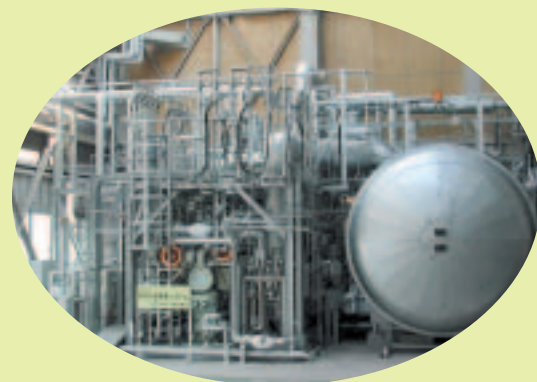
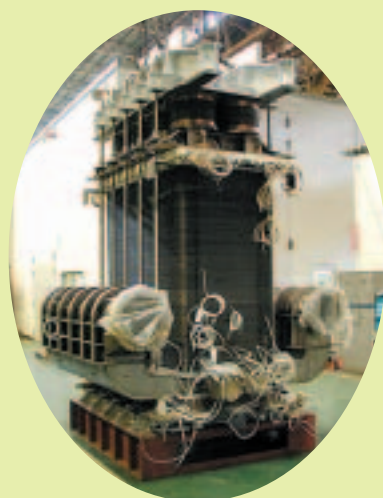


DENCHUKEN REVIEW

燃料電池発電技術 MCFC実用化への挑戦

電中研レビュー No.51 2004.3



財団法人 電力中央研究所

巻頭言	中部電力(株)技術開発本部 常務取締役本部長 清水 眞男	2
電中研「燃料電池発電技術研究」のあゆみ		4
はじめに	理事 横須賀研究所長 浜松 照秀	6
第 1 章 なぜ MCFC か (燃料電池としての MCFC の魅力)		7
1-1	燃料電池発電とは	9
1-2	様々な燃料電池	12
1-3	MCFC の基本原理	15
1-4	発電システム基本構成	17
コラム 1	: HHV ? LHV ? DC 端 ? 送電端 ? (熱効率の定義)	19
コラム 2	: 炭酸塩とは?	20
第 2 章 これまでの MCFC 開発 (その成果と課題)		21
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
第 3 章 実用化へのキーテクノロジー (実用レベルを支える基盤技術)		37
3-1	性能解析と評価技術	39
3-2	セルの高性能化と長寿命化	44
3-3	大出力化のためのスタック技術	50
コラム 4	: 炭素析出とその抑制	56
第 4 章 天然ガスからバイオ・廃棄物・石炭ガスへ (適用拡大を目指す 応用技術)		57
4-1	低カロリー燃料の適用	59
4-2	供給ガス中不純物成分の影響	63

4-3	高性能ガス精製技術	68
4-4	実電池特性に基づく発電システムの構築	72
	コラム5：MCFCによる炭酸ガス濃縮	77
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）...	79
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
付録	もうひとつの高温型燃料電池 - SOFC -	97
付-1	SOFCの特徴と位置づけ	99
付-2	基盤技術への取り組み.....	104
おわりに	===== 参事 横須賀研究所副所長 阿部 俊夫	108
	引用文献・資料等	110
	略語一覧	114

表紙絵：燃料電池による未来都市への電力・熱供給イメージ

- 上右：LNG利用火力代替MCFC発電プラント（300MW級）の概念図
- 中：天然ガス利用MCFCプラントの概念図（左：10MW級、右：7MW級）
- 下左：10kW級MCFCスタック発電設備（（財）電力中央研究所横須賀研究所構内）
- 下中：250kW級MCFC高積層スタック
- 下右：300kW級加圧小型発電システム（熔融炭酸塩型燃料電池発電システム技術研究組合川越発電試験所構内（中部電力（株）川越火力発電所内））

MCFCと‘愛’地球博



過日、「ノーベル賞受賞者を囲む技術フォーラム」に出席する機会を得ました。

パネラーはC₆₀（フラレン）の発見によりノーベル化学賞を受賞した英国のハロルド・クロート氏、また、不斉合成理論で同賞を受賞した野依良治氏、さらに次期ノーベル賞候補として名声の高い、青色発光ダイオードの赤崎勇氏およびカーボンナノチューブの飯島澄男氏であり、まさに内外の知の集合でありました。

各氏の科学技術に取り組む哲学等を拝聴でき、中部電力において技術開発の責任者を拝命している私にとって、極めて感慨深く、かつ、今後への

示唆を得ることができました。各氏の研究領域には差異があるものの、真理を探究する各氏の発言には多くの共通項が見受けられました。例えば、研究への取り組み姿勢としては、「好奇心」旺盛であること、諦めない（やり抜く）こと、また、自分の仕事に惚れ込む（美しいと思う）ことなどを全員が強調されておりました。さらに、優れた研究者に要求される能力はSerendipity（当てにしないものを偶然にうまく発見する能力）であり、また研究領域としては「人のやらない領域」を追求せよと力説され、その中でも特に**化学・物理学・生物学の融合領域**が魅力に満ちた研究領域とのことでした。

今回の電中研レビューの主題である溶融炭酸塩形燃料電池（MCFC）について、ノーベル賞受賞者の言に映して考えてみると、MCFCの基本原理は1920年代に既に開発され、それ以来80余年、国内外の機関や研究者が諦めずにやり抜いた結果により今日の技術レベルに到達したわけであります。また、燃料としてバイオマス燃料を想定すれば、將に、この技術は、**化学・物理学・生物学の融合領域**の技術といえます。

MCFCの特長については以下の各章で、それぞれの専門家の皆様が詳述することになりますが、極めて概括的に俯瞰してみますと、発電効率が高く、熱電供給が可能で総合熱効率が高いことが最大の特長と言えましょう。また、多様な原燃料の利用が可能であるとともに騒音や排出物等の環境調和性が優れていること、さらに、燃料の内部改質が可能であり、かつ貴金属触媒が不要であることも大きな利点と言えましょう。将来、MCFCが大容量化すれば、21世紀の地球環境問題の最大の課題であるCO₂問題も、MCFCを使うことによりCO₂の濃縮回収が可能になり、地層や深海への固定処分につながる有効な環境技術の一つに発展することも期待されております。

来年3月から半年間、名古屋市の東部に位置する瀬戸丘陵で、万国博覧会「愛」地球博が開催されます。メインテーマは「自然の叡智」と銘打って環境をテーマとした博覧会です。我々、電力会社も共同で「ワンダーサーカス・電力館」を出展することといたしております。会場への電力供給の主体は当然のことながら商用電源でありませんが、「政府館」の消費電力の一部にNEDOの補助を受けて、会場で発生する生ゴミから取り出したメタンガスを燃料として300kW MCFCで発電し供給することとしております。また、「電力館」へは50kW 固体酸化物形燃料電池（SOFC）を設置し空調等への電力供給をすることとしています。

万博は国内外から1500万人の入場者を予定しており、開館期間を通して、安定運転することにより、日本の燃料電池発電技術の確かさを全世界にアピールするとともに、同技術のさらなる発展に寄与してまいりたいと考えております。

中部電力(株)技術開発本部
常務取締役本部長

清水 眞 男

電中研「燃料電池発電技術研究」のあゆみ

西 暦	当研究所の状況	我が国の状況	国外の状況
1801			・ Davy (英) 燃料電池原理発表 (炭素/空気)
1839			・ Grove (英) 最初の燃料電池実験
1921			・ Baur (独) MCFC の原形実験
1946			・ Davtyan(露) アトリクス型 MCFC 実験
1952			・ Bacon (英) AFC の原形を実験、特許取得
1958			・ Broers(蘭) 多孔質 Ni 電極 MCFC 実験
1965			・ GE 社の PEFC がジェミニ 5 号に搭載 (初の実用化)
1967			・ [TARGET 計画で PAFC 開発開始 (米)]
1968			・ UT 社 (Bacon 特許取得) の AFC がアポロ 7 号に搭載
1976			・ [ERDA (米) の開発計画開始]
1977	・ 2kW AFC (富士電機製) を電力系統模擬送電設備に組み込み系統擾乱時の制御方式検討		
1979		・ [サンシャイン計画で AFC 研究開発開始]	・ [公益事業規制政策法 (PURPA 法) 制定、分散電源積極導入開始 (米)]
1981	・ MCFC ムーンライト (ML) 計画 参画 ・ 富士電機、日立と MCFC 共同研究開始	・ [ムーンライト (ML) 計画で燃料電池開発本格開始 (AFC、PAFC、MCFC、SOFC)]	・ [DOE が開発継続、MCFC 開発開始、EPRI が開発開始 (米)]
1983	・ 東芝、三菱電機と MCFC 共同研究開始 ・ MCFC1kW 級 MCFC 評価試験設備設置		・ Westinghouse Electric (WH) 社 (米) 円筒縦縞型 SOFC 開発着手
1984	・ IHI と MCFC 共同研究開始 ・ MCFC 単セル評価法開発、基本性能解明	・ PAFC4.5MW プラント発電 (東京電力/米 IFC 社製)	・ Ballard 社 PEFC 開発開始
1985	・ MCFC、1kW 級スタック試験、大型化確認 ・ PAFC システム性能解析コード開発		
1986	・ MCFC 単セル用小型加圧試験装置設置 ・ MCFC スタック標準試験法を提案 ・ SOFC 研究に着手	・ 500W 円筒横縞型 SOFC 開発 (電総研) ・ 3kW 級 SOFC 運転試験 (東京ガス、大阪ガス/米 WH 社製)	・ [燃料電池の研究開発を開始 (欧、CEC)] ・ [ECN (蘭) が MCFC 研究開始] ・ [ボルタ計画 (伊) 開始、ENEA が MCFC 開発開始]
1987	・ MCFC 加圧基本特性解明、メタネーションによる電圧飽和確認、抑制法検討	・ [系統連系ガイドライン制定] ・ 1MWPAFC プラント 2 機発電 (ML 計画) ・ 10kW 級 MCFC 発電 (ML 計画で日立、東芝、独自に富士電機、三菱電機、IHI) ・ MCFC 研究組合設立 (電中研、メーカー)	・ Ballard 社が Dow 膜による PEFC 発電 ・ ONSI 社 (米) PAFC200kW プロト機 (PC25 型) 開発
1988	・ 10kW 級 MCFC スタック試験設備設置 ・ MCFC7kW 常圧スタック試験 (富士電機製) 大型スタック基本特性把握		
1989	・ MCFC6kW スタックによるガスリサイクル運転研究、単セル非定常モデル開発 ・ SOFC 材料開発開始	・ 200kWPAFC 試験 (東京電力、大阪ガス/米 ONSI 社製 (PC25 型)) ・ 数 100kW 級 SOFC の研究開発開始 (NEDO)	・ [米公営電力組合 (APPA) が燃料電池実用化方策公募 (NOMO)] ・ [ARGE 計画で内部改質 MCFC 開発開始 (独、デンマーク共同)]
1990	・ MCFC 性能相関式開発、性能決定要因分析法開発 ・ MCFC 端部柔構造セパレータ開発、Ni 短絡現象確認、MCFC 発電システム解析コード開発	・ [燃料電池に関する技術基準制定] ・ 30kW 内部改質 MCFC 試験 (関西電力/三菱電機) ・ ナフサ燃料 10kWMCFC 試験 (石油産業活性化センター) ・ 1kW 級 SOFC 試験 (東京電力・電源開発/三菱重工 (MHI)、中部電力/MHI、東燃)	・ [米水素プログラム法制定] ・ [米加州がゼロ排出車 (ZEV) 計画 (2003 年導入) 発表] ・ [NOMO の結果 ERC と電力・ガスによる商業化グループ (FCCG) 設立] ・ 20kW 級 SOFC の運転試験 (米)

MCFC 関係は太字、政策関連は [] で示した。

MCFC : 熔融炭酸塩形燃料電池、SOFC : 固体酸化物形燃料電池、PAFC : リン酸形燃料電池、PEFC : 固体高分子形燃料電池、AFC : アルカリ形燃料電池

西 暦	当研究所の状況	我が国の状況	国外の状況
1991	<ul style="list-style-type: none"> 100kW 級 MCFC スタック試験設備設置 	<ul style="list-style-type: none"> PAFC 研究組合設立 11MWPAFC プラント発電 (東京電力/米 IFC 社製) 	<ul style="list-style-type: none"> ENEA (伊) 1MWPAFC 試験 (Ansaldo 社製/電池は IFC 製)
1992	<ul style="list-style-type: none"> Li/Na 系電解質 MCFC 研究着手、発電システム第一次概念設計 SOFC ML 計画に参画 200W SOFC スタック試作 	<ul style="list-style-type: none"> [ML 計画に PEFC 開発を追加] [燃料電池フィールドテスト事業開始 (NEDO)] [余剰電力買取制度創設] 	<ul style="list-style-type: none"> [エネルギー政策法制定 (米)]
1993	<ul style="list-style-type: none"> MCFC100kW スタック (日立製) 出力達成 (MCFC 組合分担研究) MCFC Ni 短絡予測式開発、不純物の影響評価開始 	<ul style="list-style-type: none"> [ニューサンシャイン (NSS) 計画で開発継続] [MCFC 研究組合改組 (全電力参加)] 	<ul style="list-style-type: none"> [米政府次世代自動車開発計画 (PNGV) 発表] Daymar Chrysler 社と Ballard 社が共同で燃料電池自動車の開発に着手
1994	<ul style="list-style-type: none"> MCFC100kW スタック (IHI 製) 5,100 時間運転達成 (MCFC 組合分担研究) MCFC カソード反応理論に基づく性能表示式開発、電極濡れ性評価装置設置 SOFC アノード新概念提案・高性能実証 		
1995	<ul style="list-style-type: none"> MCFC プレスセパレータ (0.5m²) による 10kW 級スタック発電、アノード性能表示式の開発、スタック 3 次元熱流動解析コード開発 MCFC スタック内部 Ni 短絡寿命予測法開発 	<ul style="list-style-type: none"> [電気事業法改正] 5MW、1MWPAFC プラント発電 (NEDO/PAFC 組合) 10kW 級常圧円筒型 SOFC の発電試験 (電源開発/MHI 製) 25kW 級 SOFC 試験 (関西電力、東ガス・大ガス/WH 社製) 5kW 級平板形 SOFC 試験 (中部電力/MHI 製) 	<ul style="list-style-type: none"> [DOE が MCFC、SOFC を対象に PDI プログラム (製品化開発) 開始]
1996	<ul style="list-style-type: none"> MCFC 高出力密度での寿命予測法開発、Li/Na 系電解質スタック試験、H₂S 影響評価 		<ul style="list-style-type: none"> ERC 社 (米) MCFC 内部改質 2MW 機発電 ONSI 社 (米) PAFC200kW 新型機 (PC25C 型) 開発 250kWMCFC 機試験 (米 MCP 社) 常圧 100kWSOFC フィールド試験 (Westinghouse Electric 社)
1997	<ul style="list-style-type: none"> MCFC 高圧 (5MPa) セル試験設備設置 MCFC ネルンストロス解析、カソード水蒸気影響解析 MCFC 寿命要因解析手法開発、内部電解質分布モデル開発、スタック性能分析手法開発 	<ul style="list-style-type: none"> [地球温暖化防止京都会議 (COP3)] 	
1998	<ul style="list-style-type: none"> 高温状態電極直接観察装置導入 MCFC 単セル寿命特性式開発、Li/Na 系電解質 10kW 級スタック (0.5m²) 1 万時間運転実証 SOFC NSS 計画参画 (電池材料低コスト化の研究) 電極支持型 SOFC 開発 (単セル) 	<ul style="list-style-type: none"> 10kW 級加圧円筒形 SOFC の発電試験 (電源開発/MHI 製) 	<ul style="list-style-type: none"> 1kW 級熱自立 SOFC の発電成功 (スイス Sulzer 社)
1999	<ul style="list-style-type: none"> MCFC 反応ガス遮断時特性解析 SPring-8 を利用した SOFC 材料局所構造解明 	<ul style="list-style-type: none"> MCFC1,000kW プラント (日立、IHI)、200kW 内部改質スタック (三菱電機) 出力達成 (NEDO/MCFC 組合) [ミレニアム計画で PEFC 開発が本格化] 15kW 級平板型 SOFC の発電試験 (中部電力/MHI 製) 	<ul style="list-style-type: none"> 100kWMCFC 試験 (伊/スペイン共同、Ansaldo 社製)
2000	<ul style="list-style-type: none"> 高温下の MCFC 電極内部直接観察手法を開発 MCFC に対する NH₃、NO_x 影響評価、実電池特性を反映した IG-MCFC システム解析 	<ul style="list-style-type: none"> 加圧形内部改質 10k 級 SOFC の発電試験 (電源開発/MHI 製) 	<ul style="list-style-type: none"> 加圧 220kW SOFC の実証試験 (Siemens Westinghouse Power 社)
2001	<ul style="list-style-type: none"> MCFC Ni 短絡防止法の開発、不純物複合効果試験、広負荷域対応発電システム解析 		<ul style="list-style-type: none"> [SECA 計画 (米) 開始] 250kW 内部改質ユニットフィールド試験 (米 FCE 社、独 MTU 社)
2002	<ul style="list-style-type: none"> Li/Na 系 1m² 10kWMCFC スタックによる 1 万時間達成 (MCFC 組合分担研究) 		
2003	<ul style="list-style-type: none"> 高濃度 CO 燃料による MCFC スタック運転実証 SOFC セラミクスインターコネクタ開発、3 セルスタック試験 	<ul style="list-style-type: none"> [再生可能エネルギー利用法 (RPS 法) 発効] MCFC300kW ユニット (中部電力新名古屋火力発電所内小型加圧システム) 1kW 級 SOFC の発電試験 (関電・東邦ガス・京セラ) 	
2004	<ul style="list-style-type: none"> MCFC スタック不純物試験 		

はじめに

理事 横須賀研究所長 浜松 照秀



電力の生産・消費にあたっては、あらゆる国・地域において省エネルギー、省資源化が重要であり、豊富かつ安価な国産エネルギーの利用が可能な場合を除いて、エネルギー資源の多様化、エネルギーコストの抑制は経済を支える基盤として重要と考える。わが国においても、今後の電力需要増が鈍化すると予想される中でも、客観的に省エネルギーでかつ温室効果ガス排出を抑えるには、電力生産に、供給、需要（消費）の全体を捉えたエネルギー需給全体（エネルギーチェーン）で評価・判断していくことが必要であり、電源に求める特性・性能は吟味

が重要と考える。

水力発電、蒸気サイクルによる火力・原子力発電に次いで、シェアの面から第三の発電原理と期待できる電気化学反応による直接発電の原理を応用した燃料電池発電は、環境性や電源規模のフレキシビリティに優れた発電方式として技術的・経済的可能性に注目が集まっている。各種の燃料電池発電方式の中から、とくに「高温型燃料電池」は、ガスタービンと組み合わせることによって通常のガスタービンコンバインドサイクル発電を超える高効率化が期待でき、ガス化技術と組み合わせることによって高効率発電の燃料多様化という、大きな魅力に富んでいる。

当研究所の燃料電池の研究は1979年に設置した「新発電特別研究室」に始まる。高温型燃料電池のうち溶融炭酸塩形燃料電池（MCFC）については、その将来性に着目して国の着手（ムーンライト計画）に先駆けて1981年から本格的に着手し、MCFC研究に積極的なメーカー各社との共同研究を通じて、草創期のMCFC技術を実用化が可能な水準に引き上げる基盤技術開発を先導してきた。

本レビューはこれまでのMCFCの開発成果の各論ならびに市場に導入される初期段階のプラントと将来展望について取りまとめたものである。天然ガスからバイオマス・廃棄物のガス化燃料まで幅広い燃料で大小さまざまな規模の高効率発電プラントが可能なMCFCの実用化に期待したい。

第 1 章

1

なぜMCFCか（燃料電池としてのMCFCの魅力）

燃料電池は環境への影響が非常に少なく効率の高い発電装置として注目されている。そのうち、熔融炭酸塩形燃料電池（MCFC）は600～700℃で動作する高温型であり、電池自体の電圧が高く、高温の排ガスを用いてガスタービンを動作させる事もでき、複合発電としてさらに高い効率が得られる。また、様々な種類の燃料を用いる事ができることも魅力の一つとなっている。炭酸塩を用いている事に特徴があり、炭酸ガスを濃縮することもできる。

第 1 章 なぜ MCFC か (燃料電池としての MCFC の魅力) 目 次

横須賀研究所 エネルギー化学部 上席研究員 麦倉 良啓
 横須賀研究所 エネルギー化学部 主任研究員 吉葉 史彦

1 - 1 燃料電池発電とは 9
 1 - 2 様々な燃料電池 12
 1 - 3 MCFC の基本原理 15
 1 - 4 発電システム基本構成 17

コラム 1 : HHV ? LHV ? DC 端 ? 送電端 ? (熱効率の定義) 19
 コラム 2 : 炭酸塩とは ? 20



麦倉 良啓 (1986 年入所)
 入所以来、燃料電池の性能および寿命評価に関連した研究、特に、性能表示式による MCFC の性能要因分析手法や、ニッケル短絡寿命に関する予測式の開発を担当。また、性能要因分析手法を発展させ、他の燃料電池 (PEFC、PAFC、SOFC) の性能評価に適用することにも取り組んでいる。今後は、新型燃料電池の開発にも注力して行きたい。
 (1 章全体、コラム 2 執筆)



吉葉 史彦 (1993 年入所)
 MCFC の大型スタック発電性能評価に関する研究や、燃料電池発電システムの熱効率解析等を実施してきた。今後は、10kW 級スタック、300kW 小型発電システム、高圧モジュール発電システムの運転や熱収支解析の経験を活かし、MCFC システムの簡素化や MCFC 発電システムの有効性を拡大する研究を展開する。
 (コラム 1 執筆)

1 - 1 燃料電池発電とは

燃料電池は、かつてはアポロ宇宙船やスペースシャトルの電源として知られていたが、近年は、自動車に搭載されたり家庭用に設置されるなどして、より身近な存在となってきた。このように燃料電池が注目される理由として、以下の魅力が挙げられる。

- ・燃料から電気に変換する効率が高い
- ・排出されるガスがクリーン
- ・幅広い分野に適用できる

このような特長は、クリーンな環境を確保しつつ現代社会に不可欠なエネルギーを確保する手段として燃料電池が最も適切な発電装置の1つと成り得ることを示している。

まず、燃料電池の歴史から振り返りたい。燃料電池は、イギリスのグローブ卿によって19世紀前半に実験され、その可能性が示された⁽¹⁾(図1-1-1)。図の下部にある4個のコップが燃料電池であり、上部の1つのコップでは水の電気分解が起こっている。下部のコップでは、水素と酸素が充填された試験管をかぶせられた2本の金属箔(白金)が、電解質(希硫酸)に浸されている。この一対の金属箔の間には1V程度の電圧が生じる。これを電池として使用した場合、試験管内のガスを消費し切れれば電気を取り出すことはできなくなるが、試験管にガス

を連続的に供給すれば連続的に発電することが可能となり、発電機として機能することになる。このように燃料を外部から供給することから燃料電池と呼ばれるようになった。燃料電池の発想はたいへん古いものであるが、実用化は20世紀に入ってからである。同時期に発明されたエンジンの実用化は早かったが、燃料電池の実用化にはかなり長い年月を要した。

燃料電池は使用する電解質により分類される。グローブ卿は電解質に希硫酸を使用した。現在はこれに代え固体高分子を用いる固体高分子形(Polymer Electrolyte Fuel Cell: PEFCまたはProton Exchange Membrane Fuel Cell: PEMFC)や、りん酸形(Phosphoric Acid Fuel Cell: PAFC)、熔融炭酸塩形(Molten Carbonate Fuel Cell: MCFC)、固体酸化物形(Solid Oxide Fuel Cell: SOFC)が主要な燃料電池である。

燃料電池発電と、現在の火力発電所の主流であるガスタービン複合発電とを比較してみたい。図1-1-2には両方式の機器構成を示す。ガスタービン発電方式ではガスタービンが発電効率を支配しているが、燃料電池発電では燃料電池が支配する。

また、各種発電システムの発電出力と発電効率の関係を図1-1-3に示す。

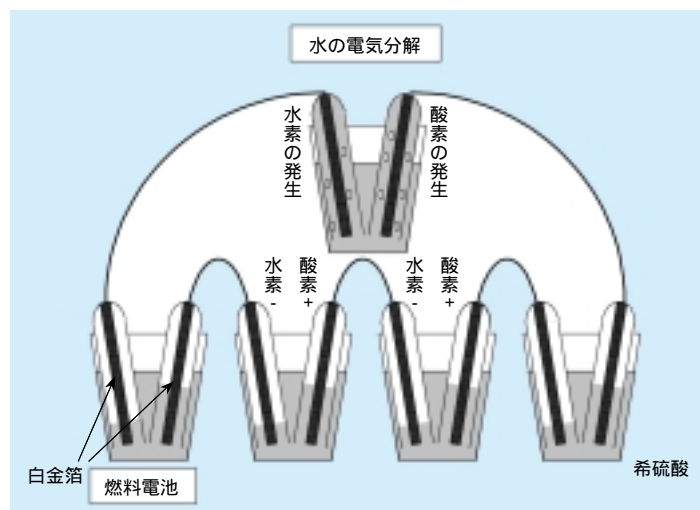


図1-1-1 グローブ卿の燃料電池

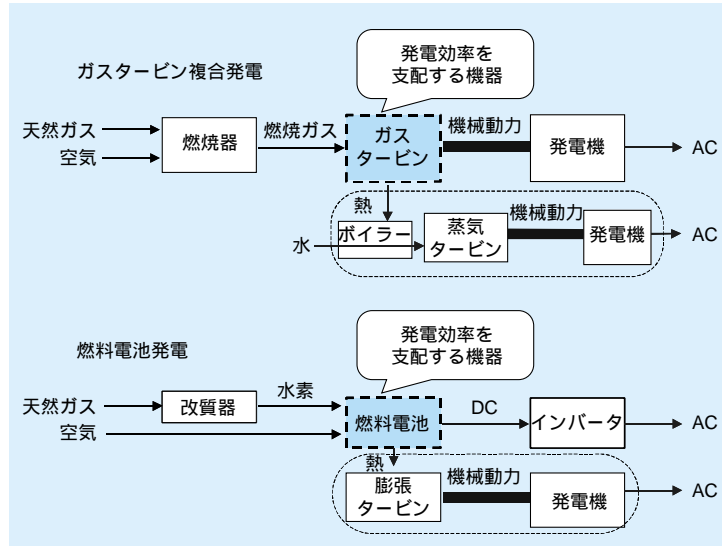


図1-1-2 発電方式による機器構成の比較

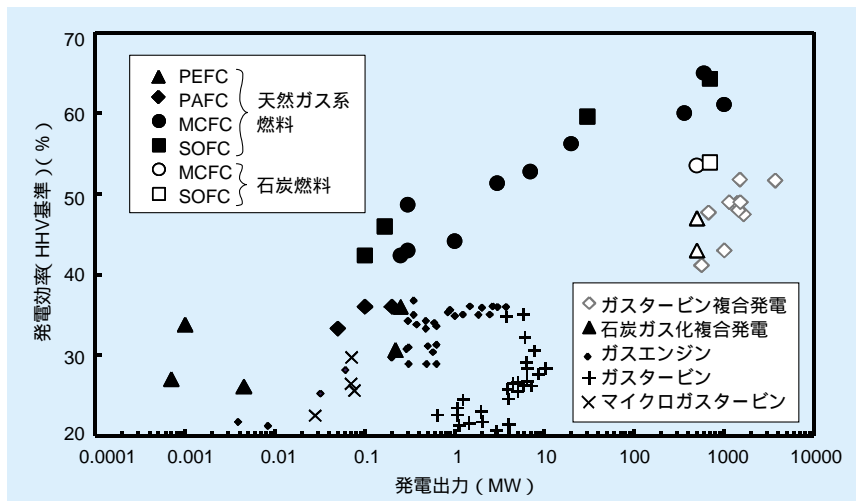


図1-1-3 各種発電システムの発電出力と発電効率

ガスタービン発電では、燃焼器で高温のガスを発生させ、ガスタービンを回して発電するが、燃料ガスが高温なほど高い発電効率が得られる。したがって高効率化のため1500 級までの高温化および大型化が進められ、51%程度の発電効率が達成されている。しかし、1500 以上のさらなる高温化には新たな材料の開発やタービン翼の冷却が必要であり、限界に近づきつつある。これに対し、燃料電池発電では発電効率の主要機器である燃料電池の理想発電効率は低温の場合ほど高く84%にも達する。一方、電池内で起こる化学反応は高温の場合ほど活発である。当所の解析によれば運転温度が500 ~ 1000 で最も高い効率が期待でき、ガスタービンと比較して低い温度域で高い効率が得られる⁽²⁾。さらに、燃

料電池とタービンとを組み合わせた複合発電では、発電出力が大きい程、発電効率の高い大型のタービンを利用できるため発電効率が高くなる。

燃料電池は、アノード、カソード、電解質（マトリックス）の3つの主要な部材から構成され、これら一組をまとめてセルと呼ぶ。図1-1-1のグローブ卿の電池で説明すると、2枚の白金箔がアノードとカソードに相当する。アノードは、燃料が供給される電極であり、燃料極あるいはマイナス極とも呼ばれる。一方、カソードは空気や酸素が供給される電極であり、空気極、酸素極あるいはプラス極とも呼ばれる。

燃料電池では電極面積を広くするほど大きな電流が得られるため、電気出力は電極面積に比例して増加する。

このため、開発されている燃料電池では1m²以上の大面積なものがある。また、燃料電池において大電力を得るためには、図1-1-4に示すように単セルを何枚も積層する。このように、多数のセルが積層されたものを一般的にスタックと呼ぶ。単セルと単セルの間にはセパレータと呼ばれる部品が使われている。セパレータは、電気抵抗の低い金属や炭素でできており、単セルを電氣的に結合する役割の他、燃料ガスと空気を分離する役割、燃料ガスと空気をセルに供給する役割があり、両側にガス流路が刻まれている。燃料電池は種類によって使用する材料が異なるため、その厚みは様々であるが、一般的にアノード、カソード、電解質の厚みは数十μm～1mm程度と非常に薄く、セパレータまで含めても1セル当たり

の厚みは1cmに満たない。

図1-1-5には、PEFCの発電原理を示す。水素(H₂)は、アノードに電子(e⁻)を与え、2つの水素イオン(H⁺)(別名プロトン)となって電解質中をカソードに向かって移動していく。この水素イオンはカソードで酸素(O₂)と反応し、電極から電子を受け取って水(H₂O)となる。このようにアノードでは、中性の物質をイオンと電子に分離し、逆にカソードではイオンと電子から中性の物質ができる。このため、アノードでは電子が過剰な状態となり、カソードでは逆に電子が不足する状態になる。つまり、これらの電極を外部的に電線で結びると自然に電気が流れることになる。これが、発電の原理である。

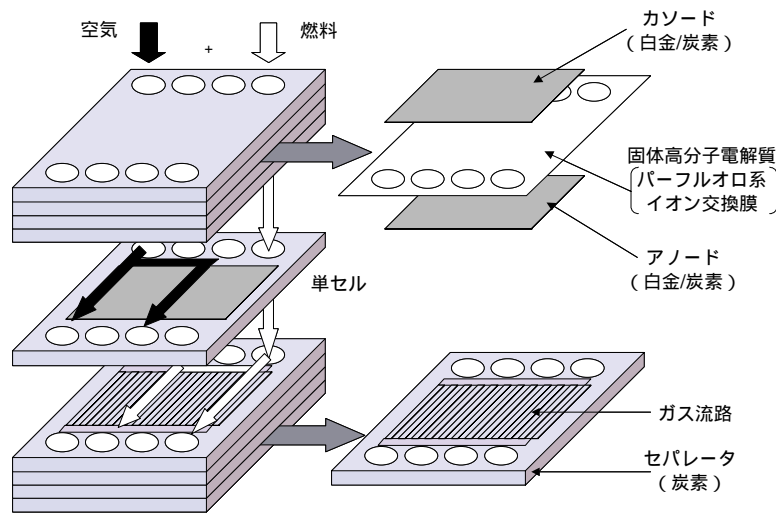


図1-1-4 PEFCのスタック構造

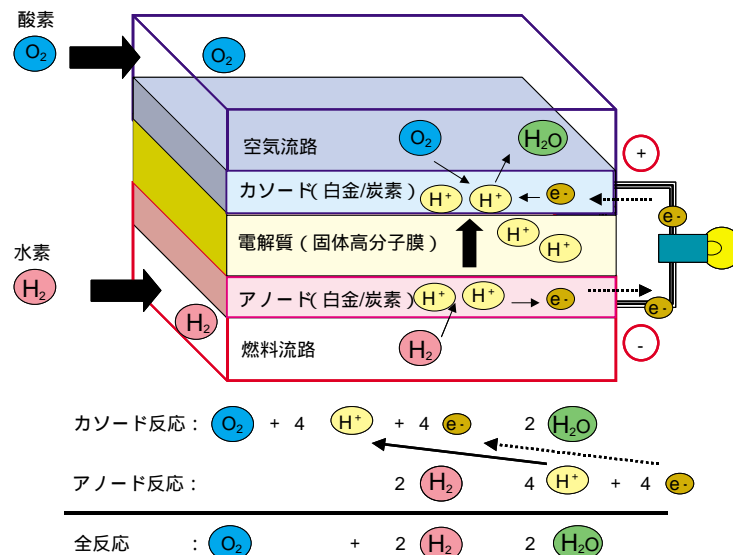


図1-1-5 PEFCの発電原理

1 - 2 様々な燃料電池

1-2-1 種類と一般的な特徴

燃料電池は、既に述べたようにPEFC、PAFC、MCFC、SOFCに分類されるが、電解質の特性によって動作温度や使用する電極材料が選定される。また、MCFCとSOFCは他に比較して電池の動作温度が高く、電池の排熱を利用した複合発電もできるため、特に高温型燃料電池と呼ばれている。燃料電池の種類を表1-2-1に、また、燃料電池の種類と燃料との関係を図1-2-1に示す。200 以下の比較的低温で動作させるPEFCやPAFCでは、化学反応を活発に行わせるため、白金を触媒として使用しているが、MCFCやSOFCは動作温度が高いため高価な触媒が必要なく、ニッケル(Ni)が電

極として使用されている。Niは天然ガスの主成分であるメタン(CH₄)を水素(H₂)と一酸化炭素(CO)に改質する触媒能力があるため、MCFCやSOFCでは天然ガスを直接燃料として使用することもできる。また、SOFCおよびMCFCは一酸化炭素を多く含むバイオマスガス化ガス、廃棄物ガス化ガス、石炭ガス化ガスなどを直接使用できるが、PAFCやPEFCでは、一酸化炭素の濃度が高いそれらのガス化ガスは使用できない。以下で各燃料電池を解説する。

- 1 PEFC：イオン伝導性を持った固体高分子（パーフルオロ系イオン交換膜）を電解質に使用することで、自動車用や家庭用として近年盛んに研究が行われている。運転温度は約80 である。発電効率は約60%と高く、安価な水素製造が実現されれば、魅力的な電源となるが、天然ガス等を燃料とする場合には、触媒である白金が10ppm以上の一酸化炭素濃度で触媒作用を失うため、一酸化炭素の除去が不可欠である。このため、天然ガスを燃料とする場合の目標発電効率は36%程度となるが、排熱を利用した給湯ができ、電気と熱をあわせた総合効率は80%近くとなり、家庭用電源としての利用が期待される。発電出力としては、家庭用として1kW級が、また、自動車用としては数十kW級が想定されている。
- 2 PAFC：電解質として非常に濃いりん酸水溶液を使用し、動作温度は200 前後である。PEFC同様に白

表1-2-1 燃料電池の種類と特徴

	固体高分子形 (PEFC)	りん酸形 (PAFC)	溶融炭酸塩形 (MCFC)	固体酸化物形 (SOFC)
動作温度	約80	約200	600 ~ 700	700 ~ 1000
電解質	プロトン導電性高分子膜	りん酸水溶液	溶融炭酸塩 (Li/K, Li/Na)	固体酸化物 (YSZ)
反応イオン	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ₂ ⁻
使用可能源燃料	水素 天然ガス メタノール	天然ガス メタノール	天然ガス バイオマス、廃棄物 石炭	天然ガス バイオマス、廃棄物 石炭
適用分野	移動用電源 分散電源など	火力代替電源 分散電源	火力代替電源 分散電源	火力代替電源 分散電源
備考	COによる触媒被毒	COによる触媒被毒		

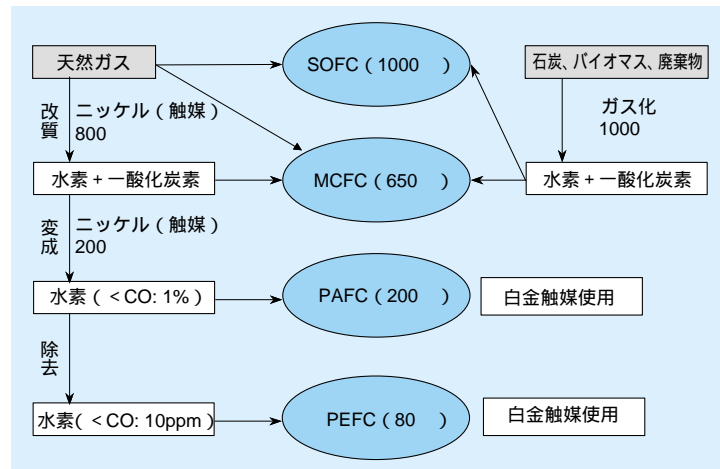


図1-2-1 燃料電池と使用可能な燃料の関係

金触媒を使用するが、PEFCよりも動作温度が高いため、一酸化炭素（CO）の許容値は1%と高い。これ以上の一酸化炭素濃度を持つ燃料を使用する場合には、一酸化炭素を二酸化炭素に転換する変成器を用いる必要がある。PAFCで使用できる燃料は比較的水素成分の多い天然ガス、メタノール、およびプロパンガス等に限定される。発電効率は40%弱であるが、排熱を利用した給湯ができ、電気と熱をあわせた総合効率は80%近くとなり、分散型電源としての利用が期待される。現在は、発電出力200kW級プラントの実証導入が進められている。

- 3 MCFC：電解質には通常、混合炭酸塩（炭酸リチウムと炭酸ナトリウムあるいは炭酸カリウムの混合物）を溶融させたものを使用する。この混合炭酸塩は約490℃で解けて、高温なほど導電率が高くなるが、700℃以上になると、電池に使用している材料を激しく腐食させるため、MCFCの作動温度は650℃前後である。アノードにはニッケル（Ni）が用いられる。また、ニッケルを触媒として、一酸化炭素（CO）は水蒸気（H₂O）と反応し、水素（H₂）と炭酸ガス（CO₂）になる（シフト反応）ので、一酸化炭素も直接燃料として使用できる。従って、石炭ガス化ガス等も直接使用することができる。発電出力としては分散型電源としての250kW級から火力代替用の数万kW級までが想定され、開発が進められている。
- 4 SOFC：電解質には、セラミックスであるジルコニアが通常使用され、その動作温度は700～1000℃である。アノードにはニッケル（Ni）主体の物質が使用されている。発電効率は45～60%で、分散型電源から火力代替用までの広い用途が期待されているが、近年は発電出力1～50kW程度の小型のものが中心に開発されている。

1-2-2 電池本体の発電効率

このような燃料電池本体の発電効率について考えてみたい。ガスタービン発電では燃料は燃焼器で全て燃焼されるが、燃料電池では電池内で燃料がなくなると電圧が急激に低下するため、供給した燃料を100%利用することはできない。供給した燃料のうち発電に利用される燃料の割合を燃料利用率と言い、同様に酸素利用率も定義

される。燃料利用率や酸素利用率は、燃料電池システムにおいて重要なパラメータであり、発電効率を上げるためには燃料利用率を高くする必要があるが、実際には80～90%程度である。ここで、燃料利用率を U_f とすると燃料電池の発電効率 ε_{fc} は、いずれのタイプの燃料電池であっても電池の出力電圧 V によって次式によって定まる。

$$\varepsilon_{fc} = \frac{nFU_f V}{\Delta H} \quad (1-2-1)$$

ここで、 n は反応電子数であり、ファラデー定数 F （C/mol）との積である nF は1モルの燃料が反応するときに移動する電荷の総量である。 H は燃料1モルを燃焼した場合の発熱量である。上式中の nF/H は燃料の種類のみによって決まり、たとえば燃料が水素の場合 $\varepsilon_{fc} = 0.675 U_f V$ （0、HHV（高位発熱量、コラム1参照）基準）となる。 V は、無負荷時の電圧である開路電圧 E から、反応によるガス濃度変化に伴う起電力の低下分（ネルンストロス）、内部抵抗による電圧降下、アノード反応に伴う電圧低下分、カソード反応に伴う電圧低下分を差し引いた値である。（性能要因の詳細については、3-1節参照）

4つの燃料電池性能の比較を図1-2-2に示す。燃料は天然ガス、燃料利用率80%、運転圧力0.5MPaとしている。図中の発電効率は電池本体の効率であり、燃料の持つ高位発熱量と発電電力との比である。いずれの燃料電池も電流密度を上げると電圧は低下する。電流密度

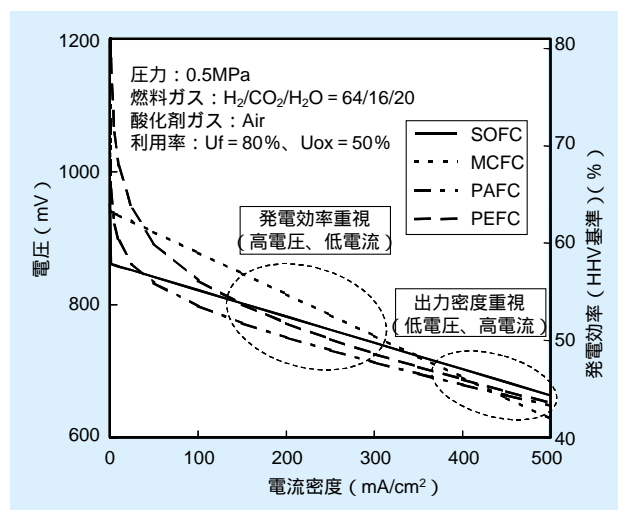


図1-2-2 各種燃料電池性能の比較

300mA/cm²以下の、発電効率を重視する、つまり、電圧の高さを重視する電流密度域では、MCFCの出力電圧が他の燃料電池よりも高い。このように燃料電池本体で最も高い電圧が得られることがMCFCの大きな魅力の1つである。一方、発電効率ではなく、出力密度重視の場合、出力密度は電圧と電流密度の積であり、例えば電流密度200mA/cm²で電圧800mVの場合の出力密度は0.16W/cm²であるのに対し、400mA/cm²で650mVの場合の出力密度は0.26W/cm²となるため、300mA/cm²以上の高い領域に設定する。この場合、MCFCはセル電圧の電流密度依存性が大きいいため、300mA/cm²以上の電流密度域ではMCFCの出力電圧の優位性はほとんどなくなり、いずれの燃料電池の電圧もほぼ同じ値となる。

