

開発投資拡大と環境保護に貢献する Oil & Gas 市場向けソリューション

Solutions for Oil & Gas Industries under Expansion of Investment Taking Account of Environmental Conservation

宮崎 幸 福島 康雄 久芳 俊一
Miyazaki Tsukasa Fukushima Yasuo Kuba Shunichi
平田 賢 藤原 貴彦
Hirata Ken Fujiwara Takahiko

世界市場に見る長期的なエネルギー消費の拡大により、依然として Oil & Gas 分野での開発投資が活発な中、限られたエネルギー資源の持続的な有効活用や、未利用エネルギーへの開発着手と権益の確保が急務となっている。これらの開発を支える Oil & Gas 生産プラントにおいて、近年ではさらなるライフサイクルコストの削減や、環境に配慮して CO₂ の排出を抑制する、高効率な生産プラントの実現が求められている。

日立グループは主要な機器・システムの効率化や技術開発によって個々の製品価値を高める取り組みと、従来からさまざまな分野で培ってきた省エネルギー技術との融合によるトータルソリューションを提供することで市場ニーズに応えるとともに、地球温暖化防止や環境負荷低減に貢献している。

1. はじめに

近年の Oil & Gas 市場を取り巻く環境は著しく変化している。需要面では、人口の増加と新興国を中心とした経済発展に伴うエネルギー消費の増大に伴い（図1参照）、石油・天然ガス資源の囲い込みをねらった活発な資源外交が展開

されており、供給の面では、限られた Oil & Gas 資源の価値の最大化と持続的な有効活用、未利用エネルギー資源の開発と投資の拡大などが積極的に行われている。

一方、地球温暖化防止や環境負荷低減の必要性により、上流の資源開発の分野から末端の石油・ガス最終製品の生産に至る、Oil & Gas バリューチェーンのすべての過程において、CO₂ の排出量削減と省エネルギーを目的とした対策が急務である。

これらを背景として、日立グループの社会・産業インフラ事業部門において手がける Oil & Gas プラント向けの設備やシステムについても、このエネルギー需要の増大に対応し、かつ環境負荷を低減するといった、相反する市場の課題を共に解決する価値提供が求められている。日立グループでは、これらのニーズに対応する製品の技術開発やソリューションの実現を通して、Oil & Gas 分野への貢献を行っている。

具体的には、生産エネルギー／設備消費エネルギーの削減、稼働率や保守性、設計の自由度の向上によるプラント設備全体の効率化・価値向上を実現するソリューションを広く提供している。

ここでは、プロセス用遠心圧縮機やガスタービン発電設備といった主要な製品における、市場の特徴をとらえた個々の効率改善や技術開発に対する取り組みと、日立グループが従来から手がけてきた省エネルギー技術の Oil & Gas 市場への適用、および、それらの要素を組み合わせたグローバルパートナーとの連携による Oil & Gas プラント設備の最適化ソリューションの例について述べる。

2. ライフサイクルコスト低減をめざす Oil & Gas 向け圧縮機

プロセス用遠心圧縮機は Oil & Gas 分野の各種ガス処理プラントやガスパイプラインなどで広く使用されており、

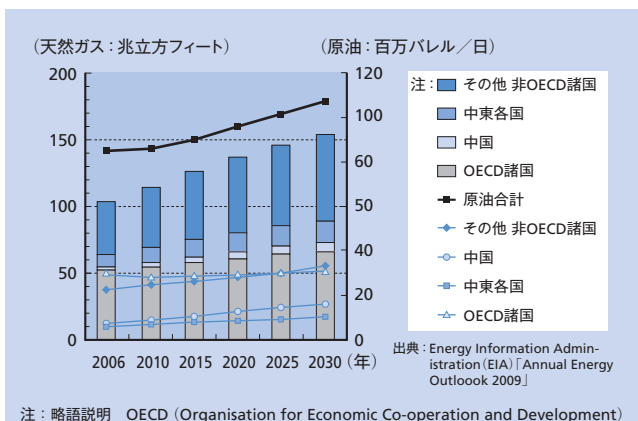


図1 | 石油・天然ガス資源のグローバル需要予測（2006～2030年）
石油・天然ガスともに、2030年は2006年と比較して約1.3～1.5倍の需要が見込まれている。

近年の原油・天然ガス価格の高騰を背景にその需要が拡大している。

この用途の圧縮機では、ライフサイクルコストの削減が重視され、高い効率とともに将来需要にも対応できるように負荷変動許容範囲は大きいことが要求される。これらの要求を満たすためには羽根車を高効率化、広作動範囲化することはもとより、効率的な容量制御方法を確立する必要がある。このニーズに対応するために開発した羽根車およびIGV (Inlet Guide Vane: インレットガイドベーン) 制御による容量制御方法について以下に述べる。

2.1 高効率広作動範囲羽根車の開発

Oil & Gas 分野において、遠心圧縮機は多段で構成される場合が多く、前段では効率を、後段では全体の作動範囲を決定することが知られている。圧縮機内部を流れる流体は、下流側へいくほど密度が高くなるため、後段側の羽根車の体積流量は小さく、低流量係数の羽根車となる。したがって、圧縮機全体として幅広い負荷変動範囲を確保する

