

燃料電池用タービン圧縮機の開発

深尾吉照・馬場利秋・稲葉 剛・金村俊勝

機械事業部・開発部

Development of High-efficiency Turbo Compressors for Fuel Cell Power Plants

Yoshiteru Fukao・Toshiaki Baba・Tsuyoshi Inaba・Toshikatsu Kanemura

Two-rotor, two-stage turbo compressors are normally used in conventional fuel cell power plants. Because the turbo compressor influences fuel cell power plant efficiency and compact, high reliability characteristics are expected for turbo compressors, a one-rotor, two-stage turbo compressor was developed. This paper reports on the development of this kind of turbo compressor for a phosphoric acid fuel cell power plant and a molten carbonated fluid fuel cell power plant.

まえがき = 燃料電池発電システムは、高い発電効率や優れた環境性を有していることから次世代発電システムとしての期待が高く、2000年度に約20万kW、2010年度に約220万kW程度の導入が目標されている。燃料電池発電システムには電池本体に使用されている電解質により、第一世代と呼ばれるリン酸型燃料電池から第二世代の溶融炭酸塩型、第三世代の固体電解質型などがあり国内では通産省工業技術院のニューサンシャイン計画（旧ムーンライト計画）を中心に開発がすすめられてきた。小型の燃料電池では電池動作圧力が常圧に近いオンサイト型（リン酸型燃料電池）が熱電併給型としてフィールドテストされ、ターボチャージャを必要としなかったが、電力事業用として大型のものは発電効率向上のため電池動作圧力を高圧化する必要があることから、燃料電池用のタービン圧縮機が開発がすすめられてきた^{1)~3)}。

タービン圧縮機の効率がプラント効率に及ぼす影響が大きいことから高効率化、また設置面積の省スペース化、信頼性向上などが課題である。そこで、当社では新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託や民間との共同開発により燃料電池用タービン圧縮機を開発をすすめてきた。これらの開発概要について以下に説明する。

1. タービン圧縮機的作用

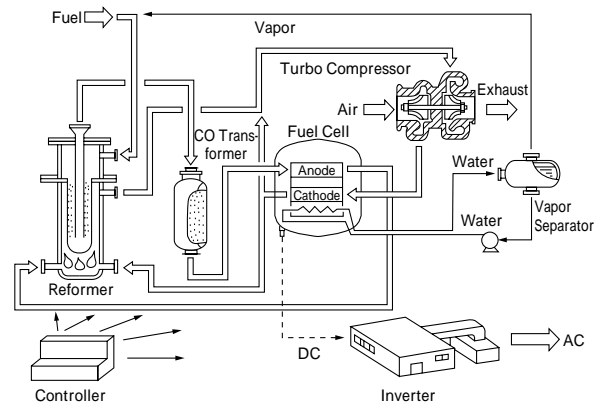
燃料電池は水の電気分解の原理とは逆に酸素と水素を電解質を介して電気化学的に反応させることにより直接電気を発生させるものである。発電システムの基本構成を第1図に示す。水素は天然ガスなどの化石エネルギーから改質されてえられるが、酸素は空気を送り込むことにより供給される。この空気を燃料電池空気極に供給するため加圧型燃料電池ではタービン圧縮機が使用される。タービン圧縮機は燃料電池および改質器から排出されるガス的高温高圧エネルギーをタービンで回収し、回収したエネルギーをもちいて直接圧縮機を駆動する。この場合、圧力比が5~8であるため従来のターボチャージャ1台では圧力比が不足する。そのため第2図に示すようにターボチャージャ2台をもちいてタービンと圧縮機を直列に接続した2軸2段システムが使用されてきた。

しかし、2軸2段システムは汎用ターボチャージャの組合わせで構成するため2軸となり、軸受などの機械損失や配管抵抗（圧力損失）が大きくなること、また、2台のケーシングとなり設置スペースが大きくなることなどが欠点であった。当社では、これに対して高効率化、省スペース化を図るため1軸上に圧縮機を2段に配した1軸2段システムを開発してきた。

