

超高温・高圧蒸気発電プラントの技術展望

Power Plants for High Temperature and High Pressure Use

現在の蒸気火力発電での蒸気条件は、最大蒸気圧力246atg、最高蒸気温度566°Cに定着しており、プラント効率は、最新鋭の火力発電所でも40%程度であるが、蒸気条件の改善によりプラント効率を相対値で7%前後向上が可能である。

しかし、蒸気条件の高温・高圧化は、同時に現行のプラント構成機器にとって過酷な運用条件となるため、材料の選定、機器の構造及び機器の構成に関し対応技術の開発が必要となる。

そこで、現有技術を最も有効に活用できるコンポーネント設計方式を基本とした、主蒸気条件350atg、650°C、再熱温度566°Cの超高温・高圧蒸気火力プラントを計画した。

本稿では、当該プラントの特長及び実用化に対する技術上の諸問題について概説する。

二宮 敏* Satoshi Ninomiya
 坂井 彰** Akira Sakai
 山地康博** Yasuhiro Yamachi
 藤井 稔*** Minoru Fujii

1 緒言

現在の蒸気火力発電所の蒸気条件は、図1に示す推移となっているが¹⁾、蒸気圧力246atg、蒸気温度566°Cに達した後は、我が国では10年以上、米国でも約20年改善されていない。

蒸気条件の改善により、図2のランキンサイクルの熱効率に示すように、プラント効率を大幅に向上できるポテンシャルをもっているにもかかわらず蒸気条件は改善されていない。これは、現有のプラントの主構成材料であるフェライト系耐熱鋼の使用限界温度が560°C程度であるところの一つの原因がある。また、オイルショック前の原油価格が、現状の $\frac{1}{10}$ という低廉さにも原因があり、これらがフェライト系耐熱材料に換え高価なオーステナイト系耐熱材料を多量に必要とする超高温・高圧蒸気火力プラント開発の意欲を阻害していた。

1957年のPhilo#6プラントの4,500psig、1,150°F、1959年のEddystone#1プラントでの5,000psig、1,200°Fなどの蒸気条件の実用プラントは^{2),3)}、当時として画期的な試みであるが、

上記の要因、当時の技術レベル及びプラントの運用技術上の問題もあり、その後の計画は挫折している。

ところが、1973年及び1978年の2回にわたるオイルショックにより、図3に示すように原油価格は異常高騰⁴⁾し、エネルギー危機が世界共通の問題となり省エネルギー、エネルギーの多様化への対応が急務となっている。これを契機に、Philo、Eddystoneなどで経験した蒸気火力プラントの高温・高圧化は、石炭火力の推進とあいまって再びクローズアップされてきた。

このような状況のもとに、米国では石炭火力での効率改善策として、プラントの高温・高圧化に対する研究開発プロジェクトを推進している^{5),6)}。本プロジェクトでは、技術開発上の難易度から3レベルの目標を設定しているが、主蒸気条件5,000psig、1,200°Fまでのプラントは達成可能と見込んでいる。

そこで本稿では、Philo、Eddystoneなどの過去の運用経験、

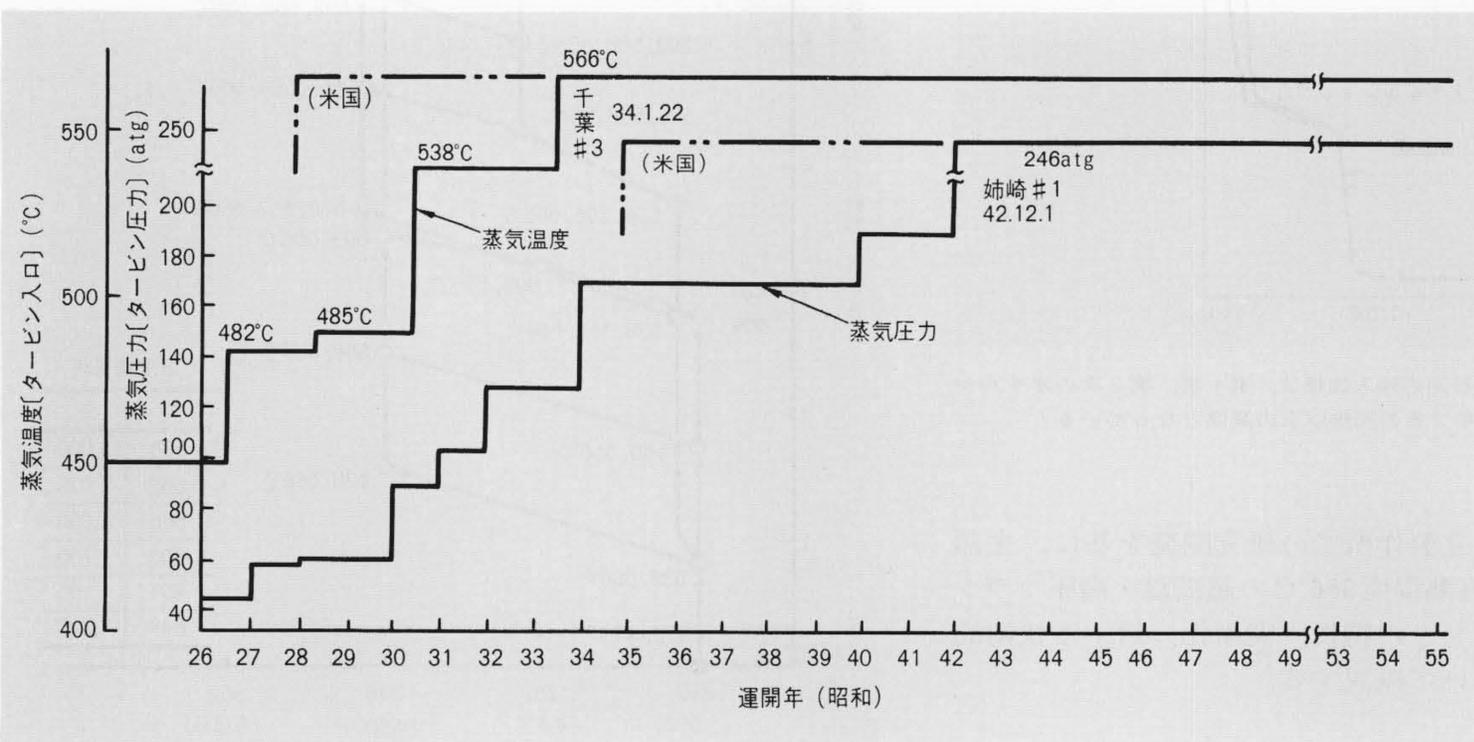


図1 火力発電所の蒸気条件の推移¹⁾ 主蒸気圧力、温度がそれぞれ246atg、566°Cに達した後は、我が国では10年以上、米国でも約20年間定着している。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所電力事業本部 *** バブコック日立株式会社

