巻頭言

特集：電力エネルギーを支える各種発電技術の最新動向

電力エネルギーを支える各種発電技術の最新動向

Recent Various Generating Technologies to support Electric Power Energy

大地 昭生*1
OHJI Akio

電力エネルギーは現代社会の豊かな生活と産業基盤を支えるクリーンで最も使い易いエネルギーである。このエネルギーは石炭，ガス，石油等の化石燃料，或いは太陽光，風力，バイオマス等の再生可能エネルギーから各種エネルギー変換技術により抽出される。電力エネルギーの重要性は，2011年３月の東日本大震災により東北，関東地域で発生した大停電，2018年９月の北海道胆振東部地震により北海道全域のブラックアウトで発生した大停電で再認識された。この発電システムは様々な発電事業者によって運用される現代社会の重要なライフラインである。本特集号はこれら発電事業者の視点から，「電力エネルギーを支える各種発電技術の最新動向」と題して，最近の環境負荷の低減と高効率化，Society 5.0に対応した運転・保守技術の高度化等について紹介する。

まず，最初に環境負荷の低減と高効率化は現代社会にとって解決すべき重要な課題である。最近の相次ぐ異常気象に伴う豪雨災害，大規模森林火災，北極地域での氷河の溶解等，温室効果ガス（主としてCO_2）の削減は地球規模で取り組むべき，喫緊の課題である。化石燃料を使用する火力発電では必然的にCO_2を発生する。化石燃料の中でも天然ガスは石炭に比べCO_2排出量が約40%少ない。さらに，天然ガス焚ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル発電システムを適用することにより，石炭火力に比べ熱効率が20%以上向上する。これにより化石燃料を20%以上節減出来，更にCO_2排出量も半減出来るため環境負荷の低減にも貢献する。今後，温室効果ガス削減の要請は益々強まると予想され，CO_2発生の少ない天然ガス焚コンバインドサイクルの建設は老朽火力のリプレースも含めて増加すると予想される。コンバインドサイクルは高効率化が期待出来る半面，高温で作動するガスタービンと組み合わせているため，ガスタービンの燃焼器，動・静翼等の高温部品は，熱疲労，クリープ損傷，熱衝撃等，苛酷な運用条件に晒される。さらに，最近の太陽光，風力発電等の変動性再生可能エネルギーの増加はコンバインドサイクルに苛酷な運用を強いている。これらは，結果的に機器の寿命を縮め，補修費の増額に繋がる。ガスタービンの高温部品の補修費の低減，定検期間の短縮，運用の最適化がコンバインドサイクルの課題である。

本稿では，コンバインドサイクルのガスタービンの高温部品の補修費を如何に低減させるかを，具体的事例を含めて紹介する。

また，コンバインドサイクルのリプレース事例として東日本大震災の際，導入された緊急電源用ガスタービン（M701F型）を東新潟火力発電所４－１号系列のコンバインドサイクルのガスタービンへ転用した事例を紹介する。東新潟火力発電所４－１号系列は我が国初の熱効率55%（低位発熱量基準）を超える画期的なコンバインドサイクルであったが，その後，開発されたM701F型高効率ガスタービンを転用することにより，熱効率の更なる改善が図られた。更に，最近，ガスタービン入口温度を1650℃に高めた高効率ガスタービンを開発中であり，実証試験を含めて現在の開発状況を紹介する。

次に，Society5.0に対応した運用の最適化，および診断，補修，交換等の保守管理の高度化ついても具体例を紹介する。Society5.0はIoT，AI，ビッグデータの活用等の諸技術が基幹技術となっている。これらの諸技術はプラントの運転監視にも適用され，性能劣化，吸気フィルター圧損増加等の傾向管理，機器の異常の事前予知等にも活用され発電設備の予防保全に効果を発揮している。

ガスタービンの吸気フィルターは圧縮機の性能劣化を抑制する上では重要である。高性能吸気フィルターの構造，性能改善策についても紹介する。

最後にガスタービンの潤滑油は高温で作動するガスタービンにとって，性能劣化は致命的である。潤滑油の特性，性能劣化の判定基準，管理についても紹介する。

以上，「電力エネルギーを支える各種発電技術」の特集号企画の趣旨と概要について紹介した。本特集号の発行に当たり，各専門分野の方々に執筆をお願いした。多忙にも拘わらず快く執筆を承諾頂いた方々にこの場を借りて御礼申し上げたい。

原稿受付　2020年９月１日

＊1　火力原子力発電技術協会　技術顧問
〒105-0014　港区芝2 -31-15
E-mail: aohji@ivy.ocn.ne.jp

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

特集：電力エネルギーを支える各種発電技術の最新動向

ガスタービン設備の保守管理について

Maintenance of Gas Turbines in Combined-Cycle Power Plant

白川 伸[*1]
SHIRAKAWA Nobiru

キーワード：ガスタービン，高温部品，高効率化，コストダウン，ライフサイクルコスト，ユーザ技術,コンバインドサイクル
Key Words：Gas Turbine, Hot Gas Path Parts, High Efficiency, Cost Down, Life Cycle Cost, User's Technology, Combined Cycle

1．はじめに

コンバインドサイクル発電は国内だけでなく海外も含め火力発電設備の主力となっている。国内では1980年代にタービン入り口温度が1,100℃級のガスタービンを採用したコンバインドサイクルが最初に導入されたが，さらなる高効率化の追求による各種の技術革新により，現在は1,600℃級ガスタービンを採用したコンバインドサイクルが営業運転を開始するに至っている。当社では，1985年に富津１，２号の1,100℃級コンバインドサイクルを導入以降，順次より高効率化されたコンバインドサイクル発電設備を採用してきた。至近では2017年に西名古屋７号の1,600℃級コンバインドサイクル設備を運開するに至っており，合計で97台のガスタービンを保有している（Table 1）。

ガスタービンの高効率化によって燃料費の削減やCO_2排出量の削減を達成してきたが，その一方でメンテナンスという観点から見ると保守費用の増大という大きな問題を抱えるようになった。高効率化によるガスタービン燃焼温度の上昇に伴い，材料に求められる高温強度の上昇は，そのまま高温部品の価格上昇につながる。また，部品の寿命途中で必要になる修理においても，コーティング等の新技術に対応した新しい修理技術も必要になることから修理のコストも従来よりも上昇することが避けられない。更に設計上の部品寿命も従来より短く設定されることに加え，修理不可の損傷による廃却率も上がる可能性が高く，各高温部品のライフサイクルコストは従来に比べ上昇傾向にある。

本稿ではこれらの諸課題に対する当社の取り組みやガスタービンの高効率化につながる取り組みについて紹介する。

原稿受付　2020年９月23日
＊1　㈱JERA　O&M・エンジニアリング本部　O&M・エンジニアリング技術部
〒103-6125　中央区日本橋２－５－１
E-mail: Nobiru.Shirakawa@jera.co.jp

2．メンテナンスコスト低減に向けた取り組み

コンバインドサイクル設備のメンテナンスコストにおいては，ガスタービンの主要構成部品である高温部品のメンテナンスコストが大きな割合を占めているため，高温部品のメンテナンスコストをいかに低減できるかが肝要である。本項では，高温部品のメンテナンス費用を低減するための取り組みである「定期的な修理における費用低減」，「寿命取替時期の延伸」，「修理インターバルの延伸」について紹介する。

2.1　定期的な修理における費用逓減

各メーカは高温部品に対して，修理点検インターバル，点検箇所及びそれに対する修理要否判定基準を設定しており，ユーザは基本的にはそれに従って各高温部品のメンテナンス計画を策定し修理内容を決定することになる。

メーカが設定する修理インターバルや修理要否判定基準は，ユーザ毎に個別に設定されているものではなく基本的に同じ型式のガスタービンに対して一律に設定されているものである。今や世界中でガスタービンが使用されているが，ガスタービンが設置されている環境やユーザによる使用条件，運用条件も様々である。例えば使用する燃料についても油とガスの違いがある。また同じガスでも産地によってカロリーや成分が異なったり，同じ産地でも液化されてLNGとして使用されている場合もある。このような様々な条件の違いが燃焼器の燃焼状態にも影響を与え，結果として異なった損傷が発生する場合がある。また，ガスタービンの運用方法も様々で，定格出力による連続運転のケースと，ピーク対応用として毎日起動停止を繰り返すケースでは高温部品を始め，多くの金属材料に与える影響も大きく異なり，実際の損傷として表面化するパターンも異なってくる。

メーカ側もある程度このようなガスタービンの使用方法の違いに対応したメンテナンスの基準を設定しているが，様々な条件に対応したきめの細かい基準ができているとは言えない。開発して間もない機種については，使用実績データも十分に蓄積されていないことから，これらの基準はより安全サイドの保守的な数値に設定されることが多い。この基準値は実際に使用された高温部品を

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

Table 1 Combined-cycle power plants in JERA

系列	ユニット数	ユニット出力 MW	系列出力 MW	熱効率 %（LHV）	運開年度（初軸）	備考
富津１号系列	6	167	1002	51.4	1985	GT更新/一軸型
富津２号系列	7	162	1134	54.3	1987	GT更新/一軸型
横浜７，８号系列	8	377	3016	55.8	1996	GT更新/一軸型
千葉１号系列	4	360	1440	54.2	1998	一軸型
千葉２号系列	4	360	1440	54.2	1999	一軸型
千葉３号系列	3	500	1500	57.3	2014	他軸型（ユニットあたりGT1台）
富津３号系列	4	380	1520	55.3	2003	一軸型
品川１号系列	3	380	1140	55.3	2001	一軸型
鹿島７号系列	3	420	1260	57.2	2012	一軸型
川崎１号系列	4	500	2000	58.6	2007	一軸型
川崎２号系列	2	710	1420	61	2016	一軸型
富津４号系列	3	507	1521	58.6	2008	一軸型
新名古屋７号系列	6	243	1458	54	1988	GT更新/一軸型
新名古屋８号系列	4	400	1534	58	2008	一軸型
上越１，２号系列	4	595	2380	58.5	2012	ユニット出力・熱効率は，ユニット単位 他軸型（ユニット数あたりGT2台）
西名古屋７号系列	2	1188	2376	63.1	2017	ユニット出力・熱効率はユニット単位 他軸型（ユニット数あたりGT2台）
川越３号系列	7	243	1701	55	1996	GT更新/一軸型
川越４号系列	7	243	1701	53.9	1997	一軸型
四日市４号系列	5	117	585	47.3	1988	一軸型
知多６号	1	854	854	43.6	1994	リパワリング
知多第二１号	1	854	854	43.6	1994	リパワリング
知多第二２号	1	854	854	44.1	1996	リパワリング

詳細に評価した結果を基に設定された数値ではなく，あくまでも設計上の解析をベースとした数値が設定されていることが多く，根拠が明確に提示されていない場合がほとんどである。

したがってメーカが設定した修理要否判定基準をそのまま適用した場合，かなり安全サイドな，言い換えれば必要以上に過剰な修理となってしまうケースが多くなる。勿論，使用開始当初はユーザとしてもどのような高温部品のどの部位がどのように損傷して，どのような修理が必要かという知見がないため，ある程度の期間はメーカ推奨通りの修理を行わざるを得ない。特に新しい型式のガスタービンを採用した場合は，高温部品においてもメーカが想定していなかった初期の不具合を生じることが多々あり，想定外の代替部品を用意する必要に迫られるなど，ユーザとしても運用面の対応に追われてしまい，「修理費用低減」という課題まで手が回らないのが実情である。

しかしこのようなメーカが想定していなかった設計に起因するような初期の不具合に対する対応においても全てメーカ任せにはせず，メーカと技術的な議論を継続的に行うことによって各高温部品に対する知識・知見が蓄積される。ガスタービンの運用実績に基づくユーザならではの技術を身につけることができる。

このように当社では，ガスタービン設備のメンテナンスコストの大半を占める高温部品の修理費用を低減させるべく，実機使用部品の損傷状況をベースに様々なリスクケースを想定し，自社独自の修理要否判定基準を制定する取り組みを続けてきた。

リスク想定の基本的な考え方としては，「ガスタービンという回転体に対して飛来物によるダメージを与えないようにする」というシンプルなものである。例えば，燃焼器のある部位にメーカ修理要否判定基準を超えた長さのクラックが確認された場合，

・修理せずに次回点検まで放置し，運転中に更にクラックが進展した場合，どうなるか？
・大きな部品の欠損が発生するか？
・欠損した部品が燃焼ガス流路へ流入した場合，後流側の各部品へどういった損傷を与えるか？

といったようにリスクを想定する。

この程度の内容であれば，高温部品の構造や構成を理解していればおおよそのリスク想定が可能である。勿論，次回の点検時に当社独自の判断で修理を先送りしたクラックの状況確認やその評価が必要である。これまでの当社の実績では独自の修理基準を適用したことによってユニット運用に支障を来すような大きな失敗をした事例はないが，こういった贅肉をそぎ落とす程度の取り組みでも，高温部品の修理費用単価が非常に高額であるために，コスト低減効果は大きく当社のように多数の同型機種を所有している場合は水平展開による大きなコストダウン効果が得られる。

2.2 寿命取替時期の延伸

各高温部品には修理基準と同様にメーカの設定した取替寿命が設定されているが，これも設計ベースの数値であり，各プラントの使用環境や条件によって真の寿命は異なるはずである。真の寿命を見極めるポイントは，以下の３つのパターンになると考える。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

①材料そのものの寿命
（継続使用した場合，実機使用環境下で破損してしまう場合）
②修理不可能な損傷による寿命
（修理によって使用可能な状態に戻らない場合）
③経済性評価による寿命
（修理はできるものの高額な修理費用が発生してしまい，新品に交換した方が経済的にメリットが出る場合）

同じ高温部品でも，燃焼器と動翼，静翼では材料も異なれば，損傷形態も当然異なるので，個別の評価が必要となる。そのポイントは定期的に実施する点検修理の中にあるため，前項での取り組みの延長線上にあると言える。したがって当社では寿命延伸するための試みとして，上記の①～③のパターンを使い分けて寿命クリチカルとなる部位や損傷形態を特定し，必要に応じて実機使用品の破壊検査を行いながら，ガスタービンの型式毎にそれぞれの高温部品に対し評価を行い当社の使用条件，運用条件における真の寿命を見極める試みを行っている。各高温部品の価格は修理費用以上に高額であることから，寿命延伸によるメンテナンスコスト低減効果は修理費用の削減効果よりも更に大きいものとなる。寿命取替時期の延伸によりユニットライフの中での購入回数を低減することができればユニットのライフサイクルコストの低減に大きく影響するため，メンテナンス費用低減のために最も重要な取り組みの一つである。

2.3 修理インターバルの延伸

修理のインターバルを延伸することによって，修理回数が減るため結果としてメンテナンスコストを下げることが可能となる。修理インターバルの延伸には，２つのケースがある。一つは，耐久性の向上された改良品を導入しインターバルを延伸するものである。これについては，既存の部品よりも価格が上昇するのが一般的であり，先行投資による投資回収時期の試算などコスト評価が必要になる。特に既存品が寿命到達前に取替えを行う場合は，インターバル延伸によるコスト低減費用だけでなく既存品の残存価値も評価に考慮する必要がある。また，部品一式を交換するのではなく，部分的に耐久性を向上させる手法もある。例えばコーティングのグレードアップや冷却構造の変更と言ったものである。これらの方法は，通常の点検修理の中で適用可能なものが多く，投資費用としても部品一式の取替えに比べると安価となる。

もう一方は，実機使用品の状態や定期的な修理の状況を評価し部品の改造をすることなくインターバル延伸を行うものである。これに関しては，前項で紹介した自社修理基準への取り組みの延長であるが，実機使用品の損傷状況の把握や設備の運用状況が重要なポイントとなる。

前述の２つのケースは更に２つのパターンに分かれる。一つは定期的なユニットの点検自体を延伸するパターン，もう一方は特定のパーツのインターバルのみを延伸すパターンの２つがある。

前者の場合，高温部品の修理だけでなく，ユニットの分解点検作業も延伸となる（頻度が少なくなる）ため，より大きなメンテナンス費用低減効果が期待できるが，高温部品の評価だけでなく，その他の構成部品や機器の評価も必要になる。

2.4 長期保守契約の活用

長期保守契約とは，長期間にわたって約束した利用率を守るために，メーカ側が高温部品の修理や取り替えを行ったり，ユニットの運転状況を常時監視したりするというものである。その契約条件はユーザとの協議での中である程度個別に決めることが可能となっている。

この長期保守契約は，保有するユニット数が少ない場合，メンテナンスを行う人材を十分に確保できない場合，あるいは使用実績がほとんど無い新機種を導入する場合等には有効な手段と言われている。同型式のガスタービンを多く所有する場合は，予備部品を所有することによって運用面でもリスク回避面でも効率的であるが，保有ユニット数が少ない場合，予備部品を保有することは効率的ではなく，また，人員の面でもユニット数が少ない場合は，定期点検の間隔も空いてしまうため，一定の人員をメンテナンスのために確保しておくことは効率的ではない。

長期保守契約は，利用率が保証されることや支払い方法込みで契約を行うため資金調達などの計画が立てやすい等のメリットはあるものの高温部品等のメンテナンスがメーカ任せとなってしまうため前述したメンテナンス費用削減（修理インターバルの延伸，寿命取替時期の延伸等）の取り組みが困難となる可能性がある。また，長期間契約を結ぶため，一定期間３rdパーティの導入によるコスト削減も見込めないことになる。保有するユニット数やユニットの位置づけ，３rdパーティ環境有無等を勘案し長期保守契約要否の検討を行う必要がある。

2.5 3rdパーティの活用

３rdパーティとは元メーカ（ガスタービン本体製造メーカ）よりも大幅に安価な価格で高温部品の修理や販売を行う会社である。世界的に販売台数も多く，技術面でも成熟している1,100℃，1,300℃級のガスタービンの高温部品を取り扱う３rdパーティは数多く存在している。昨今では，リバースエンジニアリングによってパーツの修理や製造を行うだけでなく，３rdパーティ独自で部品の改良を行う等高い技術力を有した３rdパーティも存在しており，1,100℃，1,300℃級のガスタービンにおいては，３rdパーティによる修理実績もかなり多くなってきている。ユーザにとって安価な修理や購入は魅力的ではあり，３rdパーティによる修理実績が増えてきているため，３rdパーティ採用のハードルは下がってきてはいるものの元メーカと比較し技術面のリスクは高いと言える。従って実際に適用する場合には，技術面の

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

評価を十分に行う必要がある。前述のような高い技術力を有した3 rdパーティを見極めることが，3 rdパーティの活用において重要であり，ユニットの安定稼働かつメンテナンス費用の削減を実現するポイントだと考える。

3．高効率化，高稼働化についての取り組み

当社では運開から約15年以上経過したガスタービンの更新を実施している。ガスタービンの更新を実施した最大の理由は，効率向上（回復）による燃料費の削減である。また，運開後15年程度経過すると経年的な劣化による高温部品の修理費用の増加だけでなく，大規模な点検・修理工事が必要となってくるケースもある。ガスタービンロータの精密点検や車室（ケーシング）の取替え工事がそれにあたる。こういった大きな部品の点検や更新は，費用がかかるだけでなく，その修理期間も長くなる場合が多い。例えば，ガスタービンロータの精密点検の場合，ユーザ自身で分解点検を行う事ができないため，メーカの工場で分解点検を実施するのが一般的である。ユーザ自身で予備のガスタービンロータを保有している場合は予備のガスタービンロータと入れ替え，取り外したガスタービンロータの工場点検を行うことでユニットのメンテナンス期間の長期化を回避することができるが，予備のガスタービンロータを保有していない場合は，ガスタービンロータが点検から戻ってくる間，ユニットの復旧ができないため，ユニットのメンテナンス期間（停止期間）が長期化してしまう。ガスタービン更新を実施する場合は，このようなメンテナンス費用の増加，ガスタービン更新に伴う投資費用と燃料費削減メリットを勘案し，総合的に判断を行う必要がある。

当社では，川越火力３号系列，横浜火力７，８号系列を始め，計35ユニットのガスタービン本体の更新工事を実施しユニットの高効率化に取り組んできた。

ガスタービン本体の更新工事の一例として川越火力３号系列のガスタービン更新概要について紹介する。(Fig. 1，Fig. 2）川越火力３号系列は1996年に営業運転を開始したユニットであり運開から18年程経過していた。これらのコンバインドサイクル発電設備の全７軸について，発電効率の向上（ユニットあたり相対値で1.4％向上）および経年的な使用により劣化した出力の回復（ユニットあたり6,400kW回復）を目的に，ガスタービン本体の取替工事を順次実施してきた。更新工事は2014年から開始し，2017年に最終ユニットの更新が完了している。

また，ガスタービンの高効率化の取り組みには，前述の川越火力３号系列や横浜火力７，８号系列の様にガスタービン本体を一式更新するケースの他に性能向上のために改良された高温部品への取替えを行うケースがある。この場合，ガスタービン本体一式の取替えと比較し，取替え範囲が小さいくなるため安価となる。

Fig. 1 Gas turbine upgrade work at Kawagoe Power Plant (On-site transportation)

Fig. 2 Gas turbine upgrade work at Kawagoe Power Plant (Gas turbine installation)

上越火力発電所では，2016年から2018年の間に順次GE社製７F.03型の高温部品から同社の７F.04型の高温部品（AGP（Advanced Gas Path Parts））への更新を実施した。導入によって夏季出力が63,600kW回復，効率が2.4％向上した。

4．終わりに

コンバインドサイクル発電におけるガスタービンメンテナンスコスト低減方策の取り組みについて紹介したが，自社修理基準作成による「定期的な修理での費用削減」「寿命取替時期の延伸」「修理インターバルの延伸」の取り組み等については，取り組み中の機種もあり今後も継続的に検討が必要な状況である。またこういった取り組みは，前述の通り実機で使用した各高温部品の弱点部位や部品の耐力を適切に把握する必要があるので時間を要する取り組みであるが，引き続きガスタービンメンテナンスコストの低減に対する取り組みを実施していく予定である。

参考文献

(1) 藤井泉，コンバインドサイクル発電におけるガスタービン設備の保守管理，日本ガスタービン学会誌，Vol. 37, No. 1（2009）, pp. 1-5.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

特集：電力エネルギーを支える各種発電技術の最新動向

大型ガスタービンの既存発電設備への有効活用

Effective Use of Abolished Gas Turbine to Power Plant

柳谷 伸[*1]　金谷 政孝[*1]　小山 一直[*1]　高橋 正大[*2]
YANAGIYA Shin　KANAYA Masataka　OYAMA Kazunao　TAKAHASHI Masahiro

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル，効率，廃止電源，有効活用
Key Words：Gas Turbine, Combined Cycle, Efficiency, Abolished power plant, Effective use

1．緒言

東北電力㈱では，2011年３月に発生した東日本大震災で，太平洋側の火力発電所が甚大な設備被害を受けた。

供給力を早期に確保するため，緊急設置電源として，当社４発電所に計５ユニットのシンプルサイクルガスタービン発電設備（東新潟火力港３号系列，八戸火力５号機，新潟６号機，秋田火力５号機，東新潟火力５号機）を設置した（Table 1）。

これら緊急設置電源は，需給ひっ迫時の供給力として，その役目を果たしてきたが，コンバインドサイクル化を行った八戸火力５号機を除いては，その後の電力需給状況の変化に伴い，順次廃止し，2019年３月に秋田火力５号機および東新潟火力５号機を廃止した。

秋田火力５号機および東新潟火力５号機の廃止時点の累積発電時間は，それぞれ約1,400時間，約2,100時間と少ないため，ガスタービンの有効活用方法として，営業運転開始から20年を迎えたコンバインドサイクル発電設備である東新潟火力４-１号系列（Fig. 2）のガスタービンと換装を行うこととした。

廃止した発電用の大型ガスタービンを既存のコンバインドサイクル発電設備のガスタービンと換装すること（以下，転用と称す）は，国内初の取り組みであり，転用するガスタービンを既存設備へマッチングさせるために実施した技術検討および現在までの工事の状況について紹介する。

Table 1　List of emergency installation power plants

	Output	Start Operation	Current status
Higashi-Niigata Minato No.3	26.9MW ×2	2011.8	Abolished (2015.3)
Niigata No.6	34MW	2012.1	Abolished (2015.3)
Akita No.5	333MW	2012.6	Abolished (2019.3)
Higashi-Niigata No.5	339MW	2012.6	Abolished (2019.3)
Hachinohe No.5	274MW	2012.7	Conversion to GTCC (2014.8)

原稿受付　2020年９月24日
＊１　東北電力㈱　東新潟火力発電所
コンバインド技術グループ
〒957-0101　北蒲原郡聖籠町東港一丁目１番155
E-mail: yanagiya.shin.ny@tohoku-epco.co.jp
＊２　東北電力㈱　発電・販売カンパニー
火力部（火力運営）
〒980-8550　仙台市青葉区本町一丁目７番１号
E-mail: takahashi.masahiro.fs@tohoku-epco.co.jp

2．転用の概要

Fig. 1に示すとおり，ガスタービンの発電機，燃料供給設備，排熱回収ボイラー（以下，HRSGと略），蒸気タービンは，既存設備を継続使用し，ガスタービンのみを転用する。

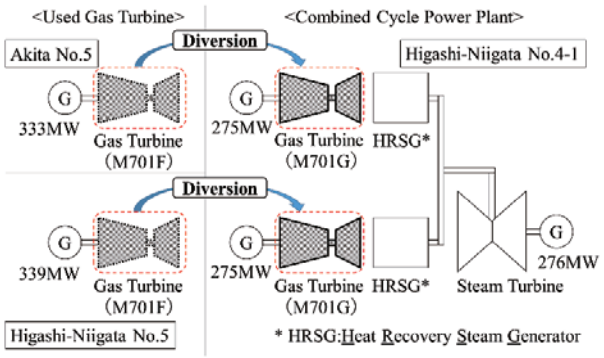

Fig. 1　Planning of the diversion used gas turbine

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

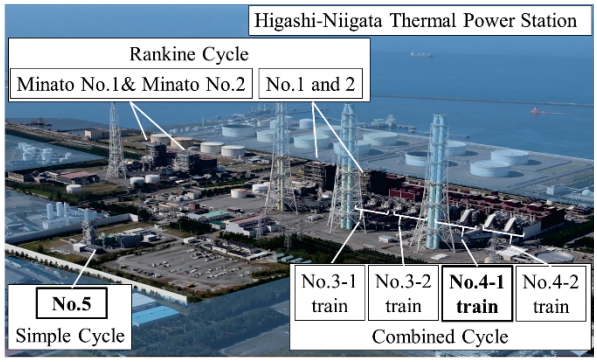

Fig. 2　View of Higashi-niigata thermal power station

3．転用するガスタービンについて

ここで，転用する秋田火力５号機および東新潟火力５号機ガスタービン（以下，転用GTと略）および転用先の東新潟火力４-１号系列のガスタービン（以下，既存GTと略）について紹介する。

3.1　転用GTについて

転用GTは，三菱重工業株式会社（現 三菱パワー株式会社）製M701F形ガスタービンであり，当社が，2010年に営業運転を開始した仙台火力４号機に初号機として開発したガスタービンである。

緊急設置電源は，燃料供給設備等のインフラが備わった発電所に設置したため，秋田火力５号機のガスタービンは軽油焚きの燃焼器を採用し，東新潟火力５号機のガスタービンはガス焚きの燃焼器を採用している。

3.2　既存GTについて

既存GTは，三菱重工業株式会社（現 三菱パワー株式会社）製M701G形ガスタービンであり，当社が，国内重電メーカーと共同で実施した「高効率ガスタービンの開発研究（1989 ～ 1994年）」の成果を反映し，燃焼器に蒸気冷却方式を適用したガスタービンである。

東新潟火力発電所４-１号系列は，1999年に営業運転を開始し，当時のコンバインドサイクル発電設備で世界最高水準の熱効率55％（低位発熱量基準）を達成した。

4．転用による効果について

4.1　出力増加

転用GTの方が単機の出力が大きいため，東新潟火力４-１号系列の発電機容量から最大限の出力増加を検討した結果，Table 2のとおり51.9MWの出力が増加する。

Table 2　Increased output due to diversion

	Before	After
Gas turbine	275MW×2	298.8MW×2
Steam turbine	276MW	280.3MW
Combined	826MW	877.9MW（+51.9MW）

4.2　熱効率向上および環境負荷低減

転用GTは，既存GTの後発機であり，ガスタービン翼や燃焼器の冷却技術が向上しているため，ガスタービン自体の効率が高い。

また，排ガス流量の増加により，HRSG入熱が増加し，蒸気タービン出力も増加することから，コンバインド効率が向上する。

さらに，Fig. 3に示すとおり，ガスタービンローター冷却空気（以下，TCAと略）のクーラーに空冷方式を採用しており，その排熱で燃料ガスを加熱する燃料ガス加熱器（以下，FGHと略）を採用することで，熱効率を向上させている。

これら熱効率の向上により，燃料消費量およびCO_2排出量を，それぞれ年間５％程度削減する。

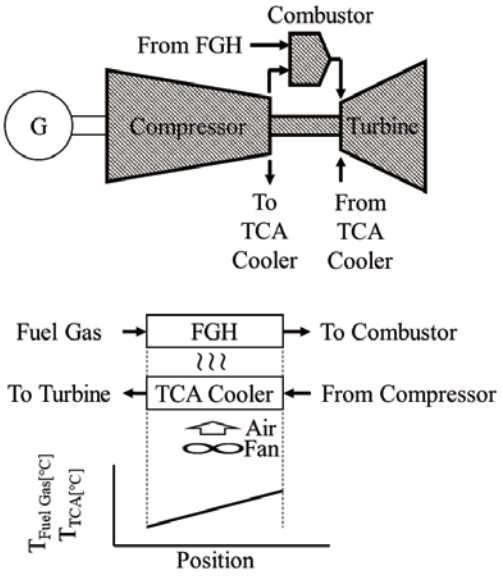

Fig. 3　Schematic of FGH and TCA cooler

既存GTは，TCAクーラーに水冷方式を採用しており，その冷却水を海水で冷却していたため，空冷方式へ変更することで，海水への熱負荷が低減できる。

また，転用GTの燃焼器は，より均一な予混合気を形成可能な燃料噴射ノズルを採用しており，NOxの排出が低減できる。

4.3　運用性向上

既存GTは，東新潟火力４-１号系列の営業運転開始以降，高効率プラントとして，ベースロード運用で運転してきたが，昨今の再生可能エネルギーの導入拡大に対応するための高頻度発停止運用（以下，DSS運用と略）を行うためには設備対策が必要であった。

具体的には，ガスタービン停止後の車室の上下メタル温度差によるキャットバックを防止するために車室内を撹拌する空気供給系統の追設，ガスタービン排気車室ならびに排気室の構造変更による発停止時の熱応力低減対策，起動時における動翼チップクリアランスの裕度を確保するための１，２段翼環の取替が必要であった。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

転用GTは，これら対策が実施済みであり，DSS運用が可能となる。

加えて，既存GTは燃焼器に蒸気冷却方式を採用しており，起動時に燃焼器を蒸気であらかじめ加温する必要があったが，転用GTの燃焼器は空冷方式であることから，蒸気での加温時間が不要となり，起動時間が短縮できる。

4.4　高メタンLNGの安定燃焼

既存GTの燃焼器は，高メタン濃度にて安定燃焼できることを確認しているが，高メタン燃焼時の燃焼振動レベルの増加に対して裕度が少ないことが課題であった。

転用GTの燃焼器は，高メタン燃焼時の保炎性を向上させた燃焼器を採用し，高メタンLNGの燃焼安定性を確保した。

5．ガスタービン転用にあたっての技術検討

既存GT基礎への据付，燃料ガス圧力など，ガスタービン換装の実現性を確認したうえで，最小限の設備改造とし，保護装置および制御装置の設定値の変更を実施した。

5.1　ガスタービン基礎

転用GTを既存GTの基礎に載せた場合の寸法の違いをFig. 4に示す。

軸方向の寸法はほぼ同じであるが，ガスタービンの中心から各サポートまでの鉛直距離が転用GTのほうが155㎜短いことから，各サポートの台板枚数を１枚から２枚に増加するとともに，グラウト厚さの厚くすることにより，既存の基礎および発電機位置にマッチングさせた。

重量については，転用GTの方が13tonほど軽く，柱脚荷重を確認し，既存の基礎に据付できることを確認した。

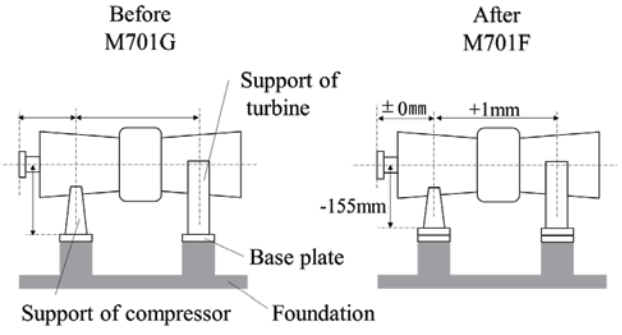

Fig. 4　Difference in dimensions before and after diversion

5.2　必要燃料ガス圧力

東新潟火力４-１号系列の燃料ガスは，発電所に隣接する日本海エル・エヌ・ジー株式会社新潟基地より，３号系列および４-２号系列と同一系統で燃料供給を受けている。

その供給圧力は，４-２号系列の高メタン燃焼に対する裕度確保を目的とした燃焼器改造に合わせ，同社の協力を得て，2019年６月に昇圧した。

昇圧後の圧力が，転用GTの燃焼器内圧およびノズル差圧，配管系統の圧力損失から算出される必要圧力以上であること確認した。

5.3　電気制御設備

電気設備は，補機の追加に伴い所内電源を一部改造したものの，発電機および主回路設備，変圧器設備は継続使用した。

ガスタービン転用に伴いサイリスタ起動装置に必要な出力トルクが変更となるが，既存の出力トルクが，転用GTの必要トルク以上であることを確認した。

一方，サイリスタ起動装置制御盤については，転用GTの着火回転数可変機能に対応する必要があり，東新潟５号機の制御盤を転用し有効活用した。

制御設備は，ガスタービン転用に伴い制御ロジックの変更およびインターフェースの入出力増減などを実施した。

制御方式変更の例として，燃料ガス圧力制御をノズル系統毎の個別制御から共通制御へ変更，燃料ガス流量制御における調節弁差圧制御から前圧制御へ変更などを実施した。

5.4　ボトミングサイクルへの影響

ガスタービン転用により，ガスタービン排ガス量が増加することから，ヒートバランスを再計算し，各部の圧力，温度，流量が，既存の東新潟火力４-１号系列の設計裕度内となっていることを確認した。

既存GTの燃焼器冷却蒸気は，HRSGの中圧蒸気から供給しており，燃焼器の冷却過程で熱回収し，再熱蒸気とともに中圧タービンへ供給していた。

ガスタービン転用による燃焼器の空冷化により，熱回収過程がなくなったため，FGH設置によりプラント熱効率を向上させることとした。

5.5　TCAクーラーの設置場所について

転用GTのTCAクーラーは，設置スペースの観点から，ガスタービンから約90m離れた場所に設置することとした。

このため，TCA配管が長くなり，配管容積が大きくなることで，負荷遮断が発生した際の車室圧力の低下が遅くなり，回転数上昇，燃焼器失火，圧縮機サージに対する裕度が，転用前に比べて低下する可能性があった。

この対応として，負荷遮断時のガスタービン入口案内翼の開度および燃料流量の減調整について，シミュレーションを実施し，最適な設定値を見い出した。

5.6　転用GTと発電機の軸系強度

転用GTと発電機を連結した軸系強度が，送電線事故時（短絡時，再閉路失敗時）に発生する異常トルクに対し，問題がないことを確認した。

6．ガスタービン転用工事について

工事は，2019年８月に電気事業法に基づく変更の工事計画を関東東北産業保安監督部に届出し，2019年10月に

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

工事を開始した。

2020年３月より，東新潟火力４-１号系列の定期点検に合わせて本格工事を開始しており，2020年11月の営業運転開始に向け，現在工事を実施中である。

6.1　ガスタービンの改造

本格工事を開始する前に，転用GTのうち秋田火力５号機ガスタービンについて，軽油焚きの燃焼器から燃焼器バイパス弁機構を備えたガス焚きの燃焼器へ改造を行った。

6.2　ガスタービンの輸送

輸送にあたっては，工期を短くするため，ガスタービンを分解して部品毎に輸送するのではなく，車室にローターを組み込んだ状態で輸送した。

ガスタービンの吊上げはジャッキアップ装置で行い，陸上輸送はトランスポーター（自走式多軸台車）にて実施した（Fig. 5，6）。

転用GTの秋田火力から東新潟火力への輸送は，船舶による海上輸送を行い，積み込み・積み下ろしは1,200トンクローラクレーンにより実施した（Fig. 7）。

ガスタービンを輸送する際，HRSGの配管類や主要変圧器など既設設備が近接する狭隘部を通過することから，事前に輸送経路について，干渉物の有無についてシミュレーションで確認し，HRSG巡視点検用通路が一部干渉することから，当該部を取外して輸送を行った（Fig. 8）。

6.3　ガスタービンの据付

転用GTを既存ガスタービン基礎上へ吊り下ろした後，アライメント調整を行い，発電機ローターとカップリングを結合した。

ガスタービン据付後は，燃料ガスやTCA，潤滑油等の附属配管の接続や計装品の取付を行い，潤滑油配管の取替に伴う消防法に基づく検査および電気事業法に基づ

（Higashi Niigata No.4-1）
Fig. 5　Removal of gas turbine with the Jack-up machine

（Higashi Niigata No.5）
Fig. 6　Loading a gas turbine on a transporter

Fig. 7　Loading a gas turbine on a ship（Akita No.5）

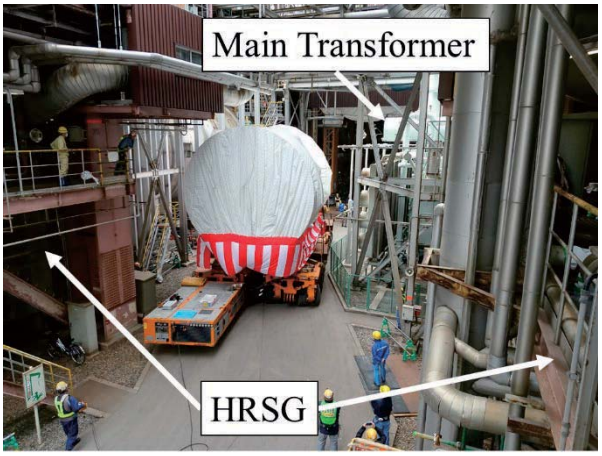

Fig. 8　Transportation of gas turbine

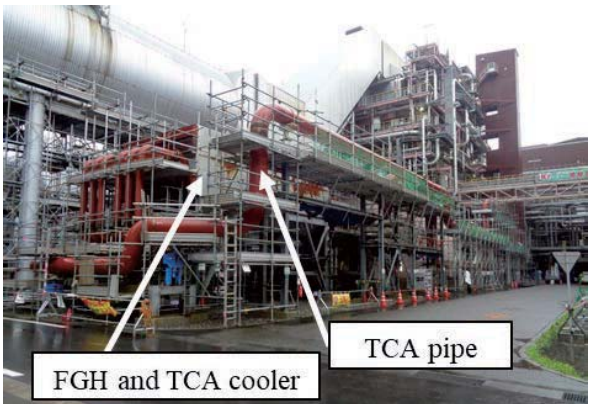

Fig. 9　Installation of FGH and TCA cooler

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

く使用前自主検査を順次実施しながら工事を進めている（Fig. 9）。

6.4 今後の予定

2020年 8 月現在で，概ねガスタービン等の機器の据付は完了している（Fig. 10）。

2020年 9 月以降，ガスタービンの起動および単体での試運転を行ったのち，コンバインドサイクルでの総合試運転を行い，使用前自主検査による技術基準への適合確認を経て，2020年11月に営業運転を開始する予定としている。

