

第 2 章

2

これまでのMCFC開発（その成果と課題）

MCFCの研究は1920年代にドイツで始まり、オランダやアメリカでの基礎研究を経て、1980年頃から我が国とアメリカで国家プロジェクトに組み込まれて開発が進んできた。当研究所では1981年に研究を開始して、同年にスタートしたムーンライト計画に参画し、スケールアップに合わせながら性能評価と技術開発を実施してきた。同計画では1999年に1,000kWのプラントが発電効率45%の目標を達成し、現在さらに高性能化を目指した開発に引き継がれている。

第2章 これまでの MCFC 開発（その成果と課題） 目次

横須賀研究所 エネルギー化学部長 渡辺 夫
 横須賀研究所 エネルギー化学部 上席研究員 伊崎 慶之
 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 課長 安井 肇一
 横須賀研究所 エネルギー化学部 上席研究員 麦倉 良啓

2 - 1 内外における MCFC 開発の経緯 23
 2 - 2 1,000kW 発電プラントの成果と課題 26
 2 - 3 高効率発電実用化への道筋 28
 2 - 4 現在の国の開発プロジェクト 29
 2 - 5 MCFC の位置付けと開発の方向性 33
 コラム3：外部改質と内部改質 35



渡辺 夫（1981年入所）
 入所以来、燃料電池の技術開発に一貫して従事。特にMCFCのセル・スタック運転・評価手法の開発、ガスサイクル運転手法の開発、システム性能解析・評価などを行うと共に国の開発計画にも携わってきた。また、SOFCセル・スタックの開発も推進している。高効率な高温型燃料電池の実現に是非寄与したい。

（2-1、2-3、2-5執筆）



伊崎 慶之（1984年入所）
 入所以来、MCFCの研究開発に従事。主に、実面積スタック化技術の開発および運転・評価法の研究を進めてきた。さらに、1,000kW級発電プラントの運転研究にも直接携わってきた。今後も、社会に役立つMCFC発電プラントの実現を目指して高効率・低コスト化ならびに信頼性向上に取り組んでいきたい。

（2-2執筆）



安井 肇一（1984年中部電力(株)入社、2003年より、MCFC発電システム技術研究組合(MCFC研究組合)に出向）
 出向して以来、国プロであるMCFC発電システム研究開発の計画、管理および組合全体の研究のとりまとめ業務に従事。現在は、2004年度から実施する高性能モジュールスタック仕様の検討に取り組んでいる。

（2-4執筆）

麦倉 良啓（8ページに記載）
 （コラム3執筆）

2 - 1 内外における MCFC 開発の経緯

2-1-1 MCFC 開発の黎明

MCFCの開発は、1921年にドイツのBaurらが燃料電池用電解質に熔融炭酸塩を用い約1000で実験したことに始まると言われている。その後しばらく時間を置いて1946年にソ連のDavtyanにより電解質を保持するマトリクス概念が導入されたり、1958年にオランダのBroersらにより多孔質Ni電極が採用されたりして、オランダ、米国などで、その電解質や電極の組み合わせに関して、盛んに研究が進められた。その間、マトリクスにはMgOなど、電極にはFe、Ni、Co、Ag、Znなどが試みられ、現在の原型ができあがったのは1970年頃である⁽¹⁾。

これらのMCFC基礎研究成果は、1970年代後半から米国においてその開発が展開される事になった。国家プロジェクトとしては、ERDA (U.S. Energy Research and Development Administration 連邦エネルギー研究開発局) によって1976年にはスタートし、1978年にDOE (Department of Energy エネルギー省) に引き継がれている。我が国では、1981年から国のムーンライト計画にPAFC、SOFCとともに採りあげられ、開発がスタートしている。

2-1-2 国外での開発⁽²⁾

(1) 米国における開発現状

米国では、DOEがMCFCの開発を推進してきた。開発初期の1970年代においては、石炭を利用する集中型発電プラントが最終目標として構想されていた。1990年代からは数MW程度までの中小容量の分散電源としての開発に重点が置かれ、コージェネレーション用プラントとしての開発が指向された。そして、最近ではVision21計画におけるクリーンコールテクノロジーの一環として、燃料電池発電の適用が見直され始めており、再び集中型としての適用も推進されていく気運が高まりつつある。

技術開発はDOEのプログラムのもと、1970年代には

IGT (Institute of Gas Technology、現GTI、Gas Technology Institute) UT (United Technologies) 社、GE (General Electric) 社などが開発を進め、基本技術確立してきた。その後、1980年代からERC (Energy Research社、現在FCE (FuelCell Energy) 社) やMCP (M-C Power) 社などのベンチャー企業により開発が引き継がれた。

現在、DOEのMCFC開発は、NETL (National Energy Technology Laboratory) を通して、FCE社の常圧内部改質方式に絞られている (内部改質については、コラム3参照)。同社ではDFC (Direct FuelCellの意) という名称で、3段階 (250kW、1MW、2MW) の容量を持つプラントの開発を進めている。このうち、250kW級システムは、ドイツMTU社 (Moter & Turbine Union、Daimler Chrysler社の子会社) との共同開発により、既に米国、日本などで10台以上のフィールドテストが行われており、わが国では、麒麟麦酒(株) に続いて、福岡市下水道局、日本金属工業(株)、石油資源開発(株)、セイコーエプソン(株) などに導入される計画が発表されている。また、国外では1MW機、2MW機の実証計画も発表されており、下水処理場での消化ガスを利用するもの (1MW) や、クリーンコールテクノロジーの一環として石炭ガス利用向けに開発するもの (2MW) などがある。また、石炭炭坑からの発生メタンを利用してその排出量を抑え地球温暖化防止を目指したもの (250kW) などもあり、種々の形態が計画されている。

同社ではまた、Vision21計画において、ガスタービンとの組み合わせによる高効率プラントの実証試験も進めており、250kWシステムをCapston社のマイクロガスタービン (30kW級) との組み合わせ試験 (DFC/T試験) を実施している。本システムは燃料電池部分が常圧で作動し、タービン (燃焼器のないエキスパンダ) はそのトッピングサイクルとして構成されている。

(2) 欧州における開発現状

欧州では分散型の熱供給用電源として位置づけた開発が進められている。

ドイツではMTU社が開発を進めている。同社ではプラント周辺機器の低コスト化の観点から、独自のHot Module 構造を考案し、それにFCE社製の250kW常圧内部改質型スタックを組み込んで250kW常圧内部改質型システムを構成した(図2-1-1)。Hot Module構造とは、横置き円筒型の収納容器内部に満たされたカソードガスを循環してスタック温度を制御する構造であり、配管が少なく、コンパクトとなる。スタックは収納容器内に横倒しに配置されており、直交流方式(燃料ガスと酸化剤ガスがセル面に沿って直交するように流れる方式)をとっている。同社から出荷されたユニットは、ドイツ、スペインで数台がコージェネレーション用として稼働している。