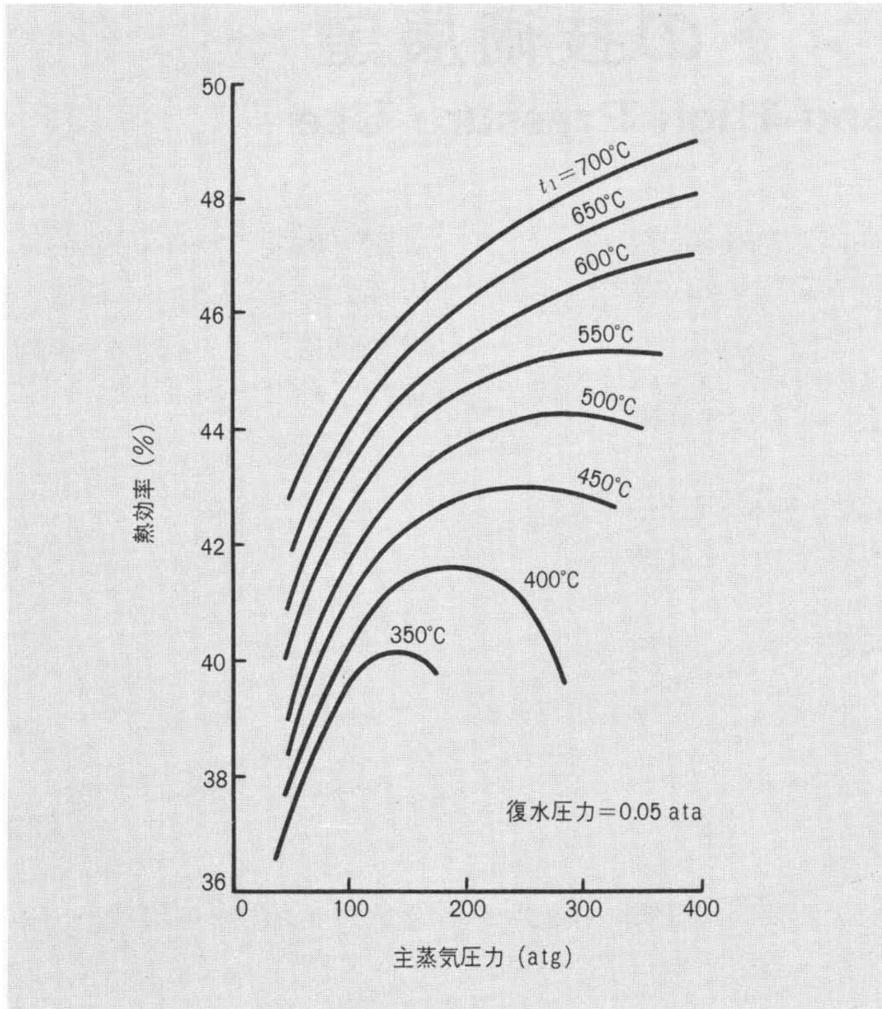


図2 ランキンサイクルの熱効率 主蒸気圧力を上昇させることにより、プラントの熱効率は上昇するが、高温になるとそれはいっそう顕著となる。

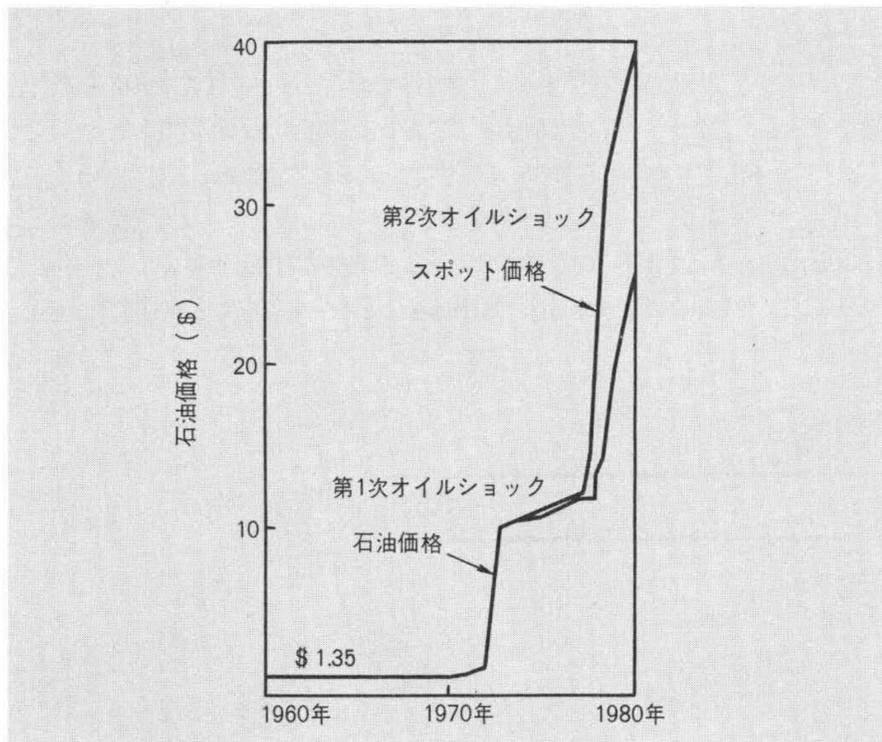


図3 石油価格の推移 石油の輸入価格は、第1次、第2次のオイルショックにより異常高騰し、1970年ごろの20倍以上の高値となっている。

米国の研究計画、更に日立製作所での研究開発を基に、主蒸気条件 350atg, 650°C, 再熱温度 566°C の超高温・高圧プラントを取り上げ、このプラントの特長、実用化に対する技術的諸問題、更に経済性について概説する。

