

# 火力発電設備の省エネルギー対策

## Saving Energy for Thermal Power Generating Plants

発電プラントでの熱効率は、超々臨界圧を含む蒸気条件の高温・高圧化、蒸気タービン長翼化(40in・2極機, 52in・4極機)などの技術開発により年々改善がなされてきた。しかし、最近の燃料事情の変化、プラント運用のミドルピーク化、あるいはプラント新地点の減少という状況下で、既設火力を含めた省エネルギー技術があらためて注目されている。省エネルギー技術としては熱サイクルの改善、機器の効率向上のほかに変圧運転方式の採用、ポンプ・ファンの可動翼化、速度制御化などのプラント補機動力軽減策あるいは新発電方式を含めた新技術・設備改善などが検討されている。

本稿は、変圧運転プラントの実績、補機動力軽減策の省エネルギー効果などについて紹介するものである。

橋本継男\* *Tsuguo Hashimoto*

栗林哲三\* *Tetsuzō Kuribayashi*

坂本辰雄\* *Tatsuo Sakamoto*

### 1 緒言

昭和48年のオイルショックを契機に、国を挙げて「省エネルギー」に取り組み始めたことはまだ記憶に新しい。「ムーンライト計画」によって高効率発電技術の計画的開発が進められてきたが、民間各企業でもエネルギー消費量の節約に取り組んだ消費端での各種省エネルギー対策が講じられた。

一方、発電端でも各々の高効率化、きめ細かい省エネルギー対策が講じられてきた。

現在、燃料価格は円高の利益ともあいまって、かなり低位に推移しているが、長期的にはエネルギー価格の上昇は不可避と考えられる。省エネルギー対策の必要性の認識を新たにし、これまでの成果を点検し新視点を得たい。

### 2 省エネルギーの視点

火力発電での経済性の追求は主として、

- (1) 単機容量の増大
- (2) 蒸気条件・熱サイクルの高級化

によって達成されてきたが、その経年的推移を図1に示す。今後は超々臨界圧化、蒸気タービンの長大翼などの開発が進められると考えるが、新規電源は最初数年はベース負荷で運用され、その後しだいに利用率は低下する傾向となる。電力需要のうち民需比率増大(昼夜需要比増大)、原(原子力)主・火(火力)従時代によってこの傾向が加速されている。

つまり、火力発電の省エネルギーの視点として、

- (1) 定格点より部分負荷での効率向上
  - (2) 起動・停止損失や夜間最低負荷運転時の燃費節約
- といった新規火力もさることながら、現存火力での省エネルギー対策に重点が置かれてくる。以下に、適用実績、将来技術を含めて各種の省エネルギー技術について紹介し、説明する。

### 3 部分負荷効率の向上

#### 3.1 変圧運転

1980年代後半の火力発電プラントのほとんどが、ミドル負荷運用を前提とした変圧プラントとなっており、変圧運転は定着したと言える(図2参照)。変圧運転による部分負荷での効率改善は実績で確認されており、超臨界圧力プラント及び亜臨界圧力プラントでの効率改善効果の実例を図3に示す。

新設プラントでの変圧運転の多くの実績・経験に基づき、既設プラントへの変圧運転適用化が現在推進されている。下記の対策は、亜臨界圧UPボイラの既設プラントでの改造・対策箇所を一例として示すものである。

##### (1) ボイラプラント

- (a) 火炉水冷壁のスパイラル化
- (b) 起動系統改善(再循環ポンプ設置による起動時損失熱回収)
- (c) 起動バイパス系簡素化(操作性)
- (d) 過熱器スプレー常用化(制御性)

##### (2) タービンプラント

- (a) 排気室スプレー温度制御化
- (b) BFP(Boiler Feedwater Pump)回転数制御範囲拡大

#### 3.2 補機動力軽減

表1に、各補機の補機動力軽減駆動方式適用表(概要)を示す。最適な補機駆動方式を選定するには、経済性(熱効率・設備価格)、運転特性(制御応答性・操作性)、保守性、配置スペース、信頼性などを考慮して決める必要がある。更に、既設補機を改造する場合は、改造範囲の最小限化、工期、既設設備への影響(基礎、関連機器・配管への影響、冷却水の確保など)を考慮して決める必要がある。

