

5. 解 説

燃 料 電 池 発 電 シ ス テ ム

三 洋 電 機 株 式 会 社
技 術 本 部 中 央 研 究 所

酒 井 貴 史 田 島 収

1. はじめに

わが国における電力需要は年々増加しており、この傾向は今後ますます顕著となることが予想される一方、石油、天然ガス等のエネルギー資源は有限であり、資源の有効利用は重要な課題となっている。

このような状況のなかで、エネルギー変換効率の高い燃料電池発電システムが世界的に注目され、特に米国、日本において燃料電池の研究開発が積極的にすすめられている。

燃料電池は、天然ガスやアルコールなどの燃料を改質した水素を主成分とする改質ガスと、空気中の酸素とから電気エネルギーを発生する装置である。燃料電池はエネルギー変換効率が高いこと、建設工事期間が短いこと、騒音が少ないこと、排出ガスが少ないこと、反応生成物が水であるということから、環境問題がほとんどないことなどの特徴をもっている。このため、いわゆるオンサイト方式で工場、オフィスビル、病院、マンションなどに設置したり、分散型発電所として、電力需要に近い場所に設置することが可能となり、送電ロスが少なくなるうえ、排熱利用ができるなど、大きな省エネルギー効果が期待される。

従来の熱機関による発電システムでは、熱エネルギーの機械エネルギーへの変換におけるカルノーサイクルの制約のために、発電効率はたかだか40%にしかならず、残りの60%のエネルギーは無駄に捨てられている。これに対し燃料電池による発電は、燃料電池において燃料が燃焼する際に放出する化学エネルギーを電気化学的手段を利用して直接電気エネルギーに変換する静止型発電装置であるため、本質的に高いエネルギー変換効率と良好な環境安全性が期待できるなどの特徴をもっている。その発電効率は40～50%、熱利用を含めた総合効率で見ると80%もの高い効率になるといわれている。

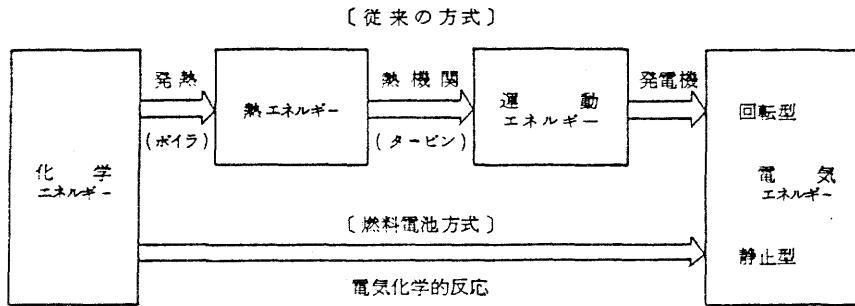
燃料電池は、水素、天然ガス、メタノール、石炭など石油以外の多様なエネルギー源を利用できる点でも大きな意義をもち、またこれらエネルギー源からの燃料を連続的に供給することで長期にわたり連続的に電力を供給することができるものである。

燃料電池発電技術は、水力、火力、原子力に次ぐ新しい発電方式として民生用あるいは事業用への応用を目指して米国においてはGRI計画、FCG-1計画などのプロジェクトが進行中でありわが国においても通商産業省工業技術院のムーンライト計画で、要素技術研究、実用化の研究が活発に行なわれている。

2. 燃料電池発電システムの概要

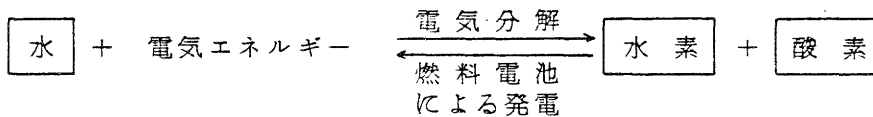
2-1 燃料電池発電の原理

普通の火力発電装置は、燃料の化学エネルギーを電気エネルギーに変換するのに3段の過程を必要とする。



それぞれのエネルギー変換過程で効率は低下する。これに対し燃料電池は、化学エネルギーから直接電気エネルギーを得る直接変換装置なので、高い効率を得ることができる。

その原理は水の電気分解の逆反応をやるものだと考えるとわかり易い。



もう少し、くわしく言えば、図1のようになる。

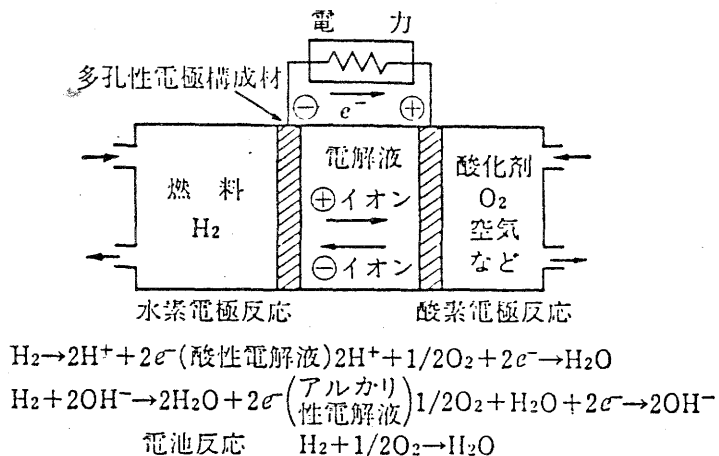
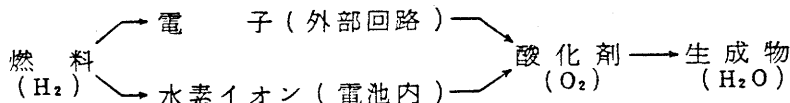


図1 水素酸素燃料電池の原理図

電池の種類によって異なるが代表的なリン酸型の場合は、次のような回路を形成させる。



供給される水素と酸素との反応エンタルピー値からみれば、一組の電池（単電池）で理論上約1.23Vの電圧が発生する。しかし、実際には電池内の活性化分極や内部抵抗等により、実質的な端子電圧は通常1.0V以下となる。電池の電圧は、圧力や動作温度によっても変わるが、活性化の手段としては触媒の利用、高温での利用があげられる。現在、出力密度をより大きく、また電池電圧をできるだけ高くするための努力が各方面で進められている。

2-2 燃料電池の種類

燃料電池は使用する燃料、電解質、酸化剤、作動温度および電池構成方式によっていろいろな種類が考えられるが、一般には、電解質の種類によって表1のように分類されている。

