い時にはゴム手袋を使用し、皮脂の付着を防ぐ
3） メーカーからの梱包状態で保管し、作業直前に開封し使用する分のみを取り出す

オ．完成品の検査

完成品の工場検査項目例を表 2.2.2.4-7 に示す。
また石狩プロジェクトの配管の外観写真を図 2.2.2.4-7 に示す。



Type 1(輻射シールド無)　Type 2（輻射シールド付）

図 2.2.2.4- 7　断熱二重管外観写真

表 2.2.2.4- 7　完成品の工場検査項目例

名称	内容
外観検査	表面に性能上支障を及ぼすような有害な傷、打痕、クラック等がないこと。溶接部の割れ、ピンホール、アンダーカット等、溶接欠陥がない事。
寸法検査	図面に記載された寸法公差を満足すること。
ヘリウムリーク検査	外管と内管の組み合わせで実施。 外管：真空法 外管を真空排気し、ヘリウムガスを溶接部に吹きかける 内管：真空容器法 内管を設定圧（0.5 MPa）のヘリウムガスで加圧する 試験時間：15 分 判定基準：リーク速度　1.00×10^{-9} Pa・m^3／s 以下

カ．輸送時の管理

配管内部の汚染の程度により到達真空度が決まるため、輸送時の防湿・防塵に細心の注意が必要である。

（参考：石狩プロジェクトの例）

・防湿・防塵方法：断熱二重管は工場完成後、断熱層は窒素ガスパージし、内管はビニール（二重）、断熱層にはゴム製のエンドキャップを取り付けた。さらにまとめてビニール（二重）、エアキャップ（二重）さらに最外にビニールで覆う。各ビニール層毎に除湿剤（シリカゲル、200 g）を内側に添付した。
・輸送時の振動管理：輸送時の内管の振動によるサポートの破損を防ぐため、輸送用仮サポートを管の両端に取り付けた。また、輸送中の外傷を防止するために車上にて断熱二重管を固定するとともに、端部はエアキャップにて保護。輸送管理のため、ショックウォッチ（5 G タイプ）を個々に添付するとともに、搭載する車両には加速度センサーを取り付け、モニターを行った。（目標管理値：3 G 以下）

(4)端末クライオスタット

ア．製作時の環境管理

端末クライオスタットの断熱性能の達成のためには、製造時に断熱層の汚染を防ぐよう環境管理が必要である。防塵・防湿の他、脱脂洗浄を行うとともに作業時には油脂の付着を防ぐため、手袋等を用いて作業を行うように留意する。

イ．端末クライオスタットの工場検査項目

端末クライオスタットについて内槽の冷媒は高圧となるため、高圧ガス保安法の冷凍保安規則の技術基準に準拠し、以下の検査を実施する。

① 高圧ガス保安法準拠対応の検査（内槽）
② 外観・寸法検査
③ ヘリウムリーク検査（運転温度での検査を行う）

表 2.2.2.4- 8　端末クライオスタット内槽の工場検査項目例（石狩プロジェクト）

名称	内容
材料納入検査	材料証明書による確認
肉厚検査	強度計算の最小肉厚値以上であること
溶接部の浸透探傷検査	冷凍保安規則関係例示基準 28.溶接部の非破壊試験に準拠 欠陥指示模様の無い事
耐圧検査	冷凍保安規則関係例示基準５．耐圧試験の規定に準拠。 試験圧力：（設計圧力＋大気圧）×1.25（窒素ガス） 試験時間：5 分 ふくらみ、伸び、漏洩等の異常なしで合格
気密検査	冷凍保安規則関係例示基準６．気密試験の規定に準拠 加圧スニファー法でリークを判定 試験圧力：設計圧力＋大気圧（ヘリウムガス） 試験時間：15 分 漏洩等の異常なし、ヘリウムの検知なしで合格

表 2.2.2.4- 9　組立品の工場検査項目例（石狩プロジェクト）

名称	内容
外観検査	表面に性能上支障を及ぼすような有害な傷、打痕、クラック等がないこと。溶接部の割れ、ピンホール、アンダーカット等、溶接欠陥がない事。
寸法検査	図面に記載された寸法交差を満足すること。
ヘリウムリーク検査	外槽と内槽の組み合わせで実施。内槽の液体窒素を充填して冷却後ヘリウムガスで追い出した状態で試験を実施 外槽：真空法 外槽を真空排気し、ヘリウムガスを溶接部に吹きかける 内槽：真空容器法 内槽を設定圧（0.5 MPa）ヘリウムガスで加圧する 試験時間：15 分 判定基準：リーク速度　1.00×10^{-9} Pa・m^3／s 以下

ウ．輸送時の管理

配管内部の汚染の程度により到達真空度が決まるため、輸送時の水分の除去および防塵に細心の注意が必要である。端末クライオスタットにおいては、開口部は輸送用フランジにて封止し、窒素パージを行って輸送した。また、MLI は現地での端末組立工事時に施工した。

(5)電流リード

ア．出荷検査項目　★

電流リードの製造についての工場検査は IEC 61788-14 に従い実施する。

（参考：石狩プロジェクトの例）

石狩プロジェクトにおいては表 2.2.2.3–15 に示す項目について実施した。また絶縁抵抗試験も実施した。各試験方法に際して、試験検査要領書を作成し、手順に従って行う。また、絶縁抵抗試験、耐電圧試験、気密試験(He リーク試験)については、PCL を絶縁フランジに取り付けた状態にて試験を行う。

表 2.2.2.4– 10　電流リードの工場検査（全数検査）

名称	検査方法	検査内容
構造検査試験	材料納入検査 外観検査 寸法検査	材料証明書による確認 著しい傷、汚れがないか マイクロメーター又はノギスによる計測
接続抵抗試験	室温において四端子法にて測定	仕様書に記載する抵抗値となっているか
定格電流通電試験	定格電流まで通電（温度測定、電気抵抗測定、外観）	各部の電圧が設計通りか 過剰発熱等が生じないこと
絶縁抵抗試験	1 kV の電圧を印加し、絶縁抵抗を測定	2000 MΩ以上であること
耐電圧試験	10^{-2} Pa 以下にて 定格電圧、5 分または 10 分間	リーク電流が観測されないこと
He リーク試験	電流リードを取り付けた状態で、He 吹き付け法により実施	リーク速度　1.00×10^{-9} Pa・m³／s 以下

He リーク検査および絶縁抵抗試験方法は以下のように実施した。

① 図 2.2.2.4-8 のように絶縁フランジに取り付けた PCL を接続する。
　ライン端子: PCL 高温側電極
　アース端子: 真空容器外壁
　銅リード下部: 外周の PCL を全て短絡（静電シールドと外周にある PCL の 1 本は、リード線により接続されている）

② PCL を取り付けた GFRP フランジを真空容器に取り付ける。

③ 真空排気し、PCL 取付部およびフランジ面に He ガスを吹き付け、He リーク試験を実施（1.0×10^{-9} Pa･m³/sec 以下）

④ 測定時の天候、気温、湿度、測定器の仕様を記録。

⑤ 1 kV の電圧を印加し、表示計の値が安定したところで絶縁抵抗値を読み取る。

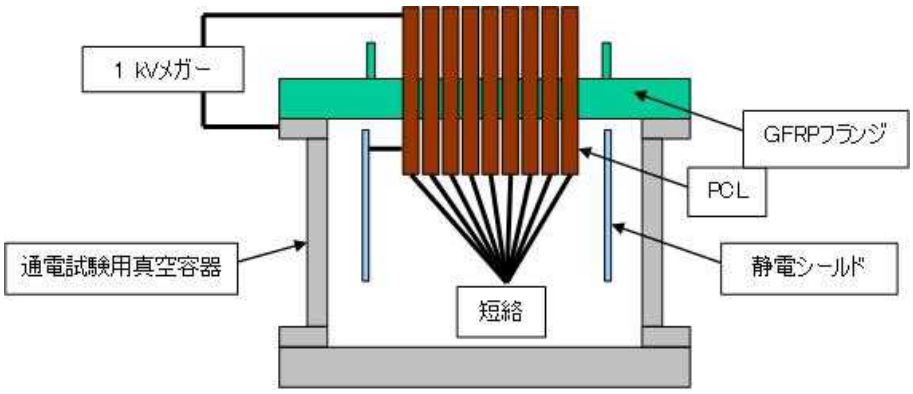


図 2.2.2.4- 8 絶縁抵抗試験概略図

(6)液体窒素循環システム

ア．冷凍機・ポンプ製造

（ア）冷凍機単体検査

ターボブレイトン冷凍機とスターリング冷凍機の検査は高圧ガス保安法に準拠し、以下の内容が必要となる。製作工場によっては液体窒素循環ライン内での試験が難しい場合もあるため、製作工場で困難な試験を現地の冷凍機システムを使って試験することも考慮する必要がある。現地で試験を実施するためには、冷凍機システムに負荷ヒーター等の直接実送電に関係のない設備を設置する必要があるが、ケーブルも含めた全冷却システムの試運転を実施する前に、冷凍機システムのみの性能試験を実施することは、初期の重大なトラブルを防止し、また、メンテナンス性の向上においても有効である。

表 2.2.2.4- 11　冷凍機工場検査項目

名称	ターボブレイトン冷凍機	スターリング冷凍機
外観・寸法検査	・縦・横・高さ寸法 ・基礎ボルト穴径・ボルト間寸法 ・現地配管と取り合う配管の取り付け寸法 ・外観に有害な傷がないこと	
耐圧検査	・水圧：設計圧力×1.5 ・水圧が困難な場合或いは冷凍機本体で水の使用が不可な部位は気圧（窒素ガス）：設計圧力×1.25 とする。	
気密検査	・気圧（窒素ガス）：設計圧力×1	
液体窒素回路真空側洩れ検査	・真空法にて 1.0×10^{-9} Pa・m^3／s 以下	
真空ケース大気側洩れ検査	・真空法にて 1.0×10^{-9} Pa・m^3／s 以下	
性能検査	・自動冷却運転確認 ・無負荷状態で常温から 66 K に到達することを確認 ・温度コントロール運転確認 ・66 K で一定時間温度コントロールできることを確認 ・冷凍能力確認 ・冷凍機内のヒーター熱負荷にて 66 K 以下に冷却できることを確認	・冷凍能力確認 ・冷凍機内のヒーターの消費電力により所定の温度（例：77 K）における冷凍能力を確認
電気試験	・絶縁抵抗試験	

表 2.2.2.4- 12 冷凍機現地検査項目

名称	ターボブレイトン冷凍機	スターリング冷凍機
性能検査	現地冷凍機システムにて液体窒素循環中の下記能力を確認 ①熱負荷追随性 疑似負荷ヒーターにより設計熱負荷をかけ、所定の温度で運転できるかを確認する。 ②冷凍能力 スターリング冷凍機を系統から切り離し、単独運転する。疑似負荷ヒーターの負荷を段階的に上昇させ一定温度で運転できることを確認する。	現地冷凍機システムにて液体窒素循環中の下記能力を確認 ①冷凍能力 ターボブレイトン冷凍機を系統から切り離し、単独運転する。疑似負荷ヒーターの負荷を段階的に上昇させ一定温度で運転できるかを確認する。

(参考：石狩プロジェクトの例)

現地冷凍機システムにて上記性能検査を実施した結果は以下の通り（回線 1 の例）

・ターボブレイトン冷凍機

①熱負荷追随検査

【検査条件】

ターボ冷凍機側流量：40 L/min、スターリング冷凍機側流量：20 L/min

冷凍機設定温度：70 K（ターボ冷凍機）

ヒーターによる熱負荷： 1.6 kW（断熱二重管～端末クライオスタットの設計熱侵入量）

【検査結果】

設計熱負荷 1.6 kW に対して冷凍機出口温度 70 K で安定

更に、熱負荷 2.7 kW に変更すると、約 2 時後に冷凍機出口温度 70 K で安定

→熱負荷に対して十分に追随できることを確認

②冷凍能力検査

【検査条件】

ターボ冷凍機側流量：40 L/min、スターリング冷凍機側流量：0 L/min

冷凍機設定温度：70 K

ヒーターによる熱負荷： 1.6 kW

【検査結果】

機器仕様に対して十分な冷凍能力（2.2 kW）を確認

・スターリング冷凍機

①冷凍能力検査

【検査条件】

スターリング冷凍機側流量：20 L/min、ターボ冷凍機側流量： 0 L/min

コールドヘッドヒーター設定：OFF（制御しない）

ヒーターによる熱負荷： 1.6 kW

【検査結果】

機器仕様に対して十分な冷凍能力（0.81 kW）を確認

（イ）ポンプ単体検査

液体窒素循環ポンプの検査は高圧ガス保安法に準拠し、以下の内容が必要となる。冷凍機と同様に製作工場において液体窒素循環ライン内での検査が困難な場合は、現地の冷凍機システムを使って検査を行う。

表 2.2.2.4- 13　液体窒素循環ポンプ工場検査項目

名称	液体窒素循環ポンプ
外観・寸法検査	・縦・横・高さ寸法 ・基礎ボルト穴径・ボルト間寸法 ・現地配管と取り合う配管の取り付け寸法 ・外観に有害な傷がないこと
耐圧検査	・水圧：設計圧力×1.5 ・水圧が困難な場合或いはポンプ本体で水の使用が不可な部位は気圧（窒素ガス）：設計圧力×1.25 とする。
気密検査	・気圧（窒素ガス）：設計圧力×1
液体窒素回路真空側洩れ検査	・真空法にて 1.0×10^{-9} Pa・m³／s 以下
真空ケース大気側洩れ検査	・真空法にて 1.0×10^{-9} Pa・m³／s 以下
性能検査	・回転試験 大気中：15000 rpm、水中：6000 rpm
電気試験	・絶縁抵抗試験

表 2.2.2.4- 14　液体窒素循環ポンプ現地検査項目

名称	液体窒素循環ポンプ
性能検査	現地冷凍機システムにて液体窒素循環中のポンプの各回転数に於ける Q-H 曲線及び軸動力曲線を確認 回転数一定でポンプ下流の弁を絞ることにより流量を変化させ、その時の差圧を計測することにより得られる。

（参考：石狩プロジェクトの例）

現地冷凍機システムにてポンプ性能検査を実施した結果は以下の通り（回線 1 の例）

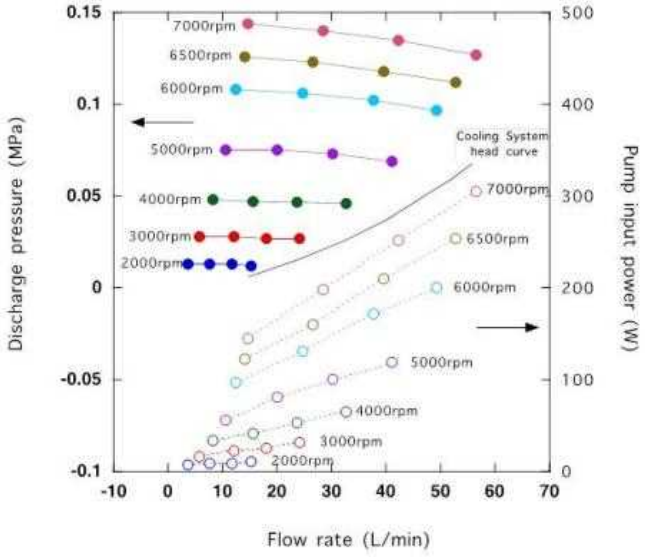


図 2.2.2.4- 9　液体窒素循環ポンプ Q-H 特性

（ウ）真空断熱配管単体検査

冷凍機システムにおいて、冷凍機及びポンプ等の機器間を接続する真空断熱配管は製作工場にて真空封じ切りで現地に出荷される。そのため、配管単体の必要な検査は全て工場にて実施される。真空断熱配管の仕様と検査内容は以下の通り。

表 2.2.2.4- 15 真空断熱配管仕様

	内管耐圧部	外管ジャケット部
設計温度	－210℃～＋40℃	0℃～＋40℃
設計圧力	0.9 MPa	－0.1013 MPa（真空）
主要材質	SUS304	SUS304
口径	25 A	65 A
入熱量	0.46 W/m（参考値）	
構造仕様	・封じ切り：安全弁機構付真空封じ切り弁 ・接続取合い：バイヨネット継手	

表 2.2.2.4- 16 真空断熱配管工場検査項目

検査項目	内容
外観・寸法検査	・組立寸法 ・肉厚、外径 ・外観に有害な傷がないこと
耐圧検査	・気圧（窒素ガス）：設計圧力×1.25
気密検査	・気圧（窒素ガス）：設計圧力×1
浸透探傷検査	・高圧ガス保安法 冷凍則保安規則 ・溶接部の非破壊試験に準拠
ヘリウムリーク検査	・真空吹き付け法にて 1.0×10^{-9} Pa・m^3／s 以下

2.2.2.5 工事

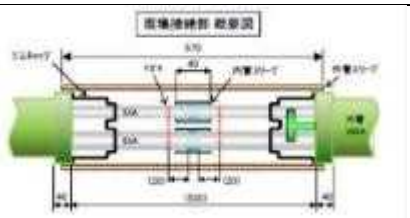
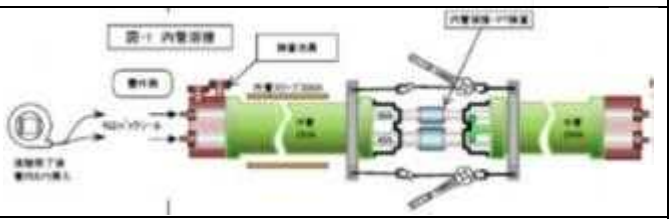
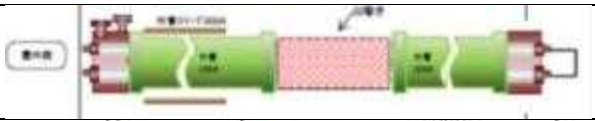
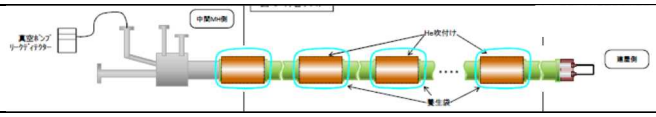
(1)断熱二重管

本節では直管ユニットによる断熱二重管の工事について記載する。断熱管は内管内に液体窒素が入り、内－外管間は断熱のため高真空に維持されている。このため、内管と外管それぞれについて、高い気密性が要求される。施工面では主に周囲環境管理と溶接管理であり、検査面では一般的なカラーチェックなどによる探傷試験に加え、He リーク試験や気密・耐圧試験などによる確認を実施する必要が高圧ガス保安法準拠を考慮すると必要となる。また、直管型の断熱二重管を地下埋設するためには、開削により設置場所の確保と、施工後の埋め戻し作業が必要となる。

（参考：石狩プロジェクトの例）

回線 1 の施工では建屋 1 から建屋 2 を結ぶルートをまず掘削し、二重断熱管をユニット毎に布設し、そのユニットを溶接して接続を行い、一連長とした。最終的には、断熱二重管部は地中に埋戻した。断熱二重管布設の施工手順を表 2.2.2.5-1 に示す。

表 2.2.2.5－ 1　断熱二重管布設手順

項目	内容	説明図等
(a)掘削	布設ルートに沿い掘削 地下水、土の飛散対策実施	
(b)二重管布設	二重管の搬入、仮置き	1ユニット＝12 m
	二重管の設置	規定の場所にユニットを重機で吊り上げ配置
	管合わせ、溶接準備	
(c)内管溶接	N_2を吹き流し、内管を溶接 溶接後、内部をカメラで検査	
	耐圧試験 スニファーチェック	0.66 MPaG(（設計圧力 0.5+0.1）×1.1)、10 分間 内管にヘリウムガスをいれ、ディテクターで漏れをチェック
(d)断熱巻付け	溶接部外側に断熱材を巻き付け	
(e)外管溶接	N_2を外管内部に吹き流し、外管を溶接	
(b)～(e)を繰り返し		
(f)外管テスト	外管内部を真空引きし、溶接個所に He ガスを吹き付けリークチェックを行う	
(g)防食処理	外管溶接部に防食処理を行う	
(h)埋戻し	全長、土砂にて埋め戻す	

断熱二重管の施工時の写真を図 2.2.2.5-1 に示す。



回線 1 ルートの掘削



内管溶接後



内管溶接部 SI 巻き付け



外管溶接



外管全長溶接後（曲り部）



外管全長溶接後（建屋 1 側）

図 2.2.2.5− 1　断熱二重管の施工時の写真

(2)超電導ケーブルコア

ア．ケーブル布設

ケーブルの布設工法は、断熱管の種類、布設場所の状況（占有可能ルート、埋設物、土質等）、ユーザーの意向などにより選択される。ここでは、表 2.2.2.5–2 に示すように断熱管の種類によりその特徴などをまとめる。この表 2.2.2.5–2 などに基づいて断熱管の種類、布設工法などを選択することになる。

表 2.2.2.5– 2　断熱管の種類による布設・建設工法の特徴

断熱管の種類	直管	コルゲート管
断熱管布設工法	開削のうえ建設（地中布設） 地上にて建設　（地上布設）	・開削、管路布設の後引入れ ・DD 工法(Direct Drilling)により開削せず管路布設の後引入れ（いずれも地中布設、管路へのケーブル引入れ張力計算必要） ・トラフ、暗渠布設
ケーブル用管路の有無	無し（直埋もしくは地上のため）	・有り（管路引き込みの場合。コルゲート管引入れ、保護のため） ・無し（開削、トラフ、暗渠接地の場合）
現地断熱管建設	ユニット毎に溶接、気密確認	不要
ケーブルコア布設	・断熱管建設後、コアを窒素槽に現地引入れ ・断熱管へのコア引入れ張力計算必要	不要（製造時コルゲート管内にコアを収納）
備考	・都市部では開削、地上建設が立地的に困難 ・大都市間等の長距離線路に向く	・既設管路への代替引替え可能 ・ケーブル単長制限のため一定区間毎にマンホールが必要

（参考：石狩プロジェクトの例）

回線 1 で行った断熱二重管と開削による地中布設の組合せでの工事について記載する。断熱二重管を現地に布設した後、ケーブルコアを断熱二重管の内管に引き入れる工法となる。

関係官庁および地権者との調整を行った上で、現地調査を実施し、既設埋設物と干渉しない布設ルートの設計を行い、図 2.2.2.5–2 のようなレイアウトを作成した。回線 1 はさくらインターネットが建設する太陽電池システムと、さくらインターネットのデータセンターを結ぶ送電線路になっており、長さ 500 m、ジョイント部が 1 箇所あり、全長が地下に埋設されている。

図 2.2.2.5–2 の通り、全長 500 m のケーブルルートには 2 箇所の曲がり部があるため、ケーブルコア引き入れ時には曲がり部での張力増加が予想される。このため事前にコア引き入れ時にダメージを与えないかどうかの検証が必要となった。検証には、断熱二重管の内管と超電導コア間の摩擦係数や、曲がり部での張力計算などが必要であり、これらのデータを収集するためにケーブルコアサンプルを用いて事前の検証を行った。



図 2.2.2.5- 2　回線 1 の建設ルート

（ア）摩擦係数確認

現地で使用される断熱二重管とケーブルコアのサンプルを用いて、摩擦係数を確認する試験を行った。図 2.2.2.5-3 のように SUS 製の模擬管路（4 m）の内部にサンプルケーブルコアを設置し傾斜させ、サンプルが滑り出した角度 θ と高さ h を測定することで、摩擦係数 μ （=tan θ ）を算出した。試験の結果、摩擦係数が 0.55～0.6 であることを確認した。

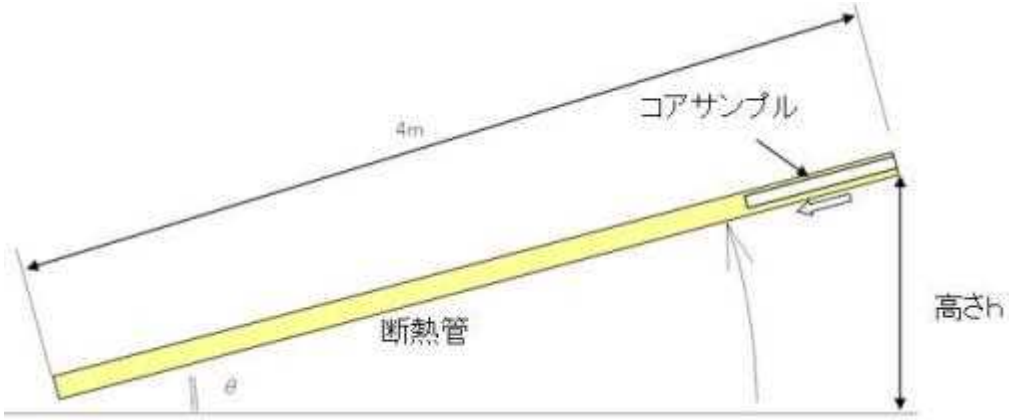


図 2.2.2.5- 3　傾斜試験概要図

（イ）引き込み検証

現地布設を模擬したモデル管路、コアを用いて引き入れ検証試験を行った。

① 模擬 SUS 管曲り部側圧影響確認試験

断熱二重管の内管と同等の水平曲がり模擬管路（SUS304、内径 65 A）を設置し約 30mの超電導ケーブルコアにバックテンションを付加しながらウィンチ及びボールローラを組み合わせ布設することで、曲がり部側圧に対する表面の影響および摩擦係数を確認した。引入れ後のケーブルコア表面に大きな異常はなかった。図 2.2.2.5-4 および図 2.2.2.5-5 に確認試験の様子を示す。



図 2.2.2.5- 4　曲がり試験状況



図 2.2.2.5- 5　試験状況（ウィンチ部）

（ウ）引き込み張力設計、ケーブル挿入方向確認

回線 1 の布設ルートは、図 2.2.2.5-2 に示すように、2 箇所の 90 度曲がりと、200 m と 300 m にケーブルコアを分ける形で、中間接続部が位置している。ケーブルコアの引込は、200 m 側と 300 m 側の 2 回に分けて行うことする。また、ケーブルコアの引込は、引き込む方向で張力が変わるので、200 m、300 m のそれぞれについて、引き込む方向を変えた場合の張力の計算を行った。結果を表に示す。尚、計算では 1.2 摩擦係数確認試験で得られた摩擦係数 0.6 を用いた。

張力計算結果を表 2.2.2.5-3 にまとめる。300 m 側の引込では、建屋 1 から引き込んだ場合、許容張力である 910 kg を超える結果となり、マンホール側から引き込むこととした。200 m 側の引込については、どちら側から引き込んでも布設張力は許容張力以下であるが、布設のスペースを考えて、マンホール側からの引込とした。

表 2.2.2.5- 3　回線 1 の布設張力計算結果

コア長さ	引込方法	最大張力(kgf)	側圧(kgf/m)
300 m コア	建屋 1→マンホール	1,345	183
	マンホール→建屋 1	664	24
200 m コア	建屋 2→マンホール	464	22
	マンホール→建屋 2	852	113

（エ）現地布設結果

（ウ）の検討結果に基づき、現地でのケーブル引き入れ作業を実施した。さくらインターネット横の建屋 1 と建屋 2 を結ぶ数に示した地下ルートに建設されている断熱二重管の内管に超電導ケーブルコアを引き込んだ。尚、ケーブルは途中でジョイントされるため、建屋 1～中間マンホール、建屋 2～中間マンホールの 2 区間に分けて、2 箇所の布設を行った。尚、ドラムの設置はスペースの関係から、中間マンホール側に設置した。

工事の概略フローは以下の通りである。また図 2.2.2.5-6 に、施工計画図を示す。

●中間マンホールから建屋 2 までの引込

布設準備→光ファイバー布設→管路導通試験（テストピース通し）→ケーブルドラム据付

→ケーブル布設

●中間マンホールから建屋 1 までの引込

布設準備→光ファイバー布設→管路導通試験（テストピース通し）→ケーブルドラム据付

→ケーブル布設

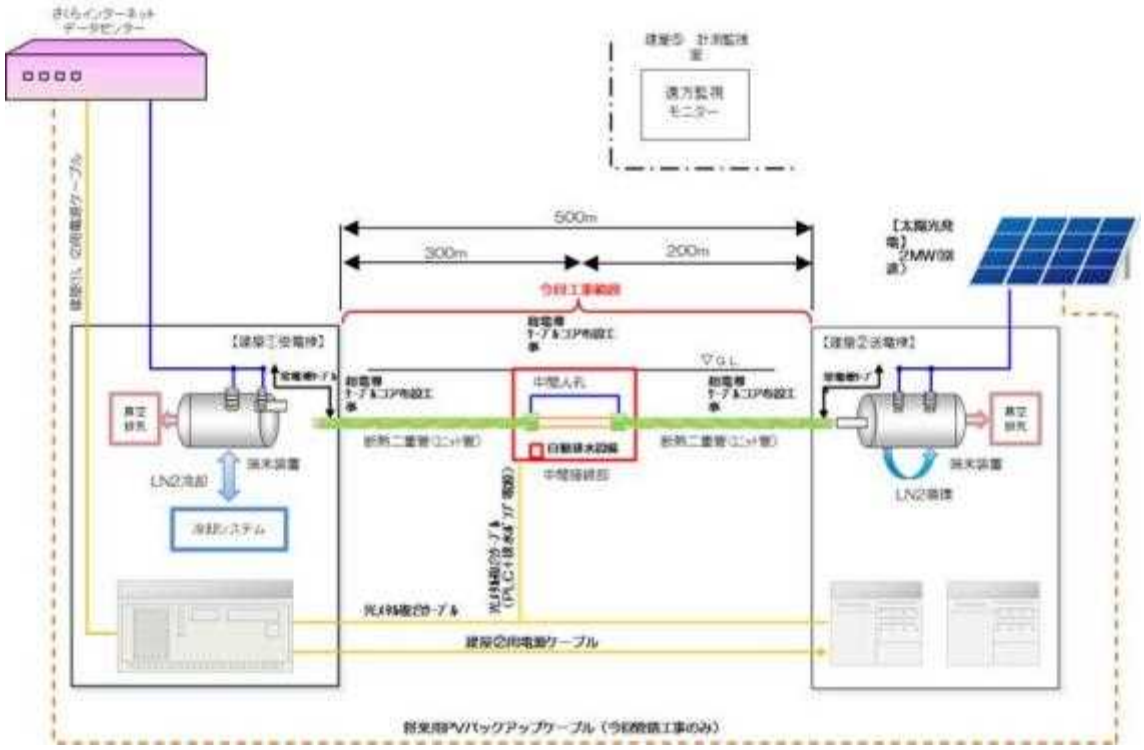


図 2.2.2.5- 6　ケーブル引入れ　施工計画図

以下に、200 m 区間、300 m 区間それぞれの布設工事結果をまとめる。

① 200mケーブル布設結果（中間接続部～建屋 2）

・準備状況



中間マンホール部ドラム据付

図 2.2.2.5- 7 布設準備状況

・管路導通試験結果

図 2.2.2.5-8 の通りテストピース（約 3 m のケーブルコア）をマンホール側から建屋 2 側へ線速約 3 m/分にて引き込み、特に途中で引っかかることなく、入線できることを確認した。尚、引込後のテストとピースについて確認したが、特に異常はなかった。



テストピースの引込

図 2.2.2.5- 8 テストピース引き込み試験

・ケーブルコア布設結果

中間マンホール側からケーブルコアを線速約 3 m/分にて建屋 2 側に向かって引き入れた。ウィンチ側の張力は引き入れの間、測定を行い、管理値である 900 kgf 以下であることを確認した。引き入れ後のコアの状況は良好であった。図 2.2.2.5-9 に布設張力の変化を、図 2.2.2.5-10 に布設時の写真を示す。

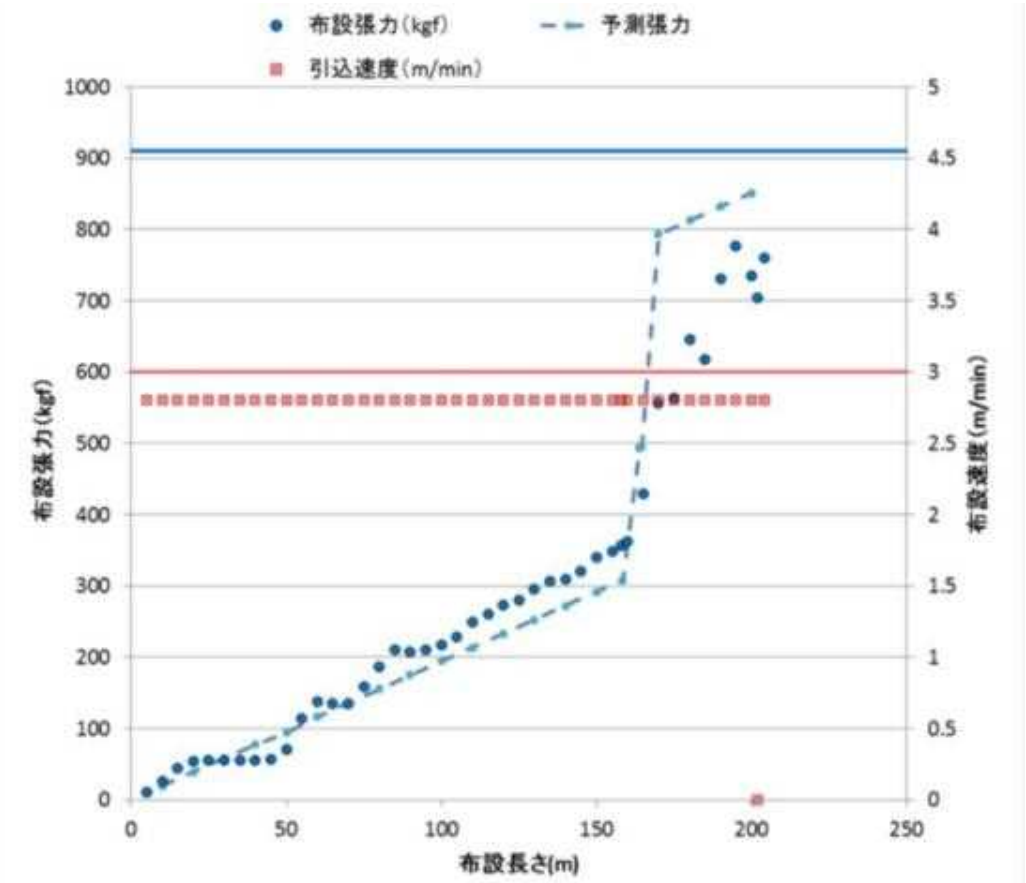


図 2.2.2.5- 9　コア 200 m 引き込み時の張力（中間マンホール～建屋 2）



引込時のドラム　　引き込み状況

図 2.2.2.5- 10　ケーブルコア布設状況（200 m）

②300 m ケーブル布設結果（中間接続部～建屋 1）

布設準備、管路導通試験については 200 m ケーブルと同様であるため、ケーブルコア布設結果のみを示す。中間マンホール側からケーブルコアを線速約 3 m/分にて建屋 1 側に向かって引き入れた。図 2.2.2.5-11 に引き入れ時の張力の変化を示す。ウィンチ側の張力は引き入れの間、測定を行い、最大値は管理値である 900 kgf 以下の 650 kgf であることを確認した。引き入れ後のコアの状況は良好であった。

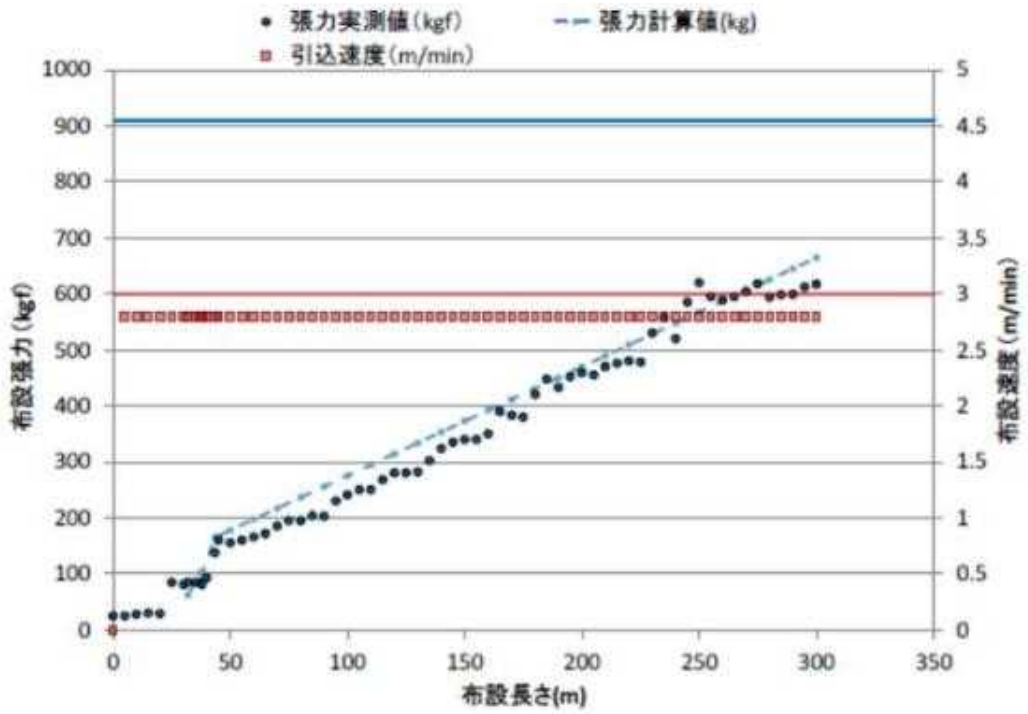


図 2.2.2.5- 11　コア 300 m 引き込み時の張力（中間マンホール～建屋 2）

イ．ヘリカル変形工事（熱収縮対策）

ケーブルの熱収縮対策として、石狩のシステムにおいては、可動式端末を用いる他、ケーブルコアを断熱二重管内でヘリカル変形させる手法を適用した。ヘリカル変形とは、具体的には、ケーブルコアを管路に布設後、一旦液体窒素にて冷却、熱収縮させた状態で両端固定後、昇温伸長させる方法で、伸長の過程でケーブルコアが自発的にヘリカル（螺旋）状に変形する性質を利用することにより、熱収縮分の余長をケーブル長全体にわたりかせぐ方法である。

ヘリカル変形工事の作業手順を図 2.2.2.5-12 に模式的に示す。ヘリカル変形工事は、超電導ケーブル布設に続いて実施する。

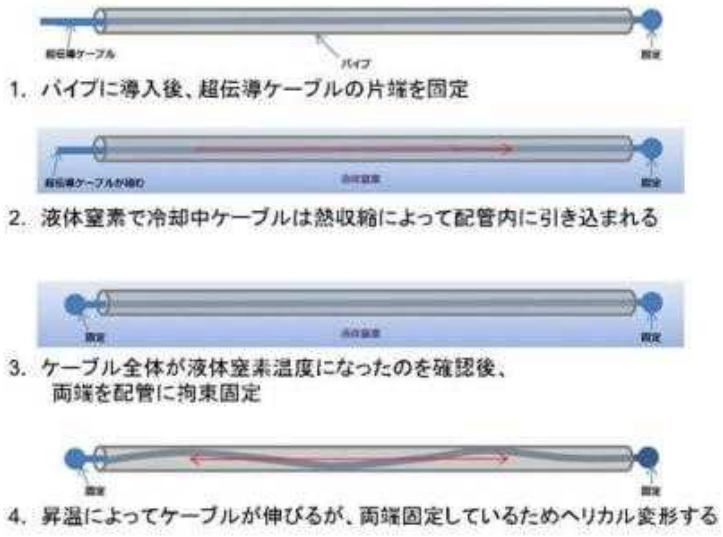


図 2.2.2.5- 12　ヘリカル変形手順

ヘリカル変形の工事計画策定にあたっては、ケーブル布設からの摩擦の影響も含めた応力分布を考慮する必要がある。図 2.2.2.5-13 にケーブルコア布設時のケーブル長に対する応力分布を示す。応力は x 軸方向に引き込むときの力によって発生する時を正にしている。ケーブルコアを配管内に引き込むにつれ、応力は大きくなっていく。この力は摩擦係数とケーブル自重で決まる。

次に、布設終了後の応力分布を図 2.2.2.5-14 に示す。両端の拘束を外した時、ケーブルコア両端での応力はゼロになるが、摩擦のためケーブルコア内部には応力が残る。例えば布設張力が最大 1 トンとすると、中心部には最大 500 kgf の力が残留する。

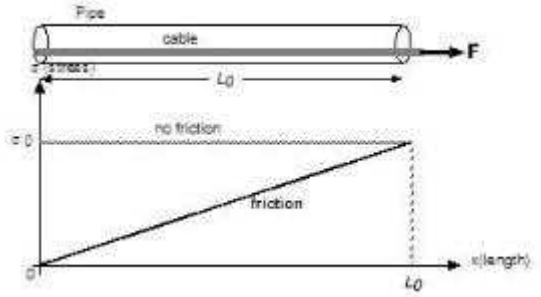


図 2.2.2.5- 13　ケーブルコア布設時の応力分布

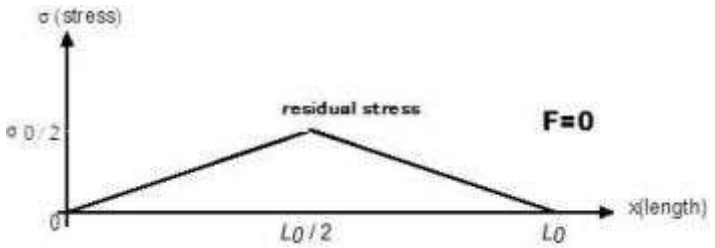


図 2.2.2.5- 14　ケーブルコア布設終了後の応力分布

この様な状況でケーブルコアの x=0 側を固定した状態で、冷却すると熱収縮により x=L_0側は配管内に引き込まれる。このときの力も摩擦で決まり、布設時の力と向きが逆で同じ大きさの力になる（図 2.2.2.5-15）。ケーブルコア布設後の残留応力と冷却時の熱収縮による力の和をとると、赤線で示したような応力分布になる。コアが完全に冷却されたときはこのような分布になっていると考えられ、右半分の力はゼロであり、また最大応力はケーブル布設時の最大布設張力となり、安全にケーブルを冷やすことが出来ると考えられる。

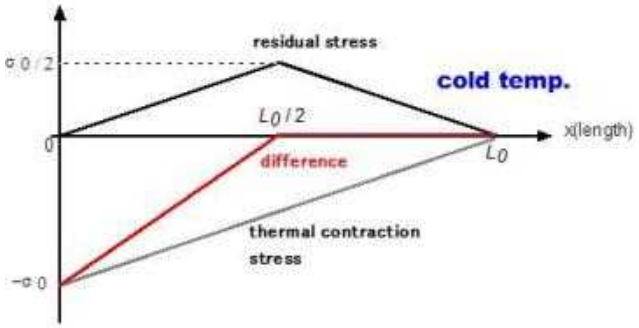


図 2.2.2.5- 15　ケーブルコアを冷却したときの応力分布

（赤線はケーブル布設時の残留応力と冷却時の熱収縮による応力の合成を示す）

（ア）ヘリカル変形工事に使用する機器構成

ヘリカル変形においては、ケーブルコアを液体窒素にて冷却するため、断熱二重管の両端に以下の機能をもった治具（ヘリカル変形仮容器）が必要となる。

・大きな熱収縮力（伸び力）に対して、ケーブルコアの固定を確実に行うことができること
・ケーブルコアの引き込まれた後に低温環境でケーブル固定を確実に行うことができること
・ケーブルコア両端に働く力を測定できるロードセルを取り付けること
・ケーブルコア引き込み量を測定する治具を取り付け可能であること
・冷却及び昇温時に窒素ガス及び液体窒素の温度及び流量が制御できる機器が付随していること
・温度計を設置し、ケーブルコア各部の温度がモニターできること（石狩プロジェクトでは、光ファイバー温度計および配管に取り付けた Pt センサーにて温度モニターをした）
・以上の機器が液体窒素温度で使用可能であり、必要な断熱性能を有すること

工事においては、ヘリカル変形仮容器の他、予冷器、真空排気装置等の機器が必要である。

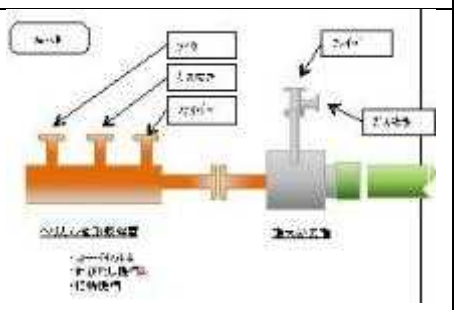
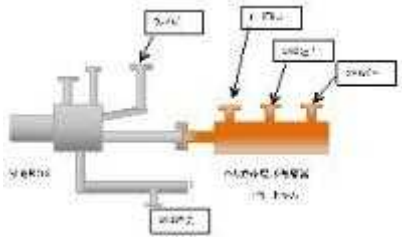
予冷器とは、ローリーから供給される LN_2 を昇温し、温度調節された GN_2 に変えて系内に送り出す装置である。

（イ）工事計画

ヘリカル変形工事の施工フロー例を表 2.2.2.5–4 に示す。布設後ケーブルコアの切断をする際の位置（ケーブル余長）、押込み距離等については、布設長、コアの残留応力分布、冷却時の熱収縮長等を考慮して決める必要がある。

ヘリカル変形工事終了後、引続きジョイント工事および端末組立工事を行う。

表 2.2.2.5- 4　ヘリカル変形工事手順例

項目	内容	説明図、注意事項等
(1)　ケーブルコア布設	ケーブルコア布設 ケーブルコアの切断	
(2)　ヘリカル変形工事準備	予冷器の設置 LN_2 ローリー手配 断熱二重管断熱層真空引き（メカニカルブースターポンプにて真空引き/炭酸ガスパージを 4 回実施後、ターボ分子ポンプにて排気）	
(3)　ヘリカル変形仮容器の取付（端末側）	容器の取付 ケーブルコアとロードセルを仮接続し ケーブルコアを押込み（移動距離と力を記録）（本区間では 20 cm 押込み） ケーブルコア端末処理 ケーブルコアとロードセルを接続 ケーブルコア引き込み量モニター用ジグの接続 温度計等の接続 容器から屋外への窒素ガス配管の設置 断熱施工等	
(4)　ヘリカル変形仮容器の取付（ジョイント側）	容器の取付 ケーブルコアとロードセルを仮接続し ケーブルコアを押込み（移動距離と力を記録）（本区間では 20 cm 押込み） ケーブルコア端末処理 ケーブルコアとロードセルを接続 温度計等の接続 容器と予冷器間の配管	
(5)　ケーブル管真空引き/窒素パージ	ケーブル管にメカニカルブースターポンプを接続し、真空引きと窒素パージを 4 回繰り返し	
(6)　冷却	予冷器を用いてジョイント側からケーブル管・リターン管同時に冷却ガスを導入（ガス温度：−50 ℃から段階的に −150 ℃まで下げる） −150 ℃になったら液体窒素を注入 満液になったら 1 日保持	
(7)　ケーブル端部の固定	ケーブルコア固定ジグを用いて端末側を固定	
(8)　昇温	液体窒素抜き 液が抜けたら、予冷器を用いて所定の温度の窒素ガスを流しながら徐々に昇温（断熱層に 10 Pa 程度まで窒素ガスを導入する） ケーブルコア全体が完全に室温に戻ったらケーブルを軸方向に前後に動かして力のかかり具合を測定する（ロードセル値が〜0 となった位置で終了）	
(9)端末処理	ヘリカル変形仮容器を取外しロードセルとケーブルコアを取り外し、端末処理を行う（ケーブルコアが伸び出さないように軸方向の位置を固定して作業を実施）	

(参考：石狩プロジェクトの例)

図 2.2.2.5–16 に回線 1 でのヘリカル変形工事の状況を示す。

回線 1、2 ともに、超電導ケーブルコアは中間接続部側で固定し、冷却は中間接続部側から実施した。



(1) 端末側ヘリカル変形仮容器取付



(2) 中間接続部側ヘリカル変形仮容器及び液体窒素供給ライン配管取付



(3) 予冷器の設置・配管



(4) 液体窒素ローリーからの液体窒素供給

図 2. 2. 2. 5– 16　回線 1 におけるヘリカル変形工事の状況

例として回線 2 の区間 3 のヘリカル変形工事における冷却及び昇温時（部分）のケーブルコアに働く力、温度、熱収縮量を図 2.2.2.5–17 に示す。ロードセルの値はケーブルコアが縮む方向に働く時のケーブルコアの軸力を正としている。図に見られるように熱収縮量（冷却時のケーブル引き込まれ量）は 1.1 m 以上であったが、ケーブルコアの縮み長がほぼ一定になった以降は中間接続部側の端末にかかる力はほぼゼロになった。

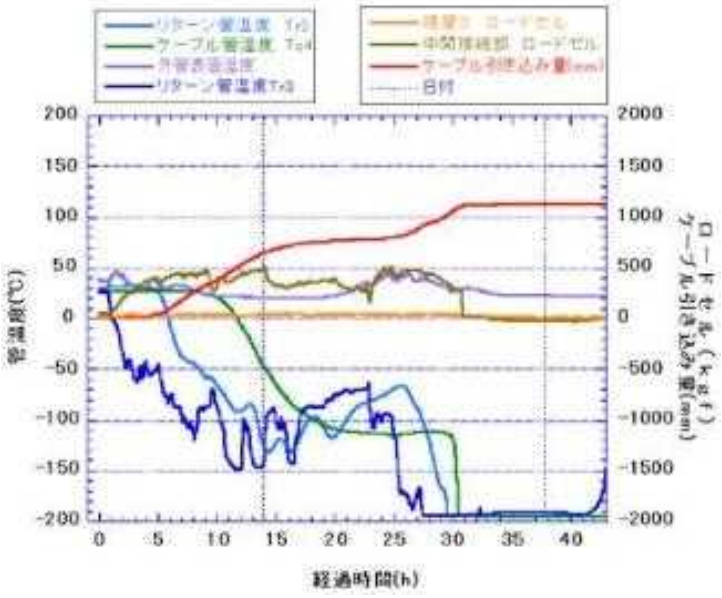


図 2.2.2.5- 17　回線 2_区間 3 のケーブルコアのヘリカル変形工事時（冷却時）の縮み量、ケーブルコア両端の軸力、温度変化

図 2.2.2.5-18 に冷却～昇温時の変化を示す。ケーブルコアを端末側で固定後、昇温とともに、両端の軸力は減少しはじめ、符号が反転し、ケーブルの伸び出し方向に力がかかり始める。また、完全に昇温後は 0～−400 kgf の間で変動していることがわかる。

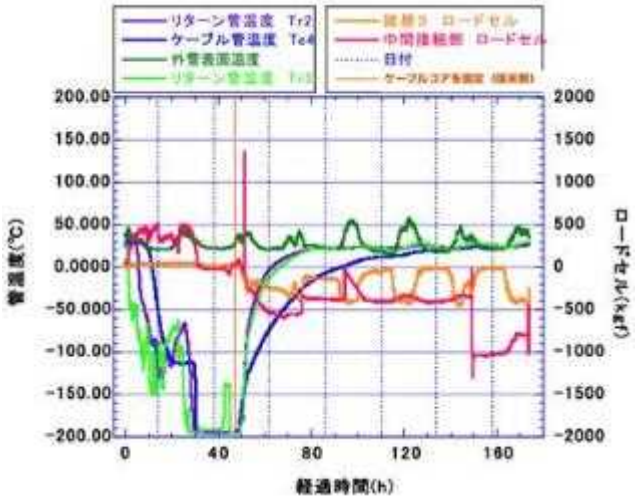


図 2.2.2.5- 18　回線 2_区間 3 のヘリカル変形工事（冷却～昇温後）のケーブルコア両端の軸力と各所の温度変化

この昇温後の軸力の変化は外管の表面温度と連動しており、また回線 1 では見られない現象であった。回線 2 では地上に断熱二重管を布設しているため、外気温変化の影響で、断熱二重管が膨張・収縮する。回線 2 は U 字のルートをしており、U 字部は膨張・収縮への対応のため、対地固定をしていない。本工事を行った時期は夏期であり、外管表面温度は昼夜で 30℃以上変化し、また U 字部の相対位置は昼夜で 50 mm 以上変化することが観測された。昇温後にみられた軸力の変動が外管表面温度の変化と連動していることから、温度変化による断熱二重管の伸び縮みが原因であると考えられる。軸力の変動が約 400 kgf と許容範囲以内ではあるが、これら外管の伸び縮みの影響については、注意が必要である。

ヘリカル変形後のケーブルコアのX線写真を図2.2.2.5-19に示す。地面に対して垂直方向および水平方向にX線を入射して撮影をおこなった。ヘリカル変形は観測されるが、水平方向と垂直方向の変形のピッチが異なっており、これはケーブル自重の影響と考えている。X線画像解析より、約0.3%の熱収縮長をヘリカル変形にて吸収できると計算される。

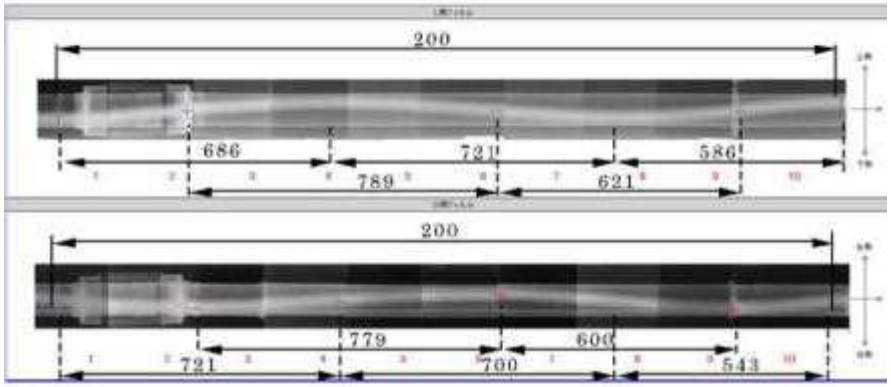


図2.2.2.5- 19　回線2_区間3のケーブルヘリカル変形後のX線写真とケーブルの長さ

石狩のシステムについて、これまで回線1、2で各々2回の冷却試験を実施しているが、いずれの場合も熱応力の大部分をヘリカル変形にて吸収出来ており、本方法が長尺ケーブルの熱収縮対策において、大変有効であることが確認できている。

(3)端末クライオスタット組立工事

ア．施工管理

端末部工事は大きく分けて

（ア）ケーブルコア端末処理

（イ）端末クライオスタット組立工事

から成る。

（ア）ケーブルコア端末処理

一般的な端末部でのケーブルコアの端部処理について述べる。通常は図2.2.2.5-20に示すようにケーブルコア端部をタケノコ状に処理し、外導体、内導体およびフォーマーを露出させる。この処理の後、導体部それぞれを気中にある電源もしくは負荷に接続することになるが、一般的には銅製の電流リードを用いて電力のやりとりを行う。この場合、銅リードを窒素槽容器ならびに真空槽容器に貫通させる必要があるため。導体貫通フランジを設置する。一般に貫通フランジは絶縁体と導体の複合構造となっており、気密性を要求されるため極力フランジ面での熱機械応力を低減させる必要がある。このため液体窒素槽に緩衝用のガス窒素槽を設けることにより温度勾配をとり、フランジ面温度が極低温にならないようにする。銅リードと導体部は、熱機械応力による超電導コアの移動や施工のしやすさを考慮し、編素線を用いて接続される。また、超電導コアに発生する熱機械応力を端末容器で分担させるため、窒素槽容器とフォーマーの間を絶縁体により固定する。

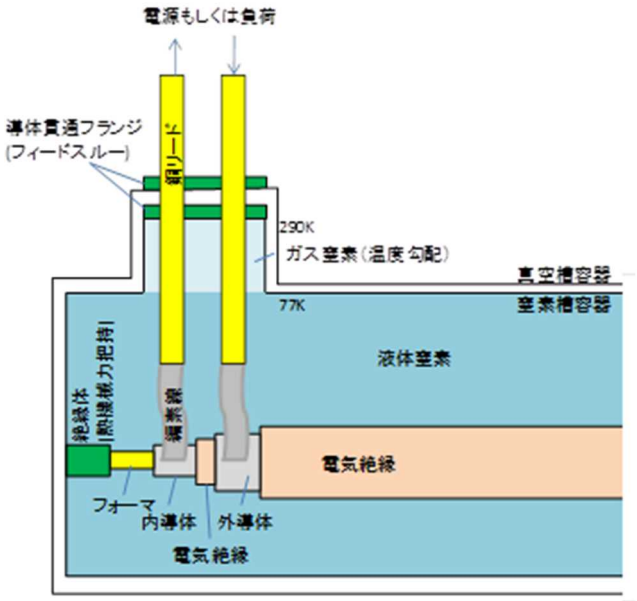


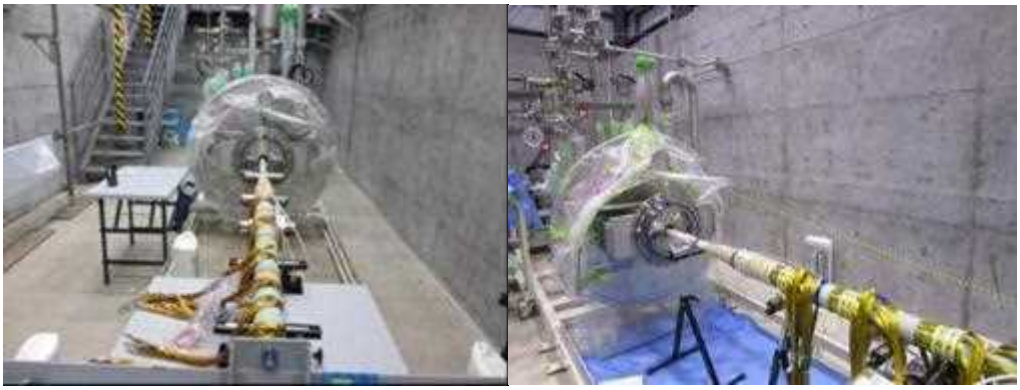
図 2.2.2.5- 20　一般的な超電導ケーブル端末の例

（参考：石狩プロジェクトの例）

超電導ケーブルの超電導素線に編素線を取り付け、編組線とペルチェ電流リード PCL に接続する設計のため、端末処理は、コア切断、層ごとの絶縁処理、超電導線材への銅編組線の半田付けが主な内容である。また石狩に布設したケーブルコアには全長の温度モニターのため、光ファイバー温度計が取り付けられており、その処理も必要となる。表 2.2.2.5-5 にケーブルコア端末処理手順及びそれぞれの作業項目における管理項目を示す。また図 2.2.2.5-21 に工事写真を示す。

表 2.2.2.5- 5　ケーブルコア端末処理手順および管理項目（石狩プロジェクト）

作業項目	内容	管理項目
① ケーブルコア切断	ケーブルコア切断	切断位置、切削屑の除去。ヘリカル変形の場合は切断前のコア把持
② フォーマー処理	ケーブルコア端部処理、スリーブ挿入、フォーマー圧縮	各露出部の寸法管理、スリーブ圧縮力
③ 超電導線材内導体１層目処理	広げ治具取付け、超電導線材固定用スペーサ取付け補強絶縁紙巻、内導体１層目広げ固定処理、銅編組電流リード線半田付け、ＦＲＰ治具組立て	半田温度、流し込み量、仕上がり寸法
④ 超電導線材内導体２層目処理	広げ治具取付け、超電導線材固定用スペーサ取付け補強絶縁紙巻、内導体１層目広げ固定処理、銅編組電流リード線半田付け、ＦＲＰ治具組立て	
⑤ 超電導線材内導体３層目処理	広げ治具取付け、超電導線材固定用スペーサ取付け補強絶縁紙巻、内導体１層目広げ固定処理、銅編組電流リード線半田付け、ＦＲＰ治具組立て、遮蔽処理	
⑥ 超電導線材外導体１層目処理	広げ治具取付け、超電導線材固定用スペーサ取付け補強絶縁紙巻、内導体１層目広げ固定処理、銅編組電流リード線半田付け、ＦＲＰ治具組立て	
⑦ 超電導線材外導体２層目処理	広げ治具取付け、超電導線材固定用スペーサ取付け補強絶縁紙巻、内導体１層目広げ固定処理、銅編組電流リード線半田付け、ＦＲＰ治具組立て	
⑧ 遮蔽処理	補強絶縁紙巻、アースワイヤー巻、接地線取付け	仕上がり寸法、巻乱れ目視
⑨ 光ファイバー融着	光ファイバー融着処理	接続による伝送ロス確認



(a) 回線 1 組立写真(建屋 1)　　(b) 回線 1 組立写真(建屋 2)



(c) 回線 2 組立写真(建屋 3)　　(d) 回線 2 組立写真（建屋 4）

図 2.2.2.5- 21　超電導ケーブルコア端末処理工事

（イ）端末クライオスタット組立工事

ケーブルコア端部処理作業終了後、端末クライオスタット組立工事を行う。工事に先立ち、ダミーケーブルコアを用いて、組立方法の検証を行い、それを施工手順書に反映する。

（参考：石狩プロジェクトの例）

端末クライオスタット組立工事の施工手順と管理項目等を表 2.2.2.5–6 に示す。また、端末工事の実施状況を、図 2.2.2.5–22 に示す

表 2. 2. 2. 5– 6 端末クライオスタット組立工事施工手順と管理項目等
（石狩プロジェクト）

	項目	内容	管理項目等
1	端末クライオスタットの搬入	—	—
2	内槽の設置・組込み ケーブルコア端部の固定	①　ケーブルコア支持部の組立 ②　ケーブルコア端部の固定 ③　ロードセル、温度計等計測線、アース線の配線	内槽カプトンシートの状態確認 計測線導通確認
3	電流導入フランジの取付と配線作業	①　超電導ケーブルコアに取付けた銅編組線を電流導入端子に締結 ②　結線が終了したら、フランジを内槽に固定	配線組立指示書 配線、抵抗記録 ボルト締結時のトルク値管理
4	内槽組立	①　内槽シールフランジの溶接や取付、付属の配管（SI 施工済み）の組込等	SI 施工済みのため手袋着用
5	内槽の検査	①　シール溶接 フランジ部の PT 検査 ②　気密試験（中間接続部と同時実施）	検査要領書
6	内槽 SI 施工	SI 施工要領書に従って作業実施	ゴム手袋着用
7	外槽の組立	①　外槽を内槽の外側に設置 ②　ロードセル・温度計の配線、フィードスルーへの接続	配線、導通確認
8	GFRP フランジの取付・PCL 配線作業・配線チェック	電流端子フランジ真空層槽内　配線組立指示書に従って作業を実施する。 ①　GFRP フランジに取付た PCL の銅電流リード部（銅編組線）を電流導入フランジの断熱層側に締結 ②　断熱層の各計測配線を計測用フィードスルーに配線 ③　GFRP フランジの取付け	配線組立指示書 配線、抵抗記録 ボルト締結時のトルク値管理
9	外槽付属品組込・調整、	①　FRP 振れ止めフランジを取付ける。(写真 13) ②　鏡板取付 ③　端末引留用スクリュージャッキ用架台及びスクリュージャッキを取付ける ④　外槽閉止フランジを取付ける。	外観検査
10	現地組立検査（He リーク試験、外観検査）	①　真空引き ②　He リーク試験 ③　外観検査	酸欠注意



(a) 内槽設置・組込作業



(b) 窒素フランジ電流導入端子接続作業



(c) 抵抗測定



(d) ケーブルコア、配線固定



(e) 内槽 He リーク試験



(f) 内槽 SI 施工



(g) 外槽の組立



(h) PCL フランジ取付

図 2.2.2.5- 22

イ．完成検査

端末クライオスタットについて内槽の冷媒は高圧となるため、高圧ガス保安法の冷凍保安規則の技術基準に準拠し、以下の検査を実施する。現地においては、断熱二重管、ケーブルジョイント、端末クライオスタット内槽の組立工事完了後、同時に耐圧・気密試験を実施する。

また、外槽組立工事完了後に、外槽のヘリウムリーク検査を実施する。

表 2.2.2.5- 7　完成検査項目例（石狩プロジェクト）

名称	内容
外観検査	表面に性能上支障を及ぼすような有害な傷、打痕、クラック等がないこと。溶接部の割れ、ピンホール、アンダーカット等、溶接欠陥がない事。
寸法検査	図面に記載された寸法交差を満足すること。
PT 検査 （浸透探傷検査）	冷凍保安規則第 64 条第 1 号による。 耐圧部溶接部全線（最終層）について実施する 欠陥指示模様の無いこと
気密試験 （全系圧力試験）	加圧試験 冷凍保安規則関係例示基準 6 気密試験の規定による 試験圧力：設計圧力＋大気圧（窒素ガス） 試験時間：120 分 気密試験圧にて保持。圧力計に降下が見られないこと、また発泡液を塗布し漏洩なきことを確認
内槽ヘリウムリーク試験	真空吹き付け法 （JIS Z2331『ヘリウム漏れ試験方法』真空吹き付け法準拠） ヘリウムリークディテクターを内槽に接続し、内槽の溶接部およびフランジ取付部にヘリウムガスを吹き付けて行う。 判定基準：リーク速度　1.00×10^{-9} Pa・m³／s 以下
外槽ヘリウムリーク試験	真空吹き付け法 (JIS Z2331『ヘリウム漏れ試験方法』真空吹き付け法準拠) ヘリウムリークディテクターを外槽に接続し、外槽の溶接部及びフランジ取付部にヘリウムガスを吹き付けて行う。 内槽：設計圧力＋大気圧（窒素ガス） 判定基準：リーク速度　1.00×10^{-9} Pa・m³／s 以下

(4) ジョイント

ア．施工管理

ノーマルジョイント（NJ）方式のケーブル接続部の組み立て工事の各工程および管理ポイントににについて表 2.2.2.5-8 にまとめる。この表を元に現地用チェックシートを作成し、詳細な施工手順の管理・確認を行うと共に、組立寸法や外観調査などを実施する必要がある。コアストップジョイント（CSJ）についてもこれと同様の施工管理を実施して組み立てる必要がある。

表 2.2.2.5- 8　ケーブル接続部（NJ 方式）の組立工事手順および管理ポイント

No.	工程	主な作業内容	管理ポイント
①	組立準備	作業環境整備	・埃、地下水対策 ・作業環境温度・湿度
		工事用電源設置	
		組立用架台設置	
②	ケーブル端部処理	窒素容器挿入	・容器挿入手順、事前勘合確認 ・切断長確認、記録
		接続長調整	
		コア切断、端部処理	
③	ケーブルコア内導体接続	スリーブ圧縮嵌合	・圧縮力、圧縮位置 ・温度管理 ・巻き付けピッチ、枚数
		超電導線接続	
		絶縁補強紙巻	
		接続前後の導通確認	
④	ケーブルコア外導体接続	外導体端部処理	・処理長さ ・温度管理 ・巻き付けピッチ、枚数
		超電導線接続	
		絶縁補強紙巻	
		接続前後の導通確認	
⑤	遮蔽処理	銅テープ巻き付け	・巻き付けピッチ
		保護層処理	
		接続前後の導通確認	
⑥	計測線処理	温度センサー取付、接続	・取付位置 ・接続方法
⑦	窒素槽組立	窒素槽組立、溶接	・溶接管理 ・漏れ検査
		気密試験	
		Heリーク試験	
⑧	真空槽組立	真空断熱材施工	・施工手順、巻き付け仕様 ・溶接管理 ・漏れ検査
		外槽組立、溶接	
		気密試験	
		Heリーク試験	
⑨	真空引き	真空ポンプによる排気	・到達真空度
⑩	防食処理	防食テープ巻き付け	

上記の施工例（写真）を図 2.2.2.5-23 に示す。


窒素槽組立


真空槽組立

図 2.2.2.5－ 23　ケーブル接続部施工例

イ．耐圧・気密試験

ジョイント組立に対しては、窒素槽および真空槽は直管型断熱管と同等の気密・耐圧および真空リーク特性が要求される。このため窒素槽組立後には窒素槽の気密・耐圧試験を、真空槽組立後は真空槽の He リーク試験を実施し、主に溶接作業の健全性を確認することが重要である。

（参考：石狩プロジェクトの例）

回線 1 の NJ ジョイント組立時に実施したこれら確認試験結果を示す。

回線 1 中間接続部の窒素槽組立後、気密試験を実施した。0.61 MPa 加圧後 10 分保持した後、現地溶接箇所に石鹸水による発泡試験を実施し良好な結果を得た。引き続き 2 h 保持し圧力低下が無いことを確認した。気密試験の様子を図 2.2.2.5–24 に示す。


気密試験


建屋 2 圧力ゲージ（0.61 Mpa）

図 2.2.2.5－ 24　回線 1 中間接続部　気密試験状況

回線 1 中間接続部の気密試験終了後、真空断熱層の処理、真空容器の溶接を実施後の確認として真空槽の He リーク試験を実施した。中間接続部ジョイント容器の真空引きを 2 h 実施し、バックグラウンドリークレート（B.G.D）が 2.0×10^{-9} Pa･m³/s になったことを確認した後、真空槽現地溶接箇所全箇所に He リーク試験を実施し良好な結果を得た。図 2.2.2.5–25 に He リーク試験の様子を示す。



図 2.2.2.5- 25　回線 1 中間接続部　He リーク試験

ウ．導通試験

ジョイントの施工が完了した段階で、超電導ケーブル端末間の抵抗を測定し、断線などの重大な施工不良が発生していないかの確認を実施する。測定された抵抗は、常温での導体部抵抗、ジョイント部抵抗ならびに端末部抵抗などをあらかじめ計算しておき、これと比較することとなる。

(5)液体窒素循環システム

ア．冷凍機・ポンプ据付工事

冷凍機システム（ターボブレイトン冷凍機やスターリング冷凍機等の機器類及び配管等）の据付検査は高圧ガス保安法に準拠し、以下の内容が必要となる。

図 2.2.2.5- 26 冷凍機システム据付検査項目

検査項目	内容
据付・外観検査	・機器（据付外観検査） ・配置計画通りに据付けられ、外面に有害な損傷がないことを目視にて確認。 ・配管ラインチェック ・配管及び弁等が所定の位置に取り付けられていることを系統図等をもとに確認。
気密検査	・気圧（窒素ガス）：設計圧力×1 ・冷凍機システム全体を窒素ガスにて加圧し、圧力変動の無いこと、及び設備からの漏えいの無いことを確認。

（参考：石狩プロジェクトの例）

冷凍機システムについて、据付・外観検査及び気密検査を実施。

気密検査に於いては、検査圧力 0.5 MPa（設計圧力：0.5 MPa）に対して、圧力変動及び漏えいの無いことを確認した。



回線 1



回線 2

図 2.2.2.5- 27　冷凍機システム外観

(6)竣工試験

断熱二重管建設、ケーブル布設、端末およびジョイント組立が完了した時点で、システム全体の健全性を確認し、ユーザーに引き渡すために必要な各種試験を実施し、自家用電気工作物として工事計画図書や法令等に合致した施工がされていること、及び設備が必要な能力を有していることを点検、試験等により確認する。これを竣工試験と称する。

ア．機械試験

竣工試験の内、機械試験として必要な試験には大きく据付試験と性能試験がある。

（ア）据付試験

冷凍機システムと断熱二重管及び端末クライオスタットとを接続した後に、冷却システム全体に対し高圧ガス保安法に準拠した以下の試験を実施する。

表 2.2.2.5- 9　竣工試験（機械試験）据付試験項目

試験項目	内容
据付・外観試験	・配置計画通りに据付けられ、外面に有害な損傷がないことを目視にて確認。 ・配管及び弁等が所定の位置に取り付けられていることを系統図等をもとに確認。
気密試験	・気圧（窒素ガス）：設計圧力×1 ・冷却システム（全系統）を窒素ガスにて加圧し、圧力変動の無いこと、及び最終接続部（フランジ）からの漏えいの無いことを確認。

（イ）性能試験

断熱性能及び循環冷却性能を確認するための試験として、以下の試験を実施する。

表 2.2.2.5- 10　竣工試験（機械試験）性能試験項目

試験項目	内容
循環・冷却確認試験	・循環・冷却に関わる冷却システム（全系統の）の定常運転実施し、一定の流量・温度・圧力による安定運転ができることを確認する。
熱侵入量確認試験	・系内の各測定点の温度差から熱侵入量を求め、設計値（計画値）に対して逸脱していないことを確認する。 なお、熱侵入量 q(W)は液体窒素の質量流量 m (kg/s)、比熱 C(J/(kg K))、測定点間の液体窒素の温度差$\triangle T$(K)として、 $q = m \cdot C \cdot \triangle T$ で求められる。
圧力損失確認試験	・系内の各測定点の圧力差から圧力損失を求め、設計値（計画値）に対して逸脱していないことを確認する。

（参考：石狩プロジェクトの例）

（ア）据付試験

気密検査に於いては、検査圧力 0.5 MPa（設計圧力：0.5 MPa）に対して、圧力変動の無いこと及び最終接続部（断熱二重管側と冷凍機システムの接続フランジ部）からの漏えいの無いことを確認した。

回線 2 の外観検査に於いては、強度上の問題は無いものの、断熱二重管端部の対地固定部が外気温の変動により生じた熱応力の影響を受けて伸縮している状態が確認された。地上布設の際には、①外管にベローを設ける、②熱を吸収しにくい外管構造（遮熱塗装等）とする、の 2 点を特に考慮して設計する必要がある。（回線 2 は元々埋設仕様の設計であったのが、製作の途中から地上布設に変更となったため、外気温の変動への対応が十分ではなかった。当初設計通り埋設となった回線 1 では同様の問題は発生していない。）

（イ）性能試験

①循環冷却確認試験

回線 1 及び回線 2 に於いて、以下の定常運転を実施し、一定の流量・温度・圧力による安定運転ができることを確認した。なお、石狩プロジェクトは実証試験であったため、流量・温度を変化させて各設定値での安定確認を実施したが、実用化の際には運用される条件、即ち最も効率の良い条件で実施するのが望ましい。

表 2.2.2.5- 11　循環冷却確認試験結果（石狩プロジェクト）

	回線 1（500 m）	回線 2（1000 m）
ターボブレイトン冷凍機設定温度	70 K、77 K	75 K
液体窒素循環流量	40～15 L/min 上記の各設定温度に対して各流量による循環冷却を実施	40～10 L/min 上記の設定温度に対して各流量による循環冷却を実施
設定圧力	0.25 MPa	0.25 MPa
安定運転	良	良

なお、回線 2 では長距離（20 km）を模擬した以下の低流量循環試験も実施し、安定運転を確認している。

表 2.2.2.5- 12　低流量循環冷却確認試験結果（石狩プロジェクト）

	回線 2（1000 m）
液体窒素循環流量	4 L/min（循環距離 2 km） ・ 循環距離 20 km、流量 40 L/min の模擬
ターボブレイトン冷凍機 設定温度	66 K ・ 末端部で 20 K 程度の温度上昇があることを考慮し、できるだけ低温とした。
設定圧力	0.35 MPa ・ 末端部で 20 K 程度の温度上昇があることを考慮し、設定圧力を上げ、飽和温度を高くした。
安定運転	良

②熱侵入量確認試験

上記循環冷却確認試験と同時に温度・流量データを蓄積し、解析した。結果を設計値との比較で示す。回線 1、回線 2 共に測定結果は設計値を下回っており、良好である。

表 2.2.2.5- 13　熱侵入量確認試験結果（石狩プロジェクト：回線 1）
外管温度：14.2℃

	断熱二重管 (ケーブル管)	断熱二重管 (リターン管)	端末×2	全体*4.6.1.1 (冷凍機システムを除く)
設計熱侵入量	600 W	280 W	900 W	1840 W
測定結果	490 W （1.0 W/m）	220 W （0.4 W/m）	370 W	1240 W

表 2.2.2.5- 14　熱侵入量確認試験結果（石狩プロジェクト：回線 2）
外管温度：-2.4℃

	断熱二重管 (ケーブル管)	断熱二重管 (リターン管)	端末×2	全体* (冷凍機システムを除く)
設計熱侵入量	720 W	1090 W	900 W	2770 W
測定結果	460 W （0.5 W/m）	660 W （0.7 W/m）	470 W	1750 W

（＊）冷凍機システムの侵入熱は運転条件により変動するため除く。

なお、回線 2 の断熱二重管は異なる構造を持つ 3 つの区間（シールド付区間、シールド無区間、U 字区間（シールド無））より構成されており、それぞれの区間毎の熱侵入量も測定している。

表 2.2.2.5- 15　断熱二重管熱侵入量測定試験結果（石狩プロジェクト：回線 2）
外管温度：-2.4℃

	距離	ケーブル管	リターン管	合計（往復分）
区間 1	474 m	0.03 W/m	0.83 W/m	0.87 W/m
区間 2	135 m	0.92 W/m	0.51 W/m	1.42 W/m
区間 3	377 m	0.79 W/m	0.43 W/m	1.22 W/m

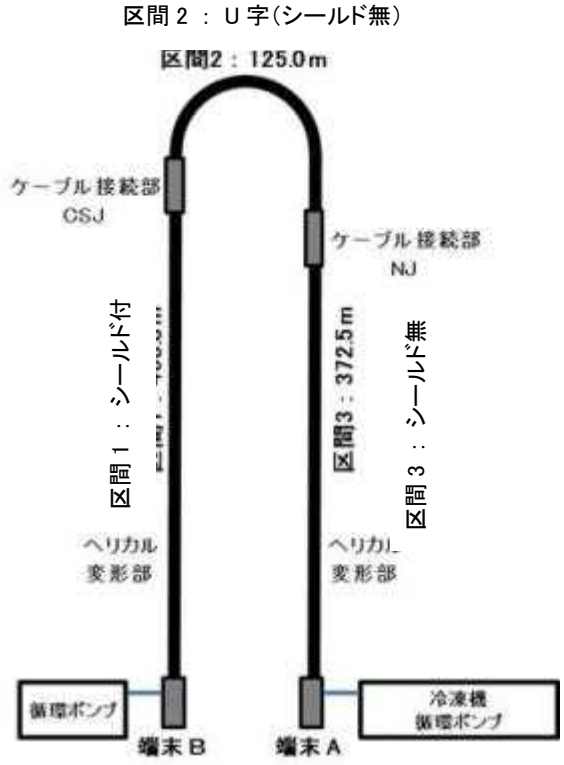


図 2.2.2.5- 28　断熱二重管概略平面図（回線 2）

③圧力損失確認試験

上記循環冷却確認試験と同時に圧力データを蓄積し、解析した。結果を設計値との比較で示す。回線 1 の測定結果は設計値を下回っており、良好である。

表 2.2.2.5- 16　圧力損失確認試験結果（石狩プロジェクト：回線 1）

	断熱二重管 (ケーブル管)	断熱二重管 (リターン管)	端末×2＋ 冷凍機システム	全体
設計圧力損失	15 kPa	8 kPa	63 kPa	86 kPa
測定結果	13 kPa	16 kPa	7 kPa	36 kPa

回線 2 については、循環ポンプ 1 台では設計時の想定である 40 L/min の流量で循環できないため、2 台直列運転による循環を行っている。そのため、40 L/min での圧力損失はケーブル管のみの測定となった。その他の結果は循環ポンプ 1 台で 35 L/min まで測定した結果から外挿した。結果は設計値を下回っており、良好である。

表 2.2.2.5- 17　圧力損失確認試験結果（石狩プロジェクト：回線 2）

	断熱二重管 (ケーブル管)	断熱二重管 (リターン管)	端末×2＋ 冷凍機システム	全体
設計圧力損失	31 kPa	17 kPa	100 kPa	148 kPa
測定結果	18 kPa	(30 kPa)	(5 kPa)	(53 kPa)

(　) 内は 35 L/min までの測定結果の外挿値

イ．電気試験　★

超電導ケーブルコアとして必要な性能、能力を有しているかを確認するために、以下の各試験を実施する。

（ア）I_c 測定試験

超電導コアは製造時、全長を冷却して超電導通電特性を確認することが困難である。このため現地輸送、布設、組立を経て全長を冷却し、全長での通電を行うことにより超電導特性の変化の有無などを確認することが竣工試験として必要となる。

I_c 測定の際、長尺線路ではたとえば内導体のみに通電することは通電用電源線の構成上困難であるため、たとえば内導体を往路、外導体を復路として往復通電を行い、試験を実施することが考えられる。この際双方の電流－電圧特性（$I-V$ カーブ）より臨界電流 I_c を求めることになるが、この際内導体と外導体それぞれの I_c 値が異なる場合、一方が先に I_c 値に到達してしまい、他方はまだ I_c 値に到達していない場合が発生する。コア導体の設計上やむを得ずこのような場合となる場合は、1）一方の I_c 値が設計と同等であることの確認、2）他方の通電特性は、一方の I_c 以上であることの確認とする、というような確認方法の定義を規定することが必要となる（この場合、一方の I_c＞定格通電値である）。

（参考：石狩プロジェクトの例）

1.2.2.3(8)イ項の I_c 測定方法にのっとり実施した、回線 2 での I_c 測定試験結果を図 2.2.2.5-29 に示す。ケーブル部の液体窒素循環温度は 69.7 K、流量は 35 L/min の条件で試験を実施し、外導体の予想 I_c=4090 A 以上(0.1 μV/cm 定義)の通電特性を確認した。内導体は外導体よりも設計 I_c 値が高いため、0.1 μV/cm 定義での I_c には到達していないが、十分な性能を有することが確認された。

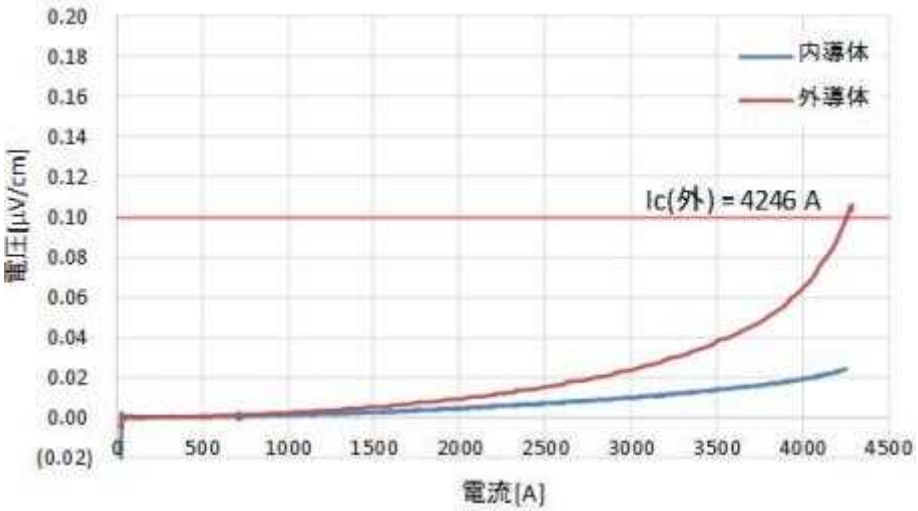


図 2.2.2.5- 29　石狩回線 2 での I_c 測定試験結果

（イ）静電容量、$tan\delta$測定

初期冷却中の C、$tan\delta$を計測することで、コアの PPLP 絶縁体に LN_2 が完全に浸漬したことの確認を行うとともに、LN_2 含浸時のケーブルの C と $tan\delta$ が設計値通りであるかを確認する。

（参考：石狩プロジェクトの例）

石狩プロジェクトにおける測定回路を図に示す。測定には LCR メータを用い、内導体－外導体間および外導体－シールド間にそれぞれ計測器を接続し、PC による自動記録とし初期冷却中の各伝記定数変化を連続的に観測した。

回線 1 組立直後の初期冷却試験にて、上記試験回路、装置を用いて内絶縁（内導体、外導体間の絶縁）、外絶縁（外導体とシールド遮蔽層間の絶縁）それぞれの静電容量 C と誘電正接 $tan\delta$ の測定を実施した。液体窒素温度で計測した静電容量および誘電正接の値は設計値に対してほぼ同等であり、ケーブルコアの絶縁状況が良好であることを確認した。

表 2.2.2.5- 18　静電容量、$tan\delta$　計測値と設計値の比較（回線 1）

C-$tan\delta$ 計測結果	設計値	計測値
		77 K
内絶縁	399 ~ 417 nF 0.1%程度	410 nF 0.0 ~ 0.2%
外絶縁	513 ~ 537 nF 0.1%程度	510 nF 0.0 ~ 0.2%

（ウ）絶縁抵抗試験、DC 課電試験

内絶縁（内導体、外導体間の絶縁）、外絶縁（外導体とシールド遮蔽層間の絶縁）に DC 電圧を印加し、各電圧での絶縁抵抗試験および直流耐電圧試験を実施する。

（参考：石狩プロジェクトの例）

太陽光発電接続前の竣工試験として試験を実施しいずれもケーブルが絶縁破壊することなく、絶縁抵抗値および漏れ電流値が電気設備技術基準を満たすことを確認した。

課電印加前にテスターで絶縁されていることを確認後、内導体、外導体間の絶縁抵抗試験を実施した。10 V、50 V 以降 50 V ずつ昇圧（各 1 分）し、250 V に到達した後 10 分間電圧を保持し、絶縁抵抗を測定した。その後一旦電圧を落としたのち直流耐圧試を実施した。100 V ずつ昇圧し、最大 600 V で 10 分間保持し漏れ電流を計測した。その後外導体と遮蔽層間も同じ手順で計測し、課電試験を完了した。結果を表にまとめる。

表 2.2.2.5- 19　試験結果

	規格	試験結果		判定
		内絶縁	外絶縁	
絶縁抵抗試験（250 VDC）	0.4 MΩ以上	20 GΩ	560 GΩ	合格
直流耐圧試験（600 VDC）	1 mA 以下	0.44 nA	0.06 nA	合格

ウ．警報確認試験

超電導ケーブルシステム、計測・接点情報の警報監視盤へのつなぎ込み等が完了した時点で警報確認試験を実施し、監視盤で正しく運転、動作情報が収集・表示されているか、軽故障条件となった場合正しく警報を発令し、情報が伝送されるか、重故障信号の判定動作に問題が無く、その場合送電システムに設置された配電盤遮断器に正しく情報が伝送され、送電遮断が行えるかを確認する。

（参考：石狩プロジェクトの例）

回線１での、太陽光発電電力を超電導直流ケーブルによりデータセンターに送電する場合の系統、回路についての実施試験について記載する。

図 2.2.2.5-30 に模式図を示す。警報監視盤には運転中の動作状況を確認するための機器動作接点信号や、液体窒素循環系、送電系の物理量情報が収集・監視されている。また重故障信号発生時には速やかに送電を遮断するため、重故障接点信号が超電導ケーブルシステムの両端に設けられた直流配電盤内の遮断器に接続されている。

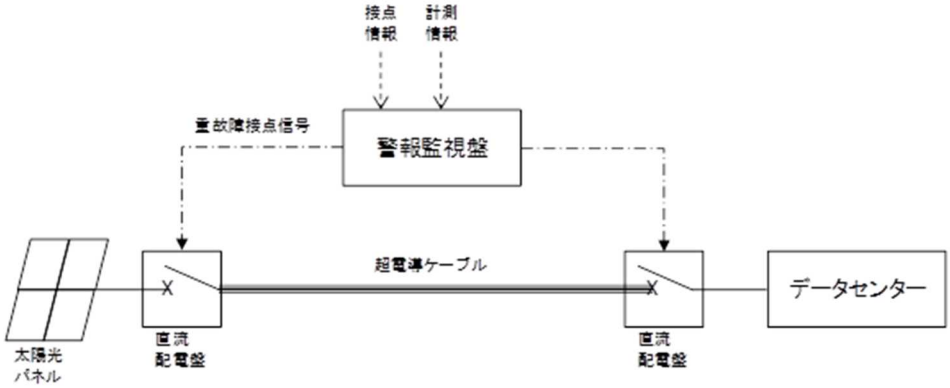


図 2.2.2.5- 30　直流送電システムの系統模式図

① 対向試験（重・軽すべて）

現地での警報・監視に関する施工、配線が完了したのち、監視盤に対して表 2.2.2.5-20 に示す対向試験を実施した。

表 2.2.2.5- 20　監視盤対向試験内容

項目	内容	備考
物理量表示確認	温度、圧力等センサーの表示値確認	配線ミス、センサー不良等の判別、修正
接点信号対向試験	接点を模擬的に動作させ、警報名が正しく表示されるか、警報がメール送信されるかを確認	動作確認、表示内容確認
警報対向試験（軽故障）	温度、圧力等のしきい値を変更し、警報判定させた場合正しく警報表示され、警報メールが送信されるかの確認	動作確認、表示内容確認
警報対向試験（重故障）	接点、軽故障などから判断される重故障状態を模擬的に発生させ、正しく警報表示され、警報メールが送信されるかの確認とともに、重故障接点が正しく動作するかの確認	動作確認、表示内容確認 重故障接点の動作確認

② 動作確認試験（重故障に対し）

①で警報監視盤の対向試験を実施し、問題ないことが確認された後動作確認試験を実施した。警報監視盤にて重故障模擬状態を生成し、その際発信される重故障接点信号により超電導ケーブルシステム両端の配電盤内遮断器が正常に動作することを確認した。

2.2.2.6 運用

(1)システム運転要領

ア．スタートアップ

超電導直流導電システムのスタートアップは常温の状態から液体窒素の循環を開始させることであり、それは液体窒素を導入するための窒素ガス（GN_2）による予冷から始まり、液体窒素（LN_2）の導入、循環起動の順に進められる。

（ア）予冷手順

予冷は断熱二重管及び端末クライオスタットを対象として実施される。予冷中に冷凍機システムを起動することで効率化を図る。以下に、予冷フロー図を示す。

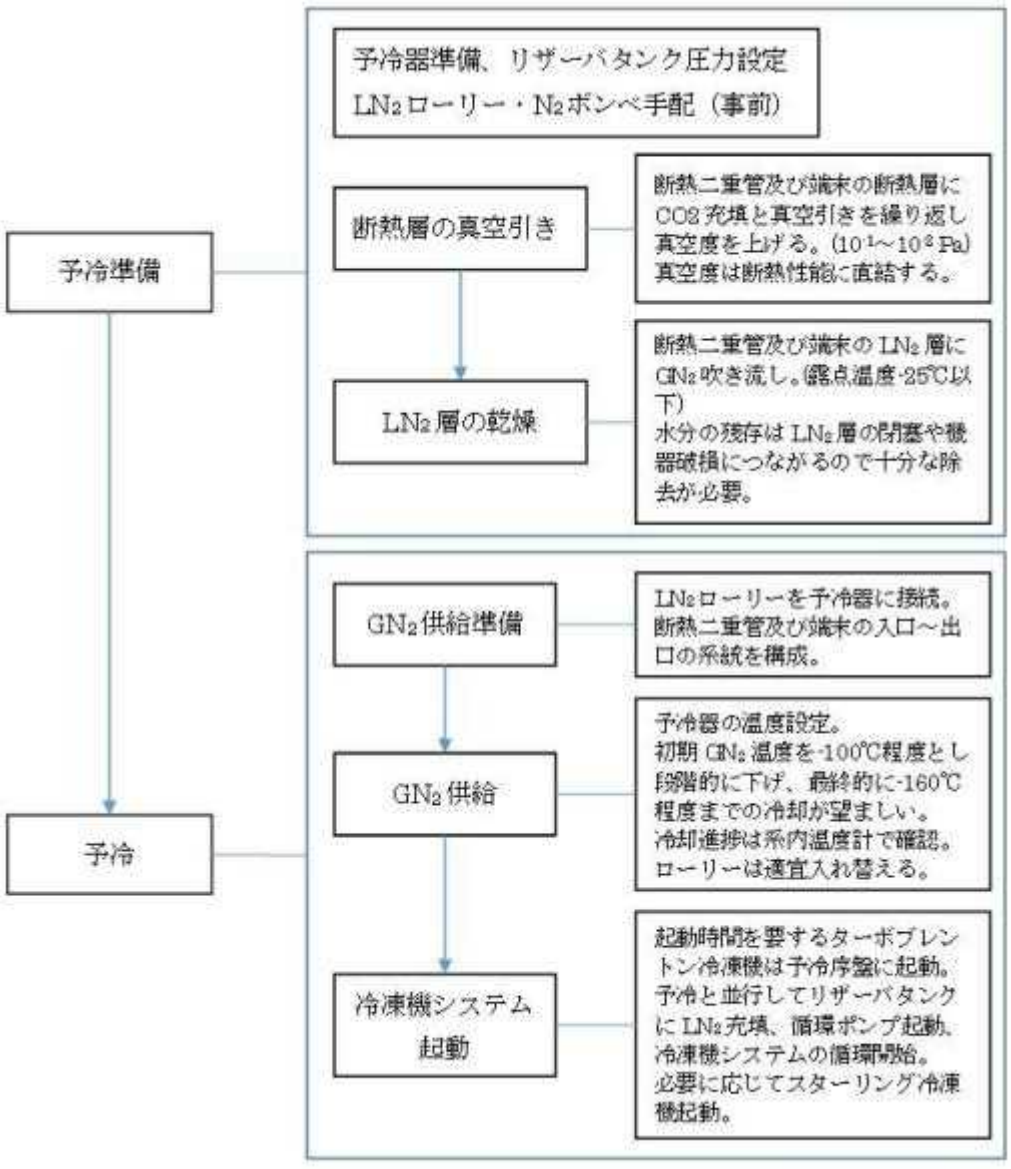


図 2.2.2.6- 1　予冷フロー図

ここで、予冷器はローリーから供給される LN_2 を昇温し、GN_2 に変えて系内に送り出す装置である。構造的には外気を利用した伝熱面積可変型の熱交換器であり、ファンとヒーターを併用することで、温度調節を可能としている。以下に外観を示す。



図 2.2.2.6- 2　予冷器

（イ）液体窒素（LN_2）の導入～循環起動手順

断熱二重管及び端末クライオスタットの予冷が完了すると、連続的に冷却システム全体への液体窒素の導入～循環起動に移行する。

以下に、液体窒素の導入～循環起動フロー図を示す。

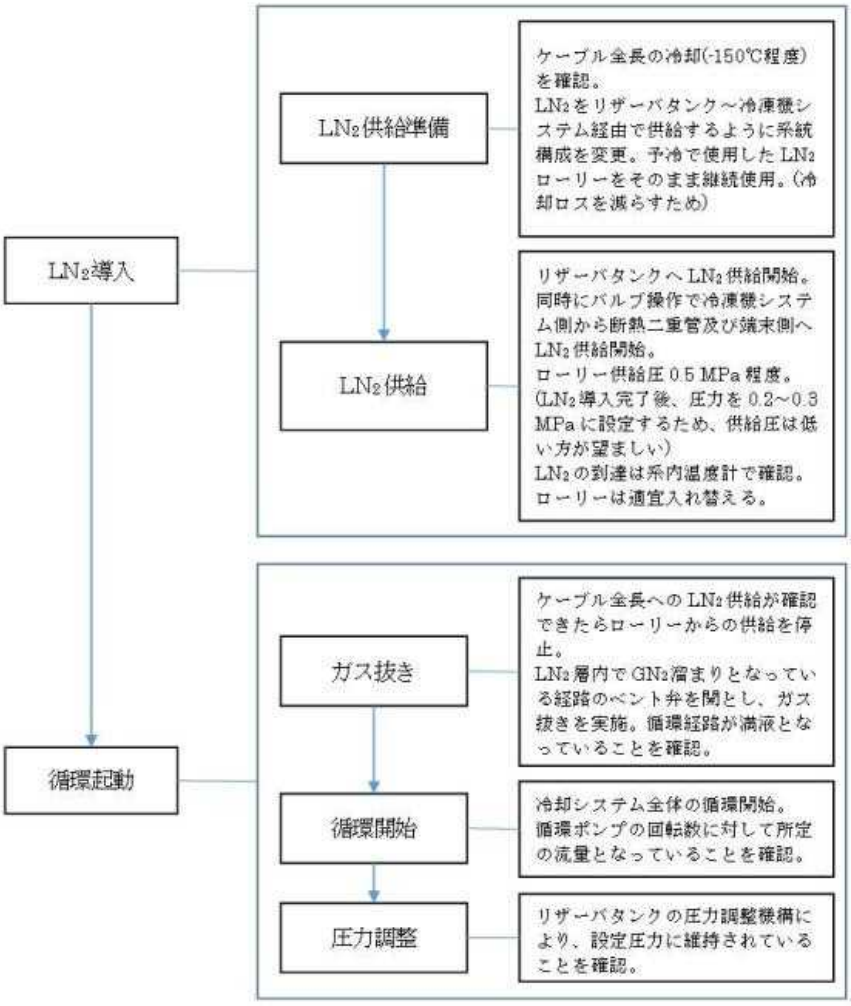


図 2.2.2.6- 3　液体窒素の導入～循環起動フロー図

（参考：石狩プロジェクトの例）

石狩プロジェクトでは予冷～LN_2導入～循環起動の各作業毎に、バルブの開閉、仮設の接続、流体の経路、設備の運転状態等を記したフロー図を使用し作業を実施した。以下にサンプルとして予冷作業フロー図を示す。

