

# 第 5 章

## 初期導入機と将来展開 ( 実用化のための製造 技術と導入シナリオ )

これまでの開発成果を受けて、300kW級のMCFC発電システムの導入が始まろうとしている。また、その製造設備の整備も進んでいる。将来のより大きなプラントについても最新の知見を入れての概念設計が行われ、経済性や環境特性が明らかとなっている。さらに、量産化によるコスト低減に合わせた導入展開などの検討も進んでいる。実用化のための重要課題はプラントコストの低減と電池の長寿命化である。今後は、それらに加え、MCFCの新しい機能創出、技術成熟のための研究が必要である。

第5章 初期導入機と将来展開（実用化のための製造技術と導入シナリオ） 目次

中部電力株式会社 電力技術研究所 燃料電池チーム 副主査 久野 慶博  
 石川島播磨重工業株式会社 エネルギーソリューション事業推進部  
 技術一グループ 課長 遠井 正明  
 横須賀研究所 エネルギー化学部長 渡辺 夫  
 名誉特別顧問 上之園 博

5 - 1 初期導入機の実際 ..... 81  
 5 - 2 導入を支える製造技術 ..... 82  
 5 - 3 実用プラントの概念設計と将来像 ..... 84  
 5 - 4 実用化へのシナリオ ..... 92  
 5 - 5 これからの研究展開 ..... 94

コラム6：MCFC 研究の草創期と実用化への期待 ..... 96



久野 慶博（1977年中部電力(株)入社）  
 入社後は火力部門の管理業務を行ってきた。研究部門在籍中、以前は主にLNG冷熱利用技術や蓄熱技術の研究開発に携わってきた。現在は、高温型燃料電池の研究や木質バイオマスを利用したガス化技術の研究など環境を重視した開発を推進している。また、国の開発計画にも携わっている。MCFCとバイオマスガス化の組み合わせによる発電を是非実現したいと考えている。（5-1執筆）

渡辺 夫（22ページに掲載）  
 （5-3、5-4、5-5執筆）



遠井 正明（1982年石川島播磨重工業(株)入社）  
 高温ガス炉（HTTR）の中間熱交換器の設計等を担当、その後日本原子力研究所へ出向し、HTTRの開発に従事した。MCFCの開発には1984年頃から参加し、システム設計やスタックの伝熱流動の挙動解析等を担当した。現在は、MCFC開発のプロジェクトマネージメントを担当し、早期実用化を目指している。（5-2執筆）



上之園 博（1953年入所）  
 電力系統の動特性制御を中心に研究開発を行い、その後、自然エネルギー、新エネルギー、超電導などの先端技術の責任者として開発にあたった。中でも熔融炭酸塩形燃料電池については電気事業の将来を考え先端をきって推進してきた。  
 電力研究所長、情報研究所長、専務理事を経て、現在名誉特別顧問  
 （コラム6執筆）

## 5 - 1 初期導入機の実際

循環型社会創造に大きく貢献できる新しい技術として、コージェネレーションシステムだけではなく、社会的に大きな問題となっている廃棄物の有効な利用方法についても検討を進める必要がある。

廃棄物には、市民生活から出る一般廃棄物（生ごみ、可燃ごみ、不燃ごみ）と企業から出る産業廃棄物（生ごみ、可燃ごみ、不燃ごみ）があり、自治体は主に一般廃棄物の収集・運搬・処理を行っている。また、産業廃棄物は、廃棄物処理業者が、収集・運搬・処理を行っている。

1999年3月時点で国内における一般廃棄物の排出量は年間5,000万トンを超え、更に産業廃棄物では、年間25,600万トン（全39,700万トンから建設残土などの不燃物を除いた可燃物）を加えると年間約3億トンになる。

一般可燃廃棄物は大部分が焼却炉で焼却処理されているが、一部の廃棄物処理施設では、廃棄物燃焼炉の熱を熱源として蒸気を発生させてタービン発電機を駆動する汽力発電方式により廃棄物の持つエネルギーを電気として回収している。しかし、発電効率が低いなどの問題から、一部の大規模な廃棄物処理設備にしか導入されていないのが現状である。

このような問題を解決できるシステムとして、高効率でかつ多種燃料に適用可能なMCFCが最も有効なシステムと考え、中部電力ではこのシステムを新名古屋火力発電所の構内に設置すると共に、廃棄物をガス化し燃料として供給できるガス化装置も設置し、組合せシステムの実証研究を計画している。

### (1) 300kW級システムの導入状況

中部電力(株)は新名古屋火力発電所構内に300kW級MCFCを設置した(図5-1-1)。300kW級MCFCは、新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)からMCFC技術研究組合が受託し進めている国のプロジェクトで開発されている加圧小型発電システムの技術を国内初の商用機として採用したものである。

燃料電池発電システムはMCFCと改質器を納めている電池モジュールと電池に燃料、空気等を供給する機器を納めたBOP(Balance of Plant、電池本体以外のプラント構成機器)スキッドから構成される。そのシステム



図5-1-1 300kW級MCFC発電設備

フローを図5-1-2に示す。システムの設計仕様は下記のとおりである。

- ・標準燃料 ; 天然ガス
- ・燃料使用量 ; 60m<sup>3</sup>/h
- ・MCFC出力 ; 300kW級(AC)
- ・圧力 ; 0.34MPa
- ・発電端出力 ; 358kW(MCFCおよび排気タービン式発電機の合計)
- ・発電端効率 ; 54%(LHV基準)

### (2) 発電試験の状況と今後の予定

MCFCの据付は2002年12月に完了し、PAC試験(システムの試運転と制御の確認試験)を2月上旬までを行い、2003年2月中旬に発電を開始した。その後、110kWまで出力を上げ、補機の状態、ガス性状およびガスリークについて確認した。

今回の試験を通じて、熱伸び差による機器の損傷や変形、排ガス循環サイクルにおける機器の腐食など発電試験を開始するまでには、非常に険しいものがあった。

2004年度に計画しているMCFCの発電試験では、LNGによる基本性能データを取得すると共に、廃棄物ガスのカロリーを模擬したガスによりMCFCの性能・運用性・制御性を把握する予定である。さらに、木質バイオマスによるガス化技術と組合せたトータルシステムとして発電試験を2005年度に実施し、運用性・制御性などのシステム評価を行う計画である。

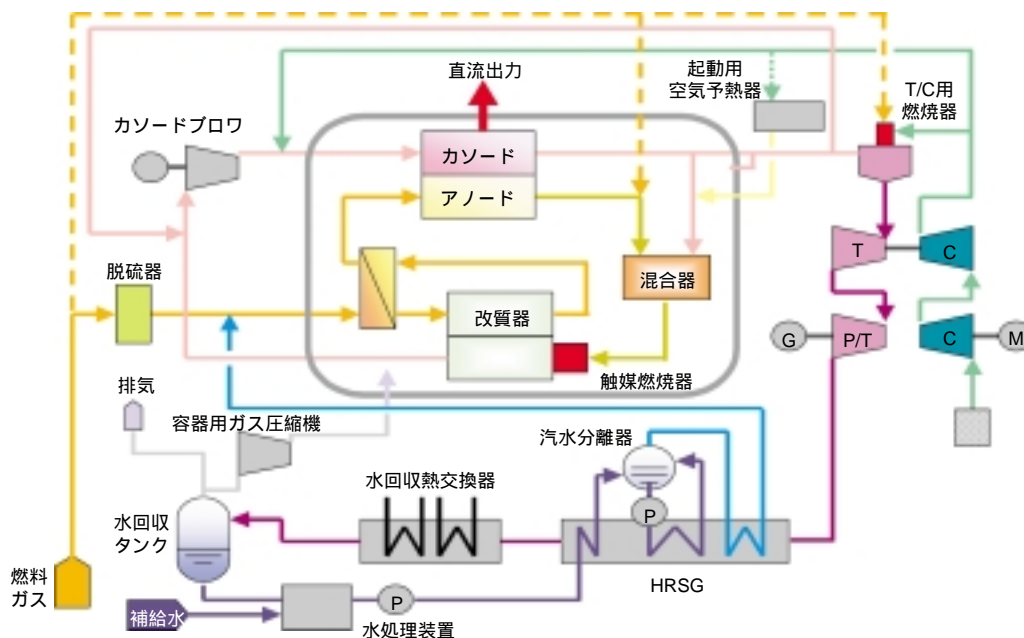


図5-1-2 300kW級MCFC発電システムフロー

## 5 - 2 導入を支える製造技術

MCFCの開発は、市場導入に向けてスタックの高積層化とプラントの実証段階を迎えている。市場導入に際しては、電池部品の大量生産技術を確認する必要がある。また、歩留まりの向上と品質管理が重要となる。また、競合する他機種とのコスト競争に対しても対抗し得るコストの実現が不可欠であるが、量産化や品質管理にも密接に関連するため、これらも含めて早期の実現が求められている。ここでは、電池部材の大量生産技術と電池の高積層化にかかわる技術について示す。

