

# 高温ガスタービンの開発動向

## Technology Trend of Gas Turbine Development

池口 隆\* Takashi Ikeguchi 児島慶享\*\* Yoshitaka Kojima  
加藤泰弘\* Yasuhiro Katô 大塚雅哉\*\*\* Masaya Ôtsuka

(a) 組立中のH-25高温ガスタービンの外観  
日立製作所自主開発の高温ガスタービンは、順調に運転実績を積み上げており、次世代ガスタービン技術の発展につながるものである。

(b) 中国電力株式会社柳井発電所2系・1軸コンバインドタービン  
1,300℃級高温ガスタービンと低NO<sub>x</sub>燃焼器を搭載し、高効率と環境適合性を実現している。



アジアを中心とした世界規模での電力需要の伸びにより、地球環境に適合したより高効率・大容量の発電設備が求められている。このため、高温ガスタービンとその排気ガスで発生させた蒸気で駆動する蒸気タービンとを組み合わせた高効率コンバインドプラントが脚光を浴びており、今後とも発電プラントの重要な一角をなすものと考えられている。

コンバインドプラントの熱効率は基本的にガスタービンの燃焼温度で決定され、主機であるガスタービンの高温化が技術開発の要(かなめ)となっている。

日立製作所は、世界に先駆けて燃焼器出口温度1,260℃のH-25型高温ガスタービンを開発して計

4台を納入し、さらに2台を製作中である。また、米国GE社(General Electric Company)製のロータを使用した最新の159 MW F7FA型まで計6台の1,300℃級ガスタービンを設計、製作、納入してきており、さらに11台を製作中である。

この実績を踏まえて次世代高温ガスタービン実用化のため、最新の耐熱材料技術、高性能冷却技術、高性能空力設計技術、および乾式低NO<sub>x</sub>燃焼技術の開発を推進している。この次世代高温ガスタービン開発でいっそうの高効率化を図るため、研究・開発技術者を茨城県勝田市のガスタービン研究開発センターに統合し、あわせて試験設備の拡充を図っている。

\* 日立製作所 機械研究所 \*\* 日立製作所 日立研究所 \*\*\* 日立製作所 エネルギー研究所



1 はじめに

エネルギー資源をほとんど輸入に頼るわが国の発電設備では、電源のベストミックスが燃料の安定確保のうえで重要なポイントとなっている。なかでもLNG(液化天然ガス)は、1980年代以降続々建設されてきている高効率コンバインドサイクル発電設備の燃料として広く利用されてきている。LNGはSO<sub>2</sub>の排出量がほぼゼロであり、CO<sub>2</sub>の排出量も石油より少なく環境適合性が高いことから、今後ともアジア地域で高い需要の伸びがあると考えられている。

LNGを燃料としたプラントで日立製作所が基本計画から設計、製作、据付け、試運転までを一貫して担当した中国電力株式会社柳井発電所2-1号系列(350 MW)のコンバインドプラントが平成6年3月に運開した。このプラントでは最新の1,300℃級F7Fガスタービンを採用することにより、実測熱効率47%以上を達成している。ガスタービンの高温化によるコンバインドプラントのいっそうの熱効率向上を図ることで、貴重なLNGを有効に活用することが今後とも期待されている。

日立製作所は、1988年に燃焼器出口温度1,260℃のH-25型ガスタービンを自主開発し、世界に先駆けて実用化した<sup>2)</sup>。すでに4台の運転実績があり、この技術と経験を研究・開発にフィードバックすることにより、ガスタービン高温化のため耐熱材料の開発、高温部品の長寿命化技術などに反映してきている。ここでは、ガスタービン高温化のための代表的な技術開発状況を中心に最近のガスタービン、燃焼器の開発動向について述べる。

2 ガスタービンの開発動向

1,300℃級の実績を踏まえた高温化次世代機として、まず1,400℃級ガスタービン(燃焼器出口温度約1,500℃相当)が実用化されるものと予想されている。このタービン実用化のための材料面からの基盤技術が耐熱材料と耐食、遮熱コーティング技術であり、冷却面からの基盤技術がタービン翼と燃焼器の冷却技術である。さらに、燃焼温度の上昇に伴い約四～八乗で指数的に上昇する燃焼排ガス中のNO<sub>x</sub>低減技術も、燃料の多様化をも含めて高度化が要求されている。

この技術の発展と次世代機につながる要素技術を表1に示す。これらの技術は解析、要素実験、実機条件での試験だけでなく、実プラントでの実績や実機内に装着した部品の長期信頼性確認により、一歩ずつ着実に進める

表1 ガスタービン要素技術の発展

日立製作所は、ガスタービン高温化のために着実に技術開発の実績を積み上げ、現在第3世代が実用化されている。この技術と経験をもとに、さらに第4世代を目指して研究開発を進めている。

| 項 目      | 第1世代    | 第2世代    | 第3世代                   | 第4世代      |
|----------|---------|---------|------------------------|-----------|
| タービン入口温度 | ～1,000℃ | ～1,100℃ | ～1,300℃                | ～1,400℃   |
| 圧 力 比    | ～10     | ～12     | ～15                    | ～20       |
| 燃焼技術     | 拡散燃焼    | 拡散・予混合  | 予混合強化                  | 超希薄予混合    |
| 冷却技術     | 無冷却     | 単純対流冷却  | 高性能タービュレンスプロモータ+フィルム冷却 |           |
| 冷却媒体     | —       | 空気      | 空気                     | 空気・蒸気     |
| 翼 材 料    | 多結晶合金   |         | 一方向凝固合金                | 一方向・単結晶合金 |
| 空力技術     | 準三次元設計  |         | 完全三次元設計(バウ翼・エンドベンド翼)   |           |

必要がある。この一例として、遮熱コーティングを施した翼を装着して実運用に供試し、データ蓄積を図っているロータの状況を図1に示す。

3 ガスタービンの要素技術

3.1 高温材料と余寿命予測

高温化に対する材料開発に関して、動翼と静翼についてはニッケル合金やコバルト合金の高温強度改良を継続するとともに、大型翼の精密鑄造の結晶制御技術に取り組んでいる。

タービン翼の内部には、伝熱促進効果の大きい乱流促進リブを設けた冷却性能の高い冷却通路を持っている。実際の翼構造で実物大の一方向凝固合金および単結晶合金によって製造した動翼を図2に示す。

