

# 発電用水蒸気循環型水素-酸素燃焼 複合タービンシステムの解析

壹岐 典彦・濱 純・古谷 博秀・高橋 三餘

工業技術院機械技術研究所

305-8564 つくば市並木1-2

## Analysis on Hydrogen-Oxygen Combustion Combined Turbine System with Steam Recirculation for Electric Power Plant

Norihiko IKI, Jun HAMA, Hirohide FURUTANI and Sanyo TAKAHASHI

Mechanical Engineering Laboratory, Agency of Industrial Science and Technology

1-2 Namiki, Tsukuba 305-8564

To obtain the useful data needed to optimize a future hydrogen combustion turbine system for electric power plants, this paper presents theoretical discussions on the steam-recirculating combined turbine system proposed by Graz University of Technology. This system consists of mainly a  $H_2-O_2$  stoichiometric combustion gas turbine cycle, a condensing turbine working in the bottoming cycle, and a high pressure turbine. All of these turbines work with the common steam. Authors investigate the performance and the exergy losses of this system by varying parameters such as turbine inlet temperature and bleeding ratio.

**Key words:** hydrogen combustion, steam, turbine, combined cycle, power plant

### 1. 緒言

国連気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)において、温室効果ガスの排出削減量が定められるなど、昨今、地球温暖化などの地球環境問題への関心の高まっている。さらに将来のエネルギー問題に対処していくために、火力発電システムではクリーン化、高効率化の技術開発が推進されている。

一方、太陽、水力などのクリーンな再生可能自然エネルギーを国際的に利用する共同研究プロジェクトが活発化してきている[1]。わが国では地球再生計画の具体的な国際大型共同研究の一つとして、水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術(World Energy Network)プロジェクトが通産省工業技術院のニューサンシャイン計画の一環として進められている[2]。このプロジェクトでは、太陽、水力などの再生可能エネルギーを水素等に変換し、これを消費国に輸送して発電・運輸等の広範囲

な分野で利用するための世界的なエネルギーネットワークを構築を目指している。この利用技術の柱の一つに水素燃焼タービンが取り上げられ、将来のクリーンかつ高効率な大型発電システムを目指して研究開発が進められている[3]。

ここでは、この大型発電用水素燃焼タービンについて、その原理や特徴を述べるとともに、これまでの研究開発の動向を紹介する。また、エクセルギー解析を行った結果、各々の作動条件において効率向上を妨げる要因が明瞭に示されたので、報告する。

### 2. 水素燃焼タービンの原理と特徴

水素燃焼タービンには、水素-空気燃焼タービンと水素-酸素燃焼タービンがある。前者の方式は、既存化石燃料の代替として水素を通常のカスタービンに利用する方式である。水素の大量供給のインフラがないため、水

素を用いた発電システムとしての運転は実際には行われていないが、既存システムを一部改造することにより水素用に転用できることなどが指摘されてきた。

一方、空気の代わりに酸素を酸化剤に利用する水素-酸素燃焼タービンでは、水素がクリーンかつ価値の高い二次エネルギーであることから、水素の特徴を活かした発電システムが提案されている。その基本的なガスタービンシステムの構成例を図1に示す[4]。ここでは、水素ガスと酸素ガスを理論比率で燃焼器へ供給して燃焼させて作動媒体を加熱し、その作動媒体と燃焼生成物である水蒸気をタービンで膨張させて発電し、燃焼生成物分の水蒸気のみを凝縮器で復水・除去し、作動媒体は圧縮機で燃焼器に戻して循環利用する。

このようなシステムについて、具体的に発電用LNGコンバインドサイクルとこれに類似した構成の水素-酸素燃焼システムとで比較してみると、水素-酸素燃焼タービンシステムには以下のような特徴がある。

- 1) 基本的に燃焼生成物である水のみを排出する、クリーンなセミクローズドシステムが構築でき、大気環境へ負荷を与えない。
- 2) 水のみを排出するので、起動時等を除いて、脱硝装置、煙突等の排気設備が不要か、小規模化できる。
- 3) ガスタービンと蒸気タービンとの複合システムを構成する場合(図2参照)、ガスタービン側の作動媒体に過熱水蒸気を用いることにより、ガスタービン出口後の水蒸気をそのまま分岐して蒸気タービンを作動させることができる。

