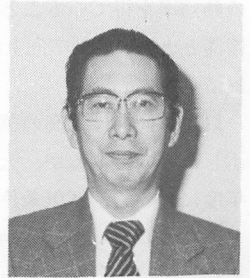


火力発電の現状と将来

Progress of Thermal Power Plant Technics



竹 内 元*
Hajime Takenouchi

1. まえがき

日本の電気事業は火力発電技術の発達にささえられて、急速な需要の増大に応じ、また低廉な電力供給を進めてくることができた。しかしながら、石油事情の変化によって、石油火力中心の状況からの脱却が必要となってきた。原子力開発の必要性の高いことはもちろんであるが、その開発のためのリードタイムを考えると、化石燃料による火力発電設備の大半を占める状態はまだ当分続かざるを得ないものと考えられる。このような状況のなかで、火力発電技術は従来の蒸気利用のみのサイクルでは大きな壁に突き当たってきたと考えざるを得なくなった。この状況を概観して将来の火力発電の進展の方向について述べる。

2. 火力発電技術発達状況

電力需要の伸びとともに系統規模が大きくなるにつれて発電設備の単機容量の大容量化の必要性は続いている。図-1は火力発電設備の単機容量の変遷を示したものである。1950年代からは一機一缶のユニット方式となったが、それ以前は一機多缶方式であったので、蒸気タービンの単機容量を示している。この図から1960年頃から日本が米国に急速に追いついた状況がうかがえる。

図-2はタービン入に圧力の、図-3はタービン入に蒸気温度の最高値を示したものである。これらの図に示されているEddystone 1号機、Philo 2号機は起臨界圧の先駆的役割をはたしたものであるが、これらのユニットの蒸気条件はその後採用されておらず、蒸気圧力 246 kg/cm²、蒸気温度 566℃が定着しその後約20年間この状態が続いている、とくに蒸気温度に関しては米国においても、それまで7℃/年の割合で蒸気温

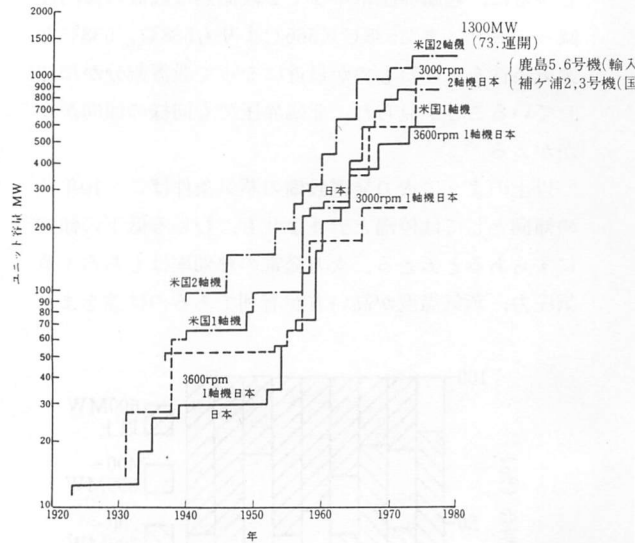


図-1 事業用化石燃料汽力発電ユニットのユニット容量の変遷

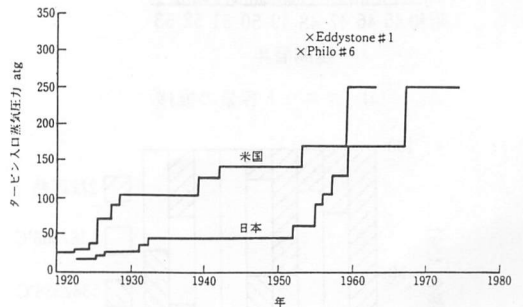


図-2 タービン入口蒸気圧力の変遷

度の向上が進んでいたのが1950年以来 566℃に止まっていることが特徴的である。図-4は米国および日本の設計正味熱効率の記録値と年間ユニット最高運転効率の変遷を示したものである。第2図、第3図の蒸気条件の向上をまさに反映しており、起臨界圧力火で40%

