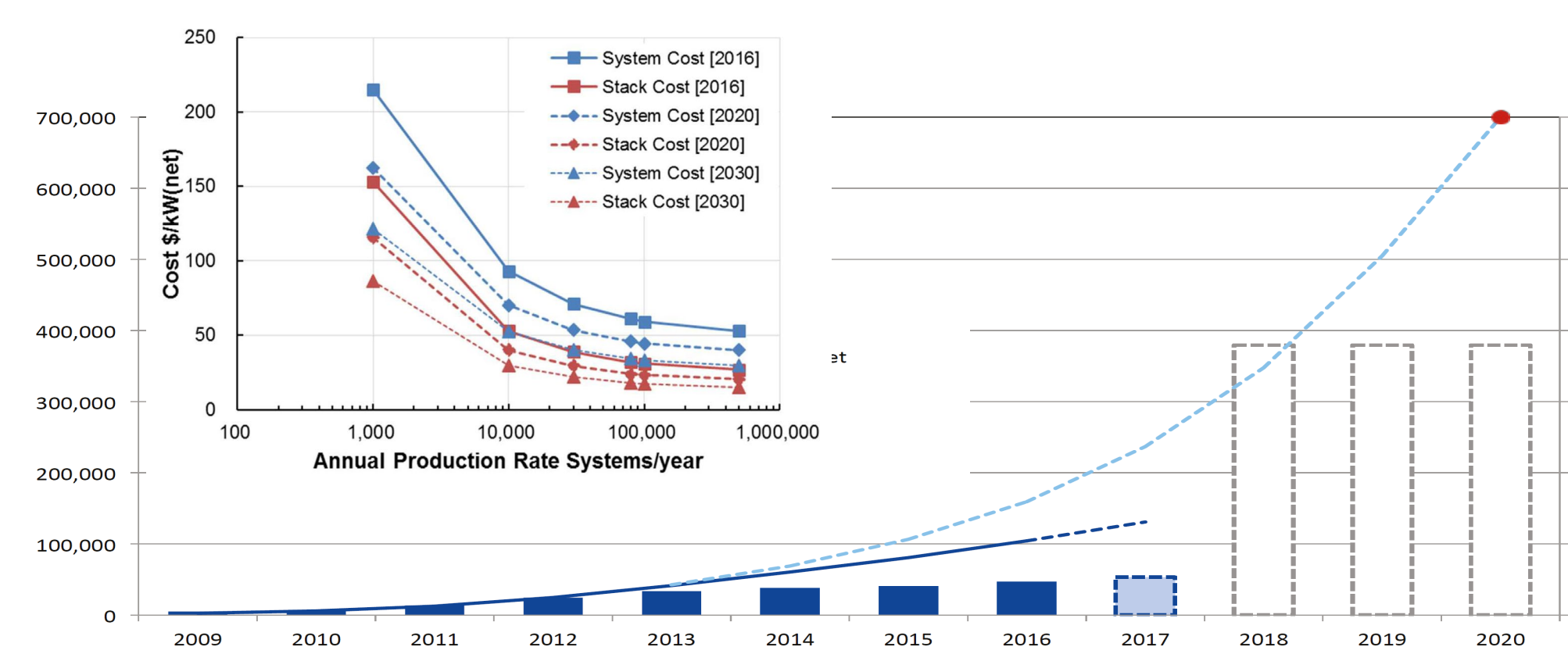


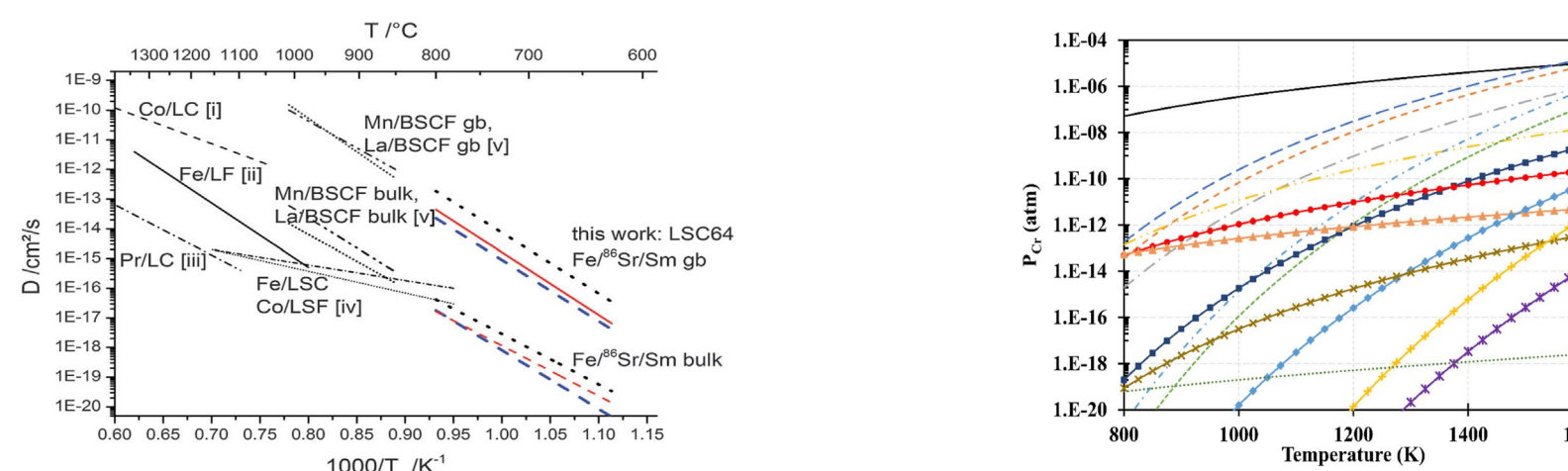
Protonic solid oxide electrolysis cells (P-SOECs) are pivotal for environmentally sustainable fuel production coupled with water splitting. However, the related faradaic efficiency is often limited to below 70%, primarily due to internal leakage stemming from minor hole conduction in the electrolyte. Here, we introduce a bipolar cell architecture incorporating hydride-ion(H^-)/proton(H^+) conductor heterojunction, offering a promising alternative to conventional H^+ unipolar