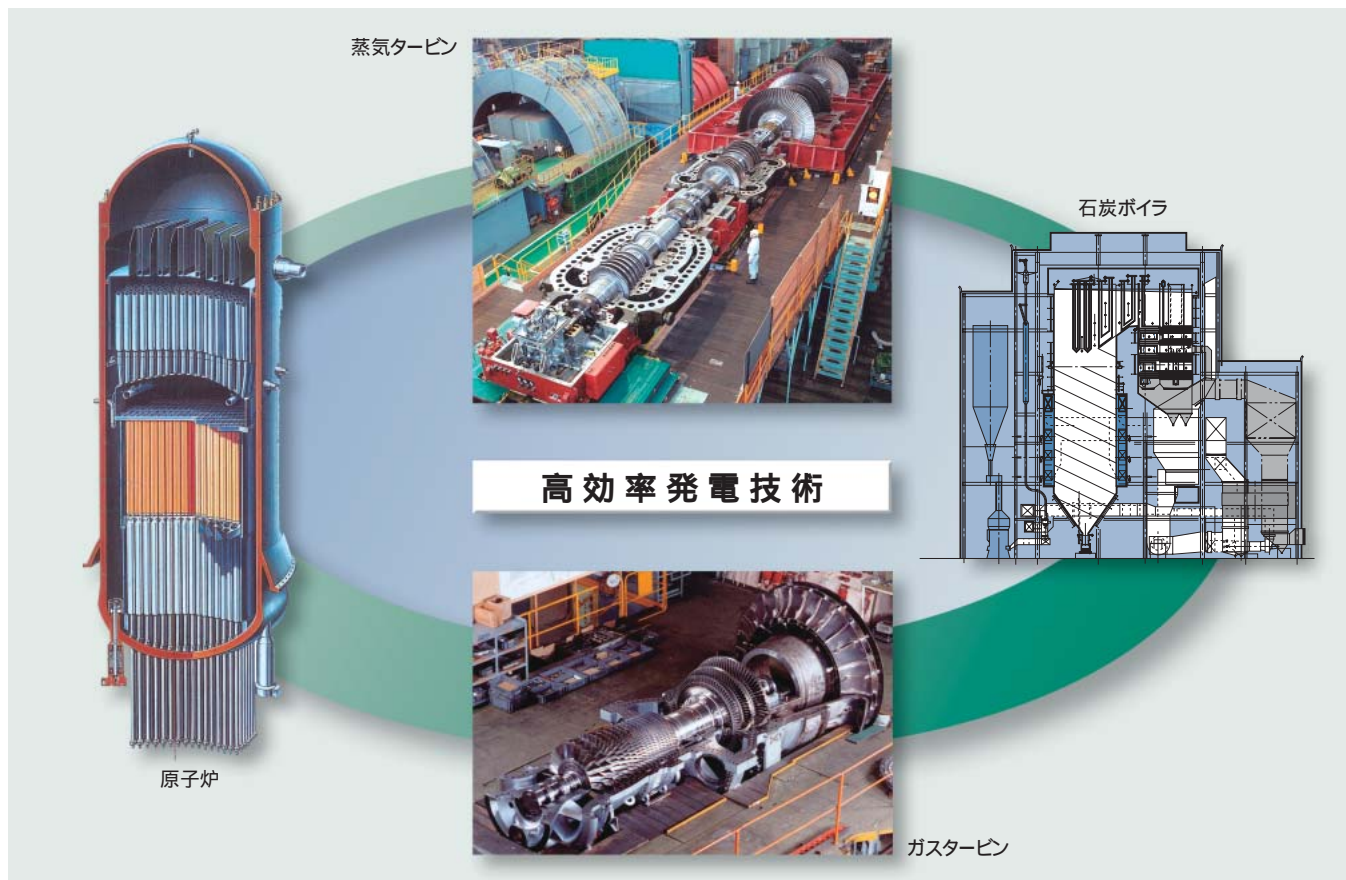


# 高効率発電技術

## Technical Trends of Electric Power Generation

小豆畑 茂 Shigeru Azuhata



### 日立製作所の高効率発電技術

日立製作所は、天然ガス、石炭、ウランの燃料源に応じて、ガスタービン、石炭ボイラ、蒸気タービン、原子炉の開発を重ねてきた。今後数十年は火力、原子力が発電分野で主力であり、高効率な発電機器の開発を継続することで日本のエネルギーセキュリティ向上に貢献していく。

エネルギー資源が乏しいわが国では、セキュリティの観点から、一つのエネルギー資源に依存せずに、さまざまなエネルギー資源を使用する。原子力発電は1955年ころに開発が始まり、安全性に留意しつつ設備容量を大きくし、1996年にはBWR技術の集大成として、単機容量1,350 MWのABWRが完成した。石炭火力は、蒸気温度の向上により、1950年代と比較して相対値で40%も発電効率が向上した。2030年までに世界全体の発電量は約2倍に増加する見込みであり、エネルギー資源の枯渇や地球温暖化防止の観点から、発電プラントのいっそうの効率向上が不可欠である。原子力発電に関しては、今後、出力規模に応じた経済性のある炉型の開発やウ

ラン資源を有効に活用する技術開発が進められる。火力発電は高温材料の開発が重要であり、これを核にタービン入口の流体温度を高くすることが大きな技術の流れである。また、ガスタービンと蒸気タービンを併用するコンバインドサイクル発電は今後も普及し、効率向上をねらった新たな熱サイクルの出現も期待される。

発電装置の開発、設計には、計算機能力の向上により、数値解析の導入が加速されている。化学反応や相変化を伴う流れの解析や伝熱計算は、複雑な現象を伴う機器の設計に十分使用できる精度となり、開発と設計の効率が向上している。

## 1 はじめに

高度情報化社会の発展と生活水準の進歩により、電

力需要は今後も増加する。一方、地球温暖化防止のためにCO<sub>2</sub>排出量削減への取り組みが世界規模で進められており、さらに高効率な発電技術が求められる。