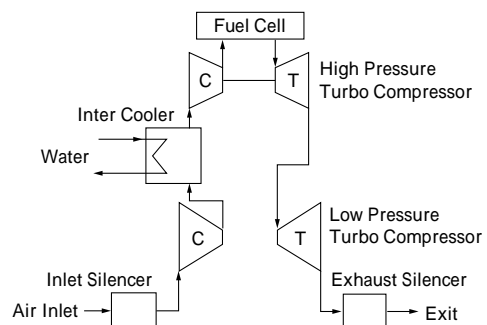
2. リン酸型燃料電池用タービン圧縮機

2.1 1軸2段システム

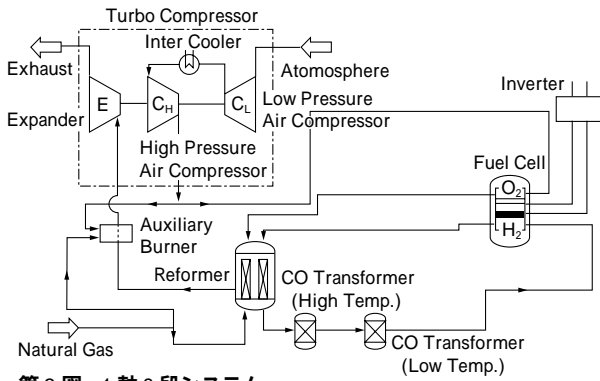
リン酸型燃料電池において、タービン圧縮機の効率1%が発電プラント全体の効率に対して約0.2%の影響を与えるとの報告がある⁴⁾。このため、5000kW級燃料電



第1図 燃料電池発電システムの基本構成
Fig. 1 Basic system of fuel cell power plant



第2図 2軸2段システム（従来型）
Fig. 2 2-rotor 2-stage system (conventional type)



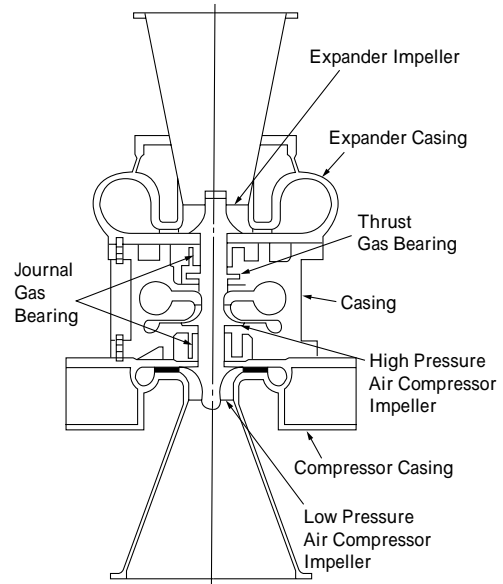
第3図 1軸2段システム
Fig. 3 1-rotor 2-stage system

池プラントを想定して1軸2段システムの開発をおこなった。プラントシステム図を第3図に、その構造図を第4図に示す。タービン圧縮機ケーシングは豎型1台となり、1軸上に低圧段圧縮機、高圧段圧縮機、タービンを配している。軸受にはハイブリッドティルティングパッド気体軸受(ジャーナル軸受)と静圧気体軸受(スラスト軸受)を採用している。豎型構造であり、潤滑油ユニットが不要なので設置スペースを小さくできるメリットがある。