1-2-3 各種電池の性能要因分析

各燃料電池で性能差を生じている原因を探るため、電流密度250mA/cm²における各性能要因を分析した結果を図1-2-3に示す。図では、棒高さが開路電圧であり、これから各性能要因による電圧ロスが差し引かれたものが出力電圧となる。棒高さに占める割合が大きい性能要

因ほど性能への影響が大きい。本図から出力電圧は、低温型であるPEFCとPAFCで低く、高温型であるMCFCとSOFCで高いがこれは以下の要因による。

開路電圧は、理論的に低温なほど高くなる。しかし、発電によって生成する水の状態もこれに影響する。燃料電池の運転温度が100℃以上の場合には水は気体状態で生成するが、PEFCでは動作温度が約80℃と低いため水は液体状態で生成し、このため開路電圧はPAFCよりも低くなる。ネルンストロスに関しては、低温型であるPEFCとPAFCではカソード側に水を生成するため燃料の希釈がなく、25mV程度と小さいが、高温型であるMCFCとSOFCではアノード側に水が生成し、燃料を希釈するため、ネルンストロスは110mVと大きい。また、カソード過電圧は、電池間で大きな差があり、低温型のPEFC、PAFCでは非常に大きく、高温型のMCFC、SOFCでは小さい、これがMCFC、SOFCの出力電圧が高い最大の要因である。MCFCはこのように出力電圧が高いことに加え、高温ではあるが、加工がしやすく比較的安価な金属材料を使用できることが特長の1つである。

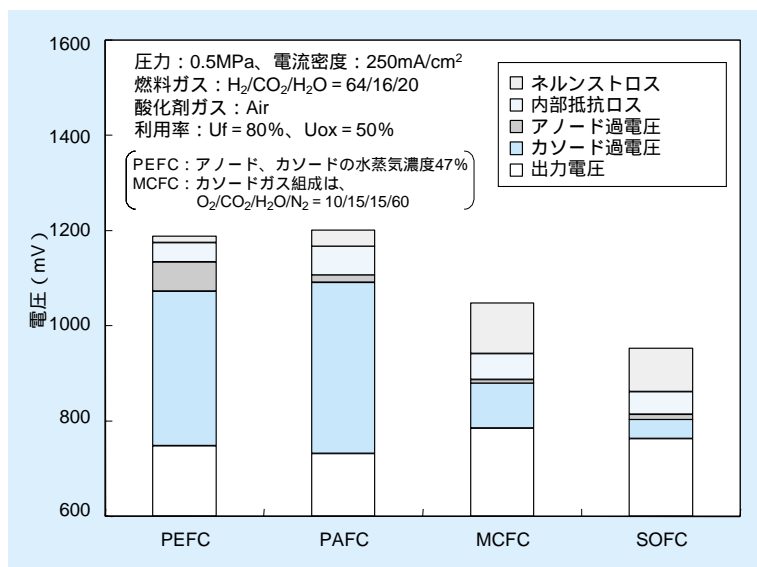


図1-2-3 各種燃料電池の性能要因分析結果

1-3 MCFCの基本原理

1-3-1 電池材料と反応

炭酸塩（コラム2参照）を電解質として用いるMCFCスタックと電極構造を図1-3-1に示す。また、MCFCの発電原理を図1-3-2に示す。

MCFCの動作温度は約650と高温である。アノードはニッケル（Ni）を主体にクロム（Cr）、アルミニウム（Al）などの金属を少量添加した合金であり、カソードは酸化ニッケル（NiO）である。電解質には、炭酸リチウム（ Li_2CO_3 ）と炭酸ナトリウム（ Na_2CO_3 ）あるいは炭酸カリウム（ K_2CO_3 ）を混合した炭酸塩（我が国では、

3-2節で詳述するように、Li/Na系混合炭酸塩が主流）が使用され、これをセラミックスであるリチウムアルミネート（ LiAlO_2 ）の多孔質板に含浸したものが電池に組み込まれている。アノードおよびカソードには、図1-3-1に示すように数 μm の細孔が多数存在する。この細孔の一部に電解質がしみ込み、ガスと電解質と電極が互いに接する場所が形成され、ここで図1-3-2に示した電池反応が円滑に進行する。すなわち、カソードでは、酸素（ O_2 ）と炭酸ガス（ CO_2 ）と電子から炭酸イオン（ CO_3^{2-} ）が生成される。炭酸イオンは電解質中をカソードからアノード方向に移動する。アノードでは、炭酸イオンと水素（ H_2 ）が反応し、水（ H_2O ）と炭酸ガスが生成され、

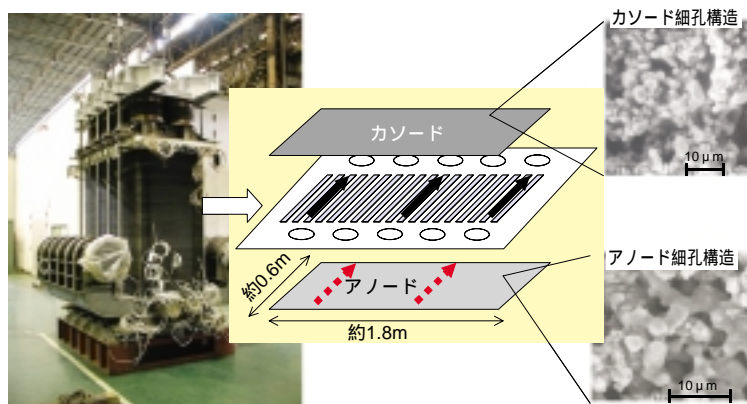


図1-3-1 MCFCスタックと電極構造

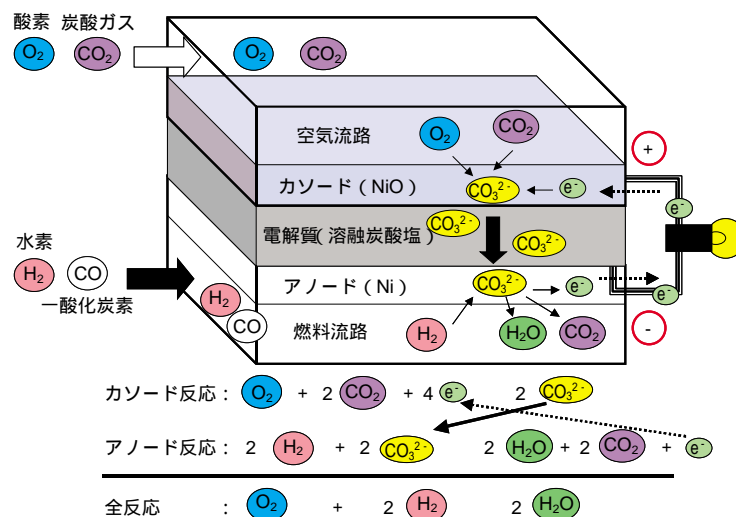


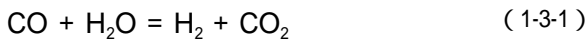
図1-3-2 MCFCの発電原理

電子が放出される。全反応は、水素と酸素からの水の生成反応である。

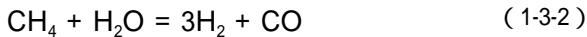
PEFCでは、水素イオンがアノードからカソードに移動し、カソードで水蒸気を生成したが、MCFCでは炭酸イオンが、逆にカソードからアノードに移動しアノードで水蒸気を生成する。この水蒸気の生成する場所の差が、性能要因であるネルンストロスの差を生じさせる。

1-3-2 燃料改質とガスリサイクル

MCFCでは、アノードであるニッケル（Ni）が触媒の役割を果たし、下記のシフト反応によって一酸化炭素（CO）と水蒸気から水素と炭酸ガスが生じる。このため、MCFCでは石炭ガス化ガスのような一酸化炭素の多い燃料ガスも、この反応によって水素に変換されるため燃料として利用できる。



また、天然ガスの主成分であるメタンの改質をセル内で行うことも可能である。メタン改質反応は



である。一般にメタンガスの改質反応とシフト反応によ

るメタンの水素への燃料転換率は、MCFCの動作温度（約650）では必ずしも大きくないが、MCFC内部では図1-3-2中のアノード反応によって水素が随時消費され、また、この反応で熱と水蒸気が発生するため比較的高い燃料転換率を得ることができる。これは内部改質型と呼ばれ、小型プラントの電池構造として適する。

一方、メタン改質を電池外で行うものを外部改質型と呼ぶ。外部改質型は内部改質型に比較して構造が簡単であり、かつ軽量であるので、大形プラントの電池構造として適する。（コラム3参照）

また、電池本体に関連した技術としてガスリサイクル運転技術がある。MCFCを安定して運転するには、図1-3-3に示す3つのガスリサイクルが必要となる。

- 1 アノードガスリサイクル：燃料排ガス中の未反応の燃料を入口側に再び戻して、燃料利用率を上げるとともに、炭素やメタンの発生を防止する。（コラム4参照）
- 2 カソードガスリサイクル：カソード出口排ガスの一部を再び入口に戻して、電池で発生する熱を効率よく回収すると共に、電池の温度を制御する。
- 3 炭酸ガスリサイクル：アノード側で発生した炭酸ガスをカソード側に戻し、カソード反応に必要な炭酸ガスを賄うことによって炭酸ガスの外部供給設備を不要にする。（コラム5参照）

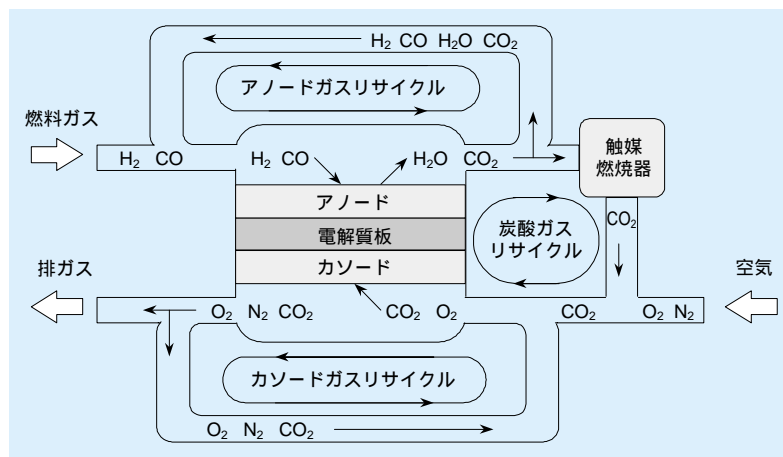


図1-3-3 MCFCのガスサイクルシステム

1 - 4 発電システム基本構成

燃料電池は、燃料として天然ガスばかりでなく、世界的に埋蔵量が豊富な石炭や、廃棄物やバイオマスを経過したガスを使用することができる。これらを燃料とする場合、天然ガスや石炭を水素や一酸化炭素にする装置が、燃料電池の前段に必要となる。天然ガスの改質器は既に実用化され、石炭から水素や一酸化炭素を取り出すガス化炉は、現在開発が進められている。燃料電池を電気事業用として使用する場合には、高い発電効率が要求されるため、燃料電池から排出される熱を利用してタービン圧縮機（T/C）や蒸気タービン（S/T）を回し付属する発電機によって複合発電を行う。図1-4-1には天然ガスを燃料とした場合の燃料電池発電システムの機器構成を示す。

PEFCでは天然ガスは改質器で水素と一酸化炭素に改質され、一酸化炭素を除去した後、燃料電池に供給される。PEFCの排熱は80℃と低く、複合発電は行わず、給湯等に利用する。PAFC、MCFCでは燃料電池の後段に燃焼器（改質器）がある。燃料電池で消費した燃料ガス中の未燃分はここで燃焼され、T/Cや改質器の熱源として利用される。MCFC、SOFCでは排熱が650～1000℃と高温なため、さらに後段に排熱回収ボイラ（HRSG）を設置し、蒸気を発生させ、S/Tで発電する。

また、SOFCでは電池内で改質が行われるため、燃料電池前段の改質器が不要となる。MCFCも電池内で改質を行う内部改質型の場合はSOFCと同じ機器構成となる。このようにMCFCなどの高温型燃料電池では、燃料供給系の簡素化が図れることが魅力である。また、電池温度制御のための冷却系についても水冷でないため複雑な水処理系が不要となることも魅力である。なお、T/Cには主として既存ガスタービン発電機の転用が考えられており、ガスタービン部を膨張タービンとして用いることが想定され、G/Tと表記することもある。

次に、燃料電池発電システムの発電効率を解説する。燃料電池発電システムの発電効率（送電端、コラム1参照）は次式で表すことができる。

$$\eta_{net} = \eta_{fp} \cdot \eta_{fc} \cdot \eta_{pc} + (1 - \eta_{fp} \cdot \eta_{fc}) \cdot \eta_{bc} - \eta_{ap} \quad (1-4-1)$$

ここで、

- η_{net} : 燃料電池発電システムの発電効率（送電端）
- η_{fp} : 燃料供給部の燃料変換効率
- η_{fc} : 燃料電池本体部の発電効率
- η_{pc} : インバータの直交変換効率（1）

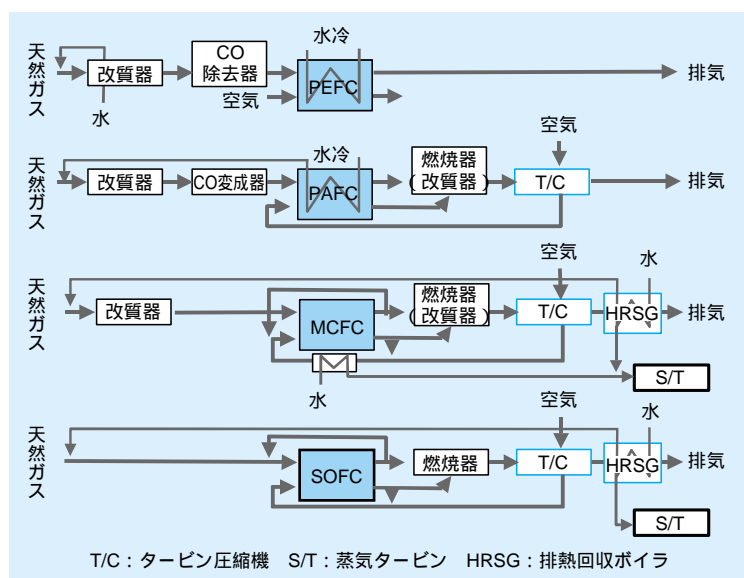


図1-4-1 燃料電池システムの機器構成

- b_c : ボトミングサイクルの発電効率（小型システムには付かない）
- a_p : カソードブロワやポンプ等の補機動力

天然ガスは改質器で水素等に燃料変換効率: f_p で転換され、燃料電池で直流電力に発電効率: f_c で変換され、インバータで交流電力に直交変換効率: p_c で変換される。また、ここで電力に変換されなかったエネルギー: $1 - f_p \cdot f_c$ は、T/Cの発電効率 b_c で交流電力に変換される。インバータとT/Cの交流電力の和から、システム内でのガス循環やポンプ等の動力として消費される補機動力: a_p を差し引いた値が、発電効率となる。図1-4-2にはMCFC発電システムの機器構成と発電効率との関係を示した。この概算では、発電効率は52%となる。

なお、本構成では燃料に天然ガスを想定しており、カソード側に電池温度制御のためのカソードガスリサイクルが設置されている。また、アノードで発生する炭酸ガスを多く含むアノード排ガスは改質器の燃焼部に入り、共存する水素や一酸化炭素が燃焼（酸化）されて、水や炭酸ガスに変わった後に、空気と混合されてカソードに供給され、炭酸ガスリサイクルが完成される。天然ガス燃料の場合には、設定できる燃料利用率に上限があり、また、水素元素を多く含み、炭素析出も比較的起こりにくいと考えられることから、本構成ではアノードガスリサイクルは付設していない。

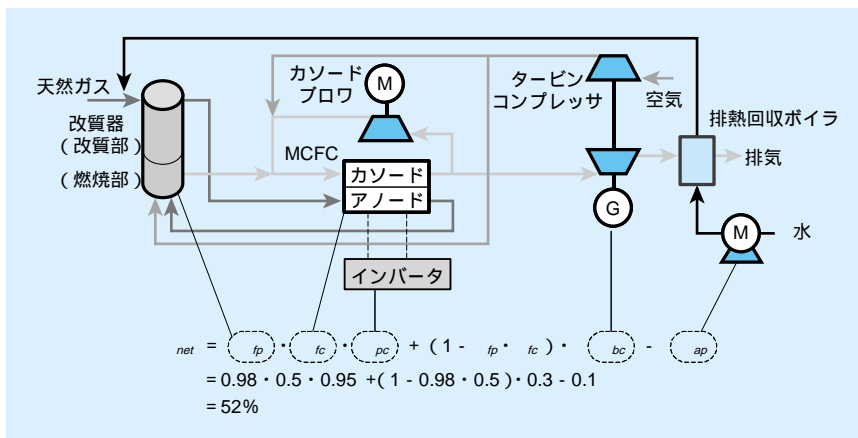
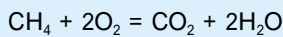


図1-4-2 MCFC発電システムの効率

コラム1：HHV？LHV？DC端？送電端？（熱効率の定義）

発電設備の熱効率は、その分母となる燃料の発熱量をどのように定義するか、あるいは、分子である発電電力をどのように定義するかにより数値が変わってくる。燃料電池発電設備ではこれらの表記が国内外で混在して用いられていることが多く注意しなければならない。

分母となる発熱量の表記には、LHVベース（低位発熱量基準）とHHVベース（高位発熱量基準）がある。両者の差は、燃料が完全燃焼した場合に発生する水の取り扱いにより生じる。例えば、天然ガスの主成分であるCH₄ 1 molが完全燃焼した場合、生成物として2 molの水が発生する。



この反応による生成物であるCO₂とH₂Oは気体である。そのうちH₂Oは、液体から気体になるとき大きな吸熱を伴う（汗が蒸発する時の吸熱により体温の上昇を防ぐことと同じである）。逆に、液体になるときに大きな発熱を伴う。

即ち、燃料は燃焼して気体の水（水蒸気）を生成するが、その気体の水が液体になる時には、熱を発生する（10.5kcal/molH₂O）。この発熱を燃料の発熱量に含めた場合、即ち、燃焼したガス中の水分が液体となった場合までの燃焼熱を分母としたのがHHVベースで定義された熱効率であり、水分が気体として排出された時までの発熱量を分母と定義するのがLHVベースの熱効率である。一般に発電装置では、水蒸気が液体の水になる時の発熱量を有効に利用することはできない。

HHVベースとLHVベースの熱効率の値の差は、燃料が完全燃焼した場合の水分量すなわち燃料中に含まれるH元素の量に左右され、水素、天然ガス、石炭ガス等の燃料種類により異なる。例えば、CH₄を燃料とし、熱効率が送電端で50% HHVとなった場合、LHVベースで標記すると、55.5% LHVに相当する。水素を燃料とした場合、HHVベースで50% HHVであれば、LHVベースでは59% LHVである。なお、COが燃焼し、CO₂を生成する場合は、燃焼反応により水が発生しないため、LHVとHHVの値は同一となる。

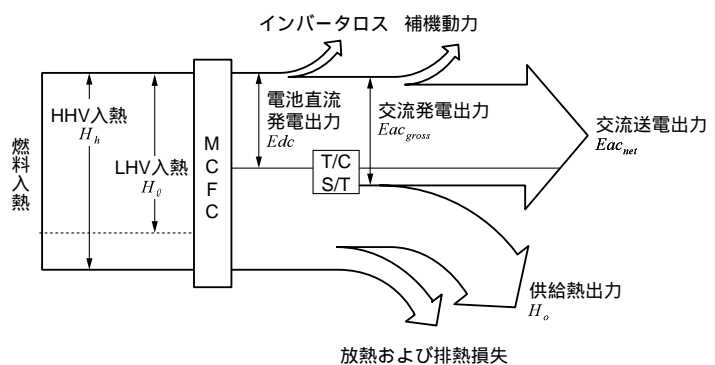
一方、熱効率の定義の際、分子となる電気出力にも様々な定義がある。通常発電装置であれば、交流で電力を利用す

るのであるから、交流端出力への変換効率のみが意味を持ち、燃料電池やガスタービンの出力から、補機動力や所内動力を差し引いた数値が送電端熱効率と一般に定義されている。

火力発電所での熱効率の定義は、我が国ではHHVベース、欧米ではLHVベースの送電端効率とすることが多い。これに対して、コージェネレーションプラントは我が国においてもLHV表記が多く燃料電池においては、適用分野によって表記がまちまちとなっているのが現状である。LHVベースで定義した場合、熱効率の数値が大きくなるので発電性能が過大評価されてしまう可能性が生じる。

また燃料電池発電では、直流で発電された電力をインバータにより交流に変換して利用することが多いため、その電気出力はDC端やAC端で定義される。DC端は燃料電池で発電された直流電力であり、電気的にインバータの上流で定義される。AC端は直流の電力を交流に変換した後の出力であり、インバータの下流で定義される。通常インバータ効率は90～95%程度であるから、DC端とAC端出力を熱効率で表した場合、3～5%程度の差が発生する。また、分散型電源として熱電併給を考えた場合には、熱効率の分子となる出力に電気出力と熱出力が含まれる。

以上のように、熱効率を論じるためには、電気出力がACなのかDCなのか、燃料の発熱量はLHVベースなのかHHVベースなのか、補機動力や所内率をどこまで差し引いているのかを明確に定義することが重要である。



例えばHHVを基準にすると H_h が分母となり、代表的な熱効率は以下で表される。

$$\begin{aligned} \text{送電端効率 } \varepsilon_{net,h} &= \frac{E_{ac,net}}{H_h} & \text{送電端効率 } \varepsilon_{gross,h} &= \frac{E_{ac,gross}}{H_h} \\ \text{総合熱効率 } \varepsilon_{tot,h} &= \frac{E_{ac,net} + H_o}{H_h} & \text{電池効率 } \varepsilon_{fc,h} &= \frac{E_{dc}}{H_h} \end{aligned}$$

図 エネルギーの流れと熱効率表現との対応

コラム2：炭酸塩とは？

MCFCに使用されている炭酸塩は、室温では白い粉状であるが、約500以上の高温では融けて無色透明な液体状態となり、これを熔融炭酸塩と呼ぶ。炭酸塩は、日常あまり聞き慣れない物質であるが、実は粉石けんや洗剤の成分や入浴剤の配合成分として広く用いられている他、食品添加物として、中華麺やこんにゃくの製造にも用いられている身近な物質である。炭酸塩は、リチウム(Li⁺)、カリウム(K⁺)やナトリウム(Na⁺)のプラスのイオン2個と炭酸イオン(CO₃²⁻)とで構成され、プラスイオンの種類や組成によって、表に示すように融点等の物性が変化する。熔融炭酸塩は高温で安定な物質であり、かつ、導電率も他の燃料電池の電解質の導電率よりも1~2桁高く、優れた物性を持つ。

MCFCの電解質としてはLi/K系混合炭酸塩が主流であったが、日本ではLi/Na系混合炭酸塩が近年、主流となっている。これは、表からわかるように、Li/Na系混合炭酸塩はLi/K系混合炭酸塩よりも導電率が高く、また、Ni溶解度が低いためである。この理由については3-2節において詳しく解説しているが、MCFCの性能面、寿命面での問題解決の

表 炭酸塩の物性比較

炭酸塩組成 (混合塩)	融点 ()	導電率 (1/cm)	Ni溶解度 ($\times 10^{-6}$ mol)
Li/K (62/38)	488	1.05	41.9
Li/Na (52/48)	496	2.18	22
Li/Na/K (43.5/31.5/25)	397	1.48	60

ため、今後も炭酸塩組成の最適化が行われていくものと考えられる。

このような最適化を促進するため、当所では3-1-2項で解説した性能表示式をさらに発展させ、炭酸塩の物性値のみからセル電圧を推算する手法を開発している⁽¹⁾。本手法では、実験に先立って、セルに多様な炭酸塩組成を適用した場合のセル電圧を推算できる。図には、その一例を示す。現状のMCFCシステムのようにスタック内温度が580~680の場合にはLi/Na系混合炭酸塩を電解質として用いることが最適であるが、セル入口温度を下げるようなシステムが可能となれば、Li/Na/K系混合炭酸塩も有力な電解質候補となることが予想される。

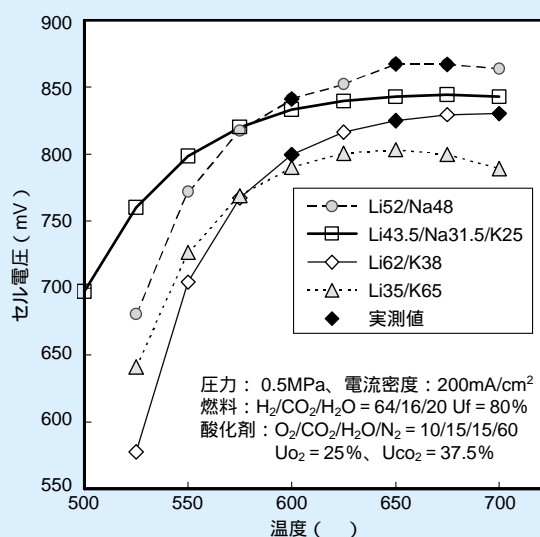


図 セル電圧の炭酸塩組成、温度依存性の推算結果

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。

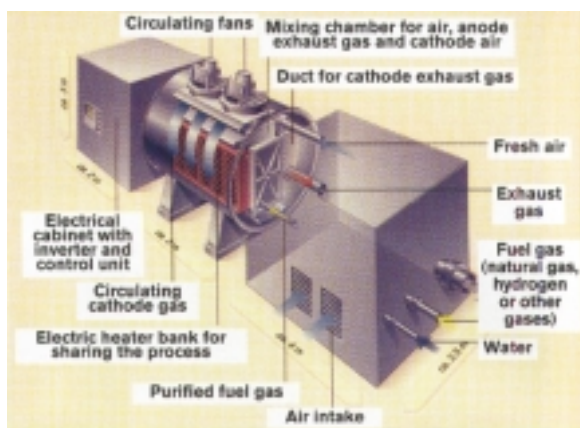


図2-1-1 Hot Module構造による250kWシステム(同社パンフレットより)

(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

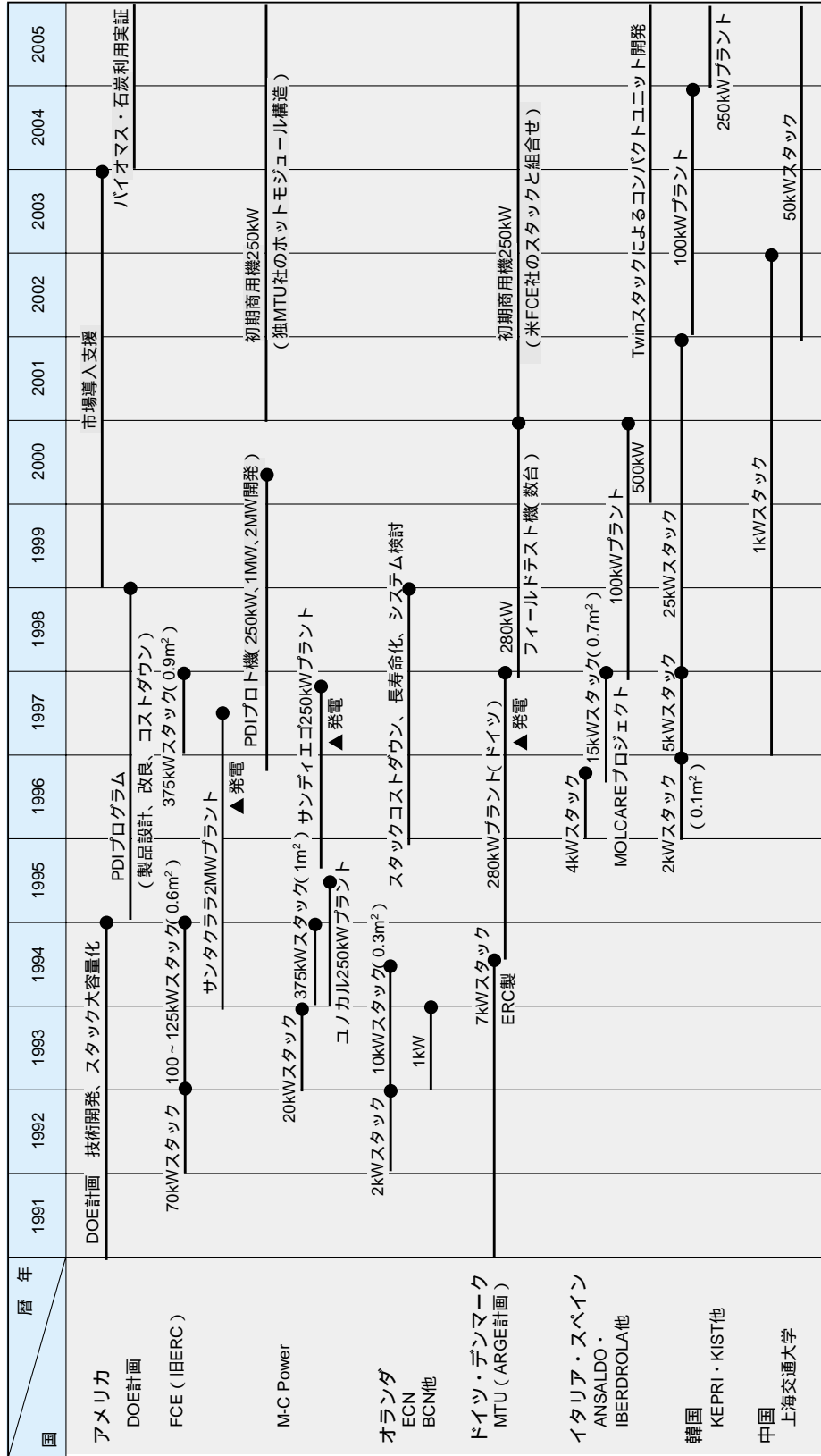


図2-1-2 国外のMCFC開発動向

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、ブロワ、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。

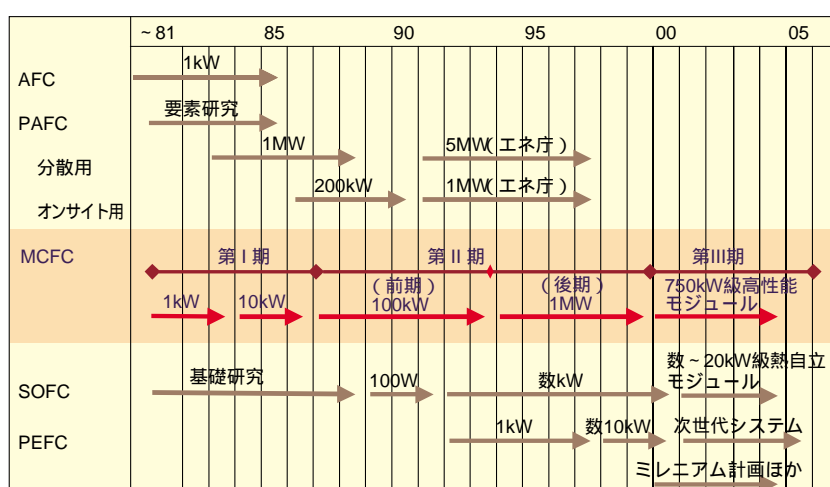


図2-1-3 我が国の燃料電池開発計画

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。

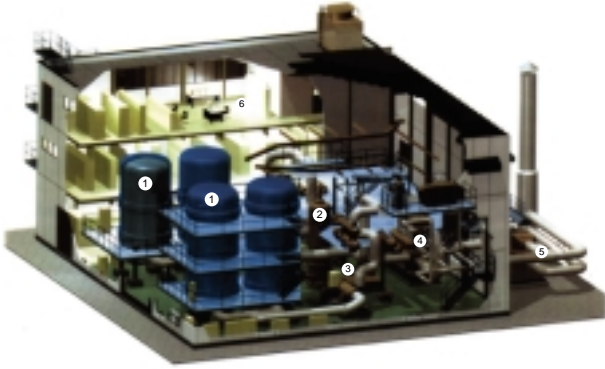


図2-2-1 1,000kWプラント

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

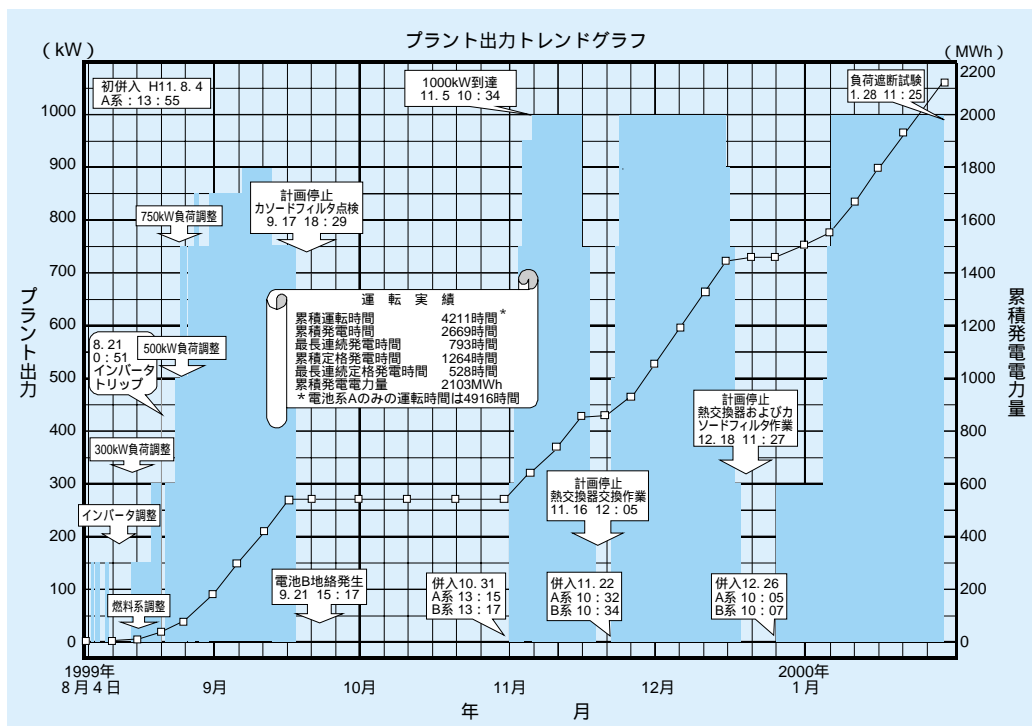


図2-2-2 1,000kWプラントの出力トレンド

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

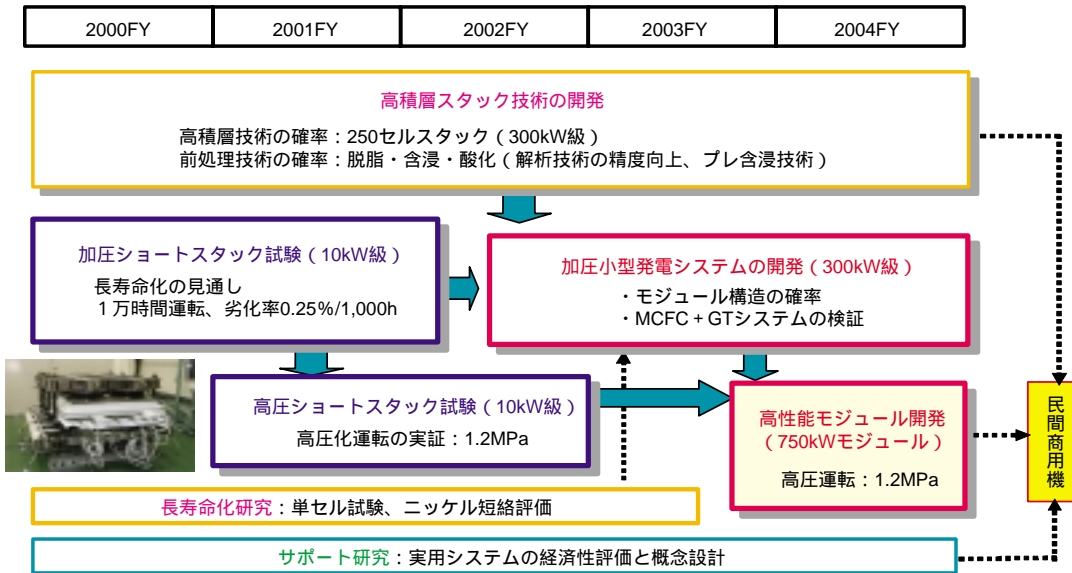


図2-4-1 第III期研究開発スケジュール

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。

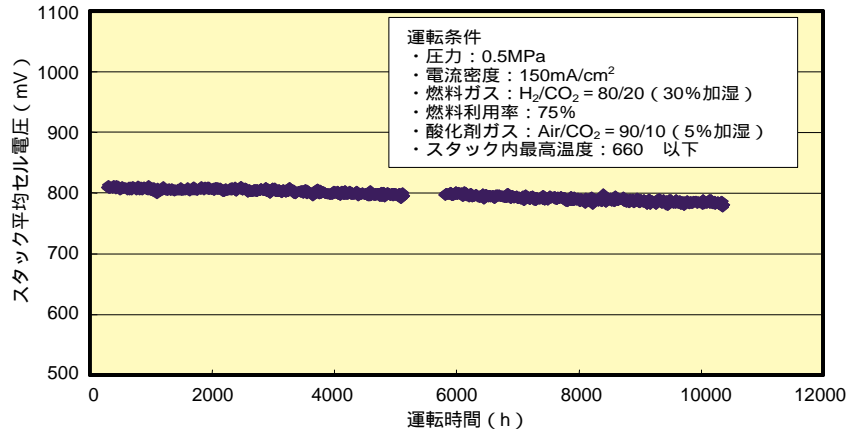


図2-4-3 加圧ショートスタックによる1万時間寿命試験結果

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

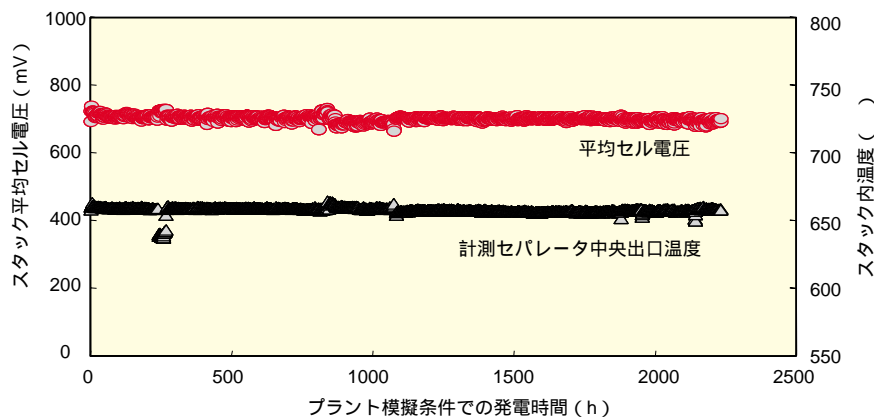


図2-4-4 高圧(1.2MPa)ショートスタック試験における電圧の安定性

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)

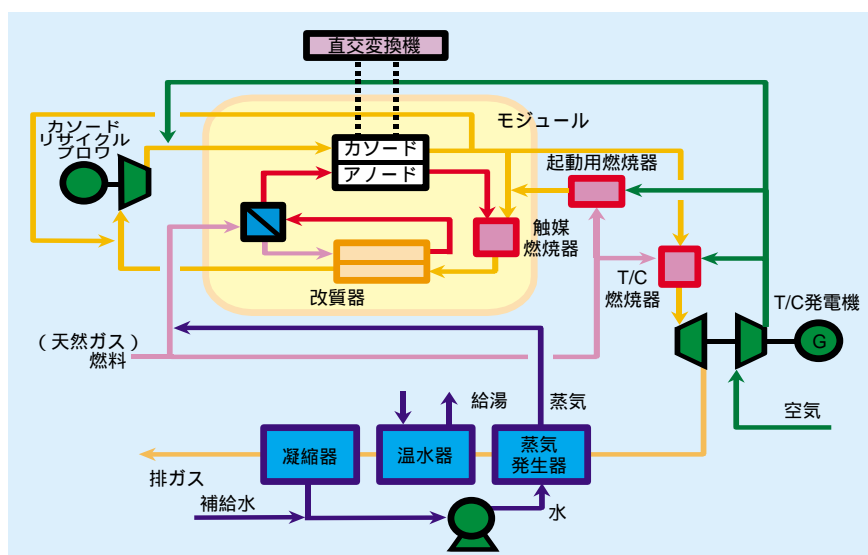


図2-4-5 加圧小型発電システムフロー

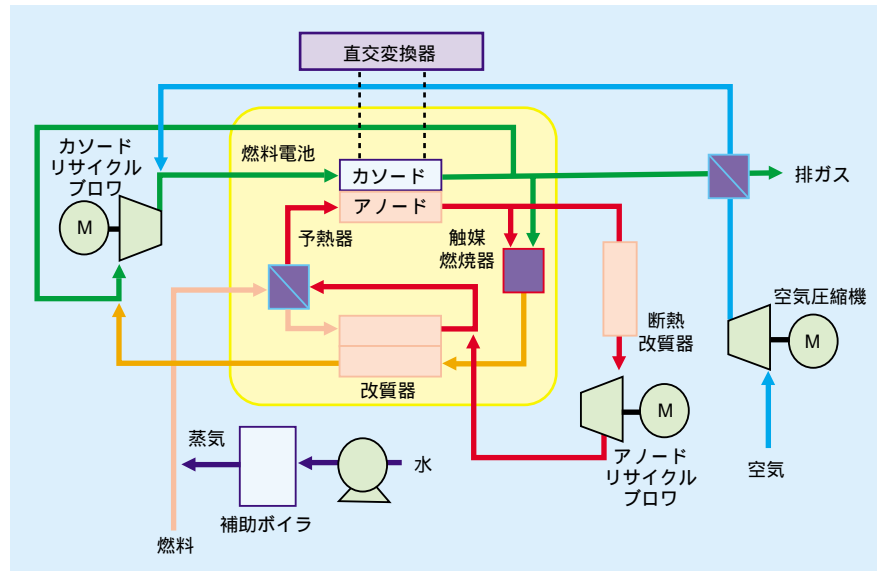


図2-4-6 高性能モジュール発電システムフロー

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「NO_x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

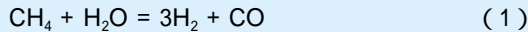
現在の開発計画は前節で述べたとおりであり、その予想成果を踏まえれば、これからの開発の方向性としては、高効率化、長寿命化、低コスト化は将来的にも引き続き改善されるべき基礎的開発であり、それらに加えて、適用分野の拡大を目指した以下の方向性を想定しつつ開発を進めていくべきである。

