

発電技術の高効率化に向けた技術動向

Technological Development of Power Generation Plants toward Efficiency Improvement

内山 洋 司*

Yohji Uchiyama

1. はじめに

火力発電は、現在、我が国の発電電力量の61%を供給しており、我が国の電力供給に基幹電源として大きな役割を担っている。火力発電は、建設の工事期間が短いため、1960年以降、我が国の高度経済成長によって急激に増加した電力需要を賄うため、数多く建設されてきた。しかし、1980年代に入って大容量の原子力発電が、電源のベース負荷を賄うようになると、火力発電は次第にミドル・ピーク負荷帯を担う電源に位置づけられるようになった。

国の長期電力需給見通しによると、将来は原子力や非化石燃料を積極的に導入することで脱化石燃料を図る計画にある。しかし、社会のエネルギー情勢は刻々と変化し、これまでのエネルギーセキュリティを基軸にしていた技術政策の見直しが迫られている。石油の供給過剰と価格の低迷、それに中東の政情安定は、エネルギーセキュリティに対する人々の関心を弱めている。それは原子力開発に対する社会の逆風を強めており、またコスト高な水力、地熱、新エネルギーなどの開発への意欲を失わしている。さらに、エネルギー産業を取り巻く規制緩和の流れは、電気料金のコスト低減に向けた競争激化を生みだしており、安価で安定に供給されている化石燃料への依存を高めている。このような最近のエネルギー情勢は、脱化石燃料化を図る政府目標の達成を難しくしている。むしろ原子力開発の停滞や規制緩和の影響によって、火力発電への依存度が高まる方向にある。おそらく火力発電がわが国の電力供給の主要電源であることは、将来も変わらないであろう。

しかし一方では、地球規模の環境問題である温暖化問題が顕在化し、その防止に向けた対策が緊急な課題

となりつつある。1997年12月に京都で開かれた気候変動枠組み条約第3回締約国会議（COP3）では、日本は議長国として先進国の削減目標を設定する大役を果たした。削減目標を設定した議長国としての立場からも、2008年から2012年までに温室効果ガスを1990年の排出量よりも6%削減するという日本の削減目標を実現していくことが求められている。

火力発電は、発電時に大量の燃料を消費するために、温室効果ガスであるCO₂を大量に放出している。わが国が将来も火力発電に依存せざるを得ないとすると、CO₂を削減できる高効率の火力技術の開発が必要になる。本特集は、そういった社会のニーズに応える火力新技術について、最近の開発動向を紹介することを目的としている。本稿では、最初に火力発電の効率化を図る技術開発課題を解説し、効率向上を図る具体例として蒸気タービン、ガスタービン、および複合サイクル発電について開発動向を説明する。次に効率向上によってCO₂排出量がどれだけ削減するかについて、火力新技術の製造、運用、廃棄のライフサイクルにわたり分析した結果を説明する。本稿では述べていないが、高効率化の技術として期待されている蒸気噴射発電、カーナサイクル発電、燃料電池複合発電、石炭ガス化複合発電、LNG冷熱利用複合発電、MHD発電についての詳細は各論の著者に任せることにする。

2. 発電技術の高効率化

2.1 効率の向上

発電技術の高効率化に向けた技術開発は、高温高压化と低温熱源の有効利用の大きな流れに分けることができる（図-1）。高温高压化は主に大型技術を中心に、エネルギーの有効利用は中小規模の分散型技術において進んでいる。

わが国の発電技術は、高温高压による熱効率の向上と、大容量化による規模の経済性を追求して発展してきた。1950年代に始めて導入した発電容量66MWの発

* 財団法人電力中央研究所 経済社会研究所上席研究員
東京工業大学総合理工学研究所人間環境システム専攻客員教授
〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 大手町ビル7F

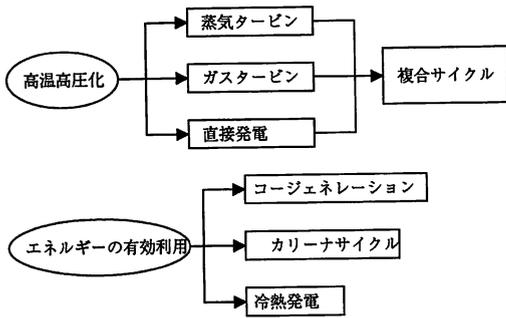


図-1 発電技術の効率向上

電プラントは、再熱式ボイラの主蒸気圧力が $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 、主蒸気温度 450°C で、発電効率は 32% （発電端）であった。その後、主蒸気条件は $169\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 538°C の時代を経て、1967年には臨界圧を越える主蒸気条件（ $246\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 538°C ）のプラント（ 600MW 、発電効率は 40.3% ）が建設された。そして1989年には、 $316\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 566°C の二段階再熱方式の超々臨界圧プラントが開発された。現在は、さらに蒸気条件を高めた超々臨界圧発電（ $345\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 650°C 、発電効率は 43% ）が開発中である。

