

省エネルギー型の新発電方式

New Generating System to Save Energy

荻 本 和 男*

Kazuo Ogimoto

1 はじめに

2度のオイルショックを受けエネルギー価格は、大巾に上昇し産業構造のあり方を根本的に見直す必要に迫られた。とりわけ我が国は、エネルギー資源の大部分、特に石油については殆ど100%を海外に依存しており、省エネルギー対策の徹底、新エネルギー技術を含む石油代替エネルギー開発の推進は重要かつ緊急の課題として官民一体となって取り組んで来た。

最近、この効果は非常にあがって来ており、世界的な景気の落ち込みと共に石油需給は大巾に緩和し、逆オイルショックと云われる時代となった。我が国の場合、昭和54年8月の「長期エネルギー需給暫定見通し」では、昭和65年度の省エネルギー前の総需要、石油換算、8.22億kl、省エネルギーを、1.22億kl（14.8%）見込み省エネルギー後の総需要を、7億klとしていたが、通産省が昭和57年4月に明らかにした、新しい「長期エネルギー需給暫定見通し」では、昭和65年度の総需要を石油換算5.9億klとしており、15.5%の省エネルギーを見込んでおり、昭和54年8月の昭和65年度省エネルギー前総需要見通し、8.22億klに比べて28%、実に2.32億klの省エネルギーとなっている。これに比べて新エネルギー・新燃料油は、昭和54年8月の見通しでは、昭和65年度に3,850万klを期待していたが、日米西独3カ国による石炭液化計画が流れるなど、石油需給緩和を背景に、新エネルギー開発が遅れ気味になっており、昭和57年度の見通しでは、昭和65年度は1,500万klとなっており、当面のエネルギー需給へのインパクトは新エネルギーよりも省エネルギーが非常に重要である事が判る。

産業界を主体とした最近の省エネルギー対策は徹底して来ているが、エネルギー供給の大きな割合を占めている発電の分野でも省エネルギー型発電方式の開発

は重要なテーマであり、ガスタービンとの組合せによるコンバインドサイクル発電、LNG冷熱利用発電、廃棄物処理発電等、その技術が既に実用の域にあるものについては建設あるいは運転が始まっている。

一方燃料電池発電とかMHD発電は、更に省エネルギーが期待出来るが実用化には今少しリードタイムが必要であり開発が急がれている。

2 燃料電池発電

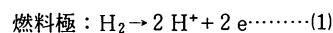
燃料電池は水素などの活性な物質（容易に酸化される物質）を電気化学プロセスを経由して酸化させ、この際放出されるエネルギーを直接電気エネルギーの形で外部回路に供給する電気化学的発電装置である。

1939年英国のGrove公が発電原理を公表して以来、カルノーサイクルの制約を受けない発電装置として多くの人達によって研究が進められ近年宇宙船用等の特殊用途の他に省エネルギー型発電方式としても脚光をあびて来た。

2.1 燃料電池の原理

起電反応について燃料ガスとして水素（ H_2 ）を、酸化剤として酸素（ O_2 ）ガスを用いた図-1、に示すような燃料電池を例にとって説明する。

燃料極では(1)式に示されるように水素が電子を放出して水素イオンとなる。



電子は外部負荷回路を通り酸素極に至る。

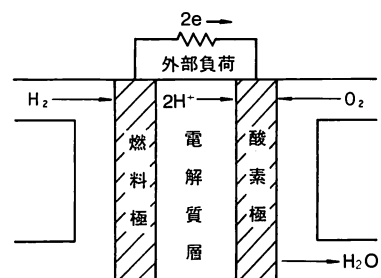


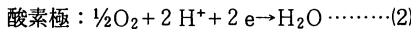
図-1 燃料電池原理図

* 東京芝浦電気(株) 電力開発技術部部长

〒108 東京都港区三田3-13-12 東芝三田ビル

一方水素イオンは電解質中を移動して酸素極に至る。

酸素極では、水素イオン・電子と外部から供給される酸素が反応して(2)式に示される様に水を生成する。



即ち外部負荷回路を流れる電子の形で直接電気エネルギーに変換されることになる。

2.2 燃料電池の種類

燃料電池は数多くの方式が報告されている。

これ等の作動温度、燃料、電解質により分類すると図-2の如くなる。

アルカリ水溶液型燃料電池は宇宙船用等の特殊用途に使用されているが、一般発電用としては化石燃料を改質して水素および一酸化炭素を作り燃料に使用する化石燃料改質型燃料電池に開発の主力がおかれている。この形としては、りん酸水溶液型、熔融炭酸塩型、固体電解質型等があげられ、それぞれ順に第一世代、第二世代、第三世代型と呼ばれており、現在第一世代型の開発が最も進んでおり実用化が近いと期待されている。

