

# 超高圧・高温火力発電プラントについて

火力計画部次長 佐野 雅 俊

## 1 ま え が き

昭和48年の第1次石油ショックと、イラン革命に端を発した第2次石油ショックにより、石油価格の急激かつ大幅な上昇と供給の不安定が世界のエネルギー情勢に多大な影響を与えた。このためエネルギー資源が乏しくその大部分を輸入に頼っている我国においては、脱石油、エネルギー源の多様化とともに省エネルギーが重要な課題となっており、特に一次エネルギーの大量消費者である電力会社においては、火力発電所の熱効率向上が急務である。

このため、最近の新設火力プラントでは、クリーン燃料（LNGやLPG）を使用することにより信頼度の向上が期待できるガスタービンと蒸気タービンを組合せることによって高効率化が図れるコンバインドサイクル機が、各電力で採用されつつある。

一方火力発電技術では、先進国である米国において、昭和30年代前半に 5,000 psig, 1,200° F あるいは 4,500 psig, 1,150° F 機の超高圧、高温の発電プラントが建設されたがいずれも実験的な性格を持ったものであり、その後建設された大容量プラントの蒸気条件は、ほとんどが 3,500 psi や 2,400 psig, 1,000° F / 1,050° F である。このように蒸気条件の改善が本格的に進まなかった最大の理由は、燃料費が安価であったため、蒸気条件の向上による建設費の増大（材料の高級化等による建設費の上昇）が、効率の向上による燃料費の節減を上回ったためである。

しかし、米国においても近年の燃料費の高騰により、高効率化のために蒸気条件を見直す機運となり、EPRI (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE) が中心となり、エンジニアリング会社とメーカーグループが検討を行い、1981年4月に APC (AMERICAN POWER CONFERENCE) でその概要が発表された。

それによると、STONE & WEBSTER, B & W, および G. E グループは、現状技術で 4,500

psig, 1,000°, 1,025°, 1,050° F 機が従来機と同等の信頼度で実現できるとしている。

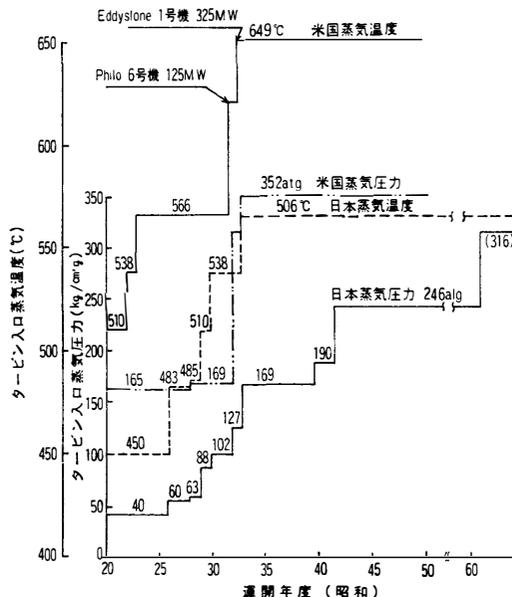
一方 GILBERT ASSOCIATES, C. E および W. H グループは、5～6年の開発期間により 4,500 psig, 1,100°, 1,050°, 1,050° F 機が実現できるとしている。

以上のような背景のもとに、国内メーカーも1980年頃から蒸気条件の向上に対し積極的に検討を進めてきており、現時点では以下に示すとおり、現有技術により 4,500 psig, 1,050°, 1,050°, 1,050° F の高効率機が従来機と同等の信頼度で製作できるとしている。

