

超高温水素燃焼タービンの研究開発

R & D of Ultra-High Temperature, Hydrogen Combusting Turbine System

濱 純*

Jun Hama

1. はじめに

昨今、温暖化、砂漠化などの地球環境問題や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おり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から水素等に変換し、これを消費国に輸送して水素燃焼タービン発電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しようとするものである。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た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、その研究開発状況および今後の動向について紹介する。

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、燃料を既存化石燃料から水素に代替する方式として水素-空気燃焼タービンがあり、また、空気の代わりに酸素を酸化剤に利用する水素-酸素燃焼タービンが挙げられる。前者の方式は、水素を燃料として通常ガ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、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(図-2)、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挙げられる。

- 1) 窒素を含まない不活性ガスを作動媒体を選択すれば、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る。したがって、大気環境へ負荷を与えない。また、逆の見方をすれば、システムの出力性能は大気条件により制約されず、設置場所も必ずしも地上のみに限定されない。
- 2) 水素-酸素燃焼により作動媒体を直接加熱する方式なので、水蒸気が作動媒体の場合には、高温過熱蒸気生成のためのボイラーが不要である。また、燃焼生成物の水のみを排出するので、起動時等を除いて、煙突等の排気設備は不要となるか、少なくとも小規模化できる。
- 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)、通常コンバインドサイクルでは作動媒体は燃焼ガスおよび水蒸気と別々で、熱交換器を介して両媒体の熱交換を行うが、水素-酸素燃焼タービンシステムでは、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

* 工業技術院 機械技術研究所 エネルギー部
燃焼工学研究室長

〒305 つくば市並木1-2

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り、古くは米国におけるガスタービン用水素燃焼器の要素研究から、最近では民生用としてロシアにおける実際の航空機を用いたジェットエンジンの実証試験などがある。しかし、定置用発電用途では特に水素のみで運転するガスタービンの研究開発は知られていない。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⁹⁾、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、70MW級の蒸気発生器の燃焼実験や蒸気発電設備に連結するための過渡実験を行ってきた⁷⁾。また、オーストリアのGraz工科大では水素-酸素燃焼利用した高効率スチーム複合サイクルを提案し⁸⁾(前出図-2参照)、これを基に燃焼温度2000℃、タービン入口温度1200℃の燃焼器の設計・製作が行われている⁹⁾。最近、ロシアでもDLR同様に酸素素ロ

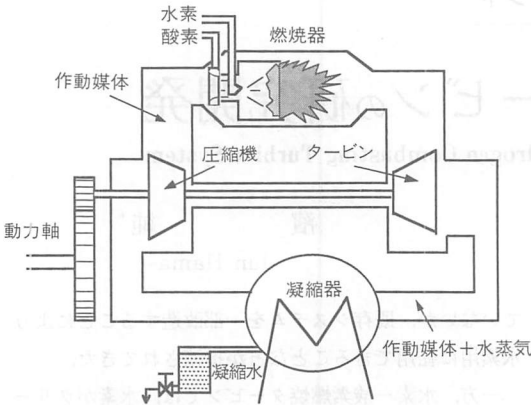


図-1 作動媒体循環型水素燃焼ガスタービンの基本概略図

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、地球温暖化ガスの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-

