

## (社)日本ガスタービン学会名誉会員の紹介

(社)日本ガスタービン学会ではガスタービン及び関連技術に関し功績顕著な方、又は本学会に対し功労のあった方のうちから理事会の推薦により総会において承認された方が名誉会員となります。去る平成 15 年 4 月 3 日、平成 15 年通常総会において次の方があらたに本学会の名誉会員となりましたのでご紹介します。



青木 千明 君  
(1932 年 9 月 18 日生)

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| 昭和 30 年 3 月                 | 東京大学工学部機械工学科 卒業                                |
| 昭和 30 年 4 月                 | 石川島重工業(株) [現, 石川島播磨重工業(株)] 入社                  |
| 昭和 51 年 9 月                 | 石川島播磨重工業(株) 陸舶ガスタービン事業部長                       |
| 昭和 56 年 11 月                | 同社 航空エンジン事業部長                                  |
| 昭和 59 年 7 月                 | 同社 航空宇宙事業本部技術開発室長                              |
| 昭和 62 年 7 月                 | 同社 航空宇宙事業本部副本部長                                |
| 昭和 63 年 7 月                 | 同社 技術本部副本部長                                    |
| 平成 8 年 7 月                  | 日本内燃機関連合会 特別参与, 常務理事                           |
| 平成 14 年 7 月                 | 日本内燃機関連合会 参与<br>[ISO 対策内燃機関標準化委員会(JICESC) 委員長] |
| 平成 5 年 11 月<br>～平成 10 年 5 月 | 国際燃焼機関会議 (CIMAC) 副会長                           |

### 本会関係略歴

昭和 47 年入会  
理 事 (5, 6, 9, 10, 14, 15 期)  
評議員 (1, 2, 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15, 16 期)



榎木 康夫 君  
(1933 年 1 月 3 日生)

|             |                           |
|-------------|---------------------------|
| 昭和 30 年 3 月 | 九州大学工学部機械工学科 卒業           |
| 昭和 30 年 4 月 | (株)日立製作所 入社               |
| 昭和 49 年 8 月 | 同社 電力事業本部 ガスタービン部長        |
| 昭和 53 年 9 月 | 高効率ガスタービン技術研究組合技術室 副室長    |
| 昭和 60 年 8 月 | 茨城県工業技術センター長              |
| 平成 3 年 4 月  | 日立エンジニアリングサービス(株) 主管技師長   |
| 平成 5 年 1 月  | (株)日立製作所 ガスタービン実用化試験設備 所長 |
| 平成 10 年 3 月 | 同上退任                      |

### 本会関係略歴

昭和 47 年入会  
理 事 (2, 3, 7, 8 期)  
評議員 (1, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 15, 17, 19 期)

## (社)日本ガスタービン学会刊行物のご紹介

### \* 学会誌特集号バックナンバー

2000 年以前のものは GTSJ 事務局までお問い合わせください。

- |                             |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| ● Vol. 31 No. 2 2003 年 3 月  | 特 集「ガスタービン用先進材料・技術の現状と課題」   |
| ● Vol. 31 No. 1 2003 年 1 月  | 小特集「潤滑油と軸受に関する技術動向」         |
| ● Vol. 30 No. 6 2002 年 11 月 | 特 集「ガスタービン用コーティング技術」        |
| ● Vol. 30 No. 5 2002 年 9 月  | 特 集「燃焼の数値シミュレーション」          |
| ● Vol. 30 No. 4 2002 年 7 月  | 特 集「ガスタービンの極小化に関する調査研究」     |
| ● Vol. 30 No. 3 2002 年 5 月  | 特 集「先進材料利用ガスジェネレータ技術開発」     |
| ● Vol. 30 No. 2 2002 年 3 月  | 小特集「ターボ機器用軸受の最新動向について」      |
| ● Vol. 29 No. 6 2001 年 11 月 | 小特集「環境負荷低減技術」               |
| ● Vol. 29 No. 5 2001 年 9 月  | 特 集「ガスタービン高温部品の保守管理技術」      |
| ● Vol. 29 No. 4 2001 年 7 月  | 小特集「ガスタービンの極超小型化に向けて」       |
| ● Vol. 29 No. 3 2001 年 5 月  | 特 集「マイクロガスタービン」             |
| ● Vol. 29 No. 2 2001 年 3 月  | 小特集「ガスタービンにおけるモニタリング技術」     |
| ● Vol. 29 No. 1 2001 年 1 月  | 特 集「ガスタービン最新運転管理（ユーザの立場から）」 |
| ● Vol. 28 No. 1 2000 年 1 月  | 特 集「超音速輸送機用推進システム（HYPR）」    |

### \* その他刊行物

#### ● 講演会講演論文集

- 第 28 回定期講演会講演論文集（155 頁，2000 年）
- 第 15 回秋季講演会講演論文集（北九州）（222 頁，2000 年）
- 第 29 回定期講演会講演論文集（142 頁，2001 年）
- 第 16 回秋季講演会講演論文集（秋田）（253 頁，2001 年）
- 第 30 回定期講演会講演論文集（334 頁，2002 年）
- 創立 30 周年記念ガスタービン講演会講演論文集（144 頁，2002 年）

#### ● ガスタービンセミナー資料集

- 第 28 回 21 世紀を担うガスタービンを目指して（110 頁，2000 年）
- 第 29 回 21 世紀のガスタービンへの期待（85 頁，2001 年）
- 第 30 回ガスタービンの最新技術とシステムの展開（135 頁，2002 年）
- 第 31 回ガスタービンの最新技術と分散電源への展開（101 頁，2003 年）

#### ● BULLETIN OF GTSJ（2000 年版，2001 年版，2002 年版）

#### ● 調査研究委員会成果報告書

- 第 21 期調査研究委員会  
ガスタービンの高温化と冷却技術（256 頁，1997 年）
- 第 26 期調査研究委員会  
ガスタービンにおけるモニタリング技術（172 頁，2000 年）

#### ● 技術情報センター運営委員会調査報告書

- 第 20，21 期技術情報センター運営委員会  
水素燃焼ガスタービンにおける水素利用に関連した物性値の調査（64 頁，1997 年）

#### ● 国産ガスタービン・過給機資料集－統計・生産実績・仕様諸元－

- 1999 年版（187 頁，1999 年）

#### ● 日本のガスタービンの歩み－日本ガスタービン学会 30 周年記念写真集（155 頁，2002 年）

#### ● ガスタービン教育シンポジウムテキスト



## 第28期会長就任挨拶

大田 英輔<sup>\*1</sup>

OUTA Eisuke

創立30年を経て、次の10年への第1歩を踏み出すこの時に、4月3日開催の日本ガスタービン学会総会にて第28期会長を拝命しましたこと、誠に光栄に存じます。多くの先生方の卓見に学びながらガスタービン関連の技術や研究の成果に憧憬を抱いて、この学会に関ってきましたが、素人の域を出ない私が、学会の更なる発展とガスタービンを主体としたエネルギー変換の技術やシステムの洗練化、社会への発信などの課題に対して果して貢献できるのか、限らない不安をも抱きます。しかし、柘植前会長の指針を受け継ぎ、会員の皆様のお知恵を拝借して、住川副会長ならびに理事・委員諸氏と共に、次代へ引き継ぐ土壌をつくる努力をする所存でもあります。

今、第23期に佐藤元会長のもとで達成されました2000名を超える会員数がほぼ維持されています。しかし、この学会の活動に親近感をもって積極的に参加される方々や学会に激励を送っていただける方々の数はそれ程多くはないように感じます。そして、製造業が直面されている困難な社会情勢の下で賛助会員の数も減少の傾向にあり、新たに賛助を得ることも容易ではない状況にもあります。

学会が20周年を迎えました頃、いくつかの大型プロジェクトがこの分野をにぎわしていました。HYPRプロジェクトが実りの時期を迎え、AMGプロジェクトがスタートし、WE-NET研究が活況を呈し、石炭ガス化複合発電、セラミックGT、ウオータジェット推進、等々非常に賑やかであった時代です。V2500もこの時期の成果でしょう。

ガスタービン学会はその頃GTマフィアとも異名を頂戴しました。パワーを持った集団とも写っていたのでしょう。私の機械工学観では、ガスタービン技術は材料も含めた広義メカニカルエンジニアリングの粋をあつめた超高級百貨店のように感じます。練りに練った工学と高度技術に基づいて生産された多くの光り輝く要素が精密にシステム化され、初めて信頼性のあるGTシステムが市場で優位性を持つという意味です。また、先般、学会設立30年の機会に日本のガスタービンの歩みを写真集にまとめて発刊しました。編集当初、各社から寄せられました資料は200機種にも及び、用途別に年代別に並

べると、我が国の研究者技術者から注がれた熱さを物語るに十分に壮観なものでありました。

このように目覚ましく発展してきました結果、大学では容易に踏み込めず、また新規参入の企業にも大変な努力が要求されるような高みに達しているのかと思われます。若い研究者ひいては大学に学ぶ者がかつてのように熱意と夢を抱いて多数輩出するであろうか、そして、経済要因によって国や産業界でも挑戦的な開発が停滞するとき、10年後あるいは20年後に、諸外国に開花するであろう新技術に再び頼ることにならないだろうか、こういった杞憂も感じます。

常に刺激的で挑戦的な目標や課題が、産業界からも工学の世界に投げかけられる状況が持続されたいと思います。その中で育つ人材や成果と展望が、ある場合には国に提言し、あるものは産業技術に幾許かの示唆を与えることができるかもしれません。欧米に見られるような形を創る事は容易ではないとしても、これからの官産学の共同の具体的な姿がガスタービン工学技術の中で形創られるように期待する次第です。それを媒介し、そういう場作りをすることが学会の大きな一つの使命であるとも考えられます。

「ガスタービン村」との風評から脱却するうえでも、有意な競合技術と協調して互いに切磋琢磨すること、遠い分野であってもそこで育つ最新技術や工学の情報を会員に伝えること、産学協同の先進国をはじめ諸外国の学界や産業界との国際協調を活発にすること、そしてガスタービンの更なる普及の為に広報を活発にすること、このような点を視野に入れて、理事会、委員会が有機的に連係して、多くの会員の皆様が参加し協賛するような活動を志したいと思います。

その大きな機会が、今秋に江戸川区民ホールで開催されます第8回ガスタービン国際会議に用意されております。今、組織委員長の伊藤源嗣元会長および川口修実行委員長の下で着々と準備が進められております。この会議を成功裏に終えることは、今後の学会の発展に必須のことでありましょう。“ガスタービンと先進エネルギーシステム”の新時代に引き継ぐことが出来ればと願っております。

終わりに、第27期の柘植会長はじめ理事・委員の皆様のご尽力と貴重な成果に心から感謝申し上げ、会員の皆様の一層のご支援をお願いし、益々のご健勝とご活躍を祈念し、会長就任の挨拶と致します。

原稿受付 2003年4月7日

\*1 (本名 吉岡 英輔) 早稲田大学 理工学部 機械工学科  
〒169-8555 新宿区大久保3-4-1

特集：ガスタービン利用高効率エネルギーシステムの動向

## 「ガスタービン利用高効率エネルギーシステムの動向」 特集号によせて

酒井 俊道<sup>\*1</sup>

SAKAI Toshimichi

本特集号は、ガスタービンを利用した複合サイクルプラント等の、高効率化を更に追及している最近のエネルギー変換システムの紹介とその将来に向けての動向を展望したものである。

ガスタービン利用高効率エネルギーシステムの活用による省エネルギーは、陸用ガスタービンの萌芽期から多くの研究者、技術者が取り組んできた問題であり、本学会の調査研究委員会、学会誌特集等でも度々取り上げられて来た。多くのエネルギー資源を外国に頼っているわが国が、効率のよいエネルギー供給を行って行くことにより、現存のエネルギー資源の消費を抑えて、これを次世代に残して行くことは、我々に課せられた使命である。

陸用ガスタービンの黎明期においては、サイクル論による考察から、ガスタービンの高い効率達成に対する大きな期待が持たれ、この時代に学生であった世代の人々は、将来の夢の原動機としてガスタービンに大きな期待と夢を寄せていた。ガスタービン利用高効率エネルギーシステムを成功させるためには、タービン入口温度の高温化及びそれに応じた圧力比の増大が不可欠のものであること、ならびにこれが非常に困難な技術であることは良く知られていた。材料、冷却及び空気力学技術は、先行していたジェットエンジン技術に助けられるところも多かったが、耐熱材料及び冷却技術が現在のレベルに達するまでには、ガスタービンを主体とした高効率エネルギーシステムの開発に関わった技術者にとって長い苦難の時代があった。しかし、関係者の弛まぬ努力の結果による耐熱材料技術及び冷却技術の向上及び低NO<sub>x</sub>燃焼技術の進歩により、本学会の調査研究委員会の資料「ガスタービンの高温化と冷却技術」等にも見られる様に、この30年間にタービン入口温度は10年間に約200℃のペースでほぼ直線的に上昇して来た。その結果、1980年代には、蒸気タービンとのコンバインドサイクルによる大型発電用高効率エネルギーシステムにおいては、プラント総合熱効率、信頼性および低公害性において、他国に引けを取らない製品が生産されるようになった。また、このようなわが国の技術力の進展は、多くのガスター

ビン研究開発の大形国家的プロジェクトによって効果的に推進され、これがガスタービン発電システムの効率向上に寄与してきたことは、関係者のよく知るところである。

今回は、ガスタービンの生産動向を知る資料として、最近生産されたガスタービン利用高効率エネルギーシステムの中から、燃料の持つエネルギーの徹底的な利用および環境対策に対する要求に答える形で、その需要が増加してきている中小型ガスタービン・コージェネレーションシステム及び高効率大型ガスタービン・蒸気タービンコンバインドシステムの状況を広く紹介した。

しかし、各要素の性能が予測される最高値に近づきつつある現在、ガスタービンシステムにおける効率の改善も、過去30-40年間に見られたようなペースで進めることは難しい状況にあり、新しい発想に基いたガスタービンを利用した高効率エネルギーシステムの開発も模索されている。その一つとして、ここでは新たなエネルギーシステムとしてその実現が期待されている高温作動型燃料電池とガスタービンのハイブリッドエネルギーシステムの可能性についての展望が掲載されている。溶融炭酸塩形燃料電池(MCFC<sup>\*</sup>)と固体酸化物形燃料電池(SOFC<sup>\*\*</sup>)は、高温作動型燃料電池であるため、ガスタービンとのハイブリッドエネルギーシステムとしてその実現が期待されているものである。

さらに、今後の実績の増加が望まれる、ガスタービン利用「ごみ」発電の運転実績を紹介した。言うまでもなく、ごみ焼却は身近な現在の社会問題であり、ガスタービンがその一役を担うべき問題であると考ええる。

また、計画及び試験を終了した炭坑の掘削跡を圧縮空気貯めとした空気蓄圧式ガスタービン利用発電についての報告を掲載した。

以上、本号では高効率ガスタービン発電システム等についての近況を展望・紹介したが、これらのシステムの有効利用ならびに関連技術の更なる進展を心から願うものである。

原稿受付 2003年3月20日

<sup>\*1</sup> 東京理科大学 工学部第一部 機械工学科  
〒162-8601 東京都新宿区神楽坂1-3

<sup>\*</sup>/ Molten Carbonate Fuel Cell

<sup>\*\*</sup>/ Solid Oxide Fuel Cell

特集：ガスタービン利用高効率エネルギーシステムの動向

## 再生サイクルを用いた高効率小型コージェネレーション用 ガスタービンの開発

楠本 吉昭<sup>\*1</sup>

KUSUMOTO Yoshiaki

キーワード：ガスタービン・エンジン、再生サイクル、コージェネレーション

Gas Turbine Engine, Regenerative Cycle, Recuperative Cycle, Co-generation

### 1. はじめに

近年、非常用あるいはコージェネレーション用の発電機駆動用原動機として、ガスタービン・エンジンが広く定着してきたが、出力数 MW クラス以下の中小型ガスタービンについてはディーゼルエンジンやガスエンジン等のレシプロエンジンと競合しており、特に 1 MW 未満の出力領域ではレシプロエンジンの独断場であった。その理由は、主に小型ガスタービンの機関熱効率（発電効率）の低さにあり、小型・軽量・高信頼性・好環境適合性（低騒音・低エミッション）・好メンテナンス性といったガスタービンエンジンの数々の優位性を持ってしても、レシプロエンジンによるコージェネレーションや、商用受電+ボイラのような従来型モノジェネレーションに対して、経済面での劣勢を挽回できなかったためである。

小型コージェネレーション用原動機としてのガスター

ビンエンジンの地位を、従来のモノジェネレーションやレシプロエンジン、さらには近い将来に強力な競争相手になるであろう燃料電池などの新技術に対抗して築き上げていくためには、その機関熱効率の向上が不可避の課題であり、その解決策のひとつが、ガスタービンエンジンの再生サイクル化である。

川崎重工では小型コージェネレーション用再生サイクルガスタービンエンジン「S7A-01」(写真1)を開発し、新たなガスタービンの用途として市場に提案した<sup>(1)(2)</sup>。現在、好調に受注・納入実績を伸ばしており、強大なレシプロエンジン・コージェネレーションの牙城の一端を切り崩せたものと考えている。

本稿では、小型コージェネレーション用ガスタービンエンジンの高効率化を考察しながら、「S7A-01」型ガスタービンの開発コンセプトについて紹介する。

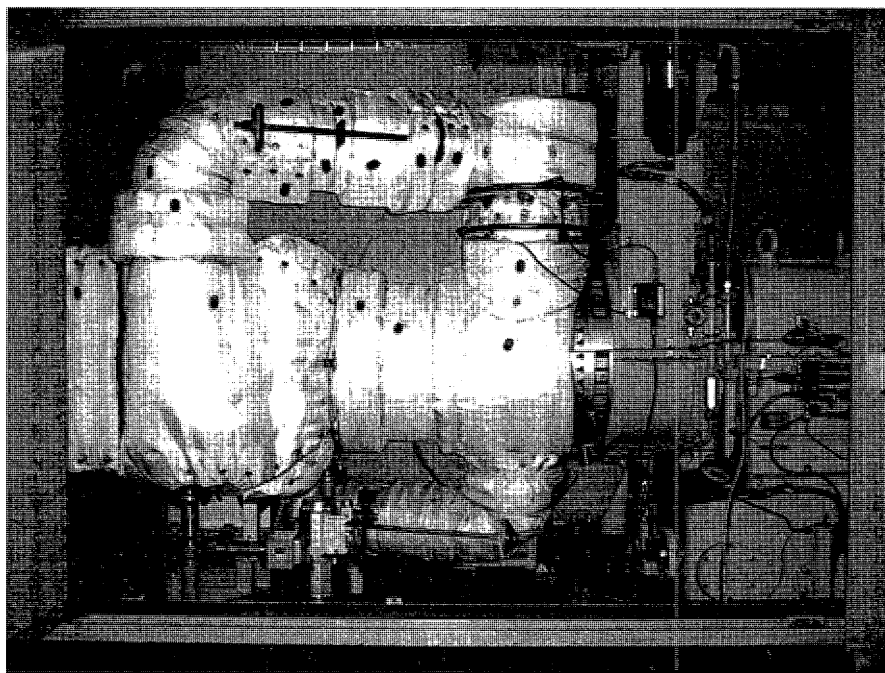


写真1 S7A-01型ガスタービン

原稿受付 2003年4月11日

\*1 川崎重工業(株) ガスタービンビジネスセンター  
産業ガスタービン技術部  
〒673-8666 明石市川崎町 1-1

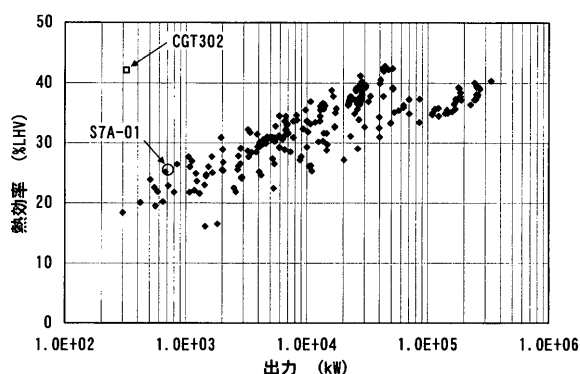


図1 ガスタービンの出力と効率

## 2. 小型ガスタービンの高効率化

シンプルサイクルガスタービンにおいて、事業用の大型のものでは単機熱効率40%を超えるものが出現しているのに対して、1 MW未満の小型のそれはせいぜい20%前半に留まっている(図1)。

この理由は、構成部品の幾何寸法が小さくなることで、1) 作動流体や潤滑油の粘性効果が増すことによる損失増加、2) ロータと静止部品間の相対的なクリアランスが増すことによる漏れ損失の増加、3) 複雑な冷却構造を採りにくいことによる冷却効率の低下とタービン入口温度高温化に対する制約、4) その他様々な形状最適化・機構複雑化の寸法的制約などが技術的な要因として挙げられる。

また、純粋な技術的要因とは別に、小型エンジンになるほど高効率化対策の費用対効果が小さくなり、高価な機構や部品を採用しにくいという要因も挙げられる。特に、コージェネレーション用ガスタービンのようにコスト増に対してシビアで、かつ、強力な競争技術がある分野では、例えば航空機用ガスタービンでは一般的に用いられているような単結晶タービン翼やメカニカルシール装置などの高価な部品を採用することで機関熱効率の向上を果たせることが明らかな場合でも、その費用対効果を慎重に見積もって採用の是非を検討する必要がある、その導入には慎重にならざるを得ない。

つまり、小型コージェネレーション用ガスタービンにおいては、高温化や高圧力比化といったガスタービン本体の性能向上策は機構の複雑化や高級材料の使用によるコストアップを招き、それが即、市場における競争力の向上に繋がるかどうかは疑問である。航転型の高効率ガスタービンを用いた小型コージェネレーションシステムも存在するが、1 MW未満の領域においてはレシプロエンジンに対抗して市場に広く受け容れられているとは、まだまだ言い難い状況にある。

発電システムとしての熱効率向上の手法としては、ガスタービン本体の高性能化の他に、コンバインドサイクル化や蒸気注入サイクル化などが中・大型のガスタービ

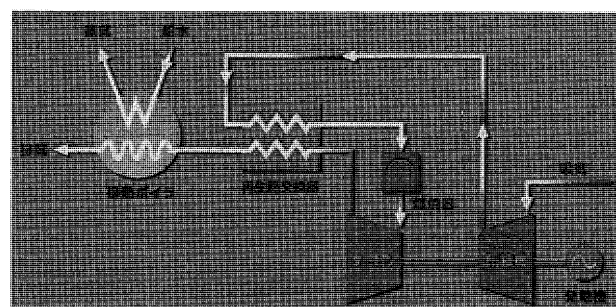


図2 再生サイクルのシステム構成

ンにおいて従来から積極的に採用されている。しかし、蒸気タービンや純水装置及びそれらの制御装置など多くの付属装置が必要で大幅なコストアップを招くことになり、小型ガスタービンではそのコスト増に見合うだけのメリットを得ることが難しくなる。

一方、再生サイクルガスタービン(図2)では再生用熱交換器を設けるのみで複雑な周辺機器を必要とせず、低コストでのシステム構築が可能である。また、特定の圧力比で機関熱効率がピークを持つ(単純サイクルでは圧力比を上げるほど熱効率が増す)という再生サイクルの特性から、目標とする熱効率に対して圧力比を低く抑えることができ、ガスタービン要素の単純化による低コスト化を果たすことができる。これらの点から、小型ガスタービンの性能向上策としては、現状では再生サイクル化が費用対効果が最も大きい手法であるといえる。

また将来的には、再生サイクル化と併せて、高温部品のセラミックス化が有望である。旧通産省のムーンライトプロジェクトの一環として発足し、1988~98年の11年間にかけて実施されたセラミックガスタービンの開発研究において、川崎重工が中心となって開発を担った「CGT 302」型ガスタービン(図3)は、300 kW級の小型ガスタービンとしては驚異的な42.1%という熱効率を達成し、小型ガスタービンの将来性に大きな希望を与えたものであるが、これは再生サイクルに加えて、高温部にセラミック部品を採用することによってタービン入口温度の高温化と冷却用二次空気の削減を実現し、これをベースに各種先進技術を導入したことの成果である<sup>(3)</sup>。しかし、現時点ではこれを即そのまま製品化できる程にはセラミックス材料の信頼性が得られておらず、まずは高温静止部品にのみセラミック部品の採用を目指した実用化研究が継続されている<sup>(4)</sup>。セラミックス化が将来の小型ガスタービンのキーテクノロジーのひとつになることは間違いのないものと思われるが、一般的な普及は未だ将来への課題である。

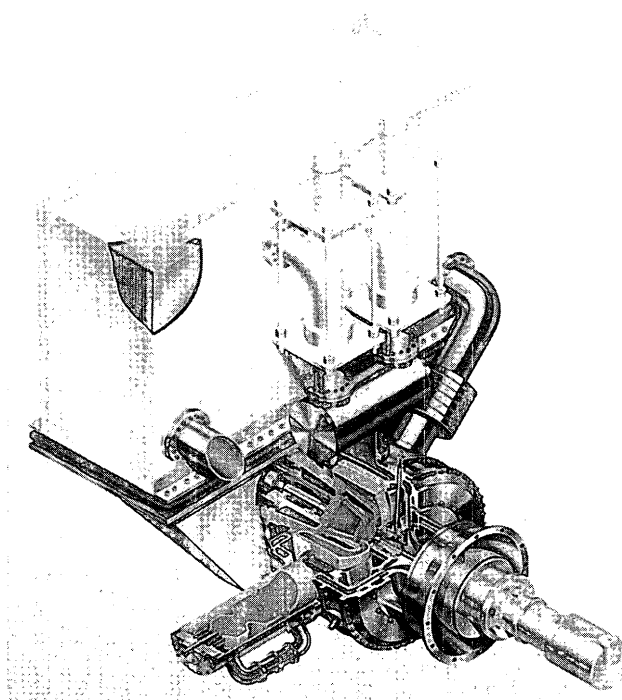


図3 CGT 302 ガスタービン

表1 S7A-01 主要諸元・性能 (ISO 標準条件)

|        |                           |
|--------|---------------------------|
| 形 式    | 再生開放一軸式                   |
| 圧縮機    | 単段遠心式                     |
| タービン   | 二段軸流式                     |
| 燃焼器    | 単筒缶型ドライ低NO <sub>x</sub> 式 |
| 減速機    | 二段平行歯車式                   |
| 再生熱交換器 | プレートフィン型伝熱式               |
| 寸 法    | mm L2600 x W1520 x H1770  |
| 乾燥質量   | kg 3, 100                 |
| 燃 料    | 都市ガス 13A                  |
| 軸端出力   | kW 712                    |
| 軸端熱効率  | % 25.5 (LHV)              |
| 空気流量   | kg/s 4.05                 |
| 排気ガス温度 | ℃ 476                     |
| 主軸回転速度 | rpm 34,000                |
| 圧力比    | 7.6                       |
| 再生温度効率 | % 60                      |

### 3. S7A-01 ガスタービンの開発コンセプト

川崎重工では、'90年代前半より「コージェネレーション用原動機としてレシプロエンジンに対抗できる小型ガスタービン」を基本コンセプトとするガスタービンの開発計画を進めてきた。「CGT 302」の研究開発を通じて再生用熱交換器を量産エンジンに適用できる目処が得られたこともあり、再生サイクルガスタービンを基本として、全く新しい構造のコアエンジンを新規に開発することとなった。従来機種をベースに再生サイクル化するのではなく、敢えて新規エンジンを開発することになったのは、従来機種に単に再生熱交換器を付けただけでは、低コスト・高効率という再生サイクルの利点を生かしきれないとの判断であった。このような背景の下で開発されたのが、「S7A-01」ガスタービンである。主要諸元を表1に示す。

エンジン仕様の決定に際しては、熱効率と排気温度のバランス、つまり再生温度効率の決定を最も重視し、慎重に検討を重ねた。

単に機関熱効率の向上のみを目指すのであれば、再生温度効率、つまり熱交換器サイズを可能な限り大きくすることで、例えば低コストの無冷却タービンでも機関熱効率30%強程度までの単機性能を得ることは十分可能な見通しであった。しかし、単機で最新のレシプロエンジンを凌駕するような性能を得ることは難しい上、排気温度の低下によって排熱回収効率が低下し、コージェネレーションシステムとしてはむしろ総合熱効率が低下してしまうことになる。また、熱交換器のサイズと重量の増大により、小型・軽量というガスタービンのメリット

も霞んでしまうことになる。

このような点から、再生温度効率の最大化による間接的な機関熱効率の向上策は、コージェネレーションシステムとして考えた場合には、レシプロエンジンに対抗すべき原動機としては中途半端な存在になってしまう恐れがあった。

そこで、レシプロエンジンに対抗して市場に受け容れられるような小型ガスタービン・コージェネレーションシステムを構築するため、小型・軽量・高信頼性・好環境適合性・好メンテナンス性といったガスタービンの優位性を損なわず、また、レシプロエンジンが苦手な熱需要への対応が可能となるような高温の排気ガスが得られるガスタービンエンジンを目指すこととなった。このため、

- ①低運用コストを実現する簡素な要素構成
- ②空冷タービン翼を採用し、高温の排気温度が得られる高いタービン入口温度設定
- ③熱効率よりも適度な比出力を得ることを重視し、幅広い再生温度効率にも対応できる圧力比設定

という三つの条件下、コージェネレーションシステムとして最適なサイクルパラメータを探った結果が表1であり、再生サイクルガスタービンとしては中途半端な感もある再生温度効率60%という熱交換器を採用することになった理由である。

結果的には、レシプロエンジンに拮抗してガスタービン・コージェネレーションシステムとして数多くの納入実績が現れ始める数MWクラスの重構造型シンプルサイクルガスタービンにほぼ等しい熱効率と排気温度となったことは興味深い。

#### 4. S7A-01 の特徴

次に、「S7A-01」ガスタービンの構造的特徴について述べる。当ガスタービンは、川崎重工の豊富な産業用ガスタービンの自主開発の経験を基に、小型コージェネレーション用再生サイクルガスタービンとして最適な構造を目指して開発されたものである。ガスタービン・コア部分の断面構造図を図4に示す。

##### (1) 基本構造

メインロータは圧縮機インペラ、タービン等の回転体をカービックカップリングで連結し、一本のメインシャフトで締め上げる簡素な構造である（写真2）。主軸受はインペラ前部に三点接触式アンギュラ玉軸受、インペラとタービン間に円筒コロ軸受を配している。タービンを片持支持する形式の簡素な軸受支持構造により、信頼性の向上と排気ディフューザの性能向上を実現した。

##### (2) 圧縮機

鍛造チタン合金を用いた高速・大径インペラと超音速擬似パイプディフューザの採用により、高効率・高圧力比の単段遠心圧縮機を実現した。

##### (3) 燃焼器

当社のドライ低NO<sub>x</sub>燃焼器シリーズの実績をベースとした都市ガス焼き予混合希薄燃焼方式の単筒缶型ドライ低NO<sub>x</sub>燃焼器を搭載し、水や蒸気噴射を行うことなく50～100%負荷の幅広い運転範囲でNO<sub>x</sub>値84ppm（O<sub>2</sub>=0%）以下を達成した<sup>(5)</sup>。今後は、都市ガス焼きの他にも様々な燃料に対応していく予定である。

ドライ低NO<sub>x</sub>燃焼器は複雑な燃焼器構造や燃料制御装置を必要とするが、湿式の低NO<sub>x</sub>法や脱硝装置を設

置することに比べれば、最も有利なNO<sub>x</sub>低減方法である。これによって得られる低エミッション性は、近年の環境重視の流れと相まって、レシプロエンジンとの差別化を図る上での大きな利点となっており、コージェネレーション用ガスタービンとしては必須の技術になりつつある。

##### (4) タービン

タービンの空冷翼化は翼そのものの製作費アップとともにエンジン構造の複雑化によるコストアップも招くものであるが、前述したようにレシプロエンジンとの差別化を図るためには避けて通れない道であった。つまり、タービン入口温度の高温化は、単機熱効率の向上というよりもむしろ、排気温度の高温化によるコージェネレーションシステムの総合効率の向上という点により主眼をおいて指向されたものである。

二段軸流構成のうち、第一段静翼は単翼セグメント構造の中空精密鑄造製（Co基）とし、翼前縁はインピンジメント冷却とシャワーヘッドフィルム冷却を併用した中大型機種と同等の高度な空冷構造を採用している。また機械加工部を極力削減したニアネット形状により加工コストの低減を図っている。第一段動翼はディスク植込み式の中空精密鑄造製（Ni基普通結晶）の翼にリターンフロー型の内部冷却通路を設けている。第一段の動・静翼とも現状のタービン入口温度に対して必要十分な冷却性能を確保するとともに、将来の更なるタービン入口温度の上昇にも対処できるような基本構造となっている。

一方、二段目は静翼、動翼とも無冷却の一体精密鑄造製（Ni基普通結晶）を採用し、大幅な部品製作コストの低減を実現した。

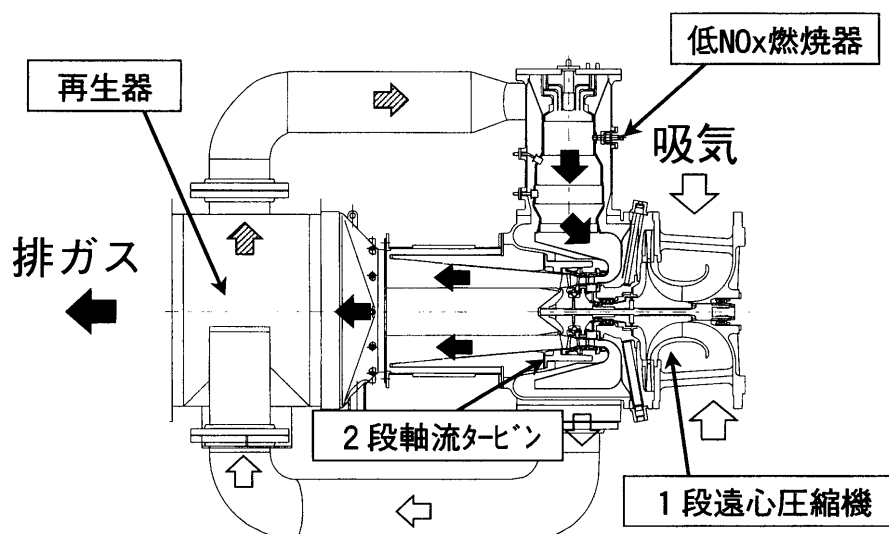


図4 S7A-01 構造図



## (5) 再生熱交換器

温度効率 60% という要求性能に対して様々な形式の熱交換器を検討した結果、耐久性・熱交換性能・コストのバランスに優れた直交流型プレートフィン式熱交換器を採用した（写真 3）。これをタービン排気方向のエンジン軸上に配置し、フレキシブル継手を内蔵した圧縮空気配管及び排気ガスダクトにて本体と接続することにより、熱膨張による変位を吸収するとともに、様々な形態の熱交換器にも対応しやすい設置方法としている。

再生サイクルの採用に当たっては、再生熱交換器の耐久性が最も懸念された点であるので、開発試験段階にて累計 2000 サイクル以上の起動停止試験と実証試験プラントによる実運用試験を平行して行い、実用上十分な耐久性を有することを注意深く確認した。

## 5. おわりに

これまでに述べたように、「S7A-01」は比較的熱需要が大きい用途の小型コージェネレーション市場に的を絞って開発され、その狙い通りに順調に受注件数を伸ばしているが、受注済み物件のうち半数以上が特に夏場の発電出力増強を目的に吸気冷却装置を採用するなど、総合熱効率が多少犠牲になろうとも、より高い発電効率を要求される事例が多い。つまり、ガスタービンの数々の優位性をもってすれば、より熱需要の少ない用途に対しても、小型ガスタービンがレシプロエンジンに対抗して市場に受け入れられるであろうことが十分に実感される。しかし、そのためには単にエンジン性能の向上を目指すだけではなく、ガスタービンの優位性を損なわずに何よりも低運用コストを実現できる高効率ガスタービンエンジンが必要となる。再生サイクルガスタービンは、このような要求に対する現時点での最も現実的な回答であるといえる。

川崎重工では、小型ガスタービンの更なる用途拡大を目指して、「S7A-01」をベースにコストアップを最小限に抑えつつ機関熱効率をさらに向上させたガスタービンエンジンの開発に取り組んでいる。

## 参考文献

- (1) 楠本吉昭, 日本ガスタービン学会誌, Vol 29-No. 3 (2001-5) p. 208-209
- (2) 辰巳康治, 川崎重工技報 148 号 (2001-12) p. 12-15
- (3) Takehara, I., Tatsumi, T., Ichikawa, Y., Summaray of CGT 302 Ceramic Gas Turbine Research and Development Program, ASME 2000-GT-644 (2000)
- (4) 唐沢亘, 長田仁, クリーンエネルギー第 11 巻-第 11 号 (2002-11)
- (5) Ogata, M., Kajita, S., Kimura, T., Okuto, A., Douura, Y., Hishinuma, M., Fukutani, N., Asano, Y., Development of a Dry, Low-NOx Combustor for a 650 kW-Class Gas Turbine, IGTC'99 Kobe TS-69 (1999)

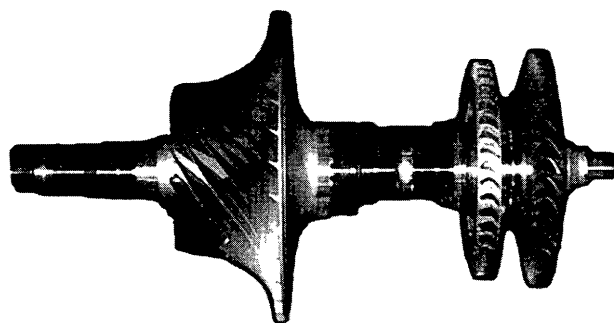


写真 2 ロータアセンブリ

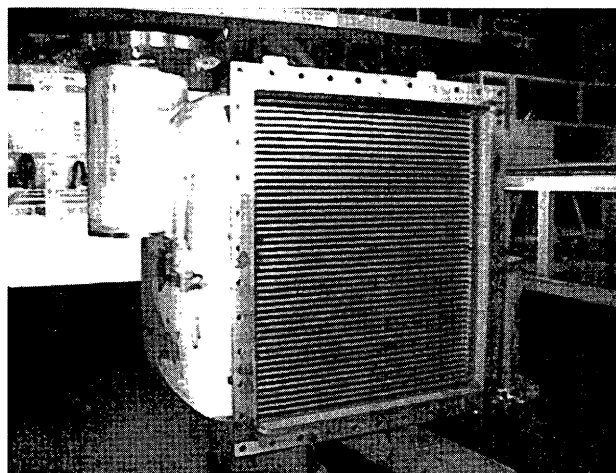


写真 3 再生熱交換器

特集：ガスタービン利用高効率エネルギーシステムの動向

## 9 MW ガスタービンコンバインドサイクル発電所

小野与志美\*<sup>1</sup>  
ONO Yoshimi

片岡 正秀\*<sup>2</sup>  
KATAOKA Masahide

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル

### 1. まえがき

ガスタービンを利用したコージェネレーションは，その総合的な高い熱効率から，エネルギーの有効利用及び地球温暖化防止にとって中核をなすシステムである。

しかし，最近の傾向として熱をあまり必要としない電力を主体とした発電プラントの需要が増えてきており，従来のガスタービン発電装置と排熱回収ボイラを組み合わせた単純なシステムでは対応しきれないケースが目立ってきている。

このような需要に対しては，蒸気タービンをボトムングサイクルとしたコンバインドサイクル発電プラントの適用が必要になる。

2002年にソラー社製ガスタービン「トラス 70 S」を主機とした CNT-60 C 型 9000 kW 級コンバインドサイクル発電所が竣工し，順調に稼動しているのので，その実例を紹介する。

### 2. コンバインドサイクルの構成

本コンバインドシステムは，発電機の両端に入力軸を設け，一端はガスタービンに接続し，他端に SSS クラッチ（自動シンクロクラッチ）を介して蒸気タービンに接続されている。ガスタービンと蒸気タービンの動力を同一軸で発電機に伝達する組み合わせとなっており，1台の発電機で 9,000 kW 出力できることから発電所の省設置スペース化に寄与している。

全体配置図を図-1に，コンバインドサイクルの仕様を表-1に示す。

また，熱電可変の概念を図-2に示すとおり，工場内の多様に変化する電力需要及び蒸気需要に対しては，ガスタービンの出力及び蒸気タービンへの蒸気の量を加減することで対応可能となっている。

蒸気を全量プロセスに送る場合には，①と②の線上で運転され，蒸気をプロセス側に送りながら蒸気タービン発電を行う場合には，②と③の線上で運転される。ただし，蒸気を全量プロセスに送ると蒸気タービン運転に必要な蒸気がなくなり蒸気タービンは停止してしまい再始

動に時間がかかることから，実際の運用面では，蒸気タービンの運転に必要な最低蒸気量（4 t/h）を確保した上で，④と③の線上で運転することになる。

このようなコンバインドサイクルの特徴を生かし，送電一定制御，発電一定制御，プロセス蒸気圧力一定制御及びプロセスへの蒸気流量一定制御などの多様な運転のパターンへの対応を可能にした。

### 3. トラス 70 S の特徴

本ガスタービンは単純開放サイクル一軸式で，圧縮機が軸流 14 段，タービンが軸流 3 段で構成されている。吸気温度 0℃ 吸排気圧損無しの条件で，熱効率は約 34% とこのクラスの一軸式ガスタービンでは，最高の性能を有している。

表-1 ガスタービンコンバインド仕様（吸気温度 15℃）

| 項目      | 単位          | 仕様                        |
|---------|-------------|---------------------------|
| プラント性能  | 総発電端出力      | kW 9,000                  |
|         | 総発電端効率      | % 43.8                    |
|         | 総送電端出力      | kW 8,745                  |
|         | 総送電端効率      | % 42.5                    |
| ガスタービン  | 発電端出力       | kW 6,600                  |
|         | 発電端効率       | % 32.1                    |
|         | 排ガス量(湿り)    | m <sup>3</sup> N/h 68,400 |
|         | 吸気圧損        | mmH <sub>2</sub> O 100    |
|         | 排気圧損        | mmH <sub>2</sub> O 300    |
|         | 排ガス温度(T7)   | ℃ 492                     |
| 排ガスボイラ  | 蒸気圧力(過熱器出口) | MPa(G) 2.94               |
|         | 蒸気温度(過熱器出口) | ℃ 365                     |
|         | 蒸気エンタルピー    | kJ/kg 3,150               |
|         | 蒸気発生量       | t/h 11.2                  |
|         | 節炭器出口排ガス温度  | ℃ 141                     |
|         | 節炭器出口排ガス圧力  | MPa 2.40                  |
| 蒸気タービン  | 発電端出力       | kW 2,400                  |
|         | 主蒸気圧力       | MPa 2.84                  |
|         | 主蒸気温度       | ℃ 360                     |
|         | 復水器圧力       | kPa(abs) 3.92             |
| ユーティリティ | 燃料使用量(天然ガス) | m <sup>3</sup> N/h 1,800  |
|         | 所内補機動力      | kW 255                    |

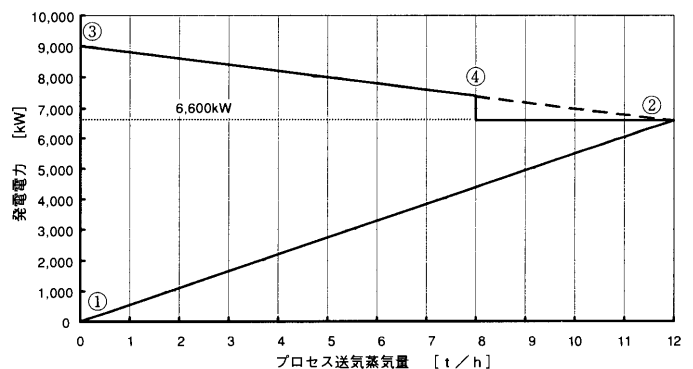


図-2 プロセス送気蒸気量と発電電力の関係

原稿受付 2003年2月28日

\*1 新潟原動機株式会社技術センター プラント設計グループ  
〒135-0053 東京都江東区辰巳 3-5-3 (サンイースト辰巳)

\*2 新潟原動機株式会社技術センター 技術開発グループ

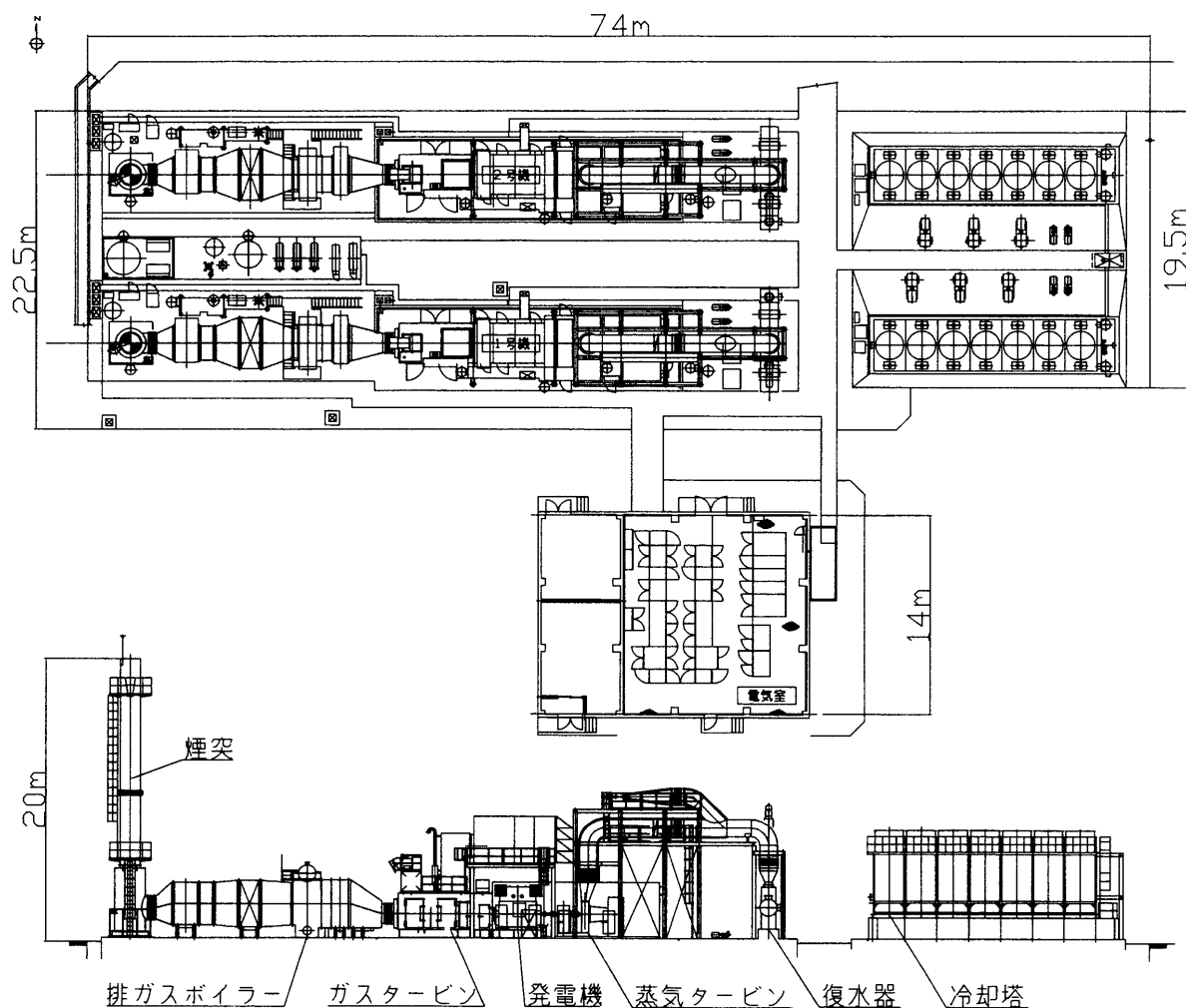


図-1 ガスタービン・コンバインドサイクル (GTCC) 配置図

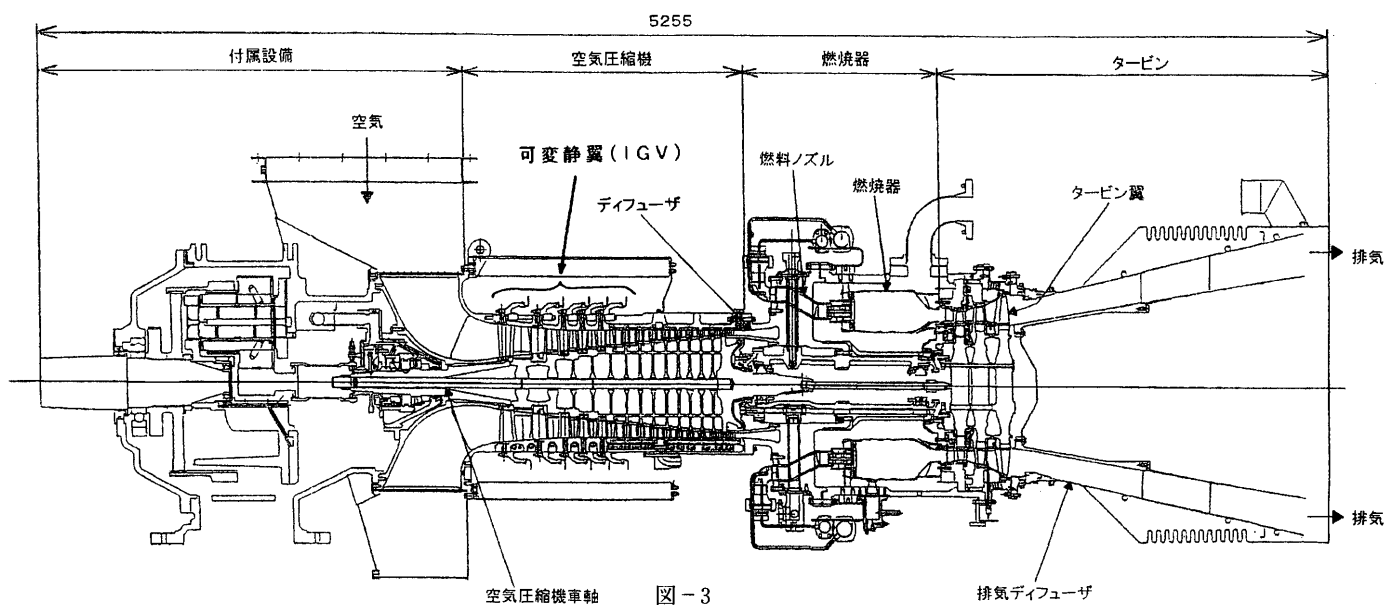


図-3

圧縮機は軸流14段で最終段での圧力比は16.0と従来にない高圧力比を達成している。構造を図-3に示す。

また、圧縮機には5段の可変静翼 (IGV) を配置しており、始動時及び低 NO<sub>x</sub> モードでの、燃焼空気の流量

調整を行っている。

燃焼器は燃焼ガスの流れがスムーズなアニュラ形 (環状形) を採用しており、燃料噴射弁は円周方向に12本配置している。

低 NO<sub>x</sub> 方式はソーラ社の開発した希薄予混合燃焼による燃焼システム (SoLoNO<sub>x</sub> 方式) を採用している。

燃焼器ライナーの冷却にはエフュージョンクーリングを採用している。これはライナー表面に多数の小孔を設け、冷却空気がライナーの内側表面に沿って均一な膜を形成し、ライナー内面を冷却している。このことにより、燃焼器ライナーの耐久性を向上させている。

タービン入口温度 (TRIT) は 1,150℃ (2,100°F) となる。そのため、第 1 段及び第 2 段のタービンブレードには Ni 基超合金の単結晶合金を採用している。

軸受けは減速機と圧縮機の間に 1 個、圧縮機と燃焼器の間に 1 個、燃焼器とタービンの間に 1 個と合計 3 個設置している。軸受けには耐久性に富んでいるティルティングパッド (自動偏芯) 方式を採用している。

#### 4. SoLoNO<sub>x</sub> (希薄予混合燃焼システム)

ソーラ社では 1987 年から、希薄予混合燃焼システムの開発を始め、「SoLoNO<sub>x</sub> の商標」で、3,000 kW～10,000 kW 級のガスタービンに採用し、ガスタービンの NO<sub>x</sub> 低減システムとして標準的に採用されている。

従来の燃焼方式では一次燃焼域にて燃料と空気の混合及び燃焼が同時に行われることにより、局所的に空燃比の低いところが生じ、一次燃焼域の平均火炎温度が高くなり、NO<sub>x</sub> の発生量が多くなる。このため、一次燃焼域に純水を噴射し、平均火炎温度を下げることで NO<sub>x</sub> の生成を低減させていたが、この方式では純水装置が必要になり、また水質の管理も必要になるなどコスト、管理面での負担増となっていた。

SoLoNO<sub>x</sub> システムは水や蒸気を使わずに NO<sub>x</sub> を低減する方式である。

この方式は 1 つの燃料噴射弁にパイロットとメインの 2 つのバーナを組み合わせている。パイロットは希薄予

混合燃焼を維持するための火種用であり、メインは希薄予混合燃焼用である。

メインのガス燃料と空気は、予め一次燃焼域上流の予混合域にて高い混合気を形成させ、一次燃焼域で燃焼させる。一次燃焼域での燃焼温度をほぼ一定に維持するように空気量を調節する。これにより、局所的な低空燃比部の発生を抑制し、平均火炎温度を低くすることにより、NO<sub>x</sub> の低減を図る。NO<sub>x</sub> 濃度は標準値 84 ppm [O<sub>2</sub> = 0 %] 以下で、同時に CO と UHC (未燃焼炭化水素) も低減できる。

SoLoNO<sub>x</sub> システムの特徴としてガスタービン負荷率と NO<sub>x</sub>, CO, UHC 排出濃度の関係を図-4 に示す。

#### 5. コンバインドサイクルのシステムフロー

コンバインドサイクルのシステムフローを図-5 に示す。

ガスタービンから排出される排ガスの熱エネルギーを排熱回収設備 [節炭器、ボイラ、過熱器] で回収し圧力 2.94 MPa(G)、温度 365℃ の過熱蒸気を発生する。

過熱器から出た蒸気は蒸気タービン側とプロセス側に分岐する。

蒸気タービンへは圧力 2.84 MPa(G)、温度 360℃ の過熱蒸気で供給され、プロセス側には 2.45 MPa(G)、温度 230℃ まで減圧、減温して供給している。

通常は蒸気全量を蒸気タービンに供給し発電優先で運転している。

本設備には余剰蒸気放出弁を設けておらず、蒸気タービン重故障の場合には蒸気タービンをバイパスし余剰蒸気全量を復水器で処理するシステムになっている。このような場合には、復水器内圧力は通常圧力 3.92 kPa (abs) から 10.78 kPa (abs) まで上昇しバランスする。

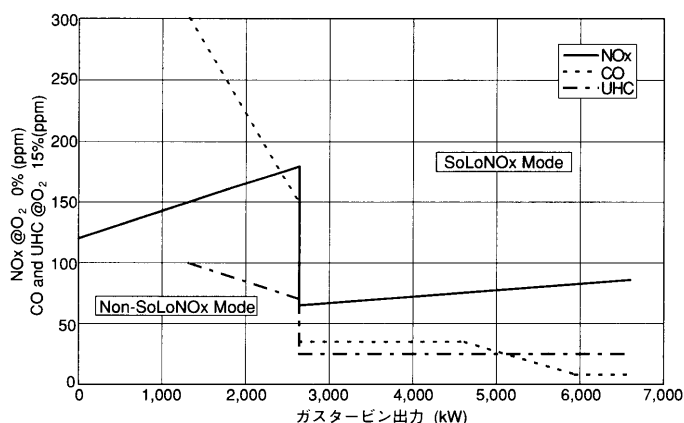


図-4 ガスタービン出口(脱硝前)の NO<sub>x</sub>, CO, UHC 濃度

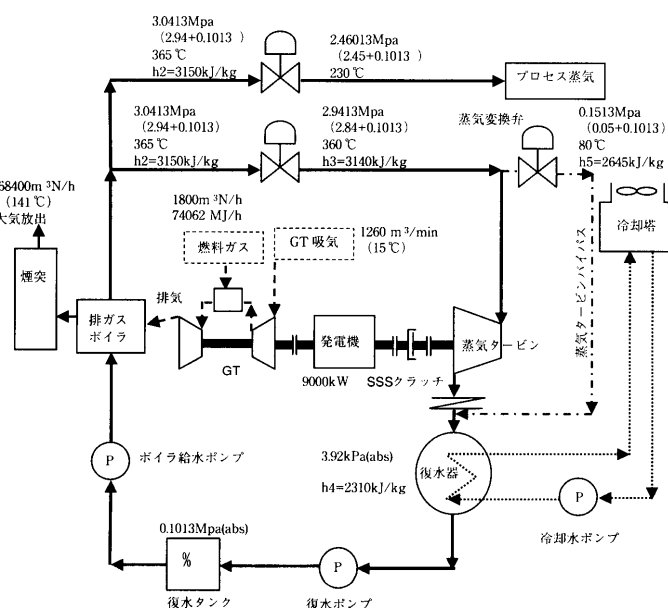


図-5 コンバインドシステムフロー

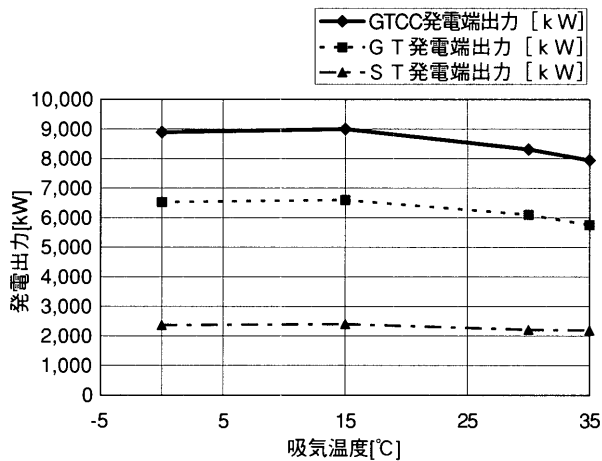


図-6 ガスタービンコンバインドサイクル出力

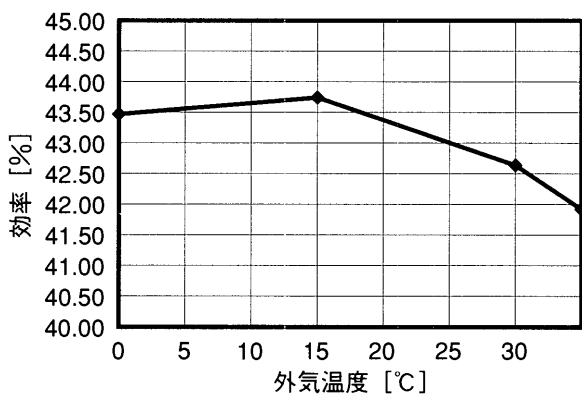


図-7 ガスタービン・コンバインドサイクル(GTCC) 発電機端効率

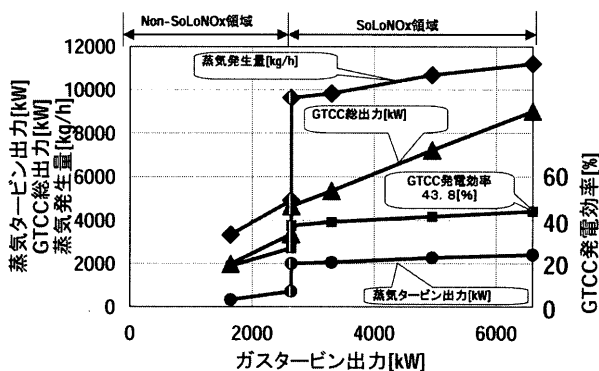


図-8 ガスタービン部分負荷とコンバインドサイクル (GTCC) 特性の関係

## 6. コンバインドサイクルの効率

図-6に吸気温度とコンバインドサイクル発電量の関係を、図-7に外気温度と効率を示す。また、部分負荷特性を図-8に示す。

SoLoNOx 制御範囲〔負荷率 40%～100%〕での蒸気の蒸発量が発電負荷率に関係なくほぼ平坦になっており、同様に総合効率がほぼ平坦な特性となっている。

これは第4項 SoLoNOx (希薄予混合燃焼システム) のところで説明したように SoLoNOx 制御では燃焼器内の一次燃焼域の燃焼温度を一定にするように燃焼空気量を IGV により絞り込むように制御するため、排ガス温度が高温レベルで平坦特性をもつことになる。その結果、部分負荷域で排熱回収効率が良くなり、また空気圧縮仕事軽減されタービンの効率も改善される。

これらの特徴を生かし本ガスタービンコンバインドサイクルは総合効率 43.8% の高い効率が得られた。

## 7. あとがき

地球温暖化対策会議京都会議 (COP 3) において、先進国に CO<sub>2</sub> 削減目標値が設定された。

CO<sub>2</sub> を削減し地球温暖化に歯止めをかける決め手は、効率よく熱電可変技術で適応することである。

小型ガスタービンコンバインドサイクルは既存の技術を組み合わせた応用技術の分野であるが、ガスタービン、蒸気タービン及び排熱ボイラなどの各設備はそれぞれ安定した稼動実績がある。

今後、小型ガスタービンコンバインドサイクルの信頼性の高い技術と高効率化が評価され、その普及が進んでいくことが期待できる。

最後に、本設備建設に当たり大阪ガス株式会社技術部殿、泉北製造所の関係者の方々の多大なご指導をいただきましたことをこの紙面を借りて感謝申し上げます。

## 参考文献

- Emission Monitoring for Clean Air Act Compliance(1995), W. S. Y. Hung, Ph. D.
- SoLoNOx Combustion System Update(1995), D. C. Rawlins, Ph. D.
- 高橋伸二, コージェネレーション, Vol.12, No.2(1997)

特集：ガスタービン利用高効率エネルギーシステムの動向

## ガスタービンを用いたコージェネレーションシステム開発

山口 亨<sup>\*1</sup>

YAMAGUCHI Toru

キーワード：ガスタービン，発電設備，コージェネレーション

### 1. 緒言

当社では航空機エンジン転用型のガスタービンを原動機としたコージェネレーションシステムを構築・販売してきた。1,000 kW～40,000 kW のガスタービンを核にしたコージェネレーションシステム及びコンバインドサイクルをシリーズ化しているが，ここでは 10,000 kW 以下のコージェネレーションシステムにつき概説する。

### 2. IM 400 ガスタービン

#### 2.1 航空転用型ガスタービンの特長

IM 400 ガスタービンは航空機エンジン転用型であるが，一般的な特長を次に示す。

##### (1) 小型・軽量

航空転用型ガスタービンエンジンは本来の「飛行機に搭載する」という基本目的から，小型・軽量を優先し設計されており，産業用に設計された他のエンジンや内燃機関と比べても同出力でコンパクトとなっている。

本稿で紹介する IM 400 ガスタービンは全長で 2,286 mm，重量で 580 kg に収まっている。

##### (2) モジュール化の採用

エンジンは各パーツ毎にモジュール化されており，保守・点検もモジュール毎に行うことが出来，整備時間が短縮されている。

##### (3) 急速起動・停止

エンジン自体は薄肉構造を採用しているため急速に起動・停止することが可能であり，IM 400 では消防法で要求される 40 秒以内の起動も満足することが可能である。また，停止時においても急速停止が可能で，その上停止後のターニング等も不要となっている。

#### 2.2 IM 400 ガスタービン

IM 400 ガスタービンは米国 Rolls-Royce 社（旧 AL-LISON 社，以下 RR 社とする）において航空機用として開発された T-56 型エンジンを発電用に転用したものである。T-56 型エンジンは日本では航空自衛隊の対潜哨戒機 P-3C に搭載されており，弊社ではライセンス

生産を行っておりその生産台数は 540 台を超えるエンジンである。外観図を図 1 に示す。

主要目は以下のとおりである。

|       |             |
|-------|-------------|
| 型 式   | 開放サイクル軸式    |
| 圧 縮 機 | 14 段        |
| タービン  | 4 段         |
| 燃 焼 器 | 缶-アニュラ型 6 本 |
| 圧 縮 比 | 12（蒸気噴射最大時） |
| 回転速度  | 14,580 rpm  |

##### (1) シリーズ化

IM 400 の原型となるエンジンは実際は RR 社では 501-K シリーズとしてそのアプリケーションの違いにより区別されている。

その大別を表 1 に示す。

KB 5 をベースに大量の蒸気噴射を可能にした KH 5，ポンプ駆動用に出力タービンを追加した KC 5，出力向上のため圧縮機上流にブースト圧縮機を追加した KB 7 等のラインアップをそろえている。