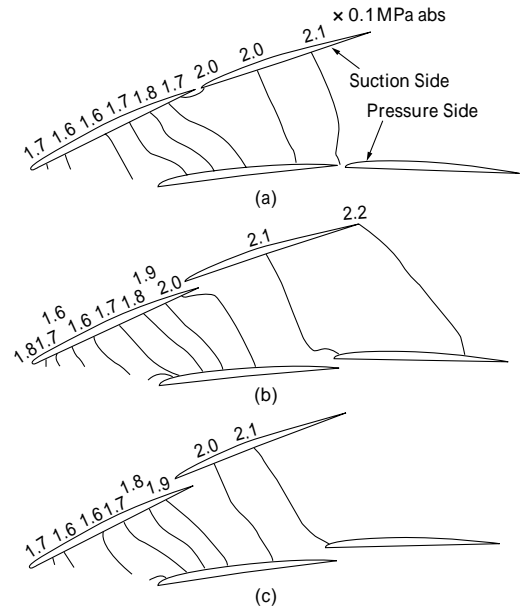
2.2 空力性能の高効率化

空力性能の高効率化のために圧縮機のインペラ比速度を高くし、ブレードには三次元ブレード曲面を開発した⁵⁾。インペラのインデューサ部は、流入空気とインペラとの相対速度が遷音速となるため、ブレード形状の微妙な変化により衝撃波の発生が生じる。すなわち、マッハ数が1近くになるブレード先端では、ブレード表面の一部に超音速域と亜音速域が混在するため流れが不安定になり、流れの不連続面である衝撃波が発生する。この衝撃波の発生を小さく抑えることのできる翼列形状を、流れ解析および風洞試験をもちいてインデューサ部に適用した。また、高比速度インペラでは流れの三次元性が大きいので、低運動量域、いわゆる境界層がブレードの負圧面側およびシュラウド側に堆積しやすいことから、インデューサ部に続く三次元ブレード形状は有限要素法をもちいた準三次元境界層解析と三次元乱流解析を併用して設計した。

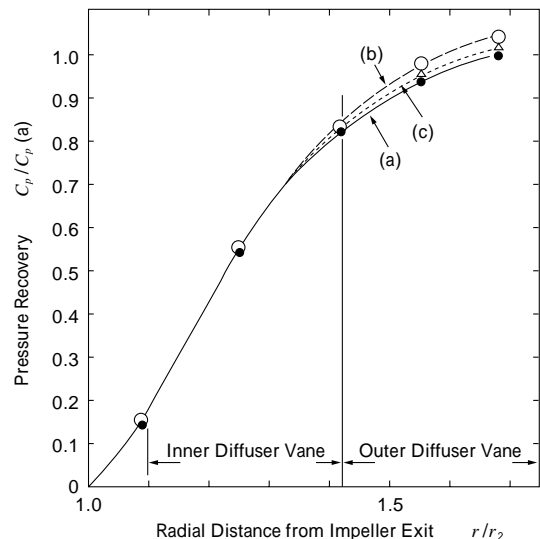
コンプレッサインペラから流出する流れを効率よく圧力に変換するため、ディフューザベーンの開発も実施した。ディフューザベーンの性能は境界層の発達とはく離に大きく影響されるため、ディフューザベーンを境界層の急激な発達が予測される位置で内側ベーンと外側ベーンに分割して性能特性試験をおこなった。第5図にディフューザ流路内の圧力分布の実測値を示す。内側ベーンと外側ベーンをずらす位置によって圧力分布に差異が生じ境界層の発達が抑制されることがわかる。ベーンの相対位置[(a),(b),(c)]とディフューザの静圧回復率の関係を示す。第6図中の(b)は同(a)にくらべて外側ベーンでの静圧回復率が大きい。相対ずれの大きい(c)では圧力回復率が(a)とほとんど変わらない。この結果、最適のベーン相対ずれを把握しコンプレッサの効率向上をはかった。



第4図 1軸2段タービン圧縮機構造図
Fig. 4 1-rotor 2-stage turbo compressor



第5図 コンプレッサディフューザ流路内圧力分布
Fig. 5 Pressure distribution in diffuser vane



第6図 ディフューザベーン流路内圧力回復
Fig. 6 Pressure recovery in diffuser vane

タービンにはラジアル型を採用し1段膨張としているため、ノズル部出口流れが超音速となる。このため、タイムマーキング法によるノズル内流れ解析により、最適形状の超音速ノズルを開発した。第7図にノズル内流れの解析結果を示す。最適な末広ノズル形状によりスムーズな速度分布をえており、タービン効率向上をはかった。