以下に、各補機動力軽減駆動方式の火力発電補機に対する

\* 日立製作所日立工場

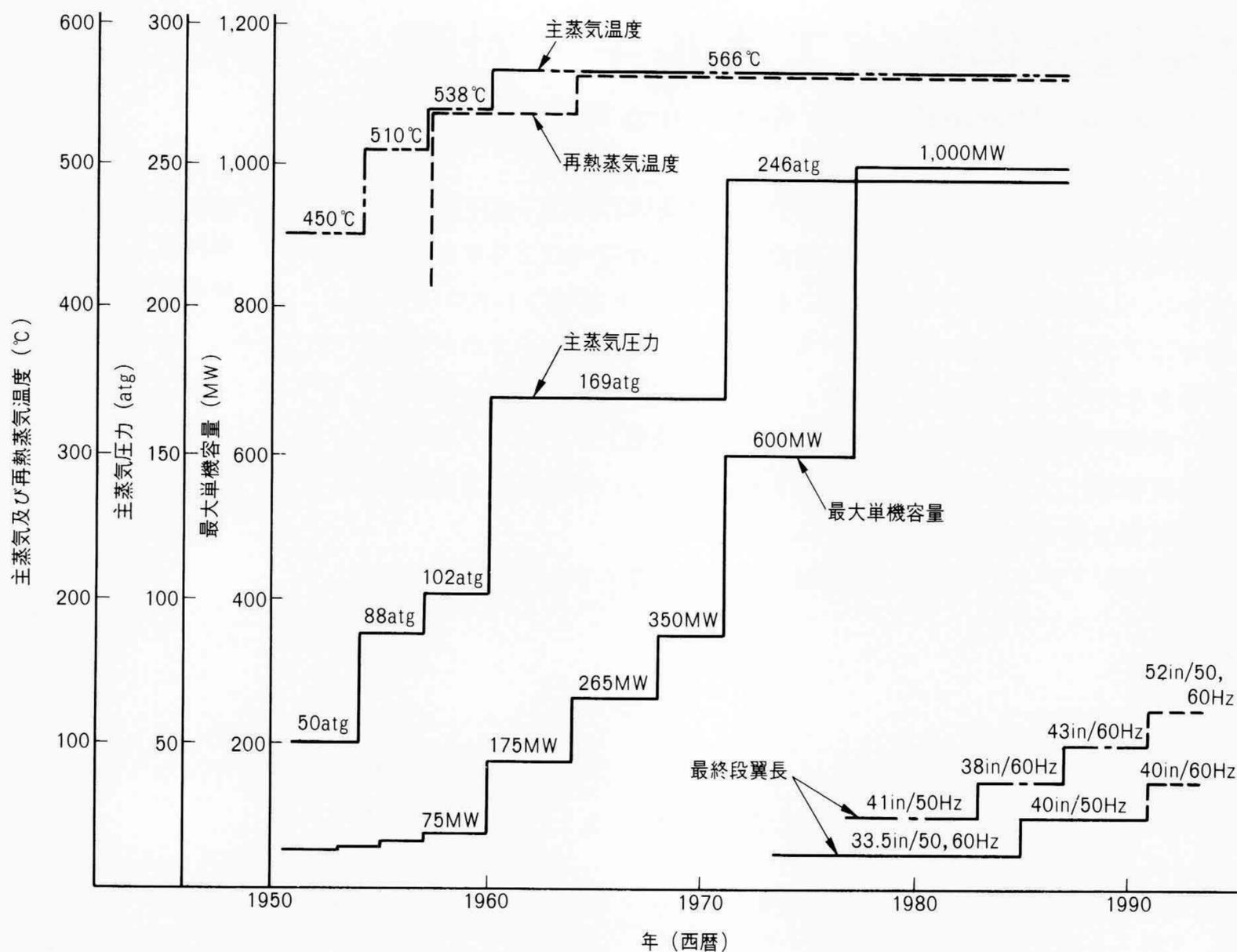
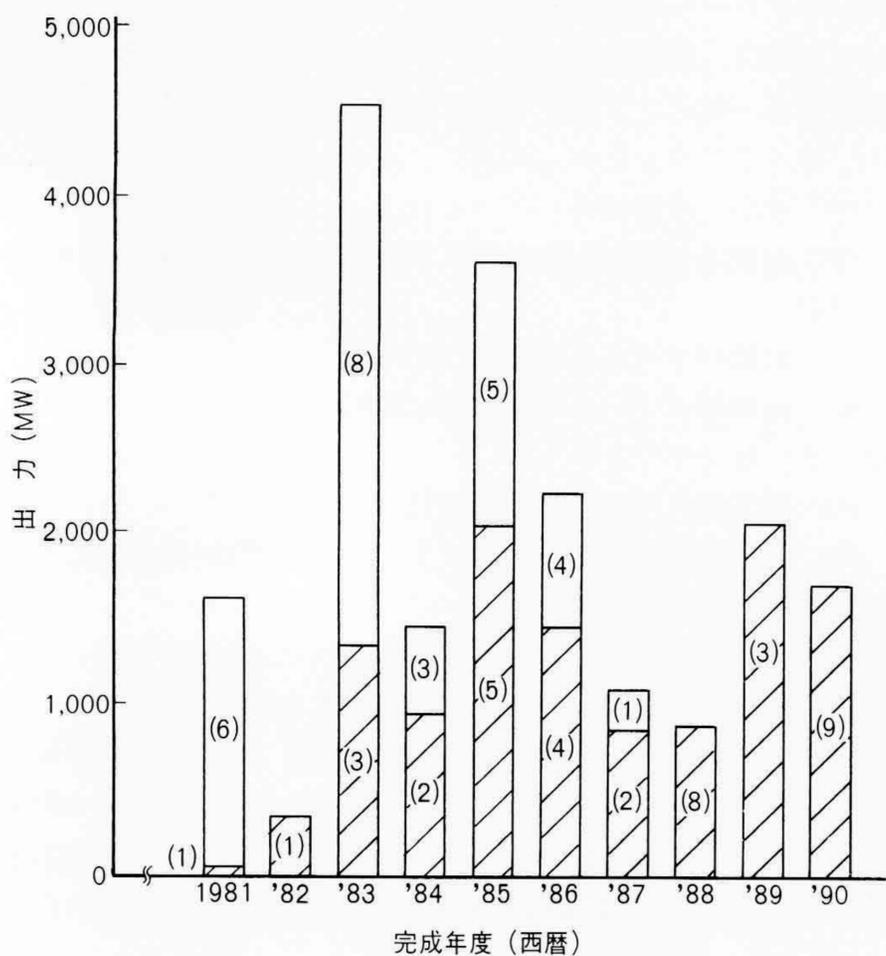


