

## エネルギー・環境問題とガスタービン

A role of gas turbines in problems of energy and global environment

吉 識 晴 夫\*

Haruo YOSHIKI

ただいまご紹介をいただきました吉識でございます。  
本日は表題の講演をさせていただきます。

(OHP)

非常に大きな題目にしましたので、研究室のほうで公開をしている内容とは多少違いますが、現在こういう問題が重要になっているということで、このへんのお話をさせていただきますと思います。

最初に、皆様よくご存じだとは思いますが、地球環境問題というものがあります。それがなぜ起こってきたかと申しますと、まず地球上の人口が非常に増大してきたことが挙げられます。さらにそのうえ経済活動が非常に活発化しているということで、人間の活動が地球の浄化能力を超えてしまった。従来ですと、地球の容量が無限と考えられていたわけですが、現在は、容量が有限化してきたということでございます。

ある人に言わせますと、地球を生物に例えますと、人間はガン細胞ではないかとも最近言われているわけでございます。

本日お話ししようと思っておりますのは、図1の左半分に書いてあるようなことでございます。例えば酸性雨の問題と申しますのは、化石燃料を使うことによって硫酸化物、窒素酸化物、そういったものが排出されまして、それらが雨と一緒に地上に下りてくる。そして酸性雨になる。特に西ヨーロッパですと、イギリスやドイツが石炭を非常に焚いており、スカンジナビア半島に酸性雨がたくさん降るといことで、かなり早くから問題になっております。

それからオゾン層の破壊。これはフロンの問題で取り沙汰されております。オゾン層がオゾンホールという形で破壊されていきますと、太陽からの有害な紫外線が降ってくる。このへんはまだある程度の対応策はとれるのですが、それにも増して温暖化という問題が最近非常に

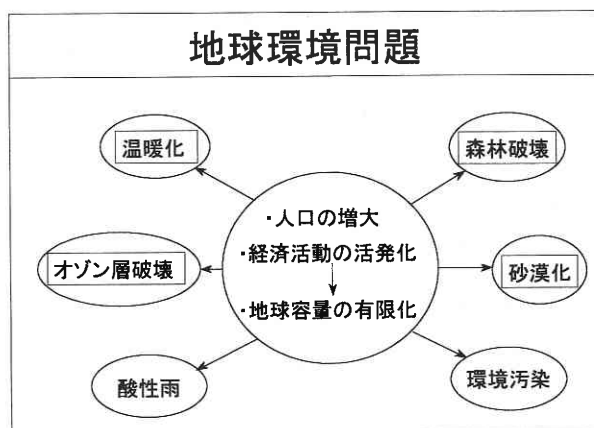


図1 地球環境問題

問題になってきております。

温暖化に寄与するガスはどんなものがあるかという、多少データが古いのですが、日本の場合ですとほぼ二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) が約半分ぐらい寄与している。残りはメタン、あるいは N<sub>2</sub>O、フロン。あとはオゾンとか水蒸気とかいろいろあるわけですが、大体同じモル数のガスで考えますと、CO<sub>2</sub> を 1 にするとメタンが 10 倍、N<sub>2</sub>O が 100 倍、フロンは 1 万倍ぐらい温室効果があります。ですからフロンはオゾン層の破壊だけではなく温暖化でも非常に問題がある。

それで CO<sub>2</sub> が現在どのような形で推移しているかということですが、多少古いデータですが、横軸が西暦の年、縦軸が大気中の CO<sub>2</sub> の濃度 (PPM) で表示してあります。

これを見ていただくとわかりますように 1960 年頃から急激に CO<sub>2</sub> が増加している。現在は、ハワイ島のマウナロアという観測所で常時測定している。

なぜハワイ島かと申し上げますと、太平洋の真ん中にあるということで、人間の経済活動からの影響を直接的には受けにくく、ほぼ地球上の平均値的な CO<sub>2</sub> 濃度を表

\*東京大学生産技術研究所 第2部

すだろうということで、このハワイ島で測定しているわけです。

ハワイ島では1960年頃から測定しておりますが、それ以前のCO<sub>2</sub>は南極とかグリーンランドの氷の中に、雪が積もって氷になる過程で、その時代の空気を気泡として閉じ込めているわけです。その気泡の年代は、炭素の同位元素で年代を同定するというので、ある年にどのくらいのCO<sub>2</sub>が大気中に含まれていたかというのを測定しているわけです。

これで見ますと、大体19世紀はじめあたりから産業革命が始まったわけですが、その頃から石炭が非常に使われだした。その効果が最近にきて非常に顕著にあらわれてきているというのが温暖化の問題になるわけです。

CO<sub>2</sub>の排出量ですが、図2のように、何といてもUSAが23%と一番多い。その次が旧ソ連邦、中国、日本は堂々第4位です。日本は経済活動が非常に活発であるという証でCO<sub>2</sub>の排出量が多い。CO<sub>2</sub>の排出量を何とかして下げていかなければいけないということになるわけです。

日本の場合の例ですが、1986年のCO<sub>2</sub>の排出は、電力が27%、産業が33%、運輸が23%、民生が17%となっています。最近民生などで電力の使用量が増えており、電力を発生するときに生じるCO<sub>2</sub>が、3分の1ぐらいまでに増えてきております。発電に伴うCO<sub>2</sub>を削減することが非常に要求されるわけでございます。

先ほど3分の1ぐらいが発電に伴ってCO<sub>2</sub>を発生すると申し上げましたが、それらは産業部門、あるいは民生部門、運輸で電気として利用されるわけです。

図3の最近のデータを見ておきますと、民生部分、すなわち家庭用と業務用、及び運輸部門がかなり増えてきている。現在世界の条約で2000年時点で1990年のレベル

## 二酸化炭素排出量(1991年)

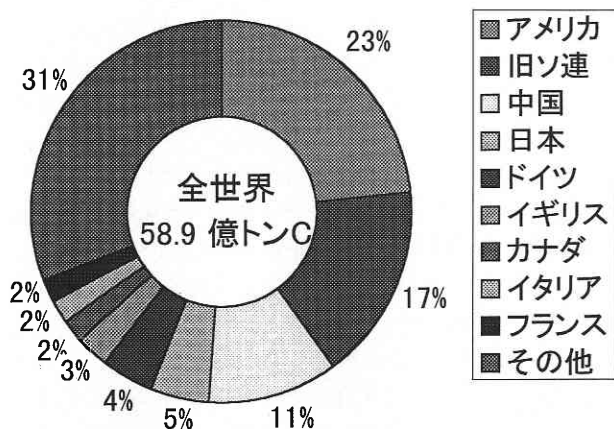


図2 二酸化炭素排出量 (1991年)