イタリアは、スペインと共に、MOLCARE計画において、1999年に100kW級スタック(加圧:0.35MPa、外部改質、直交流方式、0.75m²×150セルスタック)およびCU(コンパクトユニット;スタックおよび改質器を含む高温周辺機器を同一圧力容器内に納める)プラントを開発した。その成果をもとに、Ansaldo Fuel Cells社が中心となり、同一容器に2基のスタックとその下部に改質器と触媒燃焼器を一体化して設置したTwin Stackコンセプトによる500kWモジュール(Series500)の開発を進めている。さらに、高効率・高信頼性・低コストスタックの開発(Li/Na電解質)およびバイオマスガス化へのMCFCの適用に関する実証試験をEU支援のもと計画している。

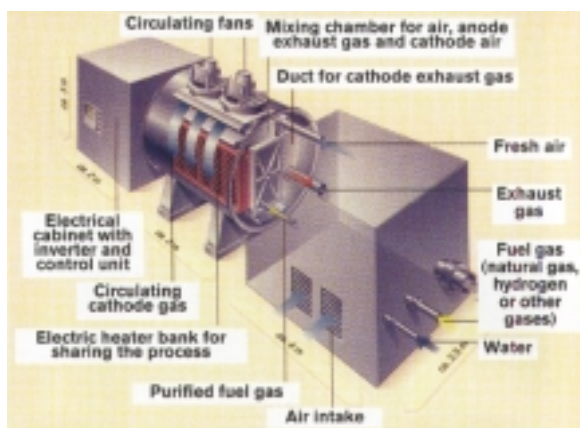


図2-1-1 Hot Module構造による250kWシステム(同社パンフレットより)

(3) アジアにおける開発現状

韓国においては、KEPRI(韓国電力公社電力研究院)が中心となり、KIST(韓国科学技術研究院)での基礎研究をもとに、加圧外部改質型プラントの開発計画を進めており、これまでに25kWスタック(内部マニホールド)の加圧での発電試験とその高性能・長寿命化実証試験を実施している。これらは、2005年の100kW級、2008年の250kW級外部改質型システムへとつなげる計画である。

中国では、政府の第九次五ヶ年計画(1996年~2000年)において、大連化学物理研究所、中国科学院が研究を進め、大連化学物理研究所において1999年に、1kW級スタックの開発が行われた。また、上海交通大学では、燃料電池研究所を設立して、上海市の支援によってほぼ同時期に1kW級のスタックを開発している。現在、第十次五ヶ年計画において、当面50kW級を目指した開発が進めている。

これら国外の開発動向を図2-1-2に示した⁽³⁾。

2-1-3 我が国での開発

我が国のMCFC開発は、世界的にも早い時期から開始され、脱石油のための技術開発に向けて設定された通産省(当時)によるムーンライト計画において1981年から推進されてきた。この開発は、電気事業用電源を中心に、石炭の利用も念頭に置きながら、当面天然ガスの利用を考慮したものであり、プロジェクトはこれまでに3期に亘って新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)によって進められてきている。

第I期(1981~1986年度)では、電池本体を中心として、10kW級スタックが(株)日立製作所、(株)東芝によって開発された。

さらに第II期(1987~1999年度)には、1987年度に設立された熔融炭酸塩型燃料電池発電システム技術研究組合(MCFC研究組合)がNEDOからの主たる受託者となり、前期と後期に、それぞれスタック本体と発電システムの開発を進めてきた。スタック本体は、外部改質型については、直交流型(正方形の1セルを4枚の電極を組合わせて構成、(株)日立製作所)と並行流型(燃料ガスと酸化剤ガスがセル面に沿って同一方法に流れる方式、長方形の1枚のセルのみで構成、石川島播磨重工