図1 日立蒸気タービンの推移 日立蒸気タービンの蒸気条件, 最大単機容量及び長翼採用の推移を示す。



注: 1. 斜線部分は変圧プラント出力を, 白の部分は定圧プラント出力を示す。  
2. ( )内は, プラント数を示す。

図2 変圧運転プラント納入実績 日立製作所の最近の変圧運転プラントの納入実績を示す。

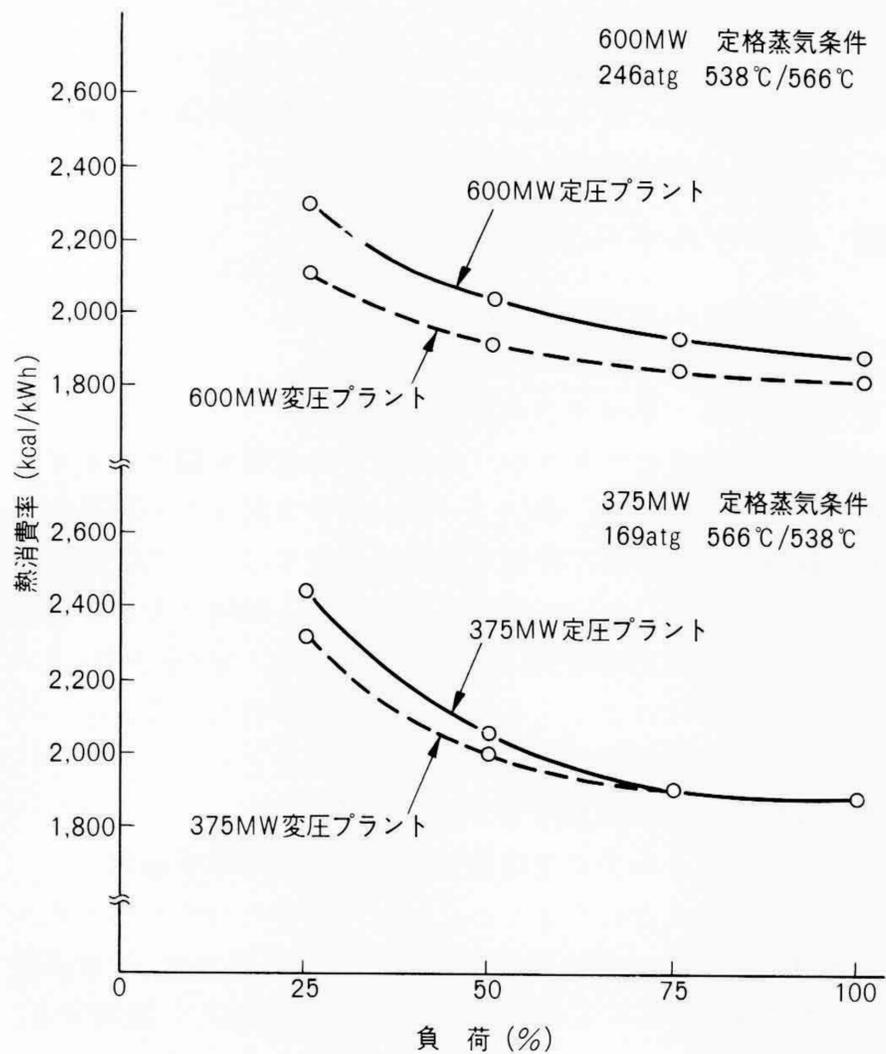


図3 600MW及び375MW定圧/変圧プラントの熱消費率特性 日立製作所納入の600MW及び375MW機での定圧, 変圧各々の熱消費率比較を示す。375MW機定圧データは計算値を示す。

表1 補機動力軽減駆動方式適用表(概要) 最適な補機駆動方式は、プラントの運用形態によって経済性、運転特性、保守性、配置スペースなどを考慮して選定する必要がある。

駆動方式	補機名称	タービン補機						ボイラ補機						特 徴	
		給水ポンプ		復水ポンプ	復水ブースタポンプ	ヒータドレンポンプ	循環水ポンプ	押込ファン	誘引ファン	ガス再循環ファン	ガス混合ファン	一次空気ファン	脱硫ファン		
		常用	起動用												
回 転 数 制 御	タービン駆動	新設	●126	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-	○	(1) 250MW以上の常用給水ポンプに採用 (2) 大容量ファンにも効果的
		改造	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	流体継手	新設	●128	●20	○	○	○	-	○	●14	●7	●5	○	●3	(1) 各補機に多数の実績あり。 (2) 既設改造がやりやすい。
		改造	●35	◎	△	△	△	-	○	●2	◎	●2	○	◎	
	多板クラッチ	新設	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	○	定格点では流体継手より効率がよいが、クラッチ摩耗の心配あり。
