

日立ガスタービンの歩みとシリーズ展開

Hitachi's Gas Turbine Product Range and Development Background

後藤 仁一郎 久芳 俊一 寺西 光夫
Gotoh Jinichiro Kuba Shunichi Teranishi Mitsuo
神野 賢治 広瀬 文之
Kamino Kenji Hirose Fumiyuki

1966年の初号機導入以来、日立ガスタービンの総受注台数は600台に至る。1960年代から1970年代は日立ガスタービンビジネスの創成期であり、GE社との技術提携による海外を中心としたガスタービンの拡販を行い、今日の礎を築いた。1980年代から1990年代はコンバインドサイクルブームとなり、日立グループは日本初の排熱回収方式のコンバインドサイクルを納入するなど、国内ビジネス拡大のきっかけとなった。一方、1988年には、設計から製造までのすべてを初めて自社技術のみで行ったH-25形ガスタービンを開発した。その後、2000年以降、H-25形ガスタービンの海外拡販を開始し、今日のグローバルビジネスへの展開につながってきた。日立グループのガスタービンビジネスは、日立製作所の創業の精神の一つである「開拓者精神」に支えられてきたとも言える。

1. はじめに

日立ガスタービンは、GE社（General Electric Company）との技術提携以来、不況や円高など幾つもの困難に直面しながらも、その受注実績は600台に至り、火力発電の主力としての位置を不動のものとしたと言える。初期の日立—GE型ガスタービンにおいては、30年を超えて運転中のユニットもあり、その信頼性は高く評価されている。続く国内コンバインドサイクルの萌（ほう）芽期においては、培った経験と国内の厳しい規制をクリアする環境技術によって市場をリードし、現在の火力発電事業の基礎を築いた。この間、日立独自の技術によるガスタービンH-25形を開発し、その高い性能と信頼性で納入実績は151台に至る。その後、姉妹機H-15形の開発に続き、100 MW級中型ガスタービンH-80形の開発が続く。

ここでは、40年を超える日立ガスタービンビジネスの歴史と、近年の開発動向について述べる。

2. 沿革

2.1 日立ガスタービン製作の起源

日立グループにおけるガスタービンの歴史は、1938年に海軍航空技術廠（しょう）から試作研究を命じられて製作した500 HP（1 HP = 約0.7457 kW）用排気タービン加給機に始まる。排気タービンは、その後徐々に大型化し、1945年8月の終戦までに800台が製作された。さらに、ジェットエンジンの試作・研究が進められ、「ネ-20」の製作協力、「ネ-230」の試作などが行われた。1954年には開放形2軸再生高圧出力式1,100 kW発電用ガスタービン試作機が完成した。1959年まで、この試作機を基に各種の研究改良が進められたが、当時のガスタービン市場はまだ熟するに足りず、商用機の生産には至らなかった。

2.2 GE社との技術提携

(1) 第1号機の製作

1964年、世界のトップメーカーであるGE社と共同製作協定に調印し、1966年に日立—GE型ガスタービンの第1号機を日本石油化学株式会社（当時）に納入した。この1号機はMS3002形、6,000 kWの2軸機であり、タービン入口温度は800°Cであった。

(2) MS5001形

MS5001形の第1号機は、GE社から受注して1967年に完成し、米国のインディペンデントオイルカンパニーに納入した。出力は16,250 kWであった。その後は全世界へ進出し、累計納入台数が286台と日立グループの主力機種となった（図1参照）。

(3) 機械駆動用ガスタービン

機械駆動用ガスタービンは、1977年にGE社経由で現在のロシア連邦向けにMS3002形を8台、アルジェリアの国営石油・ガス公社のソナトラック社向けなどにMS5002形