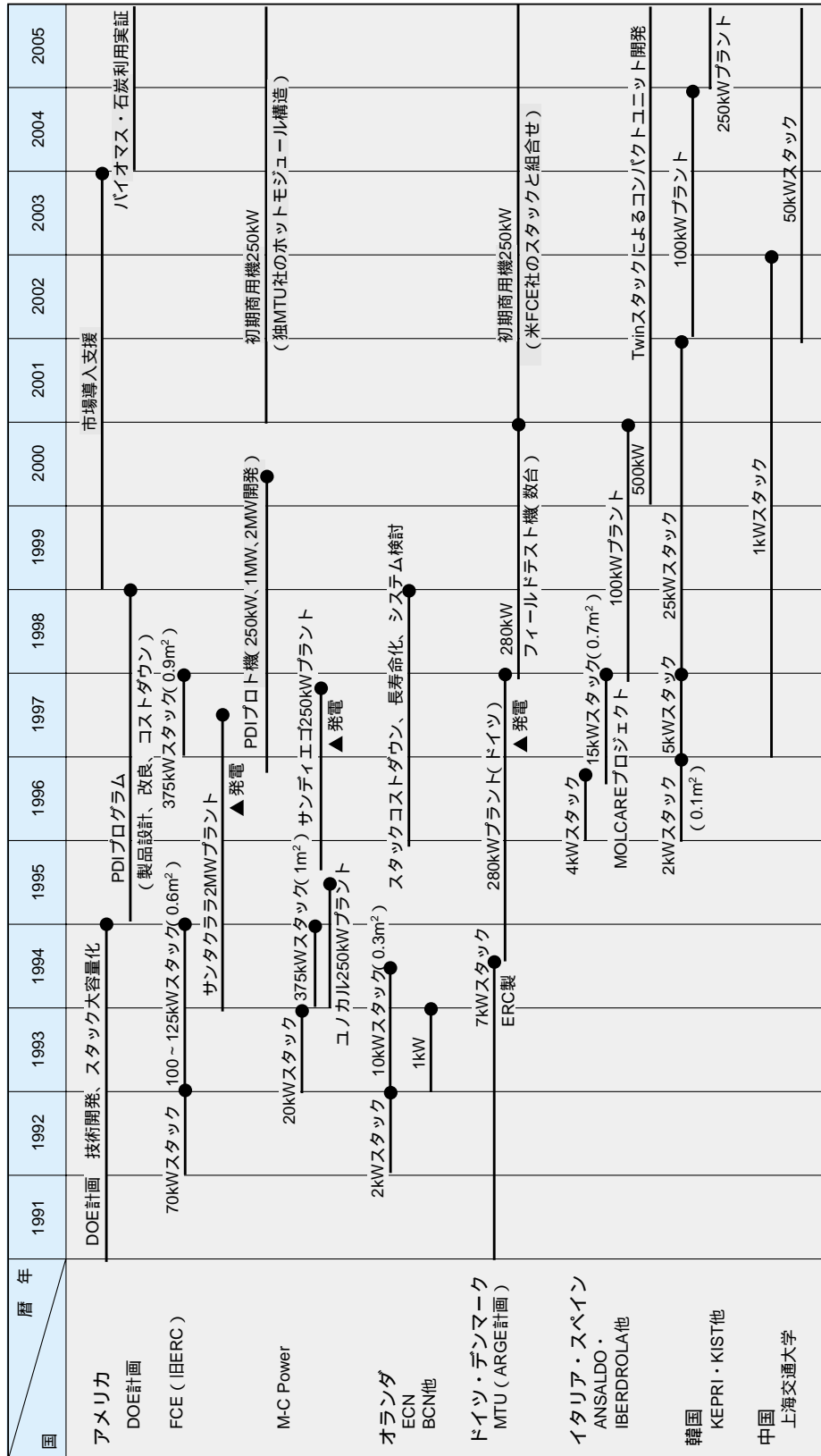


図2-1-2 国外のMCFC開発動向

業(株)(IHI))が開発され、これらの技術は前期最終年度の1993年に100kW級スタックとして検証された。また同時に1,000kWプラントに向けた改質器、ブロウ、排熱回収熱交換器などのBOP機器(Balance of Plant、電池以外の構成機器)の開発も行われた。これらの成果は後期の1,000kWプラントに適用された⁽⁴⁾。本プラントは中部電力(株)の川越火力発電所構内のMCFC研究組合川越発電試験所に設置され、LNGを燃料として、圧力0.5MPaで45%(HHV基準)以上の目標発電効率を達成した(2-2節参照)。

一方、内部改質型についても前期での30kWスタック

(三菱電機(株)が開発)検証を経て、後期には1m²級セルにより200kWの常圧内部改質スタックが開発された。

これらの成果は2000年度から開始された第III期計画(2000~2004年度)(2-4節参照)に引き継がれている。当研究所では、第I期から第III期全てに亘って、国の開発計画に携わり、当所独自の技術を背景に100kW級スタックまでの電池性能評価やトータルシステムの研究などを実施してきている。我が国の第I期から第III期までの開発計画全体を他の燃料電池の展開も含めて図2-1-3に示した。

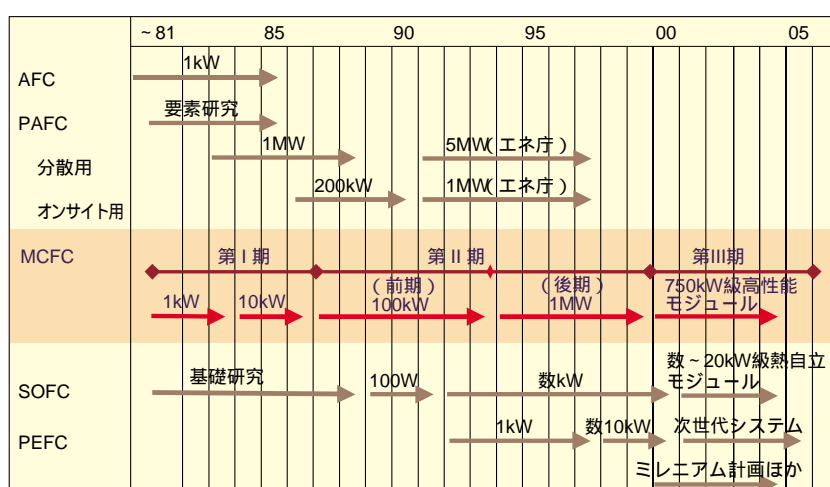


図2-1-3 我が国の燃料電池開発計画

2-2 1,000kW 発電プラントの成果と課題

2-2-1 1,000kW 発電プラントの概要⁽¹⁾

我が国のMCFC開発計画第II期では、電気事業用の高効率発電システムとして、1999年に、1,000kW級発電システムが開発・実証された。本システムは、NEDOの計画として、当研究所や電力会社などで構成するMCFC研究組合が主体となって開発したものである。システムは250kW級スタック4台(石川島播磨重工業(株)(IHI)と(株)日立製作所がそれぞれ2台ずつ製作)

と、それに燃料を供給する天然ガス用の改質器、排出ガスから動力回収を行うタービン圧縮機から構成され、中部電力(株)川越火力発電所構内に設置された(図2-2-1)。本システムは高温型燃料電池とガスタービンとを組み合わせた世界で初めての複合発電システムと位置づけることができる。システムの開発目標は、発電端効率45%(HHV基準)以上、送電端効率40%(HHV基準)以上、運転時間5,000時間以上、電圧低下率1%/1,000時間程度と設定された。

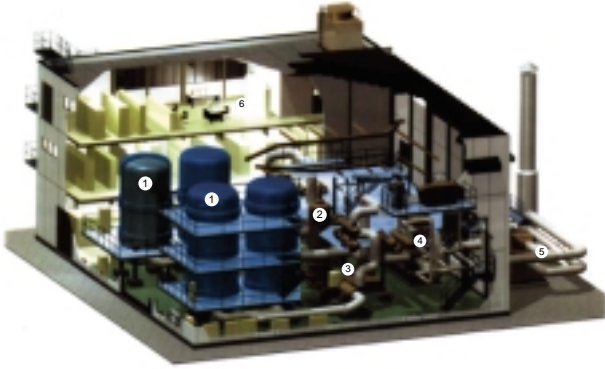


図2-2-1 1,000kWプラント

2-2-2 運転成果⁽¹⁾

プラントは、1995年の基礎工事、1996年の建屋建設に始まり、1997年に電池本体を除く機器類の据え付け、調整を経て、1998年に250kWスタック4台を据え付けた。電池据え付け前の調整試験（Process and Control（PAC）試験）には約9ヶ月の期間をかけて実施した。

図2-2-2に、プラントの電力系統への初併入から運転研究終了までの発電実績と経過を示す。運転研究は、1999年8月4日の電力系統への初併入後、先に述べた

プラント全体の最終調整を各出力レベルで行った。なお、この期間、500kW出力中に落雷による緊急停止を経験したが、プラントは、無負荷状態に安全に移行し、各機器への影響も認められなかった。その後、夏季のプラント最大出力である900kWの発電出力に9月6日に到達し、プラント点検のために、計画停止を実施した。計画停止期間中、各スタックは、電解質溶融状態で保持したが、途中、一部スタック容器内での地絡(スタックと対地間の短絡)が発生し、原因究明および対策のため、500kW分のスタックについて、室温までの冷却を余儀なくされ、冷却後、容器解放による点検および対策を実施した。

