

リン酸型燃料電池の商用化

Commercialization of Phosphoric Acid Fuel Cell

小川 善朗*

Yoshiro Ogawa

1. はじめに

世界的にエネルギーの需要は着実に伸びており、また、地球温暖化等の環境問題への対応が急がれている現在、高効率で省エネ性に優れ、かつ環境適合性に優れている燃料電池の開発・実用化に期待が寄せられている。

中でも、リン酸型燃料電池発電の開発が最も進んでおり、基本的技術は、ほぼ確立され実用化技術の開発段階にある。

ここでは、リン酸型燃料電池の原理、構造、特徴、開発の経緯と実用化へ向けての開発状況、主として平成3年5月に設立されたリン酸型燃料電池発電技術研究組合と、通産省資源エネルギー庁から支援を受ける新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）と共同して開発を進めている都市エネルギーセンター型5000kW級プラントおよびオンサイト型1000kW級プラントの開発計画についてご紹介する。

2. リン酸型燃料電池の原理および構造

リン酸型燃料電池は、平板の電解質板を2枚の電極が挟み込む形で単電池が構成される。この単電池に都市ガスやメタノールを改質して造った水素含有ガスと空気を送り込み、電極の触媒の働きにより電気分解と逆の反応を起こさせて電気エネルギーを直接つくり出す発電装置である。リン酸型燃料電池は、従来の回転型の発電装置とは異なり、電池本体では燃料ガスの燃焼は起こらず、ガスが電池部分で電気化学的に反応して電気が発生する静止型の発電装置である。リン酸型燃料電池の原理を図-1に、リン酸型燃料電池本体の構造を図-2に示す。

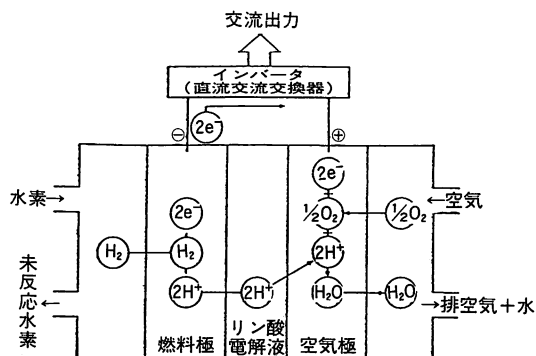


図-1 燃料電池の原理

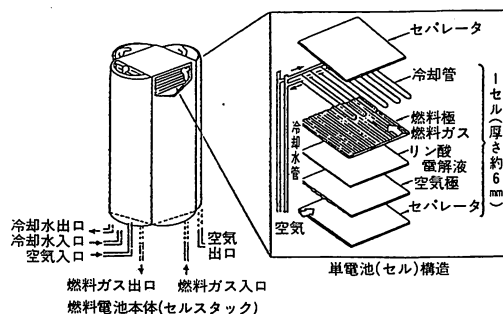


図-2 燃料電池の構造

3. 燃料電池の種類

燃料電池は電解質の種類によって、リン酸型、熔融炭酸塩型、固体電解質型に分けられる。(表1参照)

リン酸型は濃厚リン酸を電解質とするもので、電池作動温度が200℃程度と比較的低く技術的に扱いやすいため開発が進んでおり、最も早い時期の実用化が期待されている。

熔融炭酸塩型や固体電解質型の燃料電池は作動温度が650~1000℃と高いため、発電効率がリン酸型よりも高くなることが期待されているが高温型のため技術的に制約が多く現在熔融炭酸塩型は発電システムのス

*リン酸型燃料電池発電技術研究組合 技術部長
〒530 大阪市北区天神橋3-3-3 高橋ビル東3号館

表1 燃料電池の種類

種類	リン酸型	溶融炭酸塩型	固体電解質型
燃料	天然ガス メタノール ナフサ	天然ガス メタノール ナフサ 石炭ガス	天然ガス メタノール ナフサ 石炭ガス
イオン導電種	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
運転温度	200℃	600~700℃	800~1000℃
発電効率	35~45%	45~60%	50~60%
適用分野	オンサイト型 分散型	分散型 火力代替型	オンサイト型 分散型 火力代替型

