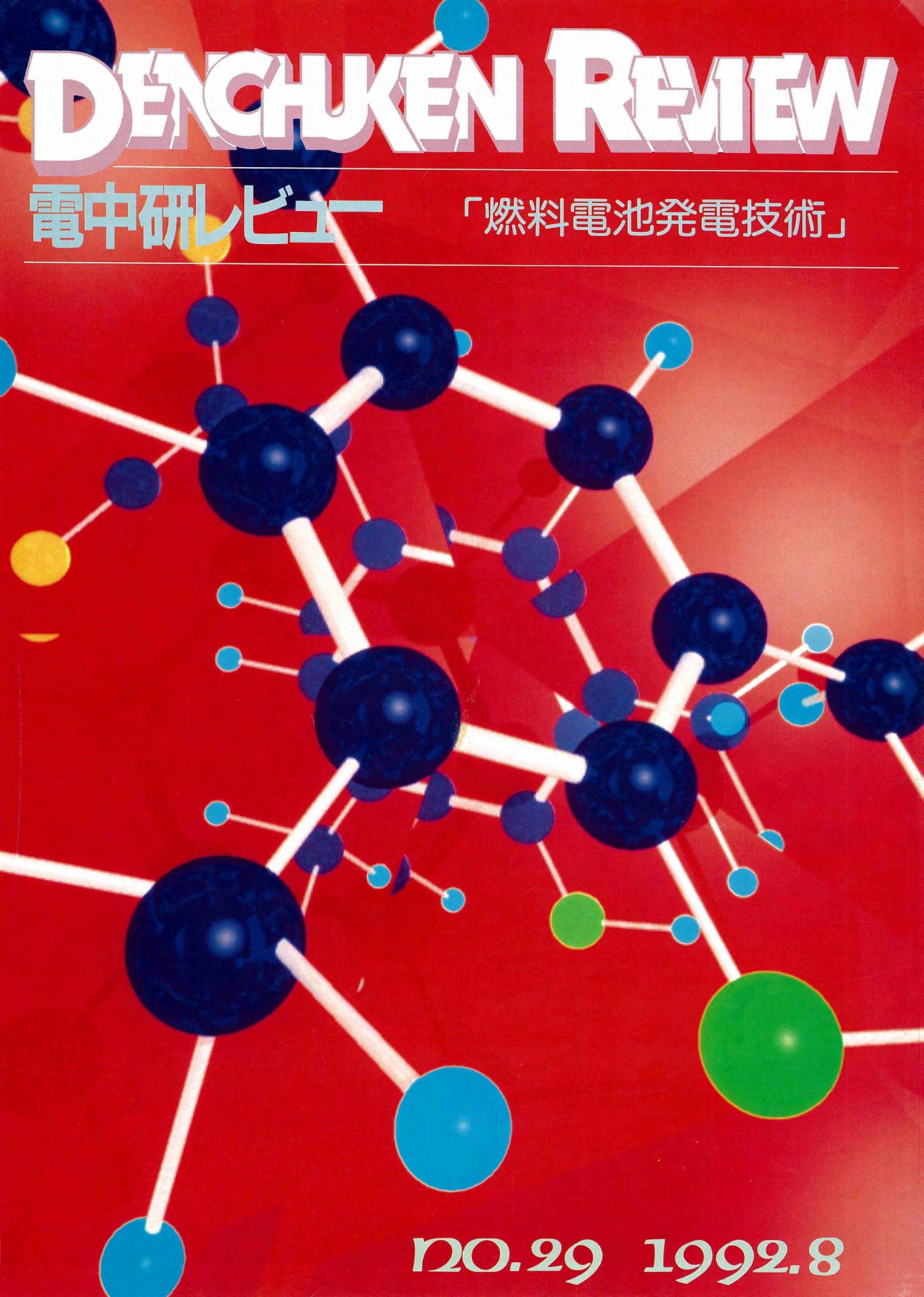


# DENCHUKEN REVIEW

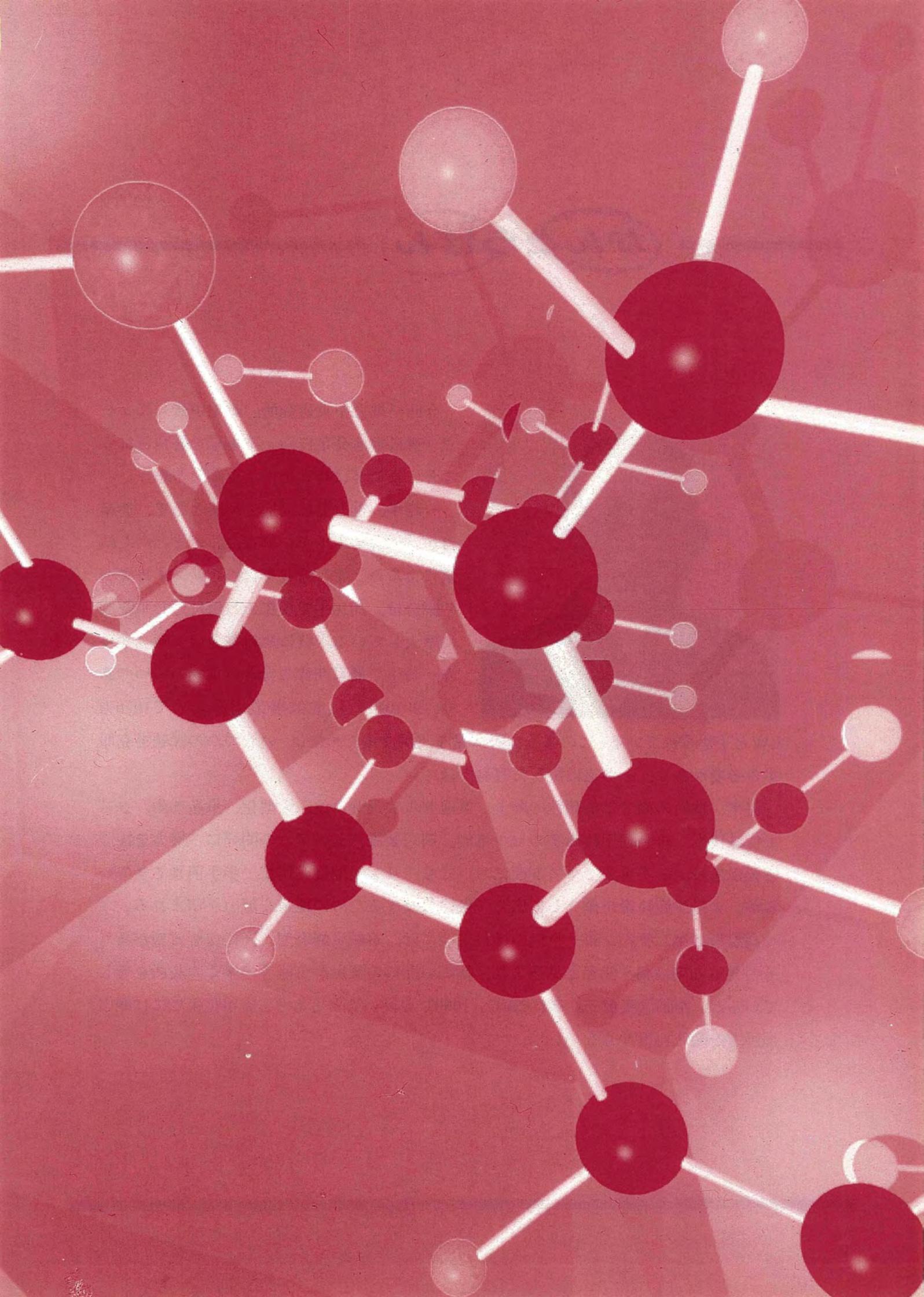
電中研レビュー

「燃料電池発電技術」



NO.29 1992.8

巻頭言	新エネルギー・産業技術総合開発機構 理事長 林 政義	2
はじめに	理事 上之菌 博	5
第1章	21世紀前半の電力供給と燃料電池導入ビジョン	7
1-1	●超長期電力供給の展望	9
1-2	●火力発電による地球環境問題と新型火力発電技術への期待	12
第2章	燃料電池による発電とは	17
2-1	●燃料電池の発電原理	19
2-2	●燃料電池の作動温度と燃料	21
2-3	●燃料電池の性能	23
2-4	●燃料電池発電プラントの効率	25
2-5	●火力発電との効率の比較	27
第3章	研究開発はどこまで進んでいるか	29
3-1	●ムーンライト計画における開発の概要	31
3-2	●実用段階に入ったリン酸型燃料電池	33
3-3	●開発が進む熔融炭酸塩型燃料電池	35
3-4	●基礎研究段階の固体電解質型燃料電池	38
3-5	●その他の燃料電池	40
第4章	大型化を目指す熔融炭酸塩型燃料電池	41
4-1	●電池の性能	43
4-2	●発電プラントとしての熔融炭酸塩型燃料電池	55
4-3	●電力系統における熔融炭酸塩型燃料電池の評価	62
4-4	●経済性の評価	64
4-5	●1MW級パイロットプラントの実現に向けて	67
4-6	●実用化に向けての開発シナリオと開発課題	71
第5章	多様な用途が期待できる固体電解質型燃料電池	73
5-1	●固体電解質型燃料電池発電システムの概要	75
5-2	●固体電解質型燃料電池発電の構造と材料開発	78
5-3	●今後の課題	88
おわりに	理事 横須賀研究所長 安芸 周一	89
関連する主な研究報告書等		90





今回「電力中央研究所」が電中研レビューで「燃料電池発電技術」特集号を発刊されること、まことに時宜を得た企画だと思う。

一昨年、電力需給逼迫を契機として、通産省が「総合エネルギー調査会」でまとめた結果によると、燃料電池を含めた新エネルギーの割合は、2010年で現在の数倍に達し飛躍的に増大している。特に燃料電池は、新エネルギーの中で最も期待の大きい電源の一つであり、2010年には電気事業用を含めて1070万

kWと予想されている。このような導入量を実現するためには、いくつかの課題を克服する必要があり、その道は決して容易ではない。

まず、技術の面では信頼性の向上、電池セルの長寿命化、大型化、量産技術、コスト低減技術、排熱利用技術等のセル単体、周辺装置、システムの開発に一層力を注ぐ必要がある。一番重要なコスト面においても、リン酸型は実用化一歩手前まできているが、大量生産技術を確立して広く一般に普及するための地道な努力が望まれる。

高温型の第二世代、第三世代の燃料電池には、熔融炭酸塩型、固体電解質型があり、その発電効率は45～60%と見込まれ、幅広い燃料の使用が可能等の多くの長所を有しているが、作動温度がそれぞれ650℃、1000℃と高いこともあり、実用化までには幾多の障害を超えねばならない。

---

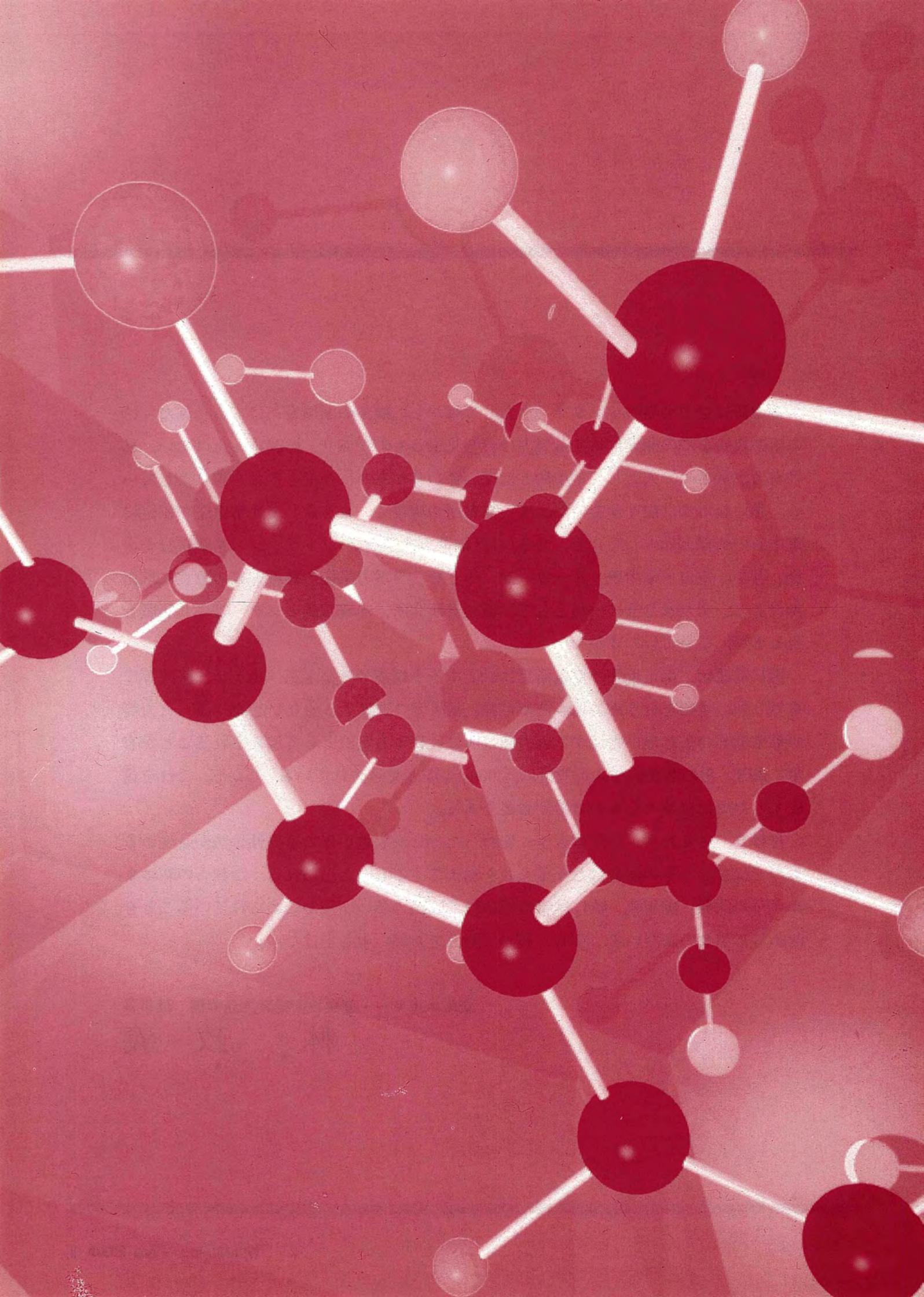
電中研は電力業界のシンクタンクとして輝かしい幾多の業績をあげてこられた。特に熔融炭酸塩型の開発に対する努力は目を見張るものがあり、感謝申し上げたい。私は電力出身者の一人として電中研とは深い係わりがあり、今でもそれを誇りとしている。思い起こせば限りがないが、寒い変電所の現場で、夜を徹して異常電圧の測定に電中研の皆様と熱中したこと、あるいは「継電方式委員会」「トランジスタ継電器委員会」等で、電力・電中研・メーカーが一体となって電力系統の継電方式の改良に取り組んだこと、また参与会の一員として、横須賀研究所、赤城試験センター等にお邪魔したこと等、枚挙にいとまがない。

燃料電池は、都市近郊の変電所等に設置する小規模分散型電源、ホテル、病院等に電気と熱の併給を行う需要地設置型電源、離島等に設置する独立型電源、LNG火力等の都市近郊の需要地に立地する火力発電所に代替する電源として導入されることが有望であり、その潜在的導入可能量は、5000万kWと見込まれている。しかし、これを達成するためには並々ならぬ努力が必要である。

月移り、星変わり、時代は大きく変わった。しかし電中研の重要性は些かも変わるものではなく、その使命は益々重大さを加えてくるものと思われる。これらの新エネルギーの開発、実用化、特に燃料電池には、国民の熱い願望がこめられていることを、改めてご認識いただき、なお一層のご努力をお願い申し上げたい。

新エネルギー・産業技術総合開発機構 理事長

林 政 義



# は じ め に

理事 上之菌 博



21世紀に向けて、人間の社会・経済活動と地球環境保全とを如何に両立させつつエネルギーを確保するかは、今や全世界の衆知を集めて解決すべき重要な課題である。このため、原子力・再生可能エネルギーの利用、徹底した省エネルギーや新エネルギーの開発が鋭意進められている。

燃料電池は、優れた環境特性、高い総合エネルギー利用効率、多様な燃料が使用可能、分散配置用小容量電源から大規模集中発電所まで適用可能などを有する、極めて魅力のある発電方式である。

電力中央研究所における燃料電池に関する研究は、1973年から2kWアルカリ型燃料電池を用い、燃料電池の運転・制御・保護方式の基礎的研究を開始したことに始まる。

現在、研究の中心となっている溶融炭酸塩型燃料電池については、ムーンライト計画のスタートする1年前から研究を開始した。

溶融炭酸塩型燃料電池を選択した理由は、原理的に発電効率が50%以上と極めて高いこと、燃料に石炭ガスが利用できることに加えて、当時研究が開始されていた石炭ガス化炉の高温クリーンアップ技術に対する見通しが得られておらず、湿式クリーンアップでは、ガスタービンとの複合発電を行っても在来火力より発電効率が下回るが溶融炭酸塩型燃料電池ではこの問題が無いことであった。

しかしながら、当時は世界的にも溶融炭酸塩型の研究が開始されたばかりで、各メーカーも電極面積10~15cm<sup>2</sup>の単電池を用いて基礎特性を測定している段階にあり、これが電力用として使用できる燃料電池に仕上がるか否かは全く不明であった。そこで我々もメーカーに出向きメーカーの人々と一緒に単電池を手作りし、データを採ってはまた素材の組合せを替え、製作方法を工夫し、使用に耐える電池の完成に努力したが、これは今までの開発研究とは全く異なった経験であり、これが現在の研究に非常に役立っている。

その後1kW級の試験設備を用いての研究により、溶融炭酸塩型燃料電池が電気事業用として実用化し得る自信を得た。その後の研究開発については皆様方がよくご承知のように、10kW級を経て100kW級の間接評価により、1000kW級燃料電池の実証試験へ向けての計画が開始されようとしている。

このような成果が得られたのは官民一体となつての努力の賜物である。しかし本当の意味での実用を実現するには、巻頭言で林NEDO理事長が述べられているように、多くの課題を解決する必要がある。当研究所は溶融炭酸塩型燃料電池開発の先駆者の一員として今後共大いに努力していきたいと考えている。





第 1 章

21世紀前半の電力供給と  
燃料電池導入ビジョン

## 第1章 21世紀前半の電力供給と燃料電池導入ビジョン ● 目次

横須賀研究所 副所長 石川 浩  
エネルギー部長 浜松 照秀

1-1 超長期電力供給の展望 .....	9
1-2 火力発電による地球環境問題と新型火力発電技術への期待 .....	12



石川 浩 (1957年入所)  
ボイラの伝熱面管理、石炭ガス化複合発電、燃料電池等エネルギー関連研究に従事。エネルギー部長を経て現在、横須賀研究所副所長。



浜松 照秀 (1970年入所)  
温排水対策、蒸気貯蔵発電、ヒートポンプ、石炭ガス化炉、燃料電池等に関する研究に従事。複合発電研究室長を経て現在、エネルギー部長。

## 1-1 超長期電力需給の展望

燃料電池がどんな特性・性能を持つかは、後章で詳しく述べられるが、ここではこの新型火力発電方式である燃料電池が導入されるイメージ、効果を展望してみる。

電気エネルギーは社会の基礎体力であり、その安定供給が電気事業運営の根幹であることに変わりはない。しかし、1990年の夏にみられた需給の極端な逼迫や、同年の政府による地球温暖化防止行動計画に立脚すれば、今後の電気事業は供給力の確保、すなわち、エネルギー源の多様化、立地推進、経済性の追求に加え、発電の高效率化、省エネルギーの推進に特段の役割を果たす必要がある。これを具体的な方策にブレークダウンするには、将来の需給の想定が重要である。

一方、最近では電源確保のリードタイムが年々長期化する傾向をたどっており、また次世代の新火力発電技術の開発に要する時間を考慮すれば、21世紀前半をカバーする「超長期の視点」でイメージをつくり、新技術導入のタイミングと位置づけを考察し、研究開発の目標を議論しておく意義は大きい。

21世紀前半に至る時代の需給について、1990年6月の電気事業審議会需給部会は、「21世紀初頭までの需給展望と電源開発目標」を中間報告として提出している。さらに、それ以遠については、当研究所でも展望を試みており、「21世紀のエネルギーと原子力」として同年報告した。

このような超長期エネルギー需給は蓋然的であるが、平均的には低率で推移するであろう。GNPの傾向に対する電力の挙動（対GNP弾性値）は、経済構造の変化による過去の増減実態はともかく、漸減の趨勢にあると考え

られ、図1-1-1のように仮に設定してみた。

この結果、需給電力量の推移は図1-1-2のようになる。現在国民一人当たりの電力消費量はおよそ6000kWh/年であり、2050年時点ではこの2倍以上となり、数字上は現在の米国の水準に近くなる。

さて、以上の需要に対する電源種別の内訳を見るには、まず、日間需要構造がどのようになるかを想定する必要がある。

産業構造の変化およびそのための技術革新により、夜間の産業用需要が減少する反面、国民生活の向上、需要側の負荷平準化の技術や施策の進展により夜間需要が支えられて、電源設備の利用率は現状が維持されると考え

電力 (kWh) の伸び率	
1988～2000年度	2.7%/年
対GNP	: 0.7
2000～2010年度	1.5%/年
対GNP	: 0.5
2010～2050年度	1.0%/年
対GNP	: 0.45

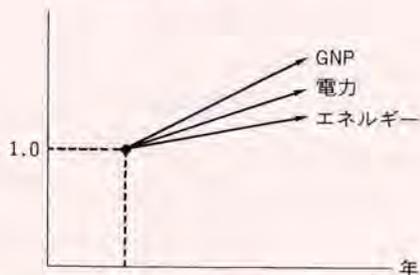


図1-1-1 2050年までの電力需要の想定

2050年までの電力需要を年代別に、年当たりの伸び率で想定したもの。対GNP弾性値は漸減の傾向にあるとし、エネルギー需給は長期的には、低率で推移することを想定した。(2010年までは電気事業審議会需給部会の想定値)

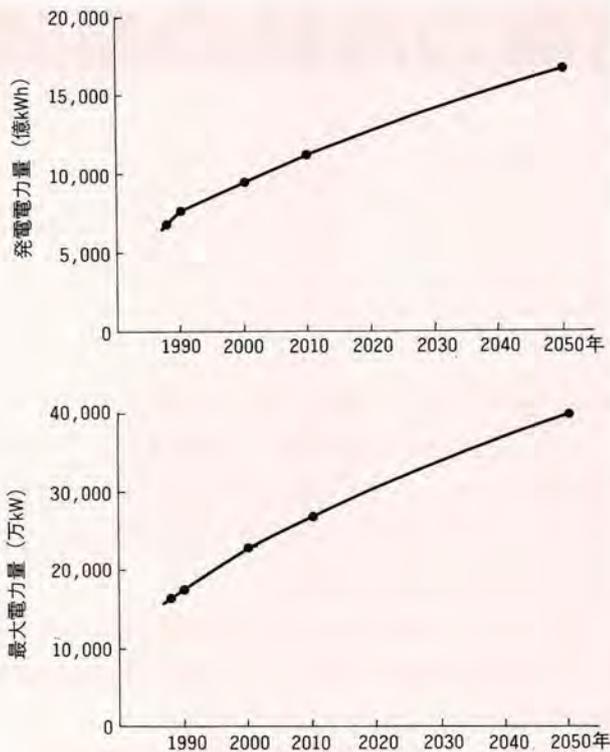


図1-1-2 発電電力量と最大電力の推移

図1-1-1の想定に基づく、2050年までの発電電力量と最大電力の推移を示した。

発電電力量は2050年には現在の2倍以上となり、国民一人当たりでは現在の米国の水準に近くなる。

最大電力は、産業構造の変化により、夜間の産業用需要が減少する反面、需要側の負荷平準化の技術や施策の進展により夜間需要が支えられて、電源設備の利用率は現状が維持されることを前提とした。

られる。このような前提のもとで最大電力の傾向を求めたものも図1-1-2に示した。

次に、対応する電源の構成を考えてみる。前述の電事審需給部会の報告とともに、2050年時点を想定する。この時代においては、まず枯渇の心配のない水力、地熱、太陽、風力など国産エネルギー開発の努力が大きく実るものとし、また地球環境問題の対策に有効で準国産エネルギーともいえる原子力発電が特段に導入促進されねばならない。

さらに、高い信頼度を有する大規模電力系統とともに、コージェネレーションや小規模エネルギー源による分散型電源なども、新技術に裏打ちされて導入が進むものとした。しかし、自然エネルギーのうち、太陽、風力など

は、賦存密度が小さく、国内での発電に充当できる地域が限られることなどの制約があり、量的には期待できない。

火力発電は、石油火力の新增設ができないため、これに代わってLNG、石炭の導入が進むことになる。このうちLNGはしばらく供給力増強の主力になるが、21世紀前半を通じては設備量、消費量ともにほぼ飽和安定するものとした。石炭は、代替エネルギーとしての開発、供給の安定性、コストの有利性から導入が促進され、火力発電の中核的存在になり、自然エネルギーや原子力の開発が不順調な場合にも、それらの代わりは石炭が負うことになる。

以上を総合して各種の電源ごとに設備容量の推移をまとめると、図1-1-3のようになる。すなわち、供給力の要

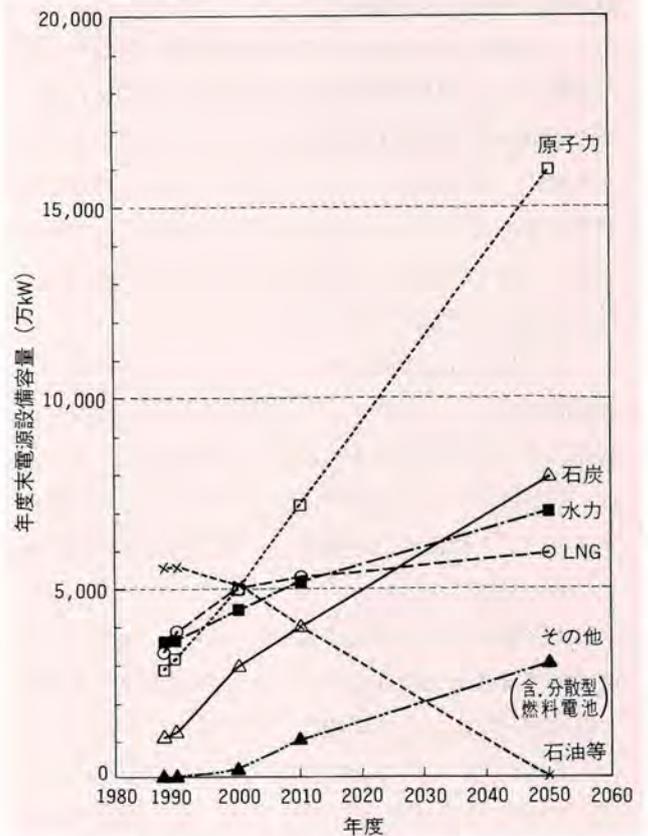


図1-1-3 電源構成の推移

2050年時点の供給力の要は原子力、石炭、LNG、水力となる。特に、原子力は地球環境問題への対応から機軸電源の位置を占める。また、火力発電は、石油火力が新增設ができないため漸減し、代わって当初LNGが供給力増強の主力になるが、その後石炭の導入が進み火力の主力となる。

は原子力、石炭、LNG、揚水など貯蔵を含む水力となろう。

火力が電源容量の3分の1強程度にとどまるので、原子力の利用率も系統運用上の制約を受けることになる。また、自然エネルギーは、これまでと違い系統運用の底上げ効果をもたらし、火力発電は一段と中間負荷運用の対象となり、LNG火力が現在の石油火力の役割を担う図式が予想される。

以上の需給シナリオに対応する電源別の発電電力量は図1-1-4のようになる。これは、国産エネルギーの最大限の開発を前提とし、化石燃料の活用を極力押さえたものである。

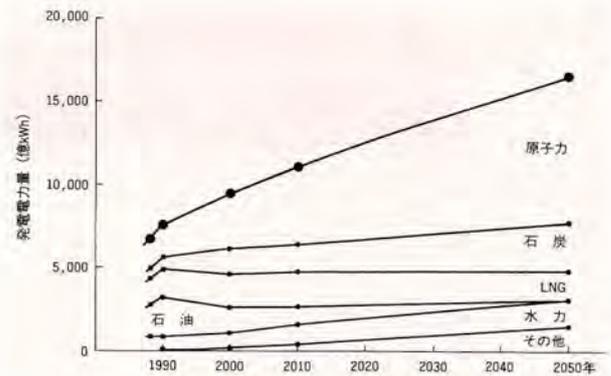


図1-1-4 電源別の発電電力量

国産または準国産エネルギーを最大限に利用し、化石燃料の利用を極力押さえることを前提として想定。

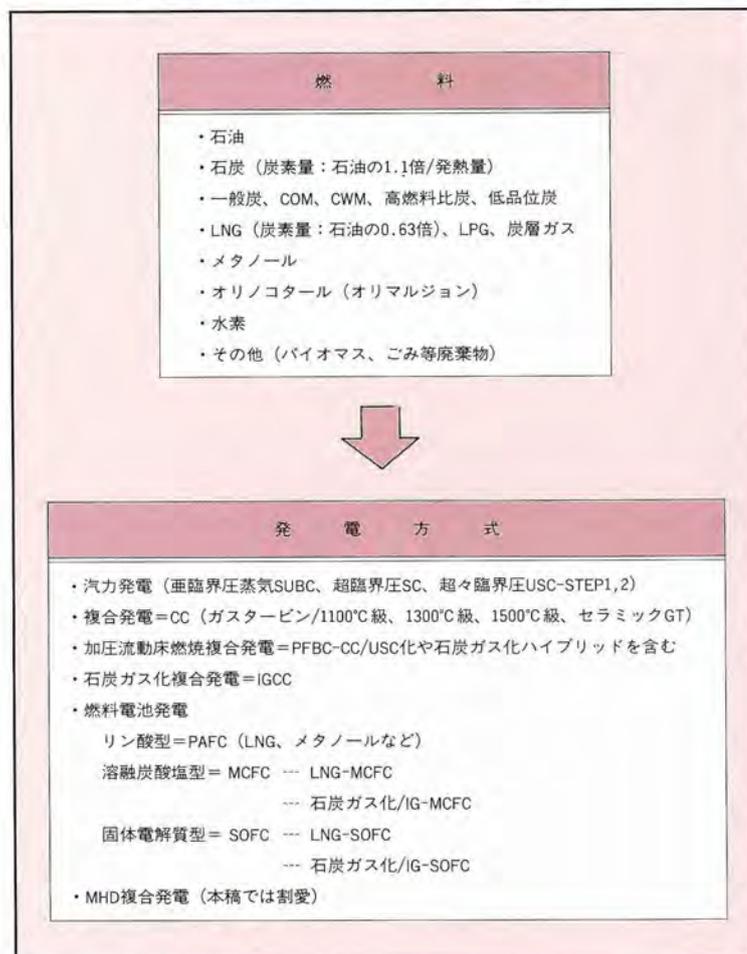
# 1-2 火力発電による地球環境問題と 新型火力発電技術への期待

前節でまとめた電事審需給部会の向こう20年の需給計画、ならびに2050年時点の需給想定に基づいて、地球環境問題の中心となっているCO<sub>2</sub>発生量と、その抑制に効果的な高効率新型火力発電導入への期待について考察してみる。

## 1-2-1 新技術の開発状況と導入の時期

火力発電の燃料と、それを直接、または改質して使用する発電方式には、将来の実用化も含めると、表1-2-1な

表1-2-1 火力発電所で使用される燃料と発電方式



どが考えられる。すでに実用化され、かつ普及しているものは、汽力発電SUBC、SC、LNG-CC1,100℃級であり、採用されつつあるものが、CC1,300℃級である。

新しい発電技術は、官、民によりプロジェクト的に研究開発が推進されている。それらの実機レベルの実用化時期は、経済性、信頼性、技術的熟成度の観点から予測が難しいが、開発の目標時期やプロジェクトの加速推進を期待すれば、石炭火力の場合、たとえば図1-2-1のようであろう。

LNGについては、複合発電の意欲的な導入が図られており、今後ガスタービンの高温化が進み、一層の効率向上が期待できよう。また、他の高効率発電についても、順次、加速的に導入を図っていくとすれば、図1-2-2のようなシナリオが考えられる。ここで、LNGを利用した分散型の燃料電池発電は図1-1-4で示した「その他」の電源として、今世紀中にも導入が図られ、分散型LNG-MCFCは2000年頃から導入されると考えられる。

次に石炭については、特段の努力をもってしても2000年までに、本格的な高効率発電を導入することは難しいが、微粉炭焚PCの超々臨界圧火力や、早期導入の可能な技術によるPFBCは期待できよう。2000年以降は、技術開発の加速推進が功を奏し、共通基盤技術としてのガスタービン、燃料電池も進歩してより高効率化が図られ、火力全

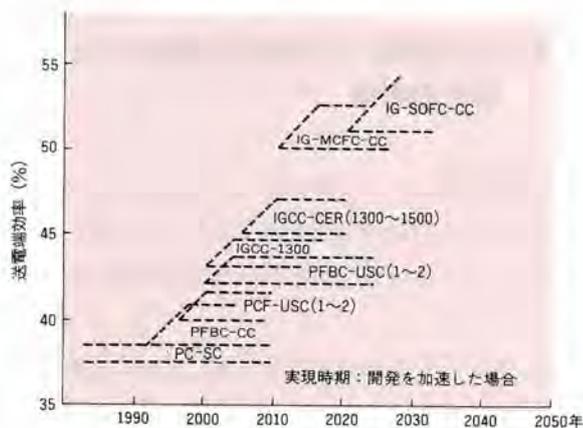


図1-2-1 石炭利用の新しい発電技術とその実現時期

開発の目標時期やプロジェクトの加速推進を期待した場合の実現時期を示した。石炭ガスを利用する溶融炭酸型燃料電池の実現は2010年以降と想定される。

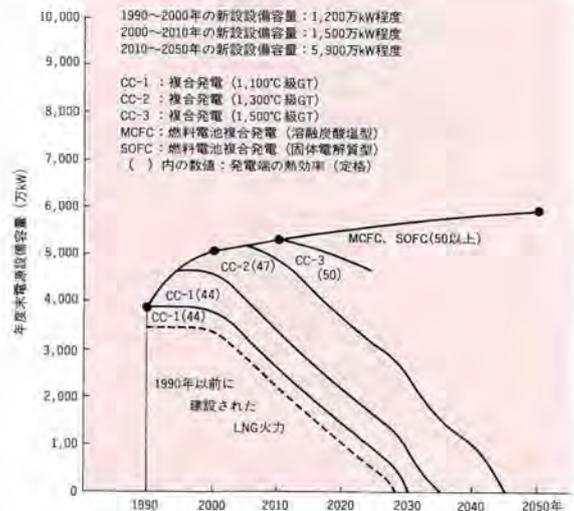


図1-2-2 LNG利用の高効率火力発電の導入シナリオ

LNGの利用では現在、複合発電の意欲的な導入が図られており、今後ガスタービンの高温化の技術進歩とともに、加速度的な導入が図られよう。なお、図中の各発電方式に付したカッコ内の数値は定格発電端効率である。(設備の寿命は、一律に40年とした)

体のレベルが向上することによって、図1-2-3のようなシナリオが可能となろう。

## 1-2-2 火力発電によるCO<sub>2</sub>発生量と新技術導入の効果

ここでは、1-1節で述べた超長期の電力需給想定に基づいて、地球環境問題の主役とされているCO<sub>2</sub>発生量を求め、高効率な火力発電技術の効果について考察してみる。

1990年10月に策定された地球温暖化防止行動計画では、「わが国の人口1人あたりのCO<sub>2</sub>排出量について、2000年以降おおむね1990年レベルでの安定化を図る」としている。電力分野のCO<sub>2</sub>発生量は、わが国全体の約3割程度といわれている。

そこで、1990年レベルに対して、CO<sub>2</sub>発生量を左右する火力発電設備の平均の熱効率が現状水準のまま変わらなかつた場合と、前節で述べた精一杯の高効率新型火力発電の導入を図った場合とについて、試算された各時代

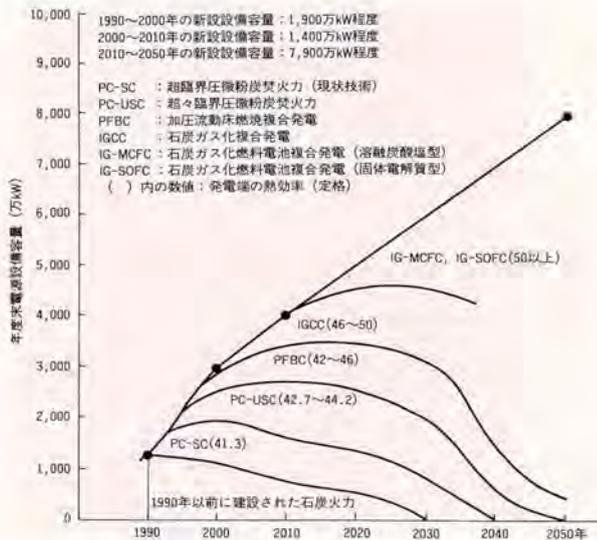


図1-2-3 石炭利用の高効率火力発電の導入シナリオ

2000年までに、本格的な高効率発電を導入することは難しいが、微粉炭燃焼PCの超々臨界圧火力や、早期導入の可能な技術によるPFBCは期待できる。2000年以降はガスタービン、燃料電池も進歩してより高効率化が図られよう。(設備の寿命は、一律に40年とした)

のCO<sub>2</sub>発生量を図1-2-4に示す。試算の基本となるCO<sub>2</sub>発生量原単位(単位熱量当たりの排出炭素量)は1988年の燃料使用量、燃料性状がベースとなっている。また、各種火力発電の熱効率については、運用平均の発電端熱効率(設備利用率に応じたものとして設定)を用いてある。