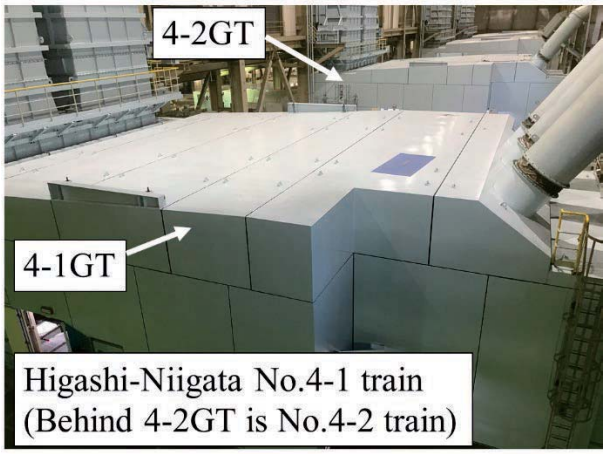

Fig. 10 After installation of gas turbine

7．おわりに

本取り組みは，今後更なる再生可能エネルギー導入拡大が行われる中で，天候の変化による負荷変動対応能力向上と熱効率向上を同時達成するため，既存のコンバインドサイクル発電設備のガスタービンを，震災時に緊急設置電源として設置した大型ガスタービンに換装するものであり，既存設備とのマッチングについて，シミュレーション等の技術検討を行い，その実現性を確認してきた。

工事にあたっては大型重機や特殊車両を用いるとともに，多くの作業者によって工事を行っていることから，現場安全管理を徹底しつつ，新型コロナウィルス感染症対策も実施しながら工事を進めており，これまで順調に工事を進めることができた。この場をお借りして関係者のご理解とご協力に厚く御礼申し上げる。

今後，2020年11月の営業運転開始に向けて試運転を行っていくが，これまで当社が培ってきたプラント建設のノウハウ，ガスタービン保守運用に関するノウハウを集結し，廃止した発電用ガスタービンを既存のコンバインドサイクル発電設備へ転用するという国内初の取り組みを完遂したい。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

特集：電力エネルギーを支える各種発電技術の最新動向

最新鋭1650℃級JAC形ガスタービンの実機実証
Validation of Latest 1650℃ Class JAC Gas Turbine

若園 進[*1] WAKAZONO Susumu
森本 一毅[*1] MORIMOTO Kazuki
松村 嘉和[*1] MATSUMURA Yoshikazu
由里 雅則[*1] YURI Masanori
片岡 正人[*1] KATAOKA Masahito
藤村 大輝[*2] FUJIMURA Daiki

キーワード：ガスタービン，コンバインドサイクル，タービン入口温度　要素技術，実機検証，第二T地点
Key Words：Gas Turbine, Combined Cycle, Turbine Inlet Temperature, Component Technology, Validation, New T-point

1．はじめに

近年，CO_2排出量削減の重要性が高まり，風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギー（以下再エネ）の大量導入が計画されているが，自然変動の避けられない不安定電源であること，また電力系統に急激な周波数変動や負荷変動が生じる等の懸念もある。その中で地球環境保全及びエネルギー安定供給の観点から，従来火力と比べ高効率かつ運用性に優れるガスタービン・コンバインドサイクル（以下GTCC）の重要性が高まっている。GTCCの高効率化にはガスタービンの高温化が重要な役割を果たしており，三菱パワー㈱（以下三菱パワー）は，1980年代に1150℃級大容量ガスタービンM701D形を開発後，タービン入口温度1350℃のM501F形，蒸気冷却式燃焼器を採用したタービン入口温度1500℃のM501G形を開発し（Fig. 1），高いプラント熱効率と信頼性及び低公害性を実証してきた。高温・高効率化に欠かせない最新技術の研究開発に取り組むため，2004年からは国家プロジェクト“1700℃級超高温ガスタービン要素技術開発”に参画，その開発成果を活用して世界初のタービン入口温度1600℃となる高効率機M501J形ガスタービンを開発した。三菱パワー高砂工場内のガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備（以下T地点）にて2011年から実証運転を開始し，その後M501J形GTCCの運転実績を着実に積み重ねている。

J形ガスタービンは燃焼器の冷却に蒸気冷却方式を採用しているが，高いタービン入口温度を維持したまま空冷化できれば，GTCCの更なる高効率化と運用性改善が期待できる。そのため，三菱パワーは高温ガスタービンの空冷化を実現する次世代GTCCの開発に取り組み，その中核技術である強制空冷システムを考案した。2015年春にT地点にてシステム全体の検証試験を完了し，その後，10,000時間以上の長期運用を実施してきた。この中核技術はタービン入口温度1650℃の高温化を達成した次世代高効率ガスタービンJAC形（J-Air-Cooled）に適用されている。JAC形ガスタービンの長期実証に向け，高砂工場内に複合サイクル発電所第２号発電設備（以下第二T地点）の建設を進めてきた。第二T地点は1650℃次世代高効率ガスタービンJAC形と新開発の高効率蒸気タービンを組み合わせた出力566MWの最新鋭GTCC設備であり，本年１月から試運転を開始し，４月２日にコンバインド定格出力566MW到達後，発電プラント運用に必要な試験・調整を実施してきた。発電設備としての機能確認を全て完了した後，７月１日より商業運転を開始している。

JAC形ガスタービンの採用によりGTCCとしての発電効率は64%に達するが，その根幹となる技術実証のために試運転中は通常の計器による計測以外に数千点にも及ぶ大規模の特殊計測を実施しオンラインで監視，評価を行った。

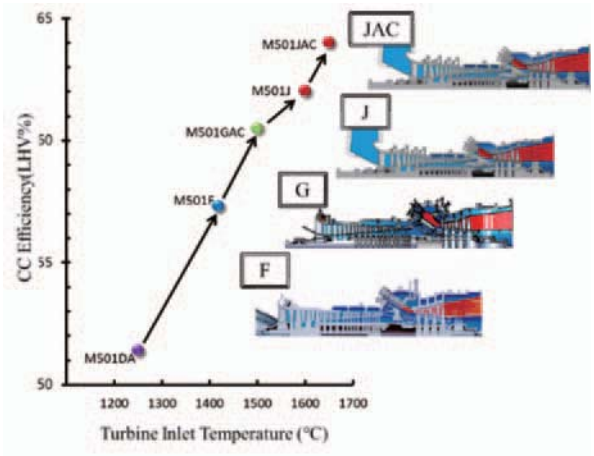

Fig. 1　Large frame gas turbine development

原稿受付　2020年９月30日
＊1　三菱パワー㈱　ターボマシナリー本部
ガスタービン技術総括部
〒676-8686　高砂市荒井町新浜２－１－１
E-mail: susumu_wakazono@mhps.com
＊2　三菱パワー㈱　サービス本部高砂サービス統轄部

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

本稿では，最新鋭の高効率ガスタービンJAC形の開発コンセプトと第二T地点における，JAC形の中核技術実証結果について紹介する。

2．J形ガスタービンの開発と実績

J形では，豊富な運転実績のあるタービン入口温度1400℃級F形，1500℃級G形・H形で実証済みの要素技術を基盤とし，国家プロジェクトで開発された1700℃級の最先端の技術開発成果を適用することにより，タービン入口温度1600℃が達成可能となった。タービン入口温度の上昇及び最新の要素技術の採用により，GTCC発電端熱効率は従来機と比べて大きく上昇した。CO_2排出量は，従来型石炭焚き火力発電所を天然ガス焚きJ形コンバインドサイクル発電所に置き換えた場合，約6割の削減が可能となる。Fig. 2にJ形の技術的特徴について示す。

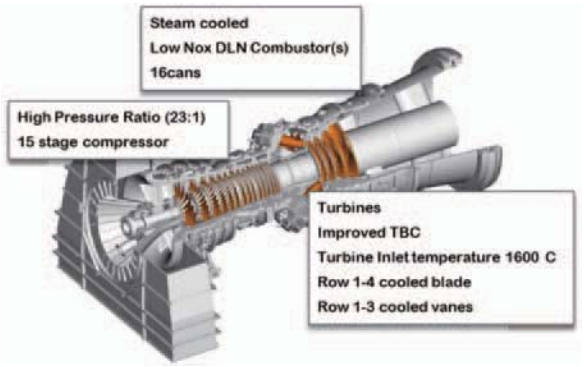

Fig. 2　Component technology of J frame gas turbine

J形ガスタービンの開発は，基本設計の段階で各要素の検証試験を実施し，その結果を詳細設計に反映，最終的に実証発電設備にてガスタービン全体の実機検証を実施するサイクルを踏んできた。Fig. 3に三菱パワー高砂工場内のガスタービン複合サイクル発電プラント実証設備（T地点）の外観を示す。J形初号機は，2011年の試運転中に2300点に及ぶ特殊計測を実施し，性能，機械特性，燃焼特性が目標値を満足することを実証し，商用機を出荷している。J形シリーズは国内外合計76台受注，順次出荷しており，現在まで45台が商用運転に入っており，累計116万時間以上の運転時間を達成している（Fig. 4）。

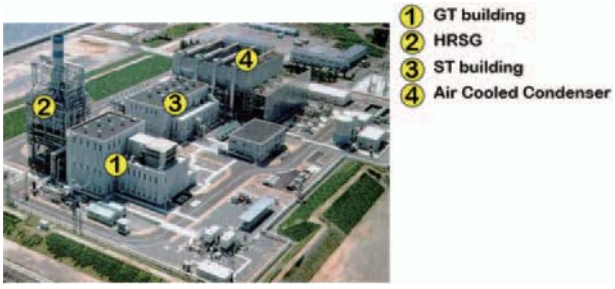

Fig. 3　Gas turbine combined cycle power plant (Validation facility) in takasago factory

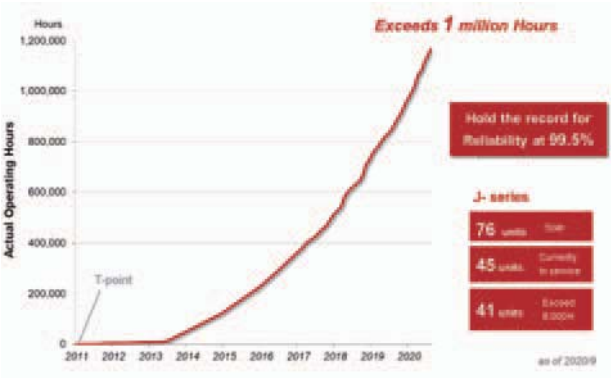

Fig. 4　J frame gas turbine operation experience

3．1650℃級JAC形ガスタービンの開発コンセプト

三菱パワーでは，実績のあるJ形をベースとして，検証済の要素技術：①燃焼器強制空冷システム，②超厚膜化TBC（Thermal Barrier Coating），③高圧力比圧縮機，を適用することで，更なる高効率化，運用性改善を狙い1650℃級次世代JAC形ガスタービンの開発を進めてきた。本ガスタービンの基本コンセプトは以下であり，個々の要素技術自体はT地点での検証を完了し，1650℃ JAC形への適用を進めた。

① 強制空冷システム採用により，運用性を向上させると共にJ形からタービン入口温度を上昇させる。
② 国家プロジェクト技術をベースに開発された超厚膜化TBCの採用により，タービン入口温度上昇に対し，高性能化と信頼性を両立させる。
③ H形と同等の高圧力比設計圧縮機を採用することにより，ガスタービン出口排気ガス温度の上昇を抑制する。

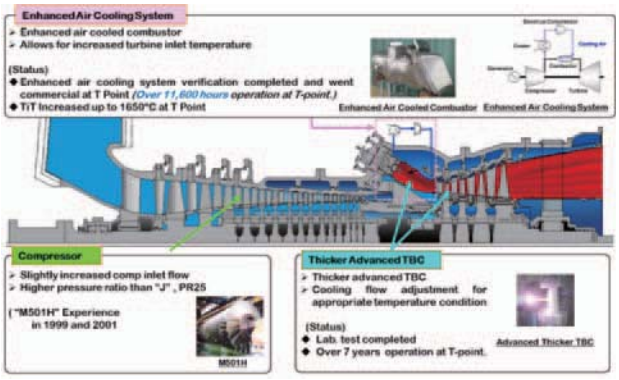

Fig. 5　1650℃ Class JAC gas turbine development concept and key technology

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

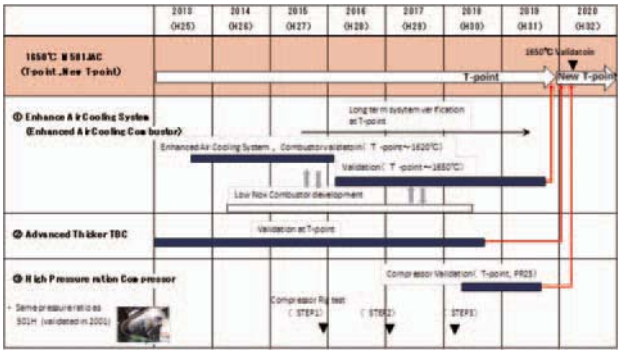

Fig. 6 Component technology and validation applied to 1650℃ class JAC gas turbine

Table 1 M501J/M501JAC Performance spec（ISO）

	M501J	M501JAC
Frequency（Hz）	60	60
Pressure Ratio	23	25
Gas Turbine Output（MW）	330	435
Gas Turbine Efficiency（% -LHV）	42	44
Combined Cycle Output（MW ,1on1）	484	630
Combined Cycle Efficiency（% -LHV）	62	>64

4．1650℃級JAC形ガスタービンに適用する要素技術検証

本項では，JAC形ガスタービンに適用したキー要素技術及び，T地点にて長期実証した結果について述べる。

4.1 燃焼器 強制空冷システム

J形ガスタービンは燃焼器の冷却に蒸気冷却方式を採用しているが，高いタービン入口温度を維持したまま空冷化できれば，GTCCの更なる高効率化と運用性改善が期待できる。そのため，高温ガスタービンの空冷化を実現する技術として，強制空冷システムを考案した。強制空冷システムの採用により，タービン入口温度1650℃級であっても空冷化を実現でき，高い複合発電効率の達成とともに，プラント全体の運用性改善が可能となる。本システムは2015年春に，T地点にてシステム全体の実機検証試験を完了しており，その概要を紹介する。

強制空冷システムは圧縮機出口（燃焼器車室）から抽気した空気を強制冷却空気冷却器（クーラ）にて冷却し，その後強制冷却空気圧縮機で昇圧して燃焼器の冷却に用いたのちに燃焼器内部の燃焼領域に戻す系統としている。Fig. 7に強制空冷システムの概略図を示す。

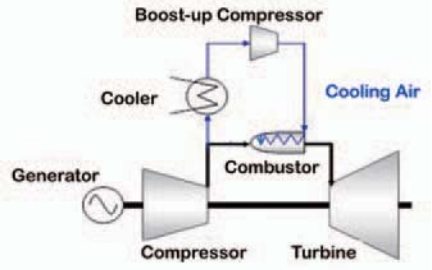

Fig. 7 Enhanced air cooling system

強制空冷システムの特徴について以下に述べる。

（1） 強制冷却空気冷却器廃熱をボトミングサイクル側で回収させ効率のよいシステムとすることが可能

（2） 燃焼器冷却構造を最適化することで既存の蒸気冷却と同等以上の冷却性能達成が可能

（3） 蒸気冷却に比べGTCC全体の起動時間短縮が可能

強制空冷システムを採用した次世代GTCCの効率向上には，少ない冷却空気量で効率的に冷却可能な燃焼器を開発し，強制冷却空気冷却器の廃熱低減と回収効率向上，強制冷却空気圧縮機の動力を低減していくことが重要となる。

強制空冷システムの実機検証

Fig. 8にT地点で実施した強制空冷システム検証設備全景及び系統概略を示す。

2015年春，T地点にて，強制空冷システムの実プラントにて要求される運用性，すなわち起動停止，負荷変化，負荷遮断といった過渡的な変化に対する追従性を検証し，すべて問題ないことを確認した。ガスタービントリップ試験時の強制冷却空気圧縮機運転点挙動についても試験実施し，ガスタービン100％負荷からのトリップにおいて，強制冷却空気圧縮機がサージに入ることなく，安全に停止できることを確認した。

この強制空冷システムはT地点にて運転，長期検証を実施し10,000時間以上の運転実績を積み上げた。

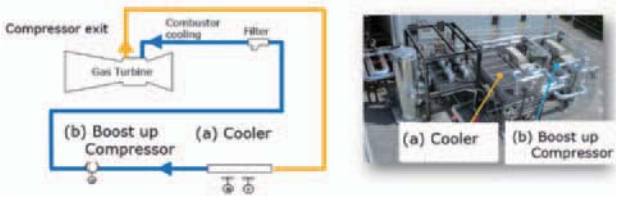

Fig. 8 Validation facility of enhanced air cooling system

4.2 超厚膜化TBC（Thermal Barrier Coating）

1650℃級JAC形ガスタービンはJ形からタービン入口温度が+50℃となるが，超厚膜化TBCの採用により，高性能化と信頼性を両立させている。一般的にTBCを厚くすると耐久性が低下するが，国家プロジェクト技術をベースに開発されたTBCは従来以上の耐久性を有し，超厚膜化が可能となった。なお，超厚膜化TBCの検証は，施工検証としてクーポン試験片を採取し，ミクロ組織，気孔率を確認したのち，熱サイクル試験を実施して耐久性に問題ないことを実翼適用前に確認した。実機検証では燃焼器，タービン１～３段動静翼，分割環に超厚膜化TBCを施工し，長期検証によって信頼性を確認した。Fig. 9にタービン１段静翼にて実施した超厚膜化TBCを示す。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

Fig. 9 Turbine row 1 vane advanced thicker TBC verification at t-point

4.3 高圧力比圧縮機

1650℃級JAC形ガスタービンの圧縮機は，当社運転実績のあるH形と同等の高圧力比設計を採用し，圧力比をJ形の23から25へ上昇させることにより，ガスタービン入口温度上昇に伴う排気ガス温度の上昇を抑制させる仕様とした。圧力比25の大風量圧縮機自体は2001年にT地点で，同じく圧力比25のH形圧縮機にて検証済である。これに加え2018年５月には，T地点にてJ形ベース，圧力比25として設計した圧縮機の実機検証を実施し，起動特性および空力性能が良好であることを確認した。

5．1650℃級JAC形ガスタービン第二T地点での実証結果

第二T地点は1650℃次世代高効率ガスタービンJAC形と新開発の高効率蒸気タービンを組み合わせた出力566MWの最新鋭ガスタービン・コンバインドサイクル設備である。JAC形ガスタービンは2019年春に工場出荷/オンベースし，2020年１月から第二T地点での試運転を開始した。

Fig. 10 On based JAC gas turbine

試運転はガスタービン単体での運転から開始し，初回着火から10回の起動でガスタービン定格負荷に到達，その後蒸気通気しCC運転で運用性確認試験を実施し７月１日より商業運転を開始している。

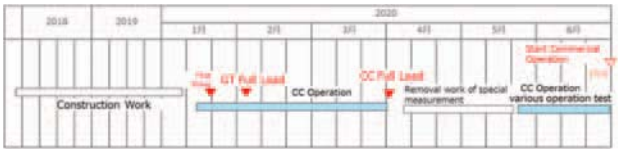

Fig. 11 Commissioning schedule at new t-point

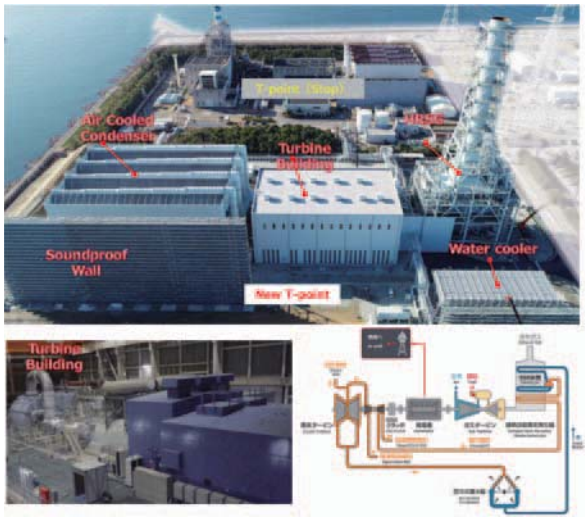

Fig. 12 Combined cycle plant at new t-point

試運転ではガスタービン起動昇速から無負荷定格速度，部分負荷，定格負荷運転中の状態量を常時監視しながら，機器の信頼性，実力性能，排ガスエミッション等を最終確認し，その後商用実プラントで求められる機能試験/特殊試験を完了させた。

JAC形ガスタービンの根幹となる技術実証のために試運転中には約2800点を超える大規模の特殊計測を実施し，健全性評価を行った。回転部については，約100点に及ぶ大規模テレメータ計測も実施し，圧縮機ロータ，タービン翼のメタル温度や振動応力健全性を確認した。本項では各要素の健全性について最終確認した結果を紹介する。

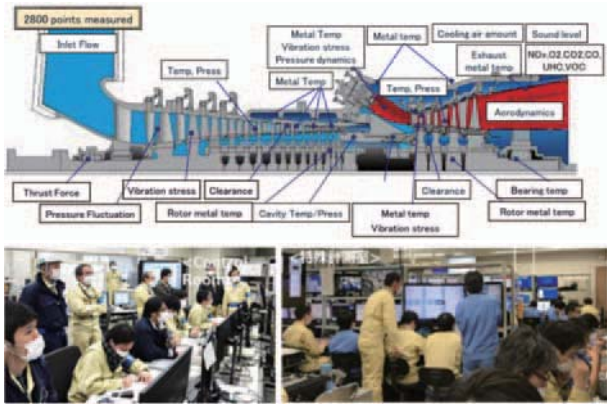

Fig. 13 Commissioning and special measurement

5.1 強制空冷燃焼器及び強制空冷システム

強制空冷システムについてはT地点にて過渡的な変化に対する追従性含め検証済である。試運転中は強制空冷燃焼器のメタル温度を計測し，実機における冷却性能について最終検証した。Fig. 14に示す通り，燃焼筒メタル温度分布は設計許容値より低く，冷却性能に問題ないことを確認した。また，燃焼振動特性や排ガスエミッションについても特に問題なく，部分負荷から全負荷まで安定運用可能であることを確認した。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

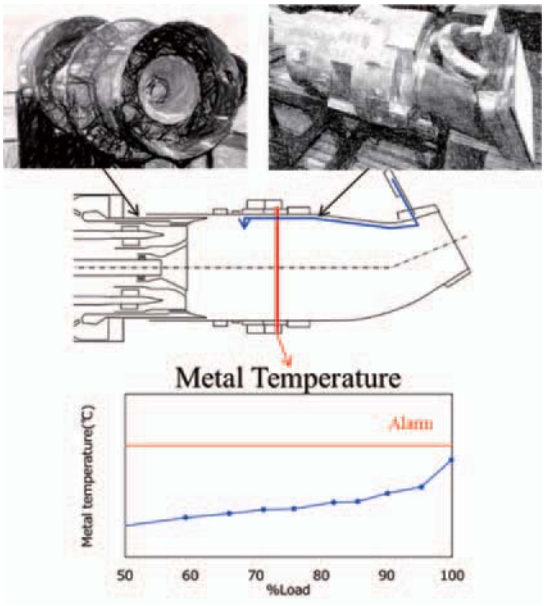

Fig. 14 Metal temperature distribution of enhanced air cooling combustor

JAC形では強制空冷システムをベースとし，負荷運転時のクリアランスコントロールを可能とするシステムを採用している。本系統では，冷却空気をタービン翼環バイパスさせて直接燃焼器へ導入する供給方法と，負荷運転中のタービンクリアランスを低減することで性能を最大化するため，タービン翼環に通気した後に供給する方法の2系統があり，負荷運転中でも切換弁（三方弁）にて切り換え可能である。前者では，クリアランスを開けておくことで大きな負荷変化運転に対応可能である（Flexible Mode）。一方後者では負荷ホールド運転中にクリアランスを詰めることができ，定常運転時の性能を最大化できる（Performance Mode）。Fig. 15 , 16に負荷運転時の三方弁切り換えによるクリアランス挙動を示す。本システムにより性能を最大化したまま従来以上の運用性向上が可能であることを最終確認した。

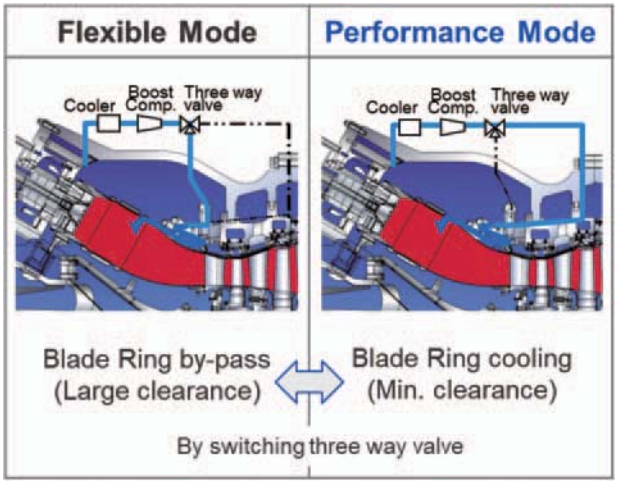

Fig. 15 Turbine Clearance Control System utilizing Enhanced Air Cooling

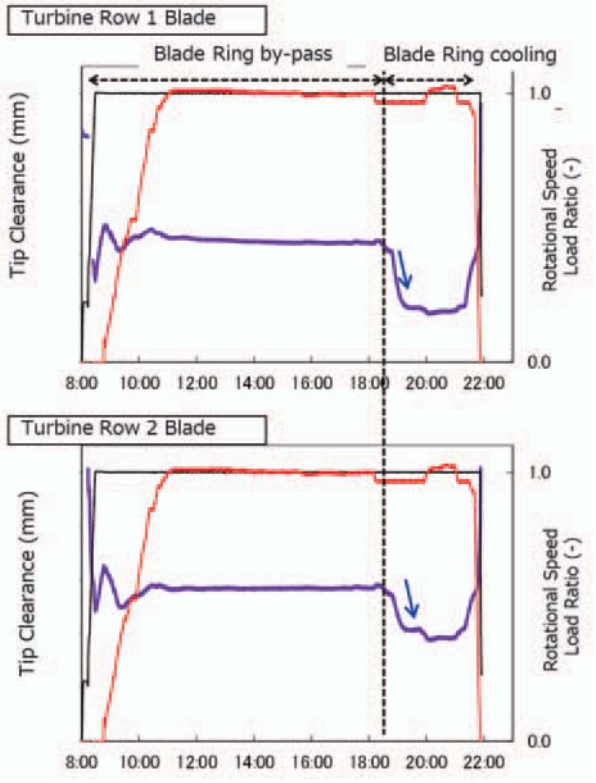

Fig. 16 Turbine tip clearance trend before/after blade ring cooling

5.2 タービン翼メタル温度

1650℃級JAC形ガスタービンはJ形からタービン入口温度が+50℃となるが，高性能化と信頼性を両立させるために超厚膜化TBCを採用している。前述の通り，超厚膜化TBCはT地点で長期検証し健全性を実施確認済である。そのTBCを適用し冷却設計を最適化したJAC形タービン１段静翼の特殊計測メタル温度分布を示す。１段静翼は最も熱負荷の厳しい翼となり冷却構造も複雑となるが，局所的な高温部もなく，いずれの部位も設計許容温度以下であり，入口ガス温度1650℃条件での健全性を確認した。

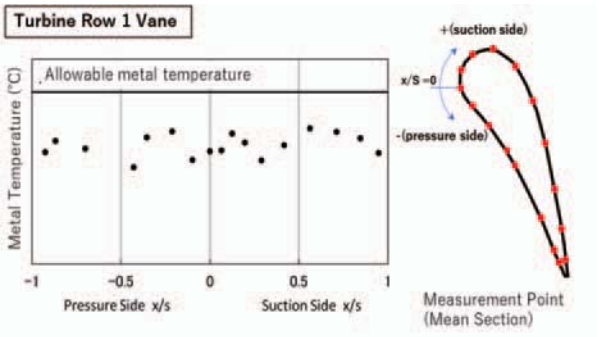

Fig. 17 Turbine row 1 vane metal temperature distribution

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

タービン１段動翼についてはテレメータ計測による翼面メタル温度/振動応力の確認に加え，T地点で導入実績のあるパイロメータ計測を実施した。燃焼器車室及びタービン１段静翼に挿入孔を設け，計測時にパイロメータを待機ポジションからガスパス内に挿入することで特に熱負荷の高くなる翼面前縁周囲の翼表面温度分布の健全性を確認した。

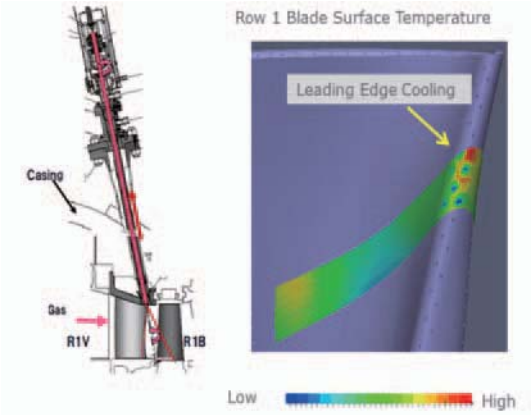

Fig. 18 Turbine row 1 blade surface temperature distribution measured by pyrometer

5.3　高圧力比圧縮機

1650℃級JAC形ガスタービンの圧縮機は，圧力比をJ形23から25へ上昇させているが，高圧力比圧縮機は出口流路面積を相対的に絞った設計とすることから，圧力比の低い起動中には流量が低下し，旋回失速が相対的に悪化する懸念がある.前述の通り，同様に圧力比25のH形圧縮機，及び，2018年５月には，J形ベースで圧力比25として設計した圧縮機をT地点にて検証したが，JAC形でも詳細な特殊計測を実施し,起動特性,翼の振動応力や空力性能が良好であることを最終確認した（Fig. 19）。

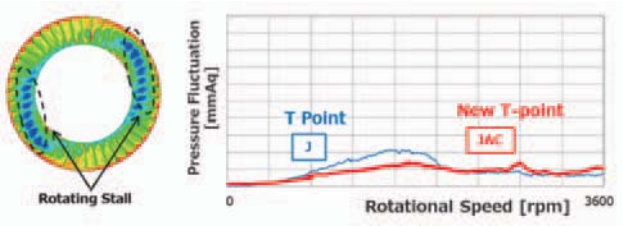

Fig. 19 JAC High pressure ration compressor stability during startup

6．まとめ

GTCCの高効率化にはガスタービンの高温化が重要な役割を果たしており，三菱パワー㈱は2004年から参画した国家プロジェクト“1700℃級超高温ガスタービン要素技術開発”の開発成果を活用して，世界初のタービン入口温度1600℃の高効率機M501J形を開発，その運転実績を着実に積み重ねてきている。GTCCの更なる高効率化と運用性改善のため，実績あるJ形をベースに，燃焼器強制空冷システム，超厚膜TBC，高圧力比圧縮機を中核技術として適用した，次世代1650℃級JAC形ガスタービンを開発，個々の要素としてはT地点で検証完了した。このJAC形ガスタービン長期実証に向け，高砂工場内に複合サイクル発電所第２号発電設備（第二T地点）の建設を進めてきたが，本年１月から試運転を開始，約2800点も及び大規模の特殊計測を実施し，1650℃運転でのJAC形機器信頼性，性能等の健全性を最終確認した。第二T地点では４月２日にコンバインド定格出力566MW到達，発電設備としての機能確認を全て完了した後，７月１日より商業運転を開始し現在も運転時間/起動回数を積み重ねている。

また，実証済のJAC形ガスタービンは北米等の商用機向けにも順次出荷を開始している。米国ユタ州で計画されているGTCC発電プロジェクト向けには水素混焼も計画されており，独自開発した燃焼器技術を組み込むことで，水素混焼率30%でJAC形ガスタービンを運転開始し，将来的には水素100%での運転を目指している。

第二T地点の長期実証運転は，遠隔監視センター（RMC：Remote Monitoring Center）から行われ，ガスタービンなどの主要機器のみならず，補機を含めたプラント全体の信頼性向上，起動時間短縮や運転パラメータの自動最適化など,デジタルソリューション「TOMONI」に搭載された各種アプリケーションの検証を行い，将来的には自動自律運転の実現も目指していく予定である。

参考文献

(1) 高村,若園,由里ほか，J形ガスタービンの運転実績踏まえた1650℃級JACガスタービンの開発，三菱重工技報Vol. 56 No. 3（2019）.
(2) 松見,川村ほか，負荷変動に対応するMHPSのガスタービン技術，GTSJ Vol. 47 No. 1（2019.1）.
(3) Hada, S., Masada, J., Ito, E. and Tsukagoshi, K., Evolution and Future Trend of Large Frame Gas Turbine for Power Generation - A new 1600 degree C J class gas turbine -, ASME Turbo Expo, GT2012-68574.
(4) 羽田,由里ほか，発電用高効率ガスタービンとその運転実績，三菱重工技報Vol. 52 No. 2（2015）.
(5) 塚越，発電用ガスタービンの高温・高効率化の進展と将来展望，GTSJ　Vol. 41 No. 1（2013-1）.
(6) 高田，次世代ガスタービンコンバインドサイクル発電設備の開発，GTSJ　第43回ガスタービン学会定期講演回（米子）講演論文集（2015-9）.
(7) 山崎ほか，次世代ガスタービンコンバインドサイクル発電設備開発への取組み，〔『火力原子力発電』別冊（CD-ROM）（2013年2月発刊）〕.
(8) 若園,由里,正田ほか，J形ガスタービンの運転実績とJACの開発，三菱重工技報Vol. 54 No. 3（2017）.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

特集：電力エネルギーを支える各種発電技術の最新動向

デジタル技術を活用した発電プラントの運用効率化

Improving Operational Efficiency of Power Plants Using Digital Technology

山根 翔太郎*1 YAMANE Shotaro　大谷 圭子*1 OOTANI Keiko　牧野 哲也*2 MAKINO Tetsuya　村山 大*3 MURAYAMA Dai　進 博正*4 SHIN Hiromasa　吉田 琢史*4 YOSHIDA Takufumi

キーワード：プラットフォーム，ダッシュボード，異常予兆検知，熱効率モデル，エネルギー効率化，最適化，予測

Key Words：Platform, Dashboard, Abnormal Sign Detection, Thermal Efficiency Model, Energy Efficiency, Optimization, Forecast

1．緒言

電力システム改革による電力の自由化の推進，低炭素・脱炭素や再生可能エネルギーの導入などによる市場変化に加え，電源分散化に対する意識が高まっている。

このため，電力業界ではデジタル技術の導入により，付加価値を高めた新たな製品・サービス・ビジネスへの展開が求められている。なかでも，プラント事業者には，運用効率化や継続的な性能向上，および運転・保守の更なる合理化が求められるようになってきている。

このような背景の下，東芝エネルギーシステムズ㈱は，発電プラントの運用効率化に寄与するソリューションを展開して，顧客の新たな付加価値創出に応えている。

この付加価値創出の実現のためには，メーカとしての当社のノウハウだけではなく，ユーザである顧客と一体となって共創することが最も重要だと考えている。このため，当社がエネルギーシステム向けに開発しているIoT（Internet of Things）プラットフォームは，ソリューション間連携や様々なデータと連携するSoS（System of Systems）を実現しており，顧客との共創を実現するための場として活用できるものである。

本稿では，当社のIoTプラットフォームの紹介と付加価値創出の事例として，発電プラントの運用効率化に寄与するソリューションおよびその技術の概要，特徴，適用事例等を述べる。

原稿受付　2020年９月27日

＊1　東芝エネルギーシステムズ㈱
DX統括部 プラントDX推進部
〒212-8585　川崎市幸区堀川町72番地34
E-mail: shotaro.yamane@toshiba.co.jp
＊2　東芝エネルギーシステムズ㈱ 府ES 発Sブ 発SR
＊3　東芝エネルギーシステムズ㈱ ERD ES開 DX技
＊4　㈱東芝 RDC AI研SAL

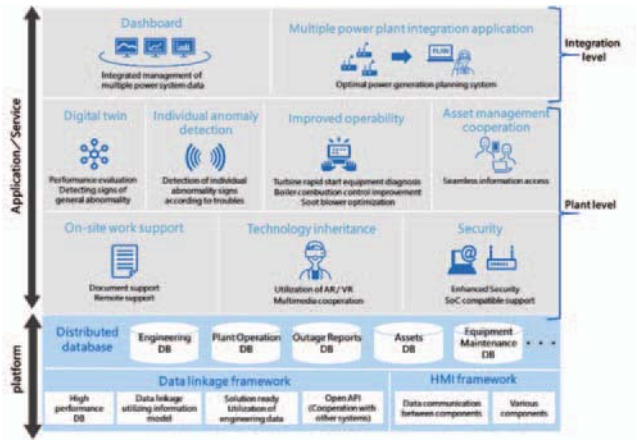

Fig. 1　Solution and IoT platform

2．エネルギーシステム向けソリューション

2.1　エネルギーシステム向け IoT プラットフォーム

初めに，エネルギーシステム向け IoT プラットフォームについて紹介する。

当社のプラットフォームは，エネルギーシステム，特にプラント事業者向けに様々なサービスを提供している。このサービスは，大きく２種類あり，１つ目は各発電所向けのプラントレベルサービス，２つ目は複数発電所の情報を連携し活用する統合レベルサービスである（Fig. 1）。

プラントレベルサービスには，デジタルツイン技術を活用したリアルタイムの“ 性能評価サービス ”，ビッグデータ分析技術を活用した“ 異常予兆検知サービス ”，各種AIや最適化技術を活用した“ 運用性向上サービス ”，様々な情報やファイルと連係可能な“ アセット管理サービス ”，作業現場向けの各種支援を行う“現場業務支援サービス ”，AR（拡張現実）・VR（仮想現実）技術や