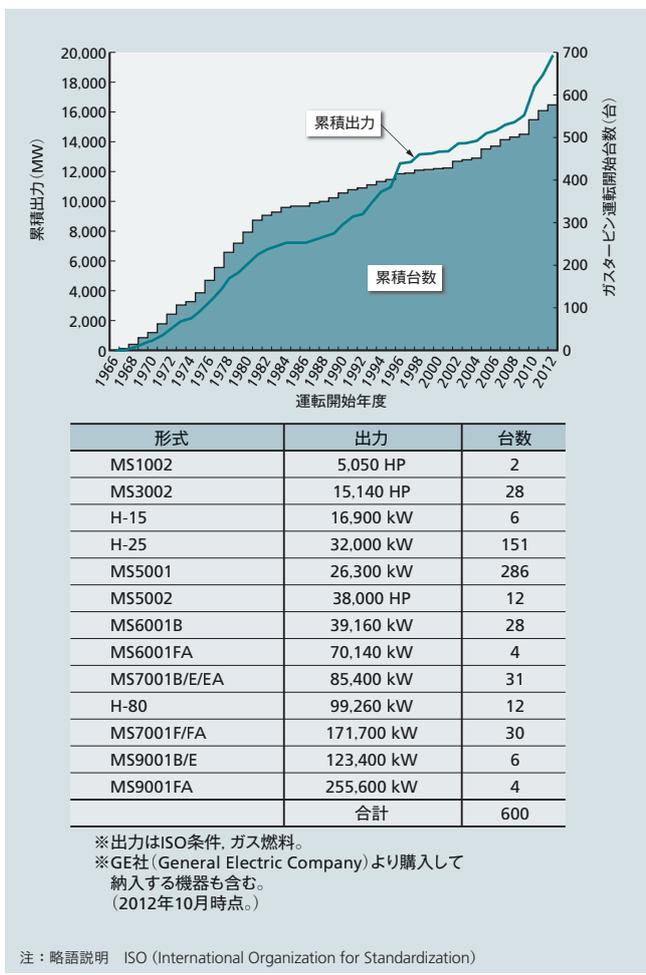


図1 | 日立ガスタービンの累積実績
 1966年以降、現在までに600台に至っている。

を完成させ、累計12台を納入した。

(4) 大容量・高性能ガスタービン

大容量・高性能ガスタービンの需要の高まりを受け、MS5001M形から比例拡大した60 Hz用MS7001形が誕生し、さらに50 Hz用MS9001形が誕生した。MS9001B形は第1段動静翼に空冷方式を採用しており、日立の第1号機は、現在の東日本旅客鉄道株式会社川崎火力発電所向けに受注し、1981年に納入した。同発電所は、日本における排熱回収方式のコンバインドサイクル発電設備の第1号機でもある。

MS7001E形は、燃焼器ならびにタービン冷却方式(第2段動静翼も空気冷却)などを改良し、1981年に完成した。

1990年代に入ると、高いプラント熱効率と運用性が評価されるLNG (Liquefied Natural Gas) 焚(だ)きコンバインドサイクル発電設備が主流となり、その主機用として、ガスタービンのニーズが高まった。1990年、中国電力株式会社柳井発電所に1,100°C級MS7001EA形を3台、1992年に3台を納入した。1991年には、九州電力株式会社新大分発電所にMS7001E形を6台納入した。これらはガスタービン、発電機および蒸気タービンが1軸につながった



図2 | 大容量・高性能ガスタービンコンバインドサイクルの例
 九州電力株式会社新大分発電所1号系列発電所の外観を示す。1990年代に大容量・高性能ガスタービンコンバインドサイクルの多数の納入実績があった。

1軸形コンバインドサイクル発電設備である(図2参照)。

1994年、中国電力柳井発電所に1,300°C級MS7001F形を2台、1996年に2台を、1軸形コンバインドサイクル発電設備として納入した。

この時期、既設火力発電設備にガスタービンを追加設置して短期間にリパワリングできる排気再燃形コンバインドサイクル発電設備が注目され始め、1994年に1,100°C級MS9001E形1台を、東京電力株式会社五井火力発電所に納入した。一方、定格負荷での高効率に着目し、1996年にMS7001FA形3台に蒸気タービン1台を構成する多軸形コンバインドサイクル発電設備を、関西電力株式会社姫路第一発電所に納入した。同年、高効率で負荷運用性に優れた1軸形コンバインドサイクル発電設備として、中部電力株式会社川越火力発電所にMS7001FA形を7台納入した。1998年には、九州電力新大分発電所にMS7001FA形を3台納入した。これら1990年納入のMS7001EA形以降のLNG 焚き燃焼器はすべて、日立グループが自主開発した乾式低NOx(窒素酸化物)燃焼器を用いた。また、1,300°C級MS6001FA形をGE社と共同開発し、日立第1号機を2000年に日立臨海発電所に導入した。