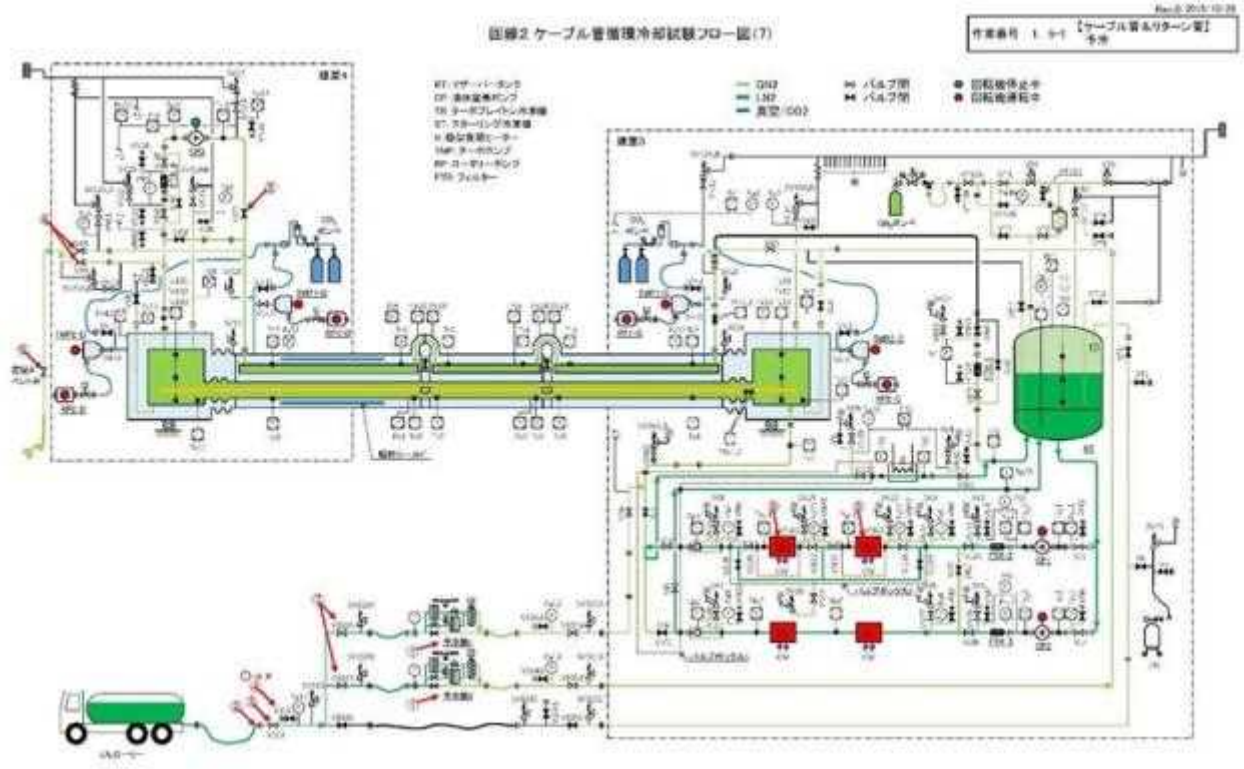


図 2.2.2.6- 4　予冷作業フロー図（石狩プロジェクト：回線 2）

石狩プロジェクトの予冷～LN_2導入～循環起動の特徴を以下に列挙する。

・断熱二重管内にはケーブル管とリターン管の 2 本が並行して設置されており、予冷は 2 本同時に同じ方向に GN_2 を供給する方式とした。
・予冷作業から LN_2 導入作業へ切り替える際にローリーの入れ替えを行わないようにするため、ローリーに十分に LN_2 が残った状態で LN_2 導入に移行できるよう、LN_2 の使用計画を工夫した。
・予冷中の断熱二重管内の温度は、光ファイバー温度計により全長に渡る温度分布を監視することで、予冷の進行状況の見極めが容易になり、作業効率が上がった。
・ターボブレイトン冷凍機は起動から冷却運転開始までに 6 時間程度必要となる。従って、予冷作業最終日の夕方に起動し、次の日の LN_2 導入に備える必要がある。なお、スターリング冷凍機は起動から 1 時間程度で冷却運転可能となる。
・予冷と並行してリザーバタンクに LN_2 を充填し、冷凍機システム（ターボブレイトン冷凍機～リザーバタンク間）の循環を開始、そのまま予冷完了を待ち、予冷完了後に、バルブ操作にて冷凍機システム側からケーブル管及びリターン管に並行して LN_2 を導入した。それと同時にローリーからの LN_2 をリザーバタンクへ連続的に供給し、リザーバタンクの液位のバランスを確認しながら供給液量を調整した。
・ローリーの入れ替えをリザーバタンクに LN_2 が十分溜まった後で実施することにより、連続的な液張りを実現した。

・LN_2 導入中のリザーバタンクの圧力は、ローリーからの液量調整によりできるだけ低く保持（0.2 MPa 以下）し、より低温の LN_2 を導入することで、循環開始時に圧力が下がって気化し循環が停止する現象を回避した。
・予冷から LN_2 導入中は超電導ケーブルの熱収縮に伴い張力が発生するため、端末にロードセルを設置し、張力を監視し、必要に応じて端末を移動させ張力を緩和した。

回線 2（1000 m）における予冷～LN_2 導入～循環起動の概略工程は以下の通り。

表 2.2.2.6- 1　予冷～液体窒素導入～循環起動の概略工程

項目	必要日数	累計日数	内容
予冷準備	7 設備の維持・管理状態によって変動する	7	・CO_2 ガス置換→真空引き（真空層） ・N_2 ガス乾燥（N_2 層） ・予冷器準備 ・リザーバタンク圧力設定 ・（LN_2 ローリー・N_2 ボンベは事前手配）
予冷	1	8	・断熱二重管・端末クライオスタットの GN_2 による冷却（-100℃→-160℃） 【24 時間連続作業】 ・ターボブレイトン冷凍機起動
	1	9	・GN_2 による冷却継続（-160℃） 【24 時間連続作業】 ・リザーバタンクへの LN_2 充填 ・冷凍機システムのみ循環開始
	0.5	9.5	・GN_2 による冷却継続（-160℃） ・ケーブル管及びリターン管が-150℃程度で均一を確認 ・導体抵抗が一定を確認
液体窒素導入	0.5	10	・冷凍機システムから LN_2 をケーブル管及びリターン管へ並行して供給 ・同時にローリーからリザーバタンクへ供給
循環起動	1	11	・GN_2 溜まり部のガス抜き ・冷却システム全体の循環開始 ・圧力調整機構による設定圧（0.25 MPa）維持の確認 ・循環の安定確認

イ．定常運転・監視

（ア）循環冷却状態の監視

定常運転時の循環冷却に関する監視項目は以下の通り。1.2.2.3（7）項に記載の通り、測定箇所を増やすと、計器類が増え、それに伴い配管の分岐が増えることから、循環が不安定になり易い。測定箇所は必要最低限としたい。

表 2.2.2.6- 2　循環冷却監視項目

項目	測定箇所
LN_2 温度	・断熱二重管（内管）　入口／出口／ケーブルジョイント ・端末クライオスタット（内槽）　上部／下部 ・循環ポンプ　入口／出口 ・冷凍機　入口／出口 ・リザーバタンク　上部／下部
圧力（LN_2 層）	・断熱二重管（内管）　ケーブルジョイント ・端末クライオスタット（内槽） ・循環ポンプ　入口／出口 ・リザーバタンク
真空度（断熱層）	・断熱二重管（外管）　入口／出口／ケーブルジョイント ・端末クライオスタット（外槽）
流量	・冷凍機下流
液位	・リザーバタンク

ここで、ターボブレイトン冷凍機は本体に LN_2 入口・出口温度計を内蔵しているため、別途温度計の設置は必須ではない。また、循環ポンプ出口温度と冷凍機入口温度を共通とすることも可能である。

(参考：石狩プロジェクトの例)

石狩プロジェクトは実証設備のため、多数の測定点を設けている。表 2.2.2.6-3 に、上記監視項目についての計測箇所を示す。

また、図 2.2.2.6-5 に LN_2 温度計の設置個所（代表）を示す。

表 2.2.2.6- 3　循環冷却監視項目（石狩プロジェクト：回線 2）(1/2)

項目	測定箇所		
LN_2 温度	断熱二重管（ケーブル管）	入口	Tc4
		ケーブルジョイント B (※)	Tc5
		ケーブルジョイント B (※※)	Tc6
		ケーブルジョイント A (※)	Tc7
		ケーブルジョイント A (※※)	Tc8
		出口	Tc9
	断熱二重管（リターン管）	入口	Tr7
		ケーブルジョイント A (※)	Tr6
		ケーブルジョイント A (※※)	Tr5
		ケーブルジョイント B (※)	Tr4
		ケーブルジョイント B (※※)	Tr3
		出口	Tr2
	端末クライオスタット A（内槽）	入口	Tc1
		上部	
		中部	
		下部	
		端部	Tc2
	端末クライオスタット B（内槽）	端部	Tc11
		上部	
		中部	
		下部	
		出口	Tc12
	循環ポンプ 1	入口	Tp11
		出口	Tp12
	ターボブレイトン冷凍機 1	出口	Tp13
	ターボブレイトン冷凍機 2	出口	Tp14
	循環ポンプ 2	入口	Tp21
		出口	Tp22
	スターリング冷凍機 1	出口	Tp23
	スターリング冷凍機 2	出口	Tp24
	循環ポンプ 3	入口	Tp31
		出口	Tp32
	リザーバタンク	上部	
		中部	
		下部	

表 2.2.2.6-3　循環冷却監視項目（石狩プロジェクト：回線 2）(2/2)

項目	測定箇所	
圧力 （LN_2層）	断熱二重管（ケーブル管）	ケーブルジョイント B
		ケーブルジョイント A
	断熱二重管（リターン管）	ケーブルジョイント A
		ケーブルジョイント B
	端末クライオスタット A	内槽
	端末クライオスタット B	内槽
	循環ポンプ 1	入口
		出口
	循環ポンプ 2	入口
		出口
	循環ポンプ 3	入口
		出口
	リザーバタンク	内槽
真空度 （断熱層）	断熱二重管（外管）	入口
		ケーブルジョイント A（前）
		ケーブルジョイント A（後）
		ケーブルジョイント B（前）
		ケーブルジョイント B（後）
		出口
	端末クライオスタット A	外槽
	端末クライオスタット B	外槽
流量	ターボブレイトン冷凍機側	冷凍機下流
	スターリング冷凍機側	冷凍機下流
液位	リザーバタンク	内槽

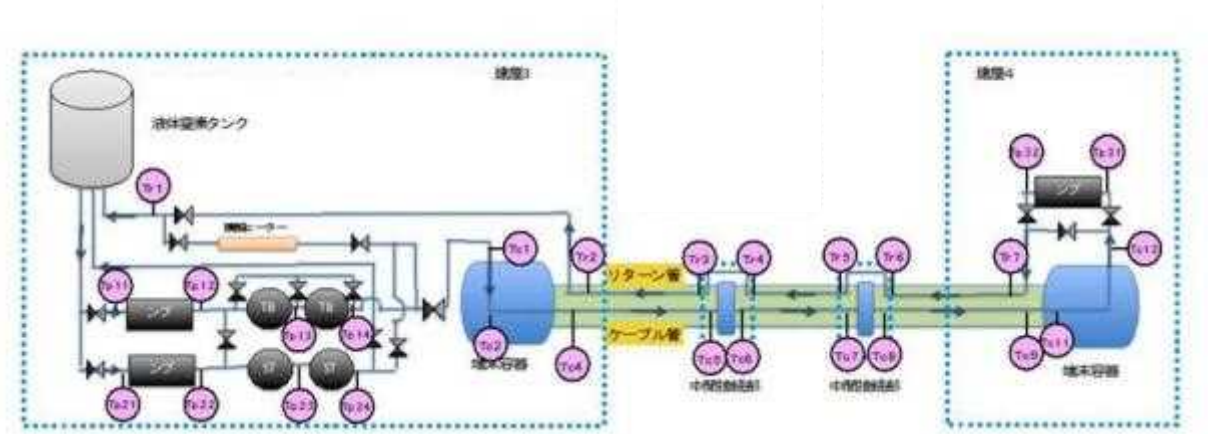


図 2.2.2.6- 5　LN_2温度計設置個所（石狩プロジェクト：回線 2）

ウ．運転停止・昇温

異常発生等により止む無く運転停止する場合には、冷媒による循環冷却状態を停止し、冷媒を放出、昇温を行うことになる。

その際、異常発生箇所により、(1)冷凍機または液体窒素ポンプ等の機器単体の昇温、(2)冷却システム全系統の昇温の２つのケースが考えられる。

冷却システム全系統の昇温の場合には、全長が完全に室温まで昇温するためには数週間～1ヶ月近く時間を要し、また、再起動に時間がかかるため昇温を出来るだけ避けた方が良い。

以下、全系統の昇温手順例について、記載する。

昇温は、循環停止、冷媒の放出（追出し）、ガスフロー等による昇温の順に進められる。

図 2.2.2.6-6 に手順のフロー図を示す。

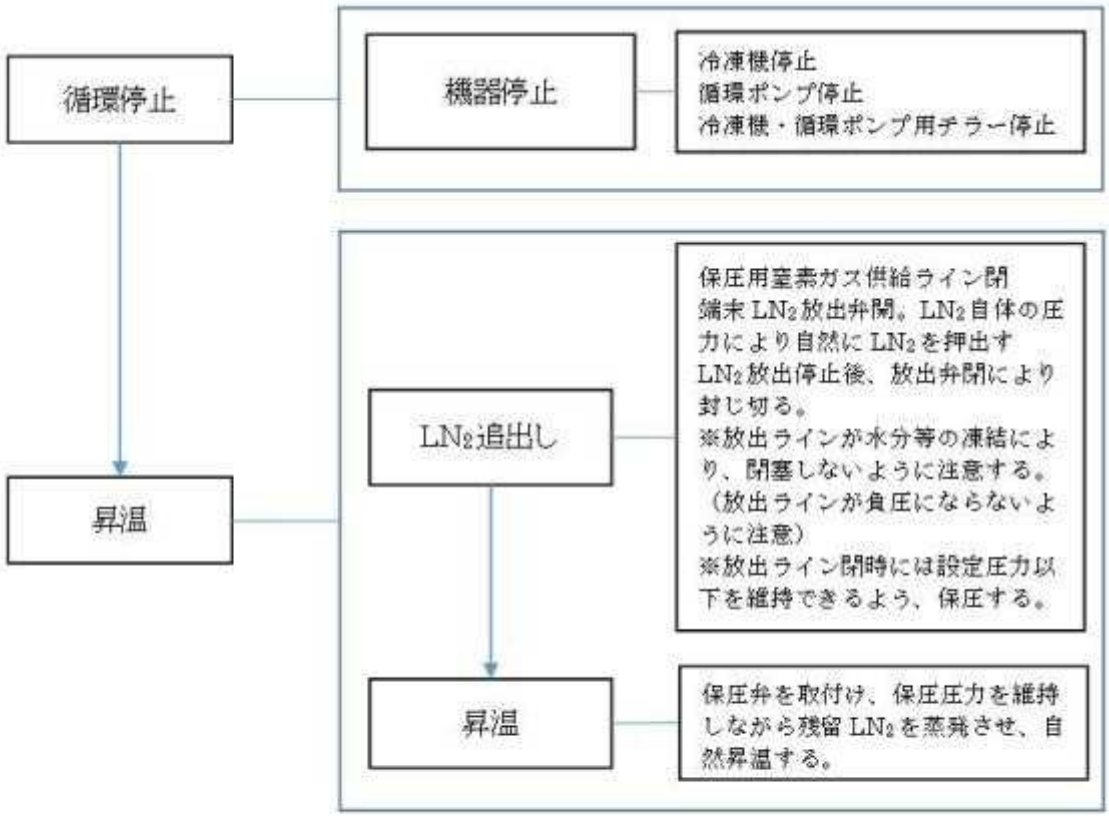


図 2.2.2.6- 6　昇温フロー図

冷凍機を停止すると、侵入熱により冷媒温度が上昇し内圧が高まるため、放出弁を開けるとその内圧に押されて冷媒が自然に放出される。しかし、ある程度放出が進み、冷媒の液面が下がると、放出弁からガスが逃げてしまうため圧力がかからなくなり、冷媒が中に溜まった状態になる。特に、管路に高低差がある場合にはそのような状況が起きやすい。溜まった状態で、閉回路にすると圧力が上昇し、設定圧以上になることがあるため、注意が必要である。

昇温速度を上げるためには、LN_2の蒸発に必要な熱を外部から供給する必要がある。方法としては、（１）断熱層にN_2ガス等を導入して、真空度を下げ、外部からの熱侵入を促進する、（２）予冷器等により温度の高いN_2ガスを導入する、などが挙げられる。

（参考：石狩プロジェクトの例）

石狩プロジェクトでは（１）循環ポンプあるいは冷凍機のみの昇温、（２）ケーブル管路のみの昇温、（３）全系統接続した状態での昇温の３パターンについて昇温作業を行った。

昇温作業にあたっては、各作業毎に、バルブの開閉、流体の経路、設備の運転状態等を記したフロー図を使用し作業を実施した。以下にサンプルとして（３）の場合の回線２の昇温作業フロー図を示す。

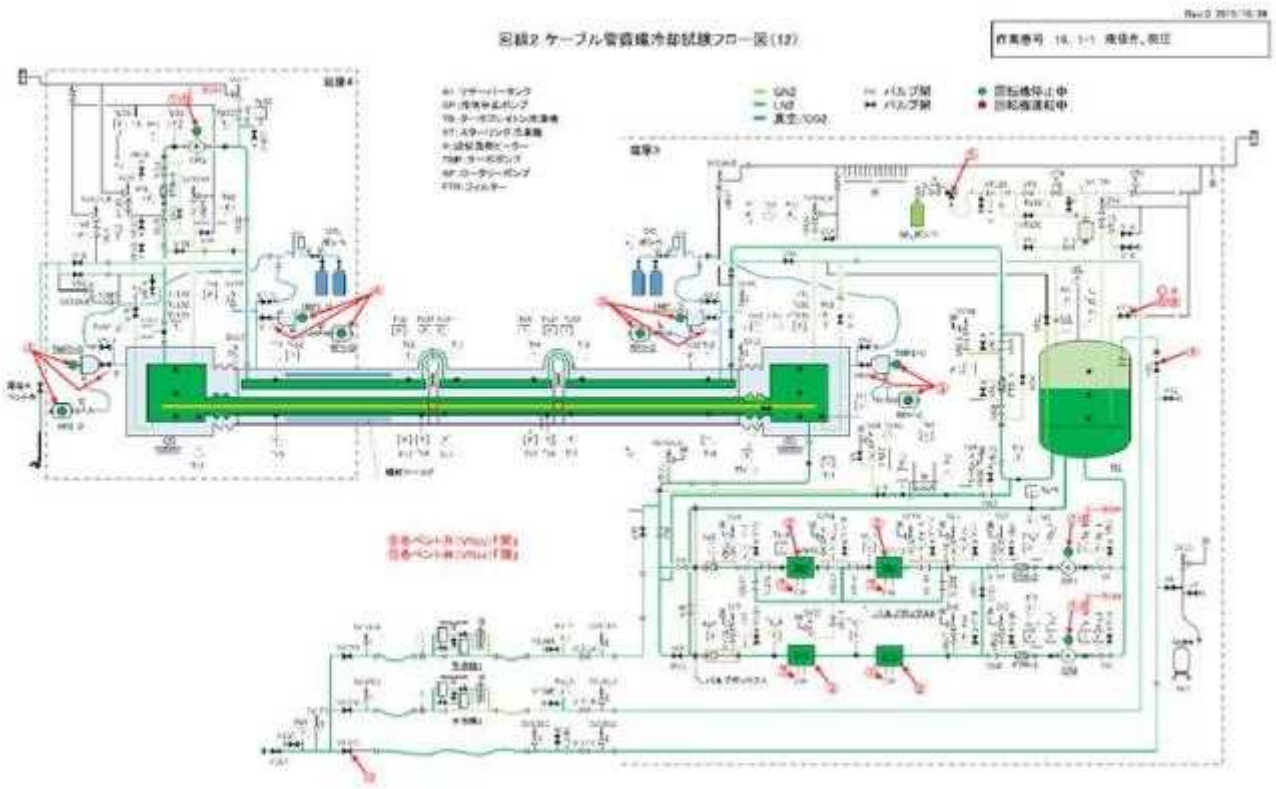


図 2.2.2.6- 7　昇温作業フロー図（石狩プロジェクト：回線 2）

石狩プロジェクトの LN_2 抜き～昇温の特徴を以下に列挙する。

・断熱二重管内にはケーブル管とリターン管の 2 本が並行して設置されている。ケーブル管は熱容量の大きいケーブルコアのため、なかなか昇温が進まない。従って LN_2 放出にあたっては、ケーブル管側が先に抜けるようにした。
・光ファイバー温度計によりケーブルコ全長に渡る温度分布を監視した。これにより、昇温の進行状況の見極めが容易になり、作業効率が上がった。
・昇温中は超電導ケーブルの熱収縮に伴い張力が発生するため、端末にロードセルを設置し、張力を監視し、必要に応じて端末を移動させ張力を緩和した。

回線 2 については 2 回の冷却・昇温作業を実施している。1 回目については昇温を促進するため、LN_2 が抜けた後、断熱層に N_2 ガスを 10 Pa 程度まで導入した。一方 2 回目については、断熱二重管の断熱層の真空度を維持した状態で昇温を行った。

図 2.2.2.6-8 に一回目および 2 回目の昇温時の光ファイバー温度計で測定したケーブル温度の時間推移を示す。1 回目の昇温においては、昇温作業開始後ほぼ 1 週間でケーブル全長の昇温が完了した。一方、2 回目の昇温では、約 1 週間経過後も断熱性能の良い区間 1 側はなかなか昇温せず、完全に昇温するまで、約 1 ヶ月の期間を要した。

また石狩においてはヘリカル変形および可動式端末による熱応力緩和法を採用したため、昇温に際してはケーブルコア温度が均一に上昇するように留意するとともに、端末において軸力を監視し、必要に応じて端末移動を実施した。

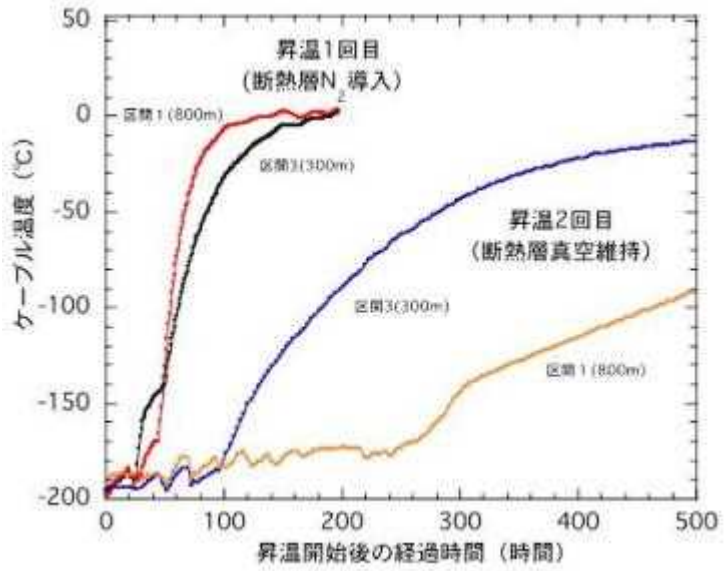


図 2.2.2.6- 8　回線 2 の 1 回目、二回目の昇温におけるケーブルコア温度の時間推移

(2)異常時対応

ア．重故障リスト

システムの異常は、重故障と軽故障に分類される。重故障とは放置すればシステムに重大な損傷をもたらす可能性のある、或いは既に重大な損傷を負っている可能性のある故障であり、重故障発生の際には警報を発報し、インターロック等により送電システムを停止する必要がある。

警報等の異常が発生した場合の処置に関しては、機器の特性に応じて製造者が取扱説明書等において必要事項を指示または表示しているので、これに従うことが重要である

重故障警報の項目は冗長化の範囲等システムの特性によっても異なるが、直流超電導送電システムでは少なくとも以下の項目を重故障警報としてリストアップする必要がある。

表 2.2.2.6- 4　重故障リスト

	重故障警報項目	重故障判断条件
1	超電導ケーブル 液体窒素温度上昇	超電導ケーブル管路に設置された液体窒素温度計のうち 2 点以上が上上限温度以上となった場合
2	液体窒素圧力低下	冷却システムに設置された圧力計のうち 2 点以上が下下限圧力以下となった場合
3	リザーバタンク液面低下	以下の 2 点を同時に満たした場合 ・リザーバタンク液面が下下限以下 ・リザーバタンク内温度計が上上限以上
4	液体窒素循環ポンプ故障	以下の 2 点を同時に満たした場合 ・循環ポンプの故障警報が発報 ・循環流量が下下限以下
5	制御・動力電源喪失	動力盤電圧が下下限以下を 5 分以上継続した場合

重故障の選定の考え方として、例えば「冷凍機の停止」に関しては、「液体窒素温度上昇」として抽出でき、冷凍機が停止しても循環していれば急激に液温が上昇することはなく、上上限温度になる前に冷凍機が復旧し定常運転に戻れば問題ないため、重故障とはしていない。一方でポンプの故障に関しては、循環が停止することで、局部的な温度の上昇が懸念され、それを検知して安全を確認するのが難しいため、重故障という判断になる。

なお、実送電においては、安定送電が必須であることから、安定的に送電できなくなる要因に対しても重故障として扱うことになる。従って、主要機器及び制御システムの多重化を計画することが重要であるが、この検討については今後の課題である。

（参考：石狩プロジェクトの例）
石狩プロジェクトでは重故障リストとして、以下の通り設定した。

表 2.2.2.6- 5　重故障リスト（石狩プロジェクト）

	重故障警報項目	重故障判断条件	設定値	運転値
1	超電導ケーブル 液体窒素温度上昇	ケーブル管に設置された液体窒素温度計（16 点）のうち 2 点以上が上上限温度以上となった場合	温度上上限 ：83 K	温度 ：70 K
2	液体窒素 圧力低下	冷却システムに設置された圧力計（8 点）のうち 2 点以上が下下限圧力以下となった場合	圧力下下限 ：0.1 MPa	圧力 ：0.25 MPa
3	リザーバタンク 液面低下	以下の 2 点が同時に発生した場合 ・ リザーバタンク液面が下下限以下 ・ リザーバタンク内温度計が上上限以上	液面下下限 ：15% 温度上上限 ：85 K	液面 ：30%以上 温度 ：72 K
4	液体窒素循環 ポンプ故障	以下の 2 点が同時に発生した場合 ・ 循環ポンプの故障警報が発報 ・ 循環流量が下下限以下	流量下下限 ：20 L/min	流量 ：40 L/min
5	制御・動力 電源喪失	動力盤電圧が下下限以下を 5 分以上継続した場合	電圧下下限 ：360 V	電圧 ：400 V

イ．停電時の対応

停電には瞬停（おおむね 1 秒未満の瞬間的な停電或いは電圧降下）と一般的な停電の 2 種類がある。直流超電導送電システムに使用される冷凍機や循環ポンプは、機器単体では瞬停でも通常の停電と同様に停止して、自動復帰しない。一般的に瞬停は停電の 50 倍以上の頻度で発生するため、瞬停再始動リレーを使用する等により自動復帰するようなシステムにする必要がある。

停電時は UPS を付属する計器類以外は全ての機器が停止する。特に冷凍機や循環ポンプ等の動力機器が同時に停止するため、1.2.2.6（2）ア項に記載した重故障警報発報及び送電インターロックとなる。

復旧に際しては、復旧作業開始までの経過時間により液体窒素の温度と圧力の状態が変わるため、対応方法もその状態に合ったものとなるようにしなければならない。模擬停電試験等により経過時間に対応する復旧手順を検討し、対応マニュアルに盛り込むことも重要である。

（参考：石狩プロジェクトの例）

石狩プロジェクトでは冷凍機及び循環ポンプに瞬停再始動リレーは設けていない。以下のような瞬停及び停電時の対応表を作成し、現場監視者が本表に従って対応した。

表 2.2.2.6- 6　冷却システム機器の瞬停及び停電時の対応表

	しきい値	機器挙動	復電後の運転再開手順
ターボブレイトン冷凍機	瞬停・電圧降下(AC320V以下) 又は停電	ユーティリティを含む全ての機器が停止 (停止工程は数分を要する) 但し、制御システムはUPSにより維持 【復電時】停止のまま 停止工程の場合はそのまま停止	以下の確認・操作で運転再開 ①警報が発報し、運転が停止していることを確認 ②運転操作盤面にて「異常リセットボタン」を押す →通常状態に戻ることを確認 ③取説の「5-3 起動方法」に従って運転を再開 ＊UPSのバッテリー維持時間(30分)を超える停電の場合は、装置の完全停止確認後、UPSを停止(取説の「7-3 停電による装置停止時」参照)しバッテリーの消耗を防ぐ
スターリング冷凍機	瞬停・電圧降下(AC180V以下) 又は停電	機器の全停止 【復電時】停止のまま	以下の確認・操作で運転再開 ①制御盤前面操作パネルの「POWER」の点灯を確認 ②「START」スイッチを押す
スターリング冷凍機 コールドヘッド凍結防止用 ヒーターコントローラ	瞬停・電圧降下(AC180V以下) 又は停電	機器の全停止 【復電時】停止のまま	以下の確認・操作にて運転再開 ①電源ブレーカーがONであることを確認 ②温度調節器が「RUN」状態であることを確認 ③「運転」スイッチを押す
液体窒素ポンプ	電圧降下(AC180V以下) かつ6000rpm以下	コントローラ電源「OFF」 スピンドルはタッチダウン モーターはフリーラン→回転停止 【復電時】停止のまま	以下の確認・操作で運転再開 ①「POWER」信号「ON(点灯)」確認 ②「ROTATING」信号「OFF(消灯)」確認 ③「RESET」スイッチ「ON」 ④「START」スイッチ「ON」 停電時間が10秒以内の場合は、復電後も「POWER」信号が「OFF(消灯)」となる可能性がある。その場合は、しばらく時間をおいてからコントローラ背面の「POWER」スイッチを「切」→「入」とする。
インバータチラー	瞬停・電圧降下(AC180V以下)	機器の全停止 (瞬停・電圧降下はエラーとなる) 【復電時】停止のまま	以下の確認・操作で運転再開 ①操作プレートのリセットスイッチを押す or 元電源遮断＆再投入 →警報解除 ②クーラー運転スイッチを押す
	停電	機器の全停止 【復電時】自動的に運転再開 (F1の設定値を「1」とする)	操作不要(自動的に運転再開)
真空ポンプ	瞬停・電圧降下(1~2秒以内)	ロータリーポンプ、ターボポンプ共に停止 自動リーク弁(遮断弁)作動せず 【復電時】ロータリーポンプ、ターボポンプ共に 自動的に起動	操作不要(自動的に運転再開)
	停電	ロータリーポンプ、ターボポンプ共に停止 自動リーク弁(遮断弁)がCLOSE →真空度は2~3桁悪化する。 【復電時】ロータリーポンプ自動起動(電源復帰後すぐ) 自動リーク弁(遮断弁)自動的にOPEN(1~2秒) ターボポンプ自動起動 →回転数定格到達(2~3分)	操作不要(自動的に運転再開) ＊自動リーク弁(遮断弁)のOPENからターボポンプ回転数定格到達までにタイムラグがあるが、リーク量少であり、真空槽下への影響はほとんどないと予想される。

また、回線 1 では停電後の対応手順を検討するため、停電試験を実施した。方法は、模擬的に 3 秒間動力電源のブレーカーを OFF としたのちにブレーカーを ON とし、そのままの状態で放置、時間経過に伴う復旧の可能性と安全性維持の可能性の両方を確認するというものである。本試験により以下の結果を得た。

①復電後、バルブ操作なしで冷却循環が再開できる最長時間：1 時間
②復電後、圧力維持機構により系内圧力が安全に維持できる最長時間：24 時間

即ち、停電発生後 1 時間以内に現場に駆けつければ、循環ポンプとターボブレイトン冷凍機の運転スイッチを ON とするだけで、循環冷却が再開する。その際、ターボブレイトン冷凍機が定常運転に戻るのに 30 分程度を要する。

また、現場へ駆けつけるまで 1 時間以上となった場合は、配管内に N_2 ガス溜まりが発生し、単に循環ポンプのスイッチを ON とするだけでは循環が再開しない可能性がある。この場合は、一旦、循環ポンプを OFF とし、系内温度計でガス溜まりが発生している箇所を確認し、近傍のベント弁からガス抜きを実施した上で再度 ON とすることで循環が開始する。なお、この作業はシステムを熟知している作業員が実施する必要がある。

2.2.2.7 保守

(1)保安規程

ア．保安規程の作成

保安規程は、電気事業法第 41 条 1 項の規定に基づき「事業用電気工作物の設置者は、電気工作物の工事、維持及び運用に関する保安を確保する」ことを目的に作成しなければならないものである。

保安規程に記載すべき事項の範囲は、電気事業法施行規則第 50 条に示されているので、それを遵守するとともに、保安業務の運営の実態に則した内容にすることが重要である。

また、保安規程記載項目の「巡視・点検及び検査基準」は、機器製造者の取扱説明書を参考にするとともに、関係者の了解の下で作成する必要があり、絶縁抵抗値、接地抵抗値は「電気設備に関する技術基準を定める省令」（電気設備技術基準）を遵守することが重要である。

さらに、保安を確保するために必要な事項は細則を制定するとともに、その細則は実態に則したものに適宜見直しすることが重要である。

（参考：石狩プロジェクトの例）

石狩プロジェクトの回線 1 の電気工作物は、別図第 3－1「設備構成（回線 1）」（図 6.1.1.1 参照）にあるように「同一構内以外にわたって他の電気工作物と電気的に接続するための電線路が設置されている電気工作物」で、回線 2 は別図第 3－2「設備構成（回線 2）」（図 6.1.1.2 参照）にあるように「高圧受電設備を有する電気工作物」であり、ともに事業用電気工作物の自家用電気工作物に該当するため、保安規程を作成し届出を行った。

石狩プロジェクトの保安規程で制定した細則及び添付図・表は以下の通り

【細則】

・電気主任技術者代務者の定め
・バイパス回線、超電導回線切替手順
・回線 1 高温超電導自家用電気工作物の運転、操作
・回線 2 高温超電導自家用電気工作物の運転、操作
・災害時連絡体制
・作業の実施

【添付図・表】

・保安業務の執行組織図、指揮命令系統及び連絡系統
・業務分掌（高圧超電導用自家用電気工作物の保安に関すること）
・責任の分界（回線 1）（回線 2）
・位置図（500,1000 m 超電導直流送電ルート）
・設備構成（回線 1）
・設備構成（回線 2）
・500 m 区間平面図
・1000 m 区間平面図
・単線結線図（全体）
・単線結線図（回線 1）
・単線結線図（回線 2）
・超電導ケーブル及び断熱二重管概略構造図
・巡視、点検及び検査基準
・保安規程経歴表

なお、保安規程作成時に参考にした文献は以下の通り

・自家用電気工作物保安管理規程（JEAC8021）
・高圧受電設備規程（JEAC8011）
・自家用電気工作物必携Ⅰ（法規手続編）

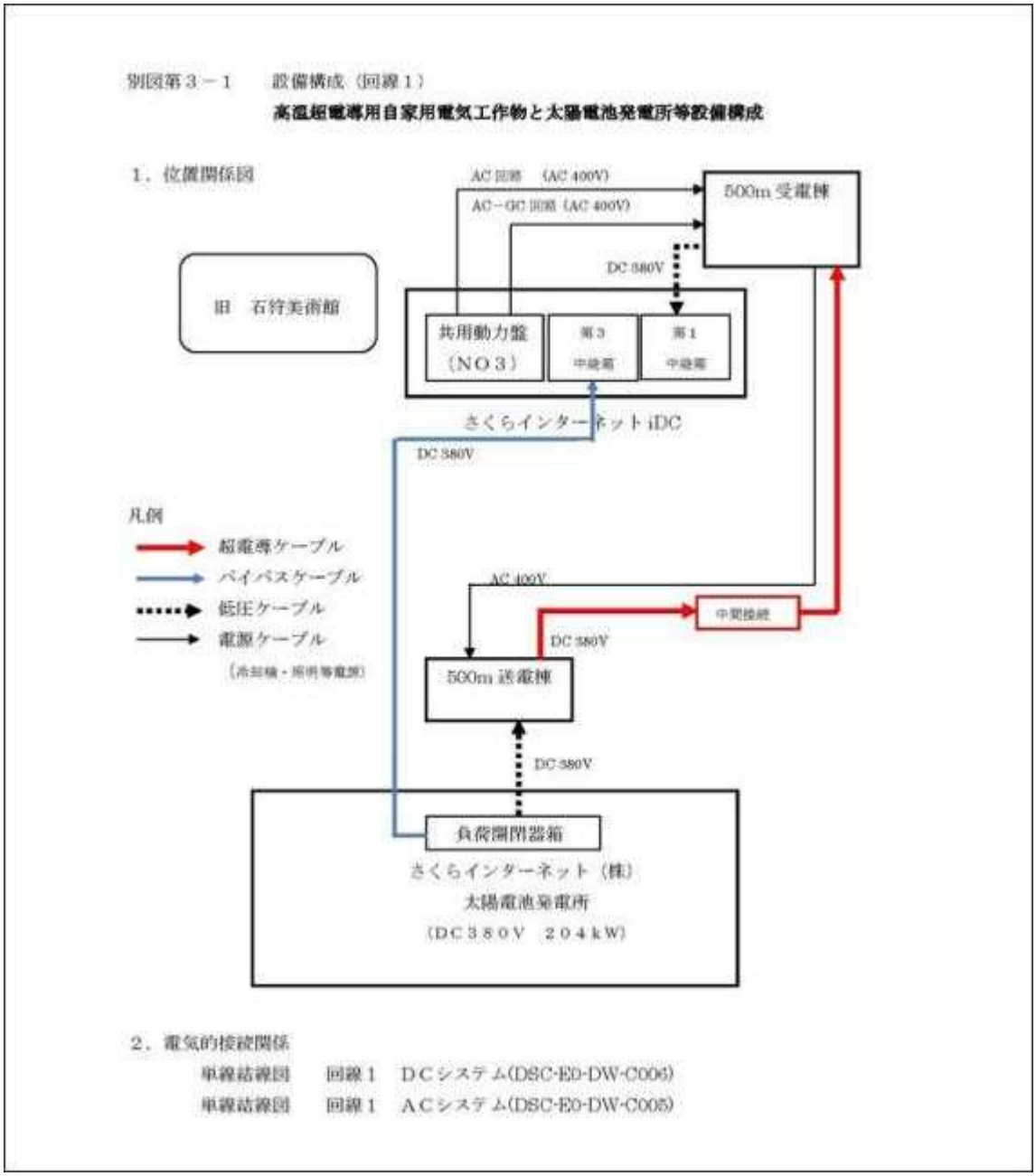


図 2.2.2.7－１　保安規程別図第３－１（石狩プロジェクト）

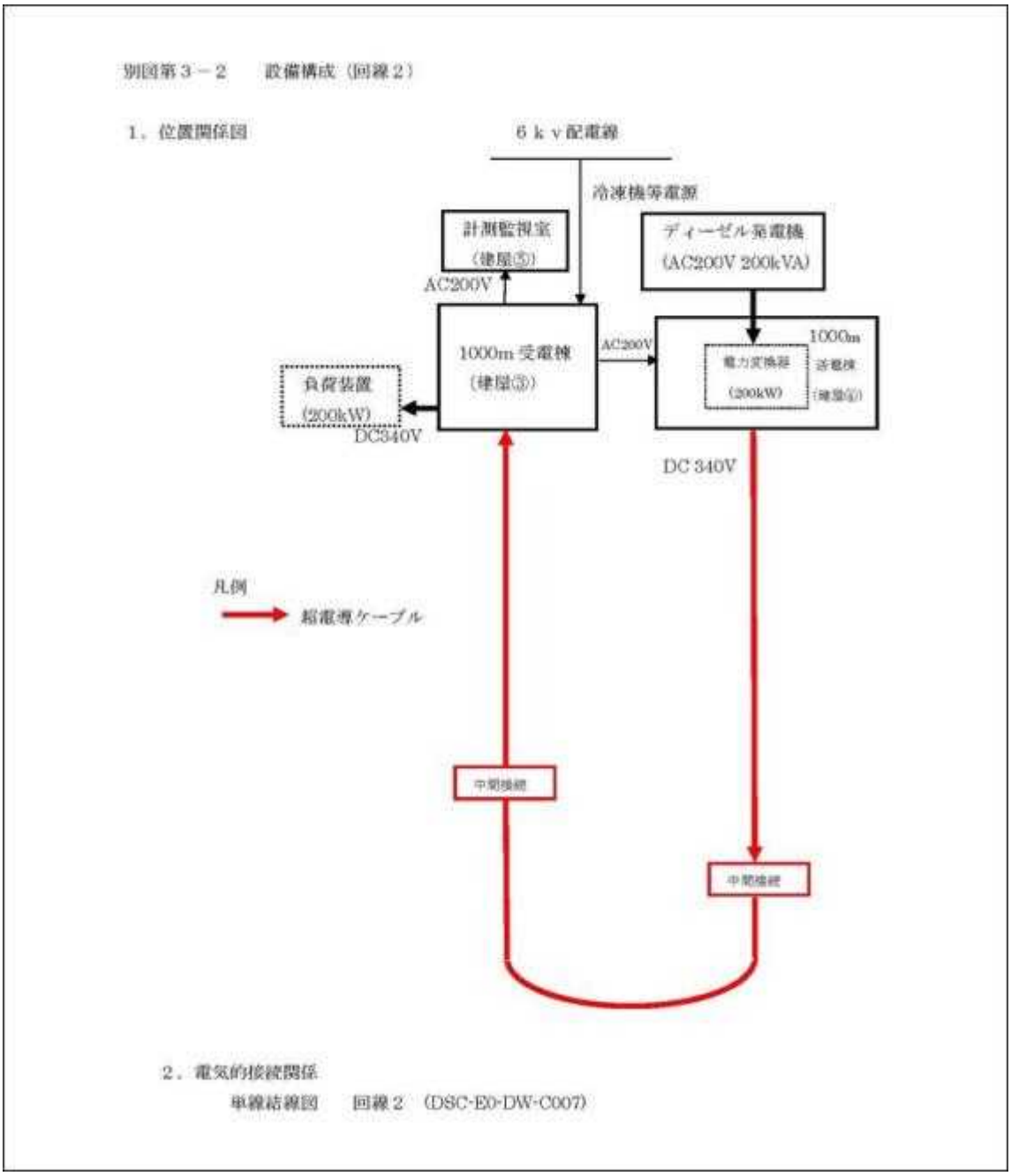


図 2.2.2.7- 2　保安規程別図第３－２（石狩プロジェクト）

イ．巡視、点検及び検査の基本原則

（ア）適合確認

電気主任技術者等は、保安規程に基づき次のいずれかの方法により、自家用電気工作物の技術基準への適合状況を確認することが重要である。

① 自らが巡視、点検及び検査を実施

② 電気使用場所の設備の巡視、点検及び検査について、その監督の下、当該事業所の従業員の中から所要の知識と技能を有すると認める者に行わせ、その記録を確認

（イ）不適合対応

電気主任技術者等は、自家用電気工作物の技術基準への適合状況を確認し、不適合又は不適合の恐れがあると判断した場合には、設置者に、その技術基準に適合するようにするためのとるべき措置及びその措置をとらなかった場合に生ずると考えられる結果を報告することが重要である。

ウ．日常巡視点検

自家用電気工作物の点検については、すべての点検を電気主任技術者等が行うことは困難な場合があるので、自家用電気工作物の運用、運転にあたる従業員や保全要員による日常巡視が事故等を未然に防ぐためには重要な役割を担っており、異常を発見した場合には電気主任技術者等に報告することが重要である。

（参考：石狩プロジェクトの例）

・日常巡視　１回／日（現地運転員による簡易的な巡視）

・巡視　　１回／月（月の中間で実施：電気主任技術者による巡視）

保安規程に定められた、巡視項目と要領の一覧表を以下に示す。

表 2.2.2.7- 1　保安規程別表第 1 より「巡視」（石狩プロジェクト）

点検個所	巡視	
	巡視要領	周期
高圧受電柱 受電棟（500m, 1000m） 送電棟（500m, 1000m） 計測監視室 電線路（超電導ケーブル） 発電機 負荷装置	・他物との接触の有無確認 ・外観における異常の有無の確認 ・運用・運転時の異常の有無の確認 ・損傷・異音・異臭・過熱	1回/月

エ．定期点検

電気主任技術者等が電気使用場所の設備を含めた電気工作物すべての点検を行うことが困難な場合にあっては、当該事業所の従業員による電気使用場所の設備の日常巡視等や専門的な知識及び技能を有する電気設備のメーカーの保全要員による点検が必要である。

なお、超電導ケーブルは一度冷却を開始したら定検時も含めて冷却を継続することでメンテナンスフリーとする。ケーブルの保全上は、熱履歴（冷却－昇温の繰り返し）を残さないことが大切であり、点検のために液抜き及び昇温を行うことはケーブルの劣化を促進する。そのため、冷凍機及びポンプ等の機器類はバイパス管路を設けて、運転を継続した状態で点検できるシステムとする必要がある。

（参考：石狩プロジェクトの例）

・月次点検　１回／月（月末に実施：電気主任技術者による点検）

・定期点検、検査　１回／年

保安規程に定められた点検項目と要領の一覧表を以下に示す。

表 2.2.2.7- 2　保安規程別表第 1 より「点検」（石狩プロジェクト）（1/3）

				点　検・検　査				
				点検要領、	*2 周期	点検・検査要領	周期	精密
高圧設備	高圧受電柱	高圧引込用負荷開閉器	本体	損傷・異音・異臭・過熱・施錠確認	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	開閉動作試験、絶縁抵抗測定		
		引き込み線路・ケーブル	本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
	高圧受電盤	断路器	本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定・インターロック		
		計器用変圧器	本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
		真空遮断器	本体	損傷・異音・異臭・過熱・施錠確認	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	開閉動作試験、絶縁抵抗測定		
		変流器	本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
		避雷器	本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
		高圧負荷開閉器	本体	損傷・異音・異臭・過熱・施錠確認	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	開閉動作試験、絶縁抵抗測定		
		変圧器	本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
		直列リアクトル	本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
		電力用コンデンサ	本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
		計器・表示装置・スイッチ・継電器	本体	指示・表示器、開閉位置確認	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	動作試験、絶縁抵抗測定		

表 2.2.2.7-2　保安規程別表第 1 より「点検」（石狩プロジェクト）（2/3）

低圧設備	低圧動力盤	漏電遮断器	本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
		配線用遮断器	本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
		電磁接触器	本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
		変流器	本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
		計器・表示装置・スイッチ	本体	指示・表示器、開閉位置確認	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
		ケーブル	本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
		変圧器	本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
直流設備	直流配電盤	遮断器	本体	損傷・異音・異臭・過熱・施錠確認	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	開閉動作試験、絶縁抵抗測定		
		計器・表示装置・スイッチ	本体	指示・表示器、開閉位置確認	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ		
			試験等	—	—	動作試験、絶縁抵抗測定		
	バスダクト		本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			接続部					
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
	ケーブル（端子箱含む）		本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			接続部					
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
	端末クライオスタット		本体	損傷・異音・異臭・加熱・霜＆氷付着	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
			試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
	超電導ケーブル・中間接続部（回線2）		本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外観点検	1回/年	

表 2.2.2.7-2　保安規程別表第 1 より「点検」（石狩プロジェクト）(3/3)

冷却システム	諸設備（空調・照明・排水・酸素濃度測定装置）	本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	損傷・異音・異臭・過熱	1回/年	
		試験等	—	—	酸欠センサー校正	2回/年	
					絶縁抵抗測定	1回/年	
	冷却循環システム（冷凍機、循環ポンプ、チラー、配管）	本体	損傷・異音・異臭・加熱・霜＆氷付着	1回/月	損傷・異音・異臭・加熱・霜＆氷付着	*	*:冷凍機&循環ポンプ:推奨周期でメンテナンスを実施
		試験等	—	—	真空度測定	1回/年	
					ガス圧力（冷凍機）		
					絶縁抵抗測定		
	真空排気装置	本体	損傷・異音・異臭・過熱 循環油の量	1回/月	潤滑油交換	1回/年	
					真空配管接続部ゆるみ		
発電機	発電機	本体	損傷・異音・異臭・過熱 冷却水の量 循環油の量	1回/月	潤滑油交換	*	*:推奨周期でメンテナンスを実施
					機能点検		
			長期停止後運転する場合は「月次兼貸出前点検表」（レンタルニッケン）により点検を実施する				
電力変換器	電力変換器	本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
		試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
負荷装置	負荷装置	本体	損傷・異音・異臭・過熱	1回/月	外管点検、清掃、補修、接続部ゆるみ	1回/年	
		試験等	—	—	絶縁抵抗測定		
機器の接地線		本体	腐食・断線	1回/月	接続部ゆるみ	1回/年	
		試験等	—	—	接地抵抗測定		

2 研究開発項目毎の成果
2.3 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発
2.3.1 超電導接続の性能、歩留り、信頼性向上技術開発
2.3.1.1　超電導接続方法の開発

図 2.3.1.1-1 に RE 系線材の構造図、表 2.3.1.1-1 に接続開発に用いたＲＥ系線材の仕様を示す。RE 系線材は、ハステロイ基板上に、IBAD 法で MgO 等の中間層を形成し、その上にエピタキシャル成長させた GdYBCO の超電導層を２軸配向させて形成させている。化学的な安定化のために銀層をテープ線全面に蒸着し、さらに電気的、機械的安定のために全体を銅メッキした線材である。高温超電導線の接続方法として、超電導層同士を向き合わせて、結晶的に接続する方法（図 2.3.1.1-2）を提案して開発を進めてきた。

接続方法は図 2.3.1.1-3 に示すように、２本の RE 系線材の被覆を除去して、超電導層を露出して、超電導層同士を面接触させ熱処理をして、２本の超電導線の超電導層を配向された結晶構造で連続的結合させることとなる。結晶成長（面内配向）を促進させるためと隙間の充てんを行うために、２本の超電導層の間には、超電導物質を塗布して熱処理する方法を行っている。

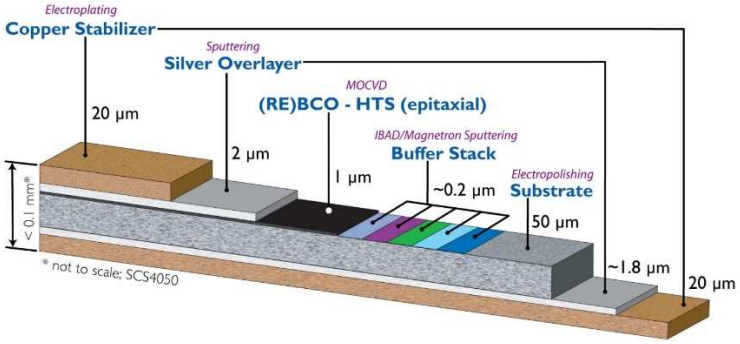


図 2.3.1.1-1 ＲＥ系超電導線材の構造（SuperPower 社製 SCS4050）

表 2.3.1.1-1　接続実験に用いたＲＥ系超電導線材の仕様

Wire	SuperPower Inc.(SF6050 AP)
Width of wire	6 mm
Thickness of Substrate	50 µm
Thickness of SC layer	1.6 µm
Thickness of Ag layer	2 µm

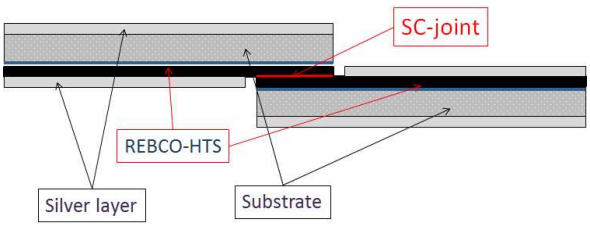


図 2.3.1.1-2　超電導接続の形態

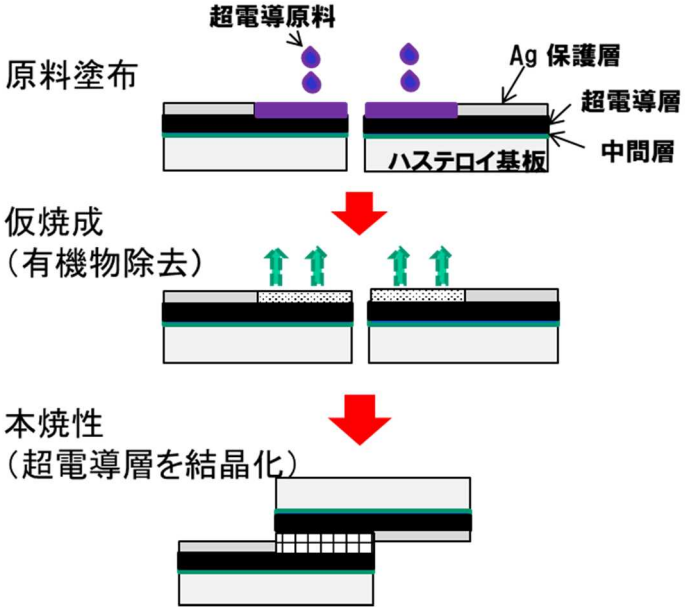


図 2.3.1.1-3　超電導接続の接続工程の概要

超電導的な接続の評価として、超電導特性を維持する最大電流を測定するＩｃ測定と、超電導接続の接続抵抗を測定する抵抗測定を行った。Ｉｃ測定は、超電導接続部を液体窒素中で浸漬冷却して、接続部の両端の電圧を測定する四端子法で行った。超電導接続の Ic 定義は、線材と同様のクライテリオンの 1 μV/cm として、電圧タップ間を 5 cm として定義した。その結果、**図 2. 3. 1. 1-4** に示すように 155 A の Ic を得ることができた。さらに、図中には一般的なハンダ接続で達成可能な接続抵抗 10^{-8}Ω のラインを引いてみて、150A 以下において、本研究で得られた超電導接続が 10^{-8}Ω以下であることが図から分かる。

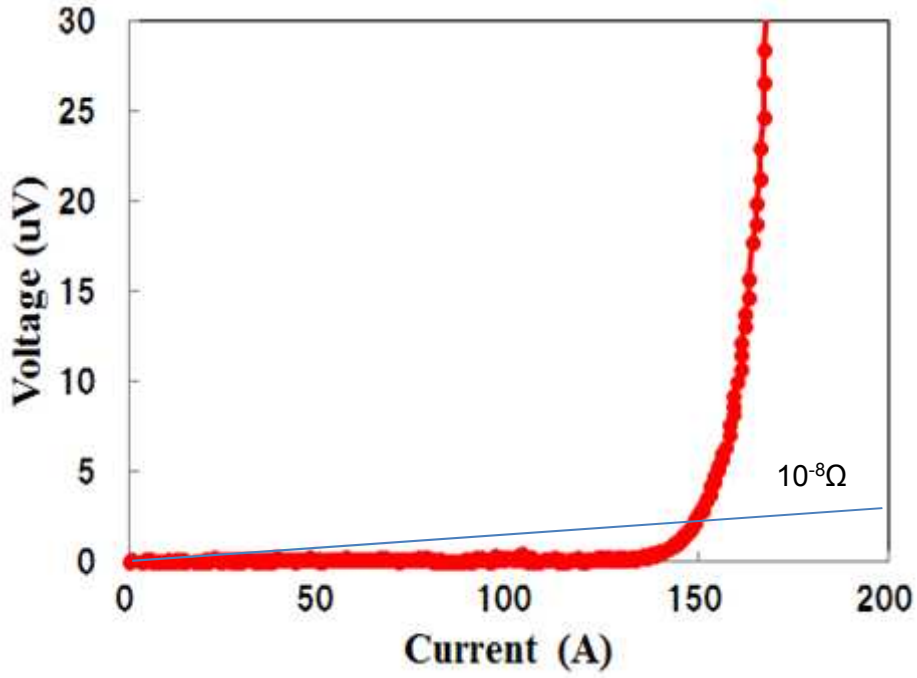


図 2.3.1.1-4　超電導接続の I-V 特性

2.3.1.2 超電導接続の温度、磁場をパラメータとした接続抵抗測定結果

本研究では、超電導接続の抵抗値を測定する方法として、RE 系線材で超電導接続したワンターンループを作成して、そこに電流を流して磁場を捕捉させ、その減衰を測定することで磁場減衰法を検討した。磁場減衰法の構成は、**図 2.3.1.2-1** に示すように、超電導接続でワンターン（閉ループ）としたサンプルを、液体窒素または冷凍機のコールドヘッドに置き、超電導状態とする。ループのところに、ループに磁界を鎖交させるように常電導線で製作された励磁（銅）コイルを置く。ワンターンループの超電導線の一か所にヒータを張り付けて、超電導ループの一部を、熱的に超電導状態を壊すようにする。この装置で、ヒータで一部常電導になったワンターンループに磁場をかけると、常電導状態の部分より磁場がループの中に入り、ループ内部に鎖交する。この状態で、ヒータの電流をオフにして、ループすべてを超電導状態にして、徐々に励磁コイルの電流を落として磁場を下げていく。この場合、ループにある磁場は補足され、それに相当する電流がループを流れて、永久電流となる。ループの超電導接続に抵抗Rがあると、ループのインダクタンスをLとすると、**式 2.3.1.2-1** で時間減衰することになり、ループのインダクタンスが分かれば、抵抗値を算出することができる。

$$H = H_0 exp\left(-\frac{R}{L}t\right) \quad \text{---- 式 2.3.1.2-1}$$

H:磁場、H0: 初期磁場、R: 抵抗、L: インダクタンス

超電導接続の抵抗測定の結果を**図 2.3.1.2-2** にします。測定は、30K で、磁場から換算される電流値として 70A での磁場減衰となっている。この結果より、実施した超電導接続で $10^{-13}\,\Omega$ 以下の抵抗が実現できていることが分かる。

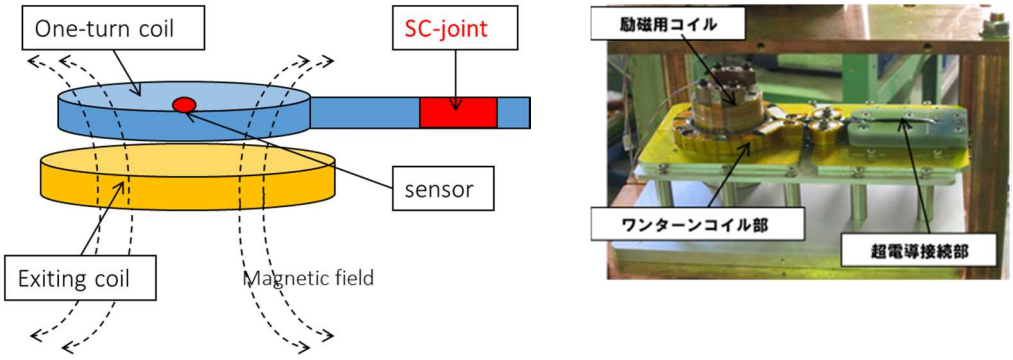


図 2.3.1.2-1　低抵抗測定システム（磁場減衰法：無磁場測定）

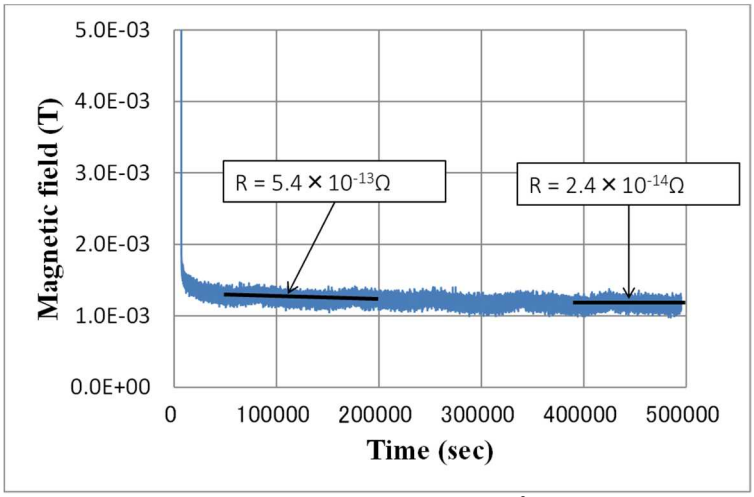
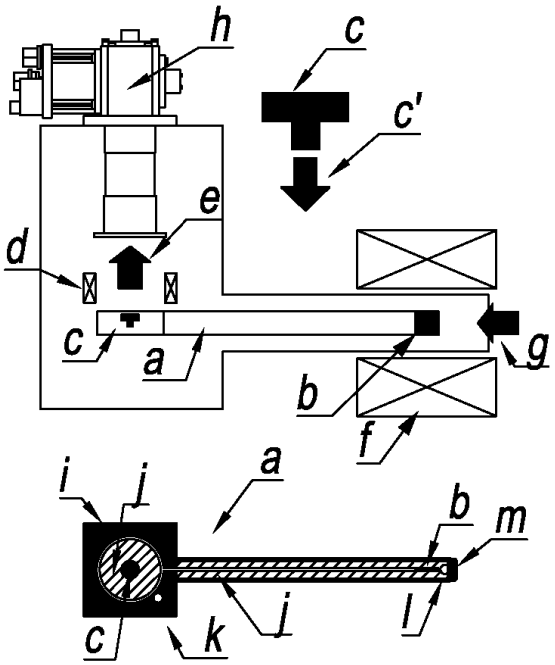


図 2.3.1.2-2　超電導接続を持つワンターンループの磁場減衰と抵抗値(0T, 30K)

先の実験では、冷凍機により温度可変はできるものの、磁場環境での測定ができなかった。そこで、NIMS 所有の冷凍機伝導冷却型 12-T 超電導マグネットを使用して、その中に超電導節則を入れて磁場環境下で超電導接続を測定することを検討した。を変化させ、また温度は GM 冷凍機を用いて 77K 以下の低温にすることで測定を行った。磁場印加型の抵抗測定装置を**図 2. 3. 1. 2-3、図 2. 3. 1. 2-4** に示す。測定装置の基本構成は、**図 2. 3. 1. 2-1** と同じであるが、ループと超電導接続の間を約 1m 取ることで、超電導マグネットの磁場の影響をループにかからないようにして、微小磁場を測定できるようにしている。



a. ワンターンループコイル, b. 接続, c.ワンターン部中心位置ホール素子（HESC), c‘. HESC の方向, d. 銅励磁コイル（ExC), e. ExC の方向, f. 超電導マグネット（SCM), g. SCM の方向, h. 40-K 冷凍機 (RDK-400B), i. アルミプレート（ヒータが設置され，接続部の温度調整を行った．この図では，ヒータを省略．）, j. FRP サポート, k. ワンターン部設置温度計, l. 接続部設置温度計, m. 接続部より 25 mm の位置に設置したホール素子

図 2.3.1.2-3　磁場印加型超電導抵抗測定装置

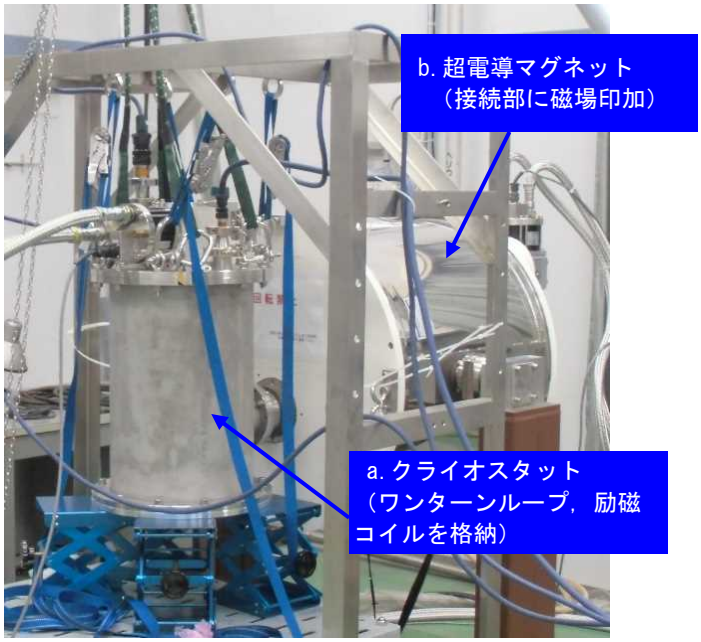
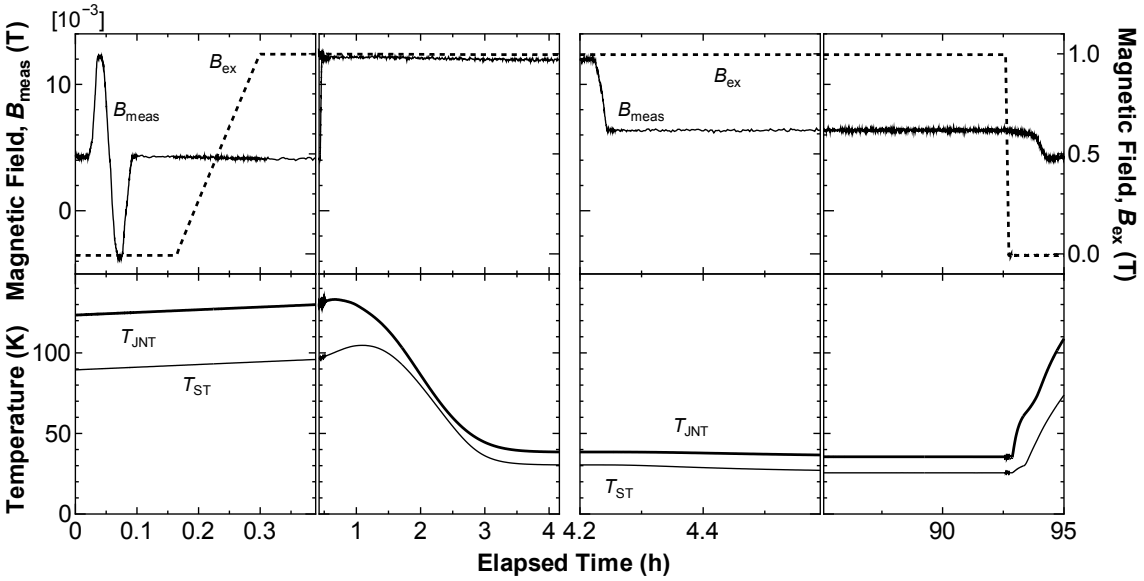


図 2.3.1.2-4　写真：磁場印加型超電導抵抗測定装置

捕捉させた磁場の減衰の測定方法は、励磁コイル（常電導銅コイル）で常電導状態のワンターンループコイルに磁場を印加したのち冷却し、超電導状態となったところで、励磁コイルを減磁して磁場を捕捉させ、その減衰をホール素子により測定した。また、接続部に磁場を印加した状態で捕捉磁場の減衰を観測するため、その位置が外部磁場印加用マグネット中心にくるようにワンターンループコイルを樹脂型枠に納めて成形し、40-K Gifford-McMahon 冷凍機により冷却した。捕捉磁場の減衰測定は、接続部の温度（35-K，50-K）および印加磁場（自己磁場，0.5 T，1.0 T）を変えて実施した。測定手順例を示すものとして、磁場強度、温度のプロフィールを**図 2.3.1.2-5** に示す。接続への印加磁場の大きさと方向は、MRI マグネットへの実装を想定した



上段：接続の状態（常電導状態，超電導状態），下段：測定手順（操作）
図 2.3.1.2-5　ワンターンループコイルに捕捉させた磁場の測定手順

ワンターンループ内の抵抗と捕捉磁場の減衰の比較を行った。各温度および磁場中での捕捉磁場の減衰を**図 2.3.1.2-6** に示す。比較のため，ループ内の抵抗が $1\times10^{-12}\,\Omega$ および $1\times10^{-13}\,\Omega$ の場合の磁場減衰の計算値を示す。接続を含め、ワンターンループ内の抵抗が、$1\times10^{-12}\,\Omega$ 未満であることを確認した。ワンターンコイル内に誘起された電流は、円電流により発生した磁場と仮定して見積もった。各試験における、誘起された電流値および接続部の抵抗値の見積を示す（**表 2.3.1.2-1**）

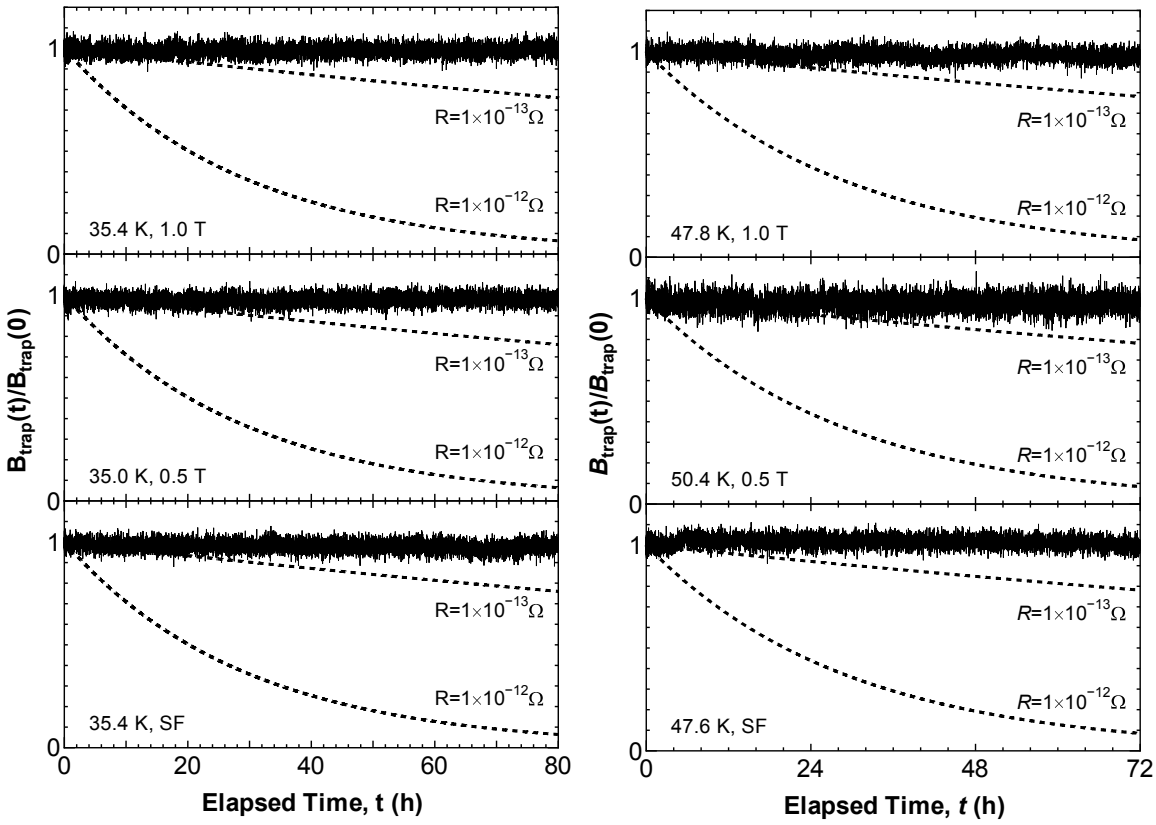


図 2.3.1.2-6　35 K、50 K におけるワンターンループコイル捕捉磁場測定と接続抵抗の見積
（接続部への印加磁場：自己磁場 SF、0.5 T、1.0 T）

表 2.3.1.2-1　**ワンターンループコイルに誘起された電流値および接続抵抗値の見積**

試験	測定温度 開始→終了	接続への印加磁場（T）	接続部の抵抗値（Ω）	コイルに誘起された電流(A)
1	38.3→35.1	0.5	$< 1 \times 10^{-13}$	103
2	38.5→35.6	1.0	$< 1 \times 10^{-13}$	102
3	38.8→35.5	SF	$< 1 \times 10^{-13}$	102
4	36.3→35.3	SF	$< 1 \times 10^{-13}$	53
室温へ昇温				
5	39.3→35.7	SF	$< 1 \times 10^{-13}$	102
6	50.7→47.7	0.5	$< 1 \times 10^{-13}$	100
7	50.6→47.8	1.0	$< 1 \times 10^{-13}$	100
8	50.3→47.5	SF	$< 1 \times 10^{-13}$	100

※試験 4:ワンターンループコイルに磁場を捕捉させるための銅励磁コイルの電流（磁場）を他の試験の半分で実施
※試験 5:試験 4 の後、ワンターンループコイルを室温まで昇温させたため，確認のため試験 4 と同条件での試験を実施

2.3.1.3 超電導接続の性能向上検討と歩留まり要因調査

超電導接続の最適条件を見出すために、ほぼ 100 サンプルの超電導接続を作成して、超電導特性の評価を行ってきた。本研究において、歩留まりの判断をする合格点について次の考えで設定した。本研究の当初の目標として、小型コイルによる永久電流試験の達成を目指すことにした。小型コイルは、MRI マグネットの模擬と、入手できる線材量、線材長さか 1 T コイルを製作することにした。**図 2.3.1.3-1** に小型コイルの外観、磁場分布を示す。また、**表 2.3.1.3-1** に小型コイルの仕様を示す。目標とする歩留りの定義は

① 接続のリスクを考慮して 50%以上の歩留まりを達成する。
② コイルの運転電流 Iop を Ic の 50%とする。
③ 接続部の測定と合否は 77K、0T の Ic で判断する。
④ 表 1 から超電導接続の仕様として 50K、0.1T、Iop 100A を達成するための 77K、0T の特性を合格値とする。

とした。50K, 0.1T と 77K, 0T の超電導接続の比較は、**図 2.3.1.3-2** の NIMS の測定データからもとめ、その結果合格値を 51A とした。

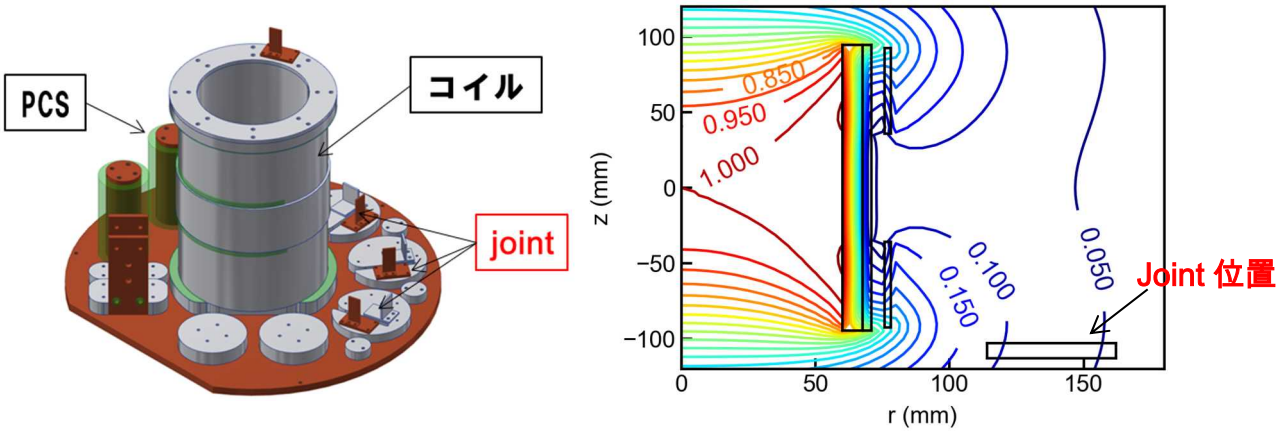


図 2.3.1.3-1 評価用小型コイルとその磁場分布

表 2.3.1.3-1　小型コイルシステムの仕様

	コイル	接続部
温度	50K	50K
電流値 Iop	100A	100A
磁場環境	1T	0.1T

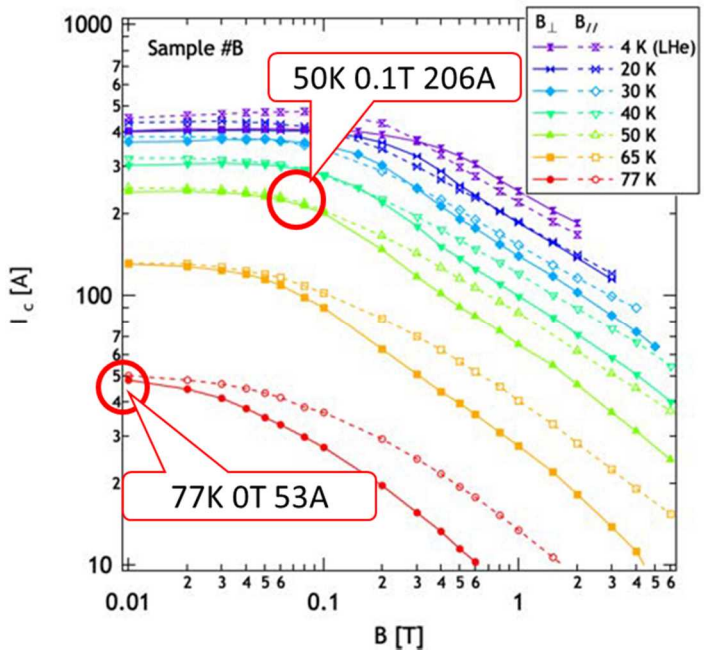


図 2.3.1.3-2　超電導接続の Ic 特性（50K, 0.1T と 77K, 0T の比）

接続部の必要 Ic

$$Ic = \frac{100\mathrm{A}}{50\%} \Big/ \frac{53\mathrm{A}_{(77K,0T)}}{206\mathrm{A}_{(50K,0.1T)}} = 51\mathrm{A}_{(77K,0T)}$$

プロジェクト開始当初は、歩留まり（目標値 50A, 77K, 0T）が 50%であったが、その後**図 2.3.1.3-3** に示すように 7.5%まで低下した。

原因調査として、作製プロセス、線材特性等調べた結果、線材の製造条件の変更があり超電導線材の超電導厚さが変わっており(Type A 1 μm → Tyep B 1.6 μm)、これによる線材の反りが**図 2.3.1.3-4** に示すように接続を阻害していると考えられた。また、超電導層膜厚と金属基板厚をパラメータとして線材の反り具合（たわみ量）を計算した結果、Type A で 50 μm、Type B で 100 μm と大きな差が出ることがわかった（**図 2.3.1.3-5**）

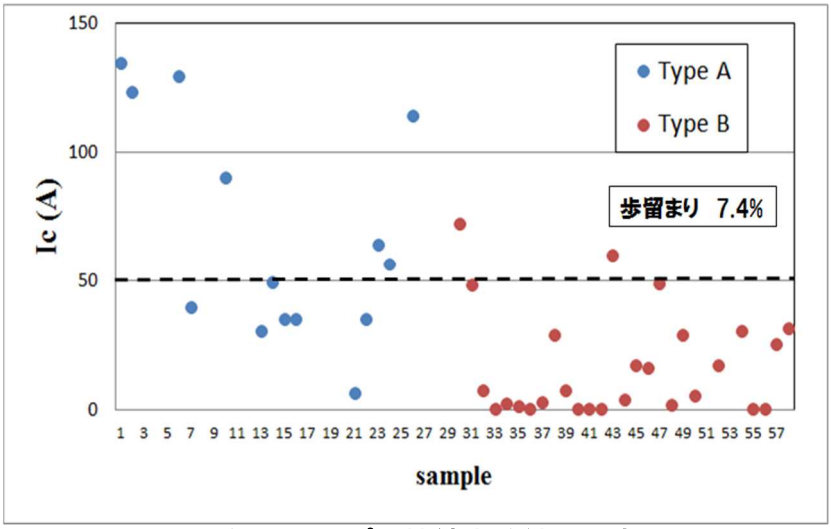


図 2.3.1.3-3　短尺サンプル接続実験結果（歩留まり低下）

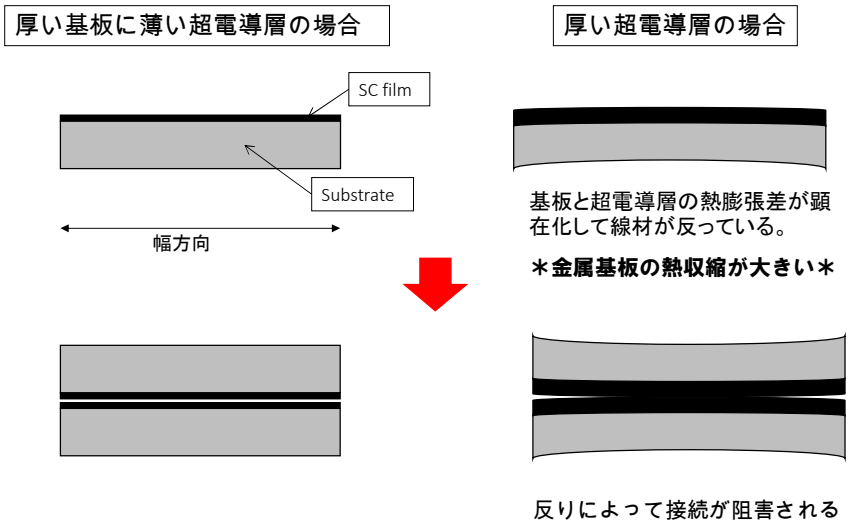


図 2.3.1.3-4　基板厚さによる反りによる接続の課題

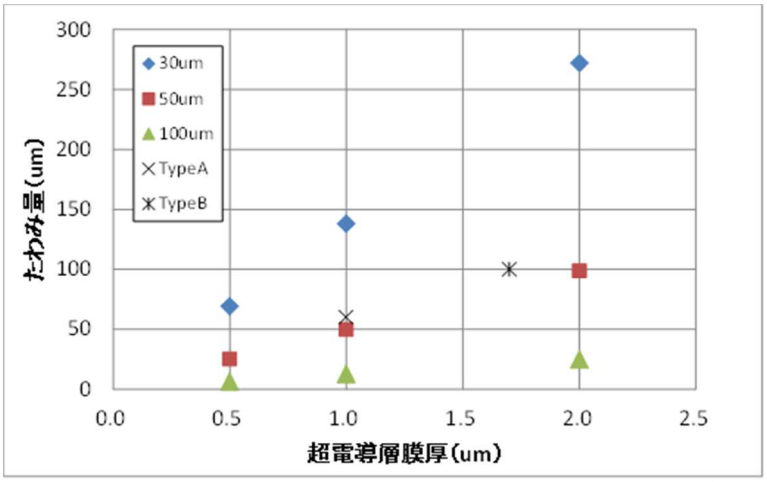


図 2.3.1.3-5　超電導線材の反り量（たわみ量）の計算結果

本研究で、原因調査を行い、接触面積を十分とることが電流特性を得るために必要であることを解明して、その対策として、エッチング法、矯正法の２つの方法を開発し、その結果図 2.3.1.3-6 に示すように、歩留まり 60%および歩留り 55%まで向上した。（具体的な対策は非公開版にて説明）

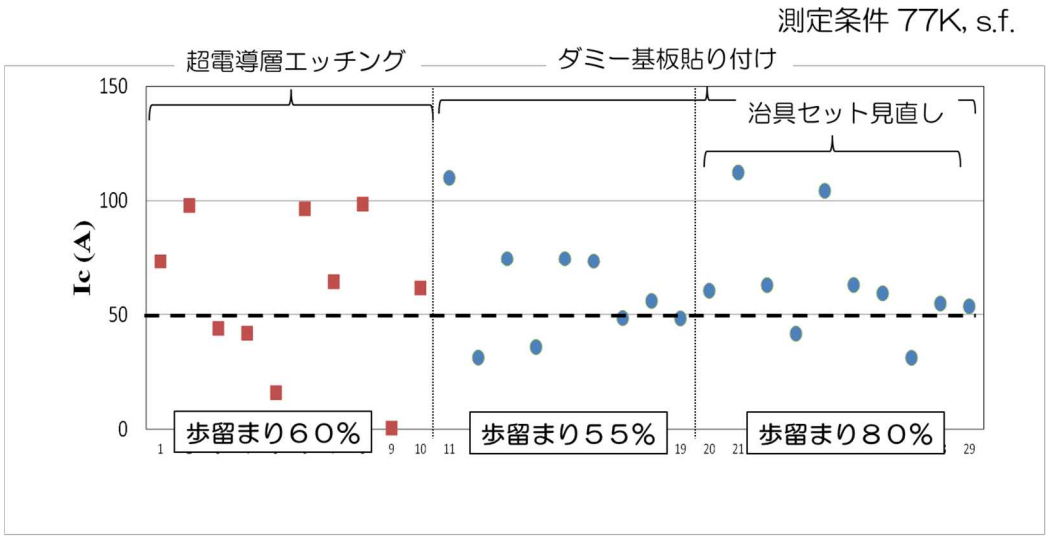


図 2.3.1.3-6　治具締め付け方法改善後の接続実験結果

さらに、特性が悪い（Ic=30 A 程度）サンプルの接続面を光学顕微鏡で観察した結果、**図 2.3.1.3-7** に示すように接続部分が片端に偏っている様子が見られ、一方で性能のよい Ic=100 A の線材は全面的についていることが分かった。片側に偏る原因究明として接続の治具組みの方法を再度検討したところ、締め込みの段階で押さえ板が傾いて押されることがあることがわかった。これらの原因は、治具の熱履歴等による変形のためと考えられる。そこで、変形のない治具を選定し、締め込み状態を確認しながら実験した結果、**図 2.3.2.3-6** に示す「治具セット見直し」の結果として歩留まりが 80%まで向上した。（治具セットの見直しは非公開版にて説明）

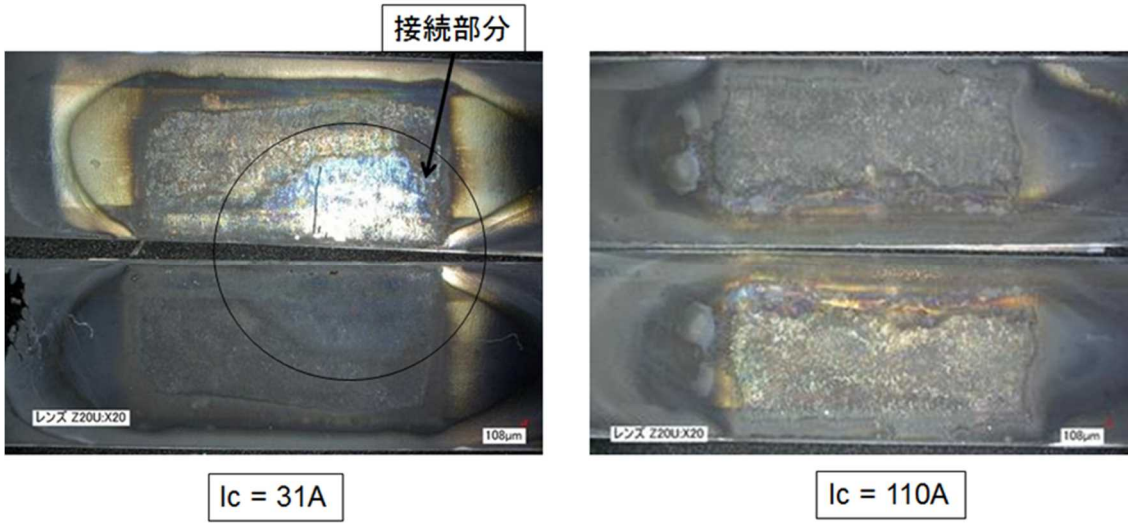


図 2.3.1.3-7　Ic 31A と 110A の超電導接続の接続面観察結果（光学顕微鏡）

2. 3. 1. 4　劣化防止技術の確立

信頼性について懸念されるのは、接続部にかかる外力と水分侵入で超電導特性が機械的、化学的に劣化することであり、当初においては、超電導接続したサンプルで液体窒素による測定の後に接続部が取れてしまったり、２回目の測定で**図 2.3.1.4-1** のようにＩｃ値が低下したりするものがあった。そのため接続部を保護する方法の開発を行った。劣化防止方法として、製作した超電導接続を収納部材に入れ、**図 2.3.1.4-2** に示すように樹脂埋めを行い、劣化防止対策を施した。こ

のサンプルを室温で保管し定期的に測定を行った結果（**図 2.3.2.4-3**）、300 日を経過しても劣化が見られず長期信頼性が維持されていることが分かった。

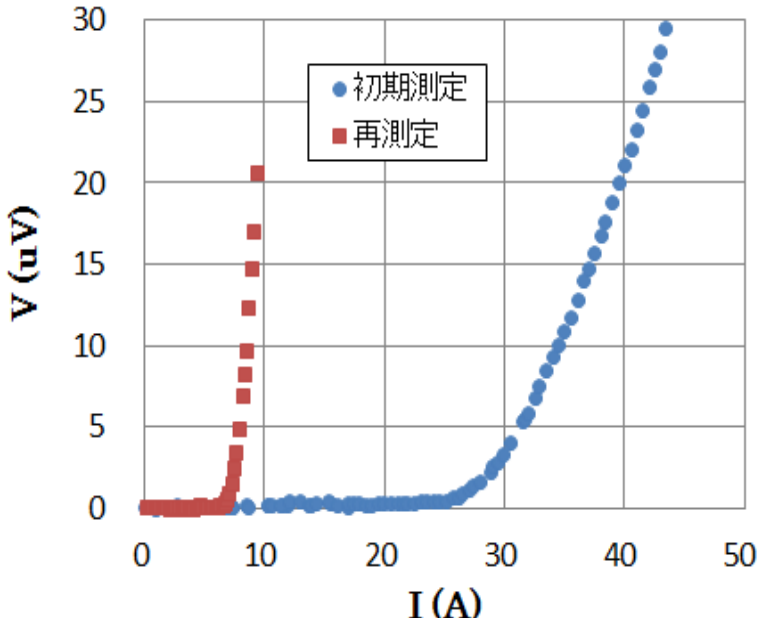


図 2.3.1.4-1　劣化防止未対策超電導接続の初回測定、２回目測定の I-V 特性



図 2.3.1.4-2 劣化防止技術

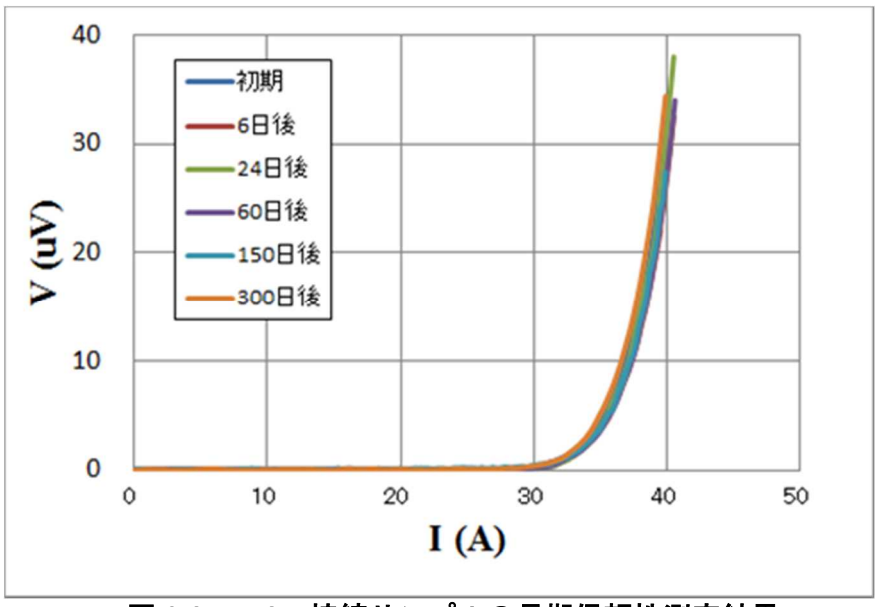


図 2.3.1.4-3　接続サンプルの長期信頼性測定結果

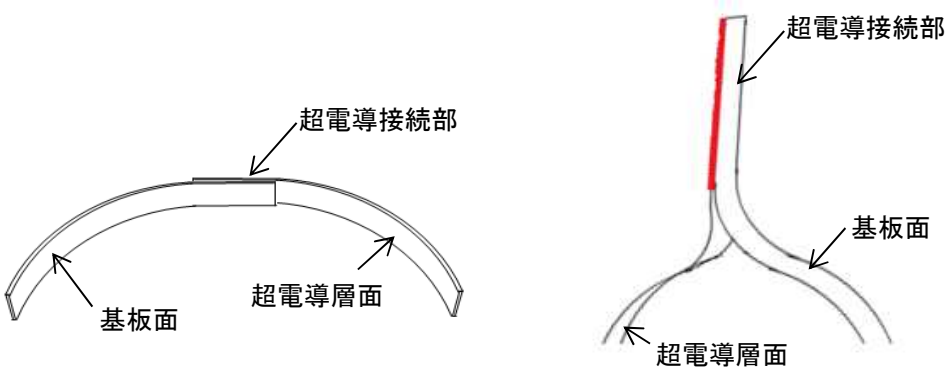
2.3.2 MRI コイルへの実装を考慮した超電導接続部の構造の開発

2.3.2.1　磁場および機械的な応力下での超電導接続

(1)　超電導接続部構造の開発

今回開発を想定している MRI マグネットは、将来の市場導入の主となる 3 T超電導 MRI を想定して開発を行っている。コイルの中心磁場は 3T であり、コイル部の最大磁場は 5T となる。RE 系超電導線を適用することを想定した場合、100A のコイル通電が必要となり、商用の RE 系超電導線材では 50K 以下に冷やす必要がある。現在商用化している超電導線の線長は 500m であることから、コイル形成には超電導線の接続が必要となる。

MRI マグネットで要求される接続としては、事前に２本以上の線を接続して長尺の線材をコイル内部に巻き込む方式と、コイル巻線を行いそれら複数のコイルを接続する方式である。**図 2.3.2.1-1** に示すように、前者は、２本の線材を「突合せ」で接続する方法(lap joint)で、接続部も線材幅、線材厚さと同等にすることになる。後者の場合には、２本の線材は「拝合せ」で接続する方法（edge joint）で、こちらは接続部分をケース等に入れて保護するなどが可能である。本研究では、**表 2.3.2.1-1** に示す目的のために突合せ接続と拝合せ接続の両方を行い、どちらも 100A 級の接続を得ることができている。