2.3 大型気体軸受

気体の粘度は普通の潤滑油にくらべて約1/1000であり、高速回転においては気体軸受の摩擦損失がきわめて小さいことから軸受損失を小さくできること、潤滑油ユニットなどの補機類が大幅に削減できるなどの利点がある。このため、燃料電池用タービン圧縮機用の大型気体軸受を開発した。ジャーナル軸受に採用されたハイブリッドティルティングパッド気体軸受の断面図を第8図に示す⁶⁾。軸受は軸を囲む3枚のパッドをピボットで傾動可能に支持してあり、軸とパッド間にくさび状の空間を形成し、加圧した気体を絞りを通してこの空間に導入することにより、その静圧で軸を支持する(静圧効果)。さらに、軸の回転により、軸につれまわる気体がこの空間に押込まれることにより発生する圧力によって、軸を支持する(動圧効果)。軸受を構成する3枚のパッドを支えているピボットのうち、1枚のパッドのピボットをばねによる支持とし、他の2枚のピボットは固定支持としてある。静圧給気はピボットを通しておこなわれ、3枚パッドのうち1枚のパッドをばね支持にすることによって、熱膨張などによる軸受隙間の変化を吸収し、軸受性能を保つことができる。また、ハイブリッドティルティングパッド軸受は静圧効果も利用しているため、動圧軸受に比べ負荷能力が大幅に向上し、起動時には静圧給気をおこなうことにより、軸と軸受との接触を防ぐことができる。

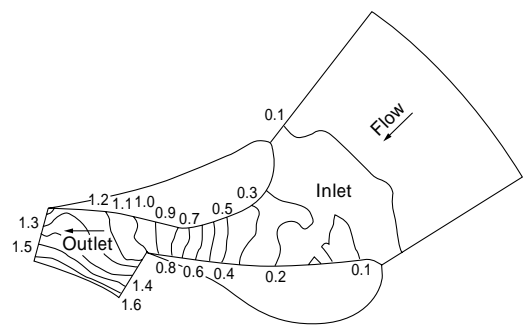
試作した気体軸受は、まず軸受動特性試験機で実機に近い状態で運転試験をおこなった。第9図に軸受の動特性試験機の断面図を示す。試験機はコンプレッサ1段とラジアルタービン1段で構成された縦型構造とし、ラジアルタービンには加熱空気を送り込むことによりロータを回転させ、えられた回転動力でコンプレッサを運転し負荷を与えるようにした。したがって、気体軸受にはインペラに作用する流体の不安定化力の影響やタービンに流入する熱の影響も作用する条件とした。

この結果、ハイブリッドは静圧効果と動圧効果の併用により、動圧のみよりも約2倍の負荷能力をもつことが確認された。また、軸受パッドの振動は回転数に同期した成分が支配的であり、軸の振動によく追従して安定していること、ロータの危険速度通過時の振幅も小さく、運転上ほとんど影響なく通過できることも確認した。

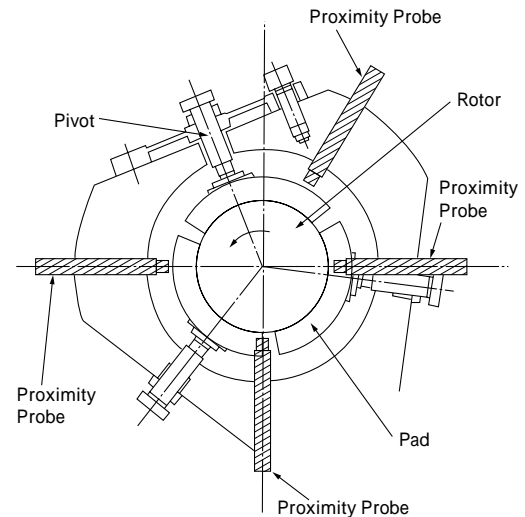
これらの確認の後、写真1に示す実機サイズの5000kW級燃料電池用タービン圧縮機を試作し、性能確認試験を実施した⁷⁾。その結果、総合効率74%の達成と、機械的にも安定して運転できることを確認した。