燃料を輸入に頼るわが国では、エネルギー安定確保の観点から、化石燃料とウランを有効に利用する発電技術をそれぞれ開発してきた。石炭火力は主蒸気温度600を実現し、発電効率が送電端で40%を超え、世界最高水準にある。原子力では、安全性と信頼性を向上させたABWR(Advanced Boiling Water Reactor:改良型沸騰水型原子炉)で、単機容量を1,350 MWeと大型化することで高経済性を実現した。

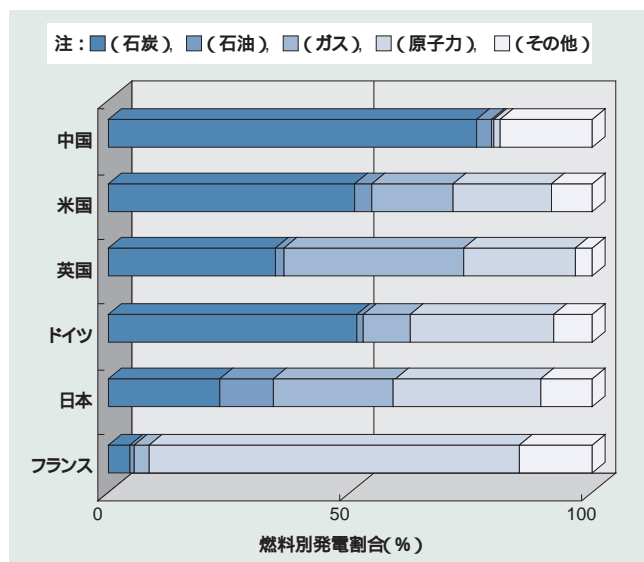
ここでは、基幹エネルギー源である火力・原子力発電の開発成果と今後の動向、および各種分散電源の先端技術について述べる。

## 2 世界の電力需給動向

IEA(International Energy Agency)の予測では、経済の発展により、世界のエネルギー需要は、2030年には2002年よりも59%増加する。その中でも、電力需要の伸びは97%と大きく、電気の使用量は現在の2倍近くになり、エネルギー全体に占める電力の割合がさらに増加する。

代表的な国における発電に用いられる燃料を図1に示す。わが国はエネルギーセキュリティの観点から1種類の燃料に偏ることなく多様な燃料を使用しており、2001年度に発電に用いられた燃料の比率は原子力31%、天然ガス25%、石炭23%、石油11%である。

豊富な石炭資源を持つ米国と中国では、発電用燃料の50%以上が石炭である。欧州では国ごとに事情が異なる。石炭資源が多いドイツでは石炭の使用割合が



出典:IEA(International Energy Agency)2001年

図1 発電に用いられる燃料の割合  
日本は資源を海外に依存するため、エネルギーセキュリティの観点から、燃料のベストミックスが図られる。

多く、北海油田を保有する英国では天然ガスの割合が多い。わが国と同様に燃料資源が少ないフランスでは、原子力が77%も占める。欧州では各国の送電網とパイプライン網が相互に接続しており、欧州全体として使用するエネルギー資源を分散している。

経済発展に伴って電力需要が急速に増加している中国やインドは、現在は石炭を主に発電の燃料に用いているものの、今後は、電力需要に近い地点に発電所を設置することができる天然ガスや原子力の利用が増加すると予測される。

## 3 原子力発電の技術動向

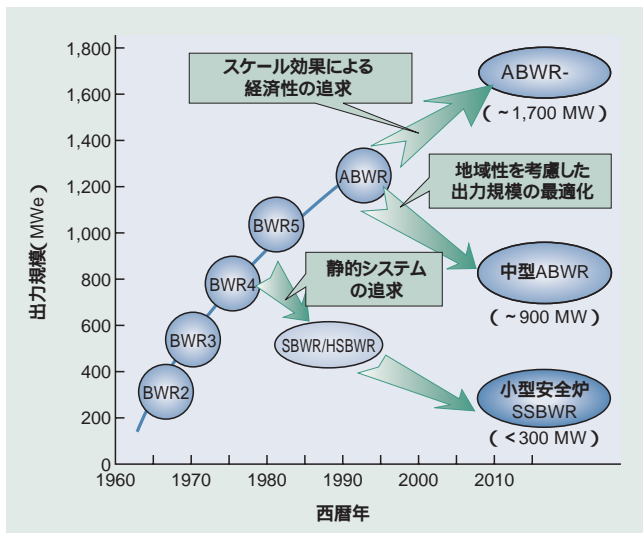
### 3.1 軽水炉BWRの高度化

わが国の発電量を燃料別に見ると原子力が最大であり、2030年には総発電量の38%に達すると予測される。国内にはPWR(Pressurized Water Reactor:加圧水型原子炉)とBWR(Boiling Water Reactor:沸騰水型原子炉)の2種類の原子炉の技術が導入されており、日立製作所は、1970年に運転を開始した、わが国初の軽水炉である敦賀原子力発電所1号機(360 MW)の建設に参加した。

その後、安全性を大前提にした経済性の追求が原子力技術開発の大命題であった。燃料費に比べて設備費の割合が大きい原子力発電設備では、スケール効果が経済性向上の最も有効な手段であり、実績を重ねながら単機出力の増大を図ってきた。同時に、高い稼働率を実現するため、信頼性の確保にも努力を払ってきたことにより、初期のBWRの電気出力は360 MWであったものが、ABWRでは1,350 MWに増加した<sup>1)</sup>(図2参照)。

