ガスタービンの新技術

New Technology for Gas Turbines

最近のガスタービンの開発は目覚ましく，ガスタービン単独の効率向上はもとより，複合サイクルとしての総合効率を上げるためますます高温・高圧化への傾向にあり，一方，いっそう信頼性の高い製品としての要求が高くなってきている。これに対処するため，高温部材の開発及び翼冷却技術の開発が急がれ，かつ環境対応の低NOx形燃焼器の実用化開発に努力が傾注されている。今回は，ガスタービン高温部材として使用されるノズル材及びシュラウド材として開発した新材料，並びに高温部動静翼の冷却方式の開発の一部を紹介し，かつ低NOx形燃焼器の開発状況，石炭ガス化などに応用できる低カロリーガスだ(焚)き燃焼器の開発状況について述べる。

漆谷春雄* Haruo Urushidani
福井　寛** Yutaka Fukui
川池和彦*** Kazuhiko Kawaike
石橋洋二**** Yōji Ishibashi

1 緒　言

ガスタービンの開発に当たり，適正な材料の選定及び高温化対応が可能な燃焼器の開発は，非常に大きなウエートを占める。特に高温部材の開発は，信頼性向上及び効率向上につながり，また環境にマッチした燃焼器の開発は必す(須)のものである。

以下に，日立製作所で開発中の1,260℃，25MW級高性能ガスタービンなどに使用する高温用材料のうち，ノズル材とシュラウド材の開発結果，並びに高温部材の冷却方式の一端についての紹介，及び今後の国内電力会社向け大容量高性能複合発電設備用として開発した低NOx(窒素酸化物)燃焼器(水や蒸気噴射なしでNOx低減を図る。)の開発状況について紹介する。

2 ガスタービン用新材料

2.1 新ノズル材の開発

ノズル材にはプラントの起動，停止の繰返しによる熱応力と運転中の定常応力が重畳し，長時間運転後には**図1**に示すようなクラックが発生し，そのつど補修を重ね使用している。この現象は高温になるほど顕著に現われる。このクラック発生によるノズルの損傷を防止するためには，熱疲労現象及びクリープ現象に対して優れた材料を開発する必要がある。

今回，従来材のコバルト基合金と比較して高炭素化で熱疲労性の改善を図り，またNb，Ti，Zrの複合添加によりクリープ破断強度，及び破断特性の向上を図った新高炭素含有コバルト基合金を開発した。この開発材の光学顕微鏡による組織写真を**図2**に示すが，これに見るように，この開発材の組織はベースメタル中に共晶炭化物，二次炭化物及びMC炭化物が分散したものである。これらの析出物と固溶強化により高温強度の向上を図った。また，温度サイクル850℃⇄300℃を付与したとき，クラック発生までのサイクル数及びクラックの箇数を調査した結果，開発材は良好な特性を示し(**図3**参照)，また高温低サイクル疲労現象に対しても高い疲労強度を持っていることが分かった。一方，クリープ破断強度でも**図4**に示すように，開発材は特に高温，長時間で優れた特性を持っており，この点でも冷却空気量減少などで効率向上へ大きく寄与している。

新開発材で精密鋳造したガスタービン用ノズルの一例を**図5**に示すが，ノズル材として要求される他の諸特性(鋳造性，溶接性，耐食性，長時間組織安定性，加工性など)に関しても，従来のコバルト基合金材と同等以上であることが実験で確認されており，高温ガスタービン用ノズル材として既に実用化

