巻 頭 言

特集：小型／移動用発電設備の現状と開発動向

# 東日本大震災と日本ガスタービン学会の公益法人化
# －特集「小型／移動用発電設備の現状と開発動向」によせて－

渡辺　紀徳*1
WATANABE Toshinori

## 1．はじめに

東日本大震災の甚大な被害を蒙った2011年が暮れ，2012年が明けた。未だ多くの被災者の方々が苦労をされており，亡くなった方々のご冥福を祈るとともに，お見舞いを申し上げる次第である。

日本ガスタービン学会は震災直前の３月１日に公益社団法人として再出発し，今後の学会活動について様々な議論を重ねている最中の震災というタイミングであった。公益法人としてのビジョン具体化の途上で大震災に見舞われ，当然のことながら復興に当たって学会が何をなすべきか，何ができるか，様々な議論が沸き起こっている。本号の小型／移動用発電設備に関する特集も，それと明示してはいないものの，震災と復興を強く意識して企画されたものであることは言を俟たない。特集によせて学会の最近の動きや議論などを，総務業務担当理事の立場から会員の皆様にご紹介したい。

## 2．新しい公益法人としての学会活動

公益法人化に際し，学会が対象とする技術領域を拡大することとした。即ち定款の改定にあたって，学会の目的を規定する旧定款第４条の「ガスタービンに関する…」の文言を現行定款第３条の「ガスタービン及びエネルギー関連技術に関する…」と改め，活動する技術領域をガスタービンに限らず，ガスタービンに軸足を置きつつもエネルギー関連技術分野へと広範囲に拡大しようとしている。この際学会の名称を変更してはどうかという意見交換もなされたが，今のところ従来のままを維持している。実質的には既にしばらく前から範囲拡大の活動が少しずつなされていたが，2011年７月に松本市で開催された定期講演会や11月のIGTC2011 Osakaで蒸気タービンのセッションが複数設けられ，活発な研究発表と討論が行われたのは具体的な動きの例である。本特集でもガスタービンだけでなく，ディーゼル機関やガスエンジンも含んだ小型発電技術とその運用が解説されている。今後はエネルギーシステムの全体像の中でガスタービン技術を捉えるという方向で，学会の活動範囲が展開されて行くであろう。

一方，公益目的事業の一つとして，広く一般向けにガスタービン・エネルギー関連技術の情報発信や啓発を行うことは重要である。学会では毎年の定期講演会に合わせて「市民フォーラム」を開催し，大学生だけでなく高校生や一般社会人を対象として分かりやすく技術を解説する機会を設けている。また，IGTC2011では講演会場で「公開セミナー」を日本語で行い，関西地区の大学生を中心とする多くの方々にガスタービン・ジェットエンジンの基礎的な講義を行った。

このような活動を通じてガスタービン・エネルギー技術の一般への普及を図ることは，技術の発展にとって不可欠の情報発信活動であるが，また人材育成の観点からも非常に重要な意義を持っている。ガスタービン分野に限らず工学系一般の問題として，若い世代の関心の低下が指摘されて久しい。学会活動においても工学系の多くの学会が人材の確保に苦しんでいる状況である。当学会はその中で20年以上にわたりほぼ一定の会員数を維持しており，会員諸氏・諸機関のご協力と役員・委員の努力のおかげと思うが，将来的な活動の発展にはより多くの若い世代の参画が必要である。中高生や大学生に技術の魅力や将来の夢を提示し，この分野の技術発展に貢献してもらえる人材を多く育成して行く方策を進めて行きたいと思う。大震災以降，エネルギー問題への一般の関心は高まっており，報道のためもあってガスタービンやコンバインドサイクルといった言葉が巷間に多く聞かれるようになっている。定期講演会で行った先述の市民フォーラムで，CCSの信頼性について高校生から本質的な質問を受けた。印象深い出来事であった。

## 3．東日本大震災とガスタービン学会

大震災と復興にあたり，学会のまず行うべきことは，ガスタービン及びエネルギー技術に関する情報収集と発信であろう。

昨年の定期講演会では緊急企画として特別セッションが設けられ，被災された岩手大学の船崎健一教授により，「東日本大震災とGTSJの果たすべき役割について」という題目で講演がなされた。現地の状況が教授の体験を交えて生々しく語られた後，震災で得られたこととして，社会のフロー（物流・エネルギーの流れ等）への依存度の高さ，電力と非常用発電の重要性，防災意識の重

原稿受付　2011年12月26日
＊1　東京大学大学院　工学系研究科　航空宇宙工学専攻
〒113-8656　東京都文京区本郷 7－3－1



Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

要性の再認識，夢と希望なしには復興があり得ないこと，などが挙げられた。また，ガスタービン学会に対しては，震災後の電力供給量の激減によりガスタービン発電への大いなる期待があるが，学会がガスタービンを中心とした電力問題等について存在意義を有したか，情報発信が十分できたか，という問題点を指摘された。

震災直後から震災に関する調査研究委員会の立ち上げが検討されていたが，８月の理事会で産業技術総合研究所の濱純氏を委員長として正式に組織され，大震災におけるガスタービン設備の被害状況と対策，その後の動向などを調査する活動が実施されている。これまで既にガスタービン非常用発電装置が，阪神淡路大震災のときと同様，極めて高い信頼度で稼働したことが明らかになっている。また，ガスタービンに関連する事業所の被災と復旧の事例が調査され，将来に生かすべき教訓がまとめられつつある。今後，更に広範な調査が続行され，報告書が発行されるとともに，学会誌や集会等で情報が積極的に開示されるものと期待される。

公益法人化で定款に事業内容として加えたものに，「関連する学術・技術に関する建議」がある。学会では数年前からガスタービンを考える会が活動しており，産業用および航空用ガスタービンの技術課題と今後の戦略を産官学のメンバーで検討して来ている。これまでに学会版ロードマップを策定して公開しているが，更にこれをもとにエネルギー関連と航空エンジン関連の研究開発プロジェクト案作成に着手し，議論を重ねているところである。また，２年前に産官学連携懇談会を設置し，学会に参画する研究機関の現状の調査分析を行うとともに，研究開発プロジェクト案等を，どこにどのように提案すれば実現可能性が高いのか，あるいは技術の発展に資するのか，などを検討している。今年度からは発展的に常置委員会として産官学連携委員会を設置し，今後活動を強化して行く計画である。これらの活動を通じて，産官学からのメンバーが建設的な議論をするために，当学会は非常に適切な場所であることを実感しており，今後の学会においてこのような活動が一つの柱になるのではないかと期待している。将来はプロジェクトの共同提案など，実質的なメリットが生み出せるような支援活動につなげられるよう努力して行きたい。

大震災と原子力発電のトラブルを経験して，その後のエネルギー戦略が未だ明確になっていない状況である。日本のエネルギー供給が大きな転換点にある中で，当学会はガスタービンを中心としてエネルギー関連技術の情報発信を行う学会として，どのようなビジョンを打ち出せばよいのであろうか。

原子力発電に代わり，ベースロードを受け持つ発電手段として，ガスタービン発電・ガスタービンコンバインドサイクル発電が当面重要な位置を占めることになるであろう。中長期的な展望では石炭の利用も重要でIGCCの実用化が目指されている。一方でこのような火力発電を$CO_2$排出削減とどのように両立して行くか，燃料の可採年数はどの程度か，新燃料の利用をどのように進めるか，など解決すべき課題は多い。

今後のエネルギー源として，再生可能エネルギーの利用が強い動機づけを与えられている。低炭素化のために当然の動向と思われるが，周知の通り供給エネルギーの変動が大きな問題となる。変動を平準化するために，ガスタービンを始めとする小型発電装置を組み込むことが有効であり，これらを含むマイクログリッド・スマートグリッドの技術が将来求められると考えられる。上記のガスタービンを考える会でも，スマートグリッドに適したガスタービン技術を明らかにすることや，発電システム安定化の基盤技術を研究開発することの重要性を議論している。

## ４．今後の学会活動について

エネルギーの展望が不明確な中であるが，ガスタービンやターボ機械技術は将来的にもエネルギー供給の基幹部分を支える重要な分野であり続けると考えられる。

長期的には多様な燃料・エネルギー源を使いこなして，多様な手段でエネルギー変換を行い供給する，ベストミックス・エネルギー技術が実現されて行く必要があるのであろう。これにCCS技術も組み合わせて$CO_2$を削減して行くのが当面のシナリオとなろう。このような発電システムの基幹部分を担うガスタービン・ターボ機械技術分野を中心的な対象とする本学会として，将来技術の基盤を進展させるための技術課題を抽出するとともに，開発シナリオを学会として考究し，発信して行く活動が重要性を増すと考えられる。現在のところまだ十分な検討はなされていないが，当学会の強みである産官学による議論を進めて，近い将来に情報発信ができるよう努めて行きたい。

## ５．特集へのむすび

本号の特集「小型／移動用発電設備の現状と開発動向」は，常用・非常用小型ガスタービン，ガスエンジン，ディーゼルエンジン，ガスタービンおよびガスエンジンによるコージェネレーションと，広い範囲の発電に関する技術動向を解説するものとなっており，これまで述べた本学会の状況と方向性，および東日本大震災後の日本のエネルギー戦略策定にとって，誠に有意義な内容を時宜を得て提供するものとなっている。執筆者各位と編集委員各位に謝意を表しつつ，今後に役立てて行きたいと思う。



Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

論説◆解説

特集：小型／移動用発電設備の現状と開発動向

# マイクロガスタービンコージェネレーションシステム

岸川　忠彦*1　KISHIKAWA Tadahiko
中川　貴博*1　NAKAGAWA Takahiro

キーワード：マイクロガスタービン，コージェネレーション，排熱回収，パワーコンディショナ，遠隔監視，消化ガス

## 1．はじめに

エネルギーセキュリティの観点から分散型電源への関心が急速に高まりつつある。

分散型電源の一つであるマイクロガスタービンは発電出力300kW未満の小型ガスタービンの総称であり，同出力のガスエンジンやディーゼルエンジンなどのレシプロエンジンに比べ構成部品の点数が少なく，小型高速発電機を回転軸に直結しているので小型，軽量，低振動である。電気事業法において定められた小型ガスタービンの要件，①発電機と接続して得られる電気の出力が300kW未満のもの，②最高使用圧力1000kPa未満のもの，③最高使用温度が1400℃未満のもの，④発電機と一体のものとして一つの筐体に収められているもの，⑤ガスタービンの損壊事故が発生した場合においても，破片が当該設備の外部に飛散しない構造を有するもの）を満たすことによりマイクロガスタービンはボイラー・タービン主任技術者の選任が不要である。

当社のマイクロガスタービンコージェネレーションパッケージは，①低振動，②低騒音，③排熱回収による高い総合効率，④完全燃焼による極めてクリーンな排気ガス特性（低NOx，未燃メタン濃度は1 ppm未満），⑤都市ガス等の高発熱量ガスから消化ガス等の低発熱量ガスに至る幅広い範囲の燃料に対応可能といった特徴を持ち，設置・運用が容易な装置である。燃料として，下水処理場における汚泥の減容化処理の過程で発生する消化ガスやごみ埋立地から発生する埋立地ガス（ランドフィルガス）などカーボンニュートラルなバイオマス燃料を利用すれば高い$CO_2$削減効果が期待できる。

当社では100kWクラスのマイクロガスタービンコージェネレーションパッケージの製造と販売を行っている[(1),(7)]。主要諸元を表1に，外観を図1に示す。

本稿では，当社の100kWクラスのマイクロガスタービンコージェネレーションパッケージを基に，その原理（仕組み），構成機器，運用事例などを紹介する。

表1　マイクロガスタービンコージェネレーションパッケージ諸元

| 機名 | TA100 |
|---|---|
| ガスタービン形式 | 再生サイクル1軸式 |
| 定格回転速度 | 68000 $min^{-1}$ |
| 定格発電端出力 | 95 kW |
| 電圧 / 周波数 | 3φAC400/440 V，50/60 Hz |
| 発電効率 | 29 %　（±1 %） |
| 排気ガス流量 | 2400 $Nm^3/h$ |
| 燃料流量 | 29.4 $Nm^3/h$（都市ガス ）<br>53.6 $Nm^3/h$（消化ガス） |
| 熱出力 | 163 kW（温水 ）<br>98 kW（蒸気） |
| 総合効率 | 79 %（温水 ）<br>59 %（蒸気 ） |
| 騒音 | 68 dB(A) 以下 |
| NO x 値 | 30 ppm 未満（16% $O_2$換算，燃料：都市ガス） |
| 外形寸法（L×W×H） | 3450 × 1150 × 2680 mm |

図1　エバラマイクロガスタービンパッケージ

原稿受付　2011年12月15日
＊1　㈱荏原製作所　風水力機械カンパニー
MGT事業推進室
〒299-0296　千葉県袖ヶ浦市中袖20-1



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

## 2．コージェネレーションパッケージ

マイクロガスタービンエンジンと主要な補機を含めたフローを図２に示す。当社のマイクロガスタービンは一軸式再生サイクルのガスタービンである。それを用いたコージェネレーションパッケージはマイクロガスタービン，再生器，パワーコンディショナ，燃料ガス圧縮機，排熱回収装置等から構成される。

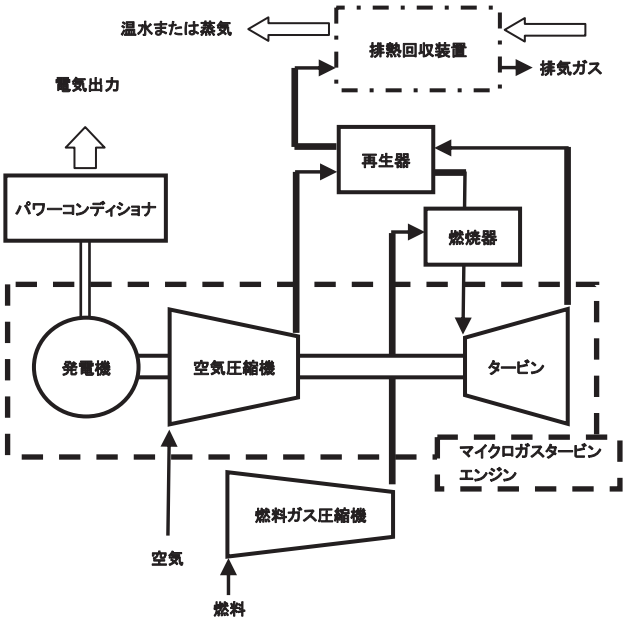



図２　マイクロガスタービンのフロー

通常の運転状態を例にとってマイクロガスタービンの動作と各機器の機能を簡単に説明すると以下のようになる。空気圧縮機により昇圧された空気は，再生器でタービンの排気ガスと熱交換して予熱された状態で燃焼器に入る。燃焼器で予熱空気を用いて燃料を完全燃焼させ，生成された高温高圧の燃焼ガスでタービンを駆動して，タービン軸と同軸の空気圧縮機側の延長線上に配置された高速発電機により発電を行う。発電された電気は商用電源の周波数に比べて高周波数となるため，パワーコンディショナにより商用電源の周波数に調整される。再生器で熱交換された後の排気ガスにはまだ有効利用可能な熱エネルギーが含まれるため，排熱回収装置によってエネルギー変換され温水や蒸気または冷水として利用される。

図３に温水利用の場合のパッケージの熱収支の例を示す。投入した燃料のエネルギーに対して，電力として29％（95kW），温水での熱回収量として50％（163kW）が得られ，総合熱効率としては79％になる

## 3．パッケージの構成機器

パッケージの断面を図４に示す。パッケージは上下２段に分かれており，上段にはエンジン本体，再生器や排熱回収装置など高温機器を，下段にはパワーコンディショナやインバータ駆動のガス圧縮機等，電気機器を配置し高温部からの熱的な影響を受けないように工夫されている。騒音特性は機側１mの平均で68dB（A）以下と低騒音で，小型軽量の回転機械であるため有害な振動もほとんど無い。以下にパッケージの各構成機器について述べる。

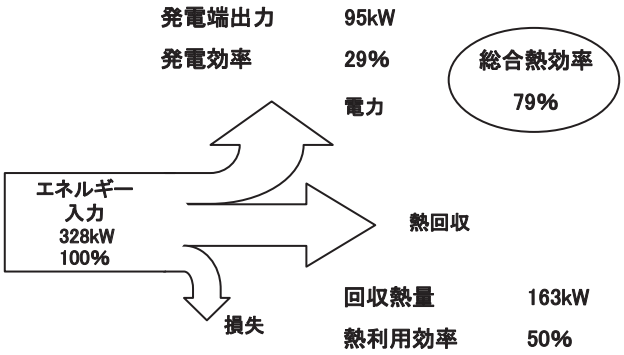
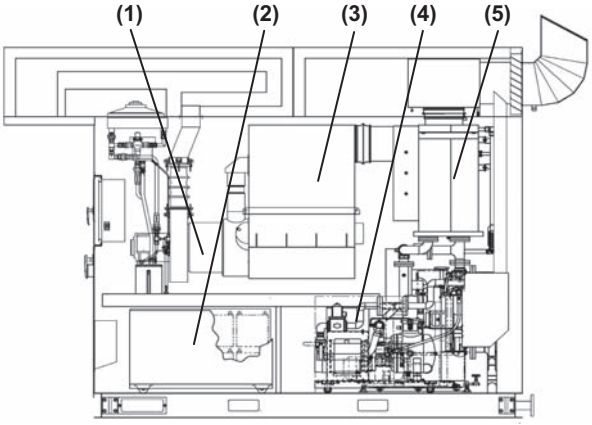



図３　温水利用時の熱収支の例




（1）マイクロガスタービンエンジン
（2）パワーコンディショナ
（3）再生器
（4）燃料ガス圧縮機
（5）排熱回収装置

図４　マイクロガスタービンパッケージ断面図

### 3.1　マイクロガスタービン

マイクロガスタービンは永久磁石型発電機と遠心式の空気圧縮機，半径流タービンが同軸上に配置された一軸式ガスタービンであり，定格回転速度は68000min$^{-1}$である。軸受は発電機ローターの両側にあり空気圧縮機側にジャーナル軸受，他方に玉軸受が採用されており，軸受の潤滑および発電機の冷却には潤滑油を使用している。

発電機も含めたエンジン本体が軽量でコンパクトなため脱着作業が容易であり，エンジン点検の際もディーゼルエンジン・ガスエンジンに比べて短い時間で作業を行うことができる。

### 3.2　燃焼器

燃焼器はアニュラー型であり，NOXの発生を抑制す



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

るために燃料が過濃な状態で燃焼する領域と，希薄状態で再燃する領域に分かれて燃焼する二段燃焼構造になっている。また，メタンは二酸化炭素の21倍の温暖化係数をもち環境への負荷が大きいため，排気ガスに含まれる未燃メタンは極力少なくする必要があるが，この濃度も１ppm未満であり極めてクリーンなガスの状態で排出される。

### 3.3　再生器

空気圧縮機の圧縮比が小さく圧縮機出口の燃焼用空気の温度がタービンの排気ガス温度に比べて低いので，再生器で熱交換を行って，排気ガスに伴って外部に放出される熱エネルギーを燃焼用空気側に回収して熱効率の向上を図っている。当社のパッケージに搭載している再生器は４つの熱交換エレメントを持つが，それぞれのエレメントは図５に示すようにフィンを持つ空気流路と排気ガス流路が交互に積み重なる断面構造を持つプレート＆フィンタイプであり，エレメント内を通過する空気と排気ガスとが効率良く熱交換できるようになっている

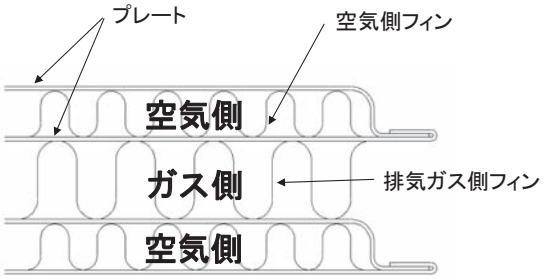



図５　再生器エレメント断面図

### 3.4　パワーコンディショナ[6]

タービン軸に直結されている発電機の回転速度は68000min$^{-1}$と高速であり，発電された電気の周波数は１kHz超と商用電源周波数に比べて高い。そのため，発電した電気を商用電源の周波数に調整するパワーコンディショナを搭載している。パワーコンディショナの主要機器はコンバータとインバータであり，コンバータで一旦直流に変換した後，インバータで系統周波数の交流に調整する。パワーコンディショナは系統連系ガイドラインに適合しており，過電圧（OVR），不足電圧（UVR），周波数上昇（OFR），周波数低下（UFR），過電流保護，単独運転検出（受動式，能動式）などの系統連系保護機能を持っている。また，系統連系運転の場合，連系開始後は系統電圧及び周波数に追従しながら指令された電力を出力するように制御が行われるが，この際に，パワーコンディショナからの出力が急激に変動すると系統に動揺を与える可能性があるので，出力を所定の割合で増加させる機能（ソフトスタート機能）と，減少させる機能（ソフトストップ機能）を有して系統への影響を抑えている。

その他にも自立運転機能，バッテリースタート機能，遠隔監視通信機能などを備えている。

### 3.5　燃料ガス圧縮機

燃料ガス圧縮機には容積型シングルスクリューコンプレッサを採用している。起動時の低流量運転ではロード・アンロード制御により，流量が増えるとインバータによる回転数制御により常に吐出圧力が一定となる制御を行っている。なお，ガスタービンの運転に必要なガスの流量は，所定の回転数と発電出力になるように燃料制御弁を開度調節することにより制御される。

都市ガスなどの高発熱量のガスが燃料になる場合は燃料ガス圧縮機をパッケージ内に搭載するが，低発熱量のガスではパッケージの外部に容量の大きなガス圧縮機ユニットを設置する場合もある。また，都市ガスの中圧・高圧導管などのように高圧で安定した状態で燃料が供給されるのであれば，燃料ガス圧縮機を省略して圧力調節器などで調圧して供給することも可能である。

### 3.6　排熱回収装置

パッケージに内蔵する排熱回収装置として温水ヒータと蒸気ボイラを標準化している。温水ヒータは無圧式の排熱回収システムを採用しており，労働安全衛生法におけるボイラ圧力容器に該当しない。蒸気ボイラは多管式貫流ボイラであり，伝熱面積を５m$^2$以下としているため簡易ボイラに区分される。温水ヒータ，蒸気ボイラともに各種届出や有資格技術者が不要である。

温水ヒータのフローを図６に示す。温水ヒータは排熱回収熱交換器，温水熱交換器，内部循環水ポンプ，貯湯槽などから構成されている。貯湯槽に蓄えられた内部循環水は熱媒として機能し，内部循環ポンプによりフィンチューブが内蔵された排熱回収熱交換器へ送られ高温の排気ガスと熱交換され高温水となり，その後，温水熱交

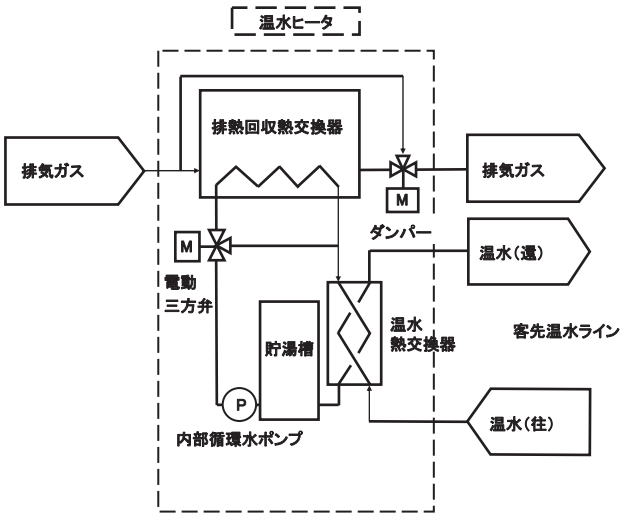



図６　温水ヒータのフロー



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

換器で客先の温水ラインの水を加熱し貯湯槽に戻る。客先の熱需要の変動に対しては，無段階制御が可能なダンパー弁による熱源排気ガス量の調節と電動三方弁による内部循環水の流路切換で熱回収量を調整して追従するため，部分負荷での運用時に冷却塔などの放熱設備が不要であり無負荷運転も可能という特長を持つ。

また，パッケージ外に設置する排熱回収装置として排ガス直接投入吸収式冷温水機も標準化しており，空調用の冷水・温水を供給することが可能である。

## 4．遠隔監視システム[(2),(3)]

運用にあたり，マイクロガスタービンには高い稼動信頼性，起動信頼性，低メンテナンスコストが要求される。適切なコストで最大の運用効率を得るためには，主要部品の劣化の進行状況を逐次把握し，適切な時期に補修又は交換することが望ましい。当社では遠隔監視システムを用いた運用のサポートとメンテナンスサービスを行っており，お客先において専任のメンテナンス要員の確保や常時の運転監視・点検は不要である。

遠隔監視システムの構成を図７に示す。各部の温度や圧力等のリアルタイムデータは常に更新されており，緊急停止の発生時には10ミリ秒周期×40秒の高速データが自動保存される。また，0.5秒周期×30分の高速過渡データや15分周期の長期データも更新されている。これらのデータはデータセンターのサーバに転送・保存でき，個々のPCの汎用インターネットブラウザソフトで閲覧が可能である。

遠隔監視の目的には，①健全性評価および故障予知，②緊急停止時の原因分析と再起動の可否判断，③故障の根本原因の究明と再発防止があり，目的遂行のためにはデータ収集と適切な分析が必要となる。上述のように遠隔監視データを長期間にわたり取得し，定期的に分析・確認することで，装置の健全性評価，経年故障の未然予防を実施しており，高い稼動信頼性が達成できている。

## 5．運用事例

マイクロガスタービンは通常，発電装置として系統連系運転される他，以下のような機能を組み合わせることで，多様な客先ニーズに対応することが可能である。

①コージェネレーションによる給湯・空調利用
②電力需要の上昇時に自動起動して発電を行うピークカット運転機能
③複数台を設置し，電力需要に応じた台数制御運転機能
④通常は系統連系でコージェネレーション装置として運用し，系統の停電時には保安用・防災用電源として運用するブラックアウトスタート機能
⑤VOC（揮発性有機化合物）を含む空気を吸気として，燃焼処理するVOC処理機能

また，マイクロガスタービンは地震の際に損傷するリスクの大きい冷却水システムなどが不要で，機器自体も軽量で地震などの振動にもよく耐えることができる。平成18年３月の消防庁告示「自家発電設備の基準」の改正で，マイクロガスタービンのように停電から発電開始まで40秒を超える発電装置であっても蓄電池設備などとの組み合わせにより所定の条件を満たせば非常用電源として認められるようになったため，系統連系での運用以外に非常用電源としての用途も期待されている。

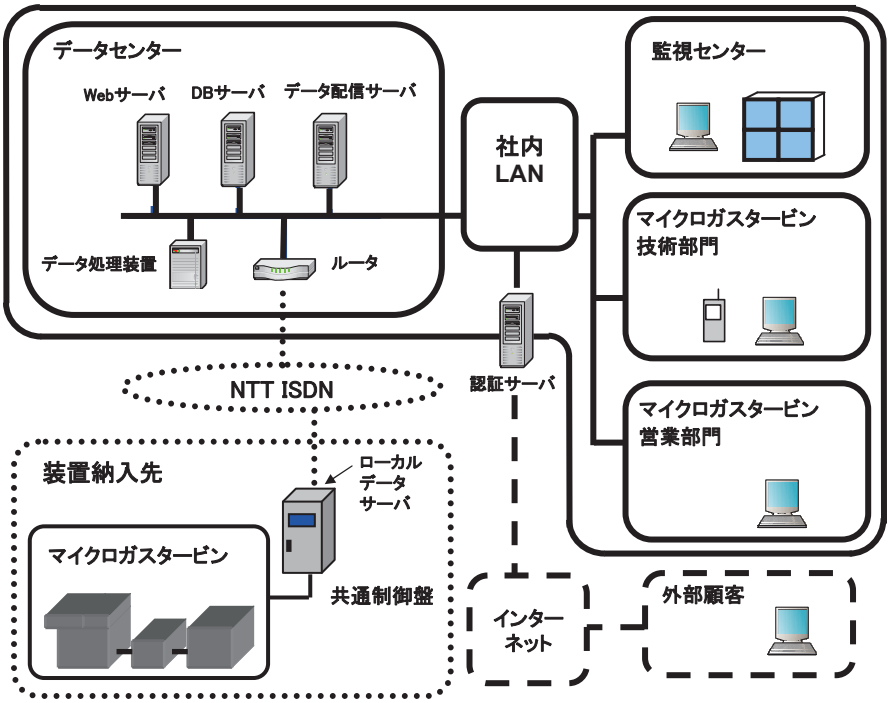



図７　遠隔監視システム



Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

先に述べたように，マイクロガスタービンは消化ガスや埋立地ガスのような低発熱量かつ季節や気温の変化で発熱量が変動する燃料も問題なく使用できる。

以下に，消化ガスコージェネレーションシステムの運用例について紹介する。図８に消化ガスコージェネレーションシステム外観を示す[(4),(5)]。本システムは福岡県久留米市南部浄化センターに設置されており，運用開始から約６年半が経過した。連続運転で運用されており，定期点検を適切に行うことでほぼ100％の年間稼働率（運転時間／実時間（8760時間））が達成できている。浄化センターでは本システムでセンター内の消費電力の約1/4をまかない，さらに温水を消化槽加温用の熱源に利用し，電気と熱の各エネルギーを合わせた$CO_2$削減量は年間約700tonになり，信頼性，省エネ性と環境性の高さを発揮している。

図８　マイクロガスタービン消化ガスコージェネレーションシステム

## ６．おわりに

マイクロガスタービンは再生器の搭載により同じ出力の単純サイクルのガスタービンに比べて高い発電効率を持ち，コージェネレーションで運用することで高い総合効率を得ることができる。コージェネレーション装置としてもパッケージ化によりコンパクトにまとめられ，低騒音・低振動で排ガスがクリーンな機器である。加えて，低発熱量の消化ガスや埋立地ガス等を燃料に用いることも可能なため，バイオマス利用機器としても省エネ・温暖化防止効果の高い運用が可能である。また，運用に当たっては遠隔監視システムを活用したメンテナンス・予防保全を行なうことで，高い稼働率が達成される。

今後，分散型発電装置の需要は高まっていくと考えられる。当社はマイクロガスタービンの利用分野を広げ，導入を促進していくことで電力の安定供給ならびに温暖化防止に寄与していきたい。

## ７．参考文献


(1) Kataoka T.・他3名，A microturbine cogeneration package for Japanese market，ASME Turbo Expo 2007，GT2007-27697.

(2) 中川，マイクロガスタービンコージェネレーションパッケージの紹介，ターボ機械，第39巻，第11号，pp9-13（2011）

(3) 片岡・他３名，100kW級マイクロガスタービン用パワーコンディショナ，日本ガスタービン学会誌，Vol.34，No.６，pp.12-21（2006）

(4) Kataoka T.・他４名，Remote monitoring and failure diagnosis for a microturbine cogeneration system，ASME Turbo Expo 2007，GT2007-27355.

(5) 片岡・他４名，マイクロガスタービンコージェネレーションシステムの遠隔監視と故障診断，日本ガスタービン学会誌，Vol.35，No.６，pp.38-45（2007）

(6) Kataoka T.・他３名，Combustion characteristics of methane-$CO_2$ mixture and a microturbine cogeneration system utilized sewage digester gas，ASME Turbo Expo 2007，GT2007-27351.

(7) 片岡・他３名，消化ガスの燃焼特性とマイクロタービン消化ガスコージェネレーションシステムへの適用，エバラ時報，第218号，pp.8-15（2008）




Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

論説◆解説

特集：小型／移動用発電設備の現状と開発動向

# 小型ガスタービン発電装置の動向について

辰巳　康治*1　TATSUMI Koji
井上　雄介*2　INOUE Yusuke
若山　直樹*3　WAKAYAMA Naoki
細川　恭史*1　HOSOKAWA Yasufumi
堂浦　康司*1　DOUURA Yasushi

## 1．はじめに

2011年３月11日の東日本大震災および原子力発電所の停止に伴う今夏の電力需給対策を経て，電力の安定供給のため工場等への自家発電装置の導入が増加している。

ガスタービンを用いた常用発電装置は，電力供給による節電対応に加え，熱供給によるエネルギーコスト削減，$CO_2$削減が可能である。一方，非常用発電装置は，電力事故や自然災害等による停電など緊急時の電力供給に対する信頼性が最重要であり，常用発電装置に求められる特性とは違った観点から，原動機としてガスタービンが選ばれている。

本稿では，小型ガスタービンおよび小型ガスタービンを用いた発電装置の動向について述べる。

## 2．常用ガスタービン

中小規模の工場にマッチした小型コージェネは，工場の節電および事業継続対応としての導入が増加している。また，小型ガスタービンコージェネは，空冷式のため冷却水が不要，ガスエンジンに比べ軽量／省スペース，非常用発電装置としても兼用可能，といった特徴があるため，病院や民生用ビルでの導入検討も増加している。

このような状況において，省エネルギーの推進や温室効果ガスの削減といった面から，小型ガスタービンコージェネにおける高効率化は重要である。さらに，世界的なトレンドとして低公害性に対する要求も年々厳しくなってきている。よって，小型ガスタービンにおいても中大型と同様，高効率および低公害が市場より要求される性能であると言える。

弊社が1989年に市場投入したM1A-13とその後継機として2010年にリリースしたM1A-17を比較しながら，小型常用ガスタービンエンジンにおける高効率化および低NOx燃焼器技術の動向について述べる。

### 2.1　エンジンの高効率化

近年CFD解析技術が飛躍的に進歩し，圧縮機やター

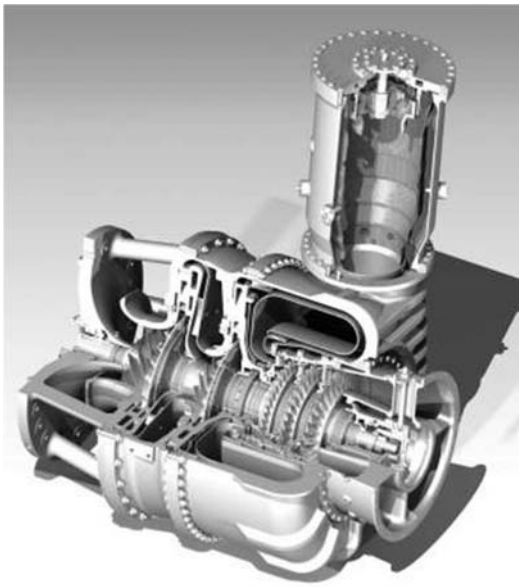


図１　M1A-17ガスタービン

表１　性能緒元表

| 機種 | | M1A-13D | M1A-17D |
|---|---|---|---|
| 型式 | | 開放単純サイクル1軸式 | |
| 圧縮機 | | 2段遠心式 | |
| タービン | | 3段軸流式 | |
| 燃焼器 | | 単筒缶式(DLE) | |
| 寸法(LxWxH) | (m) | 1.2x1x1.6 | 1.2x1x1.7 |
| 重量 | (ton) | 1.3 | 1.5 |
| 減速端出力 | (kW) | 1580 | 1800 |
| 減速機端効率 | (%) | 25.8 | 28.3 |
| 回転速度 | ($min^{-1}$) | 22000 | |
| 空気流量 | (kg/s) | 8.06 | 8.04 |
| 排ガス温度 | (℃) | 520 | 521 |
| 圧力比 | (-) | 9.4 | 10.5 |
| エミッション ($O_2$=0%換算) | (ppm) | NOx<75 | NOx<35 |

条件：ISO条件、都市ガス13A

原稿受付　2011年11月23日
＊1　川崎重工業㈱　ガスタービンビジネスセンター
産業ガスタービン技術部
〒673-8666　明石市川崎町１－１
＊2　川崎重工業㈱　ガスタービンビジネスセンター
プロジェクト部
＊3　川崎重工業㈱　ガスタービンビジネスセンター
システム技術部



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

ビンの翼形状，各通路の最適化により小型ガスタービンのさらなる高効率化が可能となった。弊社では20年以上前に設計したM1A-13をベースに，CFD解析技術を様々な要素設計に適用し，M1A-17を開発した。表１に各機種のDLE（Dry Low Emission）仕様であるM1A-13DとM1A-17Dの性能緒元比較を示す。

### 2.2　各要素の設計

⑴圧縮機

M1A-17ではインペラ単体のCFD解析に加え，インペラ下流に設置される静止体についても，インペラとの一体解析（図２）を行うことにより，通路形状の最適化を実施した。図３はM1A-13のインペラ，ディフューザの一体解析を新たに実施し流れを可視化したものである。ディフューザ出口付近に逆流域が存在し，効率低下の要因となっている。この事象は，静止体との一体解析を行うことで確認され，M1A-17では逆流域が発生しないよう通路形状を最適化した（図３）。