第二世代の燃料電池とよばれている熔融炭酸塩型燃料電池は熔融したアルカリ炭酸塩を電解質としその中の炭酸イオンの移動による電池反応によっている。動作温度が高く白金の様な触媒が不用であり本体の発電効率も高く、動作温度が高くボトムサイクルと組めば高いプラント効率期待出来る等メリットは多いがまだ開発の初期段階にある。

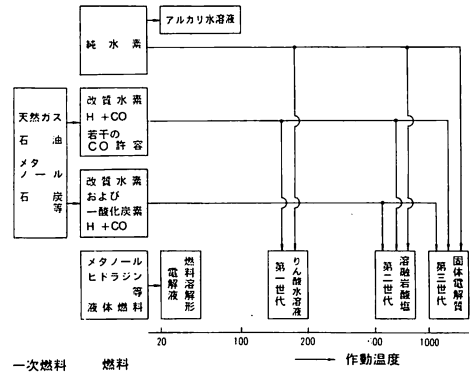


図-2 燃料電池の分類

第三世代の固体電解質型燃料電池は、1,000℃以上という高温で動作するため高い発電効率が期待出来るが解決すべき技術課題が多く実用化は相当先になると予想されている。

2.3 燃料電池発電プラント

燃料電池発電プラントは、燃料電池本体の他に多くの周辺装置から構成されている。現在最も進んでいるとされ、東京電力(株)五井火力に建設されている、米国U.T.C製4.5MWりん酸型燃料電池発電実験プラントの例を図-3に示す。また図-4に30MW燃料電池発電プラントの予想図を示す。燃料は脱硫装置を経由して(天然ガスの場合は脱硫装置不用)燃料改質器に導かれ、

