原子力発電所向け
高耐震型非常用ガスタービン発電機設備の開発

Development of Emergency Gas Turbine Generator Unit
with High Earthquake Proof for Nuclear Power Plants

中丸 敬士[*1] Keiji Nakamaru
千頭 倫太郎[*2] Rintaro Chikami
岩佐 佳成[*3] Yoshinari Iwasa
前田 敬弘[*4] Takahiro maeda
長谷部 元彦[*5] Motohiko Hasebe

東日本大震災に起因する原発事故を受けて制定された新規制基準において，原子力発電所に設置されている非常用電源に対して多様性及び独立性(位置的分散)を有する電源の追設が求められた。この要求に適合するため，当社では，既設非常用電源と原理や冷却手段の異なる非常用発電設備として，世界初となる原子力発電所向け高耐震型ガスタービン発電機設備(MEG-6000)の開発に着手。主要な機器をパッケージ内に納めるようにシステム設計された本設備の基本仕様，耐震性，信頼性などについて検証・実証し，非常用発電機設備として完成させた。本設備は原子力規制委員会の認可を取得し，現地据付工事，試運転も完遂している。製作済のものも含め，約 20 台のガスタービン発電機設備を設置する計画であり，原子力発電所向け高耐震型非常用ガスタービン発電機設備として着実に実績を重ねている。

1. はじめに

東日本大震災に起因する原発事故を受け，世界最高水準の安全性確保を目的とした，新規制基準が施行された(2013 年7月)。この新規制基準では，原子力発電所に以前から設置されている非常用電源に対して，多様性及び独立性(位置的分散)を有する様々なバックアップ電源の追設が求められ，この要求を満たす新たな電源の開発が必要となった。当社は新たなバックアップ電源として，耐震性，信頼性を有するガスタービン発電機設備(以降，GTG 設備)の開発に取り組んだ。本報では，GTG 設備導入の背景，GTG 設備の基本仕様，耐震性・信頼性等の技術的検討事項，及び原子力許認可対応実績，納入実績について紹介する。

2. ガスタービン発電機設備導入の背景

2.1 東日本大震災発生時の非常用電源の状況

東日本大震災における原発事故では，地震に伴い発生した津波により，事故収束に必要な安全設備に電力を供給する非常用電源(水冷式ディーゼル発電機設備)が機能喪失したことが，事故の大きな要因の一つとなった。この経験を踏まえ，新たに制定された新規制基準では，地震・津波に対する頑健性を更に高めるため，電源の多重性に加えて多様性(共通要因による故障の防止)及び独立性(位置的分散)が要求され，この規制要求に適合する新たな非常用発電機設備の開発が必要となった。

2.2 新規制基準における非常用電源の構成

新規制基準を踏まえた原子力発電所の非常用電源構成を図1に示す。従来は，非常用の交

*1 原子力セグメント プラント設計部
*2 原子力セグメント プラント設計部 主席技師
*3 原子力セグメント プラント設計部 部長
*4 原子力セグメント プラント設計部 次長
*5 原子力セグメント プラント設計部 課長

流電源設備としてディーゼル発電機設備(水冷式)2台が設置されていたが，新規制基準施行により，重大事故(注1)及び特定重大事故(注2)に対応するバックアップ電源の追加が必要となった。また，これらの追加電源は，従来の非常用電源に対する多様性及び独立性が要求されている。

当社は，原子力発電所の安全性向上に貢献すべく，新規制基準の要求を満たす新たな非常用電源の開発に着手した。機関型式は，既設非常用発電機設備で採用されているディーゼル機関と原理(熱サイクル)が異なり，かつ，冷却方式も水を必要としない空冷式である，ガスタービン機関を選定した。