表1 燃料電池の種類と特徴

| タイプ | 第1世代 | | 第2世代 | 第3世代 | |
|--------------------|--|--|---|--|--|
| | リン酸型 | アルカリ型 | 溶融炭酸塩型 | 固体電解質型 | |
| 電解質材料 | リン酸 (H ₃ PO ₄) 溶融 | 水酸化カリウム (KOH) 水溶液 | 溶解状態のアルカリ炭酸塩 (炭酸リチウム Li ₂ CO ₃ など) | ジルコニア (ZrO ₂)、セリア (CeO ₂) など | |
| 作動温度 | 190~230℃ (3.5~8.3atm) | 常温~100℃ | 650~750℃ | 800~1000℃ | |
| 反応 | 水素電極 | H ₂ → 2H ⁺ + 2e | H ₂ + 2OH ⁻ → 2H ₂ O + 2e | H ₂ + CO ₃ ²⁻ → H ₂ O + CO ₂ + 2e | H ₂ + O ²⁻ → H ₂ O + 2e または CO + O ²⁻ → CO ₂ + 2e |
| | 酸素電極 | 1/2 O ₂ + 2H ⁺ + 2e → H ₂ O | 1/2 O ₂ + H ₂ O + 2e → 2OH ⁻ | 1/2 O ₂ + CO ₃ ²⁻ + 2e → CO ₂ ²⁻ | O ₂ + 2e → O ²⁻ |
| | 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 または CO + 1/2 O ₂ → CO ₂ |
| | 電解質中の移動イオン | 水素イオン (H ⁺) | 水素イオン (H ⁺) | 炭酸イオン (CO ₃ ²⁻) | 酸素イオン (O ²⁻) |
| 燃料 (反応物質) | 水素 (炭酸ガス含有可) | 純水素 (炭酸ガス含有不可) | 水素、一般化炭素 | 水素、一般化炭素 | |
| 燃料の原料 | 天然ガス、ナフサまでの軽質油、メタノール | 電解工業の副生水素、水の分解 (熱化学法、電解) | 石油、天然ガス、石炭 | | |
| 化石燃料を用いた時の発電システム効率 | 40% | (60%) 燃料電池本体の効率 | 45% (50%) | 50% (<60%) | |
| 実用化された年代 | 1980年代 | (水素エネルギー時代) | 1960年代中ごろ | 1995年以降 | |
| 開発者 | UTC, WH-ERC, Engelhard, 富士電機, 日立, 東芝, 三菱電機, 三洋電機 | UTC, 富士電機, 日立 | UTC, GE-IGT, 日立, 三菱電機, 富士電機, 東芝 | WH, (BBC) 電子技術総合研究所 | |
| 備考 | 触媒に白金が必要、一般化炭素含有不可、石炭ガスも使用可能といわれている。 | 将来の水素エネルギーシステムで有効。 | 触媒不要、メタノールも使用可能、廃熱によりタービンをまわすと、50%まで発電効率が上がる。 | メタノールも使用可能、廃熱によりタービンをまわすと、60%以上の発電効率が可能、現在、実験室規模の段階。 | |

このうち実用化が最もはやいのは第1世代のリン酸型であり、現在、数十KW~数千KWの実験システムが建設されているのはこのタイプである。

2-3 燃料電池発電システムの構成

ここでは、技術開発が最も進んでいるリン酸型の場合について述べる。(溶融炭酸塩型・

固体電解質型も基本的な構成は同じ)

発電装置は図2に示すように構成される。

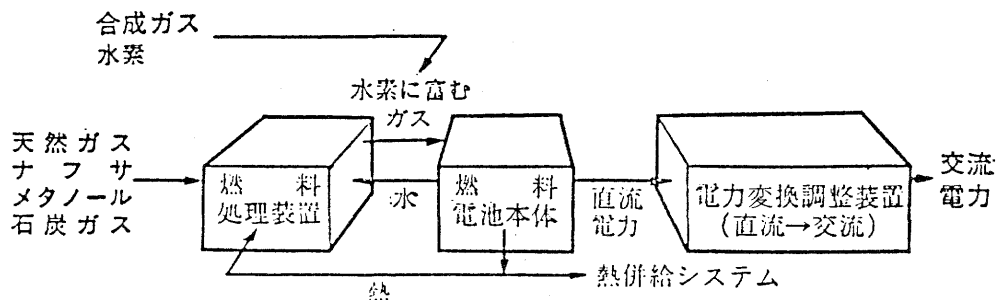


図2 燃料電池発電システムの構成

(1) 燃料処理装置

メタノールや天然ガスを改質して水素を主成分とするガスをつくる装置。

(2) 燃料電池本体

(1)でつくられた水素と空気中の酸素とを電気化学的に反応させて発電する装置。

(3) 電力変換調整装置

直流を交流に変換したり、負荷との調整を行う装置。

(4) 制御装置

(1), (2), (3)の装置を連係づけて制御するコントロールシステム。

(5) 熱併給システム

燃料電池の排熱を利用するシステム。(冷暖房・給湯システム等)

燃料電池本体の一組の電池(単電池)の実際の電圧は1V弱、電極面積 1cm^2 当たりの出力密度は $0.1\text{W}\sim 0.2\text{W}$ 程度であるので、実用電源として所要の出力を出すためには、所定の電極面積の単電池を必要数だけ電気的に直・並列に接続することが必要である。また、反応エネルギーの内、電気エネルギーとして取り出せなかった分は熱になるので、この発生熱と反応生成物の水を円滑に除去することや、反応ガスをすべての単電池に均一に送り込むことなども必要である。このための補機、制御、保護系などを備えて、初めて“燃料電池発電システム”が構成される。

2-4 燃料電池の特徴

燃料電池発電システムの特徴を一口でいえば、小規模でも高い効率が得られる公害問題のない発電システムであるといえる。このことから、都心など電力需要に近い場所に分散して

設置するのに適したシステムといえる。

次にその代表的な特徴についてやや詳しく述べる。

1) エネルギー変換効率が低い

燃料電池は化学エネルギーの直接変換で電気エネルギーを得る方式であるため熱機関としての制約や、大型回転機の機械的損失などが無いので、従来型の発電方式に比べて高いエネルギー変換効率の達成が期待できる。システムの熱効率は燃料電池本体の種類によって異なり、その作動温度が高くなるほど効率も高くなるが、いずれの型式でも40～65%と既存の発電方式の効率と同等、あるいはそれ以上である。排熱利用を含めると、80%以上の総合効率が期待できる。

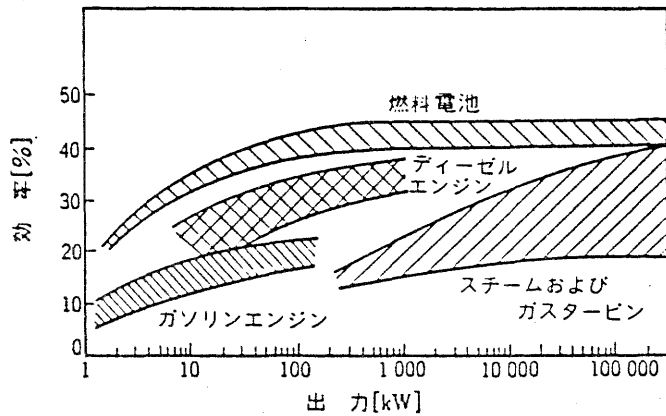
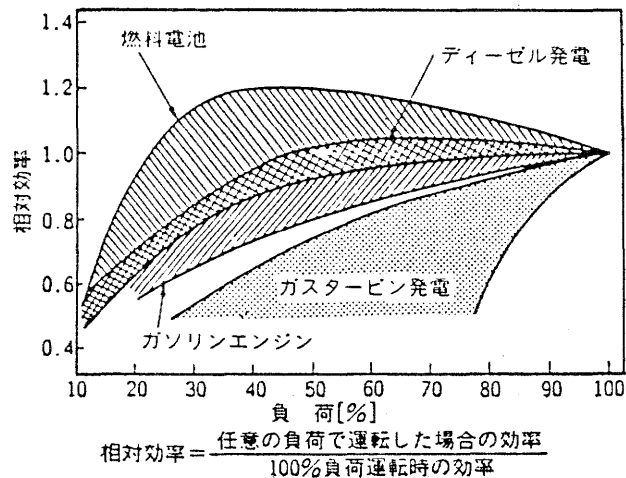