### 5-2-1 電池部品の大量生産技術

MCFCのセルを構成する主コンポーネントは、電極（アノード、カソード）、電解質板、セパレータである。

#### (1) 電極・電解質板の製造

##### 1 テープ成形技術

電極、電解質板とも大量製造技術として、連続式のテープ成形方法（ドクターブレード法）によりテープ状に成形したのち、電極のみ焼成炉で所定の温度まで加熱し、多孔質の焼結体とする。これらの技術では、セラミック

ス技術や製紙プロセスでの塗工技術がベースとなっている。

電池の性能は電極内の炭酸塩分布状態に大きく依存し、かつ電極、電解質板の空孔分布がこの炭酸塩の分布を制御する。このため、板厚および空孔が均一な実機サイズ（1m<sup>2</sup>級）の電極、電解質板の製作技術および品質管理が重要である。成形テープはバッチ毎にサンプルを取り出して品質検査を行っている。

電解質板は、LiAlO<sub>2</sub>粉からなる多孔質体であり、成形に際しては、LiAlO<sub>2</sub>粉に溶剤を混合させスラリー状（固体と液体を混合した粘性のある状態の物質）にして、電極と同様にテープ成形法により連続成形している。連続テープ成形設備を図5-2-1に示す。

##### 2 焼成技術

当初1m<sup>2</sup>級電極を焼成する際、同時に数十枚程度の焼成が可能な大型の電気炉を用いていたが、昇温と降温に時間がかかるため量産化には対応できなかった。このため、連続焼成炉を開発し、連続焼成が可能となったことで量産化の目処を付けた。連続焼成設備を図5-2-2に示す。





図5-2-1 連続テープ成形設備



図5-2-2 電極焼成用の連続焼成炉

## (2) セパレータの製造

燃料電池のセル部材の中でコストに占める比率の高い部材がセパレータであり、量産化とともにコストダウンが重要な課題である。また、セパレータは薄板の積層構造であり、構成部材の精度が要求される。したがって、部品点数の削減、軽量化、製作工程の簡素化等を図って量産化とコスト低減の両方の実現を目指している。センタープレートは両面にそれぞれ水素、および酸素が流れるため、SUSとNiのクラッド鋼を使用している。当初、セパレータのガス流路はセンタープレートの両面にコルゲート板を配置した構造としていたが、部品点数が百点以上となること、また、炭酸塩の濡れ面積が広く、腐食による炭酸塩の消失が多くなり、寿命の面で問題があった。これらの問題点を解決するため、センタープレートをプレス加工して流路を構成する設計に変更した(3-3節参照)。センタープレートのプレスでは、大面積の薄板に細かな流路を実現するため、2万トンプレスを用い

ている。これにより、コルゲート式セパレータの部品点数の大幅な削減(113点→5点)を実現した。溶接については、熱歪が少ないレーザー溶接を採用している。また、耐食性が必要なマニホールドのシール面に使用する部材については、研究開発の成果として製品化された、耐食性鋼板(アルミメッキ鋼板)を採用することで更なるコストの低減が可能になった。

これらの対策により、セパレータのコストは当初と比較して1/10程度まで低減することに成功するとともに、製作時間の大幅な短縮を実現した。

## 5-2-2 スタック高積層化技術

### (1) スタック内の流量配分特性評価

スタックの高積層化設計に際して重要な項目は、スタックの積層方向およびセル面内での流量配分特性である。MCFCの電池本体の発電効率を上げるためには、燃料利用率を上げる必要がある((1-2-1)式参照)。一方、燃料利用率を上げた場合、燃料の流量配分のばらつきにより、燃料不足が生じるとアノード電極が酸化され、著しい電池性能の低下を招く危険性がある。したがって、スタックにおける流量配分の均一化が重要となるため、スタックの3次元解析モデルを開発し、流量配分特性を評価している。

### (2) スタック内の伝熱流動解析

スタックの製造工程では、製造した個々の部材を組立て、その後工場内の前処理設備で、脱脂、含浸、酸化といった前処理が必要となる。特に含浸工程では、セルの面内の温度分布と積層方向の温度分布を均一に保持しながら昇温する必要があるため、スタック内の温度解析を行い、加熱方法の妥当性の評価も行っている。また、結果に関しては、設備設計や実際のオペレーション方法に反映している。一方、スタックは電極部とマニホールド部をそれぞれ適切な締付け力で締付ける必要がある。このため、スタックの締め付け構造(上下ボルスター、締付ロッド他)の解析を実施し、評価している。また、運転温度が680℃程度と高温であることから、長期運転による材料の高温解析(クリープ強度評価)等を実施している。(250セルを積層した高積層スタックの外観は図2-4-2参照)

### 5-2-3 プラント化技術

#### (1) プラントの制御設計

MCFCプラントの設計にあたっては、負荷変化、緊急停止などにおける制御性の評価が重要となる。このため、システムの評価においては、動特性解析シミュレーションコードを用いて、実プラントにおける様々な運転条件、再現性の必要な試験条件等を事前に評価している。動特性シミュレーションコードは、100kW級のシステム制御試験結果や、1,000kW級発電プラントの運転結果等をもとに検証を行い、機器モデルや制御モデルの精度の向上を図り、MCFC発電プラントの制御技術の確立に役立てている。動特性シミュレーションコードの開発では、電力事業用火力発電プラントの制御解析技術をベースにしている。

#### (2) 炭素析出と差圧制御

MCFCプラントシステムの設計上特に検討すべき項目としては、炭素析出の防止方法の検討、差圧制御方法

が挙げられる。炭素析出が生じると、電池内ガス通路の閉塞や多孔質電極の閉塞などによって、電池性能が低下する。対策としては、蒸気注入方式、アノードガスリサイクル方式、アノードガス再処理方式等が考えられ、システム設計に際して最適な方法を選択する必要がある(コラム4参照)。

また、アノード、カソード間の許容差圧や差圧制御方式についての検討も重要な課題である。電解質は、通常熔融状態となっているため、通常運転時において電解質にかかる極間差圧(カソード/アノード間差圧)を、電解質の吹き抜け防止のため数kPa以下に保持する設計としている。

#### (3) 高効率システムの実現

現在開発を行っているMCFCは外部改質方式を採用し、将来の大規模火力代替システムとして、更なる効率の向上を目的に、MCFCとガスタービンを組み合わせたハイブリットシステムの実現を目指している。このため、特性の異なるMCFCとガスタービンを組み合わせたシステムの検証が重要である。

## 5 - 3 実用プラントの概念設計と将来像

### 5-3-1 各種プラントの構成と効率

MCFC発電プラントの実用化に向けて、当研究所では、これまでに数多くのプラント概念設計を実施してきた<sup>(1)-(4)</sup>。以下に示す検討では、これまでの設計結果をベースに、最新の研究成果を反映させつつ、より現実性が高く、MCFC発電の特徴を最大限に発揮できるように従来の概念設計結果の改良を試みた<sup>(5)-(8)</sup>。

#### (1) 概念設計の基本方針

設計は、天然ガスを燃料とする分散電源、LNGを燃料とする火力代替集中電源、石炭を燃料とする複合発電としての集中電源の計3方式について実施した。これまで実施されてきた一般的なプラントの概念設計では、可能な限り高い発電効率を得る事を目標にしてきたが、これ

に対して今回の設計では基本的に以下の方針に従った。

##### 1 特殊機器の排除

開発の難度が高い特殊機器をプラントに適用することにより、むやみに効率向上を追求することは避け、より現実的な機器構成によるプラント設計に留意した。その端的な例が空気圧縮機および膨張タービン(すなわちガスタービン)である。従来の設計は、必要な容量のタービン発電機が容易に入手できるものと想定し、電池以外の機器に対しては実際の型式などにとらわれず設計を実施してきた。これに対して今回は、既存機器あるいはその改造で対応することとし、より現実的な設計を目指した。本方針は建設費低減にもつながらることも期待できる。特に火力代替用発電では、使用できるガスタービンが限定されるので、電池出力規模はむしろガスタービンサイドから決定することとした。

##### 2 最新電池特性の適用

電池特性の設定には最新の電池性能の実測値（小型単セル特性の平均値）を適用した。従来の電池性能には国の開発目標を設定していたが、現状では、その目標を上回る性能が得られており、より現実的な設計結果が期待できる。

### 3 電中研性能表示式の適用

運転条件によって、様々に変化する電池性能の推算は、運転条件としての温度、圧力、ガス組成などをパラメータとする IGT の簡易式<sup>9)</sup>に替えて、当研究所が提案してきた精度の高い表示式<sup>10)11)</sup>（3-1 節参照）を適用した。

### 4 基準出力密度の増大

プラント初期運転時の出力密度設定を 1.8kW/m<sup>2</sup> レベル（電流密度 200mA/cm<sup>2</sup> に対応）とし、従来（1.2kW/m<sup>2</sup>、電流密度 150mA/cm<sup>2</sup> に対応）の設定値の 5 割増とした。これにより建設費の大幅な低減を目指した。