electrolyte cells by leveraging the electrochemical rectification characteristics of the heterointerface. During steam electrolysis, a single phase perovskite-type $\text{BaZr}_{0.3}\text{In}_{0.5}\text{O}_{2.75}$ electrolyte spontaneously transforms into bipolar conductor, comprising H^+ -conducting hydrate and H^- -conducting oxyhydride layers adjacent to the anode and cathode, respectively, driven by competing hydration and hydrogenation equilibria. The bipolar configuration enables high Faradaic currents through the intrinsically high H^- ion conductivity of the oxyhydride phase and facilitates low-barrier H^+/H^- interconversion across the self-assembled heterointerface. Crucially, electronic leakage is suppressed by the formation of electron-depleted layer through the electrochemical hydrogenation at the heterointerface. As a result, the bipolar cells sustain a Faradaic efficiency of ~95% even at 1.5 A cm^{-2} , outperforming conventional H^+ unipolar cells and providing a promising pathway toward 100% electricity-to-fuel conversion.



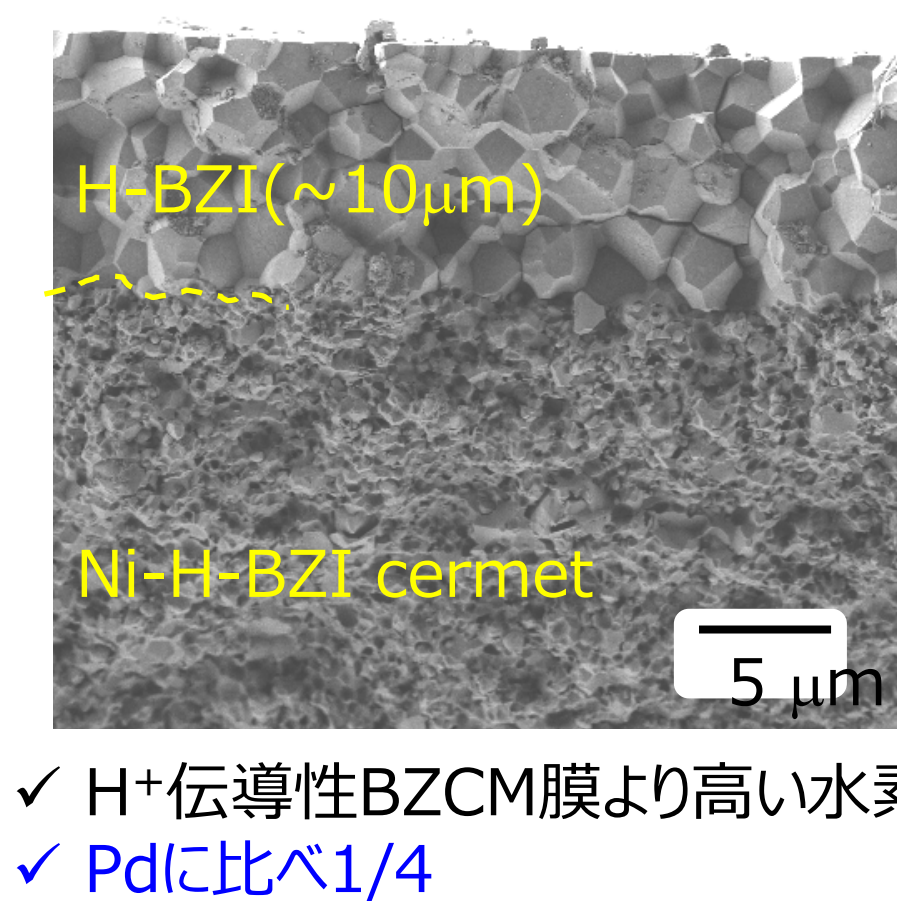
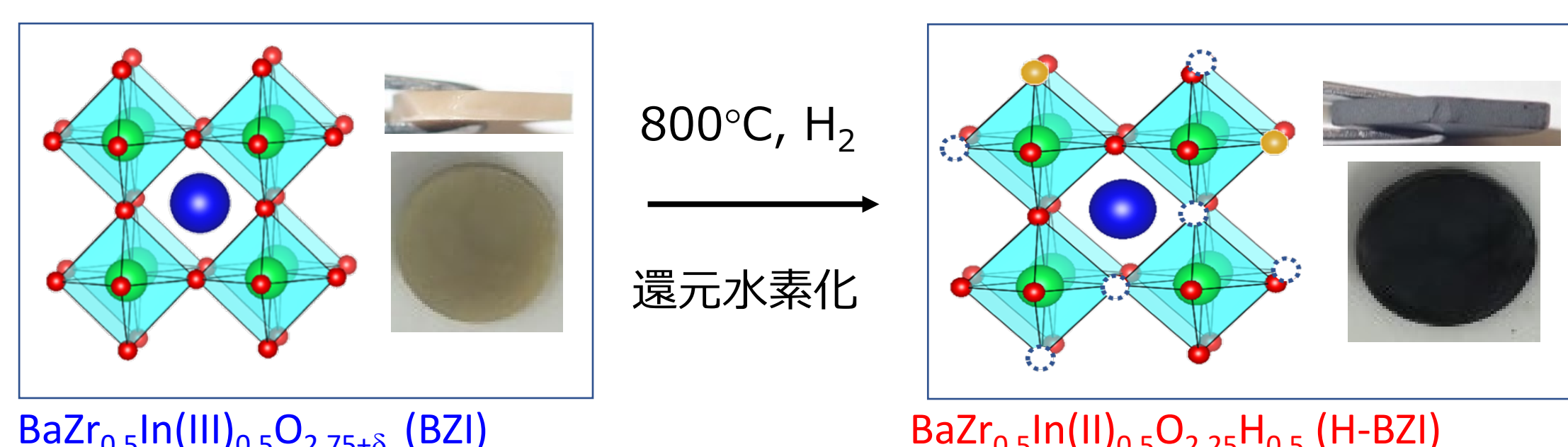
