

高効率・高出力を実現する次世代プロトン伝導セラミック燃料電池の開発

国立研究開発法人産業技術総合研究所

島田 寛之

1. テーマ設定の背景

高い発電効率が特長である高温型（700～900℃）の固体酸化物形燃料電池（SOFC）は市場への導入が進んでおり、その発電効率は55～60%に至っている。次世代型であるプロトン伝導セラミック燃料電池（Protonic Ceramic Fuel Cell: PCFC）は、さらに高い70%以上の発電効率¹⁾を実現できる可能性があるが、SOFCより作動温度が低い（400～600℃）ため、空気極／電解質の界面抵抗が顕在化し、これを低減することが課題であった。そこで筆者は、界面での電気化学反応場となる、空気極材料・電解質材料・ガスの三相界面を著しく拡大する高活性ナノ複合空気極の開発に取り組んだ。さらに、電解質表面の化学組成を精密に制御するPCFC製造技術を開発することで界面抵抗の低減を目指した。

2. 素形材分野との関連性

PCFCは主要な部材が酸化物で構成されるデバイスであり、セラミックス素形材分野と関連する。また、開発したナノ複合空気極技術と電解質焼結技術はセラミックス粉体原料に関連する技術であり、粉体素形材メーカーが関連する分野である。

3. 研究開発の成果

組成制御した電解質上にナノ複合空気極を積層する界面エンジニアリングにより、空気極／電解質の界面抵抗を低減することで、高効率と高出力を実現する次世代燃料電池PCFCを開発した。本稿では、これらの要素技術と試作したPCFCについて紹介する。

3.1 ナノ複合空気極の開発

空気極の性能は、組成由来の物性と電極微細構

造に依存する（図1）。そこで筆者は、電子伝導性触媒材料（La,Ba） $\text{CoO}_{3-\delta}$ とプロトン伝導性材料Ba（Zr,Yb） $\text{O}_{3-\delta}$ の2つの材料をナノレベルで複合化したナノ複合空気極²⁾を開発した。従来の空気極は、2つのセラミックス粉末を混合し、焼成することで作製する。これに対し、金属材料を溶かした水溶液を噴霧・熱処理する噴霧熱分解法により、空気極の原料である粉末の段階でナノ材料を複合化させた。この粉末を用いてナノ複合空気極を作製し、広い比表面積と多くの電気化学的活性点を有する微細構造を実現した。ナノ複合空気極を構成する材料粒子の大きさは50 nm（従来材料粒子の1/10）以下であり、これらが均質に複合化されることにより、三相界面を飛躍的に増加した。

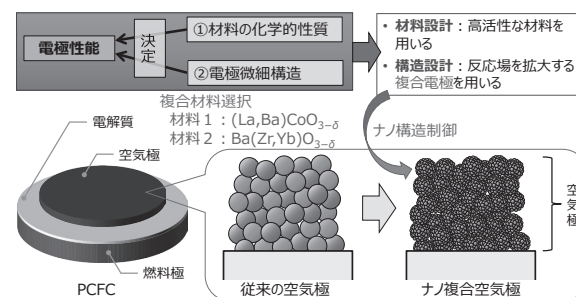


図1 ナノ複合空気極の設計概念

3.2 電解質表面組成の制御

空気極と接触する電解質表面に着目した研究を進めることにより、電解質表面の組成が界面抵抗に大きく影響することを見出した。これまでのPCFCは電解質を製造するための高温焼結時（約1500℃）に、電解質の主要構成元素であるBaが揮発し、電解質表面近傍の組成が仕込値から変化してしまっていた。これに対し、電解質の原料組成と焼結プロセスを精密に制御³⁾し（図2）、積層したナノ複合空気極に含まれるBaを電解質表

面に補填する電極焼付プロセスを経ることで界面抵抗を著しく低減することに成功した。

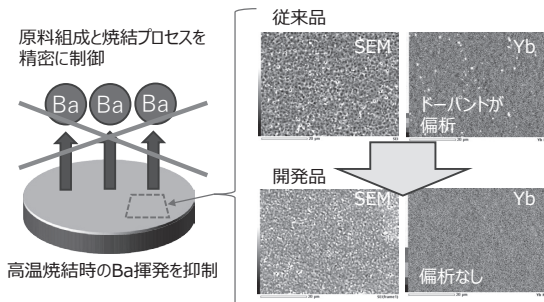


図2 電解質表面組成制御による元素分布改善

3.3 高性能PCFCの実現

燃料電池として実用化するためには、高効率・高出力密度・高耐久が要求される。開発したPCFCの発電特性を評価した結果、 1 W cm^{-2} 以上（SOFC商用機の2倍以上）の出力密度²⁾を得た。さらに、発電特性の実測データに基づくシステムシミュレーションにより、システム効率70%以上¹⁾が可能であることを示し、耐久性も実用レベルに迫る1000時間あたり1%以下⁴⁾に至った。これらの結果により、次世代の高効率発電デバイスの実現性を示した。

4. 訴求点

筆者は、PCFCをデバイスとして実際に試作・評価した経験を活かし、ボトルネック要因を俯瞰的に抽出することでPCFC開発における課題を設定した。

ナノ複合空気極は、粒子合成段階で電子伝導性触媒材料とプロトン伝導性材料を均質に複合化する技術により作製され、従来の酸化物粒子を合成後に混合する電極製造方法では得られなかった微細な電極構造を実現でき、加えて、電解質で不足する元素であるBaを空気極焼付時に補填する機能を有している。今回開発したナノ複合空気極は前例のない新しい概念の空気極であり、電解質側と併せて組成と構造を制御する界面エンジニアリングにより、その効果をさらに高めることに成功した。その結果、世界最高レベルの高出力・高効率・高耐久を兼備するPCFCを実現した。

PCFCの将来の市場として、家庭用燃料電池システムの次世代機や、データセンターへの適用などが想定されており、CO₂排出量の削減が期待されている。また、燃料電池の逆反応の電気分解により、高効率で水素を製造することもでき、再生可能エネルギーとの併用などによりカーボンニュートラルの実現にも貢献する。

参考文献

- 1) K. Li, H. Shimada et al., Ultra-elevated power density and high energy efficiency of protonic ceramic fuel cells: Numerical and experimental results, *Energy Convers. Manag.*, 296, 117678 (2023).
- 2) H. Shimada et al., Nanocomposite electrodes for high current density over 3 A cm^{-2} in solid oxide electrolysis cells, *Nat. Commun.*, 10, 5432 (2019).
- 3) H. Shimada et al., High-Performance Protonic Ceramic Fuel Cell with Ytterbium-Doped Barium Zirconate: Reducing Cathode Polarization by Improving Electrolyte Surface Condition, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 17, 40639–40649 (2025).
- 4) H. Shimada et al., Improved durability of protonic ceramic fuel cells with $\text{BaZr}_{0.8}\text{Yb}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ electrolyte by introducing porous $\text{BaZr}_{0.1}\text{Ce}_{0.7}\text{Y}_{0.1}\text{Yb}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$ buffer interlayer, *Ceram. Int.*, 50, 3895–3901 (2024).