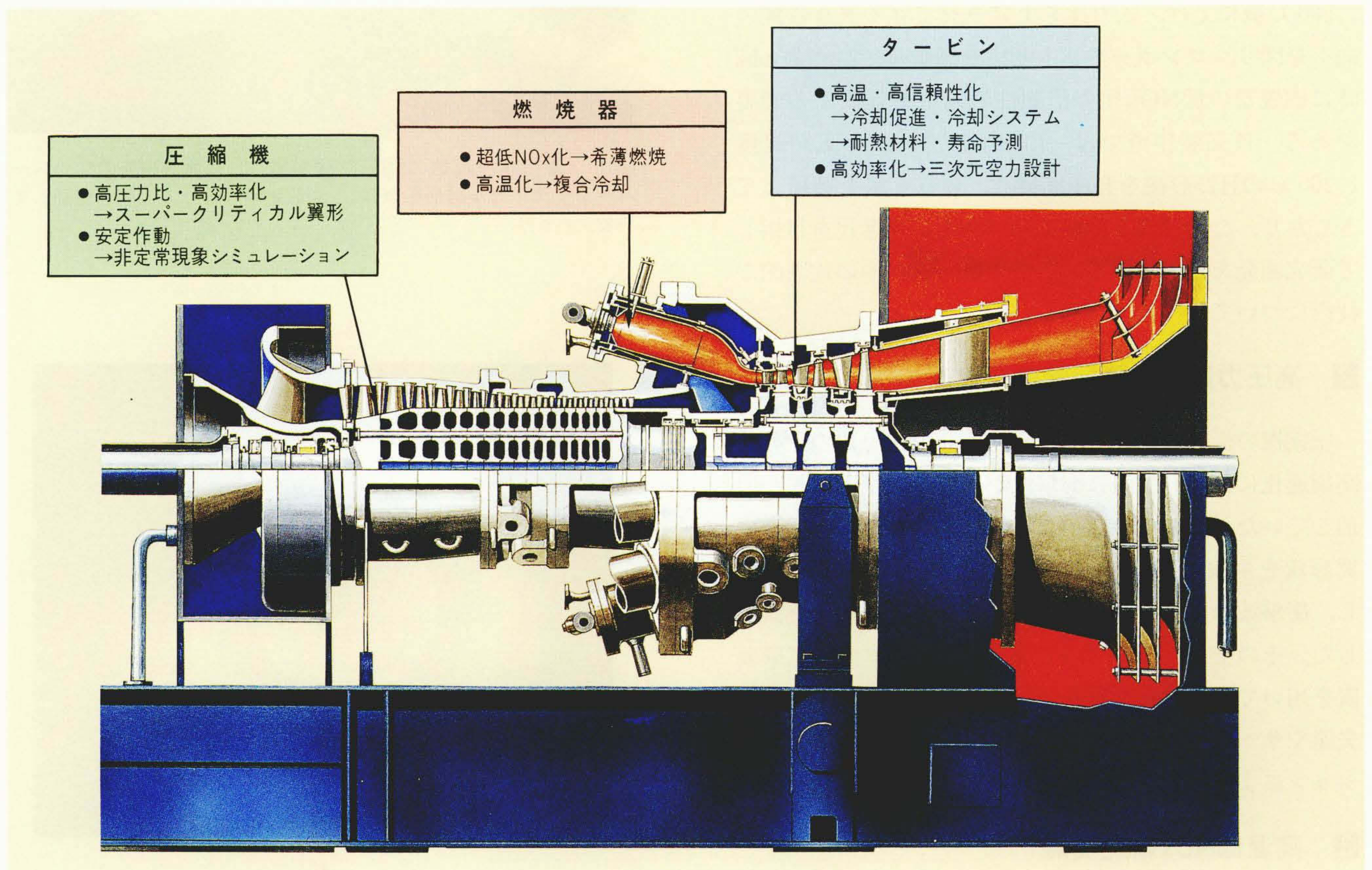


高温ガスタービンの新技術

New Technologies for High Temperature Gas Turbines

川池和彦* Kazuhiko Kawaike
石橋洋二** Yōji Ishibashi
中村重義*** Shigeyoshi Nakamura
山川正剛**** Masanori Yamakawa



注：略語説明 NO_x（窒素酸化物）

次世代高温ガスタービンの技術課題 熱効率50%以上と超低NO_x化を目指した研究開発を推進している。

エネルギー資源の有効利用、CO₂やNO_xなどの排気成分の低減によって地球環境を保全するため、火力発電プラントでは、高温ガスタービンを用いたコンバインドプラントのいっそうの高効率化と超低NO_x化が急務とされている。

日立製作所では、ガスタービンの高温・高効率化を達成するため、タービン翼の高性能冷却技術、耐熱材料と結晶制御鑄造法、高性能空力設計技術、予混合低NO_x燃焼技術などの研究開発を推進している。