にCO<sub>2</sub>の排出量を抑えるということを目指しているわけですが、94年でかなりの量が増えてしまっている。今後これから残り数年で1990年レベルにCO<sub>2</sub>の排出量を削減するということは非常に難しいことになっております。

図4は発電による二酸化炭素の排出量を国別にみたものです。縦軸は単位発電量に対するCO<sub>2</sub>の炭素換算量をグラムで表しているわけです。日本は、これで見ますとほかの西欧諸国に比べますと多少はいい。左側は火力発電、いわゆる化石燃料を燃やして電気をつくるということによって生じる二酸化炭素です。ここで特徴的なのは、ドイツが非常に高い。先ほども言いましたが、ドイツは石炭を使うということで、火力発電によるCO<sub>2</sub>の排出量が多いわけです。

あと、右側は全発電によるものですが、ここで特徴的なのはフランスが非常に少ない。なぜかといいますと、1973年に第一次の石油危機があり、その後先進国で、とにかく石油依存度を下げるということをやりました。フランスはそれに対して原子力発電を非常に推進したわけです。現在、フランスでは発電量の7割ぐらいは原子力で発電しているということで、原子力発電に切り換えた

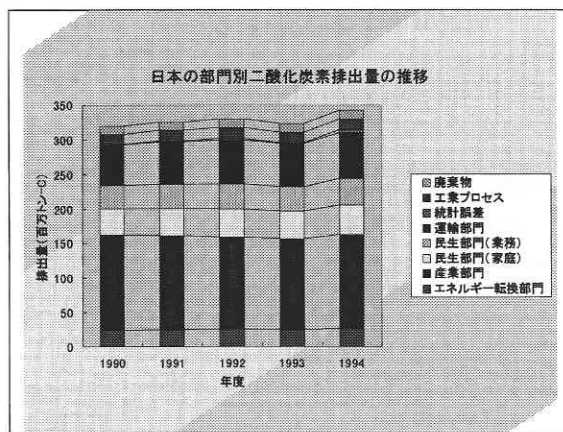


図3 日本の部門別二酸化炭素排出量の推移

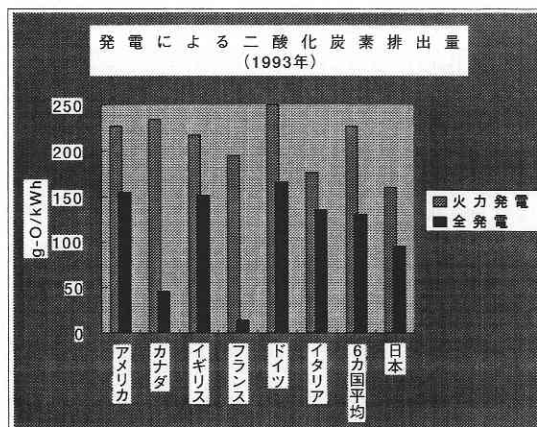


図4 発電による二酸化炭素排出量 (1993年)

ことによって発電量に対する  $\text{CO}_2$  の排出量は少なくなっている。カナダも少ないですが、これは水力発電が非常に大きなウエートを占めているものですから、全発電量に対する  $\text{CO}_2$  の排出量は少なくなっているわけです。

日本は比較的火力発電による排出量が少ない。なぜかと言いますと、73年、79年の2回にわたる石油危機のあと、日本のエネルギーを石油からほかのものに変えていくということによって、LNG火力にかなりシフトしているからです。

LNGにいたしますと、石油よりは  $\text{CO}_2$  の排出量が少なくなる。大雑把に言いますと、石炭による排出量を100としますと、石油の場合が80、天然ガスは60ぐらい、そのぐらいの割合で、要するに燃料の炭素(C)と水素(H)の割合でそうなるわけですが、Cの少ないものを燃料として使うということによって排出量が少なくなるというわけです。

$\text{CO}_2$ につきましてはこのような状況でございますが、もう一つ火力発電による排出としましては、酸性雨のところで申し上げましたように硫酸化物とか窒素酸化物、こういったものがあります。図5で見ますとドイツ、イギリス、この2つが硫酸化物が多い。というのは、硫酸黄分を多く含んだ石炭を使って火力発電をしているということのあらわれになるわけです。

これに比べますと日本は非常に  $\text{SO}_x$  と  $\text{NO}_x$  の発生量が少ない。日本の場合は非常に厳しい環境規制が行われておりまして、排煙脱硫、脱硝を行うことで非常に少ない量になっております。

ただこれも排煙脱硫、脱硝は必ずコストがかかりますので、どこの国でもそういうことが可能かという、そうはいかない。発展途上国でこれからどんどん経済活動が活発になるにつれて電気の使用量が増えていくというときに、このへんをどうするかということがその次の問題としては出てきます。このような形で環境問題が存在

するということをご認識していただきたいと思います。

次に化石燃料の話に移らせていただきます。石炭が現在地球上にどのくらいあるかというものでございます。これは大陸ごとに示している。0と書いてあるのは中東。

石炭について言いますと、地球上ほぼ万遍なく存在する。中東と南米を除きますとほぼどの大陸にもあるといえます。

1993年時点の石炭の消費量から考えますと、大体可採年数が約230年ぐらい、単純計算しますと230年ぐらいになる。

次に石油でございますが、先ほどとは様相が全く違ひまして、皆様よくご存じのように中東が3分の2ほど占めております。残りはアフリカと北アメリカ。それから南アメリカ、その他にも多少はありますが、圧倒的に中東であるということです。ですから石油の持つ危険性がここに存在するわけです。93年時点の消費量から単純に計算しますと、石油の場合はあと50年ぐらいということになります。ただ石油に関しましては、従来から残り30年と言われていたのが、もうすでに30年ぐらい経過しているのではないかという気がいたしますので、そのへんは技術的な問題で最終的に50年で石油がなくなるというものではないと思います。