同図の発電効率が現状維持のケースについてCO<sub>2</sub>発生量は、2010年まではいったん増加して減少する。すなわち、2000年までの電力需要の伸びに対し、非化石エネルギーの電源設備が追いつかず、火力発電の増大によりCO<sub>2</sub>発生量はいったんピークを迎える。そして、2010年には、需要の伸びの鈍化と非化石エネルギーの供給力により低下する。さらに、2050年にかけては、非化石エネルギーの精一杯の開発と、ほぼ横這いの火力発電にもかかわらず、CO<sub>2</sub>発生量は2000年のピークを上回る。すなわち熱効率が現状のままであれば、21世紀前半の全期間にわたって1990年レベルをかなり超過し、行動計画の目標達成は極めて困難である。

一方、高効率新型火力の導入を図った場合には、相当量のCO<sub>2</sub>発生量を抑制することができる。対象としてい

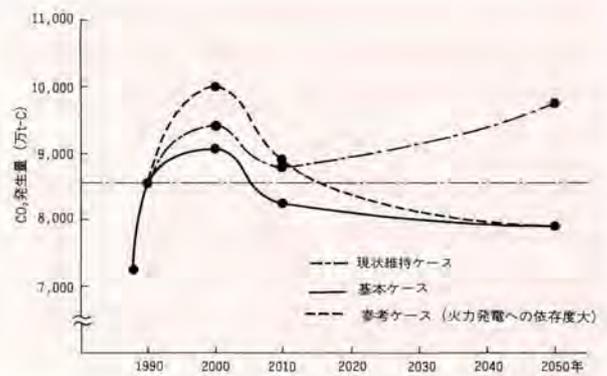


図1-2-4 CO<sub>2</sub>発生量の試算

現状維持ケースは、火力発電設備の平均の熱効率が現状水準のまま変わらないとした場合で、2010年には、需要の伸びの鈍化と非化石エネルギーの供給力により低下するが、その後漸増し、21世紀前半の全期間にわたって1990年レベルをかなり超過する。

基本ケースは、精一杯の高効率新型火力発電の導入を図った場合で、初期の時代は抑制効果が小さいものの、2005年以降には1990年レベル以下を達成できる。

参考ケースは、需要の予測外の伸びや非化石エネルギー開発の遅れなどがあり、火力発電が前記のケースより2000年、2010年でそれぞれ10%程度増加し、その後次第に基本ケースに戻る場合を想定したもので、短期的にはCO<sub>2</sub>発生量は大きく増えるが、2015年頃には1990年レベルまで低下させることができる。

る超長期の期間で、初期の時代は新火力発電技術によるCO<sub>2</sub>発生抑制効果が小さいものの、長期的にはCO<sub>2</sub>発生量を高効率化で削減可能で、行動計画に掲げられた目標の達成に十分貢献できるものと考えられる。

### 1-2-3 火力発電への依存度が増大した場合の考察

電事審需給部会による2010年までの需給想定や、1992年3月の日本電力調査委員会による向こう10年の需要予測によっても、今後の電力需要の伸びは底堅いものとなっている。

一方、電力各社の1992年度電力施設計画によれば、原子力発電所の立地難などにより供給力の向上が厳しい状況にあり、当面の新規電源としては火力を主体に頼ることになっている。すなわち2001年度までに石炭火力の開発分が2,299万kW、LNG火力が2,207万kW、原子力が1,868万kWであり、自然エネルギーなどにも努力を傾注

するものの、需給部会の計画に比べて大幅に火力への依存度が増大したものとなっている。

そこで、前節までに考察したシナリオを基本として、需給の予測外の伸びや非化石エネルギー開発の遅れなどを仮定した変化ケースについて考察する。すなわち火力発電による発電電力量が、基本ケースに比べて2000年、2010年でそれぞれ10%程度増加し、その後次第に基本ケースに戻る場合を想定した。

この場合のCO<sub>2</sub>発生量は図1-2-4に示したように当然、短期的には大きく増えるが、2050年までに基本ケースが達成できれば、2015年頃には1990年レベルまで低下させることができる。

#### 1-2-4 高温型燃料電池発電への期待

これまでに述べたように、将来の電源設備を確保しつつ、地球環境問題に対処していくためには、化石燃料を技術の粋を凝らして高度に利用することが求められてい

る。

火主水従の発電の時代に入って約30年が経過し、石油の活用、効率向上、極めて高い供給信頼度により、電力は社会の基礎として不可欠なものとなった。今後の燃料の変遷、地球新時代に対応し、高効率でクリーンな発電の追求が技術的な本流となりつつある。

溶融炭酸塩型、固体電解質型などの高温型燃料電池は、これからの要求を満たす究極の発電方式といえよう。LNG、石炭などはガスタービン技術の向上などにより、より高度に活用され、さらに高温型燃料電池を組み込んだ発電システムとして結実することが期待されている。

燃料電池発電プラントは、分散電源から集中型の現用火力発電代替プラントまで、広い範囲で高い性能を発揮することもできる。将来の実用化を見据えた総合的な研究開発が重要である。

---

\*本章は、資源エネルギー庁による研究を今回の論旨で参照させて頂き、議論を展開したものである。





第 5 章

燃料電池による発電とは

## 第2章 燃料電池による発電とは ● 目次

横須賀研究所 エネルギー部 燃料電池研究室長 阿部 俊夫

2-1	燃料電池の発電原理	19
2-2	燃料電池の作動温度と燃料	21
2-3	燃料電池の性能	23
2-4	燃料電池発電プラントの効率	25
2-5	火力発電との効率の比較	27



阿部 俊夫 (1976年入所)

セラミックガスタービン、石炭ガス化複合発電技術に関する研究に従事した後、燃焼技術研究室長を経て、燃料電池研究室長。現在、MCFC発電技術、SOFC発電技術に関する研究を推進している。

## 2-1 燃料電池の発電原理

燃料電池は燃料を効率良く利用でき、環境に優しいソフトな発電装置である。水を電気分解すれば、水素と酸素になることは良く知られている。これとは逆に、燃料電池は天然ガスや石炭などの化石燃料から取り出した水素と、空気中の酸素とを化学反応させ、直接電気と熱を取り出す新しいタイプの発電装置である。

図2-1-1に示すように、エネルギーレベルの高い水素と酸素が結びついて水になるためには、まず水素は電子を放出して、プラスの電荷を持ち、一方、酸素は水素から電子をもらい、マイナスの電荷を持つ。そして、両者が結合して中性の水になる。水素と酸素が反応して水になる時、このように電子のやりとりが行われるが、これを電気として外部に取り出す仕組みが燃料電池である。

この化学反応に伴う電子のやりとりを電気として外部に取り出すためには、図2-1-2に示すように水素と酸素の反応をイオンの伝導体である電解質の両側に分けて生じさせる必要がある。水素が反応する場所が燃料極、酸素が反応する場所が空気極であり、この2つに挟まれて、イオンの動きによって電気を動かす場所が電解質である。

燃料極と空気極はいわゆる電極であり、電子伝導体である金属あるいは炭素で作られている。さらに、この電極には、水素や酸素の供給、および反応生成物である水の排出を行うため、極めて多くの細孔が設けられている。

電解質はガスを透さないイオン伝導体から作られている。イオン伝導体という言葉は少し聞きなれないが、アルカリ液や酸は良好なイオン伝導体であり、また、食塩や炭酸塩は溶融すると良好なイオン伝導体となる。固体ではジルコニア等がイオン伝導体として良く知られている。

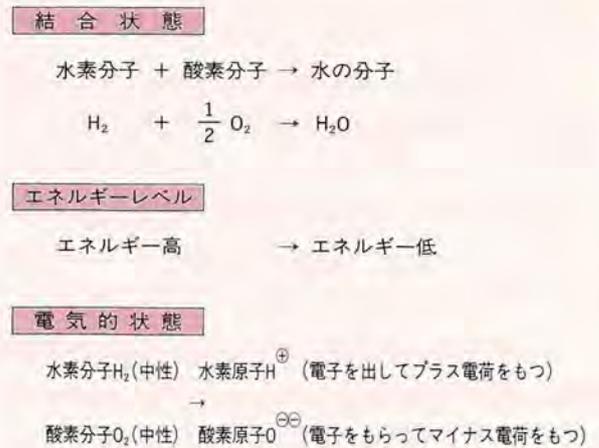


図2-1-1 化学反応と電子のやりとり

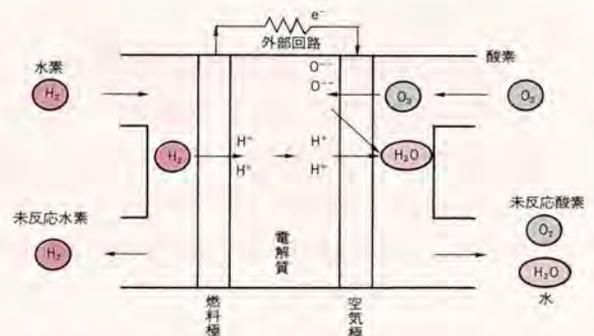
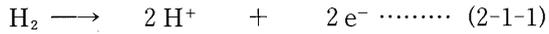


図2-1-2 燃料電池のしくみ

燃料極に供給された水素は、金属の触媒作用により、水素イオン( $\text{H}^+$ )と電子( $e^-$ )に分離される。水素イオンは電解質中を、また電子は外部回路を通じて空気極に伝わる。空気極では外部回路からの電子が供給され、さらに金属の触媒作用により、酸素が酸素イオン( $\text{O}^-$ )になる。酸素イオンと電解質を伝わってきた水素イオンが反応し、水が生成される。

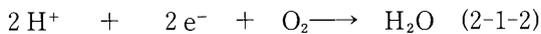
さて、図2-1-2の燃料極では



〔水素分子〕〔水素イオン〕〔電子〕

の反応を生じさせる必要がある。燃料極中の細孔を伝ってきた水素ガスは電極と電解質の境界で、金属の助けを借りて(触媒作用)、水素イオンと電子に分離する。この水素イオンと電子をそれぞれ速やかに電解質と電極を通じて放出すれば、(2-1-1)式の反応を連続して生じさせることができる。

一方、空気極では、燃料極に生じた水素イオンと電子を利用して、次の反応を生じさせる。



〔水素イオン〕〔電子〕〔酸素分子〕〔水分子〕

(2-1-1)式と(2-1-2)式を一緒に見れば、結局は水素と酸素から水ができる反応にほかならないが、燃料極で生

じた電子を外部回路を通じて空気極に流すことができるので、燃料電池から電気を取り出すことができる。

燃料電池からより多くの電気を取り出すためには、(2-1-1)式および(2-1-2)式の反応を促進する必要がある。

この方法として

- ① 温度とガスの圧力を上げる
- ② 触媒作用を高めるため、白金やニッケルを用いる
- ③ 燃料と空気、電極、および電解質との接触面積を大きくする
- ④ 電極の中の細孔に、水素、酸素、および水(水蒸気)を流れやすくする

等があり、種々の燃料電池では反応を促進させるため、材料の選定と製造方法、電池の構造、および電池の運転方法などに工夫が施されている。

なお、燃料極、空気極、電解質および燃料・空気の供給層の一組は単電池(単セル)と呼ばれており、多数の単セルを積層した燃料電池をスタックと呼ぶ。燃料電池の具体的な構造については以下の各章で述べる。

## 2-2 燃料電池の作動温度と燃料

燃料電池は使用する電解質によって主に、アルカリ型、リン酸型、熔融炭酸塩型、固体電解質型、およびポリマー型に分類できるが、このうち電気事業用としては、リン酸型燃料電池 (PAFC)、熔融炭酸塩型燃料電池 (MCFC)、および固体電解質型燃料電池 (SOFC) が開発されている。また、MCFCとSOFCは他に比較して電池の作動温度が高く、電池の排熱を利用した発電もできるため、特に高温型燃料電池と呼ばれている。

PAFC、MCFC、SOFCはそれぞれ作動温度が異なり、それにより構造や使用できる燃料が異なる。

### (1) リン酸型燃料電池の作動温度と燃料

PAFCは電解質として非常に濃いリン酸水溶液が使用されている。リン酸水溶液は温度が高いほど、イオン伝導性は良くなるが、250°C以上では液が沸騰する。この液の蒸発を防止するため、PAFCの作動温度は200°C前後となる。しかし、この温度では(2-1-1)、(2-1-2)式の電池反応がまだ不活性なため、高い触媒作用を持つ白金が必要となる。

白金は燃料中に一酸化炭素が含まれていると、一酸化炭素と反応して触媒作用を失う。このため、PAFCでは炭素成分の少ない天然ガスを使用する場合であっても、天然ガスをまず改質器を通して、水素と一酸化炭素に変え、さらに変成器を通して一酸化炭素と水蒸気から二酸化炭素と水素に変える必要がある。したがって、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。

### (2) 熔融炭酸塩型燃料電池の作動温度と燃料

MCFCの電解質には通常、炭酸塩 (炭酸リチウムと炭酸カリウムの混合物) が熔融したものを使用する。

この炭酸塩は約490°Cで溶けて、高温になるほどイオン伝導性が良くなる。しかし、700°C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°C前後としている。

電池反応は650°Cではかなり活発なため、触媒として白金を使う必要はなく、ニッケルが用いられる。また、このニッケルを触媒として、一酸化炭素は水蒸気と反応し、水素と二酸化炭素になる (シフト反応と呼ぶ) ので、一酸化炭素も直接MCFCの燃料として使用できる。したがって、天然ガス等を燃料とする場合には、改質器のみで使用できる利点を有しており、石炭ガスの場合は直接使用することができる。

### (3) 固体電解質型燃料電池の作動温度と燃料

SOFCの電解質は、セラミックスであるジルコニアが通常使用される。ジルコニアのイオン伝導性も高温になるほど良くなるが、あまり高温にすると、セラミックスが劣化するので、SOFCの作動温度は1,000°C前後となる。

電池反応は、1,000°Cでは非常に活発なため、触媒としてはニッケルで十分である。さらに、この温度では、天然ガスはニッケルを触媒として水蒸気と反応し、水素と一酸化炭素になり、さらに一酸化炭素も水素と二酸化炭素になる。したがって、SOFCは天然ガスを燃料とする場合、原理的には改質器も変成器も必要なく、また、石炭ガスも直接使用できる。

図2-2-1に各種燃料電池で用いられる燃料を、まとめて

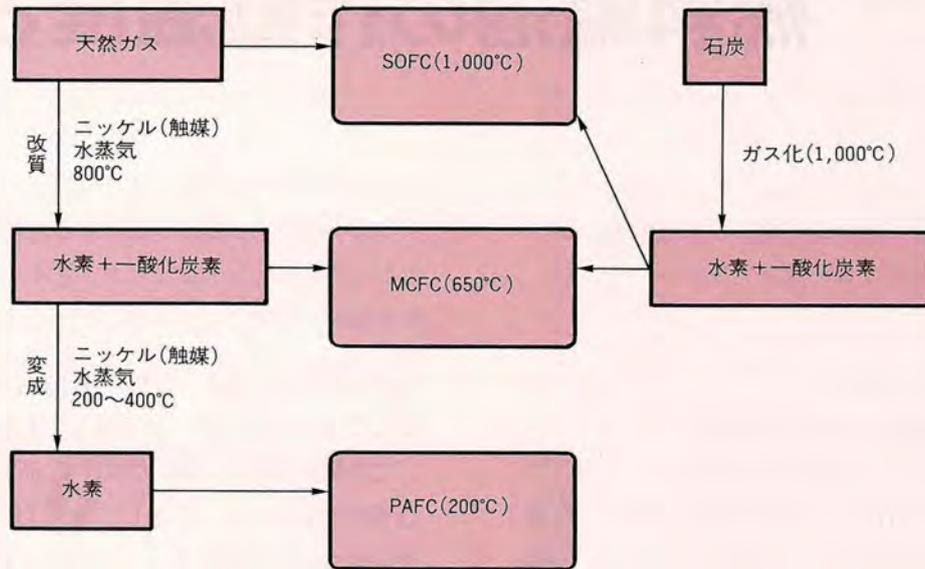


図2-2-1 それぞれの燃料電池で用いられる燃料

電池反応は主に水素に対して生じるので、天然ガスあるいは石炭ガスから水素を作る必要がある。水素を作る反応はメタンを分解する改質反応と、一酸化炭素と水素を二酸化炭素にするシフト反応に分かれるが、SOFCは作動温度が高いため、改質反応とシフト反応が電池内部で生じるために、天然ガスを直接燃料に用いることができる。MCFCでは天然ガスを燃料とする場合、別に改質器が必要であり、また、PAFCではさらに変成器が必要となる。

石炭ガスはSOFCとMCFCには直接使用できるが、一酸化炭素の含有量が多いのでPAFCには使用できない。

示した。作動温度の高い順に示すとSOFC、MCFC、PAFCであり、天然ガスはSOFCに直接使用でき、MCFCには改質器を通して使用できる。石炭ガスの可燃成分は

主として水素と一酸化炭素であるので、SOFCおよびMCFCには直接使用できるが、一酸化炭素の含有量が多すぎるため、PAFCには使用できない。

## 2-3 燃料電池の性能

燃料電池の効率、すなわち消費した燃料からどのくらい電気を取り出せるかという効率は理論上80%以上になる。しかし、電池から電気を取り出す時、電池の内部にいろいろな電気抵抗が生じて、これがロスになるので、実際には60%程度が上限である。

電池に供給した燃料が、すべて電池で反応する場合、すなわち燃料利用率が100%のとき、電池の効率は、いずれの燃料電池であっても、単セルの電圧 $v$ によって次式によって定まる。

$$\text{電池効率 } \eta = \frac{-n \cdot F}{\Delta H} \cdot v \quad \dots\dots\dots (2-3-1)$$

ここで、 $-n \cdot F$ は1モルの燃料が反応する時に移動する電荷の総量であり、 $\Delta H$ は燃料1モルあたりの発熱量である。したがって、(2-3-1)式の $-n \cdot F / \Delta H$ 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 $\eta = 0.675v$  (0℃、高位発熱量基準)となる。

また、単セル電圧 $v$ は、電解質を通過する電流密度 $j$ に対して

$$\text{セル電圧 } v = a - b \cdot j \quad \dots\dots\dots (2-3-2)$$

となる。ここで、 $a$ および $b$ は電池の種類や使用条件等によって定まる値である。

したがって、(2-3-1)式および(2-3-2)式より、電流密度 $j$ を増加させると、単セル電圧 $v$ が下がり、電池効率が低下することになる。

ところで、単セル電圧 $v$ は電池効率、ひいては発電プラントの効率に影響する値である。電流密度 $j$ はいわば電

池から取り出せる電気量を表しており、電池のコンパクト性および単位発電量あたりの建設コストを直接左右する値である。したがって、一般にいずれの燃料電池であっても、その効率と建設コストはトレードオフの関係にあることがわかる。

図2-3-1は、それぞれの燃料電池における $j-v$ 特性をま

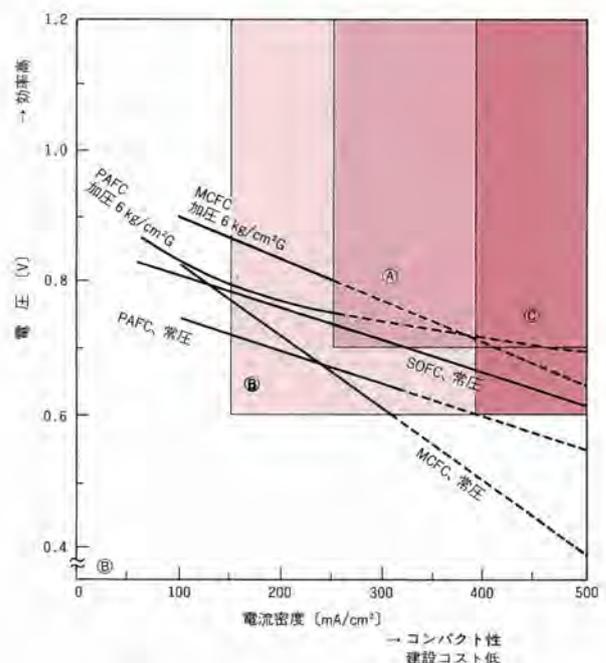


図2-3-1 それぞれの燃料電池の $j-v$ 特性

単セルの電圧 $v$ はプラントの効率、また電流密度 $j$ はプラントのコンパクト性および建設コストに大きく影響を及ぼす因子である。したがって、それぞれの用途によって、適切な $j-v$ 特性を有する燃料電池を選定することが重要である。電気事業の用途としては大型分散電源あるいは大型集中電源が期待されているので、高効率・大出力化を追求するA領域が適する。B領域は安全性、省力化が最優先するオンサイト電源に、C領域はコンパクト化が要求される高性能コージェネレーション電源に適する領域である。

とめて示したものである。j-v特性は発電プラントの効率および建設コストに影響するので、それぞれの発電プラントの用途を考えて、適切なj-v特性を選定することが極めて重要である。

燃料電池発電プラントは種々の用途が考えられるが、電気事業用としては、比較的大型な分散電源、あるいは大型集中電源が期待されている。この用途では、他に比較して一層の高効率化・大出力化が追求されるので、少なくとも単セル電圧は0.7V以上で、かつ電流密度200~250mA/cm<sup>2</sup>以上が要求される。

図2-3-1より上の要求を満足するそれぞれの燃料電池の使用条件(同図のAの領域)を整理すると、表2-3-1となる。この表は一定の電池性能を得るための使用条件の違いを示している。

表2-3-1 電池の使用条件

燃料電池の種類	0.7V以上でかつ200~250mA/cm <sup>2</sup> 以上の電池の使用条件	
	電池の作動温度	電池の運転圧力
PAFC	約200°C	加圧
MCFC	約650°C	加圧
SOFc	約1000°C	常圧でも可

それぞれの燃料電池が、ほぼ同一の電池性能(電圧と電流密度)をもつための電池使用条件(温度と圧力)は大きく異なる。この使用条件の相違により、電池性能が同一であっても、それぞれの燃料電池を中核とする発電プラントの効率が大きく異なる。

## 2-4 燃料電池発電プラントの効率

表2-3-1に示したように3つの燃料電池では、一定の電池性能を出すための使用条件が異なるので、燃料電池を中核とする発電プラントの効率も大きく異なる。

図2-4-1は最も基本的で、かつ単純な電池発電プラント

のシステム構成とエネルギーバランスを示したものである。図ではそれぞれの燃料電池発電プラントの効率の違いを明らかにするため、燃料として水素を使用するものとし、プラントの放熱ロスと循環系の所内動力は無視し

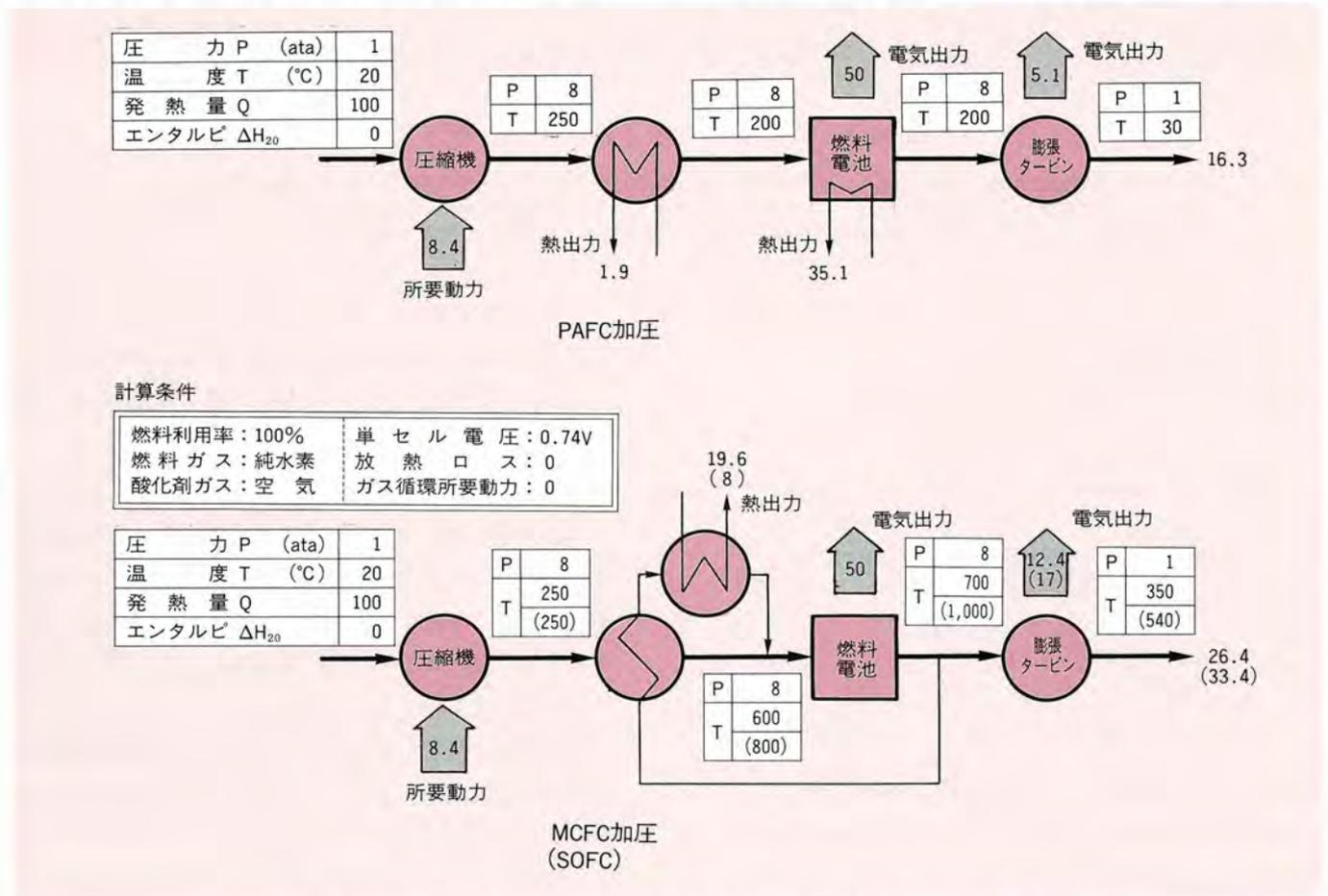


図2-4-1 加圧システムにおける燃料電池発電プラントのエネルギー収支

電池性能が同一であっても、電池の作動温度が異なるので、発電プラントの効率が異なる。この差は、主に上図に示すように、膨張タービンにおける動力の回収の量に起因している。PAFCでは、作動温度が低いので電池で発生した熱を動力（電力）として充分回収することができない。

一方、MCFCおよびSOFCでは電池で発生する熱を動力として回収しやすく、高効率化が図れる。

計算条件

燃料利用率：100%	単セル電圧：0.74V
燃料ガス：純水素	放熱ロス：0
酸化剤ガス：空気	ガス循環所要動力：0

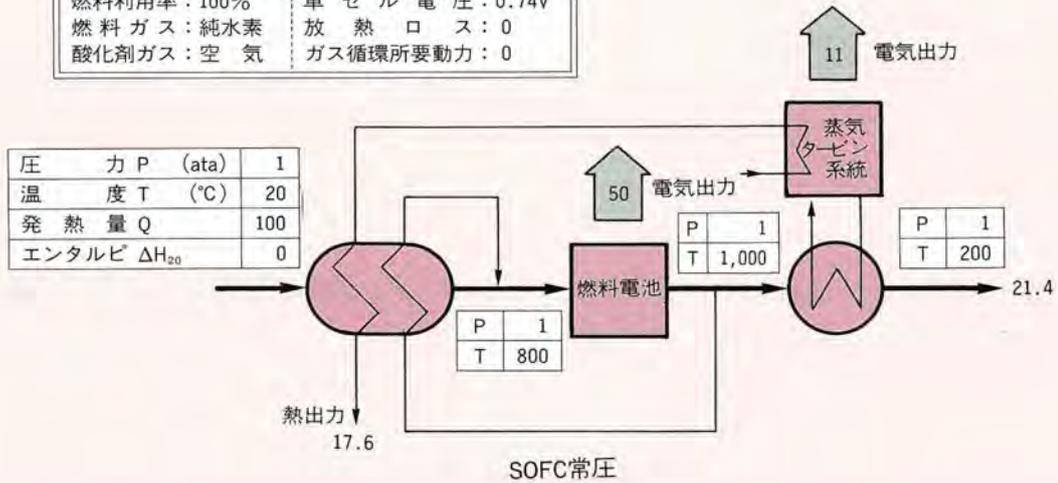


図2-4-2 SOFC常圧システムのエネルギー収支

SOFCは作動温度が約1,000℃と高く、排熱の利用方法が容易になる。上図ではSOFC本体を一つの熱発生機器と見なし、下流に蒸気タービン系を導入することによって、常圧システムでも発電効率は約60%にも達する。またSOFCの電圧を下げ、蒸気タービン系の回収エネルギーを増加させるシステムも有力と考えられる。

た。また、いずれの場合にもセル電圧は0.74Vとし、電池における燃料利用率を100%とした。

図2-4-1よりPAFC発電プラントの効率は

PAFCの発電効率

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{電池本体の発電量} + (\text{膨張タービンの発電量} - \text{圧縮機の動力})}{\text{供給水素の発熱量}} \times 100 \\
 &= 50\% + (5.1\% - 8.4\%) \\
 &= 46.7\%
 \end{aligned}$$

となる。一方、MCFCおよびSOFCの発電効率は

$$\text{MCFCの発電効率} = 50\% + (12.4\% - 8.4\%) = 54\%$$

$$\text{SOFCの発電効率} = 50\% + (17.0\% - 8.4\%) = 58.6\%$$

となる。すなわち、電池効率が同一であっても、PAFCプ

ラントではMCFCおよびSOFCプラントと比較して、電池の使用条件である温度と圧力との関係が熱サイクル上マッチングが悪く、そのため加圧の動力が電力として回収しづらいことが分かる。

SOFCの場合は、特に使用温度が1000℃と非常に高いので、電池本体を通常のボイラーと同様な一つの熱発生機器とも見なすことができる。そのため図2-4-2に一例を示すように、SOFC電池本体の下流に蒸気タービン系を導入することによって、常圧条件であっても、発電効率は約60%に達することが分かる。

電池性能に対する前提条件はあるが、原理的な電池の使用条件の観点から考えると、それぞれのプラントの効率の順番は、熱サイクル上

SOFCプラント > MCFCプラント > PAFCプラントとなる。

## 2-5 火力発電との効率の比較

ここでは具体的な燃料電池発電プラントの効率と、現在の最新鋭であるガスタービンと蒸気タービンによる複合発電（GT複合発電）の効率とを比較することによって、それぞれの発電方式の特徴と用途を考える。

比較・検討する対象はPAFC発電、MCFC発電に限った。SOFC発電は前述したように、極めて高い発電効率が期待でき、多くの用途が考えられるが、全般的には基礎研究の段階にあるので、この検討から除外した。

図2-5-1および表2-5-1はPAFC発電、MCFC発電およびGT複合発電の送電端効率と発電内訳を示したものである。MCFC発電のプラント構成の詳細については第4

章で述べる。

図2-5-1は、各発電方式の送電端効率を発電容量に対して示したものであるが、各方式は効率だけではなく、適用できる発電容量が異なるので、それぞれの用途も異なってくる。

PAFCが適用できる発電容量は50kW～約1万kWであり、数万kW以上の発電容量では、他の発電方式に比較して効率が低く、不利である。しかし、適用できる発電容量の範囲が広く、また小容量機であっても効率が比較的高いので、分散電源として適する。

MCFCは、天然ガスを使用する場合、電池本体と改質

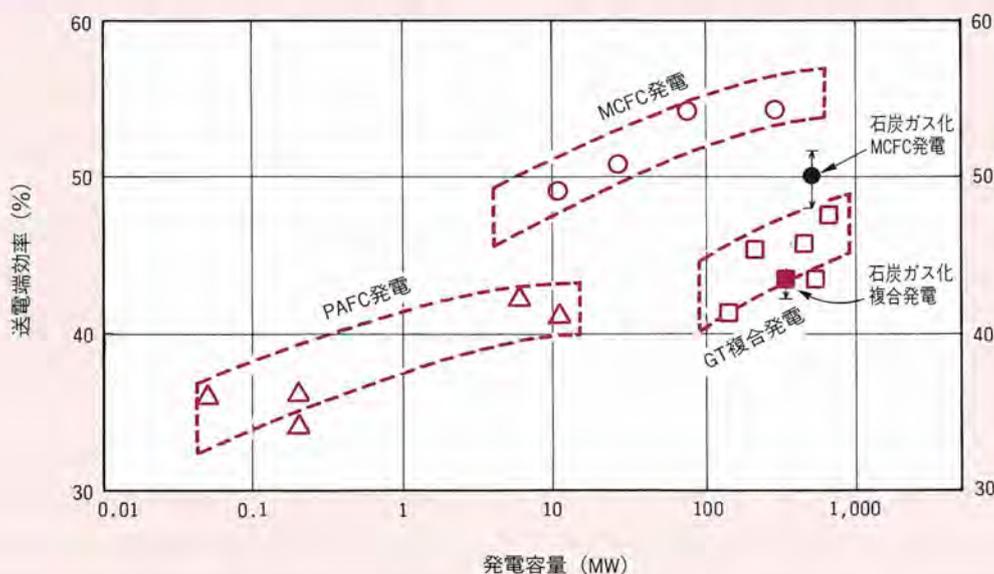


図2-5-1 ガスタービン複合発電との効率の比較

それぞれの発電方式は、効率と発電容量から主用途が決まってくる。PAFCは、50kW～約1万kWの範囲の分散電源で適しており、大容量機は効率上不利である。外部改質型MCFC発電は少なくとも数千kW以上の大型分散電源および集中火力電源に適しており、小容量機には不向きである。石炭利用としては、石炭ガス化MCFC発電と石炭ガス化GT複合発電の両者が有力である。

表2-5-1 それぞれの発電方式の効率と発電内訳

項目		分類 燃料	M C F C			P A F C	GT-ST複合火力	
			L N G		石炭	L N G	L N G	石炭
			外部改質型	内部改質型				
出力	発電端 (MW) (FC) (MW) (GT or ST) (MW)	11.5 (10.8) (0.7)	308.0 (275.0) (33.0)	31.5 (28.5) (3.0)	578 (350) (228)	4.91 (5.00) (-0.09)	670 (-) (670)	375 (-) (375)
	補機動力 (MW)	-0.7	-8.0	-0.9	-78	-0.32	-13.3	-29
	送電端 (MW)	10.8	300.0	30.6	500	4.59	656.6	346
効率	発電端 (%)	52.4	55.7	61.5	57.9	45.1	47.7	47.1
	送電端 (%)	49.0	54.2	59.8	50.1	42.2	46.4	43.5
条件	動作圧力 (ata)	6	7	7	8	7	—	—
	系列数	1	4	1	1	1	1	1
開発レベル (実用化時期)		概念設計段階 (2000年以降)	概念設計段階 (2000年以降)	概念設計段階 (2000年以降)	概念設計段階 (2010年以降)	5 MWプラント (1996年以降)	建設中	概念設計段階 (2000年以降)
位置づけ		分散型電源	集中大容量 ミドル対応可	分散型電源	集中大容量	分散型電源 熱供給	集中大容量	

器を合体構造とする内部改質型と、改質器と電池本体とを別置きにする外部改質型に大別できる。

内部改質型のMCFCは、一般に電池構造が複雑であり、電池1台あたりの容量が外部改質型に比較して制限を受けるが、表2-5-1からわかるように送電端効率がかなり高いので、分散型電源として有力である。

外部改質型のMCFC発電は、膨張タービンや蒸気タービンとの結合によって高効率化が達成できる。しかし、膨張タービンや蒸気タービン等の回転機器の効率は容量の影響を大きく受け、一般に小容量機では効率が低い。このため、外部改質型のMCFC発電の用途は、

