

燃料電池技術の開発動向

Trend of Fuel Cell Technology Development

宮崎 義憲* ・ 奥山 博信**

Yoshinori Miyazaki Hironobu Okuyama

1. はじめに

社会経済の発展とともにますますエネルギー需要が増大することは衆目が一致して予想するところである。一方、エネルギー消費の拡大とともに地球温暖化、酸性雨等の地球環境問題が表面化してきており、その解決策について地球規模で議論されるようになってきている。

使用エネルギー形態として大きな部分を占める電気エネルギーの需要を賄うための供給力の補強に当たっては、単に電力供給を考えるだけでなく、エネルギーセキュリティ、地球環境問題を念頭におくことは不可欠である。

発電効率が高く、排出物、騒音について環境安全性が良好で、燃料の多様化が可能等の特長をもつ燃料電池発電技術はこれらのハードルを超える有力な方法の一つとしてその実用化が期待されている。

わが国においては、1990年6月に出された総合エネルギー調査会総合部会及び電気事業審議会需給部会の中間報告において2000年までに約225万kW、2010年までに約1080万kWの燃料電池の導入見通しを立てている。

アメリカにおいては、1991年2月の国家エネルギー戦略(National Energy Strategy: NES)の中で2010年までに200,000MWまでの発電容量の追加の必要性が示され、一方クリーンエア法(Clean-Air Act)によるSO_x, NO_x排出レベルの制限が決められ、燃料電池発電の出現への期待がみられる¹⁾。

ヨーロッパでは発電容量の増加はあまり大きくないとされているが、EC諸国でのリプレース容量として1991~2000年に62GW、2001~2010年に75GWが予想

されている。既存発電技術の環境問題、立地的制約等から新規発電技術としての燃料電池発電への期待は大きい²⁾。

このほか、自動車の排気ガスによる大気汚染の問題からクリーンな自動車の出現の観点で燃料電池の利用が考えられている。

このような背景から、特に、日本、アメリカ、ヨーロッパにおいて積極的な燃料電池の開発が進められている。

2. 燃料電池の種類と特徴

図-1に燃料電池の基本構成を示す。燃料極(アノード)、酸化剤極(カソード)という2つの電極と、電解質板で構成される。この単セルの出力電圧は1V程度であるので、適切な電圧を得るためにこれを直列接続して使うことになる。この接続のためにセパレータ(バイポーラプレート)が隣接する異種電極間に配置される。

燃料電池は電解質、燃料、酸化剤、作動温度などにより分類する方法があるが、電解質の種類で分類するのが一般的であり、ここではこの分類方法に従う。

電解質として水酸化カリウム(KOH)を用いるアルカリ型燃料電池(Alkaline Fuel Cell: AFC)、リン酸(H₃PO₄)を用いるリン酸型燃料電池(Phos-