次に天然ガスですが、天然ガスは旧ソ連邦と中東、この2カ所が非常に多い。残りはその3分の1ぐらい。ですから天然ガスもそういう意味では石油に近いような形でわりあい偏在しています。93年時点の消費量から考えると天然ガスは大体70年ぐらいということになります。

次に化石燃料ではありませんが、 $\text{CO}_2$ 問題からは非常に有利であると考えられる核燃料となるウラン。ウランの埋蔵量を見ますと、アフリカ、北アメリカ、旧ソ連邦、オセアニアと比較的世界中に万遍なく存在するという状況で、石油ほどの危険性はない。ただ93年時点の消費量からいいますと、ウランも、今の使い方では110年ぐらいしかないということになります。

さらにもっとクリーンなエネルギーということで考えますと、水力というのが考えられます。水力はほぼ世界中にある。ないのは中東とオセアニア。ここはあまり大きな川がございませんので水力は利用できない。しかし、世界中で見るとかなりあります。

水力というのは太陽エネルギーを使いやすい形のエネルギーにしたものといえますが、実際に水力がどの程度使われているかというのがこのグラフでございます。縦軸はただいまお示ししました経済的な利用可能水力を、どのくらい利用しているかというものです。全世界の平均で見ますと、まだ3分の1にもならない。93年時点ですと26%ぐらいの量ですが、ヨーロッパと北アメリカはかなりの部分開発されています。アフリカ、南アメリカ、

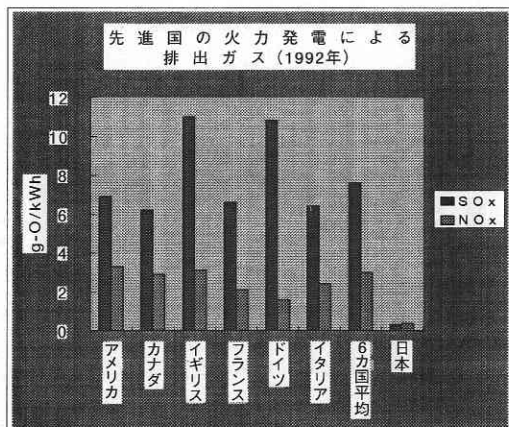


図5 火力発電による排出ガス (1992年)

アジア、旧ソ連では、まだかなりの量の水力が使われずに残されている。最近、特に話題になっておりますのは、中国の長江、その三峡ダムというところで、中国が今後の発展を見込んで水力の開発を今盛んにやっていることです。水力をもう少しうまく利用できないだろうかということで、あとからお話しするような水素利用という形が出てくるわけです。

それでは、各国のエネルギーがどのくらい自給しているかということですが、日本の場合だけをお話したいと思いますが、赤いほうはエネルギーの輸入依存度、全体のエネルギーに対して日本は現在80%以上輸入をしています。特に石油だけに限っていいますと、日本はほぼ100%輸入しています。日本のエネルギーに対する脆弱性というのが浮き彫りにされているわけです。

石油の産出の状況ですが(図6)、いわゆる石油輸出機構(OPEC)の支配している割合が、1980年時点で44%ぐらい。それがだんだん先進国がOPECから離れるということで、北海油田とかメキシコの石油とか、そういったところを開発しまして、85年では30%を切るというところまで落ち込んできた。最近はそのまただんだん上がってきて、今では40%を超しているということで、石油危機の時の状況にだいぶ近づいてきている。ですからOPECが半分以上のシェアを占めるようになると、石油危機の問題がまた出てくるということになります。

日本の石油は、ほぼ100%輸入しているということを申し上げましたが、93年時点での石油を輸入している割合ですが(図7)、サウジアラビアの22%から中東その他の6%までで約8割、この時点では8割いってませんが、約8割ぐらいを中東から輸入しております。日本の石油備蓄、今百何日分があるわけですが、中東でひとたび事が起こると、日本の石油は非常な危機的な状況に陥るということをご認識いただきたいと思います。

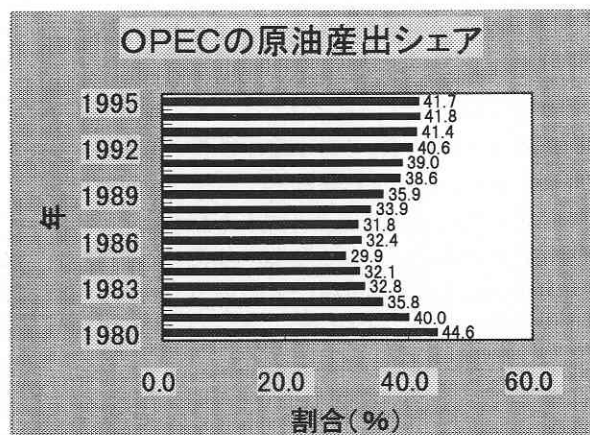


図6 OPECの原油産出シェア

日本のエネルギー事情は以上のような形で使っているのだらうかということが図8でございます。横軸は年度で、73年度が第一次の石油危機、79年度が第二次の石油危機です。この2つの時期を見ていただきますと、一番下が産業用ですが、産業用がかなりのウエートを占めてエネルギーを使っていたわけです。真ん中が民生、上が運輸です。ですから石油危機の頃は産業用が大部分のエネルギーを使っていた。ですが、2回の石油危機に際して産業は、いかに省エネルギーをするかということで非常な努力をしております。1986年の時期ではかなり減らすことに成功したわけです。ですが、最近産業の規模が拡大しているということから、94年時点ではほぼ73年時点と同じところまで産業がエネルギーを使っているという形になっておりまして、トータルとしては73年から比べますとかなり消費量が増えています。1990年以降の増加分は、ほとんど民生用と運輸用で、1973年と比べると倍ぐらいになっています。現在の日本のエネルギーの消費の傾向

