

■ 技術賞内容紹介 ■

1,450°C級ガスタービンの実用化による高効率 コンバインドサイクル発電所の開発

Development of Highly Efficient Combined Cycle Generation Plant, Utilizing 1,450°C-Class Gas-Turbine Unit.

青木 康 芳*・五十嵐 喜 良***・遠 藤 幸 雄**

Yasuyoshi Aoki Kiryou Igarashi Yukio Endo

阿 部 信 志***・山 田 昇*****

Nobuyuki Abe Noboru Yamada

1. はじめに

当社は、電力需要動向とエネルギー情勢への的確な対応を図るため、火力をはじめとして、原子力、水力、地熱など様々な発電方式を組合わせた電源構成を積極的に推進し、長期的な供給力確保と電源の多様化を行ってきた。

また、1984年には、国内で初めて大容量高効率コンバインドサイクル発電プラントとして東新潟火力発電所第3号系列が営業運転を開始し、エネルギーの有効利用やCO₂削減などの地球環境問題に対して積極的に取り組んできた。

このような背景の中で、東新潟火力発電所第4号系列は、ガスタービンのより一層の高効率化、大容量化を図るべく、当社が1989年から6年間にわたり国内ガスタービンメーカー3社と取組んだ「高効率ガスタービンの開発研究」の成果を反映し、事業用発電プラントとしては初めて1,450°C級ガスタービンを導入、発電端熱効率50%以上（高位発熱量基準、以下同様）を達成した。

ここでは、4号系列の半量である4-1号系列が1999年7月8日に営業運転を開始したことから、4-1号系列の計画から営業運転開始に至る経過について紹介する。（写真1）

2. 東新潟火力発電所第3号系列の実績

当社は1984年12月に東新潟火力発電所第3号系列で

* 東北電力(株)火力原子力本部火力部取締役火力部長

** " " " 副部長

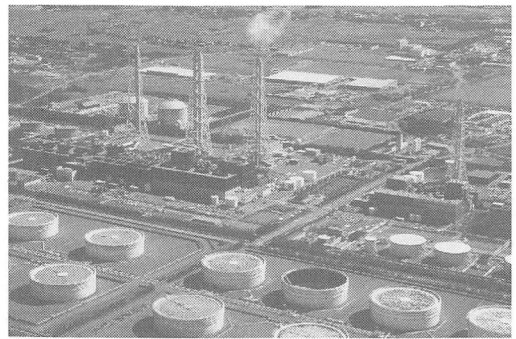
*** " " " 火力建設課長

〒980-8550 仙台市青葉区一番町3-7-1

**** 東北電力(株)副理事東新潟火力発電所長

***** " 東新潟火力発電所建設所技術課長

〒957-0101 新潟県北蒲原郡聖籠町東港1-1-155



（左奥が4-1号系列）

写真1 東新潟火力発電所全景

国内初の大容量コンバインドサイクル発電プラントを三菱重工業(株)と共同で実用化し、営業運転を開始した。

本プラントは総出力1,090MWで、ガスタービン3台、排熱回収ボイラ3台および蒸気タービン1台を組合わせた多軸型構成を1つの系列とした2系列から構成されている。

本プラントでは、低NO_x化を図る乾式予混合燃焼器の開発等によるガスタービン入口ガス温度（以下TITと呼ぶ）1,154°Cの実現や多軸型構成による蒸気タービン大型化・低圧タービン最終段への40インチ翼の採用などにより、営業運転開始以降の総運転時間が11万時間を超えた現在でも、約44%の発電端熱効率を維持しており、電力の安定供給や発電原価および環境負荷の低減に大きく貢献している。

3. 「高効率ガスタービンの開発研究」の概要

3号系列の成功により、国内外を問わずガスタービンを用いた高効率なコンバインドサイクル発電プラントが計画、建設されることとなったが、当社では3号系列の成果に甘んじることなく、さらに高効率のプラント建設を目指し、「高効率ガスタービンの開発研究」

実施について検討を開始した。

当社が本研究の検討を開始した1987年当時の技術レベルでは、ガスタービンの翼材料や冷却技術などの制約から、コンバインドサイクル発電プラントの熱効率は、3号系列で達成した44%程度が限界であった。