このような結晶制御合金翼は、新しい鑄造技術であるバイパス法で達成することができ、この新技術によって

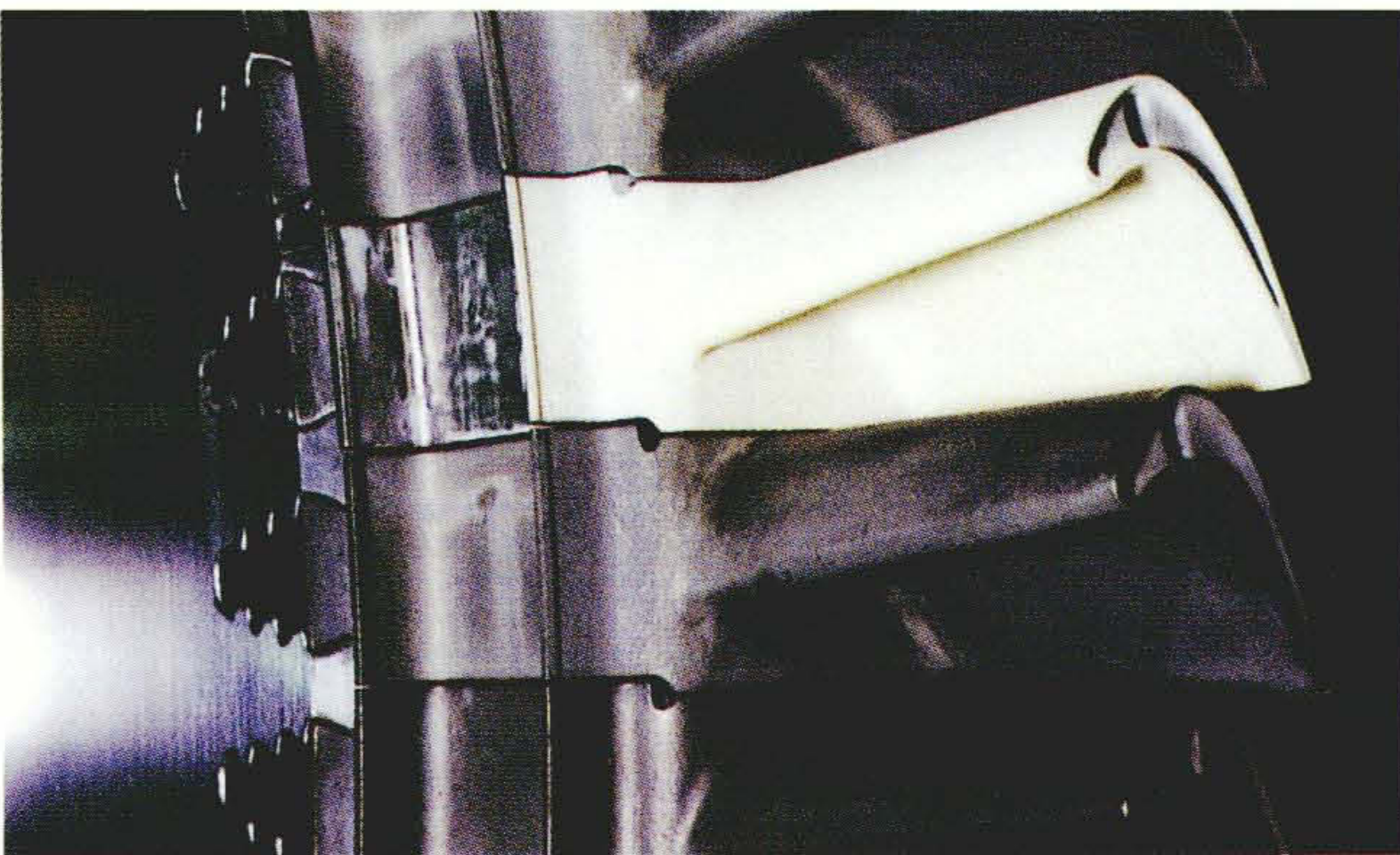


図1 遮熱コーティング翼実機試験  
表面に遮熱コーティングを施した翼をH-25型実機に装着し、信頼性確認試験を実施している。



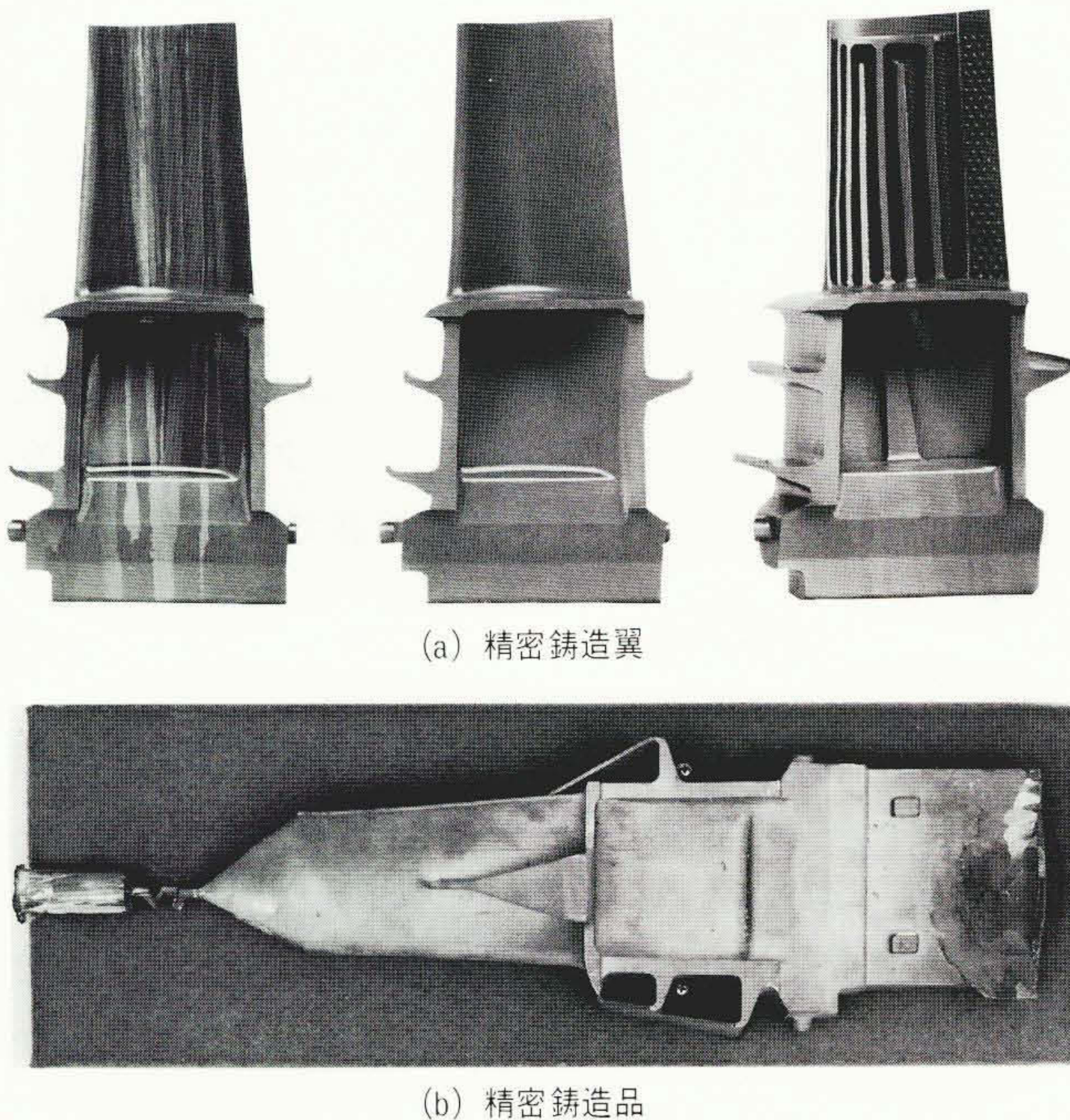


図2 精密鑄造翼および鑄造品

(a)は左から一方向凝固，単結晶，内部カットモデルを，(b)はバイパス法による鑄造品をそれぞれ示す。

いっそうの大型化も指向している。また，結晶制御による耐熱強度についても，材料強度のデータベースの蓄積により，耐用温度で従来の多結晶合金翼に比べて20～60℃の向上を確認している。

ディスク材については，H-25型ガスタービンで実績のある12%クロム鋼製ディスクを，不純物元素を除去して高純度化したうえで，新しい炭化物形成元素を加えた新12%クロム鋼を開発し，次世代機に適合した耐熱強度と靱性の向上を達成している<sup>3)</sup>。12%クロム鋼製のディスクは，航空機エンジンに広く使用されているニッケル合金に比べて成型加工性に優れるのでコスト的にも有利である。新12%クロム鋼の優れた耐熱性と製造性は実物大試作(図3参照)を行って検証している。

一方，高温化に伴う材料環境の過酷化に対しては，耐食・耐酸化および遮熱を満足するコーティング技術の開発に取り組んでいる。特に高温化に最も有効である遮熱コーティング(TBC：Thermal Barrier Coating)については，減圧プラズマ溶射による環境遮断層と熱応力緩和層とを組み合わせた多層積層構造の高耐熱性TBCを開発した。