## (2) 設計項目

従来の概念設計<sup>1)-(4)</sup>ではプラント定格性能、部分負荷性能、機器構成レイアウトなどを明らかにしているが、本再設計では、新たに以下の検討を加えた。

### 1 電池性能経時変化の考慮

経時的に変化する電池性能を考慮しつつ、プラントの運用方式について検討を加えた。本経時変化に関しては、後述する電池特性の表示式を経時変化の効果を反映させた形として考慮した（3-1-3 項参照）。プラント運用方式によっては、電池性能の経時変化にともなう補機類の運転条件変化を想定する必要があるが、その場合には補機の仕様には余裕を持たせて対応することとした。

### 2 ニッケル短絡寿命の考慮

現状の MCFC では、電池寿命がニッケル短絡に大きく制約されるという課題がある。最新の研究成果では、当面の目標とされる 4 万時間の寿命に対して、基準となる 1.2MPa の運転圧力のもと、ニッケル短絡が発生しない見通しが得られている（3-2-6 項参照）が、いずれにせよその制約は存在する。

ニッケル短絡寿命は、プラント効率に直結する電池電圧を決定する電解質厚みや運転圧力と密接な関係があり、電池電圧とはトレードオフの関係にある。今回の設計では電池寿命とプラント効率の関係についても検討した。

## (3) 設計したプラントの性能と特徴

概念設計を実施した 3 プラントの定格性能（効率）を図 5-3-1 に示す。初期性能は最近の電池性能の向上に起因して、1.8kW/m<sup>2</sup> の高い出力密度を想定したにもかかわらず、十分な送電端効率が得られることが分かった。これは近年の電池性能向上によるものである。当然のことながら電流密度を低下させればこの効率はさらに向上する。

プラントそれぞれの特徴は以下の通りである。

### 1 天然ガス利用分散型外部改質プラント

電池部分をモジュール化し、内陸設置のための陸上輸送が可能な規模を想定し 7MW 級とした。基本的な構成は、天然ガス利用の MCFC プラント一般と同様であるが、改質器には外部改質のプレートタイプを適用し、MCFC 本体とあわせて、一つの圧力容器内に収納し、熱放散の低減による高効率化を図っている。ガスタービンには燃焼器が切り離し可能な構造を持つ既存の型式を選定した。電池運転圧力は圧縮機の吐出圧力に対応して約 1.2MPa としている。本システムは国の計画において開発中の高性能モジュールを組み込む構成となっている。MCFC の実現にはこのようなプラントの実証が重要であり、特にその外観ならびに基本仕様を図 5-3-2、表 5-3-1 に示した<sup>8)</sup>。

### 2 LNG 利用火力代替型プラント

燃料には LNG を適用し、外部改質を想定した。構成上の特徴としては、既存のガスタービンを改造して用い

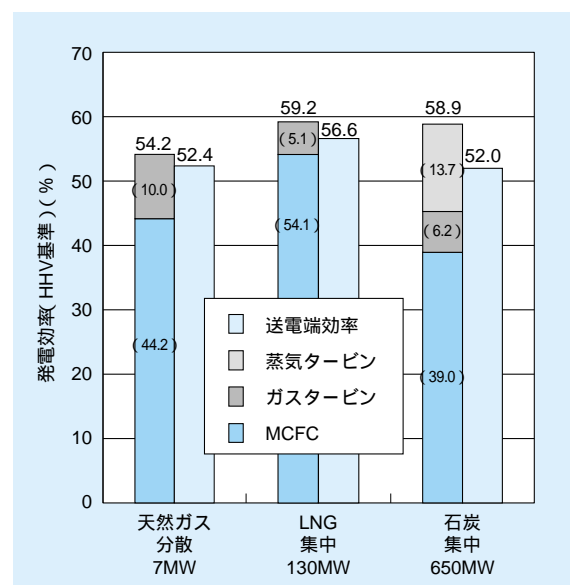


図5-3-1 設計したプラントの性能



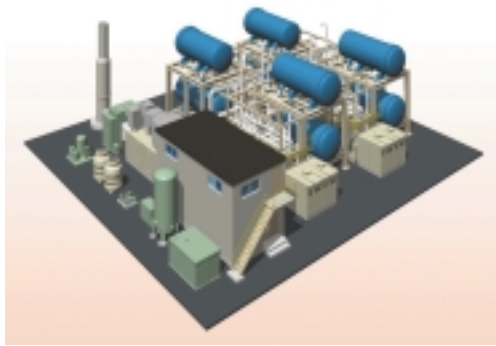


図5-3-2 天然ガス利用分散型外部改質プラント(7MW級)

表5-3-1 天然ガス利用分散型プラント主要諸元

項目	内容
燃料	天然ガス
発電端出力	7.08MW
送電端出力	6.84MW
モジュール数	8基
スタック数	2台/モジュール
出力 (dc)	372kW/スタック
セル数	227枚/スタック
電流密度	200mA/cm <sup>2</sup> (2000A/cm <sup>2</sup> )
電圧	755mV/セル
運転圧力 (電池入口)	1.16MPa
改質率 (総合)	95%
(ワンプラス)	77.2%
燃料利用率 (総合)	87.3%
(ワンプラス)	75%
O <sub>2</sub> 利用率 (ワンプラス)	17.4%
CO <sub>2</sub> 利用率 (ワンプラス)	61.7%
カソード入口CO <sub>2</sub> 分圧	0.082MPa
アノードガスリサイクル率	59.4%
カソードガスリサイクル率	61.3%
ガスタービン入口温度	787
排気温度	105
敷地面積	31m x 22m (0.096m <sup>2</sup> /kW)

ている点が挙げられる。本構成では既存の3種類のガスタービンを候補として比較検討し、圧力比が比較的小さく、改造に要する費用が少ないと考えられる機種を選定した。これによって、プラント出力規模は約110MWとなった。電池運転圧力は1.0MPa、電池排出ガス温度680、プラント排ガス温度160 (HRSG出口)である。これに合わせてLNGは燃料圧縮機で昇圧されている<sup>(5)(6)</sup>。

### 3 石炭利用複合発電プラント

出力は650MW級とし、ガス化設備には酸素吹き加圧噴流床方式、ガス精製設備には湿式を想定した。燃料電池部では、アノード入口での炭素析出を避けるため、スタック入口の燃料ガスに低圧蒸気を供給して加湿するとともに、アノードガスリサイクルを行ってアノード入口温度を高温に保持している。電池運転圧力は1.2MPa、プラント排出ガス温度はHRSG出口で112である<sup>(7)(8)</sup>。

### (4) プラント運転方法

MCFCの出力電圧は、運転時間の経過に伴って徐々に低下していく事が避けられない。これは電池内部抵抗が徐々に増大する事によるものである。これに対応したMCFCプラントの運用方式としては、1 プラント出力一定運転、2 電池負荷電流一定運転、3 電池発熱量一定運転の3方式が想定できる<sup>(5)</sup>。

出力一定運転は、電池電圧の低下に伴って負荷電流を増大させて対応するもので、これにより電池電圧、発電効率の経時的低下は最も大きくなる。負荷電流一定運転では、低下率はこれより小さくなるが、出力も徐々に減少することになる。これら2方式では、電池温度を一定に保つためのカソードガスリサイクル流量も増大させて対応する必要がある。発熱量一定運転は、電池冷却用のカソードガスリサイクル流量の増大を避けることを目的にしたもので、電池内部抵抗増大に伴い負荷電流を減少させて対応する方式である。プラント出力の減少は最も大きくなる。3方式の特徴を表5-3-2にまとめた。

設計対象とした3プラントにおけるこれらの運転方式の違いについて検討した<sup>(5)(8)</sup>。一例として、表5-3-3に、天然ガス利用分散型プラントに対する、出力一定運転方式と発熱量一定運転方式による性能変化を示す<sup>(8)</sup>。電流密度一定運転については4万時間後の空気量を確保しようとする、運転開始時の空気バイパス量が、出力一定運転の場合に比べて非常に大きくなり、運転開始時のMCFC出力比が小さくなって発電効率が大きく低下してしまうため検討しなかった。

表5-3-2 各種運転方式の特徴

運転方式	メリット	デメリット
出力一定	・プラント送電端出力一定 (累積発電電力量最大)	・ガス供給・循環用回転機負荷増加最大 ・特性低下時点での負荷を想定した機器容量設定が必要 (運転開始時に改質器や循環用回転機の大幅な部分負荷運転要求) ・効率低下最大
電流密度一定	・改質器負荷変化小	・プラント出力低下 ・ガス供給・循環用回転機負荷増加 ・効率低下
電池発熱量一定	・ガス供給・循環用回転機負荷変化小 ・上記回転機を常に定格で使用可 ・効率低下最小	・プラント出力低下最大



