

【燃料電池・水素特集】 SOFC 研究開発組織

国立エネルギー技術研究所(NETL)の SECA プログラム(米国)

目次

1. はじめに
2. プログラムの概要
 - 2.1 SECA コスト削減
 - 2.2 SECA 石炭ベースシステム
 - 2.3 FutureGen
3. 研究開発組織
 - 3.1 産業チーム
 - 3.2 中核技術チーム
 - 3.3 連邦政府の専門家
4. 取り組みと研究成果
5. 予算
6. DOE の「水素プログラム」との関係

1. はじめに

ソリッドステートエネルギー変換連合(Solid State Conversion Alliance : SECA)は、固体酸化物型燃料電池(Solid Oxide Fuel Cells : SOFC)の開発を促進する目的で発足したプログラムであり、米国全土の政府機関や産業、科学団体が参加している。SECA は、革新的材料の開発を通して SOFC のコストを削減することを目指しており、石油の輸入に対する依存を減らし、環境に配慮したエネルギー効率のよい代替エネルギー源を提供することを目標としている。

2. プログラムの概要

SECA プログラムは3つのフェーズに分かれており、フェーズが進むにつれて、燃料電池の効率およびコストの目標水準が高くなっていく。同プログラムの最終的な目標は、世界一クリーンな石炭燃料発電所を建築するという野心的な計画である「FutureGen^{注1}」に対して、燃料電池システムを提供することである。各フェーズの進行に関する詳細を表 1 に示す。

注1 米国エネルギー省主導の下で行われている硫黄酸化物(SOx)、窒素酸化物(NOx)およびCO₂を一切排出しない石炭火力発電所のプロトタイプ(試作品)設備の建設を目指すプロジェクト。NEDO 海外レポートの下記記事等を参照。FutureGen については、発行済みの下記 NEDO 海外レポートでも取り上げている。

NO.1018 <http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/1018/1018-03.pdf>

NO.1026 <http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/1026/1026-15.pdf>

NO.1036 <http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/1036/1036-15.pdf>

表1 研究開発の進行スケジュール

SECA コスト削減		
第1フェーズ	第2フェーズ	第3フェーズ
SECA 石炭ベースシステム		
第1フェーズ	第2フェーズ	第3フェーズ
FutureGen		
建設		稼働

表1からは、SECAの研究開発が次の3つのステージに分かれていることがわかる。

- コスト削減
- 石炭ベースシステム
- FutureGen

それぞれのステージの内容について、以下に説明する。

2.1 SECA コスト削減

現在、燃料電池技術の利用には、ディーゼル発電や天然ガスタービン発電などと比べてはるかに高額な費用がかかる。SECA コスト削減プログラム(Cost Reduction Program)の目的は、発電コストの削減である。このプログラムの各フェーズで期待される技術的な進歩を表2に示す。

表2 2005～2010年にかけてのSECAコスト削減の目標

	目標		
	2005年(第1フェーズ)	2008年(第2フェーズ)	2010年(第3フェーズ)
出力定格	3～10kW	3～10kW	3～10kW
コスト	-	-	400ドル/kW
効率(LHV)	35～55%	40～60%	40～60%

(LHV = 低位発熱量)

表3からは、第1フェーズにおいて可用性^{注2}、効率、耐久性、生産コストの各目標を上回る結果が達成されたことがわかる。拡張性のある大量生産技術によって製造された試作品により、90%の運転可用性が実現された。この結果は、第1フェーズの目標値であった80%を上回るものである。また出力5.4kWのシステムでは、目標値の35%を上回る41%の効率が達成された。

注2 ユーザーがそのシステムを利用できる時間が長いこと。様々な要素が合わさって可用性が構成される。信頼性が高く故障の頻度が少ないほど、修理や保守に必要な時間が少ないほど、あるいは故障しても別の装置に切り替えて運転できるなどバックアップ機能がついているほど、可用性が高いといえる。