* 日立製作所 機械研究所 ** 日立製作所 機械研究所 工学博士 *** 日立製作所 日立研究所
**** 日立製作所 エネルギー研究所 工学博士

1 はじめに

熱機関の中で高い熱効率を実現できる高温ガスタービンを中心とする現今のコンバインドサイクル発電では、タービン入口温度(燃焼器出口温度)が $1,400^{\circ}\text{C}$ 級のガスタービンを用いて熱効率46~48%の時代を迎えている。熱効率50%の壁を越えるためには、タービン入口温度を $1,500^{\circ}\text{C}$ 級に上げ、圧力比を上昇させてサイクル性能の向上を図り、コンポーネント効率を極限まで高めると同時に燃焼器の低 NO_x 化と信頼性の向上を達成する必要がある。日立製作所では、1988年にタービン入口温度 $1,260^{\circ}\text{C}$ のH25形機を自主開発し、運転実績を蓄積してきており、この技術と経験を基にさらに先進化を目指して研究開発を進めている。ここでは、その中の代表的な技術について述べる。

2 高圧力比高性能圧縮機技術

圧縮機の従来の翼形では、段当たりの圧力比の上昇と高周速化に伴い、翼面に衝撃波が発生して空力損失が増加していた。そこで、適正な翼面速度分布を与え、逆に翼形状を生成するインバース法による翼設計法を開発し、衝撃波の発生しないスーパークリティカル翼を設計した。その空力性能については、図1に示す回転試験装置を用いて確認試験を行っている。また、圧縮機の旋回失速やサージングの非定常現象については、シミュレーションによって安定作動範囲の判定精度を向上させた。

3 高温低 NO_x 燃焼技術

燃焼器ではサーマル NO_x の低減を図るため、最高火炎温度を低下させる予混合燃焼を採用し、ガスタービンの起動から部分負荷運転時の安定燃焼を確保するため、拡散燃焼を組み合わせた二段燃焼方式を実用化してきた。さらに高温化を目指す一方、 NO_x を限界まで低減するために、可燃限界組成に近い超希薄燃焼を可能とする燃焼方法を検討している。このためには、希薄安定燃焼技術や燃空比制御技術の開発が必要である。予混合と拡散の二段燃焼の火炎を図2(a)に、予混合燃焼だけの火炎の状態を図2(b)に示す。このように、予混合希薄燃焼比率を高めることができれば超低 NO_x 化を達成できる。一方、燃焼器の開発ツールとして燃焼計測と解析技術の高度化を進めている。レーザ計測や画像処理技術によって燃焼場の火炎構造や挙動の測定が可能になり、解析のほうも数値解析技術とスーパーコンピュータの発達に伴って燃