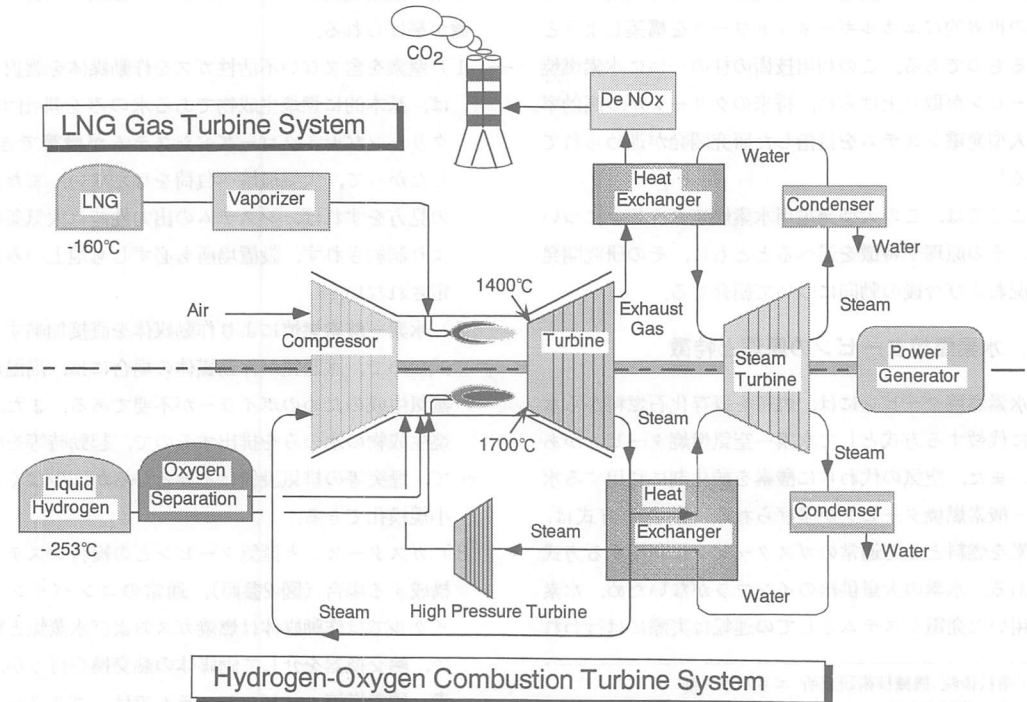


図-2 水素燃焼タービンシステムのコンバインドサイクル構成上での比較例

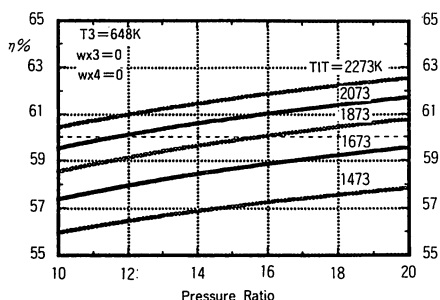


図-3 トッピング抽気サイクル (Graz) の効率試算例¹⁸⁾

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、水素燃焼ガスタービンの調査が実施されたが、定置用途の水素燃焼タービンの研究は、水素ガスタービン用燃焼器の研究¹¹⁾や一連のタービン内再熱水素燃焼ガスタービンの研究¹²⁾、超小型ガスタービンの研究¹³⁾など数は少ない。一方、水素-酸素燃焼利用のタービンシステムでは、内燃ランキンサイクルの解析¹⁴⁾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¹⁵⁾。これ以後、平成3年度からサンシャイン計画の依託調査の一環として「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。この調査当初、既存の代表的なサイクルでは、タービン入口温度2000℃の超高温で発電端効率60% (HHV) と試算された¹⁶⁾。また、前記したGraz工科大学提案の蒸気複合サイクルでは1200℃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℃より高温化することにより、60%以上の高効率が実現できる可能性が試算された(図-3)^{17) 18)}。これらの本格的な発電システム検討ならびに技術開発は、WE-NETの水素燃焼タービンの技術開発として開始された。

3.2 WE-NETにおける水素燃焼タービン技術開発の動向^{19) ~21)}

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いる。その第1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とおして、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、システムの設計・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、500MW級、燃焼器出口温度1500~1700℃、効率60% (高位発熱量基準)を最終目標としている。第1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。

これらの技術開発は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託された電力中央研究所および発電技術検査協会が再委託先企業の技術開発を分担して取り纏めを行っている。

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状況がまとめて報告されている(表1)²¹⁾。また、水蒸気を作動媒体としたランキンサイクル、トッピング抽気サイクル、ボトム再熱サイクルを対象に、同一のタービン入口温度および圧力条件のもとで発電効率ならびに各構成要素の作動条件の技術的な可能性などについて、より具体的な比較検討が行われている²²⁾。今後さらにシステムの最適化が進められ、最適システムの評価や発電プラントの概念設計が計画されている。

燃焼制御技術については、理論比で供給された水素と酸素を燃焼させて、作動媒体の水蒸気をできる限り一様かつ短期間に加熱してタービンに導く必要がある。このための燃焼器について、水素、酸素および作動媒体の燃焼器への供給方法および燃焼方式の具体的な提案が行われ、この基本バーナの製作・燃焼特性試験が実施されている。また、設計上重要な燃焼器の冷却・希釈構造などが検討されている。今後、これらの結果を踏まえて各種燃焼方式の燃焼器の概念設計や実証用燃焼器のバーナが製作され、共通な燃焼試験設備において評価試験が行われることが計画されている。