表 3 SECA コスト削減の目標達成状況

	2005 年の目標	実績
コスト	-	746 ドル/kW
効率	35 ~ 55%	41% LHV-DC
電池性能の低下率	4%/1000 時間	3.6%/1000 時間
可用性	80%	90%

SECA では、発電コストが 400 ドル/kW で商業的に採算のとれる出力 3 ~ 10kW の SOFC を 2010 年までに開発することを目指しているが、これらの成果が達成されたことにより、同プログラムは軌道に乗ったといえる。

2.2 SECA 石炭ベースシステム

各フェーズで期待される技術的進歩を表 4 に示す。

表 4 2008 ~ 10 年にかけての SECA 石炭ベースシステムの目標

	SECA 石炭ベースシステムの目標		
	2008 年(第 1 フェーズ)	2010 年(第 2 フェーズ)	2015 年(第 3 フェーズ)
出力定格*	500 kW	2 MW	50 MW
コスト	-	400 ドル/kW	400 ドル/kW
効率 (HHV)**	45%	50%	50%

* 3 つの産業チームの能力を合計したもの

(HHV=高位発熱量)

** 石炭プラントの効率

これらの目標の詳細については、以下の URL を参照：

<http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/fuelcells/seca/minrequire.html>

2.3 FutuerGen

FutureGen は、官民による共同パートナーシップである。FutureGen の目的は、2003 年の時点では、CO₂ の排出をほぼゼロに抑えて電力と水素を生産する、石炭燃料で稼働する 275MW の発電設備を開発することであった。しかし、この計画は 2008 年に見直され、二酸化炭素回収・貯留(Carbon Capture and Storage : CCS)のための二酸化炭素分離技術に照準が絞られることになり、水素生産に関する部分は削除された。見直し後の計画では、石炭ガス化複合発電(Integrated Gasification Combined Cycle)プラント、あるいは CCS 技術を用いたその他の商業用クリーンコール発電プラントを設置することを目指している。SECA のプログラムで開発される SOFC は、複数の燃料を利用できるものとなる。つまり、これらの燃料電池をタービンと組み合わせれば、FutureGen のようなシステムの中で、高効率なハイブリッドシステムとして利用することができる。この目標を達成するために、燃料電池開発の規模を拡大し、大容量の燃料電池スタック^{注 3}を組み立てることに研

注 3 多数の燃料電池セルを重ねて 1 つのパッケージにしたもの。

究開発の焦点が定められる。これらの燃料電池スタックは、数メガワット級の中央発電設備を構成するビルディングブロックとなり、これらを使って、石炭合成ガスで稼働する実証用システムを作ることができる。これらのスタックはまた、たとえば燃料電池とタービンを組み合わせたハイブリッド発電など、その他の発電モデルでも利用できるようになる可能性がある（石炭ガス化燃料電池複合発電システム）。

3. 研究開発組織

コスト削減プログラム、石炭ベースシステム、FutureGen のそれぞれのプログラムで定められた目標を達成するために、SECA では次の 3 つのグループに分かれて研究開発を実施している。

1. 産業チーム(Industry Teams)
2. 中核技術チーム(Core Technology Programs)
3. 連邦政府の専門家(Federal Government Experts)

それぞれの流れについて、以下に詳しく説明する。

3.1 産業チーム

SECA プログラムは、6 つの産業チームの参加を得て実施されている。これらのチームの目標は、ターゲットとする市場に向けて SOFC システムを開発すること、中核技術チームと共同で研究開発要件を明確にすること、また、メーカーやエンドユーザーと協力して、高出力密度 SOFC の設計を改良し、大量生産を可能にすることである。

これらの 6 チームは、互いに競争相手である一方で、燃料電池システムのコスト削減にはマス・カスタマイゼーション^{注4}が必要だという点では考えが一致している。各チームはそれぞれ個別に、その産業における SECA システムの商業化を目指している