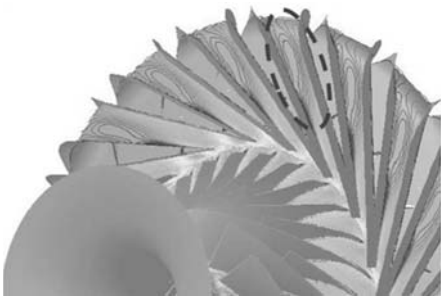


図２　圧縮機一体解析（絶対速度ベクトル）

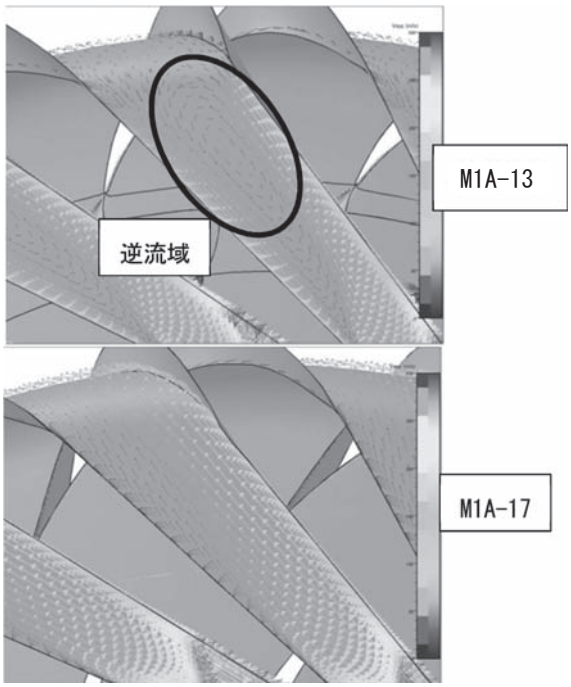



図３　ディフューザ出口（10%Span）

⑵　タービン

ガスタービンはタービン入口温度（TIT）を高く設定すれば高効率化が可能であるが，小型ガスタービンでは翼が小さいため冷却構造に制約があり，大型ガスタービンほどにTITを高くすることができない。また，TITは高温部品寿命へ直接影響するため，実績を大幅に超えてTITを高く設定すると，エンジンの信頼性に影響を及ぼす。そのため，M1A-17ではTITの設定を弊社他機種実績レベルとして信頼性を確保したまま，要素効率を向上する手法を採用した。冷却翼の設計では，他機種での実測データに基づくTIT分布をM1A-17の冷却設計に反映した。翼内部の冷却構造についても，冷却空気の偏流によるホットスポットの発生を避けるため，内部冷却構造を細部までモデル化したCFD解析を行って冷却流路の形状，配置の最適設計を行った。

また，CFD解析にてタービン全段解析を実施することにより，単翼，単段解析では問題のなかった翼型が，全段解析では剥離が生じることが明らかになるなど，これにより翼形状の最適化が可能となった。図４にM1A-13およびM1A-17の全段解析結果（マッハ数分布）を示す。

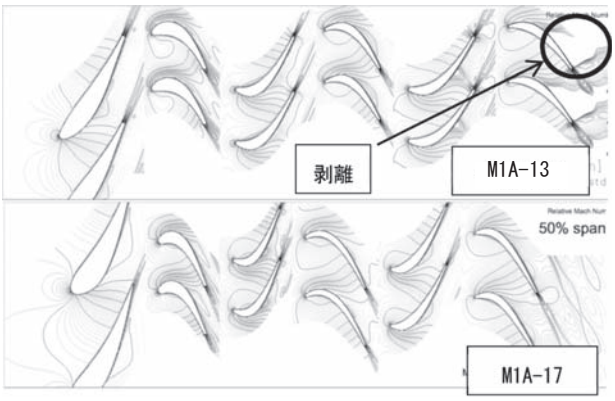



図４　タービン全段解析結果（50%Spanマッハ数分布）

さらにM1A-17では，１段ノズル冷却空気の吹き出し構造を変更し，翼後縁厚みを薄くすることで損失を低減，１段ブレードは翼先端の漏れ損失を低減するなど，近年の高効率化技術を採用し，効率向上に寄与している。

⑶排気ディフューザ

弊社のガスタービンは基本的にシャフトの両端を軸受により支持しているため，軸受保持，給油配管設置のためストラットが必要となる。ストラットは排気ガス通路内に存在するため，その本数，配置ならびに通路形状が排気ディフューザ性能に大きく影響する。M1A-17ではCFD解析により通路形状最適化，ストラット本数の低減等により排気ディフューザ効率を向上させた。図５にM1A-13とM1A-17の排気ディフューザ解析結果（軸流速度分布）を示す。



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

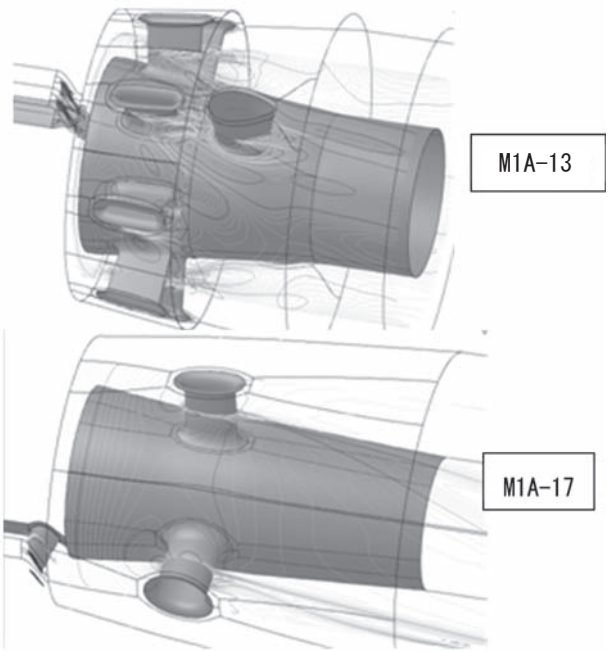



図５　排気ディフューザ解析結果（50%Span）

### 2.3　低NOx燃焼器

小型ガスタービンにおいても低エミッション化には希薄予混合燃焼が有効である。弊社が1995年に開発したM1A-13Dおよび2010年開発のM1A-17D向けDLE燃焼器にも希薄予混合燃焼技術を採用している。

以下に，各DLE燃焼器の特徴を述べる。

⑴M1A-13D

①燃焼器構造およびエミッション性能

M1A-13D燃焼器は東京ガス㈱，大阪ガス㈱，東邦ガス㈱３社殿と共同開発を行ったガス専焼DLE燃焼器である。

図６に断面図を示すが，希薄予混合バーナを８本有するマルチバーナ方式を採用している。希薄予混合バーナは空気旋回ベーンと燃料噴射スポークを備える。バーナの局所空燃比を最適に維持するため，負荷に応じて動作バーナ数を切り替える制御を行っている（図７）。また，高負荷では低NOx運転範囲を確保するため，追焚きバーナを稼働させる。追焚きバーナは希薄予混合燃焼下流に燃料を噴射するもので，NOx増加を抑えながら負荷をとることができる。

一般的なガス燃料焚きにおけるM1A-13Dの排ガス保証値は表２の通りである。超低NOx仕様は希薄予混合バーナに標準仕様より多くの空気が流れるようチャンバの燃焼空気配分を調整しており，NOxが低減される一方で負荷範囲が標準より狭くなる。

② IGVシステム

海外ではNOxに加え，COに対する規制値がある場合が多い。COは燃焼器出口温度が低下する部分負荷において排出量が増加する。また，マルチバーナ方式では部分負荷において燃焼しないバーナがあるため，燃焼中のバーナの火炎がクエンチされCO排出量が増加する傾向がある。

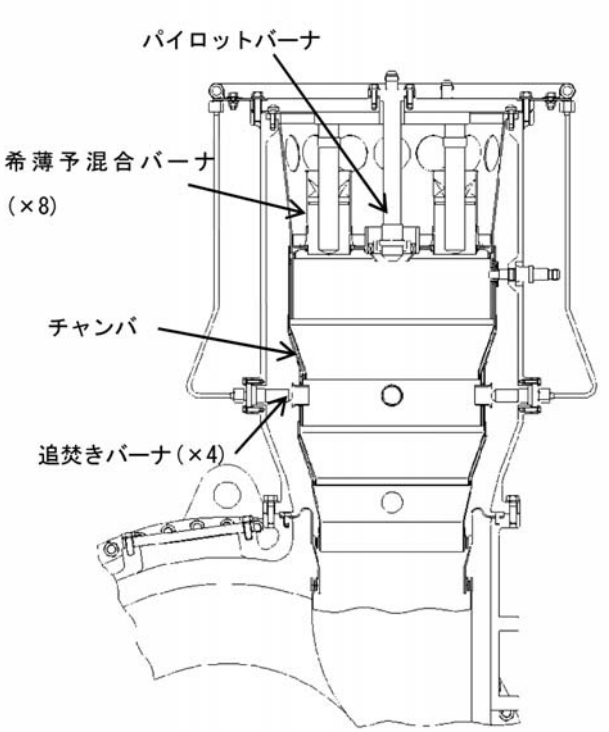



図６　M1A-13D燃焼器

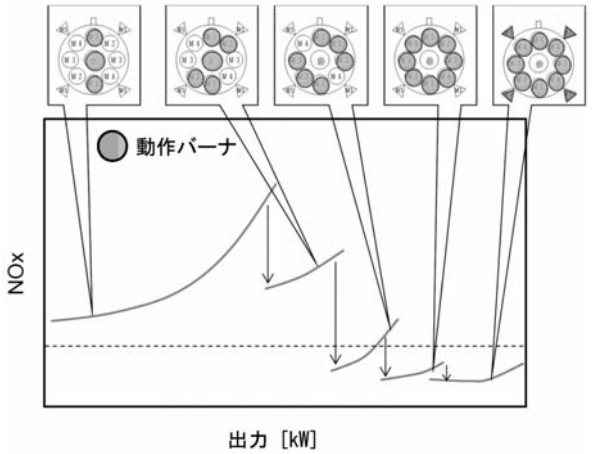



図７　マルチバーナ制御

表２　M1A-13D排ガス保証

| 仕様 | NOx 保証値（*） | 負荷範囲 |
|---|---|---|
| 標準 | 75ppm | 75～100% |
| 超低 NOx | 50ppm | 85～100% |

＊ 02=0%換算（=［NOx計測値］×21/（21－［$O_2$計測値］）

軸流圧縮機を有する中型・大型ガスタービンにおいては圧縮機可変静翼や燃焼空気を抽気する機構を設け，部分負荷において燃焼空気量を減らすことで希薄予混合



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

バーナにおける空燃比を最適に保つ制御を行うが，遠心圧縮機を用いるM1A-13Dには適用が困難である。そこで，吸気ダクトに可変翼（IGV：Inlet Guide Vane）を追加し，負荷に応じて翼角度を変えることで吸気量を調整するシステムをオプションとして用意している（図８）。このシステムを適用することで，例えばドイツのTA-Luft規制｛70～100%負荷において，NOx：50mg/Nm$^3$（$O_2$=15%），CO：100 mg/Nm$^3$（$O_2$=15%）以下｝に対応することができ，現在稼働中である。

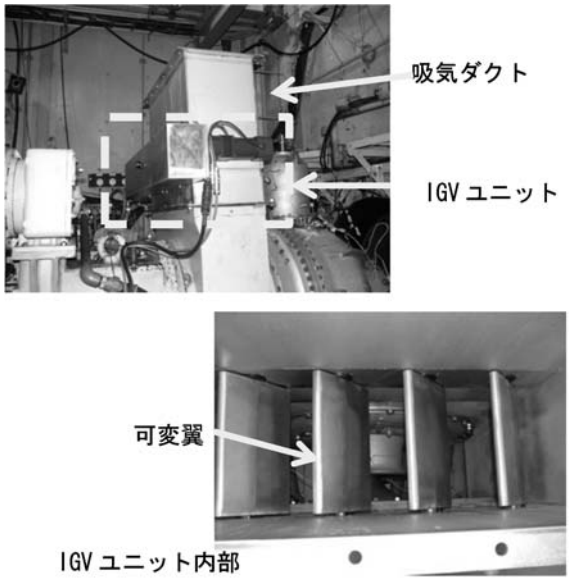



図８　IGV

⑵M1A-17D

①燃焼器構造およびエミッション性能

図９に燃焼器概略を示すが，M1A-17Dではマルチバーナ方式ではなく，ラジアルスワーラ入口に燃料噴射スポークを設置した希薄予混合バーナが，パイロットバーナと同軸に配置されている。この方式は弊社のM7AやL20Aでも採用されているものであり，他機種と同方式とすることで近年開発が進む低エミッション等の技術を水平展開しやすくした。また，M1A-13D同様に追焚きバーナを備えている。

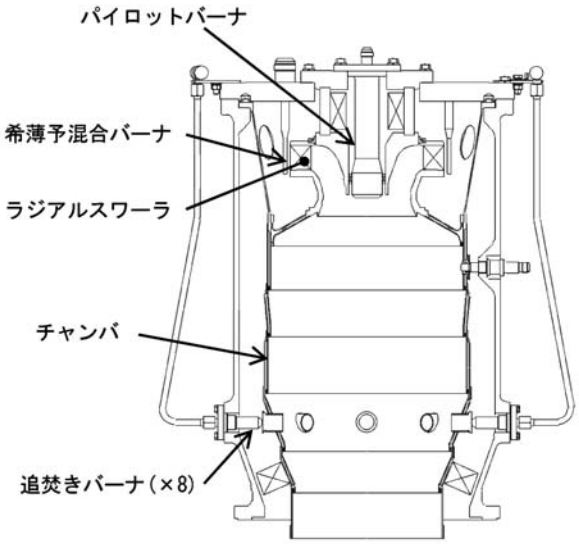



図９　M1A-17D燃焼器構造

M1A-17Dの希薄予混合燃焼は，ラジアルスワーラを経てチャンバ内に流入する空気・燃料予混合気が形成する大きな循環流によって保持される。希薄予混合バーナのエミッション性能や保炎性等はラジアルスワーラの角度や燃料噴射位置といった空気・燃料予混合部分だけでなく，燃焼器に流入する空気流速のばらつきやチャンバの空気孔位置等にも大きく影響されるため，多くの設計パラメータについて調整が必要である。本燃焼器の開発ではCFDによるチャンバ内流の解析や燃焼器単体の燃焼試験，エンジン試験を通して最適化を行った。その結果，M1A-17DのNOx保証値は表３に示すようにM1A-13Dより大幅に下げることが可能となった。

表３　M1A-17D排ガス保証

| NOx 保証値（*） | 負荷範囲 |
|---|---|
| 35ppm | 70～100% |

＊ 02=0%換算

②燃料制御

図10に負荷に対する各バーナの燃料配分概要を示す。低負荷ではパイロットバーナのみ，又はパイロットバーナ+希薄予混合バーナによって運転される（拡散モード）。拡散モードではパイロットバーナからのNOx排出量が多い。低エミッション運転（DLEモード）へはパイロットバーナが閉じることで切り替わる。DLEモードにおける希薄予混合バーナ燃料流量は低NOxかつ安定する適正空燃比となるよう調整され，負荷率上昇に伴う増加燃料は追い焚き燃焼させる。このようなバーナ制御を行うことによって，排出NOxがほぼ一定の負荷運転を実現している（図11）。

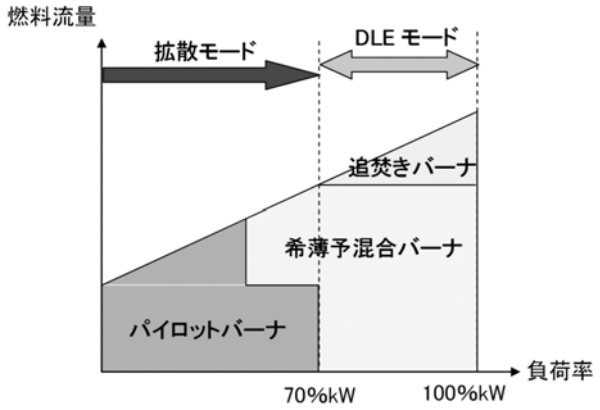



図10　燃料配分



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

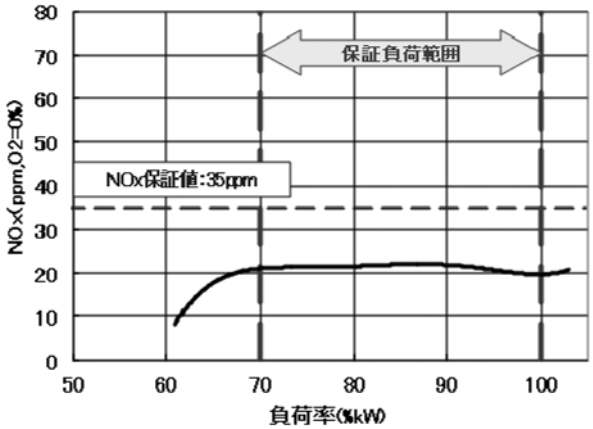



図11　排ガス特性（参考）

### 2.4　M1A-17の今後の開発計画

上述のようにM1A-17Dは，世界トップレベルの効率およびエミッション性能を実現したが，運用のフレキシビリティを広げるため，以下の開発を計画している。

①IGVの適用による低NOx運転範囲拡大

M1A-13Dに適用したIGVシステムをM1A-17Dにも適用し，低NOx運転範囲をさらに広げる。

②液体燃料焚きに対応したリキッドスタンバイ

M1A-17Dに液体燃料ノズル（拡散燃焼）を追加することで，常時はガス燃料焚きによる低NOx運用，非常時には液体燃料焚きによる始動・運転が行える非発兼用を実現する。

③DLEモードの単独運転対応

系統電力から切り離された状態である単独運転は負荷が瞬間的に変化するため，DLEバーナの燃料制御が追い付かず失火等が発生する可能性がある。現行システムではパイロットバーナを稼働させて燃焼安定性を確保しているが，燃料制御応答が速いDLEシステムを開発し，単独運転中においても低NOx運転を実現する。

## 3．非常用ガスタービン

非常用発電装置は，緊急時の比較的短時間の運用を行う目的で設置されるものであり，駆動源として用いるガスタービンは，開放単純サイクル一軸式で簡素な構造が主流である。

その設置目的から，非常時に確実に起動し電力を供給することが使命であり，搭載されるガスタービンにも，高い起動信頼性，起動から給電までの時間が短いこと，水など付属のユーティリティが不要であること，小型大出力などの特性が求められる。

常用発電装置と同様，高効率であることも重要な特性であるが，使用目的の違いから，常用ガスタービンとは違った特性が重要視され，非常用発電装置の原動機として選ばれている。ここでは，これらの特性について述べる。

### 3.1　非常用ガスタービンの特徴

以下に，弊社ラインナップで最大出力機であるPU6000型発電装置の外観（図12），ガスタービンの主要目（表４），ならびに非常用ガスタービンとしての特徴を示す。

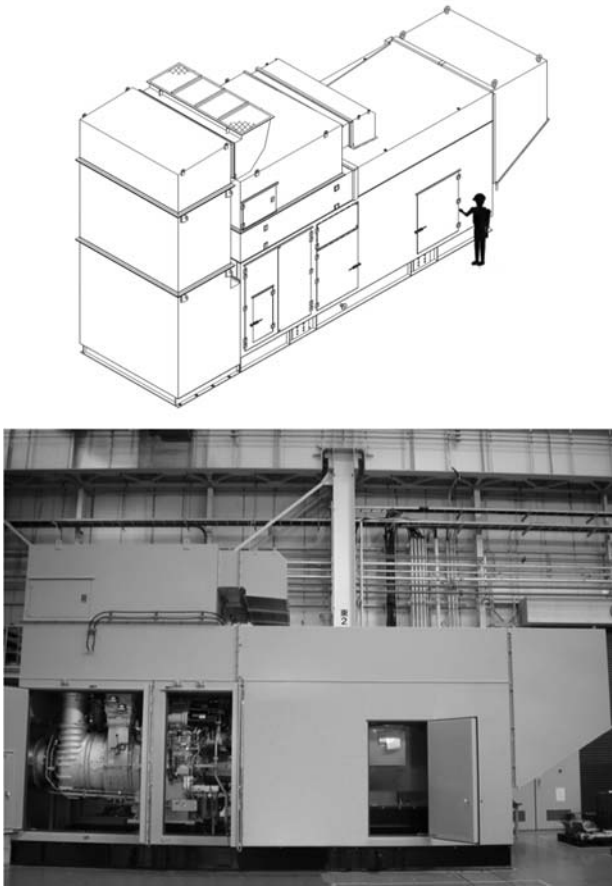


図12　PU6000発電装置外観

表４　PU6000主要目

| | | |
|---|---|---|
| 発電装置 | 機　種 | ＰＵ６０００ |
| | 定格出力 | ６，０００　ｋＶＡ<br>（４，８００　ｋＷ） |
| | 周波数 | ５０／６０　Ｈｚ |
| | 始動時間 | ４０秒以内 |
| | 使用燃料 | 灯油・軽油・Ａ重油・都市ガス |
| ガスタービン | 型　式 | Ｍ１Ｔ－３３<br>開放単純サイクル１軸式（ツイン式） |
| | 定格出力 | ５，２００　ｋＷ |
| | 回転速度 | １８，０００　ｒｐｍ |
| | 圧縮機 | ２段遠心式 |
| | 燃焼器 | 単筒缶式（拡散燃焼） |
| | タービン | ３段軸流式 |
| | 減速機 | 遊星歯車＋平行歯車 |

条件：吸気温度 40℃、大気圧 99．64kPa（高度150m相当）

⑴迅速な始動

停電発生後，自動始動して給電までの所要時間が40秒以内である。

出力の増大に伴ってガスタービンが大型化すると，始動時間が長くなるといった問題が生じてくるが，始動ト



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

ルクシミュレーションにより始動装置の最適化を図り，6,000kVAのガスタービンにおいても，40秒始動を達成している。

⑵安定した周波数特性

１軸式ガスタービンは，圧縮機の駆動と回転出力の取り出しを同じタービン（主軸）で行っていること，高速回転している主軸（18,000min$^{-1}$）を1,500/1,800min$^{-1}$の出力軸に減速するため等価慣性モーメントが大きいことから，瞬時に負荷が変動した場合でも，安定した回転速度（周波数）特性が得られる。これは瞬時に過負荷がかかりやすい非常用設備には大きな長所となる。

反面，慣性モーメントが大きいため，大容量の始動装置が必要であり，ディーゼルエンジンに比較し短所となる。

⑶自己空冷式

ガスタービンは，高温部の冷却に圧縮機出口空気を使用する自己空冷式であるため，冷却水とこれに付随する設備が不要である。そのため，断水や寒冷時の凍結などを考慮する必要がなく，多様な状況で運用を行う非常用発電装置にとって有用な特性である。

⑷小型軽量

回転機械であるガスタービンは，燃焼が連続して行われ，多量の作動流体を処理出来るため，小型軽量の長所を有する。反面，吸排気量が多いため，大きな消音装置，ダクト設備が必要である。

そのため，比較的小型の発電装置にはディーゼルエンジンが主流となっているが，大出力になるとガスタービンエンジンが主流となっている。

### 3.2　ガスタービン設備の運用実績例

東日本大震災における日本を襲った今回のマグニチュード9.0の地震は1990年以降の観測史上最大であり，世界の５大地震に数えられる規模であった。このときの弊社発電装置の運用状況について調査を行った。

調査対象エリアは，１都15県で，東北エリアは，青森県，岩手県，秋田県，宮城県，山形県，福島県，新潟県の７県。関東エリアは，東京都，神奈川県，千葉県，埼玉県，茨城県，栃木県，群馬県，山梨県，静岡県の１都８県であり，対象エリアの台数は，東北エリア499台，関東エリア2,593台の総数3,092 台であった。

そのうち，停電発生地域にあった台数1,035台（東北355台，関東680台）の始動成功台数は1,034台で，99.9%が正常に始動したことを確認できた。

始動失敗台数は１台で，その原因は設置以降25年間定期点検整備未実施であったことが判明した。

始動成功した1,034台のうち定期点検整備していたのは約半数の505台であった。弊社では1976年よりガスタービン非常用発電装置を販売しているが，設置後，相当の期間が経過した装置もあり，今後，定期点検整備の重要性が増していくと考える。

図13 に停電で稼働している市町村の分布図を示す。図14に対象エリアの停電状況を示す。

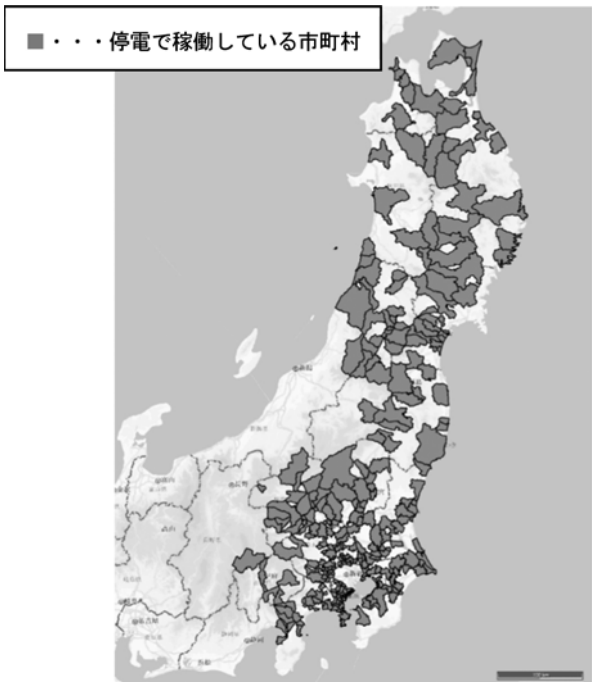



図13　停電で非常用ガスタービンが稼働している市町村

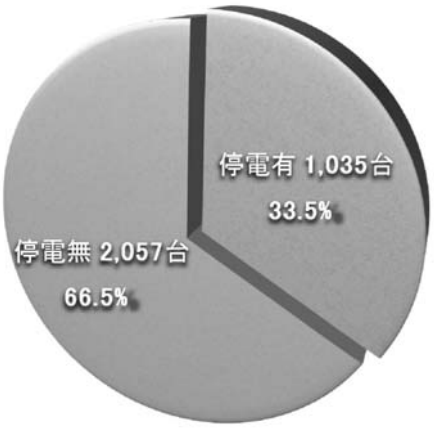



図14　対象エリアの停電状況

### 3.3　デュアルシステム

非常用発電装置は，設置目的から，比較的短時間の電力供給を目的として設置されてきた。そのため，今回の震災に伴う計画停電の様に，長時間の運用を求められる場合には，燃料供給をいかに安定して行うかが運用上の問題となる。

大半の非常用発電装置は，A重油，軽油，灯油などの液体燃料を使用しており，燃料は地下貯蔵タンク等に備蓄されるが，貯蔵量には限りがある。デュアルフュエルシステムは，緊急時に燃料供給が断たれた場合に備え，液体燃料・ガス燃料の併用を行うものである。

デュアルフューエル仕様では，停電時には液体燃料で



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

起動後，自ら発電した電気でガス圧縮機を駆動させ，運転中に液体燃料からガス燃料に切り替えることで，連続運転に対応することが可能である。これらのシステムは，常用発電設備では実績があり，燃料噴射ノズル等の燃料システムの変更により，非常用発電装置でも適用可能である。図15に液体・ガス切替時の燃料制御弁動作を示す。

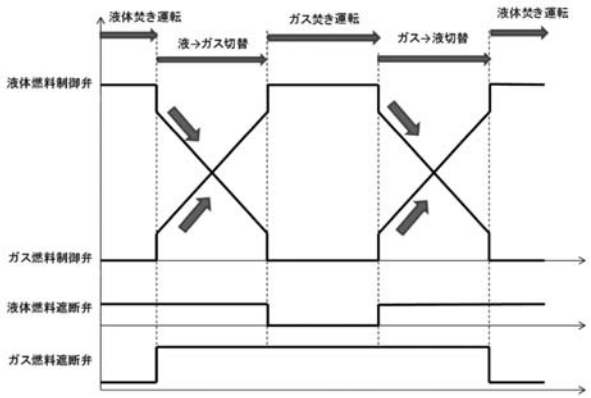



図15　燃料切替時の燃料制御弁動作

### 3.4　移動電源車

災害時に「小形・軽量で冷却水不要」というガスタービンの特長は，移動電源車にとって，理想的な特性となる。

定置式ガスタービン発電設備に機動力をプラスした，ガスタービン移動電源車「カワサキMPUシリーズ」（図16）について紹介する。

図16　カワサキMPUシリーズ

⑴振動・騒音の低減

定置式と同様，ガスタービンは振動がほとんどなく，また，騒音についても，発生音の主体が防音しやすい高周波であり，簡単な構造の防音パネルと消音器で，きわめて効果的な低騒音化を実現できる。

⑵冷却水が不要

前項で述べたようにガスタービンは自己空冷式のため，冷却水が不要である。これは，多様な運用状況を求められる移動電源車にとって最適である。

⑶　寒さに強く，起動信頼性が高い

冷却水が要らず，しかも摺動部分のないガスタービンは，構造的に寒さに強く，寒冷地仕様でもディーゼル電源車のような大がかりなヒーティングシステムは不要である。

暖機運転なしで全負荷投入できるのも，ガスタービンならではの魅力で，また燃料は，軽油，A重油のほか灯油も使用できる。灯油使用の場合には，－25℃までヒーティングなしで起動が可能である。

## 4．おわりに

小型ガスタービンを用いた常用発電設備は，コジェネレーションとし，排熱を有効利用により総合効率を高めることで，省エネルギ，$CO_2$削減に貢献する分散型エネルギシステムである。また，非常用発電設備は，社会インフラを支えるバックアップシステムである。

搭載されるガスタービンは，それぞれ違った特性から選ばれているが，原動機として高効率，高信頼性，低環境負荷を求められることには変わりはなく，今後とも開発や普及拡大につとめていきたいと考えている。



Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

論説◆解説

特集：小型／移動用発電設備の現状と開発動向

# 非常用ガスタービン設備の現状と開発動向

斉藤　雅昭*1
SAITO Masaaki

渡辺　総栄*1
WATANABE Soei

畑本　拓郎*1
HATAMOTO Takuro

住吉　雅史*1
SUMIYOSHI Masashi

キーワード：大容量化，軽量化，低騒音化，低振動化，換気ファンレス，機関制御，始動信頼性，ターニングレス，デュアルフューエル

## 1．はじめに

2011年３月に発生した震災後の計画停電を契機に，非常用ガスタービン設備の導入を検討する企業・自治体などが見られる。

そこで，設備の導入を検討している企業・自治体に対して新潟原動機㈱（以下当社という）での非常用ガスタービン設備の現状と開発動向について，キーワード毎に紹介する。

## 2．大容量化

近年，日本の大都市圏におけるインテリジェントビル，データセンタ，上水道施設及び排水施設は大規模化の傾向にあり，施設電力の大容量化が進んでいる。

これらの施設は社会的に非常に重要な役割を果たすため，停電時には，瞬時に大容量電力を安定的に供給する非常用発電装置が必要とされる。

このような背景から，当社は，単機出力2600kWの新機種NGT3B型ガスタービンを駆動源とする単機では3000kVA，ツイン機では非常用出力で国内最大級となる6000kVAの発電容量をもつ非常用発電装置CNT-3000EA，CNT-6000ENを開発した。

当社では，従来より250kVAから5000kVAまでの非常用ガスタービン発電装置をラインナップしていたが，この開発により，非常用出力で国内最大級となる6000kVAまでラインナップを拡充した。

発電装置の主要目を表１に，またNGT3B型ガスタービンの外観を図１，２に示す。

NGT3B型ガスタービンは，ガスタービン単機定格出力2,648kW，熱効率24.7％と，非常用ガスタービンとして国内最大級の出力と高効率を実現した。

表１　CNT-3000EA/6000EN発電装置主要目

| | 型式 | CNT-3000EA | CNT-6000EN |
|---|---|---|---|
| 発電装置 | 発電容量 | 3,000kVA | 6,000kVA |
| | 発電出力 | 2,400kW | 4,800kW |
| | 周波数 | 50 / 60 Hz | |
| | 始動時間 | 40秒以内 | |
| | 再始動時間 | 40秒以内 | |
| | 燃料 | A重油，軽油，灯油 | |
| ガスタービン | 型式 | NGT3B-S | NGT3B-T |
| | 定格出力 | 2,648kW | 5,296kW |
| | 回転速度 | 17,600 $min^{-1}$ | |
| | 圧縮機 | 遠心２段 | |
| | 燃焼器 | 単筒缶型 | |
| | タービン | 軸流３段 | |

周囲条件：40℃，高度150m

図１　NGT3B-S型ガスタービン外観

原稿受付　2011年11月11日

＊１　新潟原動機㈱　技術センター
〒957-0101　新潟県北蒲原郡聖籠町東港５-2756-３



Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

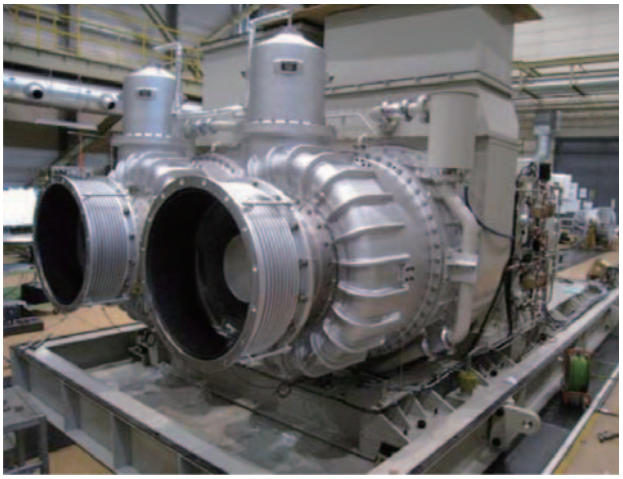


図２　NGT3B-T型ガスタービン外観

図３　CNT-4002MN装置外観

一方，日本の河川は流路が短く勾配が急なことから，台風や豪雨による災害が発生しやすく，古くから堤防，揚排水設備等の治水施設を築いてきた。　近年，河川周辺の都市化の進展に伴い，集中豪雨等の発生に対する新たな治水対策が求められるようになり，ポンプによる強制排水施設の重要性が増し，施設の大規模化・ポンプの大型化が進んでいる。

当社では，2001年より2000PS（1471kW）クラスのポンプ駆動用ガスタービン装置を自社開発し製造販売してきたが，上記のような近年の要求を満たすため，2000PS（1471kW）クラスのNGT2BM型ガスタービンを，出力軸減速機を介して２機１軸化した出力4000PS（2942kW）クラスのCNT-4002MN型ポンプ駆動用ガスタービン装置を開発した。表２に装置要目を示し，また図３に装置外観を示す。

CNT-4002MN型ポンプ駆動用ガスタービン装置は，ガスタービン及び減速機を横に配置した横型２軸ガスタービン装置であり，シングル機で実績のある当社製NGT2BM型ガスタービンを２機１軸化した純国産ガスタービン装置であり，充実したアフターサービスが可能である。

表２　CNT-4002MN装置要目

| | | |
|---|---|---|
| ポンプ駆動装置 | 型式 | CNT-4002MN |
| | 定格出力 | 4,000PS（2,942kW） |
| | 回転速度 | 1,000min$^{-1}$ |
| | 始動時間 | 約60秒 |
| | 再始動時間 | 約60秒 |
| | 燃料 | A重油，軽油，灯油 |
| ガスタービン | 型式 | NGT2BM-T |
| | 圧縮機 | 遠心２段 |
| | 燃焼器 | 単筒缶型 |
| | ガス発生機タービン（GGT） | 軸流２段 |
| | 出力タービン（PT） | 軸流１段 |
| | 回転速度（GGT） | 22,000 min$^{-1}$ |
| | 回転速度（PT） | 22,000 min$^{-1}$ |

周囲条件：40℃，高度150m

NGT2BM型ガスタービンのガス発生機タービンは，２段の遠心式圧縮機と２段の軸流タービンからなる。また，出力タービンは軸流１段を採用している。燃焼器は単筒缶型のシンプルな構造で，ライナ内壁面には遮熱コーティング（TBC）を施工し耐久性を高めている。図４にガスタービン断面図を示す。

ガス発生機タービンの吸い込み側には始動装置，燃料ポンプ及び潤滑油ポンプを駆動する補機ギヤが結合されている。

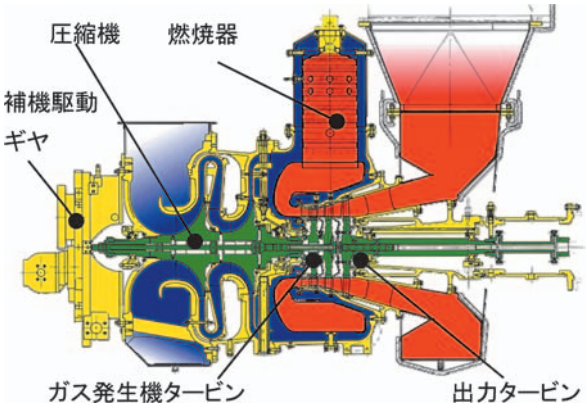



図４　ガスタービン断面図

## ３．軽量化

非常用発電装置の設置場所は，地上，地下以外にビルの屋上や中間階に設置されるケースも多く，発電装置全体は軽量，コンパクトであることが要求されている。

そこでエンクロージャは，従来のものから吸気ダクト及び吸気消音器の通路見直しなどによる構造変更，サイドパネルの最適な防音構造への見直しを実施し，騒音仕様を維持しながら軽量化を図った。また，機関台床の構



