

火力発電の技術動向

Technical Trends of Fossil Fuel Power Plant

原子力発電が石油代替電源として積極的に開発され、ベース負荷電源として今後ますます比重を増すことが予想されている。一方、我が国の電力需要も昭和59年夏には1億kWの万台を超え、夏季ピーク負荷の先鋭化に象徴される負荷パターンの変化などに対応し、火力発電としては、コストとセキュリティのバランスのとれたベストミックスの電源構成となるよう、環境面を配慮した石炭利用技術、LNGの高効率利用技術などの燃料の多様化、あるいは既設石油火力のピーク負荷対応のための高機能化改造など、従来と異なった質的向上が新しく要請されている。本稿は、これらに関する日立製作所の最新の技術動向について紹介する。

久保田道雄* Michio Kubota

1 緒言

昭和48年秋の第一次石油危機から10年を経過した去る昭和58年3月、OPECはその結成以来初めて約1.589h/l(1バレル)当たり5ドル基準原油価格の引下げを行なった。

これは、第一次、第二次の石油危機による世界的な景気停滞、徹底した省エネルギーの推進と、原子力、石炭、天然ガスなどの石油代替エネルギーの開発導入により、世界の石油需要が大きく減少した結果であり、国際的なエネルギー情勢の画期的な変化である。

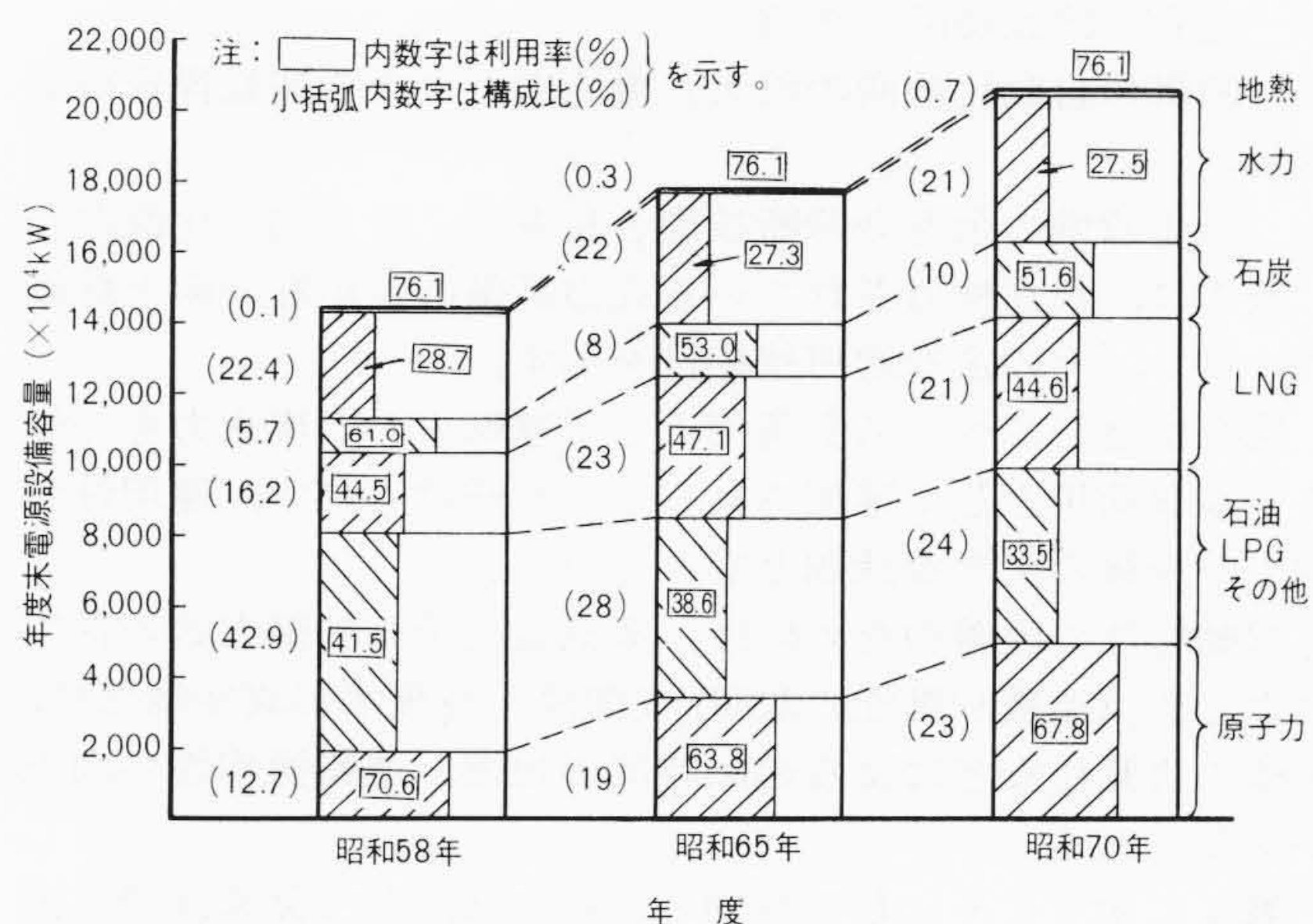
例えば、発電分野で昭和48年当時世界の原子力発電設備は約5,000万kWであったが、昭和59年6月現在では2億900万kWと1億5,900万kWの増加となった。これは原油換算約70万kl/dに相当し、現在のOPECの生産上限278万kl/dの実に25%が代替されたことになる。更に、現在建設中のものが今後次々と稼働に入る昭和65年には約4億kWと6年で倍増し、いっそうの脱石油化が進む計画である。

