

# 水素燃焼タービンの設計と要素技術開発

Design & Main Parts Development of Hydrogen Combustion Turbine

上 松 一 雄\*

Kazuo Uematsu

## 1. はじめに

地球温暖化や環境問題対策の1手段として「水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術WE-NET (World Energy Network) 研究開発」と総称される取組が通商産業省工業技術院(以降工技院と略)のニューサンシャイン計画の中で新エネルギー・産業技術総合開発機構(以降NEDOと略)のプロジェクトとして第一期'93~'98年度の6年間実施された。

この一環として、本書で紹介する500MW大容量発電を目的とした「水素燃焼タービンの研究開発」が参加各社のコンペの形で実施されて来た。

残念ながら、この開発はWE-NET中間報告<sup>1)</sup>において、海外の再生可能エネルギーをベースとした水素安定供給の目処が30年先と想定されたため、WE-NET第二期に継続するには時期尚早と判断された。

代わりに、WE-NETにて採用された2.1項に示す弊社提案の水素燃焼タービンサイクルをメタン・酸素燃焼に適用する事で現存する天然ガス燃料を使った無公害・高効率サイクルを開発する新たなプロジェクトが発足し、WE-NETと同じく工技院殿プロジェクトとしてNEDO殿からの委託の形で電力中央研究所殿のご指導の元、'99年度より公募で参加希望した各社協力体制でスタートした<sup>2)</sup>。

本プロジェクトで開発する要素技術は「水素燃焼タービンの研究開発」にも適用可能で、WE-NET第二期以降の進展によってはこの技術を利用してWE-NETでの早い時期の再開も期待される。

以上の様に水素供給の課題(大量安定供給手段と事業化・低コスト化可能性)解決へ向けてまだ時間を要するため、大規模な水素利用技術への本格的取組は困難な状況だが、水素が将来の有望なエネルギーである

事は広く認識されて来ておりWE-NET第二期計画では水素供給手段等の地道な研究開発が続けられると共に、当面規模は小さいが、短中期の導入が期待される水素自動車等の分散型水素利用技術が開発された。

こうした中、本書ではWE-NET第一期「水素燃焼タービンの研究開発」で得られた成果を紹介する。

## 2. 「水素燃焼タービンの研究開発」の成果

### 2.1 サイクル

水素燃焼タービンサイクルの研究開発は東芝、ウェスティングハウス、弊社の3社のコンペとして'93~'96年度の4年間に亘って実施された。

この結果、図1の弊社提案サイクルが高効率、実現性などの観点から「最適システム評価部会」にて選定された。

このサイクルはオーストリー第二の都市に所在するグラッツ工科大学のイェリッハ教授により考案されたサイクル<sup>3)</sup>をベースに改良したものである。

まず、水素と酸素を燃焼器3Cで燃焼させ、この出口ガス(生成物は蒸気となる)温度・圧力を1700°C/5Mpaとしてタービン4Tへ導入する。タービン4Tの排気ガスは熱交換器5H&6Hで冷却された後、圧縮機1CP&2CPに戻り、再び燃焼器3Cに戻るクロードサイクルを形成する。なお、タービン4Tからの排気ガスの半分はタービン7Tへと抽気された後コンデンサで凝縮される。この凝縮水は熱交換器5H&6Hで蒸発させられタービン9Tを駆動する。

さらに、このサイクルの特徴として熱交換器14H&15Hを有し、タービン4Tからの排気ガスの熱を再生利用する事で効率向上に一役果たしている。この再生器の利点は次の通り。

- (1) タービン4T圧力比50以下で効率が高くできる。
- (2) タービン4T入口温度1500°C以上で効率が高くできる。
- (3) タービン4Tの一段静翼高さを高くでき、冷却