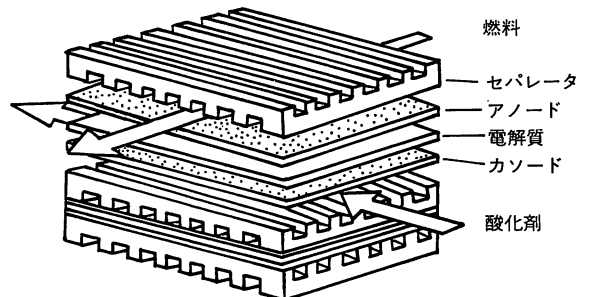


図-1 燃料電池の基本構成

*大阪工業技術試験所 無機機能材料部 燃料電池研究室

主任研究官

** " " " " 室長

表 1 燃料電池の種類と特徴の比較

	アルカリ水溶液型	酸水溶液型	熔融炭酸塩型	固体電解質型	高分子電解質型	
電解質部	電解質	水酸化カリウム (KOH)	リン酸 (H ₃ PO ₄)	炭酸リチウム (Li ₂ CO ₃) 炭酸カリウム (K ₂ CO ₃)	安定化ジルコニア (ZrO ₂ + Y ₂ O ₃)	イオン交換膜 (特にカチオン交換膜)
	イオン導電種	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻	H ⁺
	比抵抗	~1 Ωcm	~1 Ωcm	~1 Ωcm	~1 Ωcm	≤20 Ωcm
	作動温度	50~150°C	190~220°C	600~700°C	~1000°C	~120°C
	腐食性	中程度	強	強		
電極部	使用法	マトリックスに含浸	同左	マトリックスに含浸 またはペースト・タイプ	薄膜状	膜
	触媒	ニッケル・銀系	白金系	不必要	不必要	白金系
	燃料極 (一極)	H ₂ + 2 OH ⁻ → 2 H ₂ O + 2 e ⁻	H ₂ → 2 H ⁺ + 2 e ⁻	H ₂ + CO ₃ ²⁻ → H ₂ O + CO ₂ + 2 e ⁻	H ₂ + O ²⁻ → H ₂ O + 2 e ⁻	H ₂ → 2 H ⁺ + 2 e ⁻
	酸化剤極 (+極)	1/2 O ₂ + H ₂ O + 2 e ⁻ → 2 OH ⁻	1/2 O ₂ + 2 H ⁺ + 2 e ⁻ → H ₂ O	1/2 O ₂ + CO ₃ ²⁻ → CO ₂ ²⁻	1/2 O ₂ + 2 e ⁻ → O ²⁻	1/2 O ₂ + 2 H ⁺ + 2 e ⁻ → H ₂ O
全反応	H ₂ + 1/2 O ₂ → H ₂ O	H ₂ + 1/2 O ₂ → H ₂ O	H ₂ + 1/2 O ₂ → H ₂ O	H ₂ + 1/2 O ₂ → H ₂ O	H ₂ + 1/2 O ₂ → H ₂ O	
燃料 (反応物質)	純水素 (炭酸ガス含有不可)	水素 (炭酸ガス含有可)	水素, 一酸化炭素	水素, 一酸化炭素	水素 (炭酸ガス含有可)	
燃料の原料	電解工業の副生水素, 水の分解 (熱化学法, 電解)	天然ガス, ナフサ までの軽質油, メタ ノール	石油, 天然ガス, メタノール, 石炭	石油, 天然ガス, メタノール, 石炭	天然ガス, ナフサ までの軽質油, メタ ノール	
化石燃料を用いた時の 発電システム熱効率	(60%) (燃料電池本体の効率)	40~45%	45~60%	50~60%	(40~50%)	
問題点および開発課題	・燃料, 酸化剤中の CO ₂ ・水・熱収支の制御	・安価な触媒の開発 あるいは白金使用量の 低減 ・発電システム全般に わたる長寿命化, 低 コスト化	・構成材料の耐食, 耐熱性 ・CO ₂ の循環系など 要素技術の開発 熱収支, ボトミング サイクルを考慮した システム解析	・セル構造 ・耐熱材料 ・電解質の安定化 ・電解質の薄膜化	・構成材料の高性能 化, 長寿命化 ・セル構成技術と 大型化 ・水分管理 ・白金使用量の低減	

phoric Acid Fuel Cell : PAFC), リチウム, カリウム等の炭酸塩を用いる熔融炭酸塩型燃料電池 (Molten Carbonate Fuel Cell : MCFC), 酸化物イオン導電性電解質 (安定化ジルコニア) を用いる固体電解質型燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell : SOFC), 高分子電解質膜, 特にカチオン交換膜を用いる高分子電解質型燃料電池 (Polymer Electrolyte Fuel Cell : PEFC) などがある。

表 1 にこれらの代表的な燃料電池の特徴の比較を示す。

AFFCは技術的には完成度が高いが, 使用する燃料, 酸化剤への制約から現在は開発が限定されている。PAFCは商用化の前段階に到達しており, 信頼性, 経済性に重点をおいた開発が進められている。MCFCはプレパイロットプラント段階で, 高性能化, 長寿命化等に, SOFCはスタック, モジュール段階で高性能化等が当面の開発目標である。PEFCは, 燃料電池の実用化という点では1965年のジェミニ宇宙船に搭載されたことから古くからある技術であるが, 最近の高分子電解質膜, 電極触媒についての技術的ブレークスルー