このようなエネルギー情勢の変化に対応し、昭和58年我が国の総合エネルギー調査会の「長期エネルギー需給見通しとエネルギー政策の総点検について」では、従来のセキュリティを第一とした脱石油の大方針に対し、今後はセキュリティとコストのバランスのとれた最適エネルギー需給構成(ベストミックス)を目指すことになった。図1にこのような状況のもとで策定された昭和59年度の電気事業審議会需給部会の昭和58年11月の報告をもとに、それぞれ昭和58年、65年、70年時点での年度末電源構成(キロワットベース)及び各電源ごとの構成比率、利用率を数値で示した。同図中ハッチングを施した面積は供給電力量(キロワット時ベース)の大きさを示す。原子力がベース負荷として高い利用率で運用される一方、火力電源ではLNG(液化天然ガス)がミドル負荷、石炭がベース負荷よりミドル負荷、石油がピーク負荷へとベストミックスの方向で計画されている。

また、新設火力電源としては、今後10年間で石炭火力1,300万kW、LNG火力2,000万kWが計画されている。

今後の火力発電の課題とこれに対応する新技術の動向の主なものは、

- (1) 火力電源のベストミックス化への対応
- (2) 燃料の多様化の推進と環境対策
- (3) 石炭ガス化複合発電、燃料電池などの新発電技術



注：略語説明 LNG(液化天然ガス)
LPG(液化石油ガス)

図1 年度別電源設備と利用率 昭和70年度までに、原子力及び火力では石炭火力、LNG火力の設備容量は増加するが、石油火力は減少する。一方利用率については、火力は全般的に減少傾向となる。

などが挙げられる。

本火力発電新技術の特集号で、以下これら技術の詳細を紹介するが、本論文ではその背景となる社会的要請を主にし、日立製作所の技術的対応の概況について紹介する。

2 火力電源のベストミックス化への対応

昭和59年夏季の最大電力(9社合計)は、1億674万kWと前年比7.4%の伸びとなったが、同日の最低電力は最大電力の46%となっている。このように、年平均電力と夏季の最大電力の差はますます広がるとともに、冷房需要の増大を反映して昼夜間の電力需要の差も広がっている。

したがって、例えば夏季100日間、約10h/dの冷房需要による年間約1,000時間程度のピーク負荷にいかに対応していくかが重要な課題となる。

既設の石油火力については、建設時の資本費も安くまた償却も進んでいるものが多い(石油火力は出力で66%、基数で81%が運開後10年以上を経過している)。このため、図2に示す

* 日立製作所電力事業部

ように年間の固定費負担が低いため、燃料費が高くても運転時間の短いピーク供給力としては、年間運転経費が最も低くなり経済的な選択となる。

発電電力量に占める石油火力の比率は、昭和48年度の71%をピークとして58年度は36%となり、更に65年度20%、70年度には14%と想定されている。

これに対応して石油火力(LPG含む)の設備利用率は、58年度41.5%、65年度38.6%、70年度33.5%と想定され、石油火力のミドル負荷及びピーク負荷対応が明確化されている(図1)。