一方、ガスタービン開発の歴史は、TITの高温化による高効率化の歴史でもあり、1987年頃の国内外における事業用ガスタービンの開発は、3号系列の1,154℃に対し、1,300℃級を目標に進められていた。

このような状況の中で、当社はプラント熱効率50%以上の達成を可能とする1,500℃級ガスタービンの開発を目標として、実用化に必要な要素技術開発に踏み切った。

また、研究開発にあたっては、3号系列の計画・建設・運転ならびに保守などを通じて培ってきた知見に加え、メーカーが保有する知見や研究設備を最大限に活用し、より効果的な開発研究を進めるため、国内の代表的なガスタービンメーカーである(株)東芝、(株)日立製作所および三菱重工業(株)のそれぞれと個別に研究契約を締結し、1989年4月から1995年3月までの6年間に亘り実施された。

本研究は、1,500℃級高効率ガスタービンの実用化に必要な要素技術である

- ①高性能冷却翼の開発
- ②動静翼用耐熱材料の開発
- ③高温低NO_x燃焼器の開発

の3項目をテーマにして取組んだものであり、それぞれの要素技術の開発を行い、最終的に小型のモデルタービンを製作して、それらの成果を評価し、実用化の目的を得ることができた。

4. 東新潟火力発電所第4号系列の建設

当社では、「高効率ガスタービンの開発研究」で得られた成果を実機へ適用し、高性能・高信頼性さらには経済性を同時に満足する設備として東新潟火力発電所第4号系列の計画を進め、1996年4月に着工した。

本プラントは既設3号系列に隣接して建設し、発電原価の低減や信頼性の向上を考慮して、TITを1,450℃とすることとし、熱効率はコンバインドサイクル発電プラントとして世界最高クラスの50%以上を目指した。

以下に4号系列の概要を説明する。

4.1 発電設備の概要

4号系列は、総合出力1,610MWの大型プラントで

あり、既設3号系列と同様に定格出力時において熱効率に優れる多軸型コンバインドサイクル発電プラントを採用している。

プラントの構成は、ガスタービン2台、排熱回収ボイラ2台と蒸気タービン1台の組み合わせを1つの系列とした、2系列から構成されている。(図1)

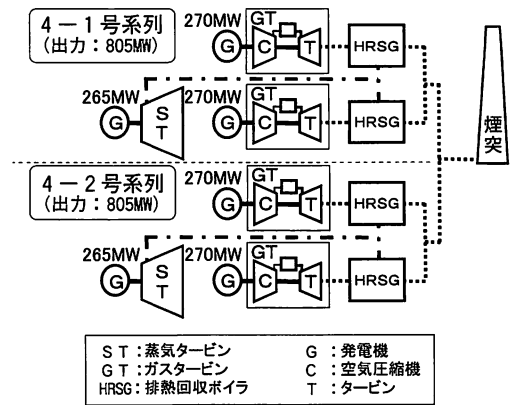


図1 4号系列の構成

主要機器の諸元を表1に示す。

表1 4号系列主機諸元

		東新潟火力発電所4号系列	
系 列		4-1号	4-2号
ガスタービン	種類	開放単軸サイクル一軸形	同左
	出力×台数	270,000kW×2台	
ガスタービン	燃料	液化天然ガス (LNG)	同左
	設計外気温度	-1℃	
	入口ガス温度	1,450℃	
	種類	くし形二流排気式再熱混圧復水形	
出力×台数	265,000kW×1台		
圧力/温度	(高圧) 13.7MPa/566℃ (再熱) 4.1MPa/566℃ (低圧) 0.49MPa/267℃		
排熱回収ボイラ	種類	排熱回収三重圧式	同左
	蒸発量×台数	(高圧) 281t/h×2台	
	圧力/温度	(高圧) 14.1MPa/569℃	
		(中圧) 5.2MPa/295℃ (低圧) 0.64MPa/270℃	