3. 日立ガスタービン開発の歴史

3.1 H-25形ガスタービンの開発

出力25,000 kW級MS5001形は熱効率が27%程度であったため、将来、熱効率の面でさらに市場競争力のある機種が必要なることを想定し、同出力級で高効率のガスタービンの自主開発を進めてきた。高性能圧縮機、タービン、および燃焼器の要素開発によって、燃焼器出口温度1,260°Cの25,000 kW級高性能ガスタービン(H-25形)を1988年に開発した。圧縮機は、研究設備において検証されたモデル圧縮機を比例拡大したものであり、圧力比15

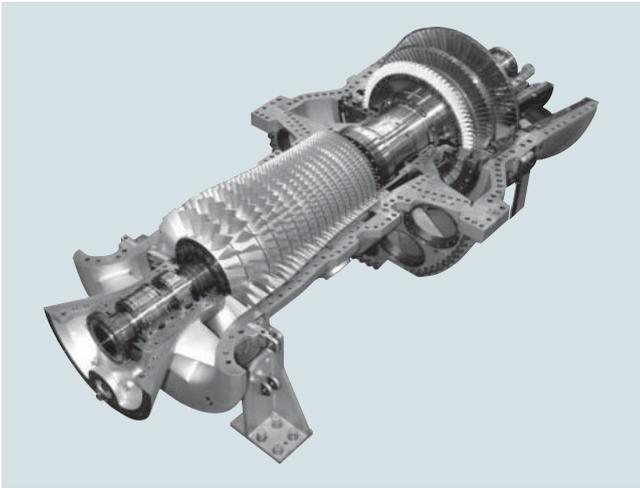


図3 | H-25形ガスタービン
H-25形ガスタービンの上半ケーシング開放時の外観を示す。

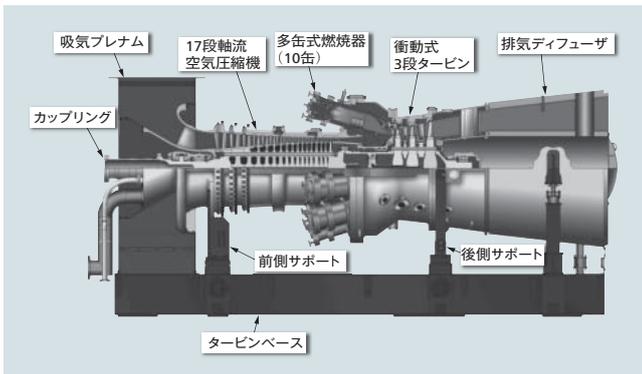


図4 | H-25形ガスタービンの断面図
H-25形は、日立グループが本格的に自主開発を行った初のガスタービンである。この3年後に、比例縮小機であるH-15形を開発した。

の軸流圧縮機を用いた。初号機をLPG・A重油焼きコージェネレーション発電設備として、出光興産株式会社徳山製油所に納入した。燃焼器は拡散バーナ付き標準型であり、蒸気噴射付きであった(図3, 図4参照)。

3.2 H-25形ガスタービン技術

(1) 圧縮機

ガスタービンの高効率化に向け、圧縮機には圧力比と効率に関して高い性能が要求される。また、圧縮機開発では旋回失速やサージングといった不安定現象の防止が課題であり、起動から停止に至るまでの広い流量範囲で安定して運転できる信頼性の確保が必要である。多段軸流圧縮機の性能と信頼性を両立する設計技術を確立するために圧縮機の自主開発を進め、1983年に17段で圧力比15という、当時としては高圧力比の多段圧縮機を試作し、目標性能を達成した。また、試作機での実測値を基に旋回失速の特性を解明し、多段圧縮機の設計技術を確立した。

H-25形ガスタービンの軸流圧縮機は、この試作圧縮機の相似設計をベースに開発した。その後、さらなる高効率化が要求され、世界最高レベルの高圧力比をめざした軸流

圧縮機(平均段圧力比1.19)の開発に着手した。この圧縮機の空力性能と強度信頼性の実証を目的として1999年に全段縮小モデル機を試作し、実証試験では目標性能をほぼ達成し、高圧力比、高負荷化の設計技術を確立した。開発には遷音速段の設計技術に加え、多段の流れ解析を適用し、圧縮機翼列のマッチング評価によって高性能化を図った(図5参照)。

