

固体酸化物形燃料電池材料の研究開発動向 —鍵となる電解質の研究開発の視点から—

燃料電池の中でも、熱効率がなくて長期性能安定性に優れ、貴金属触媒を使わなくても燃料と空気の電気化学反応が可能であり、多種類の燃料を使用できるなどの利点を有する固体酸化物形燃料電池（SOFC：Solid Oxide Fuel Cells）が注目され、精力的に研究開発が実施されてきた。現在、このシステムの実証試験が行われており、実用化に向けた課題である発電性能の長期間維持、低コストおよび高信頼性を達成するための努力がなされている。現在、実証試験が行われている SOFC は主として高温型（750℃～1,000℃作動）の中規模および大規模なシステムであり、長期間の発電性能維持と高信頼性を確認した後、システムを市場に導入する計画となっている。しかし、これらの課題の解決に当初の計画以上に期間を要しているのが現状である。また、コスト面でも、他の発電システムに競合できるレベルには至っていない。

現在、実証段階にある高温システムを市場に導入できる段階まで進めるには、システムの発電性能維持に関する研究開発で、電解質をはじめとするセル構成材料の性能低下のメカニズムを解明することが必要である。そのためには材料のナノスケール領域にまで遡って、イオンや電子の伝導メカニズムの究明と、それらを支援する解析・評価技術の研究開発が必要となっている。信頼性の確保においても、構成材料の劣化機構の実験的解明と共に、損傷・劣化に関する計算機シミュレーションを高い精度を持って実施し得る手法を確立し、これらの手法を用いた信頼性向上のための研究開発を効率的に行うことが望まれる。一方、システムのコストの低減のためには、セルおよびスタックの安価な構成材料（電解質など）の採用と、製造プロセスの確立が必要である。特に電気化学的特性と機械的性質を支配する構成材料の微視・巨視的構造を、小規模試作と量産プロセスで製造した材料とで一致させることが必須である。

しかし、一方、近年の SOFC の電解質の研究開発として、高温作動で有効なイットリア安定化ジルコニアなどに替わって、中温（500℃～750℃）や低温（500℃以下）において高い酸素イオン伝導率を有するスカンジウム安定化ジルコニア、ランタンガレートなどの探索が盛んになっている。その理由は、作動温度を下げることによって、上記の三つの課題を同時に解決できる期待があるためである。これらの新規電解質を用いたシステムの研究開発はまだ萌芽段階にあるが、高温型システムが直面している課題を一挙に解決するポテンシャルを有している。

以上のような研究開発の状況にあって、高温型システムの市場導入への課題解決が困難と判断される場合は、思い切って、研究開発を低温型システムへシフトすることも選択肢の一つである。この新規電解質の探索においても、最近著しい進歩があるナノスケールレベルでの計算機シミュレーションおよび実験手法を用いて、理論解析と実験検証の両面から進めるべきである。いずれにしても、探索段階から、将来の実用システムを想定した、セルおよびスタックの量産プロセスに向く材料を選択することが重要である。

固体酸化物形燃料電池材料の研究開発動向

—鍵となる電解質の研究開発の視点から—

河本 洋

ナノテクノロジー・材料ユニット

1 はじめに

燃料電池 (FC: Fuel Cells) は、燃料の化学エネルギーを電気エネルギーに直接変換するため、小規模でも高い発電効率を有する、良質な排熱も利用可能なシステムであるといえる。反応物質が消費されると寿命が尽きる一次電池、あるいは充放電の繰り返しで不要な生成物が増えて性能が低下する二次電池とは違い、FC は燃料を供給し続ける限り発電が持続でき、燃料を選べば大気汚染物質をほとんど出さない。各種 FC の中でも、発電効率が高い点、熱と電気の両方を供給できる点、多種類の燃料を使用できる点などの理由で、固体酸化物形燃料電池 (SOFC:

Solid Oxide Fuel Cells) が注目され、研究開発が精力的に行われてきた。他種類の FC に比べると、SOFC は、熱効率がよく、長期性能安定性にも優れ、量産に適するセルとスタックの製造プロセスを確立すれば低コストシステムが実現できる。その理由は、現在まで検討されているシステムでは作動温度が高温であることから、高価な貴金属触媒を使わなくても燃料や空気を供給する電極における電気化学反応が可能であり、セル構成材料に安価なものを使用できるためである。

ここでは、SOFC の研究開発の背景と期待、それらに関する国内

外の技術の現状を述べる。まず、SOFC の作動原理および構造を紹介し、特に SOFC を構成する電解質および電極材料の研究開発の現状とそれらの電解質に要求される特性と課題を抽出する。続いて、これらの課題を解決する方策として、イオン伝導メカニズムの解明、損傷・劣化メカニズムの解明の方法などについて述べる。一方、技術課題を一挙に解決するため、作動温度が従来のシステムより低い新規電解質の研究開発も注目されており、この探索方法についても提言を行う。

2 SOFC の研究開発の背景と期待

2 - 1

高効率発電システムとしての SOFC

図表 1 の左図に、各種発電システムの規模とそれらの効率の関係を示す^{1)~10)}。ガスタービンによる発電効率に比較すると、SOFC、熔融炭酸塩形燃料電池 (MCFC: Molten Carbonate Fuel Cells)、固体高分子形燃料電池 (PEFC:

Polymer Electrolyte Fuel Cells) などの燃料電池による効率は高い。SOFC は、ガスタービンを組み合わせるとさらに高効率なシステムを構成することができ、水素燃料の使用では水のみを排出する。エネルギー密度がより高い天然ガスや石炭ガスなどの多様な燃料を使用しても、他の化石燃料システムよりは NO_x、SO_x の排出が少ない。これまで開発されている 750℃ 以上の高温作動型 SOFC

では、起動に時間を要するなど、熱管理が容易ではない。そのため、起動停止が頻繁に行われる可搬型システムの研究開発は一部でしか行われていない。したがって、定置型システムに関する研究開発が主流となっている。

SOFC 以外で最も代表的な FC として研究開発が進んでいるとされる PEFC は、作動温度が 80℃ ~ 100℃ と低いことから取り扱い易く、システムもコンパクトにな

るため、移動体用電源としての実用化が進められている。しかし、電極には白金系触媒または白金系触媒担持カーボンとフッ素樹脂の混合体などが用いられているため、高コストになることが問題となっている。さらに、PEFC には、水素以外の改質ガスを燃料に用いる場合、電極の白金触媒が一酸化炭素にさらされることによる電池性能の低下や、電解質膜自体の長期間の運転による性能低下などの問題がある。

図表 1 の右図に、FC (SOFC、PEFC、MCFC、PAFC) と各種電池の単位重量当たりの出力密度とエネルギー密度の関係を比較した。FC の出力密度は、現段階では Li イオン電池と比較するとまだ劣っているが、エネルギー密度は高く、燃料補給が迅速に行えるという利点がある。したがって、

FC の出力密度を向上させることが、当面の課題となっている。現在のところは、高エネルギー密度という特長を生かせる、長時間の電力量を必要とする分野での用途開発が進められている。

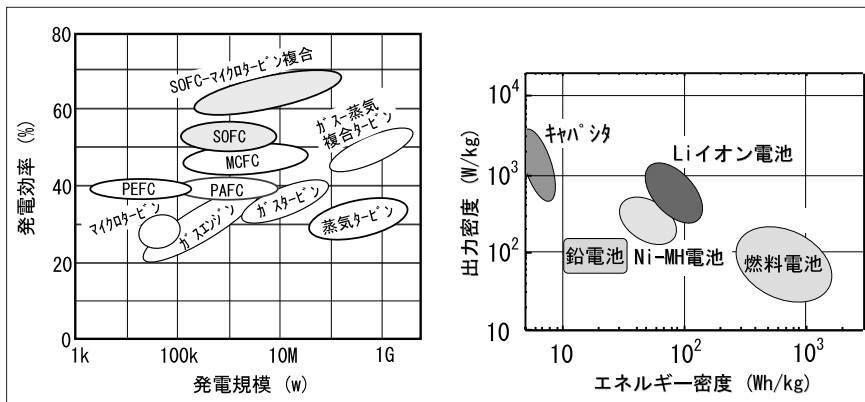
2 - 2 SOFC の応用が期待される分野

SOFC の応用が期待される分野を、使用時の電源形態および主な用途から示したのが図表 2 である。SOFC では、超小型から中・大型の発電システムまで様々な応用が期待されている。特に、分散型電源、定置型電源、コジェネシステム (電力と熱または給湯の同時供給) としての期待が、特に欧州や北米で大きい。さらに、家庭用電源、自動車の補助電源、携帯