4.2 ガスタービンの特徴

4号系列に採用したガスタービンは「高効率ガスタービンの開発研究」で開発した技術を実用化したものであり、随所にその最新技術を適用している。

事業用ガスタービンの単機出力としては世界最大級の270MW (大気温度-1℃) ガスタービンであり、

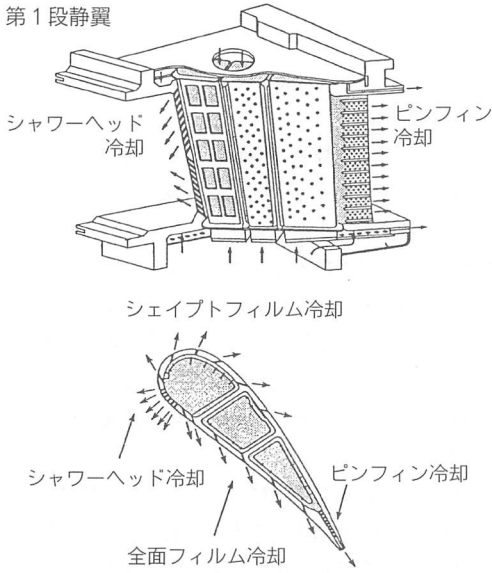
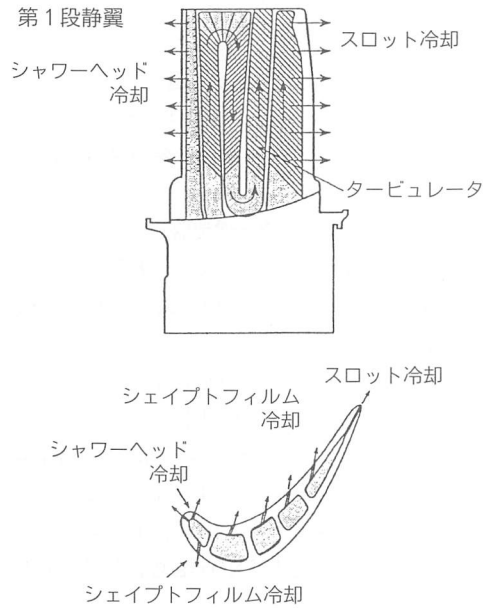


図2 高性能冷却構造



以下の技術を実用化した。

(1) 高性能冷却翼

最も高温の燃焼ガスに曝される第1段階動静翼の冷却手法としては、冷却媒体に従来から用いられている圧縮機吐出空気を使用することとし、より冷却効率を高めるため「高効率ガスタービンの開発研究」にて開発した各種高性能冷却技術を実用化している。(図2)

○ 第1段階静翼

翼内面冷却にはインピンジメント冷却を適用し、後縁部にはピンフィン冷却を用いることで冷却効率の向上を図っている。

翼外面については、シャワーヘッド冷却などを用いた全面膜冷却を適用し、さらにシュラウド部にも全面膜冷却を適用している。

○ 第1段階動翼

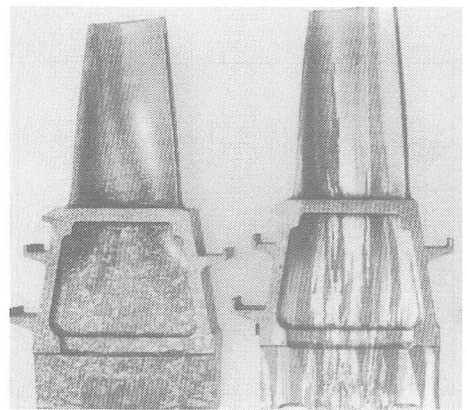
翼内面冷却はサーペンタイン流路構造のリターンフロー対流冷却を適用し、翼内部の冷却通路面には斜めリブの乱流促進体を設置することで熱伝達率を上げ、冷却効率の向上を図っている。

翼外面は静翼同様シャワーヘッド冷却などを用いた全面膜冷却により冷却性能を向上している。

このような最新技術の実用化により、1,300℃級ガスタービンと同程度の冷却空気量で1,500℃級ガスタービンの燃焼ガスに対応することが可能となった。

(2) 動静翼用耐熱材料

回転するローターに装着している動翼にかかる応力



普通鑄造動翼 一方方向凝固 (DS) 動翼
図3 高温耐熱材料

は遠心力が最も大きく、かつ1,000℃以上の高温ガスに曝されるため、特に高温部へ使用される1・2段階動翼は高温クリープ強度の高い材料を必要とする。

このため、1・2段階動翼には従来から使用されている普通鑄造合金 (CC) に代えて、高温強度に優れる「一方方向凝固合金」(DS) の大型化鑄造技術を開発し、実用化した。(図3)