この比較例に示すように、水素-酸素燃焼の特徴を活かしたタービンシステムを構築すれば、地球温暖化ガス

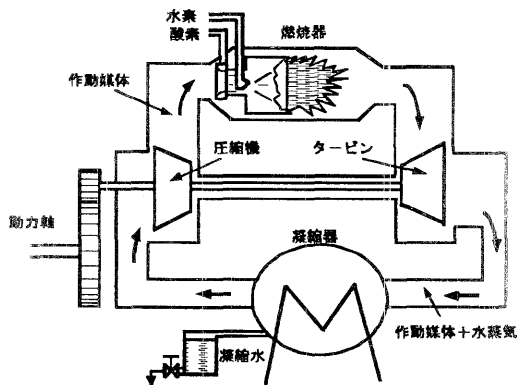


図1 水素-酸素燃焼タービンシステム

主要発生源の一つである火力発電所にとって、環境負荷フリーの理想的な発電システムの一つとなる。それゆえ、WE-NETプロジェクトでは、この水素-酸素燃焼タービンが技術開発の対象となっている。

### 3. 水素燃焼タービンの開発動向

#### 3-1 国内外の開発動向[5][6]

水素燃焼タービンの研究開発は航空機用推進機関の研究の一環として始まった。一方、水素-酸素燃焼を利用した発電用セミクローズドシステムについては、水素-酸素製造を含めた発電システムが提案され[6]、これに関連した要素技術開発としてドイツ連邦航空宇宙研究所(DLR)は、既存の蒸気タービン発電システムの部分負荷用に水素-酸素燃焼を利用した蒸気発生器の開発を進めている[7]。また、オーストリアのGraz工科大では水素-酸素燃焼を利用した複合サイクルを提案し[8](図2参照)、タービン入口温度1200°Cの燃焼器の設計・製作が行われている[9]。ロシアでも酸素水素ロケット技術を利用した水蒸気発生器の研究が公表されている[10]。

わが国ではオイルショック以後、内燃ランキンサイクルの解析[11]やこれを想定した基礎燃焼実験などが行われてきた。水素-酸素燃焼を利用したセミクローズドシステムの具体的な機能特性については、作動媒体にアルゴンを用いた不活性ガス循環型燃焼システムや小型ガスタービンシステム(図1参照)が実際に実験室レベルで運転され、システムが実際に機能することが実証された

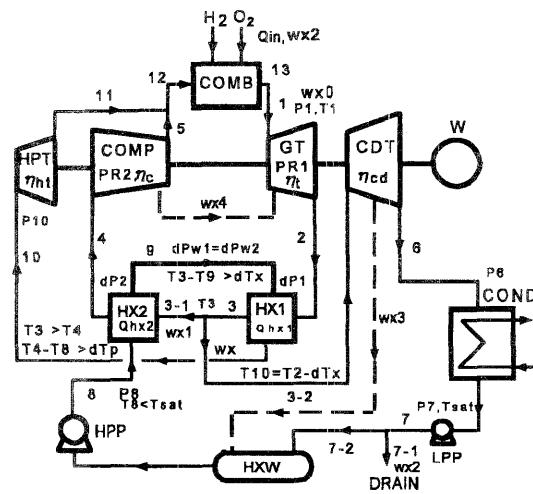


図2 水蒸気循環型水素燃焼複合タービンシステム

[12]。これ以後、平成3年度からサンシャイン計画の依頼調査の一環として「水素燃焼タービンの調査」が実施され、水蒸気または不活性ガスを作動媒体とする代表的な発電サイクルの性能計算が行われた[13]。また、WE-NETの水素燃焼タービンの技術開発が開始され、前記した GRAZ 工科大学提案の蒸気複合サイクルでは1200°Cで57.5%の高効率が報告されていることから[8]、このサイクルの分析検討が行われ、タービン入口温度を1200°Cより高温化することにより、60%以上の高効率が可能であることが試算された(図2)[14][15]。

3-2 WE-NETにおける水素燃焼タービン技術開発の動向[16]-[18]