この新しいTBCは遮熱効果改善(50～100℃)だけでなく，図4に示すようにはく離までの寿命を約2倍に改善していることを確認しており，動・静翼への実用化段階

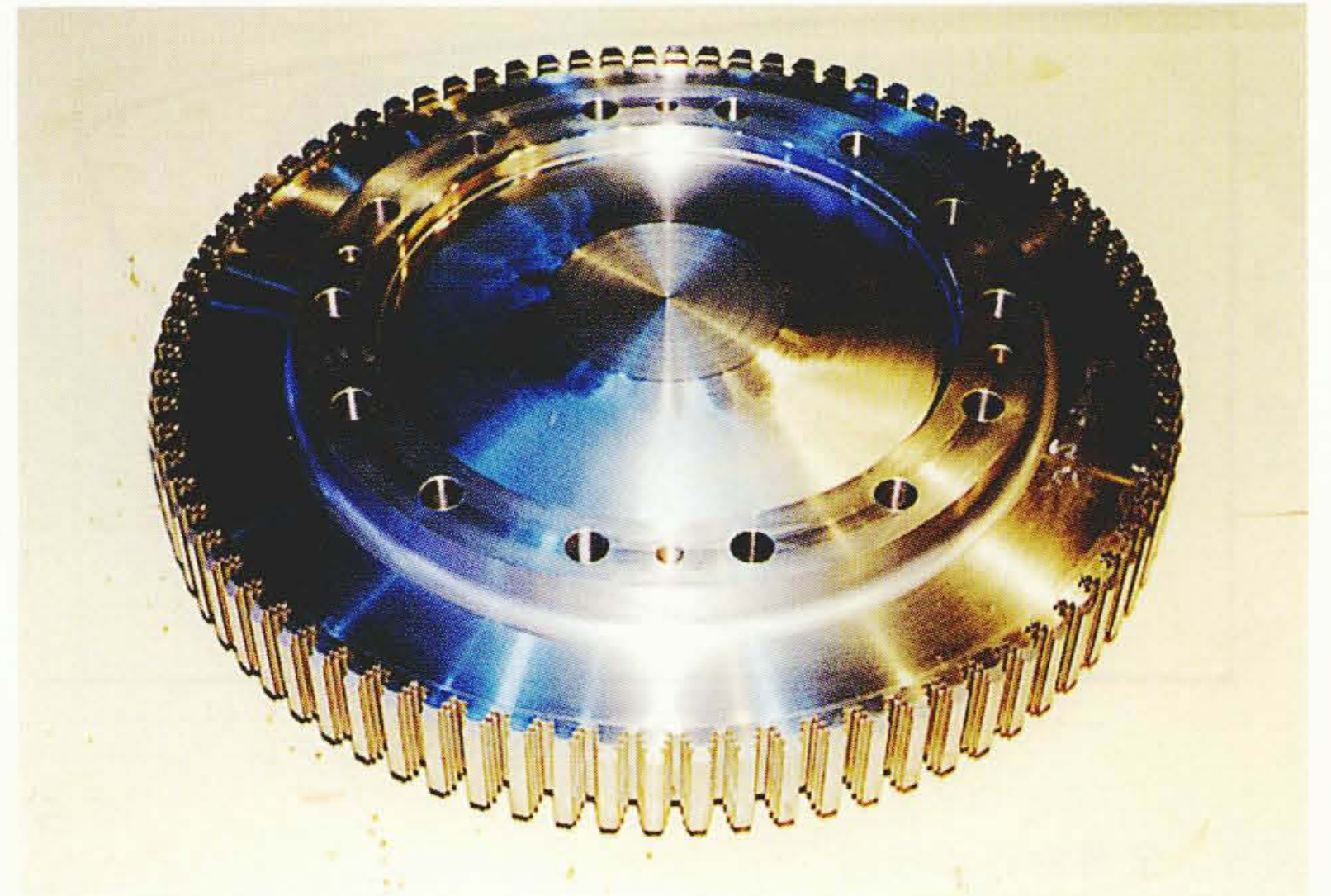


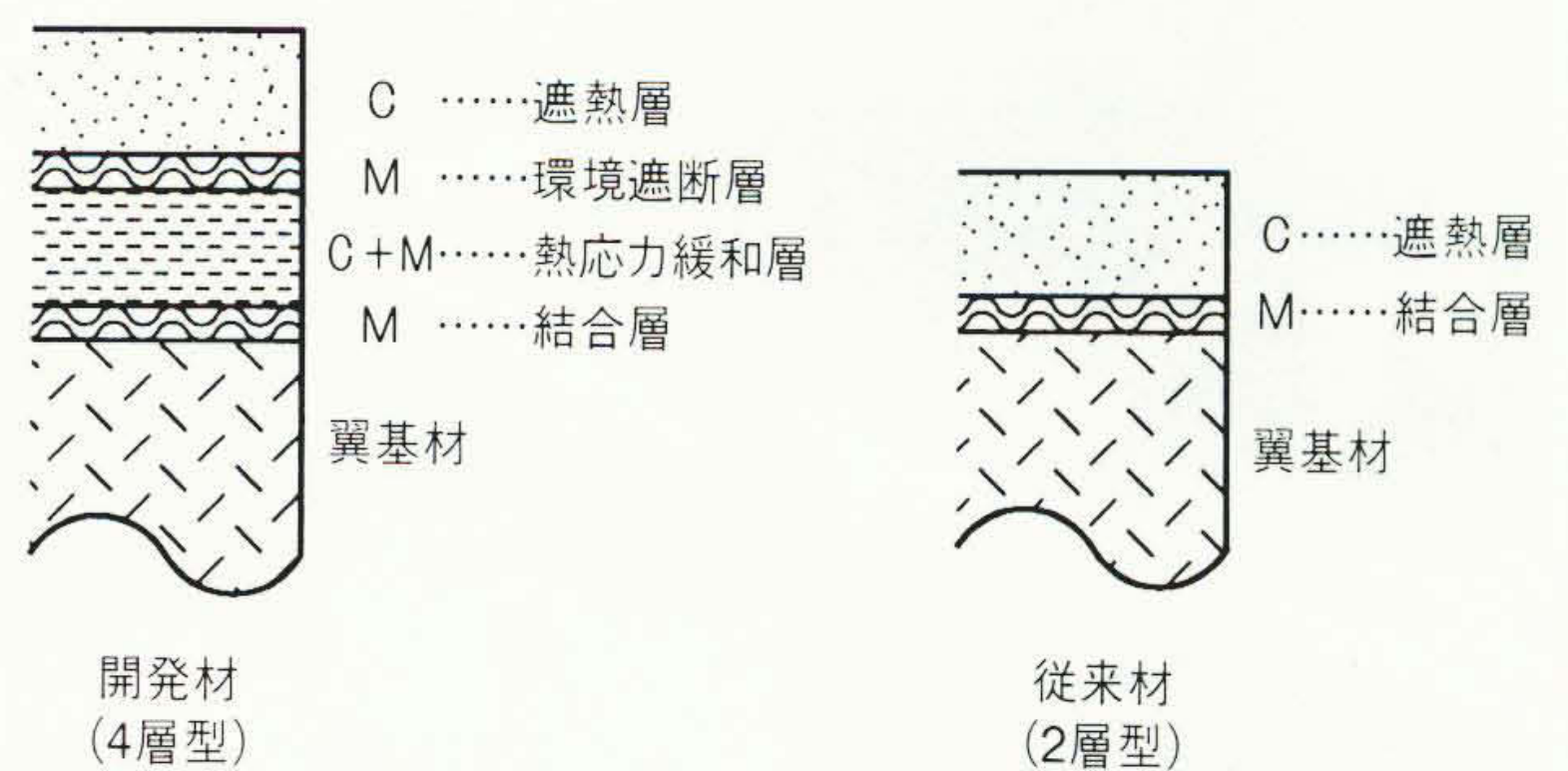
図3 実物大新12%クロム鋼製試作ディスク

耐熱性と製造性に優れた新12%クロム鋼製ディスクの実物大試作を実施している。

に近づいていると言える。

高温部品の信頼性確保のための余寿命評価技術についても，ミクロ的およびマクロ的解析評価に基づく損傷メカニズムの解明と部品の損傷限界の定量化によって高温部品の経済的な運用，補修を目指すべく寿命管理システムの開発を進めている(図5参照)。

このほかに，将来技術であるセラミックス製の動・静翼，燃焼器部品の要素試作，粉末冶金を応用し，ナノオーダー制御技術を適用したODS(酸化物分散強化合金)，TBC表面から母材の金属面まで連続的に組成を変化させて，傾斜機能を付与した長寿命コーティングなどの最先端技術の研究についても推進中である。



注：略語説明

C (セラミックス)，M (メタル)