機器などの可搬型電源として、また、従来の電力代替システムとしての用途開発も着実に進められてきた。特に競合技術に対して優位であり、SOFC の特色が生かせる市場として、家庭用または業務用としての 10kW 以下の小型容量の定常運転するコジェネシステムが有力視されており、安価な燃料を利用することができれば、これらの SOFC の市場導入時期は早まると推測されている^{10~12)}。

日本では、SOFC の導入を取り巻く状況として、中型から大型発電用の分散電源としての定負荷運転よりも、電力自由化の対象外となっている家庭用の分散電源導入には有利であるといわれている。SOFC は高効率であるため、コジェネ市場以外の電力のみでも市場性があるとの予想もある。SOFC の市場導入初期段階では、コストよりもシステムとしての信頼性が第一義的に重要であり、20 万円 /kW 以下のシステムコストでも市場導入できるといわれている¹⁰⁾。移動体用 SOFC 補助電源としては、自動車用の数 kW 級のものから大型客船用の数 100kW 級までの出力サイズのもの検討されてきた^{13~17)}。特に、補助用電源は、定負荷で起動停止回数も少なく、急速起動時間が要求されないため、SOFC の適用が十分に可能と判断されている。

図表 1 現状における各種発電システムの効率と各種電池間の出力性能の比較



PAFC: Phosphate Acid Fuel Cells (リン酸塩形燃料電池)

参考文献^{1~10)}などに基づいて科学技術動向研究センターで作成

図表 2 SOFC システム応用分野と主な課題

発電規模		使用目的 電源形態	主な用途	主な課題	
超小型	1kW 以下	主電源 機器搭載 固定	ロボット コンピュータサーバー 携帯機器	出力密度向上 長時間での性能維持 高信頼性化 低コスト化 (材料、製造プロセス)	コンパクト化 低温作動化 負荷変動への追従
小型	1kW ~ 100kW	移動体 (オンサイト) 固定 コジェネレーション 車載	家庭 自動車補助電源 電気自動車 無人テレコム基地 充電機器		
中型 大型	100kW 以上	据置 基幹 コジェネレーション 非常用	船舶 工場 商用設備 病院		中温作動化

科学技術動向研究センターで作成

3 SOFC システムの研究開発の現状

3 - 1

国内外における SOFC の研究開発状況

日本の経済産業省および(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が作成したロードマップと、米国エネルギー省(DOE: Department of Energy)のSECA(Solid State Energy Conversion Alliance)プロジェクトにおけるSOFCシステムの研究開発に関するロードマップを図表3に示す^{18~21)}。

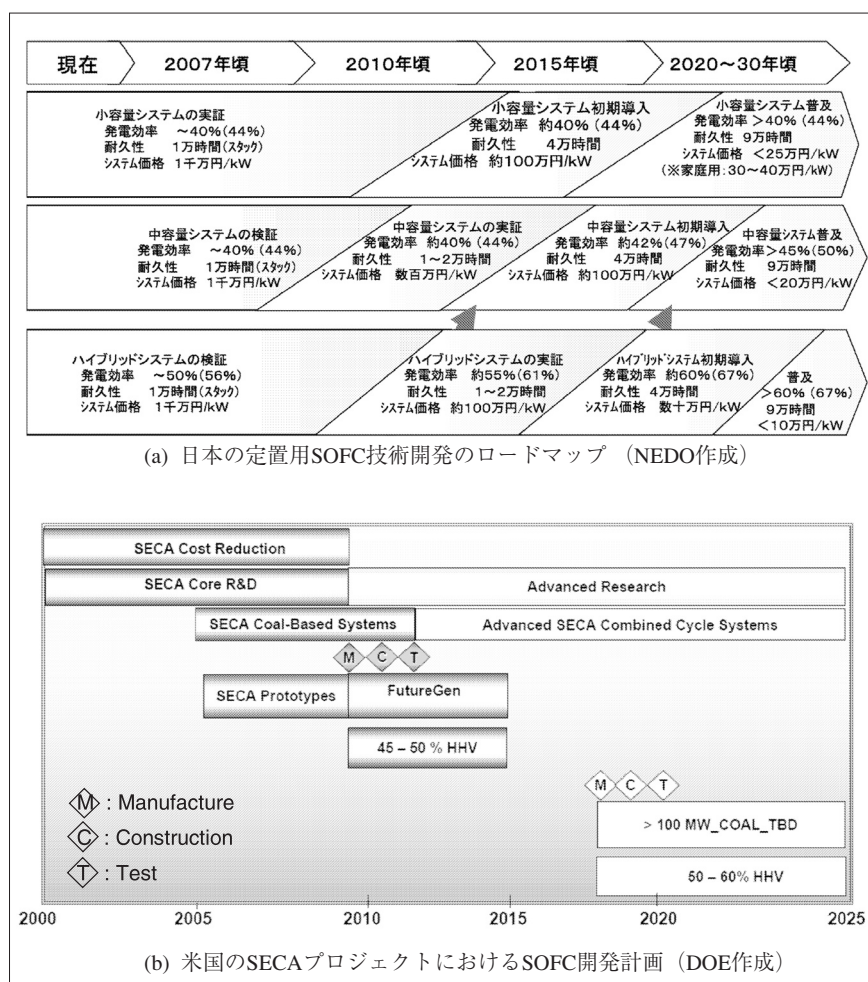
日本においては、1981年度からムーンライト計画でSOFCの研究開発が開始され、その後のNEDOプロジェクトとして、第1期(1989年~1991年)で数100W級の電池本体の研究開発、第2期(1992年~2000年)で円筒型および平板型SOFCのコスト低減と信頼性の確立に重点を置いた研究開発、第3期(2001年~2004年)でSOFC実用システム(10数kW級)の研究開発が進められてきた。第3期のSOFCの実用化に向けた研究開発課題としては、電池性能の向上や大出力化、低コスト化および高信頼性化などが挙げられている¹⁰⁾。本格的なSOFCの市場導入に向けた高信頼性とコスト競争力を確保のために、具体的には、長期間のセルおよびスタックの劣化現象の機構解明とその対策、高出力化してダウンサイジングすることによる低コスト化、種々の燃料・運転条件への対応技術などの要素技術が開発されている^{18, 19)}。図表3(a)には、2020年頃までを視野に入れて、定置用SOFCに関して今後取り組むべき技術課題およびその実現期待時期がまとめられている¹⁸⁾。特に2004年からは、

SOFCの導入と普及を強く想定して、信頼性向上に関する技術および普及期に向けたスタック技術についての開発が重視されてきた。特に950℃前後の高温作動の小発電規模分散型から中規模火力発電代替までのシステムについては、市場投入を意識したシステムの開発および運転実証による性能確認に重点がおかれている^{22, 23)}。一方、これに並行して、すでに700℃~800℃の中温度作動の小・中発電規模システムについても研究開発がスタートしている⁴⁾。

一方、現在、世界的にみて代表的なSOFCの研究開発プロジェクトは、米国DOEのSECAプロジェク

トであり、最も進んでいると判断される。米国では、DOEのVision 21プログラムとして電気事業用FCの開発が始まり、その後、SECAプロジェクトが1999年に開始され、産学官機関の強力な連携体制が構築された。現在では、NETL(National Energy Technology Laboratory)が全体の運営を行い、SECAプロジェクトを推進している。目標としては、2010年までに低コスト技術、高性能化、高信頼化などに関わる技術を確立して、2015年頃には、石炭ガス、天然ガスなどを使用して、HHV効率(水の蒸発潜熱を考慮した高位発熱量基準)45%~50%のシステム

