

特集

進歩する燃料電池技術

溶融炭酸塩形燃料電池

—パイロットプラントから実用化—

MCFC —Through Pilot Plant towards Practical Use—

幹 淳*

Atsushi Miki

1. はじめに

溶融炭酸塩形燃料電池 (MCFC) は、高い発電効率が得られ、燃料として天然ガスのほか、石炭ガス化ガスなども利用できることと、作動温度が約650°Cで金属材料が使えることなどの利点があり、在来火力代替の大容量発電や分散型発電など、広汎な分野に適用できるものと期待されている。

当研究組合は、通商産業省工業技術院のニューサンシャイン計画に基づく新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からのMCFC発電システムに関する受託研究を効率的に実施することを目的とし、電力、ガス、メーカー、研究機関の法人が組合員となり、研究開発を協力して効率的に推進してきた。

研究開発スケジュールを表1に示す。本プロジェクトは通商産業省工業技術院のムーンライト計画の一環として81年から10cm角程度の単セルによる基礎研究として開始されたが、93年11月からニューサンシャイン計画に引き継がれ、99年度には実用規模と考えられる1m²級スタックを用いた1,000kW級発電プラントの運転研究が多岐の成果を得て終了した。2000年度からは商用化の実現を加速する次期フェーズを開始した

ところである。

本報告では、これまで当研究組合が実施してきた研究開発の成果について紹介すると共に、将来展望について概観する。

2. 1,000kW級発電プラントの開発

1,000kW級発電プラントは、将来のMCFC発電の実用化に向けて、基本的なシステムを確立するため、スタック及びシステムとしての性能・運用性を検証し、実証プラントあるいは、将来の事業用発電プラントとしての運用性を評価するものである。主要な開発目標としては、発電効率45%以上、スタック電圧低下率1%/1,000時間を掲げており、5,000時間の運転研究を設定した。1,000kW級発電プラントは実証プラント数10MW級を想定し、その機器構成でシステムを構築している。運転研究の中では、第2期前期開発で得られた各要素開発成果を組み合わせ、システムとして各要素が相互に有機的に機能することを検証し将来の実証プラントの設計に反映する。中部電力川越火力発電所内の「川越MCFC発電試験所」に建設された発電プラントの外観写真を写真1に示す。

発電プラントは、スタック (燃料電池本体) 及び周

表1 研究開発スケジュール

年度 プロジェクト名	ムーンライト計画										ニューサンシャイン計画				2000~04	2005~
	'81~'86	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99		
項目	第1期			第2期前期				第2期後期				第3期				
外部改質型スタック				10kW	20~50kW	100kW	1000kW (250kW×4)				1000kW級 発電プラント		高圧 ショート スタック	実証プラント		
周辺機器				要素開発1000kW級機器			発電プラント機器				運転研究					
1000kW級発電プラント				基本仕様		設計		製作								
内部改質型スタック				5kW		30kW		200kW				加圧小型 発電シス テム		分散型発電 プラント		
高性能スタック				高性能化技術開発				長寿命化技術開発								
材料技術				基本材料技術検討				新材料開発						高性能モ ジュール	石炭ガス化 複合発電 プラント	
石炭ガス化ガス対応技術				要素開発				システム研究								
トータルシステム				プラント概念設計				導入ビジョン検討								

予備中間評価 △ 最終中間評価 △ プレ最終評価 △ 最終評価

* 溶融炭酸塩型燃料電池発電システム技術研究組合
技術部部長

〒103-0004 東京都中央区東日本橋1-1-4 東日本橋M-1ビル



(250kW級スタック4基の外観)

写真1 1,000kW級MCFC発電プラント

辺機器（燃料系、スタック周辺系、排熱回収系、交流変換器及びシステム制御系等）で構成され、電池本体は250kW級の直交流型及び平行流型各2基の外部改質型スタックから成り、0.5MPaで運転される。発電プラントの心臓部である250kW級スタックの開発については、日立、IHI（石川島播磨重工業）が97年4月より組立、焼成、初期性能の工場試験を開始した。

電池系A、すなわち直交流型250kW級スタックは電極面積 1.2m^2 、積層セル数300、40kW級モジュール6基から構成される。常圧で測定された平均セル電圧の電圧-電流密度特性の実測値は設計値を上回っている。この特性から発電プラントの運転条件に対する性能を予測すると0.815Vとなり、計画値0.786Vに対して3%以上の設計裕度があることが判明した。