ためには、後段側、すなわち低流量係数の羽根車の作動範囲を拡大することが重要である。

従来は二次元羽根車が使用されていた中低流量域において、CFD (Computational Fluid Dynamics) を駆使し、日立グループでは、高効率広作動範囲を実現するために中比速度三次元羽根車を開発した。

二次元および三次元羽根車の形状および適用範囲を図2に示す。新三次元羽根車の空力設計および流体性能は次のとおりである。

(1) 空力設計

新規開発した三次元羽根車の設計例を図3に示す。この開発の空力負荷分布は、従来と比べて入口付近の負荷を大きく、かつ中央付近の最大負荷を低減していることが特徴である。入口付近の負荷を大きくすることで、羽根車前半側で流速が低下し、羽根車の効率を向上させた。他方、羽根車中央付近の最大負荷の低減は、負圧面における最小流速を上昇させ、羽根車内部での失速を抑制し、サージマージンを拡大する。

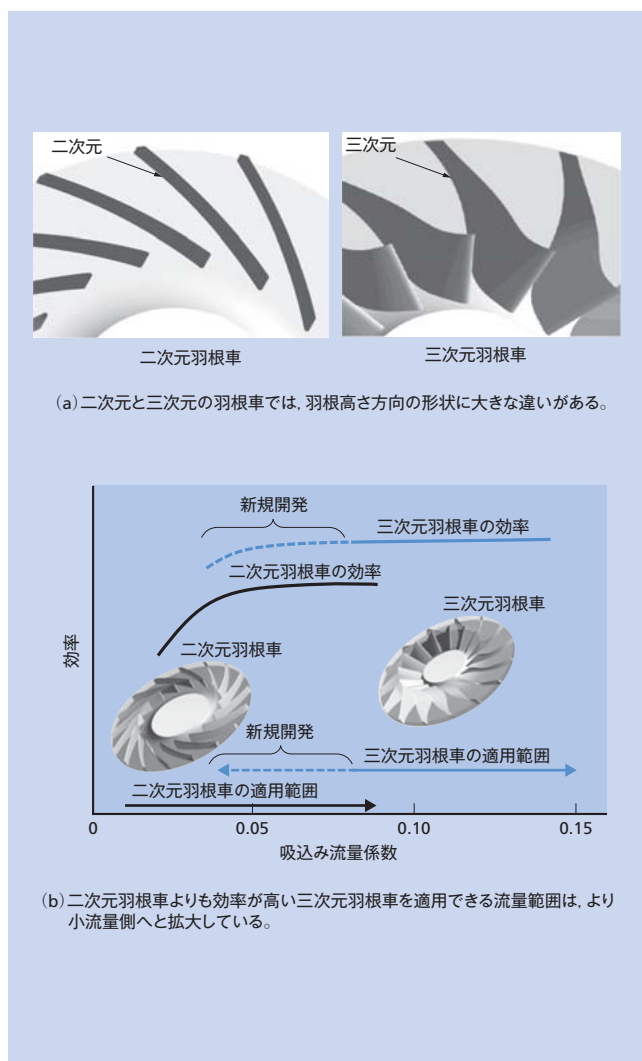


図2 | 二次元および三次元羽根車の形状および適用範囲
二次元と三次元羽根車の形状比較を(a)に、適用範囲の比較を(b)に示す。

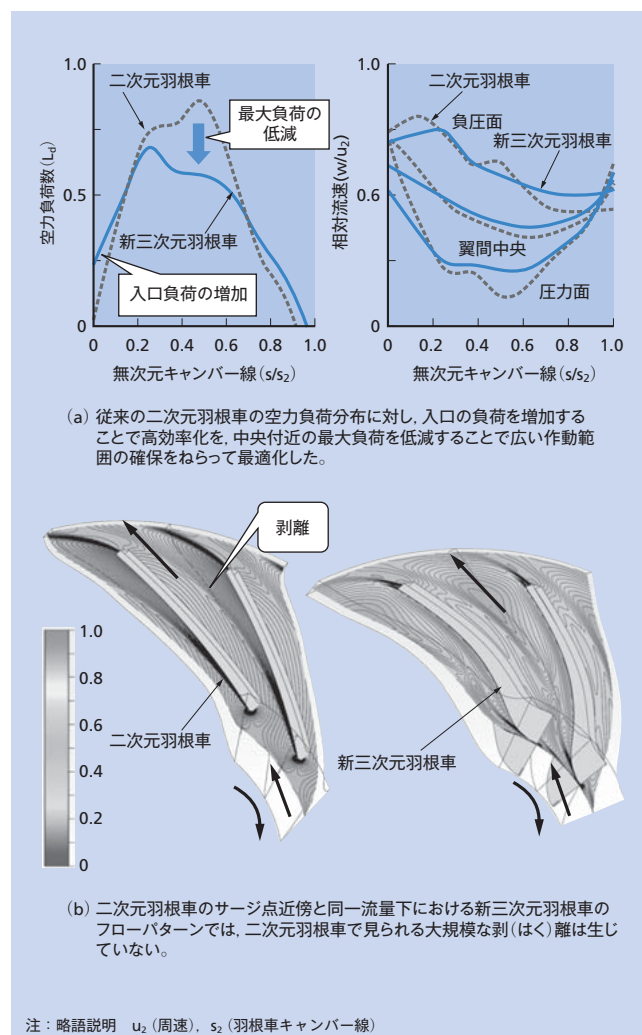


図3 | 二次元と新三次元羽根車の設計の比較
シュラウド側における空力負荷および相対流速分布を(a)に、二次元羽根車のサージ点近傍のミッドスパンにおける相対マッハ数分布を(b)に示す。