ケールアップが、また固体電解質型は要素研究が精力的に進められている。

4. 燃料電池の特徴

燃料電池は、従来の火力発電方式が燃料の持っている化学エネルギーを一旦熱エネルギーに変換後、運動エネルギー更に電気エネルギーに変換するのに対し化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換するシステムであり、次のような優れた特徴を持っている。

- (1)発電効率が高い。(図-3参照)
- (2)部分負荷運転時にも発電効率の低下が少ない。(図-

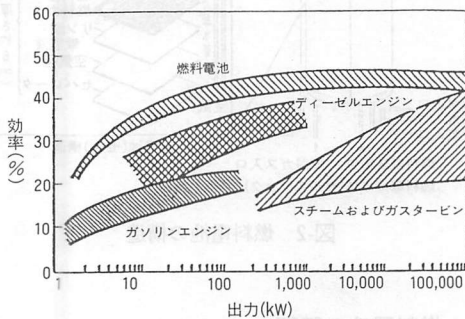


図-3 各種発電方式の発電効率の比較

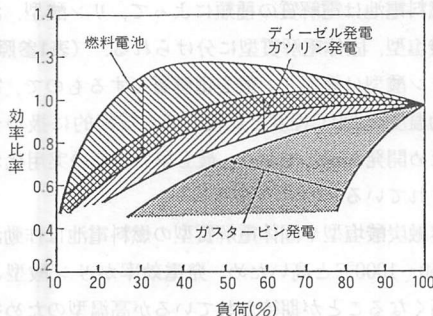


図-4 各種発電方式の部分負荷時の効率

4参照)

- (3)負荷追従性が良い。
- (4)環境に与える影響が少ない。
- (5)多様な燃料に対応できる。
- (6)建設工期が短縮できる。
- (7)発電過程で生成される排熱の利用が可能である。

5. 海外における研究開発状況

1839年英国のグローブ卿が初めて燃料電池の実験に成功して以来長期間あまり進展がみられなかったが、米国においてNASAがジェミニ、アポロ等の宇宙船に燃料電池を搭載して以来これを民生用に活用すべく、GRI, DOE, EPRI, 等による積極的な支援のもとに研究開発が進められた。

オンサイト型としてはガス事業者が中心となってTARGET計画が1967年から開始され、UT (United Technologies) 社製12.5kW (PC-11) 機が64台製作試験された。これを引継いだGRI計画が1977年から開始され、UT社製40kW (PC-18) 機46台の実証試験が行われた。

この両計画には、わが国の東京ガス、大阪ガスの2社も参画し、12.5kW機40kW機それぞれを導入し国内で実証試験を行った。

特に40kW機では、累積運転時間15,500時間を超える世界最長記録を達成した。

一方電気事業用としては、FCG-1計画が、1971年から開始され、UT社製1MWパイロットプラント(PC-19)で延1000時間の運転を行った。

これを基にスケールアップし4.5MW実証プラント(PC-22)を製作した。その後、UT社は1985年に東芝と合併でIFC (International Fuel Cells) 社を設立し、11MWプラント(PC-23)を開発した。

しかし、米国電力業界の経営環境が悪化し米国内では採用されず、東京電力向け1基のみとなった。

その他世界各国におけるリン酸型燃料電池の開発状況は図-5に示す通りオンサイト型を中心とした実証プラントの計画が推進されている。

6. 日本における研究開発状況

我が国では、1960年頃から国の研究機関、メーカーにより研究が始められた。その後、ガス会社や電力会社がユーザの立場から開発に参画し、更に1981年から国家プロジェクトであるムーンライト計画に取り上げられてから開発が大きく進展した。