(a) 突合せ接続　　(b) 拝合せ接続

図 2.3.2.1-1　超電導接続の構造

表 2. 3. 2. 1-1　超電導接続の構造による用途

	突合せ接続	拝合せ接続
本研究における用途	・Ic-B-T 評価 ・機械応力特性評価	・接続抵抗測定実験 ・永久電流試験　コイル間接続
実用時点での用途	・コイル内接続 ・超電導ケーブルの線材接続	・コイル間接続
メリット	・線材と同等のディメンションが可能	・保護処理がやりやすい
デメリット	・長尺線材の場合、設備開発が必要 ・現状は短尺サンプルしかできない。	・接続が大きくなる

(2) 超電導接続の磁場中特性評価

線材をコイル内部で接続することは、巻線工程よる機械応力、コイルが発生する高磁場、磁場と電流から線材にかかる電磁力など過酷な環境に置かれることになる。本研究では、現在の超電導接続が高磁場、高強度下でどのような特性を持つかの測定を実施した。

超電導接続の磁場中特性評価を NIMS にて実施した。**図 2.3.2.1-2** は、超電導接続サンプルを、磁場中特性評価用のサンプルホルダーに付けた状態を示す。

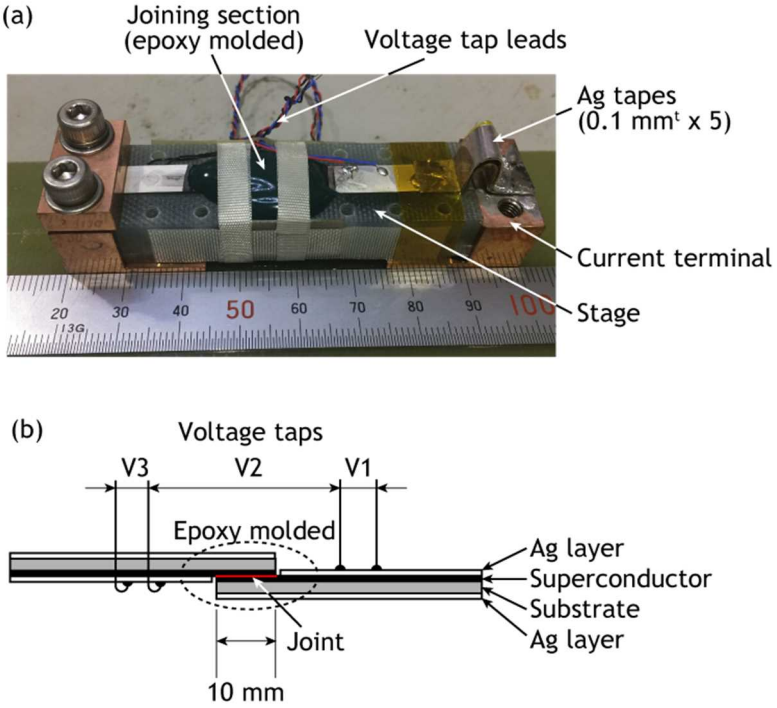


図 2.3.2.1-2 磁場測定用ホルダーに取り付けられた超電導接続サンプル

測定は、**図 2.3.2.1-3** に示す異なる I-V 特性を持つ２つのサンプルを用意した。一つは、77K、0T、Ic=107A(Sample #A)で、他方は 77K、0T、Ic=53A(Sample #B)のサンプルである。２つのサンプルに対して、温度および磁場を変えて Ic を測定した結果を、**図 2.3.2.1-4** (Sample #A)と**図 2.3.2.1-5** (Sample #B)に示す。この結果、２つの超電導接続は、77K の特性に対して低温にすることで通電電流は上がることが分かる。また磁場を上げると通電電流が下がる特性を持つことが分かった。これより、77K での線材の特性から、磁場環境、温度環境を想定して、MRI コイルの設計ができることになる。

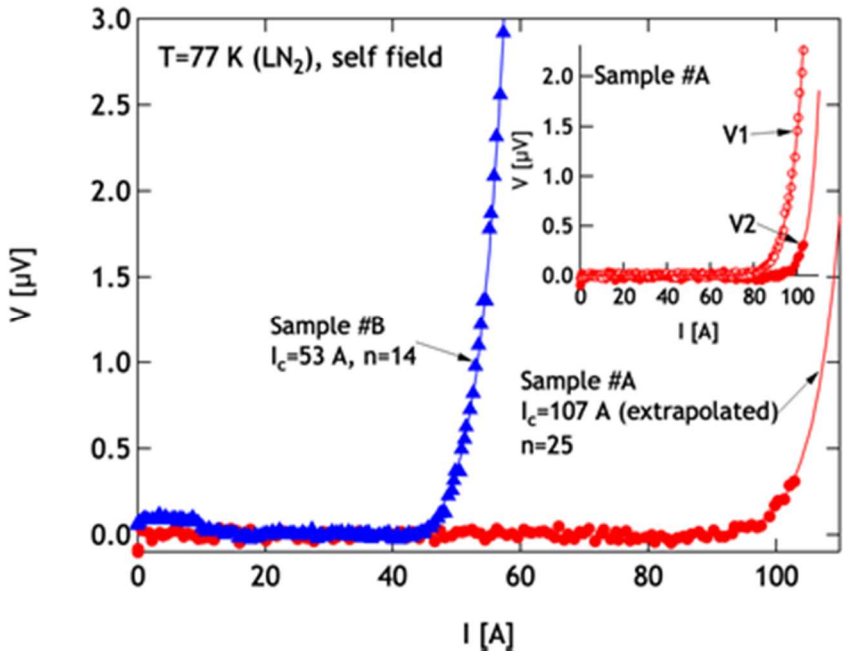


図 2.3.2.1-3 磁場中超電導特性評価サンプル

表 2.3.2.1-1 磁場中測定からの超電導接続の低温磁場特性

温度	77K	50 K	50 K
磁場	Self-field	0.1 T	1 T
Ic Type #A	107 A	312 A	180 A
Ic Type #B	53 A	206 A	80 A

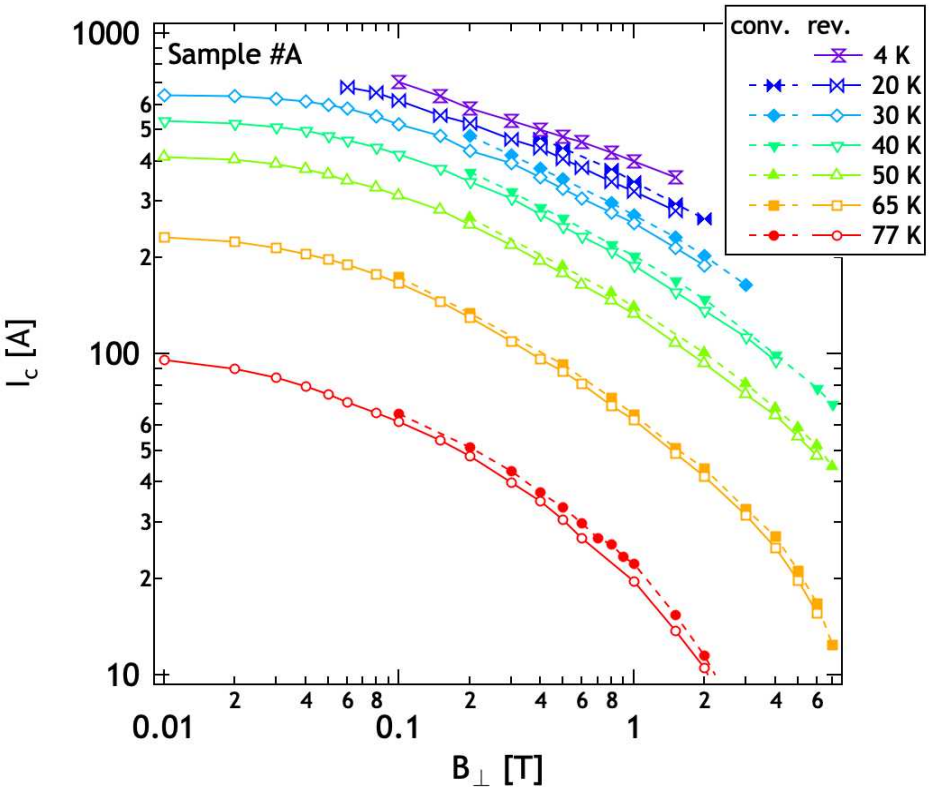


図 2.3.2.1-4 Sample#A の磁場中超電導特性評価結果

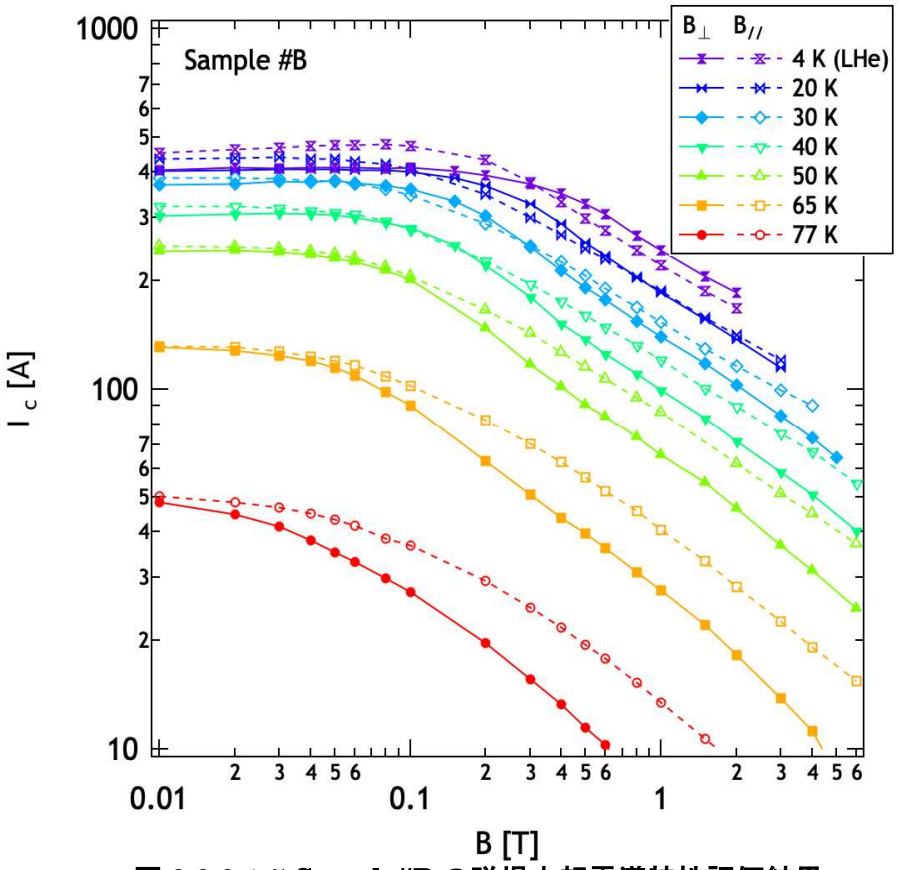


図 2.3.2.1-5 Sample#B の磁場中超電導特性評価結果

、

(3) 耐フープ応力に対する検討

超電導コイルの線材は磁場と電流により電磁力を受け、コイル内においてはコイルの半径方向の力となる。コイル中に超電導接続がある場合には、超電導接続部分は半径方向の電磁力により円周方向にフープ力が発生し、接続部を伸ばそうとする力がかかる。このフープ力は、通電電流および磁場に比例して大きくなり、その値として（磁場×コイル電流密度×コイル半径）を受ける。超電導接続の耐フープ応力の評価として、超電導接続部を引張試験機にセットして、液体窒素温度で冷却しながら、通電試験を行う方法を検討した。試験は NIMS の装置を用いて、図 2.3.2.1-6 に示すように接続サンプルをセットして、77K 温度中で応力をゼロから加えて Ic の変化を確認した。実験結果としては、77K での測定の前に常温での測定を実施し、その結果を図 2.3.2.1-7 に示す。また、77K での測定結果を 2.3.2.1-8 に示す。77K においては、引張り力 60 N まで Ic, n 値とも変化はなく、61 N 印加時に破断音（プツッというような小さな音）が発生し、劣化（Ic 測定では 1 A 未満でオーミックな抵抗発生）が起きた。しかし外観に変化はない。線材サイズ（6 mm 幅×55 μm 厚）で考えると、引張り力 60 N での応力は 182 MPa に相当すると考える。現状、182MPa は線材の強度の 1/4 しかないことから、接続はコイルから引き出してコイル外で実施することが必要であり、コイル内部で接続する場合には何らかの強度サポートが必要なことが分かった。

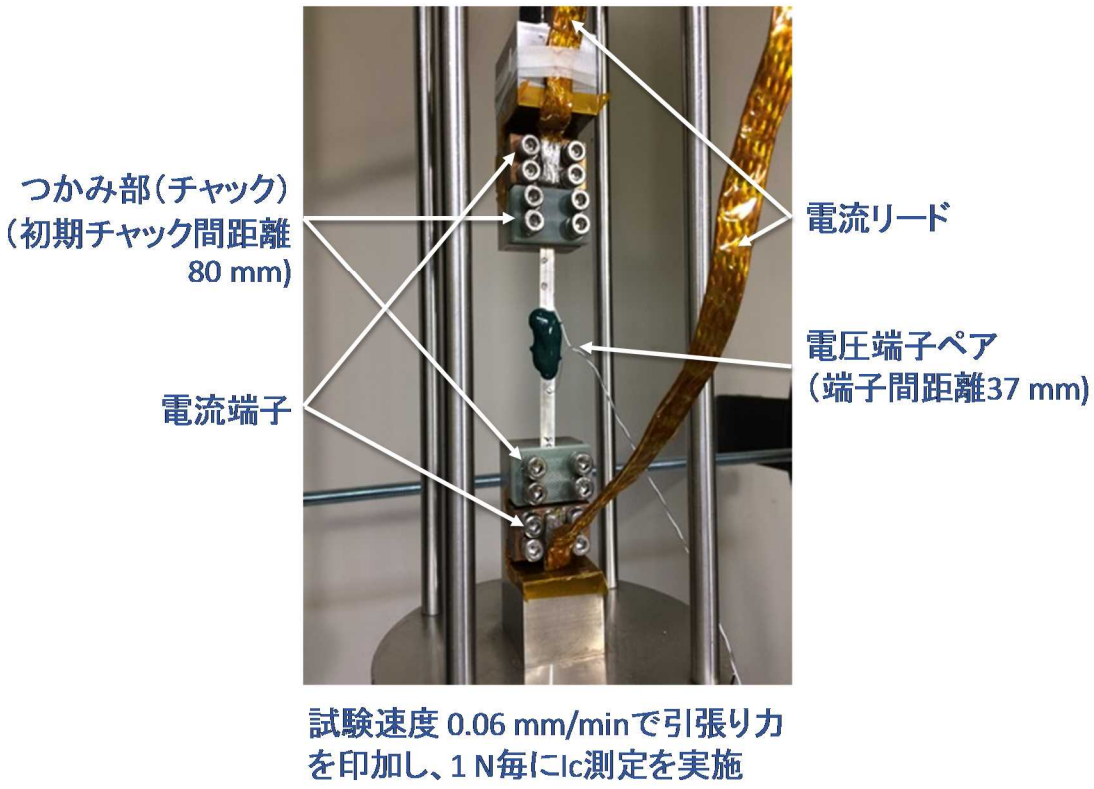


図 2.3.2.1-6 引張試験機を用いたフープ力測定装置

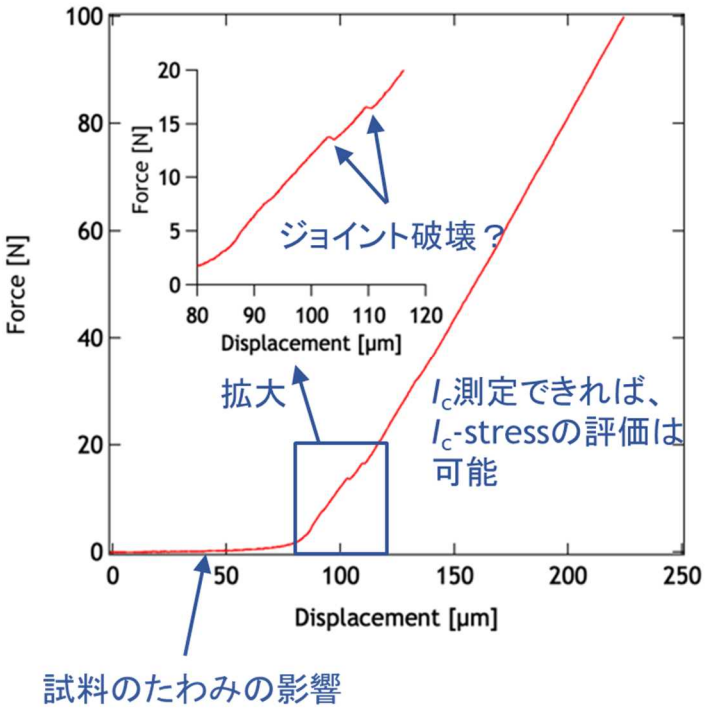


図 2.3.2.1-7 接続サンプルを常温で測定した結果

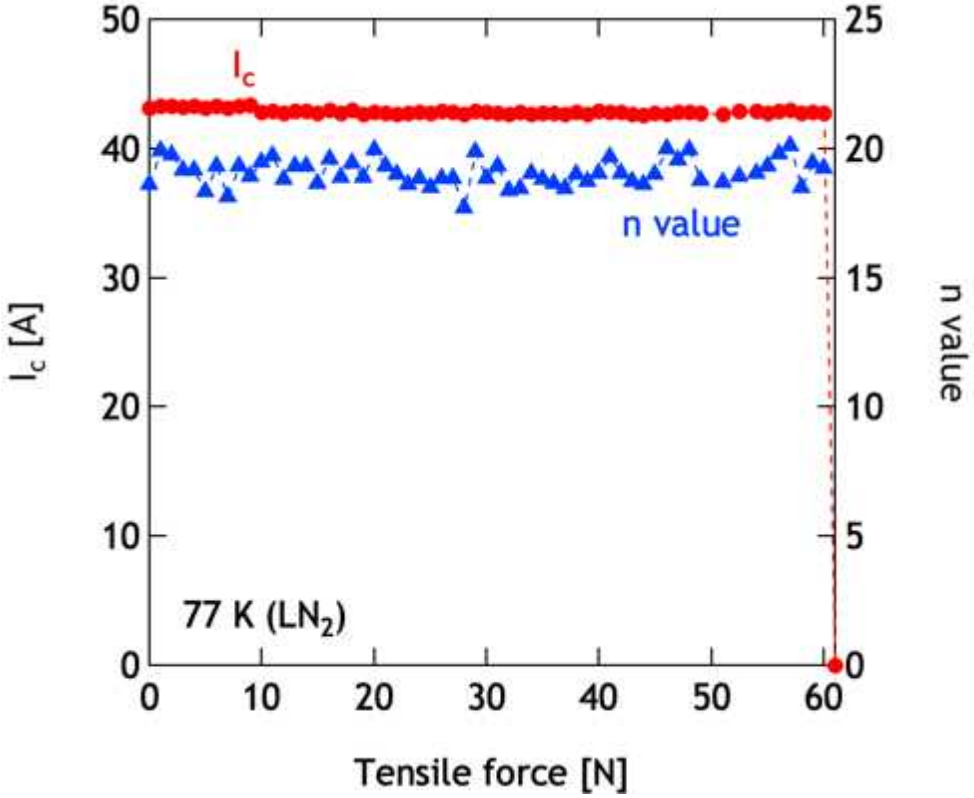


図 2.3.2.1-8 接続サンプルの 77K 引張試験結果

2.3.2.2　RE 系超電導線材のリード線の引き出し検討

MRI コイルへの実装を考慮した超電導接続部の構造として、コイルから引き出した超電導線の超電導接続部への引き回しが重要な技術である。特に RE 系超電導線はテープ上であるために、エッジワイズ方向への曲げができないことや、極端な曲げ、捩じりで性能劣化することが知られていて、リード線の引き出し部については３次元的な設計が必要となる。接続部からコイルへの線材導入部(リード部)として、**図 2.3.2.2-1** に示す「無誘導巻き構造」、「捻り曲げ構造」、「テーパー構造」の３つの方式を検討した。

(a) 無誘導巻き型（NI）

軸棒(ø20mm)に＋側と－側の線材を同方向に巻き付けて、無誘導にする。

(b) 捻り曲げ型（bend）

SUS のガイドパイプの中を＋側と－側の線材が、それぞれ歪みを与えられずに自由に曲がりながら這う。その後パイプ内を Stycast 含浸して補強する。

(c) テーパー型（taper）

テーパー(10°)がついた壁面に＋側と－側の線材それぞれが、らせん状に上部へつながる。

それぞれの構造について、4mm 幅線材を用いて「無誘導巻き」、「捻り曲げ」で実験を、6mm 幅線材で「無誘導巻き」、「テーパー」を設計、作製して Ic 測定を行い評価した。評価は、NIMS 所有の超電導コイルにリード部を入れて、温度変化、磁場変化の中での Ic 測定を行い、線材 Ic との比較を行った。その結果を**図 2.3.2.2-2** に示す。線材 Ic と比較して、各リード部 Ic はどれも劣化がないことが分かった。

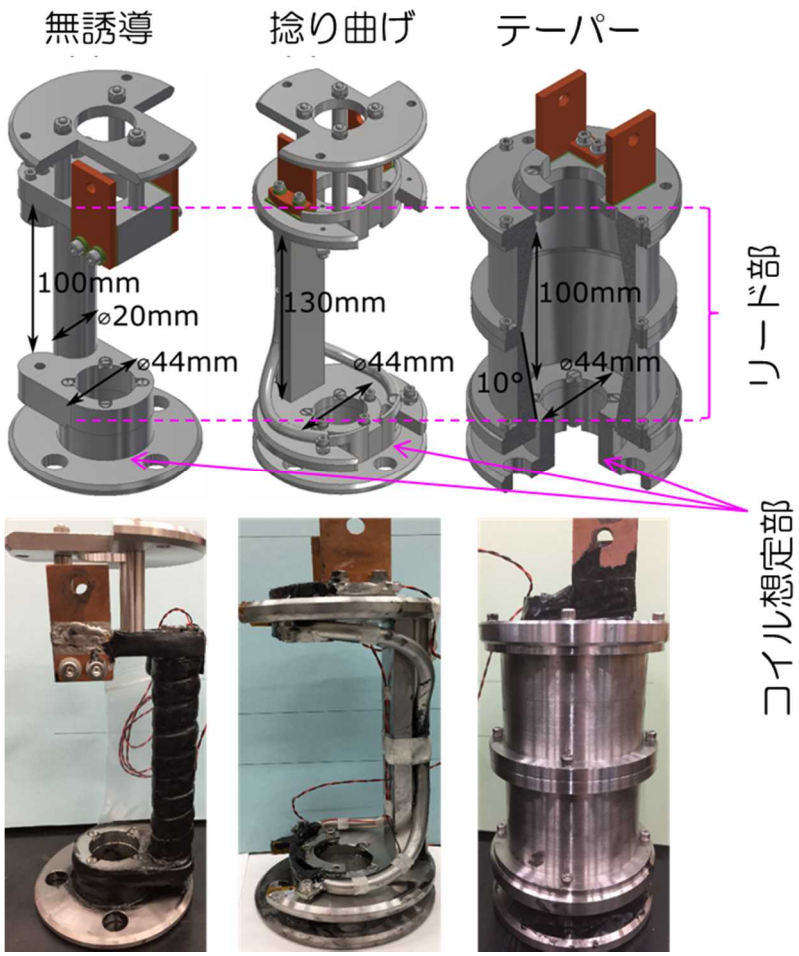


図 2.3.2.2-1　３種類のリード部(NI:無誘導巻き、bend:捻り曲げ、taper:テーパー)の構造

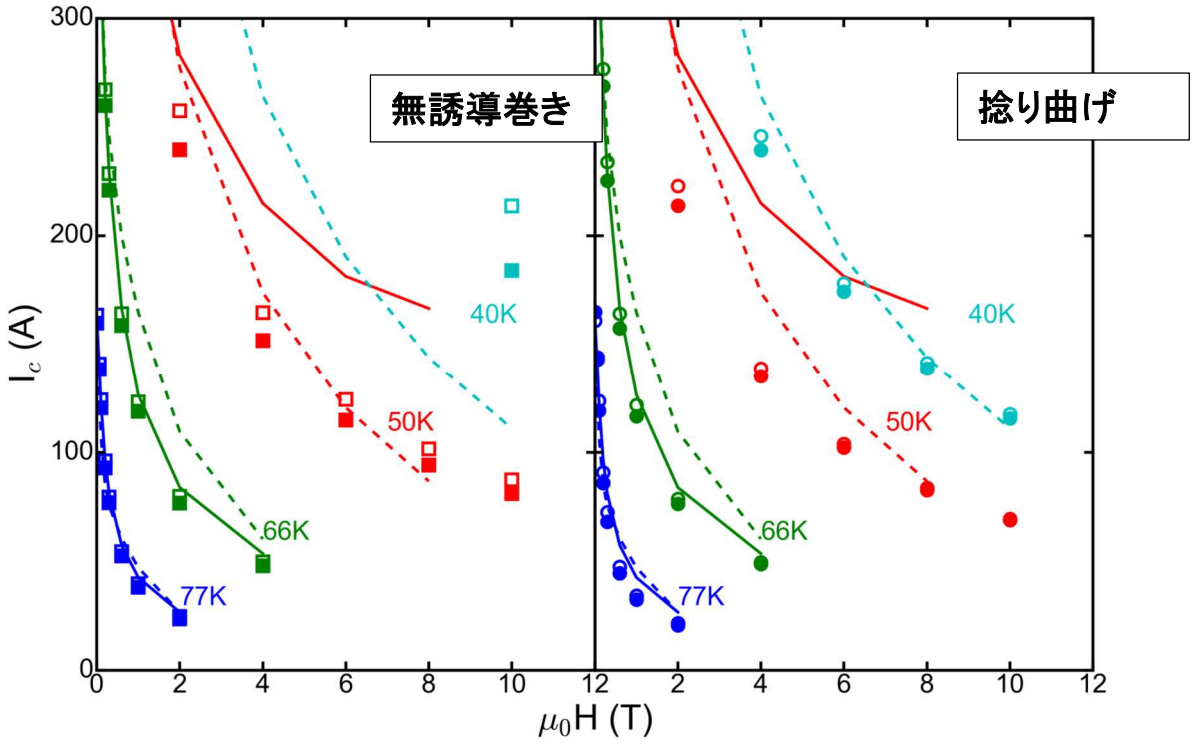


図 2.3.2.2-2 4mm 幅線材を用いた無誘導巻き、捻り曲げ構造と Ic 評価結果

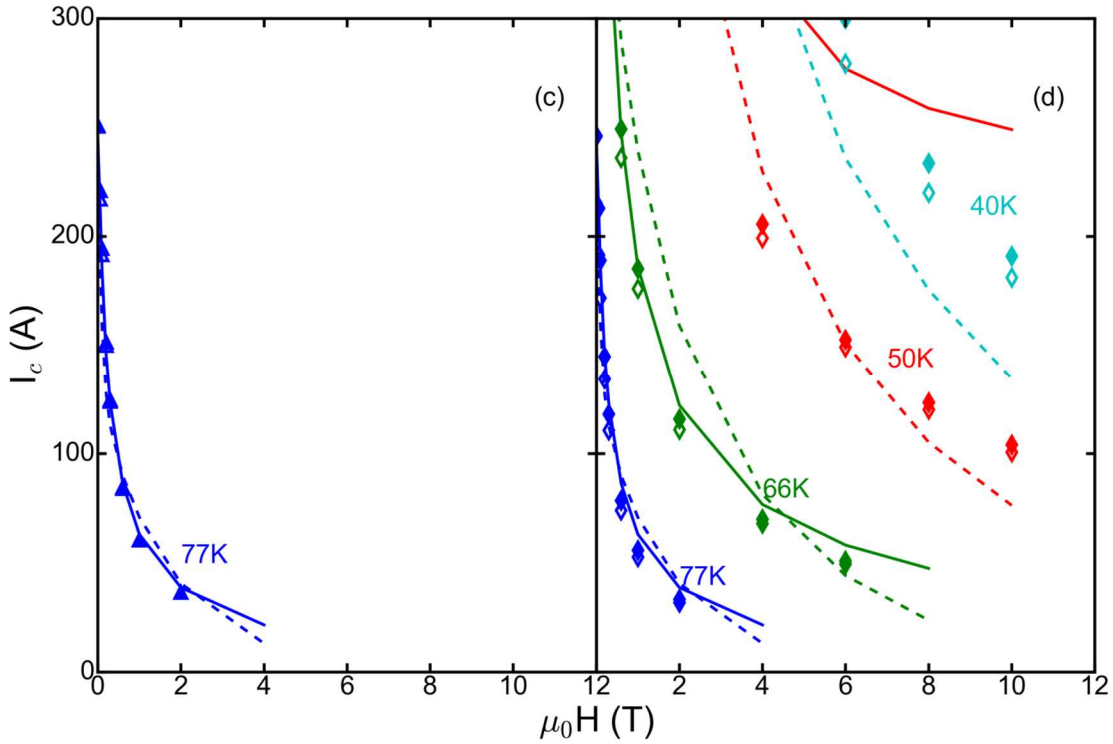


図 2.3.2.2-3 6mm 幅線材を用いた無誘導巻き、捻り曲げ構造と Ic 評価結果

本研究においては、部品構造が最も汎用的な「無誘導型」リード部を評価用小型コイルの Type1 に採用することとした。

2.3.3 MRI 製造を想定した現場環境での超電導接続の実施およびその技術の確立

2.3.3.1 現場適用可能な接続装置での超電導接続の実施

現場環境での超電導接続を行うためには、自分たちで設計した研究設備でなく、市販された設備で、かつコイル製造現場におけるサイズの装置が要求される。そこで、本プロジェクトでは、スプレーコート装置と小型焼成炉の２つの設備導入と、それでの超電導接続の実現性の評価を行い、超電導接続ができることが確認できた。研究後半のサンプル製作は、２つの設備で実施した。

(1) スプレーコート

コイルから引き出される超電導線の接続に超電導物質を塗布する方法において、開発当初は超電導物質を線材上に薄く均一に塗布するためにスピンコート（図 2.3.3.1-1）による原料塗布行っていた。しかしながら、コイルからでてくる線材のせつぞくのために、重量のあるコイルを高速で回すことは困難であり、スピンコートに代わる代替えの方式を開発する必要があった。そのため、超電導テープに超電導物質を薄く均一に塗布する方法として、スプレーコート法の調査・検討を行った。調査の結果、カスタマイズしたスプレーコート装置（図 2.3.3.1-2）で超電導原料溶液を塗布が可能であることがわかった。これにより、従来は超電導線を回転しなければ塗布できなかったものを、超電導線材側は固定した状況で塗布が可能になる。スプレーコートで超電導接続を行うために、溶液の組成条件や塗布装置の塗布条件を適正化として塗布面のムラをなくす必要がある。まず、スライドグラス上でスプレーの噴射量、噴射圧力等の検討を行い、均一化する条件を検討した。その結果、図 2.3.3.1-3 に示す通り、スライドグラス上で均一になる可能性が

見いだせた。次に、実際の超電導線を用いたスプレーコートの適用を行った。**図 2.3.3.1-4** にスプレーコート導入初期の塗布ムラがあるときの仮焼後のサンプルの表面状態を示す。した条件の適正化を行った。スライドグラス上での塗布同様に、装置パラメータや溶液の組成条件を変えることで面内ムラをなくした塗布（**図 2.3.3.1-5**）ができた。塗布膜の均一化改善による超電導接続の特性について、Ic 特性で調査した。**図 2.3.3.1-6**、**図 2.3.3.1-7** にムラのあるサンプル、塗布条件の適正化で均一化された超電導接続サンプルの 77K, 0T での Ic 測定結果を示す。この結果、ムラのある表面状態のサンプルの Ic は 5A であったのが、塗布条件の最適化で Ic は 17A に改善した。さらに、塗布条件の最適化を進めた結果、**図 2.3.3.1-8** に示すように 77K で 72A の特性が得られた。



図 2.3.3.1-1　スピンコートによる塗布



図 2.3.3.1-2　スピンコートによる塗布

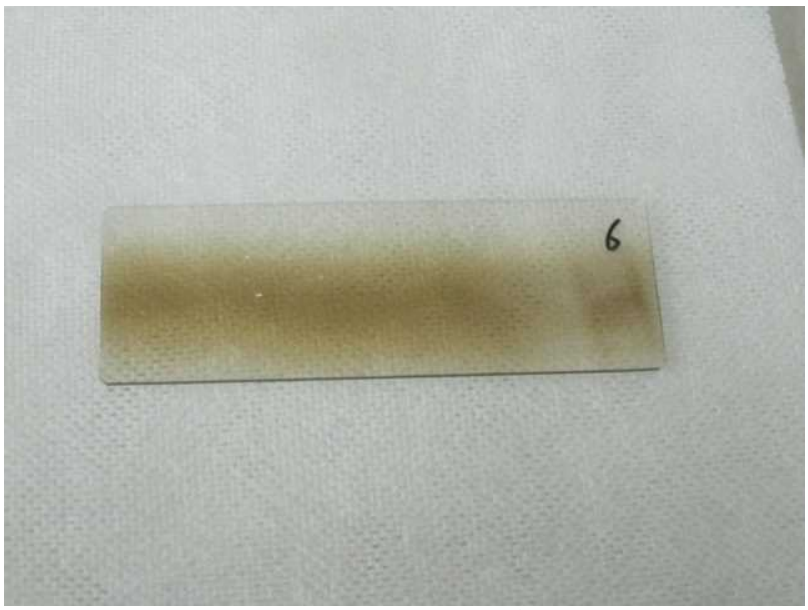


図 2.3.3.1-3　スライドグラス上の焼成膜

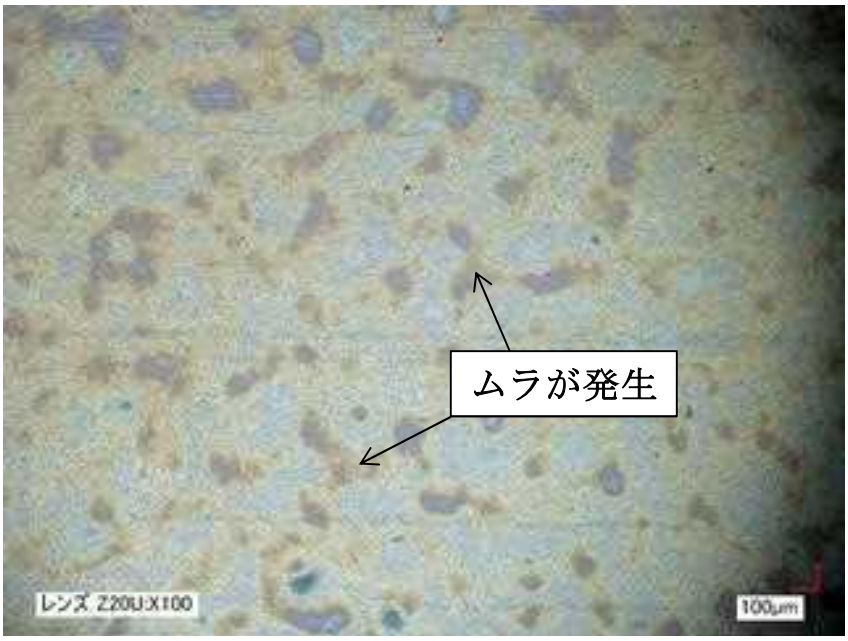


図 2.3.3.1-4　スプレーコート実施初期の塗布不均一の状況



図 2.3.3.1-5　スプレーコートの条件適正化で塗布均一となったサンプルの表面状態

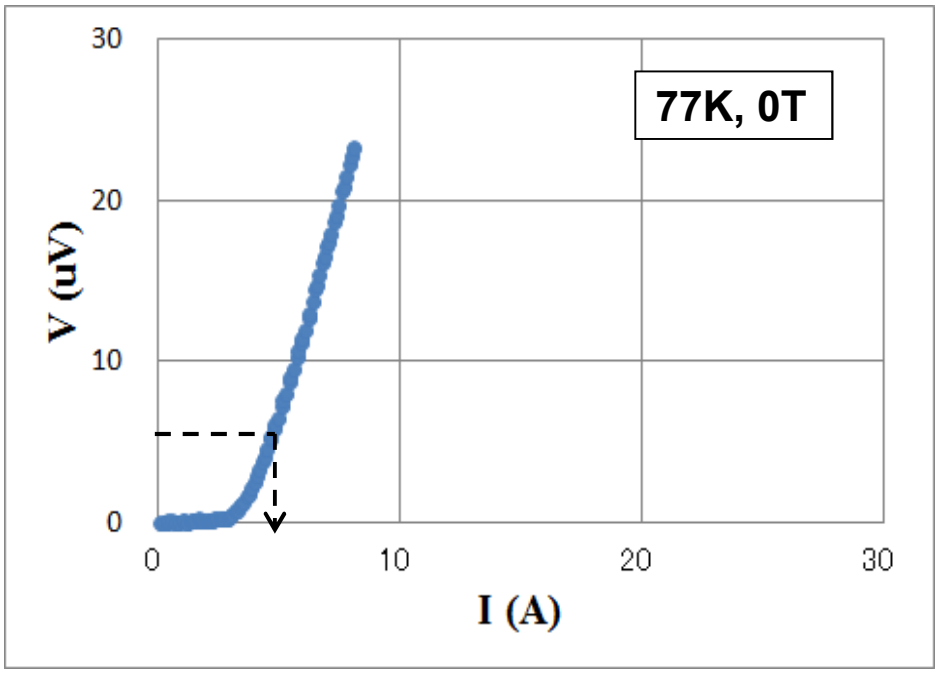


図 2.3.3.1-6　スプレーコート実施初期の塗布不均一のサンプルのＩｃ測定結果

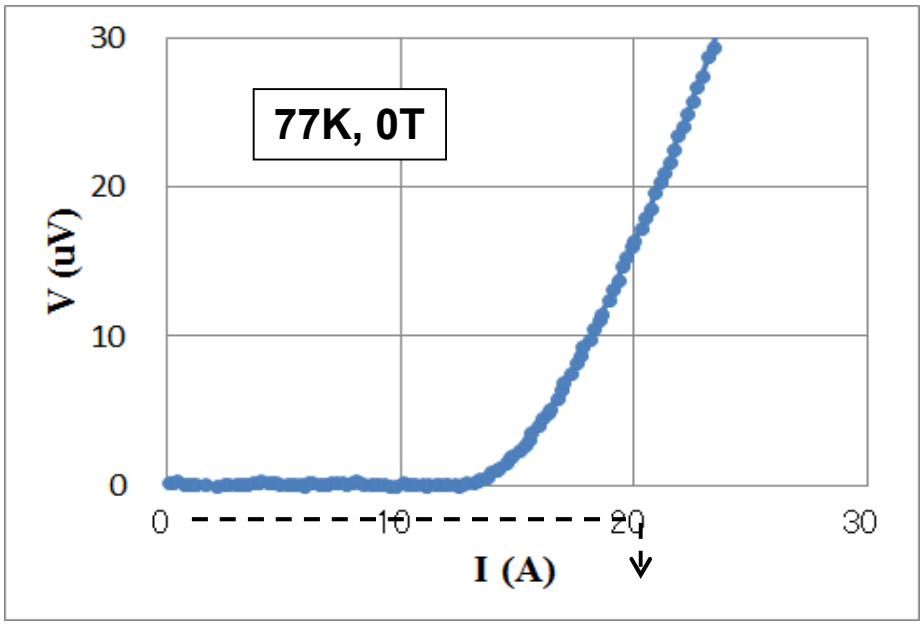


図 2.3.3.1-7　スプレーコート条件適正化後のサンプルのＩｃ測定結果

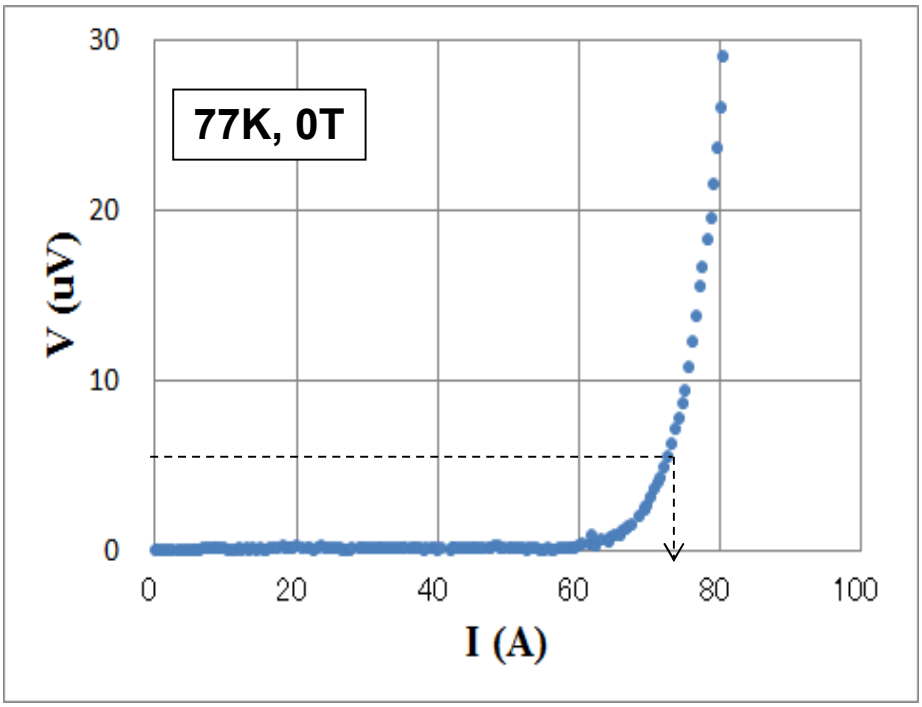


図 2.3.3.1-8　スプレーコート条件最適化、小型焼成炉導入によるサンプルのＩｃ測定結果

(2)　小型焼成炉

超電導接続の超電導層の配向、結晶成長を行う本焼成は、開発当初は大型の管状炉で行ってきた。しかし、現場作業等を考慮した場合、可搬型の小型の炉が必要と考え、小型管状炉（**図 2.3.3.1-9**）の導入を行った。昇温パターンや、ガス供給はプログラミングでき、小型化により従来炉より比べて、温度レスポンスが早くなった。そのため、酸素アニールの時間短縮ができた。前節でのスプレーコートの適用の超電導接続は、小型焼成炉の導入での本焼成を実施しており、**図 2.3.3.1-8** で示すように 72A の Ic を実現でき、本焼成炉の適用に成功している。

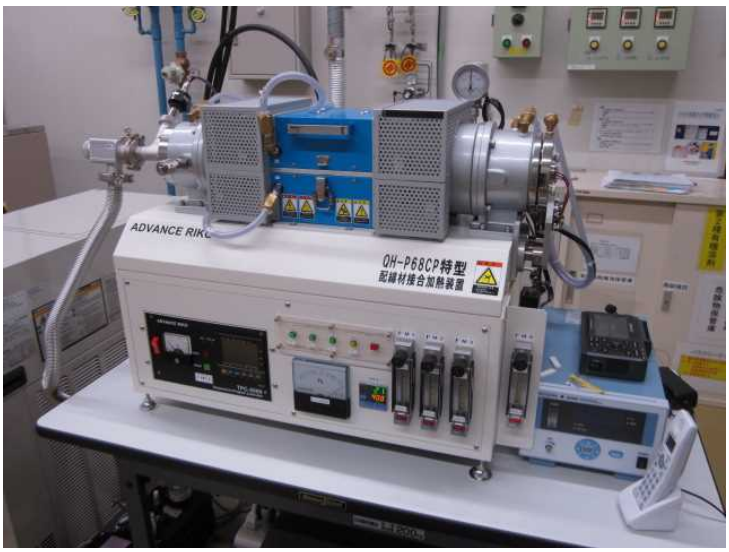


図 2.3.3.1-9　新規導入した本焼用小型焼成炉

(3) 現場適用を考慮した長尺線の超電導接続

MRI マグネットを現場環境での超電導接続を実施する場合、コイルから線材は引き出されて、その先端で接続を行うことになる。これまでの超電導接続の特性向上研究では、長さ 10cm 程度の短尺の超電導テープを用いた接続で、スプレーコート、仮焼、本焼とも超電導テープが装置内に収納でき、特に線材の引き回し、セッティングのわずらわしさが無い条件で行われていた。しかしながら、コイル接続の場合、装置外から線材を引き入れていることで、条件が変わる可能性もあり、検討が必要とされた。これは単に接続条件の変化だけでなく、脆弱な超電導線を極度な曲げや捻りを与えずに引き回して接続作業をするハンドリングについても注意が求められる。小型コイルの接続の実現性として、長尺のテープを用いた模擬的な超電導接続を行い、Ic 評価を行った、その結果、**図 2;3;3;2-1** に示すように 87A の超電導接続が達成でき、長尺線材でも接続が可能であることを確認した。

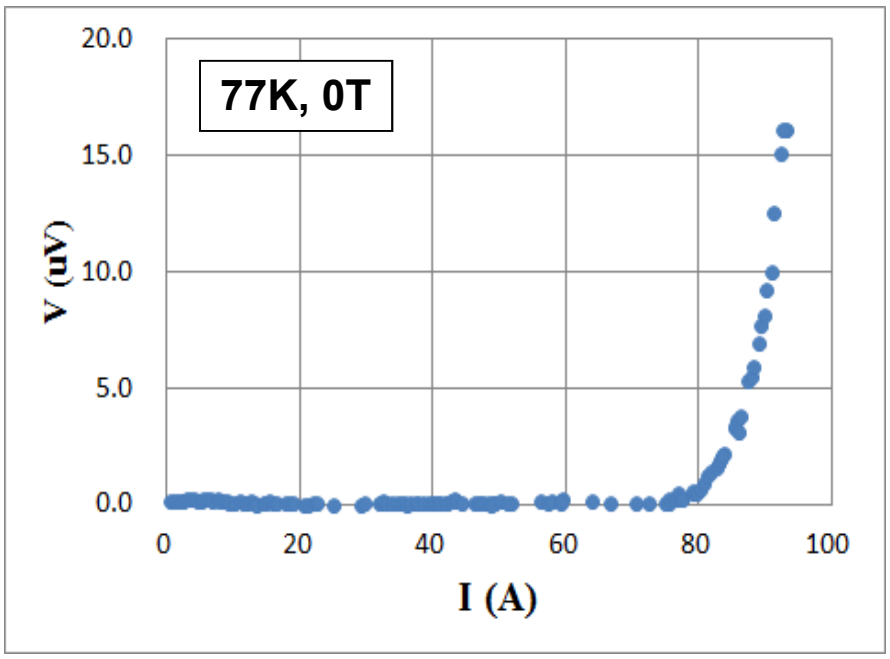


図 2.3.3.1-10　長尺線材の接続のＩｃ測定結果

2.3.3.2　評価用小型コイルの設計と要素コイル評価

(1) 小型コイルの設計

コイルを用いた超電導接続の実験を行うために、４種類、計７個の超電導コイルを製作した。その諸元を**表 2.3.3.2-1** に示す。されにそれぞれの製作したコイルの外観を**図 2.3.3.2-1～図 2.3.3.2-3** に示し、要素コイルの仕様を**表 2.3.3.2-2**、小型コイル Typer1 の仕様を**表 2.3.3.2-3** 小型コイル Typer2 の仕様を**表 2.3.3.2-4** に示す。

表 2.3.3.2-1 MRI 製造を模擬するために試作した試験コイルの諸元

	名称	寸法(外径、長さ)	目的
1	要素コイル(短尺)	73mm, 42mm 線材長　43m	ソレノイドコイルの巻線の可能性確認、巻線劣化の有無
2	要素コイル(長尺)	67mm, 121mm 線材長　36m	ソレノイドコイルの巻線の可能性確認、巻線劣化の有無
3	小型コイル　Type1 (ソレノイドコイル)	120mm, 200mm 線材長　500m	永久電流コイルの構成の確認と、永久電流試験　(無誘導型リード)
4	小型コイル　Type2 (補正コイル＋ソレノイドコイル)	147mm, 200m 線材長　826m	永久電流試験の実施，コイル間接続の実施



図 2.3.3.2-1　要素コイルの外観写真（左：短尺コイル、右：長尺コイル）

表 2.3.3.2-2　要素コイルの仕様

	短尺コイル	長尺コイル
内径（mm）	65.00	65.00
外径（mm）	73.00	69.00
コイル長さ（mm）	56.00	124.00
層数	20	10
総層数	180	200
線材長さ（m）	39.02	39.99
インダクタンス(mH)	2.40	0.86

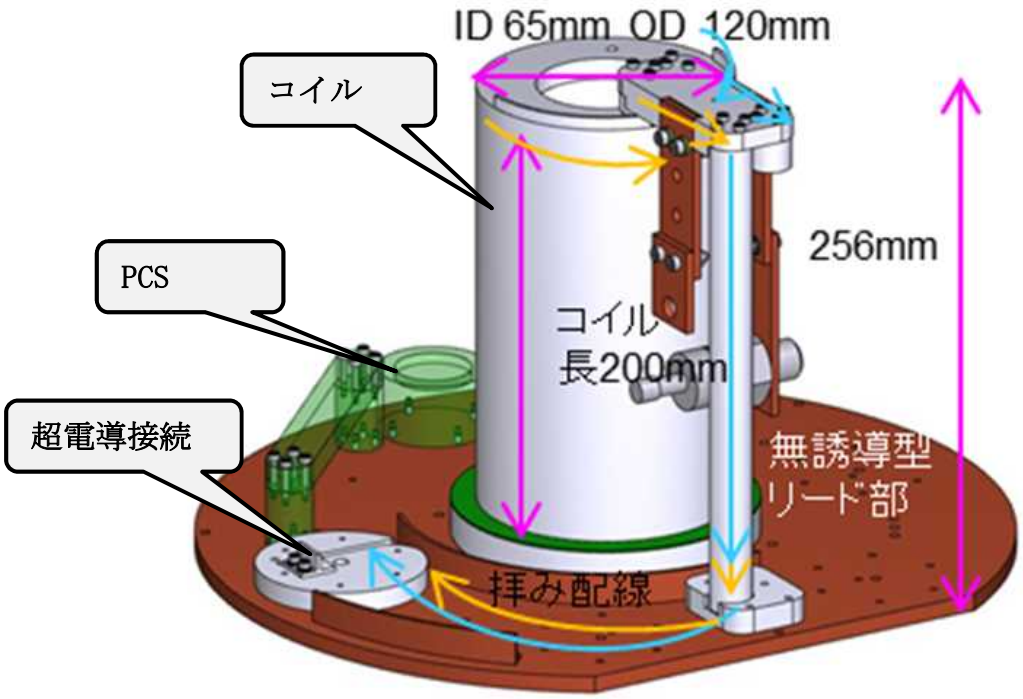


図 2.3.3.2-2　小型コイル Type1 の構造図

表 2.3.3.2-3　小型コイル Type1 のコイル仕様

内径（mm）	110
外径（mm）	120
コイル長さ（mm）	200
層数	2
ターン数	64
線材長さ(m)	24
インダクタンス（mH）	0.230

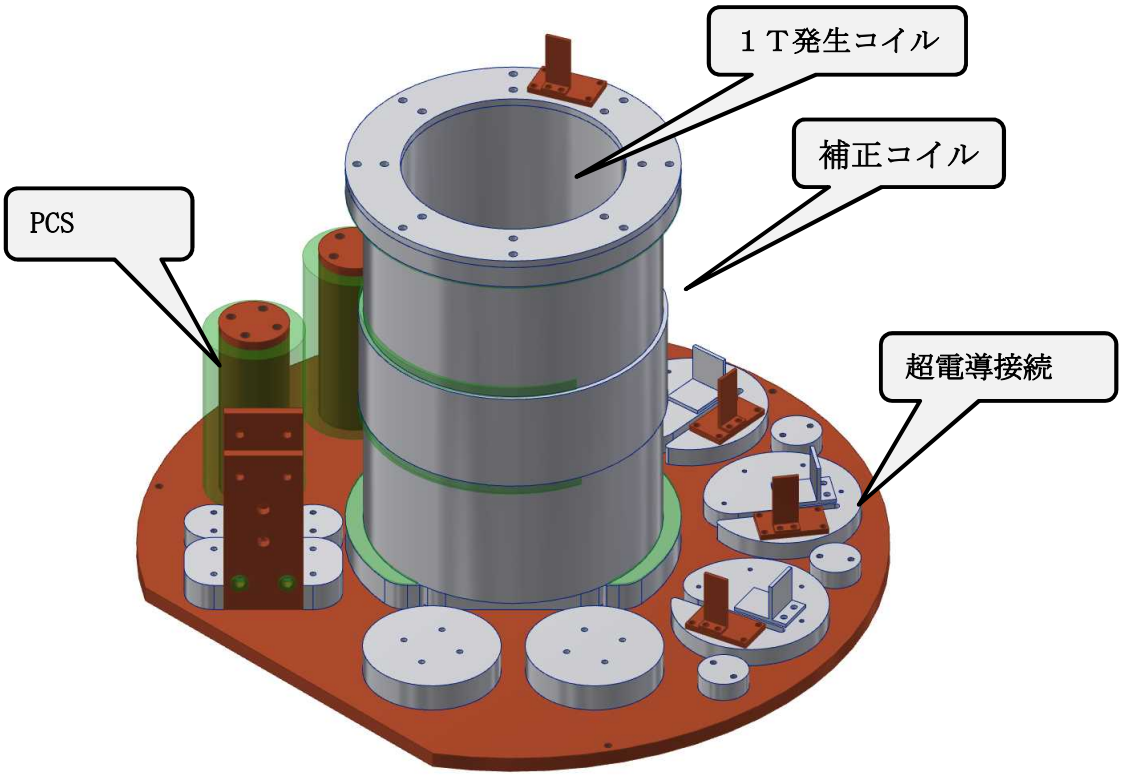


図 2.3.3.2-3　小型コイル Type2 の構造図

表 2.3.3.2-4　小型コイル Type2 のコイル仕様

電流値（A）	100	
磁場（H）	1	
インダクタンス（H）	0.235	
	主コイル	補正コイル
内径（mm）	120.0	174.7
外径（mm）	141.6	150.3
コイル長さ（mm）	200	65.6
層数	54	12
ターン数	1728	120
線材長さ(m)	710	58

(2) 自動巻線機の導入

従来高温超電導線材を用いたコイルは、線材がテープ形状であることからパンケーキコイルでコイル製作して、それを積層する方法で実施されてきた。しかしながら、ソレノイドコイルの方が、コイル密度を高めることができ、巻線も一度にできるためにパンケーキコイルに比べて経済性のよいコイルが実現できる。そのため、本研究のコイルはソレノイドコイルで実施した。また、ソレノイドコイルを効率的に巻線するために自動巻線機を導入させ、それまで熟練者しか巻線できなかった工程を、半自動で、巻線作業も 1/2 の時間でできるようになった。**図 2.3.3.2-4** に、自動巻線機を用いて巻く線作業をしている写真を示す。

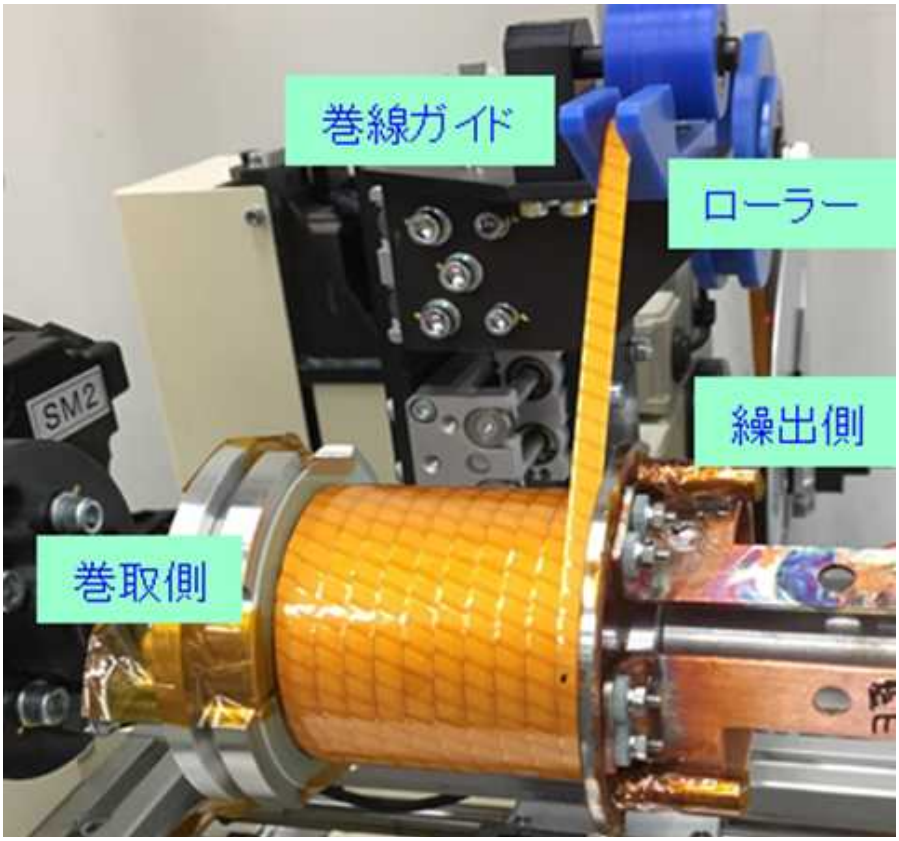
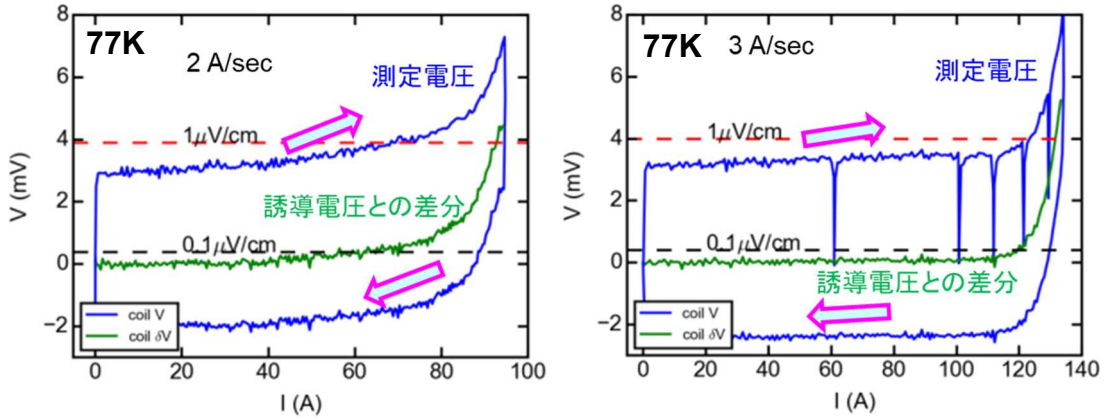


図 2.3.3.2-4　自動巻線機を用いた要素コイルの巻線風景

(3) 要素コイルの特性評価

ＲＥ系超電導線を用いてソレノイドコイルを製作することで、巻線により線材劣化が起きないのかなど確認する必要があり、要素コイルの製作を行った。特に、ソレノイドコイルの場合、コイルボビン端部で、線材の送り方向が逆になるためにエッジワイズの曲げが加わることになり、線材への影響が懸念される。そこで、エッジワイズの影響を確認することも考えて、4㎜ 幅線材と 6㎜ 幅線材で作製した要素コイルの評価を行った。測定は、低温状態に保持した要素コイルに通電してコイル電圧を測定して、電圧発生からコイル Ic を測定している。**図 2.3.3.2-5** に、6㎜ 幅線材で製作した短尺要素コイルと、長尺要素コイルの液体窒素中での測定の I-V カーブを示す。コイルの場合、インダクタンスによる電圧発生があるために、インダクタンスによる誘導電圧を除去してコイル電圧を確認する作業をする必要がある。

NIMS の大型超電導マグネットを用いた磁場中のコイル Ic の測定結果を、**図 2.3.3.2-6～図 2.3.3.2-8** に示す。77K、66K の温度環境では、コイル Ic と線材 Ic が比較的よく一致していることから、巻線による劣化が無いものと考える。50K 以下では、線材の固有性能、磁場方向依存性が強く出るために、コイル Ic と線材 Ic の関係性を説明することは難しいが、概して線材の Ic の低い部分で電圧発生があると推測される。



(a) 短尺コイル　　(b) 長尺コイル

図 2.3.3.2-5　要素コイル(線材 6 ㎜幅)の通電試験の I-V 特性

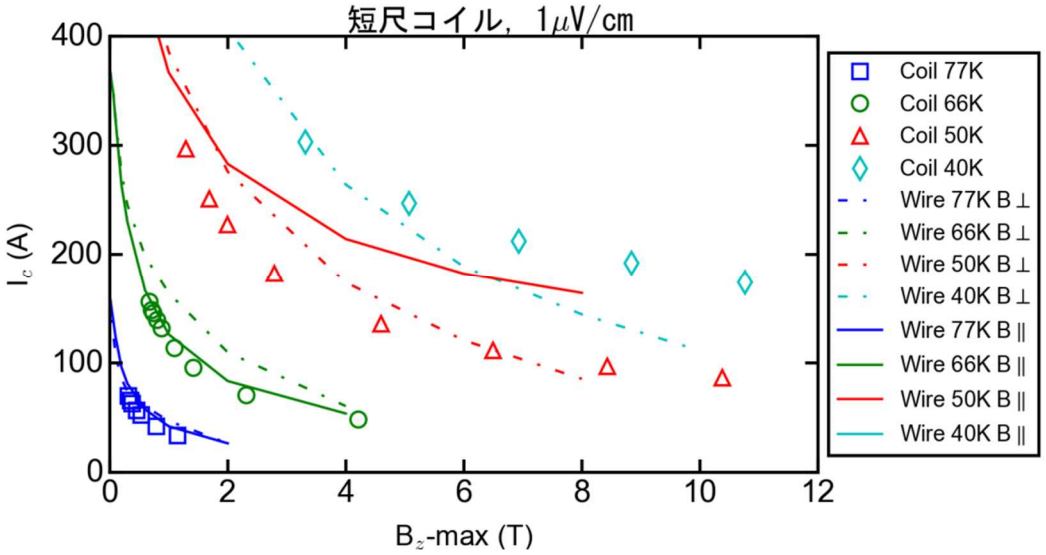


図 2.3.3.2-6　短尺要素コイル(線材 4 ㎜幅)の通電試験のコイル Ic 測定結果

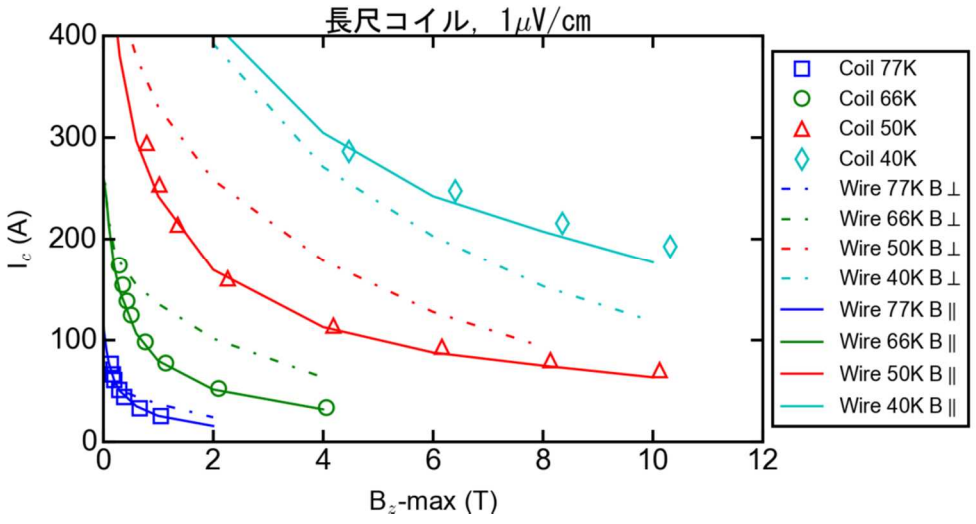


図 2.3.3.2-7　長尺要素コイル(線材 4 ㎜幅)の通電試験のコイル Ic 測定結果

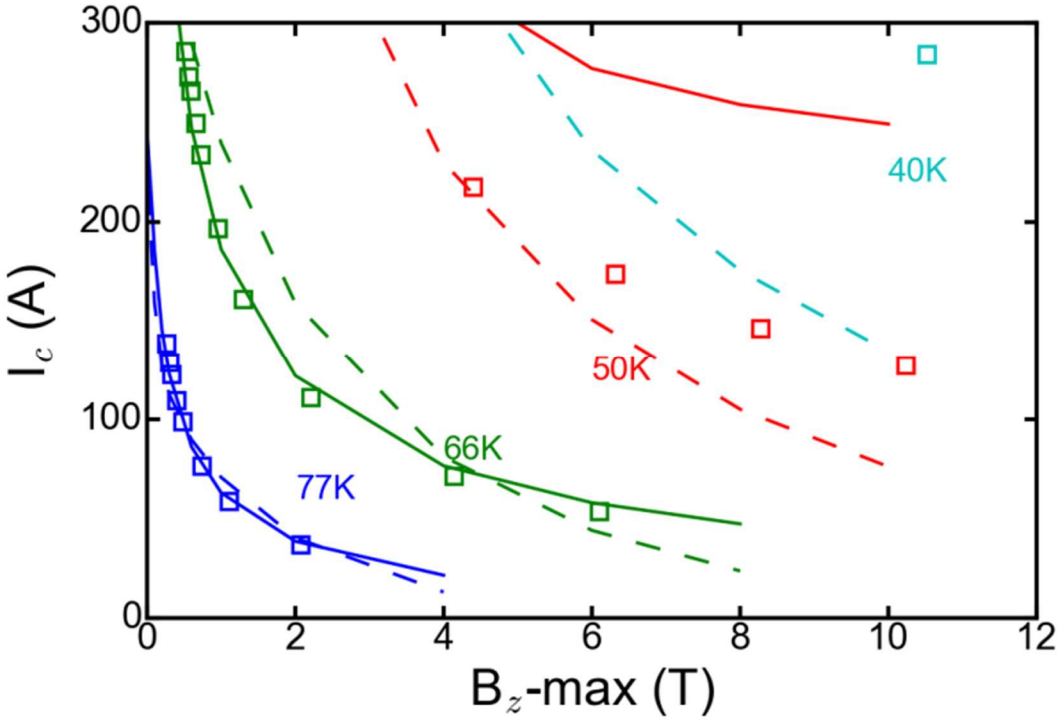


図 2.3.3.2-8　長尺要素コイル(線材 6 ㎜幅)の通電試験のコイル Ic 測定結果
（ライン　線材 Ic：実線　$B_{||}$、点線　$B_{\perp}$）

2.3.3.3　小型コイルの永久電流試験用評価装置

磁場減衰率による接続抵抗測定のための小型コイルシステム評価系の設計・製作した。設計した小型コイルシステム評価用クライオスタットを図 2.3.3.3-1 に示す。評価用クライオスタット（NIMS 既存設備）に、本測定のために設置用ステージおよび小型ＧＭ冷凍機を取付け、コイルは伝導冷却で冷却される。この評価装置を製作して、小型コイルを取り付けて、コイルおよび超電導接続のあるコイルステージが設計の温度まで冷却されることを確認した。また、評価用小型コイルのための要素試験として、永久電流スイッチ（PCS）の単独試験を実施し、PCS の ON/OFF（図 2.3.3.3-2）、および PCS ヒータの加熱による PCS、周辺部の温度（図 2.3.3.3-3）を確認した。PCS は、ＲＥ系線材で作られているために、ＲＥ系線材の臨界温度(Tc)以上にあげる必要があり、伝導冷却システムでヒータによる昇温で PCS が機能することを確認した。また、この熱によりコイルがクエンチすることを避ける必要があり、周辺温度が上昇していないことを確認した。

また、小型コイルシステムの回路図を、図 2.3.3.3-4 に示す。コイルは４つの部分から構成され、また永久電流モードを作るための永久電流スイッチで閉回路が作られる。このシステムでは超電導接続を減らすことを検討して、コイルから引き出した線で PCS を作製するなど、超電導接続を３か所としている。通電回路に加えて、要所に電圧タップ（VT）を取り付けて、各部の電圧発生を測定することができる。

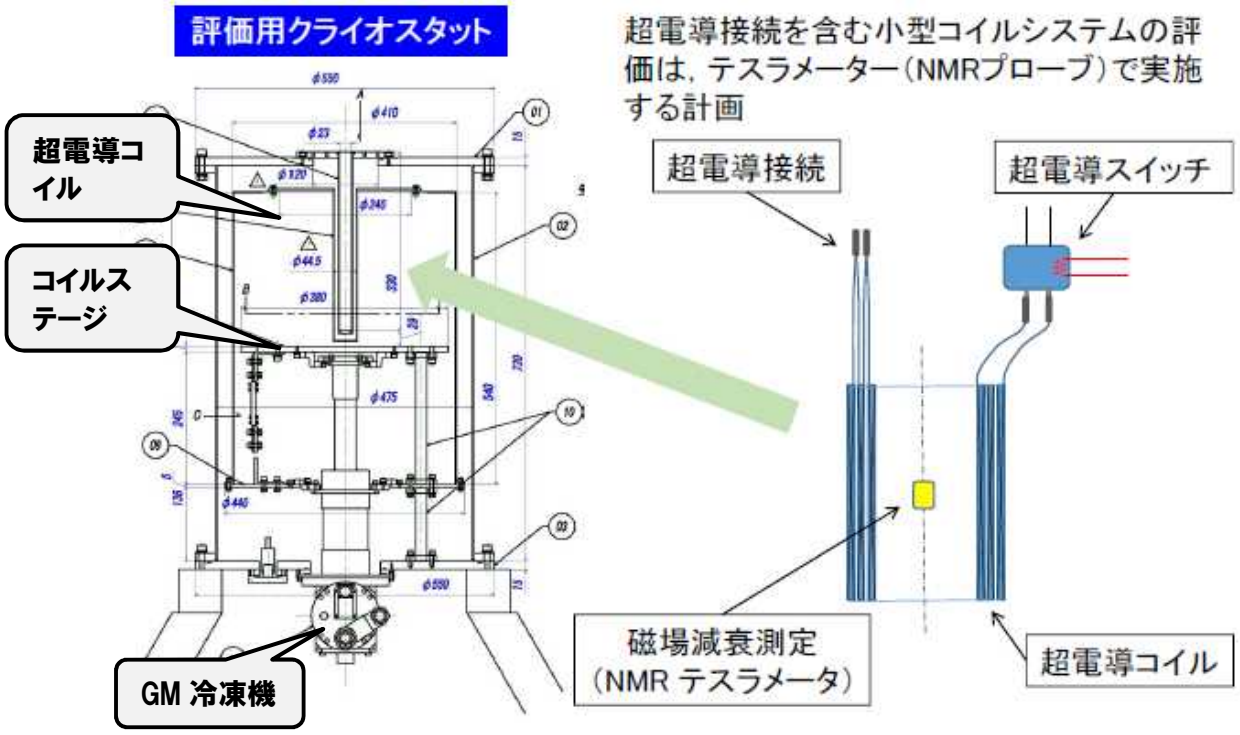


図 2.3.3.3-1 小型コイルの永久電流評価システム

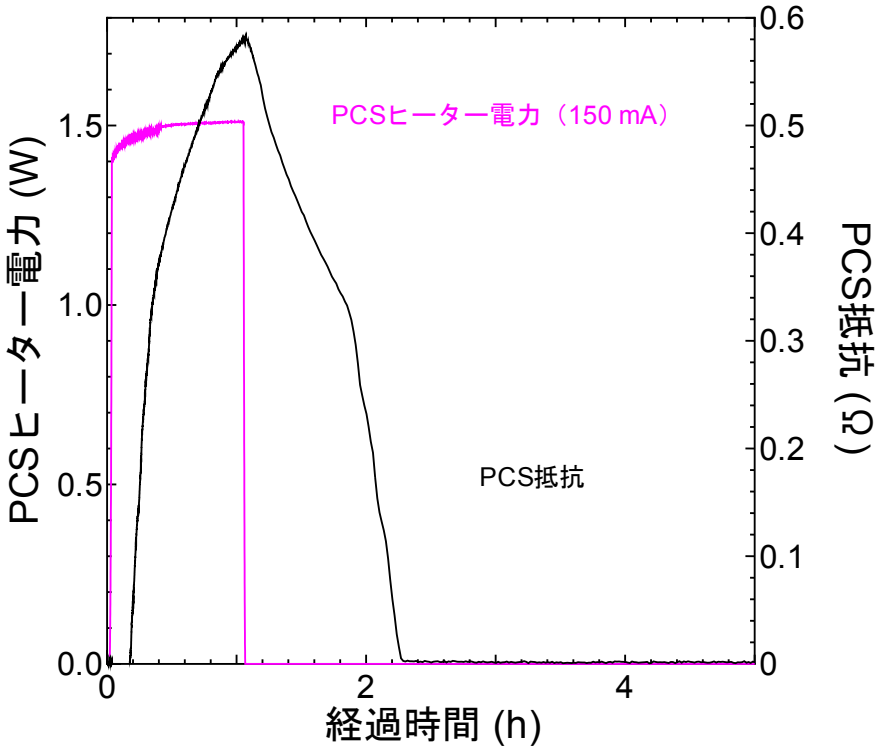


図 2.3.3.3-2　永久電流スイッチ（PCS）単独試験：PCS ON/OFF の PCS 抵抗

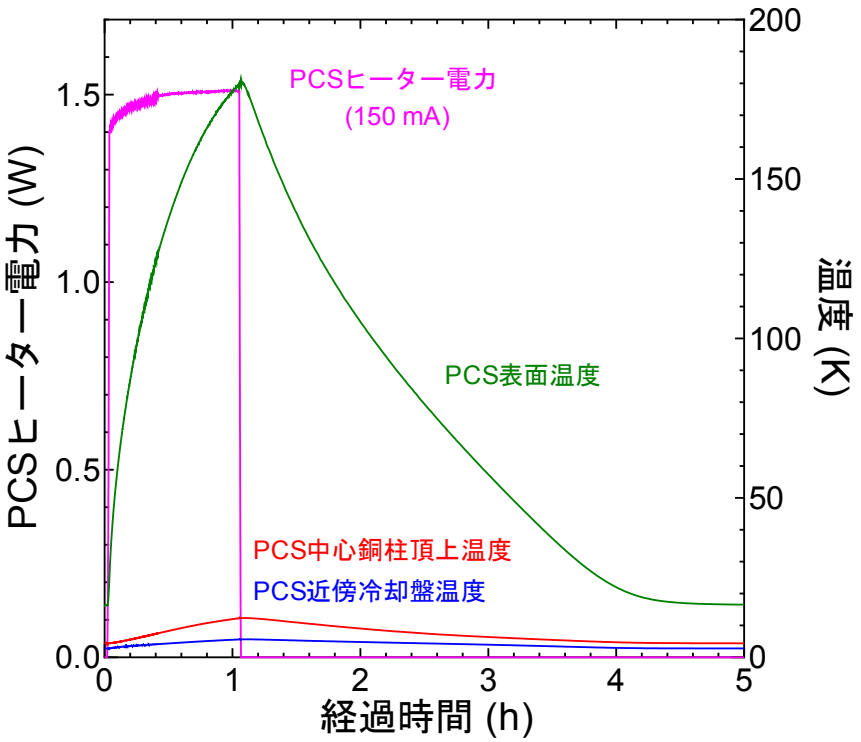


図 2.3.3.3-3　永久電流スイッチ（PCS）単独試験：PCS ON/OFF による各部温度

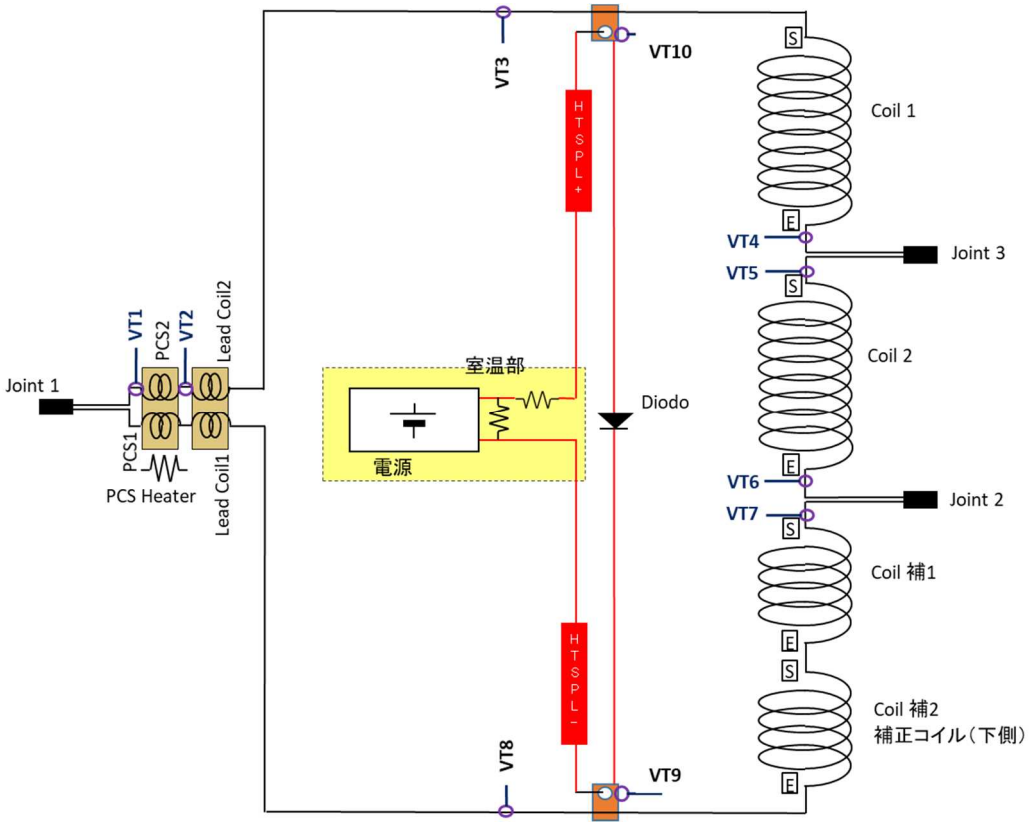


図 2.3.3.3-4　小型コイルの永久電流システムの回路図

2.3.3.4　小型コイルの永久電流試験の課題

これまで報告してきた練習コイル等の検討、サンプルでの超電導接続の検討で培ったコイル技術、接続技術を用いて小型コイルの永久電流試験に着手した。試験システムの構築のために、コイル製作、超電導接続、永久電流スイッチ製作、引き出し線の固定を行い、永久電流試験を行った。しかしながら、永久電流モードにならない事象が生じた。それについて、原因調査を行いこれまで想定していなかった問題によることが判明、課題の整理と対策検討を行った。本節では、この検討内容について、報告する。

(1) 小型コイルの作製

図 2.3.3.4-1 に永久電流試験用コイルシステムの永久電流試験用コイルの製造工程を示す。巻線終了した小型コイルから、引き出した超電導線の端部の銅被覆、銀被覆を除去して、超電導層を露出する。その上に、超電導原料を塗布して仮焼を行う。仮焼後、超電導層を向き合わせて固定して本焼して超電導接続をする。超電導接続部は、保護のためにエポキシ保護をして超電導接続が終了する。超電導接続後の写真を**図 2.3.3.4-2** に示す。また、その後引き出した余長の線を取りまとめて、引き出しの超電導線を固定するために、**図 2.3.3.4-2** に示すようにエポキシモールドを行った。

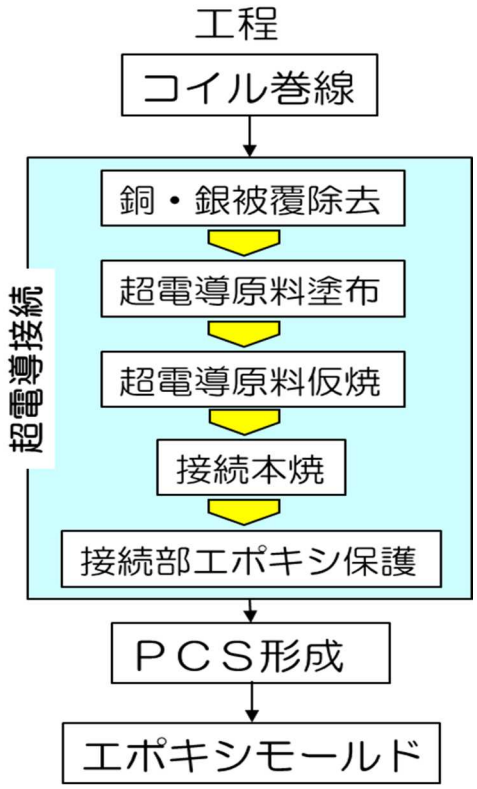


図 2.3.3.4-1　永久電流試験用小型コイルの製作工程



図 2.3.3.4-2　永久電流試験用小型コイルのコイル接続

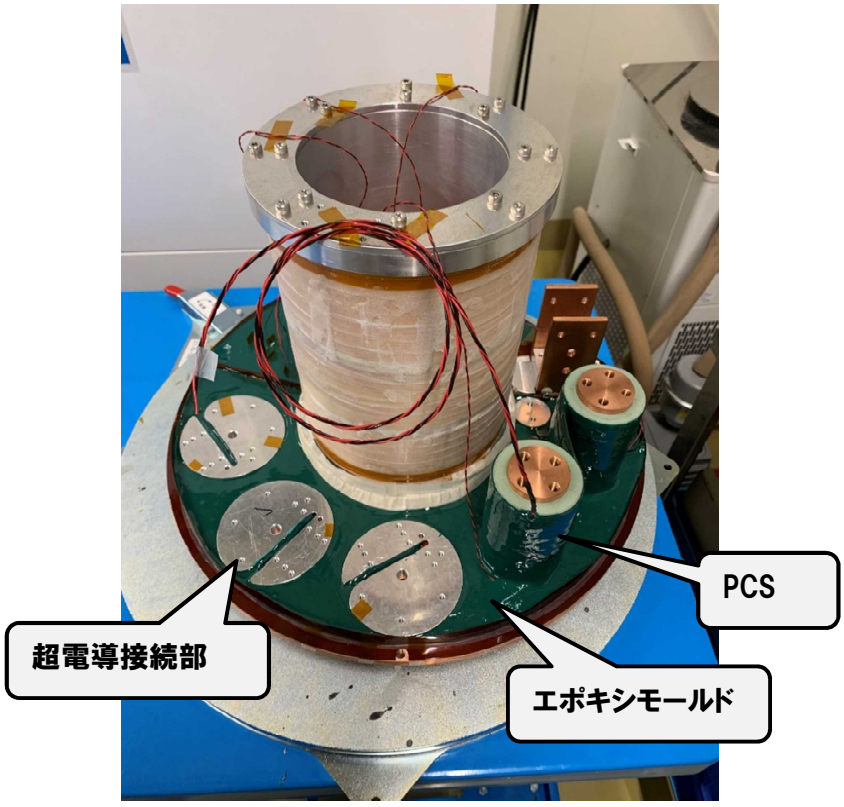


図 2.3.3.4-3　エポキシモールド後の永久電流試験用小型コイル

(2) 永久電流試験

製作した小型コイルを用いて永久電流試験を行った。試験は、超電導コイルを 4.2K まで冷却し、PCS のヒータを焚いて PCS を OFF、 電源よりコイルに通電して励磁（**図 2.3.3.4-3**）、その後、PCS のヒータを切り PCS が冷えるのを待機、ゆっくり電源電流を下げて永久電流モードにするところ、**図 2.3.3.4-4** に示すように電源電流値と同じで磁場がゼロとなってしまった。これは、**図 2.3.3.3-4** の回路図から見て、電極の左側の PCS 側に電流が流れていないことを示しており、PCS 回路側に高抵抗の部分が存在すると推測された。

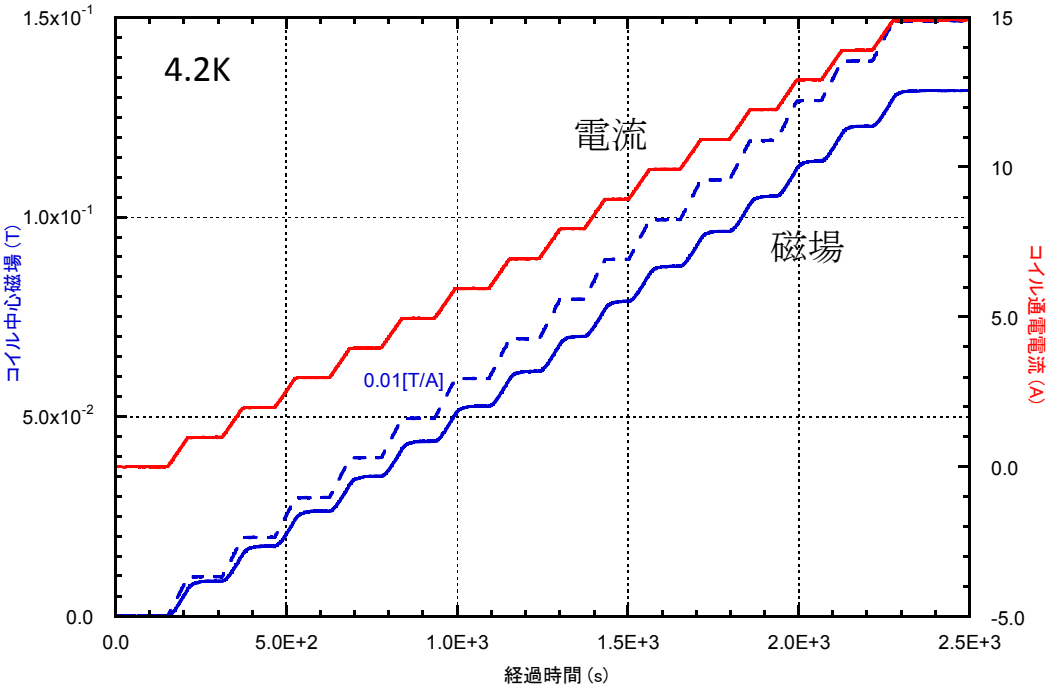


図 2.3.3.4-3　永久電流試験用小型コイルの電源電流上昇時のコイル磁場

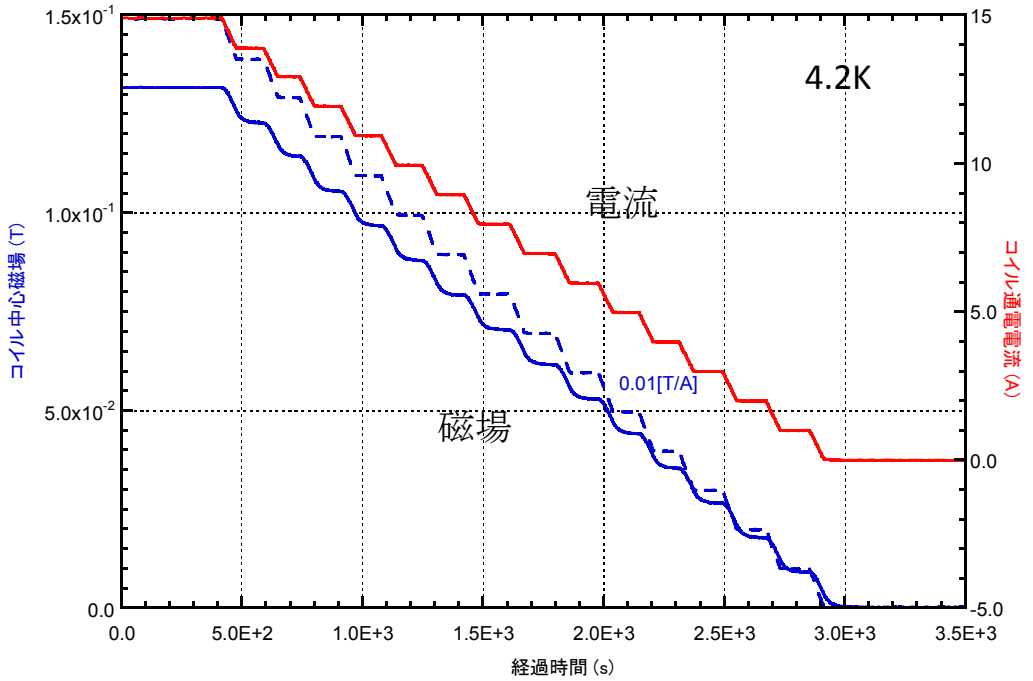


図 2.3.3.4-3　永久電流試験用小型コイルの電源電流下降時のコイル磁場

(3) 不具合箇所の特定と原因調査

PCS 回路側で抵抗発生があることで永久電流にならなかったことから、小型コイルの抵抗測定を行い、不具合箇所の特定を行った。抵抗発生の特定は、小型コイルを液体窒素に浸漬して超電導状態として電流（1A）を流して、タップ間の電圧測定を行った。測定したタップ位置を**図 2.3.3.4-4** に示す。また、発生電圧を**表 2.3.3.4-1** に示す。

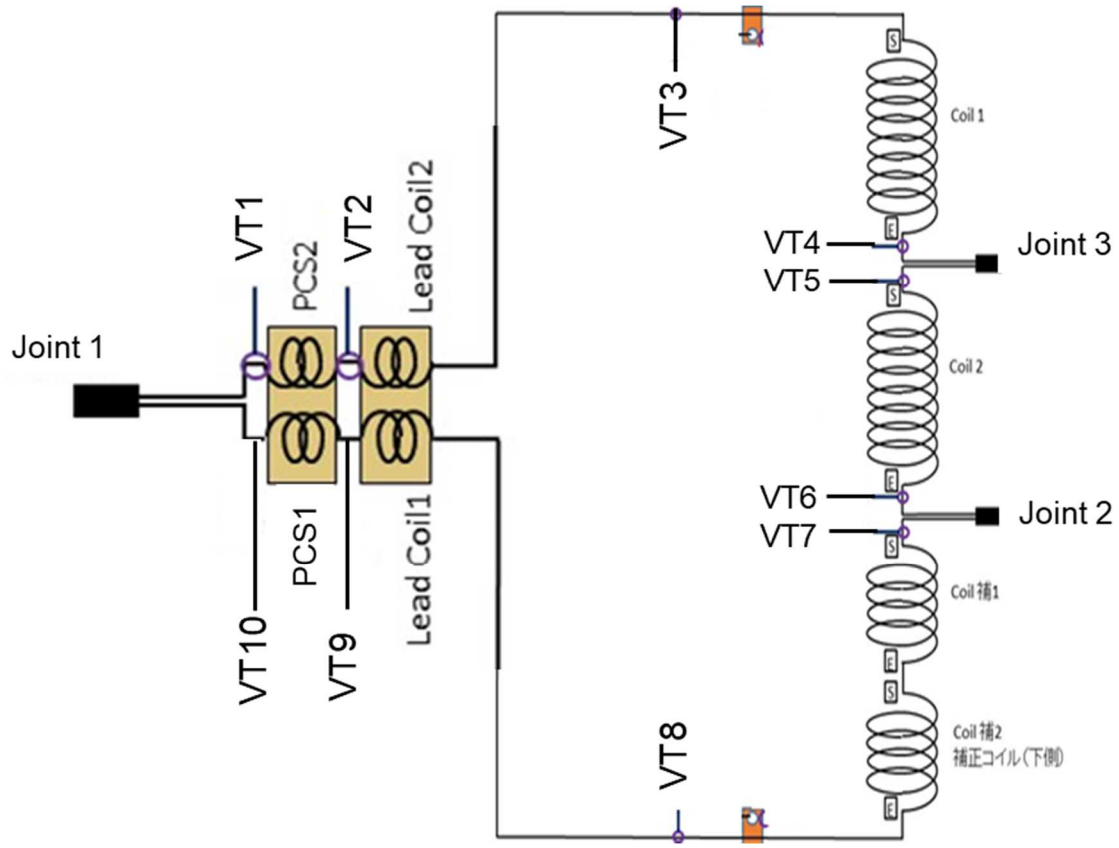


図 2.3.3.4-4　永久電流試験用小型コイルの電圧タップ（VT）位置

表 2.3.3.4-1　小型コイルの電圧タップ間の電圧測定

測定タップ	電圧（mV）	部位
VT1 – VT2	1.88	PCS2
VT2 – VT3	0	
VT4 – VT5	0	Joint 3
VT6 – VT7	0	Joint 2
VT8 – VT9	0	
VT9 – VT10	1.47	PCS1
VT10 – VT1	1.43	Joint 1

抵抗発生個所としては、Joint1、PCS1、PCS2 であることが分かった。一方で、同様に製作した Joint2、Joint3 の超電導接続では抵抗発生無く超電導特性を維持していることがわかった。これら劣化した部分、劣化しなかった部分を比較検討し、さらにサンプル試験をおこなったとこ

ろ、ある特定の条件でエポキシモールドしたことで、線材が劣化した可能性があることが判明した。

(4) 永久電流の問題に対する対策

永久電流システムを構築するうえで、コイルから超電導接続のリード線の引き出し方法、超電導接続の方法など、本研究スタート時に課題として考えていた開発項目についてはすべて達成することができた。しかしながら、小型コイルを製作したところで、超電導接続と違うこれまで想定していなかった課題が発見され、それにより永久電流にならない状況となった。そこで、この課題についての原因調査、解決方法の検討をして、その問題を除いた形の永久電流試験を計画し、図 2.3.3.4-5 のような新たなコイルを製作して、超電導接続を行い進めてきた。その結果、77K で 10A 通電した状態で PCS を ON にして永久電流として、磁場減衰の測定を行った。その結果、図 2.3.3.4-6 に示すように、約 1 時間の観測で安定した状況で磁場減衰が無いことを確認した。また、永久電流運転において、PCS や超電導接続で測定感度以上の電圧発生もなく、健全であることを確認した。