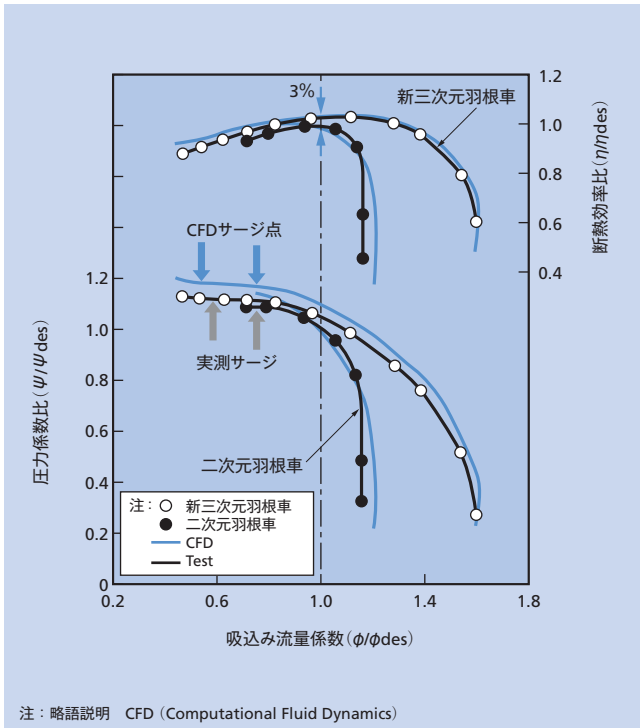


図4 | 二次元と新三次元羽根車の試験結果と性能予測
新三次元羽根車は二次元羽根車に対し、3%の効率向上と2.8倍の作動範囲拡大の両立を達成した。両羽根車のCFDによる予測精度は±5%以内である。

(2) 試験結果

試験で得られた、三次元羽根車と二次元羽根車の性能の比較とCFDによって得られた圧縮機の特性を図4に示す。効率 η および圧力係数 ψ は、二次元羽根車の定格性能で規格化されている。

同図に示されるように、新開発の三次元羽根車は従来型二次元羽根車に比べ、設計点効率が3%向上し、作動範囲が2.8倍に拡大した。二次元羽根車の三次元化と空力負荷分布の最適化を組み合わせることで、大幅な効率向上と作動範囲の拡大をもたらすことができる。

また、CFDは実測の効率および圧力係数の流量特性をきわめて高い精度で予測しており、サージ点に関する予測精度も高い。

2.2 IGV制御

ターボ機械の容量制御方法の一つとして、IGVによる容量制御方法がある。この方法には、次のような特徴がある。

- (1) 圧縮機のヘッドをあまり低下させないで、容量を調節することができる。
- (2) 回転数制御の容量調節方法に比べて、小流量側において広い作動範囲が得られる。
- (3) 吸込み絞り容量調節方法に比べて損失が少ない。
- (4) 定風圧制御では、回転速度制御よりも動力低減効果が大きい。

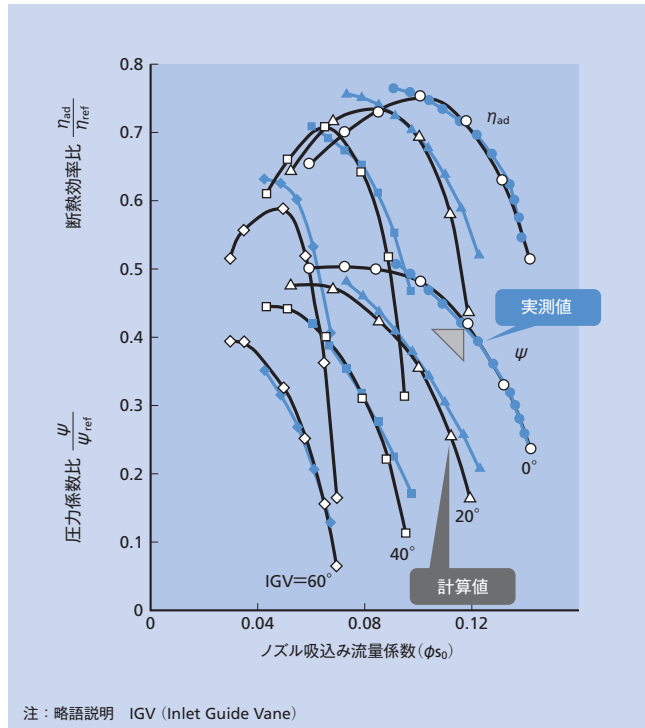


図5 | IGV付き圧縮機の流体性能予測と実測
IGV角度変化による性能の変化を示す。解析結果は実測結果とよく一致している。

本開発は、単段の遠心圧縮機設備を用い、IGV制御時の流体性能変化を解析と実験によって求めた。羽根車を内蔵する吸込ノズルからディフューザ流路までを解析領域として三次元粘性流れ解析を行い、流路形状の最適化を検討するとともに、ガイドベーンによる流れの転向特性、吸込み流路の圧力損失を計算により求めた。その後、IGVを取り付けた単段の圧縮機設備を用いて、ガイドベーン特性の検証を行った。検証の結果を図5に示す。圧縮機の部分負荷特性曲線の予測と実測結果はほぼ一致し、転向角の解析精度も検証できた。