したがって、従来ベース負荷用の大形電源として計画建設されてきた既設石油火力の負荷調整能力の向上対策が必要となる。このために日立製作所では、次に述べるような技術開発に積極的に取り組んでいる。

- (1) 最低負荷引き下げ及び運用負荷帯の拡大
- (2) 部分負荷時の効率向上
- (3) 毎週末又は毎日起動・停止(WSS又はDSS)が容易で、かつ機器の信頼性の維持のための予防保全技術
- (4) 起動・停止時間の短縮
- (5) 制御の自動化範囲の拡大と機能向上による運転操作の簡易化
- (6) 経年設備の余寿命診断技術と長寿命、耐力向上化改造

表1に、現在検討されている火力設備の運用性の向上計画の一例と、その主な適用技術例を示す。

現在主としてベース負荷用として運転中の石炭火力も今後ミドル負荷用として運用されることも避けられず、運用性の向上が今後の大きな課題となっている。

起動特性の改善のためには、蒸気温度予測制御方式の採用による蒸気温度制御性の改善、夜間停止時復水器真空度保持、主機の自動化などによる起動時間の短縮、運転操作性の向上が必要である。

表1に示すように起動時間の短縮では、現在、従来既設石油火力で点火から全負荷まで300分を180分程度に下げることが可能となり、現在計画中新設火力では100~120分を目標としている。最低負荷では現在30~35%タービン負荷を10~15