により民生用としての開発が活発になってきたところである。

3. 研究開発の現状

3.1 わが国における開発状況

わが国においては自主技術を目指して1981年度からムーンライト計画の一環として「燃料電池発電技術の研究開発」が官民で進められている。その全体計画のスケジュールを図-2に示す。1981年度から1990年度までの第1次燃料電池発電技術研究開発計画はPAFCを中心とした開発が進められ, 基本的な技術開発の目的は達成された。1991年度からは研究開発の重点をMCFC等の高温型燃料電池に移した第2次燃料電池発電技術研究開発計画が進められている。

PAFCについては, 2基の1000kW級プラントが関西電力堺港発電所 (低温低圧型, 分散配置用) 及び中部電力知多第二火力発電所 (高温高圧型, 火力代替用) 構内に建設され, 1988年度に運転研究及び解体研究を終えた。プラントはそれぞれ三菱電機, 富士電機及び日立製作所, 東芝が500kW (2スタック) ずつ製作す

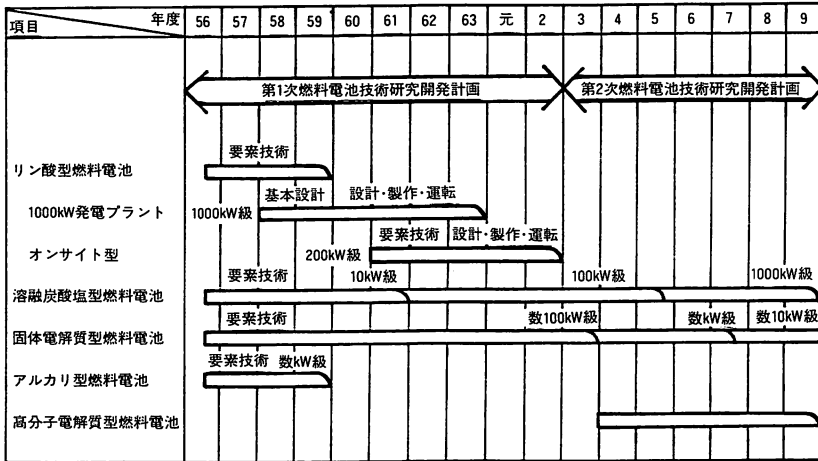


図-2 ムーンライト計画による研究開発スケジュール

ることによって建設された。このプロジェクトは当初予想しなかった技術的問題に遭遇したものの、両方式とも目標の1000kW発電を達成し、分散配置用は2000時間以上の運転や全自動運転を行い、火力代替用はより高い発電効率をめざして燃料電池を高温高圧環境下において1000時間以上の運転を行うなど数多くの成果をあげ所期の目的を達成した。プラントの動特性を向上させるためのシステム研究及び改質系の性能向上、電池寿命予測手法についての一層の検討、高効率タービン圧縮機の開発などの課題はあるものの、PAFC発電システムの実用化に向けて着実な歩みをするための展望が明確になった³⁾。

1986年度からオンサイト型PAFCの開発を総合的技術開発の一環として着手し、離島用及び業務用200kW級プラントを2基建設し、それぞれ沖縄電力、富士電機及び関西電力、大阪ガス、三菱電機が共同受託した。1989年度から1990年度にかけて運転研究を行い、常圧運転で39.7%という高い発電効率の達成、高温チームの回収、総合効率80.2%の達成⁴⁾、計画後の運転研究も含めて13,000時間超えた運転時間を記録するといった貴重なデータが得られた。

MCFCについては、1984年度に1kW級スタック、1986年度に10kW級スタックの運転・評価を行った。10kW級スタックの開発は各社とも成功裡に終了し、1987年度から新たに石炭の有効利用を目指した1000kW級MCFC発電プラントの開発が1997年度までの11年間の計画（第II期計画）としてスタートした。第II期計画ではスタックの開発を日立製作所、石川島播磨重工業、三菱電機が、トータルシステムを電力中央研