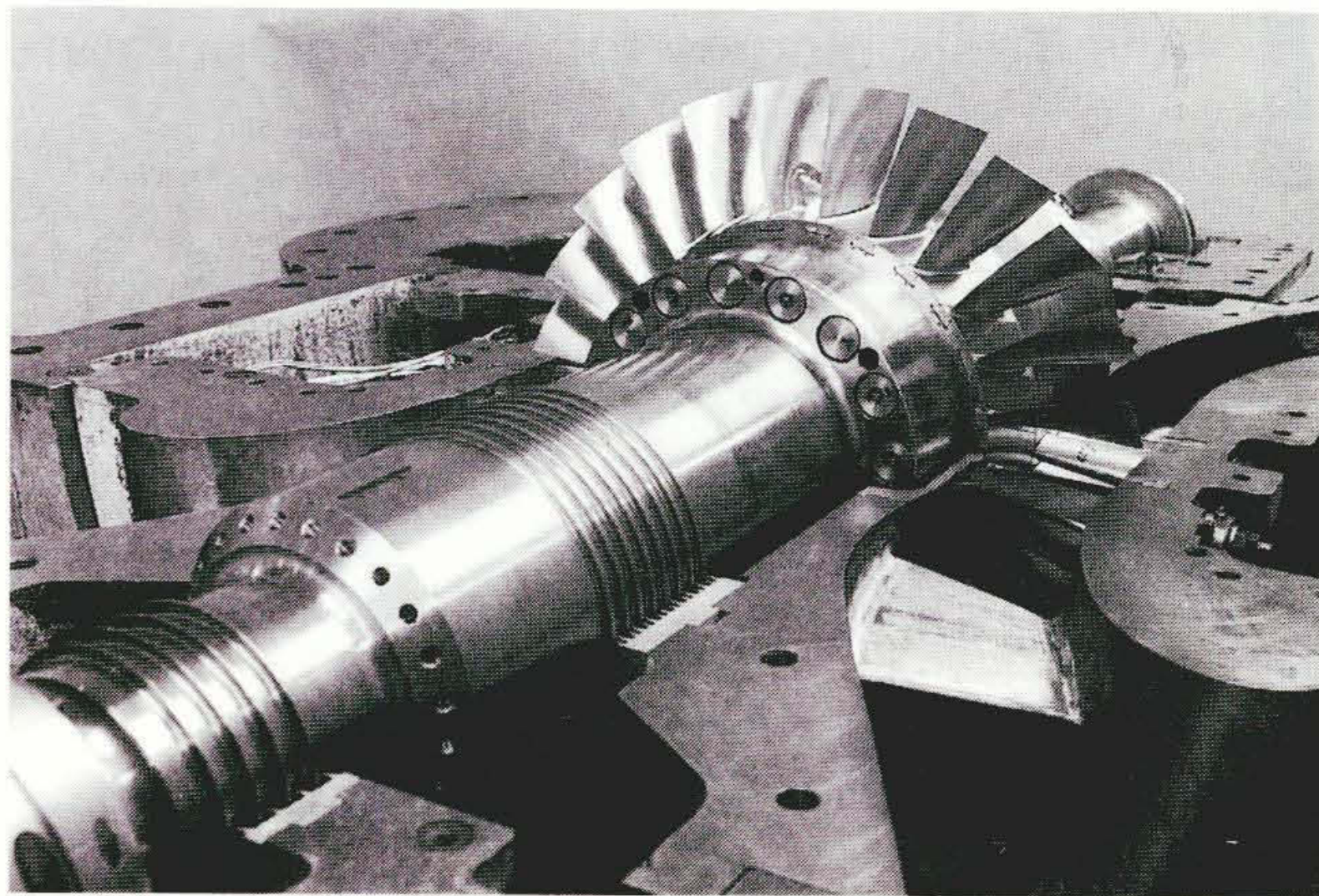
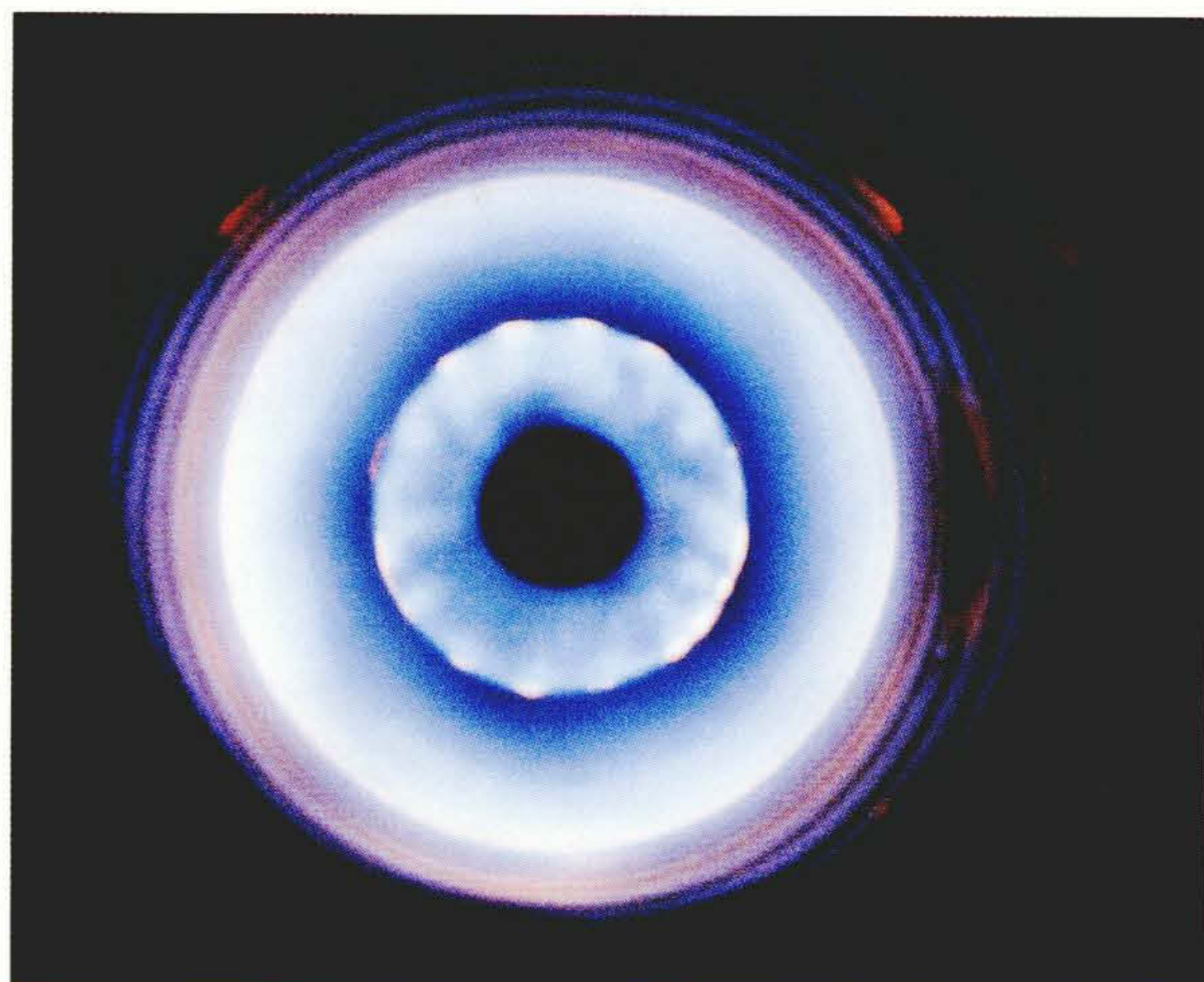