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

マルチメディアを活用した“ 技術継承サービス ”などがある。

一方，統合レベルサービスとしては，複数発電所の情報を連携させた発電監視ダッシュボードや，複数プラントの運転計画を立案する最適運転計画システムなどを提供している。

また，これらのサービスを支える当社のプラットフォームには，⑴マイクロサービス アーキテクチャによる機能単位のサービス提供，⑵クラウドまたはオンプレミス，もしくはそのハイブリット構成により実現するハードウェアに縛られないサービス提供，⑶サービス単位の分散DB（データベース）によるDBの肥大化防止，⑷情報モデル（オントロジー）活用によるサービス間のデータ連携，⑸オープンAPI活用による外部システムとの連携，⑹SSO認証によるログイン管理の６つの特徴がある。

当社のプラットフォームは，更にエネルギーシステム向けの運用技術（OT：Operation Technology）とデジタル技術（IT：InformationTechnology）を融合させることができることが強みである（Fig. 2）。

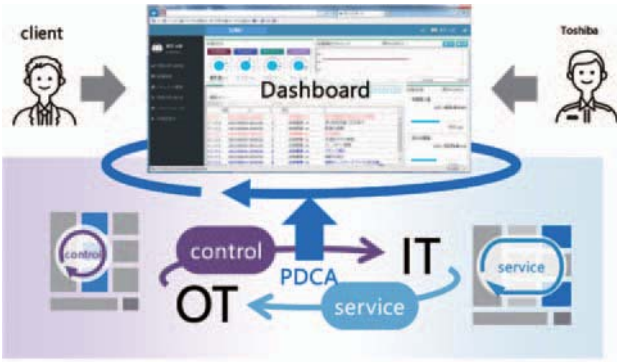

Fig. 2　Overview of IoT service

この強みを生かすため，当社は先に述べたプラットフォームの特徴とサービスに加え，ダッシュボードを活用することで，各種業務に必様な情報へのシームレスなアクセスと，情報連携による業務フローへの支援を実現している。

例えば，Fig. 3は発電プラントの熱効率監視業務における一連のPDCAサイクルである。このPDCAサイクルは，統合ダッシュボードで連携されており，異常予兆検知による異常個所の通知・可視化，確認した改善箇所における保全計画のアセット管理連携，改修工事計画作成を１つの画面で確認することができる。

さらに，統合ダッシュボードは，特定の発電所の機器異常予兆検知の確認だけでなく，各発電所での熱監視モデルや予兆検知のノウハウや保全計画の共有を行うことができる。各発電所での情報を一括に集約表示できることで，事業者は管理する全発電所を俯瞰しながら，シームレスに情報を連携させることができる。

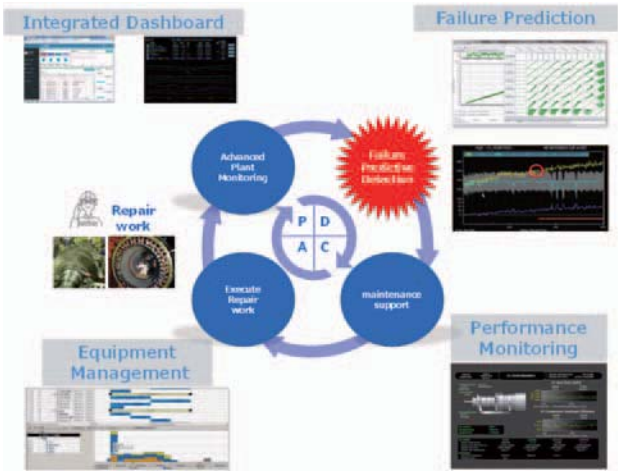

Fig. 3　Expansion of solutions contributing to efficient operation

2.2　IoT技術を用いた発電プラントの運用効率向上サービス

2.1章では，プラットフォームの特徴とダッシュボードの活用事例について説明した。本章では，当社が提供しているサービスの中でも火力発電プラントの運用効率（稼働率や熱効率など）向上のためのビックデータ解析やデジタルツインの最新技術について説明する[2]。

稼働率向上においては計画外停止の削減を図る為の異常予兆検知技術，熱効率向上においては性能劣化度合いとその要因を可視化できる熱効率モデル構築・監視技術について以下に，その概要と適用について述べる。

2.2.1　異常予兆検知技術　稼働率を向上させるには，計画外停止の削減が必須であり，ビッグデータ（発電プラント運転データ）を用いた異常予兆検知が有効な手法の一つである。当社は，予兆検知手法であるAPR（Advanced Pattern Recognition）法を用い，設備の異常兆候を早期に発見することで予定外の停止を防ぎ，より安定的な電力供給を実現している。

本手法では監視までの準備として，監視対象機器に関連するセンサをグループ化し，そのセンサの正常時データを登録するだけで行うことができる。作成したグループの正常時データから，各センサが取り得る期待値を近傍法にて算出し，運転員などのユーザに画面上で期待値と実測値の乖離（かいり）をオンラインで提供することができる（Fig. 4）。過去に起こったセンサ値の組み合わせを正常とし，起こっていない組合せの場合は逸脱と見なす，というコンセプトのため期待値と実測値の乖離発生時に認識しやすい。負荷変動中のデータや，気温・海水温度のデータなどを登録することで様々な運転状態だけでなく，季節変化にも追従した期待値が計算される。

予兆検知において重要な要素であるモデル作成については，あらかじめ当社で用意している標準データセット（標準アセット）を用いることで容易に設定することができる。さらに，運転状態変化時の一過性の異常検知を抑止するツールを装備しているため，監視中の誤警報を

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

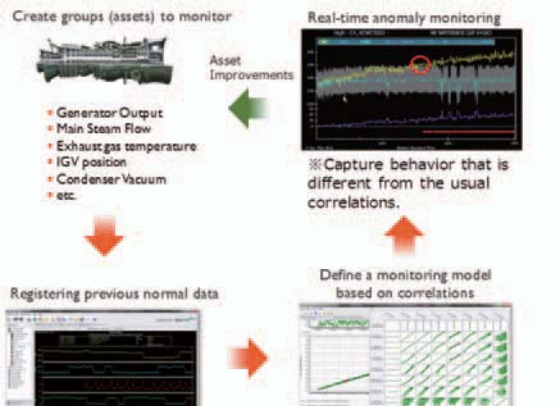

Fig. 4 Flow of processes for failure prediction

減らすこともできる。また，運用する中で誤警報が出力された場合でも設定を簡単に見直す手段が用意されているため，精度の高いアセットを作成することができる。

従来の運転監視はセンサデータの警報設定値超過を監視する方法を基本としていたが，この予兆検知技術により，警報設定値を超える前の早い段階で異常兆候の発見が可能となり，計画外停止期間の削減に貢献できる。また，しきい値設定や過去正常データ登録などの機能がユーザに開放されており，アセットの精度をより高く調整する機能を多く搭載している。このことより，各発電所，各機器に適したアセットを作成することができる。

2.2.2 熱効率モデル構築・監視技術 従来，性能計算や損失計算はユニット計算機などで行われ，その結果が随時管理されてきたが，日々の運転や保守業務には十分活用できていなかった。

当社は発電プラントの熱効率モデル（デジタルツイン）をエンジニアリングデータから構築し，実際の運転性能値とモデルベースの性能値をリアルタイムに比較することで，性能劣化度合いとその要因を可視化する技術を提案している。これにより，機器ごとの劣化や運転改善箇所の提示が可能となるので，高効率運転と燃料費削減が実現できる（Fig. 5）。また，オンラインデータと切り離したオフライン分析が可能であり，機器の改善をモデルに反映し，効果を事前検証することも可能である。

熱効率モデルで計算した結果を，2.1.1節で述べた予兆検知システムに登録することで，効率や性能低下の観点から，プラント機器の異常や変化も検知できる。監視画面構築もユーザに開放されており，熱効率モデルから算出されたプラント性能値と実測値を横並びに表示するなど，ユーザ毎に必要な情報を設定し確認することが可能である。

今までは性能管理の熱効率分析作業を担当者が定期的に行っていた。本システムを導入することで，作成した性能監視機能および画面によりリアルタイムにプラント性能を可視化することができるため，プラントの運用効率向上だけでなく，従来業務の置き換えによる業務効率化を図ることができる。

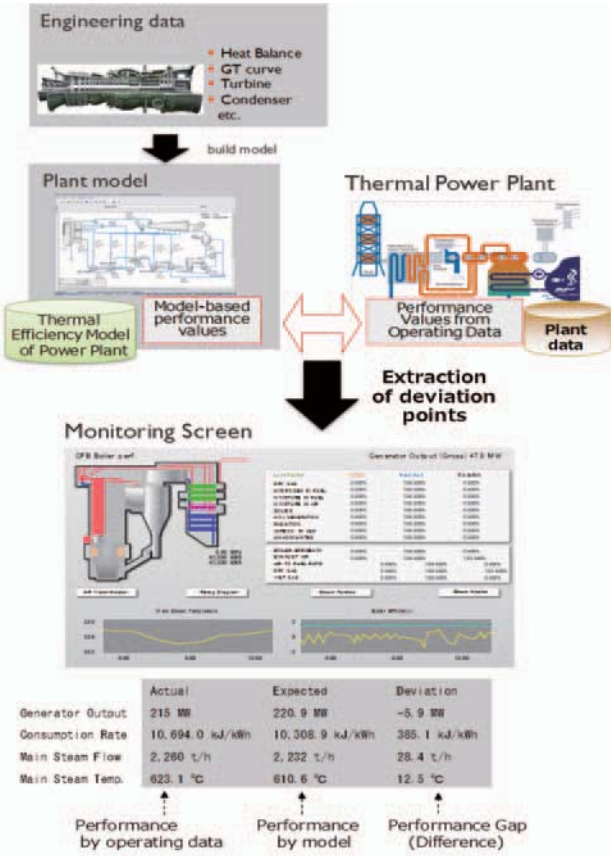

Fig. 5 Flow of thermal performance monitoring

2.2.3 運用効率向上サービスの展開例 当社が提供するソリューションは，東芝グループの㈱シグマパワー有明 三川発電所で活用し，機能の検証，評価を実施している。運用効率向上サービスも運用検証を実施した実例の１つである

また，2017年から，東北電力㈱とIoTソリューションを活用した共同研究も実施しており，過去のプラントデータを活用した予兆検知や熱効率モデル作成実施により，様々な知見を得ている。

2019年には，これらの成果を全火力発電所に展開しソリューションの導入も実施されており，ガスタービンの熱効率監視・異常予兆検知のモデル構築についても実用されている。

2.3 一般産業向けへの適用

2.2章では，火力プラント事業者向けのサービスについて述べたが，一般産業者に対しても，発電プラントに関する知見と技術を活用することで，エネルギー効率や運用性のさらなる向上に貢献できると考えている。以下では，一般産業向けエネルギープラントへの適用について述べる。

2.3.1 一般産業の課題 国内の工場やコンビナートなどに設置された自家発電設備は，製造プロセスに対して電力と蒸気を供給する役割を担っている。長期にわたって利用され，その間に増設や部分更新を重ねた結果，複雑な構成になっていることが多いこのような設備に対し

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

ても，デジタル技術を活用した発電プラントの効率化技術を適用している[3]。

Fig. 6の構成例では，ボイラや，複数台の蒸気タービン（抽気背圧タービン，抽気復水タービン），ガスエンジンなどの機器や配管を含んでおり，圧力の異なる蒸気を供給する複数のヘッダや，外部から受電した電力と発電した電力とを併せて供給する機能を持つ。このような自家発電設備は，電力と蒸気の需要変動に応じて，柔軟かつ効率的に運転する必要がある。機器構成が複雑であるため，熟練度の高いオペレータが的確に操作することで，安定した運転が行われてきた。このようなプラントに対して，実施するデータ分析例と運転評価について示す。

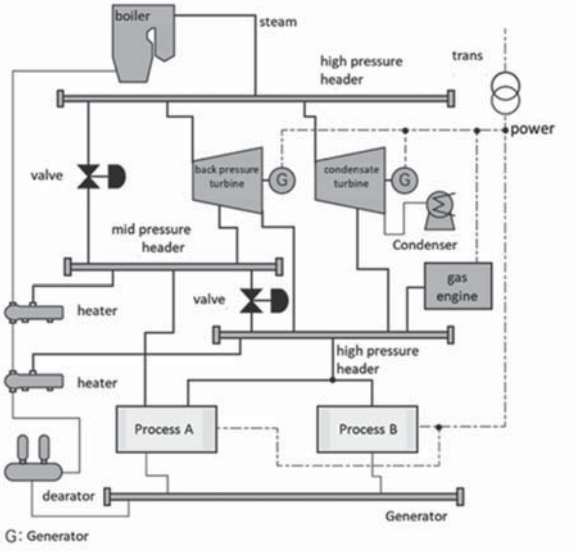

Fig. 6 Configuration example of private power generation facility

2.3.2 データ分析例 自家発電設備向けの蒸気タービンは，電力だけでなく工場の製造プロセスで使用する蒸気を供給することが特徴である。このために用いられる蒸気タービンの運転状態量には，タービン入口の蒸気量，製造プロセスで使用するための抽気量及び発電機出力などがあり，相互に関連している。加えて，タービンの出力により，抽気量が制限される。更に，製造プロセスによっては，供給蒸気圧力が一定範囲となるように運転する必要があるなど，運用上の制約が多い。また，設置から長期間にわたって使用されていることも多く，その間に特性が変化している事例もある。

実際の特性を取得するため，実データから蒸気タービンの特性を算出した例をFig. 7に示す。Fig. 7は，蒸気タービンの運転データを基に，縦軸にタービン入口の蒸気流量，横軸に発電機出力を取り，抽気量範囲でプロットを区別して表示したものである。重ねて表示した実線は，プロットしたデータから計算される実データ取得時点での特性である。これを，破線で示した設置時と比較することで，発電特性の変化を確認できる。

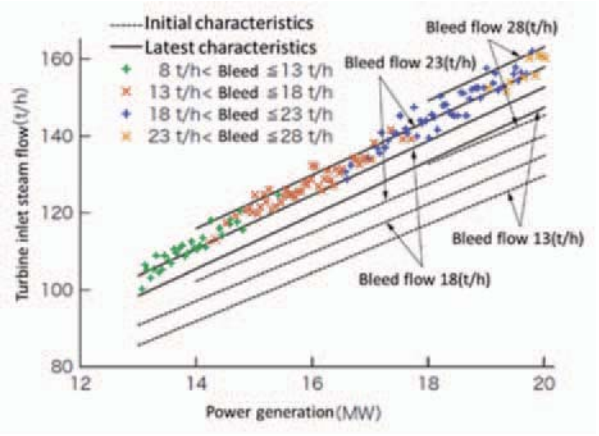

Fig. 7 Examples of power generation characteristics of steam turbine

2.3.3 デマンドマップを活用した運転評価 自家発電設備では，製造プロセスによる電力と蒸気の需要を満たすために，蒸気タービンやボイラなどの機器の組み合わせが，複数ケース存在することが多い。電力や蒸気の需要は，製造プロセスの稼働状況によって変化するので，その都度，使用する機器を変更すると，機器を頻繁に起動・停止させることにつながる。蒸気タービンやボイラは，起動時や停止時にロスを伴うので，使用機器の頻繁な変更を避けて，効率的に運転することが必要である。

Fig. 8は，電力と蒸気の需要の組み合わせをプロットしたものである。ある時間範囲における，複数の需要の組み合わせは，その時間範囲の需要（デマンド）の分布を示すため，これをデマンドマップと呼ぶことにする。Fig. 8に，復水蒸気タービンの運転範囲，及び背圧蒸気タービンとガスエンジンを組み合わせた運転範囲を，デマンドマップに重ねて示した。ある時間範囲の複数の需要を満たすためには，全ての需要を含む運転範囲になるように，機器を選択することで，頻繁な起動・停止を回避できる。また，複数の機器の組み合わせが重複する部分に需要がある場合は，効率の良い機器を選択すればよい。このように，デマンドマップを用いることで，効率的な運転計画を容易に立てることができる。

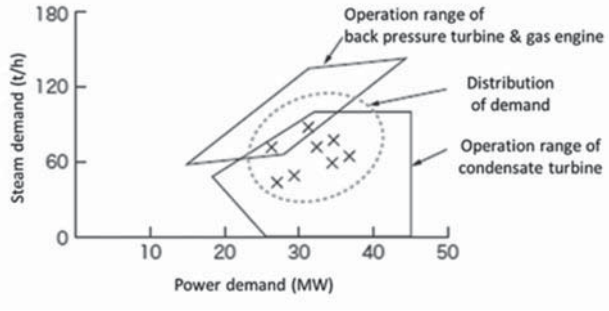

Fig. 8 Scatter diagram of steam and power demand for development of operation plan

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

2.4 最新技術について

最後に本章では，当社が提供するサービスを支える最新技術の研究事例を紹介する。当社は，顧客の運用をサポートする意思決定問題やトータルバリューチェーンに寄与する研究にも力を入れている。今回は，運用計画に関わる気象予測と発電計画作成について述べる。

我が国における再生可能エネルギー電源の導入量は，固定価格買取制度（FIT: Feed-in Tariff）導入と設備コスト低下を背景に年々増加している。文献(4)は，太陽光発電や風力発電を変動する再生可能エネルギー源（VRE: Variable Renewable Energy）と総称した上で，VRE導入量の４段階（第１段階～第４段階）を定義して，各段階で必要な事柄を概説している。我が国はその第２段階（九州エリアは第３段階）にあり，電力システム運用時にVREの出力予測が必要な段階にある。具体的には，電力事業者は需要量とVRE発電量を予測した上で需要量からVRE発電量を除く残余需要を求め，30分毎に残余需要とエリア内発電量が一致するように各発電所の発電計画を作成している。発電計画作成は，残余需要の予測誤差に備えた供給余力や発電所の各種運用制約を満たしつつ，供給の安全性や経済性を最大化する非常に困難な作業である。本節では，残余需要予測のベースとなる気象予測技術と機械学習技術，発電計画作成のベースとなる数理最適化技術に関する当社の取り組みを述べる。

2.4.1 気象予測技術 当社は，各国気象機関の全球予報を入力に利用し気象庁メソモデル（MSM）相当の気象予測データを気象モデルWRF（Weather Research and Forecasting）を用いて作成している（Fig. 9）。気象予測データを内製する利点は，予測間隔や予測先時間を自由に選べる点，用途に合わせて量的予測の精度を改善できる点，機械学習により気象データを有効活用できる点にある。予測精度は，全球予報が共通だと質的予報（例：晴，曇，雨）も共通だが，量的予報（例：日射強度，気温など）で改善を見込める。たとえば日射強度の予測精度は，気象モデルの放射伝達計算方式や高さ方向メッシュ数に依存するので，これらのパラメータを最適化することで改善できる。機械学習による気象データ活用は，外販データの組み合わせで精度改善が難しい場合でも，内製データの気象量（例：アルベド，乱流強度）を加えると精度改善できる場合がある。

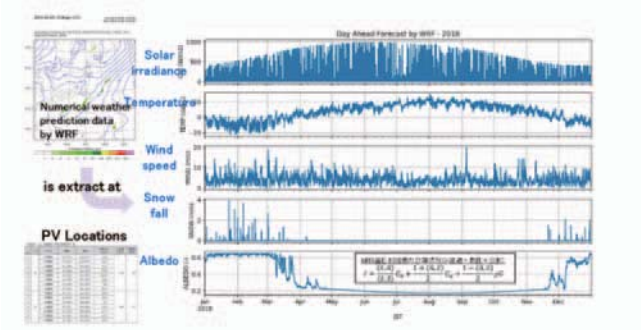

Fig. 9 Numerical weather prediction

2.4.2 機械学習技術 当社は，内製した気象予測データを用いて残余需要量を高精度に予測する説明性の高い機械学習技術を開発した。需要予測，太陽光発電量予測は，多次元の気象予測データ（説明変数）を変数選択して精度を高めるため，スパースモデリング技法を採用する（Fig. 10）。需要予測技術[5]は，気温感応度等を分離して学習できる一般化加法モデル（GAM：Generalized Additive Model）に基づき説明性を高めた上で，供給エリア内多地点の気温データを変数選択する。太陽光発電予測技術[6]は，太陽光発電所の工学モデル（物理モデル）に基づき説明性を高めた上で，多地点の気象予測データ及び発電所パラメータ（レイアウト角度と過積載率）候補値を変数選択する。

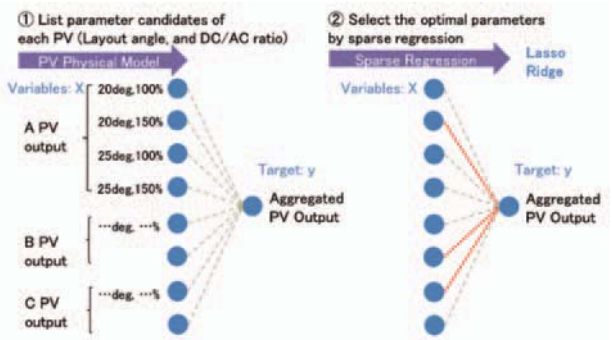

Fig. 10 Sparse regression

2.4.3 数理最適化技術 当社は，火力発電所の各種運用制約を満たした上で，全発電所の運用費がコストミニマムとなる最適発電計画を作成するための数理最適化技術を開発している。火力発電所の運用制約には，基準熱効率や定格・最低出力など常に満たすべき約50項目の基本条件と，定期点検や出力指定・試運転など所定期間において満たすべき約60項目の制約条件があり，これらを全て満足する計画を作成することによってインバランス（計画値と実績値の乖離）をできるだけ発生させない実運用に近い計画を作成することができる（Fig. 11）。実際の発電事業者の運用では，エリア内の全火力発電所を対象に，短時間で計画を作成できる速度が要求される。当社は，100台規模の発電ユニット群を対象に約30秒～３分で最適発電計画を作成できる最適化手法を開発した[7]。本最適化手法は，前段で貪欲法ベースのヒューリスティクスを用いて高速に近似解を生成して解候補の

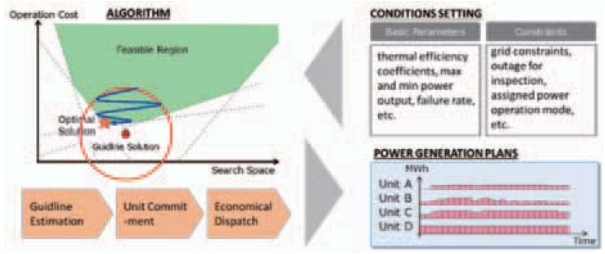

Fig. 11 Optimal power generation scheduler

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

探索範囲を限定し（ガイドライン計算／限定処理），後段で混合整数２次計画問題の厳密解法を用いてユニットの最適な起動停止タイミングと出力値を求める（並解列最適化／負荷配分最適化）多段階構成の最適化手法である。高速なヒューリスティクスと厳密解法をうまく組み合わせることによって，精緻でコストミニマムな発電計画を高速に得ることが可能となる。

3．結言

本稿では，プラント事業者がデジタル技術を活用し，新しい価値創出のためのプラットフォームと運用効率化に寄与するソリューションを紹介した。当社のソリューションは，火力プラント事業者だけではなく，一般産業者にも展開している。異常検知技術や熱効率モデル構築・監視技術は，プラントの稼働率を向上させ，発電プラントの効率化技術は，最適化な運転計画作成を容易にしている。また，当社の技術を支える研究事例として，予測技術，機械学習技術，数理最適化技術を活用した成果を一部紹介した。これらの研究成果は，随時ソリューション側に反映・展開される。

当社は今後，最先端デジタル化技術を用いたIoT プラットフォームを中心とし，プラントのライフサイクルを支援するサービスだけではなく，AI・最適化技術を組み合わせたエネルギー業界の新時代を切り開く新たなサービスを顧客と共創していく。

参考文献

(1) 青山　敬三，エネルギーシステム向けIoTプラットフォームに基づく発電プラント向けIoTサービスの展開，東芝レビュー，Vol. 75，No. 3（2020），pp. 7-11

(2) 及川 直樹，大谷 圭子，山根 翔太郎，火力発電プラントの新たな価値を顧客と共創するIoTソリューション，東芝レビュー，Vol. 74，No. 3（2019），pp. 10-13.

(3) 村山 大，中原 良樹，フィジカル領域の強みを生かした自家発電設備の最適運転支援システム，東芝レビュー，Vol. 75，No. 3（2020），pp. 21-24

(4) System Integration of Renewables - An update on Best Practice，" International Energy Agency，January 2018.

(5) 進ほか，気象予測データと機械学習を用いた高精度な電力需要予測手法，東芝レビュー Vol. 74，No. 5（2019），pp. 22-25.

(6) 特集Ⅱ：太陽光発電システムの大量導入と太陽光発電量予測技術の課題"，太陽エネルギー学会誌，vol.46 no.1（serial no.255）（2020）及び特集記事.

(7) 吉田ほか，大規模な火力発電ユニット群の最適発電計画，日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会（2018年9月）.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

特集：電力エネルギーを支える各種発電技術の最新動向

遠隔現場支援システムと技術動向

Technical Trend of Remote Site Work Support System

柴崎 宏行*1
SHIBAZAKI Hiroyuki

キーワード：スマートグラス，拡張現実，画像処理，ワイヤレスセンサ，巡視点検自動ロボット・ドローン，オンプレミス
Key Words：Smart Glass, Augmented Reality, Image Processing, Wireless Sensor, Automatic Inspection by Robot & Drone, On-premises

1．緒言

近年，火力発電事業では競争力強化のひとつとして，デジタルイノベーションの積極的な取り組みが加速度的に広がっている。

新設の火力発電所や一部の火力発電所においては，既にIoT等のデジタル技術を活用してデータを継続的に取得し,このデータをAI技術によって事前に異常の予兆を把握し，対策を行うなどの取組が進められている。

従来,火力発電所では発電所員が設備の状態を巡視点検する設備パトロールを実施し，設備の異常兆候の早期発見により，設備トラブルの未然防止に努めるなど，きめ細かな運転管理・事業運営が行なわれてきた。

既存の火力発電所においても，近年のデジタル技術を導入し，保守管理の効率化・自動化，そして現場の発電所員の負担軽減につなげていくことにより，さらに高効率な事業運営が期待される。

本稿では，はじめに火力発電所における現場作業者と遠隔指示者との間で，迅速な状況把握および正確な指示理解を目的としたスマートグラスによる作業支援システムについて紹介する。次に従来，作業者がアクセスして点検しなければならない作業箇所を，画像処理やワイヤレスセンサ，さらに巡視点検自動ロボット・ドローン等に置き換える取り組みについて紹介する。

2．火力発電事業における課題

2.1　人的課題[1]

現在，コンベンショナル発電所（ボイラー・タービン）や出力1万kW以上のガスタービン発電所では，「電気設備の技術基準の解釈 第四十七条」において「作業員による現場での常時監視」が必要とされている。火力発電所では，発電所員が日々，設備の状態を巡視点検する設備パトロールを行い，設備の異常兆候の早期発見により，設備トラブルの未然防止に努め，火力発電所の安定運転に取り組んでいる。しかし，広大な発電所内に設置されている設備は多岐にわたるため，設備パトロールには多くの労力と時間を要している。そして，油・薬品等の漏洩，機器の異音等の異常兆候の発見のためには一定の経験（外観，音，振動などのヒトの五感・感覚）に依存するなどの課題がある。

今後，定年退職に伴うベテラン技術者の減少が予想されるなか，巡視点検の技術を継承していくことが課題となる。また，発電設備の保守点検業務も，現場の作業員の経験等に多く依存している。作業員の経験等に依らない品質の確保や，ベテラン作業員の技術継承が大きな課題である。

2.2　経年化設備の健全性の確保[2]

これまでの保修については，高稼働，供給信頼性を維持するためにTime Based Maintenance（予防保全）という視点で実施してきたが，経年発電所では今後修繕費用等のコスト増加が懸念される。また，定期点検期間（2年⇒6年）の延長にも対応することとなると，コスト低減策として保修形態そのものを見直していく必要がある。具体的には設備故障の予兆的な状態を発見・推定し保修していくRisk Based Maintenance（予知保全）に移行するものと考えられる。

原稿受付　2020年9月10日
＊1　マグナ通信工業㈱　生産本部
〒168-0063　杉並区泉1丁目22番1号
E-mail: shibazaki@magna.co.jp

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

3．スマートグラスによる現場支援システム

3.1 スマートグラスの概要

スマートグラスはウェアラブルコンピュータ，メガネ型ウェアラブルデバイス，作業支援アプリケーションによって構成されている。

従来は手順書や作業マニュアルなどを手に持ちながら行っていた作業が，ディスプレイに映し出された映像を見ながら行うハンズフリーの作業へと置き換えられるため，作業現場での業務効率を高めることができる。また，作業支援アプリケーションリューションはAIやAR（拡張現実）などの関連技術と連携することで，業務計画から現場作業，遠隔支援，証跡管理までの業務サイクル全体をサポートできるソリューションである。

3.2 スマートグラスの種類

大きく分けて，スマートグラスには片眼タイプと両眼タイプがあり，さらに社内LAN専用（On-premises）のLOCAL型とインターネット専用のWEB型のものがある。

現場支援システムとして活用することができる代表的なスマートグラスを紹介する。

1）片眼タイプ[3]

片眼タイプのスマートグラスは，両眼タイプのものに比べ，小型で軽量なものが多く，扱いやすいという特徴がある。また，テキストなどの資料は小さな表示となるが，それだけに視野が広く周囲の状況や手元の様子が見やすいというメリットがある。

・Dynabook DE100/AR100（Fig. 1）

Windows対応，WEB型，防塵防水規格IP57

2）両眼タイプ[4]

両眼タイプのスマートグラスの特徴は，片眼タイプのものに比べ，表示範囲が広いことが挙げられる。片眼タイプが視野の隅に小さく表示されるのに対し，両眼タイプは映像や図面・マニュアルなどが目先の空間に大きく表れるので，それらが見やすい。図面やマニュアルなどを確認しながら作業を行う場合には両眼タイプが適している。

・EPSN MOVERIO BT-350（Fig. 2）

nvEye's®（アプリケーション）[5]によりLOCAL型に対応。

3.3 導入メリット

1）遠隔支援

スマートグラスを装着した現場作業者は，常にハンズフリーで作業し，必要に応じて支援者と音声通話をすることができる。一方，支援者は作業者の視界をPCで共有し，的確な指示を与えることができる。

2）作業ナビゲーション

管理者はあらかじめPC上で作業ステップごとに内容を作成し，各作業者にデータを配布。現場では作業者がスマートグラスでその作業内容を順次確認しながら，正確に効率よく作業を進めることができる。

3）技術継承

現場で課題となっている熟練者から新人への技術継承について，遠隔地にいる熟練者が状況を映像で判断・支援することや，熟練者の作業手順を録画し，動画マニュアルとして共有するなどの活用で，スムーズに技能を継承できる。

4）作業記録・証跡管理

作業者がマートグラスを装着することで，定められた手順どおりに作業を行ったかなど，業務が適正であったことの証拠を記録し，管理することができる。

Fig. 1 Appearance of Dynabook DE100/AR100

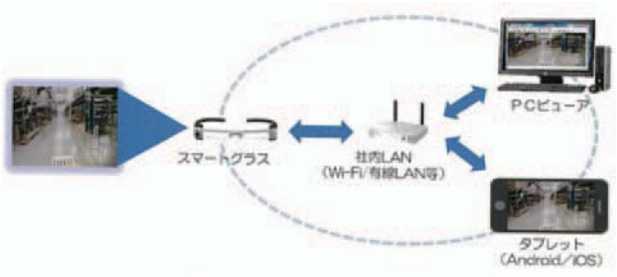

Fig. 2 System of MOVERIO BT-350/nvEye's®

4．画像処理による異常検知

4.1 概要

現在，火力発電所における監視カメラシステム（ITV）は現場での目視確認の遠隔化として利用されている。この監視カメラシステムに，画像解析機能を付加させることにより設備管理・運転管理が設備トラブルを未然に防止し，省力化などの課題に応えることにより大きな効果が期待される。画像処理による異常検知の基本的な方法は，監視カメラから取り込んだ画像の差分処理を行い，その変化分を抽出して解析処理を行うことにより異常検知を実現している（Fig. 3）。

4.2 判定機能[6]

現在の画像処理技術を用いた自動判定システムは複数の判定機能を持つが，監視設定は1画面について数百個までの設定が可能で，複数の判定機能を組み合わせて対応する。ここでは使用頻度の高い4つの機能について紹介する。

1）比較検査機能

この機能は，マスター画像とライブ画像を比較する方法で差異を検出するである。マスター画像との比較は，正常な状態をマスターとし，ライブ画像がそれと異なった場合に差異を検出し異常判定を行う。この機能は主に向きや形状の変化を検出することに利用でき，例えば通

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

常無人でなければならない場所への侵入を検知したり，バルブ方向の違いを検出したりする場合に使用できる。

2）色検出機能

指定した色を検出する方法である。指定色の検出では，画像上のある領域からどの程度指定の色が検出されたのかを判定する機能である。色の変化を検出することができるので，表示ランプの点灯状態や液体の色変化，炎色が正常であるかなどを検出する場合に使用できる。さらに，監視カメラを赤外線仕様のものにすることにより，温度変化の検出も可能である。

3）メーター数値読取り機能

アナログメーターの数値読み取り機能で，ロバスト性が高く，明暗差が激しい画像でも安定した読み取りが可能である。デジタルデータが取得できない古い設備のメーターも，この機能を使用すればデータの取得・記録・自動判定が可能となる。

4）英数字読取り機能

表示機等の英数字の読み取り機能で，一定の歪みがある文字も読み取り可能である。対象物は主に7セグメント表示機であるが，ディスプレイやタッチパネルなどに表示された英数字情報も読み取ることができ，アナログメーターの数値読み取り機能と同様に，データの取得・記録・自動判定が可能となる。

4.3 導入メリット

目視による監視，確認作業は日常的に数多く行われており，これらの作業は時間的にも労力的にも作業者の大きな負担となっている。また，監視対象に対する誤読，結果の誤記入，記入漏れといった人的ミスも潜在している。

それら人的ミスを排除できない要因は，色や形状の変化，粒子の密度などといった「見た目の変化」を確認しているものは計器類では検知が難しいことや，構造上デジタル化できない古いアナログメーターが現状では数多く存在していることである。これらの課題に対し，画像処理技術を活用することにより，監視対象物を監視カメラで撮影し画像処理することで状態の良否判定までを自動化し，時間や労力の大幅な削減が見込める。

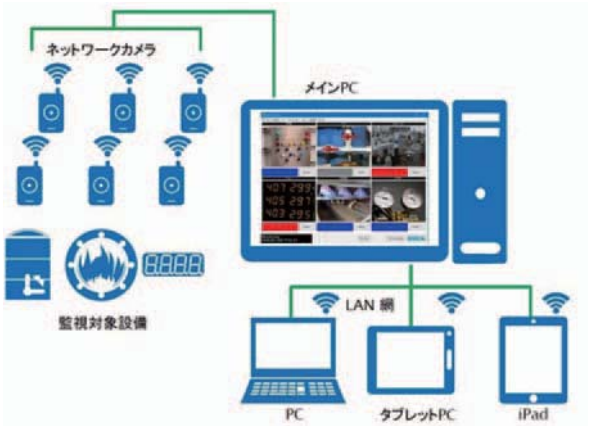

Fig. 3 Image of Image processing system

5．ワイヤレス振動センサ

5.1 概要[7]

火力発電所では多くの回転機械が使用されており，工場を安定して操業するためには回転機械の振動を測定してその機械の状態を把握すること，即ち振動監視が重要である。主機や重要補機など運転上重要な回転機械は有線の振動センサを設置してリアルタイムで監視されているが，その他の転がり軸受で支持された中小規模の回転機械には巡視点検による監視が主となっている。

回転機械の状態を正確に把握するためには，振動測定の頻度が重要である。例えば有線による監視システムの場合は，連続で振動測定できるため回転機械の状態を正確に把握することが出来るが，有線の監視システムを導入するにあたり導入費用がネックとなるケースがある。

また，ポンプやモータなど転がり軸受で支持された回転機械は，何の前触れもなく急に故障するのではなく徐々に調子が悪くなり最終的に故障に至るという傾向にあるため，巡回点検で状態監視を行っているケースが多くみられる。しかし，回転機械が数百台あるような大きな火力発電所では測定個所は膨大となり，せっかくの巡回点検時に異常兆候を見落としてしまう可能性がある。巡回頻度を高くしようとすると，技術員の確保やスケジュール調整，工数など検討しなければならない項目が多数あるため，回転機械の状態に合わせて柔軟に対応することは困難である。ワイヤレスシステムは一般的に1日毎や数時間毎に振動データを収集するため，巡回点検より頻度の高い測定が可能である。また測定間隔を変更できる機能を搭載している場合には，振動値に変化がみられる回転機械のみ測定頻度を高くすることで，回転機械の状態に合わせた柔軟な状態監視が容易に実現できる。

5.2 導入メリット

ワイヤレスが持つメリットの中で最も大きいものは，ワイヤレスの名前が表している通り「配線がいらない」という点である。近年，火力発電所において様々な種類のデータ，いわゆるビッグデータを活用するようになった。そこには，保修費用の削減や熟練技術者の減少など昨今の発電事業を取り巻く環境の変化に伴い，今まで監視システムを導入されていなかった補機等の回転機械においても，振動データを収集し予防保全を行うものが増えている。

発電設備が大きくなるにしたがってシステムは複雑になる傾向にあり，ケーブルの配線もそれに比例して増加，複雑化している。監視対象の回転機械が増える場合も同様なことが言える。システムを構築する際のケーブル敷設費用は決して無視できるものではなく，システム導入予算に対してネックになるケースも考えられる。

データをワイヤレスで伝送することによりシステム構築におけるケーブルの敷設は最小限に抑えることが可能となり，ケーブルの敷設費用が大幅に削減される。その結果，システム導入予算も削減することができる。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