- 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。

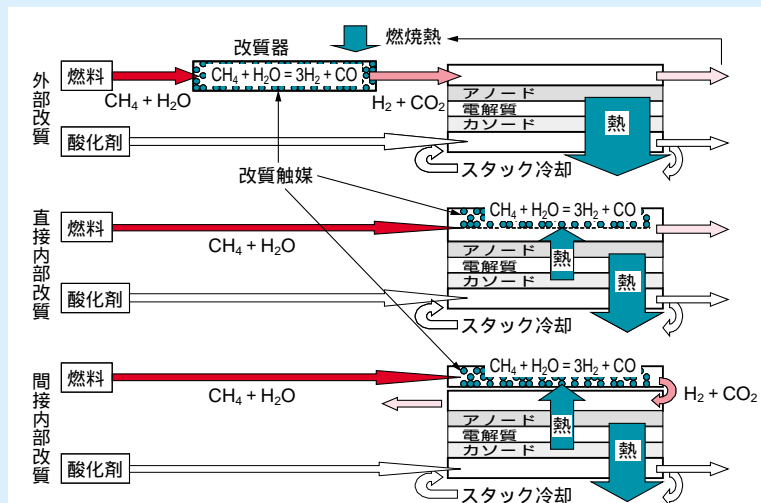


図 外部改質と内部改質

第 3 章

実用化へのキーテクノロジー（実用レベルを支える基盤技術）

MCFCの実用化のためには、まずその性能を正確に評価しなければならない。当研究所が開発した性能表示式は電極反応の理論式から導き出したもので、電池性能を決める要因を詳細に分析でき、改善点を示すことが可能である。Li/Na系電解質は、この評価法による従来電池の解析結果をもとに、当研究所が見直し提案した新しい電解質で、電池電圧の向上と長寿命化に大きな効果がある。性能表示式とLi/Na系電解質は、国内外で利用・適用が進みつつある。さらに当研究所では、これらの成果をもとに、電池の大型化、積層化の改良を重ね、10kW級MCFCで1万時間の寿命を実証した。

第3章 実用化へのキーテクノロジー（実用レベルを支える基盤技術） 目次

横須賀研究所	エネルギー化学部	主任研究員	森田 寛
横須賀研究所	エネルギー化学部	主任研究員	吉葉 史彦
横須賀研究所	エネルギー化学部	主任研究員	吉川 将洋
横須賀研究所	エネルギー化学部	主任研究員	浅野 浩一
横須賀研究所	エネルギー化学部	上席研究員	伊崎 慶之

3 - 1	性能解析と評価技術	39
3 - 2	セルの高性能化と長寿命化	44
3 - 3	大出力化のためのスタック技術	50
コラム4：炭素析出とその抑制		56



森田 寛（1992年入所）
 これまで小型単セルを用いたMCFCの性能および寿命評価を中心に研究を進めてきた。今後は石炭、バイオマス等のガス化ガスに代表される多様な燃料を使用可能にするMCFC発電システムの実用化を念頭に置きながら、電池本体のみならず電池周辺技術に関しても検討を進めていく。
 （3-1執筆）

吉葉 史彦（8ページに掲載）
 （3-1-4執筆）



吉川 将洋（1992年入所）
 MCFCの研究に携わり、これまで主に長寿命化研究としてニッケル短絡抑制手法の開発、性能評価手法の開発、高圧運転技術の開発を行ってきた。この間、MCFC研究組合に出向しスタックでの高圧運転適合性評価や300kW級モジュールの運転研究にも従事。今後は更なる長寿命化のため腐食抑制技術の開発に取り組む。
 （3-2およびコラム4執筆）



浅野 浩一（1997年入所）
 これまでMCFCの研究に携わり、電池高性能化研究において、ミクロレベルからの電極反応メカニズムの解明について検討を行ってきた。また、MCFC長寿命化研究としてニッケル短絡抑制手法の開発にも従事している。今後は、MCFC発電の実用化に向けた研究以外に燃料電池の新たな可能性についても研究を行いたい。
 （3-2執筆）

伊崎 慶之（22ページに掲載）
 （3-3執筆）

3-1 性能解析と評価技術

MCFCに用いられる燃料には、天然ガスから石炭ガス化ガスまでの広範囲な燃料が想定されており、想定される燃料によって、その発電規模、機器構成は大きく異なる。このためMCFC発電プラントの設計、運用に際しては、広範囲な運転状況下におけるMCFC本体の電池性能を精度良く予測する必要がある。本節では、この電池性能を高精度に記述することが可能なMCFCの性能表示式について述べる。

3-1-1 電池の性能要因

MCFCによる発電反応は、以下に示すアノード（燃料極）とカソード（空気極）との電気化学反応より構成され、MCFCの出力特性（電流 - 電圧特性）は一般に、**図3-1-1**に示すような傾向を示す。燃料電池においては、電流は運転条件として予め決定されるため、所定の電流時における電池電圧が、性能を表す指標となる。

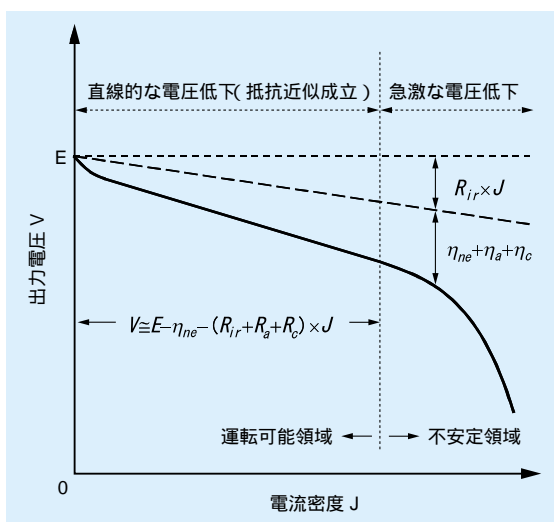
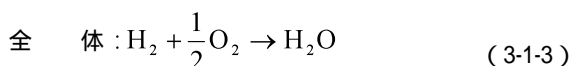
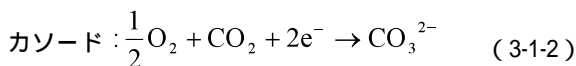
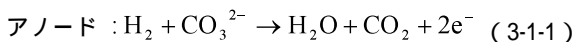


図3-1-1 MCFCの電流 - 電圧特性

MCFCの出力特性は直線の領域が大部分を占め、この直線領域が、発電用電源としての運用領域であると思われる。電池の出力電圧 V は一般に (3-1-4) 式で与えられるが、直線領域内での出力電圧は (3-1-5) 式で近似できる。

$$V = E - \eta_{ne} - \eta_{ir} - \eta_a - \eta_c \quad (3-1-4)$$

$$\cong E - \eta_{ne} - (R_{ir} + R_a + R_c) \times J \quad (3-1-5)$$

式中の各性能要因の概要は、以下の通りである。

1 開回路電圧 E

負荷電流 J を取り出していない場合の電池電圧であり、電池の最大起電力に相当する。MCFCの場合は、次式に示すネルンスト式の濃度補正項 E に、各極のガス分圧 $P_i (a/c)$ (i はガス種、 a はアノード、 c はカソードを表す) を代入した計算値で実測値をほぼ整理できる。

$$\begin{aligned} E &= E^0 + \Delta E_a + \Delta E_c \\ &= E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{\text{H}_2}}{P_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{CO}_2\text{a}}} + \frac{RT}{2F} \ln P_{\text{O}_2}^{0.5} P_{\text{CO}_2\text{c}} \end{aligned} \quad (3-1-6)$$

ここで E^0 は標準電極電位と呼ばれる値であり、電池の運転温度を考慮した (3-1-3) 式のギブズ自由エネルギー変化から求めることが可能である。 E_a 、 E_c はアノード、カソードにおける濃度補正項、 F 、 R 、 T はファラデー定数、気体定数、温度である。

2 ネルンストロス η_{ne}

(3-1-1) 式、(3-1-2) 式によって負荷電流を取り出した場合、アノードでは H_2 が、カソードでは O_2 と CO_2 が、電池の入口から出口に向かって減少する。この減少による各極のガス濃度変化は、(3-1-6) 式における濃度補正項の値を変化させ、電池面内ではネルンスト式による起電力が **図3-1-2** に示すように低下する。この低下分はネルンストロスと呼ばれ、電池入口のガス組成、各ガスの利用率によって決定される。ガス利用率とは、電池に供

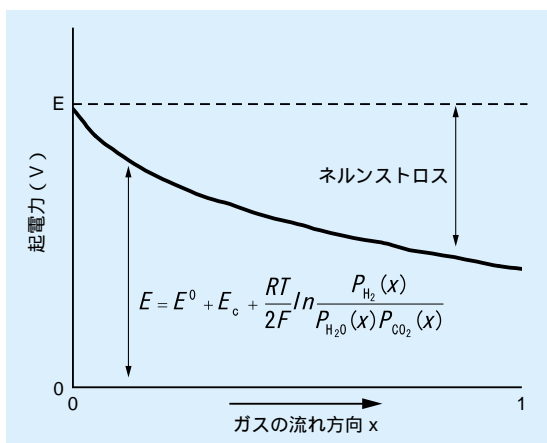


図3-1-2 起電力のセル内分布（アノード側）

給されたガス量に対する(3-1-1)式、(3-1-2)式による消費割合を表すものであり、アノードでは燃料ガス(H₂ + CO)、カソードではO₂とCO₂の2つが考えられる。MCFCにおけるネルンストロス分は一般に、アノード側の方が大きく、天然ガスの改質ガスを電池の燃料として用いた場合は、このネルンストロスがアノードにおける性能低下の大部分を占める。ネルンストロスは上述したように、電池の入口組成、ガス利用率といった電池外部との取り合い条件によって決定されるため、電池の電極性能とは、ほぼ無関係に決まってしまう性能低下要因である。

3 内部抵抗 R_{ir}

電池の構成部材に起因する抵抗であり、電圧低下 i_r に対応する。MCFCの場合には、「熔融炭酸塩電解質のイオン導電性に基づく抵抗」、「電極、集電板等の電子伝導性に基づく抵抗」、「電極、集電板、電流リード線間の接触抵抗」から成り、ほぼ温度のみに依存する性能低下要因である。10cm角程度の小型単セルでは主に、微小交流信号1kHz下での実抵抗として評価されることが多いが、高積層スタック用の1m²級セルでは、抵抗値自体がセル面積に反比例して小さくなる等の要因により、上記測定手法が必ずしも適用できるとは限らない。

4 アノード反応抵抗 R_a

(3-1-1)式によるH₂の酸化反応が生じる際、アノード側で起こる電気化学的な電圧ロス a を負荷電流 J で割り付け、抵抗換算した性能低下要因であり、圧力、温度、燃料ガス組成に依存する。多くの小型単セル試験の結果から判断すると、カソード側のロスよりも小さく、

特に高水素濃度燃料である天然ガスの改質ガス条件下では、電池の性能に与える影響は小さい。

5 カソード反応抵抗 R_c

(3-1-2)式によるO₂の還元反応が、カソード側で生じる際に起こる電圧ロス c を抵抗換算した値であり、MCFCの電極性能を決定する支配的要因となっている。この値もアノード側同様、圧力、温度、ガス組成に依存する。

なお電気化学反応に起因する電圧ロス a、c は反応過電圧とも呼ばれ、「電子移動反応における電荷移動速度」と「反応ガスが拡散等により電極表面にまで達する際の物質移動速度」の大小によって決定される。この移動速度のより遅い過程を律速過程と呼び、この律速過程の速度が、過電圧の大きさを決定する主要因となる。

3-1-2 性能表示式

電池性能の指針である出力電圧を記述、予想するモデルは主に、小型単セルを用いて検討がなされてきており、歴史的には幾つかのモデルが提案されている^{(1)~(3)}。しかしながらこれらのモデルでは、冒頭で上述したような広範囲な運転状況下における電池性能を、精度良く予測することは困難であった。この原因は、アノード、カソードで生じる電気化学的な電圧ロスを、精度良く見積もることができない点にある。特にカソード側の電圧ロスは、アノード側に比べて大きいため、このカソード側ロスを電気化学的な考察⁽⁴⁾⁽⁵⁾に基づいて精度良く記述することが、MCFCにおける性能予測の鍵となる。

カソードのO₂還元反応は、MCFCでは(3-1-2)式で与えられるが、この反応は熔融塩中に溶解した分子状酸素(O₂)の直接還元ではなく、酸素分子が熔融塩中に化学溶解し、生成したスーパーオキシドイオン(O₂^{·-})あるいはパーオキシドイオン(O₂^{2·-})が、反応の担い手となって進行するとされる。更に、電気化学的な上記反応の解析によれば、スーパーオキシドイオン(O₂^{·-})と溶存CO₂の同時拡散律速で、反応次数は上手く説明できるとされる。図3-1-3にその同時拡散の模式図を示す。

同時拡散が律速過程である場合、図の電子移動反応3、4における電荷移動速度は比較的速く、熔融塩中におけるO₂^{·-}、CO₂の物質移動速度が、電荷移動速度に比べて

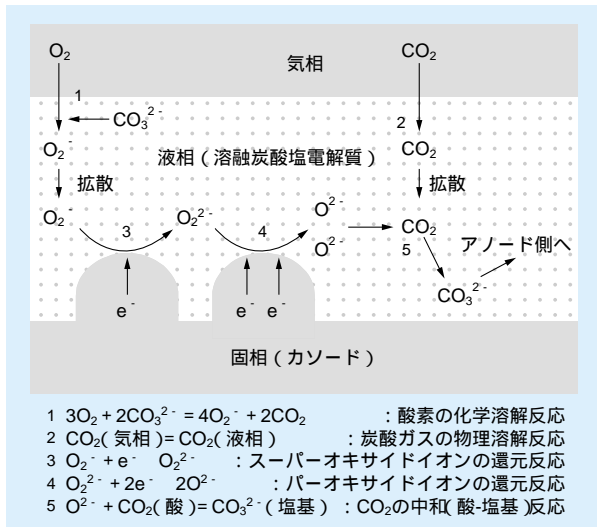


図3-1-3 カソードでの酸素還元反応

遅いことになる。上記のような反応メカニズムが、実際の MCFC にも成り立つ場合、カソードの反応過電圧を表すカソード反応抵抗式は、一定の圧力、温度下において、以下に示すガス分圧依存性をもつことが期待される。

$$R_c = c_1 P_{O_2}^{-0.75} P_{CO_2}^{0.5} + c_2 P_{CO_2}^{-1.0} \quad (3-1-7)$$

右辺第1項は酸素すなわちスーパーオキシドイオンの拡散項、第2項は溶存 CO_2 の拡散項であり、物質移動に関する係数 c_1 、 c_2 は主に、小型単セルの実験データより決定されるフィッティングパラメータである。図3-1-4には、(3-1-7)式を用いて予測した出力電圧のカソードガス組成依存性を実測値に対して示す⁽⁶⁾。経験的

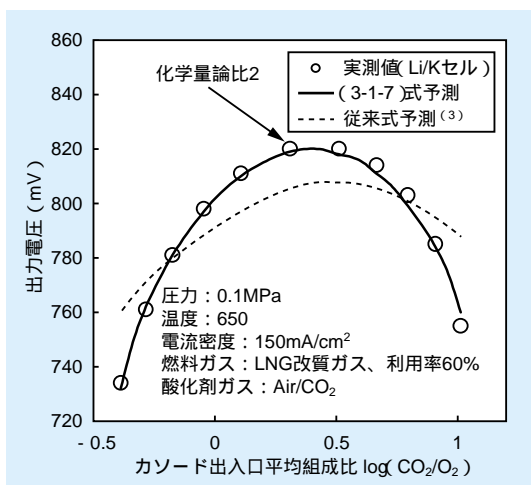


図3-1-4 電池性能のカソードガス組成依存性

な従来式⁽³⁾では、上手く表示でき得なかった出力特性を、(3-1-7)式は広範囲にわたり精度良く表示できている。

アノードの反応過電圧はカソードに比べて小さく、天然ガスの改質ガス条件では、アノード反応抵抗をガス組成に依存しない定数として扱っても、表示上の大きな誤差は生じない。しかし石炭ガス化ガス等の低水素濃度ガス下では、その過電圧は増加し、定数的扱いは困難となる。小型単セルの試験結果によれば、この過電圧は水素分圧の約 - 0.5 乗に比例して増加する⁽⁷⁾。

また温度の依存性に関しては、(3-1-5)式における各抵抗成分は、いずれもアレニウスプロット(抵抗の対数表示 vs. 温度の逆数)で整理できる。アノード、カソードの反応抵抗において、この温度依存性は、カソード側であれば(3-1-7)式中の係数 c_1 、 c_2 の依存性に帰することができる。これらの実験結果より、性能表示式における各抵抗成分の式として、次式を導出した。

$$R_{ir} = A_{ir} \exp\left(\frac{\Delta H_{ir}}{RT}\right) \quad (3-1-8)$$

$$R_a = A_a \exp\left(\frac{\Delta H_a}{RT}\right) P_{H_2}^{-0.5} \quad (3-1-9)$$

$$R_c = A_{c_1} \exp\left(\frac{\Delta H_{c_1}}{RT}\right) P_{O_2}^{-0.75} P_{CO_2}^{0.5} + A_{c_2} \exp\left(\frac{\Delta H_{c_2}}{RT}\right) M_{CO_2}^{-1.0} \quad (3-1-10)$$

ここで A 、 H は、各成分における頻度係数、活性化エネルギーに相当する。 A 、 H 値に関しては、同一仕様の発電部材(電極、電解質板)を用いたセルでは、ほぼ同程度の値をとる。図3-1-5には、上記の温度依存性より推算した予測値と実測値との比較を示す。推算した予測値は、実測値を精度良く表示できている。

反応抵抗の圧力依存性に関しては、各ガス種の分圧効果として表されるが、実際の MCFC 圧力特性では、(3-1-7)式の CO_2 に関する分圧効果はほとんど認められず、濃度のみの依存性を示す。このため(3-1-10)式では、 CO_2 の濃度項 M_{CO_2} として表示している。(3-1-5)式に(3-1-8)~(3-1-10)式を組み込んだ性能表示式の表示精度は、図3-1-1に示した直線領域内であれば、実測値の出力電圧に対して $\pm 5mV$ 以内の表示精度を有している

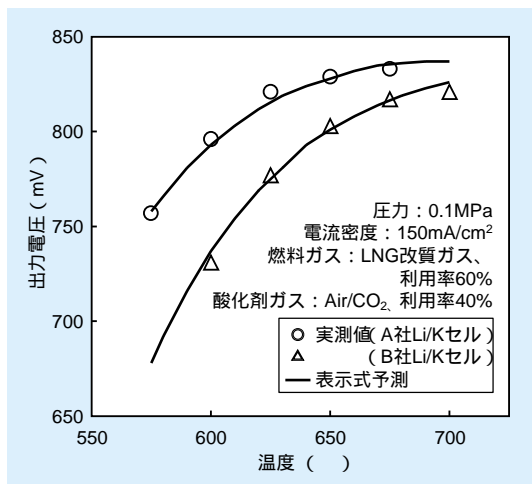


図3-1-5 電池性能の温度特性予測

ことが、多くの小型単セル試験により確認されている。

3-1-3 性能表示式による性能および寿命分析

性能表示式による性能予測は、各性能要因の定量を基に行われるため、同時に性能分析も可能となる。図3-1-6には、ある小型単セルの圧力特性分析を示す。運転圧力 P の増加とともに MCFC 性能は向上するが、この向上分は、「(3-1-6) 式の濃度補正項におけるガス分圧上

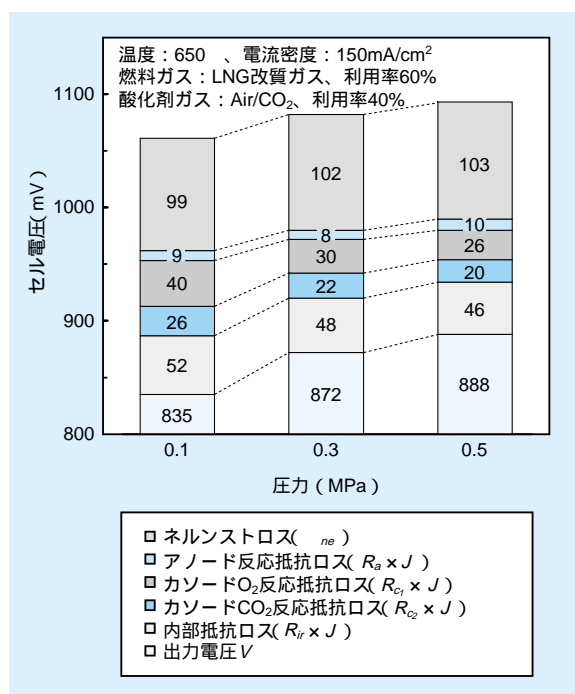


図3-1-6 電池の圧力特性分析 (Li/Kセル)

昇による開回路電圧の増加」(3-1-10)式における酸素すなわちスーパーオキシドイオンに関する圧力項 ($P^{-0.25}$) 減少によるカソード反応抵抗の低下」が主な要因である。圧力項の減少は、加圧により図3-1-3における酸素の化学溶解反応 1 が進み、熔融塩中のスーパーオキシドイオン濃度が上昇したことに対応する。図3-1-5に示した MCFC の温度低下による性能低下分は、いずれのセルにおいても主に、「 O_2 に関するカソード反応抵抗の増加」によって生じ、これは (3-1-10) 式における活性化エネルギー値 H_{C1} が、他の H 値に比べて大きいことに起因する。このような表示式分析により現在では、MCFC 性能の支配的要因であるカソード側の反応挙動を、詳細かつ定量的に把握することが可能となっている。

MCFC の寿命に関しては、次節にて述べるニッケル短絡が電池内で生じない限り、MCFC 性能の経時劣化は、運転時間 t に対して緩やかな劣化挙動を示す。この劣化挙動は、(3-1-5) 式における各抵抗成分の経時増加として記述できる。

$$V(t) = E - \eta_{nc} - \{R_{ir}(t) + R_a(t) + R_c(t)\} \times J \quad (3-1-11)$$

(3-1-11) 式における各抵抗成分の経時増加は更に、(3-1-8) ~ (3-1-10) 式における抵抗成分 R_i の A_i 、 H_i 値の経時変化と見なすことができる。

$$R_i(t) = A_i(t) \exp\left(\frac{\Delta H_i(t)}{RT}\right) \propto A_i(t) \quad (3-1-12)$$

5000 時間以上の小型単セル連続運転を通じて、各 A_i 、 H_i 値を解析した場合、いずれの抵抗成分においても、活性化エネルギー $H_i(t)$ の時間依存性は認められず、その依存性は頻度係数項 $A_i(t)$ の経時増加にある⁽⁸⁾。頻度係数項を「電池内の発電有効面積に対応する量的変数」、活性化エネルギーを「電池内の材料特性および反応メカニズムに対応する質的変数」と見なすならば、MCFC の緩やかな経時劣化現象は、「電解質損失に起因する電池内の発電有効面積の減少」と理解できる。更に、運転終了後のセル解体分析結果より判断すると、この電解質損失は主に、「カソード側の集電板と炭酸塩との腐食反応」により生じていると推定される。よって MCFC の長寿命化技術としては、ニッケル短絡防止と

ともにカソード側の集電板腐食の長期的抑制が今後の課題である。

3-1-4 大型スタックの性能解析・評価

上述した性能表示式は、小型単セルのデータを基に導出されたものであり、小型単セルの場合は、電池面内の温度は一定と見なし、解析することが可能である。しかしながら100kW級以上の大型、高積層MCFCスタックの場合、(3-1-3)式に示した発熱反応によりスタック内部は、電池入口から出口に向かって温度が上昇する温度分布をもつ。この温度分布は、電池性能を考慮したスタック内部での熱・物質収支を解くことにより推定可能である⁽⁹⁾。この場合に用いられる性能表示式の抵抗パラメータ値 (A 、 H) は、小型単セルとスタックが同一の発電部材であれば、小型単セルで得られた値を用いることができる。すなわち、スタック内部をいくつかの微小区間に分割し、単セル試験から導出された性能表示式をスタック内局所における電流 - 電圧特性に適用すれば、スタックの出力電圧およびスタック内部での発熱量を定量化し、温度分布を求めることができる。発電時における発熱量は、スタックからの出力電圧を求めることにより、消費された燃料の発熱量から算出できる^{(9)~(11)}。またスタック内部解析においては、積層方向におけるセル間の接触抵抗分を考慮する必要がある。この接触抵抗分は、小型単セルとスタックの初期性能比較により、(3-1-8)式での内部抵抗にある補正係数を掛けることで考慮される。現状では、1.2 ~ 1.3程度の補正係数値が用いられている。

このような数値解析を用いて、実用規模でのスタック発電特性を評価する場合、10kW程度の出力規模を有するスタック発電試験を実施し、実際の温度分布と数値解析結果とを比較し、開発した数値解析モデルの有効性および精度を検証することが有用である。ここでは、10kW級スタック試験で得られた発電特性に対して適用した内部状態解析モデルの有効性について示す。

図3-1-7に10kW級スタック(0.5m² × 14セル積層、図3-3-6と図3-3-7の「1998年10kWスタック」に対応)の発電性能として、各セルにおける出力電圧の燃料利用率依存性を示す⁽¹²⁾。セルNo. 14、即ち積層方向に対して最下部に位置するセルでは、燃料利用率の上昇に対してセル電圧の低下する割合が小さくなっている。このことは、本セルへの燃料供給量が、他のセルに対して多くなっていることに起因すると考えられる。No. 14以外のセルについての燃料利用率特性は、数値解析結果から得られた電圧の傾向と良く一致しており、単セルにおける電池の性能が大型スタックにおいても十分に発揮されていることが分かる。また、セル電圧に関する数値解析結果は十mV程度の精度で実測値と良く一致しており、上記数値解析手法がスタックの性能解析に有効であることを示している。

次に、同じ10kW級スタックの内部温度分布の実測値と数値解析結果との比較を示す。比較対象とした位置はスタックの中心部分であり、ガスの流れ方向について比較を行った。スタック入口ガス温度については、マニホール部(ガス供給部分)のガス温度測定結果を用いた。図3-1-8にスタック内部の温度分布測定結果を、解析結果と共に示す。また、同図には電流密度分布の解析結果

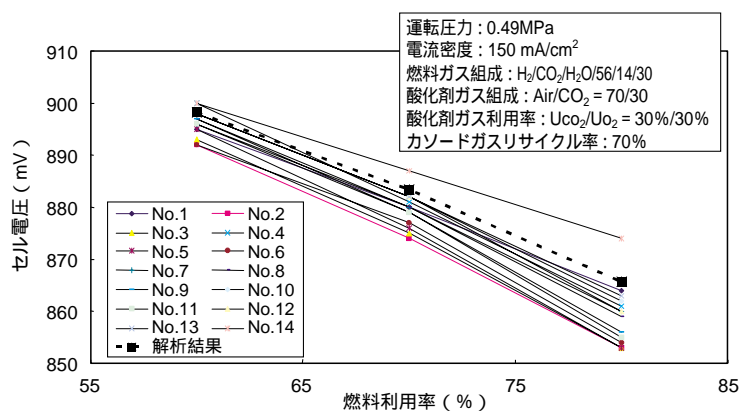


図3-1-7 10kW級スタックにおけるセル電圧の燃料利用率特性と数値解析結果の比較

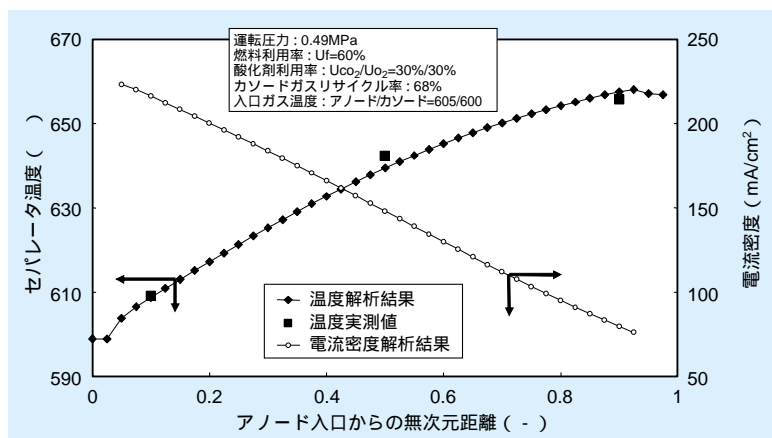


図3-1-8 10kW級スタックの温度分布実測値と温度分布及び電流密度分布の解析結果

も併せて示す。ガス入口側半分の温度上昇が大きくなっているが、これは電流密度がガス入口側で高くなっており、入口側における発熱量が大きくなったことを示している。スタックの温度測定値と数値解析結果は概ね一致しており、本解析手法がスタック内部の温度分布解析にも有効であることを示している。

10kW級スタックは、実用型の高積層スタックの発電性能や温度分布を評価するための必要最小限の単位であり、ここで述べたスタック発電性能や温度分布の推定手法は、実用段階におけるスタック性能評価手法として、有効な活用が期待できる。

3-2 セルの高性能化と長寿命化

MCFCを実用化するためには、スタックの高出力・長寿命化が不可欠であり、高い出力電圧を得るための電池内部抵抗の低減、寿命の改善に向けた電解質損失の抑制とニッケル短絡（電極材料であるニッケルの電解質中への溶解と再析出による内部短絡、3-2-4項で詳述）の抑制が必要である。出力電圧を改善するための有力な解決方法として当研究所では電解質組成に着目し、その組成の適用性について、実際のセル発電試験を中心とした検討を行ってきた。また、寿命を改善するため、ニッケル短絡に関しては当研究所では早い段階からその現象を把握し、運転条件や電池仕様と短絡発生時間との関連を明らかにしてきており、この現象を短時間で評価するための加速試験方法を確立している。そこで、以下ではこの電解質組成選定と実際のセルでの諸特性や種々のニッケル短絡抑制方法の寿命延伸効果について得られた成果を紹介する。

3-2-1 電解質組成の選定

MCFCの電解質は、1921年のBaurによって試作された Na_2CO_3 と K_2CO_3 の等モル混合塩が最初の適用例である。その後、MCFCの電解質組成は、Li、K、Naの3種の炭酸塩とその混合系において検討されてきた。1970年代になって主流となったLi/K系電解質（主として $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{K}_2\text{CO}_3=62/38$ モル比の共晶塩）は、当時の米国IGTの研究成果によるところが大きい。Li/K系電解質は、MCFCの運転温度範囲において、液体である組成範囲が広く、腐食などによる組成のずれに対しても取り扱いが容易であったことが選択の一因であったと推定される。我が国のMCFCは、1981年から通産省のムーンライト計画に組み込まれ、前記IGTの研究結果に強く影響を受け、炭酸塩組成はその詳細な検討が十分に行われないままに、一定レベル以上の性能を示すLi/K系電

解質によって開発が進んだ。しかし、近年では高性能化を目指した加圧運転試験（0.3～0.7MPa）が活発に行われ、Li/K系電解質におけるニッケル短絡現象が顕在化するようになり、その対策の必要性が高まってきた。

当研究所では、その対策の一環としてLi/Na系電解質（主としてLi₂CO₃/Na₂CO₃=53/47モル比の共晶塩）に注目し、その適用性について、セル発電試験を中心とした検討を1993年度から進めてきた⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。表3-2-1に従来のLi/K系電解質と新たに選定したLi/Na系電解質の各種物性値の違いを比較して示す。一般に内部抵抗に関係する導電率と電極反応抵抗に関係するガス溶解度は、トレードオフの関係を持つ。従って、Li/Na系はLi/K系と比較して、融点、密度、粘度などはほぼ同じであるが、酸素溶解度、ニッケル溶解度、蒸気圧は小さく、導電率は高い。これらの物性値からLi/Na系は、カソード反応抵抗は大きくなる可能性はあるものの、内部抵抗が小さく運転圧力を上げれば酸素溶解度も増すため出力電圧を高くできる可能性があり、さらにニッケル短絡発生時間を遅延できる可能性がある炭酸塩であることが分かる。

3-2-2 電解質組成変更によるセル電圧の向上

Li/Na系電解質を用いたセルを試作し、その初期特性を測定した例を圧力特性として図3-2-1に示す⁽⁵⁾。図から明らかなようにLi/Na系セルでは、0.1～4.5MPaの圧力範囲にわたってLi/K系の場合よりも高いセル電圧を示した。なお、3.5MPa以上の運転圧力で出力電圧が低下した理由は燃料ガス中でメタン生成量が多くなるためである。また図3-2-1のうち圧力1.6MPaにおける電圧低

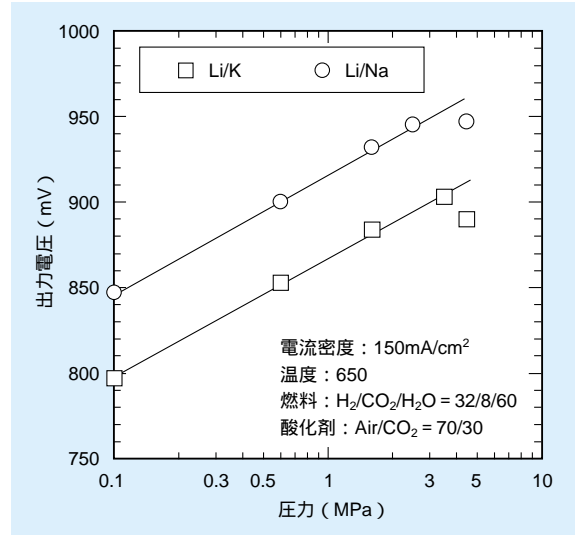


図3-2-1 Li/Na系電解質による単セル電圧と圧力の効果

下要因を3-1節の手法を用いて分析した結果を図3-2-2に示す。当初懸念していた低酸素溶解度に起因するカソードの反応抵抗の増大は認められず、逆に小さくなった。さらに高導電率に起因する内部抵抗（IR）ロスの減少が認められセルの高電圧化に大きく寄与している。

1 MPa以上の高圧領域では過電圧が減少するため全電圧降下分に占める内部抵抗による電圧降下分の割合が高くなる。このため内部抵抗の小さいLi/Na系は高電流密度で運転するほどLi/K系との差異が顕著となる。図3-2-3に圧力0.1MPa、1.6MPa、3.5MPaで電流密度を変化させた場合の出力電圧と出力密度の例を示す⁽⁵⁾。運転圧力1.6MPa、電流密度150mA/cm²において、Li/K系セルでは1.3kW/m²の出力密度であり、Li/Na系セルでは1.4kW/m²であったが、高電流密度400mA/cm²の条件ではLi/K系セルでは電圧低下が大きくデータを取得

表3-2-1 Li/K系とLi/Na系電解質の代表的な物性値

		(Li/K) ₂ CO ₃	(Li/Na) ₂ CO ₃
組成	mol%	62 : 38	53 : 47
融点		488	495.8
塩基度	PO ²⁻	6.9	6.62
ニッケル溶解度	mol fraction(× 10 ⁻⁶)	41.9	22
表面張力	(N/m)	0.22	0.24
密度	(g/cm ³)	1.93	1.97
粘度	(Ns/m ²)	8.3 × 10 ⁻³	8.1 × 10 ⁻³
蒸気圧	(g/cm ³)	- 3.2 × 10 ⁻¹⁰	- 3.5 × 10 ⁻¹⁰
導電率	(1/ cm)	1.4 ~ 1.6	2.1 ~ 2.3
O ₂ 溶解度	mol/cm ³ atm	3.3 × 10 ^{-7*}	1.8 × 10 ⁻⁷

650 における物性値

*(Li/K)₂CO₃ = 50 : 50

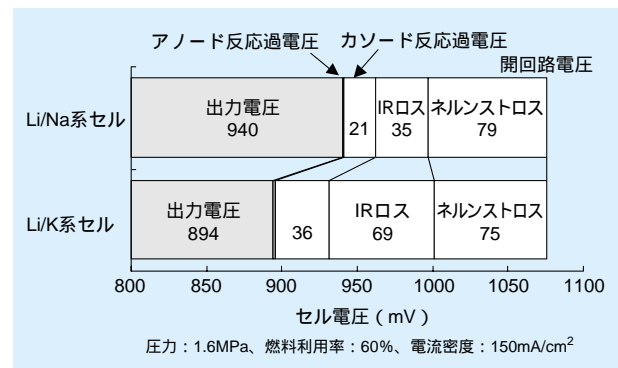


図3-2-2 圧力1.6MPaにおける電圧降下の内訳

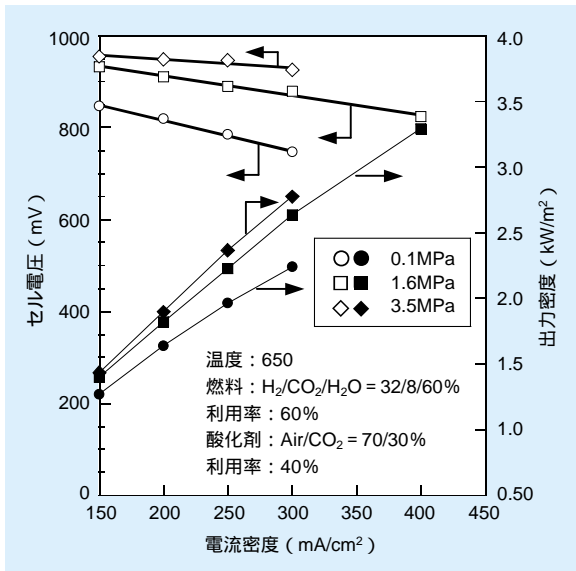


図3-2-3 Li/Na系セルの高電流密度特性

できなかったのに対し、Li/Na系セルでは、 3.3kW/m^2 の出力密度を達成することを確認し、Li/Na系の優位性を明らかにできた。

3-2-3 長時間運転

MCFCが実用化されるためには初期導入コストや減価償却などの経済性を考慮して4万時間程度の寿命が必要とされている。MCFCの電圧は、図3-2-4のように運転初期より緩慢な電圧低下を生じ、所内補機類動作範囲との兼ね合いにより、4万時間後の低下量を初期電圧の

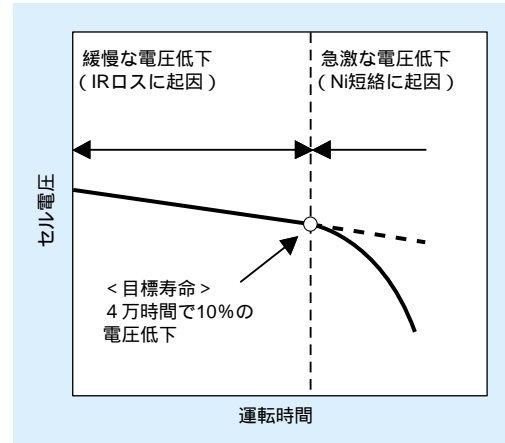


図3-2-4 MCFCにおけるセル電圧の経時変化

10%以内にするのが開発の目標値となっている。つまり、電圧低下率としての目標は0.25%/1,000時間となる。また、セル電圧はある時点を超えて急激な電圧降下を生じる。この急激な電圧降下の起点はニッケル短絡によるものであり、短絡発生を4万時間以降に遅延しなければ、短絡発生時点が寿命になると考えられる。

実際の単セルを用いた場合の長時間連続運転特性について、図3-2-5にLi/Na系電解質を用いたセルにおける625、17,500時間に及ぶ長時間電圧低下特性を、図3-2-6に約2,000時間毎の要因分析結果を示す⁶⁾。但し、本試験では5,000時間時点で一度、電解質補充を行っている。出力電圧低下要因は内部抵抗(IR)ロスの経時増加のみによって生じ、カソードやアノードの反応過電圧増加による電圧低下はほとんど生じていないことが分か

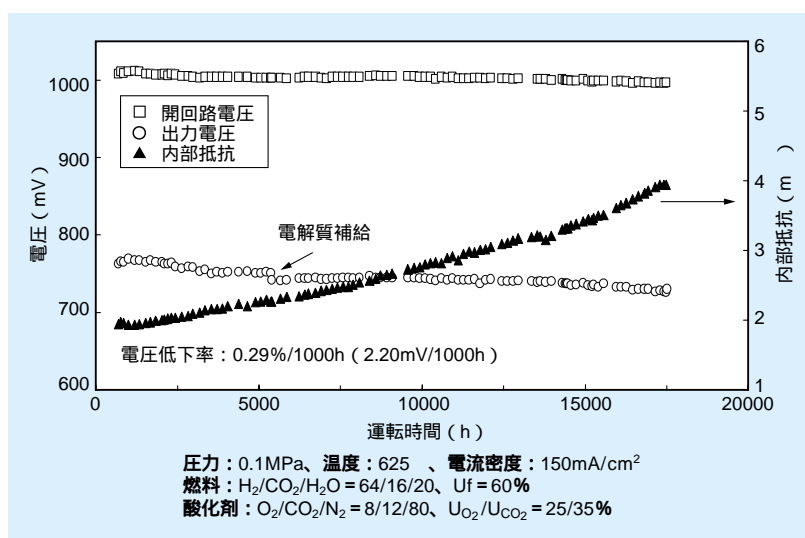


図3-2-5 Li/Na系 625 17,500時間連続運転特性

	出力電圧	IRロス	カソード 過電圧	アノード 過電圧	ネルンスト ロス	開路 電圧
208hr	767	33	115	8	93	
3160hr	757	33	122	12	93	
5032hr	755	35	125	9	93	
7144hr	749	38	128	10	93	
10168hr	750	43	121	12	93	
12880hr	746	48	121	10	92	
15764hr	739	55	124	8	92	
17488hr	732	60	124	11	92	

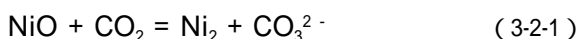
セル電圧 (mV)

図3-2-6 Li/Na系625 運転セルの性能経時分析

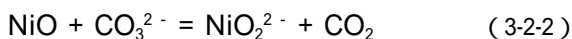
る。また、電圧低下率は、電流密度 150mA/cm²において 0.29%/1,000 時間であり、目標電圧低下率である 0.25%/1,000 時間をほぼ満足する結果が得られている。

3-2-4 ニッケル短絡現象への取り組み

現在一般的に使用されている MCFC のカソードは多孔質の Ni をセル内で in-situ 酸化したりチウム化 NiO である。この NiO の熔融炭酸塩に対する溶解は (3-2-1) 式に示す酸性溶解



と (3-2-2) 式に示す塩基性溶解



の二形態があり、MCFC の運転条件下では酸性溶解が支配的であると考えられている。つまりカソードガス中に供給する CO₂ 濃度が高いほど式の反応は右辺へ進む。いずれの機構にせよ飽和溶解度に達すれば NiO の溶解は停止する。しかし、(3-2-3) 式に示す溶解した Ni²⁺ イオンが燃料極側から拡散してくる H₂ によって還元されて金属 Ni になれば、電解質板内に Ni²⁺ イオンの濃度勾配が生じるため、電解質板中の NiO の溶解度は飽和に達することなく (3-2-1) 式の反応は持続することになる。



これが NiO カソードの溶解・析出として問題となっており、電池の運転時間が長時間になれば、電解質板中に金属 Ni が析出し、アノードとカソード間でニッケルによる内部短絡を引き起こすことになる (図 3-2-7)。また、一旦ニッケル短絡現象が生じると、電圧はそれまでの緩慢な低下と比較し、図 3-2-4 のように急激に低下してしまう。

このように、MCFC の高性能化および長寿命化のためには、ニッケル短絡の抑制が大きなカギとなる。当研究所では一般的にニッケル短絡が寿命を大きく左右する問題として認識される以前から、先行して小型単セルを用いた実験でニッケル短絡現象を確認し、電池寿命に対する炭酸ガス分圧および電解質板 (マトリクス) 厚さの依存性などニッケル短絡現象に関する知見を報告してきた。電池寿命に対する炭酸ガスとマトリクス厚さの関係は、次の (3-2-4) 式によって表される。

$$t_{sc} = A \times P_{\text{CO}_2}^\alpha \times L^\beta \quad (3-2-4)$$

ここで、 t_{sc} : ニッケル短絡開始時間 (h) P_{CO_2} : 炭酸ガス分圧 (atm) L : マトリクス厚さ (cm) である。また、乗数 α および β は、これまでの知見では、 $\alpha = -1$ および $\beta = 1.6 \sim 2.1$ である。