- ① 大都市のエネルギーセンターとして機能する大型分散電源
- ② 集中型の火力電源

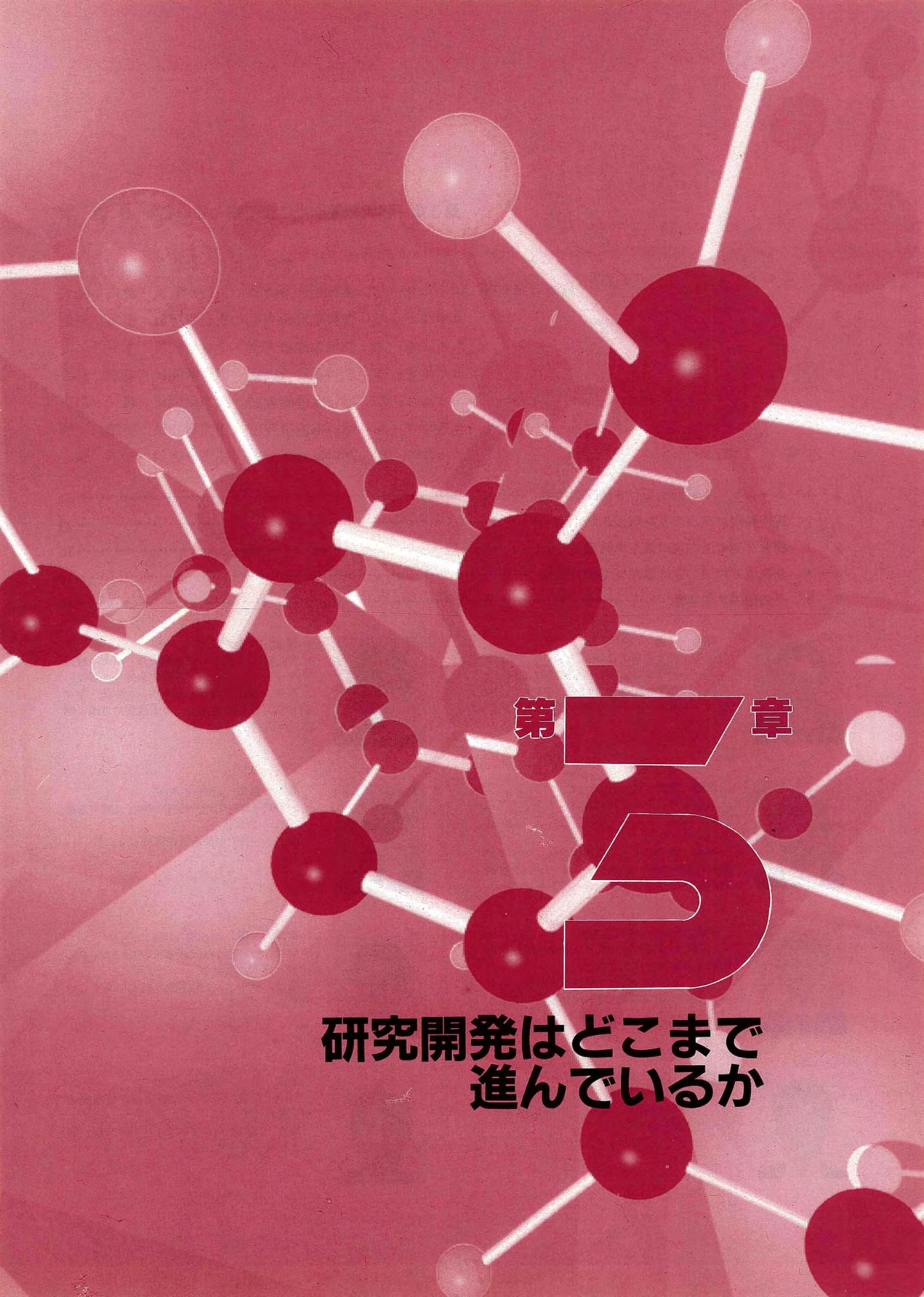
等が最も有力であり、ガスタービン (GT) 複合発電の用途と一致する。

一方、1,100℃級ガスタービンによる複合発電の送電端効率は現在43%に達しており、1,300℃級ガスタービンを

採用した47%程度の発電プラントが商用化段階に入っている。さらに、1,500℃級セラミックガスタービン等の新技術が導入できれば、天然ガスの場合で、最高52%程度に達すると考えられる。また、石炭ガス化複合発電 (通称IGCCと呼ばれている) の送電端効率は43%が試算されており、新技術が導入できれば将来的には、47%程度に達すると予想できる。

MCFC発電はGT複合発電と同程度の発電容量の場合、天然ガスMCFC発電の効率が約54~55%、石炭ガス化MCFC発電が約50%であり、将来の最も進歩したGT複合発電と比較しても、絶対値で3%程度の高効率化が見込める。

MCFC発電とGT複合発電は技術の完成度や実用化の時期が異なるので、効率のみで優劣は判断できないが、この2つの発電技術は21世紀に向かう新火力発電技術分野における最重要開発課題であり、今後10~20年で見るかぎり、これらの発電方式に対抗できる新火力発電技術は見当たらないといっても過言ではないであろう。



第            章

研究開発はどこまで  
進んでいるか

### 第3章 研究開発はどこまで進んでいるか ● 目次

			狛江研究所 調査役	福留 渥
横須賀研究所	エネルギー部	燃料電池研究室	主査研究員	渡辺 隆夫
	エネルギー部	燃料電池研究室	主査研究員	伊崎 慶之
	エネルギー部	燃料電池研究室	主査研究員	木下 久史
	エネルギー部	燃料電池研究室	担当研究員	麦倉 良啓
	エネルギー部	燃料電池研究室	担当研究員	森 昌史
	エネルギー部	燃料電池研究室	担当研究員	伊藤 響
	エネルギー部	燃料電池研究室	担当研究員	幸田 栄一
3-1	ムーンライト計画における開発の概要			31
3-2	実用段階に入ったリン酸型燃料電池			33
3-3	開発が進む熔融炭酸塩型燃料電池			35
3-4	基礎研究段階の固体電解質型燃料電池			38
3-5	その他の燃料電池			40



**福留 渥** (1967年入所)  
配電に関する研究に従事。1989年より新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)に出向し、国の燃料電池プロジェクトを、プロジェクトリーダーとして進めている。



**麦倉 良啓** (1986年入所)  
MCFCの性能や寿命評価方法、単セル性能のモデリング等に関する研究を行ってきた。現在、MCFCの単セルを用いた性能・寿命評価ならびに性能向上、寿命延伸の方策に関する研究を行っている。



**渡辺 隆夫** (1981年入所)  
MCFCのスタック性能評価、スタック運転技術、電池シミュレーション等に関する研究を行ってきた。現在、MCFCスタック性能分析、スタック運転技術の開発、電池シミュレーション技術の高度化に関する研究を行っている。



**森 昌史** (1988年入所)  
SOFCの材料開発や特性の測定に関する研究を行ってきた。現在、SOFCの製造法を研究している。



**伊崎 慶之** (1984年入所)  
MCFCの性能や冷却特性、ガス分離技術等に関する研究を行ってきた。現在、MCFCのスタック性能の評価、スタック運転技術の開発、ガス分離技術に関する研究を行っている。



**伊藤 響** (1990年入所)  
SOFCの発電特性の測定やSOFCに関する情報の研究の調査を行ってきた。現在、SOFCの電極性能の向上に関する研究を行っている。



**木下 久史** (1990年出向)  
北海道電力より、MCFC発電技術に関する技術修得のため出向。現在、主にMCFCの経済評価に取り組んでいる。



**幸田 栄一** (1990年入所)  
MCFC発電プラントの概念設計に関する研究を行ってきた。現在、MCFC発電プラントの効率分析に関する研究を行っている。

## 3-1 ムーンライト計画における開発の概要

わが国における燃料電池の本格的な開発は、1981年から始まった通商産業省工業技術院のムーンライト計画の中で、大型省エネルギー技術開発プロジェクトとして位置づけられ、実用化に向けての技術開発が開始された。

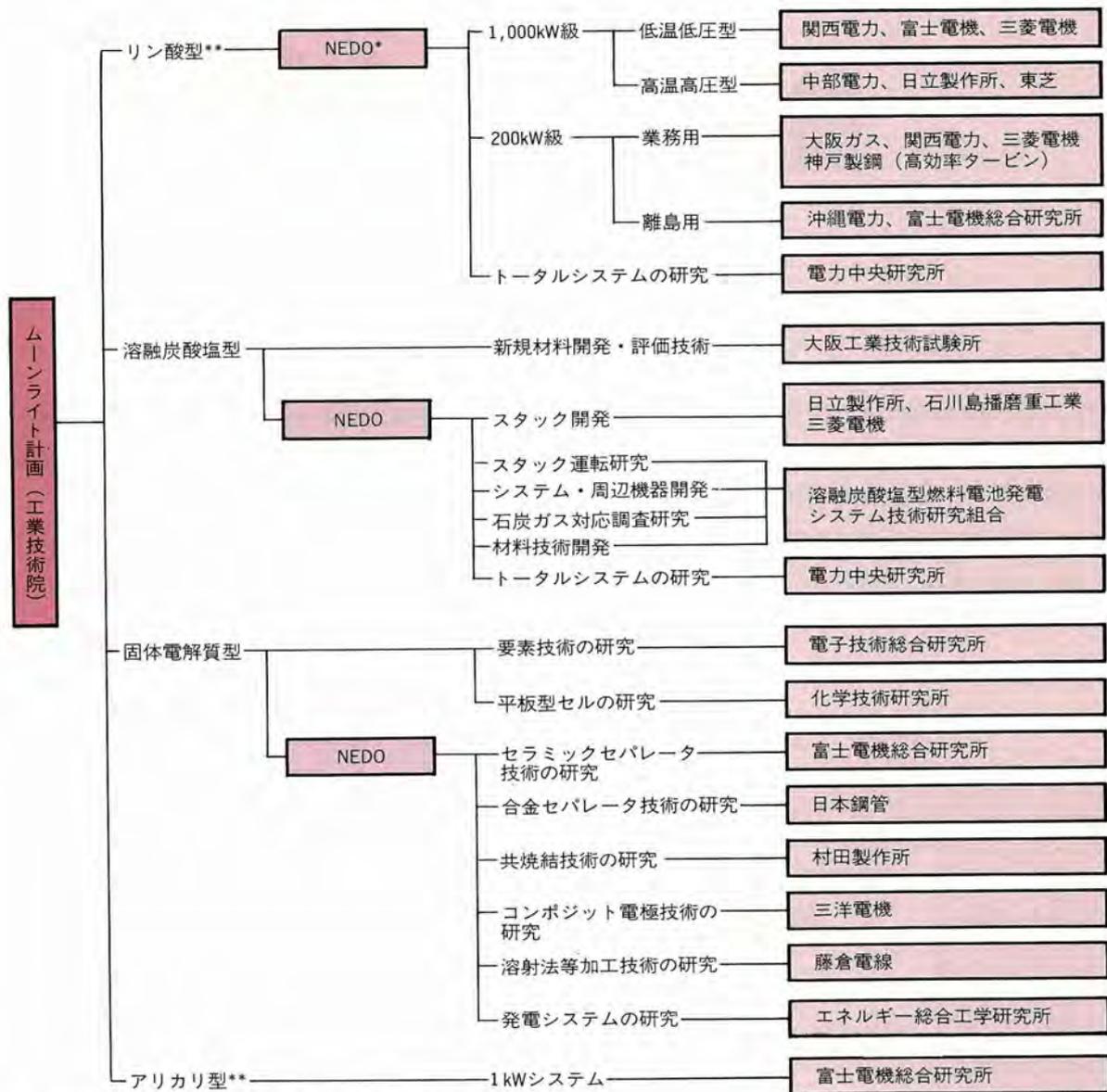
一方、民間では、電力、ガスおよび石油などのユーザーやメーカーが、このムーンライト計画に参加すると共

に、独自に社内研究、共同研究などの形で開発を進めている。さらに、国立研究機関や大学でも基礎分野を中心に研究を進めている。

表3-1-1および図3-1-1にムーンライト計画における開発スケジュールと研究開発の実施体制をそれぞれ示す。

表3-1-1 ムーンライト計画（燃料電池発電技術）の開発スケジュール

研究項目	年度	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
リン酸型燃料電池	要素研究																	
	運転研究(1000kW級)																	
	総合的技術開発(オンサイト型200kW級)																	
熔融炭酸塩型燃料電池	要素研究																	
	ベンチプラント(10kW級)																	
	スタック技術開発(100kW級)																	
制作・運転研究(1000kW級)																		
固体電解質型燃料電池	要素研究																	
	製造基盤技術研究(数100W級)																	
モジュール技術研究(数10kW級)																		
アルカリ型燃料電池	要素研究(1kW級)																	



(注) \*NEDO=新エネルギー・産業技術総合開発機構  
 \*\*終了

図3-1-1 ムーンライト計画（燃料電池発電技術）の研究開発実施体制  
 [平成元年度～平成4年度]

## 3-2 実用段階に入ったリン酸型燃料電池

リン酸型燃料電池 (PAFC) は、作動温度が200°C程度と低く、比較的扱いやすいこと、国および民間の積極的な研究開発が実を結びつつあることなどから、現在開発中の燃料電池の中で、最も実用化に近い技術である。

### (1) 国内の開発動向

ムーンライト計画では、天然ガスを用いた2台の1,000kW級パイロットプラント、都市ガスを用いたオンサイト用200kW級パイロットプラント、およびメタノールを用いた離島用200kW級パイロットプラントを開発し、既に運転研究を終了している。

電気事業者が係わるPAFCの開発動向は表3-2-1に示す通りである。このうち、大型PAFC発電プラントの実証計画としては、東京電力㈱が11MW級実証プラントの開発を進めており、既に運転に入っている。

また、電気事業者とガス事業者がリン酸型燃料電池発電技術研究組合を設立し、新エネルギー産業技術・総合開発機構 (NEDO) と共同で都市エネルギーセンター用の5MW級PAFC、およびオンサイト型の1MW級PAFCの実証プラント計画を進めている。

さらに、ガス会社とメーカーでは共同で50~100kW程度のコージェネレーション用PAFCを、石油関連業界においてもナフサおよび灯油を燃料とするオンサイト型PAFCの開発計画をそれぞれ進めている。

また、これらの民間の開発計画と共に、1989年6月に通商産業省の諮問機関である総合エネルギー調査会が打ち出した導入目標 (2000年までに民生、産業および電気事業用として合計225万kWを導入する) に基づき具体的な検討も実施されている。

メーカー各社ではこれまでの運転成果ならびにユーザーサイドの導入計画等を踏まえ、商用化を目指した生産体制の整備を進めつつあり、1991年度以降、相当数のプラントが出荷され運転を開始する予定である。

### (2) 国外の開発動向

海外におけるPAFCの開発は米国が先駆的な立場にある。その米国では、1967年に開始されたTARGET計画 (天然ガス関連産業が共同設立した組織による12.5kW基64台によるフィールドテスト)、引き続き1977年からのGRI計画 (ガス研究所による40kW基46台によるフィールドテスト) によりPAFCの技術開発を進めてきた。

その後、これらの成果を踏まえ、米国最大のPAFC開発メーカーであるIFC (インターナショナル燃料電池会社) は、㈱東芝の協力を得て、オンサイト用燃料電池を生産するONSI社を設立し、200kW級商用機の開発・生産を推進しており、これらは1992年より順次出荷される予定である。

一方、電気事業用としては、分散型燃料電池の開発を目的としたFCG-1計画が1971年より進められ、4.5MW実証プラントを、東京電力㈱五井火力発電所に設置し実証試験を行った。その後、11MW汎用プラントを開発するPC-23計画を展開し、現在、東京電力において実証試験が行われている。なお、両計画とも米国内での運転試験は、種々のアクシデントによって不調に終わっている。

ヨーロッパでは、独自のPAFCを開発するのではなく、日本またはアメリカから電池を購入してプラントを作る方針であり、イタリアでは1MWプラントの建設を計画している他、オランダ、ドイツ、スペイン、スウェーデ

表3-2-1 国内電力会社におけるリン酸型燃料電池の開発動向

会社名	規模 (kW)	燃料	電池製造元	運転期間	備考
NEDO、電力9社 電中研	5,000	LNG	富士電機(株)	'94	
北海道電力(株)	100	メタノール	三菱電機(株)	'87-'89	
東北電力(株)	50	LNG/LPG	富士電機(株)	'87-'89	
東京電力(株)	4,500	LNG	UTC	'83-'85	
	11,000	同上	東芝/IFC	'91-	世界最大プラント
	220	同上	三洋電機(株)	'87-'89	
	200	同上	IFC	'88-'90	
	200	都市ガス	同上	'89-	
中部電力(株)	1,000	LNG	東芝/日立	'87-'88	ムーンライト計画
北陸電力(株)	4	メタノール	富士電機(株)	'85-'89	サンシャイン計画
関西電力(株)	30	LNG	同上	'82-'83	
	1,000	同上	三菱/富士	'87-'88	ムーンライト計画
	200	都市ガス	三菱電機(株)	'89-'91	ムーンライト計画 大阪ガスと共同
	200	同上	同上	'91-	エネ庁・NEDO 推進プロジェクト
	50×16	同上	富士電機(株)	'90-	同上
四国電力(株)	4	メタノール	同上	'87-'88	
沖縄電力(株)	200	同上	同上	'89-'91	ムーンライト計画

ン等においてはオンサイト型を中心とした実証プラントの計画が進められている。

また、アジアでは韓国が、日本のメーカーの電池による試験を行っている、タイでも、わが国との国際研究協力事業として導入する計画がある。

以上のようにPAFC実用化への機運は、世界的な広がりを見せている。PAFCは、これまでの運転成果ならびに今後の導入計画などから判断すると、技術的には既に実

用化レベルにあるといえる。しかし、電池本体に高価な貴金属触媒を使用するため、材料面でのコスト削減が難しい。低コスト化には、電池本体の性能向上以外にも、高品質な排熱の回収と有効利用によるプラントの総合効率の向上も重要な課題となる。また、その導入・普及には、信頼性の確立や長寿命化などを含めた総合的な研究開発が必要である。

## 3-3 開発が進む熔融炭酸塩型燃料電池

熔融炭酸塩型燃料電池（MCFC）は、高い発電効率が期待でき、天然ガスから石炭ガスまで燃料の多様化が可能であるなど、優れた特徴を有している。このため、分散型から火力電源まで幅広い導入が考えられており、各国で研究開発が盛んに進められている。表3-3-1に国内外のMCFCの開発動向を示す。

### (1) 国内の開発動向

わが国におけるMCFC技術の開発は、ムーンライト計画の下で1981年に開始された。このうち、1986年までの第I期計画は、10kW級スタックの試作、運転研究を目的に進められ、当初の目的を達成している。

引き続き1987年より始まった第II期計画は1MW級パイロットプラントの実証試験を最終目的にしており、当面は1993年までに100kW級スタックを開発する計画である。この計画の中で、スタック開発はNEDOが主体となり、またプラント構成機器の開発は、1988年に設立した熔融炭酸塩型燃料電池発電システム技術研究組合が主体となって進めている。さらに工技院大阪工業技術試験所で材料開発を、当研究所ではトータルシステムの研究等を行っている。

国内のスタック開発メーカーは、ムーンライト計画に参加している(株)日立製作所、石川島播磨重工業(株)および三菱電機(株)のほか、富士電機(株)、(株)東芝、三洋電機(株)などが上げられる。主要3社のスタック性能の現状を表3-3-2に示す。

(株)日立製作所では、ムーンライト計画下で複合大容量型セルによる100kW級スタックの開発を行っている。また、当研究所との共同研究として、高い燃料利用率の条

件下における性能低下に関する検討などを行っている。

石川島播磨重工業(株)は、ムーンライト計画において変形大容量型セルによる100kW級スタック開発を実施している。自社内では、天然ガス改質器を組み合わせた2kW級ミニプラントによる3,000時間の連続運転試験を実施し、さらに、当研究所と共同で開発した加圧ガスリサイクル運転法を用いて、10kW級スタックによる4,300時間に及ぶ高燃料利用率運転に成功している。

三菱電機(株)はシステムのコンパクト化が期待できる内部改質型を指向している。ムーンライト計画では直接内部改質型を、関西電力(株)との共同研究では間接内部改質型の開発を行っている。また、当研究所との共同研究では、外部改質型小型セルによる加圧特性について検討を進めている。

この他のメーカーでの開発は、富士電機(株)が抄紙法によって電解質を製作し、これまでに7kW級スタック2基の運転実績がある。また、(株)東芝は、ムーンライト計画第I期計画において10kW級スタックを製作した実績があり、三洋電機(株)と(株)東芝は、ナフサを燃料とする10kW級スタックの運転に成功している。

その他にも、松下電機産業(株)や東北大学、横浜国立大学、山梨大学、京都大学などで基礎研究が進められ、大阪工業技術試験所では材料開発、当研究所においてもスタック性能の評価方法および運転技術に関する研究を実施している。

### (2) 国外の開発動向

米国では現在、主に3つの機関がMCFC開発を行っている。IFCは1987年までに電極面積8ft<sup>2</sup>(約7,200cm<sup>2</sup>)のセ

表3-3-1 国内外のMCFCの開発動向

国名	主な開発機関	研究開発状況・主な成果など	共同研究機関名
日本	石川島播磨重工 (IHI)	単セル面積が世界最大の1m <sup>2</sup> の変形大容量型スタック開発* 単セル面積5000cm <sup>2</sup> のセルを用いた2kW級スタックで運転時間1万時間を達成 単セル面積1m <sup>2</sup> ×50枚積層の50kW級スタックを開発* 2kW級ミニプラントの開発*	
	日立	1枚の電極有効面積が1.21m <sup>2</sup> 複合大容量型スタックを開発* 25kW級スタックを用いて加圧条件下で5000時間を超える運転に成功	
	三菱電機	単セル面積1000cm <sup>2</sup> ×50枚積層の5kW級直接内部改質型スタックの運転に成功* 単セル面積5000cm <sup>2</sup> ×62枚積層の30kW級間接内部改質型スタックの運転に成功	関西電力
	三洋電機 東燃	ナフサを燃料として、単セル面積2400cm <sup>2</sup> ×40枚積層の10kW級スタックを運転することに成功	
	東芝	10kW級スタックの開発	
	電力中央研究所	加圧ガスリサイクル運転法の開発 10kW級スタックを5気圧、燃料利用率80%のもとで4300時間運転に成功 1kW級スタック、単セルの特性評価	IHI、三菱、日立、東芝
	その他	材料開発、周辺機器開発	
米国	I F C	外部改質外部マニフォールド型20kW級スタック開発	DOE
	E R C	4000cm <sup>2</sup> ×234セル積層の70kWスタック開発	DOE、EPRIなど
	MC Power、IGT	内部マニフォールド型スタック (IMHEX <sup>®</sup> ) 開発	DOE、EPRI、GRI、IGT、IHIなど
欧州	Hydro Electrica Espanola (スペイン)	1989年から研究開発開始	
	Vattenfall (スウェーデン)	実証プラントのシステム解析中心の研究開発	
	Aiisaldo Ricerche (イタリア)	2.5kW級のスタックを開発 25kW級の加圧試験装置製作中	
	E C N (オランダ)	1000cm <sup>2</sup> ×10セル積層の1kW級スタックの運転に成功	
	M B B (ドイツ)	1995年までに100kW級スタック開発予定	ERC
	Elkraft (デンマーク)	7kW級内部改質型プラント開発	

\* ムーンライト計画

表3-3-2 主要3社のスタック性能の現状

項目	メーカー		日立製作所		石川島播磨重工業		三菱電機	
	方式		外部改質方式		外部改質方式		内部改質方式	
							直接内部	間接内部
① 試験期間			H2/4~6	H3/3~4/1	H3/5~11	H4/3~	H2/1~11	H3/1~4
② 電極面積 (cm <sup>2</sup> )			12,100	12,100	10,000	10,000	5,016	4,854
③ 積層数 (セル)			22	22	10	50	5	62
④ 出力 (kW)			25	25	10	50	3	30
⑤ 初期電圧 (V) (at150mA/cm <sup>2</sup> )			0.70 (常圧)	0.73 (6ata)	(常圧)0.75 (5 ata)0.80	0.73 (常圧)	0.80 (常圧)	0.746 (常圧)
⑥ 燃料利用率 (%)			60	40~60	80	70	60~70	60
⑦ 空気利用率 (%)			17	40	30	11	20	20
⑧ 運転時間 (Hr)			1,612	5,680	4,300	3月下旬より 運転の予定	5,070	2,131
⑨ 電圧劣化加速 (mV/1000Hr)			未発表	15程度	10~40		20~30	9

ルを20枚を積層した外部改質型のスタックを2,000時間以上運転した。ERC (エネルギーサーチ社) では、1989年までに60セル積層の5kW級スタックで連続4,000時間以上の運転を行い、さらに1990年には8kW級スタックで1,600時間の運転を行っている。また、MC PowerとIGT (ガス技術研究所) はEPRI (電力研究所)、GRI (ガス研究所)、DOE (アメリカエネルギー省) の支援を受け、内部マニフォールド型のスタックの開発を行っている。

1988年にAPPA (米国公営電力連合) が燃料電池商用化に関する広告を出し、これに対してERCが提案した2

MW級MCFCプラントが採択され、1994年には内部改質型の2MWプラントが実証運転される予定になっている。現在はその前段階として100kW級スタックの運転試験が行われる予定である。

ヨーロッパにおける開発は日米より遅れて着手され、1986年に発表されたイタリアのVOLTA計画が最初である。EC (欧州共同体) を初めとして、イタリア、オランダ、スペイン、ドイツ等で多くの実証計画があり、1992年頃には10~25kWの電池の運転試験が予定され、1994年頃には100~200kW級の電池の実証試験が計画されている。

## 3-4 基礎研究段階の固体電解質型燃料電池

1899年に安定化ジルコニアの酸素イオン導電性が発見されて以来、固体電解質型燃料電池(SOFC)に関する先駆的な研究がヨーロッパを中心に進められた。SOFCは他の燃料電池に比べると基礎研究の段階である。しかし、セラミックス技術の飛躍的な進展と地球規模の環境問題に対する関心の高まりから、日・米・欧を中心にSOFC実用化への研究開発が最近特に活発になっている。国内外のSOFCの開発動向を表3-4-1に示す。

### (1) 国内の開発動向

日本におけるSOFCの研究は、サンシャイン計画の中で、1972年に始まった。これは水素エネルギーの有効利用に関連した研究が、1981年にムーンライト計画に移行し、本格的に開始された。

この中で電子技術総合研究所は、溶射技術を用いて作った横縞円筒型で、定格出力500Wモジュールの運転試験に成功している。このタイプでは1990年に三菱重工、東京電力、電源開発のグループが独自に1kW級モジュールの運転に成功し、続いて10kW級の開発に着手している。

また、化学技術研究所では、共焼結法を用いてスタックの製造を試みたが、現在では各材料の特性把握が先決であるとして基礎研究に邁進している。

一方、NEDOの委託研究が1989年から開始された。第1段階では、民間6社(富士電機、村田製作所、三洋電機、日本鋼管、藤倉電線)と1研究所(エネルギー総合工学研究所)で数百W級スタックの実現を目指して要素技術の開発と発電システムの研究を、1992年からは第2段階として、数10kW級モジュールの開発が始まる。

また、東燃が石油産業活性化センターとの共同研究で世界で初めて平板型1kW級スタックの発電に成功している。ガス、石油、セラミックス関連企業の参入も多く見られるほか、1986年には文部省科学研究補助金重点領域「エネルギー変換と高効率利用」の課題にも取り上げられ、大学でも実用化を補完する基礎研究が展開されている。

当研究所では1987年より基礎研究に着手し、三層一体焼結型セルの開発を目指し、新材料を開発すると共に1990年には110cm<sup>2</sup>単セルで40Wの発電に成功している。

### (2) 国外の動向

SOFC開発の歴史は日本よりも欧米の方が長いが、ヨーロッパでは一時中断されていた。

米国では、1958年から着手しているWH社(ウェスチングハウス社)が、世界的に一步先んじている。WH社は平板型、横縞円筒型等を経て、独自に開発した電気化学蒸着法で製造した縦縞円筒型を考案するに到った。試験的製造工場で量産された20kW級モジュールの1,700時間連続運転が世界的に最も進んでおり、関西電力、東京ガス、大阪ガスのグループが同社の25kW級モジュールの運転を実施している。

この他にも、共焼結によるスタック製造では、Argonne国立研究所から技術移管を受けたAllied-Signal Aerospace社が、また、平板型スタックの開発では、Ceramatec社やZtek社がそれぞれ取り組んでいる。Ztek社では79cm<sup>2</sup>、10セルスタックで1,000時間の運転試験を行った。米国の国家的なプロジェクトは、1980年にDOE、EPRI、GRIによって発表され、1992年には100~200kW

表3-4-1 国内外のSOFC開発動向

国名	主な開発機関	形式	研究開発状況・主な成果など	共同研究機関名
日本	電子技術総合研究所	横縞円筒型（溶射）	500W級モジュール（最大出力1.2kW）	サンシャイン・ムーンライト計画
	化学技術研究所	平板型（共焼結）	材料開発研究が中心、単セルで数W程度	ムーンライト計画
	NEDO委託研究	平板型、縦縞円筒型	要素技術と数百W級スタックの開発（1989年より） モジュール基本構造の検討と数10kW級モジュールの開発（1992年より）	国内5社・1研究所
	三菱重工	横縞円筒型（溶射） 平板型	1kW級、10kW級（1992年より）モジュールの開発 16cm <sup>2</sup> ×10セルを2000時間運転	東京電力・電源開発 中部電力
	関西電力	縦縞円筒型	WH社製25kW級モジュールのフィールドテストを計画	東京ガス、大阪ガス
	東燃	平板型	世界初の平板型1kW級スタックに成功	石油産業活性化センター
	三井造船	平板型、円筒型	船舶用動力源として開発中	船舶用材機器開発協会
	各大学	基礎研究	文部省科学研究補助金重点領域に指定	
	電力中央研究所	平板型、円筒型	110cm <sup>2</sup> 単セルにて40W、材料開発、製造コスト試算を実施	
米国	エネルギー省		2000年に商用プラントの導入を目指す	
	Westinghouse	縦縞円筒型	20kW級ジェネレータの1700時間以上の運転、量産工場の建設	
	Allied-Signal Aerospace	一体型（ハニカム）	単セル、2セルでは700～800時間の運転、グリーン体で9層積層	
	Z-tak, Ceramatec	平板型	79cm <sup>2</sup> ×10セルで25W、1000時間（Z-tak社）	
欧州	CECプロジェクト	ハニカム型、平板型	1kW級スタック開発（1992年まで） 200kW級コージェネレーション用（1997年まで）	5カ国、9機関
	Siemens（独） Dornier（独）	平板型、円筒型	64cm <sup>2</sup> 単セルの開発 1kW級開発中 25cm <sup>2</sup> 単セルの1500時間試験 2kW級高温蒸気分解装置の運転	ECN（蘭）
	RIS <sup>φ</sup> 国立研究所（デンマーク）		製造技術、非破壊試験法等の開発	Ceramatec（米）、CEC政府計画
	ABB Corp.（スイス）	擬円筒型、平板型	低温（800℃）型を開発中	
C I S	科学アカデミー電気化学研究所	横縞円筒型	63cm <sup>2</sup> /セル×16セル/スタック×6スタックのモジュールで1kWを達成	

級モジュールを運転し、2000年には商用プラントを実現するとしている。

ヨーロッパにおける開発は、Dornierの高温蒸気分解装置を除いて、1960年代以降一時中断していたが、1986年VOLTA計画（イタリア）の開始を契機に、1987年よりEC（欧州共同体）の計画の下、ECN（オランダ）、ABB（スイス）、Siemens、Dornier（ドイツ）等を中心に5カ国、9機関で研究が再開された。当面は1kW級スタック（ハニカム型2種、平板型3種）の開発を目指している

が、最終的には1997年に200kW級コージェネ機を開発するとしており、国立研究所や各大学における基礎材料化学の裏付けの下で、着実な開発を行っている。

この他にも北欧各国、カナダ、中国等でも開発が進められており、旧ソ連邦でも1989年に1kW級スタックの運転を行っている。さらに、1990年にはIEA加盟の9カ国で協定が結ばれるなど、国際協力の下でSOFC開発に取り組む動きもみられ、今後の開発はより効率的に進められると期待できる。

燃料電池は前述した3種類以外にも、数多くの形式のものが考案・開発されている。ここでは、それらの中から、最近特に注目されている燃料電池の特徴と用途を紹介する。

## (1) アルカリ性水溶液を電解液とする燃料電池

この形式の燃料電池は最も古くから研究され、アメリカの有人宇宙船アポロに飲料水製造器と電源を兼ねた電池が搭載された。電解液にアルカリ性の化成カリ(KOH)水溶液を用いているので、アルカリ型燃料電池とも呼ばれている。この形式の燃料電池は、一般的に水素と酸素を用い、60~90℃で運転される。現在でも、スペースシャトルや海底作業艇などの特殊な作業環境での電源として用いられている。

## (2) 固体高分子膜を電解質とする燃料電池

アメリカのデュポン社が開発した固体高分子膜(ナフィオン膜)を電解質に用いた全固体型燃料電池をSPE(Solid Polymer Electrolyte)燃料電池と称している。

この形式の燃料電池は、①出力密度が高い、②100℃以下の低温で作動する、等の優れた特徴をもつほか、電池材料に液相がないため周辺システムを簡略化でき、高出

力密度を生かしたコンパクト電源が構成できる。

これまでは、電解質が高価・短寿命であることや、触媒に多量の白金を必要とすることから、全体としてコストが高くなり、主として宇宙開発用電源として検討されてきた。しかし、最近、新しい高分子電解質膜が開発されたこと、白金使用量の低減の可能性が示されたこと等により、特に車両動力源として期待されるようになった。ムーンライト計画でも平成4年度から要素研究に着手する予定である。

## (3) 実験室レベルで研究されている新型燃料電池

この新型燃料電池の大きな特徴は、燃料ガスと酸素を分ける必要のない比隔膜方式で、電池構造を大幅に単純化できる利点を有している。現在、主に2方式の燃料電池が考案されている。

一つは、アルミナ水和物膜を電解質兼ガス分離膜として用いる燃料電池である。この形式のものは、水素と酸素の混合ガスを流すことによって発電できる。

もう一つは、メタンと酸素の混合ガスを安定化ジルコニア板に流す形式のものである。この場合、電池は、メタン酸化反応の触媒になるため、特に触媒電池と名付けられている。



第 章

4

大型化を目指す  
溶融炭酸塩型燃料電池

## 第4章 大型化を目指す溶融炭酸塩型燃料電池 ● 目次

	企画部 調査役 堀内 長之	
	狛江研究所 電力システム部 系統計画研究室 主査研究員 栗原 郁夫	
	横須賀研究所 エネルギー部 複合発電研究室 主査研究員 森塚 秀人	
	エネルギー部 石炭技術研究室長 田中 隆	
	エネルギー部 石炭技術研究室 主査研究員 中山 稔夫	
	エネルギー部 石炭技術研究室 担当研究員 小林 誠	
	エネルギー部 燃料電池研究室長 阿部 俊夫	
	エネルギー部 燃料電池研究室 主査研究員 渡辺 隆夫	
	エネルギー部 燃料電池研究室 主査研究員 伊崎 慶之	
	エネルギー部 燃料電池研究室 主査研究員 木下 久史	
	エネルギー部 燃料電池研究室 担当研究員 麦倉 良啓	
	エネルギー部 燃料電池研究室 担当研究員 幸田 栄一	
4-1	電池の性能 .....	43
4-2	発電プラントとしての溶融炭酸塩型燃料電池 .....	55
4-3	電力系統における溶融炭酸塩型燃料電池の評価 .....	62
4-4	経済性の評価 .....	64
4-5	1 MW級パイロットプラントの実現に向けて .....	67
4-6	実用化に向けての開発シナリオと開発課題 .....	71



**堀内 長之** (1958年入所)  
同期発電機の分析、揚水発電所の運用、ATR等の開発などの研究から、1975年以来、新エネルギー開発研究に取り組んできた。  
現在、MCFC研究組合に出向しMCFC開発の推進に当たっている。



**森塚 秀人** (1981年入所)  
入所以来、石炭ガス化複合発電システムの解析・制御、また同PP計画の立案・設計に従事。  
現在、燃料改質によるCO<sub>2</sub>回収型火力発電システムやMCFC複合発電システムの検討に取り組んでいる。



**栗原 郁夫** (1982年入所)  
燃料電池や電池電力貯蔵など分散型電源の系統導入評価に関する研究に従事。また、電力系統の新しい制御体系として自律分散制御方式の研究開発を行っている。  
現在は、電力系統の供給信頼度や輸送力評価に取り組んでいる。



**田中 隆** (1969年入所)  
火力発電の排煙脱硫・脱硝技術を研究してきた。その後、石炭ガス化複合発電用のクリーンアップ技術や、石炭火力発電の高度化技術の開発に取り組んできた。  
現在は、石炭技術研究室長を務める。



**小林 誠** (1987年入所)  
入所以来、石炭ガス化複合発電用の乾式脱硫技術の開発を担当してきた。現在は、この知見を活かし、MCFC用のクリーンアップ技術の開発に取り組んでいる。



**中山 稔夫** (1978年入所)  
オキシダントなどの大気汚染物質の環境影響評価について研究を進めてきた。その後、石炭ガス化複合発電、MCFC用クリーンアップ技術の開発に取り組んでいる。

阿部 俊夫 18ページに記載  
渡辺 隆夫 }  
伊崎 慶之 } 30ページに記載  
木下 久史 }  
麦倉 良啓 }  
幸田 栄一 }

## 4-1 電池の性能

### 4-1-1 溶融炭酸塩型燃料電池の概要

#### (1) 単セルの構造

溶融炭酸塩型燃料電池 (MCFC) の単セルの模式構造を図4-1-1に示す。電解質としてアルカリ金属炭酸塩(Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 62%、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 38%)を用いており、約490°Cで塩が溶融状態となり、炭酸イオン(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)のイオン伝導体となる。作動時には電解質が液体になるため、通常リチウムアルミネイト(LiAlO<sub>2</sub>)等の多孔質体に保持させて使用する。

また、燃料極および空気極は多孔質状のそれぞれニッケル(Ni)および酸化ニッケル(NiO)であり、それぞれの電極の表面で電気化学反応を起こさせるため、ガス、

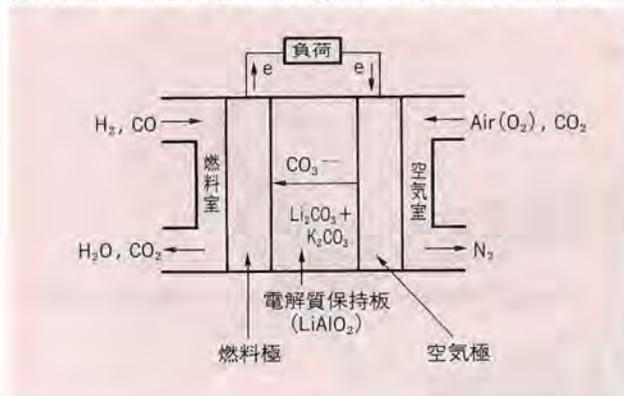


図4-1-1 溶融炭酸塩型燃料電池の模式図

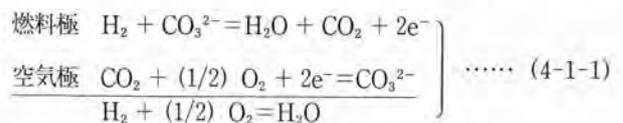
電解質としてアルカリ金属炭酸塩(Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 62%とK<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 38%)を用いており、約490°Cで塩が溶融状態となり、炭酸イオンのイオン伝導体となる。

