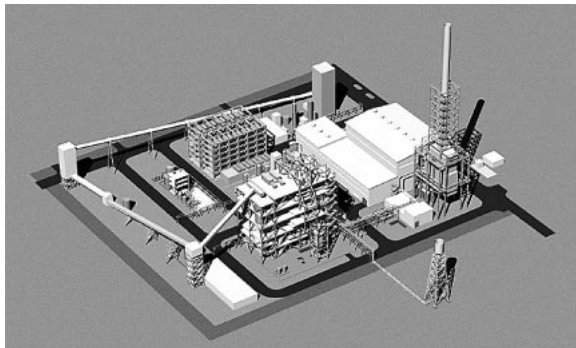


## 21世紀のエネルギー環境社会を拓く 燃料電池の開発状況

Latest Status of Fuel Cells that Open the Way to Environment Friendly Society in the 21 Century.



玄 後 義\*1  
Tadashi Gengo

小 林 由 則\*2  
Yoshinori Kobayashi

久 留 長 生\*3  
Nagao Hisatome

兼 平 真 吾\*4  
Shingo Kanehira

安 藤 喜 昌\*5  
Yoshimasa Ando

SOFCは、2004年度から4年間のNEDO委託研究で“マイクロガスタービン加圧コンバインド発電システム”、“200 kW級コージェネレーションシステム”の開発を進めている。PEFCは、JAMSTEC自律型無人巡航探査機“うらしま”に搭載し、2005年2月に、317 kmの世界最長連続航行を達成した。これらに加え、当社独自のSPWEや、IGCCと組み合わせたSOFC複合発電システム、更に再生可能エネルギーと組み合わせたクリーン複合発電システム等、21世紀を支える環境重視型のエネルギーシステムの商品化を推進している。

### 1. はじめに

本年2月に京都議定書が発効し、温室効果ガスの排出削減が急務となっているが、温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>排出量の削減には、短期的には高効率発電システムの普及による化石燃料の有効活用、長期的には再生可能エネルギーや水素燃料等の新エネルギーを合理的に組み合わせた新発電システムの実用化が必要である。

当社では、燃料の化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換し、発電効率を飛躍的に高めることができる燃料電池に早くから注目し、着実な開発の積み重ねにより、いよいよ実用化の段階に近づいている。

本稿では、当社にて商品化をすすめている固体高分子形燃料電池（PEFC：Polymer Electrolyte Fuel Cell）と固体高分子形水電解（SPWE：Solid Polymer Water Electrolysis）、及び固体酸化物形燃料電池（SOFC：Solid Oxide Fuel Cell）を機軸として、21世紀のエネルギー・環境社会を実現するためのキーテクノロジーである高効率新発電システムの開発状況の概要について紹介する。

### 2. 固体高分子形燃料電池（PEFC）

PEFCは高分子膜を電解質とした低温作動形燃料電池であり“低温で作動するため取り扱いやすく、起動性・運転操作性に優れる”“電解質が固体であるため、高い信頼性と長寿命が期待できる”、“小型でコンパクト、発電効率が高い”等の長を生かし、移動体用の動力源、あるいは業務用家庭用コージェネレーション

等の分散電源への適用が進むものと考えられる。

当社では高分子膜や触媒などの素材から改質器や電池本体等、コンポーネントからシステムに至るまでの開発を一貫して進めており、2003年には都市ガス1 kWコージェネレーションシステムの初号機をフィールド試験用として(社)日本ガス協会にサンプル出荷、続いて2003年には体積180Lのコンパクトパッケージ機の開発に成功し、AC送電端効率36%（LHV）、熱利用を含めた総合効率で80%以上（LHV）の性能を確認した。

一方、PEFCの小型コンパクト・高効率・良好な運転操作性と、純水素/純酸素燃料の適用により排出物を水のみとすることができる特長を利用することにより、水中航走体の動力源としての利用も考えられる。この場合、水圧の掛かる水中閉鎖空間での使用となるため、燃料供給システムや運転温度保持、高気密性等、陸上移動体用にはない特有の技術課題が付加される。当社ではこれら技術課題を克服し(独)海洋研究開発機構（JAMSTEC）の自律型無人巡航探査機“うらしま”の動力源として4 kW級の完全閉ループPEFCを製作した(図1, 図2, 表1)。2005年2月に駿河湾で航行試験を実施し、無人巡航探査機としては世界記録更新となる317 kmの最長連続航行を達成した。