しかしながら、ニッケル短絡は数千時間以上のオーダーで発現する現象であり、その抑制方法を確立するため

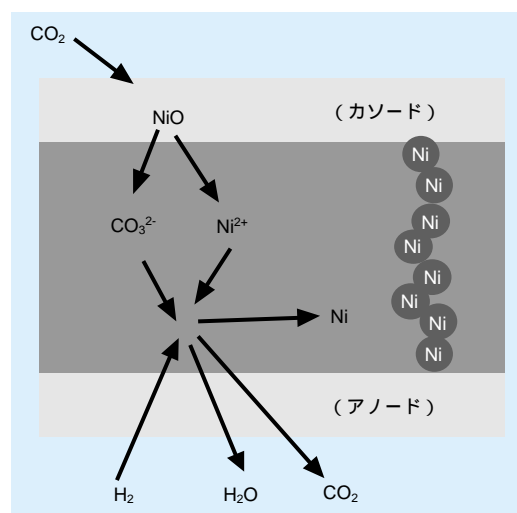


図3-2-7 MCFCにおけるニッケル短絡現象の模式図

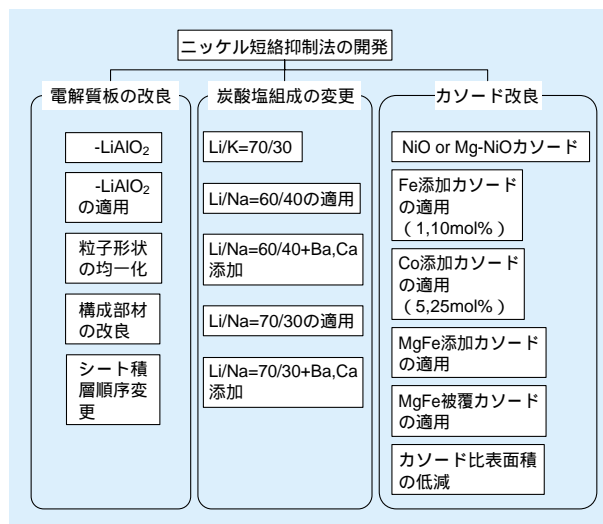
には従来のセル試験手法による検討では非常に多くの時間と労力が必要となる。例えば、図3-2-5や図3-2-6で示したセルでは開回路電圧は経時的に変化しておらず、この運転条件においては17,500時間の運転時間においてもニッケル短絡現象は発生していない。そこで、当研究所では、これまでの数気圧までのセル試験結果をもとに、ニッケル短絡現象がカソード側に供給する炭酸ガス分圧に反比例して発現することに着目し、図3-2-8に示すような2MPa（写真手前の装置）や5MPa（写真奥の装置）までの試験が可能な装置を設置し、加速試験法の確立を図ることにした。その結果、電解質へのニッケル析出量が明らかにその加速効果を示唆する結果を得た⁵⁾。そこで本試験装置を使用してニッケル短絡抑制方法の確立を目指し様々な対策を施したセルの加速試験を実施している。

我が国の電気事業が要求する高効率 MCFC-GT 複合発電システムでは、高圧（1.2MPa 程度以上）下で寿命目標である4万時間作動させることを目指しており、(3-2-4)式からもわかるように、高圧条件下ではニッケル短絡現象が短時間で発生し易くなり、MCFCの寿命に大きな影響を及ぼすことが懸念される。ニッケル短絡現象を抑制するための手法としては、1 溶出元のカソード材を変更する（カソード改良）、2 NiOカソードが溶出しにくい炭酸塩組成とする、3 短絡パスを形成しにくい電解質板構造とする（電解質板変更）等のアプローチがある。当研究所においては表3-2-2に示す種々の短絡抑制方法を立案し試行錯誤を繰り返しながらそれら単独や組み合わせでの寿命延伸効果を延べ約70セルを使用して実験的に検証してきている。次節以降では当研究所にお



図3-2-8 ニッケル短絡加速試験装置

表3-2-2 立案した短絡抑制方法



いて、これまでに得られたニッケル短絡抑制手法に関する知見を紹介する。

3-2-5 ニッケル短絡抑制法による MCFC の寿命延伸⁽⁷⁾

ニッケル短絡現象を抑制するための手法として前項の1に示したNiOに代わる代替カソード材料を開発することも1つの解決手段であり、Fe系、Co系酸化物等の材料研究が行われているが、過電圧や電気抵抗が大きいなどの問題があり、NiOに匹敵する電池性能は得られておらず、現段階においてはNiO電極の改良等によって高い性能を維持しつつ、寿命を延伸させることが現実的な方策である。

当研究所では、Li/K系電解質においてNiOカソードにFe、Coをそれぞれ添加した改良カソード材を適用した単セルの寿命延伸効果について実験的に検討した結果、図3-2-9に示すようにFeを10mol%添加したセルにおいて、従来のセルと比較し約2倍の寿命延伸効果が得られることを明らかにした。また、前項2に示したようにLi/K系電解質からLi/Na系へ電解質組成を変更することで、導電率の向上による性能向上とともに、ニッケルの溶解度は約半分減少しており（表3-2-1）、物性値を反映してニッケル短絡現象が発現するのであれば、Li/K系セルの約2倍の寿命が期待できる。このため、当研究所では、Li/K系電解質とLi/Na系電解質を適用した単セルの寿命延伸効果について実験的に検討した。

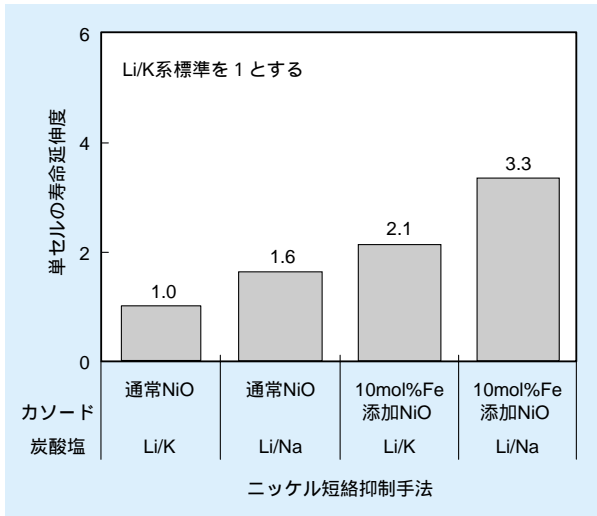


図3-2-9 抑制対策を施した単セルの寿命延伸度

その結果、図3-2-9に示すように、Li/K系と比較してLi/Na系では約1.6倍の寿命延伸効果が得られた。Li/Na系電解質は3-2-2項に示したように性能面でも大幅な向上が期待でき、寿命面と共にその優位性が明らかとなった。この結果をもとに3-3節で示すスタック開発を経て我が国においては、Li/Na系電解質が一般的に適用されるようになり、当研究所の成果がMCFCの性能向上、長寿命化へ反映されることになった。

さらに前述した寿命延伸効果の高いFe10mol%添加カソードと、Li/Na系電解質を組み合わせ、短絡加速試験を実施した結果、図3-2-9に示すように従来のLi/K系セルと比較し約3.3倍の寿命延伸効果が得られ、0.13cm

厚みの電解質板を適用した場合、カソード炭酸ガス分圧が0.08MPaにおいて、約27,000時間にわたってニッケル短絡が発生せずに運転可能と推定される結果を得た。

3-2-6 実用化に向けたニッケル短絡抑制対策の開発⁽⁸⁾

当研究所で得られたニッケル短絡抑制手法による知見をベースとして、現行の国のプロジェクトにおいて、実用化に向けたニッケル短絡抑制手法を開発している。

ニッケル短絡抑制評価手法としては、(3-2-4)式を用いて、ニッケル短絡発生時間から係数Aを求め、それらと比較し、寿命延伸効果を評価した。(3-2-4)式における乗数およびは、これまでの知見から = - 1 および =2を暫定的に用いた。

現在のところ、Feの添加量を低減するため添加法を改良し、Feを被覆した改良カソードを適用し寿命延伸効果を検討したところ、約1.4倍の寿命延伸効果が得られることを明らかにした。

しかしながら、さらに寿命を延伸させるためには、炭酸塩組成を変化させNiOの溶解量を低減する方策を導入する必要がある。このため炭酸塩組成を変更することによりNiOの溶解量低減を図ったLi/Na=70/30mol%、およびBa、Caを添加した炭酸塩(4元系Li/Na/Ba/Ca)組成をそれぞれ適用し、その組み合わせ実験を行った結果、これら全てを組み合わせセルにおいて、図3-2-10に

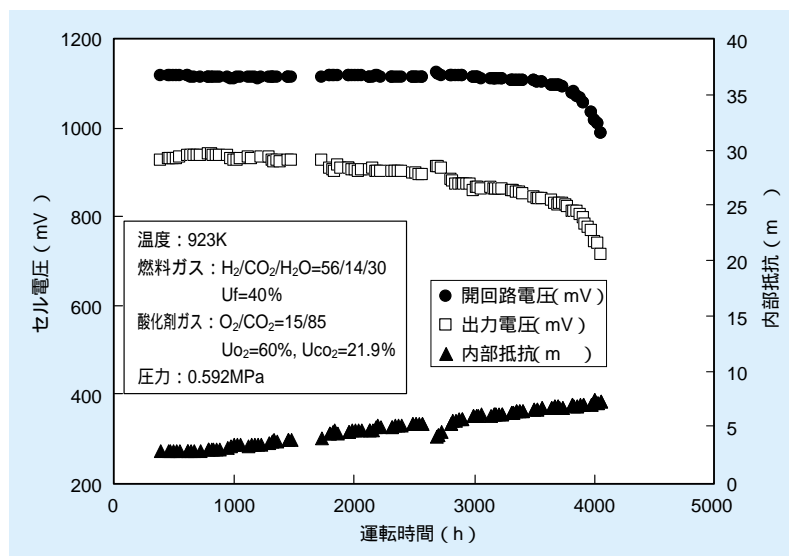


図3-2-10 ニッケル短絡複合抑制手法を施した単セルにおける加速試験結果

示すニッケル短絡加速実験の結果を得た。ニッケル短絡開始時間は、運転開始後約3,700時間であり、(3-2-4)式をもとに、0.13cm厚みの電解質板を用いて、カソード炭酸ガス分圧が0.08MPa(高压運転プラント条件に対応、2-4-3高性能モジュール、5-3-1(3)1天然ガス利用分散型外部改質プラント参照)の場合、約37,000時間までニッケル短絡が発生せずに運転可能と推定される結果を得ている。

このように、ニッケル短絡抑制手法によって、現在のところ、MCFCのセル寿命は、目標寿命である4万時

間をほぼ達成できる見込みを得つつあるが、一方で、ニッケル短絡現象については未だ不明な点も多く存在している。例えば温度が低い条件下では析出が多く、短絡時間も短くなるといわれているが、詳細は明らかにはなっていない(4-4-2項のシステム解析では考慮した)。今後はニッケルが析出するマトリックスの微細構造、運転温度、電流密度等のニッケル短絡現象に影響する諸因子を詳細に検討し、ニッケル短絡現象を解明する必要がある。さらに短絡抑制手法を適用したセルの実用化に向け、性能向上の最適化研究を行うことも必要である。

3-3 大出力化のためのスタック技術

MCFC発電プラントの実現には、スタックの大出力化(大型化)と、その運転技術の確立ならびに運転特性の把握が不可欠である。

スタックの大出力化については、セルの大型化が基本であり、製造方法改良によるセル部材の大型成形技術に加え、積層化に不可欠なセパレータ板の大型化が必要である。

また、スタックの運転技術の確立と運転特性の把握については、それら大型セルを構成するセパレータ板の性能を含めて評価しなければならない。すなわち、プラント内でのスタックの運転パラメータとしては、燃料利用率、運転圧力、酸化剤利用率のみが外部から設定・制御可能であるが、これらはスタック全体に対する運転条件であり、スタックを構成する個別のセルに対しては設定できない。従って、大型セルを積層したスタックにおいては、セル部材の性能に加え、ガスマニホールド(積層したセルそれぞれにガスを分配供給する流路)構造やセパレータ構造などスタック設計に重要な要因によって、スタック内に必然的に生じる温度分布やガス流配を含めた、より現実に近い状態での総合的な運転特性の把握が重要になる。そのためには、実際に大型セルを積層したスタックを運転試験し、その結果から、課題の抽出、改良点の評価を行い、スタック技術の確立を図って行く必要がある。

本節では、まず、大型セルを積層したスタックの運転研究において必要となる試験設備ならびに試験方法

について述べる⁽¹⁾⁻⁽³⁾。次に、10kW級スタックを用いた運転研究における、大型セパレータ板の改良・開発を中心とするスタック化技術について、性能ならびに信頼性の観点からの技術の変遷と今後の課題について述べる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

3-3-1 大面積スタック化技術への挑戦

(1) スタック運転評価試験装置と基本運転試験法

積層用大面積セル(積層化を前提に設計・製作した大面積セル)技術や、それらのスタック化技術の開発ならびに運転特性の検討に際しては、運転に必要な大型試験設備の開発と基本運転試験方法の確立が不可欠である。当研究所では、それまでの小型単セルや小型スタックでの運転経験を基に、10kW級までの大型セル積層スタックを試験できる設備を1988年に設置し、基本運転試験方法の確立ならびにスタック技術の開発に着手した⁽⁶⁾。

試験に供した積層スタックは、メーカーサイトの工場を組み立てられた後に、低振動車により試験サイトへ搬入された。試験サイト設置後は、スタックの昇温過程で必要な前処理を行い、発電可能なスタックとし、その後、常圧での反応ガスの供給、ガスリークチェック等の機能確認を行い、運転試験に入った。

運転試験においては、通常、低電流密度(50~100mA/cm²程度)での性能安定化のためのならし運転を行い、定格電流密度(150mA/cm²)での発電試験に

移行した。初期の発電試験においては、まず、セパレータ板を含めた運転特性の把握・評価を行うため、燃料利用率試験（スタックに供給する燃料流量に対するセル毎の出力電圧の変化を測定し、スタック内部の燃料ガスの配分状態を評価）、加圧試験（スタックの運転圧力に対するセル毎の電圧変化を測定し、積層セル毎の電極性能を評価）等の基本運転特性試験を、カソードガスによりスタック内部の温度制御を随時行いながら実施した。その後、各スタックの性能等を考慮し、基準運転条件を設定し、スタック信頼性確認等のための長期連続運転試験に移行した。なお、長期連続運転試験においては、定期的に別途定めた標準条件での発電性能測定を実施した。

(2) 積層用大面積セル構造の確立と検証

セルの大型化については、セル部材の大型化と同時に、スタックでの評価が可能な大型セパレータ技術の開発が必要である。ここでは、アノードガスとカソードガスがセル内で並行して流れる並行流内部マニホールドスタック（図3-3-1）を対象とした、セパレータ板の大型化に関して、0.3m²級から1 m²級までのセルを用いたスタックでの運転試験による検討結果とその開発過程での基本構造の改良について述べる。

表3-3-1に、大面積化・積層化技術の検討に使用した10kW級スタックの基本仕様を示す。0.3m²級の中面積スタックは、内部マニホールド並行流スタックの基本コンセプトの検証を目的に石川島播磨重工業(株)と当研究

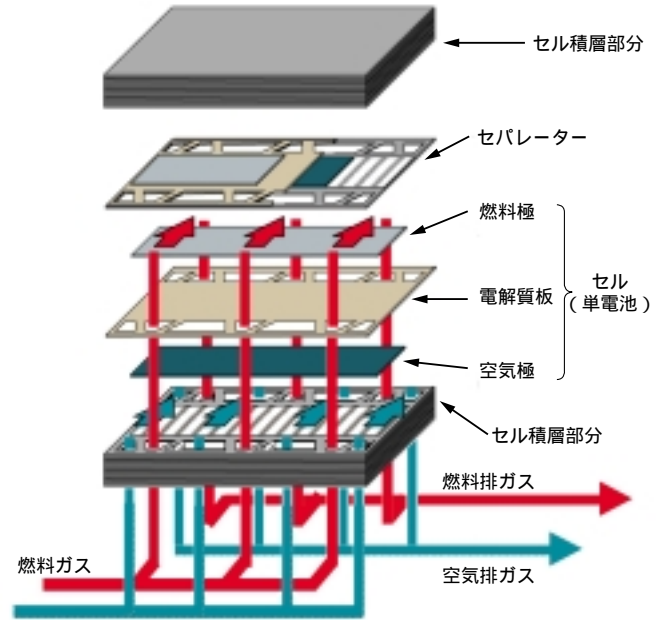


図3-3-1 MCFCスタックの構造(並行流、内部マニホールド方式)

所との共同研究において試作したスタックで、初期の運転特性試験を中心に実施し、スタック運転試験法の基礎を確立した。大面積スタックIは、その運転評価技術をもとに、国のムーンライト計画において石川島播磨重工業(株)がスタック大型化のために開発した1 m²級大型セパレータを用いたスタックの一号機である。

セパレータは、スタック性能を左右する重要な部品である。図3-3-2にその端部断面を示す。初期のセパレータはセンター板で燃料ガスと酸化剤ガスを仕切り、その上下にガス流路を確保するための流路板（コルゲート板、

表3-3-1 多層構造セパレータを適用したスタックの基本仕様

	中面積スタック	大面積スタック I	大面積スタック II
電極有効面積	約0.3m ² (0.52m × 0.6m)	約1.0m ² (0.56m × 1.8m)	
積層セル数	18セル	10セル	10セル
セパレータ構造	薄板多層構造	薄板多層構造	改良薄板多層構造
	スパーサー型端部	ダイヤフラム型端部	プレス成型型端部
ガス流方式	並行流方式		
電池冷却方式	酸化剤ガス流量制御		
アノード電極	Ni + Cr合金		
電解質保持材	ドクターブレード法によるシート構造		
			繊維補強型
電解質組成	Li/K = 62/38		Li/K = 70/30
カソード電極	In situ酸化によるリチウム化酸化ニッケル		
	MgCO ₃ 添加		

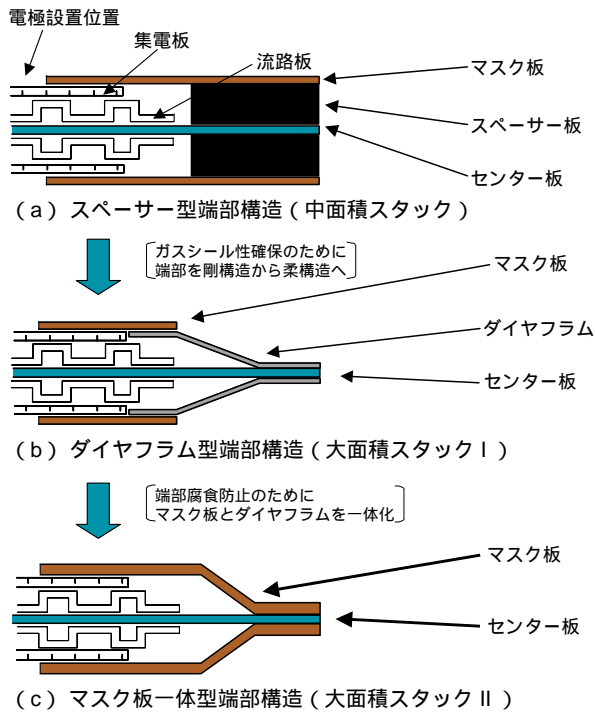


図3-3-2 多種構造セパレータにおける端部構造の改良

波板)と集電板(パンチングメタル、穴あき板)を配置した基本構成となっており、さらにその上下外周部にガスシール部を確保するためのマスク板を取り付けた多重構造セパレータであった。図3-3-2(a)に示すように、中面積スタック(0.3m²級)のセパレータは製作の容易さから端部にスペーサを設けた剛構造となっており、ガスシール部をシール性を確保するには、高い製作精度が必要であった。これに対して、大面積スタックI(1m²級)では大型化の開発過程において、シール性を確保する目的から、図3-3-2(b)に示すように、セパレータ端部構造に柔軟性を持たせるためのダイヤフラム構造を採用した。

大面積スタックIを運転試験(運転圧力0.3MPa、電流密度150mA/cm²、燃料利用率60%)した結果、スタック出力・平均セル電圧は、運転時間400時間をピークに、緩やかに低下し始め、1,000時間以降においてその低下は大きくなり、1,400時間以降に急激に低下した(図3-3-6と図3-3-7の「1990年10kWスタック」参照)。運転終了後の外観観察では、各セルともに、ダイヤフラムを適用したセパレータ端部の変形腐食が認められ、特に電圧低下が大きかったセル近傍での腐食が激しく、セパレータ端部は、腐食生成物に覆われていた。さらにダイヤフラム周辺の溶接部では図3-3-3に示すように変形

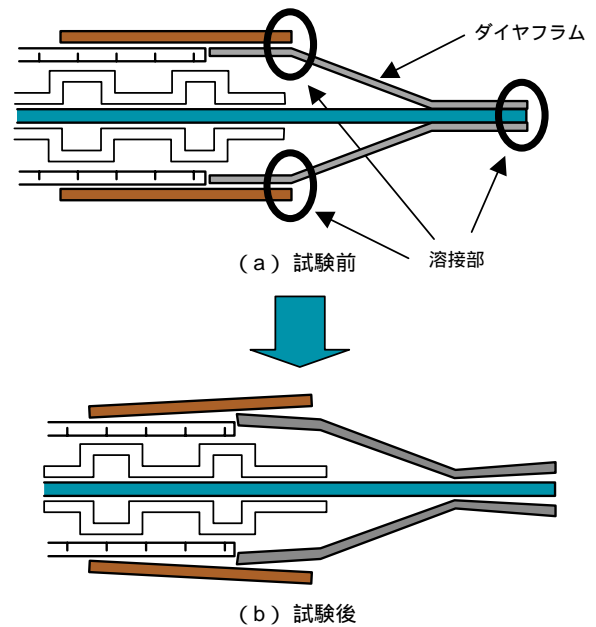


図3-3-3 セパレータ端部の異常(スタックI)

が確認され、セパレータ内部と容器間のガスリークが発生していたことが容易に推測できた。これらの結果から、大面積スタックIにおける短時間でのスタック電圧低下の主要因は、セパレータ板端部の溶接部を中心とする腐食による形状変形がガスリークの発生を招いたことであると推察され、大型化に伴うセパレータ端部の構造ならび耐食性に問題があることが明らかとなった。

大面積スタックIで明らかになった課題を解決するため、石川島播磨重工業(株)と当研究所は共同で、セパレータの信頼性向上対策として、図3-3-2(c)に示すように、マスク板端部をプレス成形してダイヤフラムと一体化した構造を、大面積スタックIIに適用した。これにより、セパレータ端部の溶接箇所が減ると共に耐食処理も容易となり、セパレータ製作の最終段階で、溶接部を中心にアルミの部分溶射処理を施して耐食性向上を図ることができるようになった。大型面積スタックIIでは、4,000時間を超える運転試験(運転圧力0.5MPa、電流密度150mA/m²、燃料利用率80%)においてもセパレータ板端部構造の健全性が確保されていることが確認された。なお、本スタックは約2,500時間以降に反応抵抗増大による電圧低下が大きくなった。(図3-3-6と図3-3-7の「1991年10kWスタック」参照。2,500時間以降は負荷電流を下げて運転したため図中でのデータは約2,500時間までが示されている。)

大面積スタックIIで開発したスタック化技術は、同セ

ルを102セル積層した上下51セルブロックからなる100kW級スタックにおいて検証後、第2章で述べた1,000kW級発電プラント用スタックとして採用された(図3-3-6と図3-3-7の「1993年100kWスタック」参照、プラントの運転成果については2-2節参照)。

3-3-2 長寿命・低コストスタック技術への挑戦

1,000kW級発電プラントの開発により、大容量スタックの技術的な実現性は確認されたが、実用化に向けては、スタックのさらなる長寿命化と低コスト化が課題となった。そのため、セパレータ構造の簡素化ならびに新型電解質スタックの開発に着手した。

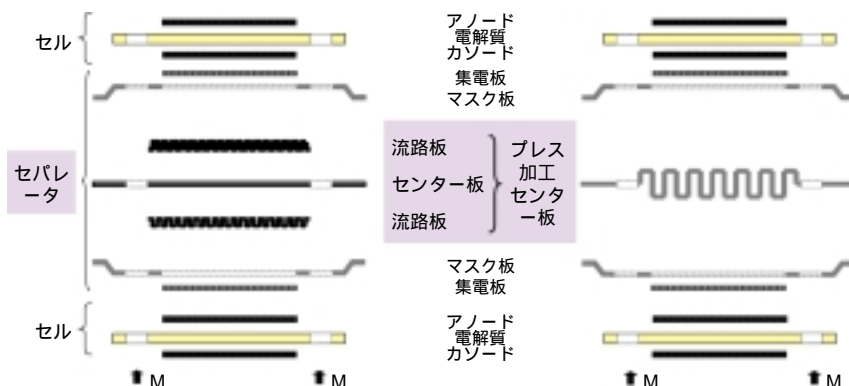
(1) セパレータ構造の簡素化

3-3-1項で述べた多層構成セパレータの中央部(電極対応部)は、センター板(1枚)、上下流路板(2枚)、上下集電板(2枚)の計5層構造となっている。セパレータのコスト低減ならびに内部接触抵抗の低減による性能の向上を考えた場合、このような多層構造から、部品点数をいかに少なくするかが課題となる。さらに、MCFCの性能劣化要因の一つとして3-2節にも示した様に、セパレータ構成部材表面での腐食等による電解質の損失が挙げられることから、大型スタックにおいては、セパレータ内での電解質の濡れ面積の低減が、長寿命化への一方策と考えられる⁽⁷⁾。この点からも積層部品点数の削減は有効となる。

セパレータの層数を低減する方法としては、1 集電板とガス流路板とを一体化する方法、または2 ガス流路板とセンター板を一体化する方法が考えられる。いずれも構造面では、セパレータ中央部を5層構造から3層構造にすることが可能である。後者の方法(2)は、製造面からは大型のプレス機等が必要となり難度が高くなるが、構成金属部材間の接触抵抗や電極との接触面積確保の観点からは、より効果的で有利であると期待できる。

これらのことから、実用化に向けたセパレータ構造として、流路板とセンター板を一体化したセンター板プレス加工セパレータ(プレスセパレータ)の検討を石川島播磨重工業(株)と共同で実施した。図3-3-4に、試作したセパレータ板の断面構造の概要を示す。本構造ではガス流路部の電解質の濡れ面積を約50~60%低減できた。本構造ではさらに、プレス成形による、量産化も容易となり、コストダウンも期待できる。

センター板プレス加工セパレータの採用による長寿命化の可能性を検討するため、0.5m²級のセパレータによる14セルの10kW級スタックを試作し、5,000時間を超える発電試験を行い、長時間運転特性の解明ならびに試験終了後の分析を行った。その結果、運転初期に部材の安定化によると思われる電圧上昇があり、その後は、発電試験終了まで安定した電圧を維持した(図3-3-6と図3-3-7の「1995年10kWスタック」参照)。その間の電圧低下量は、約0.4%/1,000時間(約4mV/1,000時間)と極めて小さく、解体後の分析によれば、セル内部での電解質損失量が3-3-1項で述べた従来型のスタックに比較して約1/2に低減していることがわかった。



(M : 内部マニホールド穴)

(a) 多層構造(従来型)セパレータ構造 (b) センター板プレス加工セパレータ構造

図3-3-4 セパレータ断面構造の比較

以上の検討から、構成部材数を低減したセンター板プレス加工セパレータが、実用化スタックの開発に対して有効な手段であることが明らかとなった。

(2) 新型電解質スタックへの挑戦

高い電圧を得るための加圧運転によってニッケル短絡現象が顕在化するまで、MCFCの電解質には、Li/K系が一般的に使用されていた。しかし、3-2節で述べたように、Li/Na系が、高性能化・長寿化に有益であるとの単セル研究結果をもとに、スタックへの適用が検討された。当研究所では、まず(株)日立製作所との共同研究において、スタックにLi/Na系電解質を適用し、その優位性を確認した。さらに、(1)で述べたプレスセパレータ技術と組合せたLi/Na系電解質による新型スタックを中部電力(株)ならびに石川島播磨重工業(株)との共同研究において開発し、0.5m²のセルを14セル積層したスタックにおいて、10,000時間を超える連続運転を実証した(図3-3-6と図3-3-7の「1998年10kWスタック」参照)。また、最大出力密度として、2.5kW/m²(従来の約1.5倍)を達成し、低コスト化に向けての対応が可能であることも明らかにした。

この技術をベースに、プレスセパレータ面積を実用規模の1m²に拡大した1m²のセルを10セル積層による

10kW級スタックにより、連続発電時間10,000時間を達成した(MCFC研究組合からの受託分担研究)。その結果、電圧低下率はこれまで試験したスタックの中で最も小さい約0.3%/1,000時間となった(図3-3-6と図3-3-7の「2001年10kWスタック」参照)。以上により、スタックの大面積化を信頼性も含め実証した。

以上のスタック技術開発の変遷を、その後の現在までの展開を含めて図3-3-5に示した。

3-3-3 実用スタック化技術の確立に向けて

これまでのMCFCスタック技術の変遷を平均セル電圧の経時変化として図3-3-6にまとめて示した。大出力化のためのスタック技術の基本となる大型積層セルの開発では、本節に示したセパレータの改良はもとより、電極や電解質板の着実な改良、高度化も図られており、1m²級の大きさで安定性も含め10,000時間程度の連続発電に耐え得る技術が確立されつつある。これらのスタックの電圧低下率についても図3-3-7に示したように、実用化のための目標とされる4万時間で10%の電圧低下に対応する0.25%/1,000時間をほぼ達成できるレベルに到達した。

現在、大出力スタック実現のための最後のハードルで

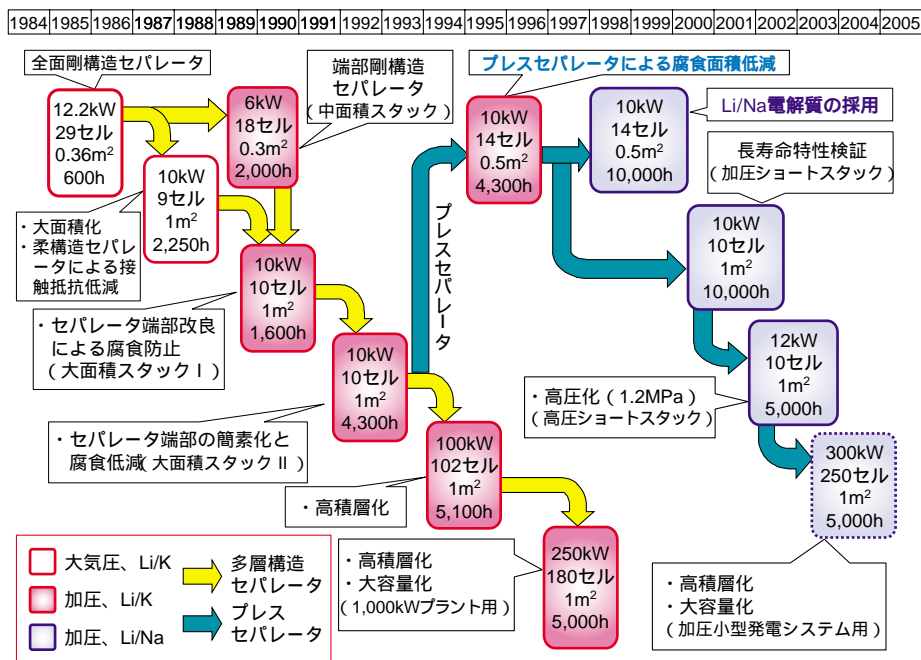


図3-3-5 MCFCスタック技術の変遷

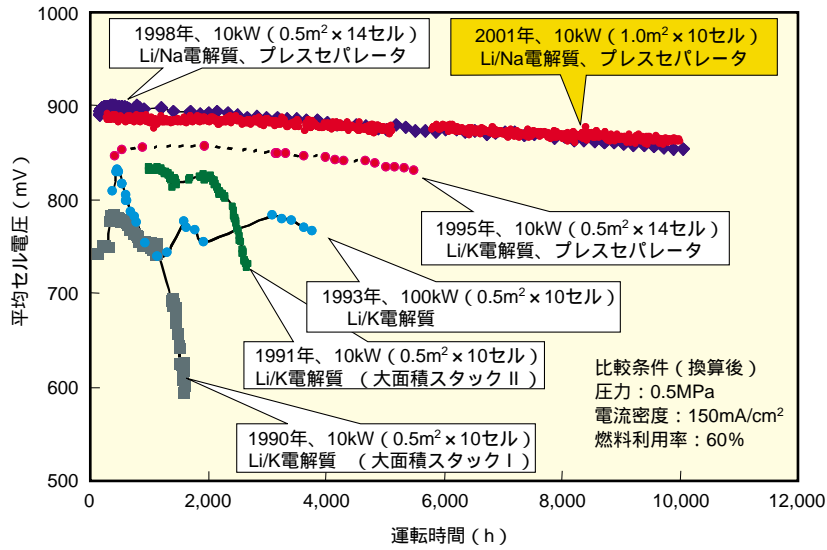


図3-3-6 スタック寿命特性改善の履歴

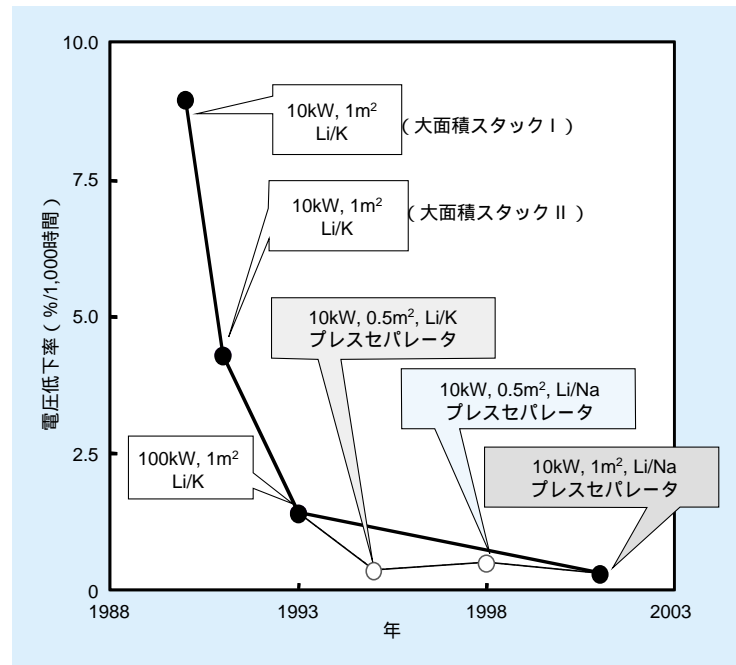


図3-3-7 スタック電圧低下率の改善

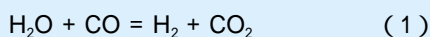
ある高積層化技術を確立するため、300kW級スタックの開発が国、メーカー、ユーザーが一体となり進められている。このハードルを一日も早く乗り越え、さらによ

り大出力のスタックを実現するため、当研究所においても、新たなブレークスルーを求め、高積層スタック化技術の開発に注力して行く予定である。

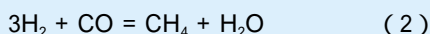
コラム4：炭素析出とその抑制

MFCFの運転において最も留意すべき点の一つに炭素析出がある。炭素析出は、発電システム内のガス精製触媒や改質触媒、熱交換器、電池のアノード表面などに、固体の炭素が析出する現象であり、数100 以上で加湿量の少ない燃料ガスを用いた際に特に発生し易いことが知られている。炭素析出はガスの配管や熱交換器などの比較的流路断面面積の小さい箇所を閉塞させ、システム運転停止や有効燃料の浪費による発電効率の低下を引き起こすため、抑制・回避しなければならない。この炭素析出発生条件は燃料ガス組成や圧力、温度条件によって変化する。特に高圧運転条件下では熱力学的に析出し易い条件となることも知られている。

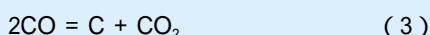
MFCFの燃料ガスとして、天然ガスを想定した場合、 H_2 、 H_2O 、 CO_2 、 CO および CH_4 が供給される。このためアノード流路内では以下のシフト反応が起こる。



また、 H_2 と CO からメタネーション生成反応が起こる。



炭素析出はBoudouard反応



によって進行すると考えられている。

これらの反応と実際の炭素析出条件との関係を明らかにするため、0.5MPaの条件下において電極の主要材料であるニッケルを用いてその粉末によ

る炭素析出試験を行った。数種類のガス組成による析出結果と熱力学平衡計算による析出の境界線を、ガス中のC、H、Oの元素比に基づいて三元図に表した。図中では二平衡((1)式と(3)式が平衡に達している場合)または三平衡((1)~(3)式がすべて平衡に達している場合)を仮定した場合の析出境界を示している。

これまでの各種試験によればシフト反応に対してはほぼ平衡組成になっていたが、メタネーション反応に対しては平衡に達しておらず、図からも二平衡条件で炭素析出の有無が決まることが明らかになった。

この三元図を基に炭素析出を防止するための条件を考慮すると、水蒸気の添加によって図中 H_2O に近づけるか、またはアノードガスのリサイクルによって CO_3^{2-} へと近づけ、燃料ガス組成を炭素非析出領域へと変更・移動させる方法が考えられる。天然ガスを燃料とする場合には、 H_2 濃度が高いため、組成は概ね三元図中の“H”側に位置することになる。したがって炭素析出防止には水蒸気添加量を制御する方が簡便となる。例えば、300kW級小型発電システムの運転条件では水蒸気濃度として28%以上(スチームカーボン比(S/C)=3)、1.2MPaで動作する高性能モジュールシステムの運転条件では水蒸気添加量として42%以上(S/C=4.4)が必要であると計算できる。同様に改質器についても必要水蒸気量の計算が可能となる。

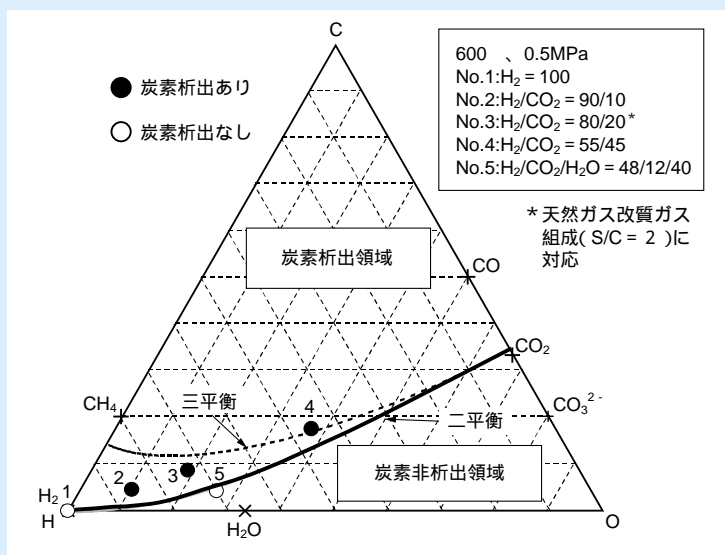


図 炭素析出条件範囲

第 4 章

4

天然ガスからバイオ・廃棄物・石炭ガスへ（適用拡大を目指す応用技術）

天然ガス改質燃料が水素主体であるのに対し、バイオ・廃棄物・石炭などのガス化ガスは一酸化炭素が主体となる。MCFCの適用性を広げるため、一酸化炭素の濃度が異なるこれらの模擬ガスにより、あらゆる一酸化炭素濃度範囲で電池が安定に発電できることを実証した。また、これらのガスに含まれる硫化水素やハロゲンなどの微量の不純物による電池性能への影響についても、詳細にそのメカニズムを解明し、目標レベルを達成するガス精製技術を開発した。さらに実際の電池特性や運転限界を反映したシステム解析によって、より現実的なシステム構築を進めている。

第4章 天然ガスからバイオ・廃棄物・石炭ガスへ（適用拡大を目指す応用技術） 目次

横須賀研究所 エネルギー化学部 主任研究員 吉葉 史彦
横須賀研究所 エネルギー化学部 主任研究員 河瀬 誠
横須賀研究所 エネルギー化学部 上席研究員 白井 裕三

4 - 1 低カロリー燃料の適用	59
4 - 2 供給ガス中不純物成分の影響	63
4 - 3 高性能ガス精製技術	68
4 - 4 実電池特性に基づく発電システムの構築	72
コラム5：MCFCによる炭酸ガス濃縮	77

吉葉 史彦（8ページに掲載）
（4-1、4-4執筆）



河瀬 誠（1993年入所）
これまでMCFCに関する研究に携わり、燃料として石炭ガス化燃料を用いた場合の電池性能に対する不純物の影響評価を中心に研究を行っている。さらに、燃料電池の高出力化のため、高性能な電極の開発に取り組んでいる。今後も、引き続きガス化複合MCFC発電の実用化に向けて不純物の影響評価、高性能な電極開発の研究を進める。
（4-2およびコラム5執筆）



白井 裕三（1983年入所）
これまで、石炭ガス化乾式ガス精製における乾式脱硫に携わってきた。現在は、乾式ガス精製技術の実用化を目指すと共に、石炭の高度燃焼技術、高品位化技術に関する研究に力を入れて実施している。これからは石炭の効率的利用の観点から幅広く研究を進めたいと考えている。
（4-3執筆）

4-1 低カロリー燃料の適用

4-1-1 MCFC の燃料多様性

高温で作動する MCFC には、高効率発電が可能なことに加えて、燃料の多様性という大きな特徴がある。高温作動であるため、CO ガスによる被毒性を有する白金等の触媒を、発電反応における触媒として必要としない。したがって、天然ガス改質ガスのような水素を主成分とする燃料ガスだけでなく、バイオマスガス化ガス、廃棄物ガス化ガス、石炭ガス化ガス等の CO を主成分とし、天然ガス改質ガスに比較して一般的に低カロリーなガスも、MCFC の燃料として適用可能となる。CO を主成分とする燃料ガスの一例として、石炭ガス化ガス、廃棄物ガス化ガスの組成の一例を天然ガス改質ガス組成と比較して表 4-1-1 に示す。天然ガス改質ガス組成は H₂ をその主成分とするのに対し、廃棄物や石炭のガス化ガスでは CO が主成分となっていることが分かる。

また、石炭ガス化ガスや廃棄物ガス化ガスを MCFC に供給するシステムには、もう一つの大きな特徴がある。それは MCFC における燃料利用率の高さである。天然ガスを燃料とした MCFC 発電システムの場合、天然ガスに水蒸気を添加し、水蒸気改質を行って H₂ を主成分とする燃料ガスを生成する。この改質反応は吸熱反応であり、改質された H₂ を主成分とする燃料は、80% 程度が MCFC での発電反応で消費され、残りの 20% 程度は、燃料の水蒸気改質反応の熱源として使わ