電解質が液体であるため、リチウムアルミネイト(LiAlO<sub>2</sub>)の多孔質体に保持して使用する。また、燃料極および空気極は多孔質状のそれぞれニッケルおよび酸化ニッケルであり、ガス、電解質および電極と同時に接触させるための細孔構造を有している。

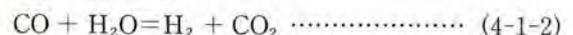
液状電解質および固体電極を接触させるための細孔構造を有している。

電気化学反応としては、燃料極において(4-1-1)式に示すように、電解質中の炭酸イオン(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)と燃料中の水素(H<sub>2</sub>)とが反応し、水蒸気(H<sub>2</sub>O)と炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)を生成するとともに、電子(e<sup>-</sup>)を放出する。

一方、空気極では供給される炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)と空気中の酸素ガス(O<sub>2</sub>)が電極上で反応し、電子を取り込み炭酸イオン(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)として電解質中に溶け込む。これらの反応を図4-1-1のように、電解質を介して起こさせることにより、外部に電気(電流)を取り出すことができる。



さらに、燃料極では、ニッケルが触媒の役割を果たし、(4-1-2)式に示すシフト反応によって、一酸化炭素(CO)と水蒸気から水素と二酸化炭素が生じる。このため、MCFCでは石炭ガスのような一酸化炭素を多量に含んだガスも燃料として利用できることが大きな特長である。

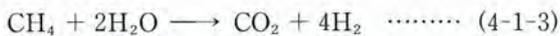


MCFCで発電するためには(4-1-1)式から分かるように、空気極に二酸化炭素を供給する必要があるが、これは通常、燃料極側で生じる炭酸ガス[(4-1-1)式および(4-1-2)]をリサイクルする事によって補えるので、外部から新たに二酸化炭素を供給する必要がない。

MCFCは燃料の改質器をどこに置くかによって、外部

改質型と内部改質型に大別でき、また内部改質型は直接内部改質型と間接内部改質型に分類できる。

図4-1-2および図4-1-3に代表的な外部改質型セルおよび内部改質型セルの構造をそれぞれ示す。内部改質型セルでは図4-1-3に示すように、燃料極側にメタンガス(CH<sub>4</sub>;天然ガスの主成分)の改質触媒を設けている。一般にメタンガスの改質反応とシフト反応



によるメタンガスの燃料転換率は、MCFCの作動温度(約650℃)では小さいが、内部改質型MCFCでは(4-1-1式)の燃料極側の電池反応によって、水素が随時消費されるので、この反応で発生する熱を利用して、比較的高い燃料転換率を得ることができる。このため、内部改質型MCFC発電プラントでは、

- ① 外部改質型に比較して、メタンガスの改質に必要な水を少なくでき、また電池の冷却に必要な動力を低減できる

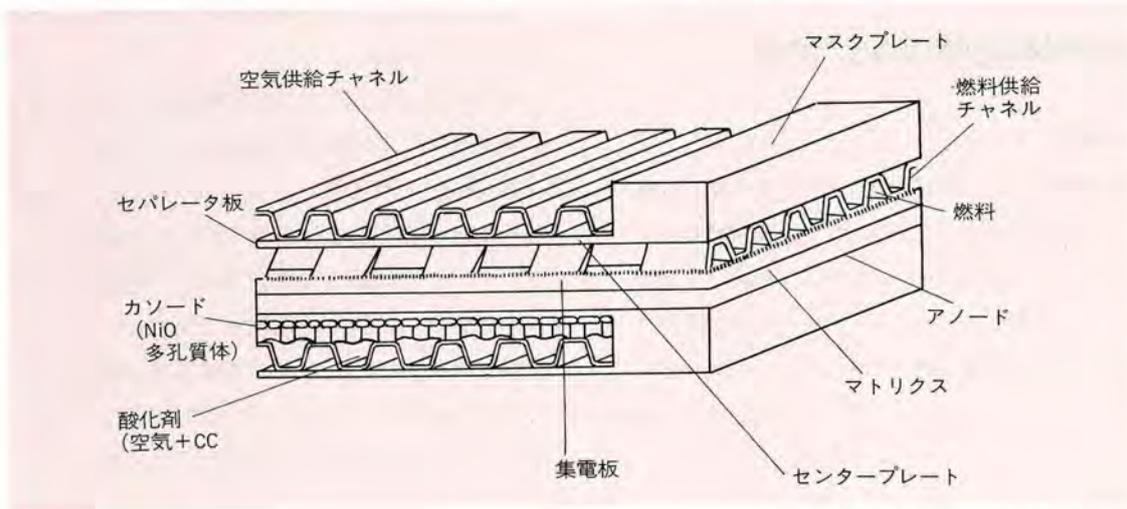


図4-1-2 外部改質型セル構造図

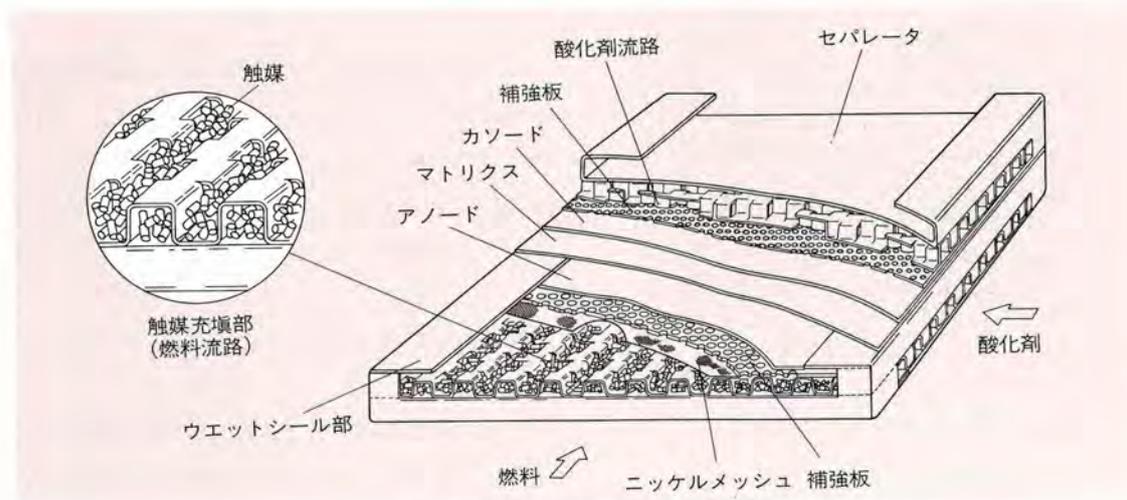


図4-1-3 直接内部改質型セル構造図

このセルでは燃料極側にメタンガスの改質触媒が設けられている。改質で生じた水素が電池反応によって随時消費されるので、電池反応で発生する熱を利用して、比較的高い効率でメタンガスを改質できる。そのため、発電プラントの効率を高くできる特徴を有するが、構造が複雑になるので外部改質型セルに比較し、大型電池に適さない。

② 電池で発生する熱を化学エネルギーとして吸い上げることができる

等により、高い発電効率を得ることができる。

一方、外部改質型MCFCでは、メタンガスの高い燃料転換率を得、しかもカーボンの析出を防止するため、(4-1-3)式において、余分な水を必要とし、プラントの発電効率を下げる原因となる。しかし、図4-1-2からもわかるように、外部改質型電池は内部改質型電池に比較して構造が単純であり、かつ軽量であるので、大型電池の構造として適する。

## (2) セル部材の製造法

燃料極は、原材料であるニッケルの微小粉末を高分子系溶剤の添加によりスラリー状にし、ドクター・ブレード法と呼ばれる方法でテープ状に成型後、還元雰囲気中で高温焼結される。燃料極の微細構造（空孔径および空孔率）は、原料であるニッケルの粒径および焼結温度で制御する。

なお、燃料極のニッケルにはクリープ変形を防止するため、微量のアルミニウムあるいはクロムが添加される。

空気極も燃料極と同様な方法で製造されるが、ニッケルの微小粒子を直接焼結させる方法も採られている。さらに、製造されたニッケルの多孔質板は、酸化され最終的に空気極となる。酸化については、セルを組み立てる前に酸化させる方法、およびスタックの中で酸化させる方法があるが、後者の方法が一般的である。

電解質保持板は一般にリチウムアルミネイト ( $\text{LiAlO}_2$ ) と補強材(アルミナの微粒子あるいは短繊維)とをスラリー状にし、ドクター・ブレード法により成形・乾燥して柔軟なグリーンシートとして作られる。柔軟なグリーンシートの状態でスタックに組み込み、その後、スタックの昇温過程でグリーンシートの脱脂・焼成が行われる。また、電解質保持板への電解質の注入は、電解質保持板に塗布、または数枚の電解質保持板の間に電解質を挟み、スタックの昇温時に溶融・含浸される。

セパレータ板はマスクプレート、センタープレート、集電板等から構成されており、通常ステンレス鋼やニッケルで作られている。セパレータ板は極めて高い平面精

度を要求されるので、プレス加工の採用によって溶接箇所を減らしたり、あるいはレーザー溶接の採用によって溶接の歪みを減らす等、細心の注意が払われている。

## (3) スタックの構造

スタックは多数の単セルを積層することによって組立てられるが、各単セルへの燃料ガスと空気の供給方法によって、外部マニホールド方式と内部マニホールド方式の二つに大別できる。

外部マニホールド方式は図4-1-2および図4-1-3に示すように燃料ガスと空気をそれぞれ、セパレータ板（マスクプレート）の外側から供給する方法であり、比較的小型の燃料電池に採用されている。

内部マニホールド方式は燃料ガスと空気の供給流路をセパレータ板の内部に設ける方式であり、主に大面積セルに採用されている。図4-1-4および図4-1-5に代表的な内部マニホールド方式によるセパレータ板の写真を示す。内部マニホールド方式のセルの開発は有効面積が既に  $1 \text{ m}^2$  を越えており、実用化レベルに達している。

内部マニホールド型セルは図4-1-6のように積層され、ガスシールはセパレータ板間に電解質板を挟み込むことで行われる(ウェットシール構造と呼ぶ)。特に、ウェットシール内部では金属部が直接電解液に接触するので、腐食を防止するため、アルミコーティングを施したり、特別な耐食合金を使用したりしている。

加圧型MCFCではスタックを保温施工後、圧力容器の

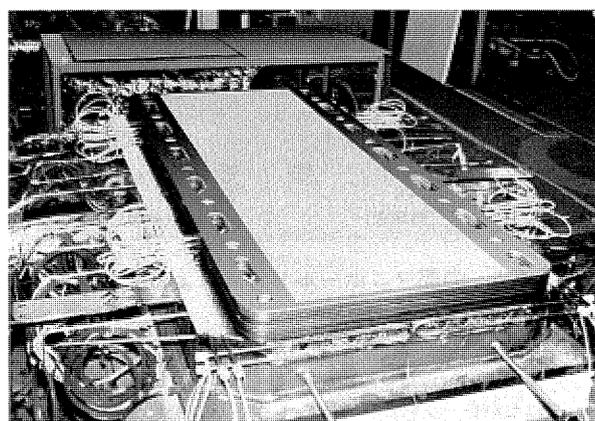


図4-1-4 直方形型大面積セル



図4-1-5 複合型大面積セル



図4-1-7 10kW級スタックの据付け状況

中に設置する必要がある。図4-1-7はスタックを圧力容器に設置する時の状況を示したものである。

#### 4-1-2 基本発電特性

MCFC発電プラントの経済性を向上させるためには、電池本体の高出力化および長寿命化が不可欠である。この方策として、加圧運転による電池性能の向上や電池本体の改善があり、これらの検討には温度や圧力などの条件をさまざまに変えて実験することが重要である。

実際の運転状況に近い大型スタックを用いた試験では、運転上の制約から温度やガス組成等の条件を必ずしも独立して任意に設定することができない。しかし、小型単セルでは、個々の運転条件を広範囲な条件に設定でき、また、限定された運転条件のみの影響に的を絞って研究することが可能である。当研究所では小型単セルを用い、電池の出力向上や寿命の延伸を目的とした基礎的な研究を実施している。

##### (1) 単セル性能の分析手法

MCFCの基本発電特性には、初期特性と経時特性があり、前者は主に効率に、後者は主に寿命に関係する。

初期特性は一般的には電流-電圧特性で表される。単セルの出力電圧 $v$ と電流密度 $j$ の関係は一般的に(4-1-4)式によって近似できる。

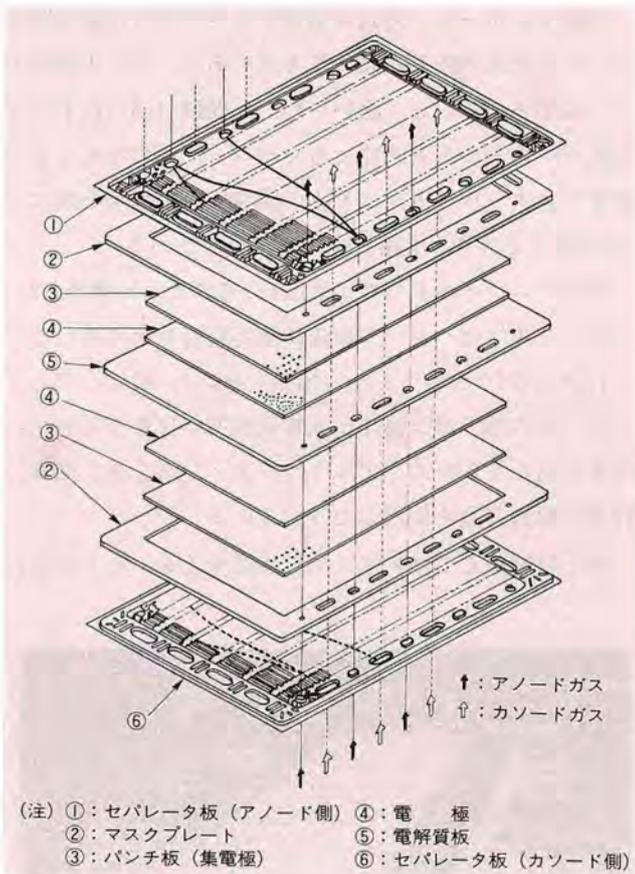


図4-1-6 内部マニホールド方式による大面積セルの組立て構造

内部マニホールド方式によるセルでは、燃料ガスと空気の供給流路がセパレータ板内部に設けられている。また、ガスシールはセパレータ板間のウェットシール構造となっている。ウェットシール構造では金属の腐食を防止するため、アルミコーティング等が施されている。

$$v \cong a - b \times j \quad (4-1-4)$$

ここで、a：開路電圧－ネルンストロス\*

b：電解質板の内部抵抗（イオン抵抗）  
+燃料極反応抵抗+空気極反応抵抗

\*電流を取った場合の開路電圧は、電池内で燃料が消費されるため、希薄となり、低下する。この低下分をネルンストロスと言ひ、ガス利用率が高いほど大きい。

(4-1-4)式中の係数aは燃料と酸化剤のガス組成および燃料利用率によって、セルの構造によらず、ほぼ理論的に決定できる。一方、係数bはセルの構造や材料、温度、圧力、燃料利用率およびカソード側のガス条件等によって複雑に変化する。セルの基本発電特性を把握することを言い換えれば、(4-1-4)式の係数bの詳細を知ることである。

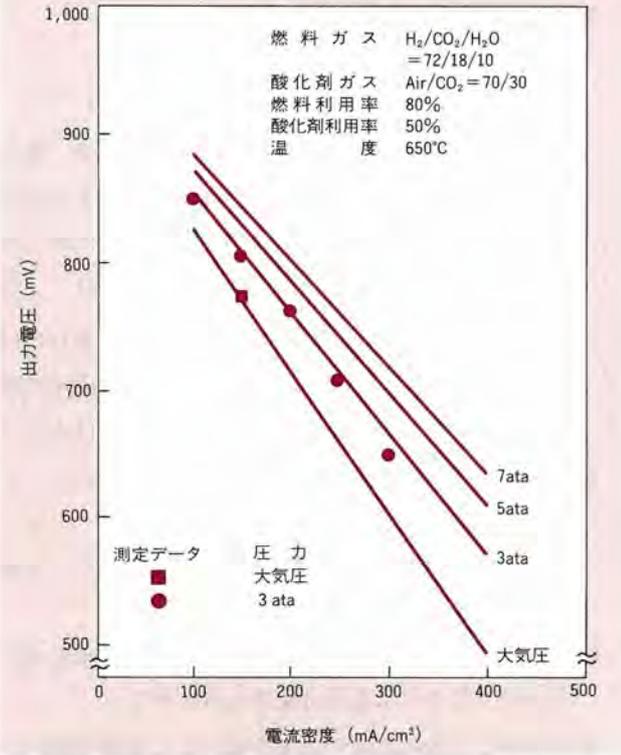


図4-1-8 電流－電圧特性における予測値と実測値の比較

出力電圧は、圧力一定の条件では電流密度を上げるに従ひ低下する。電流密度が一定の条件では、出力電圧は圧力を上げるに従ひ向上する。■印および●印は実験値で、■印のデータから性能相関式を導入し、推定した結果が実線である。3 ataのデータにおいて推定値と実測値はよく一致しており、性能相関式が高精度であることがわかる。

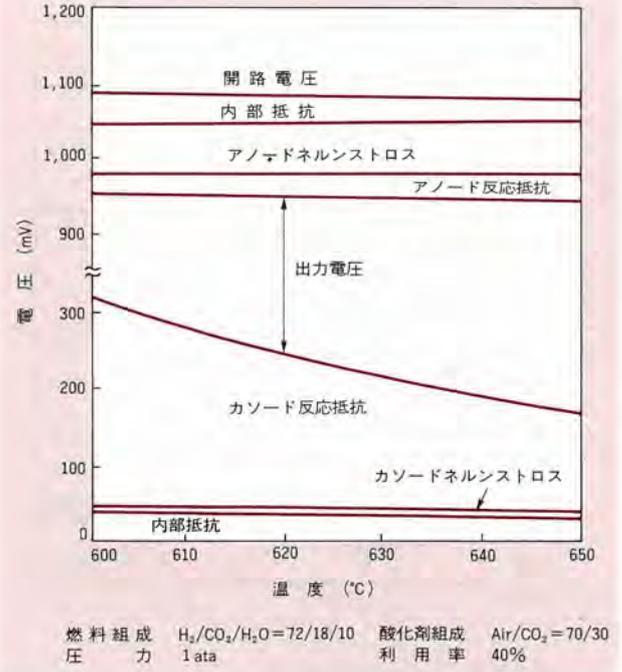


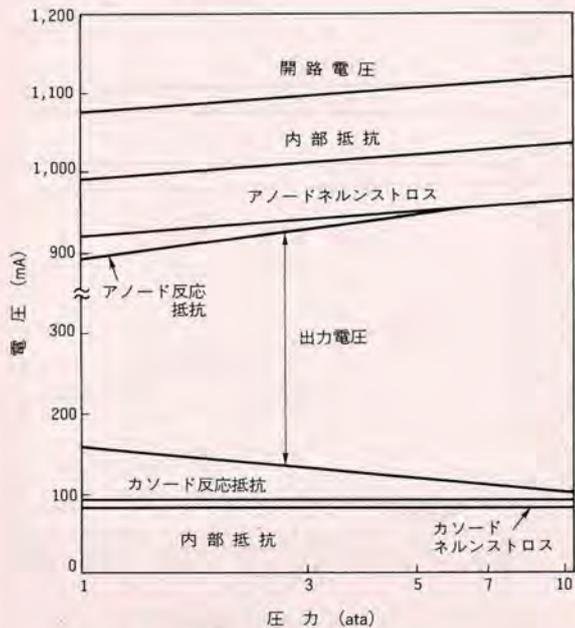
図4-1-9 性能決定要因分析手法になる電池の内部抵抗（温度変化による効果）

出力電圧は運転温度が高くなるに従ひ向上する。向上する主な原因は、電解質のイオン伝導率の向上による内部抵抗の減少ならびに、空気極の反応抵抗の減少である。特に空気極の反応抵抗の減少が大きい。

通常、係数bの値は常圧の単セル試験により、温度および燃料極と空気極のそれぞれのガス分圧の関数として決定することができる。その作業を性能決定要因分析あるいは性能相関式の導出と呼んでおり、単セル性能の詳細を現在最も良く、分析・評価できる手法である。

常圧の単セル試験結果から導出した性能相関式と実験結果との比較の一例を図4-1-8に示す。図中の実線は性能相関式からの予測値であるが、電流密度の広い範囲に亘って加圧時の実験値と良く一致している。

図4-1-9および図4-1-10は、それぞれ温度および圧力を変化させた場合の電池内部の抵抗変化を、性能決定要因分析より求めたものである。これらの結果より、MCFCでは温度が上昇するに従ひ、電解質の抵抗と空気極の反応抵抗が小さくなり、特に空気極の反応抵抗の低下が著しいことにより、単セル電圧vが上昇することが分かる。また、加圧した場合には、①開路電圧が高くなり、②燃料および酸化剤の電解質への溶解が促進され、それぞれ



燃料組成  $H_2/CO_2/H_2O=70/18/10$   
 温度  $650^\circ C$   
 酸化剤組成  $Air/CO_2=70/30$   
 利用率 40%

図4-1-10 性能決定要因分析手法になる電池の内部抵抗（圧力変化による効果）

出力電圧は、圧力の上昇に従い向上する。この原因は、開路電圧が熱力学的に向上すること、反応抵抗（特に空気極）が減少することにある。反応抵抗は、加圧により、ガスの電解質への溶解が促進されるため、減少する。

の反応抵抗が小さくなる等により単セル電圧が上昇することが分かる。

(2) 加圧時のメタンガスの発生とその防止

前述したように、加圧すると一般に開路電圧の上昇と反応抵抗の減少により、MCFCの単セル電圧 $v$ が上昇する。しかし、詳細な実験によると、特に高い燃料利用率で圧力が5気圧以上になると、図4-1-11に示すように加圧による効果が低下する。この原因を性能決定要因分析手法により調べたところ、燃料極側においてメタンガスが生成されるためと分かった。これは、メタン生成により水素が消費され、水素濃度が希薄になって、燃料極側の電池反応が阻害されるためである。

そこで、メタン生成による電圧低下の抑制策を検討した。電池内におけるメタンの生成反応は次式で表わすことができる。

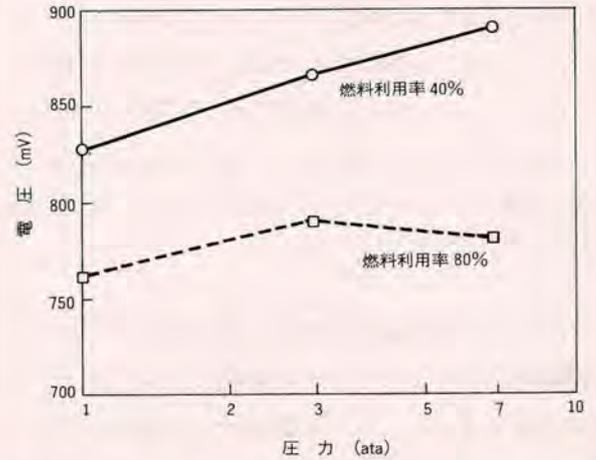
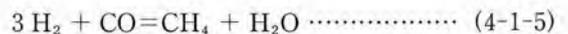


図4-1-11 加圧性能の例

小型単セルを用いて得られた加圧特性である。燃料利用率が40%と80%の場合を示してあるが、80%の場合には5気圧以上、特に7気圧で電圧が落ち込む。これは、電池内で燃料（水素や一酸化炭素）からメタンが生成され、燃料が希薄になるため、80%の場合に影響が特に大きい。



一般的に化学反応では、圧力がより高いほど分子数が少ない方への反応が進む。この場合、左辺よりも右辺の分子数が少ないため、圧力が高いほどメタンは生成し易くなる。水素や一酸化炭素の分圧が高い場合には、メタン生成が起こりやすく、逆に水蒸気分圧が高い場合には、メタンは生成しにくくなる。つまり、メタン生成を抑制するためには、水蒸気分圧を高めるか、あるいは水素や一酸化炭素の分圧を小さくする必要がある。そこで、メタンを抑制するために以下の実験を行った。

- ① 燃料ガスに不活性ガスである窒素を添加し、水素分圧を低下させる。
- ② 燃料ガスへの水蒸気添加量を増加させ、水素分圧を下げ、さらに水蒸気分圧を大きくする。

窒素添加と水蒸気添加の効果を検討した結果を図4-1-12に示す。窒素および水蒸気を適量添加した場合には、圧力の対数に比例し直線的に単セル電圧は向上した。窒素と水蒸気の添加による電圧差は10mV以下であり、添加効果には大きな違いは見られない。メタン生成の影響がない圧力1気圧では、水蒸気を10%添加した場合が最も電圧が高く、メタン生成の影響が大きくなる5気圧以

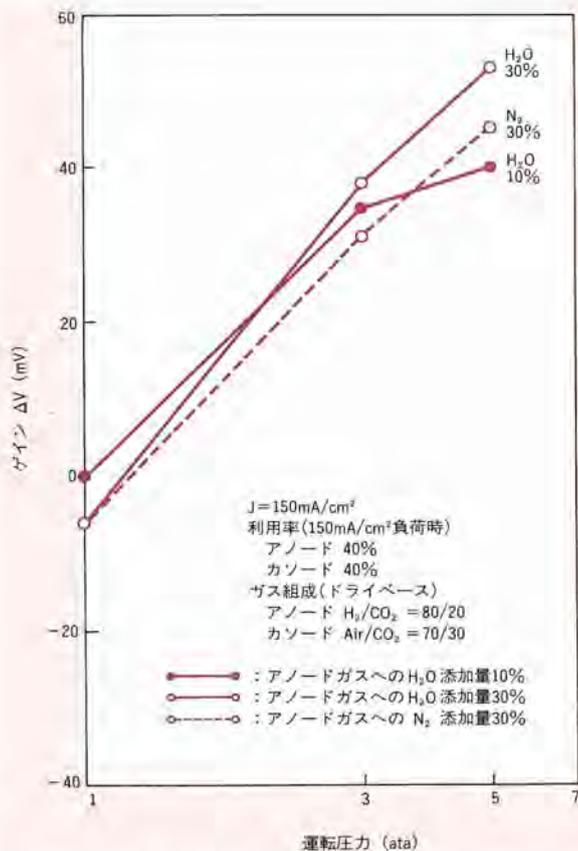


図4-1-12 N<sub>2</sub>ガス、水蒸気添加による加圧特性

水蒸気量が10%の場合、圧力5気圧では電池内でのメタン生成により、燃料が消費されるためゲインが小さい。水蒸気域は、窒素を30%添加した場合には、電池内でのメタン生成が抑制されるため、ゲインは運転圧力の対数に比例して増加する。

上の圧力では、窒素や水蒸気を30%添加することにより高い性能が得られる。すなわち、電池の性能、燃料組成、圧力などの運転条件に応じて、窒素あるいは水蒸気の添加量を調整する必要がある。

具体的には、空気吹き石炭ガスを燃料とする場合には、ガス化装置から得られるガスの窒素濃度を最適化すること、また、天然ガスを燃料とする場合には、天然ガスから水素への改質率を高くすること、燃料極への水蒸気添加量を最適化することにより高性能化が図れる。

### (3) 電池の寿命と信頼性

電池の寿命および信頼性を決定する要因としては

- ① ウェットシール部および電解質板を通したガスリークの増大

- ② 電極、特に燃料極のクリープ変形
  - ③ 集電板の腐食による電気抵抗の増大
  - ④ 空気極からのニッケルの溶出とその析出による電極間短絡
  - ⑤ 電極および電解質の微細構造の変化による電解液分布の変化、あるいは電極反応面積の低下
  - ⑥ 燃料極におけるカーボンの析出
  - ⑦ 燃料中の不純物（イオウ化合物、ハロゲン化合物等）による電極反応の阻害
  - ⑧ 局所的な燃料不足による電解質の電気分解
- 等が考えられる。

この中で①のガスリークは電解質板の割れによるものと、電解質ロスに起因するものとの2つが考えられる。前者の電解質板の割れは電解質板の機械強度の向上により、最近ではあまり問題となっていない。電解質ロスは種々の原因が考えられるが、金属の腐食による電解液の消耗が主因である。このため、耐防食合金の採用やアルミコーティングによる表面処理法が施されるようになってきており、電解質ロスは年々改良されてきている。

②に関しては、燃料極（ニッケル）にアルミニウムあるいはクロムを添加する事によりクリープ特性の向上が図られている。

③は今のところ問題とはなっていない。

⑥のカーボン析出に関しては、通常、燃料ガスに水蒸気を添加することにより防止されているが、適切な水蒸気添加量については明確にされていない。

⑧の局所的な燃料不足による問題は、燃料の流配設計の改善、および後述する燃料リサイクル運転の採用などの防止対策が採用され始めている。

⑤の微細構造の変化、および⑦の不純物の影響については、未だ系統的な研究は行われておらず、今後の課題として残されている。

MCFCの加圧運転における性能劣化要因として、最近では④のニッケル溶出・析出问题が注視されている。ここでは、この問題の最近の成果について紹介する。

酸化ニッケル空気極の溶析出问题とは、発電中に酸化ニッケルが電解質中に溶解し、拡散して電解質板内にニッケルとして析出し、この析出したニッケルが連なり

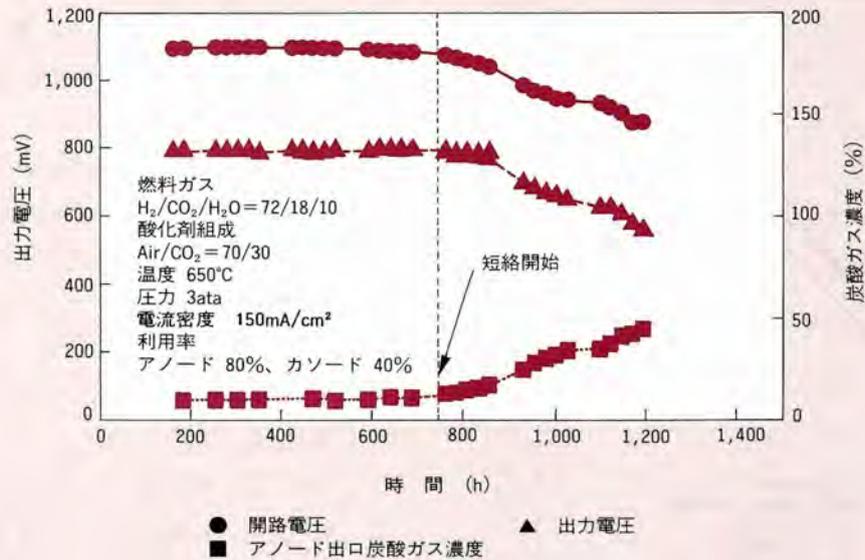


図4-1-13 酸化ニッケルの析出による短絡実験結果の一例

酸化ニッケル空気極の溶出による短絡の実験結果の一例である。圧力3気圧で実施しており、一種の加速実験である。ニッケル溶出による短絡が始まると、回路電圧、出力電圧は徐々に低下する。また、アノード炭酸ガス濃度は徐々に増加する。これは、内部短絡により発電が起り、炭酸ガスが生成したためである。

電極間短絡を起こすことである。この電極間短絡は、空気極側の炭酸ガス分圧が高いほど、また、電解質の厚さが薄いほど顕著となる。

加圧運転は、前述したように、出力電圧の向上には有力な方法であるが、空気極の炭酸ガス分圧を高めるので、酸化ニッケルの溶出を促進する。また、出力電圧を向上させるために電解質板を薄くすると、析出したニッケルが少量でも短絡が発生する。

図4-1-13はニッケルによる内部短絡のみを明確にするため、空気極側の炭酸ガス分圧を上げ、短時間でニッケルによる内部短絡を発生させた場合である。ニッケル短絡の発生は、電池を無負荷状態にした時の燃料極側出口の炭酸ガスの濃度変化として検知することができる。

ニッケル短絡が発生するまでの時間、すなわち、ニッケル短絡を検知できるまでの時間は、通常の意味での電池寿命と異なり注意を要する。電池寿命とは多数のニッケル短絡が生じ、電池電圧が低下して、使用に供せなくなるまでの時間を一般には意味している。

図4-1-14はニッケル短絡時間に対する空気極側の炭酸ガス分圧の影響を示したものであり、図4-1-15は炭酸ガ

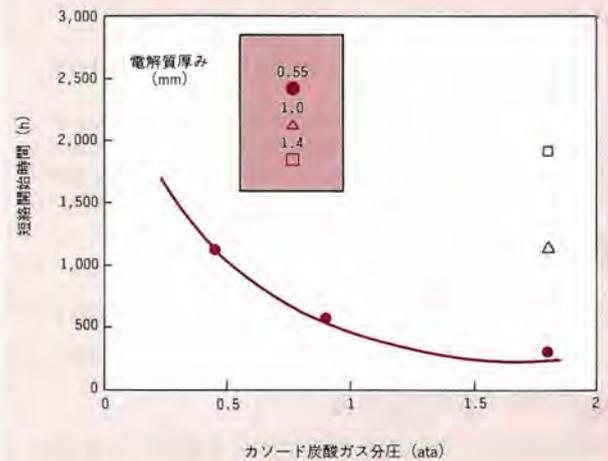


図4-1-14 カソード炭酸ガス分圧と短絡開始時間との関係

酸化ニッケル空気極の溶出による短絡発生時間をカソード炭酸ガス分圧および電解質厚さについて整理した。炭酸ガス濃度が高いほど、また、電解質厚さが薄いほど、短絡は発生しやすい。

分圧が極めて高い場合（実プラントでは加圧運転でCO<sub>2</sub>分圧は0.3~0.7気圧）のニッケル短絡時間に対する電解質の厚さの影響を示したものである。これらの結果より明らかなように、ニッケル短絡時間は炭酸ガス分圧

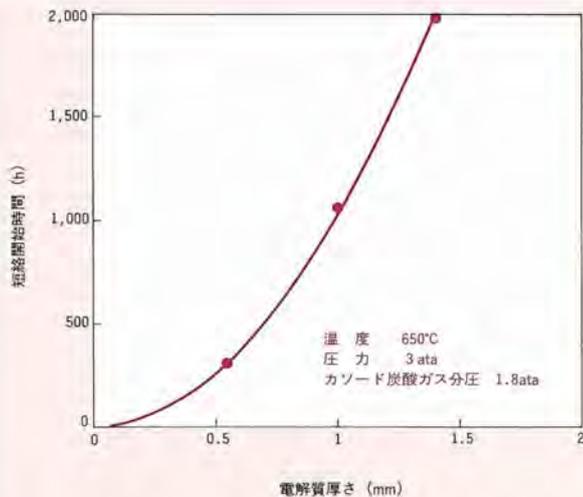


図4-1-15 電解質厚さと短絡発生時間との関係

短絡発生時間は電解質厚さのほぼ2乗に比例する。なお、この実験は炭酸ガス分圧1.8ataと実運転条件のほぼ10倍という厳しい条件で実施しているため、短絡発生時間は非常に短くなっている。

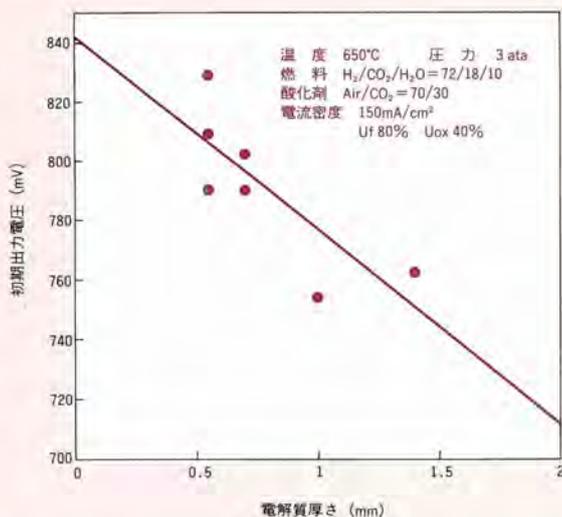


図4-1-16 電解質厚さと初期出力電圧との関係

電解質の厚さは、電池の初期性能、すなわち出力電圧に大きく影響を及ぼす。電解質厚さの増加は内部抵抗の増加につながるため、出力電圧は電解質厚さにはほぼ比例して低下する。

が低いほど、また、電解質板が厚くなるほど急激に長くなる事がわかる。一方、単セル電圧は図4-1-16に示すように、電解質板が厚くなるほど低下する。すなわち、MCFCの設計に際して、炭酸ガス分圧と電解質板厚さを電池性能（電圧）と電池寿命との兼ね合いから決定する

事が極めて重要であることがわかる。

さらに、最近ではニッケル溶出量が電流密度によって大きく左右されるとの報告や、マグネシア等の添加によってニッケル溶出量が低減できるとの報告等があり、これらに関しては詳細な研究が必要である。

現在、MCFCの運転実績はおおむね10kW~25kWスタックで4,000~5,000時間、単セル試験で10,000~20,000時間である。寿命評価とその予測法の確立を図ることはMCFC発電を実用化する上で極めて重要であり、今後一層の研究努力が必要である。

#### 4-1-3 加圧ガスリサイクル運転による効率向上

##### (1) 10kW級MCFC実験設備の概要

当研究所では、大型電池（10~20kW級）の性能評価、および加圧ガスリサイクル等の電池運転技術の開発を行う目的で、昭和63年に10kW級のMCFC実験設備を設置した。設備状況を図4-1-17に示す。

この設備は、2台の試験ループ（発電テスト装置）を持っており、後述する3つのガスリサイクル運転を同時に、しかも加圧条件（1~7気圧）で行うことができる世界唯一の実験設備である。平成3年度までに計6台の10kW級スタックの発電試験を行っている。