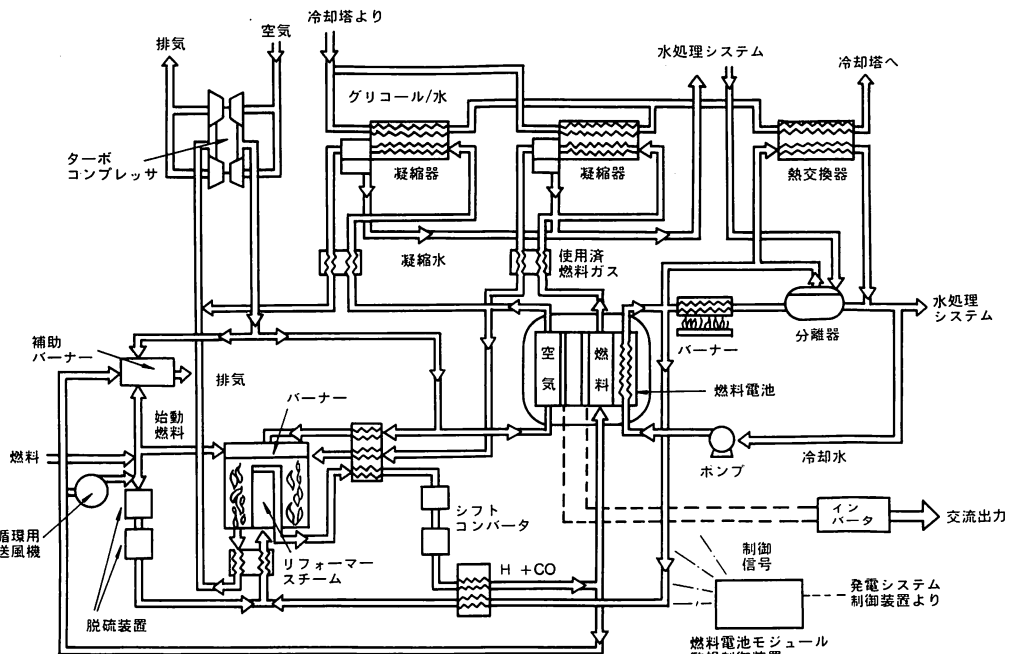


図-3 4500 kW 燃料電池発電プラント概略系統図

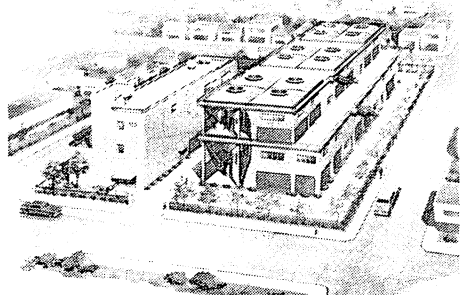


図-4 30 MW 燃料電池発電プラント例

水蒸気が添加され、水素、一酸化炭素および炭酸ガスに改質される。改質器で改質された燃料中には一酸化炭素が多く含まれているので更に高温と低温のシフトコンバータへ導き、水蒸気を添加して一酸化炭素を水素と炭酸ガスに改質し水素成分の多いガスに変え燃料極に供給する。一方改質器の排熱でターボコンプレッサーを駆動して空気を圧縮し燃料電池の空気極および改質器に酸素を供給する。燃料電池本体では起電反応を起し直流出力を得る。直流出力はインバータにより交流出力に変換され電力系統に接続される。燃料電池本体の冷却には水が使用されており本体冷却後の水の一部分は燃料改質系にも供給されている。系内には多くの熱交換器が設けられ系内の熱回収を充分行うよう計画されている。

2.4 燃料電池発電の特長

(1) 高効率である。

化学エネルギーから電気エネルギーに直接変換する方式でありカルノーサイクルの制約がなく静止器のため機械的損失がないので高い効率を期待出来る。省エネルギー型発電方式として脚光を浴びるゆえんである。

具体例

大容量火力発電 送電端プラント効率

……約38%

りん酸型燃料電池 送電端プラント効率

……40~45%

尚熱併給を行えば80%以上のプラント効率を期待出来る。

(2) 騒音が低い。

回転部分が少く騒音が小。

(3) 大気汚染物質の放出が少ない。

燃料電池本体は燃焼を併わないので本質的に少ない。

(4) 省スペース形。

単位出力当たり必要なスペースは火力発電方式の半分

程度以下に収めることができる。

(5) 排熱は少く、利用し易い。

高効率のため排熱は少い。又排熱の温度が比較的高く熱利用がし易い。

(6) 部分負荷でも高効率。

(7) 負荷応答性が良い。

(8) 起動時間が短い。

(9) 各ユニットは標準化されているので保守・管理が容易。

(10) 増設容易・規模の制約がない。

(11) 建設期間が短く、現地工事も少い。

(12) 系統短絡容量対策上有利。

インバータを経由して電力系統に接続されるので交流側系統故障電流の増加が少い。

以上のように多くの特長があるが本質的に効率が高いこと、熱併給を行えばプラント効率は80%程度を期待出来ること、公害が少く都市内又は近郊に分散配置出来る特長を考えると送電ロスも減少し、まさに省エネルギー型新発電方式として好適でありこの実用化が熱望されているゆえんである。

2.5 開発状況

(1) 米国

燃料電池の開発は、米国が最も進んでいるが、その中でも最も進んでいる UTC は現在りん酸型オンサイト用 40kW、および、りん酸型電気事業用 4,500 kW、燃料電池の実証運転を始めようとしており、つづいて、10MW 級燃料電池を 1986 年完成予定で開発しており、1987 年以降準商用化を目ざしている。また WH、および ERC でもりん酸型燃料電池開発を鋭意進めている。一方第二世代の熔融塩型については、UTC、GE 等が、第三世代の固体電解質については、WH 等が開発をすすめている。

(2) 日本

我が国では、ムーンライト計画に於て昭和 56 年度から 61 年度迄 6 年間に 110 億円を投じて燃料電池発電システムの開発が強力に進められている。

りん酸型燃料電池については、高温高压形を東芝、日立、低温低压形を富士、三菱、で分担している。熔融塩型燃料電池については、大工試および東芝、日立、固体電解質型燃料電池は電総研がそれぞれ分担をして開発を進めている。りん酸型燃料電池については、昭和 61 年度に 1,000kW 級プラントの実証運転を行う計画で鋭意開発が進められており、ここ 10 年以内には、省エネルギー型燃料電池発電所の出現が大いに期待さ