\* 三菱重工業(株)高砂製作所タービン技術部ガスタービン設計課主査

〒676-8686 兵庫県高砂市荒井町新浜 2-1-1

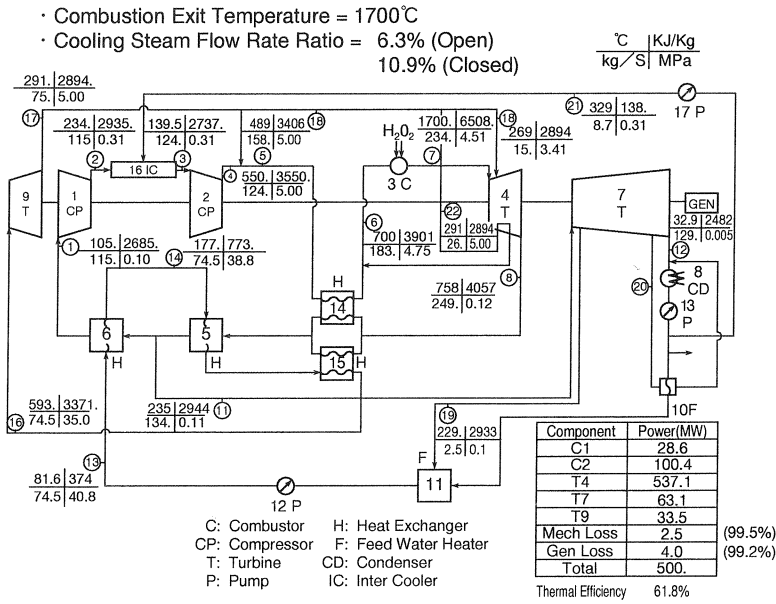


図1 500MW水素燃焼タービンサイクル

翼設計を容易にする。

結果、HHVで61.8%と数値が得られ、目標効率H HV60%以上達成が可能と判断される。

参考に上げると、文献で可能とするレベルはコンバインドプラントでHHV54%が今の所最高値である。

2.2 燃焼器

HHV60%以上達成のためには1700°C級水素・酸素燃焼器の実現性・特性を確認する必要があった。

このため、燃焼器スケールモデルの開発も併行して実施され、IHI、日立、弊社の3社でコンペを行った。研究開発は'93~'98年度の6年間実施され、各メーカーが'97年度に供試燃焼器を製作し、'98年度には弊社田

代試験場にNEDO殿予算で製作した一式の燃焼試験設備を設置し、電力中央研究所殿のご指導の元で、燃焼器出口温度1700°Cでの各社供試燃焼器の評価のための燃焼試験が順次行われた。

図2と図3に参考に弊社燃焼器の試験状況を示す。

また、この試験によって図4~図6に示す良好な結果<sup>3)</sup>を得た。この成果の詳細は、電力中央研究所殿より発表されており詳しくはそちらを参照願いたい。

図4は燃焼器出口温度1700°Cでの燃焼器壁温分布計測値を示している。壁温の許容温度は燃焼器では700°C、尾筒で850°Cであり、計測値はこれ以下となり問題ない設計である事を示している。

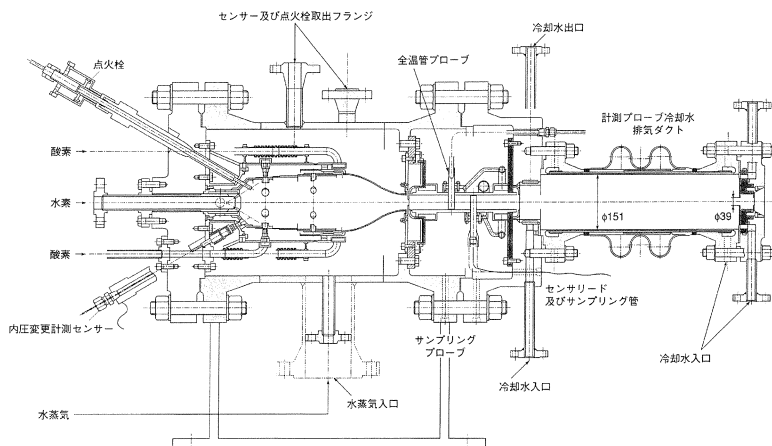


図2 燃焼試験装置(弊社燃焼器)

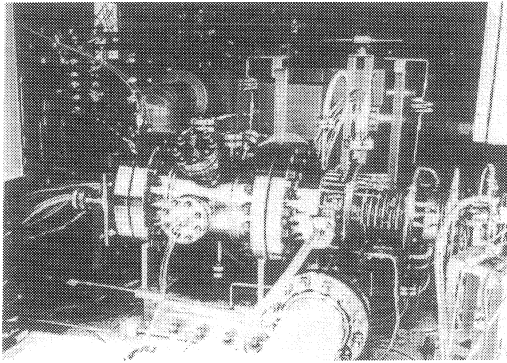


図3 1700°C燃焼試験設備

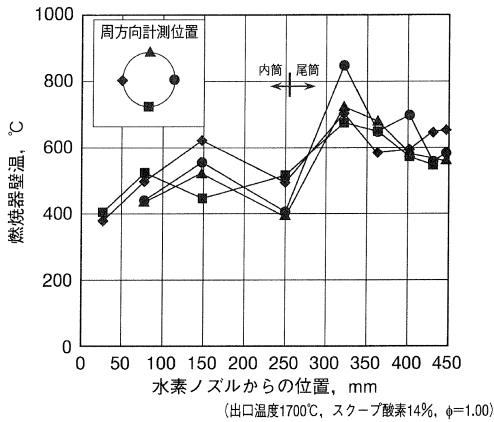


図4 燃焼器壁温 (燃焼器出口温度1700°C)