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

造を形状簡素化により見直し，軽量化した。

図５にCNT-2000E型非常用発電装置のエンクロージャ構造の従来と構造見直し後の比較図を示す。

CNT-2000E型の例では，エンクロージャと台床で約20％の軽量化を実現した。

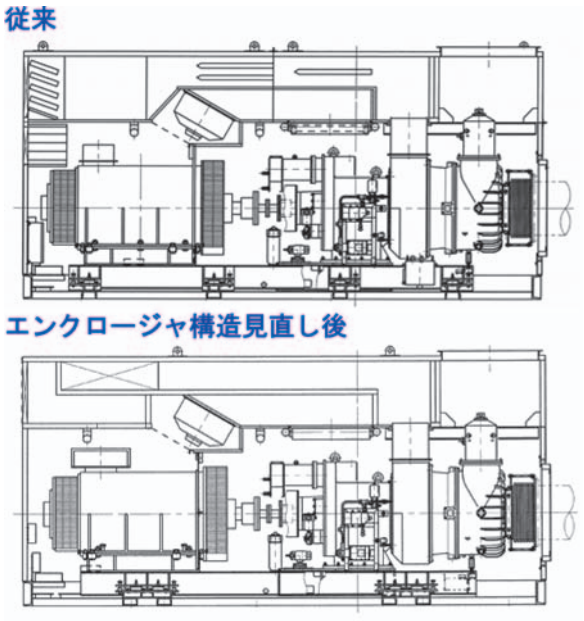



図５　エンクロージャ構造比較

上記の例と同様に軽量化を図ったCNT-3000EA非常用発電装置の断面を図６に示す。

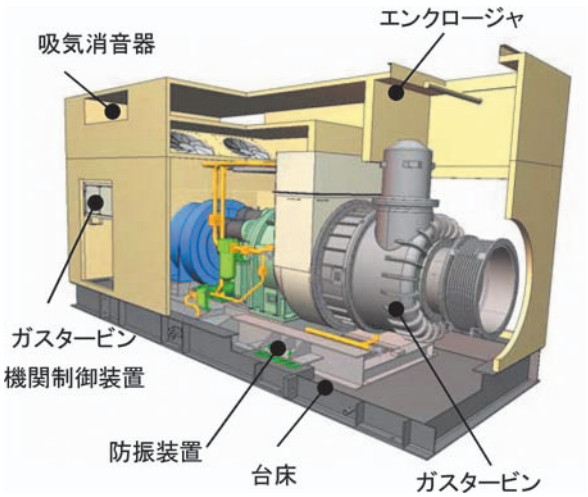



図６　CNT-3000EA発電装置断面図

CNT-3000EA型では，従来のNGT2A-T型ガスタービンを適用した3000kVA発電装置に対し，約10％の質量と約19％の外形寸法容積の低減を図っている。

## ４．低騒音化

非常用発電装置は，ビル屋上や住宅地域近隣に設置されるケースがあり，その発電装置全体は低騒音を要求される場合がある。

当社では，発電装置エンクロージャ周囲１mにて75dB（A）以下や65dB（A）以下といった低騒音仕様に対して多数実績がある。

75dB（A）以下仕様のエンクロージャは，85dB（A）とほぼ同一寸法の一重防音構造とし，65dB（A）以下仕様は二重防音構造にしている。

65dB（A）以下仕様に対応したCNT-4000E非常用発電装置の断面を図７に示す。

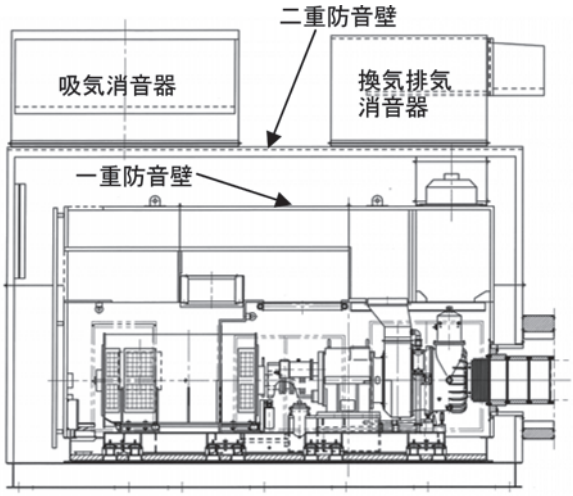



図７　CNT-4000E低騒音型発電装置断面図

## ５．低振動化

非常用発電装置がビル屋上や中間階に設置されるケースも多く，階下への振動・固体伝播音影響の低減の一つとして，発電装置側の固有振動数を下げ基礎（躯体）側への振動伝達の低減を要求される場合がある。

従来，発電装置と排気消音器の下部に防振スプリング式の共通台床を設置していた。

近年，躯体負荷低減，上部スペースの有効利用及び現地防振装置調整時間を低減する目的から，発電装置の防振装置が金属スプリング式指定の場合や固有振動数指定の場合には，防振スプリングをエンクロージャ内に内蔵した発電装置の適用を可能とした。

図８に従来の防振スプリング台床方式と防振スプリング内蔵方式の発電装置断面図を示す。



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

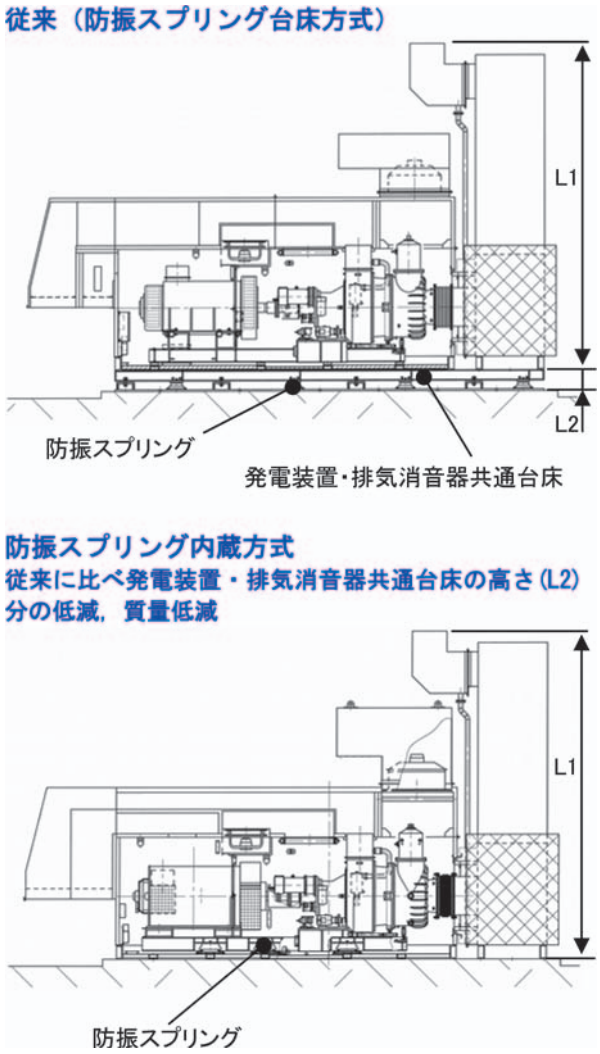



図８　防振スプリング内蔵化

## ６．換気ファンレス

近年，ビル建屋内など限られた設置スペースに非常用発電装置を設置する場合など，非常用発電装置省スペース化の傾向にあり，小型化が必須となっている。

当社では，500kVAの非常用ガスタービン発電装置で，始動用直流電源をパッケージに内蔵し，ガスタービン機関と発電機は胴体結合として短縮化することで，発電装置サイズを小型化した。

また，冷却後のパッケージ換気をガスタービン燃焼用に再利用（自吸）することで，単独排気式でありながらパッケージ換気レスとなり，換気ファン・潤滑油冷却ファンを不要とした発電装置CNT-500ERAを開発した。

これにより，パッケージ換気ファン，パッケージ換気消音器，ダクト類の削減により，設置工事が容易化される。

図９に500kVAの非常用ガスタービン発電装置の従来との比較を示す。

また，ポンプ駆動用装置では，豪雨や洪水等の発生時に運用されることが想定されるが，このような災害時には停電が併発する可能性がある。そこで当社では，装置

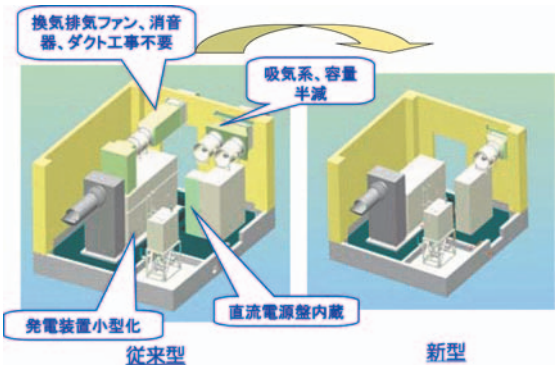



図９　換気ファンレス化

のオプションの一つとして，パッケージ内換気にモータファンを使わずに，ガスタービンの燃焼用空気を利用する換気ファンレスパッケージを開発した。装置断面図を図10に示す。

なお，本システムではパッケージ内の暖められた空気を吸入するため，出力は定格の70％となる。

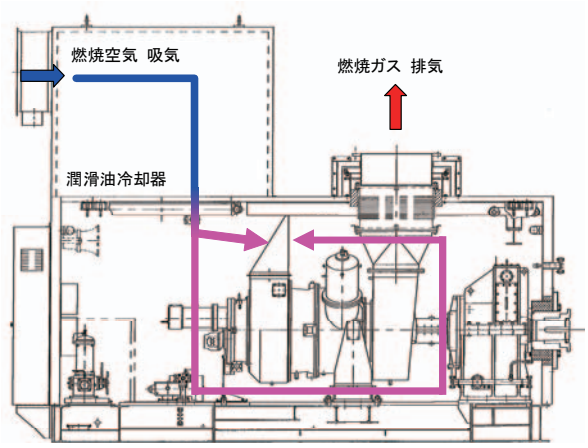



図10　換気ファンレスパッケージ

## ７．機関制御

当社ガスタービン発電装置の機関制御用PLC（Programmable Logic Controller）は，2000年以降，米国製を使用していたが，海外製品に対する部品供給面の不安などを理由に国内製を望む企業・自治体が増えているために国内製に変更した。

図11に当社ガスタービン機関制御装置の変遷を示す。

第一世代は，ガバナコントローラと国産PLCを採用していたが，第二世代として2000年以降ガバナ制御をPLCに取り込み集約してきた。

第三世代では米国製PLCに代わり，国産製PLCを採用することで，国内製を望む企業や自治体に部品の安定供給を実現している。

またPLCの変更に合わせて外部ケーブルの省配線化などを目的に自動始動発電機盤および始動用直流電源盤との信号のI/FにリモートI/Oを採用するなど制御システムの見直しも実施致している。



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

図11　当社ガスタービン機関制御装置の変遷

図12に当社ガスタービン機関制御のシステム構成図を示す。

国内製PLCを使用した新しい制御システム（新型機関制御器）は，今後当社の非常用ガスタービン発電装置の機関制御標準（Solar社製の常用・非常用ガスタービンを除く）として全機種を対象にしている。

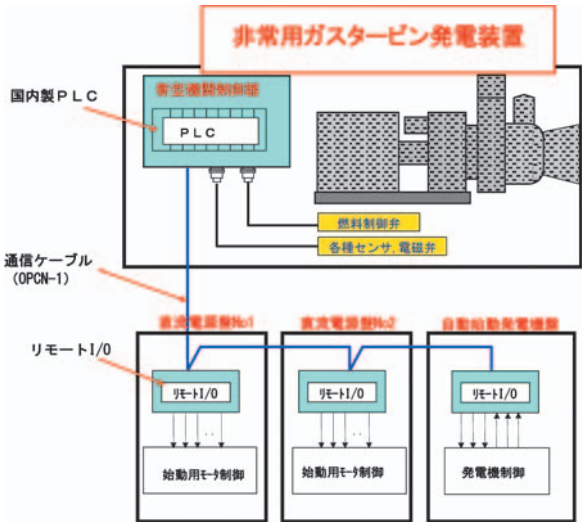



図12　ガスタービン機関制御システム構成図

当社では，機関制御器をパッケージに搭載しており，速度ピックアップ，排気熱電対等のセンサケーブル類の外部配線を不要としている。

またリモートI/Oの採用により発電機盤・直流電源盤との信号の受け渡しを通信用ケーブルとすることで外部配線の省配線化を図り，設置工事の簡素化を実現している。

当社のガスタービン機関制御は，フルデジタルコントロールによりフレキシブルな燃料制御が可能となり良好な始動性能，負荷変動時の敏速な応答性能を可能としている。

## 8．始動信頼性

非常用ガスタービン発電装置では，停電時に瞬時に電力を安定的に供給する必要があることから，始動信頼性が重要であり，更に一度復電した後の再停電時における始動信頼性も重要である。

### 8.1　再始動

インテリジェントビル，データセンタ，上水道施設及び排水施設，病院等重要な施設では，復電時の不安定な電力状況の対応，すなわち復電後再停電した場合に直ちに電力を供給する必要がある。

復電後再停電した場合，例えば機関停止中に再度始動指令が入った場合でも，フレキシブルな燃料制御により図13に示すように40秒以内で再始動できることを実証している。

この再始動技術は当社がパイオニアであり，1999年に開発・実用化して以来，大小の機種で多くの納入実績がある。



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

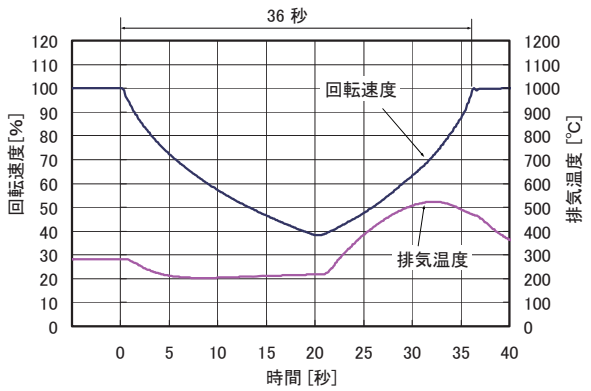



図13　再始動トレンド例

### 8.2　温態始動

当社ガスタービン機関の特徴であるロータシャフト構造，およびフルデジタルコントロールによりフレキシブルな燃料制御が可能となったガスタービン機関制御装置により良好な始動性能を可能としている。

始動前の排気温度に応じた，着火～加速のきめ細やかな燃料制御により，着火遅れや排気温度の急上昇のない安定した始動を実現している。

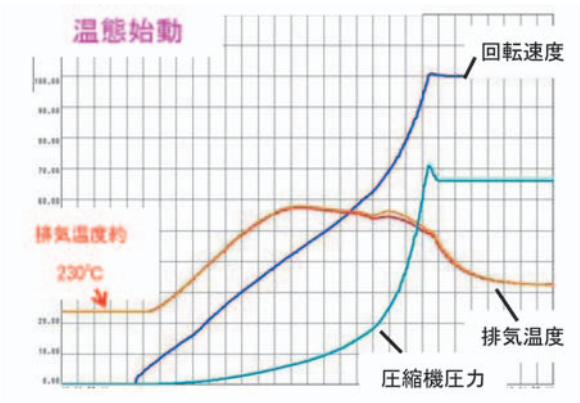



図14　温態始動トレンド例

## 9．ターニングレス

上記のように，復電後再停電した場合に直ちに電力を供給する必要があり，アフタークーリングの時間短縮が要求されている。

当社のガスタービン機関では，図15に示す様に，圧縮機ロータの両端に配置した２つの軸受でロータ全体を支持する構造で，軸受間距離が短く，機関停止後の熱による軸のたわみが少ない。そのため，アフタークーリング不要であり，アフタークーリングのためのターニングを行うことなく，ユーザーの管理運用が容易となる。

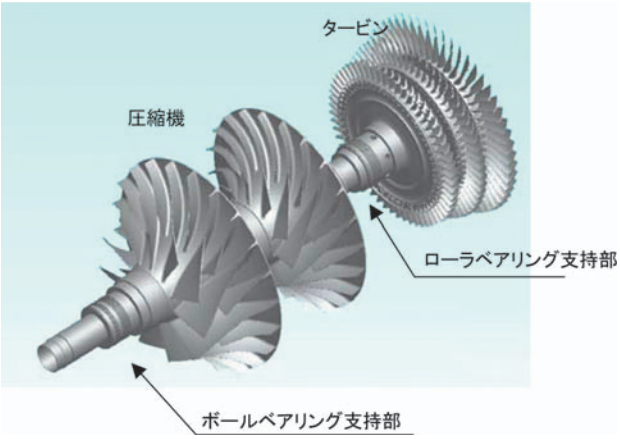



図15　軸受配置例

## 10．デュアルフューエル

非常用ガスタービン発電装置は，設置条件や取り扱いが容易な液体燃料を用いるのが一般的であるが，最近の大規模施設では高圧ガス設備を持つ場合も多く，自前で保有するガス燃料を非常用ガスタービンの燃料として使用したいという需要やLNG基地におけるガス燃料対応の需要も近年増加傾向にある。当社は，液体燃料で使用する本稿の非常用ガスタービン発電装置をベースに，都市ガスにも対応可能なデュアルフューエル構造を適用し，市場ニーズや環境負荷低減に対応している。

## 11．まとめ

1988年から製造・販売を開始した自社開発ガスタービンによる非常用発電装置は，250kVAから6000kVAまでラインナップし，数多くの納入実績と信頼性の面で高く評価いただいており，さらに多くのユーザーにご利用いただけるものと期待している。

## 参考文献

(1)　樽井真一，第37回ガスタービン定期講演会講演論文集（2009年10月）.
(2)　樽井真一，GT学会誌_第39巻第３号（2011年５月）.
(3)　樽井真一，GT学会誌_第39巻第５号（2011年９月）.



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

論説◆解説

特集：小型／移動用発電設備の現状と開発動向

# レシプロエンジンのクリーン燃焼技術とそれを利用した小型・移動型発電設備

沼田　明[*1]
NUMATA Akira

浦野　昭秀[*1]
URANO Akihide

キーワード：ディーゼルエンジン，ガスエンジン，移動用発電装置，窒素酸化物，スート

## 1．まえがき

18世初頭，人力や家畜，さらに風力や水力といった自然エネルギーに依存していた動力源が，蒸気機関の出現により大きく様変わりした。いわゆる産業革命である。その後19世紀末になり，レシプロエンジンである圧縮着火エンジン，火花点火エンジンが出現した。これにより大半の蒸気機関はレシプロエンジンに移行してゆく。その後，20世紀に入り，同じ内燃機関であるガスタービンの出現により原動機の大出力化が可能になった。さらに，近年では環境への配慮から自然エネルギーを利用した動力源が新しい形で見直されている。

このように，我々を取り巻く動力は様々な形で発展を続けている。レシプロエンジンも燃焼技術，生産技術，材料の開発，過給技術，燃料供給技術，さらに排出ガス後処理装置の開発などにより，単位排気量当たりの出力，熱効率の飛躍的な向上，および排出ガス中の大気汚染物質の大幅な低減が図られてきた。本解説では，小型/移動用発電設備の動力源として用いられるディーゼルエンジン，ガスエンジンの最新技術を紹介するとともに，2011年３月の東日本大震災以降関心が高まっているこれらレシプロエンジンを用いた小型発電設備／移動用発電設備の紹介をしたい。

## 2．ディーゼルエンジンとガスエンジンの燃焼

レシプロエンジンの燃焼は，同じ内燃機関であるガスタービンが連続燃焼であるのに対し，間欠燃焼であることが特徴である。その燃焼期間は1000分の数秒であり，この間に着火，燃焼を完結しているところにその燃焼制御の困難さがある。

同じレシプロエンジンでも，ディーゼルエンジンとガスエンジンの燃焼形態は根本的に異なる。前者は圧縮され高温，高圧になった空気に高圧で燃料を噴霧し可燃混合気を作り燃焼させる噴霧拡散燃焼である。これに対し，後者は予め空気と燃料ガスを混合させ圧縮し，火花などの外部エネルギーにて着火させ，火炎を伝播させる予混合燃焼である。この相違により，ディーゼルエンジンの高効率・低公害燃焼と，ガスエンジンのそれとは異なる技術となっている。

## 3．ディーゼルエンジンのクリーン化燃焼技術

### 3.1　ディーゼルエンジンの燃焼と窒素酸化物・粒子状物質の生成

ディーゼルエンジンは重たく，黒煙の排出や騒音，振動から，ダーティーなイメージを持たれている。しかしながら近年の目覚ましい技術の発展により，例えば高級乗用車は勿論，小型乗用車にもディーゼルエンジンが搭載されるようになり，ガソリン車と同等以上の静粛さやクリーンさを有している。

ディーゼルエンジンの排出ガスクリーン化技術を概説するに当たり，まずディーゼルエンジンの燃焼について述べたい。

前述のごとくディーゼルエンジンの燃焼は，基本的には噴霧拡散燃焼である。即ち，高温・高圧の空気の中に噴霧された高圧燃料が，蒸発，混合の後，濃度が可燃領域となった場所から化学反応が開始される。よって，燃焼反応の速度は化学反応速度ではなく混合気の形成速度によって支配される。このことから，「ディーゼル燃焼は混合律速である。」と言える。

混合律速の場合は，燃料と空気の混合気濃度が可燃領域になれば燃焼するので，事実上燃焼反応域の混合気濃度を制御することは不可能となる。このような燃焼形態のため，ディーゼル燃焼はいわゆる黒煙（以降Sootという）と窒素酸化物（以降NOxという）を同時に排出することとなる。

図１にディーゼル燃焼におけるSootとNOxの同時発生メカニズムを示す。ディーゼルエンジンのNOxはサーマル NOxであり燃焼ガスが高温となる量論混合比近傍付近で発生する。一方Sootは気相析出型のすす粒子が高温過濃域で生成され，燃焼後期に希薄条件下で再燃焼した残りが排出される。

原稿受付　2011年11月24日
＊1　三菱重工業㈱　汎用機・特車事業本部
エンジン事業部　エンジン技術部
〒252-5293　相模原市中央区田名3000



Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

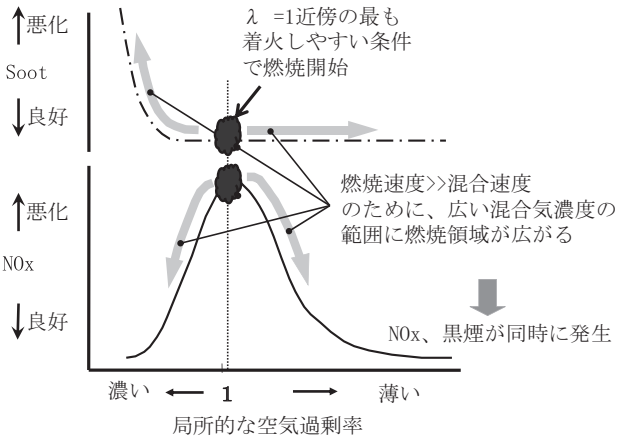



図１　ディーゼルエンジンの噴霧拡散燃焼

図の横軸は混合気濃度で右側が希薄領域，左が過濃領域である。また縦軸にSoot，NOx濃度を示す。それぞれ上方が濃度が濃く下方が薄い。

前述のごとくディーゼルエンジンの燃焼は噴霧拡散燃焼であり，ほぼ量論混合比の領域で着火し，希薄領域，過濃領域双方へ燃焼が広がる。量論混合比近傍では燃焼温度が高いことからNOxが生成され，過濃領域ではSootが発生することになる。

一方図２では横軸に燃焼温度，縦軸に混合気濃度をとってSoot，NOxの発生領域を示している。Sootは低温，過濃領域で，NOxは高温，量論混合比領域で発生しており，ディーゼル燃焼が，双方の発生領域にまたがるためSoot，NOxが同時に発生することになる。

以上，図１，図２からSootとNOxの生成特性について整理すると表１の様になる。

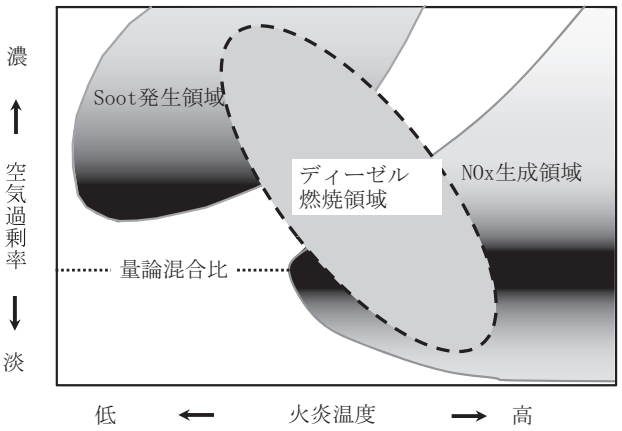



図２　ディーゼル燃焼のSoot,NOx生成領域

### 3.2　ディーゼルエンジンのクリーン化燃焼

３.１項の結果からSoot及びNOxの排出を抑えたスモークレス・クリーン化燃焼法を考えると，表２の様に整理できる。

なお，本表は燃焼方法に関わる手法について述べたものであり，排気後処理技術は含まれておらず，これは４項にて解説する。表中の燃料噴射に関する技術は，電子制御蓄圧式燃料噴射装置（コモンレール式燃料噴射装置）が実用化されたことから，噴射時期を早期化することによる混合気形成時間（予混合期間）確保や多段噴射による量論混合比近傍の混合気形成の抑制などの燃焼制御手法が燃焼温度低減のため，排ガス再循環（EGR）と組合わせる形で追求されている。

表１　ディーゼル燃焼のSoot，NO x 生成特性

| | 燃焼生成物 | |
|---|---|---|
| | Soot | NOx |
| 混合気濃度 | 過濃領域 | 量論混合比近傍 |
| 燃焼温度 | 1800K以下<br>2600K以上では発生しない | 2400K以上の高温領域 |
| 生成領域 | 燃料噴霧火炎中心付近 | 燃料噴霧火炎と空気の境界近傍 |
| 時間領域 | 燃焼が活発な時期の生成が最大で、燃焼後期に再燃焼して減少する | 最も燃焼が活発な時期より少し遅れて発生する |

表２　ディーゼル燃焼のクリーン化燃焼手法

| 狙い | 目的 | 手段 | 問題点 |
|---|---|---|---|
| 混合気濃度の均一化、希薄化（希薄化に伴う燃焼温度の低減によるNOx抑制）過濃領域の低減によるPM抑制 | 混合気の均一化（過濃領域の減少） | 燃料早期噴射による予混合燃焼 | 燃料組成の違いによる着火時期制御困難<br>燃料のシリンダ壁面付着 |
| | 混合気形成速度増大 | 燃料の高圧噴射 | 燃料噴射装置の複雑化<br>製造コストの上昇 |
| | | シリンダ内空気流動（スワール）の強化 | 超高スワールが必要<br>燃料噴霧干渉による過濃領域発生（Soot悪化） |
| | 特に低回転、低負荷域での空気量確保 | 可変容量過給機<br>ウエイストゲートバルブ付き過給機 | 制御装置の複雑化<br>コスト上昇 |
| 燃焼温度の低温化によるNOxの抑制 | シリンダ内燃焼温度全体の低温化（＋空気密度向上による希薄化） | 吸気冷却 | 冷却装置のスペース確保。<br>コスト上昇<br>冷却ファン馬力増大 |
| | | 低圧縮比化 | 始動性不良、白煙悪化（HCの増大）<br>熱効率低下 |
| | 燃焼火炎温度の低減 | 排ガス再循環（EGR） | 酸素不足によるSoot増大<br>燃焼室構成部品の腐食 |
| | 理論混合比近傍の混合気形成抑制 | 燃料噴射率制御、燃料の多段噴射 | 燃料噴射装置の複雑化<br>製造コストの上昇 |
| 後期燃焼の活性化 | 初期燃焼で発生したPMの再燃焼 | 主燃料噴射後のポスト噴射 | 燃料噴射装置の複雑化<br>製造コストの上昇 |

さらに，燃焼に関与する空気量の制御，先に述べたEGRガス量の制御の観点から可変容量過給機，ウエイストゲート付き過給機の採用が増加している。

これらの装置すなわち，燃料供給系，EGRを含む給気系，および別項に述べる後処理装置を負荷，エンジン回転速度に応じて，さらにトランジェント状態での排出ガスクリーン化のため，これらのパラメーターを総合的に制御する電子制御技術が不可欠な技術となっている。

ただし，排出ガスクリーン化のために燃焼を最適化すると熱効率を悪化させる場合が多い。また３.１項に述べたように，ディーゼルエンジンの燃焼はそもそもSootとNOxを同時に発生する特徴があり，どちらかを改善するとどちらかが悪化するというトレードオフの関係にある。

### 3.3　コモンレール式燃料噴射装置によるクリーン化燃焼

この燃料噴射装置の部品構成は，燃料高圧ポンプ，燃料高圧管，コモンレール（蓄圧器），インジェクタ（燃



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

料噴射弁），コントローラ（ECU），センサ類，ハーネス等からなる。システム概要を図３に示す。

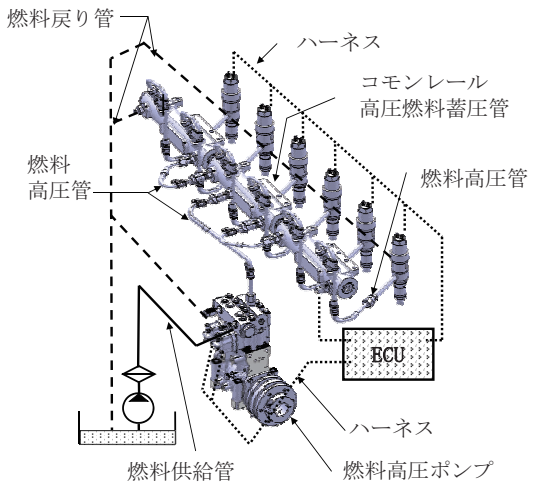



図３　コモンレール式燃料噴射装置

燃料タンクから供給された燃料は燃料高圧ポンプにて50～200MPa（機種により異なる）の任意の圧力に加圧され，燃料高圧管を経由してコモンレールに導かれる。コモンレールには高圧の燃料が充填され，ここから各シリンダに配置されたインジェクタに燃料高圧管を経由し導かれる。インジェクタには電磁弁が装着されており，ECUからの信号によりエンジンの回転速度，負荷，その他の条件に応じた噴射タイミングで開閉し，高圧の燃料をシリンダ内に噴射する。

また，ECUは，エンジンに取付けられた各種センサからの信号によりエンジンの運転状態，大気状態などを把握し，最適な燃料噴射タイミング，噴射圧力，噴射量を演算し，インジェクタの電磁弁に通電し噴射弁の開閉を行っている。

コモンレール式燃料噴射装置の特徴は以下のとおりである。

⑴低速域から高速域まで広い範囲において高圧噴射が可能

⑵サイクル中に複数回の燃料噴射が可能。

⑶噴射タイミング，噴射量，噴射圧力を出力，回転速度に応じ，木目細かく制御が可能

特にコモンレール式燃料噴射装置の特徴である⑴項の機能を用いて，例えば図４に示す様に１サイクル中に複数回燃料を噴射することでクリーン化燃焼を達成している。それぞれの噴射間隔の最短は$\mu$secオーダーであり，その具現化の困難さが判る。

### 3.3.1　近接パイロット噴射

主噴射の直前で微少燃料を噴射する近接パイロット噴射は，近接パイロット燃料の着火・燃焼によって筒内温度を上昇させ，主噴射の着火遅れを低減することで，燃焼騒音を大幅に低減する手法として実用化している。

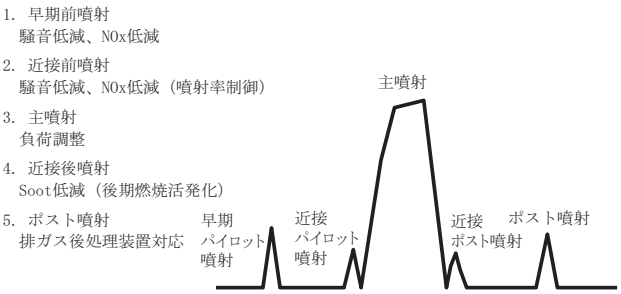



図４　コモンレール式燃料噴射装置燃料噴射パターン

シリンダ内に噴射された燃料は，微粒化，蒸発ののち空気と混合し，混合気が形成される。特に燃料噴射から燃焼初期の期間は筒内ガス温度が相対的に低いため，着火遅れが大きく混合が進みやすい。混合が進む結果，量論混合比近傍で燃焼する割合が増加することで火炎温度上昇につながる。従って初期の予混合燃焼を低減すれば火炎温度が低下し，NOxを低減できる。

そこで主噴射の直前で微少燃料を噴射する近接パイロット噴射を用いることで，近接パイロット燃料の着火・燃焼により筒内温度を上昇させ，主噴射の着火遅れを低減することでNOxを低減することができる。

### 3.3.2　早期パイロット噴射

燃料を早期（噴射時期は上死点前30度～50度）に噴射して希薄予混合気を形成して自着火すれば，NOx，Sootの生成がほとんど無い燃焼が実現できることから，一部のエンジンでこの技術が部分的に採用されている。

しかしながら早期噴射による希薄予混合自着火は，以下のような技術課題が残されている。

⑴壁面付着した燃料による吐煙悪化やHCの大量生成をともなったり，燃料の潤滑油ダイリューションを引き起こす。

⑵燃料成分の相違により着火時期が大きく異なったり，早期着火のため運転困難になる。

⑶低空気過剰率域で熱発生率が急激になりすぎ燃焼制御ができない。

⑷上記から運転可能範囲が低負荷領域に限られている。

高負荷域（低空気過剰率）で燃焼制御ができない課題を解決する手法としては，高過給により空気過剰率を増加させる方法，EGRにより燃焼抑制物質を投入する等の手段が研究されている。

### 3.3.3　ポスト噴射

Soot低減手段として，NOxと同様コモンレール式燃料噴射装置の特色である複数回噴射ができることを生かし，燃料主噴射の後にポスト噴射を実施し，燃焼の活性化によりSootの低減を図った例がある[1]。この手法も，幅広く用いられるようになってきた。



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

### 3.3.4　燃料高圧噴射とEGRの組合わせ

EGRは排出ガスを吸気に再循環することで，吸気中の酸素濃度を低減し，燃焼火炎の温度を低減してThermal NOxの生成を抑制する手法である。実際のエンジンでEGRを行う場合，以下の課題がある。

⑴酸素濃度低下に伴ってすすの再燃焼が抑制され，Sootが増える。

⑵燃焼が悪化するため等容度が低下し熱効率が悪化する。

⑶Soot，場合によっては硫黄分を含む排出ガスを再循環するためエンジン摩耗部品の劣化が進む，若しくは腐食が発生する。

⑷過給エンジンでタービン前の排出ガスをコンプレッサ後に吸入させる方式では（排気圧－給気圧）が小さいため排出ガスを再循環させにくい。

燃焼上の問題については，高圧噴射と燃焼室形状，スワール比，燃料噴射弁仕様の最適化によって酸素利用率を向上させる努力によって対応している。また，EGR量を増大する手法としては，可変容量過給機を用いる方法が広く用いられている。

EGRでNOxを低減しても，⑴項のSoot増加は致命的であるが，これを補完する方法として燃料の高圧噴射による微粒化，及び混合気形成速度の増大が上げられる。これにより，空気との混合が改善されSootの発生を抑制することが可能となる。従来の機械式燃料噴射装置では，燃料の噴射圧力はエンジンの回転速度，負荷に依存し，燃料噴射圧力が低い低速域，低負荷域ではSootの悪化を招いていた。

しかしながらコモンレール式燃料噴射装置では広い運転領域で高圧噴射が可能である。この高圧噴射とEGRを組合わせた例を図５に示す[2]。グラフではEGR率を変化させ燃料噴射圧力を60，100，120MPaと変化させているが，特にEGR率を増加しても排気煙濃度が増加せず，NOxと排気煙濃度の同時低減を可能にしている。