(2) タービン

H-25形ガスタービンのタービンは3段で構成される。第1段翼の冷却構造を図6に示す。第1段静翼はインピンジメント冷却、フィルム冷却、および後縁部のピンフィン冷却を組み合わせた冷却構造で、高い冷却効率を達成した。第1段動翼の冷却構造には、開発当時としては最新式のリターンフロー方式を採用した。冷却流路内部の表面にはタービュレンスプロモータを設け、冷却空気を大量に消費することなく高性能化をめざした構造とした。

(3) 燃焼器

H-25形ガスタービンに搭載のLNG 焼き低NO_x燃焼器の概略構造を図7に示す。1,300°C級ガスタービンに搭載

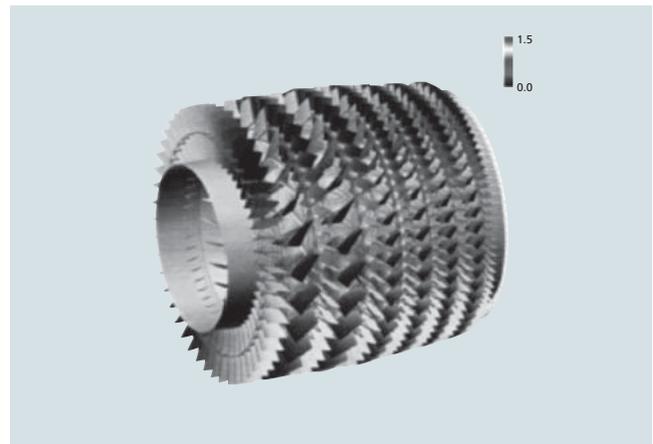


図5 | ガスタービン用軸流圧縮機の多段流れ解析の例
ガスタービンの高効率化には、圧縮機の高圧力化、高負荷化が必要である。

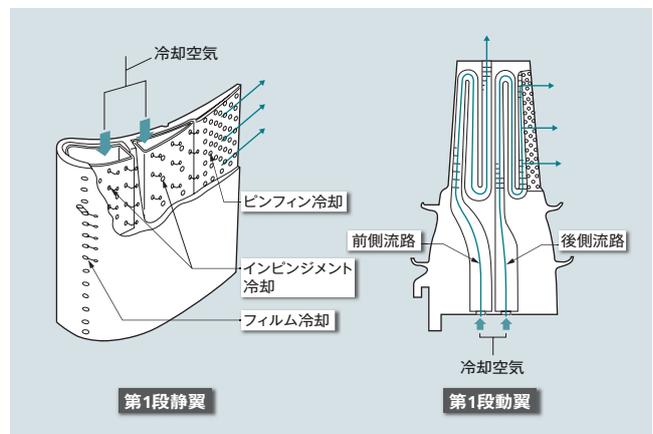


図6 | H-25形ガスタービン用タービン翼冷却構造
第1段静翼はインピンジメント冷却、フィルム冷却、および後縁部のピンフィン冷却を組み合わせている。第1段動翼の冷却構造には、開発当時としては最新式のリターンフロー方式を採用した。

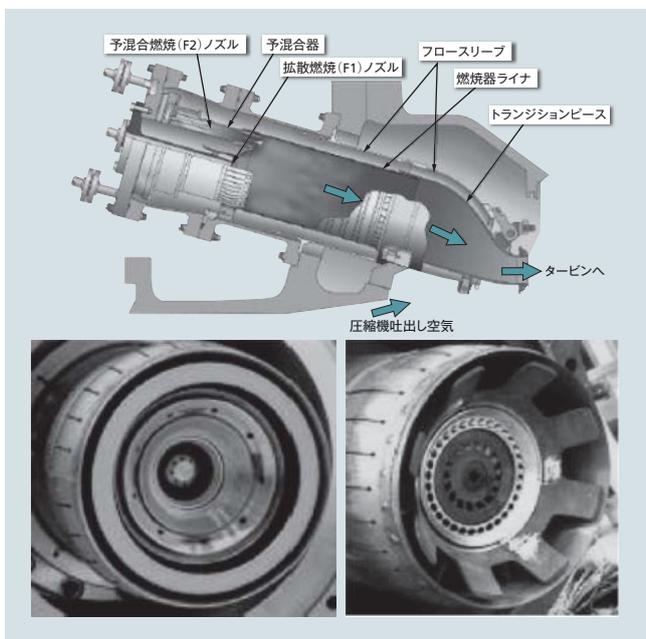


図7 | LNG焚(だ)き低NO_x燃焼器とデュアル焚き低NO_x燃焼器
H-25形ガスタービン用燃焼器の外観を示す。当時、クラストップレベルのNO_x排出量25 ppm以下を実現した。