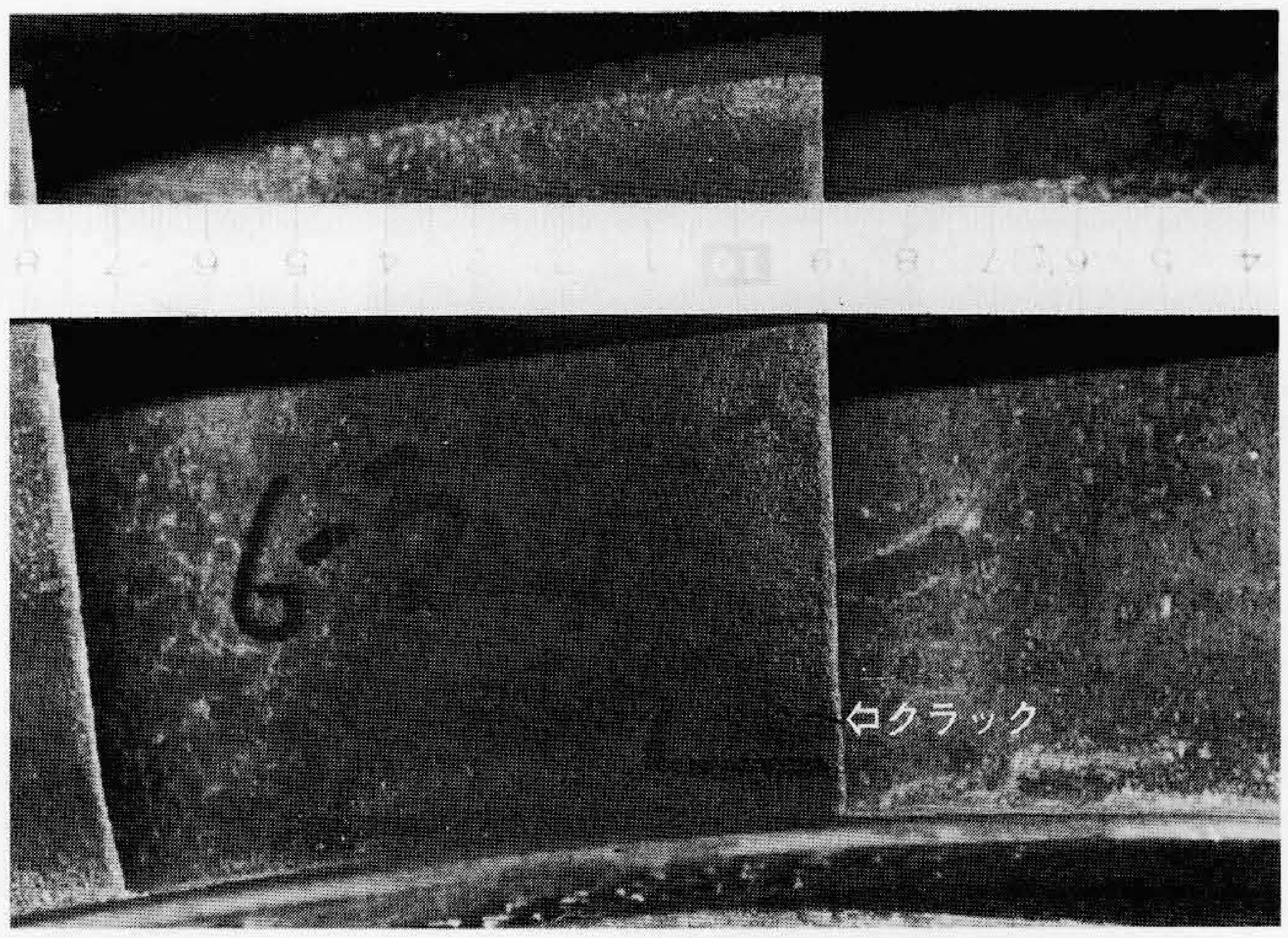


図1　クラックが発生したノズルの一例　長時間運転後のノズルに発生したクラックの状況を示す。

* 日立製作所日立工場　** 日立製作所日立研究所 工学博士　*** 日立製作所機械研究所　**** 日立製作所機械研究所 工学博士

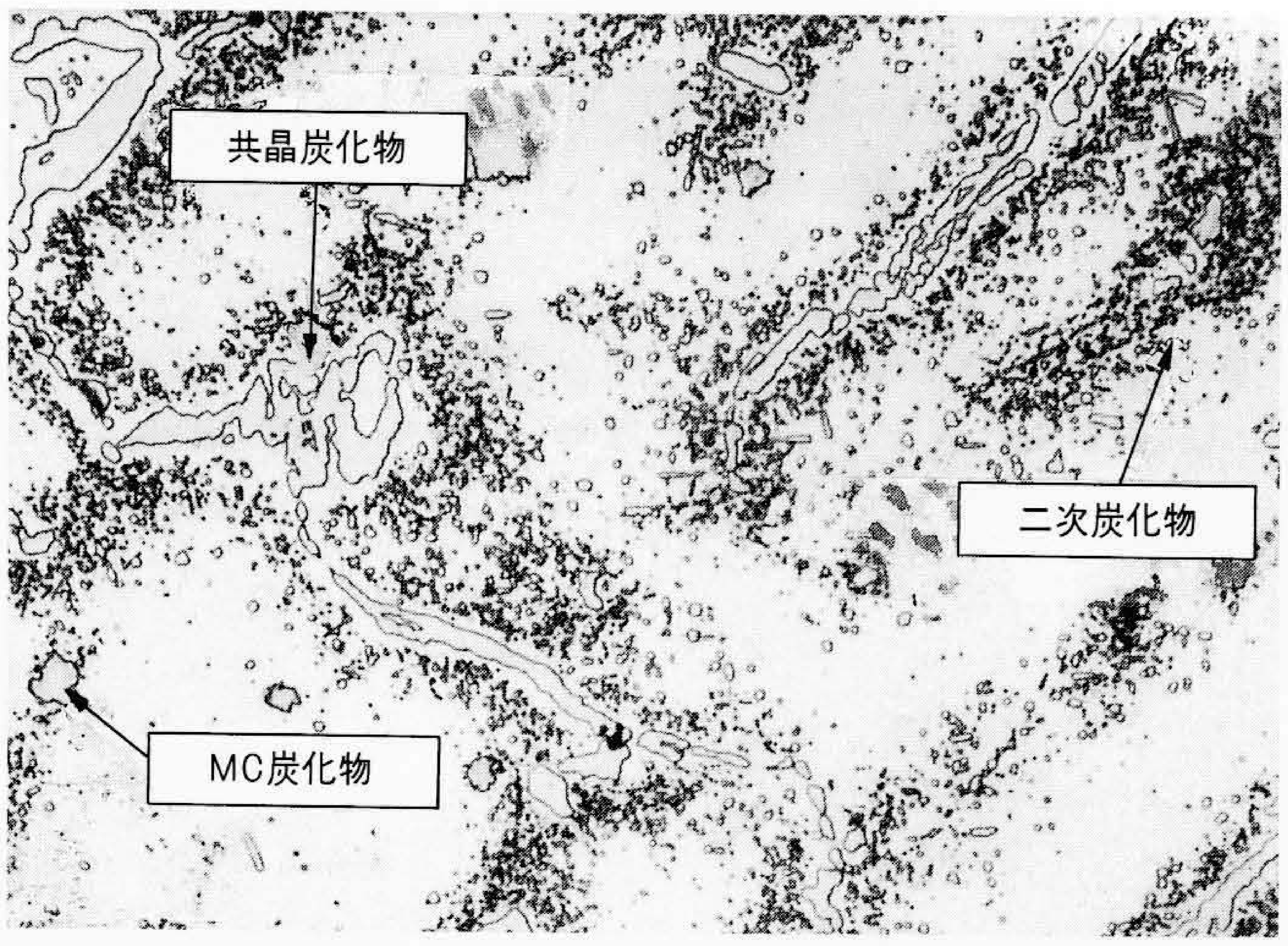
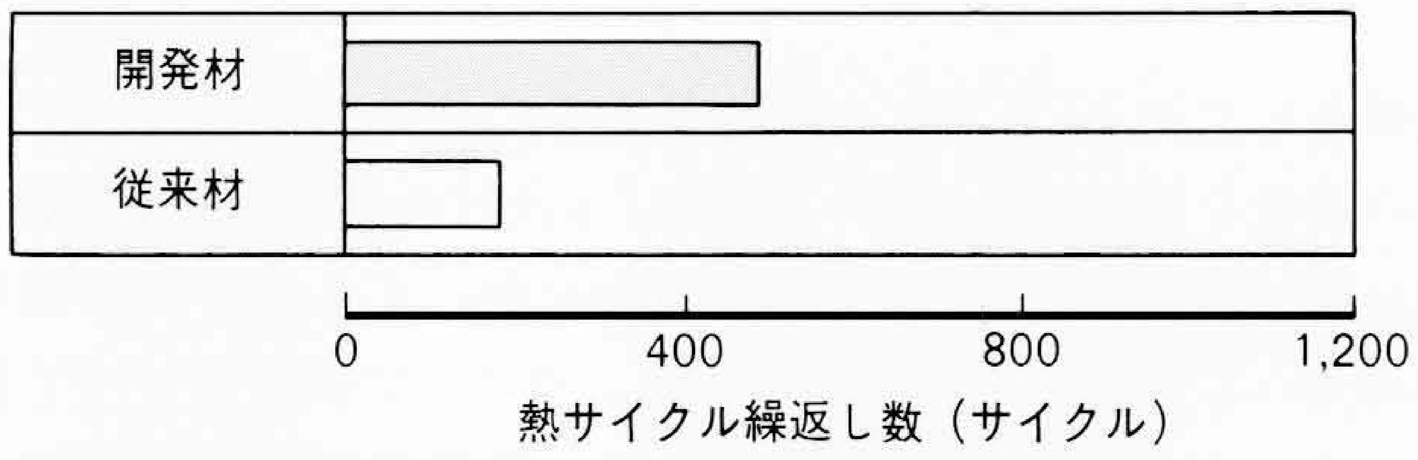
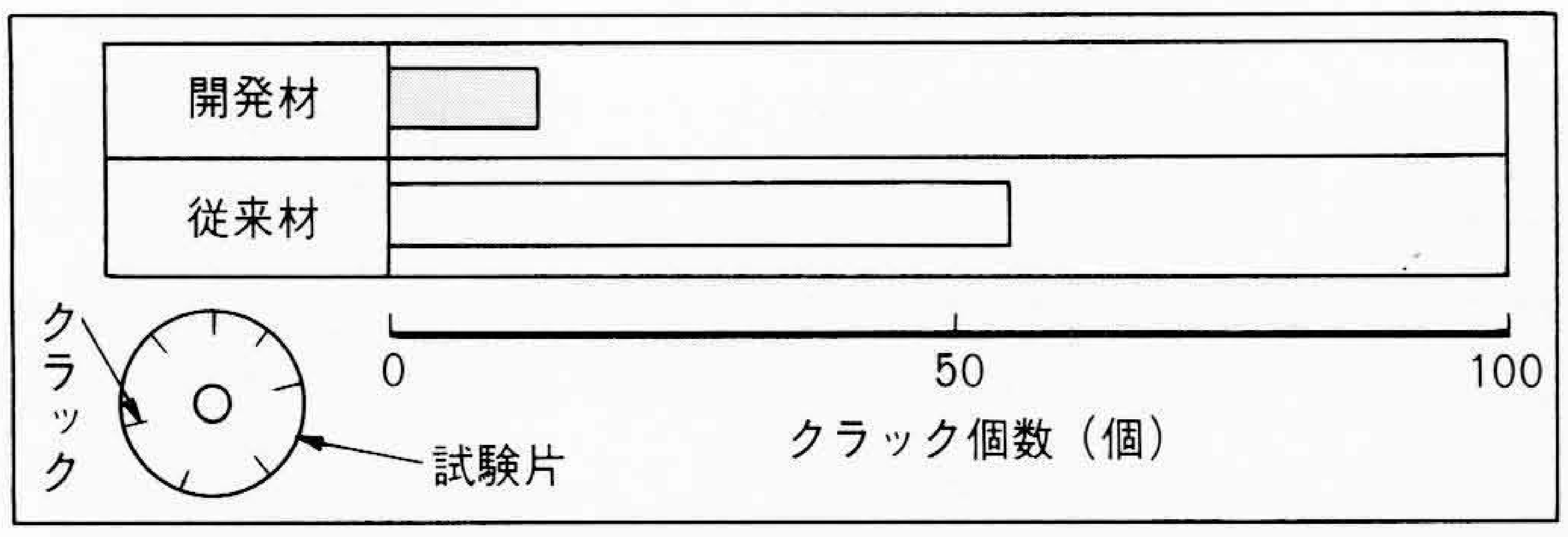


図2　新ノズル材の光学顕微鏡組織(倍率400)　MC炭化物生成元素添加による二次炭化物の凝集粗大化を阻止する状況を示す組織写真である。

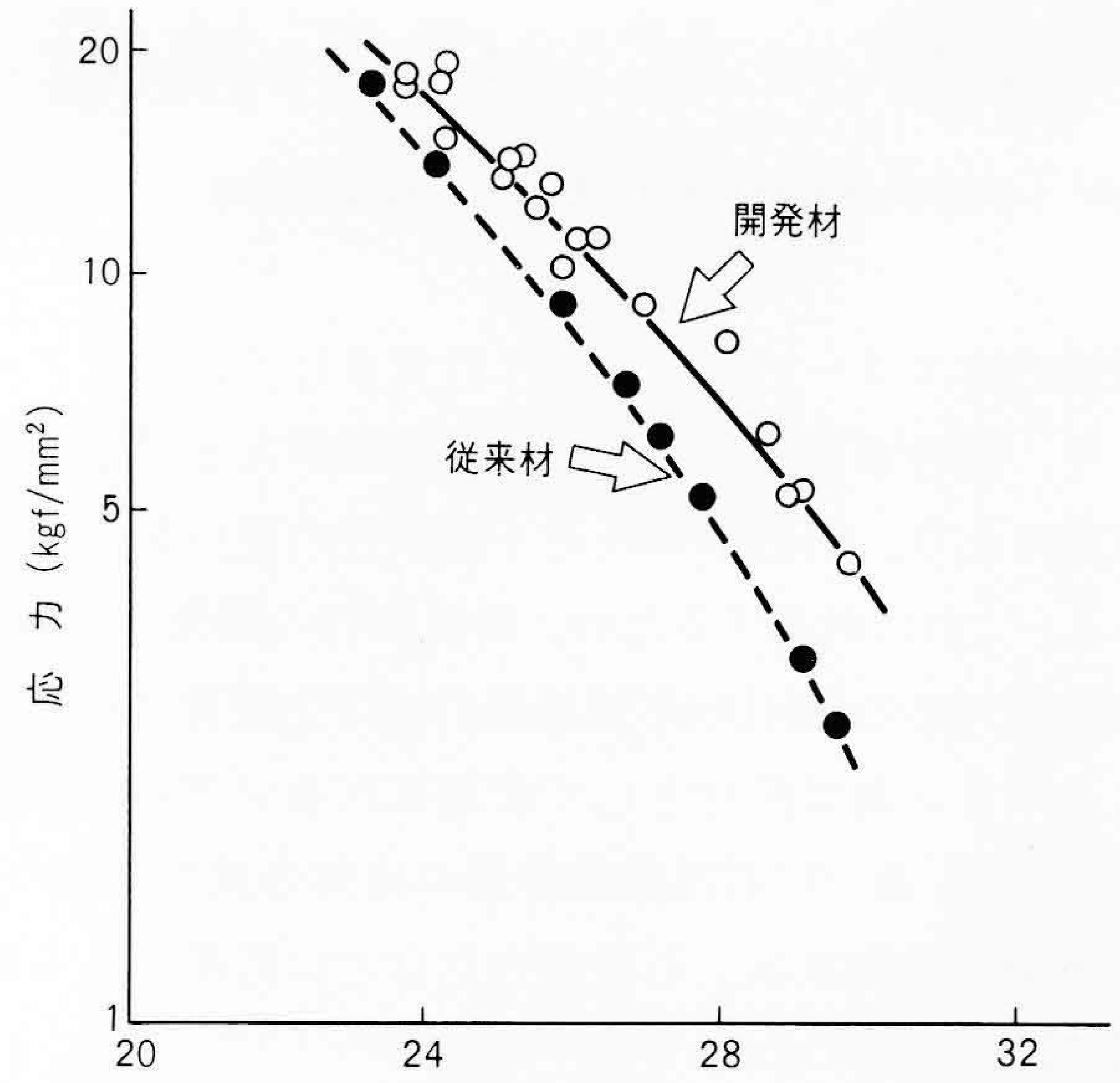


(a) 最大クラック長さ0.5mmとなるまでの熱サイクル繰返し数



(b) 最大クラック長さ10mmとなったときの試験片の全クラック数

図3　新ノズル材と従来材の耐熱疲労性の比較　温度サイクル850℃⇄300℃を付与したときに供試体に生じるクラックの長さが0.5mmになるまでの繰返し数と，最大クラック長さ10mmになったときの総クラック数の比較を示す。