れている。

3 コンバインドサイクル発電

熱機関の効率は、熱力学法則によると高温熱源の温度 T_1 と低温熱源の温度 T_2 によって決ってくる。理想的カルノーサイクル機関の効率 η は次の如くである。

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

この式より判る如く効率を高くするには T_2 を低くするか、 T_1 を高くするかの2方法がある。

一般に T_2 は冷却用の海水とか河水の温度で下限がおさえられるので、プラント効率を高くするには T_1 を高くする事が必要である。蒸気タービン発電プラントの蒸気温度は材料の問題により、566°C程度に制限されている。一方ガスタービンの入口ガス温度は現在1,100°C位であることからガスタービンと蒸気タービンを組合せればプラント効率が改善出来る事は容易に判る。ガスタービンとの組合せ以外にもMHDとか燃料電池との組合せ等も考えられるが、現在実用化されているのはガスタービンとの組合せであり、一般にはコンバインドサイクル発電と云うとガスタービンと蒸気タービンの組合せのことを云うのが普通である。

近年石油代替燃料、そしてクリーンエネルギーとして、LNGの導入が活発に行われているが、この燃料はコンバインドサイクルにも好都合であり脱石油に貢献出来る方式と云える。

3.1 方式の比較

コンバインドサイクル発電の歴史は1950年代から小規模ながらガスタービン排熱でボイラの給水加熱等に利用されはじめたが、1970年代に入ると本格的なコンバインドサイクル発電プラントが急速に建設されるようになった。現在迄に欧州では、約700万kW以上、米国では約1,000万kW以上のコンバインドサイクルが建設されており、日本でも100万kW級のプラントの建設が各所で始っている。コンバインドサイクルはガスタービン排ガスがもつ熱量を有効に回収して、蒸気タービンサイクルに導入することによってプラント総合熱効率を向上させるものであるが、大きく分けて排気再燃方式と排熱回収方式（一部助燃方式も含む）の、2つの方式がある。両方式を図-5に示す。

排気再燃方式は、ガスタービン排ガスを蒸気タービン用ボイラに導き、排熱を回収すると同時に、燃料を加えて加熱を行う方式である。通常ガスタービン1台または2台と大容量の蒸気タービン1台を組合せた蒸

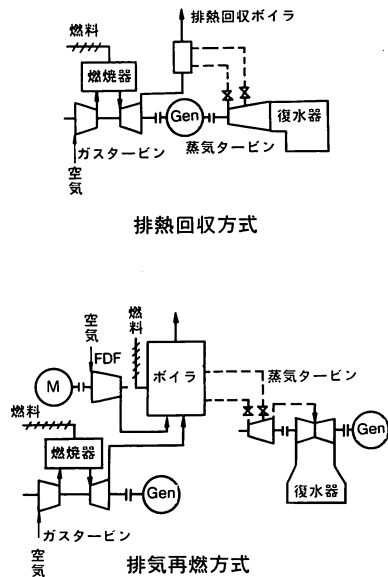


図-5 排熱回収方式と排気再燃方式

気タービン主体のシステムであり、プラント総出力のうち蒸気タービン出力が80%~90%を占める。

一方、排熱回収方式は、ガスタービンの排熱を排熱回収ボイラに導き蒸気を発生させ蒸気タービンを駆動する方式である。排熱回収方式は、ガスタービン出力がプラント総出力の60~70%を占めるガスタービン主体のコンバインドサイクルである。現在米国を中心として数多く建設されている方式であり、国内に於いて建設が進められているプラントも全てこの方式である。この方式は、ガスタービンの性能向上がプラント総合熱効率向上につながるものであり、現在積極的に高効率ガスタービンの開発が進められていることを考え合わせると、将来のコンバインドサイクルの主流になるものと考えられる。

3.2 コンバインドサイクルの特性

図-6、上方にガスタービンサイクルおよび蒸気タービンサイクルそれぞれの熱エネルギー特性を示す。

図-6、下方はこの両者組合せたコンバインドサイクルの熱エネルギー特性を示しており、無効エネルギー面積が小さくプラント総合効率が改善されることが判る。

現在ムーンライト計画では、タービン入口ガス温度1,300°Cの高効率ガスタービンの実証運転が予定されており更に1,500°Cの高性能ガスタービンの開発も計画されており近い将来50~55%のプラント効率をもつ省エネルギー形コンバインドサイクルの出現も充分期待出