図 2.3.3.4-5 再組立て永久電流コイル

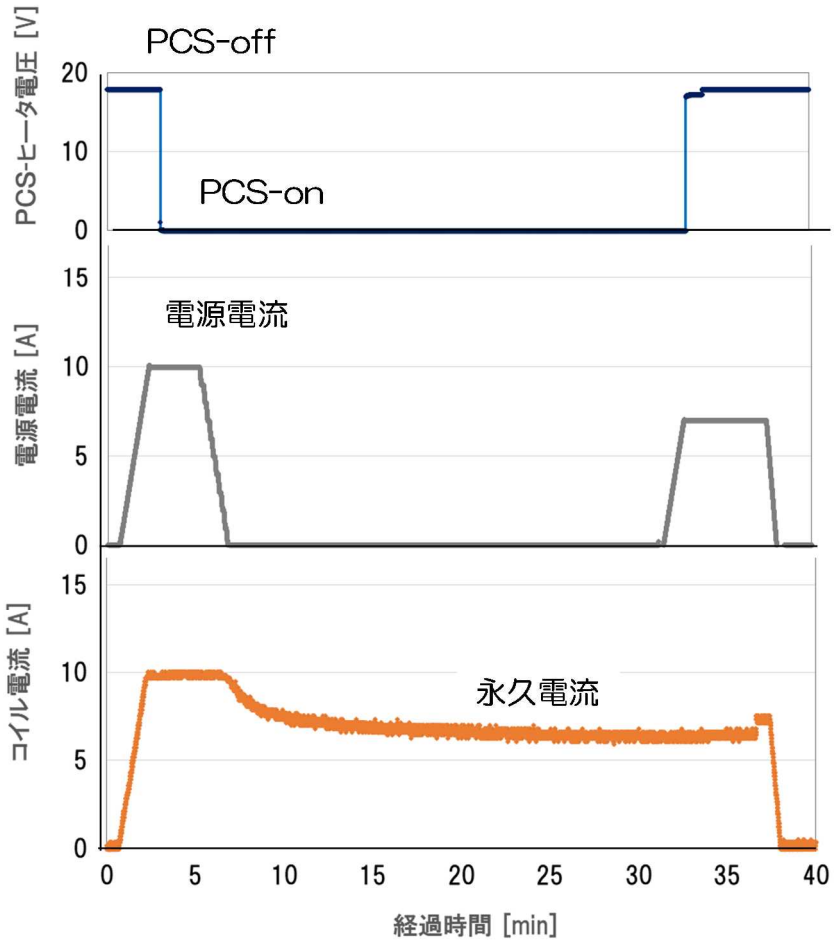


図 2.3.3.4-6 永久電流モード試験の結果

2.4　高温超電導高磁場コイル用超電導線材の実用化技術開発【磁場特性改善】

2.4.1 高磁場コイル用超電導線材の臨界電流密度向上技術の開発　（フジクラ）

2.4.1.1　磁場中高特性目標及び達成のための課題の抽出・整理

(1)　高磁場コイル用イットリウム系高温超電導線材

３Ｔ級の医療用ＭＲＩは、分解能の高い断層撮影を短時間で実施出来るため、従来の１.５Ｔ級ＭＲＩを置き換える需要が旺盛である。しかし、高磁場を発生するためにマグネットが大型化し、現状より広い設置スペースを必要とすることが課題となることがある。また、近年のヘリウム資源の供給不安から、ＭＲＩ装置を含めヘリウムフリーで冷却負荷が少なく運転可能な超電導マグネットシステムの構築が求められている。このような背景の下、１.５Ｔ級ＭＲＩ装置と同等の大きさの３Ｔ級ＭＲＩマグネットの検討を行うと、絶縁層を含む超電導線材の全断面積で臨界電流値を除算し定義した overall J_c に相当する平均電流密度（J_e）について、期待される値は４００Ａ/ｍｍ^2 と既存システムの Nb-Ti 線材における設計の約２倍となり、またその時の線材の最大経験磁場は７Ｔ程度となる。本技術開発ではヘリウムフリーかつ冷却負荷が少なく熱的に充分に安定な運転温度として３０Ｋを目指しており、既存の超電導線材の中で可能性があるのはＹ系高温超電導線材のみである。ただし、現在一般に市販されている線材においては、Ｙ系線材であっても３０Ｋ、７Ｔの外部磁場下では平均臨界電流密度（J_e）が２５０Ａ/ｍｍ^2 程度であるため、これを更に約２倍に引き上げる技術開発が必要である。

実用線材として市販を視野に入れつつ、線材の高特性化を図るにあたって最も重要なことは、生産性即ちスループットを損なわないことである。市販のＹ系高温超電導線材は、材料起因の本質的制約として電磁気的異方性と粒界弱結合の克服が必須なことから、図 2.4.1.1-1 に示すように高度に結晶配向制御した、単結晶に近い薄膜を長尺テープ状基材上に逐次蒸着する製法のみで製造されており、必然的にボトルネック工程でスループットが制限されている。本技術開発と併行して実施した課題設定型産業技術開発費助成事業「高温超電導実用化促進技術開発/高磁場マグネットシステム開発/高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発/高磁場コイル用超電導線材の生産性向上技術開発」においては、このボトルネック工程の生産性について本質的な改善を図った。

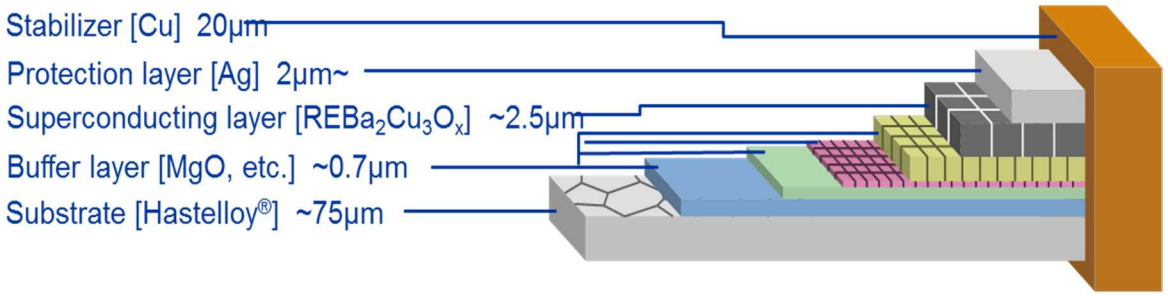


図 2.4.1.1-1　Ｙ系高温超電導線材の構造模式図

本技術開発においては、材料側面での挑戦的課題として、Ｙ系高温超電導線材の超電導層への人工ピンの導入を実施した一方、その際に線材の平均臨界電流密度増大、ならびに

生産性の向上を同時に達成することを目指した。構造が複雑な多元系酸化物である Y 系高温超電導薄膜は、過度な高過飽和条件では結晶成長の安定性が損なわれることがあり、線材特性向上と成長速度並びにスループット向上が相反関係になっている場合がある。スループットを高くしていくには、Y 系高温超電導薄膜の膜厚と品質を、できるだけ高速に蒸着する条件を見出す必要があり、人工ピンを導入することにより最適結晶成長条件範囲が狭くなることに対して、如何に改善を図るかが課題となる。

このように、超電導層成膜工程における高い生産性と線材の高性能化の技術開発を図るとともに、線材に求められている平均臨界電流密度が基板や絶縁層を含めた線材トータルの断面積で決まることから、本技術開発においては、まず最初に線材全体の寸法や構造見直しの可能性について検討するとともに、高温超電導高磁場コイルに必要とされる磁場中特性改善を適確に把握するため、磁場中臨界電流測定設備の導入を実施した。

以上のように、医療用ＭＲＩマグネットにヘリウムフリー無冷媒冷却で高磁場コイルの小型化設計を行うにあたり、Y 系高温超電導線材の性能目標として、J_e＞４００A/mm^2（３０K、７T） を設定すると共に、このとき既存の生産ラインのスループットに対して充分高速であり、併行して実施している生産性向上技術開発の目標である５０m/hr を同時に達成することを目標条件とした。

図 2.4.1.1-2 に、現在の MRI 高磁場コイルに用いられている液体ヘリウム温度（4K）の NbTi 線材、本技術開発目標である運転温度（３０K）における現状の Y 系高温超電導線材（人工ピン無し）、および目標運転温度（３０K）における Y 系高温超電導線材（人工ピン有り）の、それぞれの平均臨界電流密度（J_e）の磁場の関係（概念図）を示す。

現状のＮｂＴｉ線材は約２００A/mm^2 の J_e を温度 4K、磁場 7T で発揮する性能を有する。これに対し、現状の Y 系超電導線量産品が温度３０K、磁場７T において発揮できる J_e は約２５０A/mm^2 程度であり、３Ｔ級小型ＭＲＩマグネットに求められる J_e目標である４００A/mm^{2}に対し約半分程度であり、製造線速を高めたうえで大幅な高磁場特性の改善が必要であった。このため本技術開発においては、この大幅な高磁場特性の改善を、長尺に渡り均一で、かつ高い生産性において超電導層に人工ピンニングセンタを導入することで、小型軽量化を目指す MRI 用高温超電導高磁場コイル実現に向け目標達成を図った。

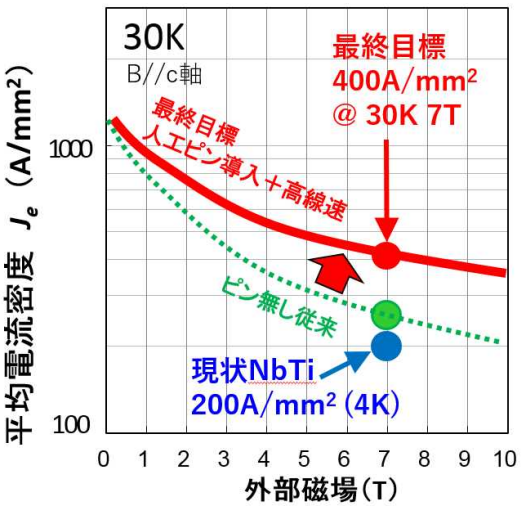


図 2.4.1.1-2　現状線材の磁場中性能比較と最終目標

(2)　磁場中高特性化目標達成のための課題抽出および整理

ア.　Y 系高温超電導線材の断面構造

図 2.4.1.1-3　に典型的な Y 系高温超電導線材の断面構造模式図を示す。線材の臨界電流値 I_c は、超電導層の臨界電流密度 $J_{c(SC)}$に超電導層の断面積（線材幅×超電導層厚）を乗じたものになるが、目標値として設定した「平均臨界電流密度（J_e）」は、更に基板、絶縁層、保護層（安定化層）を含む線材全体の断面積（線材幅×線材厚）で除した値となる。

既存の標準的な 4mm 幅 Y 系高温超電導線材における各層の寸法等を表 2.4.1.1-1 の左列に示す。現状の人工ピンの無い線材の　J_e　は約２５０A/mm^2（３０K，７T）　である。

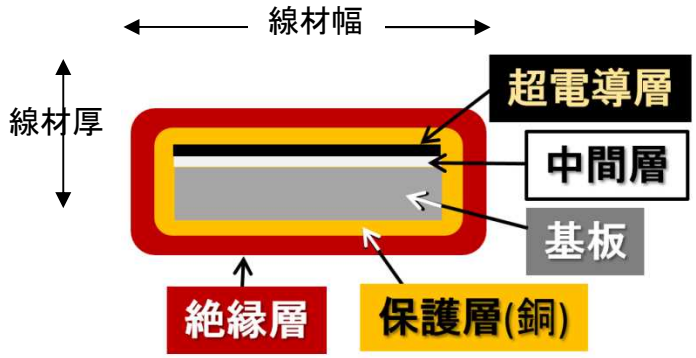


図 2.4.1.1-3　典型的な Y 系超電導線材の断面構造

表 2.4.1.1-1　従来 Y 系超電導線材の寸法パラメーターと特性/製造線速及び目標

	従来線材仕様	目標仕様１	目標仕様２
線 幅　（ｍｍ）	4.0	4.0	4.0
線 厚　（ｍｍ）	0.175	0.175	0.150
基板厚　（μｍ）	75	75	50
中間層厚　（μｍ）	0.6～1.0	0.6～1.0	0.6～1.0
超電導層厚（μｍ）	2.0	2.0～2.5	2.0～2.5
保護層厚　（μｍ） 安定化層　（μｍ）	2.0～3.0(Ag) 20 (Cu)	2.0～3.0(Ag) 20 (Cu)	2.0～3.0(Ag) 20 (Cu)
絶縁層厚　（μｍ）	27.5	27.5	27.5
超電導層 $J_{c(SC)}$(×10^{4}A/mm^2)	2.2	2.8 -3.5	2.4 -3.0
線 材　I_c　（Ａ）	175	280	240
線材　J_e　(A/mm^2)	250	400	400
製造線速　(m/hr)	20	50	50

イ. 各構成材に対する課題

平均電流密度 J_eの向上を図っていくにあたってはいくつかのアプローチがあるが、大きく分けて、

- 超電導層の臨界電流密度(J_c)を増大する。
- 超電導層の膜厚を増大する。
- 基板、中間層、安定化層・絶縁層を薄化する、

の3つが挙げられる。

(ア) 超電導層の臨界電流密度(J_c)増大

超電導層の臨界電流密度(J_c)を向上するためには、これまでに最適化しているパラメーターである「超電導層の組成、蒸着条件、結晶配向性」、「中間層の蒸着条件、膜厚、結晶配向性」を更に改善していく必要があるが、既存の組合せの中で概ね最適に近い状態に到達しており、これ以上の改善にあたっては「人工ピン」の導入が鍵となる。PLD 法による蒸着膜において人工ピンを導入すると、一般に超電導層のマトリックス(母相)内に結晶格子歪が発生することから、臨界温度(T_c)が若干低下して液体窒素温度付近の高温域における J_c は低下する傾向があるものの、本技術開発で設定されている目標、すなわちMRI運転温度である30K付近においては、大きな改善効果が期待される。

(イ) 超電導層の膜厚増大

超電導層の膜厚を厚くするためには、「超電導層工程の単位時間当たり蒸着速度向上」と「製造線速の抑制」が必要となるが、本技術開発では製造線速の向上が必要なため、必然的に「超電導層蒸着速度の向上」が必須課題となる。レーザ出力を強化すること等によって蒸着速度を上げていくことは可能であるが、この場合、高い J_c 特性を維持していることが必須であり、J_cと蒸着速度向上が両立した条件を見出すことが重要な技術的課題である。

(ウ) 基板、中間層、安定化層、絶縁層の厚さ低減

基板厚さについては、標準的に 75μm 厚さのハステロイ ™(Ni-Cr 耐熱合金)が使用されてきており、曲げや引張等の外的負荷に対する線材の機械強度確保を担っている。これを薄化するにあたっては、製造プロセス中の各工程における機械的負荷や熱履歴に耐えると共に、製造後の線材の機械強度に支障を生じない必要がある。

中間層については、Al_2O_3: ～300nm, Y_2O_3:～20nm, MgO:～10 nm, CeO_2:～500 nmと4層の酸化物膜が積層されているが、線材全体の厚さに対し相対的に薄いために厚さ低減への寄与が極めて小さい。

安定化層については、標準的には超電導層との反応性が低い銀(Ag)を保護層として表面に薄く蒸着した後に銅(Cu)層を全周にわたって形成する構造となっており、表 2.4.1.1-1 に示すように Cu 層厚は主に 20μmを採用している。この安定化層の機能は、常電導遷移にともなう温度上昇等の理由で超電導材の超電導状態が維持出来なくなった時、電気抵抗の低い銅層に電流をバイパスさせることで温度上昇を抑え焼損を防ぐため、厚さを低減すると高磁場コイルの通電電流仕様に対してリスクが高くなる。

絶縁層については、有機物テープを線材表面にラップ巻きすることで線間の絶縁が確保される。現状線材の絶縁耐圧は約 5kV 程度であるため、高磁場コイル用途として妥当である。

2.4.1.2 基板、保護層、絶縁層等の構造変更可能性検討

2.4.1.1項に基づき、超電導層以外の薄化による目標達成可能性を検討した。本技術開発においては、目標とする平均電流密度(J_e)が高く、通電中の異常発生時に 300A/mm^2 以上の電流が銅安定化層に流れる可能性があることから、安定化層の厚さは据え置くべきである。また、絶縁層についても巻線加工の安定性から選択されている条件を変更することは安定した生産性を確保するうえでリスクとなる。そこで、薄化による性能向上可能性が高い基板厚さ低減について検討を実施した。

表 2.4.1.1-1 に既存線材と開発線材に関する仕様を示すが、基板厚を現行の 75μm から 50μm に薄化することにより、超電導層に要求される臨界電流密度 $J_{c(SC)}$が変わることが解る。一方、外部応力に対して弾性変形し難い、ヤング率の大きなハステロイ ™ 基板の占める断面積比が小さくなるために、外部荷重に対する機械的強度が変化する可能性がある。そこで、それぞれの仕様にて試作した短尺試料について、引張り応力及び曲げ応力に対する強度試験を実施した。

図 2.4.1.3-1 は液体窒素中で引張荷重を与えた後、除荷した状態で臨界電流(I_c)値を測定した結果を示す。基板の薄化によって、I_cが劣化する引張応力がやや低下する傾向が見られたが、基板厚が 50μm になっても、600MPa 迄の引張応力においても I_cを維持していることが判る。これは 3T 級の MRI 用線材に加わると想定される電磁力(フープ応力)に対して充分な引張強度であると言える。

図 2.4.1.3-2 は Goldacker 法により液体窒素中にて曲げ荷重を加えた後、除荷した状態で測定した臨界電流(I_c)の変化を規格化した結果であるが、基板厚を薄くすることによって許容限界の曲げ半径は小さくなり、基板厚が 50μm になると、曲げ半径 5mm でも全く劣化が見られないことが解った。

以上より、50μmまで基板厚を薄くすることでは機械的強度に問題は生じないことが明らかになった。

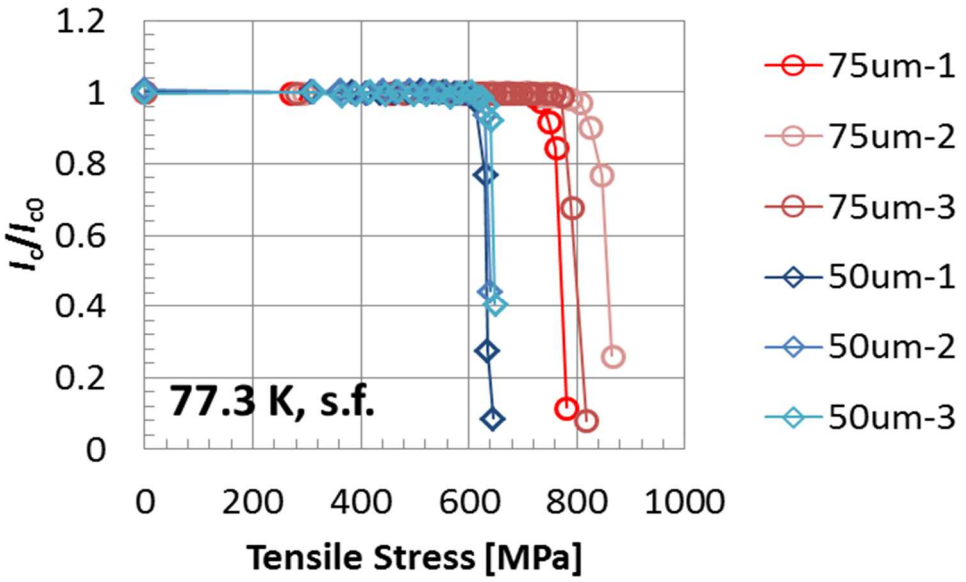


図 2.4.1.2-1　薄基板線材の引張歪特性

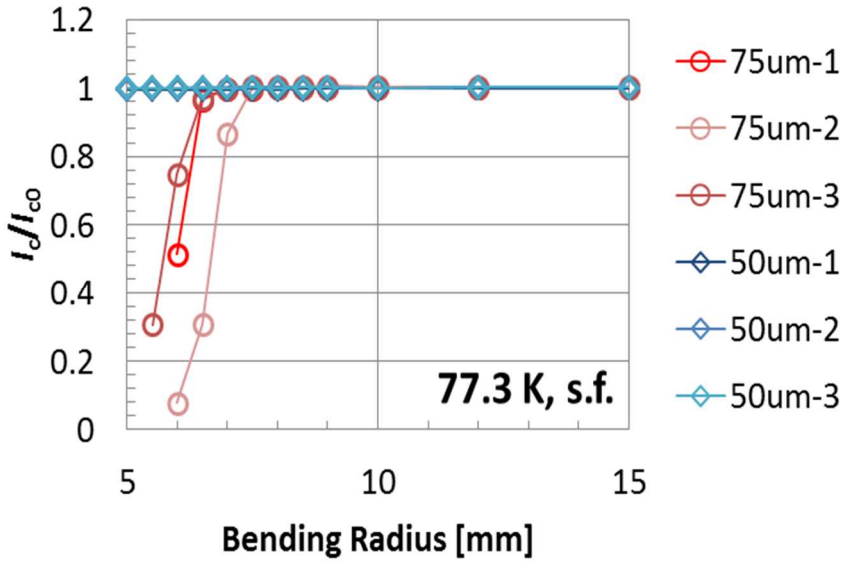


図 2.4.1.2-2　薄基板線材の曲げ歪特性

2.4.1.3 高磁場コイル用線材の高磁場特性測定

(1)　磁場中特性評価装置

超電導層への人工ピン導入による高磁場コイル用 Y 系高温超電導線材の開発では、目標条件(温度、磁場)における臨界電流(I_c)測定が必要不可欠である。Y 系線材の臨界電流は、その結晶構造に起因する異方性によって、強い磁場角度依存性を示す。MRI用高磁場コイルにY系線材を巻線すると、巻線のコイル内の線材位置における磁場分布に対応する特定の角度で線材に磁場が加わる。

このため、目標である温度30K、磁場7Tを含む磁場ならびに温度で、磁場角度依存性をはじめとする諸特性の測定を可能とするシステム構築を目的とし、磁場中特性評価装置を導入した。

(2) 磁場角度依存性の測定

ア.　サンプルステージ回転機構

磁場角度依存性測定のためサンプルステージに回転機構を設ける必要上、測定サンプル冷却経路と通電経路に制限があり、比熱の小さい低温におけるサンプルの温度上昇を抑える方法が課題であった。また、高磁場中で測定を行うため、磁気的なノイズにより測定精度が低いこと、および磁場中測定サンプルに通電できる電流容量の制約が課題であった。

イ.　装置構造

サンプルステージ設計の検討により、測定時の温度上昇を抑えつつ所要の電流通電を可能にした。また、サンプルステージ、計測線の形状や配置の検討により、高磁場測定における外的ノイズを大幅に低減した。図 2.4.1.3-1 に本磁場中特性評価設備の模式図を示す。

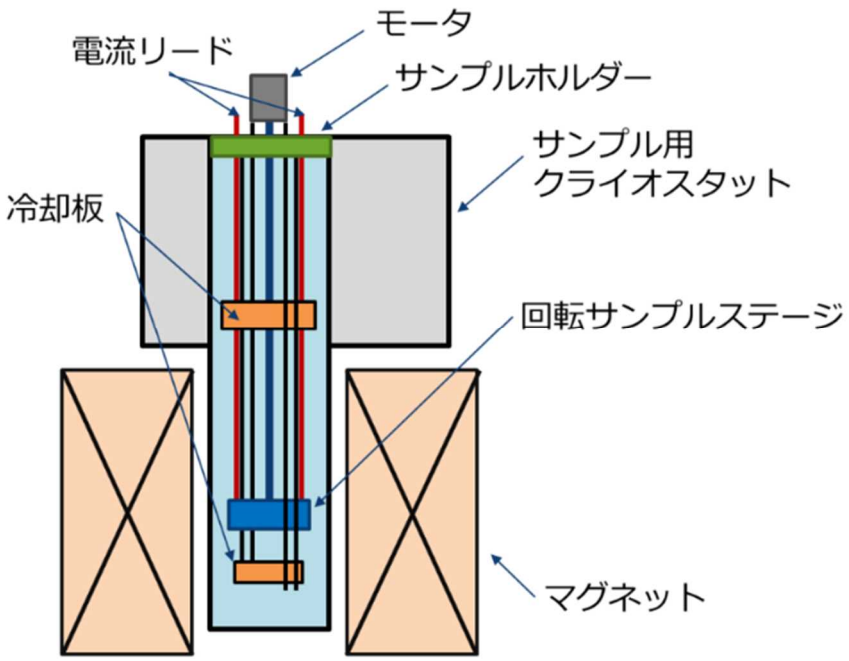


図 2.4.1.3-1　磁場中特性評価装置　模式図

(3) 測定結果

磁場中特性評価装置による測定結果を図 2.4.1.3.-2 に示す。目標である30K、7T における条件を含む広い範囲の温度および磁場条件で臨界電流を測定することが可能となった。また、各温度、磁場での臨界電流特性の角度依存性を正確に測定することで、磁場角度依存性を考慮した線材特性高性能化が可能となった。これにより、線材試作から特性測定評価まで効率的な技術開発を進め、目標である線材の電流密度性能向上の技術開発を促進することができた。

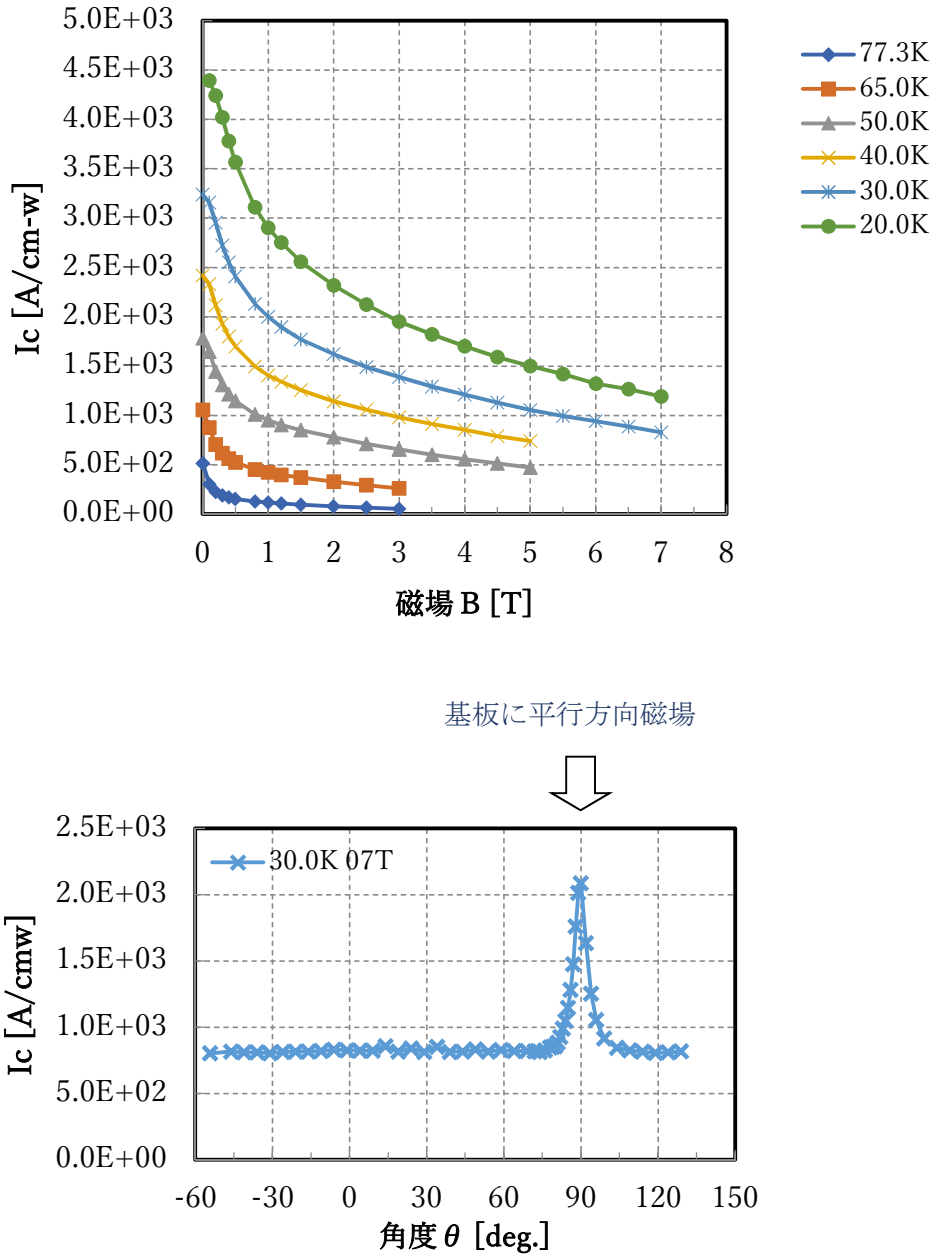


図 2.4.1.3-2 Y 系超電導線材の磁場中特性測定例
(上)単位幅あたり臨界電流値の磁場依存性および温度依存性
(下)特定温度・磁場における単位幅あたり臨界電流値の磁場角度依存性

2.4.1.4 人工ピン導入線材の磁場中ピンニング力最適化

(1)　超電導層の磁場中臨界電流密度の向上

ア. 高特性 Y 系高温超電導薄膜の磁束ピンニング

線材の平均電流密度(J_e)向上とともに生産性を改善するには、超電導層の臨界電流密度($J_{c(SC)}$)を高くすることが最も肝要である。

Y 系高温超電導薄膜のこれまでの一般定な特性向上アプローチは以下のとおりである。銅酸化物である Y 系高温超電導材料の磁束ピンニングは、図 2.4.1.4-1 に示すような層状結晶構造が要因となって本質的に定まるピン力、即ち超電導に寄与する電子の存在確率が高いCuO_2平面内に中心を持つパンケーキ状磁束の形状を決めている異方性パラメーターによって表現される有効質量モデルにより、主に磁場ベクトルの c 軸平行成分に相当するローレンツ力で定まる磁場角度依存性が現れ、基板に平行な磁場で J_c が高くなることが知られている。このモデルで示されるパンケーキ状磁束のピン止め力は、これよりも大きさの小さい原子オーダの微細かつ等方的な欠陥や空孔で定まるとされているが、このような微細欠陥は液相から熱平衡的にゆっくりと成長した単結晶では入りにくいとされ、実際にそのようなバルク単結晶に比べると気相からの蒸着薄膜の臨界電流密度($J_{c(SC)}$)は極めて高い。

このため、気相法で合成した Y 系高温超電導薄膜は、母相組成のみのままでも非常に高い臨界電流密度($J_{c(SC)}$)が単結晶基板上にて早期に報告され、これが薄膜積層構造の Y 系線材開発の動機となっている。この場合は液相成長バルクと異なって、僅かな仕込み組成ずれが超電導状態に影響を与えて臨界温度(T_c)が低下した多元系酸化物として形成されることが多い。このような薄膜を長尺テープ線材化するにあたっては、金属基板との拡散反応の抑止、精緻な組成調整と共に、結晶の a-b 軸方向(c面)を含む結晶配向性を鋭く向上させることによって、膜中に入り込むマクロスコピックな欠陥である結晶粒界や不純物を出来る限り低減し、単結晶に近づけていくことが肝要であり、実際にそのようなアプローチで長尺線材の高い特性が実現されてきた。

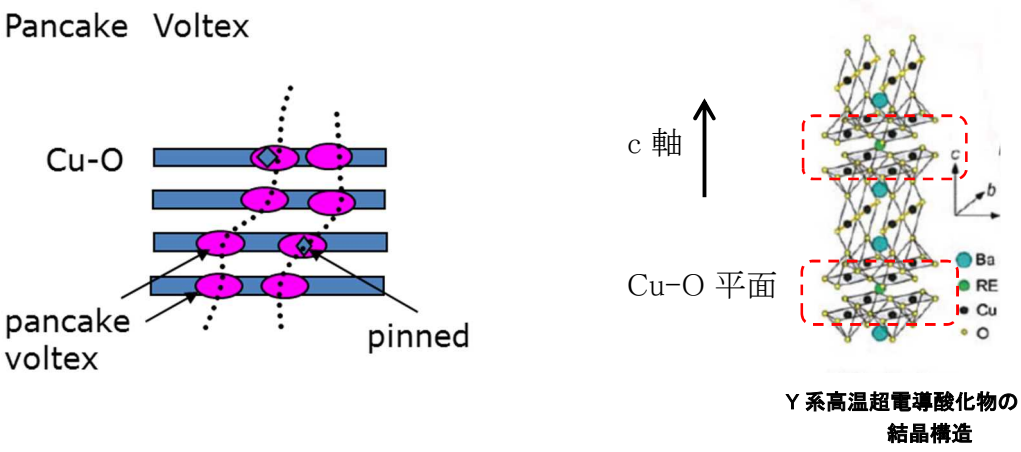


図 2.4.1.4-1　Y 系高温超電導酸化物の結晶構造とパンケーキ状磁束

以上のような経緯から、気相蒸着の Y 系高温超電導薄膜において、不純物添加は特性低下に繋がるケースが多く、工業的に有効と見做せる人工ピンニングセンタ(人工ピン)の導入手法が見出されたのは、2000 年代になって $BaZrO_3$ 等の特定のペロブスカイト系酸化物を添

加する方法が報告されてからである。即ち、$BaMO_3$ (M=Zr, Hf, Sn 等)で表されるこれらの酸化物をＹ系高温超電導薄膜中に添加すると、図 2.4.1.4-2 に示すようなマトリックス母相に対して結晶格子が整合しつつ、c 軸に平行な細長い円柱ロッド形状に結晶成長するとともに、上記に示した有効質量モデルで定まる磁場角度依存性から明らかに外れた、顕著にc軸に相関したピンニングセンタとして機能することが発見された。前述のパンケーキ磁束が人為的に導入された円柱状絶縁体ロッドに沿って揃った状態で最も安定になり、強いピン力に繋がっていると考えられる。以降これを用いた精力的な性能向上技術が広く進展し、極めて高いJ_c向上が多くの機関で報告されるようになった。しかしながら、この高J_c特性を発揮する人工ピンを導入したＹ系高温超電導薄膜は、一様に分散した揃ったナノロッド構造を形成する必要があることから、通常の膜に比べて最適成長条件が狭く、長尺にわたって均一な線材作製に適用することが難しいとされてきた。更に、強いピン力を発揮する、長さが一様に揃ったナノロッドを形成するためには、その結晶成長速度を遅く留める必要があることからスループットの低下が懸念された。このような背景により、これまで人工ピン導入 Ｙ 系高温超電導線材の市販は限定的であった。

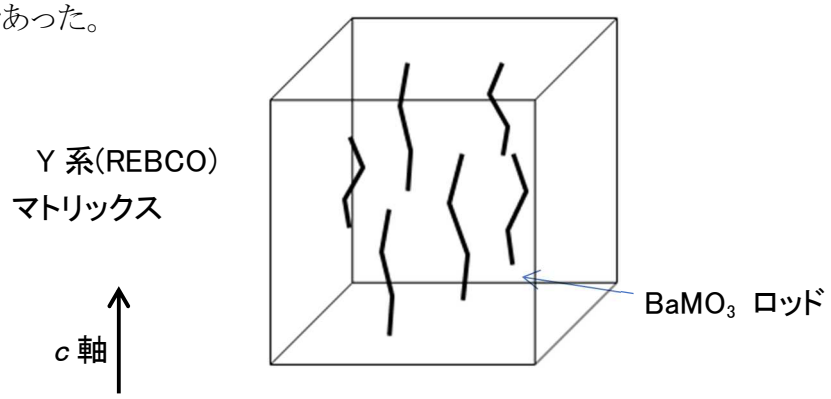


図 2.4.1.4-2　　$BaMO_3$ (M=Zr, Hf, Sn 等)によるロッド状ピンニングセンタ

イ.　PLD 法による長尺均一Ｙ系線材化技術の進展

一方、Ｙ 系高温超電導薄膜を長尺均一な線材として作製するための技術として、株式会社フジクラが発明したイオンビームアシスト蒸着法 (Ion Beam Assisted Depsition: IBAD 法)による面内配向中間層の形成、及び精緻な組成制御を長時間の成膜において実現する製法として図 2.4.1.4-3 に示すパルスレーザ蒸着法(Pulsed Laser Deposition:PLD 法)装置による線材開発が進展した。

PLD 法は、GW/cm^2 に達する高パワー密度の紫外域パルスレーザ光を超電導体の焼結体(ターゲット)に集光照射することにより多元系材料薄膜を再現性良く形成するのに適し、早期からＹ系高温超電導線材開発で(株)フジクラが主体となり長尺線材の実用化が進展した成膜技術である。当初はレーザの出力が限られ大面積蒸着が難しかったが、高強度紫外パルス光源が半導体工業分野で活用されるようになると、気体媒質を用いたエキシマレーザ技術が飛躍的に発展すると共に、パルスレーザ光の高速走査やターゲットの搬送機構等を備えたＹ系高温超電導線材量産に向けた Reel-to-reel 連続蒸着技術として大きく進展するに至った。

PLD 法によるＹ系高温超電導薄膜の連続蒸着技術により、長尺にわたる高特性線材を実現するにあたり、重要な課題は、最適な結晶成長温度を維持するための基板温度である。

特に(株)フジクラは図 2.4.1.4-4 に示すような、蒸着部分周辺全体を均熱加熱するホットウォール加熱技術を開発したことにより極めて安定した長尺線材の成膜が可能となり、この技術を用いて既に生産体制を構築してきた。ホットウォール加熱方式を用いて製造した長尺線材の長手方向臨界電流特性分布例を図 2.4.1.4-5 に示す。

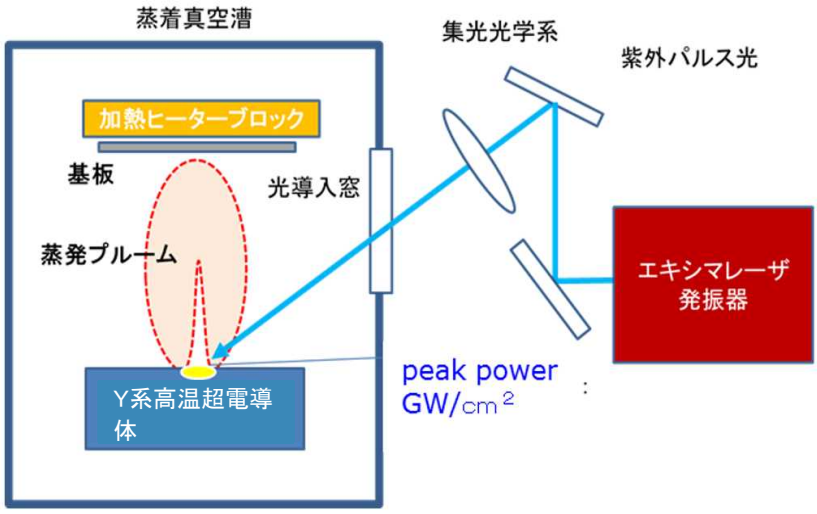


図 2.4.1.4-3 パルスレーザ蒸着法(Pulsed Laser Deposition:PLD 法)の概念図

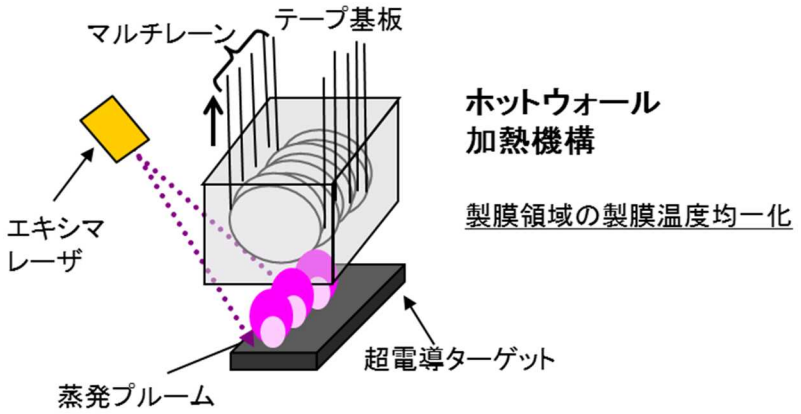


図 2.4.1.4-4 ホットウォール加熱方式 PLD 装置の蒸着部分概念図

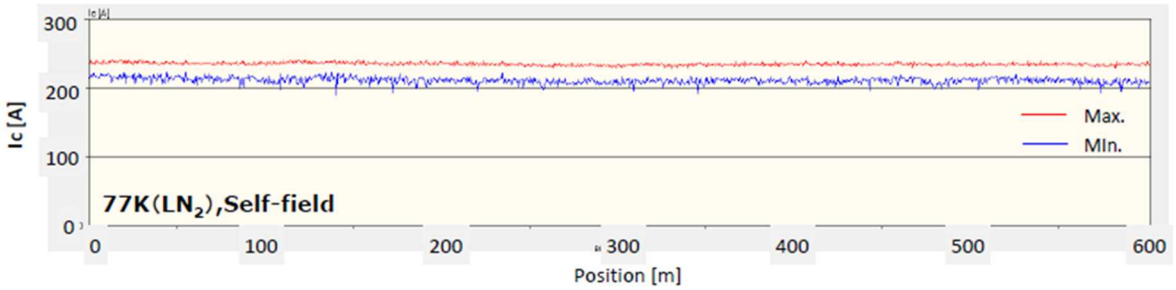


図 2.4.1.4-5 ホットウォール加熱方式を用いた典型的な長尺 Y 系高温超電導線材の長手方向特性分布(磁化法臨界電流測定)

(2) パルスレーザ蒸着法(PLD法)における人工ピン導入と蒸着速度依存性

ア. 人工ピン導入に伴う最適成膜条件の変化とホットウォール PLD 法の適用

人工ピン添加線材は、人工ピンであるナノロッド構造 $BaMO_3$ (M=Zr, Hf, Sn 等)相の成長条件が新たなパラメーターとして加わることから、図 2.4.1.4-6 に示すように最適成膜条件範囲は狭くなる。本技術開発では、基板温度等の蒸着条件の制御性に優れ、量産設備として安定した稼働が確立しつつある上記ホットウォール型PLD装置を用いて、均一な特性を持つ人工ピン導入線材を高い生産性をもって量産技術を確立することを目指したものである。

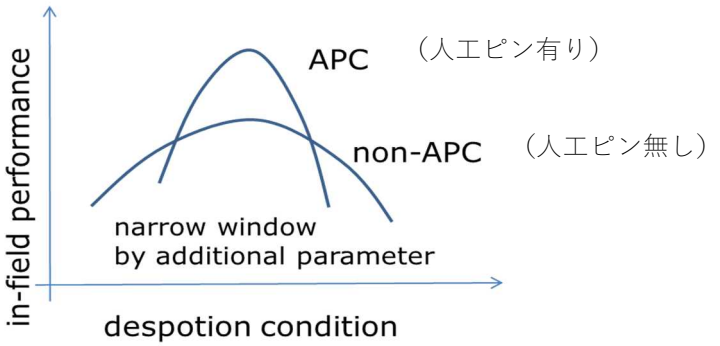


図 2.4.1.4-6 PLD 法を用いた Y 系高温超電導薄膜の人工ピン有無による最適成膜範囲の概念図

イ. 人工ピン導入による J_c 特性向上

図 2.4.1.4-7 に PLD 法を用いた膜厚 1 μm程度の Y 系高温超電導薄膜の臨界電流密度(J_c)の磁場依存性を示す。クローズシンボルは $BaHfO_3$ を数モル%添加したサンプル、オープンシンボルは $BaHfO_3$ 無添加のサンプルを示す。磁場は全て基板に垂直な方向(c 軸に平行)としている。線材の構造は 2.4.1.1 項に記載した通りであるが、成膜の最適条件は同一ではなく、人工ピン導入線材サンプルの場合は、より狭い条件をクリアするために蒸着速度を遅くした。図 2.4.1.4-7 に示すように温度 50K 以下に於いて J_c の顕著な伸びが見られ、20K に於いては無添加と比較して約 3 倍の J_c 値を得た[2.4.1.1-1]。

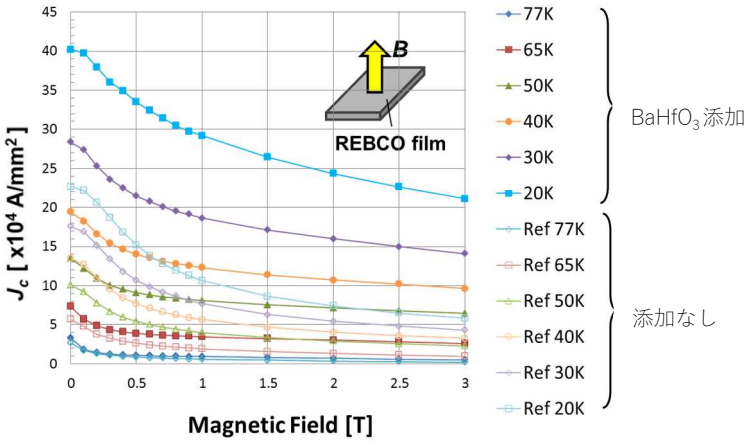


図 2.4.1.4-7 人工ピン導入による臨界電流密度(J_c)の向上s

ウ.　蒸着速度と臨界電流密度の角度依存性

図 2.4.1.4-8 に、2μm厚程度の Y 系高温超電導薄膜試料の臨界電流密度の磁場角度依存性を示す。外部磁場は 5Tに固定し、温度は 20K、30K、40K の 3 点としている。 前項で示した基板に垂直な磁場方向は、図 2.4.1.4-8 中の矢印の位置に相当し、Y 系高温超電導結晶のc軸に平行な方向になる。人工ピンを添加しない場合に於いては、前述したようにほぼ Y 系高温超電導結晶の層状構造に起因した磁場のc軸方向成分に反比例した曲線で記述できることが判る。一方、Y 系高温超電導層に人工ピンとして $BaHfO_3$ を添加した場合、c 軸に平行な磁場が掛かった場合に顕著に J_c が向上していくことが判る。これは、c軸に平行なロッド状の $BaHfO_3$ 結晶が人工ピンとして寄与していることを示している。

このとき人工ピン導入サンプルについては、A;蒸着速度を遅くしたものと、B;蒸着速度を高速条件にしたもの双方にて最適条件を探索し、磁場中特性の評価を行った。その結果、図 2.4.1.4-8 に示すように、蒸着速度によって臨界電流密度(J_c)の磁場角度(ϑ)依存性が大きく変化することがわかった。高速蒸着条件においては、c 軸平行な方向で現れるピークが明らかに低くなっていく傾向が見られる。他方、外部磁場の角度によっては、蒸着速度に強く依存しない磁場角度があり、30K以上においてはそれが顕著である。

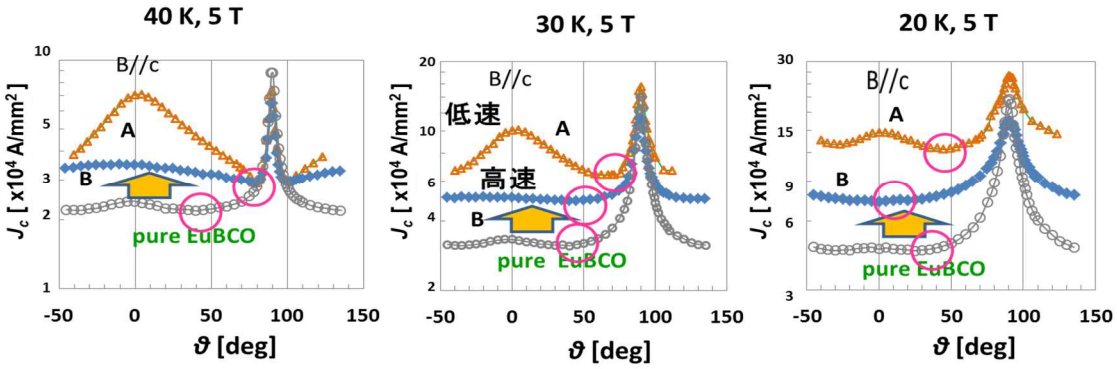


図 2.4.1.4-8　人工ピン導入サンプルの臨界電流密度の角度依存性

そこで、各条件に於いて最小の J_c となる角度で得られる線材単位幅あたりの I_c 値について、外部磁場 5Tとした際の温度依存性を図 2.4.1.4-9 に示す。温度 50K以上においては $BaMO_3$ 添加サンプルのc軸相関の程度はより鋭くなっており、最小値で比較すると人工ピン導入の効果は顕著ではないことがわかる。このように角度依存性に於いて最小を与える条件で整理する限り、PLD 法による $BaMO_3$ 添加人工ピンは、40K以下に於いて効果が顕著となり、温度が低くなるほど明確になる。

更に低温側では蒸着速度依存性が現れ、J_c 、I_c 値だけを見ると、低速蒸着条件が有利となってくるように見える。温度が低い場合はc軸相関性が不明瞭となり、磁場角度に依らずに J_c が向上するのに対し、温度が高くなってくるとブロードな成分は失われ、c軸と相関したピーク周辺で高い J_c を得る傾向に変化する。このように温度によって異なる振る舞いをする場合は性能が予測し難いため、高磁場コイル設計上必ずしも有利とは言えない。これに対し、高速蒸着条件においては、広い温度範囲で比較的磁場角度に依存せず特性向上が得られる特徴がある。

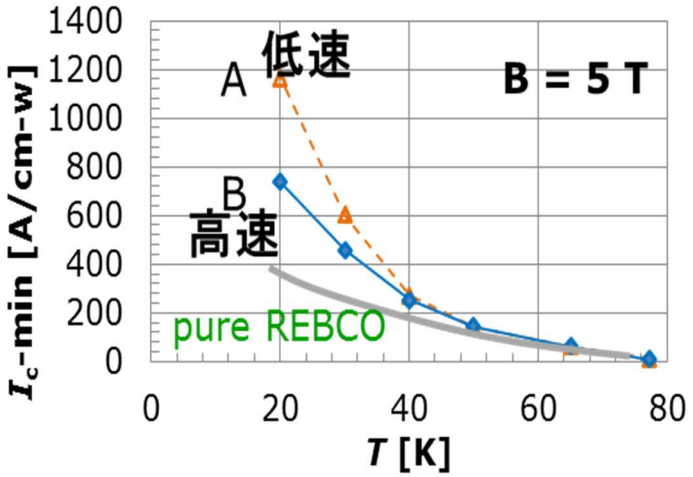


図 2.4.1.4-9　5T外部磁場の印加角度によって最小となる臨界電流値の温度依存性

エ．人工ピン添加による $BaMO_3$ ナノロッドの形状と蒸着速度

図 2.4.1.4-10 に、透過電子顕微鏡（TEM）を用いた超電導層の断面微細構造観察結果を示す。断面観察画像を見ると、数nm程度の直径のロッド形状の第二相がc軸方向に平行に成長している様子がわかる。いっぽう、平面微細構造観察画像を見ると、このロッド構造が 15～20nm 程度の間隔で分散して形成されている様子が判る。

低速蒸着条件では、長く明瞭なロッド構造が等間隔で比較的均一に並んでいる様子が判るが、高速蒸着条件では、このナノロッド構造の形状に変化が現れ、ロッドの長さが短くなって、分散していく様子が判る。構造的にもc軸に平行な方向に対する相関が成長速度によって差があることが明瞭に観察され、成膜条件とc軸に平行な磁束ピンニング力の相関に裏付けが得られた。

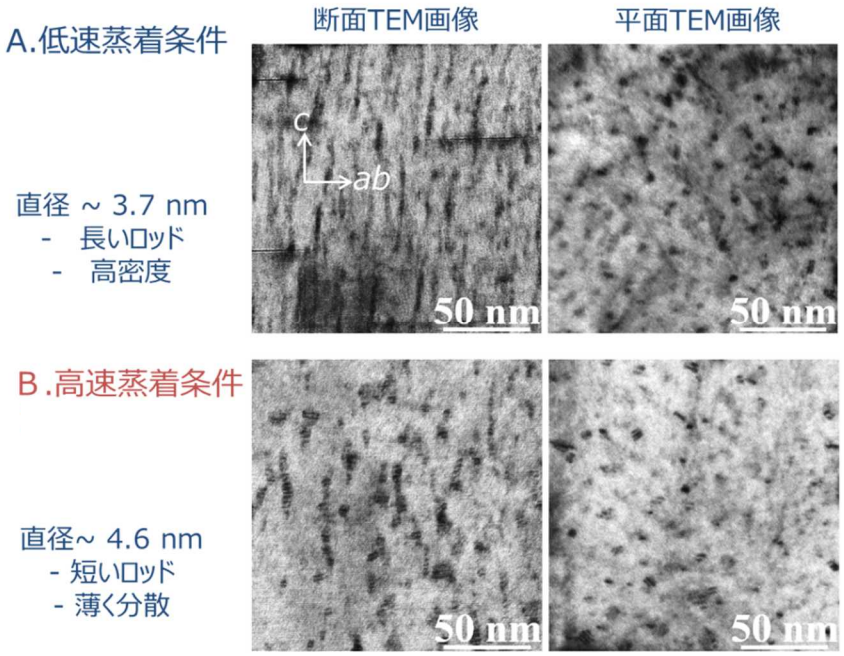


図 2.4.1.4-10　透過電子顕微鏡(TEM)を用いた微細構造観察結果 [2.4.1.1-2]

(3)　磁場中特性の高性能化と高スループットの両立

ア．スループットと蒸着速度、超電導層の臨界電流密度 J_c、線材の平均臨界電流密度 J_e

以上のように、Y 系高温超電導薄膜の蒸着速度と相反関係となって J_c 特性が変化することから、一定以上の特性を得るには蒸着速度の最適領域が存在する可能性がある。そこで、膜厚を 2μm程度に保って、目標値付近の平均臨界電流密度（J_e）特性を得るべく、線材線速と蒸着速度を変化させて条件の最適化を実施した。図 2.4.1.4-11 に示すように、製造線速、最適条件にて得られた超電導層の J_c、絶縁層を含む線材平均電流密度について一定の関係を得ることが出来た。磁場特性の評価は図 2.4.1.4-12 に示すように本技術開発の性能目標である 30K,7T において実施した。この領域では磁場角度依存性が少ない領域となっており、大半の条件において c 軸平行条件付近の磁場角度において最小値になっている。製造線速が遅い領域に於いては、超電導層のJ_c特性は高いものの、超電導層が厚くならないために、遅い製造線速においても臨界電流（I_c）値が不足し、目標の平均電流密度（J_e）特性に到達出来ない。これに対し、蒸着速度を上昇させても J_c は4×10^4A/mm^2 程度以下に下がらないため、超電導層の厚さにより臨界電流（I_c）値が確保でき、目標である J_e ＞400A/mm^2 をクリアし得ることが解る。

更に、同時に進めている課題設定型産業技術開発費助成事業「高温超電導実用化促進技術開発/高磁場マグネットシステム開発/高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発/高磁場コイル用超電導線材の生産性向上技術開発」の成果を活用しつつ、本技術開発で可能な範囲内で最大の蒸着速度に於いて条件を最適化した結果、製造線速50m/hrの条件においてJ_c特性が低下することなく3.8×10^4A/mm^2 を維持し、目標であるJ_e＞400A/mm^2（30K、7T）を越える J_e＝406A/mm^2 を得た。更に 2.4.1.2 項で検討した基板の薄化を適用することにより J_e は527A/mm^2 に到達し、最終目標を達成することが出来た。

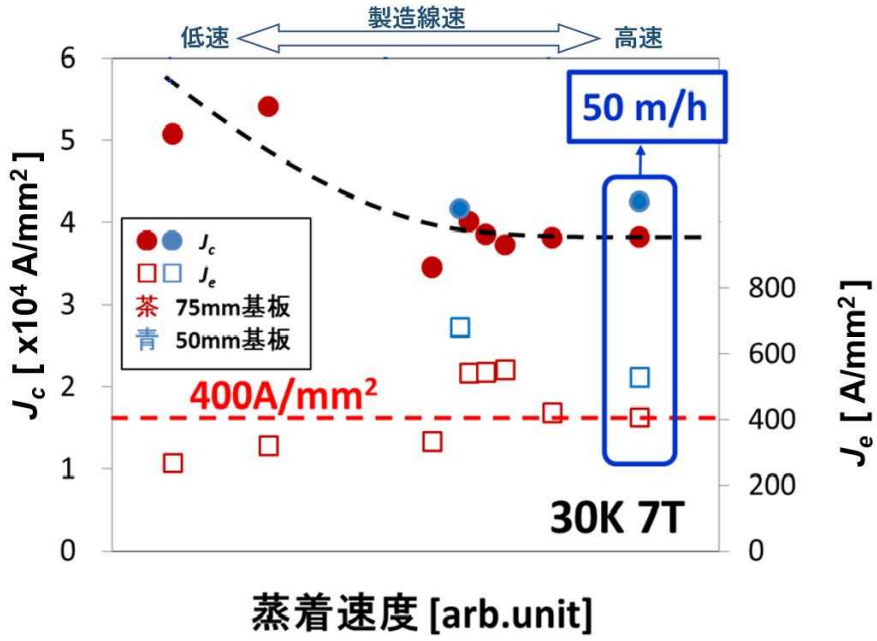


図 2.4.1.4-11　超電導層 J_c 及び線材平均臨界電流密度 J_e の蒸着速度及び製造線速依存性

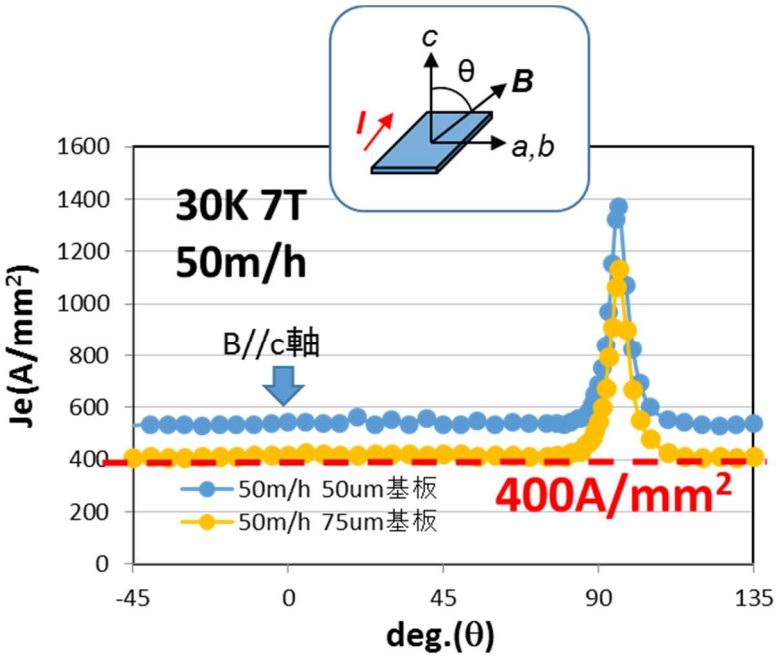
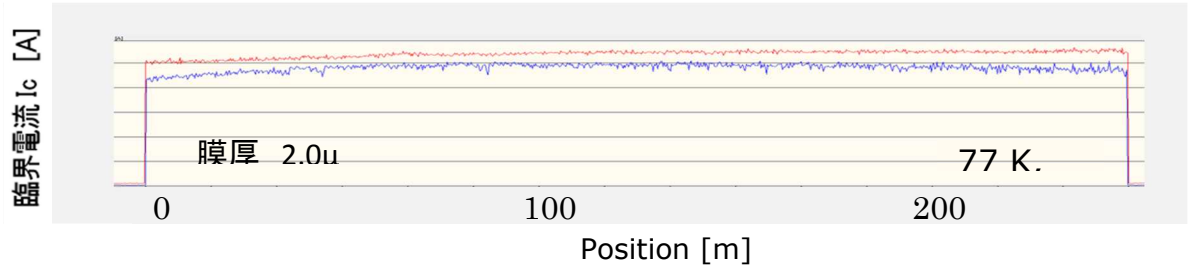


図 2.4.1.4-12　30K,7T において測定した J_e の磁場角度依存性

イ. 高特性/高スループット条件における長尺合成

以上のように、従来に比べ高い超電導特性を持った線材をより高い製造線速にて製造する条件を、人工ピン導入線材にて見出すことに成功したことから、この成果を長尺線材の安定合成に適用が可能であるか検討を行った。図 2.4.1.4-13　は、前項で見出した条件において50 m/hrの製造線速で、300m長にわたって超電導層を蒸着した線材の長手方向の超電導特性（磁化法）の分布を示す。全長にわたって均一な特性が得られている。線材の端部を切り出して30K、7Tにおける磁場中の通電特性を評価した結果、J_e は489A/mm^2 に到達し、目標である平均臨界電流密度400A/mm^2 以上を300m長の長尺合成で達成し、高性能均一長尺線材製造技術に目処を得た。



磁場中特性測定結果　：　30K,7T　における　最小　J_e 値
Je=489 A/mm^2　>　目標値 400A/mm^2　クリア

図 2.4.1.4-13　300m長に渡って連続合成したＹ系高温超電導線材の長手方向特性分布

2.4.1.5　2.4.1 項のまとめ

(1) Y系高温超電導線材の構成を検討した結果、機械的特性に影響を与えない範囲で基板厚の低減を行うことにより線材平均電流密度(J_e)向上が可能であることがわかった。

(2)　超電導層への人口ピン導入として、$BaMO_3$材料添加によってロッド状の絶縁ペロブスカイト酸化物が形成され、強くc軸相関した磁束ピンニング特性が得られ、高磁場コイルの運転条件における磁場中通電特性を上昇させることに成功した。更に、速い製造線速においても、電磁気的異方性の少ないJ_c特性を、高磁場高温超電導コイルの運転条件を含む広い温度範囲領域で得た。

(3) 厚さ2μm程度の超電導層において、製造線速を速めると超電導のピーク特性が低下するものの、更に製造線速を増大させた場合に於いても優れた超電導特性が低下させることなく維持に成功した。

(4) 製造線速50m/hr において、最終目標値である線材平均電流密度(J_e)＞400A/mm^2を越す406A/mm^2(30K、7T)を75μm厚基板線材において達成した。

(5) 基板厚を30%低減した50μm厚基板に長尺合成することにより線材のJ_eを最大527A/mm^2に増大させることに成功した。

(6) 目標である50m/hrの製造線速で作製した300m長のY系高温超電導線材端部の平均電流密度J_eは489A/mm^2(30K、7T)であり、生産性改善を図る高特性長尺線材の製造に目処を得た。

参考文献

[2.4.1.1-1] S. Fujita et. al., "Flux-Pinning Properties of BaHfO3-Doped EuBCO-Coated Conductors Fabricated by Hot-Wall PLD", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 29, Issue 5, 2019

[2.4.1.1-2] S. Fujita et. al., "Development of Long-Length BMO-Doped REBCO Coated Conductors by Hot-Wall PLD Process", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 28, Issue 4, 2018

2.4.2 長尺線材性能の均一性向上技術開発(フジクラ)

2.4.2.1 長尺均一特性技術開発

(1) 長尺線材性能の均一性向上の必要性

ア. 長尺線材の長手方向性能の均一化

(ア) 求められる長尺Y系高温超電導線材特性

金属塑性加工技術により製造され線材単長が数kmを越える金属系 Nb-Ti 超電導線材と異なり、現状の Y 系高温超電導線材は、単長が短く数 100m程度であることが多い。また、長手方向の超電導特性の長尺均一性にバラツキが存在し機器への適用の障害となっている。これを実用機器へ展開するにあたっては、明確な目的と目標をもって進めることが肝要である。本技術開発ではMRI等の実用超電導機器を想定しているが、通常は安定した高い精度を達成するために外部電源を繋げずにコイル全体をゼロ抵抗状態として運転する永久電流モードが多用され、単長10km以上のNb-Ti超電導線材が利用されている。しかしながら、近年は精度の高い高磁場コイル励磁用の安定化電源が市販されており、電源駆動による所謂「ドライブモード」においても充分な磁場精度が期待出来るようになっている。したがって、これまで高温超電導コイルとして開発例の多い低抵抗常伝導接続部を含む積層パンケーキ巻線方式を高磁場コイルに採用することが可能であるとされ、その場合のヒト全身ホールボディ撮像 MRI コイルが設計出来る線材単長として1kmが設定されている。またコイル運転温度が高いことにより突発的な常電導転移に対して積極的なクエンチ保護対策が行われないため、金属系超電導線材と同等の均一性を求めることはないとは言え、コイルの臨界電流値はコイル内部の磁場と線材中に存在するI_cの最小値で決まる以上、極度に不均一な線材ではコイル設計が困難となる。

(イ) Y系高温超電導線材の長手方向特性分布

Y系超電導線材の実用化を促進していくうえで、磁場特性に次いで重要な因子が、長手方向の特性分布である。複雑な多元酸化物である銅酸化物系に於いては、逐次的結晶組織制御を必要とするために製造パラメーターが変動しやすく、長手方向特性分布が大きな課題となっている。高磁場超電導コイルに於いては、ドライブモードであっても、ゼロ抵抗を維持出来ない箇所があると、発熱を生じて超電導状態を維持出来なくなり、クエンチ現象を引き起こして発生磁場が消失する。このため、使用される温度および磁場条件において、全長にわたってゼロ抵抗を維持できる最大値を線材の臨界電流値(I_c)とするべきであり、長手方向に特性分布が大きいと、設計値に届かずに超電導線材の歩留まりが低下する。

線材の臨界電流値(I_c)はプロセス改善により向上していくが、最適条件に於いて得られた臨界電流値(I_c)が長尺線材において長手方向に分布を生じる因子には様々なものがある。大きく分けて、①プロセスパラメータ変動により緩やかに変化するものと、②ダスト・コンタミ、傷等による局所的・突発的に変化するもの、が想定され、それぞれが複雑に重畳しているものと思われる。図 2.4.2.1-1 に局所的劣化が多発した試料における長手方向の臨界電流値(I_c)分布を示す。

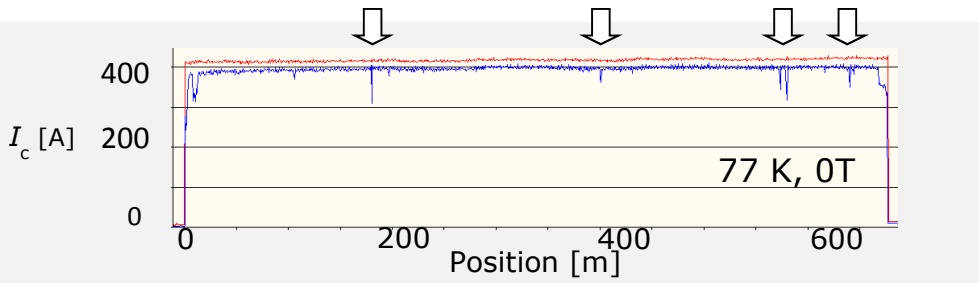


図 2.4.2.1-1　局所的な特性低下部を有する線材長手方向の臨界電流特性分布（磁化法）

ここに示す、スパイク状に落ちている箇所が上記の因子②に相当するものと思われ、全長におけるゼロ抵抗特性は矢印で示すこのポイントの臨界電流値で決まってしまうことになる。

イ．　長尺線材性能の均一性と局所的特性低下

（ア）局所的特性低下原因と特性分布改善、および線材信頼性評価

そこで、本テーマにおいては、先ず(2)項にて磁気光学画像観察法を用いた欠陥形状観察を行い、長手方向に特性分布を生じている要因のうち、②の局所的、突発的に変化するものを抽出整理を行った。その上で、(3)項にてその要因を排除していくためのプロセスクリーン化等の改善検討を複数項目実施した。最後に(4)項にて、前章にて高特性化開発を実施した人工ピン導入線材の長尺製造プロセスにおいて、その特性分布改善状況の確認を 1km 級線材の試作によって行った。

一方長手特性分布を生じる要因については、線材の機械強度との相関がある場合も有り得る。特に Y 系超電導線材はコイル巻線時の基板垂直方向引張応力に弱いことが課題であるが、短尺では観測されない低強度が長尺線材による含浸コイル巻線に於いて顕著になる等、長尺線材の機械的信頼性について、その強度分布に関する知見が必ずしも充分でない。そこで、今回開発における強度改善の確認と、安定したコイル巻線を可能とするための知見を得るべく、各種機械特性のバラツキを評価し、線材単線及びコイル巻線状態双方で機械的信頼性の評価を実施して、後掲する「2.4.2.2 線材信頼性評価技術開発」項において記載した。

（イ）臨界電流の低下率

線材の長手方向特性分布は、図 2.4.2.1-1 に示すように、平均値に対して±数%程度の緩やかな変動を有していることが多い。これに対し、局所的に大きな I_c 低下が重畳するとコイルの臨界電流値がその位置で大きく下がり、線材目標特性の半分程度に設定されている運転電流値に近づく可能性がある。動作温度が 30K と高いために熱暴走は発生し難いが、このような局所的特性低下部分で臨界電流を超えて通電し続けると、熱伝搬速度が非常に低いことから熱歪等の要因になる。

このため、このような局所低下部を排除した分布として、以下に示すように、臨界電流の低下率として、全長の臨界電流平均値と臨界電流最小値の差を全長の臨界電流平均値で除したものと定義し、これを1km長全長で0．15未満とすることを目標とした。

臨界電流の低下率:

((全長の臨界電流平均値－臨界電流最小値)／全長の臨界電流平均値) ＜ 0.15

長さ: 1km

このためには、製造プロセス中の緩やかな特性変動を一定に抑えるとともに、少なくとも大きな局所的特性低下部を 1km にわたって排除する必要がある。

(2) 長尺均一特性低下要因の抽出・整理

ア. 特性分布の評価方法

長尺の超電導線材の臨界電流特性分布の評価方法としては、通電法と磁化法が挙げられる。

通電法では実際に一定の長さの超電導線材に電流を流して I_c の決定を行うことから、実際の特性値を直接測ることができる反面、長手方向や幅方向の特性分布は検出できない。これに対し、磁化法による測定では、ホール素子のアレイを用い線材を搬送しながら磁化を検出する方法で、長手方向に連続的に臨界電流特性分布を評価できるため、局所的に特性が低下している箇所を特定することが可能である。

イ. 磁気光学効果(MO)による臨界電流特性分布の可視化

磁化法測定ではホール素子アレイの構造上の制約により、面内の特性分布は明瞭に可視化できず、要因の特定にまで至らない。そこで、特性不均一要因を特定し、均一性向上に向けた対策を講じるために、mm オーダでの面内の特性分布を可視化できるツールが必要不可欠となる。

このため、物質中を光が進む際、磁場が存在すると光の偏光面が回転するファラデー効果を活用し[2.4.2.1-1]、磁気光学効果を示す材料を基板上に形成した Magneto-Optical (MO)センサと偏光フィルタを用いることで線材の磁化分布を 2 次元的に可視化することができる。[2.4.2.1-2]

超電導線材は、冷却して超電導状態にすると、外部磁場を排除する性質を示すが、局所的に超電導特性が低い箇所が存在すると、その部分には磁場が侵入する。そこで、図 2.4.2.1-2 に示すような構成で、超電導線材に MO センサを載せ、冷却して超電導状態にした後、外部磁場を印加すると、MO センサに超電導線材の特性分布を反映した磁場分布を作り出すことができる。つまり、超電導線材の 2 次元面内の特性分布を反映した像を得ることができる。

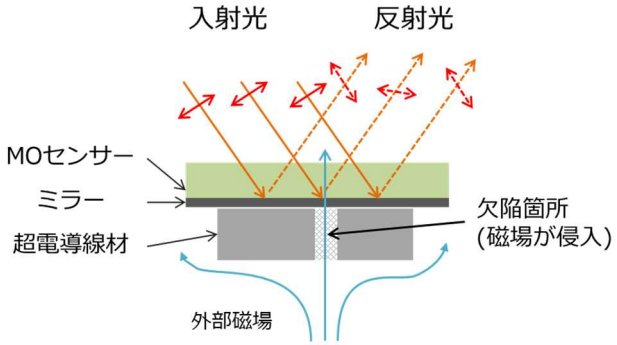


図 2.4.2.1-2　磁気光学効果を用いた超電導線材観察の原理模式図

Y 系高温超電導線材の特性分布観察を磁気光学観察によって行なうにあたり、線材を超電導状態に維持するための冷却機構と磁場を印加する機構と、MO センサや偏光フィルタなどの光学部品などを有する装置が必要となる。温度によって線材への磁場の侵入程度が異なることから、低温まで冷却が可能で温度調整も容易な冷凍機冷却タイプのクライオスタットを選定した。

観察対象のサンプルは、Reel-to-reelの磁化法臨界電流測定により特性不均一箇所を特定して切り出した後、磁気光学観察を行うことを考えると、短尺（5cm程度）のサンプルが設置できるような構成にしたクライオスタット内に磁場印加用のコイルを配置し、外部から通電電流を制御することでサンプルに印加する磁場の強さを調整する。線材サンプルの局所特性低下観察の範囲は2cm長の範囲とした。

ウ.　高精度均質性検出装置による特性分布観察

図 2.4.2.1-3 に製作した高精度均質性検出装置の構成写真を示す。サンプルをセットし冷却と磁場印加が可能な光学窓付きクライオスタットを主とし、温度調整用のコントローラや電源、光源等を備えている。

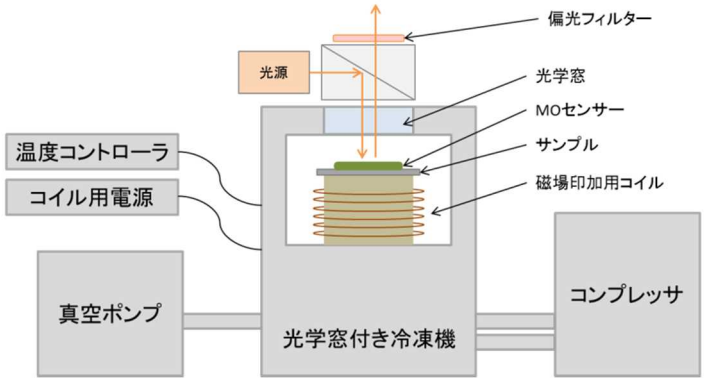


図 2.4.2.1-3　高精度均質性検出装置の構成模式図

室温から 20 K まで約 1.5 時間で冷却が可能で、3 時間程度で昇温しサンプルの取り出しが可能である。

超電導線材の特性低下部を磁気光学的に観察可能か検証するために、意図的に傷を導入した線材サンプルを用いて磁気光学像の観察を行った。ダイヤモンド製の針を用いて、線材の

エッジから幅方向に約 1 mm 長の損傷を形成した。この箇所の付近を、通常実施している磁化法によって測定した I_c の長手方向分布の結果は図 2.4.2.1-4 に示すとおりであり、非常にわずかな I_c 低下として捕えられた。この箇所の磁気光学像を図 2.4.2.1-5 に示す。磁気光学像では線材の大部分は暗く見え、エッジ部が明るく見えている。図の中央部の上側エッジから幅方向に線状に磁場が侵入している様子が明瞭に見られた。図 2.4.2.1-5 に示すように、印加する磁場の大きさを増加させたり、サンプルの温度を変えることで、磁場が線材に侵入していく様子が明瞭に確認された。

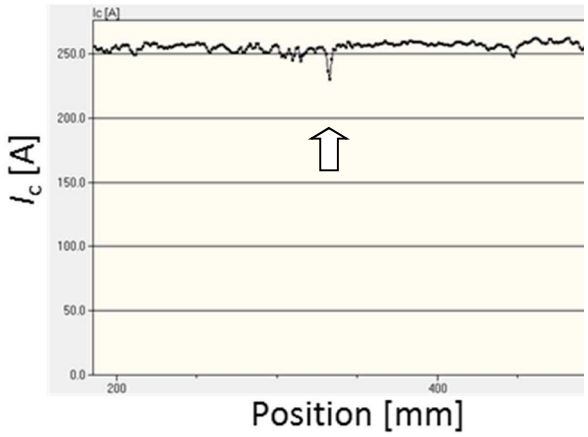


図 2. 4. 2. 1-4　意図的に損傷を形成した線材サンプルの長手方向磁化 I_c 特性測定結果

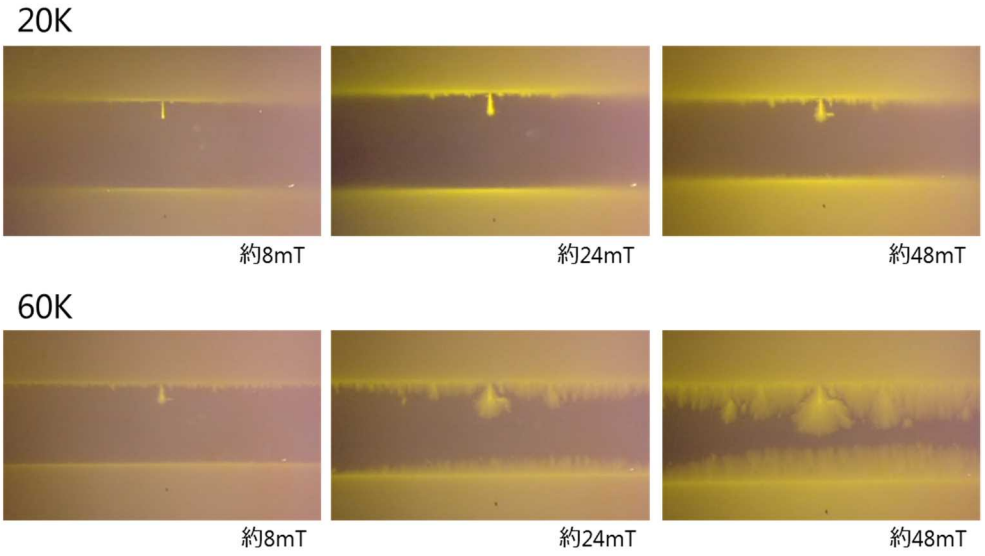


図 2.4.2.1-5　意図的に損傷を形成した線材サンプルの MO 観察像

上記の結果を受け、高精度均質性検出装置により線材に存在する特性不均一箇所の磁気光学観察をおこない、特性低下因子の調査・分類を実施した。

図 2.4.2.1-6 に、線材に曲げ歪を印加した線材サンプルの磁気光学像示す。図の右側の領域では線材エッジの輪郭が確認できるが、中央から左側は、幅方向に多数の細かい線状の磁場侵入領域があることがわかる。多数のクラックが超電導層に存在すると考えられ、特性低下の割合が大きく、I_c はほとんどゼロになっていることが磁気光学的に確認された。

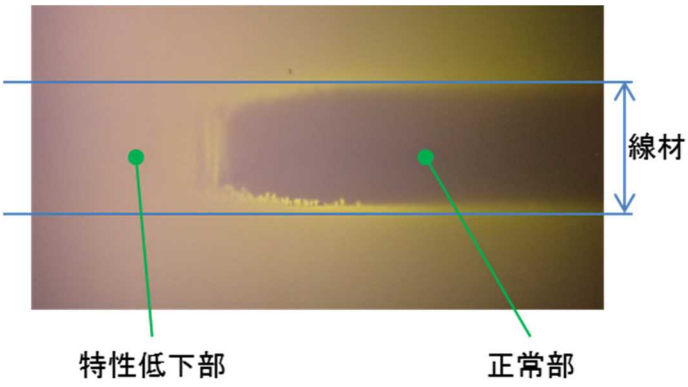


図 2.4.2.1-6　曲げ試験後サンプル（20 K，約 40 mT）

図 2.4.2.1-7 に、線材の平面方向に圧縮応力を印加した線材サンプルの MO 観察像を示す。写真上部エッジから少し内側に、長手方向に連続的に磁場が侵入している領域が確認できる。

この付近の超電導層の表面を走査電子顕微鏡（SEM）で観察したところ、図 2.4.2.1-8 に示すようなクラックが明瞭に確認された。線材に圧縮応力を加えていた治具の接触が不均一であったため、局所的に強い力が加わって超電導層の破壊が生じたものと推測される。

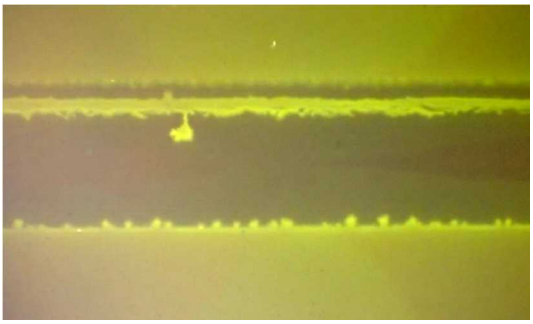


図 2.4.2.1-7　面方向圧縮による劣化（20K，約 16mT）

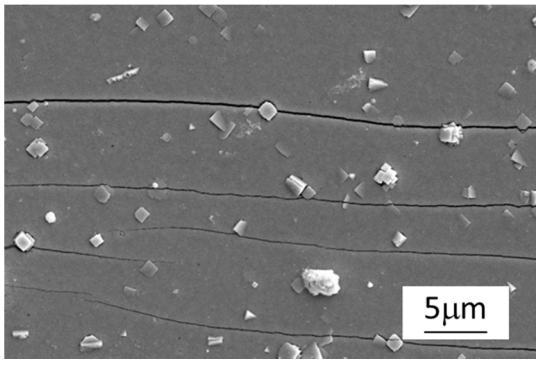


図 2.4.2.1-8　超電導層表面の SEM 像

図 2.4.2.1-9 に、製造工程中の線材磁化特性測定で発見された局所的特性低下箇所を切り出した線材サンプルの MO 観察像を示す。図下側の線材エッジから、線材幅方向に伸びる直線状の磁場侵入領域が観察されている。その形状から判断して、線材幅方向に鋭い傷が入ったものと推測される。

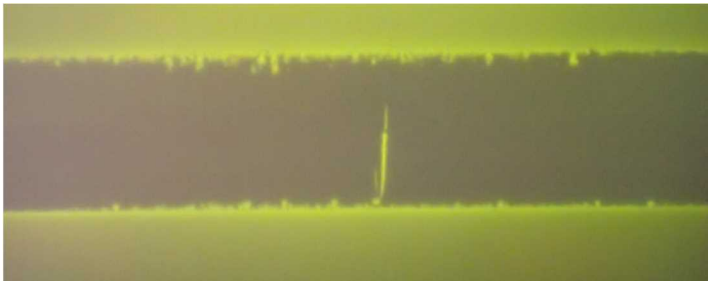


図 2.4.2.1-9 幅方向傷に起因する劣化（20 K，約 24 mT）

図 2.4.2.1-10 に、小型コイル形状で信頼性評価試験をおこなった後に解体した線材の MO 観察像を示す。エッジから磁場侵入領域が線状に曲がりくねって進展している様子が見られる。この形態は、超電導層が剥離している場合に頻繁に観察されるものであり、この模様の境界に沿って層が上下に剥離していると考えられる。



図 2.4.2.1-10 超電導層の剥離による劣化（20 K，約 24 mT）

図 2.4.2.1-11 に、製造工程中の外観検査で異常が見つかったサンプルの MO 観察像を示す。図の下側のエッジに粒状の磁場侵入領域が確認できる。

この線材サンプルについて、断面を露出して薄膜層の内部を調査した結果、異物(金属粉)が混入していることが判った。成膜工程中に発生した金属粉が線材表面に付着し、超電導層と反応し超電導特性の低下につながったと考えられる。

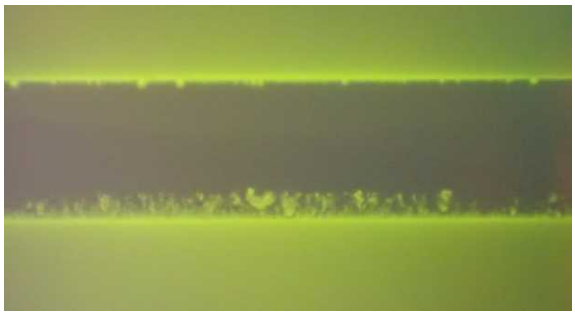


図 2.4.2.1-11 異物の付着による劣化（20 K，約 48 mT）

以上のように、特性不均一箇所の磁気光学観察により、超電導線材への磁場侵入の様子を明確に捕えることで特性低下の状況が確認ができた。特性不均一原因によって磁気光学像の形態が異なる知見が得られ、製造工程で改善すべき点を絞り込むことが可能となった。

(3)　局所的特性低下要因の排除による長尺線材の特性均一性改善

上記の結果より、局所特性低下の要因が成膜面に付着したコンタミネーションをはじめとする因子が原因であることが判明したことから、それらの原因を排除すべく、局所特性低下対策装置として表面清浄度改善を目的とした設備等を導入した。

ア．コンタミネーション除去（その1）

線材製作工程中の表面清浄度改善設備として、複数の中間層および超電導層の界面に存在するコンタミネーションを抑制する設備を導入した。中間工程の線材表面に付着するコンタミネーション数を詳細に調査するために、光学顕微鏡により種々サイズのコンタミネーション数をカウントした。

（ア）装置構成

装置構成を図 2.4.2.1-12 に示す。装置の設計コンセプトは各層成膜後の線材を本装置にセットし、Reel- to-reel 搬送させ付属の数種類のクリーニング機構により線材表面に付着したコンタミネーションを除去することである。付属のクリーニング機構は数種から成り、コンタミネーション除去は巻取り直前に配置した検査カメラにより判断している。

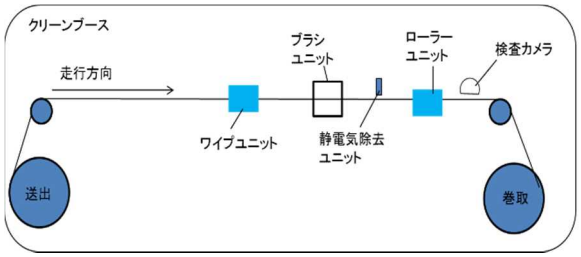


図 2.4.2.1-12　Reel-to-reel クリーン化設備　構成概念図

（イ）コンタミネーション除去確認

（イ)-1　光学顕微鏡によるコンタミネーション数確認

光学顕微鏡によるコンタミネーション数の評価結果を図 2.4.2.1-13 に示す。クリーニング機構通過前後に表面に付着しているコンタミネーション数の詳細な個数変化を調査するために、光学顕微鏡により種々径のコンタミネーション数をカウントした。今回導入したクリーニング機構を適用することでコンタミネーションを大幅に低減させることが可能であった。

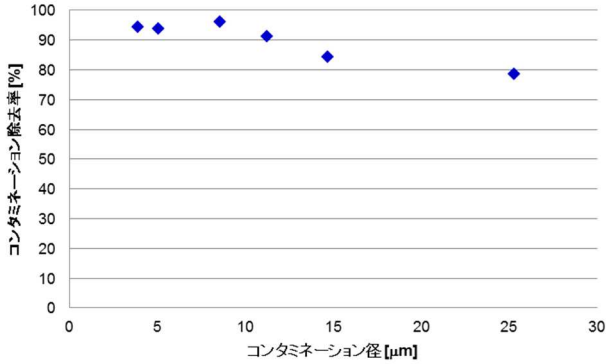


図　2.4.2.1-13　コンタミネーション除去結果

(イ)-2 外観異常数

クリーニング機構装置の使用有無で作製した線材について、超電導層表面を確認し外観異常と判断した個数をカウントした。カウントした結果を除去率に変換した結果を図 2.4.2.1-14 に示す。クリーニング機構使用により外観異常数が約 70%減少した。特に 0.5mm 未満の大きさの外観異常数が激減していた。前術の通り、クリーニングにより表面のコンタミネーションが減少することで、結晶配向を阻害する原因が排除された結果であると考えられる。

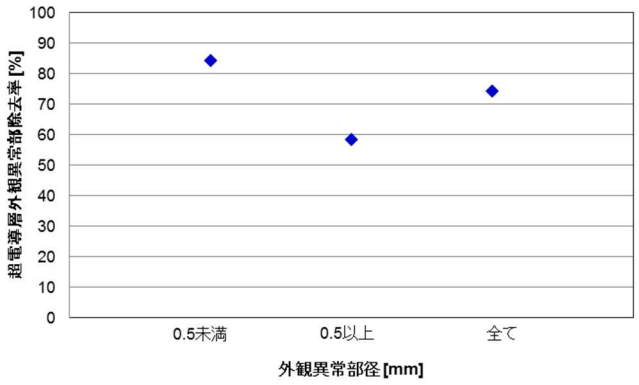


図 2.4.2.1-14 クリーニング機構使用有無による超電導層表面外観異常数

(イ)-3 臨界電流特性

1km 程度の線材作製に先駆け、クリーニング機構使用により臨界電流特性低下が抑制されるか検証を実施した。クリーニング機構使用有無の各約 70m 長の線材を作製し磁化測定により長手方向の電流特性を評価した。測定結果を図 2.4.2.1-15 に示す。クリーニング機構使用により、臨界電流特性の大きな低下は見られなかった。

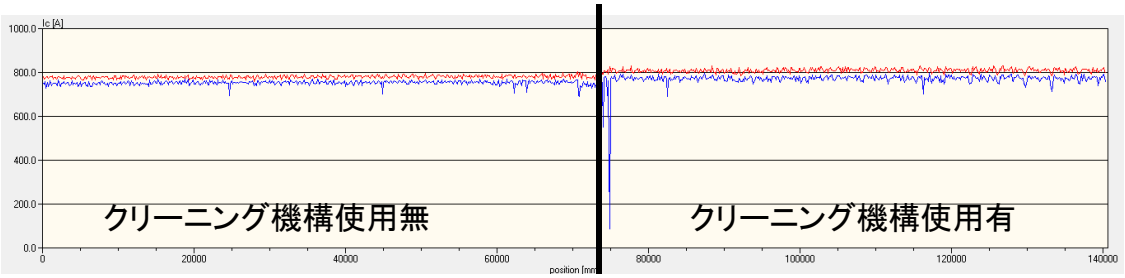


図 2.4.2.1-15 クリーニング機構使用有無線材の磁化測定結果

以上より、臨界電流特性が低下することなく、且つ表面に付着しているコンタミネーションを除去する方法として導入したクリーニング機構が有効であることが明らかになった。

イ.　コンタミネーション除去(その 2)

線材全周に付着しているコンタミネーションを除去することにより、安定化層加工時に発生する特性低下箇所の減少を図った。線材全周を一括でクリーニングするため超音波方式を選定した。なお、長尺線材に対応するために Reel-to-reel 式超音波洗浄装置を導入した。

(ア)装置構成

装置模式図を図 2.4.2.1-16 に示す。洗浄槽は 2 段構成で、1 段目は線材に付着しているコンタミネーションを液体貯留槽で超音波により振い落す超音波洗浄槽、2 段目は前段の槽内の洗浄液で再付着したコンタミネーションを液圧により落とすシャワー洗浄槽とした。

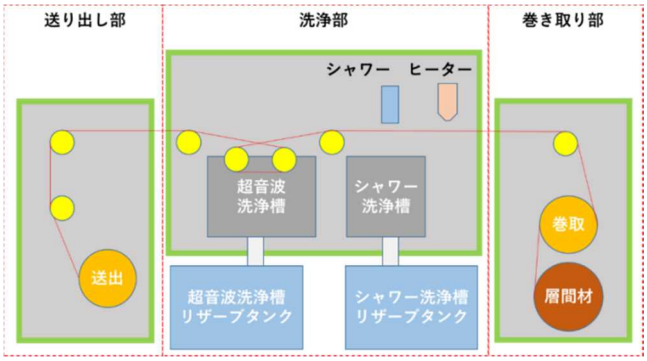


図 2.4.2.1-16　Reel-to-reel 式超音波洗浄装置模式図

(イ)　検証結果

(イ)-1　クリーニング効果確認

線材の表裏面のクリーニング効果は布で線材の表裏面を押さえつつ 50cm 長を拭き、布に転写された汚れを目視確認して評価した。超音波洗浄有無で評価した結果を図 2.4.2.1-17、図 2.4.2.1-18 に示す。洗浄により汚れの程度が減少していることが判る。

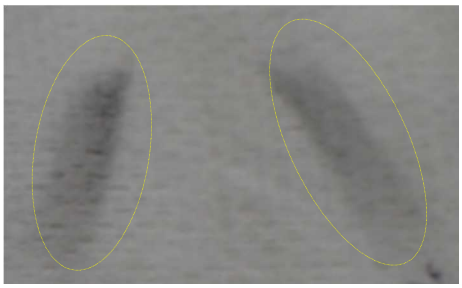


図 2.4.2.1-17　超音波洗浄無

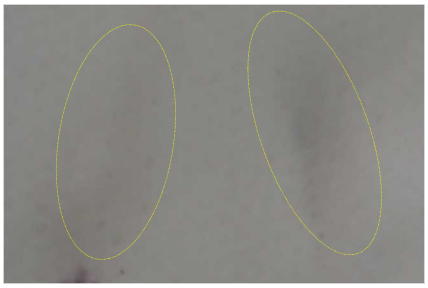


図 2.4.2.1-18　超音波洗浄有

線材側面のコンタミネーション除去率は、1m 長の線材をコイル形状に積層し、線材側面を粘着テープに押し付けた後、引き剥がしテープに転写されたコンタミネーション量をカウントし評価した。評価結果を図 2.4.2.1-19 に示す。コンタミネーションの径は 10μm 以上をカウントし、異なる 5 サンプルについて評価した。超音波洗浄前の線材に付着しているコンタミネーション量はばらつきを有していたが、洗浄により全サンプル付着量が 50%以上削減可能であった。

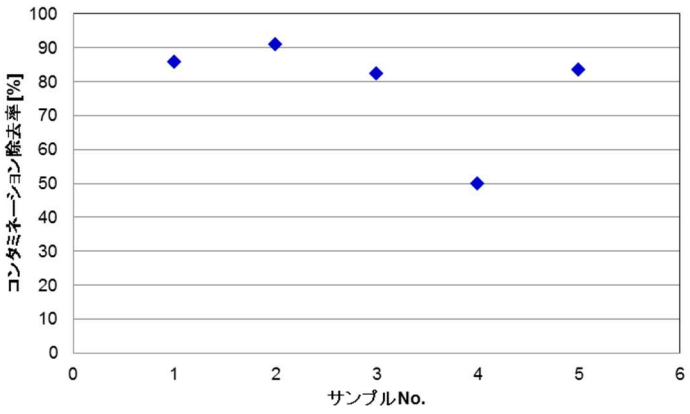


図 2.4.2.1-19 線材側面コンタミネーション除去結果

(イ)-2 電流特性

超音波洗浄前後の臨界電流特性分布を磁化測定法で測定した。結果を図 2.4.2.1-20 に示す。青色プロットの約 60m 長線材(0m～60m)に対し、超音波洗浄実施した後の結果が赤色プロット(60m～120m)である。洗浄前後で電流特性に大差なく、超音波洗浄により特性劣化は発生しない。

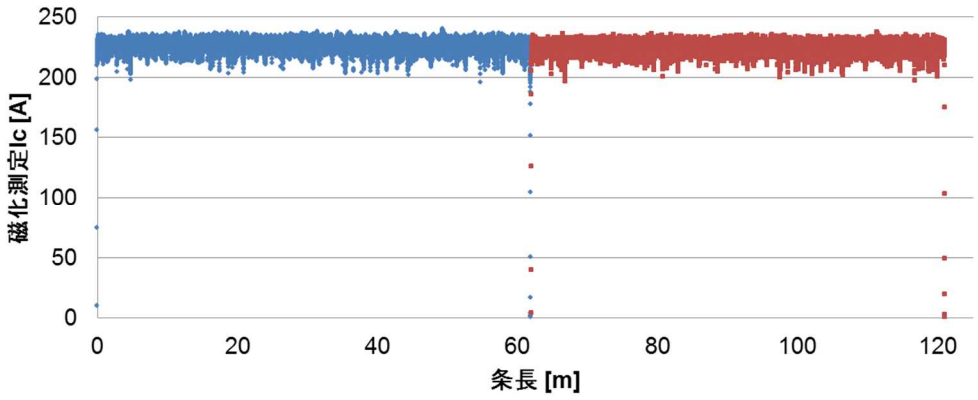


図 2.4.2.1-20 超音波洗浄前後の臨界電流分布特性

電流特性を低下させることなく、且つ線材全周に付着しているコンタミネーションを除去する方法として超音波洗浄方式が有効であることが解った。

(4)　1km 級試作線材における臨界電流の低下率

ア.　長尺人工ピン導入線材の長手方向超電導特性分布

前項までに示した特性分布低下要因解析、並びに改善の検討を実施した上で得られた長尺試作線材について、長手方向の臨界電流（I_c）特性分布を磁化法により評価した。図 2.4.2.1-21 は、プロジェクト2年目の 2017 年度に試作した 600m 級の線材試料の超電導特性分布であるが、大きな局所劣化なく作製可能となって、全長における臨界電流低下率は0．136と目標をクリア出来ている。

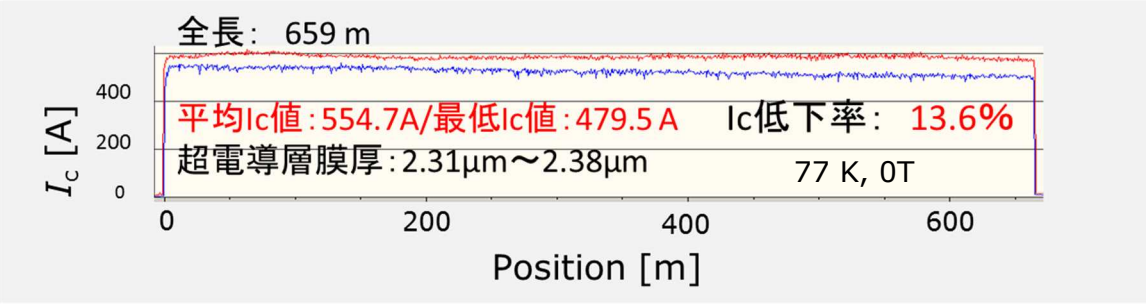


図 2.4.2.1-21　600m 長 $BaMO_3$ 添加 Y 系線材の長手方向特性分布

次に図 2.4.2.1-22 は、プロジェクト最終年度の 2018 年度に実施した 1km 級の試作線材の長手方向特性分布を示す。若干の特性低下箇所は見られるが、全測定値の平均値に対してその最小値の低下率を算出すると、それぞれ 0.16 及び 0.18 となり、目標の0．15をほぼ達成した。