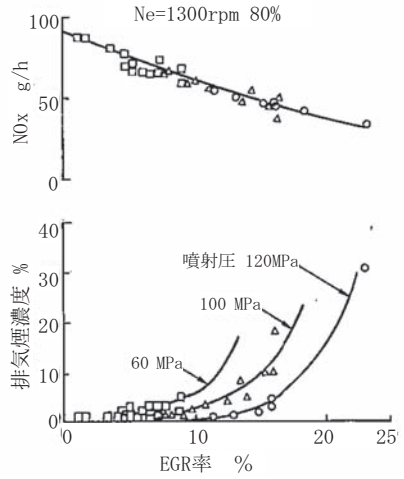



図５　高圧噴射とEGR率が排煙濃度，NOxに与える影響

## ４．排出ガス後処理装置

３.２項で記述のとおり，オンロード，オフロード用ディーゼルエンジンの排出ガス規制は段階的に厳しくなり，もはやエンジン内の燃焼だけでは規制を満足できないレベルとなってきた。そこで，排出ガス後処理装置を用いて排出ガスクリーン化を図ることとなり，特に規制の厳しい日本，欧米向けオンロード用ディーゼルエンジンには幅広く用いられ，オフロード用ディーゼルエンジンにも展開され始めた。

後処理装置には大きく２種類に分けることができ，Sootを捕捉するディーゼルパティキュレートフィルター（DPF: Diesel Particulate Filter）と尿素水（もしくはアンモニア水）を用い，NOxを窒素と水に分解する選択的触媒還元（SCR：Selective Catalytic Reduction）がある。

### 4.1　DPF

日米欧のオンロード用ディーゼルエンジンは勿論のこと，オフロード用においても排出ガス規制を満足する為に必要欠くことのできない装置となりつつある。

その名前の通り，フィルターにてSootを補足するものであり，その構造を図６に示す。多角形状のセラミックスなどを用いて作られたフィルターの壁を排出ガスが通り抜けることによりSootが捕捉され，その捕捉率は100%近い数値になる。

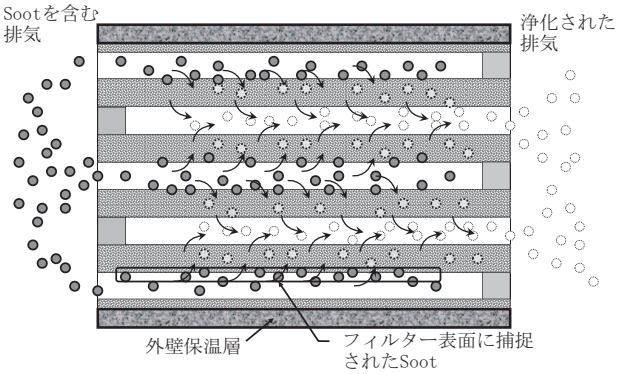



図６　DPFの構造

このような機能の為，運転を継続することによりフィルターに目詰まりをおこし，エンジンの背圧が上がるなどの問題が生じる。このため，捕捉したSootを燃焼しフィルターを再生させる機能が必要になる。

これは捕捉されたSootがフィルターに担持された触媒により酸化されることで再生されるが，触媒の種類により異なるものの250℃～300℃以上の温度が必要である。しかしながら，運転中の排出ガス温度は必ずしもこれ以上とは限らないため，排出ガス温度が低い場合は一定量のSootが堆積した後に強制的に排出ガス温度を上昇させフィルターを再生させる必要がある。

図７に示す如く，再生には特に排出ガス温度の上昇を



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

必要としない連続再生と，ECUにて排出ガス温度を強制的に上昇させる強制再生モードがある。強制再生にもエンジンを稼働させながら（負荷をかけながら）実施する自動再生モードと，アイドリング状態で実施する手動再生モードがある。

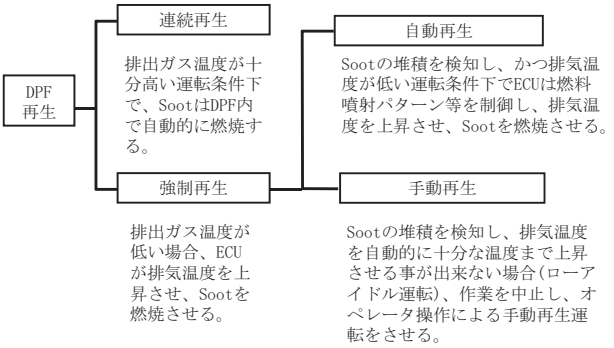



図７　DPF再生方法

Soot堆積量の判断は，ECUが運転状況からSoot発生量を演算し堆積量を推定するのが一般的である。

また排出ガス温度の上昇手段としてはエンジン入口スロットルバルブにて空気流量を制御する，もしくは燃焼の後期にシリンダ内に燃料を噴射したり，排気管内に燃料を噴射することでHC，COを作り，DPF前に設置した酸化触媒により酸化させ昇温する手段が取られている。

### 4.2　尿素SCR

尿素SCRはアンモニアがNOxと化学反応することで窒素と水に還元するものである。通常，アンモニアは取扱いが危険なことから尿素水を用いる。装置の概略を図８に示す。尿素水は触媒前に均一に噴射される必要がある。

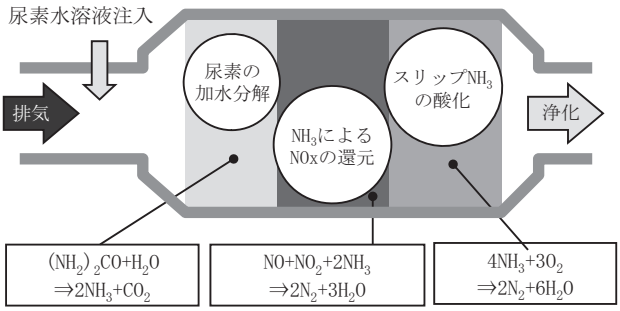



図８　尿素水添加型NOx選択還元触媒を用いた脱硝装置

尿素水噴射量が過大になると，若しくは還元反応が十分に行われなかった場合，アンモニアが直接排気管から大気に放出される可能性がある。このためスリップしたアンモニアを窒素と水にする為の触媒が設けられる。

NOx分解原理は以下のとおりである。

$(NH_2)\ 2CO+H_2O \Rightarrow 2NH_3+CO_2$

$NO+NO_2+2NH_3 \Rightarrow 2N_2+3H_2O$

$4NH_3+3O_2 \Rightarrow 2N_2+6H_2O$

NOxをSCRにて低減する場合，エンジン自体の熱効率に悪影響を及ぼすことなく低減できるメリットがある。ただし尿素水を消費する為，総合的に経済性を検討する必要がある。

一方で，排出ガス温度が一定以上にならないと触媒作用が弱いという欠点があり，部分負荷における脱硝効率は著しく低下する。

なお，尿素SCRの他にも一部乗用車用として実用化されているNOx吸蔵触媒，HC-SCRといったNOx後処理装置があるが，紙面の都合で割愛する。

## ５．ガスエンジン

### 5.1　燃料供給面及び地球環境からみたガスエンジンのメリット

IEAの世界エネルギー展望2010[3]にもあるように，オイルピークの到来が現実的なものになり，エネルギー源の多様化が叫ばれる中，天然ガス，さらにはシェールガス，炭層メタンガスといった，非従来型のガス燃料が注目されている。これらの埋蔵量は膨大で，石油に変わるエネルギー源として注目されており，これを燃料とするガスエンジンの開発も加速されている。

また地球環境の観点から見ても表３に示すように石油燃料を用いるディーゼルエンジンより優れていると言える。

表３　ガスエンジンとディーゼルエンジンの排出ガス比較

| ガスエンジンの特徴 | ガスエンジン<br>燃料：都市ガス(天然ガス) | ディーゼルエンジン<br>燃料：A重油 |
|---|---|---|
| CO2排出量が少ない<br>(同一熱効率、同一熱量換算) | 0.76<br>(ディーゼルエンジンを1とした場合) | 1 |
| NOx排出量が少ない | ～300ppm<br>( $O_2$= 0%換算 ) | ～1300ppm<br>( $O_2$= 13%換算) |
| SOx排出がほぼ無い | ≒0ppm<br>( $O_2$= 0%換算 ) | ～600ppm( $O_2$= 13%換算 )<br>(燃料中の硫黄含有量による) |

### 5.2　ガスエンジンの高熱効率化，クリーン化燃焼技術

ガスエンジンの燃焼は予混合燃焼である。ただし大型２サイクルエンジンの場合は拡散燃焼であるが紙面の都合上予混合燃焼について述べる。

予混合燃焼の特質上，NOxを抑えるために希薄混合気を作り，Sootを抑制するためにも希薄な予混合気を作ることでNOxとSootの同時低減が可能になる。

問題は希薄な燃料をどのように着火させるかであり，図９に示す様に大きく分け２種類ある。１つは大型エンジンで採用が多いプレチャンバ方式であり，プレチャンバにて少量の量論混合比近傍のガスに着火させ燃焼室の希薄ガスを燃焼させる方式である。もう一つは，直接燃焼室の量論混合比近傍もしくは希薄ガスに着火させるオープンチャンバー式である。

図10に示すごとく，希薄化することでNOxの低減，



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

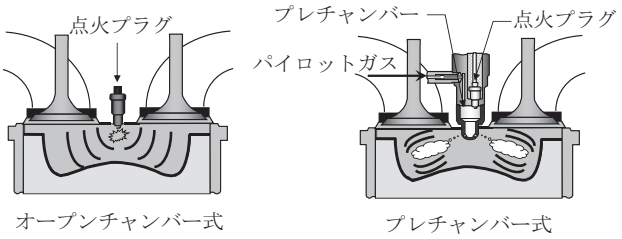



図９　オープンチャンバーとプレチャンバー方式

熱効率の向上が同時に図られることから，できる限り混合気を希薄化したいが着火が困難になる。この点でプレチャンバ方式に利点があるが，構造の複雑さを伴う短所がある。

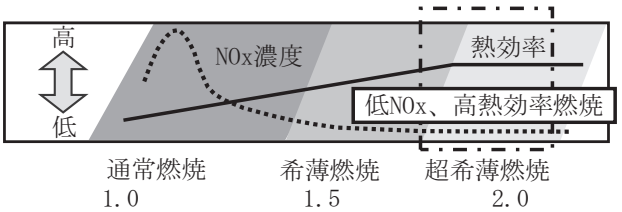



図10　空気過剰率と熱効率，NOxの関係

### 5.3　ミラーサイクルエンジン

内燃機関において，熱効率を改善するには燃焼温度と排出ガスの温度差を大きくすれば良い。膨張行程は断熱膨張とみなすことができるので，温度差を大きくとるには膨張比を大きくとればよい。

しかしながら，通常のエンジンでは圧縮比と膨張比は等しく，圧縮比を上昇させると圧縮時に混合気が過熱し，ノッキングと呼ばれる異常燃焼を引起す為，おのずと上限が決まってしまう。

そこで，図11に示す様に，膨張比を圧縮比より大きく設定したミラーサイクルと呼ばれる方式を採用するエンジンが増加している。

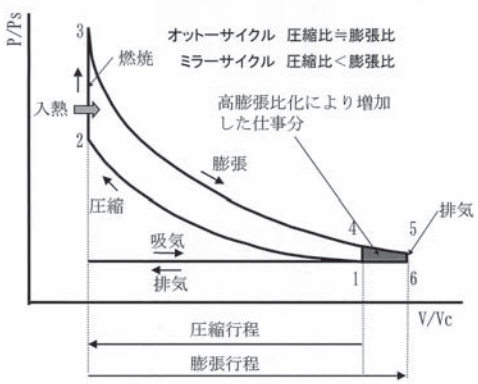



図11　オットーサイクルとミラーサイクル

これは，吸入行程の途中で吸気弁を閉じることで吸入行程を短くする，または圧縮行程の途中まで吸気弁を開けておき，圧縮行程を短くすることで見かけ上の圧縮比を膨張比より小さくすることができ，熱効率が改善される。

しかしながら混合気の吸入量が低下する為，同一排気量のオットーサイクルに比べて単位排気量当たりの出力が低くなる。これをカバーする為に過給度を上昇させ混合気を押し込むことになり，高圧力比過給機が必要になる。

## 6．レシプロエンジンを用いた発電設備

以上に述べてきたレシプロエンジンを用いた発電設備は大きく分類して定置式と移動式がある。定置式にはさらに建家内に発電設備を設置するもの，及びボンネット内に納め，そのまま設置するタイプのものがある。移動式発電設備は，屋外用ボンネットタイプとなっている。

### 6.1　ボンネットタイプ発電装置

次に，ボンネットタイプ発電設備について述べる。タイプとしては，75db以下に騒音を抑えた低騒音型，配管工事が不要である冷却システムと一体となったパッケージ，熱源より電力と熱を生産し供給するシステム（コージェネレーションシステム）に対応したパッケージなどがある。これらの出力は現在最大で２MWクラスまである。パッケージ内部にエンジンに必要な装置の大部分が搭載されており，現地での配管/配線工事が少なく，比較的容易に設置することが可能である。

小型のものは工事現場用や仮設用の電源として用いられており，主としてディーゼルエンジンが使用される。燃料タンク等の必要装置全てがパッケージ内に搭載されているため，サイトへ運搬し出力ケーブルを接続すれば，必要な電源を一定期間確保する事が可能である。

また，近年，海上輸送用コンテナの標準コンテナにエンジンを搭載した発電設備が海外において多く見られるようになってきた。ISO規格コンテナ（20Ft又は40Ft）をボンネットとして利用することで，海上輸送に要す荷詰め/荷降ろしが不要となり，陸上輸送でもコンテナヤード，トレーラへの積載，サイトへの据付まで一気通貫で行う事ができる。これにより運搬・設置の容易化，運搬期間の短縮を実現している。

図12にコンテナタイプの発電セットを示す。

### 6.2　発電装置の設置例

新興国においては，経済の発展にともない，深刻な電力不足に陥っている例が多い。これらの電力不足に対し，新規大型発電所の建設が計画されているが，急場を凌ぐため，またバックアップ電源用として，上記のような可搬式発電設備を仮設したり，非常用バックアップ電源として複数台の発電設備を設置する例が見られる。例を紹介する。

写真１はアフリカにおけるコンテナタイプ発電設備の



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

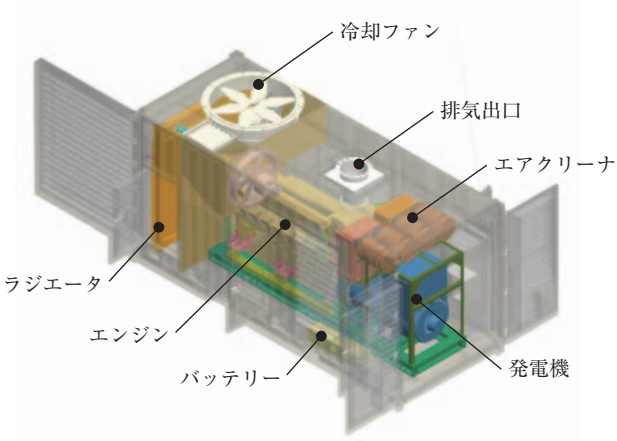



図12　コンテナを利用した発電セット

写真１　コンテナタイプDGを用いた100MW発電所

例である。電力消費の急激な増加による深刻な電力不足に対応するため１～1.5MWクラスのコンテナタイプ発電設備を76台並べ100MWの発電所としたものである。この例では整地開始後，約3.5ヶ月で送電を開始しており，短後期で発電を開始できるのが特徴である。

図13は，三菱重工業株式会社相模原製作所に2011年に設置されたボンネットタイプ発電設備の例である。同工場での自家発電機設備はこれまで電力会社の系統が正常である事を前提に系統連系運転するシステムであり，また工場電力全量バックアップを想定していなかった。そこで自家発電設備を系統電源喪失時でも運転可能なように改修し，さらにコジェネレーションシステムに対応した1.5MWクラスの発電設備６台（合計９MW）を新規に導入することで電力セキュリティーの改善を行った。

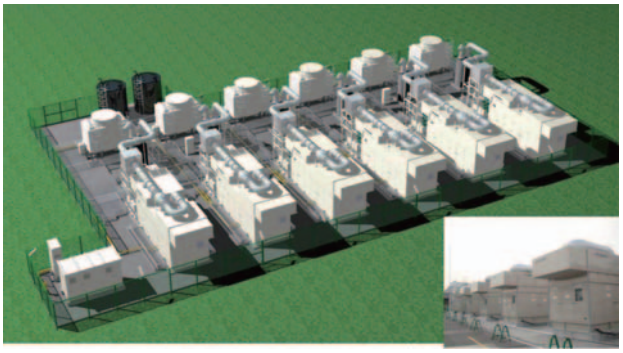


図13　ボンネットタイプ発電設備の例

### 6.3　非常用発電設備

レシプロエンジンの特徴として，急速な電圧確立及び，負荷投入可能であることが特徴の１つである。

例えば，原子力発電所に設置されている非常用ディーゼル発電設備は電圧確立10秒以内，電圧確立後すぐに，40％程度の負荷を投入することが可能である。

災害時に定置式の非常用発電設備がダウンした場合でも電源が確保できるようにボンネットタイプ発電設備をトレーラに搭載した移動式発電設備として使用されている。

### 6.4　防災兼用ガスコジェネレーションシステム

ガスエンジンを使用したコジェネレーションシステム（以下CGS）は，電気と熱を供給する極めて高効率なシステムであることから，エネルギー効率の向上，温暖化対策の推進，エネルギーセキュリティの向上の観点等から，民生用，産業用と多岐にわたり導入されている。

CGSは，これまで主として省エネ機器という位置づけでの導入が多く，必ずしも，停電時の電力供給を意識したものではなかった。東日本大震災後，停電や電力不足が起こる中，分散型・自立型エネルギーシステムとしてのCGSが更に重要性を増すと共に，停電時の防災電力をまかなう非常用発電装置を兼用する防災兼用CGSとして使用される。常時運転されるCGSを非常時にしか運転されない非常用発電機としても使用することで過大な設備導入が不要となる。ただし，非常用発電設備としての基準を満たす必要があることや，CGSの自立運転が可能な負荷には上限・下限があること等，一定の配慮が必要となることには注意が必要である。

## 7．まとめ

地球環境への配慮から，レシプロエンジンの排ガスクリーン化，高熱効率化は必須の技術である。これらのエンジンを用いた発電設備は，その特徴を生かし，我々の生活に必要不可欠な電力供給源として，また非常用電源として活躍が期待される。

一方で，$CO_2$排出量低減のため，バイオ燃料を製造，利用する技術，再生可能エネルギーを利用する発電システムにおいて，自然環境の変化による電力の山谷の補完用として，その用途を広げようとしている。

今後とも，各位のご協力を得て，電力を含むエネルギー供給源としてレシプロエンジンの発展に尽くしていきたい。

## 参考文献

(1)　H.Ogawa 他３名　Improvements in Diesel Combustion with After-Injection SAE Paper 2008-01-2476
(2)　宮下直也，黒木秀雄　自動車用ディーゼルエンジン（平成６年），P47
(3)　IEA 2010エネルギー技術展望　エグゼクティブサーマリー



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

特集：小型／移動用発電設備の現状と開発動向

# ディーゼル発電機関の概要と最新機関の技術紹介

小倉　真一郎[*1]
OGURA　Shinichiro

キーワード：ディーゼル機関，地球環境，新型機関

## 1．はじめに

ダイハツディーゼル㈱が創業してから100年以上が経過し，特に中速ディーゼル機関の基礎が出来上がった昭和30年代から50年以上が経過した現在においても，４サイクルディーゼル機関の基本的な原理，構造は大きく変化していない。しかし機関の信頼性と耐久性，高効率化，最適燃焼によるスモークレス化，メンテナンスの容易化等，性能に関する技術は大きく進歩した。また現在注目されている地球環境に対応するための排気ガスのクリーン化の技術についても，大きく前進している。

ここではディーゼル機関の概要と変遷，弊社の最新開発機関である地球環境に対応した新型ディーゼル機関について紹介する。

## 2．ディーゼル発電機関の概要

内燃機関にはガスタービン，ガソリン機関，ディーゼル機関等がある。ディーゼル機関は自動車用としても近年見直されているように，熱効率の良さ，使用燃料（表１）の多様性，運転コストの低さ，取扱いの容易性等よりエネルギー関連，産業・建機関連，船舶用など多くの分野に採用されている。そして現在もさらに環境に優しいディーゼル機関を目指し，低燃費化，スモークレス化，低NOx化等の開発が進められている。

作動方式は２サイクルと4サイクルがあり，さらに機関の回転速度により，低速，中速，高速に分類している。（表２）

高速機関は非常用発電ユニットに多く採用されており，比較的容量が小さくコンパクトに設計されている。

中速機関は，主に船舶の発電用機関，産業用の常用および非常用発電機関として巾広く採用されている。弊社においても約50 ～ 6700kWm程度までの幅広い容量をカバーしている。低速機関は主に船舶のプロペラ駆動用となり，発電用にはあまり採用されていない。

図１に機関断面図の概要，図２に発電機関（陸用）の外観写真を示す。

表１　使用燃料

| 原動機の種類 | 使用燃料 |
|---|---|
| ガスタービン | 灯油、軽油、Ａ重油 |
| ガソリン機関 | ガソリン |
| ディーゼル機関 | 灯油、軽油、Ａ重油、Ｃ重油<br>原油、バイオ燃料 |

表２　回転数の分類（目安）

| 分類 | 機関回転数 | 平均ピストン速度 |
|---|---|---|
| 高速 | １５００min-1　以上 | １０m/s　以上 |
| 中速 | ５００～１５００min-1 | ７～１０m/S　未満 |
| 低速 | ５００min-1　未満 | ７m/s　未満 |

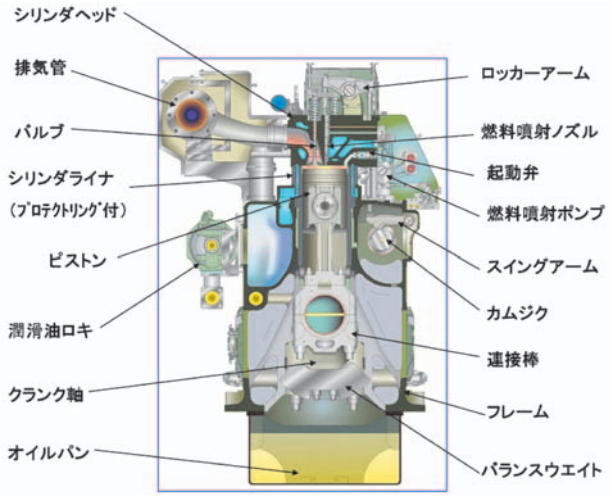



図１　機関断面図

## 3．ダイハツディーゼル機関の変遷

ディーゼル機関の原理および基本的構造自体は，ほとんど変化はないが，過給機の性能向上，機械効率の向上，燃料噴射系を含む燃焼技術の向上，および材料技術の向上等により機関の品質，性能，信頼性は大きく進歩している。その例として弊社において開発，製造，販売された，同一シリンダ径および気筒数のディーゼル機関の性

原稿受付　2011年11月18日
＊1　ダイハツディーゼル㈱　守山事業所　技術第１部
〒524-0035　滋賀県守山市阿村町45番地



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

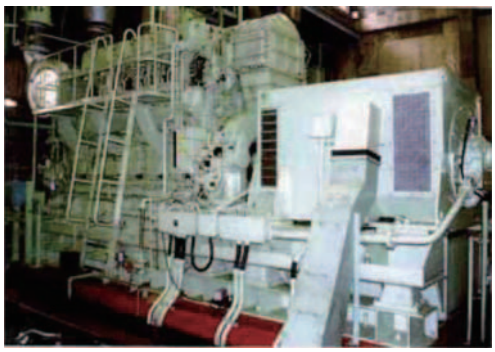


図２　発電機関外観（陸用）

能比較を示す。

1955年に開発された6PS－26型機関と約40年後に開発された6DK－26型機関とを比較すると出力率（正味平均有効圧力×平均ピストン速度）は２倍以上，出力当たり重量は約30％減，燃料消費率は約15％減となっており，高出力化，コンパクト化および性能等について，大きく進歩している。

また次に紹介する新開発のDE機関の燃料消費はさらに３～５％低減している。（表３，図３，図４）

表３　機関主要目

| 機関形式 | | 6PS－26 | 6DS－26 | 6DL－26 | 6DK－26 |
|---|---|---|---|---|---|
| 開発時期 | | 1955 | 1968 | 1983 | 1996 |
| シリンダ数 | | 6 | | | |
| シリンダ径 | mm | 260 | | | |
| ストローク | mm | 320 | 320 | 340 | 380 |
| 機関回転数 | min-1 | 720 | | | |

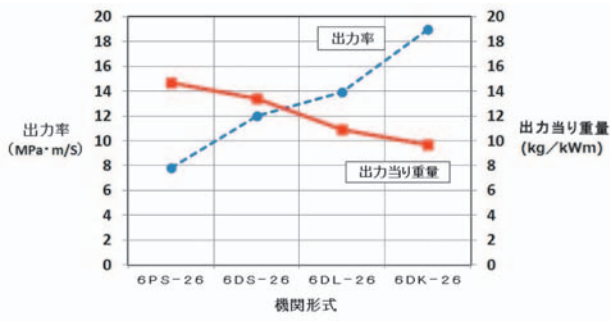



図３　機関出力率と出力当り重量の変遷

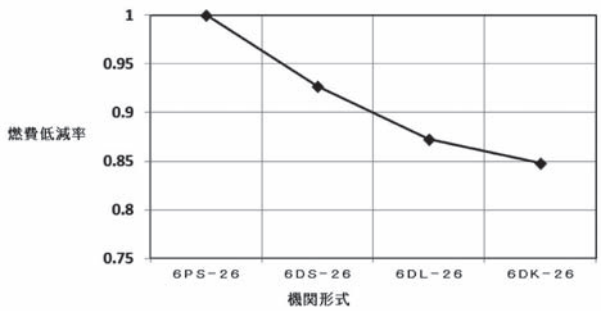



図４　燃料消費率の変遷

## ４．環境対応新型中速ディーゼル機関の技術紹介

現在，世界的に地球環境問題が大きく注目されている。そのため，機関の品質，性能とともに，今後益々厳しくなる環境問題に関して対応できるディーゼル機関が市場のニーズとなっている。それに対応可能な地球に優しいポテンシャルの高い環境対応型ディーゼル機関「6DE－18」ならびに「6DE－23」を開発したので，以下に紹介する。

### 4.1　開発コンセプト

本機関の開発目標として

①環境対応　　②耐久性と信頼性　　③経済性

④安心と安全性　　⑤取り扱い性

の５項目を取り上げ，これらを包括した以下の3項目を開発コンセプトとした。（図５）

図５　開発コンセプト

(1)地球に優しい環境対応

a）排気ガスエミッションの低減

・大気汚染防止法への適合

・低硫黄燃料油への対応（SOx低減）

・$CO_2$低減のための低燃費化とスモークレス対応

b）有害物質の削減と管理

・有害物質を含む機器の採用削減

(2)ロングライフでの耐久性と信頼性の向上

a）運転費用の低減

・部品の信頼性・耐久性の向上と寿命の確保

・適正な潤滑油消費と低燃費の達成

・容易且つ短時間で可能なメンテナンス

b）安定で確実なエンジン始動

・空気の質に影響されない始動システムの採用

c）ロングライフでの潤滑油性能確保

・大型の遠心ロキと自動逆洗ロキの標準採用

(3)安心と安全性の向上

a）完全な防火対策

・高温部の完全防備

・燃料油・潤滑油の飛散防止の徹底

b）外部配管との取合いのシンプル化

・外部との取合い部を機関前端部に集中配置

・ユニット化による作業のシンプル化



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

c）取り扱い容易なエンジンコントローラ
・機関起動停止，保護装置の一体化および機関搭載

### 4.2　機関仕様

表４に6DE－18形機関および，6DE－23形機関の主要目を示す。

表４　6DE－18，23形機関主要目

| エンジン形式 | | 6DE-18 | | 6DE-23 | |
|---|---|---|---|---|---|
| シリンダ径 | mm | 185 | | 230 | |
| ストローク | mm | 280 | | 320 | |
| シリンダ数 | | 6 | | 6 | |
| 回転速度 | min-1 | 720／750 | 900 | 720／750 | 900 |
| 機関出力 | kWm | 400～680 | 440～850 | 800～1,200 | 1,040～1,500 |
| 平均ピストン速度 | m/s | 6.72／7.0 | 8.4 | 7.68／8.0 | 9.6 |
| 正味平均有効圧力 | Mpa | 1.4～2.5 | 1.3～2.5 | 1.7～2.5 | 1.7～2.5 |
| 爆発圧力 | Mpa | 最大20 | | 最大20 | |
| 始動方式 | | 空気直動 | | 空気直動 | |

また図６に6DE－18形機関，図７に6DE－23形機関の外観写真を示す。

図６　6DE－18形機関外観写真（発電機仕様）

図７　6DE－23形機関外観写真（発電機仕様）

### 4.3　機関構造概要

機関の開発，製造，販売，およびサービス機能を有する弊社の長年の技術と販売実績に裏付けられた技術に基づき開発されたDE機関は環境対応に適合すると共に高性能，高信頼性と耐久性を有する機関である。

6DE－18，6DE－23形の両機関で，400 ～ 1500kWmの出力範囲をカバーしていることにより，陸用，舶用の幅広い用途に対応が可能である。

図８に6DE－18形機関の断面図を示す。基本的に6DE－23形機関も同様の構造としている。

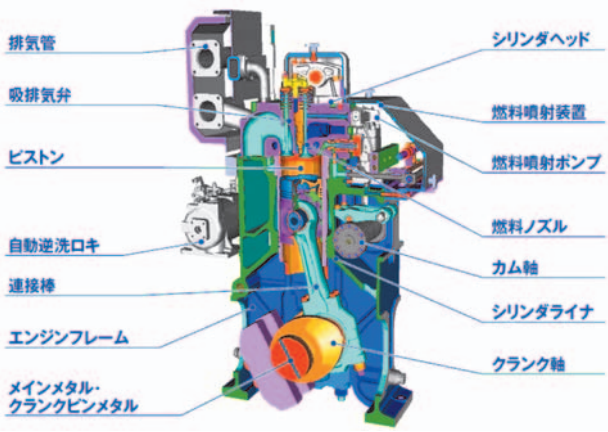



図８　6DE－18形機関断面図

以下に構造概要を述べる。

(1)排気管
・過給効率を高め，過渡応答性に優れる動圧過給方式を採用。フレームに一体化された吸気ダクトと同一側に配置し，機関の取扱い性に配慮（図９）
・安心と安全のため完全防火仕様形カバーを標準装備

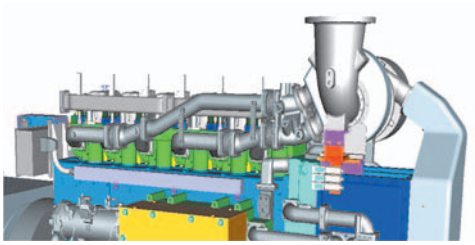


図９　排気管

(2)ピストン
・コンプレッションリング３本，オイルリング１本の合計4本のリング構成（図10）
・ピストンリング溝は耐摩耗性向上のためクロムメッキを施工

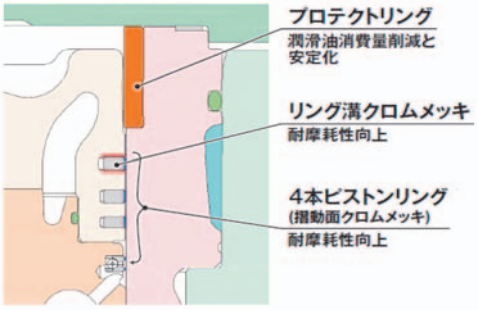



図10　ピストンリング構成

(3)潤滑油ロキ（濾過器）および潤滑油モジュール
・ロングライフでの潤滑油性能確保，およびメンテナンスの容易化のため，自動逆洗式ロキを標準装備（図11）



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

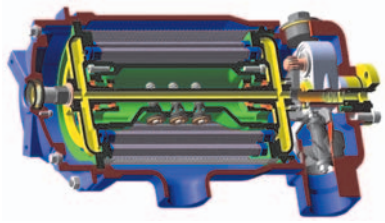


図11　自動逆洗ロキ

・潤滑油システム関連の機器は燃料噴射ポンプ棚と反対側の側面に集中配置。潤滑油冷却器，温調弁，自動逆洗ロキはブロックユニットで連結し，アクセス性および作業性を配慮（図12）

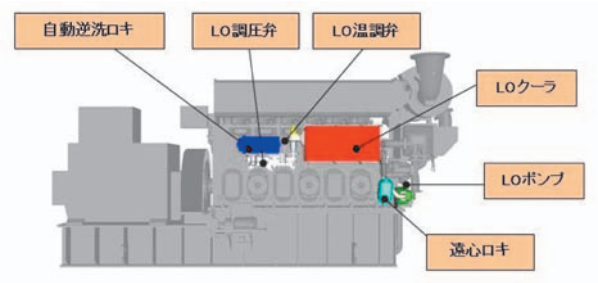



図12　潤滑油モジュール

⑷連接棒

・水平３分割方式の採用（図13）

図13　水平３分割連接棒

⑸燃料噴射ポンプ

・低硫黄燃料対応プランジャの標準採用

⑹シリンダライナ

・DE－18，23両機共，潤滑油消費量低減と安定化のためのプロテクトリングを装着（図14）

図14　プロテクトリング

## 5．DE機関の特徴

### 5.1　地球に優しい環境対応

地球に優しい環境対応機関であるDE機関は，従来機種に比べ，大幅なNOxの削減と燃料消費の低減による$CO_2$の削減を実現した。またSOxを削減するため，低硫黄燃料油の使用が可能な対策を実施している。

以下にその方策について述べる。

⑴排気ガスエミッションの低減

a）NOx，$CO_2$削減

NOx低減対策について具体的には，燃料噴射タイミング，燃料の高圧噴射，燃焼室形状とそれにマッチした燃料ノズル噴孔仕様，吸排気バルブタイミング，高圧力比・高効率過給機の採用等の組み合わせによる機関チューニングで対応している。

NOxと燃料消費との関係はどちらかを減らすと一方が増加するというトレードオフの関係にある。したがってNOxと燃料消費の両方を同時に低減するため，爆発圧力の増大，およびメカロス低減等の燃料消費低減策とNOx低減策を組み合わせ，補完し合うことで両者の削減を達成した。（図15）

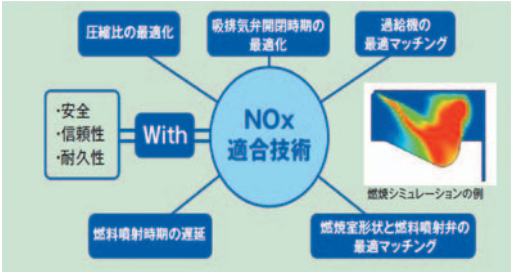



図15　NOx規制適合技術

b）SOx削減

SOx削減のために低硫黄燃料油を使用する場合の問題点のひとつは低硫黄化に伴う燃料自体の潤滑性能の低下である。この問題に対する機関側の対応はプランジャの摩耗対策として表面に摺動性に優れた特殊な表面処理を施している。また粘度低下に伴うプランジャ下部からの燃料漏れによる潤滑油汚損対策としてはプランジャ下部に高圧の潤滑油を注油することで，シールを行っている。

⑵有害物質の削減と管理

DE機関においては地球に優しい環境対応という開発コンセプトから機関用途を問わず，機関に使用される指定有害物質を削減すると同時にそれらの種別，所在とその量を記録として残す管理を先行して実施することにし



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

ている。

### 5.2　ロングライフでの耐久性と信頼性の向上

⑴運転費用の低減

ロングライフでの信頼性と耐久性の向上は運転費用の削減に繋がる。つまり部品の信頼性と耐久性を向上させると共に，低燃費，および低潤滑油消費を長期間にわたり維持すること，メンテナンスに要する時間を削減すること等により，トータルコストの削減を実現した。

部品の信頼性と耐久性を向上させるための具体的な方策として

a）シリンダヘッドの高剛性化と冷却強化，および燃料ノズル廻りの冷却強化

b）燃料噴射ポンププランジャに対する特殊表面処理の採用

等，弊社の長年の経験から蓄積した技術を取り入れ対応している。

また短時間での容易なメンテナンスと締付け精度向上のため，主要部品であるシリンダヘッドボルト，主軸受ボルト，クランクピンボルトについては油圧締めを採用した。（図16）

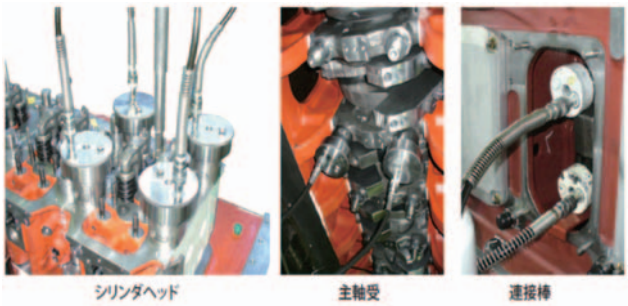



図16　油圧工具の採用

⑵安定で確実なエンジン始動

機関において，確実に始動できることが，大変重要である。DE－18，DE－23機関においては，機関始動方式として，空気の質の影響を受けない空気直動方式（起動弁方式）を採用した。（図17）