注1：想定された設計基準事故を超える，炉心の著しい損傷等の原子力発電所における重大な事故

注2：故意による大型航空機の衝突その他のテロリズムによる炉心の著しい損傷等の重大な事故

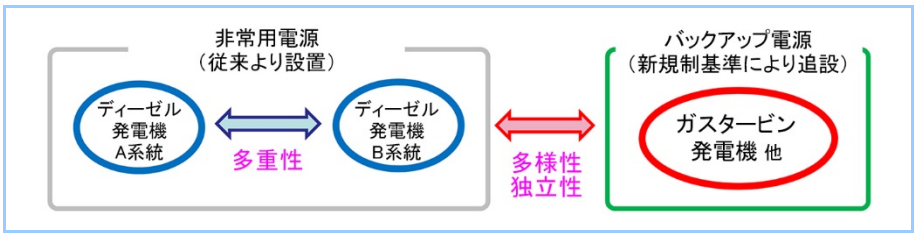

図1　新規制基準を踏まえた原子力発電所の非常用電源構成

3. ガスタービン発電機設備のシステム構成，基本仕様

当社製GTG設備全体のシステム構成例を図2に示す。エンクロージャ(設備を構成する機器を格納するための筐体)内にガスタービン機関，発電機，減速機及びその他付帯設備など主要な機器を設置し，パッケージ化している(図3)。ガスタービンは，圧縮機にて燃焼用空気を吸気し，燃料油貯蔵タンクから供給される燃料油を燃焼器で燃焼させることで高温・高圧な燃焼ガスを生成する。燃焼ガスは熱エネルギーをタービンにて回転エネルギーに変換し，動力を取り出したのちに排気ガスとして屋外へ放出される。エンクロージャ内の換気系統は，ガスタービン機関，発電機，その他構成機器から出る排熱の換気に加え，潤滑油冷却器の熱交換に必要な冷却空気も同じ系統内で共用するシンプルな構成とした。

ガスタービンパッケージの基本仕様を表1に示す。原子力発電所における重大事故事象または特定重大事故事象時に対応する非常用電源として，出力は6000kVAに設定した。また非常時に速やかに安全設備へ給電するため60秒以内の急速起動が可能である。