- 2050年度エネルギーミックス予想では、約15%の H_2 や NH_3 燃料需要、また数%のバイオガス(CH_4)燃料需要見込み。⇒ 低純度 H_2 や水素キャリアが汎用燃料として普及し、直接利用できるSOFCが必要。
- 一方SOFCの普及台数は、ロードマップ予想を下回る。要因の一つはモジュール価格の下げ止まり。

~400°C低温作動は、長寿命化には有利⇒低コスト化

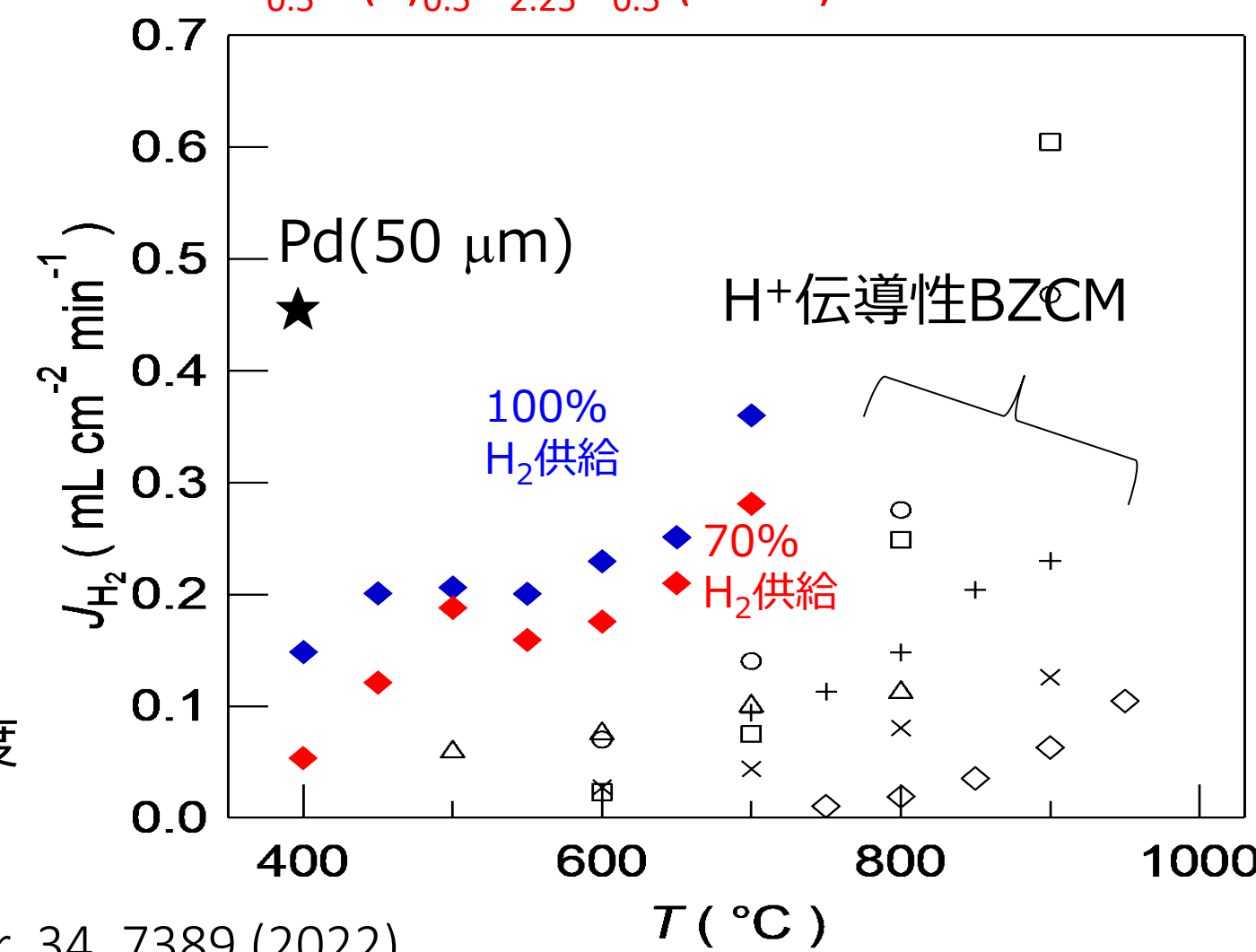
- 熱消耗：SUSの熱破壊頻度は600→400°Cになると1/1000
- Cr被毒： $\text{CrO}_2(\text{OH})_2$ 蒸気圧は800→600°Cで1/4程度。二方800→400°Cで1/100
- セラミクス材相互拡散：LSC等カソードのSr拡散係数は、800→600°Cで4桁、800→400°C 9桁減少。



1. H^-/e^- 混合伝導性セラミックス水素透過膜

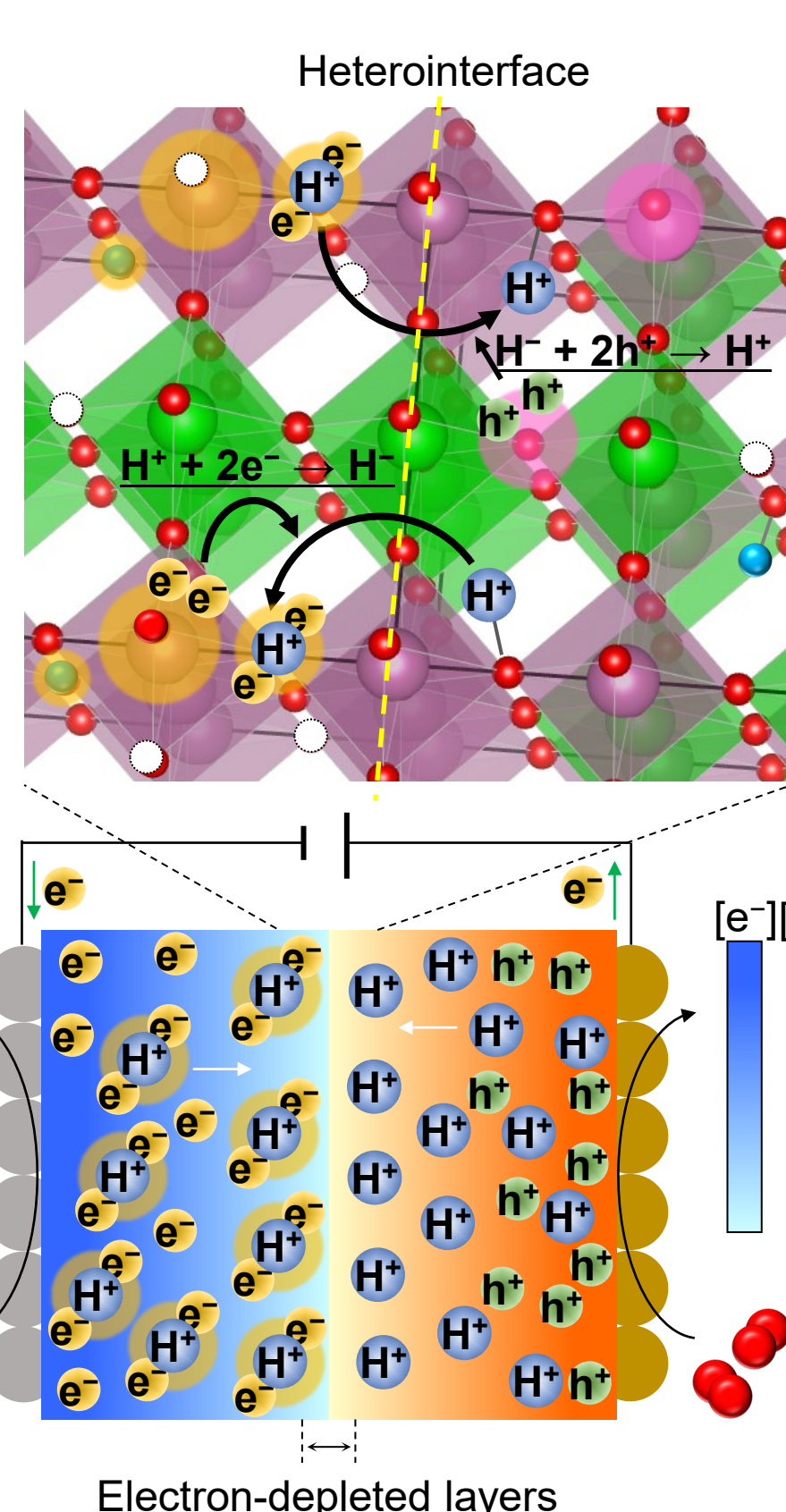
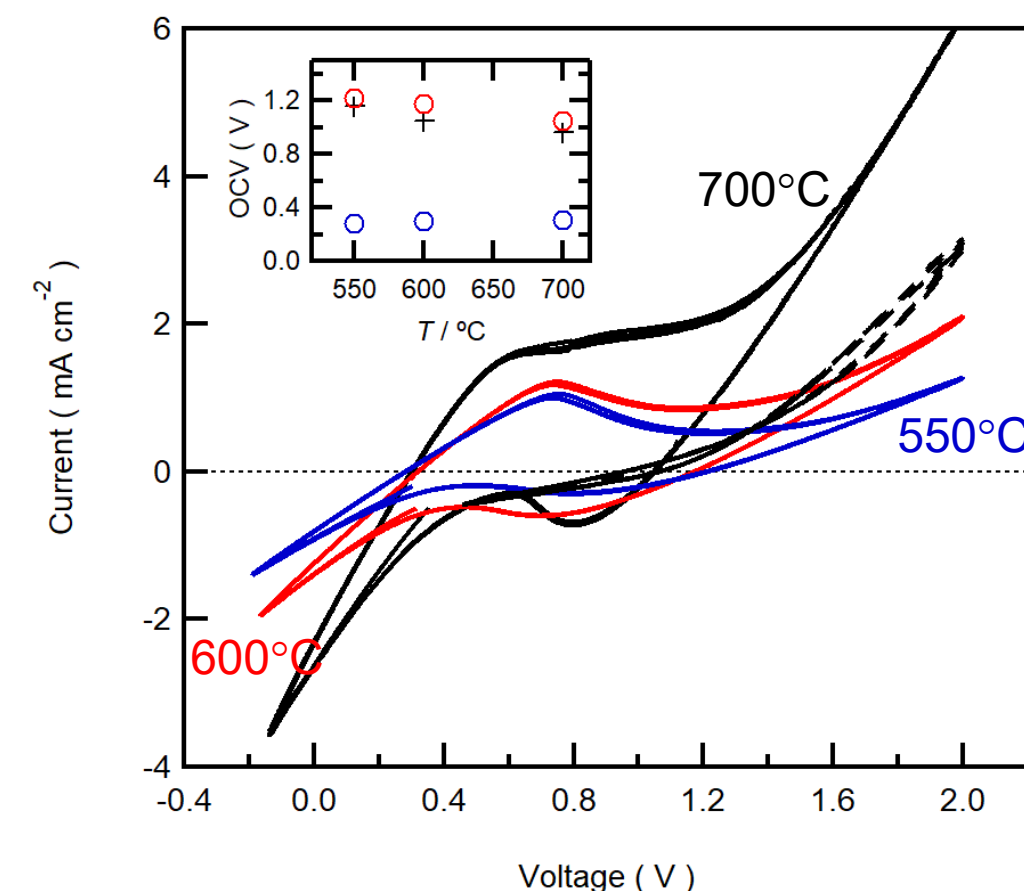
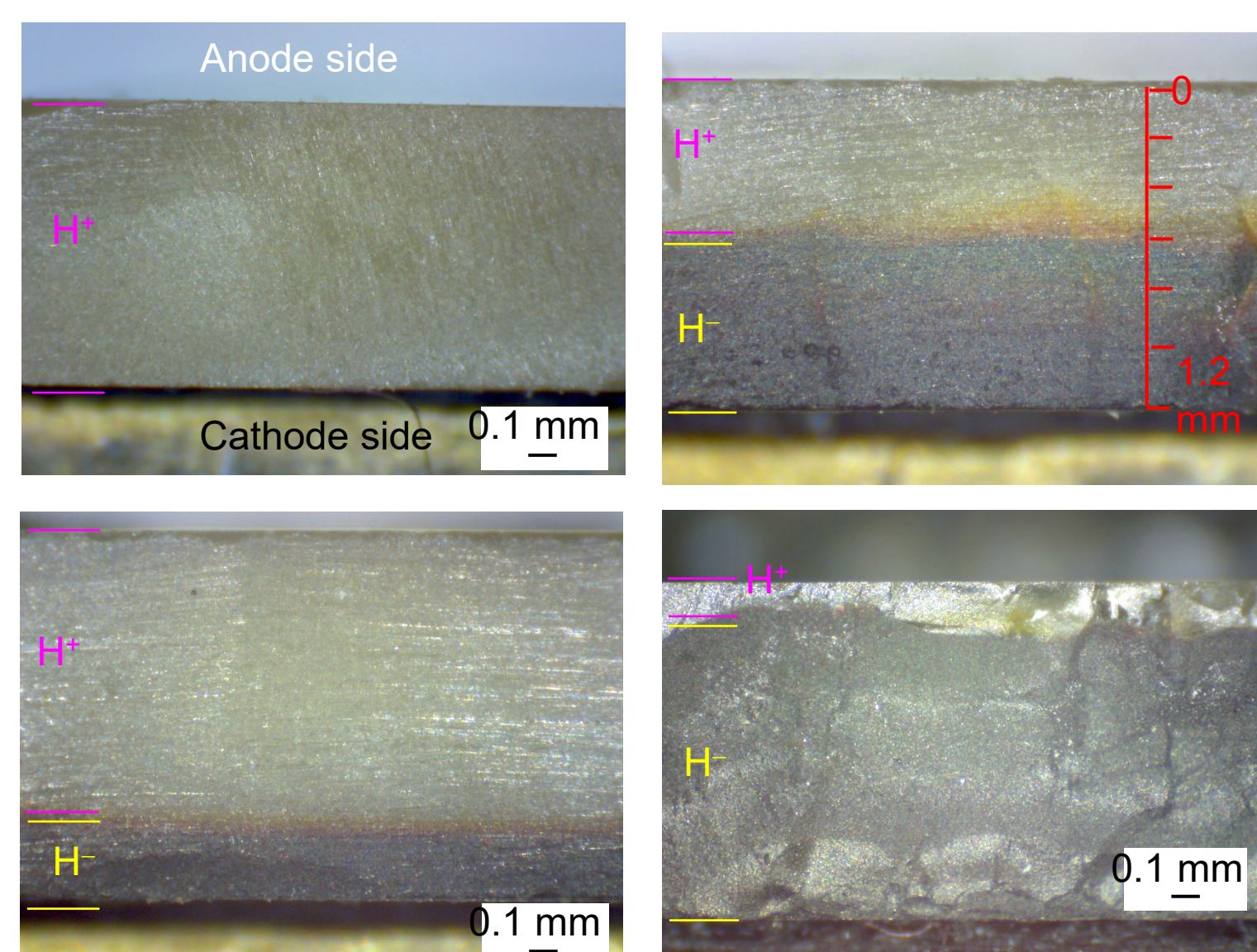


- ✓ H^+ 伝導性BZCM膜より高い水素透過度