図表3 日本と米国のSOFCシステムの研究開発プロジェクトにおけるロードマップ



参考文献^{18~21)}を基に科学技術動向研究センターで再構成

を開発することになっており、400US\$/kWのコスト目標を掲げている^{13~17, 20, 21)}。

米国、日本のいずれにおいても、SOFCの商用化は当初期待されていた通りには進んでいないが、実証試験などを通して、実用化への勢いが加速化しているのも事実である。両国いずれにおいても、実用化に向けて課題となっている発電性能の長期間維持、低コストおよび高信頼性を達成するためや、対策効果を確認するために精力的な実証試験が行われている。また、両国とも長期間の発電性能維持と高信頼性を確証した後、高温型(750℃~1,000℃作動)の中・大型システムから市場に導入を開始する計画となっている。

これらの政府プロジェクトとは独立した民間の研究開発であるが、日本国内における最近の代表的研究開発事例を以下に示す²⁴⁾。

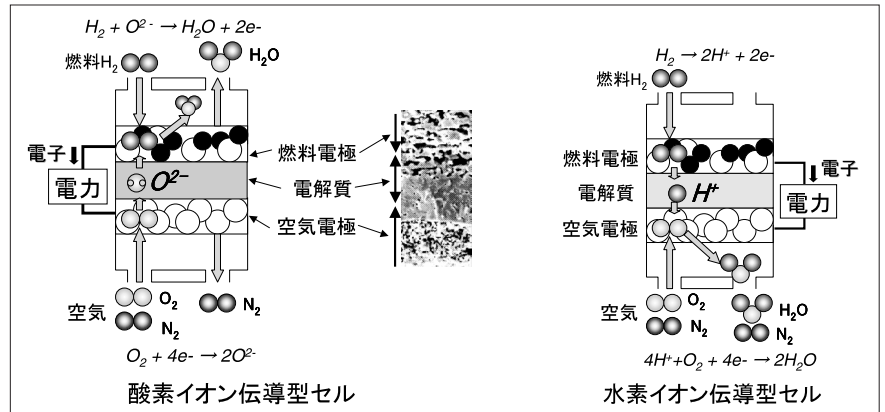
- 東邦ガス(株)は、(独)産業技術総合研究所(AIST)が開発したセルを用いて500℃で作動するSOFCシステムを試作し、2012年頃に家庭用・業務用定置型システムの実用化を目指している。
- 大阪ガス(株)は、家庭用SOFCコジェネレーションシステムを京セラ(株)と共同開発して、2008年度以降を目処に商品化を予定している。
- (財)電力中央研究所はAISTと共同で、500℃~650℃の作動温度での家庭用SOFCを開発中であり、プロトタイプのシステムで実用レベルとなる発電効率を達成した。

3 - 2

SOFCの作動原理

SOFCには酸素イオン伝導型と水素イオン伝導型がある。図表4にこれらのSOFCの作動原理の模式図を示す。図表4の左図に示すように、酸素イオン伝導型SOFC

図表4 水素および酸素イオン伝導型SOFCの作動原理(二室型SOFCの模式図)



科学技術動向研究センターで作成

では、酸素イオンが電解質を伝導して、燃料電極で水素と化合して水を精製する際に電子が放出されて電極間に電力が生じる。

一方、図表4の右図に示すように、水素イオン伝導型SOFCでは、燃料電極において水素イオンを形成する際に電子が放出されて、水素イオンが電解質を伝導して電極間に電力が生じる^{25~27)}。これまで、化学的に不安定な水素イオン伝導電解質しか見出されなかったため、この電解質に関する研究開発例は少なく、酸素イオン伝導体を用いたSOFCの研究開発がほとんどである。

図表4は、燃料と空気をそれぞれ別の部屋に供給する方式のSOFCであり、電解質を介して燃料電極と空気電極が別々の部屋に位置する、二室型と呼ばれているSOFCの作動原理を示している。燃料と空気の供給方法には燃料と空気の混合ガスを一つの部屋に供給するもう一つ方式があり、これらは一室型SOFCと呼ばれている。電解質が酸素イオン伝導体の場合は、混合ガス中の空気電極から酸素イオンを発生させて電解質中を伝導させて燃料電極で水素と反応させて、両電極間で起電力を得る方式のものである。一室型SOFCは、燃料と空気を分離しないため、二室型SOFCに比べてコンパクトに設計でき、セパレータ無しの構造によるシステムの機械

的強度・耐久性を確保しやすく、電極での発熱による起動の早さなどの優れた点を有するとの研究報告がある^{28~32)}。しかし、燃料と空気が直接酸化し易い欠点があり、二室型SOFC並みにイオン伝導度が高い電解質がいまだ見出されていないなどから、現在は圧倒的に二室型SOFCの研究開発が中心になっている。しかし、これらの課題を克服した将来は、特に小型のシステムでは、一室型SOFCの方が有利な点が多いと考えられる。

3 - 3

SOFCのスタック構造

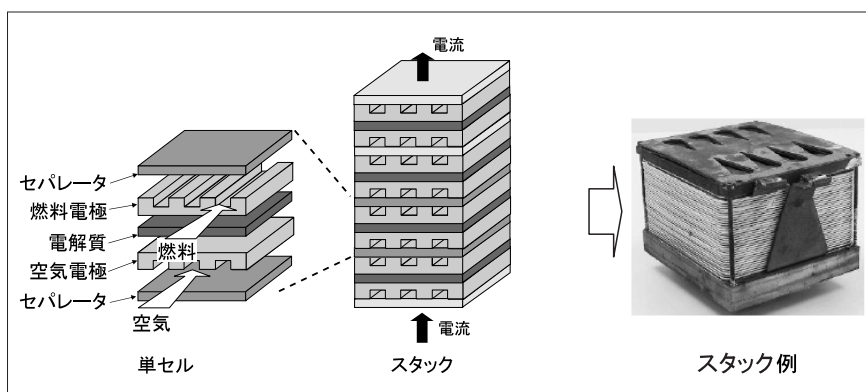
二室型SOFCシステムのセル構造には、円筒型と平板型がある。円筒形では、電解質と電極の界面の接続面積が少ないため、1セル当たりの電流経路が長くなってジュール損が大きいという欠点がある。よって、小・中規模のシステムでは平板型SOFCが研究開発の主体になっている。図表5には、平板型スタック・システムの模式図とスタック例を示す³³⁾。

高出力を得るために単セルを直列に接続したスタックが構成されるが、単セルを直列に接続する部分であるセパレータは、電子を通過させ、燃料ガスと空気を分離する役割を果たす。電気的接続を良好にするためには電解質と電極との界面での接触が重要になり、ま

た、燃料と空気の流れをそれぞれの電極で保証するには、電極材料の気孔率のコントロールも重要である。さらに、二つのガスが混じらないように、電解質とセパレータは緻密にする必要がある。

以下では、SOFC の発電性能に最も影響を与える電解質の研究開発の現状と課題、これらの課題を解決していくための方策を、現在、研究開発の主流になっている、二室型 SOFC における酸素イオン伝導体について述べる。

図表5 平板型スタック・システムの簡略模式図とスタック例



右図のスタック例の写真は参考文献³³⁾より転載

4 電解質の研究開発の現状と課題

4 - 1

電解質の研究開発の現状

SOFC の性能は、使用される電解質のイオン伝導率が高いほど向上する。すなわち、セルの内部抵抗のほとんどは、電解質の抵抗に起因する電気抵抗損である場合が多い。図表6に、これまで研究開発されてきた SOFC セルの代表的構成材料を、電解質と電極材料およびセパレータ材料に分けて示す^{1, 25 ~ 27)}。高温作動型 (750℃ ~ 1,000℃) の SOFC では、電解質としてイットリア安定化ジルコニア (YSZ : Y₂O₃ 安定化 ZrO₂)、燃料極材料としてニッケル・ジルコニア (Ni-ZrO₂) サーメット、空気

電極材料としてランタンマンガンナイト (LaMnO₃)、セパレータとしてランタニクロマイト (LaCrO₃) が多く研究されている。しかし、最近では、YSZ 以外の電解質として、スカンジウム安定化ジルコニア (SSZ : Sc₂O₃ 安定化 ZrO₂) やランタンガレート (LaGaO₃) などの高酸素イオン伝導材料などの研究が盛んになってきた。これらの電解質の他に、バリウム・セリア (BaCeO₃) およびストロンチウム・セリア (SrCeO₃) などの水素イオン伝導材料などの研究開発もこれまでに行われた。しかし、イオン伝導特性、化学安定性、コスト、研究開発例の多さなどで、YSZ は現在でも最も有力な電解質である。