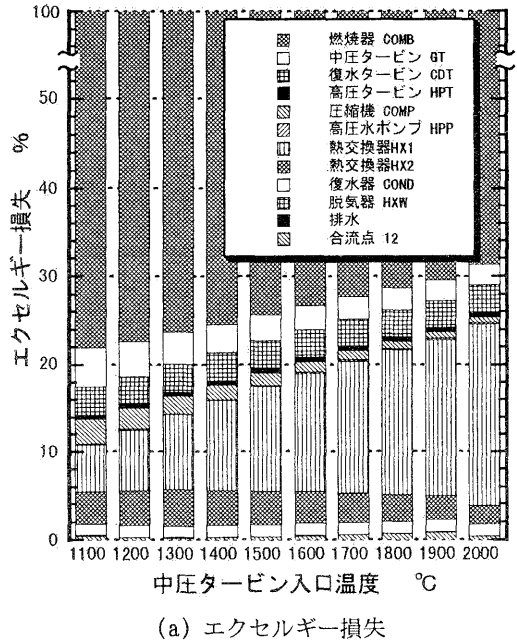
WE-NETプロジェクトは2020年までの長期計画であり、これを3期に区分して研究開発を行うこととしてスタートした。その第I期計画(1993~1998)では、調査研究、基礎的研究および要素技術研究等をおして、水素製造技術、輸送・貯蔵技術、利用技術に関する基礎的技術の確立を図り、全体システムの最適化設計に必要な情報を得るとともに、システム的设计・製作に必要な技術を確立することを目指している。

水素燃焼タービンの技術開発は、500 MW級、燃焼器出口温度1500~1700°C、効率60%(HHV)を最終目標としている。第I期計画では、最適システムを選定して、実証試験に必要な基礎技術を確立することを狙いとしており、(1)最適システムの評価、(2)燃焼制御技術の開発、(3)タービン翼、ロータ等主要構成機器の開発、(4)主要補機類の開発、(5)超高温材料の開発の5項目について、解析・調査、要素技術開発が行われている。

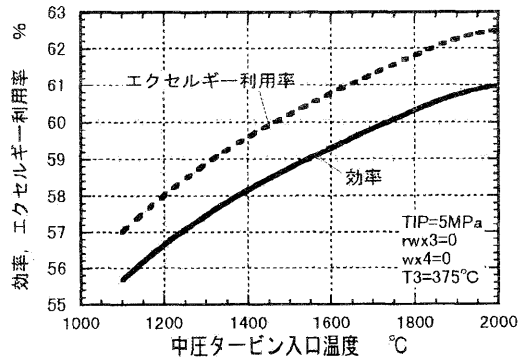
この中で、発電システムの具体的な仕様を決定するうえで重要となる最適システムについては、水蒸気や非凝縮性ガスを作動媒体に用いた、ブレイトン、ランキン、およびこれらの複合型の各種サイクルのシステム検討が行われ、各サイクルの構成とその試算結果がまとめて報告されている[18]。

4. 水素-酸素燃焼タービンのエクセルギー解析

水素-酸素燃焼タービンの代表例として、Graz サイクルを取り上げ、装置の作動条件を様々に変更してサイクル計算を行い、その結果についてエクセルギー解析を行って、効率低下の原因となるエクセルギー損失がどの