以下に現在火力計画部で調査検討中の LNG 焼き 700MW 超高圧、高温プラントの技術上の特徴を紹介することとしたい。

## 2 蒸気条件と熱効率の変遷

火力発電設備の熱効率は蒸気条件によって大きく支配される。



第1図 火力発電設備蒸気条件の推移

我国の火力発電設備は、戦後米国の技術を導入することにより蒸気条件を向上させ、大容量化と効率の向上を図ってきた。

第1図に示すとおり、昭和20年代の後半から30年代の前半にかけて主蒸気圧力を  $40\text{kg/cm}^2\text{g}$  ( $600\text{psig}$ ) から  $169\text{kg/cm}^2\text{g}$  ( $2,400\text{psig}$ ) へ、蒸気温度は  $450^\circ\text{C}$  ( $850^\circ\text{F}$ ) から  $566^\circ\text{C}$  ( $1,050^\circ\text{F}$ ) へ大幅に上昇させ、再熱サイクルも採用された。これにより火力発電所の熱効率は20%台から一挙に35%以上に向上した。さらに昭和40年代の初めには、知多火力3号機 ( $500\text{MW}$ ) 等の超臨界圧機 (主蒸気圧力  $246\text{kg/cm}^2\text{g}$  ( $3,500\text{psig}$ )) の技術が導入された。また他電力では、超臨界圧機の採用に伴い効率を最大限アップすることを目的として2段再熱プラント機 (蒸気温度  $538^\circ$ ,  $552^\circ$ ,  $566^\circ\text{C}$ ) が採用された例もある。

当社の超臨界圧プラントでは、知多火力3号機以来蒸気温度を  $538^\circ/538^\circ\text{C}$  ( $1,000^\circ/1,000^\circ\text{F}$ ) としていたが、高効率化のため渥美火力3、4号機で初めて再熱蒸気温度を  $566^\circ\text{C}$  ( $1,050^\circ\text{F}$ ) とし、タービン熱消費率を  $20\text{kcal/kWh}$  向上させた。また系統負荷の尖鋭化に伴い新鋭火力機とも言えども中間負荷運用を余儀なくされてきているため、部分負荷時の熱効率向上と熱応力の軽減を目的として、渥美火力3・4号機以降変圧運転プラントを採用している。

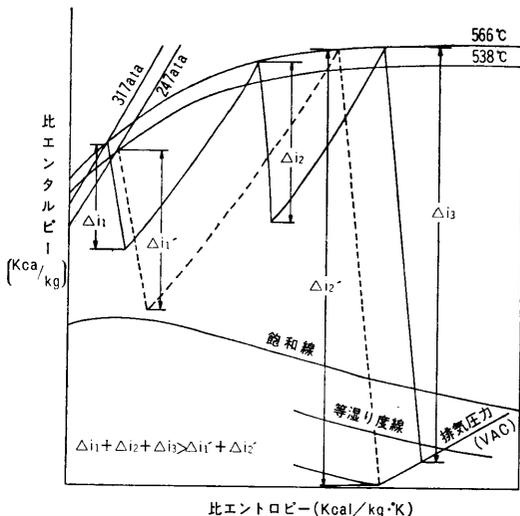
さらに、最近タービンの最適翼形の開発や、マルチフィンの採用による漏洩損失の減少等によりタービン熱消費率を  $20\sim 30\text{kcal/kWh}$  (熱効率にして  $1\sim 1.5\%$ ) 程度向上させており、当社では現在建設中の知多第二火力でこれらを採用し、熱効率の向上を回っている。

しかしながら、このような部分的改良による熱効率の向上対策は限界にきており、ランキンサイクルを使用する従来型プラントでは蒸気条件 (圧力・温度) を上昇させないことには、効率向上は不可能になってきている。

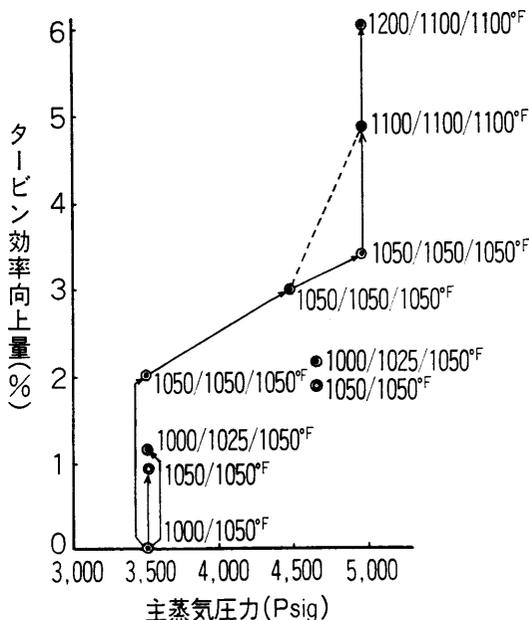
### 3 蒸気条件の向上と熱効率の改善

火力プラントにおける最大の熱損失は、復水器での排熱とボイラの排ガス損失であるが、これらの損失は、海水温度や大気温度等で制約されるもので、水-蒸気の熱サイクルではこれらの大幅な減少は望めない。