SSZ や LaGaO₃ は 750℃ 以下の中

温作動 SOFC の電解質として適用が期待されている材料である。酸素イオン伝導率は YSZ 系、セリア系、LaGaO₃ 系の順に高くなる。

4 - 2

電解質に要求される特性と課題

SOFC の市場導入に当たっては、競合する発電技術と比較して、発電特性や長時間信頼性が同等かそれら以上であることが条件となり、さらに、コストも同等かそれ以下であることも求められる。図表7に電解質に要求される主な特性を、他の SOFC 構成材料に対するものを含めて、示す^{10, 26, 27, 34)}。セルを構成する際は、作動温度下で高イオン伝導性を発揮する電解質が決定され、続いて、電解質の性能を最大限に引き出すことができる燃料および空気電極材料が選択される。よって、電解質が決まらなないと、セルおよびスタック、SOFC システムの構造が成立しない。長時間にわたる高性能の維持という信頼性確保のために、電解質および電極材料の選択と組み合わせ、それらの部材化プロセスと多層セル構造、システム化、性能と耐久性・信頼性の評価技術など

図表6 これまで研究開発されてきた SOFC セルの代表的構成材料

構成部	主な材料
電解質	安定化ジルコニア系 YSZ : Y ₂ O ₃ 安定化 ZrO ₂ SSZ : Sc ₂ O ₃ 安定化 ZrO ₂ セリア系 SDC : Sm ₂ O ₃ ドープ CeO ₂ ランタンガレート系 (La, Sr) (GaMg) O ₃
燃料電極	Ni/YSZ サーメット、Ru/YSZ サーメット
空気電極	LaMnO ₃ 系 (La, Sr) MnO ₃ 、(La, Ca) MnO ₃ LaCoO ₃ 系 (La, Sr) CoO ₃ 、(La, Ca) CoO ₃
セパレータ	LaCrO ₃ 系 (La, Sr) CrO ₃ 、(La, Ca) CrO ₃ 合金系 Ni - Cr 系、フェライト (Fe) 系

科学技術動向研究センターで作成

に関する様々な課題がある。それらの課題を発電性能、システム構造、製造プロセスに分けて以下に記す^{10, 22, 34)}。

(1)高発電性能と長時間性能安定性

炭化水素燃料を使う場合、炭素の析出を抑えて性能低下を防ぐため燃料の反応温度を設定する必要がある。初期の高性能を維持して時間経過と共に性能低下を少なくするには、作動温度を含む使用環境条件に適切な電解質と電極などの材料の組み合わせが重要となる。

作動温度を下げることによって、発電性能の長期間にわたる維持、高信頼性を確保するなどの課題を一挙に解決できる可能性がある。そのためには、低温度領域においても電気抵抗が小さい、すなわち、高イオン伝導度を有する新たな電解質を見出すことが必要となる。

(2)高強度・信頼性を有する

システム構造

たいていの場合、電極と電解質に熱膨張率の違いがあるため、作動温度下でセルが変形したり、破損する問題がある。静止状態の室温と作動温度との差に起因する電解質と電極の熱膨張の差により、

図表 7 SOFC 構成材料に要求される主な特性

構成部	要求される特性
電解質	高イオン伝導性、長期高温性能安定性、緻密性、長期信頼性（高強度、高耐久性）
燃料電極	広い反応の場（水生成）、電子およびイオンの豊富なパス、適度な多孔性（水素、生成水のスムーズな移動）、高温安定性
空気電極	広い反応の場（酸素吸着とイオン化）、電子およびイオンの豊富なパス、適度な多孔性（酸素移動）、高温安定性
セパレータ	緻密性、電子伝導性、高温・化学安定性
セルスタック	シール性（電極間のガス遮断）、材料間での強い接着と熱膨張差の吸収、部材間での低い反応性

科学技術動向研究センターで作成

電解質や電極の内部または両材料の界面領域に変形やき裂が生じやすい。よって、これらを防止するセルおよびスタックの構造強度設計が不可欠となる。

さらに、セパレータとセル間の結合の長時間安定性も課題となる。スタックは異種セラミックス層状部材から構成される多層構造体である。層内または層間のき裂発生および進展を防いで、長時間作動下での耐久性・信頼性が保証されるセルおよびスタック構造設計とその製造プロセス技術を確立することは重要な課題である。

(3)低コスト製造プロセス

現在、実証試験が行われている高温型システムのコストが、他の発電システムに比較して、競合で

きるレベルになる目処が立ったとは判断できない。セルおよびスタックの製造コストの低減には、高価な材料をできるだけ使用しないことや、製造プロセスを簡略化したり、量産に向く製造方法が必要となる。電解質および電極材料がセラミックスであるが、セラミックスに特有な製造プロセス方法として、セラミックス原料粉体とそれらのスラリーの準備、その後の成形と焼結プロセスに関わる様々な技術課題がある³⁵⁾。電解質を薄膜にするためパルスレーザ蒸着法などの気相法が実験室的には用いられるが、将来の量産を想定すると、テープキャスティング法などの湿式プロセス法による膜形成技術が望まれる。

5 電解質における課題の解決への方策

5 - 1

電解質におけるイオン伝導メカニズムの解明の必要性

SOFC システムの発電性能を長期間維持するには、セル構成材料の性能低下を支配するメカニズムの究明が必要であり、電解質のナノスケール領域にまで遡って、イオンや電子の伝導メカニズムの究明が重要である。以下に、電解質内のイオン伝導メカニズム、電解

質と電極の界面領域におけるイオン伝導メカニズムの解明、それらのナノスケール領域での挙動の解析方法について述べる。

(1)電解質内の

イオン伝導メカニズムの解明

多量の酸素欠陥を有する結晶構造からなる YSZ などの固体酸化物では、欠陥とイオンの位置の交換により、高いイオン伝導が発生する。多量の欠陥が生じて、安定な結晶構造を維持することが

できる材料の一つにペロブスカイト型酸化物^{注)}がある³⁶⁾。この結晶構造の場合は、酸素イオン伝導度が高くなると格子中から酸素が脱離しやすく、電子伝導が発現しやすくなり、長時間の高温作動下で性能低下や時効による劣化が問題になる。しかし、これらの挙動は経験的に知られていることであり、ナノスケールでの欠陥の複合構造に起因するイオン伝導メカニズムを、実験的検証をしながら、追及すべきである。その結果、電

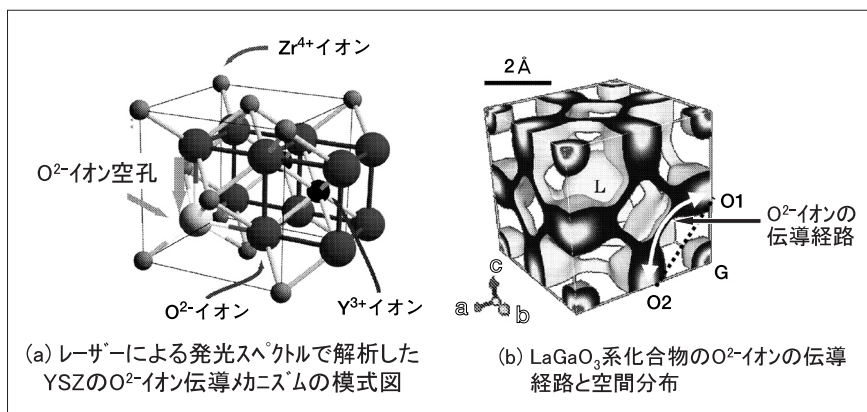
解質のナノスケール構造を制御することが可能となる。

レーザー発光のスペクトル法でYSZのイオン伝導のメカニズムを解析した例を図表8(a)に³⁷⁾、高温中性子回折法によるLaGaO₃系化合物のイオン伝導経路を解析した例を図表8(b)に示す³⁸⁾。図表8(a)は、YSZにおける酸素イオン(O²⁻)伝導メカニズムを解明した例であり、O²⁻イオン空孔としての欠陥をO²⁻イオンが占めることでイオンの伝導が生じることを表している模式図である。図表8(b)は、LaGaO₃系化合物におけるO²⁻イオンは、安定位置O1とO2の間で円弧状に連続的にかつ垂直方向に幅広く分布し、O²⁻イオンがガリウム、マグネシウムおよびコバルトの化合物(Ga_{0.8}Mg_{0.15}Co_{0.05})の陽イオンと結合を保ち、その周りを回転して、結晶中を伝導する様子を示している。なお、この高温中性子回折法によるO²⁻イオン伝導に関する解析結果は分子動力学法によるシミュレーション結果と一致している。