発電効率は、熱サイクルを使う発電システムであれば、理想サイクルであるカルノーサイクルの効率を越えることはできない。もし 43% の超々臨界圧発電が開発されたとすると、それはカルノーサイクル効率の 62.5% の達成度になる。それには高い蒸気条件に耐えるボイラやタービンの材料開発が必要になる。

さらに効率を向上する方法に、ガスタービンや燃料電池などをトッピングに、その排熱を利用して蒸気タービンを駆動する複合サイクル発電がある。複合サイクルの組み合わせは様々であるが、実用化へ向けて開発が進んでいるものにトッピングとして加圧流動床、天然ガスガスタービン、石炭ガス化ガスタービン、燃料電池、MHDなどがある。

各種複合サイクルの中で最も開発が進んでいるのが、高温ガスタービン（ブレイトンサイクル）をトッピングに蒸気タービン（ランキンサイクル）をボトムにした複合サイクル発電である。複合サイクル発電を大別すると、排気再燃式と排熱回収式の2つの方式がある。前者は、ガスタービンの排ガスに燃料を追加して、ボイラで温度を上昇し汽力発電と同様の熱回収を図るものである。後者は、燃料の追加なしにガスタービンの排ガスから排熱回収ボイラで熱回収するものである。排気再燃方式は、正確には排気再燃型複合発電

方式と呼ばれており、既設火力発電所のボイラ／蒸気タービン方式のリパワリング（出力増加と高率向上）技術である。それはガスタービンの排ガスをボイラに導き、ボイラ給水と熱交換させた後、ボイラの燃焼用空気として再利用するものである。

熱回収方式は、燃料を補給する必要がない比較的単純なシステムであり、近年のガスタービンの高温化に伴い排ガス温度の上昇から新設の複合サイクル発電の方式として広く導入されている。わが国における本格的な複合サイクル発電の導入は、東北電力の東新潟発電所と東京電力の富津発電所である。ガスタービンの燃料にはLNGが使われている。初期のガスタービンの入り口温度は、 1100°C 級で、プラント熱効率は 48% （低位発熱量基準：LHV）であった。その後、第二世代の技術として、 1300°C 級のガスタービンが出現し、プラント熱効率は 53% （LHV）に達した。LNG複合サイクル発電の特長は以下に示す高い熱効率と高い負荷調整機能である。

- 1) 定格～部分負荷まで幅広い運転領域で熱効率が高い。
- 2) プラントは、小容量機の組み合わせとなっているため負荷変化率が大きく、起動停止や出力調整に優れている。
- 3) 燃焼方式の改善や脱硝装置により、従来汽力と同等の NO_x 低減が可能である。

排熱回収式の場合、ガスタービンと蒸気タービンの組み合わせ方には、それぞれ1台ずつ発電機に直結させる一軸型と数台のガスタービンと1台の蒸気タービンを組み合わせる多軸型がある。最近のLNG複合サイクル発電は、電力系統でミドル・ピーク運用が求められていることから、出力調整や起動停止の運用性に優れている一軸式が多く採用されている。

石炭を燃料にして複合サイクル発電を行う石炭ガス化複合発電の開発も進んでいる。それは、空気や酸素などのガス化剤を用いて石炭を乾留、還元反応により H_2 や CO を主成分とするガスに分解し、それを燃料にガスタービンを駆動して排熱で蒸気タービンを駆動するものである。石炭ガス化複合発電は、米国の南カリフォルニアエジソン社が1984年から5年間、クールウォーターで $910\text{トン}/\text{日}$ の実証試験（テキサコ炉）を行った。その後、米国ではPSIエナジーとデステック社が 62MW 、 $2600\text{トン}/\text{日}$ 、タンバ電力が 250MW 、 $2300\text{トン}/\text{日}$ （テキサコ炉）、そしてシェラパシフィック電力がリノで 100MW 、 $880\text{トン}/\text{日}$ の実証プラント