	プラント名	冷却方式	容量 [kW]	製作者	'80	'81	'82	'83	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95
国内 加圧型	東京電力・五井火力	水冷	4,500	IFC	—															
	東北電力・新瀉火力	水冷	50	富士電機 *	—															
	NEDO/ 関西電力・堺港	水冷	1,000	富士+三菱	—															
	NEDO/ 中部電力・知多	水冷	1,000	日立+東芝	—															
	東京電力・五井火力	水冷	11,000	東芝(FC:IFC)	—															
	研究組合	水冷	5,000	富士電機	—															
国外 加圧型	アメリカ:FCG-1計画	空冷	(7,500)	WH	—															
	アメリカ:FCG-1計画(コンエジソン)	水冷	4,500	IFC	—															
	アメリカ:改質器開発	—	1,250	Halder Topsoe	—															
	アメリカ:FCG-1計画 PC-23 イタリア:/ ENEA	水冷 水冷	(11,000) 1,000	IFC ANSALDO(FC:IFC)	—															
国内 常 圧 型	東京ガス・キンダークラブ鶴見	水冷	40	IFC *	—															
	大阪ガス・レストラン・ロイヤルホスト	水冷	40	IFC *	—															
	関西電力・堺港火力	空冷	30	富士電機	—															
	東京ガス・万博/H第一イン池袋	水冷	40	IFC *	—															
	大阪ガス・レストラン・ロイヤルホスト	水冷	40	IFC *	—															
	北海道電力・伊達火力	水冷	100	三菱電機 *	—															
	東京電力・新東京電力	空冷	200	三洋電機 *	—															
	東電・新東京&関西電工ビル	水冷	2×200	IFC *	—															
	NEDO/ 関電+大ガス・ホテルプラザ	水冷	200	三菱電機 *	—															
	NEDO/ 沖縄電力・渡嘉敷	水冷	200	富士電機	—															
	東京ガス・技術研究所	水冷	50	富士電機	—															
	東京ガス・技術研究所	水冷	100	日立	—															
	大ガス・竹中・梅田センタービル	水冷	200	IFC *	—															
	石油活性化センター/ 石油各社	水冷	50~200	各社	—															
	NEDO/ 関西電力・六甲	水冷	50~200	各社	—															
	ガス3社(東京・大阪・東邦)	水冷	50~100	富士電機	—															
	大阪ガス/ 研究組合	水冷 水冷	500 1,000	富士電機 東芝	—															
	国外 常 圧 型	アメリカ:GRI計画 PC-18改良型 " PC-25	水冷 水冷	46×40 53×200	IFC IFC	—														
オランダ:ヨーロッパ・デモプラント		水冷	25	KTI (FC:富士)	—															
イタリア: ENEA/ ヨーロッパ・デモプラント		水冷	25	KTI (FC:富士)	—															
西独: SWB		水冷	76	KTI (FC:富士)	—															
スペイン, イタリア: (ガス会社)		水冷	各 50	富士電機	—															
タイ EGAT: NEDO/ 電源開発		水冷	50	富士電機	—															

〔注〕 1. ▲印は運開(使用前検査合格)時点を示す。 2. TARGET計画(PC-11, 12.5kW, '67~'76)は除く。 3. 小型可搬式リン酸型燃料電池は記載せず。 4. *は熱利用あり。

図-5 リン酸型燃料電池の開発実績と計画(1980年度以降)

ムーンライト計画として1981～88年にかけて電気事業用（分散配置用と火力発電所代替用の2タイプ）1000kW級の発電システムが電気事業者、国内メーカーの協力により開発され1000～2000時間の運転研究が実施された。

更に、業務用および離島用の200kW発電システムが国内メーカーと電気、ガス会社の協力により開発され1989～91年にかけて運転研究が実施された。

業務用発電システムでは、大阪市内のホテルプラザに設置し発電効率36%排熱回収により総合効率80.2%、累積運転時間13,038時間を達成した。

また離島用発電システムでは、沖縄県渡嘉敷島に設置し発電効率39.7%累積運転時間8,449時間を達成した。

一方電力業界では各社それぞれ運転研究を主体に開発に取り組んできており、中でも東京電力では、世界最大の11MWプラントを五井火力発電所構内に設置し1991年から、運転研究を実施している。