##### (2) 高効率・高出力化

基本エンジンとなる 501-KB 5 は 1879 年に米国にて 1 号機を納入して以来様々な高効率・高出力化のための

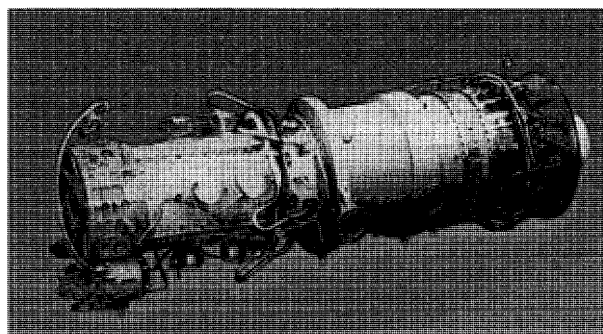


図 1 エンジン外観図（IM 400）

表 1 RR 501 シリーズ

| エンジン名称      | 特長         |
|-------------|------------|
| K B 5       | 基本エンジン     |
| K B 5 (DLE) | 低 NOx 燃焼器型 |
| K H 5       | 蒸気噴射型      |
| K C 5       | 2 軸型       |
| K B 7       | ブースト圧縮機付き  |

原稿受付 2003 年 3 月 25 日

<sup>\*1</sup> 石川島播磨重工業(株) 航空宇宙事業本部  
ガスタービンプラント事業部 営業部  
〒138-8731 東京都江東区豊洲 2-1-1

改良が行われてきた。

タービン翼へのコーティングの実施、冷却方法の変更、タービン材質の変更等によりタービン入口温度を高温化することが可能になり、その結果高効率・高出力化が達成可能となった。また、燃焼器においても冷却方法の改善により高温化に対応可能になった。

### (3) 多種燃料への対応

燃料は液体燃料（灯油）だけでなく都市ガス燃料やプロパンガスにも対応可能である。また、近年では廃棄物から発生する消化ガスの有効利用が課題となっているが、これらの燃料に対しても対応が可能である。これらの燃料に対しては単一燃料だけでなく2つ以上の燃料を切り替えて運用する Dual 燃料式にも対応が可能である。

### (4) 環境性

ガスタービンから排出される NO<sub>x</sub> を低減させるために IM 400 シリーズでは水噴射または蒸気噴射を採用している。これにより都市ガス燃料の場合には 100 ppm@0% O<sub>2</sub>、灯油燃料の場合には大気汚染防止法の規制値を満足する 70 ppm@16% O<sub>2</sub> を達成することが可能である。基本的にはガス燃料には水噴射または蒸気噴射を、灯油燃料の場合には水噴射という組み合わせで対応するが、これらを同一の燃料ノズルで実現する新ノズルも開発した。

## 3. IM400ガスタービンコージェネレーションの変遷

弊社では1987年に最初のIM 400 コージェネレーションシステムを納入してから現在に至っているが、お客様の要求が時代を経るに従い変化しており、それに伴いコージェネレーションシステム（以下 CGS という）も変遷してきている。

当初は電力も蒸気も大量に消費するお客様がその一部を CGS にて得ようとするパターンがほとんどであった。

従来型の CGS では電力と熱の比率が一定であるため、熱需要が少なくなる時期・時間帯には発電をすることがデメリットになっていた。そのために大規模工場に小さな CGS を導入したり、熱多消費型の工場向けにのみ導入されるにとどまった。

しかしながらエネルギーコストの削減を追求するお客様の要望は時期、時間と共に大きく変動する電力・熱需要にも対応可能なシステムの開発であった。

そこで弊社では蒸気噴射型ガスタービンを採用することでお客様の熱電比変化に対応するシステムを開発した。熱電比を可変に出来るため本システムを IM 400 IHI-FLECS (Flexible Electric Co-generation System) とし、お客様の要望に対応することが可能になった。

また、蒸気需要のないお客様に対応するために IM400 IHI-FLECS TYPE-E を開発した。

### 3.1 IM 400 IHI-FLECS

#### 3.1.1 開発経緯

熱電比が低い（熱使用量が電力使用量に比べて小さい）お客様や熱電比が変動するお客様において、これまでの CGS 導入の過程で問題となっていたのは余剰熱をいかに有効に利用するかということである。又、ガスタービンを利用したコージェネレーションにおいて頭の痛い問題は一般的に電力を多消費する夏期（高温期）において出力が低下することである。

近年では最新式の熱需要機器導入等により各工場において熱負荷の調整はなされているが、一般的には熱負荷は冬期に高く、その他期においてはさほど高くないパターンが多く見受けられる。また、各季節においても昼間時間帯は負荷が高いが、夜間は負荷が低いといったパターンが一般的である。（図2参照）

これらに対応するために IHI-FLECS システムを開

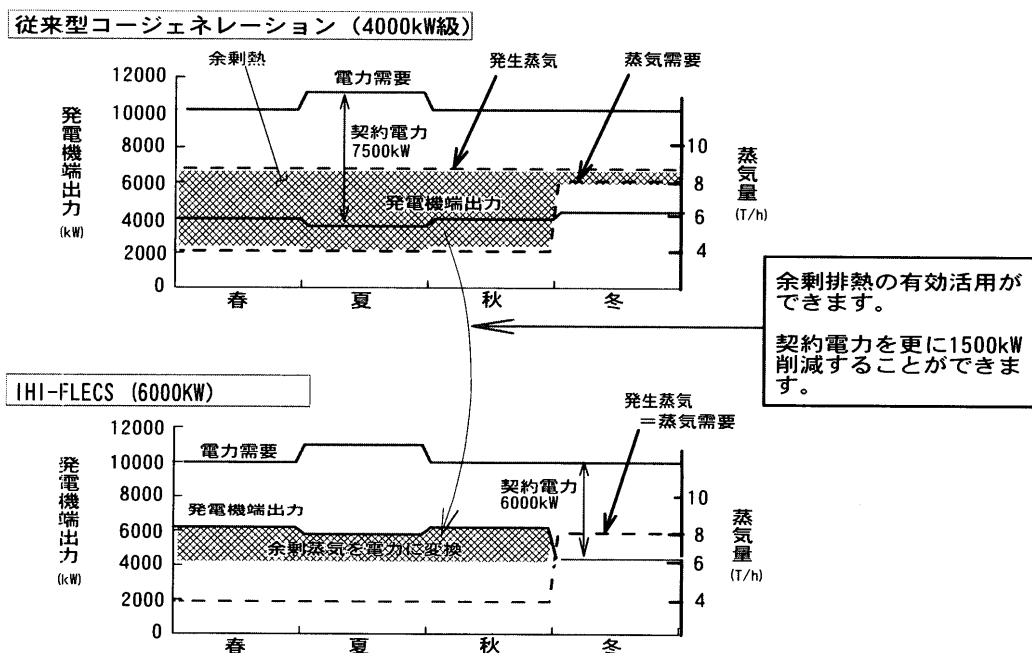


図2 季節別負荷パターン

発した。システムフローを図3に示す。

このシステムの導入により、従来は余剰熱として捨てていた蒸気をエンジンに噴射することで、電力として回収出来ることになり省エネルギー性・経済性共に大幅に向上できるようになった。

また、高温期に出力が低下することに対しても、蒸気噴射量を増加させることで出力低減防止が可能となり、熱需要量によっては出力増加をはかることでピークカット的使用することも出来、経済性は更に向上することが期待される。

### 3.3.2 IM 400 IHI-FLECS の特長

本システムの特長を以下に示す。

#### (1) 大きな熱電可変幅

本システムでは燃焼器の外側から噴射するシステムを採用しているため、発生蒸気量の3/4以上をエンジンに噴射することが可能となり、熱電比可変幅が大きく出来た。コンバインドサイクルに比べても送出蒸気量が多いときでも連続的に運用可能なため、効率面、運用面でも有利になっている。

図4にその可変範囲を示す特性図を表2に性能緒言を示す。

#### (2) システムの簡素化

本システムの最大の特徴はその過熱蒸気を得るために高温の圧縮空気の一部を抽気し蒸気混合器にて蒸気と混合することにより過熱蒸気を得ることである。

燃焼器の外側から蒸気噴射を実施するに際し、噴射する蒸気がドレン化すると燃焼器においてホットスポットが発生したり、エロージョンが起きたりするおそれがある。

このため蒸気がガスタービン中に噴射される時点においてはドレン化を防ぐためにも過熱状態にあることが望ましい。

従来型の蒸気噴射型ガスタービンシステムではこの過熱蒸気を得るために排熱ボイラー上流に過熱器を設けているがIHI-FLECSでは過熱器が不要となる。

コンバインドサイクルに比べ蒸気タービンが不要になっていることとあわせてかなりの簡素化が達成されている。

#### (3) 高い熱回収率

前項で述べたように、本システムでは過熱器での熱交換が不要となる。このため蒸気発生量が従来型蒸気噴射システムより多くなり、より高い熱回収率が実現できるCGSとしての総合効率を重視したシステムである。

#### (4) 高寿命化

ガスタービンではコンプレッサーでの圧縮空気の一部が燃焼器やタービン等の高温部の冷却空気として利用されている。

蒸気噴射(特に燃焼器ケーシングからの蒸気噴射)を実施した際はこの噴射蒸気もガスタービン内で圧縮空気と混合されその一部は冷却空気として利用されることになる。

従来型の蒸気噴射システムでは発電効率を重視するため高温(約480℃)の蒸気をガスタービンに噴射している。このため冷却空気の温度も上昇することになり冷却効率の低下を招き高温部の耐久性に大きな影響を与えている。

一方IHI-FLECSでは噴射する蒸気は飽和蒸気であり、圧縮空気と混合された後燃焼器へ噴射される時の混合気の温度は約220℃であり、通常の圧縮空気温度(約380℃)よりも低いいため冷却効果としては蒸気噴射をしない場合のガスタービンよりも大きな効果が期待でき、その分高温部の長寿命化にも効果が期待できる。

#### (5) 低NOx

蒸気噴射型ガスタービンにおいては余剰蒸気をガスタービンに噴射することにより

1. 効率的な運用を図る。
2. 出力を増加させる。

という2つの特徴と共に、「NOxの大幅な低減」という効果もある。

蒸気噴射システムは水噴射と並んでNOx低減のための一般的な手法である。

また、NOxの大部分はサーマルNOxであり、その抑制は燃焼の最高温度を押さえるのが最も有効な手段となる。

IHI-FLECSでは噴射蒸気温度が従来型の蒸気噴射シ

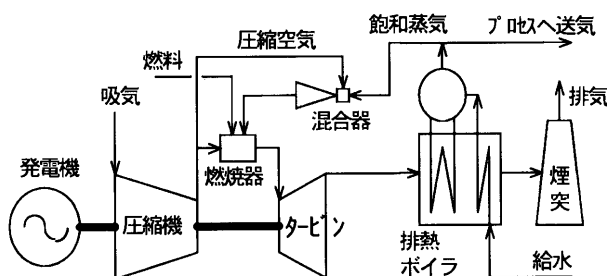


図3 IM 400 IHI-FLECS システムフロー図

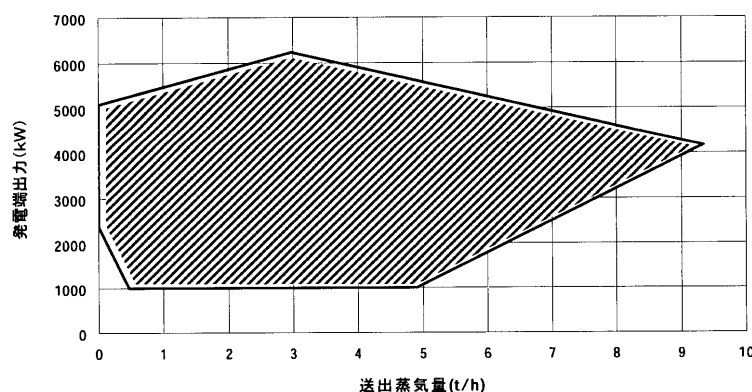


図4 IM 400 IHI-FLECS 運転特性

表2 IM 400 IHI-FLECS 性能緒言

|             | 蒸気噴射最大時 | 送気最大時 |
|-------------|---------|-------|
| 発電端出力(kW)   | 6,230   | 4,170 |
| 送出蒸気量(kg/h) | 2,970   | 9,350 |
| 発電端効率(%)    | 35.7    | 29.1  |
| 総合効率(%)     | 47.6    | 75.1  |



システムより低いため、NO<sub>x</sub>の低減についても大きな効果が期待できるものである。

実績では蒸気噴射最小時（送気最大時）NO<sub>x</sub>排出濃度が100 ppm(@0% O<sub>2</sub>)であるのに対し蒸気噴射最大時には30～40 ppm程度まで低減されている。

#### (6) 軟水の使用

従来蒸気噴射型ガスタービンには純水が必要とされてきた。これは水分中に多く含まれるアルカリ金属類がタービン等の高温部の腐食の原因になるためであり、これらを除去することが最大の目的であった。

IHI-FLECSでは噴射蒸気の汽水分離効率を向上させ、不純物がガスタービンに入り込まないシステムを採用すること、原水水質を厳密に調査すること、蒸気の質を常に監視することで軟水使用を可能にしている。

### 3.2 IM 400 TRI-FLECS

図4に示すようにIHI-FLECSでは蒸気噴射を最大にした状態でも約3t/hの蒸気をプロセスに送出してしまう。これは圧縮機のサージングの問題から蒸気噴射量が制限されているためである。

運用条件の中には蒸気需要が全く無い時間帯が存在するというパターンも多く見受けられ、それらに対応するためにTRI-FLECSを開発した。

TRI-FLECSのシステムフローを図5に示す。

CGSの導入先を需要の多い工場に限定した場合、ほとんどの工場では生産設備のために圧縮空気を使用してあり、多くのコンプレッサーを導入している。

IHI-FLECSではコンプレッサーの圧縮空気の一部を抽気し、噴射蒸気と混合させ再びガスタービンに噴射している。TRI-FLECSでは蒸気需要が少ない時にこの抽気空気を系外に取り出し、その分蒸気噴射量を増大させることで効率よく運用することが可能になった。系外に取り出された圧縮空気は工場に供給することで、コンプレッサーの動力を低減することが可能となる。

### 3.3 IM 400 IHI-FLECS TYPE-E

上述のようにFLECSシリーズではCGSとしての総合効率を重視したシステム設計を行ってきたが、近年では分散電源として発電効率を重視するユーザーも増えてきた。また、CGSプラントを2基めとして設置するユーザーも多くなり、この場合も熱需要はほとんど無い場合が増えてきた。

このような要望の変化に対応するためにTYPE-Eと

いう発電効率重視型のシステムを開発した。

図6にIM 400 IHI-FLECS TYPE-Eのシステムフローを示す。

#### 3.3.1 IM 400 IHI-FLECS TYPE-Eの特長

##### (1) 再生サイクルの導入による高効率化

IHI-FLECSシステムでは総合効率を重視するためにガスタービンに噴射する蒸気は高温の圧縮機出口空気と混合させることで過熱状態にしていたが、TYPE-Eシステムでは、更に排熱ボイラー上流に設置した過熱器で熱交換することにより発電効率をたかめている。(図6参照) また、このときに蒸気と混合するため抽気された圧縮空気も同時に過熱器で熱交換される再生サイクルとなっているために、通常の過熱蒸気を噴射する蒸気噴射サイクルに比べ抽気空気の再生分、発電効率が高くなっている。この過熱器において熱交換することで蒸気発生量は減少し総合効率は低下するが発生蒸気は全てガスタービンに噴射出来るように過熱器、排熱ボイラーを設計することで熱需要が全くないユーザーでも有効に利用可能な運転領域をもつシステムとしている。(図7参照)

##### (2) 負荷遮断対応

日本における発電設備に再生サイクルを適用するにあたっては、負荷遮断時の過速度の問題を解決する必要がある。再生サイクルでは圧縮後の空気を排熱系で加熱するために負荷遮断時に燃料を遮断しても加熱されエネルギーを持った空気がタービンに導かれ過速度を起こしてしまうという問題がある。このため負荷遮断時には加熱空気をバイパスさせる機構が必要となりシステムが大がかりで複雑なものになってしまう。

しかし、TYPE-Eシステムでは蒸気・空気混合器をエゼクター方式にすることにより駆動側の蒸気を遮断することで、被駆動側の抽気空気も同時に遮断することが可能となり、負荷遮断時の過速度の問題も簡易なシステムで対応することが出来た。

##### (3) 過熱器材質の見直し

従来から熱電可変型ガスタービンに適用する過熱器は温度レベルこそ高くないものの運用中の熱変動が大きいこと、非加熱側流体の蒸気の流量が大きく変動することから不適合が起りやすく、一般に寿命が短いとされてきた。

今回設計に当たり過熱器の通過蒸気がない状態でもガスタービンが最大出力にて連続運転可能であり、かつ数

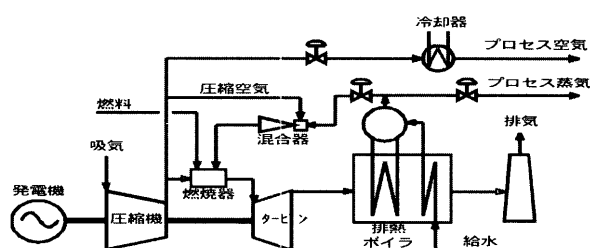


図5 IM 400 TRI-FLECS システムフロー図

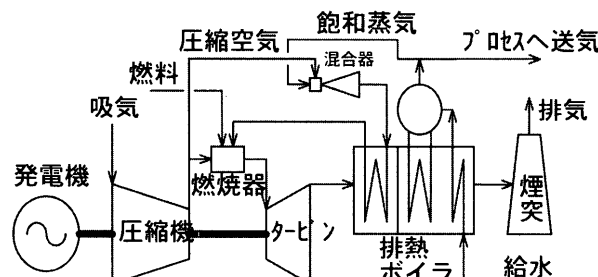


図6 IM 400 IHI-FLECS TYPE-E システムフロー

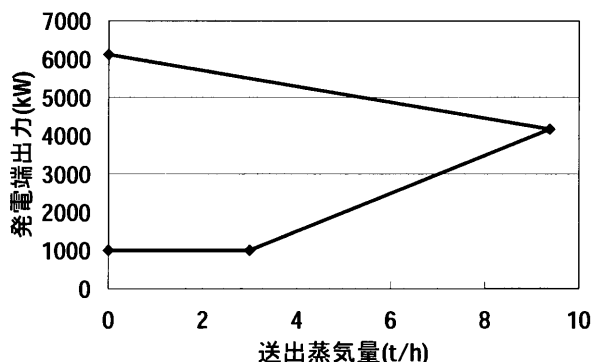


図7 IM 400 IHI-FLECS TYPE-E 運転特性

分以内に過熱器の通過蒸気量が最大(約 8 t/h)の状態に変化しても耐熱性、伸縮の観点から問題ないような材料を選定した。

#### (4) エンジン制御装置の自社開発

エンジン制御装置として自社で開発したエンジン制御装置 (FADEC: Full Authority Digital Engine Control) を採用している。本制御装置は現在では 10,000 kW 以下のガスタービンのほとんど全ての機種に適用しているが、自社開発の装置を採用することで従来ブラックボックスとなっていたエンジン制御の部分が自分たちでコントロール出来ることとなり、不適合の削減及び不適合発生時の対応が迅速になること、また自社のシステムの特徴に合わせた調整が可能となった。

### 4. 近年の CGS プラントに対する要求

様々な業種・ユーザーに納入範囲が増えるにつれて CGS プラントに対する要求も多くなってきた。本節では実際に金町浄水場エネルギーサービス株式会社 (以下 KESCO と略) 殿向けに納入した IM 400 IHI-FLECS TYPE-E の事例を基に紹介する。

#### 4.1 KESCO 殿向けプロジェクト

本プロジェクトは東京都が国及び地方自治体に先駆けて公募した PFI 事業の初号物件であり 2000 年 10 月に 2 基の IM 400 IHI-FLECS TYPE-E を納入した。

##### 4.1.1 KESCO 殿向けプラントの概要

本プラントは東京都葛飾区金町浄水場内の、既設の設備建家の 2F 屋上部分 (20 m×38 m) に 2 台が並列に設置されており、発生電力及び発生蒸気は全て金町浄水場に供給している。

基本的に浄水場で使用する蒸気量にあわせて運用され 1 台は WSS (Weekly Start and Stop) もう一台は DSS (Daily Start and Stop) で運用される。

##### 4.1.2 KESCO 殿向けプラントの特長

###### (1) 多種燃料への対応

本プラントでは重大災害時にも浄水場内に電力を供給可能なように設計されている。通常は主燃料である都市ガスにて運用されているが、都市ガス供給が遮断された場合には灯油燃料にて運転を行うこととし、プラント内

表3 使用燃料と NOx 低減方法

| 使用燃料 | NOx 低減方法   |
|------|------------|
| ガス燃料 | 水噴射または蒸気噴射 |
| 液体燃料 | 水噴射        |

に設置された 100 KL のタンクに備蓄された燃料で約 30 時間は浄水場内に電力を供給することが可能である。また、NOx 排出濃度を低減させるために都市ガス使用時には蒸気噴射、灯油使用時には水噴射を行うが、これら 4 種類を一つの燃料ノズルで噴霧可能な新型ノズルを採用している。

新型ノズルでの使用燃料と NOx 低減方法の組み合わせを表 3 に示す。

###### (2) 起動方式

先にも述べたとおり本プラントは重大災害時にも運用可能なように設計しているが、それ以外でも電力会社の停電時であっても起動可能なように空気式起動方式を採用している。これは常時圧縮した空気を貯蔵しておき、この空気で減速器に取り付けられたエアタービンを駆動し、ガスタービンの機動力とするシステムである。今回のシステムは防災用電源に供給する防災用という位置づけではないが、40 秒以内に電圧確立出来る仕様であり、起動失敗時においても連続して 5 回起動可能な容量の圧縮空気を貯蔵している。

###### (3) 水質対応

ボイラーで発生した蒸気はガスタービンに噴射されるためにその水質は厳しく管理する必要がある。使用する圧力域、給水の水質から考えると一般的には純水を使用するところだが、水質管理を厳しくすることボイラー材料の見直し等の結果、軟水にて対応可能になりランニングコストの低減に寄与している。

###### (4) 環境対策

ガスタービンに蒸気または水を噴霧することにより規制値以下にすることで対応しているが (都市ガスの場合は東京都条例、灯油燃料の場合は大気汚染防止法を適用)、ボイラー後流に設けた脱硝装置により東京都条例の半分以上 (50 ppm@0 % O<sub>2</sub> 濃度) に低減している。また、騒音についても都市部の住宅隣接地に設置するためプラントとして 75 dB (A) 以下の騒音になるよう設計することで敷地境界での規制値をクリアしている。

### 5. 結 言

これまで述べたようにガスタービンをコアとした CGS は今後の分散電源市場においても大きな割合を占めることになるかと考えられるが、ユーザーの幅が広がるのに伴いシステムに求められる要求も一段と広く、又厳しいものになって来ることが予想される。

そういったユーザーからの要望を満たすべくシステムの開発を行い、より進化したシステムが開発され幅広く行き渡ることの一助でも出来ればと考えている。

特集：ガスタービン利用高効率エネルギーシステムの動向

# ガスタービンを用いた発電システムについて

竹原 勲<sup>\*1</sup>

TAKEHARA Isao

## 1. はじめに

近年、省エネルギーや地球温暖化防止、CO<sub>2</sub>削減の観点から、また電力自由化、分散化の観点からガスタービンの高効率化およびそれを用いたシステムの高効率化が求められている。

海外および国内のガスタービンメーカーにおける高効率化の技術開発が盛んであり、日立製作所においても、これまでの数百台に及ぶガスタービン発送台数の中で培われた技術を自主開発ガスタービンに適用してきている。

ここでは、ガスタービン技術の紹介とそれを用いた発電システムについて述べる。

## 2. ガスタービン発電システムについて

### 1) 効 率

ガスタービンを用いた発電設備の効率レベルを他機種と比較したものを図-1に示す。比較としては、燃料に天然ガスをを用いた発電設備で比較しております。

ガスタービンを用いた発電設備としては、ガスタービンと発電機を用いたシンプルサイクルとガスタービンと蒸気タービンを用いたコンバインドに対し、近年注目されているガスエンジンを比較しています。

ガスタービン単体で使用するシンプルサイクルでは、航空転用型ガスタービンが高く、また20 MW以下ではガスエンジンの効率が40%と高い状態にあるが、約20 MW以上での発電では、ガスタービンと蒸気タービンを用いたコンバインド効率が50%近くに達し、さらに出力がクラスには、スケールメリットも有り、52~53%近い効率を達成出来るようになってきている。

今後もガスタービンを用いた発電設備は、より高効率化の技術開発が行われると考えられ、また、電力需要の観点で大型コンバインドだけではなく中容量のコンバインドの効率向上も着目されてくるものと考えられる。

今後、注目されると考える中容量ガスタービンの比較を表-1に示す。

航空転用型ガスタービンと産業用ガスタービン代表機種を示すが、航空転用型ガスタービンは圧縮機の圧力比も高いことから、シンプルサイクルでの効率が高い、一方ヘビーデューティ型ガスタービンは、シンプルサイクル効率が33%程度であるが、コンバインド効率では同レベルの効率が得られている。

表-1 代表的な中容量ガスタービンの性能

| 分類        | ヘビーデューティ |      |      |      |       | 航空転用   |      |
|-----------|----------|------|------|------|-------|--------|------|
|           | 日立       | GE社  | 川重   | 三菱   | GE社   | P&W    |      |
| メーカー      | H25      | H15  | F5   | L20A | MF111 | LM2500 | FT8  |
| モデル       | H25      | H15  | F5   | L20A | MF111 | LM2500 | FT8  |
| S/C出力(MW) | 27.5     | 14.7 | 26.3 | 17   | 14.57 | 22.8   | 25.6 |
| S/C効率(%)  | 33.8     | 32.2 | 28.5 | 34   | 31    | 36.8   | 37.9 |
| 排気温度(°C)  | 555      | 545  | 487  | 545  | 530   | 524    | 458  |
| C/C出力(MW) | 39.8     | 22.1 | 38.5 | 24   | 21    | 30.3   | 34.9 |
| C/C効率(%)  | 49       | 46   | 41.7 | 47   | 43    | 50.5   | 52.0 |

表-2 ガスタービン用燃料

| 燃料の種類 |       | 拡散燃焼器 | ガス焚予混合燃焼器 |
|-------|-------|-------|-----------|
| ガス    | LNG   | ○     | ○         |
|       | 天然ガス  | ○     | ○         |
|       | 都市ガス  | ○     | ○         |
|       | オフガス  | ○     | —         |
| 液体    | 軽油    | ○     | —         |
|       | A重油   | ○     | —         |
|       | ナフサ   | ○     | —         |
|       | メタノール | ○     | —         |
|       | LCO   | ○     | —         |

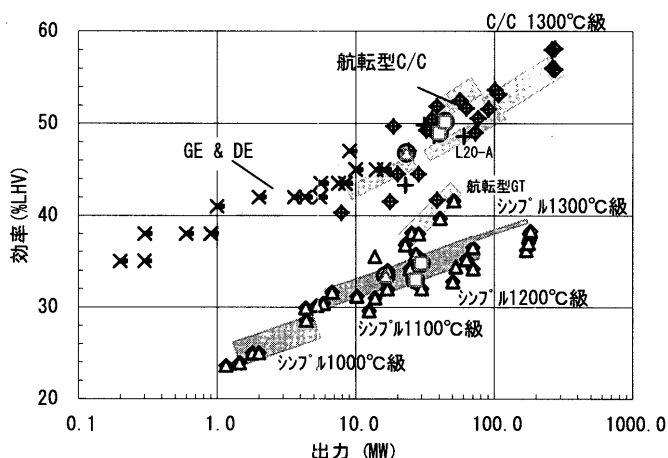


図-1 ガスタービンを用いた発電効率

原稿受付 2003年4月23日

\*1 (株)日立製作所 火力・水力事業部 日立生産本部  
タービン設計部 ガスタービン設計グループ  
〒317-8511 茨城県日立市幸町 3-1-1

## 2) 燃料の多用性

これまでの、性能比較においては、ガス焼き運転での比較としたが、ガスタービン特にヘビーデューティ型ガスタービンでは、燃焼器の構造とタービン翼の耐久性から、ガスおよび油燃料に対して多種の燃料で運転可能である。

近年では次世代のガス燃料とされる DME (ジメチルエーテル) 燃料も各社検討がされており、また油燃料も、これまで多く使われてきた A 重油から LCO 油さらに C 重油まで使用する検討が、多く実施されると考える。

## 3) 環境対策

ガスタービン燃焼器で発生する、一酸化窒素 ( $\text{NO}_x$ ) は燃料と燃焼器構造および燃焼温度で大きく影響を受ける。燃焼器の種類としては拡散燃焼器と燃料予混合燃焼器に分かれ、燃料はガスと油で大きく異なる。

下図に示すのは、当社のガスタービンにおける、上記の燃焼器の構造の違いによるガスタービン出口  $\text{NO}_x$  特性の比較と燃料の違いによる  $\text{NO}_x$  特性の比較を示す。油焚燃焼はガス焚燃焼に比べ約 1.5 倍程度  $\text{NO}_x$  の排出量が高く、最近では、中容量のガスタービンにも採用されてきている LNG 焚の低  $\text{NO}_x$  燃焼器の場合には、 $\text{NO}_x$  値は 20~25 ppm 以下が主流となってきた。

拡散燃焼器の場合、 $\text{NO}_x$  値が高いため蒸気または水を燃焼器の頭部に噴射することにより低減することになるが一般的な蒸気噴射による  $\text{NO}_x$  低減は図-3 の特性となる。

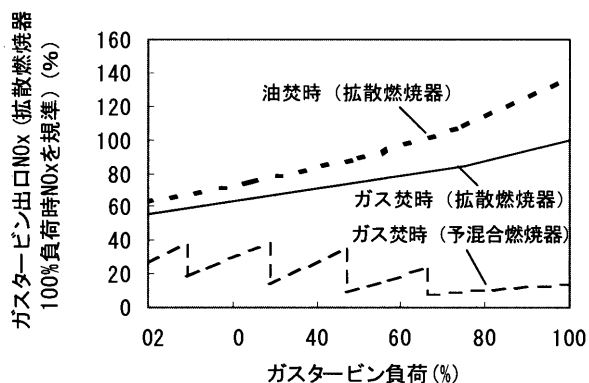
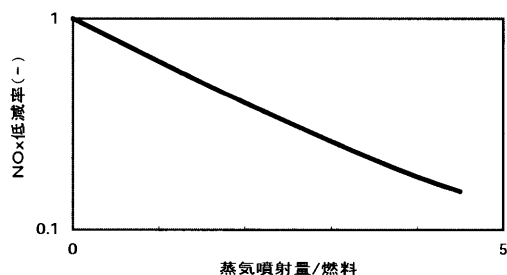


図-2 燃焼機と燃料の違いによる  $\text{NO}_x$  特性



注記: 蒸気噴射無を1とした蒸気噴射率に対する  $\text{NO}_x$  低減率。

図-3 蒸気噴射による  $\text{NO}_x$  低減率

## 3. ガスタービンの構造

ガスタービンの構造の特徴を当社が製作している H 25 型ガスタービンの断面図である図-4 を用いて説明する。

H 25 ガスタービンでは圧縮機側に起動装置を配置し、発電機をタービン側で駆動している。図-5 は圧縮機の断面図であり、軸流 17 段で圧力比 15 程度にしている。圧縮機の前段側は、流入マッハ数も高いことから、近年、スーパークリチカル翼、多重円弧翼、二重円弧翼等を用いてきている。

燃焼器はヘビーデューティ型ガスタービンで多く用いられる多缶型の燃焼器で、H 25 ガスタービンの場合 10 缶で構成され、H 15 型ガスタービンでは 6 缶で構成されている。

タービンは、衝動段の 3 段で構成されており、図-6 のタービン動翼に示すように、1 段動翼にはマルチパス型冷却翼を採用し、少量の冷却空気で適正なメタル温度にするよう内部には高性能タービュレンスプロモータを採用し、初段部分で多量の冷却空気の消費をせず高性能化を目指したものとなっている。2 段、3 段動翼には、シュラウドカバー付翼を採用し、翼先端のリークを防止し性能向上を図っている。

タービンの排気には、ラジアルディフューザを用いて

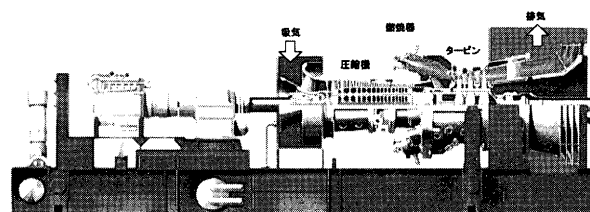


図-4 H 25 ガスタービン断面図

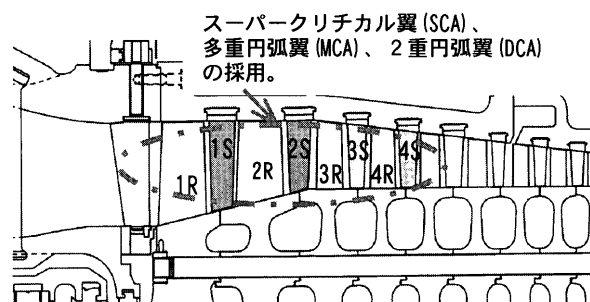


図-5 圧縮機の説明

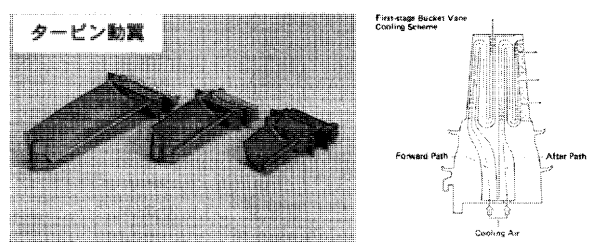


図-6 タービン動翼の説明

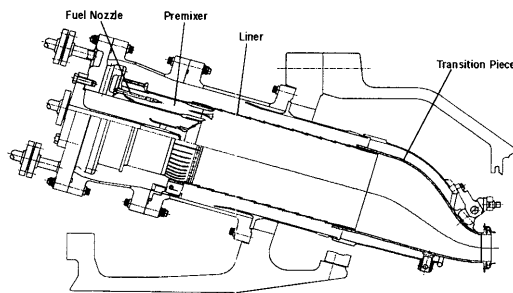


図-7 予混合燃焼器の構造図

構造を採用した構造とし、パッケージ型ガスタービンの特徴としている。最近において、中容量ガスタービンにおいても軸流ディフューザを採用し、性能向上を図ったガスタービンも見られようになってきている。

先にも述べたように、中容量型ガスタービンにおいてもガス焼き燃焼器において予混合燃焼を実施し排ガス中の一酸化窒素を低減する低 NOx 燃焼器の採用が近年主流となってきている。

その NOx レベルも 20～25 ppm 級となってきており、中容量ガスタービンに求められる負荷運用性、安定性、信頼性の観点に対する要求を満足する低 NOx 燃焼器の技術開発が必要となってきている。

図-7 に示すのは H 25 及び H 15 用ガスタービンに採用している低 NOx 燃焼器の構造で、上記の要求を満足するように、中心に拡散燃焼バーナを置き、周囲に 4 個の予混合燃焼バーナを配置した構造としている。

#### 4. 中容量ガスタービンを用いた

##### コンバインド発電設備

中容量のガスタービンで低 NOx 燃焼器を用いたコンバインドシステムの実用例を以下に紹介する。

コンバインドシステムとしましては、ガスタービンと蒸気タービンを 1 軸とした構成とガスタービン数台に蒸気タービンを 1 台とする多軸コンバインドの構成があり、各々機器構成、負荷特性も異なる、一般的には大容量のガスタービンには 1 軸コンバインドを採用している。

ここに紹介するのは、中容量ガスタービンである、H 25 ガスタービンを用いて、既設の蒸気タービン設備をリパワリングした多軸コンバインドである。

このプラントはカナダ国の既設蒸気タービン設備に 6 台の低 NOx 燃焼器を採用した H 25 ガスタービンを設置し、その排気ガスを貫流型ボイラで蒸気を発生し、その蒸気で既設の蒸気タービンを駆動する発電システムとなっている。

図-8 に示すのは、その機器構成図であり H 25 ガスタービン 6 台を新設し、その排気ガスから発生する蒸気で既設蒸気タービンを運転する構成となっている。

その設備の外観状況を図-9 に示すが、貫流ボイラ (OTSG: One through Steam Generator) を用いていることから、コンパクトな配置となっている。

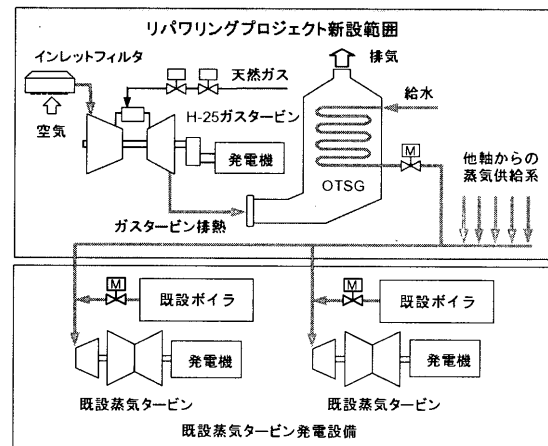


図-8 機器構成図

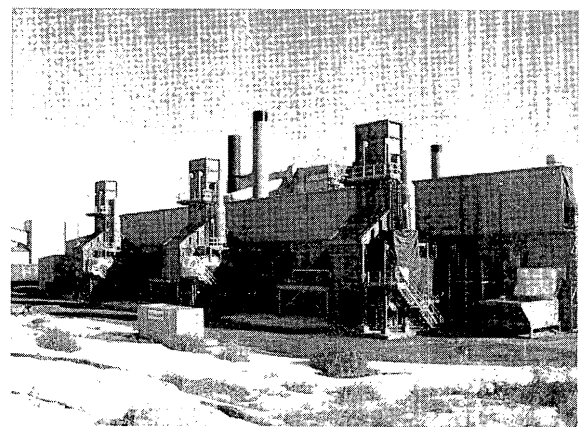


図-9 ガスタービン設置状況

また、ガスタービン設備設置場所が気温 -30℃ での運転、保守も考慮されたことから、ガスタービン設備は建屋内に配置された構成となっている。

多軸コンバインドの軸構成であること、また蒸気発生機のボイラに貫流ボイラを用いていることからプラント運転特性は、ガスタービンを順次起動し、OTSG 発生蒸気が安定したところで再負荷上昇としガスタービン定格負荷運転となっている。

これにより既設気力プラントに対して、熱効率 (LHV) で約 24% 上昇となり、CO<sub>2</sub> 削減に貢献している。

また、採用した低 NOx 燃焼器の NOx 排出特性は図-10 に示すように、低気温時から高気温時において NOx レベルは約 20 ppm 程度であり、安定した運転を確保できかつ、環境に優しい運転を可能としている。

実運転においては、多軸コンバインドであることから、燃焼器点検も 1 台毎に順次実施することが出来るため、プラントを運転する稼働率を上げるメリットも出ている。

保守運転に関しては、ガスタービン設備の長期的な保守を実施する長期メンテナンス方式を顧客殿と結び、計画的な保守サービスを取り、ガスタービン運用で重要な保守メンテナンスにおいて顧客殿の負担を軽減する運用としている。

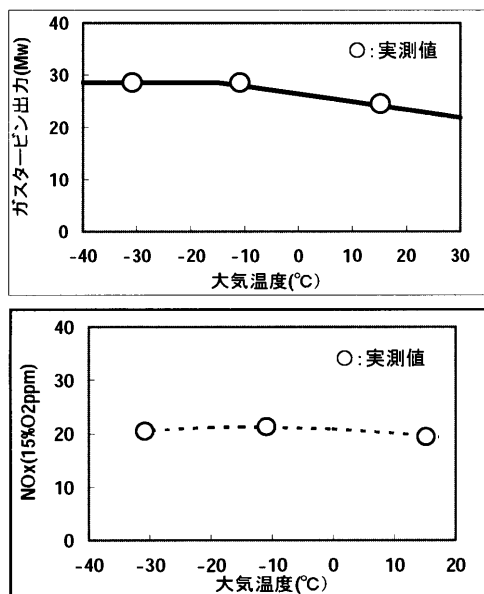


図-10 ガスタービン出力, NOx 特性

また、海外での低 NOx 燃焼器であること、立地条件が冬場マイナス 30℃ から、プラス 30℃ と運用範囲が広いことまた、長期メンテナンスを実施することから、ガスタービンの運転状態を遠隔監視しモニタリングするシステムを導入し、そのシステムのメリットを出しながら、運転保守を計画している。

図-11 に示すのは、ガスタービン遠隔監視モニタリングシステムの概念図であり、ガスタービンの運転状態

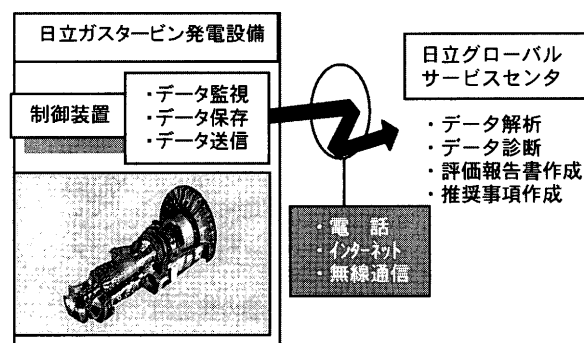


図-11 ガスタービン遠隔監視システム

を記録し、遠隔にデータを送信し、日本内の工場で運転状態を確認出来るシステムとなっている。

今後、このようなシステムによる保守管理サービスが増加してくるものと考えている。

#### 4. おわりに

以上、ガスタービン設備とそれを利用した発電システムについて記述しました。ガスタービン発電システムには、燃料の多様性、効率の利点から今後益々技術開発が進み、発電システムで重要な位置を保ち続けると予想される。

日立製作所も今後もその技術開発に努力し、環境に優しい発電設備の開発に努力していく所存です。

特集：ガスタービン利用高効率エネルギーシステムの動向

## 三菱重工の大型高性能コンバインドプラント

内田 聡<sup>\*1</sup>  
UCHIDA Satoshi

西村 英彦<sup>\*2</sup>  
NISHIMURA Hidehiko

須藤 隆之<sup>\*3</sup>  
SUDOU Takayuki

キーワード：火力発電，ガスタービン，コンバインド，PFBC，IGCC

### 1. まえがき

ガスタービンコンバインドプラントは発電効率が低い、環境特性が良い、建設期間が短い、また比較的初期投資額が小さい等の理由で火力発電の中核を占めている。また、ここ数年大型ガスタービンの信頼性が急速に上がると共にその実績が豊富になったこともコンバインドプラントに拍車を駆けている大きな理由となっている。当社の大型高性能ガスタービンである M 701 F (50 Hz)，M 501 F (60 Hz) は国内だけでなく広く世界で運転実績を積み重ねている。また燃焼器を蒸気冷却し更に高出力、高性能な M 701 G (50 Hz)，M 501 G (60 Hz) も順調に商用運転中である。本論文は天然ガスコンバインドプラントの計画状況を解説すると共に、石炭を使用するコンバインドプラントの状況等を紹介する。

### 2. ガスタービン

コンバインドサイクル発電設備の中でガスタービンは最も重要な主機である。ガスタービンの高温・高性能化によりコンバインドサイクル効率の大幅な改善が可能となった。

#### 2.1 高温化・高性能化

図1は当社のガスタービン機種の変遷と燃焼ガス温度の上昇、及びそれを可能にした技術を模式的にまとめたものである。高温化を支えたのはNi基を中心とする耐熱材料技術の開発及び、翼冷却技術の開発である。また最近では耐熱コーティング技術も高温化を支える重要な技術となった。コンバインドサイクル用の主機として本格的に採用された1150℃級D形以降燃焼温度は上昇し、最新機種では1500℃に達している。この温度上昇に伴ってガスタービン単機容量は増大し、コンバインドサイクル効率は向上している。また圧力比はコンバインドサイクル効率が最高となるような最適値を選定している（表1）。以下当社大型ガスタービンの技術的特徴を述べる。

#### 2.2 実績ある基本構造の踏襲

図2にM501G形ガスタービンの断面図を示す。当社の大型ガスタービンでは当初より一貫して、次の実績ある構造を継承してきている。

- 1) ロータは圧縮機側軸受とタービン側軸受に支えられた2軸受支持構造。
- 2) 発電機軸との接続は熱的変化の少ない圧縮機軸端駆動方式。
- 3) 排気方式はコンバインド発電設備の配置に最適な軸流排気。
- 4) キャン形の燃焼器を環状に配置したキャニュラー型燃焼器。

これらの特徴は発電用ヘビーデューティガスタービンとして最も適した構造である。

#### 2.3 低公害化

一方高性能化とともに低公害化も時代の重要な要求となり、当社では高温燃焼によるNO<sub>x</sub>の発生を抑える予

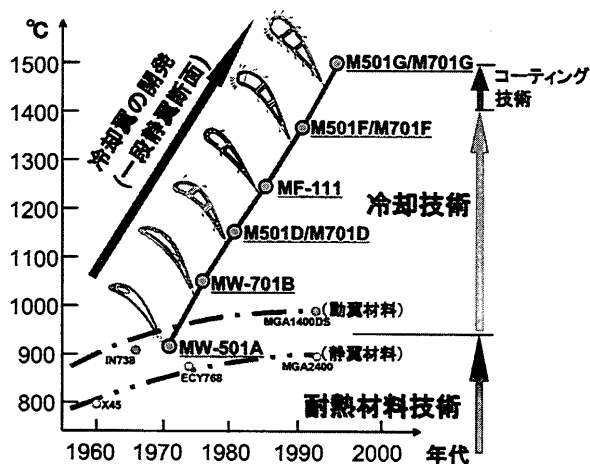


図1 ガスタービンの高温化

表1 ガスタービンの高性能化

|          | M 501 D     | M 501 F     | M 501 G |
|----------|-------------|-------------|---------|
| タービン入口温度 | 1150/1200℃級 | 1350/1400℃級 | 1500℃級  |
| 圧力比      | 14          | 16          | 20      |
| GT出力     | 114 MW      | 185 MW      | 254 MW  |

原稿受付 2003年3月10日

- \*1 三菱重工(株)原動機事業本部 火力プロジェクト部  
〒220-8401 横浜市西区みなとみらい3-3-1
- \*2 三菱重工(株)原動機事業本部 タービン技術部
- \*3 三菱重工(株)原動機事業本部 ボイラ技術部

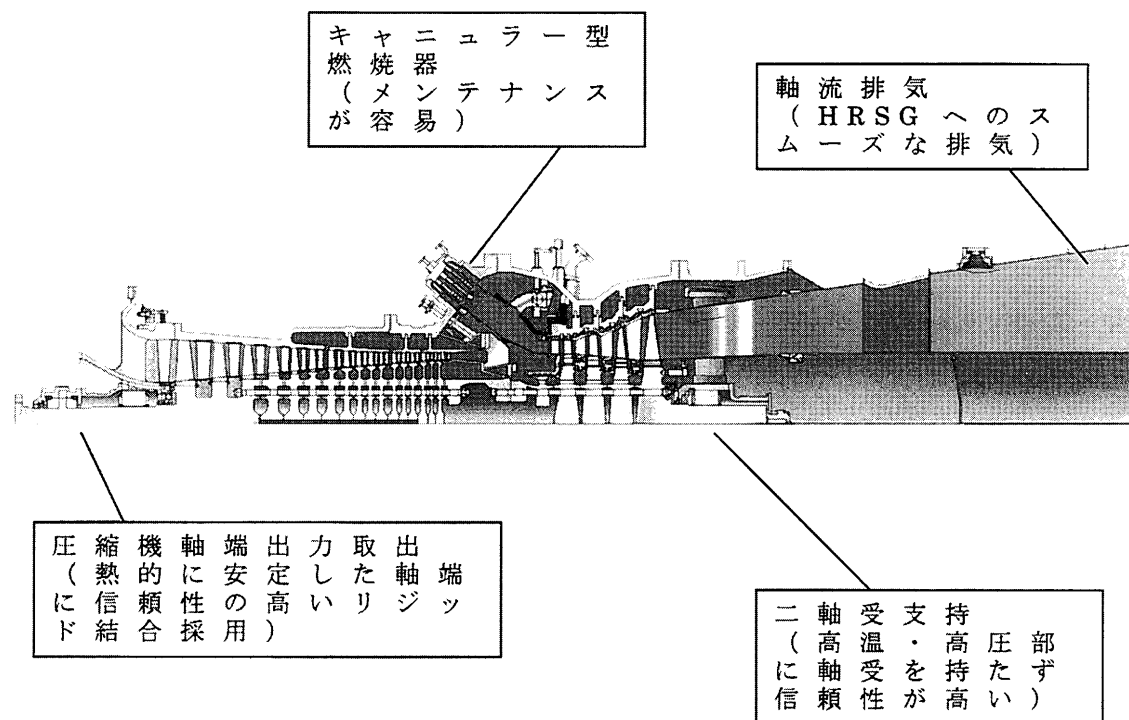


図2 M501Gガスタービン断面図

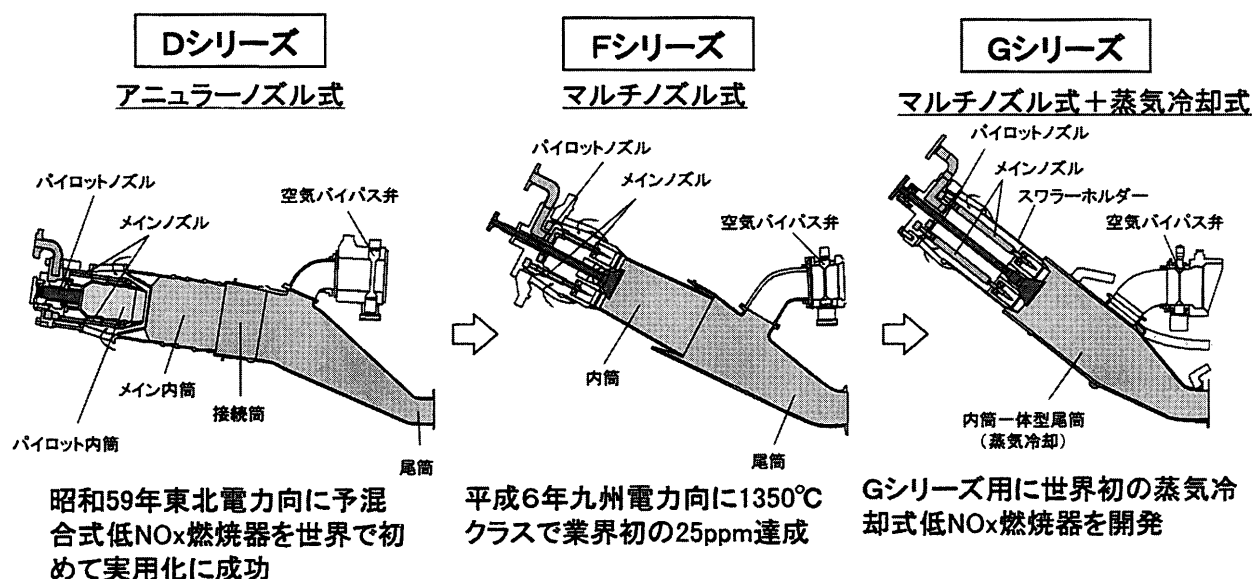
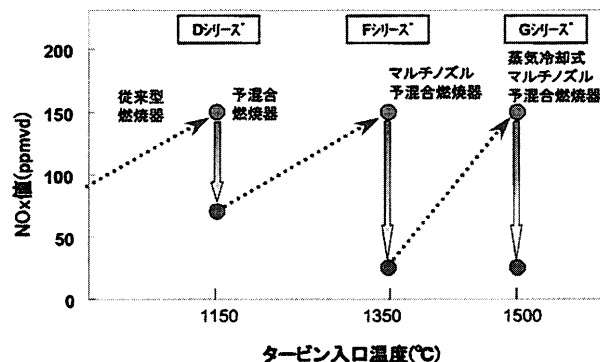


図3 予混合燃焼器の変遷

混合式燃焼器を、1984年にD形において世界に先駆けて開発・実用化した。その後F形・G形と燃焼温度の上昇に伴い、予混合燃焼技術を進化させてきており、1500℃級のG形では回収形蒸気冷却を採用している。(図3)

これはF形クラスとほぼ同等の火炎温度を保ちながら、燃焼器下流での冷却空気の混入を防ぎ、より高温の燃焼ガスをタービンに導入するというもので、高温化による高効率化を達成しながらNO<sub>x</sub>を抑えることを狙ったものである。(図4)

図4 NO<sub>x</sub>値の変遷



## 2.4 実証による信頼性確認

ガスタービンは先端技術の結晶であるが、事業用コンバインドサイクルに使用される主機として、その信頼性を確保することが重要な課題である。当社でもD形からF形、F形からG形と新規開発技術を採用した際には要素試験、スケールモデル試験、実機試験等を通じて要素の検証を行うとともに、初号機については工場での実負荷試験を実施し、信頼性を確認している。さらに実証のための発電設備を建設して実機の運転をおこない、長期間にわたって検証を継続している。

## 3. プラント全体計画

ガスタービンコンバインドプラントの全体計画はプラント構成（軸形式、主機構成）の検討から始まり、主要機器の計画、全体配置計画（パワーブロック配置、発電所構内主要機器配置）と進めて行く。

軸構成としてはガスタービンと蒸気タービンの組み合わせにより、一軸型と多軸型の2つの形式がありプラントの目的・用途に応じて選定を行う。

主機構成はガスタービン（GT）、蒸気タービン（ST）、排熱回収ボイラ（HRSG）の各形式を選定し、その後蒸気サイクル・冷却方式などを決定する。

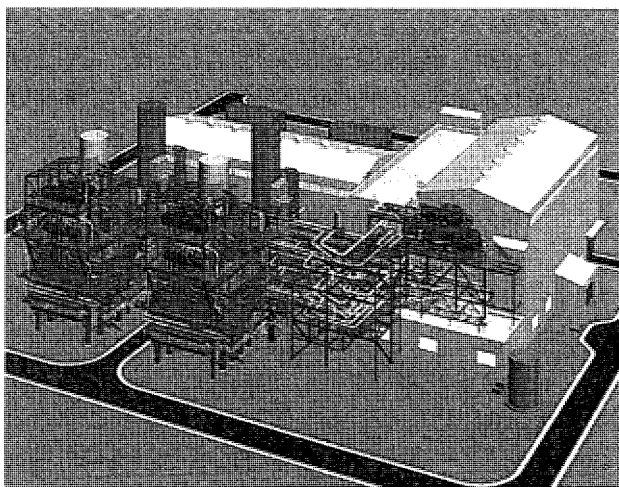


図5 2 on 1 コンバインドプラント全体図

蒸気サイクルは再熱・非再熱方式があるが最近の1400℃級以上の大型GTCCでは再熱三重圧サイクルが一般に選定される。

また、プラントの立地条件を考慮した最適な冷却方式の選定として海水冷却方式、湿式冷却塔方式、乾式冷却塔方式、あるいは空冷復水器方式などが選定される。プラント構成がほぼ決定した後は、パワーブロックの配置と発電所構内への主要機器配置の検討を行う。プラント主要機器の配置をほぼ決定した2 on 1 コンバインドプラントの全体図の例を（図5）に示す。

全体計画としては先に記載したプラント設備以外にも将来の増設計画や周辺環境への影響、法令等による敷地専有面積への制約を総合的に考慮して最終決定される。

また、最近では客先要求によりメンテナンス期間の短縮を考慮した分解配置やクレーン設備などに重点を置いたプラント配置計画を実施する場合がある。

三菱重工業ではこれらのさまざまな要因を組み合わせ、最適なプラント計画を実現している。その一例として最近のプラント納入実績の一部を表2に示す。

## 4. 蒸気タービン

コンバインドプラント用の蒸気タービンの特徴としては、次のようなことが上げられる。まず、プラント出力制御はガスタービンによって行われ、起動時ないしは負荷遮断等を除いて蒸気タービンの入口弁に対しては制御機能が要求されない。このような条件下においては、圧損の少ない大口弁を使用すると共に、部分導入調速段を廃止し初段の全周導入設計として、入口弁全開状態で変圧運転するのが性能的に有利である。また、もう1つの特徴として、ガスタービンの排ガスからの熱回収効率を高めるために蒸気サイクルは一般的にF形、G形GTに対しては再熱三重圧式となる。この方式の場合、中圧混気、低圧混気が蒸気タービンに入ってくることから蒸気流量は、高圧タービン、中圧タービン、低圧タービンの順に増加することになり、低圧タービンへの流入蒸気は、同出力通常火力機の約1.5倍の流量が流れることになる。これらコンバインドプラントの条件に適合した低

表2 三菱重工業の最近の大型GTCCプラント実績

| プラント名        | イリジャン<br>(フィリピン) | 東新潟4号系列<br>(日本) | チワワ<br>(メキシコ)   | セベルナヤ<br>(アゼルバイジャン) |
|--------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| 燃料           | 天然ガス<br>／<br>軽油  | L N G           | 天然ガス<br>／<br>軽油 | 天然ガス<br>／<br>軽油     |
| プラント出力       | 1 2 5 1 M W      | 8 0 5 M W       | 4 5 0 M W       | 4 0 0 M W           |
| G T 形式       | M 5 0 1 G        | M 7 0 1 G       | M 5 0 1 F       | M 7 0 1 F           |
| 軸構成<br>x 系列数 | 2 on 1 x 2       | 2 on 1 x 1      | 2 on 1 x 2      | 1 on 1 x 1          |
| 冷却方式         | 海水冷却             | 海水冷却            | 空冷復水器           | 湖水冷却                |
| 運開年          | 2002年            | 1999年           | 2001年           | 2002年               |

注) 2 on 1 2台のガスタービンと1台の蒸気タービンを組み合わせたプラント  
1 on 1 1台のガスタービンと1台の蒸気タービンを組み合わせたプラント

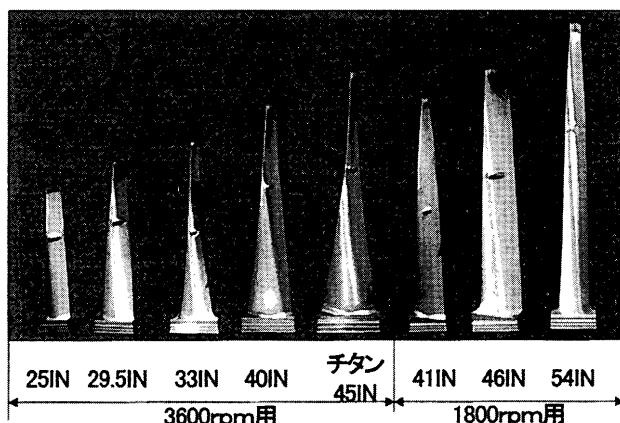


図6 低圧最終翼 ISB (Integrate Shroud Blade) シリーズ：  
60 Hz 機用

圧最終翼ラインアップを(図6)に示す。再熱単車室タービン(SRT: Single Reheat Turbine)は、1 on 1用や、2 on 1用の比較的低真空の条件に適用する。また、起動時間短縮の手段として、(図7)に示すような溶接ロータによる大口径中心孔構造を採用する場合がある。例えば、1 on 1一軸構成のパワートレイン起動時間はST起動時間に左右されるが、この溶接ロータによる大口径中心孔構造を採用することで、熱応力が大幅に低減され急速起動が可能になる。また、GT排ガス温度高温化に伴い、ST蒸気条件も566/566℃が一般的になってきているが、ST高中圧ロータ全体を高温強度材に入れ変えなくても溶接ロータ構造であれば、高温部に高温強度材、低温部には、従来材を繋ぎあわせることが可能となる。弊社では、これら溶接ロータを既に実機に適用し順調に稼動中である。

## 5. コンバインド用 HRSG の特徴

### 5.1 一般的な特徴と考慮点

コンバインド用 HRSG (Heat Recovery Steam Generator) は、ガスタービン排ガスの熱エネルギーを蒸気タービンで回収できる蒸気エネルギーに熱交換する機器である。HRSGの型式は、採用される蒸気圧力レベル段数により、単圧式/非再熱多重圧式/再熱多重圧式と分類される。循環形式により、自然循環形/強制循環形に、更に排ガスの流れ方向により、横流れ(横形)/縦流れ(縦形)と分類できる。プラントの設計条件、ガスタービン、蒸気タービンの要求条件、敷地スペース、配置に応じて最適なコンバインド用 HRSG の型式が選定される。

なお、日本国内向では環境対策として、排ガス中の窒素酸化物(NOx)を低減する脱硝装置がHRSG本体の中に組み込まれることが一般的である。

### 5.2 三菱 HRSG の特徴

代表的な大型コンバインド用三菱 HRSG の特徴について以下に述べ、外形図を図8に示す。

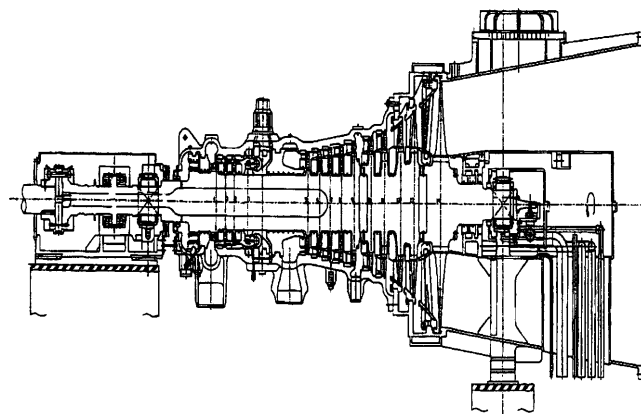


図7 急速起動対応再熱単車室タービン断面図

### 1) 再熱三重圧式

多重圧式は、蒸気・水系統が単圧式に比べ系統がやや複雑となるが、ガスタービン排ガスからの熱回収率が向上するため、大型ガスタービン向の場合は高いプラント効率が得られる再熱三重圧式を採用することが多い。

### 2) ガス縦流れ自然循環式

近年は設置スペースが小さく、かつ起動時発生熱応力が小さく急速起動に向く構造が可能なガス縦流れを採用している。また、以前は循環ポンプを採用した強制循環形が採用されたが、近年はボイラ水循環系統内の流体密度差による自然循環力を利用するシンプルな自然循環形を採用している。

### 3) コンパクト設計

経済性向上の為の取組みとして、熱伝達特性に

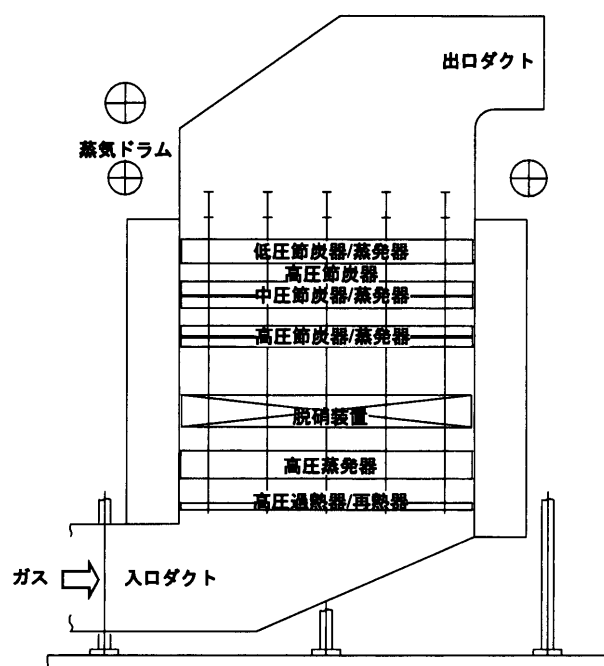


図8 ガス縦流れ自然循環再熱三重圧 HRSG

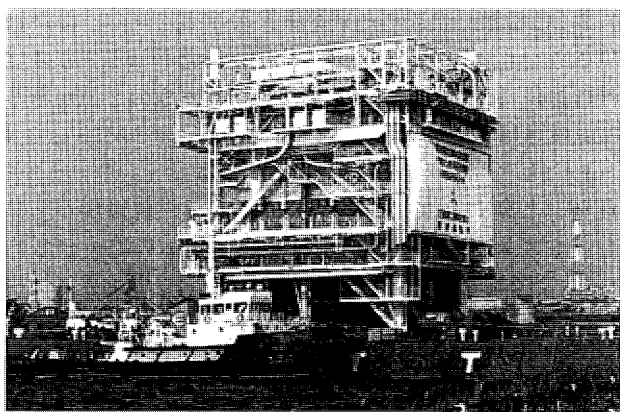


図9 701 F 形 GT 向 HRSG 一体型モジュール写真

優れたフィンチューブを採用し、構造全体のコンパクト化も目指している。

### 5.3 モジュール工法—品質向上と工期短縮

HRSG の品質向上と現地工期短縮をはかるため、自社工場で組立を行い、大型モジュールにて海上輸送、現地据付を行う工法を採用することがある。図9はその例で、701 F 形 GT 向の HRSG を一体型大型モジュールで海上輸送している様子を示す。