		改造	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	AVAF	新設	○	○	○	○	△	-	○	○	◎	○	○	○	(1) 最も効率が良い。 (2) 据付スペース大
		改造	○	△	△	△	△	-	○	○	●2	○	○	○	
	極数変換電動機	新設	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(1) 低速で定格負荷まで運転可能であること。 (2) コイル更新時のリプレースが効果的
		改造	-	-	-	-	-	-	※	※	※	※	※	※	
動 翼 可 変	ファン動翼	新設	-	-	-	-	-	●27	◎	-	-	◎	◎	(1) 流体継手より効率が良い。 (2) 大容量ファンに採用	
		改造	-	-	-	-	-	※	-	-	-	-	-		
	ポンプ動翼	新設	-	-	-	-	-	●28	-	-	-	-	-	循環水ポンプの新設、既設改造に最適	
改造	-	-	-	-	-	●5	-	-	-	-	-	-			

注：評価 ◎は優(●：納入実績あり。数値は発電設備用日立製作所納入実績台数を示す。)

○は良

△は今後燃料価格が上昇した場合に効果的である。

※は老朽化のため、設備を更新する場合に効果的である。

略語説明 AVAF(可変電圧可変周波インバータ)

適用概要について述べる。

(1) タービン駆動方式

タービン駆動方式は、250MWユニット以上の常用給水ポンプに多く採用されている。700~1,000MWユニットの大容量誘引ファン・脱硫ファンには、タービン駆動後の蒸気エネルギーをボイラ空気系及び排ガス系へ熱回収することによって熱効率の向上が得られ、今後の燃料価格によっては効果的な方式と考えられる。

(2) 流体継手方式

流体継手方式は適用性に優れ、中小容量火力プラントの常用給水ポンプ、及び大容量火力プラントの起動用給水ポンプのほかボイラファンにも多く採用されている。今後の燃料価格によっては、ヒータドレンポンプなどの小容量補機にも効果的な方式となる。また、日立製作所が開発した高速複合可