6 つの産業チームとそのプロジェクトについて、以下に詳しく説明する。

- アキュメントリクス社(Acumentrics)は、マイクロチューブラセルを使った出力 10kW のチューブラ（円筒型）SOFC 発電システムを開発している。同社がターゲットとする市場は、通信、軍事、住宅、および貨物自動車用の補助電源装置である。
- クミンズ・パワージェネレーション社(Cummins Power Generation)は、SOFCo-EFS ホールディングス社(SOFCo-EFS Holdings)との協力の下で、半導体業界で開発された低コストの多層配線技術を使った、キャンピングカー、商用車、電気通信の非常用電源向けの出力 10kW の SOFC 発電システムを開発している。

注4 顧客が商品構成（パーツ）を選択できるようにすることにより、可能な限り顧客の要望に応える形で大量生産する方式。

- デルファイ・オートモーティブ・システムズ社(Delphi Automotive Systems)は、バテール社(Battelle)との協力の下で、自動車用補助電源装置、および分散型発電システム向けの出力 5kW のプラナー(平板)型 SOFC を開発している。この技術には、パシフィック・ノースウェスト国立研究所(Pacific Northwest National Laboratory: PNNL)で開発された、革新的なシール材、燃料極(アノード)、空気極(カソード)が使用されている。デルファイは、ピータービルト・モーターズ社(Peterbuilt Motors Company)とともに、自動車の補助電源装置にこの技術を適用し、技術実証に成功した。
- フュエルセル・エナジー社(FuelCell Energy)は、バーサパワーシステムズ社(Versa Power Systems)、ガス技術研究所(Gas Technology Institute)、マテリアルズ・アンド・システムズ・リサーチ社(Materials and Systems Research, Inc.)、ユタ大学(University of Utah)、デーナ・コーポレーション(Dana Corporation)、EPRI^{注5}、および PNNL と協力して、燃料極支持型セルを使った低温でも動作可能な出力 3~10kW のプラナー型 SOFC 発電システムを開発している。
- ゼネラル・エレクトリック・パワーシステムズ社(General Electric Power Systems)は、幅広い発電ニーズに応えるために出力 3~10kW の一体型 SOFC システムを開発しており、シールレスな放射状設計(radial design)の実証を行った。
- シーメンス・ウェスティングハウス・パワー社(Siemens Westinghouse Power Corporation)は、運輸部門を対象として出力 3~10kW の SOFC 補助電源装置を、また住宅部門を対象として出力 7~10kW の SOFC 熱電供給(combined heat and power: CHP)システムを開発している。シーメンスは、スタック化^{注6}のコストを削減するために、すでに成功を収めていたチューブラ型設計を改良した。

SECA の各産業チームについて詳しくは、以下の URL を参照：

<http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/fuelcells/seca/industry.html>

2009 年 2 月、米国エネルギー省(Department of Energy: DOE)は、これらの中から第 2 フェーズに進むことのできる 2 つのプロジェクトを選出した。選ばれたのは、フュエルセル・エナジー社(バーサ・パワーシステム社と協力)と、シーメンスエナジー社のプロジェクトであった。両チームともすでに SOFC の実証を済ませており、今度は、評価のためにより大きなスタックを構成する技術を開発し、性能をさらに向上させることが期待されている。

^{注5} Electric Power Research Institute. アメリカの電力会社が資金を拠出して運営している大規模な研究機関であり、主に電気事業に関連する分野を研究している。

^{注6} 複数の燃料電池セルを重ね合わせた集合体(スタック)にすること。

詳しくは以下の URL を参照：

http://www.netl.doe.gov/publications/press/2009/09004-SECA_Projects_Move_Forward.html

3.2 中核技術チーム(Core Technology Program)

中核技術チームでは、産業チームのための研究開発が行われている。大学や国立その他の研究所が、産業チームによるプロジェクトの進行に影響を与える問題について研究している。各プロジェクトの開発を加速化するため、また開発内容の重複を減らすために、これらの研究の結果はすべての産業チームに対して公開される。