表5-3-3 天然ガス利用分散型プラントの  
運転方式による性能の変化

運転方式	項目	運転開始時	4万時間運転後
出力一定運転	送電端効率 (HHV基準) (%)	50.7	45.0
	送電端出力 (MW)	6.00	6.00
	電池出力 (MWac)	5.17	4.32
	ガスタービン出力 (kW)	1,058	1,963
	電池電圧 (mV)	771	689
	電流密度 (mA/cm <sup>2</sup> )	175	165
	総発電電力量 (kWh)	2.40 × 10 <sup>8</sup>	
発熱量一定運転	送電端効率 (HHV基準) (%)	52.4	49.0
	送電端出力 (MW)	6.84	5.62
	電池出力 (MWac)	5.78	4.77
	ガスタービン出力 (kW)	1,304	1,102
	電池電圧 (mV)	755	687
	電流密度 (mA/cm <sup>2</sup> )	200	181
	総発電電力量 (kWh)	2.49 × 10 <sup>8</sup>	

注) 電池性能は4万時間で10%低下すると仮定 (150mA/cm<sup>2</sup>時)

出力一定運転では、運転開始時点での性能が、表5-3-1に示した主要諸元からずれている。これは4万時間運転後にも一定出力を確保するための方策である。本設計で選定したガスタービンは回転数一定で運転しており、空気量は大きく変わらないため、電池性能が劣化するとMCFC側の出力を一定にする運転はできず、MCFC出力の減少分をガスタービン出力で補って、プラント発電出力を一定にする運用となる。この場合、運転開始時の空気流量は最適な流量配分に比べて、かなり多くの量をガスタービン側に流す設定となる。そのためMCFCの出力割合が減り発電効率は最適値に比べ減少し、運転開始時点からプラント効率が低下することになる。効率や出力が直線的に減少すると仮定すると、プラント平均効率(2万時間時点での効率)は出力一定運転で47.9%、発熱量一定運転で50.7%となった。

また、4万時間運転による総発電電力量を比較した場合、出力一定運転では2.40 × 10<sup>8</sup>kWhが得られるのに対し、発熱量一定運転では2.49 × 10<sup>8</sup>kWhと大きくなった。平均効率と総発電電力量に関するこれらの結果は、建設費が等しければ、発熱量一定運転の方が発電原価が小さくなり、経済的に優れる可能性があることを示している。

#### (4) ニッケル短絡寿命とプラント効率

今回設計した3プラントはいずれもMCFCカソード入口のCO<sub>2</sub>分圧が調整できるようアノード排気をバイパスできる構成となっている。天然ガス利用分散型プラントにおいて寿命と効率の関係を検討した結果を図5-3-3に示す<sup>7)</sup>。図から明らかなように、CO<sub>2</sub>分圧の上昇と共に

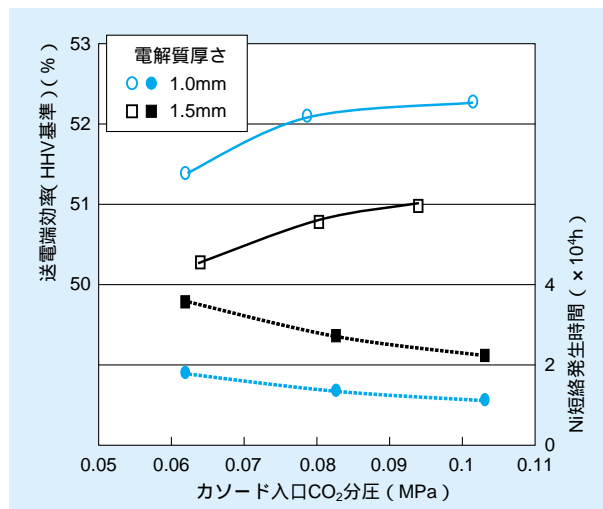


図5-3-3 プラント送電端効率とニッケル短絡寿命のトレードオフ

に、送電端効率は向上するが、ニッケル短絡寿命は短くなることが示された。また、電解質厚さが薄いほど効率は向上し、寿命は短くなることも示された。本プラントでは、電解質厚み1.5mm、CO<sub>2</sub>分圧0.08MPa(7MWプラントにおけるカソード入口CO<sub>2</sub>分圧の設計値)において、効率と寿命はおよそ51%前後、寿命3万時間程度でトレードオフの関係が得られた。

石炭利用の場合には効率と寿命は、それぞれおよそ49%、2万時間(電解質厚み2mmを仮定)となり、天然ガス利用プラントと同様なトレードオフの関係が得られた<sup>7)</sup>。石炭利用プラントにおいては、カソード側に水蒸気を注入してカソードガスリサイクルの熱交換量を下げると共にカソードでのCO<sub>2</sub>分圧を抑制すると、送電端効率は低下するものの、ニッケル短絡寿命の延伸が期待でき、効率約50%で寿命2万時間となった<sup>8)</sup>。

### 5-3-2 プラント経済性の評価

経済性については、プラント機器側に着目した建設費や生産量による検討の他、市場側を意識した電力系統全体への導入影響など、様々な検討を進めてきた。

#### (1) プラント建設費

##### 1 限界建設費

まず、既存競合発電設備と同等の発電単価を実現するため、MCFC発電設備が達成すべき限界建設単価を、競合発電設備の発電単価をもとに試算した<sup>(12)</sup>。MCFC

発電プラントは、送電端効率55%（HHV基準）、設備利用率70%、電池価格比率30%、MCFC寿命5年、MCFC残存価値0%、その他機器耐用15年、その他機器残存価値10%とした。燃料費は石炭1.5円/Mcal、LNGは2円/Mcalとし、競合する火力の発電コストは、天然ガス火力11円/kWh、既存石炭火力10円/kWh、ガスタービン20円/kWh（1万kW級）とした。限界建設単価の算出には次の（5-3-1）式を用いた。

$$\text{限界建設単価 (円/kWh)} = \frac{8760 \times \text{利用率}}{\text{年経費率}} \times \left[ \text{発電コスト (円/kWh)} - \frac{\text{燃料費 (円/Mcal)} \times 0.86}{\text{送電端効率}} \right] \quad (5-3-1)$$

また、均等化年経費率の算出には次の（5-3-2）式を用いた。

$$\text{均等化年経費率} = (1 - \alpha) \times r(1+r)^n / \{ (1+r)^n - 1 \} + \alpha \times r \quad (5-3-2)$$

ここで、 $\alpha$ は残存価値、 $r$ は金利、 $n$ は耐用年数である。計算の結果、天然ガス火力で25.1万円/kW、石炭火力で24.3万円/kW、ガスタービンで38.8万円/kW（1万kW級）が得られた。これらの限界建設費は、電池本体価格が7～8万円/kW程度になれば十分達成可能になるものと考えられる。

## 2 積算建設費

一方、一部を積み上げ方式とした経済性検討も行った<sup>(5)</sup>。MCFC発電の競合技術である。ガスタービン複合発電（GTCC発電）の建設コストを念頭に置き、MCFC発電が目標とすべき建設コストを試算した。検討に当たってはGTCC発電とMCFC発電における構成機器を、両者に共通な機器と固有の機器に分けた。共通機器に対してはGTCCの従来の建設費をもとに、機器容量や機能の比較によって、MCFC発電における価格を推定した。これらの積み上げ結果をもとに、MCFC発電固有の機器である燃料電池本体、燃料改質器、インバーター（直交変換器）の総額には、MCFCプラント全体の建設費がGTCCに競合できるレベルとなるべきことを勘案して、GTCC建設費総額レベルから上記の共通機器分を差し引いた残りの部分に対応するものとした。

検討結果を図5-3-4に示す。MCFC発電の建設費の目標値は、21～24万円/kW程度となり、そのうち、MCFC固有の機器（燃料電池本体と燃料改質器およびインバーター）の総額としての目標値は10～11万円/kWとなった。

電池価格は図5-3-5に示すように、年間200MW程度の生産量となれば約7万円/kWが見込める<sup>(6)</sup>。したがって、MCFC本体の寿命を5年として5年毎に交換するとすれば、プラントの全導入量が1,000MWに達すれば、図5-3-4に示したプラントとしての目標価格は、達成可能になると考えられる。

## (2) 導入展開から見た経済性

MCFC発電プラントは量産化によってその建設費が低減されることが期待できる。MCFCプラントでは、通常MCFC本体のみをその寿命期限（数年程度）毎に交換することが想定されているが、MCFC本体の生産