スタック容器内の地絡原因の究明および対策を実施した後、スタックの再昇温終了を待って、プラントの起動ならびに発電試験を再開した。その結果、11月5日にプラントの定格交流出力1,000kWを達成した。その後は、2度の計画停止を挟み、計3回の定格出力での連続発電試験を実施した。なお、1999年の年末においては、Y2K（2000年問題）の影響を懸念し、プラント最低負荷300kWでの連続発電状態で対応した。また、2000年1月28日に定格発電からの負荷遮断試験を通産省資源・エネルギー庁審査官立ち会いのもとに実施し、安全にプ

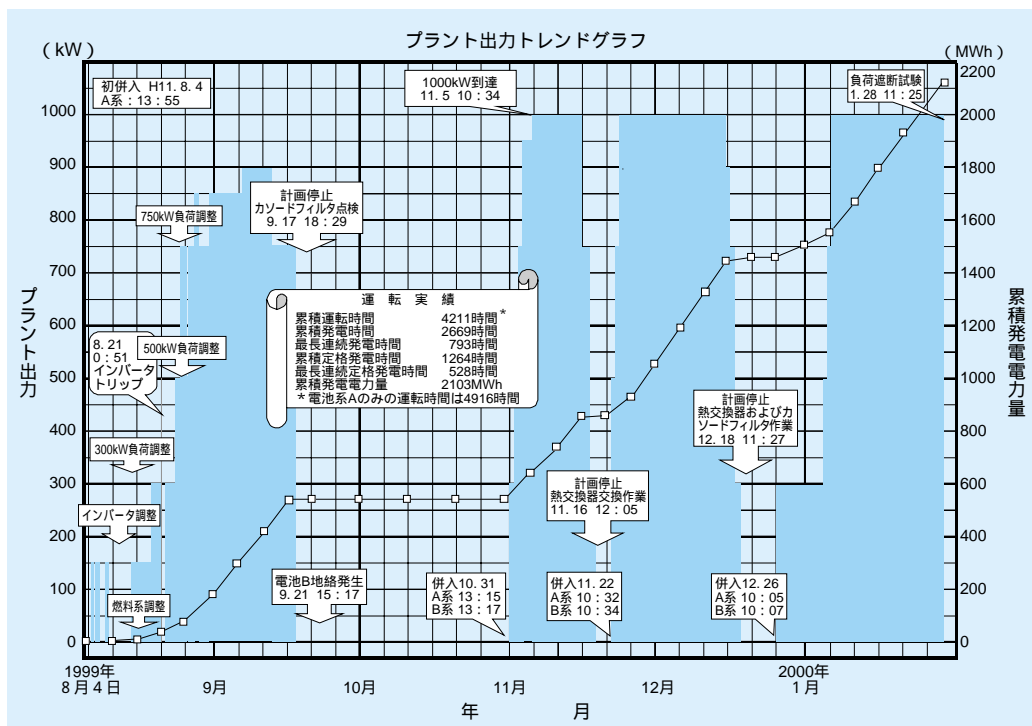


図2-2-2 1,000kWプラントの出力トレンド

ラントが停止することを実証し、国内では初めて、電気事業法第49条第2項の規程に基づく電気工作物として、1,000kW級加圧MCFC発電プラントが技術的に認知された。

この間の運転実績としては、スタックの累積運転時間：4,211時間（500kW分のスタックについては、4,916時間）、累積発電時間：2,669時間、総発電電力量：203,120kWh、プラント起動回数（冷態）：4回であった。また、発電時間の内訳を見ると、定格出力での累積発電時間が1,264時間と全体の発電時間の約50%近くとなり、運転試験初期の外気温の影響による出力制限期間を含めた750kW出力以上の累積発電時間は、全体の約75%を占める発電実績となった。さらに、定格での最長連続発電時間は、528時間であった。主な成果を、開発目標と併せて表2-2-1に示す。

以上の運転実績から、途中、トラブル等による計画の遅れはあったものの、天然ガスを用いたMCFC発電システムが、発電プラントとして技術的に実現可能であることを国内初の1,000kW級加圧発電プラントにおいて実証した。

表2-2-1 1,000kWプラントの開発目標と成果

項目	開発目標	評価
出力	1,000kW級（AC）	定格1,000kWを達成 累積発電時間（1,264時間）
運転時間	5,000時間以上	ほぼ達成（4,916時間）
発電端効率	45%（HHV基準）以上	45.2%（通常運転モードでの実績）
送電端効率	40%（HHV基準）以上（組合自主目標）	33.3%（放熱ロス、メカロス、ヒータ動力の増加が主要因）
環境	規制値以下	NOx：10ppm等規制値クリア
スタック劣化率	1%/1,000時間以下	A系：0.7%/1,000時間 B系：0.5%/1,000時間

2-2-3 残された課題

今回の1,000kW級MCFC発電プラントの運転研究から、大型スタックの発電性能面については大きな問題もなく、プラント内での運転においても十分な性能を発揮できる技術レベルに到達していることが実証できた。しかし、大型スタックの信頼性ならびにプラント全体での効率・運用性等については、今回の運転研究で得られた課題を早急に解決する必要があり、次期プラントにおいては、今回の経験を生かした総合的な視野からの設計・施工を行い、実用化レベルの加圧MCFC発電プラントとして実証することが期待された。

運転研究から、明らかとなったプラント化への課題は以下の通りである。

- 1 プラント放熱量低減のため、高温のガスが往き来する改質器と電池スタック間の放熱ロスを低減できるシステム構成およびコンパクト化の検討
- 2 プラント内で発生するダストの処理のため、スタック上流機器および配管の適正化による発生ダストの低減ならびにスタックに及ぼすダストの影響調査、フィルタ等の必要性、構造ならびにメンテナンス性等の検討
- 3 スタックからの炭酸塩飛散に対して、飛散量の推定に加え、飛散炭酸塩の析出を考慮した機器選択ならびにシステムの検討
- 4 大型スタックにおける信頼性向上のため、高温でのガスシールを兼ね備え、直流絶縁設計を十分配慮したスタックの設計ならびに構成の検討
- 5 大型化に伴う熱膨張等も考慮した圧力容器内構造の設計ならびに施工管理