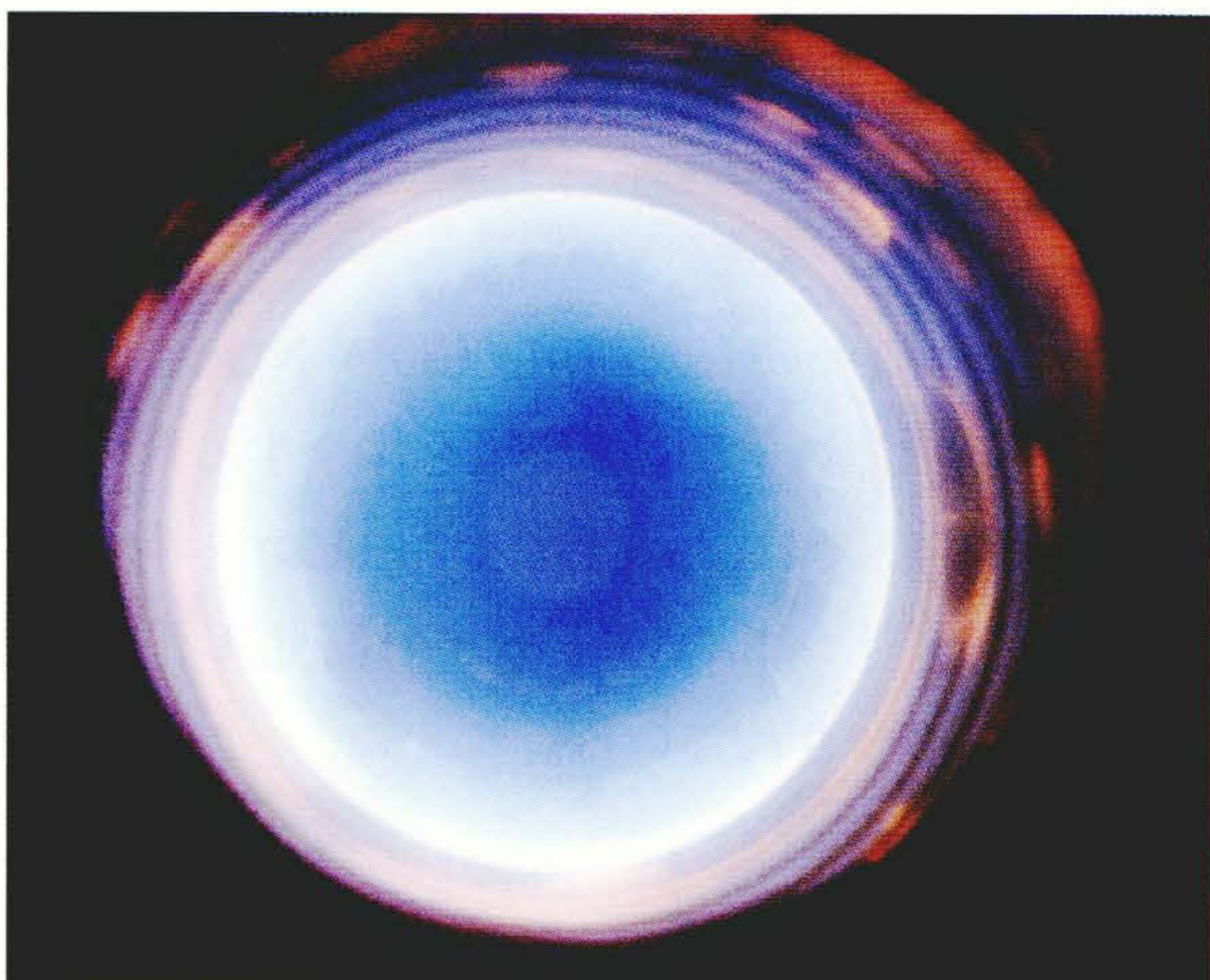