2 高効率化と経済性

蒸気条件の高温・高圧化による効率の改善策は、図4に示すように二つのルートが考えられる。すなわち、現行圧力で高温化を図る場合と、現行温度で高圧化を図る場合とである。

双方を同時に進めることにより、主蒸気条件が5,000psig, 1,200°Fでは、7%前後の効率改善の効果が期待できる。

他方、プラントの構成機器は、温度、圧力の選定により大きく変化し、これに伴う機器開発がコスト高となる場合には、効率の改善効果は経済性の面から減殺される。

Philo, Eddystoneの例では、その後この種のプラントの建設がなかったという点で、開発費用及び運用コスト双方から経済的なプラントとは言えなかったようである。前者は1975年に廃止となり、後者は種々のトラブルのためプラントの強制停止が20回/年程度と頻繁であり、現状は主蒸気温度を1,100~1,130°Fに下げ運用されていると言われている。

図5は、新プラント建設に対し、効率の改善効果から許容できる建設費の増加を、現在の石炭価格をベースに示したものである。効率向上の利得はプラント出力に比例し、また、プラントの建設単価、運転コストは出力の増大とともにスケールメリットの出るものであるから、高効率プラント建設に対しては一定規模以上のプラントであることが経済的条件となる。

出力1,000MW規模のプラントを想定すると、効率の改善が5%の場合、図5から相当建設費増加額は約100億円強となり、現在のこの種規模の火力発電所の建設費をほぼ10%増加させることとなるが、効率向上に伴う機器コストの上昇もこの範囲になければならない。また、プラントの経済的運用を図るためには、同時にメンテナンスコストの評価も必要である。

経済的に見て、効率向上と機器コスト上昇とのバランス

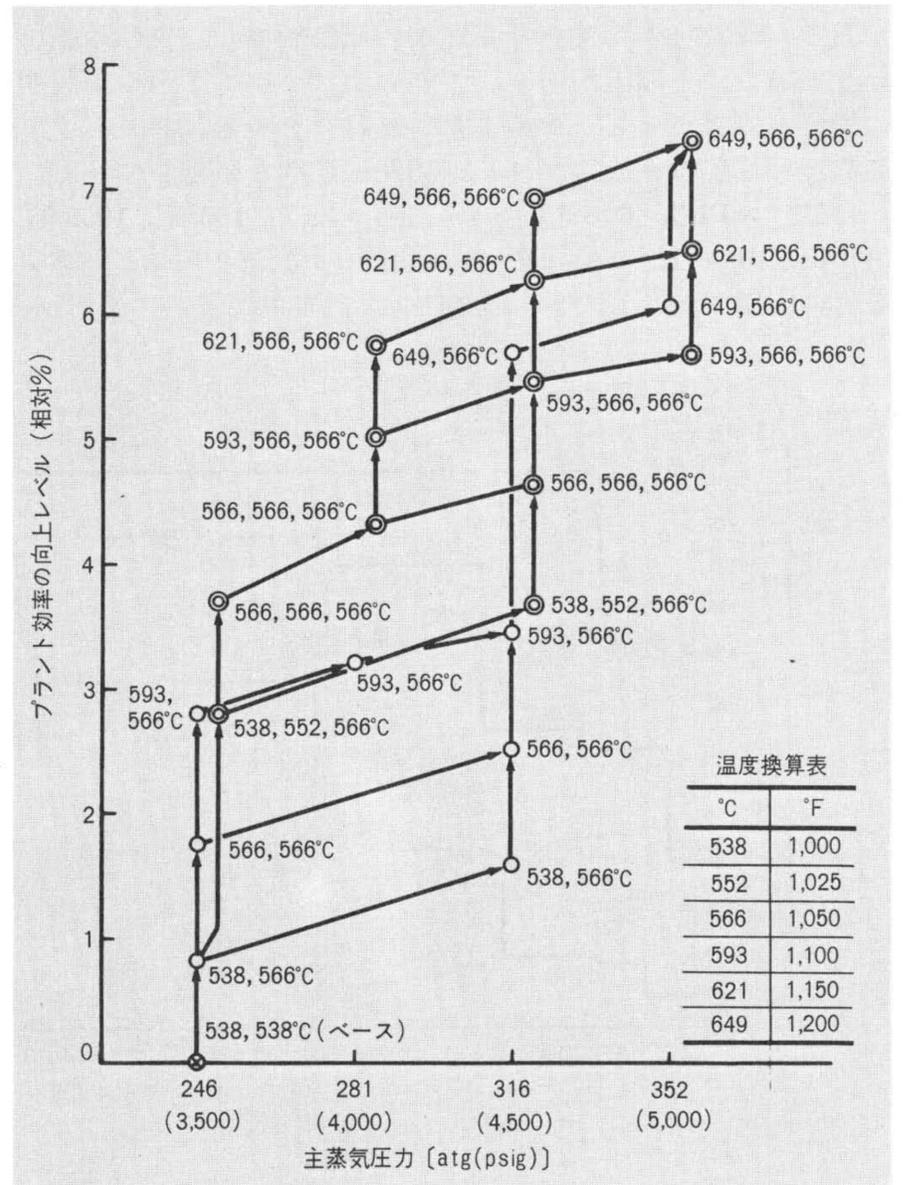


図4 蒸気条件の改善によるプラント効率の向上 蒸気条件の改善によりプラント効率は大幅に向上し、649°C(1,200°F)では7%強の効率向上が期待できる。改善方法としては、高温化、高圧化また再熱数の増加などがある。