を建設し運転している。またオランダでは、デムコレック(株)がプフナムで253MW、2000トン/日の実証プラント(シェル炉)を、スペインではエルコガス社がプエルトヤノで300MW、2600トン/日の実証プラント(プレンプロー炉)を運転中である。

複合サイクル発電の熱効率は、その主機であるガスタービンの高温・高性能化により、大幅に改善しつつある。また一方では、サイクルによる高効率化が図られている。サイクルによる効率向上には、ガスタービン自体のサイクルの改良(再熱、再生、中間冷却など)と各種複合サイクルの応用がある。後者の複合サイクルとしては、燃料電池とMHD発電との組み合わせが検討されているが、まだ研究段階で複合発電としての実績はない。燃料電池は、米国のエナジーリサーチ(株)が2MWの熔融炭酸塩(MCFC)プラントをサンタクララで、南カリフォルニアエジソン(株)が25kWの固体電解質(SOFC)のパイロットプラントを運転した実績がある。さらに将来技術として、完全クリーンを追求する水素燃焼ガスタービンやCO₂回収ガスタービンなどによる複合サイクルの検討も始まっている。

エネルギー有効利用から低温熱源の利用が進んでいる。コージェネレーションは、発電と熱発生を同時に行うシステムである。わが国では、往復動内燃機関、ガスタービン、燃料電池から発生する電力と熱を同時に利用する中小容量の分散型エネルギーシステムとして普及している。需要地に設置するコージェネレーションは、発電効率は30%と低いが、原動機からの排熱を利用することで、総合効率を70~80%にまで高めることができる。

排熱を効率的に電気に変換する研究も進んでいる。排熱回収ボイラの熱交換過程のエクセルギー損失を低減するためには、蒸発温度が蒸発の進行とともに変化する作業媒体が好ましい。それには、作業媒体に有機媒体やアンモニアと水の混合媒体を用いることで、低沸点媒体をタービン駆動に使い、高沸点媒体をエコノマイザ、凝縮器、再生加熱器を循環させてエクセルギーを高める方法がある。この方法は、カリナサイクル(kalina cycle)と呼ばれ、温度が比較的低い地下水や工場廃熱などの熱源を有効に利用するシステムとして期待されている。

低温冷熱のエネルギー有効利用が図られているわが国は、世界最大のLNG輸入国で、世界の生産量の約7割を輸入している。LNG冷熱は、現在、冷熱発電、冷凍倉庫、ドライアイス製造、空気液化分離などに利

用されているが、利用量からみるとまだ限られている。今後、LNG冷熱を有効に利用していく技術開発は、未利用エネルギーの活用として期待されている。発電への利用は冷熱発電が中心であるが、ガスタービンの圧縮機の入口空気温度を冷却し効率を向上する検討も進んでいる。それは、夏場の電力需要が最大になる時に大気温度の上昇により性能が低下する問題を解決する方法として有効である。その方法には、LNG冷熱を昼間、直接利用して圧縮機の吸い込み空気温度を下げる方法と、夜間にLNG冷熱を利用して液体空気を製造し、それを昼間のピーク時に利用して効率を改善する方法がある¹⁾。

2.2 蒸気タービンとガスタービンの高効率化

ここでは蒸気タービンとガスタービンを中心に、高効率化の技術動向を詳しく解説する。蒸気タービンの効率向上には、①高温高圧化(超々臨界圧発電)、②内部効率の向上、③最終段翼の長翼化がある。蒸気条件の高温高圧化は、前節で既に述べたように、超々臨界圧(USC)の蒸気条件(345kg/cm²、650℃)を目指して、ボイラ材料やガスタービン材料の開発が進んでいる。USCボイラの高圧化は、ボイラ耐圧部の圧肉化による熱応力対策、安全弁などでの高圧差による耐エロージョン対策、シール特性の改善等が解決すべき検討課題である。高温化に対しては、材料の高温強度、耐高温腐食、耐水蒸気酸化、溶接と加工特性が課題として挙げられる。高温高圧化に対するタービンの技術課題には、高圧部の軸シール、伸び差の吸収、ケーシング構造、材料の選定などが挙げられる。材料開発の例として、タービンの主要構成材料であるフェライト系耐熱鋼に代えてオーステナイト系の高級耐熱鋼の採用が検討されている。