図4 高耐熱性TBC

開発材は従来材の2倍の寿命がある。



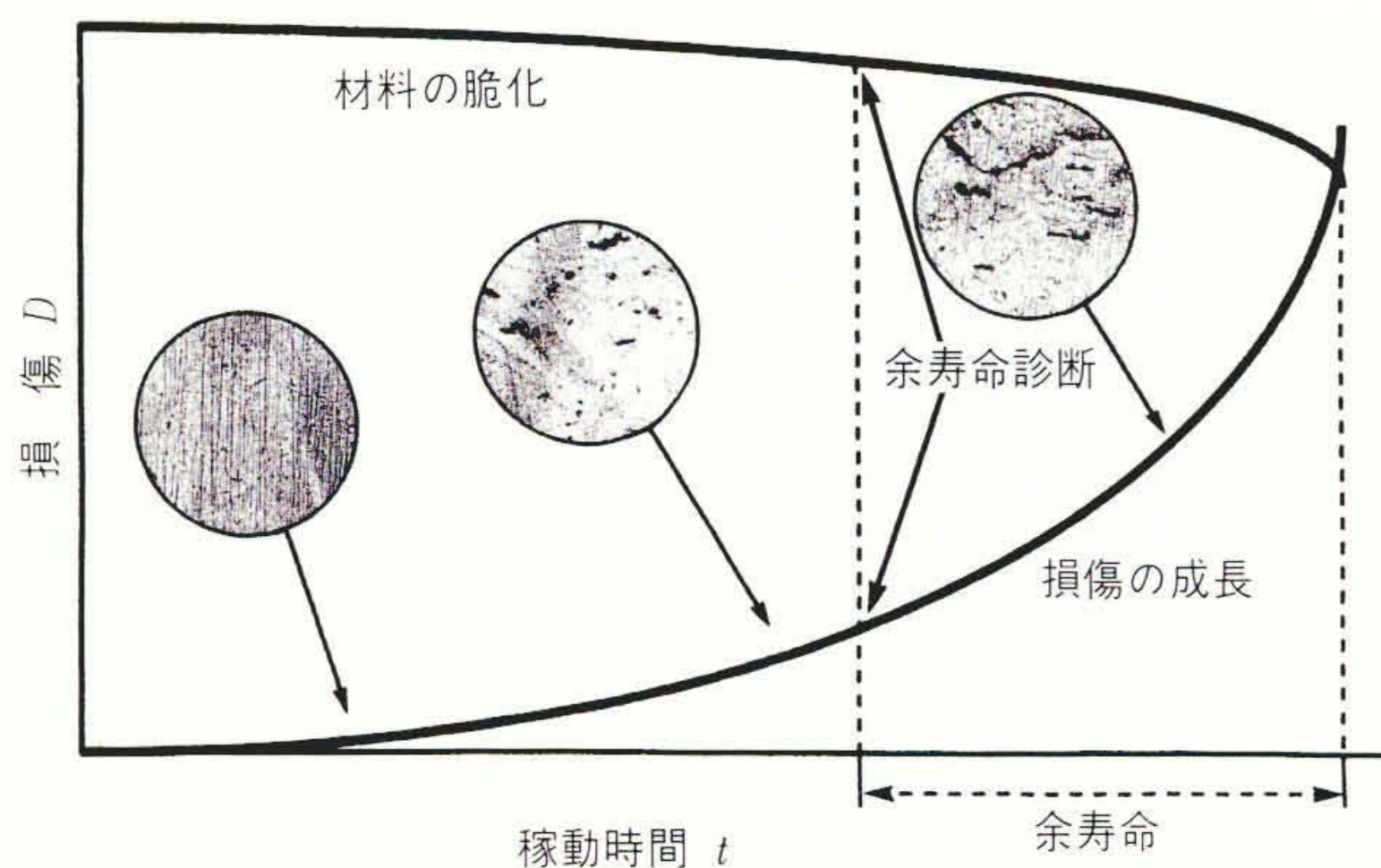


図5 余寿命評価技術

時間とともにミクロ組織が劣化する過程を評価して、余寿命を推定する考え方を示す。

### 3.2 高効率圧縮機

ガスタービンに対する高効率化の要求から、サイクル圧力比はしだいに上昇しているため、高負荷かつ高効率な圧縮機の空力設計技術の開発が重要になっている。

従来、軸流圧縮機に用いられているNACA65翼形では、段当たりの圧力比の上昇と高周速化に伴い、翼間流路内に衝撃波が発生して空力損失が増加する傾向にあった。そのため、衝撃波が発生しないスーパークリティカル翼を設計した<sup>4)</sup>。

翼形では、設計法の開発から取り組んでいる。従来のダイレクト法では望ましい翼形を決定するために、初期設計の翼形からスタートして翼間流れ計算と翼面上境界層計算を繰り返しながら翼形の修正を行っていた。開発したインバース法は、あらかじめ適正な翼面速度分布を与え、逆に翼形を生成する翼設計法であり、翼面上で与える速度分布から、直接物理面上で翼面上境界層の計算

が可能である。このため、境界層のはく離を生じないような速度分布を、翼形計算の最初に設定することができるという利点があり、圧縮機翼開発の効率化にも貢献している。

インバース法で開発したスーパークリティカル翼を使用した次世代ガスタービン用の高圧力比、高周速圧縮機の入口2段モデル機を製作し、スーパークリティカル翼形の空力性能、強度信頼性を性能検証で確認している(図6参照)。

### 3.3 高性能タービン

高温ガスタービンでは高温化による効率向上を損なわないように、少ない冷却空気で翼を冷却する必要がある。このため、冷却媒体として蒸気を利用する研究や、あるいは三次元的な流れの乱れを利用し、大幅な伝熱促進効果を発揮するV型タービュレンスプロモータの開発を行い、後者はすでに図2に示した精密鋳造翼に採用した<sup>5),6)</sup>。

このタービン翼は1,500℃を超える高温ガス風洞試験で、表面平均冷却効率57%以上を達成した。これらのガスタービン翼冷却技術は、東北電力株式会社と共同研究を実施し、日本ガスタービン学会賞とCIMAC最優秀論文賞を受賞している(図7参照)。

またタービン冷却翼については、翼形状の生成、冷却構造設計、三次元流れ解析、翼温度分布解析、応力分布解析、振動解析などをワークステーション上で一貫して設計できるCAE(Computer Aided Engineering)システムを開発している。このシステムはガスタービン冷却翼設計のために専用化されており、タービン静翼であれば図8に示すように翼本体だけでなく、エンドウォールや静翼の支持固定用フックを含め、三次元のFEM(有限要