## 6. 石炭利用コンバインドプラント

ガスタービンコンバインドサイクルの燃料として石炭

を利用するシステムには、加圧流動床ボイラ複合発電 (PFBC : Pressurized Fluidized Bed Combustion) 及び石炭ガス化複合発電 (IGCC : Integrated coal Gasification Combined Cycle) がある。両者の比較を表3に示す。

PFBC の系統例を図10に示す。PFBC では、ガスタービン圧縮機吐出空気的全量が抽気され、PFBC ボイラに供給される。PFBC ボイラでは、石炭を加圧下で完全燃焼させ、石炭のエネルギーをすべて熱エネルギーに転換する。PFBC ボイラで発生した高温ガスは、そのままガスタービンで膨張する。従って、ガスタービンは燃焼器を持たず、PFBC ボイラ自体が燃焼器の役割を果たす。高温ガスの温度は、ボイラにおける安定した流動床燃焼のため800～850℃に制限される。そのためPFBC ではガスタービンの出力割合が小さく、送電端効率は約40%である。

北海道電力(株)苫東厚真3号機 PFBC の鳥瞰図を図11に示す。

次に、IGCC の系統例を図12に示す。ガス化炉において石炭を部分燃焼させて可燃性の石炭ガス化ガスに転換したのち、ガスに含まれる灰分、硫黄分を除去しクリーンな燃料としてガスタービンに供給する。石炭ガス化ガスはガスタービンにおいて燃焼するため、ガスタービン入口ガス温度を高めることができる。商用機では、送電端効率48%が期待されている。

表3 PFBC と IGCC の比較

| 項目                 | P F B C | I G C C               |
|--------------------|---------|-----------------------|
| ガスタービン入口ガス         | 石炭燃焼排ガス | 石炭ガス化ガス(可燃性ガス)        |
| ガスタービン入口ガス温度       | 830℃    | 1250℃(実証機)～1500℃(商用機) |
| 送電端効率(HHV)         | 40%     | 40%(実証機)～48%(商用機)     |
| ガスタービンと蒸気タービンの出力比率 | 1:7     | 1:1                   |

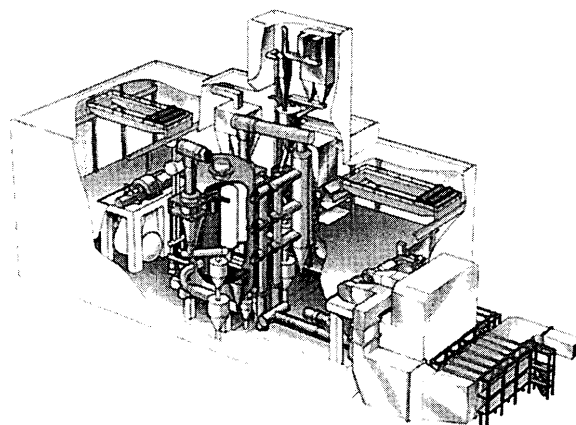


図11 北海道電力(株)苫東厚真3号機 PFBC 鳥瞰図

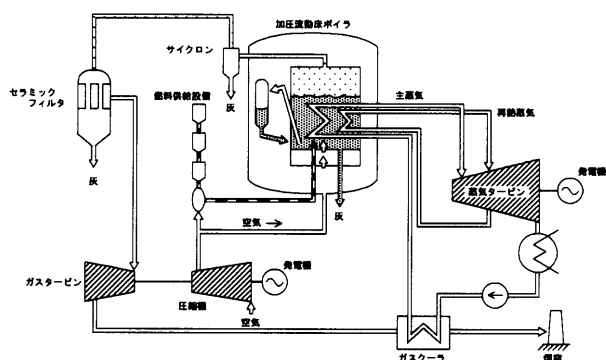


図10 PFBC 系統例

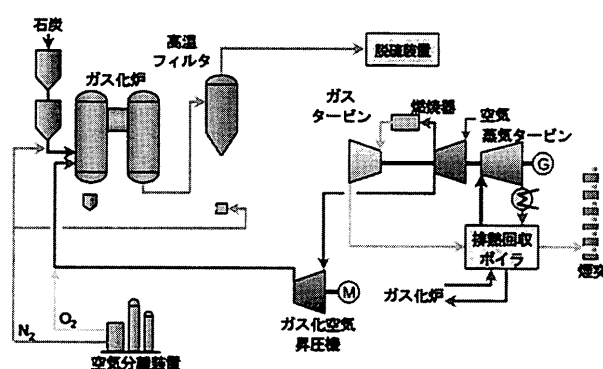


図12 250 MW IGCC 実証機系統

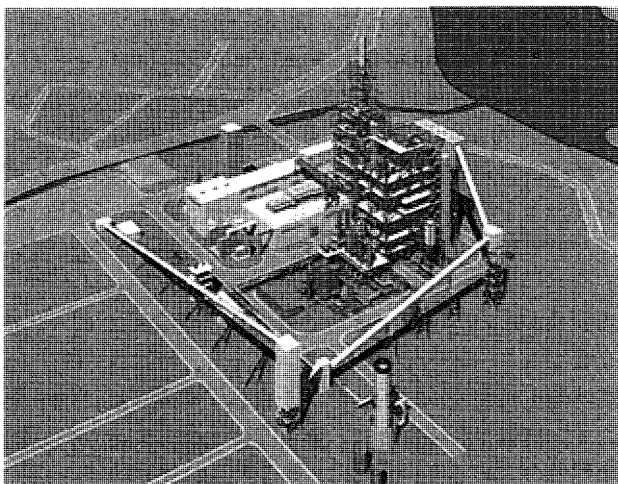


図 13 250 MW IGCC 実証機鳥瞰図

IGCC では、ガスタービン圧縮機吐出空気の一部が抽気され、ガス化剤としてガス化炉に供給される。ガス化剤の種類によって、空気吹き及び酸素吹きの 2 種がある。空気吹きは石炭ガス化ガスの発熱量が約  $4.2 \text{ MJ/m}^3 \text{ N}$  (LHV) と低い。一方、酸素吹きでは約  $10 \text{ MJ/m}^3 \text{ N}$  (LHV) と高く、CO を多く含むため理論燃焼温度が上昇し、ガスタービンにおけるサーマル NO<sub>x</sub> の発生が多くなる。この対策のため、酸素製造時の余剰窒素をガスタービン入口に投入し希釈する方法がある。この場合、ガスタービン燃焼器入口でのガス発熱量は空気吹きと概略同等となる。

現在、(株)クリーンコールパワー研究所により、出力 250 MW 規模の IGCC 実証機建設計画が進められている。IGCC 実証機の鳥瞰図を図 13 に示す。

## 7. おわりに

今後もガスタービンコンバインドプラントは火力発電の中核をなすと考えられる。そのためにも開発、設計、製造を独自で行っている弊社の責任は重いと考えられ、今後とも更に信頼性、性能の向上を図っていく所存である。

特集：ガスタービン利用高効率エネルギーシステムの動向

## 1500℃ 級蒸気冷却ガスタービンコンバインドサイクル技術

大久保貴司<sup>\*1</sup>

OKUBO Takashi

キーワード：蒸気冷却，1500℃ 級ガスタービン，コンバインドサイクル，H システム，  
蒸気タービン，水素冷却発電機

### 1. はじめに

ガスタービンサイクルは単独では効率の高い原動機サイクルとは言えないがその排熱を利用し蒸気タービンサイクルと組合せてコンバインドサイクルとする事によって飛躍的に高い熱効率を得る事ができ、高い経済性とCO<sub>2</sub>環境排出量の低減を同時に実現できる。また、近年では低NO<sub>x</sub>燃焼技術の発展によってガスタービン排気中のNO<sub>x</sub>濃度を低いレベルに押さえることが可能になった。エネルギー有効利用の側面と環境保全の観点の両方で優れた特性を合わせ持つガスタービンコンバインドサイクルは広く社会に受け入れられる様になり、世界的に見ても最近建設された火力発電プラントの大半を占めるに至っている。さらに今後はより社会的リスクの少ない電源設備としての別の側面も評価されて、長く火力電源設備の中心としての地位を維持して行くと考えられる。

現在では1,300℃級空気冷却ガスタービンを使用したコンバインドサイクルが主流であるが21世紀に入った今、より高効率な1,500℃級の時代が始まった。

東芝は98年3月に米国General Electric社との間にH System (GE社の商標)と呼ぶ1,500℃級蒸気冷却ガスタービンを使用したコンバインドサイクル用パワートレーン機器の製造に関する包括的な協業契約を締結した。H Systemには50 Hz用のS109Hと60 Hz用のS107Hがあり、それぞれGE製ガスタービンMS9001H、MS7001H(共に圧縮機部分は東芝で製造する)と東芝製蒸気タービンならびに発電機を同軸に連結した一軸型コンバインドサイクルである(図1)。

H Systemの初号機となるS109Hは本稿の執筆時には英国ウェールズ州にあるバグランベイ発電所で順調に全負荷試験を実施中で、同発電所は試験完了後1,500℃級蒸気冷却ガスタービンコンバインドサイクルを採用した世界初の発電所として商業運轉する<sup>(1)</sup>。

ここでは今後のコンバインドサイクルの主流となる1,500℃級蒸気冷却ガスタービンコンバインドサイクルシステムについて解説する。

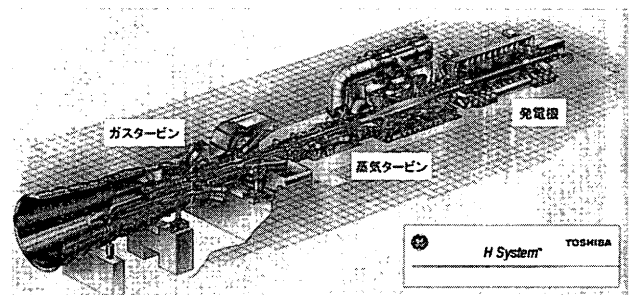


図1 H Systemの全体像

### 2. 1,500℃ 級コンバインドサイクルプラント

#### 2.1 プラントの基本仕様

H Systemを使った代表的な1,500℃級蒸気冷却コンバインドサイクルプラントの基本仕様を表1に示す<sup>(2)</sup>。蒸気サイクルには1,300℃級でも採用され高いサイクル効率を得る事ができる再熱3圧サイクルを使用する。蒸気条件はサイクル効率を向上させるため1,300℃級より高圧・高温化して、12.5~15 MPag/550~560℃としている。プラント出力は50 Hz用で490 MW、60 Hz用で394 MW、効率は共に53%以上(燃料高位発熱量基準)となり、1,300℃級に比べて出力は1.4~1.7倍、効率は約6~8%(相対値)も向上する。一方、ガスタービンの蒸気冷却と低NO<sub>x</sub>燃焼技術の複合ならびに排熱回収ボイラに設置する脱硝装置の効果によってボイラ出口のNO<sub>x</sub>排出濃度は5 ppmvd (volume dry:ドライ状態での体積濃度)以下と1,300℃級と同程度にできる。

表1 1500℃ 級蒸気冷却と1300℃ 級空気冷却  
コンバインドサイクルの比較

|                          | 蒸気冷却 1500℃級                   |             | 空気冷却 1300℃級<br>(参考) |
|--------------------------|-------------------------------|-------------|---------------------|
| パワートレーン形式                | 109H (50Hz)                   | 107H (60Hz) | 107FA (60Hz)        |
| 発電機端出力                   | 490MW                         | 394MW       | 238MW               |
| 発電機端熱効率<br>(HHV 基準)      | 53%                           | 53%         | 49%                 |
| 蒸気サイクル                   | 再熱3圧サイクル                      |             |                     |
| 蒸気条件                     |                               |             |                     |
| 主蒸気圧力                    | 12.5~15MPag                   |             | 10.4MPag            |
| 主蒸気温度                    | 550~560℃                      |             | 537℃                |
| 再熱蒸気圧力                   | 2.5MPa                        |             | 2.2MPa              |
| 再熱蒸気温度                   | 550~560℃                      |             | 543℃                |
| プラント出口NO <sub>x</sub> 濃度 | 5ppmvd (16%O <sub>2</sub> )以下 |             |                     |

原稿受付 2003年2月26日

\*1 株式会社 東芝 電力システム社 火力・水力事業部  
火力プロジェクト部

〒230-0051 横浜市鶴見区鶴見中央 4-36-5

## 2.2 H型ガスタービン

H型ガスタービンはコンバインドサイクルと一体化した1,500℃級の高出力機で、18段圧縮機、14缶低NO<sub>x</sub>燃焼器と4段タービンにより構成される。蒸気冷却システムはGE社の発電用ならびに航空機用エンジンで実証された着想と特徴を利用して設計されており、その信頼性は最先端の解析技術と入念な要素試験の実施によって裏打ちされている。

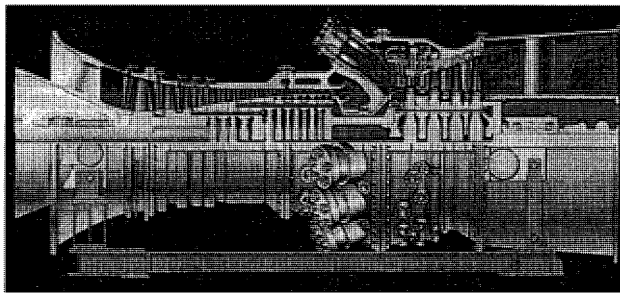


図2 H型ガスタービン断面図

H型ガスタービンの断面図を図2に示す<sup>(3)</sup>。駆動軸は一軸式コンバインドサイクルの構成に都合の良い圧縮機側にとっている。ロータは両端にある2つの軸受で支持し、スラスト軸受は圧縮機側に設けてある。タービンと圧縮機ケーシングは水平2分割設計としてあり保守が容易である。各燃焼器の燃焼室、ライナ、トランジションピースは分割されていて各々独立に交換可能である。圧縮機、燃焼器、タービンのそれぞれにはボアスコープ孔が設けられ内視点検が容易にできる配慮がなされている。

1,300℃級に比べてはるかに高い効率はタービン入口温度の上昇ならびにタービン高温部への回収型蒸気冷却方式の採用とタービン翼の3次元流れ解析設計によって実現した。一方、タービン入口温度を上げているもののNO<sub>x</sub>排出レベルは従来と変わらない。これはタービン第1段の冷却方式を回収式蒸気冷却したことによって1段静翼前後の温度降下が開放式空気冷却より少なくなるからで(図3)、燃焼器内の温度は従来の1,300℃級空冷機と同程度に維持されている結果である<sup>(2)</sup>。

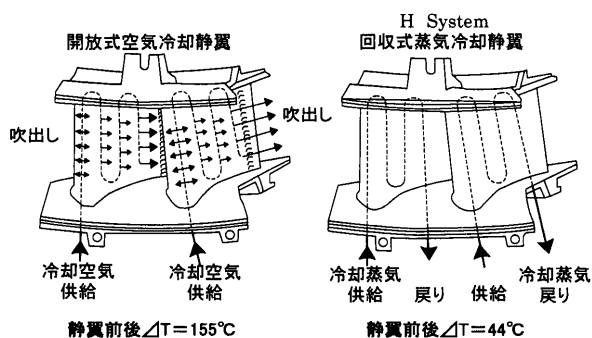


図3 1段静翼前後温度降下の差異

H型用燃焼器は多缶式の予混合低NO<sub>x</sub>燃焼システムで、燃焼ガス量の増大に合わせて缶径をFA型用燃焼器より約20%大きくした。その結果一台当たりの缶数は9Hで14缶、7Hでは12缶とFA型より少ない。

## 2.3 ガスタービン冷却蒸気システム

H Systemのガスタービン高温部を冷却する蒸気冷却システムはボトミングサイクルと緊密に一体化している<sup>(4)</sup>。その系統構成を図4に示す。通常運転時には高圧蒸気タービン排気と排熱回収ボイラの中圧過熱器からの蒸気を使って冷却する。冷却蒸気は前置きフィルタを通過してからガスタービンに入る。静止部用冷却蒸気はガスタービンケーシング上に設けた複数の座から供給し、ロータ用冷却蒸気は軸端に設けた蒸気グラウンドから供給する。同蒸気グラウンドは蒸気タービンで一般に使われているものと同様な構造で、漏洩蒸気回収座を備えている。冷却に使った蒸気は蒸気タービン系の低温再熱系統に回収し、再熱器で加熱した後中圧タービンに入る。

起動時の冷却には排熱回収ボイラの高圧過熱器低温側からの蒸気を所定の温度に調節して使う。

その前の起動初期、ガスタービンが昇速を開始して定格速度に到り併入負荷を取るまでの間は圧縮機吐出空気でガスタービンを冷却する。この間も冷却空気は前置きフィルタを通過してからガスタービン高温部に送られる。この運転を行なっている間は遮断弁を閉じて、空気が流れている蒸気冷却系統を蒸気タービン系サイクルから切離す。

また蒸気冷却系統にはバイパスラインが設けられていて、ガスタービンを空気冷却する間には排熱回収ボイラから供給される蒸気を蒸気冷却系統を介さずに再熱器～中圧バイパス弁經由復水器に排出する様になっている。この系統は蒸気冷却系統に蒸気を通気する前に供給ラインの暖機と蒸気供給の安定化を行なうために活用される。先の蒸気冷却系統と蒸気タービン系サイクルを仕切る遮断弁はトリップ回路に組込まれていて、緊急停止時には瞬時に蒸気が排出され蒸気冷却から空気冷却に移る様に作動する。

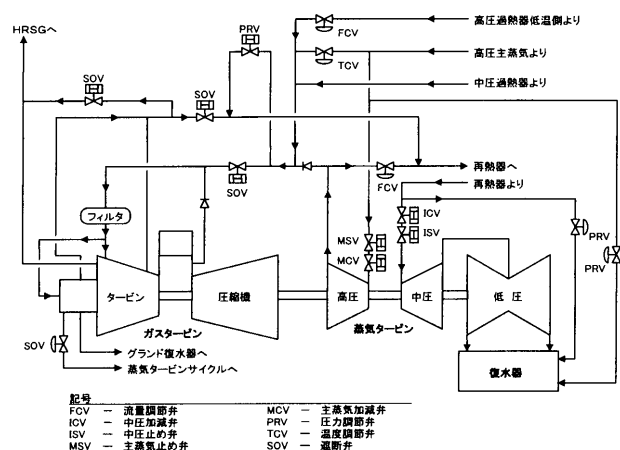


図4 蒸気冷却システム系統図

## 2.4 蒸気タービン

コンバインド用蒸気サイクルでは蒸気タービンからの給水加熱抽気が無く、逆に3つの異なる圧力レベルの蒸気が流入するため蒸気タービンの排気量は主蒸気量よりも約30%増える。その結果最終段の出力が蒸気タービン全体の15%程度を占める事もあるので、コンバインドサイクル全体を評価する上で、サイト特有の排気圧力条件に最適な最終段の長さや排気流数の選択が特に重要な因子と成る。

H Systemの蒸気タービンは表2に示す6機種から成る標準ラインアップの中から様々なサイト条件に応じて最適な機種を選択できる<sup>(2)</sup>。計画排気圧力が1.5 inHgaのベースロード機では33.5 inchの最終段を複流にしたTCDF-33.5が最適な選択で、定格負荷で排気損失が最小、プラント効率が最大となる。一方寒冷地などで計画排気圧力が1.5 inHgaより低い場合には排気流数を複流にしたまま、より長い最終段を採用する。反対に温暖なサイトで計画排気圧力が1.5 inHgaより高い場合には排気流数を減じて単流式(TCSF)を選択する事ができる。何れの機種も東芝蒸気タービンの豊富な製作実績を活かしながら、DSS運転で要求される一軸型コンバインドサイクルに特有な条件を配慮した設計にしてある。

図5に代表的なH System用蒸気タービンの組立図を示す。蒸気タービンの基本構造は1,300℃級用コンバインドでも多く使われている2ケーシング式で、コンパクトな設計とするため高压と中圧セクションは一体化し、低压セクションの入口とクロスオーバー管でつなぐ構造である。

表2 蒸気タービン標準ラインアップ

| タービン型式      |            | 復水器圧力 (インチHga) |     |     |     |
|-------------|------------|----------------|-----|-----|-----|
|             |            | 1.0            | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
| 109H (50Hz) | TCSF-42"   | [図]            |     |     |     |
|             | TCDF-33.5" | [図]            |     |     |     |
|             | TCDF-42"   | [図]            |     |     |     |
| 107H (60Hz) | TCSF-40"   | [図]            |     |     |     |
|             | TCDF-33.5" | [図]            |     |     |     |
|             | TCDF-40"   | [図]            |     |     |     |

TCSF : タンデムコンパウンド単流排気  
TCDF : タンデムコンパウンド複流排気

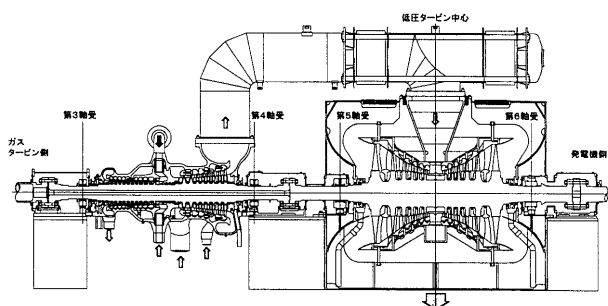


図5 蒸気タービン組立図

その高压セクションは二重車室を採用すると共に主蒸気の挿入を上下半から同時に行う構造にして起動ならびに負荷変化時のケーシングの変形を最小化し、起動時間の短縮と運転信頼性を両立させている。

H Systemの蒸気サイクルは通常負荷帯では変圧モードで運用するためタービンの各セクション入口に調速段は必要無い。従って全ての段落を全周挿入とすると共に段落数を増やして各段落の負荷を軽減し、性能と信頼性の両方を高めた。さらにアドバンスド・フローパターン (AFP) 設計を採用した高効率段落 (図6) を多用してセクション全体の効率向上を図っている。

一軸型パワートレーンの配置は中央に蒸気タービンを置き、ガスタービンと発電機をそれぞれ反対側の端に置く。各機器の車軸は強固なカップリングで直結されているのでスラスト軸受は軸系全体で一つで済み、パワートレーンの全長を短くする事ができる。

そのスラスト軸受は工場出荷前に試運転を実施する関係でガスタービンの圧縮機側に設置される。このスラスト軸受位置はパワートレーンにした時に蒸気タービンの高压セクションに最も近いので、スラスト軸受を起点とする軸系全体の伸び差が最小化でき、蒸気タービン高压・中圧セクションの軸方向クリアランスを不必要に増やさずに済む効果がある。H Systemの軸系構成と伸び・伸び差の関係を図7に示す。ガスタービンは軸方向にフレキシブルに支持されているが同圧縮機側と蒸気タービンの高压セクション前部軸受台をタイロッドで連結するので、両者の距離は常に一定に保たれ、軸系の伸び差は影響を受け無い。

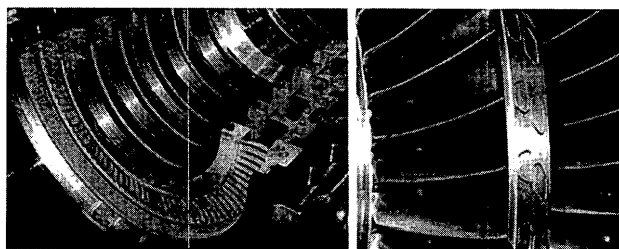


図6 アドバンスドフローパターン高効率段落

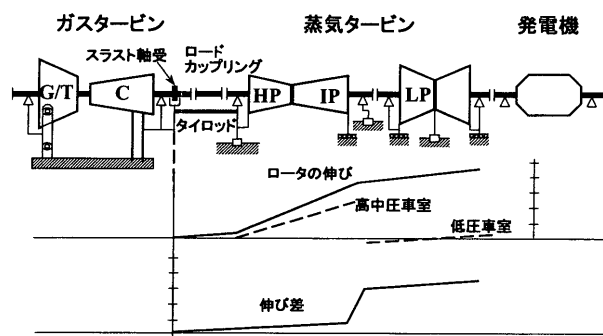


図7 軸系構成と伸び・伸び差



蒸気タービンが発生するスラスト力はガスタービンと比較して大きく無いが、ガスタービンのそれと反対方向に作用する様にして軸系全体ではスラスト荷重が最小に成るような設計がされる。

機器が強固なカップリングで連結した一軸型パワートレインは制御の簡素化とオーバースピード防止の観点からも優れたシステムと言える。H System では周到な弁設計と綿密な信頼性評価に基づいて蒸気タービン高圧セクション入口加減弁と中圧セクション入口のインターセプト弁をそれぞれ1弁にして、軸系としての信頼性を確保しながら制御システムを簡素化している。

## 2.5 発電機

H System 用発電機は400から600 MVA以上の容量が必要となる。比較的大容量と言えるこのクラスの発電機には従来から固定子コイル直接水冷却方式が使われてきた。水冷却方式は固定子の冷却には優位性があるが、水冷却のための周辺装置や配管を必要とするという欠点がある。H System では水冷却方式に替えて、従来はより容量の小さい発電機に使われてきた固定子コイル間接水素冷却方式を採用することによって周辺装置等を不要にし、システムの運用性・保守性を向上させた。

間接水素冷却方式は固定子コイルの冷却だけを取れば直接水冷却方式に比べて性能が劣る。そこで既に開発済みの高熱伝導絶縁材を固定子コイルの絶縁に使用するとともに発電機内部の水素ガス流れ分布を最適化した。同

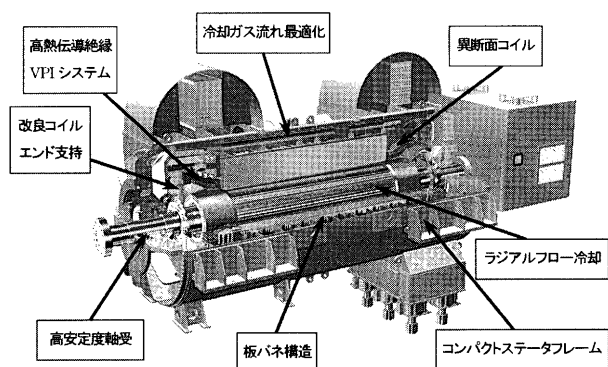


図8 大型水素冷却発電機の適用技術

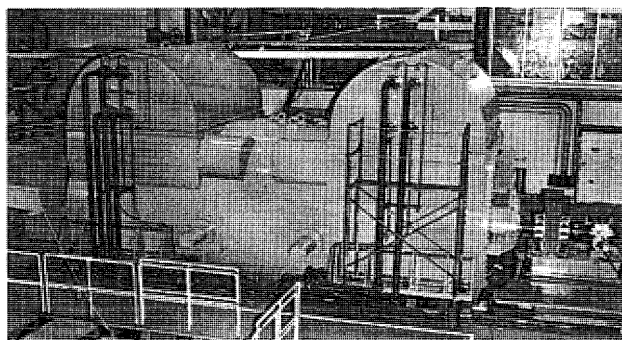


図9 大型水素冷却発電機の工場試験

時に固定子フレーム等の静止部にも FEM を使った入念な構造設計を実施して機器寸法の縮小と信頼性の向上を図った。図8に東芝製大型水素冷却発電機の適用技術、図9に工場試験の状況を示す<sup>(5)</sup>。

結果として H System 用水素冷却発電機はその外形寸法においても発電機効率においても従来の固定子水冷却発電機と変わりが無い上に、運用性・保守性は優れている。

## 2.6 排熱回収ボイラ

図10に H System による蒸気冷却ガスタービンコンバインドサイクルの全体系統を示す<sup>(6)</sup>。排熱回収ボイラには H System 専用の設計が必要である。まずサイクルは1,300℃ 級同様再熱3圧方式として熱効率の向上を図ると共に伝熱管にセレーテッドフィンチューブを使用し伝熱性能を高める。ボイラ形式には横置自然循環式を採用してガスタービン排気がスムーズに伝熱セクションを流れる様にすると同時に、蒸発器内循環のための補機動力を不要とする。脱硝触媒とアンモニア注入装置はボイラ中温部分に設置して NOx 低減効率を最大化する。ガスタービン蒸気冷却システムとの適合設計によって排熱回収ボイラは次の特徴を備える事になる：

- ガスタービン蒸気冷却システムが再熱の一部を負担するので再熱器のサイズが小さくなる。
- 高圧主蒸気の温度制御は、高圧過熱器の一部をバイパスさせる方式の蒸気減温装置で行う。この方式によれば、従来一般に使われていた給水を混入して減温する方式では避ける事が出来ない蒸気中への不純物混入の可能性が排除できる。減温用低温蒸気は、温度制御弁を通過する時の小さな圧力降下では乾き状態を維持できる程度の過熱度を確保しつつ、高圧過熱器低温側出口から抽気して過熱器高温側の大部分をバイパスさせる。一方同抽気後の残りの過熱蒸気は全ての高圧過熱器を通過してガスタービン排気と熱交換する。過熱器の高温側をバイパスさせる蒸気の比率を変える事によって高圧主蒸気の温度を制御する。
- 起動時には、高圧過熱器低温側出口から上記の高圧主蒸気温度制御用蒸気の他にガスタービン冷却蒸気も抽気する。

その他、中圧節炭器出口からガスタービン冷却空気冷却器ならびに燃料ガス加温装置への抽水系統も設けるが、これらも排熱回収ボイラ設計の一部である。

## 2.7 ボトミングサイクル

給水方式は1,300℃ 級でも多く使われ、機器配置上の制約が少ない独立給水方式を採用する<sup>(3)</sup>。復水ポンプからの復水は、通常その直近に配置される高圧中圧給水ポンプへ送られる。高圧中圧給水ポンプの高圧吐出から出た給水は複数の高圧節炭器を通過した後給水調節弁を経て高圧ドラムに至る。中圧ドラムへの給水は同高圧中圧給水ポンプの中圧吐出から中圧一次節炭器、中圧二次節



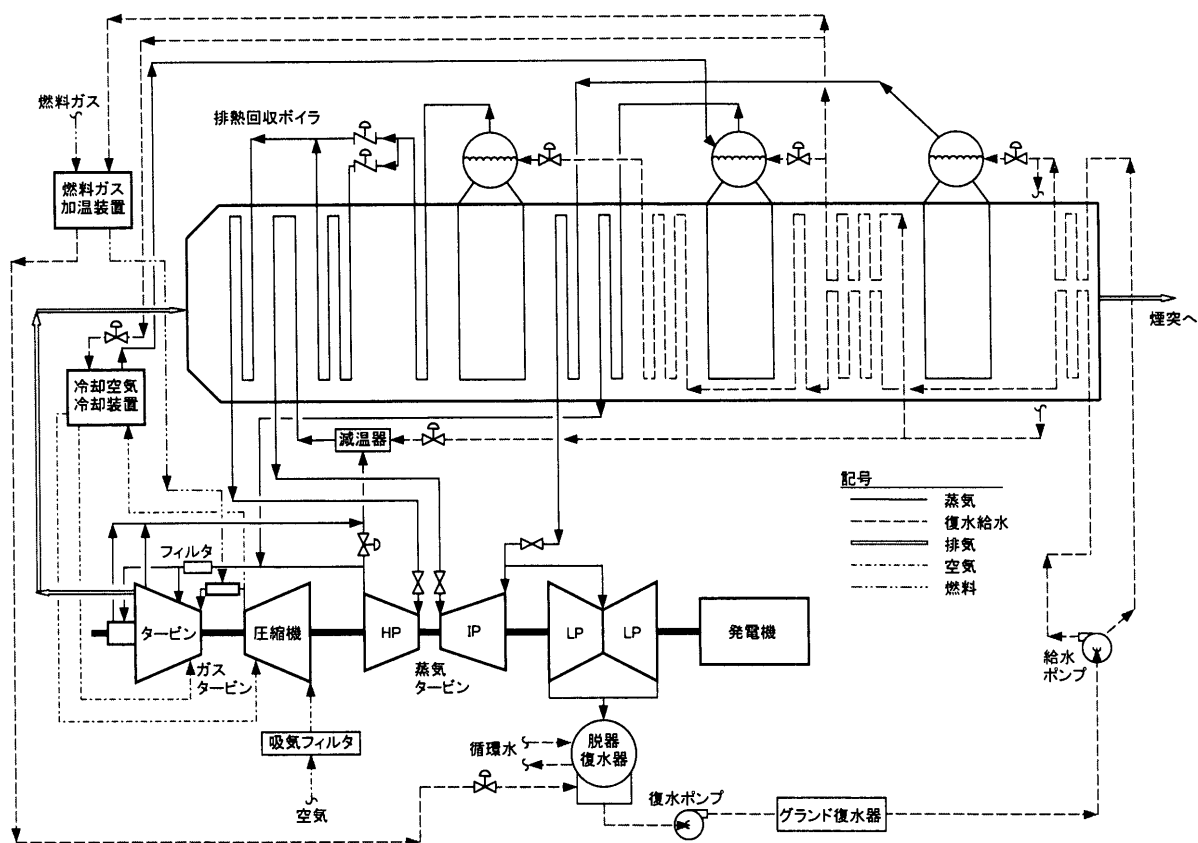


図 10 H System コンバインドサイクル全体系統図

炭器，給水調節弁を経由して行く。中圧二次節炭器出口の給水の一部は分岐して後述の燃料加温装置ならびに冷却空気冷却器に送りそれぞれサイクル効率向上のための加温ならびに熱回収に使う。低压ドラムへの給水は中圧一次節炭器出口から行なう。

高圧，中圧蒸気システムは部分負荷効率を上げるために運用負荷帯では変圧とする。一方低压蒸気システムは広い負荷帯での運用安定性を重視して一定圧制御とする。

ボトミングサイクルは次の領域でガスタービン蒸気冷却システムと統合され一体化している：

- ガスタービン冷却蒸気は高圧蒸気タービン排気と排熱回収ボイラの中圧過熱器出口から閉ループ蒸気冷却システムに供給し，ガスタービン第1段と第2段のガス通路部高温部品を冷却する。冷却に使われた蒸気は同蒸気冷却システムから低温再熱系統に回収され再熱器に送られる。つまり，閉ループ蒸気冷却システムは再熱器と直列に連結して機能する。
- 圧縮機吐出から抽気した空気を冷却空気冷却器出口の給水の一部を使って冷却する。冷却された空気は圧縮機ホイールとガスタービン高温部の一部の冷却に使う。同時に圧縮機吐出空気との熱交換によって給水から蒸気を発生させ，その蒸気を高圧ドラムに回収する。
- 排熱回収ボイラの熱を利用した燃料ガス加温システムを使ってコンバインドサイクル効率を向上させる。

中圧節炭器の出口給水の一部を燃料ガス加温器に送り熱交換によってガスタービンに供給される前の燃料を加熱する。熱交換後の給水は復水器に回収する。

## 2.8 冷却空気冷却システム

冷却空気冷却システムでは中圧節炭器出口からの給水を利用して圧縮機吐出空気を冷却する。冷却された空気はガスタービンのガス通路部部品の一部と圧縮機ホイールの冷却に使う。

圧縮機吐出空気のエネルギは同システムの蒸発器で中圧蒸気を作るために使われる。中圧給水の供給量は冷却空気冷却システムの蒸発器内の水位を一定に保つ様に制御する。

## 2.9 燃料ガス加温システム

燃料ガス加温システムでは中圧節炭器出口給水を使ってガスタービンに供給される前の燃料ガスを加温する。熱エネルギーを中圧節炭器から燃料ガス加温システムに移動するとその分だけ燃料流量が減ってコンバインドサイクル効率が向上する。即ち，低い温度レベルの排熱回収ボイラの熱をサイクル効率向上の為に有効利用する。

## 3. まとめ

H System は蒸気冷却ガスタービンを利用して世界最大出力・最高効率を実現した次世代のコンバインドサイクルシステムである。H System 用蒸気冷却ガスタービンの初号機は，米国サウスカロライナ州にある GE 社の

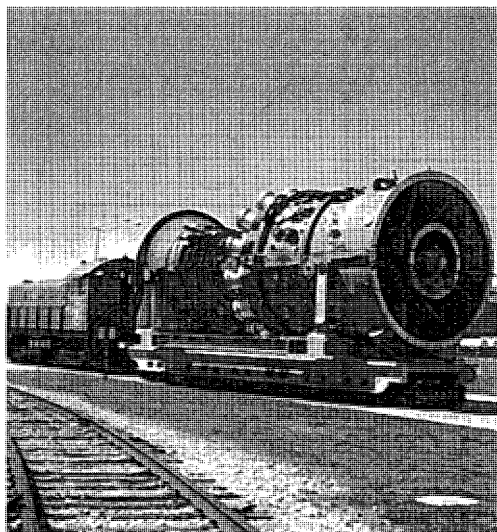


図 11 9H ガスタービン出荷

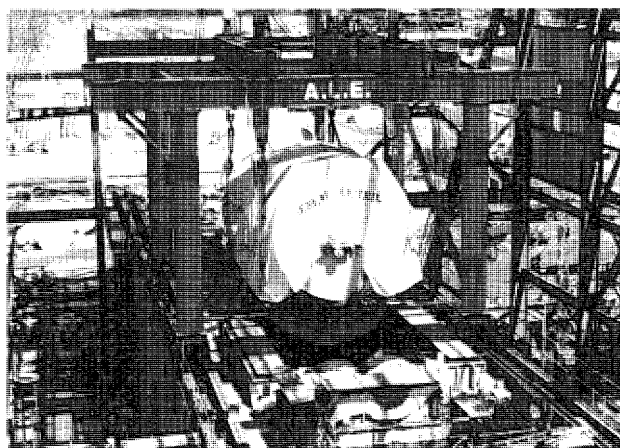


図 12 現地据付工事

グリーンビル工場で二回にわたる工場試験を実施した後 2000 年 12 月に英国に向けて出荷された (図 11)。仕向け地であるウェールズ州バグランベイ発電所ではプラント建設が順調に進んだ。図 12 に H 型ガスタービンの現地据付工事の状況を、図 13 に同発電所の遠景を示す。この H System 初号機は 2002 年 11 月に電力系統に連結、2002 年 12 月にはガスタービン全負荷に到達、2003 年 1 月にはコンバインドサイクルとして全負荷を達成し長期全負荷試験に入った。本稿の執筆時にも順調に全負荷試験を継続中である。このバグランベイ発電所は所定の試験を完了した後蒸気冷却コンバインドサイクルを適用した世界初の本格商用発電所として運開する。



図 13 バグランベイ発電所

一方わが国においても東京電力㈱によって 2006 年から 2010 年の運開を目指してアジア初の 1,500℃ 級蒸気冷却ガスタービンコンバインドサイクルプラントとなる 1,520 MW 発電所を千葉県富津に建設する計画が進められている<sup>(4)</sup>。

H System によって 1,500℃ 級蒸気冷却ガスタービンコンバインドサイクルプラントは実用段階に入った。従来のコンバインドサイクルシステムと比較して大幅な出力増加と効率向上をもたらす同システムは、エネルギーの有効利用と環境保全を最高のレベルで提供する事によってこれからの火力発電の中核を担うと期待される。

### 参考文献

- 1) 江波戸智：世界最新の 1500℃ 級 H 型ガスタービン技術について、日本ガスタービン学会誌，Vol. 30，No. 1，(2002-1)
- 2) 飯田義亮，渋谷幸生：1500℃ 級コンバインドサイクルシステム，東芝レビュー，Vol. 56，No. 6，(2002-6)
- 3) 大久保貴司：1500℃ 級次世代高効率コンバインドサイクルプラントの計画，火力原子力発電，Vol. 51，No. 3，(2000-3)
- 4) H. Asakura, T. Ishimaru, C. Maslak, J. Ranasinghe: The Tokyo Electric Power Company Futtsu 4 Thermal Power Station, Efficient, Reliable, and Environmentally Friendly Power Generation for 21st Century, 18th WEC, (2001-10)
- 5) T. Kitajima, S. Nagano, K. Yoshida, Y. Kazao, T. Katauri: Development and Verification of Hydrogen-Cooled Turbine Generator with Large Capacity, CEPSI Conference, (2002-11)
- 6) R. Smith, P. Polukort, C. Maslak, C. Jones, B. Gardiner: Advanced Technology Combined Cycles, GER-3936 A GE Power Systems, (2001-5)

特集：ガスタービン利用高効率エネルギーシステムの動向

## 二段燃焼ガスタービン GT 26 を利用したコンバインドシステム

伊藤 健之<sup>\*1</sup>

ITO Takeyuki

西村 智行<sup>\*1</sup>

NISHIMURA Tomoyuki

キーワード：GT 26, KA 26-1, 2 段燃焼ガスタービン, EV バーナ, SEV バーナ, 溶接ロータ

### 1. 概要

Alstom 社のガスタービンラインアップのうち、最新鋭大型ガスタービン GT 26 を使用したコンバインドシステムについて紹介する。

### 2. プラントの構成

#### 2.1 全体配置

図 1 に全体配置を示す。

プラントはタービン建屋、HRSG、煙突、補機器類より構成される。

タービン建屋内にはガスタービン、発電機、蒸気タービンが一軸に配置され、さらに、これら主機械の関連補機や蒸気タービン復水器も設置されている。

HRSG はガスタービンの排気端側にタービン建屋に隣接して配置される。ガスタービンから排出される排ガスは HRSG と排ガスダクトを通り、煙突より放出される。脱硝設備は HRSG 内部に装備されている。

HRSG の側面には脱気器、給水ポンプ、燃料供給装置、脱硝設備用補機、排水装置が配置されている。

制御装置と電気設備はタービン建屋の側面に道路をはさんで設置される。制御装置はモジュールに構成され、制御、電気、バッテリー、高・低圧分電装置、起動装置等をコンパクトに配置している。また、電気設備はバスダクト、所内変圧器、昇圧変圧器より構成される。

#### 2.2 パワートレンの構成

##### 2.2.1 概要

本コンバインドシステムでは、ガスタービン、発電機および蒸気タービンから構成されるパワートレンは図 2 に示すように配置される。すなわち、

- 1) ガスタービン、発電機、蒸気タービンを一軸に配置
  - 2) 発電機と蒸気タービンの間に SSS クラッチを装備
  - 3) フロアマウント方式を採用
- 等により、以下のようなメリットを有する。

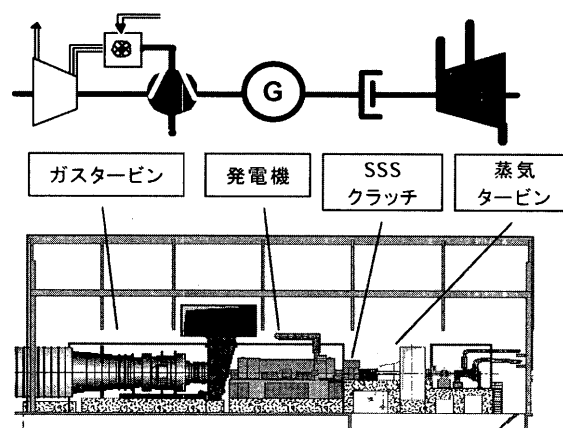


図 2 パワートレン配置

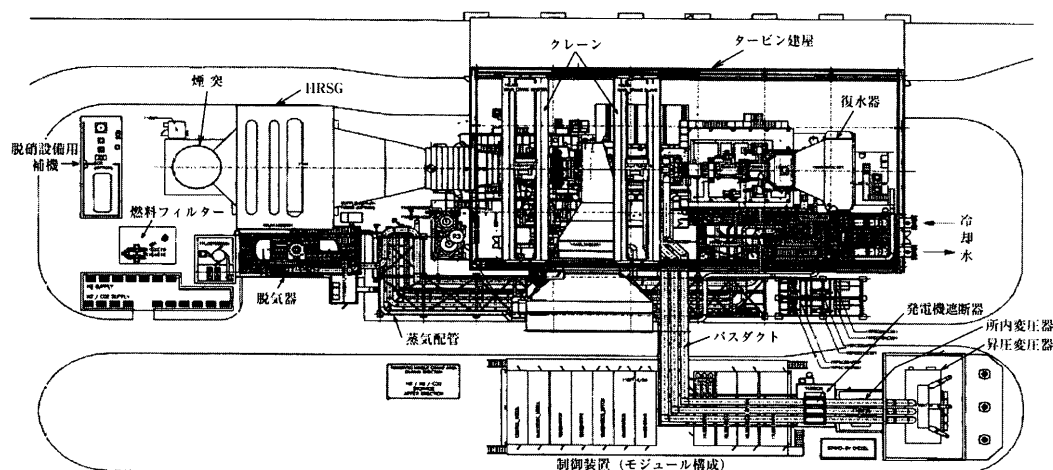


図 1 プラント全体配置図

原稿受付 2003 年 2 月 22 日

\* 1 ジャパンガスタービン株式会社

〒650-0046 神戸市中央区港島中町 2-3-4

- (1) プラントの起動時は蒸気タービンとガスタービンは SSS クラッチによって切り離されているので、ガスタービンは発電機をモータとして起動され、単独で負荷運転を行うことができる。ガスタービンからの排ガスによって HRSG が蒸気を発生するようになると、蒸気タービンを起動することができる。(補助ボイラーが不要)
- (2) 蒸気タービンが、万一、トリップした場合でも SSS クラッチの働きにより、蒸気タービンは自動的に切り離され、ガスタービンは単独運転を継続できる。
- (3) フロアマウント方式の採用により、テーブルマウント方式に比べて基礎費用を低減できる。また、メンテナンスもしやすい。

コンバインドシステムの性能を表 1 に示す。

KA 26-1 は 50 Hz 地域用ガスタービン GT 26 を使用した一軸型コンバインドシステムである。GT 24 は 60 Hz 地域用であり、GT 26 とは相似設計機である。

### 2.2.2 蒸気サイクル

蒸気サイクルは三圧再熱である。HRSG からの蒸気は全量復水器にバイパスできるようにしており、起動・停止操作が容易で、プラントの運用性が高い。

標準的蒸気サイクルを図 3 に示す。また、蒸気サイクルの主要目を表 2 に示す。

### 2.2.3 タービン建屋内の配置

タービン建屋内の配置を図 4 に示す。タービン建屋内には前述したように、パワートレンと称するガスタービン、

発電機、蒸気タービンが一軸に並べられている。また、タービン、発電機に付属する機器がパワートレンの側面に配置され、その反対側は開放検査時開放部品のメンテナンススペースとして使用できるようにしている。また、蒸気復水器は低压蒸気タービンの排気側に軸方向に配置される。

発電機と発電機用補機を据え付けている基礎台はパワートレン軸の軸直角方向に移動可能な構造としている。発電機がガスタービンと蒸気タービンの間に配置されているため、発電機ロータの引き抜きが必要な場合は可動基礎台、発電機および付属補機を一緒にパワートレン軸に対し直角方向にスライドできる。この構造により、発電機バスダクトと付属機器の配管・配線を取り外すだけで、ガスタービンと蒸気タービンを撤去することなく、タービン建屋内の常設天井クレーンによって、発電機ロータを引き抜くことができる。

### 2.2.4 電気設備

電気設備の構成についてその代表例を図 5 に示す。

プラントを起動する場合には、昇圧変圧器を介して系統電力をプラント内に取り入れ、所内変圧器からガスタービン静止起動装置に起動電力を供給する。静止起動装置によって発電機は同期電動機として作動し、ガスタービンは起動・加速される。ガスタービンが点火され、自立回転数に到達すると、静止起動装置は切り離され、ガスタービン回転速度はガスタービン制御装置によりコ

表 1 コンバインドシステム性能表

|  | KA26-1 |
|--|--------|
| 送電端出力, MW                                | 392.5  |
| 送電端効率, %<br>(LHV 基準)                     | 56.7   |
| NOx 排出量, ppmv<br>(15% O <sub>2</sub> 基準) |        |
| 脱硝設備なしの場合                                | 25 以下  |
| 脱硝設備ありの場合                                | 5 以下   |

備考：天然ガス焚き、大気条件 ISO 基準  
(15℃, 1.013bar), 湿式冷却塔方式  
の場合

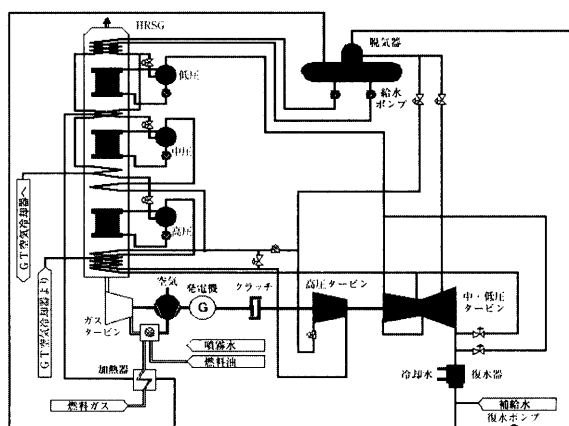


図 3 蒸気サイクル

表 2 蒸気サイクル主要目

|                  | 項目      | KA26-1    |
|------------------|---------|-----------|
| 給 水              | 脱気器圧力   | 0.2 bar   |
|                  | 脱気器給水温度 | 60℃       |
| H<br>R<br>S<br>G | 高圧蒸気圧力  | 135 bar   |
|                  | 高圧蒸気温度  | 562℃      |
|                  | 高圧蒸気量   | 85.3 kg/s |
|                  | 再熱蒸気圧力  | 28.1 bar  |
|                  | 再熱蒸気温度  | 562℃      |
|                  | 再熱蒸気量   | 95.5 kg/s |
|                  | 低圧蒸気圧力  | 4.9 bar   |
|                  | 低圧蒸気温度  | 278℃      |
|                  | 低圧蒸気量   | 9.0 kg/s  |

備考：ISO 基準におけるデータ

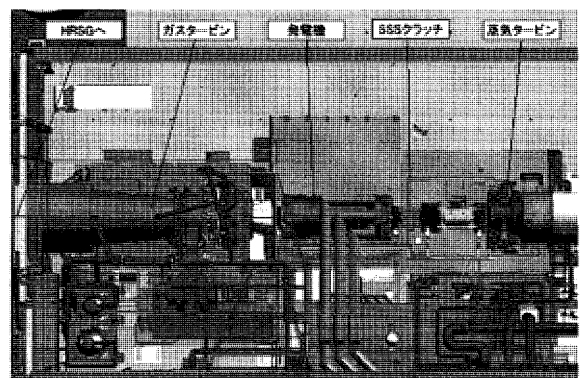


図 4 タービン建屋内配置

ントロールされる。そして同期回転速度に到達すると、遮断器の作動により、発電機は同期され、発生電力は昇圧変圧器を介して系統へ送電される。

一方、プラントを停止する場合は発電機の負荷を下げ、無負荷状態にする。その後、遮断器を開き、系統電源から切り離す。ガスタービン、蒸気タービンは停止後、冷機のためにバーリングないしはターニング運転が必要となるが、それら補機の運転に必要な電力は、昇圧変圧器、所内変圧器を介して、系統電源より取り入れる。

プラント内の交流電源が停電した場合に備え、約1時間の非常運転用バッテリー直流電源装置を装備している。

## 2.3 パワートレンの構成機器

### 2.3.1 ガスタービン<sup>(1)</sup>

溶接ロータ、アニュラー燃焼器、環境適合型 EV (Environmental) バーナなど、実証済み技術を採用しており、信頼性の高いガスタービンである。さらに、従来のガスタービンより高いタービン入口温度と二段燃焼を採用することにより高効率化を図った最新鋭ガスタービンである。

#### 1) 性能

GT 26/24 の性能を表 3 に示す。

GT 26/24 は二段燃焼構造を採用することにより、

- (1) タービン入口温度を比較的強く抑えて、高効率と高信頼性を確保、

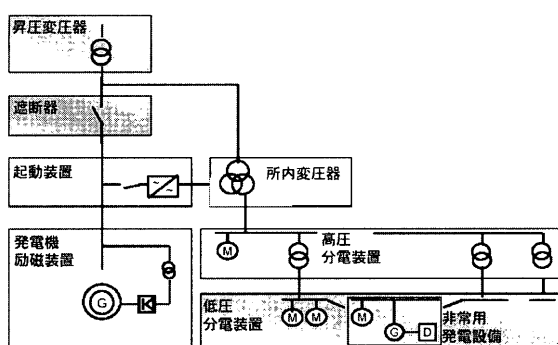


図5 電気設備の構成概念図

表3 GT 26/24 主要目表

| 項目               | 単位   | GT26             | GT24             |
|------------------|------|------------------|------------------|
| 発電端出力            | MW   | 268              | 171              |
| 発電端効率<br>(LHV基準) | %    | 37.0             | 36.5             |
| 圧縮比              | —    | 32               | 32               |
| 排ガス流量            | kg/s | 630              | 410              |
| 排ガス温度            | ℃    | 615              | 615              |
| タービン回転速度         | rpm  | 3,000            | 3,600            |
| 段数 圧縮機           | —    | 22               | 22               |
| タービン             | —    | 5                | 5                |
| 燃焼器 形式           | —    | アニュラー形           | アニュラー形           |
| 数量               | —    | 2                | 2                |
| バーナ本数(HP/LP)     | —    | 24/24            | 20/24            |
| 寸法 L×W×H         | m    | 12.3×5.0<br>×5.5 | 10.5×4.1<br>×4.6 |
| 重量               | t    | 335              | 197              |

備考：ISO基準におけるデータ

- (2) 低圧燃焼器における高温空気燃焼により安定燃焼と低 NOx 燃焼を実現、  
(3) 比出力が大きい  
等の特徴を有する。

図6に二段燃焼サイクルの T-S 線図を示す。

#### 2) 構造

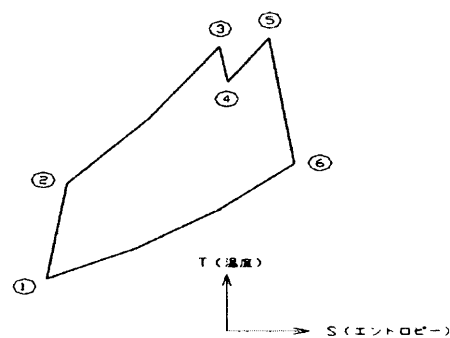
GT 26/24 の構造図を図7に示す。

ガスタービンはコールドエンドドライブで、ロータは2軸受で支持されている。

圧縮機には高性能のコントロールディフュージョン翼を採用している。入口3段静翼は可変式とし、可変静翼の角度を調整することにより100%負荷より約40%負荷までガスタービン排出 NOx 濃度と排ガス温度をほぼ一定に保つことができ、複合発電時の部分負荷効率を大幅に改善している。複合発電時の部分負荷効率を図8に示すが、従来機と比較し、50%負荷において約12%部分負荷効率は改善する。

燃焼器は高圧と低圧の二段構成である。いずれもアニュラー形で、耐熱鋼製の二重壁で構成される。燃焼壁は対流冷却であるが、フィルム冷却孔を設けていないので、冷却空気を全量予混合空気として利用し、低 NOx を可能としている。

高圧燃焼器には EV バーナ、低圧燃焼器には SEV (Sequential EV) バーナを装備している。いずれも渦流を応用した乾式予混合バーナである。EV バーナは水平2分割コーンにより構成されている。通常運転中、燃料は



① - ② = 圧縮 ② - ③ = 加熱 (HP) ③ - ④ = 膨張 (HP)  
④ - ⑤ = 加熱 (LP) ⑤ - ⑥ = 膨張 (LP)

図6 二段燃焼再熱サイクルの T-S 線図

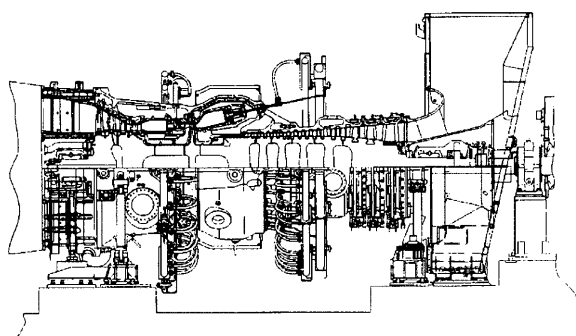


図7 二段燃焼ガスタービン断面図

コーンの稜線に沿って設けられた多数の燃料噴射孔より噴射され予混合燃焼を、また、起動時はコーンの頂点より噴射され拡散燃焼により、それぞれ安定燃焼を確保する。起動時と通常運転時の燃料はガスタービン負荷 10～15% で切り替えられる。通常運転中は起動時の燃料供給ラインを閉止するので、燃料切り替え後は完全予混合燃焼が行われる。一方、SEV バーナは二重管構造で、内側の管に燃料を、外側の管には冷却空気を供給し、バーナを保護すると共に、バーナ出口で燃料をキャリアエアと称する冷却空気で包み込み（図 9 参照）、燃焼室で安定燃焼が得られる構造としている。

SEV バーナ部に流入する燃焼用空気（高圧タービンからの排ガス）は高温であるため、燃料が投入されると、自己発火する。

低圧燃焼器での燃焼は高圧燃焼器の排ガスを使用するため、NO<sub>x</sub>を生成する酸素量が少ない、また、燃焼用空気も通常の燃焼よりはるかに高温であるため、少ない熱量で火炎温度に到達する、いわゆる、高温空気燃焼である。したがって、燃焼器内では従来の燃焼より均一な温度分布が得られ、環境汚染物質の削減に有効な燃焼が行われる。

なお、EV/SEV バーナは気体、液体いずれの燃料にも使用できる。また、いずれのバーナも燃焼器を開放することなくバーナの点検・取替が可能な構造としている。

高圧タービンは 1 段落、低圧タービンは 4 段落の構成である。高圧タービンの動静翼は空気冷却翼で、共に、シャワーヘッド冷却、対流冷却およびインピンジメント冷却を適用している。いずれも単結晶材で、TBC コーティングを施している。低圧タービンの動静翼は 1～3 段までは空気冷却翼、4 段翼は無冷却である。1 段動翼は単結晶材、2 段動翼は一方向凝固材を使用し、TBC コーティングを施している。高効率を達成するため、静翼全段と動翼 2～4 段にはシュラウドを、2 段以降の動

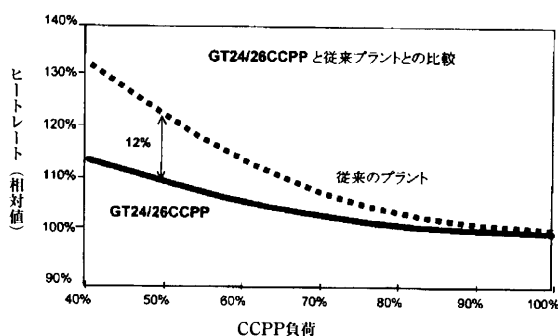


図 8 GT 26/24 CCPP 部分負荷効率

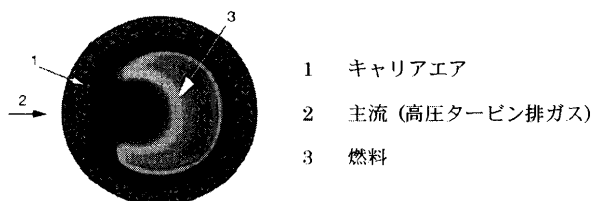


図 9 SEV バーナ出口の状態（計算による）

翼先端シールには漏洩損失軽減のためハニカムシールを採用している。

ロータはディスクおよび軸を溶接した一体ロータである。経年変化による軸心の狂いがないという利点がある。Alstom は約 60 年前から溶接ロータをガスタービンのみならず蒸気タービンにも採用しており、信頼性の高い技術である。

### 2.3.2 発電機

ガスタービンと蒸気タービンに共通の発電機として 1 基装備する。2 極、三相発電機で、KA 26-1 用は水素冷却、KA 24-1 は空気冷却を標準としている。

### 2.3.3 蒸気タービン

蒸気タービンは 2 車室軸流排気復水式タービンであり、フロアマウントである。蒸気タービンは 50～100% 負荷までスライディング圧力モードで運転される。プラント起動時、蒸気タービンは SSS クラッチにより GT 発電機と切り離されるので、全発生蒸気量をバイパスできるようにしている。

KA 26-1 用の蒸気タービンの断面図と主要目を図 10 と表 4 に示す。

### 2.3.4 SSS (Synchro-Self-Shifting) クラッチ

SSS クラッチは発電機と蒸気タービンの間で、蒸気タービンの高圧側軸受台内に装備されている。ガスタービン起動時、SSS クラッチによって蒸気タービンは GT 発電機と切り離されているが、ガスタービン運転後、蒸気タービンに十分な蒸気量が投入される（蒸気タービン

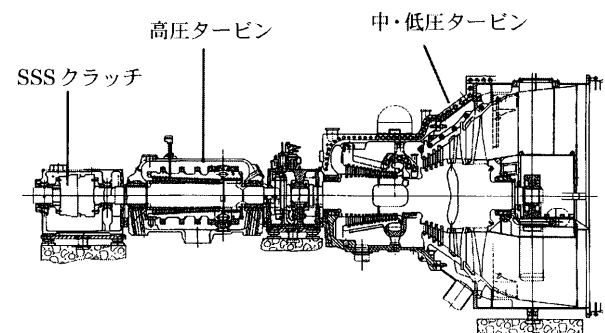


図 10 蒸気タービン断面図

表 4 蒸気タービン主要目

| 項目     | 単位  | 要目     |
|--------|-----|--------|
| 高圧タービン | -   | 反動タービン |
| 段数     | -   | 26     |
| 蒸気圧力   | bar | 132    |
| 蒸気温度   | ℃   | 560    |
| 中圧タービン | -   | 反動タービン |
| 段数     | -   | 15     |
| 蒸気圧力   | bar | 27.4   |
| 蒸気温度   | ℃   | 561    |
| 低圧タービン | -   | 反動タービン |
| 段数     | -   | 6      |
| 蒸気圧力   | bar | 4.6    |
| 蒸気温度   | ℃   | 277    |

軸の回転速度がガスタービン軸の回転速度を超えるような状態になる)と同時に、SSS クラッチは自動的に嵌合し、発電機に動力を伝達する。SSS クラッチは嵌合後ギアカップリングと同様の結合状態となり、摺動部分がないため、信頼性の高い運転を確保できる。

### 2.3.5 HRSG

三圧再熱自然循環式 HRSG である。脱硝装置は HRSG の蒸発管群の間に設置されている。HRSG の外形を図 11 に示す。

### 2.3.6 プラントの運転モード

本コンバインドシステムは三つの運転モードを装備している。

#### ① 全負荷モード

大気条件に応じた最大出力でプラントは運転される。このモードでは、プラント出力はガスタービン入口温度を一定に抑えるように制御、運転されるが、この状態で、ガスタービン排ガス温度制限装置、高圧/再熱蒸気温度制限装置が作動した場合は、出力は制限される。

#### ② 部分負荷モード

あらかじめ所要負荷を負荷分配装置に設定することにより、ガスタービン負荷制御装置が所要負荷を維持するように働く。

#### ③ 並列運転モード

ドループ特性により 40 から 95% 負荷まで系統電源との並列運転を行うことができる。負荷変更速度は KA 26-1 の場合最大 18 MW/min である。

### 2.3.7 起動・停止操作

起動時の蒸気タービンロータ温度により、ホットスタート、ウォームスタート、コールドスタートの三通り

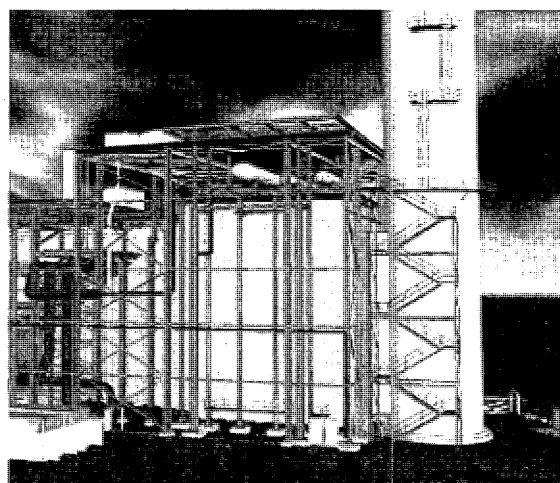


図 11 HRSG 外形図

表 5 プラント起動時間

| 起動モード                  | 起動時間    |
|------------------------|---------|
| ホットスタート(停止後約 8 時間以内)   | 約 45 分  |
| ウォームスタート(停止後約 60 時間以内) | 約 115 分 |
| コールドスタート(停止後約 120 時間)  | 約 145 分 |

の起動モードがある。いずれのモードにおいてもガスタービン起動時間は変わらず、HRSG もガスタービンの負荷取り時間を制約することはない。したがって、プラント起動時間は主に蒸気タービンの負荷取り時間に支配される。蒸気タービンの熱応力を軽減するため、蒸気タービンのロータ温度がある設定値に到達するまではガスタービン負荷は 25% 以下に制限するように働くが、ロータ温度がある設定値に到達すると、それ以降、ガスタービンに一気に負荷をかけることができる。ホット・ウォーム・コールドスタート時の起動時間を表 5 に示す。

停止操作は起動操作と逆の手順で行われる。プラント停止時間は通常約 50 分である。

### 2.3.8 特殊運転モード

特殊運転モードとして下記のものがある。

#### ① 単独運転モード

系統電源からプラントが切り離された場合、蒸気タービンはトリップする。その場合、SSS クラッチにより、蒸気タービンは単独で減速し、停止するが、一方、ガスタービンは低負荷で運転を継続し、本プラントの運転継続に必要な補機器に電力を供給する。この状態から、運転員の判断により、プラントを再度全負荷まで移行することも、停止することも可能である。