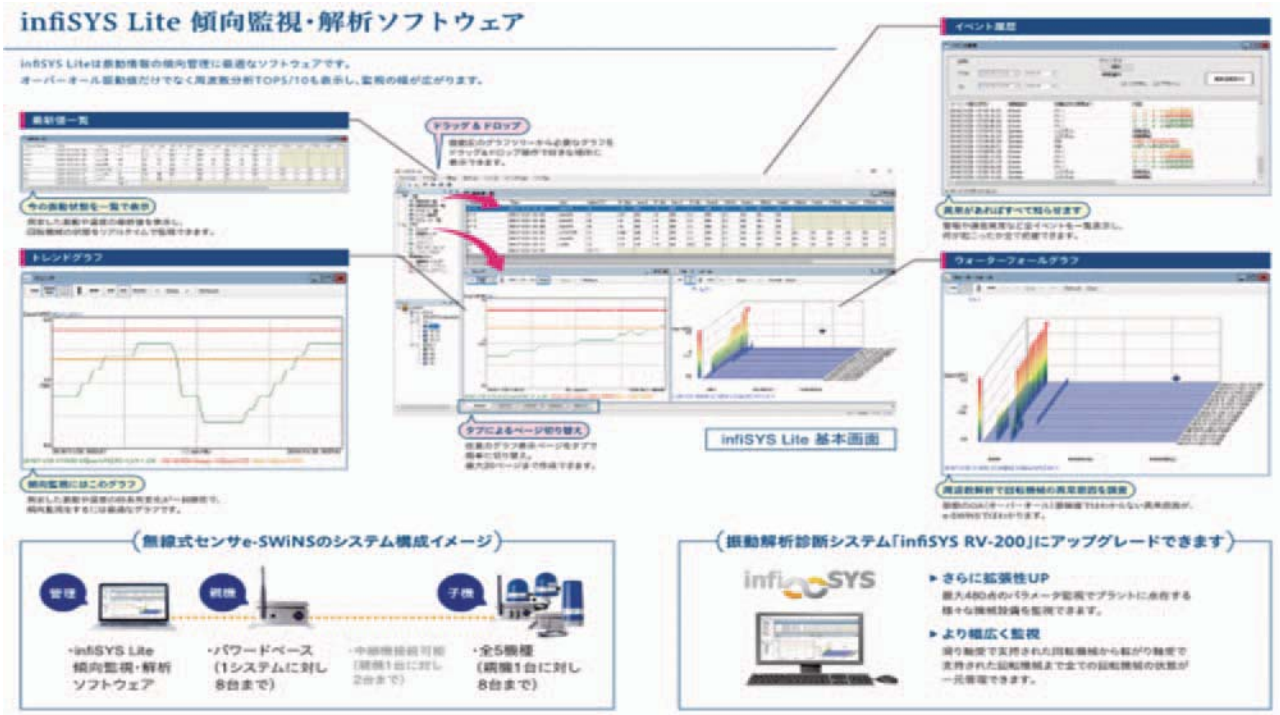

Fig. 4 System of wireless sensor

5.3 システム例

ワイヤレスシステムの例として「e-SWiNS」を紹介する（Fig. 4）。このシステムの大きな特徴は，振動監視だけでなく異常兆候の検知とその原因調査が出来るという点にある。たとえば振動値の大きさの変化によって回転機械に何か変化が起こっていることはわかるが，どんな変化・異常が起こっているのかを判断することはできない。振動値の他に振動周波数の情報があることで，振動の原因が何かという情報を読み取ることが出来ることが大きな特徴である。

6．ロボット・AIを活用した巡視点検自動化ロボット

6.1 概要[8]

関西電力では関連企業とともに，ロボット・AIを活用した巡視点検自動化システムを開発した。同社の火力発電所では，発電所員が定期的に設備の巡視点検を行っているが，多くの労力と時間を要するとともに，今後，定年退職に伴うベテラン技術者の減少が予想される中，巡視点検の技術を継承していくことが課題になっている。

本システムは，発電所員が目視などで確認していた設備情報を自動走行型のロボットを用いて収集し，AIを活用して各設備の運転状況が正常であるかを判断するものであり，現在，発電所員が行っている巡視業務の約25%を代替できるとしている。2019年12月からは堺港発電所（LNG, 計200万kW）のタービン建屋１階で実証実験を実施し，技術の有効性を確認した。今後，自社火力設備への配備や，発電所以外も含む製造業への展開を計画している（Fig. 5）。

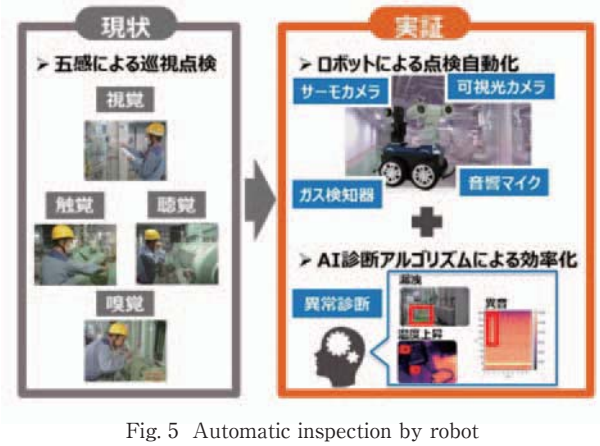

Fig. 5 Automatic inspection by robot

6.2 システム構成

1）自走走行型ロボット

あらかじめ設定した点検ルートを自動で走行し，ロボットに実装した各種センサにより，点検に必要なデータを収集する。人の五感に代替できる可視光カメラ，サーモグラフィカメラ，音響マイク，ガス検知器等を搭載。

自動充電機能を備えており，４時間の充電で７時間の連続走行ができ，一旦ルート設定を行うと人の手を介さずに点検を行うことが可能。

2）AIを用いた異常検知システム自動走行型ロボットが収集したデータと，あらかじめ登録している設備の正常時のデータをAIによって比較し，設備の異常を検知するシステム。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

7．AIを活用した巡視点検自動化ドローン

7.1 概要[9]

火力発電所では，作業員が一日で最大12時間かけて配管などの設備を点検している。生産性の向上が課題となっており，東北電力は18年度からドローンによる設備点検の検証作業を進めていた。東北電力では事前にルートを設定したカメラ付きのドローンを自動で火力発電所の建屋内で飛ばし，タービンや配管などの設備を点検する。外観や表面温度，臭いなどを検知するセンサも搭載し，AIを通してデータ分析をする。ドローンに点検作業を全て置き換えるのではなく，補完ツールとして導入する方針である。システム開発では，新潟火力発電所４号機や秋田火力発電所３号機でドローンの実証試験を進めている。既にある火力発電所や，2023年６月に営業運転を始める上越火力発電所１号機（新潟県上越市，57.2万kW）に導入する方針である。５年後をめどに，生産ラインなどの設備を持つメーカーなどへシステムを外販することも目指している（Fig. 6）。

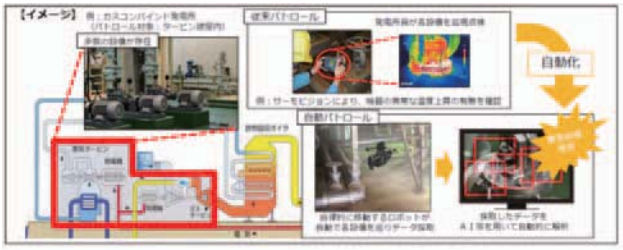

Fig. 6 Automatic inspection by drone

7.2 システム概要

１）ロボットの完全自立移動

現場をパトロールするための移動手段を，操縦者を必要としない,ドローンをはじめとする完全自立型ロボット（移動，充電を一貫して自動化）で確保する。

２）発電所員の感覚機能のデータ化

発電所員が持つ感覚機能（外，音，振動，表面温度，臭気など）を，ロボットに搭載する各種センサで再現する。

３）データの解析・判断

採取したデータの複合的な解析による判断をおこなう。

４）異常発見

発電所員が培ってきた経験（パトロールによる異常発見の技術）をAI等で再現する。実用化に向けて，実証試験を繰り返し，各機能を充実化し，各技術を組み合わせた一つのシステムとして，設備パトロールの自動化を実現する。

8．ワイヤレスシステム

8.1 ワイヤレスの概要

電波を使って信号や情報の送受信を行うワイヤレス技術は日々進歩しており，今や様々な分野への応用が進んでいる。産業分野においても，現場のセンサや計測器で測定した情報をワイヤレスで伝送するセンサネットワークの導入が急速に進んでいる。これはワイヤレスの大きなメリットの一つである配線コストの削減という目的だけでなく，作業効率の向上や安全・安心の向上，監視強化，IoTとビッグデータを活用した取り組みの一環として，膨大な現場データを収集する目的で重要な要素となっている。

8.2 ワイヤレスの種類

ワイヤレスの導入が進んでいる状況の中，産業分野ではより安全で高い信頼性を確保したワイヤレス技術を活用するため，工業用途に耐え得る技術が開発されている。

また，広く複雑な工場・プラントにおいては，複数のワイヤレスシステムを導入することから，共存して活用できるような仕組み（マルチベンダ）を考える必要がある。このような背景から，センサネットワークの通信プロトコルに対する国際標準化の活動も行われている。

ワイヤレスには無線周波数帯域や通信距離，通信速度などの違いにより多くの種類があるが，本稿で紹介したシステムに使用されるWi-Fi，ISA100.11a，920MHz帯無線について述べる。

１）Wi-Fi

Wi-Fiは，国際標準規格であるIEEE 802.11規格を使用した無線LANに関する登録商標で，企業だけでなく一般家庭や公衆無線LANとしても広く使われている。無線周波数帯域は2.4GHz帯や５GHz帯が挙げられる。上記の通り幅広く使用されていることから，たくさんある種類の中では，導入のしやすさが大きな特徴である。

２）ISA100.11a

ISA100.11aは，ISA（International Society of Automation）のISA100委員会が策定した工業用無線で，IEEE 802.15.4規格に準拠した2.4GHz帯を使用している。ISA100も国際標準規格となっている。強固なセキュリティや経路二重化などにより，信頼性の高いネットワークが特徴の規格である。

３）920MHz帯無線

920MHz帯無線は，日本国内で2012年から使用可能になった無線周波数帯域である。920MHz帯は2.4GHz帯と比較して，通信距離が長いことと回折性に優れているという利点があり，障害物が多い発電所内において，ワイヤレスのシステムを構築しやすいという特徴がある。尚，920MHz帯はスマートメーターに関連した国際標準規格に準拠したものもあるが，その他は日本国内の標準規格ARIB STD-T108で定められている。

8.3 現場支援システムとネットワーク

現在，IoT導入が進んでいるプラントで使われるIoTシステムは通常，センサデバイス層（各種センサが組み込まれた機器，設備），デバイスネットワーク層（センサからのデータを取得する無線機器），インターネット層，IoTシステムサーバ層（データを蓄積するサーバ），

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

IoTシステムアプリケーション（データを分析・学習するシステム）から構成され，センサやデバイスからのデータを収集・蓄積・分析することで価値につなげる。

一方，IoTに近い概念とされるM2Mは，モノ同士の自律的なやり取りによって正確かつリアルタイムな制御につなげる概念で，発電所内など閉じた空間（On-premises）で使われる（Fig. 7）。

現状，発電所においては，不特定多数がアクセスできるネットワークを介して，電力制御システム等が外部から不正侵入されないようにするために，外部ネットワークとの分離が規定されている（「電力システムセキュリティガイドライン（JESCZ0004）第５－１条」において，外部ネットワークとの分離）。

このため，IoTも所内サーバを用いるなど，M2Mに近いかたちで構成されるか，または「即時性が要求されるデータ連携等が必要な場合には，その間に他ネットワークや別のシステム等の緩衝エリアを設けて，間接的にデータ連携を行う仕組み等を構築する」という方法が考えられる。

また，同ガイドライン「第５－６条　アクセス制御」では，接続制御，認証，ネットワーク分割について推奨されており，これらを行わない場合，なりすましや不正な機器を接続されることにより，他の機器や電力制御システム等の稼働に影響を与える可能性があるとされている。このような，条件から発電所内のデバイスネットワーク層はOn-premisesのネットワークでの構成となる場合が多く，また，プラント構内をカバーするためワイヤレスメッシュネットワーク化が進んでいる（Fig. 8）。

使用される無線機は，AP（アクセスポイント）にマルチラジオモデルを採用し，バックホール（中継回線）には高速通信が可能で干渉のない５GHz帯を，クライアントとの通信は相互接続性の高い2.4GHz帯（Wi-Fi）と分ける事により，高速かつ安定した通信環境を確保している。また，メッシュネットワークを構築する事で，APが自律分散的に経路制御をするとともに，リアルタイムで輻輳状況やリンク速度を監視し最適な経路を選択しながらコストパフォーマンス良く広域にWi-Fi環境を構築する事が可能になった[10]（Fig. 8）。

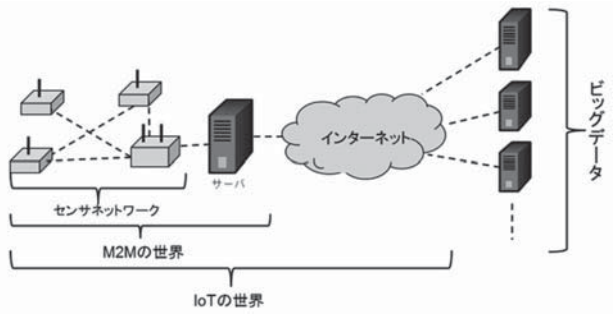

Fig. 7　Concept of IoT

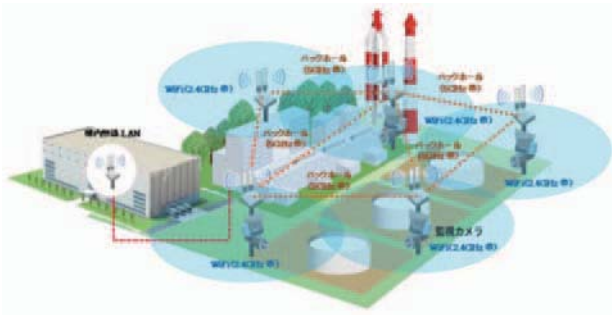

Fig. 8　Image of on premises networks

9．おわりに

本稿では，映像・音声・AR技術を活用した熟練者と現場作業者との円滑なコミュニケーションを実現したスマートグラスをはじめ，画像処理やワイヤレスセンサによる異常検知システム,さらにドローンやロボットによる巡視点検の自動化など紹介した。今後予想される熟練者の不足を補い，コストの増加を抑えつつ火力発電設備の運用・保全の品質と安全を維持する一助として，これらのシステムの普及とワークフロー化が期待される。

参考文献

(1) 経済産業省
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/pdf/022_04_00.pdf(参照日2020年6月7日).
(2) 経済産業省
https://isa100wci.org/ja-jp/Documents-japan/2017-Kawasaki/1（参照日2020年6月5日).
(3) Dynabook株式会社
https://dynabook.com/business/mecd/product/ar100-mar-2019/index.html（参照日2020年7月15日).
(4) セイコーエプソン株式会社
https://www.epson.jp/products/moverio/bt350special/（参照日2020年7月18日).
(5) JMACS株式会社
http://www.jmacs-j.co.jp/products/nveyes/（参照日2020年6月5日).
(6) スカイロジック
https://www.skylogiq.co.jp/product/easymonitoring/index.html（参照日2020年8月11日).
(7) 新川電機株式会社
https://www.shinkawaelectric.com/products/sensor/e-swins.html（参照日2020年5月25日).
(8) 関西電力株式会社　プレスリリース
https://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2020/0825_1j.html（参照日2020年8月27日).
(9) 東北電力株式会社　プレスリリース
https://www.tohoku-epco.co.jp/pastnews/normal/1201327_1049.html〉（参照日2020年8月28日).
(10) マグナ通信工業株式会社
https://www.magna.co.jp/seihin/tabid/172/Default.aspx（参照日2020年5月19日).

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

特集：電力エネルギーを支える各種発電技術の最新動向

GT吸気フィルタの寿命延伸や高性能化に向けた取り組みについて

Our Effort to extend the Service life and Performance of GT intake filters

杉本 明夫[*1]　澄田 和夫[*1]
SUGIMOTO Akio　SUMITA Kazuo

キーワード：ガスタービン吸気フィルター，フィルタエレメント，HEPAフィルター，GT吸気フィルタ室，GT吸気フィルタシステムの改善／改造及びリハビリーテーション
Key Words：GT intake filter, Filter element, HEPA filter, Filter house, Improvement / Modification and Rehabilitation of GT intake filter system

1．はじめに

弊社では，1970年代に日本に導入されたガスタービン（以下「GT」）発電設備向吸気フィルタを納入，その後約50年に渡ってGT吸気フィルタエレメント及びフィルタハウス等の関連設備／製品を設計・製作・納入している[(1)]。

この長い歴史の中で，市場の要求や変化に応じて，弊社は新しい製品・サービスを模索してきており，今年７月の日本ガスタービン学会誌では，弊社が取り扱う主な製品について紹介する機会を得た[(2)]。

GT吸気フィルタは空気圧縮機・ガスタービン等主機の手前に設置され，フィルタによってろ過された空気が直接取り込まれるという，非常に重要な部位である。日本の市場では，早くからその重要性が認識され，日本ガスタービン学会・ユーザー及び一部プラントメーカーによってHEPAフィルタ[(3)]導入によるGT性能劣化防止の効果を検証し，1990年代からHEPAフィルタの導入が進められてきた[(4)]。この動きに，フィルタサプライヤーとしてサポート出来たことは，弊社にとって誇りであると同時に，様々な知見を得る機会となった。

上述のように，国内では一般的になったGT吸気フィルタへのHEPAフィルタ導入だが，海外では東南アジア等の一部を除いて限定的であり，まだその効果に対して懐疑的な印象を持つ客先は多い。加えて，現状のフィルタ室構造等から導入が難しいサイトも多く，改造を伴う提案をする機会がある。当稿では，東南アジア等海外のGTユーザーとの取組み事例を通じて，客先視点に基づいたGT吸気フィルタの課題を解決した事例を紹介する。

原稿受付　2020年９月18日
＊1　進和テック㈱　プラント機械部
〒164-0012　中野区本町1-32-2
E-mail: k_sumita@shinwatec.co.jp

2．海外GTユーザーとの吸気フィルタ改善事例

2.1　タイ（民営電力事業会社との共同研究）

弊社は2010年頃から東南アジアのGTユーザーへの訪問を始め，GT吸気フィルタの仕様や寿命などについてヒアリングを行った。その結果，発電電力量のうちLNG比率が約70％程度（2010年当時）と高い[(5)]タイをメインターゲットとし，各サイトにHEPAフィルタ導入の提案を始めたところ，営業活動の開始当初は否定的なコメントを多数頂く事となった。一例を下記に挙げる。

・燃料費が安価で，GT性能低下は問題にならない
・人件費や薬品代等が安価なため，コンプレッサー翼のOn/Off line washingとも実施に支障無し
・吸気系の圧力損失値が高まることにより，GT性能に悪影響を及ぼさないか心配である
・HEPAフィルタは高価であり，結局フィルタメーカーだけが利益を得ることにならないか懸念がある

これら否定的な意見を聞いた当初は困惑したが，自社の営業姿勢を見直す機会が得られたものとして考え方を切り替え，GTユーザー視点で提案の内容や方法を検討し，修正を加えた。

・説明する際のフィルタ規格・仕様を海外基準とし，タイで多く用いられているEN規格（又はMERV規格）にて説明するようにした（次項Table 1の太字部分参照）。
・今までは当社製フィルタの優位性をいかにアピールするかに注目していたが，HEPAフィルタ導入によるメリットについて客先と協議を重ね，Heat Rate（Btu/kW･hr）に着目してHEPA導入機と未導入機のデータを比較することで，ガス消費量の削減によるメリットの定量的な分析を行う事が出来た
（詳細は後述）
・客先の売電契約であるPPA（Power Purchase Agreement）やLNGの購買契約（Gas Supply

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

Table 1　Comparison table of air filter testing method and grading [6][7][8][9][10]

JIS B9908(2001)	ASHRAE Standard 52.2(2017)				ASHRAE 52.1(2009)		EN	EN779(2012)			EN1822(2009)
形式1(計数法) 形式2(比色法) 形式3(質量法) の3種類にて規定	Minimum Efficiency Reporting Value	Composite Average Particle Size Efficiency(% in Size Range μm)			Average Arrestance	Average DustSpot Efficiency	Filter Class	Avg. Arrestance of Syn Dust	Avg Eff at 0.4μm	Min. Eff, at 0.4μm	Efficiency at MPPS
		Range E1	Range E2	Range E3				Test Final DP 250 Pa	Test Final DP 450 Pa		
	MERV	0.3−1.0	1.0−3.0	3.0 − 10.0	%	%	EN	%	%	%	%
形式3(質量法) ※主にプレフィルタが対象	1	N/A	N/A	E3＜20%	Avg＜65	＜20	G1	50%A≦65			
	2	N/A	N/A	E3＜20%	Avg＜65	＜20					
	3	N/A	N/A	E3＜20%	Avg＜70	＜20	G2	65%A≦80			
	4	N/A	N/A	E3＜20%	Avg＜75	＜20					
	5	N/A	N/A	20%≦E3	80	20	G3	80%A≦90			
	6	N/A	N/A	35%≦E3	85	20-25					
	7	N/A	N/A	50%≦E3	90	25-30	G4	65%A≦80			
	8	N/A	20%≦E2	70%≦E3	92	30-35					
形式2(比色法) ※主に中性能フィルタが対象	9	N/A	35%≦E2	75%≦E3	95	40-45	M5		40%A≦Em60		
	10	N/A	50%≦E2	80%≦E3	96	50-55					
	11	20%≦E1	65%≦E2	85%≦E3	97	60-65	M6		60%A≦Em80		
	12	35%≦E1	80%≦E2	90%≦E3	98	70-75					
	13	50%≦E1	85%≦E2	90%≦E3	98	80-85	F7		80%≦Em90	35	
	14	75%≦E1	90%≦E2	95%≦E3	99	90-95	F8		90%≦Em95	55	
	15	85%≦E1	90%≦E2	95%≦E3	99	95	F9		95%≦Em3	70	
形式1(計数法) ※主にHEPAフィルタが対象	16	95%≦E1	95%≦E2	95%≦E3	100	99	E10				>85
	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	E11				>95
							E12				>99.5
							H13				>99.95
							H14				>99.995
							U15				>99.999
							U16				>99.99995
							U17				>99.999995

Agreement）など，発電所の運営の根幹に関わる部分についても協議をし，どのような提案が客先の利益を最大化出来るかについて検討するようになった

上記のような発想の転換と，GTユーザー・オーナーの御協力により，タイのIPP（Independent Power Producer）発電所と共同研究を実施することが出来た。当共同研究の概要を下記に記す。

・同時期にMajor Maintenanceを実施する２機のGT（出力：245MW）のうち，１機に中性能クラス（EN Class F8）を設置してもう１機にHEPAクラス（同E12）を設置
・GT吸気フィルタ仕様以外は，メンテナンスのみで一切手を加えない（機器更新・仕様変更をしない）
・売電契約によって発電量は決められているため，ガス消費量と発電量から日々のHeat Rate を算出してメリット計算を行う
・HEPA未設置のGTはコンプレッサーにダストが付着することで所定の圧縮比が得られずロスが生じ，Heat Rateが上昇（悪化）すると仮定して，両GTのHeat Rate差を毎日記録する
・メリットの計算方法（概略）は下記の通り。
Heat Rate差 ＊ 日々の発電量（２機の平均）＊ ガス価格（毎月の平均値）＝ 一日あたりのメリット額当メリット額を日々計算して，共同研究期間中の合計メリット額を算出する
・共同研究の期間は，３年間もしくはHEPAフィルタの差圧が交換推奨値に達するまでとする

このような条件で契約書を取り交わしたものの，実務面では様々な問題・課題に直面した。一例としてフィルタ枠の強度が挙げられる。当共同研究で設置するHEPAフィルタは，既存品より重くなるため，取枠の強度に問題が無いことを確認する必要があり，図面及び現地調査の結果を基に長・短期荷重それぞれによる枠のたわみ量を計算，問題が無い事を確認した。

Fig. 1に共同研究したGT吸気フィルタ室を，Fig. 2に強度計算に用いた図面・モデリング図の一部を示す。

Fig. 1　GT intake filter house

このような強度計算は，先日当学会誌で報告した[2]ように，弊社はフィルタエレメントだけでなく，フィルタハウス・ダクト等関連設備の設計・製作が出来ることによる技術的付加価値の提供と考えている。

Fig. 3に弊社製フィルタの設置状態を示す。

GTの運転再開後，日々のデータを受領しGT性能をグラフ化することが出来た。

Fig. 4にGT運転再開後，３ヶ月を経過した時点での

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

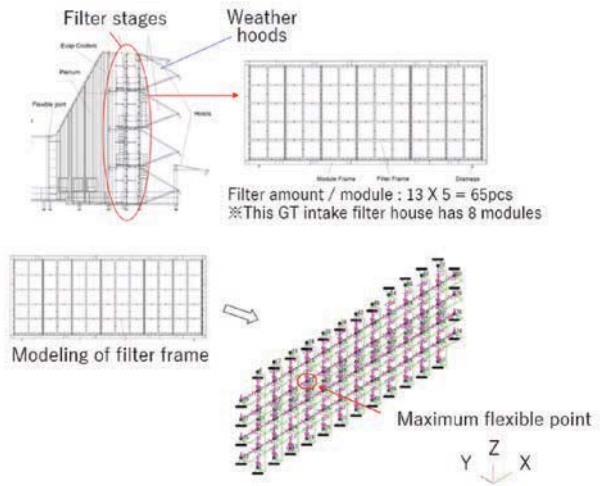

Fig. 2 Strength calculation of filter frame

Fig. 3 HEPA filters in GT intake air filter house

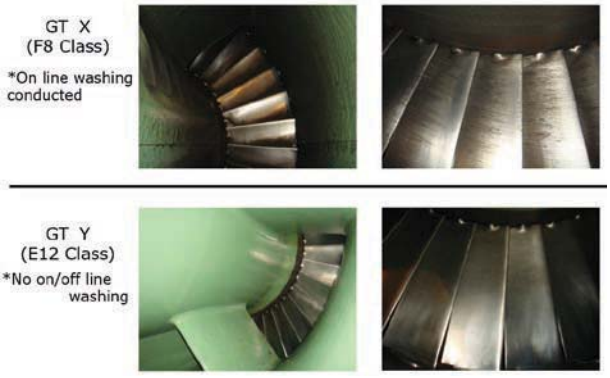

Fig. 4 Comparison photos of IGV

IGV（Inlet Guide Vane）の比較写真を示す。

また，Fig. 5に約２年間のHeat Rate推移を示す。尚，中性能フィルタが装着されているGT XのみOn line washingを二日ごとに実施していたこと，Fig. 5について客先との取り決めから実際のデータに基づいて作成した概略図であることを付記する。

Fig. 4より，中性能フィルタが設置されているGT XはIGV翼にダストが付着しており，一方でGT Y（E12クラスのフィルタを導入）のIGV翼は綺麗な状態が保たれていることが分かる。この違いが，実際どのようなメリットをもたらすかについてFig. 5を用いて説明したい。

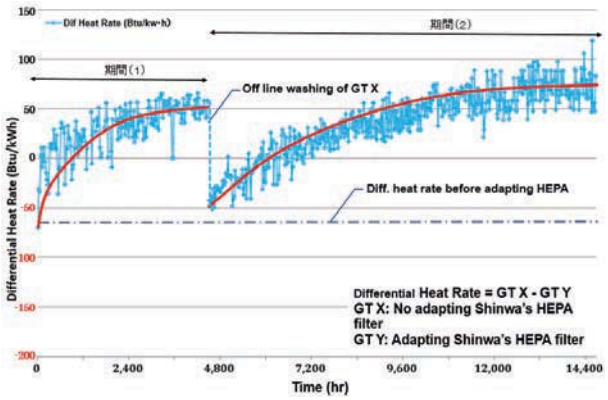

Fig. 5 Trend of heat rate value

まず，GT Yに高効率フィルタを設置する前，同クラスのフィルタを設置していた当時のHeat Rate差（GT X − GT Y）は-60（Btu/kW･hr）程度と，GT Xの方が少し低い値であった（客先から受理したデータより確認）。しかしGT Yに高効率フィルタ導入後，GT運転開始当初は上記と同じ程度であったが運転時間の経過に伴いHeat Rate差は上昇傾向を示し，4,000時間程度経過後は+50（Btu/kW･hr）程度となった。

その後，GT XのみOff line washingを実施したところHeat Rateが改善，差分は-50（Btu/kW･hr）程度に戻ったが，運転再開後に当差分は上昇傾向を示し，+70（Btu/kW･hr）程度で小康状態となった。従って，図中の期間(1)，(2)ともHeat Rateは100（Btu/kW･hr）以上の改善が見られた。元々のHeat Rateは11,000（Btu/kW･hr）前後だった為，約１％の改善が見られたことが分かる。

また，Fig. 6に当共同研究終了後に実施したOff line washingの洗浄水を示す。左端はGT X,それ以外はGT Yの洗浄水である。GT X分（F8 class）は汚れているが，GT Y分（E12 class）は綺麗な状態である。当比較からも，高効率フィルタの導入によってコンプレッサー翼へのダスト付着状況が異なることを確認した。

このようにしてデータを集めて計算したところ，約２年間で１Million 米ドル以上の天然ガス消費量削減によ

Fig. 6 Comparison photos of washing water

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

るメリットが得られたことが分かった。概算の計算式を下に示す。

Output **245**[MW] X **11**[MMBtu/Mw·hr] X **8,000** [hr/year]
x (Heat Rate increasing percent **1**[%] X **1/2**[Due to Triangle]
= **107,800**[MMBTU] X **5**[USD/MMBTU] X **2**[year]
= **1.078** [Million USD]

ガスタービンの性能はGT吸気フィルタの性能以外にも，機械的要因や環境，燃焼ガス等によって変動するものと認識しているが，当共同研究によって吸気フィルタの質がとても大きく影響することを改めて確認することが出来た。当稿では誌面の関係上紹介できないが，別のメーカーの同程度の出力を持つGTでは，E12クラスの高効率フィルタを導入したことで，Heat Rateに約３％の改善が見られたこともあり，GTメーカー・立地環境等によってGT吸気フィルタ高効率化の影響には違いがある。

2.2　インドネシア（GT吸気室の内部改造）

インドネシアは石炭が発電用一次エネルギーの約７割を占める[11]が，天然ガスは20％程度となっている。急増する電力需要に応えるため，2015年にインドネシア政府が策定した35GW開発計画に基づき発電容量の増加が進められている。

そのような中，プラントメーカーを通じて事業用GTの性能低下に悩むサイトを紹介して頂き，先方が求めている内容をヒアリングし，合わせて大気環境測定を実施して改造プランの策定をした。

2.2.1　ヒアリングと大気塵測定　客先を訪問して自社を紹介し，現在のGT状況について確認した。下記に概要を示す。

GT容量：240MW
GT吸気フィルタ形式：カートリッジ型[2]
サイトの立地：沿岸地域（都市部から至近）
ご要望：GT出力低下の抑制

上記を確認し，図面及びGT吸気フィルタ室を確認したところ，EN ClassでF8クラスのカートリッジ型フィルタのみが設置されている状況であることを確認した。Fig. 7に設置イメージを示す。

また，パルスによる逆洗は実施しているものの，ほとんど効果が無い（ダストが落下せず，圧力損失値は回復

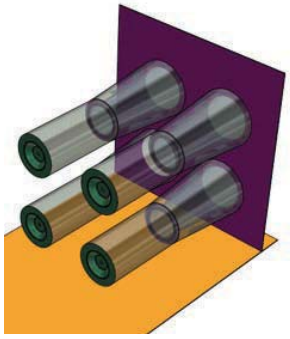

Fig. 7　Image drawing of GT intake air filter

Table 2　Comparison of dust density

Country	Indonesia	Thailand	Vietnam (Dry Season)	Japan
Location (date)	Site A –	Rayong Province 26 Apr., 2012	Phu My Province 26 Apr., 2011	Industrial area 28 March, 2011
Dust density	0.089mg/m^3	0.066mg/m^3	0.088mg/m^3	0.065mg/m^3

Table 3　Comparison of particle size distribution

Date of measurement			–	
Place of measurement			Site A	
Amount of dust weight by particle size(mg) ／percentage（%）	over 11.00	μm	0.20	6.3%
	7.0～11.00	μm	0.30	9.4%
	4.7～7.0	μm	0.30	9.4%
	3.3～4.7	μm	0.40	12.5%
	2.1～3.3	μm	0.40	12.5%
	1.1～2.1	μm	0.40	12.5%
	0.65～1.1	μm	0.20	6.3%
	0.43～0.65	μm	0.20	6.3%
	under 0.43	μm	0.80	25.0%
	total		3.20	100.0%

しない）との事だった。

大気塵測定は，ハイボリュームエアサンプラによる大気塵濃度（mg/m^3）と，アンダーセンエアサンプラによる質量基準の粒径分布（w/t %）の２つを実施し，他サイトと比較しつつ改造案を検討した。Table 2，3に測定結果を示す。

当測定結果及び立地状況から，単にプレフィルタを設置するだけでなく，水滴及び粗大粒子除去のため，コアレスフィルタ（Coalescer）の設置を提案し了承を得た。Fig. 8に新旧フィルタ仕様の違いを示す。

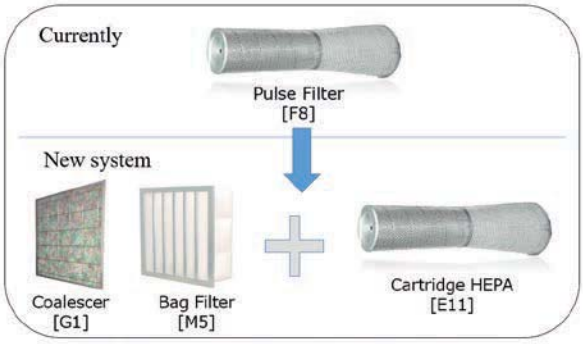

Fig. 8　Comparison of GT intake air filter system

2.2.2　GT吸気室内の改造　CoalescerとPre filterを設置するため，現地調査及び客先・取引先との協議を重ね，GT吸気フィルタ室の内部改造を行う事となった。内容は，フィルタ室内部の梁・柱に上記フィルタを設置するための部材を固定し，不要な開口箇所には封止板を張り付けるというものである。

設置するフィルタエレメントは弊社工場から供給し，改造工事用の部材及び施工業者はインドネシア国内で手配した。

Fig. 9に工事状況の写真を示す。

当改造実施後，隣設する同型GT（中性能フィルタを装着）と出力を比較した結果，半年間を経過して10MWほ

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

Fig. 9 Photo of modification working in filter house

ど高い状態である（当初の性能を維持）ことが分かった。Fig. 10にGT出力推移の比較カーブを示す。また，CoalescerとPre filterを追設したことで，カートリッジ型フィルタに到達するダストが減り，改造前よりも当フィルタ寿命が長くなったと客先よりコメントを頂いた。

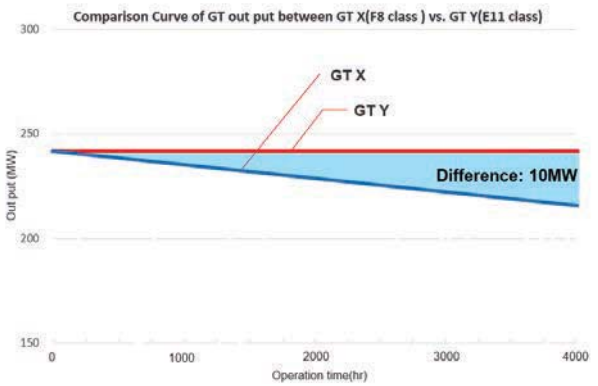

Fig. 10 Comparison of GT output

2.3 メキシコ（GT吸気室のリハビリテーション）

2020年２月時点でのメキシコにおける電源構成は，天然ガスによるCombined Cycle GTが約60％である[12]。そのため多数のGT発電所が運転されているが，弊社はメキシコ湾沿いに設けられているIPPサイトに高効率タイプのフィルタを15年以上継続して納入している。下記に当サイトの概略仕様を示す。

GT容量：165MW
GT吸気フィルタ形式：ボックス型[2]
サイトの立地：沿岸地域（都市部からは遠隔）
ご要望：現状と同等フィルタにて安定した４年以上の継続使用

現状では，E12クラスの高効率フィルタで３年程度の寿命となっている。そのような環境下で，GTメンテナンス周期を延ばす計画があり，同等クラスのフィルタにて４年以上安定して継続使用を達成したいと要望頂いた。また，サイトが海岸近くに立地しているため塩害が進んだ状態のフィルタハウスをリハビリテーションしたいとご要望頂き，実機の状態やフィルタ室の構造を確認して改造内容を提案した。

2.3.1 提案内容 実機確認の結果，高効率フィルタ下流側（GT側）は塩害が進んでいないことを確認した。そこで，高効率フィルタの上流側を切断・撤去し，新たなフィルタハウスを５階建て構造のモジュールとして組み立てて，プレフィルタ仕様を変更するプランとした。

Fig. 11に改造案の概略図・写真を示す。当フィルタ室は左右両側から空気を取り入れる構造となっており，破線部分から上流側（外気側）を切断・撤去する。

Fig. 12にフィルタモジュール概要図を示す。当フィルタモジュールを左右に５段ずつ積み重ね，既設フィルタ室と溶接にて固定する。

Fig. 11 Draft drawing and picture of this project

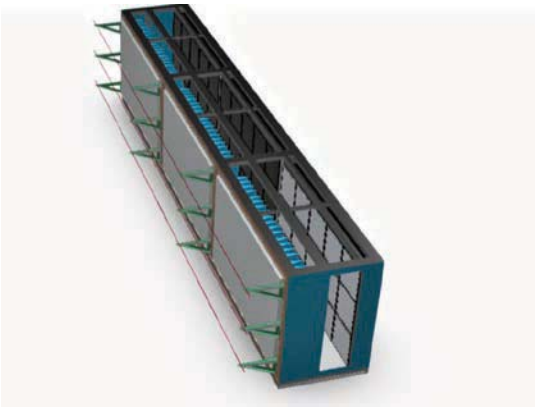

Fig. 12 Image drawing of filter module

Table 4にフィルタ仕様表を示す。水滴・粗大粒子除去用にCoalescerを導入し，プレフィルタは高効率・長寿命タイプに変更することで，最終段の高効率フィルタ寿命の延長を試みる。弊社は独自の寿命計算プログラムを持っており，大気環境測定の結果や今までの実績寿命などから，各サイトにおけるフィルタ予測寿命を求めることが出来る。Fig. 13に予想寿命プログラムを基に図示した圧力損失値の予想推移を示す。尚，Case-1は既存フィルタ構成で，Case-２は新規フィルタ構成を指す。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

Table 4　New GT intake air filter specification

	Shinwa Corporation			
	Coalescer	Pre Filter (Original)	Pre Filter (New)	HEPA filter
Appearance				
EN Class	G1	G4	M5	E12(F8+E12)
Name	Salan-Rock	Dea Kleen GT	Dea Deep PF	Luna Cel GT Duo
Model	OM-150	STC-592/592/96	DDF-PF95-FFLZ	LGT-D-YY2J/X
Dimension[mm]	594x594x25	592x592x96	594x594x500	592x592x292
Filter Element	Salan Fiber	Synthetic Fiber	Synthetic Fiber	Glass Fiber
Efficiency	(Remove water droplet	90% (Mass Method)	95%(Mass Method)	99.97% @0.3μm
Air Flow Volume [m3/min]	56	—	70	56
Initial Filter DP (Pa)	30	65	64	425
Recommend DP(Pa)	250	250	294	700
Dust Holding Capacity [g/unit]	2000	900	2,400	1,600
Weight [kg/unit]	1.5	2	2.5	12.7