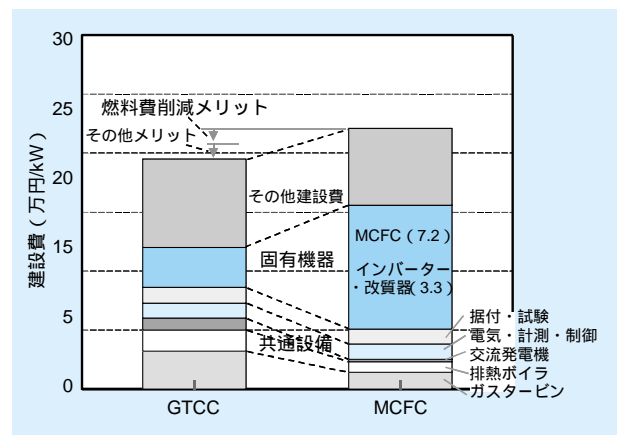


図5-3-4 MCFCプラントの目標建設費

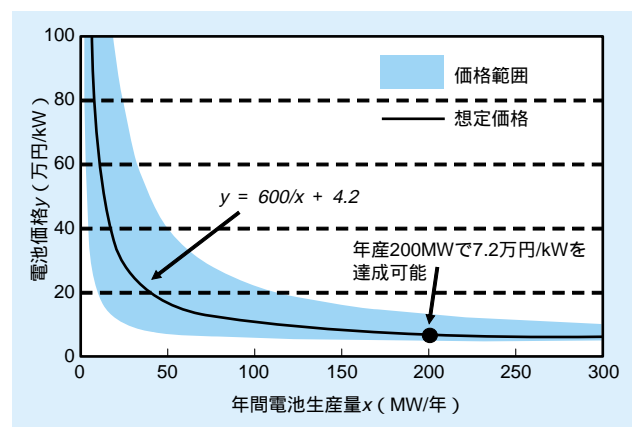


図5-3-5 MCFCプラントの目標建設費

量は、その交換頻度にも関連する。すなわち、生産量と寿命は密接に関係しており、導入初期には交換頻度の高い場合の方がコスト的に有利になる可能性がある。この点は燃料電池プラントの経済性に関わる大きな特徴とすることができる。

まず小規模の生産設備による初期導入から大規模な生産設備による商用期への段階的な生産設備の拡大を想定し、図5-3-5に示した生産量と電池価格の関係も用いながら市場への導入展開に伴う発電コストの推移を検討した<sup>(6)(12)</sup>。プラント性能実証を兼ねた少量(5 MW/年)の初期導入から、年産20MW、200MW規模への3段階の設備増設を想定すると、図5-3-6に示すように初期導入から10年程度で10円/kWh台の発電コスト達成が期待できる。

実際の市場導入においては、初期導入時の展開が重要となる。全導入量と電池寿命による発電コストの違いの検討結果を図5-3-7に示す<sup>(12)</sup>。導入量は市場規模とも考えることができ、コストミニマムの観点から市場規模に応じて適切な電池交換期間が存在することが明らかになった。すなわち初期導入段階における過度の性能目標設定は、開発費と開発期間の増大をもたらすことから、市場導入の進展に応じてMCFC発電のメリットを享受しながら、電池寿命を始めとする性能目標値を導入の各段階で合理的に設定していくことが重要である。燃料電池市場は、その規模が達成されれば、電池本体の周期的交換により電池寿命にかかわらず価格は安定することが期待できる。

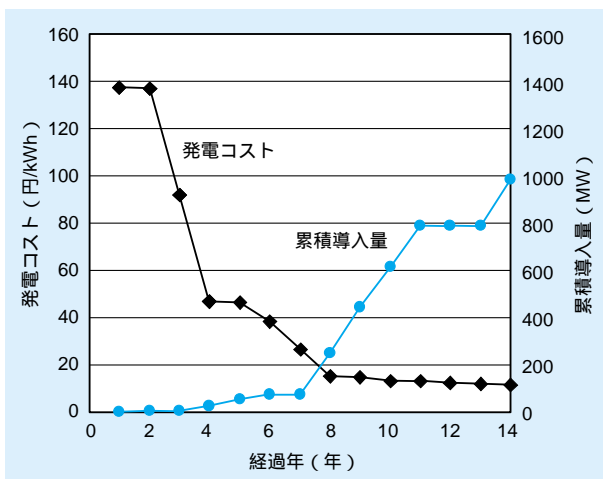


図5-3-6 プラント累積導入量と発電コストの推移  
(5、20、200MW/年の段階的な生産設備増強、2、3、4、5年の段階的な電池寿命改善を仮定)

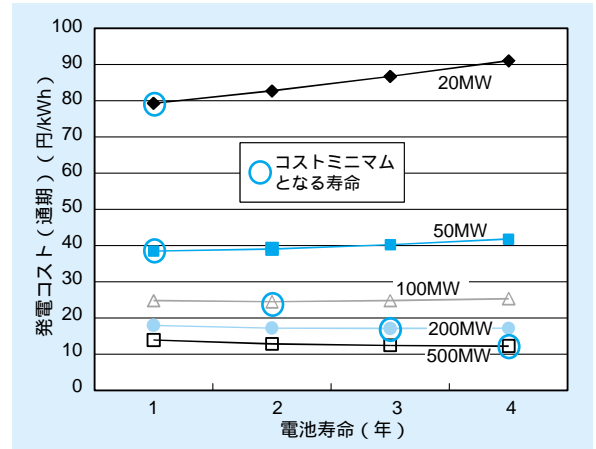


図5-3-7 MCFCの全導入量と電池寿命による発電コスト

### (3) 電源構成から見たMCFC導入の経済性

MCFC発電設備が電力系統に導入され、需給運用に組み込まれた場合の全国ベースでの経済性について、2009年の長期需給見通しに基づき、年負荷持続曲線上で分析した<sup>(13)</sup>。検討は、5-3-1項での設計プラントを参考に、MCFCが分散電源、集中(大型)電源(LNG燃料、石炭燃料)としての設置形態で全体容量の約2%程度(5,000MW)導入される場合を想定して実施し、定格負荷運用がそれぞれ全運転時間の3/3、2/3、1/3を占める3つのケースを対象にした。なお全ケースとも定格負荷時以外は最低負荷(30%)運用を行うことを想定した。

その結果、系統全体の総発電単価の変化はMCFCの導入量を少なく設定したため小さくなったものの、集中(大型)電源として既設電源に代替して導入する場合に大きなメリットが得られ、LNG燃料の場合には、定格負荷運用の時間帯が2/3を超える場合(稼働率約80%以上の場合に対応)において、また、石炭燃料の場合には全ての負荷運用ケースにおいて、MCFC導入に対応する分だけ、系統全体の総発電単価を低減できる結果となった。図5-3-8にLNG燃料の集中配置形態で導入した場合を例に総発電単価への影響を示す。ケース1において既存設備に代替すれば約0.03円/kWhの改善が見られた。一方、分散電源として導入した場合には、経済性を得るためには100%近い稼働率が必要で、特に非電気事業者が設置する場合には、LNG並の価格での燃料調達が求められる結果となった。

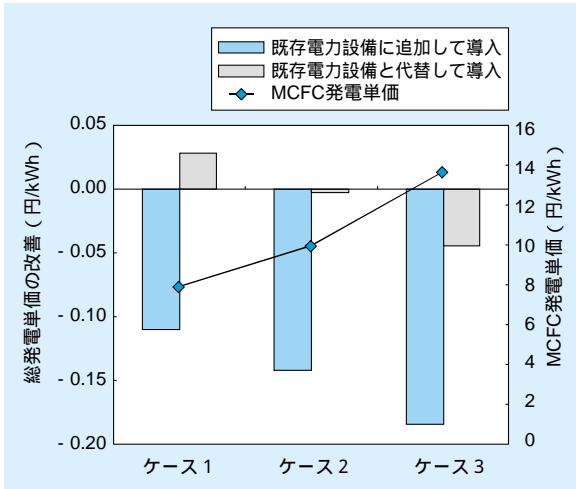


図5-3-8 MCFC発電単価と系統総発電単価の改善 (LNG燃料の集中配置形態の場合)  
 (ケース1：定格で全期間ベース運用、ケース2：全期間の2/3を定格で運用、残り1/3の期間は最低負荷(30%)で運転、ケース3：全期間の1/3を定格で運用、残り2/3の期間は最低負荷(30%)で運転)

を図5-3-9に示す<sup>(13)-(15)</sup>。集中電源としてのMCFCの原単位は従来の文献によるものであるが、今回検討した分散電源としてのMCFCと共に、その環境特性は非常に優れたものであることが分かる。

## (2) 電力系統から見た化石燃料消費量の削減

5-3-2項(3)における電力系統への天然ガス利用分散電源、集中電源(LNG燃料、石炭燃料)としての導入を想定した場合の化石燃料の消費量を重油換算値で検討した(図5-3-10)<sup>(13)</sup>。基本的には、各ケースともMCFCの稼働率が高い方が燃料消費量が抑えられ省エネ効果も高くなる。5,000MWのMCFC導入による石油換算量のエネルギー消費の変化はおおよそ300万kLのオーダーとなった。燃料種別で見ると、MCFCの稼働率変化で影響を受ける燃料種別は、おもに石油であることが分かる。LNGや石炭への影響はほとんどなく、MCFCの導入は石油代替の役割を果たすことになる。

## 5-3-3 プラント環境性能の評価

MCFC発電設備の大きな特長である優れた環境保全性に関しても、プラント単体としての環境特性、系統に導入した場合の影響を検討した。また、小型分散電源として導入した場合の経済性も含めた環境特性についても検討した。