#### ② 蒸気タービンバイパス運転

万一、蒸気タービンが運転できない場合でも、ガスタービンと HRSG を運転することは可能である。その場合、HRSG で発生した蒸気は全量バイパスラインより復水器に排出される。本運転モードは熱効率が悪いので、緊急時にのみ使用される。

#### ③ ロータのターニングおよびバーリング運転モード

ガスタービンロータと蒸気タービンロータにはそれぞれバーリング装置とターニング装置が装備されている。プラント停止後、ロータを均一に冷却させるため、自動的に、この運転モードに移行する。

## 3. あとがき

二段燃焼方式の最新鋭ガスタービンは 1995 年に相似設計機である初号機 (GT 24) を納入し、それ以来、現在までに GT 24 は 51 機、GT 26 は 24 機、合計 75 機が営業運転または試運転に入っている。その間、実運転を通して初期トラブルはもとより、種々不具合を経験したが、安定運転を最優先に、改善・改良を加えてきた。

その結果、ガスタービンの総運転時間は 530,000 時間を越え、総起動回数も 18,000 回に達した。また、最長運転機は 36,000 時間を越え、信頼性の高い安定した運転が得られるようになってきている。今後はプラントのさらなる性能アップへの取り組みが予定されている。

## 参考文献

- (1) 加藤誠, 福原広嗣, 沖園信博, 伊藤健之, 池田忠司, 吉元譲, 小池淳一, 火力原子力発電, 53-10 (2002 年 10 月), p 144

特集：ガスタービン利用高効率エネルギーシステムの動向

## シーメンス製ガスタービンとコンバインドサイクル発電設備

門脇 徹<sup>\*1</sup>

KADOWAKI Toru

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル，一軸式構成，燃焼振動，性能，  
Gas turbine, Combined cycle, Single shaft configuration, humming, performance

## 1. まえがき

コンバインドサイクル発電方式は，その発電効率の高さ，環境負荷の低さ等に利点があり，これらが近年の市場の要求に一致していることから広く採用されるようになった。特に1990年代に入ってから，1300℃級，更には1400℃級の高性能ガスタービンが開発され，これに合わせた蒸気条件の上昇とサイクルの最適化によって，コンバインドサイクルの性能は飛躍的に向上した。

本稿では，シーメンス社のガスタービンを採用したコンバインドサイクルの概要を述べると共に，最新型ガスタービンを採用した一軸式コンバインドサイクルについて紹介する。また，ガスタービンを中心に，コンバインドサイクルの性能向上に影響を及ぼすパラメータの評価結果を紹介する。

## 2. シーメンス製ガスタービンによる

## コンバインドサイクルの概要

シーメンス製ガスタービンを使用したコンバインドサイクルは，各ガスタービンのラインアップに対して，出力に応じたコンバインドサイクルモデルが系列化され，それらが標準化されている<sup>(1)</sup>。

表1にシーメンスの第二世代機（1100℃級，V94.2およびV84.2形機）を使ったコンバインドサイクルの性能諸元を示す<sup>(2)</sup>。これらの2形機では排ガス温度がそ

表1 2形機及びコンバインドサイクルの性能諸元

| GTモデル                 | V94.2     | V84.2     |
|-----------------------|-----------|-----------|
| 出力                    | 159 MW    | 109 MW    |
| 周波数                   | 50 Hz     | 60 Hz     |
| 効率                    | 34.5 %    | 34.0 %    |
| 排ガス量                  | 519 kg/s  | 360 kg/s  |
| 排ガス温度                 | 540 °C    | 544 °C    |
| C/Cモデル <sup>(1)</sup> | GUD1.94.2 | GUD1.84.2 |
| 送電端出力                 | 238 MW    | 163 MW    |
| 送電端効率(LHV)            | 52.1 %    | 51.5 %    |
| C/Cモデル <sup>(2)</sup> | GUD2.94.2 | GUD2.84.2 |
| 送電端出力                 | 478 MW    | 329 MW    |
| 送電端効率(LHV)            | 52.3 %    | 51.9 %    |

性能はISO大気条件，複圧非再熱，真空0.04barの値

\*1)は別軸，\*2)は多軸

原稿受付 2003年4月3日

\*1 富士電機株式会社 富士・シーメンスエネルギー推進室  
〒210-9530 川崎市川崎区田辺新田1-1

れほど高くないので，排熱回収の経済性の観点からボトムリングサイクルは複圧式としている。また，軸構成については，多軸式のみが系列化されている。

表2には最新型機である3A形機（1400℃超級，V94.3AおよびV84.3A形機）での性能諸元を示す。3A形機の導入に伴うコンバインドサイクルの基本思想の一つは，高効率化とプロセスの簡略化，運用性の向上などにあった<sup>(3)</sup>。そのため，排熱回収は三圧再熱式とし，ガスタービンの高性能化と合わせて，従来機に比べ性能が飛躍的に向上している。軸構成については，プラントの系統構成と運用の簡素化や信頼性の向上などを指向して，一軸式を標準化しラインナップに加えた。

標準設計された一軸式コンバインドサイクル発電設備の概略系統図，配置図を図1，2に示す。パワートレインは，ガスタービン-発電機-蒸気タービンの順に配置され，次の特長を有している<sup>(4)</sup>。

## (1) パワートレインの床置き配置を採用

ガスタービンおよび蒸気タービンを共に軸流排気方式とすることで，パワートレインを床置き配置としている。大型のタービン架台が不用となると共に，タービン建屋は1階構造とでき，従来の建屋構造に較べて土木建築費の大幅な低減を図っている。

## (2) クラッチの採用

発電機と蒸気タービンの間には，自動着脱の可能なクラッチを設置している。クラッチが伸び差を吸収するので，ガスタービンおよび蒸気タービンは，伸び差やスラスト荷重に対して独立した設計が可能となる。また，ガ

表2 3A形機及びコンバインドサイクルの性能諸元

| GTモデル                 | V94.3A      | V84.3A      |
|-----------------------|-------------|-------------|
| 出力                    | 266 MW      | 180 MW      |
| 周波数                   | 50 Hz       | 60 Hz       |
| 効率                    | 38.6 %      | 38.5 %      |
| 排ガス量                  | 656 kg/s    | 456 kg/s    |
| 排ガス温度                 | 584 °C      | 582 °C      |
| C/Cモデル <sup>(1)</sup> | GUD1S.94.3A | GUD1S.84.3A |
| 送電端出力                 | 392 MW      | 260 MW      |
| 送電端効率(LHV)            | 57.4 %      | 57.1 %      |
| C/Cモデル <sup>(2)</sup> | GUD2.94.3A  | GUD2.84.3A  |
| 送電端出力                 | 784 MW      | 532 MW      |
| 送電端効率(LHV)            | 57.3 %      | 56.8 %      |

性能はISO大気条件，三圧再熱，真空0.04barの値

\*1)は一軸，\*2)は多軸



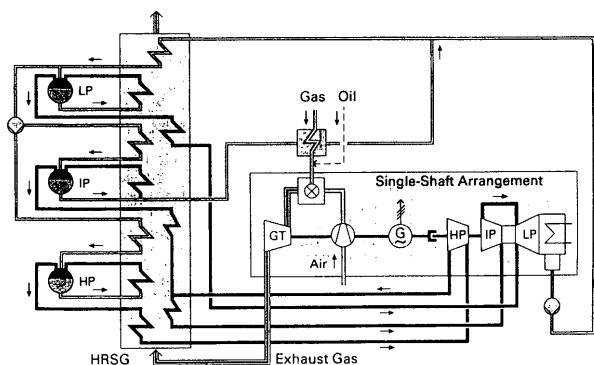


図1 三圧再熱式の概略図（一軸式）

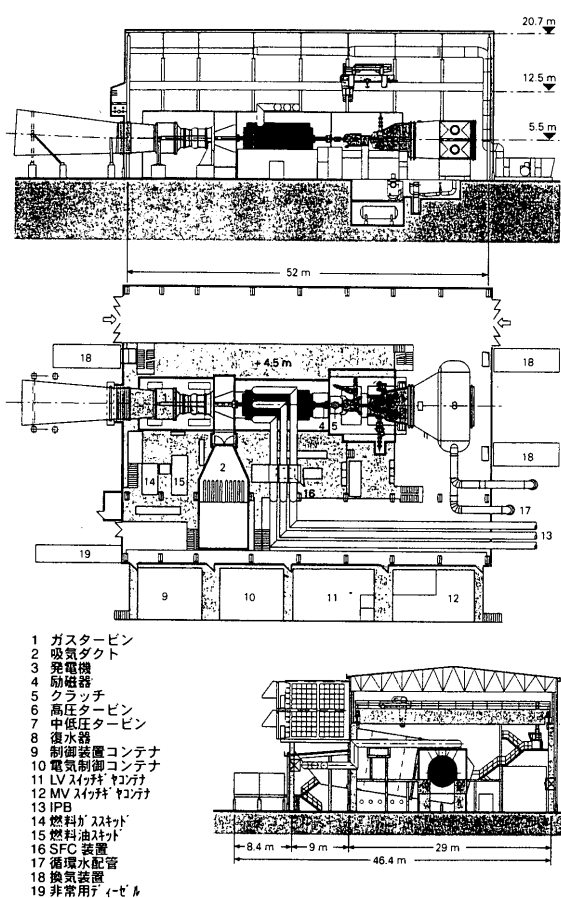


図2 一軸式コンバインドサイクルの配置図（V94.3A）

スタービンの起動／停止が蒸気タービンとは無関係に行えるので、蒸気タービンの空転時に必要となる冷却蒸気が不要となり、起動損失と設備費が低減できる。

### (3) サイリスタ起動方式の踏襲

ガスタービン起動装置は、SFC（静止形周波数変換装置）により系統からの電力を任意な周波数に変換して発電機に供給し、発電機を電動機として起動する方式を踏襲している。起動用電動機やトルクコンバータが不要となるので、全軸長を短くして全体配置をシンプル化している。SFCは電気式であることから保守も容易であり、複数軸のプラントではSFCを共用とできる利点もある。

### (4) 計装制御システムおよび電気設備

計装制御システムは、シーメンス社製の発電プラント

用プロセス制御システム「テレパーム XP」を採用している。テレパーム XP の特徴としては、国際水準の基本ソフトウェアとオープンコミュニケーションを採用している、ソフトウェア、ハードウェアの高度なモジュール化と柔軟な拡張性を有している、統一されたマンマシンインターフェースによる操作、監視、管理が可能、などが挙げられる。

電気制御装置はPCC（Power Control Center）とよばれるコンテナ式が標準として採用されており、建屋を必要としない。これにより土木建築費を低減すると共に、工場で配線、組立、試験を完了したコンテナを出荷することで、現地での据付期間、試運転期間を短縮している。

## 3. コンバインドサイクルの構成機器

最新型ガスタービンである3A形機を使用した一軸式コンバインドサイクルの主要構成機器について、以下に説明する。

### 3.1 ガスタービン設備

#### 3.1.1 3A形ガスタービンの特徴<sup>(4), (5)</sup>

3A形ガスタービンの鳥瞰図を図3に示す。シーメンス社の全てのガスタービンに共通な特徴は、実証済みの技術をベースにしていること、および最新技術を導入する際には、事前の工場全負荷試験により導入技術の徹底的な検証と改良を繰り返し、新型機の高信頼性を確保していることである。3A形ガスタービンでもこの考えが踏襲されており、実証済みの技術としては次の構造が採用されている。

- (1) 半径方向に切られた鋸歯状のハースセレーションを介して1本のセンタータイボルトで結合された軽量・高剛性のディスク型ロータ。
- (2) 高温部に軸受を持たない二軸受支持方式。
- (3) 保守点検が容易な水平二分割ケーシング構造。

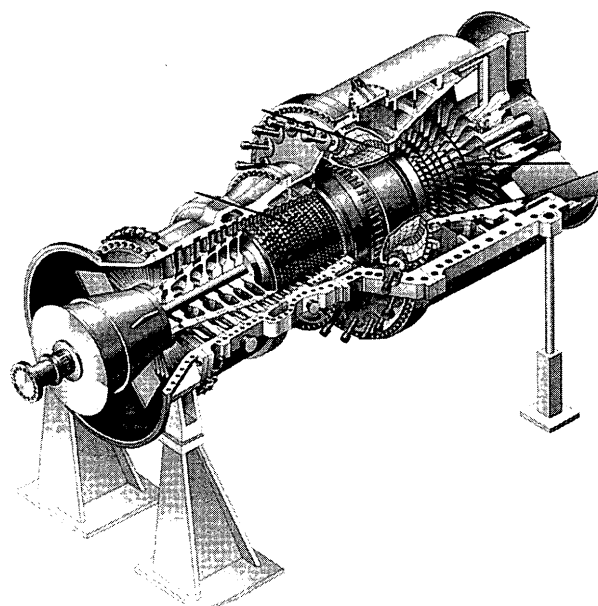


図3 3A形ガスタービン鳥瞰図

- (4) 圧縮機側に発電機を配置するコールドエンドドライブ方式。
- (5) コンバインドサイクルに適した軸流排気。
- (6) 大型燃焼室内でのマルチバーナ燃焼。
- (7) 気液両燃料での乾式低  $\text{NO}_x$  予混合燃焼が可能なハイブリッドバーナ。

3A 形ガスタービンでは上記に加え、さらなる高効率化を目指して、航空機エンジンの最先端技術を導入し、圧縮機およびタービン翼列は三次元流力設計されている。また、タービン翼には単結晶 (SC) 翼材、遮熱コーティング (TBC) や高性能フィルム冷却を導入し、これらの最先端の材料技術や冷却技術の改良により高温・高効率化を実現している。

3A 形機では、シーメンスの伝統的なサイロ型燃焼器から発展したアニュラ型燃焼器を採用することにより、冷却を必要とする表面積を小さくした。燃焼室ケーシングは多数のライナ (セラミックタイル) を内貼りした二重壁構造である。これらにより燃焼室の冷却に必要な空気量を減らすことで、余った冷却空気をタービン翼の冷却と燃焼用空気として配分することが可能となり、入口温度の高温化への対処と火炎温度低下による低  $\text{NO}_x$  化を実現している。

### 3.1.2 3A 形ガスタービンの改良<sup>(6)</sup>

上記の最新技術を採用した 3A 形機だが、導入初期に生じた問題に対して次のような改良を実施し、信頼性を向上させている。

#### (1) 燃焼振動対策

燃焼振動は理論的手法だけでは解決できないため、新型ガスタービンの開発時にはよく起きる問題である。3A 形機でも当初に燃焼振動を経験したが、幾つかの改良を実施することによりこれを解決した。

燃焼振動は、火炎の不安定によって生じる音響系との共鳴が原因であり、高温ガスタービンでは特に顕著である。3A 形機のアニュラ型燃焼器について言えば、バーナ出口に発生する環状の渦が共振の原因であった (図 4 左側)。即ち、バーナ出口において、バーナノズルから噴射される燃料と高温の燃焼ガスが環状渦の作用によって混合することにより、混合気は短時間での自発火を繰り返して圧力変動を生じる。この圧力変動の繰り返しにより機器の振動が誘発されているというものである。

この解決策としてバーナ設計を変更し、バーナ出口に円筒状の延長部を追加した (CBO: Cylindrical Burner Outlet 図 4 右側)。これにより環状渦による可燃性混合気の形成が抑えられるので、自発火とそれに伴う音響系の共鳴はもはや発生しなくなった。

#### (2) セラミックタイル保持機能の強化

当初の 3A 形機では、燃焼室内に貼りされているライナは金属製ヒートシールドであったが、ガスタービン性能向上のため最新機はセラミックタイルへと変更された。

セラミックタイル製のライナ自体は、シーメンスの従

来機から採用されている十分な実績を有するものである。しかし、運転条件の厳しい 3A 形機では、タイルの保持力が不足する問題を経験した。

この解決手段として、タイル保持具の設計変更によりタイル保持力を強化した。これにより、全運転領域でタイルの浮き上がりに対して十分な裕度を確保した。

### 3.2 蒸気タービン設備

蒸気タービン設備は、軸流排気式蒸気タービンと軸流復水器の採用で、高効率かつ経済的に優れた設備としていいる。各プラント型式と排気圧力に応じて低压翼の選定と型式の標準化が行われている。三圧再熱式に採用される蒸気タービンの外形図を図 5 に示す。

本蒸気タービンは、高压部はつば型構造、中低压部はケーシング 2 つ割の軸流排気構造としている。コンバインドサイクル用蒸気タービンは、高压部が高温高压小流量、中圧部が高温中圧大流量といった特性があるので、高压部と中・低压部ケーシングを分離することにより、蒸気条件に応じた最適な翼列設計を可能としている。中

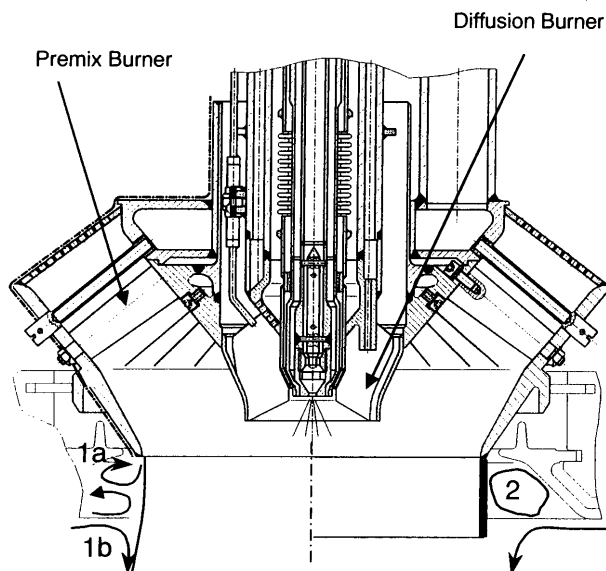


図 4 燃焼振動の発生 (左側) と抑制 (右側) 原理

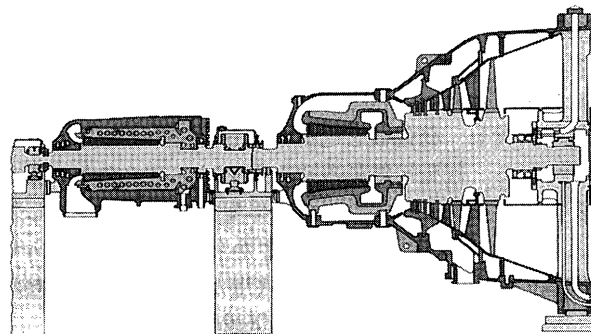


図 5 三圧再熱式軸流排気蒸気タービン外形図

低圧部に採用している軸流排気タービンは、排気損失がより低い長所がある。

### 3.3 発電機設備

発電機は、発電機容量に応じて空気冷却式と水素冷却式によって標準化している。一軸式コンバインドサイクルの大型発電機には、効率重視の水素冷却式が採用されている。

## 4. コンバインドサイクルの性能向上

ガスタービンおよびコンバインドサイクルの性能向上に与える影響量が大きい項目について、シーメンスのガスタービンモデル、蒸気タービンモデルおよびサイクル計算プログラムを用いて行った評価結果を、4.1 から 4.5 に紹介する<sup>(7)</sup>。

なお、本章で言うタービン入口温度 (TIT) は ISO 温度 (比較算定タービン入口温度) であり、燃料入熱と圧縮機空気量から決まる熱力学的な温度である。2 形機 (1100℃ 級, 圧力比約 11), 3 形機 (1300℃ 級, 圧力比約 16) の TIT はそれぞれ約 1050℃, 約 1150℃ であり, 3 A 形機 (1400℃ 超級, 圧力比約 17) のそれは 1250℃ に近づきつつある。ISO 温度は、単に第一段静翼前温度を上昇させてもタービン冷却空気量の増加も多い場合には上昇しないため、ISO 温度上昇のためには、冷却技術と材料技術の向上が不可欠である。

### 4.1 タービン入口温度 (TIT) および圧力比の上昇

ガスタービンの効率および出力に最も影響を及ぼすのが、圧力比と TIT である。

圧力比を上昇していくと、入熱に対する放出熱の割合が低下していくため、ガスタービンサイクルの熱効率は向上する。但し、実際のガスタービンにおける圧縮や膨張過程は不可逆過程であるため、ガスタービン効率はある圧力比において最大値をとり、それ以上の圧力比とす

ると効率は低下する。TIT が上昇すると、タービンの膨張過程で利用できる断熱熱落差が増加するのでタービン部出力は増加する。よって、TIT の上昇に伴いガスタービン出力、効率が上昇する (図 6)。

一方ボトムリングサイクルにおいては、排ガス温度が高い場合に蒸気条件が高くなり効率が上昇するので、コンバインドサイクル効率は、ガスタービンが最高効率となる圧力比よりも低いところで最高となる。最新形ガスタービンではこの圧力比は 16~22 程度である (図 7)。なお、蒸気温度を高くした場合は、これよりも小さい圧力比で高い排ガス温度が得られるので、コンバインドサイクル効率が最高となる圧力比はより小さくなる。

### 4.2 タービン効率および圧縮機効率の向上 (図 8)

ガスタービンの有効出力を 1 とすると、通常、タービ

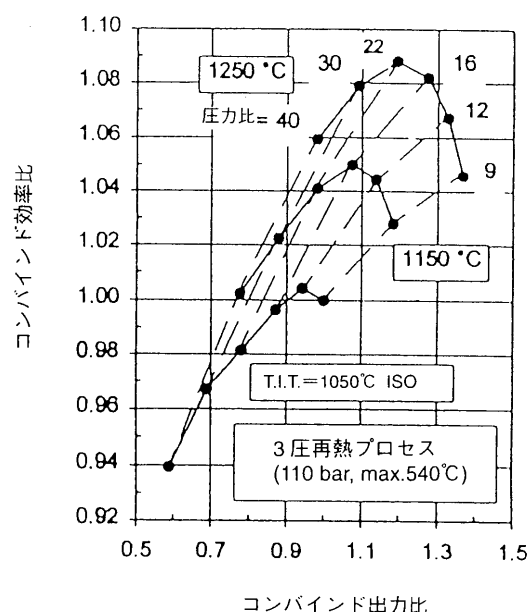


図 7 圧力比と TIT の影響 (コンバインドサイクル)

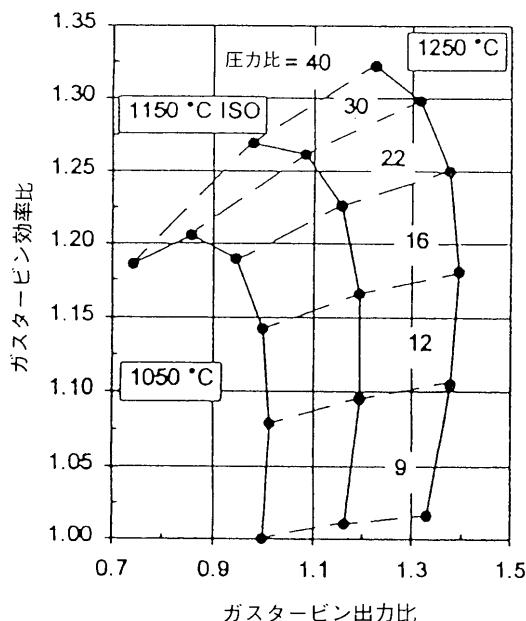


図 6 圧力比と TIT の影響 (ガスタービン)

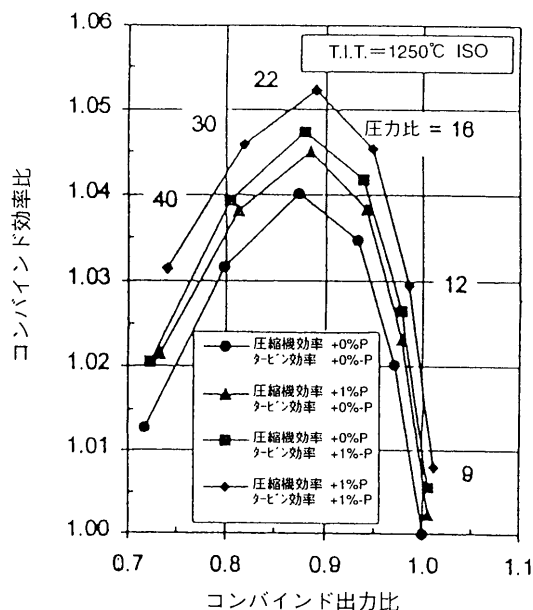


図 8 圧縮機/タービン効率の影響

ン部の出力はほぼ2, 圧縮機の動力はほぼ1である。よって, ガスタービン効率については, タービン効率の向上の方が効果は大きい。但し, 圧力比が増大していくとタービン部出力/圧縮機動力の比が小さくなるため, 圧縮機効率向上の重要性が増す。

これらによるコンバインドサイクル効率の向上量は小さく, ガスタービン効率向上の半分以下である。

タービン効率および圧縮機効率は, 翼効率の向上と隙間漏れ損失の低減によって得られる。

### 4.3 燃料の予熱

排熱回収ボイラへの給水で燃料を予熱すれば, ガスタービンの排ガスエネルギーを燃料のエネルギーとして

回収することができる。これにより, 燃料量が低減されるので, ガスタービン, およびコンバインドサイクル効率が向上する (図9)。燃料予熱は経済的な効率向上策である。

### 4.4 排熱利用の最適化

多重圧化により排ガスと給水との温度差を減少させ, 排熱回収率を向上すれば, ボトムリングサイクルの効率を向上することができる。また, 蒸気の再熱の導入により, 蒸気タービンへの供給エネルギーが上昇するので, 蒸気タービンプロセスの効率は向上する (図10)。

高効率コンバインドサイクルプラントでは, 三圧再熱が一般的に採用されている。

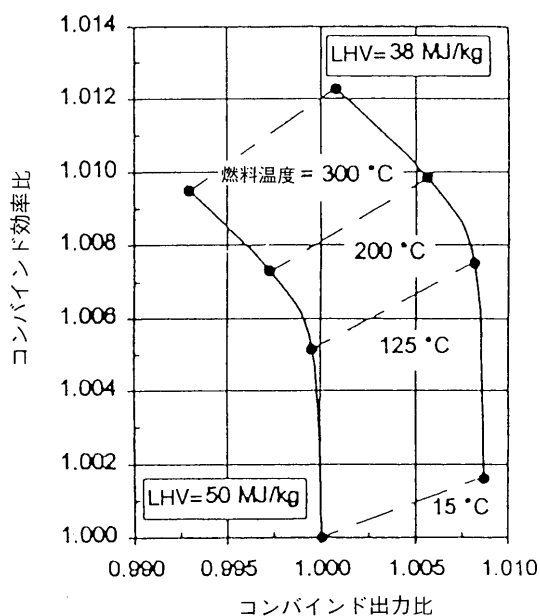


図9 燃料予熱の影響

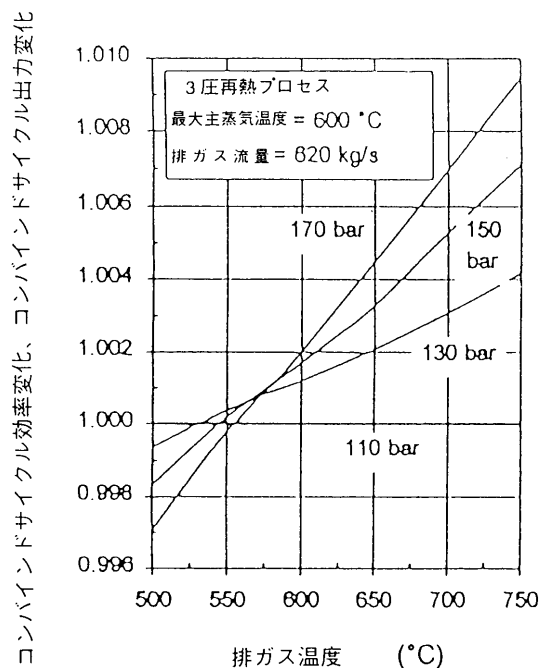


図11 主蒸気圧力の影響

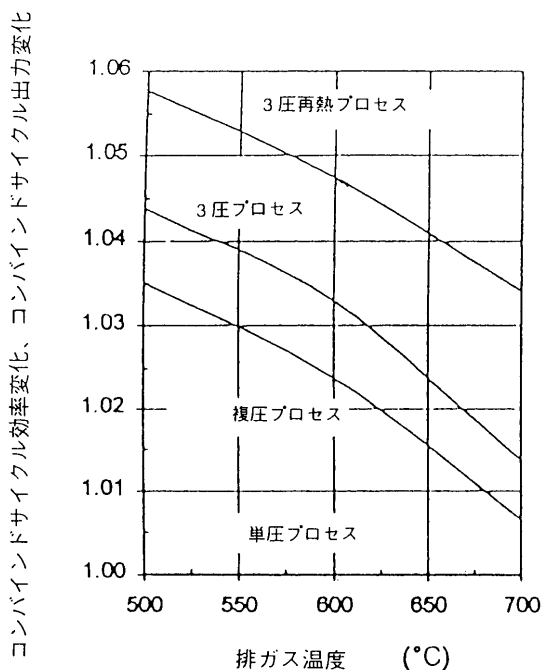


図10 多重圧化の影響

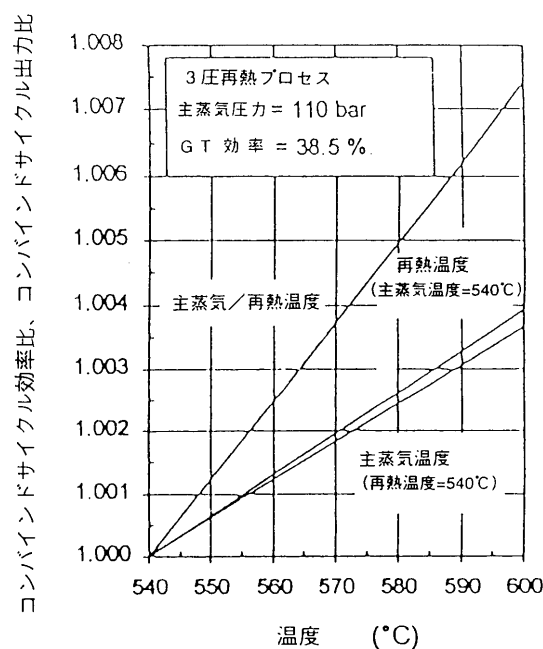


図12 主蒸気/再熱温度の影響

#### 4.5 主蒸気条件の上昇

主蒸気圧力の上昇により、蒸発温度は上昇し、蒸発エンタルピは低下するので、高温熱の利用度は向上し、排熱回収ボイラ内の温度差は低下する。圧力上昇に伴い、蒸気の体積流量が減少するので、蒸気タービンの線図効率は低下する（図 11, 12）。

コンバインドサイクルにとって最適な主蒸気温度は、ガスタービンの排熱温度と共に上昇する。排熱回収ボイラ入口ガス温度が 550℃ から 575℃ の場合は、熱力学および経済的観点から、最適な主蒸気圧力は、三圧再熱の場合で 110 bar と考えられる。排ガス温度が 600℃ となった場合は、最適な主蒸気圧力は 130 から 150 bar 程度と考えられる。

#### 5. 運用実績

3 A 形機の納入実績は、建設中のものも含めると 140 台を超え、用途としては単純サイクル、一軸コンバインドサイクル、多軸コンバインドサイクル、リパワリング、淡水化コンバインドサイクルがある。その内、80 台を

超える機械が運転を開始しており、これらの運転時間の合計は、80 万時間を超えている（2003 年 1 月現在）。

表 3 に 3 A 形機を採用したコンバインドサイクルの例として、マインツピースバーデン発電所（ドイツ）の概要を示す<sup>(8)</sup>。ガスタービンには、最新型の V 94.3 A が採用されている。蒸気タービンは、プロセス抽気や地域熱併給を考慮して、前述の 2 ケーシング構造ではなく、高圧・中圧・低圧ケーシングの 3 ケーシング 9 構成が採用されている。そのためプラント形式は 1 on 1 の別軸式コンバインドサイクルとなっている。コンバインド出力は 400 MW 級であり、58% 以上の高効率に加え、NOx の実測値は 50 mg/m<sup>3</sup>（約 21 ppm, 16% O<sub>2</sub>）以下と良好で、高効率と低 NOx が実証されている。

#### 6. 今後の展望

ガスタービンの開発やコンバインドサイクルの改善は、市場からの需要に応じて行われていくものである。成熟市場といわれる電力分野だが、高性能化や環境負荷の低減、信頼性の向上、運用の柔軟性、ライフサイクルコストの低減など、追求すべき課題は少なくはない。これらの要求を満足すべく、今後のガスタービンやボトムリングサイクルの開発、各単体機器の開発やシステムの最適化が行われ、近い将来には 60%（LHV）以上の熱効率が達成され则认为る。

表 3 マインツピースバーデン発電所の概要

| プラント形式  |      | 別軸式コンバインドサイクル                                     |
|---------|------|---|
| ガスタービン  | 型式   | V94.3A 形  |
|         | 台数   | 1 台   |
|         | 燃料   | 天然ガス（バックアップ：軽質油）                                  |
| 蒸気タービン  | 型式   | 三重圧再熱復水式、3 ケーシング構造                                |
|         | 台数   | 1 台   |
| 排熱回収ボイラ | 型式   | 三重圧再熱 自然循環式                                       |
|         | 台数   | 1 台   |
| GT 用発電機 | 型式   | 水素冷却式   |
|         | 台数   | 1 台   |
|         | 容量   | 330MVA  |
| ST 用発電機 | 型式   | 空気冷却式   |
|         | 台数   | 1 台   |
|         | 容量   | 200MVA  |
| 窒素酸化物   | 低減方式 | 乾式予混合燃焼   |
|         | 排出量  | 50mg/m <sup>3</sup> （約 21ppm, 16%O <sub>2</sub> ） |

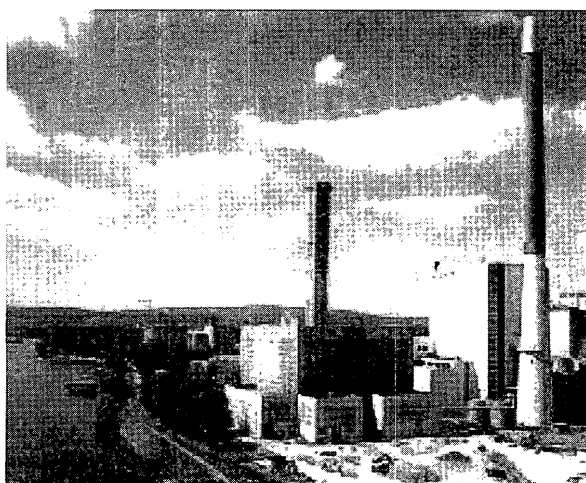


図 13 マインツピースバーデン発電所外観

#### 参考文献

- (1) 山形通史, 武田淳一郎, 山本隆夫, IPP 向けコンバインドサイクル発電設備, 富士時報, vol.73, 2000, p.639
- (2) Balling, L., Joyce, J. S., Rukes, B., The New Generation of Advanced GUD Combined-Cycle Blocks, Power-Gen Europe, Amsterdam May 1995
- (3) Balling, L., Frankle, M., Wolt, E., Feldmueller, A., Operating Experience with the Latest Combined Cycle Technology using Advanced Gas Turbines, Power-Gen Asia, Singapore September 1997
- (4) 明甌市郎, シーメンスの最新型コンバインドサイクルプラント, 日本ガスタービン学会誌, Vol.27 No.3, 1999, p.146
- (5) 吉川修平, 山本隆夫, 富士-シーメンスガスタービン, 火力原子力発電, Vol.46 No.10, 1995 年 10 月, p.161
- (6) Becker, B., 3 A Problems and Solutions, Modern Power Systems, September 2000, p.39
- (7) Kail, C., Rukes, B., Fortschrittliche Gas- und Dampfturbinenprozesse zur Wirkungsgrad- und Leistungssteigerung bei GUD-Kraftwerken, VDI-Berichte Nr. 1182, 1995
- (8) Roberto Chellini, Operating Experience at Mainz-Wiesbaden, Diesel & Turbine Worldwide, July-August 2001, p.60

特集：ガスタービン利用高効率エネルギーシステムの動向

## 航転型ガスタービン LM 6000 を利用した コンバインドサイクル発電設備

佐藤 敏明<sup>\*1</sup>  
SATO Toshiaki

須貝 晃<sup>\*1</sup>  
SUGAI Akira

滝谷 浩<sup>\*1</sup>  
TAKIYA Hiroshi

キーワード：ガスタービン，LM 6000，航転型，高効率，コンバインドサイクル，発電設備

### 1. 緒言

近年，航空転用型ガスタービン（航転型ガスタービン）を使用した発電プラント（特にコージェネレーションシステム，コンバインドサイクルシステム）が国内外において多く設置されている。当社は，エンジン単機出力 1 MW から 50 MW までの航転型ガスタービンを使用した発電プラントを製品として取り扱っており，これまで数多くの実績を蓄積してきている。

本稿では，その中で最新型の出力 45 MW 級 LM 6000 ガスタービンを採用したコンバインドサイクルプラントについて，実用プラントへの適用例を交えて概説する。

### 2. 航転型 LM 6000 PC/PD ガスタービン

#### 2.1 航転型ガスタービンの特長

LM 6000 は航空機エンジンを母体とする航転型ガスタービンである。航転型ガスタービンは一般に次の特長を持っている。

##### (1) 高効率

エンジン単体での出力軸端熱効率が高い。LM 6000 の場合 42% 以上の効率を持つ。

##### (2) 軽量・コンパクト

航空機エンジン用として開発されているので，重構造型一般産業用ガスタービンと比較して，徹底的に軽量化が図られている。本稿で紹介する LM 6000 PC は総重量 7.8 t，全長 4.9 m，LM 6000 PD は総重量 8.9 t，全長 4.9 m と極めて軽量かつコンパクトである。

##### (3) 保守の容易性

モジュール単位での整備と換装が可能であるため，作業が迅速にできる。このことはオーバーホール時の停止期間を短くすることに寄与する。

##### (4) 急速起動及び停止

エンジン自体が薄肉構造なので，急速起動及び停止時の熱衝撃に強い。起動指令から 10 分程度で全負荷運転が可能である。

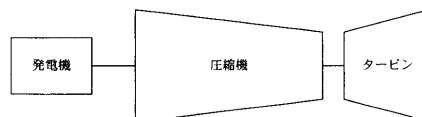
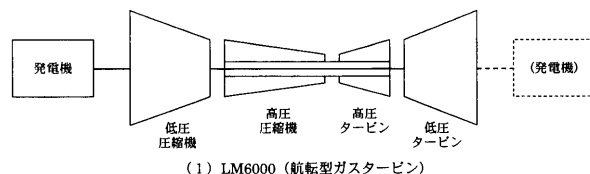
#### 2.2 LM 6000 ガスタービン

LM 6000 は米国 General Electric 社（以下 GE とする）製 45 MW 級ガスタービンで，航空機用 CF 6-80 C 2 ターボファンエンジンを産業用に転用した，現在実用化されているガスタービンの中では，単機最高効率の機種のひとつである。航空機用 CF 6 系列エンジンの産業用への転用は，25 MW 級 LM 2500 (CF 6-6)，35～50 MW 級 LM 5000 (CF 6-50) が既に多くのプラントに実用化されており，LM 6000 はこれらの使用実績を基に，構造の簡素化と高効率化を図って開発されたものである。

LM 6000 の高効率性は高圧力比化，タービン入口温度の高温化，圧縮機及びタービン部等の要素効率の改善に加え，従来は航空機用エンジンのコア部分をガス発生器とし，別構造として新設計した出力タービンと組み合わせていたところを，低圧圧縮機を駆動する低圧タービンから直接出力を取り出すというコンセプトを採用することにより達成されている。また，2 軸式の構造を採用することにより，瞬低に強く，部分負荷性能が優れているという特長を併せ持つ。

LM 6000 の概念図を第 1 図に，構造図を第 2 図に示す。また，主要目は以下の通りである。

|       |  |
|-------|--|
| 型 式   | 開放サイクル 2 軸式                                |
| 圧 縮 機 | 低圧圧縮機 (LPC) 軸流 5 段<br>高圧圧縮機 (HPC) 軸流 14 段  |
| 燃 焼 器 | 環状式  |
| タービン  | 高圧タービン (HPT) 軸流 2 段<br>低圧タービン (LPT) 軸流 5 段 |



第 1 図 LM 6000 概略図

原稿受付 2003 年 3 月 14 日

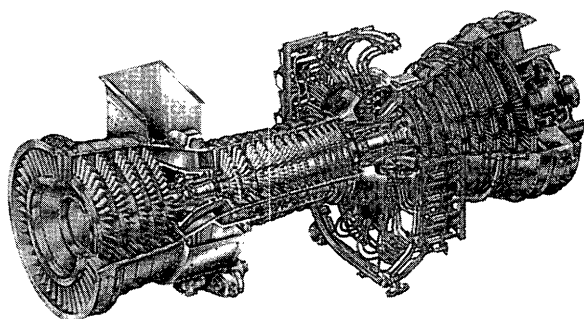
\* 1 石川島播磨重工業株式会社 ガスタービンプラント事業部  
システム技術部  
〒135-8731 江東区豊洲 2-1-1

現在製造されている LM 6000 ガスタービンには、従来型の燃焼器を持つ LM 6000 PC と、低 NO<sub>x</sub> 型燃焼器を持つ LM 6000 PD の 2 種類がある。LM 6000 PC/PD の生産は 1996 年に開始され、2002 年 9 月時点で合計 439 台、初期型である LM 6000 PA/PB を加えると 599 台の生産実績を数えている。

LM 6000 PC と LM 6000 PD はエンジンの基本構造は同じであるが燃焼器部分が次のように異なっている。両エンジンの性能は第 1 表に示す。

#### (1) LM 6000 PC

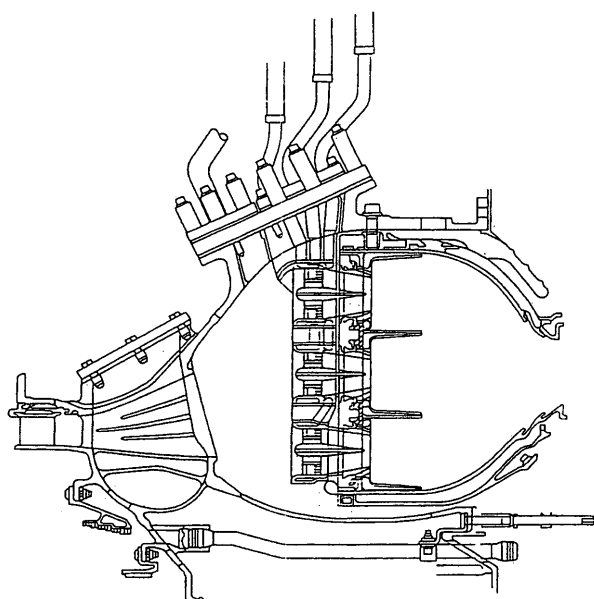
SAC (Single Annular Combustor) と称する環状燃焼器を有して、ガス焚、液焚、両焚が可能であり、水又は蒸気噴射により NO<sub>x</sub> を 21 ppm (残存 O<sub>2</sub>: 16% 換算) まで低減可能である。



第 2 図 LM 6000 PD 構造図<sup>(1)</sup>

第 1 表 LM 6000 PC/PD 性能<sup>(2)</sup>

| 項目            | 種別 | LM6000PC | LM6000PD |
|---------------|----|----------|----------|
| エンジン軸出力 (kW)  |    | 44,200   | 43,100   |
| 熱消費率 (kJ/kWh) |    | 8,487    | 8,520    |
| 排気ガス温度 (°C)   |    | 452      | 449      |
| 排気ガス流量 (kg/s) |    | 125.8    | 124.8    |



第 3 図 DLE 燃焼器<sup>(2)</sup>

#### (2) LM 6000 PD

DLE (Dry Low Emission) 型 3 層環状燃焼器を有し、水又は蒸気噴射無しで NO<sub>x</sub> を 21 ppm (残存 O<sub>2</sub>: 16% 換算) 以下に抑制可能である。DLE 燃焼器の断面図を第 3 図に示す。

なお、当社はこの LM 6000 ガスタービンの開発、生産分担 (RSP: Revenue Share Partner) も担っており、圧縮機後部フレーム及び後部出力軸アダプター部品を生産している。

### 3. LM 6000 コンバインドサイクル発電プラントの特長

LM 6000 を採用したプラントは、以下の特長がある。

#### (1) 設置面積が小さい

航転型ガスタービンの場合は、ガスタービン発電装置がコンパクトである。これに加えて、高効率の LM 6000 を採用することにより、排熱回収ボイラおよび蒸気タービンが相対的に小型のもので済むため、コンバインドサイクルプラント全体の設備総重量と設置面積が小さくなり、バージ上に設置した実例もある。

#### (2) 短納期に対応

設置面積が小さく機器が小型であることから、設置工事期間を短縮することができる。それに加えて、航転型ガスタービンは、多くの部品が航空機用エンジンと共通の量産品であり、エンジンの製造期間自体が短い。当社では契約後の納期をシンプルサイクルプラントで 18 ヶ月、コンバインドサイクルプラントで 24 ヶ月を標準としている。

#### (3) DSS (Daily Start & Stop) への対応

急速起動・停止が可能な航転型ガスタービンの特性を生かし、DSS への対応が可能である。プラント起動指令からガスタービン発電機は 30 分以内に、蒸気タービンも含めたプラントの全負荷運転には約 2 時間で到達することができる。

日本国内のように電力インフラが整備された市場において、LM 6000 で対応できる 40 MW~100 MW 級の発電所はピークカット用として DSS 運用が要求されることが多いが、ユーザーの多様な運用要求に対応可能である。

#### (4) NO<sub>x</sub> 低減対策が容易

LM 6000 PC に水又は蒸気噴射を行う、もしくは DLE 燃焼器を持つ LM 6000 PD を採用することにより、ガスタービン出口 NO<sub>x</sub> を 21 ppm (残存 O<sub>2</sub>: 16% 換算) に抑制可能である。アンモニアによる脱硝装置を設置することで更に NO<sub>x</sub> を低減することも可能であるが、この場合にもアンモニアの消費量を少なく抑えることができる。

#### (5) メンテナンスが容易

LM 6000 ガスタービンは軽量かつコンパクトであり、モジュール単位での整備を可能としているため、メンテナンスが容易である。

それに加えて当社は、GE の認定する LM エンジン整備工場を保有し、パッケージおよび制御装置についても

GE 社の認定を受けて独自に設計・製造している、世界でも数少ないメーカーの1つである。これらの利点を生かし、メンテナンスを強力にバックアップすることが可能となっている。

#### (6) 多様な燃料を選択可能

LM 6000 ガスタービンはガス燃料として LNG, BOG, 13 A 等を、液体燃料として灯油、軽油、ナフサ、NGL (Natural Gas Liquid) 等を使用可能である。また、これらのガス燃料、液体燃料を切り替えて使用することも可能である。

### 4. 実用プラントへの適用例

#### 4.1 台湾向けガスタービンコンバインドサイクル発電設備

本プラントは当社が2000年3月に納入した、総送電量155 MW クラスの独立系発電所である。台湾の半導体工場向け電力とプロセス蒸気供給を実施している。本工事は Phase 1 工事として23ヶ月、Phase 2 工事として32ヶ月で完了し、1999年6月より部分負荷での、2000年2月より全負荷での商用運転を開始している。当社は、土木建築を含むプラント全体の設計、機器納入の EP (Engineering and Procurement) 契約および据付・試運転への SV 派遣契約を請け負った。

本プラントのシステムフロー図を第4図に示す。主要構成機器は以下のとおりである。

##### ・ガスタービン×3台

LM 6000 PD ガスタービン

航空転用型開放サイクル 2 軸

DLE (Dry Low Emission)

天然ガス焼き

##### ・ガスタービン用発電機×3台

水空冷式発電機 (45 MW)

##### ・排熱回収ボイラ×3台

2 圧貫流式

高圧蒸気：4.4 MPaG

低圧蒸気：0.62 MPaG

##### ・蒸気タービン×1台

混圧式抽気復水タービン

##### ・復水器×1基

水冷式 (表面冷却式)

##### ・蒸気タービン用発電機×1台

水空冷式発電機 (36 MW)

##### ・吸気冷却設備×4台 (1,875 USRT)

ターボ式冷凍機

##### ・燃料ガス圧縮機×4台

レシプロ式

容 量：11,500 Nm<sup>3</sup>/h

圧力比：5.1/2.0 MPa

##### ・冷却塔×1基

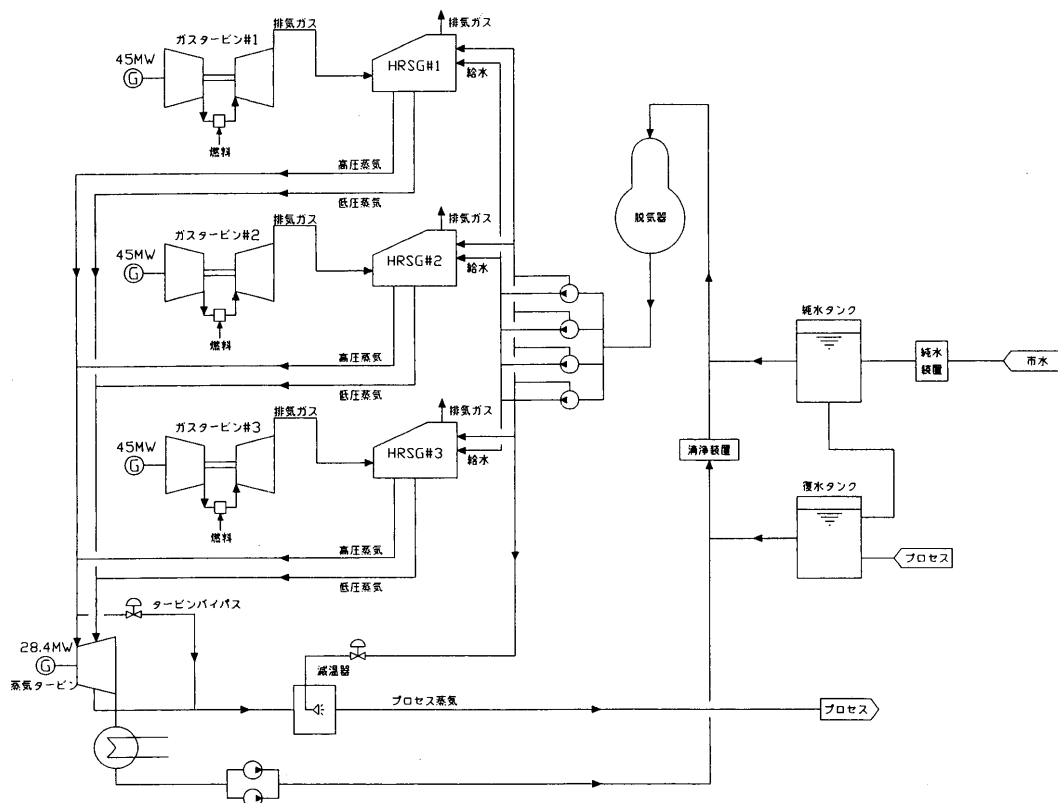
カウンターフロー式

可変ファン (2 速) 付き

冷却能力：597.8 GJ/h

循環水量：14,400 m<sup>3</sup>/h

本プラントの特長として、次の点が挙げられる。



第4図 台湾向け発電プラントシステムフロー図



- (1) ターボ式冷凍機を使った吸気冷却装置の採用により、ガスタービンの吸気温度を 7.2℃ まで冷却し、ガスタービン発電機は最大出力約 45 MW で運転される。
- (2) プロセス蒸気は蒸気タービンの中間段から抽気し、減温装置により所定の蒸気条件とした後供給される。
- (3) プラントに供される敷地面積が約 150 m×約 150 m と非常に狭いため、排熱回収ボイラにはコンパクトでバイパス設備のいらない貫流型を採用した。第 5 図にプラント全体配置図を示す。
- (4) 排熱回収ボイラに貫流型を採用したことから、Dry Running が可能となり、航空転用型ガスタービンを用いたシンプルサイクルプラントの大きな特長である急速起動が可能である。
- (5) プラント敷地境界における騒音規制が昼間 70dB(A)、夜間 55 dB(A) と厳しいため、屋外設置機器については低騒音タイプの機器を選定すると共に、ガスタービン発電機および復水器を含む蒸気タービン発電機については建屋内設置とするなどの防音対策を実施している。
- (6) 運転形態は DSS (Daily Start and Stop) または WSS (Weekly Start and Stop) 運転が基本で、連続運転が基本となる他の同クラスのプラントと比較して起動回数が多く、信頼性に対する要求が厳しくなっている。
- (7) DLE 燃焼器を有するガスタービンを採用することにより、水噴射または蒸気噴射をすることなく、ガスタービン出口での NOx 濃度を 25 ppmv (残存酸素濃

度 15%) と低く抑えている。なお、環境規制上の点から、本プラントにはその他の脱硝設備は装備していない。

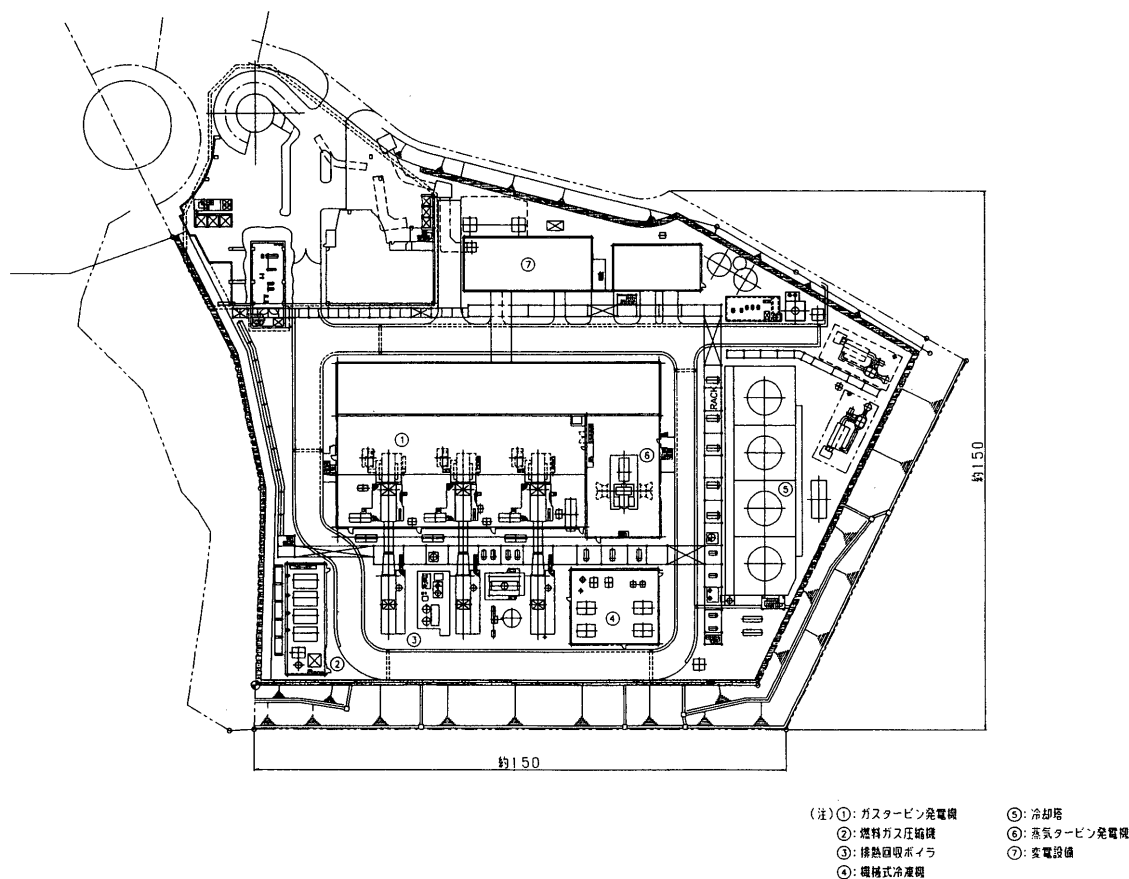
本プラントは信頼性と高効率を要求されたプラントであったが、機器の選定に当たっては、実績と信頼性を設計上十分に考慮すると共に、システム設計上も電気・蒸気を安定供給出来る様十分に考慮した。その結果、1999 年 9 月、台湾南投県で発生した大地震の際でも、本プラントは停止することなく発電を続行し、安定して電力を供給し続けることができた。大地震直後より長期間に渡り、電力不足のために発生する停電により、多くの半導体工場が多大な損害をこうむったが、本プラントから給電されている工場の安定操業に貢献した。

#### 4.2 国内ガス会社向けガスタービンコンバインドサイクル発電設備

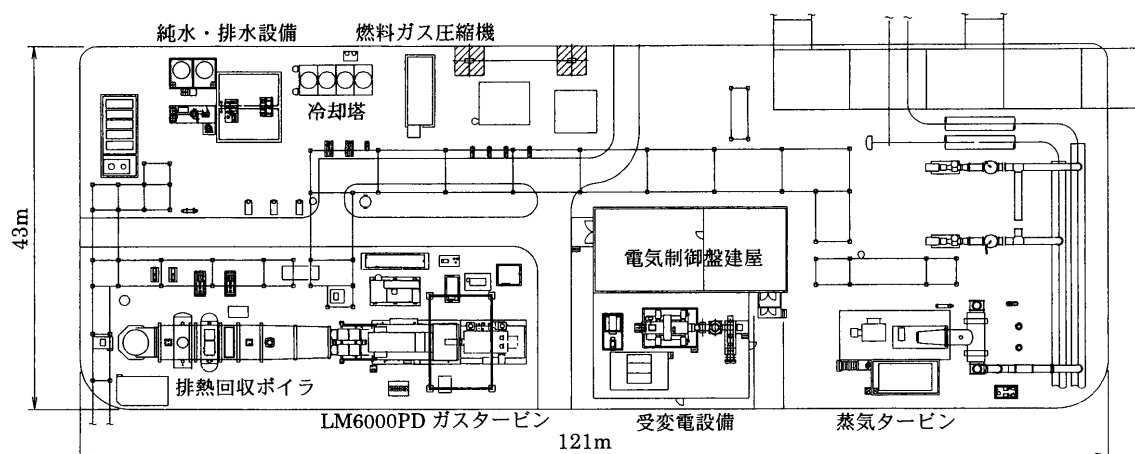
本プラントは 2002 年 6 月に土建も含めた EPC 契約で受注した。2004 年 6 月に運用開始の予定である。プラント全体配置図を第 6 図に示す。

航転型で DLE 燃焼器をもった LM 6000 PD ガスタービン 1 台に、排熱回収ボイラ、蒸気タービン 1 台を組合せたコンバインドサイクル発電設備であり、下記の特長がある。

- (1) 本プラントはガスの製造所に設置されており、LNG の気化ガスをガスタービンの燃料に使用する。
- (2) 本プラントは連続運転のほか、DSS (Daily Start & Stop) 運転に対応できるように設計されている。



第 5 図 台湾向け発電プラント全体配置図 (単位: m)



第6図 国内ガス会社向け発電プラント全体配置図

頻繁な起動・停止要求に対し、高い信頼性を確保することが要求されている。

- (3) 運転・停止はDCS（プラント統括制御装置）による全自動制御となるよう設計されている。
  - (4) 夏場の吸気冷却のための冷水を、LNG 気化器の冷熱を利用して生成し、ガスタービン吸気温度を15℃まで冷却する。これにより、夏場でもガスタービン単独で最大出力41 MWの発電が可能である。
- 主要機器の仕様は次のとおりである。

・ガスタービン発電機×1台

LM 6000 PD+水空冷発電機 (41,850 kW)

燃料：LNG 気化ガス

・排熱回収ボイラ×1台

排熱回収二圧自然循環型（脱硝装置付）

高圧蒸気：4.6 MPa

低圧蒸気：0.7 MPa

・蒸気タービン発電機×1台

混気復水式タービン+水空冷発電機 (11,590 kW)

・燃料ガス圧縮機×1台

スクリー式

容 量：12,500 Nm<sup>3</sup>/h,

圧力比：4.7/0.8 MPa

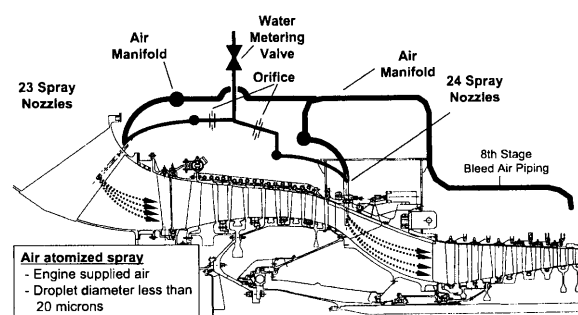
本プラントは、設計がほぼ完了し、今後は現地工事や各機器の検査・試運転が山場を迎える。完成に向けより一層注力し、優れたプラントとすべく努力していく。

#### 4.3 オーストラリア向け LM 6000 PD SPRINT

##### ガスタービン発電設備

本プラントは2001年6月に1号機、2001年12月に2号機が運用を開始した、LM 6000 PD ガスタービンによるシンプルサイクル発電設備である。この発電設備は電力需要の多い時間帯にのみ運用するため、起動・停止にかかる時間が短い航転型ガスタービンは好評を得た。

運用開始後の2002年2月に、客先より夏場の出力増強を求められ、GE社の特許技術であるSPRINT<sup>TM</sup> (SPRay INTERcooling) システムの追加工事・試運転を実施した。これは純水4t/hをガスタービン圧縮機に

第7図 SPRINT<sup>TM</sup> システム概略図<sup>(3)</sup>

噴射することで吸気の中間冷却を行い、出力を増強するシステムである。第7図にSPRINTシステムの概要図を示す。このシステムにより、本プラントでは夏場（外気温30℃）の1台あたりの出力を33 MWから42 MWまで上昇させることができた。冷凍機を使用した吸気冷却システムを導入した場合と比較して、安価かつ短納期で導入できるというメリットがある。LM 6000 PD SPRINTとしては世界で2番目の商用プラントの納入実績となった。

#### 5. 結 言

LM 6000 ガスタービンコンバインドサイクルプラントはエンジン自体が高効率、軽量、コンパクトであることに加え、発電プラントとしても設置面積を少なくでき、また運転、保守の容易なプラントである。本書に概説した実例プラントをはじめとして、今後、国内外に拡販を図っていく所存である。

#### 参 考 文 献

- (1) 石川島播磨重工業株式会社カタログ IHI-LM Engine Series Gas Turbine Power Plant
- (2) 野崎明, 佐藤敏明, 石川島播磨技報 Vol.38 No.5, (1998) p.291
- (3) G. H. Badeer, GE Aero-derivative Gas Turbines—Design and Operating Features GER-3695 E

特集：ガスタービン利用高効率エネルギーシステムの動向

## 熔融炭酸塩形燃料電池(MCFC)ハイブリッドシステム

伊藤 和彦<sup>\*1</sup>

ITOU Kazuhiko

遠井 正明<sup>\*1</sup>

TOOI Masaaki

蘭田 章吾<sup>\*1</sup>

SONODA Shogo

谷 秀久<sup>\*1</sup>

TANI Hidehisa

キーワード：ガスタービン，燃料電池，熔融炭酸塩形，ハイブリッドシステム

Gas Turbine, Fuel Cell, Molten Carbonate, Hybrid System

### 1. はじめに

熔融炭酸塩形燃料電池(= Molten Carbonate Fuel Cell, 以下はMCFCと称す)は，発電効率がよく，環境負荷が低い発電システムである。燃料として都市ガス，天然ガスや石炭ガス化ガス，さらには廃棄物ガスやバイオマスガスなど多様な燃料の使用が可能で，将来の発電技術として期待が持たれている。また，MCFCは電解質として熔融炭酸塩を使用するため，その作動原理から，有効な炭酸ガス分離濃縮装置としての機能を有しており，地球温暖化防止の点からも貢献できる技術である。

我が国におけるMCFCの開発は旧通商産業省工業技術院のムーンライト計画として，1981年(昭和56年)にスタートした。その後ニューサンシャイン計画に引き継がれ，2000年からは5ヵ年計画として第Ⅲ期開発が始まった。石川島播磨重工業(株)(以下，IHIと称す)は，1983年(昭和58年)よりMCFCの実用化に向けた研究開発を開始し，1987年(昭和62年)からはニューサンシャイン計画に参画し，現在に至っている。

第Ⅲ期開発では，MCFCの早期実用化を目指し，まず小型分散電源用としての300kW級加圧小型発電システムの開発を行う。さらに中規模から大規模までの高効率発電システムの実現を目指し，MCFCとガスタービンを組合せたシステム実現のための課題である高圧運転技術とモジュール化技術の開発を行う計画である。現在，300kW級の加圧発電システムは，熔融炭酸塩型燃料電池発電システム技術研究組合殿の川越MCFC発電試験所において発電試験を実施中である。また，この開発成果をもとに民間におけるフィールド試験も開始している。