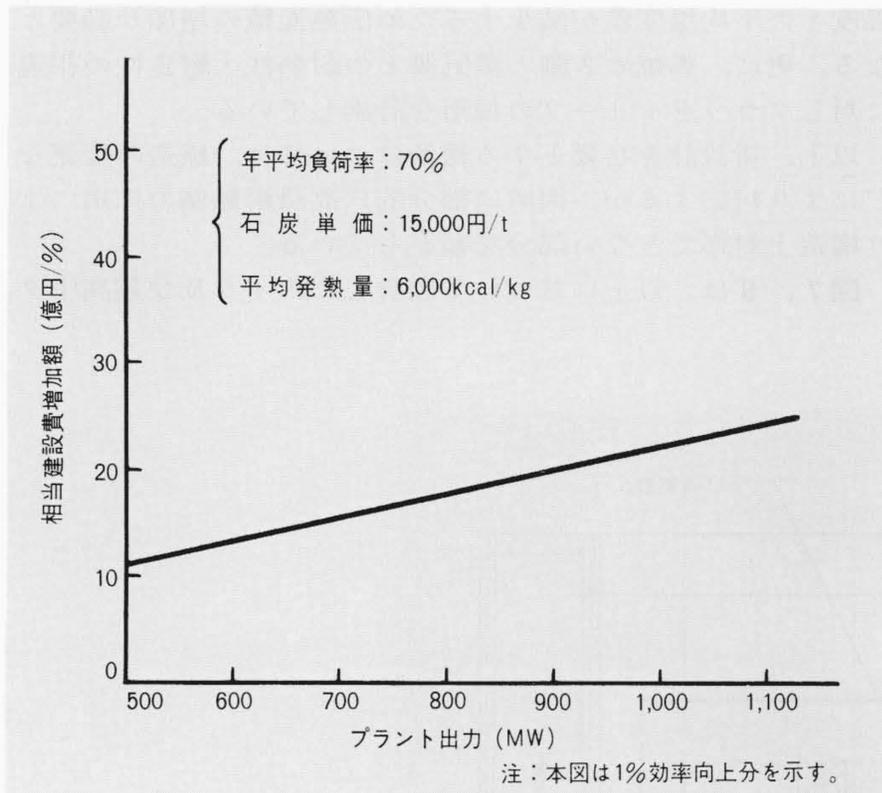


図5 効率向上による相当建設費の増加 プラントの高効率化は建設費の増加を伴うが、1,000MWプラントで1%の効率改善は、約20億円の建設費増加を許容できる。

が適切なものとして、蒸気条件が4,500psig, 1,000°F/1,025°F/1,050°F⁷⁾、あるいは4,500psig, 1,100°F/1,050°F/1,050°F⁸⁾の2種のプラントが提案されている。前者は出力700~800MWでは現行の設計技術の範囲にあり、後者は次期火力として期待できるものと言える。

本稿では、これらの提案と並行し、省エネルギーの観点から効率向上レベルの極大化、コスト上昇要因を軽減するための高級材料の適用範囲、及び新設計部位の極小化、機器の信頼性の確証を容易にできる十分な運転実績のある既存プラント機器の効果的活用、また、開発テンポの促進、プラントの運用安定性などを再度評価し、更に、現在までに実用化されたプラントの最高の蒸気条件が、主蒸気で5,000psig, 1,200°F, 再熱蒸気温度で1,050°Fである点を考慮し、次期蒸気火力発電プラントとして、出力1,000MW, 蒸気条件5,000psig, 1,200°F/1,050°F(350atg, 650°C/566°C)の単段再熱プラントを設定し、その計画を試みた。

3 高効率プラントの設計

図6は、主蒸気350atg, 650°C, 再熱温度566°Cの発電プラント概略構成を示すものである。既存の我が国最新鋭の出力1,000MW, 蒸気条件246atg, 538°C/566°Cの発電プラントに比べ、約5%強の効率改善となる。

本プラントは、前項の経済性の検討結果から設定したもので、高効率化に伴う初期投資増加の最小化をねらいとしている。このため、プラント構成機器に対し運用実績のある諸コンポーネントの有効活用、更に既存プラントの高効率化への改造も可能とすることを、本プラントの設計基本としている。

図6には、新設計を必要とする部分(□の箇所)と実績コンポーネントを適用する部分とを区別してある。前者に対し開発関連機器及び技術的課題をまとめると、表1に示すようになる。同表中、*印を付けた項目は、R&D(Research and Development)の積極的推進が必要となるもので、これらの機器開発ないし技術課題の解決が、高効率超高温・高圧蒸気火力プラント実現のポイントである。

表1 超高温・高圧蒸気発電プラントの開発課題 超高温・高圧蒸気発電プラントを実用化するためには、高温・高圧化に対する対応技術の開発が必要となる。

設備名	開発項目	
	開発機器名	技術課題
ボイラ	過熱器チューブ 過熱器管寄 循環ポンプ 弁, 管群構成	溶融石炭灰腐食* 過熱器材料選定* 過剰空気量の最適化 炉内ガス圧降下の軽減 排ガス温度低下の防止
タービン	超高压タービン* 超高压, 高压及び中压初段翼	高压部の軸シール法* 伸び差の吸収 ケーシング構造の最適化 材料の選定*
補機関係	超高压給水ポンプ* 高压給水加熱器 コントロールシステム	ポンプの軸封法 給水系統の最適構成 蒸気温度の制御

注: *印を付けた項目は、R&D(Research and Development)が必要となる。

以上をもとに、図6のプラントの設計仕様は以下の内容のものである。

まず、既存の実績コンポーネントの活用と、既存プラントの高効率化への改造可能という観点から、高压、中压及び低压タービン各セクションの入口蒸気条件、給水加熱蒸気の抽気条件は、既設1,000MWプラントとほぼ同等に選定した。このため、図6のプラントは、この構成での最高効率とはなっていないが、実績コンポーネントの広範囲活用を図っている。