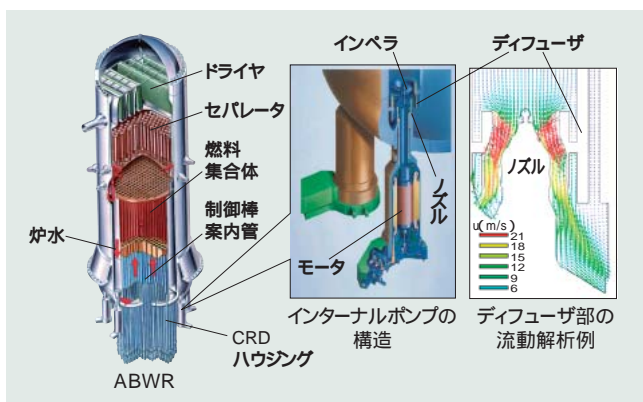
ABWRで導入された新しい特徴技術にRIP(Reactor Internal Pump)システムがある(図3参照)。RIPシステムでは、原子炉内部の冷却水を循環させるポンプを圧力容器底部に取り付けるため、それまでのBWRに存在していた外部再循環配管やジェットポンプがなくなり、構成が簡素化された。特に、外部再循環配管がないため、格納容器内部の配置空間が広く取れ、格納容器内の放射線源が少なくなり、定期点検時の作業性改善や従業員の被ばく線量が低減した。また、圧力容器のノズルのうち、炉心部分以下に接続する大口徑のノズルがなくなるため、配管破断を想定した場合でも燃料が露出することはなく、安全性も向上した<sup>2)</sup>。

現在は、国内の発電所建設が一段落し、今後の原



注:略語説明 BWR(Boiling Water Reactor), ABWR(Advanced BWR), SBWR(Simplified BWR), HSBWR(Hitachi Small BWR), SSBWR(Safe and Simplified BWR)

図2 原子炉大型化の経緯と今後の動向  
原子力の開発は、これまでの単機出力増加に加えて、さまざまなエネルギー環境に応じた炉型の開発が検討されている。



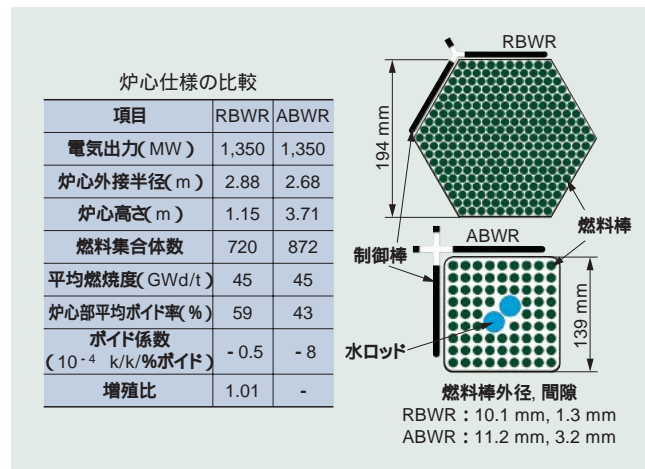
注:略語説明 CRD(Control Rod Drive:制御棒駆動機構)

図3 ABWRインターナルポンプの流動解析  
ABWRのキーコンポーネントであるインターナルポンプの機器仕様設定では、流れの数値解析が力を発揮した。

子力発電技術開発の方向性が議論されている。従来の方針のように、スケール効果による高経済性をねらう場合には、1,750 MW級のABWR-がある。また、電力需要の伸びと送電網の建設状況に応じて、建設予定地点ごとに最適な炉心出力が異なり、出力規模に応じた炉型の開発や送電網を前提としていない独立電源としての開発も考えられる。

### 3.2 RBWR

長期的には、化石燃料だけではなく、ウラン235も枯渇する。この対策として、Puサイクルの実現は有力であり、Na冷却炉を用いたFBR(Fast Breeder Reactor:高速増殖炉)が開発されている。



注:略語説明 RBWR(Resource-Renewable Boiling Reactor)

図4 RBWRとABWR炉心構造の比較  
RBWRは、燃料棒の稠密配置により、中性子の減速を緩和する。

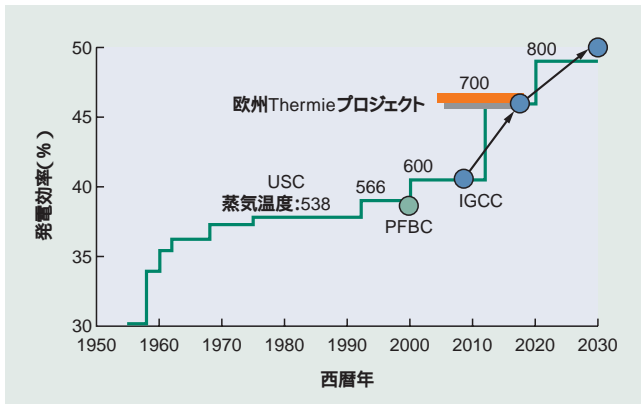
また、軽水炉の技術を用いてPu転換率を向上し、負のボイド係数を維持しつつ転換比を1以上にできるRBWR(Resource-Renewable Boiling Reactor)も将来炉の候補の一つである<sup>3),4)</sup>。BWR炉心には蒸気泡(ボイド)が存在することにより、炉心に存在する水の割合を小さくできる。RBWRは、この効果を活用する。燃料棒の配置がABWRの場合には四角格子である。これを稠密三角格子とすることで、燃料の冷却効果を良好に維持しながら、中性子を減速させる軽水を効果的に排除する。RBWRでは、エネルギー長期安定供給とともに、長寿命の放射性廃棄物を次の世代に残さないため、Puといっしょにアクチノイド核種をリサイクルすることが可能である。この商用化にはまだ多くの技術開発を伴うものの、現行の軽水炉の延長上にある技術であり、将来の普及が期待される(図4参照)。

## 4 石炭火力発電の技術動向

### 4.1 蒸気火力発電効率の変遷

現在の石炭火力発電の中心は微粉炭燃焼による蒸気火力である。この発電効率は1950年代には30%であったものが、現在では40%を超える<sup>5)</sup>(図5参照)。1960年代から2000年までの40年では、約5%の増加であり、効率の増加率は年間0.12~0.13%である。革新的な技術開発が望まれ、蒸気とガスタービンを組み合わせたコンバインドサイクル発電が将来の火力発電として期待される。その一つであるPFBC(Pressurized Fluidized Bed Combustion)コンバインドサイクル発電では、石炭





