

ガスタービンの新技術

Design Improvements for Gas Turbines

脱石油は火力発電の重要課題の一つであり、このためLNG及び石炭が当面の主要燃料となっている。ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドプラントにLNGを使用すると、熱効率も良く、DSS運用にも適するなど利点がある。このコンバインドプラントの主機となる大容量ガスタービンの開発には、相似則を適用して信頼性の確保が図られ、慎重に新しい技術を採用して、タービン入口温度を上昇させ性能の向上が行なわれてきた。この結果、日本国有鉄道川崎発電所のコンバインドプラントでの3年半の運転により所期の性能と信頼性が確認された。最近MS7001E形の設計改善が行なわれていっそう信頼性の向上が図られており、画期的な新技術の研究も進んでいる。

樗木康夫* Yasuo Ôteki

徳永賢治* Kenji Tokunaga

西嶋庸正* Tsunemasa Nishijima

1 緒言

二度にわたるオイルショックで省エネルギーが国家的見地から要請されており、電力の分野でも脱石油と将来にわたるエネルギーの安定確保を図るため、原子力を中心とした電源開発が推進されるとともに、LNG(液化天然ガス)、石炭などのエネルギー資源の多様化が積極的に推進されている。

オイルショック当時、総発電量の60%を占めていた石油火力は、昭和68年度には20%以下になり、原子力、石炭、LNGが設備容量で昭和58年に比較して2倍程度に増加するものと予想されている¹⁾。

我が国のLNGは、原産地での製造基地、専用タンカーによる大量輸送を含めて、国際的な長期契約に基づくコンビナートとして位置付けられており、現実には石油消費の節減に非常に有効な手段となっている。LNGはバナジウム、ナトリウムなどの腐食性成分を含まず、重油に比較し高温腐食の面でガスタービンの燃料として理想的である。省エネルギー、高効率指向の時代の要請に対応して、現在建設中の設備を含めLNGを燃料とする発電所は、その大部分がガスタービンを主力としたコンバインドプラントになるものと予想される。

2 大容量ガスタービン

日立製作所では、昭和39年から米国のGE(ゼネラルエレクトリック)社とヘビーデューティ形ガスタービンの共同製作を行っており、生産台数は300台以上に達する。この間に日立-GE形ガスタービンは、着実に高出力化、高効率化が図られてきた。高出力化は実績のある機種をベースに慎重にスケールアップが図られ、また高効率化はタービン入口温度を上昇させる方向で開発が進められ、耐熱合金の進歩、タービン翼の冷却方法の改善などにより実用化されてきた。

2.1 相似設計

新しい機種のガスタービンを開発する場合、既存の信頼性の確立した機種をベースとして、幾何学的相似則を適用することを基本として開発が進められてきた。これは幾何学的寸法を回転数に反比例して増減することにより、空気力学的、機械的に相似な圧縮機及びタービンを設計できるという原理に基づく。

図1に、圧縮機の空気流量が年代とともに変遷した状況を

示す。MS5001(5,100rpm)をベースにスケールアップして大容量ガスタービンの60Hz機であるMS7001シリーズ(3,600rpm)が開発され、MS7001Bをベースとして50Hz機のMS9001シリーズ(3,000rpm)が開発された。この相似設計によれば、回転数に反比例して寸法が決まり、空気流量は寸法の2乗に比例する。出力は空気流量に比例するからMS9001BはMS7001Bの1.44倍の出力を発生することになる。また流速や周速は同じであるから、効率や圧力比も同じである。このようにして信頼性・性能とも同一で大容量化されたMS9001シリーズのガスタービンが開発された。図2にMS7001E形ガスタービンの断面図を示す。

2.2 性能向上

ガスタービンの性能の向上は、主としてタービン入口温度を上昇させることで達成されてきた。この状況を図3に示す。昭和35年に850°C程度であったタービン入口温度は、約20年の間に約1,150°Cへと300°Cも上昇した。これに伴いガスタービンの熱効率も20%から30%へと向上している。このタービン入口温度の上昇は、耐熱材料の発展、冷却技術の進歩などによって達成されてきたが、主な技術開発の項目を次に述べる。