した第三代燃焼器を縮小設計し、大型機で培った経験と技術を凝縮した。拡散パイロット付き予混合低NO_x燃焼器でリング状の保炎器を踏襲しており、このクラストップレベルのNO_x排出量25 ppm以下を実現した。さらに、燃料多様化対応として、油焚きも可能で、ガス焚き時の性能はガス専焼機と同等のガス・油デュアル焚き低NO_x燃焼器を開発した。この燃焼器では、ガス焚き時には安定に予混合火炎を保持し、油焚き時には空気と油の混合を促進する放射型保炎器を採用し、ガス・油の単独燃焼時、混焼時、燃料切り替え時の安定燃焼を実現した。

4. ガスタービンビジネスの拡大

4.1 海外ビジネスの拡大

H-25形ガスタービンは、1988年の初号機納入から約10年間は、主に国内石油化学会社向けのコージェネレーション用として納入された。一般にガスタービンのユーザーは実績を重視し、新しい機種への導入には慎重になる傾向にある。とりわけ、同クラスのベストセラー機であるGE社のMS5001形ガスタービンの存在は大きく、営業、技術、設計が一体となった拡販活動が開始された。H-25形ガスタービンは2000年、日本での約10年間の経験と実績をベースに、海外向け初号機の韓国への納入を実現し、以降、世界各国に数多くの納入実績を重ねてきた。現在、H-25形/H-15形ガスタービンは高性能、高信頼であることが評価され、累計受注台数は150台を超える。また、総運転時間も140万時間を超え、世界各地で順調に運転中である(図8参照)。



図8 | 日立ガスタービン開発の歴史
2012年5月までの国内外におけるH-25形ガスタービンの納入実績を示す。最低気温-48℃の極寒のロシアから、気温が50℃を超えるイラクまで、さまざまな環境の下でH-25形ガスタービンは順調に運転を続けている。

4.2 H-25形ガスタービンのアプリケーション

H-25形ガスタービンは、電力会社から石油化学会社まで、多彩なアプリケーションが特徴である。

近年の電力会社向けの適用例として、2007年に運転開始したハンガリーE.ON社ハンガリーNYKCE (Nyíregyházi Kombinált Ciklusú Erőmű) プロジェクトがある(図9参照)。NYKCEプロジェクトは、H-25形ガスタービン1台、追い焚きバーナ付き排熱回収ボイラ1台、蒸気タービン1台から構成される多軸コンバインドサイクルプラントである。送電端コンバインドサイクル出力は、29.5~49.5 MWである。このプラントは、ガスタービンの排熱を利用して地域暖房用温水を供給するとともに、付近の工場向けに26 bar (1 bar = 0.1 MPa) の高圧蒸気と7.5 barの低圧蒸気を供給する熱電併給システムであり、89.3%のコージェネレーション効率を持つ高効率プラントである。さらに、環境面においても、低NO_x型燃焼器を採用し、定格運転時25 ppm (Dry) 以下 (15% O₂換算値)



図9 | ハンガリーE.ON社ハンガリーNYKCEプロジェクト
この発電所は系統に連系されており、付近にある工場に電源を供給するとともに、暖房熱源を供給するために建設された。

を達成している。

石油化学会社向けの適用実績には、ペトロチャイナ社のベタラ地区ガス田開発プロジェクトがある(図10参照)。このプロジェクトは、インドネシア共和国スマトラ島内にあり、電力系統から遠く離れているため、H-25形ガスタービン3台をサイトの電源設備とする、アイランドオペレーションの形をとる。このサイトには、数千キロワットクラスの多数の電動機駆動圧縮機がある。従来、これらの圧縮機駆動設備は機械駆動型ガスタービンを用いるのが主流であったが、運転やレイアウトの容易さ、メンテナンス作業の軽減、予備品の負担軽減、およびコストダウン効果などのメリットが評価され、電源設備をH-25形ガスタービンに集約する提案が認められた。圧縮機をすべて電動機駆動に変更することで、システム全体としての運用性も高められた。