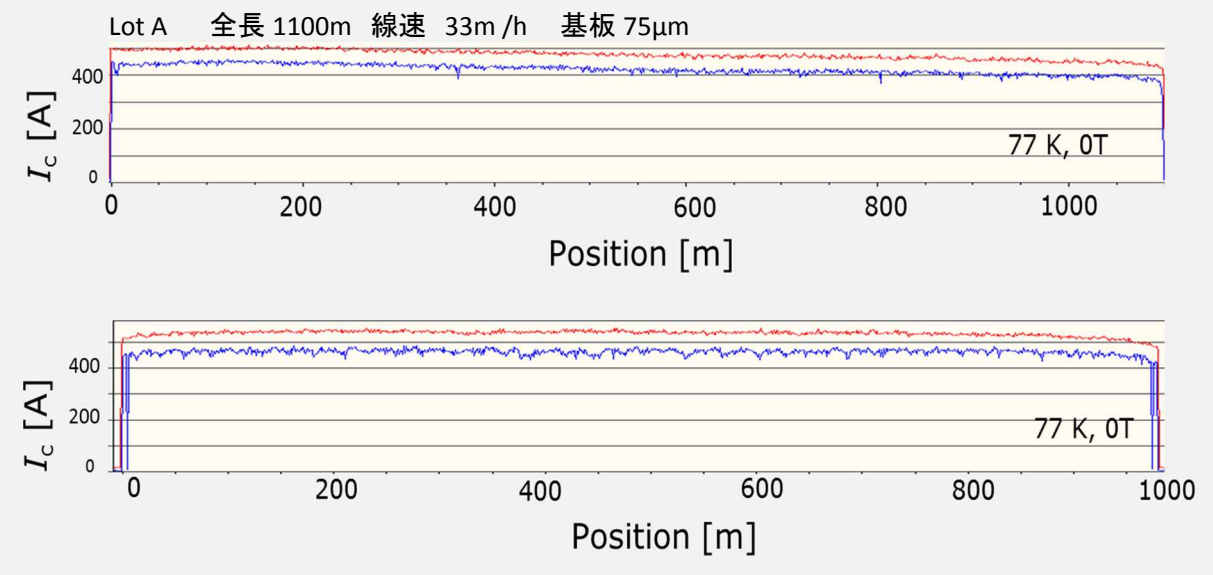


図 2.4.2.1-22　1km 長の $BaMO_3$ 添加 Y 系高温超電導線材の長手方向特性分布

イ．　特性低下部分の特徴と目標達成状況

1km 長線材の長手方向特性分布の特徴を解析するために、図 2.4.2.1-22 下に示したロット B 試料について、端部から 100m 長区間ごとに平均 I_c 値と最小 I_c 値の確認を行った。その結果、表 2.4 .2.1-1 に示すように、全長で評価される低下率とは別に定義された各区間低下率として、その最小 I_c 値にて同区間の平均 I_c 値で除算して評価して見ると、大半の区間では臨界電流低下率は0．15以下となったが、0.16 となる箇所が 1 か所あることがわかった（区間③）。全長での最小 I_c 値は表の⑨にあたる区間で得られた最小 I_c 値 426A と同一であるが、⑨区間内での低下率は 0.15 に止まった。

図 2.4.2.1-23 に、図 2.4.2.1-22 のロット B に相当する 100m 長各区間における 1km 長線材の長手方向 I_c 特性分布を示す。ここに示すように、平均値から数十%も低下するような劣化ポイントは 1km 長に於いてほぼ排除されたことがわかる。しかしながら、100m 区間で唯一 0.15 以上の低下を示した低 I_c 部を図中に示すように拡大してみると、緩やかに変動する I_c 特性に数 mm 長程度の小さな 0.10 程度の局所低下部が重畳していることが解る。

このように 0.10 程度の低下部が 1km 長で 1 か所程度のため、現状の I_c 特性均一度に於いてほぼ目標値の均一性が得られた。今後、局所特性低下部を排除するためのプロセス改善にあたり、緩やかに変動する特性分布について、膜厚の安定性や基板温度安定性等を中心とする蒸着条件変動の改善を進めることで、1km 級の線材長における安定的な製造技術に目処を得ることができた。

表 2.4.2.1-1　100m 長各区間における平均 I_c 値、最小 I_c 値、I_c 値低下率

	平均Ic値 (A)	最低Ic値 (A)	Ic低下率 (%)	
①	504	430	15	
②	513	443	14	
③	515	435	16	
④	511	433	15	
⑤	512	434	15	
⑥	509	433	15	
⑦	508	434	15	
⑧	506	443	12	
⑨	501	426	15	➡ 全長での最小 Ic 値
⑩	488	430	12	

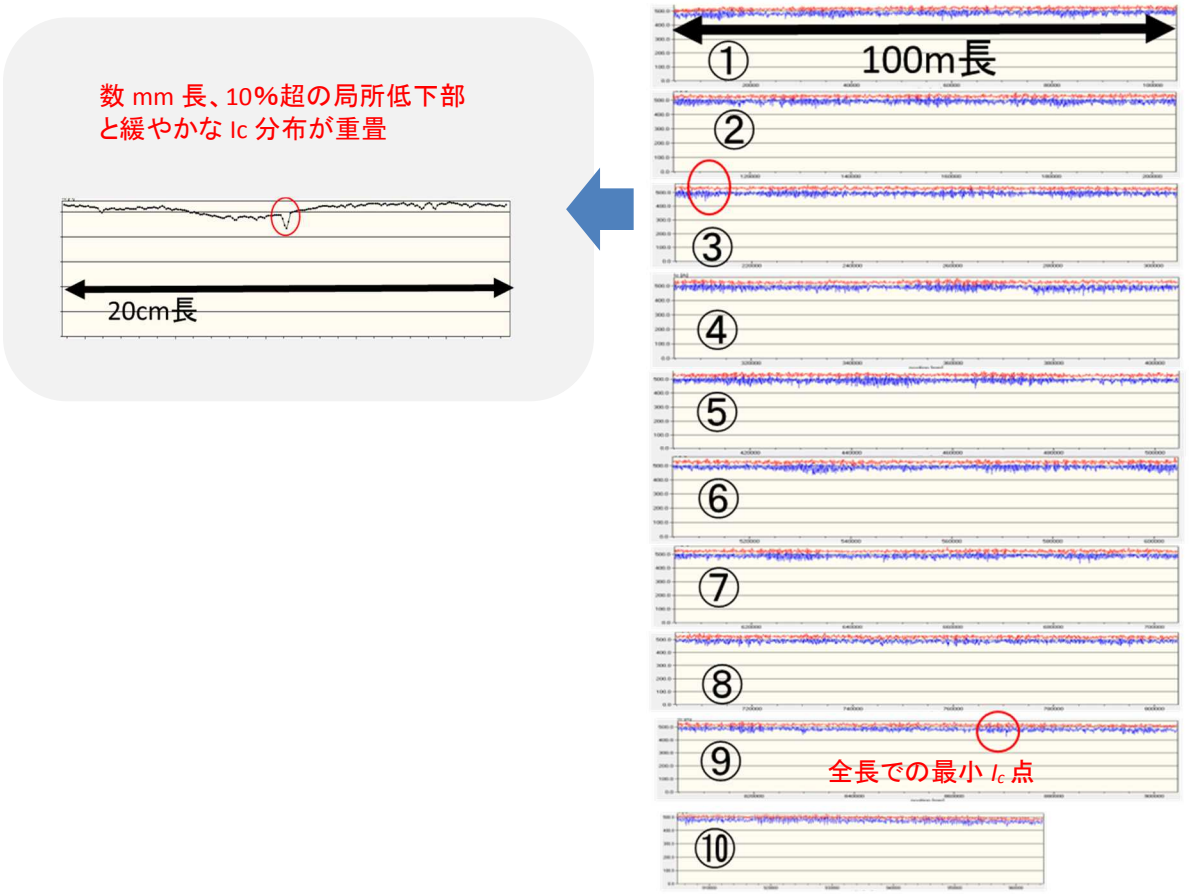


図 2.4.2.1-23　100m 長各区間における 1km 長線材の長手方向 I_c 特性分布

(5)　2.4.2.1 項のまとめ

ア. Y 系超電導線材により積層パンケーキ巻線構造の高温超電導高磁場コイルの実現を念頭に置き、単長 1km の線材にて超電導特性分布の均一性を示す指標である臨界電流の低下率を 0.15 以下とした。

イ. 長尺 Y 系超電導線材の臨界電流の低下率のネックとなる局所的特性低下箇所について、磁気光学観察法を用いてその画像解析を実施し、様々な要因でプロセス中のコンタミネーションや超電導層の破壊が生じていること等を特定した。

ウ. 製造工程で製造中に入り込む各種のコンタミネーション等を低減すべく、クリーン化設備等を導入し、局所的特性低下因子を排除することで超電導特性の長尺均一性を改善した。

エ. 1km級線材に於いて、臨界電流の低下率を 0.15 以下とする長尺線材の製造技術に目途を得た。

参考文献

[2.4.2.1-1]　Z.W. Lin, et al., ″Magneto-optical visualization of magnetic processes in superconducting strip with the application of magnetic fields and currents″, IEEE Transactions on Applied Superconductivity (Volume: 14 , Issue: 3 , Sept. 2004), p.p.1959-1965, 2004

[2.4.2.1-2]　T. Machi et al., ″ Development of a magneto-optical imaging equipment for long length 2G-HTS tapes ″, Physica C, vol. 445-448, p.p. 673-676, 2006

2.4.2.2 線材信頼性評価技術開発 （フジクラ、九州大学共同実施）

(1) 基礎的機械特性の評価 （フジクラ）

Y 系高温超電導線材を使用した機器を作製、運転する際には線材に様々な機械的負荷が印加される。そのため、線材の信頼性を確保する上で様々な方向の力に対する線材特性挙動を把握することが重要である。本項では、Y 系高温超電導線材の基礎的な機械特性評価として、長手引張方向や線材厚さ方向(剥離方向)に対する線材信頼性評価技術開発を図った結果について述べる。

ア. 引張試験

超電導コイルを励磁すると、熱的応力やフープ応力と呼ばれる線材長手引張方向の大きな電磁力が働くため、Y 系高温超電導線材の長手引張方向に対する超電導特性の把握が重要である。そこで、Y 系線材を液体窒素(LN_2)中で引張負荷を印加可能で、同時に臨界電流(I_c)が測定可能な試験装置を作製し I_c の引張負荷依存性を調べた。

試験装置の概要を図 2.4.2.2-1 に示す。測定ジグは LN_2 中に浸漬されており、電極を兼ねたチャック(つかみ治具)で線材を挟み込み、引張試験機で引張負荷を印加する。そのときの荷重と歪は、引張試験機に取付けたロードセルと線材に貼り付けた歪ゲージによって測定した。I_c は試験前(I_{c0})、引張負荷印加時(I_{cl})と負荷除荷時(I_{cu})で測定し、それを繰返しながら歪に対する I_c 特性を測定した。図 2.4.2.2-2 に繰り返し応力付加に伴う規格化した I_c の歪み依存性を示す。

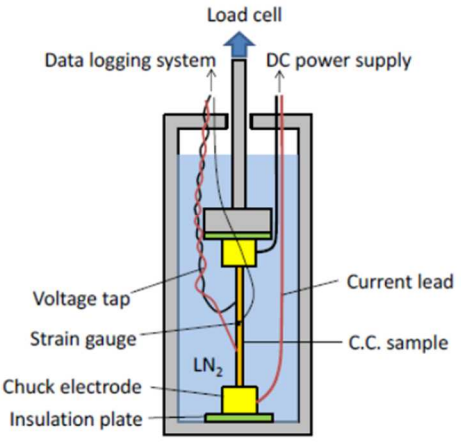


図 2.4.2.2-1 LN_2 中引張試験装置

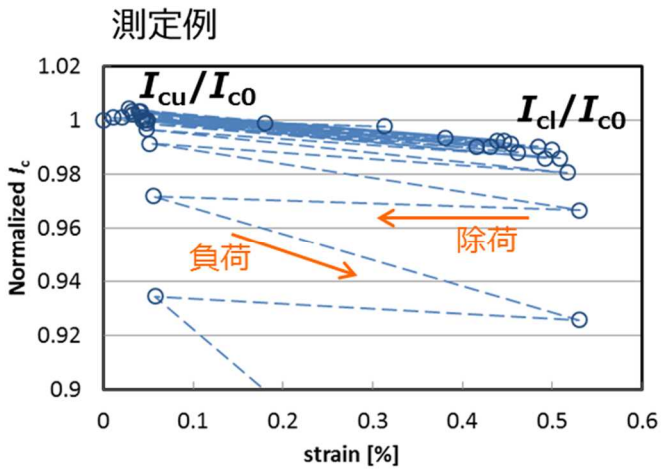


図 2.4.2.2-2 LN_2 中引張試験の概要

除荷時、規格化した I_c-応力-歪特性結果例を図 2.4.2.2-3 に示す。この図は複数の同一構造の線材サンプルを試験した結果を重畳して示している。負荷印加前の I_{c0} に対する負荷除去時の I_{cu} の比率が99%以下になる条件(不可逆歪)が各試料でほぼ同一であり、ばらつきは小さい。

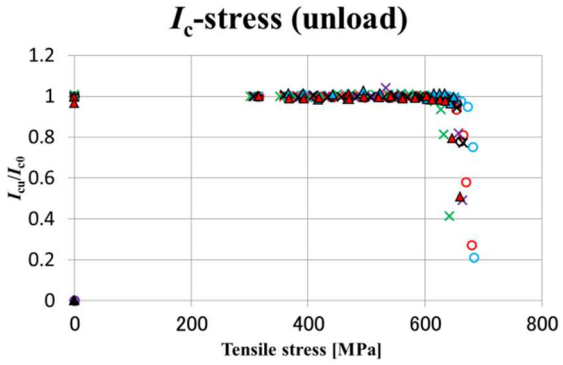


図 2.4.2.2-3　LN_2 中引張試験結果（I_c の歪依存性）

これを定量的に示すために、試験した 55 サンプルの結果をワイブル解析し、不可逆応力に対して累積破壊確率をプロットした結果を図 2.4.2.2-4 に示す。強度のワイブル平均は 620 MPa であり、ばらつきを表す指標である m 値（大きいほどばらつきが小さい）は 32 であった。この m 値は比較的大きな値であり、Y 系高温超電導線材の引張強度のばらつきは小さいことがわかった。

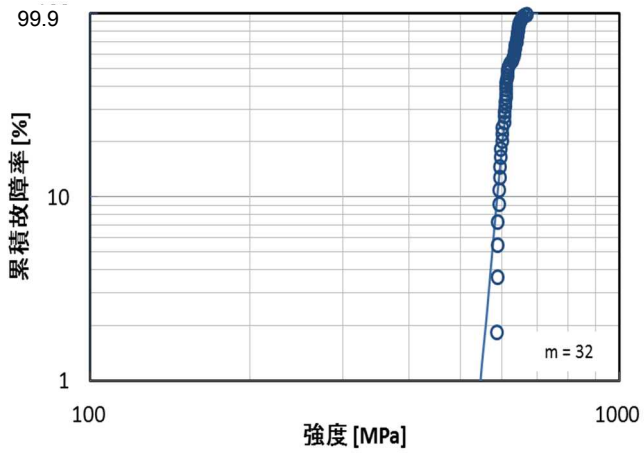


図 2.4.2.2-4　LN_2 中引張試験結果のワイブル解析

イ.　アンビル剥離試験

超電導コイルは一般的に電磁力に対する剛性を高めたり、冷却のための伝熱パスを確保する目的で、コイルを樹脂で含浸する場合が多い。Y 系高温超電導線材をパンケーキコイル状に巻き線して、樹脂で含浸した場合、含浸樹脂と Y 系線材との熱収縮差により、冷却時に Y 系線材には厚さ方向（剥離方向）の熱応力が加わる。しかしながら、一般に Y 系線材は剥離方向の強度が弱く、ばらつきも大きいことが報告されている。そこで、ばらつきも含めた剥離強度を評価するため、アンビル剥離試験[2.4.2.2-1]、及び、後述する樹脂含浸コイル形状サンプル試験の二種類の方法で剥離強度の評価技術の確立を図った。

図 2.4.2.2-5 に示すように上下の銅製ブロック（アンビル）で線材を挟み、はんだ接合した試験サンプルを多数作製した。このようなサンプルを LN_2 中に浸漬し、引張試験機により上下方

向(線材表面に垂直方向)に荷重を印加し、破断強度を測定した。線材と上側アンビルとの接合面積は 4 mm×8 mm = 32 mm^2 とし、計 670 個のサンプルを試験した。

試験結果をワイブル解析し、破断応力に対して累積破壊確率をプロットした結果を図 2.4.2.2-6 に示す。ワイブル平均値は 35 MPa であり、 m 値は 3.26 であった。ア. で述べた長手引張に対する m 値に比べて小さい値となっており、強度ばらつきが非常に大きいことがわかった。

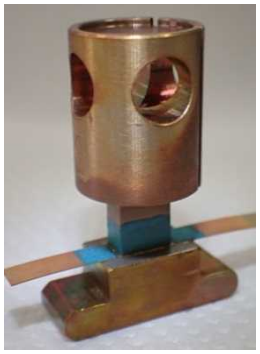


図 2.4.2.2-5　アンビル剥離試験サンプル

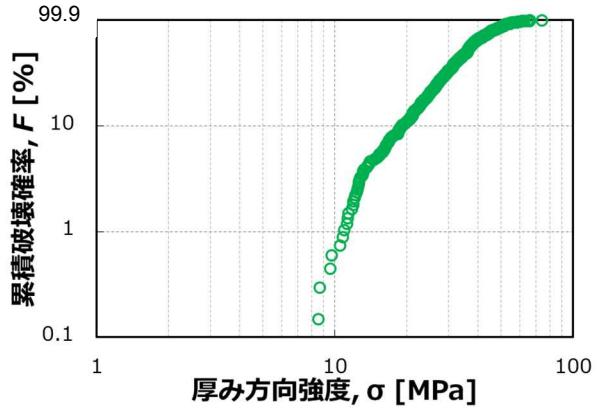


図 2.4.2.2-6　LN_2 中アンビル剥離試験結果のワイブル解析

ウ.　樹脂含浸コイル形状サンプルによる剥離強度評価

Y 系線材の剥離強度は、応力を印加する面積によって値が大きく異なり、上述したアンビル剥離試験のような短尺サンプルから得られた剥離強度と、樹脂含浸コイル形状で劣化する剥離応力とでは大きな乖離がある。アンビル剥離試験では剥離応力印加面積を大幅に広げることには限界が有るため、樹脂含浸コイル形状サンプルを作製し、冷却時の熱応力を利用して線材に剥離応力を印加(以下、含浸コイル試験と称す)することで、その剥離強度を評価した。

直径 φ30 mm の巻枠に Y 系線材をエポキシ樹脂および絶縁テープと共に巻線し、加熱硬化することで樹脂含浸コイルサンプルを作製した。コイルは LN_2 で冷却し、I–V 特性を測定した。コイルが冷却時の剥離応力により劣化したかどうかの判定基準は、I –V 特性の電圧挙動を累乗近似した際の指数である n 値がクライテリア(n 値 = 20)よりも下回った場合とした。冷却時のコイル内の線材剥離方向の熱応力[2.4.2.2-2]は、コイルの内径(ID)と外径(OD)の比(OD/ID)のみによって決まるため、OD/ID が適当な剥離応力となるようにコイルターン数を調整した。実際に印加される剥離応力は、有限要素法(FEM)による数値計算にて算出した。この含浸コイル試験の手法では、コイルを冷却して、OD/ID に応じた剥離応力が線材に印加された際の、剥離による線材特性劣化有無の情報しか得られないため、コイルが劣化した破壊した時点の剥離応力が判らず、アンビル剥離試験のようなワイブル解析ができない。このため、同一の OD/ID を有する多数のコイルを評価することで、その劣化発生の割合から累積破壊確率を求める手法で、ワイブル解析を行って強度を評価した。

コイルの破壊確率(*F*)と、コイル内の剥離応力の最大値(σ_c)の関係を図 2.4.2.2-7 に示す。剥離応力の増加に従ってコイル劣化確率が増加していることがわかる。上述したように、線材剥離強度は応力が印加される面積に依存するため、本試験のコイル劣化確率はコイルに使用した線材長に依存する。本試験での剥離応力が異なる(すなわち OD/ID が異なる)コイルはその線材長が異なるため、図 2.4.2.2-7 の結果を単純にワイブル解析することはできない。また、コイル内の線材に働く剥離応力は線材長手方向に分布を有する。このような場合、寸法効果および応力分布を考慮したワイブル解析を実施する必要がある。寸法効果および応力分布を考慮したワイブル分布は下記の式 2.4.2.2-1、式 2.4.2.2-2 式で表される。

$$F(\sigma_c、\ S) = 1 - \exp\left[-\frac{S_E}{S_0}\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_0}\right)^m\right] \qquad (2.4.2.2\text{-}1)$$

$$S_E = \int_S \left(\frac{\sigma(x)}{\sigma_c}\right)^m dS \qquad (2.4.2.2\text{-}2)$$

ここで、F はコイルの累積破壊確率、σ_c はコイル剥離応力の最大値、σ_0 はワイブル尺度係数、m はワイブル形状係数であり、S_0 は単位面積 1mm^2 とし、S_E は有効面積と呼ばれる。(2)式で求まる有効面積は、有限要素解析によって計算した剥離応力分布を用いて積分した。

ワイブル解析により単位面積あたり累積破壊確率に変換したワイブルプロットの結果を図 2.4.2.2-8 に示す。上述のアンビル剥離試験の結果も単位面積で規格化した値をプロットしている。アンビル剥離試験と含浸コイル試験の結果が一致していることから、短尺の剥離試験の結果と実際のコイルの劣化確率は、その面積が大きく異なるために強度差があるのであって、面積を考慮することで両者の強度特性は一致することがわかった。

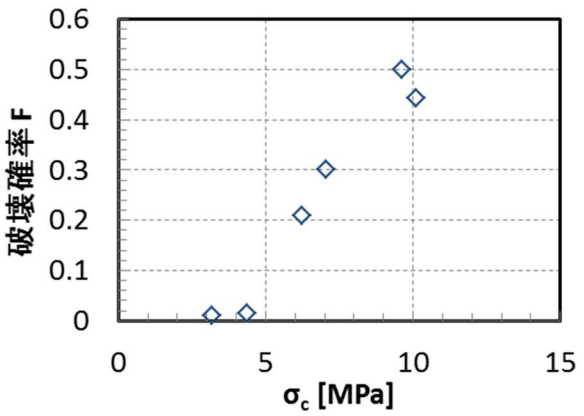


図 2.4.2.2-7　剥離応力に対するコイル劣化確率

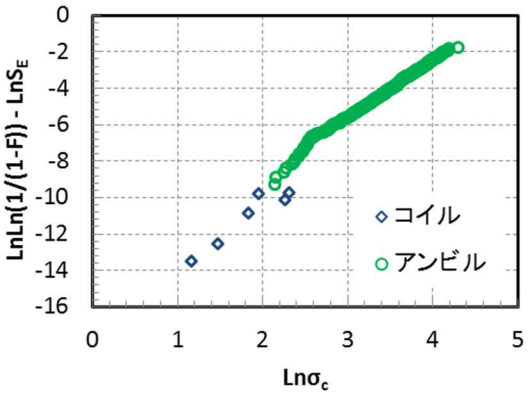


図 2.4.2.2-8　含浸コイル試験結果とアンビル剥離試験のワイブルプロット

エ．　室温および LN_2 中における疲労試験

（ア） 疲労係数

Y 系 線材表面に垂直な剥離方向の破壊強度は、超電導層に直接力が印加される静的強度のほか、疲労現象による強度低下の有無を把握する必要がある。剥離方向の破壊挙動は、層状（lamellar）構造を有する Y 系高温超電導層や中間層を含むセラミックス層の内部または界面の疲労現象に支配されると考えられるため、疲労特性を把握する必要がある。

疲労による破断時間t_cと負荷応力σの関係は、

$$t_c \propto \sigma^{-N} \qquad (2.4.2.2\text{-}3)$$

で表される。ここで Nは疲労係数と呼ばれ、疲労特性を特徴づけるパラメーターであり、N値が大きいほど疲労が進展しにくい。一般に N は環境温度に依存し、低温ほど N 値が大きいとされるが、超電導線材の N 値を求めた例はない。そこで、室温(約 293K)と低温(LN_2 温度；77K)で疲労係数 Nを求めることを目的とした。

（イ） 静疲労試験と動疲労試験

疲労係数 Nを求めるため、二種類の疲労試験を実施した。ひとつは静的な負荷を印加し、破断時間を測定する静疲労試験を実施した。負荷と破断時間の関係式(2.4.2.2-3)から疲労係数を求めるものである。この試験は室温でのみ実施し、図 2.4.2.2-9 に示すスタッドピンとよばれる直径 φ2.7 mm のピンを線材中央に接着剤で固定する。クリープ試験機で一定の静的荷重を印加した状態で破断までの時間を計測した。

二つ目は荷重を負荷する速度を変え、その負荷変化速度と強度の関係から疲労係数を求める動疲労試験[1.4.2.2-3]を実施した。試験は 2.4.2.2 (1) イ．項で述べたアンビル試験によって行い、室温中と液体窒素（LN_2）中の環境でそれぞれ疲労係数を求めた。疲労係数を求める際には初期強度のばらつきも含めて解析する必要があるため、疲労の項を考慮したワイブル解析式式（2.4.2.2-4）で解析を行った。

$$ln(ln(1-F)^{-1}) = \frac{m}{N-2}\{(N+1)\,ln\,\sigma - ln\,\alpha\} + C(N) \qquad (2.4.2.2\text{-}4)$$

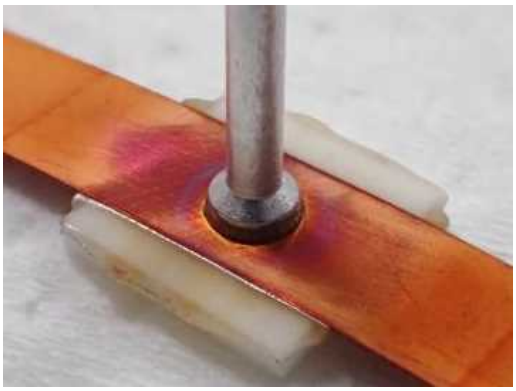


図 2.4.2.2-9　スタッドピンによる静疲労試験片

静疲労試験の結果を図 2.4.2.2-10 に示す。この結果から N 値を求めると 22.6 となった。この値はこれまで報告されている通常のセラミックス材料の疲労係数と同程度の値であった。

動疲労試験の結果を図 2.4.2.2-11 に示す。実線は実測値を式(2.4.2.2-4)でフィッティングした結果である。このフィッティングにより N 値を求めると、室温(約 293K)で N = 23.0、LN_2 温度(77K)で N = 150 となり、室温の N 値が静疲労試験の結果とほぼ同一となった。また、LN_2 中の N 値は非常に大きく、LN_2 温度程度の低温ではほとんど疲労現象が進展しないことがわかった。

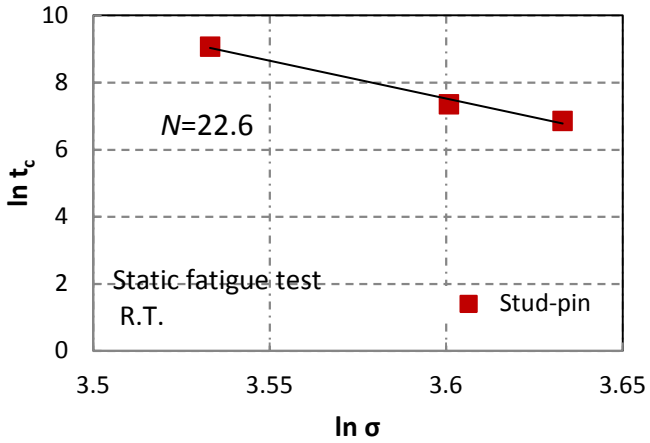


図 2.4.2.2-10　静疲労試験結果

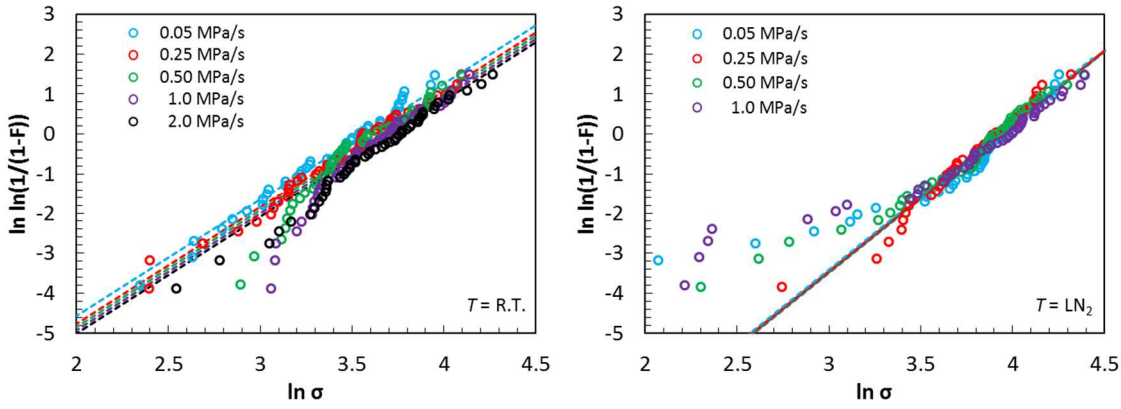


図 2.4.2.2-11　(左) 室温(約 293K)の動疲労試験結果、(右) LN2 温度(77K)の動疲労試験結果

オ．　中間温度における動疲労試験

前項では室温と LN_2 中でアンビル剥離試験による静疲労試験を実施し、疲労係数 N 値が室温では N～20、LN_2 温度では N～100 という値が得られ、疲労係数は温度により変わることがわかった。室温と LN_2 温度の中間の温度での疲労係数が求められればその温度の影響が概ね解釈でき、特定の温度範囲でのヒートサイクル環境等で疲労特性が解明に繋がる。特殊な荷重条件を負荷する信頼性試験装置として、恒温槽付き引張試験装置を導入し、室温と LN_2 温度の中間の温度においてアンビル剥離試験による動疲労試験を実施した。

試験装置の模式図を図 2.4.2.2-12 に示す。N_2 ガスにより温度調節が可能な測定用恒温槽を引張試験機に取り付けたものである。アンビル剥離試験用サンプルは 2.4.2.2 (1)イ. 項の図 2.4.2.2-5 と同様のものであるが、上側アンビルとの接合面積は 2 mm×4 mm = 8 mm^2(線材幅方向が 2 mm、線材長手方向が 2 mm)とした。試験槽の温度を-10 ℃±2 ℃に調整し、加重負荷速度を変化させて剥離試験を行った。解析方法は前項と同様である。

中間の温度である-10 ℃(263K)におけるアンビル剥離動疲労試験の結果を図 2.4.2.2-13 に示す。この温度での疲労係数として N = 167 が得られた。前項の LN_2 での結果と近い値であり、充分に大きい値である。従って-10℃(263K)ではほとんど疲労しないことが明かになった。前項の結果と併せて、疲労係数の結果を表 2.4.2.2-1 にまとめる

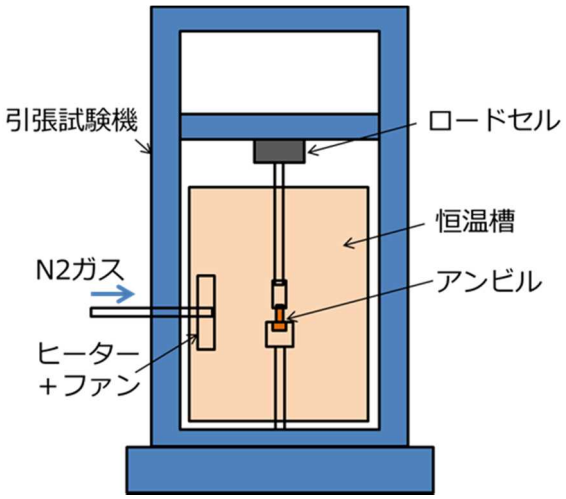


図 2.4.2.2-12　中間温度における動疲労試験装置　模式図

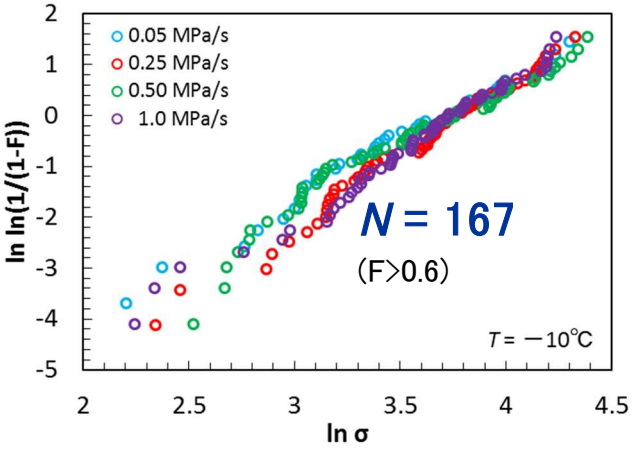


図 2.4.2.2-13　−10℃(263K)における動疲労試験結果

表 2.4.2.2-1　疲労係数の比較

.	室温 (約 293K)	−10℃ (263K)	LN_2 (77K)
静疲労	N=22.6	−	−
動疲労	N=23.0	N=167	N=150

(2) 静的疲労特性評価 (フジクラ)

ア. 液体窒素中における長期応力負荷試験

2.4.2.2 (1) エ. 項で示した線材剥離方向の動疲労試験の結果より、極低温環境における剥離応力に対する疲労係数は非常に大きいことが解った。このため、線材に長期間剥離応力を印加し続けても、時間経過とともに劣化が発生する確率は極めて小さいことになる。本項では、実際のコイル状サンプルを用い、長期間の応力負荷線材信頼性評価装置により、樹脂含浸コイル形状サンプルを長期間冷却することで剥離応力を長期間線材に印加する試験を実施した。樹脂含浸した超電導コイルでは、冷却時にコイル形状(OD/ID、内径対外径比)に依存した線材剥離方向の熱応力(剥離応力)が作用する。従ってコイルを冷却し続けていれば剥離応力が作用し続けることになるため、長期間冷却し続けることで剥離応力に対する静疲労特性を確認することができる。

試験に用いたコイル形状サンプルは、2.4.2.2 (1) ウ. で述べた樹脂含浸コイルと同じものであり、その試験において劣化を生じなかったサンプルを用いた。コイル内径は φ 30 mm、OD/ID = 1.8 で、この剥離応力の計算値は最大 9.6 MPa である。試験では同じ寸法の 5 個のコイルを一度に試験した。試験装置の模式図を図 2.4.2.2-14 に示す。試験槽に上記複数個

のコイルを格納して液体窒素（LN_2）を充填し、液面計と電磁弁による液体窒素自動供給により LN_2 による浸漬冷却状態を維持するものである。定期的にコイルの I_c、及び、劣化の指標として定義した I-V 特性を累乗近似した際の指数（n 値）を測定し、コイル形状サンプルの劣化有無を調査した。

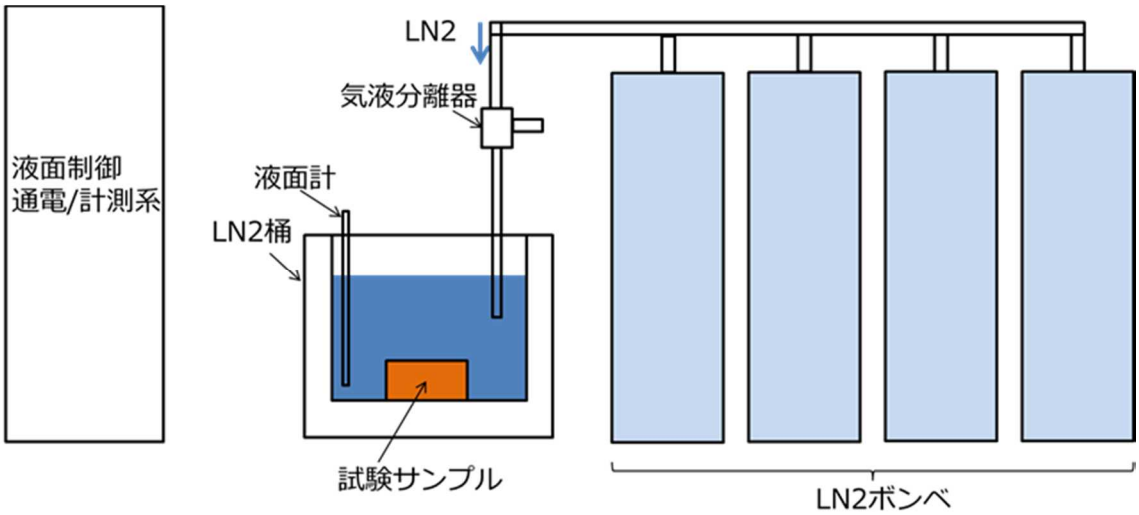


図 2.4.2.2-14　線材長期応力負荷信頼性評価装置　模式図

コイル I_c と n 値の時間変化を図 2.4.2.2-15 に示す。今回、1700 hr まで試験を実施したところ、コイル形状サンプルに劣化は確認されなかった。長期間の剥離応力印加における短尺サンプル試験結果の通り、静疲労による劣化は確認されなかったことから、短尺試験の妥当性が検証できた。

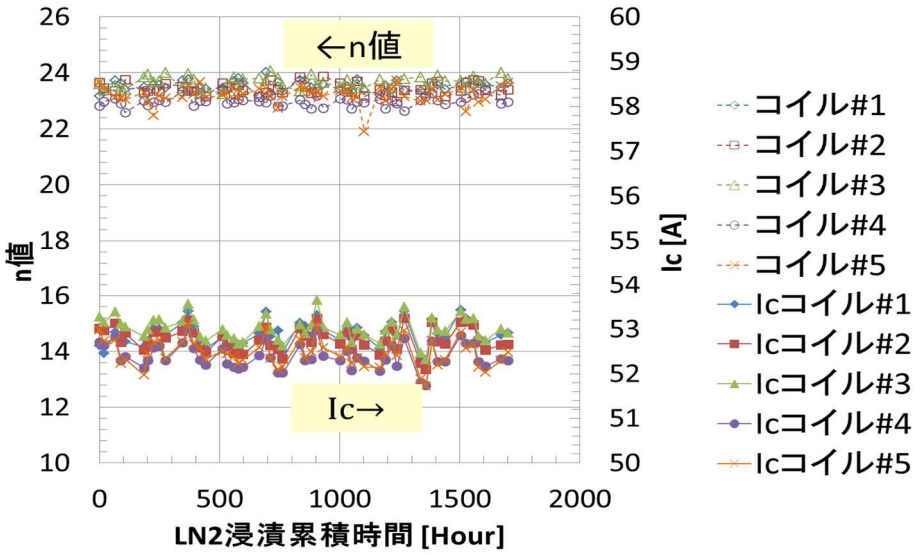


図 2.4.2.2-15　樹脂含浸コイル形状サンプルの長期冷却による I_c、n 値の変化

(3) 動的疲労特性評価 （フジクラ）

ア.　繰り返し引張応力試験

前項までに剥離応力に対する各種条件での疲労試験結果を述べたが、実際の高温超電導高磁場コイルの使用環境では、励消磁に伴うフープ応力と呼ばれる電磁力により、線材に長手方向の引張応力が繰り返し印加されることから、線材長手方向の引張応力に対する疲労特性は非常に重要である。そこで、線材繰り返し引張応力信頼性評価装置により、Y 系線材の1,000,000 回程度の繰り返し引張試験を行い、その疲労特性を評価した。

試験装置の模式図を図 2.4.2.2-16 に示す。油圧サーボ式の疲労試験機、LN_2 槽、引張試験治具、通電試験装置で構成される。Y 系線材を 2.4.2.2(1) ア. で述べた引張試験治具と同様のものに取り付け、LN_2 に浸漬し、サーボ油圧駆動(最大 12 Hz)による制御で繰返し引張応力を印加する。線材には電圧端子と電流端子を取り付けておき、繰り返し回数 1 回、100 回、1000 回、10000 回、以後 10 万回毎に引張負荷除荷時の I_c(I_{cu})を測定し、劣化を検出できるようにした。図 1.4.2.2-17 のような正弦波の応力を線材に印加し、応力比($R = \sigma_{max}/\sigma_{min}$)を固定して、$\sigma_{max}$ を変化させた。

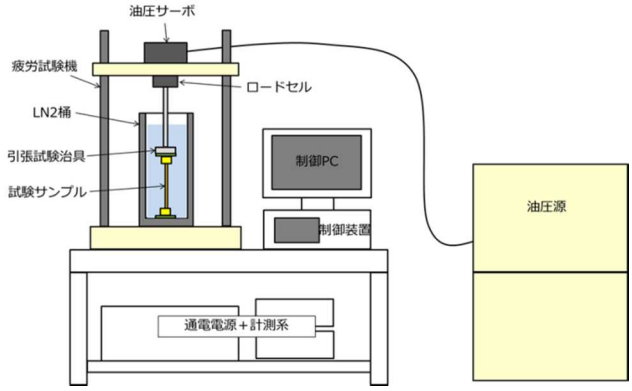


図 2. 4. 2. 2-16　線材繰り返し引張応力信頼性評価装置　模式図

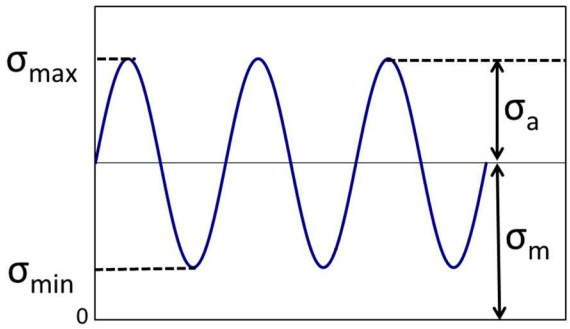


図 2.4.2.2-17　繰返し応力印加の模式図

図 2.4.2.2-18 に、応力比 $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 0.3$ とした際の、I_c の繰返し引張回数依存性を示す。線材の単発引張試験の強度は、1.4.2.2(1) ア. 項で示したように 600～650 MPa 程度である。繰り返し数が 10 万回を超えると単発試験の強度よりも低い応力範囲における有限回数で I_c の劣化または線材破断が生し、疲労破壊が確認された。ただし、550 MPa 以下では 100 万回まで特性劣化や破断は見られなかった。図 2.4.2.2-19 に、劣化または破断した繰返し回数と、その時の最大印加応力 σ_{max} の相関を示す。

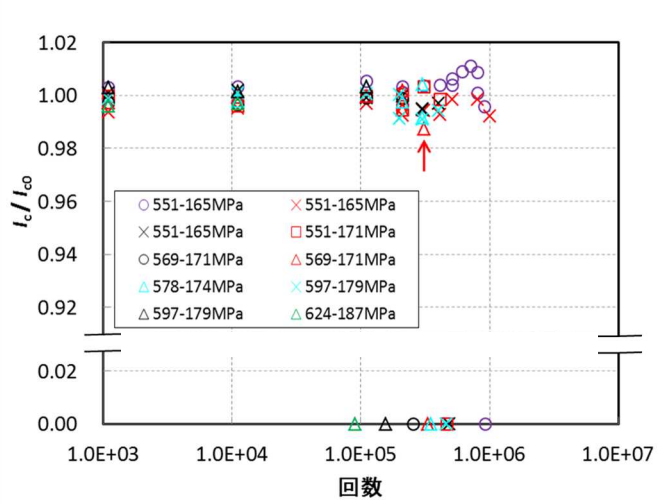


図 2.4.2.2-18　規格化した I_c の繰返し引張回数依存性（$R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 0.3$）

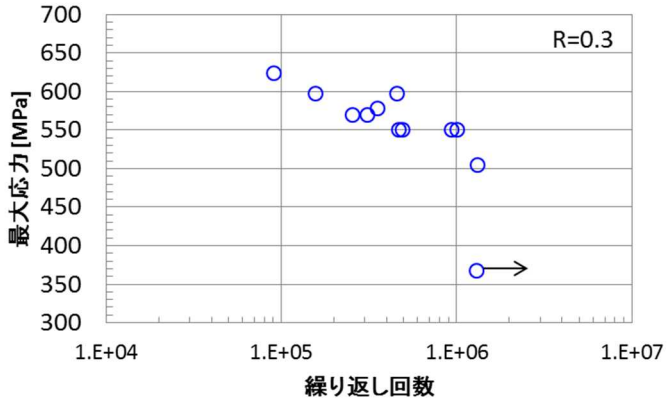


図 2.4.2.2-19　繰返し引張回数と最大印加応力の関係

イ. 含浸コイル化ヒートサイクル試験

超電導コイルの実使用環境のひとつに、極低温と室温間の冷却および昇温、即ちヒートサイクルがある。2.4.2.2 (2) の結果から、コイルを冷却し続けていれば疲労による劣化は極めて生じにくいが、室温では疲労係数 N は低温環境ほど大きくないため、ヒートサイクルによる熱負荷が繰り返されると、疲労による劣化の可能性が考えられる。そこで、線材ヒートサイクル負荷信頼性評価装置により、樹脂含浸コイル形状サンプルにヒートサイクルによる繰返し熱負荷を与え、劣化有無を検証した。

評価には 2.4.2.2 (2)で述べた Y 系高温超電導線材をコイル形状とした樹脂含浸コイルサンプルと同様のものを 5 個用いた。試験装置の模式図を図 2.4.2.2-20 に示す。冷却には LN_2 蒸発ガスを用い、昇温にはヒータで加温した N_2 ガスを用いた。ヒートサイクル温度は、本方式で冷却可能最低温度の-160℃ (113K) とし、図 2.4.2.2-21 に示すように、室温 (293K) と-160 ℃を 20K/min の昇降温速度で 5 サイクル程繰返し、その後液体窒素に浸漬してコイル I_c を測定した。実際の試験時の温度プロファイルを図 2.4.2.2-22 に示す。

コイル I_c および n 値のヒートサイクル回数による変化を図 2.4.2.2-23 に示す。今回、102 回のヒートサイクルを実施したところ、コイルサンプルに劣化は確認されなかった。

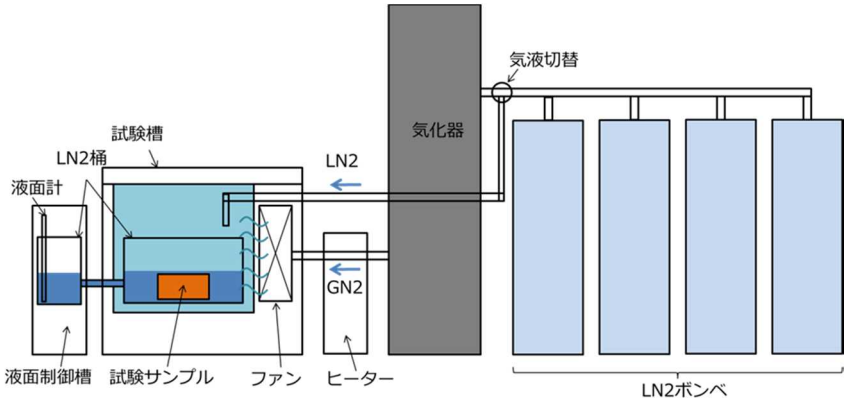


図 2.4.2.2-20　線材線材ヒートサイクル負荷信頼性評価装置　模式図

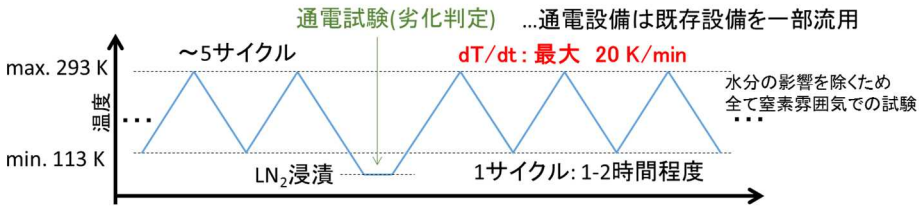


図 2. 4. 2. 2-21　ヒートサイクル温度履歴概念図

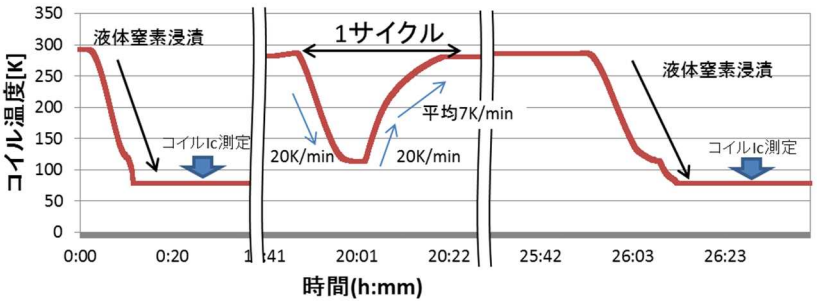
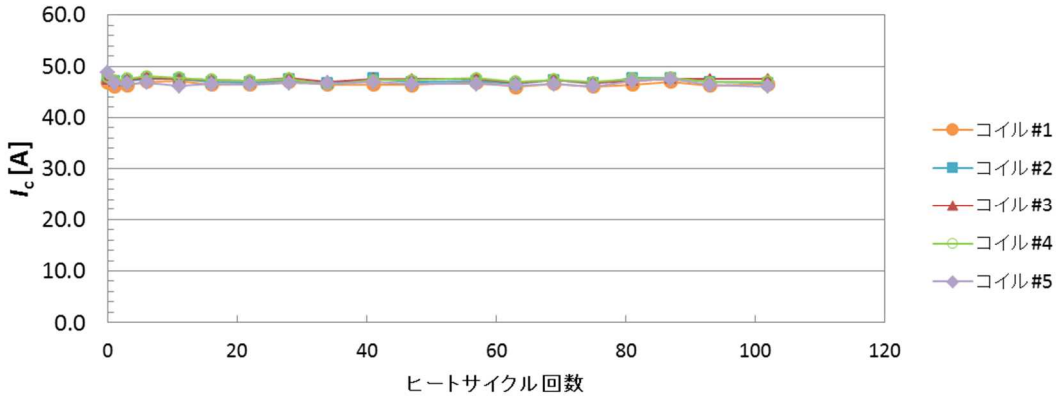


図 2.4.2.2-22　線材ヒートサイクル負荷試験の温度プロファイル(実測値)



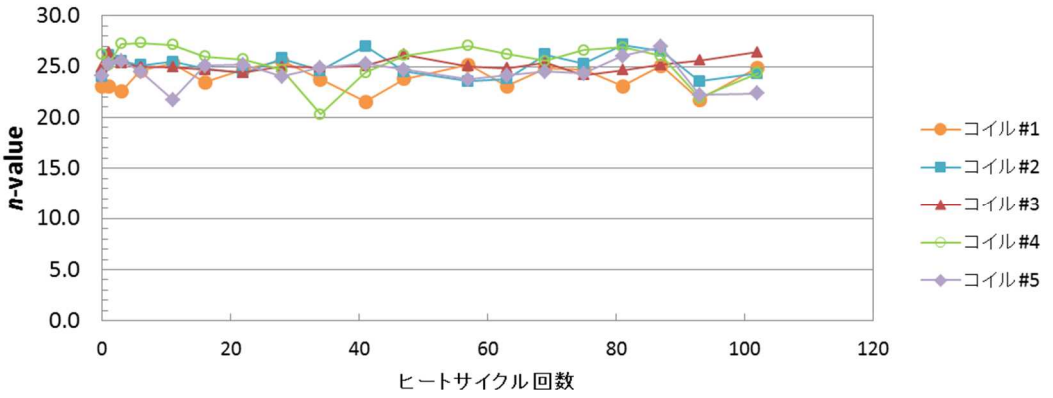


図 2.4.2.2-23　線材ヒートサイクル負荷試験結果（上：I_c 変化、下：n 値変化）

(4) 外部磁場中複合負荷機械特性評価 （フジクラ）

高磁場を発生する超電導コイルでは、強大なフープ応力（$F_{Hoop}=B\times J\times R$、ここで B は磁束密度、J は電流密度、R は線材巻線半径）と呼ばれる電磁力がコイル自身に作用し、超電導線材には長手方向の単純引張荷重以外にも様々な応力が印加される。従って、複雑な応力下において Y 系高温超電導線材の劣化特性を把握することは高磁場コイル応用上極めて重要である。そこで、磁場中でコイル形状サンプルに大電流を通電して電磁力を印加し電磁力を線材に印加し、線材の特性変化の可能性を調査した。

磁場中で超電導コイルに大電流を通電するためには、コイルの臨界電流を充分に大きくする必要がある。また、冷凍機冷却で大電流を通電するためには、コイル通電時の発熱と外部からの熱侵入を充分に抑えた電流経路を確保し実現する必要がある。これを達成するために、外部磁場中線材複合負荷機械特性測定装置を導入した（図 1.4.2.2-24）。この装置は 1 台の 2 段 GM 冷凍機と 1 台の単段 GM 冷凍機、1 対の HTS 電流リードを備える。

本装置に、内径 150mm、11 ターン×2 層の 2 層コイル形状サンプルを取付けて通電を行った。コイルは内径 140mm、外径 150mm の GFRP 製巻枠にポリイミドテープを 2 重ラップ巻した絶縁 Y 系高温超電導線材を巻線した。コイル形状サンプルの内層には電流導入用の銅電極を取り付け、サンプル最外周で銅板はんだ付けにより電極を接続した。その後、エポキシ樹脂による真空加圧含浸固定を行った。コイルの外観を図 2.4.2.2-25(a)に示す。コイル外周面には歪ゲージを貼り付けた。樹脂含浸したサンプルは、伝導冷却のための真鍮製フランジに取り付け、コイルの中心にホール素子を（図 2.4.2.2-25(b)）、フランジには温度センサを設置した。コイルを図 2.4.2.2-25(c)のように設置し、真空引きの後に冷却を行った。

磁場の印加は、自社設備である大口径(室温ボア径 200 mm、磁場 5T)の Y 系高温超電導マグネット装置を使用した。サンプルを取り付けて冷却し、この状態でコイル形状サンプル中心位置で 5 T になるよう外部マグネットを励磁し、サンプルに電流を通電した。サンプルに 334 A まで通電した結果を図 2.4.2.2-26 に示す。通電に伴いコイル電圧に多数のスパイクノイズが見られたが、コイル外周に取り付けた歪ゲージが不連続的に変化しているため、電磁力によりコイルの含浸樹脂にクラックが入りコイル形状サンプルが不連続的に変形したものと考えられる。

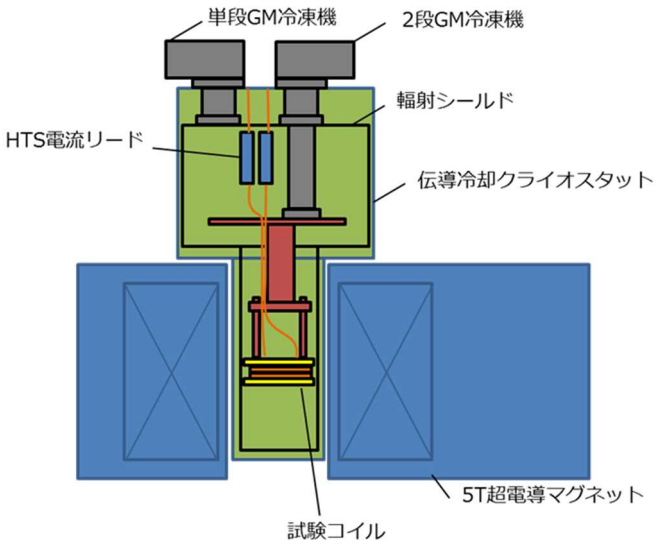


図 2.4.2.2-24　線材外部磁場中複合負荷機械特性信頼性測定装置　模式図

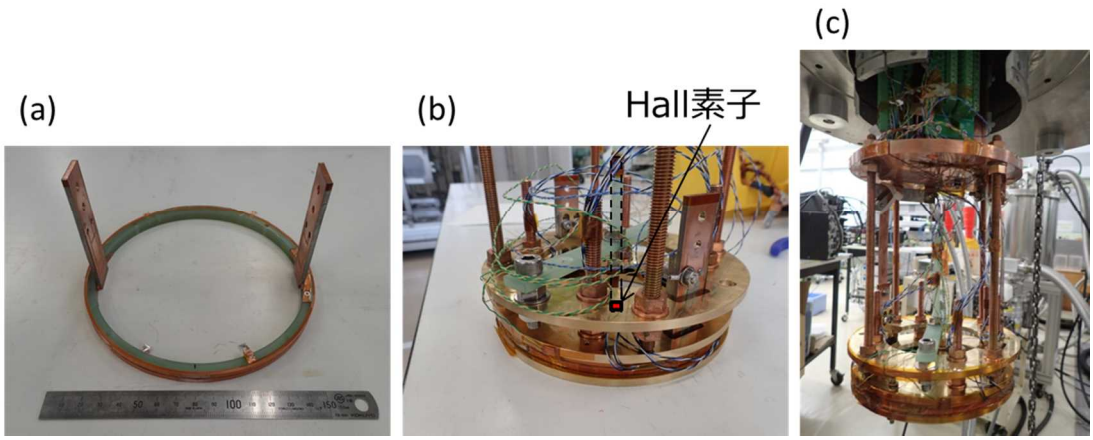


図 2.4.2.2-25　　(a)作製したコイル形状サンプル外観、
(b)サンプルにフランジおよびホール素子を取り付けた様子、
(c)サンプルを測定装置に取り付けた様子

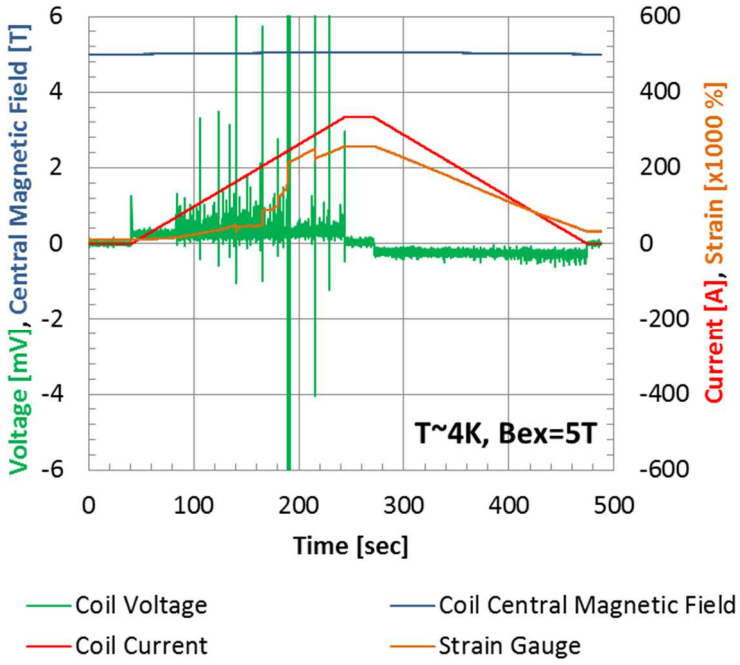


図 2.4.2.2-26　5T 外部磁場中でのコイル通電試験結果

334 A で電流値を一定に維持したところコイル電圧は発生せず、コイルは劣化しなかった。このとき、コイル外周で計測された実際の歪は約 0.25 %であった。

このときのフープ力（F_{Hoop}）により線材に発生する応力（σ_{Hoop}）を、銅である安定化層を含む Y 系高温超電導線材で応力を負担するので（低強度のポリイミド絶縁層や含浸樹脂層は応力分担せず無視できる）、その電流密度換算で応力を見積った。

この結果、コイル最内層のコイル軸方向の磁場は B = 5.86 T、線材の通電電流密度 J = 759 A/mm^2、コイル内半径 75 mm より、σ_{hoop} = 334 MPa であった。

実機相当の MRI 用高磁場コイルに印加される引張方向の電磁力として 180MPa 程度が試算 されているため、334 MPa のフープ力に耐えることが確認されたことで、充分なマージンを持っていることが確認された

(5) 信頼性評価における非破壊特性分布測定技術　(九州大学共同実施)

ア. 非破壊特性分布測定原理

Y 系高温超電導線材は、幅広のテープ形状を有していることから、高磁場コイル応用に際して、多くの場合パンケーキコイルとして巻線して用いられる。この時、特に内径対外径比が大きくなると、冷却時の熱応力によってテープ面に垂直に剥離応力が作用し、線材特性の劣化に繋がることが報告されている。したがって、高温超電導コイル用線材の信頼性評価技術として、巻き線時の積層された線材内における欠陥の有無や、欠陥位置の検出が重要となる。本技術開発では、コイル形状に巻線された線材の健全性を、非破壊かつ非接触に評価する手法の開発を目的とした。

国立大学法人九州大学は、着磁した線材の作る磁気を二次元的に検出することにより素線の欠陥を可視化する技術:走査磁気顕微法(SHPM)を既に開発し、超電導層の局所欠陥の検出に有効である事を明らかとしてきた。さらに本手法を応用して、積層超電導導体内の欠陥を非破壊かつ非接触で検知する観測技術を有している。本技術開発では、パンケーキコイル巻線時の高温超電導線材の信頼性評価技術として展開し、(株)フジクラにおいて作製した線材を小型含浸巻線サンプルとし、信頼性試験時の熱応力により劣化を観察することによって、線材信頼性評価適用可能性を検証した。

図 2.4.2.2-27 に模式的に示すとおり、パンケーキコイル巻線の一部は、線材を積層したサンプルによって模擬することが出来る。

ここで、図 2.4.2.2-27 右に示す様な積層導体を着磁した際に、表面に生じる磁場分布について考える。均一な超電導線の素線を積層した場合は、隣り合う素線の作る磁場が打ち消し合うことから、垂直磁場(z 軸)成分は巻線上ではほぼゼロとなり、コイル端部でのみ逆符号の大きなピークを生じる。一方、素線に欠陥部位が存在すると、局所的にその部位の磁気モーメントは小さくなり、等価的に逆方向の磁気モーメントが作る磁場が重畳されることから、積層導体においても図 2.4.2.2-28 に模式的に示すとおり、欠陥部位を境に符号が反転する信号が重畳されると考えられる。従って、積層方向(y 軸)に空間微分をとると、同図に示すとおり dBz/dy は欠陥直上においてディップを生じる。本原理を用いれば、積層導体内の欠陥位置をコイル表面の磁気像の観察によって可視化する事が可能となる。

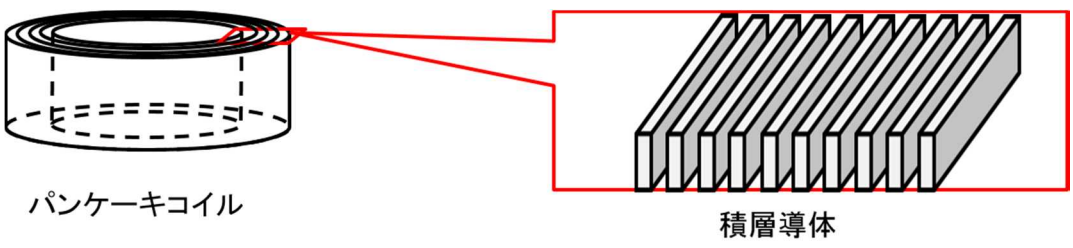


図 2.4.2.2-27　積層導体によるパンケーキコイル巻線部位の模擬

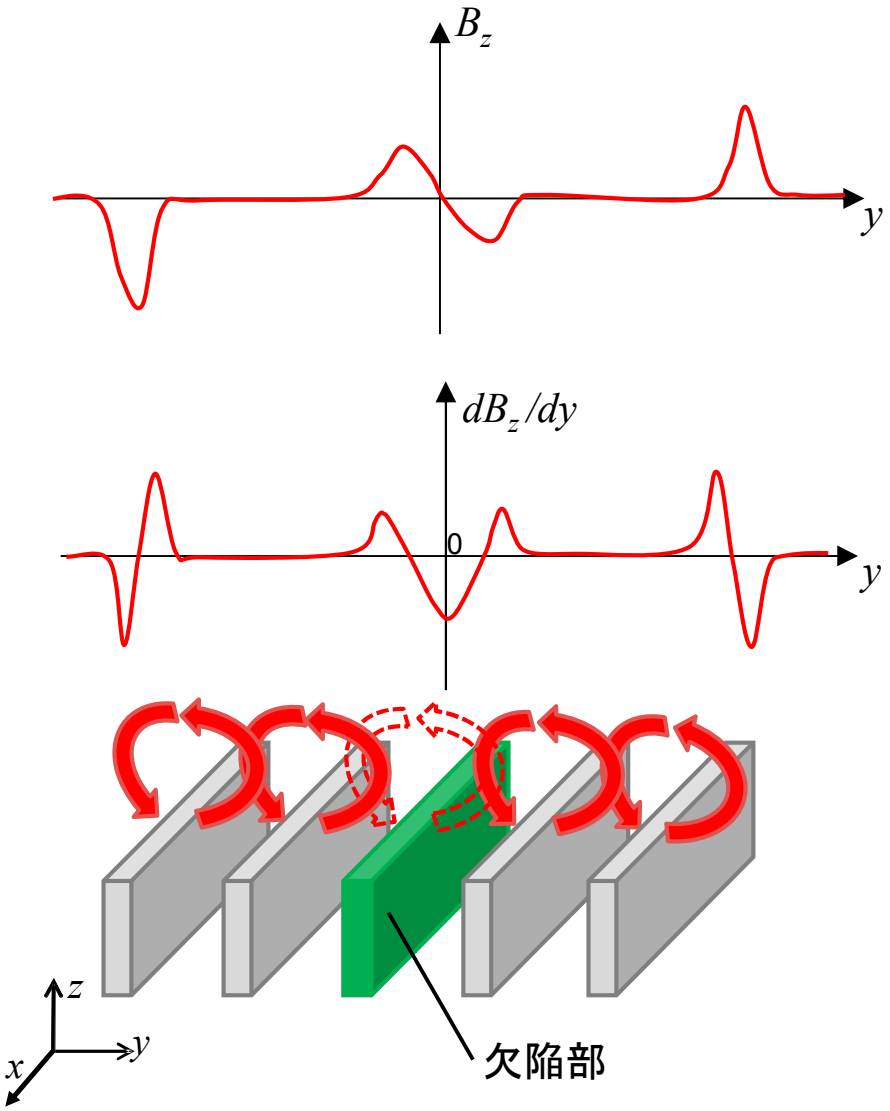


図 2.4.2.2-28　着磁した積層導体表面近傍の磁場分布の模式図

垂直成分 B_z、ならびに B_z の y 方向微分の分布と欠陥位置の関係

イ．原理検証測定

そこで、本測定手法の原理検証のため、超電導線材1枚分の厚さを有する金属板（超電導線材を構成するハステロイ ™ 基板）を Y 系超電導線材(GdBCO 線材) 積層導体内に挿入したモデル試料を作製した。図 2.4.2.2-29 に測定した積層模擬サンプル、および非破壊特性分布測定を行った結果を示す。線材1枚分の欠陥位置を明瞭に捉えていることが分かる。

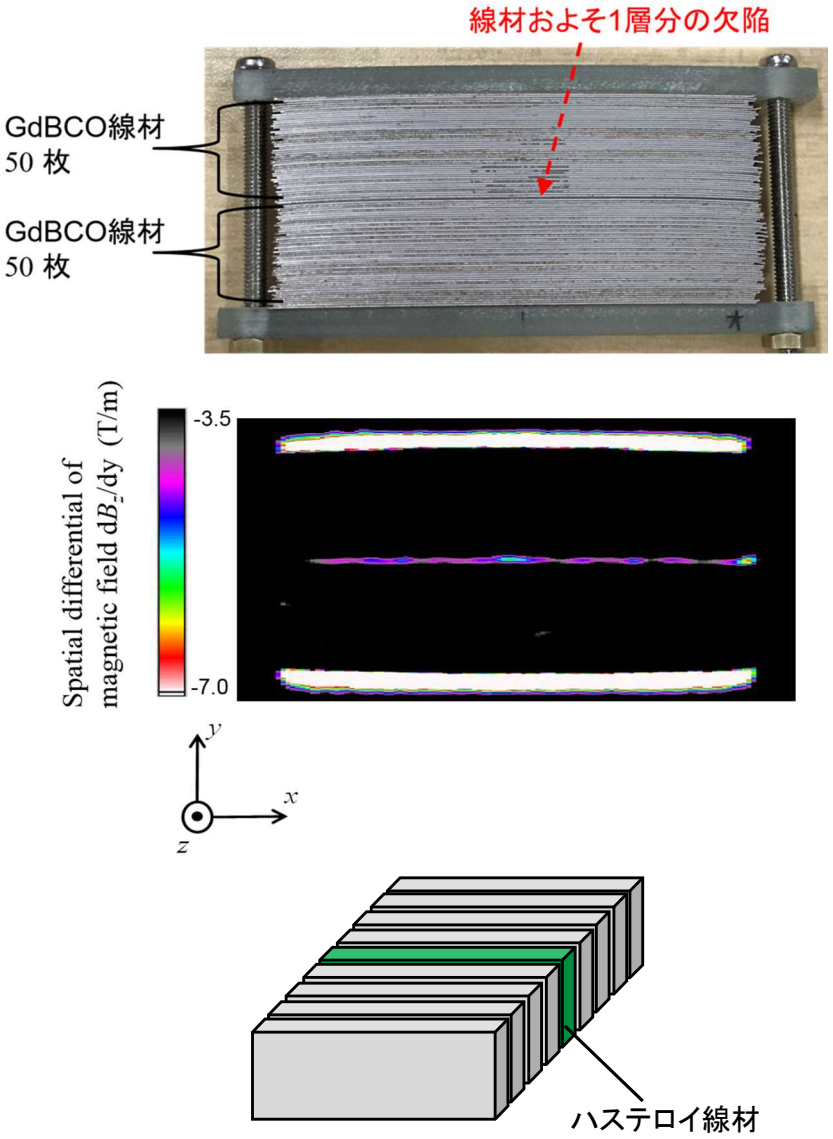


図 2.4.2.2-29　線材1枚分の欠陥層を有する模擬試料の非破壊特性分布測定結果

ウ．含浸コイル状線材サンプル測定

次に、2.4.2.2(5) ア．項に述べた非破壊特性分布測定法を用いて、2 種類のエポキシ樹脂含浸を施した線材のコイル形状サンプル評価を行った。サンプルの外観写真を図 2.4.2.2-30 に示す。いずれも、サンプル内径は 50 mm、外径は 100 mm である。右のサンプル(HL268)は、直流四端子法による臨界電流(I_c)測定の結果、I_c = 5 A、 n 値は 2 と、冷却の際の熱応力に起因していると考えられる信頼性評価試験により超電導特性が大きく劣化した線材サンプルである。一方、左のサンプル(HL263)は I_c = 95 A, n 値は 31 と信頼性評価試験後も良好な超電導特性を保っていた試料である。



図 2.4.2.2-30　非破壊特性分布測定試験に用いたエポキシ樹脂含浸測定サンプル

非破壊特性分布測定結果を図 2.4.2.2-31 に示す。磁気分布像が十字型になっているのは、x 方向と y 方向とに 2 度に分けて測定したことに起因している。測定サンプルの外径と内径の白ラインは、サンプル端部に起因する信号である。巻線内に周方向に筋状に観察される色の異なる部分が線材の欠陥位置を示している。直流四端子法による通電測定で大きな劣化が確認されたサンプル図 2.4.2.2-31 (b)の HL268 において、明らかに多くの欠陥部位の存在が確認出来る。しかしながら、良好な超電導特性を示す図 2.4.2.2-31 (a)の HL263 においても欠陥と思われる部位が 3 箇所ほど現れており、欠陥フリーでは無い可能性がある。この原因は今のところ明らかではないが、考えられる可能性として、今回の非破壊特性分布観察の際、複数回の冷却試験を行ったことから、その際の熱応力によって新たに欠陥が導入されたもの、あるいは、I_c の大きな低下を招かない程度の素線の端部の部分的な劣化が導入されていたことなどが考えられる。

以上より、高磁場コイルの巻線を模擬した積層導体サンプルにおいて、性能劣化微細部位の検出に成功した非破壊特性分布測定技術の、高温超電導高磁場コイル開発における線材信頼性評価検証技術への展開が強く期待される。

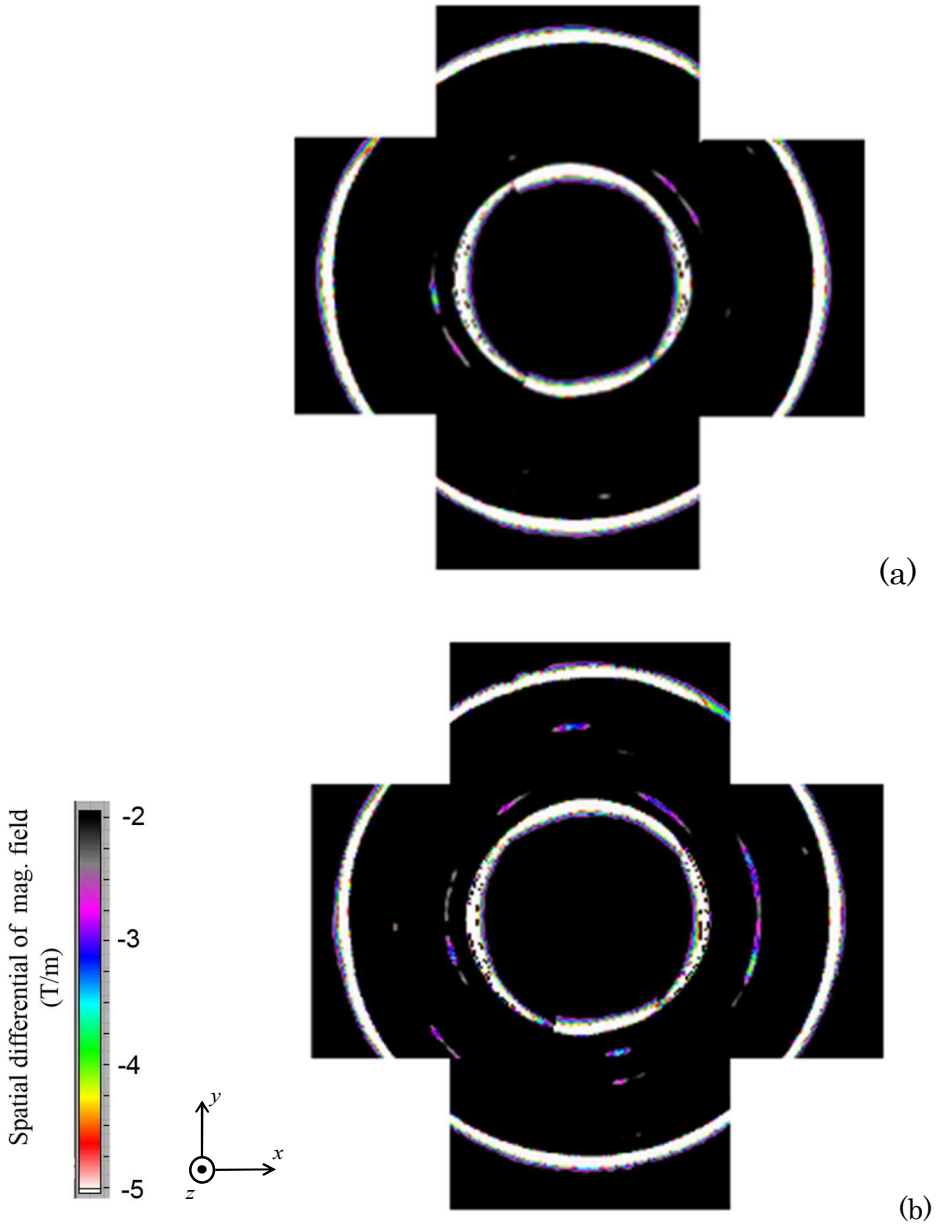


図 2.4.2.2-31　非破壊特性分布測法によるコイルの評価結果
巻線内の円弧状の筋状の部位が欠陥位置を示す
(a) HL263: I_c = 95 A, n = 31、(b) HL268: I_c = 5 A, n = 2

(6)　2.4.2.2 のまとめ

ア. 長尺線材の均一性、特に局所的特性低下部について、高温超電導線材の機械的強度と相関がある可能性があることから、評価の一環として機械強度の長手方向分布に関する検証ならびに長期信頼性の検証等を実施した。

イ. 基礎機械特性評価として、高温超電導線材の長手方向、並びに線材基板に垂直な方向の引張強度の評価をワイブル解析によって行った。その結果、長手方向引張強度は極めてバラツキが少ないことがわかった。

ウ. 線材基板に垂直な方向については、樹脂含浸コイル形状の巻線を冷却する方法によって長尺線材の試験評価を実施し、アンビル法による線材短尺サンプルとのバラツキの相関を評価した。その結果、垂直方向引張については一般的なセラミックスと同等の大きなバラツキが観測され、長尺になるにつれ低い強度での破壊の可能性が増えることがわかった。

エ. 疲労特性の評価として、線材基板に垂直方向の剥離強度の静疲労及び動疲労試験を実施した結果、疲労定数として常温で N=22～23 が共通して得られた。また液体窒素温度中と、-10℃において、動疲労試験を実施した結果、N=150～167 と非常に大きな値となり、疲労破壊がほぼ経時的に進展しないことが解った。

オ. 高温超電導線材の信頼性評価として、長手方向繰り返し引張強度試験を実施した結果、550MPa の引張応力に於いて1×10^{6}回の繰り返し応力負荷に耐えることを明らかにした。

カ. 信頼性評価試験として、含浸コイル巻線形状サンプルの長時間の冷却による静的疲労並びにヒートサイクルによる繰り返し応力負荷試験を実施した。その結果、9.6MPa の垂直引張剥離応力が線材基板の垂直方向に加わった状態で、1700 時間の連続負荷、並びに 20K/min の昇降温速度で 100 回以上のヒートサイクルに充分耐えることを確認した。

キ. コイル巻線形状サンプルでの信頼性評価試験として、線材に通電した状態における外部磁場中機械特性評価を実施した結果、フープ力 334MPa を印加した状態で特性劣化が生じないことを確認した。実機相当 MRI コイルに印加される引張方向の電磁力は 180MPa 程度と試算されているため充分なマージンをもっていることが確認された。

ク. 線材信頼性評価試験の一環として、ホール素子をスキャンさせる方法を用いた 2 次元的磁気測定技術の応用を検討し、含浸コイル巻線積層模擬サンプルの線材側面をホール素子にてスキャンすることにより、信頼性試験における熱負荷によって劣化した巻線サンプル中に発生した線材の特性低下箇所を見出すことに成功した。非破壊特性分布測定技術の、高温超電導高磁場コイル開発における線材信頼性評価検証技術への展開が強く期待される。

参考文献

[2.4.2.2-1] D. C. van der Laan, et al., Supercond. Sci. Technol., 20, 765-770 (2007)
[2.4.2.2-2] H. Miyazaki, et al,. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 25, no. 3, 6602305 (2015)
[2.4.2.2-3] D. Munz, et al., Ceramics: Mechanical Properties, Failure Behaviour, Materials Selection Springer Verlag (199

2.4.3 高磁場コイル用低損失構造線材の研究開発 （産業技術総合研究所、京都大学再委託）

現在量産されている高磁場コイル用 Y 系高温超電導線材はテープ形状であり、マグネットに適用した場合に遮蔽電流により逆向きの磁場が発生する。また、励磁などの電流通電時に発生する電磁気的な履歴損失と結合損失が大きいという課題がある。このため、スクライブ(分割)線材と撚線構造が有望である。そこで高磁場コイル用低損失構造線材の実現に向け、マグネット設計に必要なテープ線材の基礎物性測定、電磁応答シミュレーション、細線化のための2次元的組織均一化技術等の研究開発を実施した。

2.4.3.1 基礎物性測定 （産業技術総合研究所）

(1)目的

現在市販されている線材について、磁化の磁場依存性、熱伝導率、熱容量を測定することで、それぞれの臨界電流以外の線材特性を把握し、マグネット設計時の基礎データの収集を目的とする。

(2)実験方法

磁化測定については、高感度のSQUID（Superconducting Quantum Interference Device: 超電導量子干渉素子）を利用したカンタムデザイン社製MPMS3を用いて、温度依存性、および磁場依存性の測定を行なった。熱伝導率、および、熱容量の測定については、カンタムデザイン社製PPMSを用いて、測定を行なった。熱伝導率はヒートパルス法を用いた測定を行い、ゼーベック係数と電気抵抗も同時に測定することが可能であり、試料形状は図に示す通りである。

また、熱容量については、2τ モデルといわれる手法、つまり、試料を載せたプラットフォームの熱浴への熱緩和、およびプラットフォームと試料との間の熱緩和の両方を加味したモデルを用い、プラットフォームの全温度応答に対してフィッティングし、試料の熱容量を導出する手法を取っている。

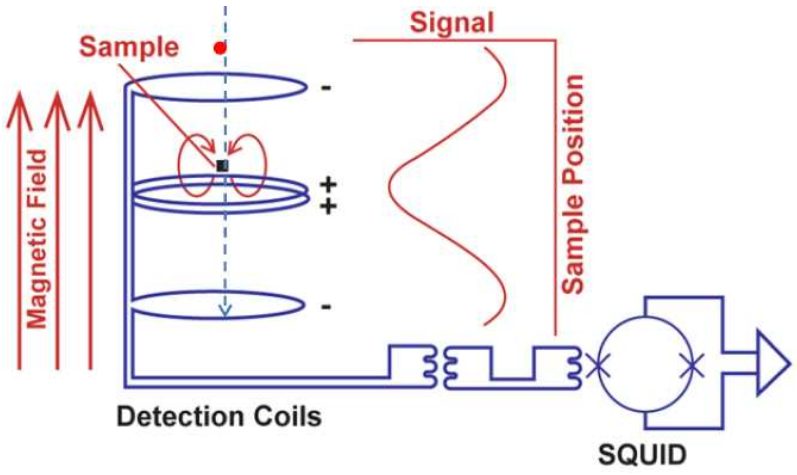


図 2.4.3.1-1 磁化測定の原理図

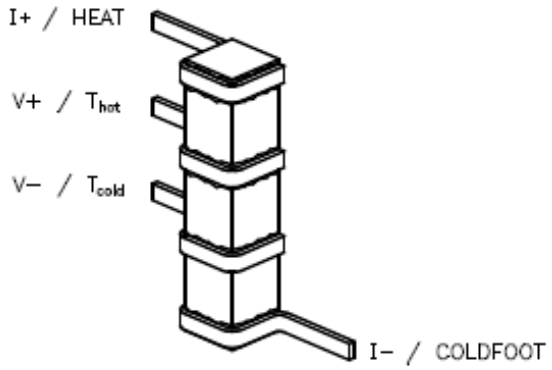


図 2.4.3.1-2 典型的な熱伝導率測定試料

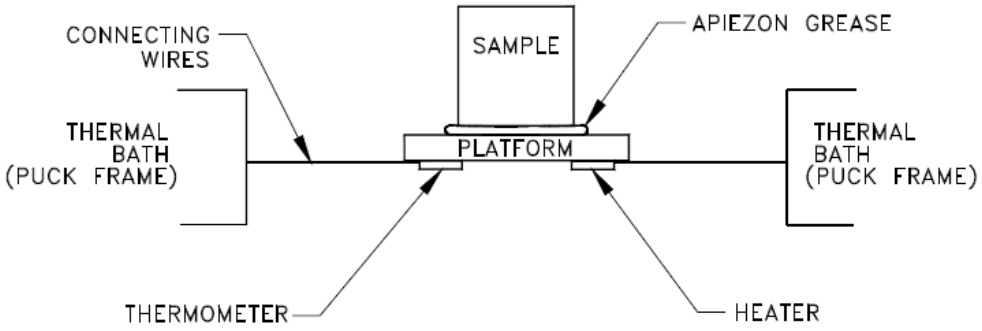


図 2.4.3.1-3 熱容量の測定試料配置

(3)測定試料

表 2.4.3.1-1 産総研製 Y 系線材

Lot.No.:P2R161216-1e
長さ:5.1 m
臨界電流:Ic=365.8 A(1.0 μ V/cm) @77K
線材幅:10 mm
超電導層:EuBCO-pure 膜厚～1μm
中間層:CeO_2(700nm)/$LaMnO_3$(～8nm)/MgO(～5nm)/Y_2O_3(～14nm)/$Gd_2Zr_2O_7$(～66nm)
基板:Hastelloy^{TM} (100μm)
安定化層:Ag のみ

表 2.4.3.1-2 フジクラ社製 Y 系線材

型番:FYSC-S12
臨界電流:Ic＞550 A @77K
線材幅:12 mm
超電導層:GdBCO-pure 膜厚～2μm
中間層:CeO_2/MgO/Y_2O_3/Al_2O_3
基板:Hastelloy^{TM}(75μm)
安定化層:Ag のみ

表 2.4.3.1-3 SuperOx 社製 Y 系線材

型番:ST-2-100
臨界電流:Ic= 87.3A(E,M), 66A(Cu1,2,3) @77K
線材幅:2 mm
超電導層:GdBCO-pure 膜厚～2μm
中間層:CeO_2(100-200nm)/ $LaMnO_3$(30-50nm)/MgO(～5nm)/$LaMnO_3$ or Y_2O_3(30-50nm) /Al2O3(～66nm)
基板:Hastelloy^{TM} (75μm)
安定化層:Ag(E,M),Ag+Cu(Cu1,2:sputter),Ag+Cu(Cu3:Electrolytic plating)

表 2.4.3.1-4 SuperPower 社製 Y 系線材

Type:SCS2030-AP, 10um Cu QS
M4-362-12 0304(64.69-74.80m)
長さ: 10.11 m
線材幅: 2.0 mm
臨界電流:Ic ＝58 A
HTC Layer: Y 系
基板:Hastelloy^{TM} (30μm)
安定化層: 10 microns of Cu (5μm each side) and 10 microns of SnPb

それぞれの線材測定の狙いは、

・産総研、フジクラ線材では金属（ハステロイ TM）基板の厚みの違いの比較

・SuperOx 線材では、銅安定化層の有無での比較

・SuperPower 線材では、金属（ハステロイ TM）基板が薄く、人工ピン有り線材の特性

を知ることにある。

(4)　磁化

磁化測定は、超電導以外の特性を調べるために、超電導の反磁性の信号が少ない *ab* 面内に平行に磁場を印可して測定を行った。

産総研製 Y 系線材の磁化測定結果を下記に示す。温度依存性のデータから、常磁性に特徴的な温度依存性を示していることが分かる。超電導転移点で磁化のヒステリシスが発生し、常磁性の磁化に超電導のシグナルが加わっていることが分かる。磁場依存性については、同じく、常磁性物質の上に、超電導に由来する反磁性の信号が加わった結果が得られている。

フジクラ社製線材については、同じ磁場では産総研製の線材とほぼ同じ磁化の値を示していることが分かる。超電導のシグナルについては、膜厚が約 2 倍であることもあり、フジクラ線材の方が大きな信号が出ていることが分かる。また、フジクラ線材については、線材の横方向の違いを確認するため、12mm 線材の中心部と端部を切り取って測定したが、若干、端部の方が超電導のシグナルが大きい結果が得られた。

SuperOx 社製の線材の結果からは、銅メッキの有無により超電導のシグナルの大きさが異なるが、重さにより規格化しているため、銅の重量増が超電導のシグナルが小さく見える要因となっている。

SuperPower 社製線材については、基板が薄く、磁化の絶対値が小さくなっていることが分かる。それに伴い、単位重さ当たりの超電導のシグナルの割合が大きくなっている。また、参考までに、H//c軸に磁場を印可した結果も示す。超電導に由来する反磁性が大きく、基板の情報がほぼ消えていることが分かる。

ア.　産総研製Ｙ系線材の磁化測定結果

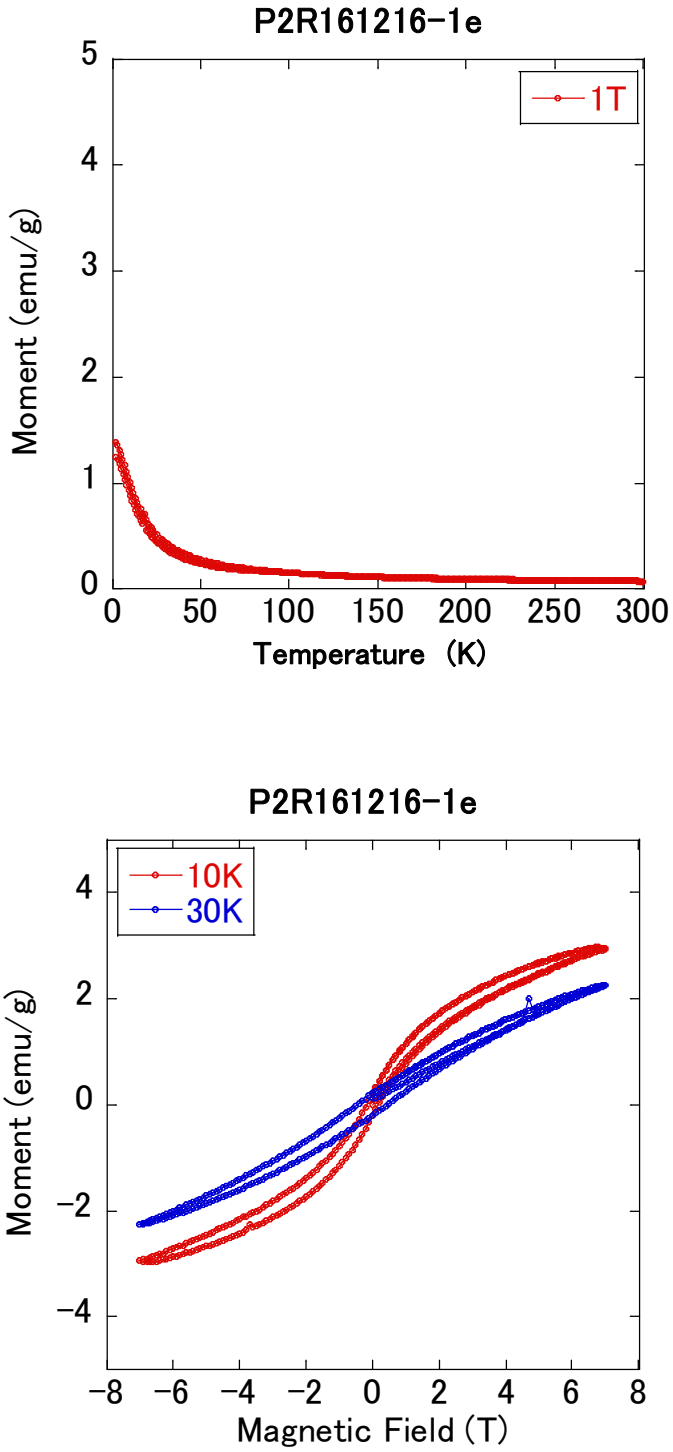


図 2.4.3.1-4　産総研製Ｙ系線材の磁化測定結果

イ． フジクラ社製 Y 系線材

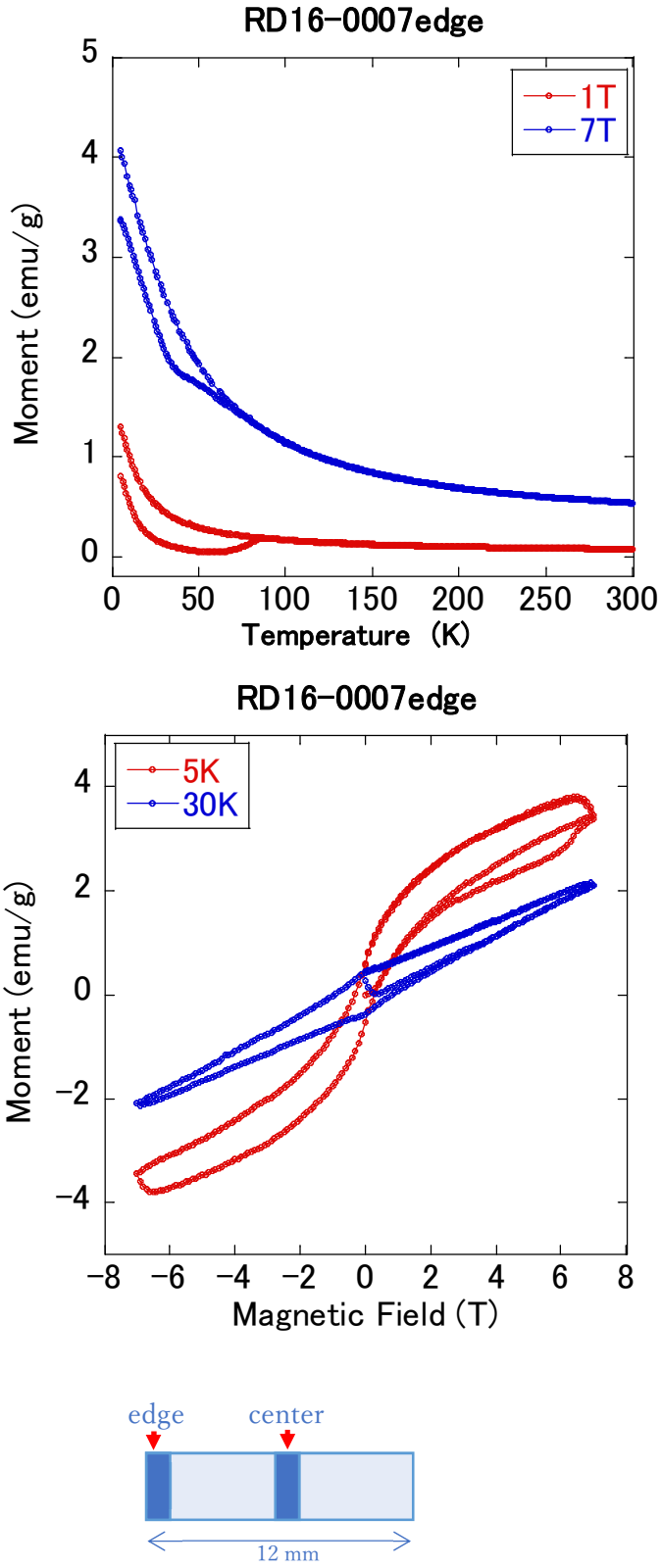


図 2.4.3.1-5　フジクラ社製 Y 系線材の磁化測定結果(線材の端部)