$P=T(\log t_r+C)\times10^{-3}$
T：℃+273
C：20
ここに
P：ラーソンミラーパラメータ
T：温度(K)
t_r：破断時間(h)
C：定数，20

図4　新ノズル材と従来材のクリープ破断強度の比較　従来材と開発材のクリープ破断特性を，ラーソンミラー曲線で比較したものである。

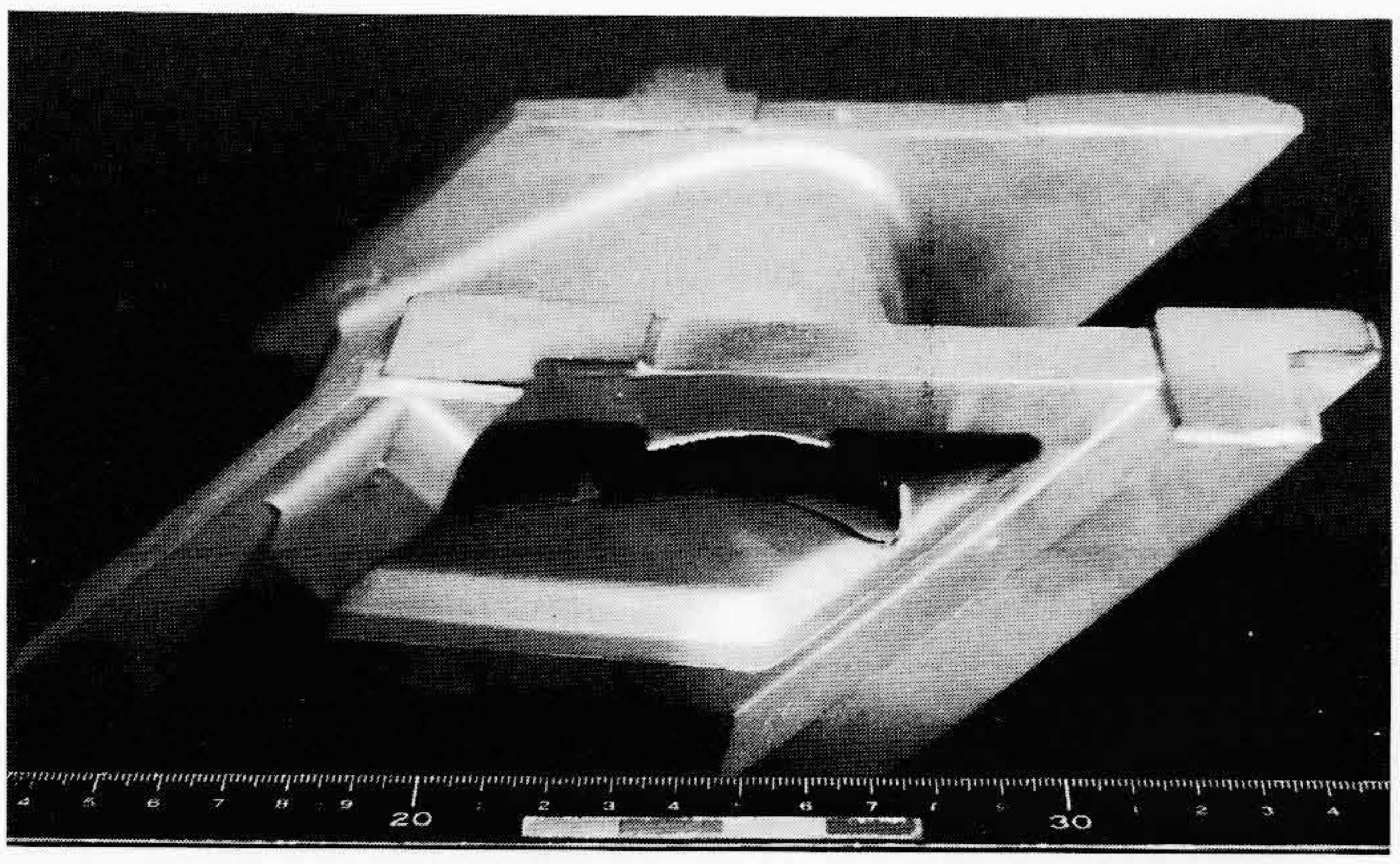


図5　新ノズル材で精密鋳造したガスタービン用ノズルの一例　新ノズル材で製作したノズルを，上方から見た写真である。

の域に達している。

2.2　新シュラウド材の開発

シュラウド材でもノズル材と全く同様に，高温域で使用されるための繰返し熱応力と定常応力の重畳，更にもろい金属間化合物(σ相)の析出による組織変化との相乗効果によって，クラックの発生は多く見られていた(**図6**)。

今回このもろい金属間化合物の析出を防止し，組織の長時間安定化を図り，かつクリープ破断特性の優れた新鉄基合金のシュラウド材を開発し，実用化への段階に入った。この新開発材は，C，Ni，Si及びCrの含有量を調整して組織の安定化を図り，かつNb，Tiを添加してクリープ特性を改善したものである(**図7**)。また，**図8**に示すように，温度サイクル試験の結果クラック発生が大幅に改善され，耐熱疲労性が従来材に比べて優れた合金であることが立証された。なお，鋳造性，加工性などでも従来材に比べ同等であることが確認されている。

3　タービン要素開発(翼の主に冷却関係)

ガスタービンは，タービン入口温度の高温化と圧縮機の高圧力比化による熱効率，比出力特性の向上が追求されてきたが，高温・高圧力比化はタービン翼などの高温部品にとっては冷却条件が厳しくなるため，サイクル上のメリットを損なわないような高い冷却効率を持った翼冷却技術が必要となる。