### (1) 各種発電設備によるCO<sub>2</sub>排出原単位

これまで多方面で検討されてきた電気事業用としての集中電源のライフサイクルアセスメント(LCA)解析結果と比較したMCFC発電プラントのCO<sub>2</sub>排出原単位

### (3) 小型分散電源における環境性能と経済性

MCFCの初期導入形態と予想される小型分散電源の環境特性は、導入展開のための重要な指標になる。そこで現状では規制が緩やかな民生用を対象に経済性も含めて検討した<sup>(16)</sup>。民生用コージェネレーションシステムからの環境への排出物に関しては、大都市圏の一般環境大気濃度の5~7%程度を占めるとの報告があり、今後設置台数が増加すればその影響度は大きくなっていくものと考えられる<sup>(17)</sup>。

民生のコージェネレーションの75%は事務所、ホテル、店舗、病院の4業種が占めているが、これらの内、熱需

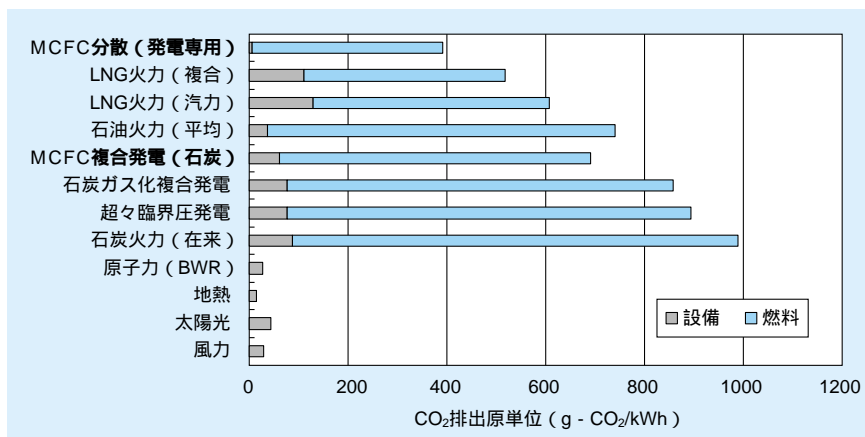


図5-3-9 各種電源のCO<sub>2</sub>排出原単位比較



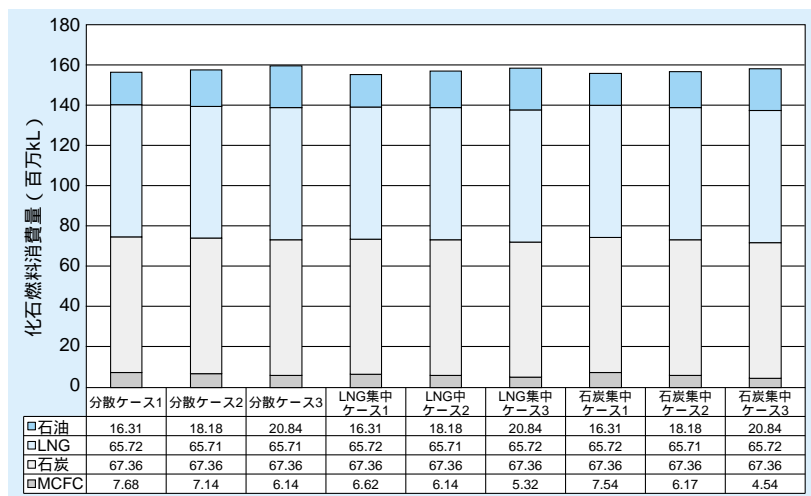


図5-3-10 燃料別消費量の比較（ケース分けは図5-3-8と同様）

要の少ない用途ならびに多い用途の代表としてそれぞれ、事務所とホテルについて検討した。一例としてホテルにMCFCを導入した場合と競合機種であるディーゼルエンジン（DE）を導入した場合の導入前後の環境影響物質削減率を図5-3-11に比較して示す。ディーゼルエンジン導入により、省エネルギー性は高まりCO<sub>2</sub>排出量は削減されるが、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>は増大する結果となった。これに対してMCFCの導入では、全ての項目でディーゼルエンジンに比較しても優位となることが明らかとなった。

また、導入後の投資回収年数に関して、環境排出物の排出削減コストを反映させて経済性への影響を検討した<sup>(16)</sup>。その結果排出物削減コストを加味することに

より投資回収年数は数%短縮できた。さらに、MCFC設備コストが20万円/kW程度まで安くなった時に、初めて対抗機種（約11万円と仮定）と同等の投資回収年数を達成できることが分かった。ホテルにおける例を図5-3-12に示す。

この他、近年IT関連産業の急速な伸びに伴って設置が盛んになっているデータセンターについても、一定の熱需要を有する点で最もMCFCに適した適用形態の一つとしてその環境性と経済性を検討しており、UPS代替として想定した場合、MCFCの費用が80万円/kW（電池交換費用1回分込み）と比較的高額であっても、充分なコスト削減効果が期待できることが明らかになっている<sup>(16)</sup>。

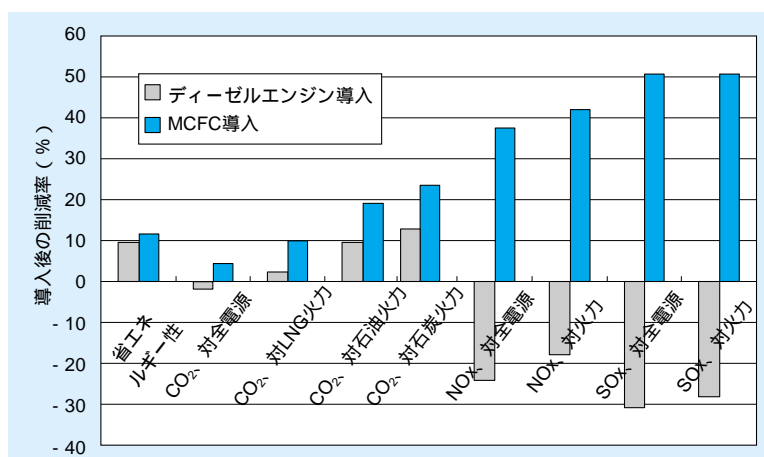


図5-3-11 発電設備導入に伴う環境性能の変化（ホテルにおける導入前後比較）

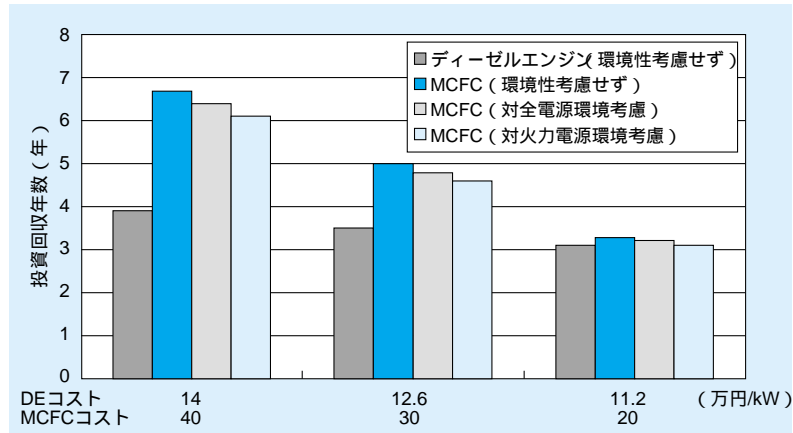


図5-3-12 発電設備の投資回収年数（ホテルの場合）

## 5 - 4 実用化へのシナリオ

### 5-4-1 初期導入市場の実態

一般市場への普及に必要な価格レベルに導くまでの初期導入期は非常に重要である。初期導入が予想される市場は分散電源市場であるが、それらも、容量範囲によって様々な特徴を有する。そこで、MCFC実用化へのシナリオを検討するにあたり、まず市場実態についての調査を行った<sup>(1)-(5)</sup>。

1,000kW規模以下の民生業務用発電市場<sup>(1)</sup>では、コージェネレーション設備として導入が進んでおり、その目的は、主にエネルギーコストの削減にある。しかしその中でも500kW級以下では、夜間停止の運転パターンが多く、運転管理のための担当者も少ない。このため、経済性の事後評価が十分になされていない場合が多い。熱利用についても熱が余っているからと言う消極的な理由が多い。これに対して500～1,000kWクラスの設備では、しっかりした運転体制とフラットな負荷パターンにより、概ね計画に近い経済性が確保されている。しかし、設備のトラブルに対する改善要望は非常に強い。

1,000～10,000kWクラス<sup>(2)</sup>では、環境を意識した導入と、熱利用による積極的な経済性追求が特徴的である。また、ガスタービンも多用されている。業務用あるいは産業用としてのコージェネレーションへの適用が多く、稼働状況は全般的に良好であり、しっかりしたメンテナ