図3 機種別発電効率



$$\text{相対効率} = \frac{\text{任意の負荷で運転した場合の効率}}{\text{100\%負荷運転時の効率}}$$

図4 各種発電装置の相対効率変化

2) 小規模出力のもので効率がよく、部分負荷における効率も高い —

効率は発電規模にほとんど関係なく、小規模の出力のものでも高い効率が得られる(図3)。また燃料電池はその特性から低負荷時でも熱効率よく運転できるので(図4)電力消費の変動分を燃料電池に担わせ、原子力や石炭火力を最高効率の定格運転で定常的に運用することにより、電力系統全体の発電効率を向上させることができる。さらに負荷応答性にも優れているので中間負荷供給用、ピーク負荷供給用として適用できる特性をもっている。

3) 環境問題が少なく、立地上の制約が少ない —

燃料電池はその発電原理から環境汚染の危険が少ない。即ち主要部分での燃焼が少なく温度も低いことから大気汚染の心配も殆んどなく(図5)回転機器の数も少ないので騒音、振動が小さいなど、立地上の制約が少ない。したがって燃料電池発電所は人口が密集し、

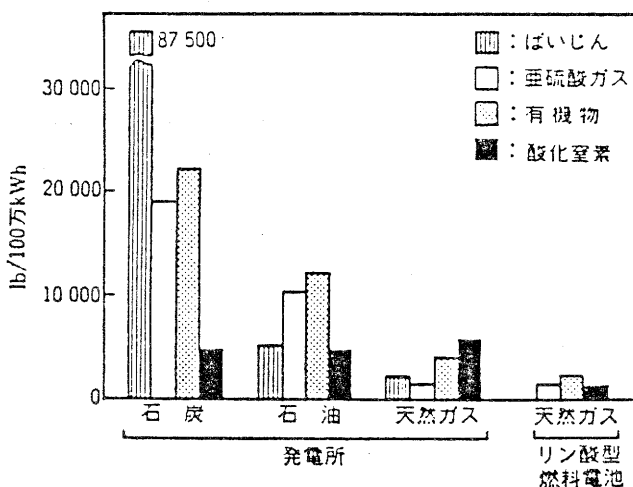


図5 各種発電方式による発電所の排出物

電力需要の多い市街地にも設置でき、遠隔地から都市への送変電設備、送変電損失の低減を可能にできる。また都市部およびその近郊においては熱需要が多いことから回収した廃熱を有効に利用することにより高い総合熱効率(80%程度)が期待できる。

4) 建設工期が短い —

燃料電池はモジュール構造をとるが、これは工場でのモジュール単位での流れ生産を可能にし短い期間で建設できることを示している。さらに機器の配置については自由度の高い設計が可能で所要面積は相当節減されと考えられる。

5) 燃料電池はさらに燃料として天然ガス、メタノール、石炭ガスなどを利用することがで

き、石油代替効果も大きいなどの特徴をもっており、エネルギー源の多様化の時代に適した発電方式といえる。

このように燃料電池発電システムは中間およびピーク負荷用の高効率、都市内分散配置型発電所として、エネルギー供給システムの中で重要な位置を占め、また、離島や僻地における独立電源、ビル、病院などのオンサイト電源などとして期待されている。

3. リン酸型燃料電池

リン酸型燃料電池は米国においてDOE, EPRI, GRIなどからの開発資金を得て、United Technologies Corporation (UT社), Westinghouse社(WH社), Engelhard社(EI社), Energy Research Corporation(ERC社)などの会社が研究を続けフィールドテストを実施するまでにいたっている。

日本においても最も実用化が間近い燃料電池として昭和53年ごろから民間で意欲的に研究が進められるようになり、昭和56年度に通産省のムーンライト計画のテーマのひとつとして取り上げられて以来現在実用化へ向けて盛んに研究開発が行なわれている。

3-1 リン酸型燃料電池の特徴

リン酸型燃料電池は、電解質として濃厚リン酸液を使用し、150～190℃で起電反応を行なわしめるもので、電解質が酸性であることから二酸化炭素による電解質の変質がない。このため燃料として高純度の水素を必要とせず経済的で入手容易な天然ガス、ナフサ等の化石燃料あるいはメタノール等を改質した炭酸ガスが混在する水素の利用が可能である。又、酸化剤として空気をそのまま使用することが出来るので現在一般発電用としてもっとも盛んに開発が行なわれている。この型の電池は、すでに一部で実証試験が始まっており第1世代燃料電池の代表となっている。現在のところ、集合住宅用の100KW級オンサイト発電装置、電力事業者向けの1万KW級の発電装置の開発に力が注がれている。

リン酸を電解質に用いる形式は、電解質の蒸気圧の制約、さらに構成材料などの耐熱性の制約から、上述のように150～190℃に、維持しなければならない。このため、電池内部の反応を活性化するために触媒が必要であり、現在一般に白金が使用されている。

燃料電池では発電時には電池の内部抵抗損や活性化分極損などに起因する発熱があるので、電池の温度が上記の値を越すのを防止するため、冷却系が設けられている。この冷却系で搬出した熱を使って水蒸気を作り、燃料改質に使用するなど、系内での排熱回収が図られている。

天然ガスやナフサを用いる発電システムは図6に示すような構成となるがこの基本構成は発電規模に関係なく一様である。

3-2 燃料改質装置

リン酸型燃料電池システムで使用される原料は、天然ガス、メタノール、ナフサ等である。最初の工程は脱硫工程で脱硫には硫黄化合物の種類により、活性炭を用いて吸着除去したり、あるいは改質されて生成した水素の一部を使って、燃料に含まれている硫黄化合物を反応させ、硫化水素を生成させてこれを酸化亜鉛床に吸着させる方法などがある。脱硫後の燃料ガスはつづいて水蒸気とともに約750～800℃の改質器（リフォーマ）に送られ、水素、一酸化炭素に分解する。リフォーマの熱源としては、燃料電池本体での未使用の水素と燃料の一部が用いられる。