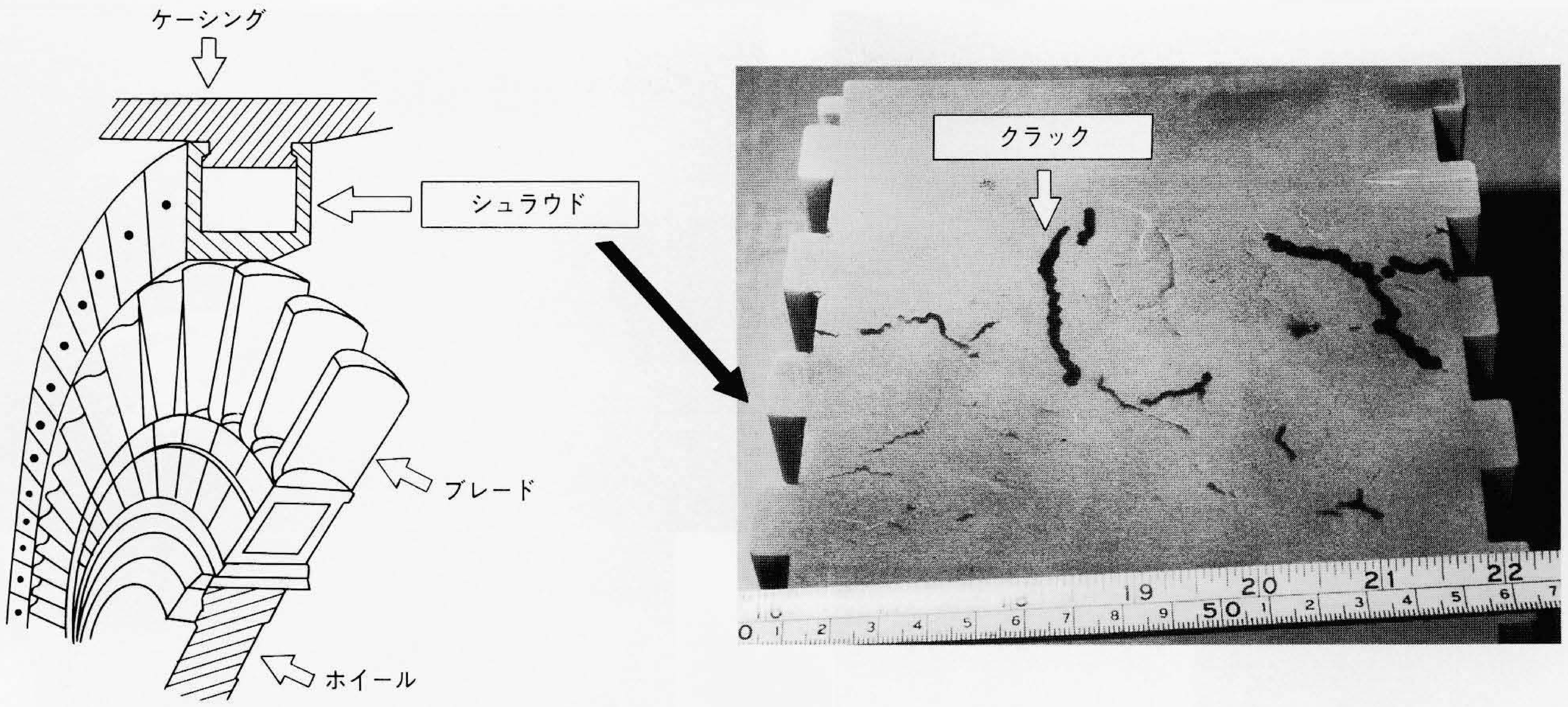


図6　シュラウドセグメントの取付位置及びクラックの発生状況　シュラウド使用中に発生したシグマ相に熱疲労が作用し，クラックが生じた状況を示す。

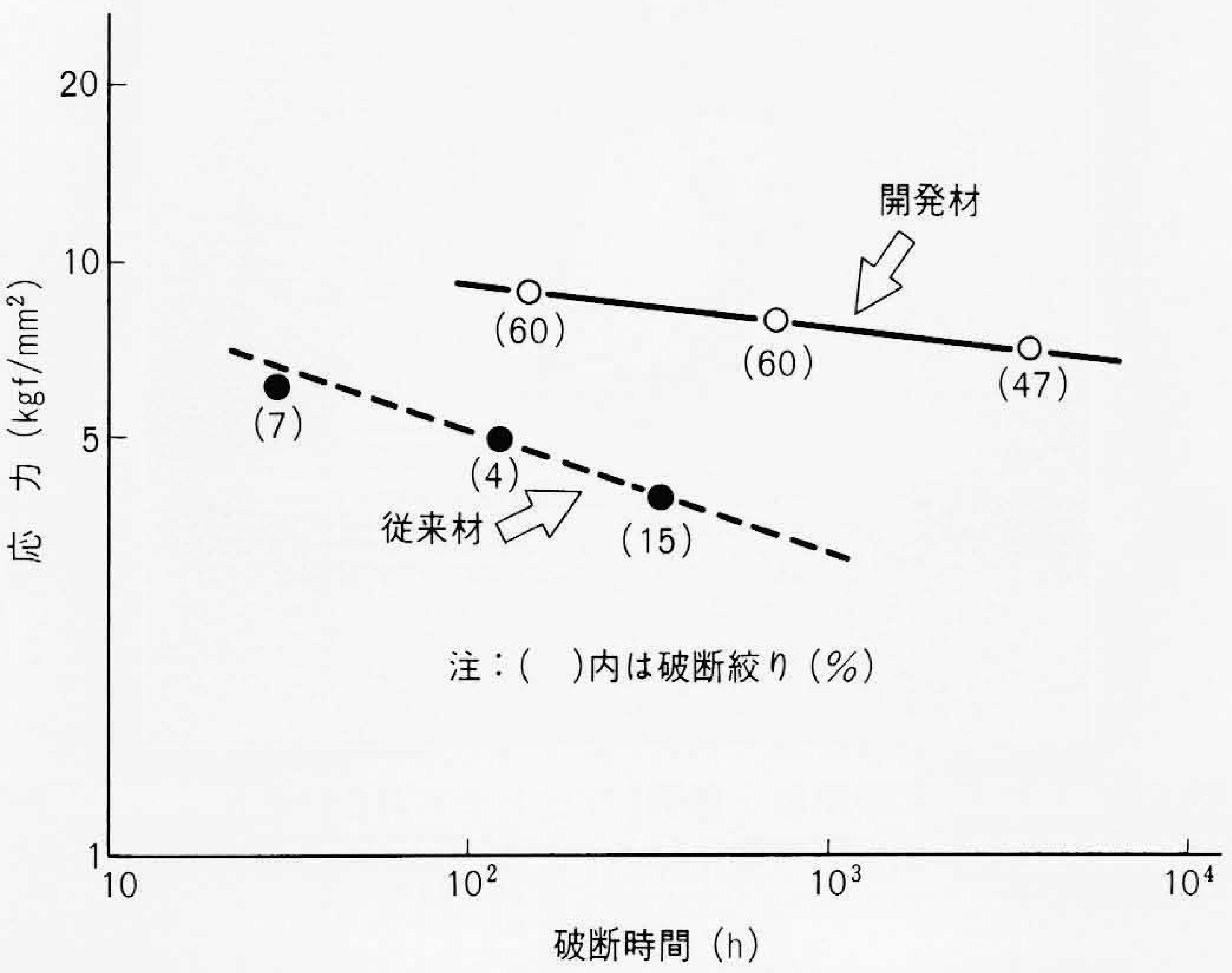


図7　新シュラウド材と従来材のクリープ破断強度の比較　新開発材と従来材のクリープ破断特性を，時間を横軸に破断時間をとり比較したものである。

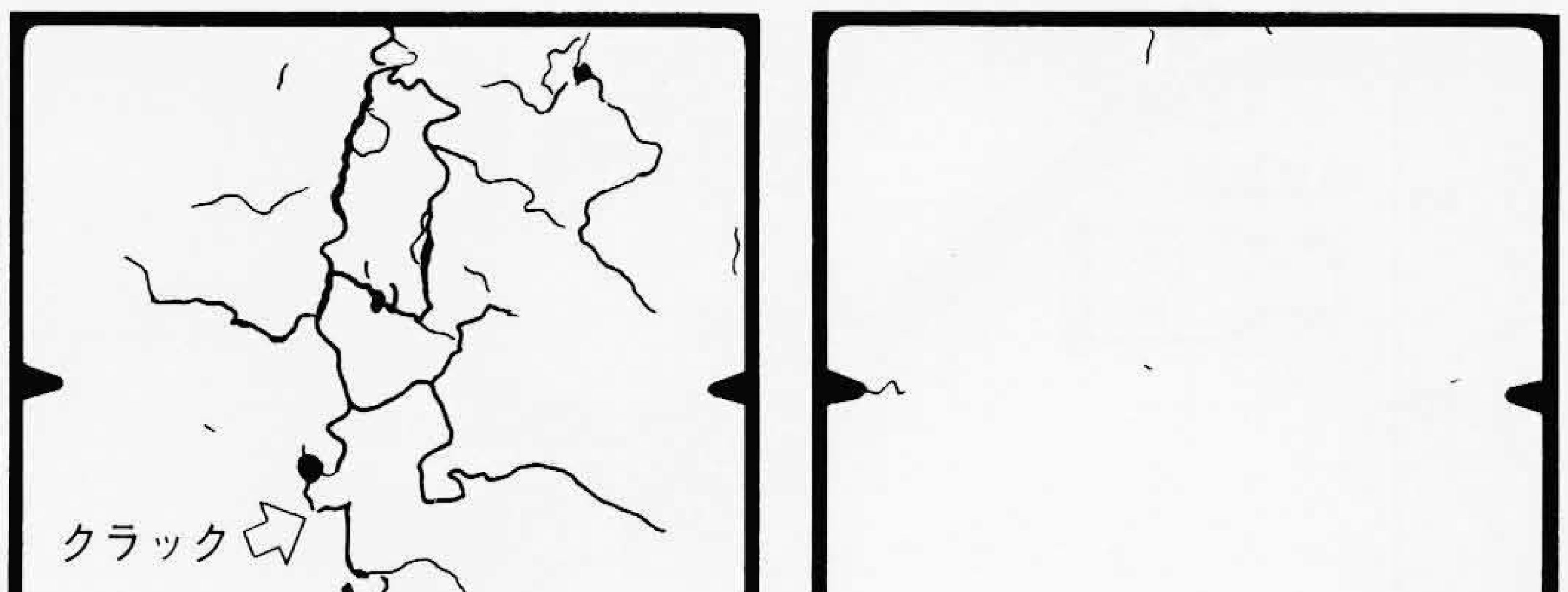


図8　新シュラウド材と従来材の耐熱疲労性の比較　温度サイクル750℃⇄100℃を150回与えたときの断面に発生したクラックの状況(倍率1.9)を示す。

同時に，空力性能，冷却性能，耐熱材料，強度信頼性にバランスのとれた総合的な設計技術が重要となる。このために，ヒートバランス，空力，翼形，冷却，強度，振動などの一連の設計についてCAD (Computer Aided Design)，CAE (Computer Aided Engineering)化を図るとともに，その設計のベースとなる各種の要素試験を実施している。高温タービンでは，冷却空気の消費量がガスタービン全体性能に及ぼす影響が大きいことから，冷却を中心とした要素研究を次の観点から行っている。

(1)　冷却空気量がガスタービン性能に及ぼす影響の分析と把握[1)]

(2)　冷却空気消費量の少ない高性能冷却翼の開発

(3)　冷却翼の熱負荷の低減と熱応力を低減する翼形状の検討

(4)　耐熱材料の材料データの蓄積と寿命評価

これらの主要課題に対し以下に述べるよう要素研究を系統的に進めている。

3.1　2次元高速翼列試験

図9はタービン翼の空力性能を実マッハ数で測定する翼列風洞で，通常の翼形損失や流出角特性のほかに，フィルム冷却や後縁吹出しによって，主流空気と冷却空気が混合する影響も把握している。

3.2　冷却試験

ガスタービンの冷却は現用の1,100℃級ガスタービンに採用されている静翼のインピンジメント冷却，フィルム冷却や動翼の単純対流冷却に対し，冷却性能の向上を図る目的で次の手順で伝熱研究を行っている。