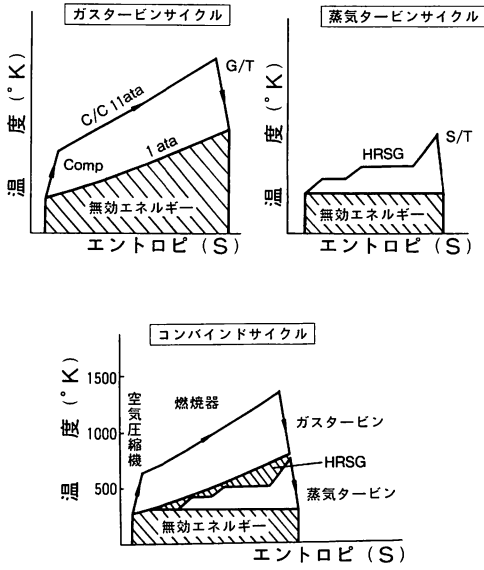


図-6 コンバインドサイクルプラントのサイクル

来る。

3.3 燃 料

コンバインドサイクルは、ガスタービンを使用しているため燃料によって信頼性が影響される。

現在我が国では天然ガスを燃料として考えており、この場合従来火力と同程度の信頼性が充分確保出来る。

しかし石炭利用の見地から将来石炭ガス化コンバインドサイクル発電が望まれるがガス化炉の効率、クリーンアップのための消費エネルギーを考慮するとガスタービンは入口温度 1,400~1,600°C位の高効率ガスタービンでないとプラント効率の点より魅力のないものとなっ

てしまう。今後の開発努力に期待したい所である。

4 MHD 発電

MHD発電では、2,700°C前後の高温ガスを作動流体として使用する。従ってMHD発電システムをトップリングサイクルとして石炭火力発電システムをボトムリングサイクルとしてコンバインドサイクルを組みれば高温熱源の温度 (T_1) が高いことから非常に高効率の省エネルギー型発電が可能となる。

米・ソで開発がすすめられているが日本でもムーンライト計画の下にこの画期的な技術開発が進められている。

4.1 MHD 発電の原理

MHD (Magneto Hydro Dynamics) 発電はファラデーの法則に基いて熱エネルギーを直接電気エネルギーに変換する画期的な方式である。

即ち石炭、重油、天然ガス等の燃料を燃して2,700°C程度の高温の燃焼ガスを毎秒1,000m程度の高速流として流しこれと直角の方向に磁場をかけるとこれ等に直角な方向に起電力を発生するというもので回転部分が全くなく機械的損失がない。また高温にさらされるが、いずれの部分も静止しておりタービン翼に於ける熱応力とか熱衝撃による材料の問題がない点が有利である。MHD発電システムよりの排熱は2,000°C程度のため下流に汽力発電システムを組合せてプラント熱効率を向上させている。

4.2 MHD 発電—汽力発電コンバインドシステム

図-7にMHD発電—汽力発電のコンバインドシステムの例を示す。石炭は、燃焼器で燃やされるが燃焼ガスが電離しやすい様にシード剤と呼ばれる電離電圧

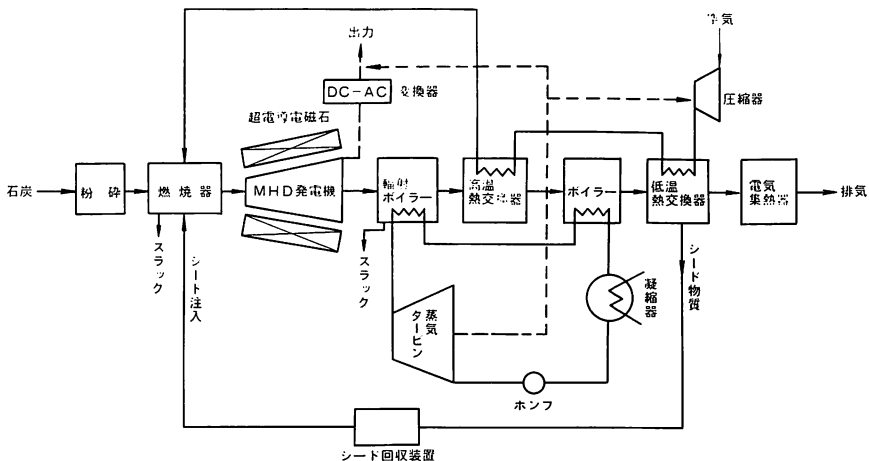


図-7 石炭燃焼オープンサイクルMHD発電・汽力発電システムの例

の低いセシウムやカリウム等のアルカリ金属を加えて MHD 発電機本体の発電チャンネルに高温ガスとして吹き込まれる。ここで発電した電気は、直流出力であるので、DC-AC 変換装置で交流に変換し電力系統に送電される。MHD 発電機を出た排ガスはボトムリングサイクルのボイラに供給され、その発生蒸気は蒸気タービンを廻し通常の発電を行い、この電力も合せて送電される。