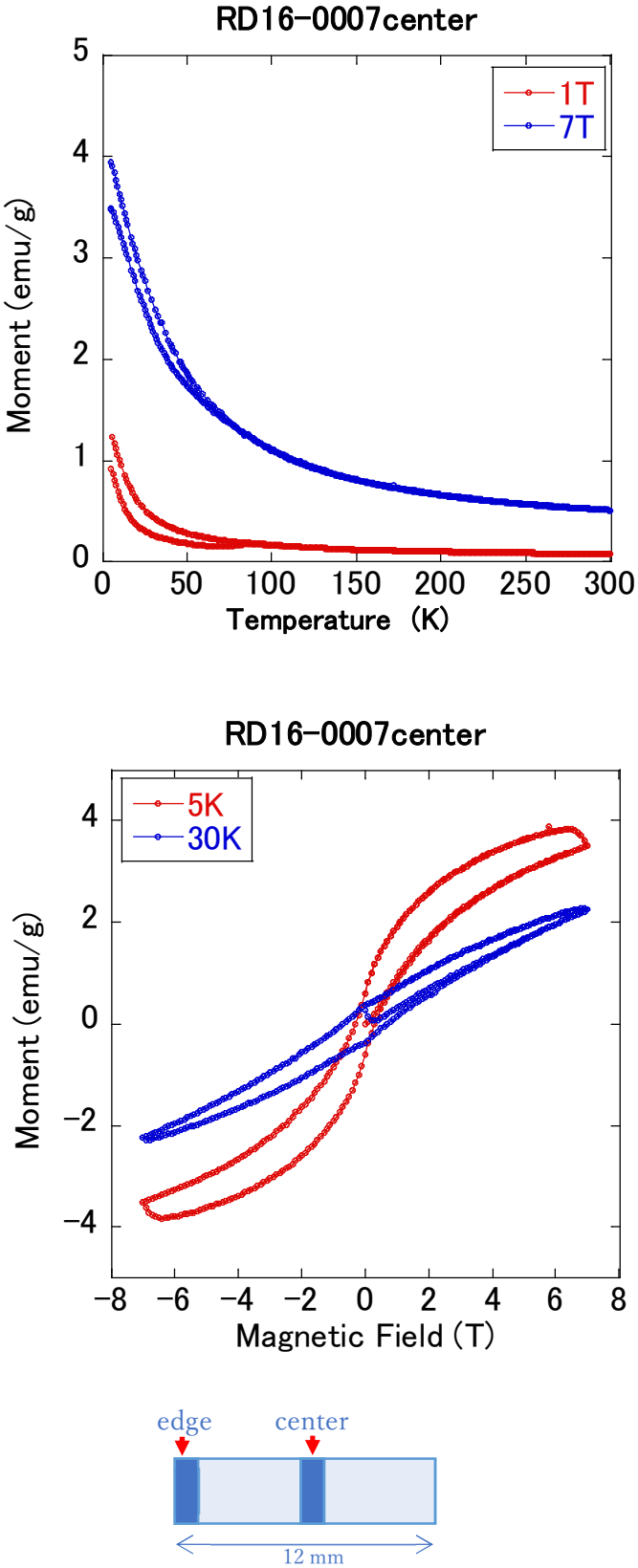


図 2.4.3.1-6　フジクラ社製 Y 系線材の磁化測定結果（線材の端中央部）

ウ． SuperOx 社製 Y 系線材

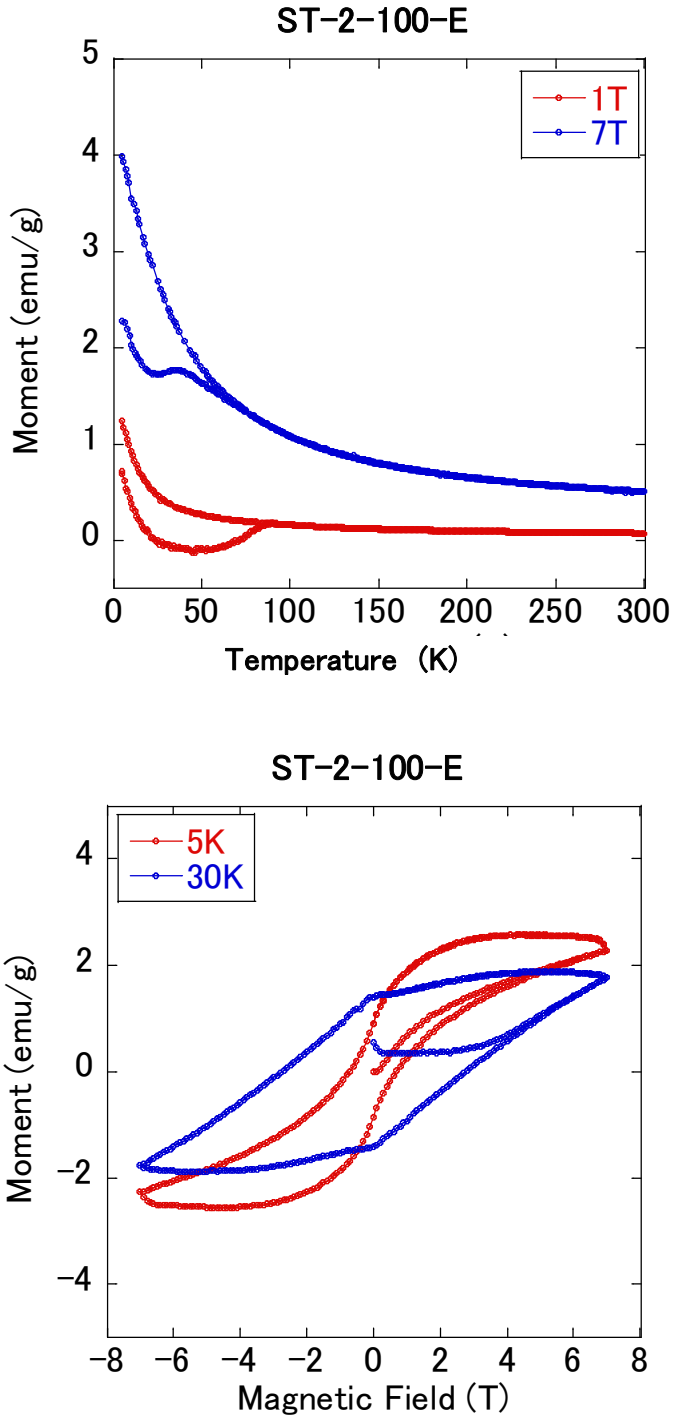
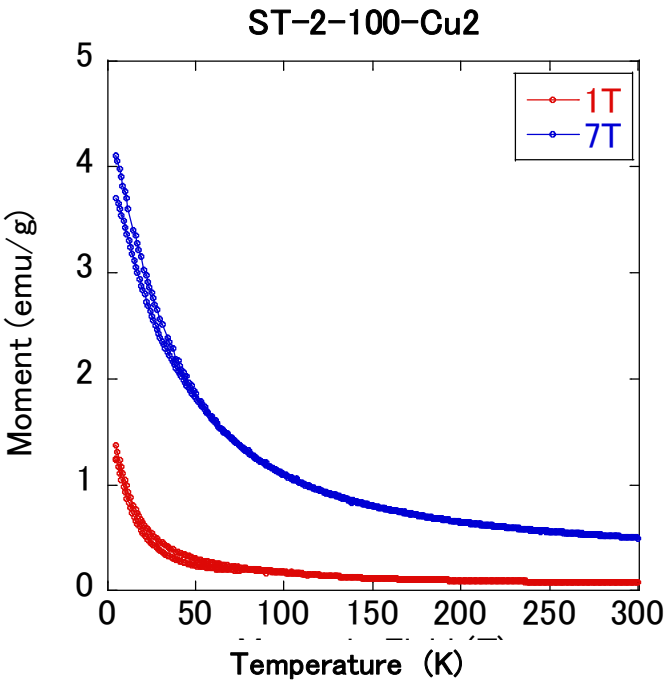


図 2.4.3.1-7　SuperOx 社製 Y 系線材の磁化測定結果(銅安定化層無し)



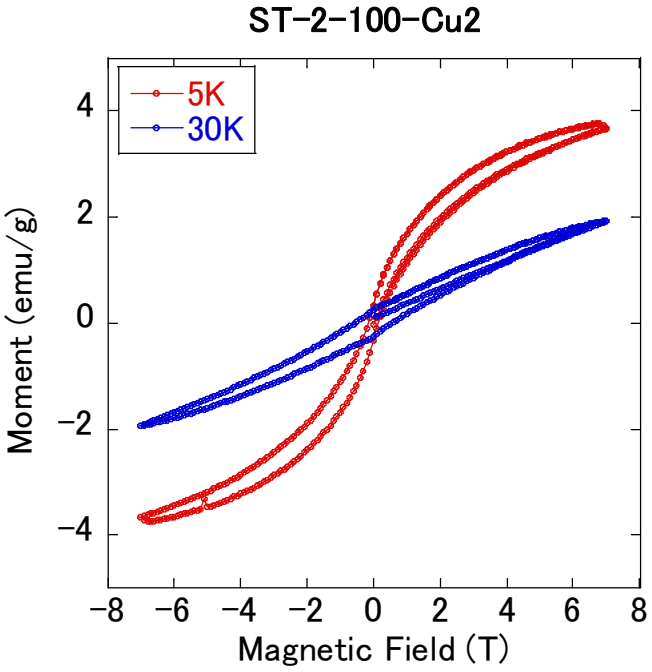


図 2.4.3.1-8　SuperOx 社製 Y 系線材の磁化測定結果(銅安定化層有り)

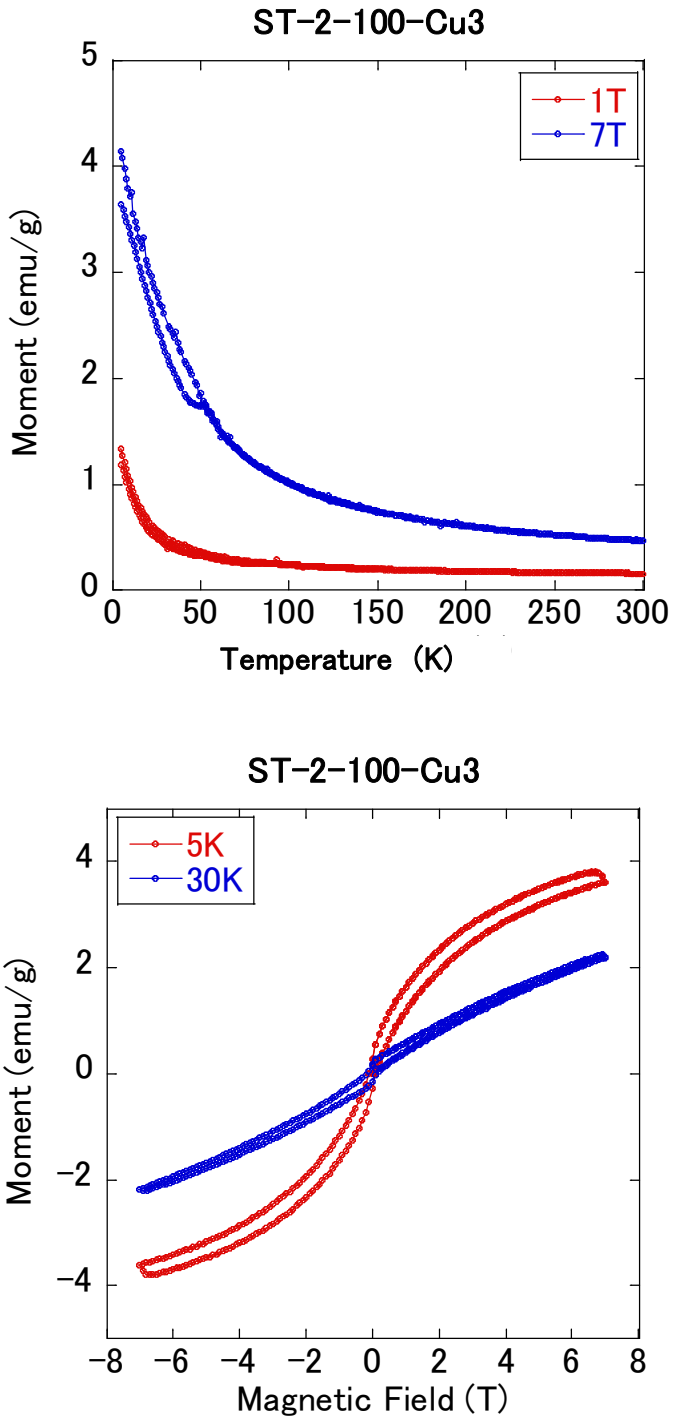


図 2.4.3.1.9　SuperOx 社製 Y 系線材の磁化測定結果(銅安定化層有り)

エ.　SuperPower 社製　Y 系線材

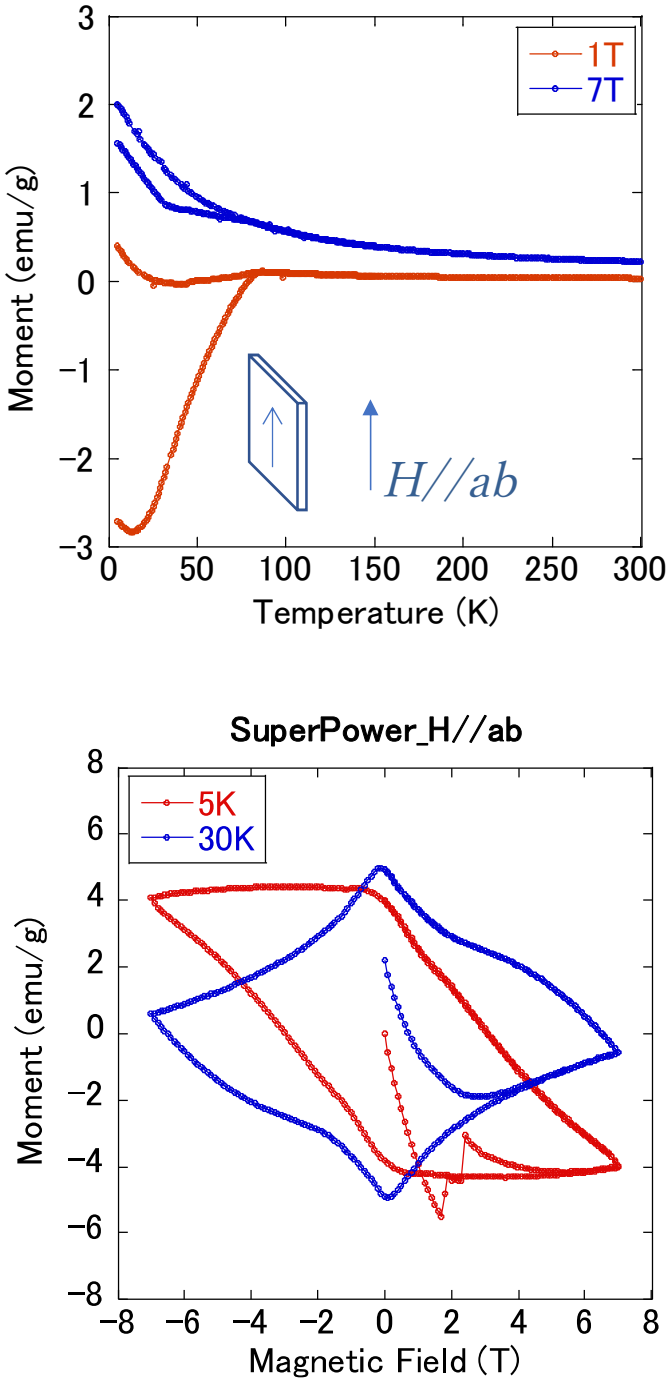


図 2.4.3.1-10　SuperPower 社製 Y 系線材の磁化測定結果（基板に平行な外部磁場）

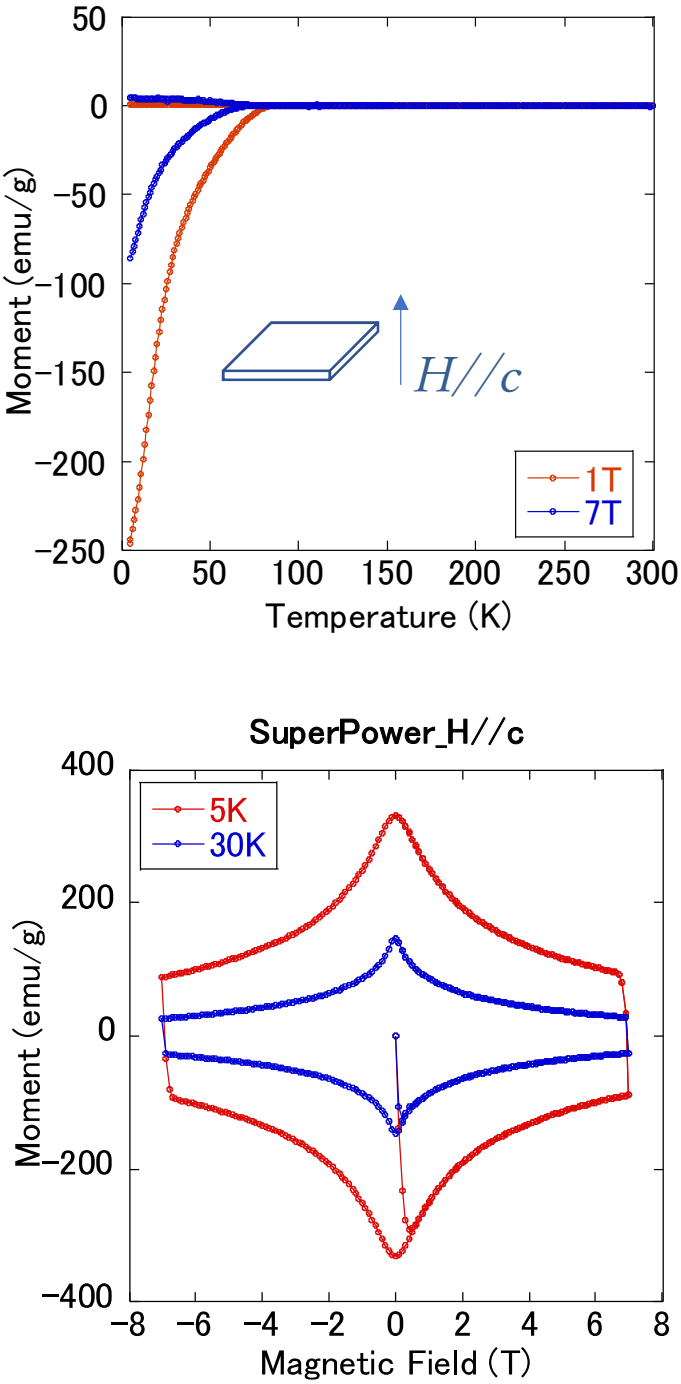


図 2.4.3.1-11　SuperPower 社製 Y 系線材の磁化測定結果（基板に垂直な外部磁場）

(5) 熱伝導率

熱伝導率は下記のように、電子による寄与と格子による寄与の和として表される。

$$熱伝導率\quad K = K_e(電子) + K_{ph}(格子) \quad (1)$$

電子から熱伝導への寄与は下記のように不純物、電子−電子相互作用、電子−格子相互作用による寄与からなり、ウィーデマン・フランツ則 K/σ = LT (L:ローレンツ数)が成り立つ。

$$K = B_{imp}T^{-1} + B_{e-e}T + B_{e-p}T^{2}$$

また、格子からの熱伝導への寄与については、低温では T^3 に比例し、高温では $1/T$ に比例することが知られており、各種の金属の熱伝導率の結果を下図に示す。

線材の測定から得られた温度依存性のデータからは、ハステロイ TM の主成分である Ni に近い温度依存性を示していることが分かる。

産総研製とフジクラ社製線材の違いについては、基本的に線材幅の違い(産総研製:5mm, フジクラ製:2mm)に由来する。熱伝導率では超電導のシグナルの判別は出来ないレベルであることが分かる。

SuperOx 社製の線材の結果からは、銅安定化層の有無により、熱伝導率の絶対値が大きく異なり、銅の熱伝導率の影響が大きく現れていることが分かる。

SuperPower 社製線材については、銅のメッキ層に加えて、はんだの材料である Pb−Sn 合金層があるため、さらに大きな熱伝導率を示すことが判明した。このことは、線材の保護の目的で使用している銅のメッキ層、及び、はんだ材が線材の熱伝導率に大きな影響があるため、熱流入がある場合おける線材の取り回しにおいては注意が必要であることが明らかになった。

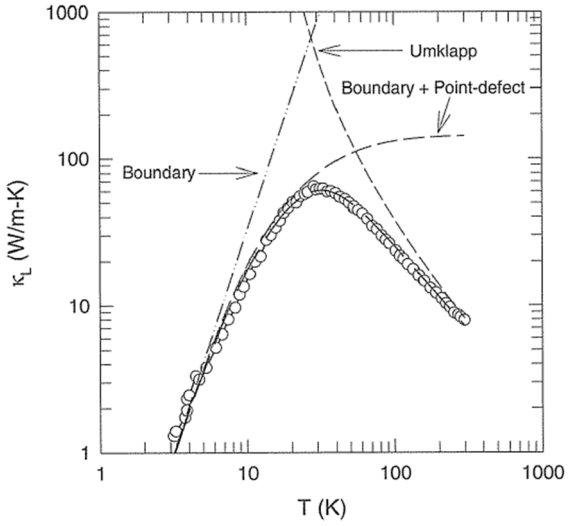


図 2.4.3.1-12 格子による熱伝導率の寄与

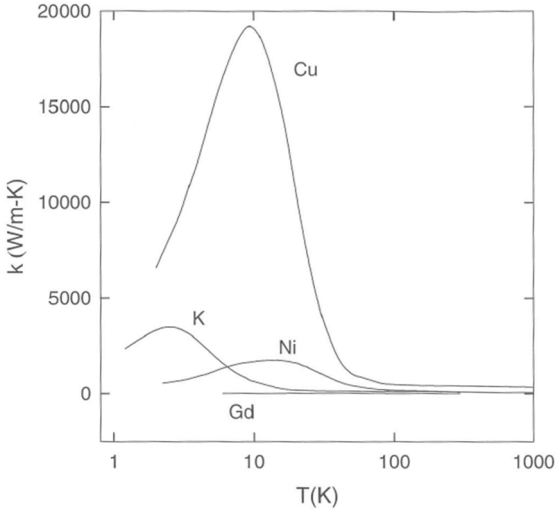


図 2.4.3.1-13 各種金属の熱伝導率

ア． 産総研製 Y 系線材の熱伝導率測定結果

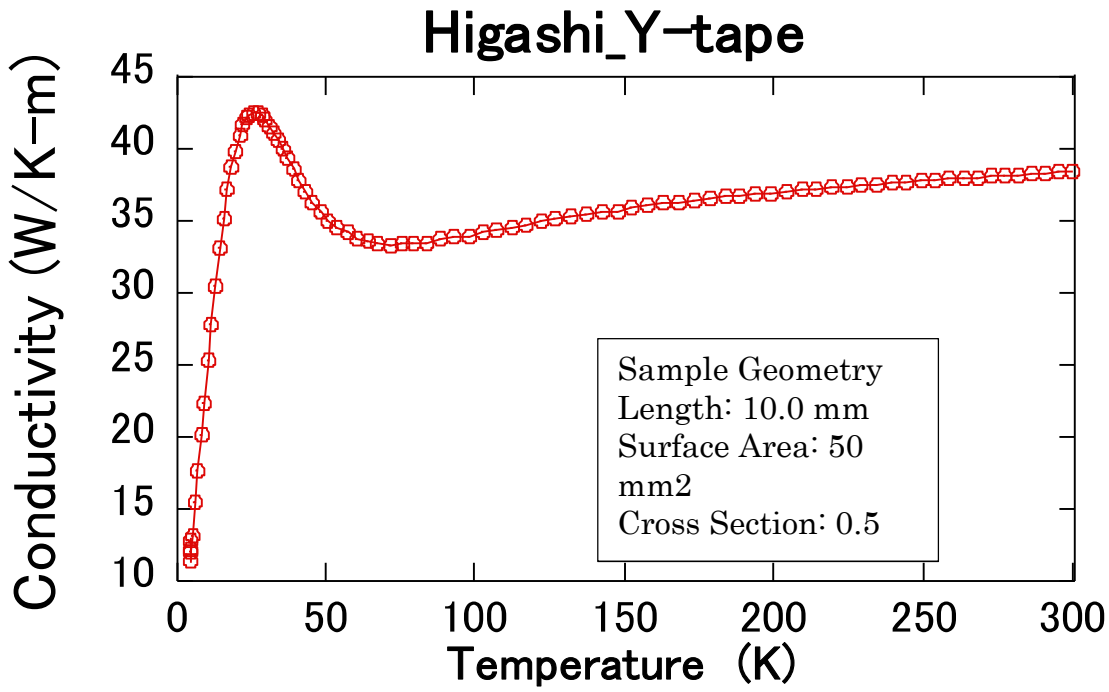


図 2.4.3.1-14　産総研製 Y 系線材の熱伝導率測定結果

イ． フジクラ社製 Y 系線材

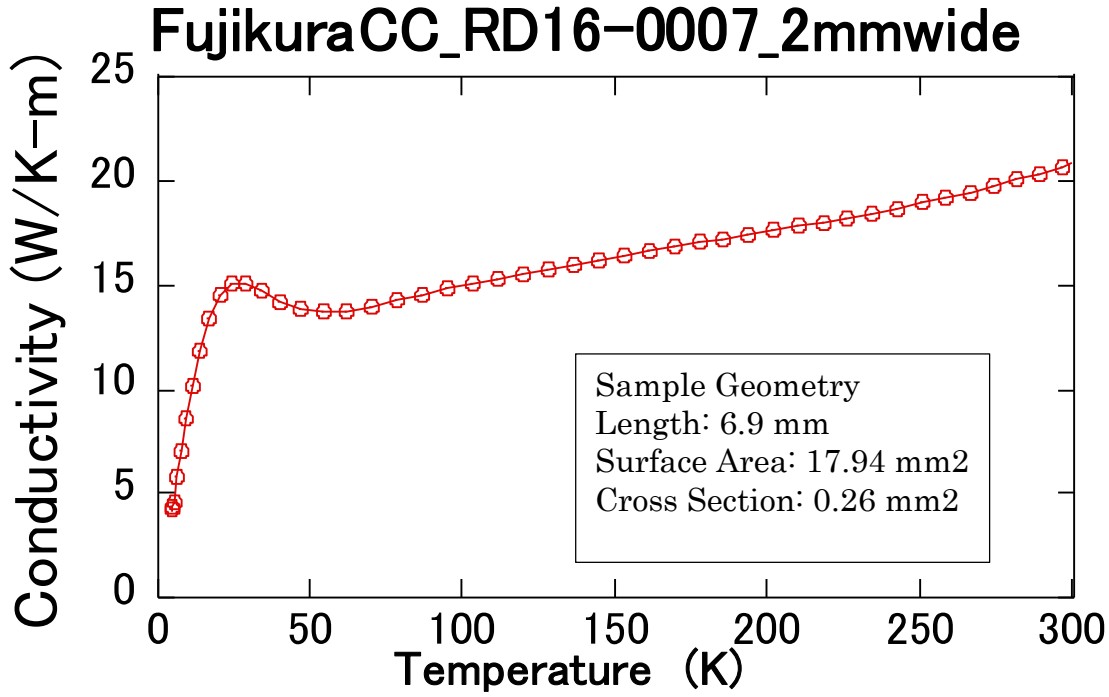


図 2.4.3.1-15　フジクラ社製 Y 系線材の熱伝導率測定結果

ウ． SuperOx 社製 Y 系線材

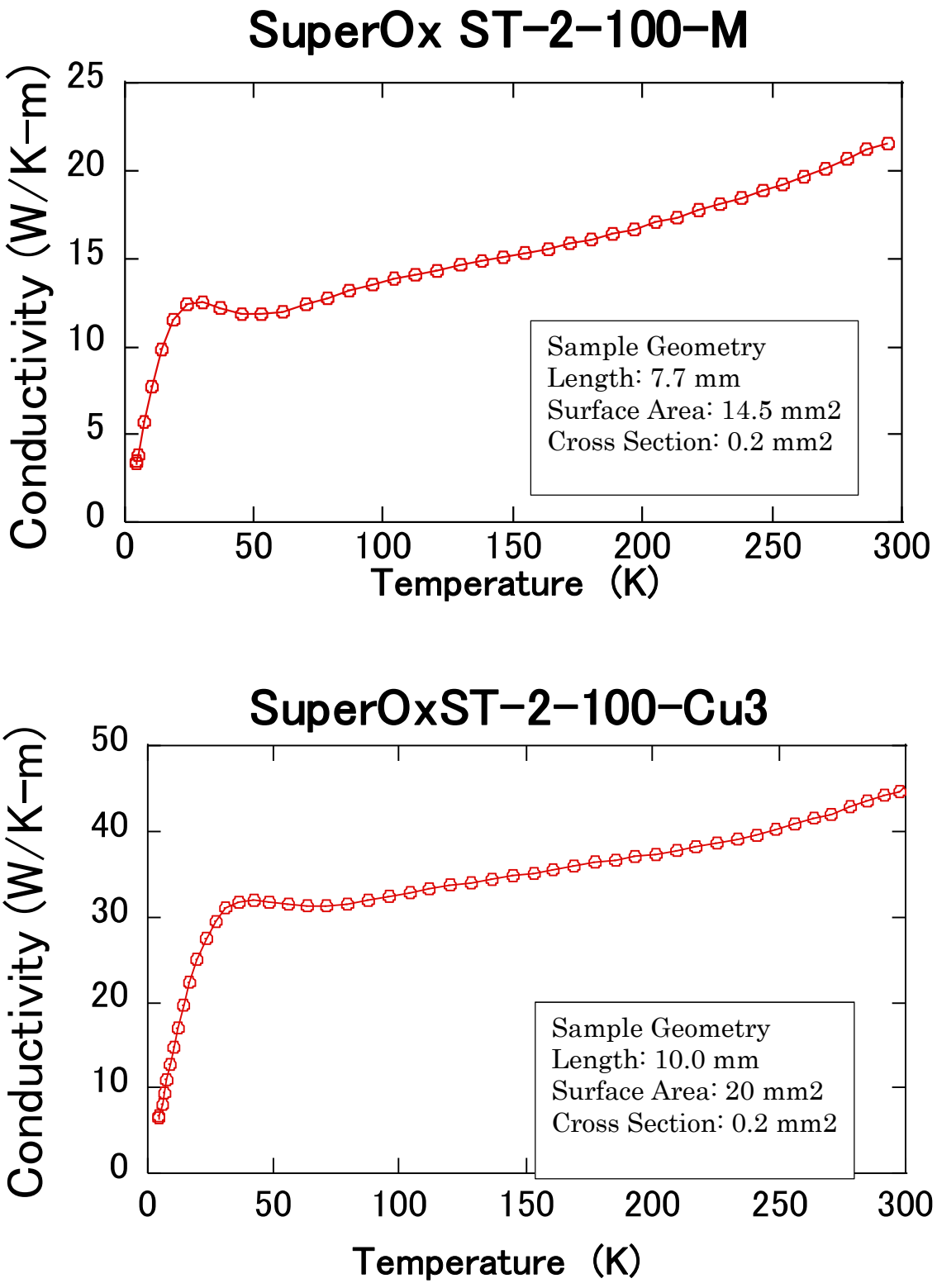


図 2.4.3.1-16　SuperOx 社製 Y 系線材の熱伝導率測定結果（銅層無し、銅層有り）

エ. SuperPower 社製 Y 系線材

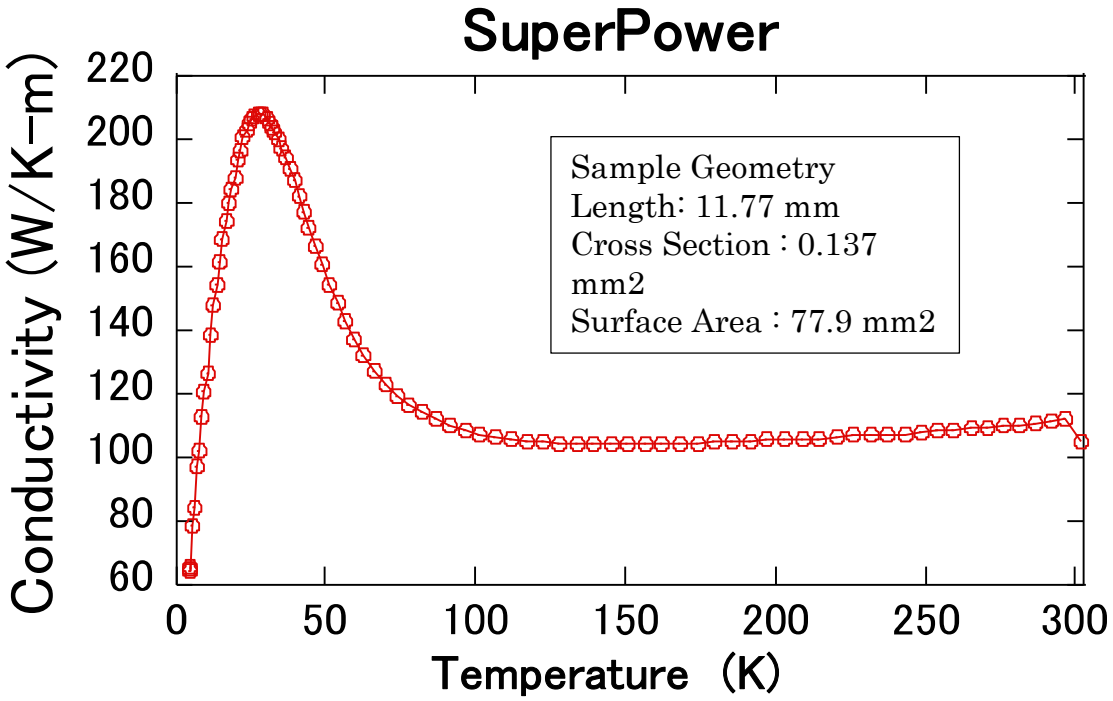


図 2.4.3.1-17　　SuperPower 社製 Y 系線材の熱伝導率測定結果

(6)　熱容量

一般に、金属の熱容量は電子比熱と格子比熱の和で表現され、低温では $C = \gamma T + AT^3$ で表される。ここで第一項は電子からの寄与、第二項は格子からの寄与である。また、室温近くの高温ではある一定の定数(3R)に近づくことが知られている。

それぞれの線材の熱容量の測定結果について、以下に示す。基本的に測定にかかる熱容量の大部分は金属(ハステロイ TM)基板からの寄与である。したがって、ハステロイ TM の膜厚や、銅膜の有無により比熱の絶対値は変わっていることが分かる。超電導からの信号は、線材における超電導層の比を考えると現れていないのは当然である。

ア． 産総研製 Y 系線材の熱容量の測定結果

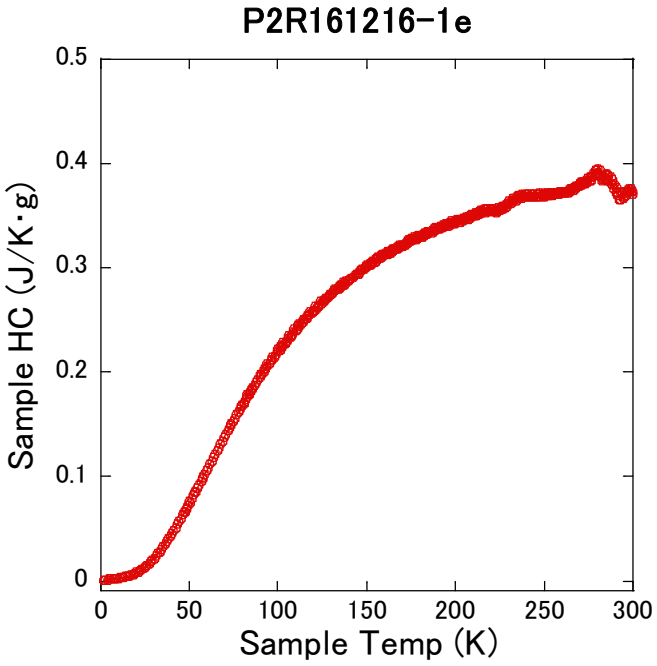


図 2.4.3.1-18　　産総研製 Y 系線材の熱容量の測定結果

イ． フジクラ社製 Y 系線材

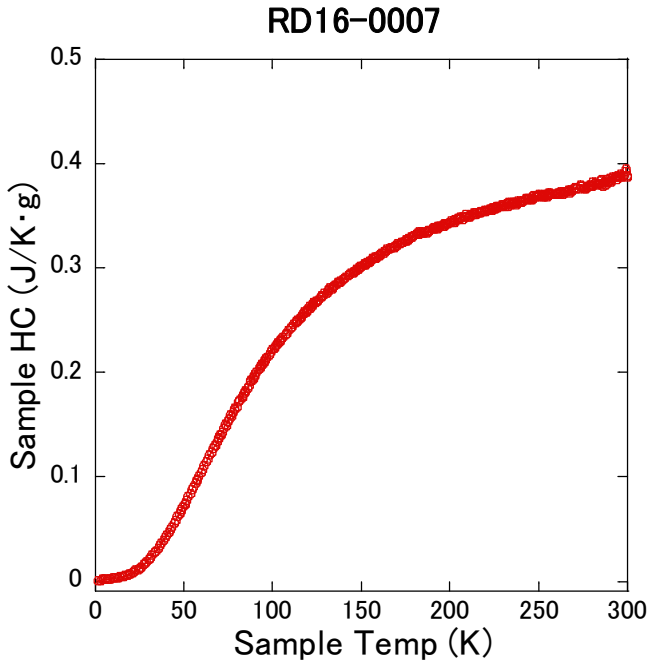


図 2.4.3.1-19　　㈱フジクラ社製 Y 系線材の熱容量の測定結果

ウ. SuperOx 社製 Y 系線材

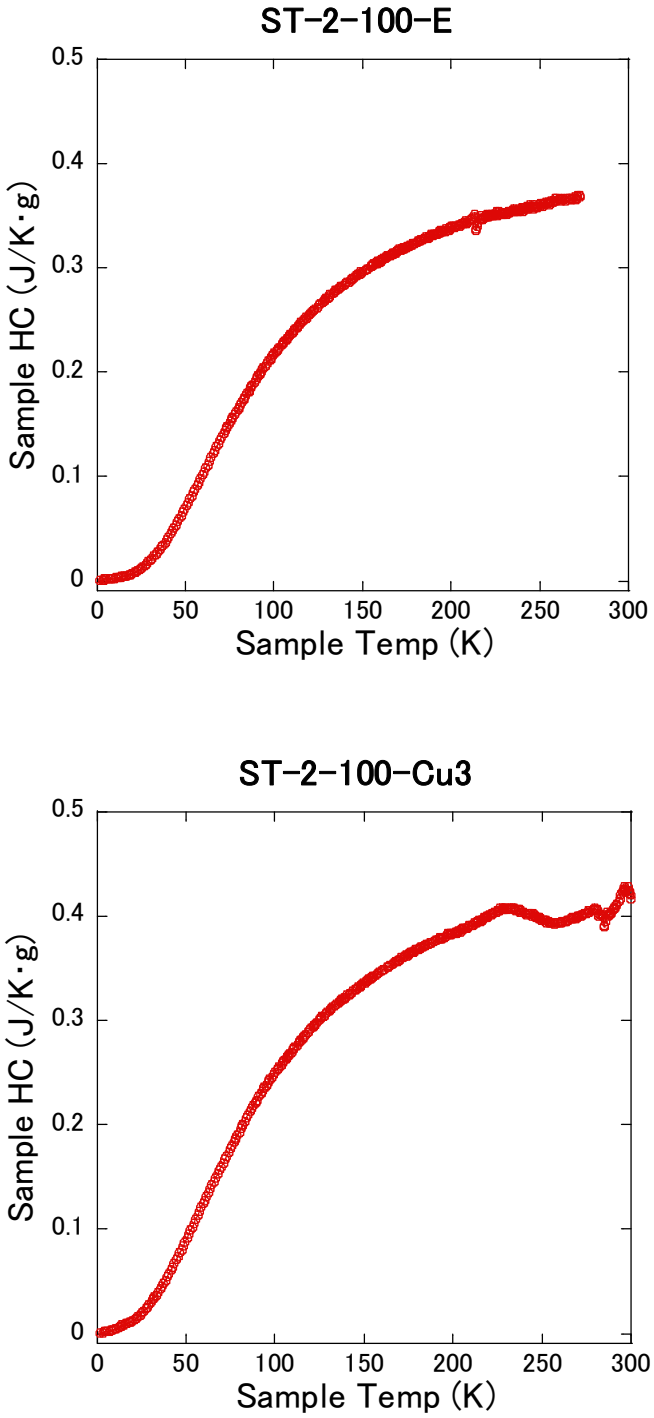


図 2.4.3.1-20　　SuperOx 社製 Y 系線材の熱容量の測定結果（銅層無し、銅層有り）

エ． SuperPower 社製 Y 系線材

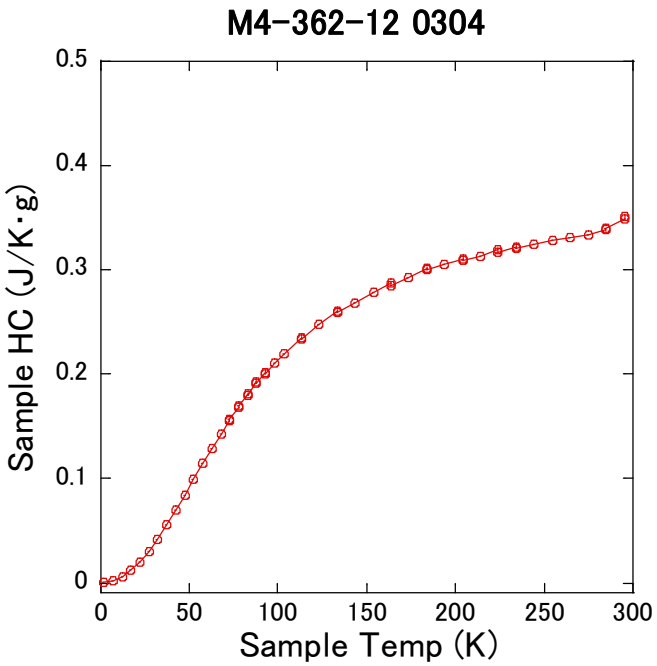


図 2.4.3.1-21　SuperPower 社製 Y 系線材の熱容量の測定結果

（7） 2.4.3.1 項のまとめ

様々な超電導線材を用いて、主に超電導層以外に着目して、基礎物性の測定からその特徴を得ることができた。基本的には、各素材の和で表現できるものであるが、その量の違いにより物性が変化し、特に熱伝導に大きな違いをもたらすことが明らかになった。この結果は、今後のシミュレーションやマグネット周りの熱設計に役立つものと見込まれる。

2.4.3.2 細線化に向けた線材幅方向の組織・特性分布低減技術 （産業技術総合研究所）

現在の量産 Y 系高温超電導線材はテープ形状であり、マグネットに通電した際に線材に遮蔽電流が流れ逆向きの磁場が発生する。そのため、磁場が安定するまでに一定の時間が必要である。また、励磁などの電流通電時に発生する履歴損失と結合損失が大きいという課題がある。それに対するアプローチとしてスクライブ(分割)線材と撚線構造によりその課題を解決することを目的とする。

本項では、テープ線材の細線化のため、線材幅方向の組織・特性分布低減技術に取り組むことにより安定化磁場発生用線材として交流損失の低減を達成する。磁場特性を向上させるためには人工ピンの導入が有効であるが、自由度が増加することにより作製ウインドウが狭く、線材幅方向の組織・特性分布が生じる課題を有していた。本研究開発では、磁場中で高い特性が期待できる人工ピン入り Y 系線材を対象とし細線化技術の開発を行った。

具体的には、MOD(Metal Organic Decomposition)法による中間層の表面平滑化による超電導層の組織・特性分布改善技術開発を行い、安定化磁場発生用線材として交流損失の低減（高い磁場中臨界電流を持ったうえで無加工と比較して、交流損失が 1/10）を目指す。

(1) 中間層の表面平滑化による超電導層の組織・特性分布改善技術開発

「高磁場下高特性安定線材技術」における人工ピン入りテープ線材の線材幅方向の組織・特性分布改善技術において、MOD 中間層表面の平坦化プロセス技術の開発を実施した。IBAD 法において、良好な結晶性を有する中間層を得るためには、基材となるハステロイ ™ 基板の表面粗さは 2 nm 以下であることが望ましい[2.4.3.2-1]。ハステロイ ™ 基板の表面平坦化技術には機械的研磨法や化学的研磨法が採用され量産線材製造に適用されている。一方、安定化磁場発生を目指すテープ線材の細線化技術においては、特に線材の幅方向の超電導特性分布を極力一定にすることが重要であり、MOD 法を利用する平坦化プロセスは将来の中間層表面平坦化技術適用の可能性が期待できる。このため、量産に適すると考えられる毒性・引火性の低い新たな MOD プロセスを開発し、短尺線材サンプル（0.15m 長および 1m 長）により基礎的検討を実施した。

MOD 平坦化プロセスの概略を図 1.4.3.2-1 に示す。ハステロイ ™ 基板上に MOD 平坦化層用原料溶液を塗布し、乾燥させゲル化層を形成させる。このゲル化層に熱処理を施し酸化物（平坦化）層にする。ゲル化層から酸化物層への変換過程において、収縮率が小さいほど平坦化に有利である。塗布～熱処理工程を繰り返して行い、酸化物（平坦化）層を積層化させることで、平坦性はさらに向上する。MOD 平坦化プロセスにおける平坦化層の表面粗さ（Ra）と積層数（n）との関係は、次式で示される。

$$Ra = R_0\left(\frac{t_0 - t}{t_0}\right)^n$$

ここで、R_0:基板の表面粗さ、t_0:熱処理前(ゲル)の膜厚、t:熱処理後(酸化物)の膜厚である。

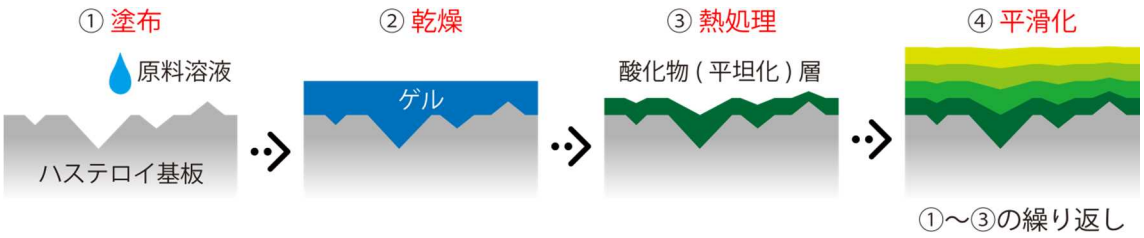


図 2.4.3.2-1　MOD 平坦化プロセスの概略図

ア. 実験－1

従来、MOD 平坦化プロセスでは MOD-$CeZrO_3$ 平坦化層の検討が行われてきた。しかし、MOD-$CeZrO_3$ 平坦化層用原料溶液の溶媒には揮発性、引火性、毒性が高いトルエンが用いられており、工業化において大量に用いるには問題がある。そこで、異なる溶媒を用いた MOD 平坦化層原料溶液の開発を試みた。さらに、MOD-Y_2O_3 平坦化層の検討を行い、加工工数低減に繋がり得る中間層数の削減を試みた(図 2.4.3.2-2)。



図 2.4.3.2-2　MOD 平坦化プロセスを用いた中間層付きハステロイ ™ 基板の構造

レブリン酸イットリウム錯体を 1-メトキシ-2-プロパノール溶液に溶解させ MOD-Y_2O_3 平坦化層用原料溶液を生成した。イットリウム錯体の濃度は 0.25 mol/L に調整した。1-メトキシ-2-プロパノールの諸特性及び主な適用法令について、トルエンと比較したものを表 2.4.3.2-1 に示す。トルエンと比較して 1-メトキシ-2-プロパノールの蒸気圧は低く、引火点は高い。さらに、トルエンは毒物及びにより劇物取締法により劇物、化学物質排出把握管理促進法法(化管法、PRTR 法)により第一種指定化学物質に指定されている。これらのことより、1-メトキシ-2-プロパノールは、揮発性、引火性が低く、より安全な溶媒であると言える。

表 2.4.3.2-1 1-メトキシ-2-プロパノール及びトルエンの諸特性と適用法令

	1-メトキシ-2-プロパノール	トルエン
蒸気圧(20℃)	1.2 kPa	2.9 kPa
引火点	32℃	5℃
消防法	第 4 類 第二石油類 危険等級Ⅲ 水溶性	第 4 類 第一石油類 危険等級Ⅱ 非水溶性
毒物及び劇物取締法	－	劇物
化管法(PRTR 法)	－	第一種指定化学物質 政令番号:300

ハステロイ ™ 基板(長さ 0.15m×幅 10 mm)上にディップコート法により塗布を行い、純酸素雰囲気中、室温から 500℃まで 10℃/min の昇温速度で熱処理を施し、MOD-Y_2O_3 平坦化層を成膜した。

イ. 結果と考察－1

溶質にレブリン酸イットリウム錯体、溶媒に 1-メトキシ-2-プロパノールを用いた MOD-Y_2O_3 平坦化層用原料溶液を開発した。図 2.4.3.2-3 にこの原料溶液を用いて成膜した MOD-Y_2O_3 平坦化層の表面粗さと成膜回数との関係を、従来の MOD-$CeZrO_3$ 平坦化層での結果と併せて示す。塗布回数の増加と共にハステロイ ™ 基板の表面粗さは減少し、約 10 回の成膜で目標とする 2 nm に達した。MOD-Y_2O_3 平坦化層においても MOD-$CeZrO_3$ 平坦化層と同等の平坦化効果が確認された。MOD-Y_2O_3 平坦化層(12 層)上に中間層(PLD-CeO_2 / Sputter-$LaMnO_3$ / IBAD-MgO)を成膜したところ、PLD-CeO_2(0.6 μm-t)の面内配向性は $\Delta\phi$ (220) = 3.48° であった。一方、この中間層上に PLD-$EuBa_2Cu_3O_y$ 層を成膜し超電導特性を評価した結果、I_c = 0 A/cm-w が得られた。PLD-$EuBa_2Cu_3O_y$ 層が超電導特性を示さなかった原因を究明するために PLD-$EuBa_2Cu_3O_y$ 層の XRD 測定を行ったところ、$EuBa_2Cu_3O_y$ 由来のピークに加えて Ni、Cr 由来のピークが観察された。PLD-$EuBa_2Cu_3O_y$ 層が超電導特性を示さなかったのは、ハステロイ ™ 基板からの Ni、Cr 元素の拡散に因るものと考えられる。これらの結果より、MOD-Y_2O_3 平坦化層は、ハステロイ ™ 基板の平坦化には充分有効であるが、ハステロイ ™ 基板からの Ni、Cr 元素の拡散防止効果は有しないことが分かった。よって、ハステロイ ™ 基板から Ni、Cr 元素等の拡散を防ぐ拡散防止層の導入が必要であると考えられる。

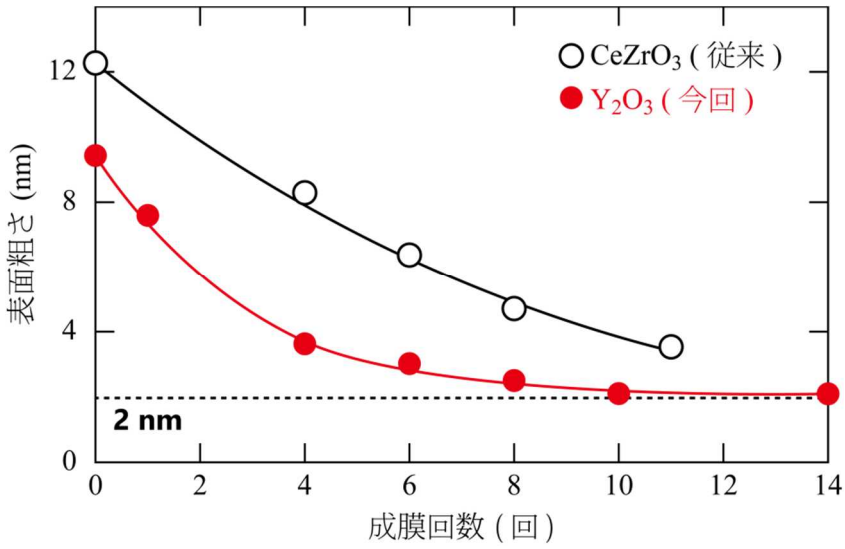


図 2.4.3.2-3　MOD 平坦化プロセスにおける成膜回数と表面粗さとの関係
○: $CeZrO_3$ 平坦化層（従来）。●: Y_2O_3 平坦化層（今回）

ウ. 実験－2

上述の通り、MOD-Y_2O_3 ベッド層用原料溶液を新規に開発し、MOD-Y_2O_3 平坦化層による平坦化の効果を確認した。一方、同系ではハステロイ ™ 基板からの Cr、Ni 元素の拡散という新たな問題が生じた。そこで、拡散防止層としての効果も期待できる MOD-$GdZrO_3$ 平坦化+拡散防止層の導入を検討し、図 2.4.3.2-4 に示すような MOD-Y_2O_3 / $GdZrO_3$ 平坦化層の開発を試みた。この際、MOD-$GdZrO_3$ 平坦化+拡散防止層及び MOD-Y_2O_3 平坦化層の層数をそれぞれ 6 層と 4 層とし、総層数を MOD-Y_2O_3 平坦化層のみの場合と同等の 10 層とした。

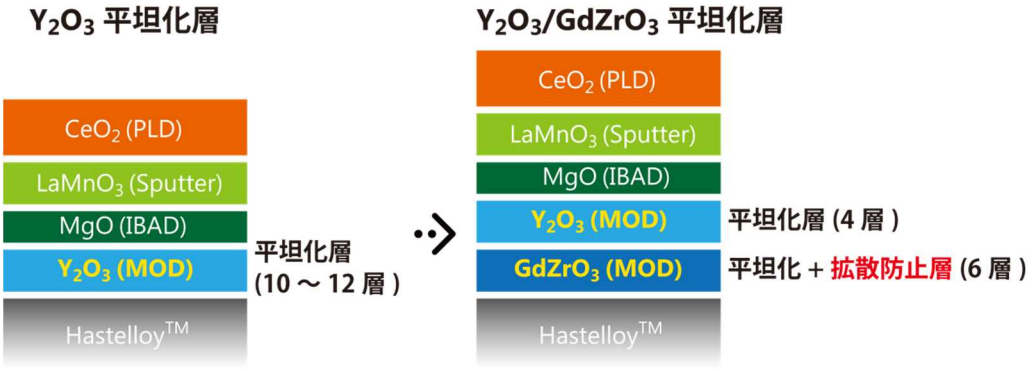


図 2.4.3.2-4　MOD-Y_2O_3 平坦化層及び MOD-Y_2O_3 / $GdZrO_3$ 平坦化層を用いた中間層付きハステロイ ™ 基板の構造

MOD-$GdZrO_3$ 平坦化+拡散防止層用にプロピオン酸ガドリニウム錯体及び 2-エチルヘキサン酸ジルコニル錯体を 1-メトキシ-2-プロパノール溶液に溶解させた原料溶液を開発した。ガドリニウム錯体及びジルコニル錯体の濃度は、それぞれ 0.10 mol/L に調整した。Reel-to-reel 焼成炉を用いて、ハステロイ ™ 基板（1m 長×10 mm 幅）上に、まず MOD-$GdZrO_3$ 平坦化+拡散防止を 6 層成膜し、続けて MOD-$GdZrO_3$ 平坦化+拡散防止層上に MOD-Y_2O_3 平坦化層を 4 層成膜した。

エ. 結果と考察－2

図 2.4.3.2-5 に、MOD-Y_2O_3 / $GdZrO_3$ 平坦化層における表面粗さと成膜回数との関係を示す（1～6 層：MOD-$GdZrO_3$ 平坦化+拡散防止層、7～10 層：MOD-Y_2O_3 平坦化層）。MOD-Y_2O_3 / $GdZrO_3$ 平坦化+拡散防止層においても、MOD-Y_2O_3 平坦化層と同様に平坦化効果が確認できた。MOD-Y_2O_3 / $GdZrO_3$ 平坦化層に、PLD-CeO_2 / Sputter-$LaMnO_3$ / IBAD-MgO 中間層を成膜したところ、$\Delta\phi$ (220) = 3.15° の面内配向性を有する PLD-CeO_2 層（0.6 μm-t）が得られた。この中間層上に成膜した PLD-$EuBa_2Cu_3O_y$ 層（0.6 μm-t）の XRD パターンにおいて Ni、Cr のピークは観察されず、MOD-$GdZrO_3$ 平坦化+拡散防止層がハステロイ ™ 基板からの Ni、Cr 元素等の拡散防止に有効に機能していることが確認された。MOD-Y_2O_3 / $GdZrO_3$ 平坦化層を用いて作製した PLD-$EuBa_2Cu_3O_y$ 線材の超電導特性を評価した結果、I_c = 294 A/cm-w（J_c = 4.9 MA/cm^2）と非常に良好な超電導特性が得られた。以上より、MOD-Y_2O_3 / $GdZrO_3$ 平坦化層は、ハステロイ ™ 基板の平坦化に有効であり、高い均一性を有した超電導線材の作製が期待できると考えられる。

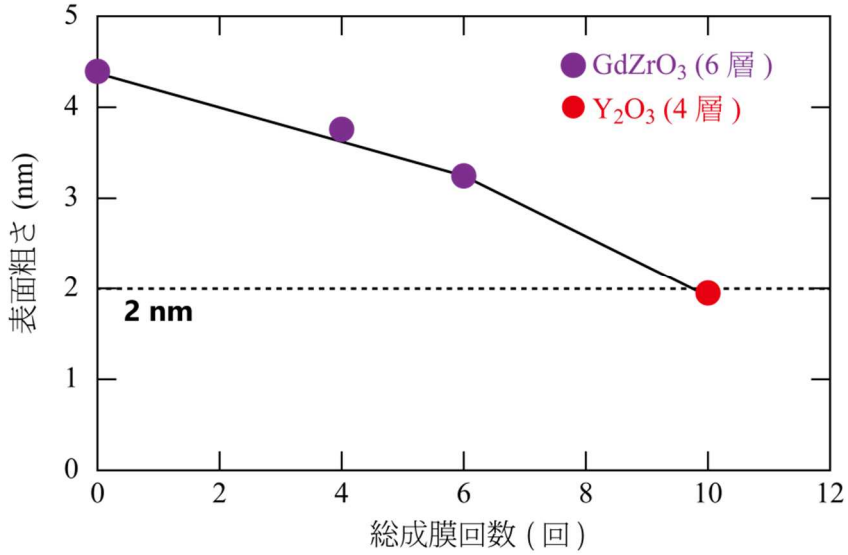


図 2.4.3.2-5　MOD- Y_2O_3 / $GdZrO_3$ 平坦化層における成膜回数と表面粗さとの関係

(2) 超電導層の組織・特性分布改善技術開発

高磁場コイルへの Y 系高温超電導線材応用を考えた場合、外部磁場により線材内部に誘起される遮蔽電流を抑制するためにスクライブによる細線化が有望と考えられるが、細線化実現の為には中間層表面平滑化のみならず、PLD 法による超電導層成膜の検討も不可欠である。

線材の幅方向等の超電導特性に分布を与える原因として、金属基板および中間層表面性に起因するもの、PLD 法を用いた超電導層を成膜する際のターゲットの表面形状の変化やそれに伴うプルーム(アブレーションプラズマ)の乱れ(図 2.4.3.2-6)、ターゲット駆動システムの周期性等による臨界電流(I_c)の分布(図 2.4.3.2-7)等がある。

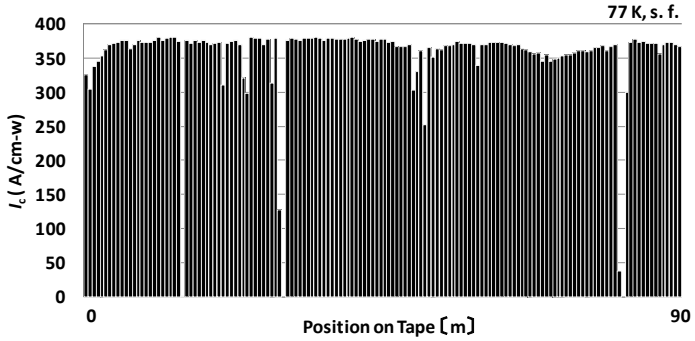


図 2.4.3.2-6　90 m 長 pure-GdBCO 線材の長手方向 I_c 分布（77 K, s. f.）

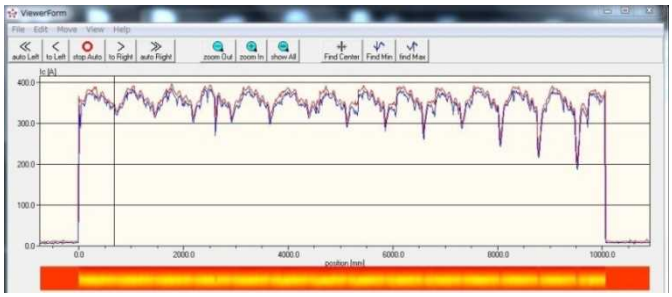


図 2.4.3.2-7　10 m 長 EuBCO + BHO 線材の長手方向 I_c 分布（77 K）

基板及び中間層の構造は、PLD-CeO_2/sputter-$LaMnO_3$/IBAD-MgO/sputter-Y_2O_3/sputter -$Gd_2Zr_2O_7$/ハステロイ TM という構造を有しているが、2 軸配向層である IBAD-MgO 層の膜厚が約 4 nm と非常に薄いため、金属基板の表面粗さを約 ＜ 2 nm にしなければ著しく配向性が低下する。そのため、機械的研磨もしくは化学的研磨による表面平滑化を行う必要がある。金属基板であるハステロイ TM 基板の欠陥部の低減に関しては、表面研磨時の研磨痕や研磨液の残留を極力低減する手法を用い、更に微細な付着物を除去するための洗浄クリーニングを行った。

超電導層の不均一性に関しては、PLD 法は高真空装置を使用して成膜を行うことや、高出力の UV レーザを用いてターゲットを爆発的にアブレーションさせるため、不純物等による汚染や組成ずれの少ない高特性の超電導層を成膜することが出来るが、均一性に関しては不安定な要素をもつことがある。それは、プルームに指向性があること、また、従来の PLD 法(Out-of-plume PLD method)では、高 J_c 特性を得るためにプルームの先端(ショックフロント)付近に基板が位置するようにして成膜を行うが、この方法では、長尺基板上への成膜(長時間成膜)の際には、ターゲットの表面形状の変化によるプルームの乱れの影響を受ける。プルームが乱れることによって最適条件からのズレ(組成比や膜厚等)を引き起こし、その結果、I_c 分布は不均一なものとなる。

そこで従来の PLD 法(Out-of-plume PLD method)とは異なる手法である面プルーム PLD 法(Plane-plume PLD method)を用いることで均一性の改善を試みた。図 2.4.3.3-8 は、従来の PLD 法と面プルーム PLD 法の概略図である。上述したようなプルームの乱れによる I_c 分

布の不均一性を改善するために、面プルーム PLD 法ではプルーム内部に基板が位置される状態に設定し、また、基板の長手・幅方向の両方に均一性の効果を与えるために 2 次元的なマルチプルーム法を用いることで局所的な組成ずれや膜厚の変化を防ぎ、かつ、レーザ発振時の高い繰返し周波(300 Hz)に対してより多くのプルーム数(18 プルーム)にすることで高過飽和度の影響による結晶性の低下も防ぐことが出来るため、高速成膜にも対応することが可能となっている。なお、プルーム内部に基板を位置することによって元のターゲット組成比からのズレが起こるという問題も生じるが、これらは、元のターゲットの組成比を変更することで解消することが可能である。

そこで、面プルーム PLD 法を用いて以下の成膜条件で 100 m 長の EuBCO + BHO 層の成膜を行った

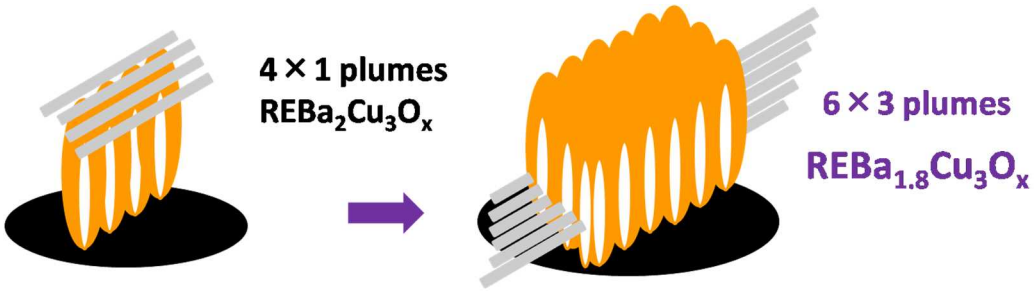


図 2.4.3.3-8　従来の PLD 法(左図)と面プルーム PLD 法(右図

図 2.4.3.2-9 は、金属基板である 235 m 長ハステロイ ™ の洗浄クリーニング前後の欠陥分布を Reel-to-reel レーザ顕微鏡により評価した結果である。図のように洗浄クリーニングを行うことで欠陥数が著しく減少していることがわかる。

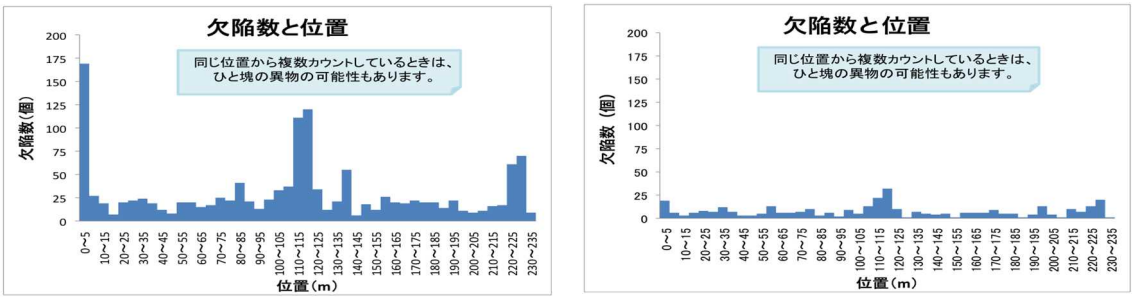


図 2.4.3.2- 9　Reel-to-reel レーザ顕微鏡を用いた 235 m 長ハステロイ ™ 基板の欠陥数・位置評価
(クリーニング前（左図)、クリーニング後（右図))

図 2.4.3.2-10 及び図 2.4.3.2-11 は、それぞれ、従来の PLD 法と面プルーム PLD 法で作製した 100 m 長 EuBCO + BHO 線材の長手方向の I_c 分布と n 値分布である。図 2.4.3.2-12 は、従来の PLD と面プルーム PLD 法で作製した長尺 EuBCO + BHO 線材の特性均一性を

SHPM(Scanning Hall Probe Microscopy)で 2 次元臨界電流密度(J_c)分布および臨界電流の低下率とは異なる指標である標準偏差(STDEV)として磁気的に評価した結果である。これらの結果から、面プルーム PLD 法の I_c 分布及び n 値の均一性は、長手方向及び幅方向ともに従来の PLD 法と比較して改善されていることがわかる。これは、上述したように、基板をプルーム内に位置する面プルーム PLD 法を用いることで、ターゲットの表面形状及びターゲット駆動の周期性を伴うプルームの乱れの影響が低減している結果であると言える。更に、長尺成膜時には 4～6 ターンを使用するマルチターン方式も用いて製造速度の向上を行っているが、面プルーム PLD 法を用いることで、各ターンの EuBCO + BHO 層の特性が平均化されることも均一性が向上したことの一因であると考えられる。図 2.4.3.2-13 は、従来の PLD 法と面プルーム PLD 法を用いて作製した EuBCO + BHO 層の表面 SEM 写真である。この SEM 写真から、従来の PLD 法を用いた場合は線材の幅方向端部と中央部とでは表面形態が異なることがわかる。特に端部においては EuBCO 相の異方粒が増加していることがわかる。これは、図 2.4.3.2-8 のように、従来の PLD 法でマルチターン方式を用いた場合、1 軸方向のみのマルチプルームであるがゆえに、各ターン(特に両端のターン)において、プルームの先端部(ショックフロント)と基板の位置関係が幅方向で異なるため、最適成膜条件のズレや組成ずれを引き起こすことで面内の表面形態に分布が生じたと考えられる。他方、面プルーム PLD 法の場合には、2 軸方向でマルチプルームを行っているため、全てのターンがプルーム内部に位置するような状態で成膜を行うことができ、各ターンによる特性の分布が平均化されるため面内の表面形態もほぼ均一になっていると考えられる。

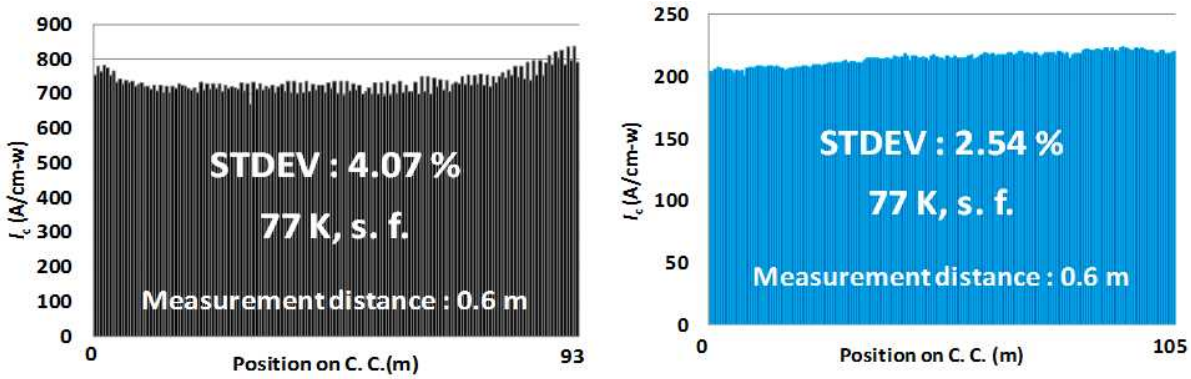


図 2.4.3.2-10 従来の PLD 法(左図)と面プルーム PLD 法(右図)で作製した EuBCO + BHO 線材の単位幅あたり短尺 I_c 分布と標準偏差の比較（77 K, s.f.）

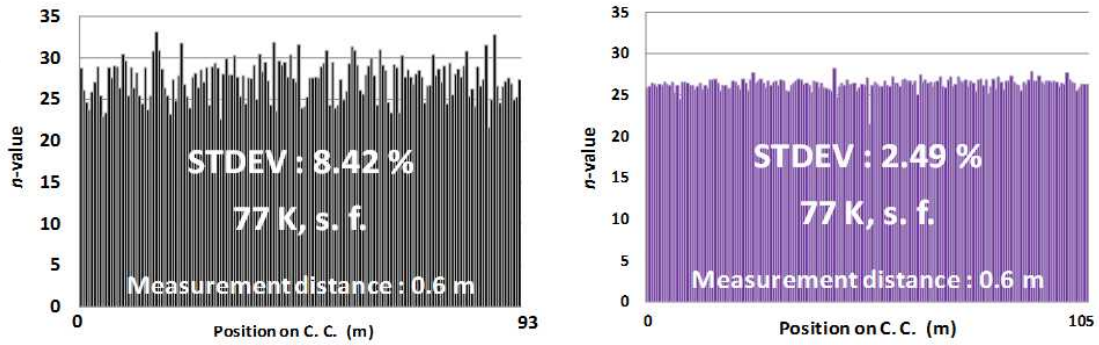


図 2.4.3.2.-11　従来の PLD 法(左図)と面プルーム PLD 法(右図)で作製した EuBCO + BHO 線材の短尺 n 値分布と標準偏差の比較

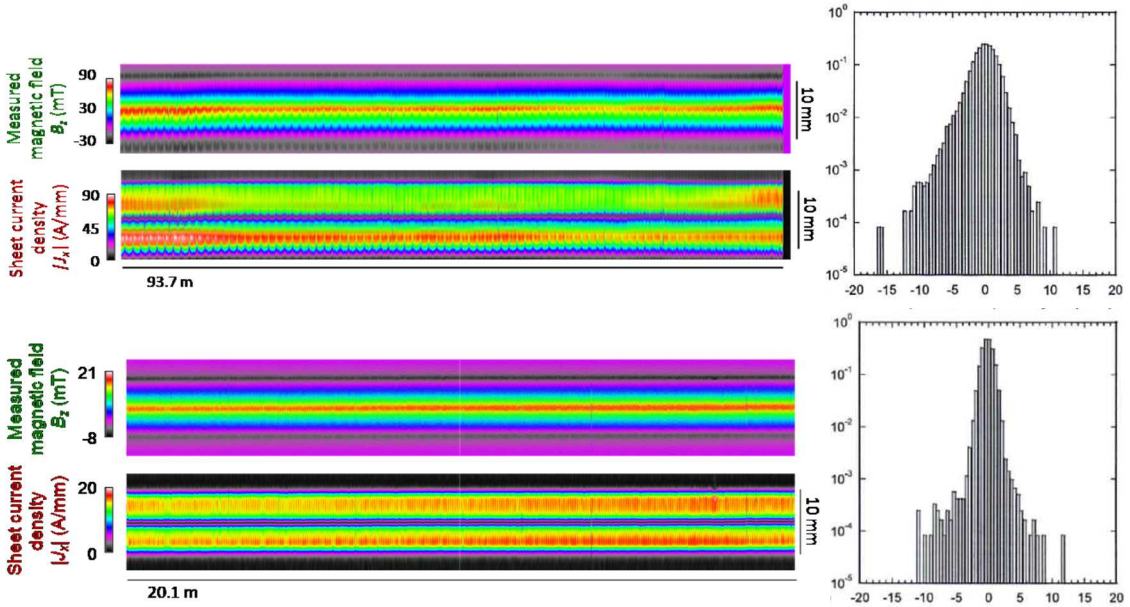


図 2.4.3.2-12　従来の PLD 法(上図)と面プルーム PLD 法(下図)で作製した EuBCO + BHO 線材の面内磁化法臨界電流密度(J_c)分布比

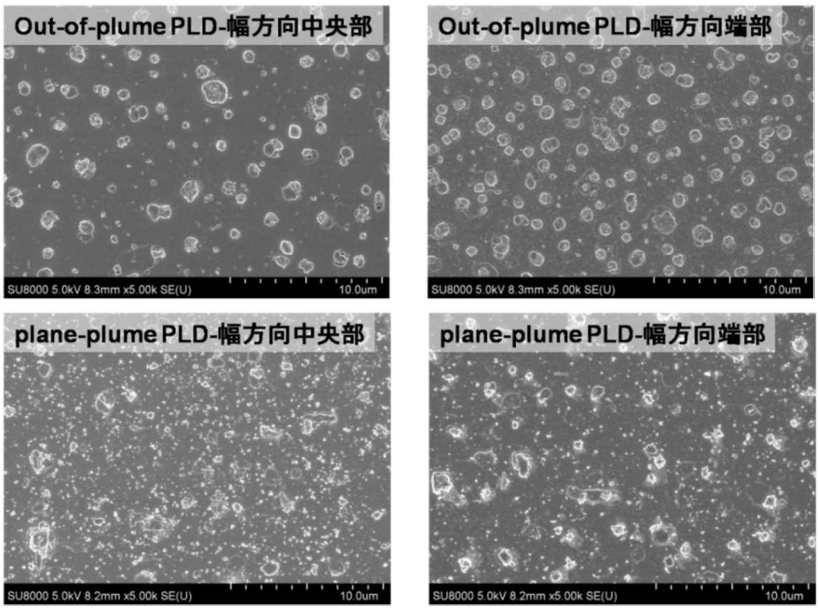


図 2.4.3.2-13　従来の PLD 法(上写真)と面プルーム PLD 法(下写真)で作製した EuBCO + BHO 層の表面 SEM 写真(左側;10 mm 幅線材の中央部、右側;端部)

図 2.4.3.2-14 は、面プルーム PLD 法用いて作製した EuBCO + BHO 線材の 65 K、 3 T における特性を示したものである。異方性の少ない J_c-B- θ 特性を有していることから、あらゆる角度の印加磁場に対しても臨界電流(I_c)の変化が少ないことがわかる。これは、従来の PLD 法と比較して面プルーム PLD 法は堆積速度が増加しているため人工ピンである BHO が比較的細かくランダムな方位を有していることと、過飽和度の増加により自然に導入される積層欠陥の量が増加していることが影響していると考えられる。

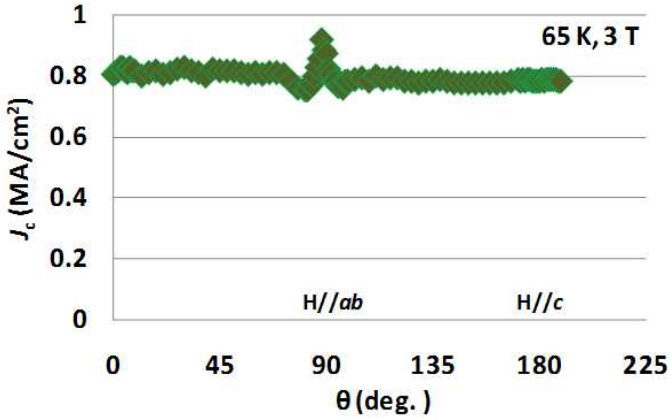


図 2.4.3.2-14 面プルーム PLD 法で作製した EuBCO + BHO 線材の Jc-B- θ 特性 (65 K、3 T)

(3) 2.4.3.2 項のまとめ

MOD 法による金属基板中間層表面平坦化プロセスの開発において、溶媒に 1-メトキシ-2-プロパノールを用いた MOD-Y_2O_3 平坦化層及び MOD-$GdZrO_3$ 平坦化+拡散防止層用原料溶液を開発した。MOD-Y_2O_3 / $GdZrO_3$ 平坦化層を成膜したハステロイ ™ 基板に、中間層(PLD-CeO_2 / Sputter-$LaMnO_3$ / IBAD-MgO)及び超電導層(PLD-$EuBa_2Cu_3O_y$)を成膜して作製した線材は、超電導特性(I_c = 294 A/cm-w、J_c= 4.9MA/cm^2)を示した。以上より、MOD-Y_2O_3 / $GdZrO_3$ 平坦化層は、ハステロイ ™ 基板の平坦化に有効であると考えられ、優れた幅方向の特性分布を有する超電導線材への適用可能性が期待できる。

PLD 法による超電導層の組織・特性分布改善技術開発においては、長時間成膜に伴うプルームの不安定性について、従来の PLD 法(Out-of-plume PLD method)から面プルーム PLD 法(Plane-plume PLD method)に変更することで、プルームの不安定性の影響を低減し特性分布改善が可能となった。面プルーム PLD 法で作製した線材の磁場中特性は、従来の線材よりも異方性の少ない特性を得ることができた。

参考文献

[2.4.3.2-1] V. Matias, 2006 Los Alamos presentation *Superconductivity for Electric Systems Annual Peer Review* (Arlington VA, July 25-27 2007)

2.4.3.3　シミュレーション　（産業技術総合研究所）

高磁場コイル用低損失構造線材の研究開発として、超電導テープ線材の電磁応答と損失に関するシミュレーションを行った結果について述べる。

MRI 等に用いられる高磁場マグネットでは、マグネットの励磁および消磁過程において損失・発熱を生じ、またマグネット内の線材は数テスラ以上の高磁場中にある。そこで、超電導テープ線材の低損失化のための構造を明らかにすることを目的とし、定速で掃引される高磁場中における超電導テープ線材の磁化損失について理論・シミュレーション研究を行った。特に、撚線化および細線化加工した線材の幾何学的構造の影響について考察した。以下に 3 つの構造（1. 撚線化した線材、2. 撚線化かつ細線化した線材、および 3. 螺旋巻きした線材）について、超電導テープ線材の定速掃引磁場中の磁化損失に関する研究成果を述べる。

（1）撚線化した超電導テープ線材における磁化損失

超電導テープ線材は、その幅広面に対して垂直な磁場中で大きな損失を生じることが知られているが、その損失を低減するための一つの方法として、撚線化した構造のテープ線材について考察した。図 2.4.3.3-1のように、テープ線材をその中心軸の周りに撚った（ツイストした）構造をもつ線材である。Takayasu et al. [2.4..3.3-1] は、実際に、積層した超電導テープ線材を撚った構造の導体 (Twisted stacked-tape cable conductor) を試作している。本研究では、先ず撚線構造の基本的な幾何学的効果を把握するため、図 2.4.3.3-1 のような一枚の撚線化テープ線材について考察した。

テープ線材における超電導層の厚さ(～ μ m)は幅(～mm)に比べて充分薄いので、超電導層を流れる電流密度は厚さ方向に一様であるとし、超電導層内の 2 次元電流分布を考察する薄膜近似が非常に良い近似となる。電流密度はスカラー量である流れ関数 (Stream function) の微分として導かれ、電流の流線は流れ関数の等高線に相当する。薄膜近似では、テープ面に垂直な磁場成分に対する電流密度の応答を考察すれば充分であり、垂直磁場に対する Maxwell-Faraday の電磁誘導則および電場と電流密度との関係式より、流れ関数に関する方程式が得られる。ここで、超電導層における電場と電流密度の関係式として、広く用いられているn値モデル（冪乗則）を採用したが、線材の幾何学的形状の効果を明確にするため、臨界電流密度などの磁場依存性は無視した。

図 2.4.3.3-1 の撚線化テープ線材の解析において、撚線化テープ面状での座標系(u,v)を用いた。u 方向はテープ面状の幅方向に相当し、v 方向はテープ面上を螺旋状に進む長手方向に相当する。この(u,v)座標系を用いて、上記の流れ関数に関する閉じた方程式を解析的に導き、得られた 2 次元非線形ポアソン方程式を数値的に解いた[2.4.3.1-2]。数値シミュレーションにおけるパラメーターの値は、テープ線材幅 w_0 = mm、超電導層の厚さ d_0 = 2 μ m、臨界電流密度 $J_c = 5\times10^{10}$ A/m^2、電場基準 $E_c = 1\times10^{-4}$ V/m、冪乗則指数 n = 2、およびツイスト・ピッチ L_p = 40～400 mm とした。

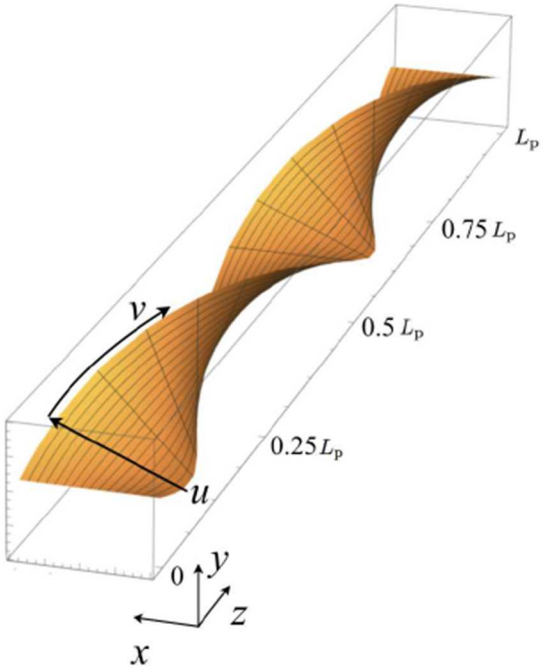


図 2.4.3.3-1　撚線化した超電導テープ線材

撚線化した超電導テープ線材においては、ツイスト・ピッチ L_p はテープ幅 w_0 に比べて充分長く、ゆるやかに撚った状態である。この場合、撚線化したテープ線材は、長手(z)方向に連続的に傾いた平坦なテープ線材を接続した集合とみなすことができる。この傾いた平坦テープ近似を確認するため、テープ線材における垂直磁場成分の分布を調べた。図 2.4.3.3-2 に、垂直磁場成分の幅(u)方向依存性を、螺旋状長手方向の座標 v を変化させてプロットした結果を示す。シンボルは数値シミュレーションの結果であり、実線は平坦なテープ線材が磁場方向に対して傾いた場合の理論式[2.4.3.1-3]のプロットである。v/L_p = 0.5 の場合は、印加磁場の方向(y 方向)に対してテープ面は垂直であるために磁場の値は全体的に大きいが、v/L_p = 0.75 では、テープ面は印加磁場に平行なので磁場の値は小さい。シミュレーション結果(シンボル)は理論式(実線)とよく一致しており、上記の傾いた平坦テープ近似が妥当であることを示している。

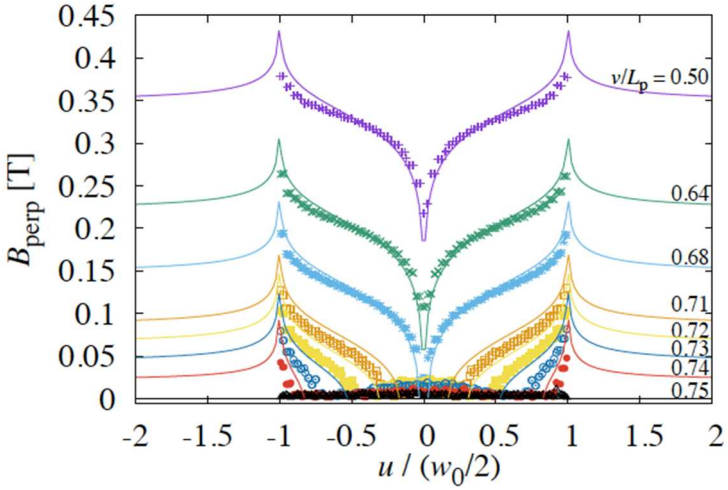


図 2.4.3.3-2　垂直磁場成分の分布

図 2.4.3.3-3 に、外部印加磁場 B_a（実線）およびシミュレーション結果である損失パワー P（シンボル）の時間依存性を示す。マグネットの励磁過程を想定して、外部印加磁場 B_a は、t = 30s から t = 170s までは一定の掃引速度で増加させた。B_a が定速掃引となっている時間帯において、損失パワー P はほぼ一定となっている。ただし、臨界電流密度などの磁場依存性を考慮すると、外部印加磁場が定速掃引されても損失パワーは時間的に一定ではないことも確認した。黒塗りシンボルで示した撚線化テープ線材の損失パワーは、白抜きシンボルで示した垂直磁場中の平坦テープ線材の損失パワーの 0.64 倍程度である。これは、撚線化テープ線材では、B_a に対して部分的に傾いており、テープ面が B_a に対して平行に近い部分で生じる損失が小さいためである。上記の傾いた平坦テープ近似に基づいて、平坦テープ線材の損失に対する撚線化テープ線材の損失の比を求めると、n 値が無限大の臨界状態モデルでは $2/\pi$ = 0.637 となり、さらに一般の n 値に対するこの比の理論表式も導いた。さらに、流れ関数についての2次元非線形ポアソン方程式において、ツイスト・ピッチ L_p がテープ線材幅 w_0 に比べて充分長く、ゆるやかに撚られた極限について理論的に考察し、これまで直感的に用いられていた傾いた平坦テープ近似の妥当性を、解析的に確認した。なお、ツイスト・ピッチがテープ線材幅に比べて充分長い場合は、線材単位長あたりの損失は、ツイスト・ピッチに対してほとんど依存しないことも明らかにした。

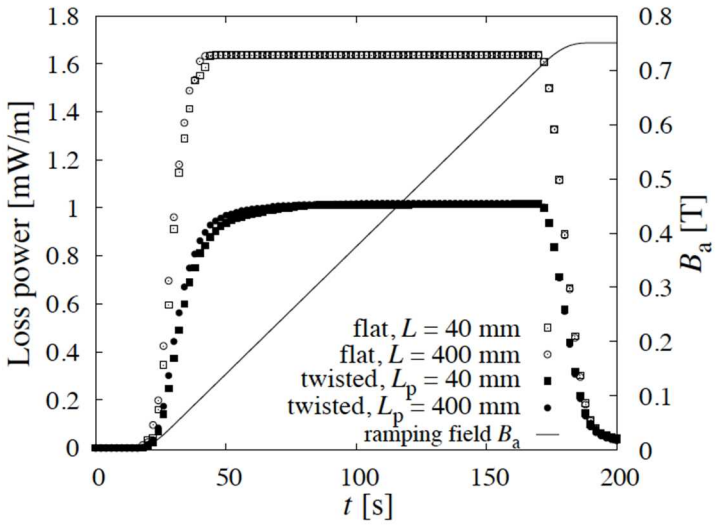


図 2.4.3.3-3 外部印加磁場および線材単位長あたり損失パワーの時間依存性

参考文献

[2.4.3.3-1] M. Takayasu, L. Chiesa, L. Bromberg, and J. V. Minervini, Supercond. Sci. Technol. 25, 014011 (2012).

[2.4.3.3-2] Y. Higashi, H. Zhang, and Y. Mawatari, IEEE Trans. Appl. Supercond. 29, 8200207 (2019).

[2.4.3.3-3] E. Brandt and M. Indenbom, Phys. Rev. B 48, 12893 (1993).

(2) 撚線化かつ細線化した超電導テープ線材における磁化損失

超電導テープ線材が垂直磁場中で大きな損失を生じる問題を解決する一つの有効な手法として、テープ線材を細線化することが知られている。その理由は、超電導線材中を出入りする量子化磁束線の移動距離が、細線化により小さくなるためである。しかし、細線化した超電導テープ線材の熱磁気不安定性を抑えるためにテープ線材を銅などの安定化材で覆うと、超電導細線どうしが電気的に結合することにより、細線化の効果がなくなって大きな損失を生じる恐れがある。その超電導細線の結合を抑えるために、線材を撚線化する手法が知られている。そこで、図 2.4.3.3-4 のような、4 分割に細線化して撚線化した超電導テープ線材の定速掃引磁場中の電磁応答と損失について考察した。

シミュレーションの手法は基本的には「1. 撚線化テープ線材」の場合と同様であり、薄膜近似による電磁誘導則から導かれる電流密度の流れ関数についての方程式を数値的に解いた。ただし、電場と電流密度との関係式として、超電導細線中では同様の n 値モデルを採用したが、細線間は銅を想定した常電導抵抗による線形の関係を与えた。数値シミュレーションにおけるパラメーターの値は、テープ線材幅 w_0 = 4mm、超電導細線の幅 w_1 = 0.97mm、細線間の溝幅 s_1 = 40 μ m、超電導層の厚さ d_0 = 2 μ m、臨界電流密度 J_c = 5×10^{10} A/m^2、電場基準 E_c = 1×10^{-4} V/m、乗則指数 n = 21、細線間の常電導抵抗率 ρ_n = 1×10^{-9} Ωm、およびツイスト・ピッチ L_p = 2～6m とした。

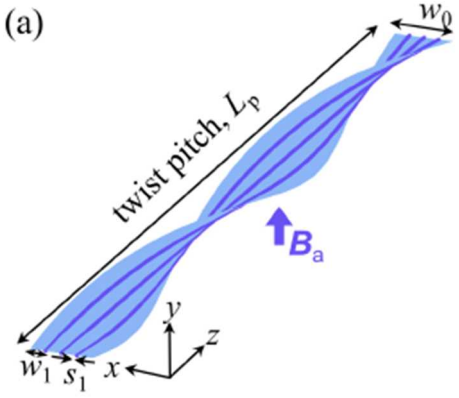


図 2.4.3.3-4 撚線化かつ細線化した超電導テープ線材

図 2.4.3.3-5 に、テープ線材面における電流密度の分布を示す。撚ったテープ線材面を紙面上に平坦に広げた(u、v)座標面上の分布として表示しており、幅(u)方向には線材幅 w_0、長手(v)方向には半ピッチ $L_p/2$ における分布なので、長手(v)方向のスケールは幅(u)方向に比べて 1/1000 程度に圧縮されていることに注意されたい。また、黒線は電流密度の流線を流れ関数の等高線として示したもので、カラー・プロットは臨界電流密度 J_c で規格化した電流密度の絶対値である。磁場掃引速度が β = 3mT では電流流線のループはほぼ 4 分割されており、超電導細線の電磁結合はほとんど無い。一方、β = 300mT では電流流線はテープ面全体にわたって大きなループを形成しており、超電導細線が結合していることがわかる。

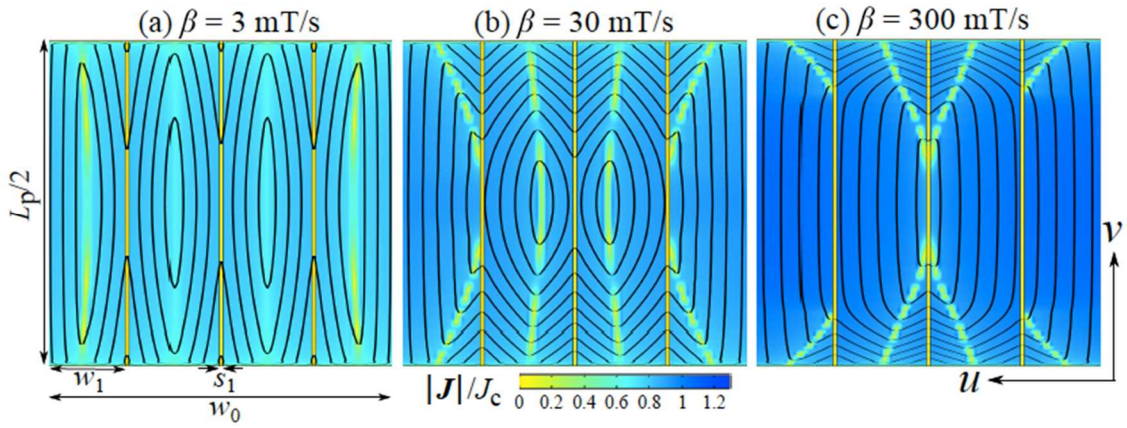


図 2.4.3.3-5　L_p = 2m の場合のテープ線材面における電流密度分布

図 2.4.3.3-6 に、線材単位長あたりの損失パワー P を磁場掃引速度 β で除した P/β を、β の関数としてプロットしたシミュレーション結果を示す。三角シンボル▲は超電導細線で生じた損失、丸シンボル●は細線間の常電導体で生じた損失、および四角シンボル■は両者の和である線材全体の損失を示している。P/β の β 依存性は、同様な線材に正弦波交流磁場を印加した場合の、一周期あたり交流損失の周波数依存性[2.4.3.3-4]と良く似ている。常電導体での P/β は、β に対してピークをもつ依存性を示し、そのピークにおける β の値を臨界掃引速度 β_c と定義する。$\beta = \beta_c$ では、図 2.4.3.3-5(b)のような電流分布となっている。$\beta >> \beta_c$ では、図 2.4.3.3-5(c)のような電流分布で超電導細線は結合し、図 2.4.3.3-6(a)のとおり超電導細線の損失▲および全体の損失■は大きいことがわかる。一方、$\beta << \beta_c$ では、図 2.4.3.3-5(a)のような電流分布で超電導細線の結合はなく、図 2.4.3.3-6(a)のとおり超電導細線の損失▲および全体の損失■は 4 分割細線化の効果により 1/4 程度に小さく抑えられていることがわかる。図 2.4.3.3-6(a)は L_p = 2m の場合であり、図 2.4.3.3-6(b)は L_p = 6m の場合の損失である。両者を比較すると、ツイスト・ピッチに応じて β_c が変化し、L_p は短い方が超電導細線の電磁結合を抑えられることがわかる。理論的考察により β_c の Lp 依存性を調べたところ、β_c は L_p の2乗に反比例することがわかった[2.4.3.3-5]。MRI マグネットを励磁する場合、超電導線材が経験する磁場の掃引速度はおおよそ β = 1mT/s であるとすると、L_p < 2m とすれば超電導テープ線材の細線化は損失低減に有効であることが明らかとなった。L_p = 2m は線材幅 w_0 = 4mm に比べて 3 桁ほど大きく、かなりゆるやかに撚った場合であり、充分現実的なツイスト・ピッチである。

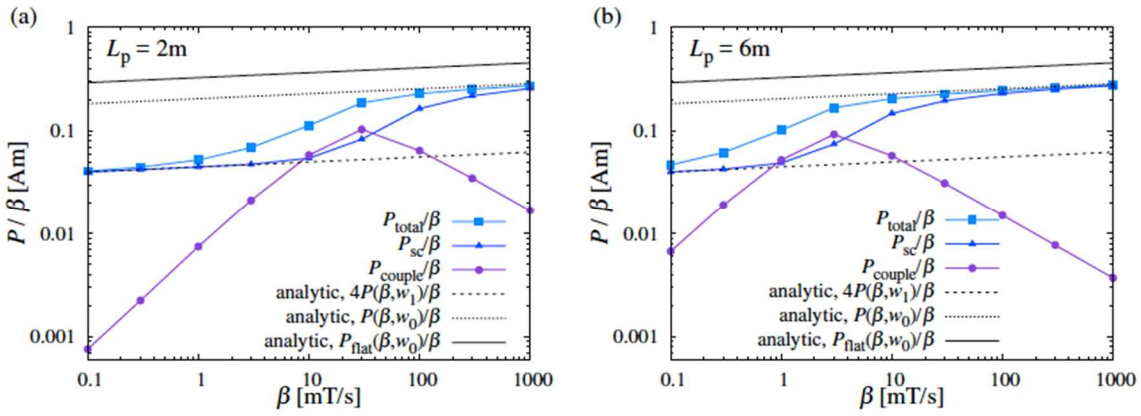


図 2.4.3.3-6　単位長あたり損失パワー Pを磁場掃引速度 βで除した P/β の β依存性

参考文献

[2.4.3.3-4] N. Amemiya, S. Sato, and T. Ito, J. Appl. Phys. 100, 123907 (2006).
[2.4.3.3-5] Y. Higashi and Y. Mawatari, Supercond. Sci. Technol. (2019), in press.