電池系B、すなわち、平行流型250kW級スタックは電極面積 1m^2 、積層セル数280、125kW級サブスタック2基から構成される。常圧で測定された平均セル電圧の電圧-電流密度特性から、発電プラントの運転条件に対する性能を予測すると0.781Vとなり、計画値0.763Vに対して2%以上の設計裕度があることが判明した。

電池本体以外の主要機器の単体試験を経て、模擬スタックを用いたBOP（周辺機器：電池本体を除く機

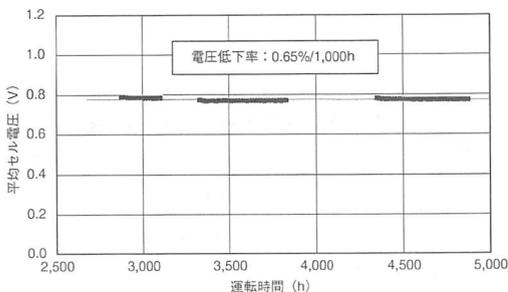


図1 1,000kW級発電プラントの平均セル電圧の経時特性（電池系A）

器の総称)の性能・制御性及び信頼性の確認、運転方法の確立、並びにプラント全体の性能予想を目的に、97年度までに検討したPAC (Process and Control) 試験方法及び運転試験方法をもとに、98年3月からプラントのPAC試験に着手した。PAC試験では、排熱回収系、燃料系、電池系の順で行い、プラント全体の総合試験を進め、プラントの静特性を中心とした調整を行い、運転方法の確立、定格条件でのプラント性能評価に必要なデータの収集を実施した。

スタックは99年2月に川越MCFC発電試験所に据付られ、3月から総合調整を行い、7月にはスタックの昇温が完了し、7月末から本格的に発電を開始した。これまでに、スタックの地絡トラブルが2度見られたものの、9月には夏季定格出力900kW、11月には定格出力1,000kWを達成し、2000年1月末に運転試験を終了した。この間、運転時間4,916時間、発電時間2,669時間、発電電力量2,103MWh、発電効率46.1%を達成した。またスタック性能についても、初期電圧、電圧低下率とも目標を満足する結果を得ている。図1、2にスタック電圧の経時特性を示す。これらによりMCFC発電システムの成立性を検証することが出来た。

3. 内部改質型200kW級スタックの開発

電池内部で燃料の改質を行う内部改質方式のMCFCは更に高い発電効率を達成するとともに、コンパクトで単純なプラント構成が可能である。内部改質型200kW級スタックは 1m^2 級セル220枚と前段改質部である平板状改質器36枚の積層物である。スタックは2個のサブスタック（100kW級）に分割され、各サブスタックはセル110枚（平板状改質器18枚）で構成される。燃料排気及び酸化剤の給排気は各ブロックの上端板を介して実施し、燃料（天然ガスとスチームの混合ガス）は各平板状改質器へ直接供給する。サブスタックは架台を介して上下に設置し、200kW級スタック