(a) エクセルギー損失



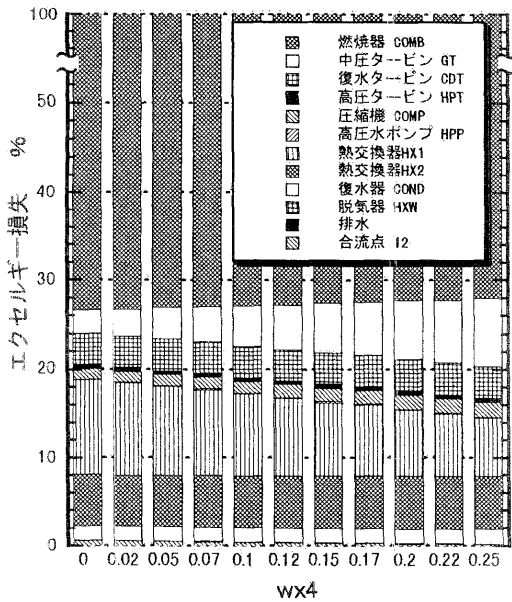
(b) 効率、エクセルギー利用率

図3 中圧タービン入口温度の影響

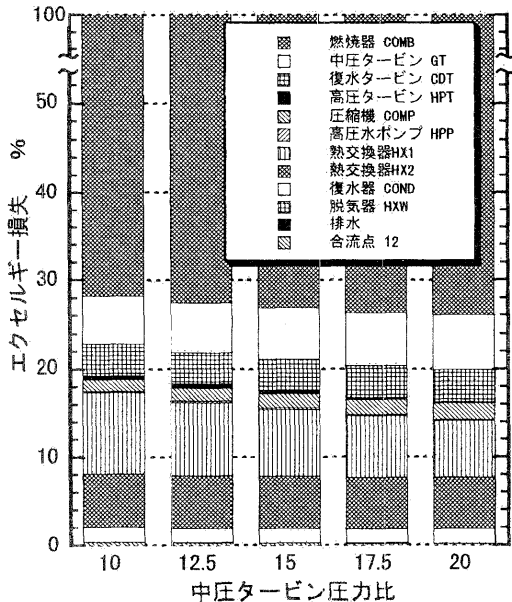
箇所での程度起こっているかを調べた結果を紹介する。代表的なパラメータとそのときの効率、システム各部でのエクセルギー損失の割合を調べたところ、以下に示すいずれの場合でもエクセルギーの損失の7割ほどが燃焼器内で発生しており、最もエクセルギー損失が大きい。しかし、燃焼により燃料の化学エネルギーを熱エネルギーに変換する上で、このエクセルギー損失は不可避であり、通常、他の部分のエクセルギー損失を低減することで、効率向上を図ることになる。

4-1 中圧タービン入口温度の影響

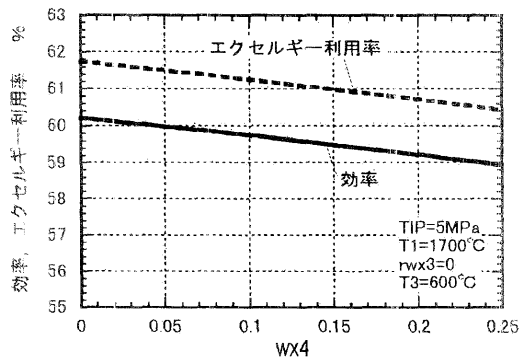
Graz 工科大の計算条件に対して、中圧タービン入口



(a) エクセルギー損失

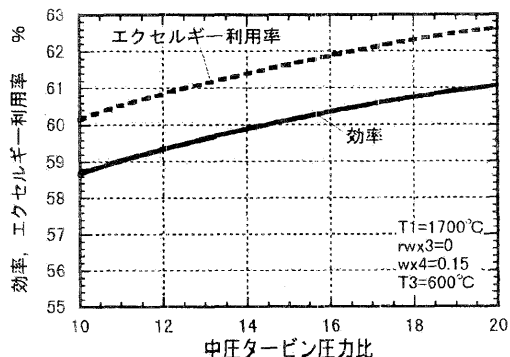


(a)エクセルギー損失



(b)効率、エクセルギー利用率

図4 中圧タービン翼冷却用抽気 wx4 の影響



(b)効率、エクセルギー利用率

図5 中圧タービン圧力比の影響

温度 T1 を 1100~2000°Cまで変化させたときのエクセルギー損失の内訳について各部の割合を図3(a)に示し、システムの効率を(b)に示す。ここでは、仮に無冷却でもタービン翼の耐熱性に問題を生じないような技術が実現されたものとして、無冷却のままタービン入口温度を上昇させて検討した。(a)の棒グラフは上から下へ凡例順に領域分けして表示している。なお燃焼器におけるエクセルギー損失が他の部分でのエクセルギー損失に比べて大きいため、50~100%の間で目盛りを圧縮して表示する。温度上昇により、効率が上昇して行くが、高温になると効率向上の程度が小さくなっている。エクセルギー損失割合をみると、熱交換器 HX1 の損失が大きくなって

おり、これが効率向上を妨げている。熱交換器 HX1 でのエクセルギー損失が大きい原因は中圧タービン出口温度が高いため、HX1 での熱交換量が大きくなるためであり、対策としては高温化とともに中圧タービンの膨張比を大きくして、タービン出口温度を下げることにより、熱交換によるエクセルギー損失を低下させることが考えられる。また、熱交換器の耐熱温度の点から考えても、中圧タービンの膨張比増大によるタービン出口温度低下は必要である。