このように，MCFCはこれまでの開発成果を踏まえて，普及に向けた技術開発へ発展させる段階に入っており，早期事業化へ向けMCFCの商品化を加速するとともに，製造体制も整えつつある。

### 2. MCFCの特徴<sup>(1), (2)</sup>

MCFCは次の特徴を兼ね備えた次世代の発電システムである。

ムである。

#### 2.1 高効率発電

MCFC発電プラントは数百kW級の小型クラスで48%(LHV)，数十万kW級の大型クラスで60～65%(LHV)と，広い発電容量領域で既存の発電設備と比べて高い発電効率が期待できる。また，石炭利用においても50～55%(LHV)程度の高効率が見込まれる。

特に，数MWから10MW規模の分散電源でも55%(LHV)以上の送電端効率が得られるため，燃料消費量の削減とCO<sub>2</sub>等の排ガス生成物の低減が可能である。

#### 2.2 環境性

MCFC発電プラントでは，改質器の燃焼部で最高温度が800℃程度であり，NO<sub>x</sub>はほとんど発生しない。SO<sub>x</sub>の発生源であるイオウ成分は，脱硫器で前処理除去するため，SO<sub>x</sub>の発生もほとんど無い。地球温暖化の原因となる炭酸ガスは，発電効率が低い分，燃料の消費が抑えられて総排出量を低減できる。さらに，既存の発電プラントと比べて大量の冷却水が不要となる。このように，MCFC発電システムは，環境負荷が小さい環境適合型発電技術である。

#### 2.3 燃料の多様性

MCFCは作動温度が650℃と高く，電極反応を促進するための白金等の触媒を必要とせず，原燃料として天然ガスは勿論のこと，石炭ガス化ガス，バイオマスガス，廃棄物ガスなどの多様な燃料に対応することが可能である。また，廃棄物のガス化ガスや工場等で発生するメタンや水素等の副生ガスも燃料とすることができるなど，資源の有効活用が図れる。

#### 2.4 炭酸ガスの分離・濃縮機能

MCFCの運転では燃料電池の燃料極排ガス中の炭酸ガス濃度が高くなるため，炭酸ガス分離濃縮装置としての利用が期待できる。燃料極排ガスのガス組成は，炭酸ガスと水蒸気が主成分であり，この水蒸気を除去すると，ほとんどが炭酸ガスとなり，炭酸ガスの回収が可能となる。また，火力発電所等の炭酸ガス発生源にMCFC発電設備を併設し，発生源からの排ガスの一部をMCFC発電設備の酸素極側へ供することにより，燃料極側へ炭酸ガスを濃縮することも可能となる。このように，MCFCは地球温暖化防止対策に貢献できる技術である。

原稿受付 2003年3月10日

\*1 石川島播磨重工業株式会社 エネルギー・プラント事業本部  
エネルギーソリューション事業推進部  
〒135-8733 江東区豊洲 3-1-15

## 2.5 高温運転の有利性

MCFCは作動温度が650℃と高く、ガスタービン、蒸気タービンと組合せた高効率発電システムの構築および高温排熱を利用した蒸気による冷暖房への活用が図れるシステムの構築等が可能である。

## 2.6 量産化と大容量化が容易

現在開発しているMCFCは、基本単位であるセルを積み重ねた単純な構造体で構成されているので、製造工程の自動化と量産化が容易である。量的に多数を占める部材は一般的な無機材料や金属材料であり、低コスト化が期待出来る。また、作動温度が650℃程度であることから、構造材料に金属を用いることができ、装置の大型化が容易である。

## 3. MCFC 開発の状況

### 3.1 開発経緯

IHIは早くからMCFCの優位性に着目しMCFCの開発に取り組んできた。1983年(昭和58年)よりMCFCの実用化に向けた研究開発を開始し、1987年(昭和62年)からは旧通産省工業技術院のムーンライト計画に参加した。その後、ニューサンシャイン計画に引き継がれ現在に至っている。この間、1995年から1999年までの第Ⅱ期後期開発では、1,000kW級発電プラントのシステム全体の設計とスタックの開発を担当した。スタックの開発では、250kW級スタック2基を製作して納めた他、制御システムを設計・製作して納めた。本開発では、世界で初めて加圧運転による1,000kWの発電試験に成功した。第1図にMCFC開発計画スケジュールを示す。

### 3.2 第Ⅲ期開発内容

2000年から2004年までの5ヵ年計画である。最終開

発目標は、今期の開発後に実証プラントと位置付けられる数MW級の中規模発電プラントで使用する内陸設置も考慮した基本モジュール(以下、高性能モジュールと称す)を開発すること、本モジュールを使用し、既存の中規模発電設備ではなし得ない高効率な発電プラント可能性の確認を目標としている。

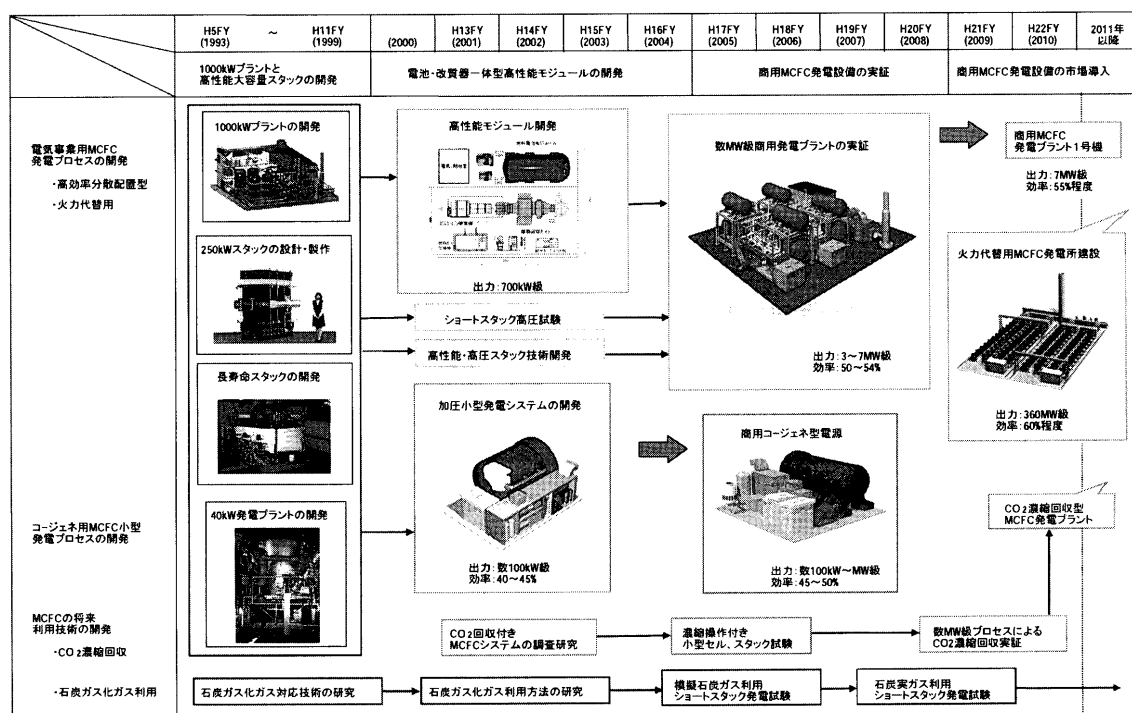
高性能モジュールは、スタック、改質器、高温配管等、高温部となる機器を同一の压力容器内に組込んで一体化した構造であり、コンパクト化を図ると共に、放散熱量を低減してプラント効率の低下を抑制するように設計されている。数MW級のプラントは、複数の高性能モジュールとガスタービンを組合せた高圧システムとする計画であり、スタック性能の向上と高電流密度化およびシステムの高効率化を目指している。

今期の具体的な主要開発課題は、MCFCとガスタービンを組合せたシステムの実証、1MPa以上の高圧運転の実証、モジュール化構造の実証、長寿命化の検証等である。

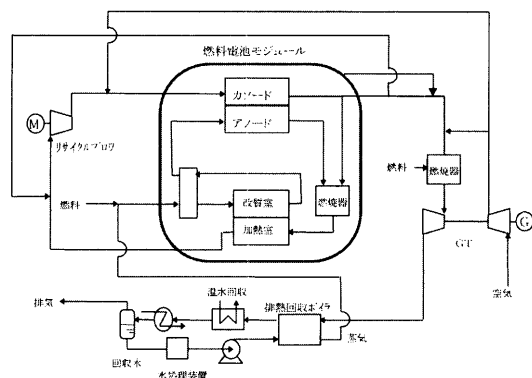
## 4. ガスタービンとのハイブリッド化システム

### 4.1 システム構成

MCFCとガスタービンのハイブリッド化システム構成を第2図に示す。MCFCからの排ガスにより、タービンにて動力回収を行い、MCFCの反応に必要な酸素と発電反応の際に発生する熱を冷却するための圧縮空気を供給し、余剰動力を電力として取り出す。MCFCの場合、プラント運転条件下(圧力、温度、燃料等の条件)での電池単独の発電効率は50-55%(LHV)程度であるが、ガスタービンの動力回収により発電効率は約5-10ポイント程度上昇し、発電設備全体の効率向上に寄与する。



第1図 MCFC 開発スケジュール



第2図 MCFC/GT システムフロー

また、本システム構成の場合、プラント運転圧力はガスタービン運転圧力と等しい圧力となり、一般的に組合せるガスタービン容量が大きくなればなる程、運転圧力は上昇する。例えば、数10kW級のマイクロガスタービンや数100kW級のガスタービンと組合せる場合、運転圧力は0.6MPa以下であり、数MW級のガスタービンと組合せる場合は0.7MPaから1.5MPaの範囲となる。運転圧力の上昇は電池電圧の向上、リサイクルブロー動力の低減等、発電効率向上に寄与し、プロセス配管、機器サイズ低減に寄与する。一方、燃料ガス圧縮機動力の増加、改質率の低下、電池寿命への影響等の要因ともなり得る。実際の設計ではプラント発電出力に見合うガスタービン容量により、運転圧力が決まり、本条件で最適な発電効率を得られるシステム構成としている。

燃料電池とガスタービンを最適にハイブリッド化させるためには燃料電池とガスタービンの出力比がポイントとなる。発電設備はガスタービンへの供給燃料を最小とし、燃料電池への供給燃料を最大にする出力で発電効率が最適値となる。

また、部分負荷運転では燃料電池の出力を下げた状態でガスタービン出力を上げるにより熱の割合が増加するため熱電比の幅広い変更が可能となる。定格負荷運転時は熱電比0.3~0.6程度であるが、部分負荷運転時にガスタービン出力を上げるにより、2.0程度の熱電比が可能となる。

#### 4.2 燃料電池の発電効率

ガスタービンによる発電を除いた燃料電池本体部分の発電効率は供給燃料発熱量に対する燃料電池出力(AC)である。これにガスタービン発電出力を加えたものが発電端効率・・・式(1)となる。

$$\eta_{\text{gross}} = \frac{P_{\text{FC}}(\text{AC}) + P_{\text{GT}}}{H_{\text{FUEL}}(\text{LHV}) \times \text{Finput}} \times 860 \text{ kcal/h/kW} \cdots \text{式(1)}$$

$\eta_{\text{gross}}$  : 発電端効率 (-)

$P_{\text{FC}}(\text{AC})$  : 燃料電池交流出力 (kW)

$P_{\text{GT}}$  : ガスタービン出力 (kW)

$H_{\text{FUEL}}(\text{LHV})$  : 燃料発熱量 (kcal/kmol)

$\text{Finput}$  : 燃料流量 (kmol/h)

このうち、燃料電池単独での発電効率は天然ガス中の

主成分であるメタンを水蒸気改質して燃料とした場合、燃料原単位に対しては・・・式(2)でも表される。

例えば、燃料としてのメタンがどれだけ水素や一酸化炭素に変換するかという改質率・・・式(3)、この際の改質反応・・・式(4) (但し、PEFCやPAFCの場合はCOを燃料として利用できないため別途反応器により下記反応・・・式(5)により水素化して利用)、各温度、圧力、ガス組成、電流密度等の条件によって決まる作動電圧と、燃料電池で利用できる燃料をどれだけ電気反応に利用したかという燃料利用率、および燃料電池で発生した直流を交流に変換するインバータの変換効率の積になる。

$$\eta_{\text{FC}} = \frac{nF \times 4 \times R_{\text{ref}} \times F_{\text{CH}_4\text{in}}}{H_{\text{CH}_4}(\text{LHV}) \times 1 \text{ kmol/h}} \times V \times U_f \times \eta_{\text{INV}} \cdots \text{式(2)}$$

$V$  : 作動電池電圧 (V)

$U_f$  : 燃料利用率 (-)

$H_{\text{CH}_4}(\text{LHV})$  : メタンの低位発熱量 (kcal/h)

$\eta_{\text{INV}}$  : インバータ効率 (-)

$n$  : 1 molの電池反応によって移動する電子数 (=2価/mol)

$F$  : ファラデー定数 (=23.06 kcal/V/mol)

$R_{\text{ref}}$  : 改質率 (-)

$F_{\text{CH}_4\text{in}}, F_{\text{CH}_4\text{out}}$

: 改質器入口、出口のメタン流量 (kmol/h)

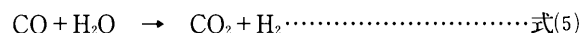
改質率: メタンを例にした場合

$$R_{\text{ref}} = (F_{\text{CH}_4\text{in}} - F_{\text{CH}_4\text{out}}) / F_{\text{CH}_4\text{in}} \cdots \text{式(3)}$$

改質反応



シフト反応



計算例としてメタン1kmol/hが95%改質して電池電圧が0.75V、燃料利用率が80%、インバータ効率が93%としたの効率は下記となる。

$$\eta_{\text{fc}} = \frac{2 \times 23.06 \times 1,000 \times 4 \times 0.95 \times 1.0}{192,190} \times 0.75 \times 0.8 \times 0.93 = 0.509 = 50.9\% (\text{LHV}) \cdots \text{式(6)}$$

従って、システムを最適設計するためには改質率、作動電圧、燃料利用率をどれだけ高くできるかにかかっており、このために運転圧力や温度、ガス条件および熱利用の方法等を最適化し、前述したガスタービンとのハイブリッド化のための設計を行う。

#### 4.3 ハイブリッド化のためのガスタービン仕様

ハイブリッドを最適化するためにはガスタービンが下記に示す要件を満たすことが望ましい。

- (1) 圧縮空気を燃料電池に抽気可能な構造
- (2) 燃料電池からの排ガスをタービンに供給可能な構造
- (3) 空燃比領域の広い燃焼器
- (4) 小さいターンダウン比
- (5) 最小燃料からの点消火による圧力変動抑制
- (6) 空気量と排ガス流量比の変更

## (1) 圧縮空気を燃料電池に抽気可能な構造

プラント起動時はまず、ガスタービン単独で起動・昇温して、次に燃料電池を昇温・昇圧するためにガスタービン圧縮空気を一部抽気する。このための圧縮機構造が必要であり、この際、一時的に戻りガスがない状態となるため失速しない抽気条件が必要である。また、ガスタービン燃焼用空気と燃料電池への抽気空気流量は各々制御するため各々流量制御弁が必要となる。再生熱交換器を有するガスタービンであれば、構造上の改造箇所は不要である。

## (2) 燃料電池からの排ガスをタービンに供給可能な構造

燃料電池系統昇圧後は燃料電池系統からガスタービンにガスを戻すためガスタービン燃焼器とタービン入口間に燃料電池からの排ガスを供給する構造が必要である。

## (3) 空燃比領域の広い燃焼器

燃料電池系統は熱容量が大きく、昇温に時間がかかるため、ガスタービンからの抽気空気量は多いほど望ましい。また、起動開始後直後は燃料電池からの戻りガスは、ほぼ常温となるためこの状態においてもガスタービン運転を行える必要がある。また、タービン排ガス系統には燃料電池系統を昇温するための再生熱交換器を設置しており、熱供給も多いほど望ましい。

このため、ガスタービン用の燃焼空気量が少なくても、燃焼可能な、空燃比領域の広い燃焼器であることが望ましい。

## (4) 小さいターンダウン比

燃料電池系統は昇温完了後、負荷併入、負荷上昇していくが、負荷上昇に伴い燃料電池系統からの排ガス量は増加し、温度も上昇するためガスタービンへの供給燃料を徐々に減少させる制御を行う。この際、ガスタービン燃焼器のターンダウンを小さくするので最低燃料流量は小さい程、燃焼器点消火時の圧力変動要因を低減できる。

## (5) 最小燃料からの点消火による圧力変動抑制

システム構成によっては発電効率を最適化するために負荷上昇時は発電設備の定格負荷近傍にてガスタービン燃焼器を消火する。また、負荷下降時はガスタービンを点火する。

点消火に伴い、ガスタービン回転数は急変し、これに伴い系統圧力が変動して燃料電池系統の電池差圧や流量制御等に影響を及ぼす可能性がある。燃料電池系統は燃料電池容器容積が大きいいため圧力変動を比較的吸収する機能を持つが、ガスタービン回転数の変動が大きい場合は問題になる。このため、ガスタービン燃焼器の点消火を必要とするシステムの場合、圧力変動を抑制する制御が必要であり、かつ燃料電池負荷を含めた設備負荷との協調制御が重要である。

## (6) 空気量と排ガス流量比の変更

燃料電池とハイブリッド化した場合、ガスタービン単独運転時に比べてタービン入口温度は下がるが、燃料電池系統へ供給する燃料や改質用蒸気により流量は増加する。このため、発電設備の定格負荷運転条件ではガスタービン単独での定格運転条件に比べ、タービン側流量に対して圧縮機側流量の割合が小さくなる。従って、燃料電池とのハ

イブリッド化をより最適化するためにはガスタービンの圧縮機とタービンどちらかの流量を変えることが望ましい。

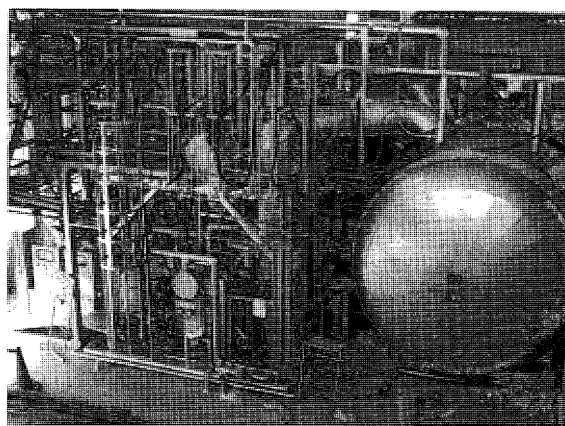
このように、ガスタービンとハイブリッド化することは発電効率の向上、加圧による機器・配管サイズの削減等に寄与するが、上記のようなガスタービン側の仕様要件と協調制御がポイントとなる。

4.4 300 kW 級 MCFC 発電設備<sup>(4), (5)</sup>

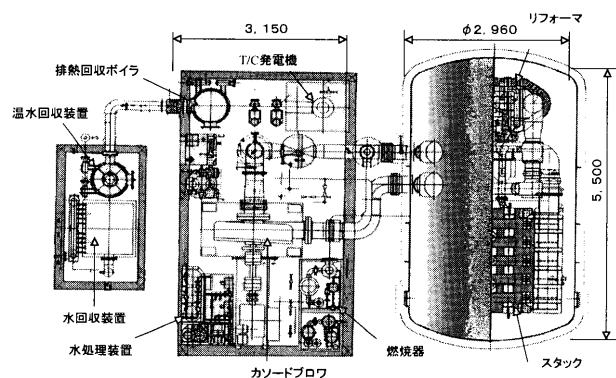
現在、300 kW 級 MCFC 発電設備 3 機をフィールド試験中である。各設備はシステム構成および燃料電池系統に関してはほぼ同じ仕様であるが、空気供給・排熱回収系統の機器については開発経緯と設備の目的などから異なる仕様のものを使用している。

第 2 図に示したシステムは燃料電池スタック、改質器、燃料予熱器を容器内に設置する燃料電池モジュールと燃料電池をガス循環により温度調節するカソードブロワ、空気供給・排熱回収としての回転機および排熱回収ボイラ、コージェネとしての運用を検証するための温水・水回収熱交換器、直流/交流インバータから構成されている。第 3 図に MCFC 研究組合殿向け 300 kW 級加圧小型発電システムを示す。また、第 4 図に機器配置図、第 5 図に燃料電池モジュールを示す。機器配置は燃料電池スタックと改質器を容器内に配置する燃料電池モジュールとカソードブロワ、排熱回収ボイラ等の主要補機およびその他の補機を各々スキッド化したもので構成している。

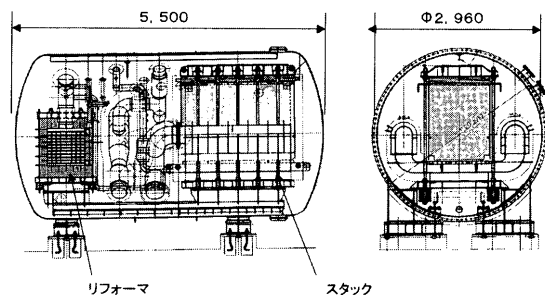
本設備は 300 kW 級の一号機ということや、フィール



第 3 図 300 kW 級加圧小型発電システム



第 4 図 機器配置図



第5図 燃料電池モジュール

第1表 プラント計画仕様

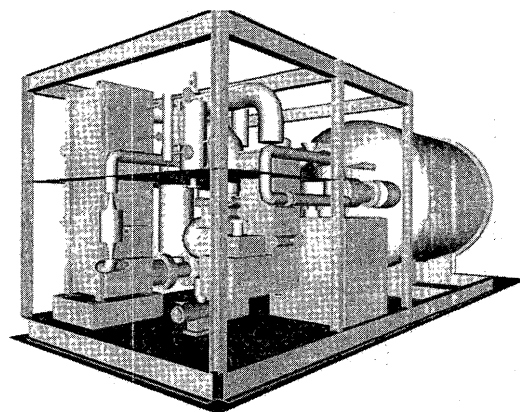
|            |         |
|------------|---------|
| 燃料         | 都市ガス    |
| 燃料電池出力(AC) | 320kW   |
| MGT 出力     | 40kW    |
| 発電端出力      | 360kW   |
| 補機動力       | 30kW    |
| 送電端出力      | 330kW   |
| 発電端効率(LHV) | 57%     |
| 送電端効率(LHV) | 52%     |
| 運転圧力       | 0.32MPa |
| 電池電圧       | 0.751V  |
| 燃料利用率      | 83%     |
| 改質率        | 93%     |

ド試験という目的から計装機器数も多く発電設備としてはその規模に対して大きなサイズになった。現在、稼動中の2機、3機目については運転圧力の上昇による配管・機器サイズの減少、計測・制御点数の削減、温水・水回収用熱交換器のプレートフィン化、脱炭酸塔から脱炭酸膜への変更などにより、補機スキッドは同サイズ内の機器数を増やすことが可能となり、設備全体ではサイズダウンしている。しかし、MCFCの特徴である発電効率の優位性を確保しながらサイズおよびコストを同規模他の発電設備レベルとしていくためには更なるシステム構成の簡素化、計測・制御点数の削減、補機の一体化、高温配管箇所への削減等を行う必要がある。

現在、これまでの設計実績を反映し、次設計のシステム仕様および構成、機器配置等を検討している最中であり、燃料電池モジュール構造の見直し、システム構成の簡素化、機器数の削減等を行う計画である。第1表にプラント仕様、第6図に機器配置の鳥瞰図を示す。

#### 4.5 数 MW 級 MCFC 発電設備<sup>(3)</sup>

燃料電池と組合せるガスタービン出力を大きくすることによって、発電設備規模は大きくなる。2 MW 級ガスタービンとのハイブリッド化の場合、第2表の設備仕様を示すような発電設備容量となる。また、ガスタービン圧力上昇に伴い、運転圧力も上昇する。先にも述べたように運転圧力上昇はメリット、デメリットがあるが、高圧化による改質率の低下は燃料ガス中の水素変換効率を下げるため燃料電池で使用する水素が減り、直接発電効



第6図 機器配置鳥瞰図

第2表 プラント計画仕様

|            |        |
|------------|--------|
| 燃料         | 天然ガス   |
| 燃料電池出力(AC) | 5.8MW  |
| GT 出力      | 1.3MW  |
| 発電端出力      | 7.1MW  |
| 補機動力       | 0.3MW  |
| 送電端出力      | 6.8MW  |
| 発電端効率(LHV) | 60%    |
| 送電端効率(LHV) | 57%    |
| 運転圧力       | 1.1MPa |

率低下に影響する。式(4)に示したように反応式はモル数が増加する反応のため圧力が高くなるほど進み難くなり、一方、水蒸気は多いほど水素化が進む反応となる。

また、高圧化によりタービン膨張比増加によるタービン出口温度は低下し、蒸気飽和温度は上昇するため蒸気確保が難しくなる。一方、改質用蒸気は増加させるほど改質率は向上するため高圧化における蒸気は多いほど望ましい。この対策として、電池反応によって生成する水蒸気を用いて未反応分のメタンを改質するシステムを検討している。本システムは水蒸気濃度の高いアノード出口ガスの一部を別途設置する改質器で水素化してアノード入口へリサイクルしてやり、燃料として使用する方法である。改質器はリサイクルシステムの配管の一部に改質触媒を充填するだけの簡易な構造とし、外部からの熱は供給せず、プロセスの顕熱により改質するシステムである。これらの対策を行うことにより発電効率は60%(LHV)程度を想定している。

#### 5. 炭酸ガス濃縮機能

燃料電池のなかでも MCFC は電解質に炭酸塩を使用しており、その電池反応式(7)、式(8)から炭酸ガスを炭酸イオンの形でカソード(酸素極または正極)からアノード(燃料極または負極)へ移動させる。通常の反応ではアノードで生成した炭酸ガスは等量カソードで消費されるため、系外へ排出される炭酸ガスは原燃料中の炭素成分だけであり、発電効率が高ければ、出力に対する燃料





特集：ガスタービン利用高効率エネルギーシステムの動向

## 固体酸化物形燃料電池(SOFC)複合発電システム

加幡 達雄<sup>\*1</sup>

KABATA Tatsuo

キーワード：固体酸化物形燃料電池 (SOFC)，ガスタービン複合発電

### 1. はじめに

当社では、固体酸化物形燃料電池 (SOFC) の開発を進めている。SOFC は、ガスタービン複合発電と組み合わせ、70% LHV に及ぶ高効率を得られること、石炭を含む多様な燃料が使用可能であること、また規模にかかわらず高い発電効率が得られることから大容量から中小容量まで広い範囲をカバーする将来の電源として期待されている。当社は 1984 年に開発着手以来、電池材料・電池構造・製造技術及び電池モジュールの開発を推進し、現在数 10～100 kW 級発電システム実証機の開発段階にある。本稿では SOFC の特徴、当社 SOFC 開発状況と SOFC 複合発電について紹介する。

### 2. SOFC の特徴

燃料電池 (Fuel Cell) は燃料の持つ化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換する装置で、熱機関を上回る高効率が可能である。蓄電池 (Battery) や乾電池のような電力を蓄える装置ではなく、連続的に発電する装置である。

固体酸化物形燃料電池 (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell) の発電原理を図 1 に示す。水の電気分解と逆の反応である。イオンだけを伝導し電子・ガスを伝導しない電解質を隔て、水素 ( $H_2$ )・一酸化炭素 (CO) の燃料と空気を流すと電圧が発生する。燃料側・空気側の電極間を外部回

路で接続すると、電解質を酸素イオン ( $O^{2-}$ ) が流れ、電子が外部回路を流れる回路が構成され、外部回路の負荷で電力を取り出すことができる。水素・一酸化炭素はそれぞれ水 ( $H_2O$ )・二酸化炭素 ( $CO_2$ ) となって燃料側に排出される。反応全体は燃焼と同じであるが、燃焼では熱のみが得られるのに対して、燃料電池では一部が電力として直接取り出せる。

発電用の燃料電池として表 1 に示す 4 形式の開発・実用化が進められている。電解質の種類により運転温度が異なる。リン酸形 (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell) と固体高分子形 (PEFC, Polymer Electrolyte Fuel Cell) は低温形燃料電池と分類され、水素イオン ( $H^+$ ) 導電性の電解質を用いるもので、直接の燃料は水素のみである。都市ガス等の燃料を用いる場合は、改質器により水素に転換する必要がある。また、低温での反応促進のため電極に高価な白金触媒を用いている。最近話題となっている燃料電池自動車は水素燃料で固体高分子形 (PEFC) を動力源としている。熔融炭酸塩形 (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell) と固体酸化物形 (SOFC) は高温形燃料電池と分類されるもので、高温の排熱を利用してガスタービン複合発電に適用できるものである。

SOFC は、電解質に酸素イオン導電性のセラミックスであるイットリア安定化ジルコニア ( $ZrO_2-Y_2O_3$ ) を用いる。電極を含め発電部が固体のセラミックスであるため、液体電解質の燃料電池 (PAFC, MCFC) での課題である電解質の飛散や腐食の問題がなく、安定で耐久性が高い。電解質が酸素イオン導電性であるために、水素 ( $H_2$ ) だけでなく一酸化炭素 (CO) も直接の燃料として利

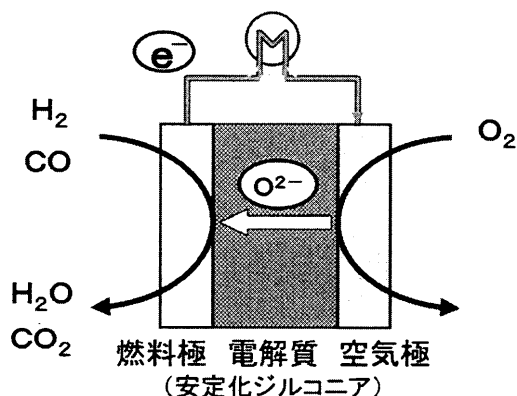


図 1 SOFC の発電原理

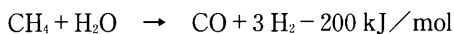
表 1 燃料電池の種類

|             | 固体高分子形 (PEFC) | リン酸形 (PAFC) | 熔融炭酸塩形 (MCFC) | 固体酸化物形 (SOFC) |
|-------------|---------------|-------------|---------------|---------------|
| 電解質         | 高分子膜          | リン酸         | 熔融炭酸塩         | セラミックス        |
| 移動イオン       | $H^+$         | $H^+$       | $CO_3^{2-}$   | $O^{2-}$      |
| 運転温度 (°C)   | 60～100        | 150～200     | 600～650       | 900～1000      |
| 発電効率 (LHV%) | 約45           | 約45         | 約50           | 約50           |
| 複合発電        | —             | —           | 55～65         | 60～70         |
| 用途          | 自動車用<br>家庭用   | 分散電源用       | 事業用<br>分散電源用  | 事業用<br>分散電源用  |

原稿受付 2003 年 3 月 26 日

\* 1 三菱重工業(株)エネルギーシステム技術部新技術開発課  
〒220-8401 神奈川県横浜市西区みなとみらい 3-3-1

用できる。また、900～1000℃の高温作動であるため、発電反応で発生する高温の熱と水蒸気を利用して、天然ガス等の炭化水素燃料をH<sub>2</sub>、COに転換できる。これを内部改質という。改質反応は吸熱反応であるので、SOFCに投入した燃料は改質により発熱量が増加する。天然ガスの主成分であるメタン(CH<sub>4</sub>)の改質反応は次式で表され、燃料発熱量が20%増加し、発電効率向上に寄与している。



CH<sub>4</sub>の低位発熱量：800 kJ/mol

SOFCは電解質を含むすべての構成要素が固体であるため、液体電解質保持のために平板形状となっている他の燃料電池と異なり、平板形の他に円筒形の発電部形状が考えられる。当社では、平板形の一つであるMOLB形(一体積層形)と円筒形の開発を進めており、以下に開発状況を紹介します。

### 3. 当社 SOFC 開発状況

#### 3.1 MOLB 形 SOFC

MOLB形(MOnoblock Layer Built, 一体積層形)SOFCの電池構造を図2(a)に示す。電池本体は燃料極、電解質、空気極から成る発電膜と、発電膜を電氣的に接続するインタコネクタにより構成される。SOFC 発電膜に凹凸状の3次元ディンプル構造を採用することで、単位体積あたりの有効発電面積を増加させ出力密度の向上を図るとともに、発電膜の機械的強度を向上させている。また、発電膜の3次元ディンプル構造自体が発電膜両面の燃料及び空気の流路と電流経路を形成し、インタコネクタを単純な平板形状とすることができる。MOLB 形 SOFCでは、平板状の発電膜とインタコネクタを積み重ねて電池を構成するため、電池端部に燃料ガス及び空気をシールするガスシール材が必要である。当社では高密度化セラミックスを用いたガスシール材料を独自に開発し、耐久性・信頼性を向上させた。

MOLB 形 SOFC は、発電膜・インタコネクタ・ガスシール材料ともセラミックス製でそれぞれ焼結法にて製造している。機械加工のないシンプルな製造工程で、連続的に製造できることから、電池本体の製造コストを大幅に低減できる。

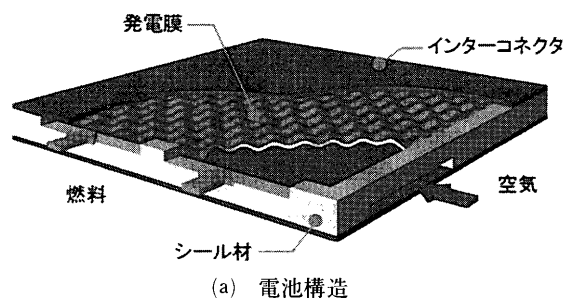
当社では1990年より中部電力㈱との共同研究にてMOLB 形 SOFC の開発を進めている。1992年に150 mm×150 mm 電池を40段積層したスタック3個を使用して平板形 SOFC における世界初のkW級発電に成功して以来、1996年には200 mm×200 mm 電池を40段積層したスタック2個を使用して、平板形 SOFC としては当時最高の出力5.1 kW (出力密度0.23 W/cm<sup>2</sup>)を達成した。さらに1997年からは大容量化と信頼性確保の達成のために、T-MOLB 形 (Train type MOLB, 連結式一体積層形) 電池を開発した。T-MOLB 形電池の外観を図2(b)に示す。発電膜とインタコネクタを10

段積層した電池に、ガスマニホールドを取付けたものを単位として、10個連結したものである。

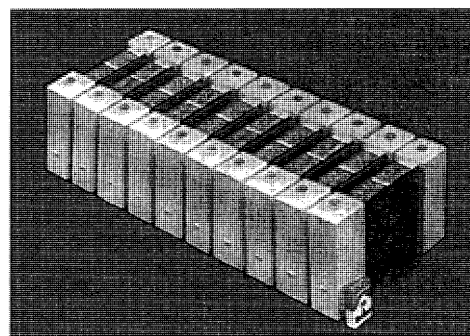
2000年から10 kW 級モジュールを製作し、発電試験を実施した。平板形 SOFC としては世界最高となる発電出力15 kWを確認し、累積発電時間7500時間(100%内部改質試験2473時間を含む)を達成した。10 kW 級モジュールでは、200 mm×200 mm 電池10段積層したものを30個使用している。

2001年度からは新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)の委託を受け、将来のSOFC 発電システムの基礎となる熱自立モジュールの開発を中部電力㈱と共同で実施中である。

MOLB 形 SOFC は発電部がコンパクトであることから、常圧運転 SOFC での高効率コージェネレーションシステムの早期実用化が期待され、2003年度の運転開始に向けて50 kW 級実証機の開発を進めている。(図3)



(a) 電池構造



(b) 外 観

図2 MOLB 形 SOFC

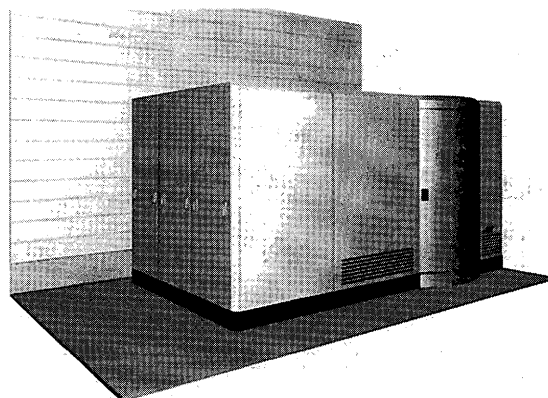
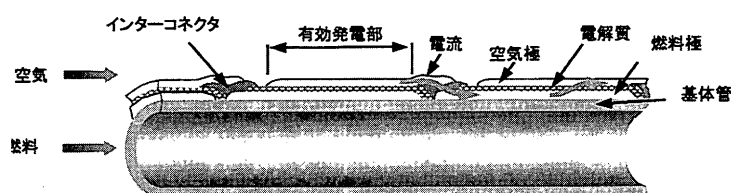


図3 MOLB 形 SOFC コージェネレーションパッケージ

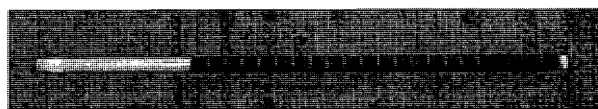
### 3.2 円筒形 SOFC

円筒形 SOFC の電池構造及び外観を図 4 に示す。セラミックス製基体管上に燃料極、電解質、空気極の薄膜を積層して発電部を構成し、発電部の間をインタコネクタで直列に接続している。燃料は基体管の内側から、空気は外側から供給する。

電池本体の低コスト化のため、焼結法による電池製造技術の開発を進めてきた。円筒形 SOFC の製造法は、押出法で成形したセラミックス製基体管上に、未焼結の状態の外表面に、燃料極、電解質、インタコネクタ及び空気極原料のセラミックス粉を溶媒に溶かしたスラリーを基体管表面に順次印刷し複数の膜を同時に焼結している。円筒形状の薄膜セラミックスの製造方法として他に蒸着・溶射などがあるが、印刷にて高速製膜の後、一括して焼き上げる焼結法は最も低コストの製造方法で、電池



(a) 電池構造



(b) 外 観

図 4 円筒形 SOFC

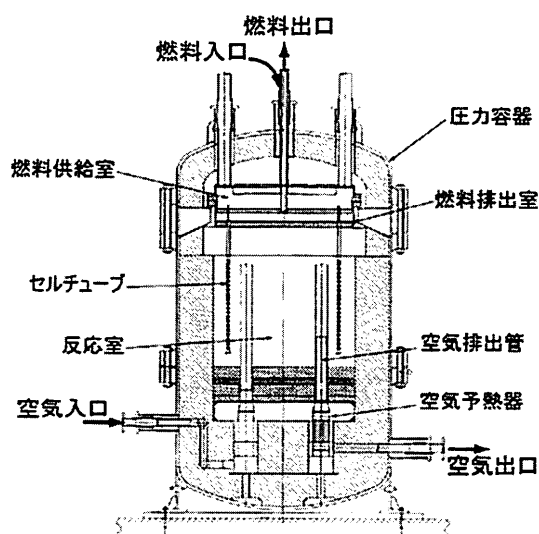
本体の製造コストが大幅に低減する。

更なる低コスト化を目指し、単位面積当たりの電気出力を増加させたアドバンス円筒形 SOFC の開発を新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受け実施している。

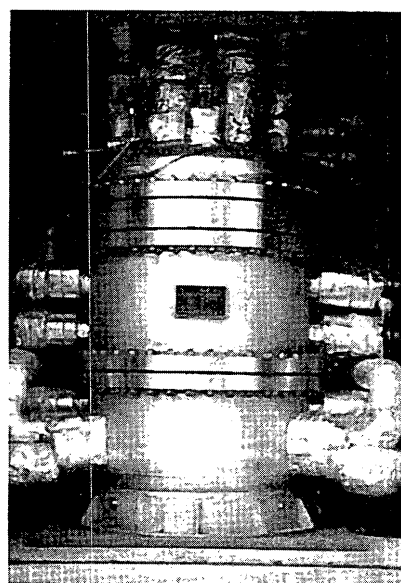
当社では 1989 年より電源開発㈱との共同研究にて円筒形 SOFC モジュールの開発を進めている。1990 年に国産 SOFC として初めて 1 kW 級モジュールの発電に成功以来、1995 年に常圧型 10 kW 級モジュールの 5000 時間連続運転を達成した。さらにガスタービン複合発電に不可欠である加圧化技術開発の一環として、1996 年に加圧型 1 kW 級モジュールの連続 1000 時間運転、1998 年に加圧型 10 kW 級モジュールの連続 7000 時間運転を実施した。

2001 年には加圧内部改質型 10 kW 級モジュールにて、圧縮天然ガス (CNG: Compressed Natural Gas) を燃料とする内部改質発電にて、755 時間の連続発電に成功した。加圧内部改質型 10 kW 級モジュールの仕様は、288 本のセルチューブを装着し、圧力 0.39 MPa、温度 900℃ で 10 kW の出力を得るものである。モジュール構造及び外観を図 5 に示す。モジュール容器は円筒型形状で、下方から空気、上方から燃料を投入し、それぞれ排ガスとの再生熱交換による予熱を経て、発電室に供給している。加圧内部改質で世界に先駆けて連続 755 時間の運転を達成した。

ガスタービンとの複合発電に不可欠な加圧内部改質技術に基づき、2004 年度の運転開始に向けて、100 kW 級システム開発を進めている。



(a) 構 造



(b) 外 観

図 5 加圧内部改質型 10 kW 級モジュール

#### 4. SOFC ガスタービン複合発電システム

SOFCは1000℃の高温で作動するので、加圧型SOFCをトッピングとするガスタービン複合発電プラントでは、SOFC反応後の高温で燃料成分の少ない排燃料ガス(発熱量約3 MJ/m<sup>3</sup>N, 700 kcal/m<sup>3</sup>N)を、高温の空気で燃焼してガスタービンに導くことにより、極めて高い発電効率が得られる。図6に各種発電システムのT-S線図を示す。線図で囲まれた部分を取り出せる仕事(電気エネルギー)である。(a)は蒸気タービンで用いられる再熱サイクル(ランキンサイクル)、(b)はガスタービン(プレイトンサイクル)をトッピングしたものである。(c)は更にSOFCをトッピングしたものである。SOFCで燃料の化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換するので、温度を1000℃より上げることなく(b)より多くの仕事(電気エネルギー)を取り出すことができる。ガスタービンの高温化の代わりにSOFCを置くことにより、高効率が得られる。

SOFC ガスタービン複合発電システムは、規模・燃料に応じて様々なシステム構成が考えられる。

図7(a)にSOFCとガスタービンの複合発電システムを示す。オープンサイクルのガスタービンの燃焼器をSOFCで置き換えたものである。燃料はSOFCに投入され直接電力に変換される。SOFCで得られる電力は直流であるので、インバータで交流に変換される。空気は、ガスタービン圧縮機から全量がSOFCに送られ、SOFCはガスタービン圧縮機出口圧力で加圧運転される。SOFCで発電した後の燃料成分の少ないガスを燃焼してガスタービンに送るので、タービン入口温度は900℃程度となり比較的低いが、上流のSOFCが高効率で発電しているので、システム全体の効率は高くなる。当社の6 MW級ガスタービンMF-61形を使用する場合、17

MWのSOFCと組み合わせ、送電端出力23 MW、送電端効率61%(LHV基準)となる。

図7(b)に天然ガス燃料のSOFC・ガスタービン・蒸気タービン複合発電システムを示す。700 MW級SOFCガスタービン複合発電システムでは、送電端効率は72%(LHV送電端)となる。発電出力は、SOFCが550 MW、ガスタービンが150 MW、蒸気タービンが60 MWである。プラントのイメージを図8に示す。

図7(c)に石炭ガス化SOFC複合発電システムの系統を示す。石炭ガス化炉からの燃料ガスはガス精製を経てSOFCに投入され直接電力に変換される。空気は、ガスタービン圧縮機から全量が抽気されてガス化炉とSOFCに送られる。SOFCでの発電後の燃料と空気を燃焼してガスタービンに送り、ガスタービン排ガスから排熱回収ボイラにて発生させた蒸気と、石炭ガス化炉からの蒸気を合わせて蒸気タービンで発電する。700 MW級石炭ガス化SOFC複合発電システムでの発電効率は60% LHVで、石炭燃料の発電システムとしては、極めて高い効率である。プラントのイメージを図9に示す。

#### 5. むすび

SOFCは、環境に優しい発電システムとして大きく期待されている。SOFCとガスタービン複合発電とを組み合わせることにより、究極の高効率発電システムを構成することが可能で、地球温暖化ガス排出量削減にも貢献できる。

今後共SOFC電池モジュールのスケールアップとシステム開発を着実に進めていく。当社はSOFC・ガスタービン・排熱回収ボイラ・蒸気タービンと複合発電プラント全体の技術を有しており、これをSOFC複合発電の実用化に活かしていきたい。

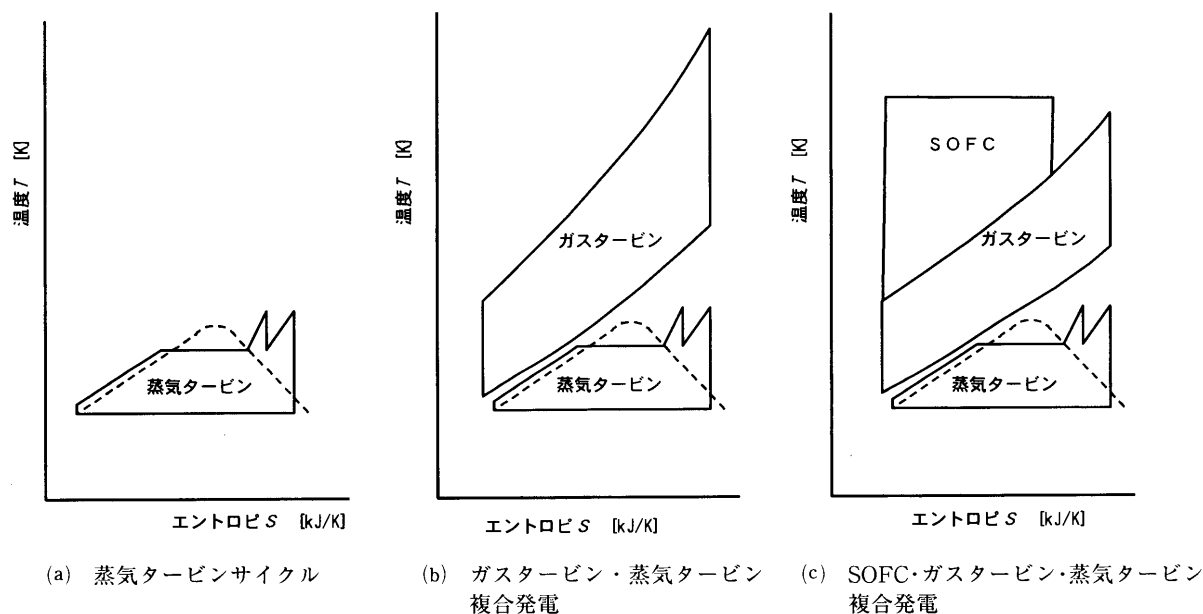
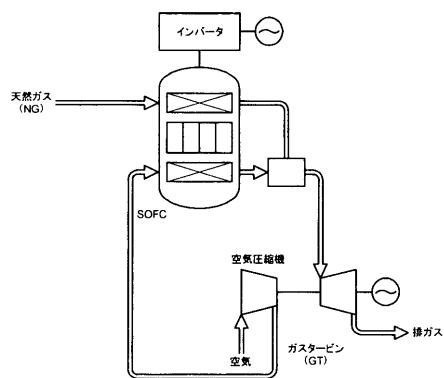


図6 複合発電システムのT-S線図



(a) 天然ガス焼き SOFC・ガスタービン複合発電システム

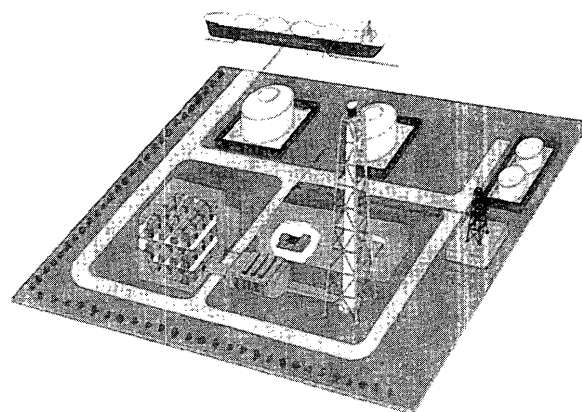
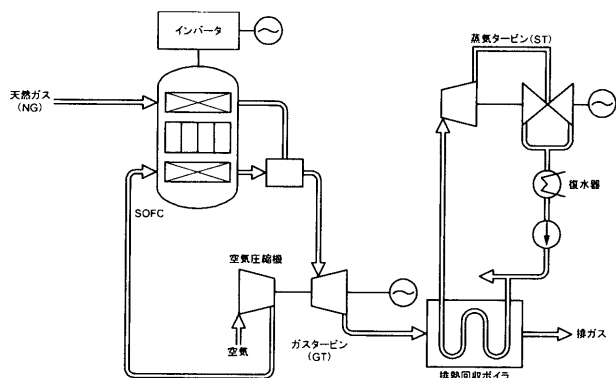


図8 天然ガス焼き SOFC ガスタービン複合発電プラント



(b) 天然ガス焼き SOFC・ガスタービン・蒸気タービン複合発電システム

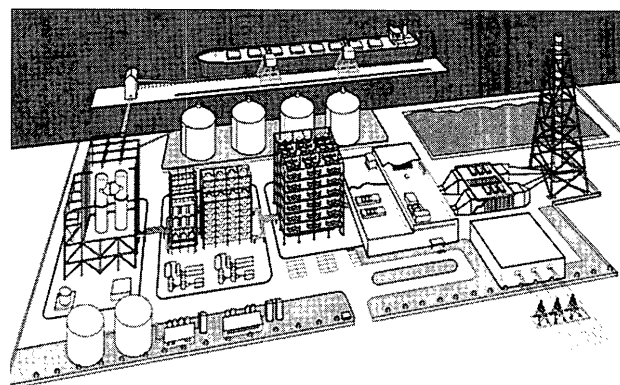
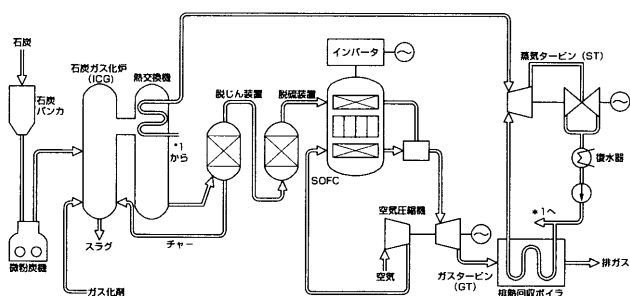


図9 石炭ガス化 SOFC 複合発電プラント



(c) 石炭ガス化 SOFC 複合発電システム

図7 各種複合発電システム

終りに、SOFCに関する当社の技術は、NEDO 委託研究及び長年にわたる電源開発㈱、中部電力㈱との共同研究の中で培われてきた。関係者に対し感謝の意を表する。

特集：ガスタービン利用高効率エネルギーシステムの動向

## スーパーごみ発電システム

原田 拓二\*<sup>1</sup>  
HARADA Takuji

大庭 康二\*<sup>1</sup>  
OBA Yasuji

キーワード：スーパーごみ発電，複合発電システム，航転形ガスタービン，LM 2500，高浜発電所，ごみ焼却設備

Gas turbine Combined System, Waste Incineration Power System, Aeroderivative gas turbine, LM 2500, Takahama Power Station, Incineration Plant

### 1. 緒言

群馬県企業局高浜発電所は，国内実証第1号機としてスーパーごみ発電設備の運転を1996年11月より開始した。スーパーごみ発電は，ごみ発電技術にガスタービン複合発電技術を組み合わせることで，従来の5～15%の発電効率を30%以上に高める発電方式で，本発電所は最大出力25,000 kW，発電効率34.4%で運転されている。

本発電所は，群馬県企業局と新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO）の共同技術実証事業として，既設ごみ焼却施設である高浜クリーンセンター敷地内に建設されたもので，図1に発電所全景を示す。本事業の目的は，ごみ焼却施設で発生した蒸気を，ガスタービンの排気で加熱する排熱回収ボイラ・ガスタービンおよび蒸気タービンを組み合わせた複合ごみ発電技術を開発実証することであった。7年間順調な運転を続け，得られたデータより，その目的は十分に達成された。



図1 発電所全景

本論文は，発電設備の概要を述べると共に運転実績を報告するものである。

### 2. 高浜発電所の概要と特徴

本発電所は，主要設備としてガスタービン発電設備・排熱回収ボイラおよび蒸気タービン発電設備で構成され，建築面積約1,200 m<sup>2</sup>，高さ30 mの建家内に収められている。図2に平面図を，図3に断面図を示す。

本発電所のシステムは，既設ごみ焼却設備にて発生した蒸気とガスタービン排気より発生させた蒸気を合流させた後，過熱器で高温化させて蒸気タービンへ導くシス

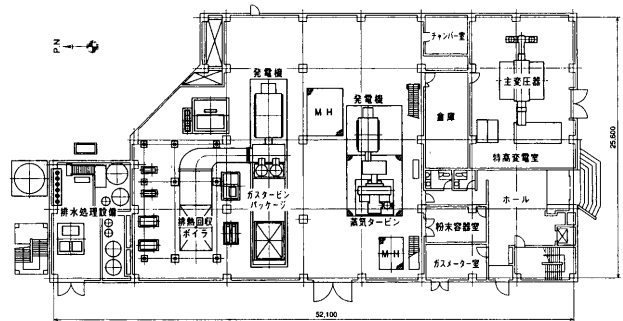


図2 平面図

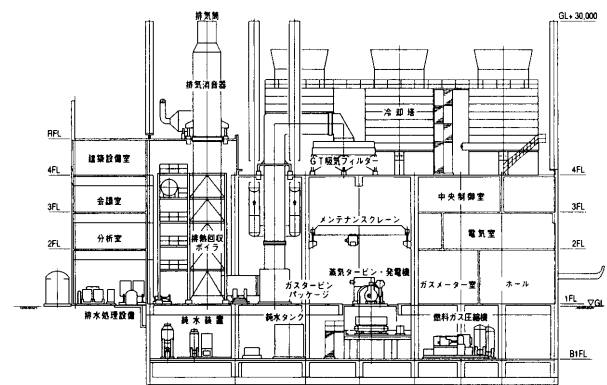


図3 断面図

原稿受付 2003年3月3日

\*1 日立造船(株) 機械事業本部 エンジニアリング事業部  
発電システム部  
〒559-8559 大阪市住之江区南港北1-7-89

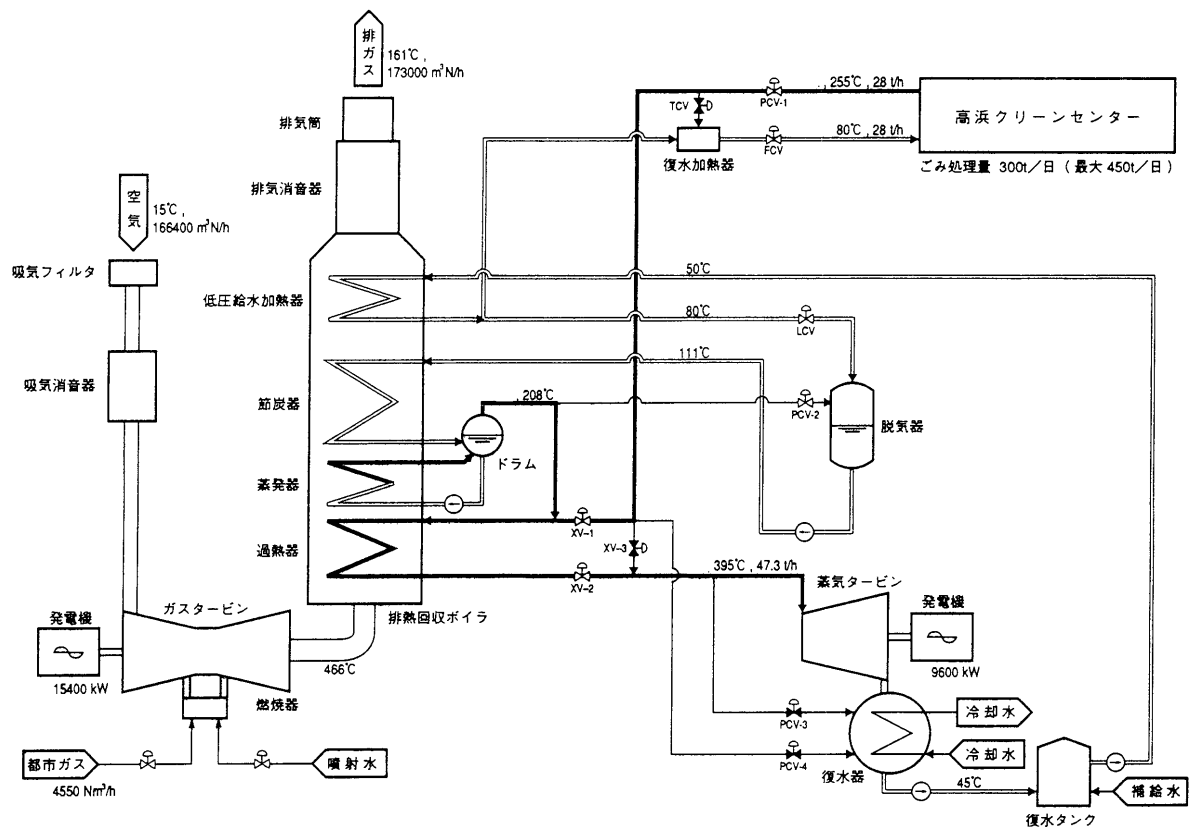


図4 システムフロー

表1 主要設備仕様

| ガスタービン    |                     | 蒸気タービン    |                 |
|-----------|---------------------|-----------|-----------------|
| 形式        | 単軸開放サイクル2軸式         | 形式        | 復水タービン          |
| 定格出力      | 17,500kW            | 定格出力      | 10,500kW        |
| 外気温度      | 0℃                  | 主蒸気圧力     | 1.47MPa G       |
| 燃料        | 都市ガス12A             | 主蒸気温度     | 395℃/250℃       |
| NOx対策     | 水噴射                 | 排気圧力      | 9.8kPa          |
| NOx値      | 40ppm以下(O2 16%)     | 蒸気タービン発電機 |                 |
| ガスタービン発電機 |                     | 形式        | 3相交流発電機         |
| 形式        | 3相交流発電機             | 定格出力      | 12,400kVA       |
| 定格出力      | 20,600kVA           | 電圧        | 6,600V          |
| 電圧        | 6,600V              | 復水器       |                 |
| 排熱回収ボイラ   |                     | 形式        | 水冷式(シェル&チューブ)   |
| 形式        | 単胴強制循環式             | 冷却面積      | 1,020m²         |
| 蒸気圧力      | 1.52MPa G           | 冷却水温度     | 30℃             |
| 蒸気温度      | 400℃                | 冷却水量      | 2,770t/h        |
| 蒸気量       | 51.3t/h(受入蒸気28t/h含) | 冷却塔       |                 |
| 給水温度      | 110.8℃              | 形式        | 超低騒音型強制通風式乾湿併用型 |
|           |                     | 循環水量      | 3,300t/h        |
|           |                     | 冷却水温度     | 43℃/30℃         |
|           |                     | 外気湿球温度    | 25℃             |

テムで、スーパーごみ発電と呼ばれている。そのシステムフローを図4に、設備仕様を表1に示す。

- 本発電所の運用上の特徴は、以下のとおりである。
- (1) 総出力25,000kWで運転される事業用発電所で、電気事業としての安定供給と給電指令に基づく運転を行う。
  - (2) 本発電設備のガスタービンは、WSS (Weekly Start & Stop) および DSS (Daily Start & Stop) で運用できる計画としている。(運開後現在まで WSS で運用中)
  - (3) ごみ焼却設備にて発生する蒸気処理するために、蒸気タービン発電設備および復水器は連続運転で運用する。

3. 基本計画と実績

3.1 設備容量

本発電所は電気事業法上、ガスタービンを原動機とする高浜第一発電所と、蒸気タービンを原動機とする高浜第二発電所で構成されている。ガスタービンの認可出力は、気温0℃、燃料使用量5,000 m³/hをベースに17,500 kW、蒸気タービンの認可出力は、気温35℃、クリーンセンターからの受入蒸気量28 t/hをベースに10,500 kWに決定した。ただし総発電出力は各種制約により、25,000 kWで運用されている。

3.2 発電効率

本発電設備の発電効率は次式によって定義され、スーパーごみ発電出力時の計画値は34.3%である。

発電効率 =  $\frac{\text{総発電電力出熱}}{(\text{都市ガス燃料入熱} + \text{ごみ焼却入熱})} \times 100$

ごみ焼却入熱については、本発電所が受け入れる蒸気量を28 t/h、焼却炉ボイラの効率を80%として算出した熱量を採用している。クリーンセンター建設時の熱精算図から逆算した低位発熱量7,225 kJ/kgをベースに算出した発電効率を表2、表3に示す。

既設のクリーンセンターは、1,300 kWの背圧タービンを装備しており、発電効率は5.1%と低いが、本タービンを休止して、高浜発電所側で発電する場合、ガスタービン停止時15.1%、ガスタービン運転時34.3%と計画

表2 発電効率比較(1)

|              | クリーンセンター | 高浜発電所  |        |
|--------------|----------|--------|--------|
|              |          | GT運転時  | GT停止時  |
| ごみ焼却量(t/d)   | 150x2炉   | 150x2炉 | 150x2炉 |
| ごみ発熱量(kJ/kg) | 7,225    | 7,225  | 7,225  |
| 受入蒸気量(t/h)   | —        | 28     | 28     |
| ST主蒸気圧力(MPa) | 1.77     | 1.57   | 1.57   |
| ST主蒸気温度(°C)  | 240      | 395    | 250    |
| ST排気圧力(kPa)  | 127      | 9.8    | 9.8    |
| ST出力(kW)     | 1,300    | 9,630  | 3,800  |
| GT出力(kW)     | —        | 15,370 | 0      |
| 総発電出力(kW)    | 1,300    | 25,000 | 3,800  |
| 発電効率(%)      | 5.2      | 34.3   | 15.1   |

注: ST: 蒸気タービン, GT: ガスタービン

表3 発電効率比較(2)

|                             | 通常運転時  | GT最大出力時 | ST最大出力時 | ボイラ蒸気量最大時 |
|-----------------------------|--------|---------|---------|-----------|
| 外気温度(°C)                    | 15     | 0       | 35      | 35        |
| 受入蒸気量(t/h)                  | 28     | 15      | 29.8    | 0         |
| GT燃料消費量(Nm <sup>3</sup> /h) | 4,550  | 5,000   | 4,430   | 5,000     |
| GT出力(kW)                    | 15,370 | 17,500  | 14,500  | 16,860    |
| ST出力(kW)                    | 9,630  | 7,300   | 10,500  | 5,100     |
| 総発電出力(kW)                   | 25,000 | 24,800  | 25,000  | 21,960    |
| 発電効率(%)                     | 34.3   | 37.6    | 34.1    | 41.8      |

通りの効率が得られた。また各種運転モードにおいても、表3に示すとおり34.1~41.8%の発電効率が見られ、所期の目的を達成した。

### 3.3 システム計画

本発電所は、既設のクリーンセンターの運転状態によって変動する蒸気を全て受け入れる必要があるために、以下の点に配慮して、システムを構築した。

- (1) ガスタービン停止時においても、クリーンセンターからの蒸気を受け入れて、蒸気タービンを運転するために、クリーンセンターから受け入れる蒸気と、排熱回収ボイラからの発生蒸気を合流させて過熱器に導くラインと過熱器のバイパスラインにバイパス弁(XV-1およびXV-3)を設置し、ガスタービンの運転・停止に合わせて、両弁を自動的に切り替えることとした。
- (2) 蒸気タービンがトリップした場合でも、クリーンセンターからの受入蒸気を処理し、ガスタービンの運転を継続させるために、タービンバイパス弁(PCV-3)を設置した。本弁は、蒸気タービン入口蒸気量を全量処理出来る容量とし395℃または250℃の蒸気を直接復水器に導くシステムとした。
- (3) クリーンセンターの3炉運転時には、最大45t/hの蒸気を受け入れる必要がある。そのために、プラントバイパス弁(PCV-4)を設置し、蒸気タービン入口蒸気量が定格以上となった場合に、余剰蒸気は昇温せずに、復水器に直接導くシステムとした。
- (4) クリーンセンターへ返送する復水の温度を常時80℃とするために、排熱回収ボイラに低圧給水加熱器を、復水返送ラインに復水加熱器をそれぞれ設置した。

## 4. 主要機器

### 4.1 ガスタービン

ガスタービンは、TF 39型航空機用エンジンをベースとした米国ゼネラルエレクトリック社製のLM 2500で、圧縮機・燃焼筒・高圧タービン・出力タービン・排気コレクター・アクセサリギヤボックス等より構成される単純開放2軸型のガスタービンである。本ガスタービンは航空機転用型であり、産業型に比較してコンパクト・軽量で急速始動が可能である。構造を図5に示す。