4.3 MHD 発電の特長

MHD 発電は、可動部分がない、高温が必要であるという条件より種々の特長が出て来る。MHD 発電の利点としては次の事があげられる。

(1) コンバインサイクルとした時高効率。

電気出力 100kW 級の MHD 発電 - 汽力発電コンバインドサイクルは、50%近くが期待出来、その発電原価は、石炭火力とほぼ同じ位にすることが出来ると云う試算結果も出ている。

(2) 環境問題にも対応出来る。

プラント効率が高い事は、それだけ熱公害が少ないということとなる。SO_xに対しては、燃焼ガスに混入されているカリウム化合物等の、シード剤が燃焼ガスの冷却過程で硫黄分と結合して、回収が容易な硫酸カリウムとなり、環境汚染を防止する。NO_xについては、高温燃焼のためその発生量は多くなるが、2段燃焼として、1次燃焼では、燃料比を多くしたり、2,000°C以上での燃焼ガスの滞留時間を長くとり、熱平衡値迄、NO_xの分解を進める等の方法で NO_xの放出を、少くして環境問題に充分対応することが出来る。

(3) 燃料の多様性。

重油や天然ガスは勿論のこと、石炭の直焚きも可能であり、あらゆる燃料に対応出来る。

(4) 可動部分がない。

可動部分のないことは、運転・保守上非常に有利となる。但し、発電チャンネルは電極が消耗するため、例えば、毎年交換が必要等の保守の手間がかかる点が、欠点だがこれについては、保守のし易い構造を考え出すことが必要となろう。

4.4 開発状況

(1) 日本

我が国に於ける開発は、米ソに遅れていることは事実であるが着々と進んでおり米国に追いつくことは夢ではない。ムーンライト計画で進められている電総研のマーク7 MHD 実験機は発電時間 227時間、平均出力 99kW を記録し、200時間以上の耐久性が証明され

た。またこれと並行して要素研究、システム研究も行われ更には日米協同開発の可能性も検討が進められている。

(2) 海外

米国では、システム上流の試験用の CDIF、システム、下流の試験用の CFFF 装置がほぼ完成して動き始めている。AVCO では同社のマーク7 発電チャンネルで、1,000時間の試験に成功し、電極寿命は 5 ~ 8,000時間耐えるとしている。

ソ連に於ては、既に U-25にて 20MW の発電に成功しており現在 1986 年完成目標で U-500計画(プラント出力 500MW) が強力に進められている。

その他、中国、印度、オーストラリア、オランダ、ポーランド等で開発が進められている。中国でも研究を開始しており 1981 年 6月に 100時間連続運転に成功しており MHD 出力 13kWe と小さいがその成果は評価すべきだろう。

MHD 発電の実用化は、現計画ではソ連が最も早いと見られているが、日本、米国での実用時期の予測は非常にむずかしい。

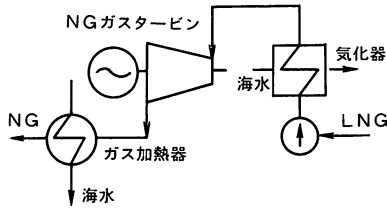
5 LNG 冷熱利用発電

政府は本年 4月に昭和 65 年度のわが国の「石油代替エネルギーの供給目標」を閣議決定した。LNG は石炭に次ぎ、原子力よりも多く、今後共クリーンでかつ石油代替エネルギーとして重要な柱となり多量に使用される。昭和 55 年度の LNG 火力発電設備は 1,971kW、全発電設備に占める割合は 15.2%、昭和 65 年度にはこれが 4,300kW 20.6%になると予想されている。