ンス体制によって、トラブルは軽微なものに限られている<sup>(2)</sup>。

10,000kW以上の分野<sup>(3)</sup>では、工場内に設置する自家用発電設備としてコージェネレーション設備の利用が多く、発生する蒸気を工場の生産プロセスに利用する例も多い。エネルギー多消費産業では、コスト削減のために、電力の自給率を上げる事が基本的認識となっている。運用はほとんどが24時間稼働であり、年間稼働率も高く、設備トラブルはほとんど無い。

以上を踏まえ、MCFCの初期導入に当たっては、比較的小規模のコージェネレーション設備の特徴を良く踏まえた設備構成、性能目標の設定が重要となる。

### 5-4-2 導入の基本ステップ

新規電源が新たに市場に導入されていくためには、「既存電源を大きく上回る機能・性能と同等以下のコスト」、あるいは「同等の機能・性能と大幅な低コスト」のいずれかが要求される。MCFCでは当面前者、発電効率の高さと優れた環境特性の実現を目指して開発を進めていくべきである。

MCFC導入シナリオとしてその基本的考え方を整理した。多くの新規発電設備と同様に、MCFCは導入初期の設備費が高い。一方で量産による設備費低減効果は、特に電池素子における大量生産による低減が非常に大き

いことが期待される。また、補機類（BOP）に関して温度レベルが金属材料を適用できる領域にあることから既存の熱交換器などが適用でき、比較的低価格でシステムを構成できる。このようなことから、MCFCの導入は、その初期には設備費の高さをある程度補償できる小容量電源としてニッチ市場からの導入が想定される。その後、信頼性の向上や量産による設備費の低減と一般的市場への普及拡大によって、より規模の大きな事業用も含めた電源としての普及が始まるものと期待される。

表5-4-1に想定される基本的なMCFCの導入ステップをまとめた<sup>2)</sup>。初期導入は、所要費用の絶対額が少ない自家用小型分散電源から進み、その性能の確認を経て、より大型の事業用電源へと展開することが想定される。このような過程にあって、MCFCは初期には既存分散電源を凌駕する機能・性能の実証、本格導入段階においては既存分散電源と同等あるいはそれ以下の価格、発展的導入段階にあっては大型事業用電源を上回る機能と価格を実現させていく必要がある。

### 5-4-3 導入拡大への道筋

#### (1) プラント建設費低減

一般市場に受け入れられるためには、効率の高さはもとより、将来的な建設費低減も見通しておく必要がある。近年電気事業における規制緩和に伴って発電設備の価格低下が著しく、新型発電設備の目標価格は、より厳しいものとなっている。目標とする建設単価を実現するためには、スタック本体の部品点数の削減、材料使用量の削減、軽量化、高出力化、量産化など、電池本体に関する一層のコスト低減が重要である。電池以外ではBOP機

器のコスト低減も重要である。比較的小容量のMW級以下のシステムでは全体価格に占めるBOP費用の比率が高くなるといわれている。さらにシステムの固定費だけでなく、運転費用の低減も重要であり、効率はもとより、今後システム運用経験を積み重ねる事によって、保守管理費は大きく改善されていくことが期待される。

#### (2) 寿命目標の段階的設定

信頼性すなわち電池寿命の確保も導入初期には重要な課題となる。燃料電池発電設備は一般には数年で電池部分を交換しながら数十年間運用することが想定されている。この場合、5-3-2項(2)で示したように初期導入期のMCFC寿命は必ずしも当面の目標とされる数年である必要はなく、むしろ電池交換頻度を高めることによる低価格化効果が期待できることも明らかになっている。導入の進展に応じた段階的な性能目標の設定がむしろ重要であり、市場規模の拡大に伴って寿命を延伸していくことが望ましい。

#### (3) 導入施策の充実

初期導入期における金融上の助成、税制上の助成、補助金、規制緩和などの優遇制度は、その後の燃料電池の普及・展開に非常に重要な役割を果たす。米国では、気候変動プログラムの中で、燃料電池の設備容量に対して、kW当たり1,000ドルの補助金が出されている他、州毎にも優遇措置が整備されている。欧州でもコージェネレーション（combined heat and power, CHP）システムに対して発電電力量に応じて補助金が拠出されている。我が国でも、既に同様の各種優遇措置が取られてはいるものの、さらに充実されることが望まれる。

表5-4-1 想定される基本的なMCFCの導入ステップ

導入段階	初期導入段階	拡大段階			普及段階
主目標	基本信頼性検証	コスト低減・信頼性向上			実用化
想定導入分野	ニッチ市場	小規模分散電源	中規模分散電源	自家発電用電源	事業用電源
想定発電容量	～300kW級	数百kW級	数千kW級	数千～数万kW級	数万kW級以上
想定燃料	特殊燃料を含むあらゆる燃料	都市ガス バイオガス 廃棄物ガス 特殊燃料	都市ガス バイオガス 廃棄物ガス 特殊燃料	都市ガス LNG	LNG 石炭
重要視される項目	発電効率				
	熱利用				
	環境影響度				
	運用性				
	信頼性	(基本信頼性)			
	寿命				
経済性					

## 5 - 5 これからの研究展開

MCFCの電池本体技術に関しては、発電面積1m<sup>2</sup>セルによって構成された10kW級スタックの初期性能とその長期安定性が、1万時間を越える発電試験によって実証されている。MCFCの基本構造や主な材料仕様はほぼ決定され、電池の製造技術についても、電解質や電極に対するテープ成形法、電極の還元雰囲気連続焼成法、およびセパレータ板製造に対する大型精密プレス法や連続自動溶接等、今後の大量生産に適する製造方法が開発され、既に電池の製造に採用されている。すなわち、MCFCに関しては基本的技術課題をほぼ解決したと判断できる。しかし、基本的な技術開発の成功と、その技術を広く社会に普及する商用化とは一般に大きな隔りがある。MCFCは基本的な技術開発に成功したが、商用化して広く社会に技術を普及させるためには、これまで以上の努力が必要である。目前の商用化に対する比較的短期の課題、および広く普及するための比較的長期の課題を纏めると、以下のようになる。

- ・電池生産工場における品質・生産性向上による徹底した電池本体製造コスト低減
- ・他の競合技術に対抗できるMCFC発電の新たな機能創出
- ・超長期の電池性能安定性等、技術成熟による一層の性能向上

### 1 MCFC本体の品質・生産性向上

MCFC本体の製造コストは、製造機械の償却費等に対応する固定費、および材料購入費等に対応する変動費に区別できるが、MCFCの生産量が少ない場合には変動費に比較して固定費が著しく高いことが大きな特徴である。したがって、MCFC本体の製造コストについては大量生産による低減効果は極めて大きく、現状の製造技術の踏襲によって、MCFCの経済性は充分に成立すると考えられてきた。しかし、最近の発電機器の価格低下は予測を上回っており、例えば、発電用大型ガスタービンの本体価格は約3万円/kWであり、さらに低下する傾向が窺える。すなわち、MCFC本体の製造コスト・価格を従来の重電機器価格の常識の範囲内と想定しては、将来広く社会に普及できるとは到底考えられ

ない。

MCFC本体の製造に必要な材料は比較的安価な炭酸塩、ステンレス鋼、およびニッケル等であり、また製造技術も極めて大量生産に適する方法であるので、MCFCの製造コストを予想以上に低減できる潜在的可能性は高い。現状の製造工程を分析し、コスト増となる工程の見直しと改善、および製造歩留まりの向上が必要である。またコストを低減できる電池構造の追及が今後一層重要になる。特に、電池製造メーカーの考え方の切り替えが必要であり、最も生産性向上が進んでいる家電メーカーや自動車メーカーの経験を学び、今後は徹底した生産性向上に対する研究と実践が必要になる。

品質管理・保証等によるMCFC品質向上は生産性向上と共に、MCFCの商用化では重要である。最近の研究開発の結果、MCFCの品質は以前よりかなり安定したものを製造できるようになったが、まだ商用化段階と言えるレベルではない。まして、品質向上と生産性向上の両立は今後の課題であり、将来のMCFCの普及を左右する最も重要な問題である。

### 2 MCFC発電の新たな機能創出

MCFC発電は従来、高効率発電、環境保全性、および使用燃料の多様性等を主な特徴・優位性として掲げ、電池本体の開発を中心にして、システム設計とシステム構成に必要な改質器やターボチャージャー等の補機類の開発、石炭ガスや廃棄物ガスに対する適用性の研究が進められてきた。当面の計画では、MCFCの燃料多様性の特徴を生かし、中部電力(株)やトヨタ自動車(株)が2005年に開催予定の愛知万国博覧会で生ごみ発電や廃棄物発電を実証しようとしており、その後、中部臨空都市国際交流特区の常滑市で空港の生ゴミなどを使いながら発電を継続することも予定されている。高効率発電、環境保全性、および燃料多様性はMCFC発電の大きな特徴・優位性であるが、MCFCの利点はこれらに留まらない。MCFC本体の開発に見通しが見えた現段階では、初期導入を促進するため、MCFCの利点を最大限に発揮させ、MCFCの市場を拡大する必要がある。