この方式はシリンダ内に直接圧縮空気を送り込み機関を始動させるため，空気中の水分等による悪影響もなく，また構造も簡単なため始動の信頼性を向上させることができる。

⑶潤滑油性能の長期維持

潤滑油性状を長期間にわたり適正な状態に保つには潤滑油劣化の原因となる燃焼残渣物を削減することが重要である。その方策として燃焼改善とフィルターの強化を行なった。潤滑油中のスラッジを取り除く大型遠心ロキ，および機関内への異物混入を防ぐロキには日常メンテナンス不要の自動逆洗ロキを標準採用としている。

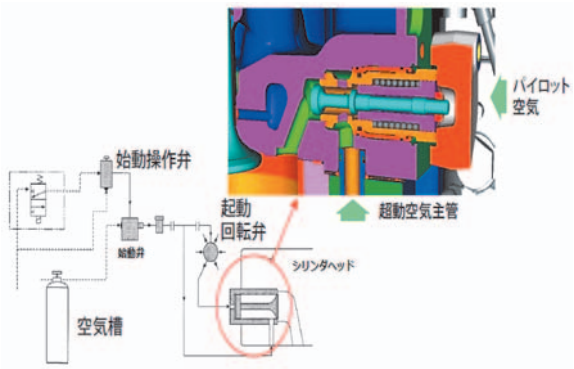



図17　起動弁

### 5.3　安心と安全性の向上

⑴完全な防火対策

機関室の火災は重大事故に繋がる。安心と安全性向上の観点から，火災対策として高温部を完全にカバーすると共に燃料油および，潤滑油の徹底した飛散防止対策を実施した。（図18）（図19）

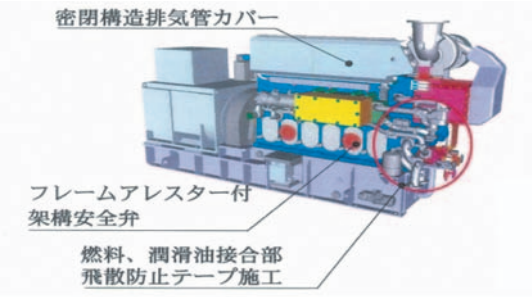



図18　防火対策（排気側）

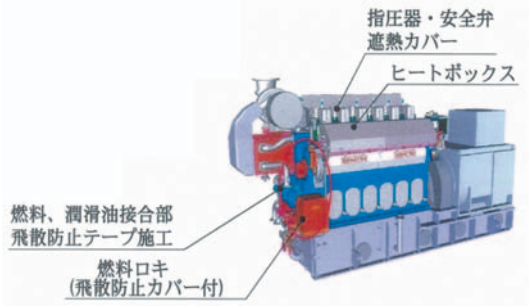



図19　防火対策（燃料噴射ポンプ側）

⑵外部配管との取り合いのシンプル化

機関据え付け時の工事省力化のため，機関配管と外部配管との接続位置を機関前方一箇所に集中させた。また配管を減らし，付属機器をユニット化することでメンテナンスの容易化をはかっている。（図20）



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

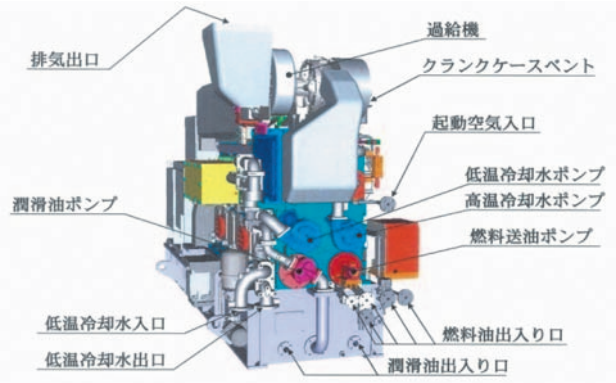



図20　外部配管との取り合い位置

## 7．おわりに

DE機関は，弊社における主力機種であるDK機関での6000台以上の販売実績から得られた技術をベースに「地球に優しい環境対応」，「ロングライフでの耐久性と信頼性の向上」，「安心と安全性の向上」の３項目のコンセプトをもとに開発を行い，商品化を達成した。

DE機関は今後益々厳しくなる環境規制に対応可能であると共に巾広い用途に適応できる機関としている。

今後も巾広いお客様のニーズに適応し，さらに地球環境に優しい機関の開発を進めていく所存である。



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

論説◆解説

特集：小型／移動用発電設備の現状と開発動向

# 自家発電用ガスエンジンの効率向上を目的とした，小型蒸気タービン発電機の開発

林　一尭[*1]
HAYASHI Kazutaka

弓田　孔生[*1]
YUMITA Kosei

白岩　弘行[*1]
SHIRAIWA Hiroyuki

中野　晋[*2]
NAKANO Susumu

キーワード：ガスエンジン，蒸気タービン，分散電源，コンバインドサイクル，ボトミングサイクル，コージェネレーション，ラジアルタービン

## 1．はじめに

エネルギー消費効率の向上と，低炭素社会の実現に向けて，特に産業・民生分野における中期的改善手法として，未利用排熱の利用促進が求められている。自家用発電設備に焦点を当てた場合，未利用排熱の有効利用の例として，ガスエンジンやディーゼルエンジン，ガスタービン等を用いたコージェネレーションシステムがある。これらは，電力に加えて蒸気および温水を回収するシステムであり，昨今の省エネ機運の高まりにより普及が進んできていたが，燃料価格の高騰により2005年以降新規導入数が減少に転じ，やや打ち止めの感があった。しかし，2011年３月11日の東日本大震災後の電力危機により，再度自家用発電設備の需要が高まってきている。

この様に再び価値が見出されてきている自家用発電機であるが，需要家によっては，蒸気や温水を熱源として利用する用途が無い場合もある。この場合，蒸気タービンとのコンバインドサイクルや，有機ランキンサイクル（ORC）による排熱利用が考えられるが，特にガスエンジンやディーゼルエンジンでは排熱回収量が少なく，十分な電力が得られる発電方法が無いのが実情であった。このため，圧力１MPa程度の低圧蒸気を有効利用するための高効率な小型蒸気発電機の開発が期待されている。また，産業プラントや中小規模の廃棄物焼却施設では，利用されずに排出されている蒸気が大量に存在するという調査結果も報告されており，小型蒸気発電機にかかる期待は大きくなっている[(1)]。

法規制の面からも，小型蒸気発電機の導入を推進すべく規制緩和が進められており，2010年には圧力２MPa以下，蒸発量10t/h以下の背圧蒸気タービン発電機用のボイラが電気工作物から外されており，2011年には出力300kW以下の蒸気タービン発電機の一部について，主任技術者の選任免除や工事計画届出書の提出が不要になっている。

当社および㈱日立製作所日立研究所でも，未利用排熱の有効利用を図るべく，出力150kWの小型蒸気タービン発電機を開発した。本稿では，当社で扱うガスエンジンの概要と，そのガスエンジンの発電効率を高める一手段として，その排熱を利用したボトミングサイクル用の小型蒸気タービンの開発状況について紹介する。

## 2．日立ガスエンジン発電装置

はじめに当社で取り扱っているガスエンジン発電装置について示す。当社では，General Electric社 GE Energy部門のイエンバッハ社（GE Energy's Jenbacher gas engine division（以下GEJ社と略す））と2004年にディストリビュータ契約を結び，300kW ～ 2,700kW級ガスエンジンのパッケージングを行い，㈱日立製作所を通して国内に販売している。

GEJ社は，オーストリアのインスブルック市近郊イエンバッハ市に工場を持ち，1957年にガスエンジン初号機を開発して以来ガスエンジン専用メーカとして50年以上の歴史を持ち，すでに世界各国に10,000台以上，12,500MW以上の高性能ガスエンジンを製造販売している実績がある。近年，特に地球規模の環境問題に対する関心が高まるなかで，世界的にその実績，性能，燃料の多様性の要求により生産量の増大が行われている。（日本国内では，すでに約315台が導入され，そのうち当社の納入実績は300 台となっている。）日本国内での都市ガス13Aを燃料とするGEJガスエンジンの機種と概略仕様を表１に示す。

GEJ社ガスエンジンは，ディーゼルエンジンからの転用ではなくガスエンジン専用として開発されており，以下に示す特徴がある。

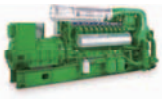
①ガスエンジン専用設計のためコンパクト，軽量，省ス

原稿受付　2011年12月２日
＊１　㈱日立エンジニアリング・アンド・サービス
〒316-0023　日立市東大沼町１-15-１
＊２　㈱日立製作所　日立研究所



Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

表１　GEJ社製ガスエンジンラインアップ（日本標準機種）

| 項目 | 単位 | Type2 | | Type3 | | | | | Type4 | | Type6 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 周波数 | Hz | 50 | 60 | 50 | 50 | 50 | 60 | 60 | 50 | 60 | 50 | 60 |
| エンジン回転速度 | min-1 | 1,500 | 1,800 | 1,500 | 1,500 | 1,500 | 1,200 | 1,200 | 1,500 | 1,200 | 1,500 | 1,500 |
| 発電出力 | kW | 312 | 330 | 550 | 735 | 920 | 585 | 735 | 1,253 | 1,000 | 2,740 | 2,690 |
| 蒸気量 | kg/h | 260 | 295 | 360 | 465 | 705 | 425 | 470 | 635 | 530 | 1,515 | 1,515 |
| 増速ギア | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | →1,800rpm |
| 発電機極数 | - | 4P | 4P | 4P | 4P | 4P | 6P | 6P | 4P | 6P | 4P | 4P |
| 気筒数 | - | 8 | 8 | 12 | 16 | 20 | 16 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| BMEP※ | MPa | 1.56 | 1.40 | 1.56 | 1.56 | 1.56 | 1.56 | 1.56 | 1.70 | 1.70 | 1.80 | 1.80 |
| モジュール外観 | - | | | | | | | |  | | | |

※BMEP: 正味平均有効圧力

ペースである。また，シリンダー内の微小な隙間に未燃焼ガスが溜まりにくい構造の導入や，ミラーサイクル化，高性能ターボチャージャー，最新の燃料制御装置の導入により，環境負荷低減と発電効率向上を達成している。

② ３MWクラスのType６でも，エンジン回転速度を1500min$^{-1}$と高速にすることが可能で，低速のガスエンジンに比べ軽量，省スペースで高出力を求める顧客のニーズに対応可能である。

③予混合希薄燃焼方式を採用し，窒素酸化物の発生を抑制している。NOx排出濃度は，200ppmおよび320ppm（０%$O_2$濃度，ドライ）の２種類を標準機種として備えている。

④コンパクトな燃焼室の設計により，スパークプラグのみでの点火を可能にする単室燃焼システムを採用しており，点火のための補助燃料が不要である。

図１に，Type４の機種を対象としたコージェネレーションパッケージの外観を，また，図２にその系統図を示す。コージェネレーションパッケージには，エンジン，発電機，潤滑油タンク，発電機盤，遮断器盤，燃料制御を行うTecJet™を備えた燃料配管およびエンジンを制御するモジュール盤等が収納されている。TecJet™は流量計一体型ガス調節弁機能を持つ燃料調節弁で，空燃比制御の応答時間をより短くし，空燃比設定をより正確にし，発熱量の変化に対してより迅速に対応することができる。この燃料調節弁と希薄予混合燃焼の採用により，燃料は，天然ガスだけでなく，メタンを主成分とした低

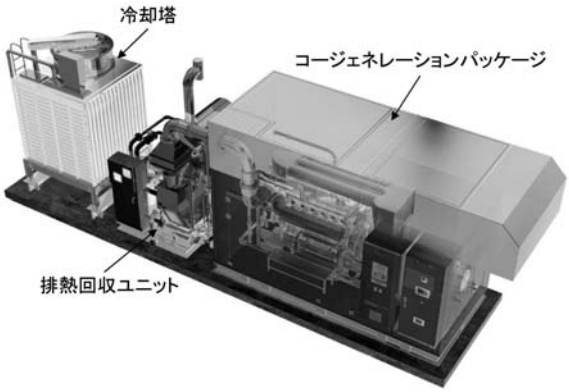



図１　コージェネレーションパッケージの外観
（GEJ社製Type４ガスエンジンの例）

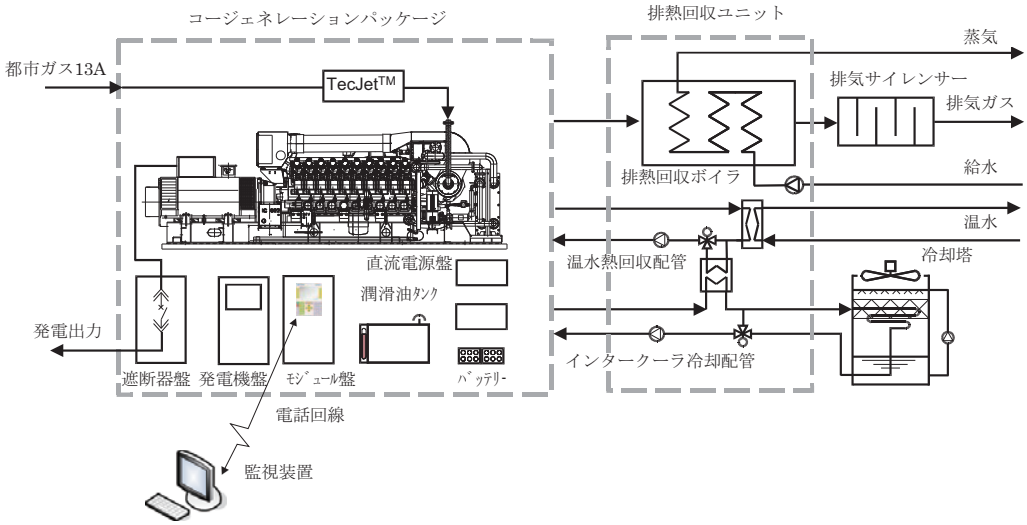



図２　コージェネレーションシステムの系統図（GEJ社製Type４ガスエンジンの例）



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

発熱量のバイオガスやごみ埋立地発生ガスのほか，下水処理場発生ガス，炭鉱発生ガスおよび水素，一酸化炭素を含む特殊ガス等，天然ガス以外の幅広い分野のガスに対応が可能である。

エンジンの容積効率向上，ノッキング防止のため，ターボチャージャーにより昇圧した予混合気は２段のインタークーラにて冷却後エンジン燃焼室に供給される。前段のインタークーラでは温水による熱回収が行われ，後段のインタークーラはエンジン入口の予混合気温度を調節する。インタークーラで回収された熱は，ジャケット水の温水回収，オイルクーラーからの温水回収，および排ガスからの蒸気発生を合わせ排熱として利用される。コージェネレーションシステムでは，電力に加えて，蒸気および温水が容易に回収でき，総合効率は82.5％を達成している。

なお，通信回線を利用した監視システムにより，エンジンの運転状態を遠隔で監視し，緊急時の迅速な対応が可能である。

これまでは，排熱，排ガスの利用としては蒸気及び温水のコージェネレーションが一般的であったが，欧州では排ガスからの二酸化炭素を温室に供給して植物の発育促進に適用している例もある。しかし，より多くの電力を必要としている需要家に対しては，排熱からの発電を試みる必要があり，ガスエンジンのボトミングサイクルとしての小型蒸気タービンを開発することになった。

## ３．小型蒸気タービンの種類

現在市場に投入されている小型蒸気タービンの形式としては，図３に示すように蒸気の利用方法の違いによって，背圧タービンと復水タービンがある。背圧タービンは，タービンの排出蒸気を工場用蒸気等に利用するものである。１MPa程度以下の低圧蒸気を工場プロセス等で使用する場合でも，ボイラや蒸気ヘッダー圧力と使用圧力との間に開きがあることが多く，この圧力差を利用して背圧タービンで発電する需要家が近年増加している。一方の復水タービンは，タービンの排出蒸気を復水器で冷却して凝縮させることで，蒸気をタービン内で低圧まで膨張させるシステムである。タービン排出蒸気を工場プロセスで使用することはできないが，断熱熱落差が大きくなるために発電出力は格段に大きくなる。この方式も近年増加しているが，高効率な発電システムが無いのが実情であった。

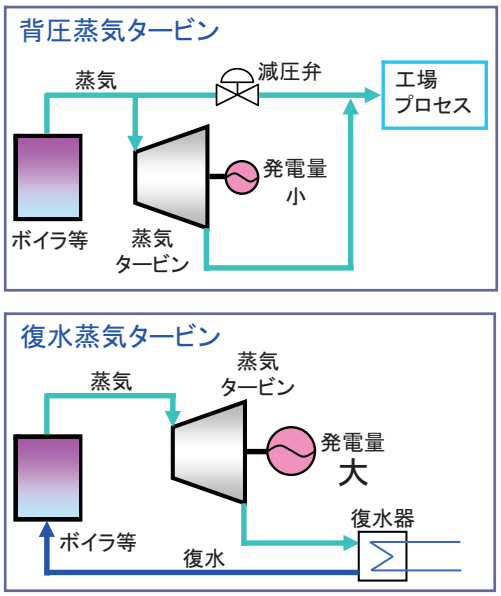



図３　蒸気の利用方法による，タービンの分類

## ４．小型蒸気タービンプロト機の概要と特長

当社では，供給される蒸気に対してなるべく多くの発電出力を得ることを目標とし，復水タービンを適用した小型蒸気タービンシステムプロト機（以下：プロト機と称す）を開発した。主な特長を以下に示す。

⑴小型で高効率なタービン形式であるラジアルタービンを採用し，復水方式の採用と真空ポンプの使用により断熱熱落差を増加させたことで，大きな発電出力を得ることができた。

⑵水潤滑軸受の採用により潤滑油が不要となり，環境負荷低減を実現できた。また，軸受損失を低減できた。

⑶システムのパッケージ化により，設備導入を容易にした。

既存の小型蒸気タービンと，プロト機の送電端出力（計画値）の比較を，図４に示す。プロト機は単位蒸気量あたりの出力が大きく導入メリットが大きいことに加え，ボイラ，冷却塔等の附帯設備を小型化できる。

プロト機を利用した発電システムの例を図５に示す。入口蒸気条件は，定格時で，圧力：0.88MPa，温度：174℃，流量：1.91t/hである。この少量低圧の蒸気から，蒸気タービンでの発電により，系統端出力：150kWを得られる。発電に使用した蒸気は，復水器で凝縮され，ドレン水として再度排熱回収ボイラ等に供給される。

プロト機本体の系統図を図６に示す。システムは，電気，蒸気，循環水，空気，冷却水の５系統から構成されている。

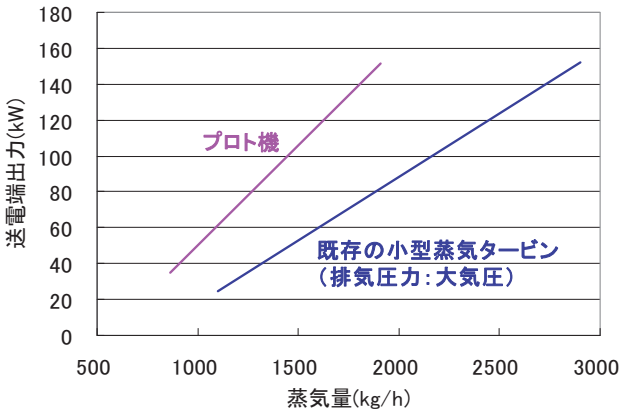



図４　プロト機と既存の小型蒸気タービンの送電端出力比較



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

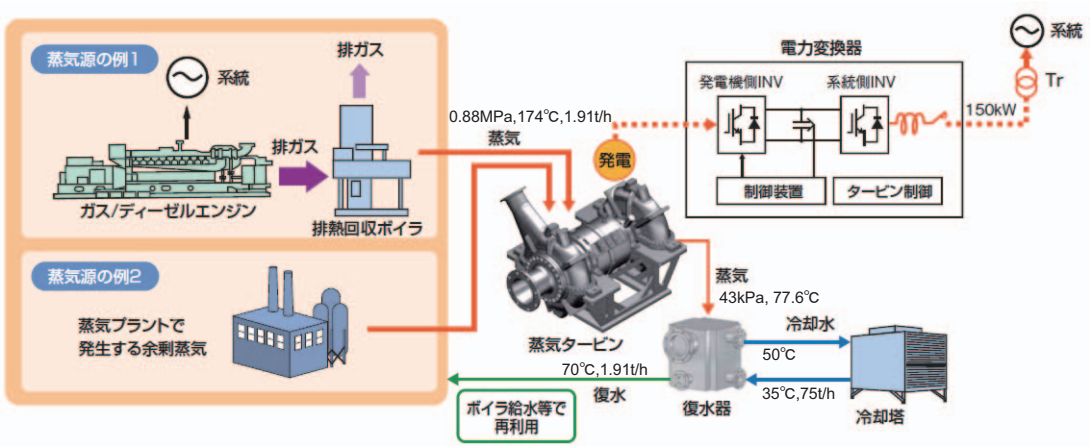



図５　プロト機を利用した発電システムの例

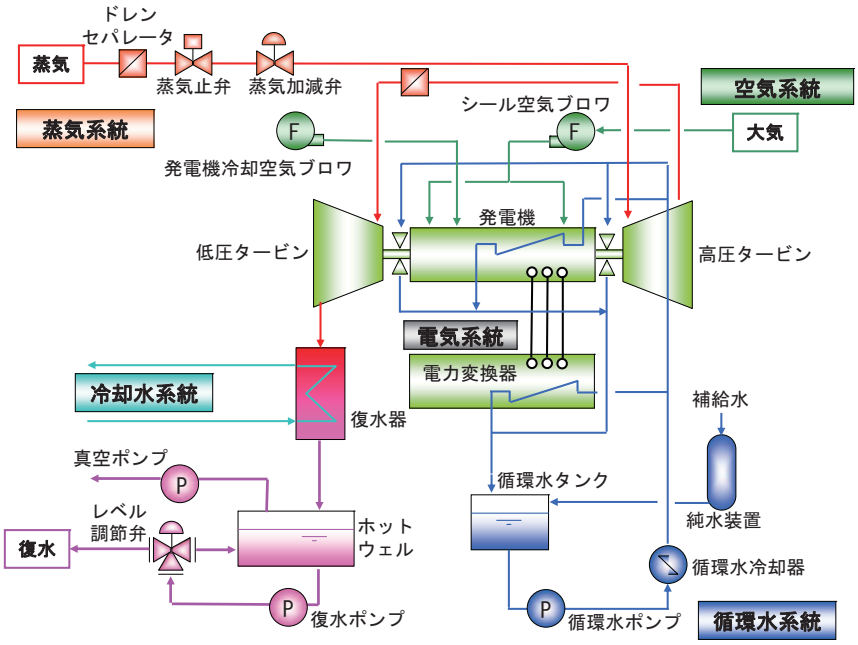



図６　プロト機本体系統図

１）電気系統

電気系統は，系統電源，双方向電力変換器[2]（図７），及び発電機を繋ぐラインから成る。双方向電力変換器の双方向とは，系統側から発電機側に電気を流す場合と，逆に発電機側から系統側に電気を流す場合の２方向の電力制御が可能という意味である。起動時は系統側から電力を引き込み，インバータ制御により発電機ロータをモータとして駆動する。次に，蒸気が投入され，タービンによる仕事が軸受損失，風損等のロータの損失を上回れば発電となり，発生電力を電力変換器で商用周波数に変換して系統側に供給する。この様に双方向電力変換器を利用することで，起動・停止時の運転制御を簡素化できるだけでなく，安定した高品位な電力を系統に供給できる。

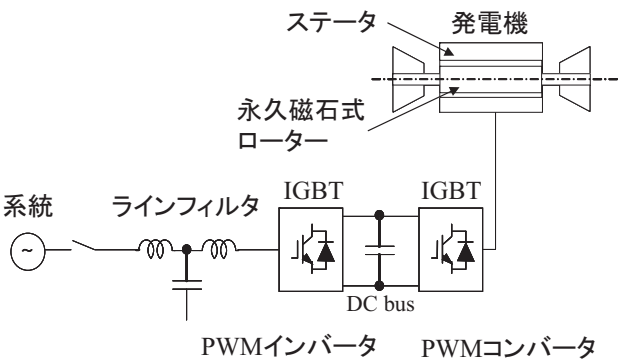



図７　双方向電力変換器システム

２）蒸気系統

0.78MPaの飽和蒸気を，高圧タービンと低圧タービンの２段で膨張させる。復水器での蒸気の凝縮に加え，真空ポンプで比凝縮性ガスを排出することで，低圧タービン出口で蒸気を43kPa（負圧）まで膨張させ，熱落差を増加させて高出力を得ている。また，飽和蒸気であるため，高圧・低圧タービン手前にはドレンセパレータを設置している。



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

3）循環水系統

循環水系統は，双方向電力変換器と発電機ステータ用の冷却水と，水潤滑軸受[3]（図８）の潤滑水を供給するラインである。循環水ポンプによって送水された水は循環水冷却器によって除熱され，電力変換器，発電機，及び水潤滑軸受に供給され，再び循環水タンクに戻る。

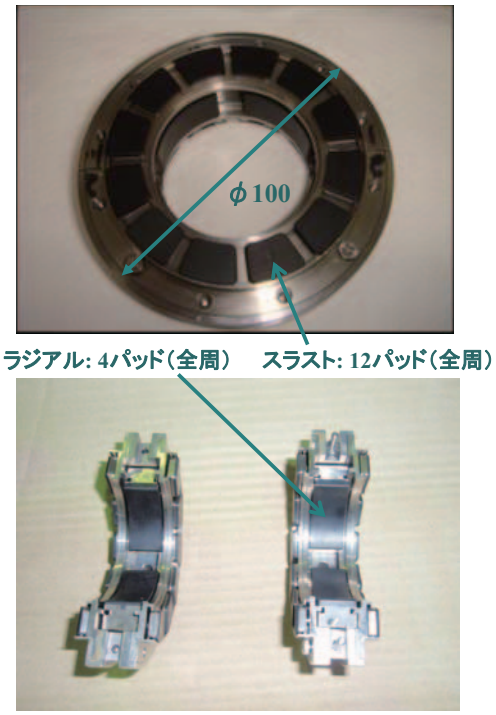



図８　水潤滑軸受

4）空気系統

空気系統は，発電機ロータの冷却空気と，ラビリンスシール部のシール空気を供給するラインである。

5）冷却水系統

冷却水系統は，復水器での蒸気冷却と，循環水冷却を行うラインである。既設プラント等から冷却水の供給が不可能な場合には，空冷式の復水器やラジエータを使用することもできる。

## 5．タービン本体の基本設計

タービンシステムの基本設計として，高圧段と低圧段の負荷配分，各段の圧力比，及び各段のタービン断熱効率と出力の検討が必要であった。検討方法は，参考文献(4)に記載されている基礎的な方法で実施した[5]。すなわち，相似則を用いて過去の公開文献からの効率マップを参照に，効率が高くなる条件を選定した。また，本開発のタービンロータは２段タービンであるが，ロータの構造はできるだけ簡易な構造を目指した。つまり，両翼車に生ずる軸方向力を互いに打ち消すような圧力比とし，バランスピストンやバランスディスクの設置を必要としない軸構造とした。

タービン本体の基本仕様を表２に示す。高圧段の圧力比：3.5，低圧段の圧力比：4.6とすることにより，タービン起動から定格出力到達までのスラスト力を，300N以下に抑える設計となっている。また，回転数：51,000rpmの高速回転を実現することで，タービンの小型化を図っている。このためには，高速対応の電力変換器，発電機，軸受の開発が必要であったが，㈱日立製作所で開発していたマイクロガスタービンの主要技術[2],[6]を転用することにより，短期間でこれを実現することができた。

表２　蒸気タービン本体の基本仕様

| No. | 項目 | 単位 | 高圧側 | 低圧側 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 定格出力 | kW | 150 | |
| 2 | 回転数 | rpm | 51,000 | |
| 3 | 型式 | − | 復水型2段ラジアルタービン | |
| 4 | 入口蒸気圧力 | MPa | 0.78 | 0.2 |
| 5 | 入口蒸気温度 | ℃ | 169.5 | 120.3 |
| 6 | 流量 | t/h | 1.91 | 1.8 |
| 7 | 圧力比 | − | 3.5 | 4.6 |
| 8 | 直径 | mm | 154 | 184 |
| 9 | 断熱効率 | % | 80.7 | 81 |

図９及び図10に，高圧及び低圧タービン翼車の３次元流れ解析結果と写真を示す。いずれも定格回転数での設計条件における結果である。高圧・低圧タービンともスムーズな流れが得られている。

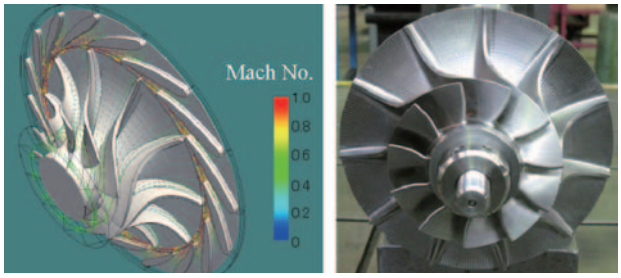



図９　高圧タービン（左：マッハ数分布，右：写真）

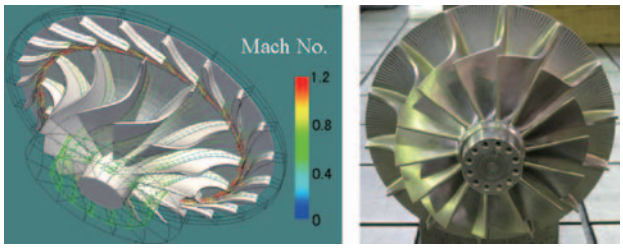



図10　低圧タービン（左：マッハ数分布，右：写真）

## 6．プロト機の概要

図11に，プロト機ユニットの外観を示す。ユニットは２階で構成され，１階部分に循環水系の機器とホットウェルや真空ポンプ等の排気系機器を設置し，２階部分にタービン本体と復水器が設置されている。電力変換器は別置とした。ユニット寸法は，長さ：3.0m，幅：1.3m，高さ：3.3mである。復水器・ドレンセパレータ等の機



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

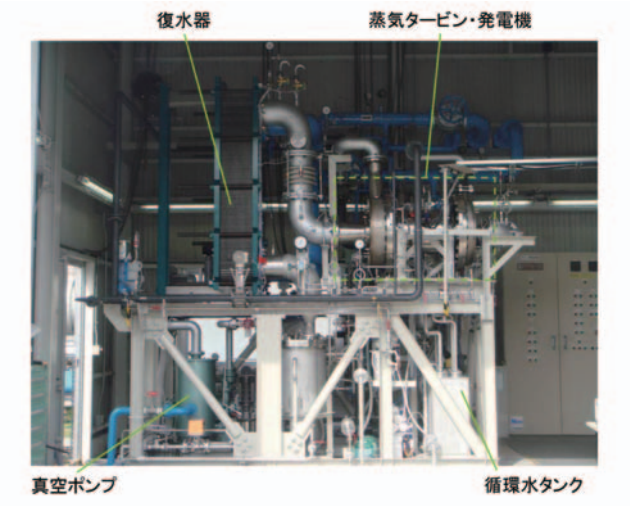



図11　プロト機外観写真

器を市販品で揃えたことが，ユニット寸法に大きく影響している。

## 7．負荷試験結果

プロト機の負荷試験結果[7]の一例を，図12に示す。図は，発電機端出力が150kW到達後，８時間連続運転を実施した結果である。供給蒸気は高圧タービン入口で蒸気圧700kPa，低圧タービン入口で180kPaであった。高圧及び低圧とも入口圧は設計圧より低く，発電機端出力に対してはさらに増加できる裕度を有している。本試験結果では，発電機端において150kWを発電し，電力変換器系統側で143kWを得ている。タービンシステムの補機電力は約８kWを要すため，補機電力を差し引いたタービンシステムの発電量は135kWになる。双方向電力変換器の変換効率は平均96.7%であり，設計値である95%より高い値を得た。また，発電機ロータにかかるスラスト力は，150kW運転時で200N以下，最大でも約300N[8]であり，設計条件を満足している。

## 8．量産機開発

プロト機の試験結果により，性能確認ができたことを受け，パッケージの小型化とコスト低減を目標として量産機設計を行った。図13に量産機パッケージの設計結果を3Dモデル化したものを示す。蒸気タービン本体ケーシングは，鋳物化して量産時のコスト低減を図ることとし，さらに蒸気取合い位置を変更することで，パッケージ全体の寸法低減に貢献している。特に復水器はろう付けタイプのプレート式熱交換器を使用することで，大幅に寸法低減している。

また，プロト機の試験結果を受けて，真空ポンプの出力低減やタンク寸法低減を図り，装置全体の寸法をプロト機の45%に低減している。また質量はプロト機の72%となる。この小型化により，量産機パッケージは12フィートコンテナに収まるサイズとなり，輸送が簡単になる。

量産機用の蒸気タービン本体ケーシングおよび真空ポンプについては，現在製作・手配を進めており，近く運転試験を行う予定である。

## 9．ガスエンジンシステムへの適用

GEJ社製ガスエンジンと当社で開発中の小型蒸気タービン以下：当機と称す）のボトミングサイクルを考えた場合，例としてType３エンジン３台と当機１台の組合せ（図14）や，Type６エンジン１台と当機１台の組合せ（図15）等が考えられる。各々の場合の発電出力と効率の増加を表３に示す。Type３の場合は，当機導入により発電量は150kW増加し，発電効率は40.2％から42.4%となり2.2ポイント増加する。Type６の場合は，当機は部分負荷運転となるものの発電量は111kW増加し，発電効率は43.4%から45.2%となり1.8ポイント増加する。

また，GEJ社のガスエンジンの特長の１つとして，バイオ燃料を利用できることから，バイオ燃料を使ってガスエンジンで発電し，その排熱を利用して当機で発電すれば，バイオ燃料生成に必要な電力を当機で補う事もできるので，環境負荷低減と効率性の両方を兼ね備えたシステムの構築も可能となる。

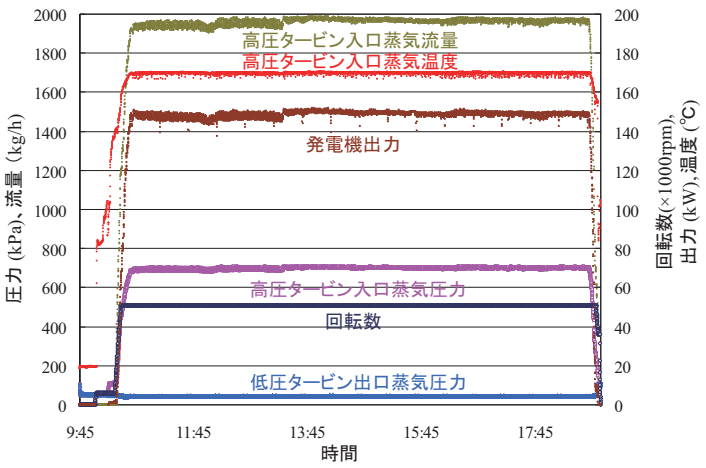



図12　プロト機負荷試験結果（８時間連続試験）



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

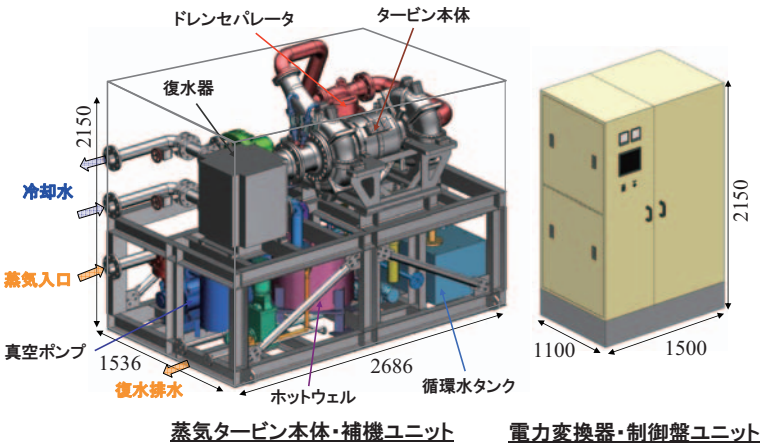



図13　量産機パッケージ

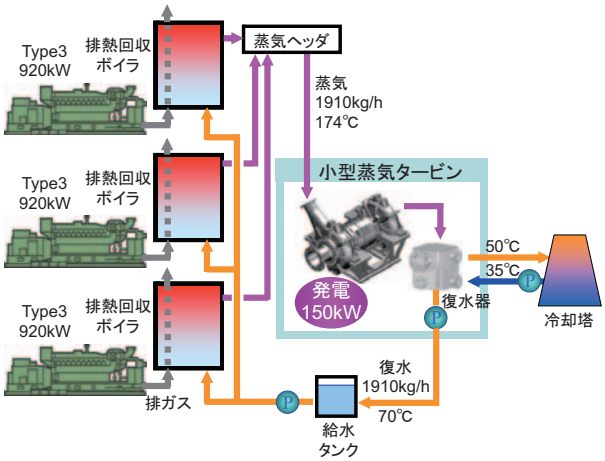



図14　GEJ社製ガスエンジン（Type 3）と当社製小型蒸気タービンのボトミングサイクルの例

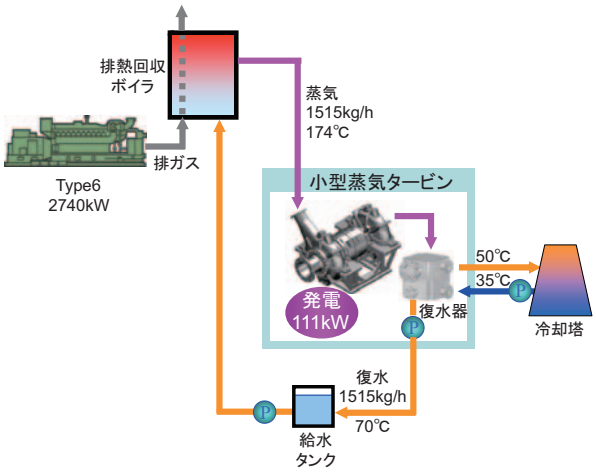



図15　GEJ社製ガスエンジン（Type 6）と当社製小型蒸気タービンのボトミングサイクルの例

表3　当社製小型蒸気タービン導入効果の例

| ガスエンジン型式 | ガスエンジンのみ | | ガスエンジン+小型蒸気タービン | |
|---|---|---|---|---|
| | 発電量 | 発電効率 | 発電量 | 発電効率 |
| Type3(3台) | 2,760kW | 40.2% | 2,910kW | 42.4% |
| Type6(1台) | 2,740kW | 43.4% | 2,851kW | 45.2% |