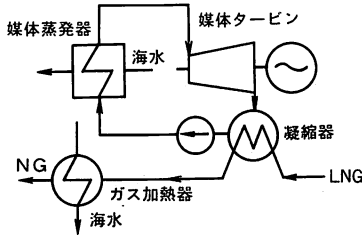
LNG は海路、異国より -162°C という極低温に冷して運びこみこれを海水で暖めて気化して LNG 火力発電に使用している。最近の様に LNG の使用量が増えると、この LNG の冷熱をみすみす海にすてることなく、何とか利用したいという気運が強くなり、LNG 冷熱発電システムが開発された。この発電量はほぼ LNG 火力発電量の約 1%位となり結果的には総合効率を約 1%改善した事となり、省エネルギー技術としても意義深いものである。

5.1 LNG 冷熱利用発電の原理

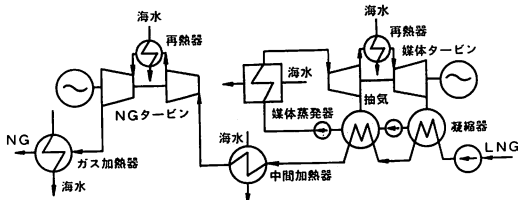
LNG は気化する際 200kcal/kg の熱を周囲からうばう。この冷熱を発電に利用するには色々な方法が考えられる。もっとも実用化の容易な方法としては、これをランキンサイクルの低熱源として使用し低温源が -162°C と非常に低い為、高温源としては発電所周囲に



(a) 直接膨張式



(b) 2次動作流体式



(c) 組合せ式

図-8 発電サイクル構成

多量にある海水を使用して、この温度の間で適当な動作流体でランキンサイクルを働かせる事により発電が可能となる。

5.2 発電サイクルの構成

基本的には直接膨張式、2次動作流体式およびこれ等を組合せた方式の3種類がある。

(1) 直接膨張式 (オープンサイクル)

LNGを圧送し海水で加熱ガス化してこれが低圧まで膨張する時のエネルギーで膨張タービンを廻して発電する方法である。再熱や再生サイクルを組み効率を向上する事が出来るが、経済性とのかね合いで決めるべきである。

(2) 2次動作流体式 (クローズドサイクル)

フロン、プロパン等沸点の低い動作流体をグロズドループの中を流し、海水を高熱熱源として動作流体を加熱蒸発させこれをタービンに導き膨張させタービンを廻し排気を LNG で冷して凝縮させる方式である。LNGは排気を冷す過程で気化される。

動作流体の選定によって出力が大巾に異ってくるので動作流体の選定は設計条件と共に充分検討する事が必要である。この選定に当っては出力の点のみでなく

動作流体の入手の難易、価格、毒性、可燃性等を考慮して決める事が必要となってくる。

(3) 組合せ方式

(1)と(2)の方式を組合せたものである。

図-8(a)(b)は各々単独のものを又(c)には抽気再熱ランキンサイクルと再熱直膨タービンの組合せが示されている。

5.3 LNG 冷熱利用発電所の建設状況

大阪ガスでは既に1,450kWの運転を行い、続いて6,000kW級が建設中である。東邦ガスでも1,000kW級の運転を始めている。また本年秋には最大記録の8,500kWの発電が北九州エル・エヌ・ジーで行われようとしている。その後東京、中部、東北の各電力会社とか東京ガス等で、3,000~16,000kWのものが続々計画されており省エネルギーに一役買うものと期待されている。

6 廃棄物処理発電

一般廃棄物は、家庭ゴミおよび下水汚泥に分類でき、家庭ゴミについてはすでに電力として一部エネルギー回収されているが、現状ではタービン背圧が大気圧程度であり、熱効率の高い発電方法ではないが、将来は抽気復水タービンの利用等による熱併給発電による廃棄物の保有熱量の有効利用が望ましい。

一方、下水汚泥(脱水ケーキ)は発熱量が100~400kcal/kg程度であり、この状態での再利用は困難である。しかし、下水汚泥を嫌気性消化する際に消化ガスが得られ、これをガスエンジン燃料として発電に利用することが可能である。我が国では実証試験が始められたばかりであるが欧米ではすでに発電に利用されている。

7 む す び

省エネルギー型新発電方式について既に実用に入っているものから、未だ開発過程にあるもの等の概要を紹介した。現在のところ石油需給は緩和した様であるが長期的に見ればエネルギーの節約は絶対的なものであり、たゆまぬ省エネルギー開発をこれからも続けていく事が必要であろう。