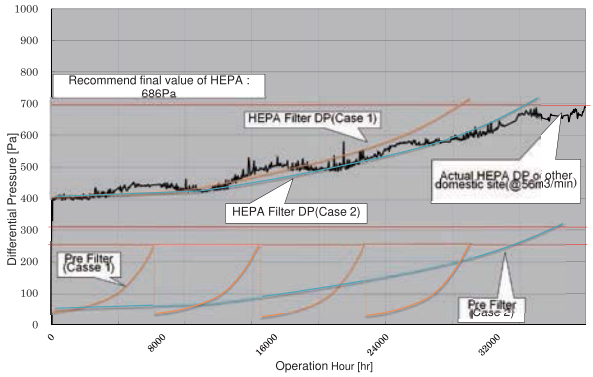

Fig. 13　Comparison of estimated filter differential pressure

2.3.2　施工について　定期検査期間中に施工を完了する必要があり，またGT吸気室は主機につながるダクト・プレナムに直結する位置にあるため，他の施工業者との調整が困難であった。加えて，日系企業を通じてメキシコ国内の業者に作業を依頼したため，工期管理や品質管理について，日本とは異なる難しさを感じつつ，監督はじめ関係各位の尽力により施工完了することが出来た。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

Fig. 14，15に改造工事状況の写真を示す。

Fig. 14　Rehabilitation of GT intake filter house

Fig. 15　Rehabilitation of GT intake filter house

3．将来展望及び結語

当稿では，弊社が今までに培ったGT吸気フィルタエレメント及び周辺機器の設計・製造技術を用いてユーザー視点で要望を実現した事例を紹介した。今後も顧客・関係各位と良い関係を築いてベストな製品・サービスの提供を進めることで，日本及び世界のガスタービン業界の発展に貢献したいと考える。その基礎となる知識・経験は，国内外のGTユーザーとの様々な取引を基としており，その機会を頂いている事に感謝して結びとする。

参考文献

(1)　大和田厚志他，ガスタービン用吸気フィルタの選定とその設置効果，日本ガスタービン学会誌，Vol. 42 No. 3 (2014).
(2)　杉本明夫他，ガスタービン用吸気フィルタ及びダクト等の事例・技術動向，日本ガスタービン学会誌，Vol. 48 No. 4 (2020).
(3)　日本工業規格（JIS）Z8122（2000）コンタミネーションコントロール用語　4114 HEPAフィルタ.
(4)　三浦千太郎，ガスタービンにおける吸気フィルタ総論，日本ガスタービン学会誌，Vol. 25 No. 99 (1997).
(5)　Energy Statistics (EPPO)，Thailand's Power Development Plan 2010 (Ministry of Energy).
(6)　日本工業規格（JIS）B9908（2001）換気用エアフィルタユニット・換気用電気集じん器の性能試験方法.
(7)　ANSI/ASHRAE Standard 52.2 (2017).
(8)　ANSI/ASHRAE Standard 52.1 (2009).
(9)　European Norm (EN) 779 (2012).
(10)　European Norm (EN) 1822 (2009).
(11)　PT.PLN RUPTL 2015-2024.
(12)　メキシコエネルギー規制委員会：CRE (Comision Reguladora de Energia) report Feb. 2020.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

特集：電力エネルギーを支える各種発電技術の最新動向

ガスタービン油の性能と管理

Performance and Maintenance Management of Gas Turbine Oil

山田 賢司*1
YAMADA Kenji

キーワード：コンバインドサイクル，ガスタービン油，酸化防止剤，スラッジ，管理，DryTOST
Key Words：Combined Cycle，Gas Turbine oil，Antioxidant，Sludge，Maintenance，DryTOST

1．はじめに

ガスコンバインドサイクル発電システムは1980年代から導入が始まり，その後燃焼ガスのタービン入口温度の高温化による発電効率の改善が図られてきた。燃焼ガス温度は導入当初の1100℃級から1300℃級，1500℃級と上昇し，近年では1600℃級の高効率機が実用化され，さらに1700℃級の超高効率機の実用化検討が国家プロジェクトにより推進されている[1]。

ガスコンバインドサイクル発電の電力供給全体に占める比率はFig. 1 の発電構成比に示す通り，2011年の東日本大震災以降，原子力発電の停止の影響を受け上昇しており，今後更なる効率改善とCO_2削減など環境性能の向上が期待されている。

タービン油は主に軸受の潤滑油として使用されるが，ガスコンバインドサイクル発電においては燃焼ガスの影響を受け軸受付近が高温に晒されるため過酷な使用環境となる。そのためガスコンバインドサイクル発電用のタービン油は高温条件に長期間耐えうる専用のガスタービン油を選定しなければならない。また，発電設備を長期間に渡り安定的に稼働するためには，ガスタービン油の特性を把握した上で適切な潤滑油管理を実施することが重要である。

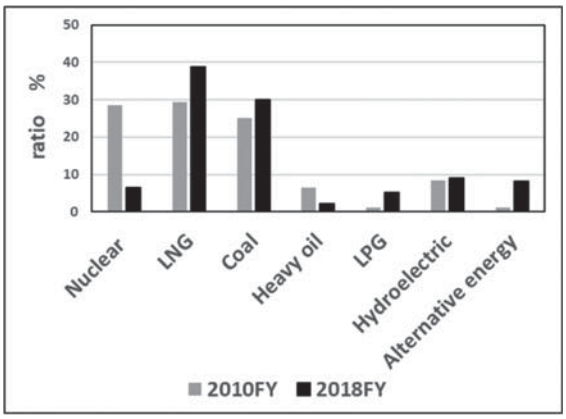

Fig 1　Power generation composition ratio by power source[2]

※In 2010,Total of 10 electric power companies from The Federation of Electric PowerCompanies of Japan. In 2018, 10 area totals from the energy survey by Agency for Natural Resources and Energy

原稿受付　2020年 9 月 4 日

＊1　コスモ石油ルブリカンツ㈱
〒340-0193　幸手市権現堂1134- 2
E-mail: kenji_yamada@cosmo-oil.co.jp

2．ガスタービン油に求められる性能

タービン油としての基本的な性能は適正粘度，酸化安定性，さび止め性，消泡性，放気性等が挙げられ，特にガスタービン油では酸化安定性を強化し高温条件下での長期使用に耐え得る性能を付与しなければならない。また長期使用中に劣化物などによるオイルに不溶の成分，いわゆるスラッジが発生すると軸受の温度上昇など最悪の場合機器の運転に支障をきたす場合もあるため，基油や添加剤の選定において最も重視すべき点である。

ASTM及びISOに規定される汎用タイプ及び高温用タービン油の新油規格をTable 1 に示す。また市販ガスタービン油の例として当社ガスタービン油の性能の一部をTable 2 に示す。

ASTM，ISOともに高温用タービン油の規格では酸化安定性試験の一つであるRPVOT（Rotating Pressure Vessel Oxidation Test）の下限値が高く設定されている。RPVOTは金属触媒，水，加圧酸素の存在下で試験油を150℃の高温に加熱し，酸化防止剤が消耗するまでの時間を評価する。スラッジの発生状況など総合的な性能評価には適さないが，酸化防止剤の寿命を短時間に評価できる。

ガスタービン油と蒸気タービン油のRPVOT値の違いは主に酸化防止剤の選定によるもので，蒸気タービン油ではフェノール系酸化防止剤，ガスタービン油ではアミン系酸化防止剤が使用されることが一般的である。フェノール系酸化防止剤は添加量の増加に対しRPVOT値が頭打ちとなり長寿命化には適していない。またフェノール系酸化防止剤の中で最も一般的なDBPC（2,6-di-tert-

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

Table 1 Specification for turbine oils (VG32) (Excerpt)[3),4),5)]

Property	Unit	Test method		ASTM D4304		ISO 8068	
		ASTM	ISO	Type I (bearing temp. ≦110°C)	Type III (bearing temp. >110°C)	L-TSA,TGA	L-TGB,TGSB (high temp.)
Colour	rating	D1500	2049	report			
Appearance(20°C)	rating	–	–	clear and bright			
Kinematic viscosity(40°C)	mm^2/s	D445	3104	28.8-35.2	28.8-35.2	28.8-35.2	28.8-35.2
Viscosity index	–	–	2909	–	–	90min	90min
Density(15°C)	kg/m^3	D4052	3675	report			
Flash point(COC)	°C	D92	2592	180min	200min	186min	200min
Acid number	mgKOH/g	D974	6618	report	report	0.2max	0.2max
Water content	%	D6304	6296	0.02max	0.02max	0.02max	0.02max
Pour point	°C	D97	3016	-6max	-6max	-6max	-6max
Demulsibility(54°C)※1	min	D1401	6614	30max	30max	30max	30max
Foaming seq.1	ml/ml	D892	6247	50/0max	50/0max	450/0max	450/0max
seq.2	ml/ml			–	–	50/0max	50/0max
seq.3	ml/ml			–	–	450/0max	450/0max
Air release time(50°C)	min	D3427	9120	5max	5max	5max	5max
Rust preventive properties(artificial sea water)	rating	D665	7120	pass	pass	pass	pass
Copper corrosion(3h,100°C)	rating	D130	2160	1max	1max	1max	1max
Oxidation stability(TOST)			4263-1				
-time for total acid number 2	h	D943		2000min	5000min	3500min	3500min
-sludge after 1000h	mg	D4310		200max	200max	200max	–
-total acid number at 1000h	mgKOH/g	D4310		report	report	0.3max	–
Oxidation stability(RPVOT)	min	D2272		350min	750min	report	750min
Oxidation stability(m-RPVOT)	%	D2272, modified		–	85min	–	85min
Oxidation stability			7624				
-total oxygen containing products	%	–		–	–	0.4max	–
-sludge	%	–		–	–	0.25max	–
Oxidation stability at high temperature(72h,175°C)		D4636-2	–				
-viscosity change	%			–	–	–	report
-acid number change	mgKOH/g			–	–	–	report
-metal specimen mass change (steel, aluminium, cadmium, copper, magnesium)	mg/cm^2			–	–	–	±0.250
Filterability(dry)Stage I	%	–	13357-2	–	–	80min	80min
Filterability(dry)Stage II	%	–	13357-2	–	–	report	report
Filterability(wet)Stage I※2	%	–	13357-1	–	–	50min	50min
Filterability(wet)Stage II※2	%	–	13357-1	–	–	50min	50min
Elastomer compatibility NBR			6072				
-volume change	%			-4~15	-4~15	–	–
-hardness change	–	–		-8~ 8	-8~ 8	–	–
Cleanliness	rating	–	4406	18/16/13	18/16/13	-/17/14	-/17/14
FZG scuffing fail stage	stage	D5182	–	–	report	–	–

※1 Applies only to steam turbine oils and combined cycle turbine oils with exposure to water in ASTM D4304 and to TSA, TGSB in ISO 8068.

※2 Applies only to TSA, TGSB.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

Table 2 Performance example of commercial turbine oil

Property	Unit	Turbine Super GT32
Kinematic viscosity(40℃)	mm^2/s	32.17
Viscosity index	–	132
Acid number	mgKOH/g	0.07
Oxidation stability(TOST)		
-time for total acid number 2	h	>14000
-total acid number at 1000h	mgKOH/g	0.05
Oxidation stability(RPVOT)	min	2600
Oxidation stability(modified RPVOT)	%	92

Butyl-p-Cresol)）は昇華温度が低くガスタービン油の使用環境では蒸発してしまう虞があるため使用を避ける場合が多い。酸化防止剤の蒸発性は修正RPVOTにおいて，121℃に加熱したタービン油に窒素を3L/hの流量で48時間バブリング処理し，処理前後のRPVOT値を比較し評価される。ASTM，ISOともに高温用タービン油では修正RPVOTを85%以上と規定している。その他規格項目において一般用と高温用タービン油では大きな違いはなく，高温使用を想定した酸化防止性能がより厳しく設定されている。ただし，市販のガスタービン油はRPVOT値が2000分を超えるものが主流であり，またTOST（Turbine Oil Oxidation Stability Test）における酸価2 mgKOH/g到達時間も１万時間を超えるなど，酸化安定性に関しては規格値を遥かに上回る性能の製品が実用化されている。

3．ガスタービン油の管理

ガスタービン油には高温下での長期使用を想定した性能が付与されているが，使用期間中においては定期的な管理を着実に実行し適正な性能が維持されていることを確認しなければならない。

管理基準は公的規格や設備メーカー，オイルメーカーが定める基準を参考に各発電所で規定される。参考として代表的な国際規格であるISO 11366及びASTM D4378をTable 3 に示す。

管理基準項目には新油同等の値を維持すべき項目と，使用過程での添加剤の消耗とともに変化しオイル交換時期の見極めのために経過を監視する項目とに分かれる。また，タービン油自体が消耗し変化する性状と水分やコンタミネーションなど外的要因による場合があり，さらにそれらが複合的に関係する場合もある。

主な管理項目の考え方について以下に解説する。

動粘度（Kinematic viscosity）

軸受などの摺動部分で油膜を保持するためにタービン油の粘度は適正な値を維持しなければならない。動粘度が増加した場合，その要因としてはタービン油の酸化劣化，基油の低分子量成分の蒸発，混入水分による乳化，高粘度油の混入などが可能性として考えられるが通常はほぼ一定の値で推移する。正常な状態で運転された場合でも酸化劣化は進行するが酸化防止剤の機能により酸化の連鎖反応を抑制するため基油の粘度増加には至らない。ただし，酸化防止性能が低下すると粘度増加は加速的に進行するため注意が必要である。

動粘度低下については低粘度油の混入が疑われる。

酸価（Acid number）

タービン油には酸性成分のさび止め剤が添加されるため新油でも微小の酸価を示す。新設設備ではさび止め剤の一部が金属表面をコーティングし消耗するため初期に若干低下しその後一定の値を維持する傾向がある。動粘度と同様に酸化防止性能が低下すると基油の酸化が進むため酸価の値は加速的に上昇する。油中の酸性成分が増加すると機器内部の金属と反応しオイルに不溶の金属塩を生成しスラッジ化する虞がある。

RPVOT値と酸化防止剤残存率（Antioxidant residual rate）

これらはタービン油中の酸化防止剤の消耗に伴い低下する項目である。

RPVOTは熱，酸素，金属触媒，水といった実使用の劣化環境を模擬し加速条件により強制劣化させることで残存寿命を評価する。一方，酸化防止剤残存率は成分分析により残存寿命を評価する。ASTM D4378ではRPVOT値及び酸化防止剤残存率が新油の25％，ISO 11366ではRPVOT値が25%を使用の限界と定めている。

RPVOTは加速劣化試験であるためコンタミネーションや基油の劣化の影響を含めた使用油の酸化防止剤残存寿命を評価することができる。ただし試験法上の精度はRPVOT値1000分以下の試験油に対し規定されているためガスタービン油では試験結果のバラツキが懸念される。よってRPVOT値及び酸化防止剤残存率の双方を管理することが好ましい。尚，ガスタービン油の場合，長寿命化と耐スラッジ性の両立のため複数の酸化防止剤を組み合わせる場合が多く，RPVOT値と酸化防止剤残存率の低下速度は必ずしも一致しない。そのため，例えばRPVOT値よりも先に酸化防止剤残存率が交換基準に到達するという場合もあり，その際は使用限界と判断すべきかと考える。

汚染度（Insolubles）

汚染度は細孔0.8 μmのメンブランフィルタで100mlの使用油をろ過しろ過前後の重量増加を測定する。汚染度の増加要因には摩耗粉，コンタミネーションなどの混入物とオイルの酸化劣化物や金属腐食によるものがある。通常は前者の混入物が主体で１mg/100ml前後で推移するが，汚染度が上昇傾向を示す場合には劣化物の可能性を疑い，ろ過後フィルタ補足物の成分分析を行う必要がある。

酸化防止機能が低下し基油の酸化が進行すると汚染度は急激に上昇するが，RPVOT値や酸化防止剤残存率を管理値以上に保つことでそのような状況は回避できる。

一方，添加剤の化学構造が変化し基油に不溶化する場合もある。ガスタービン油ではアミン系の酸化防止剤が主に使用されるが，アミン系酸化防止剤は酸化防止機能

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

Table 3 Warning limits at the in-service monitoring of gas turbine oils [6],[7]

Property	Warning limit		Test method
	ASTM D4378	ISO 11366	
Acid number increase over new oil	0.1~0.2mgKOH/g (up to 20000h)	0.1~0.2mgKOH/g (up to 3000h)	ASTM D974 /ISO 6618
	0.3~0.4mgKOH/g at any time	0.3~0.4mgKOH/g at any time	
RPVOT	<50% of original(up to 20000h)	<50% of original(up to 3000h)	ASTM D2272
	<25% at any time	<25% at any time	
Appearance	hazy	hazy	–
Rust preventive properties(distilled water)	–	light fail (after 20000h)	ISO 7120
Colour	unusual and rapid darkening	unusual and rapid darkening	ASTM D1500/ISO 2049
Kinematic viscosity(40°C)	5% change from original	5% change from original	ASTM D445 /ISO3104
Flash point	drop of 15°C or more	drop of 15°C or more	ASTM D92 /ISO 2592
Foaming	>450ml/10ml	>450ml/10ml	ASTM D892 /ISO 6247
Air release time(50°C)	double time compared to new oil	>8 min	ASTM D3427/ISO 9120
Cleanliness	18/16/13 or OEM recommended limits	–	ASTM F311 and F312 or D7647 or User defined
Wear metals	>10-20ppm	–	ASTM D5185
Additive elements	±25%	–	ASTM D5185
Antioxidant residual rate	<50%(up to 20000h)	–	Voltammetry/FTIR ASTM D6810,D6971
	<25% at any time	–	
Insolubles	>0.1wt%	–	ASTM D2273

を果たした後に基油に不溶のスラッジとなるものもある。この場合にはRPVOT値や酸化防止剤残存率が基準値に到達していなくてもスラッジが発生するため他管理性状は正常値を示す場合が多い。さらにスラッジが軸受部などの局所的な高温箇所で発生し堆積した場合にはオイルタンクから抜き取った試験油では検知することが難しい。

水分（Water content）

タービン油の水分は大気中の水分の吸湿による場合には通常数10ppm以下であり，100ppm程度までは外観は透明である。ガスタービンの場合は高温環境により水分が蒸発するため油中に蓄積される心配は少ないが，一軸タイプのコンバインドサイクルで蒸気タービン油と兼用の場合には注意が必要となる。水分量が大きく上昇する場合には冷却水の漏れを疑う必要がある。

油中水分の増加による弊害には油膜低下による潤滑不良，さびや腐食の発生，酸化劣化の促進，さび止め剤の抽出によるさび止め性の低下などが考えられる。

色，外観（Colour，Appearance）

色は新油時では淡黄色透明で使用時間の経過とともに徐々に濃色化するが通常は性能低下との直接的な関係は無い。ガスタービン油の場合にはアミン系酸化防止剤がフェノール系酸化防止剤に比べ着色し易いため蒸気タービン油より色の変化は速い。

外観に濁りが発生した場合には水分や異物の混入が考えられるためオイル分析と並行し現場での調査を早期に始める必要がある。尚，水分は油温が低下すると析出する場合があるのでサンプリング直後及び室温の両方で濁りを確認することが好ましい。

4．ガスタービン油の耐スラッジ性について

ガスタービン油の処方設計においてはスラッジの発生をいかに抑制するかが最も重要である。特にアミン系酸化防止剤は酸化防止機能後の基油との溶解性も考慮し選定しなければならない。

ガスタービン油の耐スラッジ性評価法としてASTM D7873にDryTOSTが規定されている[8]。DryTOSTは水なし，120℃でのTOSTで試験後油のRPVOT残存率と汚染度の関係を求め，RPVOT残存率25%での汚染度を報告値とする。三菱日立パワーシステムズ㈱ではDryTOSTにおける汚染度100mg/kg以下を合格としている[9]。DryTOSTの実施例としてTable 2 で紹介した当社ガスタービン油での結果をFig. 2 に示す。またRPVOT残存率と酸価の関係についてFig. 3 に示す。

RPVOT残存率25%において汚染度は基準値を余裕を持って満たしているが，酸価については上昇傾向を示しておりRPVOT値の下限値付近では酸化劣化が進行する兆候が見られた。

実際の設備では局所的な高温箇所で添加剤が不溶化し発生したスラッジは通常のオイル管理では検出することが難しいため，ガスタービン油の選定段階で少なくとも

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

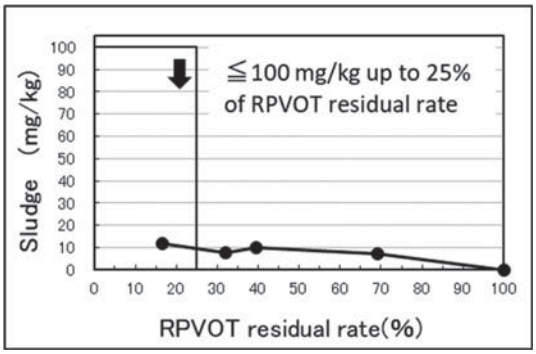

Fig. 2 Sludge amount in Dry TOST

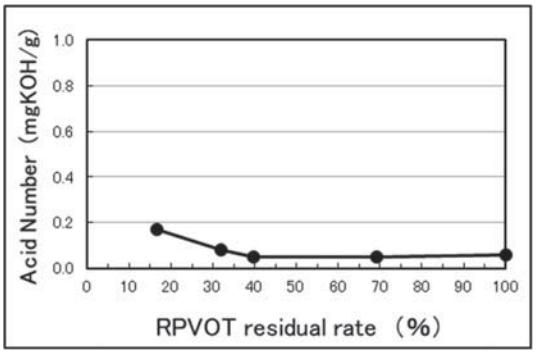

Fig. 3 Acid number increase in Dry TOST

オイル寿命の指標となるRPVOT値や酸化防止剤残存率が基準値に到達するまでは，スラッジの増加を抑制できることを予め見極めておくことがその後の管理にとって非常に重要である。

さらに交換方法として使用油の一部を抜き取り新油を補給する部分更油についても考慮する必要がある。ガスタービン油開発当初は全量更油を想定したが，需要家の要求に応じ部分更油を実施するケースも考えられる。その際前歴油に蓄積された劣化物の影響による性能の低下が懸念されるため確認が必要である。

部分更油を模擬した劣化油混合試験結果についても当社ガスタービン油での試験結果を紹介する。試験は三菱日立パワーシステムズ㈱で規定される劣化油混合DryTOSTに準拠し実施した。

劣化油混合DryTOSTにおいて試験油はTable 4 に示す手順に沿って作成した。まず劣化油はDryTOSTでRPVOT値が新油の約50%となるよう時間を設定し作成した。次に作成した劣化油と新油を等量混合したものを試験油とし，さらに試験油のDryTOSTを実施した。試験結果をFig. 4 ～ 6に示す。

劣化油混合油の初期のRPVOT値はTable 4 に示した通り，計算値比較で95%と劣化油の悪影響による低下はほぼ無かった。劣化油混合油のDryTOSTにおいてスラッジは新油と比較し増加傾向を示したが十分低い値を維持している。RPVOT値の低下速度及び酸価増加は新油とほぼ同等の結果を示した。

本試験の結果としては部分更油において劣化油が大きな悪影響を及ぼすことは無かった。ただし，実際に部分更油を実施する場合の使用油の状態によっては，また部分更油を繰り返した場合には十分な性能を維持できなくなる可能性も考えられる。特にRPVOT値や酸化防止剤残率が下限値近くまで低下し酸価が上昇傾向を示す場合

Table 4 劣化油混合DryTOSTにおける試験油の作成手順

劣化油作成方法	DryTOST試験でRPVOT値が新油比約50%低下した劣化油を作成
劣化油RPVOT	1230分（DryTOST 1920時間後油)
試験油	新油50%と劣化油50%を混合
試験油RPVOT	1830分
試験油のRPVOT回復率	95% （計算値※との比較）（新油RPVOT 2600分）

※(新油RPVOT+劣化油RPVOT)／2

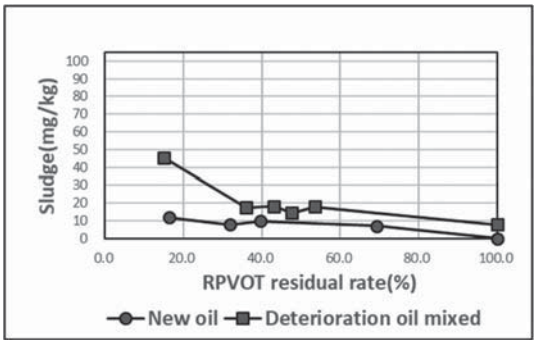

Fig. 4 Impact of deteriorated oil －Sludge－

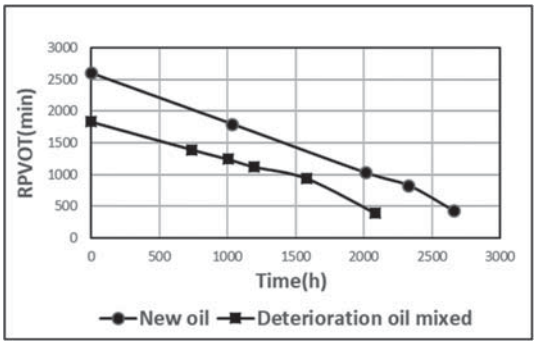

Fig. 5 Impact of deteriorated oil
－decreasing speed of RPVOT－

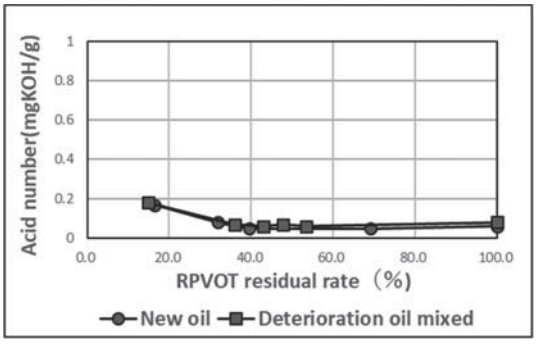

Fig. 6 Impact of deteriorated oil －acid number－

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

には全量更油を推奨する。

5．ガスタービン油の新たな管理手法について

ガスタービン油の劣化や酸化防止剤残存率の評価方法について，ここまでに説明した以外の手法について紹介する。

最初に酸化防止剤の劣化挙動を調べることでスラッジの前駆体を早期に検知し機器トラブルを未然に防ぐための試みがあり報告事例を紹介する。

ガスタービン油中のアミン系酸化防止剤の分子量分布をゲルパーミエーションクロマトグラフィ（以下，GPC）を用い測定する手法で，劣化過程において重合した高分子量成分の比率がスラッジの増加と相関することを劣化加速試験において実証している[10]。同じくGPCを用い異なるアミン系酸化防止剤の変質パターンを調べ，アミン系酸化防止剤のタイプ別の消耗速度やスラッジ生成との関係を報告した事例もある[11]。また，化学発光法により炭化水素が酸化される際に発生する発光強度を実機使用油においてモニタリングした事例が紹介されている[12]。

次にオイルの劣化状態を使用現場において簡易的かつ迅速に分析できる管理手法としてメンブランパッチ比色法が提案されている。本手法は使用油をろ過したフィルタの色相によりオイルの劣化度合いを評価するもので，ASTM法 やCPA法（Calorimetric Patch Analyzer）などがある。

ASTM法（ASTM D7843）では使用油50mlを同量の石油エーテルで希釈し細孔0.45μmのメンブランフィルターでろ過，乾燥後のフィルタ表面の反射光色相を比色分光光度計を用い測定しブランクフィルタとの色差を測定する[13]。

CPA法では使用油を細孔0.8μmのメンブランフィルタでろ過し，フィルタの上下方向から白色光を投射し反射光及び透過光をR（赤），G（緑），B（青）の色信号に分別し検知し色差を求める[14]。透過光の測定によりフィルタ内部に補足された劣化物の影響を考慮しているところが特徴的と言える。

また，酸化防止剤残存率を使用現場で簡易に測定できる手法としてボルタンメトリー（Voltammetry）がある。ボルタンメトリーは試料液中の酸化防止剤を電気的に酸化させ発生する電流を定量することで酸化防止剤の残存率を計測する手法で少量サンプルで短時間に測定できる。ASTM D6971にフェノール系及びアミン系酸化防止剤の測定法が規定され[15]ASTM D4378の管理基準の評価法となっている。

6．おわりに

高効率ガスコンバインド発電設備においてガスタービン油に求められる性能と管理について解説した。タービン油の管理は機器の健全性を保つ上で重要であり，管理項目の意義を十分理解した上で変化に応じた適切な対処が求められる。また基準値内であっても傾向を監視し早期の対応をすることで大きなトラブルを未然に防ぐことが可能となる。

今後のさらなる高効率機や新たな発電システムの開発においても，その実用化にはタービン油の性能と管理技術が重要となる。

参考文献

(1) 経済産業省，次世代火力発電に関わる技術ロードマップ <https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/jisedai_karyoku/pdf/report02_01_00.pdf>.
(2) 電気事業連合会, 電気事業のデータベース（INFOBASE）<https://www.fepc.or.jp/library/data/infobase/index.html>.
(3) ASTM D4304-13.
(4) ISO 8068（2006）.
(5) ISO 8068 AMENDMENT 1.
(6) ASTM D4378-13.
(7) ISO 11366（2011）.
(8) ASTM D7873-13.
(9) 矢野昭彦，吉岡真一，小林康広，ガスタービン油のスラッジ生成の評価方法について, 潤滑経済, No. 9（2015），pp. 20-24.
(10) 橋本勝美，永松典俊，加藤聡，嶋光正，熊崎脩，水野賢二，鉱油系ガスタービン油劣化判定法の開発，火力原子力発電，Vol. 51，No. 6（2000），pp. 52-59.
(11) 吉田俊男，熊崎脩，ガスタービン油の実用性能と使用油管理，日石三菱ﾚﾋﾞｭ，Vol. 43，No. 1号（2001），pp. 12-18.
(12) 和田幸悦，タービン油の品質動向と潤滑管理，潤滑経済，No. 2（1995），pp. 42-47.
(13) ASTM D7843-18.
(14) 今智彦，本田知己，佐々木徹，松本謙司，タービン用無添加鉱油の酸化過程とメンブランパッチの色との関係，トライボロジスト，Vol. 61，No. 10（2016），pp. 709-715.
(15) ASTM 6971-09（Reapproved 2014）.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

技術論文

負荷調整用地上型圧縮空気エネルギー貯蔵(CAES)を備えたガスタービンシステムの基礎検討

A Fundamental Study on a Gas Turbine System with Overground Compressed Air Energy Storage (CAES) for Load Regulation

野々村 弘樹*1 NONOMURA Hiroki
中野 晋*2 NAKANO Susumu
竹田 陽一*2 TAKEDA Yoichi

ABSTRACT

In order to stabilize the power system when increasing the output power of renewable energy, we proposed overground compressed air energy storage (CAES) as a facility equipped with the power absorption function in the existing gas turbine system. The overground CAES system consists of a reserve tank for storing compressor discharge air, an intermediate compressor for boosting the reserved air to a higher pressure, and a discharge tank for storing the boosted air. The operation methods of the CAES system are shown, and the operation was confirmed by our dynamic simulator for medium capacity gas turbines. By providing a reserve tank and discharge tank with a diameter of 18 meter and extracting or discharging 10% of the compressor's rated intake air flow, about 3.3 MWh of power absorption and about 3.7 MWh of power discharge can be performed, and we confirmed it had the function of load regulation.

キーワード：ガスタービン，CAES，負荷調整，圧縮機，貯留
Key words：Gas turbine, CAES, Load-regulation, Compressor, Reservoir

1．緒言

近年，CO_2を排出しない，燃料を消費しないなどの点から，再生可能エネルギーの導入が進められている。再生可能エネルギーとは，太陽光，風力，地熱など化石資源によらず自然界に常に存在するエネルギーを指し，日本においても導入は増加傾向にある。しかしながら太陽光や風力等の変動電源は，出力が天候に依存するため電力需要に合わせた調整が困難である。また大量導入時には，電力供給の安定化のため，電力系統から余剰電力を吸収しなければならないという課題がある。電力供給と余剰電力吸収を行える負荷調整用電源として揚水発電がある。これは，余剰電力を利用して水を汲み上げ，電力需要の大きい時間帯に，汲みあげた水を放水し発電するシステムであり，電気エネルギーを位置エネルギーに変換して貯留することが可能である。しかし，現在の日本では揚水発電施設の増設は困難である。一方，揚水発電と同様の概念で，余剰電力を利用して圧縮空気の形でエネルギーを保存し，電力需要時に貯留した圧縮空気を放出してガスタービンで発電するシステムとしてCAES(Compressed Air Energy Storage)[1]がある。

CAESは，圧縮機とタービンが個別の回転軸を有するガスタービンシステムを用いて，地下の岩塩層巨大空間に，余剰電力を利用して生成した圧縮空気を貯蓄し，電力需要の大きくなる時間帯に圧縮空気をガスタービンに放出することで発電するシステムである。揚水発電と同様，余剰電力の有効活用が可能である。また急速な電力要求時には，貯留圧縮空気を急速供給し発電量を増加させることで，負荷追従運転を容易に実現できる。しかし，日本には大容量の空間を形成できる厚い岩塩層はほとんど分布していないため，パイロットプラントでの実証[2]を除き，実用化は困難な状況である。また，ガスタービンによる発電ではないが，CAESと同じ概念で，断熱圧縮した空気を貯蔵し，電力が必要な時に貯蔵した圧縮空気を膨張させ発電するシステムの開発も行われている[3]。

ここでは，既存のガスタービン設備に地上設置の空気貯留タンクを設けてCAESの機能を持たせる地上型CAESを追設したガスタービンシステムを検討する。このシステムは実用化例が少なく，基本構成や基本仕様など，システムの基礎検討が十分に行われていない。

本研究では，既存のガスタービン設備を活用し地上型CAESを付加することで電力吸収を含む電力調整可能なガスタービンシステムの基礎検討として，その基本構成，

原稿受付 2019年11月15日
査読完了 2020年9月17日
＊1 東北大学大学院 工学研究科ファインメカニクス専攻
〒980-0845 仙台市青葉区荒巻青葉6－6
E-mail: Hiroki.nonomura@rift.mech.tohoku.ac.jp
＊2 東北大学大学院 工学研究科
〒980-0845 仙台市青葉区荒巻青葉6－6

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

運転方法を提案し，動作解析によってその基本動作の確認を行うと共に，地上CAESシステムの運用による電力調整効果を定量的に検討することを目的とする。

2．変動電源導入増加に伴う課題

変動電源の大量導入に伴い，電力の需要と供給のバランスが崩れることが想定される。Fig. 1は東北６県と新潟エリアの2019年夏季と冬季の電力需要[4]を示した図である。国内の電力需要は昼食時間帯に需要が低下する傾向がある。またこの時間帯は雨天時を除き太陽光による発電量が増加する時間帯と重なる。このためこの時間帯は，再生可能エネルギー以外の発電設備，特に出力調整が他の発電設備に比べて比較的容易なガス火力発電設備の出力を低減させて対応する。しかし，太陽光発電が電力需要を大幅に上回る場合には余剰電力の吸収が必要になる。揚水発電を除く従来の発電設備では，電力吸収機能は無いため，余剰電力の吸収には蓄電池システムの設置が必要に成っている。東北電力管内には大型の蓄電池システムが２か所設置されており，そのうちの一つは，昼食時の余剰電力の吸収と，その後の電力需要増加時の放電により電力調整する目的で使用されている[5]。ここでは，既存ガスタービン発電設備を活用することで，しかも余剰電力の吸収が可能な上記蓄電池システムと同等な電力調整機能を有するシステムとし，既存ガスタービン発電設備への地上型CAESシステムの適用を考える。

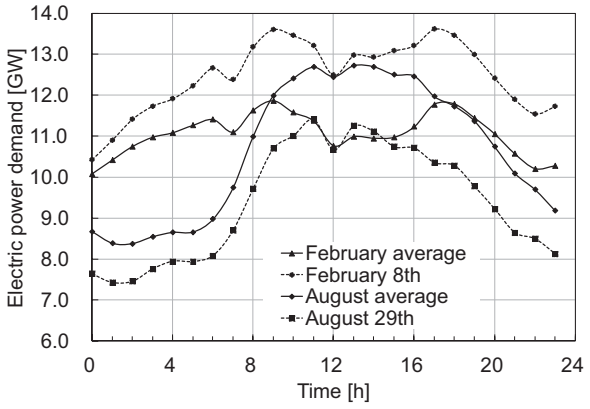

Fig. 1　Electric power demand curves [4]

3．地上CAESシステム

3.1　基本構成

従来のCAESシステムでは，圧縮機とタービンの回転軸が分離，または切り離しが可能な構造で，圧縮機とタービンは独立に運転できる。一方，既存発電用ガスタービンは圧縮機とタービンが同一の回転軸を有する場合が多いため，圧縮機とタービンをそれぞれ独立に運転することはできない。このため，既存発電用ガスタービンに地上CAESを適用するためには，圧縮機とタービンを分離運転しないことが制約になる。

Fig. 2に地上CAESの概略図を示す。地上CAESは貯留タンクと放出タンクの２タンクシステムにより構成される。２タンク間に中間圧縮機を設置して，圧縮機より抽気した空気をさらに昇圧させたうえで貯留することが可能である。

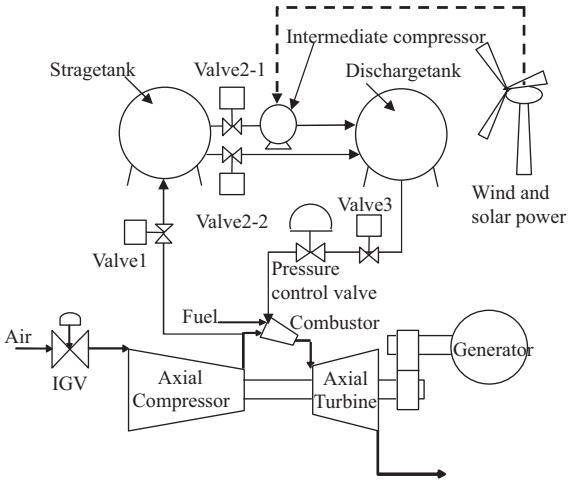

Fig. 2　Schematic of the overground CAES system

3.2　地上CAESシステムの運転方法

圧縮機の吐出空気を貯留するのは，系統への電力需要が少ないときで，例えば待機運転中や部分負荷運転時が考えられる。ここでは，部分負荷運転時の圧縮機吐出空気の一部を貯留する場合を考える。一方，発電量の増加が要求されるときは，部分負荷運転のような低出力状態からの発電出力の増加を行うため，例えば，部分負荷運転状態での圧縮機吐出空気に放出タンクからの圧縮空気を追加して，短時間に発電出力を増加させる。ある程度の供給時間を確保するためには圧縮機吐出圧の空気を更に昇圧して貯めておく必要がある。この動作を，圧縮機特性曲線を用いて説明する。Fig. 3に既存発電用ガスタービンシステムに用いられる圧縮機の圧力-流量特性曲線を示す[6]。圧縮機吐出圧はタービン負荷によって決まり，タービン修正流量は，今回の作動範囲内では，ほぼ一定になるため，その関係を用いてタービン入口圧を算出した。今，50%負荷運転状態で圧縮空気を抽気することを考える。定格負荷運転状態から燃料流量を絞り50%負荷状態にしてCAESを作動させる。ここで，以後，CAES作動とは，Fig. 2に示すCAESシステムのバルブまたは中間圧縮機の動作を開始することを意味し，圧縮空気貯留時は，バルブ1,2-1,2-2を開け，中間圧縮機を起動させることを，また圧縮空気放出時はバルブ３および圧力調整弁を開けることを意味するものとする。Fig. 3中①点の50%負荷運転点での圧縮機吐出空気のうち10%を抽気してCAESに貯留すると仮定する。この抽気量10％は後述のCAESからの空気供給時に圧縮機吐出圧がサージ回避できる条件から決めた。圧縮機吐出空気の10％を抽気する時，タービンへの空気流量は圧縮機吐出空気の90%になるため，燃焼温度を一定にした場合のタービンの作動点は，タービン特性線に沿って②に移る。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