変速形流体継手<sup>1)</sup>は、流体継手の入力側に歯車増速機を組み込み、流体継手と増速機を同一ケース内に収納した小形流体継手で、既設の増速機とほぼ同じスペース内で流体継手と増速機をリプレースすることができる。このため、既設電動給水ポンプ及び既設ボイラファンの回転数制御化としても多く改造されている。一例として既設156MWユニットの給水ポンプを流体継手化改造し、約5~6年で資本回収が得られ好調な運転を行っていることが報告されている<sup>2)</sup>。

(3) 多板クラッチ方式

多板クラッチは、極薄油膜によってクラッチ間で動力伝達する方式であり、定格点ではスリップゼロとなり滑り損失がなくなるため流体継手よりも多少効率がよいが、クラッチ摩耗対策の必要がある。一般産業用のポンプ・ファンなどに多く採用されているが、事業用火力プラントにはガス混合ファ

ン・脱硫ファンに数台採用されている。

(4) AVAF(可変電圧可変周波インバータ)方式

図4の駆動方式による押込ファンの消費動力特性例に示すように、AVAF方式は最も効率の良い方式である。日立製作所では、産業用火力プラントでの20台近い納入実績を踏まえ、いち早く事業用火力プラントへの導入を計画し、250MWユニットの既設680kWガス再循環ファンを改造(AVAF化)した。導入目的であった動力の軽減及び制御性の改善について、所期の効果を得ることができ好調な運転を行っている<sup>3)</sup>。

AVAF化する場合、特に据付スペースの確保を必要とするが、コンパクト化を図るため表2に示すトランジスタインバータの採用、インバータの高圧化による入出力変圧器の省略、電動機の低圧化による出力変圧器の省略などの検討を進めている。

(5) 極数変換電動機方式

適用する極数変換電動機方式は1巻線2速度方式であり、既設電動機とほとんど外形寸法が変わらないため、基礎を流用でき改造が容易である。特に、既設電動機の巻線更新時期にリプレースを行えば効果的である。

適用対象補機としては、常時の運転点に対して比較的定格点に大きな余裕を持つボイラファンなどが考えられる。

(6) 動翼可変軸流ファン

動翼可変軸流ファンは、大容量ファンである押込ファンに多く採用されている。日立製作所が開発した2段動翼可変軸流ファンは、1段当たりの昇圧力を軽減することができ、高効率範囲を拡大できること、及び低周速化できることから、高効率タイプの押込ファン、風圧が1,500mmAqを超える一次

表2 サイリスタインバータとトランジスタインバータの比較  
据付スペースは、インバータ部分だけの比較を示し、入・出力変圧器は含まれていない。

項目		方式	サイリスタインバータ	トランジスタインバータ
制御方式			電流形PAM制御	電圧形PWM制御
主変換素子	コンバータ		サイリスタ	ダイオード
	インバータ		サイリスタ	サイリスタ
特性	電源力率		約80%(定格点で) 低速域は略比例で低下	90~95% 全運転領域
	効率		ベース	1%程度高い。
	電源高調波		ダイオードよりも大	高次分が少ない。
	負荷脈動トルク		大	比較的小さい。
据付スペース(面積)			ベース	30~40%小さい。
適用補機出力			~10,000kW	~800kW

注：略語説明 PWM(パルス幅変調)

空気ファン、耐摩耗性が要求される誘引ファン・脱硫ファンに採用することができる。

また、既設固定翼ファンが老朽化し設備更新する場合は、動翼可変軸流ファンに取り替えると効果的である。

(7) 可動翼循環水ポンプ

可動翼循環水ポンプは、近年新設大容量プラントのほとんどすべてに採用されており、また既設固定翼循環水ポンプについても可動翼化に改造されてきている。

日立製作所が開発した新形可動翼循環水ポンプは、既設固定翼循環水ポンプの改造範囲を最小限化し、ボール部の改造と電動機とポンプの間に翼操作機構を追加することによって可動翼化できる。既設600MWユニットの固定翼循環水ポンプを可動翼化に改造した例では、約3~5年で資本回収が得られる。

(8) 省エネルギー効果試算例

表3に、175MWユニットの既設火力プラント補機を、回転制御化又は動翼可変化した場合の省エネルギー効果試算例を示す。年間消費動力軽減量は1万1,615MWh/年となり、改造対象補機動力の25.9%、所内率で1.9%軽減できることになる。