## 10. おわりに

これまで利用されていなかった少量低圧の未利用排熱や蒸気を活用するために，小型蒸気発電機の導入が期待されていることから，当社で推進している小型蒸気タービンプロト機の開発状況について述べた。東日本大震災により，ガスエンジン等の自家発電設備の必要性が見直されてはいるが，低炭素化が必要な状況は変わる訳ではなく，国全体として，また地球規模としてもエネルギーの有効利用を促進していくことは今後益々重要になってくると考えられる。当機がその一助となることを期待し，今後さらに開発を推進していきたい。

## 参考文献

(1) 蓮池，フレキシブルタービンシステムの研究開発，季報エネルギー総合工学，vol.27 No. 3，(2004)，pp76-86
(2) Nakano, S. et al., Development of a 150 kW microturbine system which applies the humid air turbine cycle, ASME Turbo Expo, (2007-6), GT-2007-28192
(3) Nakano, S. et al., An advanced microturbine system with water-lubricated bearings, Int. J. Rotating Machinery, (2009) ,Article ID 718107
(4) Balje, O. E., Turbomachines – A guide to design, selection, and theory, (1981), John Wiley & Sons, Inc., New York
(5) Nakano, S. et al., A 150 kW radial inflow steam turbine system for the bottoming cycle of reciprocating engines, ASME Turbo Expo, (2010-6), GT-2010-23231
(6) Nakano, S. et al., A study on thrust of radial turbines that have a permanent magnet generator rotor in a common shaft, Proc. Int. Gas Turbine Conf., (2011-11), IGTC2011-0170
(7) Hayashi, K. et al., 150 kW class two-stage radial inflow condensing steam turbine system, ASME Turbo Expo, (2011-6), GT-2011-46192
(8) 中野，他4名，2段復水ラジアル蒸気タービンの開発，日本ガスタービン学会誌，Vol.39 No. 6，(2011-11)，pp441-448



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

論説◆解説

特集：小型／移動用発電設備の現状と開発動向

# 天然ガスコージェネレーションと運用技術について

八代　和久*1
YASHIRO Kazuhisa

北浦　州雄*2
KITAURA Kunio

佐藤　浩*3
SATO Hiroshi

国分　晋裕*3
KOKUBU Kunihiro

キーワード：コージェネレーション，ガスエンジン，停電対応，BCP（Business Continuity Plan），ユーザー

## 1．はじめに

2011年３月11日，マグニチュード9.0というわが国の観測史上最大の大地震が発生し，それに伴う大津波は東北地方を中心に甚大な被害をもたらした。加えて福島第一原子力発電所の事故は日本全体に大きな影響を与えた。事故の終息が見えない中で，日々の生活から経済活動に至るまで，先行き不透明な状況が続いている。

当社では，数十kWのガスエンジン・マイクロタービンから10MW弱のガスエンジン・ガスタービンのコージェネレーションまで，関東地方を中心に北海道から九州まで，原動機330台，発電用容量442MWのコージェネレーションの設計，建設，試運転ならびにメンテナンスを行っている。東日本大震災によって，当社の事業エリアでは，特に北関東において工場等が大きな被害を受けた。商用電力と連系した運転のみを想定したコージェネレーションでは，地震に伴い発生した停電により，商用電力が復旧するまで運転ができなかった。一方，停電にも対応できるコージェネレーションの価値が大きく認識された。非常用発電設備の多くは，石油を燃料としているが，震災直後は石油燃料の入手が困難になったこともあり，都市ガスでも運転できる非常用発電設備の要望が高まっている。

その後に実施された計画停電では，商用電力と連系した運転のみを想定していたコージェネレーションの対応に追われた。具体的には停電時にコージェネレーションが停止しないようにする方法や，停電後の再起動を手動で行えるようにする方法などを検討し，BCP（Business Continuity Plan）対応としてお客さまのご要望に合わせたエンジニアリング提案を実施した。通常，コージェネレーションの排熱が利用できる熱負荷を考慮すると，電力需要の1/3程度をまかなう容量のコージェネレーションを設置することが一般的であることから，BCP対応においては，停電時に「負荷を選択する」ことがポイントとなる。

これまでコージェネレーションは，$CO_2$削減や省エネルギーを目指して，コスト削減すなわち経済性の追求を最優先に取り組んできた。しかし，震災以降は効率やコストを多少犠牲にしても，停電など非常時のセキュリティを高めたいというお客さまのご要望が増加してきた。停電時でも稼働するコージェネレーションは従来からあったが，提案先は病院やデータセンターなど限られた業種が中心であった。電力不足の長期化が懸念される中，工場やビル等における電源として，コージェネレーションの新たな展開が期待される。

コージェネレーションに対するニーズが高まる中，本稿では，停電対応のコージェネレーション導入事例ならびに当社の運用経験に基づくユーザー技術・設計等について紹介する。

## 2．停電対応コージェネレーションシステム導入事例

### 2.1　森永乳業株式会社東京多摩工場様の紹介

森永乳業様の多摩サイト（東京都東大和市）は，1966年に操業が開始された同社の主力工場である。４万坪以上の広大な敷地で，牛乳や乳飲料，ジュース，ヨーグルト，粉ミルク，クリープなどを生産する。同社は全国で約40以上の生産拠点を持つが，多摩サイトは最大の生産拠点であり，同社の年間生産量の1/4を占める。

この拠点のエネルギー供給の要となっているのが２基のガスコージェネレーションである。4,100kWのガスタービンと，6,030kWのガスエンジンの２つのガスコージェネレーションが稼働し，発電した電力と排熱から回収された蒸気の供給を行っている。

### 2.2　コージェネレーション導入の経緯

もともと同工場には，設立時から粉ミルクなどを作る

原稿受付　2011年12月２日
＊１　㈱エネルギーアドバンス　ソリューション企画部
〒105-8527　港区海岸１－５－20-21F
＊２　㈱エネルギーアドバンス　産業エネルギーサービス部
＊３　㈱エネルギーアドバンス　カスタマー技術部



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

際に牛乳を乾燥させるドライヤー設備があり，熱源として大量の蒸気を必要としていた。そのため設立翌年の1967年には背圧スチームタービン式の自家発電設備を導入し，蒸気を利用しながら発電をしていた。これが長年利用して更新時期を迎えていたのに加えて，生産量増加に伴う電力負荷増加に対応するためより大容量の発電を行えるようにという目的で，1996年にガスタービンコージェネレーションを導入した。

コージェネレーションの排熱はドライヤー設備への蒸気供給の他，牛乳製造プロセスでの殺菌や，生産ラインの洗浄に使う高温水の製造などに利用。さらに1998年にヨーグルト製造設備を増設した際，アンモニア吸収式冷凍機を設置し，これにより排熱からマイナス10度の冷熱を発生させ，製品の冷蔵・冷却も行えるようになった。

その後，2006年にガスエンジンコージェネレーションをエネルギーサービスにより追加で導入。補助金の適用を受けたほか，エネルギーサービスのスキームを用いることにより，イニシャルコストをかけずに，生産量の増加に伴う電力需要の高まりへの対応と，電源セキュリティの向上を目指した。

特に電源セキュリティの向上については，2003年に柏崎原発問題で電力不足が懸念されたのを契機に，電力会社からの送電が停止したらどうするか，改めて社内で検討した。既存のガスタービンコージェネレーションは起動電力がないと立ち上げられない仕様であり，停電したら自家発電が行えず，製造を継続することができない状態になりかねない。停電時も最低限の工場機能を維持可能にするために，自立運転仕様のガスエンジンコージェネレーションの導入を決定した。

現在，蒸気の利用をより効率的に行えるガスタービンをベースとして毎日24時間連続運転を行っている。発電効率が高く停止・立ち上げが容易なガスエンジンは８時から22時まで運転し，電力ピークカットに役立てている。また，２つのガスコージェネレーションを導入したことにより，構内の電力をまかなうだけでなく，外部への電力販売も可能になった。同工場で年間に使用する電力量のうち80％程度をガスコージェネレーションで発電し，昼間は発電量の15％程度を外部に販売している。もちろん蒸気の有効活用による$CO_2$削減効果も大きい。同工場は省エネ効果などにより，2011年に東京都から「優良特定地球温暖化対策事業所」に設定された。

### 2.3　コージェネレーションの自立運転

2011年３月11日の東日本大震災に際しては，ガスコージェネレーションを導入していたことが大きな支えになった。地震そのものによる被害は，製造設備の軽微な損傷程度のものだったが，翌週から始まった計画停電に対応できるかは深刻な問題であった。しかし，自立運転が可能なガスエンジンコージェネレーションにより，工場内の約70％の電力需要に対して計画停電時も電力を供給できたため，最小限の生産を継続することができた。

同社の製品の多くは大量に作り置きできず，日々，求められる量を安定的に供給しなくてはならない。とりわけこの多摩サイトは育児用粉乳をはじめとする日々の生活に必要な食品を製造しており，工場が停止すると食料不足の危機感を助長することにもなりかねない。同社ご担当者様の「社会的責任を果たすという意味でも，ガスコージェネレーションを導入したのは正解だった。」との言葉は，エネルギーサービスを提供する企業として，大変うれしく感じている。震災後にはガスタービンコージェネレーションについても自立運転を可能とする対策工事を実施し，現在では非常時にもほぼ100％の電力供給をバックアップできる体制になっている。

一方で，震災以降，節電が社会的課題になる中，多摩サイトでガスコージェネレーションによる自家発電比率を高めていたことが同社グループ全体の節電対策に大きく貢献している点も見逃せない。

震災後の節電対策として，電気事業法27条に基づく15％の電力使用制限が発令された。東京電力管内にある事業所での「共同使用制限」が認められたため，多摩サイトにコージェネレーションを持つことで，全体の調整幅に余裕を持つことができた点について，同社から評価をいただいている。

同社ではすでに主要工場のほとんどでガスコージェネ

図１　1998年に増設されたヨーグルト製造棟

図２　ガスエンジンコージェネレーション6,030kW



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

レーションを導入済みだが，小規模な生産拠点も含めてさらに整備を進めていく方針とのことである。“生活必需品を安定供給する”という社会的使命を果たしていく上で，ガスコージェネレーションの役割はますます大きなものになっていくものと思われる。

## 3．運用経験に基づくユーザー技術，設計例並びに運用技術について

### 3.1　小型ガスタービンのユーザー技術

エネルギー消費に占める電力の割合が高いお客さまではガスエンジンコージェネレーションが採用され，電力料金の高い平日日中のみの運用が多い。一方，大量に蒸気を使用する工場などのお客様では，排気ガス温度が高くその流量が多いガスタービンコージェネレーションが選択され，連続運用のユーザーが多い。ガスタービンコージェネレーションのトラブルによる急な計画外停止は，電力会社からの自家発補給電力費用のみならず，蒸気供給停止によってお客様が生産する製品の不良や設備トラブルなどを引き起こす。ユーザーにとって，急な重故障停止の回避（信頼性）は最重要項目である。しかしユーザーにとってコージェネレーションの導入目的である経済性と環境性が損なわれれば，コージェネレーションはユーザーに選択されなくなってしまう。経済性，環境性，信頼性を高めるユーザーとメーカーの活動の具体例を以下に紹介する。

### 3.2　小型ガスタービンのユーザー技術の具体例

＜フィルタ技術＞

東京ガスグループでは，他者に先駆けて，ガスタービンに入る空気の流路には，プレフィルタ，中性能フィルタ，高性能（HEPA）フィルタの３種類のフィルタを設置することを標準としている[1]。圧縮機の汚れによる性能低下を防ぎ，発電出力，効率の低下を回避できるとともに，圧縮機洗浄と圧縮機再コーティングなどのメンテナンス間隔を延長している。表１に標準的なフィルタ構成を示す。

表１　ガスタービン吸気フィルタの構成

| フィルタ | 捕集効率 |
|---|---|
| プレフィルタ | 95%以上（重量法） |
| 中性能フィルタ | 92%（比色法） |
| 高性能フィルタ | 99.97%以上（@0.3μm） |

小型ガスタービンでは開放型の発電機が使用される。発電機を冷却する空気は外部から取り入れられるが，その空気中に異物が入っていると，異物が発電機内部に付着して絶縁低下などの悪影響を与える。ガスタービンコージェネレーション設置にあたっては周囲環境を調査し，必要に応じて大気分析などを行っているが，設置後に周囲環境が変わることもある。発電機冷却やパッケージ換気用の空気の流路にはフィルタではなくデミスターはが取付けられている例が一般的である。

ある製糖工場で，ガスタービンコージェネレーション設置時の大気分析の結果からは特殊な対応は必要ないと判断したが，運転開始から８年で発電機の絶縁性能が大きく低下した。約２年使用したそれぞれの吸気フィルタで捕集された物質の分析とフィルタ表面の走査型電子顕微鏡による観察をおこなった。その結果，捕集物は数μmの粉体が凝集したもので，その98%以上がプレフィルタで捕集されていることが判明した。プレフィルタと同じフィルタを既存の発電機冷却空気流路に設置することは困難であったため，比色法40%と55%のフィルタを組合せて流路の上流に設置したところ，その後の発電機の絶縁性能は低下していない。

東京湾岸に設置した７MW級ガスタービンコージェネレーションの発電機冷却やパッケージ換気の空気流路には，比色法65%以上のフィルタを設置した。運転開始から３年経過したが，毎年の点検で明らかにパッケージ内部の汚れが少ないことが確認されている。今後，発電機の絶縁性能劣化防止への効果を検証していく。

＜潤滑油回収＞

ガスエンジンなどレシプロ原動機と比較するとガスタービンの潤滑油の消費量は少ないが，合成油など高価な潤滑油を使用する機種もある。実際の消費量は，メーカーの許容する値の20%以下であることが多いが，個体差が大きく，許容値を消費する場合には経済性への影響が無視できない。消費される潤滑油の多くは，圧縮機から抽気された空気と混合され，ミスト状で専用の配管で外部に排出される。この潤滑油ミスト配管には，セパレータが取付けられていて分離した潤滑油をタンクに戻している。さらに電気式の潤滑油ミスト集塵機を取付けることにより，潤滑油の消費を大幅に減らすことが可能になる。２MW級ガスタービンに電気式の潤滑油ミスト集塵機を取付け，分離した潤滑油をタンクに戻すよう改

図３　電気式ミスト集塵機



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

造したところ，年間約200リットルあった潤滑油の消費量は10%以下に減少した。ただしすべてのケースで同様の効果が得られるわけではなく，例えば同様の装置が取付けられている1.5MW級のガスタービンでは，事前に分離された潤滑油の性状を分析・調査した結果から性状がメーカー基準に適合しなかったために回収を断念している。

＜信頼性向上＞

小型ガスタービンを用いたコージェネレーションでは，コストの制約から冗長化がされておらず，ひとつのセンサーの不具合が重故障停止に直結する。あるガスタービンでは，軸受けに軸振動センサーが２つ組み込まれているにもかかわらず，一方のセンサーを予備とし，もう一方のセンサーのみを使用して振動を判断するため，センサーや変換器の故障がそのまま重故障停止につながった。これを２つのセンサーを同時に使用し，両方のセンサーの測定量が規定値を超えた時に異常とみなすように変更することにより，不要な重故障停止をなくし信頼性を向上させた。

故障項目については，運転を継続したいユーザーと安全担保と設備保護の観点から早めに停止させたいメーカーとが一緒になって，発生しうるリスクを十分に検討して決定すべきである。

### 3.3　原動機交換方式

1995年の電気事業法の改正で発電出力10MW未満のガスタービンでは原動機交換前の工事計画届が不要になったことから，整備や修理が必要な時に，メーカーで整備されたガスタービンと交換する方式（原動機交換方式）を採用するユーザーが増えており，世界的に見ても原動機交換方式が主流になってきた。原動機交換方式では，他のユーザーから取外されたガスタービンの整備や修理はメーカーが実施するため，整備前の運用や整備内容にユーザーの意思は反映されない。このため原動機の保証条件をユーザーとメーカーの間で明確に取り決めておくべきである。紹介した潤滑油ミストの回収のような設備や運用の変更にあたっては，メーカーとの合意が必要である。

原動機交換方式の普及に伴い，フルメンテナンス契約という言葉が聞かれるようになった。フルメンテナンス契約とは，予め決められた部品交換や調整・清掃などの整備に加え，故障した部品の修理や交換を追加費用無しで行う契約である。しかし，契約には予防保全のための部品交換や修理完了までの時間が定められていないのが一般的で，その部分のリスクはユーザーが担保しなければならない。

ユーザーとメーカーの関係は両輪に例えられる。一方だけが回転しても真直ぐに進むことができない。設計・製作・整備を担うメーカーと日常の運転管理を行うユーザーとの協力が何より重要である。

### 3.4　ガスエンジンのユーザー技術

ガスタービンと比較したガスエンジンの経年課題の特徴としては，連続燃焼のガスタービンと比較して振動が大きいことから，振動起因の問題が挙げられる。

特に大型ガスエンジンでは故障停止で生じる電力会社への自家発補給電力料金が高額になる事から，故障予知や，予防保全活動に力を入れている。

また，故障要因がガスエンジンシステムの設計そのものに有る場合も存在するため，多くのプラントを有するが故の関係の強さを活かして，メーカーやパッケージャーと協働で設計自体を見直す活動も推進している。

以下に，活動の具体例を紹介する。

### 3.5　ガスエンジンのユーザー技術の具体例

＜設計見直し＞

ガスエンジンの振動に起因するトラブルの発生箇所としては，大きく分けて ①電気機器・配線，②配管類，の２つが挙げられる。

このうち，①電気機器・配線は，何の予兆もなく突然事象が発生するケースが多いため，故障予知が困難である。そのため，あらかじめ設計において故障が発生し難い設計とすることが求められる。電気機器・配線に関する振動対策としては，弊社は以下のような取り組みを実施している。

・エンジンマウント制御機器の振動ダンパー改善：柔らかい材質に変更
・端子部改善：緩みの発生し得るネジ端子からバネ端子に変更
・配線端末処理改善：裸配線をフェルール（棒端子）に変更
・電源配線のシールド線端末処理方法改善：配線を折り返して被覆を傷付ける可能性のある突起を排除
・信号配線のコネクター削減：コネクターレスセンサー類の採用（図４）
・コネクター接触不良対策：振動する部位のコネクターに接点潤滑剤塗布

また，②配管類は，一旦不具合を起こすと水漏れやオイル漏れと言った大きなトラブルを引き起こす可能性があり，復旧にも時間を要するため，日常点検による予防保全のみならず耐振動性を考慮した設計が重要となる。配管類に関する振動対策としては，以下のような取り組みを展開している。

・小口径配管のクランプ（締め具）改善：配管との接触部の面取り及びゴム等のシム（詰め物）挿入
・振動部位のボルト改善：高張力ボルトへの変更

これ以外にも，ガスエンジンの振動としては煙道内の



Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

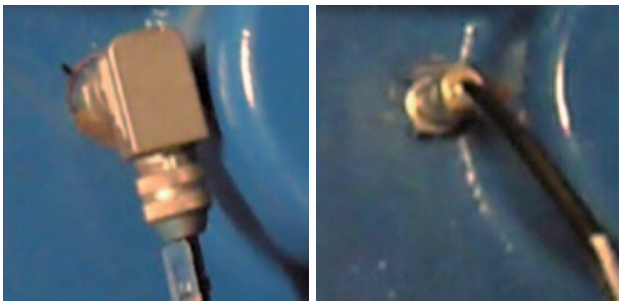


図４　コネクターレスセンサーの採用例
（上：コネクター有タイプ，下：コネクターレスタイプ）

排気脈動が存在し，振動に極端に弱い機器などは，この微弱振動でも繰り返し晒される事で損傷する可能性がある事が知られている。この対策としては，弊社では脈動の実測やシミュレーションソフトを利用した解析を実施し，煙道のどの部位に機器を設置する事が最適かを判定した上で設計・施工を実施している。

また，振動による配管の損傷等は，配管組み付け時に無理な応力が加えられている事との組み合わせで発生する場合が多いため，メンテナンス後の機器，及び配管の組み付け作業時は，機器・配管本体やサポートに無理な力が加えられていない事の確認を標準手順として確認を実施している。

### 3.6　故障予知・予防保全

上記のように，振動起因のトラブルへの対策は多岐にわたり実施しているが，それでも予期せぬタイミングでの機器の損傷は発生し得る。

これを未然に防ぐため，過去に発生した不具合時の各種データを集め，不具合が発生する前にどのような予兆があったかを整理し，それらから得られた知見を元にどのような項目をどのような閾値で故障予知する事が有意であるかの検討を繰り返し行っている。弊社での取り組みの例として，24時間の遠隔監視によるトレンドデータ監視により，以下のような故障予知に取り組んでいる。

・電気信号接触不良の初期段階検知：指示値の変化率を自動検知し，実際の値が変動し得る以上の急激な変化を検出した場合は予知アラームを発報
・計装空気等の漏れ検知：通常の圧力監視の他に，コンプレッサー類の発停頻度を監視し，異常な高頻度で発停を繰り返している場合は漏れを疑う

### 3.7　水平展開

弊社では，同一機種を多数所有するメリットを活かし，１つのエンジン・プラントで取得したトラブル経験や故障予知の知見を他の全プラントの故障未然防止に役立てている。

本稿では特に振動起因の課題に特化してご紹介したが，これ以外の，長期にわたるオペレーション経験から得られたあらゆる知見を全プラントに適用する事で，故障発生頻度の大幅な低減を実現している。

## 参考文献

(1)　三浦千太郎，日本ガスタービン学会誌，25-99，(1997-12)，p.8



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

特集：小型／移動用発電設備の現状と開発動向

# シャープ（株）亀山工場向けエネルギー供給システムの紹介

深谷　百合子[*1]　FUKAYA Yuriko
菊谷　　潔[*1]　KIKUTANI Kiyoshi

キーワード：コージェネレーションシステム，瞬時電圧低下，オンサイトエネルギーサービス，運転保守

## 1．はじめに

シャープは創業100周年にあたる2012年に向けて，めざすべき姿，企業ビジョンを「エコ・ポジティブカンパニー」と定めた。「エコ・ポジティブカンパニー」とは，事業活動による環境負荷を大幅に上回る環境貢献を果たす企業を意味している。

特に温室効果ガスについては，2012年度までに，シャープの創エネ・省エネ商品をお客さまにお使いいただくことによる削減貢献量が，事業活動による排出量の２倍となるように，省エネ・創エネ商品の開発と普及をするとともに，排出量の削減に取組んでいる。その温室効果ガス排出量抑制を目的として，亀山工場では，コージェネレーションシステム，太陽光発電を積極的に導入している。本稿ではコージェネレーションシステムを含めたエネルギー供給システムの概要と運転保守を中心に紹介する。

## 2．亀山工場の概要

亀山工場は，液晶パネルから液晶テレビの組立てまで一貫生産する世界初の垂直統合型工場として，2004年１月より操業を開始した。2006年８月には，液晶第２工場が稼動を開始し，液晶テレビ向け大型液晶パネルの需要拡大に対応してきたが，今後は，スマートフォンやタブレット端末用液晶の生産も可能な工場へと転換し，モバイル液晶事業の中核を担う工場へと生まれ変わろうとしている。

液晶パネルの製造においては，生産装置動力はもとより，工程内を一定の温湿度に保ち，かつ，高い洗浄度を保つための空調に多くのエネルギーを消費している。このため，省エネやエネルギー供給の高効率化による温暖化対策は重要な課題となっている。

一方，生産装置は多くの精密機械から構成されているため，瞬時の電圧低下でも影響を受けるものが少なくない。したがって，エネルギーの安定供給と高効率化の両方が求められる工場である。

図１　工場全体図

## 3．エネルギー供給システムの概要

亀山工場で使用する電力，冷温水等のエネルギーは，工場敷地北側に位置するエネルギー供給システムから供給している。エネルギー供給システムは特別高圧受変電設備，コージェネレーション設備，冷凍機・小型パッケージボイラ等の熱源設備から構成されており，小型パッケージボイラを除いて，液晶第１工場，液晶第２工場用システムに分かれている。

また，太陽光発電設備は，工場屋上と工場東側にある亀山市の雨水調整池の水面上に設置しており，発電した電力はすべて工場内で消費している。

エネルギー供給システムの概要を図2および表１に示す。

### 3.1　太陽光発電システム

太陽光発電システムは燃料を必要としない環境配慮型の発電装置であり，シャープは太陽光パネルの機器メーカーとして40年以上の歴史と実績を持っている。シャープでは自らエコロジーなエネルギーを作り出す「創エネ」の一環として大規模な太陽光発電システムを亀山工場内の建屋屋上，壁面および亀山工場東側に隣接する亀山市の雨水調整池の水面上に設置している。

特に，液晶第２工場の壁面には図３右下に示すような窓ガラスのイメージの「シースルータイプ薄膜太陽電池」を設置し，昼間は太陽の光を通しながら発電し，内

原稿受付　2011年11月９日
＊１　シャープ㈱　ディスプレイデバイス事業本部
亀山環境安全推進センター
〒519-0169　三重県亀山市白木町幸川464
＊２　㈱シーエナジー　お客さまサービス部　亀山事業所



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

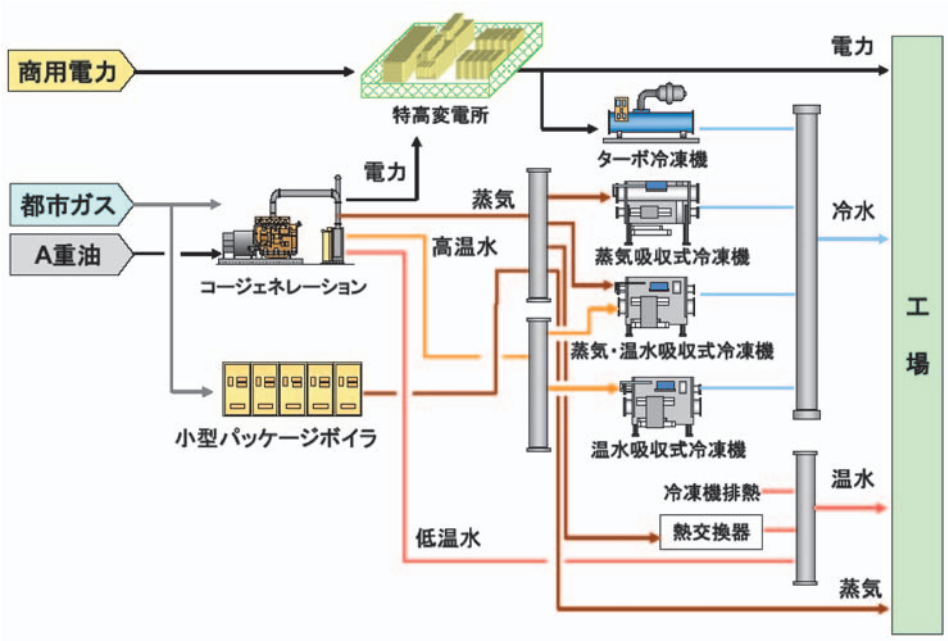



図２　エネルギー供給システム概略図（液晶第２工場用設備）

表１　エネルギー供給システム設備概要

| 設備区分 | 設備名 | 液晶第１工場用設備 | 液晶第２工場用設備 |
|---|---|---|---|
| 特別高圧受変電設備 | GIS開閉設備・変圧器 | 25,000kVA×５台 | 30,000kVA×５台 |
| | 瞬低対策装置 | 10,000kVA×１台<br>（超電導電力貯蔵装置） | 10,000kVA×２台<br>（電気二重層キャパシタ装置） |
| 太陽光発電設備 | － | 1,960kW | 3,450kW |
| コージェネレーション設備 | ガスエンジン発電機 | 2,880kW×４台 | 2,880kW×10台 |
| | 排ガスボイラ | 2t/h×４台 | 2t/h×10台 |
| 熱源設備 | ターボ冷凍機 | 1,500USRT×10台 | 1,500USRT×23台 |
| | 蒸気吸収式冷凍機 | 800USRT×２台 | 1,000USRT×２台 |
| | 温水吸収式冷凍機 | 300USRT×２台 | 400USRT×３台 |
| | 蒸気・温水吸収式冷凍機 | － | 440USRT×１台 |
| | 小型パッケージボイラ | 2.0t/h×10台 | |

側から外の景色が確認できると同時に，適度な遮光性もあることから，日射熱のカットによる冷房の電力負荷軽減が可能である。

太陽光発電システムの合計発電容量5,410kWは一般家庭の約1,350軒に相当し，抑制できる二酸化炭素（$CO_2$）排出量は年間約3,500トン（注：火力発電比）に達する。

### 3.2　コージェネレーションシステム

(1)システムの概要

コージェネレーションシステムは，都市ガスを燃料とする希薄燃焼高効率ガスエンジンを採用しており，温室効果ガス排出量の抑制だけでなく雷などによる瞬間的な電圧低下や停電時にも工場へ安定的に電力を供給するために設置している。具体的な導入規模や機種選定等については，工場で使用する蒸気，空調用熱源（冷水・温水）の負荷と瞬時電圧低下対策を要する重要負荷電力と

図３　太陽光発電システム



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

のバランスを考慮のうえ決定しており，工場で使用する電力の約３割を供給している。なお，瞬時電圧低下対策とは高速遮断器を組み合わせたシステムのことである。

コージェネレーションシステムは，液晶第1工場用で11,520kW（2,880kW×４台），液晶第２工場用で28,800kW（2,880kW×５台×２式）を導入しているが，排熱の利用方法はいずれも同様のシステムであり，具体的には図４のとおりである。

ガスエンジンは電力を発生するとともに，蒸気，高温水（88℃→83℃），低温水（35℃→30℃〔第２工場向けのみ〕）による排熱を回収している。蒸気は工場プロセス用の他，蒸気吸収式冷凍機の熱源として利用する。また，高温水は温水吸収式冷凍機の熱源として利用する。

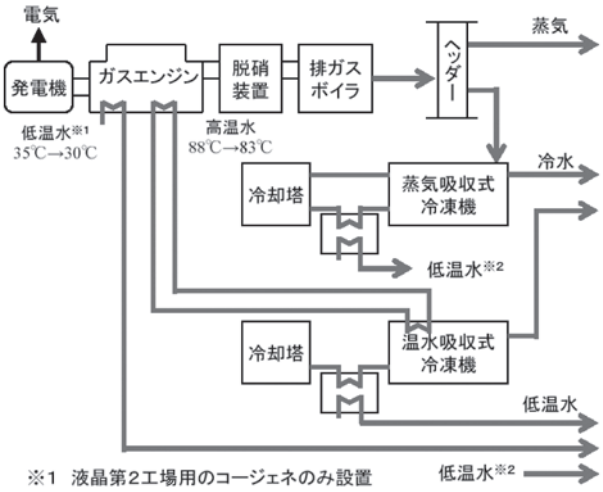



図４　コージェネレーションシステム基本フロー

なお，吸収式冷凍機を運転した際に発生する利用価値の低い低温水についても，ガスエンジンから回収した低温水とともに空調用熱源として利用している。これにより，排熱のカスケード利用を可能とし，高い総合効率を実現している。コージェネレーション排熱のカスケード利用のイメージを図５に，それぞれのコージェネレーションシステムについて機器の仕様を表２に示す。

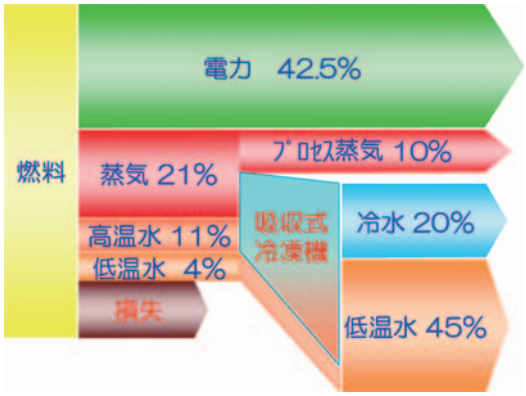



図５　排熱のカスケード利用（液晶第２工場用）

表２　コージェネレーションシステムの仕様

| | 項　目 | 内　容 |
|---|---|---|
| ガスエンジン | 製造メーカー | 新潟原動機㈱ |
| | 型式 | 圧縮着火式希薄燃焼ガスエンジン |
| | 機種 | 18V22AG型 |
| | 定格出力 | 2,969kW |
| | 主燃料 | 都市ガス13A |
| | パイロットオイル | A重油 |
| 発電機 | 製造メーカー | 西芝電機㈱ |
| | 型式 | 回転界磁式交流同期発電機 |
| | 発電機出力 | 2,880kW（42.5%） |
| 脱硝 | 製造メーカー | 帝人エンジニアリング㈱ |
| | 方　　式 | 尿素水接触還元分解法 |
| 熱回収 | 蒸気回収量 | 2.0t/h（21%） |
| | 高温水回収量 | 2,610MJ/h（11%） |
| | 低温水回収量 | 1,006MJ/h（4%） |

図６　コージェネレーションシステム

また，コージェネレーションシステムには，環境負荷を低減するため，ガスエンジンの排気系統に尿素水使用した脱硝装置を装備している。これにより大気汚染防止法で定める窒素酸化物濃度600ppmの1/3以下である180ppm以下（$O_2$＝０％換算）で運用している。

⑵瞬時電圧低下・停電対策

亀山工場では，落雷等による瞬時電圧低下が発生すると生産装置が停止し，液晶パネル製造に影響がでるため，大規模な瞬低対策装置を導入している。

瞬低対策装置のうち，コージェネレーションと高速遮断器を組み合わせたシステムの概要を以下に示す。

通常コージェネレーションは，図７に示すとおり商用系統と連系して運転を行っており，工場側の重要負荷に送電を行っている。連系運転中において商用系統に落雷等による瞬時電圧低下が発生した際には，高速遮断器を開放し商用系統から重要負荷の切離しを行い，コージェネレーションは自立運転（周波数一定制御）に移行して送電を継続する。

液晶第１工場用コージェネレーションの運開以降延べ



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

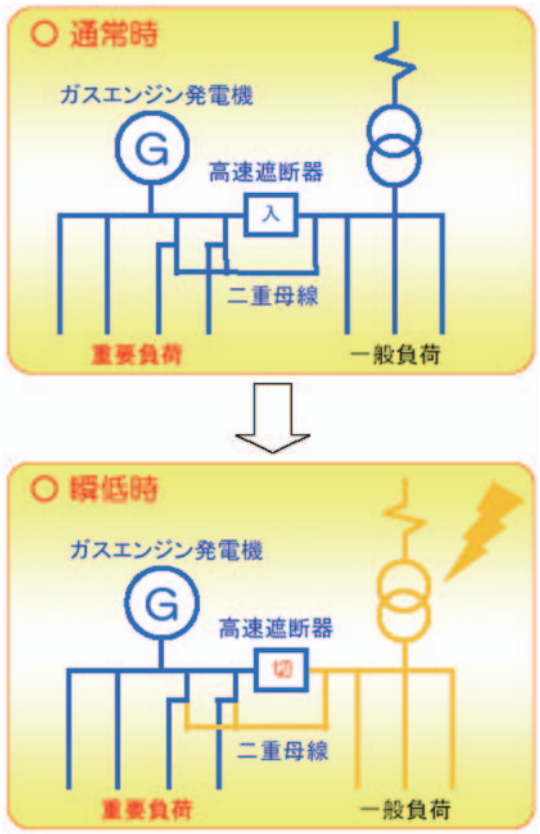



図７　瞬時電圧低下発生時の動作イメージ

77回，本システムが動作しているが，いずれも送電に影響が出ることなく自立運転に移行できている。

また，本システムは落雷等による瞬時電圧低下だけでなく，大規模地震等の自然災害により商用系統が長時間停電した場合においても，燃料である都市ガス，機器冷却水が確保されれば，運転を継続することも可能である。ただし，災害による交通遮断等により運転に必要なA重油，尿素水の供給が滞る場合は，最大運転日数は３日間程度となる。