注:略語説明 PFBC( Pressurized Fluidized Bed Combustion ),IGCC( Integrated Coal Gasification Combined Cycle ),USC( Ultra Super Critical )

#### 図5 石炭火力発電効率の変遷

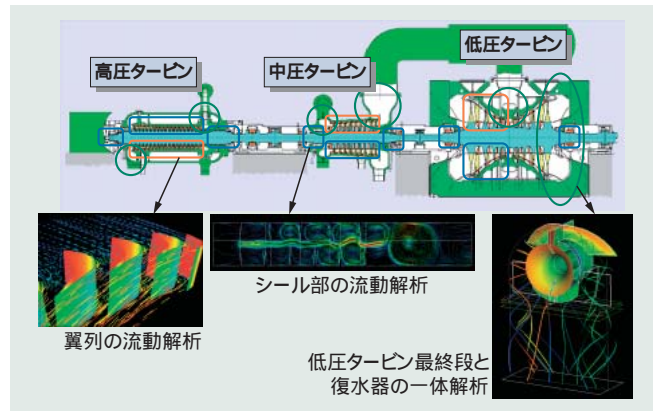
石炭火力の発電効率は、蒸気条件の改善が主流であり、将来はIGCCも主役の候補となる。

を高圧化で燃焼し、その燃焼ガスでガスタービンを回転させる。特徴は、流動媒体に石灰石を使うことにより、炉内で脱硫ができることである。PFBCコンバインドサイクル発電は、国内では3基の商用プラントが建設された。これをさらに普及するためには、建設費の低減と効率向上の継続的な努力が必要とされる<sup>6)</sup>。石炭をガス化してガスタービンの燃料にするIGCC( Integrated Coal Gasification Combined Cycle )は、海外ではすでに数基の商用プラントが建設され、将来の主役となる発電技術の候補である。一般に、新たな発電技術は成熟した従来技術に比べて習熟度が低いために建設費がかさみ、長期信頼性の実証が必要でもあるため、IGCCが広く普及するにはまだ時間がかかる。

蒸気火力発電の効率向上は蒸気温度の上昇によって達成され、現在では600 級のプラントが建設されている。高温条件を達成するためには、高温領域で強度が高い材料を使用して、ボイラ耐圧部伝熱管の肉厚増加を抑えるとともに、熱応力の緩和と管内圧力損失を低減する必要がある。

石炭火力の一段の高効率化を目指し、欧州では700 級の蒸気火力発電の技術開発が進められている。技術の優位性を保つには、わが国でもこれに対抗する大型プロジェクトが必要であり、Ni基合金のような高温材料の開発がこの鍵となる。

蒸気温度の上昇のほかに、構成する機器の損失改善技術も進歩している。タービン翼の開発では、高効率化を目指すことは当然である。例えば、低圧最終段動翼では、流出する運動エネルギーを減らしてプラント効率を向上させるために、長翼化が課題となる。3,000  $\text{min}^{-1}$ 、600 MW級のプラントの最終段翼長を48インチ



#### 図6 蒸気タービン内の流動解析

蒸気タービンの効率向上のためのアイデア確認には、流れの数値解析が必須である。

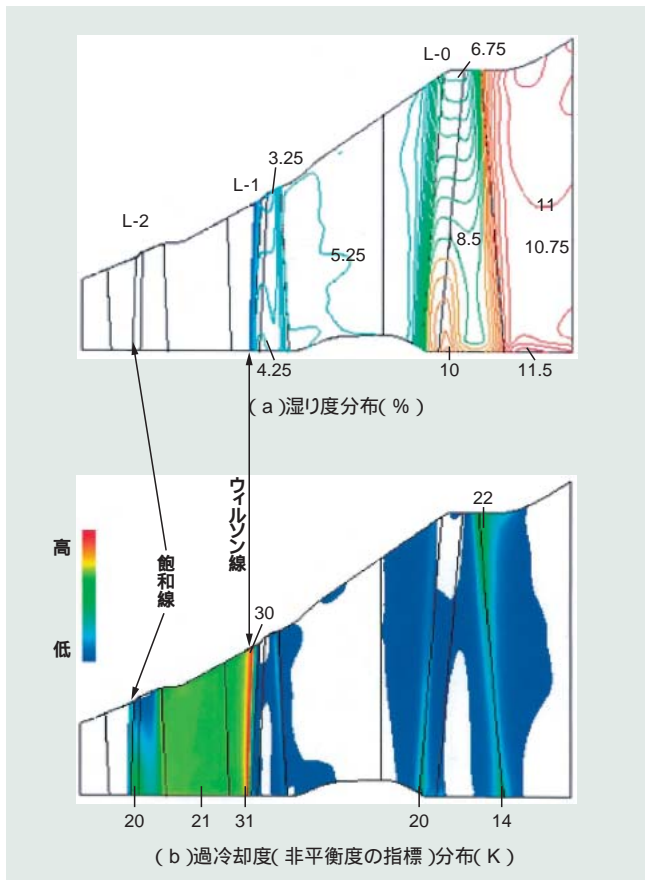
(122 cm)から53インチ(135 cm)に変えることでプラント効率を約0.3%向上できる。一方、最終段長翼では遠心力が増大するために、10年前までは、3,000  $\text{min}^{-1}$ の48インチ翼はチタン合金で作られてきた。その後、材料の進歩により、現在では安価なスチール製である。今後も新たな材料開発とともに、いっそうの長翼化が進むものと考えられる。