(1)　冷却モデル装置による熱伝達率の測定と，伝熱促進法の検討

(2)　上記で開発された冷却要素を採用した2次元冷却モデル翼による冷却性能の評価

(3)　実翼と同じ精密鋳造製の冷却翼による高温回転試験

冷却翼の冷却性能評価に対しては，通常の熱電対を用いた

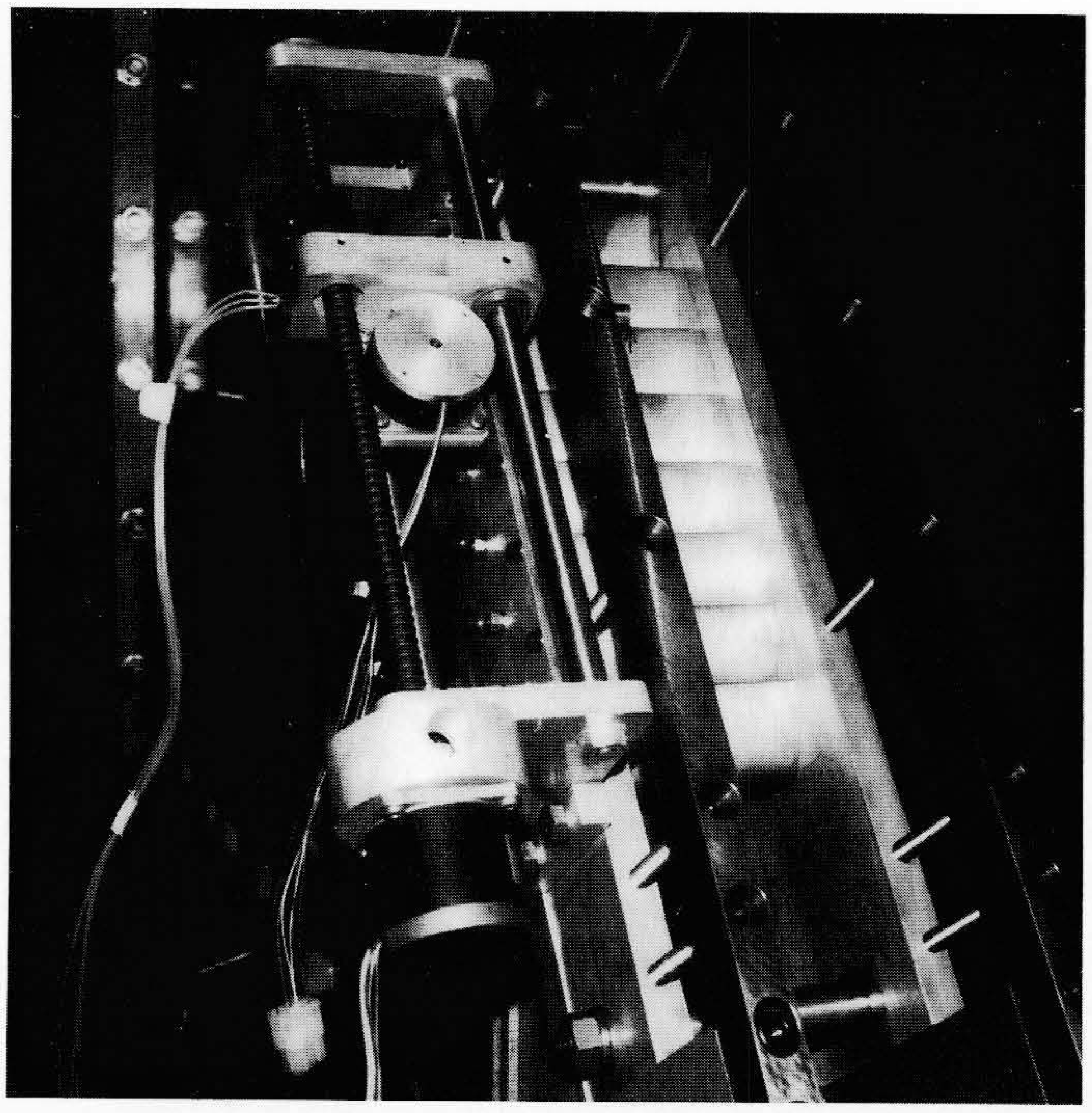


図9 翼列風洞試験装置 空力性能試験及び冷却性能試験用高速翼列風洞装置を示す。

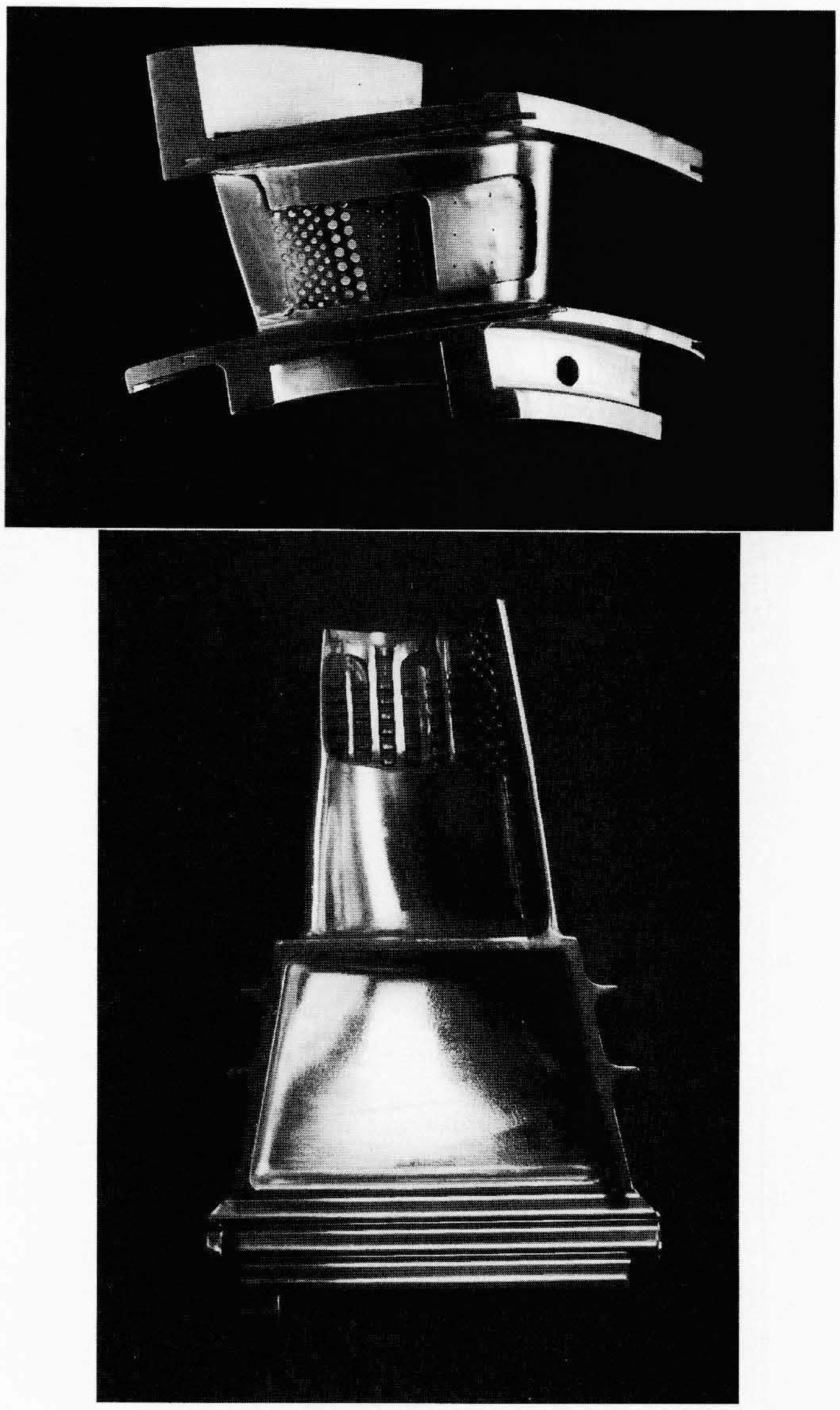


図10 高温回転試験用動・静翼(カットモデル) 高温回転試験で試験した動翼及び静翼の一部分をカットした状態を示す。

翼温度の測定に加え，光学的に翼面の面温度分布を光学的に測定して画像処理する測定法や，パイロメータを用いた回転翼の非接触温度計測技術などを用い，より高精度の温度情報を，より多く取るよう工夫している。

また，翼面だけでなく，二次流れの影響を受けシミュレーションの難しいエンドウォール部の冷却に対しても基礎試験によって熱負荷分布などの測定を行い，冷却設計のデータとして用いている。

以上の結果，静翼のインピンジメント冷却の強化法や動翼に対するタービュレンスプロモータ付きのリターンフロー形冷却構造を開発し，その冷却性能の改善効果を確認した。**図10**に高温回転試験に供試した静翼と動翼のカットモデルを示す。

更に冷却翼自体の性能のほかに，所定の冷却空気量を確実に冷却翼に供給するために，ロータ内を通る流動状態の解明，流動損失を低減するインデューサの開発など冷却空気供給系統の検討や，動翼，静翼間のすきまからの主流ガスの漏れ込み量とシール空気量の関係などのデータも専用の試験装置によって把握している。

4 ガスタービン燃焼器の開発

4.1 低NOx燃焼器

(1) 開発計画

LNGの高効率利用を目指した大容量複合発電プラントが，本格的な稼動期に入っているが，これらにはいずれも厳しいNOx規制値が課せられている。このプラントに要求されるNOxレベルは現状燃焼器のNOxの約40%以下という非常に低い値であり，しかも経済性の観点から，水や蒸気噴射を用いない燃焼制御だけで低減させるものでなければならない。このため従来にない予混合燃焼方式を取り入れた全く新しい構