一方、タービン翼・ロータ等の主要機器では、高効率を実現するために従来にない1700℃程度の超高温水

表 1 各種水素燃焼タービンサイクルの構成と試算結果²¹⁾

サイクル	不活性ガス循環サイクル・Ar				不活性ガス循環サイクル・CO ₂				ボトムing再熱サイクル ^{*1}				ボトムing再熱サイクル ^{*2}			
	1500		1700		1500		1700		1500		1700		1500		1700	
最高温度 (°C)	1500		1700		1500		1700		1500		1700		1500		1700	
冷却媒体割合 (%)	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15
発電端効率(HHV, %)	51.1	48.8	54.0	52.0	52.2	50.3	55.4	53.9	60.4	58.7	61.5	60.2	61	60.1	62.2	61.4

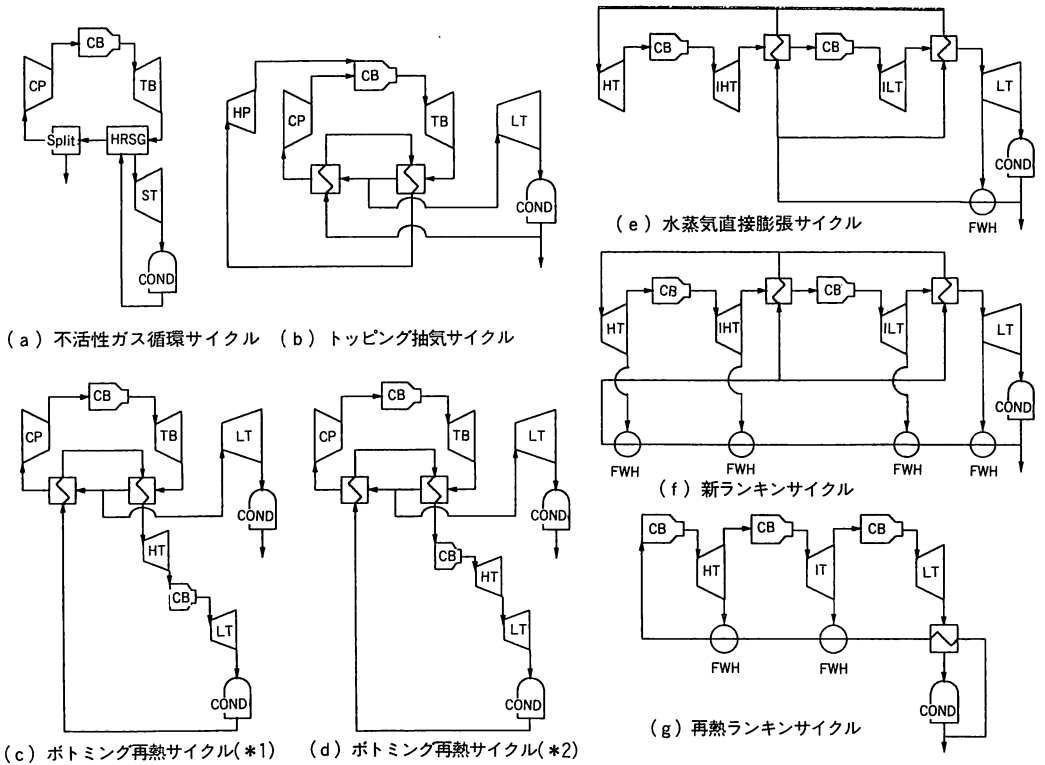
サイクル	トッピング抽気サイクル				水蒸気直接膨脹サイクル				新ランキンサイクル				再熱ランキンサイクル ^{*3}		
	1500		1700		1500		1700		1500		1700		1700		
タービン入口温度	1500		1700		1500		1700		1500		1700		1700		
冷却媒体割合	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	無冷却	従来型	閉ループ
発電端効率	60.1	59.1	61.5	60.5	56.4	54.8	58.5	55.5	58.7	57.2	60.2	58.9	65.3	60~61	63~64

※1 再燃器がボトムing第1タービンの後。

※2 再燃器がボトムing第1タービンの前。

※3 最高圧力500barの場合。最高圧力を100barとすると発電端効率約3%低下する。

なお、冷却に関しては、従来型の膜冷却を用いた場合と、閉ループ冷却を用いた場合について検討。



蒸気のタービン入口温度が必要であることから、タービン翼およびロータの冷却方式・構造などが具体的に検討されている。これらの検討から提案されたタービン翼について、前記したバーナ評価用燃焼試験設備を用いてタービン翼列試験が計画されている。

高効率化に不可欠な熱交換器等の主要補機については、再生や再熱条件によって、従来の蒸気用熱交換器よりも高温となることが予測され²²⁾、これらも含めた高温熱交換器の検討が進められている。また、WE-