PEFCは固体高分子膜を挟んで燃料水素と空気（酸素）を流し水を生成する反応において、燃料の持つ化学エネルギーを電気エネルギーとして取り出す装置であるが、逆に固体高分子膜を挟んで両側に水を流し電圧を加えると水が電気分解し水素と酸素が発生する。

\*1 原動機事業本部新エネルギー事業推進部長

\*2 原動機事業本部新エネルギー事業推進部技術グループ長

\*3 長崎造船所火力プラント設計部燃料電池開発課長

\*4 神戸造船所新製品・宇宙部次長

\*5 原動機事業本部新エネルギー事業推進部技術グループ首席



図1 無人巡航探査機「うらしま」 無人巡航探査機として世界最高記録更新となる317 kmの最長連続航行を達成（写真提供：（独）海洋研究開発機構）

表1 PEFC主要仕様

出力	4 kW (2 kW × 2)
運用温度	60
発電効率	54 % (発電端 LHV)
使用燃料	純水素 / 純酸素

表2 SPWE 電解試験結果

運転条件				結果	
電流密度 (A/cm <sup>2</sup> )	圧力 (MPa)	温度 (°C)	平均セル電圧 (V)	電流効率 (%)	エネルギー効率 (%)
1	0.1	80	1.6	100	91
1	0.7	80	1.6	98	89
2	0.7	83	1.9	98	77

電流効率 = 発生水素のエネルギー / セル投入エネルギー  
 エネルギー効率 = 発生水素のエネルギー / 電解装置投入エネルギー

SPWEはこの原理を利用した水素製造技術である。SPWEは他形式と比較して、“高分子膜がガスバリアとしても機能するため高純度水素が製造可能”“セル抵抗が低いため、大電流密度での運転が可能となり装置がコンパクト”等、水素製造技術の中でも高純度水素が高いエネルギー効率で得られる特長がある。

当社では、1993年から（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託研究“WE-NETプロジェクト”にて、将来の水素社会へ向けた水素ステーション用SPWE装置の開発を行ってきた。

2003年からはNEDOからの委託研究“水素安全利用等基盤技術開発事業”に参加し、本技術の低コスト化のための研究を進めている。当社では、水素製造技術課題である“高効率”“低コスト”を同時に克服することを目標に、発生H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>ガスのボイド率により水を循環させる“自然循環型装置”を考案した。これにより循環水ポンプが不要となり、さらに、当社の豊富なボイラ技術をベースにWE-NET成果を発展させたセパレータの改良等でこれを実現し、2004年より一体型自然循環装置（図3）を開発、電解試験を実施した（表2）。2005年度から製品化に向けた耐久性向上を中心に開発を進めている。



図2 “うらしま”搭載PEFC 水の中閉鎖空間での使用のため4 kW級の完全閉ループ式を採用。



図3 一体型自然循環装置・水電解システム “高効率”“低コスト”を同時に克服する、発生H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>ガスのボイド率により水を循環させる自然循環型を採用。

### 3. 固体酸化物形燃料電池（SOFC）

燃料電池の中でSOFCは、“電池単体の発電効率が高い上に、作動温度が1000℃レベルと高いため、高温の排出ガスを利用した複合発電システムとすることにより60%を超える高い発電効率が達成可能である”“燃料の内部改質が可能で、燃料中のCO含有を許容するため、天然ガスから石炭ガスまで多種燃料が使用可能である”“電解質が固体であるため、長寿命が期待できる”等の優れた特長がある。これら特長により、SOFCは中小規模コージェネ機から火力代替の大規模容量機まで幅広い用途への適用が期待でき、当社はSOFCの実用化・普及に向けて開発に取り組んでいる。

#### 3.1 円筒形SOFCの開発

円筒形SOFCは電源開発（株）と共同で1998年に加圧モジュールを開発し、最大出力21 kW、連続運転時間7000時間を達成した。2001年には、焼結法により製造したセルを用い、内部改質方式の加圧10 kW級モジュールを開発、連続発電755時間を達成した。現在はSOFCの早期確立を目的に、電源開発（株）が150 kW級システムを2006年に設置、運転予定として進めている。

一方、2004年より4年間の計画で、NEDOからの委託研究にて、マイクロガスタービン（MGT）との組み合わせによる世界最大級の加圧コンバインド発電システムの開発を行っている（図4）。