このため、熱効率の向上を図るには第2図に示すとおり、タービン入口の蒸気条件 (圧力・温度) の向上や再熱段数の増加により、タービン内の有効仕事量を増加させ、相対的に復水器での排熱損失を減少させることが必要となる。蒸気条件の向上や2段再熱の採用によるタービン効率の向上量は第3図の如く試算されている。



第2図 蒸気条件の向上による熱効率の改善



第3図 蒸気条件とタービン効率

#### 4 700MW超高压・高温機

前述のとおり、米国では現状技術により 4,500 psig, 1,000°, 1,025°, 1,050°F (316 kg/cm<sup>2</sup> ρ, 538°, 552°, 566°C) 機が実現できているが、我国でもメーカー各社で検討が進められており、現在までの調査検討結果で、以下に示すとおり若干の技術開発を要するものの、現有技術の延長で 4,500 psig, 1,050°, 1,050°, 1,050°F (316 kg/cm<sup>2</sup> ρ, 566°, 566°, 566°C) 700 MW 高効率機が実現できる見通しを得た。

##### (1) ボイラ

ボイラを超高压・高温化するためには、以下に示す技術的対応が必要となる。

##### ア 高温・高压材料

超高压・高温ボイラの概略管系線図を第4図に示すが、この中で実績圧力を超える範囲としては、給水管→火焔→過熱器→主蒸気管であり、一方実績温度を超える範囲としては過熱器→主蒸気管となるが、これから範囲の機器は次の方法で対処できる。

(ブ) 実績材料の厚肉化で対応する。

(例) 節炭器管, 火焔水冷壁管, 過熱器管等

(イ) 高温強度の高いオーステナイト鋼を多用して対応する。

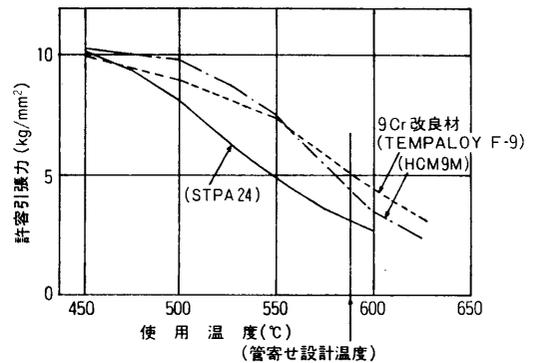
(例) 過熱器管

(ウ) 実績材料を使用するが、個数を増すことにより内径を小さくし、実績並みの肉厚として対応する。

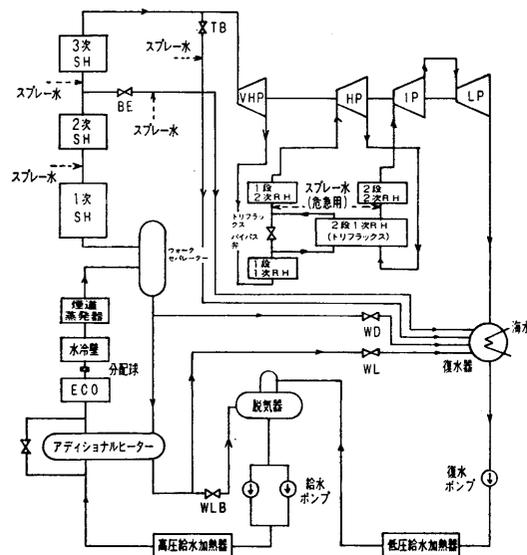
(例) ウォーターセパレーター

(エ) 高温強度の優れた開発材(9Cr改良材)で対応する。

(例) 過熱器出口管寄せ, 主蒸気管, 弁類等



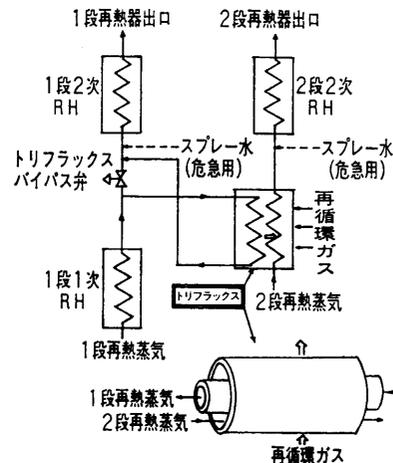
第5図 9Cr改良材の許容引張応力



第4図 ボイラの概略管系線図の例

##### イ 2段再熱蒸気温度制御

従来のスプレー水を用いる制御方式については、温度制御を計画どおりにできず、必ずしも計画熱効率が達成されない場合が多かったが、今回は第6図に示すトリフラックス制御方式で対応する。