現在、同チームでは、研究対象となる各問題に対して、次のように優先順位が付けられている。

1. ガス・シール
1. インターコネクター
1. 故障解析
2. 空気極の性能
2. 燃料極 / 燃料処理
3. 材料コスト
4. パワーエレクトロニクス

現在、実施されているプロジェクトには、次のような分野のものがある。

- 材料と生産

この分野では、より高品質で低価格な燃料電池の生産を可能にするための新材料の調査・研究が進められている。また、燃料電池の大量生産を可能にするためのコスト効果の高い方法の調査・研究も進められている。

- 燃料処理

この分野では、燃料電池の燃料効率を向上させるとともに、燃料中の不純物による燃料電池の被毒を抑制するための改質技術の研究が進められている。

- パワーエレクトロニクス

この分野では、燃料電池内部の電力システム（たとえば直流(DC)から交流(AC)への変換など）の最適化を目指した研究が進められている。

- モデル化とシミュレーション

この分野では、将来の技術動向を予測し、今後改善の見込める分野を見つけるための研究が進められている。

- 周辺機器

この分野では、燃料電池の周辺機器システムやプロセス制御を改善するための研究が進められている。

これらのプロジェクトの詳細については、以下の URL を参照：

<http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/fuelcells/seca/core-tech.html>

3.3 連邦政府の専門家

連邦政府の専門家は、SECA プログラムの管理や、産業チームと中核技術チーム間の交流の推進、また、個々の企業レベルでの利害を超えた、国家レベルでの SOFC の応用についての検討などを行っている。

SECA プログラムは、米国立エネルギー技術研究所(National Energy Technology Laboratory : NETL)および PNNL の責任の下、DOE 化石エネルギー局(Office of Fossil Energy)と NETL 石炭戦略センター(Strategic Center for Coal)の支援を受けて行われている。NETL はプログラムの実施や、産業チームと大学や研究所間の連携を管理している。

4. 取り組みと研究成果

SECA プログラムのプロジェクトについては「3.1 産業チーム」の項で、またプログラムの研究テーマについては「3.2 中核技術チーム」の項で、詳しく説明した。

DOE の Web サイトには、産業チームに関するニュースとして、大規模発電に対応できる SOFC を開発するフュエルセル・エナジー社によるプロジェクトの進捗状況と、既存のチューブラ設計を改良したシーメンスパワー社の取り組みが特記されている。

また同サイトでは、中核技術チームに関するニュースとして、特に、次のような技術進歩について紹介している。

- アルゴン国立研究所とそのパートナーは、SOFC の空気極表面の化学的な性質や構造が、実験室の室温条件下であっても燃料電池作動中の高温条件下であっても、基本的に変わらないことを発見した。この発見により、実験室の室温の条件下においても、分析的な手法によって空気極材料を研究できる可能性があることがわかった。
- 米国海軍は、無人海底車の中などのような極限状態における SOFC スタックの性能について、独自に試験および評価を行っている。
- NETL は、石炭由来の燃料中に含まれる被毒性不純物による SOFC への影響を調べるための試験装置の導入を完了した。

- アレゲニー・テクノロジーズ社(Allegheny Technologies)とそのパートナーは、SOFC で利用できる、フェライト・ステンレス鋼を使ったコスト効率の高い商業用インターコネクター材料を開発し、実証を行った。
- フェニックス・アナリシス&デザイン・テクノロジーズ社(Phoenix Analysis & Design Technologies Inc.)と R&D ダイナミクス社(R&D Dynamics Corporation)は、温度に敏感なポンプ構成部材から高温の燃料電池ガスを隔離する新技術の実証に成功した。
- シンシナティ大学は、SOFC 作動中の高温状態から室温へ温度が低下しても、結晶化せず柔らかい状態が維持される、ひび割れないガラスシールを特定した。
- アルゴン国立研究所とそのパートナーは、クロム被毒の緩和方法を突き止めた。