図6 遷音速軸流圧縮機の回転試験装置

次世代ガスタービン用の高圧力比、高周速圧縮機の入口2段モデル機で、スーパークリティカル翼形の空力性能、強度信頼性を確認している。

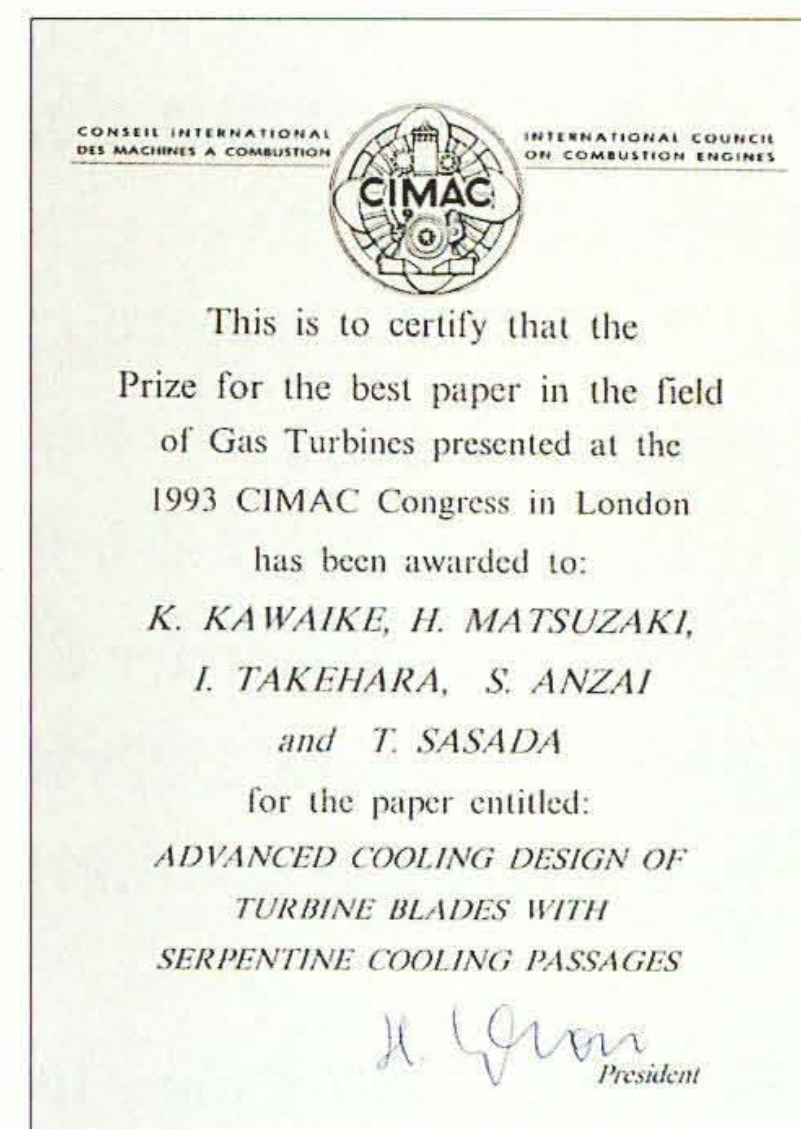


図7 CIMAC最優秀論文賞

タービン冷却技術で学会から高い評価を受けている。



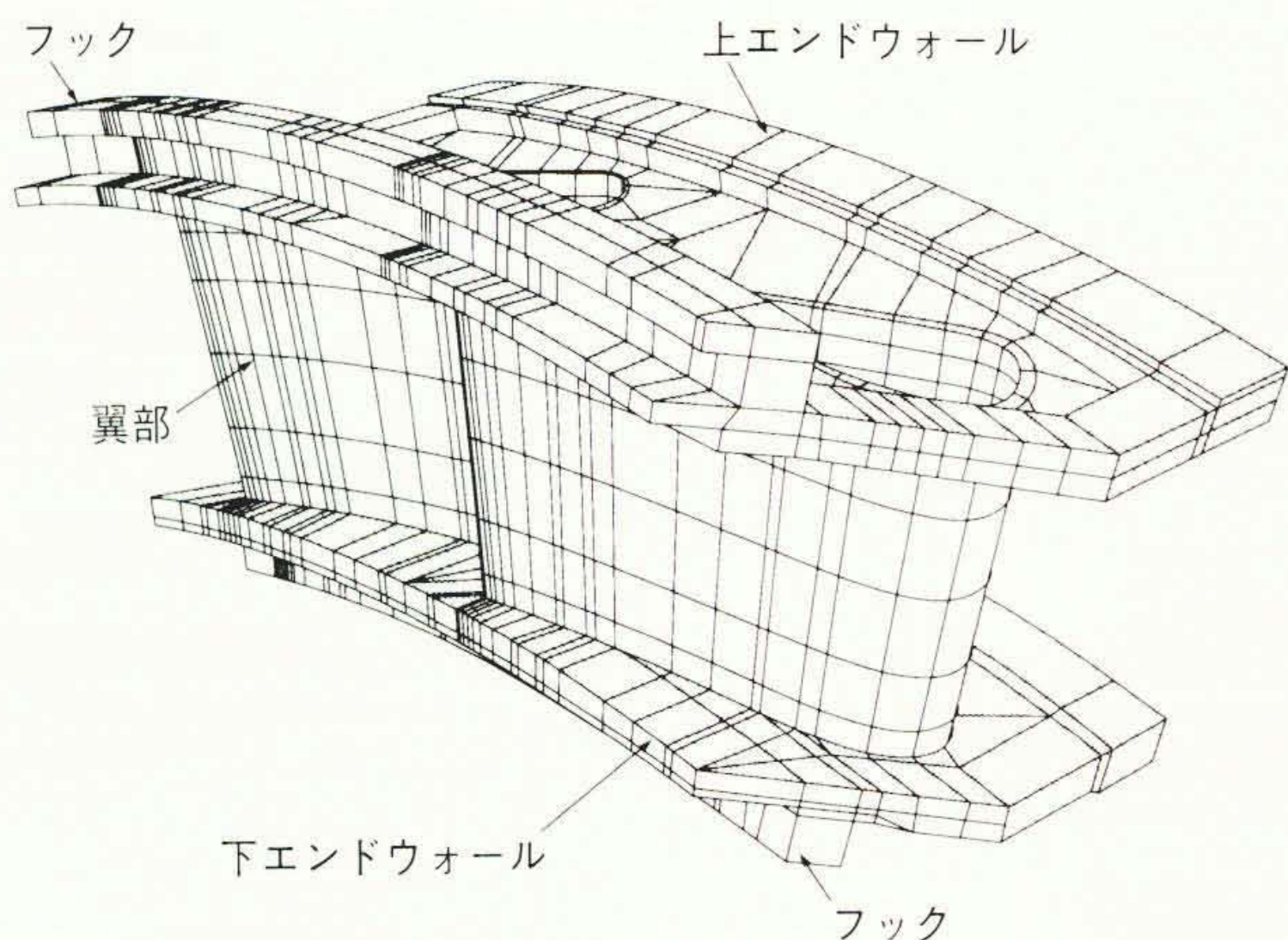


図8 ガスタービン冷却設計CAE

ガスタービン翼形状の生成，冷却構造設計，三次元流れ解析，翼温度分布解析，応力分布解析，振動解析などをワークステーション上で一貫して設計できるCAEシステムを開発している。これは自動メッシュ図の例を示したものである。

素法)解析のためのメッシュや熱的境界条件を自動生成できるようになっている。このCAEシステムを用いて，翼の厚み方向や高さ方向の温度分布をできるだけ均一にして熱応力を低減できる冷却翼構造を開発し，強度と信頼性を確保している。

### 3.4 高温・低NO<sub>x</sub>燃焼器

高効率・環境保全のニーズにこたえるには，燃焼ガス温度の高温化と低NO<sub>x</sub>化が重要な課題となってきた。一般にNO<sub>x</sub>の排出量は火炎温度の上昇とともに増加するため，1,100℃級から1,300℃級，1,400℃級へと高温化が進むなかで，NO<sub>x</sub>を従来の62.5 ppm (16%O<sub>2</sub>)から飛躍的に低減させるためには，高度な低NO<sub>x</sub>燃焼技術が要求される。

従来，ガスタービンでNO<sub>x</sub>を低減するために水または蒸気を燃焼器内に噴射する方法がとられてきた。水噴射の場合，ほぼ燃料流量相当の良質な水質の水量を確保する必要があり，また蒸気噴射の場合も，水噴射のさらに約1.4倍の蒸気を蒸気サイクルから抽気する必要がある。このため，ガスタービンの高温化・大容量化に伴い経済的な面からも水，蒸気を使用しない乾式低NO<sub>x</sub>燃焼器が望まれていた。

日立製作所は1,100℃，1,300℃級の大型コンバインドサイクルプラントを計画するにあたり，当初から乾式低NO<sub>x</sub>燃焼器を開発し採用している。すでに，1,100℃級および1,300℃級プラントでの低NO<sub>x</sub>燃焼器の運転実績も積み重ねてきている。燃焼器の開発，設計にあたっては解析，モデル試験，実燃焼器による実運用条件での