2 - 3 高効率発電実用化への道筋

2-3-1 実用化への方向性

1,000kWプラントの結果を受け、MCFC研究組合において、実用化へ展開するための方策が協議された。

1,000kWシステムは将来の火力代替発電システムとして開発され、プラントとしての成立性を明らかにし、設定された開発目標も概ね達成した。しかしそれに並行して、外部状況の大きな変化があった。すなわちコンバインドサイクル技術の進展である。通称ACC（Advanced

Combined Cycle) と呼ばれるガスタービン複合発電サイクルは、MCFC技術の進展に比肩するようにガスタービン入口温度の向上が図られ、その発電効率は、1996年時点で1300級ガスタービンにより約49%が達成されている。さらに、1999年時点では1500級ガスタービンにより、その発電効率は約51%まで向上している。

これに対して、1,000kWプラントでは、使用材料(Li/K系電解質)に起因する電池性能の限界から、大容量化による効率向上はあまり見込めないものと推測された。すなわち、ACC発電技術の進展に照らし合わせると、火力代替用としての将来の展望が見えにくい状況と言わざるを得なかった。

もう一点の課題は、コストである。1,000kWプラントでは、スタック本体を構成するセパレータにコルゲート板を用いており、部品点数が多く、その重量、コストも大きな比率を占めていた。さらに、プラント容量に対応した改質器一台に複数のスタックが接続された構成であったため、容量の変更に伴う改質器やスタックの設計変更が避けられず、火力代替の大型機への適用に際してより効果的な方策が模索された。

2-3-2 高性能化・低コスト化のためのキーテクノロジー

これらの状況を受け、実用化への展開のために協議された方策の要点は、さらなる効率向上を達成するための

電池技術や運転条件の採用、将来的なコスト低減を見据えたシステム構成の選定である。

そのためのキーテクノロジーとして選択されたのが、Li/Na系の新規電解質の適用、プレスセパレータの採用、発電部分のモジュール化である。

詳細は3-3節に示したが、Li/Na系電解質は、内部抵抗を低減するばかりでなく、カソード(NiO)の溶解度低減によってニッケル短絡を抑制し寿命延伸を図ることのできる電解質として、当研究所が以前からその適用性評価に取り組んできたものである。プレスセパレータについても、構成部品点数を削減し、軽量化、低コスト化、さらには腐食面積低減に伴う寿命延伸が図れるセパレータとして、当研究所が石川島播磨重工業(株)や中部電力(株)と共同で開発を進めてきたものである。発電部分のモジュール化に関しては、比較的小容量の容器の中に、MCFCスタック本体とその容量に対応する改質器を組み込むものであり、要求されるプラント容量に合わせてモジュール数を増減させることで対応でき、モジュールの規格化と量産による低コスト化も期待できる。また、ガスタービンとの組み合わせによる複合発電を構成し高効率化を図ることとし、適合する既存ガスタービンの作動圧力に合致した圧力でMCFCを運転することを目指した。

これらの技術提案は国の評価会議で高い評価を得、開発計画は次の第III期へと展開する事となった。⁽¹⁾

2-4 現在の国の開発プロジェクト

2-4-1 第III期MCFCプロジェクトの概要

MCFC研究組合は1988年2月に設立され、経済産業省の下、NEDOからのMCFC発電システムに関する受託研究を同年から推進している。これまでの開発成果を基に、2000年度からはMCFC発電システムの早期実用化を目指して第III期計画(5ヵ年)を開始している。2004年現在の構成員は(財)電力中央研究所、北海道電力(株)、東北電力(株)、東京電力(株)、中部電力(株)、北陸電

力(株)、関西電力(株)、中国電力(株)、四国電力(株)、九州電力(株)、電源開発(株)、石川島播磨重工業(株)、(財)日本ファインセラミックスセンターである。

第III期研究開発スケジュールを図2-4-1に示す。本計画では高性能が期待できる新しい電解質(Li/Na系)を適用した10kW級ショートスタックの長寿命試験(1万時間)、1.2MPaの高圧条件下でのショートスタック試験をまず実施し、その結果をふまえて、300kW級の加圧小型発電システムの開発とそれに続く高性能モジュールの開発が計画されている。以下に第III期プロジェクトの

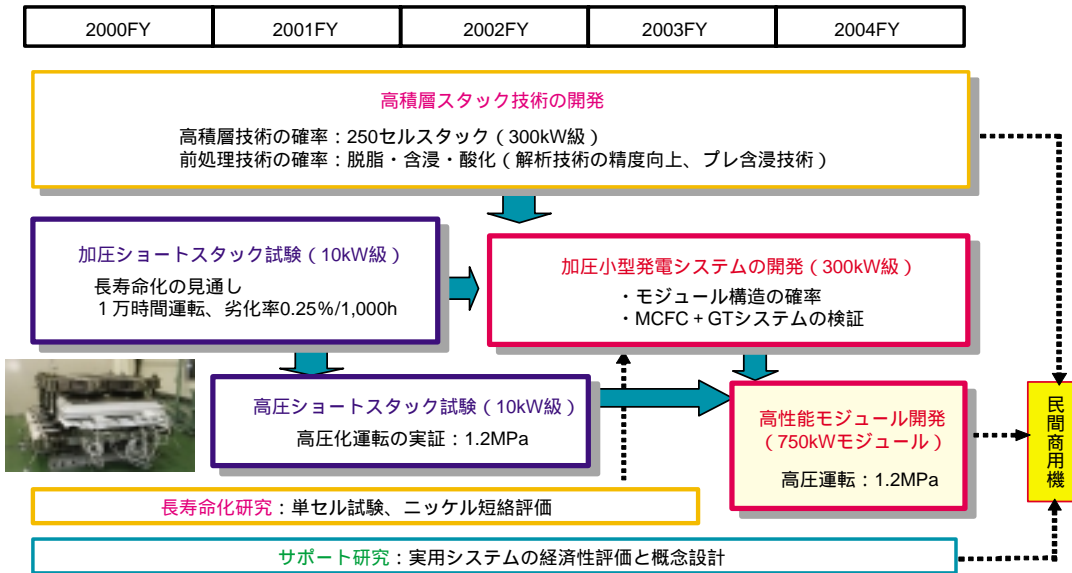


図2-4-1 第III期研究開発スケジュール

これまでの主要成果について紹介する。(1)-(3)

2-4-2 要素技術開発

(1) 高積層スタック技術開発

加圧下（0.5～1.2MPa程度）の運転で、4万時間程度の寿命を持つ1m²級セルを250段積層した大型スタックの設計・製造技術を確立することを目的としている。

2002年に加圧小型発電システムで使用する250段積層スタックを製作した。製作した250段スタック外観を図2-4-2に示す。



図2-4-2 250段スタック外観

また、将来のMCFCの高性能、高信頼性および低コストを目的とした次世代電池材料の開発と基礎データの蓄積も行った。特に、1.2MPaの高圧下の運転では、カソード材料であるニッケルの電解質中への溶出が顕著になるため、これを抑制するMgFeO被覆改良カソードの製造技術を(財)ファインセラミックスセンターが開発した。