2.3 今後の展開

CFDを活用した空力負荷分布の最適化により、羽根車に関して世界トップクラスの効率向上(当社従来比:+3%)と大幅な作動範囲の拡大(同:2.8倍)を実現した。日立グループでは、仕様選定から図面化までに対応した独自の自動設計システムを構築し、活用している。この開発の成果は、同システムへ組み込みが完了しており、顧客の仕様に応じた高効率・広作動範囲を両立させた圧縮機をきわめて短時間で選定できる。さらに広い作動範囲を確保できるIGV制御の設計法も確立した。これらの開発成果を生かし、Oil & Gas市場や電力負荷に応じた幅広い作動範囲が要求されるCCS (Carbon Dioxide Capture and Storage) 用途に適した高効率、広作動範囲の遠心圧縮機を迅速、タイムリーに提供していく。

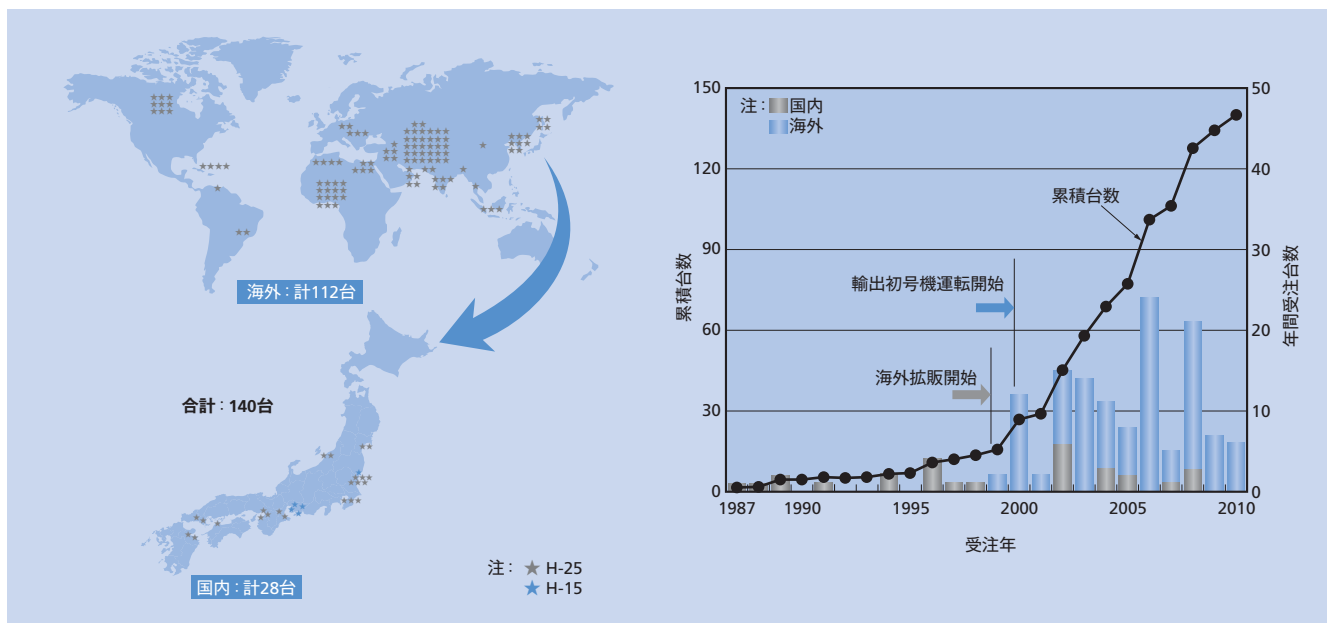


図6 | H-25ガスタービンの受注実績
1987年に初号機を受注して以来、納入台数は累計で140台となっている。

3. H-25ガスタービンのOil & Gas市場への適用

環境保全や省エネルギーに対するニーズの高まりから、近年ガスタービンの利用が急速に伸びている。

これはガスタービンの持つ優位性（高効率・発展性・環境適応性・燃料多様性・運転性）によるものであるが、大型と中・小型においてはマーケットの違いから重要視されるニーズが異なる。

ここでは、Oil & Gas市場において急速に売り上げを伸ばしているH-25ガスタービンについて述べる。

3.1 Oil & Gasマーケットの特徴

3.1.1 信頼性と特殊規格

石油精製所あるいは石油化学プラントにおいてはガスタービンの停止は単に電力の不足にとどまらず、付随するプラントを停止する事態となり、大きな損失に至る。したがって、Oil & Gas分野における最も重要なファクターは信頼性である。いかに高性能であってもフィールドでその信頼性が十分に証明されなければ採用されない。この点は、大出力と高効率を追求し開発競争を行う事業用大型ガスタービンと大きく異なる。プラントを絶対に止めないという思想はプラント構成にも現れる。ガスタービンは部分負荷運用をベースに必要な台数を決定し、さらに予備機を設ける。したがって、4台あるいは5台といったケースが多い。