(1) 耐熱材料

(a) 高温強度の向上

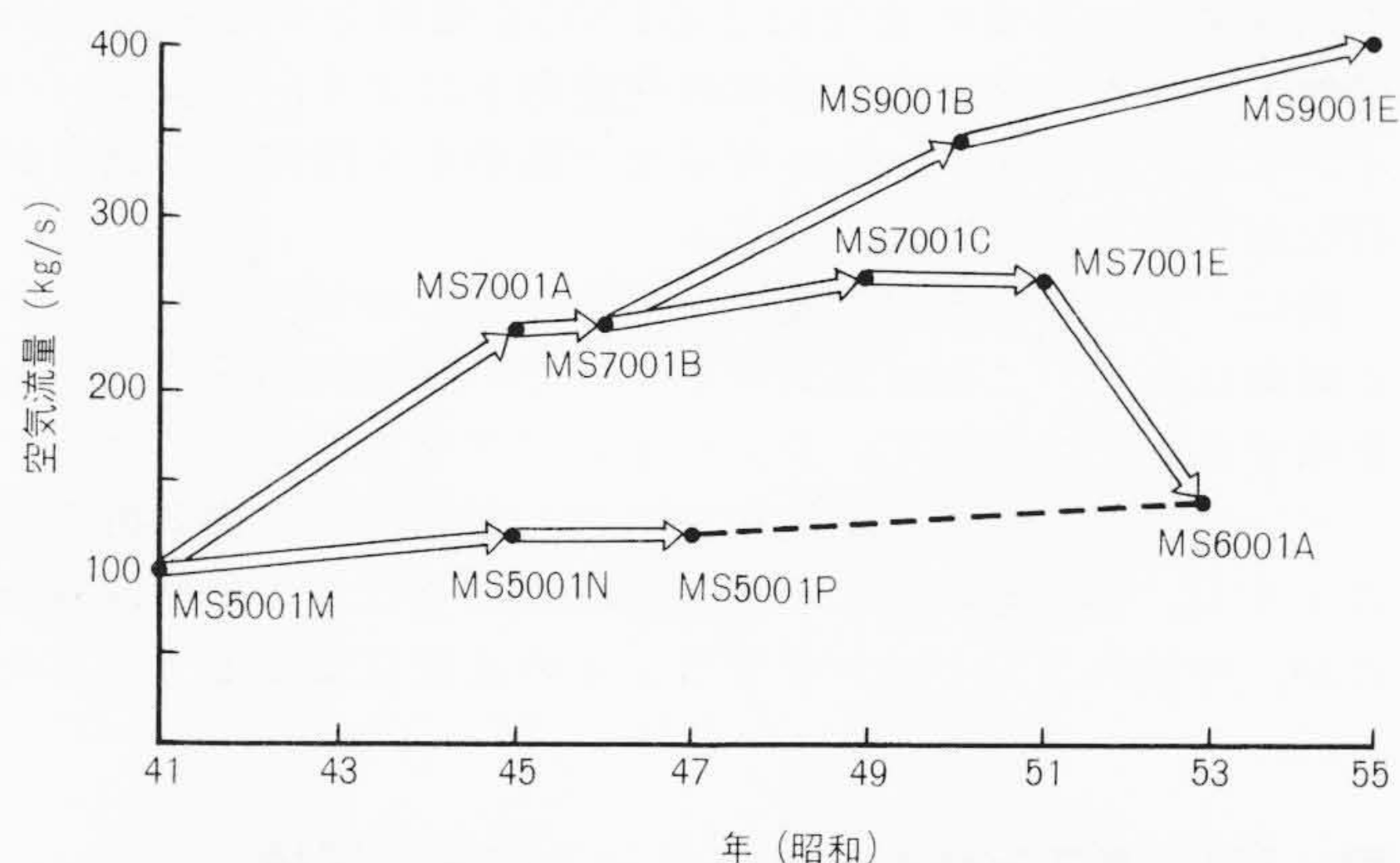


図1 圧縮機流量の変遷 大容量ガスタービンは、信頼性を重点にMS5001Mからスケールアップにより開発されてきた。

* 日立製作所日立工場

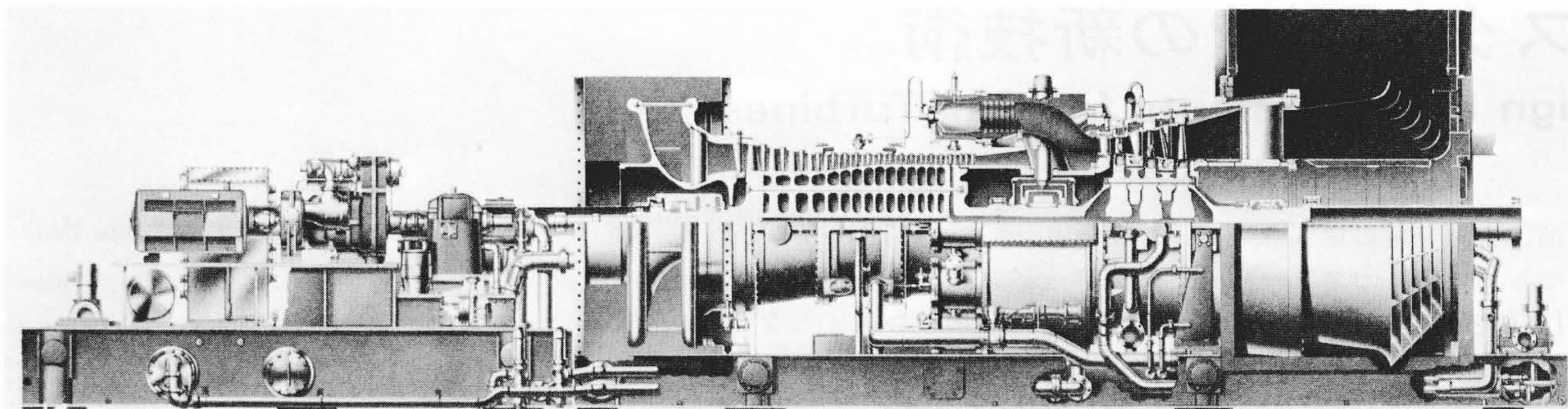


図2 MS7001Eガスタービン断面図 最新鋭の機種で出力80MW、タービン入口温度1,104℃(ベース)である。最近信頼性向上のため設計改善が行なわれた。

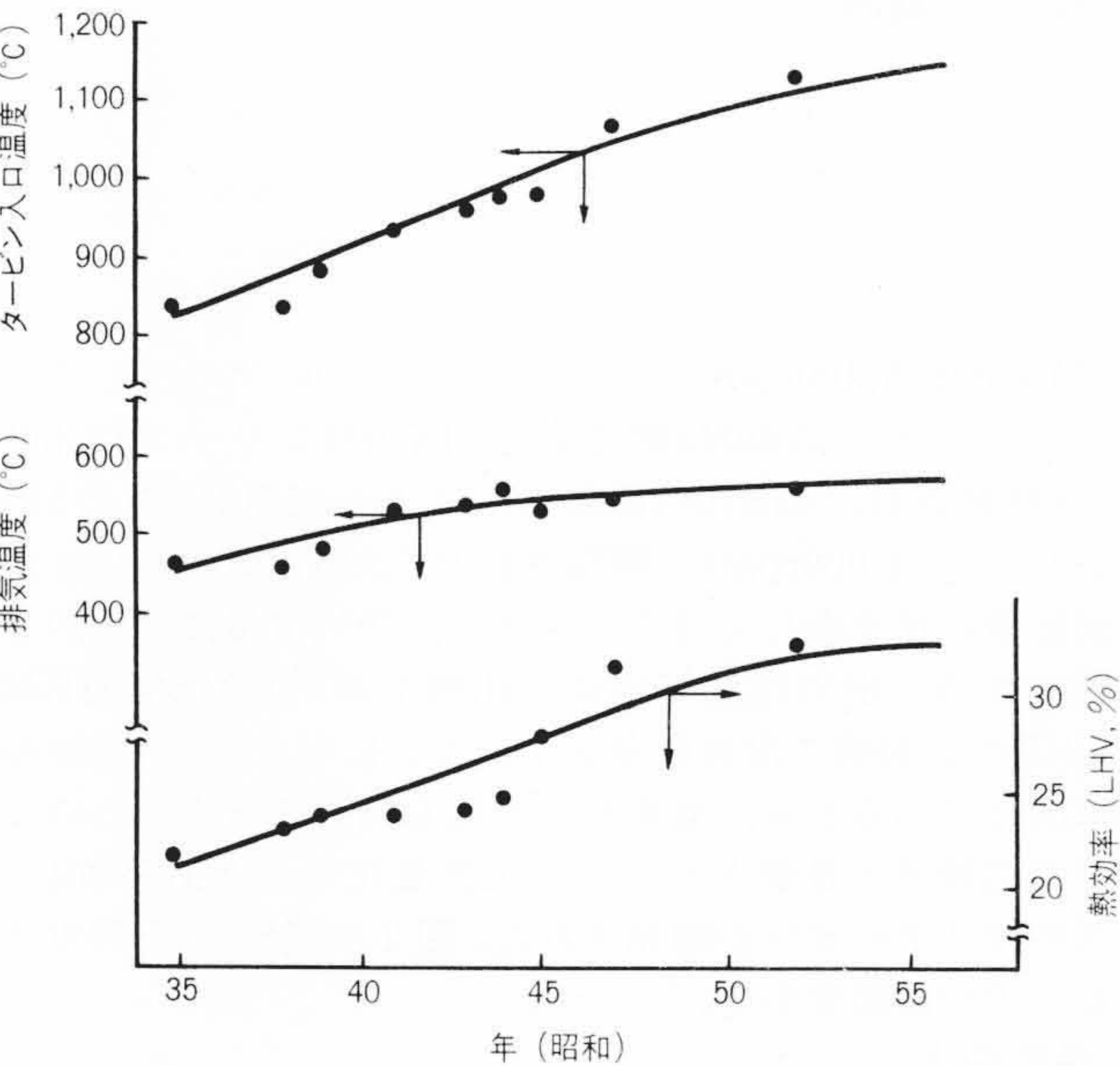


図3 ガスタービンの性能向上(ピーク) 過去20年間にタービン入口温度は300℃上昇し、熱効率は20%から30%へと向上した。

- (b) 精密鋳造法
- (c) 高温での耐食性の改善
- (2) 耐食コーティングの開発
- (3) 静翼及び動翼の空気冷却

2.3 コンバインドプラントへの適用

我が国の電力事業で使用されてきたガスタービンは、非常用及びピーク負荷用が中心であった。しかし、オイルショック以後の燃料事情の変化によるLNGを燃料とする発電所の増加、及びガスタービン自体の性能向上により、今後コンバインドプラントが省エネルギー及び高効率を指向して建設が行なわれるものと期待される。