ガスタービン本体はパッケージに納められており、定期点検時にはパッケージから、本体のみを取り外し、専門工場にて整備することになっている。またウッドワード製NETCON 5000にて制御される。

本機は2軸型ガスタービンであるので、負荷遮断特性に特に留意し、シミュレーション計算を行うと共に、米国にて実機試験を実施して、負荷遮断特性を改良し、回転上昇率を10%以下に押さえることに成功した。また系統遮断時にも所内単独運転にスムーズに移行することを現地試運転時に確認した。

NOx低減対策には、ガスタービン燃焼器に水噴射を行う方法を採用している。水噴射系の発停についても、自動化を図りガバナにて噴射量を制御し、NOxの1時間値としてガスタービン全負荷範囲において、規定値の40ppmを達成した。原水として、高濃度のシリカを含む地下水に対応するため、ガスタービンで要求される噴射水の水質(シリカの含有量0.1ppm以下)を確保する目的で、純水装置とポリシャの間にろ過装置を装備した。

### 4.2 排熱回収ボイラ

排熱回収ボイラは、堅型の強制循環式でガスタービンに近接して配置したが、屋内設置のために配置上、排ガスの流れが3回直角方向に変化せざるを得なかった。そのために、シミュレーションにより、ガス流れの偏流を推定し、ダクト内に整流板等を設置した。

排熱回収ボイラの構造は図6に示すとおりで、外部保温方式を採用し、ガス流れに沿って二次過熱器・一次過熱器・蒸発器・節炭器・低圧給水加熱器の順に配置している。伝熱管はいずれもフィンチューブを採用し、過熱器については急速起動時の高温に耐えられる材質としてSTBA 22Sを選定した。

### 4.3 蒸気タービン

本発電所の運転形態は、ガスタービンが間歇運転(WSSまたはDSS)されるにもかかわらず、蒸気タービ

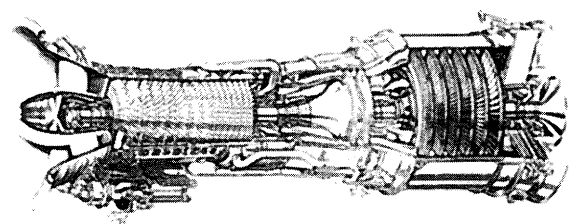


図5 LM 2500 ガスタービン



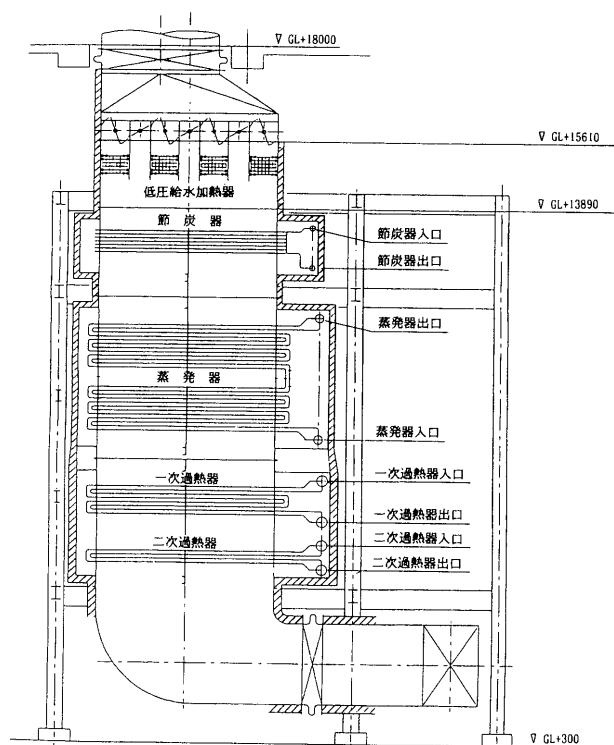


図6 排熱回収ボイラ構造図

ンは連続運転される。そのためにガスタービンの発停に応じて主蒸気温度が変化して、温度変化は145℃（運転時：395℃，停止時：250℃）に達し、蒸気タービンの疲労寿命に大きく影響する。したがって、過渡状態における熱応力と熱疲労を軽減するために、ガスタービンの起動・停止時における受入蒸気の切替制御、ガスタービン出力上昇・下降における適切な温度制御およびガスタービントリップ時には蒸気タービンをトリップさせるインターロックを採用した。

#### 4.4 復水器

高効率発電を達成するために、水冷式復水器により、器内圧力を9.8kPaとしている。復水器は蒸気タービン排気用であると同時に、ごみ焼却炉で発生する蒸気の処理装置として位置づけられており、バイパス弁経由の蒸気も受け入れる設計としている。

### 5. 発電所の運転計画

#### 5.1 発電所運転モード

本発電所は、系統電力・ガスタービン発電電力・蒸気タービン発電電力の3電源で運転されており、電源系統の信頼性は極めて高いシステムとなっている。本発電所の運転パターンは表4に示すとおり、通常3種類の運転

表4 発電所の運転モード

| 運転モード     | 1       | 2        | 3      |
|-----------|---------|----------|--------|
| 系統電力      | ○       | ○        | ○      |
| ガスタービン発電機 | ○       | ×        | ○      |
| 蒸気タービン発電機 | ○       | ○        | ○      |
| 受け入れ蒸気    | ○       | ○        | ×      |
| 備考        | 平日の通常運転 | 土・日・祝日運転 | 焼却炉定検時 |

パターンがある。モード1は通常の平日の運転パターンで、モード2は土・日・祝日の運転パターンでガスタービンは停止、モード3はクリーンセンターの定検時等で受入蒸気のない場合の運転パターンである。WSS運用ではモード1とモード2の繰り返しとなり、主蒸気温度が395℃と250℃とに変化するので、後述のとおり、排熱回収ボイラ発停制御に配慮した。

#### 5.2 プラントインターロック

事故時等の異常事態が発生した場合に備えて、以下のプラントインターロックを装備して、安定運転が継続出来るように配慮した。

##### (1) 系統電力トリップ時

トリップ時間は一般的には短時間であるので、復旧操作を簡単にするために、ガスタービン運転時（運転モード1および3）は蒸気タービンを負荷遮断し、ガスタービンの所内単独運転とすることにした。またガスタービン停止時（運転モード2）は、蒸気タービン所内単独運転とすることにした。

##### (2) ガスタービントリップ時

蒸気タービン主蒸気温度の急変を避けるために、蒸気タービンをトリップさせ、系統電力で所内負荷をまかなうものとした。ただしガスタービンの発停中は主蒸気温度が低いので、主蒸気温度が300℃以下の場合は、蒸気タービンをトリップさせずに、運転継続するものとし、不要動作をミニマム化させた。

##### (3) 排熱回収ボイラトリップ時

排ガスバイパスラインを装備していないので、ガスタービンをトリップさせることにした。ガスタービントリップ以降の制御は前項(2)のとおりである。排熱回収ボイラトリップ要因としては、ドラム液面と排熱回収ボイラ循環水の異常であり、誤動作防止の観点から2 out of 3の多重化方式によるトリップ回路を採用した。

##### (4) 蒸気タービントリップ時

ガスタービン出力をトリップ前の状態で運転継続させ、プロセス変動を極力与えないように配慮した。この場合蒸気タービン入口蒸気は、自動的にバイパスされて復水器に導かれ、ごみ焼却炉の運転に支障がないようにした。ただし排気真空度低下によるトリップについては、蒸気の処理が出来ないので、ガスタービンもトリップさせることにした。そのトリップ回路も誤動作防止の観点から2 out of 3の多重化方式を採用した。

### 6. 運転制御の計画と実績

本発電所の特徴は、ごみ焼却炉から供給される変動する蒸気を使用するにも係わらず、総発電出力を一定に保つ必要があることである。このために負荷追従性に優れた航空機転用型のガスタービンを採用すると共に、シミュレーションを行い最適な制御方法を確立した。以下にそのための総発電電力制御方式とガスタービン・排熱回収ボイラの発停制御方式の概要と実績を示す。

## 6.1 ガスタービン・排熱回収ボイラの発停制御

### (1) 起動制御

ガスタービン・排熱回収ボイラはWSS運用で、発停回数が多く、短時間の起動完了が要求されるために、制御上以下の点に配慮した。

- ガスタービンの急速始動。(起動後15分で負荷運転に移行)
- 前項(a)に伴う排熱回収ボイラの急速起動対策として、ドラム昇圧制御・ドラム液面制御および節炭器内での蒸気発生防止制御。
- 過熱器についても、急速起動対策として、クリーンセンターからの受入蒸気による昇圧制御および主蒸気温度変化率制御のもとでのバイパスからの受入蒸気切替制御。
- 主蒸気温度変化率制御のもとで、ガスタービン出力上昇制御。(前項(c)の受入蒸気切替制御と併行)

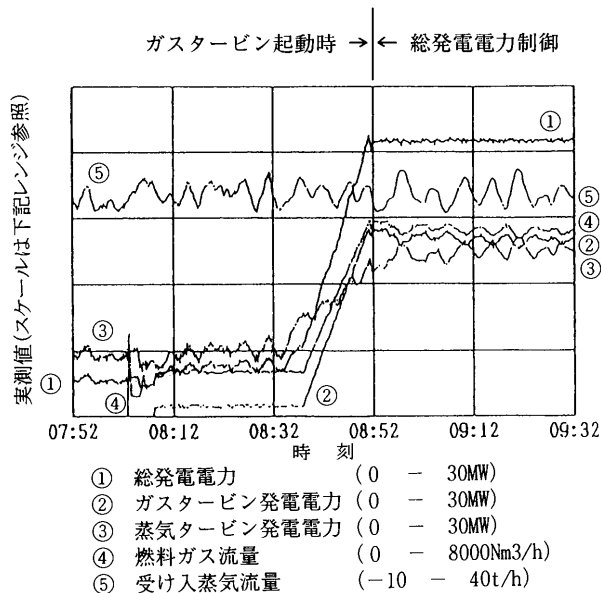


図7 ガスタービン起動時および総発電電力制御時の運転実績

以上の制御はすべて自動化されており、手動操作はガスタービンの起動と同期投入時のブレイクポイントのみとした。

図7および図8に起動時の運転実績を示す。ガスタービンは、起動操作後15分で所期負荷に達し、排熱回収ボイラ昇圧制御のもとで、ドラム圧力が上昇している。主蒸気温度変化率制御のもとで、受入蒸気切替制御と出力上昇制御を行い、ガスタービン起動から1時間以内に25,000 kWの総発電電力制御に計画通り移行していることが確認された。

### (2) 停止制御

25,000 kWの総発電電力制御からの停止制御については以下の点に配慮した。

- ガスタービンの出力下降制御は、主蒸気温度変化率に配慮した下降率とした。
- 受入蒸気切替制御は、ガスタービン所期負荷下降後とした。

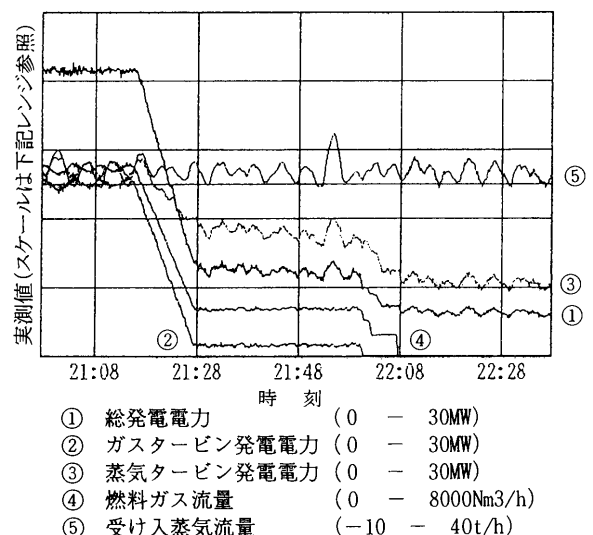


図9 停止時の運転実績(1)

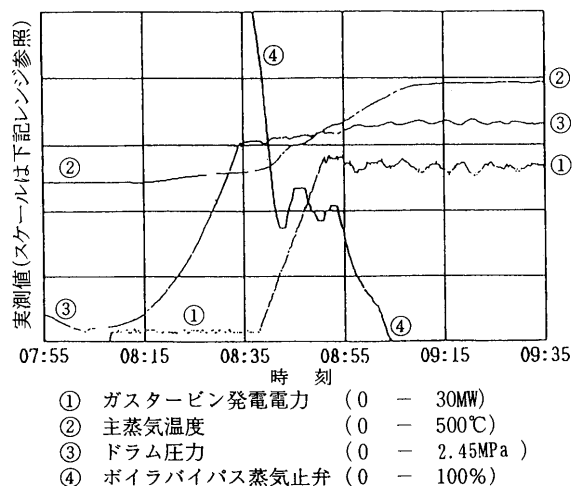


図8 ガスタービン起動時の運転実績

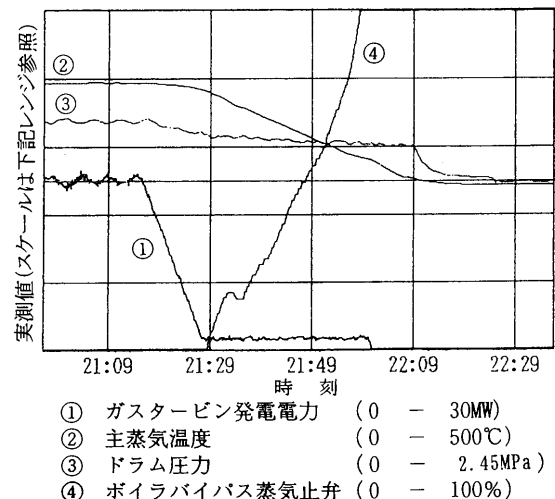


図10 停止時の運転実績(2)

- (c) 受入蒸気切替制御完了後に、ガスタービンを停止する。
- (d) ガスタービン停止時に排熱回収ボイラへの高温の入熱が急速に消失するので、主蒸気温度変化率制御。

図9および図10に停止時の実績を示す。出力下降開始から12分程度で、所期負荷に到達し、主蒸気温度が下降している。所期負荷到達後は、受入蒸気切替制御が開始され、主蒸気温度は更に下降している。ガスタービンの燃料遮断は、出力下降開始から、約50分後に行われており、計画通り制御がなされていることが確認された。

## 6.2 総発電電力制御

本発電設備は、通常25,000 kWの一定出力での総発電電力制御を行う。蒸気タービンは主蒸気圧力制御を行うために、ごみ焼却炉で発生した蒸気量に応じて出力変動し、この出力変化をガスタービンで吸収することで一定出力を得るシステムとした。

その結果、ガスタービンの排気エネルギーが変化し、蒸気タービンの入口蒸気量も変化し、蒸気タービン出力が変動する。したがって、システムを安定化させるためには、ガスタービンの出力制御が急速に行われる必要があり、どの程度の安定運転が可能であるかが課題であった。

図7に示すとおり、受入蒸気量は3分間で約6 t/h

変動し、これに追従して蒸気タービン出力も変動しているが、総発電電力は25,000 kWに一定保たれており、良好な制御がなされていることが確認できた。なお1時間値の変動巾は±100 kWであった。

## 7. 結 言

高浜発電所は、1996年10月31日に通産局（現経済産業局）の使用前検査に合格し、翌11月よりWSSで運用され、現在まで順調に運転中である。ごみ発電技術と複合発電技術を結合させたスーパーごみ発電技術が実証されたことの意義は大きい。

廃棄物の処理方法については、各種技術検討がなされているが、我が国の現状からは廃棄物発電の役割は非常に大きい。ただし廃棄物発電は、原料のエネルギー密度が小さく、供給量が不安定なために、発電効率が低く、安定供給が困難で質の悪い電源となっている。本技術はこの欠点を補うために開発したもので、ガスタービンをバッファとすることで、電力を高効率で安定供給することができるシステムであり、今後の普及を期待したい。

最後に本発電所建設工事に際して、群馬県企業局殿とNEDO 殿から多大なご指導をいただき、また運転実績データについては、高浜発電所殿の協力をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。

特集：ガスタービン利用高効率エネルギーシステムの動向

## 圧縮空気貯蔵ガスタービン発電パイロットプラントの実証運転について

山崎 裕史<sup>\*1</sup>

YAMAZAKI Hirofumi

キーワード：ガスタービン，圧縮空気貯蔵，負荷平準化

Gas Turbine, Compressed Air Energy Storage, Load Leveling

### 1. はじめに

圧縮空気貯蔵ガスタービン (Compressed Air Energy Storage Gas Turbine 以下：CAES-G/T) 発電とは何か、一般に耳慣れない用語なので以下に説明する。

図1の(a)に示す通常ガスタービン発電は、空気圧縮機とガスタービンを一体で連結運転し、生成した圧縮空気を直ちにガスタービンの燃焼用空気として利用し、発電するものである。

これに対し、図1の(b)に示すCAES-G/T発電は、ガスタービンと空気圧縮機を分離した構造である。夜間や休日の余剰電力で空気圧縮機を稼働して圧縮空気を生成し、それを岩盤内に設けた地下貯蔵施設に貯蔵する。

この圧縮空気を昼間の電力ピーク時に取出して燃料と共に燃焼させ、ガスタービン発電に利用するものである。

従来のガスタービン発電は、タービン発生出力の約2/3が圧縮機の駆動に使われ、電力として取り出されるのは残りの約1/3程度に過ぎない。一方、CAES-G/T発電では夜間等のオフピーク時に貯蔵しておいた圧縮空気を昼間に使用するので通常の約3倍の出力が得られるので大きな負荷平準化効果があり、電力貯蔵型電源の一つとして、早期の導入が期待されている。

CAES-G/T発電の商用プラントとしては、1978年に西独のフントルフ発電所 (290 MW)、1991年には米国

のマッキントッシュ発電所 (110 MW) で実用化され、技術的には見通しが立っている。

これら海外の例では、いずれも圧縮空気地下貯蔵施設は気密性・安定性に優れ、経済的に空洞建設の出来る岩塩層内に構築している。

しかし、わが国には設置可能な岩塩層がなく、比較的軟質で亀裂のある岩盤が多く、CAES-G/T発電を実用化するためには、高圧空気を貯蔵する耐圧性と気密性をもった貯槽を如何に経済的に建設するかが大きな課題となっている。

従って、圧縮空気地下貯蔵施設の健全性 (耐圧性・気密性) を確認するとともに、CAES-G/T発電パイロットプラント (以下：パイロットプラント) の建設、運転を通じて発電システムの実用性および安全性を確認することが必要である。

このことから、電力貯蔵型電源として実用化されている揚水発電を補完する電源の技術開発の一つとして、本プロジェクト (新型負荷平準化電源技術開発調査) が立上げられた。

このプロジェクトは、国 (経済産業省資源エネルギー庁) が平成2年度から12年間にわたって推進し、(財)新エネルギー財団 (NEF) に委託した事業である。この中で、北海道電力 (株) がガスタービン発電施設関係を電源開発 (株) が圧縮空気地下貯蔵施設関係を担当した。平成9～12年度にわが国初の「CAES-G/T発電パイロットプラント」の建設と試運転を行い、平成13年度には実証運転を行ったので、その概要について紹介する。

### 2. CAES プロジェクトの概要

今回のCAES-G/T発電パイロットプラントの立地地点は、技術的実証を行うことが本来の目的であったことから調査および建設に要する時間と費用の低減を図ることを第一条件として考えられた。

このため、地質資料がある程度整備されており、地下へのアプローチとして既設の坑道が利用できる鉱山や炭坑跡地を中心に検討された結果、最も条件が整っている北海道中央部に近い空知郡上砂川町の旧三井砂川炭鉱の

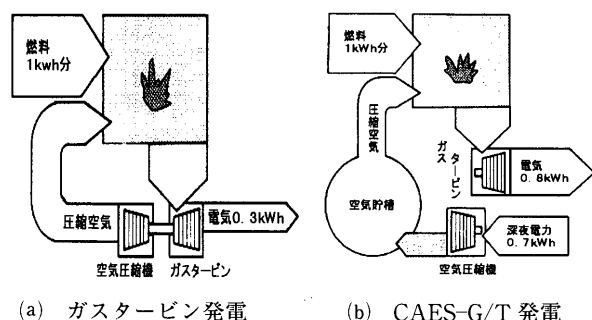


図1 CAES-G/T 発電とは

原稿受付 2003年2月27日

\*1 北海道電力 (株) 火力部火力計画グループ

〒060-8677 札幌市中央区大通東1丁目2



### 3.1.6 使用燃料

使用燃料は、環境的に適しており、プラントの設置場所が山間地にあることから入手が容易な灯油とした。

以上のパイロットプラント概要を図5に示す。

### 3.2 システム構成

システムは、大別して「空気圧縮設備」、「ガスタービン発電設備」、「圧縮空気地下貯蔵施設」の3つから構成される。このシステムフローを図6に示す。

#### 3.2.1 空気圧縮設備

空気圧縮機は、空気吐出量が少ないため、ガスタービンおよび発電機／電動機と一軸となった遠心式圧縮機ではなく4段の往復動（レシプロ）圧縮機を採用した。

この空気圧縮機は、別置の電動機により駆動され、夜間のオフピーク時の電力を使用し、約10時間かけて圧縮空気地下貯蔵施設（圧力：4～8 MPa.absで運用）へ空気を圧入する。

#### 3.2.2 ガスタービン発電設備

##### 1) ガスタービン

ガスタービンは当初計画では、I社製IM 270 ガス

- 上砂川町の三井砂川鉱跡地に建設
- 出力2,000kW
- 発電4時間
- 圧縮空気充填10時間
- 地下貯槽容量1,600m<sup>3</sup>(6m×57m)
- 貯蔵圧力4～8MPa(絶対圧)
- 貯蔵温度50℃以下
- 使用燃料: 灯油

図5 パイロットプラントの概要

タービン1台をCAES化改造することでシステムの概略検討を進めていた。しかし詳細検討を進める中で、計画空気量で発電要求事項を満足するためにはガスタービンの改造箇所が多く、また運用上も不利な点があることが明らかになった。

これらから、2,000 kW パイロットプラントに使用可能なI社製の既存ガスタービンを改造する種々のケーススタディを行い、定格出力時の熱効率の計算を行い、最も有利なサイクルを選定するものとした。

その結果、IM 270(高圧タービン)+IM 270(低圧タービン)+NO<sub>x</sub>低減純水噴射システムを採用した。

##### 2) ガスタービン発電設備

ガスタービン発電設備は、別置型の高・低圧タービン、空気予熱器、発電機および制御装置類から構成される。

発電のプロセスとしては、地下に貯蔵されていた圧縮空気が、通気管を経て地上部の空気予熱器にて暖められ、高圧燃焼器へ導かれる。そこで燃料（灯油）が投入され燃焼ガスとなり、高・低圧タービンを駆動する。この駆動力が減速機で一軸に合致され発電機を駆動して発電するものである。低圧タービンを出た排ガスは空気予熱器にて熱回収され、燃焼用空気の加熱に利用している。

この排ガス中のNO<sub>x</sub>濃度を低減させるため、燃焼器に純水を噴射する。

表1にガスタービン発電設備の基本性能を示す。

高圧・低圧タービン外観を図7、図8にそれぞれ示す。

#### 3.2.3 圧縮空気地下貯蔵施設

##### 1) 施設の概要

圧縮空気貯蔵施設は、圧縮空気を貯蔵する地下施設とこれと地上の発電設備を結ぶ通気管から構成される。

そのうち空気溜めである圧縮空気地下貯蔵施設は、地

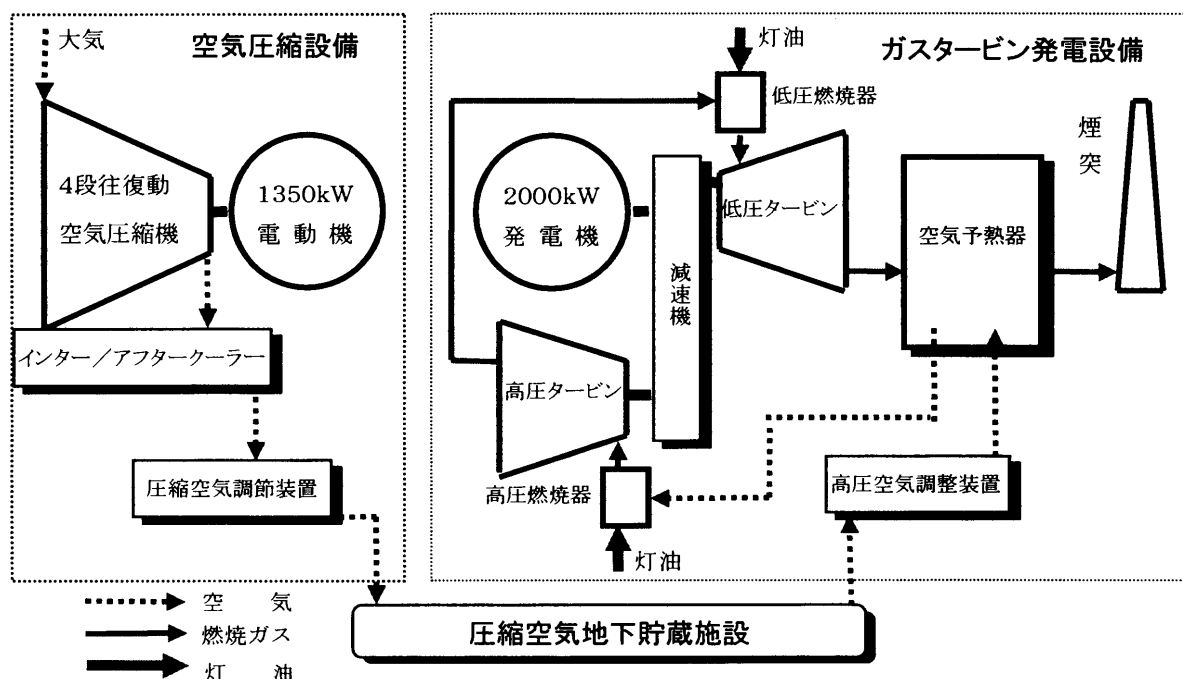


図6 システムフロー図

表1 ガスタービン発電設備の基本性能

| 項 目                         | 基本性能       |        |
|-----------------------------|------------|--------|
| 発電機端出力 (kW)                 | 2,000      |        |
| 減速機端出力 (kW)                 | 2,080      |        |
| 発電機回転数 (min <sup>-1</sup> ) | 1,500      |        |
| 発電効率 (%)                    | 58.8 (LHV) |        |
| システム効率 (%)                  | 30.9 (LHV) |        |
| NO <sub>x</sub> 濃度 (ppm)    | 70         |        |
|                             | 高圧タービン     | 低圧タービン |
| 燃料流量 (Kg/h)                 | 159        | 125    |
| 空気流量 (Kg/s)                 | 4.00       | 4.16   |
| 入口圧力 (MPa. abs)             | 1.383      | 0.47   |
| 入口温度 (K)                    | 998        | 1095   |
| 排気温度 (K)                    | 822        | 807    |
| 水噴射流量 (Kg/h)                | 56         | 100    |
| 回転数 (min <sup>-1</sup> )    | 43,553     | 18,338 |
| タービン出力 (kW)                 | 777        | 1375   |

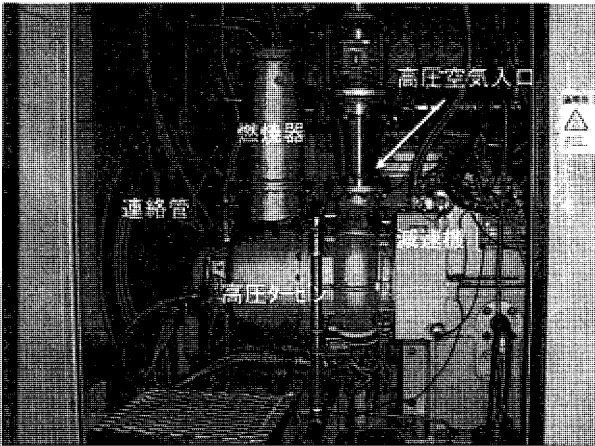


図7 高圧タービン外観

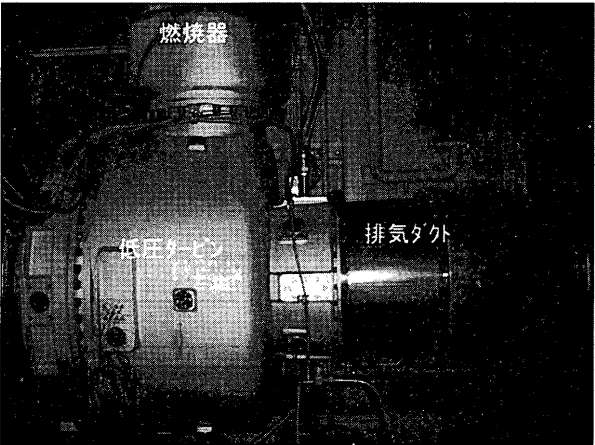


図8 低圧タービン外観

下約 450 m に構築される円形断面を有するトンネル型の空洞であり、貯槽部、プラグ部、端部から構成される。その大きさは、内径 6 m、長さ 57 m の円筒をマスコンクリートにより閉塞した容量約 1600 m<sup>3</sup> の高圧空気貯槽である。

圧縮空気地下貯蔵施設概略仕様・概念図を表 2、図 9 に、それぞれ示す。

2) 基本構造

圧縮空気地下貯蔵施設を構築する際の最大の技術的課題は、前述したとおり「地質構造が複雑で、一般に気密性の低いわが国の岩盤内に、必要十分な耐圧性および気密性を確保する」ことにある。

本プロジェクトでは、圧縮空気地下貯蔵施設の構築に当り、多種多様な岩盤構造への適用性を重視し、耐圧性、気密性を区分して対処する気密ライニング構造を採用した。本方式の概念図を図 10 示す。

a) 耐圧構造

圧縮空気地下貯蔵施設となる空洞のライニングを 16 分割（図 10 では説明のため 8 分割）し、内圧の作用時に分割部を開口させライニングの周長変化を許容する。このような柔らかいライニング構造とすることによって、内圧の岩盤負担を大幅に高め、分割ライニングに発生する引張応力を抑制し、ライニングの設計合理化を図るものである。この分割されたライニングピースを「コンクリート覆工版」と呼ぶ。

表2 圧縮空気地下貯蔵施設概略仕様

|         |  |
|---------|--|
| 種 類     | 地下空洞方式ゴムシート内張り気密ライニング  |
| 容 量     | 1, 6 0 0 m <sup>3</sup>  |
| 最高使用圧力  | 8. 0 MPa. a b s  |
| 主 要 寸 法 | 直径φ 6 m×長さ L 5 7 m   |
| 材 料     | ナイロン繊維補強ブチルゴムシートおよび<br>プレキャスト鉄筋コンクリート                                  |
| 通 気 管   | ・圧力配管用炭素鋼鋼管（アルミニウムメッキ）<br>・配管径 1 0 0 A（外径 1 1 4. 3 mm）<br>・配管長 6 0 5 m |

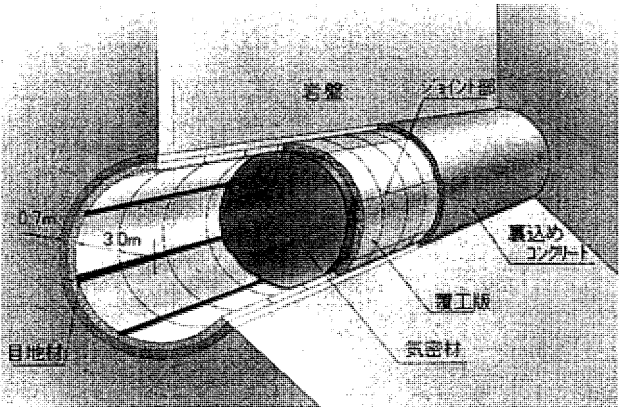


図9 圧縮空気地下貯蔵施設概念図

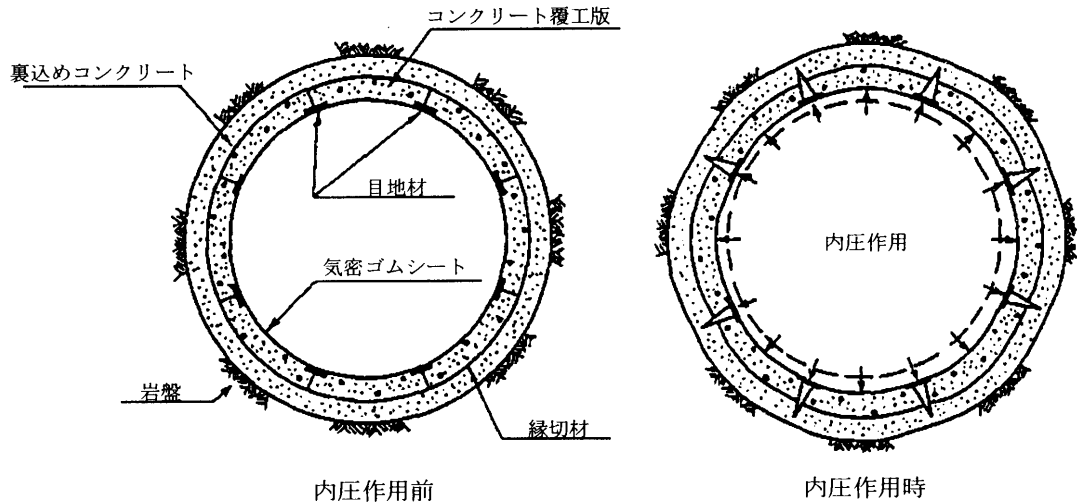


図 10 基本構造概念図

b) 気密構造

覆工版の内側に薄いゴムシートを装着して、ゴム材料特有の高い気密性能と覆工版の変形に追従する伸縮性能により圧縮空気の漏洩を防止する。

4. パイロットプラントの実証運転および性能試験

パイロットプラントは、平成 10 年度から高压タービンの製作を開始し、平成 11 年度は機器の製作と工場試験にて機能の確認を実施した。

平成 12 年 5 月から機器の据付および試運転調整を行い、使用前自主検査後の平成 13 年 6 月から 10 月まで実証運転を実施した。

ガスタービン発電設備の試運転および実証運転工程を表 3 に示す。

4.1 実証運転

実証運転は、30 および 60 サイクル運転を通して発電時間 393 時間 45 分、発電サイクル 106 回、受電電力量 1,773 MWh、送電電力量 750 MWh の実績であり、負荷平準化電源としての信頼性を検証することができた。

1 サイクルの運転は図 11 に示すように、1 日に圧縮空気を貯蔵するための空気圧縮機の運転時間が約 8 時間、ガスタービンによる定格出力 (2,000 kW) の発電時間が約 3 時間 30 分である。

実証運転パターンを図 11 に、実証運転の実績を表 4 に示す。

4.2 性能試験

2000 kW 定格負荷性能試験および部分負荷性能試験結果を表 5 に、実績値と計画値の相違を以下に説明する。

4.2.1 空気流量

空気流量は、図 12 に示すように計画値より約 3 % 増加したが高压タービンスラスト調整用および低压タービン冷却用 2 次空気流量の増加により使用量が計画値より 2.5% 増加したためである。

4.2.2 燃料消費量

燃料消費量は、図 13 に示すように計画値より約 4 % 増加したがその主な要因は以下のとおりである。

- ・ 高压タービン・低压タービン燃料配分変更
- ・ 高压タービンノズルエリアが 6～7 % 広い
- ・ 高压燃焼器燃焼効率が 3～5 % 低下

4.2.3 発電効率

発電効率は、図 14 に示すように燃料消費量の増加に伴い計画値より約 2 % 低下した。10 月 23 日の発電効率は、空気予熱器のカーボン付着により温度効率が低下したため 6 月 15 日および 8 月 10 日より 2.5% 低下した。

4.2.4 システム効率

システム効率は、図 15 に示すように計画値より約

表 3 試運転および実証運転工程

| 項 目       | H13/2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------|-------|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 試運転調整     | ■     | ■ | ■ | ■ | ■ |   | ■ |   |    |
| 使用前自主検査   |       |   |   |   | ▼ |   |   |   |    |
| 実証運転      |       |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 30 サイクル運転 |       |   |   |   | ■ | ■ |   |   |    |
| 90 サイクル運転 |       |   |   |   |   |   | ■ | ■ | ■  |
| 性能試験      |       |   |   |   | ▼ |   | ▼ |   | ▼  |
| 設備点検      |       |   |   |   |   | ▼ |   | ▼ | ▼  |



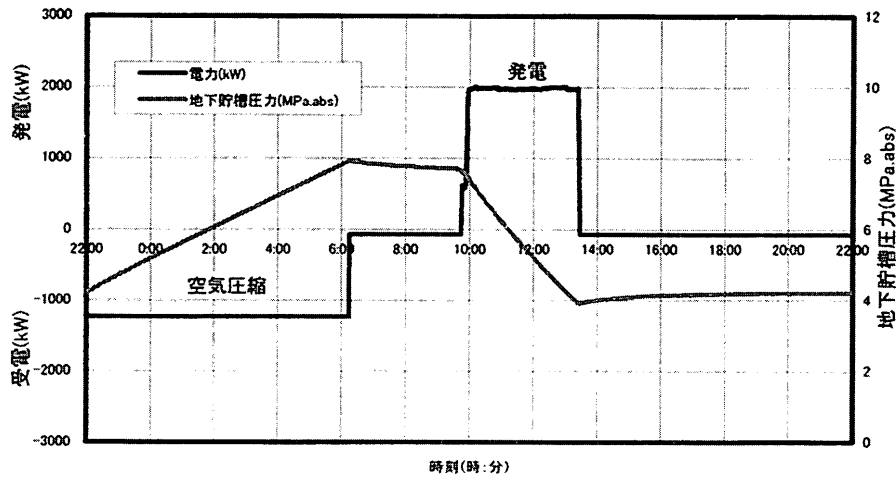


図 11 実証運転パターン

表 4 実証運転実績

| 項 目      | 運転実績        |
|----------|-------------|
| 発電時間     | 393 時間 45 分 |
| 発電サイクル回数 | 106 回       |
| 発電電力量    | 781 MWh     |
| 送電電力量    | 750 MWh     |
| 受電電力量    | 1,773 MWh   |

表 5 性能試験結果

|         |                | 発電機出力<br>(kW) | 空気流量<br>(kg/h) | 燃料消費量<br>(kg/h) | 発電効率<br>(%:LHV) | システム効率<br>(%:LHV) |
|---------|----------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| 定 格 負 荷 | 計画値(EOR)       | 2,000         | 15,660         | 284.7           | 58.7            | 30.8              |
|         | 実測値(H13.6.15)  | 1,988         | 16,148         | 291.9           | 57.6            | 31.8              |
|         | 実測値(H13.8.10)  | 1,990         | 16,192         | 292.5           | 57.6            | 31.2              |
|         | 実測値(H13.10.23) | 1,987         | 16,173         | 305.3           | 55.1            | 31.0              |
|         | 平 均            | 1,988         | 16,171         | 296.6           | 56.8            | 31.3              |
|         | 計画値との差         | -12           | +511           | +11.9           | -1.9            | +0.5              |
| 25%負荷   | 実測値(H13.10.24) | 635           | 9,749          | 132.0           | 41.0            | 20.1              |
| 50%負荷   | 実測値(H13.10.24) | 985           | 12,040         | 172.3           | 48.2            | 24.3              |
| 75%負荷   | 実測値(H13.10.24) | 1,527         | 15,772         | 232.2           | 55.1            | 28.1              |

$$\text{発電効率} = \frac{(\text{発電機出力} \times 860)}{(\text{燃料消費量} \times \text{燃料発熱量})} \times 100 (\%)$$

$$\text{システム効率} = \frac{(\text{発電機出力} \times \text{発電時間} \times 860)}{(\text{燃料消費量} \times \text{燃料発熱量} \times \text{発電時間}) + (\text{空気圧縮動力} \times \text{空気圧縮時間} \times 860)} \times 100 (\%)$$

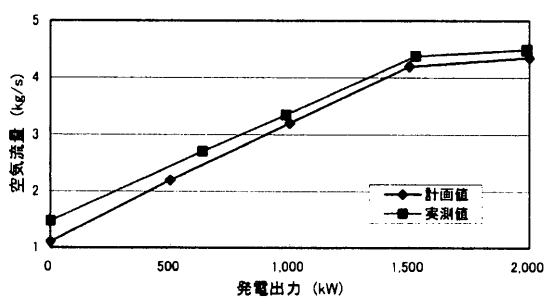


図 12 空気流量

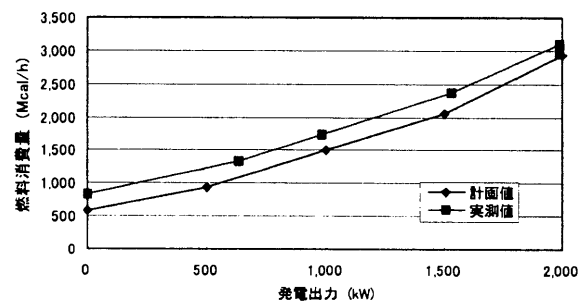


図 13 燃料消費量

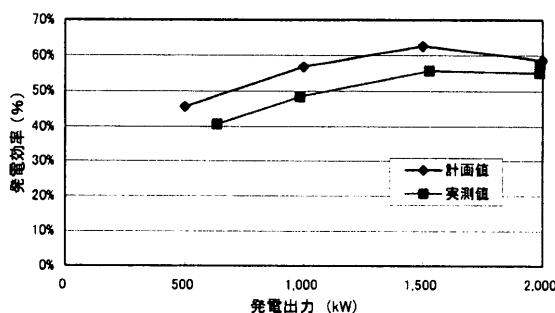


図 14 発電効率

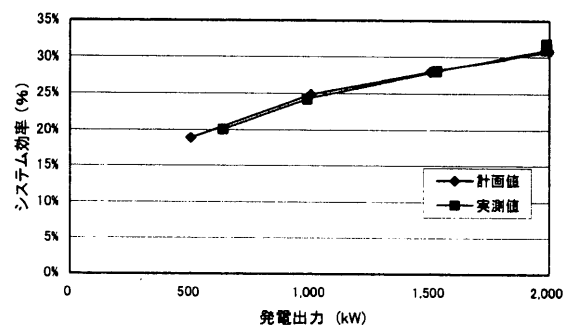


図 15 システム効率

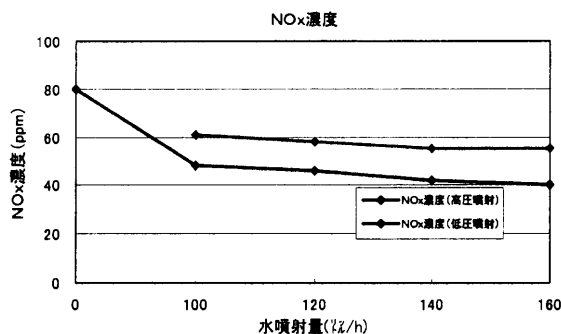
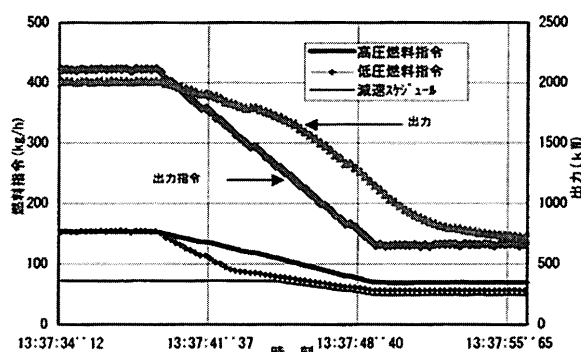
図 16 NO<sub>x</sub> 濃度

図 17 急負荷変動試験

0.5% 上昇した。これは空気圧縮機の性能が計画値より良く消費動力が 8.9% 少なかったことと、計画値算出において空気圧縮動力を定格吐出圧力 8 MPa.abs での消費動力  $1,230 \text{ kW} \times 10$  時間としていたためである。

#### 4.2.5 水噴射試験

本パイロットプラントでは高压タービンのみに水噴射することで、図 16 に示すように NO<sub>x</sub> を 55 ppm 程度（排出基準値：70 ppm）に抑制することが可能であった。本試験では、高压および低压燃焼器それぞれ単独に水噴射を行い NO<sub>x</sub> 濃度の測定を行った。本パイロットプラントのような 2 段燃焼の場合、高压燃焼器に水噴射を行う方が NO<sub>x</sub> 低減に効果がある。

#### 4.2.6 急負荷変動試験

負荷の急変動に対し問題なく運転ができたが、2,000→600 kW 急負荷変動試験では図 17 に示すとおり、空気流量調節弁の設置位置とガスタービンまでの空気配管長の影響および燃料消費量が減速スケジュールから決定される下限値に到達したことにより、負荷指令に対し実負荷の応答が 5～6 秒遅れた。

#### 4.2.7 CAES 化技術

CAES-G/T は冒頭説明したとおり、タービンと圧縮機が分離しているため通常のガスタービンに比べ慣性力が小さく、負荷遮断時の回転上昇および高压タービンスラスト（軸方向の推力）対策などの技術課題を有している。このため、これら技術課題を解決するための対策とその検証を行った。

##### 1) タービン回転上昇対策

定格負荷遮断時のタービン回転の上昇は図 18 に示す

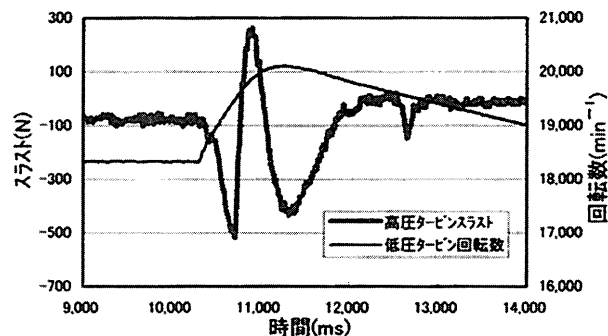


図 18 定格負荷遮断時のタービン回転数とスラスト変動

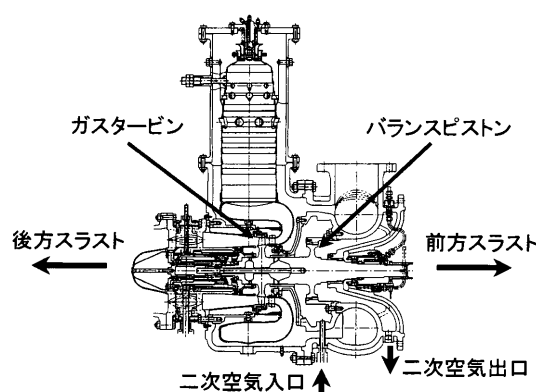


図 19 高压タービン構造

とおり 109.5%（回転数  $20,010 \text{ min}^{-1}$ ）であり、燃料の即時遮断とタービン入口空気を大気開放することにより目標の 113% 以内とすることができた。

##### 2) 高压タービンスラスト対策

定格負荷遮断時の高压タービンスラストは図 18 に示すとおり、最大変動値が -520 から 280 N と軸受許容値（ $\pm 1,470 \text{ N}$ ）以下とすることができた。

このスラスト対策は、図 19 の高压タービンの構造に示すとおり、新たに設置したバランスピストンへの加圧二次空気によって調整する構造とし、定格負荷遮断時にはスラストバランス室の加圧空気をタービン入口空気の大気開放とタイミングを合わせて開放し、スラストを許容変動幅に抑えることができた。

## 5. おわりに

実証運転および性能試験の結果、CAES-G/T 発電施設は特に技術的問題はなく、また、圧縮空気地下貯蔵施設の耐圧性および気密性も確認された。

今後の商用規模 CAES-G/T 発電への展開には特段の技術的課題は見当たらず、効率的にも揚水発電等と遜色ないため経済的見通しが得られれば商用プラントの実現も十分考えられる。

## 参考文献

- ・ 新型負荷平準化電源技術開発調査成果報告書（2002.3, METI, NEF）
- ・ 保苅，土田，小椋：火力原子力発電 Vol.53（2002）

# ゴミ焼却場用の蒸気結合システムについて

## Analyses of Gas-Steam Combined Systems for Waste Recover Plant

シュチック・オクサナ\*

Shtyk Oxana

キーワード：ゴミ発電所、蒸気噴射ガスタービン、リパワリング、コージェネレーション

Waste-to-Energy Power Plant, Steam Injection Gas Turbine, Repowering, Co-generation

### Abstract

For the purpose of carbon dioxide suppression and fossil energy saving, gas-steam combined power systems applied to waste-recover plant are proposed. Three types of gas turbine systems, such as Combined Cycle, Steam Injected Gas Turbine Cycle and Partial Regenerative Dual Fluid Gas Turbine Cycle were compared and the result of analysis shows that Combined Cycle can realize higher efficiency than the other two systems.

### 1. 緒言

国土の狭い日本であるが、製品の生産と消費、およびそれに伴うゴミ処理の量は世界でも有数である。現在、一般都市ゴミの74%が焼却されており、約15%が埋め立てられ、残りがコンポスト（ゴミを堆肥化する装置）などで処理されている。ゴミ処理施設は全国に約1900個所あり、そのうち焼却熱を利用して発電している施設は約230個所である。発電を行っている施設は規模も大きく、24時間体制で焼却が行われている。これらの施設のゴミ処理量は約200～600トン/日である。発電施設のないゴミ焼却施設の処理量は、50～150トン/日であり準連続式またはバッチ処理式の場合が多い。

他の発電方式に比べ、ゴミ焼却熱による発電の効率が低いのは理由がいくつかある。まず、ゴミ焼却工場の半分以上は不連続にゴミを焼却しており、発電はほとんど行われていない。連続式のゴミ焼却工場での発電設備の有無を図1に示す。図1は廃棄物研究財団の「ゴミ焼却施設台帳」(1999-12)に示されたデータを集計したものであり、ゴミ焼却施設の規模と発電設備の有無との関係を示している。連続式ゴミ処理施設は473個所あったが、そのうち発電を行っている施設は約半分しかない。また、焼却施設の発電効率は一般的に低いため、発電が行われないこともある。発電効率が低い第一の原因は、蒸気の温度を最高でも400℃程度までしか上げられないことである。このような低い温度で蒸気タービンを駆動しても発電効率はせいぜい12%止まりである。

日本で最初のゴミ焼却発電施設として、大阪市西淀工

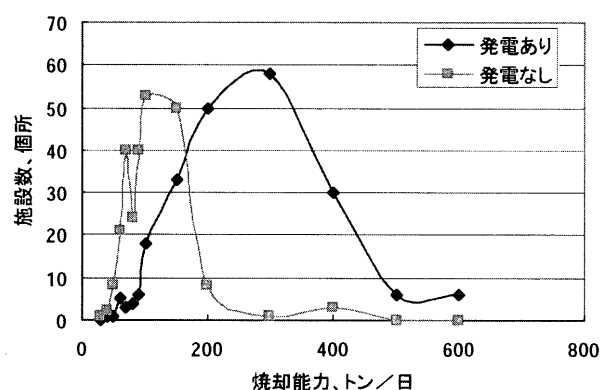


図1 ゴミ焼却施設規模と発電施設有無との相関関係

場が昭和40年に建設された。蒸気条件は350℃×3 MPaであった。しかし、ボイラー過熱器で高温腐食による管破損事故が多発したため、それ以来長い間、蒸気温度を300℃以下とする方針が採用されてきた。

以上の問題の解決のため、現在可能な方法として、発電施設各段階での効率改善、複合タービン発電方式の採用、ボイラー過熱器鋼管壁の定期交換、の3つの方法がある。本稿では、そのうち最初の2つについて細かく検討する。

### 2. ゴミ発電の従来技術問題点とその対策

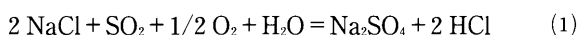
日本の場合、ごみ処理場は内陸部に多く、海または川の水を冷却水として利用できる条件はほとんどないためタービンの復水器は空冷式がほとんどであるが、本論文では大陸の大河の河岸のように冷却水が豊富に利用できる場合を想定していることをあらかじめ述べておく。

一般に、生ゴミには塩分が多く、塩化ビニールなどが混じっているため、焼却したときに燃焼ガスの塩化水素

原稿受付 2003年3月3日

\*1 芝浦工業大学理工学研究科地域環境システム専攻  
〒330-8570 埼玉県大宮市深作溜井原 307

の濃度が高くなる。このガスで蒸気を作るとき、ボイラー鋼管の管壁温度が 330℃ を超えると急速に高温塩素腐食が進むとされる(図 2 参照)。このため、300℃ 程度の低い温度でしか蒸気タービンを駆動できず、低い発電効率を余儀なくされる。高温塩化腐食の仕組みとしては、ゴミ中の塩化物やアルカリの酸化により、次の式(1)から生成された硫酸塩( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )が管を溶解し、塩化水素( $\text{HCl}$ )は式(2)の反応により腐食性の高い塩素ガス( $\text{Cl}_2$ )に変化する。



また、この反応は飛灰スケール中の重金属(鉛、亜鉛、錫など)から生成される低融点塩化物により促進されると考えられている。

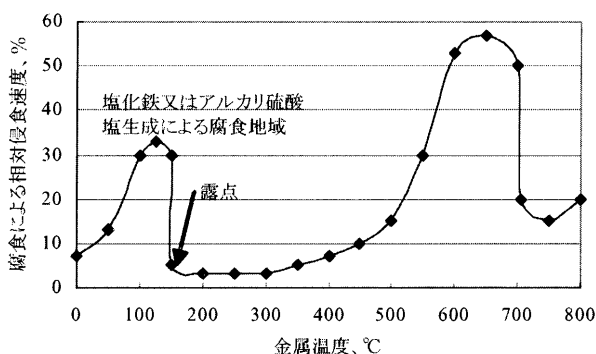


図 2 鋼管壁温度と腐食速度の関係

生成された塩素ガス( $\text{Cl}_2$ )と鉄および酸化鉄皮膜の間では、(3)と(4)の反応により鉄が最終的に三塩化鉄( $\text{FeCl}_3$ )の形で蒸発し、腐食の原因となっている。

但し、ゴミ発電効率が低い原因は複雑であり、蒸気温度だけを上げて、発電効率は火力発電の場合ほど上がらない。以下に、蒸気温度以外の要因について述べる。対象としたゴミ焼却施設は処理量が 900 トン/日、ボイラ蒸気条件 10 MPa×500℃(目標値)である。

#### a) 蒸気条件の影響

蒸気圧力を固定すると、温度を 20℃ 上げるごとに発電効率は 0.3~0.4% 向上する。

#### b) 空気比の影響

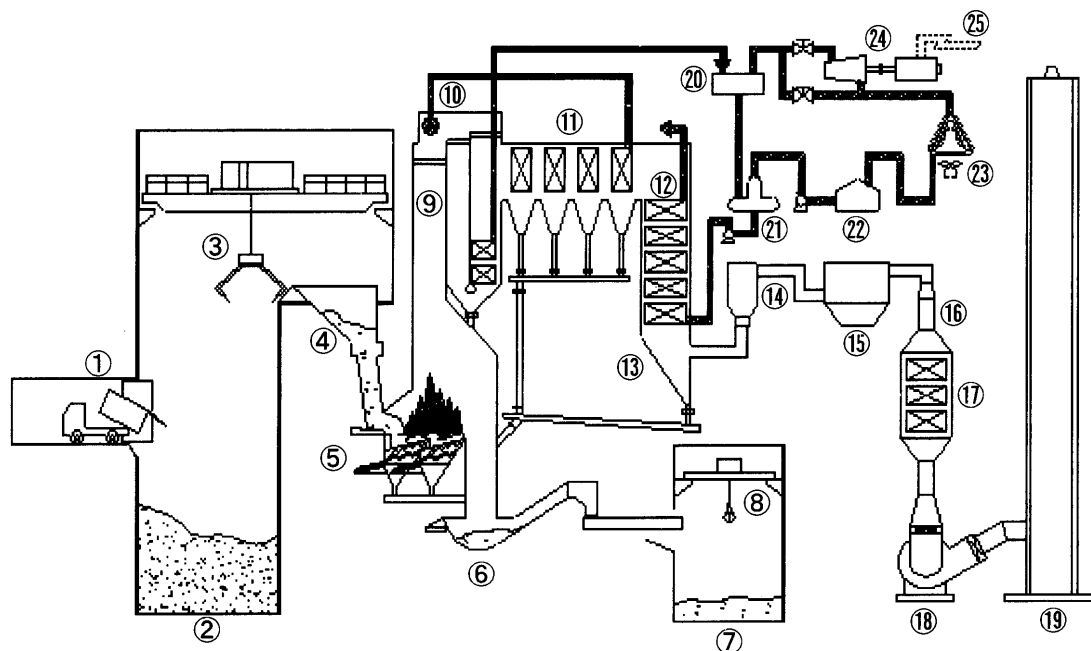
高温燃焼ガスはボイラーの火炉を経て、さらに過熱器へと導かれている。火炉出口ガス温度は一般的に溶融付着防止のために 900℃ 以下に抑えられている。このため、空気比は 2~3 が採用される。そうすると、ボイラーの出口排ガス中の酸素濃度は 10~15% になる。これは、火力発電の 4% の酸素濃度と比較すると、排気ガスの持ち出す熱損失が上がるため、発電効率は 5% 下がる。

#### c) タービン排気圧力の影響

ゴミ焼却施設用蒸気タービンの復水器は空冷式が多く、タービン排気圧力は一般的に 25 kPa 程度である。これは、水冷式の場合の排気圧力である 5 kPa と比較して発電効率が 3% ほど低くなる。

#### d) 節炭器の影響

ゴミ発電では、空気予熱器は、材料の腐食問題のため



- |               |           |           |             |             |
|---------------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| 1) 投入ステージ     | 2) ゴミピット  | 3) ゴミクレーン | 4) ゴミ供給装置   | 5) 火炉(ストーカ) |
| 6) 灰押し出し装置    | 7) 灰ピット   | 8) 灰クレーン  | 9) ボイラ部     | 10) ドラム     |
| 11) 過熱器       | 12) 節炭器   | 13) ホッパー  | 14) 反応蒸発塔   | 15) ろ過式集塵器  |
| 16) 蒸気式ガス再加熱器 | 17) 脱硝反応塔 | 18) 誘引送風機 | 19) 煙突      | 20) 蒸気分岐管   |
| 21) 脱気器       | 22) 復水タンク | 23) 復水器   | 24) タービン発電機 | 25) 送電線     |

図 3 ゴミ焼却発電概略図

一般的に使用されていない。予熱器で冷却材として使われている給水温度は、低温腐食防止をするため 150℃ 以上に上げる必要がある。そのため、高温側の排気温度も 220℃ 以下に下げることが難しい。もし水予熱器の次に空気予熱器を設置して、排気温度を 100℃ まで下げられれば、発電効率は 0.9% 向上させられる。

#### e) 給水温度の影響

上記のように、給水温度が 150℃ に設定されるため、排気温度は 220℃ となる。経済的に許される限り節炭器管の伝熱面積を大きくして、排気温度を 220℃ から 180℃ まで下げられれば、発電効率は 0.5% 改善される。

#### f) 集塵装置の温度制限の影響

最近では、ダイオキシン低減のため、集塵装置としてバグフィルタ (BF) が採用されている。BF の場合、入口ガス温度は約 150℃ に設定されている。そうすると、節炭器から出てくる 220℃ の排気ガスを BF 前の反応蒸発塔で冷却する必要があるため、熱損失が増える。

#### g) 脱硝反応塔の温度制限の影響

BF を出た排ガスは触媒式脱硝装置に入るが、触媒の適正反応温度の関係からガスは 150℃ から 210℃ に昇温される。このように 220℃ の排ガス温度は BF の前で 150℃ まで冷却され、次に脱硝のために蒸気を使って 210℃ まで加熱される。このエネルギーの無駄使いを避けられれば、つまり、節炭器を出た 220℃ の排気ガス温度を脱硝反応塔まで同温レベルで維持すれば発電効率は約 1.5% 改善できる。

#### h) 工場規模の影響

ゴミ焼却施設の機器の大きさ、系列数、蒸気条件などが同じであれば、発電効率はゴミ焼却量だけに左右される。例として、焼却量が 300 トン/日の場合を想定すると、100 トン/日まで減った場合、発電効率は約 2～3% 下がる。

発電の高効率化のためには、現在、いくつかの方法があるが、いずれにしても課題としてプラント全体の効率を向上させ、蒸気温度も 500～600℃ まで上げることがある。ひとつの方法として、先に述べたとおり、ゴミ焼却施設の各問題点個別にではなく、総合的に解決することが挙げられる。

もう一つ、アメリカやヨーロッパでよく使われている方法として、予熱器管の耐食性材料の開発と、それを使った予熱器管を 3～5 年ごとに交換することがある。厳しい腐食環境に耐える、耐腐食性および耐火性の強い超合金が火炉蒸発管に使われる。また腐食防止のため、二重管構造が一般的に採用されている。内部管は SiC 系耐火物を用いて高温ガスから保護する。外部管は、Ni, Cr 系耐食性合金の被膜により耐久性を 3 年以上に高める。これらの工夫により、蒸気温度を 400℃ まで上げられれば発電効率は 20%、蒸気温度を 500℃ 程度まで上げられれば発電効率は 30% まで改善されるものと期待されている。

### 3. 未利用蒸気を活用した

#### 二流体ガスタービン発電システム比較

さらに別の方法として、リパワリングを採用することがある。つまり、焼却ボイラを出る蒸気温度を 300℃ 程度に抑え、別個に燃料を焚いてガスタービンを駆動して、その排ガスで蒸気を過熱し、ガスタービンまたは蒸気タービンに導いて再度動力を取り出す。本論文では、ガスタービン廃熱を発電効率向上に有効利用する方法として、回収蒸気で蒸気タービンを駆動するコンバインドサイクルと、回収蒸気を燃焼器内に噴射する蒸気噴射ガスタービンサイクルを比較する。

ガスタービンについては 1000～5000 kW 級を想定し、以下の要素特性を設定した。

|                 |                |
|-----------------|----------------|
| 減速ギア効率: 98%     | 機械効率: 98.8%    |
| 発電機効率: 95.5%    | 圧縮機断熱効率: 76.7% |
| タービン断熱効率: 83.3% | 圧力比: 11        |
| 燃焼器効率: 99.0%    | ピンチポイント: 50℃   |
| 給水温度: 60℃       |                |

空気の条件は、ISO 標準 (大気圧 101.3 kPa, 温度 15℃, 相対湿度 60%) とした。燃料としては都市ガス ( $\text{CH}_4 = 88\%$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6 = 6\%$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8 = 4\%$ ,  $\text{C}_4\text{H}_{10} = 2\%$ , 燃料発熱量 9984 kcal/m<sup>3</sup>) を想定した。

ガスの各成分の比熱は長島・松永の計算式を使用することとした。

蒸気タービンの諸条件については、機械学会蒸気表を基にするソフトウェアにより計算した。蒸気タービンの復水器は水冷式であり、背圧は 0.005 MPa と仮定した。蒸気タービンの断熱効率は 70% 程度とした。

下記のとおり、他の 3 種類のシステムを比較の対象とした。

#### 1) コンバインドサイクル

ガスタービンからの 600℃ ほどの高温排ガスにより、排熱回収ボイラで発生した飽和蒸気 (圧力 1.8 MPa, 温度 206℃) は過熱器に導かれ、500℃ 程度まで過熱され、蒸気タービンによる発電出力を得る (図 4 参照)。

#### 2) 従来形蒸気噴射ガスタービン

蒸気噴射ガスタービンは、1970 年代から欧米各国で提案された。図 5 に示すとおり、タービン下流の排熱回収過熱器を通して過熱された蒸気が、燃焼器内に噴射される。燃焼器内に噴射された蒸気は燃焼ガスとともにタービン内で仕事をし、ガスタービンの出力と効率を増大させる。

#### 3) 部分再生二流体ガスタービン (以下、PRDF と略す)

PRDF システムを図 6 に示す。圧縮機出口空気は二つの経路に分けられ、片方はそのまま燃焼器に入るが、他方は燃焼器に入る前にエジェクタで飽和蒸気と混ぜ合わされ、過熱器に導かれ、排熱により過熱される。本システムは圧縮空気の一部による部分的な再生操作が行われる、エクセルギー損失の少ない排熱回収手法として提案されており、比較的手軽に熱電可変が実現できるシステムとして注目されている。

次に、3つのシステムに対して、効率、経済性、環境への影響について比較検討を行った。3つのシステムに対して発電効率、総合発電効率、リパワリング効率等の各々について比較する。まず最初に蒸気噴射割合の変化が発電効率にどう影響を与えるかについて述べる。発電効率の定義は次のとおりである。

発電効率 = 発電機端出力 / (燃料流量 × 燃料発熱量)

この定義によれば、単位出力あたりのガス燃料消費量が少ないシステムが有利である（発電効率の計算式の中で、ゴミ自体の発熱量が考慮されていない）。したがって、この3つのシステムの中で、コンバインドサイクルの場合だけ、新たな燃料を加えなくても出力を増加させられる。ゴミ工場から廃棄物である蒸気の供給を無償で受けるが、この蒸気はGTの排ガスによって過熱されて、STに入る。蒸気流量が増えれば増えるほど、STの出力は上がる。これに対して、GTの燃料消費量は変化し

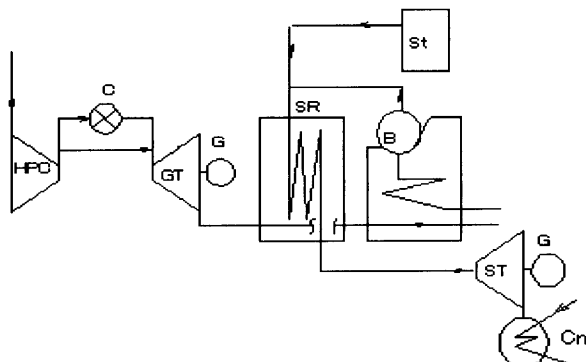


図4 コンバインドサイクル

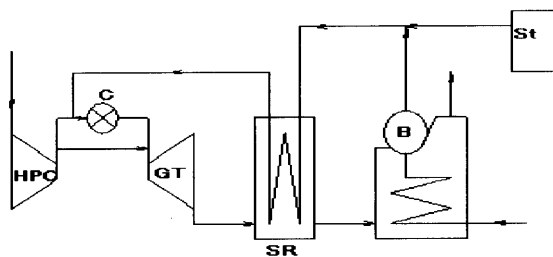


図5 従来形蒸気噴射ガスタービン

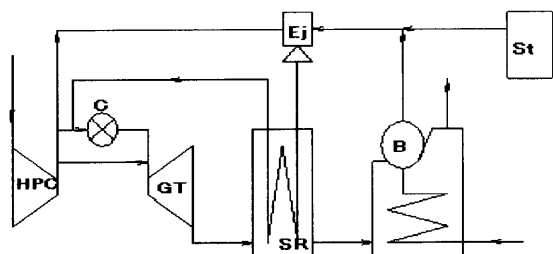


図6 部分再生二流体ガスタービン（PRDF）

図4～6中の記号

C : Combustor, G : Generator,  
HPC : High Pressure Compressor, SR : Steam Reheater,  
GT : Gas Turbine, Cn : Condenser,  
ST : Steam Turbine, B : Boiler,  
St : Saturated Steam from Waste Recovery Plant.