これらの研究開発の詳細については、以下の URL を参照：

http://www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/fuelcells/fuelcells_seca.html

SECA による SOFC プログラムはまた、SECA 以外の国家プログラムに対して技術基盤を提供する役割も果たす。そのようなプログラムには、たとえば次のようなものがある。

- ビジョン 21 (FutureGen はこの中に含まれる)

<http://fossil.energy.gov/programs/powersystems/vision21/>

- 21 世紀貨物輸送パートナーシップ

<http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/about/partnerships/21centurytruck/index.html>

5. 予算

FutureGen は 2003 年にブッシュ大統領により開始され、10 年間で 10 億ドルという予算が割り当てられた。FutureGen は官民が共同で実施している事業であるため、政府は、民間のエネルギー企業からなる FutureGen 連合(FutureGen Alliance)とプロジェクトのコストを分担している。FutureGen で必要とされるコストの推定額は、2008 年までに 18 億ドルに増加した。FutureGen 連合によれば、同プロジェクトからは 3 億ドルの収益が見込まれており、この資金はプロジェクトに戻されるという。また、同連合の参加企業による出資は 4 億ドルになるという。2008 年の初め、世界中で、エネルギーインフラ関連の開発プロジェクトが、物価の高騰による影響を受けた。そのような状況の中、FutureGen のコストも上昇し、DOE は同プロジェクトに対する経済的な支援を引き上げた。

オバマ大統領の新しい景気刺激策である「米国復興・再投資法案(American Recovery

and Reinvestment Act)^{注7}」では、エネルギー効率と再生可能エネルギーの研究に対して 20 億ドルの予算が割かれており、このうちの一部が DOE の裁量で FutureGen に割り当てられる可能性がある。

FutureGen 連合の詳細については以下の URL を参照：

<http://www.futuregenalliance.org/alliance/members.stm>

米国復興・再投資法案の詳細については以下の URL を参照：

<http://appropriations.house.gov/>

6. DOE の「水素プログラム(The Hydrogen Program)」との関係

DOE の「水素・クリーンコール燃料プログラム(Hydrogen and Clean Coal Fuels Program)」は、石炭資源を水素などのクリーンな燃料に変換する新技術を開発することに取り組むプログラムである。このプログラムには、DOE のエネルギー効率化・再生可能エネルギー局(Office of Energy Efficiency and Renewable Energy)、化石エネルギー局(Office of Fossil Energy)、原子力局(Office of Nuclear Energy)、科学局(Office of Science)、および米国運輸省(Department of Transportation)が参加している。プロジェクトは、次の 3 つのセクションに分かれている。

- 石炭からの水素の生産
- 石炭からの高水素含有燃料の生産
- システム分析

FutureGen プロジェクトは、化石エネルギー局の下で実施されており、水素イニシアティブ(Hydrogen Initiative)からは資金を受けていない。また、同プロジェクトは、2008 年に再編されて以降、水素生産とは関わりがなくなった。しかし、水素プログラムの Web サイトには、FutureGen は「水素社会の実現のために重要なプログラムである」と記載されている^{注8}。

以下の DOE の Web サイトから、2008 年 9 月に発行された出版物「石炭から水素を生産する技術の開発・実証に関する複数年計画(Hydrogen from Coal Multi-Year RD&D Plan)」をダウンロードすることができる：