特に、タービン入口温度の上昇とともに排気温度も上昇する傾向にあり、これは蒸気サイクルでの熱回収効率の向上を意味する²⁾。したがって、コンバインドプラントとしてガスタービンの排気をボイラ燃焼用空気として利用する排気再燃方式よりも、排熱回収ボイラで熱回収だけを行なう排熱回収方式が、今後のコンバインドプラントの主流になると考えられる。

3 141MWコンバインドプラントの運転実績

排熱回収方式の我が国での最初のコンバインドプラントが日本国有鉄道川崎発電所で運転を開始したのは昭和56年であった。このプラントは、既設の60MW火力設備を撤去しその跡地に新設したいわゆるリパワリングであり、蒸気タービン

建屋、ボイラ建屋、蒸気タービン架台、蒸気タービン発電機及び冷却水取排水路を再利用している。新設されたガスタービンはMS9001B形で、排熱回収ボイラは自然循環形を採用した。プラントの主な仕様を表1に示し、主な特徴を以下に述べる。

- (1) DSS (Daily Start/Stop：毎日起動・停止)運用に適し、起動時間が短い(ホットスタートで全負荷まで60分以内)。
- (2) 熱効率が低い。
- (3) 環境対策が十分考慮されている。
 - (a) NO_x(窒素酸化物)低減のため、ガスタービンへの水噴射と排熱回収ボイラ内に脱硝装置を設置。
 - (b) SO_x(硫黄酸化物)対策のため、燃料として灯油を使用。
 - (c) 騒音対策として消音装置、防音建屋を設置。

3.1 運転状況

本プラントの試運転の結果については既に詳細に発表されているので³⁾、ここでは営業運転開始後の運転状況について述べる⁴⁾。本プラントは昭和56年4月に運転を開始し、昭和59年9月まで既に3年以上を経過し、この間発電日数1,074日、運転時間1万5,728時間を記録している。表2に運転実績を示す。

表1 日本国有鉄道コンバインドプラント仕様 ベース負荷、大気温度15℃で総出力118.9MW HHV(熱効率)39.06%である。

ガスタービン定格		ベ	ー	ス
大 気 温 度		15℃		
コンバインドプラント				
形	式	排熱回収形		
発 電 端 出 力		118.9MW		
発 電 端 熱 効 率		39.06%		
ガスタービン				
形	式	MS9001B		
出 力		81.5MW		
燃 料		灯 油		
排 ガ ス 流 量		1,249t/h		
排熱回収ボイラ				
形	式	自然循環		
主 蒸 気 流 量		141.0t/h		
主 蒸 気 温 度		455℃		
主 蒸 気 圧 力		ゲージ圧56kg/cm ²		
最 終 給 水 温 度		111.0℃		
ボ イ ラ 入 口 ガ ス 温 度		518℃		
ボ イ ラ 出 口 ガ ス 温 度		219℃		
蒸気タービン				
形	式	復水式		
出 力		37.4MW		
復 水 器 真 空		722.0mmHg		

表2 運転実績 昭和56年4月から59年9月までの3年半の実績平均の送電端熱効率は37.6%と大容量火力並みの実績を示している。

項 目	記 号	実 績 値
発 電 日 数	OD	1,074日
発 電 時 間	OH	15,728時間
発 電 電 力 量	GMWH	1,648,306MWh
送 電 電 力 量	NMWH	1,618,219MWh
発電端熱効率 (HHV)	—	38.3%
送電端熱効率 (HHV)	—	37.6%
1 日 平 均 運 転 時 間	ADOH	14.6時間
1 日 平 均 利 用 率	ADCF	53.7%
運 転 時 平 均 負 荷 率	ALFO	88.1%

注：ADOH = $\frac{OH}{OD}$ ALFO = $\frac{GMWH}{OH \times 118.9MW} \times 100\%$
ADCF = $\frac{GMWH}{OD \times 24h \times 118.9MW} \times 100\%$
118.9MW：大気温度15℃、ベース定格時の出力

負荷運用は季節により異なるが、通常毎朝6時ごろ起動し朝夕の通勤時のピーク負荷に対処し、夜21時ごろに解列するというパターンを繰り返している。このような運用状況であるため、1日当たりの平均運転時間は約15時間となっている。3年半の運転実績をベースとした平均の発電端熱効率は38.3%で、送電端は37.6%を示しており、この間の効率低下はほとんど認められない。この熱効率は毎日の起動及び停止中の損失を含むものであり、連続運転の超臨界圧の大容量火力に匹敵するものである。