なお、燃料電池の導入を促進するため全国で当面（1995年度まで）50～200kW級のプラントを中心に36台程度導入する予定である。

また、ガス業界でも米国のTARGET計画、GRI計画に参画して以来積極的に研究開発に取り組んできており、オンサイト型の商品化を目指して2つのプロジェクトが進行中である。

一つは、ガス3社（東京ガス、大阪ガス、東邦ガス）と富士電機が共同開発しているもので50kW×9台、100kW×7台を試作し運転試験の評価後50台の量産試作機を試作評価後、1993年から商品機として販売を開始する計画であり、1990年から順次運転試験を開始している。

二つ目は、ガス3社（東京ガス、大阪ガス、東邦ガス）が、ONSI社の200kW量産試作機（PC-25）53台の内21台を導入し、試験運転を1992年から実施1993年から商品機を販売する計画である。

7. 都市エネルギーセンター等リン酸型燃料電池の開発

前項までに述べたように、10年に及ぶ国家プロジェクトと、電力・ガス業界、メーカーによる技術開発をベースとして本格導入を目指した高信頼度化、コンパクト化、低コスト化等の実用化技術を開発するため、リン酸型燃料電池発電技術研究組合（PAFC研究組合）が1991年5月に設立された。組合構成員は電力業界10

社（北海道電力、東北電力、東京電力、中部電力、北陸電力、関西電力、中国電力、四国電力、九州電力、電力中央研究所）とガス業界4社（東京ガス、大阪ガス、東邦ガス、西部ガス）である。

この組合と、通産省資源エネルギー庁から支援を受ける新エネルギー・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型5000kW級発電プラントと、オンサイト型1000kW級発電プラントの開発を実施することになった。以下にその概要について述べる。

7.1 都市エネルギーセンター型 5000kW発電プラント

大面積、高電流密度電池、コンパクト性に優れた大型改質器等の既存基本技術を基に、電気事業用として高い送電端効率を指向し、かつ排熱の利用も考慮して、現状で見通せる技術で高信頼度、コンパクトな実証プラントを開発し、運転研究を行う。

(1)プラントの開発目標は、表2の通り

(2)開発スケジュールは平成3～5年度に設計、製作、据付を行い平成6～8年度に運転研究を行う

(3)設置場所

尼崎市の関西電力(株)尼崎第二発電所跡地

(4)システム構成の概要

・5000kWプラントのイメージ図（図-6）

・5000kWプラント概略系統図（図-7）を参照

a. 燃料電池系

燃料電池は6スタックで構成され、電池スタックの電気的接続は（3スタック直列）×2並列である。

b. 燃料改質系

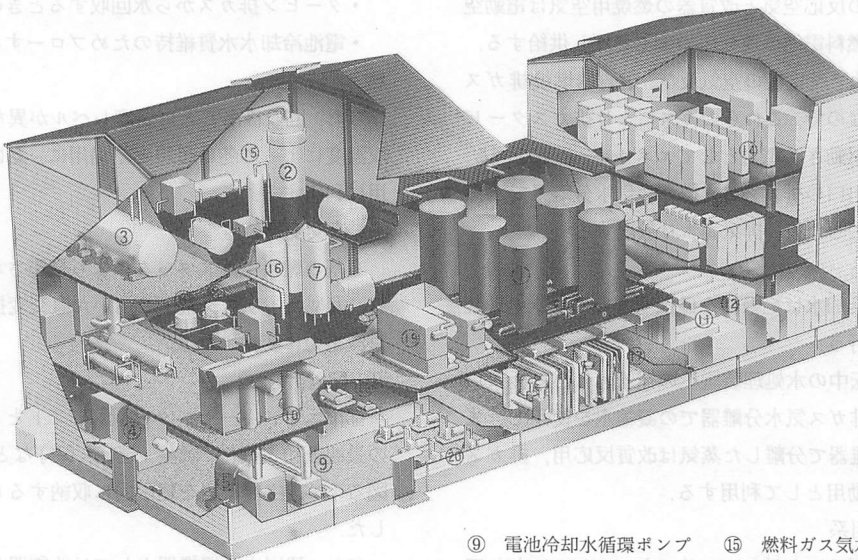
原燃料としては都市ガス（13A）を原燃料ガス圧送機で昇圧して供給する。原燃料ガスに付臭剤として添加されている硫黄成分は、脱硫反応器で水添脱硫反応により除去する。次に電池反応熱によって発生させた蒸気と原料ガスを混合させて改質器に供給し、水蒸気改質反応によって水素リッチの改質ガスに変換させる。

