

「水素エネルギーシステムのための固体酸化物セル技術の可能性」

東北大学大学院環境科学研究科教授 川田達也

はじめに：再エネ導入と水素

近年、地球温暖化による異常気象が頻発し、脱炭素と、そのための再生可能エネルギー導入の必要性が広く認識されるようになった。しかしその一方で、メガソーラーや陸上風力の設置には抵抗も大きく、宅地開発のための森林伐採は認められても再エネ導入のための土地利用は批判されるといった現象が生じている。このため、地域で受容され、利益を還元できるような地域密着型の再エネ導入を進めることが求められるが、収益性や安定供給の課題は大きく、ベースロード電源としての従来型火力や原子力への回帰圧力も強まっている。今後は、VPP、マイクログリッド、EV 連携など、柔軟な電力利用に向けた構造の転換を加速することで、安定供給と再エネ導入加速の両立を図ることが望まれるが、季節間変動を含む長期電力融通をこれらの手段で実現することは難しく、電力のみからなるエネルギーシステムで、十分なエネルギーレジリエンスを有する社会の姿を描くことは現実的ではない。一方、一部の産業や長距離輸送などのエネルギー需要では電化が最適解ではないケースがあり、再エネ電力を、水素やアンモニア、合成燃料等として貯蔵する Power to X を一定程度導入することが必須であると考えられている。これらの、柔軟な電力網と P2X を、セクタカップリングによってつなぎ、最適化することで、より強靱で低炭素なエネルギーの未来が開けると考えられる。

P2X の課題は、再エネ電力⇒化学エネルギー⇒電力の往復効率の低さとコストにある。一般的には、最も単純な水素においても、往復効率は 30%前後と認識されている。ただし、これは技術によって大きく変化させ得る値であり、また、水素や燃料を電力の一時貯蔵形態と捉えるか、様々な産業に使える有価物と捉えるかで評価が変わる。本稿で紹介する高温水蒸気電解では、外部の排熱によって水蒸気を供給できれば、エンタルピー／投入電力の効率($\Delta_r H^\circ(\text{H}_2\text{O})/W$) が理想的には 100%(LHV)となり、システムでも 80-90%が実証されている¹⁾。水素を原料として、あるいは熱源として利用する場合においては、エネルギーの観点からは電化システムに比べて遜色のないものとなる。電力に戻したい場合は効率 60%(LHV)²⁾の燃料電池を組み合わせると 50%前後

の往復効率が期待できる。以下では、このような高温セルの技術の概要、開発状況、さらに、コスト等の課題について紹介する。

技術の概要

ここで紹介する高温型の燃料電池と電解セルはそれぞれ固体酸化物形燃料電池：Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)、固体酸化物形電解セル：Solid Oxide Electrolysis Cell (SOEC)と呼ばれる。“Solid Oxide”は、高温で酸化物イオン伝導性を発現する固体酸化物セラミックスを電解質として使うことに由来する。SOFC と SOEC を合わせて「SOC(s)」と表現することもある。電解質材料としては ZrO_2 に希土類等の元素を添加して立方晶相を安定化した「安定化ジルコニア」が使われることが多い。最も一般的なものは Y_2O_3 を 8mol% 添加した ZrO_2 (YSZ) である。この電解質の片面に導電性セラミックス材料 ((La,Sr)MnO₃, (La,Sr)CoO₃, (La,Sr)(Co,Fe)O₃ など) の層を形成して酸素電極とし、対面に Ni と YSZ の混合物層を配して燃料極とする。約 600°C 以上に昇温して燃料極に水素/水蒸気混合ガスを、酸素極に空気を供給すればその分圧に応じて開回路電圧

$$E = -\frac{\Delta_f G^\circ(H_2O)}{2F} - \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}$$

R : 気体定数, F : ファラデー定数
 T : 絶対温度, p : ガス種 i の分圧
 $\Delta_f G^\circ(H_2O)$: T での水の標準生成 Gibbs エネルギー