本プラントに使用されたガスタービンはMS9001Bであり、更に高性能のガスタービンであるMS9001Eが開発されていること、また本プラントでは既設建屋を利用するため、排熱回収ボイラのスペースに制限があり、ボイラ出口のガス温度が約220℃で計画され、新プラントでは更に排熱回収効率の改善余地を残していることを考えれば、本プラントの運転は非常に効果的に行なわれており、所期の目的を十分に達成しているといえる。

3.2 保 守

ガスタービンは、国内では法令により毎年1回の開放点検を実施することになっている。本プラントでは4回の定期点検を既に経験している。

環境対策として比較的NOxの発生の少ない燃焼器を使用し、かつ水噴射によるNOx低減を図ったこともあり、運転当初燃焼器ライナ、トランジションピースの一部にクラックや摩耗が見られた。このため各種の試験を実施し、燃焼器ライナの設計改善及び厚肉剛性形トランジションピースの開発を行なった。更に、燃焼器ライナの一部にセラミックコーティングを施工し、メタル温度を均一化することにより燃焼器の信頼性は一段と向上した。運転当初500時間ごとに実施していた燃焼器点検は、現在定期検査の中間で1回行なうまでに改善され、プラントの運用上の柔軟性を増加させている。

4 最近のMS7001形機の設計改善

MS7001ガスタービンの変遷を表3に示す。昭和46年にMS5001をベースに開発されたAモデルの空冷翼は第1段静翼だけであったが、Bモデルでは第1段動翼にも空冷方式が採用され、Eモデルでは第2段の動静翼も空冷翼となった。このEモデルが開発されて数年を経過し、これらの運転実績を基に

出力増加と信頼性向上のための設計改善が実施された。この新形機(EAモデル)では、タービン入口温度は1,104℃となり、Aモデルの899℃と比較し205℃上昇し、出力は流量の増加も加わって47MWから80MWへと約70%の増加が可能となった。このEAモデルに採用された設計改善について次に述べる。

4.1 燃焼器用トランジションピース

材料をハステロイ-XからN-263に変更し、クリープ強度の向上を図った。図4にクリープ強度の比較を示す。またタービン静翼との取付部近くにリブを取り付け強度向上を図るとともに、取付部の構造も応力が薄肉部に集中しないようブラケット構造とし信頼性の向上を図った。

4.2 第1段静翼

(1) 図5に示すように、静翼リブに冷却空気孔を設け前後の空間を導通させることにより、燃焼生成物などにより背側冷却孔が小さくなった場合にも、翼内側のインピンジメント冷

表3 MS7001ガスタービンの変遷 Aモデルが開発されてから現在まで、十数年間の性能及び信頼性向上のための設計改良状況を示す。

項 目	Aモデル	Bモデル	Eモデル	EAモデル
出力 (kW, ガス燃料)	47,000	61,300	74,400	80,000
熱 効 率 (%LHV)	29.2	31.0	31.9	32.0
排ガス流量 (kg/s)	233	240	272	287
タービン入口温度(℃)	899	1,004	1,085	1,104
圧縮機段数	17段			
タービン段数	3段			
タービン強制空冷翼	第1段静翼	第1段動静翼	第1, 2段動静翼	
設計改良点	●MS5001をもとに大容量化	●第1段動翼に空冷翼を採用	●第2段動静翼に空冷翼採用 ●スロット冷却形燃焼器採用	●信頼性向上のための設計改善 ●出力増加のための設計改善