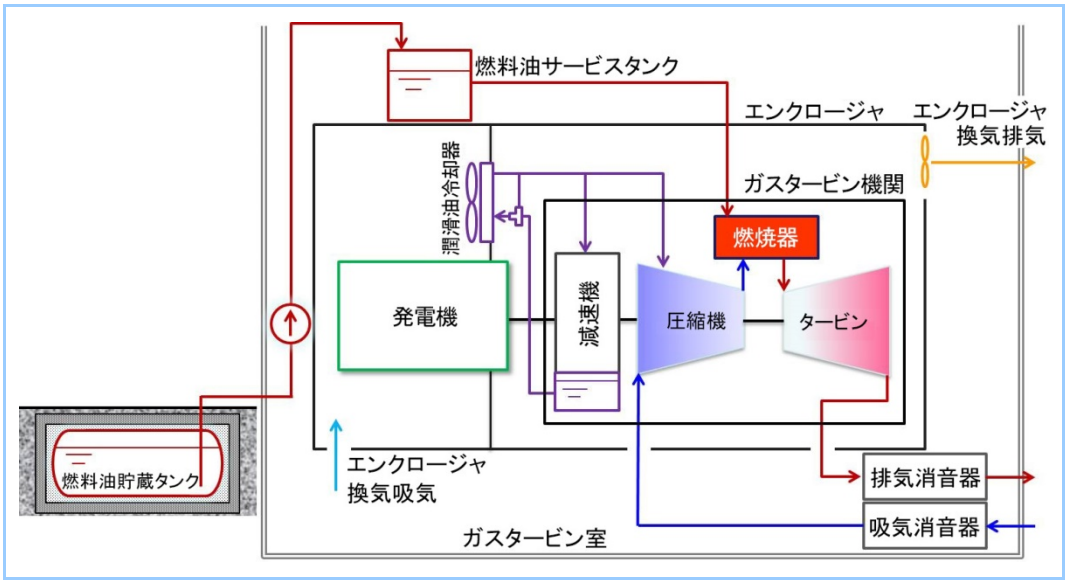

図2　ガスタービン発電機設備のシステム構成例

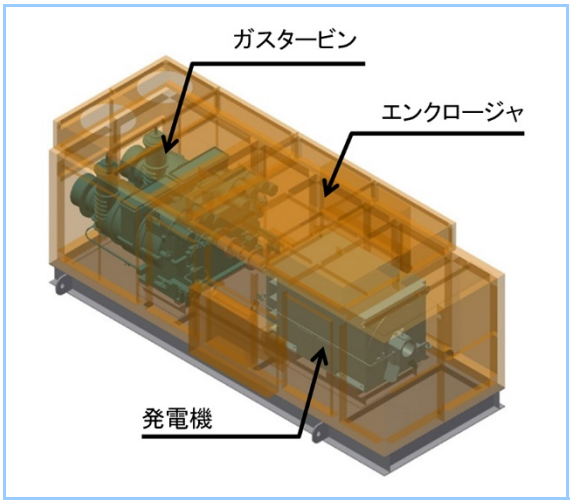

図3 ガスタービンパッケージ外観

表1 ガスタービンパッケージ基本仕様

項目	仕様
機種	MEG-6000
定格出力	6 000kVA/6 900V (4 800kW)
周波数	50/60Hz
始動時間	60 秒以内
使用燃料	軽油・A重油
寸法	3.2m×8.3m×3.7m(高さ)
重量	約 53ton

4. 原子力発電所への GTG 採用に伴う検討事項

新規制基準施行前において，日本国内の原子力発電所向けに高耐震型 GTG(Gas Turbine Generator)設備の納入実績はなく，当社は，新規制基準及び従来の各種規制に対応する GTG 設備を新たに設計，検証した。以下に当社製 GTG 設備の技術的特徴及び原子力発電所への採用に伴う検討事項を示す。

4.1 多様性，独立性の確保

原子力発電所の既設非常用電源はディーゼル機関を用いた設備であるが，当社は熱サイクル，及び冷却方式の観点で多様性を有する機関としてガスタービンを採用した。

ガスタービン機関とディーゼル機関の各熱サイクルにおける燃焼プロセスの比較を図4に示す。同じ内燃機関であるが，ディーゼル機関が熱エネルギーを一旦往復運動に変換後，回転運動に変換して動力を得るのに対し，ガスタービン機関は直接回転運動に変換して動力を取り出す。このプロセスの違いが新規制基準における非常用電源の多様性の要求を満たす。また，原子力発電所に設置されているディーゼル機関は海水による間接的な水冷式だが，ガスタービン機関は海水を必要としない空冷式であり，この点においても多様性を満足する。更にガスタービン機関は海水供給設備の近くに設置する必要がないため，津波の影響を受けない高台への設置が可能であり，位置的分散の観点からも自由度が高い設備である。