蒸気タービン内部効率の向上では、翼形状の選定のほかに、シールと排気部の流路形状の流体力学的な特性の解析が重要である。近年では、計算機の進歩に伴って大規模な計算が容易となり、CFD( Computational Fluid Dynamics )が設計で駆使される( 図6参照 )。理想気体を扱うにとどまっていた従来の流れ解析に代わり、現在は蒸気による湿り条件や相変化も考慮した非平衡凝縮流れ解析が可能になった。

特に、蒸気タービンの低圧段設計では、蒸気非平衡凝縮を考慮することが重要である。非平衡凝縮現象により、蒸気の相変化が飽和線を超えるL( 低圧 )2段より1段下流のL-1段で遅れて起こることをとらえた解析を 図7 に示す。この解析法を設計に適用することで、理想気体の仮定に基づく解析や、蒸気表( 熱平衡状態 )を用いた解析法に対し、各段落の負荷配分や速度三角形の予測精度が改善され、性能の向上が実現できる。翼列間の遷音速領域での蒸気凝縮については、従来の解析例が少ない現象であり、非平衡凝縮モデルの妥当性を実験で検証した<sup>7)</sup>。

## 4.2 環境対策

石炭火力発電では、燃焼ガス中に含まれるNOx( 窒素酸化物 )、SOx( 硫黄酸化物 )、ばいじんの排出量低減が大気汚染防止のための技術課題である。これらの



注:略語説明 L (Low Pressure)

図7 蒸気非平衡凝縮を考慮した低圧三段落流体解析  
タービン低圧段では蒸気の一部が凝縮し、この効果も精度よく評価できる解析技術を開発した。

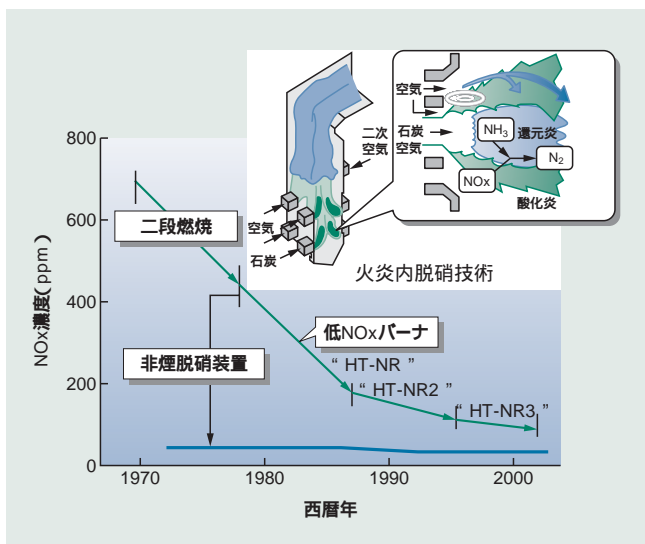


図8 低NOxバーナの開発経緯  
石炭燃焼で排出されるNOxを、燃焼改善と排煙処理で1970年代の1/10以下に低減した。

汚染物質を処理する排煙処理装置の開発では、1970年代以降に急速な進歩があった。脱硝装置では多量の酸素が存在する条件下で微量のNOxを固体触媒表面でNH<sub>3</sub>と選択的に反応させるSCR (Selective Catalytic

Reduction), 脱硫装置ではSO<sub>2</sub>を石灰石でセッコウにする「石灰石-セッコウ法」がそれぞれ開発され、普及した。最近では水銀のような極微量物質の排出規制も米国では議論されており、また、地球温暖化の観点からは、CO<sub>2</sub>の回収技術も開発中である。

排ガス中のNOx濃度の変遷を図8に示す。1970年代初頭にはボイラ出口での燃焼ガス中のNOx濃度は700 ppm近くあったものが、燃焼技術の改善で現在ではボイラ出口で150 ppm以下であり、これを脱硝装置で数十ppmに低減する。石炭には、燃料中に含まれる窒素に起因するNOxが多い。この窒素が燃焼過程でNOxを還元するNH<sub>3</sub>にも変化し、これらの反応を利用する燃焼法が開発された。火炉内へ空気を段階的に投入する二段燃焼法がその代表であり、多くのボイラでこの燃焼法が採用されている。日立製作所の特徴的技術である火炎内脱硝では、この二段燃焼で進む反応を、バーナ出口で形成される火炎内で進ませる火炎構造を実現する<sup>9)</sup>。

微粉炭燃焼の研究は、石油危機のあった1970年代後半から燃焼の分野で大きなテーマになった。火炎内脱硝の性能は、燃焼の始まる着火過程が左右する。石炭の着火時からの火炎の伝搬の状況は石炭の種類で大きく異なり、微粉炭燃焼を精度よく数値解析するためには、この着火プロセスを説明できるモデルの構築が重要になる<sup>9)</sup>(図9参照)。微粉炭の燃焼は、大別して、着火、熱分解、気体燃焼、および固体燃焼から成り、NOxの排出量の予測には、これらのプロセス内での窒素化合物の挙動を追う必要がある。NOxの前駆物質であるNH<sub>3</sub>、HCNも含めて、火炎内での微量成分の挙動の予測精度は、現状では図10に示す程度までに高