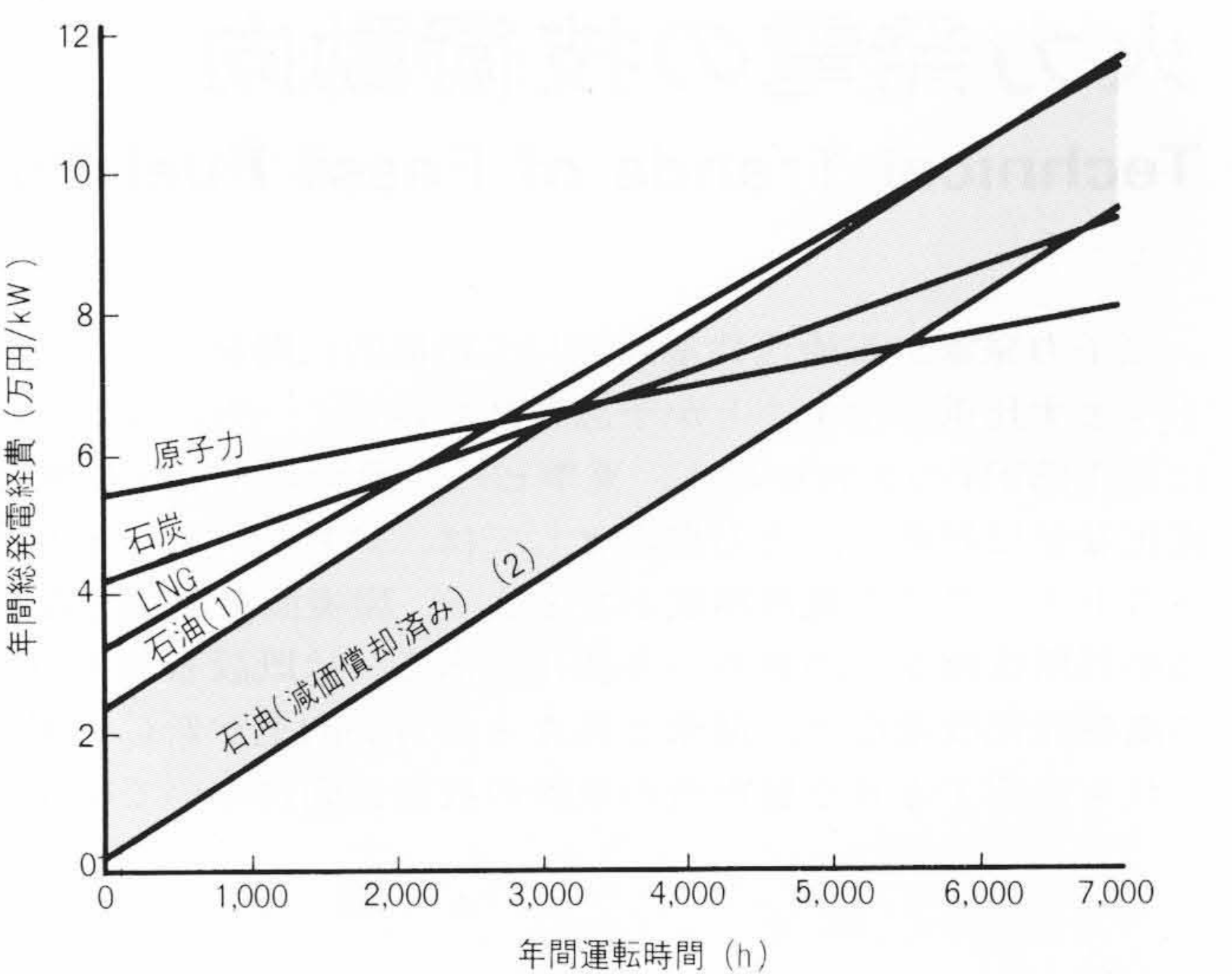


図2 年間運転時間と総発電経費 年間総発電経費は固定費と燃料費であり、運転時間零の縦軸との交点は年間固定費(万円/kW・年)を示し、各直線のこう配は燃料費(万円/kWh)となっている。石油(1)は新設プラントを、石油(2)は償却済プラントを示す。したがって、償却途中のプラントはこの中間に入る。償却が進んでいる石油火力をキロワット当たり1~2万円かけて改良工事を行なっても、年間1,000~2,000時間のピーク負荷対応には、最も経済的となる。

%に下げることを目標としている。

日立製作所では、火力プラントの蒸気条件の上昇による高効率化実現のため、316atg、593・566・566℃、及び352atg、649・566・566℃の超々臨界圧プラントの新材料、及び構造面での研究開発を進めてきたが、これらの新技術開発の成果を従来の蒸気条件の火力プラントに適用し、DSS、ピーク負荷運用に耐え、高信頼性の実現を図るために有効活用しつつある。

以下に、これらの新技術の主な適用例について述べる。

- (1) 新起動制御法
従来の起動制御法は、ボイラ主蒸気圧力の昇温・昇圧完了までプログラム制御だけであったため、どうしても熱応力低

表1 石油及び石炭火力の運用性の向上 従来、ベース負荷用として建設された石油火力・石炭火力は、今後ミドル負荷用及びピーク負荷用として新技術を適用した運用性の向上が必要となる。

プラント	単位	石油火力				石炭火力		
		既設		最近運開	建設中	最近運開	建設中	将来
		現状	改造後(計画)					
項目								
運用負荷帯	—	ベース負荷	ミドル/ピーク負荷	ミドル負荷	ピーク負荷	ベース負荷	ベース負荷	ミドル負荷
ボイラ形式	—	定圧貫流	定圧貫流/変圧	変圧ペンソン	変圧ペンソン	定圧貫流	定圧貫流	変圧ペンソン
起動時間 (ホットスタート)	min	300~360	150~180	140~160	100~120	300~360	300~360	120~150
負荷変化率	定格~50%負荷	3	3~5	5	5~7	1	3	3~5
	50%~最低負荷	1	1~3	3	3~5	0.5	1	2~3
最低負荷	%負荷	30~35	30	15	10~15	50	35	35
制御方式	—	アナログ式APC リレー式ABS	デジタルABC (蒸気温度予測制御方式) デジタルABS	ハイブリッド式APC	分散形 総合デジタル 制御システム	同左	同左	同左+光ネットワーク システム
適用技術	—	—	耐力向上改造 新形起動バイパス弁 新起動バイパス系統 熱応力監視装置	熱応力監視装置	熱応力監視装置	—	—	ミル操作性、制御性の 改善 タービンバイパス系統 熱応力監視装置

注：略語説明 APC(Automatic Plant Control)、ABS(Automatic Burner Control System)

減上大きなマージンを見込んだ緩慢な起動設定を行っていた。これに対し新起動制御法は、ボイラの厚肉部である汽水分離器と過熱器ヘッダの熱応力を常時測定、監視し、許容できる主蒸気圧力の昇温率・昇圧率を求め、これを実現する上で燃料投入量が最低となるような過熱器バイパス量、タービンバイパス量を数理計画法の手法を適用して求める。これにより、燃料投入量の約20%の節約と計画寿命消費率のもとに起動時間の短縮が図られる。