##### (2) ガスリサイクル運転技術

MCFC発電プラントを実用化するには、図4-1-18に示



図4-1-17 10kW級MCFC実験設備

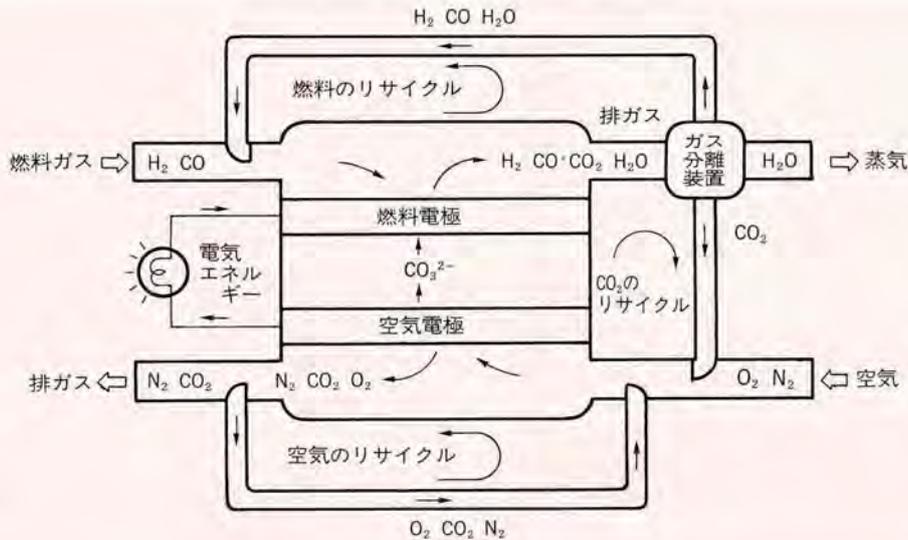


図4-1-18 加圧ガスリサイクル運転システム

MCFC発電プラントを実用化するためには、以下のリサイクル運転の確立が必要である。

- ・燃料のリサイクル……燃料排ガス中の未反応の燃料を入口に戻して、燃料の利用率を上げる。
- ・空気のリサイクル……電池で発生する熱を回収しつつ、温度をコントロールする。
- ・CO<sub>2</sub>のリサイクル……CO<sub>2</sub>供給設備を不要にする。

す3つのガスリサイクル運転技術の確立が不可欠である。

すなわち

① 燃料ガスのリサイクル

燃料排ガス中の未反応燃料を入口へ再び戻して、燃料の利用率を上げると共に、カーボンやメタンガスの発生を防止する。

② 空気のリサイクル

空気極出口ガスを入口に再び戻して、電池で発生する熱を効率良く回収して、電池温度をコントロールする。

③ CO<sub>2</sub>のリサイクル

燃料極側で発生したCO<sub>2</sub>を空気極側に戻し、CO<sub>2</sub>の外部供給設備を不要にする。

さらに、実際の運転ではガスリサイクルと共に、電池の損傷を防止するため、燃料極側と空気極側との圧力差を200mmH<sub>2</sub>O以下にコントロールする必要がある。

その他の運転技術として、電池の監視・異常探査技術、起動・停止運転技術、および部分負荷時の安定運転技術等があり、これらの技術の確立を早期に図る必要がある。

(3) 大型スタックの発電特性

加圧ガスリサイクル運転の一例として図4-1-19に、燃料ガスのリサイクル運転結果を示す。この図は燃料ガスのリサイクル率と電池のエネルギー変換効率（供給した燃料の化学エネルギーのうち、電気エネルギーに変換される割合）との関係を示したものである。図から明らかなように、リサイクルを実施すると燃料利用率を70%から90%に上昇させることができ、その結果、電池のエネルギー変換効率を約46%から53%まで改善することができる。しかし、リサイクル率をあまり大きくすると、リサイクルプロアの動力が大きくなるので、リサイクル率は50%以下が適切であることが分かる。

燃料のリサイクルによって燃料利用率を上昇できる理由を1m<sup>2</sup>級大面積セルを10枚積層した10kW級スタックにより調べた。この場合の各セル電圧とガスリサイクル率の関係を図4-1-20に示す。図から、リサイクル率の増加に伴い、各セル電圧のばらつきが減少することが分かる。すなわち、リサイクルによって、燃料分布の均一化が図られ、局所的な燃料の不足を防止できるので、高い燃料利用率での運転を達成できる。この燃料のリサイク

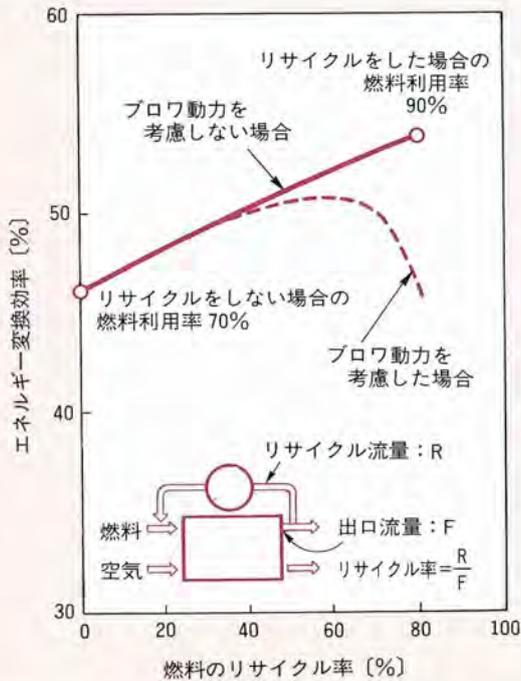


図4-1-19 燃料のリサイクルによる高効率化

未反応燃料を再び入口に戻すリサイクル運転によって、燃料利用率を70%から90%に向上することができ、その結果、エネルギー変換効率を約46%から53%まで改善することができる。しかし、リサイクル率をあまり大きくすると、リサイクルプロウの動力が大きくなり、効率は低下する。

ル運転法は実用規模の高積層スタックに対して、特に有効な運転法である。

大型スタックの性能の現状として、ここでは当研究所と石川島播磨重工業㈱の共同で平成3年5月～11月に実施した10kW級スタックの加圧発電試験について紹介する。

試験に使用したセルおよびスタックは図4-1-4および図4-1-7に示したものであり、スタックは幅830mm、長さ1,870mm、厚さ8mmの単セルが10枚積層されている。単セルの有効面積は約1m<sup>2</sup>であり、単セル面積としては実用規模のものである。燃料と空気は単セルの両端内部に設けられたマニホールドから並流として供給される。

このスタックは、平成2年度にムーンライト計画の一環として当研究所で実施した同一仕様のスタックの試験結果を参考にして、①薄くて広いセパレータ板（マスクプレート）をプレス加工し、単セルの平面精度の向上と変形の防止を図ったこと、②電解質の消耗を防止するた

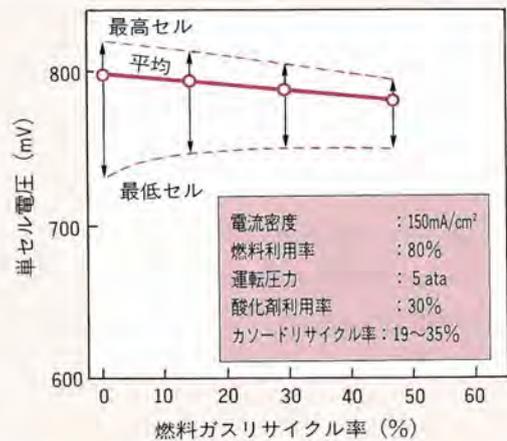
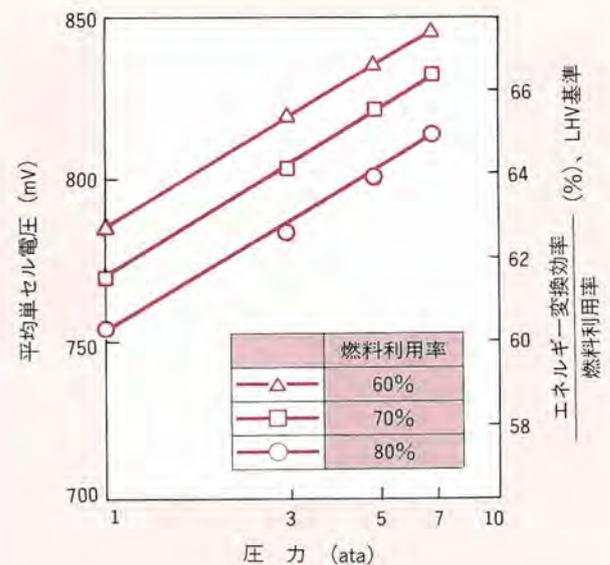


図4-1-20 燃料ガスリサイクルの効果

リサイクル率の増加によって単セル電圧のバラツキが減少する。すなわち、リサイクルによって燃料分布の均一化が図られ、局所的な燃料不足を防止できるので、高燃料利用率運転が可能となる。



スタック中心部温度：650～655°C  
 燃料組成：H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O=68/17/15  
 酸化剤組成：Air/CO<sub>2</sub>=70/30  
 酸化剤利用率：30%  
 カソードリサイクル率：22～45%  
 電流密度：150mA/cm<sup>2</sup>

図4-1-21 10kWスタックの加圧性能

圧力の上昇と共に単セル電圧とエネルギー変換率は上昇する。圧力5ata、燃料利用率80%の時、平均単セル電圧とエネルギー変換率はそれぞれ0.8V、51%であり高効率化が図れる。

め、電解質による金属の腐食を抑える2重の防食コーティング（アルミニウム処理）を採用したこと、③防食コーティングの保護被膜を維持するため、スタックを収納する圧力容器内に微量の空気を注入したこと、等が主な改良点である。

発電試験では、運転初期に基本特性試験を行い、約700時間後からは長期連続試験に移行した。長期連続試験は実機での使用条件を想定し、5気圧、燃料利用率80%、電流密度150mA/cm<sup>2</sup>とした。なお、運転実績は総運転時間4,283時間、負荷運転時間3,680時間、総発電電力量27,619kWhであった。

図4-1-21に運転初期におけるスタックの発電性能を示す。図には平均単セル電圧とエネルギー変換効率を圧力に対して示している。図から明らかなように、圧力の上昇とともに単セル電圧とエネルギー変換率は上昇する。圧力5気圧、燃料利用率80%の時、単セル電圧とエネルギー

変換率はそれぞれ0.8V、51%であり、極めて高効率である。

図4-1-22は平均セル電圧と電池出力の経時変化を示したものである。図中には比較のため、平成2年度に実施した同一仕様スタックの試験結果も合わせ示してある。平均単セル電圧は運転開始後、600時間あたりで一時低下するが、その後2,200時間後まで極めて安定し、その後再び電圧の低下が大きくなっている。電圧の低下率はおおむね10~40mV/1,000hrであり、未だムーンライト計画の目標値8mV/1,000hrに達していない。しかし、平成2年度の試験結果に比較すると、電池寿命はおよそ2倍に延びており、改良の効果が大きく現れている。

電池寿命に影響する要因は前節で述べたように極めて多く、また、複雑であるが、電池寿命は今後の着実な研究努力により一步一步延ばせると当研究所では確信している。

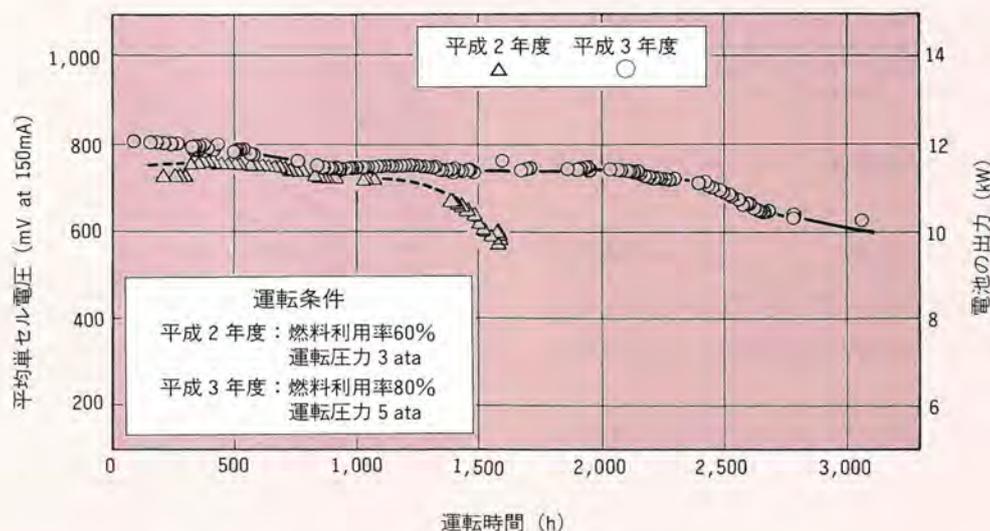


図4-1-22 大面積10kWスタックのセル電圧と出力の経時変化

面積が1m<sup>2</sup>（実用規模）の単セルを10枚積層した10kWスタックの長期連続試験結果である。試験条件は実機を想定したものである。平成3年度の試験では、2,200時間まで安定していたが、その後電圧が低下した。しかし、平成2年度の試験結果に比較して寿命が2倍に延伸された。電池の寿命は一步一步着実に延伸されている事がわかる。

## 4-2 発電プラントとしての 溶融炭酸塩型燃料電池

### 4-2-1 天然ガス利用の溶融炭酸塩型 燃料電池発電プラント

天然ガスを燃料とするMCFC発電プラントは、基本的には図4-2-1に示すように燃料処理系、燃料電池系、排熱回収系、および電力調整系から構成される。しかし、実際には燃料排ガス中の水分を除去するための機器や改質用の蒸気を発生するための機器などが含まれるため、より複雑な構成となる。

システムの構成を順に追うと、まず燃料処理系では、天然ガスを水蒸気で改質してMCFCの燃料となる水素と一酸化炭素を得る。また、燃料に都市ガスなどを用いる場合などは改質装置に入る前に脱硫装置で硫黄分を除

去する必要がある。

燃料電池系では、改質された燃料が燃料極側に供給される。燃料極からの排ガスは未反応分を改質用の燃料として改質器のバーナーで完全に燃焼させた後、空気と共に空気極に供給する。また、空気極の排ガスの一部を空気極入口側へ戻すことにより、電池スタック内の温度を制御する。

排熱回収系では燃料電池からの排ガスで膨張タービンを駆動する。膨張タービンには空気極へ供給する空気の圧縮機が同軸上に連結されており、タービンの出力からこの圧縮機の動力を差し引いた分を電力として取り出すことができる。

また、実際のシステムにおいては燃料極からの排ガスを一旦冷却して水分を除去した後に改質器バーナーに供

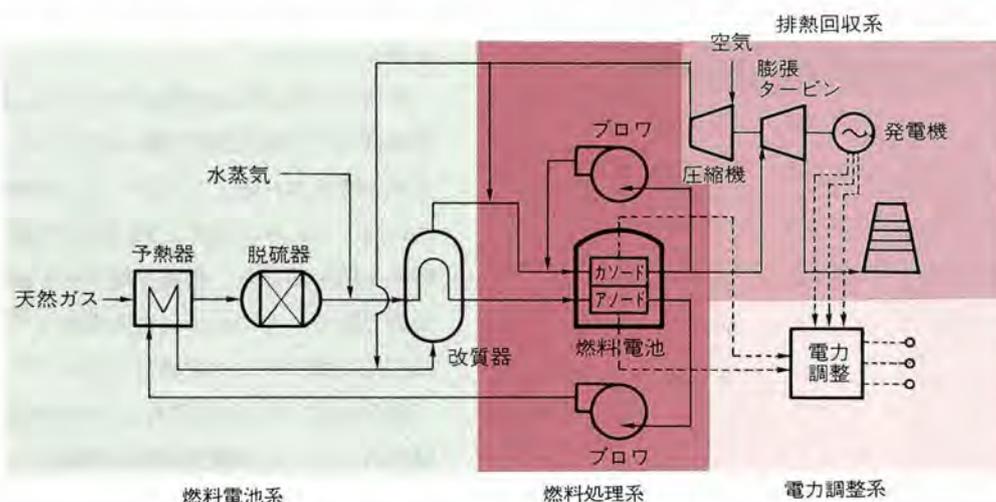


図4-2-1 天然ガスMCFC発電プラント概略構成

天然ガスを燃料とする外部改質型MCFC発電システムの概略の構成を示す。実際には数多くの熱交換器等が必要である。

給する。このため、この過程で水の潜熱分に相当する熱を捨てていることになる。また、膨張タービンを出たガスはまだ400℃近い温度であり、ここからも熱を回収することができる。これらの熱を有効に利用することによって全体としてより高効率なシステムとすることができる。

天然ガスMCFC発電システムの概略の構成は以上の通りであるが、実際のプラントの構成を検討していくと、さまざまなシステム構成を考えることができる。

MCFCの種類から分類すると、燃料電池の内部で天然ガスの改質も行う内部改質型プラントと電池の外に改質器を備える外部改質型プラントに分けることができる。前者は小容量のものでも高効率である反面、スタックの大きさが制限されることなどから50kW～数万kW程度の発電容量のものに適すと考えられる。一方後者は、ボトミングサイクルの発電に依るところが大きくなるので数万kW以上の発電プラントに向いていると考えられる。

また、プラントの用途によって分類すると火力代替用の集中型発電プラントと分散電源とに分けることが出来る。

例として、外部改質型のMCFCを用いた集中型および分散型の発電システムの概念設計の結果を表4-2-1に示す。

表4-2-1 天然ガスMCFC発電プラント概念設計例

システム		集中電源用	分散電源用
送電出力		50.0 MW	24.6 MW
内訳	MCFC	45.6 MW	23.0 MW
	膨張タービン	5.7 MW	3.0 MW
	補機動力	1.3 MW	1.4 MW
送電端効率		54.5 %	50.1 %
総合効率		—	72.5 %
熱回収	冷熱回収率	—	21.5 %
	温熱回収率	—	1.4 %

天然ガスを燃料とするMCFC発電プラントの概念設計例として、発電効率を重視する集中発電プラント、および熱併給を行って総合効率を重視する分散型プラントの2ケースを示す。

す。

集中型のプラントとしては数100MW級のプラントを構成する1系列を想定し、LNGを燃料とする50MW級のシステムの概念設計を行った。その結果、この規模のシステムでも送電端効率は約55%となり、高効率な大規模発電プラントをユニット化して建設できることが分かる。

また、分散型のシステムは熱併給するものとして設計した。特に、高温の排熱が得られるというMCFCの特長を活かすため、できる限り冷熱を多く取り出すことにした。その結果、送電端効率50%以上、総合効率70%以上を見込めることが分かった。

#### 4-2-2 石炭ガス利用の溶融炭酸塩型燃料電池発電プラント

##### (1) プラントのシステム構成と効率

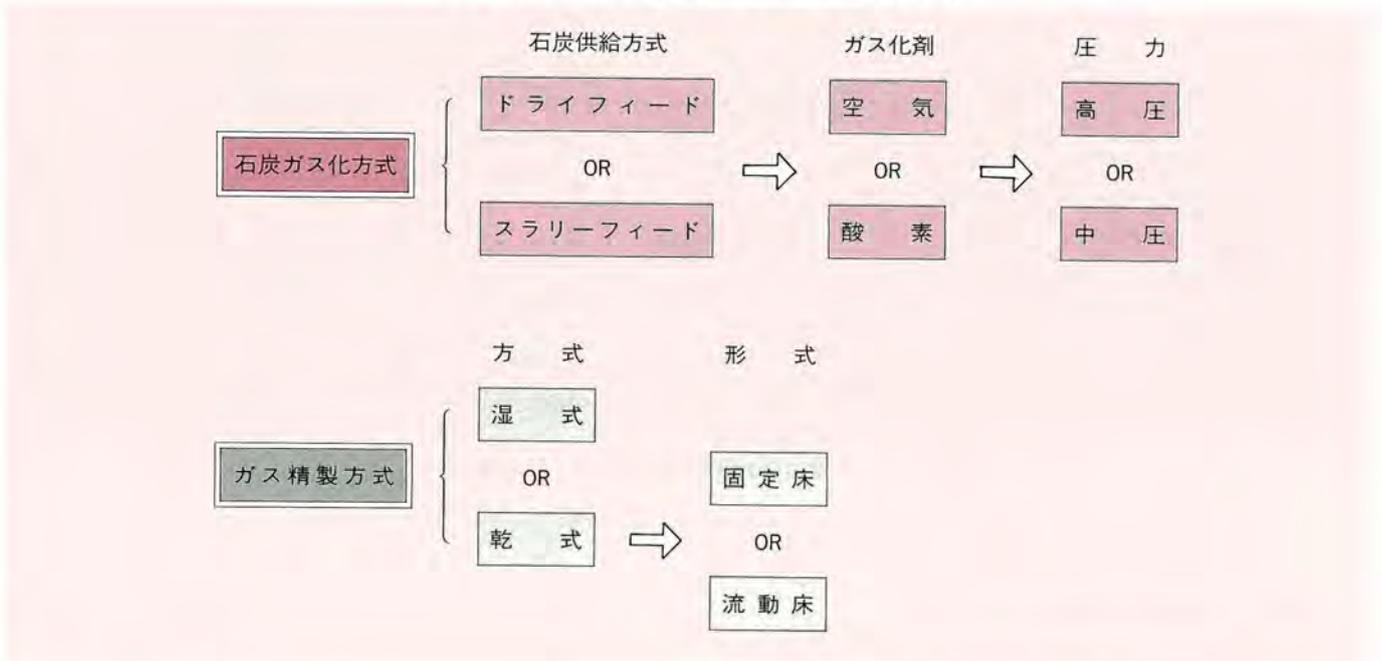
石炭ガス化MCFC発電プラントは、発電効率が高くクリーンな発電システムとして、早期の実用化が強く期待されている。

プラントの基本的な構成は天然ガスのプラントとほぼ同様である。しかし、燃料処理系として石炭ガス化設備、ガス精製設備を備えている点、また、ガス化炉、リサイクルラインおよび排熱回収ボイラ等から多量の蒸気を得られるため蒸気タービンによる発電が重要になる点などが異なっている。

石炭ガス化MCFC発電プラントに適用する石炭ガス化技術、ガス精製技術は表4-2-2に示すようなさまざまな方式が考えられる。したがって、早期の実用化を図るためには、これらの方式とMCFCとを組み合わせる場合の特性を明らかにし、最適な組合せを検討して行くことが必要である。そのため、当研究所では各種の石炭ガス化MCFC発電プラントの検討を行ってきた。

表4-2-3にガス化方式およびガス精製方式の異なる3種類のプラントの概念設計の結果を示す。一例として、図4-2-2に空気吹きガス化炉と乾式ガス精製装置を用いたプラントの構成を示すが、他のプラントもほぼ同様の構成となる。ただし、酸素吹きの場合には酸素製造設備が必要であり、湿式ガス精製を用いる場合に

表4-2-2 石炭ガス化方式およびガス精製方式



はガス熱交換器が必要である。

各システムを比較すると、システムⅠは発電端効率は他に比べて低いが、空気吹きのため、所内動力が少なく送電端効率は50%を超える。

システムⅡはCWMを用いるため、石炭ガスに多量の水分を含んだままMCFCに供給されるので、電池効率が低くなり、3システムの中で最も効率が低い。

システムⅢは湿式のガス精製装置を用いているが、ガス熱交換器の適切な設置により熱のロスを最小限に抑え、3システムの中で最も高い発電効率を示した。しかし、酸素製造設備、水処理設備等が必要となるために建設コストが高くなると予想される。

図4-2-3にシステムⅢのプラントレイアウトを示す。このシステムでは、単位出力当たりの敷地面積が既設微粉炭火力の1.5~2倍もある。これを減らすためにはMCFC本体の高出力化が最も重要であるが、酸素製造設備の不要な空気吹きの石炭ガス化炉の採用、水処理装置や熱交換器類が不要な乾式ガス精製方式の採用も非常に効果的である。

各システムには一長一短があり、現状では、最適なシステム構成を特定することは出来ない。各システムの特

表4-2-3 石炭ガス化MCFC発電プラント概念設計例

	システムⅠ	システムⅡ	システムⅢ	
石炭供給方式	空気搬送	C W M	窒素搬送	
ガス化剤	空気	酸素	酸素	
ガス精製方式	乾式	乾式	湿式	
発電容量	475MW	441MW	447MW	
内訳	燃料電池	296MW	288MW	307MW
	膨張タービン	26MW	45MW	88MW
	蒸気タービン	178MW	167MW	113MW
	所内動力	-25MW	-59MW	-61MW
発電端効率	53.3%	54.7%	58.2%	
送電端効率	50.6%	48.2%	51.2%	

各種のガス化およびガス精製方式をMCFCと組み合わせた場合の特徴を明らかにするため、石炭ガス化方式とガス精製方式の異なる3通りのプラントの概念設計を行った結果を示している。

徴はかなり分かってきているが、今後、効率や経済性のみならず、環境問題や運用性の面から含めて、最適なシステム構成を検討していくことが重要であろう。

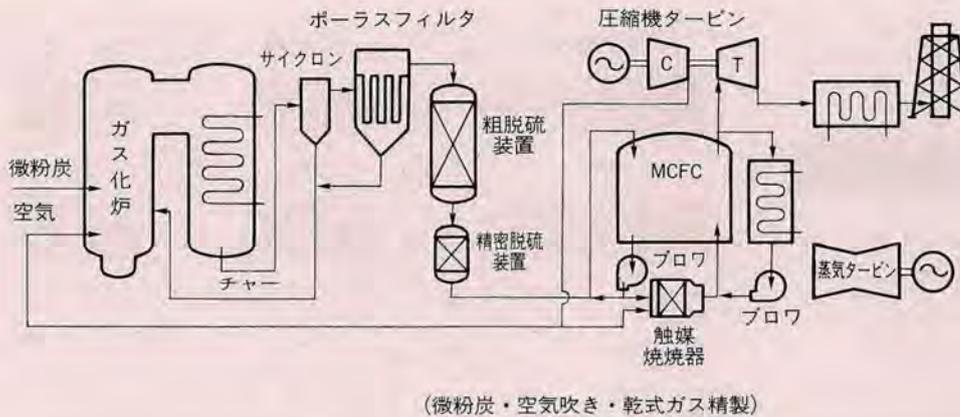


図4-2-2 石炭ガスMCFC発電プラントの概略構成

石炭ガスMCFC発電プラントのシステム構成の一例として、ドライフィード空気吹き石炭ガス化、乾式ガス精製のシステムの概略構成を示す。

## (2) 石炭ガス化MCFC用クリーンアップ

石炭ガスには、未燃分(チャー)、硫黄化合物、ハロゲン化合物、窒素化合物などの不純物が含まれている。これらの濃度は、ガス化方式、炭種およびガス化の条件によって変わるが、およそ図4-2-4に示したレベルである。この他に微量元素、重金属などの不純物が含まれていることも考えられるが、その形態や濃度は定かではない。

これらの不純物の中で、硫黄化合物やハロゲン化合物はMCFCの性能や寿命に大きな影響があると考えられている。チャー、硫黄化合物およびハロゲン化合物について、現状での許容濃度の予測値を図4-2-4に合わせて示した。最も厳しい予測値として、硫化水素や硫化カルボニルなどの硫黄化合物は総量で1 ppm、塩化水素などのハロゲン化合物は0.1 ppmとなっている。なお窒素化合物およびその他の不純物については、いまのところMCFCへの影響が十分には検討されていない。今後、それらの不純物の影響を詳細に評価するため、特に実験的な検討が必要である。

石炭ガスを有効に利用するために、硫黄化合物やハロゲン化合物などの不純物の除去技術はこれまでに開発されてきている。それらは湿式法と乾式法に大別でき、湿式法はアンモニア合成などの化学プラント用のクリーンアップ技術として既に実用化されており、乾式法は石炭ガス化複合発電用に開発が進められている。

しかし、これらの技術は、石炭ガスをMCFC用に利用するには性能が不十分である。硫黄化合物の除去を例にとれば、湿式、乾式いずれの方法でも5 ppm程度が除去の限界であり、許容濃度を満足するにはさらに酸化亜鉛系の仕上げ用脱硫剤を併用する必要がある。

また、ハロゲン化合物の場合にも1ないし5 ppmが除去の限界であり、MCFCの許容濃度を達成するためには一層の高性能化を要する。

このように石炭ガスをMCFCの燃料として利用するには、多種の不純物について極めて低い許容濃度を達成しなければならない。このために

- ① 再生可能で、より高性能な脱硫剤の開発
  - ② 許容濃度を達成するハロゲン化合物吸収剤の開発
- などの要素技術を確認し、従来の技術と比べ格段に高性能なクリーンアップ装置を開発することが、今後の重要な課題である。

従来の技術を改良して、高性能なクリーンアップ装置を開発するためには、経済性にも考慮する必要がある。すなわち、高性能化のための吸収塔の設計、運転条件、ならびに吸収剤などの変更が、建設コストや運転コストを増加させると予想されるので、そのコストを詳細に評価した上で改良方策を決定すべきである。

性能的にも経済的にも満足なクリーンアップ装置が開発された場合、次に重要な検討事項はシステム構成の最

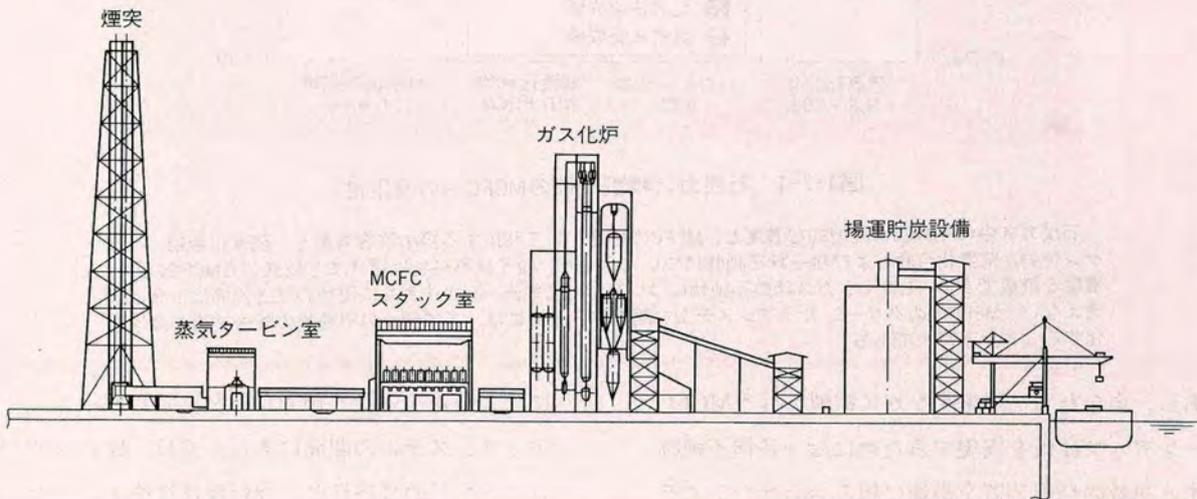
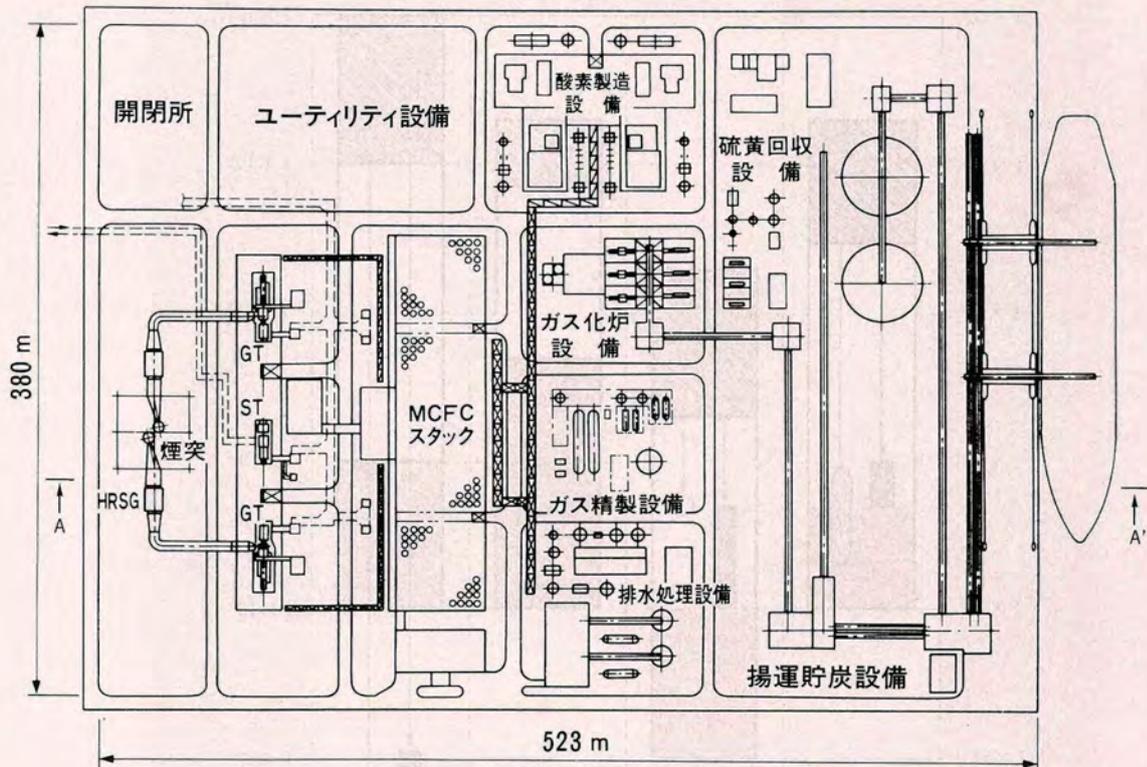


図4-2-3 石炭ガス化MCFC発電プラントのレイアウト

石炭ガス化MCFCプラントのレイアウト例として、ドライフィード酸素吹き石炭ガス化、湿式ガス精製を行うシステムのプラントレイアウトを示す。

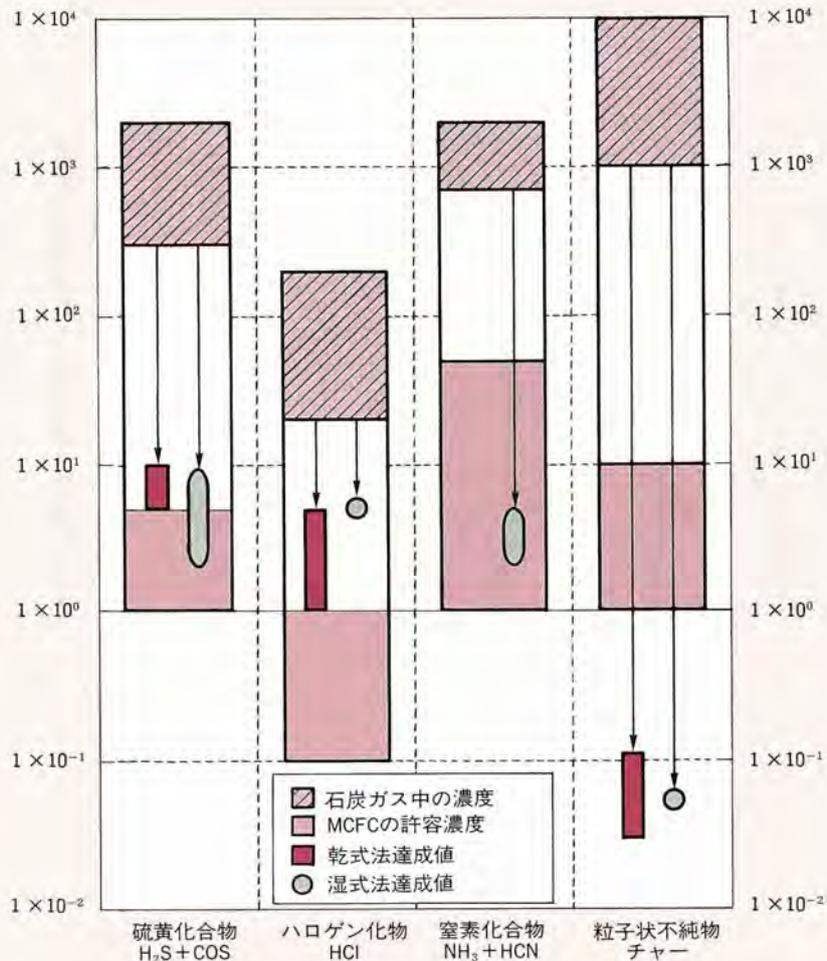


図4-2-4 石炭ガス精製技術のMCFCへの適用性

石炭ガス中の不純物の典型的な濃度と、MCFCの燃料として利用する際の許容濃度を、硫黄化合物、ハロゲン化合物、窒素化合物および粒子状不純物について示した。粒子状不純物は湿式法も乾式法もMCFCの許容濃度を達成できる。しかし、ガス状の不純物については、湿式法、乾式法ともに現状の除去性能は十分とは言えない。MCFC用のクリーンアップシステムを開発するためには、まず個々の不純物の除去技術を高性能化することが不可欠である。

適化である。すなわち、効率的なガス精製を行うMCFC用クリーンアップ技術を実現するためには、各種不純物に対応する複数の精製装置を最適に組み合わせたシステムを構築することが求められる。

現段階では、石炭ガス中の濃度や許容濃度が未確認の不純物も多く、最終的なクリーンアップシステムの構成を限定できない。そこで、MCFC用クリーンアップシステムの基礎評価を、機器構成や熱効率などの面から試みた。その結果、個々のクリーンアップ装置に湿式法と乾式法のいずれを選択しても、発電プラント全体の熱効率

には大差がないことが分かった。したがって、クリーンアップシステムの開発にあたっては、建設コストや運転コストなどの経済性と、運転操作性やメンテナンスなどの運用性が重要な評価項目となることが分かった。