新設計となる機器は、ボイラの過熱器、主蒸気系統、タービンの超高温・高圧セクション(超高压タービン)、ボイラ給

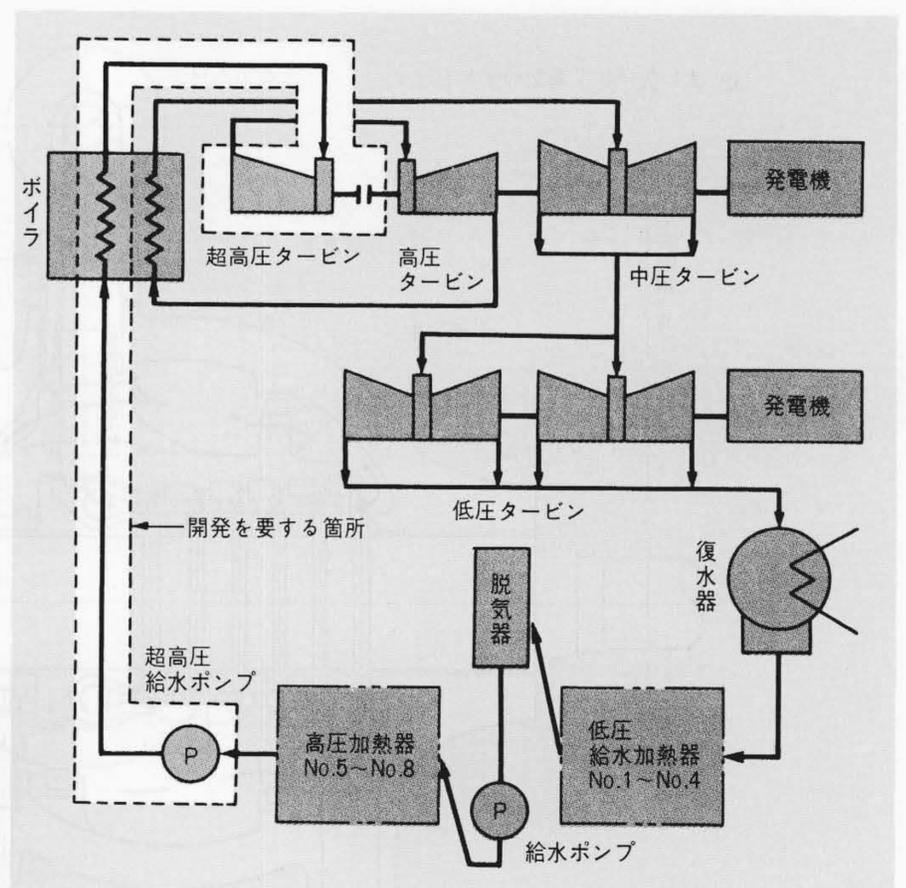


図6 コンポーネント設計による超高温・高圧発電プラントの構成例 コンポーネント設計の積極導入により、超高温・高圧発電プラントの機器開発の極少化を図ることができる。

水系統及び最終給水加熱器出口の超高压給水ポンプなどに限られてくる。これらの機器の共通の問題は、いずれも高温化・高压化に対するもので、殻及び管構造物の応力緩和策、更に内外壁の温度差の軽減策が課題となるが、殻構造の多重化、球殻構造(応力は円管構造の大略 $\frac{1}{2}$)の採用、及び管構造物に対する小径化・多管化により対応している。