4-2 タービン翼冷却の影響

図4に中圧タービン翼冷却用の抽気の流量 wx4 に対す

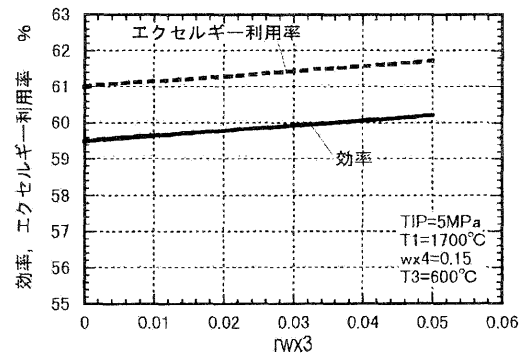
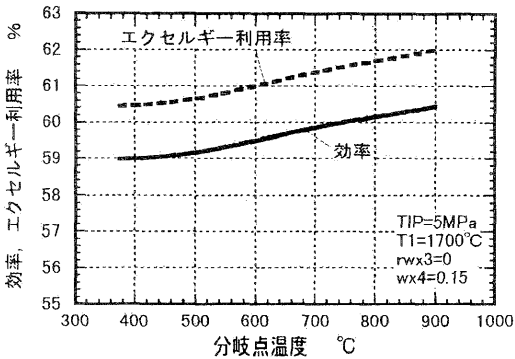
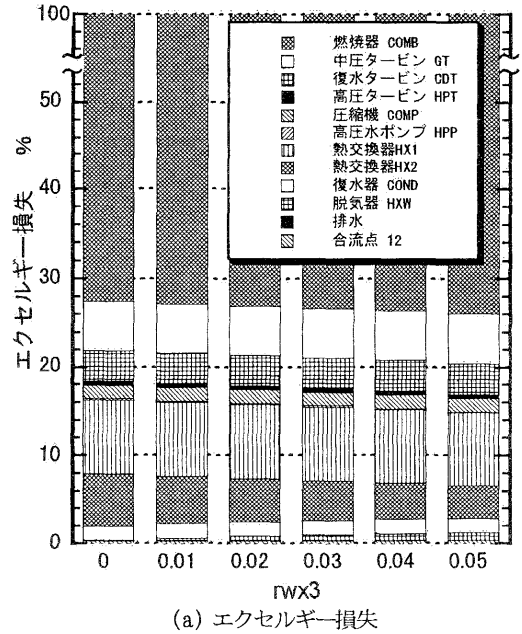
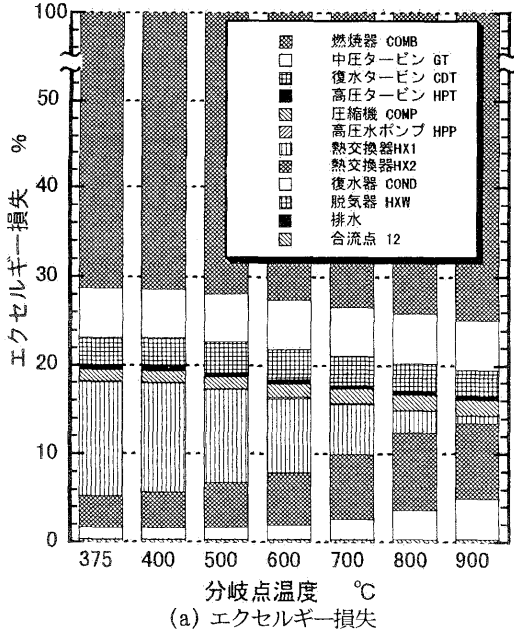


図6 分岐点温度の影響

図7 rwx3 抽気の効果

る効率や各部でのエクセルギー損失の割合の変化を示す。中圧タービン入口温度を 1700°C とし、冷却用の水蒸気はそのまま混入されると簡単に仮定して計算し、 $w_{x4}$  は中圧タービンの全作動媒体流量を 1 とし無次元化している。冷却用の抽気が増大するほど、中圧タービンでのエクセルギー損失が増大するが、熱交換器 HX1 のエクセルギー損失が減少するので、効率の低下は小さくなっている。逆に言えば、本設定より中圧タービンの膨張比等を変更することにより、熱交換器 HX1 におけるエクセルギー損失を低減して効率が向上する可能性がある。

ところで、中圧タービン入口温度を 1700°C とした場合に翼冷却を行わないとは考えにくいので、以下の検討

においては  $w_{x4}=0.15$  とした。

#### 4-3 中圧タービン圧力比の影響

中圧タービン圧力比を増大し、中圧タービン入口圧を増大すると、図5のように中圧タービンおよび圧縮機でのエクセルギー損失が増大するものの、熱交換器 HX1 でのエクセルギー損失が低減され、効率が向上する。つまり、中圧タービンで十分に膨張してタービン出口温度が低下し、熱交換器 HX1 の負担が軽くなったことが裏付けられる。