また、ガスタービンはパッケージデザインとして標準化されているため、工場で負荷運転をして出荷することはまれであるが、Oil & Gasにおいては工場での負荷試験を行って出荷するケースが多く、少なくとも無負荷運転試験が要求される。これはサイトへ不具合を持ち込まないという方

針による。この思想はもちろん機器設計にも適用され、最も厳しいと言われる米国石油協会（API：American Petroleum Institute）規格が適用されるほか、計装システムにおいては徹底した冗長性やモニタリングシステムなどが要求される。

3.1.2 燃料の多様性と環境対策

大型コンバインドシステムの場合、環境対策および効率の面から天然ガスを燃料とし、DLNC（Dry Low NO_x Combustor：低NO_x燃焼器）が用いられる。一方、Oil & Gas分野において、最近では天然ガスが多くなったものの、軽油焚（だ）きや天然ガス／軽油二重燃料あるいはオフガスと、燃料の種別は多岐にわたる。これらの場合、環境対策としてDLNCのほか、水噴射あるいは蒸気噴射が用いられる。ガスタービンは燃焼ガスを直接作動流体としているため、腐食をはじめとする不具合は燃料・燃焼に起因することが多く、Oil & Gas分野では燃料の評価に関する高いエンジニアリング力が要求される。

3.2 H-25ガスタービン

3.2.1 H-25ガスタービンの歴史

1987年の初号機受注以来、累計の受注台数は140台（5台は相似縮小モデルH-15ガスタービン）に至る（図6参照）。

H-25ガスタービンの受注実績をマーケットごとに分類したものを表1に示す。Oil & Gasマーケット向けが過半数を示していることがわかる。

3.2.2 H-25ガスタービンの特徴

H-25ガスタービンは30 MWクラス発電用ヘビーデューティ軸ガスタービンとして、このクラス最高レベ

表1 | H-25ガスタービンの納入先別受注実績
Oil & Gas市場向けが半数以上を占めている。

納入先	台数 (割合)
Oil & Gas	74台 (53%)
電力会社およびIPP会社	48台 (34%)
他産業用	8台 (6%)
地域冷暖房	7台 (5%)
研究・開発設備	3台 (2%)
合計	140台 (100%)

注：略語説明 IPP (Independent Power Producer)

表2 | H-25ガスタービンの主な仕様
長期連続運転に適したヘビーデューティ仕様となっている。

機器	仕様
ガスタービン	ヘビーデューティ型 シンプルサイクル軸形
圧縮機	17段軸流形、圧縮比 14.7
タービン	3段インパルス型 空気冷却翼：1. 2段動静翼
燃焼器	リバースフロー、10缶 標準燃焼器または 乾式低NOx燃焼器 (DLNC)

注：略語説明 DLNC (Dry Low NOx Combustor)

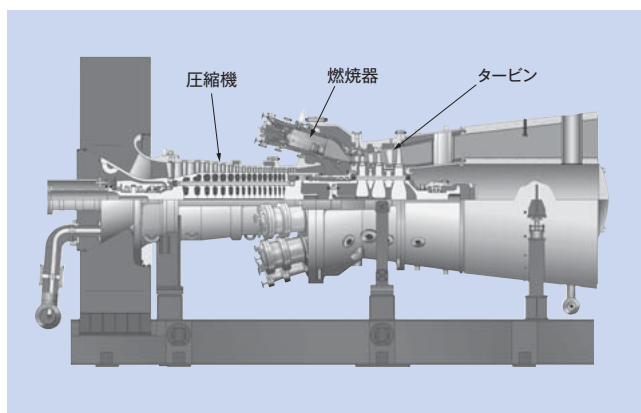


図7 | H-25ガスタービンの断面図
発電用に適した一軸形ガスタービンの断面図を示す。

ルの効率と信頼性を持つ。

H-25ガスタービンの主な仕様を**表2**に、断面を**図7**にそれぞれ示す。

3.3 H-25ガスタービンの適用例

ロシア・サハリン沖で進められている天然資源開発プロジェクトの一つである「サハリンIIプロジェクト」納めのH-25ガスタービンを**図8**に示す。大気温度最低-42℃にもなる環境の中、プラントの電力を供給するだけでなく、WHRU (Waste Heat Recovery Unit) に熱を供給することで高い総合効率を達成している。寒冷地域のコージェネレーションシステムに用いられる場合は、WHRUの代わりにHRSG (Heat Recovery Steam Generator) が用いられ、総合効率は80%を超える。

3.4 今後の展開

H-25ガスタービンはその性能および信頼性の高さから大きく受注を伸ばしてきた。その用途はOil & Gasマー



図8 | サハリンIIプロジェクトにおけるH-25ガスタービン
LNG (Liquefied Natural Gas) の安定供給に貢献するH-25ガスタービンの外観を示す。

ケット向けにとどまらず、地域冷暖房システムや一般産業用のコージェネレーションシステムへの適用など幅広い。今後ともそのニーズに対応するために、高効率・高信頼性のさらなる向上に努力する所存である。

4. 高圧インバータによる省エネルギー・CO₂排出削減ソリューション

日立グループは、Oil & Gas分野向けとして、前述のようなプロセス用遠心圧縮機、ガスタービン発電設備といった主要設備のほか、これまで培ってきたさまざまな製造業分野での省エネルギー提案のノウハウと実績を生かし、Oil & Gasプラントの既存設備を対象とした省エネルギーソリューションを積極的に展開している。以下にその概要を示す。