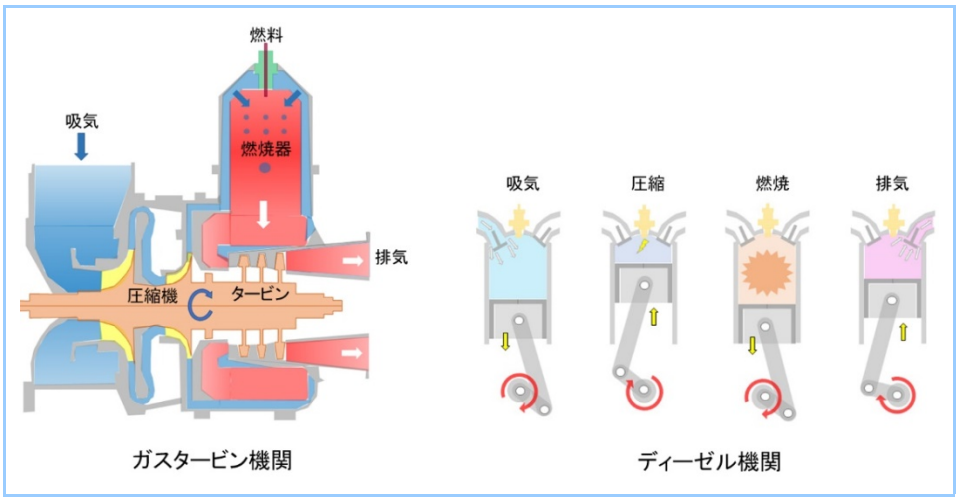

図4 ガスタービン機関とディーゼル機関の燃焼プロセスの比較

4.2 原子力要求を満たす耐震性の検証

(1) ガスタービン機関の耐震性の検証

地震発生時においても，原子力発電所の安全設備に電力を供給するために GTG 設備は設

計上想定する最大の地震動(基準地震動)に対して耐える必要がある。これを実現するためのガスタービン機関の耐震性を解析評価により設計・検証した。

ガスタービン機関は JEAG4601 に機能維持確認済加速度(加振試験により耐震性が検証された加速度)の記載がないことから,既往知見や過去の審査実績を参照しつつ,FEM(Finite Element Method)解析(有限要素法を用いた数値解析)等を利用した地震時の挙動確認や耐震評価の手法を確立し,地震発生時にガスタービン機関の機能が維持できることを確認した。

なお,ガスタービン機関の実機大の加振試験においても,水平方向約 2.2G,鉛直方向約 3.1G の加速度に対する耐震性を確認している[1](図5)。

図5 ガスタービン機関単体加振試験

(2) 付帯設備の耐震性の検証

ガスタービン機関以外の付帯設備(エンクロージャ,ポンプ・タンク・ダクト・配管等)についても,従前の通り JEAG4601 の評価手法に基づき耐震性を確認した。その中でも高温な排気ガス(約 600℃)の流路となる排気系統機器では,耐震性(高い剛性)に加えて相反する特性となる耐熱性(熱伸びの吸収)との両立が必要であるが,特に熱負荷の大きいガスタービン機関排気出口に設置される排気消音器では実現が容易でない。しかし当社は,原子力プラント向けの耐震評価手法と高温機器向けの伝熱解析等を用いた設計手法を総合した検討により異なる機能・特性を両立させた構造を実現した。同構造では図6に示すように,比較的温度の低い機器外側に剛性の高いフレーム材を配置して耐震性を確保する一方,高温ガスに晒される内側の消音部は熱伸びを拘束しないパネル状の構造とした。支持板の上に載せられ抑え板で面方向に支えられているパネルは面内方向にスライドして熱伸びを吸収可能であり,隣り合うパネルが接触しても互いに拘束しないため熱応力の発生を抑制できる。この機器内外で機能を分離した二重構造を採用することにより,耐震性と信頼性の両立を達成している(特許第 6649119 号)。