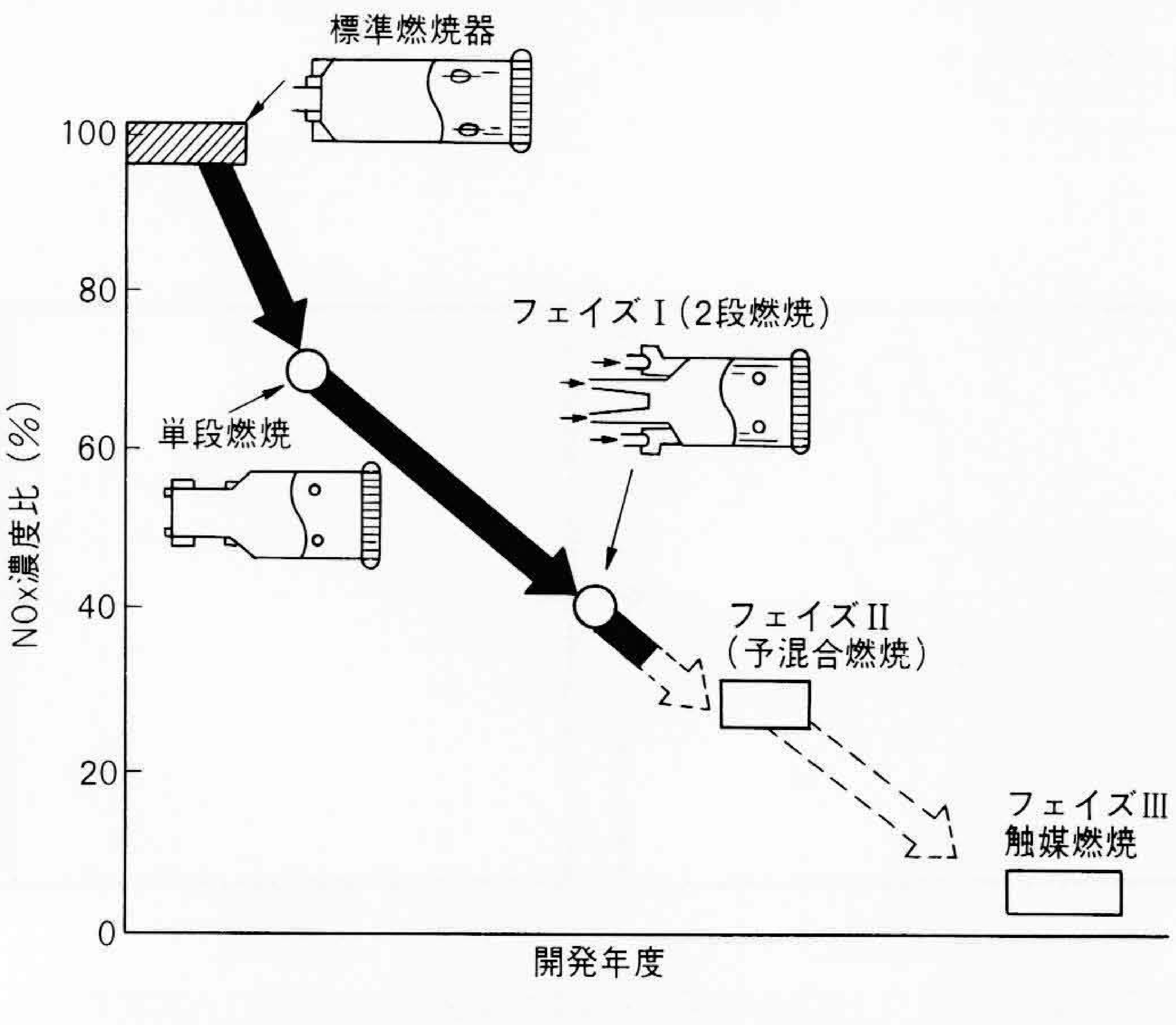


図11 低NOx燃焼器の開発計画 本図は，開発年度が進むに従って，NOx濃度の低い燃焼器が開発されていることを示す。

造の燃焼器の開発が必要となる。**図11**に低NOx燃焼器の開発計画を示す。

開発は3段階のNOx目標値に対して進められており，フェイズⅠの開発目標値は現状燃焼器のNOxレベルの40%以下とするものである。フェイズⅡは同じく30%以下である。フェイズⅢは低NOx化の最終目標値であり，触媒燃焼を用いて5%以下とすることをねらうものである。**図11**中の太く黒い矢印線は，これまでの低NOx化の経緯を示すものである。各種の燃焼器選定試験を経て，フェイズⅠとしては拡散燃焼と予混合燃焼を組み合わせた2段燃焼方式の開発を進め，実圧燃焼試験によりNOx及び燃焼器性能が開発目標値を達成できることを確認した。

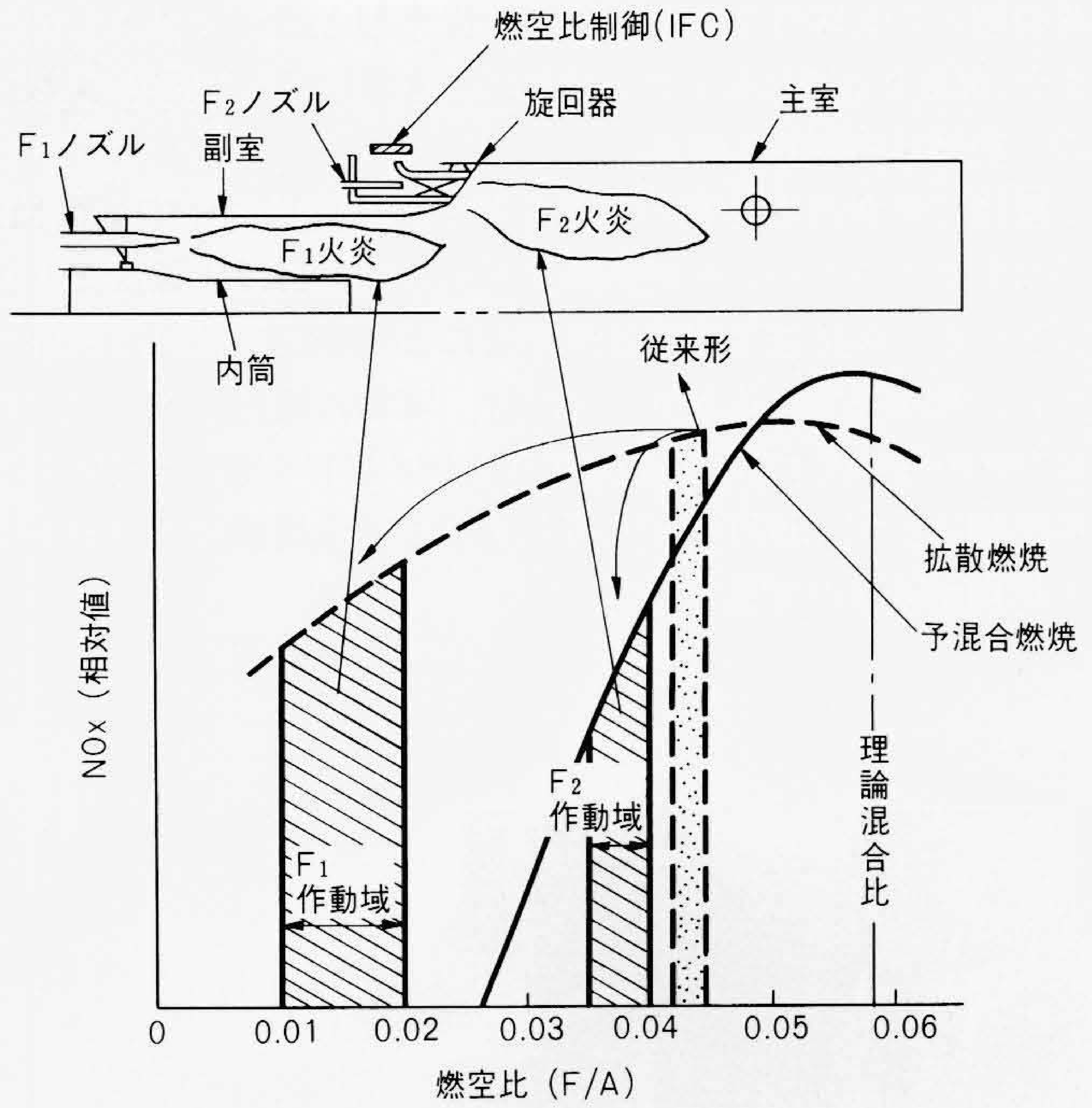
(2) 低NOx燃焼器の燃焼方式及び燃焼器構造（フェイズⅠ）

図12は低NOx燃焼器の作動燃空比範囲と，それに対応するNOxレベルの相対的傾向を示したものである。燃料中に窒素分を含まないガス燃料などのNOx生成量は，火炎のピーク温度により支配的な影響を受ける[2]。したがって，燃料希薄燃焼による低温燃焼化によりNOxの生成を制御できるが，この場合，同図に示すように均一混合気の燃焼，すなわち予混合燃焼が低NOx化に非常に有利となる[3]。しかし，予混合燃焼は安定燃焼できる燃空比範囲が狭いので，ガスタービンの全作動域を安定燃焼させるための対応技術が必要となる。これらのことと部分負荷に対する低NOx化などを考慮して，以下の燃焼方式を採用した。

(a) 1段目を拡散燃焼，2段目を予混合燃焼とする2段燃焼方式
(b) 1段目のマルチノズル化
(c) 2段目の燃空比制御

1段目，2段目燃焼（以下，F_1，F_2と記す。）の作動燃空比は，構造開発を進めた一連の燃焼試験によってNOxと燃焼性能のバランスを図った適正範囲に設定した。F_2の燃空比制御は予混合燃焼の作動域を拡大し，できるだけ低負荷側で2段燃焼を可能とするために行うもので，具体的にはF_2ノズルに供給される燃焼空気量を内部流量制御器（IFC：Internal Flow Control）によってF_2燃料流量に対応して調節し，適正燃空比範囲での燃焼を実現させるものである。**図13**にガスタービンの負荷に対するF_1，F_2の燃料比及びIFCの開度計画を示す。