* (財)電力中央研究所 理事
エネルギー環境技術研究所長

の熱効率を得ていることが示めされ、蒸気条件向上の停滞とともに、効率向上が停滞していることが示めされている。

以上の傾向は最高の蒸気条件または熱効率について示したものであるが、火力発電設備が運転開始された年度において、蒸気条件またはユニット容量の分布がどのようになっているかを見ると図-5(a)~(d)のごとくなっている。(a)で見ると大容量化は着実に進んでいることがうかがえる。また(b)でわかるように起臨界圧が次第に主流となってきていることも明らかである。しかるに、起臨界圧ボイラで2段面熱は設置の傾向は減っており、また538℃/566℃よりも538℃/538℃と蒸気条件を下げたものが最近になって設置割合が増加していることが見られ、亜臨界圧でも同様の傾向がうかがえる。

以上のように火力発電設備の蒸気条件はこゝ十年位の傾向としては停滞と云うよりも、むしろ低下の傾向にすらあると云える。火力発電の熱効率はもちろん蒸気圧力、蒸気温度が高い方が有利であるのは論をまた

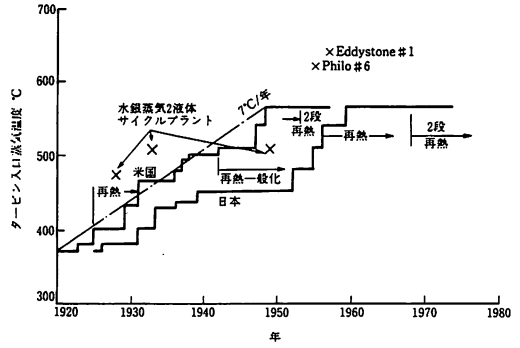


図-3 タービン入口温度の変遷

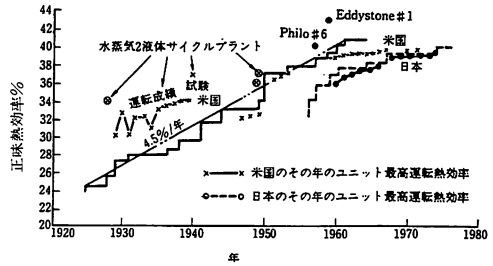
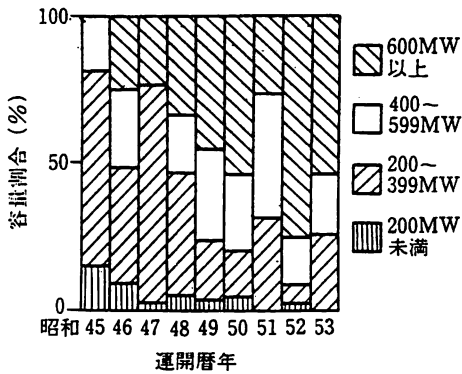
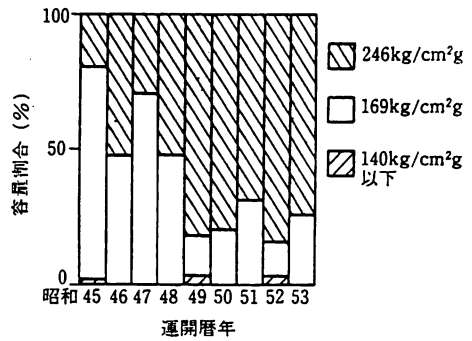