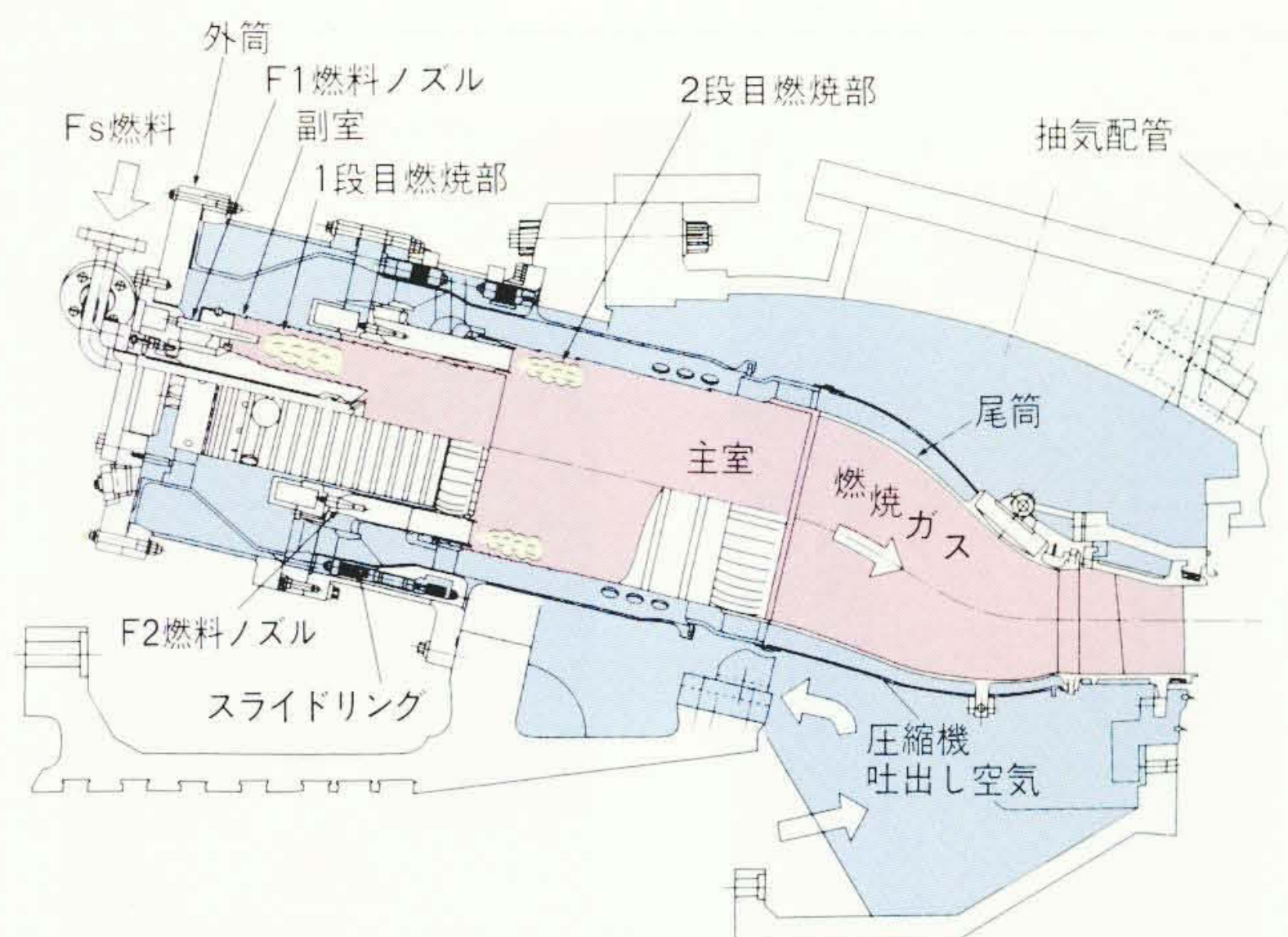


図9 低NO<sub>x</sub>燃焼器の構造

LNG燃焼I, 300℃級用として実績のある燃焼器の構造を示す。

検証を踏まえて，さらに運用プラントでの貴重な実データをフィードバックしながら，いっそうの高温・低NO<sub>x</sub>化技術の開発を進めている。

開発した1,300℃級の代表的な燃焼器構造を図9に示す。この燃焼器では，燃焼器中央部に火炎安定性に優れた拡散燃焼をさせる1段目燃焼部を配置し，燃料と空気の混合比率を変えることにより，火炎温度が制御できる希薄予混合燃焼方式を2段目燃焼部に採用している。この燃焼方式でNO<sub>x</sub>排出量を低減させるためには，できるだけ多くの空気を2段目燃焼部へ送り込み，さらに，ここでの燃料と空気をできるだけ均一に混合させることが重要である。そのため，燃焼器内の空気量配分の最適化とともに，燃焼室の上流に予混合器を設け，燃料と空気の混合を促進している。予混合器出口には，希薄予混合火炎の安定化のために保炎機構を設けている。また，温度分布を均一化するため，予混合器をアニュラー形状としている。

このために，図10に示すような保炎部分の流動・燃焼シミュレーション解析技術を開発し，実機条件での試験と比較しながら次世代機開発の解析ツールの研究にも取り組んでいる。このほか，冷却技術，遮熱コーティング技術や燃焼計測技術の継続的な適用により，より信頼性，運用性，保守性に優れた低NO<sub>x</sub>燃焼器を開発している。

将来の燃料多様化に対応して，石炭ガス化用低カロリー燃焼器や灯油などを対象とした液体燃料燃焼器にも取り組んでいる<sup>7)</sup>。低カロリー燃焼器については，石炭ガス化複合発電技術研究組合勿来事業所内に設けられた石炭ガス化プラントで日立製作所が担当したガスタービン