DS翼の適用により、遠心力方向の結晶粒界を無くすることが可能となり、同じニッケル基超合金を用いたCC翼と比較してクリープ強度を向上することが可能となった。

なお、その他の動静翼にも1・2段動翼と同様に高温強度の高いニッケル基超合金を適用した。

また、1, 2段動静翼にはメタル温度低減のために翼の全面にセラミックスによる遮熱コーティング(TBC)を施工し、高温の燃焼ガスから金属材料を保護している。

(3) 回収型蒸気冷却式低NO_x燃焼器

TITの上昇は窒素酸化物(NO_x)の大幅な上昇を伴い、高温化による冷却技術の他に低NO_x化の技術を開発することが重要である。

本プラントでは、従来の1,300℃級ガスタービンで実用化されているマルチノズル型乾式低NO_x燃焼器を基に、ノズル、スワラー、燃焼器形状および燃焼器内部流れの最適化などの様々な改良を施し、さらなる高温化・低NO_x化を図るため、NO_x発生が少ない予混合燃焼比率を高めた乾式低NO_x燃焼器を開発・実用化した。

本燃焼器の最大の特徴は、燃焼器壁面の冷却媒体に世界で初めて蒸気を採用した点である。(図4)

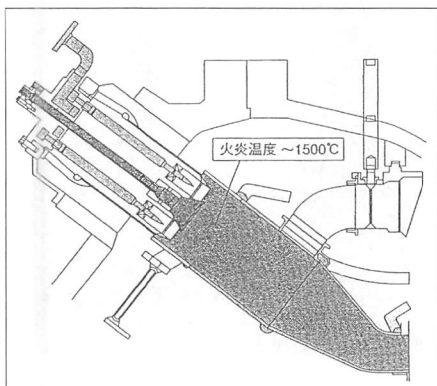


図4 蒸気冷却式燃焼器

従来の空気冷却を用いた燃焼器では、壁面を空気冷却するため、燃焼器外側から燃焼器内側に空気を流し込み、壁面を空気冷却しつつ、内壁面に空気の膜を構成することで、冷却効果を高めていた。

このため、燃焼ガスが冷たい空気と混ざること、燃焼器を出るまでの間に燃焼ガスの温度が低下し、火炎温度に対して、TITが大きく低下していた。

そこで燃焼器壁面を空気ではなく蒸気で冷却し、かつそれを回収することにより、空気希釈による燃焼ガス温度の低下を抑制し、火炎温度を従来並みに抑えつつTITを上昇させることが可能となった。

加えて、冷却に用いた蒸気を蒸気タービンの駆動に用いることにより、熱エネルギーとして有効的に回収し、プラント全体での熱効率向上に努めている。

(4) 枚数低減翼

ガスタービン動静翼の設計に際しては、最新の数値解析技術を用いて完全3次元形状設計を行った。

これは航空機用小型ジェットエンジンのタービン翼に適用されていた技術を大型翼に反映したものである。

この技術の適用により、翼の空力特性が向上し、翼1枚当たりで受ける燃焼ガスの作用力を増加させることが可能となり、動静翼の枚数を低減しても、従来設計翼を用いたガスタービンと同等の性能を得ることが可能となった。

この枚数低減翼の適用により、従来設計翼に比べて翼枚数を約20%削減することが可能となり、枚数の低減に伴う冷却空気量の削減による効率向上と、高価なタービン翼の購入コスト低減が同時に達成された。