#### 4-4 分岐点温度の影響

分岐点温度  $T_3$  を上昇させると、熱交換器 HX1 の熱交

換量が低減され、逆に熱交換器 HX2 の熱交換量が増大して、図6のように HX1 におけるエクセルギー損失が低減するものの、HX2 におけるエクセルギー損失が増大する。しかし、トータルではエクセルギー損失は低減し、効率は向上する。また、分岐点温度 T3 が 600°C 以上では、復水器におけるエクセルギー損失も増大する。これは復水タービン出口の温度が高くなり、復水されないまま復水器へ作動媒体が流入するため、復水器で捨てる熱が増大することが原因である。したがって、分岐点温度が高いほど復水タービンの膨張比を大きく取る必要がある。

#### 4-5 $w \times 3$ の効果

経路 8 の水の温度が高いほど、水の蒸発のための熱交換量が少なく済み、熱交換器 HX2 におけるエクセルギー損失が少なくなり、熱効率が向上すると考えられる。そのため、GRAZ サイクルでは復水タービンから抽気して水を予熱する経路が設けられている。その経路を流れる水蒸気流量  $w \times 3$  の復水タービン蒸気流量に対する比率  $r_{w \times 3}$  について、予熱効果を調べたのが、図7である。脱気器 HXW において水と水蒸気を混合するため、エクセルギー損失が発生するが、熱交換器 HX2 におけるエクセルギー損失の低減効果の方が大きく、 $r_{w \times 3}$  の増加とともに、熱効率が上昇する。しかし、 $r_{w \times 3} = 0.06$  以上では経路内で沸点に達するため、高圧水ポンプ HPP の使用条件に適合せず、システムが成り立たなくなる。

#### 5. まとめ、今後の課題等

水素-酸素燃焼タービンシステムの例として、GraZ サイクルを取り上げて、エクセルギー解析を行い、効率低下の原因となるエクセルギー損失の様子を調べた結果、高温化に伴い、中圧タービンの膨張比の増大が効率向上に有効であることなど、効率向上に関する指針が得られた。

水素燃焼タービン技術開発は、スタート時の各種提案の検討や基礎実験が進み、各要素技術の具体的な仕様や方式が固まってきている。これらのキーテクノロジーについて、さらに実証に向けてのデータ蓄積および評価を継続していく必要がある。また、開発が進む中で、新たな課題・提案が見いだされてきている。LNG ガスタービンでは NOx 生成のため、タービン入口温度の高温化に限界が迫っているが、本水素燃焼タービンの基本サイクル

を利用してメタン-酸素燃焼を行うことで NOx フリーとなり、タービン入口温度の高温化が可能となって CO<sub>2</sub> 回収が容易となるシステムの提案もなされている[19]。

#### 参考文献

1. B.Drolet et al.; 10th World Hydrogen Energy Conference, 23 (1994)
2. 例えば、片山 正一郎; 日本ガスタービン学会誌 22-86、(1994)
3. K.Ueda, et al.; International Hydrogen and Clean Energy Symp. '95 Tokyo, 189 (1995)
4. 濱 純; 燃焼研究 105、29、(1996)
5. 濱 純; 日本機械学会、講習会「エネルギー変換の先端技術」、9 (1994)
6. 水素エネルギーシステム研究会編、水素エネルギー読本、オーム社、1982、p127-133
7. H. J. Sternfeld & P. Heinrich; Int. J. of Hydrogen Energy, 14-10, 703 (1989)
8. H. Jericha, et al.; ASME OGen-Turbo IGTI-6, 435 (1991)
9. H.Jericha,& O.Starzer, 19th Int. Congress on Combustion Engine, G20, CIMAC, Florence (1991)
10. F.N.Pekhota, et al.; 11th World Hydrogen Energy Conference, 292 (1996)
11. 井亀 優他; 機械学会論文集、56-531、3554 (1990)
12. J. Hama; ASME-JSME International Conf. on Power Engineering-93, Sep. 12-16, Tokyo, 475 (1993)
13. 小川 紀一郎他; 日本機械学会、動力・エネルギーシステム部門シンポジウム、920-93、125 (1992)
14. 山下巖; 日本ガスタービン学会誌 22-86、9 (1994)
15. 壹岐 典彦他; 日本機械学会茨城講演会講演論文集、(1994)
16. M.Murase; Proc.of International hydrogen and Clean Energy Symp.'95 Tokyo, 55 (1995)
17. 三巻 利夫; NEDO 第 14 回事業報告会、アルコールバイオマス技術分科会、57 (1994)
18. 佐藤 幹夫; NEDO 第 15 回事業報告会、アルコールバイオマス技術分科会、8 (1995)
19. H.Mori, et al.; 12th World Hydrogen Energy Conference, 2, 1505-1514 (1998)