ボイラの過熱器チューブについては、燃焼ガス温度と蒸気

温度との平均温度差が減少するため伝熱面積の増加が必要となる。更に、燃焼ガス側と蒸気側との耐熱性・耐食性の相違に対しクラッドチューブの採用を計画している。

以上、新設計を必要とする機器については、構造の変更などにより対応するが、同時に部分的に高級耐熱鋼の採用により構造上対応できない部分を補完している。

図7、8は、以上に基づいて設計したボイラ及び超高压タ

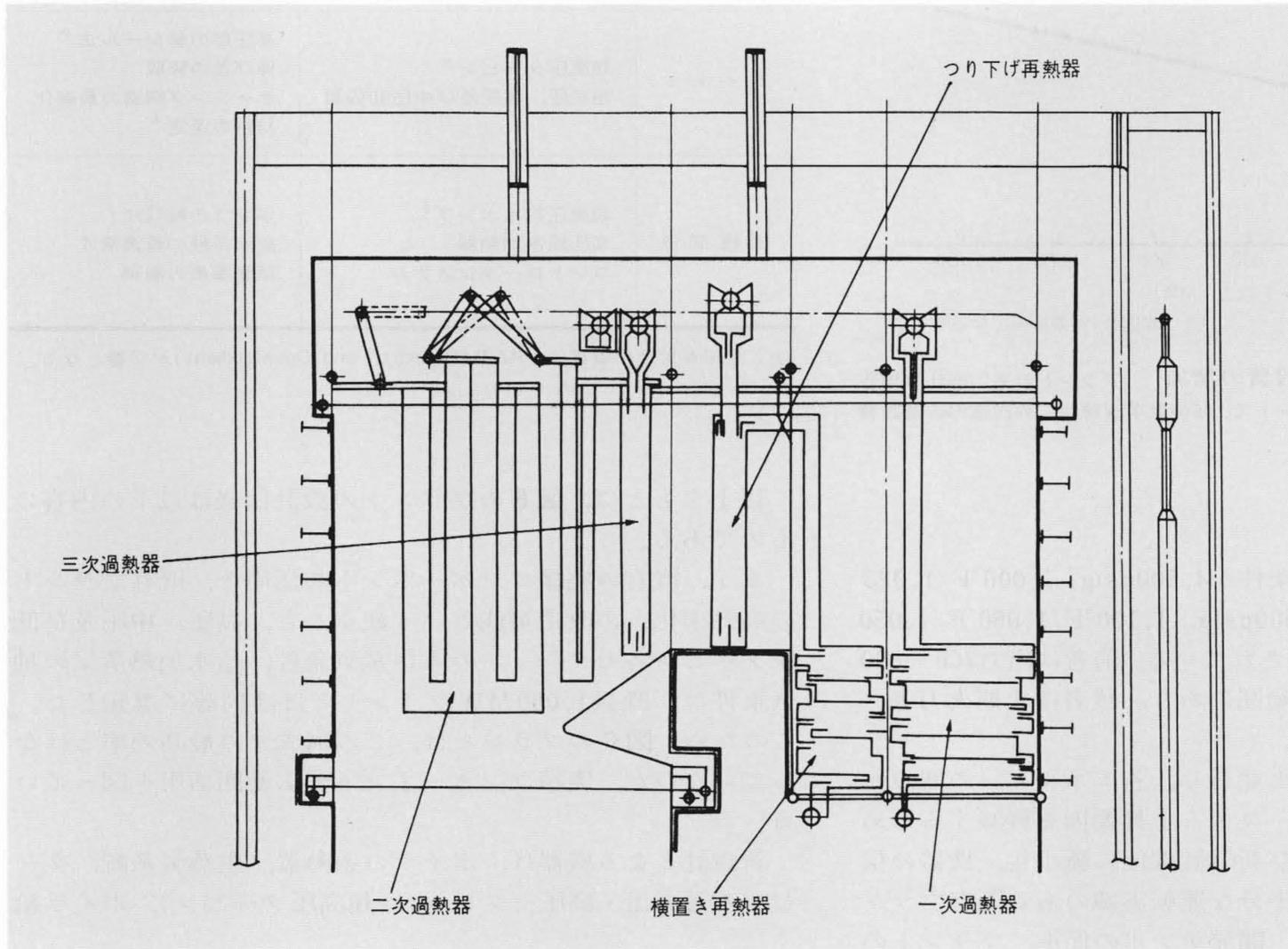


図7 超高温・高压ボイラの構造 高温・高压化により過熱器関係が最も過酷な条件となるが、炉内ガス圧の降下、過剰空気の適性化などのため、炉内構成の最適化が必要である。

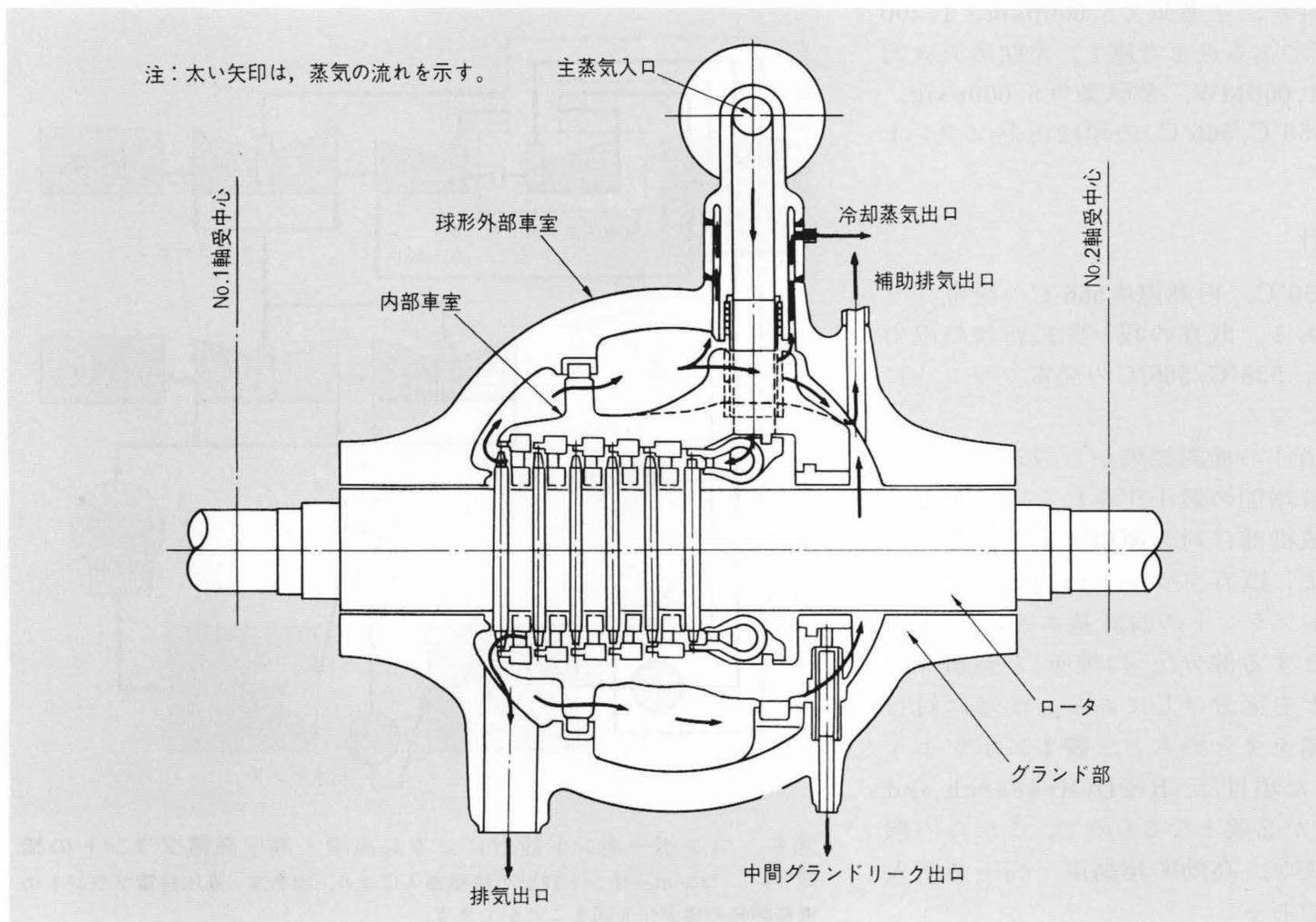


図8 超高压タービンの構造 超高压のため、球殻状のケーシングに特長がある。また、異常応力の発生防止、伸び差の吸収のため、クーリング蒸気の循環が必要である。

ービンの概略設計例で、ボイラは過熱器、再熱器周りを主体に示してある。

4 材料の選定と基本設計技術

ボイラの過熱器、主蒸気管、超高压タービンなどは、在来のプラントに比べ100°C程度高温の蒸気にさらされるため、通常使用するフェライト系の耐熱材料では実用が困難であり、適性材料の選定が重要となる。また、高温化とともに高圧となるため、殻、管構造物に対し応力緩和、伸び差の吸収など構造設計上の工夫が肝要である。

4.1 材料の選定

表2に、当該高温・高圧蒸気火力プラント用材料として代表的候補材料を示した。これらの材料は、現用のCr-Mo系の低合金鋼に対し、Cr, Niを多量に含み、かつMo, Tiなど数種の強化元素を複合添加した高温強度の安定なFe基, Ni基の耐熱超合金である⁹⁾。高Ni高Co系オーステナイト合金は燃焼器用材料に、高Ni高Cr系オーステナイト合金は化学装置関係材料に、析出硬化形のオーステナイト合金は高温ガスタービン用