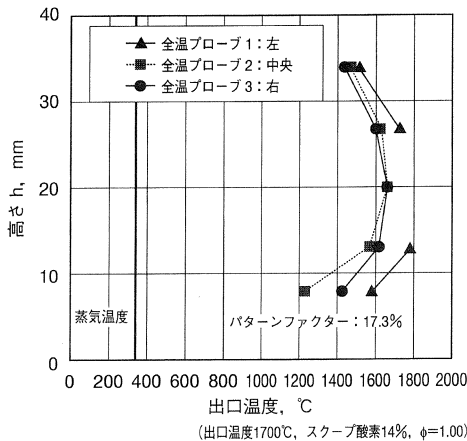


図5 燃焼器出口温度分布 (燃焼器出口温度1700°C)

図5は同じく燃焼器出口温度1700°Cでの出口温度分布計測値を示している。このパターンファクタは17.3%と従来ガスタービンと同じレベルであり正常である事を示している

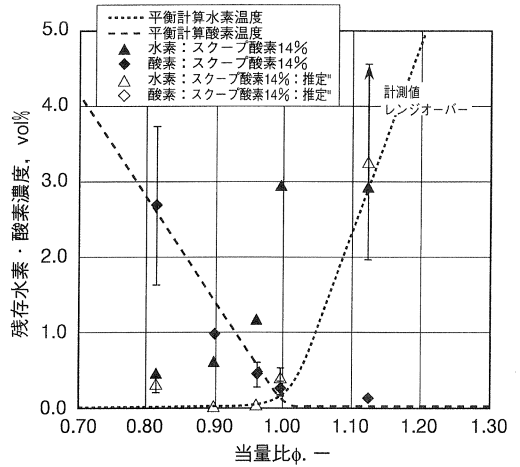


図6 残存水素・酸素濃度 (燃焼器出口温度1700°C)

図6は同じく燃焼器出口温度1700°Cで水素・酸素当量比を変化させた場合の燃焼生成物(蒸気)中での残存水素・酸素濃度計測結果を示している。このような蒸気中の水素・酸素濃度計測は初めての試みであったため計測系の調整を行いながら得たが、図の▲で示す通り水素濃度が蒸気混入の影響を受けて高く計測されている事が判明した。この影響を考慮して酸素とのバランスを取って整理したのが△である。この結果、平衡計算値の傾向と良く一致する結果となった。

### 2.3 タービン冷却翼

HHV60%以上達成のためには燃焼器同様、1700°C級タービン冷却翼の実現性・特性を確認する必要があった。

このため、高温タービン4Tの1段動静翼スケールモデルの開発も併行して実施され、東芝、日立、弊社の3社でコンペを行った。研究開発は'93~'98年度の6年間実施され、各メーカーが'97年度に供試タービン1段動静翼を製作し、'98年度には弊社田代試験場にNEDO殿予算で製作した一式の燃焼試験設備に翼列試験設備を付加設置し、発電技検殿のご指導の元で、タービン入口温度(燃焼器出口温度)1700°Cでの各社