### 石油輸入総量(1993年)

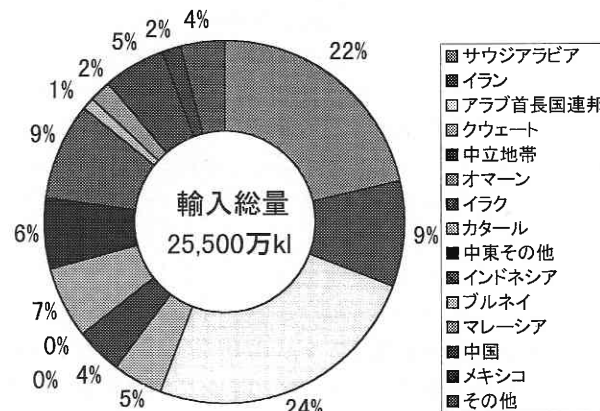


図7 日本の石油総輸入量 (1993年)

### 最終エネルギー消費の推移(原油換算)

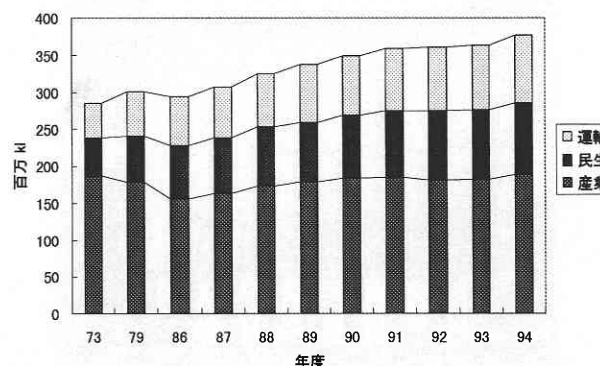


図8 日本の最終エネルギー消費の推移 (原油換算)

としてはこの2つ、民生部分と運輸部分にウエートがかかってきているということが言えると思います。

いま、消費のほうからお話したわけですが、それを、一次エネルギーとしては何を使っているかを図9に示します。下から石油、石炭、天然ガス、原子力、水力、一部地熱というのがあるのですが、ほとんど見えません。あと新エネルギーというような形であります。73年の頃、8割ぐらいが石油に頼っていたわけですが、それで、2回の石油危機に伴いまして、脱石油ということで、とにかく石油の割合を減らしていく。ここで特徴的なのは天然ガスと原子力、この2つが増えてきたわけですが、ですからこれらを増やすことによって石油の消費を減らしてきたというわけです。

ですが、全体のエネルギー消費が増えるということに伴いまして、現在では73年時点と同じぐらいの量の石油の使用量になっている。1986年では8割ぐらいから6割ぐらいまでに減らしたわけですが、その後6割より増えつつあるということです。

ここで、石炭も最近わりに増えておりますが、先ほどCO<sub>2</sub>の問題からいうと石炭を使うのは非常に不利ではあるわけですが、化石燃料としての量からいいますと石炭は非常にたくさんある。最近では火力の技術も進歩しまして、少なくともCO<sub>2</sub>以外のものに対しては十分排煙脱硫、脱硝することによってクリーンな排出ガスにはなっている。効率自身も、タービンの蒸気条件を変えることによってかなり高効率になってきましたので、こういう形で対応しているわけです。

発電ですが、発電につきましては日本がどのような状況で推移したかということで申し上げます(図10)。75年、これは先ほどと順番が違ってますが、一番下に地熱があるはずなんですが、ほとんど見えません。その上に水力がありまして、石炭があります。石油、LNG、原子力という順です。75年のときはLNGと原子力は非常に少

一次エネルギー総供給の推移(原油換算)

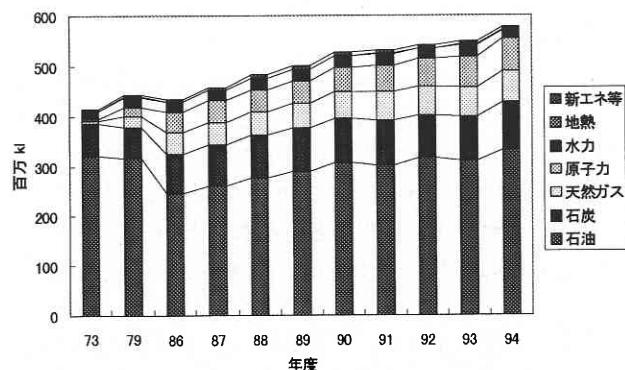


図9 日本の一次エネルギー総供給の推移(原油換算)

なかったですが、現時点、94年では原子力が発電量の4割近くをまかなっております。あとLNG、石油、石炭、水力はほとんど増えておりません。ですから今後どうやって発電の割合を変えていくかということが議論されているわけですが、ここに書いてありますような形で原子力が増えていったりLNGを増やしたりということはなかなか難しい。そう簡単にはいかないということになるかとは思います。

そこでガスタービンがどんな役割をするかということに話を移らせていただきたいと思います。よくご存じの方も大勢おられるかもしれませんが、ガスタービンは、図11に書きましたように、左側から空気を吸い込むわけですが、ここにコンプレッサーがございます。このコンプレッサーで空気を高圧にします。高圧の空気に、ここに燃焼器がありますが、ここに燃料を吹き込んで燃焼させ高温高圧のガスをつくる。高温高圧ガスの膨張によってこのタービンが仕事をするというわけです。タービンの仕事によって圧縮機(コンプレッサー)を駆動し、その残りのもので、こちらはいま出力になってますから、

日本の発電構成

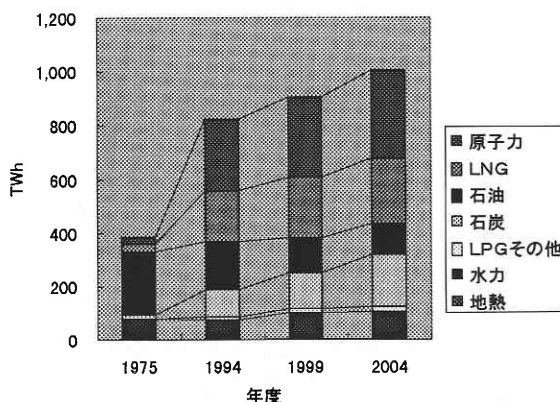


図10 日本の発電構成

## ガスタービンのサイクル

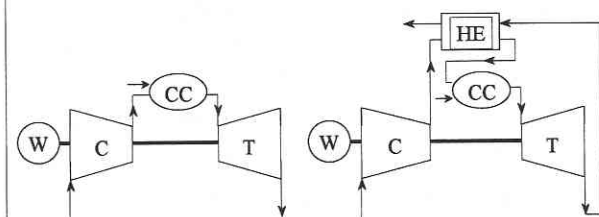


図11 ガスタービンのサイクル

発電ですと発電機をまわして電気をつくるというような形になっております。

ジェットエンジンなどですと、出力軸はありませんので、それをまわすタービンはありません。残りのエネルギーはこちらからジェットの形で噴出する。それで推力を得るという形がガスタービンの基本構成でございます。