(2) 電解質と電極の界面領域におけるイオン伝導メカニズムの解明

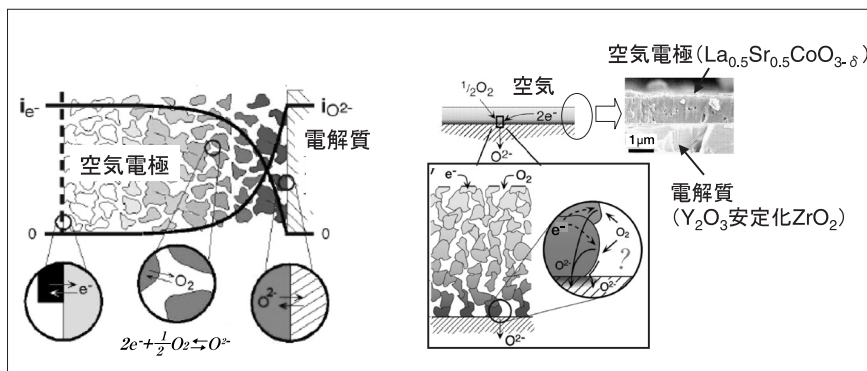
電解質自体のイオン伝導性と共に、電解質と電極の界面領域におけるイオン伝導性もSOFCの発電性能を左右する。最近、このイオン伝導メカニズムの解析に関する研究がされ始めたが、図表9に電解質と空気電極の境界領域でのイオン伝導メカニズムの模式図を示す^{39), 40)}。この図は、電解質と電極の境界領域において、酸素イオンおよび電子伝導、それらの混合伝導経路やメカニズムがセルとしての電圧・電流特性にどの

図表8 YSZおよびLaGaO₃系化合物における酸素イオン伝導メカニズムの解析例



参考文献^{37), 38)}を基に科学技術動向研究センターで再構成

図表9 電解質と空気電極の境界領域におけるイオン伝導メカニズムに関する模式図



参考文献^{39), 40)}を基に科学技術動向研究センターで再構成

ように影響を与えているかを解明するためのモデルである。電解質と電極の界面において、イオンと電子の電気化学的挙動が明らかになれば、どのような電解質と電極の界面領域のナノからミクロスケール構造が好ましいかという研究指針を得ることができる。DOEのSECAプロジェクトでは、現在精力的に、大学と国立研究機関が連携して、電気化学的挙動と材料構造の関連性に関する解析を進めている^{39), 40)}。電解質と電極の界面領域における電気化学反応メカニズムを明らかにすることは、SOFCの基盤的評価技術の強化に

も繋がる。

(3) 電解質のナノスケール領域でのイオン伝導挙動の解析方法

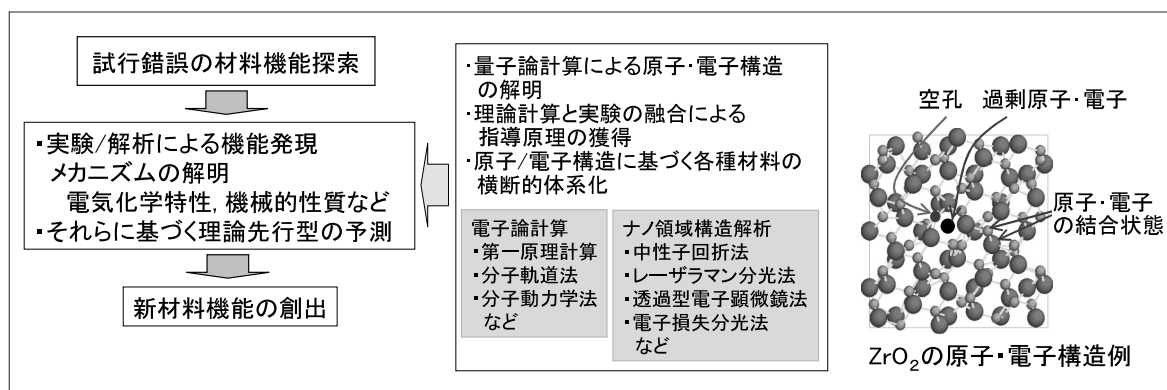
これまでは材料の試作と評価の繰り返しによって、電解質を含むセル構成材料の研究開発がなされてきたと言える。しかし、画期的な特性を発現する材料の開発には、その発現メカニズムをナノスケール領域で解明することが、試行錯誤的研究開発よりは、結果的には近道になると考えられる。すなわち、ナノ材料科学と言われる様々な理論計算や実験検証によって、材料特性を劇的に向上させることが可能性となる例が増えつつある。量子論を用いたシミュレーションによる原子・電子構造の解明、理論計算と実験の融合による指導原理の獲得、原子・電子構造に基づく各種材料の横断的体系化

■ 用語説明 ■

注 ペロブスカイト型酸化物

ABO₃という金属元素A、Bと酸素の化合物で表される酸化物セラミックス。周期表にあるほとんどの金属元素がそれらの構成元素となる。A、Bの組み合わせによって様々な特性、例えば強誘電性、超伝導性、イオン伝導性を示す。

図表 10 ナノスケール領域での機能発現メカニズムの解明による新規材料創出方法



科学技術動向研究センターで作成

が SOFC の電解質の研究開発においても不可欠である。理論に基づくシミュレーション手法としては第一原理計算、分子軌道法、分子動力学法などあり、ナノスケール構造を解明する実験手法としては中性子回折法、レーザラマン分光法、高分解能透過型電子顕微鏡観察法、電子損失分光法などがある。図表 10 にナノスケール領域での機能発現メカニズムを解明して新規材料を創出する方法に関する模式図を示す。

今後は、実験とシミュレーションの相互による材料機能の発現メカニズムの解明と、それらに基づく理論先行型の研究開発により新たな電解質を見出すという研究の進め方をとっていくことが望ましい。

5 - 2

電解質の損傷・劣化メカニズムの解明

図表 3 (a) のロードマップに示した、日本の中・高温型 SOFC の研究開発における現状の問題として、作動環境条件下における信頼性向上に関わる技術については、マクロスケールからナノスケール領域までの電解質の損傷・劣化挙動を支配しているメカニズムを究明すべきである。システムの試作と評価の繰り返しで研究開発目標達成に期間を要するよりは、メカニズムの解明に重点をかけて、最

終的にはシステムアップする手順の方が全体の研究開発期間を短縮することができる可能性が強いと考えられる。その際、5 - 1 節で述べた、ナノスケール領域での挙動解析方法が有力なツールとなる。

DOE の SECA コア技術プログラムの中ではスタックの破壊挙動解析が最優先テーマとなっており、セル構造上の破壊クライテリアに関して現在まで精力的に研究開発が行われてきた²¹⁾。電解質と電極の境界領域における電気化学反応の解明、セルおよびスタックの破壊挙動の解析に重点が置かれ、ナノスケール領域までの物質の挙動やそのメカニズムの追求、それらの基礎的解析手法の研究、マクロスケールまでの破壊挙動のシミュレーションおよび手法の開発が進められている。

SOFC は長寿命システムであることが前提になるが、中・高温型システムでは長期間にわたる性能安定性の実証試験が今後本格化する状況にある。中温型システムの開発が進展しつつあるが、高温型システムに比べて経験は少ない電解質が使用されているので、高温型で蓄積した技術を基盤に、欠陥の生成、それらのナノからマクロスケールまでの進展・拡大への機械的メカニズムを明らかにする研究開発が盛んになると予想される。電解質以外の材料も含めた劣化機構の解明と寿命予測法確立な