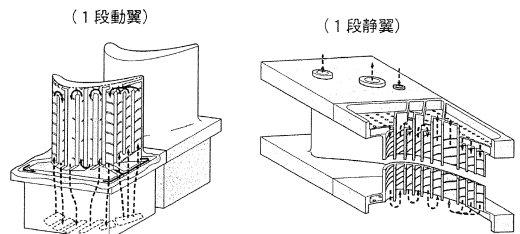


図7 弊社タービン1段動静翼

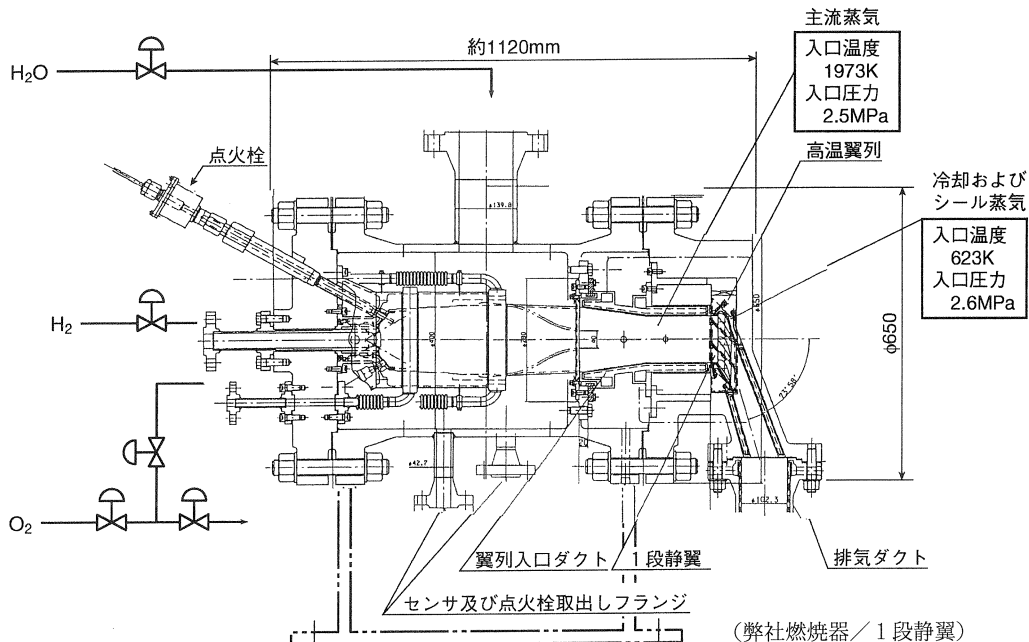
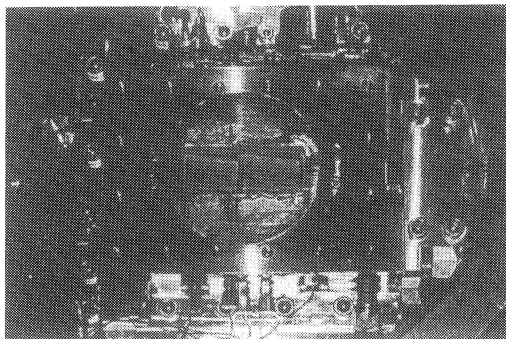
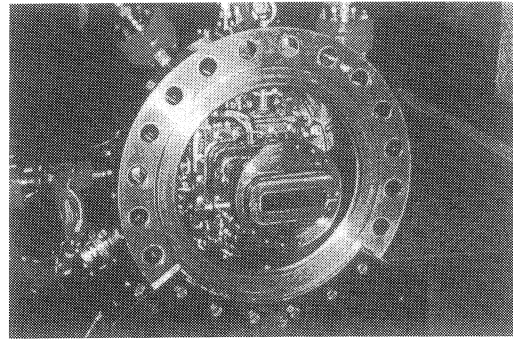


図8 1700°C翼列試験装置



供試翼部



翼列外観 (入口)

図9 1700°C翼列試験設備

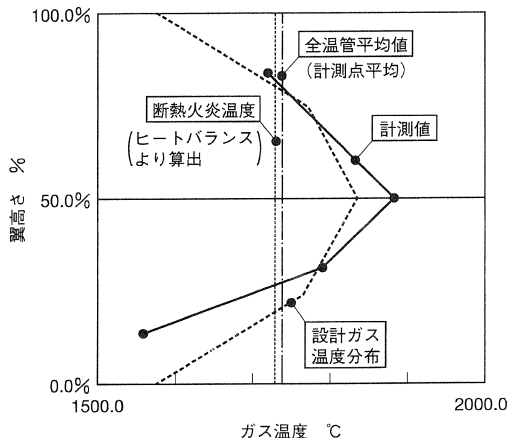


図10 タービン1段静翼入口ガス温度 (1700°C相当)

供試タービン動静翼の評価のための翼列試験が順次行われた。

図7に弊社供試タービン動静翼の図を示す。また、図8～図9に弊社タービン翼列試験状況を示す。

試験の結果、図10～図12に示す通り良好な結果<sup>4)</sup>を得た。この成果の詳細は発電技検殿より発表されており詳しくはそちらを参照願いたい。

図10は燃焼器出口温度1700°C相当試験でのタービン1段静翼入口でのガス温度実測結果を示している。計測のガス温度平均値と断熱理論ガス温度平均値はほぼ一致し、1700°Cより若干高めとなり評価する上では厳しい目の条件である事が分かる。また、タービン冷却翼設計条件として選んだガス温度分布推定と実測はわ