3.3 最低負荷運転中の省エネルギー

プラントの運用形態として、最低負荷運用とするか、週末停止運用とするかは、電力系統全体で評価されるが、最低負荷運用時には省エネルギー対策も重要な課題となる。つまり、部分負荷運用の下限での運用であり、前述の補機動力の軽減効果も相対的に増大することになる。また、低負荷による排出熱量あるいは熱サイクル中の流量などが低減するので、複数ユニットによるプラント冷却水系の共用化あるいは循環運転用小容量ポンプの採用、AVAF方式によるポンプ駆動などの運用が有効なものとなる。

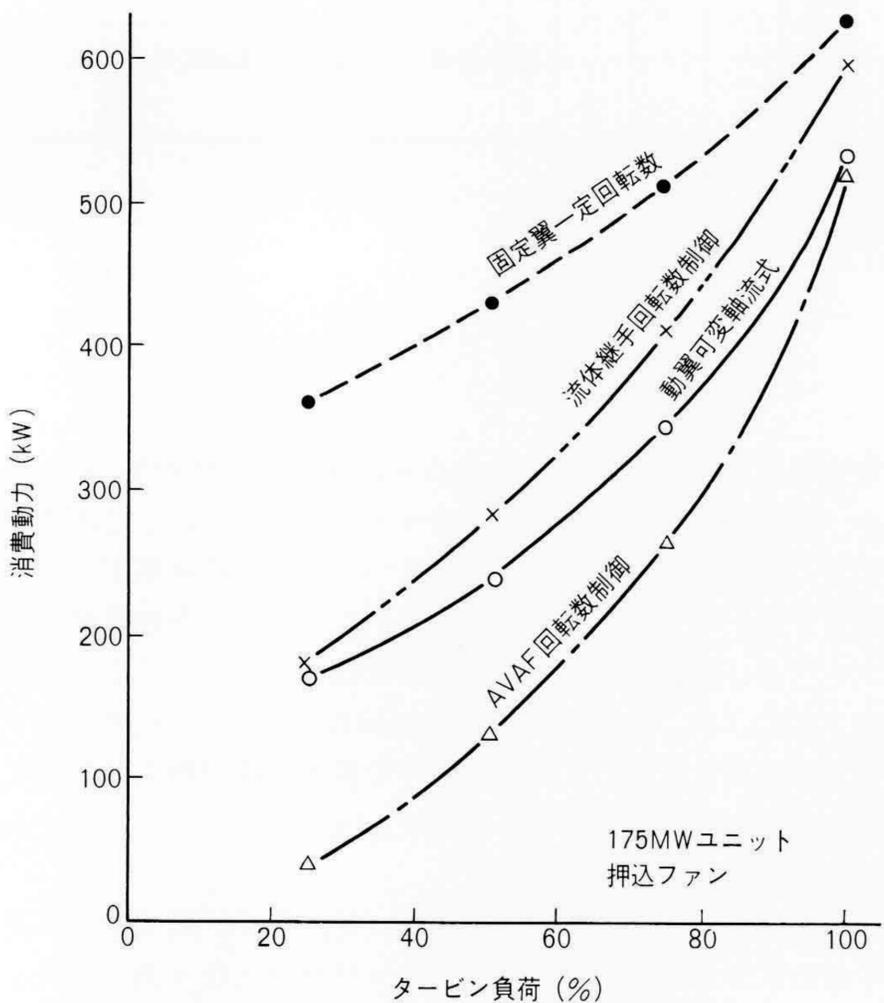


図4 駆動方式による押込ファンの消費動力特性例 AVAF回転数制御方式は、最も効率の良い方式である。

表3 175MW既設火力補機改造省エネルギー効果試算例 省エネルギー効果は大きく、所内率で1.9%(絶対値)軽減することができる。

補機名称	改造駆動方式	年間消費動力(MWh/年)	
		現 状	改造による軽減量
給水ポンプ	流体継手化	17,408	2,588
循環水ポンプ	動翼可変化	4,596	1,335
誘引ファン	流体継手化	9,845	1,803
ガス再循環ファン	AVAF化	2,887	2,460
脱硫ファン	流体継手化	10,101	3,429
計	—	44,837 (100%)	11,615 (25.9%)