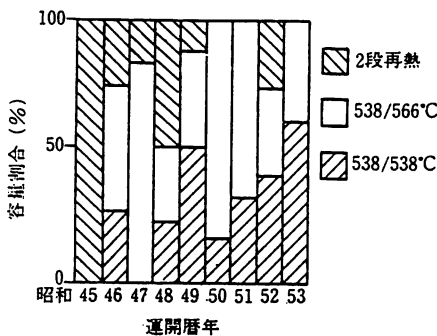
図-4 設計正味熱効率および年間ユニット最高運転効率の変遷



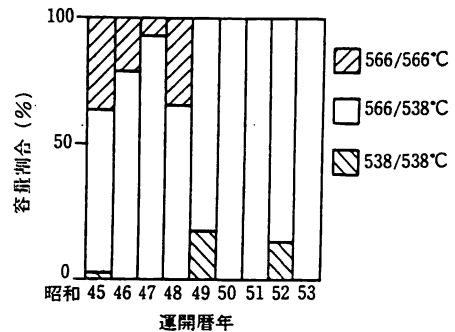
(a) ユニット容量の推移



(b) 蒸気圧力の推移



(c) 超臨界圧ボイラの蒸気温度の推移



(d) 亜臨界圧ボイラの蒸気温度の推移

図-5 日本における火力発電設備設置状況の推移

ないのにこの傾向はなにによって生じたものであろうか。

3. 蒸気温度向上を阻害する要因

前項で換起した疑問点，すなわち定格蒸気温度が向上どころかむしろ低下の傾向になった原因は，一つには高温の過熱器管には，高価なSUS系の耐熱材料を使用せねばならないことから，発電原価の点から，定格蒸気温度を下げたと考えられる。さらに大きな要因としてボイラ過熱器管の障害が566℃の方に多く発生したことが挙げることができよう。

図-6はボイラ過熱器管の管外表面の減肉障害の発生台数を，定格蒸気温度が538℃の場合と566℃の場合と比較したものである。図-7はボイラ再熱器管について同様の比較をしたものである。減肉障害は主としてバナジウム的高温腐食によって生ずるものであり，蒸気条件の高いほど管外面のメタル温度が高くなりや

すく，そのため蒸気温度の高いほど減肉障害が生じやすいことがこれらの図は示していると云えよう。このことを過熱器管の減肉障害の発生状況を過熱器管外面温度で示した図-8で見るとさらに明確になっている。すなわち外面温度が590℃以上で減肉障害が出始め，600℃以上で顕著になっている。管外面温度が600℃を超えないようにしてタービン入に温度を566℃にすることは不可能ではないが，過熱器，再熱器の伝熱面負荷および蒸気流量の不均一性のため，容易でないであろう。

過熱器，再熱器の内面で生ずる障害としてはスケール剥離による管閉塞の問題がある。図-9は管内面温度区分でスケール剥離障害の発生状況を示したもので，内面温度590℃以上で多発していることを示している。図-10は566℃における管の材質別に発生状況を示したもので，SUS系の管に多いことを示している。