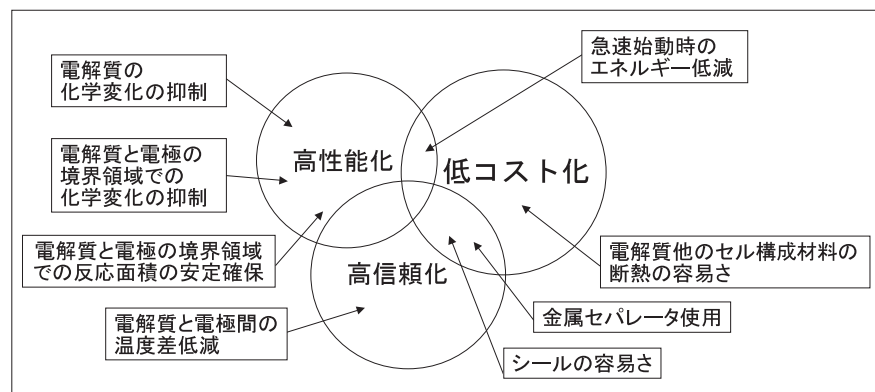
どが不可欠である。

5 - 3

電解質を含むセル構成材料の低コスト製造プロセスの開発と作動温度の低温化

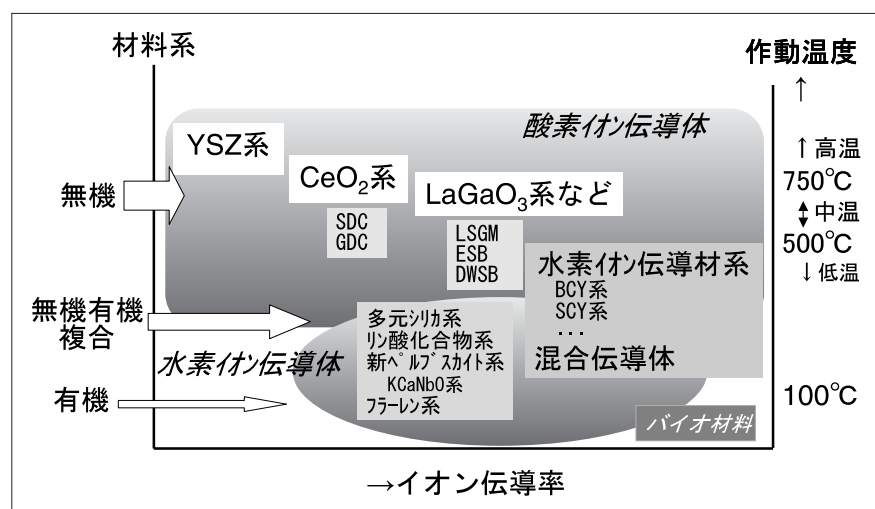
高温型 SOFC システムのコストの低減には、安価な電解質とその他のセルおよびスタック構成材料の採用とそれらの製造プロセスの見直しがある。そのために、作動環境下での電解質とこの特性を充分発揮させることができる電極材料の電気化学挙動や特性発現メカニズムと量産規模でのそれら材料の微視・巨視的構造の関係を把握する必要がある。この製造プロセス技術には低コストなセラミックス素材の選択、セラミックスに特有な製造プロセスなどが含まれる。材料のプロセスを選定においては、ドクターブレード法、スピンコート法などのセラミックス湿式プロセス法が低コストな電解質を製作するプロセスと言える。物理蒸着 (PVD: Physical Vapor Deposition) 法、化学蒸着 (CVD: Chemical Vapor Deposition) 法、パルスレーザ蒸着 (PLD: Pulse Laser Deposition) 法、コロイダルスプレー蒸着法 (CSD: Colloidal Spray Deposition) などの製膜方法は、材料探索段階で膜形成には効果的方法であるが、これらの方法は実用セルおよびスタックの量

図表 11 低温作動 SOFC の必要理由と電化質をはじめとしたセル構成材料との関係



科学技術動向研究センターで作成

図表 12 イオン伝導率および作動温度の関係における電解質の種類



BCY : BaCe_xY_{1-x}O₃
SCY : SrCe_{1-x}Yb_xO_{3-α}

科学技術動向研究センターで作成

産には不向きである。よって、単なる小サイズのサンプルを得ることに留まらず、大面積や大量生産が可能な電解質膜作製方法を研究初期段階から想定しておくことが大切である。

これまで、研究開発当初は750°C～1,000°Cで作動する高温型のSOFCの研究開発が主流であったが、上記の信頼性の確保、低コスト化や起動時間の短縮のため、低温作動化が望まれている。図表11に低温作動SOFCの必要理由を、高信頼性化、低コスト化および高性能化の観点から電化質をはじめとしたセル構成材料との関係において示す。低温作動化により、断熱の容易さ、材料選択の自由度が増して金属セパレータが使用でき、セルおよびスタックのシール

が容易になるため、コストが低いセルを作成できる。その結果、低温型システム全体が、高温型に比べて、コンパクトにすることが可能となる。さらに、セル間の温度差低減による高信頼性化が可能になり、かつ、電解質と電極の境界領域における劣化を防ぐことによって反応面積を安定的に確保することができるため長期間における性能維持ができる^{22, 35, 36, 41, 42)}。

一方、作動温度が低くなると、電解質の抵抗の増大や電極での反応が不活発になるため発電性能が低下する。これは、化学エネルギーから電気エネルギーに変換できる理論効率の最大値は温度低下と共に増大するが、その一方で、電解質の抵抗や電極境界領域での反応抵抗が大きくなり、発電効率が

低下するためである。よって、低温でも十分低い電気抵抗を示す電解質の研究開発が必要となる。

5 - 4

作動温度が低い 新規電解質の探索

図表12には、無機材料（セラミックス）、有機材料などの各種電解質を、イオンおよび電子伝導性と作動温度の視点から模式的に示す。高温作動での様々な課題が顕在化して、数年前からはYSZに替わり、セリア（CeO₂）系酸化物（例えば、SDC: Ce_xSm_{1-x}O_y）やLaGaO₃系酸化物などを中心とした中温作動用電解質の研究開発が盛んになってきた。なお、このLaGaO₃系酸化物は日本の大学で開発された高酸素イオン伝導体である³⁶⁾。

これらの酸化物をベースとした低温作動用電解質の研究開発が最近活発化している。500°C以下で酸素イオンの高伝導性を示す、LSGM (La_xSr_{1-x}Ga_yMg_{1-y}O₃) などの電解質の探索が一段と活発化している^{43, 44)}。GDC (Ce_xGd_{1-x}O₂)、ESB (Bi_{2-x}Er_xO₃)、DWSB (Bi_{2-(x+y)}Dy_xW_yO₃) などの酸化物も低温で高イオン伝導性を示す電解質として注目されており⁴⁵⁾、低温作動下において飛躍的にイオン伝導が高い電解質が見出される可能性もある⁴²⁾。しかし、作動温度を下げて高温作動並み以上の性能を有する新規電解質は探索段階にあり、これらを用いたシステム技術は萌芽段階にあるが、高温型システムが直面している課題を一挙に解決するポテンシャルを有している。よって、高温型システムの市場導入への課題を解決できにくい場合は、思い切って、低温型システムの研究開発へシフトすることも選択肢の一つである。この新規電解質の探索は、最近著しい進歩があるナノスケールレベルでの計算機シミュレーシ

ンや実験手法を用いて、理論と実験検証の両面から進めるべきである。

図表 13 にそれぞれ、これまで各種ジャーナル誌などに発表された主な低温作動用電解質である SDC、GDC、LSGM などにおいて、それらの材料設計に必要な条件について一覧する。低温で酸素イオン伝導特性を上げるために電解質を薄膜化して低分極または低オーミック抵抗を実現することが効果的になる。また、それらの薄膜をどのようなプロセスで製作するかが課題となる。