究所が担当している。また、溶融炭酸塩型燃料電池発電システム技術研究組合（MCFC研究組合）がスタック運転研究、周辺機器及びシステム技術、石炭ガス対応技術、並びに材料技術を担当している。新規材料開発と材料評価技術は大阪工業技術試験所が担当している。これまでに電極面積1m²級の25kW級スタックの常圧運転、加圧運転、内部改質型5kWスタックの開発、運転が順調に進捗してきており、50kWスタックについても近々運転研究に入ることになっている。今後数10kW～100kW級スタックが製作され、1994年度には運転されることになっている。この成果を踏まえて、1996～1997年度に1000kW級プラントの実証試験が実施される予定である。

SOFCは1986年度までに電子技術総合研究所を主体とした基礎技術を蓄積してきており、1987年度から新たに化学技術研究所が参画して要素研究を開始した。1989年度からは一層の開発推進を図るために富士電機総合研究所、三洋電機、日本鋼管、村田製作所、藤倉電線及びエネルギー総合工学研究所が参画して製造基盤技術の開発が開始された。1991年度には数100W級燃料電池が開発され、この成果を踏まえて、1995年度に数kWモジュールを開発し、ここで中間評価を行い、その評価結果を踏まえ数10kWのモジュールの研究開発を行うことになっている。

PEFCについては1992年度から新たに研究開発が開始される。

また、ムーンライト計画以外でも資源エネルギー庁のPAFCの商用化開発、分散型新発電技術実用化実証研究、石油産業活性化センターのナフサ利用技術の研

究、電力、ガス会社を中心とした独自の開発が進められている。

ムーンライト計画でのPAFCの研究開発成果を踏まえて、リン酸型燃料電池発電技術研究組合（PAFC研究組合）では、PAFCの商用化を目指して都市エネルギーセンター型燃料電池としての5 MWプラントと、オンサイト型燃料電池としての1 MWプラントを1990年から1996年にかけて設計、製作、運転試験を行うことになっている。

分散型新発電技術実用化実証研究は、関西電力の六甲新エネルギー実験センターに太陽光発電、風力発電設備とともに50kWスタック14台、200kWスタック1台の合計900kWのPAFCが設置され、1993年までの予定で系統連系を中心とした実証研究が行われる。

石油産業活性化センターではナフサ利用技術の一環として1986～1990年に特にナフサを燃料としたPAFC、MCFCの技術開発を進めてきており、1990～1994年で内部改質型MCFC、SOFCを、1991～1995年で商用プロトタイプのPAFC開発を進めている。

電気事業における燃料電池の研究開発は、1980年から東京電力、関西電力を中心に本格化してきており、現在ではほとんどの電力会社がそれぞれの目的を定めて自主研究あるいは国のプロジェクトに協力して、運転研究を中心に開発に参画している。

東京電力はIFC (International Fuel Cells Corp.) 社から4.5MW PAFCプラントを導入し、1982～85年にかけて実証研究を行った。当初計画の大半が達成されるとともに、燃料電池発電システムの特徴と問題点が明らかにされた。長期にわたる運転の結果、全体の性能低下が認められたが、電池本体の性能低下はほとんど認められなかった。この成果を踏まえて、IFCと東芝の11MW PAFCプラントを東京電力五井火力発電所内に導入して1991年春に初発電し、1993年3月までの予定で実証試験が行われることになっている。また、電源開発、三菱重工業との共同研究で1991年までに1kW級SOFCスタックの運転研究を行った。

関西電力では、三菱電機との共同研究で1991年に30kW級の間接内部改質型MCFCを開発、運転研究を行い、1992年に100kW級の間接内部改質型MCFCの運転研究を行う予定である。SOFCについては、東京ガス、大阪ガスと共同でWH (Westinghouse) の25kWモジュールを設置し、1992～1993年の1年間の予定で運転研究を行うことになっている。電気事業ではこのほかにも多くの計画をもっており、特に、各社に