(2) ショートスタックによる信頼性評価

本研究の目標は、単セルやショートスタック（実用規模面積のセルを数10段程度積層したスタック）の発電試験により性能を確認し、また、試験後に電池を解体分析して劣化状況やその要因を検討し、目標としている4万時間運転の可能性を見通すことにある。ショートスタックを用いた1.2MPaの高圧運転試験を行い、スタックおよびシステムの高圧運転への適合性も評価している。

1 加圧ショートスタック試験

2001年4月から平成2002年6月に、(財)電力中央研究所において、実用規模（有効電極面積1m²級）のセルを用いた10kW級ショートスタックによる1万時間発電試験（運転圧力0.5MPa）を行った。この間に試験装置の点検などで数回の発電停止があったが、スタック平均出力約11.5kWで運転を継続し、その電圧低下率は1,000時間当たり約0.3%であった。加圧運転条件下でのスタック性能は、ほぼ実用可能なレベルに到達したことを実証した。図2-4-3にスタック電圧の経時変化を示す。

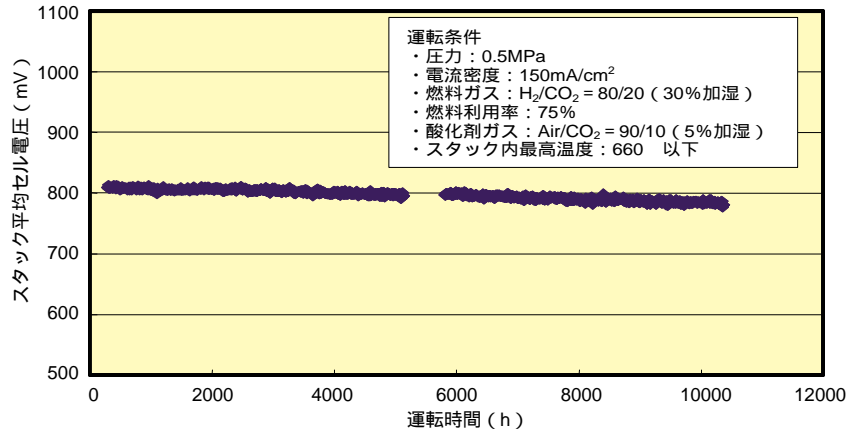


図2-4-3 加圧ショートスタックによる1万時間寿命試験結果

発電試験を終了後、石川島播磨重工業(株)相生工場にてスタックの解体分析評価が行われ、外観観察では異常な腐食や炭酸塩の流れ出しは認められなかった。また、カソード電極から炭酸塩中へのNi析出量、電解質損失量およびセパレータ表面の腐食量など、スタック寿命を決定する要因の調査結果から0.5MPa程度の運転圧力条件下では4万時間の運転が可能との見通しを得た。

2 高圧ショートスタック試験

中部電力(株)川越火力発電所構内にあるMCFC研究組合川越発電試験所(以下川越試験所)に設置した高圧試験装置で、1m²級セルを10段積層した10kW級スタックを対象に送電端発電効率55%以上(LHV基準)が期待できる中規模MCFC発電設備の運転ガス条件を模擬した運転圧力1.2MPaの試験を、2002年2月から2003年1月まで(累積発電時間は約3,100時間)行い、初期平均セル電圧715mV(電流密度200mA/cm²、出力は約15kW)を確認した。世界で初めて1m²級スタックによ

る高圧運転に成功するとともに開発目標を達成した。これにより高性能モジュールの開発目標を達成する見通しを得た。図2-4-4にプラント模擬条件での発電試験結果を示す。

(3) 加圧小型発電システムの開発

1 加圧小型発電システムの目的

MCFCの早期市場導入を図るため、300kW級の小規模電源を製作し運転試験を実施して、スタックと改質器を同一容器内に収納した基本モジュールおよびMCFCとターボチャージャー発電機とのコンバインド発電システムの信頼性を評価することを目的としている。開発目標を表2-4-1に示す。また、加圧小型発電システムのフローを図2-4-5に示す。

2 発電試験

2003年1月初めから総合調整運転を開始し、1月14日に初併入を達成し、発電試験を開始したが、ガスリー

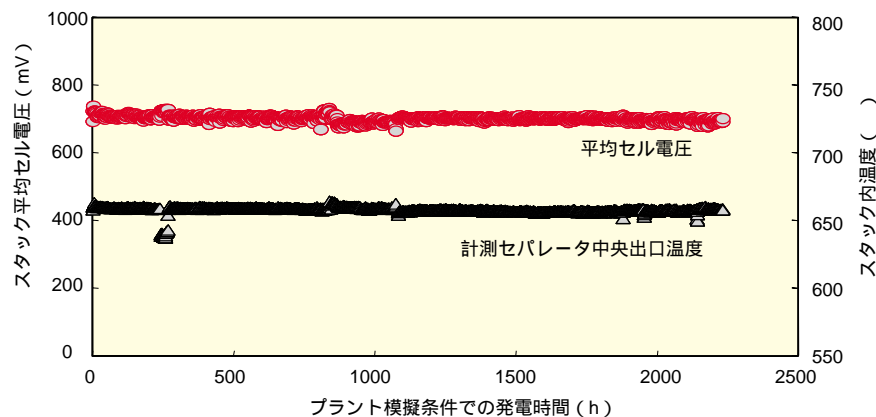


図2-4-4 高圧(1.2MPa)ショートスタック試験における電圧の安定性

表2-4-1 加圧小型発電システムの開発目標

出力	300kW級 (AC) を目標に検証
運転圧力	0.4MPa程度
発電時間	5,000時間以上
燃料ガス	天然ガス
電圧低下率	0.3%/1,000時間程度 (200mA/cm ² にて)
送電端効率	43%以上 (HHV基準)

クおよび電圧低下など不具合が発生したため、累積発電時間631時間の時点で運転停止、調査・原因究明を実施した。主な不具合原因は下記のとおりである。

- ・高積層スタックの前処理技術の未確立
- ・ガスリークを伴う場合の上部セルの燃料不足現象
- ・マニホールド部の締付力不足

その後、不具合部分を補修して、9月27日より部分負荷にて発電試験を再び開始し、12月上旬まで連続運転を実施した。2003年12月上旬までの300kWの加圧小型発電システムの累積発電時間は、約2,250時間、累積発電電力量は、約199,000kWhである。