図1 遷音速圧縮機の回転試験装置 衝撃波損失のないスーパークリティカル翼形を開発し、回転試験によって性能を確認している。



(a)



(b)

図2 低 NO_x 燃焼器の火炎状況 (a)は拡散・予混合二段燃焼器の火炎であり、中心部が拡散火炎、外周部が予混合火炎である。(b)は安定燃焼している予混合火炎だけの火炎である。

焼現象の予測や解明ができるようになってきた。これまで蓄積してきた大規模乱流解析技術を基に乱流燃焼解析技術の開発を進めており、乱れの非等方性を考慮するために独自に開発したレイノルズ応力輸送モデルの適用や、濃度変動を考慮できる確率密度関数法の導入などで解析精度を向上させている。拡散燃焼状態で、旋回乱流場で燃焼する過程の解析例を図3に示す。この解析技術は、拡散燃焼や予混合燃焼状態の予測に有効であり、燃焼器の設計や数値実験に活用できる段階に達してきた。

4 高性能冷却タービン技術

高温化に対しては、サイクル性能を損なわないように、少量の冷却空気タービン翼を効果的に冷却する必要があるため、内部冷却とフィルム冷却性能の向上を追求している。これらの空気冷却技術はジェットエンジンが先行し、かなり成熟した技術ではあるが、新たな基礎実験の結果、図4に示すように大幅な伝熱促進効果を達成できる乱流促進リブを開発した。フィルム冷却に関しては、フィルム孔の出口形状の適正化によって冷却性能の改善を確認している。また、蒸気やミストなどの冷媒を用いる冷却法に関しても検討を進めている。タービンの高性能化に対しては、三次元乱流解析技術を、二次流れ損失を低減する目的でフローパターンや翼形を径方向に弓状に積層するバウ翼などの最適設計に適用している。