表4-1-1 各種燃料ガス組成の違い(例)

	天然ガス 水蒸気 改質ガス	石炭ガス化ガス		廃棄物ガス化ガス (都市ゴミ)*	
		空気 吹き	酸素 吹き	空気 吹き	酸素 吹き
CO	9.2	28	65	16	49
H ₂	50.0	13	25.2	16	29
CO ₂	6.1	2.5	0.1	11	16
H ₂ O	34.1	1.5	0.1	-	-
CH ₄	0.5	0	0	2	<0.1
N ₂	0.01	56	9.4	53	5.6
発熱量 kcal/m ³ _N	1,849	1,213	2,729	1,193	2,222

*乾基準

れる。すなわち燃料電池から改質器への一種の燃料エネルギーの再循環が行われており、改質用熱源確保のため、MCFC における燃料利用率には上限がある。これに対して、石炭を燃料とした場合、石炭をガス化する過程で必要とされる熱は、石炭自身を燃焼させることにより供給されるため、MCFC からの燃料エネルギーの再循環は行われない。したがって、MCFC での燃料利用率に上限は無く、むしろ高い熱効率を得るためには、ガス化されたガスのほとんどを MCFC における発電で消費することが望ましい。すなわち、燃料利用率を高く設定する必要がある⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。

このような観点をもとに、本節では CO 濃度の高い燃料ガスを用いた場合の単セル、スタックの性能について述べる。

4-1-2 小型単セルによる多様な燃料への適応性検証

MCFC が多様な燃料に対応できることを確認するため、まず電極面積 100cm² の小型単セルによる試験を燃料ガス条件を変えて行った。MCFC が CO 濃度の異なる各種燃料ガスでも発電できるためには、シフト反応が平衡に達する速度が発電反応に対して十分速く、電極反応によって消費された H₂ 分は電池内で速やかにシフト反応によって CO から転化され、補われる必要がある⁽⁷⁾。低 H₂ 高 CO 濃度ガスでのシフト反応の転化速度を検証するため、各ガス条件での電池出口組成を検討した結果、常圧下での H₂ 濃度実測値は、平衡組成に対し若干のずれが認められる(図 4-1-1 (a)) もの、0.3MPa 運転条件下での H₂ 濃度は、ほぼ平衡組成に達しており(図 4-1-1 (b))、加圧条件下では上記ガスにおいても十分なシフト反応に関する転化速度が得られることが明らかとなった。

各燃料ガスによるセル電圧の圧力依存性に関しては、空気吹き石炭ガス条件では特に、常圧、アノードガス(燃料ガス)リサイクル率 50% 条件下において電池性能の低下が認められたが、他の低 H₂ 高 CO 濃度条件に関しては、天然ガス条件に比べて一律に絶対値は下がるも

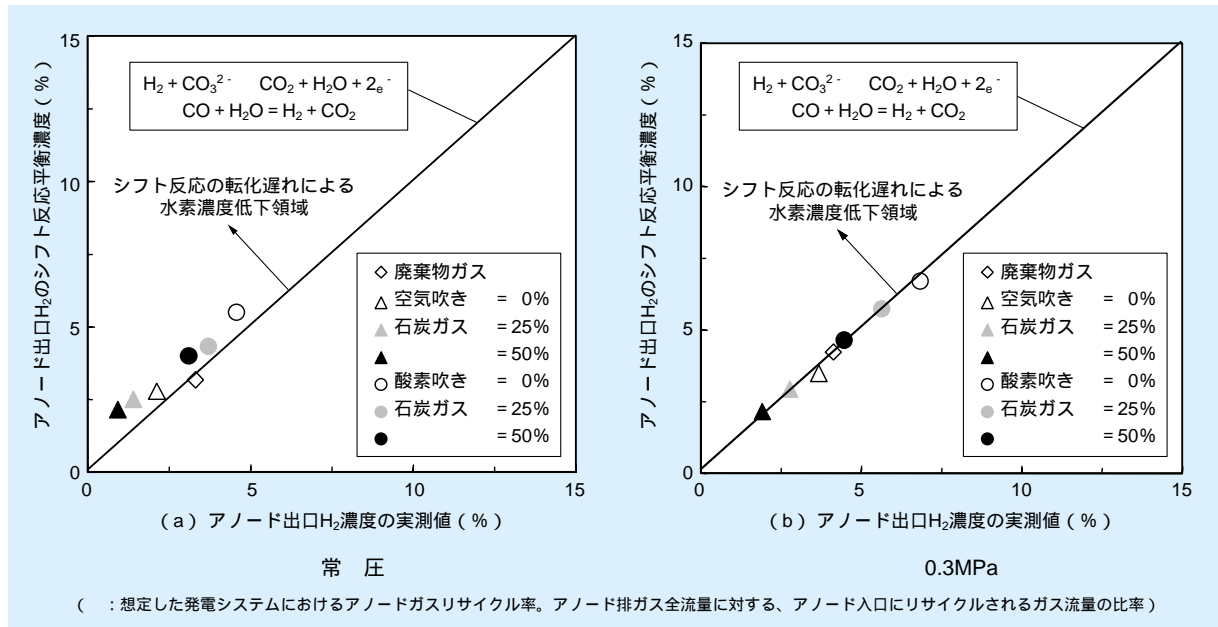


図4-1-1 MCFC内部におけるシフト反応平衡状態（アノード出口水素ガス濃度の実測値と計算値との比較）

の、ほぼ同様の圧力依存性を示した。

性能の安定性に関しては、燃料ガスを酸素吹き石炭ガス条件とし、酸化剤ガス側を Air/CO₂ とし、これに加湿した場合と加湿しない場合について試験した。500 時間の連続運転では、いずれの酸化剤ガス条件下においてもアノード出口組成に経時変化は認められないが、電池電圧は酸化剤ドライガス条件下では経時的に安定しなかった。これに対し Air/CO₂ に 10% 程度の水蒸気を加えた酸化剤ウェットガス条件下では 500 時間安定に電圧は推移した。

4-1-3 高濃度 CO 燃料によるスタック発電特性

石炭ガス化 MCFC 発電システムや廃棄物ガス化 MCFC 発電システムを実用化させるためには、単セルによる検証ばかりでなく、内部に温度分布や電流密度分布を持つスタックによる検証が必要である。上述したように 1 CO を多く含む燃料ガスを用いて、2 高い燃料利用率条件下における、実用規模のサイズを有する MCFC スタックの発電特性を明確化することがキーポイントとなる。

スタックに石炭ガス化ガス組成等を模擬した燃料を供給するためには、高濃度の CO を多量に連続的に生成する必要がある。そのため H₂ と CO₂ ガスからの逆シフト

反応と CO₂ ガス分離膜を利用し、高濃度の CO ガスを連続的に生成する CO 燃料供給装置を設置し、CO 燃料源として用いた。本装置で連続的に生成された燃料のガス組成は H₂/CO/CO₂/N₂/CH₄=0/93.3/9.67/0/0 であった。

本供給装置を用いて、10kW 級スタック（電極面積 1m²セル 10 枚）により燃料ガス組成を変えて発電試験した。本試験の特徴は、燃料ガスの組成が水素リッチなガスから CO リッチなガスまで、燃料中の可燃成分の組成を変更して試験したことである。そのため、燃料中の H₂ 対 CO の比率を、CO/(CO + H₂) として表した。この組成比率は燃料利用率と共に本試験における重要なパラメータである。試験を実施したガス条件を図 4-1-2 にプロット点として示す。燃料利用率の設定は最高で 95% に達しており、また、CO/(H₂+CO) 比は最大で 1、即ち、燃料としては CO のみ（加湿有り）を供給した場合でも安定して発電することができた。

図 4-1-2 に示したそれぞれの運転試験条件では、設備運転の都合上、燃料ガス中における CO₂ 及び H₂O の濃度が異なっている。そのため、CO/(CO+H₂) 比をパラメータとしてスタック性能の比較を行う場合には、燃料種以外のガスとして供給された CO₂ 及び H₂O が発電性能に与える影響について補正する必要がある。そこで、スタックの平均セル電圧について、スタック性能と温度分布に関する数値解析により、CO₂ 無供給（CO₂ フリー）で 50% 水蒸気加湿の条件への電圧補正を行った。また、

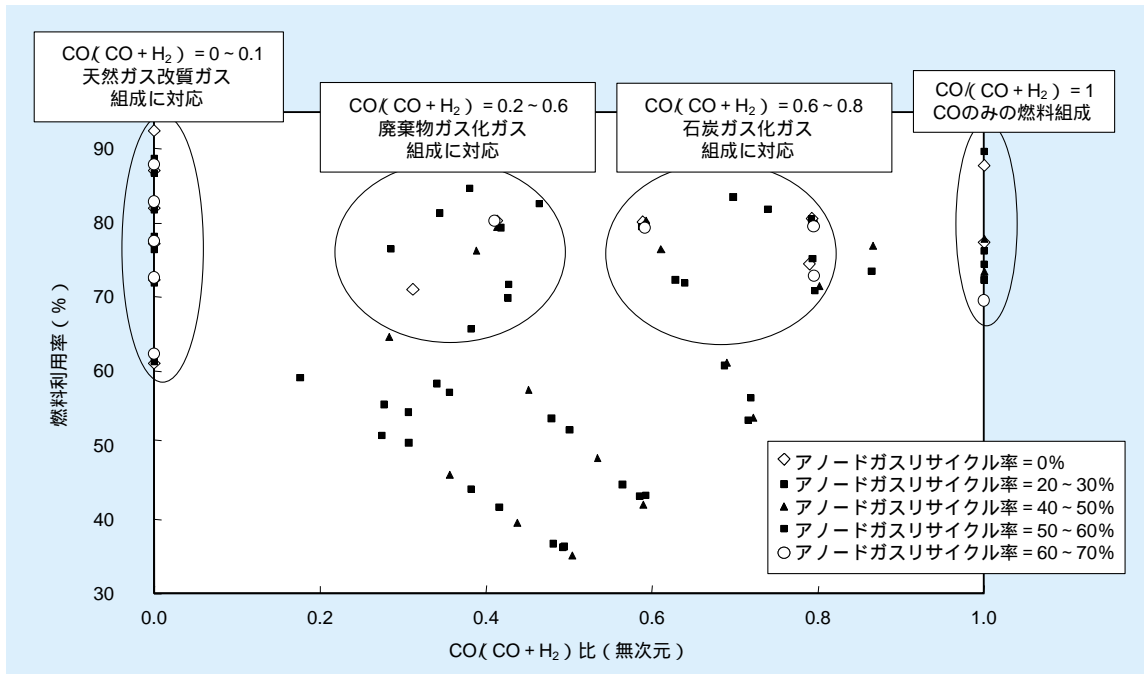


図4-1-2 発電試験を実施したときのCO(CO+H₂)比と燃料利用率

燃料利用率もしくはCO/(H₂+CO)比に対するデータ取得点はばらついているので、アノードガスリサイクル率毎に電圧を補間した。

図4-1-3に天然ガス改質ガス組成、及び、石炭ガス化ガス組成を模擬した燃料を供給した場合について、スタック平均電圧の燃料利用率依存性を示す。石炭ガス化MCFC発電システムでは、アノードガスリサイクルを行わないシステム、及び、アノードガスリサイクルを多量に行うシステムが想定されるため(4-4-1項参照)本図

にはこれらの2つのケースについての電圧を示した⁽²⁾⁽⁸⁾。両ケースともその燃料利用率特性は、天然ガス組成の場合の燃料利用率特性と同様の傾向を示している。これらの結果から、石炭ガス化MCFC発電システムにおいても、天然ガスシステムの場合と同様に本スタックが適用可能であることが分かった。

次に、燃料ガス組成を大きく変化させた場合のスタック発電性能について示す。図4-1-4は、燃料利用率が75%(天然ガスシステムにおける燃料利用率に対応)の

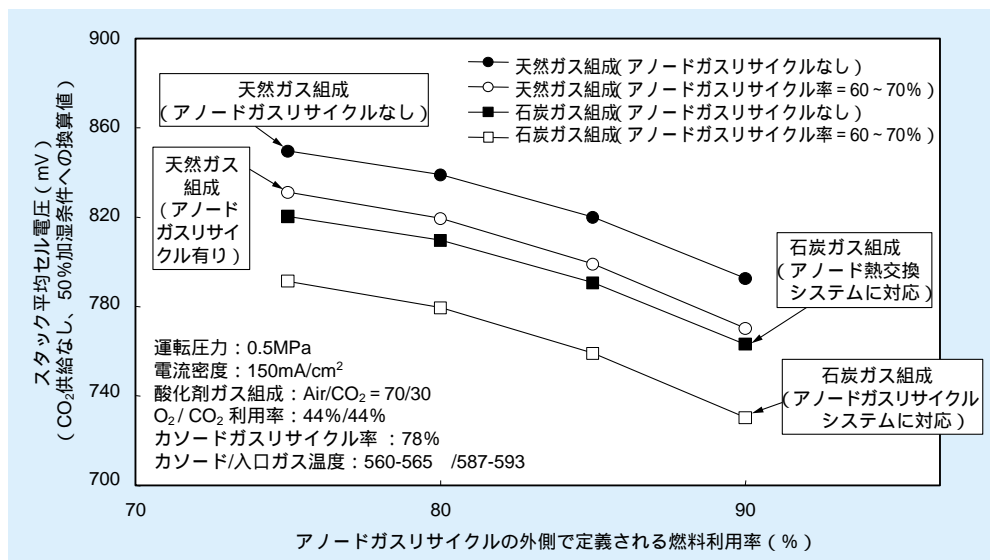


図4-1-3 天然ガス改質ガス及び石炭ガス化ガスを模擬した燃料によるスタック発電特性(平均セル電圧の燃料利用率依存性)

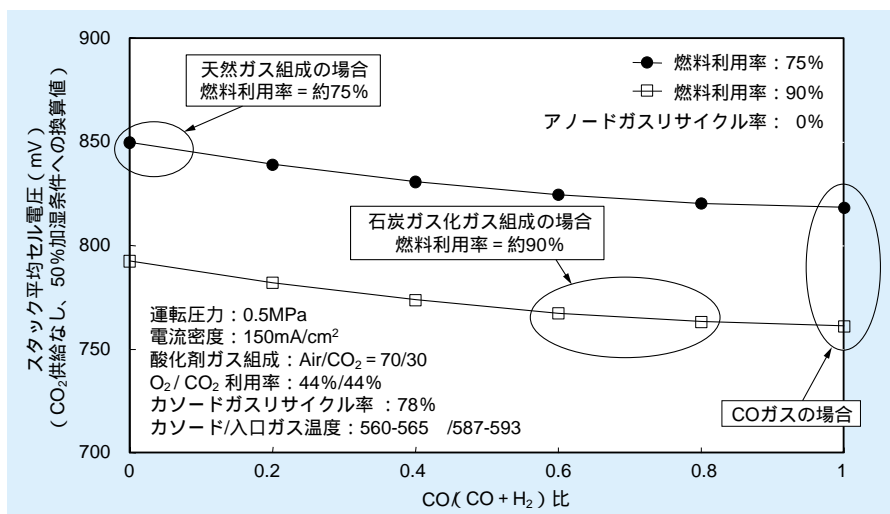


図4-1-4 CO/(CO + H₂) 比を変更した場合のスタック発電特性

場合、及び、90%（石炭ガス化システムにおける燃料利用率に対応）の場合について、燃料ガス中のCO/(H₂+CO)比の変更に伴うスタック発電特性である。ここでは、燃料ガス組成のスタック発電特性に与える影響に着目するため、アノードガスリサイクルを行っていないケースについて示した。CO/(H₂+CO)比が0～1の範囲において、いずれの両燃料利用率でも、同様の電圧変化を示している。特に、CO/(H₂+CO)比が1の場合には燃料としてH₂を供給していないが、この場合でもスタックは安定した挙動を示すことが分かった。

4-1-4 スタック内部シフト反応と温度分布に関する解析

スタックに石炭ガス化ガスのようなCO濃度の高い燃料ガスを供給した場合の電池内部におけるシフト反応について、単セルと同様に調べた。シフト反応はH₂を生成する時に発熱反応となるため、CO濃度の高いガスを燃料として供給した場合、スタック内部で大きな発熱が生じ、内部温度分布に影響を与えることが予想される。ここでは、スタックにおけるアノード出口ガス組成のシフト平衡とスタック内部の温度分布に関する解析を行った。

図4-1-5にスタック出口ガスの水素濃度について、実測値と625におけるシフト反応平衡濃度の関係を示す。プロットは、CO/(H₂+CO)組成比を0～1まで変更した燃料ガス組成に対応している。アノード出口H₂ガス

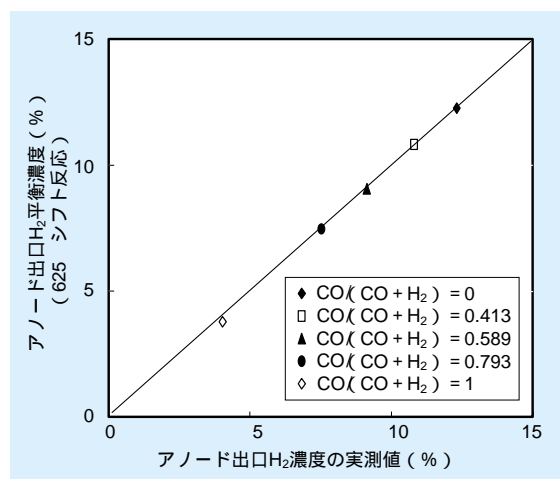


図4-1-5 アノード出口水素濃度実測値の平衡計算値との比較

濃度の実測値はいずれもシフト反応に関して平衡に達していることが分かる。特にCO/(H₂+CO)=1の場合は、燃料ガスとしてCOのみ（加湿あり）を供給しており、この場合でも、シフト反応が平衡に達していることが分かった。また、図4-1-6に燃料中のCO/(H₂+CO)組成比を0～1まで変更した場合のスタック中心温度を、スタック内部でのシフト平衡を仮定して計算した温度と比較して示す。シフト反応によるスタック中心温度実測値の上昇幅は、スタック内部温度分布解析結果と概ね一致しており、シフト反応がスタック内部で平衡に達していることが、スタック内部温度分布の観点からも明らかとなった⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

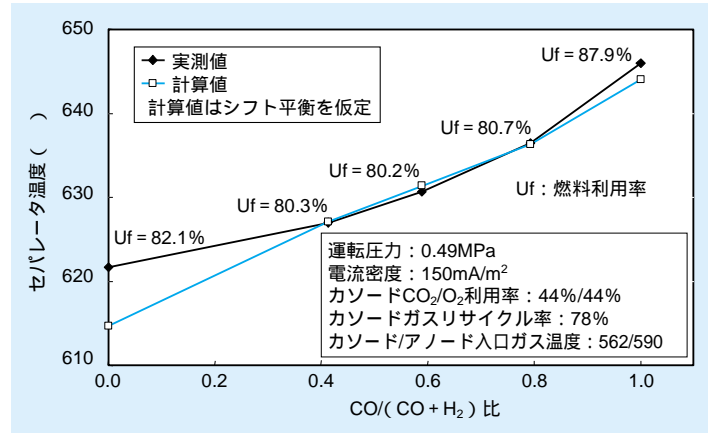


図4-1-6 スタック中心温度実測値とシフト平衡を仮定した場合の温度解析結果の比較

4 - 2 供給ガス中不純物成分の影響

MCFCは、高温（約650℃）で作動することからCOによる電極反応触媒の被毒はなく、COを多量に含む石炭ガス化ガスや、再生可能エネルギーとして注目されている廃棄物ガス化ガス、バイオマスガス等を燃料ガスとして用いることができると共に高効率発電が可能である。しかし、これら燃料ガスは、天然ガス改質ガス燃料に比べ、多種類の不純物（硫黄化合物、ハロゲン化合物、窒素化合物等）を多量に含んでおり、それらの影響は個々の不純物によって異なっている。また、これらの不純物はCO₂リサイクルに伴い酸化剤ガスに混入することになる。

ここでは、それらの燃料中の代表的な不純物であるH₂S、HCl、HF、NH₃および酸化剤ガス中の不純物であるNO_x、SO₂のセル性能への影響について、小型単セル試験結果をもとに報告する。

4-2-1 燃料ガス中不純物の影響

(1) H₂Sの影響

図4-2-1に高H₂濃度の燃料（H₂/CO₂/H₂O=64/16/20）での電池電圧の経時変化、図4-2-2に高CO濃度の燃料（H₂/CO/N₂/CO₂/H₂O=10/26/13/21/30）での電池電圧の経時変化を示す。図4-2-1より、H₂S濃度が高いほど電圧への影響が大きいことがわかる。また、電池電圧低

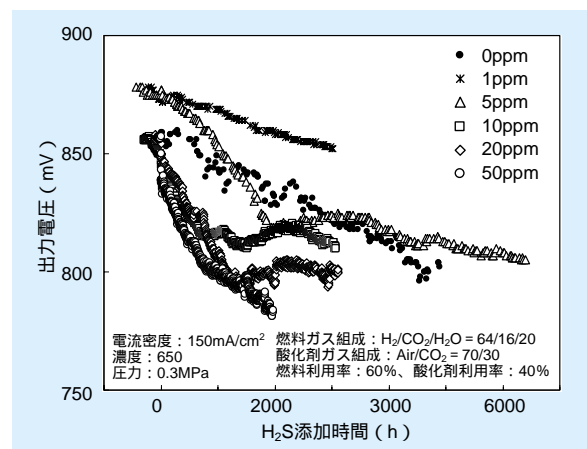


図4-2-1 高H₂濃度燃料におけるH₂Sの影響

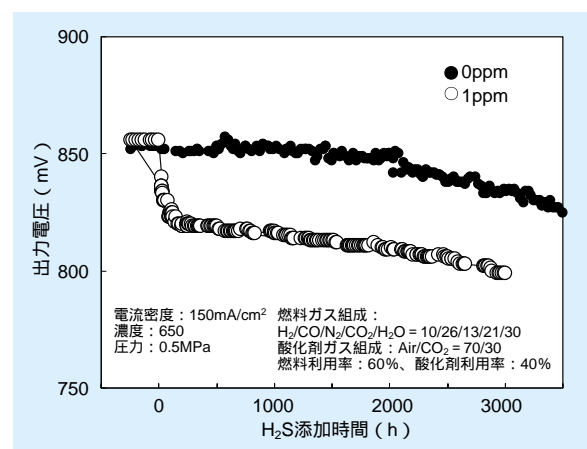


図4-2-2 高CO濃度燃料におけるH₂Sの影響

下のパターンは、H₂S添加直後に急激な電圧低下があり、添加約1,000時間までは電圧低下率が大きいものの、時間とともに電圧低下率は減少していることがわかる。

さらに、図4-2-1と図4-2-2を比較すると、図4-2-2ではH₂S : 1 ppmの添加により約20mV電圧が低下しており、H₂Sの影響が大きいことがわかる。

これは、図4-2-3に示すように添加したH₂Sの一部がアノード(Ni)表面に化学吸着しNi触媒機能の低下を引き起こすことが原因であり⁽¹⁾⁽²⁾、そのため、COからH₂への転化反応(シフト反応)が阻害され、発電反応の主反応物質であるH₂が欠乏し電池性能が低下する。したがって、CO濃度の高い燃料ほどH₂Sの影響は大きくなり、高H₂燃料でのH₂S許容濃度は5 ppm程度であるが、高CO濃度燃料では1 ppm以下となる。

また、運転圧力が高いほど燃料が電池内に滞留する時間が長くなるため、シフト反応の反応速度の低下を補うことができ、H₂Sの影響が小さくなる結果となった。(図4-2-4)

(2) ハロゲン化合物(HCl、HF)の影響

高CO濃度燃料にHCl : 10ppm添加した場合、HF : 10ppm添加した場合の両者において、不純物による発電性能への影響は認められなかった。⁽³⁾しかし、図4-2-5の電池内でのHCl、HFの挙動および図4-2-6のCl、Fの物質収支に示すように、HClおよびHFは熔融炭酸塩と反応し塩化物イオン(Cl⁻)およびフッ化物イオン

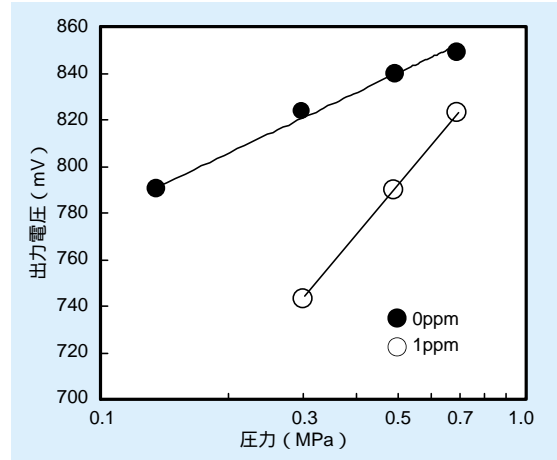


図4-2-4 H₂Sの影響と運転圧力の関係

(F⁻)として電解質中に蓄積されることが、試験後の解体分析により明らかとなり、炭酸塩ロス(炭酸イオンの減少)が電池寿命に影響を及ぼすことになる。加えて、塩化物イオンは運転圧力が低い場合、NaClまたはKClとして蒸発するため電解質ロス(電解質量の減少)も寿命に影響を及ぼす。さらに、電解質中のフッ化物イオン濃度が高い場合、カソード集電板の腐食が激しくなることから、長時間および高濃度HFでの運転では、腐食およびそれに伴う電解質ロスが電池寿命に対して問題となる。以上のような背景から運転時間40,000時間達成するためには燃料中のHClおよびHF濃度を1 ppm以下に抑える必要がある。

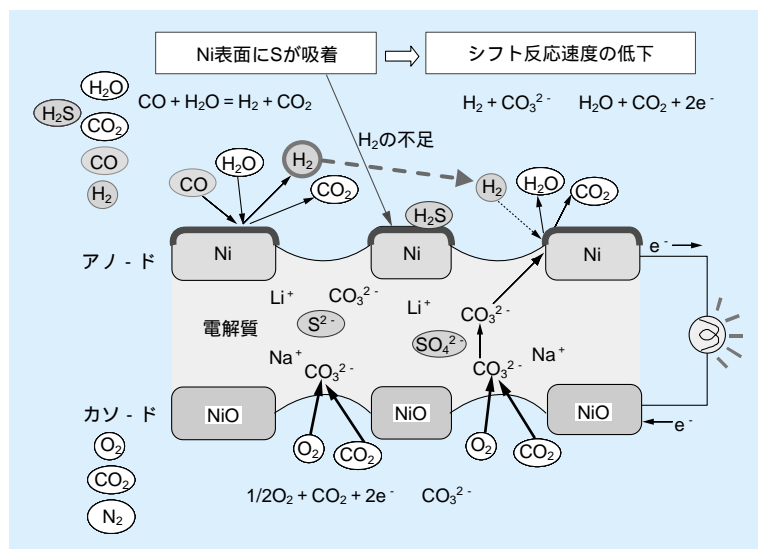


図4-2-3 電池内でのH₂Sの挙動

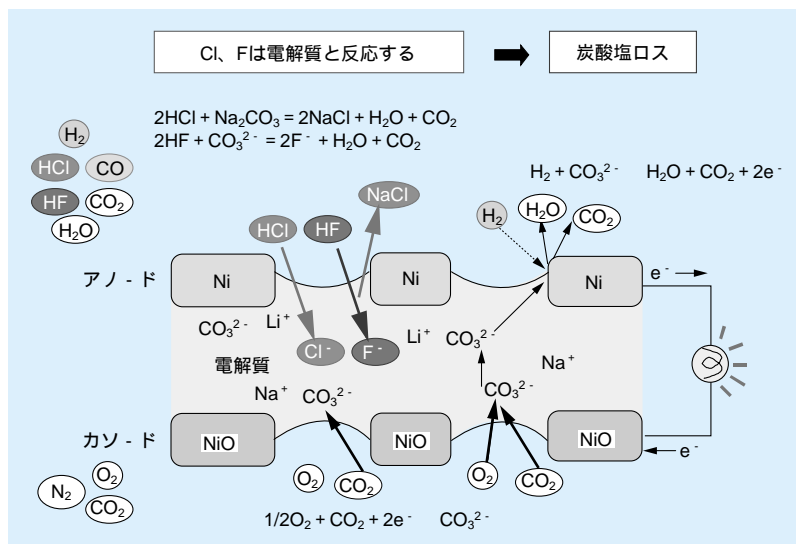


図4-2-5 電池内でのHCl、HFの挙動

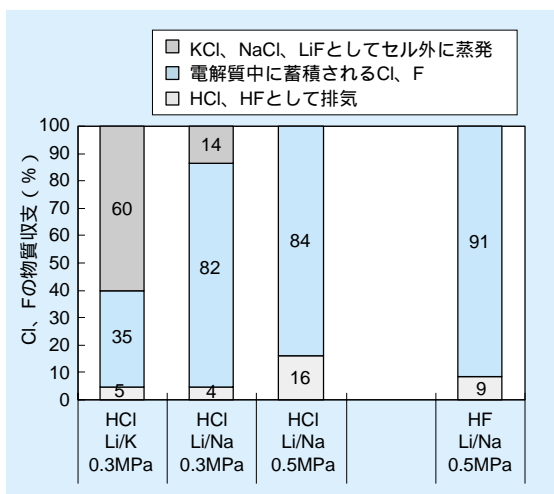


図4-2-6 Cl、Fの物質収支

いる場合、炭酸ガスリサイクルによって酸化剤ガスに送り込まれる窒素酸化物濃度は約20～50ppm程度となる。

また、NOx、SO2を多量に含むごみ焼却場・火力発電所・製鉄所などの排ガスを酸化剤ガスに用いることも考えられる。

(1) NOxの影響

図4-2-7に示すNOx：50ppm添加した場合の電圧経時変化より、NOx添加により内部抵抗が増加し、電池電圧は低下することがわかる。しかしながら、その内部抵抗の増加は数十時間で飽和するため、電池性能の低下は抑えられる。

(3) NH3の影響

高CO濃度の燃料にNH3：300ppm添加した場合、電池性能への影響は確認できず、添加したNH3のほぼ全量が燃料排ガス中に排出される。また、NH3：500ppmを含んだ高H2濃度の燃料による発電試験においても電池性能に影響がないことを確認した。(4)

4-2-2 酸化剤ガス中不純物の影響

燃料排ガス中のH2SおよびNH3は、炭酸ガスのリサイクルに伴い触媒燃焼器で酸化され硫酸化物(SO2)または窒素酸化物(NOx)となりカソードに送り込まれる。例えば、燃料中にアンモニアが約300ppm含まれて

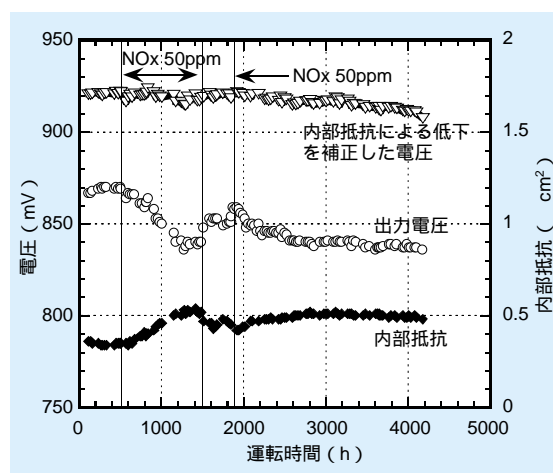


図4-2-7 NOx：50ppm添加した場合の電圧経時変化(図4-2-1の運転条件と同様)

これは、図4-2-8に示すように、継続的にNO_xはカソード側から電解質に溶解するが、アノードにおいて燃料ガス中のH₂とNO₂⁻またはNO₃⁻が反応し、N₂としてアノード排ガス中に放出されるため、電解質中にはほとんどNO₃⁻またはNO₂⁻は蓄積されないためと考えられる。したがって内部抵抗増加原因となる物質の生成も鈍化し、結果的に電池性能の低下はほとんど起こらない。またこの結果は、供給されたNO_xがN₂に還元されることを示しており、MCFCのように燃料ガスと酸化剤ガスが電解質板によって仕切られている機器は脱硝機能を持ち合わせていることを示している。酸化剤中NO_x濃度が100ppm以上になると内部抵抗の増加に加え反応抵抗も増加も大きくなるため、NO_xの許容濃度は50ppm程度となる。

(2) SO₂の影響

SO₂の添加により、図4-2-9に示すようにカソード流路部の腐食が進行しやすくなるため、通常のカソード流

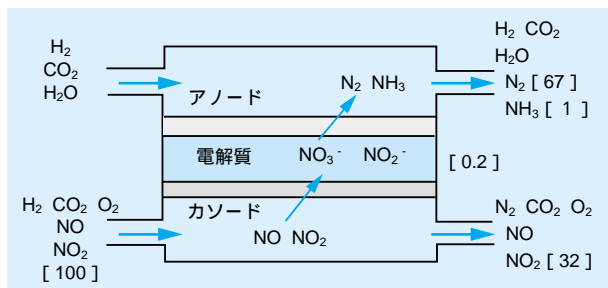


図4-2-8 電池内でのNO_xの挙動

([] は添加したNO_x量を100とした場合の窒素化合物の収支)



図4-2-9 SO₂によるカソード流路部 (SUS316L) の腐食

路部材に用いられているステンレス鋼 (SUS316L) よりも耐腐食性の高い材料 (例: インコロイ 825) を用いる必要がある。図4-2-10にインコロイ 825のカソード流路部材を用いた場合の高H₂濃度燃料における電圧経時変化を示す。電圧の経時変化はH₂S添加の場合と類似した傾向にあり、SO₂添加初期に電圧の低下は大きいが時間の経過にしたがって小さくなる。

また、SO₂の影響は高H₂濃度燃料よりも高CO濃度燃料での影響がかなり大きくなるため、高CO濃度燃料でのSO₂許容濃度は1 ppm以下となる。このように酸化剤ガス中にSO₂を加えた場合でも、燃料ガス組成によって、影響度に違いが現れるのは、図4-2-11の機構に示すようにアノード側にH₂Sの状態では放出され、H₂Sの影響も加わるためである。

4-2-3 複数不純物共存条件による電池性能への影響

H₂S、HCl、HF、NH₃が共存するような条件で電池性能への影響を調べた。まず、高CO濃度の燃料にH₂S : 1 ppmを添加し、320時間後にNH₃ : 300ppm、HF : 10ppm、HCl : 5 ppmを同時に追加した場合の電圧経時変化を図4-2-12に示す。H₂Sの添加によって図4-2-2と同様に電池電圧は約25mV低下したが、NH₃、HF、HClの添加によっては多少電圧に変動が見られるものの大きな変化は見られていない。

図4-2-13では、H₂S、HCl、HF、NH₃に加えNO_x : 20ppm、SO₂ : 1 ppmを添加した場合の電圧の挙動を

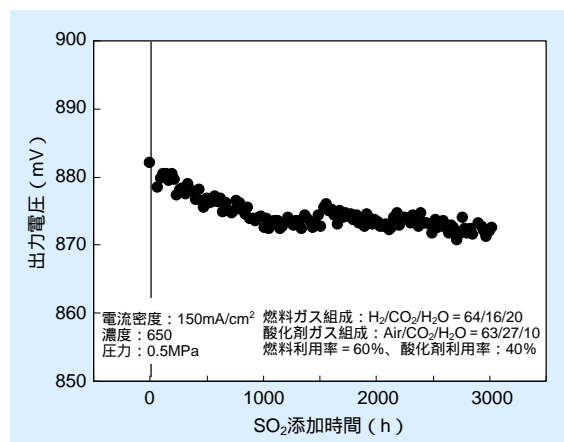


図4-2-10 インコロイ825のカソード流路部材を用いた場合の電圧経時変化

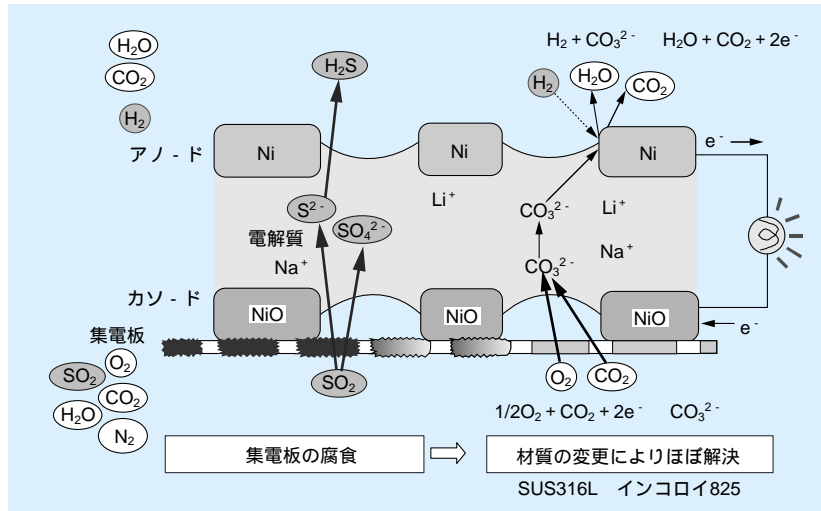


図4-2-11 電池内でのSO₂の挙動

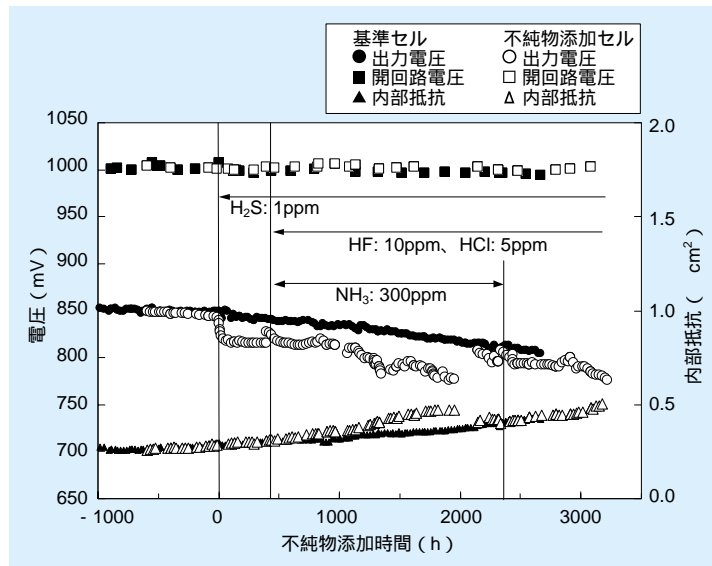


図4-2-12 H₂S、HCl、HF、NH₃の複合影響
(図4-2-2の運転条件と同様)

示す。個々の不純物の影響は現れているが、複数の不純物が含まれることによる発電性能への複合的な影響は見られなかった。

これまでの結果から、各不純物の影響と許容濃度は表4-2-1に示すようにまとめられ、これら不純物の複数種が供給ガスに含まれる場合は、個々の不純物の影響の加

算として全体への影響を評価できる。

以上、当研究所を中心として実施した石炭ガス化燃料中の各種の不純物による電池特性への影響評価について述べた。今後はバイオ・廃棄物・石炭ガスの実ガスを用い不純物の影響について明らかとしていく必要がある。

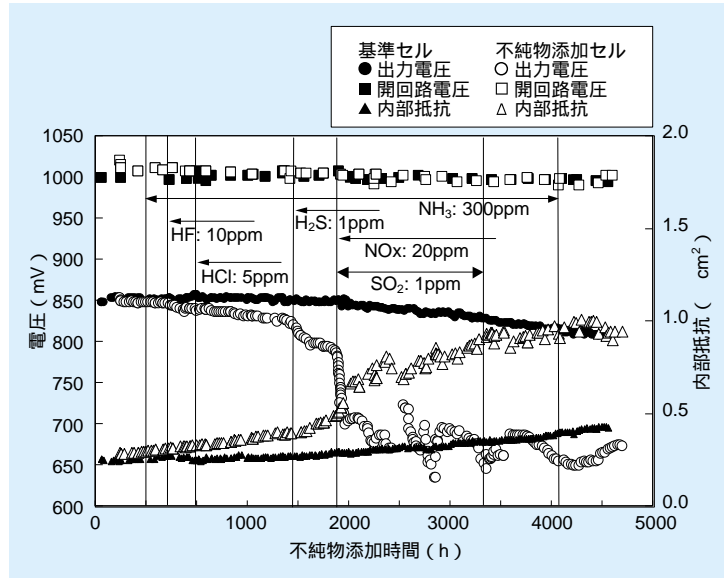


図4-2-13 燃料中不純物H₂S、HCl、HF、NH₃および酸化剤中不純物SO₂、NO_xの複合影響（図4-2-2の運転条件と同様）

表4-2-1 各不純物の影響と許容濃度

不純物	影響	許容濃度 (ppm)	
		高H ₂ 濃度燃料	高CO濃度燃料
H ₂ S	シフト反応の反応速度低下	5	1
HCl	炭酸塩ロース	1	
HF	炭酸塩ロース・腐食	1	
NH ₃	なし（500ppm以上のデータなし）	500	
SO ₂	腐食・シフト反応の反応速度低下	3	1以下
NO _x	内部抵抗の増加	50	

4 - 3 高性能ガス精製技術

4-3-1 高性能ガス精製技術の概要

バイオマス・廃棄物・石炭ガス化ガスには、様々な不純物が含まれており、前節ではこれらの不純物による電池性能への影響について述べた。これらのガスをMCFCに適用するためには、性能を低下させる成分を必要なレベルまで除去するガス精製技術の開発が必要である。

除去成分としては、ばいじん、硫黄化合物（H₂S、COS）、ハロゲン化物（HCl、HF）が挙げられ、当研究所では、MCFC性能への影響度を考慮しつつ、これら

の当面の目標としてばいじん濃度 1 mg/m³_N以下、硫黄化合物およびハロゲン化物濃度 1 ppm以下を設定し、ガス精製技術の開発を進めてきた。これらの目標値は、開発が進められている石炭ガス化複合発電（IGCC）用のガス精製目標に比較して、さらに高いレベルのものとなっている。

このガス精製技術としては、ガスを室温レベルまで冷却して除去する湿式ガス精製技術と高温のまま除去する乾式ガス精製技術が挙げられる。湿式ガス精製技術では、ばいじん除去後、アンモニアおよびハロゲン化物（HCl、HF）などが水スクラバーで除去され、さらにCOS変換器により湿式脱硫装置では除去し難いCOSがH₂Sへ転