これらの障害対策として，管の製造方法に改良が加

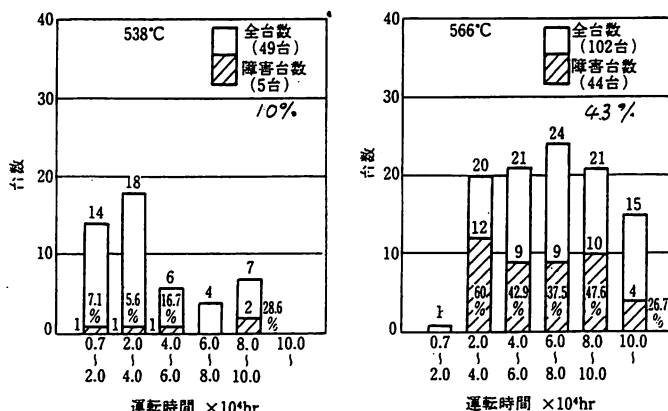


図-6 蒸気温度条件の相違による運転時間別に見た過熱器管の減肉障害 * 1

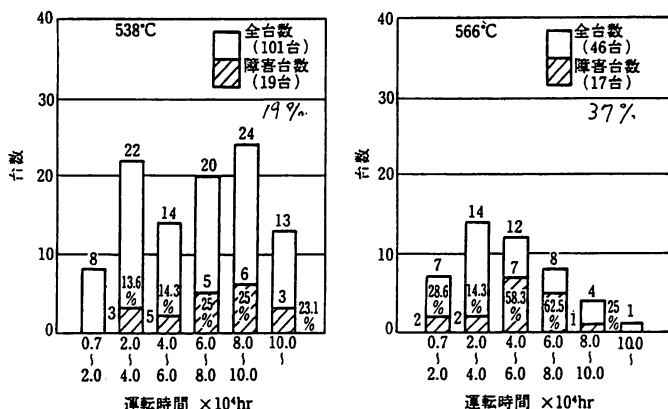


図-7 蒸気温度条件の相違による運転時間別に見た再熱器管の減肉障害

* 1 減肉障害については減肉速度が0.4mm/10⁴ hrを越えたものとして定義

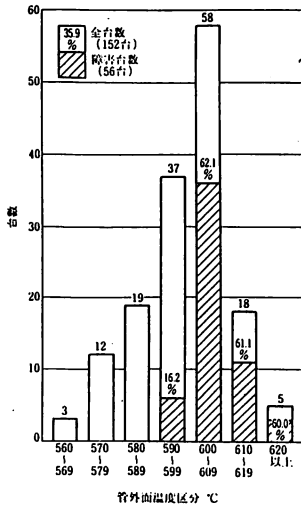


図-8 過熱器管における管外面温度と減肉障害との関係

*2: 減肉障害については減肉速度が $0.4\text{mm}/10^4\text{hr}$ を越えたものとして定義

えられ、その後の発生抑制に効果をもたらしているの
で最近の状態は改善されてきているのであるが、蒸気
温度向上の点に関して耐食性から考えると今後の蒸気
温度向上については見とおしは暗らいと云わざるを得
ない。

4. 火力発電効率向上の方策

火力発電の熱効率 40% 程度になっており、これを
さらに高めることは、石油の供給制約下においてはま
ずまず重要な研究課題である。ところで熱エネルギー
の 40% が電力に変換された残りの損失約 60% はどこ
に行くのかと云えば、約 45% は復小器損失として冷却
水に、 10% 弱が排ガス損失として煙突から排出されて
いる。熱エネルギーの面から見て、この復小器から冷
却水に放出される部分が非常に多くなっているが、こ
れは冷却水の温度を 7°C 程度上げる熱量であり、エネ
ルギーの量としては多いが、エネルギーの価値として
は極めて低いものである。エネルギーを考えると、
熱量と動力とを同じものとして考えるのは説明をしや
すいところである。1kWhをそのまゝ熱の発生源とす
れば860kcalにしかならないが、ヒートポンプの動力
として使えば2000kcalの暖房源として使えることはそ
の一例であろう。