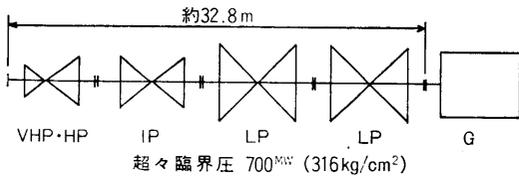
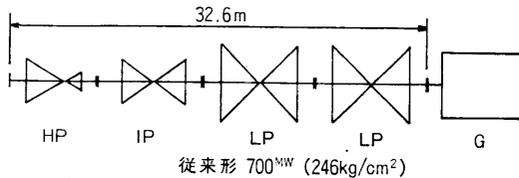


第6図 トリフラックス方式

(2) タービン

主蒸気圧力の高圧化により蒸気の比容積が減少するので、超高压 (VHP) タービン初段翼を単流化することができ、これにより VHP と HP (高压) タービンを一体化することが可能となった。このため車室数ならびに全長とも従来の 700 MW機と同等とすることができるので、伸び差や振動は従来機並みの特性が確保できると考えられる。また VHP 初段翼以外の翼は運転実績がある範囲のもので製作できる。

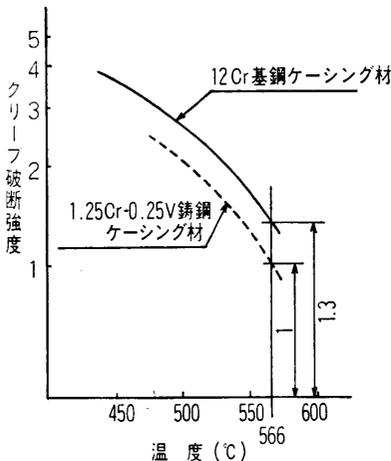
タービンの超高压・高温化には以下の技術で対応する。



第7図 タービンの全体構成

ア 高温耐圧部

高温・高压で使用する VHP・HP タービンのケーシングや MSV, CV の本体ならびにノズルボックスは、厚肉化による熱応力の増大を防止するため、従来の 1¼Cr-1Mo-¼V 鋳鋼に代えて高温強度の高い 12Cr 鋳鋼を使用する。12



第8図 ケーシング材のクリープ強度

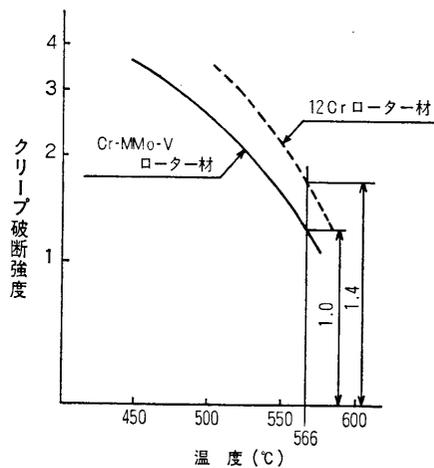
Cr 鋳鋼は第8図に示すとおり 566°C においては従来の 1¼Cr 鋳鋼に比べて 1.3 倍の強度を有しているため、肉厚の増大を抑え熱応力もローター以下とすることができる。

イ VHP・HP ローター

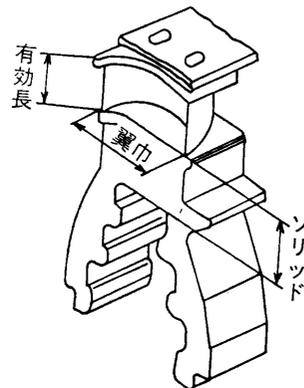
初段翼を単流化するため翼が大型化するうえ主蒸気温度が上昇するので翼植込部の応力が厳しくなる。このため、VHP・HP ローターは、従来最も多く用いられてきた Cr-Mo-V 鋼に代えて 12Cr 鋼を使用する。