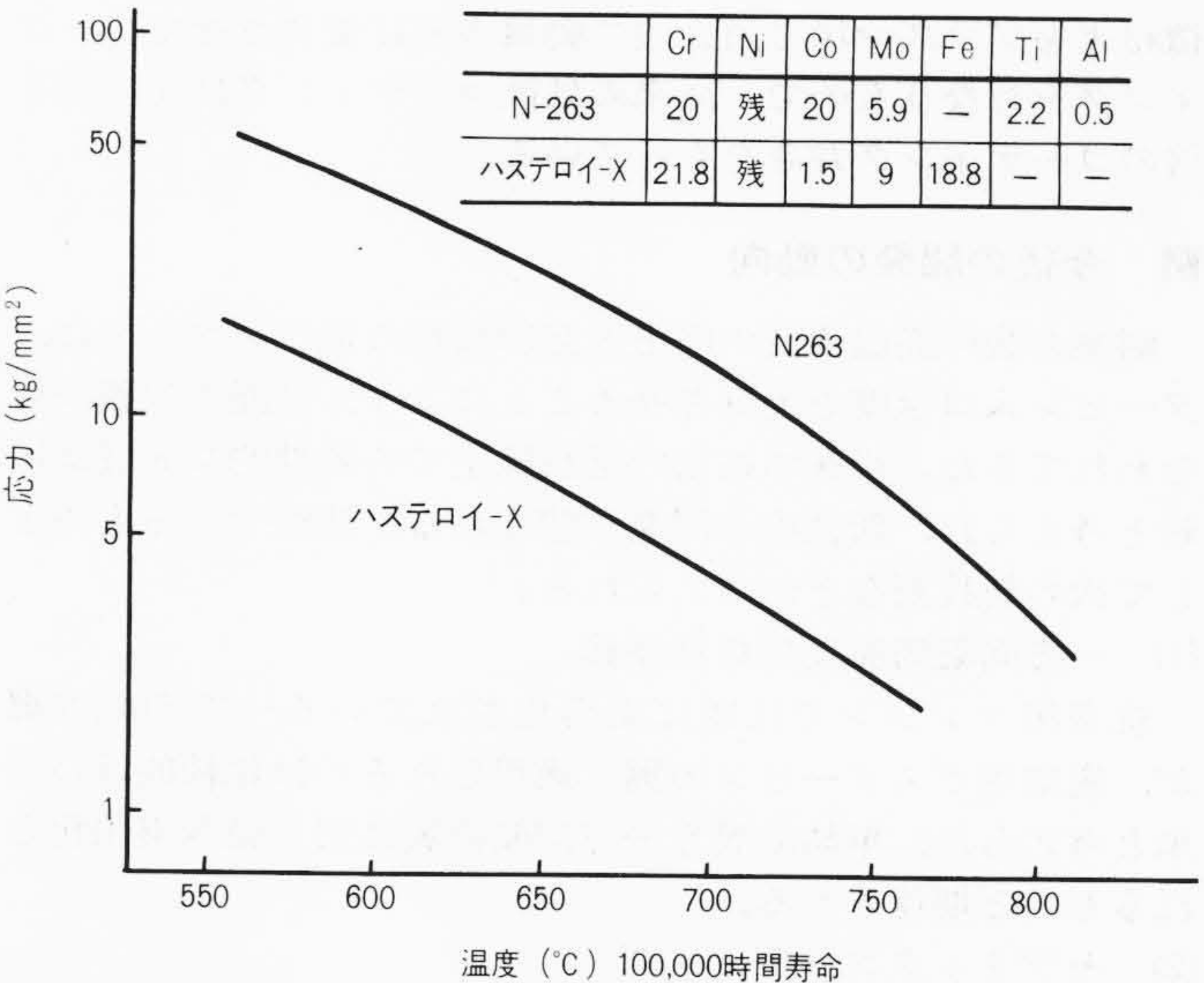


図4 トランジションピース材クリープ強度比較 トランジションピースには、クリープ強度の大きいN-263が新しく採用された。

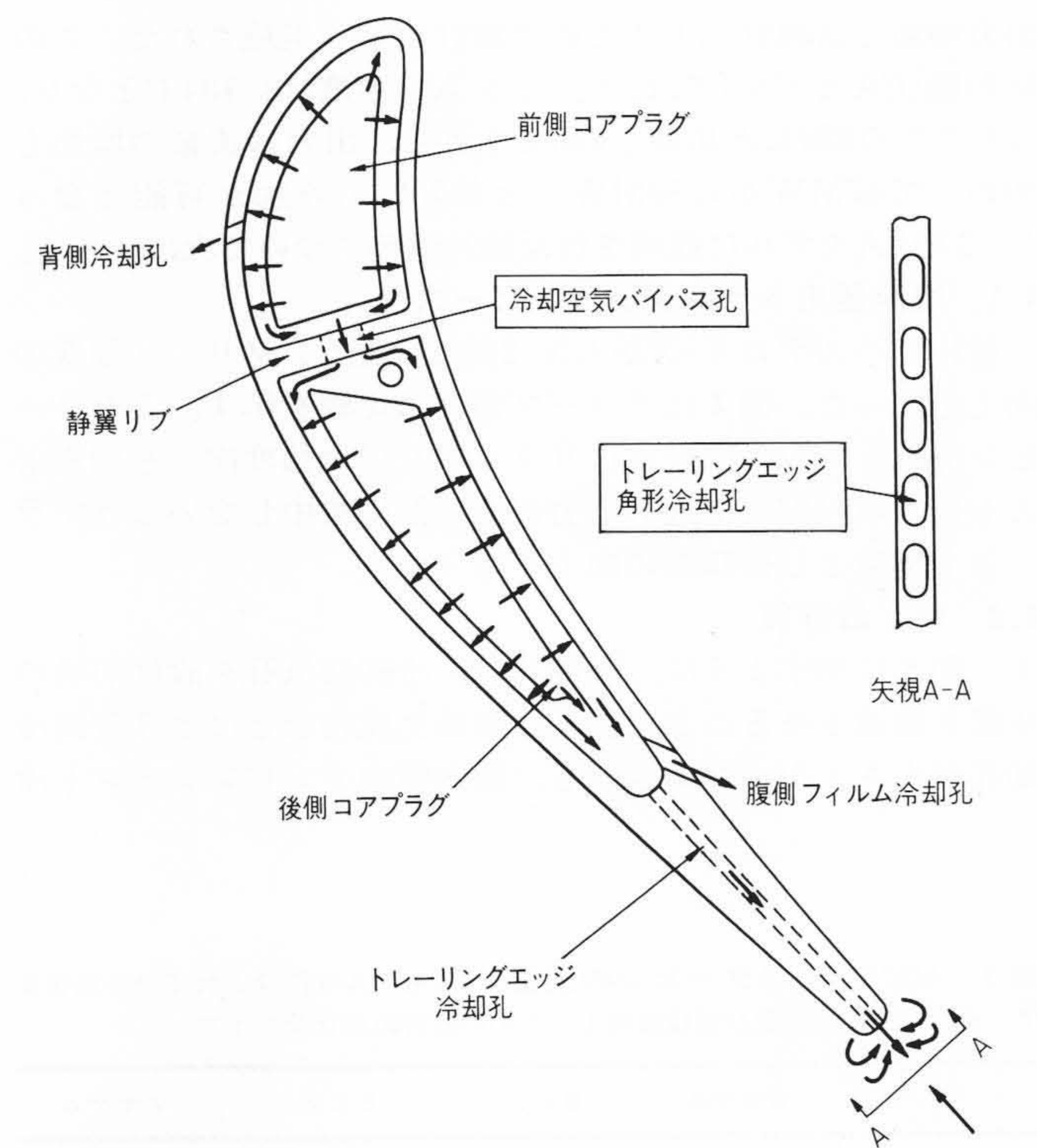


図5 新形第1段静翼 冷却空気バイパス孔を設け、トレーリングエッジ冷却孔の出口を角形にして冷却を強化し、信頼性の向上を図った。

- 却が効果的に行なわれるようにした。
- (2) トレーリングエッジ冷却孔の出口を角形にすることにより、冷却効果の改善を図った。
 - (3) サイドウォール端部での熱変形によるクラックを防止するため、冷却孔を新たに設けた。

4.3 第1段動翼

- (1) 新材料として第1段動翼にGTD-111を採用した。このGTD-111は、従来用いられてきたIN-738と比較して22℃の温度上昇に相当するクリープ強度の改善が行なわれている。図6に動翼材のクリープ強度を示す。
- (2) 耐食コーティングとして従来白金-アルミ拡散コーティングを実施してきたが、更に耐食性を改善するためVPS(真空プラズマスプレー)コーティングを採用した。このVPSコーティングは、低圧のアルゴン雰囲気中でクロムとアルミの微粉末をプラズマ場で超音速で動翼表面に衝突させてコーティングを行なうもので、従来の拡散コーティングに比べ約2倍のコーティング寿命をもっている。

5 今後の開発の動向

耐熱合金の高温強度の向上と空冷技術の進歩をベースに、タービン入口温度を上昇させることにより、性能の改善が行なわれてきた。現在の技術の延長線上での画期的な発展は困難と考えられ、新技術の開発が望まれる。期待できるものとして次の新技術などが考えられる。

- (1) 一方向凝固翼及び単結晶翼
航空用エンジンでは既に実用化されている一方向凝固翼が、産業用ガスタービンの翼に適用されるのは比較的近い将来と考えられ、単結晶翼も一方向凝固翼に引き続き実用化されるものと期待される。
- (2) セラミックコーティング
翼表面にセラミックコーティングを行ない翼の耐熱性を向上させる技術は、間もなく実用化される有望な新技術で、良