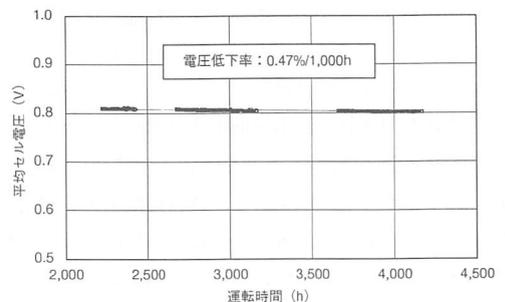


図2 1,000kW級発電プラントの平均セル電圧の経時特性（電池系B）

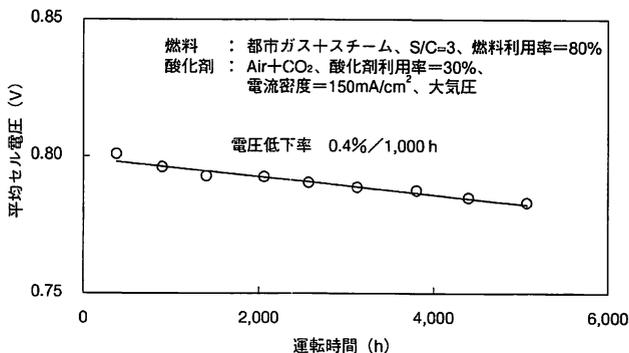


図3 内部改質型200kW級スタックの平均セル電圧の経時特性

とする。

第1サブスタックの試験は、98年10月初旬に完了し、第2サブスタックの試験は99年2月に完了した。実測データは $0.12\text{A}/\text{cm}^2$ （定格 $0.15\text{A}/\text{cm}^2$ の80%部分負荷）であるが、110セルの平均セル電圧は815mVを示した。97年度実施した同仕様の先行機（30kW級）データをもとに定格条件での特性を推定すると、200kW級スタックの目標電圧である0.8V（0.3MPa加圧換算）を上回る見込みを得た。

関西電力尼崎燃料電池発電試験所では、98年11月から試験設備のPAC試験が行われた後、99年4月に電池サブスタックが搬入、据付された。6月には昇温を開始し、6月末から運転を開始した。初発電の後、7月に定格出力を達成した。これまでに、ボイラ等周辺装置のトラブルや停電による停止が起こったが、いずれも電池スタックに影響を及ぼすことなく復旧し、2000年2月に運転試験を終了した。この間、運転時間5,259時間、発電時間5,036時間、発電電力量1,134MWhを達成した。またスタック性能についても、初期電圧、電圧低下率とも目標を満足する結果を得ている。図3にスタック電圧の経時特性を示す。

4. 長寿命化技術の開発

本開発はスタックの長寿命化・高性能化を目的としており、NEDOの2つの開発目標を達成するように進めてきた。第1の目標はショートスタック試験による1万時間の運転で、電圧低下率（劣化率）が $0.25\%/1,000$ 時間程度であることを確認すること。第2の目標は小型単セル試験により、燃料電池の劣化機構を解明し、寿命評価法を確立するとともに、新しい材料やスタック構造の開発研究により実用上必要とされる4万時間程度の寿命を見通すことである。

ショートスタック試験として、スタックメーカ3社

はそれぞれLi/Na塩の採用、電極や電解質板等の材料開発および腐食変形に追従できるエッジ部のソフト化構造等の改良を進め、最終年度での1万時間の運転を目指した。0.5m²級外部改質平行流型によるショートスタック試験は製作上の不具合により1万時間の試験はできず、次期フェーズで再度試験を行うこととなった。1m²級内部改質型によるショートスタック試験は約5,000時間の運転であったが、約7,000時間のホットタイムに対する電圧低下率は $0.25\%/1,000$ 時間で、ほぼNEDO目標を達成する結果を得た。結果を図4に示す。

次いで、寿命評価手法の確立のため、電力中央研究所を中心に一連の小型単セル試験で電池性能と劣化率の定式化（寿命予測式）を行い、また各メーカは数ケースの小型単セル試験で寿命予測式のパラメータを算出し、数1,000時間の運転試験で4万時間の電池寿命を見通すことを目指した。

寿命予測式の導出のため、電池寿命に影響を与える因子を考慮し運転温度と運転時間、電解質充填量、Ni短絡、カソード水蒸気分圧、システム条件長時間運転の5種類の試験を行った。試験は95年度から99年度まで合計32ケース実施し、主として電解質の損失や電極構造の変化による緩慢な劣化を記述する寿命予測

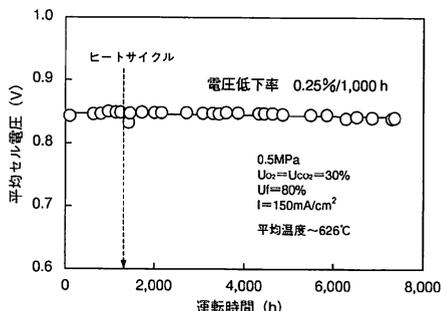


図4 内部改質型ショートスタックの経時特性

式及びNi短絡による急激な劣化を記述する式（Ni短絡発生予測式）を提案した。

緩慢な劣化を記述する寿命予測式は電力中央研究所が従来から検討してきた電圧表示式を基に、新たに式中の係数の経時変化を表現できるように改良した。Ni短絡発生予測式も同様に電力中央研究所で検討してきた式を基に定式化した。