が生じる。外部に負荷を接続すれば燃料電池として電力を得ることができ、外部に電源を接続すれば電解セルとして水素を発生させることができる。水素を燃焼させた場合の反応熱は $-\Delta H(H_2O)$ となるが、燃料電池ではそのうちの一部を電気として取り出し、残りを熱として取り出すことになる。図 1 に示すように、電気として取り出し得るエネルギーは高温ほど小さくなるはずだが、実際は電極反応を進めるために必要な電圧ロス（過電圧）が高温では小さく、このため低温形 FC に比べて SOFC は効率が高くなる。さらに、放出される熱も高温で高いエクセルギーをもつため利用価値が高く、メタンを燃料とするシステムではその改質熱に用いて効率をさらに上げることができる。これにより、最新コンバインドサイクルによる大型火力の発電効率と同等あるいはこれを超える効率(55-65%)を 0.7kW~5kW の小型システムで達成可能である。一方、電解ではギブズエネルギー相当の電力を外部から投入して反応を進行させる。

この場合は吸熱反応となるが、過電圧を加えてエンタルピー相当の電力を与える（熱中立運転）ことで、外部の高温熱がなくとも反応が進行し、エンタルピー効率 100%で電解を行うことが可能である。

燃料電池や電解セルは、通常、基本単位である「単セル」を複数積層した「スタック」として用いられる。スタックではガスシールと集電を両立することが求められるが、SOCの主要部はセラミックスであるため、無闇に積層すると破損の危険がある。そこで、SOFCとして開発が始まった当初から、様々なセル・スタックの形態が提案されてきた。代表的なものを図2に示す。スタックは断熱材に囲われたホットボックス内に収納され、ガス供給系や電源系を含む「システム」を構成する。SOFCとSOECは、同じ材料やスタックデザインが使われる場合が多く、同一のセルを可逆運転するr-SOCとして利用することも可能である。前述のように、SOFCとしての動作は発熱反応であり、SOECとしての動作は、セル電圧が熱中立点以下で吸熱、それ以上では発熱となる。このようにSOCのスタック・システムの設計は、熱のマネジメントが重要な要素となっており、セルもそこで生じる温度分布や熱応力を考慮してデザインされる。