2004年度は、6月中旬頃より、川越試験所内にて、新たに製作した検証スタックを用いての発電試験を、運転時間5,000時間以上を目標に実施する予定である。

2-4-3 高性能モジュールの開発

高性能モジュールと既存のガスタービンとを組み合わせたMCFCコンバインド発電システムは、システム解析結果より運転圧力1.2MPaの7MW級プラントで送電端効率55% (LHV基準) 以上が達成できる見通しを得ている。

本開発では、より高発電効率を目指した中大規模容量のMCFC発電システムの基本となる高性能モジュールを第Ⅲ期MCFCプロジェクトにおける要素技術開発の成果を基に設計・製作し、運転圧力1.2MPaの高圧発電試験によってその性能を確認することを目的としている。

今後は、2004年10月中旬までに高性能モジュール試験設備を川越試験所内へ据付けて、発電試験を実施する予定である。開発目標を表2-4-2に示す。また、高性能モジュール発電システムフローを図2-4-6に示す。

表2-4-2 高性能モジュールの開発目標

出力	750kW (DC) 級を目標に検証
運転圧力	1.2MPa程度
燃料ガス	天然ガス
発電端効率	47% (LHV基準)

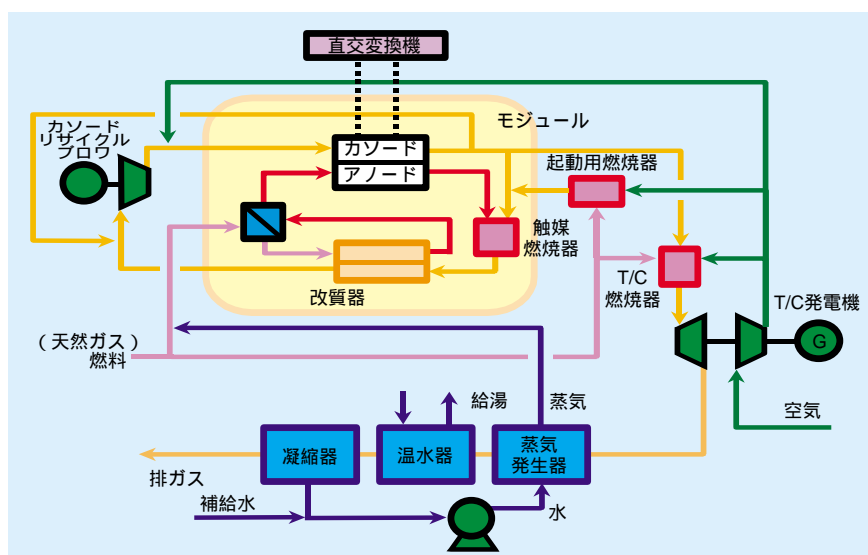


図2-4-5 加圧小型発電システムフロー

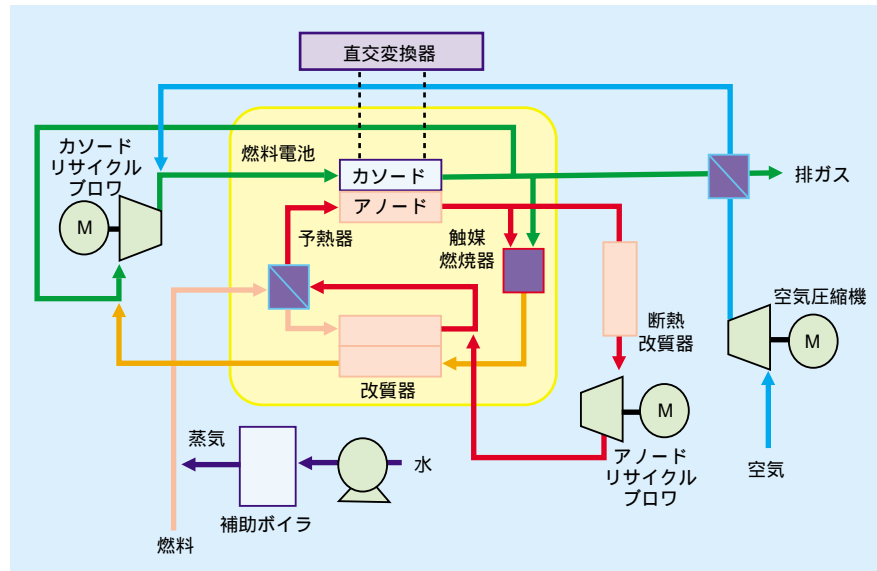


図2-4-6 高性能モジュール発電システムフロー

2-5 MCFC の位置付けと開発の方向性

2-5-1 MCFC の得手・不得手

MCFCはこれまでの開発成果を受けて、今後様々な用途、分野に適用されていく事が期待される。その導入・実用化をスムーズに進めるためには、MCFCの持つ特性を十分に理解し、MCFCのあるべき位置づけと共に、これからのあるべき技術開発の方向性を明確に認識する必要がある。

現在開発が進められている燃料電池はその用途として、事業用、自家用、家庭用、自動車用、携帯用などが想定されている。その適用先は各燃料電池それぞれがもつ特徴に合わせたものになり、主な想定適用先は1-2節にて既に示した通りである。

一般的な発電設備との比較において、燃料電池は、高い発電効率、優れた環境特性、排熱利用による高い総合効率、量産化による低コスト化などの特長をもつ。これらの燃料電池が持つ一般的特長に加えて、MCFCの特長を改めて挙げれば、まず高温型である事により、ガスタービンとの組み合わせによる高効率発電の実現が可能で、CO成分を多く含む幅広い炭化水素系燃料の利用が

可能という事になる。さらに付録で示すもう一つの高温型燃料電池であるSOFCに比較すれば、電極などのシート成型法による大面積化、大容量化が容易であることを挙げる事ができる。これらに加え、MCFCが持つ特異な特長としては、炭酸イオンを媒体とする事による「炭酸ガス濃縮機能」(コラム4参照)、炭酸塩を媒体とした「NOx浄化作用」(4-2-2(1)参照)がある。

一方、MCFCが不得手とする特徴は、高温型であることによる冷起動時間の長さ、CO₂リサイクル設備の必要性などであり、極端な小容量(100kW級以下)分野への適用には難しさがある。

2-5-2 MCFC の位置づけ

欧米では現在MCFCは中小規模のコージェネレーション電源との位置づけが強い。しかし、上述の特長を踏まえれば、電力システムの信頼性が高く高効率化が進んでいる我が国においては、MCFCはあくまで発電を主体とした高効率で環境特性に優れた電源と位置づけるべきである。すなわち、我が国においては、将来の大型化も視野に入れた自家用あるいは事業用電源として位置づける