今後さらに、寿命評価方法の高度化を図り、4万時間の見通しを得る技術を確立する予定である。

5. 次期プラント開発構想

1,000kW級発電プラントの場合、燃料電池スタックは250kW×4基、高温カソードガスリサイクルブロワは500kW×2基、その他はすべて1,000kW容量となっている。次期の開発では、この1,000kW級発電プラントの技術を踏まえながら、要素研究として並行して開発を進めている長寿命化、高性能化の最新技術を適用して、数MW程度の分散型発電プラントを実証していくことが必要と考えるが、最終的には石炭ガス化と組み合わせた火力代替用大型集中型発電プラントに進めていく。

次期MCFC発電設備はMCFC発電ユニットと既存のガスタービン（GT）により構成する。システムの基本となるMCFC発電ユニットは燃料電池モジュール、アノードリサイクルブロワ、カソードリサイクルブロワ、インバータ等により構成する。また、燃料電池モジュールは燃料電池スタック本体、リフォーマ、燃料予熱器等を一つの容器内に収納して構成する。燃料電池モジュールは高温機器を一つの容器内に収納して高温機器、配管の集中化による放散熱量の低減を図る。

以上の構想を基に、内陸設置を想定した分散型として7MW級MCFC発電設備を提案している。図5に鳥瞰図を示す。本設備は750kW級の燃料電池モジュール2基からなる1.5MW級MCFC発電ユニット4基と定格出力2MW級GT1基により構成される。本発電システムの送電端効率は52.4%であり、総合効率は52.8%である。総合効率については更に温水回収温度を下げれば高くなる。また、本GTは定格2MWであるが、発電効率を優先させる運用を行った場合、ガスタービンへの燃料供給を減少させるため1.3MW程度の出力となる。従って、GT出力を定格とする運用を行った場合、総出力は上昇し、熱回収量も上昇する。このように、燃料電池出力に対してGT出力を変えることにより、熱電比を変える運用が可能である。

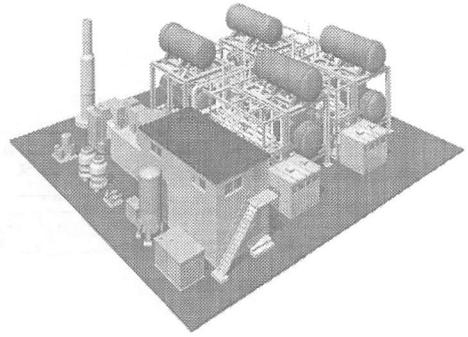


図5 7MW級MCFC発電プラント鳥瞰図

このように、MCFC発電ユニット及び燃料電池モジュールは仕様の標準化を目標に設計しており、発電規模の選定はMCFC発電ユニット数とMCFC出力に見合うGTの選定により行う。MCFC発電設備の運転圧力はGT運転圧力によって決まる。最近の高効率GTの場合はタービン入口温度は1,000℃以上であり、圧力も1MPa以上である。

MCFCの高圧運転は循環ブロワ等の補助機動力低減やプラント構成機器・配管のコンパクト化及び電池性能の向上に寄与するが、カソードガス中のCO₂分圧の上昇に伴うカソード電極からのNi溶出が懸念される。カソードから溶出したNiイオンはアノード側で還元されNi金属として電池内部に析出し、電気的短絡を起して電池性能劣化の要因となる。これまでのMCFCのシステムではアノードで生成したCO₂はそのままカソードで消費する構成となっていたが、アノード排ガスの一部をガスタービンの燃焼器に供給し、カソードへ供給するCO₂量を調整するシステム構成とした。これにより、カソード入口でのCO₂分圧をシステムとして下げることができ、Ni溶出抑制が可能となる。

6. 将来展望

MCFCは開発初期に設定された電池本体の性能目標値を、1,000kW級発電プラント規模でほぼ満足するレベルにまで向上を遂げており、加えて、新しい電解質の適用等によって、さらに高効率なプラントを構成できる状況へと進展しつつある。将来的にはACC（Advanced Combined Cycle）プラントに適用されている1MPa級動作のGTと組み合わせることができれば、60%前後の高効率も達成できる。