(2) 新形制御弁

有限要素解析モデルを用いて、熱応力低減のためボディの薄肉化を図り、内弁に流れの整流化のためのケーシングを設置して騒音、振動の低減と耐エロージョン性の向上を図った新形制御弁を開発中であり、今後のDSS運用に有効となる。

(3) 新 材 料

超々臨界圧プラント用に開発された新材料は、いずれも高温クリープ破断強度、高靱性、脆化速度、耐食性、加工性などの面で従来材を上回っており、従来火力への適用を図ると薄肉化やDSS運用時の寿命延長に寄与する。

ボイラ用材料としては9Cr改良材、強化SUS材、タービン用材料としては低Si高強度Cr-Mo-Vロータ材、改良12Crロータ材、ボロン入り鍛造弁などが利用可能である。

3 燃料の多様化の推進と環境対策

(1) 石炭利用の拡大

第二次石油危機以降、石油に比べカロリー当たりの価格が50%以下と大幅に割安となった石炭を、少しでも多く利用するための石油火力から石炭火力への燃料転換改造は、昭和59～60年度ではほぼ完了する。この間、転換又は石炭焚き増しする火力プラントは全国で16基323万kWに達することになる。これらの石炭転換工事に当たっては十分な環境対策が実施され、石炭用の高ダスト脱硝装置、脱硫装置、電気式集塵器など総合的な排煙処理技術が採用されている。

しかし今後の石炭転換改造は、ボイラの構造、発電所敷地上の制約などの点から現状技術では難しいと考えられる。

このため日立製作所では昭和56年以降石炭を高濃度石炭-水スラリー(CWM: Coal Water Mixture)として流体化し、輸送、貯蔵、燃焼などの制御、操作面で重原油に近づける研究を実施し、実用化への必要な基礎研究をほぼ完了したが、更にCWMの商用化製造装置へのスケールアップの確認のため、バブコック日立株式会社呉研究所に昭和59年10月に5t/hの2室形新方式湿式チューブミルを設置するとともに、1.5t/hバーナの商用化規模の燃焼試験中である。一方、日立製作所の研究所に小形ミルを新設し、石炭多炭種のCWM製造の最適条件の検討を行なっている。

更に、CWMの脱灰技術の成否は、CWMの今後の需要拡大の鍵となるものであり、重点課題として取り組んでいる。

脱灰の方式は主として浮選法で、捕集剤を気化供給することにより薄い油膜気泡を形成し、炭分粒子を選択的に付着浮上させることによりユーティリティの低減と脱灰率の向上を図っている。

CWMの実用化は石炭火力の運用性の向上のためにも極めて有利な手段であり、微粉炭燃焼に比べて不利とされる製造コスト(粉碎動力費、添加剤費)と水分によるボイラ効率の低下による燃料費の増加も、ミドル運用など運転時間が短い場合は相対的に緩和される。

新設微粉炭燃焼火力としては、我が国最大容量700MWの電源開発株式会社納め竹原3号ユニットが、昭和58年3月か

ら営業運転に入った。

本プラントの制御システムは、負荷追従性の向上、石炭ミルを含むシステムの複雑化に対応したプラントの信頼性向上、全自動化などのニーズに対応するため、各サブグループ制御装置に記憶・判断機能をもつマイクロプロセッサを適用し、予測適応制御の採用、多重化構成、異常診断機能の充実、最適機能分散構成などをもたせた国内初の大容量石炭火力総合デジタル制御システムを採用し、負荷変化率3%/minの安定運転のテストで当初の目標であるプラントの運用性能、信頼性の飛躍的向上を実証した。今後の石炭火力の運用性の向上計画は表1に示すとおりである。

一方、石炭利用拡大のために必要とされる環境対策として低NOx燃焼技術の開発を行なっており、この新高効率低NOx微粉炭燃焼技術は、火炎内部に低空気比領域を形成しNOx還元物質を発生させることによりNOxの低減を図るもので、この研究開発のため石炭燃焼火炎のレーザ光による化学成分の濃度及び温度の計測を実施している。

これらの成果をもとに開発された新高効率低NOxバーナを商用化するためにまず産業用石炭ボイラに採用し、昭和60年3月から営業運転の予定であり、NOx、未燃分とも好成績を得ることができるものと期待している。