4.1 ユーティリティ補機設備の省エネルギー

日立グループは、ファン・ポンプ・ブロワといったユーティリティ補機設備へのインバータ適用による省エネルギー性評価を行っている。補機設備へのインバータ導入は、プラント定期補修の時期によらず、設備の部分停止での対応が可能な場合が多く、熱源設備や受変電設備への影響が少ないため、既存のOil & Gasプラントでも幅広い適用が可能である。

まず、対象プラントの設備リストからインバータ化の候補設備を絞り込み、実際の稼動状況を調査したうえで、インバータ化による省エネルギー効果、CO₂排出削減効果、投資効果の評価を行う。また、単なる導入効果の評価だけではなく、インバータ導入に伴い懸念される技術的な課題(例えば、インバータトリップ時の風量変動への影響およびその対策など)にも評価を加え、総合的な省エネルギー改善提案を行うことができる。

4.2 圧縮機の電動ドライブ化

これはOil & Gasプラントの主要エネルギー消費源であるプロセス用遠心圧縮機に対して、既存の蒸気タービン駆動からモータ駆動化した場合の効果を算定し、評価・更新の提案を行うものである。前述の補機設備と比較して、大きな省エネルギー・CO₂削減効果が見込めるが、電力供給設備の増強や、熱源設備の集約化など、総合的なエネルギーバランスの検討と評価が必要である。

日立グループは、対象プラントの蒸気フローおよび運転状況から電動化による蒸気バランスの変化を考慮に入れたうえで、省エネルギー効果の評価を行う(図9参照)。

4.3 CO₂削減効果の評価

海外のOil & Gasプラントでは、電力・ガス・燃料油などのCO₂排出係数が定まっていないケースが多いため、CO₂の排出削減効果を算出するには、プラント内のエネルギーシステムを個別に把握する必要がある。

日立グループは、Oil & Gasプラントの熱源および発電システムの構成、運用状況や使用している燃料の組成を調査し、

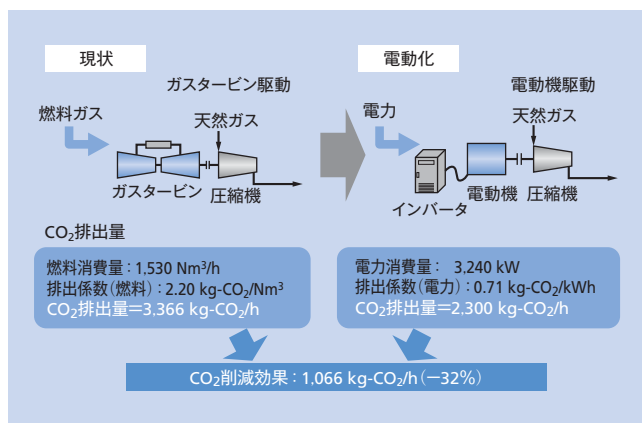


図9 | 既設タービン駆動圧縮機の電動化によるCO₂排出量削減の考え方
電動機容量の適正化による運転効率の向上、およびCO₂排出係数の低い電気エネルギーへの切り替えによりCO₂の排出量を削減する。

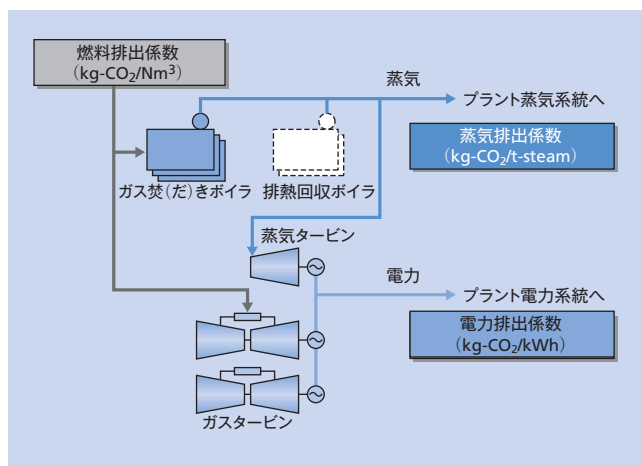


図10 | CO₂排出係数算定イメージ

燃料組成およびプラント内の熱源、発電設備構成、運用状況によってCO₂排出係数を算定する。

CO₂削減効果の算定と評価を行っている(図10参照)。

4.4 今後の展開

既設プラントの省エネルギーと電動化を大規模に実施した場合、所内の電力・蒸気バランスの変化に留意する必要がある。今後は、ガスタービン発電設備や蒸気系統といったエネルギー供給設備全体での改善ソリューションを積極的に展開していく。

5. 中小規模LNGプラントに対するトータルソリューション

近年のLNG (Liquefied Natural Gas: 液化天然ガス) プロジェクトは、年間生産量300万t級以上の大規模天然ガス田の開発が主流であり、それ以下の中小ガス田の開発は採算面での優先順位が低く、必要最小限の開発にとどまり、そのほとんどが商業ベースから取り残されていることが多い。日立グループはグローバルパートナーと共同で、採算ベースに合致したトータル生産効率の高い、年間生産量50万~200万t規模をターゲットとしたLNGプラントの開発に取り組んでいる。