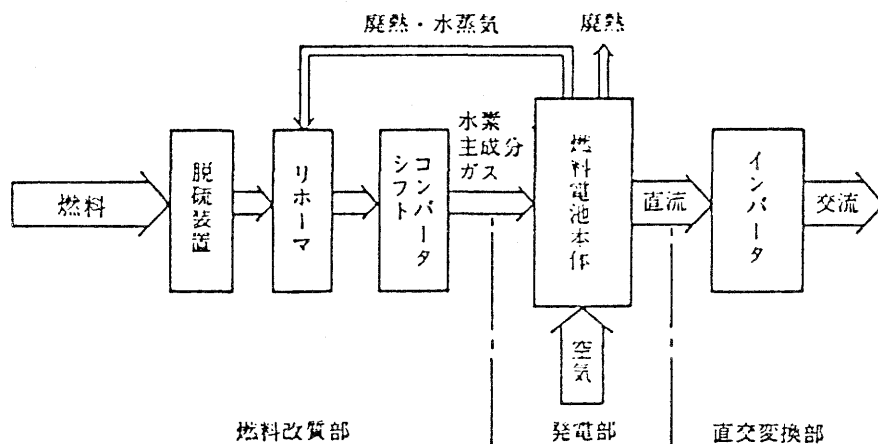


図6 燃料電池発電システムの基本構成

リフォーマで改質された燃料中には一酸化炭素が多量に含まれているので、さらにシフトコンバータを経由させ、一酸化炭素を水素と二酸化炭素に改質し、より水素成分の多いガスに変換する。同時に一酸化炭素は電極触媒に影響を及ぼさない濃度まで低減されて、燃料電池本体へと送られる。

3-3. 燃料電池本体

燃料電池本体の基本構成は図7に示すように、濃厚リン酸液を含有するマトリックスを中間にして、燃料極（負極）と酸素極（正極）とが相対向して組み合わせられ、一对の単電池が形成される。この単電池を反応ガスを供給する溝が切り込まれた炭素材のセパレーターを介して、積層化し、集合電池が形成される。

マトリックスは、濃リン酸を保持する役割りを果しており、作動温度で濃リン酸に侵されず、自由電子を通さないことが必要なこと、また薄型、大型化が要求されることから、フェノール樹脂繊維の不織布やシリコンカーバイトなどが用いられている。

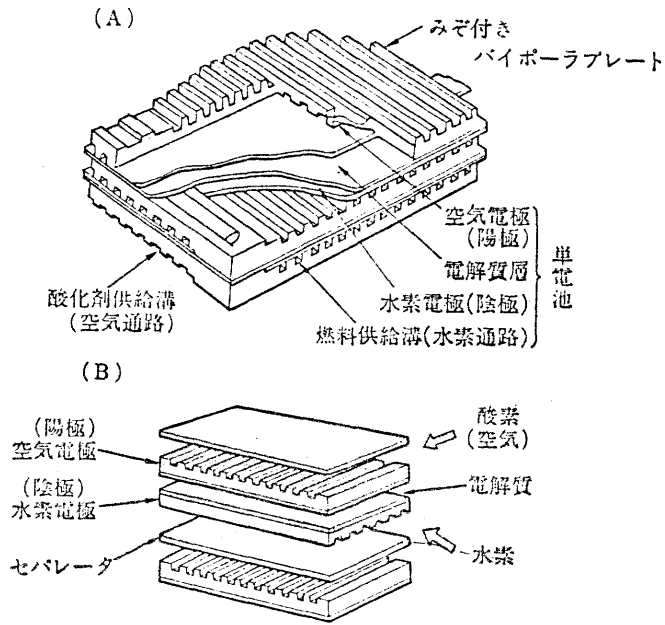
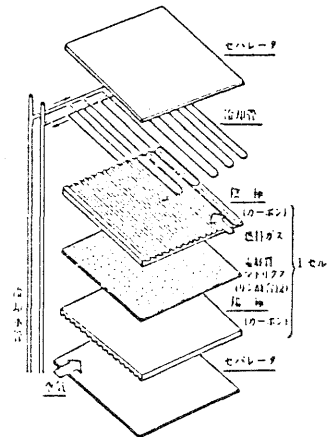
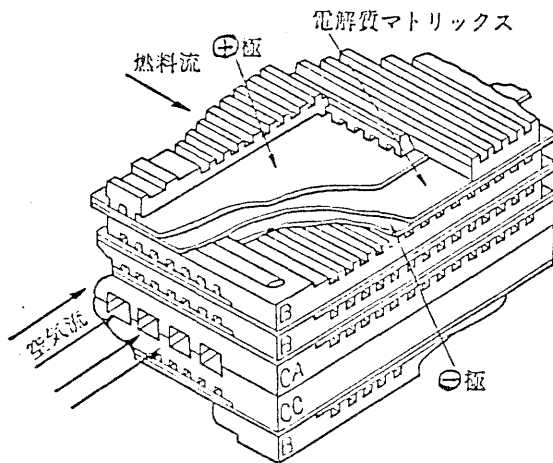


図7 リン酸燃料電池の単電池構造の比較
 (A) リブ付セパレーター使用電池
 (B) 平板セパレーター使用電池

電極は、例えばカーボン繊維を紙状にすいたカーボンペーパーを基材に白金触媒を被覆したカーボン粉末をポリテトラフルオロエチレンなどで結着した多孔性の膜状のもので、その中で濃りん酸と反応ガスとがうまく接触するようになっている。

セパレーターには、リブ付と平板とがあり、リブ付セパレーターは、グラファイトなどの気密性カーボン系材料の板でガスの通路として両面に互いに直交する方向の溝をつけ、ガス室を仕切ると共に、電極に接触し、セパレーターを介して隣接する電極を電気的につなぐインターコネクターの役目をする。従って、導電性が良く、ガスを透過させないことが必要である。また、平板セパレーターを使用する場合は、リブ付電極を用いなければならない。反応によって電池内で水が生成するがこの水は還流している燃料ガス、酸化剤ガスとともに電池系外に搬出されるので、電池内の電解質濃度は一定値に維持される。

燃料電池は、運転時に高い反応熱や抵抗による熱が発生するため、電池全体を冷却する必要がある。電池を冷却する方式には、大別して空冷式と水冷式の2通りの方式があり、その概念を図8に示す。空冷式は電池反応に用いている空気の一部を、電池の冷却にも用いる方式であり、構成がシンプルとなる。この方式は、電池の中に数セルごとに冷却プレートを用いたもので冷却用チャンネルの孔の大きさは、反応用チャンネルのそれより大きく、冷却用空気



B : バイポーラプレート (プロセス空気および燃料
チャンネル付)
CA : ⊖極 DIGAS 冷却プレート
CC : ⊕極 DIGAS 冷却プレート

<空 冷 式>

<水 冷 式>

図 8 燃料電池の冷却方式

が多く供給される。電池に供給された空気は、一部は反应用として、一部は冷却用としてそれぞれ用いられる構成である。一方、水冷式は電池の中(カーボンプレート内)に細いパイプを設けて、そのパイプに冷却水を供給して冷却する方式で、水の品質管理が重要であり、冷却水処理装置などの付属装置が必要となるほか、構成が複雑になる傾向がある。このほか、油や有機溶媒を使って冷却する方式も検討されている。