- ✓ Pdに比べ1/4

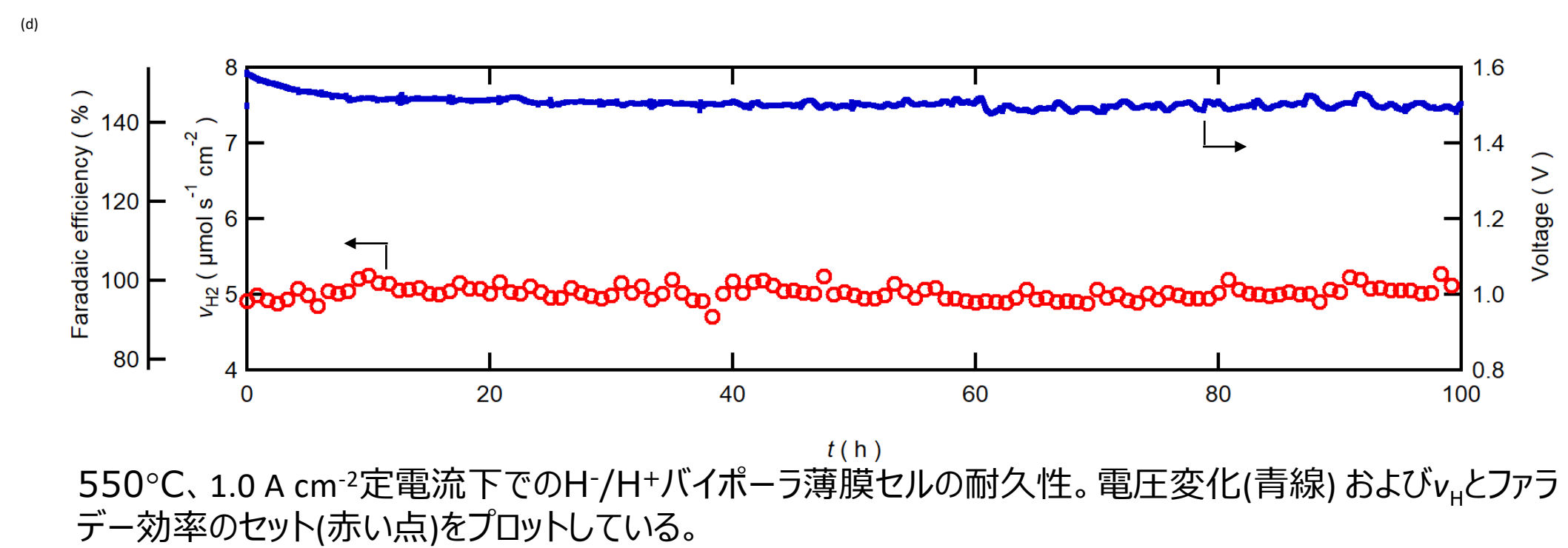


Chem. Mater. 34, 7389 (2022).
特願2021-039946 「水素透過材料」 2021年3月12日。

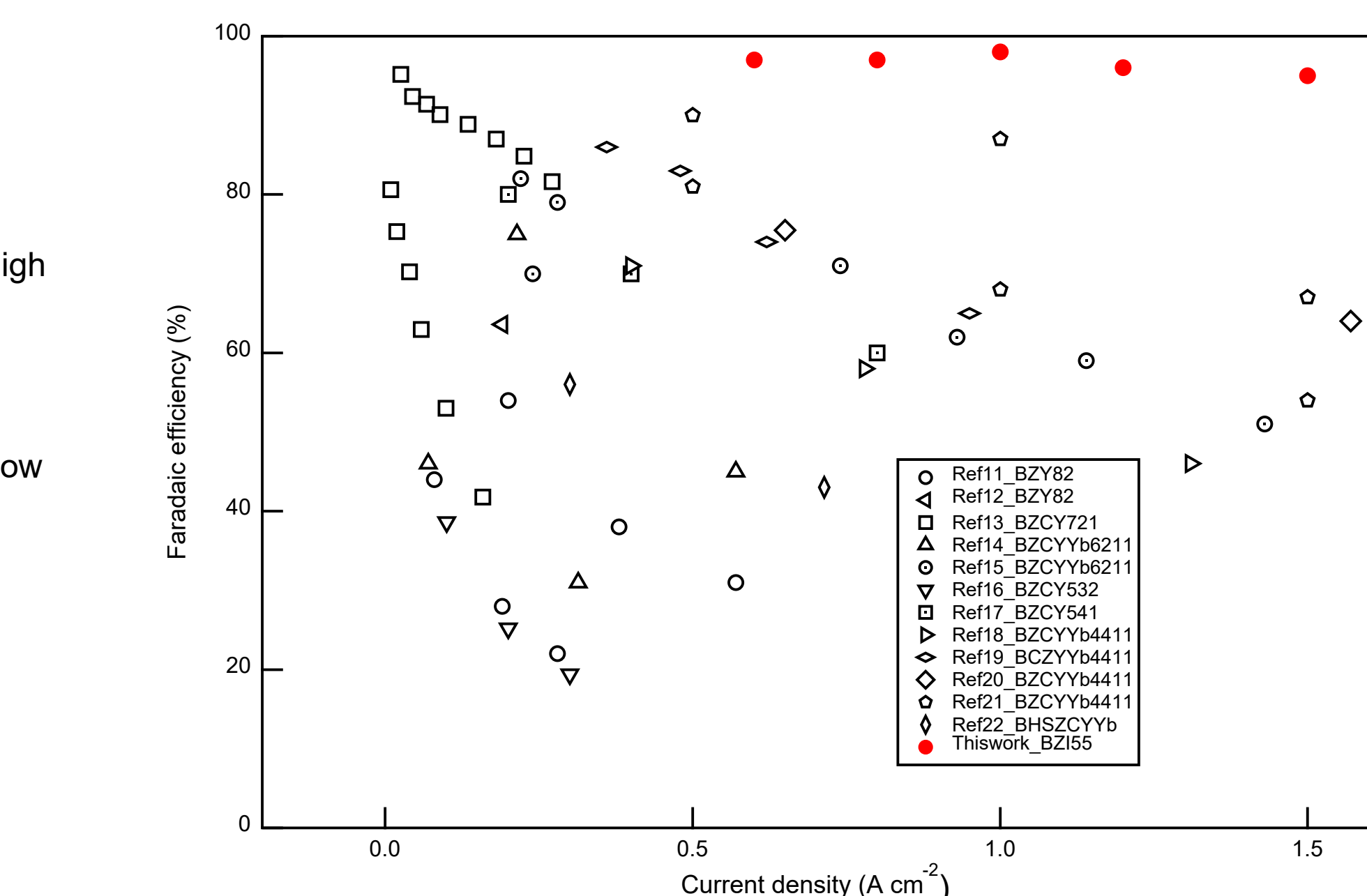
3. H^-/H^+ -バイポーラ水蒸気電解セルによる高効率水素製造



H^-/H^+ バイポーラ水蒸気セルにおけるH-BZI/BZIヘテロイオン界面での H^-/H^+ レドックス。a、無加湿空気を供給した H^-/H^+ バイポーラセルのサイクリックボルタモグラム： $\{\text{H}_2, \text{Pt (CE)} | \text{H-BZI/BZI} | \text{Au (WE)}\}$ 、乾燥空気。青、赤、黒の実線は、それぞれ550、600、700°Cにおけるボルタモグラムを示す。黒の点線は、参照として700°Cにおける H^+ ユニポーラセルのボルタモグラムを示した(湿潤 H_2 、 $\text{Pt (CE)} | \text{BZI} | \text{Au (WE)}$)ここで、 Au (WE) の電圧は、OCVからカソード、続いてアノード側へと掃引し、その後、再びカソード側へと掃引した。