こういうガスタービンを原動機としますが、ガスタービンの特徴としましては、まず第一番目に小型、軽量、大出力ということで、この特徴をいかに発揮しているのが航空用エンジンのジェットエンジンでございます。

多種燃料への適応性ということで、気体燃料、液体燃料、燃料の種類を選ばないで何でも燃やせるという特徴がございます。

低公害性ということでは、排出ガスがわりあいクリーンであるということが、ガスタービンの特徴です。

あと良好な保守整備性ということで、頻繁に手入れをしなくてもすぐスタートボタンを押せばスタートするというので、非常用の発電の電源になる。

良好な始動性というのは、普通の火力のボイラーから蒸気を発生させて蒸気タービンをまわすというものと数時間かかるわけです。それに対してガスタービンの場合ですと、スタートしてからフルパワーをとるまでには数十分のオーダーですむということで、ピーク負荷用という応用例があります。

このように申し上げますと、ガスタービンはそんなにいいのかなということですが、そうではありませんで、ガスタービンでは少なくともコンプレッサーを駆動するのにタービン出力の半分ぐらいの動力を使います。ですからどうしても熱効率が低い。その熱効率の低さをカバーするためにはどうするかというと、タービンの最高温度を高温化しようということになるわけです。高温化することによってタービンの効率を高めようというわけです。そのへんの話ですが、きょうは簡単にお話ししたいと思います。

図 11 に 1 軸の単純サイクルの、左側が単純サイクルです。コンプレッサーがありまして、燃焼器があってタービンがある。このタービンの発生仕事でコンプレッサーをまわしてさらに出力を得るという形です。こういうサイクルでやりますと、タービンの高温化というのはタービン入口の温度を高くすることでございますが、いくら高くしても排気の温度がそうは下がらない。完全には温度が低くなるころまでは膨張できないわけです。そうしますと、排気を持ち出すエネルギーは非常に大きいということで、どうしても熱効率が悪くなる。タービン単体の熱効率をよくしようとしますと、排気を右側の絵のような形で熱交換器を通してコンプレッサーからの空気を温めてやる。温めてやることによって、ここの燃

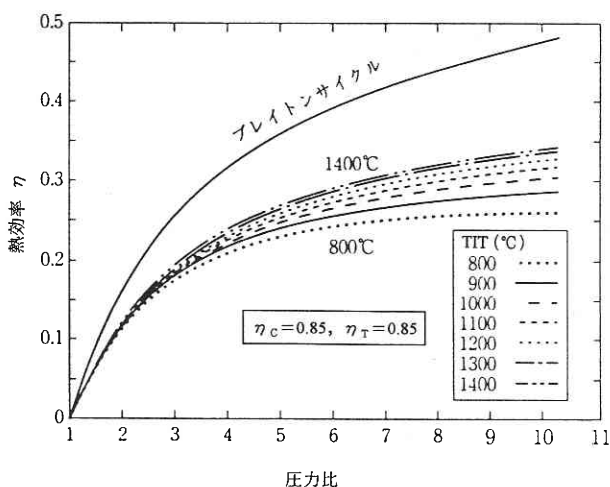


図 12 一軸開放型単純サイクルガスタービンの性能

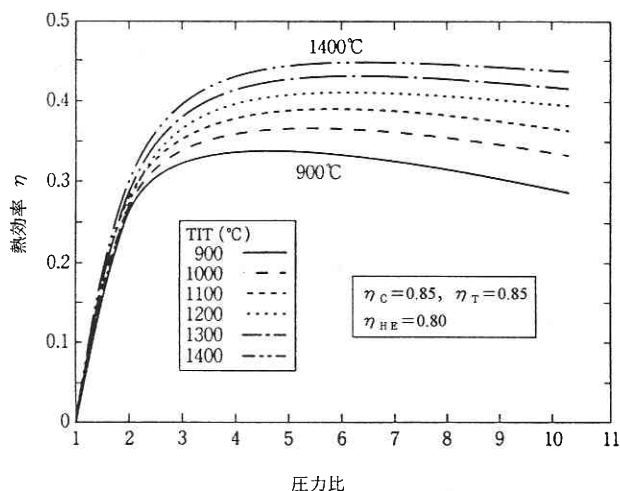


図 13 一軸開放型再生サイクルガスタービンの性能

焼器で加える熱量が少なくてすむという再生サイクルにするわけです。

一軸単純サイクルの場合、タービン入口温度 TIT によって熱効率がどのくらい変わるかという簡単な試算の例を図 12 に示します。これは横軸を圧力比にとってあります。縦軸に熱効率。仮定としましては、タービンとコンプレッサーは 85 % の効率とか、その他の効率を書いてあります。タービンの入口温度をパラメータにとってあります。いまみたいな 1 軸の単純サイクルで計算しますと、圧力比 10 ぐらいでも熱効率 30 % までいかないわけです。それも、これは圧力損失だとか漏れだとか、そういったものを考慮しておりませんのでこのくらいになるわけです。

それを再生サイクルにするとどうなるかというのが図 13 でございます。再生サイクルにすることによって、要するにタービンからの排熱を使うということで、圧力比



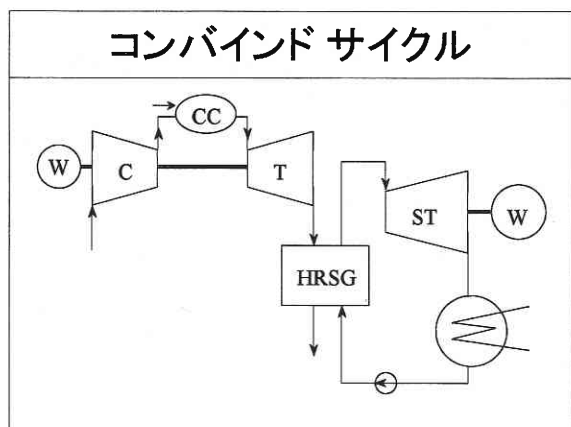


図14 コンバインドサイクル

5とか6とかいうへんでもうまくやれば40%ぐらいとなります。タービン単体の効率を上げようとしても、どうしても再生サイクルが必要になってくるわけです。

ですけれども、発電用のような大きなもので考えますと、再生サイクルよりは、もう一つ別の、タービンからの排熱を蒸気タービンのサイクルにもってくるほうが得になります。

それが図14でございまして、タービンの排熱を利用し、排熱回収ボイラで蒸気を発生させるということをやります。蒸気を発生させて、こちらのスチームタービンで動力を得るという形にします。