3-4. 開発の現状

燃料電池は、もとは宇宙開発用の電源として開発されてきたものであり、民生用に利用する目的で組織的に研究開発が開始されたのは、1967～1971年に米国においてTARGET計画、FCG-1計画が発足した時からである。

(1) TARGET計画

1967年米国の主要ガス会社27社が組織し、小型民生用燃料電池の実用化を目標としたものである。1972年から日本の東京ガスと大阪ガスも参画しPC-11型(出力12.5KW)の実証試験が行われた。この計画内容は1977年から米国ガス協会(GRI)に引きつがれ、出力40KWのPC-18を開発するに至っている。このPC-18を東京ガ

スと大阪ガスが導入し、実証テストを実施している。
 PC-18のシステム図を図9に示す。

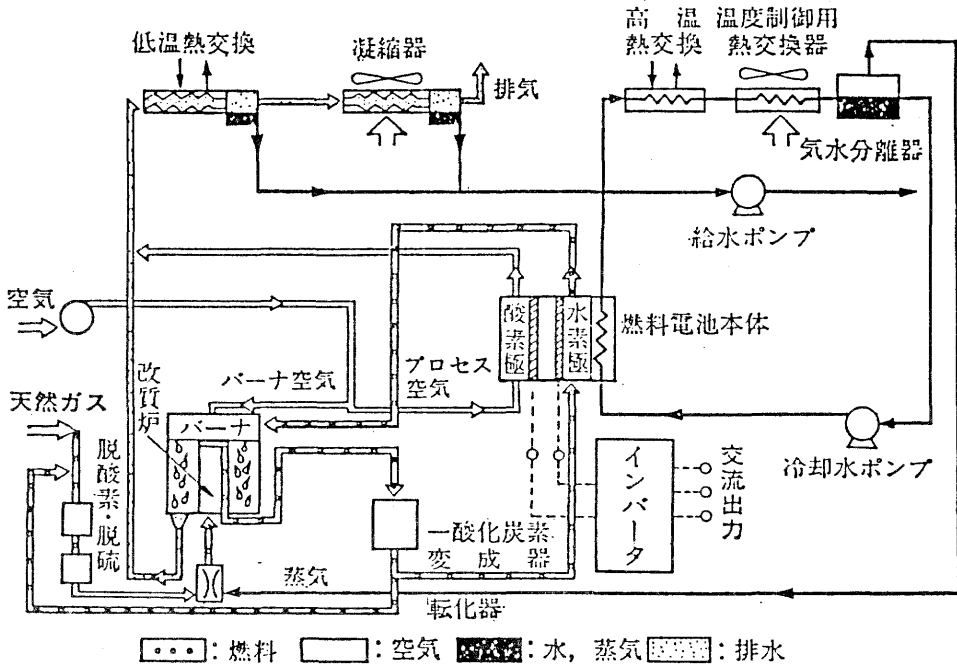


図9 PC18のシステム図

(2) FCG-1 計画

1971年、米国の9電力会社等により電気事業用の燃料電池を開発する目的で発足したものである。米国エネルギー省(DOE)、電力研究所(EPRI)の援助を受け、ニューヨーク市に4.5MWの実証プラントを建設中である。なお、同様のプラントを東京電力が千葉県五井火力発電所に導入し実証試験中であり、その系統図を図10に示す。

米国におけるリン酸型燃料電池の開発グループを大別すると2グループに分かれる。

一つは、電池本体の冷却方式として空冷式を採用しているウェスチングハウス社/エネルギーリサーチ社(WH/ERC)、もう一つは、水冷式を採用しているユナイテッドテクノロジー社(UTC)である。

(3) 日本における開発状況

1981年から通産省のムーンライト計画の一環として発足し、昭和59年度まで要素研究を実施するとともに、59年度からは1,000KWの実験システムを製作する予定であり、その研究開発計画を表2に構想図を図11に示す。

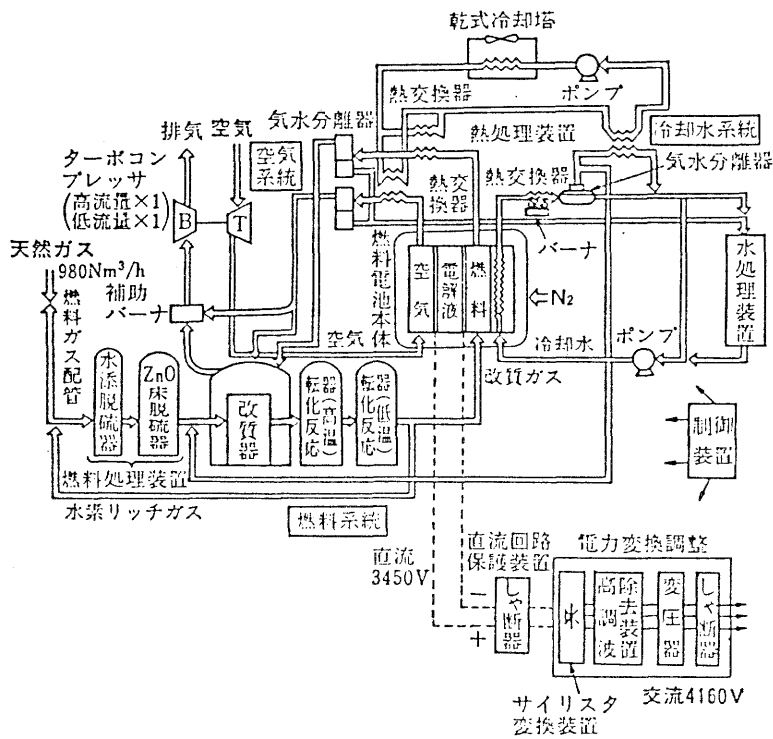


図 10 東京電力 4.5 MW の実証プラントの系統図

表 2 燃料電池 発電技術の研究開発計画

■ : NEIDO プロジェクト

| | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 |
|------------------|----------|----|----|------------|----|-------|
| (1) リン酸型燃料電池 | 要 素 研 究 | | | 試 験 作 業 | | 実証試験 |
| | | | | 1,000 kw 級 | | |
| (2) 磷酸型燃料電池 | | | | 要 素 研 究 | | 数 kw |
| (3) 固体電解質型燃料電池 | | | | 基 礎 研 究 | | |
| (4) アルカリ型燃料電池 | 要 素 研 究 | | | | | 数 百 W |
| (5) トータル・システムの研究 | システムの最適化 | | | 数 kw | | |