そこで湿式法と乾式法のそれぞれのシステムを検討したところ、経済性を向上させる観点から以下に述べるようなさまざまな問題点が明らかになった。

まず湿式法では、吸収塔のほかに吸収液の再生用の機器類、熱交換器および排水処理設備などが必要となり、これらの数と大きさが建設コストの増大を招く。また、

吸収液の再生動力などが運転コスト増大の原因と成り得る。

一方、乾式法では石炭ガス中の種々の不純物に個別の除去プロセスに対応するため、湿式法と比べて構成機器数が多くなり建設コストが増大する。また、燃料ガスを高温に保つため、湿式法では除去されていた高沸点の不純物が燃料電池まで到達することも考えられる。これら高沸点の不純物を除去するために機器数が増加すれば建設コストの増大につながる。さらに吸収剤が高価であったり、再生困難な場合には運転コストの増大が懸念される。

これらの経済性に関する問題を軽減するために、湿式法と乾式法を最適に組み合わせた簡素なシステムが考えられる。図4-2-5に、湿式法と乾式法を組み合わせたクリーンアップシステムの構成を示す。このシステムでは脱塵と脱硫に乾式法を採用し、湿式法と較べて所内動力の

低減を図っている。また窒素化合物やハロゲン化物などの乾式法で除去しにくい不純物をスクラバで一括処理し、高価な触媒や再生困難な吸収剤を使用しない方式としている。このように一部を湿式法で処理するため、乾式法では問題となった高沸点の不純物も除去できる。

当研究所では、MCFC用の効率的なクリーンアップシステムの実現に向けて、以下に掲げる課題に取り組む予定である。

- ① MCFCの性能や寿命への各不純物の影響評価
- ② 現状のクリーンアップ技術の適用性評価と、改良・改善点の抽出
- ③ 早期実現を目指す乾式・湿式併用システムの改良課題の抽出
- ④ より簡素なクリーンアップシステムの開発に向けた高性能脱硫剤やハロゲン化物の吸収剤の開発

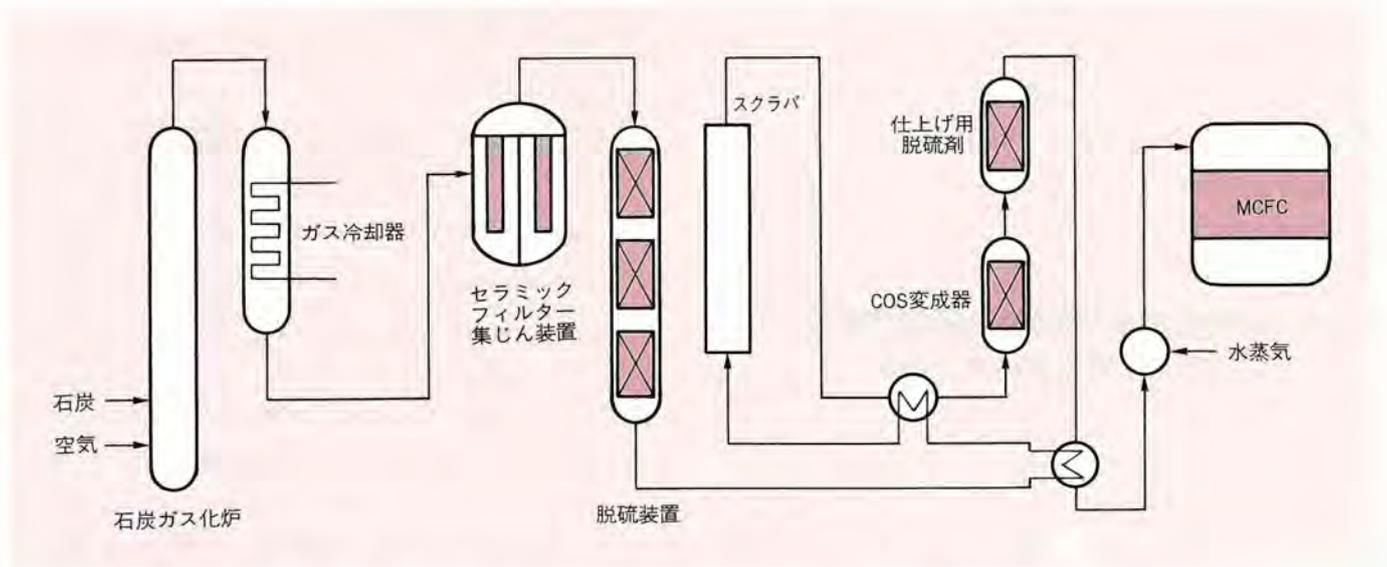


図4-2-5 溶融炭酸塩型燃料電池用石炭ガス精製システム（乾式法＋湿式法）

現状で考えられるMCFC用クリーンアップシステムの最適構成を示した。粒子状不純物はセラミックフィルターで除去する。硫黄化合物の大部分を脱硫装置で除去した後、窒素化合物やハロゲン化合物などの水溶液不純物をスクラバで除去する。このスクラバではガスが冷却されるので、乾式法では除去が困難な高沸点の化合物も同時に除去される。最終的に残った微量の硫黄化合物をCOS変成器で硫化水素に転換し、仕上げ用脱硫剤で許容濃度を達成する。

## 4-3 電力系統における溶融炭酸塩型燃料電池発電の評価

MCFC発電は分散電源から、石炭ガス化と組み合わせた100kW級の大規模集中電源まで幅広い適用が考えられる。

これまで、燃料電池発電の電力系統への導入に係わる技術的課題は、主として分散電源としての適用に伴う系統連系上の保護・制御問題が中心に検討されてきた。しかし、石炭ガス化MCFC発電のような大規模・集中的な導入に対しては、MCFC発電が静止型の電源であることから、特に従来型発電機の同期安定運転に与える影響が重要になると考えられる。

そこで、以下ではまず大規模なMCFC複合発電の導入による系統安定度上の効果について検討例を紹介し、次いで分散電源としての適用に当たって、特に瞬時電圧低下の抑制効果に言及する。

### 4-3-1 大規模溶融炭酸塩型燃料電池発電による系統安定度の向上効果

MCFC発電自体は静止型の電源であるため、従来の発電機のように系統事故に伴うタービン入力と発電機出力のアンバランスならびに回転体の慣性力によって発電機が脱調するという現象はない。しかし、実際のプラントとしては複合発電の形態をとるため、同一地点からの静止型と回転型の異なる2種類の発電方式による送電となる。

図4-3-1に大規模MCFC発電所からの電力輸送を想定したモデルシステムを示す。この場合、線路に事故が発生した時に、複合発電のうち従来型発電機が安定運転できるかどうかを検討してみる。これにはMCFC自体のインバ

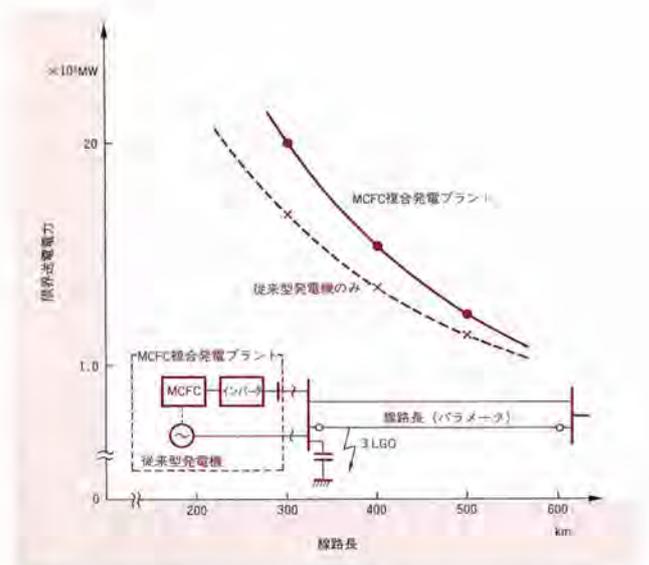


図4-3-1 MCFC発電による電力輸送能力の向上

MCFC複合発電プラントからの電力輸送では、通常の発電機のみによる輸送に較べて、より安定な運転ができるため、10～20%の輸送力の向上が期待できる。

一タの制御・保護方式も大きく影響するので、次のような条件を想定した。すなわち、直流送電等における他励式インバータの制御・保護方式を参考にして、インバータの転流失敗発生とともに遮断器とコンデンサを開放し、事故が除去された後、系統電圧の回復とともに、インバータのソフトスタートにより徐々に出力を増加させ、これと協調をとりながらコンデンサを段階的に投入するものとした。

検討では、従来型の発電機のみによる場合とMCFC複合発電の場合で、過渡安定度によって決まる送電限界がどのように変化するかを見ることとした。図4-3-1はその結果の一例であり、送電距離に対する限界送電電力を示

した。同一の送電線に対して、通常の発電機のみによる場合に較べて、MCFC複合発電では10~20%程度の輸送力の向上が見られる。

これは、MCFC複合発電の中の回転体発電機の全電力輸送に占める割合が小さいことや、インバータ制御によるMCFC発電本体の速やかな出力回復などによるものである。なお、輸送力限界点の状況について調べると、端子電圧の低下によりインバータが再度分離され、結果的に発電機が脱調するという経緯をとる。このため、インバータの安定運転領域を広げることにより、輸送力の一層の向上が期待できる。

#### 4-3-2 分散電源としての瞬時電圧低下の軽減効果

燃料電池発電を分散型電源として、配電用変電所など比較的需要地に近い所に導入する場合には、系統事故による過渡的な電圧低下、いわゆる瞬時電圧低下に対して、ある程度これを軽減する効果があるものと考えられる。そこで、一例として図4-3-2に示すモデルについて、上位系統で1線地路事故が発生した場合の負荷側電圧の変動

について検討してみた。

燃料電池は1ユニット5MWとし、配電用変電所に3台設置された状態を想定した。燃料電池発電のインバータは自動式PWM制御を考え、ある程度の電圧低下に対しては優先的に電圧制御を行う方式とした。

結果は同図に示すように、燃料電池のない場合には事故発生とともに30~40%程度の電圧低下を生じる。なお、これまでに実測された瞬時電圧低下の7~8割はこの範囲に入っている。

燃料電池を設置した場合には、電圧低下は図のように緩和される。燃料電池の導入量が増えれば電圧低下の抑制効果は大きくなるものの、仮に配電用変圧器の容量と同量(20MW)の燃料電池を導入しても、鋭敏な負荷機器にとって問題が生じないような値(電圧低下量15%以下)までに抑制することは困難である。また、電圧低下時には、インバータに3倍程度の過電流が流れる。

このため、実際問題としては、系統事故時におけるインバータの保護・制御方式ならびにコスト面からの過負荷耐量に依存するものの、燃料電池単独で瞬時電圧低下に対応するのは、相当の導入が進んだ場合でも困難であると考えられる。

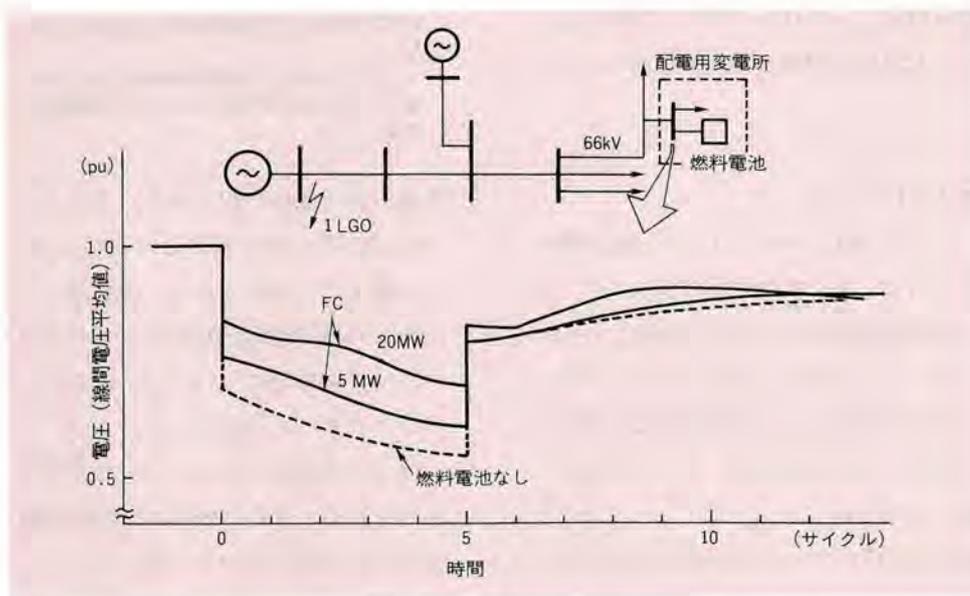


図4-3-2 分散型燃料電池による瞬時電圧低下に対する評価

燃料電池を分散型電源として、配電用変電所などに導入した場合、電力系統の事故による瞬時電圧低下はある程度緩和される。しかし、電圧低下に鋭敏な負荷機器に影響を与えない程度(電圧低下量15%以下)にまで抑制することは難しい。

## 4-4 経済性の評価

### 4-4-1 材料コストからの経済性評価

MCFCは、開発途上の技術であるため現時点で経済性を適正に評価することは困難である。しかしながら、目標コストの設定とそれに至るコストダウン方策を検討しておくことは、今後の技術開発の方向性を明らかにする上でも有用である。

そこで、経済性の評価方法の一つとして、現状のスタック材料費と将来要求されるコストとの比較による評価を試みた。すなわち、現時点で考えられる電池構成材料費を類推すると共に、将来要求されるMCFCプラントコストから要求材料費を設定し、これらのコスト比較により将来の実用化に向けた課題、開発の方向性を明らかにすることとした。

#### (1) スタック材料コストについて

現在の10kw級スタックを基に、平成5年より運転が開始される100kW級スタック、ならびに1MWプラントでの使用が想定される250kW級スタックの3種類について、I) セル本体、II) ヒータやマニホールなどの付属構造物、III) 圧力容器に区分し、その材料重量の積み上げによりスタック材料コストを求めた。なお、材料の歩留まりは一切考慮していない。

図4-4-1に出力別のMCFCスタックの重量比率を示す。これより、現状の10kW級スタックでは、圧力容器の比率が最も高いが、出力の増加にともないスケール効果によりその割合が少なくなることが分かる。

図4-4-2に250kW級スタックに使用される主要材料の

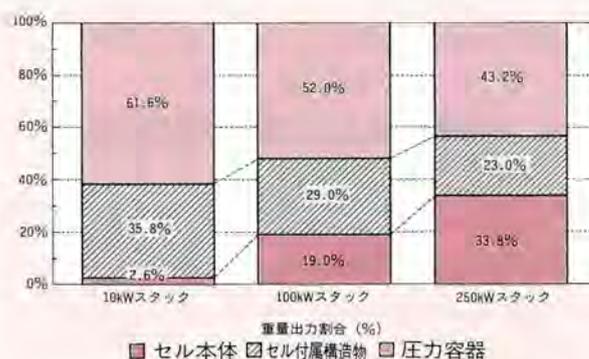


図4-4-1 大容量スタックの重量割合

本図は、各スタック容量別に見た、セル本体、セル付属構造物および圧力容器の重量割合を示したものである。

10kW級スタックでは、圧力容器とセル付属構造物が全体の97%で、特に圧力容器は60%を占め、セル本体は2.6%にすぎない。

しかし、スタック容量の増加に伴い、セル本体の重量割合が増し、逆に圧力容器およびセル付属構造物の重量比率が減少する。

重量内訳と価格内訳を示す。ここで、将来価格とは、将来のMCFCの実用化により大量に材料が使用されることを想定した価格であり、炭酸鋼、ステンレス、ニッケルなどの汎用材料は数%のコストダウンを、炭酸塩、マトリックス材等については、将来の大量使用による大幅なコストダウンを想定した。

図より重量比ではニッケルおよびステンレスが全体の8割を占め、また、価格でも将来価格を適用した場合、全体の約8割を占めている。

図4-4-3には、250kW級スタックを基準にした出力別スタックの材料費ならびに商用段階に要求される材料費の比較を示した。ここで、商用段階の材料費は、商用段階におけるブレイクイーブンコスト (約20万円/kW) の

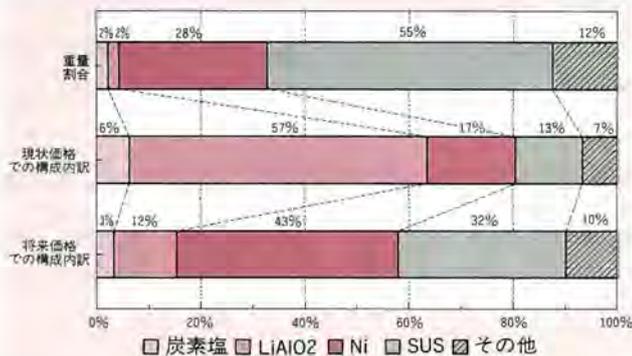


図4-4-2 250kW級スタックの主要材料内訳と価格内訳

本図は、250kW級スタックに使用される主要材料に対する、重量割合と、材料価格に現状および将来の価格を適用した場合の内訳比率を表したものである。

重量比率では、ニッケルとステンレスが全体の83%を占めている。また、重量比率と価格比率を見た場合、チリウムアルミニウムは重量で2%にすぎないが、現状価格では、57%であり単位重量当たりの価格が高価であることがわかる。

一方、価格に将来価格を適用した場合、チリウムアルミニウムの大量購入により、大幅な価格低下がある。この結果、ニッケルとステンレスの価格が全体の75%を占める。従って、将来のコストダウンには、これら材料の低減化が最も重要な要素となる。

1/5程度を電池の材料費が占めるものと仮定した。

図より、250kW級スタック材料費は10kW級の1/3である。これは、圧力容器およびセル付属構造物のスケールメリットによるものであり、電池本体は、全くスケールメリットが無いことが分かる。

これらは材料価格に将来価格を適用したものであるが、商用段階の要求コストとはまだ開きがある。

## (2) MCFCプラントのコスト低減方策

商用段階の要求コストの実現には、材料コストに大きな割合を占めるステンレスおよびニッケルなどの価格の低減を期待するか、もしくは、安価な新材料の適用を実現させる必要がある。

しかしながら、特にニッケルの市場価格は現状でも激しく変動しており、将来、大量に使用されるとしても大幅な価格の低減は望めない。また、現状ではニッケルやステンレス代替材料はない。

したがって、MCFCを商用可能なコストまで下げるためには、kW当たりの電池出力密度の向上を図り、材料の

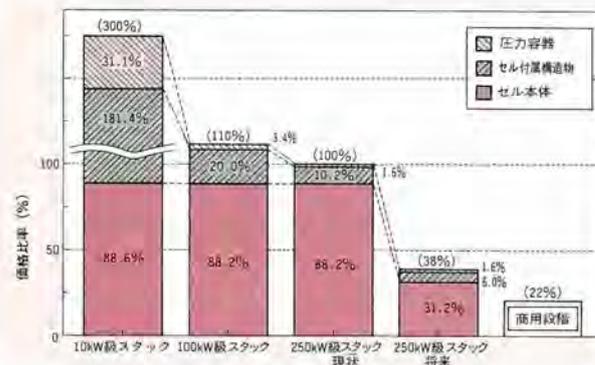


図4-4-3 容量別スタック材料費の比較

本図は、商用段階に要求されるスタックの材料コストに対し、現状および将来の材料価格を適用した場合の、各種容量別スタックの材料費率を示したものである。

スタック容量別の比較において、10kW級スタックが250kWスタックに容量が増加した場合、コストが1/3になるのは、圧力容器およびセル付属構造物のスケールメリットによるものである。一方、セル本体は、スケールメリットがほとんど無いことがわかる。

また、250kW級スタックに将来の材料価格を適用した場合でも商用段階の要求コストには、まだ開きがあることがわかる。

使用量の低減を図ることが最も妥当なコスト低減対策である。

## (3) 要求性能およびコスト低減方策

先の材料費の試算において将来価格を用いたケースと商用段階のケースの比較により、材料費を低減させるために必要な電池性能は、以下の通りである。

$$\text{要求性能} = \text{現状電池性能} \times \frac{\text{将来の材料コスト}}{\text{商用段階コスト}}$$

ここで、現状の電池性能は1kW/m<sup>2</sup>、現状価格に対する将来の材料コストならびに商用段階コストはそれぞれ、図4-4-3より、38%、22%である。

以上から将来の電池性能は、1.7~1.8kW/m<sup>2</sup>とする必要がある。しかし、現状では材料価格が不透明であるので、目標として当面出力密度を1.5kW/m<sup>2</sup>として考えることが妥当であろう。

現状技術では、実用規模セル（電極面積1m<sup>2</sup>級、出力密度1kW/m<sup>2</sup>）の加圧運転における初期性能として、814mV、150mA/cm<sup>2</sup>が報告されているが、出力密度の向上を図ることによって、先の要求性能を達成する技術開発

が必要である。

電池本体は開発途上の技術で、今後も性能向上へ向けた技術開発の余地があり、コストダウンの期待は大きい。また、貴金属を使用せず、汎用金属を使用していることから、将来の大量生産による大幅なコスト低減ができるものと期待される。

#### 4-4-2 分散電源としての送変電クレジット

分散電源を導入すると、送変電設備に対する建設コストが軽減でき、電力供給に対するトータルコストの減少が期待できる。この効果は送変電クレジットと呼ばれている。ここでは、この送変電クレジットについて試算例を紹介する。

燃料電池を分散型電源として導入する場合の送変電クレジットについて、従来は平均的に見てどうなるかという議論が多かった。しかし、実際には導入地点や導入可能量などがさまざまであるため、これらのバラツキを考慮した上でクレジットを評価することが妥当である。

そこで、既存の輸送設備の老朽度による増設のタイミ

ングや需要の伸びなど、地点によるバラツキを考慮した上で、一般市街部、都心部、都心過密部の3種類の地域について、確率論的な立場から送変電クレジットを検討してみた。

図4-4-4は配電系統のある地点への燃料電池の導入量と送変電クレジットとの関係を示したものである。これによると、平均的なクレジットの値は導入量によらずほぼ一定である。

一方、地点によるバラツキを考慮した場合には、導入量が少ないと、状況によっては大きなクレジットが期待できるものの、ほとんどの場合は期待できない。これは導入量が少ないため、その影響が上位系の輸送設備の増設繰り延べまでには及ばないためである。

これに対し、導入量がある程度増えると、バラツキが減少し、導入地点を特に選ばなくても、ある程度のクレジットが期待できるようになる。

確率的に最も出現しやすいクレジットの値から見ると、都心部や都心過密部では負荷容量の15%程度以上の燃料電池を導入すれば、間違いなく大きな送変電クレジットが期待できることになる。

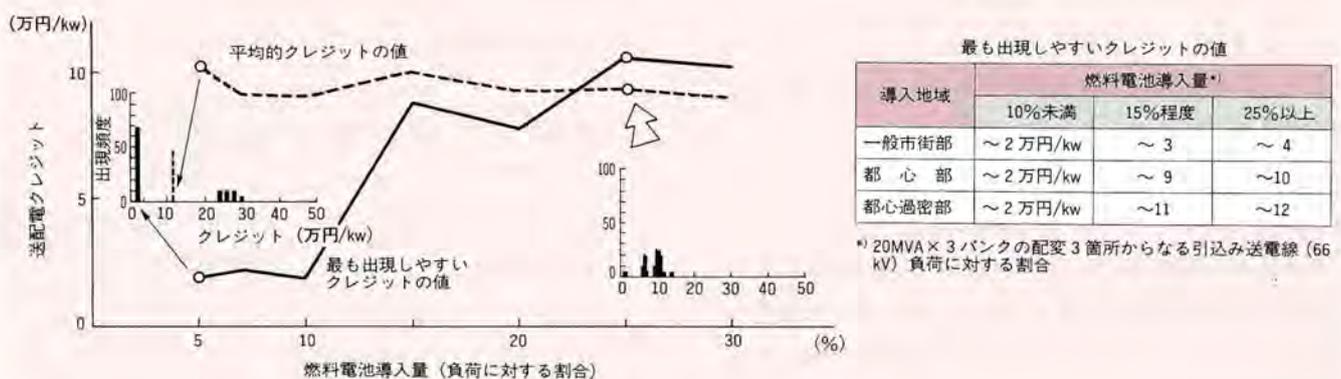


図4-4-4 燃料電池導入地点の系統状況のばらつきを考慮した送変電クレジット

図は、燃料電池のある地点への最大導入量をパラメータとした場合の送変電クレジットの値を示したものである。

ここでは、燃料電池の導入地域が異なる場合においても引き込み送電負荷に対する燃料電池の導入量が15%未満であると、大きなクレジットが期待できないことを示している。

しかし、同様に燃料電池の導入量が15%以上であると、送配電系統における上位系統の輸送設備の繰り延べ等による送変電クレジットが期待でき、特に都心部や都心過密部では、25%以上の燃料電池の導入により大きな送変電クレジットが期待できることを示している。

# 1 MW級パイロットプラントの実現に向けて

## 4-5-1 ムーンライト計画における1 MW級パイロットプラントの開発

わが国のMCFCの開発は、通産省工業技術院のムーンライト計画の一環として、昭和56年から開始され、現在、第II期計画（昭和62年～平成9年度）が進められている。このうち前半は、100kW級燃料電池スタックの開発・実証と、発電プラント化へ向けての1MW級システム技術の確立を、後半では、1 MW級発電プラントの開発・実証を行う計画である。

電池本体については、既に25kW～50kWのプリプロトタイプ電池の試験に着手している。また1 MW級発電システムを構成する周辺機器については、基本設計が概ね完成しつつある。そして、燃料電池本体は平成5年9月の中間評価に向けて100kW級スタックを製作・運転し、引き続き、250kW級スタック（1 MW級パイロットプラント用）へと展開する。

一方、システムおよび周辺機器技術については、同様に中間評価として1 MW級機器を試作して運転性能を把握する。これらのすべての要素技術の実証試験は、当研究所の赤城試験センター構内に開設したMCFC研究組合赤城総合試験所にて実施する。

## 4-5-2 1 MW級パイロットプラントの構成と周辺機器

ムーンライト計画におけるMCFC発電の開発では、平成5年度後半から1 MW級パイロットプラントの開発

に着手し、平成8年度には実証運転を開始する計画である。

開発目標は、LNGを燃料として発電効率45%以上、環境対策として法令以下の基準を満たすことである。

1 MW級MCFC発電システムは図4-5-1に示すように大きく分けて燃料系、スタック周辺系、排熱回収系とそれらを総括制御するシステム制御系の4つのサブシステムで構成される。

燃料系は天然ガスを水素に富んだガスに転換するサブシステムで、燃料改質器が中心となる。この改質器に必要な熱源としては、燃料電池の残存燃料ガスを燃焼させて得る方式を採用している。このため、燃料極から出る低カロリーの残存燃料ガスを安定して燃焼させるため、触媒燃焼方式が採り入れられている。

スタック周辺系は電池本体の空気冷却や、電池反応に不可欠な空気極への炭酸ガス供給等を行うサブシステムで、電池本体やその周辺のガスリサイクルライン等で構成される。リサイクルラインには700℃の高温に耐える構造の高温ガスプロアが必要となる。

排熱回収系は、燃料電池から出る高温高圧の排ガスエネルギーを回収するサブシステムであり、電池に供給する空気の加圧や改質器に必要な蒸気の発生などに利用する。そのため、空気極出口の高温、大流量ガスから動力および排熱回収を行う高性能で耐久性のあるタービン圧縮機および排熱回収熱交換器が使われる。

システム制御系は、各サブシステムを相互に有機的に動作させて、発電設備として具備すべき性能で速応性のある運転制御を可能にするものである。

現在、開発されているシステム・要素機器と1 MW級

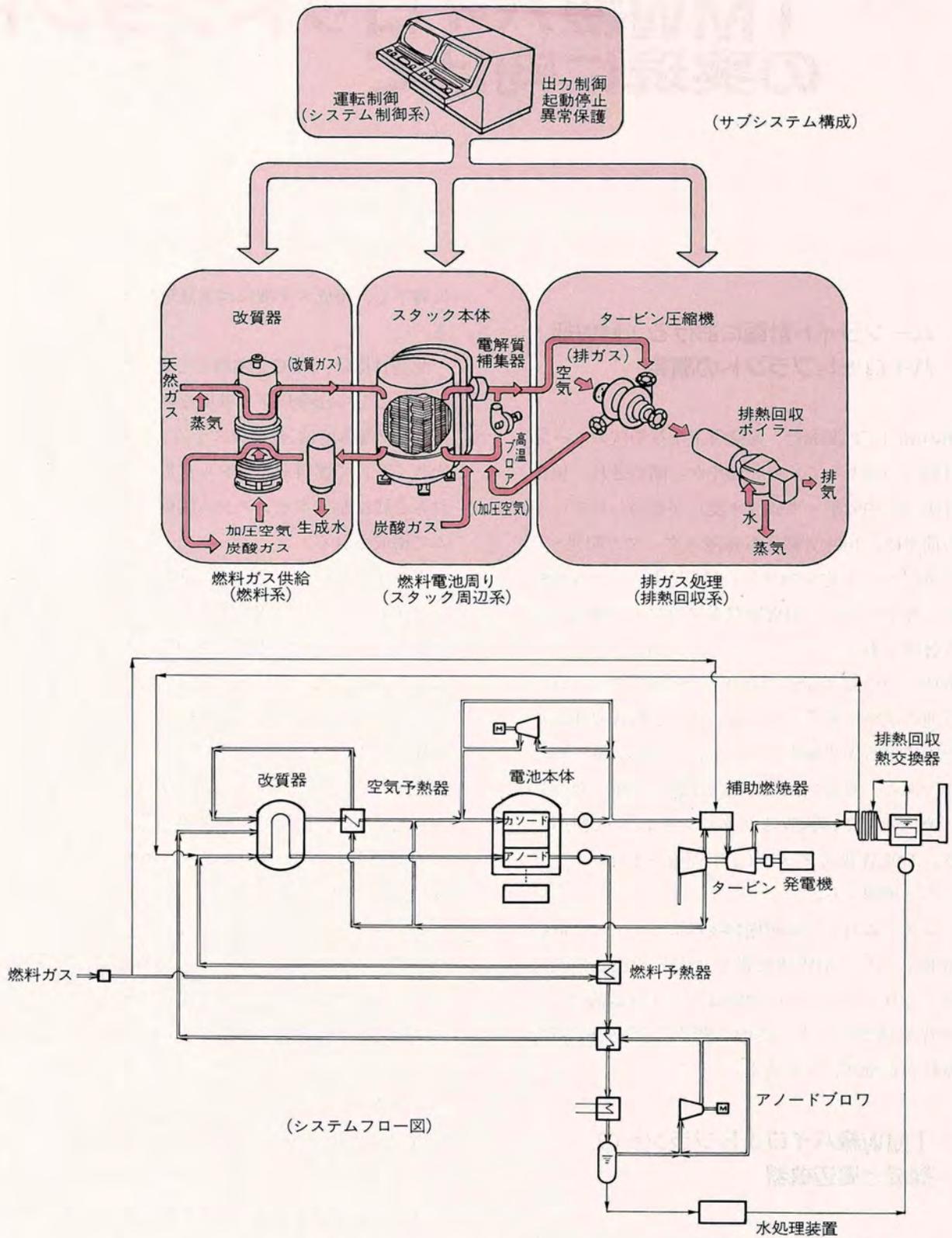


図4-5-1 1 MW級MCFC発電プラント基本システム構成

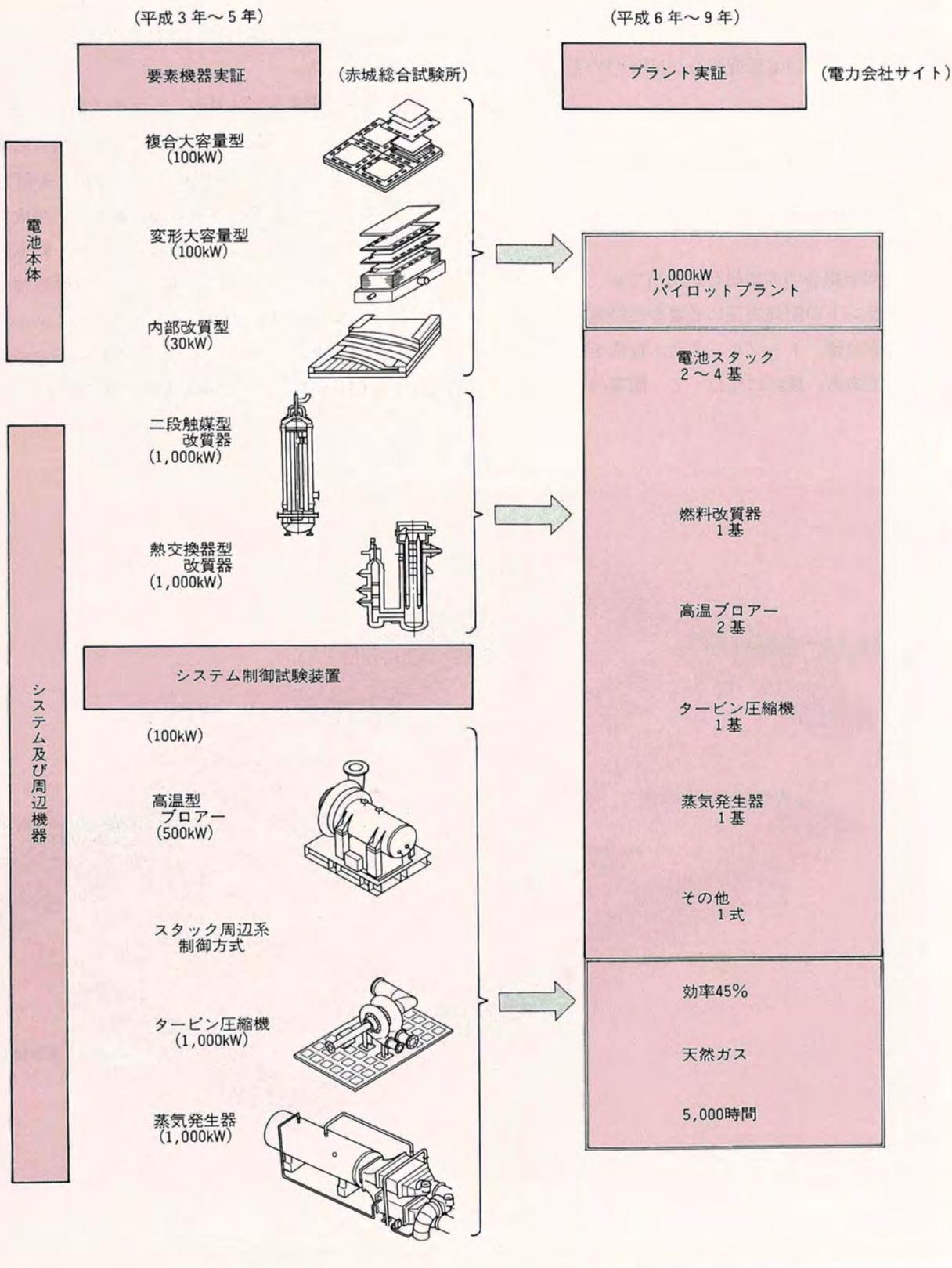


図4-5-2 ムーンライト計画におけるMCFC発電技術開発実施計画の概要

プラントとの関係を図4-5-2に示す。

これらのサブシステムを構成する主要機器および制御方式の開発は、MCFC研究組合がNEDOの委託を受けて実施している。

### 4-5-3 赤城総合試験所における要素 実証試験

MCFC研究組合の赤城総合試験所では、1 MW級パイロットプラントの開発実証に必要な燃料電池の性能、システム要素技術、トータルシステム技術を総合的に検証する予定である。検証に当たって、開発の最終的な性能

確認はもとより、実用化に備えた信頼性、安定性、さらには現地での据付け、調整、運転方法等の確認をも目指している。

既に平成3年4月からシステム構成と制御方法選定のための実証試験が開始されており、着々と成果を得ている。平成4年度より当研究所が分担して研究する100kW級スタックの運転研究設備に着工し、平成5年度初めより運転試験に入る予定である。また、時を同じくして、他組合員が担当する改質器（二段触媒燃焼型および熱交換器型）が運転試験に入る。さらにスタック周辺系、排熱回収系の各設備が据え付けられる予定である。