今後、電池の低コスト化や信頼性確保はなお重要である。現状の課題についてはほとんど解決の見通しがあるが、60%程度の効率達成のためには高圧化（1

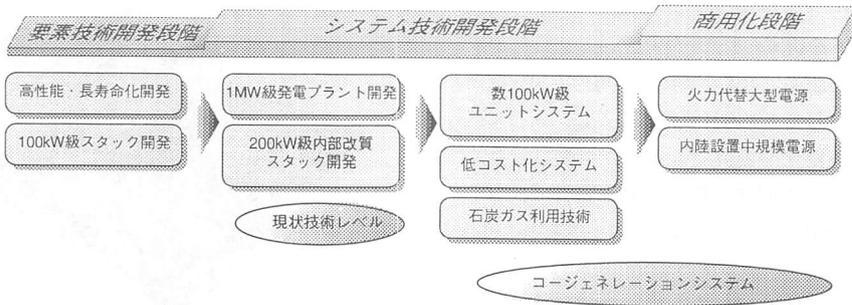


図6 MCFC実用化のシナリオ

MPa以上)が必要であり、より長寿命を求める場合には、Ni短絡に関わる寿命制約の問題が今後解決すべき主要課題となる。一方、プラントとしての運用性や環境性の検討は今後さらに重要性を増してくるものと想定される。これらの点からも電池本体の高積層化が重要である。また、最終的な大型プラントに向けての1段階として、モジュール化(規格化)も重要な課題になるものと予想される。さらに、最終的に石炭利用技術としての適用を図るために重要な、ガス中不純物の影響の解明やガス精製技術の開発も、すでに着実に進められている。

経済性については、特に電池寿命の影響が大きいが、当面の目標とされる4万時間の見通しは得られつつある。初期導入期には割高にはなるが、初期市場が形成され、信頼性が確認され、認知度が高まれば火力代替用として電池生産量が増え、200MW/年程度の市場が確立されれば、従来の火力との競合コストを実現できる。また、市場規模の小さい初期導入期には、短時間で電池を交換する方が経済的にも有利になり、導入の進展に応じた段階的な性能目標の設定が重要となる。今後は、高効率化のみを追求するのではなく、立地環境上の利点や電力系統における利点を最大限に発揮できる構成として、運用上の制約等を明らかにしつつ、検討を重ねることがトータルコストの低減の観点から必要である。また、導入各段階におけるユーザー、メーカー他の適切な役割分担についても議論していく必要がある。

電力用としては、最終的な利用形態は石炭ガス化技術を適用した高効率の複合発電と位置づけられるが、その実現に至る過程では、天然ガスを利用する高効率発電としての活用も考えられる。導入・実用化のためには、短期的には天然ガス利用プラントとして実現することによる技術確立、量産による低コスト化なども重要な方策と考えられる。

今後の導入シナリオならびにそれに繋げるための開発シナリオの一案を図6に示す。当面、天然ガス利用を念頭に置いての、基本モジュール開発、関連技術の確立を通して、基本モジュールによる初期導入・実証、その結果を踏まえての多数のモジュールで構成される万kW～数万kW規模のプラントによる量産、低コスト化のシナリオが想定される。また、この間数万時間オーダーの運用プラント用モジュールの実証、実用化に展開していくことが考えられる。さらにこれらに並行して、MCFC発電の特長を生かした内部改質型システムやCO₂分離型システムの検討、実証などを行い、MCFC発電プラントの利用形態をより幅広く展開し、さらに信頼性向上、コスト低減を図っていくことが必要と考えられる。これらの点から、MCFC発電システムは近い将来電気事業への導入の可能性を十分にものとも考える。

7. おわりに

ニューサンシャイン第2期計画は99年度で終了したが、2000年から2005年まで新たなフェーズの研究開発を実施する。近年のコンバインドサイクル発電の急速な発展を受け、次期フェーズでは高圧スタックの開発、数100kW級モジュールの開発等を行い、商用化への道を加速する予定である。

最後に、当組合の研究開発の推進に関して、有益なご指導を賜っている通商産業省工業技術院ニューサンシャイン計画推進本部、NEDO燃料・貯蔵技術開発室、その他の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 幹淳, 伊藤和彦: 「実用化をめざす溶融炭酸塩形燃料電池(MCFC)の展望」, H12年電気学会全国大会シンポジウム(2000.3)
- 2) K. Ito, et. al.: "Development of Large Scale MCFC Power Plant", 3rd IFCC, (1999.12)