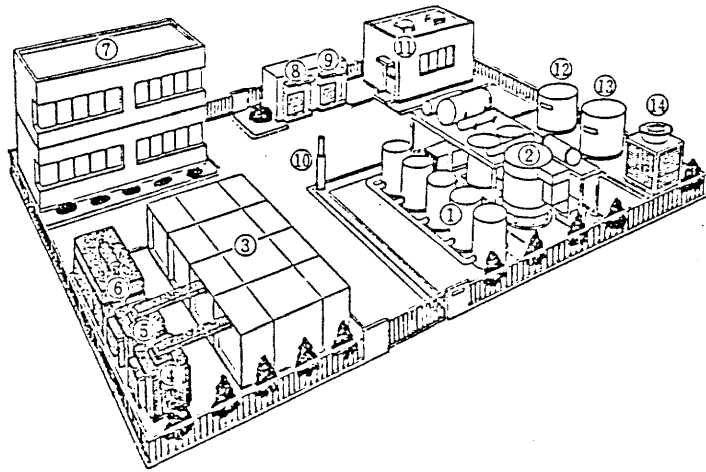


図 11 1,000 kW 燃料電池発電所の構想図（工業技術院ムーンライト計画の実証試験用） ①燃料電池、②燃料改質装置、③サイリスタ変換装置および開閉装置 ④出力変圧器、⑤リアクトル、⑥非常用ディーゼル発電機、⑦制御室および管理事務所、⑧ N₂ カードル、⑨ H₂ カードル、⑩フレアースタック、⑪補修装置室、⑫燃料タンク、⑬純水タンク、⑭冷却塔

ムーンライト計画では、立地の観点から次の2方式の技術開発を進めている。

1. 分散配置用燃料電池発電システム

— 低温低圧型 —

市街地内に分配設置されるローカル発電用の比較的小容量〔20MW～30MW級〕発電システムとして考える。

無人運転を前提とするため、これに適した保守性、運転性を有する。

市街地に建設するためこれに適する構造・システムである。

2. 火力発電所代替用燃料電池発電システム

— 高温高圧型 —

臨海にある既設火力発電所のリプレースなど火力発電所地点に設置される比較的大容量〔100MW級〕発電システムとして考えられる。

有人運転及び至近地点に保守要員の駐在することを前提とし、発電効率を最大限に向上することを目標とする。

臨海火力発電所サイトに建設するため、これに適する構造・システムである。

低温低圧型は、三菱電機と富士電機製造が、高温高圧型は(株)東芝と日立製作所が担当することになっており、1985年度末までにそれぞれの1,000KWのパイロットプラントを完成させ1986年にその実証試験の実施を予定している。NEDOではこの1,000KWプラントの達成すべき目標を表3のように設定しており、低温低圧型は関西電力に、

また高温高压型は中部電力に設置して実証試験が行なわれる予定である。

表3 燃料電池発電技術の開発目標

| リン酸型燃料電池 | | 溶融炭酸塩型燃料電池 | |
|----------|--------------|--|--|
| 項目 | 目標 | ①59年度に1kW級, 61年度までに10kW級電池を試作・運転し, 評価する。 | ②セルスタックの評価方法の研究, 及び, 石炭ガス化からのガスの利用や排ガスを利用するガスタービン, ボイラー・タービンと続くボトミングサイクル等を含めたトータルシステムの研究を行う。 |
| 出力 | 1,000kW級(AC) | なお, 実用化時点における目標発電効率は45%とする。 | |
| 発電効率 | 40%以上 | | |
| 白金使用量 | 6.5mg/w以下 | | |
| 寿命 | 40,000時間 | | |
| 環境 | 法令基準値以下 | | |

また将来の実用システムにおいて, 次の条件を満たすことを前提とする。

- ① 経済性 在来火力発電方式と同等以上
- ② 設置場所 都市内又は都市近郊に設置可能
- ③ 設置面積 発電所用地と同等以下

これとは別に, 民間会社による研究開発が実施されており, 水冷式では日立, 東芝, 三菱, 富士の重電メーカーが, 空冷式は, 三洋電機がそれぞれ出力20~50KW級の実験システムを試作し運転試験を行っている。

民間の異業種間の共同研究も盛んで, 東京電力-三洋電機-東洋エンジニアリング, 関西電力-富士電機-日揮等電力会社-電気メーカー, エンジニアリング会社間の共同研究が実施され, 我が国の開発速度は, 米国にくらべて非常に速い。

図12に各種燃料電池の開発スケジュールを示す。

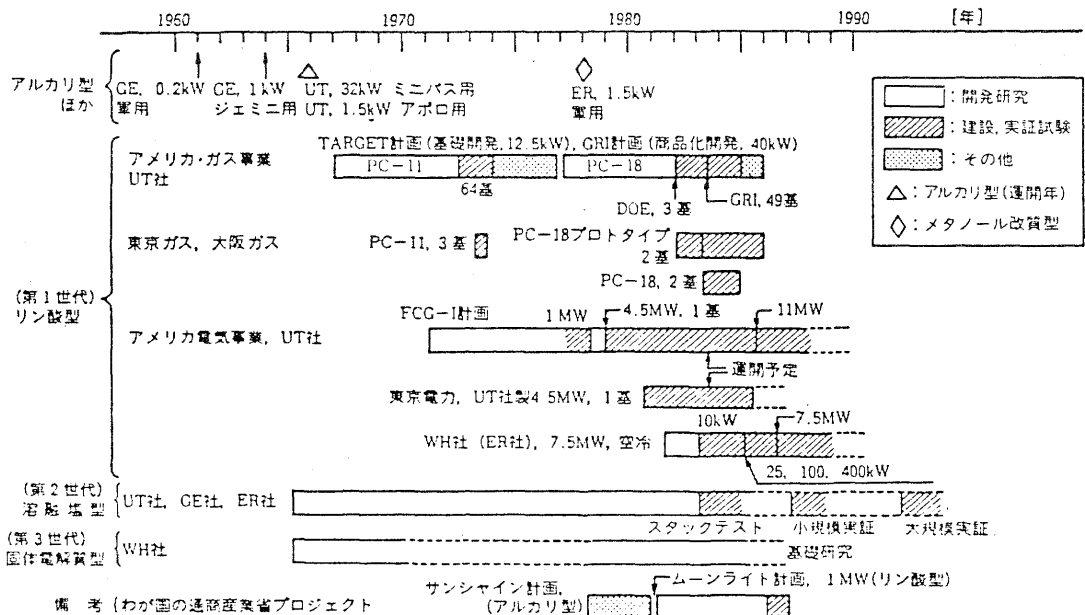


図12 各世代電池の開発スケジュール

4. アルカリ電解質型燃料電池

アルカリ型燃料電池は各種燃料電池の中で開発の歴史がもっとも古く1959年Baconが燃料電池の実用可能性を実証するのに用いたものもこのアルカリ型の燃料電池である。