この 12Cr 鋼は第9図に示すとおり、566°C において、従来の Cr-Mo-V 鋼に比べて 1.4 倍程度の強度を有しており、クリープによる経年的曲り防止にも有効である。

しかし、12Cr ローターは熱伝導度が低く軸受部のゴーリング現象が発生し易いので、ジャーナ



第9図 ローター材のクリープ強度



第10図 ダブルテノン鞍形翼

ル部とスラスト軸受カラーはCr—Mo—V鋼のスリーブを焼バメする構造となる。

ウ 超高圧初段翼

VHP初段翼は、初段翼として実績が多く信頼度の高いダブルテノン、鞍形翼(第10図)とし、サイズは、600MW機で実績のあるものを若干短くして使用する。

翼を短くすることと2アドミッションを採用することにより、曲げ応力と遠心応力が低下するので、蒸気圧力が高くなっても翼の応力は許容値以内にできる。

5 超高圧・高温プラントの経済性

蒸気条件の向上により熱効率が上昇し燃料費が節減できるが、一方設備費は高級材料の使用や厚肉化により増大する。

このため、現有技術あるいは若干の技術開発により従来機と同等の信頼度が確保できると考えられる7ケース(第1表参照)について経済性の検討を行った。

第1表 超高圧・高温プラントの経済性検討機種

ケース	蒸気条件	タービン形式	発電端効率
①	246kg/cm <sup>2</sup> g 538°/566°C	T. C	39.7%
②	246 538°/566°C	C. C	40.5%
③	246 538°/566°/566°C	T. C	40.5%
④	316 538°/566°/566°C	T. C	41.1%
⑤	316 538°/566°/566°C	C. C	41.7%
⑥	316 566°/566°/566°C	T. C	41.4%
⑦	316 566°/566°/566°C	C. C	42.0%

(注) T. C : Tandem Compound 1軸型  
C. C : Cross Compound 2軸型

この結果、現在のLNG価格ではケース③がやや有利であるが、LNG価格が上昇した場合は、ケース⑥316kg/cm<sup>2</sup>g, 566°/566°/566°C 1軸機が最も有利となり、ケース⑦に比べて設備費もかなり節減できる。

以上のような状況から、次期LNG焚き700MW火力プラントとして、316kg/cm<sup>2</sup>g, 566°/566°

/566°C (4,500psig, 1,050°/1,050°/1,050°F) 1軸機を採用する計画である。

6 今後の動向

現在我国では省エネルギーならびにエネルギー多様化の観点から高効率ガスタービンを初めとする発電設備の高効率化や、石炭の液化・ガス化等が国を挙げて研究されている。

特に高効率ガスタービンは入口ガス温度1,500°Cを目標に高効率化を図り、このガスタービンを使用したコンバインドサイクル機により総合熱効率45%以上を狙って開発が進められている。しかし、ガスタービンの高温化は信頼性と表裏一体の関係にあり、さらに燃料がクリーンであることも重要な要素となっている。また石炭をガス化して使用する場合は、ガス化のためのエネルギー消費も大きいと総合熱効率はかなり低下することが予想される。さらにこれらの設備も膨大であるので、石炭を使用する場合のトータルコストは在来形の火力機とどちらが有利になるか現時点では明確でない。

一方在来形の火力機は、現有技術では信頼性の面から316kg/cm<sup>2</sup>g, 566°/566°/566°Cが上限と考えられるが、高効率化のためにさらに蒸気条件を向上させることが望まれる。

米国では前述のとおり、APCにおいてGILBERT ASSOCIATESグループが発表した4,500psig, 1,100°/1,050°/1,050°F (316kg/cm<sup>2</sup>g, 594°/566°/566°C)を当面の目標として開発が進められると考えられるが、エネルギーの高価な我国においては、より高効率なプラントを開発すべきであり。

国内では当社の700MW機を先導役にして各電力で検討が始められている。

なかでも電源開発(株)が国の援助のもとに石炭火力の蒸気条件として352kg/cm<sup>2</sup>g, 649°/594°/594°C (5,000psig, 1,200°/1,100°/1,100°F)を最終目標としてメーカーと共同研究が開始されており、これの早期達成が期待される。