一方，CAESからの空気供給を行うのはタービンシステムの発電量が少ないときであり，予めIGV開度を絞り，圧縮機吸気流量を低減して発電出力を低下させた状態で行う。回転数一定（100%回転数）でIGV開度を変えた時の圧縮機の性能曲線は図の一点鎖線に移動する[7]。IGV開度の減少によりサージ圧も図中破線に示すように低圧側に移動する。タービン運転点を部分負荷運転点である②から100%負荷点④に移行させるため圧縮機吐出圧も④と同じ③まで昇圧する必要がある。前述の抽気流量は，IGV開度を絞った時の圧縮機のサージ圧が圧縮機定格運転点の圧力を下回らないように決める。本解析ではサージに対する裕度を持たせるため抽気量を10%にした。タービン流量に関しては圧縮機吐出空気流量90%とCAESからの供給空気量10%で，定格空気量を確保する。②と④では圧力が異なり，貯留タンクの空気を直接燃焼器に供給できないため，中間圧縮機によって昇圧しておく必要がある。この中間圧縮機の動力には変動電源による余剰電力を使用する。

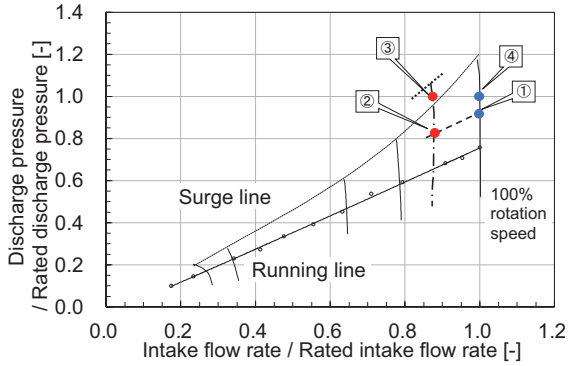

Fig. 3　Compressor characteristic curve and CAES operating point

4．設置対象ガスタービンと計算条件

4.1　設置対象ガスタービンシステム

地上型CAES動作の計算は，中容量ガスタービンシステムを解析対象とし，既開発のガスタービンシステムダイナミックシミュレータ[8],[9]にCAES動作計算プログラム[10]を組み込み行った。解析はTable 1に概略仕様を示すコンバインド発電に用いられるガスタービンを対象とした。Table 1に示す発電システムはガスタービンと蒸気タービンからなるコンバインドサイクル２系列のシステムである。ガスタービンシステムのシミュレータは，入力データとして，圧縮機入口案内弁（IGV）の開度，ロータ回転数，および燃料流量を与え，圧縮機の吐出状態，燃焼温度，タービン出入口の状態，圧縮機動力，タービン出力を計算するシミュレータである。Fig. 4にコンバインドサイクルの計測出力と，ダイナミックシミュレータの計算結果であるガスタービン出力の計算結果，および供給蒸気と排気蒸気の温度圧力から推定した蒸気タービン出力分をダイナミックシミュレータ計算結果に加えた結果を示した。計測は連続運転中に行われたが，シミュレーションでは起動プロセスが必要なため，計算開始の０～0.08時間までを仮想的な起動時間とした。ガスタービンは全ての時間帯，定格回転数で運転されており，IGV開度と燃料流量のみ変更している。IGV開度は経過時間1.23時間以降の開度を100%としたときに，1.15時間までは68％になる。また，燃料流量は，1.23時間以降を100%にしたとき，1.15時間以前は78%になる。Fig. 4において，出力値は，1.23時間以降のガスタービン出力で無次元化した。Fig. 4から，CAES計算プログラムを組み込むガスタービンシステムのダイナミックシミュレータとして妥当な計算が行えるシミュレータになっていることが分かる。

Table 1　Specifications of calculation target gas turbine system

Rated output power	109MW（(GT+ST)×2）
Rated rotational speed	7280rpm
Compressor	17 stages axial flow
Turbine	3 stages axial flow
Combustor	Low Nox Combustor（10 cans）

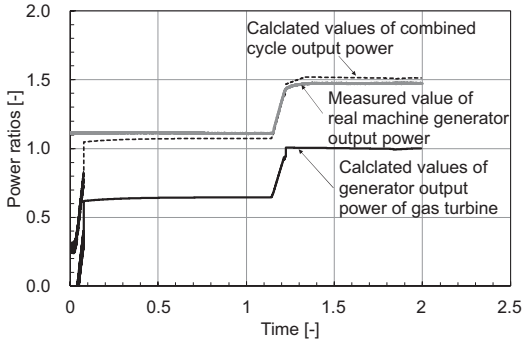

Fig. 4　Comparison of output powers for medium capacity gas turbine

4.2　地上CAESの仕様と計算方法

今回の計算では，CAES設備の基本能力の把握のため圧縮機吐出空気の貯留とタンク空気の放出とも持続時間を１時間とした。これは昼食時の電力需要が低下する時間を考慮して設定した。計算に用いたCAESの仕様をTable 2に示す。

Table 2　Specifications of overground CAES

Storage tank	Spherical shape（18m in diameter）
	Minimum pressure 75% of rated discharge pressure of compressor
Discharge tank	Spherical shape（18m in diameter）
	Maximum pressure 300% of rated discharge pressure of compressor
Compression ratio of intermediate compressor	4
Rated flow of intermediate compressor	10% of rated intake flow rate of compressor
Diameter of piping	0.14 m

中間圧縮機の性能曲線は，既存圧縮機の性能曲線[11]をベースとして，タービンシステムの圧縮機の定格流量の1/10に修正したものを用いる。性能曲線をFig. 5に示す。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

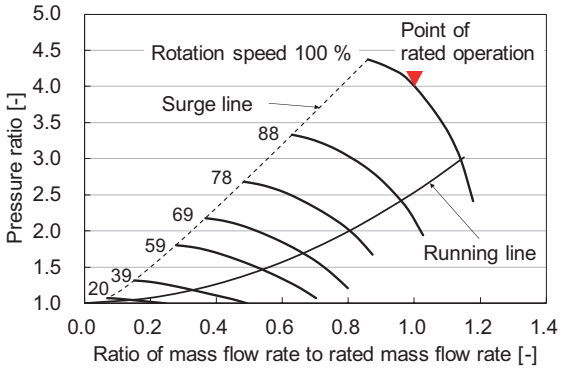

Fig. 5 Characteristics curves of intermediate compressor

中間圧縮機は，起動後300秒間は起動運転線に沿って昇圧し，定格回転数到達後は，吐出側の負荷に伴い100％回転数の性能曲線上を移動すると仮定した。タンク直径は，中間圧縮機の昇圧によって放出タンクに蓄えられる空気量が，空気放出時のCAES作動時に圧縮機定格吸気流量の1/10を１時間以上タービンシステムに供給可能となるように設定した。

次にタンク内状態量変化の計算方法を示す。タンク内の状態量変化は，質量保存式，エネルギー保存式，および状態式を用いて算出した。また，エネルギー式ではタンク表面からの放熱を，対流熱伝達率７(W/(m^{2}K))，放射率0.5と仮定して計算した。

$$\frac{dM_{rt}}{dt} = m_1 - m_2 \qquad (1)$$

$$\frac{dM_{dst}}{dt} = m_2 - m_3 \qquad (2)$$

$$\frac{d(C_p M_{rt}\, T_{rt})}{dt} = m_1 C_p T_{co} - m_2 C_p T_{rt} - A_{rt}\left[\alpha\left(T_{rt,out} - T_a\right) + \beta\sigma\left({T_{rt,out}}^4 - {T_a}^4\right)\right] \qquad (3)$$

$$\frac{d(C_p M_{dst}\, T_{dst})}{dt} = W_{comp} + m_2 C_p T_{rt} - m_3 C_p T_{dst} - A_{dst}\left[\alpha\left(T_{dst,out} - T_a\right) + \beta\sigma\left({T_{dst,out}}^4 - {T_a}^4\right)\right] \qquad (4)$$

$$P_{rt} = \frac{M_{rt}}{V_{rt}} R T_{rt} \qquad (5)$$

$$P_{dst} = \frac{M_{dst}}{V_{dst}} R T_{dst} \qquad (6)$$

ここで，A:タンク表面積[m^2]，Cp:定圧比熱[J/(kg K)]，dt:時間刻み[s]，M:質量[kg]，m:質量流量[kg/s]，P:圧力[Pa]，R:気体定数[J/(kg K)]，T:温度[K]，V:体積[m^3]，α:対流熱伝達率[W/(m^{2}K)]，β:放射率[-]，σ:Stefan-Boltzman定数[W/(m^{2}K^4)]。

添え字は，1:貯留タンク流入，2:貯留タンクから放出タンク，3:放出タンク流出，a:大気 co:圧縮機吐出側，dst:放出タンク，out:タンク外壁，rt:貯留タンクを表す。

4.3　CAES作動時のタービン運転条件

4.3.1　圧縮機吐出空気を抽気する場合　CAESシステムへの圧縮空気の貯留は，ガスタービンシステムが50%負荷運転状態で行う。計算では，開始から0.5時間経過まではFig. 4に示した運転と同じ運転，つまりFig. 6に示すように，回転数は起動時を除き全て定格回転数一定に維持し，IGV開度比を初期値68%として，その後開度比を100％に保つ。これは，Fig. 4に示した部分負荷から定格負荷運転を再現したものである。Fig. 6にタービンシステムの計算条件として回転数，燃料流量，およびIGV開度を示す。0.5時間経過後，燃料流量を絞り発電出力を50%負荷まで低下させる。この時の燃料流量は，定格吸気流量での無負荷運転時の燃空比と100%出力時の燃空比から推定した燃空比によって与えた。その後，燃料流量は50％負荷時の燃空比を保つため，CAES作動による燃焼空気流量の低減に伴い燃料流量も減少する。CAES作動後，約0.5時間（経過時間1.29時間）経過後に燃料流量を増加した。つまり，50%負荷状態から，CAES作動により10%の空気を抽気すると，燃空比一定の運転条件では空気流量の低下に伴い発電出力が低下する。このため，発電出力が50%になるように燃料流量を増加させたものである。なお，IGV開度の時間変化率はFig. 4に示した実機タービンシステムの運転と同一にした。

Fig. 7にCAESシステムの計算条件として，バルブ１，２－１，２－２，および中間圧縮機のON・OFF（ONが１，OFFが０）を示す。CAESシステムは経過時間0.79時間からバルブ１，２－１，および２－２を開にして中間圧縮機を作動させて，貯留タンクおよび放出タンクに空

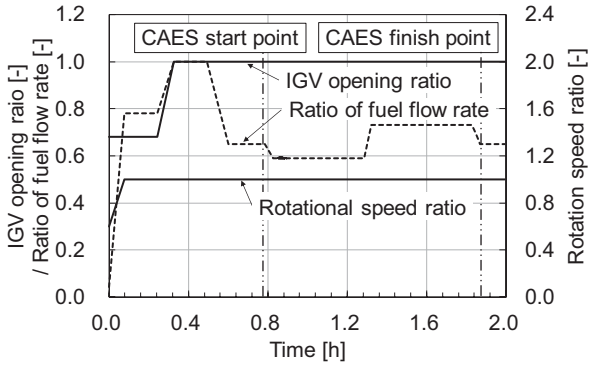

Fig. 6 Input data of turbine system for the operation of extracting compressed air

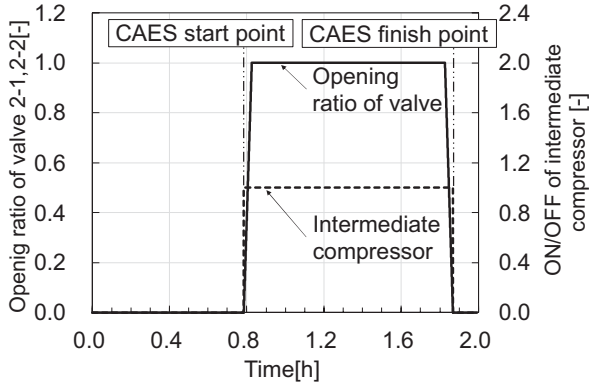

Fig. 7 Input data of CAES system for the operation of extracting compressed air

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

気を貯留する。なお，貯留タンクと放出タンクの初期値は，50%負荷運転時の圧縮機吐出圧，吐出温度とした。

4.3.2 放出タンクの空気を供給する場合 Fig. 8にタービンシステムの計算条件を示す。計算は前節と同様に，0.5時間まではFig. 4に示した部分負荷と定格負荷運転を再現し，0.5時間以降に負荷変更を開始する。CAESからの空気供給によるガスタービンシステムの出力増加は，タービンシステムが部分負荷運転状態にある場合に実施される。計算では，初めにこの部分負荷の運転状態を用意する。0.5時間経過後，IGV開度は変更せず，燃料流量を絞り発電出力を50%負荷まで低減しFig. 3①の運転状態にする。その後IGV開度比を83%まで下げてFig. 3②の運転状態にしてCAES作動前のガスタービン運転状態を用意する。CAES開始後は，放出タンクからの空気供給に伴い燃料流量を増加させる。CAES作動1時間後にIGV開度を戻す。前節と同様に，IGV開度の時間変化率はFig. 4に示した実機タービンシステムの運転と同一にした。

Fig. 9にCAESシステムの計算条件としてバルブ3の開度を示す。経過時間0.79時間からバルブ3と圧力調整弁を開にして放出タンクからガスタービン燃焼器に空気を供給する。

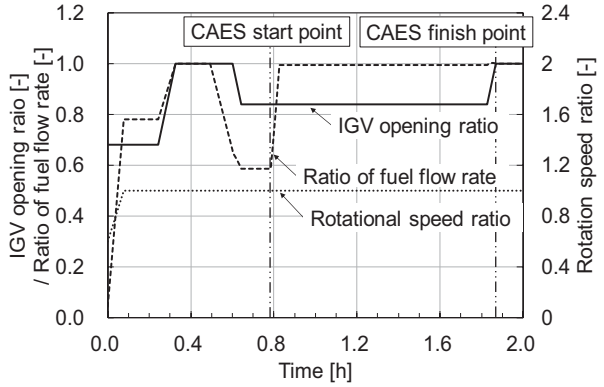

Fig. 8 Input data of turbine system for the operation of discharging compressed air

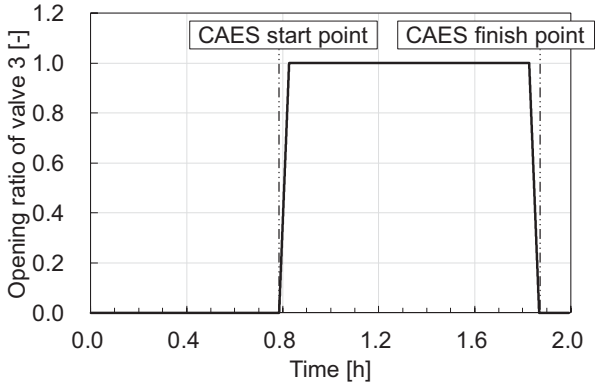

Fig. 9 Input data of CAES system for the operation of discharging compressed air

5．解析結果と考察

5.1 圧縮機吐出空気を抽気する場合

5.1.1 CAESシステムの変化 貯留タンクおよび放出タンクの圧力変化，流入空気流量，中間圧縮機動力をFig. 10からFig. 12に示す。以後の節，章を含め解析結果はCAES開始前の定格運転状態終了直前の0.4 hから表示する。Fig. 10は貯留タンク，放出タンク内の圧力を，圧縮機の定格吐出圧で除したグラフである。Fig. 10で中間圧縮機起動前の両タンク圧と中間圧縮機起動後の貯留タンク圧力が減少しているのは，タンク放熱に伴う圧力低下とCAES動作後は貯留タンクへの流入空気量と中間圧縮機の吸気流量の差による圧力低下が表れたものである。Fig. 11で中間圧縮機の空気流量が貯留タンク注入流量よりも多いのは，CAES作動中の1時間内では，放出タンク圧と貯留タンク圧の比が中間圧縮機の定格圧力比以下の状態で運転されているため中間圧縮機の吸気流量が定格流量以上になるためである。Fig. 12から1時間の抽気で，最大3.5 MWの動力を吸収することが分かる。

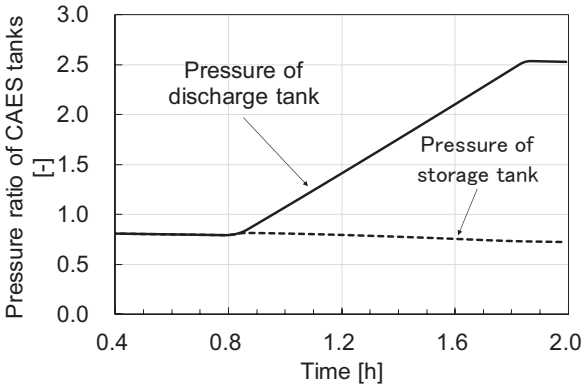

Fig. 10 Pressure change in tanks

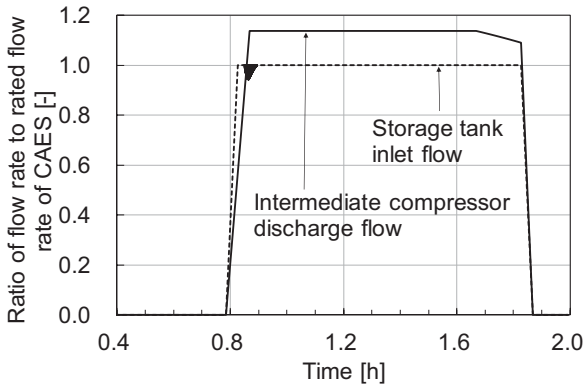

Fig. 11 Mass flow rate of storage tank and intermediate compressor

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

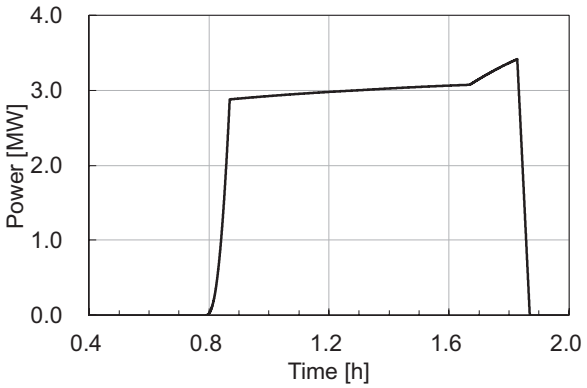

Fig. 12 Intermediate compressor driving power

5.1.2　ガスタービンシステムの変化　CAES作動時におけるガスタービンシステムの空気流量，圧縮機吐出圧，各種出力をFig. 13からFig. 15に示す。Fig. 13で，CAES作動後，圧縮機吸気流量は変化ないものの，タービンに送られる空気流量は約10%低減し，この低減分の空気流量がCAESに貯留される。

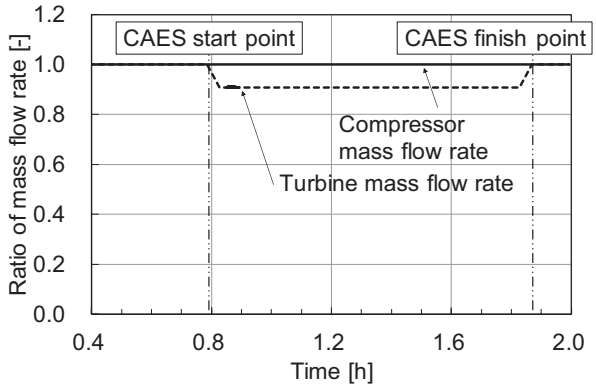

Fig. 13 Mass flow rate of gas turbine system

Fig. 14にタービンシステムの圧縮機吐出圧力を示す。①はFig. 3に示した50%負荷状態での圧力である。CAES作動後，燃焼温度を一定に保つ状態で空気流量を低減すると，タービン修正流量は一定のため，圧縮機吐出圧力は空気流量の低減に伴い低下し②の状態になる。この状態では発電機出力は50%よりも低下する。1.29時間以降は発電機出力を50%に戻すため燃料流量を増加させタービン入口温度を上昇させている。この負荷増加に伴い圧縮機吐出圧力は若干増加する。

Fig. 15はタービン出力，圧縮機動力，発電機出力を示したものである。CAES作動時の前半はCAES作動前の燃空比を保っているため，CAESへの抽気による空気流量の低下に伴う燃料流量の低下で発電機出力の低下が見られる。

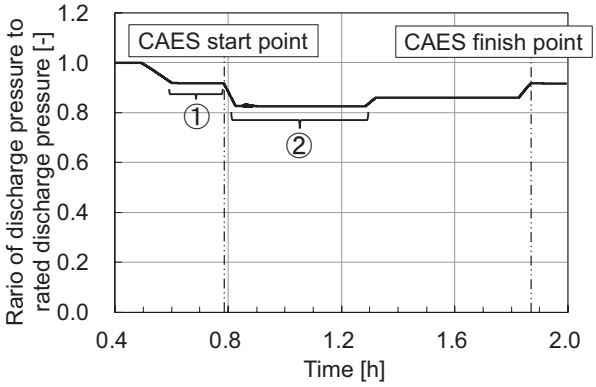

Fig. 14 Pressure change of gas turbine compressor

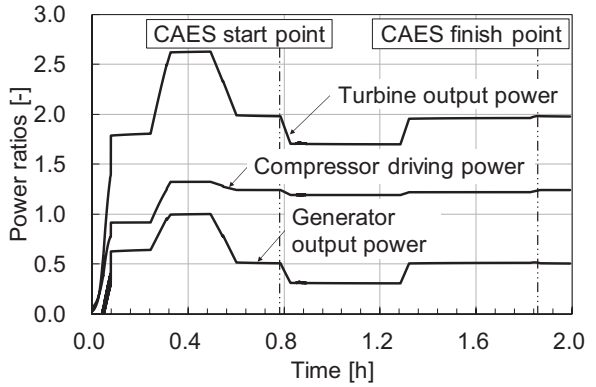

Fig. 15 Comparison of output power

5.2　放出タンクの空気を供給する場合

放出タンクの初期値は，5.1に示した中間圧縮機による1時間の充填後の状態にし，燃焼器に対して1時間の空気供給を行うものとする。

5.2.1　CAESシステムの変化　貯留タンクおよび放出タンクの圧力変化，ガスタービンへの供給流量をFig. 16，Fig. 17に示す。放出タンクの圧力は空気流量をガスタービンに供給するため低減する。しかし，空気供給1時間後においても圧縮機定格吐出圧以上の圧力を保持しており，放出タンクからガスタービンへの空気流量は供給できている。放出タンク18mで1時間の空気供給には十分な空気量を保有できている。

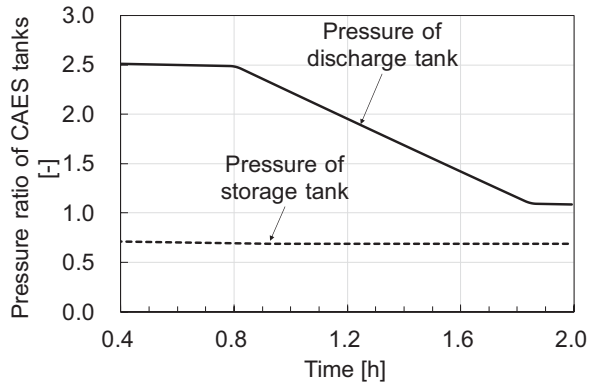

Fig. 16 Pressure change in tanks

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

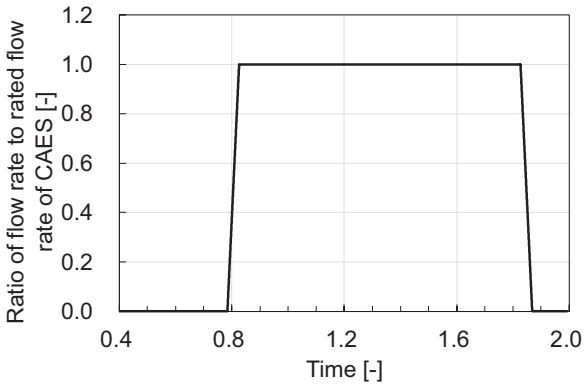

Fig. 17 Discharge mass flow rate of discharge tank

5.2.2 ガスタービンシステムの変化 CAES放出時のガスタービンへの供給空気流量，燃料流量，圧縮機吐出圧，各種出力を，Fig. 18からFig. 20に示す。Fig. 18から，CAES作動に移行した時の圧縮機吸気流量はCAES作動前とかわらず90%程度の吸気量であるが，CAES作動により，タービンに供給される空気流量は通常の定格運転時と同等の空気が供給される。Fig. 8に示した燃料流量は定格運転時の燃焼温度と同等になるよう燃空比を合わせてあるので，空気流量の増加に伴い増加し，CAES作動前の定格運転時と同等の燃料流量になっている。

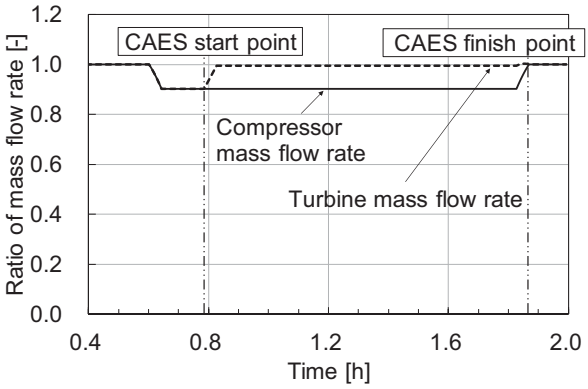

Fig. 18 Mass flow rate of gas turbine system

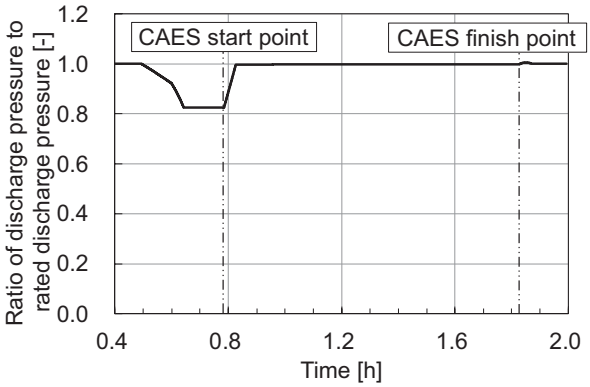

Fig. 19 Pressure change of gas turbine compressor

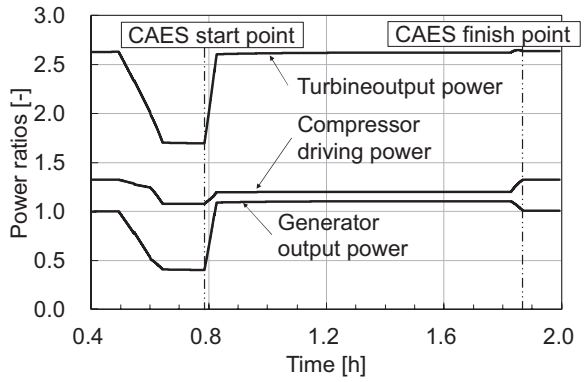

Fig. 20 Comparison of output power

Fig. 19の圧縮機吐出圧力はCAES作動直前の状態では，Fig. 3②の状態にある。CAESを作動させ，空気流量の増加に伴い，燃料流量を増加させ，発電出力を増加させるため，圧縮機の作動点も高圧力側に移動し，結果的には100%吸気の定格出力運転点と同等の圧力になる。Fig. 20の出力結果から，CAES作動時の発電量は通常の定格出力運転時における発電出力よりも約10%増加している。CAESを作動して空気を供給する場合，タービン出力は通常の定格出力運転とCAES作動時では差異はないが，CAES作動時では圧縮機の吸気量低減により圧縮機動力は低減し，この動力低減量が発電出力の増加に寄与している。

5.3 CAES作動時の発電効率，吸収電力量と放出電力量

CAES動作によるガスタービンシステムの発電効率を考察する。Fig. 21は発電機出力を投入燃料の熱量で除した発電効率を，CAES無しの通常の100%発電出力時を1として表した発電効率比である。圧縮機吐出空気を貯留する場合，同じ50%負荷運転で比較すると，CAESを作動した場合は，約0.09の効率低下をもたらしている。一方，CAESからの空気供給で発電出力を増加する場合の効率は，通常の100%出力時に比べて発電効率が約0.11増加することが分かる。貯留と供給をトータルとして考える場合には，タービンシステムとして約0.02の効率向上が図られることに成る。

次にCAES動作時の電力吸収量と供給発電量を考察する。電力吸収量は，貯留タンクから放出タンクに加圧し

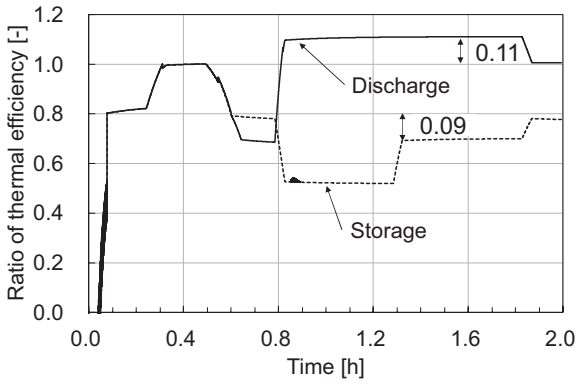

Fig. 21 Thermal efficiency during CAES operation

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

て空気を貯留するときに外部電力が必要となるため，この中間圧縮機の消費電力として算出する。また，放出電力量の算出は，ガスタービンの定格出力と空気放出CAES作動時の発電量の差で評価する。結果をFig. 22に示す。1時間での吸収量として3.3MWhを，放出量として3.7MWhが算出される。これらの発電量は地上CAESを設置したガスタービンの定格発電量の約1割に相当する。Fig. 23に，Fig. 15およびFig. 20に示した発電機出力を示す。抽気時は中間圧縮機の動力を消費するため，CAESを含めた本タービンシステムが外部に供給できる出力はFig. 15に示した発電機出力からFig. 12に示した中間圧縮機動力を差し引いた値になる。Fig. 23には抽気時のGTシステム出力としてこの値を示す。図に示すようにCAES作動時に本タービンシステムが外部に供給できる電力範囲はガスタービンシステムの定格出力の約41～110%になる。仮に発電負荷50%がタービンシステム運転上の最低負荷であった場合，Fig. 23のCAES終了点以降のガスタービンシステムの出力範囲である50～100%が通常のガスタービン設備の電力供給範囲になる。地上CAESの追設によりタービンシステムの出力調整範囲を約1.4倍拡張することができる。一方，容量に関しては，現在稼働するリチウムイオン電池の蓄電池システムの容量[5]に比べると約1/10以下であるが，地上CAESの場合，その動作は圧縮機のサージを回避しなければならないことと，空気の貯留量および放出量とも圧縮機の定格吸気流量に依存する。より多くの電力吸収や電力供給を期待する場合には，より大容量のタービンシステムにCAESを適用する必要がある。

最後に地上CAESによる充放電効率を示す。充電量に対する放電量として充放電効率を定義すると，地上CAESでの放電量は空気放出時のCAES作動によって得られる発電利得量とする。充電に必要な動力は空気貯留時に要する動力と中間圧縮機の動力になる。空気貯留時に要する動力の考え方としては，空気貯留時のCAES作動によって低下した発電量分として捉えることにする。Fig. 24に空気貯留時のCAES作動時もCAES作動前と同じ燃料流量を保ったときの発電出力を示す。Fig. 24には参考のためFig. 15に示した発電出力も示す。空気貯留時のCAES作動により発電出力比で約0.1の低下を示す。これは電力量として約3.6MWhに相当する．充電に要する電力量は，この電力量と中間圧縮機動力量の3.3MWhを合わせて6.9MWhになり，放出電力量3.7MWhをこの量で割り充放電効率は約54%になる。地上CAESでは，CAESからの空気供給によって得られる発電利得とCAESに空気抽気することで生じる発電損失はほぼ同等になるため，充放電効率は中間圧縮機動力に大きく依存することになる。中間圧縮機動力は，中間圧縮機の圧力比とタンク直径の選定に依存する。つまり，放出タンク径が増加すると一定放出空気量を保持するタンク圧力が低下するため，中間圧縮機圧力比の低減により中間圧縮機動力が低減し充放電効率は増加する。逆にタンク径が減少すると中間圧縮機動力の増加により充放電効率は低下する。Fig. 25に放出タンク直径をパラメータとした場合の，放出電力量に対する吸収電力量を横軸に取った場合の充放電効率を示し，蓄電池システムを含む他システムとの比較[12]を示す。本地上CAESシステムの場合，放出タンク径を増加することで充放電効率は揚水発電や蓄電池システムと同等にまで上げることはできるが，電力吸収量は低減する。

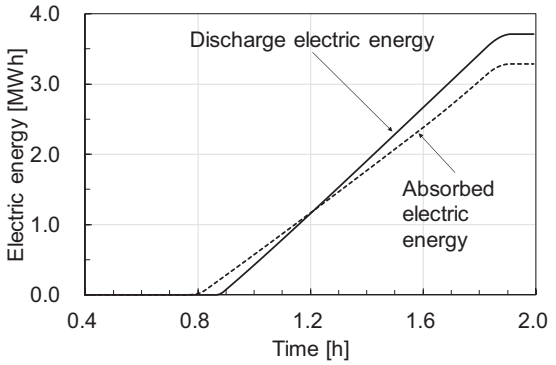

Fig. 22　Absorbed and discharged electric energy

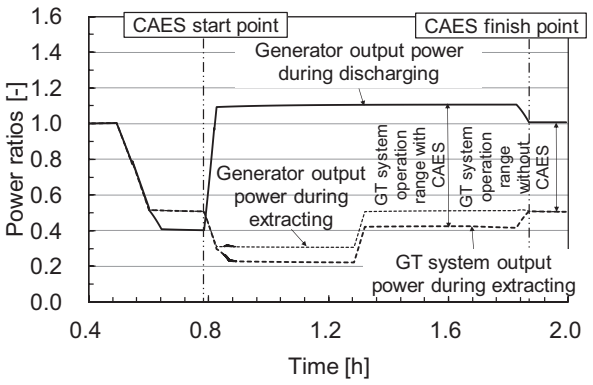

Fig. 23　Gas turbine system operation range with and without CAES

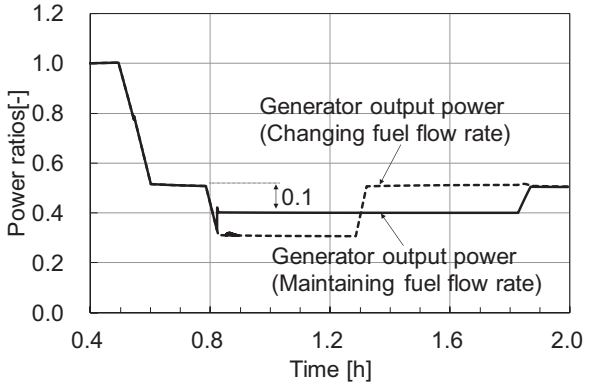

Fig. 24　Comparison of generation output power during extracting by the difference of fuel flow rate

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

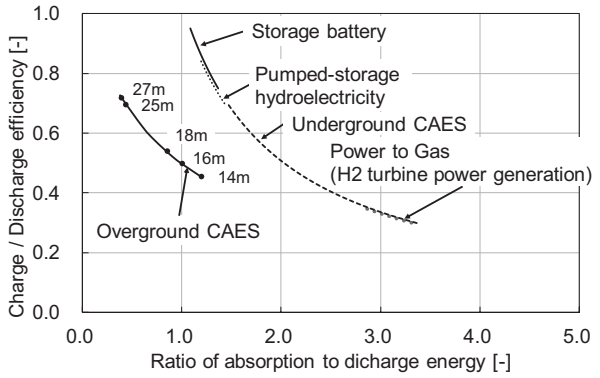

Fig. 25 Charging/discharging efficiency

6．結論

変動電源導入増加時の電力系統安定化のため，既存ガスタービンシステムに電力吸収機能を備えた設備として地上型CAESを提案した。本地上型CAESシステムは，圧縮機吐出空気を貯留するタンク（貯留タンク）と，その貯留空気をさらに高圧に昇圧する中間圧縮機，およびその昇圧空気を貯留するタンク（放出タンク）等から成る。また，CAESシステムに空気を貯留する場合と，CAESシステムから空気を放出する場合の運転方法を示し，中容量ガスタービンを対象としたダイナミックシミュレータでその動作を確認した。直径18 mの貯留タンクおよび放出タンクを設け，圧縮機の定格吸気流量の10 %の空気を抽気または放出することで，ガスタービン発電機定格発電量の約1割に相当する3.3 MWhの電力吸収と3.7 MWhの電力放出が行え，既存ガスタービンシステムの出力調整範囲の拡張が可能になり，負荷調整用としての機能を向上できることを確認した。

謝辞

本研究は東北電力株式会社と東北大の共同研究部門である電力エネルギー未来技術共同研究部門で実施されたもので，東北電力株式会社からは研究遂行に対して多くの支援を頂きました。深く感謝の意を示します。

参考文献

(1) Jidai Wang, Kunpeng Lu, Lan Ma, Jihong Wang, Mark Dooner, Shihong Miao, Jian Li, and Dan Wang, Overview of Compressed Air Energy Storage and Technology Development, Energies 10, 991 (2017).
(2) 中北智文，小林英夫，奥原巌，高橋克行，安田友芝，圧縮空気エネルギー貯蔵ガスタービン（CAES-G/T）の開発，石川島播磨技法，Vol. 43 No. 3 (2003).
(3) 戸島正剛，松隈正樹，新たな断熱圧縮空気蓄電システム「空圧電池」の開発，日本AEM学会誌，Vol. 24, No. 4 (2016).
(4) 東北電力ネットワーク㈱，過去実績データのダウンロード，東北電力㈱公式ウェブサイト https://setsuden.nw.tohoku-epco.co.jp/download.html , (2019).
(5) 東北電力ネットワーク㈱，南相馬変電所需給バランス改善蓄電池システム実証事業成果概要，東北電力㈱公式ウェブサイト http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/170331/170331_1.pdf , (2016).
(6) Y. Kashiwabara, Y. Katoh, H. Ishii, T. Hattori, Y. Matsuura, and T. Sasada, Developments leading to an axial flow compressor for a 25 MW class high efficiency gas turbine, 90-GT-238, (1990).
(7) 生井武文，井上雅弘共著，ターボ送風機と圧縮機，コロナ社，(1988).
(8) 関慧一, 中野晋, 竹田陽一, マイクロガスタービンの動作解析, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 43 No. 3 (2015), pp. 68-74.
(9) 鈴木晃純，中野晋，田中翔悟，竹田陽一，菅原由貴，中容量ガスタービン用動作解析シミュレータの開発，第45回日本ガスタービン学会定期講演会 講演論文集, (2017)
(10) 野々村弘樹，中野晋，竹田陽一，地上型圧縮空気貯蔵（CAES）を備えたガスタービンシステムの基礎検討，日本機械学会東北学生会，第49回卒業研究発表講演会，(2019-3)
(11) S. Nakano, T. Kishibe, H. Araki, M. Yagi, K. Tsubouchi, M. Ichinose, Y, Hayasaka, M. Sasaki, T. Inoue, K. Yamaguchi, H. Shiraiwa, Development of a 150 kW microturbine system which applies the Humid Air Turbine Cycle, ASME Turbo Expo, GT-2007-28192, (2007).
(12) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO），電力貯蔵分野の技術戦略策定へ向けて，技術戦略研究センター（TSC）レポートTSC Foresight, (2017).