2.4 大型化

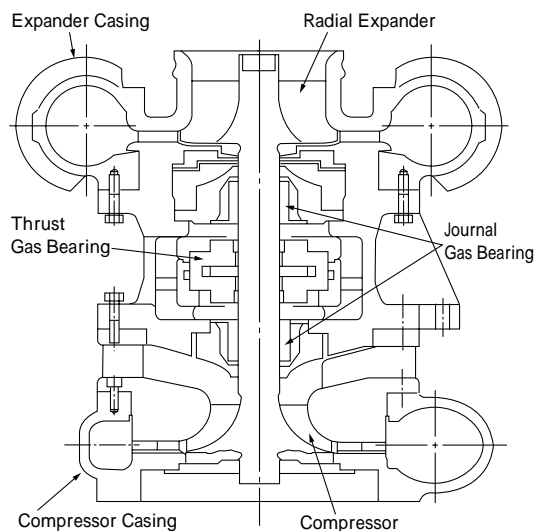
1軸2段システムの大型化として11MW級燃料電池用タービン圧縮機の開発もおこない、超大型のハイブリッド



第7図 タービンノズル内流れ解析(等マッハ線)
Fig. 7 Mach number distribution at turbine nozzle



第8図 ハイブリッドティルティングパッド気体軸受断面図
Fig. 8 Cross section of hybrid tilting pad air bearing

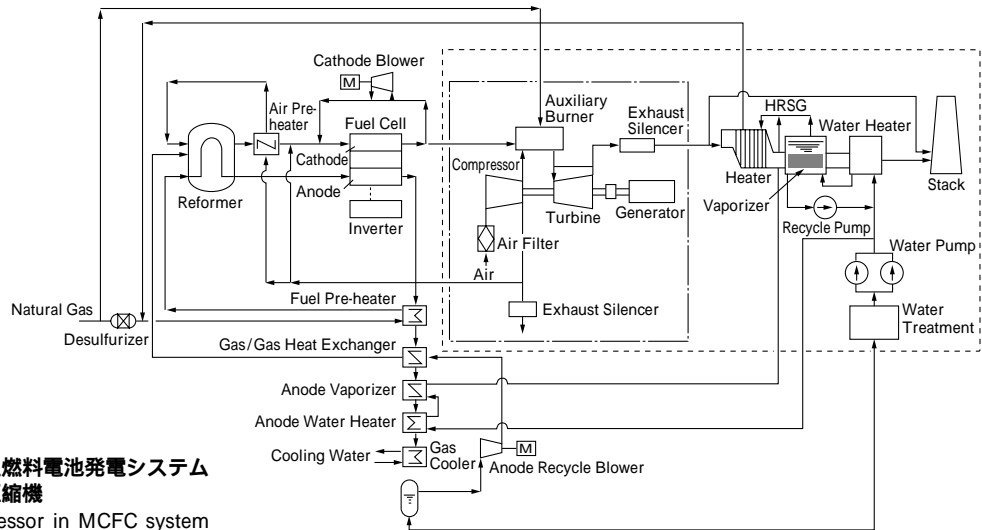


第9図 気体軸受動特性試験機断面図
Fig. 9 Cross section of dynamic characteristic test apparatus

ドティルティングパッドジャーナル軸受を使用した実機サイズのタービン圧縮機を製作した。1軸2段システムとして各コンポーネントの大型化と高圧化をはかっており、運転試験の結果、安定した運転と、省スペース性を確認している⁸⁾。