5.1 小型電動LNGプラントの提案

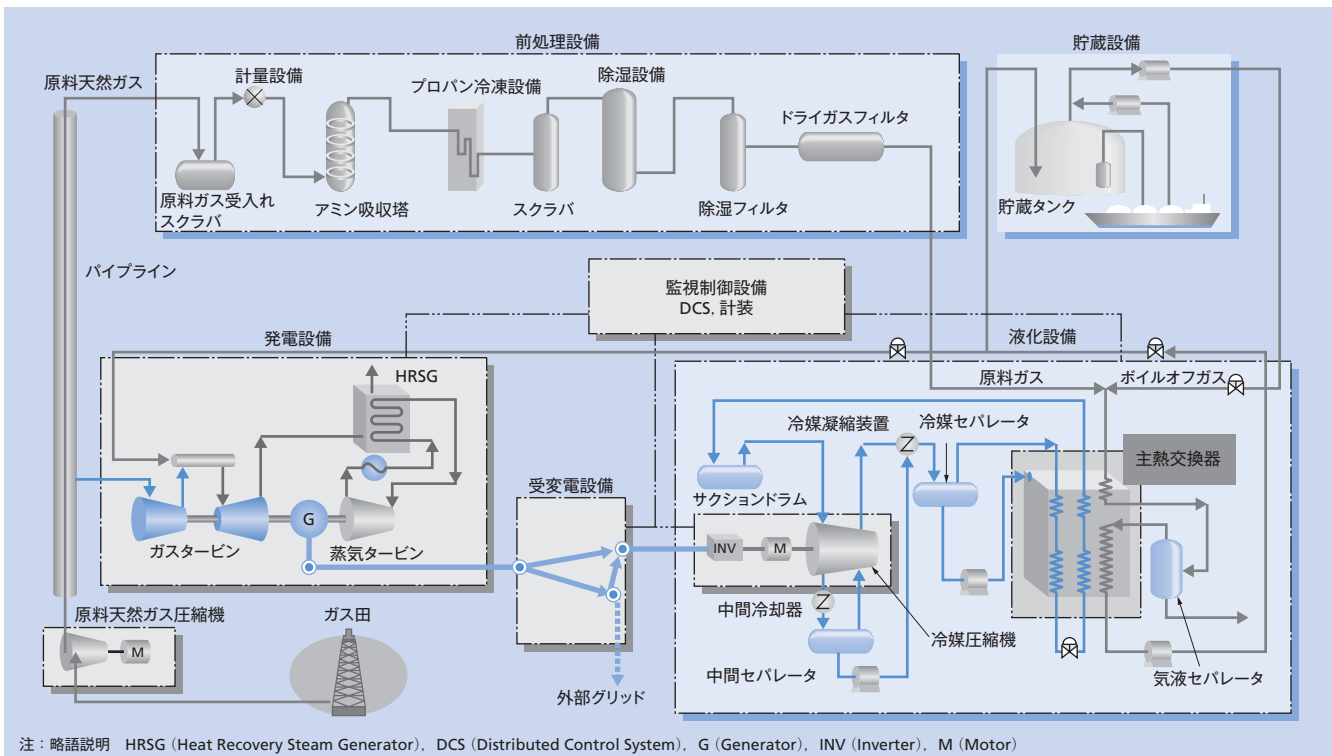
エンジニアリング会社と共同で提案するLNGプラントのフローを図11に示す。

日立グループは、液化設備における冷媒冷却用のプロセス遠心圧縮機とその駆動設備、プラントに電力を供給する発電設備と受変電設備、そしてこれらの設備や液化プロセスの監視制御設備を含めた、機械・電気設備一体のトータルソリューションの提案を行っている。

冷媒冷却用の圧縮機には、モータ駆動方式を採用し小型化を図る。これにより設備のモジュール化が可能となり、プラント建設工事の作業性を高め、工事期間を短縮するなど、トータルコストの低減を図ることができる。

またモータ駆動の場合、ガスタービン駆動に見られるような、定期補修による設備の停止機会が少なく、年間を通じた稼働率を向上させることで、設備のライフサイクルコストを軽減させ、生産物であるLNGそのものの価格競争力を高めることができる。

さらに、モータをインバータで変速制御することで、始動性がよく操作性に富む圧縮機駆動システムを実現することができ、負荷変動が必要な運転パターンにも追従できることから、その消費電力の削減分が省エネルギー効果として期待できる。



注：略語説明 HRSG (Heat Recovery Steam Generator), DCS (Distributed Control System), G (Generator), INV (Inverter), M (Motor)