表2 主要部品のターゲット材料 超高温にさらされる部位には、在来のフェライト系耐熱材料に換え、オーステナイト系の耐熱材料の選定が必要である。

主要部品名		鋼種
ボイラ	過熱器チューブ	Ni基超合金, Fe基超合金
	ボイラ弁	オーステナイト系ステンレス鋼
	主蒸気管	オーステナイト系ステンレス鋼
超高压タービン	ロータシャフト	Fe基超合金
	動翼, 静翼	Fe基超合金
	主弁, 加減弁	オーステナイト系ステンレス鋼
	ノズルボックス	オーステナイト系ステンレス鋼
	内部ケーシング	オーステナイト系ステンレス鋼
	外部ケーシング	オーステナイト系ステンレス鋼, フェライト系耐熱鋼

表3 高温用材料に要求される性質 火力プラントの高温用材料としては、在来材料に比べ高温でより安定な特性を示す材料が必要であり、溶接性、加工性も重要なファクタである。

部品	要求性質	備考
ボイラ	クリープ強さ 熱疲れ強さ 高温安定性 液相石灰に対する耐食性* スケールに対する耐食性* 溶接性 加工性*	*: ボイラチューブ, 過熱器チューブ
超高压タービン	クリープ強さ クリープ破断強さ 熱疲れ強さ 高温安定性 減衰率* 溶接性**	*: 動翼 **: 主弁, 加減弁, ケーシング

材料に、更にオーステナイト系ステンレス鋼は耐熱材料として幅広く実用されているものである。析出硬化形のオーステナイト合金は、15Cr-26Ni系のものがFCC(Fluid Catalytic Cracking)用膨張タービン(最高ガス温度650°C)のロータ及び翼材として2年以上の運転実績がある¹⁰⁾。

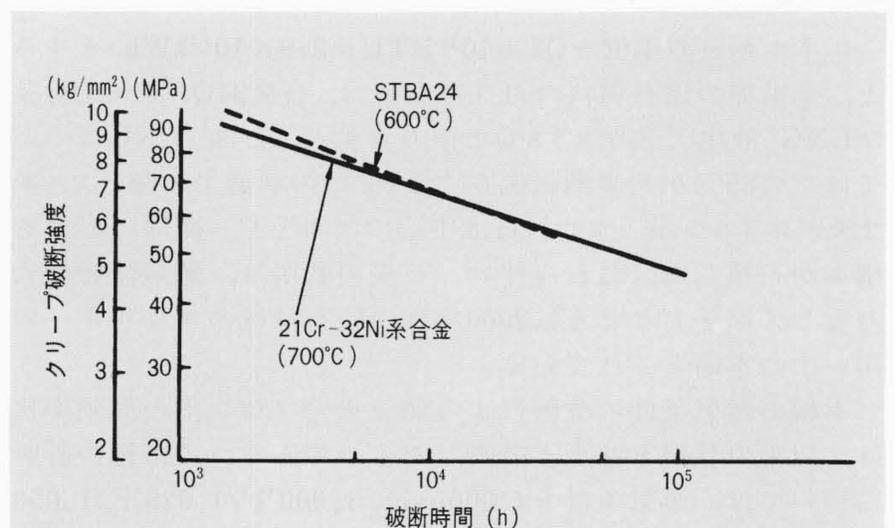
以上の観点から、超高温・高圧蒸気火力プラント用材料として要求される表3に示す性質に対し、これらの材料の適合性は高いと言える。図9にはボイラの過熱器チューブ用材料、及び超高压タービンのロータ用材料について、現用材料との比較例を示した。いずれも100°C温度レベルが上昇したにもかかわらず、現用材と同程度の強度ないしこれに勝る特性をもっている。

しかし、これらの材料の実用化に際しては、実体として的高温強度及び耐食性の評価、特に石炭燃焼の場合では、ボイラチューブ材料の炭種による影響の評価が肝要であり、かつ実構造物に適合できる安定な製鋼技術という問題にも取り組む必要がある。

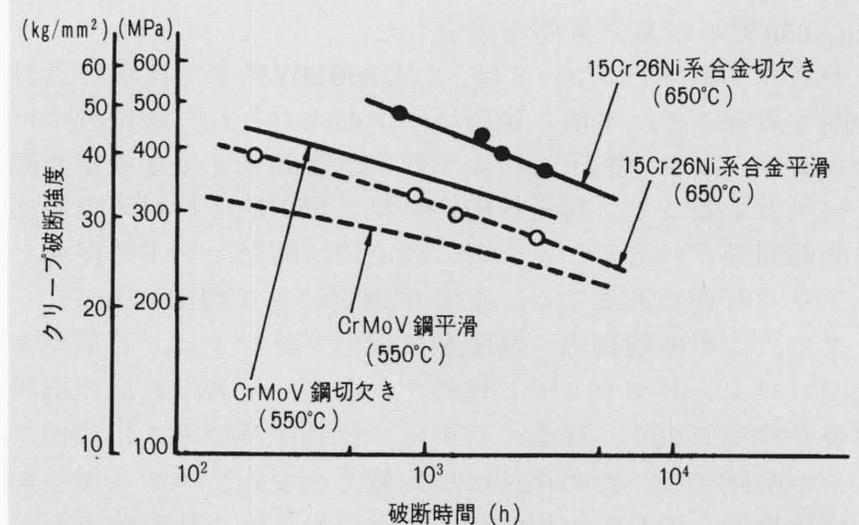
4.2 基本設計技術

適性材料の選定は、当該超高温・高圧蒸気火力プラントの重要課題ではあるが、高級材料の効果的使用という点から、プラントの構成機器の構造を高温・高圧化に適合させることが必要である。

技術課題として、殻構造(タービンケーシング),管構造(ボ



(a) ボイラ過熱器チューブ用材料



(b) タービンロータ用材料

図9 析出硬化形Fe基超合金の強度 ボイラ過熱器チューブ及びタービンロータ材として有力な材料である。100°C高温レベルでもその強度は、在来のフェライト系耐熱鋼に勝る。