改質器における反応では、一酸化炭素濃度が高いので高温CO変成器、低温CO変成器によって一酸化炭素を水素と二酸化炭素に変成させる。改質器における水蒸気改質反応においては理論的に必要な水蒸気量に対し過剰に加えるので、燃料電池に供給する改質ガスの水素分圧を高めるために燃料ガス気水分離器で過剰な水蒸気成分を凝縮除去する。

なお、改質器における反応は吸熱反応であり、その熱源としては燃料電池で未反応の燃料ガスを燃焼させ

表2 都市エネルギーセンター型5000kW級発電プラントの開発目標

項目	開発目標	備考	
定格出力 [kW]	5,000	交流発電端 高周波はコージェネガイドラインによること。 直交変換装置出口 電気+暖房+給湯 電気+暖房+給湯	
出力電圧 [kV]	6.6kV, 3相, 60Hz		
発電端効率 [% (HHV)]	46以上		
送電端効率 [% (HHV)]	42以上		
総合効率 [% (HHV)]	71以上		
燃料電池本体	リン酸型		
動作圧力 [kg/cm ² G]	6程度		
動作温度 [°C]	200程度		
セル有効面積 [cm ²]	8,000~10,000		
セル電流密度 [mA/cm ²]	300程度		
セル電圧 [mV]	746程度	単基容量 5,000kW相当	
冷却方式	水冷却		
改質器形式	単管式		
空気供給方式	電動コンプレッサ +排ガスタービン発電機		
起動時間 冷起動 [時間]	6以内		56時間停止後
暖起動 [時間]	3以内		
負荷変化速度 [%/分]	20以上		
最低負荷 [%]	30		
運転監視	無人運転		
運転モード	WSS		本館建物投影面積+屋外機器面積
排熱利用	蒸気, 高温水, 温水の排熱を利用して 暖房, 冷房, 給湯を行えること。		
設置面積 [m ² /kW]	0.27以下		
設置場所	屋内		
NOx 排出濃度 [ppm]	10以下		
SOx 排出濃度 [ppm]	0.1以下	定格時 (O ₂ : 7%換算)	
使用燃料	都市ガス 13A		



- | | | | |
|------------|--------------|---------------|---------------|
| ① 燃料電池スタック | ⑤ 排ガスタービン発電機 | ⑨ 電池冷却水循環ポンプ | ⑬ 燃料ガス気水分離器 |
| ② 改質器 | ⑥ 脱硫反応器 | ⑩ 起動用ボイラ | ⑭ 改質器空気予熱器 |
| ③ 水蒸気分離器 | ⑦ 高温CO変成器 | ⑪ インバータ | ⑮ 空気極循環プロア |
| ④ 電動空気圧縮機 | ⑧ 低温CO変成器 | ⑫ 変圧器 | ⑯ 循環プロア |
| | | ⑬ 制御室 | ⑰ 冷凍機 (排熱利用用) |
| | | ⑭ コントロールセンター室 | ⑱ 排熱利用設備ポンプ |