4.3 蒸気条件の向上

4号系列ではプラント熱効率の向上のため、ボトムサイクルの蒸気条件を3号系列と比較して大幅に向上させている。

3号系列では高圧・低圧の複圧式を採用していたが、4号系列では再熱サイクルを加えて三重圧式を採用した。

さらに主蒸気条件を566℃/13.7MPaの従来型火力発電所並の高温高圧条件とし、プラント熱効率向上を図っている。

他にも低圧蒸気を過熱蒸気条件とし、低圧蒸気タービン最終段に40.5インチのISB翼を採用するなど、ガスタービン以外にも数多くの高効率化技術を導入している。

5. 工場実負荷試験

本プラントに用いたガスタービンは、事業用として世界で初めてTITが1,450℃のガスタービンであることから、発電所搬入前の平成10年5月にガスタービン製作メーカーである三菱重工(株)高砂製作所にて、実機ガスタービン初号機による実負荷試験を実施した。

工場実負荷試験の結果、TIT 1,450℃級ガスタービンに導入した各種の新技术は、以下に示すとおり、計画どおりの性能を有していることが確認された。

加えて熱効率、出力とも計画性能を満足していることから、現地据付後にプラント定格出力、熱効率とも目標を達成できる見通しを得た。

5.1 試験概要

工場実負荷試験はガスタービン単体を対象とした試験で、ガスタービン本体、発電機本体は実機を使用し、起動性能、機械的性能、実負荷性能を確認するものである。

- ガスタービンと発電機は実機と同様の配置（図5）とし、発電機からの発生電力は水抵抗器により吸収し、抵抗器で熱せられた水は冷却塔にて冷却、再循環させる。

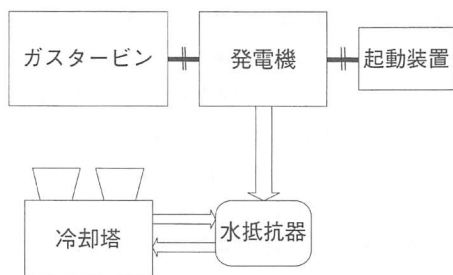


図5 実負荷試験装置構成図

- ガスタービン本体には通常の監視機器の他に特殊計測機器を取付け（約1,400点）、全体性能と、高温部のメタル温度等の各要素性能を計測した。
- 水抵抗器の容量制限から、約50%までの試験を実施した。

5.2 全体性能確認結果

全体性能については、工場実負荷試験での計測結果を、大気圧力、大気温度、吸排気ロスおよび燃料諸元など東新瀉火力発電所の現地条件に補正し、計画負荷特性と比較評価を行うことにより、定格出力での全体性能を予想し、評価を加えた。

○ 熱効率

試験時の各負荷での熱効率を現地条件に換算した結果、計画と同等の結果が得られ、本ガスタービンが計画性能を満足していることを確認した。

○ 出力

熱効率の場合と同様の比較評価を行ったところ、換算後の出力特性が計画特性とほぼ一致し、TIT1、450℃、大気温度-1℃の計画条件にて定格出力270MWを達成できる見通しを得た。

○ 環境諸元

排ガス流量・温度、NO_xなど、環境諸元についても計画を満足し、プラント全体して問題が無いことを確認した。

5.3 特殊計測結果

工場実負荷試験では、タービン動静翼や燃焼器などの高温部品を中心に、メタル温度などの特殊計測を実施した。

工場実負荷試験時の最大負荷における計測結果を基に各部の冷却効率を算出し、実機定格出力である270MW時の各部温度を推定した。

この結果、工場実負荷試験での動静翼最高メタル温度は1段静翼にあり、換算結果定格出力条件でも十分な冷却性能を持つことが確認された。

また燃焼器の蒸気冷却性能に関しても、計画冷却蒸気量にて、冷却蒸気出口温度、燃焼器各部メタル温度ともに計画値を下回っており、定格出力条件でも十分な冷却性能を持つことが確認された。

5.4 燃焼特性結果

ガスタービン運転中におけるNO_x、CO、UHCといった排出ガスの特性についても、良好な結果を得た。

また、燃焼振動に関しても、管理値以下で安定しており、本燃焼器は低NO_xのために予混合比率を大幅に拡大しても、安定した燃焼状態を維持できることが確認された。

6. 4号系列建設工事

4号系列は1996年4月に工事計画認可を受け、同月に着工した。

本プラントは電気事業法改正後、国内で初めて建設されたプラントであり、中間検査省略などの規制緩和を受け、東北通商産業局のご指導の下、工場での当社立ち会いによる検査などにより、設備の保安を確保した上で積極的に新規手法を導入し、発電原価の低減に前向きに取り組んできた。