ない。蒸気噴射GTの場合には、蒸気噴射量が増えれば増えるほど、噴射蒸気温度を1100℃まで過熱するための新たな燃料が必要となる。ただし2種類の蒸気噴射GTの比較において（図7aおよび7b参照）、ゴミ回収蒸気噴射量比率が例えば50%のときに、部分再生形の出力増加割合は従来形の約1.25倍であり、そのため発電効率も2～6%ほど高くなる。

発電効率、総合発電効率の意味を理解するためには「増加割合」という概念が役に立つ。

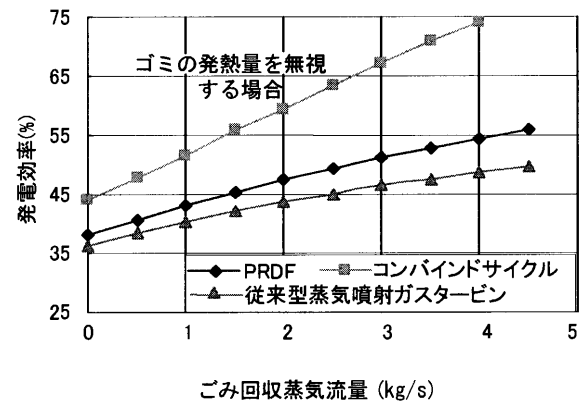


図7 ゴミ回収蒸気流量と発電効率の関係

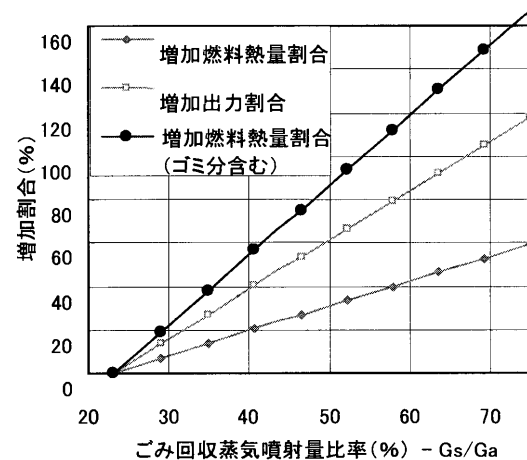


図7a 従来形蒸気噴射発電

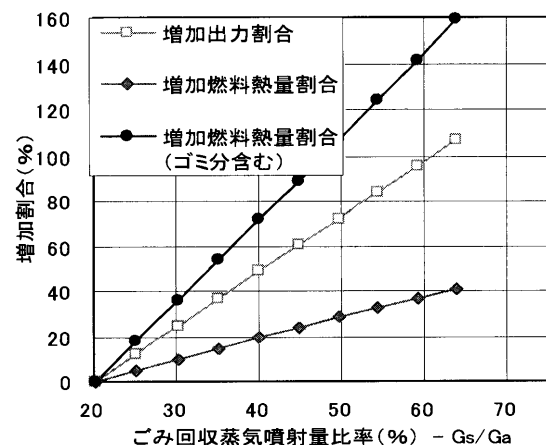


図7b 部分再生蒸気噴射発電

$$\text{出力増加割合} = (p - p_0) / p_0$$

$$\text{燃料増加割合} = (g - g_0) / g_0$$

p — 蒸気噴射をする場合の出力

g — 蒸気噴射をする場合の燃料消費量

p<sub>0</sub> — 蒸気噴射をしない場合の出力

g<sub>0</sub> — 蒸気噴射をしない場合の燃料消費量

この定義による出力増加割合が燃料熱量増加割合より大きければ発電効率が上がる。図7aの例では、蒸気噴射流量比が40%の場合、出力増加率=40.1%、燃料増加率=20.4%である。つまり、出力増加率が燃料の2倍程度増える。図7bの部分再生形の場合、同じ条件を与えると、出力増加率=48.6%、燃料増加率=19.4%となり、出力増加率が燃料の2.5倍大きい。

しかし、ここでゴミを燃料として考えれば、燃料増加率が出力増加率より大きくなる（図7a、7bのそれぞれ一番上の線参照）。この事実は総合発電効率に影響を与え、蒸気噴射をすればするほど総合発電効率がかかることとなる。総合発電効率は次のように計算される。

$$\text{総合発電効率} = \frac{\text{総合発電量}}{(\text{外部燃料入熱} + \text{ゴミ燃料入熱})}$$

総合発電効率の定義では、ゴミは燃料と考えられている。蒸気流量が増えれば増えるほど燃料増加率は上がり（総合燃料流量の中で発熱量の少ないゴミ割合が増えるから）、総合発電効率は下がる。これでは蒸気噴射をする意味はなく、未利用の蒸気を捨てるのが一番合理的なことになってしまう。このことから、未利用の蒸気を活

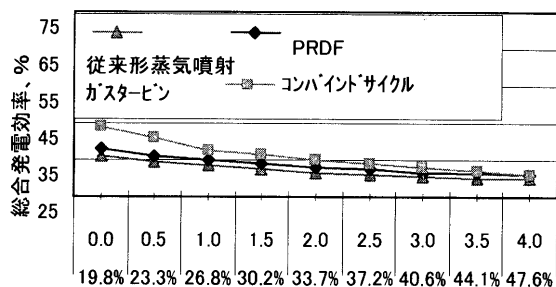


図8 ゴミ回収蒸気流量と総合発電効率の関係

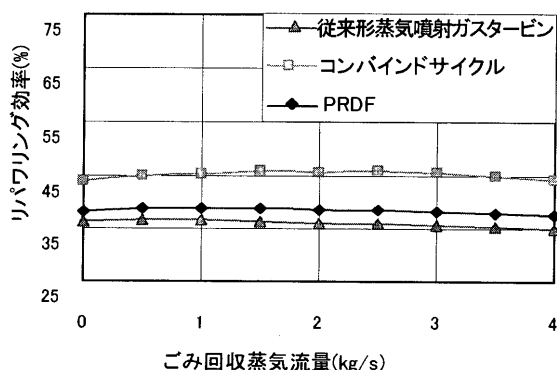


図8a ゴミ回収蒸気流量とリパワリング効率の関係

用するシステムでは、総合発電効率、発電効率による評価は不適当であると考えられる。

次のステップとしてリパワリング効率をもとにして比較する。

図8に三つのシステムでのゴミ回収蒸気流量とリパワリング効率の関係を示した。

念のために、リパワリング効率は学理論上の効率ではなくて、実際の従来形のエネルギーシステムを取り外して、その代わりに新たなシステムを投入するときに、従来形のシステムと比べると、単位出力当たりの燃料消費量がどのくらい少なくなるかということを示している。

リパワリング効率の定義と計算例は次のとおりである。

リパワリング効率 =

$$\frac{\text{総合発電量} - \text{従来形発電量} \times 860}{(\text{外部燃料入熱} + \text{従来形燃料入熱}) - \text{従来形燃料入熱}}$$

$$= \frac{\text{総合発電量} - \text{従来形発電量} \times 860}{\text{外部燃料入熱}}$$

$$= \frac{(\text{GT 発電量} + \text{ST 発電量} - \text{従来 ST 発電量}) \times 860}{(\text{GT 燃料流量} \times \text{燃料発熱量})}$$

図9に、ゴミ回収蒸気流量(STのサイズ)を固定して、GTの吸気空気流量(GTのサイズ)を変えた結果を示す。

従来形蒸気噴射ガスタービンとPRDF両システムにおいて熱サイクル的な最適化検討に加えて、機械要素の技術的問題についての検討する必要がある。

燃焼器のサイズやサージ マージンや残酸素分等の問題点から蒸気噴射量は15~20%程度に限定されているのが現状である。図10と図11を参照して、残酸素分の余裕を比較する。

各システムの燃焼器内の残酸素分の余裕を比較した結果を示す。この図では、未利用の蒸気を扱い、蒸気噴射割合が20%を超える場合のみを扱った。蒸気噴射割合が20%以下の場合には排熱回収ボイラで生成しうる蒸気量であり、既に多くの研究がなされている。この図から分かるとおり、この2つのシステムの大きな相違点は、従来形蒸気噴射ガスタービンにおいては残酸素濃度が圧

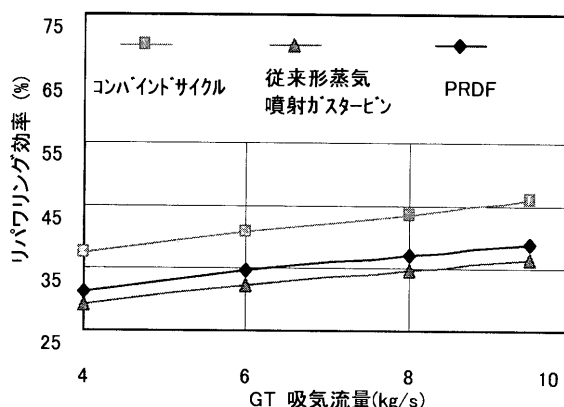


図9 GT吸気流量とリパワリング効率の関係

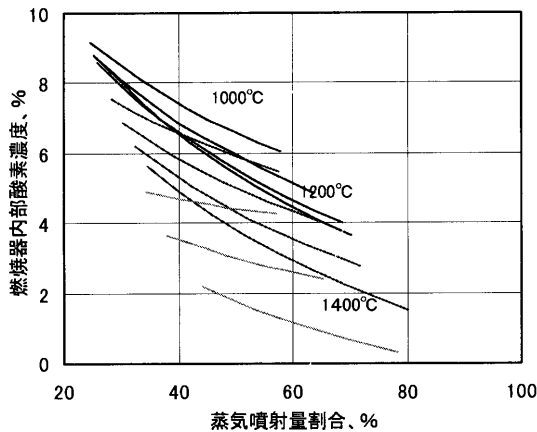


図10 蒸気噴射量と残酸素濃度の相関関係

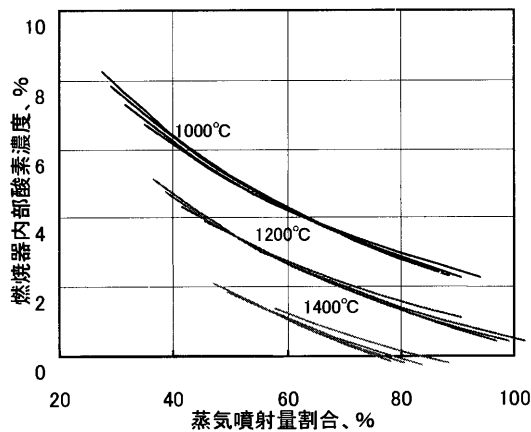


図11 蒸気噴射量と残酸素濃度の相関関係

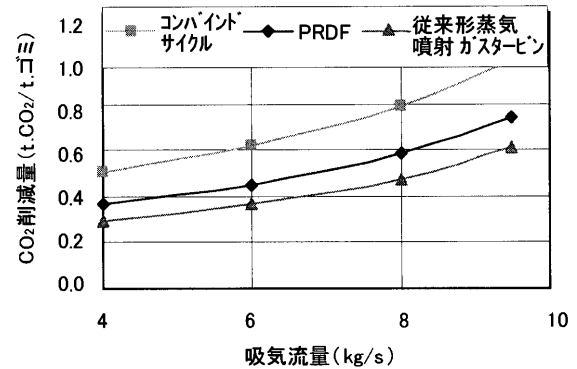
力比に依存しないことであり、PRDFにおいては従来形蒸気噴射ガスタービンと同じ噴射割合において、より大きな残酸素濃度がある。現在、完全燃焼をさせるためには残酸素濃度が12～15%必要であると考えられる。しかし、上図からは残酸素濃度が5～8%であっても燃焼が継続している限り、蒸気噴射を40%まで上げてよいことになる。

#### 4. 炭酸ガス排出量削減効果

COP3の会議以来、日本は温室効果ガス排出量削減について厳しい義務を負うようになった。そこで、化石燃料の消費節約だけでなく、再生可能エネルギーや低質燃料などの未利用エネルギーの活用を図る必要性が高まっている。次に、上記の3つのシステムのために炭酸ガス排出量削減の計算方法を示す。

ゴミから発電される電力は、事業用火発電所での発電量を減らし炭酸ガス排出量を低減させる効果があるのでその量を算出した。

$$\begin{aligned} \text{炭酸ガス排出量削減効果 (kgCO}_2\text{)} = & (\text{発電端発電量: kW}) \times \\ & (\text{事業用火発電所 CO}_2\text{ 発生原単位}) - \\ & (\text{燃料使用料: MJ}) \times (\text{燃料 CO}_2\text{ 発生原単位}) \end{aligned}$$

図12 GT 吸気流量と CO<sub>2</sub> 削減量の関係

事業用火発電所 CO<sub>2</sub> 発生原単位 = 0.59 kgCO<sub>2</sub>/kW

(0.16 kgC/kW)

1992 年事業用火発電所の総平均

燃料 CO<sub>2</sub> 発生原単位 = 灯油 0.0678 kgCO<sub>2</sub>/MJ

ここに計算の例としてコンバインドサイクルをあげたい (他の2システムでも同様に炭酸ガス排出量が削減される)。

ゴミ回収蒸気流量 = 2 (kg/s),

吸気流量 = 9.494 (kg/s)

① 計算プログラムの出力結果より

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ 総排出量} &= 0.01935 \text{ (kmol/s)} \times 44.0088 \text{ (kg/kmol)} \\ &\times 3600 \text{ (s)} = 2598 \text{ (kg/h)} \end{aligned}$$

② 計算プログラムの出力結果より

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ 総排出量} &= 5973.2 \text{ (kW)} \times 0.59 \text{ (kgCO}_2\text{/kW)} \\ &= 3524.2 \text{ (kg/h)} \end{aligned}$$

炭酸ガス排出量削減効果 (kgCO<sub>2</sub>)

$$= (② - ①) / 1000$$

$$= (3524.2 - 2598) / 1000$$

$$= 0.925 \text{ (tCO}_2\text{/t ゴミ)}$$

上記のとおり、コンバインドサイクル、従来形蒸気噴射ガスタービン、PRDFの3種類のシステムを比較したが、コンバインドサイクルは効率的だけではなく、環境的にも優れたシステムとして考えられた。これに加えて、図10から読み取れるとおり、GTの大きさ(吸気空気量)は炭酸ガス排出量削減に好影響を与える。

#### 5. 結 論

廃棄物発電の低効率につながる各々の点を調べ、それを改善する方法を検討した。

ゴミ焼却施設の未利用蒸気を活用する3種類のシステムの比較検討を行い、以下の結論を得た。

- ① ゴミ発電の効率を上げる問題は複雑なため、施設全体の効率を向上させるだけでなく、蒸気温度も500～600℃まで上げ、その上でゴミ焼却施設の各問題点を個別に(予熱器管の耐食性材料の開発問題点を含め)解決する必要がある。
- ② 3種類のシステムの中でコンバインドサイクルは効率的だけではなく、環境的にも優れたシステムとして認



められた。ただし、本研究において検討対象としたコンバインドサイクルでは、高い真空度の得られる水冷却式復水器および比較的大規模な蒸気タービンに対応する断熱効率を採用したため、ランキンサイクルが有効に働くシステムとなっている。従って、空冷式復水器を採用し、比較的小規模なシステムを検討対象とすると、本報告とは違った結論が得られる可能性があるため、それらについては今後の検討としたい。

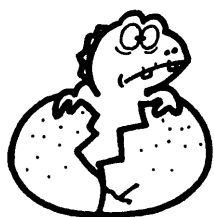
- ③3つのシステムに対して発電効率、総合発電効率、リパワリング効率等の各々について比較した上、自発生蒸気を利用するシステムとは違う熱力学的最適化評価を行うべきことが分かった。次の研究話題として有効に取り出し得る仕事量としてエクセルギー効率をシステム評価の基準とすることが考えられる。

## 謝 辞

本論文執筆に際して貴重なご意見を賜った石川島播磨重工業(株)秋山算甫氏、同じく宇治茂一氏、芝浦工業大学大学院システム工学部平田賢教授に深謝する。

## 参 考 文 献

1. 宇治茂一, 部分再生二流体ガスターンシステム, 日本機械学会論文集 B, 66 巻 648 号 (2000-8)
2. Si-Doek Oh, Hyo-Sun Pang, Energy Analysis for a Gas Turbine Cogeneration System, Trans.of ASME, Vol. 118, 1996
3. 須恵元彦, エクセルギーによるコージェネレーションシステムの性能評価, 日本ガスタービン学会誌 Vol. 27, N 4, 1999. 7
4. 須恵元彦, 蒸気噴射形ガスタービンを適用したゴミ発電システムの性能特性, 日本機械学会論文集 B, 62 巻 597 号 (1996-5)
5. 廃棄物研究財団, ゴミ焼却施設台帳, 1999-12
6. 秋山 算甫, 未利用エネルギーを活用したガスタービン発電システム, 日本ガスタービン学会誌
7. 小川紀一郎, 滝川, 廃棄物発電システム高効率に関する考察, 火力原子力発電 Vol. 50, N 7
8. Touchton, Influence of Gas Turbine Combustor Design and Operating Parameters on Effectiveness of NOx Suppression by Injected Steam or Water, ASME Edition 6"84
9. 平田賢, 龍澤正, 秋山算甫, シュチック オクサナ, 宇治茂一, 特許出願番号: 特願 2000-197890, ガスタービン発電装置



## アイス ブレーキング

毛利 邦彦<sup>\*1</sup>

MOURI Kunihiko

講演会やシンポジウム等の冒頭で講演と直接関係ない話題を提供して、緊張した会場を和らげる「枕」を英語では「アイス ブレーキング」と言います。

今月号の喫茶室から連載が可能であれば、私が使う「アイス ブレーキング」の例を紹介したいと思います。

下に示す2つの化石の写真があります。一つは中国四川省産の恐竜の卵の化石ともう一つはロシア産の三葉虫の化石です。

恐竜の卵の化石は米国ロスアンジェルスにて1000ドル(約12万円)で購入しました。これを家に持ち帰った次の朝、年取った母に言われました。「昨晚は一睡も出来なかった。いつ恐竜の卵がふ化して、私を食べてしまうのではないかと」90歳に近い母であり、笑えぬ思いでしたが、そのような思いも有るか。

三葉虫の化石には「触角」がある珍しいものです。折れやすい「触角」が残っているのは、これは東京で毎年開催されている国際化石展で購入したもので13万円もしました。「触角」がない三葉虫は通常3000円位で売っています。

私の友人はこの化石を見て、プラスチックで出来た贋物であると、馬鹿にした顔をして、笑っています。私はこう言って反論しています。「写真右上に購入した店の証書があるのは、この化石がまがい物でないことの証明だ」と。

今の日本の電力業界は電気事業法の大幅な改正により、規制緩和が進んでいます。電力会社も寡占独占の時代から競争の世界にシフトしようとしています。また発電技術も集中・大型化の発電技術から小規模・分散型発電技

術へと関心の目がシフトして来ております。安定・継続の社会から変化・消滅の社会に変わろうとしております。この社会に生き残るためにはどうしたら良いのか。この化石がそのヒントを与えて呉れています。恐竜は大きく強い生き物で、何者にも負けない生き物でしたが、今は絶滅して存在していません。気候の変化に適用出来たゴキブリは今でも生き残って、これからの変化にも生き残ると思われます。

また、三葉虫の化石は「触角」があると13万円、「触角」がないと3000円とその価値が大きく変わります。「触角」は英語で「antenna: アンテナ」です。私たちはこの変化の動きを敏感に察知するアンテナを持っていないければ、変化を認識できず滅びる危険に晒される事があります。昔は銀行が潰れる事は考えられませんでした。今はその現実が確実に起こっています。大企業であろうともこの変化に柔軟に対応するためにはアンテナを張り巡らし「価値」ある情報を収集しなければ生き残れないのではないのでしょうか。

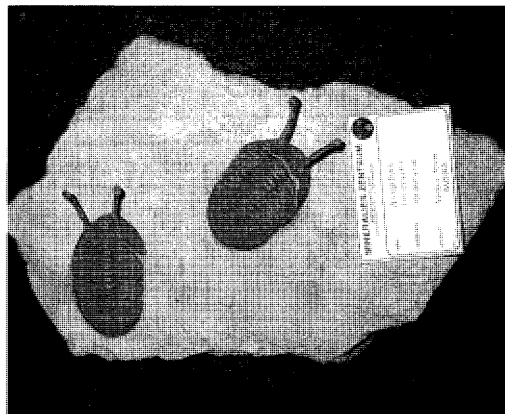
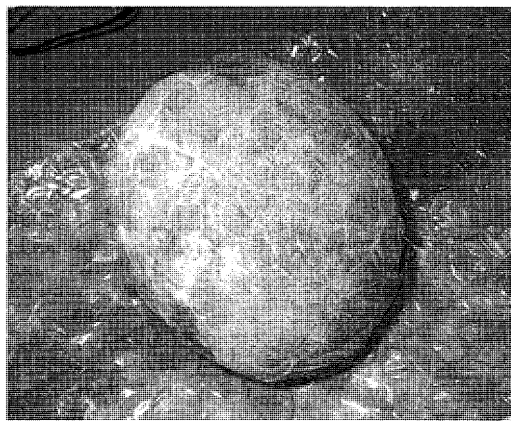
この二つの化石を眺めていると、私の思いは1億数千万のタイムトラベルし、そして現代に戻り、現代を生き残る「教訓」を再認識しています。

欧州への3次元の旅には80万円位掛かります。1億数千万年の4次元の旅は25万円、安い買い物をしたと思っているのは自己満足かも。

この化石についての話を規制緩和、分散電源の台頭を題材にした講義や講演会には必ず用いることにしております。

もし、この話をお使いになる方がいましたら、ぜひお使い願いたいと思います。

今回は「恐竜の糞」の化石について、お話をします。



原稿受付 2003年4月23日

\*1 電源開発(株) 技術開発センター

〒235-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎 1-9-88

## 産業技術総合研究所におけるガスタービンの研究

松沼 孝幸<sup>\*1</sup>

MATSUNUMA Takayuki

## 1. はじめに

産業技術総合研究所（産総研）は、旧通商産業省工業技術院の15研究機関が統合して、平成13年に発足した。主な研究分野は、ライフサイエンス、情報通信、環境・エネルギー、ナノテク・材料・製造、計測標準、地質海洋の6つで、基本的には産業技術の全てが対象である。研究拠点は、茨城県のつくばセンター（図1）を中心に、北海道、東北、臨海副都心、中部、関西、中国、四国、九州の各センターなど全国に広がる。総職員数は約3,200名（研究者は約2,500名）で、さらに企業や海外からの研究者が約1,500名いる。日本最大規模の公的研究機関で、産業界や大学と連携した研究も盛んである。

産総研は、旧工業技術院の時代から、300 kW セラミックガスタービン、超音速輸送機用推進システム、WE-NETなどのプロジェクトに参加してきた。現在のガスタービン研究（図2）は、エネルギー利用研究部門の循環システム、エネルギー変換材料、ターボマシンの3

研究グループ、基礎素材研究部門の金属材料組織制御・評価研究グループ、セラミックス研究部門の力学特性標準技術研究グループなどが協力して実施している。

## 2. 産総研でのガスタービン研究の概要

## 2.1 二酸化炭素回収対応タービンシステム

タービン入口温度1500℃以上の高効率ガスタービン技術を実用化するためには、システムのクローズ化、高温・高圧に耐える構成要素が必要となる。そこで、経済産業省からの委託により、二酸化炭素回収対応セミクロード型タービンシステム（図3）の研究開発を推進してきた。システム解析<sup>(1)</sup>から、当量比0.93でシステム効率55%（HHV）の達成が予測できた。超高温材料に関しては、水蒸気・高温高圧の雰囲気下における、炭素繊維／炭素マトリックス複合材料<sup>(2)</sup>、長繊維強化セラミックス基複合材、セラミック遮熱コーティング<sup>(3)</sup>の機械特性などを研究している。

## 2.2 燃焼技術

水素燃焼タービン用燃焼器の燃焼速度の測定と理論計算の比較<sup>(4)</sup>、同軸バーナの吹消えと排ガス特性<sup>(5)</sup>、小型高温水蒸気発生装置<sup>(6)</sup>などを研究している。図4のように、水素-酸素予混合気流中に紫外光レーザーを照射して平面領域に同時に着火する斬新な実験にも成功した<sup>(7)</sup>。

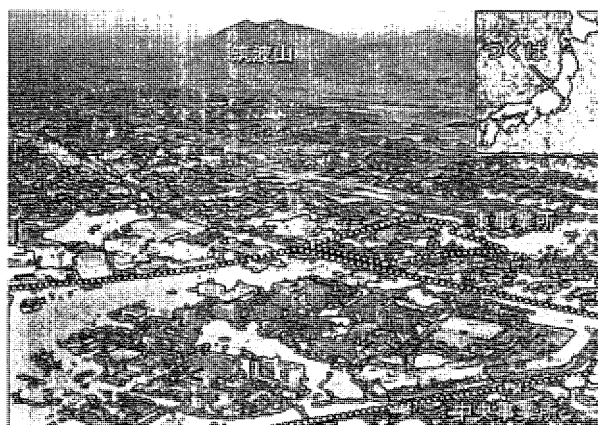


図1 産業技術総合研究所つくばセンター

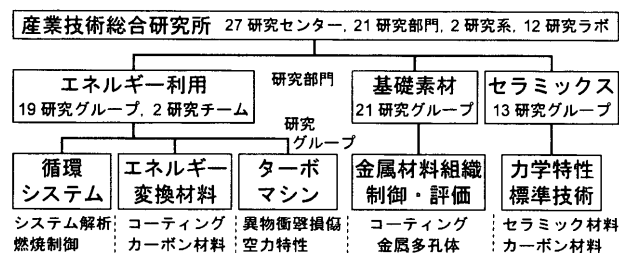
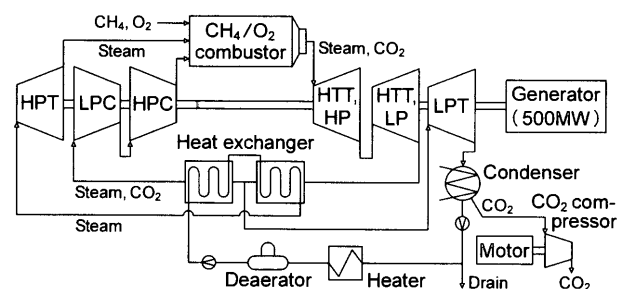


図2 ガスタービン研究の主な組織と内容

図3 CO<sub>2</sub>回収対応セミクロード型タービン

H<sub>2</sub>: 66.7%, O<sub>2</sub>: 33.3% (O<sub>3</sub>: 1.4%), Incident laser energy: 569 mJ  
Flow speed of mixtures: 2.1 m/s, Frame speed: 5,000,000 f/s

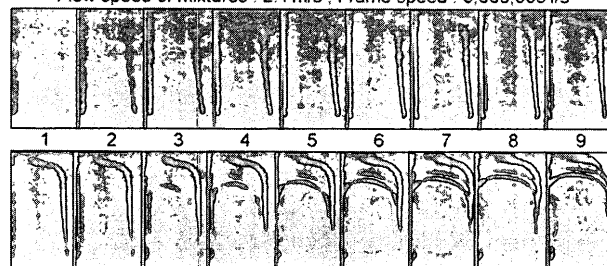


図4 紫外光レーザーによる予混合気流の平面着火過程

原稿受付 2003年2月26日

<sup>\*1</sup> 独立行政法人 産業技術総合研究所  
エネルギー利用研究部門 ターボマシン研究グループ  
〒305-8564 茨城県つくば市並木1-2-1

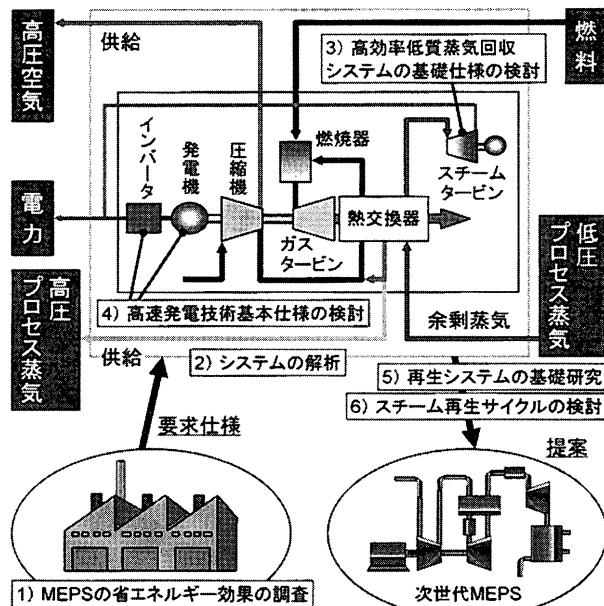


図5 フレキシブルタービンシステム研究開発の概要

### 2.3 フレキシブルタービンシステムの検討

中小工場からの低質蒸気などの未利用廃熱を回収・高度利用して、多様なエネルギー需要に効率的な対応をするために、図5のような、蒸気再生/水噴霧式小型タービン、低質蒸気回収タービン、高速負荷追従型発電・蓄電装置を組み合わせるフレキシブルなタービンシステム(MEPS)の開発を検討している<sup>(8),(9)</sup>。本研究は、NEDOエネルギー有効利用基盤技術先導研究開発の「多様なニーズに対応するフレキシブルタービンシステムの研究開発」として、エネルギー総合工学研究所、東京工業大学、神戸製鋼所、東芝、川崎重工業と共同で行っている。産総研は、蒸気の潜熱を利用したスチーム再生サイクルを提案し、システムの解析と評価に取り組んでいる。

### 2.4 マイクロガスタービンの基礎研究

分散電源用マイクロガスタービンの研究開発が、近年盛んである。産総研は、科学技術振興事業団の戦略的基礎研究「マイクロガスタービン・高度分散エネルギーシステム」の中で、セラミック翼の異物衝撃損傷、低レイノルズ数域でのタービン翼列特性の研究を担当している。

ガスタービンを高効率にする効果的な方法は、タービン入口温度の高温化である。小型ガスタービンでは翼冷却機構を採用できないため、耐熱性の高いセラミックの適用が望まれる。しかし、セラミックは衝撃力に弱く、エンジン内の異物の衝突による損傷が懸念される。そこで、セラミック翼に直径1mmの粒子を高速で衝突させ、破壊現象を調べている<sup>(10),(11)</sup>。図6に、電熱型銃、セラミック翼、破損例を示す。破損例では、応力波の干渉によって、衝撃点から離れた後縁部が壊れている。

また、小型ガスタービンでタービン入口温度を高温化すると、タービン翼列のレイノルズ数が大幅に低下して、境界層の剥離や二次渦の増大が発生する。図7に、環状翼列風洞の写真と非定常流れの計測例を示す<sup>(12)</sup>。

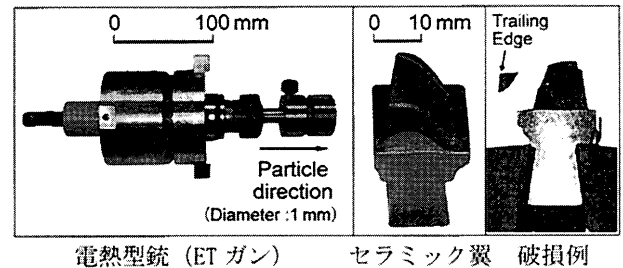


図6 セラミック翼の異物衝撃損傷 (FOD)

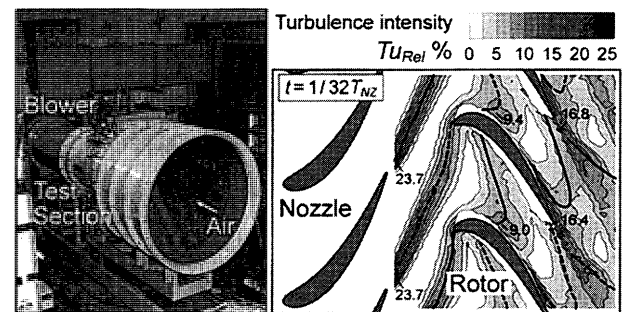


図7 低レイノルズ数域でのタービン翼列の空力特性

### 3. おわりに

産業技術総合研究所でのガスタービン研究を、簡単に紹介した。詳細は、下記の文献を参照していただきたい。

### 参考文献

- (1) Ebara, T., Iki, N., Takahashi, S., Hama, J., JSME International Journal, Series B, 45-3(2002-8), p. 451-456
- (2) Iwashita, T., Swan, M. V., Field, J. S., Ohta, N., Bitoh, S., Carbon, 39-10(2001-8), p. 1525-1532
- (3) Sodeoka, S., Suzuki, M., Inoue, T., Thermal Spray 2001: New Surface for a New Millennium, (2001-5), p. 737-741
- (4) 壹岐典彦, 古谷博秀, 濱純, 劉峰, 高橋三餘, 倉田修, 日本ガスタービン学会誌, 25-87(1997-6), p. 85-92
- (5) 倉田修, 日本ガスタービン学会誌, 30-1(2002-1), p. 42-49
- (6) Iki, N., Ebara, T., Saito, T., Furutani, H., Proc. ILASS-Asia 2001(2001-10), p. 321-326
- (7) Furutani, H., Liu, F., Iki, N., Hama, J., Takahashi, S., archivum combustionis, 20-1-2 (2000), p. 13-18
- (8) 古谷博秀, Uzunow, N., 壹岐典彦, 第30回ガスタービン定期講演会論文集, (2002-10), p. 157-162
- (9) NEDO, エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発「多様なニーズに対応するフレキシブルタービンシステムの研究開発」平成13年度報告書
- (10) 吉田博夫, 李銀生, 日本ガスタービン学会誌, 30-1(2002-1), p. 50-54
- (11) Yoshida, H., Chaidhri, M. M., Hoshi, Y., Philosophical Magazine A, 82-10(2002), p. 2031-2040
- (12) 松沼孝幸, 阿部裕幸, 筒井康賢, 日本ガスタービン学会誌, 30-4(2002-7), p. 312-321

# 次世代型船用ガスタービンの研究開発(SMGT プロジェクト)

植木 昭彦<sup>\*1</sup>

UEKI Akiyoshi

## 1. 船舶へのガスタービンの搭載状況

航空用や発電用に広く使われているガスタービンエンジンも、船用には必ずしも多く使われているとはいえない。

しかしながら、米英を始めとする世界の海軍の主力艦は、ほとんどがガスタービンであり、その意味では商業船への搭載が少ないというべきであろう。すなわち、世界の艦艇に主機として搭載されているエンジンは1200台程度と推定され、このうちわが国の護衛艦搭載のエンジン台数は、200台程度と推定される。わが国主力護衛艦の約80%にガスタービンが搭載されている。

軍用に多く用いられる理由としては、①小型・軽量、②機動性が良い、③メンテナンスが容易、④振動、騒音が少ない、⑤冷却水が不要などの理由によると考えられる。

また商業船への採用が少ない理由としては、航空転用形船用ガスタービンは①エンジン価格及びメンテナンス費が高い、②オーバーホール間隔が短い、また発電等産業用に広く使われているガスタービンを船用に使用する場合はディーゼルに較べてエンジン単体としての熱効率が低いなどが挙げられる。

商業船への数少ない実例として、ジェットフォイルへのガスタービンの搭載がある。国の内外で40艇弱使われており、エンジンは予備エンジンを含め、140台程度と推定される。

一方メガシップと呼ばれる7万総トン以上のクルーズ客船へのガスタービンの搭載が進んでいる。最近竣工した客船や建造予定の客船に25MW級のガスタービンが、ディーゼルエンジンや蒸気タービンと組み合わせられて、採用されている。

なかでも、客船「プリンセス号」の新シリーズ(8万8千総トン)では、ディーゼル(15MW)2基とガスタービン(25MW)1基によるハイブリッド電気推進方式で、ディーゼルは船体後部、ガスタービンは煙突基部に置かれる画期的なシステムとのことである。メガシップ用のガスタービンの台数は30台程度と推定される。

導入のメリットとして、船会社は①大気中に排出される有害物質(NOx, SOx)の大幅な減少、②エンジンスペースの縮小、③騒音・振動の軽減、④メンテナンスの

容易さ、⑤排熱回収で生み出された蒸気の利用の5点を上げている。

この5点の中では、寄港時の環境問題への対応が最大の導入動機と考えられる。

## 2. 開発経緯及び今後の予定

平成5年12月、運輸技術審議会は「新時代を担う船舶技術開発のあり方について」の答申をまとめ、「チャレンジシップ21計画」の一環として環境への負荷の少ない船用ガスタービンシステムの開発を提言した。

これを受けて、人と地球にやさしく、かつ、効率の良い船用のガスタービンを開発することとなり、国内ガスタービンメーカー5社(石川島播磨重工業、川崎重工業、ダイハツディーゼル、新潟鉄工所、ヤンマー)により、スーパーマリンガスタービン(以下SMGTという)技術研究組合が設立された。

川崎重工業を幹事会社とし、国土交通省、運輸施設整備事業団及び日本財団の支援・助成を受け、平成9年度から開発をスタートし、14年度に予定通り目標を達成して開発を終了した。

引き続き14年度から、3ヵ年計画で日本財団の支援のもと、実船搭載に必要な耐久性・信頼性の確立及び排熱利用のための研究開発を実施することとなった。

## 3. 開発エンジンの目標及び特長

### 3.1 開発の目標

ガスタービンは、構造上NOxの排出量はディーゼルエンジンに較べて本来的に少ないが、A重油焚きを前提に高速ディーゼルの約1/10、既存の同クラスの産業用ガスタービンに較べても約1/3の1g/kWh以下を目標とした。

また、従来のガスタービンの欠点である熱効率の低さを改善し、高速ディーゼルエンジン並とするため、熱効率の目標値をこのクラスのガスタービンとしては世界的にも類を見ない38~40%と定めた。

なお従来のガスタービンは低質油の使用が制限される場合が多かったので、燃料は船用で入手しやすくかつ経済的なA重油が焚けることとした。

### 3.2 開発エンジンの特長

#### 3.2.1 低NOx燃焼器

A重油焚きでかつNOxの排出量を既存のガスタービンの約1/3、高速ディーゼルの約1/10の水準に引き

原稿受付 2003年3月25日

\*1 スーパーマリンガスタービン技術研究組合

〒105-0003 港区西新橋1-5-14

下げるために、船用としての利用を考慮し乾式低 NOx 燃焼器を開発した。燃焼方式は従来の拡散燃焼方式に替えて、液体燃料 (A 重油) 焚きの予蒸発・予混合希薄燃焼方式を採用した。

このため燃焼器は、①火種としてのパイロットノズル

②燃料を空気とよく混合させて希薄混合気を作り、燃焼させるメインノズル③全負荷近辺でメイン燃焼域の後方に燃料を噴射して燃焼させる追焚きノズルの 3 種類のノズルを持ったものとなった。

### 3.2.2 熱交換器

熱効率を高速ディーゼル並にするために、熱交換器を備えた再生サイクル方式を採用している。すなわち圧縮機から出た空気を燃焼器に入れる前に熱交換器を通すことにより、排熱の一部を回収し、熱効率の改善を目指している。

熱交換器には、高い温度効率とともに船用として比較的小型でかつ強度、耐久性に優れ、加えて大型化の際の製作がしやすいプレートフィン型を採用した。熱交換器のコア部は、高さ数 mm の多数のフィンを取付けた排気ガス通路と空気通路が、隔壁で隔てられて交互に積層される。その隔壁とフィンを通じて、ガスと空気が熱交換する。全体では 100 対以上を積層する。

### 3.2.3 圧縮機

出力 2500 kW クラスでは、一般に構造が簡単な遠心圧縮機を採用する例が多いが、高効率を追求するために、低圧部の軸流 4 段と高圧部の遠心 1 段を組合せる方式を採用した。軸流圧縮機は、静翼を固定した通常のものに加えて、部分負荷での性能を向上させるため圧縮機の案内翼 (IGV) から 3 段静翼までを可変としたものも開発した。

### 3.2.4 冷却翼

熱効率を向上させる方策の一つに、タービン入り口温度 (TIT) を上げる方法がある。SMGT では、TIT を従来のこのクラスの高圧タービンに較べて 50~100℃ 高い 1200℃ に設定した。この高温からタービン翼を守るために、効率的に冷却できる翼内部の冷却構造の研究開発を行なった。

SMGT のような小さな翼ほど、加工に高度な技術が必要となる。

## 4. 陸上試験結果

研究開発期間の最終年度である平成 14 年度に川崎重工業明石工場で実施された陸上試験により、A 重油焚

きで、出力 2500 kW 以上、熱効率 38% 以上、NOx 1 g/kWh 以下の開発目標を達成した。

## 5. 今後の予定

6 年をかけて開発した SMGT は、平成 14 年から 3 年間の予定で、日本財団からの助成により、次のフェーズに入っている。

これは、現在エンジン開発と並行して進められている「次世代内航船 (スーパーエコシップ=SES)」プロジェクトで建造される船舶に搭載されることを想定して、必要な耐久性・信頼性を確立するための試験と開発を行なうためである。

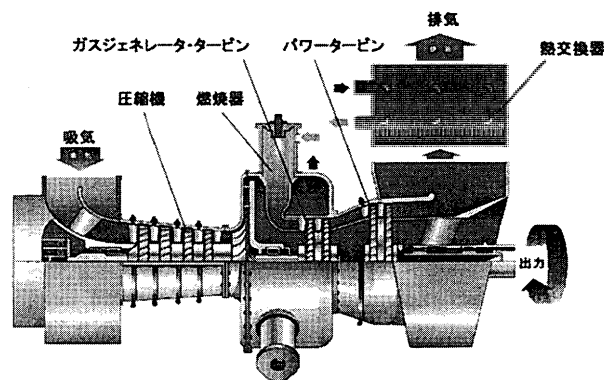
具体的には、15、16 年度 2 年間の耐久試験の結果を踏まえて、次世代内航船搭載用のエンジンを製作する。

予定通りに進めば、平成 17 年度から、実船に搭載し船上での実証試験を行なうことになる。

以上

SMGT の形式・仕様

|          |               |                      |
|----------|---------------|----------------------|
| 出力       |               | 2500 kW              |
| パワーセクション | 形式            | 再生開放 2 軸式            |
|          | 圧縮機 軸流段       | 4 段 (固定静翼型、可変静翼型)    |
|          | 遠心段           | 1 段                  |
|          | 燃焼器           | 4 缶式                 |
|          | ガスジェネレータ・タービン | 軸流 2 段               |
| 熱交換器     | パワータービン       | 軸流 2 段 (固定静翼型、可変静翼型) |
|          | 形式            | プレートフィン型             |



SMGT の構造

## 参考文献

- (1) 世界の艦船別冊「海上自衛隊ハンドブック」(2001 年 7 月)
- (2) 世界の艦船「メガシップ時代の到来」(2000 年 2 月)
- (3) 荒井 正志, 日本ガスタービン学会 2002 年度セミナー資料集「次世代型船用ガスタービンの開発」

# (社)日本ガスタービン学会 評議員会・総会報告

## 総 務 理 事

本学会の評議員会および通常総会が、去る4月3日(木)に東京の江戸川区総合区民ホールにおいて開催された。

第27期第2回評議員会は同ホール2階議室の間にて山本誠君の司会で10時15分より開かれ、評議員の互選により川口修君が議長になり、議事が進められた。評議員会への出席者9名、委任状提出者45名で同会が成立することが宣言され、第27期事業報告(案)、同収支決算報告(案)につき審議が行なわれ、何れも承認された。なお、同案については菅 進、野田廣太郎両監事による監査結果が報告された。次いで、名誉会員推薦案を総会に諮ることが承認された。引き続き第28期事業計画(案)、同期予算(案)の審議が行われ、いずれも承認された。

第28期第1回評議員会は山本誠君の司会で同日11時10分より同会場で開かれ、評議員の互選により伊藤高根君が議長になり、議事が進められた。最初に、出席者16名、委任状提出者43名で評議員会が成立することが宣言され、以下の議案の審議が行なわれた。すなわち、第28期評議員選挙結果に基づく第28期役員候補者、第29期事業計画・予算案を平成15年度内に文部科学省へ提出するための審議手続きが審議され、これらの諸案を総会に諮ることになった。また、最後に予定されていた第28期事業計画・予算案の説明、報告は賛成多数により省略された。

平成15年通常総会は、同日13時より同ホール2階の議室の間で御法川孝君の司会で開催された。第27期榎本誠会長の開会挨拶の後、同君を総会議長とし、議事が進められた。同総会への出席者32名、委任状提出者1056名(会員数2042名の過半数)で同総会の成立が宣言された後、以下の議案の審議が行なわれた。すなわち、第27期事業報告、同期収支決算報告につき、水木新平総務(主担当)理事および塚越敬三総務理事による説明の後、菅 進、野田廣太郎両監事による監査の結果、適正である旨が野田廣太郎監事より報告され、それぞれ承認された。その後、名誉会員推薦につき榎本誠会長より提案があり、青木千明氏、榎木康夫氏を名誉会員とすることが承認された。ついで、第28期事業計画、同予算案に関し、水木新平総務理事、塚越敬三総務(財務担当)理事より説明があり、別掲通り承認された。ついで、第28期評議員選挙結果の報告の後、第28期役員候補者の選任が行われ、あらかじめ理事会及び評議員会で審議され選出された20名の理事候補者が全員承認され、理事の互選により会長に吉岡英輔君、副会長に住川雅晴君が選出され、満場一致で承認された。ここで、吉岡英輔新会長より、就任の挨拶が述べられ、あらためて吉岡会長より新理事に対して担当委員会の委嘱がなされた。引き続き、第29期事業計画・予算案を平成15年度内に文部科学省へ提出するための審議手続きが審議され、承認された。議事録署名者の件が諮られた後、最後に第27期会長の榎本誠君より退任ならびに閉会の挨拶があり、平成15年通常総会を終了した。

通常総会に続いて名誉会員推薦状及び記念品贈呈式が行われ、青木千明氏、榎木康夫氏に第27期榎本誠会長より推薦状と記念品が贈呈された。これに於て、両氏より挨拶が述べられた。

### 第27期(平成14年度)事業報告

#### 1. 事業の概要

定款に定める諸事業を下記のように実施した。

#### (1) 研究発表会及び学術講演会等の開催(集会事業)

| 時 期         | 場 所                       | 名 称                     | 発 表 内 容  | 参加者数 | 演題数           |
|-------------|---------------------------|-------------------------|--|------|---------------|
| H14/3/8     | 大阪大学基礎工学研究科機械科学コース流体工学研究室 | 第1回見学会・技術懇談会            | HII Aロケット開発に見る最新技術課題等と技術懇談                               | 19名  |               |
| H14/5/23    | 航空宇宙技術研究所                 | Dr.David C.Wisler 特別講演会 | The History of Gas Turbine Aero Engine Development at GE | 97名  | 1             |
| H14/5/24    | 早稲田大学国際会議場                | 創立30周年記念講演会             | 技術伝承、技術動向、運用と実績、学生会員の研究成果の発表、特別講演                        | 204名 | 27            |
| H14/6/21    | 東洋製罐㈱ 川崎工場                | 第2回見学会・技術懇談会            | 小型一軸コンバインドサイクル発電設備の見学                                    | 20名  |               |
| H14/7/4-5   | 富士電機㈱ エネルギー製作所            | 第8回ガスタービン教育シンポジウム       | 若手技術者および学生の教育(講義および施設見学)                                 | 70名  | 6             |
| H14/10/9-11 | 富山国際会議場                   | 第30回定期講演会、見学会           | 会員の研究、開発成果の発表  | 124名 | 56            |
| H14/11/8    | ㈱タクマ京都工場                  | 第3回見学会・技術懇談会            | マイクロタービン発電機、バイオガス化プラントの見学                                | 22名  |               |
| H15/1/16-17 | 東京ガス㈱ 本社                  | 第31回ガスタービンセミナー          | 「ガスタービンの最新技術と分散電源への展開」                                   | 112名 | 9+パネラー1人セッション |

#### (2) 学会誌及び学術書の刊行(出版事業)

| 図 書 名                             | 発 行 年 月 日                                   | 発行部数  |
|-----------------------------------|---|-------|
| 日本ガスタービン学会誌                       | H14/3/20, 5/20, 7/20, 9/20, 11/20, H15/1/20 | 2,300 |
| Bulletin of GTSJ 2002             | H14/4/22                                    | 800   |
| 「日本のガスタービンの歩み」日本ガスタービン学会30周年記念写真集 | H14/5/21                                    | 400   |
| 創立30周年記念ガスタービン講演会講演論文集            | H14/5/7                                     | 250   |
| 第30回定期講演会講演論文集                    | H14/9/25                                    | 200   |
| 第30回ガスタービンセミナー資料集                 | H15/1/6                                     | 180   |

#### (3) 内外関連学協会との連携並びに協力(国際交流事業等)

平成14年度に継続して協賛した行事は30件であり、新規のものは下記の4件である。

| 種類  | 開催時期        | 名 称                     | 場 所          | 関連団体名          |
|-----|-------------|-------------------------|--------------|----------------|
| 協 賛 | H14/11/8    | 第25回材料講習会               | 日本材料学会議室     | 日本材料学会         |
| 協 賛 | H14/11/25   | 第35回座談会<br>分散型エネルギー源の開発 | 名古屋通信ビル2Fホール | 日本機械学会<br>東海支部 |
| 協 賛 | H14/10/4    | 燃焼フォーラム21               | 工学院大学新宿校舎    | 日本エネルギー学会      |
| 協 賛 | H15/1/21-22 | 第139回腐食防食シンポジウム         | 東京都立大学国際交流会館 | 腐食防食協会         |

#### (4) ガスタービンに関する研究、調査(調査研究事業)

| 名 称                         | 実 施 期 間         | 調 査 内 容  |
|-----------------------------|-----------------|--|
| ガスタービンの極小化に関する調査・研究         | 平成13年度より継続して実施中 | 超小型ガスタービンの性能から要素技術に到るまで調査・研究を海外研究機関と共同で行う。                         |
| 平成13年度のガスタービン及び過給機の生産統計資料収集 | 毎年度継続して実施中      | 我国におけるガスタービン及び過給機の生産に関する資料を収集し、纏めると共に、結果を学会誌及びBulletin of GTSJに掲載。 |
| ガスタービン技術の歴史とその継承            | 平成14年度より実施      | 我国におけるガスタービン技術の歴史を調査し、その継承につき、研究を行う。                               |

#### (5) 研究の奨励及び研究業績の表彰(表彰事業)

ガスタービンに関連した研究及び技術開発を奨励するため2年に一度、優れた研究、技術に対して、ガスタービン学会賞(論文賞、技術賞、研究奨励賞)を授与している。平成14年度は表彰の年度に当たらない。

#### II. 処務の概要

##### 1. 役員等に関する事項

##### 1.1 役員(理事、監事)

|       |  |
|-------|--|
| 理事・会長 | 榎本誠夫                                   |
| 副会長   | 吉岡英輔                                   |
| 総務理事  | 水木新平(主担当)、伊藤高根、川池和彦、塚越敬三、本阿弥真治         |
| 企画理事  | 小泉忠夫(主担当)、井口和春、庄司不二雄、杉浦重泰、土屋利明、長島利夫    |
| 編集理事  | 毛利邦彦(主担当)、江田武司、千葉正俊、林 茂、平岡克英、湯浅三郎、吉岡洋明 |

##### 監事 菅 進、野田廣太郎

##### 1.2 監事・評議員

27期監事及び評議員は、定款第15条、第16条、第17条、細則第21条から第27条により以下のように選出された。ただし、前記の理事は、定款第17条及び細則第21条により評議員から除かれた。

船崎健一、辻本良信、三宅裕、井上雅弘、連水洋、鈴木健二郎、原田広史、川口修、長島昭、遠藤征紀、鈴木和雄、柳良二、吉田豊明、山根隆一郎、水野三郎、藤岡義行、高橋敏、新田明人、荒川忠一、堀昭次郎、吉澤晴夫、渡辺紀徳、望月貞成、山本誠、竹野忠夫、田辺清、佐々木直人、川崎敏裕、水野進、三堀健、渡辺康之、井上良夫、盛田明男、一本松正道、岩本敏昭、森建二、山下直之、中西卓夫、井上誠、弘松幹雄、長谷川好道、大原久宜、相曾健司、樋口新一郎、佐々木祥二、古島誠、飯田義亮、和泉孝彦、小林正、松田健、五十嵐喜良、杉山勝彦、中村直、吉岡俊彦、大田原彦彦、小松秀明、中村昭三、西嶋康正、大庭康二、安部利男、高木俊幸、荻田浩司、青木素直、長谷川 清、堀江一郎、岩佐照久、荒川貞雄

##### 2. 職員に関する事項

| 職 務  | 氏 名   | 就任年月日     | 担 当 事 務 | 備 考 |
|------|-------|-----------|---------|-----|
| 事務局長 | 三浦 敦子 | 1991年4月1日 | 事務局の総括  | 常 勤 |

##### 3. 役員等に関する事項

##### 3.1 理事会

6回開催され、第26期第2回評議員会議案、第27期第1回評議員会議案、平成14年度通常総会議案、第26期事業報告・決算案、第27期事業計画・予算案、第27期事業実施にともなう業務、第28期事業計画・予算案、次期役員候補者推薦等を審議し、決定した。

##### 3.2 評議員会・総会

第26期第2回評議員会、第27期第1回評議員会、平成14年通常総会は、平成14年4月4日に開催された。既に学会誌Vol.30.No.3.(2002.5)に詳細が報告されているので省略する。

##### 4. 許可、認可、承認、証明等に関する事項

| 申請月日 | 申 請 事 項 | 許可等月日 | 備 考 |
|------|---------|-------|-----|
|      | なし      |       |     |

## 5. 契約に関する事項

| 契約年月日    | 相手方            | 契約の概要                                   |
|----------|----------------|---|
| H14/5/17 | 名取 勲           | 第3工新ビル301号室の賃借契約<br>(H14/4/21-H16/4/20) |
| H14/6/25 | 中島ビジネスソリューション㈱ | 経理・財務等経営全般の相談<br>(H14/6/1-H15/5/31)     |
| H14/7/1  | ニッセイエプロ㈱       | 学会誌編集事務業務委託契約<br>(H14/07/01-H15/06/30)  |
| H15/2/17 | ㈱エヌ・ティー・エス     | 「小型セラミックガスタービン」<br>出版についての覚書(5年間)       |

## 6. 寄付金に関する事項

| 寄付の目的 | 寄付者 | 申込金額 | 領収金額 | 備考 |
|-------|-----|------|------|----|
|       | なし  |      |      |    |

## 7. 主務官庁指示に関する事項

| 指示年月日               | 指示事項                | 履行状況                      |
|---------------------|---------------------|---------------------------|
| H14/11/13<br>(実地検査) | 公益法人内部規則・規程等の整備について | 会計処理・情報公開等の規程を準備、<br>検討中。 |

## 8. 各委員会の活動

## 8. 1 総務委員会

委員長 水本 新平 他10名 開催7回  
庶務、会計、渉外、その他学会運営に関する事項を担当した。また、英文論文集発刊検討  
ワーキンググループを組織し、発刊の意義と可能性について検討した。

## 8. 2 企画委員会

委員長 小泉 忠夫 他16名 開催6回  
教育シンポジウム、見学会、セミナー等の企画・実施を担当した。

## 8. 3 編集委員会

委員長 毛利 邦彦 他21名 開催6回  
学会誌の編集に関する事項を担当した。

## 8. 4 ガスタービン統計作成委員会

委員長 西原 昭義 他10名 開催1回  
平成13年の国内ガスタービン及び過給機生産に関する統計資料をまとめ、学会誌及び  
Bulletin of GTSJ に掲載し、平成14年の統計資料の収集を行った。

## 8. 5 学術講演会委員会

委員長 野崎 理 他10名 開催2回  
創立30周年記念講演会の運営、第30回定期講演会の実施、また第31回定期講演会の企画  
を行った。

## 8. 6 ガスタービン技術情報センター運営委員会

委員長 山本 誠 他4名 E-Mail 会議のみ  
ガスタービン学会ホームページを管理し、掲載内容の追加・修正を行った。

## 8. 7 地方委員会

委員長 橋本 正孝 他18名 開催2回  
見学会の計画と実施及びフォーラムの計画を行った。

## 8. 8 Bulletin 編集委員会

委員長 山本 一臣 他8名 開催3回  
Bulletin of GTSJ 2002 を発行した。Bulletin of GTSJ 2003 は学会ホームページに掲載す  
る形態へ変更となったため、委員会では原稿形態、編集作業方法の見直しを行った。それ  
らもとづいて編集作業を進め、発行準備を行っている。

## 8. 9 選挙管理委員会

委員長 本間 友博 他5名 開催2回  
第28期評議員および監事選挙に関する管理を行った。

## 8. 10 調査研究委員会

## (1) ガスタービンの極小化に関する調査研究

委員長 吉謙 晴夫 他38名 開催2回  
平成13年度に発足した「ガスタービンの極小化に関する調査・研究」を引き続き行った。

## (2) CGT 出版

委員長 伊藤 高根 他11名 開催4回  
小型セラミックガスタービンの関連技術について、技術分野を4つに分けて過去の開発を通  
じてえられた知見、技術をまとめ、書籍として発行する準備を進めた。座談会の内容を含め  
て来期前半に出版の予定で原稿を整理中。

## (3) ガスタービン技術の歴史とその継承

委員長 渡辺 紀徳 他20名 開催3回  
30周年記念写真集出版事業を引き継ぎ、日本のガスタービン技術の歴史とその継承につ  
いて調査した。活動には(社)研究産業協会を通してNEDOからの助成を受けた。

## 8. 11 学会賞審査委員会

委員長 山根 隆一郎  
今期は表彰年度に該当しないため、情報収集を行った。

## 8. 12 国際交流委員会

委員長 坂田公夫 他6名

## 8. 13 30周年記念事業実行委員会

委員長 酒井 俊道 他14名 開催3回  
学会創立30周年記念式典、記念講演会、記念写真集出版、記念表彰に関する実行案を策定  
し、実施した。

## 8. 14 30周年写真集出版小委員会

委員長 渡辺 紀徳 他15名 開催4回  
学会設立30周年記念写真集の企画および編集作業を行い、写真集「日本のガスタービンの  
歩み」を刊行した。調査活動を調査研究委員会に引き継いだ。

## 8. 15 国際会議実行委員会

委員長 川口 修 他53名 開催5回  
次期国際会議(2003年国際ガスタービン会議東京大会)開催へ向け、2002年5月末に学会  
内に組織委員会(委員長 伊藤源嗣)を発足させるとともに準備委員会を実行委員会に改組  
して改めてスタートさせた。現在までに、論文の募集、会場の手配、展示会の準備等を行う  
とともに、論文申し込み状況を勘案してプログラム編成作業中である。また、開催経費補助  
のために財団等に助成金を申請中である。

## 9. 会員の異動状況

## 会員の異動状況書

| 会員種別      | 会 員 数                |                      | 増減数  | 備 考      |
|-----------|----------------------|----------------------|------|----------|
|           | 本年度末<br>平成15年2月28日現在 | 昨年度末<br>平成14年2月28日現在 |      |          |
| 正 会 員     | 2,042名               | 2,058名               | -16名 |          |
| 賛助会員      | 124社                 | 129社                 | -5社  | 本年度末166口 |
| 学生会員      | 84名                  | 82名                  | +2名  |          |
| 個人会員<br>計 | 2,126名               | 2,140名               | -14名 |          |

## 第28期(平成15年度)役員及び評議員

理事・会長 吉岡英輔

副会長 住川雅晴

総務理事 川池和彦(主担当)、小松秀明、鈴木和雄、本阿弥貴治、山本勝弘

企画理事 土屋利明(主担当)、杉浦重泰、杉山洋吉、高木俊幸、長島利夫、

古島 潔

編集理事 湯浅三郎(主担当)、杉本隆雄、千葉正俊、林 茂、森下 進、盛田明男、  
吉岡洋明

監事 酒井俊道、佐藤玉太郎

評議員 前期選挙結果のうち、上記理事に就任した方を除く64名

(社)日本ガスタービン学会  
第27期(平成14年度)収支決算

## 1. 収支計算総括表

平成14年3月1日から平成15年2月28日まで

| 科 目             | 合 計        | 一 般 会 計    | 特 別 会 計 1   | 特 別 会 計 2  |
|-----------------|------------|------------|-------------|------------|
| I. 収入の部         | 円          | 円          | 円           | 円          |
| 1. 基本財産運用収入     | 3,349      | 3,349      | 0           | 0          |
| 2. 会費・入会金収入     | 25,821,645 | 22,321,645 | 0           | 3,500,000  |
| 3. 事業収入         | 13,293,630 | 12,562,550 | 731,080     | 0          |
| 4. 雑収入          | 2,313,961  | 2,038,486  | 275,190     | 285        |
| 5. 補助金収入        | 410,000    | 410,000    | 0           | 0          |
| 6. 取崩し収入        | 500,000    | 500,000    | 0           | 0          |
| 7. 特別会計1より繰入収入  | 7,500,000  | 0          | 0           | 7,500,000  |
| 8. 特定預金取崩収入     | 7,500,000  | 0          | 7,500,000   | 0          |
| 当 期 収 入 合 計     | 57,342,585 | 37,836,030 | 8,506,270   | 11,000,285 |
| 前 期 繰 越 収 支 差 額 | 26,591,154 | 19,060,192 | 7,530,962   | 0          |
| 収 入 合 計         | 83,933,739 | 56,896,222 | 16,037,232  | 11,000,285 |
| II. 支出の部        |            |            |             |            |
| 1. 事業費          | 20,904,663 | 17,235,752 | 2,855,379   | 813,532    |
| 2. 管理費          | 24,231,302 | 20,655,614 | 922,747     | 2,652,941  |
| 3. 特定預金支出       | 800,000    | 800,000    | 0           | 0          |
| 4. 特別会計2へ繰入支出   | 7,500,000  | 0          | 7,500,000   | 0          |
| 当 期 支 出 合 計     | 53,435,965 | 38,691,366 | 11,278,126  | 3,466,473  |
| 当 期 収 支 差 額     | 3,906,620  | △ 855,336  | △ 2,771,856 | 7,533,812  |
| 次 期 繰 越 収 支 差 額 | 30,497,774 | 18,204,856 | 4,759,106   | 7,533,812  |