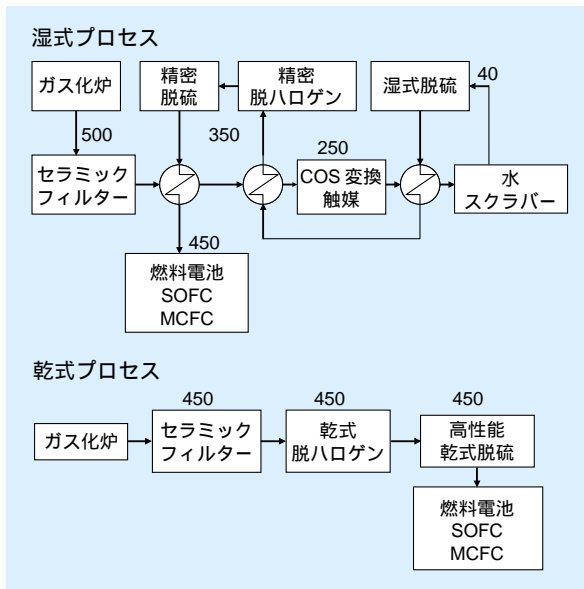


図 4-3-1 ガス精製プロセス

換される。最後に MDEA (メチルジエタノールアミン) などの吸収液を用いた湿式脱硫装置で H₂S を除去する。また、湿式脱硫装置では、硫黄化合物を 1 ppm 以下まで除去できないため、酸化亜鉛等の乾式脱硫剤によりさらに精密に硫黄分を除去する必要がある。一方、乾式ガス精製技術においては、高温のまま、同一温度でばいじん、硫黄化合物、ハロゲン化合物を除去する。このため、熱損失が極めて少なく、さらに熱交換器など機器がなく、湿式ガス精製に比べ、プロセスも簡素化にできる利点を有する。しかし、本プロセスは MCFC 用も含めて現状において実用化された例はない。

当研究所では、このように湿式ガス精製技術に比べて、メリットの多い乾式ガス精製技術を MCFC に適用するため、400 ~ 450 において使用する高性能乾式ガス精製技術の開発を進めてきた。

4-3-2 セラミックフィルター集じん技術

高温でかつ硫黄化合物やハロゲン化合物が含まれる腐食性の高い雰囲気ではばいじんを 1 mg/m³ 以下まで精密に除去する技術として、セラミックフィルター集じん技術の開発を進めた。この技術においては、図 4-3-2 に示すように石炭ガス化ガスが、フィルターの外面から内面へ通過する間に、ばいじんがフィルター外面で除去され、ばいじん層が形成される。その後は、この層でばいじん

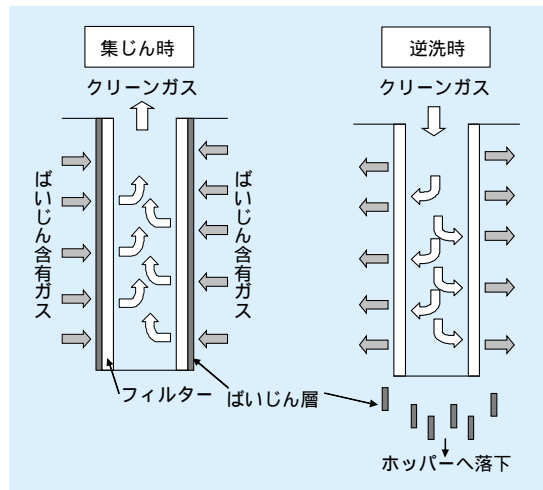


図 4-3-2 セラミックフィルター集じん法

が除去され、次第に層が厚くなり、圧力損失が設定の値に達した時点で、クリーンなガスを内面側に噴射し、ガスを逆向きに流し、ばいじん層を払い落とすこと(逆洗)により、繰り返し使用する。

このセラミックフィルターにおいては、腐食しないこと、逆洗ガスとの温度差による熱衝撃に強いこと、圧力損失が小さいことおよびフィルター内部へのばいじんの侵入を防止できることが必要となる。

当研究所は SiC を用い、外面の気孔を微細化すると共に、ばいじんの除去に関与しない内部の気孔を大きくした二層構造のフィルターを開発した(図 4-3-3)。このフィルターは当研究所に設置した 2 トン/日空気吹き噴流床石炭ガス化装置に対応した乾式クリーンアップ装置により性能が評価され、さらに、勿来 200 トン/日空気

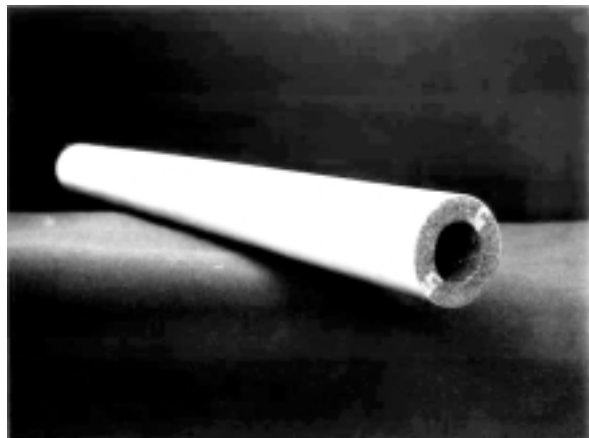


図4-3-3 セラミックフィルターエレメント
外径70mm、内径40mm、長さ1000mm

吹き噴流床石炭ガス化パイロットプラントにおいて検証され実証段階にある。

4-3-3 乾式脱硫技術

金属酸化物を用いた脱硫剤に石炭ガス中の硫黄化合物 (H_2S 、 COS) を吸収させて除去する。さらに使用後の脱硫剤を再生して使用することを前提としている。この脱硫剤を開発するに当たっては、以下の事項を考慮して検討を進める必要がある。

- 1 炭素析出による脱硫剤の崩壊が生じない。
- 2 目標濃度まで除去できる。
- 3 再生でき、長期間使用できる。

図4-3-4に脱硫剤を用いる当研究所が開発した固定床脱硫システムを示す。このシステムでは、3塔を有し、還元、脱硫および再生の3工程を順次切り換えることにより連続的に脱硫を行う。また、硫黄分を吸収した脱硫剤は酸素と反応させ、硫黄分を二酸化硫黄 (SO_2) として放出させて再生される。この再生反応は発熱反応であるため、脱硫剤温度が耐熱温度 (800) を超えないように、硫黄回収後の再生ガスをリサイクルして、酸素濃度が1.5%程度となるように空気を希釈して再生に用いる。

当研究所では、石炭ガス化複合発電用に硫黄化合物を100ppm以下まで除去できる酸化鉄系ハニカム脱硫剤を開発し、その性能を勿来の200トン/日石炭ガス化複合発電パイロットプラントにおけるバイパス試験(全ガス量の1/10)で検証した。

さらに高性能化し、MCFCにも石炭ガスを利用できるように、硫黄化合物を1ppm程度まで低減できる亜鉛

フェライト脱硫剤の開発を進めた。

1ppm以下と極低濃度までの除去を前提とする場合には、鉄成分では達成が困難であり、亜鉛成分の添加が不可欠である。また、再生の容易さからは鉄成分を含んでいた方が好ましい。そこで1ppm以下まで除去できる亜鉛成分と再生が容易な鉄成分とを組み合わせた亜鉛フェライトを用いたハニカム脱硫剤(図4-3-5)を調製し、性能評価を実施した。この結果、図3-4-6に示すように450において酸化鉄では除去できなかった1ppm以下までの除去が可能であることを明らかにした。さらに脱硫/再生繰り返し試験を実施し、硫黄分吸収容量の急激な低下はなく、長期的に利用できる見通しを得ている。

4-3-4 脱ハロゲン技術

使用する吸収剤は石炭ガス中のHClとHFを同時に除去する必要がある。図4-3-7に各物質の化学平衡における除去の可能性を示す。この結果からはHClおよびHFを同時に1ppm以下まで除去できる成分としてナトリウム系の物質が挙げられる。

当所は、活性の高いナトリウム化合物としてアルミン酸ナトリウム ($NaAlO_2$) を見出した。これに活性アルミナを添加することにより多孔質な吸収剤を調製し、性能評価を行った結果、図4-3-8に示すように、炭酸ナトリウムのような工業原料をそのまま使用するのに比べ、硫黄化合物共存下で高い性能を有していることを明らかにした。また、反応後ナトリウム成分は再生し難い塩化物やフッ化物となるため、再生・再利用が重要な課題となる。そこで、アルミニウム成分のみを回収する方法について検討し、アルミニウム成分をリサイクルできる調製法を考案した。

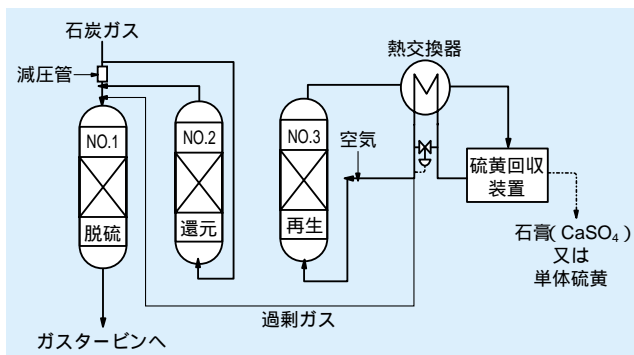


図4-3-4 固定床脱硫システム

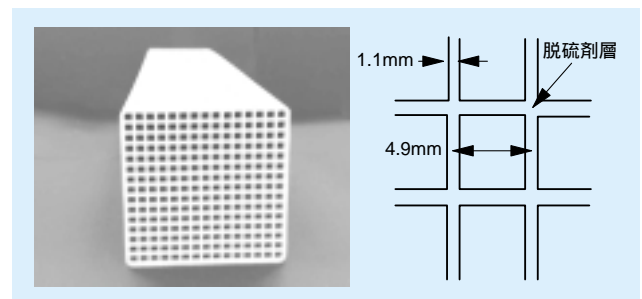


図4-3-5 亜鉛フェライトハニカム脱硫剤
 $ZnFe_2O_4$: 20wt%

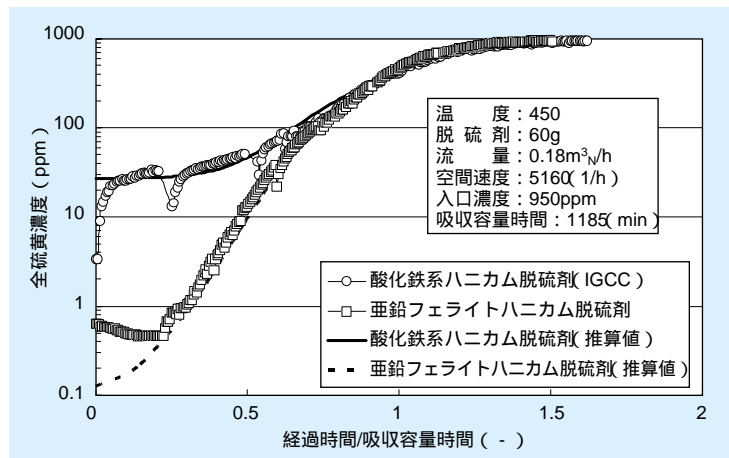


図4-3-6 亜鉛フェライト脱硫剤の脱硫性能

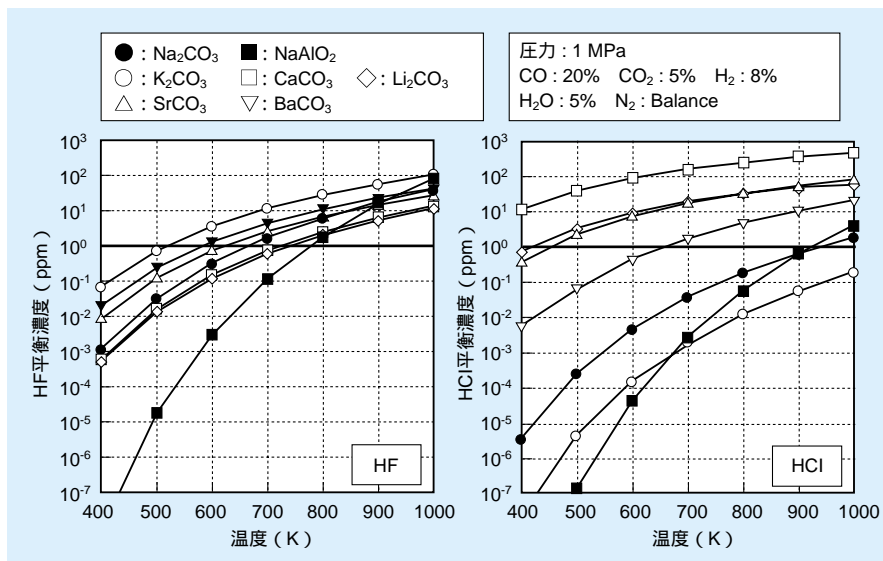


図4-3-7 各種金属酸化物のHCl、HF平衡濃度

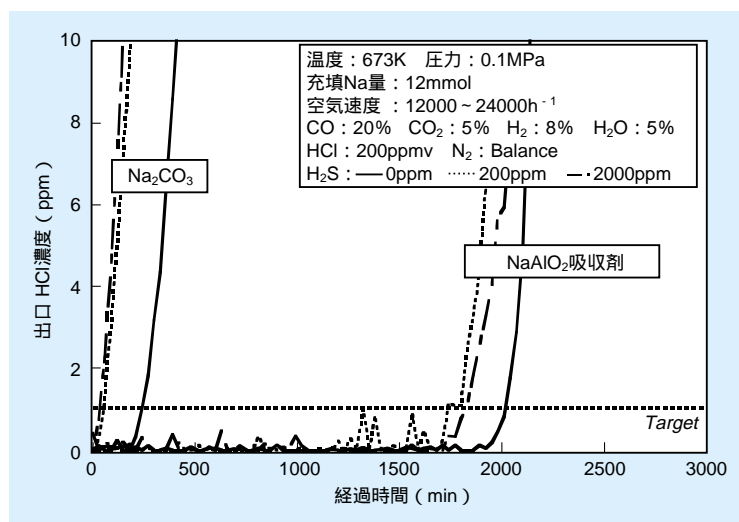


図4-3-8 NaAlO₂吸収剤のHCl除去性能

現在、ナトリウム成分を再利用するための再生法および吸収剤の粒径や形状を調節可能な調製法について検討を進めている。

4-3-5 発電効率に及ぼすガス精製システムの影響

石炭ガス化炉3方式に湿式ガス精製技術、乾式脱硫技

術を組み合わせた場合のMCFCの効率計算を実施した。この結果、表4-3-1に示すように、すべての方式において50%（HHV基準）以上の発電効率を得られることが判明した。さらに乾式法を採用した場合には、ガス化方式による差異はなくなり、53%と最も高い発電効率を得られることが判明した⁽⁵⁾。

表4-3-1 石炭ガス化MCFC発電の発電効率推算結果

	空気吹き ドライフィードガス化炉		酸素吹き ドライフィードガス化炉		酸素吹き スラリーフィードガス化炉	
	発電端効率 (%)	送電端効率 (%)	発電端効率 (%)	送電端効率 (%)	発電端効率 (%)	送電端効率 (%)
湿式ガス精製 MDEA法	57.2	52.5	61.4	53.1	58.9	51.4
乾式ガス精製 ZnFe ₂ O ₃ + NaAlO ₂	58.3	53.3	61.9	53.3	60.6	53.1

4-4 実電池特性に基づくシステムの構築

MCFC発電システムの構成は様々な研究機関やMCFCメーカーにより多数提案されている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。しかしながら、多くのシステムに関する熱効率解析結果をみると、実際のMCFCの性能や発電可能な条件について、必ずしも十分に考慮したとは言えないものが多い。このことは、システム特性を解析するにあたり、最も基本となる実電池の発電可能な条件が明確化されていないことに起因しているものと考えられる。これらを考慮しないシステム設計では、実際の発電は不可能であり、MCFCの適用を拡大・展開して行くことは困難である。

当研究所は従来から、単セルやスタックにおける実電池発電特性や運転限界を実験的に把握してきており、それらをシステム設計やシステム性能解析に結びつけることが可能である。本章では、まず多様な燃料を供給した場合のシステムの一例として石炭ガスを対象に実電池の発電可能な条件を反映したシステム性能解析を行い、より現実的な石炭ガス化MCFC複合電システムの特性を示す。また、もう一例として、天然ガス燃料に焦点を当て、幅広い負荷領域にて運転が可能なMCFC発電システムの特性解析を実施し、将来的な新しい適用形態について示す。

4-4-1 発電システム構成に対するガス中不純物（H₂S）の影響度

MCFCに、バイオマス、廃棄物、石炭などの多様なガス化ガス燃料を適用するためには、これらのガスに対するMCFCの耐久性検証のみならず、電池部分におけるガス組成条件等が発電に適切となるようなプラントシステムを構成することが重要である。これらのガス中には4-2節で述べたように多くの不純物が含まれる。H₂Sは、アノード流路内部においてシフト反応を阻害し、反応は未平衡状態となる。多くのガス化燃料の主成分であるCOがH₂へ十分転換されずアノード出口H₂濃度が1%を下回るような条件では、電池電圧が低下することが報告されており、このような実電池における発電特性をシステム熱物質収支に反映させることも、現実的なシステム構成を得るためには重要となる⁽⁶⁾。そこで石炭ガス化MCFC発電システムを対象に熱効率解析を行い、電池出口H₂濃度とシフト反応進行度の関係を明らかとした。さらに、シフト反応未平衡状態がシステム全体の特性に与える影響度を調べた。検討の対象としたシステ

ムは、アノード出口ガスをアノード入口に再循環させるアノードガスリサイクルシステム、及び、アノードガスリサイクル系を省略しアノード出入口間に熱交換器を設けたアノード熱交換システムである。

表4-4-1に、電池の安定した発電のために必要なガス条件のうち、システム解析に反映させた運転限界を示す。表中カソード入口での炭酸ガス分圧はニッケル短絡を抑制することを目的としたものである(3-2-6項参照)。これらのガス組成や運転条件を考慮することにより、実電池の発電特性を反映したシステム性能の解析が可能となる。

図4-4-1(a)にアノードガスリサイクルシステムの構成図を示す。アノードガスリサイクルの目的は、アノード入口部分における炭素析出を防止することである。炭素析出防止のために必要なアノードガスリサイクル率は80%程度となることが分かった。図4-4-1(b)にはアノード熱交換システムの構成図を示す。本システムでは、アノード入口におけるガス温度を所定の温度に上昇させるため、アノード出口ガスとの熱交換を行うシステム構成となっている。また、アノード入口におけるCO₂濃度が低くなるため、ガス組成から見る限り高い電圧が

期待できる。本システムの場合、炭素析出防止のためには、アノードガスに蒸気を添加する必要がある、排熱回収系からの蒸気供給を伴う構成になっている。燃料ガスへの蒸気添加量は約60%程度が必要となる。

これらのシステムに対して、アノード流路内部におけるシフト反応が未平衡状態となる場合について、アノード出口水素濃度に関する解析を行った。シフト反応の平衡状態に関しては、 $K = \frac{(H_2 \cdot CO_2)}{(CO \cdot H_2O)}$ [床平衡] / $\frac{(H_2 \cdot CO_2)}{(CO \cdot H_2O)}$ [坪平衡] の値を解析に導入し、Kの値を1以下の範囲で変更することによりシステムの熱物質収支解析に反映させた。図4-4-2に、Kの値が0.4に低下した場合の、アノード出口におけるH₂濃度と設定燃料利用率の関係を示す。アノード出口における

表4-4-1 解析に考慮した電池の運転制約要因と制約条件

場所	運転制約要因
アノード入口	炭素非析出条件
アノード出口	水素濃度1%以上
カソード入口	低炭酸ガス(0.1MPa以下)分圧

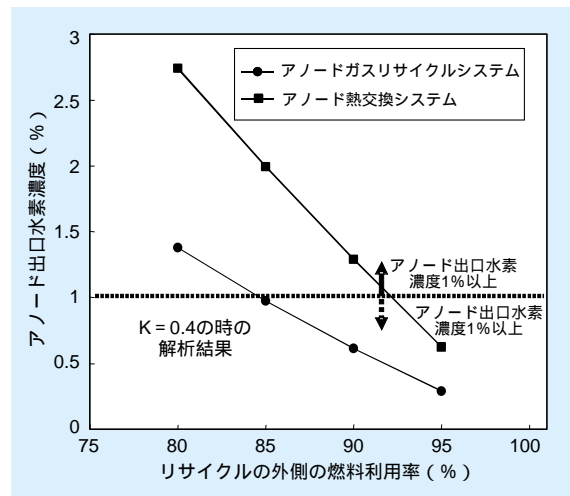


図4-4-2 アノード出口H₂濃度のプラント燃料利用率依存性 [$K = \frac{(H_2 \cdot CO_2)}{(CO \cdot H_2O)}$] [床平衡] / $\frac{(H_2 \cdot CO_2)}{(CO \cdot H_2O)}$ [坪平衡]]

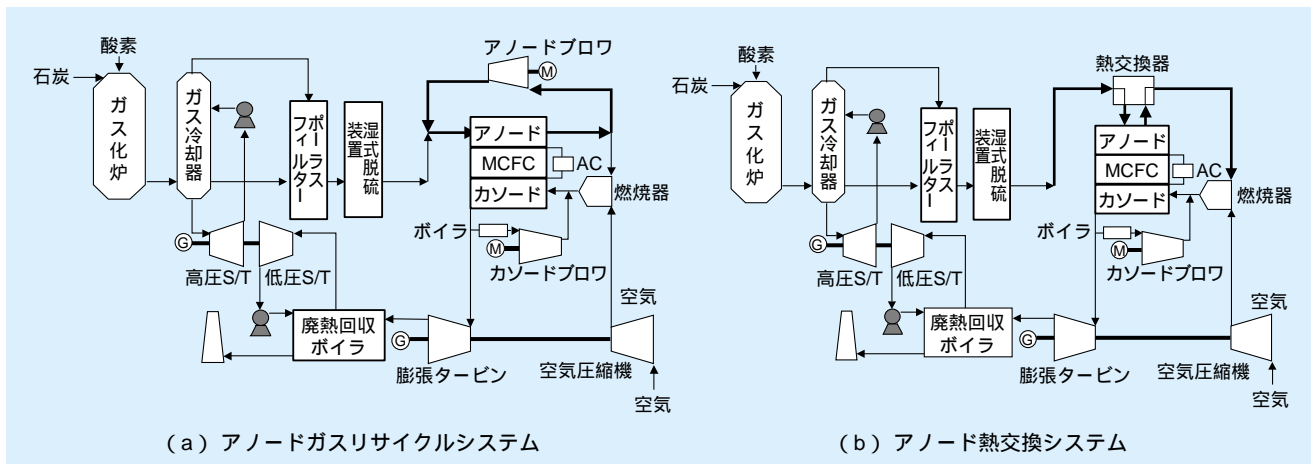


図4-4-1 不純物(H₂S)影響度検討の対象とした石炭ガス化複合MCFC発電システムの構成

H₂濃度が1%程度以上となる燃料利用率の領域は、アノード熱交換システムの方が広がっており、アノード熱交換システムは、アノードガスリサイクルシステムに比べて、燃料利用率を高く設定した運転が可能であることが分かった。

一方、ニッケル短絡抑制のためには酸化剤ガス（カソードガス）中のCO₂分圧を低くした運転が必要である。カソード側のシステム構成に注目すると、検討を行ったシステムではカソードガスリサイクル系にボイラーを設置し、電池からの熱量を蒸気タービンに回収することによりシステム全体の熱効率を向上させるような構成となっている。スタックの温度はカソードガスリサイクル系での熱回収量と空気圧縮機からの供給空気量により制御される。従って回収熱量を変えればシステムへの供給空気量が変化し、カソードCO₂ガス分圧を調整できる。システム熱効率とカソード炭酸ガス分圧についての検討結果を図4-4-3に示す。ニッケル短絡抑制のための運転可能領域において、カソードCO₂ガス分圧を低下させると、アノードガスリサイクルシステムでは熱効率の低下を伴うのに対し、アノード熱交換システムでは、逆に熱効率の上昇を伴うことが分かった。

以上の結果から、実電池における不純物の影響を考慮することにより、アノード熱交換システムは、石炭ガス化燃料のような高CO濃度、低H₂濃度燃料に対して、幅広い燃料利用率で運転可能であり、カソード炭酸ガス分圧を低減させた条件にも十分対応可能なシステムにな

ることが判明した。

4-4-2 広負荷域対応システム

MCFC発電プラントは、電池本体側からみれば、発電効率の高い定格点にてベース電源として運用されることが望ましいが、電力系統側から見れば、電源構成上、ミドル負荷運転も含めた幅広い負荷領域に対応することが要求される。従って、MCFC発電プラントを高効率、かつ幅広い負荷範囲に亘って運転することは、MCFCの早期導入に向けた重要課題である。これまでに提案されているMCFC発電システムでは、定格点において最大効率を得られるように空気流量とMCFC容量を決定し、ガスタービン圧縮機の回転数は一定として設計している。従って圧縮空気量も一定となり、部分負荷運転時には、スタック冷却用空気が過剰となり圧縮空気の一部を燃料電池からバイパスさせ、燃料を追い焚きして直接ガスタービンに供給している。このため、部分負荷効率が大幅に低下するという課題があった⁽⁷⁾⁻⁽¹⁰⁾。本来、MCFC本体には部分負荷時においても発電効率が高いという特徴があるが、このような設計では燃料電池の特徴を十分に引き出せていない状況にあった⁽¹¹⁾。

そこで、天然ガスを燃料とするMCFC発電システムを対象とした熱物質収支解析を実施し、広い負荷範囲において高効率発電が可能なシステムを提案した。解析に当たっては特に、1ニッケル短絡及び腐食管理の指標と

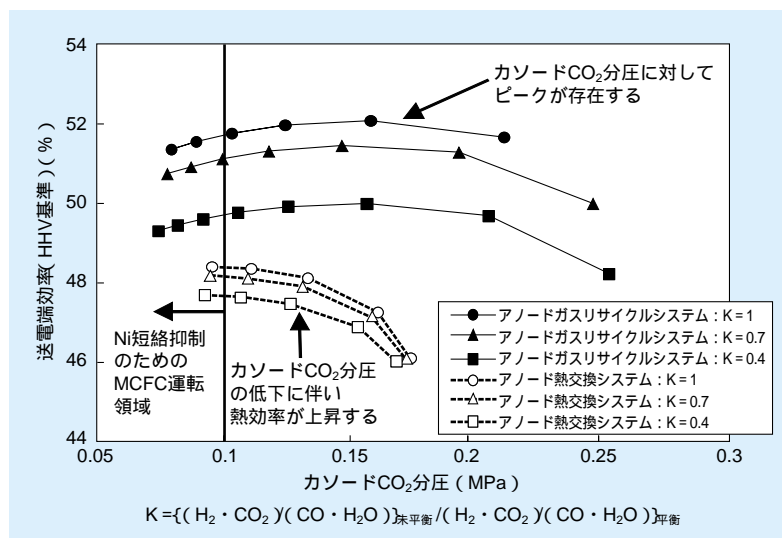


図4-4-3 カソード炭酸ガス分圧と熱効率の関係

なるスタック運転温度範囲、2スタックへの安定した燃料供給のための最大燃料利用率、3極間差圧を適正範囲内に保つためのカソード流路圧力損失の上限値を管理項目とした(表4-4-2)。運転負荷範囲を拡大するには、負荷変動時にスタック内部における発熱量が変化するため、発熱に合わせたスタックの冷却方式が重要な技術課題となる。

図4-4-4(a)にベースとした外部改質型MCFC発電システムの構成を示す(ケース1)。燃料予熱器と蒸気発生器からの天然ガスと蒸気を混合し、改質器によりH₂を主成分とする燃料ガスを生成する。この燃料はMCFCのアノード流路内に供給され、発電反応の後、改質器の燃焼部に供給され、燃料改質プロセスでの吸熱をまかなうために燃焼される。一方、空気は圧縮機で加圧され、改質器の燃焼排ガスと混合してから燃料電池のカソード側に供給される。カソード排ガスの一部はガスリサイクルブローにより、カソード入口側に再循環され、

MCFCの温度を調整する役割を果たす。カソード排ガスの一部は改質器燃焼部の燃焼用空気として利用され、残りは膨張タービン入口へと導かれる。膨張タービン排ガスは燃料改質用の蒸気を生成した後、系外に放出される。

本ベースシステム(ケース1)では、前述したように、部分負荷運転時にシステム効率が低下する。そこで、MCFCの冷却空気が過剰とならないよう、空気圧縮機をガスタービンから分離し、回転数制御により流量を変更可能となるシステム(ケース2)を考案した。本システムでは、空気圧縮機の流量と圧力比の関係をもとに、高負荷運転時でMCFCの冷却空気が多量に必要なときは、空気圧縮機の回転数を増加させて高圧運転する一方、部分負荷運転時でMCFCの冷却用空気量を多く必要としない場合には、空気圧縮機の回転数を低下させ、低圧運転している⁽¹²⁾⁻⁽¹⁸⁾。即ち、MCFCシステムが変圧運転されることとなる。変圧運転は、空気流量の多い時に高圧となるため、MCFCでの圧力損失が小さくなることから、ウエットシールの保護に有利であり、空気流量の少ないときは、低圧運転となるため、カソード炭酸ガス分圧が低下し、Ni短絡によるMCFCの寿命面で有利となる。なお、本ケースではカソードリサイクル系に冷却器も設置し高負荷時のスタック冷却を補助している。

ケース2では、高圧運転時には、燃料改質率の低下に伴い燃料利用率が低下し、システム効率が低下する。そ

表4-4-2 発電特性解析に当たり考慮した実電池の運転可能条件範囲

位置	設定条件	条件設定の目的
An/Ca入口温度	> 600	Ni短絡抑制
An/Ca出口温度	< 660	腐食抑制
燃料利用率	< 85%	燃料ガス不均一分配抑制
カソード圧力損失	< 3kPa	ガスリーク抑制
セル電圧	> 700mV	安定した発電

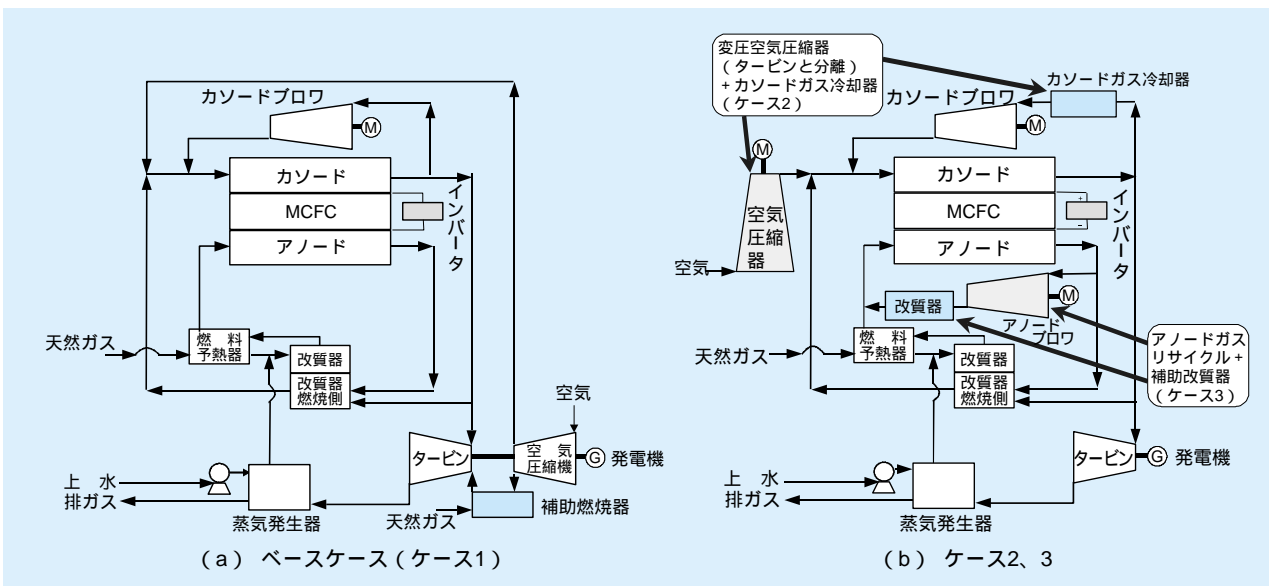


図4-4-4 天然ガスを燃料とする広負荷対応発電システムの構成

ここで、アノードガスリサイクル系並びに補助（断熱）改質器を設置し、高圧運転時でも燃料の改質率を高く設定でき、熱効率を高く取れるシステム（ケース3）についても検討した^(7X19)。

図4-4-4(b)に、空気圧縮機を変圧運転とし、カソードガスリサイクル系にガス冷却器を設置したケース2、及び、ケース2にアノードガスリサイクルと断熱改質器を設置したケース3のシステム構成を示す。また、対象とした3ケースにおける負荷率に対する熱効率の解析結果を図4-4-5に示す。

ケース2では、100%負荷運転時にシステム圧力が上昇し、燃料改質率が低下するため熱効率が低下するものの、60%程度の部分負荷時に熱効率は55%程度と最大値を示した。ケース3では、高圧運転時にアノードリサイクル系の追設によって改質率を高く保つことができるため、ケース2と比較して、100%負荷時の熱効率が高くなった。いずれのケースでも、100%負荷時における熱

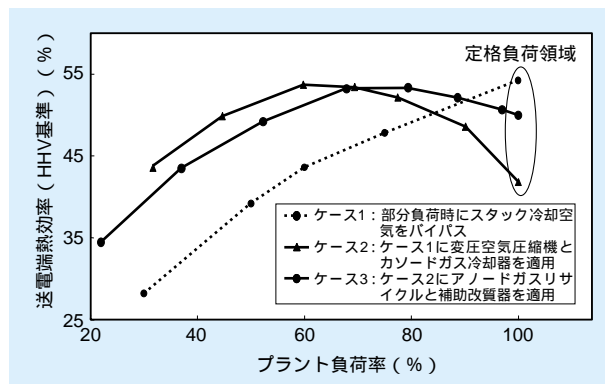


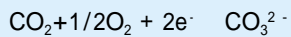
図4-4-5 性能比較を行ったシステムの部分負荷特性

効率はベースケースと比較して低下するものの、幅広い負荷範囲で熱効率がベースケースより高くなっていることが分かる。これらの解析より、負荷変動に幅広く対応するMCFCシステムを構成するためには、回転数制御による変圧運転型空気圧縮機の組み合わせが有効であることが明らかとなった⁽²⁰⁾。

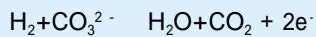
コラム5：MCFCによる炭酸ガス濃縮

MCFCは、発電に伴って炭酸ガス（CO₂）がカソードからアノードに移動し、その結果、CO₂濃度がカソード側に比べてアノード側で高くなるという原理的な特徴をもっている。このため、アノード排ガス中のH₂Oを取り除くとCO₂濃度は90%近くなり（N₂を含まない天然ガスなどの燃料を使用した場合）、CO₂を効率よく分離回収することが可能となる。

しかしながら、MCFCのカソード反応は



であるから、カソード側に反応ガスとしてCO₂を供給しなければならない。通常のプラントでは、カソードに必要なCO₂はアノード反応



で発生するCO₂のほぼ全量をリサイクルすること

によって供給している（図（a））。

一方、高濃のCO₂を含むアノード排ガスに着目して、アノード排ガスをCO₂回収プラントに導入することが考えられ、この場合、カソードで必要なCO₂を系外から導入する方式が検討されている。この方式のCO₂分離回収MCFCプラントに、既設火力発電所、製鉄所、ごみ焼却場などから排出される燃焼排ガス（CO₂を含む）をカソードへの酸化剤ガスとして導入すれば、それら排ガス中に含まれるCO₂を効率よく濃縮するシステムとなる（図（b））。

例えば、7MW級MCFC発電プラントにおいて燃料を天然ガスとし、電流密度150mA/cm²、燃料利用率85%とした場合、最大約6.3トン/時間のCO₂を濃縮回収できる。

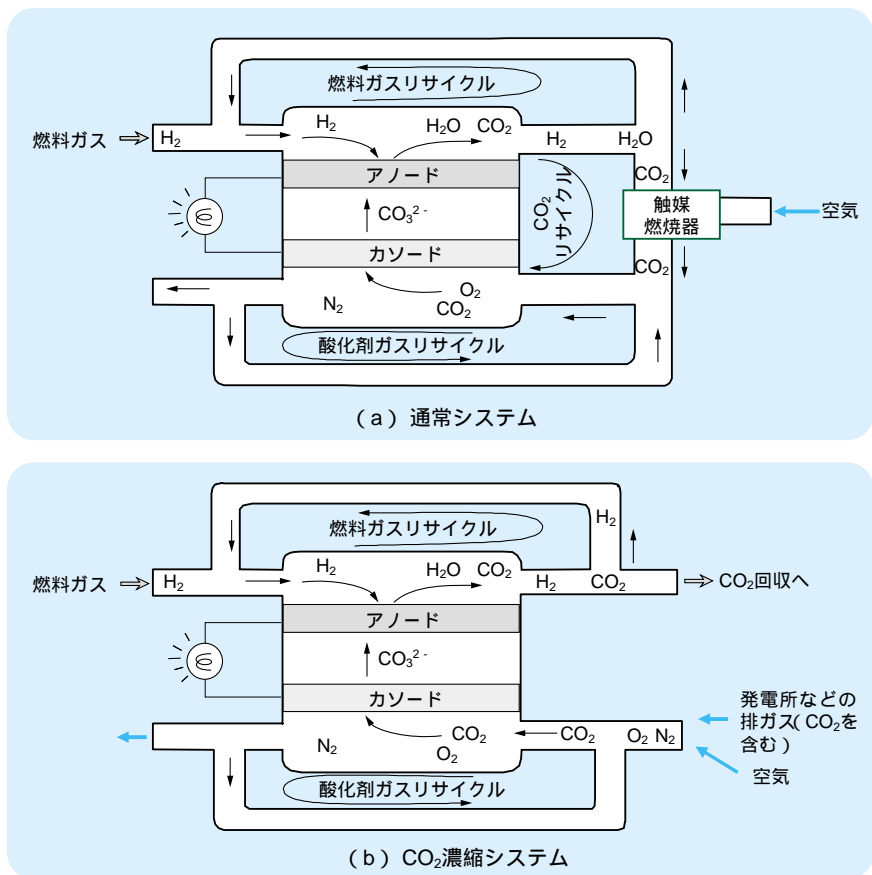


図 通常システムと外部からのCO₂を濃縮するシステムの比較

第 5 章

5

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 ; 60m³/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。

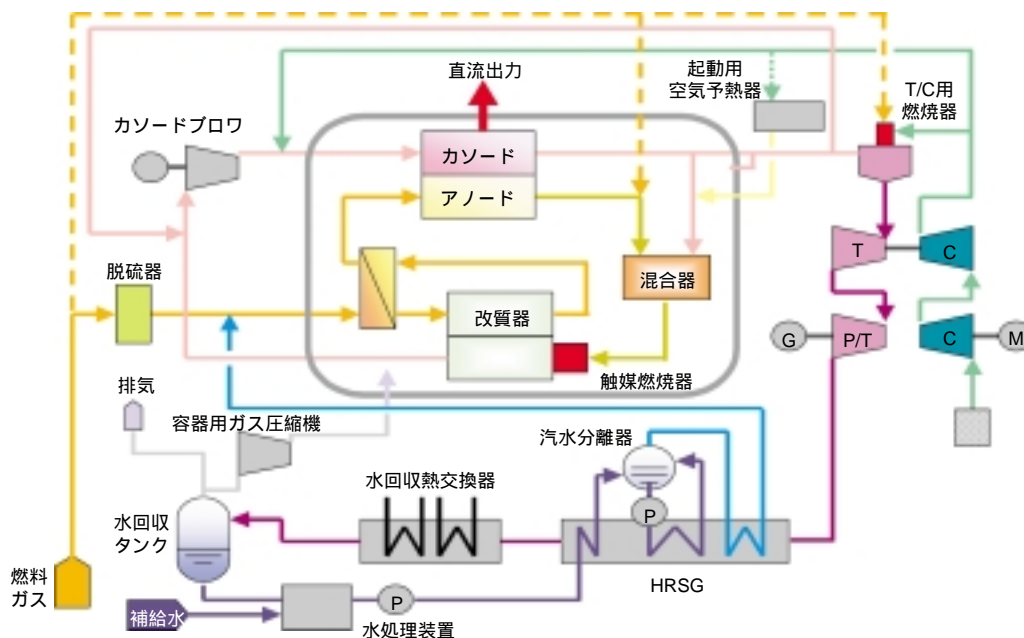


図5-1-2 300kW級MCFC発電システムフロー

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他、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（1m²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、LiAlO₂粉からなる多孔質体であり、成形に際しては、LiAlO₂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1m²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⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。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⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。

(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⁹⁾に替えて、当研究所が提案してきた精度の高い表示式¹⁰⁾¹¹⁾（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/m² レベル（電流密度 200mA/cm² に対応）とし、従来（1.2kW/m²、電流密度 150mA/cm² 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¹⁾⁻⁽⁴⁾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/m² 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⁸⁾。

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

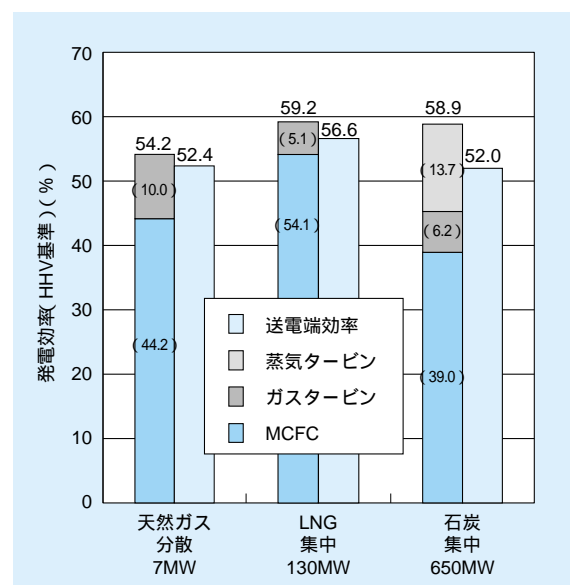


図5-3-1 設計したプラントの性能

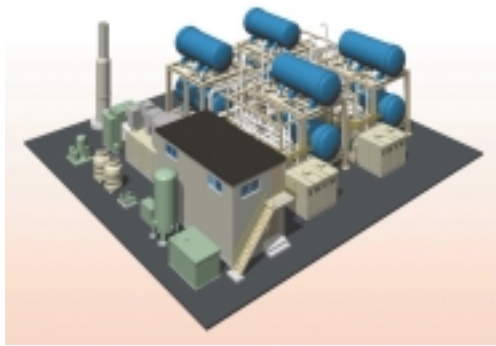


図5-3-2 天然ガス利用分散型外部改質プラント(7MW級)

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 ² (2000A/cm ²)
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 ₂ 利用率 (ワンプラス)	17.4%
CO ₂ 利用率 (ワンプラス)	61.7%
カソード入口CO ₂ 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 ² /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⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

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⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

(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⁽⁵⁾。

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⁽⁵⁾⁽⁸⁾。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⁽⁸⁾。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 ²)	175	165
	総発電電力量 (kWh)	2.40 × 10 ⁸	
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 ²)	200	181
	総発電電力量 (kWh)	2.49 × 10 ⁸	

注) 電池性能は4万時間で10%低下すると仮定 (150mA/cm²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 × 10⁸kWhが得られるのに対し、発熱量一定運転では2.49 × 10⁸kWh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CO₂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⁷⁾。図から明らかなように、CO₂分圧の上昇と共に