今後、更に実証を行ない大容量石炭ボイラにも採用する予定であり、本特集号に詳細を紹介した。

流動床燃焼方式は、滞留時間が微粉炭燃焼方式に比べて長く、かつ炉内で脱硫を行なえるため、低品位炭でも経済的に効率よく燃焼させる技術であるが、流動床ボイラは既に産業用ボイラでは実用化の段階に入っており、今後事業用ボイラへの適用のための大形化、信頼性、運用性の検証が課題となっており、電源開発株式会社の160t/h(50MW相当)の本格的実証試験に川崎重工業株式会社とともに参画し、昭和61年からの試運転を目指して現在機器製作の段階に入っている。

産業用ボイラでは昭和58年6月に釧路市熱供給公社納め11t/h流動床ボイラが運開された。これは従来使用されていなかった太平洋炭鉱のスラッジ炭(発熱量約1,400kcal/kg湿炭ベース)を使用するものであり、地域振興をも含めて高い評価を得ている。

更に、現在王子製紙株式会社苫小牧工場納め42t/h及び同江別工場納め50t/h流動床ボイラを製作中である。本ボイラは低品位炭、スラッジ炭及び木くずなど多種燃料を使用する計画である。

(2) LNG利用大容量コンバインドプラント

日立製作所では既に昭和56年4月、我が国最初の排熱回収形コンバインドプラントとして出力141MWプラントを日本国有鉄道川崎発電所に納入した。以降本プラントは順調に運転され、昭和59年9月までに4回の定期検査を実施し貴重な運転経験を得ている。

この間の1日平均運転時間は14.6時間で、毎日1回の起動・停止を行なっているにもかかわらず、信頼性99.2%、起動信頼性98.3%と外国で発表されている同種コンバインドプラントの運転実績に比べ格段に優れた成績を示すことができたのは、信頼性を重視した設計製作技術と、ユーザーの高度の運転、保守の結果である。

この間改善した主な項目は、次のような燃焼器の信頼性の向上対策である。

(1) 燃焼振動の低減のため空気配分の適正化などを行なった新形燃焼器の開発

(2) 燃焼器の強度向上対策

(3) 燃焼器高温部にセラミックスの遮熱コーティングの採用
これらの対策により定期検査を除く燃焼器点検などの計画停止時間は、当初の2年間の約700時間に比べ後半の2年間では約300時間と半減させることができた。

コンバインドプラント全体の事故停止時間は、当初の2年間の178時間に比べ、後半の2年間で14時間と $\frac{1}{10}$ 以下の好成績を示している。

日本国有鉄道川崎発電所に納入されたコンバインドプラントは、ガスタービンの入口ガス温度が $1,000^{\circ}\text{C}$ 級であった。現在建設中のガスタービンでは $1,100^{\circ}\text{C}$ 級を採用しており、プラント効率が約43% (高位発熱量基準, LNG) といっそうの向上が図られている。

ガスタービンの入口ガス温度の上昇は、一方では NO_x の発生の増加を必然的に伴うため、現在よりいっそうの低 NO_x 化を目指す技術開発を最重点に実施中である。

$1,100^{\circ}\text{C}$ 級のガスタービンのよりいっそうの信頼性向上のため、高温ガス通路部の各重要部品の設計改善が既にプロトタイプで実証され、昭和60年末から出荷するユニットに採用予定である。

4 新発電方式

(1) 石炭ガス化複合発電

従来の微粉炭火力の送電端熱効率は、高位発熱量基準で37～38%程度であるが、石炭ガス化プラントと高性能ガスタービンを主体としたコンバインドプラントを有機的に組み合わせることにより、熱効率の向上を図ることができる。すなわち、ガス化炉で発生したガスの冷却の際生じる蒸気を、コンバインドプラントの蒸気サイクルで有効に利用すること、及び空気酸化方式のガス化炉に対し、ガス化炉で必要とされる空気をガスタービンの主コンプレッサ出口空気の一部を供給するなど、組み合わせによるメリットは大きい。このように最適化を図った石炭ガス化複合発電の送電端熱効率は、将来ガスタービンが更に高性能化しガスタービンの入口ガス温度が $1,300^{\circ}\text{C}$ を超えると、40%程度となり微粉炭火力を上回るものとなる。

ガスタービンの入口ガス温度は $1,500^{\circ}\text{C}$ 級を目指す研究開発が進められており、これに伴う熱効率のいっそうの向上はこれからの火力の最も期待される新技術である。