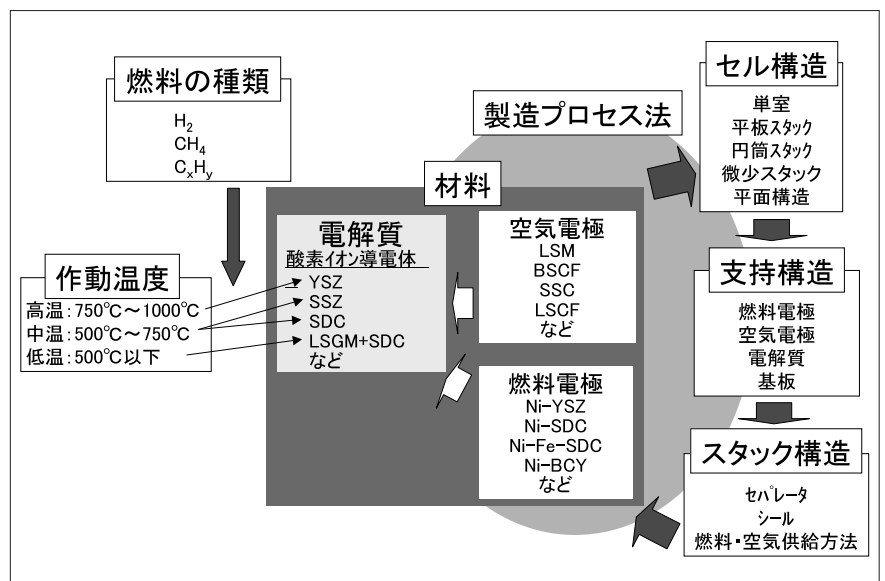
現在、中温作動の電解質は定まりつつあるが、低温作動のものは探索段階にある。それぞれの電解質にどの電極材料が最適なのかを見出すことも、高発電効率で高信頼性を有するセルを開発するうえで重要な技術要素である。図表 14 に、これまで研究開発されてきた電解質に対する、電極材料、燃料の種類、作動温度、セルからスタック構造などとの関わりを示す。酸素イオン伝導の電解質を用いた場合、どこまで低温化が可能なのかは、ひとえに作動温度下における電解質内の高イオン伝導性と、この特性を充分発揮させる電極材料の選択にかかっている。すなわち、電解質における高イオン伝導の他に、空気電極における容易な酸素イオンの発生とその電解質への伝導と、燃料電極境界領域内の高効率なイオンの移動と水素との化学反応性にも SOFC の発電性能は影響を受ける。

図表 13 低温作動用電解質の材料設計に必要な条件

材料設計に必要な条件	酸素イオン伝導体			水素イオン伝導体
	SDC	GDC	LSGM	BCY
イオン伝導性	○	○	○	◎
絶縁性	△ 低酸素分圧下	△ 低酸素分圧下	○	○
化学安定性	○	○	△ Ni+SDC 添加	—
化学安定性 (酸化・還元雰囲気)	△	△	× 低酸素分圧下	△ Pr 添加
ガス遮断性 (無気孔)	○	○	△～○ PLD 法	○ CSD 法
膜の均一性 (オーミック抵抗低減)	△	○	△～○ PLD 法	○ CSD 法
熱膨張 (電極と同等)	○	○	○	—
低コスト	△	×	×～△	○

科学技術動向研究センターで作成

図表 14 電解質に対する電極材料、燃料、作動温度、セルおよびスタック構造などとの関わり



LSM : La_{0.8}Sr_{0.2}MnO₃
 BSCF : Ba_{0.5}Sr_{0.5}Co_{0.8}Fe_{0.2}O₃
 SSC : Sm_{0.2}Sr_{0.8}CoO₃
 LSCF : La_{0.8}Sr_{0.2}Fe_{0.8}Co_{0.2}O₃

科学技術動向研究センターで作成

6 日本の SOFC の研究開発における産学官連携の方向

高温型 SOFC のグローバルな研究開発状況としては、システムの実証試験が広範囲になされており、市場導入時期が近づいているようにも数年前から観測されていたが、現時点では、世界を見渡

しても市販されているシステムはまだ存在しない。これは、システムの信頼性の確保ができていないことや、競合技術に比べて対抗できるレベルまでの低コスト化が達成されていないなど、様々な問題

がまだ解決されていないためである。これらの問題を解決するため、電解質をはじめ、セルまたはスタックを構成する材料の改良または新規の開発を、産学官機関がそれぞれの得意とする分野で連携して

行うことが望まれる。

「第3期科学技術基本計画」におけるナノテクノロジー・材料領域では、革新技術によって、エネルギー利用の大幅な高効率化を達成することを目的にした革新的FC材料を開発することが掲げられている⁴⁷⁾。基礎的段階にあり実用化までに長期間を必要とし、社会性が強く環境保全に大きく関わる研究開発に対しては、これまでのプロジェクトの推進方法から脱却した新たな産学官機関の連携によるイノベーションを誘発する研究開発の進め方が必要である。発電特性の向上と長期間にわたる性能維持や、様々な使用環境において信頼性を有するSOFCに仕立てるには、電解質を中心としたセル構成材料のナノスケール領域での機能発現メカニズムを明らかにすることが不可欠である。この

ような基礎・基盤技術重視の研究開発を産学官機関の連携で実施して、革新的SOFCの創出を迫すべきであり、その中で、大学・研究開発独法における基礎研究の役割は大きい。この期待に応えるためには、大学・研究開発独法での基礎研究の更なる充実を図るべきである。

「経済成長戦略大綱」においては、これまでのバラバラに進められていた産学官機関の研究開発に横串を通して事業化および市場展開を図るべきであるとの提唱がされており、イノベーション創出を成功させるポイントとしては科学への廻りなどによる発想の転換が揚げられている⁴⁸⁾。その中で、研究開発が閉塞状況に陥った場合には、既存の研究開発の延長線上での検討をいったん止めて、基礎科学的原理に遡った研究開発によ

り、ブレークスルーを実現すべきとしている。

日本における今後のSOFCに関わる国家プロジェクトでは、テーマの選定以前の段階でも戦略検討を充分に行い、目標値設定においても世界トップを目指すべきであり、世界トップレベルの発電性能の実現が可能となる研究開発に注力すべきである。革新的システムの開発においては、電解質を中心としたセル構成材料の特性発現メカニズムまで遡った究明と、それらを支援する解析技術の研究開発が極めて重要となる。この中で革新的技術を創出するには、大学・研究開発独法による材料科学に基づく基礎研究成果としての材料シーズ技術を企業などによるシステム側のニーズ技術開発へスムーズに結び付けることが決め手となる。

7 まとめ

FCシステムの中で、なぜSOFCが注目されるのかを高効率発電システム、応用が期待される分野、国内外のSOFCの研究開発の現状から紹介し、その発電システムの現状での課題を電解質の視点から述べ、今後の課題に対する解決方を考察した。

現在、高温型SOFCの実証試験が行われており、実用化に向けては発電性能の長期間維持、低コストおよび高信頼性を達成することが課題となっている。これらの課題を解決するには、材料のナノスケール領域にまで遡ってセル構成材料の性能低下のメカニズムを解明することが必要であり、それらを支援する解析技術の研究開発が重要となっている。信頼性の確保においても、構成材料の劣化機構の実験的解明と共に、損傷・劣化に関する計算機シミュレーション手法を効果的に用いて、研究開発

を効率的に行うことが望まれる。システムのコストの低減には、安価なセルおよびスタック材料の採用とそれらの製造プロセスの見直しが必要である。さらに、電解質を含むセル構成材料の電気化学挙動や特性発現メカニズムの観点から、試作段階のセル構成材料と量産規模でのそれらの材料の微視的および巨視的構造の関係を把握しておくべきである。

一方、近年、高温で作動するイットリア安定化ジルコニアなどに替わって、低温(500℃～750℃以下)において高い酸素イオン伝導率を有するスカンジウム安定化ジルコニア、ランタンガレートなどの電解質の研究開発が盛んになってきた。これらの新規電解質やSOFCシステムの研究開発は萌芽段階にあるが、高温型システムが直面している課題を一挙に解決するポテンシャルを有している。

このような研究開発の状況にあって、高温型システムの市場導入への課題を解決できにくい場合は、思い切って、低温型システムの研究開発へシフトすることも選択肢の一つである。この新規電解質の探索は、最近著しい進歩があるナノスケールレベルでの計算機シミュレーションや実験手法を用いて、理論解析と実験検証の両面から進めるべきである。さらに、探索段階から、将来の実用システムを想定した、セルおよびスタックの製造プロセスに向く材料の研究開発を実施することが大切である。この新規電解質を用いるシステムでは、これまでのセルの試作と発電特性の測定の繰り返しを重点とする方法ではなく、材料のナノ構造領域での特性発現挙動を明らかにしながら研究開発を実施することが望まれる。この研究開発では、大学・研究開発