⑶運用実績

コージェネレーションシステムは，工場の生産増強に合わせて３期分けて増設しており，それぞれの稼動開始，および運転実績を表３に示す。

表３　コージェネレーションシステム運用実績

| | 設置台数 | 稼動開始 | 運転時間 |
|---|---|---|---|
| 第１期 | ４台 | 2004年６月 | 46,000時間/台 |
| 第２期 | ５台 | 2006年６月 | 40,000時間/台 |
| 第３期 | ５台 | 2010年12月 | 16,000時間/台 |

工場の生産状況に応じて運転台数を調整しているため，年毎の運転時間にバラツキがあるものの，過去最大の年間稼働率は，第１期のコージェネレーションで運転時間8,480時間（稼働率96.8％）を記録したこともある。この稼働率が示すように，コージェネレーションシステムの停止は定期点検に伴うものが殆どであり，不具合による停止は１台あたり年平均１回未満と安定した運転を継続できている。

## ４．エネルギー供給システムの運用保守

亀山工場のエネルギー供給システムは，シャープとして初めてシーエナジーと「オンサイトエネルギーサービス」契約を締結し，シーエナジーによる運用保守を行っている。オンサイトエネルギーサービスとは，エネルギー供給に必要な設備の選定・調達・設置・運転監視・メンテナンスをエネルギー供給事業者であるシーエナジーが行うサービスである。

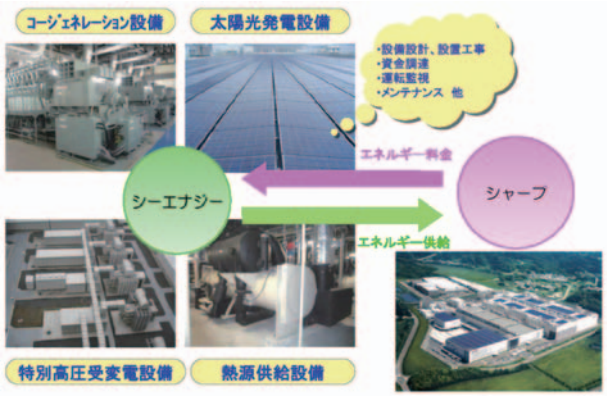



図８　オンサイトエネルギーサービスのイメージ

コージェネレーションシステムを含むエネルギー供給システムの運用保守は，24時間２交替制で行っている。

ガスエンジン発電機，冷凍機の起動停止等の通常操作は，制御室からの制御員による遠隔操作で行い，メンテナンスに伴う各機器の個別操作は，現場にある操作盤にて行っている。また，各機器の点検として１回/日の巡視点検を行っている。

コージェネレーションシステムのガスエンジン発電機には，製造メーカーである新潟原動機の集中監視システム（NESTY）が組込まれており，集中監視センターに

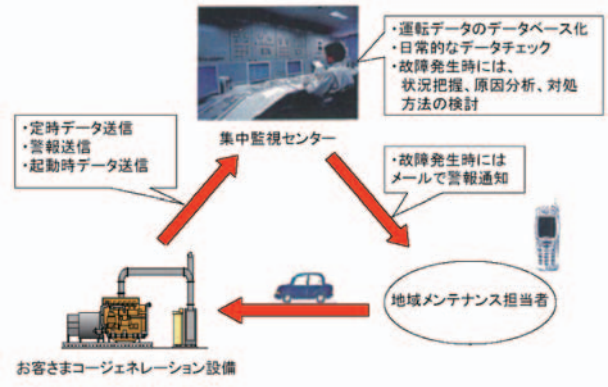



図９　NESTY概要図



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

てコージェネレーションの運転データのデータベース化，チェックを行っている。さらに，故障発生時には状況把握，原因分析を行うとともに，メンテナンス担当者へのメール送信，緊急出向により早期復旧に役立っている。

ガスエンジンの定期点検は，運転時間4,000時間毎の簡略点検と，8,000時間毎の本格点検を行っている。点検にかかる日数は，１台あたり簡略点検で２日間，本格点検で最大14日間必要となる。したがって，全14台のガスエンジンの本格点検を行うためには約７カ月必要となるが，電力会社との契約に伴う制約等から，本格点検は１台毎しか実施できず，かつ夏場（７月～９月）には点検が行うことができないため，夏場を除く期間に定期点検が集中する状況となっている。

## ５．運用改善事例

エネルギー供給システムの運用の中で，運用改善を行った事例を紹介する。

亀山工場では，ガスエンジン発電機，ターボ冷凍機等を多数設置しており，各機器の冷却水用の冷却塔も同様に多数設定している。限られたエリアに多くの冷却塔を設置しているため，図10で示すように外気温度が上昇する夏場に，近接する冷却塔からの暖かい排気を吸込み冷却塔の冷却能力が30％程度低下する事象が発生していた。その対応策として，図11のように各冷却塔の間に遮蔽板を設置し，近接冷却塔からの排気の廻り込み防止を行った結果，冷却能力が定格まで回復することができた。

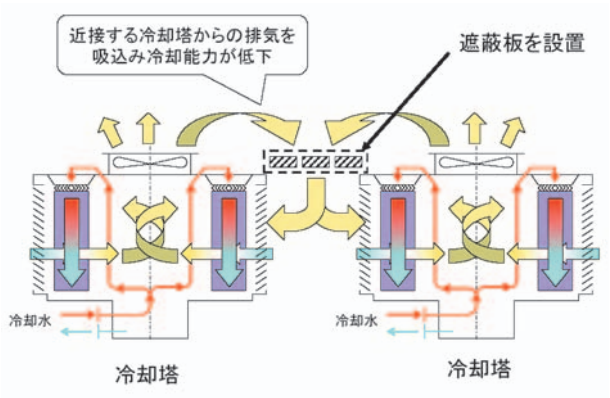



図10　冷却塔能力低下イメージ

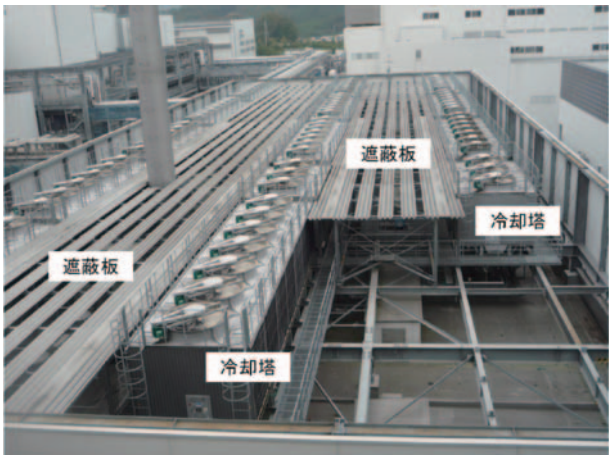



図11　遮蔽板取付状況

## ６．おわりに

以上に述べたとおり，亀山工場ではコージェネレーションシステムや太陽光発電設備等の温室効果ガスを低減するための環境設備を大規模に導入するなど，環境に対して最大限の配慮のうえ工場建設・操業を行ってきた。これらの環境設備は工場の操業形態と同様に年間を通じてベース運転を行うこととしており，その安定的な稼動が，環境負荷低減にとって不可欠なものとなる。したがって，これらの設備を適正に管理し，高効率運転を維持するとともに，さらなる効率向上に資するための取り組みを今後も継続的に進めていくこととしたい。



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

技術論文

# 高反動度型超音速タービン翼列のための数値流体解析手法

# Computational Fluid Dynamics for Highly-Reaction-Type Supersonic Turbine Cascades

妹尾　茂樹*1
SENOO Shigeki

**ABSTRACT**

A 2D computational technique for turbulent flows of supersonic turbine cascade was developed, in particular grid generation method and inflow and outflow boundary conditions. The grid generation technique uses multi-block structured grids and the orthogonality of the grid is good even for highly staggered blades. The nonreflecting boundary conditions based on two-dimensional characteristic theory can prevent non-physical reflection of a shock wave at the inlet and outlet boundaries. Computational pressure distributions on transonic compressor agree well with the experimental results. The computational method was applied to the supersonic turbine cascade of the last stage blade in a steam turbine. Shock waves can be captured accurately and stably and spurious reflections of shock waves at the boundaries can be avoided.

**Key words**：Turbine, Supersonic flow, Computational fluid dynamics, Grid generation, Boundary conditions

## 1．はじめに

蒸気タービンの高効率化，大容量化のためには，最終段の環帯面積（軸方向下流側から見た流路面積）を大きくすることが有効である。最終段を出た蒸気の運動エネルギーは，排気室のディフューザによって一部静圧回復するが，残りの部分は回転エネルギーに使えないエネルギー損失となる。そのため，環帯面積を大きくして，最終段から排気される運動エネルギーを最小化することが，タービン効率の向上に有効である。

最終段環帯面積を大きくするためには，動翼翼長もしくは平均流路径を大きくする必要がある。タービン段落静動翼間では，静翼出口の旋回速度により，外周側ほど静圧が大きくなるため，動翼先端側ほどエンタルピ落差が大きくなり，相対流出速度が大きくなる。一般的な蒸気タービン最終段動翼の，流路径の大きな位置での相対流出速度は，超音速となっている。さらに流路径位置を大きくすると，動翼入口部の速度三角形に対し，動翼周速が支配的となり，相対流入速度も超音速となる。

流入速度が亜音速で，流出速度のみが超音速の場合，マッハ数に合わせた翼間流路幅分布となる，絞り－拡がり流路を持つ翼型（遷音速タービン翼型）を設計することで，強い衝撃波は回避することが可能である。それに対し，流入速度も超音速となる超音速タービン翼型の場合，翼上流側の衝撃波の発生を回避することは難しい。翼上流で生じる衝撃波は，翼型損失を増大させるだけでなく，翼間流路幅最小部における淀み点圧力（全圧）を変化させるため，翼間を流れる流量の予測も難しくさせる。

このように複雑な流れとなる超音速タービン翼型の性能評価には，数値流体解析技術が有効である。しかし，蒸気タービン最終段動翼の先端側超音速翼型を，精度良く流体解析するためには，主に二つの問題がある。一つは解析格子，もう一つは境界条件である。

蒸気タービン最終段の外周側では，静翼の流出速度が小さく，動翼の周速が大きいために，動翼に対する相対流れは，周方向近くから流入するようになり，それに合わせて翼のスタッガー角が大きくなる。また，遠心応力低減のため，先端側の翼断面積を大きくできず，ソリディティ（コード・ピッチ比）が小さくなる。そのため単一のH型格子では，格子のゆがみが大きくなり，衝撃波や膨張波などの複雑な流れ場を精度良く捉えられなくなる。一方，汎用的なマルチブロック格子では，翼列の持つ周期性が利用できず，ブロック格子間の物理量の内挿により精度が低下する問題がある。そこで，本研究では，高スタッガー角を持つ翼型に対しても格子のゆがみが大きくならず，かつ周方向境界で格子点を完全に一致

原稿受付　2011年１月20日
校閲完了　2011年12月12日
＊1　㈱日立製作所　日立研究所
〒319-1292　日立市大みか町７－１－１



Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

させることで，内挿による精度低下を回避できるマルチブロック構造格子生成法を開発することを目的とする。

また，衝撃波を含む流れを有限な解析領域で計算する場合，衝撃波が解析領域境界で，非物理的な反射や干渉をしない境界条件を用いる必要がある。二次元翼列流れの入口超音速流入時の境界条件として，主流方向の一次元Riemann不変量を外挿するChima[1]の手法や，二次元の特性理論をベースにしたGiles[2]の手法が提案されている。これらの手法は，主に超音速流入となる圧縮機翼列の流体解析に適用されてきた。本研究では，Giles[2]の無反射境界条件を，近似Riemann解法に基づくTVD（Total Variation Diminishing）法[3],[4]に組み込める形に定式化し，蒸気タービン最終段動翼の先端側の超音速翼型に適用できるようにすることも目的とする。

**主な記号**

| | |
|---|---|
| $C_p$ | : 翼面圧力係数，式（10） |
| $c_p$ | : 定圧比熱 |
| h | : 比エンタルピ |
| $n_{xj}$ | : 格子面に垂直な単位ベクトル |
| $P_{01}$ | : 全圧 |
| p | : 静圧 |
| Pr | : Prandtl数 |
| Q | : 保存変数ベクトル |
| u, v | : 軸方向速度，周方向速度 |
| x, y | : 軸方向，周方向 |
| $\hat{\varepsilon}$ | : 比内部エネルギー |
| $\lambda$ | : 熱伝導率 |
| $\mu$ | : 粘性係数 |
| $\rho$ | : 密度 |

**下添え字**

| | |
|---|---|
| 1, 2 | : 翼列入口，翼列出口 |

## 2．流体解析手法

翼スパン方向流路厚みの軸（x）方向変化を考慮した，二次元乱流解析を行うために，二次元圧縮性流体の支配方程式であるNavier-Stokes方程式に，側壁からの圧力の影響の項を付加した式を用いる。乱流量を取り扱うために，その方程式をアンサンブル平均したReynolds方程式を基礎方程式とする。

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{\Omega} Q\, d\Omega + \int_{\partial\Omega}\left(F_j \cdot n_{x_j}\right) dS = \int_{\partial\Omega}\left(F_{vj} \cdot n_{x_j}\right) dS + P dS_x \qquad (1)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix},\quad F_j = \begin{bmatrix} \rho u_j \\ \rho u u_j + p\delta_{1j} \\ \rho v u_j + p\delta_{2j} \\ (e+p)u_j \end{bmatrix},\quad F_{vj} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{1j} \\ \tau_{2j} \\ q_j \end{bmatrix},\quad P = \begin{bmatrix} 0 \\ p \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (2)$$

$$e = \rho\left(\hat{\varepsilon} + \frac{1}{2}\left(u^2 + v^2\right)\right) \quad \text{単位体積当たり全エネルギー} \qquad (3)$$

$$\tau_{ij} = T_{ij} - R_{ij} \quad \text{応力テンソル} \qquad (4)$$

$$T_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}\right) \quad \text{粘性応力テンソル} \qquad (5)$$

$$R_{ij} = -\rho\overline{u_i' u_j'} \quad \text{Reynolds応力テンソル} \qquad (6)$$

$$q_j = \frac{\lambda}{c_p}\frac{\partial h}{\partial x_j} + \tau_{ij}u_i - \rho\overline{h' u_j'} = \frac{\mu}{Pr}\frac{\partial h}{\partial x_j} + \tau_{ij}u_i - \rho\overline{h' u_j'} \qquad (7)$$

熱流束（分子熱流束＋応力による仕事＋乱流熱流束）

図１に，本解析手法で用いる解析要素の六面体を示す。六面体の頂点の，軸方向座標xと，周方向座標yは，格子番号（i,j）に対する二次元の関数とする。すなわち，スパン方向の辺（例えば$P_5P_1$）は，すべてz軸に平行であり，i方向の面$S_i$（例えば$P_1P_5P_8P_4$）と，j方向の面$S_j$（例えば$P_1P_5P_6P_2$）は，すべてx-y平面に直交する（面ベクトルはx-y平面に平行）。スパン方向座標zは，下面の頂点$P_1,P_2,P_3,P_4$ではすべてゼロ，上面の頂点$P_5,P_6,P_7,P_8$では軸方向座標xのみの関数として指定する。そのため，面$S_{ij}$（$P_5P_6P_7P_8$）の面ベクトル（外向き法線ベクトル）の，y方向成分$S_{ij,y}$はゼロとなる。面$S_{ij}$の面ベクトルのx方向成分の内向き成分－$S_{ij,x}$が，式(1)右辺第二項の$dS_x$である。

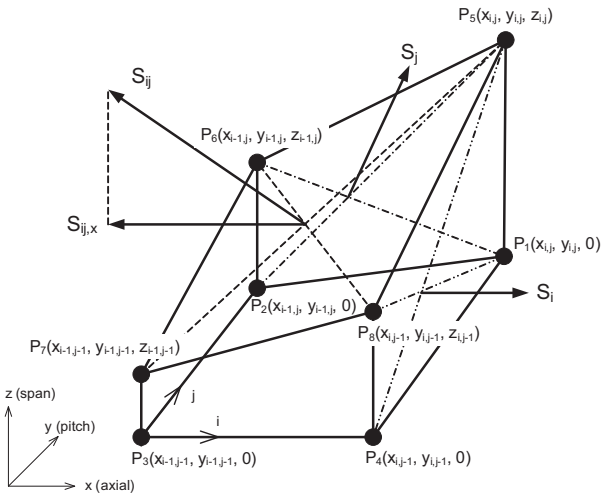



Fig. 1　Computational cell

乱流量には，低Reynolds型k-εモデル[3]を用いた。

以上の方程式を，有限体積法を用いて離散化し，対流項を近似Riemann解法に基づく，三次精度Chakravarthy-Osher TVD法[4]で，粘性項を二次精度中心差分法により解く。時間積分法には陰解法の一種である対角化近似因子化法（Diagonal Form of Implicit Approximate Factorization Algorithm）[5]を用いた。

## 3．格子生成法

本研究では，五つのブロック構造格子を組み合わせた，



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

マルチブロック構造格子生成法を開発した。図２に，ブロック格子分割図を示す。翼形状を示すために３流路分の格子ブロックを示したが，実際に流体解析を行うのは１流路である。翼部には，周期境界条件を課す格子の流れ方向番号をずらした構造格子①を用いた。入口と出口解析領域境界線が，周方向線と平行になるように，入口と出口の三角形領域に，それぞれ二つずつのブロック構造格子②③と，④⑤を挿入した。

### 3.1　翼部の格子

翼部格子①の生成のために，初めに，周期境界条件を課す格子の流れ方向番号の，背側と腹側とのずらし量（オフセットoffset）を決める。オフセットは，翼間流路部の格子の直交性が良くなるように行うものであり，以下の手順で決める。

１）翼背側の翼前縁（ixws1）から，最小距離にある翼腹側格子（ix_throat_ps）を決める

２）offset = ix_throat_ps－ixi より，オフセットを決める。

流路入口側での格子の直交性を優先した理由は，スタッガー角が大きい翼は，流入，流出速度が，ともに超音速となる超音速タービン翼型である可能性が大きく，超音速タービン翼型では，入口流路幅で，翼間流量が決まるためである。また，オフセット量は，入口側と出口側で同じ量を用いることとした。

### 3.2　入口部，出口部格子

入口の三角形領域の二つのブロック構造格子②，③の格子数を決める。ブロック構造格子境界で，格子が完全に一致する条件から，格子数は以下の三つの条件を満たさなくてはいけない。（図３参照）

１）　NY1　= NX2 + NY3

２）　offset　= NX2 + NX3

３）　NY2　= NX3 + NY3

この条件より，次式の関係を導くことができる。

$$NX2 = \frac{NY1}{2} + \frac{offset}{2}\left(1 - r_{gin}\right),\ r_{gin} \equiv \frac{NY2}{offset} \tag{8}$$

$r_{gin}$は，解析領域入口部の格子数NY2のoffset格子数に対する比である。三角形領域の形に応じて調整するパラメータで，この値を指定するとすべての格子数が決まる。

次にブロック構造格子②と③に分割することを考える。ブロック構造格子①との境界は，境界上を等間隔分割することとし，格子数比NX2:NY3から分割点A1を決める。周方向境界は，すでに格子分割されているため，格子数比NX2:NX3から，分割点A2が決まる。最後に三角形領域内部のA3は，三角形の図心（centroid）とし，３点を直線で結んだ境界で，ブロック構造格子②と③に分割する。解析領域入口境界は，等間隔に格子分割する。

出口領域も同様に境界上の格子を分割する。

### 3.2　内部格子生成

五つのブロック構造格子の境界上の格子を生成したあと，その境界格子から，滑らかな内部格子を生成するために，ポアソン方程式による格子生成法[6]を適用した。ブロック構造格子ごとにポアソン方程式を用いて内部格子を生成するが，ブロック格子境界での，格子点の連続性に加え，格子線勾配と格子幅の変化率も滑らかに接続されるように，ポアソン方程式のソース項を定式化した。

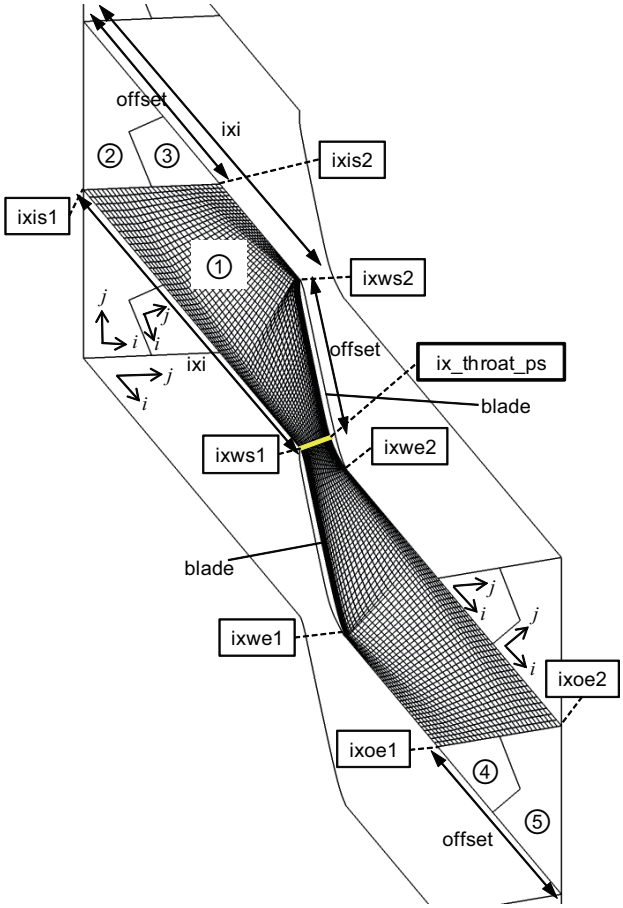



Fig. 2　Block grid structure

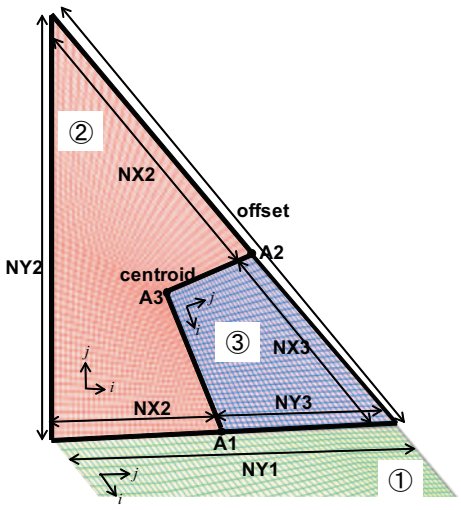



Fig. 3　Inlet region grids



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

### 3.3　格子生成結果

図４に，格子生成例を示す。翼のスタッガー角76.5度と大きいにも関わらず，翼間流路部で直交性を有する格子が生成できていることがわかる。翼間流路部で，格子線のなす角の最小値が，単一のH型格子の場合約15°と小さくなるのに対し，開発した格子生成法では約70°と，90°に近づけることができている。

また，五つのブロック構造格子境界と，周期境界部で隣接するブロック構造格子と格子点が完全に一致し，かつ格子線勾配，格子幅の変化率も滑らかに接続していることがわかる。

本格子生成法の特徴は，対象を蒸気タービン長翼先端のようにスタッガー角が大きい翼型に特化し，それに適したトポロジを用いることで，品質の良いマルチブロック構造格子を容易に生成できるようにしたことである。本手法の，格子品質（直交性）以外の利点は以下である。

⑴構造格子を用いたため空間微分項の高精度化が容易
⑵格子の品質を均一にできることで，異なる翼型の性能比較に，格子品質の影響が入りにくい
⑶格子生成に用いるパラメータ数を少なく抑えているため，格子生成のノウハウを蓄積しやすい
⑷非構造格子と比較して計算時間が短く抑えられる

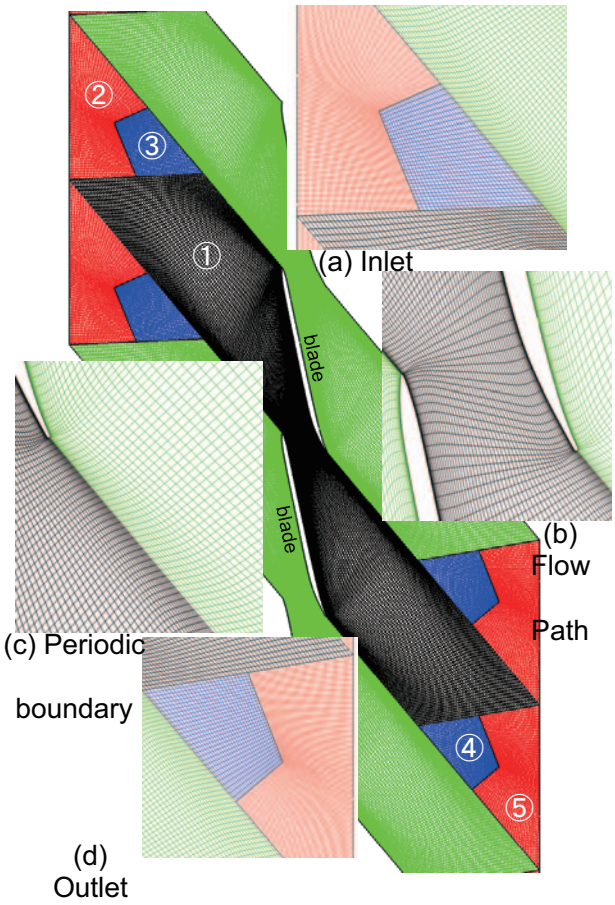



Fig. 4　Computational grids

## 4．境界条件

### 4.1　理論

超音速流入に対する境界条件として，Giles[2]の提案した無反射境界条件の考え方を，近似Riemann解法に基づくTVD法に組み込める形に修正して適用した。近似Riemann解法のベースとしている理論は，一次元の特性理論であり，Euler方程式（式⑴の右辺を０とした式）の対流項を，保存量ベクトルQで偏微分して得られる行列の，固有値分解を用いている。

これに対して，Gilesの提案した無反射境界条件の特徴は，上記固有値分解の理論に，二次元のフーリエ級数展開を組み合わせることで，流入・流出境界での周方向の非一様性を考慮できるようにした点にある。解析境界上での物理量（primitive variables：密度，軸流速度，周方向速度，圧力）を，周方向平均量と変動量とに分解し，周方向平均量は一次元的に扱い，変動量はフーリエ級数展開を用いて，周方向波数と軸方向波数を持つ二次元の特性波に分解する。その中で解析領域に入ってくる特性波成分の振幅をゼロとすることで，境界上での非物理的な波の反射を小さくする，また理想的には無くす手法である。

前章で述べたように，本研究では，入口・出口境界の格子線が周方向に平行となるように格子生成するために，特性波が，解析領域に入るかどうかの判断は，特性波の軸方向の伝播速度の正負だけで判断できる。Euler方程式に，二次元の特性波の形をした解を代入して得られる分散関係式を用いると，任意の周方向波数に対し，４つの軸方向波数が決まる。さらに，それらの４つの波に対し，それぞれ軸方向の伝播速度が定式化できる。

本研究では，流入，流出速度が超音速であることを想定しているが，軸流速度成分は亜音速とする。軸流速度が音速，さらには超音速になる状態はリミットロードと呼ばれ，蒸気タービンでは，そのような設計は行わない。そのため，この想定は実際の蒸気タービン翼間流れに対し妥当である。この軸流速度が亜音速の場合，入口境界から解析領域に流入する特性波の数は，４つのうち３つとなり，出口境界から流入する特性波は，１つとなる。それらの流入する波の振幅を０とすることで，非物理的な波の反射を防止する。

流入境界条件としては，無限遠での全圧，全温，流れ角を与えるが，解析入口境界位置では流れ角の周方向分布を許す。流出条件は，無限遠での静圧を与えるが，解析出口境界位置では静圧の周方向分布を許す。

### 4.2　解析結果

流入マッハ数1.3，等エントロピー流出マッハ数2.1の条件で解析を行った。翼型は，流路幅が入口で最小となる拡がり流路を持つ超音速翼型だが，出口でも斜め衝撃波を発生させるために，出口で不足膨張となるように，本研究の解析用に設計した翼である。衝撃波と計算領域



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

境界との干渉に注目するため，ここでは非粘性解析を実施した。蒸気タービンが対象であるが，支配方程式では理想気体を仮定し，比熱比を1.135とすることで，湿り蒸気の熱力学的特性を模擬した。

表１に示すように，３種類の境界条件と，入口，出口境界の軸方向位置を変えた解析を実施した。表１に示す軸方向位置の数値は，翼軸コード長を基準とした，入口境界と翼前縁間距離，出口境界と翼後縁間距離の値である。境界条件は，(1)特性理論を使わずに，入口では軸流速度，出口では密度，および軸方向と周方向の運動量を外挿する方法（normal），(2)Chima[1]の提案した主流方向のRiemann不変量を外挿する方法（1D Riemann），(3)二次元の特性理論に基づく本研究で採用した手法（2D characteristic）の３種類を比較した。解析要素数は，領域の大きい場合が109,080，小さい場合が85,080である。

Table 1　Inflow and outflow boundary conditions

| | Boundary conditions | | Axial positions | |
|---|---|---|---|---|
| Case | inflow | outflow | inlet | outlet |
| 1 | normal | normal | 9.6 | 9.6 |
| 2 | 1D Riemann | normal | 9.6 | 9.6 |
| 3 | 2D characteristic | 2D characteristic | 9.6 | 9.6 |
| 4 | normal | normal | 4.8 | 4.8 |
| 5 | 2D characteristic | 2D characteristic | 4.8 | 4.8 |

図５に境界条件の影響を比較したcase 1, 2, 3の等圧力線図を示す。流入境界条件に関し，通常とChimaの境界条件は，入口部で斜め衝撃波が膨張波として反射しており，その反射膨張波が翼間流れにも影響をおよぼしている。それに対し，本研究の境界条件は，入口部での斜め衝撃波の膨張波としての反射が小さく，翼間流れに大きな影響をおよぼすことを回避できている。流出境界条件に関し，通常の境界条件では斜め衝撃波が出口境界と干渉することで，等圧力線が乱れたようになっているが，本研究の境界条件では，その影響はほとんど見られない

図６は，通常境界条件と本研究の境界条件で，入口・出口計算領域を半分に小さくした場合の等圧力線を，五つの流路の中央の流路に挿入し，比較したものである。本研究の境界条件は，この場合でも入口境界での反射膨張波は小さく，その反射の翼間流れに対する影響は無視できる，一方，本研究の境界条件でも，翼下流側では等圧線がわずかに振動しており，本解析条件の場合は，出口境界を翼の軸コード長の９倍程度下流にとる必要があることがわかる。

## ５．検証

本研究の解析対象は，超音速タービン翼型であるが，検証するための試験データを見つけることができなかったため，流入速度が超音速である遷音速圧縮機翼型の直線翼列試験データと比較することで，開発した解析手法の精度検証を行う。作動流体は空気であり，比熱比は1.4を用いた。表２に解析熱条件を示す。AVDR（Axial Velocity Density Ratio）は，側壁境界層の発達や側壁からの吸込みにより，上流と下流側で流路幅が変化する効果を表す項で，次式により定義される。

$$AVDR = \frac{\rho_2 u_2}{\rho_1 u_1} \tag{9}$$

解析は，流入マッハ数が1.0をわずかに超える翼型[7]

Table 2　Thermal boundary conditions

| Parameters | Unit | Case 6 | Case 7 | Case 8 |
|---|---|---|---|---|
| Blade type | - | DFVLR | DFVLR | ARL-SL19 |
| Inlet Mach number | - | 1.03 | 1.10 | 1.58 |
| Inlet flow angle | deg | 148.5 | 148.5 | 147.5 |
| Static pressure ratio | - | 1.47 | 1.57 | 2.12 |
| AVDR | - | 1.14 | 1.15 | 0.99 |

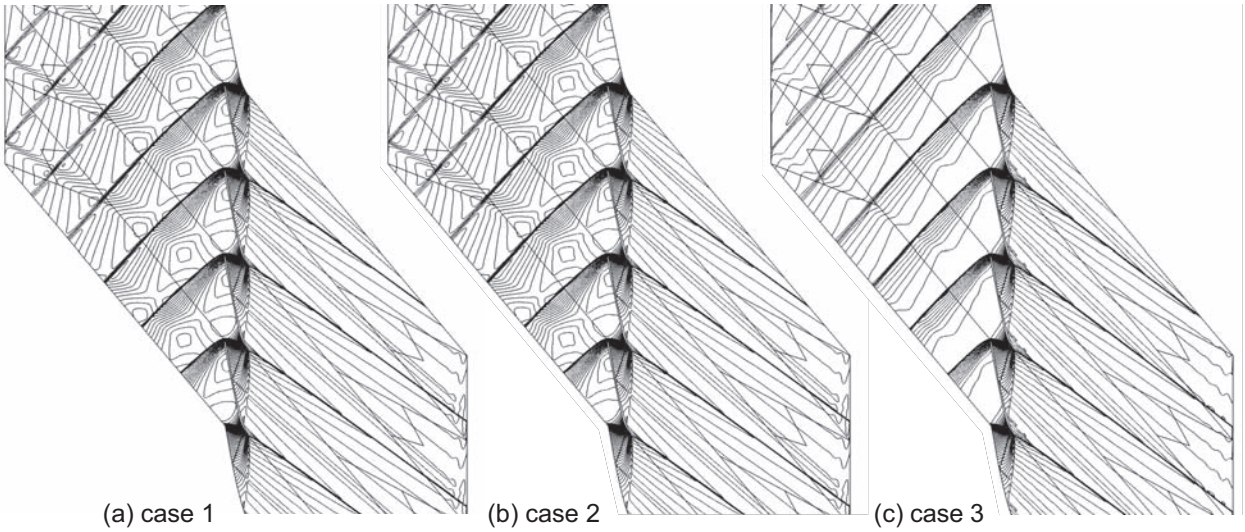



Fig . 5　Iso-pressure contours



Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

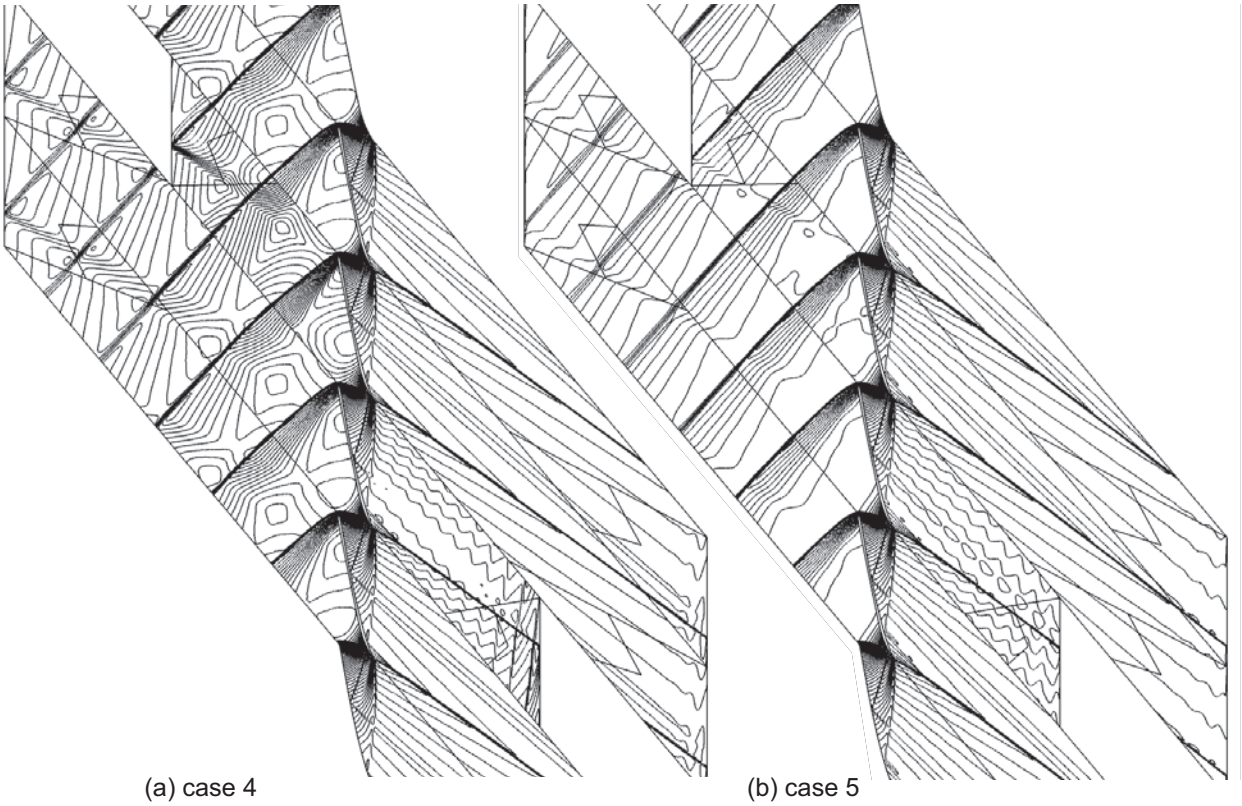



Fig . 6　Iso-pressure contours

（DFVLR翼型）に対し２条件と，設計流入マッハ数が1.612と大きい翼型[8]（ARL-SL19）に対して行った。流出マッハ数は，３ケースとも亜音速である。ドイツ航空宇宙研究所（DFVLR）で行われた試験と比較した。