http://fossil.energy.gov/programs/fuels/hydrogen/Hydrogen_Systems_Analysis.html

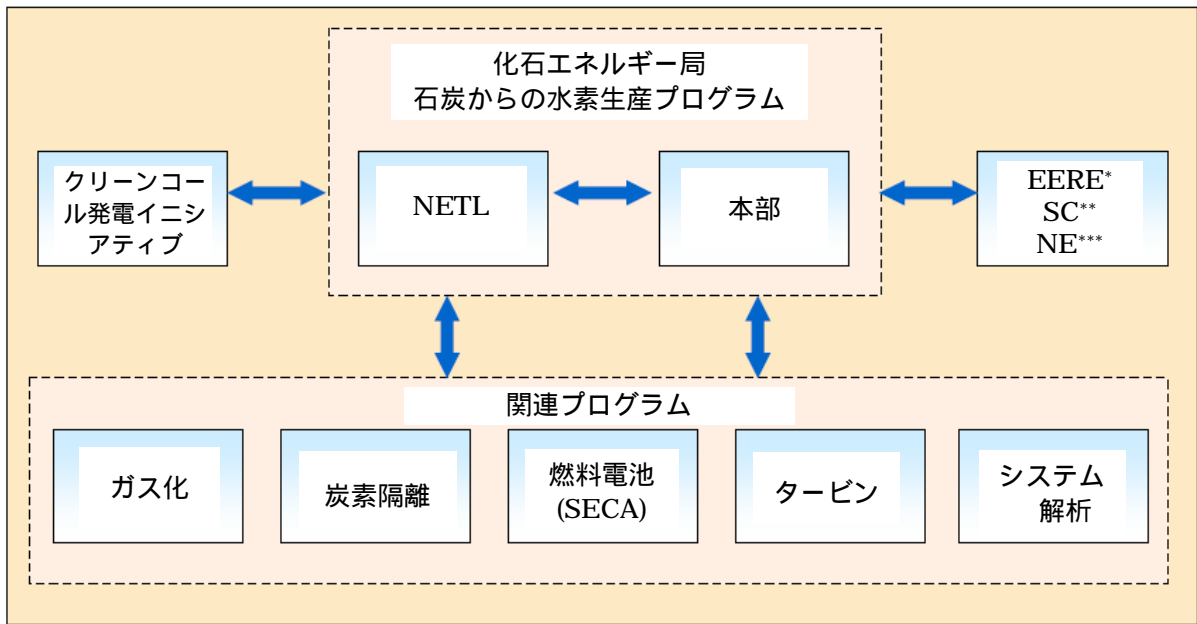
この文書^{注9}の 61 ページに掲載されている図 14 の中で、SECA は「石炭からの水素生産

注7 景気対策法案、景気刺激法案、景気回復法案などさまざまな名称で呼ばれている。

注8 <http://www.hydrogen.energy.gov/offices.html>

注9 <http://fossil.energy.gov/programs/fuels/publications/programplans/H2fromCoalRDDPlan08.pdf>

プログラム(Hydrogen from Coal Program)の「関連プログラム(Associated Program)」として位置付けられている(図1)。「石炭からの水素生産プログラム」の主な要素は、SOFCなどの燃料電池で利用するための高純度な水素の生産である。つまり、SECAの取り組んでいるSOFCは、これらの水素プログラムによって開発される高品質な水素の利用先となる。



(出所: Hydrogen from Coal Multi-Year RD&D Plan)

* エネルギー効率・再生可能エネルギー局
 ** 科学局 *** 原子力局

図1 「石炭からの水素生産プログラム」と関連プログラムの連携

この報告書のセクション 4.1 (17 ページ) には、次のように記されている。

「DOE 化石エネルギー局のクリーンコール部門と、プログラムの実施者である NETL 石炭戦略センター(Strategic Center for Coal)は、発電効率を向上させながら、石炭利用に伴う環境への影響を削減するために、石炭ガス化技術および二酸化炭素分離技術に関する研究開発を進めている。このようなガス化、分離、ガスタービン、燃料電池の開発努力は、「石炭からの水素製造プログラム」の下で直接行われるのではなく、クリーンコール部門や NETL によるその他のプログラムの一環として実施されている。そのため、これらの分野における研究開発の取り組みの中には、「石炭からの水素製造プログラム」に直接的な関わりを持たない内容も含まれている。」

編集: 久我 健二郎、翻訳: 桑原 未知子

(出典: SRI Consulting Business Intelligence Explorer Program)