事ができる。特に電気事業においては、短期的には、地域に密着した環境特性に優れた電源として、また、長期的にはエネルギーセキュリティやCO₂排出量を大幅に削減できる高効率電源として既存火力発電の代替電源としての活用が考えられる⁽¹⁾。

2-5-3 開発の方向性

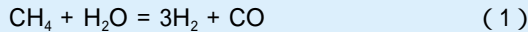
現在の開発計画は前節で述べたとおりであり、その予想成果を踏まえれば、これからの開発の方向性としては、高効率化、長寿命化、低コスト化は将来的にも引き続き改善されるべき基礎的開発であり、それらに加えて、適用分野の拡大を目指した以下の方向性を想定しつつ開発を進めていくべきである。

- 1 都市ガスなどを燃料に用いる発電専用電源を想定した既存電力システムによる効率を総合的に上回る高効率化
- 2 負荷調整用高効率電源を想定した上記小型電源への負荷追従性の付加、運用性の多様化
- 3 地域社会に密着した小型電源を想定した廃棄物やバイオマスなどを適用する燃料の多様化
- 4 天然ガスを燃料とする事業用大型電源を想定した既存大型火力発電設備を大きく上回る高効率化
- 5 石炭ガス化複合発電を想定した、石炭利用発電所としての高効率化

次章以降では、これらの開発の方向性を念頭に、これまで当研究所が進めてきたMCFCの基礎技術、適用拡大技術について示し、今後の実用化方策を探る。

コラム3：外部改質と内部改質

現在、火力発電所等で燃料として使用されている天然ガスの主成分はメタン（ CH_4 ）であるが、燃料電池はメタンを直接、燃料として利用することができない。このため、メタンは第1章で述べたように、改質器で水素（ H_2 ）に変換される。メタン改質反応は以下で示される。



本レビューではこの改質反応を改質器（リフォーマ）で行わせてから水素を電池に供給する外部改質方式を想定したMCFCについてその研究成果を示している。

これに対して、本反応を電池内部で行う方式が内部改質方式であり、その適用は高温型燃料電池（MCFC, SOFC）に限定される。その主な理由は、1 内部改質で副反応的に生成される一酸化炭素がPEFCやPAFCで触媒として使用している白金を被毒する、2 PEFCやPAFCの運転温度である200 以下の温度域では改質反応が遅い、3 改質に必要な水蒸気を多く供給する必要がある、などである。一方、MCFC、SOFCでは低温型（PEFC、PAFC）とは対照的に、1 改質反応で生成される水素を発電により常に消費するのに加え、改質に必要な水蒸気が発電により常に供されるため、(1)式のメタン改質反応が促進されメタンの改質率が向上し、プラント効率向上につながる、2 内部改質で生成する一酸化炭素も燃料となる、3 電池運転温度である600～1000 で改質反応が円滑に進行する、のように内部改質には有利な条件が整っている。内部改質方式を採用するメリットは、1 改質反応に必要な熱として電池の発電に伴う発熱を有効利用できる、2 改質器を電池内に設けるため、プラントとしてはコンパクトな設計が可能となる、3 改質により熱が吸収されるため電池冷却に必要な動力を低減できる、などである。内部改質方式では、発電に伴う発熱量の60%が改質反応に利用されるため、電池を冷却する動力を大幅に抑制することが可能となる。

図には、改質方式の違いを示す。外部改質方式ではアノード排ガスを燃焼させ、改質用の熱を賄い、また、電池冷却のためカソードガスを循環させる。内部改質方式では、電池で発生する熱で改質を行うため、冷却に必要なカソードガス循環量も少量で済む。

また、内部改質方式には、直接内部改

質方式と間接内部改質方式の2方式がある。これらの違いは改質触媒の位置であり、触媒は、直接方式ではアノード内に設置されるが、間接方式では電池とは別の容器内に設置され、この容器は電池にサンドイッチされて、電池からの熱を有効利用できる。間接方式にする理由は、MCFCでは改質触媒が電解質に接触すると触媒能力が低下するためであり、SOFCでは電池入口部で急激に起こりやすい改質反応を抑制するためである。間接内部方式は、アノードで発生する水蒸気を有効利用できないため、改質効率は直接方式よりも低い、上記のようなメリットがあるため、両者を組み合わせて使用される場合もある。

このような内部改質方式では、図に示すように電池部分の構造が複雑になるが、改質器が不要であり、コンパクトなシステムを組むことができるため、小型プラントに向いていると考えられる。しかし、電池温度を制御するための電池内における触媒配置の工夫や、改質触媒が劣化した場合には電池ごと交換する必要があるため改質触媒の寿命延伸など、高度な技術が必要となる。

一方、外部改質方式は大型プラントに向いていると考えられる。これは、改質触媒の交換等の管理が容易であり、電池構造もシンプルであり、電池の温度制御もカソードガス流量の制御で容易であるためである。特に、バイオマス、廃棄物、石炭等のガス化ガスの成分は一酸化炭素や水素が主体でメタンは多く含まれないため、メタンを改質する必要性は低く、シンプルな外部改質方式が向いている。

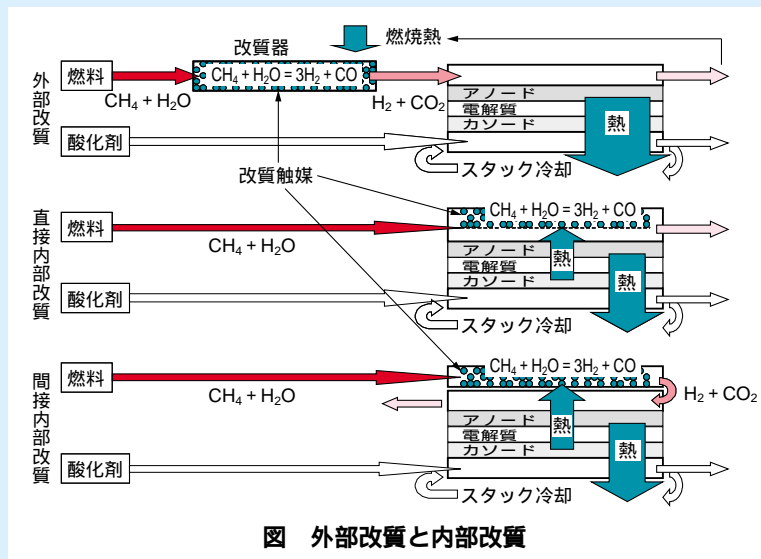


図 外部改質と内部改質