なぜ蒸気タービンのほうがいいのかといいますと、先ほど言いましたようにコンプレッサの動力というのはタービンの発生する動力の約半分ぐらい食います。ですけれども、蒸気タービンの場合は水を加圧します。液体を加圧しますので、この圧縮仕事という、加圧に要する動力は少なくて済みます。

さらに、ここにコンデンサー、復水器がありますが、ここで非常に圧力を低くできます。ですから同じ圧力に対してもスチームタービンのほうが膨脹比が高くとれるということで、発生する仕事が増えます。ですから大きなものになりますと、こういうスチームタービンを組合せたほうが有利になる。そこで、発電用の場合にはこういう形のコンバインドサイクルを使うわけです。

タービンにとりましては、先ほど高温化するということが不可欠と申し上げましたが、高温化すると、それに伴っていろいろな技術的な対応をとらなければいけない。まず最初に高温に耐える材料というものが問題になります。現在の材料では、そのまま冷却しないで使えるものは非常に少ないわけです。ですからどうしてもタービン翼だとか燃焼器は冷却をしなければいけない。冷却に必要な空気がたくさんになってしまえば何のために高温化したかわからないということになりますので、やはり

耐熱材料のほうも開発していかなければいけない。そこで、現在いろいろなところで耐熱合金、あるいは金属間化合物、そういった最先端の金属材料の開発が行われております。

ただ、金属では冷却しなければいけない。しかし小型のガスタービンですと、翼の冷却が不可能になります。そうしますと、いきおい無冷却で構成部材をつくらなければいけない。そこで、セラミックスの利用ということが行われているわけです。

このように高温化しますと、燃焼のほうとしても、先ほど排気はきれいだと申し上げましたが、やはり $\text{NO}_x$ の発生が増えます。ですから高温になって排出ガスがクリーンになるような、そういう燃焼技術の開発が必要になります。さらには、 $\text{NO}_x$ だけではなくに $\text{CO}_2$ も考えますと、燃料としては水素を使うということが究極の選択になってきます。

水素を使うというのは、まだなかなか難しいので、その前段としまして、Cが少ないもので扱いやすいものということで、メタノールを使おうという研究開発をやったことがございます。これはメタノールで石油を代替しようということです。メタノールの特徴としましては、常温でとにかく液体である。ただしLNGに比較しますと発熱量が約半分ぐらい。ただし比重が約倍ありますので、必要な燃料流量としてはLNGとほぼ同じぐらいで同じ発電量が得られるということになります。

さらにもう少し違った面から言いますと、日本は天然ガスをパイプラインで引いてこられません。現在LNG（液化天然ガス）の形で使っているわけですが、あまり小さい規模の天然ガス田といったものはLNGに向かない。あるいは現在使っていないようなコールベッドメタンガス、そういったものをメタノール化する。そうしますと常温で液体ですから日本に持ってくるにも非常に便利であるということで、現在未利用のガス田だとかメタンといったようなものの利用もできる。

さらに排気特性でいいますと、燃料中にはNとかSとかばいじんというものがないから、非常に排気特性がきれいである。さらに燃焼温度が低いものですから、空気中で燃やしてもThermal  $\text{NO}_x$  自身の発生も少ないということで、メタノール自身の特性は非常に良いわけです。それをガスタービンになぜ使うかといいますと、メタノールと水蒸気を反応させる改質反応で水素をつくり、水素によって発熱量を増やすということをやります。ただし、吸熱反応でございしますので、外から熱を加えてやらなければいけない。その熱にガスタービンの排気が持っている熱エネルギーを使ってやろうということです。

これが模式的に書いたものですが、こちら側がガスタ

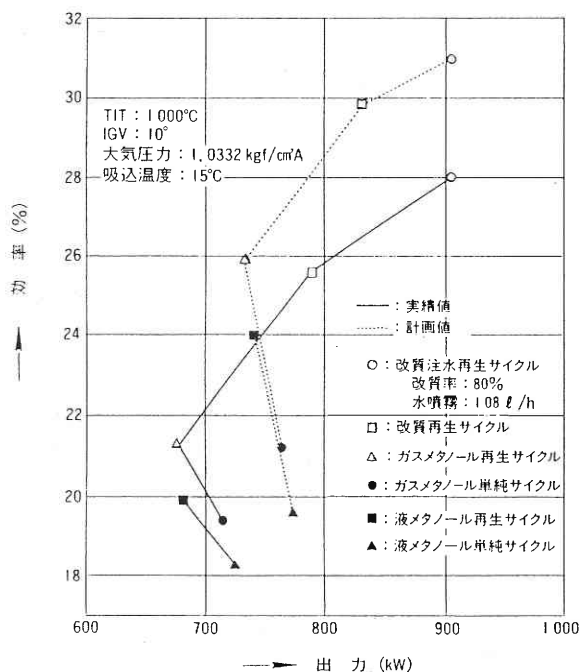


図 15 メタノール利用各サイクルの性能

ービン，ガスタービンの排熱でメタノールの蒸発，水の蒸発，ここで水とメタノールを反応させて改質する．改質ガスをこの燃焼器にもってくる．水を蒸発させたものを，さらに蒸気噴射もさせて出力を上昇させようということをやったわけです．

図 15 は横軸が出力で縦軸が熱効率です．高位発熱量基準で表現してありますが，点線で書いてあるのは計画値で実線で結んであるほうが実験値です．これは中国電力の大崎町でやられた実験で，タービンとしては 1000 kW 級で，入口温度も 1000°C であまり性能は良くありません．これはいわゆるメタノールを蒸発させて，ガスで焚いた単純サイクル．こちらにいきますと，再生サイクルです．再生サイクルというのは，先ほどの図 11 でお示ししましたように，コンプレッサの出口の空気を温めて燃焼器に持ってくる．そうすることにより，熱効率の改善が図れる．