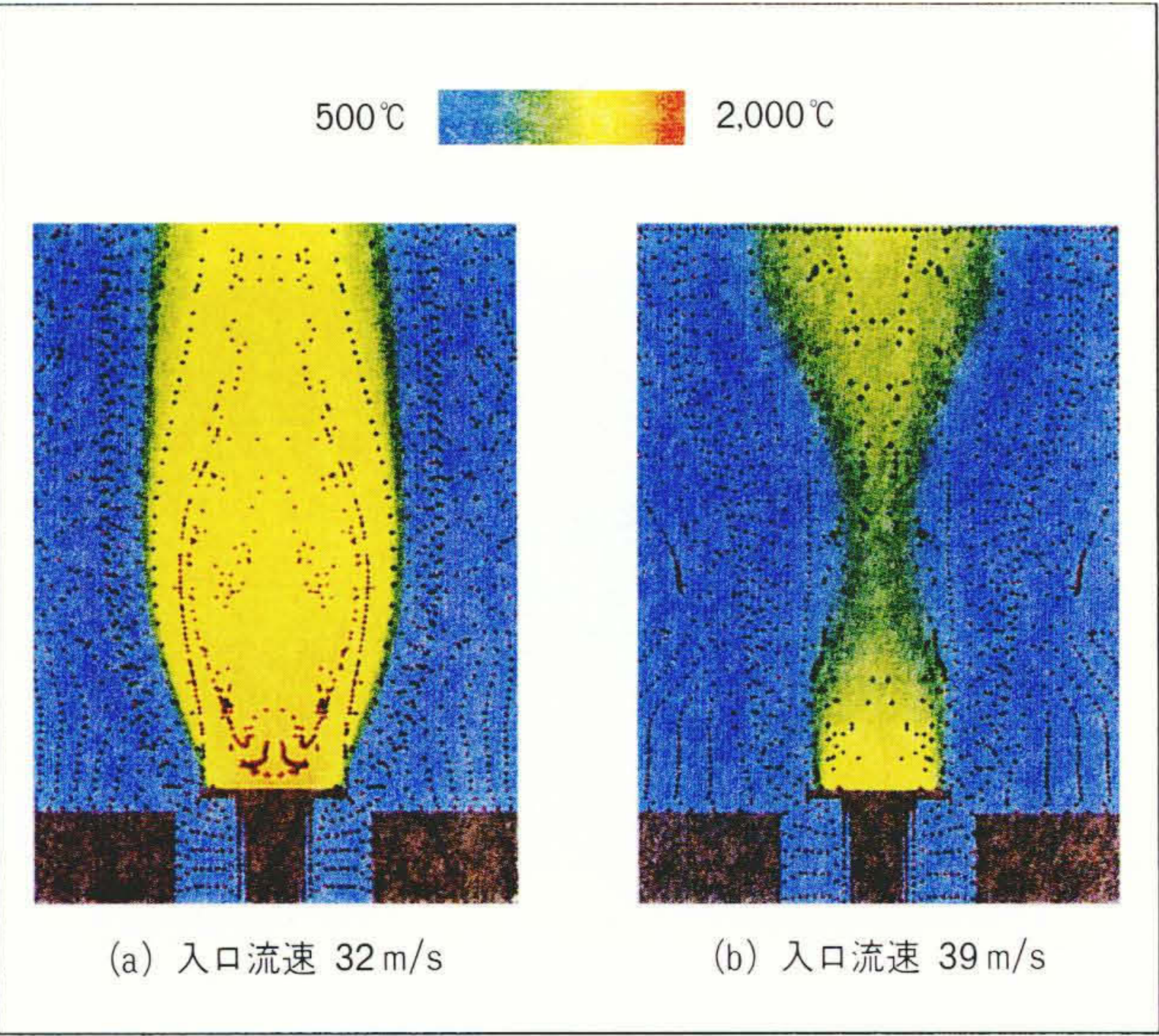


図10 火炎吹き飛びの解析結果  
流速が増加すると火炎が不安定になり、吹き飛ぶ様子がわかる。

の運転実績が表れつつあり、将来へつなげる技術として位置づけられる。

4 ガスタービン研究開発センター

ガスタービンを開発するためには多種多様な技術を統合していく必要があり、従来、日立製作所の日立研究所、機械研究所、エネルギー研究所に分散していた研究・開発陣を茨城県勝田市に設置したガスタービン研究開発センターに集約して、基盤技術を支援する研究所間の連携と強化を図っている<sup>8)</sup>。ガスタービン研究開発センターでは、表2に示すような基礎研究から応用、実証、実用化までを一貫して担当している。これにより、次世代が

表2 ガスタービン研究開発センターのテーマ

基礎研究から実発電プラントでの長期信頼性確認試験までを一貫して実施できる設備を集約し、分散していた研究・開発陣を統合して開発の効率化を図っている。

| 設備名       | 主な研究開発テーマ                                                                                 |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 基礎研究設備    | 基礎技術の研究開発<br>●翼列風洞、空気タービン、遷音速圧縮機によるタービン翼、圧縮機翼などの空力性能の研究<br>●燃焼器試験スタンド等による希薄予混合火炎の安定性などの研究 |
| 実負荷試験設備   | 高圧、実圧試験による技術確認<br>●ガスタービン駆動の高圧空気源設備を用いた実負荷条件での低NOx燃焼器技術確認<br>●多種燃料を用いた燃焼試験による液だき燃焼器の開発    |
| 実用化総合試験設備 | 実機運転による開発品の実証<br>●遮熱コーティングを施した動・静翼の実機長期信頼性確認試験<br>●補機類の実運転での性能確認試験                        |

スタービンの研究・開発体制のいっそうの充実を図っている。

5 おわりに

ここでは、最近の日立製作所でのガスタービンの開発動向について述べた。ガスタービンの開発は長期的な視点にたった要素技術開発と実用化による実績の蓄積が必要であり、次世代を目指したコンバインドプラント用を中心として、ユーザーニーズにこたえた高温ガスタービンの開発に今後とも力を注いでいく考えである。

終わりに、ここに紹介した技術開発の一部は、各電力会社殿をはじめとするユーザー側のご理解、ご指導のもとで進められたものであり、関係各位に対し感謝する次第である。

参考文献

1) 十市：転機を迎えるLNG開発とわが国の課題，エネルギー経済，20-2，2～18(1994-2)

2) H. Urushidani, et al.：Development of a New 25 MW High Efficiency Heavy-Duty Gas Turbine H-25, ASME Paper 91-GT-72(1992)

3) K. Hidaka, et al.：Development of 12 CrSteel Disc for Heavy Duty Gas Turbines, ASME Paper 94-GT-199(1994)

4) Y. Katoh, et al.：Development of a Transonic Front Stage of an Axial Flow Compressor For Industrial Gas Turbines, ASME Paper 93-GT-304(1993)

5) 安斎，外：乱流促進リブの形状が伝熱・流動特性に及ぼす効果，日本ガスタービン学会誌，19-75，65～73(1991)

6) K. Kawaike, et al.：Advanced Cooling Design of Turbine Blades with Serpentine Cooling Passages, CIMAC 1993

7) 樽戸，外：液体燃料の予蒸発・予混合燃焼におけるNOx排出特性，日本機械学会論文集(B編)，59-563，217～224(1993-7)

8) 川池：日立製作所ガスタービン研究開発センター，日本ガスタービン学会誌，21-82，29～31(1993-9)