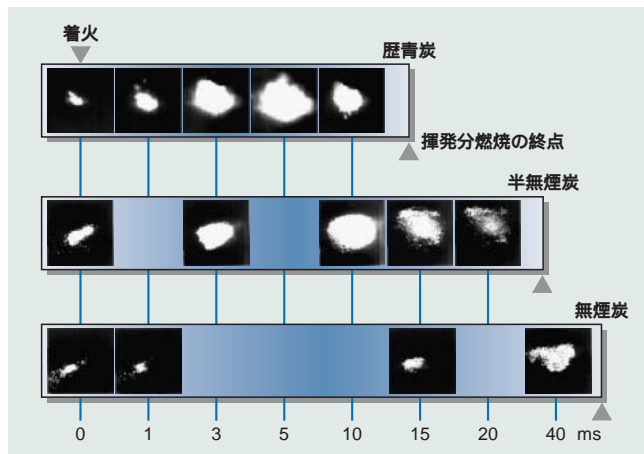


図9 石炭火炎の伝播状態  
微粉炭燃焼の高速ビデオ写真により、火炎伝播モデルの精度が向上した。

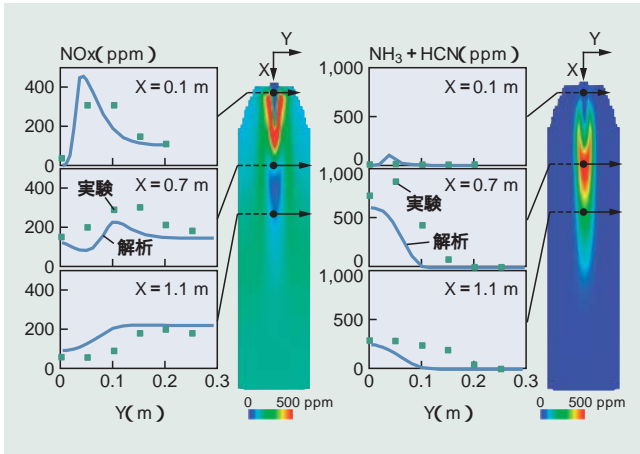


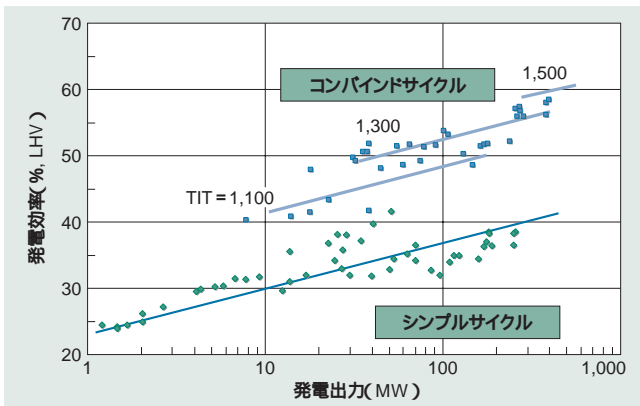
図10 ガス濃度の解析結果  
微粉炭火炎内の微量成分も数値解析で十分に予測できる。

められている<sup>10)</sup>。火炉全体の性能予測には、燃焼火炎のほかに伝熱の問題が加わり、灰の伝熱面への付着など、さらに複雑な現象の解析が必要になる。これらは現象を再現できる実験を基にした物理モデルの構築と並行して進められ、最新の1,000 MW級ボイラの設計や既設プラントの改良設計にも活用している<sup>11)</sup>。

## 5 天然ガス火力発電の技術動向

### 5.1 コンバインドサイクル

石油と天然ガスを燃料とする発電方式としては、ガスタービンの排熱を蒸気で回収し、蒸気タービンを回すコンバインドサイクル発電の採用により、発電効率が向上した(図11参照)。効率向上のためには、単機容量の増加とガスタービン入口温度の上昇が効果的であ



出典:Gas Turbine World 1997

注:略語説明 TIT(タービン入口温度), LHV(Lower Heating Value)

図11 コンバインドサイクルの発電効率  
ガスタービンは大容量化と高温化により効率が向上する。

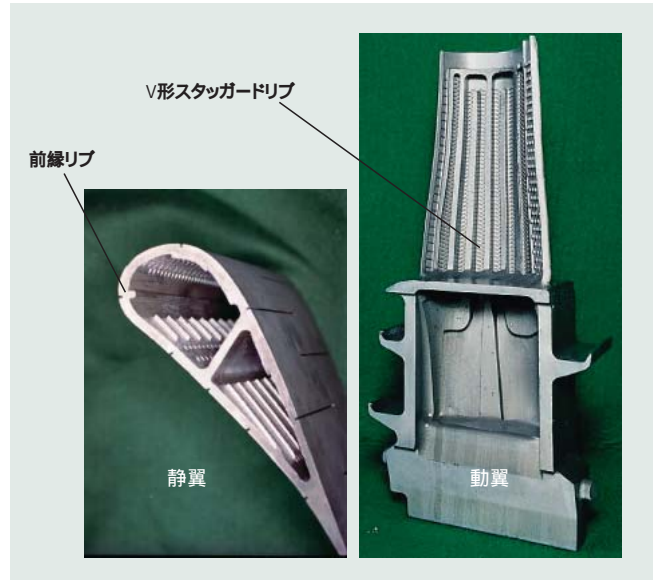


図12 ガスタービン翼  
高温ガスに触れるタービン翼の冷却構造が信頼性と効率を左右する。

る。現在1,500 級のガスタービンが実用化されており、今後もいっそうの高温化を目指した技術開発が必要である。

タービン入口温度の上昇は、タービン翼の材料開発と冷却技術によって実現される。最近では耐熱性に優れた単結晶翼も信頼性が高くなり、また、材料では、母材の耐熱性向上に加えて、タービン翼表面をセラミックでコーティングするTBC(Thermal Barrier Coating)もその有効性が示され、採用されている。

冷却では、冷却用の空気を翼表面に沿って流すフィルム冷却法の採用が大きな流れであるが、フィルム孔周辺の局所的な応力発生や、主流ガスとの混合損失によるガスタービン効率の低下もあり、タービン翼の内面から冷却する技術開発も盛んである。タービン翼内の冷却構造の例を図12に示す。静翼には冷却空気を噴流として衝突させるインピンジメント冷却を採用しており、熱負荷の大きい前縁部分の伝熱性能を向上させる突起構造が特徴である。冷却通路には、三次元的な微小渦の発生により、熱の移動を促進させるリブを設けており、高い伝熱性能と低い圧力損失特性を示すV形スタaggerドリップを開発している<sup>12)</sup>。