(3). 螺旋巻き超電導テープ線材における磁化損失

上記の撚線化したテープ線材とは異なる幾何学的形状をもつ線材が、Conductor On Round Cable (CORC) 線材として提案された[2.4 .3.3-6]。この線材は、図 2.4.3.3-7 のように超電導テープ線材を円筒面に螺旋巻きした構造を持ち、円筒径は～mm オーダまで細くすることができ、ツイスト・ピッチも上記の撚線化テープ線材よりはるかに短く巻くことができ、さらにフレキシブルで線材としての取り扱いが容易であるという優れた特徴をもつ。この線材の損失の幾何学的形状効果を明らかにする目的で、定速掃引磁場中の磁化損失について理論解析および数値シミュレーションを行った。実際の CORC 線材とは異なり、テープ線材は一枚のみ単層で巻かれた単純化したモデルについて考察した。シミュレーションの手法は、「1. 撚線化テープ線材」の場合と同様である。数値シミュレーションにおけるパラメーターの値は、テープ線材幅 w_0 = 2mm、超電導層の厚さ d_0 = 2 μ m、臨界電流密度 $J_c = 5\times10^{10}$ A/m^2、電場基準 $E_c = 1\times10^{-4}$ V/m、冪乗則指数 n = 29、円筒半径 R = 0.3～20mm、およびツイスト・ピッチ L_p = 2～200 mm とした。

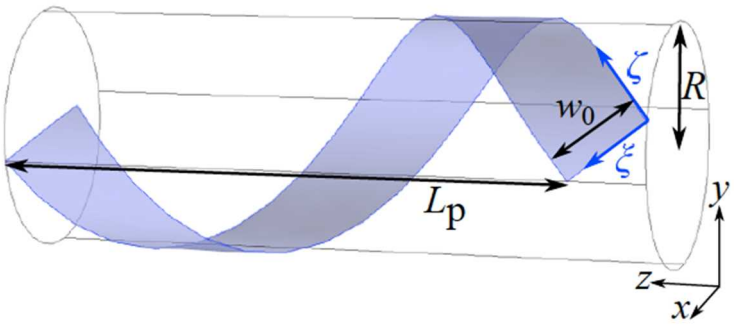


図 2.4.3.3-7：円筒面に螺旋巻きした超電導テープ線材

図 2.4.3.3-8 に、螺旋巻き超電導テープ線材の線材単位長あたりの損失パワーをツイスト・ピッチ L_p に対してプロットしたシミュレーション結果を示す。L_p が線材幅 w_0 より小さくなると損失もいくらか小さくなるものの、特に円筒径 R がテープ線材幅 w_0 より大きい場合、損失は L_p に対してほとんど依存しないことがわかった。また、円筒径が小さくなると、損失が小さくなる様子が見られた。

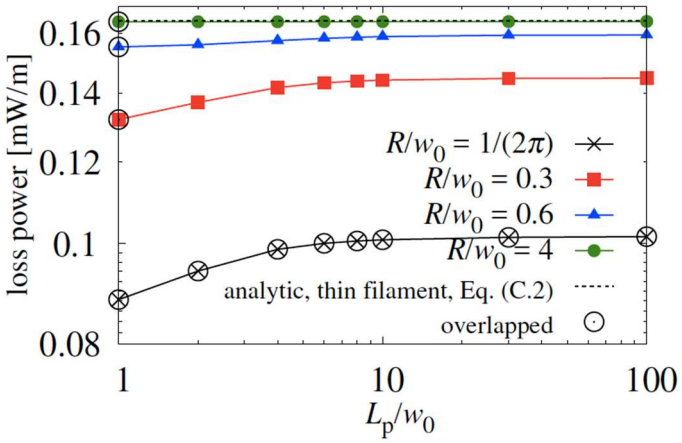


図 2.4.3.3-8　螺旋巻き超電導テープ線材の線材単位長あたりの
損失パワーのツイスト・ピッチ依存性

図 2.4.3.3-9 は、損失パワーの円筒径依存性である。円筒径 R がテープ線材幅 w_0 より小さくなると、損失は明らかに小さくなることがわかった。これは、円筒径が小さいと、外部印加磁場方向(y 方向)から見た線材幅が小さくなるためであり、一般に細線化により超電導体の損失が小さくなることと本質的に同じ効果である。図 2.4.3.3-9 で、横軸の下限が $R/w_0 = 1/2\pi$ であるのは、R/w_0 がこれより小さいと、テープ線材同士が重なるためである。電流密度の流れ関数についての方程式を導き、垂直磁場中の平坦テープ線材の損失に対する螺旋巻き超電導テープ線材の損失の比について理論的に考察した。その結果、円筒が太い極限($R/w_0 \rightarrow \infty$)のときの損失に対して、円筒が細い場合($R/w_0 = 1/2\pi$)の損失は $(2/\pi)^2 = 0.405$ 倍に小さくなることを明らかにした[2.4.3.3-7]。さらに、細線化した超電導テープ線材を円筒状に螺旋巻きした線材(細線化した CORC 線材)の磁化損失についてもシミュレーションを行い、超電導細線の電磁結合の抑制と損失低減のためには、ツイスト・ピッチを小さくすることはもちろん、円筒径を小さくすることも有効であることを明らかにした。

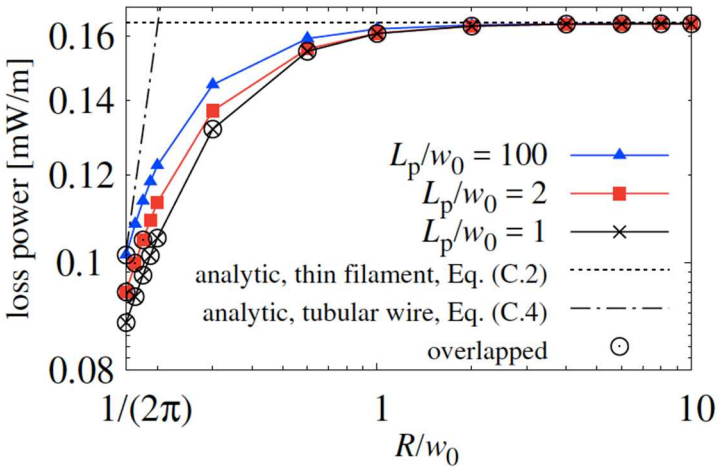


図 2.4.3.3-9 螺旋巻き超電導テープ線材の線材単位長あたりの損失パワーの円筒径依存性

参考文献

[2.4.3.3-6] D. C. van der Laan, Supercond. Sci. Technol. 22, 065013 (2009).

[2.4.3.3-7] Y. Higashi and Y. Mawatari, unpublished.

(4) 2.4.3.3 項のまとめ

ア. 撚線化テープ線材の磁化損失に関する結論として、次の 2 点を明らかにした。

（ア） ゆるやかに撚られた場合は傾いた平坦テープ近似が妥当である。

（イ） 外部印加磁場に対するテープ線材の傾き角が局所的に変化することで、垂直磁場中の

平坦テープ線材の損失より小さくなる。

イ. 撚線化かつ細線化した超電導テープ線材の磁化損失に関する結論として次の 2 点を明らかにした。

（ア） 磁場掃引速度 β が臨界掃引速度 β_c より充分小さい場合、超電導細線の電磁結合はなく、損失低減に細線化は有効である。一方、β が β_c より大きい場合、細線が結合して大きな損失を生じる。

（イ） 臨界掃引速度 β_c はツイスト・ピッチ L_p の 2 乗に反比例し、L_p を小さくすることで細線化による損失低減が有効である。ある条件のもとで、L_p を 2m より小さくすれば、MRI マグネットの磁場掃引速度～1mT/s で細線化による損失低減が可能である。

ウ. 螺旋巻き超電導テープ線材の磁化損失に関する結論として、次の 2 点を明らかにした。

（ア） 円筒径を小さくすると線材単位長あたりの損失は小さくなり、テープ線材が重ならない限界まで円筒径を小さくした場合の損失は、円筒径が大きい極限における損失に比べ

て 0.405 倍まで小さくなる。

（イ） 細線化した螺旋巻き超電導テープ線材において、円筒形を小さくすることは、超電導細線の電磁結合の抑制と低損失化にも有効である。

2.4.3.4 細線化加工 （産業技術総合研究所）

（1） マルチビームレーザによるスクライブ加工高速化技術開発

Y 系線材を超電導マグネットに応用する上で交流損失の低減および遮蔽磁場の影響の低減が必要不可欠である。そのために産業技術総合研究所は銅安定化層と超電導層を溝状に切削するレーザスクライビング法を用いて線材の細線加工を行っている[2.4.3.4-1]。エキシマレーザ(KrF)を用いた長尺スクライビング加工は、剥離強度が低下せず、化学エッチング法に比べて臨界電流（I_c）低下率が小さく、溝幅制御が容易で、長尺線材に適用実績があるため Y 系線材の細線化に必要な技術であるが、産業への適用となると加工速度を高めなければならない。そのためには、一回の照射で複数の溝を形成できるマルチビーム化を実現する必要がある[2.4..3.4-2]。

従来のエキシマレーザ(KrF)を用いた長尺スクライビングは実験室内での検証であったため、1本のビームによる加工であった。そのため例えば10分割線材では9回のレーザ照射が必要となるため加工時間が約1桁長くなり、線材製造に適用するには加工速度の向上が必要であった。

スクライビングの加工速度を向上させる最も効果的な方法は、1回に複数のレーザビーム(以下、ビームと称す)を照射するマルチビーム化である。マルチビームを生成するための手法として、線材の幅方向にビームを広げ、そのビーム内の強度を均一にする方法を選択した。ビームはマスクによって長方形に整形されるが、ビーム幅が広がることで複数のマスクを用いたマルチビーム化が可能になると考えた。

ア． 技術開発および実験方法

（ア） マルチビーム化技術

エキシマレーザはガスレーザであるため、固体レーザのように位相が揃っておらず、ビーム形状は長方形である。このため複数のマスクを配置することでマルチビームが生成可能であると当初は考えたが、固体レーザほどではないものの、長方形ビームの内部にはビーム強度に分布が存在し、中心部にガウシアン成分を有しているため、マスク入射前のビーム強度を均一にしなくてはビーム間に強度の違いが生じ、同一深さの切削ができない。そのためにホモジナイザを導入した。

ホモジナイザには、フライアイレンズ、非球面レンズ、回折光学素子(DOE、 Diffractive Optical Elements)を用いる方法がある。非球面レンズでは円形のビームとなってしまい長尺線材加工に適した長方形ビームの生成には不向きである。DOE は非常に均一性の高いビームが生成できるが、その最大径は数 10μm の大きさに限られており、これも線材加工に適した技術とは言えない。そこで、長方形で数 10mm の大きさで均一なビームを発生できるフライアイレンズを導入した。搬送される長尺線材の加工が可能であればよい事から、通常のフライアイレンズではなく、線材の幅方向のみを均一化するために、7個のシリンドリカルレンズを並べたものをホモジナイザとして用いた(図 2.4.3.4-1)。

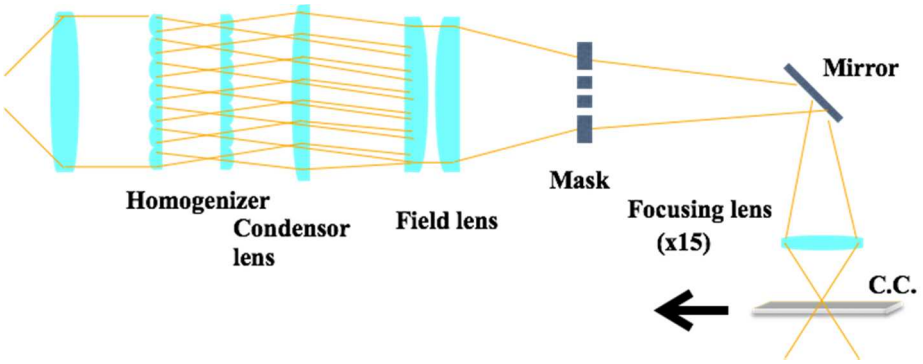


図 2.4.3.4-1 マルチビームを発生するレーザスクライビングの光学系の模式図

(イ) ホモジナイザ導入による影響

図 2.4.3.4-1 に示すように実際のホモジナイザは接合した7つのシリンドリカルレンズを2組用いている。そのままではビームが広がるので、フィールドレンズ面で一定の大きさになるようにコンデンサーレンズを導入し、フィールドレンズはマスクを通過して集光レンズへビームを導くために設置した。図中ではフィールドレンズ後のビームは1本に集約して描いてあるが、実際には複数のビームの集合である。光学設計において、ホモジナイザから線材試料面への距離の位置で各シリンドリカルレンズからのビームが1本に集束するように計算してあるので、これが線材の搬送などによってずれた場合には複数のビームに分裂してしまうことが危惧される。したがって、集光レンズと試料との距離 z が計算値からずれた場合にどこまで許容されるのかを調べる必要がある。そこで、最適な焦点位置からずらした場合のビームの振る舞いを蛍光紙およびビームプロファイラによって観察し、許容範囲を見極める実験を行った。ここで、ビームが分裂したかどうかは、ビームプロファイラによるビームの幅が最適な焦点位置から増加したかによって判断した。

(ウ) マスクの設計製作

マスク面でのレーザービームの幅方向の広がりは、蛍光板を用いて測定したところ約 10mm であった。そこで、10mm に収まるように複数の長方形を配置する設計を行い、実際に 0.3mm

厚のステンレスでマスクを製作した(表 2.4.3.4-1)。線材試料に打ちおろす集光レンズは 15 倍であるため、10mm 幅は線材上では約 660μm となる。溝の幅は全て 20μm とした。

表 2.4.3.4-1　マルチビームのための光学マスク

Mask No.	Filament Width (μm)	Beams per one shot	Filament number
1	605	2	8
2	480	2	10
3	293	3	16
4	188	4	24

(エ) マルチビームを用いたスクライビング加工

表 2.4.3.4-1のマスクを用いて、マルチビームスクライビングを行った。試料は 5mm 幅に切断した GdBCO 線材を用いた。フィラメント数は 5mm 幅で、8、 10、 16、 24 本であった。それぞれの分割数に対して、同時に照射できるビーム数は 2、 2、 3、 4 本である。レーザ照射は1回のみとした。パルスレーザの1パルスあたりの加工長さは 0.025mm で、線材の搬送速度は 2.00mm/s としたので、レーザの繰り返し周波数は 80Hz となった。アシストガスはレーザ照射と同軸上から圧縮空気を吹き付けた。

イ. 実験結果と考察

(ア) ビームの均一性

図 2.4.3.4-2 に線材面でのレーザの強度分布の観察結果を示す。ホモジナイザ導入後にマスクを抜いてビーム強度を測定した場合(a)には、幅方向に 780μm の均一なビームプロファイルが得られ、設計値 600μm よりも均一幅が広くとれることが分かった。マスクを挿入してデュアルビームとした場合(b)でも、強度が均一な 2 本のビームを得ることに成功した。

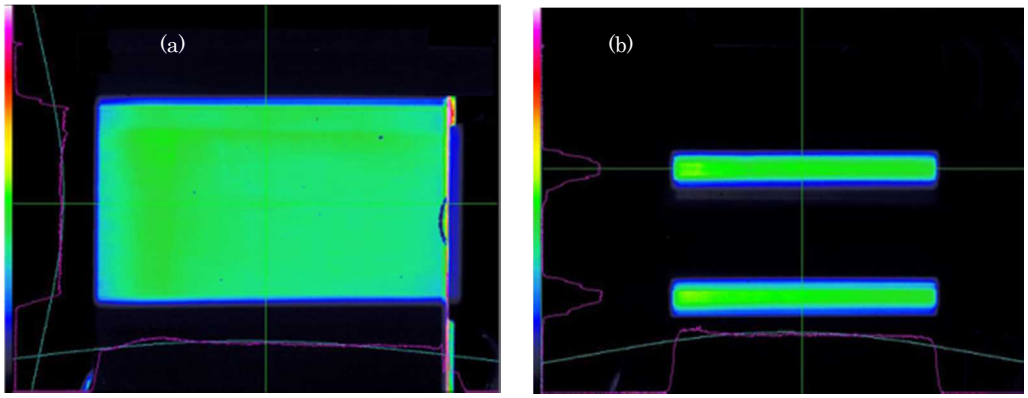


図2.4.3.4-2　線材試料位置での2Dビームプロファイルの観察結果
(a) マスクなしのビームプロファイル、 (b) 2本ビームのプロファイル

図 2.4.3.4-3 に 2 本のビームによってスクライビング加工した溝の深さのエネルギ密度依存性を示す。2 本のビームの深さ分布はほぼ同一となり、設計通りに同時に2本のスクライビング加工が可能となったことを示せた。

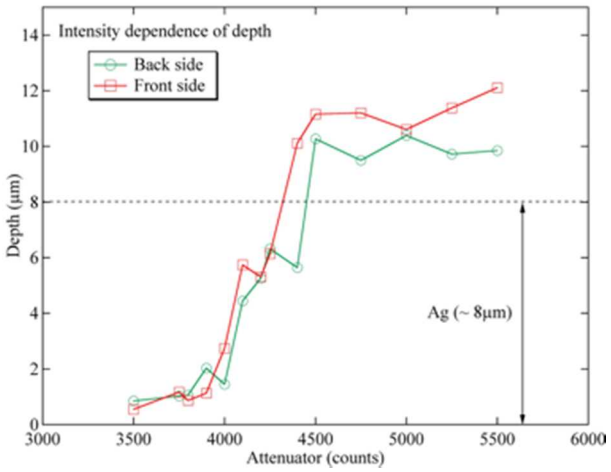


図2.4.3.4-3 2本のビームによりスクライビングした
溝の深さのエネルギー密度依存

(イ) ホモジナイザ導入によるビーム形状

図 2.4.3.4-4 に最適な焦点位置から大きく外れた場合のビーム形状を蛍光紙に照射した結果を示す。ここで、マスクは1個の長方形だけを用いた。本来ならば1本のビームだけが観察されるはずであるが、上記で危惧したように7本のビームにスプリットしている様子が分かる。これは、7つのシリンドリカルレンズによって分離されたビームが見えたと考えられる。

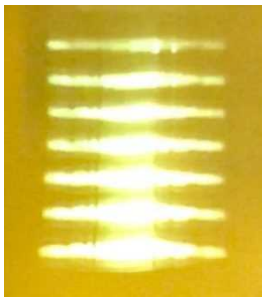
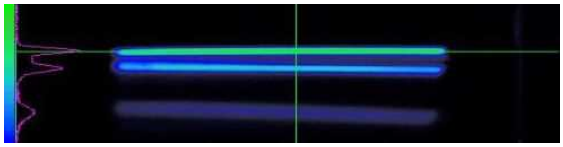


図 2.4.3.4-4 焦点(集光レンズと試料面の距離)がずれた場合のビームパターン

次に、集光レンズの高さを最適位置に合わせた場合と、僅かにずらした場合のビーム強度の2次元マッピングを行った。図 2.4.3.4-5(a)は z 軸を 50μm ずらした場合のビーム強度の分布である。明らかに最適な位置でのビーム形状 (b)に比べてビームが分裂してサブビームが

出現している。このようにして求めたビーム分裂を起こさない許容範囲は約±30μm であることが分かった。搬送中の線材が±30μm も z 方向の位置ずれを起こすことはないので、一旦最適な z 位置に調整すればサブビームが発生しない長尺線材加工が可能と考えられる。

(a) Deviated from optimum z position



(b) Optimum z position

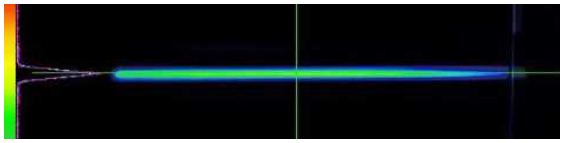
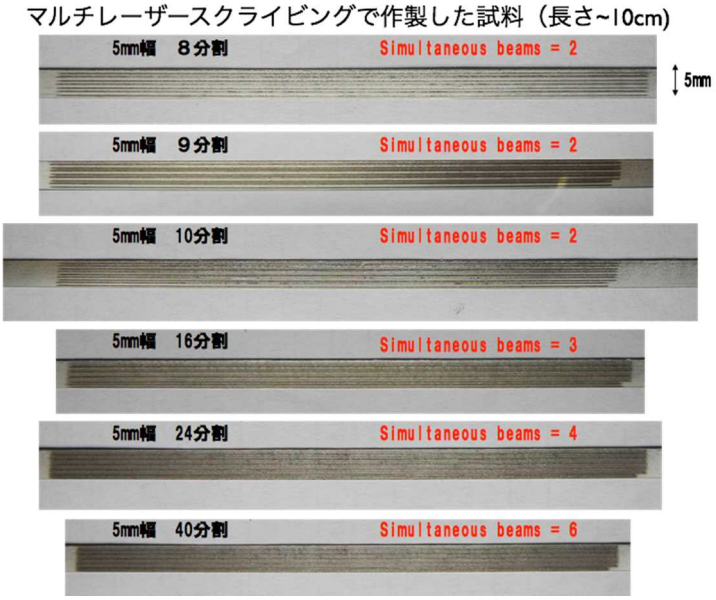


図 2. 4. 3. 4-5　ビームプロファイルの観察結果

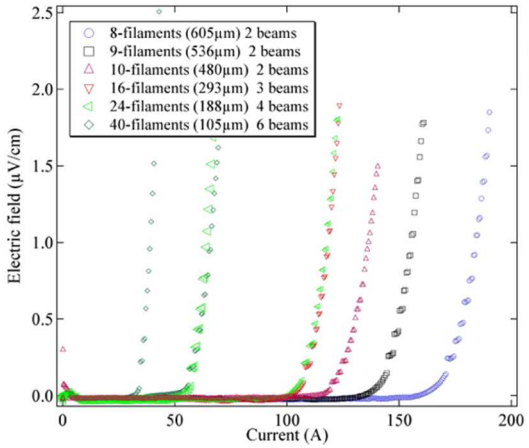
(ウ)　マルチビーム加工による線材細線化の結果

図 2.4.3.4-6 に、8、 9、10、 16、 24、40 分割線材の加工後の光学顕微鏡写真を示す。ここで、写真の右側に示した数字は、同時照射のビーム数を示している。図 2.4.3.4-7は図 2.4.3.4-6 に示した線材の I-V 特性の測定結果である。測定は全フィラメントに電流を流し、77K、自己磁場の条件で行った。図 2.4.3.4-8 は図 2.4.3.4-7 の I-V をもとに I_c の分割数依



存性をプロットした結果である。計算上の面積低下率よりも I_c の低下が大きかった。その原因として、ビーム強度や搬送速度、わずかな焦点距離のずれによる漏れビームの発生などが考えられるが、これらについては今後の研究の進展に委ねたい。

図 2.4.3.4-6　マルチビームでスクライビングした線材試料外観



Division number	n value
8	25.25
8	24.84
9	19.88
9	24.08
10	24.47
10	20.79
16	22.13
24	19.82
24	21.08
40	14.86
40	15.94

図 2.4.3.4-7　マルチレーザスクライビングした線材の電流-電圧(*I*-*V*)測定結果

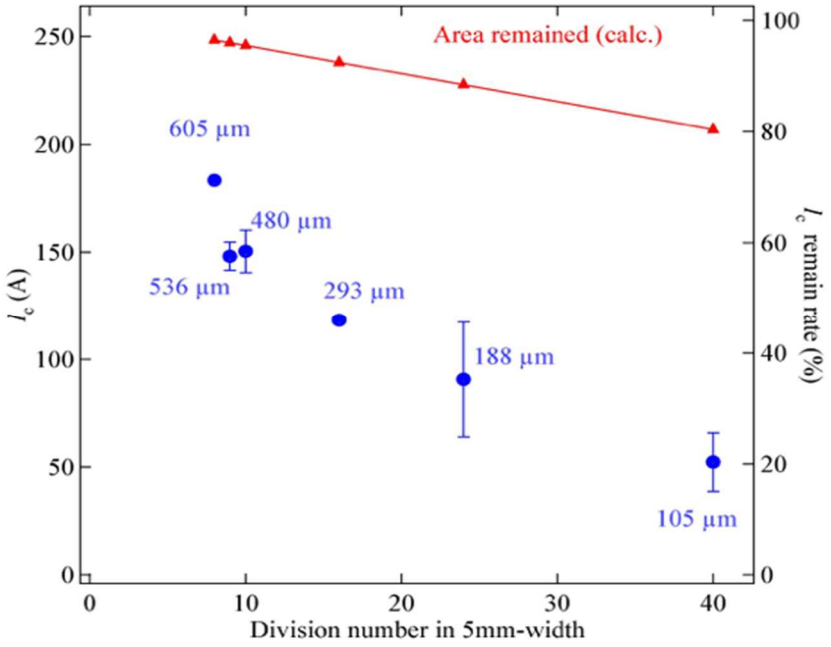


図 2.4.3.4-8　分割数による 5mm 幅の I_c の変化

ホモジナイザを導入することによって、複数のビームを同時に照射するマルチビームスクライビングが可能であることを示すことができ、スクライビング加工速度を向上できた。ここで得た知見をもとに、今後もスクライビング加工技術を向上させていく必要がある。

図 2.4.3.4-9 は、従来の PLD 法及び 2.4.3.2 (2) 項で述べた面プルーム PLD 法で作製した線材 (0.6 m 長)をレーザスクライブ法を用いて細線化し(10 mm 幅を 8 分割)、それぞれの細線ごとの短尺臨界電流(I_c)を 8 本測定し分布を示したものである。臨界電流の低下率(Dispersion = {($I_{c\ average}$) - ($I_{c\ min.}$)} / ($I_{c\ average}$) ×100 (%)))から、面プルーム PLD 法で作製し

たEuBCO + BHO線材が細線化された場合でも臨界電流分布改善が実現されていることがわかる。これは、上述したように元の線材幅方向の臨界電流分布改善が大きく寄与していると考えられる。

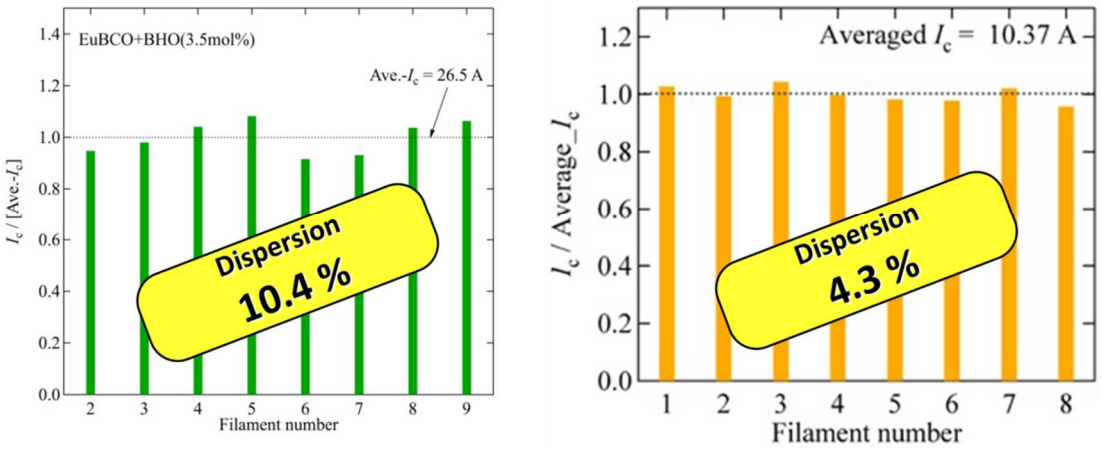


図 2.4.3.4-9 従来の PLD 法(左図)と面プルーム PLD 法(右図)で作製した 0.6 m 長線材の細線化時の短尺臨界電流(I_c)分布測定結果と臨界電流の低下率 (77 K, s.f.)

図 2.4.3.4-10 は、面プルーム PLD 法を用いて作製した 10 mm 幅の短尺線材をレーザスクライブ法で 16 分割した写真である。スクライブによって 16 分割した 3 m 長線材のヒステリシス損を測定した結果が図 2.4.3.4-11 である。分割無し線材と比較して、ヒステリシス損が約 1/16 に減少していることがわかる。このことから、レーザスクライブ法によって細線化することで交流損失を低減することが可能であり、安定化磁場発生用線材要素技術として有用であると言える。



図 2.4.3.4-10 レーザスクライブ法で 16 分割に細線化した 10 mm 幅 EuBCO + BHO 線材

(各フィラメント幅: 約 581 μm、フィラメント間の幅: 約 20 μm)

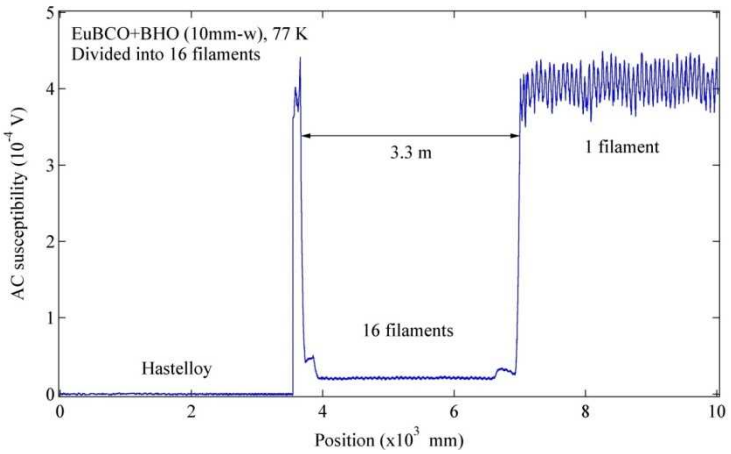


図 2.4.3.4-11　面プルーム PLD 法を用いて作製した 10 mm 幅、3 m 長 EuBCO + BHO 線材の
無分割(1 filament)とレーザスクライブ法で 16 分割した際(16 filaments)のヒステリシス損の比較

(2) 2.4.3.4 項のまとめ

EuBCO + BHO 線材をレーザスクライブ法で細線化した結果、細線化時の線材幅方向の臨界電流(I_c)分布が無分割時と同様に優れた特性分布を有し、また、線材細線化のために複数に分割加工した線材において、分割数に比例し交流損失(ヒステリシス損失)が減少することが確認された。

これらの結果から、目標である「高い磁場中臨界電流を持ったうえで無加工と比較して、交流損失 1/10」を達成した。

参考文献

[2.4.3.4-1]　T. Machi, *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 26 (2013).

[2.4.3.4-2]　T. Machi, *et al.*, J. Phys.A, Conf. Ser., 1054(2018)012033.

2.4.3.5　損失測定 （産業技術総合研究所、京都大学再委託）

結晶配向制御のために蒸着プロセスを用いるＹ系高温超電導線材はテープ形状を有しており、高温超電導高磁場コイル用線材を安定磁場発生用途で実用化するためには、テープ形状の線材をなんらかの方法で加工や集合化し、巻線工程で扱い易い丸線や平角線のような形状にする技術開発が重要である。我が国はＹ系線材をはじめとする高温超電導線材の開発に関しては世界をリードしてきたが、テープ形状の線材を上述のように加工、集合化する技術開発ついては立ち遅れているのが現状である。また、Ｙ 系線材は金属系超電導材料であるニオブチタン（Nb-Ti）線材などと比較してマルチフィラメント化（多芯化）が容易でない。また、レーザ光などを用いて超電導層を分割しマルチフィラメントに類似した構造としても、丸線形状でないため、ツイスト加工することがさらに困難であり、磁場変化に伴う交流損失の低減や遮蔽電流の低減が課題となっている。

本項では、様々な集合導体や線材の交流損失特性評価を通して、これらの課題解決の見通しを得ることを目的とした。

(1)　大気圧液体窒素冷却交流損失測定システム

(2)項、(3)項において述べる結果は、京都大学が所有する大気圧液体窒素冷却による交流損失測定システムにより行った。システムの概念図を図 2.4.3.5-1 に示す。このシステムでは、100 mT の交流磁場を印加し、300 A_{peak} の交流を通電した状態で、試料の交流損失を測定することができる。交流磁場を印加した状態での磁化損失は図 2.4.3.5-2 に示すような、試料鎖交型ピックアップコイルで測定し、交流電流を通電した状態での通電損失は試料に取り付けた電圧タップで測定する。

交流磁場下で交流電流を通電した状態での全損失は、そのときの磁化損失と通電損失の和として求めた。交流磁場印加用の銅マグネットの励磁にコンデンサバンクを利用しているため、交流磁場の周波数は 13.88 Hz、26.62 Hz、65.44 Hz、72.44 Hz、112.5 Hz、188 Hz の離散的な値である。ただし、磁場の振幅を 1 mT（1×10^{-3}T）ないし 2 mT 程度に抑えれば、コンデンサバンクによる共振を利用せずに電源で直接励磁できるので、周波数を数 Hz から 1 kHz まで連続的に変えて磁化損失を測定することができる。

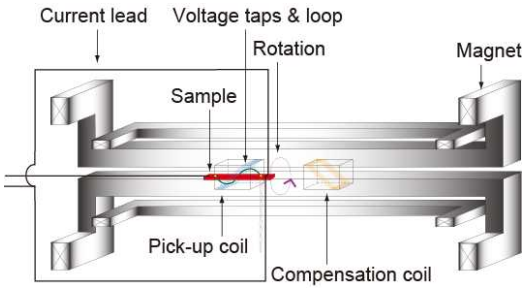


図 2.4.3.5-1　交流損失測定システム

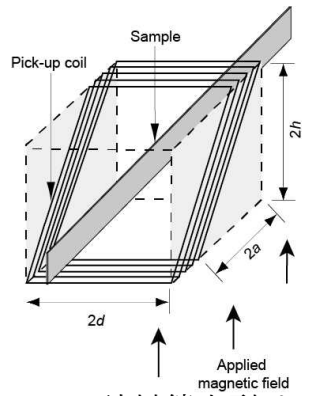


図 2.4.3.5-2　試料鎖交型ピックアップコイル

(2)　CORC 導体と比較用試料の交流損失測定

ア. 測定対象の試料

本項で述べる交流損失測定は以下の三つの試料について行った。

- 直線状の幅 2 mm の薄膜線材（臨界電流 63 A）
- 幅 2 mm の薄膜線材（臨界電流 63 A）を直径 10 mm の GFRP フォーマの上にピッチ 10 mm で巻き付けたスパイラル状線材（図 2.4.3.5-3）：CORC 導体の基本構造という位置づけ
- 幅 2 mm の薄膜線材（臨界電流 68 A）を各層 2 本×3 層巻いて製作された CORC 導体、ならびに、その CORC 導体から素線を剥いでいった導体（図 1.4.3.5-4、表 1.4.3.5-1）

磁化損失のみを測定する際の CORC 導体(Conductor On Round Cable 導体)は、より長い CORC 導体から京都大学で切り出したものであるが、電流を流す CORC 導体試料には、メーカにて円筒状の電流端子が両端に取り付けられている。通電の際には、図 1.4.3.5-5 に示すような、CORC 導体の電流端子に合わせた半円断面の溝を切った半割銅ブロックで電流端子を挟み電流を供給した。

通電用の CORC 導体試料には図 2.4.3.5-6(a)に示すように電流端子の中に臨界電流測定用の電圧タップが取り付けられている。この端子では電流を流し込む端子に近すぎるため、通電損失測定は、電流端子の部分でない CORC 導体本体の部分の外側の素線に、別途、電圧端子を取り付け（図 2.4.3.5-6(b)）、それにより行った。

イ. 直線状線材とスパイラル状線材の磁化損失の比較

直線状線材に対して、様々な角度の交流磁場を印加して磁化損失を測定した。磁化損失測定値を線材面に垂直な磁場成分に対してプロットした図が図 2.4.3.5-7(a)である。このようなプロットを行うと、よく知られているように異なる角度の磁場下で測定した磁化損失もほぼ一本の線上に重なる。次に、スパイラル状線材の磁化損失と線材面に垂直な磁場下で測定した直線状線材の磁化損失を図 2.4.3.5-7(b)で比較する。なお、図 2.4.3.5-7 では、磁化損失は線材単位長さあたりの値で示してある。スパイラル状線材では長手方向の位置で線材面に対する磁場の角度が変化するため、垂直磁場下での直線状線材の磁化損失よりスパイラル状線材の磁化損失は小さくなっている。また、スパイラル状線材が受ける磁場分布をもとに、様々な角度の磁場下で測定した直線状線材の磁化損失を重み付け平均した値（図中で Straight WA）をプロットすると、低磁場の領域を除きスパイラル状線材の磁化損失（図中で Spiral）とよく一致していることがわかる。

ウ. CORC 導体の磁化損失

図 2.4.3.5-8 に、CORC 導体と CORC 導体から素線を剥がして作った試料導体の磁化損失を磁場振幅に対してプロットした。周波数は 65.44 Hz である。ここで磁化損失は

図 2.4.3.5-7 とは異なり線材単位長さではなく導体単位長さの値で示してあることに注意を要する。図 2.4.3.5-8(b)は、$(\mu_0 H_e)^2 \pi\omega^2/\ \mu_0$（$H_e$ は印加磁場の振幅、w は線材幅）で規格化した規格化損失である。図 2.4.3.5-8 を見ると、高磁場領域では、CORC 導体の損失が一番大きく、線材を剥ぐに従って損失は小さくなっていっている。一方、低磁場領域では、逆に CORC 導体の損失が一番小さく、線材を剥ぐに従って損失は大きくなり、銅コアだけにしたときの損失、すなわち銅コアの渦電流損失が一番大きくなっている。これは、低磁場領域では、磁束の侵入が小さいため超電導体のヒステリシス損失は小さく、相対的に銅コアの渦電流損失が大きく、線材を巻き付けるにつれて超電導線材が磁場を遮蔽するために銅コアの渦電流損失も小さくなるためと考えられる。

図 2.4.3.5-9(a)には、小振幅（1mT）の交流磁場を印加したときの磁化損失を周波数に対してプロットした。CORC 導体の損失が一番小さく銅コアの損失が一番大きく、素線が少ない場合の損失－周波数曲線の形状は銅コアのそれとほぼ同じであることがわかる。銅コアの渦電流損失が損失を支配し、素線数が増えるにつれ超電導線による磁場遮蔽効果により銅コアの渦電流損失が減り、一方、それに比べ超電導体のヒステリシス損失は小さいものと考えられる。図 2.4.3.5-9(b)に示すように、銅コアの損失測定値は渦電流の理論値とよく一致した。

エ. CORC 導体の通電損失

CORC 導体本体の外側の線材につけた電圧タップで測定した通電損失を図 2.4.3.5-10 に示す。小電流領域で見られる周波数による通電損失の差は銅コアの渦電流の寄与であると考えられる。

オ. CORC 導体の全損失

図 2.4.3.5-11 に振幅 200 A の交流電流を流した状態で交流磁場を印加したときの CORC 導体の全損失を交流磁場振幅に対してプロットした。図には、通電損失成分、磁化損失成分も合わせて示してある。低磁場領域では通電損失が支配的で、高磁場領域では磁化損失が支配的となっている。

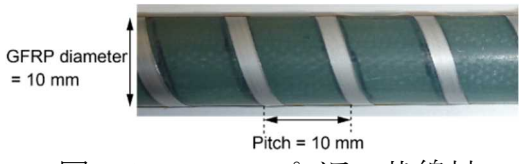


図 2.4.3.5-3 スパイラル状線材

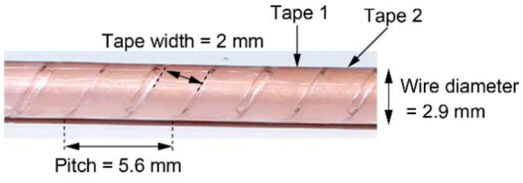


図 2.4.3.5-4 CORC 導体

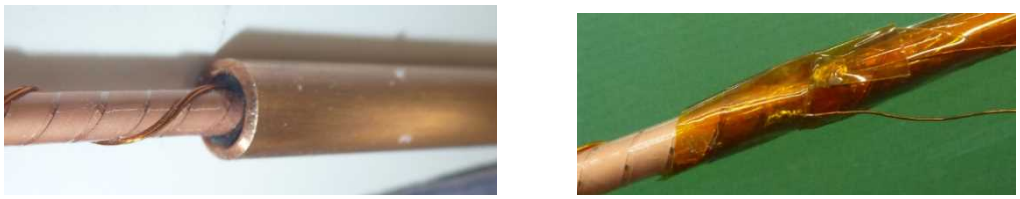
表 2.4.3.5-1　CORC 導体と CORC 導体から素線を剥がして作った試料導体

試料名称	層数	各層の本数	心材
3L-2T (オリジナルの CORC 導体)	3	2	銅(直径 2.5 mm)
2L-2T	2	2	銅(直径 2.5 mm)
1L-2T	1	2	銅(直径 2.5 mm)
1L-1T	1	1	銅(直径 2.5 mm)
SP5D-CORC	1	1	GFRP(直径 5 mm)
Cu core	0	0	銅(直径 2.5 mm)



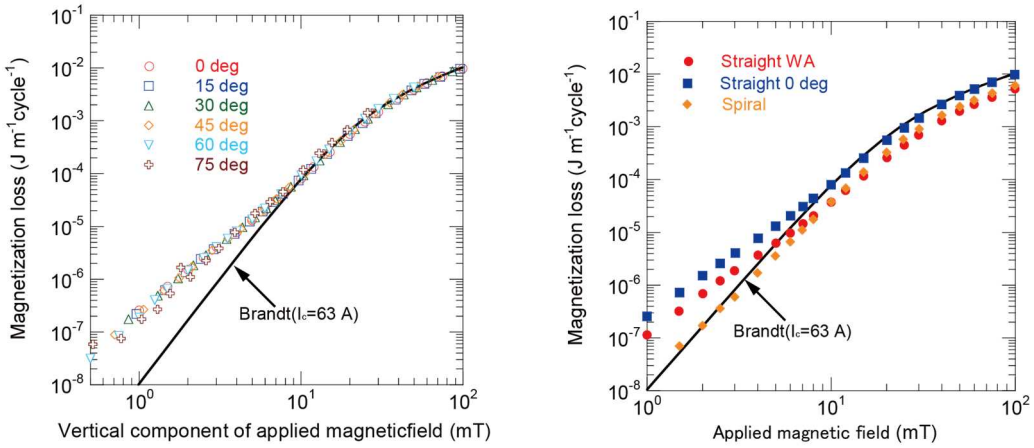
(a) 半割銅ブロックと端子　　(b) 銅ブロックの外観

図 2.4.3.5-5　CORC 導体に通電するための端子と銅ブロック



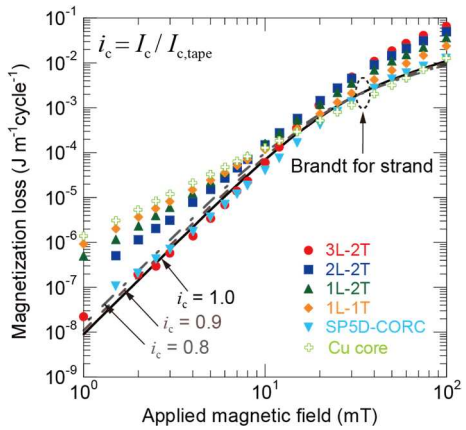
(a) 電流端子内の電圧タップ　　(b) 素線上につけた電圧タップ

図 2.4.3.5-6　CORC 導体の電圧タップ

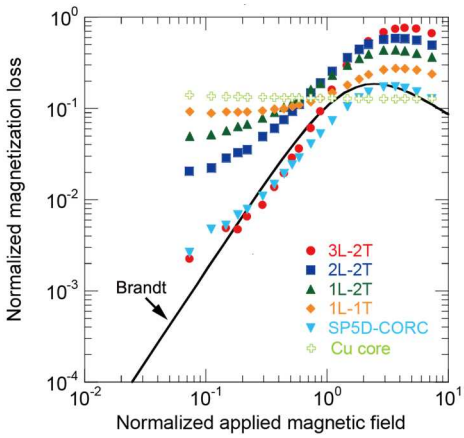


(a) 直線状線材　　(b) スパイラル状線材

図 2.4.3.5-7　直線状線材とスパイラル状線材の磁化損失(65.44 Hz)の比較

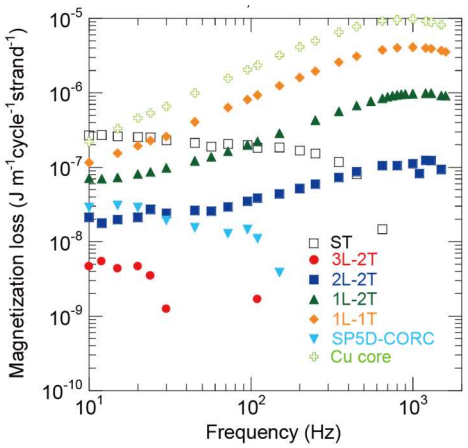


(a) 磁化損失(導体単位長あたり)

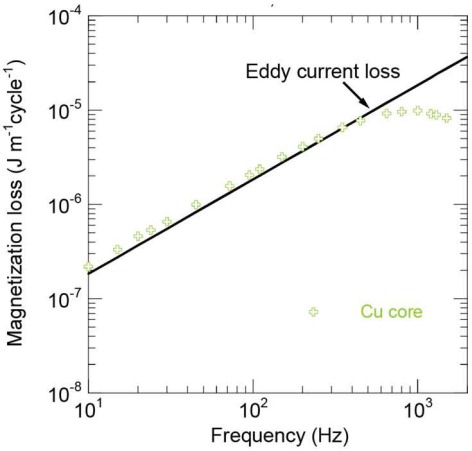


(b) 規格化磁化損失(テープ単位長あたり)

図 2.4.3.5-8　CORC 導体と CORC 導体から素線を剥がしてつくった試料導体の磁化損失(65.44 Hz)(導体全体、磁場振幅に対してプロット)



(a) テープ(テープ単位長あたり)



(b) 銅コア(単位長あたり)

図 2.4.3.5-9　CORC 導体と CORC 導体から素線を剥がしてつくった試料導体の小振幅磁場下での磁化損失(1 mT)(周波数に対してプロット)

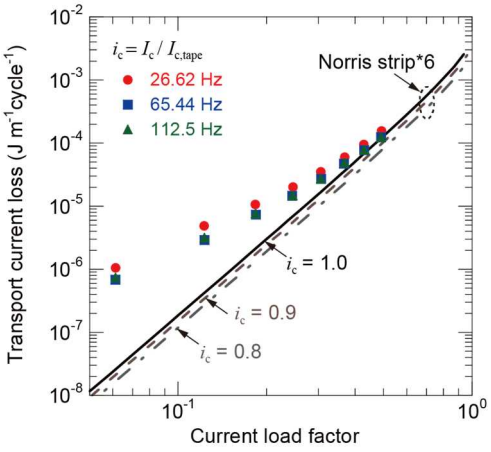


図 2.4.3.5-10　CORC 導体の通電損失
(導体全体、導体単位長あたり)

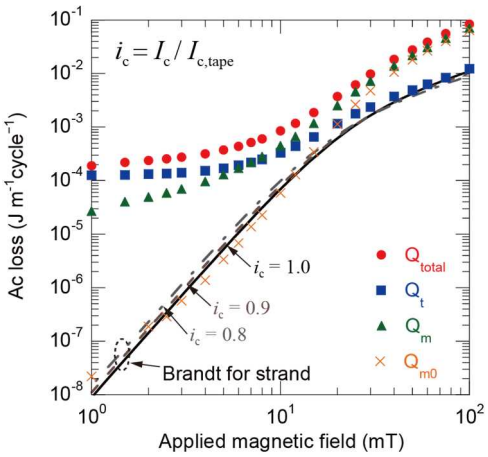


図 2.4.3.5-11　CORC 導体の全損失
(200 A、65.44 Hz)
(導体全体、導体単位長あたり)

(3) 分流用金属層なしマルチフィラメント線材の磁化損失測定

ア. 測定対象の試料

産業技術総合研究所で作製された表 2.4.3.5-2 に示すようなマルチフィラメント線材の磁化損失を測定した。この線材では超電導層をレーザにより分割しており、フィラメント間は電気的に絶縁されているか、高抵抗である。

イ. 小振幅磁場下の磁化損失の周波数依存性

1 mT の小振幅磁場下で広範囲に周波数を変化させて磁化損失を測定した結果を図 2.4.3.5-13 に示す。磁場の方向は試料面に垂直である。フィラメント間が電気的に接続されているならば、結合損失が発生し、磁化損失は周波数依存性を示し、典型的にはある周波数でピークをもつデバイ型の曲線を描くはずである。然るに、図に示された磁化損失はこのような周波数特性を示しておらず、ヒステリシス損失が支配的であると考えられる。この結果は、先述したように試料線材のフィラメント間の抵抗が大きい、ないし、フィラメント間が絶縁されていることを示すものである。

ウ. 磁化損失の磁場振幅依存性

各試料に周波数一定(65.44 Hz)で振幅を変えた磁場を印加した場合の磁化損失の比較を図 2.4.3.5-14 に示す。磁場の方向は試料面に垂直である。超電導層を分割し、フィラメント数を増やすに従って、磁化損失は小さくなっていっていることがわかる。これはマルチフィラメント化の効果である。図 2.4.3.5-15 から図 2.4.3.5-20 に各線材の磁化損失の実験値と Brandt の式による理論値の比較を示す。それぞれの線材で、実験値は分割したフィラメントに対応する Brandt の理論値(実線)とほぼ一致していることがわかる。このことも、フィラメント分割の効果を示すものである。

表 2.4.3.5-2 測定試料詳細

略称	フィラメント数	試料幅 (mm)	試料長 (mm)	加工
1f-A	1(非分割)	5	100	なし
2f-A	2	5	100	なし
4f-A	4	5	100	なし
6f-A	6	5	100	なし
8f-A	8	5	100	なし
10f-A	10	5	100	なし



(a) 試料 1f-A



(b) 試料 2f-A



(c) 試料 4f-A



(d) 試料 6f-A



(e) 試料 8f-A



(f) 試料 10f-A

図 2.4.3.5-12 試料写真

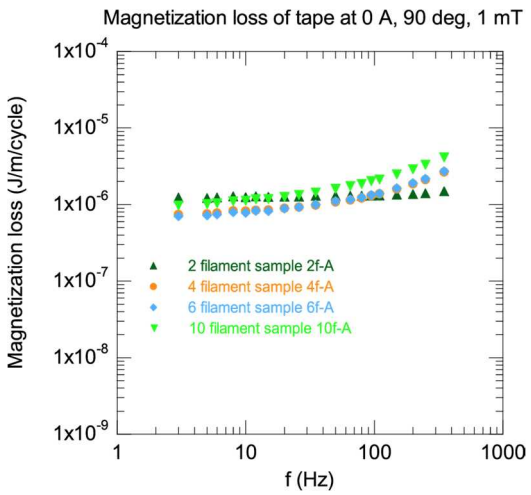


図 2.4.3.5-13 小振幅磁場磁化損失の比較

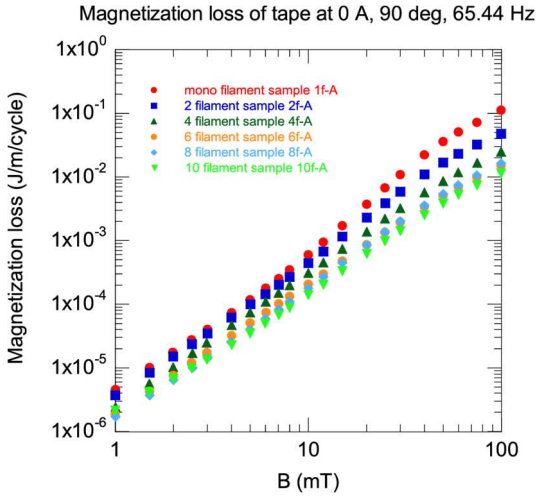


図 2.4.3.5-14 各線材の磁化損失周波数依存性

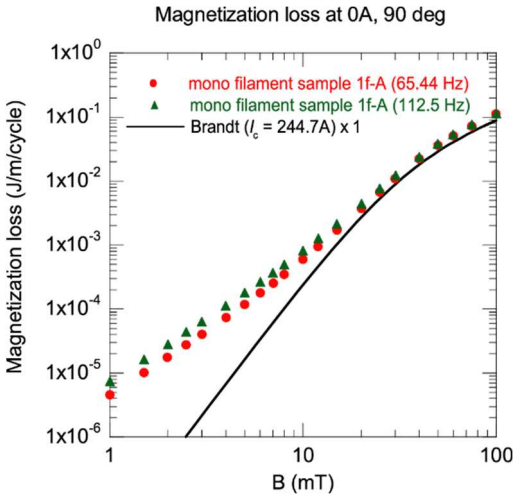


図 2.4.3.5-15 非分割線材の磁化損失

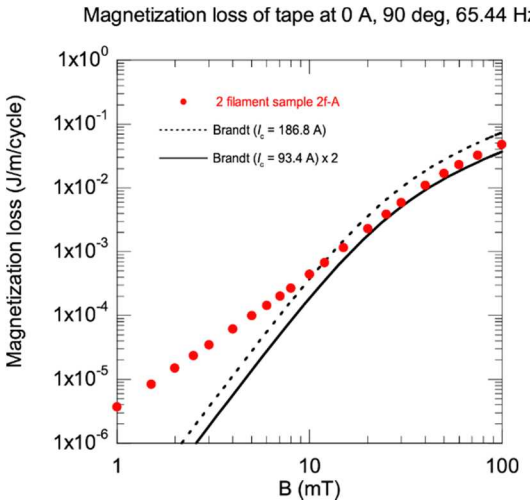


図 2.4.3.5-16 2 フィラメント線材の磁化損失

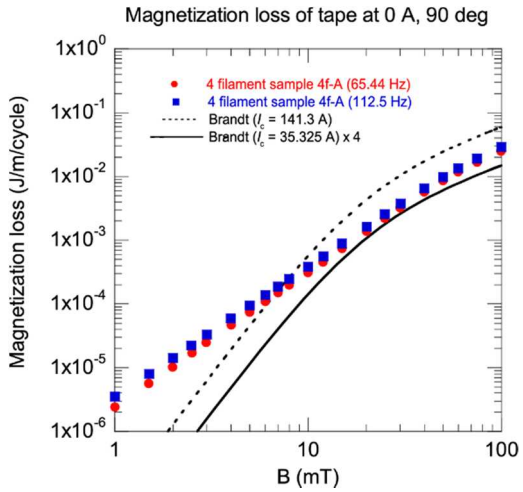


図 2.4.3.5-17　4 フィラメント線材の磁化損失

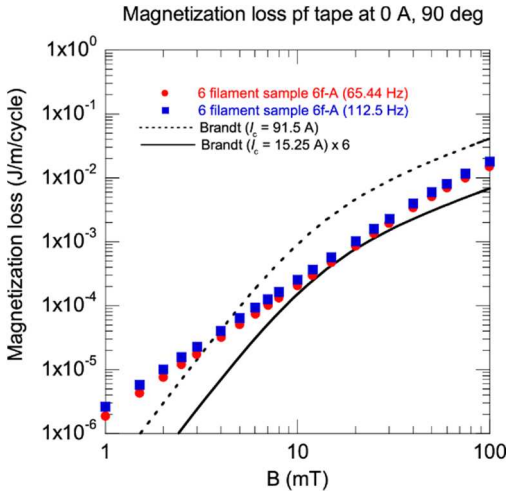


図 2.4.3.5-18　6 フィラメント線材の磁化損失

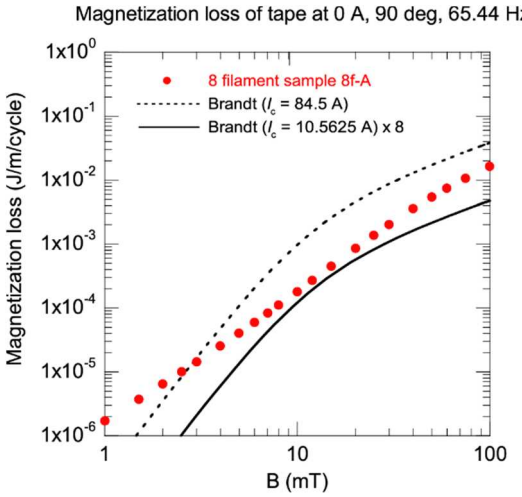


図 2.4.3.5-19　8 フィラメント線材の磁化損失

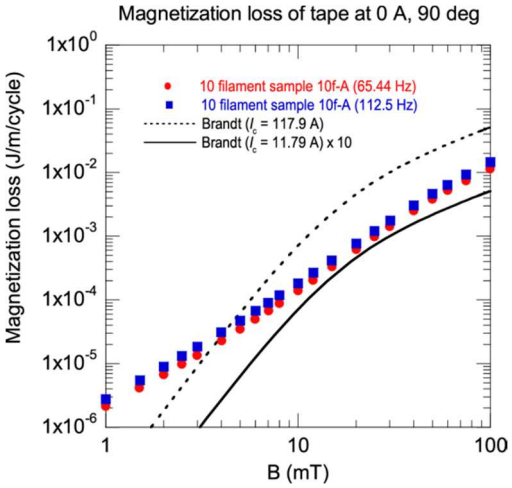


図 2.4.3.5-20　10 フィラメント線材の磁化損失

(4) 温度可変交流損失測定システムの構築

試料を浸漬冷却する液体窒素を減圧することにより、試料温度を変化できる交流損失測定システムを構築した。装置の概念図を図 2.4.3.5-21 に示すが、この測定システムにおいては、通電損失は測定せず、ピックアップコイルを用いて磁化損失を測定することに特化したシステムである。そのかわり、磁場発生用マグネットと試料を密封可能な GFRP 製クライオスタットに設置することができ、真空ポンプにより減圧することにより液体窒素温度を 77 K より下げることができる。液体窒素温度はセルノックス™温度センサと白金温度センサ、LakeShore 社製温度モニタにより測定できる。図 2.4.3.5-22 に本測定システム(含むマグネット)の外観写真を、図 2.4.3.5-23 に真空ポンプの前段で低温のガスを昇温する排気熱交換器の外観写真を示す。真空ポンプにより排気・減圧過程におけるクライオスタット内部の温度・圧力の時間変化を図 2.4.3.5-24(a)に、真空ポンプを停止しクライオスタットを閉鎖した状態での自然昇温過程におけるクライオスタット内部の温度・圧力の時間変化を図 2.4.3.5-24(b)に示す。特に、図 2.4.3.5-24(b)の自然昇温過程においては、200 分にわたっ

て、温度はほぼ 64 K に保たれており、交流損失測定を行うに充分な温度安定性が確保できたと考えられる。また、磁化損失測定においては、試料をピックアップコイルに挿入したときの信号から試料なしの場合のバックグラウンド信号を差し引いて損失に相当する電圧を求める。図 1.4.3.5-25 に示すようにバックグラウンド信号には温度依存性があり、各温度に応じたバックグラウンド信号を利用する必要があることがわかった。

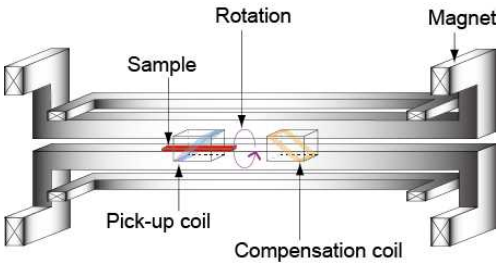


図 2.4.3.5-21　温度可変交流損失測定システムの概念図

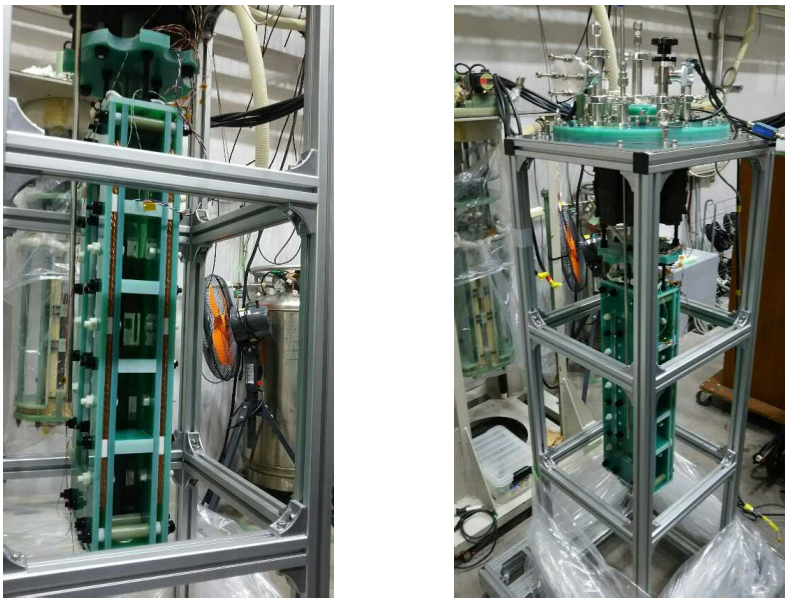
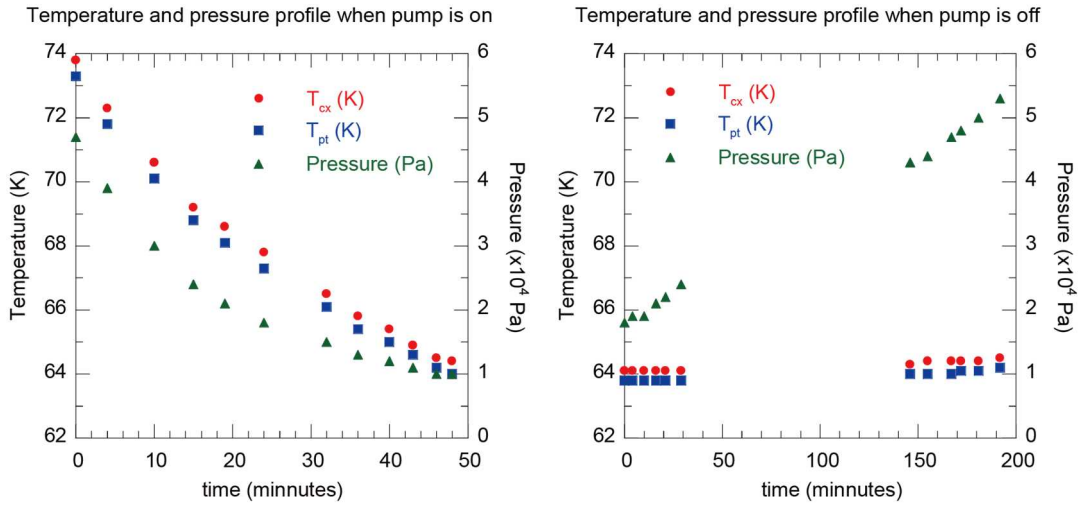


図 2.4.3.5-22　温度可変交流損失測定システム(マグネット)の外観写真



図 2.4.3.5-23　温度可変交流損失測定システムの排気熱交換器



(a) 減圧中(ポンプ起動)　　(b) 昇温中(ポンプ停止)

図 2.4.3.5-24　温度可変交流損失測定システムのクライオスタット内部の温度・圧力変化

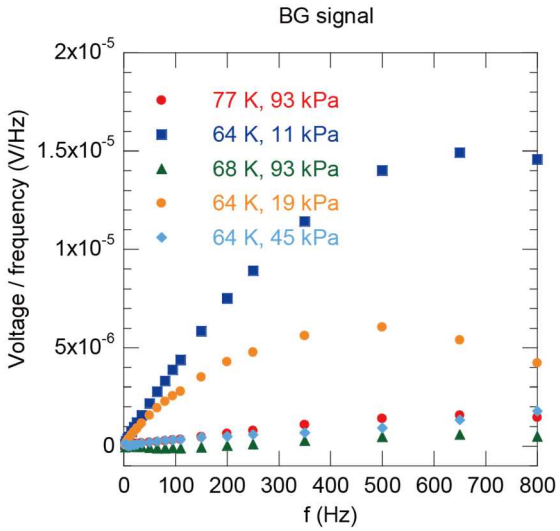


図 2.4.3.5-25　温度可変交流損失測定システムのバックグラウンド信号

(5)　分流用金属層付マルチフィラメント線材の磁化損失測定

分流用金属層なしマルチフィラメント線材は、フィラメント間の電磁的結合がなく分割による交流損失低減が確実である一方で、ひとつのフィラメントに常電導部が発生した場合の他のフィラメントへの電流分流が困難で、常電導転移に対する安定性や保護の点で問題があると考えられる。そこで、このような問題点を解決し常電導転移に対する線材のロバスト性を向上させる目的で厚さ 0.05 mm の銅テープをはんだ付けした分流用金属層付マルチフィラメント線材を試作した。試作した直線状の試料 6f-D の外観写真を図 2.4.3.5-26(a)に示す。また、実効的にツイストの効果を得るために、この試料を直径 20 mm の GFRP フォーマのまわりに、ピッチ 120 mm でスパイラル状に巻きつけた試料 6f-D(SP)の外観写真を図 1.4.3.5-26(b)に示す。これらの試料の小振幅磁場下における磁化損失の周波数依存性を測定した結果を図 2.4.3.5-27(a)、(b)に示す。それぞれ、測定は

77 K と 64 K で行った。ここで、200 mm の有限長直線状試料はツイストピッチ 400 mm の無限長線材と結合電流の流れ方の点では類似であると考えられる。図 2.4.3.5-27 に示した結果より、200 mm 程度のツイストが行えれば数ヘルツ程度の周波数ではフィラメント間の結合が解け、120 mm 程度のツイストを施せば、さらに高い周波数でもフィラメント間の結合が解ける可能性があることがわかった。これは、MRI マグネットなどにおいて、励磁時の交流損失や遮蔽電流磁場を減らす上で有益な知見である。

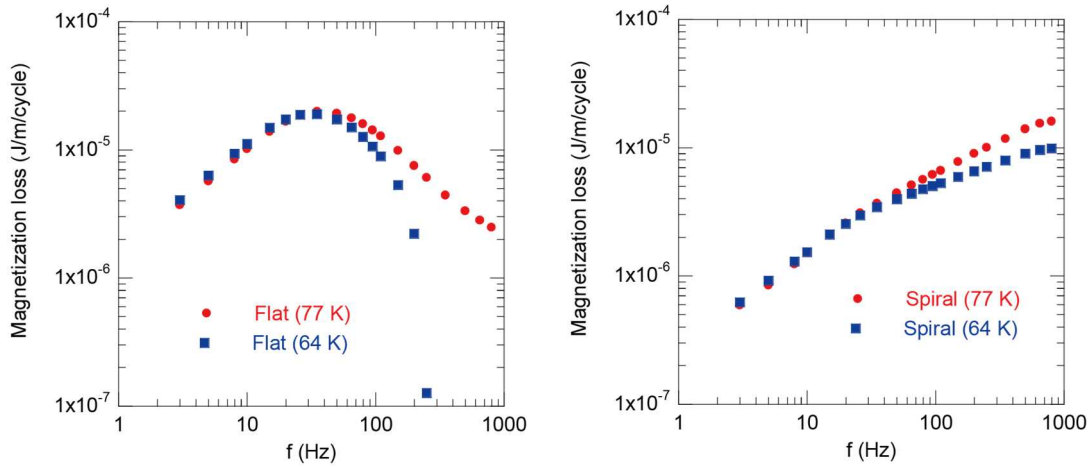
表 2.4.3.5-3 測定試料詳細

略称	フィラメント数	試料幅 (mm)	試料長 (mm)	加工
6f-D	6	5	150	銅テープをはんだ付け
6f-D(SP)	6	5	150	6f-D を直径 20 mm の棒にピッチ 120 mm でスパイラル状に巻き付け



(a) 試料 6f-D　　(b) 試料 6f-D(SP)

図 2.4.3.5-26 試料写真



(a) 直線状試料 6f-D　　(b) スパイラル状試料 6f-D(SP)

図 2.4.3.5-27 小振幅磁場磁化損失の周波数依存性(1 mT)

(6) 2.4.3.5 項のまとめ

高温超電導高安定磁場マグネットシステム応用において有用な疑似丸線と考えられる CORC 導体の電磁特性についての知見が得られた。また、マルチフィラメント化による磁化低減効果を実験的に確認したほか、常電導転移に対するロバスト性を高めた分流用金属層付マルチフィラメント線材においてもツイストを施すことにより、MRI の励磁のようなゆっくりした磁場変化に対しては、充分交流損失を低減し磁化を低減できる見込みがあることを実験的に確認した。また、温度可変の交流損失測定システムを構築し、これらの実験に活用した。

2.4.3.6　2.4.3 項のまとめ

(1)　種々のＹ系高温超電導線材の基礎物性(磁化、熱伝導率、熱容量)を測定し、その磁気的、および熱物性について、それらの特徴を把握し、今後の熱物性のシミュレーションやマグネット設計に有用な情報を得た。

(2)　MOD-$GdZrO_3$ 平坦化+拡散防止層用原料溶液を開発し、平坦化とともに金属元素の拡散防止を同時に達成した。また、MOD-$GdZrO_3$ 層上に更なる中間層、超電導層を成膜し、高い超電導特性(Ic = 294 A/cm-w、J_c = 4.9 MA/cm^2)を得た。MOD 層が均一化及び低コスト化への目処を得た。

(3)　撚り線化テープ線材については、平坦テープよりも磁化損失が小さくなることを明らかにするとともに、螺旋巻きの円筒形を小さくすることでさらに損失を低減させることができることを明らかにした。細線化した線材の撚り線化テープ線材について、超伝導細線間の電磁結合についての検討を行い、その境界条件をシミュレーションから明らかにした。

(4)　マルチビームレーザによるスクライブ加工高速化技術開発、およびPLD線材における特性均一化技術開発を行った。 また、ホモジナイザ導入によって複数のビーム照射によるマルチビームスクライビングが可能であることを示し、スクライビング加工速度を向上に成功した。

(5)　金属基板の改良と中間層の洗浄及び面プルーム PLD 法(plane-plume PLD method)の開発により I_c のばらつきを抑制することが可能となり、EuBCO + BHO 線材の Ic 分布の均一性の向上を確認した。 また、磁場中特性に関して従来の EuBCO + BHO 線材よりも異方性の少ない J_c-B-θ 特性を得た。

(6)　細線化線材の測定から、分割数に依存した交流損失の低減を実験的に明らかにし、最終的には、3m 長 16 分割 EuBCO-BHO 線材において目標である交流損失1/10以下を上廻る1/16以下を得た。また、分流用金属層付マルチフィラメント線材を撚り線化することにより、MRIの励磁のようなゆっくりした磁場変化に対しては、充分交流損失を低減し磁化を低減できる見込みがあることを実験的に確認した。

2.4.4　研究開発項目毎の成果　全体まとめ

「高温超電導実用化促進技術開発／高磁場マグネットシステム開発／高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発」において実施した研究開発項目毎の成果全体を以下に示す。

2.4.4.1 高磁場コイル用超電導線材の臨界電流密度向上技術の開発

(1) Y系高温超電導線材の構成を検討した結果、機械的特性に影響を与えない範囲で基板厚の低減を行うことにより線材平均電流密度(J_e)向上が可能であることがわかった。

(2) 超電導層への人口ピン導入として、$BaMO_3$材料添加によってロッド状の絶縁ペロブスカイト酸化物が形成され、強くc軸相関した磁束ピンニング特性が得られ、高磁場コイルの運転条件における磁場中通電特性を上昇させることに成功した。更に、速い製造線速においても、電磁気的異方性の少ないJ_c特性を、高磁場高温超電導コイルの運転条件を含む広い温度範囲領域で得た。

(3) 厚さ2μm程度の超電導層において、製造線速を速めると超電導のピーク特性が低下するものの、更に製造線速を増大させた場合に於いても優れた超電導特性が低下させることなく維持に成功した。

(4) 製造線速50m/hrにおいて、最終目標値である線材平均電流密度(J_e)＞400A/mm^2を越す406A/mm^2(30K、7T)を75μm厚基板線材において達成した。

(5) 基板厚を30%低減した50μm厚基板に長尺合成することにより線材のJ_eを最大527A/mm^2に増大させることに成功した。

(6) 50m/hrの製造線速で作製した300m長のY系高温超電導線材端部の平均電流密度J_eは489A/mm^2(30K、7T)であり、生産性改善を図る高特性長尺線材の製造に目処を得た。

2.4.4.2　長尺線材性能の均一性向上技術開発

(1) 長尺均一特性技術開発

ア. Y 系超電導線材により積層パンケーキ巻線構造の高温超電導高磁場コイルの実現を念頭に置き、単長 1km の線材にて超電導特性分布の均一性を示す指標である臨界電流の低下率を 15%以下とした。

イ. 長尺 Y 系超電導線材の臨界電流の低下率のネックとなる局所的特性低下箇所について、磁気光学観察法を用いてその画像解析を実施し、様々な要因でプロセス中のコンタミネーションや超電導層の破壊が生じていること等を特定した。

ウ. 製造工程で製造中に入り込む各種のコンタミネーション等を低減すべく、クリーン化設備等を導入し、局所的特性低下因子を排除することで超電導特性の長尺均一性を改善した。

エ. 1km 級の Y 系高温超電導線材に於ける臨界電流の低下率15%以下をほぼ達成し、高磁場コイル用長尺線材の製造技術に目途を得た。

(2) 線材信頼性評価技術開発

ア. 長尺線材の均一性、特に局所的特性低下部について、高温超電導線材の機械的強度と相関がある可能性があることから、評価の一環として機械強度の長手方向分布に関する検証ならびに長期信頼性の検証等を実施した。

イ. 基礎機械特性評価として、高温超電導線材の長手方向、並びに線材基板に垂直な方向の引張強度の評価をワイブル解析によって行った。その結果、長手方向引張強度は極めてバラツキが少ないことがわかった。

ウ. 線材基板に垂直な方向については、樹脂含浸コイル形状の巻線を冷却する方法によって長尺線材の試験評価を実施し、アンビル法による線材短尺サンプルとのバラツキの相関を評価した。その結果、垂直方向引張については一般的なセラミックスと同等の大きなバラツキが観測され、長尺になるにつれ低い強度での破壊の可能性が増えることがわかった。

エ. 疲労特性の評価として、線材基板に垂直方向の剥離強度の静疲労及び動疲労試験を実施した結果、疲労定数として常温で N=22～23 が共通して得られた。また液体窒素温度中と、-10℃において、動疲労試験を実施した結果、N=150～167 と非常に大きな値となり、疲労破壊がほぼ経時的に進展しないことが解った。

オ. 高温超電導線材の信頼性評価として、長手方向繰り返し引張強度試験を実施した結果、550MPa の引張応力に於いて1×10^{6}回の繰り返し応力負荷に耐えることを明らかにした。

カ. 信頼性評価試験として、含浸コイル巻線形状サンプルの長時間の冷却による静的疲労並びにヒートサイクルによる繰り返し応力負荷試験を実施した。その結果、9.6MPa の垂直引張剥離応力が線材基板の垂直方向に加わった状態で、1700 時間の連続負荷、並びに 20K/min の昇降温速度で 100 回以上のヒートサイクルに充分耐えることを確認した。

キ． コイル巻線形状サンプルでの信頼性評価試験として、線材に通電した状態における外部磁場中機械特性評価を実施した結果、フープ力 334MPa を印加した状態で特性劣化が生じないことを確認した。実機相当 MRI コイルに印加される引張方向の電磁力は 180MPa 程度と試算されているため充分なマージンをもっていることが確認された

ク． 線材信頼性評価試験の一環として、ホール素子をスキャンさせる方法を用いた 2 次元的磁気測定技術の応用を検討し、含浸コイル巻線積層模擬サンプルの線材側面をホール素子にてスキャンすることにより、信頼性試験における熱負荷によって劣化した巻線サンプル中に発生した線材の特性低下箇所を見出すことに成功した。非破壊特性分布測定技術の、高温超電導高磁場コイル開発における線材信頼性評価検証技術への展開が強く期待される

2.4.4.3 高磁場コイル用低損失構造線材の研究開発

(1) 様々な超電導線材を用いて、主に超電導層以外に着目して、基礎物性(磁化、熱伝導率、熱容量)の測定からその特徴を調査した。基本的には、各素材の和で表現できるものであるが、その構成量の違いにより線材の物性が変化し、特に熱伝導に大きな違いをもたらすことが明らかになった。これらの結果は、今後のシミュレーションやマグネット周りの熱設計に役立つものと見込まれる。

(2) 細線化に向けた線材幅方向の組織・特性分布低減として、幅方向の特性分布を改善する金属基板中間層表面平坦化プロセス開発、および PLD 法におけるプルームの不安定性の影響の低減により、特性分布を改善できた。

(3) 高磁場コイル用低損失構造線材の研究開発として、超電導テープ線材の電磁応答と損失に関するシミュレーションを行うとともに交流損失を実測し、以下を明らかにした。

ア． 撚線化テープ線材の磁化損失に関する結論として、ゆるやかに撚られた場合は傾いた平坦テープ近似が妥当である。また、外部印加磁場に対するテープ線材の傾き角が局所的に変化することで、垂直磁場中の平坦テープ線材の損失より小さくなる。

イ． 撚線化かつ細線化した超電導テープ線材の磁化損失に関する結論として、磁場掃引速度 β が臨界掃引速度 β_c より充分小さい場合、超電導細線の電磁結合はなく、損失低減に細線化は有効である。一方、β が β_c より大きい場合、細線が結合して大きな損失を生じる。また、臨界掃引速度 β_c はツイスト・ピッチ L_p の 2 乗に反比例し、L_p を小さくすることで細線化による損失低減が有効である。また、ある条件のもとで、L_p を 2m より小さくすれば、MRI マグネットの磁場掃引速度～1mT/s で細線化による損失低減が可能である。

ウ．　螺旋巻き超電導テープ線材の磁化損失に関する結論として、円筒径を小さくすると線材単位長あたりの損失は小さくなり、テープ線材が重ならない限界まで円筒径を小さくした場合の損失は、円筒径が大きい極限における損失に比べて 0.405 倍まで小さくなる。また、細線化した螺旋巻き超電導テープ線材において、円筒形を小さくすることは、超電導細線の電磁結合の抑制と低損失化にも有効である。

(4)　EuBCO + BHO 線材をレーザスクライブ法で細線化した結果、細線化時の線材幅方向の臨界電流(I_c)分布が無分割時と同様に優れた特性分布を有し、また、線材細線化のために複数に分割加工した線材において、分割数に比例し交流損失(ヒステリシス損失)が減少することが確認された。これらの結果から、目標である「高い磁場中臨界電流を持ったうえで無加工と比較して、交流損失 1/10」を達成した。

(5) 高温超電導高安定磁場マグネットシステム応用において有用な疑似丸線と考えられる CORC 導体の電磁特性について、マルチフィラメント化による磁化低減効果を、温度可変交流損失測定システムを構築し実験的に確認した。分流用金属層付マルチフィラメント線材においてもツイストを施すことにより、ゆっくりした磁場変化に対して充分交流損失を低減し磁化を低減できる見込みがあることを実験的に確認した。

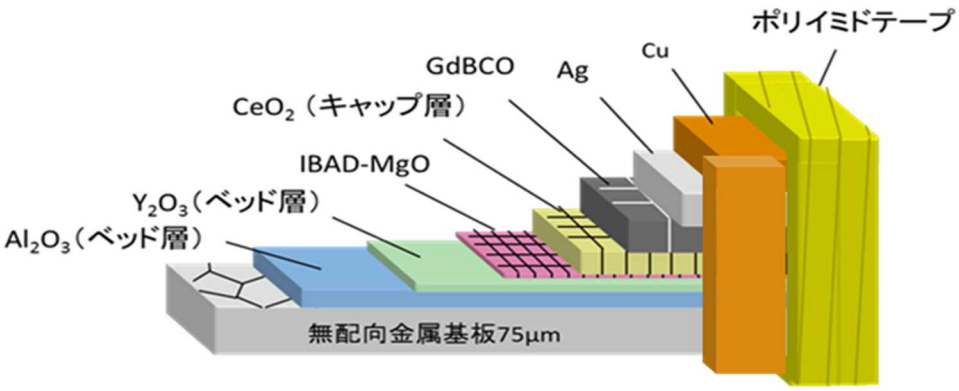
2.5 高温超電導高磁場コイル用超電導線材の実用化技術開発【生産性向上】

2.5.1 高磁場コイル用超電導線材の生産性向上技術開発（フジクラ）

2.5.1.1 生産性向上への課題抽出(フジクラ)

(1)Y 系高温超電導線材の構造と律速製造工程

図 2.5.1.1-1 に本開発にて対象としている IBAD 法配向中間層と PLD 法による超電導層を有する Y 系高温超電導線材の構造を示す。Y 系超電導線材にはいくつかの異なる製法があるが、いずれもこのようにテープ状基板上に薄膜層のコーティングを繰り返すことによって製造されるコンセプトを踏襲することからコーテッドコンダクター(Coated Conductor)とも呼ばれる。伸線等の塑性加工による冶金学的な工程を含まず、半導体プロセスに準ずる多数の逐次処理工程によって構成されているため、全体のスループットは最も遅い工程により制約を受けて決定されるという特徴がある。開発初期は、IBAD 法中間層工程の製造線速が、イオンビーム照射による配向結晶の選択成長を必要とし低速なために律速工程となっていたが、90 年代末に開発が進展した MgO（酸化マグネシウム）層を利用した高速配向成長が可能となってからは、他の工程が律速となりスループットが決まっていた。



2.5.1.1-1 IBAD 法配向中間層と PLD 法超電導層を用いた Y 系超電導線材の構造図

最も開発課題が大きかった工程は、蒸着レートや蒸着面積に制限がある一方で、高い通電電流特性を得るために一定の膜厚を必要とする超電導層の蒸着工程であった。PLD 法は CVD 法など他の蒸着方法に比べて単位面積当たりの蒸着レートが速いプロセスであるが、スループットが高い条件にするほど最適条件の維持が困難になって成膜不可となる特徴がある。現状はこれらの制約により線速は 20m/hr 程度である。他の複数工程においても個々の制約によりスループットは線速 20m/hr 程度となっていた。

また、検査工程において長尺線材の特性分布評価を実施する場合、通常は押し付け電極を用いた逐次通電測定法もしくは非接触測定である連続磁化測定法が用いられるが、前者は数 10cm 単位の分解能であり、後者は長手方向にミリメータオーダーの分解能があるものの、幅方向の分解能は低く、欠陥検出とその要因のフィードバックに至るプロセスを長尺線材で実施することは難しかった。仮に磁気光学像のようにミリメータオーダーの分解能で幅方向を含めて二次元的な特性分布を把握することが出来れば、長尺線材で発生する微視的な特性分布の要因を把握することが可能となり、製造工程改善の技術開発に大きく寄与することが出来る。

ホール素子を走査させ高分解能で臨界電流密度の二次元的な磁気的分布を測定する装置（Scanning Hall Probe Microoscopy（SHPM））があるが、線速は 20m/hr 程度に留まっていた。

⑵目標値の設定

上記のような律速工程について課題を検討し目標値を決定した。最も重要な PLD 超電導層工程については、本技術開発では MRI 運転環境における磁場中臨界電流特性向上を達成するとともに製造線速向上を図る必要がある。

このため、委託事業テーマである「高磁場コイル用超電導線材の臨界電流密度向上技術の開発」で実施した人工ピン導入 Y 系高温超電導線材において、充分速い蒸着速度で約 2μmの膜厚において臨界電流密度特性向上を前提に、課題設定型産業技術開発費助成事業テーマである「高磁場コイル用超電導線材の生産性向上技術開発」において線速向上を実現する必要がある。優れた超電導特性を有する超電導層の生産技術開発において、高速蒸着条件を実現する技術的な方策の妥当性を検証するための目標線速として、従来の2倍以上である 50m/hr を設定した。この目標を達成することにより、生産設備開発をはじめとする様々なアプローチを通じ更なるスループット向上の展望を得ることが可能となる。

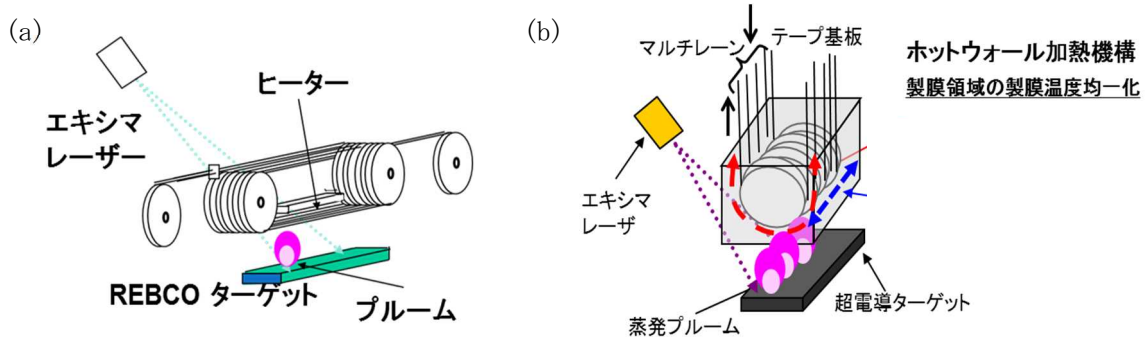
高精度な長尺線材の高速連続検査工程としては、ホール素子スキャン磁気顕微鏡（SHPM）のマルチセンサー化の検討により 50m/hr 化を達成することで、更なる高速化の展望が得られる。なお線速は全て 12mm 幅線材の加工に相当する数値である。

2.5.1.2　生産性改善技術開発(フジクラ)

(1) PLD 超電導層工程の生産性改善

ア. 超電導層成膜用 PLD 蒸着装置

Y 系高温超電導薄膜は、一部酸素サイトの結合が弱い多元系酸化物であり、再現性良く安定にストイキオメトリ薄膜を蒸着するためには、蒸気圧の影響を受けにくいプロセスである必要があることから、エキシマレーザ等を用いて高輝度の紫外パルスレーザ光を焼結体ターゲットに集光する PLD 法が高品質薄膜を得るという観点で最も適切なプロセスの一つである。また、蒸着レートを速くしても充分に結晶が面内配向した薄膜が得られ易いことから、線材製造プロセスとして高スループット化に対しても高いポテンシャルを有している。これまで PLD 法を用いた Y 系線材開発はエキシマレーザ発振器の性能向上と共に長尺化プロセス開発が進展したが、その際、最適蒸着条件が大きな課題となってきた。図 2.5.1.2-1 (a)に典型的な PLD 装置の蒸着部分の模式図を示すが、大面積化のために複数本の基板テープを旋回させながら、テープ裏面を加熱ブロックにて加熱し、ブロック接触部の熱のコントロールにて温度制御を行っていた。この方式ではロット内の長手方向分布及びロット間の再現性を維持するために調整が必要となるパラメーターが多い欠点がある。これに対し、図 2.5.1.2-1 (b)に示すような蒸着部全体を加熱し、外部から線材を輻射により均熱加熱するホットウォール(Hot-wall)加熱方式を(株)フジクラが早期に開発に成功したことで量産時の基板テープ温度制御が容易になった。そこで、本技技術開発では、ホットウォール加熱方式における更なる基板テープ加熱条件の詳細検討を実施し、線速の向上に及ぼす効果等を検証した。



(a)典型的な Reel-to-reel PLD 装置　　(b)Hot-wall 式 Reel-to-reel PLD 装置

図 2.5.1.2-1　PLD 装置の加熱蒸着部の模式図

イ. 高スループット条件の確認

「高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発」の委託事業テーマとして実施した「高磁場コイル用超電導線材の臨界電流密度向上技術の開発」において見出した、図 2.5.1.2-2 に示す人工ピン導入超電導線材の高蒸着レート成膜条件を活用し、本課題設定型産業技術開発費助成事業において高速成膜条件で製造線速の高速化を実施した。30K、7T における超電導層の臨界電流密度 $J_{c(SC)}$が、非常に速い蒸着速度においてもほぼ 4×10^4A/mm^2 を維持し得る条件を得た。本技術開発の結果、50m/hr の製造線速においても従来と同等の高 J_c 特性が維持され、その結果、線材の平均臨界電流密度(J_e)として目標値 400A/mm^2(30K、7T)を超す値を達成することに成功した。

高蒸着速度条件にて高 J_eを維持しつつ、高スループット 50m/h 達成

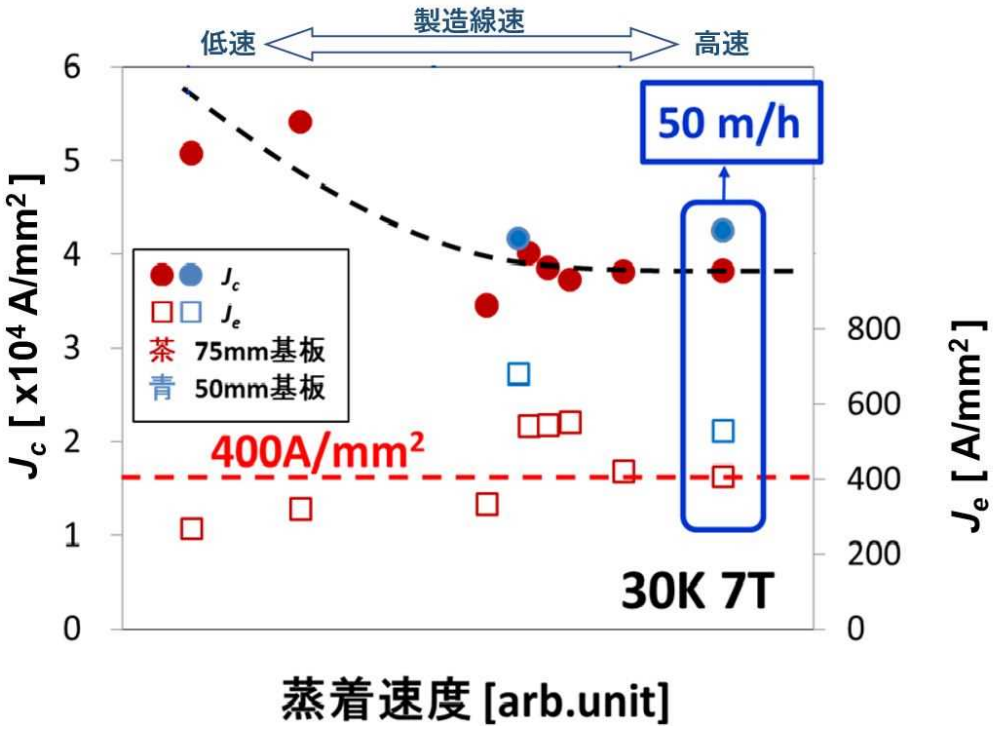


図 2.5.1.2-2 蒸着速度及びスループットと磁場中臨界電流密度特性

図 2.5.1.2-3 にスループット 50m/hr において成膜した 5m 長の線材サンプルについて、液体窒素温度(自己磁界;s.f.)において磁化法により測定した長手方向の J_c 特性分布を示す。高速製造線速条件においては、通常は最適成膜条件幅が狭くなるために均一な長手方向特性分布が得にくいが、本技術開発により良好な均一性が得られた。

テープ基板の厚さは、これまで製造実績が豊富な 75 μ m 厚、および高 J_e化には有利であるが技術開発課題の多い 50 μ m厚の双方について試作を実施した。磁場中の超電導特性は試作線材の端部を切り出して短尺で測定した。線材全体の厚さと断面積が異なるため、基板厚 75 μ m および 50 μ m の線材について、30K、7T における平均臨界電流密度(J_e)の値はそれぞれ目標値を越える 406A/mm^2 および 527A/mm^2 であった。



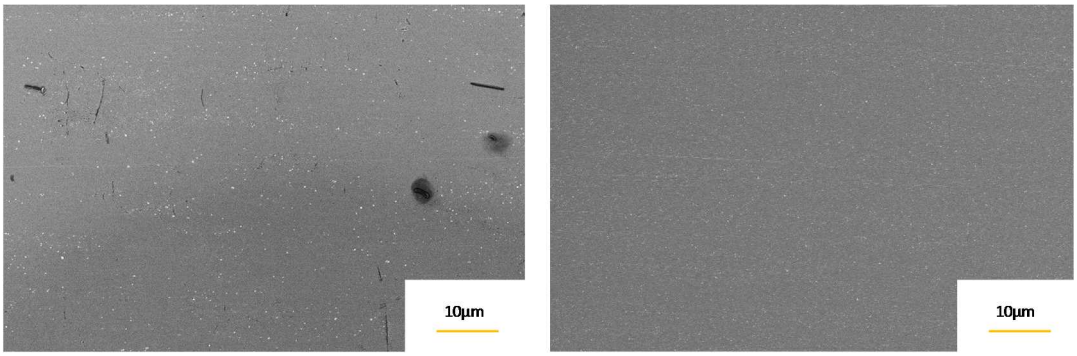
図 2.5.1.2-3 製造線速 50m/hr の線材サンプルの長手方向 J_c 特性分布

(2) 基板表面品質

長尺にわたって均一な長手方向臨界電流分布特性を持つ超電導線材を製造するにあたり、基材となる金属基板の表面品質は非常に重要である。そこで品質を維持したまま目標値である線速 50m/hr 以上のスループットの達成を目指した。

高速化にあたり、線速が品質に寄与するパラメーターの抽出とその影響度について調査を実施し、作業性や設置スペース、環境面などに充分配慮した形をとり、なかでも最も効率化が期待されるパラメーターに着目した。その結果、従来の 2 倍以上の加工線速である 50m/hr においても、全長において均一かつ良好な品質を示すことができた。

さらに、高い品質を維持するにあたって、金属基板上に発生する機械的相互作用や化学的相互作用による欠陥発生防止を図ったことにより、表面品質は図 2.5.1.2-4 に示すように大きく向上した。



(a)欠陥発生対策前の基板表面 SEM 像　(b) 欠陥発生対策後の基板表面 SEM 像

図 2.5.1.2-4 欠陥発生対策前後の表面性

(3)　安定化層品質

MRI コイルは精度の高い磁場分布の均一性を大口径マグネット空間で実現させるため、精度の高い巻線加工が要求される。このためテープ形状の Y 系高温超電導線材には厳しい寸法精度が求められる。線材における中間層（ベッド層、キャップ層；図 2.5.1.1-1 参照）および超電導層の厚さは数μm程度に過ぎず、線材の寸法は、数十μmの厚さを有する金属テープ基板ならびに安定化層によって大きく支配される。