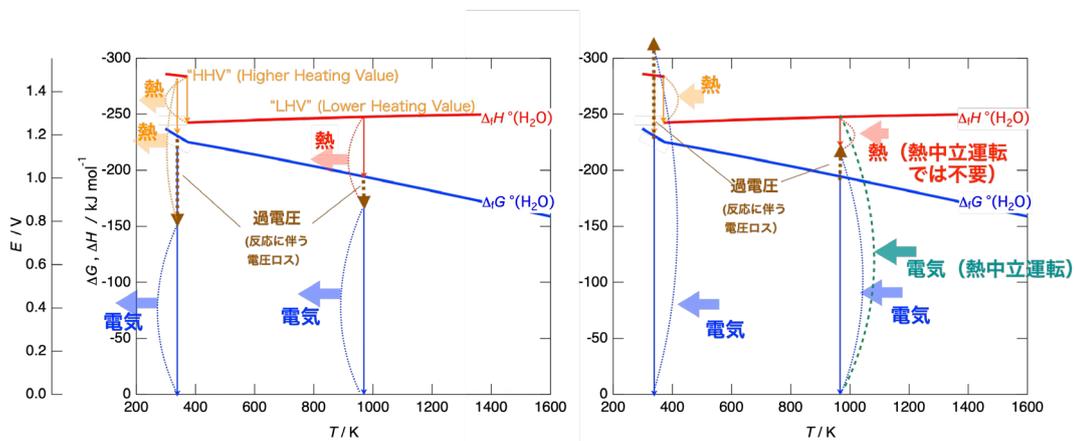


図 1 (a)水素燃料電池と(b)水電解の熱力学関数 (ΔH° , ΔG°) の温度依存性

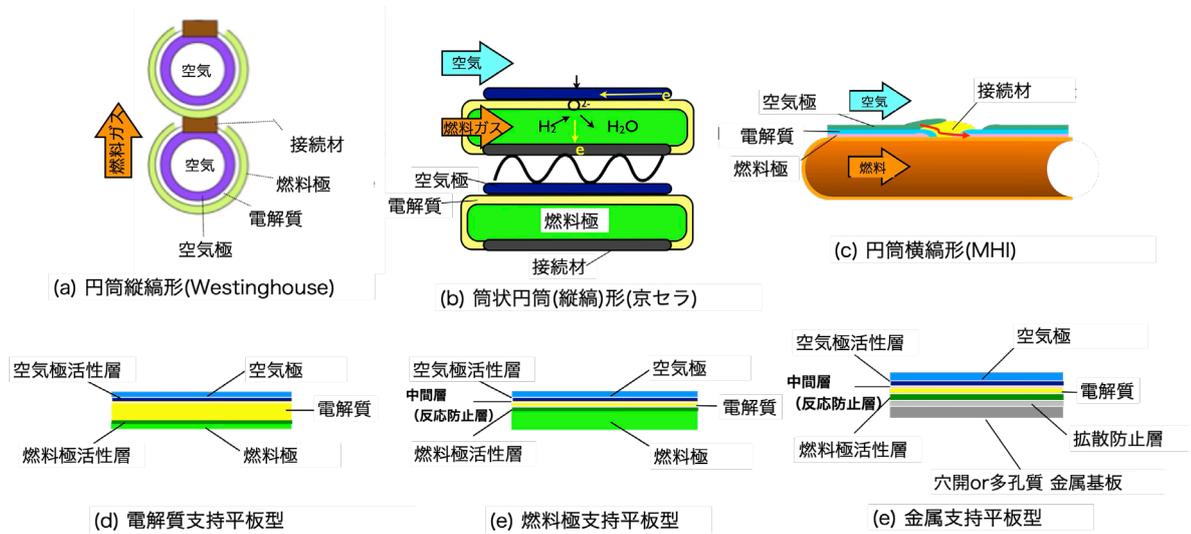


図 2 代表的な SOFC のセル形状 (部材の名称は SOFC として記述している)

開発の歴史と現状

以下では、図 2 に示したセルの形状に着目して SOFC としての開発の歴史と、SOEC への展開を含む開発の現状を述べる。尚、紹介した企業名は一例であり、他にも数多くの企業等が開発に携わっていることを申し添える。

○円筒形セルの黎明期と展開

安定化ジルコニアの酸化物イオン導電性を利用した最初の技術は SOFC でも SOEC でもなく、19 世紀の終わりに有名な物理化学者である Walther Nernst がランプの発光体として用いたことに始まる³⁾。これを共に特許化した米国 Westinghouse 社が、後に SOFC の開発を始める。Westinghouse 社のセルは図 2(a)に示す様に、一端封じの多孔質セラミックス管の上に空気極・電解質・燃料極の順にセル部材を重ねたもので、電解質は電気化学蒸着 (EVD) という独自の方法で多孔質上に緻密膜を形成することを可能にしていた⁴⁾。このセルの完成度は非常に高く、長時間の耐久性も実証されていたが、成膜法のコストが高く部門の買収等を経て開発を中断している。Westinghouse 型のセルはセル間の直列接続を、長手方向に配置したインターコネクタ部を介して行うためしばしば「円筒縦縞形」と称される。これに対して三菱重工 (MHI) は一本の多孔質基体管上に複数のセルを直列接続する「円筒横縞形」(Segmented-in-Series 型) のセルを開発してきた⁵⁾。MHI はこれを焼結法で作製することに成功し、スタックを加

圧容器中で運転して排熱をガスタービンで使用するハイブリッドシステムを実用化した。このタイプの SOFC は現在でもいくつかのサイトで運転されており、現在では同社は同様のデザインの SOEC を開発して実証試験を行なっている⁶⁾。