中間検査の省略により、ガスタービンや蒸気タービン



写真2 ガスタービン搬入状況

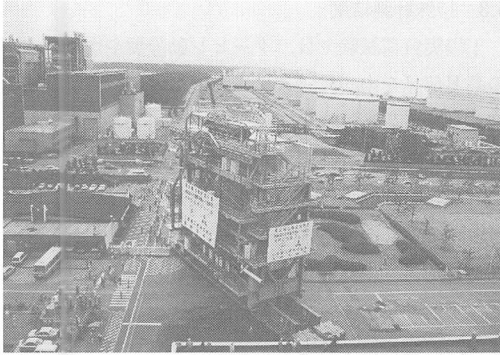


写真3 排熱回収ボイラ搬入状況

ンの据付には、国内で初めて一体型搬入方式を採用し、工場組立てによる信頼性向上・現場据付工事期間短縮を図った。(写真2)

また、排熱回収ボイラはモジュール工法を採用し、合理化に努めた。(写真3)

1基の排熱回収ボイラを縦に2分割して搬入し、1つのモジュールは幅約10m、奥行き約30m、高さ約30mとなり、重量は約1,600トンに達する。

このモジュールを特殊トレーラを使用して、港から発電所構内までの約2kmの行程を2時間半かけて運搬し、据え付け個所に搬入、設置した。

これらの工法の採用により、現地作業数が大幅に削減され、コストダウンとともに現地据付工程の短縮、品質管理の向上が図られた。

7. 現地試運転状況

4号系列の内、半量である4-1号系列は、1998年10月からガスタービン1号機、2号機、蒸気タービンの順で試運転を開始した。

ガスタービンは両機とも定格出力を達成、高温部メタル温度等の特殊計測についても良好な結果が得られ、TIT 1,450℃における動静翼と燃焼器の冷却性能、燃焼器の燃焼特性などが良好であることを確認した。

また、蒸気タービンは1998年12月に通気、初並列を行い、4-1号系列のコンバインド運転を開始した。

1999年2月には、大気温度-1℃にて4-1号系列の定格出力805MWを達成した。

4-1号系列は、引き続きガスタービンの燃焼調整やプラントの各種調整・試験を行い、1999年5月に実施した性能確認試験にて事業用大容量火力発電所としては国内最高、また世界的にも最高水準となる熱効率50.6%を達成した。

その後も4-1号系列は試運転調整を順調に進め、1999年7月8日には東北通商産業局による使用前検査に合格し、営業運転を開始した。

8. おわりに

東新潟火力発電所第4号系列は、当社が6年間の歳月をかけて取組んだ「高効率ガスタービンの開発研究」の集大成として計画した世界最高クラスの熱効率を誇る大容量コンバインドサイクル発電プラントである。

4-1号系列が50%の熱効率を達成したことにより、当社従来型LNG火力発電所の熱効率39%と比較して、4号系列全体で年間燃料使用量を約37万トン削減でき、併せて地球温暖化物質の一つであるCO₂排出量の約22%削減が期待できる。

これは、発電コストの削減と温室効果ガス排出量の削減に大きく寄与できることを意味しており、お客さまに対し安価で、環境負荷の低い、高品質の電気が供給でき、競争原理が導入された電力市場において、当社の競争力強化に大きく貢献するものと考えている。

今後は、既に営業運転を開始した4-1号系列の信頼性の向上と高効率運転維持を図るとともに、4-1号系列で得られた知見を4-2号系列に反映し、建設工事に万全を期す所存である。

最後に東新潟火力発電所第4-1号系列の営業運転開始にあたり、多大なご協力を賜りました関係者各位に、深く感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) Shuichi TAKAHASHI, Nobuyuki ABE, Noboru YAMADA and Hiroyuki MATSUZAKI; Construction of Higashi-Niigata Thermal Power Station, Unit No.4, Proceedings of the International Gas Turbine Congress 1999 Kobe VOLUME I
- 2) 遠藤幸雄; 東北電力(株)東新潟火力発電所第4-1号系列の建設・試運転; 平成11年度火力原子力発電大要旨集