さらに改質再生サイクル．メタノールを水蒸気で改質することによって効率の改善が大幅にできる．さらに改質注水再生サイクルにしますと，もっと良くなるという実験結果が出ました．計画よりは 4 % ほど，実際の実験では出なかったわけですが，一応こういう形で計画どおりの変遷ができたということで，メタノールを水素が使えるまでの間のつなぎとすることは考えられるかなという気がしております．

次に，ニューサンシャインの中で NEDO がやっている 300 kW 級のセラミックガスタービンの開発ですが，一応

タービンのエンジンの効率としては 42 %．ここでいっておりますエンジンの効率は LHV 基準です．先ほどまでの HHV ですから，発熱量が高位か低位かによって 10 % 近くの差はございます．タービンの入口温度が 1350°C ということです．

ここに燃焼器が別に書いてありますが，ここにタービンスクロールがあって，これがガスジェネのタービン，いわゆるコンプレッサを駆動するタービン，こちら側に出力タービンがあるわけです．こういう高温部をセラミックスでつくるということをやっております．

現在どのような状況にあるかといいますと，301，302，303 という 3 つのグループでやったわけですが，基本型 CGT といまして中間評価の段階の目標でございます．このときにはタービンの入口温度 1200°C，熱効率は 30 % ぐらいでやっております．

実際にどのくらいまでやれたかといいますと，301 が，石川島播磨重工業のグループですが，温度レベルとしては 1200°C をクリアしている．出力が 200 kW 弱，熱効率としては 26 % ぐらいです．302 は川崎重工業のグループでございまして，こちらは温度が 1280°C，これはかなり無理してまわしているわけです．出力 240 kW で熱効率が 37 % ということで，こちらのほうはこの目標をクリアしている．

どういう特徴があるかといいますと，301 は一軸で 302 は二軸，303 は自動車と同じような形の再生熱交換器を使っている可搬型のものでしたが，こちらは熱交換器のところがうまくいかないということで，中間評価の段階で断念しました．現在は 301 と 302 の 2 つで進行しております．

1000°C 以上，要するに 1000°C 以上といいますと無冷却では，ふつうの金属だとたないわけですが，セラミックスでやっておりますので，それはもつ．累積 90 時間以上まわしています．1200°C 以上，一応この目標値ですが，それでも 33 時間とか 60 時間とかまわして，現在あと 1 年半ぐらいですが，そこで当初の目標の 42 %，出力 300 kW に向けて開発中でございます．

次に，石油産業活性化センターが中心になってやりました自動車用の 100 kW セラミックガスタービンの開発です．こちらは出力 100 kW，自動車用ですから先ほどの 300 kW に比べますと小型なわけです．小型になればなるほど効率を達成するというのは難しくなります．それでもなおかつ最良燃費点で 40 % 以上をやろうという非常に高い目標を掲げたわけです．タービン入口温度は先ほどと同じように 1350°C を目標にしました．排気特性としては，ガソリン乗用車並みということで，100 kW ですから乗用車用というエンジンになるわけですから，その規制値を満足する必要がある．



これが断面の模型ですが、ここに燃焼器があって、タービンがあって、両脇に再生熱交換器があるというものです。こちらへんの色がついている部分の高温部分をセラミックスでやるということです。

この研究は今年の3月で一応終了しております。実際にどこまで達成できたかという点、出力は92kW、タービンの入口温度が1350℃、回転数は10万回転、最大熱効率は36%弱で目標の40%には達しませんでした、ほぼ9割の達成度で、この結果もよかったらうといえます。

このときの最良燃費点は、温度が1350℃で9万回転。運転時間としては、1000℃以上、金属ですと無冷却ではまわせない状態が累積で50時間ぐらい。1350℃では3時間弱まわすことに成功しました。

排気特性ですが、10-15モードで実際にエンジンを回すということではできません、定常状態での排気から計算値で推定することをやったわけですが、 $\text{NO}_x$ は0.15 g/km、目標値の0.25 g/kmからいいますと、十分排気特性も満足するだろう。そういうわけで燃焼器の開発もうまくいったと思います。

現在進行中のものとして水素の燃料応用ということでニューサンシャインの中で行っています。いわゆるWE-NET計画です。

そのなかで水素燃焼タービンの開発を行っています。しかし、水素をどうやって発生するか。水素は地球上にそのままでは存在しておりませんから、何らかの方法でつくらなければいけない。最初に申し上げましたが、現在水力の利用はまだかなり地球上では余力がある。そこで水力で発電して、水の電気分解より液体水素にして、日本に持ってきて発電しようということです。かなり何回も変換しますから、いままでと同じような発電効率では全然わりに合わない。ですからどうしても発電効率を非常に上げなければいけない。水素燃焼タービンの開発

については、目標値としては、今度は熱効率をHHV基準で60%以上。ガスタービンと蒸気タービンの複合サイクルにする。この場合、水素と酸素を燃焼させますから、作動流体が水蒸気になります。ですからいわゆる排熱回収ボイラーは必要ないというわけです。水素・酸素燃焼ですから、排気は水蒸気だけということで、いままで問題にしてきたような排ガスについては問題にならない。ただ、水素をどうやってつくるかというところには非常に大きなネックがあることになります。

図16は現在考えられておりますサイクルです。これは非常に複雑なサイクルでわかりにくいのですが、ここがガスタービンのサイクル。これとこれの2つが蒸気のサイクルという形で、ここを回す流体と、あと、ここが途中から抜きまして、蒸気のほうのスチームサイクルを回す、こういうようなサイクルを一つは考えております。ここに燃焼器がございまして、ここで水素と酸素を燃焼させる。この温度が1700℃で、1700℃ぐらいでやると先ほどの開発目標の60%、これは何とか達成できるのではないかと。ただ、実際にモノをつくりますと、いろいろロスなどがございしますので、ほんとにいくかどうかというのはまた別問題ですが。