図-6 5000kWプラントのイメージ図

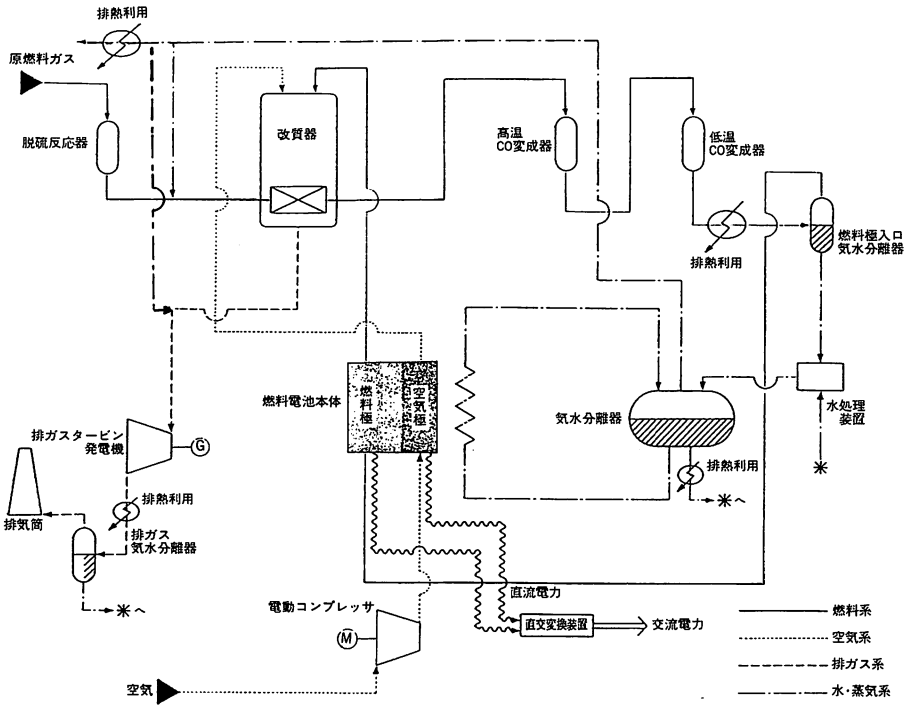


図-7 5000kWプラントの概略系統図

て得る。

c. 空気系

燃料電池の反応空気と改質器の燃焼用空気は電動空気圧縮機で燃料電池の運転圧力まで昇圧し供給する。

なお、電池で反応後の空気及び、改質器燃焼排ガスは高温高圧なので、これらのガスにより排ガスタービン発電機を駆動させ電力としてエネルギー回収を図る。

タービン出口の排ガスは、排ガス気水分離器で水蒸気を凝縮除去した後、排気筒より放出する。

d. 水蒸気系

燃料電池冷却水は絶縁性を確保するために水処理装置で処理を行う。

また、運転中の水処理装置への補給水は燃料極入口水分離器、排ガス気水分離器での凝縮水を使用し、また、気水分離器で分離した蒸気は改質反応用、排ガスタービン駆動用として利用する。