NETの全体システムでは、水素の製造から利用まで様々なルートが検討されているが、その主要なルートの一つとして、液体水素で消費地に輸送し利用するルートが想定されている²³⁾。この液体水素の冷熱を利用して酸素製造を行い、発電所内での酸素製造に伴う所内動力を減少させるための検討なども進められている。

超高温水素燃焼タービンの基盤となる超高温材料の開発については、最終目標の2000°Cの条件下において耐久性を有する材料開発を重視し、耐熱超合金、金属

間化合物, CMC, C/Cの各候補材についてその課題が整理され²⁰⁾, その特性評価試験が進められている。また, 千数百度の超高温水蒸気雰囲気下での評価試験はこれまでにないので, 適用性評価に必要な材料評価試験法自体も検討されている。

4. 水素燃焼タービンの今後の課題と見通し

4.1 基盤課題

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徐々に固まりつつある。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。

一方, これらの技術開発に関連する基礎的, 基盤的なデータの蓄積や整備なども必要である。例えば, 最適サイクルの検討やタービン翼の冷却構造の解析に必要な水蒸気の熱物性値は, 現存で世界的に標準化されている温度および圧力範囲では, 対象となる高温・高圧条件をカバーしておらず, これらの統一的な基準の整備が必要であろう。また超高温状態での水蒸気放射の影響なども把握する必要がある。

燃焼技術分野では, 水素-酸素-水蒸気系の燃焼技術は, 水素-酸素燃焼の先駆的なロケットおよびジェットエンジン燃焼技術, あるいは既存のLNG燃焼器の技術などからのアプローチが考えられるが, 耐久性, 信頼性が要求される定置型用途で, かつクローズドシステムの構築を狙う視点からすれば, 未踏の技術分野といえる。このため, 水素-酸素-水蒸気系の基本的な燃焼特性はほとんどなく, 最近, 水素-酸素-水蒸気系の燃焼速度や可燃範囲などのデータが調べ出された状況にあり²⁵⁾, これらの実機条件に対応した高温・高圧時の燃焼特性データ²⁶⁾などの把握が必要となる。また, 1700°C以上の超高温過熱水蒸気の温度や, 残存未燃ガス濃度などの計測技術などは単に計測技術としてだけでなく, システムの監視制御として将来的に必要なとなる。

さらに, 大量の水蒸気, 未燃水素あるいは未燃酸素, ならびに燃焼中間生成物が含まれる超高温の作動媒体と, これらに晒される可能性のある燃焼器壁やタービン翼面とで生じる表面反応については, 耐熱・耐酸化・耐腐食性の検討を進めていくうえで重要であるが, 未だデータが十分でない。

このように, 水素燃焼タービンの技術開発に必要な基礎・基盤的研究課題も解決していく必要がある。

4.2 今後の見通し

ガスタービンと蒸気タービンとのコンバインドサイクルは, 今日, 大型火力発電用タービンシステムの主流になりつつあり, 現在, 1300°C級のLNGコンバインドサイクルでは発電効率48% (HHV) が実用化されている。次の目標は2000年を目処に1500°C級で効率52~54%とされ, この目標に向けて再熱化, 高圧力比化などの技術開発が進められている。また, これを越える次のステップの高温化については, 希薄予混合燃焼によるNO_x低減手法でも燃焼器のクリーン化が難しいなど, 未だその技術開発の方向性は見えない²⁷⁾。しかし, 1700°C級, 効率60%を狙う水素燃焼タービンがこのステップの高温化目標とマッチし, さらに現在のLNG利用技術の延長上に液体水素利用技術をイメージすれば, 次世代の発電システムの重要課題にこれを位置付ける見方もできよう (図-4)²⁷⁾。いずれにしても, 水素燃焼タービンの具現化は21世紀の次世代以後となろう。

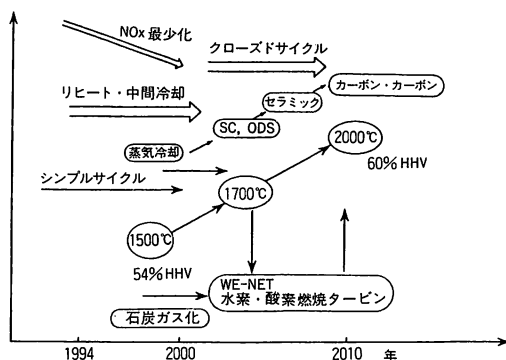


図-4 水素燃焼タービンの火力発電システムの位置づけの一例²⁷⁾

しかし, 大型発電技術の開発は, その規模や耐用年数などから長期的視野に立って発電技術の開発方向を見据え, 信頼性, 耐久性を含むシステムの実証評価を段階的に推進していかなばできないものであり, また2010年頃に石油燃料の潜在需要に対して供給不足が始まることが予測されていることなどを考えれば, 環境さらにはエネルギー問題解決に理想的な水素燃焼タービンの技術開発は, 燃焼制御およびタービン高温化等の要素技術開発, 基本システムの実証試験など現時点から段階的に進展させていかなばならない技術開発の一つであろう。