おいてPAFCの運転研究が予定されている。

ガス事業における燃料電池の研究開発は比較的早期から行われてきている。1972年からTARGET計画に参画して、運転研究を中心に開発を行っている。1977年からGRI (Gas Research Institute) 計画に参画し、オンサイト用の40kW級PAFCプラントをIFCから導入して実証試験を行った。東京電力の4.5MWプラントの場合と同様に、燃料電池本体の故障はほとんどなく、電池周辺の故障を経験した。ガス事業ではIFCの200kW PAFCを導入した開発プロジェクトを現在実施中あるいは計画中である。また、富士電機との共同開発で商用化を目指したオンサイト用PAFCの開発を進めている。1992年からは多くのモニター機が市中に現れ、1993年度末には商用機の製造、販売が始まる予定である。MCFC及びSOFCについても計画が進行中である。特にSOFCについては、WHの3kW級スタックを導入した運転研究を1988年に行い、現在関西電力と共同で25kW級スタックの運転研究の準備中であり、これとは別にコージェネレーション用25kW級スタックの運転研究を1992年に計画している。

3.2 アメリカにおける開発状況

燃料電池の開発は、アメリカにおいて主導的に進められてきた。開発これまでPAFCを中心に進められてきたが、ここ5年くらい前から開発の中心が高温型燃料電池へと移ってきている。

民生用の燃料電池はDOE (Department of Energy), EPRI (Electric Power Research Institute), GRIがスポンサーとなって開発が進められている。

FY	92	93	94	95	96	97	98
SOFCシステム							
SOFC製造 開発							
SOFC製造 改良							
SOFC製造 開発テスト							
MSOFC製造 開発							
MCFCシステム							
MCFC製造 開発							
MCFC製造 改良							
MCFC製造 開発テスト							
PAFCシステム							
PAFC製造 開発							
燃料電池のアドバンス研究 及び技術開発							

図-3 DOEによる燃料電池の研究開発スケジュール

DOEの開発計画を図-3に示す¹⁾。

PAFCについてはGRIを中心にIFCが40kWのオンサイト用実証機を46台製造し、このうち2台は東京ガス、大阪ガスに供与されて、フィールド・テストが行われた（GRI計画）。現在、商業的な導入期に到達してきており、IFC/ONSIがオンサイト用の200kWスタックを1992～1993年に60台余製造し、アメリカ、日本、ヨーロッパに設置される予定である。また、2基の4.5MWに続く準商用機としての11MWを東芝と共同で東京電力に設置、運転研究に入っている。WHは産業用コージェネレーション向けの空冷式375kWモジュールを開発中である。

MCFCについてはIFCが8ft²-20セルスタックを開発し、MCP（M-C Power Corp.）はセパレータに特徴のある内部マニホールド型セルを、ERC（Energy Research Corp.）は内部改質型スタックを開発している。MCPは1991年に70セルを積層したスタックの運転、1992年2月に10ft²フルスケールの20kWスタックの運転を行った。1993～1994年にはUNOCAL（Union Oil of California）において、1994～1995年にはSan Diego G&Eにおいて250kWシステムのテストが予定されている。ERCでは4ft²-20kWスタックの開発、運転が行われ、1992年4ft²-

70kWスタック、1992～1993年に6ft²-120kWスタックを用いてPG&E（Pacific Gas & Electric）において実証試験を行うことになっている。米国公営電力連合（APPA）は、この実証試験の成功を条件に1994年度よりサンタクララで2MWプラントの実証を行い、商用1号機を1996年頃とする商用化スケジュールを打ち出している。

SOFCについてはWHが円筒型で20kW出力を達成し、これに引き続いて25kWモジュールを日本において、また、1993年にアメリカにおいて100kWコージェ

表2 ヨーロッパにおける燃料電池研究開発の概観

国	プログラム開始	期間(年)	燃料電池のタイプ
CEC	1989	3	SOFC PAFC MCFC DMFC
オランダ	1986	5 新プログラム 準備中	MCFC PAFC
イタリア	1986		PAFC MCFC SOFC PEFC
ドイツ			SOFC AFC
スペイン	1988	5	MCFC
デンマーク	1990	3	SOFC MCFC
ノルウェー	1988	5	SOFC
スイス	1988	3	SOFC
ESA	1988	2	AFC