○家庭用コージェネレーション

SOFC は高温で動作することから、開発の初期には、そのアプリケーションには大型の火力代替システムが想定されていた。これに対し、ヨーロッパを中心に家庭用の電気・熱併給システムとしての用途の開拓が行われた。当初は 1kW 程度の小さな SOFC は熱自立が難しいと考えられていたが、京セラは、縦縞型のセルを平板状に潰して小型化したセル（図 2(b)）を開発し、800°C 以下への作動温度の低温化やスタックのコンパクト化によって、アイシン、大阪ガス等とともに 0.7kW の家庭用燃料電池「エネファーム Type-S」の開発に成功した。すでに 20 万台以上のユニットが販売されている。エネファームは、コージェネレーション装置として発電とともに給湯にも用いられるが、最近のモデルでは発電効率が 55%に達しているため⁷⁾、送電ロスを考慮すればモノジェネレーションでも意味のあるレベルとなっている。大阪ガス等では、数 1000 台のエネファーム type-S を制御する VPP の実証を行なっている⁸⁾。京セラの SOFC はこのように都市ガスを燃料とする家庭用としては成功したが、セルの先端で残燃料を燃焼させる形式のため、さらなる高効率化や純水素燃料のための燃料リサイクルに対応や SOEC への展開には向かない。このため当初のデザインを活かしつつ燃料流路を閉鎖系とするセルの開発が期待されている。

○平板セルによる高効率 SOFC/SOEC

一方、スタックの出力密度を向上させるために、平板を積層する一般的な燃料電池の形のスタックも開発されてきた。米国のベンチャーである Bloom Energy は、図 2(d) のように電解質膜で構造を支える形の平板セルで、業務用 200kW 級のシステムを開発し、これを客先に設置して電気を販売するビジネスモデルで実績を重ね、韓国では SK との合弁会社を設立して大規模な発電施設の建設を行うなど、昨年段階で、業務用燃料電池の総発電容量として世界最大となる 1.3GW 以上の販売実績を達成している⁹⁾。システム効率はある程度の劣化を見込んだ設計や運用となっているが、初期には 60%を超える。これには電解質に通常の YSZ でなく安定化剤として Sc₂O₃ を用いて導電率を改善している効果も含まれる。現在では同様の構造の SOEC の開発を行い、MW 級システムの実証を行なっている。ドイツの Sunfire は Bloom Energy と同様に、

電解質支持型セルを用いて、主に SOEC システムの開発に注力している。すでに 2.7MW の電解システムや、製鉄や化学プラントからの排熱を利用した水蒸気発生、CO₂ と H₂O の共電解などの実証を行なっている¹⁰⁾。

平板セルは、合金板を介して直列に積層するため、高温動作に耐える特殊な合金の使用が必要となる。作動温度を低温化しようとするすると電解質の抵抗増加によって性能が制限されるため、電解質の薄膜化が試みられてきた。Jülich 研究所¹¹⁾で提案された方法は、燃料極層を厚くして、その上に 10 μ m 以下の薄い電解質層を載せる方法 (図 2(e)) で、750°C 程度の温度で十分な特性が得られるため、現在、多くの企業がこの方式を採用している。上述した京セラのセルも基体管が燃料極であり、これと同様の構造と見ることができる。このタイプの森村 SOFC 社のセルは、三浦工業やデンソーがシステムに採用しており 5kW 級の小さなシステムで 65% の AC 発電効率を達成している^{12,13)}。このタイプのセルを用いた SOEC は、国内では日本特殊陶業などが開発しており、複数のメーカーとシステム化を進めている¹⁴⁾。デンマークの Haldor-Topsoe¹⁵⁾ もこの構造のセルを用いており、今後の大型 SOEC の開発に向けて年算 500MW の生産容量をもつ工場を建設したとされる。

○金属支持セルによるロバスト化

上記の燃料極支持型セルでは電解質に比べ燃料極機体の熱膨張率が大きいため、高温で焼結後に降温させると電解質には常に圧縮応力が働くことになり、薄い電解質でも機割れにくい状況が達成されている¹⁶⁾。セルのロバスト性をさらに改善する方法として注目されるのが英国 Ceres Power 社¹⁷⁾による金属支持形セル (図 2(f)) である。これは、支持体にレーザー穿孔した金属板を用い、その上に電極・電解質を成膜することで、機械的・熱的な衝撃に強いセルを達成している。Ceres Power 社はこの製造ライセンスを販売する形で各国のシステムメーカーと協業しており、日本でも昨年デンソーがライセンス契約を結び、大規模 SOEC の開発を始めている¹⁸⁾。