3. 溶融炭酸塩型燃料電池用タービン圧縮機

第二世代の溶融炭酸塩型燃料電池はシステム効率がリン酸型燃料電池よりもさらに向上することから NEDO



第10図 溶融炭酸塩型燃料電池発電システム
とタービン圧縮機
Fig. 10 Turbo compressor in MCFC system

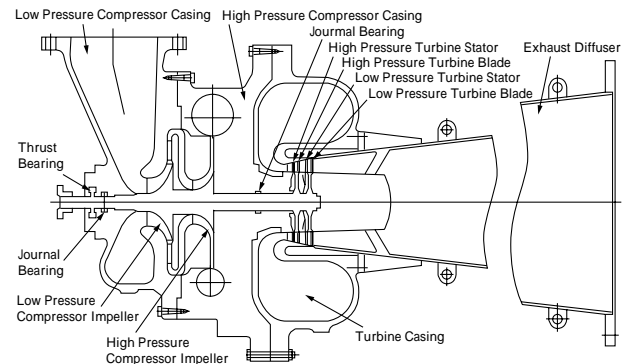


写真1 5000kW級燃料電池用タービン圧縮機
Photo 1 Turbo compressor for 5000kW fuel cell

ニューサンシャイン計画にて開発が進められている。溶融炭酸塩型燃料電池の特徴は燃料電池の作動温度が約700と高く、高温高圧の電池排ガスがタービンに流入する。当社では1000kW級パイロットプラント用にタービン圧縮機を開発している⁹⁾。

タービン圧縮機まわり(排熱系)の構成機器は第10図に示すように、補助燃焼器、タービン圧縮機、発電機、軸受潤滑流体供給装置などである。1軸型タービン圧縮機は減速機を介して、発電機を駆動する。空気吸込フィルタ・消音器を経由した空気は圧縮機で昇圧され、カソードおよび改質器へ送られる。また、一部は燃焼用空気として補助燃焼器に供給される。

カソードに送られた空気は燃料電池での反応に使用され高温となるが、このカソード排ガスは必要に応じて補助燃焼器により熱エネルギーを付加され、タービンに流入し動力を回収する。



第11図 溶融炭酸塩型燃料電池用タービン圧縮機
Fig. 11 Turbo compressor for MCFC

タービン圧縮機の構造図を第11図に示す。1軸上に低圧段圧縮機、高圧段圧縮機と高圧段タービン、低圧段タービンを配した構造であり、圧縮機は2段遠心型、タービンは2段軸流型を採用している。リン酸型燃料電池用と比較してガスタービンに近い構造となっている。

むすび = 当社では燃料電池用タービン圧縮機としてリン酸型燃料電池用から溶融炭酸塩型燃料電池用まで、それぞれのシステム特性に最適となるよう、当社のターボ技術を結集して開発を進めてきた。今後、本開発成果が燃料電池発電の実用化に貢献できることを期待している。

参考文献

- 1) 宮下和也: ガスタービン学会誌, Vol.24, No.96(1997), p.33.
- 2) 矢崎茂孝: 石川島播磨技報, Vol.26, No.2(1986), p.117.
- 3) 林宗浩ほか: 機講論, Vol.900, No.14(1990), p.317.
- 4) 通商産業省大型省エネルギー技術(燃料電池発電技術)研究開発推進会議・経済性評価ワーキンググループ: リン酸型燃料電池発電技術の将来展望(第1報), (1984), p.29.
- 5) 平田敏明ほか: 神戸製鋼技報, Vol.41, No.1(1991), p.48.
- 6) 平田敏明ほか: 神戸製鋼技報, Vol.41, No.1(1991), p.52.
- 7) Y. Fukao et al.: Proceedings of International Fuel Cell Conference, (1992), p.109.
- 8) 佐藤頼生ほか: 機講論, Vol.95, No.1(1995), p.111.
- 9) 加納文質ほか: MCFC 研究組合第25回セミナー講演要旨集, (1995), p.41.