円筒形セルは基体の外表面上に燃料極、電解質、空気極の薄膜を積層して発電部を構成し、隣接する発

電部の間をインターコネクタで直列に接続しているものである。円筒形セルチューブの外観を図5に示す。当社ではNEDOからの委託研究“アドバンス円筒形セルの開発”にて、この円筒形セルの高出力化に取り組んできた。円筒形セルでは電流を長手方向に流すため空気極の抵抗値低減とともに、空気極と電解質の界面の抵抗値低減がセル性能向上に有効であり、極材料や接合部の改良により高出力化を図っている。加圧状態でのセルチューブ発電試験結果を図6に示す。MGTとのコンバインドサイクルでのSOFC運転圧力である圧力0.4 MPaにおいて0.21 W/cm<sup>2</sup>の出力密度を達成しており、今後も更なる高出力セルの開発を進めていく。

モジュールは、2001年から信頼性向上のための本格的な技術開発を進めてきた。円筒形セルチューブを束ねて燃料・空気の供給、集電を行う最小単位のカートリッジを構成し、カートリッジを複数個並べてサブモジュールを構成して、電氣的に直列に接続して電流の取り出しの単位とし、さらに、サブモジュールを圧力容器の長手方向に複数並べて拡張性の高いモジュール構成としている。

MGTの燃焼器は、SOFCで化学エネルギーを大部分消費したあとの低カロリー燃料（都市ガスの1/10の発熱量）が供給されるため、これを安定燃焼する技術が必要となるが、産業用ガスタービンで培った高炉ガス等の低カロリーガス燃焼技術を適用している。また、SOFCとMGTの連携時には圧力と温度のシステムとしての制御技術も重要な課題である。このMGT加圧コンバインド発電システムでは、発電効率50%以上（LHV）を性能目標としている。

### 3.2 一体積層形SOFCの開発

一体積層形 MOLB形：MOno-block Layer Built形)



図4 MGTコンバインド発電システム マイクロガスタービンとの組み合わせによる世界最大級の加圧コンバインド発電システム。



図5 円筒形セルチューブ 長さ1500 mmのセルチューブ。

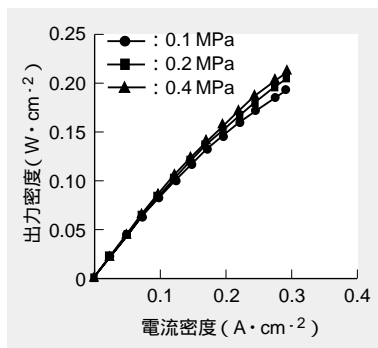


図6 円筒形セルチューブ加圧試験結果 マイクロガスタービンとのコンバインドサイクルでのSOFC運転圧力である0.4 MPaにおいて0.21 W/cm<sup>2</sup>の出力密度を達成。

SOFCは、中部電力(株)と共同で1996年に 200 mm × 40段 × 2スタックよりなる5 kW級電池を開発し、出力密度0.23 W/cm<sup>2</sup>を達成した。2001年にはセル積層方式を改良した連結式一体積層形モジュールを開発し、最大出力15 kW、内部改質運転2473時間を含む累積発電時間7500時間を達成した。

2005年3月から9月に開催された愛知万博のワンダースカス電力館で日本初となるコージェネレーションシステムの実証試験を行うとともに、NEDOからの委託研究にてマイクログリッド電力網の電源の1つとしても出展し(図7)、平板形SOFCとしては、100%内部改質にて世界最高出力となる30 kWを達成した。

一方、2004年より4年間の計画で、NEDOからの委託研究にて平板形としては世界最大級の200 kW級コージェネレーションシステムの開発を行っている。

電池は発電反応に関与する発電膜(燃料極/電解質/空気極)、それらを集電・接続するインターコネクタ、ガスシール材、及び燃料・空気をそれぞれ電池に供給するマニホールドよりなる発電スタックにて構成される。図8にMOLB形SOFCスタックを示す。発電膜は凹凸状に加工した高性能な三次元ディンプル形状を採用して燃料・空気それぞれのガス流路を確保する機能を持たせるとともに、コンパクトなシステム構築を可能にしている。また、現在の200 mm電池に対し、更なるモジュールコンパクト化のため、大面積化を図った大型電池の開発を進めている。この大型電池の発電試験結果を図9に示す。電流300 Aにおいて、出力2 kWを達成し、高出力化が可能であることを確認した。

モジュールは、NEDOからの委託研究“熱自立モジュールの技術開発”にて、2002年から出力密度0.35 W/cm<sup>2</sup>の200 mm電池を用いたヒートサイクル試験、



図7 NEDO新エネプラント向け40 kW級コージェネレーションシステム 愛知万博にNEDOからの委託研究にてマイクログリッド電力網の電源の1つとして出展。



図8 MOLB形SOFCスタック 発電膜, インターコネクタ, ガスシール材, 及びマニホールドよりなるサイズ 200 mm の発電スタック.