H-25形ガスタービンは、世界の主要なLNG基地においても活躍している。エジプトのダミエッタプロジェクト、ロシア連邦のサハリンIIプロジェクト、ならびにナイジェリアのポニープロジェクト向けに12台の納入実績を重ね、製油所、肥料プラント向けを含めたOil & Gasの世界において、安定した性能、信頼性が高く評価され、全受注台数の半数を占めている。

このうち、ロシア連邦のサハリンIIプロジェクトは、外気温度が -48°C にもなる寒冷地に適用した例であり、排熱回収装置を含めてH-25形ガスタービン4台が屋内設置となっている(図11参照)。4台中2台にガス専焼の乾式低 NO_x 燃焼器を採用し、残り2台にガス・油のデュアル乾式低 NO_x 燃焼器を採用することにより、プラント運用性の向上を図っている。

中東地区においては、一般財団法人日本国際協力システ



図10 | インドネシア共和国ペトロチャイナ社ベタラプロジェクト

近隣の数十か所のガス井からのガスと液をパイプラインで受け入れ、気液分離した天然ガスを精製する設備である。プロセスガス中の水分を除去するドライヤの吸着材(Molecular Sieve)を再生するために高温のガスが必要とされ、H-25形ガスタービンの排熱を利用している。

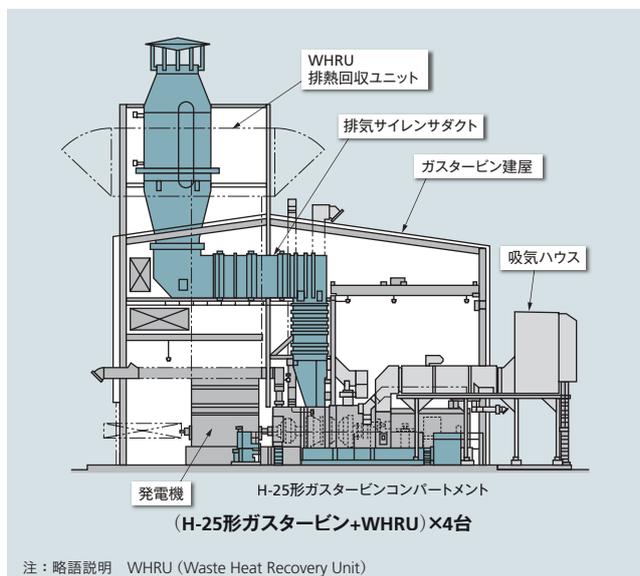


図11 | ロシア連邦サハリンIIプロジェクト

H-25形ガスタービンとして寒冷地向けの事例となった。

ムから、イラク戦争後の復興事業としてイラク向け天然ガス・軽油燃焼H-25形ガスタービンを受注した(図12参照)。2007年にタジ発電所に3台、2008年にモスル発電所に2台を納入した。治安上の問題を背景に、日本からイラク国内のサイトに据付け・試運転指導員を派遣することができなかったため、ガスタービンの遠隔据付け・試運転を試みた。現地作業は必ずしも順調には進まなかったが、プロジェクトに参加したイラクの人々のみずから手で建設するという意気込みと、イラク復興のために貢献したいという日立グループのエンジニアの思いが結実し、運転開始にこぎ着けることができた。



図12 | イラク復興支援プロジェクト

日立グループの指導員を派遣せず、イラク人のみで据付けから試運転までを完遂した。

5. 近年の動向

5.1 H-80形ガスタービンの開発

H-25形で培った技術を基にH-80形ガスタービンを新たに開発し、2010年、九州電力新大分発電所に納入した(図13参照)。新大分発電所1号系列は1991年に運転開始したコンバインドサイクル発電設備であり、最新の発電設備と比較すると効率が低く、主に負荷調整用として運用されていた。そこで効率と利用率の向上をめざし、ガスタービンのリプレースを提案した。これにより、プラント効率で3% (絶対値) の向上を図ることができ、さらに、CO₂削減にも大きく寄与した。今回は、顧客ニーズにより、ガスタービンのリプレースだけで効率を向上するために、軸出力の変更をせずに既設配置へ納める必要があった。このため、圧縮機駆動軸(回転速度:4,580/min)と出力軸(回転速度:3,600/min)の回転速度が異なる2軸構造を採用した。H-80形は、世界最大容量^{※)}の2軸型ヘビーデューティ(重構造)形ガスタービンでもある。