図７に，等マッハ数線図を示す。どのケースも，衝撃波を明確に捉えることができており，上流側に伸びた衝撃波が，入口境界で非物理的な反射を起こしていないことが確認できる。

図８に，case 6 とcase 7 の，翼面翼面圧力係数$C_p$分布を，解析と試験とで比較した図を示す。

$$C_p = \frac{P_{01} - p}{P_{01} - p_1} \tag{10}$$

翼背面の衝撃波の位置を，精度良く予測できている。case 7 の亜音速部，すなわち翼腹面と衝撃波後の翼背面の圧力係数を，解析はわずかに小さく予測している。

図９にはcase 8 の，翼面等エントロピマッハ数$M_{is}$分布を，解析と試験とで比較した図を示す。

$$M_{is} = \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1}\left\{\left(\frac{P_{01}}{p}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right\}} \tag{11}$$

図７（c）からもわかるように，case 8 の流れは，垂直衝撃波下流の非定常性が強い。そのため，図９の解析結果には，時間平均した翼面等エントロピマッハ数分布を示した。解析結果の衝撃波位置は，試験と良く合っているが，翼背側では，無次元軸方向位置0.8の衝撃波の下流で，流れは翼面曲率によって加速されているのに対し，解析では衝撃波で流れがはく離し，流れの加速は見られない。

また，翼腹面に入射する垂直衝撃波による減速も，試験では緩やかに減速されているのに対し，解析では急激に減速している。垂直衝撃波が翼腹面に入射する部分では，翼面境界層と強い垂直衝撃波の干渉で境界層がはく離するため，解析結果においても垂直衝撃波位置が前後に振動する。翼列試験では，その影響が無次元軸方向位置0.8までおよんでいるが，解析では0.8まではおよんでいない。

比較的弱い衝撃波と境界層との干渉は，解析によって精度良く捉えられているが，強い垂直衝撃波と境界層の干渉により，境界層がはく離するような現象に対しては，解析と試験結果の翼面圧力分布に差があることから，乱流モデルなどに改良が必要だと考えられる。

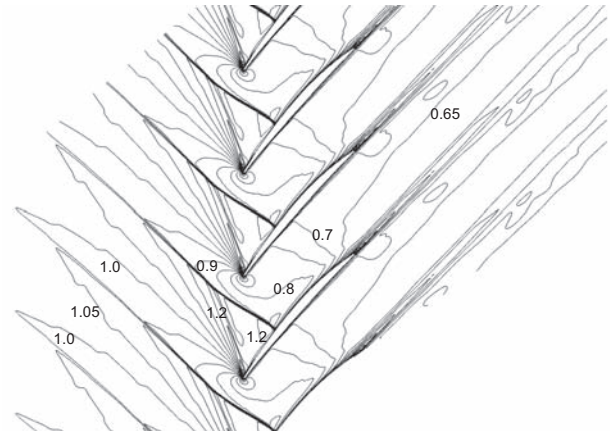
表３に，解析結果の全圧損失係数$\omega$と，流出角を，試

$$\omega = \frac{P_{01} - P_{02}}{P_{01} - p_1} \tag{12}$$

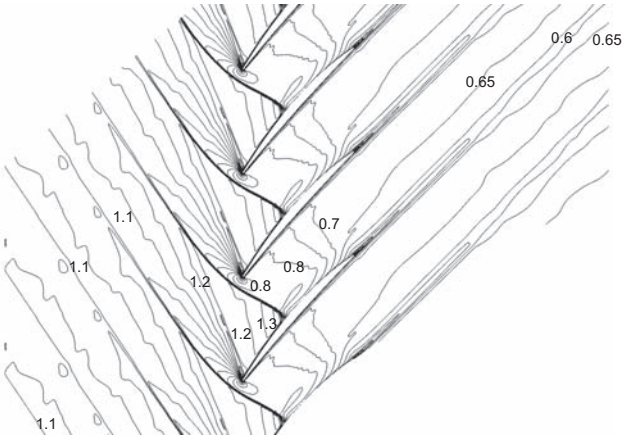
験結果と比較して示す。全圧損失係数は，case 6 , 7 はともに約２%解析結果が小さい。非定常性の強いcase 8 の方が，両者の一致は良い。流出角は，解析は，試験に比較的近い値を予測できている。



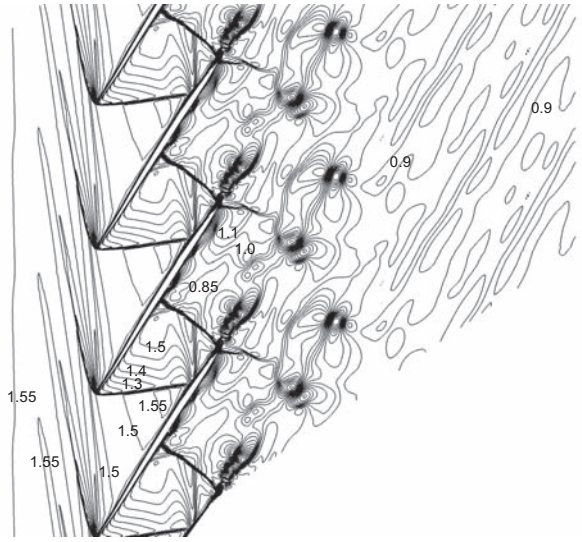
Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.




(a) case6 (DFVLR $M_{in}$=1.03)

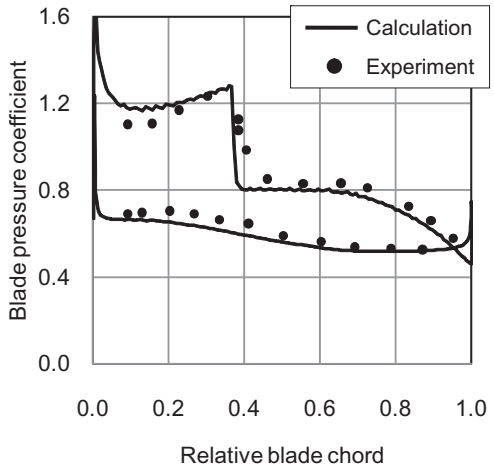



(b) case7 (DFVLR $M_{in}$=1.10)

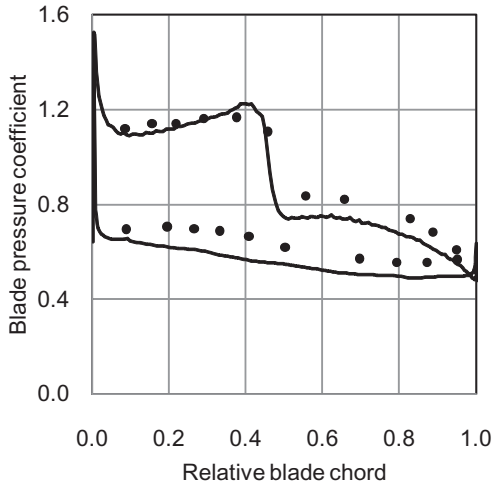



(c) case8 (ARL-SL19 $M_{in}$=1.58)

Fig. 7 Iso Mach number contours（increments 0.05）




(a) case6 (DFVLR $M_{in}$=1.03)




(b) case7 (DFVLR $M_{in}$=1.1)

Fig. 8 Pressure coefficient distributions on the blade surface

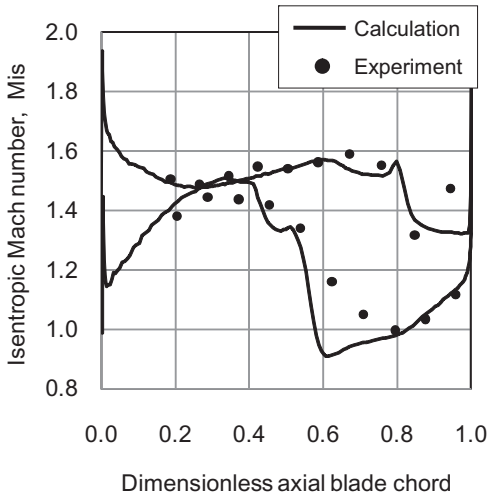



Fig. 9 Isentropic Mach number distributions on the blade surface case 8（ARL-SL19 $M_{in}$=1.58）



Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

Table 3 Comparisons of loss coefficient and outlet flow angles

| Parameters | Unit | | Case 6 | Case 7 | Case 8 |
|---|---|---|---|---|---|
| Loss coefficient | % | CFD | 4.3 | 6.5 | 14.6 |
| | | Exp | 6.1 | 8.4 | 14.4 |
| Outlet flow angle | deg | CFD | 135.7 | 135.2 | 153.0 |
| | | Exp | 136 | 136 | 151.2 |

## 6．結論

スタッガー角の大きな超音速タービン翼型の，衝撃波を含む流れ場を，精度良く予測できる乱流解析手法，特に格子生成法と流入，流出境界条件を開発した。

五つのブロック構造格子生成法は，蒸気タービン長翼先端部のようにスタッガー角が大きくソリディティが小さい翼型に対しても，直交性の良い格子が生成可能である。そのため衝撃波を精度良くかつ安定に捉えることができる。また，周期境界部とブロック格子境界部で，格子点は完全に連続である。加えて，格子線勾配と格子幅の変化率も滑らかに接続するように内部格子生成に用いるポアソン方程式のソース項を定式化した。そのため，周期境界部やブロック格子境界を，衝撃波は減衰すること無く通過できる。

二次元の特性理論に基づく流入，流出境界条件を，斜め衝撃波との干渉が起こる超音速流入，流出境界に適用した。境界条件は，物理量を周方向平均値と変動量とに分離し，平均量は，仮想的な無限遠方で与えた境界条件を満足するように決め，変動量は二次元入射特性波の振幅がゼロとなる条件から決めた。この境界条件により，衝撃波が流入，流出境界と干渉する場合においても，その衝撃波の非物理的な反射や振動を抑制できることを確認した。

開発した解析手法の精度を，遷音速圧縮機翼型の直線翼列試験と比較することで検証した。翼面圧力分布および衝撃波位置，流出角，全圧損失係数が試験と良い一致を示し，本手法の妥当性が検証できた。

## 参考文献


(1) Chima, R. V., "Inviscid and Viscous Flows in Cascades with an Explicit Multiple-Grid Algorithm," AIAA Journal, vol.23, No.10, (1985), pp. 1556-1563.

(2) Giles, M. B., "Nonreflecting Boundary Conditions for Euler Equation Calculations," AIAA Journal, vol.28, No.12, (1990), pp. 2050-2058.

(3) Senoo, S., Shikano, Y., Ikeguchi, T., and Segawa, K., "Three-dimensional Turbulent Flow Analysis through Turbine Blades," Proc. 4th KSME-JSME Fluid Engineering Conference, (1998), pp. 197-200.

(4) Chakravarthy, S.R. and Osher, S.,"A New Class of High Accuracy TVD Schemes for Hyperbolic Conservation Laws", AIAA Paper 85-0363, (1985)

(5) Pulliam, T. H. and Chaussee, D. S., "A Diagonal Form of an Implicit Approximate-Factorization Algorithm", J. Comp. Phys., Vol.39, (1981) p. 347.

(6) Steger, J.L., and Sorenson, R.L., "Automatic Mesh-Point Clustering near a Boundary in Grid Generation with Elliptic Partial Differential Equations", Journal of Computational Physics, Vol.33, (1979), pp.405-410.

(7) Schreiber, H.A., and Starken, H., "Experimental Cascade Analysis of a Transonic Compressor Rotor Blade Section", ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.106, (1984), pp.288-294.

(8) Tweedt, D.L., Schreiber, H.A., and Starken, H., "Experimental Investigation of the Performance of a Supersonic Compressor Cascade", ASME Journal of Turbomachinery, Vol.110, (1988), pp.456-466.




Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

会　告

会　員　各　位

公益社団法人日本ガスタービン学会
会長　筒井康賢

# 2011年度通常総会の開催案内通知と議決権行使の方法について

会員各位には既にご承知のように，日本ガスタービン学会は公益法人化に伴い定款を改定致しました。2011年度通常総会（2012年４月開催）は新定款にしたがって実施するため，従来と少しやり方が異なる部分があります。

定款第15条・16条に記載されております通り，総会の開催通知を理事会の定めるところにより電磁的方法で行うことができます。また「会員に関する規程」第17条により，議決権の行使も学会の承諾があれば電磁的に行うことができます。理事会では2011年度通常総会で従来の郵送に加え，電磁的方法も実施することを決議致しました。そこで以下のような手続きで開催案内の通知，出欠回答，議決権行使を行います。

１．開催案内の送付方法の希望調査

学会から正会員宛てに，通常総会開催案内の送付方法のご希望を調査する文書を近日中に郵送します。同封する返信はがきにより，通常総会開催案内を電子メールで受信するか，郵便で受け取るか，いずれかの希望をお答え下さい。

なお，ご回答は学会メールアドレス（gtsj@pluto.dti.ne.jp）宛に電子メールにていただいても結構です。ご回答がない場合は従来通り郵便にて総会案内を発送させていただきます。

２．通常総会への出欠回答

希望調査で電子メールによる受信を選択された場合は，通常総会への出欠回答及び委任状提出を学会ホームページ内の「会員ページ」上で行うことができます。会員ページは現在整備中で，近日中に稼働します。利用方法は電子メールにてお知らせします。

開催案内の郵送を選択された場合は，従来通り返信はがきにて出欠回答及び委任状提出を行っていただきます。なお，通常総会開催案内は，2012年３月下旬に発送する予定です。

３．議決権の行使

電子メールによる受信を選択された場合は，学会ホームページ内の「会員ページ」にて議決権行使（投票）を行うことができます。

郵送を選択された場合は，同封の返信はがきにより議決権行使（投票）を行うことができます。

４．その他

学会経費削減の観点から，できるだけ「電子メールでの受信」を選択していただきますよう，お願い申し上げます。

以上



Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

会　告

# 「ガスタービン及び過給機生産統計」に関するお詫びと訂正

毎年本学会誌７月号または９月号に掲載しております「ガスタービン及び過給機生産統計」の表６の一部に，複数年にわたり誤記がありましたのでのお知らせ致します。読者の皆様にはご迷惑をおかけしましたことを謹んでお詫びし，訂正致します。

ガスタービン統計作成委員会

表６　X年発電用ガスタービン用途別生産台数及び出力（kW）

| 区分　Size | | | | 大型　Large Unit 22,065kW～ | | 全　出　力 Total | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 用　途 Application | | コード Code | | 台数 Units | 出　力 Output(kW) | 台数 Units | 出　力 Output(kW) |
| | | | | : | | : | |
| 事業用 | ベースロード発電用 | BL | ・・ | A | | B | |
| | ピークロード発電用 | PL | | | | | |
| | 非常用発電用 | EM | | | | | |
| Public Use 事業用　合　計　Total | | | | | | | |
| | | | | | | | |

正誤表

| X 年 | A | | B | | 学会誌掲載号 / 頁 |
|---|---|---|---|---|---|
| | 誤 | 正 | 誤 | 正 | |
| 2005 | 8 | 23 | 11 | 26 | 2006年 Vol.34 No. 4 / 307頁 |
| 2006 | 8 | 0 | 10 | 2 | 2007年 Vol.35 No. 4 / 289頁 |
| 2007 | 8 | 5 | 8 | 5 | 2008年 Vol.36 No. 4 / 301頁 |
| 2009 | 8 | 12 | 8 | 12 | 2010年 Vol.38 No. 5 / 368頁 |
| 2010 | 8 | 6 | 8 | 6 | 2011年 Vol.39 No. 4 / 280頁 |

## 読者の皆様の声をお聞かせ下さい

学会誌編集委員会では，より良い学会誌制作のため，日本ガスタービン学会誌の読者の皆様からのご意見ご要望等を受け付ける窓口（下記メールアドレス）を設置いたしました。どうぞお気軽に皆様からの声をお寄せ頂けますようお願い申し上げます。

お寄せ頂いたものについては学会誌編集委員会委員長が拝読し，必要によっては委員会に諮るなどして，ご意見等を今後の学会誌の中に反映して参りたいと思います。

E-mail：hensyu@gtsj.org

・ご意見をお寄せいただく際は，氏名，会員/非会員の別，ご所属等 をお知らせください。なお，匿名でのご意見はご遠慮下さい。

・技術論文・随筆・書評などの学会誌への投稿については，従来どおり，学会誌巻末の学会誌編集規程に沿って投稿してください。

読者の皆様からの声をお待ちしています。



Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

会　告

## ▷入 会 者 名 簿◁

〔正会員〕

川村　康太(日　立)　稲山　恭太(日　立)　石田　真(島津製作所)　赤木　悠一郎(I H I)

Mohamad Hapiz(東芝ジーイー・タービンサービス)　井筒　大輔(三菱重工)　李　平(三菱重工)

山岸　将太郎(川崎重工)

## ○本会共催・協賛・行事○

| 主催学協会 | 会合名 | 共催/協賛 | 開催日 | 会場 | 詳細問合せ先 |
|---|---|---|---|---|---|
| 日本非破壊検査協会 | 第19回超音波による非破壊評価シンポジウム | 協賛 | 2012/1/26-27 | 東京工業大学　蔵前会館 | 日本非破壊検査協会　学術課<br>TEL:03-5821-5105,FAX:03-3863-6524 |
| 日本金属学会 | 日本金属学会セミナー「高温過酷環境を制する耐食材料/コーティングのさらなる挑戦」 | 協賛 | 2012/3/15-16 | 東京工業大学百年記念館フェライト会議室 | 日本金属学会<br>http://wwwsoc.nii.ac.jp/jim/index-j.shtml<br>TEL:022-223-3685,E-mail:meeting@jim.or.jp |
| 日本計算工学会 | 第17回計算工学講演会 | 協賛 | 2012/5/29-31 | 京都教育文化センター | 日本計算工学会事務局<br>E-MAIL:office@jsces.org<br>URL http://www.jsces.org/17/index.htm |
| 日本機械学会 | 第17回動力・エネルギー技術シンポジウム | 協賛 | 2012/6/21-22 | 九州大学医学部キャンパス百年講堂 | 日本機械学会<br>http://www.jsme.or.jp/pes/Event/symposium.html |

## ◇2012年度会費納入のお願い◇

2012年度会費をお納めいただく時期となりました。
下記金額を所定の口座または事務局宛お送りください。
尚，既に銀行引き落としの手続きをされている方は，2012年3月23日貴口座より引き落としさせていただく予定です。ここにあらためてご連絡させていただきますので，ご了承ください。

| | | |
|---|---|---|
| 賛助会員 | 1口 | 70,000円 |
| 正会員 | | 5,000円 |
| 学生会員 | | 2,500円 |

郵便為替　**00170－9－179578**
銀　行　みずほ銀行　新宿西口支店
普通預金口座　**1703707**
いずれも**口座名は㈳日本ガスタービン学会**です

※会費の納入には，簡単，便利な「口座引き落とし」をお勧めいたします。未だ手続きをなさっておられない方は，巻末の預金口座振替依頼書にご記入の上，事務局までお送り下さい。自動振替をご利用されますと振込手数料は学会負担となります。
事務手続き合理化のため，皆様のご協力をお願いいたします。



Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

## 2011年度役員名簿

**会長**　筒井　康賢（高知工科大）
**副会長**　佃　　嘉章（三菱重工）
**法人管理担当執行理事**　加藤　泰弘（日立製作所），幸田　栄一（電中研），鈴木　　健（ＩＨＩ），六山　亮昌（三菱重工），渡辺　紀徳（東大）
**公益目的事業担当執行理事**　壹岐　典彦（産総研），佐藤　哲也（早大），杉本　隆雄（兵庫県立大），辻田　星歩（法政大），二村　尚夫（JAXA），船崎　健一（岩手大），山根　秀公（防衛省），山本　誠（東京理科大）
**理事**　荒川　忠一（東大），高橋　雅士（東芝），永井　勝史（川崎重工），坂野　貴洋（中部電力），宮原　忠人（東京ガス）
**監事**　本阿弥眞治（東京理科大），吉田　豊明（ＪＡＸＡ）

## 2011年度委員名簿（順不同）　2011年10月６日現在

○は委員長

**企画委員会**　○幸田　栄一（電中研），太田　　有（早大），加藤　泰弘（日立），鈴木　　健（ＩＨＩ），六山　亮昌（三菱重工），渡辺　紀徳（東大）
**国際委員会**　○渡辺　紀徳（東大），荒木　秀文（日立），石田　克彦（川崎重工），太田　　有（早大），岡井　敬一（ＪＡＸＡ），小森　豊明（三菱重工），中村　良也（アイ・エヌ・シー・エンジニアリング）廣光　永兆（ＩＨＩ），福田　雅文（物材研），藤綱　義行（ＥＳＰＲ組合），船崎　健一（岩手大），松田　　寿（東芝），山根　　敬（ＪＡＸＡ），山本　　誠（東京理科大）
**運営委員会**　○渡辺　紀徳（東大），伊藤　高根，川上　龍太（東京電力），幸田　栄一（電中研），小森　豊明（三菱重工），酒井　義明（東芝），佐藤　哲也（早大），杉本　隆雄（兵庫県立大），鈴木　　健（ＩＨＩ），二村　尚夫（ＪＡＸＡ），笠原　公輔（ＩＨＩ）
**学術講演会委員会**　○壹岐　典彦（産総研），内田　竜朗（東芝），斉藤　圭司郎（三菱重工），高橋　康雄（日立製作所），武田淳一郎（富士電機），東部　泰昌（川崎重工），長谷川武治（電中研），姫野　武洋（東大），平野　孝典（拓殖大），山本　　武（ＪＡＸＡ），仲俣千由紀（ＩＨＩ）
**集会行事委員会**　○二村　尚夫（ＪＡＸＡ），吉田　征二（ＪＡＸＡ），岡　　芳彦（三井造船），木村　武清（川崎重工），酒井　英司（電中研），澤　　徹（東芝），谷光　玄行（ＩＨＩ），伊村　　晋（ＪＡＬエンジニアリング），中村　友行（防衛省），西村　英彦（三菱重工），松沼　孝幸（産総研），三嶋　英裕（日立），山形　通史（富士電機），山根　秀公（防衛省），山本　　誠（東理大），吉田　英生（京大）
**ガスタービン技術普及委員会**　○山根　秀公（防衛省），秋山　　陵（日立），木村　武清（川崎重工），斉藤　大蔵（東芝），伊村　　晋（ＪＡＬエンジニアリング），福山　佳孝（ＪＡＸＡ），古川　洋之（ＩＨＩ），宮原　忠人（東京ガス），村田　　章（農工大），屋口　正次（電中研），山本　　誠（東理大），渡辺　紀徳（東大）
**学会誌編集委員会**　○船崎　健一（岩手大），壹岐　典彦（産総研），坂野　貴洋（中部電力），佐藤　哲也（早大），辻田　星歩（法政大），宮原　忠人（東京ガス），荒木　秀文（日立），柏原　宏行（川崎重工），吉野　展永（ＩＨＩ），刑部　真弘（東京海洋大），加藤　千幸（東大），川上　龍太（東京電力），岸根　　崇（三菱重工），佐々木　直人（ＩＨＩエアロスペース），鈴木　伸寿（東芝），檀原　伸補（防衛省），寺本　　進（東大），中野　　健（ＩＨＩ），早田　陽一（ダイハツ），服部　学明（三井造船），北條　正弘（ＪＡＸＡ），三鴨　正幸（中部電力），山下　一憲（荏原），渡辺　和徳（電中研）
**英文論文集編集委員会**　○渡辺　紀徳（東大），山根　　敬（JAXA），壹岐　典彦（産総研），石田　克彦（川崎重工），太田　　有（早大），加藤　　大（ＩＨＩ），幸田　栄一（電中研），柴田　貴範（日立），田頭　　剛（JAXA），姫野　武洋（東大），船崎　健一（岩手大），山本　武（JAXA），山本　　誠（東京理科大），吉岡　洋明（東芝）
**ガスタービン統計作成委員会**　○辻田　星歩（法政大），山上　展由（三菱重工），荒木　伸二（日立），井出　琢磨（ＩＨＩ），野村　藤樹（ターボシステムズユナイテッド），澤　　徹（東芝），白石　　隆（三菱重工），原田　　純（川崎重工），米田　幸人（ヤンマー）
**広報委員会**　○杉本　隆雄（兵庫県立大），東部　泰昌（川崎重工），姫野　武洋（東大），船崎　健一（岩手大），松沼　孝幸（産総研），山根　　敬（ＪＡＸＡ）
**表彰委員会**　○佃　　嘉章（三菱重工），佐藤　哲也（早大），壹岐　典彦（産総研），二村　尚夫（ＪＡＸＡ），船崎　健一（岩手大），六山　亮昌（三菱重工），渡辺　紀徳（東大）
**産官学連携委員会**　○渡辺　紀徳（東大），本阿弥眞治（東理大），赤城　正弘（防衛省），壹岐　典彦（産総研），石井　潤治（東芝），岡崎　正和（長岡技術科学大），幸田　栄一（電中研），永留　世一（川崎重工），西澤　敏雄（ＪＡＸＡ），幡宮　重雄（日立），福泉　靖史（三菱重工），藤岡　順三（物質・材料研），船崎　健一（岩手大），古川　雅人（九大），満岡　次郎（ＩＨＩ），吉田　英生（京大）
**創立40周年事業準備委員会**　○筒井　康賢（高知工科大），太田　　有（早大），幸田　栄一（電中研），福山　佳孝（ＪＡＸＡ），二村　尚夫（ＪＡＸＡ），船崎　健一（岩手大），山本　　誠（東理大），渡辺　紀徳（東大）
**調査研究委員会**　○濱　　純（産総研），壹岐　典彦（産総研），岸部　忠晴（日立製作所），小森　豊明（三菱重工），辻田　星歩（法政大），永井　勝史（川崎重工），満岡　次郎（ＩＨＩ），山本　　悟（東北大）
**ACGT2012実行委員会**　○山根　　敬（ＪＡＸＡ），福田　雅文（物質・材料研），船崎　健一（岩手大），松田　　寿（東芝），山本　　誠（東理大），渡辺　紀徳（東大）

**2011年国際ガスタービン会議大阪大会実行委員会**

**委員長**　武石　賢一郎（阪大）
**副委員長**　佐藤　幹夫（電中研）
**幹事**　岡井　敬一（ＪＡＸＡ）
**総務委員会**　○藤岡　照高（電中研），高西　一光（関西電力），小田　豊（阪大），長谷川　武治（電中研），水川　雅夫（関西電力），木村　武清（川崎重工），高田　和正（三菱重工），野崎　理（ＪＡＸＡ）
**論文委員会**　○辻本　良信（阪大），山本　誠（東理大），山崎　伸彦（九大），中田　俊彦（東北大），渡辺　紀徳（東大），牧野　敦（ＪＡＸＡ），今成　邦之（ＩＨＩ），太田　有（早大），金子　成彦（東大），吉岡　洋明（東芝），古川　洋之（ＩＨＩ），壹岐　典彦（産総研），船崎　健一（岩手大），赤松　史光（阪大），田沼　唯士（帝京大），幸田　栄一（電中研），伊藤　栄作（三菱重工），柴田　貴範（日立），齋藤　英治（日立），谷村　和彦（川崎重工），西岡　卓宏（日立プラントテクノロジー）
**財務委員会**　○山脇　栄道（ＩＨＩ），廣川　順一（ＩＨＩ），笠原　公輔（ＩＨＩ），杉浦　裕之（川崎重工）
**展示委員会**　○正田　淳一郎（三菱重工），小森　豊明（三菱重工），北山　和弘（東芝），塚原　章友（三菱重工），岸根　崇（三菱重工），原　浩之（三菱重工），山本　智彦（三菱重工），［正］鈴木　伸寿（東芝），［副］石川　揚介（東芝），吉國　孝之（ＩＨＩ），西村　真琴（日立），井上　俊彦（川崎重工），山形　通史（富士電機），友田　俊之（関西電力），柳澤　徹（大阪ガス），山田　秀志（ＪＡＸＡ），中村　昌義（ＧＥ）
**行事委員会**　○木下　康裕（川崎重工），堀川　敦史（川崎重工），安田　耕二（日立），松尾　亜紀子（慶大），瀬川　大資（大阪府大），岩井　裕（京大），西村　英彦（三菱重工）
**顧問**　大田　英輔（早大名誉教授），川口　修（慶大名誉教授），大槻　幸雄（川崎重工），玉木　貞一（ＩＨＩ），塚越　敬三（三菱重工）



Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

# 編集後記

新年あけましておめでとうございます。

震災発生から10か月が経過しました。皆様が，早く震災前の生活に戻れることと，今年が良い一年になることを強く願っています。

また，ガスタービン学会は設立40年という節目の年になるようです。学会の更なる発展と飛躍を期待するとともに，学会員として協力していきたいと思っています。

震災時の原子力発電所の事故を発端に全国の原子力発電所が停止し，全国的な電力不足の継続が懸念されています。

このような状況において，原子力発電所の代替電源として注目されたのが，風力や太陽光を利用した「再生可能エネルギーを利用した発電装置」です。自然の力をエネルギー源とし，環境にやさしい発電方法であるので，最も普及が望まれる電源設備です。しかし，発電コストは大型発電設備と比較してもまだ割高で，発電可能な出力は気象等に影響されるなど，安定した代替電源となるには，課題が残っています。

もう一つ代替電源として注目されているのが「自家用発電設備」です。従前から，工場や大型ビル等では，自家用電源だけでなく排熱を空調機器等で利用するコージェネレーションとして採用されてきました。震災以降，この設備が非常用電源として使用できることが，理由になっています。発電装置には，使用燃料は，石油（重油・軽油），ガス等，原動機は，ガスタービンだけでなくディーゼルエンジン，ガスエンジンと複数の選択肢がある。特に発電用燃料費は，市況に大きく左右されるため，高効率発電装置の開発や排熱を有効活用できるシステムの構築が，重要な課題でもあります。

2011年９月号では「再生可能エネルギーの利用」について紹介したので，2012年１月号では「自家用発電設備」について紹介することとしました。

本紙読者はガスタービンを専門とする方が大半だと思いますが，学会がガスタービンに限らずエネルギー関連の技術領域へ拡大する方針もあり本号では「特集：小型／発電装置の現状と開発動向」と題し，ディーゼルエンジンやガスエンジンの状況だけでなく，これらを利用したシステムの事例を紹介することとしました。

この特集が，ガスタービンに関する方々だけでなく，発電装置やコージェネシステム等に携わる方々にも興味を持っていただき震災復興および震災対策になることを期待しています。

最後になりますが，本号刊行にあたり，執筆者の方々にはお忙しいなか，快く原稿作成をお引き受けいただき，ありがとうございました。編集委員一同，心よりお礼申し上げます。なお，本号の企画編集は，荒木委員（日立製作所），檀原委員（防衛省），山下委員（荏原製作所），および三鴨（中部電力）が担当しました。　（三鴨　正幸）

（表紙写真）

今回の表紙については論説・解説の各著者より提供・流用しております。詳細については各記事を御参照ください。


・小型ガスタービン発電装置の動向について
……（P. 8 ～ 14）
・自家発電
……（P.34 ～ 40）


# ☘事務局だより✉☘

明けましておめでとうございます。会員の皆様の年越しは如何でしたでしょうか。

昨年を振り返りますと日本は東日本大震災，福島原発事故，超円高と未曾有の苦難に遭遇し，経済的にも大変な一年となりました。被災された方々はまだまだご苦労されており，お見舞いを申し上げます。ガスタービン学会は，この厳しい三重苦の中で４年に一度の大イベントであるIGTC11大阪大会を迎えました。当初，アブストラクトは259編（海外132編）の申込があり，大成功を予感させていましたが，原発事故直後は多くの外国人が日本から引き上げる事態となり，一転して開催を危ぶむ状態になりました。しかし，実行委員会をはじめ会員の皆様の「大会を成功させるのだ」という強い思いが通じ，481名（海外115名）が参加する大盛会となりました。一部セッションは立ち見も出るほどで，事務局としては会場の写真を撮りに行くたびに元気をいただきました。ご参加下さいました皆様，改めてお礼を申し上げます。

さて，今年は創立40周年にあたり記念行事が予定されていますが，手始めに本１月号の表紙に記念ロゴが入りました。また，４月には公益社団法人としての最初の通常総会を迎えますが，総会はこれまでとすっかり様変わりをする予定です。何より議決権行使の方法に電子投票が加わります。もうすぐその案内レターがお手元に届くかと思いますが，利便性の向上とともに経費の節約にもなりますので皆様の積極的な電子投票のご利用をお願いしたいと思います。特に今回は一昨年定めました定款の一部不備を改訂する予定でいます。定款改定には正会員の３分の２以上（約1300人以上）の賛成が必要となりますので例年になく多くの会員の皆様の議決権行使を重ねてお願い申し上げます。

最後に，今年一年の皆様のご健勝とお仕事の発展を祈念して筆を置きます。　（平岡克英）



Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.

## 学会誌編集規定

2003.8.29改訂

１．本学会誌の原稿はつぎの３区分とする。
Ａ．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。
Ｂ．依頼原稿：本学会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。執筆者は会員外でもよい。
Ｃ．学会原稿：学会の運営・活動に関する記事（報告，会告等）および学会による調査・研究活動の成果等の報告。

２．依頼原稿および投稿原稿は，ガスタービン及び過給機に関連のある論説・解説，講義，技術論文，速報（研究速報，技術速報），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，その他とする。刷り上がりページ数は原則として，１編につき次のページ数以内とする。

| | |
|---|---|
| 論説・解説，講義 | 6ページ |
| 技術論文 | 6ページ |
| 速報 | 4ページ |
| 寄書，随筆 | 2ページ |
| 書評 | 1ページ |
| 情報記事欄 | 1/2ページ |

３．執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し，編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記１に示す。

４．会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は，編集委員会が定める方法により審査され，編集委員会の承認を得て，学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては，別に技術論文投稿規程を定める。

５．依頼原稿および学会原稿についても，編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は，査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。

６．依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。

７．学会誌に掲載された著作物の著作権は原則として学会に帰属する。
　但し，著作者自身または著作者が帰属する法人等が，自ら書いた記事・論文等の全文または一部を転載，翻訳・翻案などの形で利用する場合，本会は原則としてこれを妨げない。ただし，著作者本人であっても学会誌を複製の形で全文を他の著作物に利用する場合は，文書で本会に許諾を求めなければならない。

８．著作者は，学会または学会からの使用許諾を受けた者に対し著作者人格権を行使しない。

９．本会発行の著作物に掲載された記事，論文などの著作物について，著作権侵害者，名誉毀損，またはその他の紛争が生じた場合，当該著作物の著作者自身又は著作者の帰属する法人等を当事者とする。

付記1．原稿送付先および原稿執筆要領請求先
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5158　Fax. 03-5733-5164
ニッセイエブロ㈱ 制作部 編集制作課
E-mail：eblo_h3@eblo.co.jp
学会誌担当　佐藤孝憲

## 技術論文投稿規定

2010.8.27改訂

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）投稿原稿は著者の原著で，ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
3）投稿原稿は，一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし，要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。
２．使用言語は原則として日本語とする。
３．投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてＡ４版刷り上がり６ページ以内とする。ただし，１ページにつき16,000円の著者負担で４ページ以内の増ページをすることができる。
４．図・写真等について，著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。
５．投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し，正原稿１部副原稿（コピー）２部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。
６．原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。
７．投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し，編集委員会で採否を決定する。
８．論文内容についての責任は，すべて著者が負う。
９．本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては，学会誌編集規定７．および８．を適用する。

**日本ガスタービン学会誌**
**Vol.40　No.1　2012.1**
発行日　2012年１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　船﨑　健一
発行者　筒井　康賢
〒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㈱
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5158　Fax. 03-5733-5164

©2012，公益社団法人日本ガスタービン学会

**複写をご希望の方へ**
本学会は，本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。
本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は，㈳学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し，企業等法人による社内利用目的の複写については，当該企業等法人が社団法人日本複写権センター（㈳学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては，その必要はございません（社外頒布目的の複写については，許諾が必要です）。

権利委託先　一般社団法人 学術著作権協会
〒107-0052　東京都港区赤坂９－６－41　乃木坂ビル３Ｆ
FAX：03-3457-5619　E-mail：info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用，転載，翻訳等）に関しては，㈳学術著作権協会に委託致しておりません。直接，本学会へお問い合わせください。



Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.204, 2025/07/04.