熱の面から見れば、高温にある熱量は動力=電力に
変換できる可能性を多く持っているのでエネルギーと
しての価値が高いことになる。このようなエネルギー

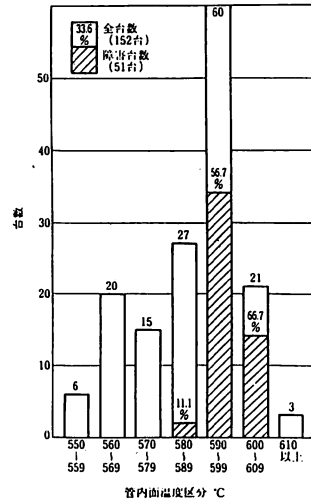


図-9 過熱器管における管内面温度とスケール剥離障害との関係

*1: スケール剥離障害については管閉塞率(推積スケール厚さと管内径の比)が 50% を越えたものとして定義

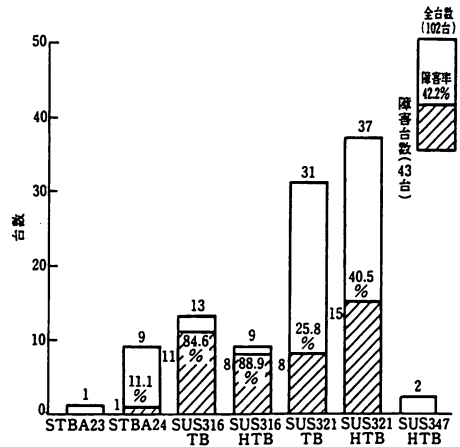


図-10 566°Cユニットにおける過熱器管の水蒸気酸化障害

の価値すなわちエクセルギーの観点から損失の分析
を行うと、燃焼損失すなわち燃焼と云う不可逆過程を行
うことによる損失が約 26% 、燃焼ガスから蒸気への伝
熱(1600°C から 566°C への伝熱)と云う不可逆過程の
損失が約 17% でこの二者で約 43% と大部分の損失の原
因を作っていることになる。

蒸気条件の向上が効率向上になるのはまさにこの部
分の損失を減らすことになるのであるか前項で述べた
ごとくこの面からの改善は画期的な耐熱金属材料の開
発なくしては望み難い。

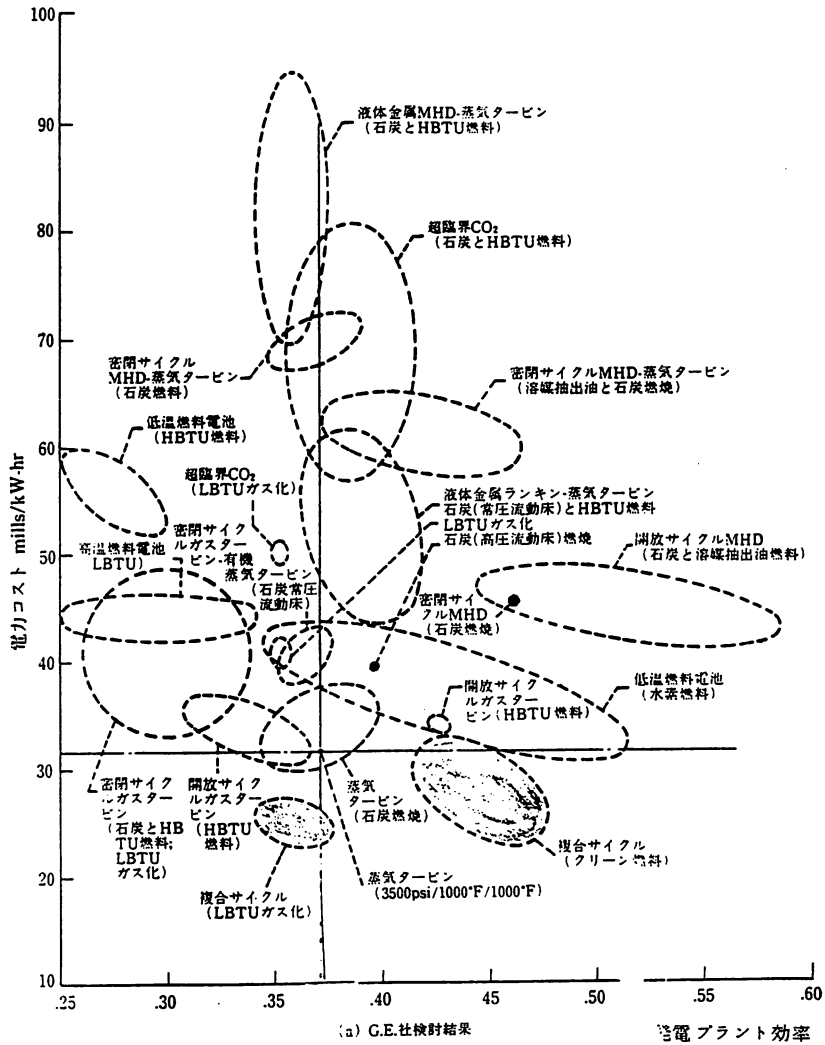


図-11 将来の発電システムの比較検討結果 (NASA)