図14に燃焼器構造を示す。燃焼器の全長と主室径は，従来



注：略語説明 IFC(Internal Flow Control)

図12 低NOx燃焼器の燃焼方式 本図は，燃焼器を2段燃焼にした場合，NOx濃度が低下する原理を示したものである。

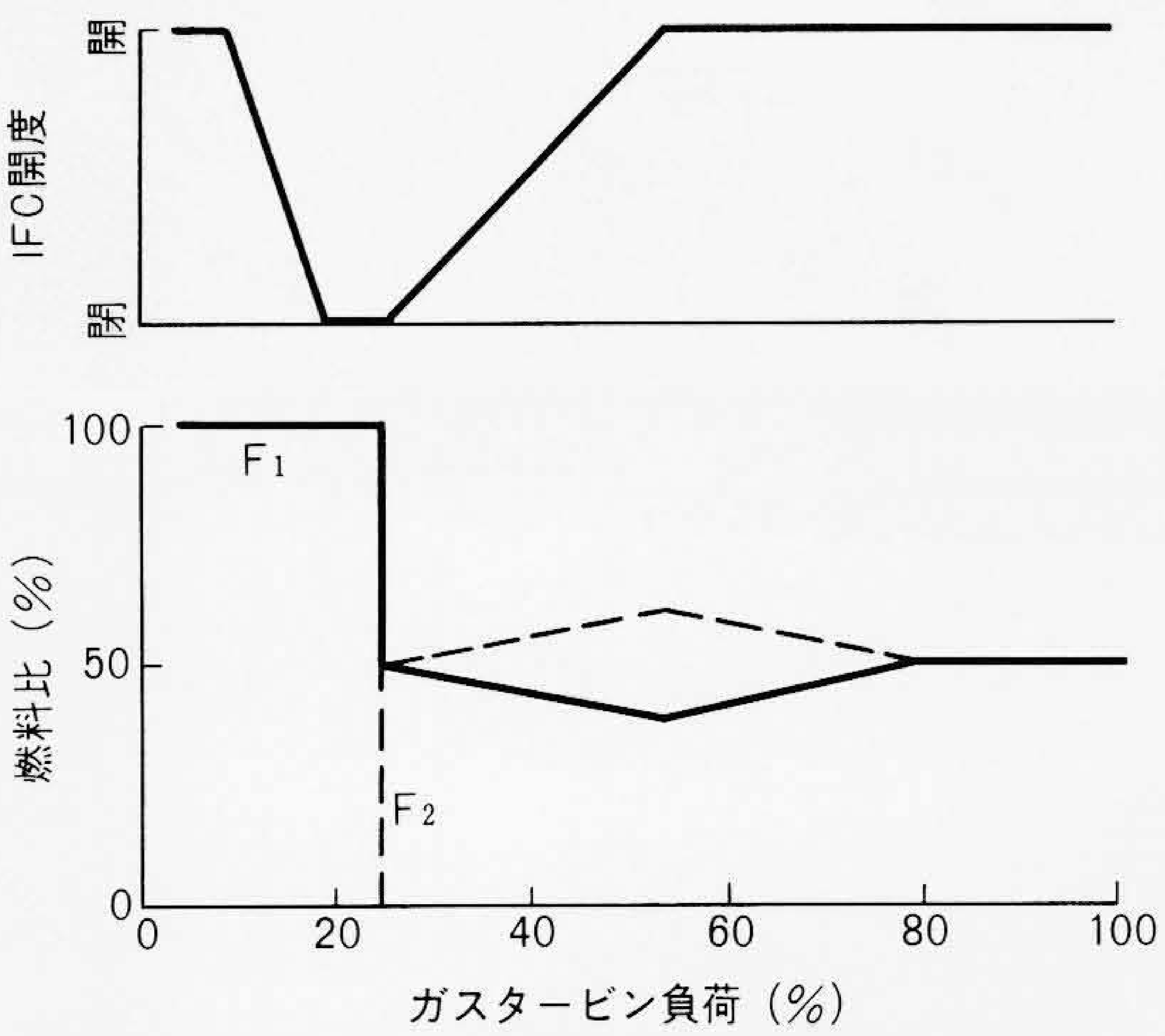


図13 燃料比及びIFC制御計画 本図は，2段目(F_2)燃料を，ガスタービン負荷のどの時点で投入するか，及びそれに伴うIFC(Internal Flow Control)の動きを示したものである。

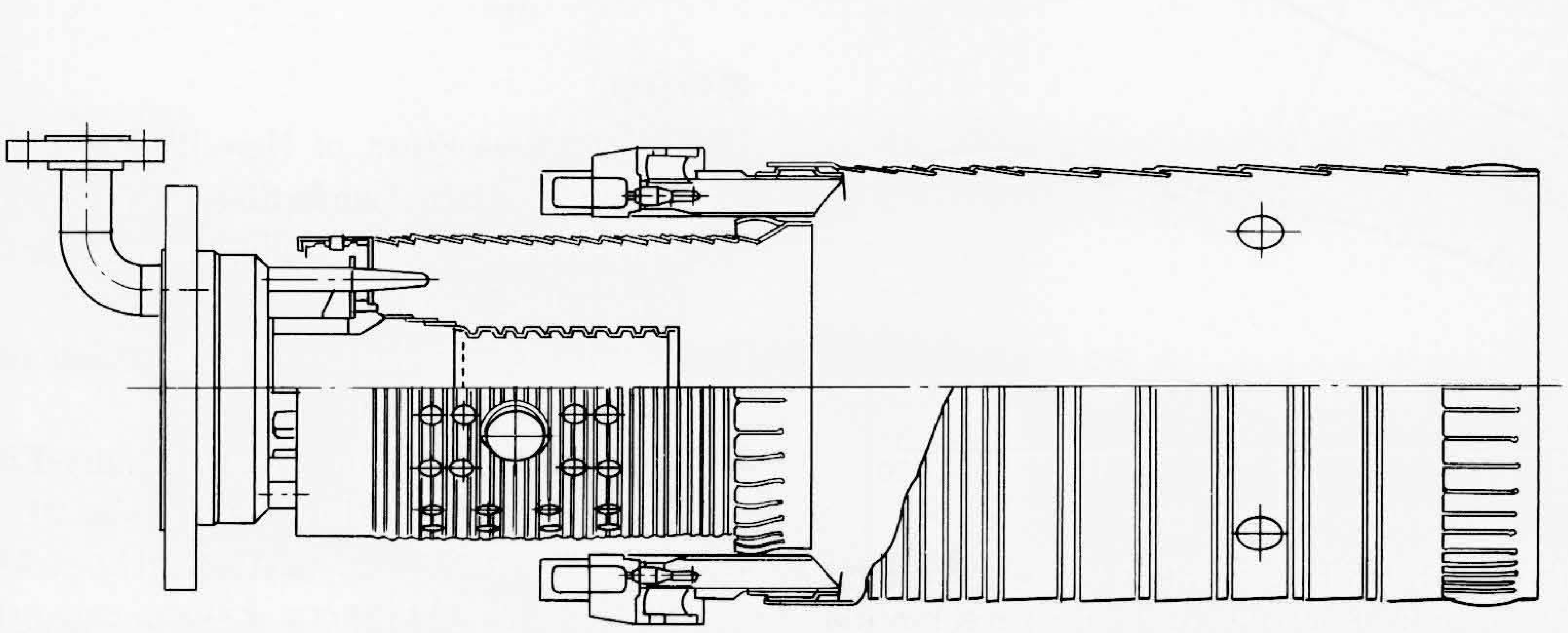


図14 燃焼器構造 本図は低NOx燃焼器の構造図を示すもので，上半が断面，下半が外形状を表している。

燃焼器との互換性を持たせる上で従来形と同一寸法とした。また，副室と主室は組立性と信頼性を考慮して別体構造とした。

(3) 燃焼試験設備の概要

図15に燃焼試験設備の全景を示す。燃焼用高圧空気はMS 5001形ガスタービンを駆動動力とする軸流17段圧縮により供給される。供給空気温度は減温器によって実機条件に調整できる。燃焼器テストスタンドには，実物の尾筒，タービン静翼が組み込まれており実機とフローパス形状を合わせてある。本設備により1,300℃までの実圧条件での燃焼試験及び着火，火炎伝搬試験が実施できる。