図11 | 小型電動LNGプラントのフロー
日立グループは、遠心圧縮機と駆動設備、発電・受変電設備、監視制御を含めた機械・電気設備一体のシステムを提案する。

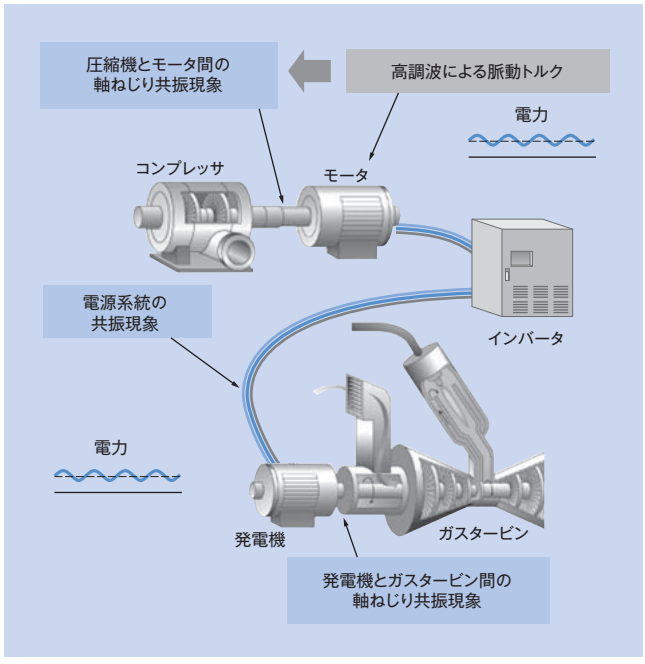


図12 | インバータ制御に伴う共振現象の例
ガスタービンと発電機から成る発電システムとインバータ制御のモータ駆動圧縮機システムの総合制御で発生する可能性がある共振現象を、独自の振動抑制・制御技術で抑制する。

5.2 インバータ制御に起因する共振現象への対応

ガスタービンと発電機から構成される発電システムと、インバータ制御を伴うモータ駆動圧縮機を総合的に制御する場合、以下のような共振現象が発生する可能性がある(図12参照)。

(1) 圧縮機とモータ間の軸ねじり共振現象

電動機電流に含まれる高調波電流が原因で、駆動軸トル

クに発生する脈動トルクの周波数と機械軸系のねじり固有振動周波数が一致すると、共振現象でねじり振動トルクが増大してカップリングの破損など、機械軸系にダメージを与える可能性がある。

(2) 電源系統の共振現象

電源系統の送電線や変圧器、進相コンデンサや高調波フィルタによって共振回路が形成され、この共振周波数とインバータが出力する高調波成分が一致すると受電電圧に過大なひずみが発生し、電源系統に連系する他の設備に対して悪影響を与える可能性がある。

(3) ガスタービンと発電機間の軸ねじり共振現象

モータ駆動圧縮機で構成されるシステムの故障などが原因で、発電システム内のガスタービンと発電機間に軸ねじり共振現象が発生する可能性がある。

さらに、発生した軸ねじり共振がインバータと発電システム間の相互作用によって拡大し、その結果、発電システムの軸を損傷し、寿命を短くするなどの悪影響を及ぼす可能性がある。

日立グループではこれらの現象を事前に想定し、設計段階でのシミュレーション解析を綿密に実施し、その解析結果に基づいて、独自の振動抑制・制御技術を用いた最適設計を行うことで、共振現象を抑え、重大な損傷を回避するシステムを提供していく。

5.3 今後の展開

この規模のLNGプラントは、中小ガス田の商業化を加速させ、同時にCBM (Coalbed Methane: 炭層ガス) などの非在来型ガス資源の開発に適用できるなど、限られたエネルギー資源のさらなる有効活用に貢献できるものである。日立グループは、この生産効率の高い小型電動LNGプラントについて、エンジニアリング会社との共同提案を皮切りに、積極的な展開を行っている。また、発電システムから液化プロセスまでのシステム全体を、グループトータルの技術を結集することにより、今後も独自の最適化設計と価値の提供を追求していく。

6. おわりに

ここでは、開発投資が拡大し、かつ環境配慮を意識したOil & Gas分野に対する日立グループのソリューションメニューの概要について述べた。

Oil & Gas分野は、プラント現場のニーズ把握から技術開発、製品・システムの納入と稼働まで、長期にわたる顧客やエンジニアリング会社およびメーカー間のパートナーシップが重要である。日立グループは、今後も社会・産業インフラ部門の力を結集し、個々の製品単位からトータルソリューションの提供まで、あらゆる場面でこれからの市場ニーズに対して、従来にない取り組みで、いっそう貢献していく。

参考文献

- 1) "Hitachi Groups Activities in Oil & Gas Industry," Hitachi Review, Vol.58, No.1 (2009.1)
- 2) 荒井, 外: 日立H-25ガスタービンの特徴と適用例, 日立評論, 90, 2, 174~179 (2008.2)

執筆者紹介



宮崎 幸

1991年日立製作所入社, 社会・産業インフラシステム社 国際戦略本部 新興国ビジネス推進部 所属
現在, 中東地域における社会・産業インフラビジネスの戦略立案と新規開拓業務に従事



福島 康雄

1973年日立製作所入社, 株式会社日立プラントテクノロジー 社会・産業システム事業本部 所属
現在, 圧縮機・ポンプなどの大型回転機械の技術統括業務に従事
工学博士, 技術士(機械部門)
日本機械学会フェロー, ターボ機械協会会員



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業務に従事
博士(工学)
日本機械学会会員, 日本ガスタービン学会会員



平田 賢

1979年日立製作所入社, トータルソリューション事業部 プロジェクト統括本部 環境エネルギーソリューションセンター 所属
現在, 環境・CO₂排出削減のソリューション業務に従事



藤原 貴彦

1990年日立製作所入社, 社会・産業インフラシステム社 国際戦略本部 新興国ビジネス推進部 所属
現在, アジア・オセアニア地域における社会・産業インフラビジネスの戦略立案と新規開拓業務に従事