SOFC・SOEC の課題と展望

○耐久性・信頼性の課題

SOFC/SOEC の課題としてインターネット検索を行うと第一にあげられるのが「高温作動による材料劣化」である。しかし、これは必ずしも正しい表現ではない。例えば初期に開発された Westinghouse 社のセルは当初から高い耐久性を示していたし、他社と比較して運転温度が高い MHI のスタックも早くから 10 年以上の耐久性を示してい

る。劣化に関する課題は、むしろ中低温作動化に伴って採用した合金の使用や、高活性な電極材料・構造に起因するところが多い。実際の SOC での耐久性に対する対策は、システムの運用法やコストターゲット等とのバランスで決定される。機械的信頼性についても同様であり、例えば、単セルのサイズを大きくすればコスト的には有利になるが、それを重視しすぎると温度分布の発生やガス流配の乱れなどによって信頼性が低下する。現場の技術者の感覚と異なる経営判断がなされて開発が止まってしまった例もある。いずれにしても、劣化や信頼性低下に影響する因子が何で、どのような条件でそれが発現するかなど、現象に対する正しい理解をもとにしたセル設計が求められる。

SOFC の耐久性・信頼性については、NEDO のプロジェクトで産官学連携研究が活発に行われる中で、多くの課題が抽出され、解決法が見出されてきた。SOEC の課題の多くもこれらと共通しているが、SOEC 動作に特徴的な劣化モードも見出されており、現在、その詳細を解明する取り組みが行われている。また、SOEC では、その用途として比較的大規模のシステムが想定されるため、機械的信頼性に対する要請も厳しくなる。このため、東北大でも、セラミックスの破壊のメカニズムに立ち返った基礎的な現象解明の取り組みを開始した。

○コストの課題

SOFC/SOEC のシステムはガス・熱・電気の制御のための補機類等が高価格になりがちである。このため他の水素エネルギーシステムに比べ OPEX は小さいが CAPEX は大きいと評価される。ここでは詳細は論じないが、システムに関しては量産や大型化に伴って改善することが見込まれる。一方、セルスタックについては、Pt などの特に高価な材料は使用しないものの、図 2(e)の燃料極支持形では単セルの多くの部分を Ni-YSZ が占め、また、電解質支持形（図 2(d)）では高価な Sc を含む安定化ジルコニアが占める。空気極層は薄いですが、La や Co を含む酸化物が用いられる。このようにセル材料は安価とは言い難く、コスト低下のためにはセルの薄層化、もしくは、単セルあたりの出力の増加が求められる。金属支持形セル（図 2(f)）は、基板を安価な汎用ステンレスで作製すればコスト低下が期待でき、また、ロバスト性によって 1 セルの大面積化も期待できる。現在では金属支持形セル・スタックの製造に商業的に成功しているのは Ceres Power 社のみであるが、国内の複数の企業で開発が盛んに進められているので今後の展開に期待したい。

○変動再エネへの対応

SOEC は再エネ電力を用いた高効率な水素製造装置として期待されるものの、運転温度の変化を伴うような運転は得意ではないので、再エネの余剰電力での発電を考える場合には、特に入力電力が低下する夜間の運転方法に工夫が必要である。このため、現状での実証試験は系統電力も利用した定格運転を行う場合が多い。産業のプロセス熱等を含むエネルギー需要のすべてを再エネで賄うような未来では、電力として利用する以上の再エネが常に供給されることになるので、SOEC を常時運転させて、これらを備蓄可能な燃料に変換することは十分に意味がある。一方、水素を電力の平準化に用いようとする場合には、SOEC/SOFC のリバーシブル運転がひとつの選択肢と考えられる。上述のように、SOC は同一のセルを電解・発電の両モードに使うことができるので、昼間に再エネが余る時には電解で水素を製造し、夜間にはその一部を用いて電力供給を行う。これによりスタックの夜間の温度低下を防ぐことが可能となる。ただし、リバーシブル運転では、自身が製造した水素の一部を利用することになるので、発電を十分な高効率で行うことが必須となる。SOEC 運転では図 1 で説明したように大きな過電圧による熱中立運転が考えられるのに対し、SOFC ではなるべく過電圧を減らすことが高効率化の条件であるため、一般的には SOFC の電流は SOEC の 3 分の 1 程度となる。このため、システムのサイズは想定する夜間の電力供給量の数倍の水素製造能力をもつものになる。この意味でも、SO システムは、水素を電力の一時保存形態とするのではなく、基本的には有価物としての水素の供給を目的とすることが適切であろう。