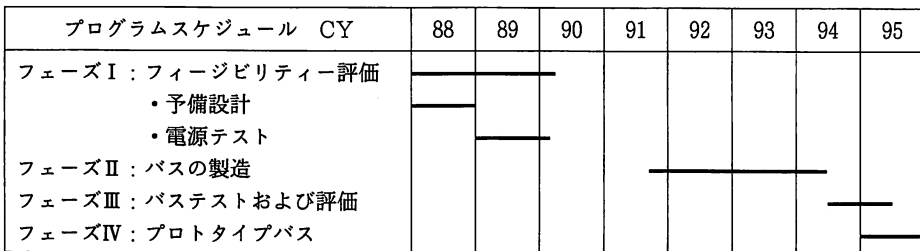


図-4 PAFC/バッテリーバスプログラム

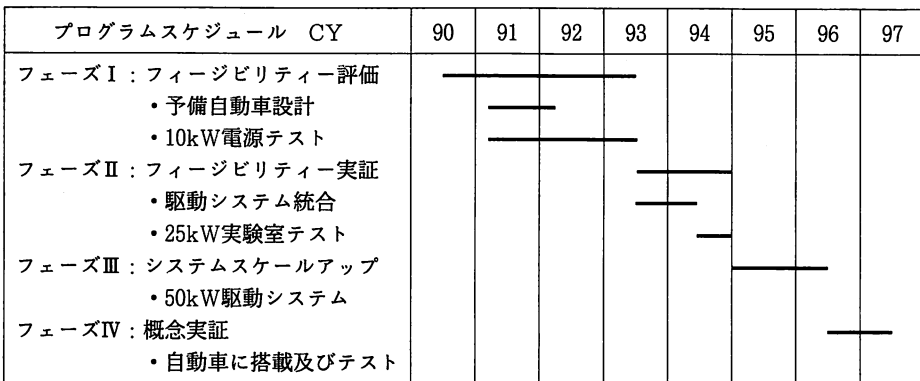


図-5 PEFCプログラム

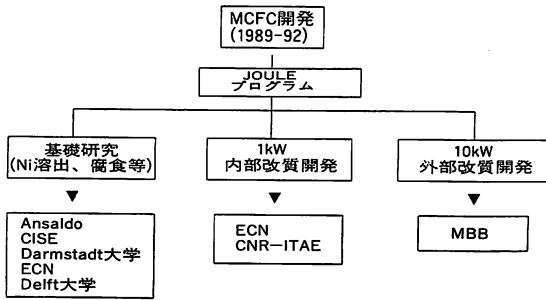


図-6 CECのMCFCの研究開発計画

ネレーションシステムを運転する計画をもっている。このほかANL, Allied-Signalがモノリシック型(MSOFC)を, Ceramatec, Ztekが平板型を開発中である。

このほかに電気自動車用としてのPAFC, PEFCの開発がなされている。この開発計画を図-4, 5に示す⁵⁾。

3.3 ヨーロッパにおける開発状況

オランダ, イタリア等が国家プロジェクトとして, また, EC委員会(CEC)が管理するプロジェクトとも緊密な連携を取り開発を進めている。表2にヨーロッパにおける燃料電池開発の概観を示す⁶⁾。EC委員会による燃料電池開発計画JOULE計画(1989-1992, Joint Opportunities for Unconventional or Long-term Energy supply)によるMCFCとSOFC開発体制を図-6, 7に示す。

PAFCについては基本的にはスタックの独自開発は行わず, スタックを日本, アメリカから購入し, システム化をヨーロッパで行い, 運転研究を行う形を取っている。AEM(イタリア)ではIFCのスタックを導

入する1MWプラントの開発が進められており, 1992年に運転する計画である。また, オランダ, イタリアにおいて日本製のスタックを用いた運転研究が行われ, スウェーデン, デンマーク等においてIFCの200kWスタックを導入した運転研究を計画している。

MCFCについてはオランダ, ドイツ, イタリアなどが開発を進めている。ECN(オランダ)は1989年に1kW級スタックを開発し, 1995年に石炭ガスと天然ガスを燃料とする2つの250kWシステムの運転が計画されている。MBB(ドイツ)ではERCの協力を得て1994年に250kWユニットの運転を予定している。オランダ, イタリア, イギリスの共同開発で内部改質型1kWスタックの開発計画も進行している。Elkraft(デンマーク)ではERC製の7kWスタックの運転研究を1991年に行った。