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

報 告

IGTC2019 Tokyo報告
1．全 般

西澤 敏雄*1
NISHIZAWA Toshio

1971年に開始されたInternational Gas Turbine Congress, IGTCは2019年に第12回を迎えた。1990年代以来の東京地区で2回開催，関西地区で1回開催というこれまでの順序を踏襲し，今回も前回大会に続いて東京で開催することとした。概ね3年間の準備期間を経て，International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo（IGTC2019 Tokyo）は2019年11月17日㈰から22日㈮まで，前回と同じ東京都港区の虎ノ門ヒルズフォーラムで開催された。関係各位・各機関のご尽力，ご協力により，海外からの論文数が国内からの論文数をはじめて上回るなど，盛会の裡に終了することができた。

過去11回にわたり，IGTCは日本のガスタービン技術の発展に寄与してきた。日本のガスタービンおよびエネルギー関連技術の発展に資する国際的な情報交換と発信，および人的交流を促進することを主たる目的とし，昨今のエネルギー情勢やガスタービン・航空エンジンの技術状況を反映させて，最新の学術・技術情報を交換するとともに，将来の技術展望や国際協力，また人材育成などを視野に入れた有益な討議を行う国際会議として開催した。2016年10月に立ち上げた準備委員会では，IGTC2019 Tokyoの開催趣旨と意義，および周辺情勢に関する認識について議論し，以下のようにまとめた。

⑴基本理念

日本のガスタービンおよびエネルギー関連技術の発展に資する国際的な情報交換と発信と人的交流を促進する

⑵開催趣旨と意義

・ガスタービン・エネルギー関連分野の技術情報の交換の場を提供
・フォーラム，パネルを通じた国際情勢の認識を共有，技術動向と将来技術に関する討論
・日本の工学・技術・ユーザー情報を海外に発信，今後の協力や人材交流の機会を提供
・国際体験を通じた若手人材育成
・アジア域における求心力の向上

⑶周辺情勢

・IGTCは4年に1度の国際会議として定着
・2003年からASME/IGTIとの協力関係が復活
・ASME Turbo Expoがアジアで初めて韓国・ソウルで2016年に開催
・アジアでは日中韓に加えインドの協力でACGTを計5回開催。日本では2018年に9年ぶりに開催
・ASME/IGTIとは独立の組織として2016年にGPPSが設立され，アジアでは2017年に中国・上海で開催
・航空分野ではISABEが同じ2019年9月に豪州で開催

⑷エネルギー・技術情勢

・震災後のエネルギーシナリオが混沌としている。
・原子力再稼動の見通しの厳しさから，ガスタービン発電の重要性が更に高まっている。
・環境技術の重要性は変わらないが，CO_2削減のシナリオや国際的体制は益々不透明に。
・再生可能エネルギーに対応する新しいガスタービン技術について学会主導のプロジェクトを立ち上げ
・航空エンジンについてはV2500後継事業としてPW1100G-JMの開発が進み，他の機種の国際共同開発も活性化。低燃費・環境技術は引き続き重要課題であり，国内企業がフロントランナーの一角を占めている。
・HONDAジェットのエンジン開発・運用という新たな動きも始まった。

以上の理念と情勢を踏まえ，最新の学術・技術情報の交換促進とともに，日本の情報の積極的な発信に留意して会議を企画実施した。

次章以降で詳細に示されるように，幸い多数の論文と参加者が得られ，活発な議論と人的交流を行うことができた。本国際会議が盛会に開催できたのは，関係各位のご努力とともに，助成・協賛をいただいた諸団体のご支援のおかげである。特に実行委員会委員各位には，本来業務でご多忙な中，ひとかたならぬご尽力をいただいた。実行委員長として心よりお礼を申し上げる。また，学会事務局のみなさん，渡辺前会長，識名前副会長をはじめとする学会理事の各位にも，開催に向けて様々なご協力をいただき，深く感謝申し上げたい。会議事務局のイーサイド社と虎ノ門ヒルズ関係者各位から支援いただいて円滑な運営ができ，たいへんお世話になった。国際委員会を通じて海外からの参加を促進して下さったInternational Advisory Committeeの委員各位にも，御礼申し上げる。最後に，本国際会議に参加していただいた全ての方々と論文の査読に貢献していただいた関係の皆さんに心より感謝申し上げる。

＊1 IGTC2019実行委員長
宇宙航空研究開発機構 航空技術部門

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

2．講　演

論文委員会

Ⅰ．特別講演

1．Plenary Lectures

ガスタービン関連学術・技術の最新動向について，各専門分野からの知見を得るため，4件のプレナリーレクチャーを依頼した。航空，燃焼，空力，製造と異なる分野からそれぞれ1件ずつ講演いただいた。

Plenary Lecture 1: Dr. James D. Heidmann（NASA Glenn Research Center）“NASA Aeronautics Overview and Propulsion Challenges”

Dr. James Heidmannからは，NASAの航空プログラムの概要と，その中でのガスタービン関連研究についてご紹介頂いた。

まず，NASAの戦略的キーワードとして，安全，民間超音速旅客機，超高効率旅客機，推進システム，モニタリング，自動化の6つが掲げられた。その中で今後の航空市場をリードするための鍵として，超音速旅客機，Urban Air Mobility（UAM），電動航空機の3つを挙げた。電動航空機は，全機レベルでの最適化により大幅な燃費改善が可能であること，VTOLのUAMにより新しい市場を開拓できること，特に短距離での輸送に効果的であり，最初は小型機から適用し，2030年頃にはMWクラスの電動機を用いた90–150席の旅客機への適用を目指すことが示された。電動航空機では複数の電気エネルギー供給方式が提案されているが，全バッテリ方式は大幅なバッテリ能力の向上が必要であり，ガスタービンとバッテリを組み合わせた電力供給方式になる。そのためのガスタービンとして“High Power Density Core”技術が必要であり，ガスタービン分野の研究が今後も需要であることが示された。その中のトピックスとして，低NOx燃焼器，ノイズ低減技術，着氷の研究が紹介された。

（寺本 進*1）

Plenary Lecture 2: Prof. Timothy C. Lieuwen（Georgia Institute of Technology）“Key Combustion Challenges for Future Gas Turbines”

Lieuwen 教授は燃焼振動の研究で著名であるが，今回のInvited Lectureでは，GT向け燃焼器に将来要求される内容について幅広く講演していただいた。

まず，燃焼に要求されるKey Driverとして1）High efficiency cycles 2）Decarbonized Fuel 3）Flexible Operationの3つを挙げ，さらにMiddle Driverとして① Low NOx combustion technology in high temperature, ② GT operatability, ③ Fuel / Oxidizer capabilityの3つの紹介があった。

高効率化のためには燃焼温度を上げる必要があるが，低NOx排出量を両立させる必要がある。NOxは温度に対し指数関数的に増加し，滞留時間に比例する。GTCC効率65%には高い燃焼温度が必要であり，理論計算では燃焼温度1975Kだと滞留時間10msでNOx生成量が30ppm程度となる。ここで，滞留時間を短縮することで，理論計算上は1ppm程度までNOxを下げることが可能であり，Axial Fuel Stagingが低NOx化対して有望な手法であることが紹介された。ただ，理論計算では予混合気が瞬時に混合すると仮定しており，燃料を如何に早く混合させるかが重要になることについて説明があった。

また，運用性に影響する燃焼振動については，振動の周波数＜振動の発生箇所＜振動の音圧レベルの順に予測が難しいこと，燃焼振動の発生メカニズムや解析による振動の予測手法などを簡単に説明された。

質疑応答では，サイクル自体への燃焼の関与としてPressure Gain Combustionなどの手法がある旨や，Active dampingによる燃焼振動抑制の課題などの意見が活発に交わされた。

燃焼をテーマとした内容であったが，専門以外の人にもわかりやすい内容であり，聴講者も多く好評であった。

（齋藤 敏彦*2）

Plenary Lecture 3: Prof. Joerg R. Seume（Leibniz University Hannover）“Improving Aerothermal and Aeromechanical Turbomachinery Design by Combining High-Fidelity Methods with Multi-Stage Approaches”

Joerg R. Seume教授は翼列流れを中心とした広い範囲のターボ機械流れの研究で著名であるが，今回は多段の軸流ターボ機械の高信頼性シミュレーション，検証実験に関する最新の研究をご紹介いただいた。

講演ではまず初めに，なぜ多段軸流ターボ機械の空力の研究をするのか，その狙いや位置付けを明確にされた。続いて設計予測精度の改善事例として，タービン伝熱が損失に与える影響，エンドウォールの形状や境界層遷移の影響に関する研究が紹介され，多段ターボ機械の空力解析事例として，前段側でのアクティブ流れ制御が後段の空力に及ぼす影響や，前段・中段・後段での翼表面粗さが全体性能に及ぼす影響が議論された。続いて実機運転で使われた翼表面形状を測定して，実粗さ形状とsand-grain粗さ要素の影響の違いを詳細に調べた研究，

＊1　IGTC2019論文委員長
東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻
＊2　三菱重工業㈱総合研究所

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

多段翼列流れでのウェイクによる遷移のモデル化，LES解析での入口乱れのモデル化など，高信頼性解析を実設計に使うために必要となる研究が報告された。

最後に，数値解析の検証データ取得が可能な，新しい実験設備が紹介された。圧縮機試験では入口圧力を最大8barまで加圧でき，タービン試験ではレイノルズ数を10^4から10^6の範囲で設定できるため，実機に近い条件での検証データが取得できるものとして，特に注目を引いた。（寺本 進）

Plenary Lecture 4: Dr. Thomas H. Pang（GE Additive）“How Additive Is Driving the Future of Manufacturing”

2018年6月にGEにより設立されたGE Additiveの日本統括責任者Thomas Pang氏に，近年，新しい製造法として注目されている金属3Dプリンタの概要と，GEやGE Additiveにおける取り組み等について講演いただいた。

GEは2016年に，代表的な金属3DプリンタメーカであったConcept LaserやArcam等を買収し，現在はGE Additiveとして金属3Dプリンタを製造・販売している。

金属3Dプリンタにより，従来の製造法では製造困難であった形状の機能部品を製造できるほか，複雑形状部品の一体製造による部品点数の削減等が期待されている。航空機エンジンの燃料ノズルは多数の部品から製造されていたが，GEでは金属3Dプリンタを使用してひとつの部品として製造することに成功し，A320neoやB737MAX用LEAPエンジンに実用化されている。

さらに，現在開発中のB777X用GE9Xエンジンにも，金属3Dプリンタで製造されたTiAl合金タービン翼が搭載されていること等が紹介された。

会場には多くの聴講者が集まり，講演後の質疑応答も活発に行われ，大盛況であった。

（北條 正弘*1）

2．Panel Discussions

特定のテーマについて講演者および参加者が共通に議論する場として2件のパネルディスカッションを設けた。

Panel Discussion 1: “Future of Aircraft Propulsion Technology: a Manufacturers' Perspective”

近年のIGTCでは航空エンジン技術に関するパネルディスカッションが行われているが，多くが海外動向の紹介を軸とし，将来エンジン技術開発の道筋に関する議論をすることが多かった。今回は，多少趣向を変えて，世界の中で力をつけつつある国内3社から光る技術を含む現状と将来に向けた取り組み状況の紹介を行い，その上で，エンジン開発の目指すべき姿の総括を行うこととした。また，前回（2015年）に続き虎ノ門での開催であることを踏まえ，前回に続き経済産業省の担当者に登壇いただき，国内の官の対応を含めた議論を行うこととした。

まず，海外からの招待講演者として，官代表としてNASAのHeidmann氏 よ り，NASA's Perspectives on Aircraft Propulsion Challenges and Opportunitiesと題した話題提供がなされ今後取り組むべき研究課題やNASAの取り組み紹介がなされた。続いて海外の産業界代表として，Rolls-RoyceのHaselbach氏より，Evolution and Revolution for Sustainable Aviationと題した話題提供がなされた。

日本からは，まず経済産業省の新倉崇之氏より，Japanese Government’s Efforts to Reinforce Aircraft Engine Industryと題した話題提供がなされ，日本としての力点を置く技術開発や国による産業支援体制の紹介がなされた。続いて，国内3社の話題提供がなされた，第1に，IHIの加藤大氏による，Key Technologies for Future Turbo Fan Enginesと題した話題提供がなされた。IHIが得意とする低圧系の空力技術などが紹介された。第2に，川崎重工の酒井祐輔氏より，Technologies for Future Aero Engine in KHIと題した話題提供がなされ，同社による，圧縮機・燃焼器・ギアボックスに関する取り組みが紹介された。そして第3に，三菱重工航空エンジンの牛田正紀氏より，Future of Aircraft Propulsion Technology: MHIAEL's Activitiesと題した話題提供がなされ，燃焼器技術，タービン技術，加工・修復技術などの注力する技術，エンジン最終組み立ての取り組みなどが紹介された。

討論においては，あらかじめ定められた議論課題（“Material”, “Superior Techs or what are good at”, “Team work”, “Long term perspective”）に対して各登壇者の意見等が示され，議題が明確になっているために議論集約がそれぞれについてなされた。最後に座長のJAXAの石井達哉氏，Summary and Suggestionが投影により示され，議論の結果のまとめがなされた。

新しい視点での試みであったが，IACメンバからも興味深いパネルであったとのコメントをいただいており，企画の意図は伝わったものと思われる。

（岡井 敬一*1）

Panel Discussion 2: “Turbine Technology Development in a Low Carbon Society and a Hydrogen Society”

低炭素社会に向けた動きが活発となってきており，再生可能エネルギーの導入を促進する上で水素の導入も進み始めている。欧米先進国では火力発電への投資が縮小し，再生可能エネルギーへの投資が進んでいる。このような社会情勢の中で，ガスタービンや蒸気タービンなどのエネルギー機器の技術開発が今後どの方向に進んでいくべきか，各講演者にご講演頂き，その後パネルディスカッションを行った。

＊1 宇宙航空研究開発機構 航空技術部門

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

橋本道雄教授（大阪大学）が日本のエネルギー基本計画，水素基本戦略，燃料電池戦略ロードマップ改定，水素普及拡大に必要なコストを紹介し，NEDOを中心に進められている水素の製造，輸送・貯蔵，利用に関する研究開発の概要について講演された。なかでも水素発電は，大規模な水素需要を生み出すことから，水素社会実現に向けての起爆剤となり得る他，エネルギー安定供給とGHG削減目標達成の双方に貢献する重要技術として，積極的な研究開発が行われていることが示された。

GEの取り組みついては，戸村泰二氏が脱炭素に向けたガスタービン発電の役割，水素燃焼技術などについて講演された。

シーメンスの取り組みついては，大築康彦氏が脱炭素に向けた取り組み，天然ガスと水素の混焼，水素燃焼技術などについて講演された。

三菱日立パワーシステムの取り組みについては，谷村聡氏が三菱重工/MHPSの水素戦略，LNG/水素混焼ガスタービン発電，水素燃焼ガスタービンの技術開発などについて講演された。

川崎重工業の取り組みについては，西村元彦氏が水素サプライチェーン，水素燃焼ガスタービンコジェネレーションなどついて講演された。

ヨーロッパタービンネットワークの取り組みについては，Christer Björkqvist氏が水素燃焼ガスタービンやアンモニア燃焼ガスタービンなどについて講演された。

パネルディスカッションは，水素社会におけるガスタービンの役割，ヨーロッパ，米国など地域による燃料選択の違いに着目して行われた。天然ガス，水素，アンモニアなどの燃料選択，集中電源と分散電源を考慮した議論となった。天然ガス焚き発電用ガスタービンについて，水素混焼への燃料転換は技術的な準備が進んでおり，今後は天然ガス-水素混焼は可能であることは織り込み済みであること，水素社会に移行するには，水素サプライチェーンの確立が重要であること，水素社会でもガスタービンは活躍が期待されることが明確になった。

（壹岐 典彦*1）

3．Invited Lectures

前回のIGTCでは最新のトピックスについて自由に議論する場として，講演原稿を義務付けないフォーラムを設けたが，今回は趣を変えて招待講演を増やし，プレナリーレクチャーとは別に4件の招待講演を企画した。

Invited Lecture 1: Dr. Frank Haselbach（Rolls-Royce）“Key Technologies for Future Aircraft Engines”

Dr. Frank Haselbachは，ベルリン工科大学における研究活動を経て産業界に移り，以来エンジン技術開発を主導しており，講演時点で大型エンジンプログラムのチーフエンジニアを務めている。今回はRolls-Royce社におけるエンジン開発を中心に低燃費エンジンの鍵技術について講演いただいた。

講演では，まず，Rolls-Royce社の開発した運用中のターボファンエンジンに関する概要が説明され，最新のTrent-XWBについて卓越した環境性能が詳しく紹介された。また，ACAREの目標に基づく開発計画が示され，Advance 3 デモンストレータによるコアエンジン技術やALECSys（Advanced Low Emissions Combustion System）による燃焼器技術，ALPS（Advanced Low-Pressure System）デモンストレータによる大型ファン複合材技術適用など技術開発状況が紹介された。Ultrafanエンジンに適用する各要素技術開発状況を概観するとともに，新たにドイツに建設したギアの研究開発施設の紹介もなされた。

将来の低炭素化に向けて研究開発が活発化している電動化技術についても取り組みが紹介され，技術実証計画例としてACCEL（Accelerating the Electrification of Flight）計画について言及がなされた。

具体的な開発例紹介が多く，エンジン技術開発の鍵技術とともに関連計画の提示が多く示唆に富む講演であった。

（岡井 敬一）

Invited Lecture 2: Dr. Toshio Nishizawa（JAXA）“Outline of JAXA's Project: Advanced Fan Jet Research（aFJR）”

宇宙航空研究開発機構（JAXA）の航空技術部門事業推進部長（元aFJRプロジェクトマネージャー）の西澤敏雄氏に，JAXAで行われたaFJR（高効率軽量ファン・タービン技術実証）プロジェクトの概要について講演いただいた。

まずJAXAの前身である航空技術研究所で行われたFJRプロジェクトの概要と現在の航空技術部門の試験設備等の紹介があり，aFJRプロジェクトに繋がる背景が示された。続けてaFJRプロジェクトのゴールと課題構成について説明があった。aFJRプロジェクトでは，国内のエンジンメーカーの強みとなっている低圧系要素に着目し，プロジェクトのゴールとして，最新のエンジンに対して⑴ファンの効率1pt向上，⑵ファンの重量0.1%軽量化，低圧タービンの重量9.1%軽量化を掲げた。これらのゴールを達成するため，５つの技術が研究テーマとして選定され，⑴層流ファンによる空力性能の向上，⑵中空CFRPによるファンブレードの軽量化，⑶ファンディスクの軽量化，⑷セラミックス材料（CMC）の適用による低圧タービンの軽量化，⑸従来のアルミニウムからプラスチックの適用による吸音ライナーの軽量化に関する研究が実施された。これらの研究はJAXAを中心に，IHI，東京大学，筑波大学，金沢工業大学，東京理科大学との共同で行われた。また，本講演に関連して，

＊1 産業技術総合研究所省エネルギー研究部門

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

11/19㈫ 9：00–11：05 Room A（TuAM11）にてaFJRプロジェクトで行われた個別の研究テーマについてのセッションを企画し，5件の論文が発表された。

本講演では，個別の研究テーマのうち，中空CFRPファンに対するバードストライクのシミュレーションと実証試験の動画が紹介された。また，軽量音響ライナーの吸音性能試験とLESによる数値解析結果が提示され，プロトタイプの圧縮試験により十分な強度を有することが示された。CMCを適用した軽量低圧タービンについてはタングリング設計が大規模数値シミュレーションとスピンテスタによる実証試験により有効に機能することが示された。いずれも数値シミュレーションによる予測と実証試験を合わせた取り組みとなっていることが特徴的であった。

これらの成果を積算することにより，aFJR技術はV2500に対し－16%以上の燃料消費の低減（ターゲットは16.0%）を実現できることが示されるなど，日本の航空エンジンプロジェクトの進展をご紹介いただいた。会場からは将来の展望やタングリング設計の実証方法などについての質問があった。

（鈴木 正也*1）

Invited Lecture 3: Prof. Mehdi Vahdati（Imperial College London）“A Review of Computational Aeroelasticity of Civil Fan Blades”

Mehdi Vahdati教授からは，民間エンジンのファンブレードを主な対象とした，空力弾性の数値シミュレーションについて包括的な講演を頂いた。

講演では，まず民間ファンエンジンにおける空力弾性予測の重要性が述べられた。民間ファンエンジンの効率は空力的には一定レベルに達しており，今後は更なる大径化，複合材などの新しい素材・製造法，ショートナセルなど空力面以外での改良が予想される。大径化や複合材の利用は振動特性に影響を及ぼし，ショートナセルの採用によりインレットディストーションの影響が強くなる。いずれも空力弾性に影響を及ぼすため，設計段階での予測が重要となる。一方で，時として破壊を伴う空力弾性の実試験は依然として高コストであり，計算機の発達を背景とした数値シミュレーションによる予測が重要になっている。このような背景の元，民間エンジンでおき得る3種類の空力弾性問題として，part speedの失速フラッタ，インレットディストーションによる空力弾性，バードストライクに伴う空力弾性振動の数値シミュレーションが示された。十分な解像度を持った高信頼性数値解析であれば，実験室レベルの実験では調べきれないパラメータの影響まで調べることができるが，数値解析の信頼性は表面粗さや入口乱れ等の境界条件の影響を強くうけるので，十分な注意が必要であることが述べられた。

（寺本 進）

＊1　宇宙航空研究開発機構　航空技術部門

Invited Lecture 4: Dr. Francesco Montomoli（Imperial College London）“Machine Learning for Turbomachinery”

Dr.Montomoliは，Florence大での学位取得後，GE社，ケンブリッジ大ホイットル研究所，サレー大での研究キャリアを経て，2014年から現籍のインペリアル大の上級講師（Senior Lecturer）に就任し，現在は同大にて準教授（Reader）の地位にある。研究分野は，航空エンジン・ガスタービンの全般にわたるが，特に，数値解析の不確かさの分野での研究業績が著名である。そうした経歴の延長線上で，近年は，数値解析による最適化問題やAI技術の適用について特に活発な研究を展開している。また研究活動だけに留まらず，大学からの起業・技術移転についても，過去に複数の実績を上げている。今回は，その特に近年注力しているAI技術のターボ機械開発への適用について講演を頂いた。講演は，大きく分けて3部構成で展開された。

まず第1部は，翼型設計を題材にして，機械学習を用いた形状最適化の取組例が紹介された。ここで，機械学習のアルゴリズムとしては，ニューラルネットワークが用いられていた。

第2部としては，やはり機械学習を用いて，乱流モデルの精度向上を行う試みが紹介された。適用例としては，ガスタービンの冷却翼の内部構造を模擬した系において，流れや熱輸送の予測精度を向上するもの。解析ケースに応じてアルゴリズムのトレーニングを行わずとも，予め一定のトレーニングを施したアルゴリズムが，対象によらずある程度の精度を示す可能性が示唆された。

最後の第3部では，囲碁のAIソフトを利用して，バックステップ流れを最適化するというユニークな取組が紹介された。AI技術がいかに我々の社会で身近になっているのか，またそうした技術をエンジニアリング問題に手軽に適用できる環境が整ってきていることを実感できるトピックスであった。

全体として，詳細なアルゴリズム論も踏まえながら，ただし，AI技術の専門的な知識を持たない一般のガスタービン研究者・技術者にもわかりやすいように具体的な事例を引用しながら議論が展開され，聴衆各位がそれぞれの研究開発の現場に適用する具体的イメージを持てるような良い講演であった。

（大北 洋治*1）

Ⅱ．一般講演

1．Aerodynamics and Design

Aerodynamics and Designの分野では，17のセッションに分かれて合計62件の論文発表が行われた。前回大会に比べてセッション数が1件，論文数が8件，前々回大会に比べてセッション数が4件，論文数が22件の増加となっており，講演数の増加傾向が続いている。セッションはすべてオーガナイズドセッションとして行わ

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

れ，それぞれのセッションで軸流圧縮機，遠心・斜流圧縮機，軸流タービン，CFDの分野に関連した発表があった。以下に，オーガナイズドセッションごとに説明する。

Aerodynamic and Design of Axial Compressorsは３セッションで行われ，sweep，静翼ペニーギャップ，周方向ブリードポート形状の効果等に関して計９件が発表された。Aerodynamic and Design of Turbineは３セッションで行われ，出口ディフューザ，ノズルベーンの空力，高負荷翼やダクトの３次元形状最適化，翼端漏れ流れ等に関して計10件が発表された。Aerodynamic and Design of Centrifugal and Mixed-Flow Compressorsは１セッションで行われ，ディフューザベーンのクリアランス効果，軸方向ケーシングトリートメントの最適化，前縁はく離と翼端漏れ渦の制御等に関して計５件が発表された。Unsteady Flow and Flow Controlは２セッションで行われ，失速点近傍，軸方向隙間，４段軸流タービン等における非定常流とその制御に関して計７件が発表された。Unsteady Flow and Stability Enhancement in Compressorsは２セッションで行われ，失速点の予測，高精度な非定常流計算，二重衝撃波を伴う圧縮機の非定常流れ特性，サージ近傍における渦の発達等に関して計９件が発表された。Aeroelasticity and Flutterは２セッションで行われ，旋回失速に対する振動翼の影響，ファンの低速フラッタ検知，蒸気タービンにおける凝縮の効果，振動翼に作用する非定常力等に関して計８件が発表された。なお，このオーガナイズドセッションの冒頭で，Imperial College LondonのVahdati教授によるReview講演が行われた。Aerodynamic and Design of Gas Turbines；Multi-physicsは2セッションで行われ，超臨界CO_2圧縮機，タービン翼への粒子付着，遷音速圧縮機における湿度の影響，ファンへの着氷等に関して計８件が発表された。Frontier on Computational Fluid Dynamics in Gas Turbinesは２セッションで行われ，LESによる形状損失の予測，高負荷タービン翼のRANS/LES計算，エンジン全体計算，表面粗さの考慮等に関して計６件が発表された。

発表の国内外の比率は国内が約27%，海外が約73%であり，前回大会の国内60%，海外40%と比べると，海外からの講演者が大幅に増えた。４日間にわたり各講演室はほぼ満員であり，ディスカッションも活発で，前回大会と同様，質の高い国際学会のセッションを開催できたと思われる。（山本 誠*1）

２．Aircraft Engines

航空エンジン分野は，４セッションで，15篇の論文が発表され，うち，２篇は招待講演であった。

New Engine Developmentのセッションでは，一般講演として，戦闘機用エンジンの開発プログラムが紹介されたほか，招待講演として，ロールスロイス社のDr. Frank Haselbachが，同社の将来航空エンジン向けの重要技術について，またJAXAのDr. Toshio Nishizawaが，JAXAのaFJRプロジェクトでの技術開発について，それぞれ講演した。

Acoustic Issuesのセッションでは，航空エンジンの騒音関係の技術に関する３篇の論文発表があり，熱線流速計を用いた詳細な非定常計測データおよびそこから得られる音響的知見に関する研究，貫流を伴う系での吸音ライナ性能の数値予測の研究，小型ターボファンエンジンを用いた騒音の実証試験研究，に関する発表があった。

JAXAのaFJRプロジェクトの諸成果を紹介するセッションも企画され，複合材中空ファンブレード開発，遷音速層流ファンに関する研究，低圧タービンのフラッタに関する研究，複合材製の軽量吸音ライナ開発，貫流を伴う系での吸音ライナ性能に関する研究，の５篇の論文発表があった。

Propulsion-Aircraft Integration & Electrificationのセッションは，将来航空機用に注目されている機体とエンジンの統合設計や推進の電動化に関する4件の論文発表があり，コンパクト化したインテークの流れ場に関する研究，同じくインテークでの境界層吸い込み技術に関する研究，二次元スケール翼型を用いた境界層吸い込みの研究，推進電動化のエンジン性能，機体性能へのインパクトを試算した研究，の発表があった。

（大北 洋治）

３．Combustion, Fuel and Emissions

燃焼関連および燃焼器開発関連では，Combustion CFD，Fuel and Flame Diagnostic，Combustor Developmentsの３セッションで14件（国内９件，国外５件）の講演を行った。燃焼シンポジウムと開催日が重なったことや，Withdrawが重なったこと（Abstractの時点では19件の投稿）があり，IGTC2011の28件，IGTC2015の24件に比べ講演数が少なくなった。

Combustion CFDでは，断熱/非断熱FGM燃焼モデルにおける壁面近傍での火炎挙動およびCOの生成についての研究，Micro-Mix水素ドライ低NOx燃焼技術について，NOx排出の実験値，FGM燃焼モデルとRANS，LESのそれぞれの比較検討についての研究，予混合旋回バーナの火炎挙動について，固有直行分解を用いた燃焼振動の予測に関する研究，燃焼CFDの計算負荷低減を狙った，ニューラルネットワークによる多成分輸送係算出法についての研究であった。

Fuel and Flame Diagnosticでは，エアブラスト燃料噴射弁を対象にした噴霧質量分布の定量評価法についての研究，油燃料バーナおける高温・高圧環境下での紫外線発光/熱発生計測と燃焼安定性についての研究，メタン/水素混合燃料ガスの燃焼速度および逆火特性についての研究，燃料/酸素予混合気の燃焼状態について，順

＊1　東京理科大学工学部第一部機械工学科

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

列エントロピを用いた燃焼騒音から燃焼振動への遷移の評価についての研究の発表であった。

Combustor Developmentsでは，燃料多様化に関する研究開発が多く，拡散燃焼器における天然ガス/水素混焼および水素専焼時のNOx排出量の予測手法の研究，Micro-Mix水素ドライ低NOx燃焼技術を用いた天然ガス/水素混焼の研究，産業用ガスタービン燃焼器への適用研究，アンモニア燃焼ガスタービン用の燃焼器研究開発，超臨界CO_2サイクルタービン用の燃焼器研究開発の発表であった。

各発表とも活発な質疑応答があり，有意義なセッションとなった。（堀川 敦史*1）

4．Control and Diagnostics

制御・診断関連のセッションとしては主に機械学習関連の講演を中心にしたDigital/IT/Statistical Issues-1，診断技術を中心としたDigital/Statistical Issuess-2，そしてシステム・制御系を中心としたSystem and Controlの3セッションが設定され，合計12件の講演発表がなされた。

Digital/IT/Statistical Issues-1ではMontomoli先生を含む三方の講演発表がなされ，航空エンジンへの機械学習の適用について，実機航空エンジンとCFDモデルの協業についての取り組み，機械学習を用いた予測診断・故障診断の研究について報告された。

Digital/Statistical Issuess-2では4件の講演発表がなされ，ガスタービン診断技術について様々な手法を比較し，産業用ガスタービンでの実装に関する主要な課題について検討したもの，燃焼内を観察できるボアスコープの開発，精度と計算コストに見合ったリアルタイム複合手法による故障診断，機械学習に基づいたタービンディスクキャビティ冷却流れの最適化，についての報告があった。

System and Controlでは3件の講演発表がなされ，インタークーラ等による熱交換システムを搭載した航空エンジンの燃料消費の推算について，Modelicaを使った複合サイクルパワープラントの蒸気ボトミングシステムのダイナミックシミュレーションについて，ニューラルネット等を用いてガスタービンの状態変化に応じた制御を行う手法について，それぞれ報告された。

国内で開催されるガスタービンの制御・診断関連のセッションとしては最大規模だったと思われる。これまでのガスタービン学会主催講演会ではほとんど無かった機械学習・ニューラルネットワークなどに基づく診断技術・制御技術に関する報告が大半を占めるに至っており，隔世の感を禁じ得ない。

（田頭 剛*2）

5．Cycle Innovation

性能分野は，航空エンジン・定置用合わせた“Design and Performance Evaluation in System Perspective”（以下システムセッション）とCO_2ならびにCCS（Carbon dioxide Capture and Storage）技術に関する“CO_2 and CCS”の2セッションを設けた。システムセッションは4編，CO_2 and CCSセッションは3編である。

システムセッションにおいては，Tesla air micro-expander（IGTC-2019-036）とRankineサイクル向けRadial inflow turboexpander（IGTC-2019-152）に関する実験・解析研究結果が発表された。IGTC-2019-133は，Startup時を含む過渡応答に関するガスタービン運転シミュレーションを行い実験結果と比較を行っている。IGTC-2019-234では，航空エンジンの飛行経路を想定したMission Fuel Burnの解析方法と解析事例が示された。それぞれ，システムのくくりにありながら多岐にわたるテーマが扱われていたが，活発な質疑応答がなされていた。

CO_2 and CCSセッションにおいては，CCSに関する検討例（IGTC-2019-073）1件と，超臨界二酸化炭素利用サイクルについて，システム評価（IGTC-2019-025）と，実在気体効果の評価方法の検討（IGTC-2019-102）各1件が紹介された。IGTC-2019-073では，燃焼に関する実験結果を提示した上で，CCSサイクルの検討事例を示している。超臨界二酸化炭素利用サイクルについては，システム評価と実在気体効果に関するそれぞれ重要な視点での検討結果が示されており，質疑応答も興味深いものであった。

（岡井 敬一）

6．Heat Transfer

Heat Transfer分野は，Internal Cooling，Blade Cooling，Film Cooling，Novel Cooling Technologies，Advanced Methods in Heat Transfer，Endwall Cooling，Thermal Managementsの7セッションで27件の論文発表が行われた。海外からの発表が15件と半数以上を占めており，前回（26件中の17件）の海外発表件数からはやや減少したものの，国際会議にふさわしい海外比率となった。国別でみると，中国6件，ドイツ4件，韓国3件，米国2件と中国からの発表が最も多かった。ただし，海外からの発表はIAC委員の協力に依るところも大きく，国際性のさらなる向上が今後の課題と言える。

Internal Coolingでは，動翼Uダクト内の熱伝達，翼前縁部の噴流冷却，サーペンタイン流路内の内部冷却，V形リブとディンプルの複合冷却，片持ち型のピンフィン冷却，に関する4件の内部冷却に関する発表があった。Blade Coolingでは，翼後縁カットバック冷却における冷却空気脈動に関するLESと実験，動翼先端部のチップ冷却に関するCFD，に関する3件の発表があった。Film Coolingでは，フィルム冷却を伴う静翼の熱連

＊1 川崎重工業㈱ 技術研究所
＊2 宇宙航空研究開発機構 航空技術部門

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

成解析手法，拡大模型を用いたフィルム冷却流れのPIV，２つの小孔を伴うフィルム冷却における冷却空気脈動のCFD，高速応答PSPによるフィルム冷却効率の計測，Nekomimi冷却孔に関するRANSとLESの比較，に関する５件の発表があった。Novel Cooling Technologiesでは，衝突噴流とフィルム冷却の複合冷却構造のCFD，フィルム冷却と渦発生器を組み合わせた系のLES，感温液晶によるラティス冷却の熱伝達計測，翼前縁内部のSwirl tube冷却に関するCFD，に関する４件の発表があった。Advanced Methods in Heat Transferでは，遺伝的アルゴリズムを適用した多目的最適化による静翼前縁の複合冷却構造の最適化，空力と伝熱を考慮したエンドウォール形状の多目的最適化，ベイジアンモデル較正を適用したSSTモデルによるフィルム冷却効率の予測，に関する３件の発表があった。Endwall Coolingでは，タービン静翼列の上流に設置した冷却孔からの吹き出しが馬蹄渦に与える影響を検討したCFD，エンドウォール部の複数の冷却孔からの個別寄与を推定する重ね合わせ手法，油膜法と５孔管によるパージ流条件の検討，高速応答PSPによるパージ流の膜冷却効果の非定常計測，に関する４件の発表があった。Thermal Managementsでは，空冷式オイルクーラの溝付きフィンによる性能向上に関するCFD，キャビティ内部の回転流れの伝熱予測に適した相似パラメータの検討，静翼・動翼境界部のリムシールの性能予測実験，電動航空機に適した軽量オイルクーラのヒートシンク構成の最適化，に関する４件の発表があった。各セッションの参加人数は概ね40名前後であり，活発な質疑・討論が行われた。全７セッションは全てB室で実施できたことから参加者にも分かりやすく，部屋の大きさも適切であった。

（小田 豊*1）

7．Industrial Gas Turbine and Power Systems

Industrial Gas Turbine and Power Systems では，IGTC2015では10件の発表があったのに対し，今回は５件の発表があった。そのうち，国内からの発表３件，海外からの発表２件でほぼ半数ずつであった。

発表の内容はAdditive Manufacturing（AM）の実エンジンでの検証例１件，エンジンのアップグレードの紹介×１件，実機解析技術の紹介×１件，新機種の開発×２件であった。発表それぞれについて，以降に詳細を示す。

IGTC-2019-037ではAM製NGV翼の適用を紹介し，従来の鋳造翼との形状比較，実機運用による検証結果が発表された。IGTC-2019-065では30MW級ガスタービンのアップグレードの紹介がなされ，効率向上を可能とした燃焼器やTBCの改良について説明があり，出力増加理由や温度計測手法について討議がなされた。IGTC-2019-098では，強制空冷燃焼器を適用した大型GTの開発について報告があり，強制冷却化による効率への影響や，部分負荷性能の改良について質疑がなされた。IGTC2019-150では，セカンダリエア系統について，1Dモデルと3D-CFDを用いた最適化手法の報告があり，計算パラメータなどについて討議がなされた。IGTC2019-170では，5MW級ガスタービンの開発手法と従来機種からの運用性の改良について発表があり，検証で用いられたチップクリアランスセンサについて質疑応答があった。