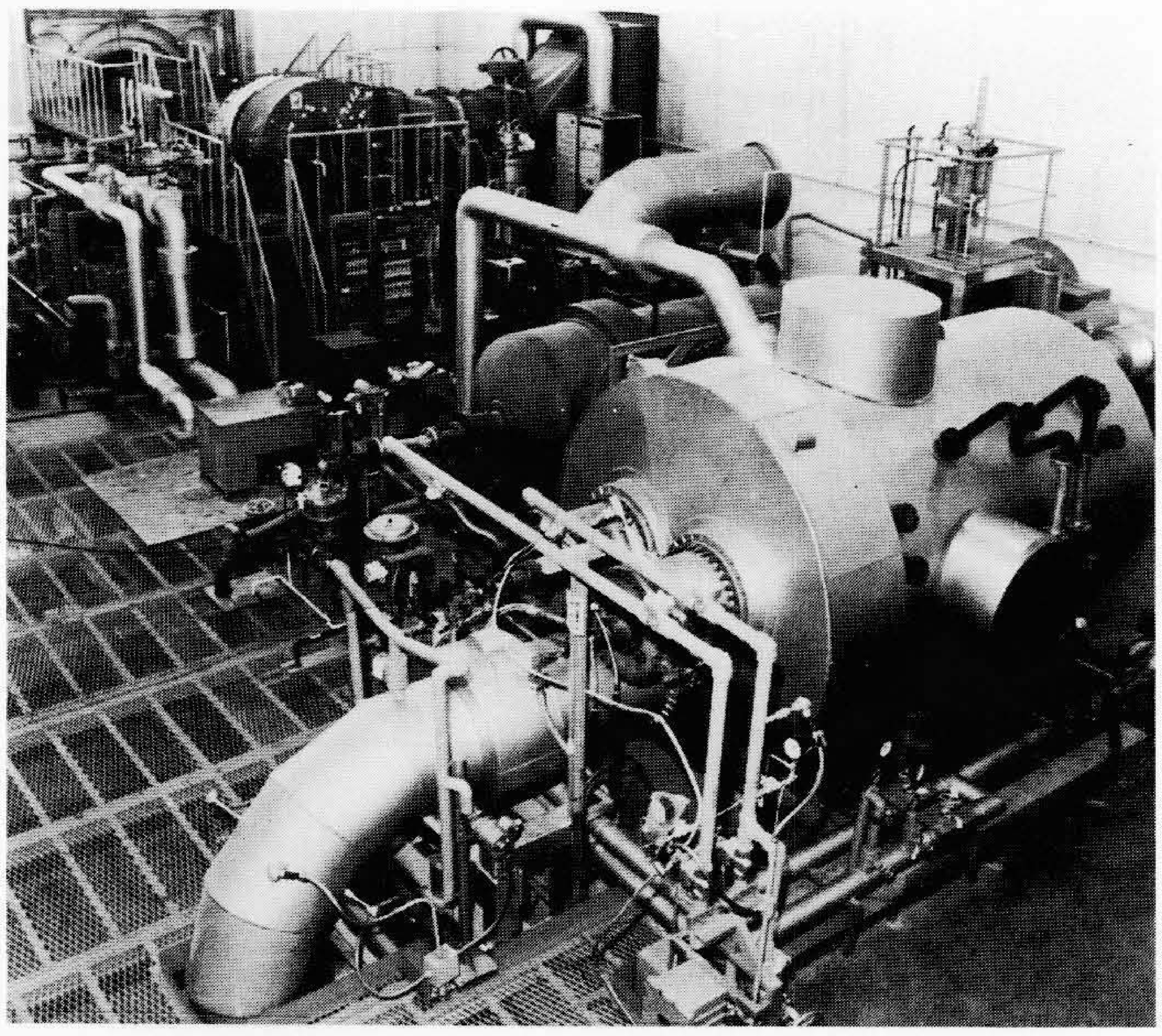


図15 燃焼試験設備の全景　燃焼試験室の内部写真で，空気源，予熱装置及び燃焼器試験設備を示す。

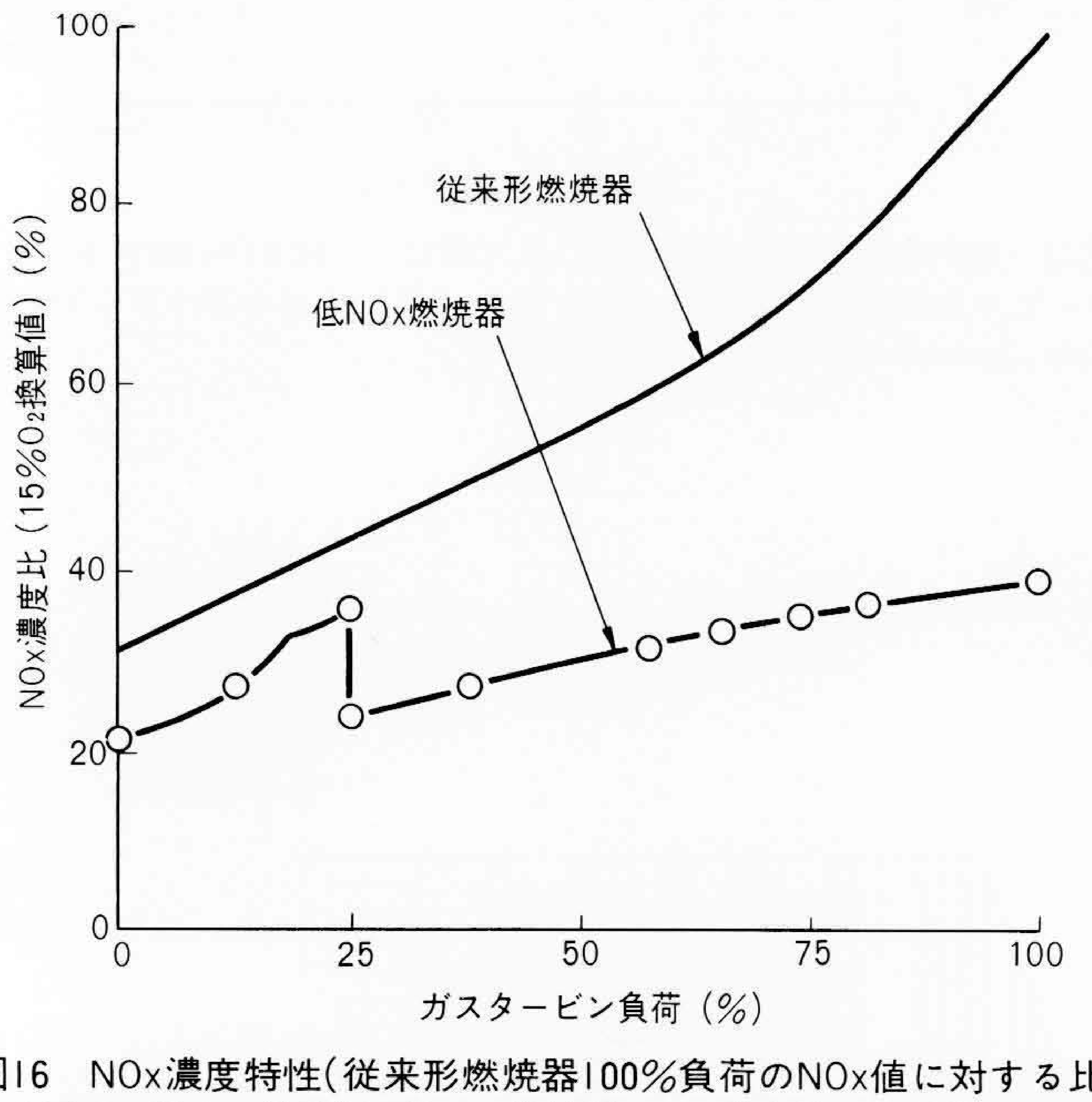


図16 NOx濃度特性(従来形燃焼器100%負荷のNOx値に対する比)　本図は，従来の燃焼器と低NOx燃焼器のNOx濃度特性を比較したもので，従来と比較して半分以下になっている。

(4) 燃焼試験結果

実圧燃焼試験によるNOx特性を**図16**に示す。無負荷から約25%負荷までがF_1単独燃焼である。ガスタービン負荷約25%での2段燃焼への燃料切替えにより低NOx燃焼へ移行し，ガスタービンの全運用負荷帯にわたって低NOx化が達成されている。F_1単独燃焼時もマルチノズルの採用によりNOxは従来形燃焼器よりも低い。一方，未燃分であるCOは高負荷条件では数ppm以下であり，2段燃焼への移行時を含む低負荷時もIFCを用いた燃空比制御により低いレベルに抑えられる。また，燃焼器内の振動圧力は安定燃焼の実現によって従来燃焼器と同等の低いレベルであり，燃焼器の信頼性に問題のないことが確認された。

4.2 低カロリーガスだき燃焼器

石炭のクリーン燃料化による高効率発電を代表とする石炭ガス化複合発電プラントの開発が進められているが，このガスの性状はガスの精製方法によって大別すると，空気酸化と酸素酸化に分けられ，前者の場合には発熱量が1,000kcal/Nm^3程度のいわゆる低カロリーガスであり，後者の場合は2,500kcal/Nm^3程度の中カロリーガスとなる。これらのガスをガスタービン燃料として用いるためには，燃料特性の変化に対応して，(a) 燃料流量の増大化，(b) 火炎温度の低下，(c) 可燃限界の変化，(d) 燃焼に必要な空気量の増大，などの問題があり，これらを解決するための燃焼技術の開発とこれに基づく新構造燃焼器の開発が必要となる。

日立製作所では，発熱量が1,000kcal/Nm^3以下の低カロリーガスのガスタービン燃焼器への適用を目指した低カロリーガスだき燃焼器の開発を進めている[4)]。

5 結　言

新ノズル材については，従来のコバルト基合金に比べ高炭素化及びNb，Ti，Zrの複合添加により，熱疲労性の優れた高クリープ破断強度を持つ材料の開発が成功し，実用化の域に達した。また，新シュラウド材でも同様に高温域での耐熱疲労性の優れた材料の開発を可能とした。

一方，翼の冷却でも種々の実験を重ね，インピンジメント冷却やタービュレンスプロモータの冷却性能を把握し，その改善策及び効果を十分確認し，実翼への適用を図っている。

また，燃焼器でも，2段燃焼方式を採り入れた低NOx燃焼器の開発，及び低カロリーガスだき燃焼器の開発を行い，実用化を進めている。

参考文献

1) K.Kawaike：Effect of New Blade Cooling System with Minimized Gas Temperature Dilution on Gas Turbine Performance, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power(Oct. 1984)
2) G.D.Lewis：Prediction of NOx Emissions, ASME Paper No.81-GT-119(1981)
3) V.J.Lyons：Fuel/Air Nonuniformity-Effect on Nitric Oxide Emissions, AIAA Journal Vol.20, No.5(1982)
4) 岩井，外：ガスタービン燃焼器における火炎構造とフューエルNOx排出量，第15回ガスタービン学会定期講演会論文集(1987)