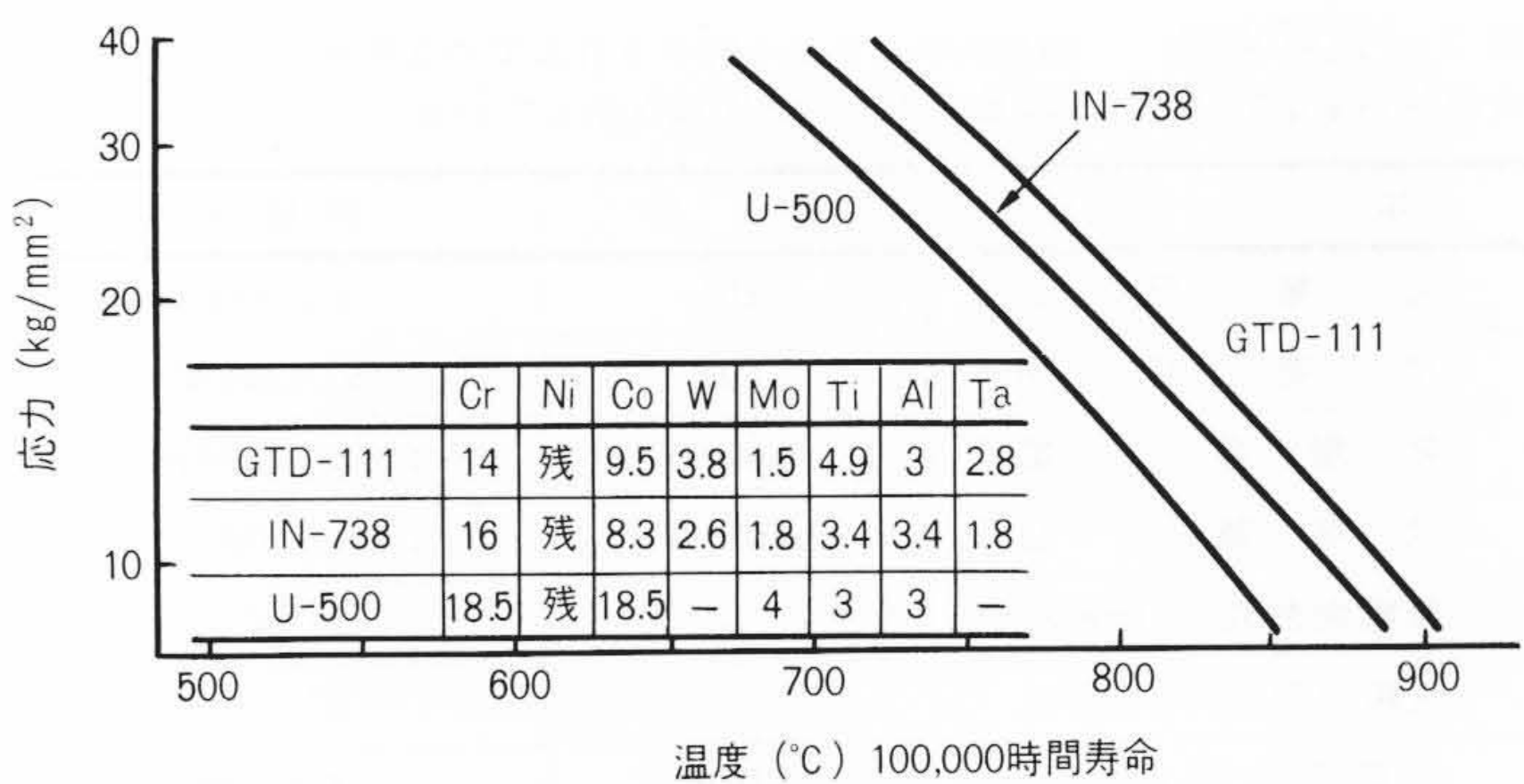


図6 第1段動翼材クリープ強度比較 新材料GTD-111は、従来のIN-738に対し22℃の温度上昇に相当するクリープ強度をもっている。

- 好なコーティング層を得るための研究が行なわれている。
- (3) セラミック翼
翼自体をセラミックで製作するセラミック翼は、自動車用など小形ガスタービンを中心に研究が行なわれており、これが実用化されると冷却空気量を極小とすることが可能で、性能面での効果は大きい。
 - (4) 拡散接合翼
冷却構造が複雑化すると一体の精密鑄造は困難と考えられ、翼の背側と腹側を別個に作り拡散接合ではり合わせるもの、薄い板の表面に冷却溝を加工したものを拡散接合で積層するもの、などが考えられている。
- 石炭が発電用燃料として増加していくことは、我が国での当面の課題であり、石炭ガス化コンバインドプラントが時代の要請にこたえ登場する日も遠くないものと期待される。またメタノールが設備投資の軽減、輸送費の低減からLNGとともに有望なエネルギー源と考えられており、メタノールを燃料としたコンバインドプラント実現の可能性も大きい。

6 結 言

コンバインドプラントの主機となるガスタービンの大容量化、性能改善及び信頼性向上について、開発の経緯とMS7001E形ガスタービンで最近実施した設計改善について述べた。また我が国で初めての排熱回収式コンバインドプラントとして日本国有鉄道で昭和56年以来順調に運転を行なっている141MWプラントの運転実績について紹介した。

省エネルギーを指向する時代の要請と中間負荷運用の必要性などから、コンバインドプラントは今後発電設備の重要な部分を分担するものと考えられるが、本稿がガスタービン及びコンバインドプラントの建設にいささかでも参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 松田：最近のエネルギー情勢，火力原子力発電，335号，769～783(昭59-8)
- 2) 乾，外：コンバインドプラント，日立評論，63，7，443～448(昭56-7)
- 3) 近藤，外：141MWコンバインドプラントの概要と試運転実績，日立評論，63，7，449～454(昭56-7)
- 4) 上田：日本国有鉄道141MW複合発電設備の運転状況，日本ガスタービン学会誌，12，45，70～75(昭59-6)