※) 2012年10月現在、日立製作所調べ。

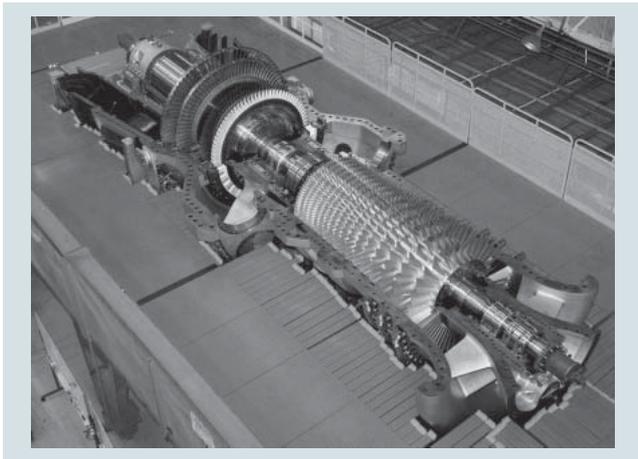


図13 | 九州電力株式会社新大分発電所に納入したH-80形ガスタービン世界最大級の2軸型ガスタービンである。老朽化したガスタービンの効率向上に貢献している。

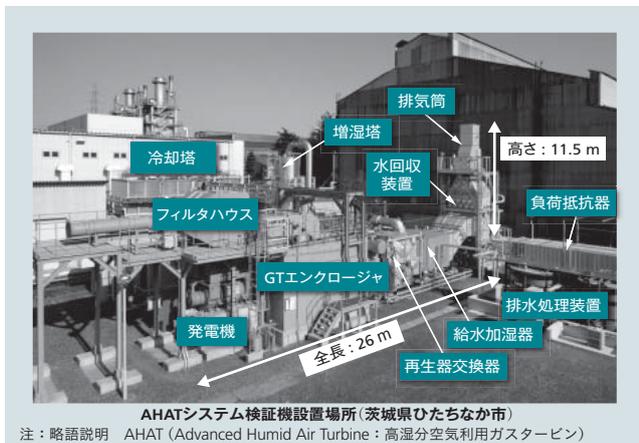


図14 | 高湿分空気利用ガスタービンAHAT 3 MW級システム検証機 AHATシステムの成立性を確認した。

5.2 高湿分空気利用ガスタービン

高効率で運用性に優れたガスタービンシステムであるAHAT (Advanced Humid Air Turbine: 高湿分空気利用ガスタービン)を開発中である。AHATは再生サイクルに改良を加えた新型ガスタービンシステムであり、圧力比と燃焼温度の上昇によらずに高効率化が可能である。また、ボイラや蒸気タービンを利用しないため、高い負荷変化率とフレキシブルな運用が期待できる。これまでに出力3 MWクラスのシステム検証機による試験を行い、システムの成立性を確認した(図14参照)。また、2011年度後半から40 MW級実用化要素技術試験設備による試験を実施中である。

将来、中容量クラスでの市場投入をめざしている。

6. おわりに

ここでは、40年を超える日立ガスタービンビジネスの歴史と、近年の開発動向について述べた。

日立グループのガスタービンビジネスの歴史は、創業時から受け継がれる「開拓者精神」の歴史でもある。今後も中容量ガスタービンのトップメーカーをめざし、さらなるイノベーションにチャレンジしていく。

執筆者紹介



後藤 仁一郎

2000年日立製作所入社、電力システム社 火力事業統括本部 火力事業部 火力グローバル事業推進本部 グローバル戦略企画部 所属
現在、グローバル事業戦略の企画に従事
博士(工学)
日本機械学会会員、日本材料学会会員、日本ガスタービン学会会員



久芳 俊一

1979年日立製作所入社、電力システム社 日立事業所 ガスタービン設計部 所属
現在、ガスタービンの設計および海外受注活動に従事
工学博士、技術士



寺西 光夫

1979年日立製作所入社、電力システム社 火力事業統括本部 火力事業部 火力サービス技術本部 所属
現在、ガスタービンサービスの受注活動に従事
日本ガスタービン学会会員



神野 賢治

1980年日立製作所入社、電力システム社 電力統括営業本部 国際電力営業本部 所属
現在、火力発電設備の受注活動に従事



広瀬 文之

1973年日立製作所入社、電力システム社 火力事業統括本部 火力事業部 火力サービス技術本部 所属
現在、火力発電設備サービスの受注活動に従事