図4-5-3に実証試験設備の完成予想図を示す。

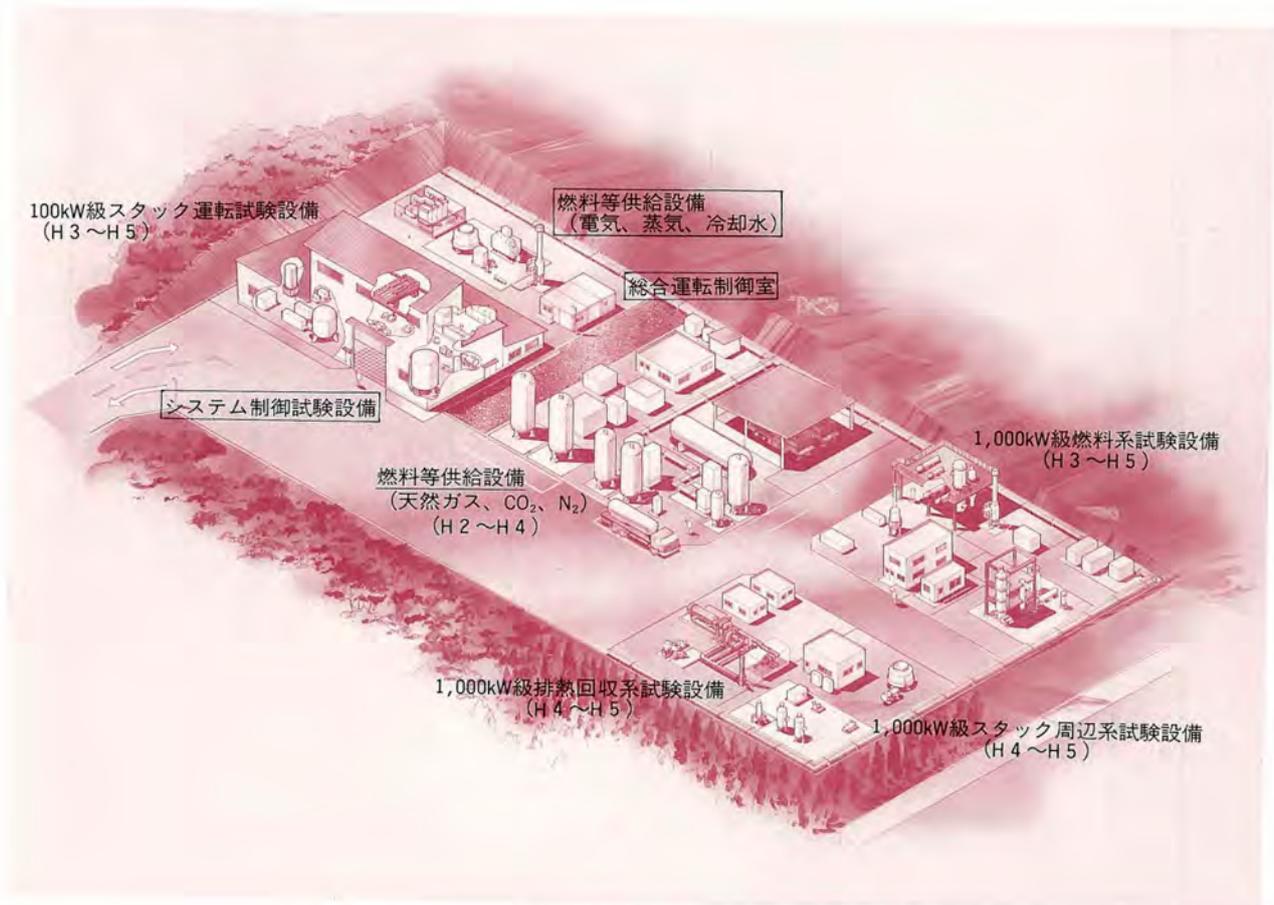


図4-5-3 MCFC発電システムの実証試験設備完成予想図

## 4-6 実用化に向けての 開発シナリオと開発課題

MCFC発電の技術開発はこれまで順調に進展しているが、現時点では10~50kW級電池の試験段階であり、残されている課題も多い。

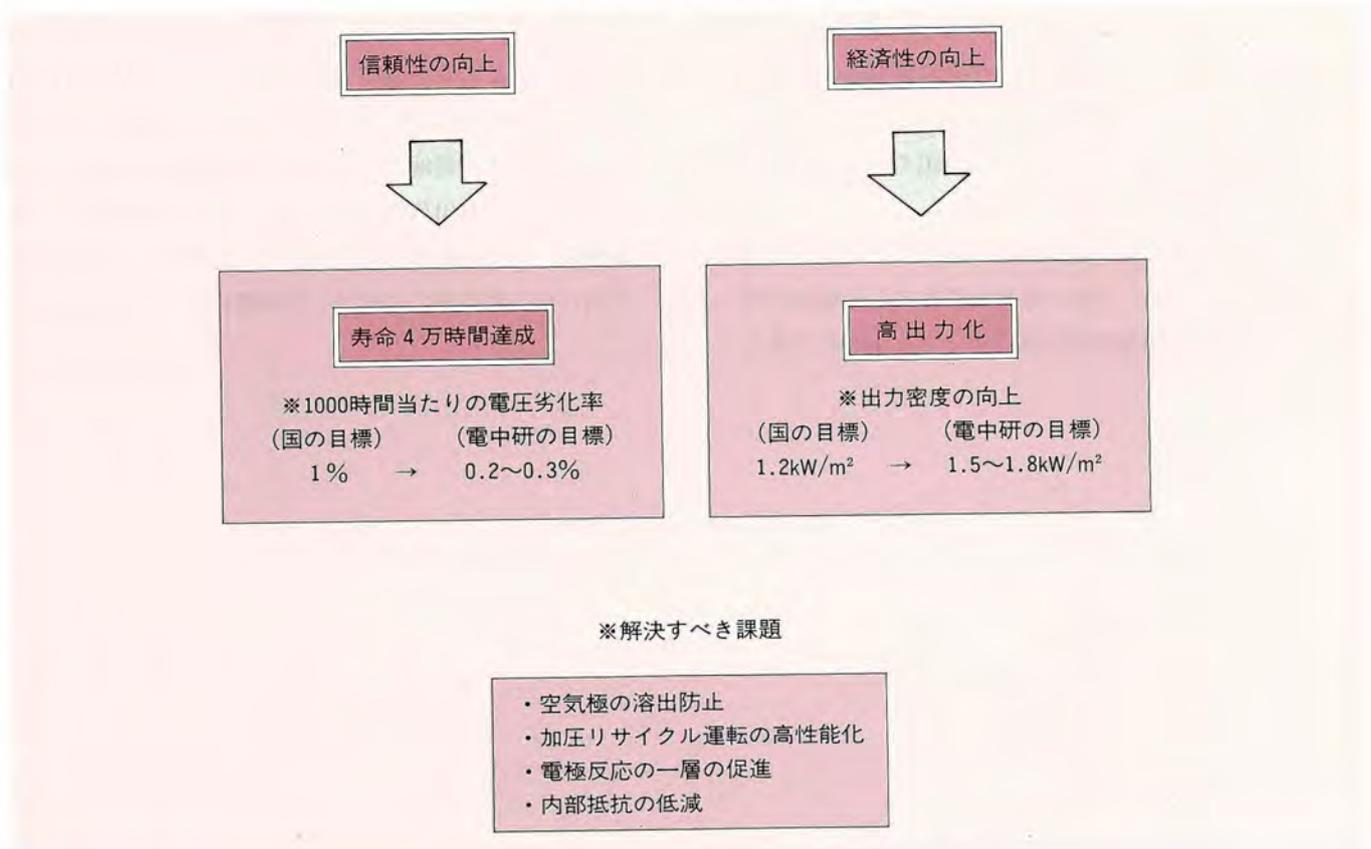
特に電池本体に関しては、表4-6-1に示すように、1)信頼性の向上、2)経済性の向上、に集約することができ、信頼性に関しては、

- ① 少なくとも4万時間以上の電池寿命の確保
- ② 電池性能の向上と安定化を図るため、加圧ガスリサ

イクル運転等による運転技術の一層の高度化が必要である。また、経済性に関しては量産技術の確立は言うまでもないが、さらに、電池の大容量化、高出力化によるコスト低減が必要である。

これらの課題を解決し、図4-6-1に示すように、1MW級パイロットプラントの開発を踏まえ、2000年を目途に50%を越える高効率化と経済性を実証して、先ず天然ガスを燃料とするMCFC発電の実用化を図るべきである

表4-6-1 MCFCの今後の課題



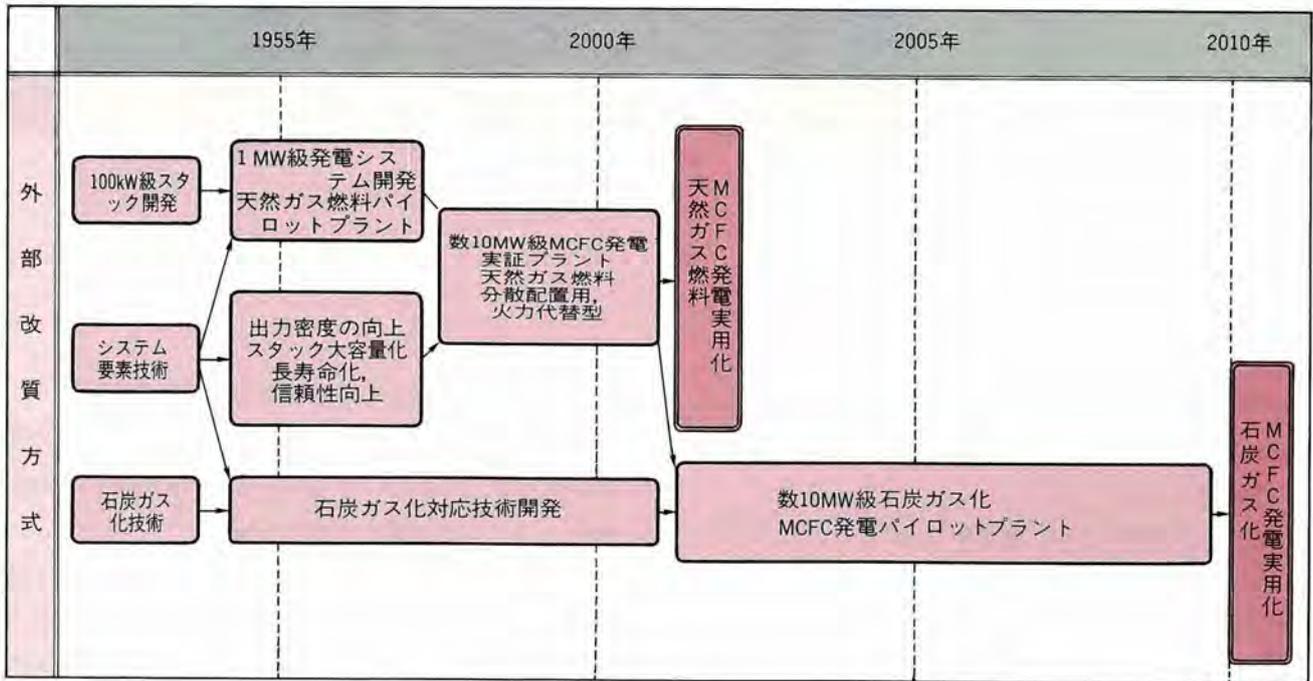


図4-6-1 MCFC発電技術開発のシナリオ

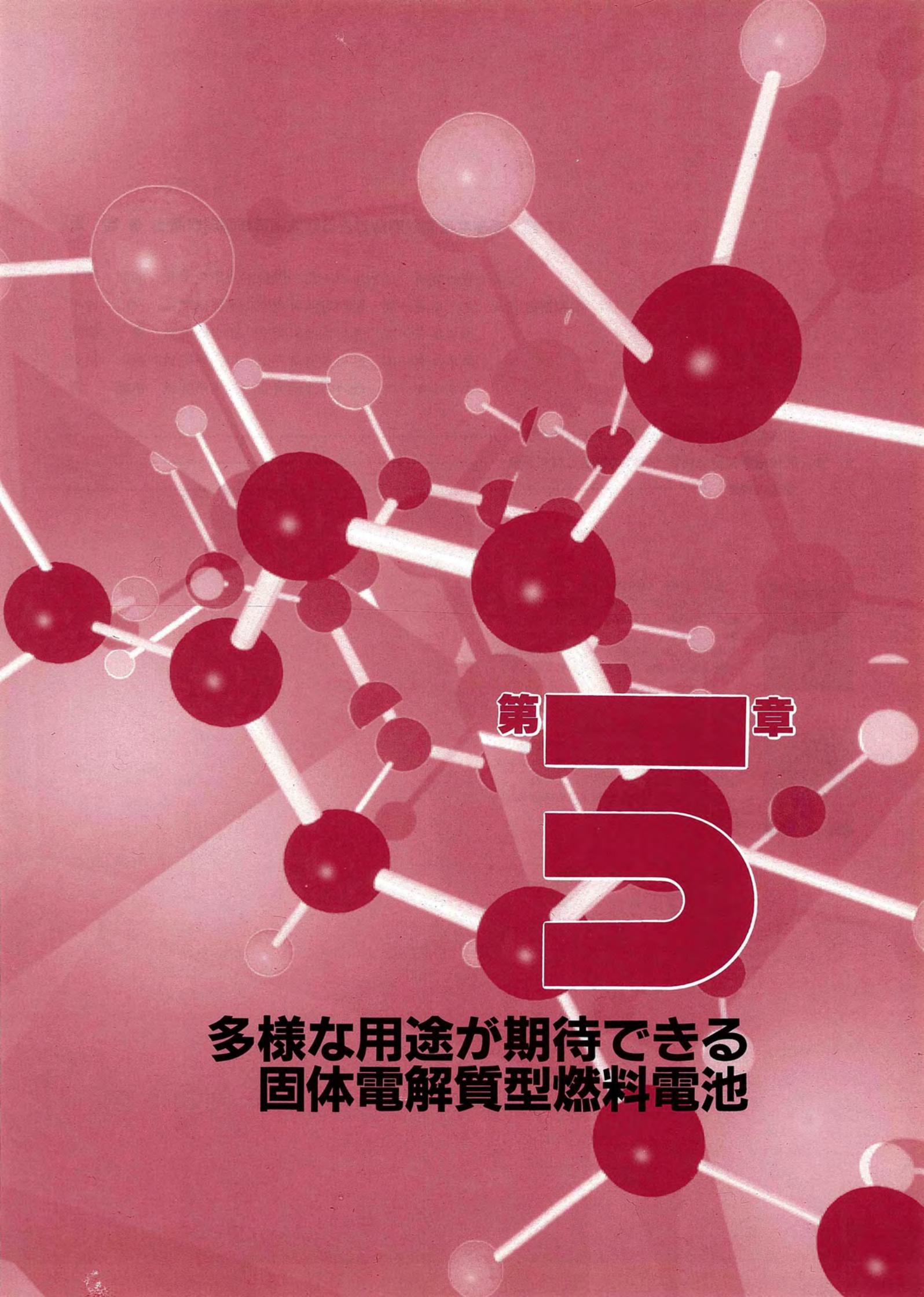
う。

さらに、クリーンアップ技術を早急に開発し、2010年を目途に石炭ガスを利用したMCFC発電が実用化できれば、地球環境問題はもとより、わが国のエネルギー政策に大きく寄与できると考えられる。

なお、内部改質方式によるMCFC発電は一層の高効率化が期待されている。今後、外部改質方式との相違を明確にし、効率的な開発計画を検討することが必要である

う。

最後に、この章を執筆するに当たっては、特にNEDOおよびMCFC技術研究組合からの受託研究成果、中央電力協議会の燃料電池専門部会からの依頼研究成果、さらに当研究所と石川島播磨重工業(株)、(株)日立製作所、三菱電機(株)、富士電機(株)との共同研究の成果を一部使用させて頂いた。関係各位に付記して謝意を表す。



第 五 章

5

多様な用途が期待できる  
固体電解質型燃料電池

## 第5章 多様な用途が期待できる固体電解質型燃料電池 ● 目次

横須賀研究所 エネルギー部 燃料電池研究室長 阿部 俊夫  
 横須賀研究所 エネルギー部 燃料電池研究室 主任研究員 浅川 仲平  
 エネルギー部 燃料電池研究室 担当研究員 森 則之  
 エネルギー部 燃料電池研究室 担当研究員 森 昌史  
 エネルギー部 燃料電池研究室 担当研究員 伊藤 響

5-1	固体電解質型燃料電池発電システムの概要 .....	75
5-2	固体電解質型燃料電池発電の構造と材料開発 .....	78
5-3	今後の課題 .....	88



浅川 仲平 (1964年入所)

火力発電の排ガス脱硫、送電線の塩害、炭酸ガスの回収・有効利用、ガス分離等の研究を行ってきた。

現在、PAFC、MCFC、SOFC等の燃料電池の構造設計に関する研究に従事している。



森 則之 (1987年入所)

高温ガスタービン用セラミック燃焼器、セラミック静翼の開発を通してセラミックを高温燃焼器に適用する研究を行ってきた。

現在、固体電解質型燃料電池の構造設計に関する研究に従事している。

阿部 俊夫 18ページに記載  
 森 昌史 } 30ページに記載  
 伊藤 響 }

## 5-1 固体電解質型燃料電池発電システムの概要

固体電解質型燃料電池 (SOFC) では、作動温度が $1,000^{\circ}\text{C}$ と高いので、その開発にはセラミックスの適用技術が不可欠である。また、高効率な発電システムを構築するためには、質の良い高温の排熱を生かした設計が特に重要である。

これまで、SOFCは種々の発電システムへの適用が期待されてはいるが、その設計を詳細に検討した例は少ない。これはSOFCの開発自体が基礎研究段階であり、電池を大型化した時の電池性能を正確に把握できなかったためである。しかし最近では、国内でも数百W～数kW級の電池が開発され、発電システムの検討にも着手されるようになった。

当研究所では、昭和63年度からSOFCの構成材料開発

に着手し、基礎研究を行ってきた。現在、当面の目標をコージェネレーション用の小型SOFC (10kW級) の開発とし、基本的なSOFC発電技術の確立を目指している。

### 5-1-1 単セルの出力特性

SOFCは他の燃料電池と比較して出力密度を高くとれることが特徴である。ここでは、当研究所が試作した単セルを例にして、SOFCの出力特性について考察する。

図5-1-1に直径13cmの平板型単セル (有効面積 約 $110\text{cm}^2$ ) を、また、この単セルの発電試験の結果を図5-1-2に示す。試験は理想的な条件の下で行われたが、最大約40W (出力密度 $0.36\text{W}/\text{cm}^2$ ) の出力が得られた。



図5-1-1 試作したSOFC用単セル

当研究所が発電試験に用いた単セル。白い部分は電解質 (直径13cm : 厚さ $300\mu\text{m}$ )、その内側の黒い部分は空気極 (直径12cm : 厚さ $10\mu\text{m}$ ) である。なお、反対側の表面に燃料極が塗布されている。

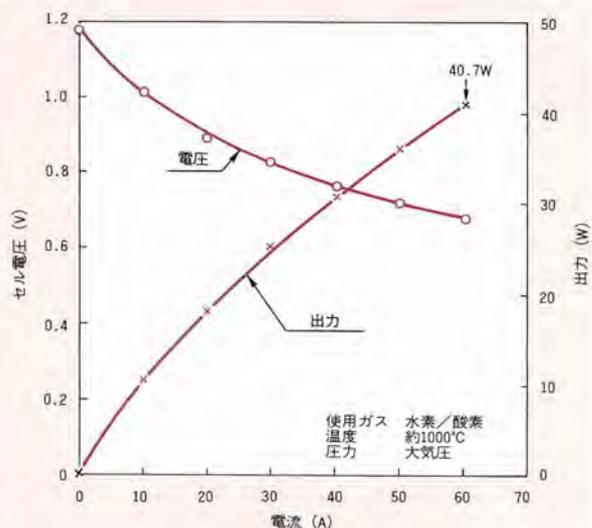


図5-1-2 単セルの出力特性 (有効面積約 $110\text{cm}^2$ )

図5-1-1の単セルを用い、 $1000^{\circ}\text{C}$ 、常圧で発電した試験結果。本試験では最高出力40.7W (電圧672mV、電流60.5A) を得た。なお、使用した燃料は水素、酸化剤は酸素である。

また、以前に行った予備実験の結果では、直径4cmの平板型単セル(発電有効面積は約3cm<sup>2</sup>)で、最大出力約1.7W(出力密度0.55W/cm<sup>2</sup>)であった。

SOFCはこのように高出力化が可能であるので、発電装置を極めてコンパクトにすることができる。

## 5-1-2 固体電解質型燃料電池発電システム

SOFCを発電システムに適用した場合の長所として、次のことが考えられる。

### ① 燃料の多様化

SOFCは、天然ガス、石炭ガス等を燃料として直接使用できる。

### ② 炭化水素系ガス燃料の内部改質

SOFCの燃料極には一般に、ニッケル金属を含んでいるので触媒作用がある。燃料中に水蒸気を添加することで、LNG、LPG等の炭化水素系のガス燃料を、電極表面で直接改質できる。これにより、システムの簡素化、コンパクト化が図れる。

### ③ 高温排熱の利用

電池を出たガスの温度は約1,000℃である。火力発電所のボイラ火炉出口のガス温度は1,100～1,200℃であることから、SOFCは火力発電所のボイラーに匹敵する熱エネルギーも発生することができる。

現在、一般に考えられているSOFCの適用システムは、

コージェネレーション用電源、分散型電源、大規模集中型電源である。ここでは、排熱の有効な利用方法を示すため、燃料にLNGを用いた内部改質型のシステム構成例をいくつか挙げてみる。

コージェネレーション用の電源の一例として、冷・温熱を供給するシステムを図5-1-3に示す。吸収式冷凍機を用いることにより、高温の排ガスから冷熱が取り出せる。SOFCは高出力化が可能で、しかも排ガスが高温であるので、効率の良い二重効用型吸収冷凍機を使用できる。そのため、高性能な小型コージェネレーションシステムを構築できる可能性が高い。

分散型電源の一例を図5-1-4に示す。高温の排ガスから蒸気を発生し、温熱を地域に併給するシステムである。

大規模集中型電源への適用例として、汽力発電と組み合わせた複合発電システムを図5-1-5に示す。大容量化することで汽力発電でのスケールメリットが生じ、より高い発電効率が得られる。

以上、常圧で作動するSOFCを例に3種類のシステムを挙げたが、SOFCを加圧して運転できれば、高温排ガスからも電力を効率良く回収できるので、さらに各システムの効率向上が期待できる。また、ガスタービンを用いたシステム構成も大きなメリットがある。

このように、SOFCは多様な利用が考えられるが、まずは、電池本体技術の確立が必要である。

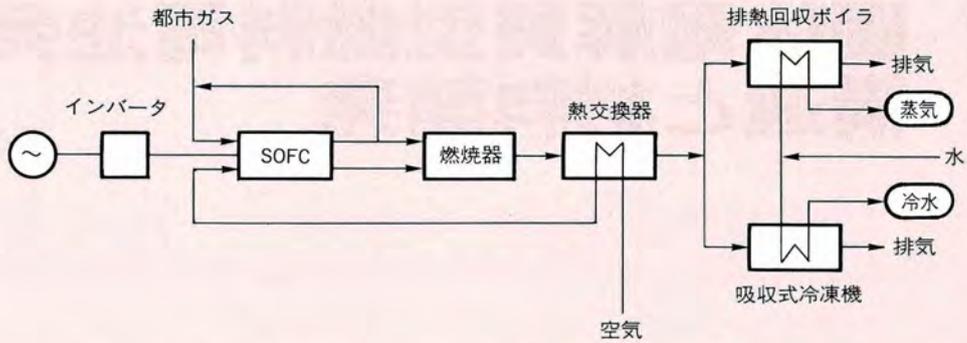


図5-1-3 SOFCを適用したコージェネレーションシステムの一例

都市ガスを燃料とする内部改質型のSOFCを想定している。そのため、燃料の改質に必要な水蒸気はSOFCから出た排ガスの一部から供給する。  
未反応の燃料を燃焼器で処理した排ガスは、その熱を熱交換器で空気予熱に使用後、排熱回収ボイラあるいは二重効用型吸収式冷凍機に流入する。この時、排熱回収ボイラでは蒸気を、二重効用型吸収式冷凍機では冷水を発生する。蒸気は暖房、給湯に、冷水は冷房等に利用する。

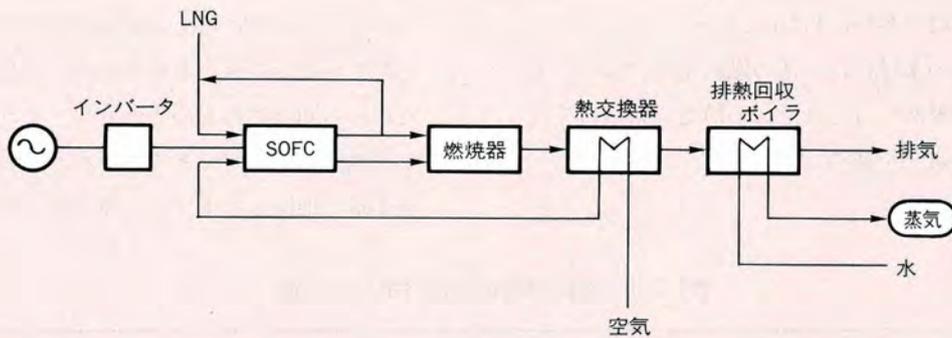


図5-1-4 SOFCを適用した分散型電源システムの一例

燃料としてLNGを分散型電源に、SOFCを適用したシステムの一例。熱交換器までのシステムは図5-1-3と同様である。本システムでは、排熱を回収して発生する蒸気を発電所の周辺地域へ供給して、暖房、給湯の熱源に利用する。

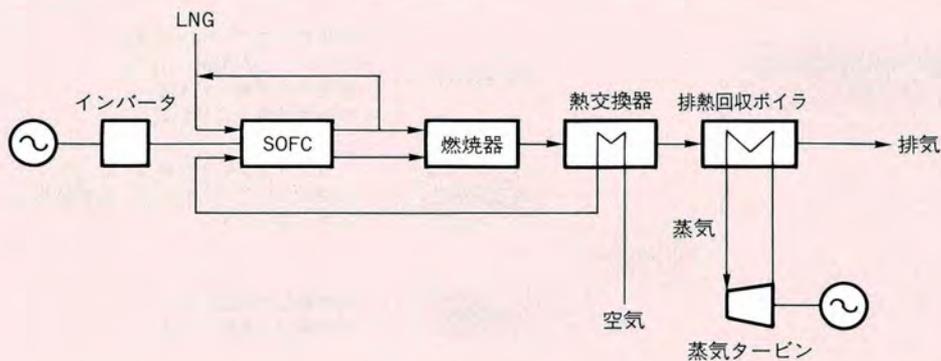


図5-1-5 SOFCを適用した大規模集中電源システムの一例

熱交換器までのシステムは図5-1-3と同様である。本システムでは、排熱を回収して発生する蒸気を用いて、蒸気タービンからも電気を発生する複合発電プラントである。

## 5-2 固体電解質型燃料電池発電の構造と材料開発

### 5-2-1 電池の構造

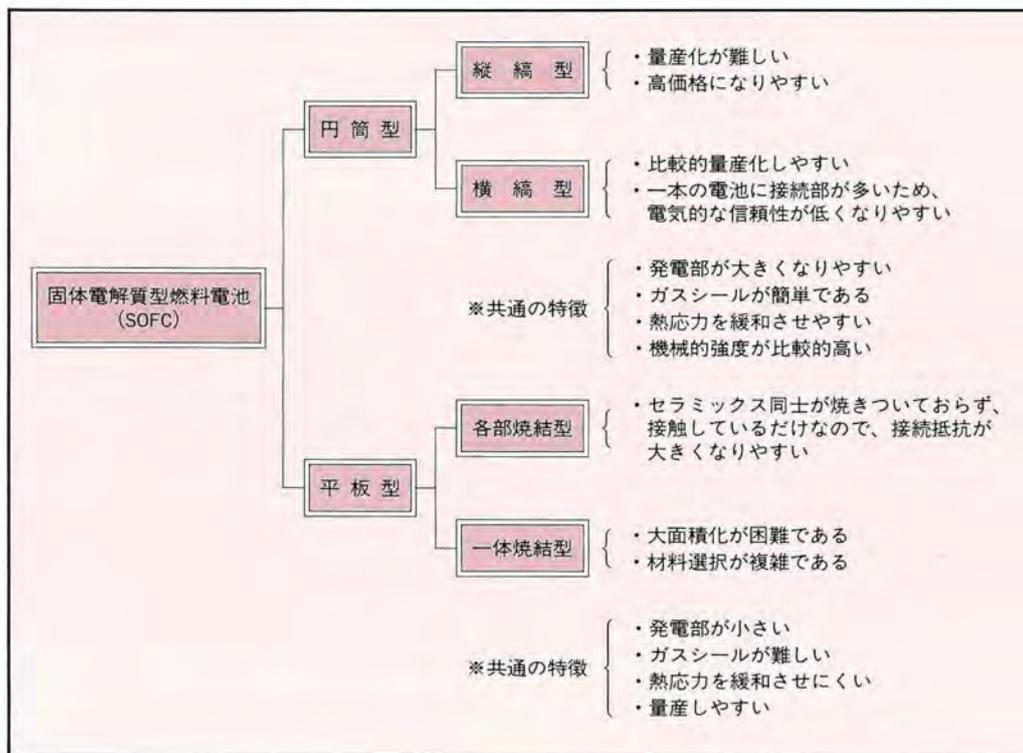
SOFCの電池構造は、大別して円筒型、平板型の2つが考えられている。それらの構造を図5-2-1(a)~(d)に、また、それぞれの特徴を表5-2-1に示した。

このような構造の多様性は、他の燃料電池にはないのである。各研究機関ではそれぞれの構造の特徴を生かすような独創的な研究を進めている。

### 5-2-2 電池材料

SOFCの各セル部材の候補には、単独材としてはその役割に応じた優れた機能を有しているものが見い出されている。しかしながら、未だ高性能なSOFCスタックが得られていないのは、セルやスタック化の製造工程中の熱処理、雰囲気処理を施すときに、それらの機能が、しばしば喪失するからである。したがって、セル材料の特性を正確に把握した上で、全体の製造工程を考慮しながら

表5-2-1 固体電解質型燃料電池の特徴



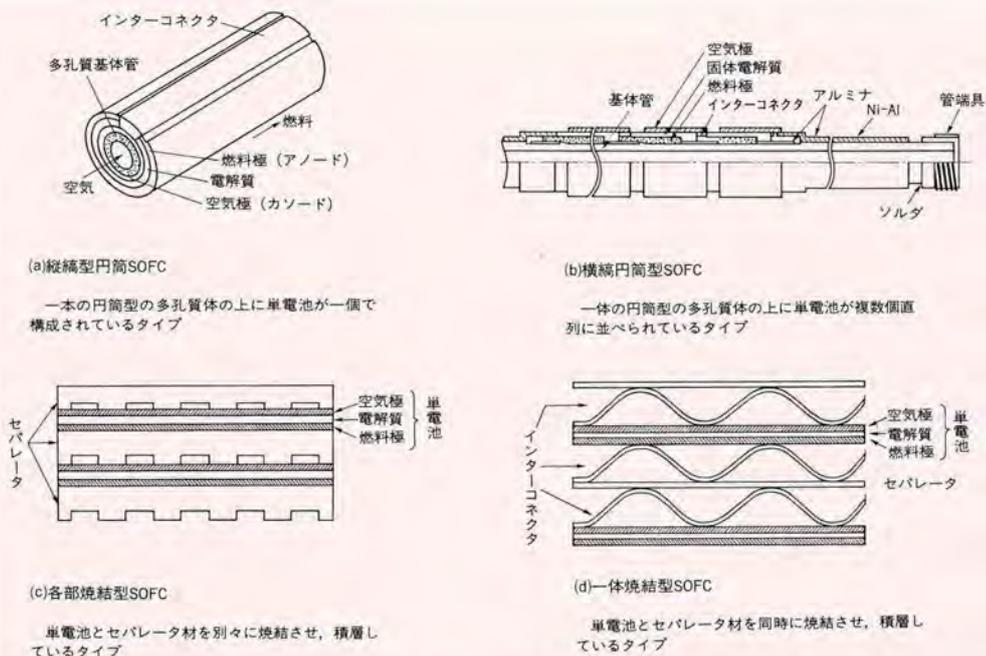


図5-2-1 SOFCの構造

(a)、(b)は円筒型SOFCである。(a)は1つの円筒に1つの単セルで電池を構成しているが、(b)は1つの円筒に複数の単セルを直列に配置して電池を構成する。  
 (c)、(d)は平板型SOFCである。平板型ではセパレータ等を介して単セルを直列に積層し、電池を構成する。(c)は単セルとセパレータが機械的に押しつけられて、電気的な接触を保つが、(d)は単セル、インターコネクタ、セパレータを同時に焼結して、電気的な接触を保つ。

表5-2-2 当研究所のスタック開発目標

セル部材	作業条件	作製条件後の性能		
		電導率 (S/cm)	過電圧 (mV)	相対密度 (%)
電解質	1400°C以下の温度で十分に焼成可能	0.1		94以上
空気極	1400°C程度の焼成温度でも電極性能が低下しない	50~100	50以下	40~60
燃料極	1400°C程度の焼成温度でも電極性能が低下しない	500~1000	50以下	40~60
セパレータ	1400°C以下の温度で十分に焼成可能	5 (還元雰囲気) 50 (酸化雰囲気)		94以上

過電圧：電極部でH<sub>2</sub>分子を2H<sup>+</sup>イオンあるいはO<sub>2</sub>を2O<sup>2-</sup>にする抵抗、および反応する場所まで供給ガスが拡散する抵抗

個々の材料の製造方法を開発していくことが重要である。

当研究所では、燃料極、電解質、空気極の三層一体焼結による単セル製造法を考えており、表5-2-2のようにスタック中の単セル発電面積が400cm<sup>2</sup>以上の大面積セルで、3.5kW/m<sup>2</sup>以上の高出力の平板型SOFCの開発を目標としている。

(1) 電解質

SOFC用電解質に要求される特性は、

- ① イオン伝導性が高いこと
- ② 電子伝導性を示さないこと
- ③ 高温・酸化還元雰囲気中で化学的に安定であること

と

- ④ 熱応力に強く機械強度が優れていること
- ⑤ ガスを透過しないこと
- ⑥ 資源的に豊富で価格が安いこと

等である。高温で高い酸素イオン伝導性を示す物質として、安定化ジルコニアが知られている。酸化ジルコニウム（ジルコニア、 $ZrO_2$ ）は資源的に豊富な耐火物原料として良く知られているが、約 $1,150^\circ C$ と $2,370^\circ C$ で結晶構造に変化が起り、9%の体積変化が生じる。このため、2~3種の金属酸化物を固溶させて、ほたる石型（図5-2-2）の結晶構造とし、常温から高温の間で安定化させる。

SOFCの電解質材料としては表5-2-3に示すような多

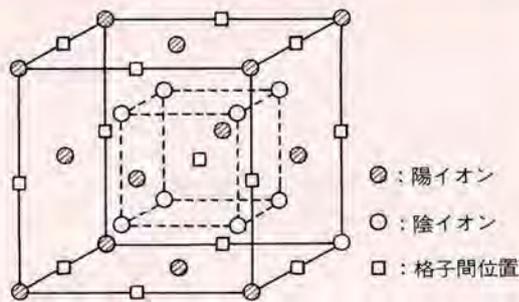


図5-2-2 ほたる石型結晶構造

ほたる石型構造では、陽イオンが面心格子（図中では陽イオンだけが配列しているような立方体の角と正方形をなす面の中心に位置している配列のこと）を形成し、その格子内に単純格子の陰イオン8個が入っており、中心は大きな間隙となっている。酸素イオンはこの間隙を通して移動する。

表5-2-3 安定化ジルコニアの導電率

固溶体の組成	導電率 $S \cdot cm^{-1}$	
	$1,000^\circ C$	$800^\circ C$
$(ZrO_2)_{0.89} (CaO)_{0.11}$	$4.5 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$
$(ZrO_2)_{0.85} (CaO)_{0.15}$	$2.5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$
$(ZrO_2)_{0.91} (Y_2O_3)_{0.09}$	$9.0 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
$(ZrO_2)_{0.91} (Yb_2O_3)_{0.09}$	$1.6 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-2}$
$(ZrO_2)_{0.9} (Nd_2O_3)_{0.1}$	$6.0 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
$(ZrO_2)_{0.9} (Gd_2O_3)_{0.1}$	—	$2 \cdot 10^{-3}$
$(ZrO_2)_{0.67} (LaO_{1.5})_{0.33}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	—

くの安定化ジルコニアが研究されているが、酸化カルシウムで安定化したジルコニアは経時的に導電率が低下することやコスト的な問題から、イットリアで安定化したジルコニア（ $Y_2O_3$  stabilized  $ZrO_2$ 、YSZ）がもっとも多く利用されている。

YSZの導電率は $Y_2O_3$ 固溶量が9 mol%のときに極大値を示し、結晶構造の安定性との兼ね合いから一般には8 mol%の材料が用いられる。それでもYSZの導電率は約 $0.1S/cm$ で電解溶液や溶融炭酸塩のそれに比べて10分の1程度である。このため、燃料電池の電解質として用いる際には、不純物がなく、ち密で薄い膜を作って、電気的な抵抗を小さくする必要がある。

一方、運転温度の低温化や材料開発の目的でYSZ以外の電解質を開発している研究機関もある。例えば、YSZよりも低温で高い酸素イオン伝導性を示すセリア（ $CeO_2$ ）系電解質や、酸素イオンではなくプロトン伝導性を示す $SrCeO_3$ 系電解質などが良く知られている。

ところで、電解質の成膜法はセルやスタックの構造と直接結び付くために、各機関でいろいろな方法が検討されている。この中でも世界的に最も進んでいるといわれるWH社の開発したEVD法は、化学蒸着法とYSZのイオン導電性を組み合わせた巧みな方法であり、数~数10  $\mu m$ のち密な膜を製造できる。しかし、塩素系ガスを高温で用いるために装置の耐食性を考慮せねばならず、成膜に時間を要し、コスト高となる。

セラミックスの耐熱・耐食性膜の製造に用いられるプラズマ溶射法を中心にした溶射技術についても研究されているが、設備が高く、粉体の条件や溶射雰囲気調整が難しく、思ったほど歩留りが良くないので開発を進める機関は少ない。

以上、さまざまな方法を紹介したが、いずれも次に述べる方法に比べて、将来的にはコストの面では不利であると、当研究所では考えている。

ここに挙げる方法はセラミックスの泥しようまたは混練物から成形、焼結工程を経て製品を得る方法である。SOFCでは、この古来からあるセラミックス成形技術に応用、発展させて用いることができる。電解質板の製造にスリップキャスト法やテープキャスト法