SOFCについてはEC委員会の管理のもとでハニカム型及び平板型の開発が行われており, 1992年にSiemens(ドイツ)による平板型とABB(ドイツ)による改良円筒型の2つの1kWスタックが開発される計画である。

4. おわりに

エネルギー需要の拡大とそれに伴う地球環境問題への影響は, その解決策の一つとして燃料電池の実用化を期待している。

電気事業用, エネルギーの有効利用を目指したコージェネレーション用, さらには電気自動車等に種々の燃料電池が開発されている。

燃料電池の実用化に当たっては最終的に高性能化, 長寿命化, 高信頼性, 経済性(低コスト化)が克服す

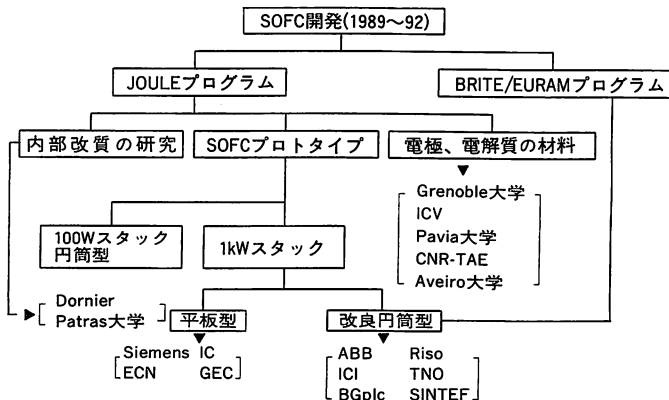


図-7 CECのSOFCの研究開発計画

べき重要な課題となる。これらは相互に関係をもっているが、それぞれの技術開発ステップに合わせてその主要課題を解決しながら歩を進めてきている。

技術開発と合わせて、燃料供給ネットワークの整備、熱供給ネットワークの整備、標準化、関係法規の整備等の諸環境の整備も必要となる。

今年からは燃料電池の開発関係者だけでなく、一般社会の目に触れる機会が多くなる。関係者、ユーザ、政策担当者の実用化への熱意がその道を切り開くことになるだろう。

エネルギー問題、地球環境問題はまさに地球規模の問題である。今後ますます国際協調による問題解決も必要となるだろう。

参 考 文 献

- 1) M. Mayfield, Proc. International Fuel Cell Conf., KS-1 (1992).
- 2) C. E. Gibbs and M. C. F. Steel, J. Power Sources, 37, 35(1992).
- 3) 通商産業省・産業技術審議会省エネルギー技術開発部会・評価分科会, 「1000kW級リソ酸型燃料電池発電システム評価報告書」, 平成元年4月.
- 4) 通商産業省・産業技術審議会省エネルギー技術開発部会・評価分科会, 「リソ酸型燃料電池発電システム(200kW級等)評価報告書」, 平成3年5月.
- 5) P. G. Patil, J. Power Sources, 37, 171(1992).
- 6) P. Zegers, Proc. International Fuel Cell Conf., KS-2 (1992).

協賛行事ごあんない

「1993年 JSME-ASME 動力エネルギー国際会議」開催について

1. 主催 日本機械学会
2. 共催 米国機械学会
3. 会期 1993年9月12日(日)~16日(木)
4. 会場 京王プラザホテル(東京)
5. 参加予定 約500名
6. 発表講演予定 約200件
7. 研究発表講演会内容
 - 1) 予定セッションテーマ
 - General Sessions
 - Power Generation Systems and Computers
 - Fuel Utilizations
 - Operation and Maintenance
 - Environmental Protection
 - Alternative Energy
 - Economics

- Special Sessions
- Ultra-High Efficiency, High Performance Energy Systems
- Advanced Combustion Technology
- Repowering and Upgrading
- New Materials for Energy Systems
- Strategies for Solving Global Environmental Problems
- 2) 使用言語 英語

■ 問い合わせ先

社団法人 日本機械学会
 動力エネルギーシステム部門
 〒151 東京都渋谷区佐々木2-4-9
 新宿三信ビル5F
 TEL 03-3379-6781