e. 排熱利用系

燃料電池プラントは、コージェネレーションとして優れた特性を有する。それを実証するため次の4ヶ所から排熱を回収する。

- ・改質用として投入した蒸気の内、余剰分を回収するための冷却排熱

- ・電池排熱にて発生させる蒸気の内、改質用として利用しない蒸気

- ・タービン排ガスから水回収するときの冷却排熱
- ・電池冷却水水質維持のためブローする水の冷却排熱

なお、回収箇所ごとに温度レベルが異なる。その回収温度によって冬は暖房と給湯用に、夏は冷房と給湯用に利用する。

f. 直交変換装置

6基の燃料電池スタックにより発電された直流電力は、大型サイリスタ素子を用いた直交変換装置により交流電力に変換される。

g. 配置計画

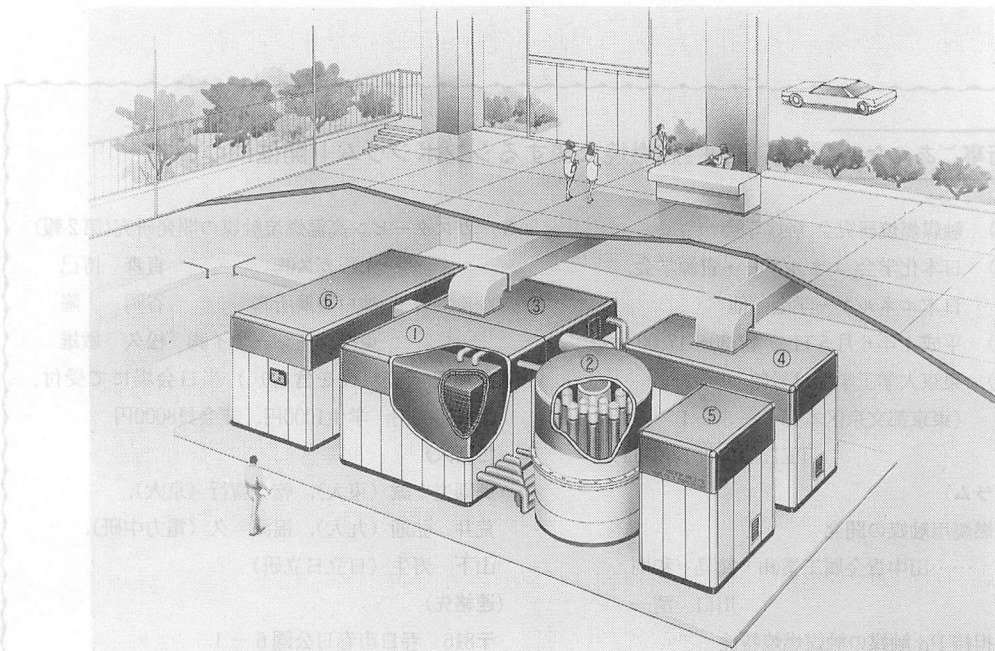
都市エネルギーセンター型プラントとして、周囲との景観調和と掘付、調整、運転、保守などの効率化を図るため、主要機器を建屋内に収納するレイアウトとした。

なお、建屋内設置機器としては改質器が最も高く、この改質器を収納することとして建屋の高さを設定した。

装置類は敷地面積の低減を図るために3層階構造とした。

表3 オンサイト型1000kW級発電プラントの開発目標

項目	開発目標	備考
定格出力 [kW]	1100	発電端出力
(直交変換装置損失, 補機動力を差引いたNET交流出力は1000kW)		
出力電圧 [kV]	既存電源に対応	6.6kV
発電効率 [% (HHV)]	36	送電端ベース
総合効率 [% (HHV)]	71	
熱利用効率	35	
高温排熱 [% (HHV)]	20~25	170°C 蒸気
低温排熱 [% (HHV)]	15~10	65°C 温水 (戻り50°C)
燃料電池本体	リン酸型	
動作圧力 [kg/cm ² G]	常圧	
動作温度 [°C]	205程度	
スタック数	1	2サブスタックを組み合わせた一体構造
セル有効面積 [cm ²]	8,000~10,000	
セル電流密度 [mA/cm ²]	250~300	
セル電圧 [mV]	660	
冷却方式	水冷	
改質器	多管式	単基容量1000kW相当
暖起動時間 [時間]	3以下	WSS運用
運転監視	無人運転	
NOX排出濃度 [ppm]	10以下	定格時 (O ₂ :7%換算)
SOX排出濃度 [ppm]	0.1以下	
設置場所	都市中心部ビル内	
設置面積 [m ² /kW]	0.1未満	
輸送高さ	陸上輸送可能なこと	
熱利用形態	冷暖房給湯	水蒸気回収により二重効用吸収式冷温水機を駆動
パッケージ	分割パッケージ	個々に輸送可能なこと
使用燃料	都市ガス 13A	