また, この技術開発の段階的に得られる成果は, 将

来の火力発電システムのクローズドタイプの先導的役割に加えて、蒸気タービンの高温・高効率化、トップリングサイクルの高温化に必要なタービン翼の冷却技術、湿り空気や水蒸気混入等の最近のサイクル改善、ならびに再生および再熱技術などの次世代技術への波及効果も期待できよう。

したがって、このような技術を含む水素燃焼タービンの技術開発は、将来的にエネルギー消費国であり続ける我が国にとって、エネルギー消費の節約やエネルギー源の多様化などのエネルギー供給の安定確保を図る技術開発の一つとしても重要となろう。

5. あとがき

水素は、電力を補完するクリーンな2次エネルギーであるが、地上に豊富に存在しない。しかし、化石燃料がその蓄積に超長期間要するのに対し、太陽などから地球に供給されるエネルギーを用いて多種多様な方法で極めて短期間にかつ容易に生成できる。それゆえ、その時代に供給されるエネルギーでその時代のエネルギーを賄うエネルギー体系を可能にするエネルギー媒体の一つともいえる。この循環型クリーンエネルギー利用体系へ徐々に移行していくうえでも、WE-NE Tプロジェクトにおいて推進される技術開発は益々重要となろう。

大型火力発電におけるゼロエミッションテクノロジーの一つとして位置づけられる水素燃焼タービンの技術開発は、水素利用の国際的規模の需要と供給の両輪の一輪を担う中核的な技術開発であり、我が国が世界に先駆けて推進している技術開発でもある。したがって、水素の特徴を生かした最適なシステムの構築に向けて、この技術開発が着実に推進されていくことを期待したい。

終わりに、図面の一部を提供して頂いた機械技術研究所西尾匡弘氏に感謝致します。

参考文献

1) B. Drolet et al., 10th World Hydrogen Energy Confer-

- ence, 23 (1994) (以下WHECと略)
- 2) 例えば、片山正一郎, 日本ガスタービン学会誌22-86, 3 (1994-9)
- 3) K. Ueda, et al., International Hydrogen and Clean Energy Symp. '95, Tokyo, 189 (1995)
- 4) 濱 純, 燃焼研究105, 29(1996-7)
- 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)
- 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, p127-133, オーム社 (1982)
- 7) H. J. Sternfeld P. Heinrich, Int. J. of Hydrogen Energy, 14-10, 703 (1989)
- 8) H. Jericha, O. Starzer M. Theissing, ASME OGen-Turbo IGTT-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) M. Nomura, et al, Int. J. of Hydrogen Energy, 6-4, 397 (1981)
- 12) 春海一佳他6名, 第11回日本ガスタービン学会秋季講演会, 165 (1996-11)
- 13) 宮島健次他4名, 同上, 171 (1996-11)
- 14) 井亀 優他4名, 機械学会論文集, 56-531, 3554 (1990)
- 15) J. Hama, ASME-JSME International Conf. on Power Engineering-93, Sep. 12-16, Tokyo, 475 (1993)
- 16) 小川紀一郎他2名, 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 (1992-11)
- 17) 山下 巖, 日本ガスタービン学会誌22-86, 9 (1994-9)
- 18) 壹岐典彦他4名, 日本機械学会茨城講演会講演論文集, (1994-9)
- 19) M. Murase, Proc. of International hydrogen and Clean Energy Symp. '95 Tokyo, 55 (1995-2)
- 20) 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 (1994-9)
- 21) 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 (1995-9)
- 22) H. Sugisita, et al., 11th WHEC 1850 (1996)
- 23) M. Chiba, et al. 11th WHEC 13 (1996)
- 24) 新田明人, 日本機械学会誌, 99-929, 251 (1996-4)
- 25) A. Yu. Kusharin et al., Chem. Phys. Rep. 14 (4) 584 (1995)
- 26) 壹岐典彦, 他4名, 第24回ガスタービン定期講演会講演論文集, 33 (1996-5)
- 27) 福江一郎, 第32回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 357 (1995-5)