注：1. 負荷と運転時間

負 荷	MW	175	130	90	45	計
年間運転時間	h	1,300	1,100	1,700	2,020	6,120

2. 稼働率：70%，利用率：40%

年間発電電力量：614,400MWh/年

改造による所内率軽減率 =  $\frac{11,615}{614,400} \times 100 = 1.9\%$

#### 4 起動・停止損失の減少

負荷運転中の省エネルギー対策と同様に、起動・停止時のエネルギー損失を最小限に抑制することもDSS(Daily Start Stop)運用などの頻繁な起動・停止プラントでは重要な省エネルギー対策となる。この場合は、プラント起動時間の短縮あるいは起動損失となる排出熱の回収を図る手段を講じる必要がある。最近の新規プラント実績で、ボイラ点火からプラント全負荷起動時間が100分以内という短時間起動(100%タービンバイパスプラントでは同70分)を達成しており、既設火力でも自動化のほか起動時間短縮技術の適用化が図られている。

#### 5 今後の課題

以上述べた各種省エネルギー技術は、既設プラントも含めて広く適用あるいは具体的検討が実施されてきているが、今後の課題として表4に示す新技術が挙げられる。つまり、プラントとして小容量かつ高効率化を図った一軸コンバインドサイクルあるいは燃料電池発電などの新発電方式の採用によるエネルギーのよりいっそうの有効利用であり、また排熱回

表4 省エネルギー新技術 今後考えられる各種省エネルギー新技術発電方式及び内容を示す。

No.	発電方式	内 容	備 考
1	熱併給	ガスタービン排熱回収 プロセス排熱回収	コージェネレータ、 ピークロード対応
2	蓄熱利用	熱水・蒸気蓄熱	
3	コンバインド サイクル	一軸コンバインドプラ ント	高効率発電
4	燃料電池	燃料電池発電	同 上

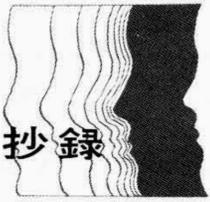
収や熱水・蒸気回収利用などの熱併給、蓄熱利用がコージェネレーション若しくはピークロード対応として考えられる。一方、既設火力では省エネルギー対策に加えて、省人(省力)化という観点から運転保守・管理へのAI(Artificial Intelligence)技術の適用が今後なされてゆくと考えられる。

#### 6 結 言

以上、最近の火力発電の省エネルギー技術について紹介したが、原主火従を基調とした一次エネルギーの多様化が更に推進され、今後よりいっそうの中間負荷運用、省エネルギー化が必要となる。そして、プラント規模から補機単体まで各種の省エネルギー技術が考えられるが、変圧運用、プラント補機動力軽減策の実用化は、多数の実績を挙げている。既設プラントへの適用に際しては、改造規模と経済性についてプラントごとの運用を踏まえた検討が重要である。日立製作所としては、更に高効率化、コンパクト化を重点とした技術改善に努力し、将来技術を含めた多種多様の省エネルギー技術の開発・計画を推進してゆく考えである。

#### 参考文献

- 1) 黒岩, 外: ボイラ給水ポンプの省エネルギー化に関する可変速流体継手の最近の動向, 日立評論, 62, 10, 739~744(昭55-10)
- 2) 芦田, 外: 流体継手の設置による省エネルギー, 火力原子力発電, 33, 387~399(昭57-4)
- 3) 地福, 外: 電力・産業用大容量ACドライブシステム, 日立評論, 68, 8, 625~630(昭61-8)



## 浮動ヘッドスライダの追従特性 (有限要素法による解法)

日立製作所 尾高聡子・田中勝之・他2名

日本機械学会論文集C編 53-487, 815-828 (昭62-3)

浮動ヘッドスライダは、気体軸受の原理を応用して、ヘッドを走行する磁気記録媒体面上に微小かつ一定のすきまに浮上させ、記録の入出力を行う装置である。装置の性能と信頼性を高めるためには、これを安定に浮上させねばならない。スライダの浮上量は記録の高密度化、アクセスの高速化に伴い微小化しており、現在では $0.2\sim 0.3\mu\text{m}$ に達するものも開発されている。

このように微小なすきまで浮上しているため、スライダの浮上特性は、形状のわずかな相違、走行面の微小な粗さ、媒体面の微小な振動やうねりにより大きく変化する。したがって、これらの諸因子の影響をあらかじめ精度よく予測して、スライダを設計しなければならない。

現在、スライダの浮上特性は、気体の分子平均自由行程の影響を考慮した静的な浮上特性、及び追従特性解析(媒体面の微小変動に対する周波数領域での追従特性)により予測されている。これらは、基礎方程式