もう一つのサイクルは、完全にガスタービンのサイクルはありません。全部蒸気サイクルです。ただし、これは再熱サイクルになっています。燃焼器がここここの2ヶ所にあります。これもやはり1700℃で、かなりの高圧になっておりますので、ここも技術開発としてはかなりあるわけですが、これは要するに作動流体、燃焼ガスが水蒸気という理由でこういう簡単なサイクルができるわけです(図17)。

$\text{CO}_2$ の問題で、原子力が非常に重要になってくるという話を申し上げたかと思いますが、現在我々のほうでやっておりますのはガス炉を考えております。ただし原子

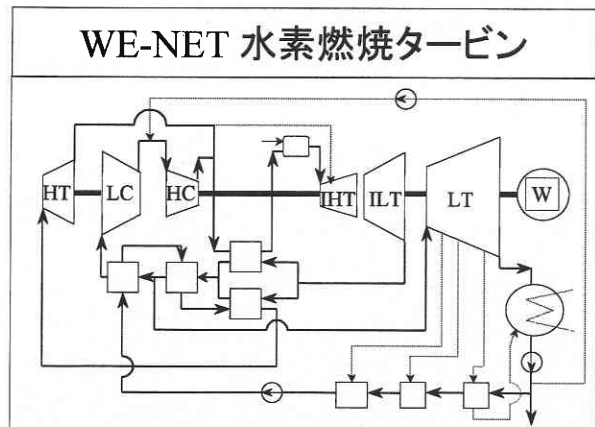


図16 WE-NET 水素燃焼タービン(1)

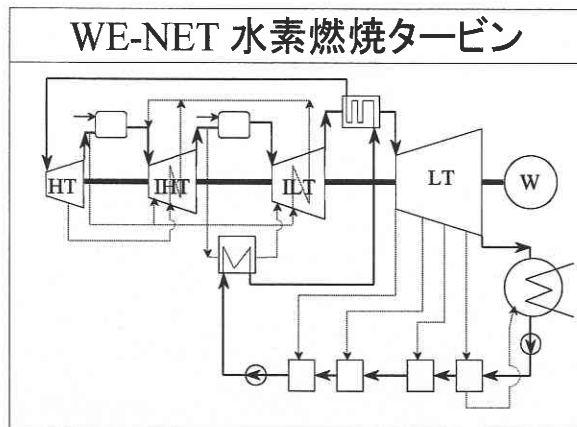


図17 WE-NET 水素燃焼タービン(2)

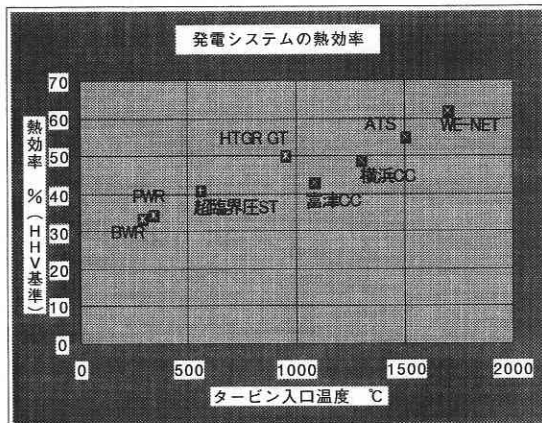


図 18 発電システムの熱効率

炉は、何といっても安全性がない限りは使えませんので、そこを原子炉側でやっていただくということが大前提です。安全性がない限りは使えませんので、これはそちらでやっていただく。そういうことが達成できれば、あと化石燃料の枯渇、ウラン燃料の枯渇、CO<sub>2</sub>の問題、そういった問題に対して非常に対応はとれるというわけです。

サイクル的には、これは単純化して書いてあるわけですが、ここに高温ガス炉があります。ガス炉は、冷却材としてはヘリウムをまわしますので、タービンでヘリウムのエネルギーを取り出そうというわけです。これはクローズドサイクルになっております。これがコンプレッサーですが、いままでの軽水炉ですと水が循環しているわけです。水の循環の代わりにヘリウムをまわすわけですから、圧縮機がちょうど循環ポンプに相当します。動力をタービンが発生して、圧縮機を駆動した残りの出力で発電しようというわけです。

どのくらいの温度レベルかといいますと、最大950°C、あるいは900°Cくらいで考えている。普通の軽水炉ですと350°Cくらいですから、それに比べると非常に高温になっています。

全体的に発電のシステムでみますと(図18)、どんな状況かといいますと、横軸がタービンの入口温度です。縦

軸が熱効率、高位発熱量基準で書いてあります。現在の軽水炉(BWR, PWR)がこの300°C~350°Cぐらいの温度レベルで30数%のところにあるわけです。それに比べて火力発電の超臨界圧は550°Cぐらいで41%か42%ぐらい。

ここに富津CC(コンバインドサイクル)と書いてありますが、これは東京電力の富津の火力発電所で、ガスタービンと蒸気タービンのコンバインドサイクルですが、これが1100°Cクラスの高スタービン、42~43%です。こちらに横浜のCCと書いてありますが、これも東京電力の横浜火力、これが1350°Cクラスの高スタービンを使って熱効率が48%ぐらいになります。

先ほど言いましたWE-NETこれが1700°Cで60%。高温ガス炉の高スタービンが、これは950°Cのところを書いてあると思いますが、それで50%ぐらい。あと一つ、全然お話ししませんでした、ATSと書いてありますが、アメリカの電力研究所が計画しておりますもので、タービンの入口温度が1500°Cで、熱効率が55%ぐらいです。少なくとも現状より10%も向上すればもちろんいいわけですが、WE-NETは水素の問題があるので、なかなか難しい。そういう意味でガスタービンを使って、火力も蒸気単体から比べますとコンバインドにすることによって数%熱効率が上昇している。ガスタービンの利用により、エネルギー問題、排気問題には非常に役立ってきたといえるかと思います。

何も発電だけではございませんで、先ほども自動車のCGTという話もいたしましたが、今年からは舶用のスーパーマリンガスタービンという研究開発も始まっておりますし、今後いろいろな面でガスタービンが果たす役割は大きいのではないかという気がいたします。

きょうは、発電するほうだけしか言いませんでしたが、使い方も十分考える必要があります。今後ともエネルギー問題に対して多少なりともお役に立っていききたいというふうに考えて研究は進めております。

今日は、ご清聴ありがとうございました。

(1997年6月6日講演)