アルカリ型燃料電池の作動原理は前述の図1のようになる。

すなわち、リン酸水溶液燃料電池で水素イオンが電解質内の荷電担体であったのに対しアルカリ水溶液燃料電池では水酸イオンが荷電担体となっている。

電極は正極、負極とも多孔性の焼結ニッケルや炭素材を使用している。電極に付与される触媒はリン酸型のように必ずしも白金である必要はなく、銀やラネニッケル、活性炭さらにポリフィリン錯化合物などが使用できる。電極には燃料、酸化剤の反応を円滑に進める為に一般的にはポリテトラフルオロエチレン膜を形成して撥水処理を行っている。アルカリ型燃料電池は、リン酸型燃料電池に比べて、正極での酸素の還元反応が進みやすく高い電流密度と高い電圧が得やすく、効率も高い。電解質は通常30～40%の水酸化カリウム水溶液である。

アルカリ型燃料電池はリン酸型燃料電池と比べて腐蝕性が弱いので触媒、材料の選択範囲が広いという利点を持つが水酸化カリウム水溶液が炭酸ガスを含むガスと接触すると次第に炭酸ガスを吸収し反応、炭酸カリウムが電極に析出し急激に出力が低下するという欠点を持っている。したがって、燃料には純水素が必要となり、また酸化剤として空気を利用する場合は脱炭酸を考慮する必要がある。

アメリカにおいては1960年ごろから盛んに研究が始まり、人工衛星、宇宙船用電源として実用化されて、アポロ、スペースシャトルの計画でその大きな成果を示している。アポロ宇宙船に使用されたものは、電解液として85%の濃厚水酸化カリウム水溶液を用い、200～250℃で作動するもので最低維持出力0.9KW、2分間最大出力1.4KWとなっている。アルカリ型電池は通常水溶液(30%～40%)を使用するという点から常温(室温～80℃)で作動するのが一般的であるが、このアポロ宇宙船用は濃厚、高温を特徴としている。

スペースシャトル用の電池はアポロ用に比べて重量当りの出力は8倍、容量当りの出力は6倍になり大巾な改良がうかがえる。

なお、将来の長期間の宇宙滞在に備えて太陽光発電が不可能な夜間の電源として、アルカリ型の水分分解装置と燃料電池とを組み合わせた再生型の燃料電池が35～300KWの出力規模で考えられている。

日本国内においては将来の人工衛星電源として三菱重工-日本電池が共同で基礎実験を行い、富士電機は昭和53年に国のサンシャイン計画の委託を受け概念設計、触媒電極及びセル構造の研究等を行っている。研究は昭和56年よりムーンライト計画へと引継がれ燃料電池本体目標効率45%を目指して開発継続中である。

5. 熔融炭酸塩型燃料電池

熔融炭酸塩燃料電池は、熔融状態のアルカリ炭酸塩を電解質とした電池である。普通使用される炭酸塩は、炭酸リチウム (Li_2CO_3)、炭酸ナトリウム (Na_2CO_3)、炭酸カリウム (K_2CO_3) などの混合物で常温では白色の固体であるが高温で、液体にし電解質として使用する。融点は $400 \sim 700^\circ\text{C}$ 程度である。

この燃料電池はリン酸型燃料電池に比べてより高い効率での発電が期待でき、作動温度がリン酸型の 190°C に比べて $600 \sim 700^\circ\text{C}$ と高いことから触媒として白金を必要としない。また使用可能燃料の種類が幅広いことから次世代に実用化できる有望な発電装置として注目され、現在、実用化を目指して開発が進められているリン酸型燃料電池に対比させて第2世代の燃料電池といわれている。

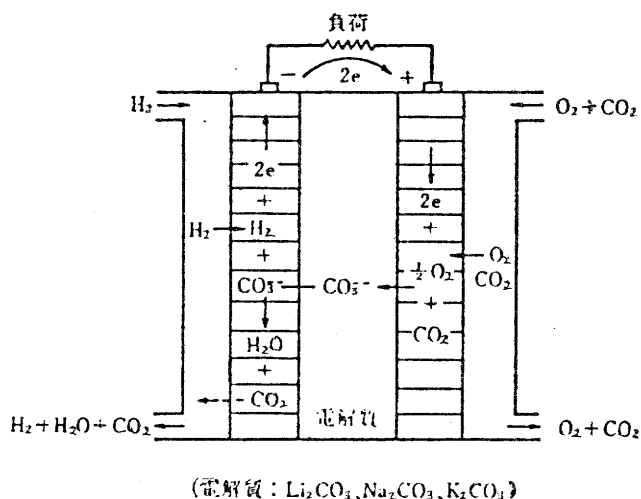
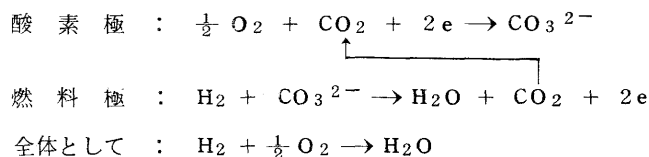


図13 熔融炭酸塩型の発電原理

5-1. 発電の原理

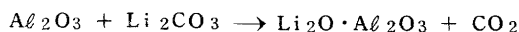
熔融炭酸塩燃料電池の原理を図13に示す。

この燃料電池では電荷担体となるのは炭酸イオン(CO_3^{2-})である。この炭酸イオンは炭酸ガス(CO_2)に酸素イオン(O^{2-})を付加した形であるから酸素イオン導電体と同じ効果を示す。燃料電池本体の酸素極へは炭酸ガスと空気が供給され外部回路より電子を受け取って炭酸イオンとなる。炭酸イオンは電解質中を燃料極側へ移動し、水素と反応して炭酸ガスや水を生じるとともに電子を外部回路へと放出する。反応式は次のようになる。



以上の反応式から明らかなように酸素極側の炭酸ガスの供給がないと電解質中で炭酸イオンが次第に減少することになるので燃料極で発生した炭酸ガスを外部経路を経て酸素極側に戻し、その炭酸ガス源とする必要がある。空気に炭酸ガスを加えてやるのがこの燃料電池の特殊条件である。

熔融炭酸塩型燃料電池にはペースト型電池およびマトリックス型電池の二通りがあるが、現在研究されているのはほとんどペースト型電池である。電解質の形態はマグネシア粉末ジルコニア粉末あるいはアルミナ粉末と炭酸塩電解質とを混合し加圧したもので最近ではアルミナを使用するケースが多いが、アルミナあるいはジルコニアの場合は高温で、



の反応を起こしアルミン酸リチウムあるいはジルコン酸リチウムを生成するのでむしろアルミン酸塩またはジルコン酸塩を炭酸塩に混合した方が良いといわれる。

電極は両極ともニッケル系金属材料であり、燃料極としては、クロムあるいはコバルトを加えた焼結ニッケル、酸素極としてはやはり多孔性の酸化ニッケルが使用される。

電解質板の両側にはスペーサーがある。スペーサーは燃料室や空気室を形成するとともに燃料極、酸素極からの集電の働きをしているので有孔金属板や金網などが使われている。

5-2. 熔融炭酸塩型燃料電池の特徴

リン酸型やアルカリ型燃料電池に比べて、熔融炭酸塩燃料電池にはいくつかの大きな特長がある。第1の特長は、作動温度が650℃と高いので高価な白金触媒を必要とせずしかも大きな電流密度が得られることである。