5 高温材料・信頼性技術

高温化に対する材料開発に関しては、Ni合金やCo合金

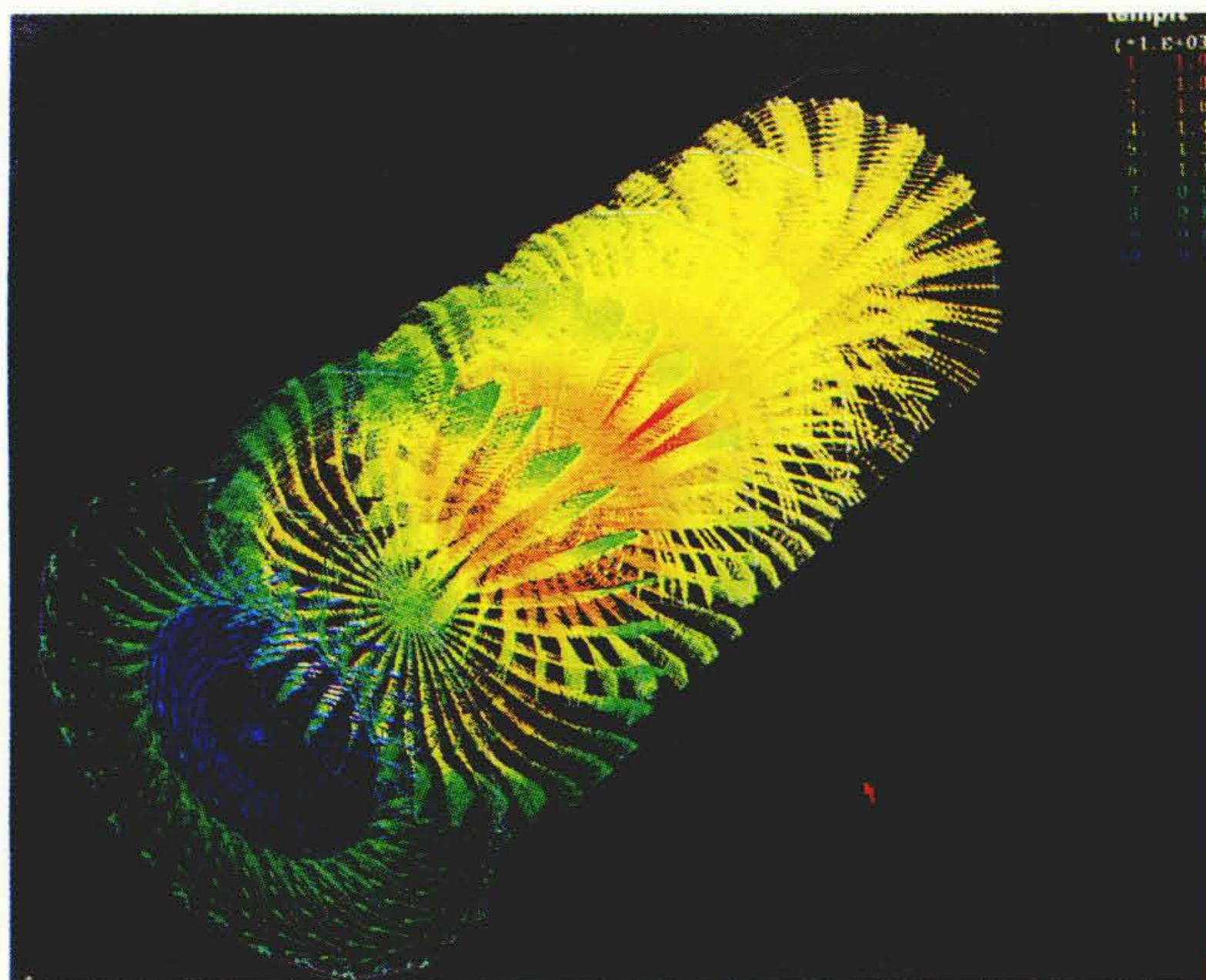


図3 燃焼シミュレーション 乱流燃焼解析コードを開発して、燃焼器内の流動・燃焼状態が解明できるようにした。色はガスの温度を、矢印は速度ベクトルを示す。

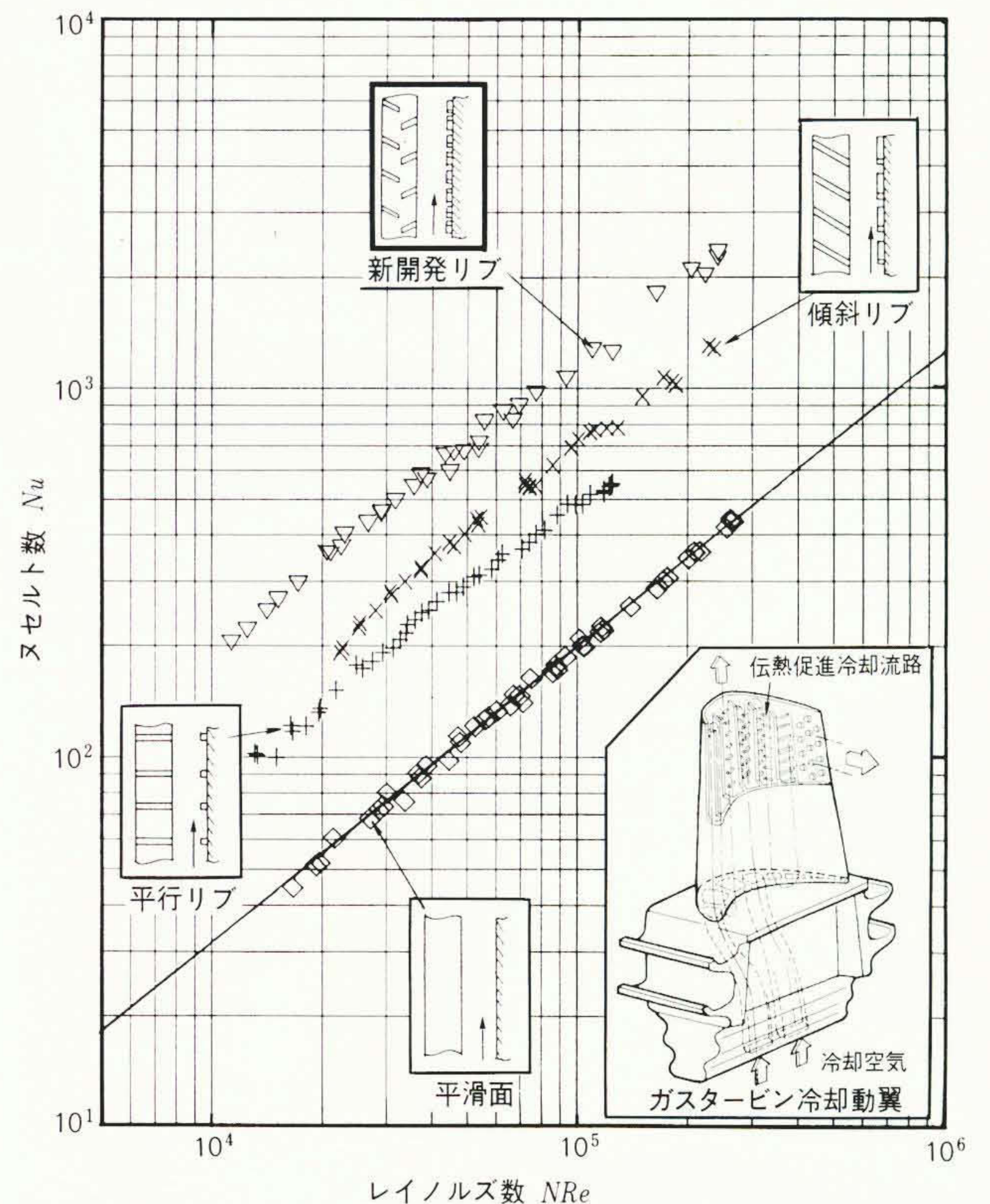


図4 タービン動翼用乱流促進リブの伝熱促進効果 動翼冷却流路に用いる伝熱促進リブに関して、大幅な伝熱促進効果が得られるリブ形状を開発した。

の高温強度の改良を継続するとともに、大形翼の精密製造の結晶制御技術に取り組んでいる。翼長170 mm級の普通鑄造、一方向凝固、単結晶合金翼を図5に示す。結晶粒界の除去によってクリープ強度と高温低サイクル疲労強度が向上し(図6)、耐用温度で20~60℃の向上効果を確認している。また、これらの材料強度のデータベースを蓄積することにより、高温部品の寿命予測や信頼性の向上を図っている。

このほかに、傾斜機能を持たせた長寿命遮熱コーティングの開発、および将来材料であるセラミック、共晶合金、酸化物強化合金についても長期的視野で検討している。

6 おわりに

産業用ガスタービンは、航空用ジェットエンジン技術を基礎に発展してきたが、近い将来、ジェットエンジン以上に高温化が進むと予想され、新たなブレークスルー技術が求められている。ここでは、その一部について述べたが、このほかに高精度設計CAE、高性能シール、各