○共電解への対応

SOEC は高温で動作するため、燃料側に CO_2 が供給されれば、これを容易に CO に分解することが可能である。このため、CCU を想定するエネルギー利用の文脈では、 H_2O と CO_2 を共電解して $\text{CO}+\text{H}_2$ の所謂「合成ガス」を製造する SOEC が常温の水電解に比べて有利となる。特に、後段に合成ガスからの燃料合成プラントを併設する場合には、その発熱反応で得られる熱を水蒸気発生に有効に利用することができ、総合的なエネルギー効率を向上させることが可能となる。現在、国内ではグリーンイノベーション基金などを利用して、大阪ガス・東芝などが関与するメタネーション¹⁹⁾や、JPEC などが受託する液体燃料合成の研究開発が行われている²⁰⁾。これらのプロセスに用いる SOEC では、動作温度を下げると電極での炭素の析出が問題となる。このため 800°C 以上での運転が望ましく、そのためには、図 2 の中では(d)の電解質支持形のも

のが適している。これは、高効率な燃料極支持セル (e) を高温で用いると、熱活性的な電極反応抵抗や電解質抵抗が小さくなり、熱中立のための大きな過電圧が燃料極支持層内でのガス拡散過程にかかり、炭素析出の誘発や電極の劣化の原因となるためである。この場合はセル電圧を熱中立よりも低く抑えて、温度維持を炉内に設けたヒーターで行うなどの対策が必要となる。

おわりに

以上、SOC 技術の概要、歴史、課題、展望を述べてきたが、再エネを主なエネルギー源とする将来において、SOC をどのように活用していくかは試行錯誤の状態である。

東北大学では、環境科学と工学の研究科間センターとして 2023 年に「SOFC/SOEC 実装支援研究センター」を立ち上げて、開発に携わる企業と大学、異業種企業間の交流を通して SOC の開発を推進する活動を行なっている。高いポテンシャルをもつ技術として、SOFC、SOEC が、将来のエネルギーシステムの重要な要素となることを願っている。

(1) <https://sunfire.de/en/news/worlds-largest-soec-electrolyzer-startet-up-at-nestes-rotterdam-refinery/>

(2) <https://www.aisin.com/jp/news/2025/010437.html>

(3) Kendall 本

(4) W. J. Dollard, *J. Power Sources*, 37, 133 (1992)

(5) K. Tomida, N. Hisatome, T. Kabata, H. Tsukuda, A. Yamashita, Y. Yamazaki, *Electrochemistry*, 77(5), (2009)

(6) <https://www.mhi.com/news/240425.html>

(7) https://www.aisin.com/jp/product/energy/cogene/enefarm/wp-content/uploads/2025/01/CAT.FC022-5_ENEFARMCATALOG2022.pdf

(8) https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2023/1765291_54087.html

(9) <https://www.bloomenergy.com/news/bloom-energy-announces-gigawatt-fuel-cell-procurement-agreement-with-aep-to-power-ai-data-centers/>

(10) <https://sunfire.de/en/news/worlds-largest-soec-electrolyzer-startet-up-at-nestes-rotterdam-refinery/>

(11) D. Stöver, U. Diekmann, U. Flesch, H. Kabs, W. J. Wuadackers, F. Tietz, I. C. Vinke, *ECS*



Proceedings Volumes, 1999-19, SOFC-VI, (1999)

(12) <https://www.miuraz.co.jp/news/newsrelease/2020/901.php>

(13) <https://www.denso.com/jp/ja/news/newsroom/2025/20250421-01/>

(14) <https://www.avl.com/ja-jp/press/press-release/niterra-and-avl-are-developing-a-disruptive-hydrogen-production-technology>

(15) <https://www.topsoe.com/solutions/technologies/soec>

(16) Mina Yamaguchi

(17) <https://www.ceres.tech>

(18) <https://www.denso.com/jp/ja/news/newsroom/2024/20240806-01/>

(19) https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2025/1788299_58387.html

(20) <https://www.pecj.or.jp/news/7678/>