第2の特長は、幅広い種類の燃料の使用が可能であることである、他の型の燃料電池では、燃料ガス中の水素以外の成分とその割合が大きな問題になるが、この型では一酸化炭酸(CO)も燃料として活用できるので、安い燃料の供給が可能で、燃料処理装置もシフトコ

ンバーターが省略出来るなど簡単なものにすることができる。石油燃料に代わり、石炭をガス化した燃料を使う大型発電も可能となる。

第3の特長は、高い熱効率が得られることである。

溶融炭酸塩型については以上のような特長を生かすべく幅広い応用が考えられており、都市分散型の規模から図14に示すような石炭ガス化装置と組み合わせた燃料電池-蒸気タービンの複合発電まで検討されている。溶融炭酸塩燃料電池の発電効率は、石炭ガスを燃料として利用すれば45%、天然ガスを使うと50%になる。さらに、複合発電では50~55%の効率が期待できるといわれている。

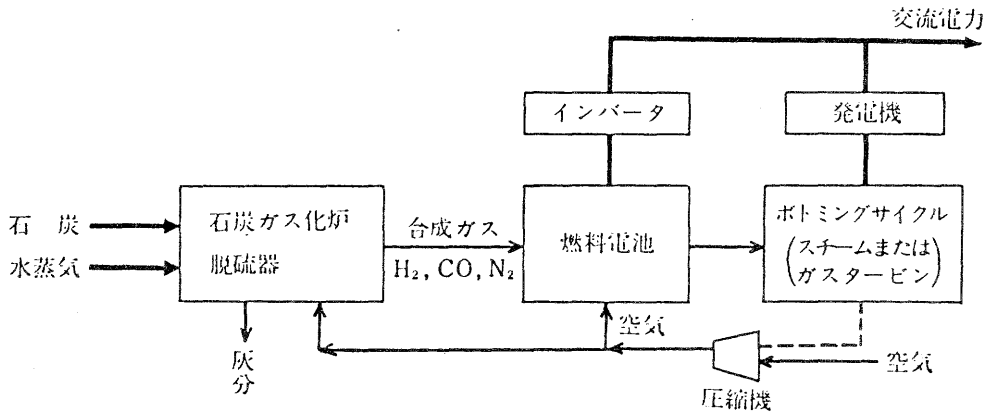


図14 溶融炭酸塩型燃料電池発電システムの構成

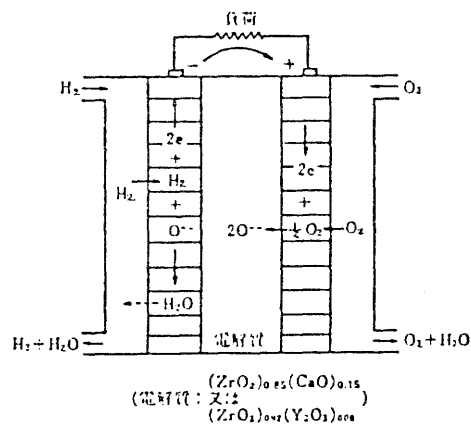


図15 固体電解質型の発電原理

さらに熔融炭酸塩型の電池では、その燃料源として、天然ガスやメタノールを利用する場合、燃料処理装置の機能を電池本体に備えた内部改質機構型のものが可能であり、システムはより簡素化されるとともに効率はさらに高くできるといわれている。

6. 固体電解質型燃料電池

固体電解質型燃料電池は、より高効率の燃料電池として開発が進められているものである。熔融炭酸塩型燃料電池よりも高い1,000℃という高温で作動することから発電効率は50%程度が期待でき、廃熱の有効利用も可能である。廃熱の工業的有効利用を含め石炭を燃料とする大規模発電所が究極の構想となっている。

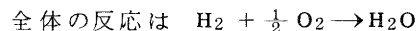
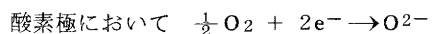
しかしながら、高温作動ということで材料面に関する問題は熔融炭酸塩型よりも大きく実用化には、まだかなりの時間が必要と考えられ、第3世代燃料電池と称されている。

この電池は、電解質に固体材料を用いるため構造などに特色があり、製造技術も電子材料技術の手法などが利用されている。

6-1. 作動原理

固体電解質型燃料電池の作動原理を図15に示す。この型の燃料電池は例えば安定化ジルコニア(ZrO_2-CaO)等の酸素イオン導電体系の固溶体などのセラミックスで O^{2-} が主たる導電種である物質を電解質に用いたものである。空気中の酸素が酸素極で反応し酸素イオンとなり固体電解質内を移動して燃料極に達する。燃料極では、燃料(水素、一酸化炭素、メタンなど)が反応して外部回路に電流が流れる。

酸素極、燃料極での反応式では次のようになる。燃料が水素の場合



となる。

6-2. 電池の構成材料

使用される固体電解質は安定化ジルコニア系やセリア・ガドリア系、および酸化ビスマス系の3種に大別できる。この中で、安定化ジルコニア系は比較的導電率が高く、還元雰囲気にも安定で、ほとんど電子導電性を示さないことや取扱性、価格、資源量の点でも他の材料より良いので最もよく研究されている。電極材料には、電子導電性の酸化物が使用されている。空気極材料としては、コバルトとランタンの酸化物系のものが導電率が高く、さらにこの系にSr, Caなどを加えた3成分系のものが用いられている。一方、燃料極としては、 V_2O_3 + ニッケル系の材料たとえば、Ni-NiO, CoNi-ZrO₂ サーメットなどの材料が用いられている。

電池は、固体電解質と電極より構成されるが、単電池の電圧および出力は小さいため、これら単電池を直列、さらに並列に接続して、大容量の電池システムを作る。このため、単電池間を接続するインターコネクタが重要となってくる。このインターコネクタは燃料極と酸素極をつなぐため、還元、酸化の両方の雰囲気強い材料でなくてはならない。また、使用温度が高いため、耐熱性の材料が必要である。現在、ニッケル系やランタンクロマイト系の材料が用いられている。

7. おわりに

以上述べたとおり、燃料電池は将来有望な新しい発電システムであるが実用化されるためには技術的にも経済的にもまだまだ解決せねばならない課題がある。

技術的課題としては、第一に熱効率の向上、特に発電効率の向上であろう。オンサイト型のような小規模のシステムでも送電端効率40%以上は必要となろう。第二に要素技術の開発による設備費の低減、特に電池本体のコストダウンは重要な課題である。第三に耐用年数の延長、信頼性の向上があげられる。

経済的課題としては、第一に量産効果などによる設備費（建設費）の低減、第二に燃料費（運転費）の低減などが重要である。このほか、需要に見合った電気と熱の利用システムの総合的検討も必要である。

このような課題をかかえているものの、最近の米国と日本の開発状況でみるかぎり、多額の資金と労力を投入した結果、急ピッチで進歩しており、このペースで進むと、近い将来実用化されることが充分期待できるものと思われる。