蒸気タービンの内部効率を向上させる技術として、これまでにノズルと羽根まわりの最適速度分布、フィン増加による翼先端の漏洩蒸気の低減、衝撃波の乱れを最小にする最終段遷音速翼断面、デイフーザ形状の最適化による損失低減などが図られてきた²⁾。それによって内部効率は3%程度の向上を達成した。最近、これら技術の拡大と高性能三次元ノズル・羽根の開発で、内部効率をさらに1.5~2%だけ向上させている。

蒸気タービンの最終段長翼は、プラント出力の10%以上も負担しており、蒸気タービンの性能と信頼性を左右する最も重要な要素の1つである。長翼は高遠心力場で使用されるために、材料強度、流体性能、翼振動評価の高性能化を図っていく必要がある。長翼材料

としては、従来の12Cr鋼にMo, N含有量を増加し固溶および炭窒化物による析出物分散強化を図った新Cr鋼の開発がある。それにより、12Cr鋼系では最長級の3000rpm用43インチ長翼が開発されている³⁾。

2.3 ガスタービン技術の高効率化

発電用ガスタービンは、1939年にスイスのBBC社（現在はABBに改称）で4MWが最初に商用機として製作された。当時は、ガスタービンの入り口温度は552℃、熱効率も17.4%であったが、その後、大容量化と高温化が進み、現在では1500℃級のガスタービンが出現し、単機容量も230MW、熱効率は38.5%に達成している。

ガスタービンの性能向上は、空力設計、燃焼技術、材料開発などの各要素課題を総合した結果として実現するものである。その主な要素課題には、次に示す技術があげられる。

- ・ガスタービン翼の高温耐熱材料の開発（一方向凝固合金、単結晶合金、超合金、金属間化合物、酸化物分散強化型材、炭素複合材、セラミックス）
- ・コーティング技術（耐食・耐熱、傾斜機能材料、加工技術）
- ・高温部材の高性能冷却技術（動・静翼の冷却構造、水蒸気冷却）
- ・低NO_x燃焼技術（希薄予混合燃焼、触媒燃焼）
- ・燃焼器や動・静翼等の補修コスト低減化

上に示した技術進歩によって、発電用ガスタービンの性能は年々向上してきている。最近では、タービン入り口温度1300℃級のガスタービン（三菱重工㈱：501F/701F）から、1500℃級のガスタービン（同：501G/701G）が開発されてい⁴⁾。その性能は表1に示すように、ガスタービン単体の熱効率が38.5%（LHV）、複合発電にしたプラント熱効率が58%（同）以上にもなっている。高性能を達成するために、従来のガスタービンにいくつかの改良を施している。タービン翼形は完全三次元翼で、第1～第3段動静翼を空冷翼にしている。1500℃の温度に耐えられるようにするため、新

表1 1500℃級ガスタービンの性能⁴⁾

性能項目	1500℃(501G)	1300℃級(501F)
ガスタービン単機出力 [MW]	230	153
ガスタービン熱効率 [% , LHV]	38.5	35.3
圧力比	19	14
排ガス流量 [kg/s]	531	427
排ガス温度 [°C]	593	578
複合プラント出力 [MW]	343.3	232
複合プラント熱効率 [% , LHV]	約58	53.6

耐熱合金、一方向凝固、全面遮熱コーティングのタービン翼材料を採用している。また、圧縮機は空力性能を高めた17段の新型軸流圧縮機、燃焼器は冷却用空気を必要としない世界初の回収型蒸気冷却方式である。

ガスタービンは、圧縮機、燃焼器、タービンの3要素で構成されている。この形式のガスタービンは、シンプルサイクルと呼ばれており、構造が簡単で信頼性が高いといった利点を有している。ガスタービンのエクセルギー効率を高めていくには、高温化や断熱効率の向上とともに空気流量当たりの燃料消費量を大きくする方法がある。それは燃空比を高める方法で、ガスタービンの構造を低圧圧縮機、中間冷却器、高圧圧縮機、高圧燃焼器、高圧タービン、再燃焼器、低圧タービンの7要素で構成するレヒートガスタービンである。レヒートガスタービンの最適圧力比は、50～100で、シンプルサイクルの12～18に比べて大きくなる。わが国では、1980年代に通産省のムーンライト計画でその性能を実証するための研究開発が行なわれた。レヒートサイクルを用いたLNG複合サイクルの熱効率は50%（HHV）と試算されている。