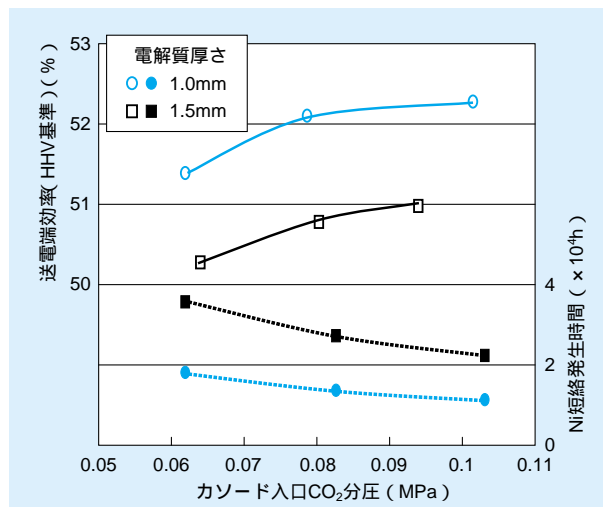


図5-3-3 プラント送電端効率とニッケル短絡寿命のトレードオフ

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、CO₂分圧0.08MPa(7MWプラントにおけるカソード入口CO₂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⁷⁾。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CO₂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⁸⁾。

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⁽¹²⁾。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、 α 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⁽⁵⁾。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⁽⁶⁾。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

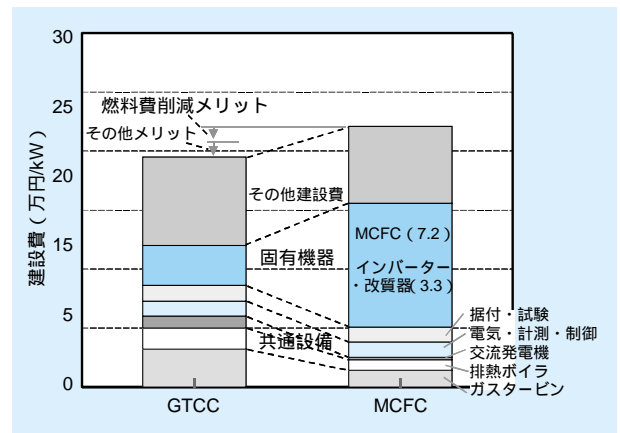


図5-3-4 MCFCプラントの目標建設費

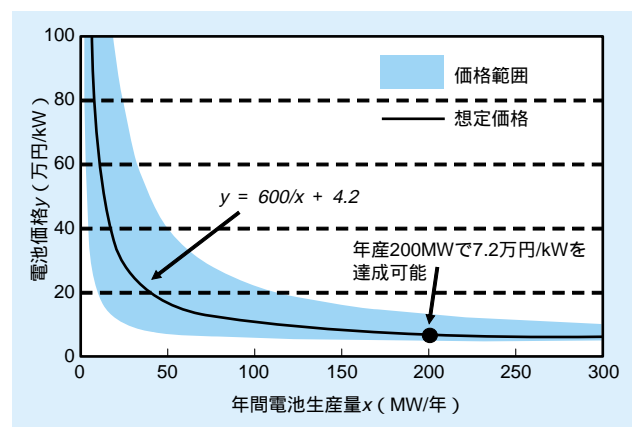


図5-3-5 MCFCプラントの目標建設費

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⁽⁶⁾⁽¹²⁾。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⁽¹²⁾。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。

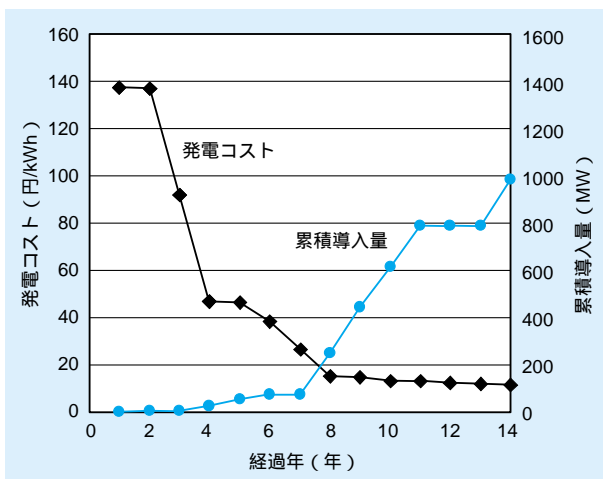


図5-3-6 プラント累積導入量と発電コストの推移
(5、20、200MW/年の段階的な生産設備増強、2、3、4、5年の段階的な電池寿命改善を仮定)

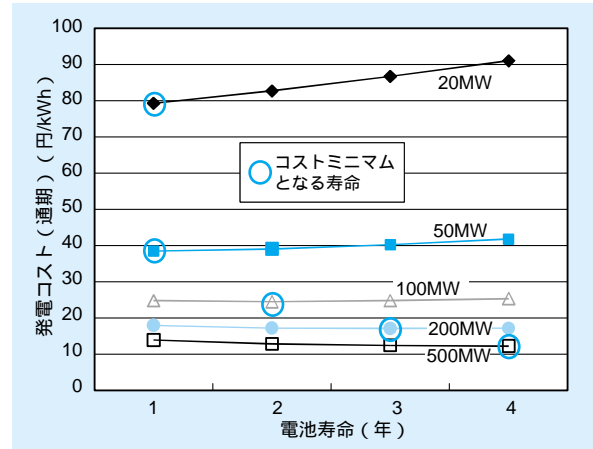


図5-3-7 MCFCの全導入量と電池寿命による発電コスト

(3) 電源構成から見たMCFC導入の経済性

MCFC発電設備が電力システムに導入され、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⁽¹³⁾。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、システム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、システム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必要とされる結果となった。

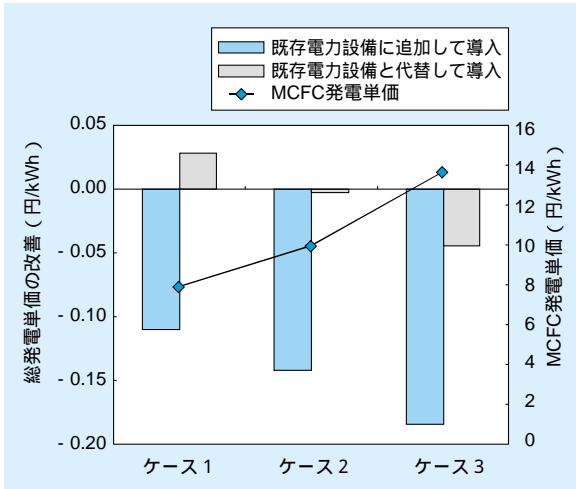


図5-3-8 MCFC発電単価と系統総発電単価の改善 (LNG燃料の集中配置形態の場合)
 (ケース1：定格で全期間ベース運用、ケース2：全期間の2/3を定格で運用、残り1/3の期間は最低負荷(30%)で運転、ケース3：全期間の1/3を定格で運用、残り2/3の期間は最低負荷(30%)で運転)

を図5-3-9に示す⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾。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)⁽¹³⁾。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CO₂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CO₂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⁽¹⁶⁾。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⁽¹⁷⁾。

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

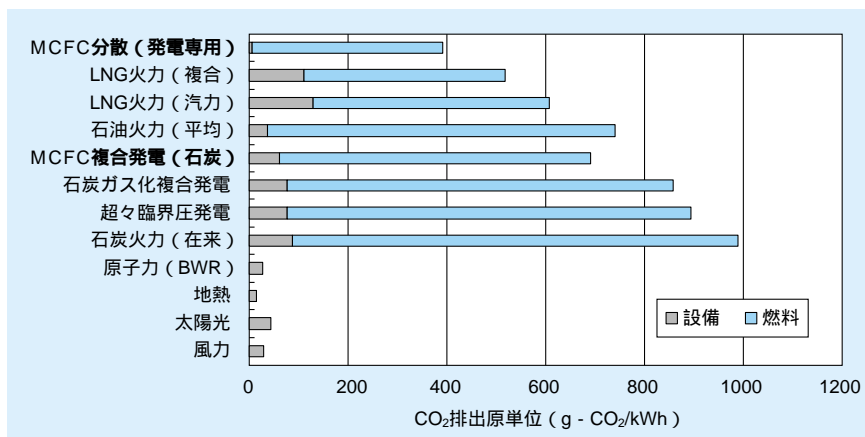


図5-3-9 各種電源のCO₂排出原単位比較

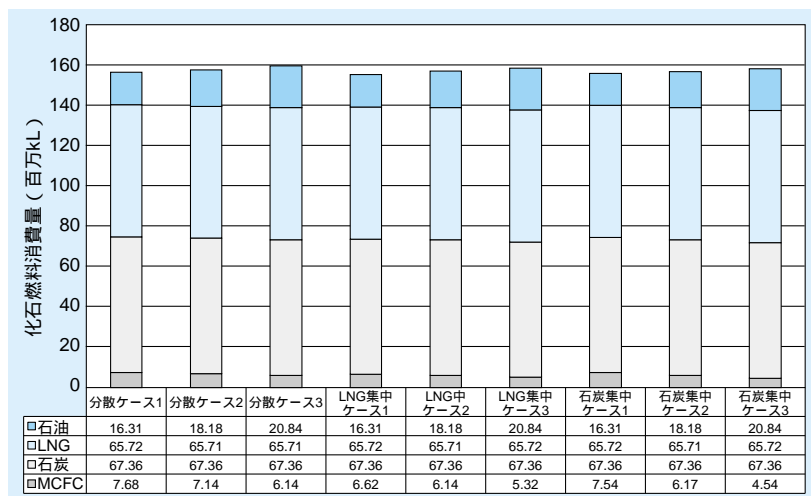


図5-3-10 燃料別消費量の比較（ケース分けは図5-3-8と同様）

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CO₂排出量は削減されるが、NO_x、SO_x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⁽¹⁶⁾。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⁽¹⁶⁾。

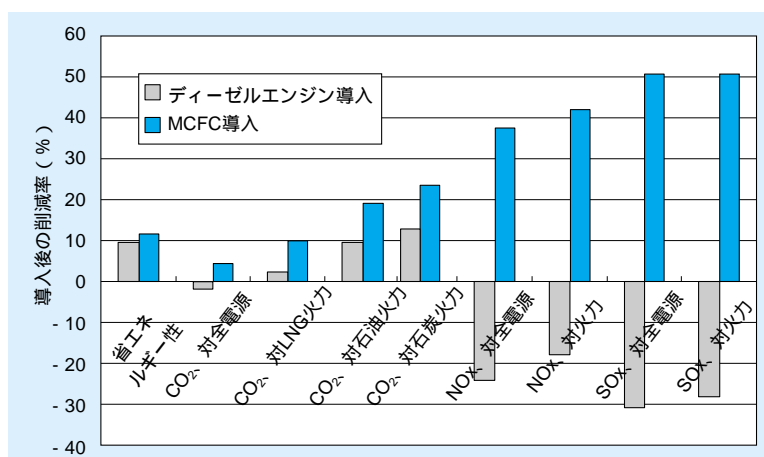


図5-3-11 発電設備導入に伴う環境性能の変化（ホテルにおける導入前後比較）

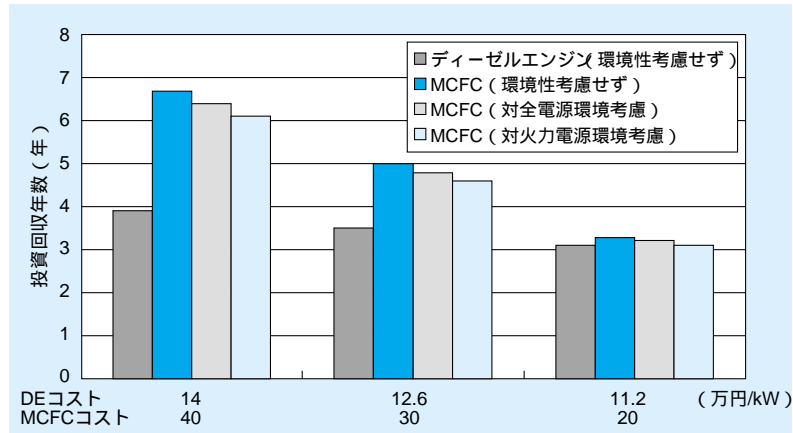


図5-3-12 発電設備の投資回収年数（ホテルの場合）

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⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。

1,000kW規模以下の民生業務用発電市場⁽¹⁾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⁽²⁾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⁽²⁾。

10,000kW以上の分野⁽³⁾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⁽²⁾。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1m²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_x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_x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。

ま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)

付 録

もうひとつの高温型 燃料電池 SOFC

固体酸化物形燃料電池（SOFC）はMCFCより高温の700～1,000℃で動作する燃料電池で、国のプロジェクトでも開発が進められている。電池構造、材料、運転温度などについて様々なバリエーションが提案されており、MCFCより高効率となる可能性がある。当研究所では、1,000℃動作、オールセラミックス製で、低コスト化が期待できる、独自の電極支持型SOFCを開発中である。これはこれまで蓄積してきた材料技術に基づくものであり、先頃のセラミックスインターコネクタの開発によって大きく進展し、小型のスタック試験にまで至っている。今後、大型化を進めていく予定である。

横須賀研究所 エネルギー材料部 主任研究員 山本 融
 エネルギー機械部 主任研究員 森 則之
 エネルギー材料部 主任研究員 伊藤 響

付 - 1 SOFC の特徴と位置づけ 99
 付 - 2 基盤技術への取り組み 104



山本 融（1993年入所）
 これまで、SOFCに関する研究に携わり、電池を構成する材料の開発と材料の劣化メカニズムの解明に取り組んできた。今後は、SOFC発電技術の実用化に向け、電池の運転評価技術ならびに性能評価手法の開発に取り組んでいきたい。

（付-1-1、付-1-2執筆）



森 則之（1987年入所）
 高温ガスタービン用セラミック燃焼器、セラミック静翼、SOFCセル・スタックなどの開発、SOFC発電システムの性能解析に関する研究を行ってきた。現在、ガスタービンのモニタリング技術に関する研究を行っており、その成果の実用化を目指す。

（付-1-3執筆）



伊藤 響（1990年入所）
 これまでSOFC関連研究では、製造コスト試算、燃料極材料の長期安定性向上を中心とする構成材料の研究、ならびに材料面からのスタック化技術開発に取り組んできた。今後は、当研究所が提案する燃料極支持形SOFCの実現を目指し、引き続きスタック化技術の開発に取り組んでいきたい。

（付-2執筆）

付録 - 1 SOFC の特徴と位置づけ

付-1-1 SOFC の特徴

SOFCは、セラミックスの電解質を使用し、燃料電池の中では最も高い温度領域（700～1000℃）で作動することから、高効率な発電システムの構築が期待されている。SOFCは、セルスタック構造の違いから、平板構造と円筒構造に大別されるが、基本的にはアノード（以降、燃料極）、カソード（以降、空気極）、および電解質からなるセラミックス製の単電池（単セル）が、インタコネクタ（MCFCのセパレータに対応する。SOFCでは、このように呼ばれることが多い）を介した連結構造を有する。（付図1-1）

SOFCの作動温度は、一般に電解質の種類と形状によって決まる。現在、技術的な成熟度が高く一般的に用いられているイットリア安定化ジルコニア（YSZ）の場合、作動温度は1000℃である。その特徴を以下にまとめる。

1 セラミックスを用いた全固体での電池構成が可能な

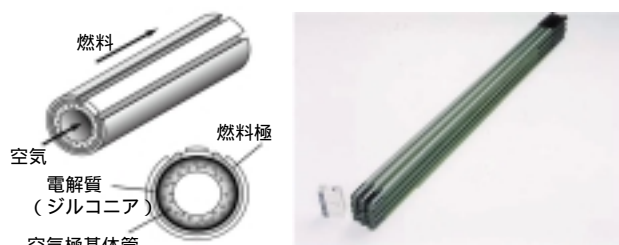
ことから、高温動作が可能な多様な電池形状をとることができる。

2 高温動作が可能なことから、高出力密度と高い発電効率が期待できる。

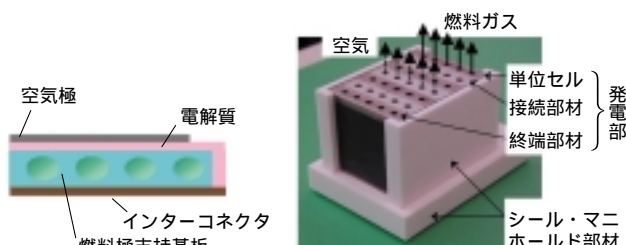
3 電池反応が容易に進行することから、貴金属を使った触媒電極が不要になるとともに、内部改質が可能なことから、水素以外にも、天然ガス、石炭ガスなども直接燃料にできる。

4 電解質をはじめとする材料が固体であるため、腐食や電解質の散逸が無く、長期間安定した運転が可能となる。

5 高温排熱を改質反応やガスタービンの駆動にも有効に使えるため、高い発電効率のコージェネレーションシステムやコンバインドシステムの構築が可能となる。これらのうち、固体であることに起因する1、4の特徴はMCFCには無いものであり、MCFCでは構成材料やスタック構造などのコンセプトが確立されているのに対し、SOFCでは、その構成材料、電池構造などについて



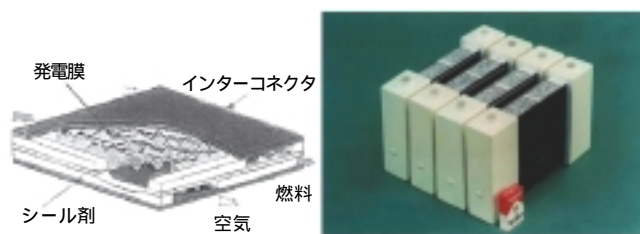
1 縦編円筒型SOFC（東陶機器）
多孔質の円筒管上に単電池が
一個形成されている



3 電極支持型SOFC（当研究所）
多孔質電極基板上に単電池とインタコネクタが形成されている



2 横編円筒型SOFC（三菱重工／電源開発）
多孔質の円筒管上に単電池が複数個形成
されている



4 一体焼結型SOFC（三菱重工／中部電力）
立体形状の単電池とインタコネクタに
より形成されている

(a) 円筒型

(b) 平板型

付図1-1 SOFCの種類と特徴
（産業技術総合研究所のホームページなどより）

て様々な方式が試みられている。SOFCはこれまでの国内外の研究開発により、電池本体の技術完成度は着実に高まっており、高発電効率システムとしての早期の実用化が期待されている。

付-1-2 外部機関の動向

SOFCの開発では、米国のWestinghouse Electric社（現Siemens Westinghouse Power社、SWP社）が20年以上にわたり、定置用としての開発を中心に世界をリードしてきた。SWP社は、円筒軸方向にインタコネクタを配置した縦縞型と称される円筒型SOFCの開発を進めている。SWP社は、1997年に日本で東京ガスと大阪ガスと共同で実施した25kW級常圧型モジュールの発電試験の後、1997～2000年には、オランダにおいて、100kW級常圧型のコージェネレーションシステムの実証試験を実施している。その後、このシステムは、ドイツに移設され、2万時間以上の累積運転時間を達成した。また、2000年には、米国内において、世界で初めてとなる200kW級加圧型SOFCとマイクロガスタービンのハイブリッドシステムの実証運転に成功している。現在は、加圧型SOFCマイクロガスタービンハイブリッドシステムの商用化に向けた開発研究を進めている。

当初、SOFCの開発は、定置用の電力会社向けを想定して始まったが、現在では様々な用途への適用拡大も指向されている（付表1-1）。ここ数年、世界的には、数

kW～数10kWクラスの小型定置用SOFCの研究開発を中心とした流れがある。カナダのGlobal Thermoelectric社や、ドイツのSulzer Hexis社などは、急速に家庭用や小型定置用の平板型SOFCの研究開発を進めている。これらの電池は、電解質の基板の上に空気極と燃料極を形成した自立膜（電解質支持）平板型電池と、ガス流路を加工した金属製のインターコネクタから構成されている。

米国では、SECA（Solid State Energy Conversion Alliance）プログラムと称して、様々な用途に適用可能な小型スタックを開発し、大量生産による低コスト化を図ることを目的に、国家的規模で研究開発を進めている。SWP社は、商用化を目的に小型定置用ではFuel Cell Technology社と、運輸分野ではFord社とともにSOFCの高出力・低コスト化を目指している。

我が国においては、1981年度からムーンライト計画にとりあげられて、研究開発が進められている。1989年度からは、NEDOの研究開発計画として数100W級の電池本体の研究開発が行われ（Ⅰ期）、その後1992年度から2000年度まで、燃料電池本体のコスト低減と信頼性確立に重点を置いた開発が行われてきた（第Ⅱ期）。この中で、東陶機器（株）、新日本製鐵（株）、九州電力（株）は、共同で、SWP社と同様の円筒型SOFCの開発を実施してきた。また、三菱重工業（株）と中部電力（株）は、共同で開発を進めている平板型（MOLB Mono Block Layer Built型）SOFCスタックによる熱サイクル試験や負荷追従性の検討を進めた。当研究所も低コスト化の

付表1-1 各開発機関のSOFC開発状況

機 関 名	目標時期	開 発 状 況
中部電力+三菱重工業	2005	2004年まで50kW級システムの評価
関西電力+三菱マテリアル	2007	2006年まで数kW低温作動型システムの開発
電源開発+三菱重工業	2006	円筒縦縞型100kW天然ガス利用システム
JFEエンジニアリング	2004～2005 (試験用販売)	Fuel Cell Technology社製Flat-plateセルまたはSWP社製縦縞円筒形利用、数kW～MW級までをラインアップ、5kW級で300kg、170×70×60cm程度
東陶機器	2004	NEDOプロでの10kW級システム、NEDO以外でマイクロチューブ型を開発
京セラ	2003	電極支持型による家庭用システム
東邦ガス	2005	スカンジウム安定化ジルコニア電解質の単セルを用いた商品化を大手電機と共同開発
Sulzer Hexis社	2001以降	電極支持型単セル+金属セパレータ使用950 作動、電気1kW+温水3kW家庭用システム
Siemens Westinghouse Power社(独、米)	2004	縦縞円筒型構造、250kW～1MW級SOFC+MGT加圧ハイブリッドシステム実用化、2010年までに低コスト化
Delphi社(米)(+BMW)	2006～2010	商用・軍用車載用補助電源、固定用電源5kW級で70kg/44L
Global Thermoelectric社	2007	低温作動電極支持型、Delphi社にスタック供給
Acumentrics社(+住友商事)	2004	円筒マイクロチューブ形、家庭・飲食店、通信事業用1～250kW級システム
Rolls & Royce	2007	電極支持型で1MWSOFC+MGT

観点から、安価な粗製ランタンを用いた電池構成の可能性の検討を実施した。

この成果を基に2001年度から4年間の計画で、東陶機器が円筒型を、三菱重工業(株)と中部電力(株)が平板型スタックを用いて、実用システムに適用できる高信頼性、拡張性および経済性を有する熱自立モジュール(10数kW級)の開発が進められている(第III期)。また本計画では、SOFCの使用範囲の拡張を目指した適用性拡大に関する要素研究も、三菱重工業(株)ならびに東京ガス(株)によって行われている。さらにNEDOは2004年度から、新たに市場導入を念頭においた各種SOFCシステム開発と、フィールド試験を含めたSOFC性能評価技術の開発を実施する予定である。

SOFCの実用化に向けた課題としては、材料開発も含めての電池性能の向上、分散電源用途に適用可能なセルスタックの大出力化、それらを低コスト・高信頼性をもって実現可能な基本システム構成の検討などが挙げられる。

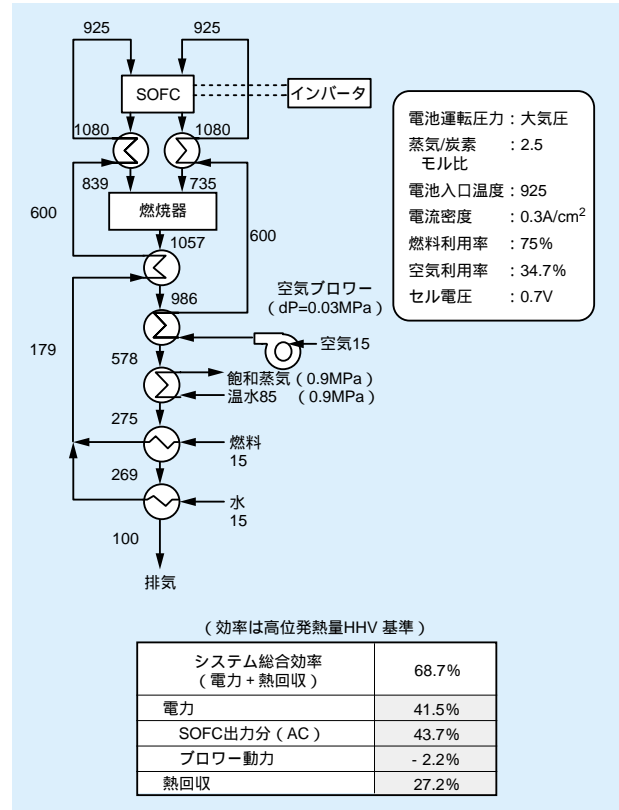
付-1-3 SOFC 発電システム

SOFC 発電システムは、MCFCと同様に多様な燃料を利用でき、また電池からの高温排ガスを用いての複合発電や熱供給が行えるので、様々なシステム構成が提案されている。ここでは、天然ガスを利用して、高温排ガスで複合発電を行う場合と、熱供給を行う場合の各システム、ならびに石炭ガスを利用する場合のシステムを例示しながら、SOFC 発電システムの特徴を紹介する。

(1) 常圧熱供給システム

まず、当面の導入形態と考えられる常圧システムとして、熱を供給するシステムを、付図1-2に例示する⁽¹⁾。付図1-2は、天然ガスを電池内部で改質する常圧作動のSOFCを用いて、0.9MPaの飽和蒸気を発生するシステムである。熱回収量は回収を行う媒体温度により変化し、媒体を蒸気とするよりも温水とした方が熱回収量を多くできる。しかしながら、高温の媒体ほど熱としての利用価値は高くなるので、ここでは二重効用吸収式冷凍機が駆動できる条件、すなわち冷房需要にも対応できる熱回収条件で性能解析を行っている。

このシステムでは、電池の電気出力が加圧時よりも低下し、空気供給にブロワ - 動力が必要であるため、発電



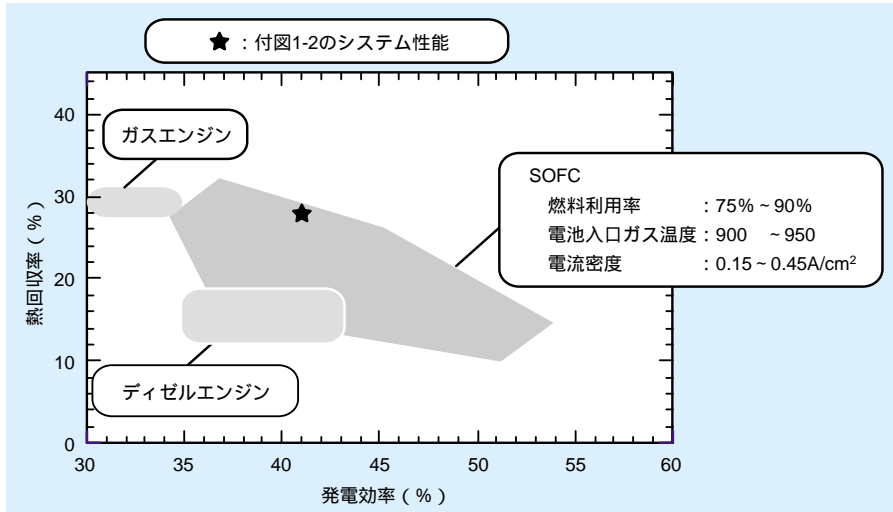
付図1-2 熱供給を行う内部改質型常圧作動SOFC発電システムの例(天然ガス燃料)

効率は40%程度となった。また回収できる熱量は約30%であり、総合効率は約70%との結果が得られた。

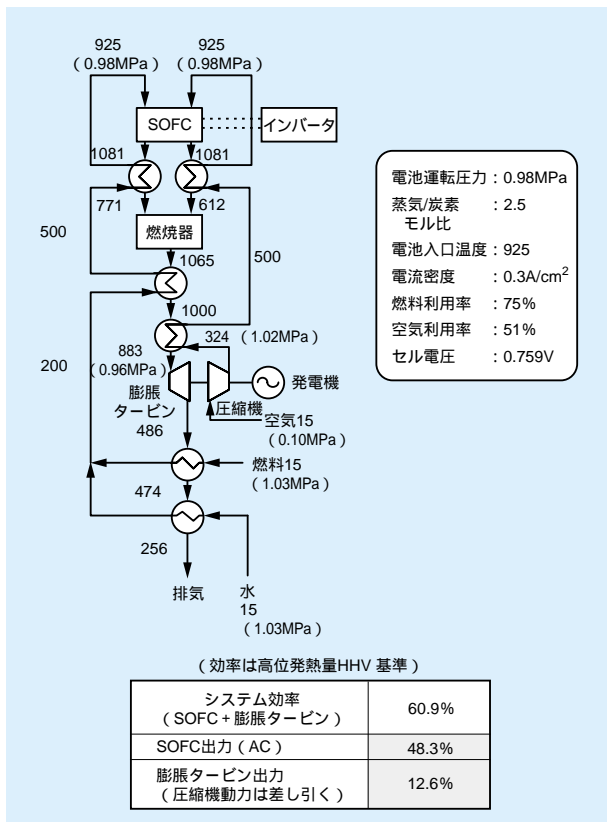
付図1-2のシステムでは、SOFCの運転条件である電池入口温度、燃料利用率、電流密度を変化させることで、電気出力および熱回収にかかわる効率に変化する。その検討結果を、付図1-3に示す⁽²⁾。熱供給を行うSOFCシステムの発電効率は最大50%程度まで見込めることがわかる。このようにSOFCでは、既存の発電装置よりも、高い発電効率を維持しつつ、さまざまな熱回収率でシステムを構築できる可能性がある。

(2) 内部改質型加圧発電システム

次に、より高効率発電を目指した将来型のシステムとして、天然ガスを燃料とし、SOFCと膨張タービンで発電を行うシステムの構成例、ならびにシステム性能の解析結果を付図1-4に示す⁽¹⁾。このシステムでは、電池内部で天然ガスを改質し、加圧で運転できるSOFCを想定している。性能解析では構成、運転条件などの最適化が図られていないが、約60%のシステム効率を期待できるとの結果が得られている。



付図1-3 熱併給を行うSOFC発電システムの性能⁽²⁾⁽³⁾



付図1-4 内部改質型加圧作動SOFC発電システムの例（天然ガス燃料）

また、図から分かるように、MCFC 発電システムと異なり、SOFC では電池からの排気ガスをリサイクルする必要がない。それは、電解質中の電荷移動体となる酸素を大気から供給でき電池排ガスを再利用する必要がないこと、SOFC の作動温度（900 ~ 1,000）は、燃料改質に適した温度であり電池内部で直接燃料を改質するこ

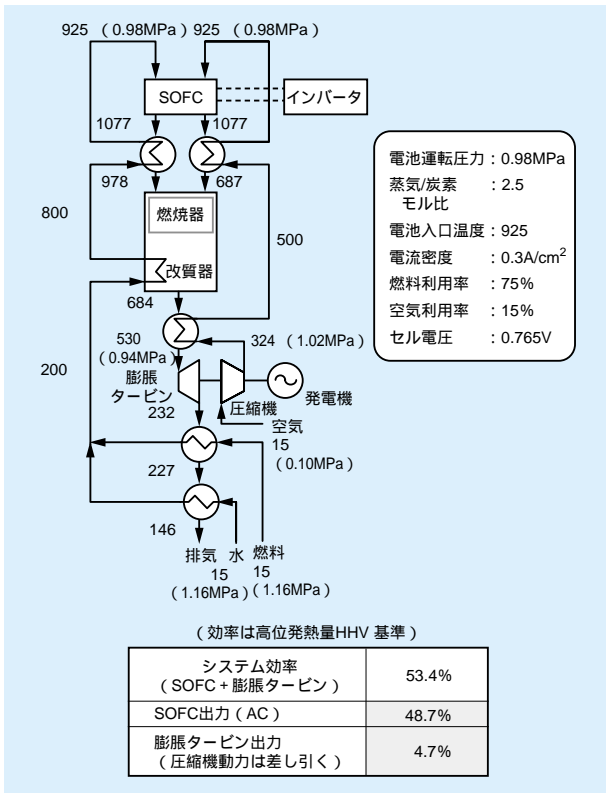
とで電池冷却の効果が期待できること、が理由である。

(3) 外部改質型加圧発電システム

システムにおよぼす内部改質の効果を例示するため、外部改質を行った場合のシステムを付図 1-5 に示す⁽³⁾。付図 1-5 には、燃料供給、SOFC の出入口ガス温度などの条件を付図 1-4 と同一とし、解析を行った結果も示す。外部改質を行うシステムでは、内部改質の場合よりも電池冷却に大量の空気が必要となるため、空気供給にかかわる圧縮機での消費動力が増え、かつ膨張タービン入口でのガス温度が著しく低下する。このため圧縮機動力を差し引いた膨張タービンからの電気出力は著しく低下し、ひいてはシステム全体の効率を引き下げることになる。もし、付図 1-5 でカソードガスのリサイクルを行えば、外部から供給する空気流量を大幅に減らすことができ、内部改質の場合とほぼ同じシステム効率を得られる。しかし、システム構成機器は増えることとなる。以上から、SOFC では、膨張タービンと組合せ、かつ電池内部で燃料改質を行うことにより、高効率のシステムを比較的単純な構成で構築できることがわかる。

(4) 石炭ガス化複合発電システム

最後に、石炭ガスを燃料とする SOFC 発電システムの性能解析結果を紹介する。石炭ガスを燃料とする場合には天然ガスと異なり、燃料改質が不要となるので、内部改質による電池冷却ができない。したがって、外部からの流入空気量を減らしてシステム効率を高めるために、



付図1-5 外部改質型加圧作動SOFC発電システムの例 (天然ガス燃料)

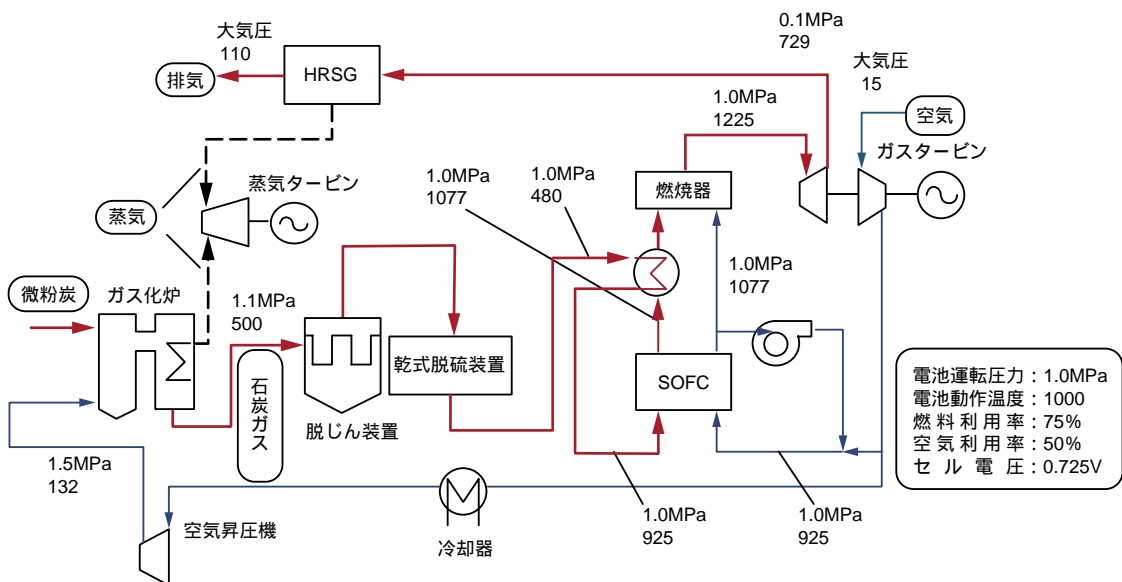
カソードガスのリサイクルによる電池冷却が必要となる。石炭ガス利用のシステム構成例を付図1-6に、性能解析の結果を付表1-2に示す⁽⁴⁾。図は微粉炭を空気でガス化し、生成したガスを、高温ガス精製(乾式)システムで脱じん、脱硫するシステムである。また、発電出力は、

付表1-2 石炭ガスを燃料とするSOFC発電システムの性能

石炭供給方法	微粉炭 空気搬送	微粉炭 窒素搬送
ガス化剤	空気	酸素
ガス精製方式	乾式	湿式
発電端効率(HHV基準)(%)	58.6	60.3
送電端効率(HHV基準)(%)	53.4	53.2
出力 (%)	SOFC	28.1
	ガスタービン	13.9
	蒸気タービン	16.6
	所内動力	- 5.2

SOFC、ガスタービン、蒸気タービンから得られる。表では微粉炭を酸素でガス化し、湿式でガス生成した場合の性能もあげているが、いずれのシステムでも50%を超える送電端効率が期待できる。

以上、SOFC発電システムの可能性について紹介した。SOFC発電システムを実現するためには、電池以外に燃料、空気を電池入口温度まで予熱する高温熱交換器が不可欠となる。数百kW級のSOFC発電システムを実証したSWP社では、セルが円筒形状であることを活かし、高温熱交換器を電池と一体構造とすることで、この問題に対処している。一方、セルが平板形状のSOFCでは、別途高温熱交換器を設備する必要があるため、SOFC本体とともに高温熱交換器の開発が必須と考えられる。



付図1-6 石炭ガスを燃料とするSOFC発電システムの例

付録 - 2 基盤技術への取り組み

本節では、当研究所が開発を進めている燃料極支持型 SOFC に関連するこれまでの研究成果ならびに試作スタックの発電試験結果について紹介する。

付-2-1 SOFC 研究開発の目標

当研究所では、1988年にSOFC発電に関する調査を実施し、高効率発電システムへのSOFCの適用とその実現には、1 高温（1,000℃）作動、2 全セラミックス製、3 低コスト製造技術の確立、を満足する必要があると結論づけ、当研究所におけるSOFCの開発目標とした。

第一の目標である高温作動は、電解質が良好な導電性を示す温度であることと、より高効率な発電システムの構築には有効利用できる排熱が高温の方が有利であるとの考えに基づいている。そして、この作動条件を満足するには、金属よりも耐熱性に優れたセラミックス系材料を適用していくという使用材料上の制約が加わって、第二の目標となった。また、当研究所がSOFCの研究開発に着手した当時、SOFC発電の実現性を示した米国 Westinghouse Electric 社（当時）製 3 kW 級スタックや旧電子技術総合研究所製 0.5 kW 級スタック等は、製造コストが極めて高く、SOFCの実用化には少なくとも製造コストを大幅に低減することが課題になっていた。そこで、SOFC発電の実用化に必要と考えられた低コスト化を第三の開発目標に加えることとした。当研究所では、SOFCの製造コストに関しては、2種類の構造のSOFCを三つの製造方法で量産した場合の各種費用（原・材料費、設備費、光熱費、労務費等）を試算して、低コスト製法を明らかにするとともに、原材料費の削減

や出力密度の向上が低コスト化に必要であるとの指針を得ている⁽¹⁾。

以上より、当研究所では、SOFC用セル材料の研究に重点を置きながら、セラミックス湿式法等の低コスト製造法の適用が容易で、比較的高い出力密度が得られると考えられた電解質支持型平板SOFCのスタック化技術の開発に着手した。

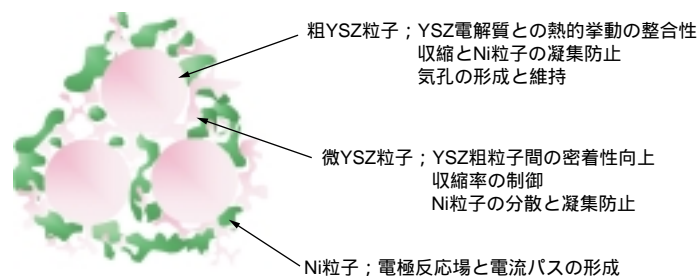
付-2-2 セルの高性能化技術

SOFC単セルの高性能化は、セル材料、セル構造、作製方法に関する最適化を進め、これらのベストミックスによってはじめて達成できる。

(1) 燃料極マイクロ構造の改良⁽²⁾⁽³⁾

研究開発の初期段階における解決すべき最大の課題は、十数時間で発電が不可能な状態にまでなる性能低下現象であった。特に、単セルに流れる電流を大きくすると、この性能低下は顕著に現れた。そこで、各電極について、カレント・インターラプション法を用いた発電時における電極特性の解析と発電前後における各電極のマイクロ構造変化の顕微鏡観察を実施した。その結果、空気極には問題がなく、燃料極の劣化が原因であることが分かった。

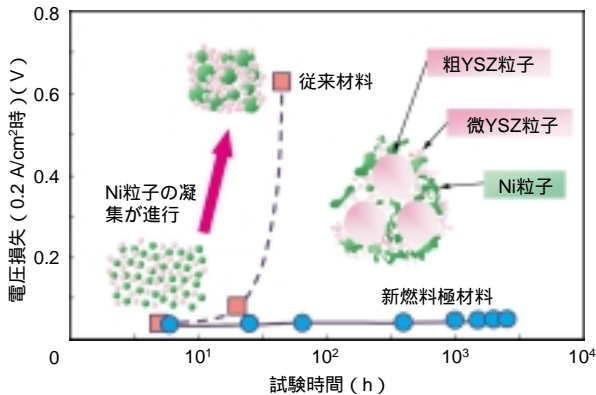
この劣化は、燃料極材料に用いるニッケル（Ni）粒子の熱凝集による材料全体の緻密化と電流パス切断の進行が原因である。そこで、これらの現象を抑制するために、燃料極に用いるYSZ粒子を従来の微細な粉末粒子から粗・微二種類のYSZ粉末粒子に変更し、**付図2-1**に示すような概念のマイクロ構造を提案した。このマイクロ構造



付図2-1 当研究所が開発した燃料極のマイクロ構造概念

では、粗・微 YSZ 粒子によって燃料極の骨格を形成し、特に粗 YSZ 粒子間に出来る粒間細隙に Ni 粒子と気孔を分散させて、連続的なつながりを維持している。また、微 YSZ 粒子は、粗 YSZ 粒子同士の接着性や燃料極と電解質との密着性の向上を果たす粉末である。

試作した燃料極材料を電解質板に塗布し、焼き付けて電解質支持型 SOFC 単セルの燃料極とし、燃料極における電圧損失の変化を測定した。付図 2-2 には、同一条件下で測定した新材料と従来材料の電圧損失の経時変化を併せて記した。新材料は従来材料と同等の性能を有しており、また長期安定性については大幅な改善がみられている。ただし、流れる電流を大きくする（電流密度でおおむね 1.2 A/cm^2 以上）と、劣化が進行することもわかった。