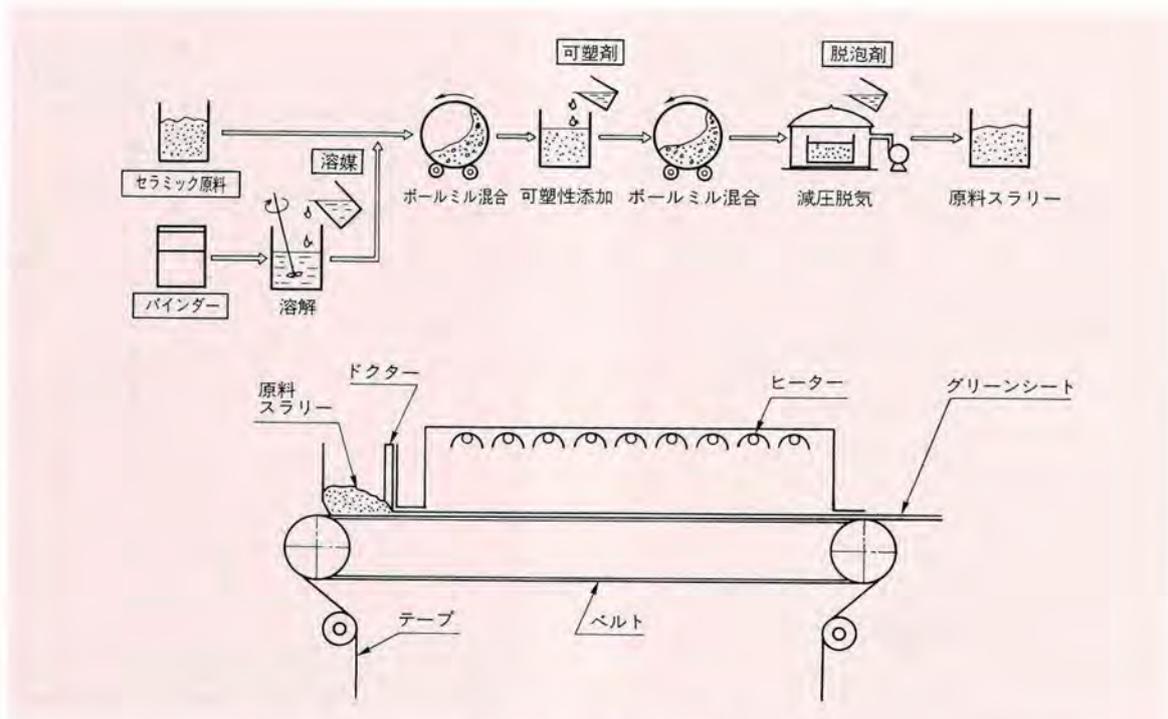


図5-2-3 ドクターブレード法の概略図

本製法は、テープキャスト法の一つである。砂状のセラミックス粉体を泥状にすることにより成形しやすくし、その泥をプラスチックのテープに乗せ、ドクターと呼ばれるナイフエッジで均一な厚さをもった薄膜に形を整える。

などを用いれば、コスト的にも安くできる。

当研究所は共焼結法によるスタック製造という目的からドクター・ブレード法による電解質板の製造条件を明らかにした。図5-2-3にドクター・ブレード法の概略図を示す。この方法は簡便で、大量生産が可能、寸法精度が高く、50～500 $\mu$ m程度の独立膜製造に適している。YSZの粒径、スラリー条件、脱脂・焼結工程の最適化などについて検討した結果、当研究所はち密で導電率等に影響しない成膜条件を明らかにした。

ところで、YSZは高温での機械強度が低く、熱伝導率も小さいので、SOFC運転中に電解質に温度差が生じると破損する可能性がある。これは平板型にとって特に深刻な問題である。そこで、当研究所では、この問題点を改善するために、従来あるYSZの良好な特性を維持しながら、ジルコニアと反応しないアルミナ粒子を分散させたジルコニア-アルミナ複合電解質材料を開発した。アルミナの粒径や分散方法を検討し、YSZやコンジット材料の曲げ強度、耐熱衝撃性を明らかにしたもので、ア

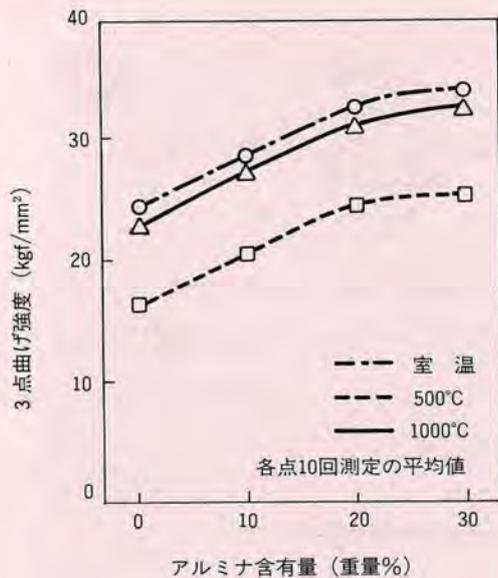
ルミナ(粒径0.2～0.7 $\mu$ m)を加えた電解質はYSZよりも曲げ強度で1.4倍、耐熱衝撃性も100 $^{\circ}$ C向上させることに成功した(図5-2-4、図5-2-5)。

## (2) 空気極

空気極材料に要求される特性は、

- ① 電子伝導率が高く、多少の酸素イオン伝導性を有すること
- ② 高温酸化雰囲気中で化学的に安定であること
- ③ 電解質材料やセパレータ材料と反応しないこと
- ④ 電解質を含め、その他のSOFC構成材料との熱膨張率および焼結時の収縮率が一致していること
- ⑤ 資源的に豊富で価格が安いこと
- ⑥ ガス透過性に優れた膜が製造でき、かつ長時間その構造を維持できること

等である。高温酸化雰囲気中にさらされるSOFCの空気極に金属材料を用いることは考えられない。そこで、超電導性を示すセラミックスと同じ結晶構造のペロブスカイ



3点曲げ強度：  
試験片を一定距離に配置された  
2点で支え、支点間の中央の1点  
に荷重を加えて折れたときの最大  
曲げ強度。(JIS規格)

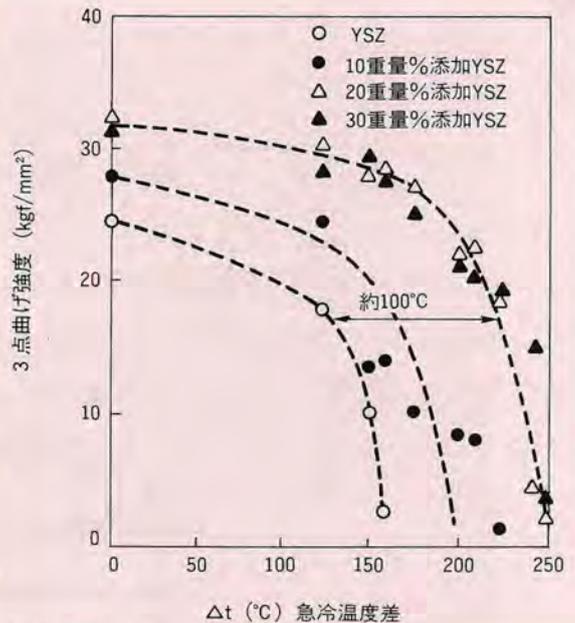
図5-2-4 ジルコニアおよびジルコニア-アルミナ複合電解質の機械強度

アルミナをジルコニアに添加していったときの各温度(室温、500°C、1000°C)の機械強度である。セラミックスの機械強度は温度が上昇するとともに弱くなるのが一般的な傾向であるが、本研究結果では、ジルコニアの機械強度は、温度上昇と共に一旦は弱くなるが、再び向上する特異な結果が得られた。

ト型(図5-2-6参照)複合酸化物セラミックスが用いられている。この中でもランタンコバルタイト(LaCoO<sub>3</sub>)系、ランタンマンガンナイト(LaMnO<sub>3</sub>)系セラミックスは高い電子伝導性(100~1,000S/cm、1,000°C付近)を持つため、SOFCの空気極材料として選択されてきた。

しかし、LaCoO<sub>3</sub>系セラミックスはとりわけ高い電子伝導性と電極活性を有するものの、電解質材料との熱膨張係数が異なり、かつ他の材料との反応性に富んでいるので、近年のスタックやモジュールの開発ではあまり用いられなくなった。

これに対して、LaMnO<sub>3</sub>系セラミックスはLaCoO<sub>3</sub>系セラミックスに比べて電子伝導性はやや劣るものの電解質との整合性に優れている。そこで、電子伝導性を向上させるため、LaMnO<sub>3</sub>のLaの一部をCa、Sr等のアルカリ土類金属で置換した(La, Sr)MnO<sub>3</sub>または(La, Ca)



水中投下法：  
ある一定の温度に加熱した試料を水中に投下し急激な温度変化を与えて、試料に熱応力を発生させる。その後、3点曲げ強度試験により試料強度の相対的な変化をみる方法。

図5-2-5 ジルコニアおよびジルコニア-アルミナ複合電解質の耐熱衝撃性

本結果では、ジルコニアおよびジルコニア-アルミナ複合(新)電解質の耐熱衝撃性を水中投下法という方法で間接的に試験したものである。急激に温度差をつけた後でも新電解質の方は機械強度を維持していることがわかる。このことから、アルミナが温度差に対する機械強度の劣化を大幅に抑制することがわかった。

MnO<sub>3</sub>が用いられている。しかし、LaMnO<sub>3</sub>系セラミックスも電解質材料と全く反応しないわけではなく、最近、Aサイトの欠損量(La、Srイオンが欠乏する現象)およびSrの添加量によって反応生成物の量が変化することが見い出されている。

当研究所では空気極について、材料開発の面から研究を進め、電気的な抵抗を大きくせずに反応性をより抑えた空気極材料を見い出している。共焼結法やスクリーン印刷法などでセルを製造する時の高温条件下(1,400°C程度)や長時間の発電運転下で空気極が電解質と反応して、その界面に電氣的に高抵抗な生成物を生じたり、焼結が進行して電極性能が劣化したりすることがある。これを防ぐために、Cr添加の(La, Sr)(Mn, Cr)O<sub>3</sub>を開発し、良好な結果を得た。

(La, Sr)MnO<sub>3</sub>系セラミックスについては、電解質

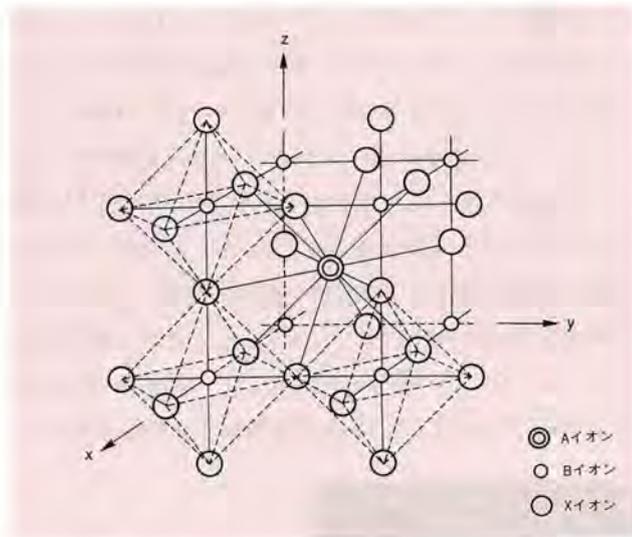


図5-2-6 ABX<sub>3</sub>のペロブスカイト型構造

ペロブスカイト型では、La、Sr、Caイオン等が存在するAサイトと、Mn、Cr、Mgイオン等が存在するBサイトとがあり、それぞれAサイトイオン、Bサイトイオンと呼ばれる。また、Bサイトの金属イオンはXイオン(この場合はO<sup>2-</sup>イオン)によって6配位で囲まれた構造となっている。

材料との反応性と電子伝導性との両面からの検討を加え、より優れた空気極材料が得られる粉体合成法とLaサイトの欠損量、およびSrの添加量の許容範囲を明らかにした(図5-2-7)。また、これらの材料開発の中で、LaMnO<sub>3</sub>系セラミックスの結晶構造、収縮率、熱膨張係数、導電率、焼結性を明らかにし、共焼結法によるセルの製造法に目処をつけた。

以上のように、空気極に関する研究はかなり進んでおり、電子伝導性や化学的安定性、電解質との反応性に関する要求は満足しつつある。

### (3) 燃料極

燃料極材料として、初期の段階では化学的に安定な白金、あるいは白金合金が使用されていたが、高価であるため最近ではニッケル(Ni)とYSZとのサーメット(陶性合金)が使われている。

燃料極に要求される条件は

- ① 電子伝導性が大きいこと
- ② 高温還元性雰囲気中で安定であること
- ③ 電解質、セパレータ(インターコネクタ)、あるい

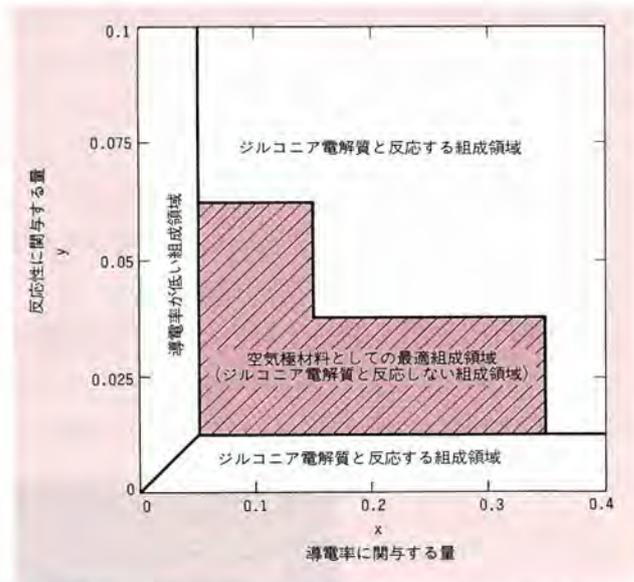


図5-2-7 空気極材料であるランタンマンガナイト [(La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>)<sub>1-y</sub>MnO<sub>3+z</sub>] が安定に存在する組成領域

通常のペロブスカイト型構造では、AサイトとBサイトの金属元素の比が1:1で安定な場合が多い。ランタンマンガナイトは、ペロブスカイト型構造をとるが、Aサイト金属の方が少なくなっており、例えばAサイトとBサイトの金属元素の比が0.9:1のような不安定比になっている。このAサイト金属の安定な量はストロンチウムの量に影響し、Aサイト金属が少なすぎてもマンガン元素が過剰になり、ジルコニアと反応する要因を作り出す。本研究により、ジルコニアと安定な組成領域を明らかにした。

は支持管材料等と反応しないこと

- ④ 安価であること
- ⑤ 内部改質型SOFCでは、メタンガス改質に対する触媒能力が大きいこと

等である。これらの条件を満たすような候補材としては、高融点の金属類、あるいはそのサーメットが考えられる。金属類では、高融点金属として、Co(コバルト)、Ni(ニッケル)が有力である。金属系の材料の中ではNi系は導電率も高く、YSZに対する熱膨張率の整合性も他の金属に比較して良い。また、メタンガスの改質に対する触媒能力も良好である。サーメット系ではサーメット比が大きくなるほど導電率が小さい。円筒型セルの場合、電解質との熱膨張率差を小さくした高寿命型セル指向の場合は、Ni/40%YSZが、高出力型指向セルの場合は、NiOが有力と考えられている。

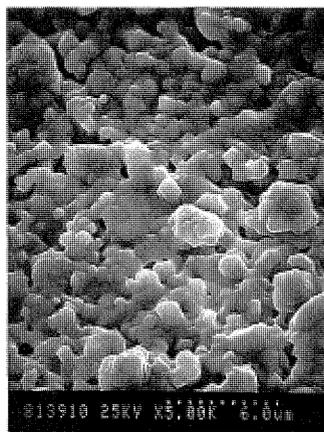
平板型SOFCに使われる燃料極材料は基本的に円筒型

SOFCの場合と同じであるが、電解質であるYSZとの熱膨張率の差を小さくし、Niの焼結の進行を防止するため、ニッケル (Ni) とジルコニア ( $ZrO_2$ ) とのサーメットが有力である。ニッケルジルコニアサーメット (Ni- $ZrO_2$ ) の熱膨張率と導電率はジルコニアの混合比によって変化するので、最適な混合比を選択する必要があるが、現在Ni/40%YSZが使用されている例が多い。

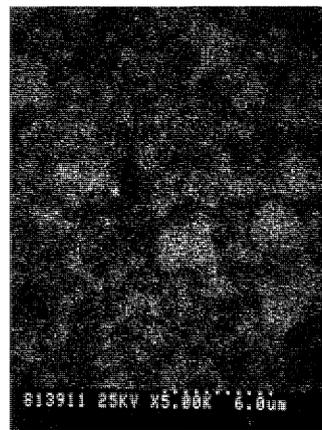
当研究所では、Ni-YSZを燃料極に用い、空気極に $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ を用いた有効電極面積 $1.57cm^2$ のプレス成形タイプの平板型セルを試作し、その出力特性を検討し

た。その結果、電流密度 $220mA/cm^2$ 時の出力密度は、試験開始24時間後に $260mW/cm^2$ であったが、360時間後には出力 $95mW/cm^2$ に減少し、出力の著しい低下を経験した。

このような経時的に出力が減少する原因を解明するため、燃料極表面のNi金属分布を試験の前後でSEM写真により比較した。図5-2-8に示すように、試験後の単セルではNi金属の焼結による偏析が観察された。これがセルの経時的劣化の一因と考えられる。そのため、偏析が生じないようにマイクロ構造を明らかにし、燃料極の製造法および適切なNi-YSZの合成法を検討する必要がある。

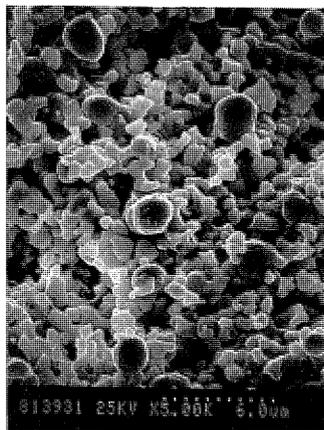


燃料極表面

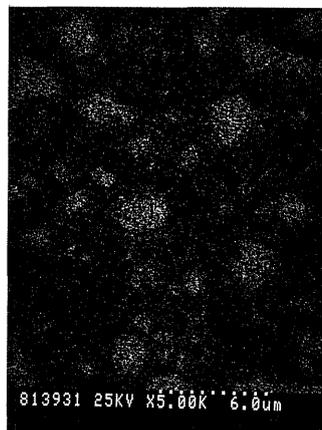


Ni金属の分布

試験前



燃料極表面



Ni金属の分布

試験後 (310時間後)

図5-2-8 燃料極のNi分布

左上の図は試験開始前の燃料極の表面写真 (SEM写真) である。右上は同一表面でのNi金属の分布を表す。Ni金属が表面の全体に分布していることが分かる。

一方、左下の図は試験後の燃料極の表面写真 (SEM写真) を、右下は同一表面でのNi金属の分布を示す。試験後は、Ni金属が一部に偏析して分布していることが分かる。

#### (4) セパレータ

平板型SOFCは、構造的にはPAFCやMCFCと同様であり、セパレータは、燃料と空気を仕切るガスシール構造を有すると共に、電極表面からの集電、セルの直列接続を行うための電流通路、ガスディフューザ機能、スタックを構成する場合の強度メンバーとしての機能などを受け持つ。また、高温における耐酸化性・耐還元性・電子伝導性・加工性・低コストなど多くの要求を満たさなければならず、次のような特性が要求される。

- ① 電子伝導性が良いこと
- ② ガス透過性がないこと
- ③ 高温酸化、および還元雰囲気中で安定であること
- ④ 他の構成材料と熱膨張率が整合すること

現在、多くの研究機関では、ニッケルアルミ (NiAl) 系サーメット、ニッケルクロム (NiCr) 系サーメット、およびランタンクロマイト ( $\text{LaCrO}_3$ ) 等が検討されている。

当研究所では、平板型SOFCのセパレータ候補材としてランタンクロマイト系セラミックス ( $\text{LaCrO}_3$ 系) を研究している。 $\text{LaCrO}_3$ は電気伝導性とYSZとの熱膨張率の整合性を良好にするため、カルシウム (Ca)、ストロンチウム (Sr) あるいはマグネシウム (Mg) が添加される。

ところで、 $\text{LaCrO}_3$ 系セラミックスは焼結しないことで有名な材料として知られている。例えば、従来の粉混ぜ法で合成した粉体では図5-2-9(a)のようにホットプレス成型を用いても、ち密にはならない。そこで、微粒の

原料粉体を合成するために、当研究所と化学技術研究所が開発した新粉体合成法 (共沈ドライアップ法) と成型法 (雰囲気調整したホットプレス法) の両者を併用することで、図5-2-9(b)に示すような、ち密な焼結体を得ることに成功した。さらに、 $\text{LaCrO}_3$ の組成を適正化すると、ホットプレス法を用いなくても、図5-2-9(c)に示すように、焼結温度としては比較的低い1,300°C程度で、ち密な焼結体ができることが分かった。

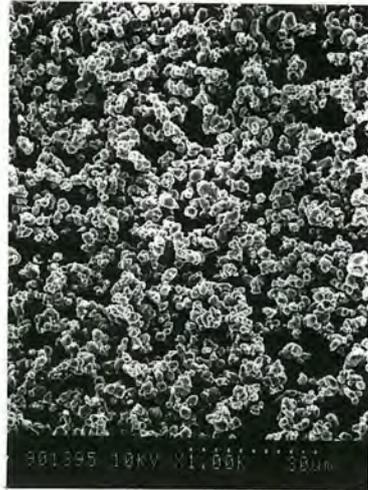
1,300°Cの温度では他のセル部材の機能は低下しないが、セパレータと他のセル部材との接触面で、反応生成物が生じたり、あるいはセル部材が変質し、セルの発電特性を低下させる可能性がある。そこで、当研究所は三重大学と共同で、Mg、Ca、Srをそれぞれ添加した $\text{LaCrO}_3$ とYSZとの反応性を調べた。その結果、セルの製造温度 (1,300~1,500°C) では、いずれの $\text{LaCrO}_3$ でもセル性能に影響する電気伝導性の低い化合物 (ランタンジルコネート、ストロンチウムジルコネート) が生成する。ただし、Mg、Ca、Srの添加量を図5-2-10に示すそれぞれの組成に選定すれば、ランタンジルコネート等の生成を防止できることが分かった。

当研究所は当面、3層一体焼結型平板セルの開発を目指しているが、図5-2-9および図5-2-10の研究成果は、3層一体焼結セルよりさらにコスト面等で有利な一体焼結型スタックの製造の可能性を開くものである。

なお、表5-2-4に国内外の主要な研究機関で行われているSOFC材料の一覧を示す。



(a) 従来の粉体製法を用いた  
ホットプレス成型後の焼結体表面



(b) 新粉体製法を用いた  
ホットプレス成型後の焼結体表面

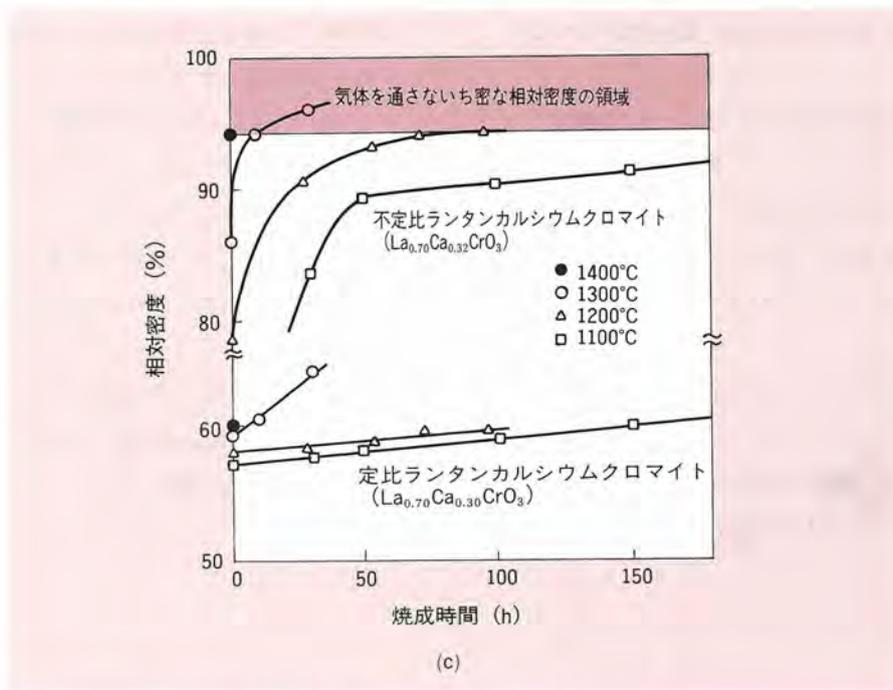


図5-2-9 ランタンクロマイトの焼結

- (a) 一般に、ち密なセラミックス焼結体を製造できる方法として、ホットプレス成型法がある。粉混ぜ法（原料の合成方法）では通常粗い粉体しか合成できないので、ホットプレス成型法を用いても、ち密には焼結しない（黒い部分は気孔である。また、粒子が見えるということはち密に焼結していないということである。）
- (b) 共沈法のような非常に細かい粉体が合成できる方法では、ホットプレス成型法を併用することで、ち密に焼結させることができる。
- (c) 組成を調整しないと、1800°Cよりも低い温度では焼成時間を長くしても焼結がほとんど進まないが、組成を調整してやれば簡単に（短時間で）ち密に焼結させることができる。

添加剤	ランタンクロマイトの組成式	置換量 x				
		0	0.1	0.2	0.3	0.4
Mg	$\text{LaCr}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_3$	反応しない領域				反応する領域
Ca	$\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{CrO}_3$					
Sr	$\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_3$					

図5-2-10 セル性能を劣化させるような反応が起こらないランタンクロマイトの組成領域

各粉体を混合、焼成し、各々で反応性をみた実験の結果である。斜線の組成のランタンクロマイトは、問題となる反応生成物がほとんど発生しない。

表5-2-4 固体電解質型燃料電池の構成材料組合せ例

製造箇所 (形式)	部品名	燃料極	電解質	支持管	インターコネクタ (セパレータ)	空気極
W H 社 (円筒型、縦縞型)		Ni-ZrO <sub>2</sub>	YSZ	CSZ	La(Mg)CrO <sub>3</sub>	La(Sr)MnO <sub>3</sub>
B B C (円筒型、横縞型)		Ni-ZrO <sub>2</sub> Co-ZrO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> CSZ	La(Sr)MnO <sub>3</sub> LaCrO <sub>3</sub> (Sr, Ni)	La(Sr)MnO <sub>3</sub> La(Bi)NiO <sub>3</sub>
電 総 研 (円筒型、横縞型)		NiO/ NiO-YSZ	8YSZ	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiAl-CSZ/ LaCrO <sub>3</sub> /LaCoO <sub>3</sub>	LaCoO <sub>3</sub>
東電/電発/三菱重工 (円筒型、横縞型)		NiO(-YSZ)	YSZ	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> CSZ	NiAl-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LaCoO <sub>3</sub>
Ztek (平板型)		NiO-YSZ (Ni40wt%)	YSZ	なし	金属系	La <sub>0.85</sub> Sr <sub>0.15</sub> MnO <sub>3</sub>
Ceramatec (平板型)		Ni-YSZ	92ZrO <sub>2</sub> - 4Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 4Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	なし	La <sub>0.9</sub> Sr <sub>0.1</sub> CrO <sub>3</sub>	La(Sr)MnO <sub>3</sub>
Siemens (平板型)		NiO-8YSZ	8YSZ	なし	金属系	La(Sr)MnO <sub>3</sub> La(Sr)CoO <sub>3</sub>
Allied-Signal/ANL (一体型)		Ni-YSZ	8YSZ 3YSZ 8YZ-3YSZ	なし	La(Sr, Mg)CrO <sub>3</sub> ディストリビュータは 電極と同じ	La(Sr)MnO <sub>3</sub>
化 技 研 (平板型)		Ni-YSZ	8YSZ 3YSZ	なし	(La, Ca)CrO <sub>3</sub> ディストリビュータは 電極と同じ	(La, Ca)MnO <sub>3</sub>
電 中 研 (平板型)		Ni-YSZ Ni = 40vol%	8YSZ	なし	La <sub>0.7</sub> Ca <sub>0.32</sub> Cr <sub>0.98</sub> O <sub>3</sub>	(La <sub>0.8</sub> Sr <sub>0.2</sub> ) <sub>0.96</sub> MnO <sub>3</sub>

## 5-3 今後の課題

SOFCの開発において最も重要な課題は、材料開発であり、しかも材料は、電池構造と密接な関係がある。円筒型SOFCの場合、単セル発電だけのデータではあるが20,000時間作動させてもほとんどセル性能が劣化しないものも報告されている。しかし、このセルは電気化学蒸着 (Electrochemical Vapor Deposition ; EVD) 法という高価格で生産性が悪い製法で作られているため、低コスト化を図る新しい製造法の開発を余儀なくされている。

当研究所では、テープキャスト法による平板型セルを考えているため、それに応じた課題がある。テープキャスト法により製造する場合、燃料極/電解質/空気極の3層を一体として同時に焼成する方がコスト面および性能面から有利である。しかしながら、この場合、製造条件が、表5-3-1のように規制される。そのため、この製造条件を念頭においた材料開発が、今後とも強く求められる。特に当研究所では長寿命化を図るため、新しい燃料極の開発が急務と考えている。

また、セルの大面积化および均一化を図るためには、

表5-3-1 同時焼成法SOFCの構成条件に共通した製造条件

共通の製造条件	
焼成雰囲気	空気中
温度	1300 ~ 1400°C
保持時間	0 ~ 10時間
その他	各温度での収縮挙動を一致させる

多くの製造ノウハウを有する素材メーカーと密接な関係を強化することが必要である。

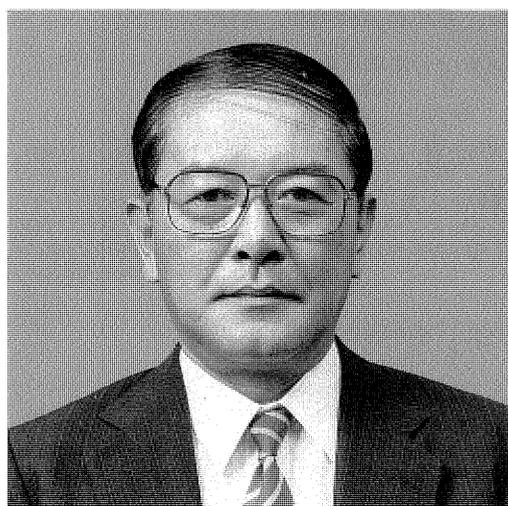
さらに、SOFCの実用化を図るためには、材料開発とともに、表5-3-2に示す開発課題を解決する必要がある。当研究所は当面、SOFCの材料開発を進めると同時に、SOFCの発電容量を段階的に大きくしながら、これらの開発課題を解決していく計画である。その後、技術の進展を勘案して大型SOFC発電の開発への展開を図る考えである。

表5-3-2 SOFCの開発課題

課題	内容
電池の高性能化	・単セルの大型化、積層化<高出力化、長寿命化
電池構造の最適化	・供給ガスの配管構造、シール方法 ・スタック、モジュールからの出力取り出し構造
電池の運転確立	・供給ガス出入口温度の制御方法 ・スタック、モジュールの温度制御方法
システム周辺技術の開発	・高温熱交換器 ・未反応燃料用燃焼器 ・システム技術

# お わ り に

理事 横須賀研究所長 安芸 周一



世界は人口爆発を背景として、「経済発展」と「エネルギー・資源・食糧」と「環境」の3者間の鼎立し難い関係—いわばトリレンマの状態—に直面しています。そして、いかにこれを克服して「持続可能な開発」の道を見出すかが人類の究極の課題として、その解決が模索されています。

このためには、今日また21世紀の文明を支える資源、エネルギーの徹底した効率的活用、すなわち、従来の資源、エネルギーの生産消費のプロセスを抜本的に見直した「省エネ・省資源社会の構築」が必須の事として求められています。

21世紀においても人類はそのエネルギーの中樞を化石燃料、特に資源の埋蔵量から石炭に依存しなければならないと考えられます。

本レビューで紹介した燃料電池発電技術は、化石燃料を用いる高効率で優れた環境安全性を有する発電技術で、「省エネ・省資源社会構築」の要になる技術として大きな期待が寄せられています。

リン酸型燃料電池発電は開発が最も進んでおり、既に実用化段階を迎えています。分散型の電源、熱源として、普及が進むものと期待されます。

固体電解質型燃料電池発電はまだ基礎研究段階ですが、広い用途が考えられますので、将来極めて魅力のある発電技術に発展する可能性があります。

熔融炭酸塩型燃料電池発電は、大型分散電源あるいは石炭を利用する新型火力発電技術として、当研究所では力を入れている研究課題です。国のムーンライト計画では平成5年度より、当研究所も含め電力会社の参加を得て、1000kW級パイロットプラントの設計・建設が開始される予定であり、いよいよ開発が本格化します。しかし、この技術を実用化するためには、これからが重要な時期であり、電池の大容量化、信頼性の向上、コスト低減等の課題を解決する必要があります。

エネルギーの面からトリレンマの解決の重要な一翼を担う燃料電池発電技術の実用化に向けて、産・官・学が力を結集し、知恵を出し合い、効率的な研究開発を進めることが大切です。

当研究所もその一環として、燃料電池発電技術の実現化に向けて、今後共一層の努力を傾注する所存です。関係各位のご指導、ご協力を心からお願いいたします。

## 関連する主な研究報告書等

1. 「高温型燃料電池プラント技術の現状と展望」平成2年度電力中央研究所研究発表会－火力部門－予稿集(1990)
2. 「溶融炭酸塩型燃料電池小型単セルの加圧性能特性」電中研 研究報告：W89013 (1989)
3. 「抄紙法電解質板MCFC小型単セルの基本特性」電中研 研究報告：W89022 (1989)
4. 「溶融炭酸塩型燃料電池小型単セル加圧運転特性」電中研 研究報告：W90004 (1990)
5. 「MCFCの性能相関式の開発」電中研 研究報告：W90013 (1991)
6. 「溶融炭酸塩型燃料電池の性能評価Ⅰ. 小型単セルによる加圧性能の分析」DENKI KAGAKU, 60, No.2 (1992)
7. 「溶融炭酸塩型燃料電池の性能評価Ⅱ. 性能相関式の開発」DENKI KAGAKU, 60, No.2 (1992)
8. 「10kW級溶融炭酸塩型燃料電池発電実験－抄紙法電解質板スタック(その1)－」電中研 研究報告：W89012 (1989)
9. 「溶融炭酸塩型燃料電池6kWスタックの発電特性(第1報)－加圧特性とメタンの生成現象の検討－」電中研 研究報告：W89035 (1989)
10. 「溶融炭酸塩型燃料電池6kWスタックの発電特性(第2報)－ガスリサイクル特性－」電中研 研究報告：W89046 (1989)
11. 「溶融炭酸塩型燃料電池の発電特性(改良型大面積10kW級電池の長期運転試験)」電中研 研究報告：W91042 (1992)
12. 「Cell Performance for Solid Oxide Fuel Cells」The Second International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells, pp.821-829 (1991)
13. 「電気エネルギーをつくるジルコニアセラミックス」月刊 ニューセラミックス1月号 (1991)
14. 「平板型セルの製造コスト試算」電中研 研究報告：W90024 (1991)
15. 「ジルコニア電解質のドクターブレード法による成膜法」電中研 研究報告：W89028 (1990)
16. 「ジルコニア－アルミナ複合電解質の開発(1)機械的特性」電中研 研究報告：W90018 (1991)
17. 「Phase Relation in the System,  $(La_{1-x}A_x)_{1-y}MnO_{9+z}$  (A=Ca and Sr)」Material Research Bulletin, 6 (1991)
18. 「ANew Cathode Material  $(La, Sr)_{1-z}(Mn_{1-y}Cr_y)O_3$  ( $0 \leq y \leq 0.2$ ) for SOFC」DENKI KAGAKU, 58(6), (1990)
19. 「単セル基礎出力特性試験による電池材料開発課題の検討」電中研 研究報告：W90007 (1990)
20. 「Low Temperature Air-Sinterable Lanthanum Calcium Chromites with Chromium Deficit for SOFC Separator」DENKI KAGAKU, 59(4), (1991)
21. 「ランタンクロマイトとジルコニア電解質の反応性」電中研 依頼報告：W91023 (1992)

本部/経済研究所 東京都千代田区大手町1-6-1 ☎(03)3201-6601 ☎100  
柏江研究所/原子力情報センター/ヒューマンファクター研究センター/  
情報通信研究センター  
東京都柏江市岩戸北2-11-1 ☎(03)3480-2111 ☎201

我孫子研究所 千葉県我孫子市我孫子1646 ☎(0471)82-1181 ☎270-11  
横須賀研究所 神奈川県横須賀市長坂2-6-1 ☎(0468)56-2121 ☎240-01  
赤城試験センター 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567 ☎(0272)83-2721 ☎371-02  
塩原試験場 栃木県那須郡塩原町関谷1033 ☎(0287)35-2048 ☎329-28

## 編集後記

電中研レビュー第29号「燃料電池発電技術」をお届けいたします。

本号では「巻頭言」をNEDO理事長 林 政義様をお願いいたしました。ご多忙中にもかかわらず快くご寄稿いただき、心よりお礼を申し上げます。また、ご寄稿いただきましてから、発刊に至るまで、若干、時間の空いてしまいましたことを、この場をお借りしまして、お詫びいたします。

燃料電池の開発は、国のプロジェクトを1つの太い幹に、電気事業のみならず、メーカー、ガス、石油など、さまざまな産業の総力を結集して進められております。

現在の開発の状況を、分かりやすく例えますと、リン酸型が一番上のお兄さんで、もうすぐ大学を卒業するこ

とができそうです。次男は、溶融炭酸塩型、こいつはやっと中学生、にきび面の生意気盛り。末っ子は固体電解質型、小学校の低学年、まだまだ落ち着きのない、いたずら坊主といったところでしょうか。今後、やっつけなければならない宿題は、いずれも沢山残っています。

そんな中、燃料電池の実用化には、なみなみならぬ期待が寄せられております。しかし、親の過大な期待が、時として子供に大きな負担となってしまうことが、往々にしてあります。非行に走ってしまわないように、また、兄弟喧嘩をしないように、温かい目で見守ってあげたいものです。

本レビューは、当研究所でのこれまでの研究成果を中心に取りまとめたものです。第1回目の通信簿とでも例えましょうか。

本レビューが、地球のため、人類のためのエネルギー開発の一助になれば幸いです。

**IR**