- ① 電池本体ユニット
- ② 改質器ユニット
- ③ 燃料・排ガス系ユニット (一酸化炭素変成器, 脱硫器等)
- ④ 空気・冷却水系ユニット (空気ブロア, 汽水分離器等)
- ⑤ 水処理装置
- ⑥ 電気系ユニット (インバータ, 変圧器, 制御装置等)

図-8 1000kWプラントのイメージ図

建屋内は可燃性ガスの取扱い上の安全を考慮して装置室、電池室、電気室に分割して配置を考えた。

7.2 オンサイト型1000kW級発電プラント

大面積、高電流密度電池等の既存基本技術を基に燃料電池から回収する蒸気の冷房用としての高効率活用を図ると共に、プラントのコンパクト化を志向した開発を行いその運転研究を行う。

- (1)プラントの開発目標は表3の通り
- (2)開発スケジュールは平成3～6年度に設計、製作、据付を行ない、平成7～8年度に運転研究を行う。
- (3)設置場所

東京都港区の東京ガス(株)技術研究所

- (4)システム構成の概要

・1000kWプラントのイメージ図(図-8)参照

8. 燃料電池導入目標量

1990年6月の総合エネルギー調査会あるいは、電気事業審議会需要部会の中間報告において、地球環境問題対応等から、燃料電池の積極的導入が強調されリン酸型燃料電池の導入目標量は、分散型電源(電気事業

用)として2000年に約105万kW、2010年に約310万kW、自家発電源(オンサイト用)として2000年に約90万kW、2010年に約280万kWとなっている。

この目標を達成するためには、先ずメーカ、ユーザー一丸となって信頼性を立証することであり更なる課題はコスト低減である。その方策としては

- ①構成機器の性能向上、コンパクト化、簡素化等による一層の技術開発
- ②製造・加工方法の改善、専用加工機の導入等の生産技術の合理化
- ③大量生産による量産効果等が考えられ、国による支援政策、メーカの技術開発と量産設備投資、ユーザーによる早期導入等各分野の努力と協力が必要である。

9. おわりに

PAFC研究組合は、発足後まだ1年にも達しておらず開発計画のみの紹介になりましたが、今後共通産省資源エネルギー庁、NEDOをはじめ関係者の協力により本プロジェクトを成功させリン酸型燃料電池の早期実用化に貢献したい。

協賛行事ごあんない 「第13回触媒燃焼に関するシンポジウム」開催について

〈主催〉 触媒燃焼研究会、触媒学会
 〈協賛〉 日本化学会、エネルギー・資源学会、
 日本エネルギー学会 他
 〈日時〉 平成4年6月5日(金) 13:30～17:00
 〈会場〉 東京大学工学部11号館
 (東京都文京区本郷7-3-1)
 TEL 03-3812-2111)

〈プログラム〉

1. 燃焼用触媒の開発
 ……田中貴金属工業(株) 鶴見 和則
 川口 清一
2. 担持Pd触媒の触媒燃焼特性
 ……早稲田大学 菊地 英一
 松田 剛

3. ガスタービン高温燃焼触媒の開発研究(第2報)
 ……大阪ガス(株) 貞森 博己
 神戸製鋼所(株) 谷岡 隆
 東洋シーシーアイ(株) 松久 敏雄

〈参加費(資料代を含む)〉当日会場にて受付。
 会員5000円、学生1000円、非会員8000円

〈世話人〉

御園生 誠(東大)、乾 智行(京大)、
 荒井 弘通(九大)、福沢 久(電力中研)、
 山下 寿生(日立日立研)

〈連絡先〉

〒816 春日市春日公園6-1
 九州大学総合理工学研究科材料開発専攻
 荒井 弘通 TEL 092-573-9611(内310)
 FAX 092-573-2318