ガスタービン入口温度、すなわち燃焼温度が上昇するとNOxが増加する。石炭のように燃料中の窒素に起因するNOxが大半を占める場合には、その発生量に及ぼす燃焼温度の影響は小さい。しかし、空気中の窒素がNOxになる天然ガスの燃焼では、NOxの発生量は温度とともに指数関数的に増加する。希薄予混合燃



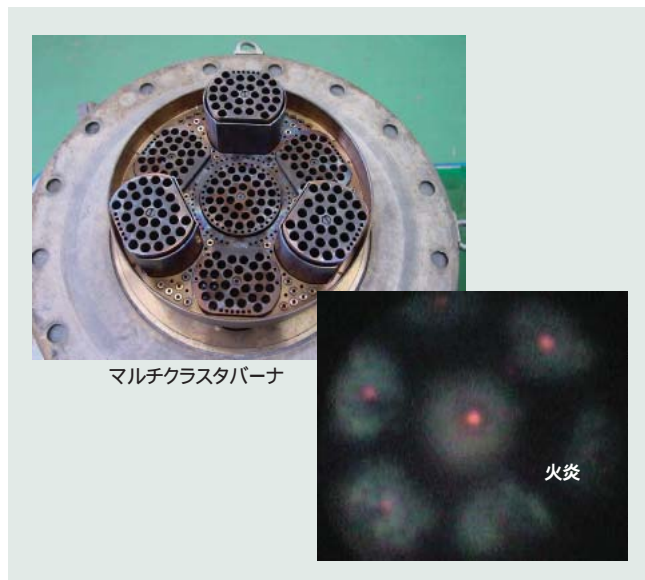


図13 ガスタービン燃焼器  
燃料と空気の混合を良くする燃焼器構造の例を示す。

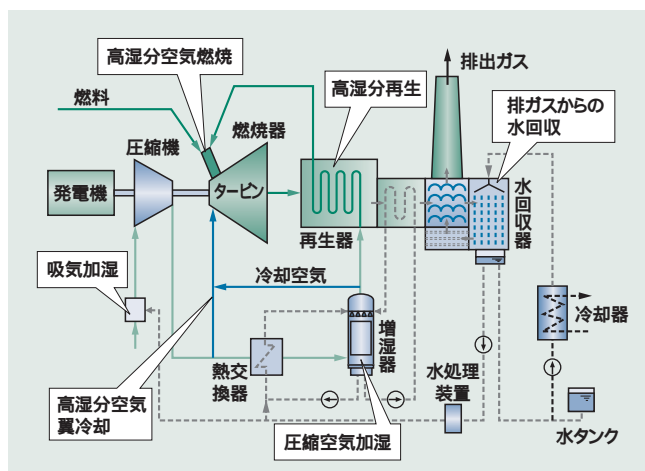


図14 AHATシステムの構成  
AHAT(Advanced Humid Air Turbine)により、ガスタービン単体でコンバインドサイクルと同等、もしくはそれ以上の効率を達成する。

焼では、局所的な高温領域の存在をなくして、燃焼器内の温度分布を均一にする。これを達成できる燃焼器の開発がここ10年以上の課題である。また、現在のガスタービンはボイラに比較すると、使用できる燃料の種類が少ない。ガスタービンの普及には、ジメチルエーテルのような新しい燃料も燃焼できる燃焼器が必須である。NOxの低減と多種燃料対応を目指した燃焼器の例を図13に示す<sup>13)</sup>。

## 5.2 AHATシステム

ガスタービンを用いた発電システムの高効率化には、圧力比や燃焼温度を上げずにサイクルと冷却方法を改

良する方法もある。AHAT(Advanced Humid Air Turbine)システムでは、圧縮機吐出空気を増湿塔で温水と直接接触させた低温の高湿分空気で排ガスからの熱を回収する(図14参照)。湿分を増加することで増出力を、再生器で燃焼空気を予熱することにより、それぞれ燃料削減を実現することができ、効率が向上する。また、ガスタービンでは出力の半分が圧縮機動力に消費される。このため、AHATでは圧縮機入口に水を噴霧し、圧縮機内の空気温度の上昇を抑制することによって圧縮機動力を下げる。これらにより、蒸気タービンを用いることなく、コンバインドサイクルをしのごう高効率システムを構成することができる<sup>14)</sup>。

## 6 分散電源

大容量の集中電源に代わり、電力の消費地あるいは消費施設ごとに発電設備を設置する分散電源がある。分散電源は一般には集中電源に比べると発電効率は低いものの、この普及には、以下のような幾つかの背景がある。欧米のように電力の自由化が進み、電力事業も垂直統合から水平分業になると、送電会社の送電網の維持、拡張の経済的な負担が大きくなり、変電所の建設よりも分散電源のほうが経済的に有利になる場合が出てくる。熱の需要がある場合には、発電設備の排熱回収で熱と電力を併給し、熱効率を80%近くに高められるコージェネレーションが有効になる。あるいは環境保全を重視すると、再生可能エネルギーを使用する発電が選択される。

再生可能エネルギーによる発電では風力が有望視され、世界的に大きな普及が見込まれている。また、電力の消費施設が容易に導入できる電源として太陽電池がある。わが国は世界中で、最大の太陽電池生産国である。国内ではRPS( Renewable Portfolio Standard)法が施行され、電力会社には、2010年までに電力全体の1.35%以上を供給する義務が課せられた。

熱併給発電には小型のガスタービン、ガスエンジン、およびディーゼルエンジンが使用される。最近では、200 kW以下のMGT(Micro Gas Turbine)が開発され、普及が進んでいる。MGTは装置が小型なために、ガスタービン入口での圧力とガス温度が低く抑えられ、発電効率が30%程度と低い。このMGTの効率を向上させるために、ガスタービン効率を大幅に向上できるAHAT技術を取り入れたのがMHAT(Micro Humid Air Turbine)である。このタービン翼の構造を図15に示す<sup>15)</sup>。