## 2. 正味財産計算書総括表

平成14年3月1日から平成15年2月28日まで

| 科 目               | 合 計        | 一 般 会 計    | 特 別 会 計 1  | 特 別 会 計 2 |
|-------------------|------------|------------|------------|-----------|
| 【増加の部】            | 円          | 円          | 円          | 円         |
| 資 産 増 加 額         | 8,333,812  | 800,000    | 0          | 7,533,812 |
| 負 債 減 少 額         | 0          | 0          | 0          | 0         |
| 増 加 額 合 計         | 8,333,812  | 800,000    | 0          | 7,533,812 |
| 【減少の部】            |            |            |            |           |
| 資 産 減 少 額         | 11,627,192 | 1,355,336  | 10,271,856 | 0         |
| 負 債 増 加 額         | 800,000    | 800,000    | 0          | 0         |
| 減 少 額 合 計         | 12,427,192 | 2,155,336  | 10,271,856 | 0         |
| 当 期 正 味 財 産 増 減 額 | 11,627,192 | 1,355,336  | 10,271,856 | 0         |
| 当 期 正 味 財 産 増 加 額 | 7,533,812  | 0          | 0          | 7,533,812 |
| 前 期 繰 越 正 味 財 産 額 | 73,723,154 | 47,192,192 | 26,530,962 | 0         |
| 期 末 正 味 財 産 合 計 額 | 69,629,774 | 45,836,856 | 16,259,106 | 7,533,812 |



## 3. 貸借対照表総括表

平成15年2月28日現在

平成15年3月19日

| 科 目           | 合 計        | 一般会計       | 特別会計1      | 特別会計2     |
|---------------|------------|------------|------------|-----------|
| 【資産の部】        | 円          | 円          | 円          | 円         |
| 流動資産          | 30,986,934 | 18,694,016 | 4,759,106  | 7,533,812 |
| 固定資産          |            |            |            |           |
| 基本財産          | 10,000,000 | 10,000,000 | 0          | 0         |
| その他固定資産       | 52,232,000 | 40,732,000 | 11,500,000 | 0         |
| 固定資産合計        | 62,232,000 | 50,732,000 | 11,500,000 | 0         |
| 資産合計          | 93,218,934 | 69,426,016 | 16,259,106 | 7,533,812 |
| 【負債の部】        |            |            |            |           |
| 流動負債          | 489,160    | 489,160    | 0          | 0         |
| 固定負債          | 23,100,000 | 23,100,000 | 0          | 0         |
| 負債合計          | 23,589,160 | 23,589,160 | 0          | 0         |
| 【正味財産の部】      |            |            |            |           |
| 正味財産          | 69,629,774 | 45,836,856 | 16,259,106 | 7,533,812 |
| (うち基本金)       | 10,000,000 | 10,000,000 | 0          | 0         |
| (うち当期正味財産減少額) | 11,627,192 | 1,855,336  | 10,271,856 | 0         |
| (うち当期正味財産増加額) | 7,533,812  | 0          | 0          | 7,533,812 |
| 負債及び正味財産合計    | 93,218,934 | 69,426,016 | 16,259,106 | 7,533,812 |

社団法人 日本ガスタービン学会

会長 柘植 綾夫 殿

社団法人 日本ガスタービン学会

監事 菅 進

監事 野田 廣太郎

## 監 査 報 告 書

平成14年度事業報告書、収支計算書、及び財産目録について、

関係書類とともにその内容を監査した結果、法令および定款に照らして

正当であることを認めます。

(社)日本ガスタービン学会  
第28期(平成15年度)事業計画書

## 1. 事業の概要

平成15年度(第28期:平成14年3月1日から平成15年2月28日まで)は、前年度に引き続き、定款に定める下記諸事業を行う計画である。第27期においては学会誌の年間6回の発行体制を維持した。第28期は「IGTC2003」国際ガスタービン会議に向けての準備を行い、11月2日から7日にかけて開催する。学会及び事務局運営については一層の合理化や会員へのサービス改善ならびに財務体質の強化を行う予定である。

## (1) 研究発表会及び学術講演会等の開催(集会事業)

| 名 称        | 予 定 回 数 | 開 催 予 定 時 期 |
|------------|---------|-------------|
| 定期講演会      | 1回      | 平成15年6月     |
| 見学会・技術懇談会  | 2回      | 6月他         |
| 教育シンポジウム   | 1回      | 7月          |
| 国際ガスタービン会議 | 1回      | 11月         |
| セミナー       | 1回      | 平成16年1月     |
| フォーラム      | 1回      | 未定          |
| シンポジウム     | 1回      | 未定          |

## (2) 学会誌及び学術図書等の刊行(出版事業)

| 図 書 名               | 発 行 予 定 時 期                      | 予 定 部 数 |
|---------------------|----------------------------------|---------|
| ガスタービン学会誌           | 平成15年3月、5月、7月、<br>9月、11月、平成16年1月 | 約2,300  |
| 定期講演会論文集            | 平成15年6月                          | 400     |
| IGTC'03 Proceedings | 平成15年11月                         |         |
| セミナー資料集             | 平成16年1月                          | 200     |
| Bulletin of GTSJ    | 平成16年2月                          | 30      |

## (3) 内外関連学協会との連携並びに協力(国際協力事業)

「IGTC2003」国際ガスタービン会議に向けて 海外関連学協会及び同国際会議の海外アドバイザリコミッティとの連携の強化を図る。また、Bulletin of GTSJ をCD-ROM化して発行海外関連学協会へ配布し、情報交換を密にすると共に学会ホームページにも掲載し、学会の活動状況を広く紹介する。

国内については昨年度と同様に、関連学協会(約25団体)との共催及び協賛により学術講演会、セミナー等を計画、実施するとともに、必要に応じて関連学協会の行事を協賛する予定である。

## (4) ガスタービンに関する研究・調査(調査研究事業)

一昨年度より実施中の「ガスタービンの極小化に関する調査・研究」を引き続き実施し、国際ガスタービン会議にて発表を行う。昨年度末に「ガスタービン技術の歴史とその継承」調査研究委員会を発足させたが、これを継続し、ガスタービン技術の伝承を図ると共に資料を作成する。また、平成14年のわが国におけるガスタービン及び過給機の生産実績の統計資料を収集、集計し、学会誌及びBulletin of GTSJに掲載する。

## 7. 財産目録

平成15年2月28日現在

| 科 目            | 合 計        | 一般会計       | 特別会計1      | 特別会計2     |
|----------------|------------|------------|------------|-----------|
| 【資産の部】         |            |            |            |           |
| 流動資産           |            |            |            |           |
| 現金 預 金         | 30,986,934 | 18,694,016 | 4,759,106  | 7,533,812 |
| 普 通 預 金        | 15,494,645 | 3,201,727  | 4,759,106  | 7,533,812 |
| みずほ銀行新宿西口支店    | 3,179,194  | 3,179,194  | 0          | 0         |
| みずほ銀行新宿西口支店特別口 | 4,759,106  | 0          | 4,759,106  | 0         |
| UFJ銀行新宿新都心支店   | 33         | 33         | 0          | 0         |
| 三井住友銀行新宿西口支店   | 22,500     | 22,500     | 0          | 0         |
| 東京都民銀行新宿支店     | 7,533,812  | 0          | 0          | 7,533,812 |
| 郵便 貯 金         | 15,010,000 | 15,010,000 | 0          | 0         |
| 普通貯金           | 15,010,000 | 15,010,000 | 0          | 0         |
| 振 替 預 金        | 482,289    | 482,289    | 0          | 0         |
| 流動資産合計         | 30,986,934 | 18,694,016 | 4,759,106  | 7,533,812 |
| 固定資産           |            |            |            |           |
| 基本財産           |            |            |            |           |
| 基本財産引当預金       | 10,000,000 | 10,000,000 | 0          | 0         |
| 中央三井信託銀行新宿西口支店 | 10,000,000 | 10,000,000 | 0          | 0         |
| 基本財産合計         | 10,000,000 | 10,000,000 | 0          | 0         |
| その他の固定資産       |            |            |            |           |
| 敷 金            | 1,032,000  | 1,032,000  | 0          | 0         |
| 記念事業積立預金       | 4,500,000  | 4,500,000  | 0          | 0         |
| UFJ銀行新宿新都心支店   | 4,500,000  | 4,500,000  | 0          | 0         |
| 助成事業積立預金       | 500,000    | 500,000    | 0          | 0         |
| 三井住友銀行新宿西口支店   | 500,000    | 500,000    | 0          | 0         |
| 退職給与積立預金       | 23,100,000 | 23,100,000 | 0          | 0         |
| 東京三菱銀行新宿中央支店   | 23,100,000 | 23,100,000 | 0          | 0         |
| 表彰事業基金         | 8,000,000  | 8,000,000  | 0          | 0         |
| 三井住友銀行新宿西口支店   | 8,000,000  | 8,000,000  | 0          | 0         |
| 事務所整備積立預金      | 3,600,000  | 3,600,000  | 0          | 0         |
| 三井住友銀行新宿西口支店   | 3,600,000  | 3,600,000  | 0          | 0         |
| 国際交流引当預金       | 11,500,000 | 0          | 11,500,000 | 0         |
| みずほ銀行新宿西口支店特別口 | 11,500,000 | 0          | 11,500,000 | 0         |
| その他の固定資産合計     | 52,232,000 | 40,732,000 | 11,500,000 | 0         |
| 固定資産合計         | 62,232,000 | 50,732,000 | 11,500,000 | 0         |
| 資産合計           | 93,218,934 | 69,426,016 | 16,259,106 | 7,533,812 |
| 【負債の部】         |            |            |            |           |
| 流動負債           |            |            |            |           |
| 前 納 会 費        | 408,200    | 408,200    | 0          | 0         |
| 雇 用 保 険        | 80,960     | 80,960     | 0          | 0         |
| 流動負債合計         | 489,160    | 489,160    | 0          | 0         |
| 固定負債           |            |            |            |           |
| 退職給与引当金        | 23,100,000 | 23,100,000 | 0          | 0         |
| 固定負債合計         | 23,100,000 | 23,100,000 | 0          | 0         |
| 負債合計           | 23,589,160 | 23,589,160 | 0          | 0         |
| 正味財産           | 69,629,774 | 45,836,856 | 16,259,106 | 7,533,812 |

- (5) 研究の奨励及び研究業績の表彰（表彰事業）
- ガスタービンに関連する研究及び技術開発を奨励するために、優れた研究と技術に対して隔年でガスタービン学会賞を授与している。今年度は表彰年度に該当し、その表彰を平成16年4月に開催される総会で行う。
- (6) その他目的を達成するために必要な事業
- 継続教育を含めたガスタービン技術者の教育を目的に、教科書作成のための委員会を発足させる。

2. 委員会の設置

以上の諸事業を実施するため、下記の常置及び臨時委員会を設置する。

- 常置委員会： (1) 総務委員会  
(2) 企画委員会  
(3) 編集委員会  
(4) ガスタービン統計作成委員会  
(5) 学術講演会委員会  
(6) ガスタービン技術情報センター運営委員会  
(7) 地方委員会  
(8) Bulletin 編集委員会  
(9) 国際交流委員会
- 臨時委員会： (1) 組織検討委員会  
(2) 会員委員会  
(3) 選挙管理委員会  
(4) 調査研究委員会  
(5) 学会賞審査委員会  
(6) 財務検討委員会  
(7) 国際ガスタービン会議 2003 年東京大会組織委員会  
(8) 国際ガスタービン会議 2003 年東京大会実行委員会  
(9) その他

(社)日本ガスタービン学会  
第28期(平成15年度)収支予算書

1. 予算総括表

平成15年3月1日 から 平成16年2月28日

| 科 目          | 合 計         | 一 般 会 計    | 特 別 会 計 1  | 特 別 会 計 2  |
|--------------|-------------|------------|------------|------------|
| I. 収入の部      | 円           | 円          | 円          | 円          |
| 1. 基本財産運用収入  | 20,000      | 20,000     | 0          | 0          |
| 2. 会費・入会金収入  | 22,376,000  | 21,876,000 | 0          | 500,000    |
| 3. 事業収入      | 10,900,000  | 10,100,000 | 800,000    | 0          |
| 4. 補助金等収入    | 4,156,000   | 156,000    | 0          | 4,000,000  |
| 5. 会費登録・展示収入 | 39,400,000  | 0          | 0          | 39,400,000 |
| 6. 雑収入       | 3,979,000   | 1,260,000  | 119,000    | 2,600,000  |
| 7. 戻し入れ収入    | 7,500,000   | 0          | 7,500,000  | 0          |
| 当期収入合計       | 88,331,000  | 33,412,000 | 8,419,000  | 46,500,000 |
| 前期繰越収支差額     | 30,497,774  | 18,204,856 | 4,759,106  | 7,533,812  |
| 収入合計         | 118,828,774 | 51,616,856 | 13,178,106 | 54,033,812 |
| II. 支出の部     |             |            |            |            |
| 1. 事業費       | 41,606,000  | 13,881,000 | 650,000    | 27,075,000 |
| 2. 管理費       | 25,809,000  | 18,079,000 | 260,000    | 7,470,000  |
| 3. 特定預金支出    | 6,300,000   | 800,000    | 7,500,000  | 0          |
| 4. 繰入金支出     | 7,500,000   | 0          | 0          | 7,500,000  |
| 当期支出合計       | 81,215,000  | 32,760,000 | 8,410,000  | 42,045,000 |
| 当期収支差額       | 5,116,000   | 652,000    | 9,000      | 4,455,000  |
| 次期繰越収支差額     | 35,613,774  | 18,856,856 | 4,768,106  | 11,988,812 |

計 報

評議員・2003 年国際会議実行委員 小林 正 君 56 才

平成 15 年 4 月 28 日逝去されました

ここに謹んで哀悼の意を表します

- (5) 研究の奨励及び研究業績の表彰（表彰事業）
- ガスタービンに関連する研究及び技術開発を奨励するために、優れた研究と技術に対して隔年でガスタービン学会賞を授与している。今年度は表彰年度に該当し、その表彰を平成16年4月に開催される総会で行う。
- (6) その他目的を達成するために必要な事業
- 継続教育を含めたガスタービン技術者の教育を目的に、教科書作成のための委員会を発足させる。

2. 委員会の設置

以上の諸事業を実施するため、下記の常置及び臨時委員会を設置する。

- 常置委員会： (1) 総務委員会  
(2) 企画委員会  
(3) 編集委員会  
(4) ガスタービン統計作成委員会  
(5) 学術講演会委員会  
(6) ガスタービン技術情報センター運営委員会  
(7) 地方委員会  
(8) Bulletin 編集委員会  
(9) 国際交流委員会
- 臨時委員会： (1) 組織検討委員会  
(2) 会員委員会  
(3) 選挙管理委員会  
(4) 調査研究委員会  
(5) 学会賞審査委員会  
(6) 財務検討委員会  
(7) 国際ガスタービン会議 2003 年東京大会組織委員会  
(8) 国際ガスタービン会議 2003 年東京大会実行委員会  
(9) その他

(社)日本ガスタービン学会  
第28期(平成15年度)収支予算書

1. 予算総括表

平成15年3月1日 から 平成16年2月28日

| 科 目          | 合 計         | 一 般 会 計    | 特 別 会 計 1  | 特 別 会 計 2  |
|--------------|-------------|------------|------------|------------|
| I. 収入の部      | 円           | 円          | 円          | 円          |
| 1. 基本財産運用収入  | 20,000      | 20,000     | 0          | 0          |
| 2. 会費・入会金収入  | 22,376,000  | 21,876,000 | 0          | 500,000    |
| 3. 事業収入      | 10,900,000  | 10,100,000 | 800,000    | 0          |
| 4. 補助金等収入    | 4,156,000   | 156,000    | 0          | 4,000,000  |
| 5. 会費登録・展示収入 | 39,400,000  | 0          | 0          | 39,400,000 |
| 6. 雑収入       | 3,979,000   | 1,260,000  | 119,000    | 2,600,000  |
| 7. 戻し入れ収入    | 7,500,000   | 0          | 7,500,000  | 0          |
| 当期収入合計       | 88,331,000  | 33,412,000 | 8,419,000  | 46,500,000 |
| 前期繰越収支差額     | 30,497,774  | 18,204,856 | 4,759,106  | 7,533,812  |
| 収入合計         | 118,828,774 | 51,616,856 | 13,178,106 | 54,033,812 |
| II. 支出の部     |             |            |            |            |
| 1. 事業費       | 41,606,000  | 13,881,000 | 650,000    | 27,075,000 |
| 2. 管理費       | 25,809,000  | 18,079,000 | 260,000    | 7,470,000  |
| 3. 特定預金支出    | 6,300,000   | 800,000    | 7,500,000  | 0          |
| 4. 繰入金支出     | 7,500,000   | 0          | 0          | 7,500,000  |
| 当期支出合計       | 81,215,000  | 32,760,000 | 8,410,000  | 42,045,000 |
| 当期収支差額       | 5,116,000   | 652,000    | 9,000      | 4,455,000  |
| 次期繰越収支差額     | 35,613,774  | 18,856,856 | 4,768,106  | 11,988,812 |

計 報

評議員・2003 年国際会議実行委員 小林 正 君 56 才

平成 15 年 4 月 28 日逝去されました

ここに謹んで哀悼の意を表します

## 第 31 回ガスタービン定期講演会（北見市）・見学会のお知らせ

日本ガスタービン学会と日本機械学会の共催による第 31 回ガスタービン定期講演会・見学会を以下のように開催します。会員の皆様多数ご参加下さい。

### 開 催 日：

- ・講演会 2003 年 6 月 25 日(木), 26 日(木)
- ・見学会 2002 年 6 月 27 日(金)

### 開 催 場 所：

- ・北見市芸術文化ホール  
〒090-0811 北見市泉町 1 丁目 2 番 22 号  
TEL：(0157)31-0909, FAX：(0157)68-1537

### 講 演 会：

- ・一般講演 空力, 燃焼・燃焼器, 材料, 伝熱, ガスタービンシステム
- ・特別講演 「流水について (仮題)」
- ・オーガナイズドセッション 「ガスタービン技術の歴史とその継承」

### 参加登録費：

- ・共催学会正会員 13,000 円
- ・学生会員 4,000 円
- ・会員外 18,000 円
- ただし学生に限り, 論文集無しで 1,000 円 (会員), 4,000 円 (非会員)

### 懇 親 会：

- ・第 1 日目の講演会終了後, 開催いたします。
- なお, 懇親会参加費として 2,000 円を徴収させていただきます。

### 見 学 会：

- ・日 時：6 月 27 日(金)
- ・見学先：北見工業大学, 北見市浄化センター。
- ・定員 45 名程度, 先着順, 講演会登録者に限ります。
- ・参加費 6,000 円
- ・解散の予定は, 女満別空港 16 時 50 分頃, 北見駅 17 時 30 分頃です。

### 参加申込方法：

講演会, 見学会に参加をご希望の方は, 参加申込書に必要事項をご記入の上, 学会事務局宛にお申し込み下さい。  
参加登録は, 受付の混乱を避けるため, 事前登録をお願いします。講演者も参加登録をお願いします。

### 講演会場への交通等：

- ・JR 北見駅より徒歩 3 分, 女満別空港より北見駅前までバス/車で約 45 分。
- ・ホテルについて  
「北見東急イン」はガスタービン学会用に次のホームページを準備しており, 申込もできます。  
<http://www.kitamitokyuinn.co.jp/public/vip/gas.html>

## 第 31 回ガスタービン定期講演会 (2003 年 6 月 25, 26 日)

## 参加申込書

(社) 日本ガスタービン学会 行

FAX:03-3365-0387

TEL:03-3365-0095

|          |   |
|----------|---|
| 会社／大学等名称 |   |
| 所在地      | 〒 |
| TEL      |   |
| FAX      |   |

参加者名 (所在地、連絡先が所属により異なる場合には、本用紙をコピーして別シートにご記入ください。)

| フリガナ<br>氏 名 | 所 属 | TEL<br>FAX | 所属学協会<br>(GTSJは会員番号) | 会員<br>資格 | 見学会<br>(6千円) | 懇親会<br>(2千円) |
|-------------|-----|------------|----------------------|----------|--------------|--------------|
|             |     |            |                      |          | 参加<br>不参加    | 出席<br>欠席     |
|             |     |            |                      |          | 参加<br>不参加    | 出席<br>欠席     |
|             |     |            |                      |          | 参加<br>不参加    | 出席<br>欠席     |
|             |     |            |                      |          | 参加<br>不参加    | 出席<br>欠席     |
|             |     |            |                      |          | 参加<br>不参加    | 出席<br>欠席     |

## 【事務局への連絡事項】

払込方法(○印をつけてください) 参加費等入金予定日 月 日

1. 銀行 (みずほ銀行 新宿西口支店 普通 1703707)
2. 郵便振替 (00170-9-179578)
3. 現金書留

送金金額 円(内訳: )

当日支払いは原則として受け付けません。(当日不参加の場合でも参加費はお支払いいただきます。)

\* 請求書の発行について

1. 要 宛名( )
2. 不要

\* 領収書の発行について

1. 要 宛名( )
2. 不要

## 第31回ガスタービン定期講演会 (北見) プログラム

— 第1日 —

(一般講演 講演時間15分 討論5分、\*印 講演者、連名者の所属が省略されている場合は後者と同じです)

| 第1室   |  | 第2室   |  |
|-------|--|-------|--|
| 12:30 | 《一般講演》ガスタービンシステムⅠ<br>座長：須田祐志 (荏原製作所)<br>A-1 携帯用ガスタービン発電機の開発 (排気熱活用時の性能検討)<br>* 前川裕彦、熊倉弘隆、木之下博 (IHI エアロスペース)<br>A-2 寒冷地域における屋外マイクログラスタービンコジェネシテムの実証研究<br>* 統本誠悟 (北見工大院)、橘佐知夫、山田貴延、石谷博美、佐々木正史 (北見工大)<br>A-3 小型リヒートガスタービンについての検討<br>* 豊岐典彦、古谷博秀、高橋三郎 (産総研)<br>A-4 小型ガスタービン直結用発電電動機<br>高橋則雄、橋場豊、霜村英二、* 橋立良夫、新政憲 (東芝)   | 12:30 | 《一般講演》空力Ⅰ<br>座長：今成邦之 (石川島播磨)<br>B-1 低レイノルズ数領域における高性能圧縮機翼列の空力設計コンセプト<br>* 園田豊隆、有馬敏幸 (本田技術研究所)<br>B-2 1000℃超高速型タービン羽根車の設計検討<br>* 八木学、百々聡、中野晋、関原傑、山口和幸 (日立)<br>B-3 単動翼列多段タービン駆動ファン<br>* 岩瀬謙、齊藤喜夫、松田幸雄 (航技研)<br>B-4 超小型速心圧縮機の要素試作と実験<br>* 平野利幸 (法大院)、山口直樹 (キャンノン)、御法川学、辻田星歩、水木新平 (法大)  |
| 13:50 |  | 13:50 |  |
| 14:05 | 《一般講演》ガスタービンシステムⅡ<br>座長：園島信也 (日立)<br>A-5 IM270-IHI-FLECSの開発<br>* 山本誠二 (石川島播磨)<br>A-6 既設コンバインドサイクル発電ユニットの熱効率解析<br>* 幸田栄一、高橋徹 (電中研)、笹尾真一 (中部電力)<br>A-7 高効率最適再燃型革新ガスタービン複合発電システム (MORIT/CC) の検討<br>* 森塚秀人、幸田栄一、渡辺和徳 (電中研)<br>A-8 Study of Application of Steam Recuperation System in Advanced Combined Cycles<br>* Nikolaj Uzunow, Hirohide Furutani (産総研) | 14:05 | 《一般講演》空力Ⅱ<br>座長：白鳥敏正 (都立科大)<br>B-5 3次元衝撃波/乱流境界層干渉場の受動バイパス吹出し制御に関する研究<br>* 戸田和之 (東理大)、篠原洋平 (東理大院)、山本誠 (東理大)<br>B-6 タービン段における非定常空力特性解析 (CFD 及び EFD による評価)<br>* 山田和豊、船崎健一 (岩手大)、廣間和人 (岩手大院)<br>B-7 遷音速軸流圧縮機動翼列における翼端漏れ渦崩壊に起因した自励振動現象<br>* 古川雅人 (九大)、山田和豊 (岩手大)、中野智樹、井上雅弘 (九大)<br>B-8 タービンスキスキヤビティへの主流巻き込みに関する数値解析<br>* 浜辺正昭、児玉秀和、寺町健司 (石川島播磨)、山本一臣、野崎理、根本俊治、山根敬 (航技研) |
| 15:25 |  | 15:25 |  |
| 15:40 | 《一般講演》ガスタービンシステムⅢ<br>座長：豊岐典彦 (産総研)<br>A-9 高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)の動力変換系統の設計<br>* 高田昌二、滝澤貴和、國富一彦、Yan Xing (原研)、皆月功 (三菱重工)<br>A-10 先進的FADECの概念検討<br>* 杉山七羽、田頭剛 (航技研)<br>A-11 クラスタワーファーンによる小型VTOLエンジンシステム<br>* 松田幸雄、齊藤喜夫、岩瀬謙 (航技研)<br>A-12 常圧タービン (APT) の提案<br>北嶋潤一、* 原田英一、田中一雄 (川崎重工)、辻川吉春、金子憲一 (大阪府大)   | 15:40 | 《一般講演》空力Ⅲ<br>座長：野崎理 (航技研)<br>B-9 円形翼列周りに発生する不安定流れ (平板翼の翼弦長の影響)<br>* 高間信行、吉識晴夫、西村勝彦 (東大)<br>B-10 二次元翼列・翼まわり流れにおける衝撃波振動現象と圧力変動<br>* 高橋恭平 (都立科技大院)、白鳥敏正 (都立科技大)<br>B-11 遷音速圧縮機翼列の翼間衝撃波変動に伴う翼面圧力変化<br>* 平野孝典 (拓大)、森山哲、藤原淳 (拓大院)、田中英穂 (東大)、藤本一郎 (拓大)<br>B-12 部分負荷状態におけるタービン動翼ミッドスパンの非定常流れ<br>* 松沼孝幸、筒井康賢 (産総研)  |
| 17:00 |  | 17:00 |  |
| 17:15 | 《特別講演》<br>「流水について (仮題)」 講師：青田 昌秋 氏 (北海道立オホーツク流水科学センター)   |       |  |
| 18:15 |  |       | 座長：白鳥敏正 (都立科技大)  |

## 第2日

(一般講演 講演時間15分 討論5分 \*印 講演者、連名者の所属が省略されている場合は後者と同じです)

| 第1室   |  | 第2室   |   |
|-------|--|-------|---|
| 9:20  | 《一般講演》燃焼 I<br>A-13 希薄予混合予蒸発燃焼器の保炎器形状と排出特性<br>* 下平一雄、黒澤要治、立花繁、山本武、鈴木和雄 (航技研)<br>A-14 希薄予混合燃焼における円錐形保炎器及び旋回流型保炎器の燃焼特性の比較<br>* 山本武、黒澤要治、立花繁、Laurent Zimmer、下平一雄、吉田征二 (航技研)<br>A-15 筒状火炎を用いた2段希薄予混合燃焼<br>* 高木秀幸、會田直樹 (法大院)、山田秀志、林茂 (航技研)、川上忠重 (法大)   | 9:20  | 《一般講演》空力 IV<br>B-13 吹き込みによる遠心圧縮機のサーージングの制御<br>* 朝賀裕一朗 (法大院)、佐藤邦明 (キャノン)、辻田星歩、水木新平 (法大)<br>B-14 翼後縁部の加振による翼列フラッター能動制御の解析<br>* 賀登順一 (東大院)、渡辺紀徳 (東大)<br>B-15 多翼列 CFD を活用した高圧圧縮機の翼振動低減方法の検討<br>* 加藤大、今成邦之 (石川島播磨) |
| 10:20 |  | 10:20 |   |
| 10:35 | 《一般講演》燃焼 II<br>A-16 燃焼ガス中に噴射された気化燃料-空気予混合気の燃焼と NOx 生成<br>(第二報 一方が過濃予混合気の場合について)<br>* 會田直樹、高木秀幸 (法政大院)、林茂、山田秀志 (航技研)、川上忠重 (法政大)<br>A-17 軸方向に複数の火炎配置を有するガスタービン用低 NOx 燃焼器の燃焼安定性<br>* 前田福夫、岩井保憲、山田正彦 (東芝)<br>A-18 SMGT 用 A 重油燃焼器の NOx 燃焼器の開発 (第2報)<br>* 堂浦康司、木村武清 (川崎重工)<br>A-19 ガスタービン燃焼器の小型化における問題点の把握<br>* 高松正周、室田慎介 (慶大院)、川口修 (慶大) | 10:35 | 《一般講演》空力 V<br>B-16 超音速圧縮機における非定常多段解析と単翼列解析<br>* 山上舞、今成邦之 (石川島播磨)<br>B-17 過給機用ラジアルタービンスクローラの内部流動に関する研究<br>* 大迫雄志、中道憲治、前川昌三 (三菱重工)  |
| 11:55 |  |       |   |

昼休み (11:55~13:30)

|       |  |
|-------|--|
| 13:30 | 《オーガナイズドセッション》学術講演委員会・調査研究委員会合同企画セッション「ガスタービン技術の歴史とその継承」<br>「大容量ガスタービンの高温・高効率化の開発について (仮題)」<br>「純国産の産業用・船用ガスタービンの開発を通して思うこと」<br>塚越政三 (三菱重工)<br>杉本隆雄 (川崎重工) |
| 14:50 | オーガナイザー：渡辺紀徳 (東大)、船崎健一 (岩手大)   |

|       |  |                |  |
|-------|--|----------------|--|
| 15:05 | 《一般講演》燃焼Ⅲ<br>座長：山本武（航技研）<br>A-20 超小型ガスタービン用プロパン燃焼器の燃焼特性に及ぼす燃焼器入口形状の影響<br>* 上原麻美子（都立科技大院）、湯浅三郎（都立科技大）<br>A-21 Ultra Micro Gas Turbine 要素間の熱移動がガスタービン性能に及ぼす影響<br>* 押味加奈（都立科技大院）、湯浅三郎（都立科技大）<br>A-22 DME の基礎燃焼特性<br>* 小泉浩美、井上洋、小林成嘉（日立）、成川公史（中部電力）<br>A-23 タービン翼列間における水素燃焼流の3次元計算（噴出口配置の影響）<br>* 南雲貴志（東理大院）、戸田和之、山本誠（東理大）   | 15:05          | 《一般講演》材料Ⅰ<br>座長：吉田博夫（産総研）<br>B-18 次世代単結晶超合金の開発<br>* 小泉裕、小林敏治、横川忠晴、原田広史（物材機構）、青木祥宏、荒井幹也（石川島播磨）<br>B-19 CM247LC・DS 合金の高温弾性定数測定における測定法の違いによる数値差の考察<br>* 桜井裕、白川理恵（アグネ技術センター）<br>B-20 大気プラズマ溶射による縦割れ・遮熱コーティング材の熱サイクル変形挙動<br>* 荒井正行、岩田字一（電中研）、水津竜夫、谷和美（トーカロ）<br>B-21 遮熱コーティングプラズマ界面酸化過程に及ぼす試験片形状・種類ならびに雰囲気の影響<br>* 荒井正行、岩田字一（電中研）、岡嶋芳史（東工大）、岸本喜久雄（東工大） |
| 16:25 | 《一般講演》燃焼Ⅳ・伝熱<br>座長：岩井保憲（東芝）<br>A-24 発電用パルスデトネーションエンジンの作動解析<br>桜井毅司（埼玉大院）、小原哲郎、大八木重治（埼玉大）、* 村山元英（石川島播磨）<br>A-25 耐熱金属オフセットフィンを用いたプレートフィン形コンバクト熱交換器の研究<br>* 吉川毅、姫路裕二、重文字幸喜、赤間信也（防衛庁）<br>A-26 複合型インピンジン冷却システムの多目的遺伝的アルゴリズムによる最適化<br>船崎健一（岩手大）、* Carlos Felipe Favarreto, Hamidon Bin Salleh（岩手大院）<br>A-27 複合型インピンジン冷却構造の研究<br>* 仲俣千由紀、山脇栄道（石川島播磨）、吉田豊明、三村富嗣雄（航技研）、松野伸介、今井良二（石川島播磨） | 16:25<br>16:40 | 《一般講演》材料Ⅱ・保守<br>座長：児島慶亨（日立）<br>B-22 タービン用セラミックス材料の衝撃特性（第2報）<br>* 吉田博夫（産総研）、李銀生（富士総研）<br>B-23 産業用ガスタービン遮熱コーティングの信頼性向上技術<br>* 金子 秀明、鳥越 泰治（三菱重工）<br>B-24 産業用大型ガスタービンの更なる信頼性向上について<br>* 赤城弘一（三菱重工）   |
| 18:00 |  | 17:40          |  |



## 第9回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

近年ガスタービン技術の発展には目ざましいものがあります。航空機に搭載されるジェットエンジンをはじめ大規模発電やコージェネレーション用としても用途が広がっております。また、ガスタービンは高効率であること、NO<sub>x</sub>排出を抑えることが比較的容易である等の理由で、環境に優しい原動機として、将来の人類のエネルギー問題に寄与する大変重要な役割を担っております。

一方、ガスタービンはまだまだ発展途上にあると言われており、高効率化・大容量化等多岐にわたる研究・開発分野で若い技術者の活躍が期待される分野です。そのような状況下で、学生及びガスタービン初心者の方の技術者を対象とした標記シンポジウムの開催を計画しました。会員・非会員を問わず積極的にご参加下さい。

1. 日 時：平成 15 年 7 月 3 日(木), 4 日(金)
2. 場 所：独立行政法人 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町 7-44-1 (JR 三鷹, 吉祥寺, 京王線調布駅よりバスで約 15 分)
3. プログラム：3 日(木) 9:30- 受 付  
10:00-10:10 開会の挨拶  
10:10-10:40 「航技研における航空用エンジン関連研究」遠藤征紀 (航技研)  
10:40-12:20 「ガスタービン概論」 長島利夫 (東京大学)  
12:20-13:30 昼 食  
13:30-16:30 航空宇宙技術研究所 研究設備見学  
(展示室, 超音速エンジン試験設備, 風洞, スーパーコンピュータ等)  
17:00-19:00 懇親会  
4 日(金) 9:20-10:50 「ガスタービンと流体力学」濱崎浩志 (石川島播磨重工)  
10:50-11:00 休 憩  
11:00-12:30 「ガスタービンと伝熱工学」吉田豊明 (航空宇宙技術研究所)  
12:30-13:30 昼 食  
13:30-15:00 「ガスタービンと燃焼工学」前田福夫 (東芝)  
15:00-15:10 休 憩  
15:10-16:40 「ガスタービンと材料工学」新田明人 (電力中央研究所)  
16:40-16:50 アンケート記入  
16:50- 閉会の挨拶
4. 定 員：80 名 (定員超過の場合は抽選)
5. 対象者：大学, 大学院, 高等専門学校在籍者, ガスタービン若手の技術者
6. 参加費：学生 (会員：¥2,000, 非会員：¥5,000), 社会人 (会員：¥7,000, 非会員：¥12,500)  
(注：当日入会可, 入会金 ¥500, 年会費：学生会員 (¥2,500), 正会員 (¥5,000))
7. 懇親会：参加費 無料
8. 申込方法：下記の申込書に 1) 所属 学校名 (専攻, 学年), 社名 (部課名, 入社年度), GTSJ 会員は会員番号, 2) 氏名, 3) 連絡先住所, TEL, FAX, E-mail, 4) 懇親会参加の有無を明記し, 学会事務局宛に, 郵便, ファクシミリ, 電子メールのいずれかにより平成 15 年 6 月 13 日(金) (必着) までに, お申し込み下さい。

注：開催場所案内図及び詳細については当学会ホームページをご覧ください。

(<http://www.soc.nii.ac.jp/gtsj/index.html/>)

### 第9回ガスタービン教育シンポジウム参加申込書

(平成 15 年 7 月 3, 4 日)

(社)日本ガスタービン学会 行

FAX: 03-3365-0387 TEL: 03-3365-0095 E-mail: gtsj@pluto.dti.ne.jp

|        |   |  |                  |     |
|--------|---|--|------------------|-----|
| 氏 名    |   |  | 懇親会              | 出 欠 |
| 所 属    |   |  | 学年, 入社年度         |     |
| 連 絡 先  | 〒 |  |                  |     |
| 電 話    |   |  | GTSJ 会員番号 (No. ) | 非会員 |
| ファクシミリ |   |  | E-mail アドレス      |     |

申込締切日：平成 15 年 6 月 13 日(金) (必着)

## ◇ 2003 年度会費納入のお願い ◇

2003 年度の会費をお納めいただく時期となりました。  
下記金額を所定の口座または事務局宛お送りください。  
尚、既に銀行引落しの手続きをされている方は、  
2003 年 3 月 24 日貴口座より引落としさせていただきます。  
ここでご連絡させていただきますので、ご了承ください。

|       |     |          |
|-------|-----|----------|
| 賛助会員  | 1 口 | 70,000 円 |
| 正 会 員 |     | 5,000 円  |
| 学生会員  |     | 2,500 円  |

|                         |                |
|-------------------------|----------------|
| 郵便為替                    | 00170-9-179578 |
| 銀 行                     | みずほ銀行 新宿西口支店   |
|                         | 普通預金口座 1703707 |
| いずれも口座名は(社)日本ガスタービン学会です |                |

※かねてより会費自動振替のご協力をお願い致しておりますが、未だ手続きをなさっていない方は、巻末の振替依頼書にご記入の上、事務局迄お送り下さい。自動振替をご利用されますと振り込み手数料は学会負担となります。皆様のご協力お願いいたします。

## [日本ガスタービン学会誌広告掲載のご案内]

日本ガスタービン学会誌の発行部数は約 2,500 部、年 6 回、奇数月 20 日に発行され、  
会員（個人会員、賛助会員）と定期購入先に配布されます。学会誌の広告は、会誌本文と  
同様に重要な情報として、会員と学会誌読者に活用されています。

企業、製品、技術、書籍等の PR、求人や行事案内などにもご利用下さい。

## 掲載料；

後付け、白黒印刷、版下支給の場合

1 p            60,000 円

1/2 p        35,000 円

カラー、表紙および表紙対向ページの場合についてはお問い合わせ下さい。

## 広告掲載の受付；

下記の学会事務局にお申し込み下さい。申し込み期限は掲載号発行日の 2 ヶ月前です。

版下がある場合は、発行日の 1 ヶ月前でも間に合いますので、ご相談下さい。

申込先            〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-5-13 第 3 工新ビル 402  
Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387

## ◇ 2003 年度会費納入のお願い ◇

2003 年度の会費をお納めいただく時期となりました。  
下記金額を所定の口座または事務局宛お送りください。  
尚、既に銀行引落しの手続きをされている方は、  
2003 年 3 月 24 日貴口座より引落としさせていただきます。  
ここでご連絡させていただきますので、ご了承ください。

|       |     |          |
|-------|-----|----------|
| 賛助会員  | 1 口 | 70,000 円 |
| 正 会 員 |     | 5,000 円  |
| 学生会員  |     | 2,500 円  |

|                         |                |
|-------------------------|----------------|
| 郵便為替                    | 00170-9-179578 |
| 銀 行                     | みずほ銀行 新宿西口支店   |
|                         | 普通預金口座 1703707 |
| いずれも口座名は(社)日本ガスタービン学会です |                |

※かねてより会費自動振替のご協力をお願い致しておりますが、未だ手続きをなさっていない方は、巻末の振替依頼書にご記入の上、事務局迄お送り下さい。自動振替をご利用されますと振り込み手数料は学会負担となります。皆様のご協力お願いいたします。

## [日本ガスタービン学会誌広告掲載のご案内]

日本ガスタービン学会誌の発行部数は約 2,500 部、年 6 回、奇数月 20 日に発行され、  
会員（個人会員、賛助会員）と定期購入先に配布されます。学会誌の広告は、会誌本文と  
同様に重要な情報として、会員と学会誌読者に活用されています。

企業、製品、技術、書籍等の PR、求人や行事案内などにもご利用下さい。

## 掲載料；

後付け、白黒印刷、版下支給の場合

1 p 60,000 円

1/2 p 35,000 円

カラー、表紙および表紙対向ページの場合についてはお問い合わせ下さい。

## 広告掲載の受付；

下記の学会事務局にお申し込み下さい。申し込み期限は掲載号発行日の 2 ヶ月前です。

版下がある場合は、発行日の 1 ヶ月前でも間に合いますので、ご相談下さい。

申込先 〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-5-13 第 3 工新ビル 402  
Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387

## ○ 本会協賛・共催行事 ○

| 会 合 名   | 開催日・会場                                  | 詳細問合せ先   |
|---|---|--|
| 平成 15 年度情報学講座<br>ーヒューマノイド(ヒト型ロボット)のい<br>る社会ー  | H 15/5/21-7/5<br>東京電機大学<br>神田キャンパス      | 東京電機大学 学務部学事課 担当/高澤, 堀<br>TEL: 03-5280-3555 FAX: 03-5280-3623<br>E-MAIL: megumi@jim.dendai.ac.jp   |
| 第 262 回講習会 製品開発, 技術開発の<br>ための最適設計技術と応用<br>(デモ展示付き)  | H 15/6/19-20<br>大阪科学技術センター<br>8 階中ホール   | 日本機械学会関西支部<br>TEL: 06-6443-2073 FAX: 06-6443-6049<br>E-MAIL: jsme@soleil.ocn.ne.jp   |
| 日本流体力学会年会 2003  | H 15/7/28-30<br>工学院大学 新宿校舎              | 日本流体力学会年会 2003 運営委員会事務局<br>(東京理科大学工学部機械工学科 山本 誠),<br>E-MAIL: yamamoto@rs.kagu.tus.ac.jp,   |
| 第 11 回機械材料・材料加工技術講演会<br>(M & P 2003)  | H 15/10/17-18<br>武蔵工業大学<br>世田谷キャンパス     | 湯浅栄二 (武蔵工業大学工学部機械工学科)<br>TEL: 03-3703-3111,<br>URL: <a href="http://www.jsme.or.jp/mpd/">http://www.jsme.or.jp/mpd/</a>  |
| 可視化情報学会全国講演会<br>(宇都宮 2003)  | H 15/10/31-11/1<br>宇都宮大学 工学部            | 実行委員長: 庵原昭夫 (宇都宮大学)<br>TEL: 028-689-6036,<br>幹 事: 二宮 尚 (宇都宮大学)<br>TEL: 028-689-6043,<br>URL: <a href="http://www.vsj.or.jp/utsunomiya/">http://www.vsj.or.jp/utsunomiya/</a> |
| Eco Design 2003 3rd International Sym-<br>posium on Environmentally Conscious<br>Design and Inverse Manufacturing | H 15/12/8-11<br>国立オリンピック記念<br>青少年総合センター | エコデザイン学会連合事務局<br>TEL: 03-3815-1681, FAX: 03-3815-1691,<br>E-mail: haraki@bcasj.or.jp   |

## ▷ 入 会 者 名 簿 ◁

## 〔正会員〕

池 口 拓 也 (川崎重工)    加 藤 悦 男 (リタケセラミックス)    吉 葉 正 行 (都立大)    吉 田 英 生 (京大)  
浜 辺 正 昭 (I H I)

## ○ 本会協賛・共催行事 ○

| 会 合 名   | 開催日・会場                                  | 詳細問合せ先   |
|---|---|--|
| 平成 15 年度情報学講座<br>ーヒューマノイド(ヒト型ロボット)のい<br>る社会ー  | H 15/5/21-7/5<br>東京電機大学<br>神田キャンパス      | 東京電機大学 学務部学事課 担当/高澤, 堀<br>TEL: 03-5280-3555 FAX: 03-5280-3623<br>E-MAIL: megumi@jim.dendai.ac.jp   |
| 第 262 回講習会 製品開発, 技術開発の<br>ための最適設計技術と応用<br>(デモ展示付き)  | H 15/6/19-20<br>大阪科学技術センター<br>8 階中ホール   | 日本機械学会関西支部<br>TEL: 06-6443-2073 FAX: 06-6443-6049<br>E-MAIL: jsme@soleil.ocn.ne.jp   |
| 日本流体力学会年会 2003  | H 15/7/28-30<br>工学院大学 新宿校舎              | 日本流体力学会年会 2003 運営委員会事務局<br>(東京理科大学工学部機械工学科 山本 誠),<br>E-MAIL: yamamoto@rs.kagu.tus.ac.jp,   |
| 第 11 回機械材料・材料加工技術講演会<br>(M & P 2003)  | H 15/10/17-18<br>武蔵工業大学<br>世田谷キャンパス     | 湯浅栄二 (武蔵工業大学工学部機械工学科)<br>TEL: 03-3703-3111,<br>URL: <a href="http://www.jsme.or.jp/mpd/">http://www.jsme.or.jp/mpd/</a>  |
| 可視化情報学会全国講演会<br>(宇都宮 2003)  | H 15/10/31-11/1<br>宇都宮大学 工学部            | 実行委員長: 庵原昭夫 (宇都宮大学)<br>TEL: 028-689-6036,<br>幹 事: 二宮 尚 (宇都宮大学)<br>TEL: 028-689-6043,<br>URL: <a href="http://www.vsj.or.jp/utsunomiya/">http://www.vsj.or.jp/utsunomiya/</a> |
| Eco Design 2003 3rd International Sym-<br>posium on Environmentally Conscious<br>Design and Inverse Manufacturing | H 15/12/8-11<br>国立オリンピック記念<br>青少年総合センター | エコデザイン学会連合事務局<br>TEL: 03-3815-1681, FAX: 03-3815-1691,<br>E-mail: haraki@bcasj.or.jp   |

## ▷ 入 会 者 名 簿 ◁

## 〔正会員〕

池 口 拓 也 (川崎重工)   加 藤 悦 男 (リタケセラミックス)   吉 葉 正 行 (都立大)   吉 田 英 生 (京大)  
浜 辺 正 昭 (I H I)

5月号をお届けします。

4月3日開催の総会で、柘植会長に代わり大田新会長が誕生しました。最初に新会長のご挨拶を掲載します。学会は昨年創設30周年を迎えましたが、変化する社会環境に対応する学会の有り方、進むべき方向と役割認識、さらに11月に国際ガスタービン会議開催を予定していますが、この会議開催に対する新会長の熱意が伝わってきます。

今月号は、ガスタービンを使用した産業用高効率発電プラントを特集し、酒井先生には特集号刊行にあたり「特集号によせて」をご寄稿いただきました。ガスタービン本体の高効率化、構成要素の開発改良については、これまでに本誌でもたびたび取り上げられてきましたが、今回は実際にガスタービンが製品開発から始まり、産業界でどのように利用されているか、運用実績はどうか、技術的問題点は何かなどを小型から事業用大型装置まで広範囲に、各メーカーの方に解説していただきました。電気・蒸気併給のコージェネレーション、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル、今後の開発、改良が期待される燃料電池とガスタービンを組み合わせたハイブリッドシステム、ガスタービン利用ごみ発電、さらに昼夜電力需要の差を埋めることを目的とした蓄圧式ガスタービンと盛り沢山の内容になりました。会員各位のご参考になれば幸いです。なお、使用用語については産業界内でも業種により違いが見られます。用語統一への対応は今後の課題として残りました。

今回は技術論文を一遍掲載しましたが、最近の編集委員会では話題になるのは、技術論文の投稿促進対策です。本学会では、会誌が技術論文発表の場という位置付けであり、もっと多くの技術論文が投稿掲載されることを願っています。

最後になりますが、本号は原稿締め切りが年度末のお忙しい時期であったにも関わらず、ご執筆をお引き受け頂いた各著者の方々に厚くお礼申し上げます。

期が変わり会誌編集委員会のメンバーも何人かが交代しています。少しでも会員の皆様の役に立つ会誌にするように湯浅新編集委員長のもと、委員一同努力して参ります。学会に対するご協力、ご支援をお願いいたします。本号の企画編集は合田委員（KHI）、西村委員（MHI）、山本委員（IHI）と千葉（IHI）が担当しました。

（千葉）

## 〈表紙写真〉

### SMGT 実験機

説明：写真は、性能試験用に製作された SMGT 実験機。川崎重工明石工場で陸上試験に供され平成14年度後半にA重油焚きで、出力2500kW、熱効率38%以上、NOx排出量1g/kW・h以下の開発目標を達成した。エンジン形式は、熱交換器つき再生開放2軸式である。引き続き実船搭載に必要な耐久性、信頼性確立のための試験を行い、来るべき次世代内航船の搭載に備える。  
（提供 スーパーマリンガスタービン技術研究組合）

だより

## ♣事務局 ☒ ♣

桜の季節も瞬く間に過ぎ去り、この学会誌がお手元に届く頃はもう新緑の季節となっていることでしょう。

今年の冬は寒かったのが、桜の開花も遅れるのではといわれていましたが、例年通りに開き始め、4月3日の通常総会の時がちょうど満開でまさに見頃。会場の周りにもたくさんの桜の木があり、青空に薄桃色の花弁が映えて綺麗でした。今年度の始まりのこの節目の総会の時に思いがけずお花見が出来て、今年は何かいことありそうだと喜んでます。

今年は秋に国際会議を控えていますので、通常の行事が前倒しとなり、定期講演会も北海道の「北見」で6月25、26、27日に開催。6月の北海道は、本州とちがって梅雨もなく爽やかと聞いていますので、今から楽しみです。

秋の国際会議までの間に、見学会も教育シンポジウムも例年通り行われますので、学会誌会告やHPを時々覗かれることをお勧めします。

新しい年度に入り異動も多いことと思います。住所変更・所属変更がございましたら速やかにご連絡いただきますようお願いいたします。また、会費を未納の方は、是非お早めにお送りください。

巻末の「預金口座振替依頼書」にて、銀行・郵便貴口座よりの自動引落しに是非ご協力下さいますようお願いいたします。

[A]

5月号をお届けします。

4月3日開催の総会で、柘植会長に代わり大田新会長が誕生しました。最初に新会長のご挨拶を掲載します。学会は昨年創設30周年を迎えましたが、変化する社会環境に対応する学会の有り方、進むべき方向と役割認識、さらに11月に国際ガスタービン会議開催を予定していますが、この会議開催に対する新会長の熱意が伝わってきます。

今月号は、ガスタービンを使用した産業用高効率発電プラントを特集し、酒井先生には特集号刊行にあたり「特集号によせて」をご寄稿いただきました。ガスタービン本体の高効率化、構成要素の開発改良については、これまでに本誌でもたびたび取り上げられてきましたが、今回は実際にガスタービンが製品開発から始まり、産業界でどのように利用されているか、運用実績はどうか、技術的問題点は何かなどを小型から事業用大型装置まで広範囲に、各メーカーの方に解説していただきました。電気・蒸気併給のコージェネレーション、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル、今後の開発、改良が期待される燃料電池とガスタービンを組み合わせたハイブリッドシステム、ガスタービン利用ごみ発電、さらに昼夜電力需要の差を埋めることを目的とした蓄圧式ガスタービンと盛り沢山の内容になりました。会員各位のご参考になれば幸いです。なお、使用用語については産業界内でも業種により違いが見られます。用語統一への対応は今後の課題として残りました。

今回は技術論文を一遍掲載しましたが、最近の編集委員会では話題になるのは、技術論文の投稿促進対策です。本学会では、会誌が技術論文発表の場という位置付けであり、もっと多くの技術論文が投稿掲載されることを願っています。

最後になりますが、本号は原稿締め切りが年度末のお忙しい時期であったにも関わらず、ご執筆をお引き受け頂いた各著者の方々に厚くお礼申し上げます。

期が変わり会誌編集委員会のメンバーも何人かが交代しています。少しでも会員の皆様の役に立つ会誌にするように湯浅新編集委員長のもと、委員一同努力して参ります。学会に対するご協力、ご支援をお願いいたします。本号の企画編集は合田委員（KHI）、西村委員（MHI）、山本委員（IHI）と千葉（IHI）が担当しました。

（千葉）

## 〈表紙写真〉

### SMGT 実験機

説明：写真は、性能試験用に製作された SMGT 実験機。川崎重工明石工場で陸上試験に供され平成14年度後半にA重油焚きで、出力2500kW、熱効率38%以上、NOx排出量1g/kW・h以下の開発目標を達成した。エンジン形式は、熱交換器つき再生開放2軸式である。引き続き実船搭載に必要な耐久性、信頼性確立のための試験を行い、来るべき次世代内航船の搭載に備える。  
（提供 スーパーマリンガスタービン技術研究組合）

だより

## ♣事務局 ☒ ♣

桜の季節も瞬く間に過ぎ去り、この学会誌がお手元に届く頃はもう新緑の季節となっていることでしょう。

今年の冬は寒かったのが、桜の開花も遅れるのではといわれていましたが、例年通りに開き始め、4月3日の通常総会の時がちょうど満開でまきに見頃。会場の周りにもたくさんの桜の木があり、青空に薄桃色の花弁が映えて綺麗でした。今年度の始まりのこの節目の総会の時に思いがけずお花見が出来て、今年は何かいことありそうだと喜んでます。

今年は秋に国際会議を控えていますので、通常の行事が前倒しとなり、定期講演会も北海道の「北見」で6月25、26、27日に開催。6月の北海道は、本州とちがって梅雨もなく爽やかと聞いていますので、今から楽しみです。

秋の国際会議までの間に、見学会も教育シンポジウムも例年通り行われますので、学会誌会告やHPを時々覗かれることをお勧めします。

新しい年度に入り異動も多いことと思います。住所変更・所属変更がございましたら速やかにご連絡いただきますようお願いいたします。また、会費を未納の方は、是非お早めにお送りください。

巻末の「預金口座振替依頼書」にて、銀行・郵便貴口座よりの自動引落しに是非ご協力下さいますよう重ねてお願いいたします。

[A]

## 学会誌編集規定

1996.2.8改訂

1. 本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。
  - A. 投稿原稿会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
  - B. 依頼原稿本学会編集委員会がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。
  - C. 学会原稿学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および学会による調査・研究活動の成果等の報告。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、ガスタービン及び過給機に関連のある論説・解説、講義、技術論文、速報（研究速報、技術速報）、寄書（研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介）、随筆、書評、情報欄記事、その他とする。刷り上がりページ数は原則として、1編につき次のページ数以内とする。

|          |         |
|----------|---------|
| 論説・解説、講義 | 6 ページ   |
| 技術論文     | 6 ページ   |
| 速報       | 4 ページ   |
| 寄書、随筆    | 2 ページ   |
| 書評       | 1 ページ   |
| 情報欄記事    | 1/2 ページ |

3. 執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記1に示す。
4. 会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は、編集委員会が定める方法により審査され、編集委員会の承認を得て、学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては、別に技術論文投稿規定を定める。
5. 依頼原稿および学会原稿についても、編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は、査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。
6. 依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。
7. 本学会誌に掲載される記事・論文などの著作権は原則として本学会に帰属する。
8. 著作者本人が自ら書いた記事・論文などの全文または一部を、本学会誌に掲載されたことを明記したうえで、転載、翻訳、翻案などの形で利用する場合、本会は原則としてこれを妨げない。ただし、著作者本人であっても学会誌を複製する形で全文を他の著作物に利用する場合は、文書で本会に許諾を求めなければならない。

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先  
〒105-0004 東京都港区新橋 5-20-4  
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168  
ニッセイエブロ(株) 制作部デジタル編集課  
E-mail: eblo\_h3@mbr.sphere.ne.jp  
学会誌担当 佐藤孝憲

## 技術論文投稿規定

1997.1.28改訂

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。
  - 1) 主たる著者は本学会会員であること。
  - 2) 投稿原稿は著者の原著で、ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
  - 3) 投稿原稿は、一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし、要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。
2. 使用言語は原則として日本語とする。ただし、著者が外国人会員であって日本語による論文執筆が困難な場合は英語による投稿を認める。
3. 投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6ページ以内とする。ただし、1ページにつき12,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。
4. 図・写真等について、著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。
5. 投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し、正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。
6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。
7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し、編集委員会で採否を決定する。
8. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては、学会誌編集規定7.および8.を適用する。

### 日本ガスタービン学会誌 Vol.31 No.3 2003.5

発行日 2003年5月20日  
発行所 社団法人日本ガスタービン学会  
編集者 湯浅三郎  
発行者 大田英輔  
〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-5-13  
第3工新ビル 402  
Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387  
郵便振替 00170-9-179578  
印刷所 ニッセイエブロ(株)  
〒105-0004 東京都港区新橋 5-20-4  
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2003, (社)日本ガスタービン学会

#### 複写される方へ

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(社)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は、直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。

〒170-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル  
学術著作権協会  
TEL: 03-3475-5618 FAX: 03-3475-5619  
E-mail: naka-atsu@muji.biglobe.ne.jp



## 学会誌編集規定

1996.2.8改訂

1. 本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。
  - A. 投稿原稿(会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。)
  - B. 依頼原稿(本学会編集委員会がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。)
  - C. 学会原稿(学会の運営・活動に関する記事(報告、会告等)および学会による調査・研究活動の成果等の報告。)
2. 依頼原稿および投稿原稿は、ガスタービン及び過給機に関連のある論説・解説、講義、技術論文、速報(研究速報、技術速報)、寄書(研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介)、随筆、書評、情報欄記事、その他とする。刷り上がりページ数は原則として、1編につき次のページ数以内とする。

|          |        |
|----------|--------|
| 論説・解説、講義 | 6ページ   |
| 技術論文     | 6ページ   |
| 速報       | 4ページ   |
| 寄書、随筆    | 2ページ   |
| 書評       | 1ページ   |
| 情報欄記事    | 1/2ページ |

3. 執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記1に示す。
4. 会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は、編集委員会が定める方法により審査され、編集委員会の承認を得て、学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては、別に技術論文投稿規定を定める。
5. 依頼原稿および学会原稿についても、編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は、査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。
6. 依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。
7. 本学会誌に掲載される記事・論文などの著作権は原則として本学会に帰属する。
8. 著作者本人が自ら書いた記事・論文などの全文または一部を、本学会誌に掲載されたことを明記したうえで、転載、翻訳、翻案などの形で利用する場合、本会は原則としてこれを妨げない。ただし、著作者本人であっても学会誌を複製する形で全文を他の著作物に利用する場合は、文書で本会に許諾を求めなければならない。

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先  
〒105-0004 東京都港区新橋 5-20-4  
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168  
ニッセイエブロ(株) 制作部デジタル編集課  
E-mail: eblo\_h3@mbr.sphere.ne.jp  
学会誌担当 佐藤孝憲

## 技術論文投稿規定

1997.1.28改訂

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。
  - 1) 主たる著者は本学会会員であること。
  - 2) 投稿原稿は著者の原著で、ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
  - 3) 投稿原稿は、一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし、要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。
2. 使用言語は原則として日本語とする。ただし、著者が外国人会員であって日本語による論文執筆が困難な場合は英語による投稿を認める。
3. 投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6ページ以内とする。ただし、1ページにつき12,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。
4. 図・写真等について、著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。
5. 投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し、正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。
6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。
7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し、編集委員会で採否を決定する。
8. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては、学会誌編集規定7.および8.を適用する。

### 日本ガスタービン学会誌 Vol.31 No.3 2003.5

発行日 2003年5月20日  
発行所 社団法人日本ガスタービン学会  
編集者 湯浅三郎  
発行者 大田英輔  
〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-5-13  
第3工新ビル 402  
Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387  
郵便振替 00170-9-179578  
印刷所 ニッセイエブロ(株)  
〒105-0004 東京都港区新橋 5-20-4  
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2003, (社)日本ガスタービン学会

#### 複写される方へ

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(社)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は、直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。

〒170-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル  
学術著作権協会  
TEL: 03-3475-5618 FAX: 03-3475-5619  
E-mail: naka-atsu@muji.biglobe.ne.jp

## 学会誌編集規定

1996.2.8改訂

1. 本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。
  - A. 投稿原稿(会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。)
  - B. 依頼原稿(本学会編集委員会がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。)
  - C. 学会原稿(学会の運営・活動に関する記事(報告、会告等)および学会による調査・研究活動の成果等の報告。)
2. 依頼原稿および投稿原稿は、ガスタービン及び過給機に関連のある論説・解説、講義、技術論文、速報(研究速報、技術速報)、寄書(研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介)、随筆、書評、情報欄記事、その他とする。刷り上がりページ数は原則として、1編につき次のページ数以内とする。

|          |        |
|----------|--------|
| 論説・解説、講義 | 6ページ   |
| 技術論文     | 6ページ   |
| 速報       | 4ページ   |
| 寄書、随筆    | 2ページ   |
| 書評       | 1ページ   |
| 情報欄記事    | 1/2ページ |

3. 執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記1に示す。
4. 会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は、編集委員会が定める方法により審査され、編集委員会の承認を得て、学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては、別に技術論文投稿規定を定める。
5. 依頼原稿および学会原稿についても、編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は、査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。
6. 依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。
7. 本学会誌に掲載される記事・論文などの著作権は原則として本学会に帰属する。
8. 著作者本人が自ら書いた記事・論文などの全文または一部を、本学会誌に掲載されたことを明記したうえで、転載、翻訳、翻案などの形で利用する場合、本会は原則としてこれを妨げない。ただし、著作者本人であっても学会誌を複製する形で全文を他の著作物に利用する場合は、文書で本会に許諾を求めなければならない。

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先  
〒105-0004 東京都港区新橋 5-20-4  
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168  
ニッセイエブロ(株) 制作部デジタル編集課  
E-mail: eblo\_h3@mbr.sphere.ne.jp  
学会誌担当 佐藤孝憲

## 技術論文投稿規定

1997.1.28改訂

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。
  - 1) 主たる著者は本学会会員であること。
  - 2) 投稿原稿は著者の原著で、ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
  - 3) 投稿原稿は、一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし、要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。
2. 使用言語は原則として日本語とする。ただし、著者が外国人会員であって日本語による論文執筆が困難な場合は英語による投稿を認める。
3. 投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6ページ以内とする。ただし、1ページにつき12,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。
4. 図・写真等について、著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。
5. 投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し、正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。
6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。
7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し、編集委員会で採否を決定する。
8. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては、学会誌編集規定7.および8.を適用する。

### 日本ガスタービン学会誌 Vol.31 No.3 2003.5

発行日 2003年5月20日  
発行所 社団法人日本ガスタービン学会  
編集者 湯浅三郎  
発行者 大田英輔  
〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-5-13  
第3工新ビル 402  
Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387  
郵便振替 00170-9-179578  
印刷所 ニッセイエブロ(株)  
〒105-0004 東京都港区新橋 5-20-4  
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2003, (社)日本ガスタービン学会

#### 複写される方へ

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(社)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は、直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。

〒170-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル  
学術著作権協会  
TEL: 03-3475-5618 FAX: 03-3475-5619  
E-mail: naka-atsu@muji.biglobe.ne.jp

## 学会誌編集規定

1996.2.8改訂

1. 本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。
  - A. 投稿原稿会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
  - B. 依頼原稿本学会編集委員会がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。
  - C. 学会原稿学会の運営・活動に関する記事(報告、会告等)および学会による調査・研究活動の成果等の報告。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、ガスタービン及び過給機に関連のある論説・解説、講義、技術論文、速報(研究速報、技術速報)、寄書(研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介)、随筆、書評、情報欄記事、その他とする。刷り上がりページ数は原則として、1編につき次のページ数以内とする。

|          |        |
|----------|--------|
| 論説・解説、講義 | 6ページ   |
| 技術論文     | 6ページ   |
| 速報       | 4ページ   |
| 寄書、随筆    | 2ページ   |
| 書評       | 1ページ   |
| 情報欄記事    | 1/2ページ |

3. 執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記1に示す。
4. 会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は、編集委員会が定める方法により審査され、編集委員会の承認を得て、学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては、別に技術論文投稿規定を定める。
5. 依頼原稿および学会原稿についても、編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は、査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。
6. 依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。
7. 本学会誌に掲載される記事・論文などの著作権は原則として本学会に帰属する。
8. 著作者本人が自ら書いた記事・論文などの全文または一部を、本学会誌に掲載されたことを明記したうえで、転載、翻訳、翻案などの形で利用する場合、本会は原則としてこれを妨げない。ただし、著作者本人であっても学会誌を複製する形で全文を他の著作物に利用する場合は、文書で本会に許諾を求めなければならない。

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先  
〒105-0004 東京都港区新橋 5-20-4  
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168  
ニッセイエブロ(株) 制作部デジタル編集課  
E-mail: eblo\_h3@mbr.sphere.ne.jp  
学会誌担当 佐藤孝憲

## 技術論文投稿規定

1997.1.28改訂

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。
  - 1) 主たる著者は本学会会員であること。
  - 2) 投稿原稿は著者の原著で、ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
  - 3) 投稿原稿は、一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし、要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。
2. 使用言語は原則として日本語とする。ただし、著者が外国人会員であって日本語による論文執筆が困難な場合は英語による投稿を認める。
3. 投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6ページ以内とする。ただし、1ページにつき12,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。
4. 図・写真等について、著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。
5. 投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し、正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。
6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。
7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し、編集委員会で採否を決定する。
8. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては、学会誌編集規定7.および8.を適用する。

### 日本ガスタービン学会誌 Vol.31 No.3 2003.5

発行日 2003年5月20日  
発行所 社団法人日本ガスタービン学会  
編集者 湯浅三郎  
発行者 大田英輔  
〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-5-13  
第3工新ビル 402  
Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387  
郵便振替 00170-9-179578  
印刷所 ニッセイエブロ(株)  
〒105-0004 東京都港区新橋 5-20-4  
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2003, (社)日本ガスタービン学会

#### 複写される方へ

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(社)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は、直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。

〒170-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル  
学術著作権協会  
TEL: 03-3475-5618 FAX: 03-3475-5619  
E-mail: naka-atsu@muji.biglobe.ne.jp