更に、石炭の利用拡大のためには環境面での対策が不可欠であるが、石炭を30～40気圧の加圧条件で酸素によりガス化した燃料を直接脱硫すれば、脱硫装置で処理するガスの体積は通常の大気圧の微粉炭燃焼火力の排煙脱硫に比べ $\frac{1}{10}$ ～ $\frac{1}{20}$ になり、より高効率な脱硫が可能となり、また装置が割安になる上に、硫黄が商品価値のより高い単体硫黄として回収されるというメリットがある。

その他、灰処理、ばい塵、 NO_x 、排水などについてもガス化したほうが処理しやすいため、石炭ガス化は環境対策上有効である。

このため、米国で最も環境規則の厳しい南カリフォルニアで、Cool-water program, 1,000t/d 100MW石炭ガス化複合発電プラントの5年間にわたる実証試験が昭和59年夏から開始され、関係者の注目を集めている。

日立製作所でも、発電用ガス化炉として、高効率、大容量化、幅広い炭種の適合性などの面から噴流層加圧ガス化炉の開発を研究所COTEC (Coal Technology) センターに1t/dの基礎試験設備を設置して、ガス化基本特性、ガス化効率の向上、各種炭種特性や高性能脱塵などの試験を行ない、基礎技術の開発に成果を挙げている。

他方、高温ガスタービンの開発についても、日立製作所研究所のHTD (High Temperature Development) 試験装置やGTD (Gas Turbine Technology Development) センターで、高温化技術や低 NO_x 、低カロリー燃焼器などの研究開発も行なっている。

現在指向している日立石炭ガス化複合発電の方式は、

(a) 加圧噴流層式ガス化炉で多段旋回バーナにより炉内温度の制御が容易に行なえるため、酸化剤として酸素又は空気のいずれの場合でも多炭種に対し適用が可能

(b) 湿式ガス精製方式による後流設備の信頼性の確保と環境対応性の向上

(c) 最適な熱回収システムと再熱、複圧式蒸気タービンサイクルの選定による総合熱効率の向上

(d) $1,300^{\circ}\text{C}$ 級高性能ガスタービンの採用

であり、日立製作所の総合力を挙げて研究開発に取り組んでいる。

(2) 燃料電池発電

我が国では、昭和56年8月にムーンライト計画による「燃料電池発電技術の研究開発」の基本計画が策定され、リン酸型燃料電池と熔融炭酸塩型燃料電池が国の開発テーマとして政策的に取り上げられ現在推進されている。

日立製作所でも、ムーンライト計画で電池本体技術の開発に参画するとともに、研究所を中心に周辺装置やリフォーマなどについては自主開発を進めている。

第二世代の熔融炭酸塩型燃料電池は、 CO や CO_2 を含む石炭ガス化ガス燃料も使用可能な燃料電池で、作動温度が高く ($600\sim 700^{\circ}\text{C}$) 排ガスの熱回収による蒸気サイクルと組み合わせた高効率複合発電システムが可能となり、火力技術の応用が行なえるようになるので現在基礎的な研究を実施し750Wの出力が得られる10セル積層試験などに成功している。

5 結 言

以上、日立製作所での最近の火力発電の技術動向について紹介したが、これらの技術開発は基礎研究から実証プラントを経て商用化するまでには長期間を要するものが多い。

しかし、最近の研究開発の効率及び精度向上のうえで大きな力を発揮しているのは、大形コンピュータによる解析技術、シミュレーション技術の進歩と各種センサの開発を伴う計測技術の進歩であり、従来には見られなかった精度で効果的な開発が多方向に進められている。

これらの研究開発の成果を商用化するための実証試験には、最近多くなっている電力会社との共同研究及び国のサンシャイン計画、ムーンライト計画、各種委託研究プロジェクトなどが効果的であり、日立製作所としてもこれらに積極的に参画してゆく方針である。

電力の伸び率は長期的に平均2～3%/年としても、今後20～30年という長期では現在の1.5～2.0倍の電力需要となる。

火力発電技術の開発は信頼性の実証を含め長期間を要するものが多いので、社会のニーズに沿って地道な研究開発に努力を続けたいと考えている。

参考文献

- 1) 昭和58年度電気事業審議会中間報告
- 2) 資源エネルギー庁編：第3世代のエネルギー戦略，電力新報社(昭和58-10)
- 3) 通商産業省編：エネルギー'84危機10年からの出発，通商産業省(昭和59-4)