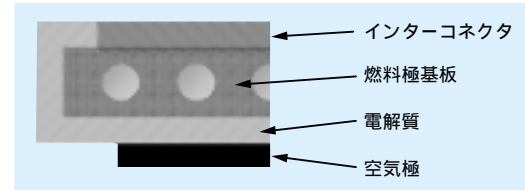


付図2-2 当研究所が開発した燃料極の電圧損失の経時変化

(2) 燃料極支持型 SOFC の提案

当研究所では、直径 40 mm の YSZ 電解質板を用いた電解質支持型構造の単セルにより、開発した電極材料の性能評価を行うとともに、単セルの大面積化を進め⁴⁾、最終的にはスタックの基本構造となる単位セルを開発した（ここでは電解質と両電極から成るセルを単セルと呼び、これにインターコネクタを付けたセルを単位セルと呼んで区別する）。本単位セルでは、利用率・熱サイクル特性等を評価するとともに、材料やスタック構造に関する課題の抽出を行った⁵⁾⁶⁾。その結果、取り出せる出力に限界があり、高い加工精度が必要な部品点数が多い等の課題が見出された。

そこで、新たに燃料極支持型構造を提案⁷⁾し、その開発に着手した。本構造では、付図 2-3 に示すように空気極よりも電気抵抗が低い燃料極で基板を作製し、これ



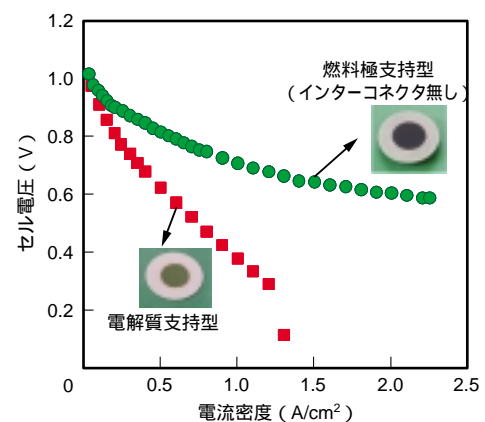
付図2-3 当研究所が提案する燃料極支持型SOFC（単位セル基本構造）

を電解質とインターコネクタ（I.C.）で包み込むように直接成膜し、さらに電解質膜上に空気極を成膜している。

この構造により、各部材での抵抗損失や燃料極/I.C.間の接触抵抗を最小限とし、電解質の密着効果によって電極反応場を増大させて出力の向上を目指した。また、当所開発の燃料極材料³⁾⁸⁾で作製した基板は、良好な熱伝導性が期待でき、強度と安定性にも優れるため、単セルでの温度分布を小さく抑えられ、セル破損も起こりにくいといった特長がある。

(3) 燃料極支持型単セルの試作と初期特性

燃料極基板への電解質の成膜では、低コストな成膜技術として陶磁器等で用いられる釉薬（うわぐすり）技術を応用したスラリーコート法を用い、緻密な膜を成膜することに成功した⁷⁾。付図 2-4 では、同一材料で作製した電解質支持型、および燃料極支持型単セルの発電性能を比較して示している。新たに提案した SOFC は従来の SOFC に対して 3 倍以上の出力取り出しが可能であり、長時間安定性についても、従来のセルでは性能低下が生じた高い電流密度（ 1.2 A/cm^2 程度）で通電しても、安定した発電状態を維持した。

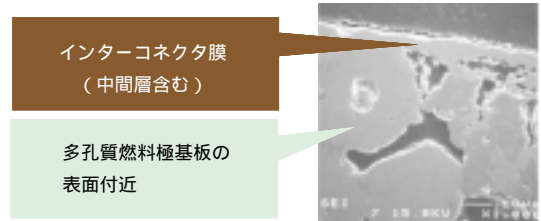


付図2-4 電解質支持型セルと燃料極支持型セル（インターコネクタなし）の発電特性

付-2-3 燃料極支持型 SOFC のスタック化技術

(1) インターコネクタ成膜方法の確立

当研究所が提案する燃料極支持形 SOFC において、多孔質燃料極基板表面上への緻密な I.C. の成膜は、単セル構造の成立性を左右するキーテクノロジーである。しかし、高温作動型 SOFC において I.C. 材料あるいはセパレータ材料として用いられるランタンクロマイトは、緻密に焼結させることが難しく、またスラリーコート法で成膜する際の熱処理工程で燃料極材料との間で進行する化学反応により、緻密膜を得ることが不可能であった。そこで、このような化学反応の進行を抑制し、かつ電気的に低抵抗で熱膨張挙動が整合する材料を中間層として見出し、付図 2-5 に示すような緻密な I.C. 膜を成膜することに成功した⁽⁹⁾。

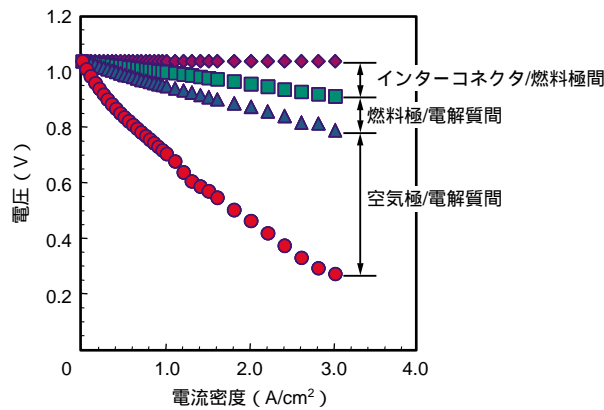


付図2-5 スラリーコート法で成膜した緻密インターコネクタ膜

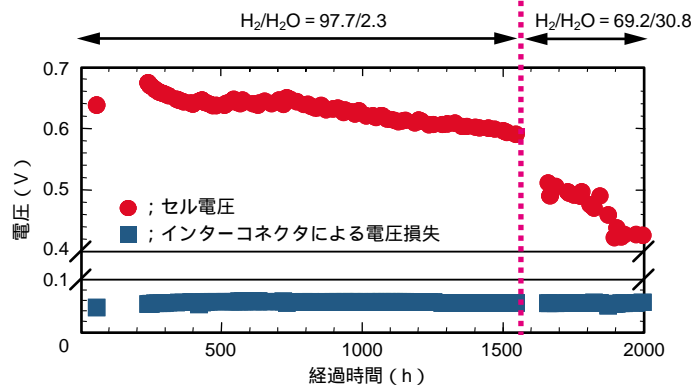
(2) 試作単位セルの発電性能評価⁽⁹⁾

I.C. 膜を成膜した単位セルの発電特性を測定した結果

(付図 2-6) 開回路電圧 (以下、OCV) が理論値 (約 1.07 V) と一致したことから、電解質や I.C. 膜でのガス漏れは生じていないことが確認された。また、電流密度が 2.0 A/cm^2 のときに最高出力密度 0.93 W/cm^2 が得られた。各部件での電圧降下を解析した結果、I.C. 膜/燃料極間および燃料極/電解質間での電圧降下はほぼ同じ値で全体に対する割合も小さいが、空気極/電解質間での電圧降下は、電圧降下全体のほぼ $2/3$ を占めていた。また、電流密度 1.2 A/cm^2 時での長時間安定性を確認した結果、測定開始初期に空気極の酸素不足比量の緩和現象および 700 時間経過以降に空気極の劣化によるセル電圧



(a) 発電初期における電流密度と各種電圧 (電圧ロス分) との関係



(b) 連続試験 (1.23 A/cm^2) におけるセル電圧、インターコネクタでの電圧損失の変化

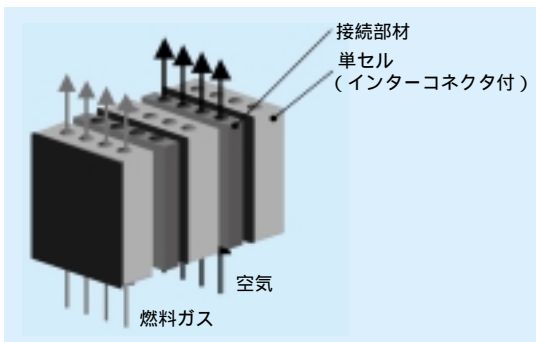
付図2-6 インターコネクタを成膜した燃料極支持型SOFCの発電特性

の低下が観察されたが、インターコネクタの経時劣化は確認されなかった。さらに、インターコネクタに用いられるランタンクロマイトは、一般に、高温で高加湿雰囲気下での分解が懸念されているが、開発したインターコネクタには性能低下がみられなかった。

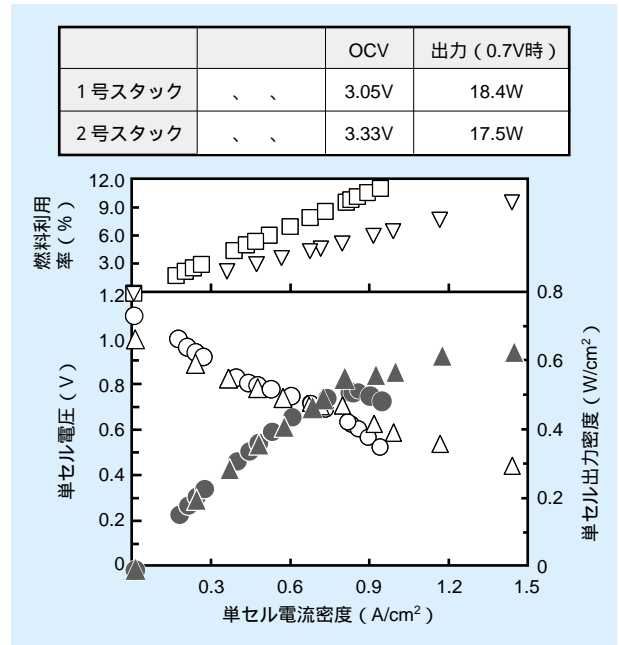
(3) スタックの試作と発電試験

現在、試作しているスタックは、セパレータ板を介して単セルを接続する平板形や金属フェルトを挿入して単セルを接続する円筒形と異なり、付図2-7のように空気極材料で作製した接続部材でI.C.付き単セルを連結して構成した。これは、空気流路の確保、同一部材⁽¹⁰⁾の接合による接触抵抗の低減、多孔性部品の挿入による柔構造化と熱応力等の緩和を目的としており、シールやマニホールド部材には雲母系ガラスセラミックス⁽¹¹⁾を適用して、スタックの全セラミックス化を図った。

これまでに、3セルスタックを試作して、発電試験を実施した⁽¹²⁾。使用部材を付表2-1に、発電特性を付図2-8にそれぞれ示す。1000において、燃料ガスとして加湿水素を、酸化剤ガスとして空気を、それぞれ供給し



付図2-7 3セルスタックの概念構造と試験前スタック（付図2-1に試験前スタックの写真を図示した）



付図2-8 試作した3セルスタックの発電特性（単セル換算値、本研究では2式のスタックを試作して、それぞれの発電性能を評価した。）

た場合、OCVが理論値と一致したことから、電解質・I.C.膜ならびにガスシール部分でのガス漏れはなく、構造の健全性が確保されていることが明らかになった。また、性能評価試験用小型スタックではあるが、約0.5 W/cm²（単セル電圧0.7V時）以上の出力密度が得られ、1,000作動のスタックでの発電性能としては、近年公表されている他機関のものよりも高い出力密度が得られた。

以上、当所独自のSOFC技術によって、高性能な小型スタックを再現性良く作製でき、1000作動・全セラミックス製SOFCの実現に対する目途が得られた。今後は、スタック構造の改良、ならびに単位セルの面積化を進めて、実用レベルでのスタック技術を確立して行く。

付表2-1 3セルスタックに使用した部材

部材名		構成する材料	備考
単セル	燃料極（多孔質基板）	Ni-YSZサーメット	当所開発
	電解質（緻密膜）	8YSZ	市販品
	空気極（多孔質膜）	ランタンマンガンナイト	当所開発
	インターコネクタ（緻密膜）	ランタンクロマイト+中間層	当所開発
接続部材（多孔質基板）		ランタンマンガンナイト	当所開発
終端部材（多孔質基板）		Ni-YSZサーメット+インターコネクタ膜	当所開発
シール・マニホールド部材		雲母系ガラス・セラミック	市販品

お わ り に

参事 横須賀研究所副所長 阿部 俊夫



ジェームズ ワットが蒸気機関を発明したのが1782年であり、1901年には我国最初の蒸気自動車の販売広告が新聞に掲載されました。しかし、1876年にオットーにより発明されたガソリン機関は急速の進歩を遂げ、1913年、ヘンリー フォードがガソリン車の大量生産に成功してから、蒸気自動車や当時の電気自動車はまたたく間に姿を消しています。

蒸気機関は自動車分野ではガソリン機関に駆逐されましたが、汽車、船舶、および発電用蒸気タービン等の大型熱機関として発展し、また、自動車におけるガソリン

機関は20世紀に社会趨勢や人々の要求に支えられ、性能・耐久性・量産技術・低コスト化の観点から飛躍的に発展しました。

一方、燃料電池の発電原理が最初に提唱されたのは、1839年、イギリスのグローブ卿によってであり、オットーのガソリン機関の発明以前であります。燃料電池の実現性を議論できるようになったのは、20世紀後半であります。燃料電池を実現するためには、電極反応の基礎理論や多孔質材料技術等の発展を待つ必要があり、20世紀初頭に既に民生用として実用化が図られた蒸気機関やガソリン機関等の内燃機関に比較し、燃料電池の開発は大きく遅れました。このため、燃料電池が既に技術的完成域に達している内燃機関に、性能面および経済面で対抗し、民生用として発展・普及することは容易な事ではありません。

燃料電池は最初極めて特殊な用途として開発され、宇宙船電源としてのアルカリ形燃料電池が使用されました。一方、民生用としては、最初にりん酸形燃料電池が実用化され、普及しましたが、その発電効率が電力系統の需要端効率より低いため、用途が限定され、期待ほど大きく普及していません。最近では、将来の水素社会をイメージした自動車用の固体高分子形燃料電池（PEFC）がブームとなり、燃料電池技術に対する社会的認知を得る観点から大きな前進であると言えます。

高効率な発電システムとして最も期待されていますのが、高温型燃料電池である熔融炭酸塩形燃

料電池（MCFC）と固体酸化物形燃料電池（SOFC）であり、本書では主にMCFC技術を紹介しました。SOFCは作動温度が最も高く、その実用化が難しい技術と考えられていますが、性能および耐久性の観点から優れた潜在性を有しますので、将来極めて魅力ある発電技術に発展する可能性があります。

MCFC発電は分散配置型中小電源あるいは集中型火力発電技術として、当研究所が力を入れている研究課題です。研究開始後、約20年が経過しましたが、この間、国家プロジェクトと連携を取りつつ、電力各社や電池製造メーカーの協力を得て、多くの単セル試験やスタック発電試験に基づく電池性能の評価・予測技術、および電池材料・構造最適化技術等の研究を推進してまいりました。最近、MCFC発電は、多くの関係各位のご努力により、ようやく実用化の見通しが明らかになり始めていますが、MCFC技術が拠点となり、高温型燃料電池が性能・経済面で従前の内燃機関に対抗し、社会に広く普及できるかは、むしろこれからが重要な時期であり、信頼性の向上や徹底したコスト低減に対して、一層格段の努力が必要です。

「省エネ・省資源社会の構築」は我国の必須の課題であり、その構築に向けて、燃料電池技術が重要な一翼を担うためには、これまで以上に関係各位が努力し協力しあうことが大切です。当研究所は高温型燃料電池技術を是非とも実現させるため、今後とも一層努力する所存です。関係各位のご指導、ご協力を心から御願い致します。

最後に、本書を纏めるにあたり、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）および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）の受託研究成果、中部電力（株）、石川播磨重工業（株）（IHI）、（株）日立製作所、三菱電機（株）との共同研究成果を使用させて頂きました。また、MCFC研究組合殿、中部電力殿、およびIHI殿には、本書の分担執筆をお願いしました。本書が高温型燃料電池技術の啓発・普及に少しでも役立つことを期待しつつ、付記して謝意を表する次第です。

引用文献・資料等

第1章

- (1) W. R. Grove "On a Gaseous Voltaic Battery" *Philosophical Mag.*, Vol. 121, pp417-420 (1842)
- (2) 麦倉、浅野「各種燃料電池の性能と要因分析」電気学会論文誌B、Vol. 120-B、pp885-892 (2000)

第2章

2-1

- (1) Mamantov, Braunstein editor "Advances in Molten Salts Chemistry Vol.4" Plenum press (1981)
- (2) Fuel Cell Seminar Abstracts など
- (3) 「燃料電池発電システムの分散配置技術」電気学会技術報告 第711号、燃料電池発電分散配置技術調査専門委員会 (1999)
- (4) 「前期開発成果とその1000kWパイロットプラントへの適用」第25回MCFCセミナー、MCFC研究組合 (1995)

2-2

- (1) 「熔融炭酸塩型燃料電池発電システム技術開発成果」MCFC研究組合 (2000)

2-3

- (1) 平成12年度「高温形燃料電池発電技術」研究開発成果報告会 講演要旨集、NEDO (2001)

2-4

- (1) (2-3(1)と同じ)
- (2) 平成13年度「高温形燃料電池発電技術」研究開発成果報告会 講演要旨集、NEDO (2002)
- (3) 同 平成14年度 (2003)

2-5

- (1) 渡辺、麦倉、阿部「電気事業におけるMCFC導入の可能性」W98514、電中研依頼研究報告 (1999)

第3章

3-1

- (1) T.G.Benjamin, E.H.Camara, and L.G.Marianowski, "Handbook of Fuel Cell Performance" Institute of Gas Technology, U.S. DOE Report, EC-77-C-03-1545 (1980)
- (2) C.Y.Yuh and J.R.Selman "The Polarization of Molten Carbonate Fuel Cell Electrodes I. Analysis of Steady-State Polarization Data" *J.Electrochem. Soc.*, Vol.138, pp3642-3648 (1991)
- (3) 麦倉、阿部、渡辺、伊崎「熔融炭酸塩型燃料電池の性能評価II. 性能相関式の開発」電気化学および工業物理化学、60巻、2号、pp124-130 (1992)
- (4) 内田、仁科「熔融アルカリ炭酸塩中の水素および酸素ガス電極反応」日本化学会誌、Vol.8、pp1297-1307 (1988)
- (5) 仁科、内田「熔融炭酸塩形燃料電池のガス電極反応」表面、Vol.27、pp843-856 (1989)
- (6) 森田、麦倉、伊崎、渡辺、阿部「熔融炭酸塩型燃料電池

池の性能評価IV. カソード反応論に基づく性能表示式の高精度化」電気化学および工業物理化学、63巻、11号、pp1053-1060 (1995)

- (7) 森田、麦倉、伊崎、渡辺、阿部「熔融炭酸塩型燃料電池の性能評価V. アノード反応抵抗表示式の導出」電気化学および工業物理化学、65巻、9号、pp740-746、(1997)
 - (8) 森田、麦倉、伊崎、渡辺「小型単セルを用いた熔融炭酸塩型燃料電池の寿命特性式」電気学会論文誌B、Vol.120-B、pp1112-1118 (2000)
 - (9) 吉葉、阿部、曹、渡辺「MCFCスタック内部解析手法の研究 - 並行流型スタックの解析 - 」日本機械学会論文誌B、63巻、606号、pp675-682 (1997)
 - (10) F.Yoshiba, N.Ono, Y.Izaki, T.Watanabe, T.Abe "Analytic Investigation of the Internal Condition of an MCFC stack" *Journal of Power Sources* 71, pp328-336, 1998-3
 - (11) F. Yoshiba, T. Abe, T. Watanabe "Numerical analysis of molten carbonate fuel cell stack performance : diagnosis of internal conditions using cell voltage profiles" *Journal of Power Sources*, Vol.87 pp21-27 (2000)
 - (12) F.Yoshiba, H.Morita, M.Yoshikawa, Y.Mugikura, Y.Izaki, T.Watanabe, M.Komoda, Y.Masuda, N.Zaima, "Improvement of electricity generating performance and life expectancy of MCFC stack by applying Li/Na carbonate electrolyte Test results and analysis 0.44m²/10kW- and 1.03m²/10kW-class stack" *Journal of Power Sources*, Vol 128, 2, pp152-164 (2004)
- #### 3-2
- (1) 吉葉、吉川、森田、阿部、山口、岩本「Li/Na系電解質MCFCカソードガス分圧依存性」第62回電気化学協会大会、307、p85 (1995)
 - (2) 吉川、吉葉、森田、阿部、山口、岩本「加圧雰囲気におけるLi/Na系電解質を用いたMCFCの特性評価」第2回燃料電池シンポジウム、FCDIC、B4-5、pp289-293 (1995)
 - (3) 吉川、森田、麦倉「Li/Na系電解質を用いたMCFCの温度特性について」第37回電池討論会、2B06、pp277-278 (1996)
 - (4) 山賀、黒江、岩本、山口、加茂、吉川、吉葉、渡辺「Li/Na系電解質板を用いた小型単セルの特性評価(2)」第37回電池討論会、2B18、pp301-302 (1996)
 - (5) M. Yoshikawa, Y. Mugikura, T. Watanabe, T. Ohta and A. Suzuki "The Behavior of MCFCs Using Li/K and Li/Na Carbonates as the Electrolyte at High Pressure" *J. Electrochem. Soc.*, 146, No.8, pp2834-2840 (1999)
 - (6) H. Morita, M. Komoda, Y. Mugikura, Y. Izaki, T. Watanabe, Y. Masuda and T. Matsuyama "Performance analysis of molten carbonate fuel cell using a Li/Na electrolyte" *Journal of Power Sources*, Vol.112 pp509-518 (2002)

- (7) M. Yoshikawa, Y. Mugikura, T. Watanabe, T. Kahara and T. Mizukami, "NiO Cathode Dissolution and Ni Precipitation in Li/Na Molten Carbonate Fuel Cells - Distribution of Ni Particles in the Matrix" J. Electrochem. Soc., Vol.148, No.11, pp1230-1238 (2001)
- (8) 浅野、河瀬、吉葉、麦倉、伊崎、渡辺「MCFCの寿命に及ぼすニッケル短絡抑制効果」第44回電池討論会、3E03、pp682-683 (2003)
- ### 3-3
- (1) Y. Izaki, T. Watanabe, Y. Mugikura, T. Hamamatsu "Experimental Results of a 10kW Class Molten Carbonate Fuel Cell" IECEC, No.899306, p1523 (1989)
- (2) 渡辺、伊崎、麦倉、堀内、阿部、浜松、石川「熔融炭酸塩型燃料電池10kW級発電システムの開発」火力原子力発電、41巻、8号、p1027-1034 (1989)
- (3) 渡辺、伊崎、麦倉、阿部、浜松、石川「熔融炭酸塩型燃料電池発電技術の開発 - 10kW級電池システムの開発 - 」日本機械学会論文集 (B編) 57巻、535号、No.90-0882B、pp831-836 (1991)
- (4) 伊崎、渡辺、阿部、遠井、松山、保坂「100kW級熔融炭酸塩型燃料電池スタックの発電特性」日本機械学会論文集B、61巻、592号、pp4477-4482 (1995)
- (5) 伊崎、麦倉、渡辺、阿部、幸田、佐藤、保坂、松山、清水、近藤「平行流内部マニホールドMCFCスタックの開発と運転試験・評価技術」電中研総合報告W11 (1998)
- (6) 伊崎、渡辺「熔融炭酸塩型燃料電池発電システム運転制御法の基礎検討 - 加圧試験装置の開発 - 」電中研報告T87067 (1988)
- (7) C.Yuh, R.Johnsen, M.Farooque and H.Maru "Carbonate Fuel Cell Endurance: Hardware Corrosion and Electrolyte Management Status" Proceeding of the second international symposium on Carbonate Fuel Cell Technology, Electrochem. Soc., vol.93-3, pp158-170 (1993)
- ## 第4章
- ### 4-1
- (1) T.Kivisaari, D.Jansen, A.deGroot, C.Sylwan "Feasibility study of a coal-fired high-temperature fuel cell system" Fuel Cell Seminar Abstracts, pp570-573, (2000)
- (2) R.M.Reinstrom "CARBONATE FUEL CELL POWER PLANT SYSTEMS" IEEE, Vol.PAS-100, No.12, pp4752-4759 (1981)
- (3) T.L.Bonds, M.H.Dawes, A.W.Shenacke "MOLTEN CARBONATE FUEL CELL BASED COAL FIRED POWER PLANTS FOR ELECTRIC POWER GENERATION" American Chemical Society, 8412-0513-2 /79 /0779 -116 (1979)
- (4) 幸田、森塚、渡辺、阿部「石炭ガス化MCFC複合発電システムの性能解析 - 最適システム構成の検討 - 」電中研報告W92045 (1993)
- (5) 長崎、鈴木、幸田、上田「石炭ガス化MCFC発電システムの概念設計研究」日本機械学会第5回動力エネルギー技術シンポジウムA27、pp168-173 (1996)
- (6) 長崎、木田、辻口「燃料電池用石炭ガス化製造技術 (EAGLE) パイロットプラントの計画」日本機械学会第6回動力エネルギー技術シンポジウムA107、pp39-44 (1998)
- (7) 河瀬、麦倉、伊崎、渡辺、福田「MCFC特性に対するH₂Sの影響I. 出力電圧とセル内ガス組成の変化」電気化学および工業物理化学、66巻、4号、pp449-455 (1998)
- (8) 吉葉、伊崎、渡辺「石炭ガス化MCFC発電システムの検討 (実電池発電限界を反映したシステム検討とその性能解析)」日本機械学会論文集 (B編) 69巻、677号、pp148-154 (2003)
- (9) 吉葉、麦倉、伊崎、渡辺、奥田、荒井、渡辺、久野、松山「多様な燃料を用いた10kW級MCFCスタックの発電特性」第10回燃料電池シンポジウム、FCDIC、pp186-191 (2003)
- (10) F. Yoshida, Y. Mugikura, Y. Izaki, T. Watanabe, T. Okuda, Y. Arai, M. Watanabe, Y. Kuno, and T. Matsuyama "Electricity Generating 10kW-Class MCFC Stack Performance Fueled By Various Gas Compositions," Proceedings of the International Conference on Power Engineering-03 (ICOPE-03), F204, pp2/445-2/450 (2003)
- ### 4-2
- (1) (4-1 (7)と同じ)
- (2) 河瀬、麦倉、伊崎、渡辺「MCFC特性に対するH₂Sの影響II. 電池内での硫黄成分の挙動 - 」Electrochemistry、67巻、4号、pp364-371 (1999)
- (3) 河瀬、麦倉、伊崎「バイオマス燃料電池等におけるMCFCの不純物耐久性」第10回燃料電池シンポジウム、FCDIC、pp182-185 (2003)
- (4) M. Kawase, Y. Mugikura, T. Watanabe, Y. Hiraga, T. Ujihara "Effects of NH₃ and NO_x on the Performance of MCFCs" Journal of Power Sources Vol.104、pp265-271 (2002)
- ### 4-3
- (1) 「石炭ガス化複合発電の実現に向けて - 実証機開発の支援と将来への研究展開 - 」電中研レビュー、No.44、(2001)
- (2) 布川、白井、野田、秋保、小林「高性能乾式脱硫技術の開発 - 亜鉛フェライト系脱硫剤の長期性能評価 - 」電中研報告W01030 (2002)
- (3) 布川、白井「高性能乾式脱硫技術の開発 - 八二カム状亜鉛フェライト系脱硫剤の脱硫・再生特性の把握 - 」電中研報告W02010 (2003)
- (4) 白井「石炭ガス化ガスにおける固定床乾式脱硫技術の開発」粉体工学会誌 Vol.40、No.8、pp582-590 (2003)
- (5) H.Shirai, M.Kobayashi, M. Nunokawa "Thermal Efficiencies of IG-MCFC Systems with Different Types of Coal Gasifier and Coal Gas Clean Up

System” The 4th International World Energy System Conference, B372, pp427-432 (2002)

4-4

- (1) (4-1 (1) と同じ)
- (2) (4-1 (2) と同じ)
- (3) (4-1 (3) と同じ)
- (4) (4-1 (4) と同じ)
- (5) (4-1 (5) と同じ)
- (6) (4-1 (6) と同じ)
- (7) K.Itou, T. Shimizu and M. Iio, “Development of large scale MCFC power plant” 3rd IFCC proceedings, C4-4 pp313-316 (1999)
- (8) (2-3 (1) と同じ)
- (9) (2-4 (2) と同じ)
- (10) 「燃料電池発電技術開発 - 溶融炭酸塩型燃料電池発電技術開発 (実用システムの経済性評価と概念設計) - 」平成11年度 NEDO 受託成果報告書 (2000)
- (11) Y. Mugikura, K. Asano “Performance of Several Types of Fuel Cells and Factor Analysis of Performance” Electrical Engineering in Japan, Vol.138, No.1, pp24-33 (2002)
- (12) A.F. Massardo and B. Bosio “Assessment of Molten Carbonate Fuel Cell Models and Integration With Gas and Steam Cycles” Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, ASME, Vol.124 pp103-109 (2002)
- (13) A.F. Massardo and F. Lubelli “Internal Reforming Solid Oxide Fuel Cell - Gas Turbine Combined Cycles (IRSOFC-GT): Part A- Cell Model and Cycle Thermodynamic Analysis” Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, ASME, Vol.122, pp27-35, (2002)
- (14) H. Uechi, S. Kimijima, N. Kasagi “Cycle Analysis of Micro Gas Turbine - Solid Oxide Fuel Cell Hybrid System,” JSME,B, Vol.68, No.666, February, pp336-345 (2002)
- (15) J. Palsson, A. Selimovic and L. Sjunnesson “COMBINED SOLID OXIDE FUEL CELL AND GAS TURBINE SYSTEMS FOR EFFICIENT POWER AND HEAT GENERATION” the 3rd IFCC proceedings, D3-4, pp391-394 (1999)
- (16) S. Campanari “Full Load and Part-Load Performance Prediction for Integrated SOFC and Microturbine Systems” Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, ASME, Vol.122, pp239-246 (2000)
- (17) P. Costamagna, L. Magistri, A.F. Massardo “Design and part-load performance of a hybrid system based on a solid oxide fuel cell reactor and a micro gas turbine” Journal of Power Sources, Vol.96 pp352-368 (2001)
- (18) S. Kimijima, N. Kasagi “PERFORMANCE EVALUATION OF GAS TURBINE - FUEL CELL HYBRID MICRO GENERATION SYSTEM” proceedings of ASME TURBO EXPO 2002 GT-2002-30111 (2002)

(19) H. Yasue, K. Takatani “DEVELOPMENT OF 1000kW MCFC POWER PLANT” the 3rd IFCC proceedings, C2-1, pp251-255 (1999)

(20) 吉葉、伊崎、渡辺「広負荷域対応型 MCFC 発電システムの提案」電中研報告 W01031 (2002)

第5章

5-3

- (1) 「燃料電池発電技術開発 - 溶融炭酸塩型燃料電池発電システムの研究開発 (トータルシステムの研究) - 」平成3年度 NEDO 受託成果報告書 (1992)
 - (2) 同 平成4年度 (1993)
 - (3) 同 平成5年度 (1994)
 - (4) 幸田、阿部「外部改質型溶融炭酸塩型燃料電池発電の概念設計と経済性」火力原子力発電 Vol.45, No.7 pp61-72 (1994)
 - (5) 「燃料電池発電技術開発 - 溶融炭酸塩型燃料電池発電システムの研究開発 (トータルシステムの研究) - 」平成8年度 NEDO 受託成果報告書 (1996)
 - (6) 同 平成9年度 (1997)
 - (7) 同 平成10年度 (1998)
 - (8) 同 平成11年度 (1999)
 - (9) (3-1 (1) と同じ)
 - (10) 森田、麦倉、伊崎、渡辺、阿部「MCFC 性能表示式の高精度化 - その1カソード反応論に基づく性能表示式の導出 - 」電中研究報告 W94015 (1995)
 - (11) 森田、麦倉、伊崎、渡辺、阿部「溶融炭酸塩型燃料電池の性能評価Ⅴ. アノード反応抵抗表示式の導出」電気化学および工業物理化学、65巻、9号、pp740-746 (1997)
 - (12) (2-5 (1) と同じ)
 - (13) 「燃料電池発電技術開発 - 溶融炭酸塩型燃料電池発電技術開発 (実用システムの経済性評価と概念設計) - 」平成13年度 NEDO 受託成果報告書 (2002)
 - (14) 本藤ほか「ライフサイクルCO₂排出量による発電技術の評価 - 最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響 - 」電中研報告 Y99009 (2000)
 - (15) 内山洋司「私たちのエネルギー 現在と未来」培風館 (1996)
 - (16) 「燃料電池発電技術開発 - 溶融炭酸塩型燃料電池発電技術開発 (実用システムの経済性評価と概念設計) - 」平成14年度 NEDO 受託成果報告書 (2003)
 - (17) 佐藤、市川「都市部のコージェネレーションシステムから排出される窒素酸化物の大気環境濃度予測」電中研報告 T02007 (2003)
- 5-4
- (1) 「燃料電池発電技術開発 - 溶融炭酸塩型燃料電池発電技術開発 (実用システムの経済性評価と概念設計) - 」平成12年度 NEDO 受託成果報告書 (2001)
 - (2) 同 13年度 (5-3 (13) と同じ)
 - (3) 同 14年度 (5-3 (16) と同じ)
 - (4) 例えば日本コージェネレーションセンター「コージェネレーションシステム導入実績表」(各年度版) など
 - (5) 今村、浅野「自家用発電設備の設置動向調査」電中研報告 Y97018 (1998)

付録

付-1

- (1) 森、阿部、渡辺「固体電解質型燃料電池複合発電システムの研究(第2報、構成が異なる発電システムの性能解析)」日本機械学会論文集、66巻、652号、B編、pp222-227(2000)
- (2) 森、渡辺、阿部「熱を併給するSOFC発電システムの性能検討」電中研報告W97022(1998)
- (3) 斉川、三巻、森塚、岩坪、長谷川(浩)、浜松、「コージェネレーション技術の現状と研究開発課題」電中研研究調査資料W89906(1989)
- (4) 森、「固体電解質型燃料電池の研究開発システム研究(システム研究)」平成9年度NEDO受託研究成果報告(1998)

付-2

- (1) 伊藤、森、森、阿部「固体電解質型燃料電池の開発 - 各種SOFCの製造コスト試算 - 」電中研報告W92028(1993)
- (2) 伊藤、山本、森、阿部「SOFC用燃料極の高性能化に関する研究 - カレント・インターラプション法によるSOFCの劣化現象の解明 - 」電中研報告W93019(1994)
- (3) 伊藤、山本、森、阿部「SOFC燃料極の高性能化に関する研究 - 電極ミクロ構造の改良による長寿命化 - 」電中研報告W94016(1995)
- (4) 森、伊藤、森、阿部「固体電解質燃料電池の開発 - 110cm²級単セルの試作および発電試験結果 - 」電中研報告W92013(1993)
- (5) 森、渡辺「固体電解質型燃料電池発電技術の開発 平板型単セルとセラミックセパレータを用いた電池の設計とその性能評価」電中研報告W99002(1999)
- (6) 伊藤、山本「固体酸化物形燃料電池の性能評価平板型セルによる実発電状態下での電池材料の適用性」電中研報告W00043(2001)
- (7) 伊藤「支持膜型SOFCの開発(その1) - 単セルの試作と発電特性 - 」電中研報告W99001(1999)
- (8) 伊藤「固体電解質燃料電池材料の適正化研究 - YSZ支持型燃料極材料の混合比の適正化(1) - 」電中研報告

W99019(2000)

- (9) 安本、山本、伊藤「電極支持形SOFCスタックの研究 - インターコネクタ成膜法の開発と単位セルの発電特性 - 」電中研報告W02008(2003)
- (10) 山本、森、伊藤、山本「SOFC構成材料の研究; 電池構成材料間の接合の研究(1) - 燃料極/セパレータ間の接合材料の合成と基礎評価 - 」電中研報告W97006(1998)
- (11) 山本、伊藤、森、森、阿部「雲母系ガラスセラミックスのSOFC用ガスシール材としての適応性」電中研報告W94024(1995)
- (12) 伊藤、安本、山本「燃料極支持形SOFCスタックの研究 - 高出力密度、1,000 作動形全セラミックス製3セルスタックの作製 - 」電中研報告(2004)

電中研「燃料電池発電技術研究」のあゆみ

- (1) 高橋武彦「燃料電池(第2版)」共立出版(1992)
- (2) 竹原善一朗監修「燃料電池技術とその応用」テクノシステムズ(2000)

コラム2

- (1) 麦倉、森田「MCFC性能表示式の高精度化 - 電解質物性値に基づくカソード性能推算手法の開発 - 」電中研報告W02023(2003)

コラム4

- (1) 吉川、麦倉、渡辺、太田、鈴木「高圧下におけるLi/K系セルおよびLi/Na系セルの特性解析」電中研報告W97009(1998)
- (2) 曾根、岸田、小林、渡辺「燃料電池発電プラントにおける炭素析出の抑制 - (その1) ステンレス上における炭素析出反応機構の実験的検討 - 」電中研報告W99003(2000)
- (3) 白井、渡辺、曾根「燃料ガスからの炭素析出現象の解明(その1) ステンレス上での初期炭素析出特性」電中研報告W00010(2001)

コラム5

- (1) (5-3(16)と同じ)

略語一覧

ACC	Advanced Combined Cycle	IGT	Institute of Gas Technology (米国ガス技術研究所、GRIと統合して現在GTI)
AGRE	European Direct Fuel Cell Consortium	IHI	Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd (石川島播磨重工業株)
APPA	American Public Power Association (米国公共電力協会)	KEPRI	Korea Electric Power Research Institute (韓国電力公社電力研究院)
BCN	Brandstofel Nederland (Dutch Fuel Cell Corporation)	KIST	Korea Institute of Science and Technology (韓国科学技術研究院)
BOP	Balance of Plant (補機類)	LCA	Life Cycle Assessment (ライフ・サイクル・アセスメント)
CEC	Commission of the European Communities (欧州共同委員会)	MCP	M-C Power Co.
CHP	Combined Heat and Power (熱電併給)	MHI	Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (三菱重工業株)
COP3	The 3rd Session of the Conference Of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (第3回気候変動枠組み条約締結国会議)	MOLB	MONo-block Layer Built (一体積層)
DFC	Direct FuelCell	MOLCARE	Molten Carbonate Europe
DOE	Department of Energy (米国エネルギー省)	MTU	Motoren und Turbinen Union Friedrichshafen
ECN	Energy research Center of the Netherlands	NEDO	New Energy Development Organization (新エネルギー・産業技術総合開発機構)
ENEA	Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente (Italian National Agency for New Technologies, Energy and the Environment)	NETL	National Energy Technology Laboratory (米国立エネルギー技術研究所)
EPRI	Electric Power Research Institute (米国電力研究所)	NOMO	Notice of Market Opportunity (燃料電池市場導入に関する公告)
ERC	Energy Research Co. (現FCE社)	PAC	Process And Control
ERDA	Energy Research and Development Administration (米国エネルギー研究開発局)	PDI	Product Development and Improvement
FCE	FuelCell Energy Co. (旧ERC)	PNGV	Partnership for a New Generation of Vehicles (新世代自動車に関する協力計画)
GTI	Gas Technology Institute (GRIとIGTの合併により設立された研究所)	PURPA	Public Utility Regulatory Policies Act (公益事業規制政策法)(米国)
GRI	Gas Research Institute (米国ガス研究所、IGTと統合して現在GTI)	RPS	Renewable Portfolio Standards
GTCC	Gas Turbine Combined Cycle (ガスタービン複合発電)	SECA	Solid state Energy Conversion Alliance
I.C.	Inter Connector	SPring-8	Super Photon ring-8 GeV
IFC	International Fuel Cells Co.	SWPC	Siemens Westinghouse Power Co. (旧WH社)
IG-MCFC	Integrated coal Gasification MCFC combined cycle (石炭ガス化複合MCFC発電)	TARGET	Team to Advance Research for Gas Energy Transformation
		UT	United Technologies Co.
		WH(WE)	Westinghouse Electric Co. (現SWP社)
		YSZ	Yttria Stabilized Zirconia (イットリア安定化ジルコニア)
		ZEV	Zero Emission Vehicle (無排出ガス車)

既刊「電中研レビュー」ご案内

- NO. 38 「大気拡散予測手法」2000. 3
NO. 39 「新時代に向けた電力システム技術」2000. 6
NO. 40 「原子燃料サイクルバックエンドの確立に向けて」2000. 11
NO. 41 「需要家と電気事業のエネルギーをトータルで考える
需要家の特性解明と省エネ技術」2000. 11
NO. 42 「原子力発電所の人工島式海上立地」2001. 1
NO. 43 「酸性雨の総合評価」2001. 2
NO. 44 「石炭ガス化複合発電の実現に向けて
実証機開発の支援と将来への研究展開」2001. 10
NO. 45 「地球温暖化の解明と抑制」2001. 11
NO. 46 「微粉炭火力発電技術の高度化
環境性の向上と発電コストの低減」2002. 11
NO. 47 「商用周波磁界の生物影響研究」2002. 11
NO. 48 「送電設備の風荷重・風応答評価技術」2003. 2
NO. 49 「未利用地熱資源の開発に向けて
高温岩体発電への取り組み」2003. 3
NO. 50 「電気事業とIT 情報通信技術で変える・変わる」2003. 10

編集後記

電中研レビュー第51号「燃料電池発電技術（MCFC実用化への挑戦）」をお届けします。

燃料電池は、分散電源のホープとして古くから期待され、国のプロジェクトを初めとして当研究所などの多くの機関が、その実用化に挑戦してきました。中でも高温型と呼ばれる熔融炭酸塩形燃料電池（MCFC）や固体酸化物形燃料電池（SOFC）は、化石燃料の高効率利用にも貢献できることから、大型の火力発電代替用や分散電源として大いに期待されています。

しかしながら、従来の回転機器による発電とは異なり、電気化学反応によるために、電極の劣化をはじめとする、今まで経験のない多くの課題に突き当たり、いくつかの挫折を乗り越えて、研究開発を進めてきた経緯があります。

このレビューでは、MCFCを中心に、これらの困難を克服して、実用に向かう過程を、成功事例だけでなく、いかに克服してきたかについても紙幅を割きました。

MCFC実用化に向けた技術克服の歴史は、今、自動車用や家庭用として話題となっている固体高分子形燃料電池（PEFC）や、セラミックスを使ったSOFCの開発にも、大いに役立つものと考えます。

この電中研レビューが、燃料電池開発に携わる方々への参考となり、燃料電池に関心を持たれる方々には、技術開発の素晴らしさのご理解に役立てればと存じます。

最後になりましたが、巻頭言をご執筆いただいた中部電力株式会社常務取締役清水眞男様に、心より感謝を申し上げますとともに、燃料電池が導入される万国博覧会「愛」地球博のご成功をお祈り申し上げます。



電中研レビュー NO.51

平成16年3月25日

編集兼発行・財団法人 電力中央研究所 広報グループ
100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 [大手町ビル7階]
(03) 3201-6601 (代表)
E-mail : www-pc-ml@criepi.denken.or.jp
<http://criepi.denken.or.jp/>
印刷・株式会社 ユウワビジネス

本部 / 経済社会研究所	100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1	(03) 3201-6601	我孫子研究所	270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646	(04) 7182-1181
狛江研究所 / 情報研究所 / 原子力情報センター			横須賀研究所	240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1	(0468) 36-2121
ヒューマンファクター研究センター / 低線量放射線研究センター / 事務センター			赤城試験センター	371-0241 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567	(027) 283-2721
	201-8511 東京都狛江市岩戸北2-11-1	(03) 3480-2111	塩原実験場	329-2801 栃木県那須郡塩原町関谷1033	(0287) 35-2048