金属テープ基板（材質：ハステロイ ™）は充分高い寸法精度を有しており、安定化層の厚みで線材の幅および厚さ精度が決まる。いっぽう、安定化層積層工程において、安定化層厚さの均一性を確保しながら製造線速を高速化していくことには大きな課題があり、これまでの製造線速は 20m/hr 程度の低い値となっている。このため、線速を 50m/hr（12mm 幅の場合、4mm 幅換算では 150 m/hr に相当する）を実現するための技術開発を実施した。

まず、シミュレーションにより安定化層厚を均一に積層する条件検討を行った結果、条件を変えることにより線材幅方向の安定化層厚指標の分布が大きく異なることが解った。次に、安定化層の表面品質に関わる条件確認を行った。条件を変更することにより表面品質が変わることを確認した後、50m/hr （12mm 幅当り、4mm 幅線材換算で線速 150m/hr)で安定化層積層の条件最適化の検討を行った。この結果より、線線材幅方向に均一な安定化層積層が可能となっていることが明らかにした。これらの結果から長尺線材でも高速で安定して安定化層積層が可能であることを確認した。

ウ　長手方向臨界電流分布特性

安定化層積層前後の磁化法による臨界電流（I_c）分布測定結果を図 2.5.1.2-5、2.5.1.2-6 に示す。この結果から高速での安定化層積層による超電導電流特性に影響を与えないことを確認した。

以上の結果から、線速 50m/hr （12mm 幅、4mm 幅線材換算で 150m/hr） において、均一かつ高い寸法精度で安定化層を積層できることを確認した。

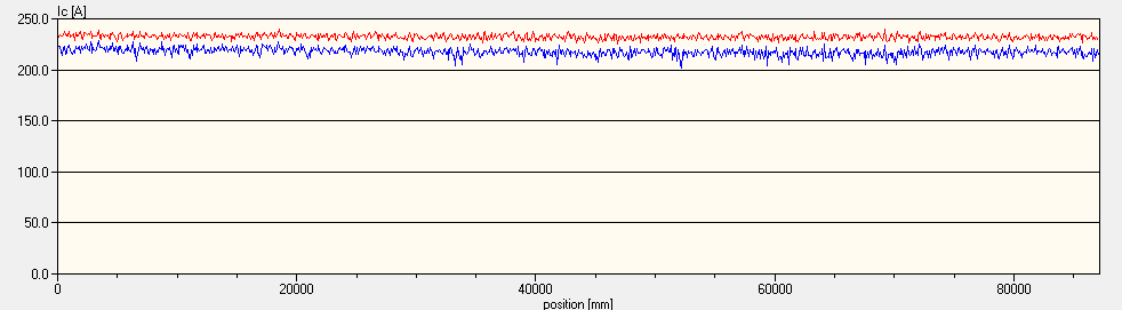


図 2.5.1.2-5　安定化層積層前の磁化法による I_c 分布測定結果

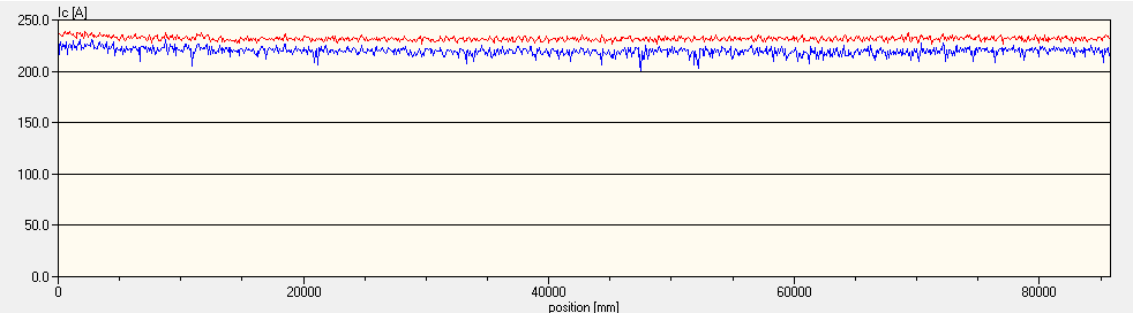


図 2.5.1.2-6　安定化層積層後の磁化法による I_c 分布測定結果

(4) 連続非破壊高精度特性測定工程線速改善 （フジクラ）

ア. 目的

長尺にわたって均一な線材を製造するためには、線材の二次元的な特性分布を長手方向に連続的に非破壊で取得し、微小な特性低下部を検出する必要がある。液体窒素で線材を冷却しながら長手方向に搬送し、ホール素子を線材幅方向にスキャンすることで線材表面の磁化の信号を取得し、面内の臨界電流密度特性の微細分布情報を得る手法を採用し、分解能を維持したまま高線速で長尺線材を評価できる装置の開発・導入を行った。測定の高速化にあたり、「高磁場コイル用超電導線材の実用化技術開発（委託事業）」の長尺線材性能の均一性向上技術開発で目標とした1km長の線材の連続測定が可能となる高速高精度連続磁化測定装置の設計製作を行った。

イ. 単チャネル条件による高精度特性測定装置立上げ

まず、線材搬送部の設計・製作を実施した。最大 12mm 幅のテープ状線材を長手方向に連続的に搬送できる機構を備えた高速高精度連続磁化測定装置の設計・製作をおこなった。図 2.5.1.2-7 に模式図を示す。Reel-to-reel 方式の線材駆動部と線材を冷却する液体窒素槽を備え、ホール素子を線材幅方向にスキャンするための 3 軸ステージを有する構造となっている。

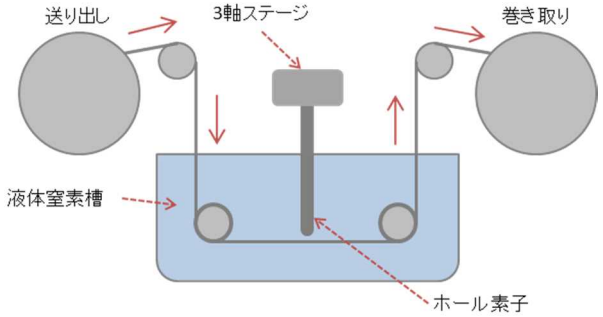


図 2.5.1.2-7　高速高精度連続磁化測定装置の模式図

線材の長手方向に連続的に磁化を測定するにあたり、線材搬送時の精度が重要になる。そのため、長手方向の搬送精度や線速安定性を評価した。

長手方向の搬送精度は 0.3%以内であり、線速安定性は設定値±数%～10%程度に抑えられていることを確認した。例として、図 2.5.1.2-8 に設定線速を 54m/hr とした際の線速安定

性の評価結果を示す。設定値±4%と、目標の 50m/hr を越える高線速において安定した搬送が可能であることを確認した。

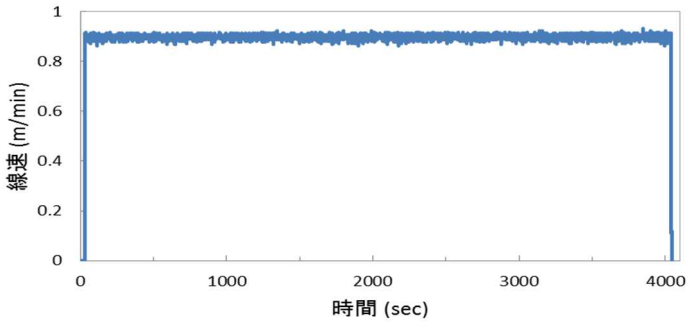


図 2.5.1.2-8　高速での線材搬送安定性評価結果

続いて、後述する 2.5.1.3 項(1)の共同研究成果に基づき、ホール素子を搭載した測定用プローブの作製と計測機器類を組み合わせた測定システムの立ち上げを実施すると共に、本設備のマルチチャネル化改良を実施した結果、目標を越える 64.8m/hr の線速にて面内高精度測定が可能であることが確認された。

(5) 生産性改善線材の試作(フジクラ)

本技術開発では、生産性向上のため律速である工程に改良を実施し、スループット 50m/hr を全工程にて達成することを目的としている。その際、委託事業である「高磁場臨界電流密度の高性能化技術開発」の目標値である 30K、7T での平均電流密度 J_e≧400A/mm^2 の特性を有することが前提となっている。そこで、各工程の条件最適化により、目標スループットを上記条件を前提にクリアできる長尺線材を作製可能であることを検証した。

ア. 超電導層成膜工程

超電導層成膜を実施するために、75μm 厚および 50μm 厚の金属テープ基板を用いた。超電導層成膜は、(1) PLD 超電導層工程の生産性改善 において、短尺成膜での条件の最適化により得られた条件を用いて、長尺成膜試作を実施した。

図 2.5.1.2-9 は、75μm 厚の金属テープ基板を用いて線速 50m/hr で成膜した 12mm 幅 50m 長線材の磁化法による長手方向における 77K(自己磁場;s.f.)の I_c 分布である。超電導層の膜厚は、約 2.0μm である。この線材の端部を切り出し、MRI 用高磁場コイルの運転環境である 30K、7T で短尺通電 I_c 測定を実施した結果、平均電流密度として J_e=411A/mm^2 が得られ、最終目標値をクリアしていることを確認した。

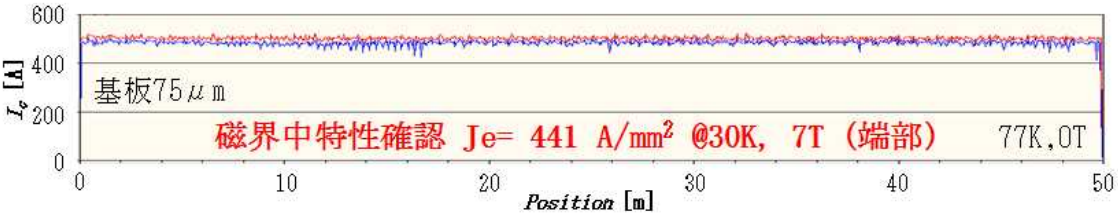


図 2.5.1.2-9 線速 50m/hr で成膜した 12mm 幅 50m 長線材の長手方向 I_c 分布

図 2.5.1.2-10 は、50μm 厚の金属テープ基板を用いて、線速 50m/hr で成膜した 12mm 幅 40m 長線材の磁化法による長手方向における 77K(自己磁場;s.f.)の I_c 分布である。超電導層の膜厚は、約 2.0μm である。この線材の端部を切り出し、MRI コイル運転環境である 30K、7T で短尺通電 I_c 測定を実施した結果、換算した平均電流密度として J_e=522A/mm^2 が得られ、最終目標値をクリアしていることを確認した。

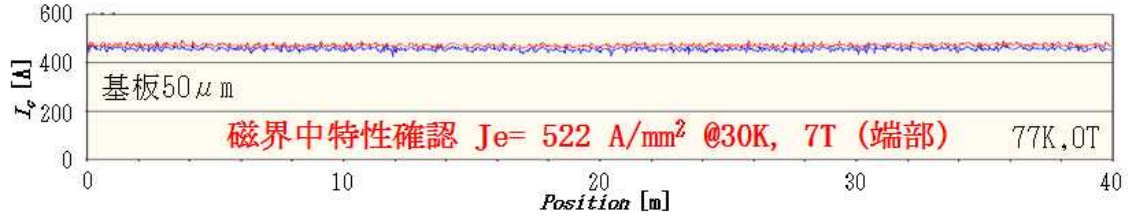


図 2.5.1.2-10 線速 50m/hr で成膜した 12mm 幅 50m 長線材の長手方向 I_c 分布

図 2.5.1.2-11 は、50μm 厚の金属テープ基板を用いて、線速 50m/hr で成膜した 12mm 幅 300m 長線材の磁化法による長手方向における 77K(自己磁場;s.f.)の I_c 分布である。超電導層の膜厚は、約 2.0μm である。この線材の端部を切り出し、MRI コイル運転環境である 30K、7T で短尺通電 I_c 測定を実施した結果、換算 J_e=489A/mm^2 が得られ、本プロジェクト目標値をクリアしていることを確認した。

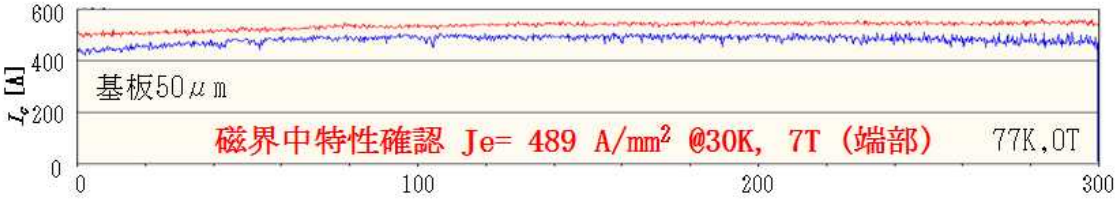


図 2.5.1.2-11 線速 50m/hr で成膜した 12mm 幅 300m 長線材の長手方向 Ic 分布

図 2.5.1.2-12 は、50μm 厚の金属テープ基板、75μm 厚の金属テープ基板を用いて、線速 50m/hr で試作した超電導層を製膜した線材の長さと J_e の値をまとめたものである。75μm 厚の金属テープ基板でも、最終目標値である J_e ＞400A/mm^2 (30K,7T)をクリアしており、さらに 50μm 厚の金属テープ基板では、充分なマージンを持って最終目標値をクリアすることができた。また、線材長においても、数百メートル級の線材作製に成功したことで、さらなる長尺線材の作製が可能である展望を得ることができた。

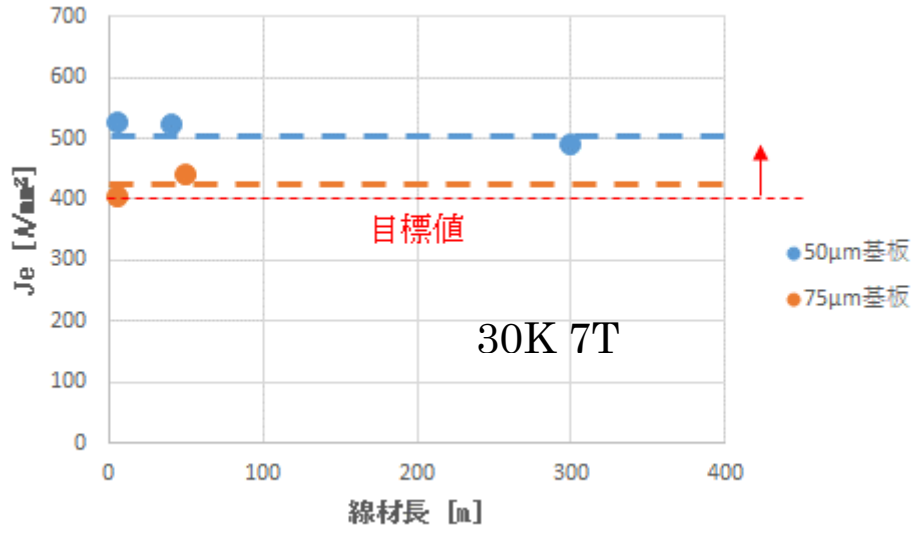


図 2.5.1.2-12　線速 50m/hr で成膜した 12mm 幅線材の長さと磁場中 J_e 値

イ. 安定化層

上記の超電導層を形成した 12mm 幅の中間工程線材を 4mm 幅×3 本に加工し、線速 150m/hr(12mm 幅換算で、50m/hr)で銅安定化層を形成した。

図 2.5.1.2-13 は、75μm 厚基板の 4mm 幅線材を、線速 150m/hr(12mm 幅換算で 50m/hr)で安定化層複合を実施した線材の、磁化法による長手方向における 77K(自己磁場;s.f.)の I_c 分布である。測定した線材の安定化層の厚さは、約 40μm であった。長手方向の特性均一性指標である臨界電流の低下率[(全長 I_c 平均値－I_c 最小値)/全長 I_c 平均値]は、約0．15を示し、4mm 幅においても均一な I_c 分布を有する線材が得られた。

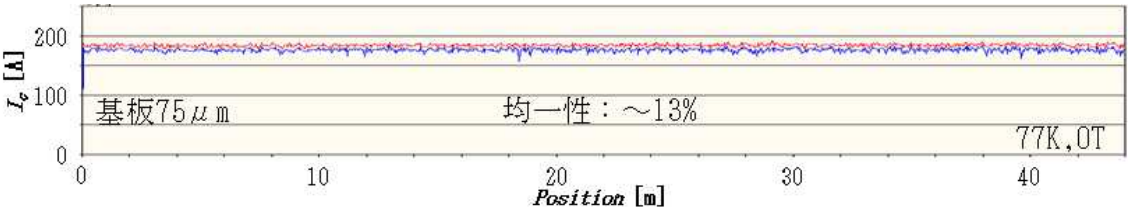


図 2.5.1.2-13　線速 50m/hr(12mm 幅換算)で作成した 4mm 幅線材の長手方向 Ic 分布

図 2.5.1.2-14 は、50μm 厚金属テープ基板の 4mm 幅線材を、線速 150m/hr で安定化層複合を実施した線材の磁化法による長手方向 I_c 分布(77K、自己磁場;s.f.))である。この安定化層の厚さは、約 40μm であった。全長にわたる臨界電流の低下率は、約0．11を示し、4mm 幅線材において均一な I_c 分布を有する線材が製作できていることがわかる。

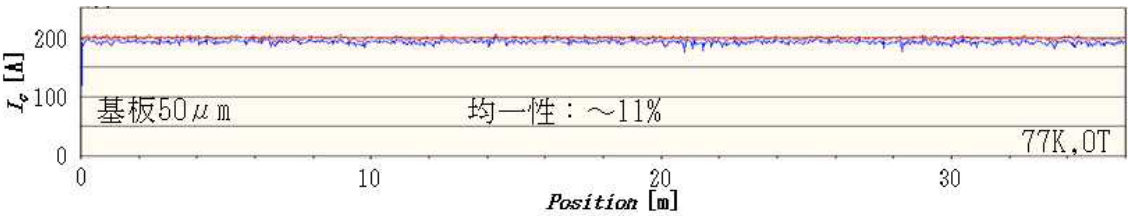


図 2.5.1.2-14　線速 50m/hr(12mm 幅換算)で作成した 4mm 幅線材の長手方向 I_c 分布

以上より、生産性を律速する工程において条件最適化を実施し、委託事業で実施した「高磁場臨界電流密度の高性能化技術開発」テーマにおける最終目標値 J_e≧400A/mm^2（30K、7T）を確保した状態で、目標である線速 50m/hr を全工程を通じて達成した。

2.5.1.3 生産性改善線材の特性評価及び解析

(1) 高磁場コイル用超電導線材の生産性向上における連続非破壊高精度特性測定技術開発
（フジクラ、九州大学共同研究）

ア. 高速化に向けた多チャネル条件による高精度特性測定技術

(ア) 単チャネル条件における測定結果

連続非破壊高精度特性測定のためホール走査型連続磁化測定装置を用いた単チャネル測定条件において、測定線速 12m/hr の場合の超電導線材表面の磁化分布とシート電流密度分布の評価結果を図 2.5.1.3-1 に示す。図 2.5.1.3-2 に、取得した磁化分布から算出した長手方向の I_c 分布を示す。全長にわたって均一な磁化分布と電流密度分布であることがわかる。測定サンプルとして、$BaHfO_3$ を添加した 12mm 幅、約 30m 長の EuBCO 高温超電導線材を用いた。

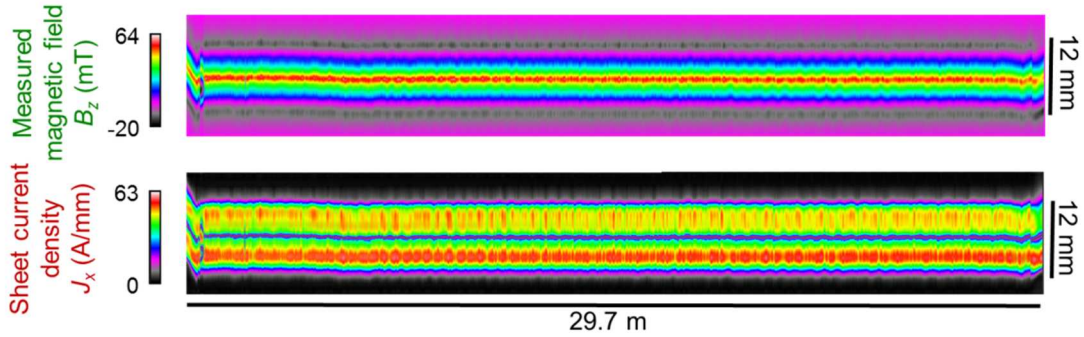


図 2.5.1.3-1　超電導線材表面の磁化分布（上）とシート電流密度分布（下）

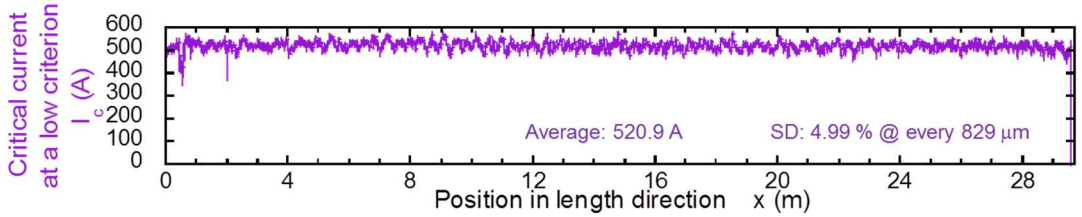


図 2.5.1.3-2 長手方向の臨界電流(I_c)分)布

また、図 2.5.1.3-3 に、測定開始端付近の 1m 長の領域を拡大したシート電流密度分布を示す。拡大図をみると、一部の領域で特性が低い領域が存在することがわかる。図 2.5.1.3-4 には、線材長手方向中央付近の 1m 長領域を拡大したシート電流密度分布を示す。

図中の上側のエッジ付近に、小さな特性低下部が存在することがわかる。

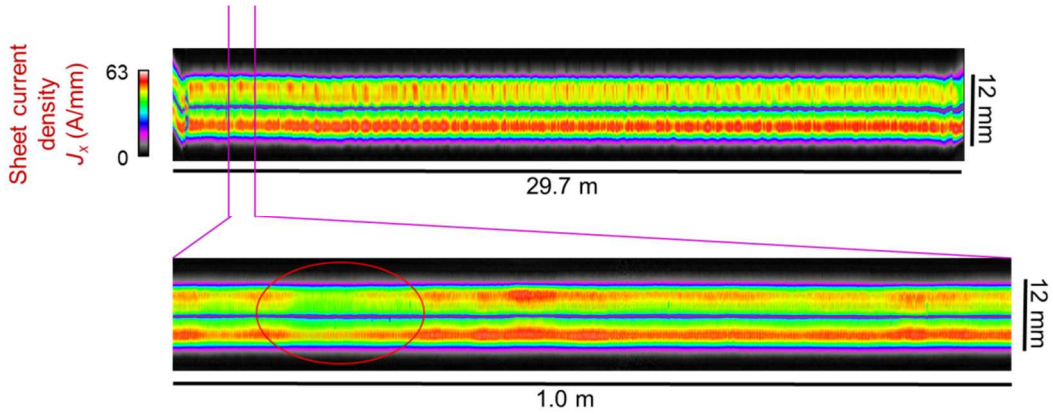


図 2.5.1.3-3 シート電流密度分布の拡大図（測定開始端付近）

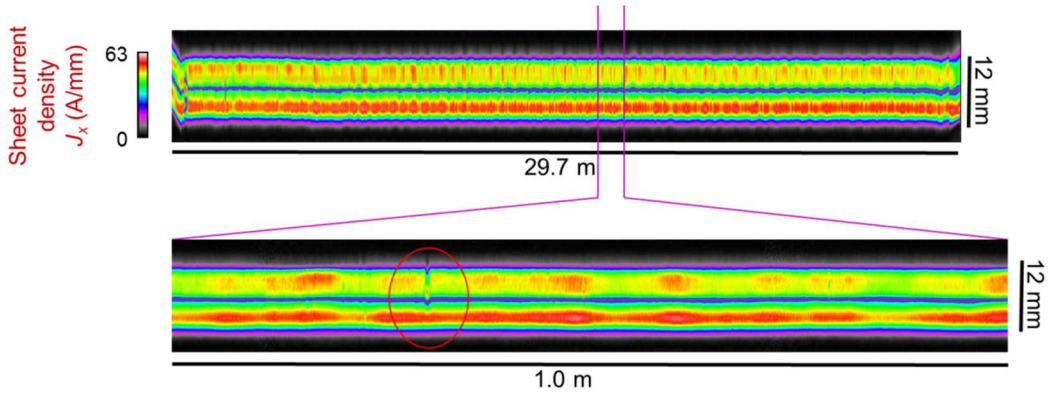


図 2.5.1.3-4 シート電流密度分布の拡大図（長手方向中央付近）

(イ)マルチチャネル化センサによる測定結果

次に長手方向に 3 式並べてセットされたマルチチャネル化センサを用いて、幅方向スキャンを効率よく実施するための各種条件検討を実施した。その結果、図 2.5.1.3-5 に示すように、マルチチャンネル化によって、線速 64.8 m/hr で測定を実施した磁化分布及び長手 Ic 分布についても、シングルチャネルで 12/hr で測定した結果(図 2.5.1.3-1、2)とほぼ同等の精度で測定されていることが確認され、目標の 50m/hr を越える測定速度で高速高精度測定を可能とした。

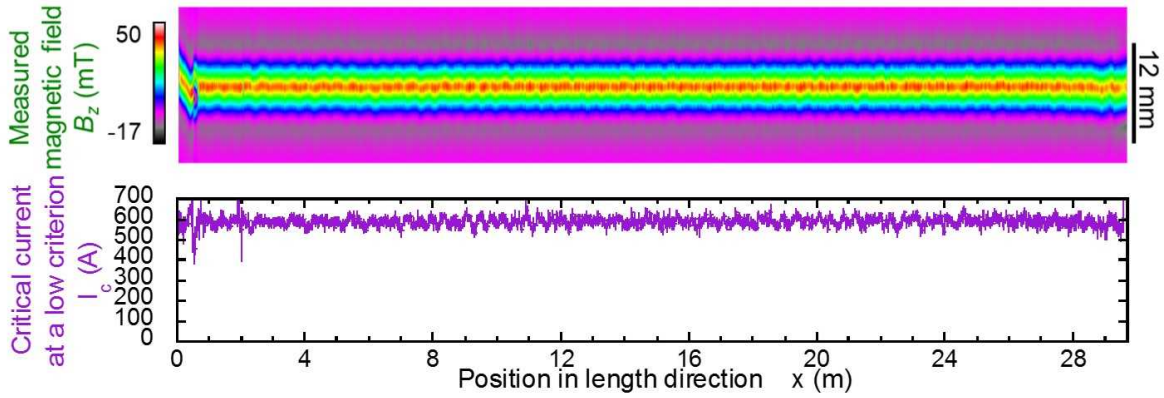


図 2.5.1.2-5 高線速条件(64.8m/hr)で測定した超電導線材表面の
磁化分布と長手方向の臨界電流(I_c)分布

イ. 高磁場中高精度測定技術開発

高速蒸着条件における人工ピン導入線材の長手方向均一性を高速で評価するにあたり、自己磁場下で検出した磁化信号により確認されている高い長手方向均一性の特性分布が、ある一定の高磁場中に於いても維持されるかどうか過去に検証された事例がない。このため、低磁場で測定した線材の特性分布が高磁場でのコイル応用に与える有用性について調査した。

すなわち、外部磁場を印加可能な連続磁化測定装置に於いて、最大 2.0 T までのいくつかの外部磁場中に於いて、液体窒素中にて高線速製造条件による長尺線材について長手方向特性分布の測定を実施した。その結果、図 2.5.1.3-6 に示すように、印加磁場に依存せず長手方向に同様の分布を持って臨界電流値が測定されることがわかった。そこで、各磁場における長手方向 I_c 値分布データをそれぞれの I_c 平均値で規格化して見ると、図 2.5.1.3-7 に示すように、大半の測定箇所で磁場に依存せず一致するものの、磁場中で数%程度臨界電流密度が上昇あるいは低下する数 mm 長オーダの箇所が認められた。これは人工ピンを入れない場合には確認されていない独特の分布ではあるが、全体としては特性分布の磁場依存性は極めて少ないことがわかり、人工ピンが長手方向にほぼ均一に導入され、それを検出することが可能であることを示唆している。

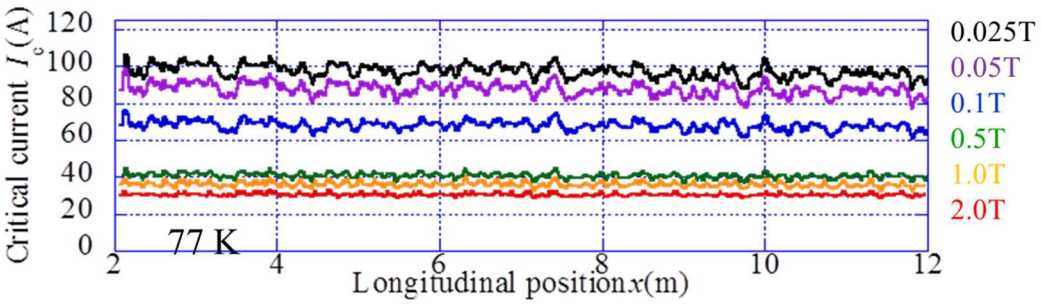


図 2.5.1.3-6 外部磁場下で磁化法により連続測定した I_c 値の長手方向分布

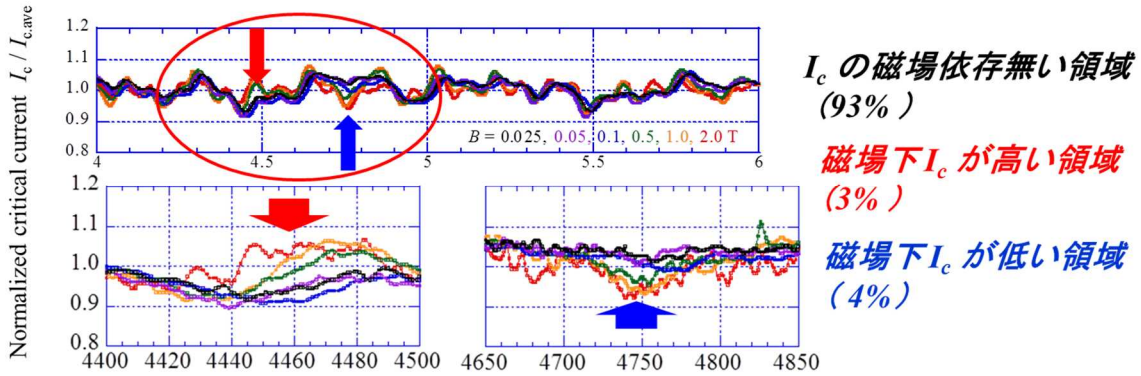


図 2.5.1.3-7 平均 I_c 値で規格化した外部磁場下の I_c 値の長手方向

(2) 生産性を向上した高温超電導線の超電導諸特性の評価解析 (フジクラ、東北大学共同研究)

ア. 生産性を向上した高温超電導線材の磁場中特性評価

生産性を向上するためには PLD 工程で形成する超電導層の蒸着速度を高速化する必要がある。そこで、作製した Y 系高温超電導薄膜の蒸着速度に注目し、超電導層(BHO-EuBCO)の成膜条件を検討し最適条件を見出した。ひとつは蒸着速度が低速のもの(条件 A と呼ぶ)で、もうひとつが蒸着速度が高速のもの(条件 B と呼ぶ)である。これらのサンプルについて、広い温度、磁場範囲で磁場中J_c特性を調べた。磁場中での J_c 測定は東北大学が開発した大電流通電およびサンプルの回転が可能なプローブ、および高速・高精度な計測システムを用いた。磁場の印加には東北大学の強磁場超電導マグネットを用いた。 J_c の磁場依存性(B // c)を図 2.5.1.3-8 に示す。条件 A は非常に高い J_c 特性を有している一方、条件 B においても従来の人工ピンなし GdBCO 線材よりも高い J_c 特性を有していることが分かった。これらを J_c で比較すると、膜厚が厚い分、条件 B の方が高くなる。各温度における 5 T 磁場中の I_c の磁場角度依存性を図 2.5.1.3-9 に示す。条件 A は B // c においてナノロッドによるピークが確認できる一方、条件 B においては条件 A のような高い B // c ピークは確認できなかった。このことは、蒸着速度によってナノロッド形状の人工ピンの形状が大きく変わっていることを示唆する。

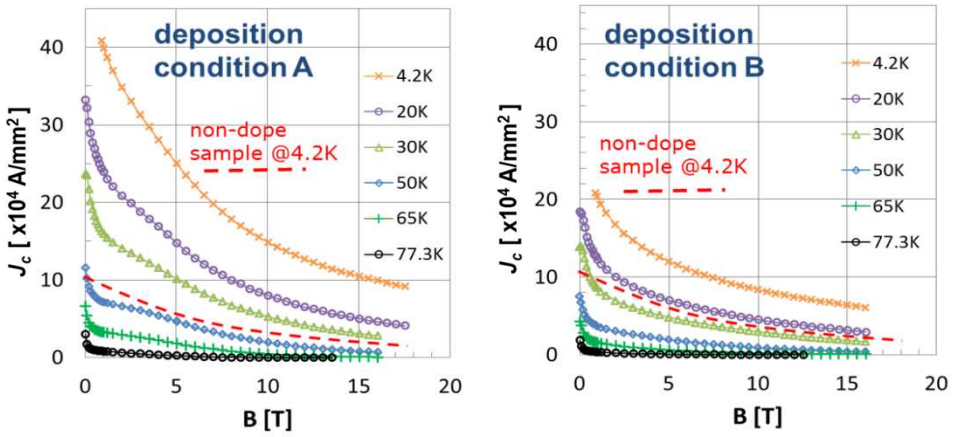


図 2.5.1.3-8 J_cの B // c 磁場依存性(左:蒸着速度 A、右:蒸着速度 B)

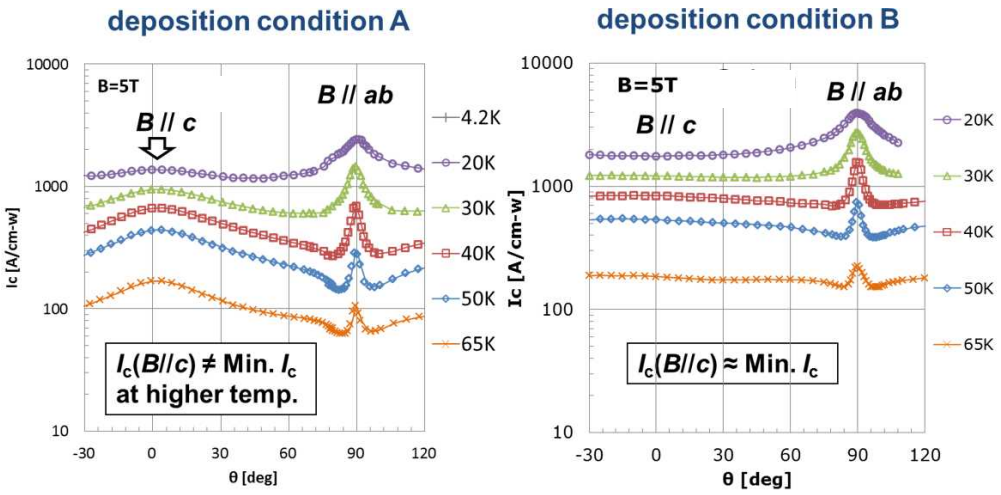


図 2.5.1.3-9 I_cの 5 T 磁場中の磁場角度依存性(左:蒸着速度 A、右:蒸着速度 B)

これらのサンプルの J_c の磁場依存性(B // c)を図 2.5.1.3-10 に、J_c の磁場角度依存性の例を図 2.5.1.3-11 に示す。人工ピン導入により高磁場特性向上を図った線材において、蒸着速度が速く、かつ超電導特性に優れる条件を見出したことにより、高磁場コイル用高性能線材の生産性向上が可能となった。

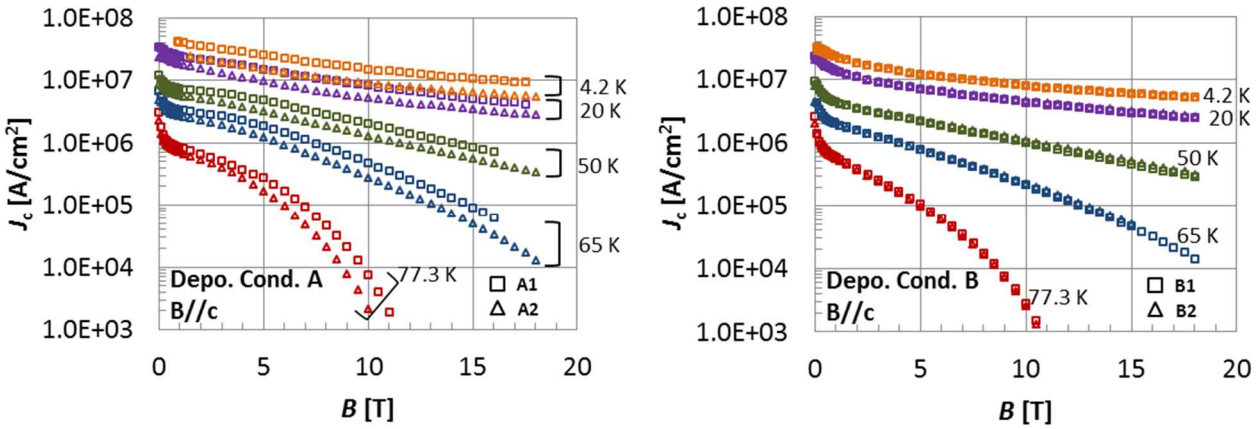


図 2.5.1.3-10　J_c の B // c 磁場依存性(左:蒸着速度 A、右:蒸着速度 B)

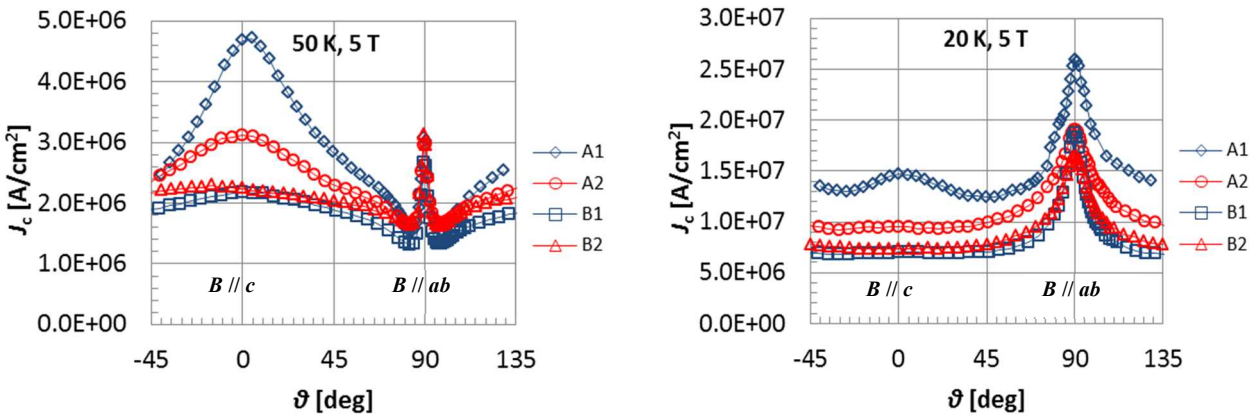


図 2.5.1.3-11　J_c の磁場角度依存性(左:50 K, 5 T、右:20 K, 5T)

イ. 生産性を向上した高磁場高特性線材のピン力密度とスケーリング解析

次に表 2.5.1.3-1 のサンプルについて、巨視的ピン力密度($Fp = J_c \times B$) 特性の挙動を調べた。FAST は高速での成膜条件 B であり、SLOW は低速での成膜条件 A のサンプルに相当する。Pure は比較として従来のピンなし GdBCO 量産線材である。これらのサンプルの J_c の磁場依存性(B // c)を図 2.5.1.3-12 に示す。この結果から F_p を計算しその最大値(F_p^{max})で規格化した値(F_p/F_p^{max})を、F_p の最大値を与える磁場(B^{max})で規格化した磁場(B/B^{max})に対してプロットしたものを図 2.5.1.3-13 に示す。FAST と Pure は温度に依らず規格化 F_p カーブが一致している、つまり F_p の温度スケーリング則を満たしている。このようなスケーリング則は金属超電導材料や人工ピンを導入していない Y 系高温超電導薄膜等で成り立つことが報告されている。一方で、SLOW はこのようなスケーリング則を満たしていない。このような振舞いは c 軸方向に揃ったナノロッド状の人工ピン(c 軸相関ピン)を導入した Y 系高温超電導薄において報告されている[2.5.1.3-1]。一般的に PLD を含む気相蒸着プロセスを用いて人工ピンを導入した場合、SLOW のような c 軸相関ピンが形成されるが、FAST のように蒸着速度が速い場合(条件 B)は人工ピンの c 軸相関性が弱いランダムピンニング点のような振舞いとなっていると考えられる。F_p の磁場依存性は、経験的に以下の式で表現される。

$$\frac{F_\mathrm{p}}{F_\mathrm{p}^{\max}} = C\left(\frac{B}{B^{\max}}\right)^{p}\left(a-\frac{B}{B^{\max}}\right)^{q} \qquad (1)$$

ここで、a は不可逆磁場 B^{irr} と B^{max} の比 (B^{irr}/B^{max})であり、77.3 K における測定データより求めることができる。C は規格化定数であり、$(a-1)^{-q}$ である。p、q はフィッティングパラメータである。FAST と Pure の a、p、q の値を図 2.5.1.3-13 の図中に示した。

$F_p = J_c \times B$ であるから、F_p のスケーリング則(1)式が成立する場合、B^{max}、F_p^{max} の温度依存性がわかれば(1)式より J_c の磁場、温度依存性が計算できる。B^{max} の温度依存性として B^{irr} に関する表式[2.5.1.3-2]を用いて以下の式を用いる。さらに、F_p^{max} も B^{irr} に依存するため F_p^{max} の温度依存性も同じ式を仮定する。

$$B^{\max}(T) = A\left(\frac{T}{T_c}\right)^{-\alpha}\left(1-\frac{T}{T_c}\right)^{\beta}, \qquad (2)$$

FAST サンプルの B^{max}、F_p^{max} の温度依存性の実測値と、(2)式を用いたフィッティングの結果を図 2.5.1.3-14 に、フィッティングパラメータを表 2.5.1.3-2 に示す。このフィッティング結果をもとに(1)式から J_c を計算した結果を図 2.5.1.3-15 に示す。実測データと比較的よく一致しており、コイル設計等で有用である。

表 2.5.1.3-1 評価サンプル諸元

試料	超電導層	I_c (77.3 K, 自己磁場)
FAST	BHO-EuBCO	464 A/12mm 幅
SLOW	BHO-EuBCO	300 A/12mm 幅
Pure	GdBCO	690 A/12mm 幅

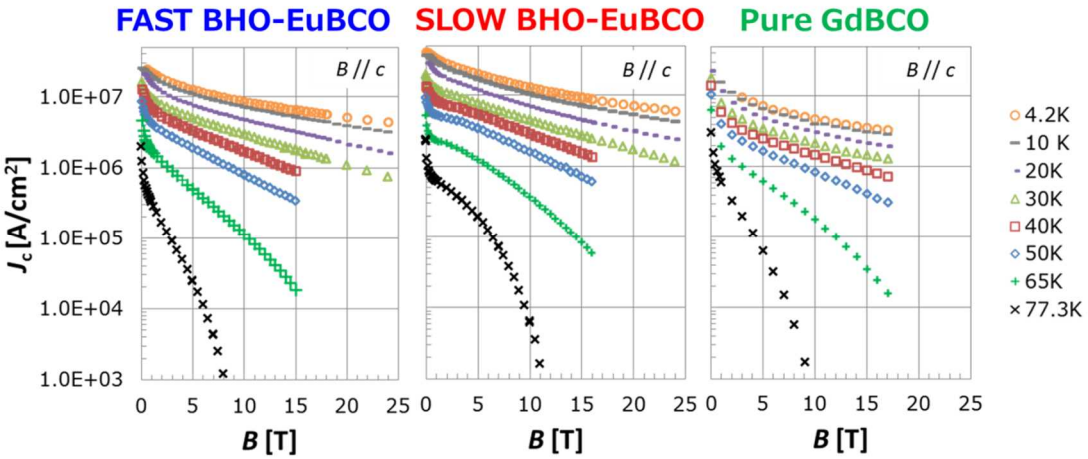


図 2.5.1.3-12 J_c の B // c 磁場依存性

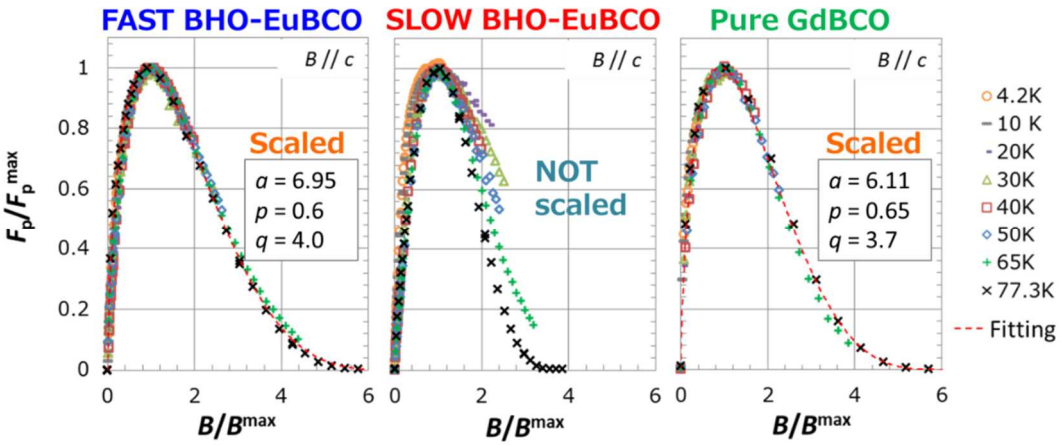


図 2.5.1.3-13 左：規格化 F_p の規格化磁場依存性

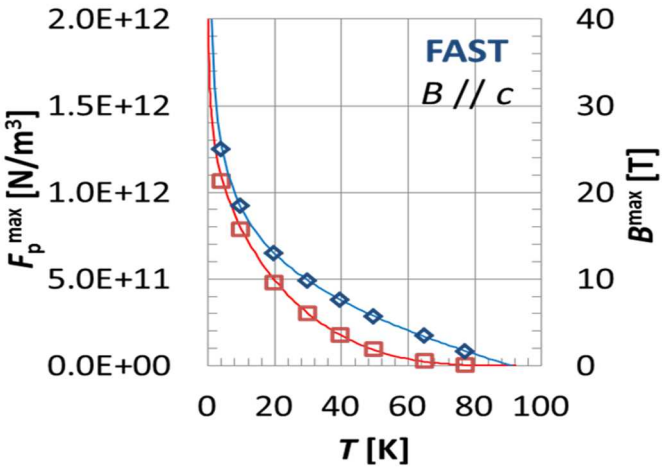


図 2.5.1.3-14　FAST サンプルの F_p^{max} および B^{max} の温度依存性とそのフィッティング曲線

表 2.5.1.3-2　FAST サンプルの F_p^{max} および B^{max} のフィッティングパラメーター

	A	α	β
F_p^{max}	8.3×10^{11}	0.13	2.9
B^{max}	10.5	0.3	1

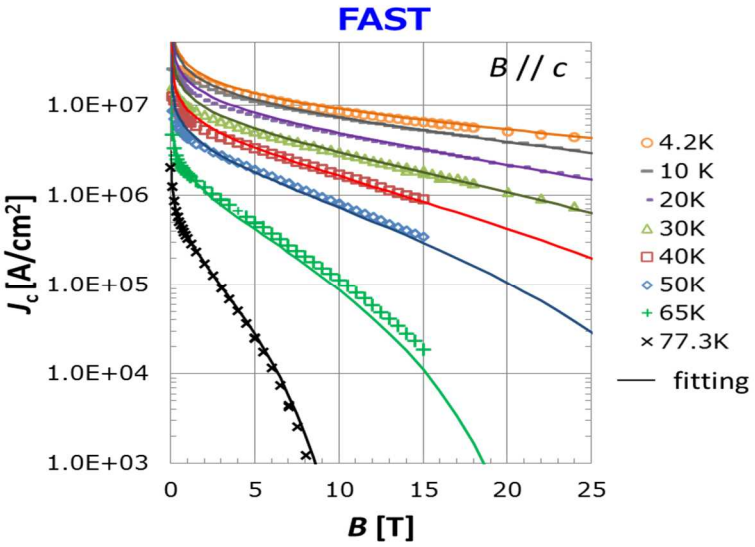


図 2.5.1.3-15　FAST サンプルの J_c の B // c 磁場依存性の計算結果

参考文献

[2.5.1.3-1]　S. Awaji et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 30, 114005 (2017).

[2.5.1.3-2]　Y. Tsuchiya et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 30, 104004 (2017).

2.5.1.4　研究開発項目毎の成果 全体まとめ

（1）IBAD 法/PLD 法に基づくイットリウム系線材の製造工程全体を見渡し、製造スループットに影響する律速工程の洗い出しを行い、超電導層成膜工程、基板表面品質、安定化層品質、検査工程の 4 か所を特定し、それぞれの現状の課題を抽出し、目標値として全工程で 50m/hr を設定した。

（2)超電導層成膜工程については、ホットウォール加熱方式の高線速時における基板テープ加熱条件の詳細検討を実施した。この結果、線速 50m/hr 以上においても、委託事業成果の高蒸着速度条件において、目標値である 400A/cm^2 をクリアした形で線速 50m/hr での成膜を実現した。

（4)基板表面品質を維持して高線速を達成するため、品質に影響を与えるパラメーターを抽出し最適化した結果、50m/hr にて安定した長尺加工が可能なことを確認した。

（5)安定化層品質については、一定の膜厚分布を保った状態で高速複合処理を行い、良好な条件が得られる構造を選択した。この結果、幅方向、長手方向に均一な膜厚を維持した状態で、12mm 幅当りに於いて 50m/hr (4mm 幅に於いては 150m/hr)の線速を達成した。

（6） 各律速工程に於いて線速を全て 50m/hr をクリアした状態で通貫試作を実施し、300m 長に於いて委託事業の特性目標である 400A/mm^2 を越す平均臨界電流値を生産性を向上した条件において達成した。

（7)「検査工程」に於いては、長尺に渡って高精度に特性欠陥部の抽出を行えるよう、2 次元的に磁化測定が可能な「速高精度連続磁化測定装置」の設計製作を実施した。九州大学にて開発されているスキャンホール素子顕微鏡(SHPM)の素子部をマルチチャンネル化することにより、従来得られていた高精度(長手方向 1mm)を維持して、線速 64.8m/hr で測定することに成功した。

（8） 高磁場コイル用超電導線材として、2.0 T までの外部磁場中に於いて、高線速製造条件による長尺線材について長手方向特性分布の測定（液体窒素中）を高分解能で実施した結果、数 mm 長オーダで磁場中で数%程度臨界電流密度が上昇あるいは低下する箇所が認められたが、全体として磁場依存性は極めて少ないことがわかった。

（9） 広い温度磁場領域に於いて、高線速製造条件にて作製したサンプルの臨界電流密度特性を測定した結果、コラム状の人工ピン材料を導入して特性が向上しているにも関わらず、高速成膜条件に於いては c 軸相関性が顕著ではなく、各温度における最大ピン力密度を与える磁場が一般的なスケール則で近似可能なことが見出された。

Ⅳ. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

1. 電力送電用超電導ケーブルシステムの実用化開発【交流】

1.1 電力事業を取り巻く環境

地球温暖化対策としての CO_2 排出量の削減は、電力事業者にとって喫緊の課題の一つである。特に東日本大震災以降、原子力発電所の停止分を補うために、火力発電所の稼働比率が大幅に上昇している。例えば東京電力における CO_2 排出源単位は、震災前の 2010 年度の 0.375 kg-CO_2/kWh から、震災後の 2012 年度には 0.525 kg-CO_2/kWh（いずれも炭素クレジット反映前）へと 40 %程度増加している。この対策として例えば電源系においては、火力発電所熱効率の大幅な改善や、家庭分野ではエコキュートなどの高効率機器の導入普及などを進めている。一方で流通設備を見ると送配電ロスは 5%前後で推移しており、送配電ロスをさらに低減できるような有効な対策がないのが現状である。この送配電ロスを抜本的に削減するような技術開発が強く求められている。

一方、2016 年 4 月に東京電力株式会社は分社化され、流通設備を受け持つ東京電力パワーグリッドのミッションとして託送料金の低減があげられている。このため、新規設備の増設はもちろん既設設備の改修判断は非常に厳しい状況にある。また、2016 年 10 月 12 日に発生した埼玉県新座市付近の洞道内ケーブル火災の対策により、今後 30 年をかけて回線延長 700km 以上の 275kVOF ケーブル（POF を含む）を CV ケーブル化することとなった。パワーグリッドの設備は経年とともに改修計画を計画的に立案しているものの、限定された予算内での対応を強いられており、ケーブルを含めた電気設備、ならびにこれを収納するトンネルや管路等土木構造物の経年劣化が顕著になっている。

超電導ケーブル技術は、トータルコストが低減されることが前提ではあるものの上記の課題を解決できる唯一の革新技術であり、次世代の電力送電網の構築においても重要な技術と位置づけられる。

1.2 実用化・事業化の見通し

超電導ケーブルの適用例として、基幹系電力送電網への導入、および既存 OF・POF ケーブルの代替が考えられる。

先ず、最も有効な適用例が、現在 275kV の地中ケーブルで構成される基幹系の電力送電網への導入である。（以降、代表的な呼び名として「都内導入系統」と表記する。）電力需要の増加に伴い遠方大規模電源を増強する際には、それに合わせて 275kV 系の都内導入系統も拡充する事になる。これを既存の 275kV ケーブルで構築しようとすると、新たに洞道（最低でも内径 2.1m）の建設が必要である。しかしながら、特に都内においては地下空間に他の公共インフラ等が集中しており、新たな洞道を建設することが非常に困難になっている。これに対して超電導ケーブル技術を適用すると、既存 275kV ケーブルと同容量の電力を内径 150mm の既設管路に収容可能な 66kV 超電導ケーブルで構築可能である。図 1.2-1 に既存の 275kV ケーブルを用いた場合の系統構成例と、66kV 超電導ケーブルを用いた場合の系統構成例、および両者のサイズ比較を示す。この図からわかるとおり、超電導ケーブルを適用することで洞道新設が不要となり、また既設管路の有効活用も可能なため、建設コストを大幅に低減できる。また、超電導ケーブルは非常に低損失であるため冷却に必要な電力を考慮しても、送電ロスを半分程度まで低減でき、CO_2 削減に有効であると考えられる。

更に、都心にある 275kV ケーブルを収納しているトンネルを代表とする地下構造物の劣化リスクがある。ケーブルを多数収納したトンネルを全面的に改修する場合の施工方法は、一旦別のスペースを用意して、その中に新しいケーブルを布設して、送電可能であることを確認した後、古いトンネルの改修を実施するのが系統的にもリスクが少ない工法である、

しかしながら、この別のスペース、すなわちトンネルの確保も非常に困難となることが想像され、超電導ケーブルを用いたコンパクトな管路で移設を行うようなケースも考えられる。

次の適用例が経年化した既存 OF・POF ケーブルの代替である。既存の 154kV 変電所・地中送電線は、今後老朽化対策および増容量対策が必要となるが、CV ケーブルで対応する場合にはケーブル容量の制約から既存 OF ケーブルより大径化するので、既設ケーブルを収容している管路の活用はできず、新たな洞道建設が必要となる。これに対して超電導ケーブル技術を活用すると、66kV 超電導ケーブルで大容量化に対応できるうえに既設管路の再利用も可能で、大幅なコストダウンと CO_2 削減が可能である。図 1.2-2 にはこのようなパターンとして、湾岸火力発電所からの送電系統への超電導ケーブルの適用例を示す。このような適用により 154kV 系統を 66kV 系統にてリプレースでき、電圧階級の整理と、それに伴う 154kV 送変電設備の省略も併せて可能となる。

経年化した 154kV および 275kV の POF ケーブルの取替策として、CV ケーブルでの代替が検討されているが、CV ケーブルは POF ケーブルに比べて容量が小さいため、CV ケーブルを用いる場合には回線数を増加させる必要がある。この場合、既存洞道が回線増に対応可能かどうかなど様々な課題をクリアする必要がある。大容量送電が可能な 275kV 用の超電導ケーブルを活用すれば、既設 POF ケーブルと同容量の電力を、回線数を増やすことなく、単純なリプレースとして更新できる。さらに POF ケーブルは送電容量確保のために油循環冷却システムと冷却ステーションを備えており、この冷却ステーションのスペースを有効利用して超電導ケーブル用冷却システムを構築できる。しかしながら POF ケーブルは新座洞道火災対策のため、既に計画的な改修が予定されており、超電導ケーブル適用には、コストが大幅に削減可能でかつ、信頼性が CV ケーブルと同等以上になることが求められる。また、昨今の節電等のため、POF ケーブル当初の送電容量が完全に確保できなくとも系統次第である程度の容量を CV ケーブルで送電可能であれば問題ない、との判断がなされる可能性もありうる。

上記例の他に発電所の引出口（発電機～変圧器間）などの大電流が流れる部分には、内部水冷ケーブルや GIL（ガス絶縁式送電ライン）などの大容量ケーブルが用いられている。これらは大容量であるために既存 CV ケーブルでの置き換えが困難で、経年後の代替策に苦慮しているのが実態である。コンパクトで大容量送電が可能な超電導ケーブルは、これら既設大容量ケーブルの代替策として早期の実用化が渇望されている。

図 1.2-3 には、既存の大容量ケーブルの例として、発電所引出口に利用されている既存内部水冷ケーブルの断面写真と、大容量ケーブルの代表である POF ケーブルの断面写真を示す。いずれも大容量であることから既存 CV ケーブルでの代替にはスペース等の制約があるが、コンパクトな大容量超電導ケーブルであれば、それらの制約なしでの代替が可能である。昨今の状況を鑑みると、275kVPOF ケーブルについては計画的な改修予定をパワーグリッドが検討しているため、超電導ケーブルのコスト競争力向上が早急に求められる。

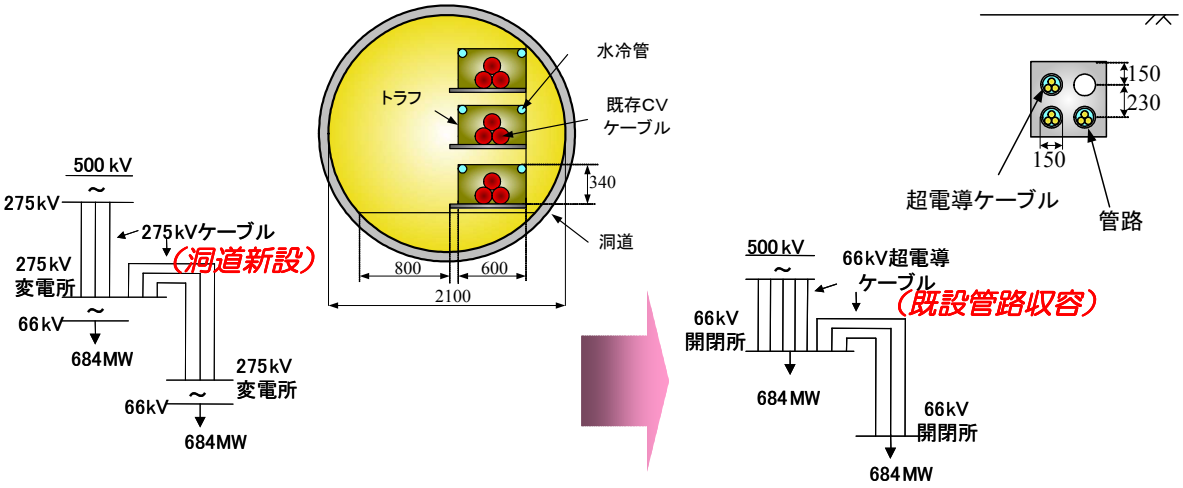


図 1.2-1　既存ケーブルと超電導ケーブルでの系統構成比較とサイズ比較
（都内導入系統）

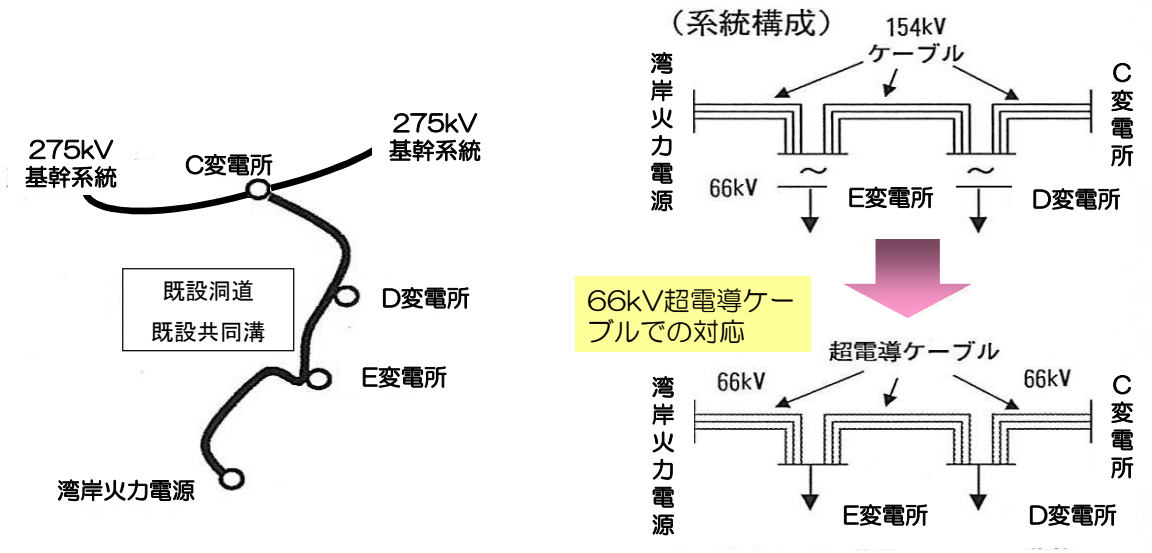


図 1.2-2　湾岸火力電源からの送電系統のリプレースへの超電導ケーブルの適用例

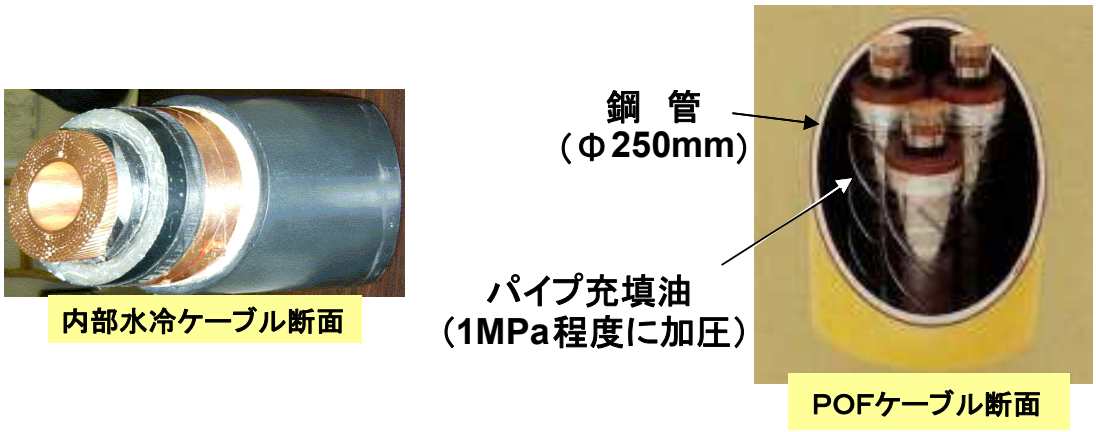


図 1.2-3　内部水冷ケーブルと POF ケーブルの断面写真

超電導ケーブルの適用により、1.1 に述べたとおり大幅な CO_2 削減効果が期待できる。また、既存ケーブルでの系統構築から超電導ケーブルでの系統構築に移行することにより、既存ケーブル用の洞道新設が不要となるなど、大幅なコスト削減も期待できる。

図 1.2-4、図 1.2-5 は、都市部の地下送電線に常電導ケーブル（275kV）と超電導ケーブル(66kV)を適用した場合の建設コストと送電損失の比較を示したものである。線材、冷凍機のコストが将来的に下がれば、建設コストは従来システムの 60%に低減ができると期待されるが､2019 年断面では､線材や冷凍機の量産化による低減効果がまだみられないため、コストは低減していない。将来線材の高性能化・量産化、ならびに冷凍機の量産化により、さらなるコスト低減が見込まれるが、その実現時期は現時点では明確でない。また、送電損失については将来的には、従来システムの 60%程度に損失を低減することが可能であることをプロジェクト開始前に見込んでいたが、交流損失低減技術、断熱管侵入熱の目標値 1.8W/m の達成、ブレイトン冷凍機の効率 0.11 の見込みが得られたことから、2020 年断面での従来システムの 60%程度への低減が現実的であることが示された。

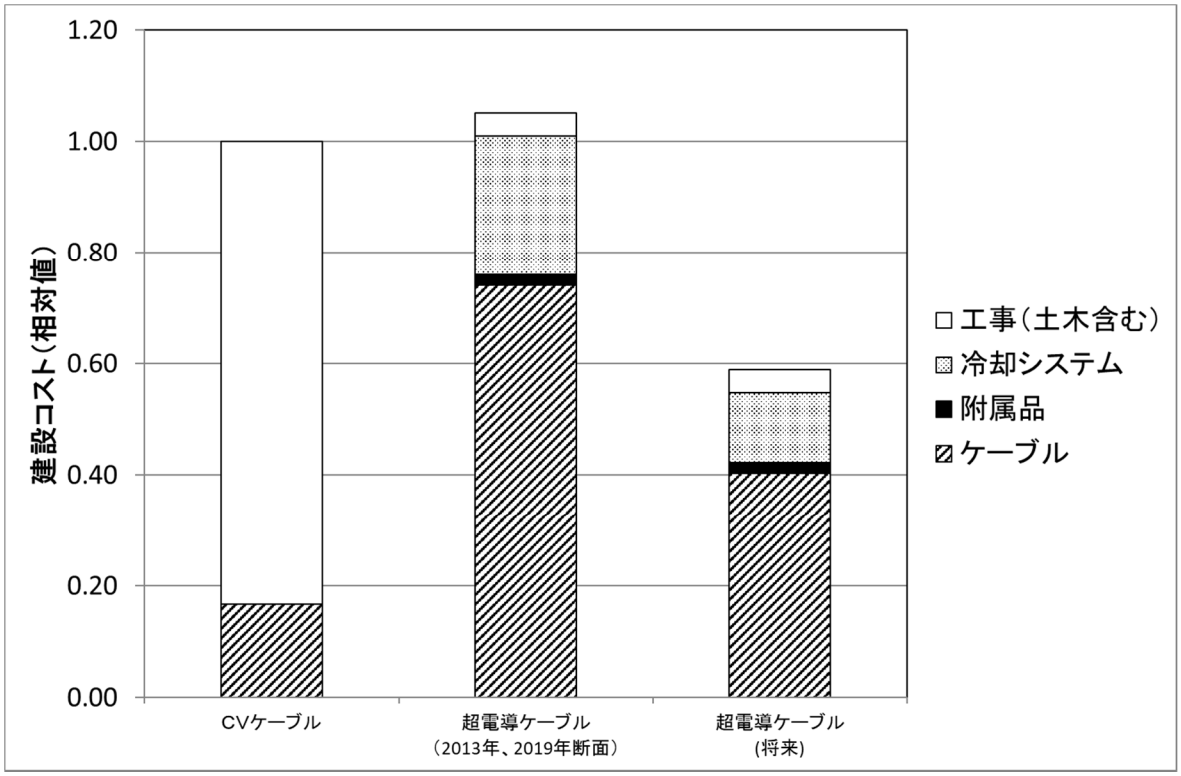


図 1.2-4　建設コストの比較（相対値）

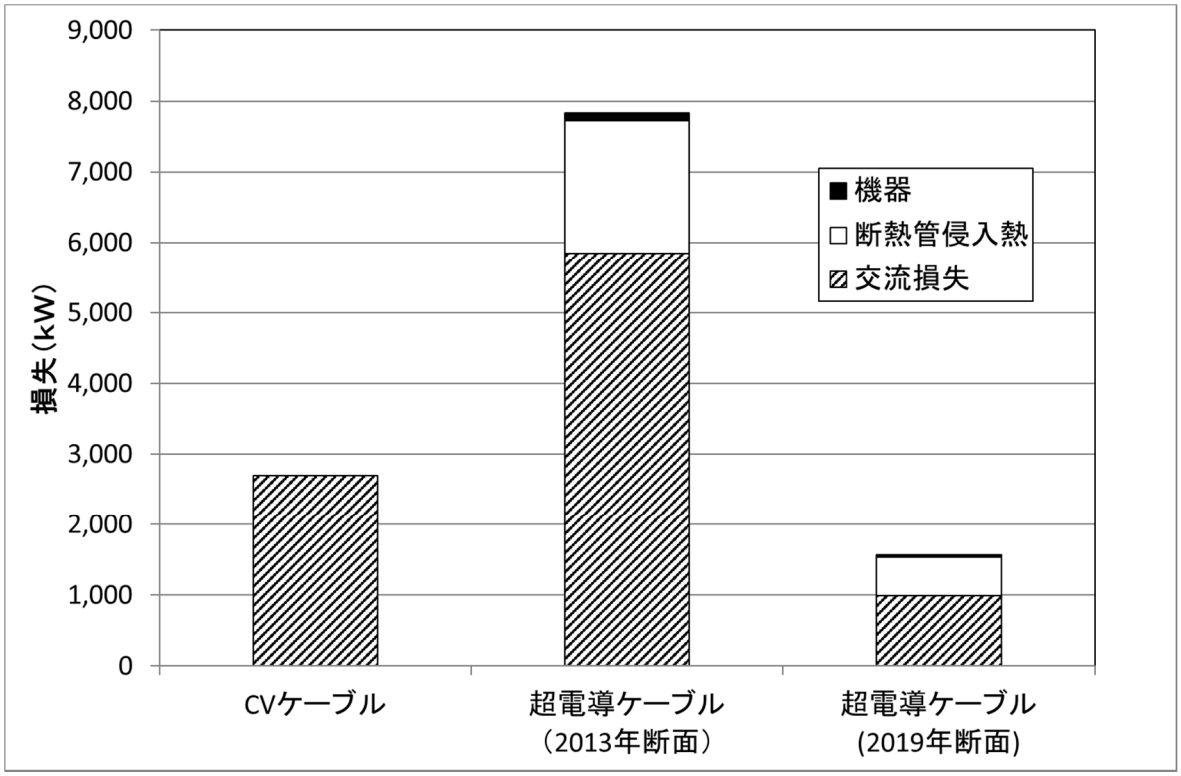


図 1.2-5　負荷率の違いによる送電損失の変化

1.3 実用化に向けた課題

超電導交流送電ケーブルシステムの開発に関し、「超電導技術開発／高温超電導ケーブル実証プロジェクト」（平成19年度～平成25年度）において、66kV/200MVA級三心一括型超電導ケーブルシステムの一年間以上の実系統連系試験を行い、電力システムの一部として利用可能な信頼性を有することを検証するとともに、冷却システムに関しては、5kW級のブレイトン冷凍機開発を実施して冷凍機単独でCOP（Coefficient of Performance）0.10を達成した。その後、「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」（平成26年度～平成27年度）において実際の電力系統へ導入するため、地絡・短絡などの事故時の安全性評価と対応策の構築、ブレイトン冷凍機の耐久性評価を進めた。さらに本プロジェクトにおいて、実用化のために不可欠な安全性能の確保、事故・故障発生時の復旧方法策定、ならびに運転管理・早期復旧のためのガイドラインを作成した。また、冷却システムの効率0.11達成のための方向性の提案とメンテナンスインターバル40,000時間を担保可能と判断するデータ取得を実施した。今後の実用化に向けた課題としては、実機での確認検証等を除けば主要な技術的検証はおおよそ完了したと思われ、残された課題は下記のような運用面、コスト面が中心になる。

1） 超電導ケーブルは液体窒素の漏洩対応や超電導ケーブルのジョイント施工など、同電圧階級のCVケーブルと比べてトラブル復旧に日数がかかる。もちろん通常ケーブルと同様冗長性を持たせることは不可欠であるものの、復旧時間が長いため系統全体としての信頼度は低下してしまう。この信頼度をあげるためには復旧時間のさらなる短縮の検討が引き続き必要である。一方、このような条件を加味しても超電導ケーブルを導入すべきメリットを明確化するため、低コストや低損失化を今後も進めていく必要がある。
2） 短絡電流に対して超電導ケーブルの温度特性より、通常のCVケーブルでは必要としない保護リレーや高速遮断器の設置などの対応が必要となる。このような超電導ケー

ブル特有の系統運用・設備構成が必要であることを、系統運用者や設備管理者へ十分な理解を促す必要がある。

3) 事故点同定は設備復旧上、重要な判断要素である。しかしながら、超電導ケーブルは抵抗が無いという特徴を有するが故に、従来の抵抗値を活用した事故点同定方法の適用は難しい。そのため、事故点同定について超電導ケーブルならではの新しい観点が必要である。

1.4 実用化・事業化までのシナリオ

各社における超電導ケーブルシステムの実用化戦略は以下のとおりである。

・東京電力ホールディングス株式会社

1.3 にて述べた課題に記載した通り、超電導ケーブルの事故点同定から事故復旧に至る手法を確立することがまず必須である。その際、復旧時間の短縮は今後とも検討を続ける必要がある。なお、超電導ケーブル特有の運用・設備構成について運用者等に十分な理解促進を図ることが非常に重要である。

・住友電気工業株式会社

技術的には 1.3 の実用化へ向けた課題への対応を行っていく必要があるが、これらの対応は適用場所によって異なることもあり、具体的な適用場所を探索することが先決であると考えている。国内電力事業の情勢は、1.1 で説明された通り、東日本大震災以降、新規設備の導入については、非常に厳しい環境にあることは認識している。従って、欧米、中国、韓国などの海外への展開を検討する必要があると考えている。現状は、国際会議の参加を中心に、各国の電力事情や超電導ケーブルに対するニーズ、開発状況について調査している段階である。電力需要の伸びからすると中国が最も期待できるものと考えるが、電力会社の状況などは情報が制限されており、詳細を得るのは難しい状況である。欧米については、米国、ドイツ、スペイン等の情報からは、低電圧大容量の超電導ケーブルを郊外から都市部に引込むルートに適用の可能性があると思われる。

一方、コストについては、超電導ケーブルの多くは線材コストが占めており、線材の低コスト化を進めていく次第であるが、ある程度量がでないと、安価にならない。したがって、こちらも増産設備の投資ができる程度の、確実なマーケットをとらえることが先決と考えている。

電力向け以外は、鉄道用ケーブル、データセンター用ケーブル、消磁ケーブルなどの応用が検討されており、これらの動向にも注目していきたい。

・古河電気工業株式会社

超電導ケーブルの低コスト化が実用化への必須条件と考えており、2030 年の実用化を目標に考えている。超電導ケーブルでなければ解決できない箇所への導入を念頭におき、ユーザが求める機能の取り込みを検討し、国内においては電力ケーブルの入替え需要が増加する 2030 年頃に超電導ケーブルの商業化を目指していく。また、海外市場において日本の優位性を確保するためにも、他国が到達できていない高電圧領域の超電導ケーブルの早期実現を果たし、国際標準化において日本のイニシアチブを主張して、技術先行性をベースに市場拡大を目指していきたいと考える。

・株式会社前川製作所

比較的に短距離の超電導ケーブルを想定した 5 kW ブレイトン冷凍機の高効率・高信頼化の検証を行ったことで実用化が加速すると考えている。ブレイトン冷凍機は、実証試験が

終了した 2018 年に、成果を反映し営業を開始した。また、さらなる、冷凍機の小型化・低コスト化を行うことで、市場の拡販を考えている。平行して超電導ケーブルの長距離化などに対応するために、冷凍機の大容量化を行い、さらに超電導ケーブル市場拡大に対応可能なように考えている。

1.5. 波及効果

本技術開発は、高温超電導線材を活用した交流超電導ケーブルシステムの実証を目指すものである。

諸外国においても交流超電導ケーブルの実証プロジェクトが進行中である。米国においては老朽化した送電ネットワークの近代化を目指したスマートグリッド構想が進行中で、超電導ケーブル技術もこの対策の一環として取り上げられている。これまでに、Long island で開発された超電導ケーブルは、大容量化は容易だがコンパクト化が困難な単心タイプの超電導ケーブルであったが、最近検討中のものは、変電所間を連系する低電圧の三相同軸タイプのケーブルである。このケーブルは、三相が同軸上に構成されているので、コンパクト化に適している。

また、2014 年に運開したドイツの Essen プロジェクトのケーブルも同じく三相同軸型である。尚、Essen のケーブルは 5 年程経過した現在も安定に運転を続けいてる。本技術開発で採用している超電導ケーブルは、大容量化、高電圧化、コンパクト化のいずれもバランス良く実現可能である。本技術開発を早期に確立することで、諸外国の超電導ケーブル導入プロジェクトでの本技術の採用など、海外への波及効果も期待できる。

地球温暖化対策として今後加速的に導入量が増加すると予想されている太陽光発電や風力発電などは、いずれも発電端は直流であり、ウィンドファームのように大規模集積化が進むと直流での直接送電のニーズが高まると予想される。また、データセンターなどでの電力消費は直流であり、低電圧大電流の直流配電システムへのニーズも高い。このような直流送電システムに対しても、本技術開発で培った超電導ケーブル技術の展開が可能で、これにより送電ロスはさらに大幅に低減でき、より大きな省エネルギー効果と CO_2 削減効果をもたらすことができる。

2. 電力送電用超電導ケーブルシステムの実用化開発【直流】

2.1 直流超電導送電のニーズ

2011 年の東日本大震災に伴う原子力発電所の事故によって、再生可能エネルギーの導入が加速度的に増加している。図 2.1-1 参照。

不安定な電源の容量が大きくなることの、ネットワークへの影響や、辺境に建設された太陽光発電所や、洋上風力発電所から、中継場所（変電所等）への電力送電に関しては、新規の送電線や海底ケーブルが必要であり、さらなる再生可能エネルギーの導入に関する課題の一つとなっている。これらの送電線は交流送電や直流送電などが考えられるが、太陽光発電はそもそも低電圧の直流発電であること、風力発電に関しても低周波（発電方式にもよるが）発電を商用周波数に直流を介して変換しており、直流送電の可能性が検討されている。

将来的に、これらの再生可能エネルギーの導入が進み、大容量の電力を送る場合は、超電導直流ケーブルの適用が期待される。

尚、上記の傾向は、海外ではより顕著であり、送電距離も長い場合があると考えられ、長距離超電導ケーブルの適用が期待される。

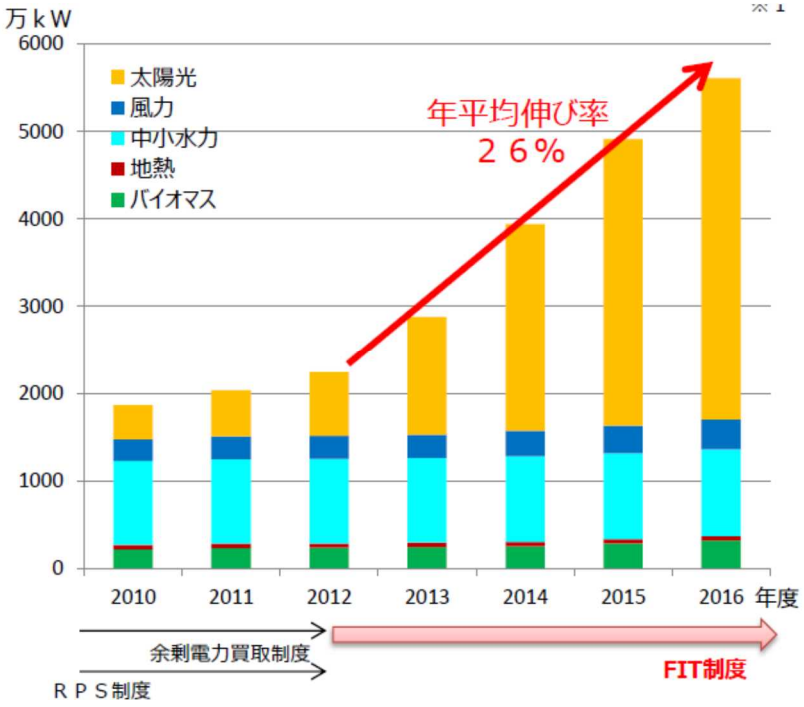


図 2.1-1　再生可能エネルギーの設備容量の推移
（出典：再生可能エネルギーの現状と本年度の調達価格等算定委員会
について　平成 29 年 9 月資源エネルギー庁）

2.2 研究開発成果の及ぼす波及効果

本プロジェクトでは、実用化を見据えた長距離線路を模擬した循環冷却試験及び検討を行うと共に、実運転を想定した故障時の挙動調査など、多様なケースでの運転検証を行うことで、長距離化、信頼性・安全性の検証を通じて実用化を促進する効果がある。また、送電システムを管理・維持・運用する側の視点で電気事業法上必要とされる保安規定における点検項目や運転基準を設定できる等のガイドラインを作成することで、運転技術の蓄積・向上の効果がある。

2.3　事業化の取り組み

本プロジェクトでは、1km（往復で 2km）の直流超電導ケーブルの冷却性能等を確認したが、実用化においては、数 10km 以上の超電導ケーブルが必要であると考えられる。そのためには、さらなる技術開発や、システム検証を行う必要があり、石狩超電導・直流送電システム技術組合が中心となり、その開発を進めていく計画である。

また、実用化には、コストダウンについても平行して行う必要があり、特に超電導線材、冷凍機に関してはその必要性が強いと考えられている。これらの低コスト化は、メーカの努力によるところが大きい。

住友電気工業は、電力ケーブルを製造し電力会社等のユーザに販売している実績を有している。また、超電導分野においてもビスマス系超電導線材の量産化に成功し、販売しているメーカでもある。さらにこのビスマス系線材等を用いた超電導ケーブルの開発実績を多数有しており、その実用化のための開発を行ってきた。

直流超電導ケーブルについては、需要増加が期待できそうであるが、上記技術開発、システム検証と歩調を合わせ、実用化のタイミングにおいては、コスト的にもメリットがでるように努力していきたい。

3. 高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発

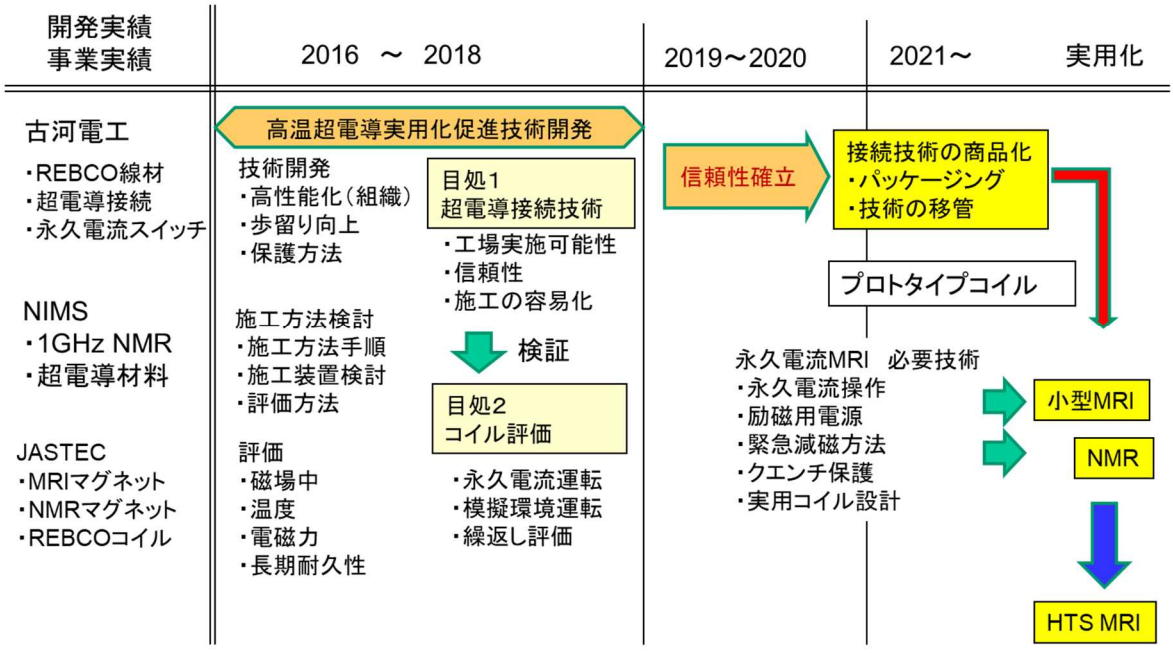
本開発テーマにおける実用化・事業化の定義は、本テーマで開発された超電導接続を用いた超電導マグネット、超電導ＭＲＩ、超電導ＮＭＲ等の試作品、超電導接続技術等の社会的利用（顧客への提供等）が開始されることである。また。当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により、企業活動（売り上げ等）に貢献することを言う。

本研究開発においては、事業化を念頭にした開発を意識して、内容的にはコイル製造現場で線材接続ができるプロセスを考え、その方法で目標の接続特性を得ることができた。また、数値的にも、歩留まりの概念を導入して、開発としては立ち上げ時期ではあるものの歩留まり５０％を大幅に達成することができた。

超電導接続は、コイル製造現場で使われるもので、その実施者はコイル製造メーカになる。そのために、開発した超電導接続を、コイル製造メーカに提供していくことになるが、コイル製造メーカとしては、もう一段高い超電導接続の信頼性、安定性の確立が必要となる。また、現状では高温超電導線材も 500m が流通しているが最も長い長さであり、MRI マグネット製作には数ｋｍの長さが必要と考えられている。そのために、メーカにおける数年の信頼性確立研究の継続が求められる。

一方で、超電導接続技術は、ノウハウ技術であり、その技術保護は難しいものである。特に、工場内で行われるために、成果物の入手も難しく、入手しても製作プロセスを知ることは難しく、特許等で権利化しても、侵害を立証することは難しい。そのために、接続技術を接続設備とあわせてパッケージングしたり、技術移管可能な形にするなど、商品化することも必要である。これは、NEDO プロで実施した成果が、国内の競争力強化に使われるためにも大事であり、そのための検討を必要となる。これらの時間と、並行して進められる高温超電導ＭＲＩ開発が融合することで、永久電流モードで運転される MRI が事業化するものと考えている。以上説明した事業シナリオを、図 3-1 に示す。

図 3-1 事業化シナリオ



開発対象のＭＲＩの想定（潜在）市場については、現在のＭＲＩの市場：MRI の設置台数国内 5,000 台、世界 22,000 台であり、これら設備は、５～１０年ごとに更新される。さらに、近年は、新興国では新規需要が立ち上がり、マグネットの国内市場 約 400 億円/年、

世界市場 約 3000 億/年と想定している。ＭＲＩのユーザは、ＭＲＩマグネットを均一磁場を安定に発生する磁場発生装置としてみているので、安価で、性能が良く、メンテナンスが容易で、軽量・コンパクトを望み、高温超電導がそれらのニーズを達成すれば、これまでの低温超電導ＭＲＩから高温超電導ＭＲＩに一斉に変わるものと予想している。

一方で、本技術の波及効果として、永久電流を必要とする超電導機器は、リニア、フライホイール、ＭＣＺなど産業機器等にもある。これらは、永久電流とすることによる運転の容易さに加えて、電源駆動では停電など電源がダウンした時に永久電流であれば磁場発生を継続できるなど、装置の信頼性向上に寄与し、特にインフラ系のマグネットにニーズがあるものと考えている。これら産業系のニーズを表 3-1 に、また高温超電導マグネットの市場予想を図 3-2 に示す。以上のことから、本プロジェクトの成果については実用化・事業化の見通しがあると言える。

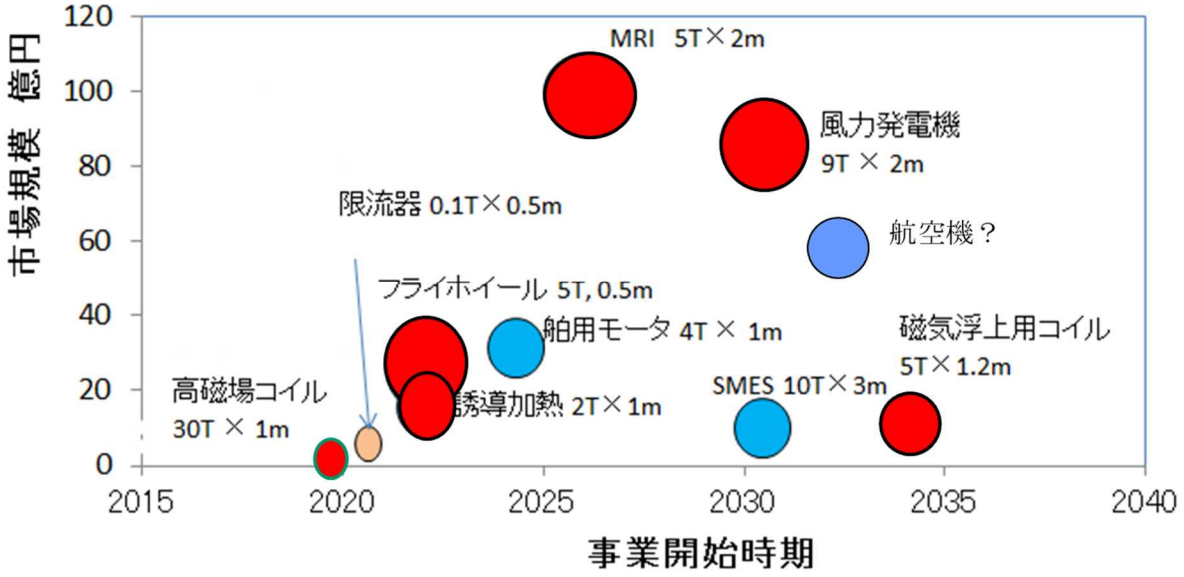


図 3-2 高温超電導の事業予想（事業者想定）

表 3-１　永久電流を必要とする超電導機器

適用機器	必要性	励磁間隔	要求抵抗値
ＭＲＩ	メンテナンスフリー ファンクショナル撮像（アンギオ）	１年	$10^{-12}\,\Omega$
ＮＭＲ	高安定化電源の不要化 運転の簡素化	１年	$10^{-12}\,\Omega$
ＭＣＺ シリコン引上げ	常備電源台数の低減 運転コストの低減	１年	$10^{-12}\,\Omega$
リニア	東京-大阪間 営業時間内の無電源運転	１日	$10^{-9}\,\Omega$
フライホイール （磁気ベアリング）	停電時の磁場喪失防止 （安全対策）	１日	$10^{-10}\,\Omega$
風力発電機 （界磁コイル）	回転子への電源供給の簡素化 （スリップリングの問題解消）	無風間隔 １週間	$10^{-11}\,\Omega$

4. 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【磁場特性改善】

本技術開発で、医療機器としての小型化・ヘリウムフリー化のニーズに則した３Ｔ級高温超電導ＭＲＩマグネットシステムを実現するにあたり、必要とされるＹ系超電導線材が満たすべき性能目標として、高磁場条件下での高電流密度性能、1㎞程度の長さ及びその特性均一性、発生磁場の安定性に関連する交流損失の低減技術の確立、の３つを達成した。このうち、高磁場条件下での高電流密度性能については、求められる小型３Ｔ級マグネットシステムにおけるコイル内最大経験磁場が７Ｔに達する可能性があり、かつ線材断面全体にわたる平均臨界電流密度（J_e）として従来線材の約２倍に相当する４００Ａ／ｍｍ^{2}以上が必要とされ、冷却エネルギー消費が充分低くかつ熱的に安定な温度として望ましいとされる温度３０Ｋで目標通り達成した。本事業ではこの従来線材の約２倍となる高電流密度の線材を「高温超電導実用化促進技術開発／高磁場マグネットシステム開発／高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」にて進める３Ｔ級高温超電導ＭＲＩマグネット使用者向けに設定納期通りに安定的に供給した。従来仕様と合せると線材量で１００ｋｍ以上の線材供給の役割を担い、これにより単に高性能なＹ系高温超電導線材の開発や量産技術開発だけに留まらず、市販されるＹ系高温超電導線材として競争力のある高温超電導線材を安定して提供する量産技術力も世界トップレベルの水準に達したものと考えている。

さらに、本研究開発を通じてＹ系高温超電導線材の低温下での引張応力、繰り返し引張応力による挙動、電磁力による線材の耐性を明らかにし、さらにコイル形状において１００回以上の繰返しヒートサイクルにおいても特性に何ら影響がないことを明確にした。これは３Ｔ級高温超電導ＭＲＩマグネットシステムを実現するにあたり様々な観点から得られた有益な評価結果であり、実用的、長期的な観点からも有益な評価結果を得られたと考えている。

本技術開発は、既に製造販売されているＹ系高温超電導線材の性能向上を進めた成果であり、その成果は実用化のため速やかに製品化される計画である。本技術開発を通じてＭＲＩマグネットに要求されるコイル平均電流密度２００Ａ／ｍｍ^2（７Ｔ）を実現することにより、ＭＲＩ分野を含む各種高性能高磁場機器の開発需要に応える充分な競争力を得られることが期待される。今後、本技術開発成果に基づいて各種機器の使用者に応じたカスタマイズを行うことによって、様々な応用機器への展開が可能となり、高温超電導機器市場の発展に貢献することが期待される。

5. 高温超電導高磁場コイル用線材の実用化技術開発【生産性向上】

本技術開発は、既に製造販売されているＹ系高温超電導線材の生産性向上改良を進めるものであり、その成果は実用化のための製品化される計画である。本技術開発を通じて生産性を向上し、かつ、ＭＲＩマグネットに要求されるコイル平均電流密度２００Ａ／ｍｍ^2（７Ｔ）を実現することにより、市販されるＹ系高温超電導線材としてコストパフォーマンスにおいて競争力のある高温超電導線材を提供する。また、「高温超電導実用化促進技術開発／高磁場マグネットシ

ステム開発／高温超電導高安定磁場マグネットシステム技術開発」への線材提供により、安定した特性のＹ系高温超電導線材を提供する量産技術力も世界トップレベルの水準を達成したものと考えている。今後、本成果に基づいて更なる研究開発および更なる量産投資を行えば、線材の需要量増加に伴い、低温超電導線材に比べた通電性能価格比（円／Ａm比）を現状の２０倍近くから２０２５年頃には１０倍～数倍程度まで下げ、高温超電導ＭＲＩマグネットの市場投入に貢献することが期待される。さらに、２０２６年以降、ＭＲＩシステムの１０％以上が高温超電導ＭＲＩシステムに置き換わり、その浸透が加速すればその大幅な増産効果により２０２６年以降も通電性能価格比（円／Ａm比）数倍以下も視野に入れることが出来ることが期待される。

また、本技術開発成果に基づいて更なる量産技術開発を行うことでＭＲＩ分野を含む各種高性能高磁場機器の開発需要に応える充分な競争力を得られることが期待される。今後、本技術開発成果に基づいて更なる技術開発および更なる量産投資を行えば、線材の需要量増加に伴い、低温超電導線材に比べた通電性能価格比を現状から大きく下げ、高温超電導ＭＲＩマグネットの市場投入に貢献することが期待される。