化石燃料を対象とした新しい発電方式が数多く考えられているが、これらについて発電コストと発電効率の予測した調査の例として図-11を示す。

すなわち効率向上が期待できるものとしては、MHD発電、燃料電池、複合サイクルの三種が挙げられる。この図では石炭からの発電効率については、ガス化または液化の収率を考慮に入れて求めている。

複合サイクルにおいては、図-12に一例を示すようにに燃焼ガスをガスタービンに噴射し、そのときの入口温度を1000℃～1500℃とし、ガスタービンの排気で蒸気発生を行い、蒸気タービンを駆動する構式である。このような高温ガスタービンを蒸気タービンの上におくことによって効率を向上させる方式である。ガスタ

ービンではボイラ過熱器と異り、耐熱合金を使用する部分が限定されるので、極めて高級の耐熱合金が採用できることと、冷却器とすることで、高温ガスを動力発生時の作動流体とすることが可能となる。

ガスタービン入口温度は、LNGなどのクリーン燃料とすれば、1100℃の入口ガス温度のものが実用の段階となり、これで42%の熱効率が期待できる。さらに日本においてはムーンライト計画として1982年にパイロット機として1300℃級の試運転を、1984年にプロト機として1500℃級の設計試作を計画している。

ムーンライト計画では高効率ガスタービンの開発目標を表1のように設定しているが、この目標は極めて意欲的なものであり、この達成には宮尾の協力と努力

が必要であり、これの達成と実用化ができれば、クリーン燃料に対しての高効率化は大きく飛躍することができよう。

とくにムーンライト計画における高効率ガスタービン開発計画では、図-10に示したレヒートガスタービンの開発を指向している。レヒート式は図-13に示すように、効率が高くてできることとともに、部分負荷効率が低いことが期待できる。

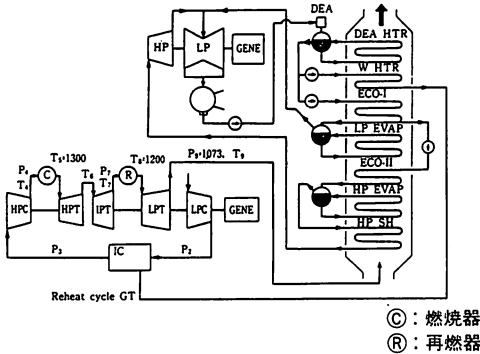


図-12 レヒートガスタービン複合サイクル系統線図

電力需要の日負荷変化は、図-14に示すように、深夜は日最大の50%を割る状況にあり、今後原子力比率が高まると、原子力は基底負荷をもつので、火力発電設備は日負荷変動に応ずる運用が必要になる。この点から、レヒートガスタービンを利用した複合発電は望ましい特性をもっていると云えよう。

燃料電池、MHDなどの新発電方式も有資な方式である。燃料電池は燃焼と云う不可逆過程を使用せずに、

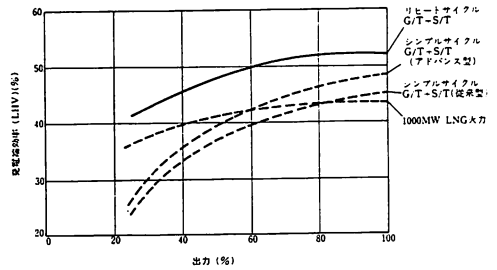
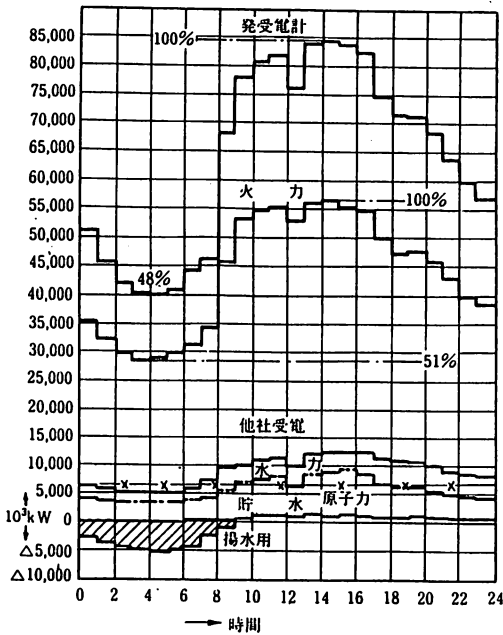