燃焼ガスタービンに水蒸気を注入し、大幅な出力増と熱効率の改善を計る方式がSTIG（steam injected gas turbine）サイクル（チェンサイクル）である。この方式は、効率をガスタービン単独と複合サイクルの中間程度にまで高めることができ、また復水蒸気タービンが不要となるため設備費の大幅な低減が期待できる。また蒸気噴射により、NO_x排出量も1/5程度にまで低減できる効果がある。反面、排ガス中に含まれる水蒸気が大気に放出されるために、大量のボイラ補給水を必要とするといった問題があり、中小規模の自家発電設備やコージェネレーションとしての利用に限られる。

STIGサイクルで大気に放出される排気ガス中には水蒸気の潜熱が大きな割合を占めており、エネルギー損失の大きな原因となっている。このシステムの熱効率をさらに高めるには、排気ガスの温度（HRSG出口で100℃）を維持しつつ水蒸気成分を下げる必要がある。HAT（humid air turbine）サイクルは、STIGサイクルと再生サイクルを融合したサイクルで、排ガスの放出温度を維持しつつ排ガスの水蒸気成分を少なくする方法である⁵⁾。

表2 火力新技術の概要

LNG : ①LNG複合発電 : (ガスタービン) 1,350℃, (発電端効率) 50% [: HHV]
石炭 : ②超々臨界圧発電 : (蒸気条件) 351気圧, 649/595℃, (発電端効率) 43% [HHV]
③石炭ガス化複合発電 : (ガス化炉) 1,300℃, ドライ供給, 空気吹き 乾式ガス精製 (発電端効率) 45% [HHV]
④石炭ガス化溶融炭酸塩型燃料電池複合発電 (MCFC) : (ガス化炉) 上と同じ (発電端効率) 55% [HHV]

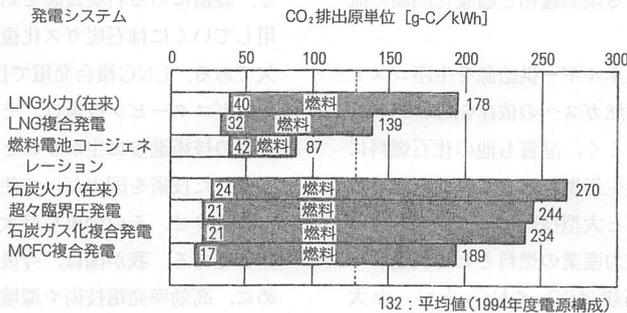


図-2 火力新技術のCO₂排出量

3. 火力新技術によるライフサイクルCO₂排出量

設備の製造、運用、廃棄のライフサイクルにわたる温室効果ガスの分析によると、火力発電のCO₂排出量の大半は発電時の燃料から排出している⁹⁾。火力発電プラントからCO₂排出量を削減するには、燃料を節約していくことが最も大切であり、それには高効率発電やコージェネレーションといった技術開発が必要になる。ここでは、火力新技術がCO₂排出量の低減にどの程度まで貢献できるか試算した結果⁶⁾を紹介する。

発電効率を向上する技術には、LNGを燃料とするLNG複合発電、石炭を燃料とする超々臨界圧発電、石炭ガス化複合発電、それに石炭ガス化溶融炭酸塩型燃料電池などがある。それぞれの新技術について色々な方式が世界中で開発されているが、わが国で開発している方式を表2に示す。表に示す新技術はすべて電気事業用の大型設備で発電出力はすべて1,000MWである。

温室効果ガスには、単にエネルギー(石炭、石油、天然ガス、電力)の消費によって発生するCO₂だけでなく、天然ガスの採掘時に粗ガス中に含まれるCO₂、セメント製造時の化学反応で発生するCO₂、それに石炭や天然ガスの採掘時に大気中に漏洩するメタンなどがある。メタン洩れは採掘地点で大きく異なるが、わが国に輸入しているガス田と炭鉱について調べると、

天然ガスで生産ガス量の1%、坑内掘りで石炭1トンあたり約7.3kgのメタン洩れがあるといわれている。漏洩メタンの温暖化影響はCO₂に比べて大きい。それは、メタンが時間とともに分解していくため積算年数によって異なる。今回の検討では積算年数を100年とし、温暖化ポテンシャル(Global Warming Potential)をIPCC報告書のデータからCO₂の21倍として計算した。