独法による基礎研究を軸とした産官学機関の連携と分担を効果的に実施する運営方法に期待するところが多い。

参考文献

- 河本洋、「エコシステムとしての燃料電池とセラミックス」、日本材料学会第51期学術講演会講演論文集、p.363 (2003)
- 渡辺隆夫、前田征児、「クリーンコールテクノロジーにおける高温型燃料電池の動向と展望」、科学技術動向 2006 年 11 月号
- 本間琢也、「図解・燃料電池のすべて」、工業調査会、(2003)
- NEDO「燃料電池・水素技術開発部」資料：
<http://www.nedo.go.jp/nenryo/index.html>
- 「燃料電池のすべて」、Newton 2006 年 11 月号、p.30～63
- 「燃料電池 2006」、日経 BP 社、(2006)
- 「特集：SOFC および関連技術の開発状況」、燃料電池開発情報センター機関紙、(2006)
- 「特集：SOFC の研究開発状況」、燃料電池開発情報センター機関紙、(2003)
- NEDO 資料「熔融炭酸塩形燃料電池発電技術開発」、(2000)
- 「SOFC 将来構想に関する提言」、NEDO - SOFC 発電技術委員会：
<http://www.nedo.go.jp/iinkai/gijutsu/gijutsu/sofc/teigen.pdf>, (2004)
- 嘉藤徹、「固体酸化物形燃料電池の開発状況と将来動向」：
<http://unit.aist.go.jp/nano-ele/event/20040120/4.pdf> (2004)
- 水崎純一郎、「SOFC 開発の最近の動向と基礎科学的話題」、水素エネルギーシステム、Vol.30、No.1、p.66～74 (2005)
- “7th Annual SECA Workshop and Peer Review”：
<http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/06/seca/index.htm>, DOE-NETL
- “Sixth Annual SECA Workshop”：
http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/05/SECA_Workshop/SECAWorkshop05.html, DOE - NETL
- “SECA Annual Workshop and Core Technology Program Peer Review Workshop”：
<http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/04/seca-wrshp/seca-wrshp04.html>, DOE - NETL
- “Fourth Annual SECA Meeting - Seattle, WA”：
<http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/seca/seca03.html>, DOE - NETL
- “Third Annual Solid State Energy Conversion Alliance (SECA) Workshop”：
<http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/02/SECA/seca02.html>
- 「2006 燃料電池・水素技術開発ロードマップ～今後取り組むべき技術課題～(総論)」、NEDO 燃料電池・水素技術開発部：
<http://www.nedo.go.jp/nenryo/gijutsu/souron.pdf> (2006)
- 「固体酸化物形燃料電池編」：
<http://www.nedo.go.jp/nenryo/gijutsu/sofc.pdf> (2006)
- W. A. Surdoval, “U.S. DOE Fossil Energy Fuel Cell Program”：
http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/06/seca/pdf/SurdovalSECA_091206_was.pdf (2006)
- NETL Home Page：
<http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/fuelcells/seca/>
- 「燃料電池・水素技術委員会のまとめ—今後取り組むべき技術開発について—(平成 16 年 6 月リリース版)」、NEDO 技術開発機構
- 新エネルギー技術開発プログラム「固体酸化物形燃料電池システム技術開発」基本計画 (平成 18 年度版)：
<http://www.nedo.go.jp/activities/portal/gaiyou/p04004/h18kihon.pdf> (2006)
- 「第 129 号 低コストで小型の家庭用 SOFC」、燃料電池開発情報センター Latest News：
<http://www.fcdic.com/> (2007)
- 河本洋、「自動車におけるエネルギー機器へのセラミックス部材の適用」、材料、Vol.50、No.5、p.550 (2001)
- 河本洋、「自動車におけるエネルギーシステムと材料技術」、ポリマーフロンティア 21 シリーズ 11「自動車と高分子材料」、(株)高分子学会編、(株)シーエムシー出版、p.4 (2002)
- 福井武久、エネルギー学会誌、78 - 1、p.27 (1999)
- T. Hibino, et al., “One-chamber solid oxide fuel cell constructed from a YSZ electrolyte with a Ni anode and LSM cathode”, Solid State Ionics, 127 p.89 - 98, (2000)
- T. Hibino, et al., “A Low-Operating-Temperature Solid Oxide Fuel Cell in Hydrocarbon-Air Mixtures”, Science, Vol.288, 16 June 2000, p.2031-2033, (2000)
- T. Hibino, et al., “Solid Oxide Fuel Cell with a Novel Geometry That Eliminates the Need for Preparing a Thin Electrolyte Film”, Journal of The Electrochemical Society, 149 (2), pA195 - A200 (2002)
- Z. Shao, et al., “A thermally self-sustained micro solid-oxide fuel-cell stack with high power density”, nature, Vol.435 | 9, P.759 - 798 (2005)
- 日比野光宏、「Ba-In-O 系電解質を用いた一室式燃料電池および混合伝導体の開発」、FC EXPO 2007 大学・国立研究所による研究成果発表フォーラム資料、(2007)

- 33) S. Shaffer, "Development Update on Delphi's Solid Oxide Fuel Cell Power System":
<http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/06/seca/pdf/Shaffer.pdf>
- 34) K. C. Wincewicz, et al., "Taxonomies of SOFC material and manufacturing alternatives", Journal of Power Sources, 140, p.280 - 296 (2005)
- 35) H. Kawamoto, et al., "Mechanical and Thermal Properties of Strontium-substituted Mixed Lanthanide Manganite for Solid Oxide Fuel Cells", Pro. of 2000 Fuel Seminar, p.546 (2000)
- 36) 石原辰巳, 「新しい高酸化物イオン伝導体 LaGaO₃ 系酸化物の燃料電池への応用」, 工業材料, Vol.47, No.9, p.110 ~ 115 (1999)
- 37) 「エネルギー機能材料の電子構造と光学特性」:
<http://www.qep.energy.kyoto-u.ac.jp/res2n/uji04-2scA4.pdf>
- 38) 野村勝裕, 「酸化物イオン伝導経路の可視化—固体電解質のイオン導電機構の解明に大きな一歩—」:
http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/aist_today/vol03_12/p19.html (2003)
- 39) J. R. Wilson, et al., "Advanced Measurement and Modeling Tools for Improved SOFC Cathodes":
<http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/04/seca-wrkshp/seca-wrkshp04.html>
- 40) S. B. Adler, "Separating Rate-controlling Factors in Solid Oxide Fuel Cell Cathodes":
<http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/06/seca/index.htm>, DOE - NETL
- 41) 稲垣淳, 「低温作動 SOFC 高性能セルの開発」, 「図解・燃料電池のすべて」, 工業調査会, p.71 ~ 73 (2003)
- 42) E. D. Wachsman, 2003 Fuel Cell Seminar 講演資料, (2003)
- 43) J. Yan, et al., "High-Power SOFC Using LSGM/SDC Composite Film", Electrochemical and Solid-State Letters, 8(8), p.A389 - A391 (2005)
- 44) J. Yan, et al., "Nanosize Effect on the Oxide Ionic Conductivity of Lanthanum Germanite Thin Films", Electrochemical and Solid-State Letters, 8 (11), p.A607 - A610 (2005)
- 45) E. D. Wachsman, "Stable High Conductivity Bilayered Electrolytes for Low-Temperature Solid Oxide Fuel Cells", 2003 Fuel Cell Annual Report, p.97 ~ 101 (2003)
- 46) H. Iwahara, et al., "Prospect of hydrogen technology using proton-conducting ceramics", Solid State Ionics, 168, p.299 - 310 (2004)
- 47) 「第3期科学技術基本計画・分野別推進戦略—ナノテクノロジー・材料分野—」, 総合科学技術会議:
http://www.Mext.go.jp/a_menu/kagaku/kihon/06032816/001/001.pdf (2006)
- 48) 「イノベーション創出の鍵とエコイノベーションの推進 (中間報告)」, 産業構造審議会・産業技術分科会, (2007)

執筆者



ナノテクノロジー・材料ユニット リーダー

河本 洋

科学技術動向研究センター

<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>



工学博士、日本機械学会フェロー。トヨタ自動車(株)にて自動車部材の開発段階における強度設計・評価を担当し、その後、財団法人ファインセラミックスセンターにて経済産業省関連プロジェクト(ファインセラミックスの研究開発など)に従事。専門は構造部材の強度設計と信頼性評価技術。