図-13 各種発電プラント部分負荷効率比較

表1 高効率ガスタービン研究 最終目標

項	目	開 発 目 標
複 合 発 電 サ イ ク ル	総 合 効 率	55%以上
	タービン入口温度	1,500℃
	ガスタービン出力	100 MWクラス
超 高 温 耐 熱 合 金	クリープ破断強さ	1,000℃, 900℃及び800℃の50,000時間クリープ破断強さがそれぞれ3.5, 11及び26kg/mm ² 以上
	高温定歪疲れ強さ	0.5%全歪幅 2,500回以上
	高温耐硫化腐食性	高温溶融塩 (NaCl 25% + Na ₂ SO ₄ 75%, 900℃) 浸漬試験において、0.1mm腐食量に達する時間が200時間以上
超 高 温 耐 熱 セ ラ ミ ッ ク ス	曲 げ 強 度	3点曲げにおいて 常 温 100kg/mm ² 以上 1,500℃ 60kg/mm ² 以上
	高 温 腐 食 性	1,500℃, 1,000時間の空気酸化後の、常温曲げ強度 (3点曲げ) が50kg/mm ² 以上
	ク リ ー プ 破 断 強 さ	1,500℃, 1,000時間のクリープ破断強さが25kg/mm ² 以上



昭和53年8月23日 水曜日

項目	最大電力	平均電力	電力量	負荷率
貯水	1,325	790	18,970	597
水力	9,380	5,863	140,705	625
火力	55,307	43,544	1,043,047	773
原子力	7,117	7,087	170,094	996
他社受電	12,286	9,084	218,011	739
	—	—	—	—
揚水用	△ 5,116	△ 1,343	△ 32,238	263
発電電計	84,574	64,234	1,541,619	760

図-14 日負荷曲線の例

電気化学的過程で発電するので高温でなくとも高効率が可能である。またMHD発電は高温ガスを利用するので、蒸気タービンとの複合サイクルによって、高効率が可能である。この両者とも技術開発の発展段階にあり、ガスタービンに比して技術の成熟度が低いので、今後の技術開発にまつところが多い。

5. 石炭火力発電技術

石油資源の供給制約下におけるエネルギー源として考えられるのは、LNG、原子力、石炭（主として海外炭）が主体であり、他のエネルギー源は開発の必要性はあるものの、日本におけるエネルギー供給として多くを期待することはできなからう。火力発電について考えるときに、LNGに関しては、前述のガスタービン・蒸気タービン複合サイクルによって効率化をはかることが望ましい。これに対して、石炭の利用体系に関して考察してみよう。

石炭の国内資源は限定されたものであるため、これからの石炭利用技術開発は、海外炭を念頭におくべきである。図-13は石炭利用した発電の流れのなかで課題を記したものである。海外炭を利用する場合に、まず問題となるのは輸送である。もちろん石炭船を接岸させて陸揚げする方式はすでに確立された技術であるが、日本のように火力発電所の立地難から、この方式

にこだわっているのは多くの石炭火力発電所開発は困難となるであろう。このため石油のようにシーバース・パイプ揚げの技術開発が望まれるわけである。この観点から各種の石炭新利用技術を使った場合、産炭地から発電までの形態を、重油火力および微粉炭火力を基準に整理して見る。表2は微粉炭火力と重油火力の産炭地から発電までの石炭の処理がどのようにされるかを示したものである。表3は各種の石炭新利用技術が輸送・処理の段階で、表2の重油火力または微粉炭火力のいずれに近い形を利用するかを示したものである。