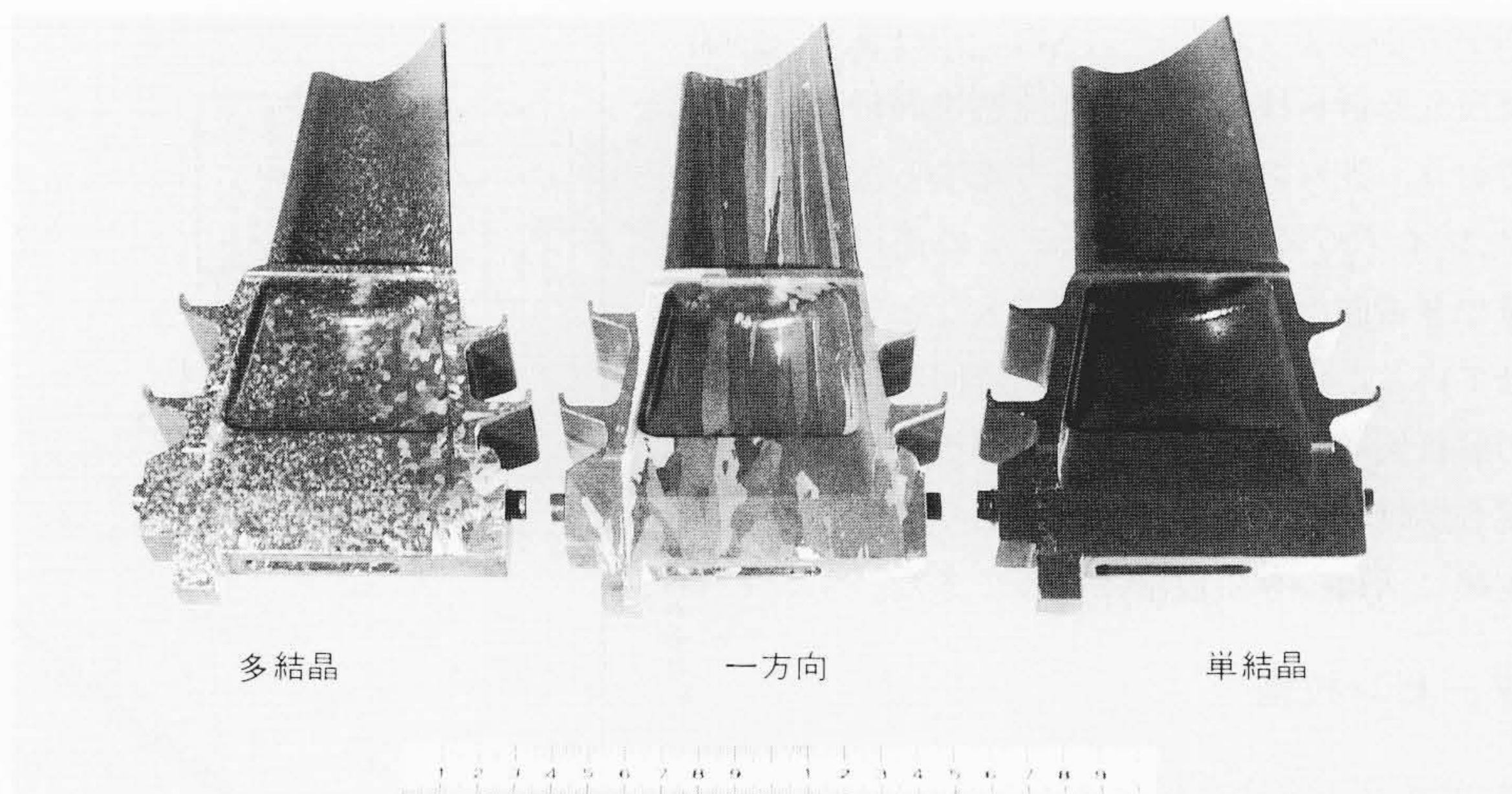


図5 結晶制御精密鑄造 結晶制御によって精密鑄造した一方向凝固翼と単結晶合金翼の外観を示す。

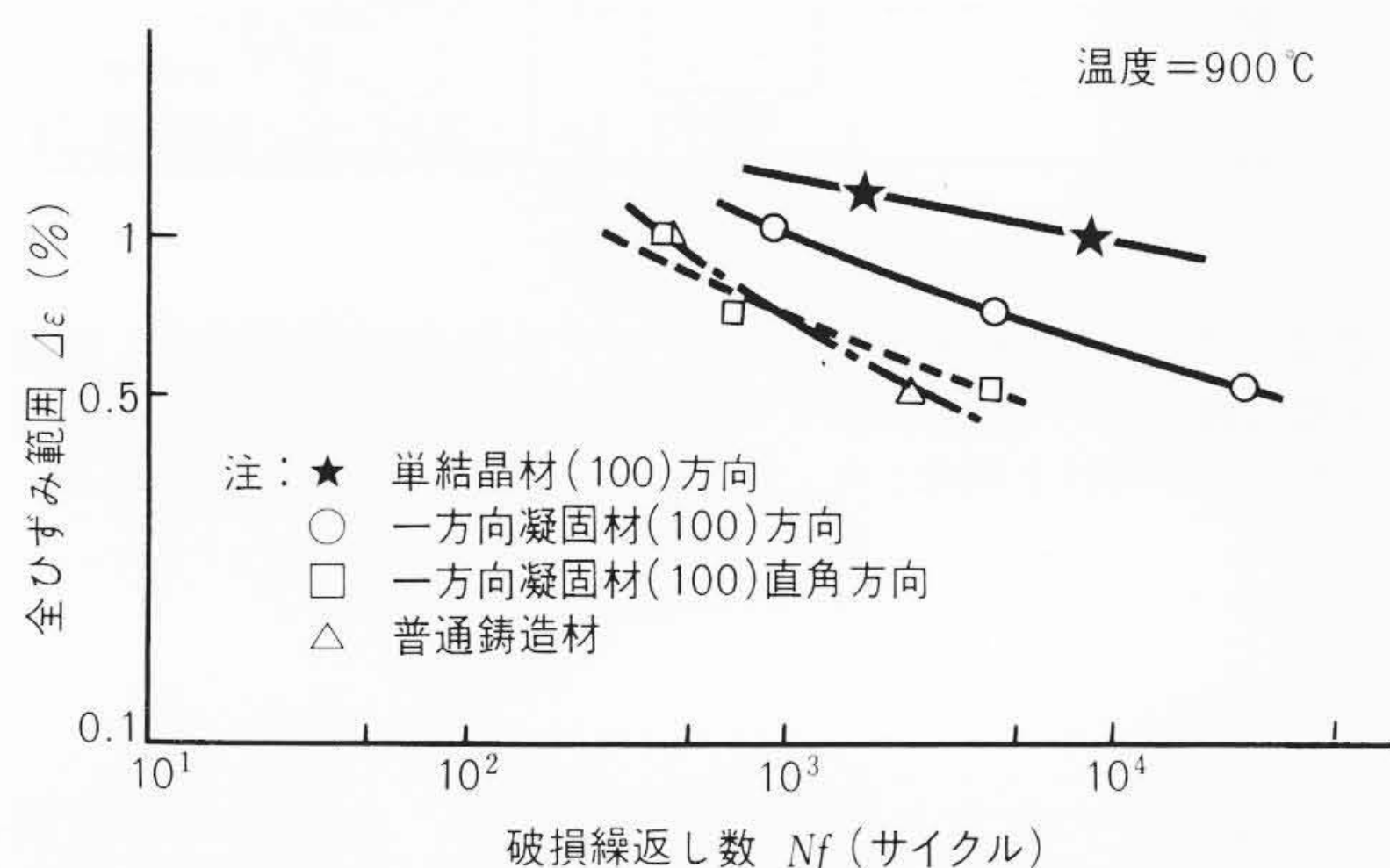


図6 耐熱合金の高温低サイクル疲労強度 結晶制御合金は、高温低サイクル疲労にも優れた特性を示す。

種計測技術の開発に取り組んでおり、直面するエネルギーと環境問題に挑んでいく考えである。なお、ここで述べた内部冷却と単結晶精密鑄造に関する開発については、東北電力株式会社との共同研究によって実施している。

参考文献

- 1) H. Urushidani, et al. : Development of a New 25 MW High Efficiency Heavy-Duty Gas Turbine H-25, ASME Paper 91-GT-72(1992)
- 2) 加藤, 外 : 産業用ガスタービン用軸流圧縮機の遷音速入口段の開発, 第20回ガスタービン定期講演会講演論文集(1992)
- 3) H. Ishii, et al. : A Numerical Study of Surge and Rotating Stall in Axial Compressors, AIAA 91-1896(1991)
- 4) 石橋, 外 : ガスタービン低NO_x燃焼器の開発, 第14回ガスタービン定期講演会論文集(1986)
- 5) 大塚, 外 : レイノルズ応力輸送モデルによる旋回乱流燃焼解析, 第29回燃焼シンポジウム前刷集(1990)
- 6) K. Kawaike, et al. : Effect of New Blade Cooling System with Minimized Gas Temperature Dilution on Gas Turbine Performance, ASME Transaction, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 106-4(1984)
- 7) 安斉, 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(1991)
- 8) S. Nakamura, et al. : Development of Materials and Coating Process for High Temperature Heavy-Duty Gas Turbines, ASME Paper 90-GT-79(1990)
- 9) A. Yoshinari, et al. : Nickel Base Superalloys Single Crystal Growth Technology for Large Size Buckets in Heavy-Duty Gas Turbines, ASME Paper 91-GT-22(1991)
- 10) 松田, 外 : 高耐力耐熱合金に対する全ひずみエネルギーに基づく疲労・クリープ相互作用下の寿命予測法の提案, 材料, 38-430(1989)