温室効果ガスをCO₂に換算してライフサイクルにわたる排出量の総和を求め、発電プラントの耐用年間発電電力量で割ると、1kWh当たりの電気を生産するのに排出したCO₂量が求まる。次式は、その算定式を示したものである。

$$\text{CO}_2\text{排出原単位 [g/kWh]} = \frac{\text{CO}_2\text{総排出量} (*)}{\text{寿命期間中の発電電力量 [送電端]}}$$

* : 設備建設+設備運転+発電用燃料+メタン洩れ

火力新技術についてライフサイクルにわたるCO₂排出量の分析結果を図-2に示す。図からLNG複合発電は在来火力であるLNG火力に比べCO₂原単位を22%も低減しており、低減効果が大きいことがわかる。その値139g-C/kWhは、現時点(1994年)の電源構成の平均値132g-C/kWhにほぼ近い値になっている。石炭火力の場合、新技術による排出原単位の低減効果は、超々臨界圧発電、石炭ガス化複合発電、MCFC複合発電で、それぞれ10%、13%、30%である。発電効率向上による燃料の節約効果は大きく、原単位の低

減効果は、発電効率にほぼ比例して大きくなっている。

4. おわりに

本報告は、今後、期待される火力発電の新技術について、その開発動向を記述したものである。しかし最近の社会情勢は、ここで紹介した新技術開発に必ずしも順風とは言えない。それは、世界のエネルギー産業に大きな影響を与えている規制緩和と温暖化問題の流れである。

規制緩和は、社会のエネルギー供給源を生産コストが安価で良質な石油や天然ガスへの依存を高めている。石炭のように取り扱いにくく、品質も他の化石燃料に比較して劣る燃料は、民生用燃料としては使い難いエネルギーであり、もともと大型技術によって効率良くクリーンに使用できる電力産業の燃料として利用すべきものである。現在、石炭はSO_xやNO_xといった大気汚染物質の排出、温室効果ガスであるCO₂の排出、さらに石炭灰の処分といった環境問題を抱えており、電力産業からその利用が敬遠されている。今後、規制緩和によって電力産業が公益性を失い、コスト低減のために競って石油や天然ガスを利用するようになれば、石炭は益々利用されなくなっていく。

最近のエネルギー情勢は、良質な燃料を先に利用し、私たちの子孫には質の悪い燃料を残すという流れをつくっている。子孫は、いずれは膨大にある石炭資源に依存せざる得ず、その利用に際して発生する環境問題を解決しなければならない。環境と調和する石炭利用技術の開発は人類の共通課題であり、化石燃料にまだ余裕がある今から着手すべきものである。

温室効果ガスであるCO₂の削減は、火力発電ではSO_xやNO_xの脱硫・脱硝装置のように脱炭装置をつ

けて除去することは実現性から見て難しい。火力発電の温暖化対策は、効率の高い発電システムの開発が現実的な解決策である。発電技術の高効率化は、温室効果ガスであるCO₂排出量を抑制するだけでなく燃料の節約も図れ、将来のエネルギーセキュリティにも貢献することになる。中でもカロリー当たりのCO₂排出量が最も多い石炭は、発電プラントの効率向上が重要になる。豊富にある石炭資源を効率良くかつクリーンに利用していくには石炭ガス化複合発電の技術開発は不可欠である。LNG複合発電で目覚ましい進歩を遂げているガスタービン技術は、その成果を石炭ガス化複合発電の技術進歩に生かすことができる。

優れた技術を国内だけで使うのではなく、世界に広く普及させ、その効果を最大限に発揮できるようにすべきである。我が国は、今後、途上国の環境改善のために、高効率発電技術や環境技術を途上国に移転していくことも大切になる。

引用文献

- 1) 内山洋司, 平山省一, 佐藤禎司; 液体空気貯蔵ガスタービン発電システム, エネルギー・資源, 12巻, 6号 (1991)
- 2) 大平ら, "蒸気タービン効率向上技術の変遷と最新技術", 日本機械学会第75期通常総会講演会 (1998年3月)
- 3) 坪内ら, "新型蒸気タービン長翼の開発", 日本機械学会第75期通常総会講演会 (1998年3月)
- 4) 塚越ら, "1500°C級G形ガスタービンの開発と実証運転状況", 日本機械学会第75期通常総会講演会 (1998年3月)
- 5) 竹矢一雄; ガスタービン開発の現状と将来, 超高温材料シンポジウムⅣ, 66-67 (1994)
- 6) 内山洋司; 発電プラントのライフサイクル分析, 電力中央研究所報告Y94009 (1995)