石炭液化、メタノールは産地付近で処理後は重油火力と同様の輸送過程でよい。これに対してCOM、SOM（SRC-oil Mixture）石炭水スラリーなどは、陸揚げについては重油火力に準じた方式が採用できるが、その他の点ではそれぞれに応じた適切な処理技術が必要となる。

これらの各種の方式の内どれが有望かと云うことは、収率、コスト、産炭地の条件、発電所の立地条件、発電効率などを総合的に評価せねばならないし、またこれらの内の多くはまだ技術開発の途上にあるので、今後の研究にまたねばならないところである。

とくに石炭ガス化複合発電は、効率面からは最も高くなることが期待されるものであるが、LNGなどのクリーン燃料の場合と異なり耐熱金属材料の耐食性に格

段の配慮を必要とするので、これからの技術開発に格段の努力を必要とするところである。

排煙処理技術については最近の実証研究によって解

決のメドがついたと云える。しかしながら灰処理については立地上の制約条件となることが予想され、今後の研究課題となるであろう。

表2 石炭または重油の処理の流れ

		(ベースA) 微粉炭火力	(ベースB) 重油火力
海	産地	掘採、掘採一次処理、掘採貯蔵	掘採、掘採一次処理、掘採貯蔵
	産地または産地付近	掘採、掘採一次処理、掘採貯蔵	掘採、掘採一次処理、掘採貯蔵
外	内陸	陸上輸送	パイプライン輸送
	積地	野積、野積出、野積出	タンク貯蔵、シーバース式パイプ積み
	海洋	海上輸送	外航タンカー(流体輸送)

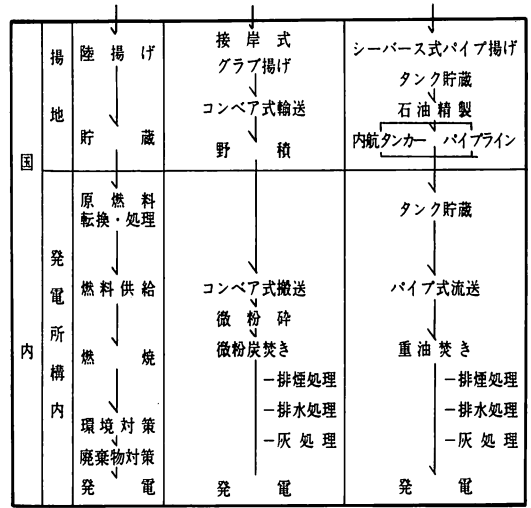


表3 各種石炭新利用技術における処理法の比較

		液化油	メタノール	S R C I	S O M	C O M	粗粒COM	石炭スラリ	ガス複合発電
海外	産地	A	A	A	A	A	A	A	A
	産地附近処理	P	P	P	P	A	A	P	A
	内陸輸送	B	B	A	A	A	A	B	A
	積地	B	B	A	P	P	A	P	A
	海洋輸送	B	B	A	S	S	A	S	A
国内	陸揚げ	B	B	A	B	B	P	B'	A
	貯蔵	B	B	A	B'	B'	P	P	A
	発電所	B	B	A	B	A'	A	A	S
	灰処理	不要	不要	不要	不要	要	要	要	要

A：微粉炭火力と同様
 B：重油火力と同様
 P：処理プロセス
 S：特殊方式となる。

6. 終りに

以上火力発電の効率向上の方策と、石炭利用技術について概観したが、これらの技術は極めて多岐に亘り、

解決しなければならない課題は数多くまた困難なものが多い。しかしエネルギーの安定供給は我国の至上命題となっているので、われわれは強力を挙げてこれらの課題解決に努力せねばならないと考えている。