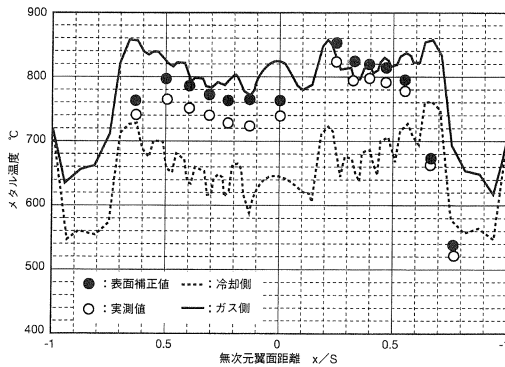


図11 タービン1段静翼壁温(1700°C相当)

ずかな狂いはあるがまずまずである事も分かる。

図11は同じく燃焼器出口温度1700°C相当におけるタービン静翼壁温の設計値と計測値を示す。○は実際の計測値で、●は熱電対の壁厚さ方向深さを補正してガス側表面壁温に換算したものである。●と太線との比較が設計値と実測の比較となる。この結果、ほぼ設計通りの計測が得られた事が分かる。

図12は翼列試験後の1段静翼断面のマイクロ写真を示している。TBC、アンダーコート、母材共に正常である事が分かる。

### 3. まとめ

以上の通り、水素燃焼タービンの研究開発では、水素・酸素燃焼を利用したHHV60%以上の1700°C級高効率サイクルを選定し、この実現性を評価するために短時間ではあったが世界でも初めて1700°C下での燃焼試験と翼列試験を実施した。この結果、実現可能性を立証する数々の計測結果を得た。

この試験実施に当たっては、工技院殿、NEDO殿を初め、電力中央研究所殿、発電技検殿の皆様による寒冷地と言う厳しい自然環境である田代試験場での細かいご指導を頂いた。この皆様のご努力には心より感謝申上げたい。さらに、参加全社が高い技術力を証明し全ての試験が成功裏に終わった事も喜ばしい限りであった。

また、本プロジェクトでは、上記に詳述したサイクル、燃焼器、タービン翼の他、熱交換器(東芝、弊社)、超高温材料(参加社多数)、ロータシール(KHI、弊社)、冷熱利用酸素製造(神戸製鋼、大同ほくさん)の机上検討も併行して進められた。これらについても予定通りの成果を得る事ができた<sup>5)</sup>。

今後、より大型のクローズドサイクルプロトタイプ

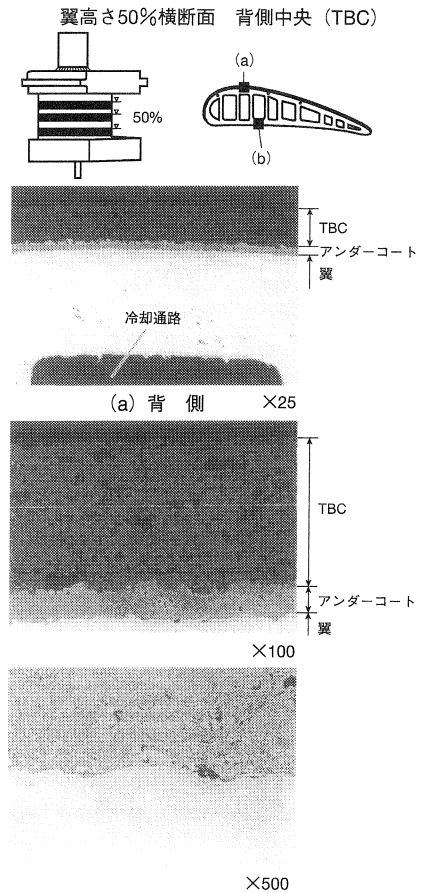


図12 ミクロ断面(1段静翼)

プラントを製作し、プラントとしての評価へと進めたいと希望している。水素燃料の供給の可能性が高まった段階でのプロジェクト再開を祈念してやまない。

### 引用文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構/水素・アルコールバイオマス技術開発室, 「水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術(WE-NET)第一期研究開発中間成果報告書」1998-01
- 2) H. Jericha他, 「A Novel Thermal Peak Plant」, ASME Cogen-Turbo III Nice France1989
- 3) 西田啓之他, 「水素燃焼タービン用燃焼器の開発」, 第37回燃焼シンポジウム1999-12
- 4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構主催, 「WE-NET水素エネルギーシンポジウム」東京・科学技術館1999-02
- 5) 久松鴨, 「水素燃焼タービン第I期研究開発成果及び二酸化炭素回収対応クローズド型高効率ガスタービン技術第I期研究開発計画について」新エネルギー・産業技術総合開発機構第19回事業報告会水素・アルコール・バイオマス技術分科会予稿集, 1999-09, PP57-80.