発表件数は前回より減ったが，前回同様に闊達な議論がなされたと考えている。

（齋藤 敏彦）

8．Materials and Manufacturing Technologies

Materials and Manufacturing Technologiesでは，「ディスク用材料開発」，「鋳造用合金およびコーティング技術開発」，「製造技術」の３セッション構成とし，全体で発表件数は11件であった。

「ディスク用材料開発」では，高圧タービンディスク等に使用される粉末冶金合金の合金開発に関する成果が報告された。単結晶合金を多結晶のディスク材に改良するもので，添加元素の影響等が詳細に調べられていた。また，粉末冶金合金を供試材として引張特性に及ぼす金属組織の影響，溶解・鍛造合金を供試材として疲労特性に及ぼす金属組織の影響等，ディスク用材料の機械的特性に及ぼすミクロ組織の影響に関する研究成果の発表がなされ，これらの新材料の特性や強度発現メカニズムに関する積極的な討議が行われた。

「鋳造用合金およびコーティング技術開発」では，レアメタルで高価なReを無添加とした一方向凝固合金の開発，過給機タービン翼用の低密度合金の合金開発，コーティングの分野では微細粉末を用いたTBCの開発の現状に関する報告，1700℃級ガスタービンに向けた低熱熱伝導率のトップコート，および高い対酸化性を有するボンドコートの開発に関する発表なされ，高い関心を集めていた。

「製造技術」ではAdditive Manufacturingで２件の報告と，新しく開発されたTi合金のクリープ変形機構に関する研究成果が報告された。Additive Manufacturingの１件目はMo粉末への適用に関する研究であり，高融点合金へのプロセス適用の可能性が示された。もう一件は実用的な研究で，ガスタービン部品を製造する際の熱ひずみの制御や品質モニタリングに関わる研究成果が報告された。Ti合金の研究はクリープ変形機構に及ぼす金属組織の影響を系統的に検討したもので，活発な討議がなされた。

（高橋 聰*2）

＊1　関西大学　システム理工学部
＊2　㈱IHI　技術開発センター

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

9．Small Gas Turbine and Turbochargers

前々回のIGTC2011では，Turbocharger Technologyとして4コマ，計9件の講演（海外5件）があり，IGTC2015では，Small Gas Turbine and Turbochargerとして3コマ，Turbochargerが9件（海外6件），Small Gas Turbineが3件（海外2件），計12件（海外9件）があった。今回は，3コマで，Compressorが4件（海外1件），Small Gas Turbine Systemが5件（海外4件），Small Gas Turbineが4件（海外4件）の発表がなされた。過給機はいずれも圧縮機に関連した講演であり，TuPM13において，遠心圧縮機の入口形状の性能への影響，インペラ先端漏れの渦崩壊の制御による運転範囲の拡大，サージング予測，非対称翼ディフューザによる翼振動低減について報告された。小型のガスタービンについては，様々なガスタービンが取り上げられた。WeAM13において，マイクロウェーブロータに関して，流路断面の影響，性能特性に関する数値シミュレーションについて報告された。また，SOFCとガスタービンのハイブリッドシステム，空気を液化して蓄エネルギー効果を得るシステム，熱再生器付の80kWクラスのターボシャフトエンジンの概念設計とフライトシミュレーションについて報告された。WeAM23において，2MWクラスのガスタービンについて2件，1.2MWガスタービン1件，7kWガスタービン1件と小型ガスタービンの研究が発表された。

（壹岐 典彦）

10. Steam Turbines

蒸気タービン分野では全体で4編の投稿があり，セッションを1つ設けた。低圧タービン長翼低圧段の湿りに関するものがドイツの大学から2編（#7，#124），既設プラントの熱併給システムへの転換に関するものが中国の会社から1編（#207），タービンの起動停止に関するものがドイツの大学から1編（#64）であった。前回は16編の投稿で5セッションだったので，大幅な件数低減だった。しかし，前回は全て大学からの投稿だったが，今回は中国の会社からの投稿があり，その点では改善が見られた。

個別の論文についてみると，長翼低圧段に関しては，湿り蒸気中の液滴の計測プローブに関する数値シミュレーション（#7），LESによる湿り蒸気の翼流れ解析（#124）があり，現在蒸気タービンの中ではこの分野での解析・計測法の進歩が期待されていることを伺わせた。

中国からの論文は既設石炭火力の蒸気タービンシステムを熱併給システムに転換し，エネルギーの効率的な利用を目指すものであり，中国の現在のエネルギー産業のニーズを直接反映したものと思われた。

タービンの起動停止に関する論文（#64）は，ドイツでの再生可能エネルギーの急速な普及にともなう，火力発電プラントの急速な負荷変動への対応を念頭においたものであり，これもドイツのエネルギー産業のニーズを直接反映したものと思われた。

いずれの講演も現在の蒸気タービンシステムへのニーズに深くかかわっており，有意義なものであった。

なお，聴講者は概ね40名で席にはまだ余裕はあったものの活発なディスカッションが行われた。

（福田 雅文*1）

11. Structure and Dynamics

Structure and Dynamicsの分野では，Structural Vibration & DampingとRotordynamics & Structural Mechanicsの2セッションで計10件の講演が行われた。講演件数は，前回のIGTC2015と同数であった。国別でみると，国内4件，ドイツ3件，韓国2件，中国1件であり，海外からの発表の割合が多かったと言える。講演内容の傾向としては，基礎研究よりは応用技術のほうが多かったと感じたが，内容は設計法や試験，シミュレーション等，さまざまな講演が行われた。会場は，2セッションとも比較的小さい部屋であったが，聴講者でほぼ満席の状態であった。

（北條 正弘）

12. Testing Technology

本セッションは今回のIGTC2019から新しくできたセッションである。全体で5件の講演発表が行われた。1件目の講演は静電容量センサによる遠心圧縮機のチップクリアランス計測に関するものであり，サージ時のクリアランス計測についても報告があった。2件目はニューラルネットワークを用いた複孔ピトー管のキャリブレーションに関するものであり，5孔ピトー管を用いた実験結果では多項式近似よりも精度で上回り，キャリブレーションの時間・コストの削減に寄与することなどが報告された。3件目もピトー管計測に関するもので，定速で移動計測するピトー管により計測精度を損なわずに計測時間を短縮できることが報告された。4件目は流れをストークス流れとして渦理論を適用し，ビオサバールの法則から速度を計算するベルマウス設計の理論と実際の試験結果についての報告があった。5件目はバッテリ不要のマイクロ波ワイヤレス給電可能な翼振動計測システムの開発について報告された。それぞれの講演発表で活発な質疑応答がなされたという印象を受けた。

（田頭 剛）

＊1 （一社）高効率発電システム研究所

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

3．展　示

安田 聡*1
YASUDA Satoshi

1．はじめに

11月18日㈪から21日㈭の４日間に亘り，International Gas Turbine Congress 2019 Tokyoの展示会を虎ノ門ヒルズフォーラム（５階メインホールならびにホワイエ）で実施した。展示会場では，国内外から28社の企業・団体が参加して企業展示を行った。また，大学から11研究室がパネル展示を実施した。また展示会入場者に向けてアンケートも実施し，参加者の情報ならびに今後の展示会に向けた課題を抽出した。

2．準備経過

本展示会の実施は，富士電機，GE，本田技研，IHI，JAXA，KHI，東芝，三菱パワーよりなる展示委員会及び出展事務局（展示支援業者）が協力し企画，運営した。

2018年９月に第１回展示委員会を開催し，展示会内容の検討を始めた。2018年12月には出展要綱を作成し各社に配布した。今回，英文版も作成し関連企業に配布した。2019年１月に第一次締切を行うも２月～５月に委員から各社に対して直接フォロー連絡をとり出展募集に努めた。研究関連業者に対する大学側からのフォローもあり，海外の団体の申込もあったが，予定していた小間数（62小間，１小間4.5m^2）に対して，61小間となった。2019年８月，会場である虎ノ門ヒルズフォーラムにて出展申込社に対して出展社説明会を開催した。展示委員会は2018年９月より2019年10月まで計５回の展示委員会を行い，展示会に備えた。

3．企業出展状況

展示会にご協力いただいた企業および団体を表3.1に示す。

ガスタービン・ターボ過給機・蒸気タービン・再生可能エネルギー等の関連技術・機器，部品・部材，工作機械，計測・データ処理機器･試験器，コンピュータ・関連ソフト，出版物等，幅広い分野にまたがる企業/研究機関からの展示参加があった。今回も展示会は期間中，入場無料で開放した。製品の実物やモックアップ，ビデオ・パネル等の展示，製品やソフトを使った実演など各社とも趣向を凝らし興味深い内容であった。なお今回もASME/IGTIの展示ブースも設け相互交流の一助とした。展示会会場の様子を図3.1，3.2に示す。

表３.１　展示会社一覧

ブースNo	企業名
1	富永物産株式会社
2	株式会社IDAJ
3	B&B - AGEMA
4	ASME Gas Turbine Segment（IGTI）
5	三協インタナショナル株式会社
6	株式会社大手技研
7	三菱パワー株式会社
8	三菱重工航空エンジン株式会社
9	一般財団法人日本航空機エンジン協会
10	東芝エネルギーシステムズ株式会社
11	株式会社IHI
12	川崎重工業株式会社
13	株式会社インターナショナル・サーボ・データー
14	国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
15	丸文株式会社
16	株式会社第一システムエンジニアリング
17	コンカレント日本株式会社
18	パルステック工業株式会社
19	株式会社本田技術研究所エアロエンジンセンター
20	防衛装備庁航空装備研究所
21	丸和電機株式会社
22	NUMECAジャパン株式会社
23	株式会社キグチテクニクス
24	国立研究開発法人産業技術総合研究所
25	株式会社富士テクニカルリサーチ
26	TEMA ENERGY SPA
27	auratech Co., Ltd.
28	Notre Dame Turbomachinery Laboratory

＊1　IGTC2019展示委員長
三菱パワー㈱　エンジニアリング本部プロジェクト総括部
電力計画部

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

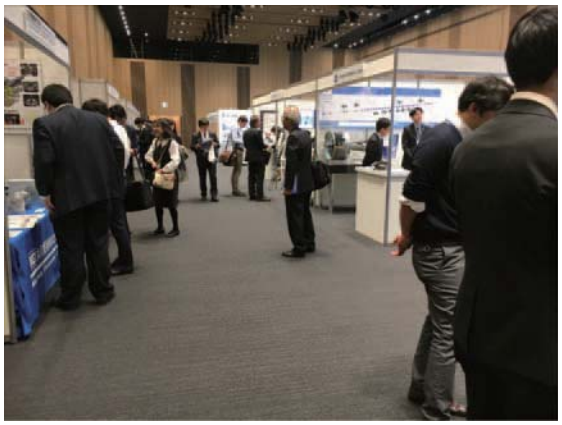

図3.1　企業展示の様子（5階メインホール）

図3.2　企業展示の様子（5階ホワイエ）

4．大学展示

全国11大学からの展示参加があり，各研究室の最新情報が報告された。会議中，A0ポスター用紙に足を止め熱心に眺める参加者の姿が多く見かけられた。表3.2に大学展示参加研究室一覧を示す。

表3.2　出展大学一覧

小間	大学名
1	東京理科大学／山本CFD研究室
2	東京大学 ジェット推進研究室
3	早稲田大学 流体工学研究室
4	東北大学/山本(悟)・古澤研究室
5	九州大学 推進工学研究室
6	船﨑・谷口，山田研究室
7	東京大学 寺本・岡本研究室
8	京都大学/熱物理工学研究室
9	長岡技術科学大学 ガスタービン高温材料強度学研究室
10	東京農工大学 村田研究室
11	早稲田大学 佐藤研究室

5．当日の運営

展示会場前に展示専用の受付を設置して常時2名を配置し，展示パンフレットの配布や来場者のサポート等を行った。また，展示受付とは別に，展示会当日毎に展示委員から当番を決めて展示会場を定期的に周回し，会場内の雰囲気を写真撮影するとともに，会場内に問題が発生していないか，要望事項がないかを尋ねて廻った。

設営期間を含め，展示会終了日まで学会行事としてウェルカムパーティ，講演会，バンケット等が開催されたが，今回の展示会場は一部，展示会開催前および展示会終了後も外来者が自由に行き来できる場所にも展開されていたため（5階ホワイエが施錠管理できない），展示物をガードするために，幹事会社からガードマン役を任命し，展示会社担当者が不在の間も展示品の管理に当たった。

6．参加者数

スペースの都合上，5階メインホール入口で展示会の入場者数をカウントした。4日間で延べ1050名の来場者数を数えた。なお展示会場入口で新規来場者に配布したアンケート用紙は356枚であった。

7．アンケート結果

IGTC展示会の更なる改善を図るため，今回も展示会来場者に対してアンケート（日本語版）を実施した。

展示会来場者356名にアンケート用紙を配布し，45名から回答を得た。

展示会をどのように知ったか，会場の感想，興味のある展示内容，さらには展示会への要望，参加者の所属等について無記名で尋ねた。

この結果，現状の学会からの案内（ポスター含む）方法だけでは来場者の半数近くにしか展示会情報が浸透していないことが明らかになった。しかし，来場者内訳ではIGTC2019への参加登録者以外が半数であり，展示会目的の来場者が多数いることが分かった。今後の展示会PRによっては更なる来場者の増加も期待できると考える。また，来場者はメーカーと大学・研究機関と一般がそれぞれ3割であり，ユーザー，官公庁，学生が少ないので，周知拡大が必要であることがわかった。

会場については前回同様に来場者ならびに出展社ともに高評価であった。会場の虎ノ門ヒルズの地の利を生かした結果と思われる。ただしアンケートとは別に，出展社からはホワイエとメインホールとは照明が異なり，ホワイエが暗く感じたことやホワイエの奥への人の流れが悪いといったマイナス意見も聞かれた。

広報改善および会場内の人の流れを促す工夫によって今後のIGTC展示会の一層の飛躍が期待できると考える。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

4．見　学

仲俣 千由紀*1
NAKAMATA Chiyuki

2019年11月22日㈮にOptional Facility Tourが2コースに分かれて実施された。

Tour Aの訪問先は，茨城県つくば市の国立研究開発法人物質・材料研究機構（National Institute for Materials Science，以下NIMS）で，参加者17名（日本人10名）と行事委員３名の計20名でのツアーとなった。

NIMS には定刻より20分程度早く到着し，前倒しで見学を開始した。英語班と日本語班に分かれ，耐熱材料のクリープ設備群，Ni基超合金の開発設備，熱遮蔽コーティング／三次元造形設備及び最新鋭の電子顕微鏡装置といった材料技術に関する設備とデモンストレーションを見学した。NIMSには見学担当をアサインいただくなど多大なるご協力をいただき，見学をスムースに実施することができた。NIMSの皆様には本見学会開催に際し，多大なるご協力をいただいたことに感謝申し上げたい。見学に際しては参加者から多くの質問が出ており，興味深く拝見させていただいた。参加者の皆様にご満足いただける見学となった。

図４.１　NIMS

昼食後は，筑波山山麓にある稲葉酒造に向かい，酒蔵見学を行った。筑波山を望む田園風景の美しい場所なのであるが，生憎の悪天候であったため残念ながら景色を楽しむことはかなわなかった。酒蔵では日本酒の製造法や特徴などの説明を聞いた後，併設される直売所にて買い物を楽しんでいただいた。

Tour Bの訪問先は，神奈川県川崎市のJERA川崎火力発電所であり，参加者14名（日本人２名）と行事委員３名の計17名でのツアーとなった。

JERA 川崎火力発電所では，はじめにJERA紹介映像によるご紹介をいただいた後に，川崎火力発電所に関するご説明をいただいた。中央制御操作室を外から見学した後に，PRルームでプラント全景模型・ガスタービン模型・ガスタービン高温部品（燃焼器・タービン翼）の展示についてご説明いただいた。タービン建屋内に移動すると，ガスタービン発電設備の１台がちょうど定期点検中であり，取り出されたロータや高温部品を安全通路から見ることができた。特にガスタービン高温部品の展示では非常に多くの質疑応答があり，議論が尽きない様子であった。なお本発電所見学では，通常は日本語説明であるところ，特別に英語でのご対応をいただいた。JERAの皆様には特別のご対応をいただいたことに対し感謝申し上げたい。

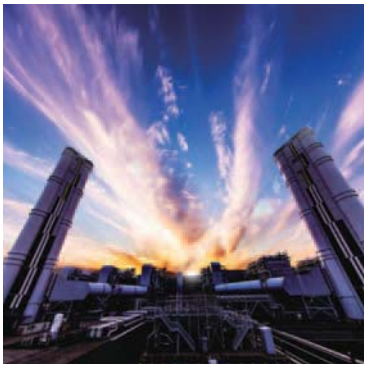

図４.２　JERA川崎火力発電所

昼食後は，キリンビール横浜工場に移動した。到着が早かったため，見学開始を待つ必要があったが，エントランスに色々な展示があり時間を持て余すことなく楽しむことができた。見学ではまずシアタールームで紹介映像を鑑賞し，その後は施設内を見学しながら製造工程を説明いただいた。各所で映像やプロジェクションマッピングを用いた説明が配されており，見せ方に創意工夫が感じられた。見学後はビールの試飲を楽しんだ。

最後に，生憎の悪天候の中，途中の道路混雑等もあり，参加者皆様にご不便をおかけすることもありましたが，皆様のご協力により無事見学会を終えることが出来ました。参加者皆様，ご協力いただいた皆様に感謝申し上げます。アンケートなどで皆様から頂いたご意見を参考に，次回の見学会をより良いものにできるよう引き継いで参ります。

＊1　IGTC2019行事委員長
㈱IHI　航空・宇宙・防衛事業領域 民間エンジン事業部

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

会　告

2020年度見学会および若手技術者交流会 開催中止のお知らせ

集会行事委員会

今年度開催を計画しておりました見学会および若手技術者交流会は，新型コロナウイルス感染症の拡大防止と参加者および関係者の健康や安全面を考慮し，中止することといたしました。皆様には，お詫びを申し上げますとともに御理解いただきますようお願いいたします。

学生フォーラム開催のお知らせ

今後活躍が期待される学生の皆様がよりガスタービンに興味を持って頂けるように，ガスタービン関連の企業および業務紹介を行うイベントとして新たに学生フォーラムを開催致いたします。

1．日　　時：　2021年1月28日㈭　13：00～17：00（予定）

2．開催方式：　オンライン開催

3．参加要領：　12月中旬頃，当学会ホームページに掲載予定。（http://www.gtsj.org/）

4．参 加 費：　無料

第49回ガスタービンセミナー開催のお知らせ

第49回ガスタービンセミナーを下記の通り開催いたします。
産官学の最前線で活躍されている方々を講師にお迎えし，航空用および発電用のガスタービンに関する最新技術動向についてご講演いただきます。

1．日　　時：　2021年1月29日㈮　10：00～17：00（予定）

2．開催方式：　オンライン開催

3．テ ー マ：　「ガスタービンの最新技術動向および低炭素社会に向けた技術開発」（予定）

4．参加要領：　12月中旬頃，当学会ホームページに掲載予定。（http://www.gtsj.org/）
※今年度に限り，学生は参加費無料

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

○本会協賛行事○

主催学協会	会合名	協賛	開催日	詳細問合せ先
気象影響防御技術コンソーシアム	第5回WEATHER-Eyeオープンフォーラム	協賛	2020/12/1	URL：https://www.weather-eye.jp/
日本流体力学会	第34回数値流体力学シンポジウム	協賛	2020/12/21-23	URL：http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd34/
IMechE（Institution of Mechanical Engineers）	14th International Conference on Turbochargers and Turbocharging	協賛	2021/5/11-12	URL：https://www.imeche.org/turbo

▷ 入 会 者 名 簿 ◁

〔正会員〕

寺本 正彦　菊池 之宏(IHI)　蜂須賀 剛(IHI)　Ekenechukwu Chijioke Okafor(産業技術総合研究所)
宮澤 弘法(東北大学)　田村 良範(東北電力)　三上 和樹(東北電力)

次号予告　日本ガスタービン学会誌2021年1月号（Vol.49 No.1）

特集　電動化とガスタービン
論説・解説
巻頭言　渡辺 紀徳（東京大学）
低炭素社会の実現に向けた航空機電動化技術研究　小島 孝之，岡井 敬一，西沢 啓，（JAXA）
高温超電導技術を用いた航空機用電気推進システムの開発 和泉 輝郎（産業技術総合研究所）
脱炭素化にむけた航空機・エンジン電動化システムの役割　大依 仁（IHI）
推進電動化による技術革新旅客機の構想検討　山北 晃久，戸井 康弘，石川 忠（日本航空機開発協会）
航空機電動化に向けた電力変換・配電技術の展開（仮）　岩田 明彦（大阪産業大学）
電動航空機で期待されるエンジン埋め込み・境界層吸込み効果について
岡井 敬一（JAXA）佐藤 哲也（早稲田大学）
サイクル解析と重量推算に基づく電動化航空エンジンの性能評価　姫野 武洋，渡辺 紀徳（東京大学）
自動車用電動ターボチャージャーの技術動向　小林 祐二（IHI）

定期講演会報告
第48回日本ガスタービン学会定期講演会全体報告　渡邊 裕章（九州大学）
先端技術フォーラム　幸田 栄一（電力中央研究所）

見聞記「2020年ASME国際ガスタービン会議」
執筆者･･･壹岐 典彦（産業技術総合研究所）／浅子 知昭（IHI）／金子 雅直（東京電機大学）／田中 久人（本田技術研究所）／塚本 和寛（日立製作所）／松井 孝太朗（IHI）／山根 秀公（防衛装備庁）／平口 英夫（日本技術士会）／金子 康智（龍谷大学）／宮澤 弘法（東北大学）

※タイトル，執筆者は変更する可能性があります。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

2020年度役員名簿

会長　識名 朝春（IHI）

副会長　太田 有（早大）

法人管理担当執行理事　石井 達哉（JAXA），大石 勉（IHI），餅 雅英（川崎重工），岸部 忠晴（三菱パワー）（兼務），村田 章（東京農工大）

公益目的事業担当執行理事　石井 達哉（JAXA）（兼務），伊藤 栄作（三菱重工），岡田 満利（電中研），及部 朋紀（防衛装備庁），岸部 忠晴（三菱パワー），佐藤 哲也（早大），鈴木 伸寿（東芝ESS），新関 良樹（徳島文理大），野崎 理（高知工大），姫野 武洋（東大）

理事　鈴木 雅人（産総研），清野 幸典（東北電力），秡川 宏樹（JALエンジニアリング），福谷 正幸（本田），渡邉 啓悦（荏原）

監事　筒井 康賢（元高知工大），松﨑 裕之（東北発電工業）

2020年度委員名簿（順不同）

2020年11月 6 日現在
○は委員長

倫理規定委員会　○餅 雅英（川崎重工），大石 勉（IHI），岸部 忠晴（三菱パワー），姫野 武洋（東大），村田 章（東京農工大）

自己点検委員会　○餅 雅英（川崎重工），大石 勉（IHI），岸部 忠晴（三菱パワー），姫野 武洋（東大），村田 章（東京農工大）

運営委員会　○村田 章（東京農工大），石井 達哉（JAXA），大石 勉（IHI），餅 雅英（川崎重工），岸部 忠晴（三菱パワー），酒井 義明（東芝ESS），佐藤 哲也（早大），塚原 章友（三菱パワー），寺本 進（東大），姫野 武洋（東大），松沼 孝幸（産総研）

企画委員会　○岸部 忠晴（三菱パワー），石井 達哉（JAXA），太田 有（早大），餅 雅英（川崎重工），佐藤 哲也（早大），塚原 章友（三菱パワー），姫野 武洋（東大），村田 章（東京農工大），安田 聡（三菱パワー），輪嶋 善彦（本田），渡辺 紀徳（東大）

国際委員会　○渡辺 紀徳（東大），石井 達哉（JAXA），伊藤 優（東大），岡井 敬一（JAXA），岸根 崇（三菱パワー），邉 英智（本田），渋川 直紀（東芝ESS），谷 直樹（IHI），都留 智子（川崎重工），福田 雅文（高効率発電システム研究所），船崎 健一（岩手大），山根 敬（JAXA），山本 誠（東京理科大）

学術講演会委員会　○渡邊 裕章（九大），今野 晋也（三菱パワー），岡嶋 芳史（三菱重工），岡本 光司（東大），尾関 高行（電中研），糟谷 宏樹（東芝ESS），北村 英二郎（本田），富永 純一（JFEエンジニアリング），中山 健太郎（川崎重工），野崎 理（高知工大），姫野 武洋（東大），平川 香林（IHI），平野 孝典（拓殖大），藤澤 信道（早大），藤原 仁志（JAXA），松沼 孝幸（産総研），山形 通史（富士電機）

集会行事委員会　○姫野 武洋（東大），安藤 友香（防衛装備庁），伊藤 栄作（三菱重工），伊藤 祐太（本田），尾崎 喜彦（川崎重工），小沢 寛二（IHI），金澤 直毅（川崎重工），河上 誠（日立），小島 充大（富士電機），澤 徹（東芝ESS），泰中 一樹（電中研），西江 俊介（三井E&Sマシナリー），西村 英彦（三菱パワー），秡川 宏樹（JALエンジニアリング），吉田 征二（JAXA）

ガスタービン技術普及委員会　○岡田 満利（電中研），石田 克彦（川崎重工），井筒 大輔（三菱パワー），垣内 大紀（IHI），窪谷 悟（東芝ESS），鈴木 正也（JAXA），長谷川 晃（JALエンジニアリング），林 明典（三菱パワー），村田 章（東京農工大），山本 誠（東京理科大），渡辺 紀徳（東大）

学会誌編集委員会　○佐藤 哲也（早大），荒木 秀文（三菱パワー），壹岐 典彦（産総研），岩井 裕（京大），大塚 裕也（本田），岡村 直行（JAXA），加藤 千幸（東大），金子 雅直（東京電機大），黒瀬 良一（京大），酒井 英司（電中研），佐藤 浩（東京ガス），渋川 直紀（東芝ESS），鈴木 雅人（産総研），清野 幸典（東北電力），田尻 敬次（荏原エリオット），千葉 秀樹（酒田共同火力発電），辻田 星歩（法政大），寺本 進（東大），中野 賢治（IHI回転機械），新関 良樹（徳島文理大），野原 弘康（ダイハツディーゼル），八田 直樹（三井E&Sマシナリー），原 浩之（三菱パワー），福谷 正幸（本田），北條 正弘（JAXA），松﨑 裕之（東北発電工業），松田 博和（川崎重工），三ヶ田 一裕（JALエンジニアリング），宮入 嘉哉（防衛装備庁），村上 秀之（NIMS），室岡 武（IHI），森澤 優一（東芝ESS），山下 一憲（荏原），渡邉 啓悦（荏原）

論文委員会　○山本 誠（東京理科大），青塚 瑞穂（IHI），壹岐 典彦（産総研），大北 洋治（JAXA），小田 剛生（川崎重工），田頭 剛（JAXA），寺本 進（JAXA），中谷 辰爾（東大），姫野 武洋（東大），山田 和豊（岩手大），山本 武（JAXA），吉岡 洋明（東北大）

ガスタービン統計作成委員会　○太田 有（早大），赤澤 弘毅（川崎重工），飯塚 清和（IHI），恵比寿 幹（三菱重工エンジン＆ターボチャージャ），佐々木 慎吾（三菱パワー），澤 徹（東芝ESS），須古 弘規（ターボシステムズユナイテッド），藤澤 信道（早大），山上 展由（三菱パワー），米田 幸人（ヤンマーパワーテクノロジー）

産官学連携委員会　○岸部 忠晴（三菱パワー），壹岐 典彦（産総研），今村 満勇（IHI），岡崎 正和（長岡技科大），及部 朋紀（防衛装備庁），幸田 栄一（電中研），佐々木 隆（東芝ESS），野崎 理（高知工大），原田 広史（NIMS），二村 尚夫（JAXA），松﨑 裕之（東北発電工業），吉田 英生（京大），笠 正憲（川崎重工），輪嶋 善彦（本田），渡辺 紀徳（東大）

広報委員会　○鈴木 伸寿（東芝ESS），壹岐 典彦（産総研），尾関 高行（電中研），酒井 義明（東芝ESS），谷 直樹（IHI），長谷川 晃（JALエンジニアリング），山本 誠（東京理科大），吉田 征二（JAXA）

表彰委員会　○太田 有（早大），餅 雅英（川崎重工），岸部 忠晴（三菱パワー），佐藤 哲也（早大），姫野 武洋（東大）

将来ビジョン検討委員会　○高橋 徹（電中研），小田 豊（関西大），賀澤 順一（JAXA），酒井 義明（東芝ESS），柴田 貴範（三菱重工），柴田 良輔（本田），多田 和幸（東北電力），寺本 進（東大），仲俣 千由紀（IHI），姫野 武洋（東大）

男女共同参画推進委員会　○川澄 郁絵（本田），猪亦 麻子（東芝ESS），川岸 京子（NIMS），都留 智子（川崎重工），森川 朋子（三菱パワー），山上 舞（IHI）

調査研究委員会　○川岸 京子（NIMS），大北 洋治（JAXA），岡崎 正和（長岡技科大），岡田 満利（電中研），長田 俊郎（NIMS），筧 幸次（東京都立大），金久保 善郎（IHI），岸部 忠晴（三菱パワー），東部 泰昌（川崎重工），野上 龍馬（三菱重工航空エンジン），日野 武久（東芝ESS），輪嶋 善彦（本田）

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

編集後記

ついこの前までの厳しい残暑がうそのように，秋雨をもたらした前線が南下し，夏から秋の空気に入れ替わってから一気に気温が下がってきました。暑さ寒さも彼岸までとはよくいったものです。山形・庄内平野では，稲刈りが終盤となっておりますが，稲刈りがまだ終わらないうちに遠くシベリアから冬の使者白鳥が飛来してきました。私のアパートの上空からも飛ぶ白鳥の鳴き声が聞こえてきます。コロナ禍の中でも着実に季節は進んでおります。(10月10日現在)

コロナと言えば山形・庄内地方では４月に感染者が発生して以来，感染者発生ゼロの日が長期間に亘って続いております。しかしながら，地方では，コロナに感染してしまうと感染者が特定され易く，悲しいかなコロナに対する偏見により，住まいを移さざるを得なくなるケースが多々見受けられます。このようなことは無くなって欲しいのですが，メディアで報道されていることよりも，いっそう厳しい現実に直面してしまいます。経済再生のためGo Toキャンペーンの必要性を感じつつ，一方，コロナ感染の恐怖と隣り合わせとなっており，早くコロナが終息することを切に願うばかりです。

さて，以前から編集委員会におきまして，学会誌で「ユーザー視点のテーマ」を特集できないかとの議論がありました。そのようなことを踏まえ，ガスタービン賛助会員懇談会でのご意見も勘案しつつ「メンテナンスコスト低減」「運用性向上」「性能向上」「高効率化」などの切り口から，11月号は「ユーザー視点のテーマ」にチャレンジしてみました。当初はトラブル事例とその改善策，新規運転開始プラントの運転状況などについても記事化できないか検討を行っておりましたが，私の力不足となかなか機微に関わる内容となるため断念せざるを得なくなり，結果して「電力エネルギーを支える各種発電技術の最新動向」ということで落ち着くこととなりました。ユーザーの方々の今後の事業運営にあたっての一助となれば幸いと考えます。

最後になりますが，本特集において，大変ご多忙，そしてコロナ禍において在宅勤務などテレワークで不自由も余儀なくされている中，快く執筆をお引き受けいただいた著者の方々には深く感謝申し上げます。また，編集作業にあたってサポートそしてご意見をいただきました理事，編集委員および事務局の皆様，さらには今月号において新たに広告に協賛していただいた各企業の皆様に心より御礼申し上げます。　　(千葉 秀樹)

●11月号アソシエイトエディタ
千葉 秀樹（酒田共同火力発電）
●11月号担当委員
原 浩之（三菱パワー）
松田 博和（川崎重工業）
室岡 武（IHI）

(表紙写真)
今回の表紙については，【論説・解説】の著者より流用およびお借りしています。
詳細については，下記記事をご参照ください。

・「ガスタービン設備の保守管理について」……(P348 ～ 351)
・「大型ガスタービンの既存発電設備への有効活用」……(P352 ～ 356)
・「最新鋭1650℃級JAC形ガスタービンの実機実証」……(P357 ～ 362)
・「デジタル技術を活用した発電プラントの運用効率化」……(P363 ～ 368)
・「遠隔現場支援システムと技術動向」…(P369 ～ 374)
・「GT吸気フィルタの寿命延伸や高性能化に向けた取り組みについて」……(P375 ～ 380)

☘事務局だより✉☘

前号でもお伝えした通り，コロナ禍の影響で年明けから混乱が続き，７月の長雨。・豪雨，８月の酷暑を経て，ようやく気候も落ち着いてきた感がありますが，いまだ新しい病との付き合いかたを模索していて気持ちもなかなか落ち着きません。私は活用されている方も多いであろうGo toイベント，イーツの波にも乗れず，行動範囲がいつにもまして狭くなっている，すなわち運動不足にもつながってしまい，筋力が低下する悪循環を招いているのは情けない限りです。

事務局でも手洗い消毒の励行はもちろん，テレワークの活用や，勤務日のシフトを工夫して密を減らし，在室中もマスク着用，換気を心掛けるなど，感染予防に気を引き締めて業務にあたっています。

色々制約を受けることが多い昨今ですが，新しい試みがいくつかあります。まず，J-stageにJGPPの論文登録を進めており，より広い情報発信の種まきを進めています。また，技術論文投稿のシステムを導入し，本年中に移行することとなり，そちらの準備も進めています。イベント自粛が求められた前期では教育シンポジウム・見学会等が中止となり，イベントを取りやめざるを得ない状態が続きましたが，10月に開催された学会の定期講演会もWeb開催となり，試行錯誤がつづいたものの，おかげさまで皆様のご協力のもと，ひと味違ったスタイルではありますが，いつものように皆様の交流の場をまたひとつお届けできたのではないかと思います。そして来年１月にはやはりWeb開催にてセミナーを行います。まだまだ新しい試みが続きそうですが，一歩ずつあゆみを進めて有益な情報，場をお届けできれば幸いです。

(田頭味和)

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.

学会誌編集および発行要領（抜粋）

2018年７月13日改定

1．本会誌の原稿はつぎの３区分とする。

A．依頼原稿：学会誌編集委員会（以下，編集委員会）がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は本学会会員（以下，会員）外でもよい。

B．投稿原稿：会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。

C．学会原稿：本学会の運営・活動に関する記事（報告，会告等）および会員による調査・研究活動の成果等の報告。

1.2．技術論文の投稿については，「技術論文投稿要領」による。

1.3．英文技術論文の投稿については，Instruction to Authors, JGPP（International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems）による。

2．依頼原稿および投稿原稿は，論説・解説，講義，技術論文，寄書（研究だより，見聞記，新製品・新設備紹介），随筆，書評，情報欄記事の掲載欄に掲載することとし，刷り上がりページ数は原則として以下のとおりとする。

論説・解説，講義	6ページ以内
技術論文	「技術論文投稿要領」による
寄書，随筆	3ページ以内
書評	1ページ以内
情報欄記事	1/2ページ以内

3．原稿の執筆者は，本会誌の「学会誌原稿執筆要領」に従って原稿を執筆し，編集委員会事務局（以下，編集事務局）まで原稿を提出する。編集事務局の所在は付記１に示す。

4．依頼原稿は，編集委員会の担当委員が，原稿の構成，理解の容易さ等の観点および図表や参考文献の書式の観点から査読を行う。編集事務局は査読結果に基づいて，執筆者への照会，修正依頼を行う。

5．投稿原稿のうち技術論文以外のものは，編集委員会が審査し，本会誌への掲載可否を決定する。

6．投稿原稿のうち技術論文の審査，掲載については，「技術論文投稿要領」に従う。

7．依頼原稿の執筆者には，学会事務局から原則として「学会誌の執筆謝礼に関する内規」第２条に定めた謝礼を贈呈する。

8．非会員の第一著者には掲載号学会誌１部を贈呈する。

9．本会誌に掲載された著作物の著作権は原則として本学会に帰属する。本学会での著作権の取扱いについては別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程」による。

10．他者論文から引用を行う場合，本会誌に掲載するために必要な事務処理及び費用分担は著者に負うところとする。

付記１　原稿提出先および原稿執筆要領請求先（編集事務局）
ニッセイエブロ㈱ 企画制作部
学会誌担当：高橋 邦和
〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17 明産西新橋ビル
TEL：03-5157-1277
FAX：03-5157-1273
E-mail：eblo_h3@eblo.co.jp

技術論文投稿要領（抜粋）

2018年７月13日改定

1．本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。

1）主たる著者は本学会会員であること。

2）ガスタービン及びエネルギー関連技術に関連するものであること。

3）「学会誌原稿執筆要領」に従って執筆された，日本語原稿であること。

4）一般に公表されている刊行物に未投稿であること。ただし，以下に掲載されたものは未投稿と認め技術論文に投稿することができる。

- 本学会主催の学術講演会・国際会議のプロシーディングス
- 特許および実用新案の公報，科学研究費補助金等にかかわる成果報告書
- 他学協会の講演要旨前刷，社内報・技報，官公庁の紀要等の要旨または抄録

2．原則として刷り上がり８ページ以内とする。ただし，「学会誌の掲載料に関する内規」第２条に定めた金額の著者負担で４ページ以内の増ページをすることができる。

3．カラー図は電子版と本学会ホームページ上の「技術論文掲載欄」に掲載し，冊子体にはモノクロ変換した図を掲載する。著者が「学会誌の掲載料に関する内規」第３条に定めた金額を負担する場合には，冊子体もカラー印刷とすることができる。

4．投稿者は，「学会誌原稿執筆要領」に従って作成された印刷原稿または原稿電子データを，技術論文原稿表紙とともに学会誌編集事務局に提出する。

5．投稿された論文は，論文委員会が「論文査読に関する内規」に従って査読を行い，掲載可否を決定する。

6．論文内容についての責任は，すべて著者が負う。

7．本技術論文の著作権に関しては，「学会誌編集および発行要領（抜粋）」９.および10.を適用する。

日本ガスタービン学会誌
Vol.48　No.6　2020.11
発行日　2020年11月20日
発行所　公益社団法人日本ガスタービン学会
編集者　佐藤 哲也
発行者　識名 朝春
〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
第３工新ビル402
Tel. 03-3365-0095　Fax. 03-3365-0387
郵便振替 00170-9-179578
銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店
㈱ 1703707
印刷所　ニッセイエブロ㈱
〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17
明産西新橋ビル
Tel. 03-5157-1277　Fax. 03-5157-1273

©2020，公益社団法人日本ガスタービン学会

複写複製をご希望の方へ
公益社団法人日本ガスタービン学会では，複写複製に係る著作権を一般社団法人学術著作権協会に委託しています。当該利用をご希望の方は，学術著作権協会（https://www.jaacc.org/）が提供している複製利用許諾システムを通じて申請ください。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.87, 2025/06/07.