表4 構造設計の指針 超高温・高圧化により、機器の設計条件は過酷なものとなるが、構造設計の基本を的確に活用することにより対応できる。

主 要 部 品 名	設 計 指 針	
ボ イ ラ	過熱器チューブ	小径多管, クラッド方式
	ボ イ ラ 弁	多弁化, 球殻化
	主 蒸 気 管	小径多管, ループ付
超 高 圧 タービ ン	ロータシャフト	(クーリング)
	動 翼	スロットル方式, 変圧運転
	軸 シ ー ル	軸長延長, ダブルフロー方式
	主 弁, 加 減 弁	多弁化, 球殻化
	ケーシング	球殻化, 多重化, クーリング
給 水 ポ ン プ	——	多段化, 高速化

イラチューブ、主蒸気管ほか)などの最適設計による作用応力の軽減、管類の伸び差及び超高压タービンのロータとケーシングとの伸び差の吸収法、軸シール法、更に給水ポンプの超高压化などがあり、表4に示すものが対応設計指針である。

これらの対応技術は、既存のプラントに対し実用されているもので、設計技術として完全に新技術となるものはないが、設計条件は一段と厳しくなるため応用に際し綿密な検討が必要である。

5 実用化への展望

エネルギーの単位を $Q(=10^{18}\text{BTU}=2.9\times 10^{14}\text{kWh})$ とすると、全世界の化石燃料の可採埋蔵量は、石炭34Q、石油11Q及びLNG(液化天然ガス)8Qと限りがあり、石油、LNGについてはその85%が共産圏に偏在する³⁾。この状態での第1次、第2次のオイルショックは、石油中心のエネルギー確保の形態を根本から覆した。これに伴い、石炭の利用は、新鋭微粉炭火力として原子力とともに2000年代の脱石油後のエネルギーの担い手の本命とされている。

本稿の蒸気条件の改善による蒸気火力プラントの高効率化は、以上の状況を踏まえ計画したものである。この種の計画については、蒸気条件を4,000psig, 1,000°F/1,025°F/1,050°F(316atg, 538°C/552°C/566°C)とした主蒸気圧力だけを上昇させた二段再熱プラントの計画が1981年計画完了を目標に米国で進められているが、本稿ではこれを更に一歩進め350atg, 650°Cの主蒸気条件を選定した。

前者のプラントについては、出力800MW級までは現行設計範囲であること、本稿の場合は、次期火力としての位置づけになるが、高温・高圧化による効率改善効果をできる限り高レベルとすること、材料技術的に見て650°Cは材料の実用化可能範囲内といえること、更に経済性、開発テンポの促進という点で有利であること、などが選定の主な理由である。

また、この種超高温・高圧蒸気火力プラントは、石炭ガス化コンバインドプラントと比較されるが、前者は石炭の直接燃焼が特長であり、後者の石炭ガス化効率及びガス化設備コストが明確でないため単純には比較できない。エネルギーの多様化策として双方が対峙することになろう。比較例として4,500psig, 1,100°F/1,050°F/1,050°F(316atg, 593°C/566°C/566°C)の蒸気火力プラントの場合、ガス化コンバインドプラントに比べ(ガスタービンの入口ガス温度が1,400°Cの場合)、プラント効率は若干ではあるが劣るとの意見がある。

超高温・高圧蒸気火力プラントは、オイルショックを契機

に一躍脚光を浴びたものであるが、Philo, Eddystone, その他欧米の先行プラントの試みは、この種プラントの再開発に対しその問題点の所在を明らかにしており、更に火力プラントに対する最近の設計技術、材料技術などの進歩により、蒸気火力プラントの蒸気条件を改善し高効率化を図る技術的基盤は出来上がっていると考えている。

しかし、当該プラントの高効率化の実を挙げ、かつ既存のプラント並みの信頼性を維持するためには、適用する個々の技術の適合性を確認することが必要である。

高温実体環境下での材料の評価、重要部材の実体評価、パイロットプラントの建設と評価、そして実用プラントの建設、というステップが実用化への手順である。

開発の促進を図るためには、関係官庁、ユーザー及びプラントメーカーとの協調がポイントである。

なお、日立製作所では、研究所を中心に材料関連技術、機器の構造、またシステム技術に関しR&Dを推進中であり、本稿は、これらの結果を基に関係工場のプラント及び機器設計技術を合わせ取りまとめ、概説したものである。

6 結 言

超高温・高圧蒸気火力プラントは、過去の試みでは評価されなかったが、高効率化による経済的発電所の建設、及び燃料資源の節約という二大視点からクローズアップされた。

幸いこの20年間に火力プラントに対する設計技術、また耐熱材料の開発は一段と進歩しており、蒸気条件の改善による高効率蒸気火力プラントの開発の素地はできている。

しかし、実用化への道は平坦とはいえず、今後の研究開発によりいっそうの努力が必要である。

以上の意味から、本稿が超高温・高圧蒸気発電プラントの建設に対し大方の参考となれば幸いである。

参考文献

- 湯川, 外: タービン技術の歩み, 火力原子力発電, Vol.31, No.12 (1980-12)
- J. H. Harlow: Observations Regarding Eddystone No. 1 - First Year of Operation of 5,000 psig and 1,150°F, Combustion, Jan. 1962, 他
- S. N. Fiala: First Commercial Supercritical-Pressure Steam-Electric Generating Unit for Philo Plant, Transactions of the ASME, Feb. 1957
- 藤村: 世界のエネルギーと原子力開発, サンケイ出版 (1980年6月)
- S. B. Bennett, D. V. Giovanni et al.: Heat Rate Improvements in Pulverized Coal Power Plants, Power Engineering, May. 1980
- S. B. Bennett, R. L. Bannister and D. V. Giovanni: Design & Performance of Pulverized Coal Power Plants, Power Engineering, Nov. 1980
- A. F. Armor, R. H. Ladino et al.: The Next Generation of Pulverized Coal Power Plants, American Power Conference, Apr. 1981
- S. B. Bennett, R. L. Bannister et al.: The Design and Performance of the Next Generation Low Heat Rate Pulverized Coal Power Plants, American Power Conference, Apr. 1981
- 長谷川: ステンレス鋼便覧, 日刊工業新聞社 (昭和54年1月)
- 湯川, 外: 流動接触分解装置における動力回収設備の開発, 日立評論, 62, 123~128 (昭55-2)