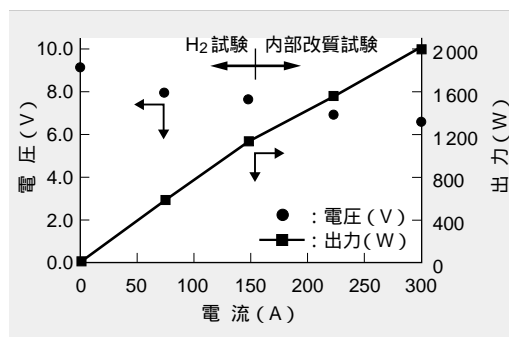


図9 大型電池発電試験結果 電流300 Aにおいて, 出力2 kWを達成.

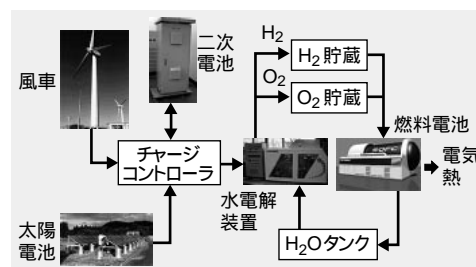


図10 クリーン複合発電システムの構成例 再生可能なエネルギー供給システムと, 燃料製造システム, 発電システムで構築される.

及び運転制御方法検証試験を実施し, 電池, モジュール各構成要素の温度追従性, 制御特性データを取得した上で, デジタル制御システム (DCS) を採用した10 kW級モジュールを製作した. モジュール構造は数100 kW級モジュールの概念設計に基づき, 基本単位モジュールを切り出した構造とし, 大容量化への拡張性を考慮した.

現在, それらを反映して200 kW級コージェネレーションシステムのモジュール構造の検討を進めている. 200 kW級コージェネレーションシステムは中小規模の分散型電源市場等への投入も狙ったシステムで, 発電効率45%以上 (LHV), 総合効率80%以上 (LHV) を性能目標としている.

### 3.3 実用化への取り組み

これまで当社はSOFCの開発を着実に進め, 現在では発電システムとしての技術検証及び普及のための製品化に取り組む段階に近づいたと考えている.

将来の大型火力発電所の代替機種として, 高効率期待できるSOFC+ガスタービン+蒸気タービンの複合発電システムこそが, 当社が狙う究極のSOFCの製品コンセプトであるが, 開発の初期段階におけるSOFC製造設備の量産体制等も考慮して, まずは小型のシステムでMarket Inできる市場を見据え, 既設設備の効率改善, 常圧システムでの市場開拓を普及加速の可能性として検討を進めている.

将来の大型火力発電所の代替機種と位置付ける天然ガス焚き数100 MW級SOFC+ガスタービン+蒸気タービンの複合発電システムでは送電端発電効率70%以上が期待でき, 更に石炭を燃料とした数100 MW級石炭ガス化炉 (IGCC) + SOFC + ガスタービン + 蒸気タービンの複合発電システムでも送電端発電効率60%以上を目論んでおり, 今後はシステム化技術を早期に確立させ, 製品化に向けて邁進する所存である.

## 4. ま と め

CO<sub>2</sub>排出量の削減が急務となっている今日, 短期的には化石燃料を利用した高効率発電システム, そして, 長期的には化石燃料枯後のエネルギー社会を支えるシステムとして, “太陽光” “風力” 等再生可能なエネルギー供給システムと, 燃料製造システムである “水電解装置” により水素としてエネルギーの貯蔵を可能とし, 発電システムである “燃料電池” を需要に応じて組み合わせることで構築される “クリーン複合発電システム” (図10) の実用化が期待される.

当社では, 既に “風車” “太陽電池” を商品化しているが, “燃料電池” “水電解装置” についても技術を確立し, 早期商品化を進め, 21世紀のエネルギー環境社会構築に貢献していきたいと考えている.

最後に, これら製品の技術は委託研究又は, 共同研究の中で培われたものであり, この場を借りて委託元, 共同研究先に対し, 謝意を表す.

### 参 考 文 献

- (1) Yamamoto, I. et. al., Research and Development of Long Cruising Autonomous Underwater Vehicle, Proc. UUST05 (2005)
- (2) 加幡達雄ほか, 円筒形SOFC高効率コンバインドサイクルシステムの開発, 第12回燃料電池シンポジウム講演予稿集 (2005) p.213
- (3) 武信弘一ほか, MOLB形SOFCの開発, 第12回燃料電池シンポジウム講演予稿集 (2005) p.208



玄後義



小林由則



久留長生



兼平真吾



安藤喜昌