を数値的に解くものである。静的な解析には有限要素法が用いられているが、追従特性解析には、差分法若しくはDivergence Formulation法が採用されている。このため、形状の複雑なスライダを扱うことが難しかった。

本論文は、これを解消するため、追従特性解析に有限要素法を適用することを提案し、その適用例を報告した。本報告の手法により、任意のスライダを扱うことが可能になるばかりでなく、静的浮上特性から追従特性解析まで有限要素法により統一的に扱えるようになる。

本論文では、有限要素法を適用する手法を明らかにし、三角形要素を用いた詳細な定式を示した。これを従来公表されている計算例に適用し、従来と同じ結果が得られることを確かめた。また、テーパフラットスライダについて追従特性を計算し、Yaw角が零の場合ばかりでなくYaw角がある場合にも、実測値とよく一致することを明ら

かにした。

本論文の手法は、複雑な形状のスライダについても容易に追従特性を計算できることが特徴である。その例として、面粗さをモデル化した三角波溝や方形波溝が、テーパフラットスライダの走行面にある場合について追従特性を計算した。

また、浮上量が小さく追従性が良いとされる負圧スライダについて、追従特性を計算した。その結果、浮上量が小さいとき、追従性が良いことを明らかにするとともに、浮上量が大きい場合には追従特性が悪いことを確かめた。

本論文の手法により、スライダの特性を予測する場合に、静特性解析で有限要素法を採用すれば、追従特性解析でその手法を差分法若しくはDivergence Formulation法に変更することなく、有限要素法により統一的に扱えるので、複雑な形状のスライダの取扱いが極めて容易になった。

## 優先度可変型光伝送システム

日立製作所 有田節男・一ノ瀬祐治・他1名

日本原子力学会誌 29-5, 420-427 (昭62-5)

近年、大形発電プラントで、監視性と制御性向上の要求に応じて計装・監視システムは大規模化する傾向にあるが、同時に経済性との両立も要求されている。

プラント計装・監視システムで取り扱う情報は、プラント機器の状態を監視するITVC(工業用テレビジョンカメラ)からの画像情報、プラントの状態を示すプロセス情報、制御装置の健全性を評価するための保全情報、構内電話などの音声情報があり、膨大な情報量となる。このため、これらの情報を一括して、限られた伝送容量内でプラント現場から中央制御室まで効率よく伝送できる光伝送システムの開発が望まれている。

本論文では、伝送情報に優先度を割り付け、優先度の高い情報を短い周期で高速伝送することによって、高い伝送効率を実現する優先度可変型の光伝送システムについて報告した。

限られた伝送容量内で多くの情報を伝送するためには、運転監視上重要となる情報

を短い周期で伝送し、その他の情報を比較的長い周期で伝送すればよい。しかし、情報の重要度はプラントの状況に応じて異なる。そこで、本システムの伝送方式としては、プラントの状況に応じてそれぞれの情報に優先度を割り付け、優先度の高い情報を短い周期で伝送するようにした。

開発した伝送システムは、以下のような機能・構成とした。基本的には、中央制御室に設置するCCU(中央制御装置)から、現場に設置するRTU(遠隔端末装置)に優先度変更情報を伝送する。そして、各RTUはこの優先度変更情報を解読して、優先伝送すべき情報の伝送パターンを組み換える。CCUとRTUは、CCUに固有の伝送制御装置を除いては基本的には同一構成であり、以下の特徴を持たせた主要部分から成っている。

### (1) 多重回路及び分離回路

優先度変更情報で指定される伝送パターンに従って伝送すべき情報を多重化する一方、多重伝送されてきた情報を種類ごとに分配する。

### (2) パケットステーション

優先度変更情報を解読し、次に伝送すべき情報の伝送パターンを決定する。

### (3) 画像ステーション

パケットステーションからの指令により、ITVCの同期のタイミングを調整し、動画像伝送と、こま落とし画像伝送を制御する。動画像伝送は監視対象に顕著な変化が生じたときに使用するが、フレーム内予測符号化方式を採用して32Mbpsに帯域圧縮している。

### (4) 伝送制御装置

CCUに接続する固有の装置であり、運転員の指令に従い各情報に優先度を割り付け、これをコード化した優先度変更情報としてパケットステーションに伝送する。

開発した優先度可変型光伝送システムは、プラントの状況に応じて重要となる情報を選択的に伝送して伝送効率を高めており、実験によってその有効性を確認している。