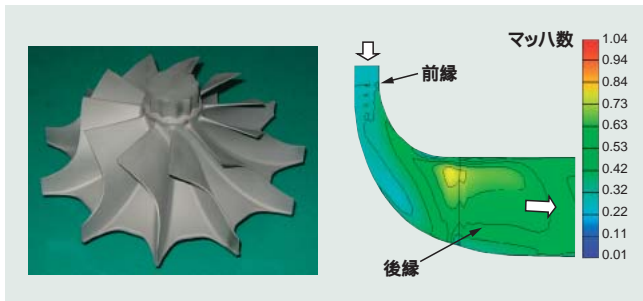


図15 MHATのタービン翼と流動解析結果  
数値解析でタービン翼の基本設計が可能である。

分散電源としては、各種燃料電池の開発も進んでい  
る。これはNOxを発生しないため、クリーンな電源とし  
て期待されている。この中でSOFC( Solid Oxide Fuel  
Cell:固体酸化物型燃料電池)は、セラミックス層内を酸  
素が移動して水素と電池反応を起こすもので、電池反  
応温度が900℃と燃料電池の中で最も高く、高い発電  
効率が期待できる。また、将来MGTを組み合わせた  
SOFC/GT( Gas Turbine)ハイブリッドシステムが完成  
すれば、小規模な分散電源で、大規模集中電源と同  
等の発電効率を達成できる。

## 7 おわりに

2030年までに、世界全体の発電量は約2倍に増加す  
る見込みである。一方、地球温暖化やエネルギー資源  
の枯渇などの地球規模の問題が徐々に顕在化してき  
ている。これらを背景に、再生可能エネルギーの活用  
や発電プラントの効率向上はこれからもますます重要  
になる。また、これまでの発電設備は経済性と効率の  
観点から単機出力の増加、いわゆる大容量化が一つ  
の大きな流れであった。しかし、今後は電力事業の自  
由化の浸透、あるいは熱併給発電や再生エネルギー  
発電の要望が強まることで、中小規模の分散電源も普  
及する素地が出来つつある。

一方、新規の電源設備では、既存の技術習熟した  
設備に対して、経済性、長期信頼性の実証が大きな課  
題であり、普及にはこれらの解決にこれからも多くの努  
力を必要としている。

エネルギー関連の機器では、化学反応、相変化、伝  
熱、流れの絡む複雑な現象が現れるため、現在では、  
このような機器の設計には、数値解析技術が必須であ  
る。また、実験で得られる結果を説明できる普遍的な  
モデルの構築と、これに基づく数値解析によるさまざま  
な現象の解釈と評価が次の進歩には重要であり、これ  
らの蓄積が信頼性の高い次世代の発電技術を生むも  
のとする。

## 参考文献

- 1) 木下, 外:設備投資の分散性と投資額の抑制を可能にする中型ABWR  
“ ABWR-600 ”, 日立評論, 86, 2, 197~200( 2004.2 )
- 2) 高橋, 外:改良型沸騰水型軽水炉インターナルポンプの厚肉スリーブノズ  
ルの開発, 日本機械学会論文集B, 69, 684, 18~24( 2003.8 )
- 3) R. Takeda, et al.:General Features of Resource-Renewable BWR  
( RBWR ) and Scenario of Long-term Energy Supply, International  
Conference of Evaluation of Nuclear Fuel Cycle Systems, Palais  
des Congrès, Versailles, France, 938-945( 1995 )
- 4) 竹田:次世代型沸騰水型RBWRの概念, 第28回炉物理夏期セミナー  
キスト, 99~106, 社団法人日本原子力学会( 1996 )
- 5) 松本, 外:東京電力株式会社常陸那珂火力発電所第1号機1,000 MW  
発電設備の完成, 日立評論, 86, 2, 173~176( 2004.2 )
- 6) 小松, 外:大容量加圧流動床ボイラ複合発電プラントの完成, 日立評論,  
83, 2, 207~210( 2001.2 )
- 7) S. Senoo, et al.:Non-Equilibrium Homogenously Condensing Flow  
Analyses as Design Tools for Steam Turbines, Proc. of ASME Fluid  
Eng. Div. Summer Meeting FEDSM 2002-31191( July. 2002 )
- 8) M. Taniguchi, et al.:A Reduced NOx Reaction Model for Pulverized  
Coal Firing Boilers, 28th Int. Sym. on Combustion( July. 2000 )
- 9) M. Taniguchi, et al.:Laser Ignition and Flame Propagation of  
Pulverized Coal Dust Clouds, 26th Int. Sym. on Combustion, 3189-  
3195( 1996 )
- 10) K. Yamamoto, et al.:A Study of Gasification Reactions in  
Pulverized Coal Combustion, 3rd Int. Symp. on Advanced Energy  
Conversion Systems and Related Technologies, 1-B-5( 2001 )
- 11) 山本, 外:微粉炭燃焼ボイラの燃焼解析技術, 日立評論, 82, 2, 177~  
180( 2000.2 )
- 12) 安斉, 外:高温ガスタービン用内部冷却強化タービン翼の開発, 日本機  
械学会第73期全国大会講演論文集( ), pp.123~124
- 13) T. Saitou, et al.:Development of Multi Cluster Burner for Fuel  
Grade DME, Proc. of ASME Turbo Expo. 2004, GT-2004-53689  
( June. 2003 )
- 14) S. Hatamiya, et al.:An Evaluation of Advanced Humid Air Turbine  
System with Water Recovery, Proc. of ASME Turbo Expo 2004,  
GT2004-54031( June. 2004 )
- 15) S. Dodo, et al.:Development of an Advanced Microturbine System  
Using Humid Air Turbine Cycle, Proc. of ASME Turbo Expo 2004,  
GT-2004-54337( June. 2004 )



小豆畑 茂

1975年日立製作所入社, 日立研究所 所長  
現在, 電力・電機ほかの製品についての研究開  
発の指導に従事  
工学博士  
日本燃焼学会会員, 日本機械学会会員  
E-mail: azuhata@gm.hrl.hitachi.co.jp