これまでの研究の結果、MCFC発電には炭酸ガスの



濃縮機能、カソードにおけるNO<sub>x</sub>の分解機能、アノード排ガスによる淡水の製造機能、良好な部分負荷効率、および迅速な負荷追従機能等を有することが指摘されている。

これらの利点のうち、炭酸ガスの濃縮機能（コラム5参照）に着目した試験が計画されている。また、NO<sub>x</sub>の分析機能については4-2-2項（1）に示した。

水素や炭化水素系燃料が燃焼すると、必ず水が発生するが、従来の発電システムでは、燃料に大量の空気を混合するため、排ガスから水を抽出することは現実的でなかった。しかし、MCFC発電ではアノード排ガスの水分濃度が極めて高いため、アノード排ガスから容易に淡水を抽出することができる。淡水の製造機能は離島や乾燥・砂漠地帯に発電所を立地する場合、極めて好都合であり、役立つ。

MCFC発電のシステム設計は、従来、主に定格運転時の性能に注目して研究が行われてきた。最近になり、ようやく部分負荷時の効率に着目した変圧運転システムの研究が開始されている。また、これまでの多くの単セルやスタック試験の経験から、MCFCの負荷追従速度が極めて速いことが認識され、MCFCの非定常挙動に着目した基礎研究が実施され始めている。さらに、国のプロジェクトで300kWの発電システムが開発されているが、この300kW発電システムの運転経験では、電池本体を熔融塩の凝固温度約500℃以下に降温しなければならない場合は極めて少なく、MCFCが発電しない場合であっても、MCFC本体や改質器は運用期間中ほとんどが500℃以上のいわゆる暖機待機状態に維持されることが理解され始めている。MCFC本体を常温から炭酸塩熔融温度約500℃に上昇させるためには、かなりの長時間を必要とするが、炭酸塩が既に熔融状態であれば、MCFCの起動はかなり短時間で可能である。

すなわち、MCFC発電では、起動時間が短く、負荷追従速度が極めて速く、さらに部分負荷効率が高いシステム構成が可能と考えられる。このような特徴を有する電源は需要地サイドの分散電源として理想的であり、例えば、風力や太陽光発電との結合による極めて省エネルギー効果の高い分散電源の出現、あるいは、送配電システムの安定性に役立つ分散電源等、従来型の分散電源の欠点を回避・補完することができるので、分散電源の導入量を大幅に拡大することが可能になる。

MCFC発電における負荷変化時の動特性等に関しては基礎研究が開始されたばかりであるが、今後、理想的なMCFCの分散電源を実現するために、新たな視点に基づく本格的な研究開発が必要である。

### 3 技術成熟による一層の性能向上

当面の目標である寿命5年の技術的見通しは達成できたので、MCFCの大量普及に備え、今後は寿命を10年に倍増することを目指すべきである。そのためには、また基礎研究に立ち戻る必要がある。

電池電圧を向上させ安定に維持するためには、電極構造が最も重要な役割を果たしており、電解質の占有状態との関連性について、運転条件と電極/電解質の濡れ性を考慮した電極設計技術を高度化しなければならない。この設計においては電池寿命の観点からも、占有電解質量の経時変化に対応して高電圧を維持できる電極製造技術が必要である。さらに、今後多様な燃料に適用させつつMCFCプラントを普及させて行くに当たっては、燃料ガス組成や酸化剤ガス組成の違いによらず十分な寿命が確保できるように、電解質との濡れ性と電極マイクロ構造の適切なマッチングを図る必要がある。

電池寿命を倍増させるには、寿命に影響を与える要因である電解質損失の低減とニッケル短絡抑制（発生時間の遅延）がさらに重要である。電解質損失は、電極内部での電解質分布の経時的変化を意味し、反応抵抗の増大をもたらすほか、電極と電解質板と接するマクロポアが電解質で満たされなくなり接触抵抗（内部抵抗）の増大につながる。また、腐食生成物による内部抵抗の増大も懸念される。電解質損失は、主に金属部材の腐食に伴って電解質が反応・消耗することに起因しており、高温腐食をさらに抑制する技術や電気抵抗の小さい腐食生成物に着目した技術開発が必要である。

ニッケル短絡は電解質への電極材料の溶解と電解質マトリックス内での析出の両面から、さらに幅広く検討されるべき課題であり、電解質への溶出を現状よりさらに低減できる新規カソード材料の開発、溶解度を低減する新規電解質組成や添加物、析出を抑制する電解質マトリックス構造の開発をさらに進めていくべきである。

これらの基礎研究は、MCFCの普及拡大を支える重要な技術であり、プラント製造法や運転法の開発に並行して引き続き着実に継続して行かなければならない。

## コラム6：MCFC研究の草創期と実用化への期待

MCFCに着想したのは、石油代替エネルギーとして石炭ガス化発電の基礎研究が米国・欧州で開始されたことによる。石炭ガス化発電は環境面で優れているが、石炭直焚発電に比べて発電効率が大幅に低下するためガスタービンと組合せる複合発電とする必要があり、これがためには石炭ガスのクリーンアップが不可欠となる。このクリーンアップ方式としては水洗方式が一般的であったが、これによる石炭ガス化複合発電の発電効率は、その当時のガスタービンの効率が30%程度であったため石炭直焚発電と同等あるいは同等以下しか望めなかった。この問題解決のためには、高温の乾式クリーンアップ方式を開発するか、ガスタービンを遙かに上回る発電効率を持つ新しい発電方式を開発する必要があった。そこで、発電効率50%以上の期待が持て、各種ガスが燃料として使用可能なMCFCの調査・研究に着手することとした。

MCFCは、1920年頃ドイツにおいて研究が行われたが、電解質の漏れ、電極の腐食などの問題が解決されず研究は中止されていた。当研究所が基礎研究段階から研究を開始したのは1980年代初めのことである。当時、基礎研究は、工業技術院大阪工業技術試験所（現(独)産業技術総合研究所関西センター）ほか各重電メーカーの研究所で開始されていた。そこで各機関と個別に共同研究契約を結び、当研究所の研究員が各研究所に出向き、電極面積5cm角程度の単電池段階から試作・試験し、開発研究をスタートさせた。その後、電極面積を徐々に拡大し、電極面積30cm角の単電池を10枚積層した1kWのMCFCを製作できる段階となり、当研究所横須賀研究所構内に1kW級電池試験装置を設置し、各種試験を実施し発電用としての利用に自信を持てたのである。この結果が、60cm角単電池による10kW級スタックの要素技術開発などを経て、1,000級発電プラントの実現に向けたムーンライト計画での実用化試験に繋がることとなった。

また、PAFCの経験から、プラント構成要素の基礎研究が重要であるとの認識のもと、電池本体以外の周辺機器の研究開発を基礎的段階から行うため、MCFC発電システム技術研究組合の設立が促されたことも忘れてはならない。1999年から2000年にかけては、中部電力川越火力発電所構内のMCFC研究組合川越発電試験所でプラントの実

証と運転研究が行われた。世界初となる1,000kW級出力の達成と約5,000時間に及び運転実績を挙げた際には、MCFC開発に係わってきた一人として格段の感激を覚えたものである。

これらの結果を受けて、引き続き早期実用化を図るための国の研究開発が進められており、民間においても中部電力(株)、トヨタ自動車(株)などで実証研究が行われている。これらの有効な成果が一日も早く世間に認められ、市場が広がることを期待している。

一方、国外でもMCFCの早期実用化の研究が開発されており、既に内部改質型MCFCのフィールドテストが開始されつつある。我が国でもかつて関西電力/三菱電機が開発を進め、長期実証試験にも成功した実績がある。特に、分散型電源用としての利用に魅力を有しており、その実用化の可能性も十分に感じられたものである。

さて、MCFCを早期に市場に導入するには、どのような方策が考えられるであろうか。最も重要な経済性については、高コストに繋がる特殊な材料・製造技術は見当たらないので今後のコスト低減努力に大いに期待するとして、その他の課題について考えてみたい。

先ず市場導入を急ぐとすれば、燃料は天然ガス利用に限定して開発を進めるべきと考える。次に他の燃料電池とMCFCの違いをもっと強調すべきである。すなわちMCFCは、1 発電専用機として50%以上の発電効率が期待でき、排熱利用面での制約がない。2 中小容量分散電源として任意の容量選択が可能で立地的制約がない。3 負荷変動特性など利便性や環境性に優れている。

そして、性能向上などの研究開発の重要性を十分に認識しつつも、それ以上にフィールドテストを積極的に進め、電源としての優位性と既に実用段階にきていることについて、社会で確固たる認知を得る努力をすべきと考える。

我が国で、MCFC研究を発想し中核を担って先導的に研究を推進してきたのは当研究所である。この優れた研究を支える研究者の健闘に期待するところ大である。

(電力中央研究所

名誉特別顧問、前専務理事 上之園 博)