挿入図は、アノード方向掃引前後の H^+ ユニポーラ (黒十字) および H^-/H^+ バイポーラセル (それぞれ青と赤の丸) のOCVを示している。b、アノード分極(ECモード)およびカソード分極(FCモード)による、H-BZI/BZIヘテロイオン界面の水素化および脱水素化と、それによる電気化学電子的空乏層の成長と消滅。



550°C、1.0 A cm^{-2} 定電流下での H^-/H^+ バイポーラ薄膜セルの耐久性。電圧変化(青線)および v_{H_2} とファデー効率のセット(赤い点)をプロットしている。



11. Lei, L., Zhang, J., Guan, R., Liu, J., Chen, F., and Tao, Z. (2020). Energy Convers. Manag. 218, 113044. 12. Lei, L., Tao, Z., Wang, X., Lemmon, J.P., and Chen, F. (2017). J. Mater. Chem. A 5, 22945–22951. 13. Vollestad, E., Strandbakke, R., Tarach, M., Catalán-Martínez, D., Fontaine, M.-L., Beauf, D., Clark, D.R., Serra, J.M., and Norby, T. (2019). Nat. Mater. 18, 752–759. 14. Tang, C., Wang, N., Zhu, R., Kitano, S., Habazaki, H., and Aoki, Y. (2022). J. Mater. Chem. A 10, 15719–15730. 15. Tang, C., Wang, N., Kitano, S., Habazaki, H., Aoki, Y., and Ye, S. (2025). Green Energy Environ. 10, 150–160. 16. Huan, D., Shi, N., Zhang, L., Tan, W., Xie, Y., Wang, W., Xia, C., Peng, R., and Lu, Y. (2018). ACS Appl. Mater. Interfaces 10, 1761–1770. 17. Zheng, H., Riegraf, M., Sata, N., and Costa, R. (2023). J. Mater. Chem. A 11, 10955–10970. 18. Choi, S., Davenport, T.C., and Haile, S.M. (2019). Energy Environ. Sci. 12, 206–215. 19. Ding, H., Wu, W., Jiang, C., Ding, Y., Bian, W., Hu, B., Singh, P., Orme, C.J., Wang, L., Zhang, Y., et al. (2020). Nat Commun 11, 1907. 20. Kim, D., Jeong, I., Ahn, S., Oh, S., Im, H.-N., Bae, H., Song, S.-J., Lee, C.-J., Jung, W., and Lee, K.T. (2024). Adv. Energy Mater. 14, 2304059. 21. Choi, M., Kim, D., Lee, T.K., Lee, J., Yoo, H.S., and Lee, W. (2025). Adv. Energy Mater. 15, 2400124. 22. Oh, S., Kim, D., Ryu, H.J., and Lee, K.T. (2024). A Adv. Funct. Mater. 34, 2311426.