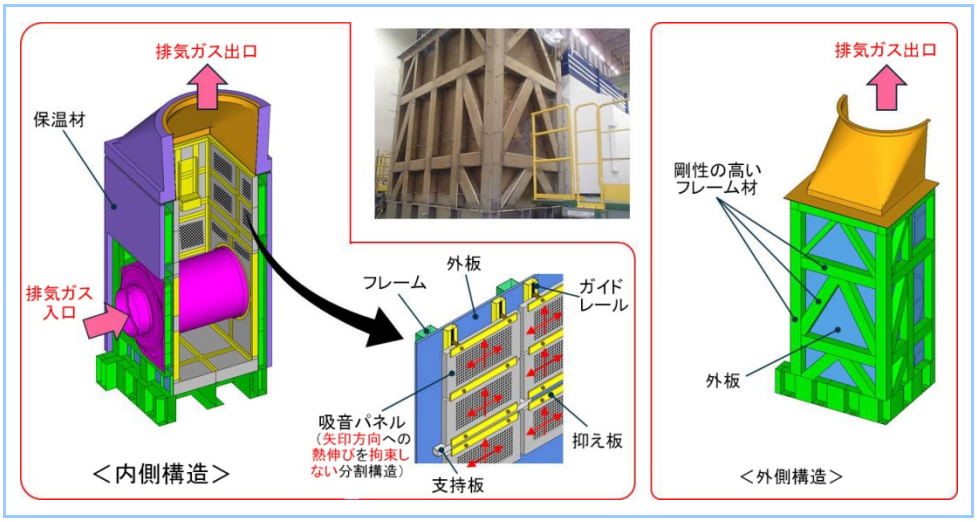

図6 スライド式消音部パネル概要図

4.3 非常用電源としての信頼性の検証

GTG 設備には以前から設置されている非常用発電機設備と同等の高度な信頼性が要求されることから，既設の非常用ディーゼル発電機設備向けの米国規格 IEEE Std 387 に規定された信頼性検証試験（Initial Type Tests）に準じて，実機を用いて信頼性を検証した。

信頼性検証試験は表2に示す3つの試験項目から構成されており，2014 年1～2月にかけて当社神戸造船所内施設にて実施した。

表2 ガスタービン信頼性試験内容

信頼性検証試験	内容
負荷試験	指定された期間の定格負荷による連続運転，及び負荷切り離し運転による機関性能の健全性確認
起動信頼性試験	実機要求を満たす時間内での起動，及び負荷投入による機関動作の健全性確認
マージン試験	実機要求出力の 10%を超える負荷への瞬時投入・遮断における電圧，周波数の変動制御に対する健全性確認

(1) 負荷試験

負荷試験では主として100%定格負荷による24時間連続運転を行い，燃料消費量，排気ガス温度等の機関性能に関する健全性，安定性を確認した。燃料消費量の検証により，燃料貯蔵量に対する設計精度の高さを証明し，新規制基準において要求される特定重大事故等における“外部電源喪失後7日間の電力供給”に対しても燃料消費量の信頼性が担保されることを確認した。

(2) 起動信頼性試験

起動信頼性試験では，100 回連続の起動・停止運転を行い，運転指令に対する機関動作の健全性を確認した。本試験は，機関が完全に冷却されていない状態（温態状態）で，60 秒以内での急速起動と停止操作を繰り返す非常用発電機設備特有の過酷な試験である。本試験も支障もなく達成し，緊急時の対応の電源として信頼性の高さが証明された。

(3) マージン試験

マージン試験は，実機運用で要求される最大出力より 10%大きい負荷へ瞬時投入後，及び遮断後に変動する電圧，周波数を整定させる制御の健全性を検証する。試験では規格要求よりも更に広い 100%定格負荷の範囲で投入・遮断を行い，健全性を確認した。本試験にて，ガスタービン機関の持つ高速で大きな回転慣性力による負荷変動に対する高い安定性も確認でき，制御健全性と合わせて高い信頼性が証明された。

以上に示すように GTG 設備（MEG-6000）は，IEEE に準じた信頼性検証試験を国内で唯一達成した原子力発電所向け GTG 設備として高い信頼性が実証されている（図7）。

図7 GTG 設備信頼性試験関係者集合写真

5. 許認可実績/工事実績

原子力発電所への設置にあたっては，原子炉等規制法に基づき，設置許可申請，工事計画に対する原子力規制委員会の許認可が必要となる。当社製 GTG 設備は世界最高水準とされている新規制基準に基づく審査を通過し認可を取得している(2020 年 10 月時点において川内 1/2 号，高浜 3/4 号，高浜 1/2 号，伊方3号，玄海 3/4 号機の計9プラントで認可取得)。

また，当社製 GTG 設備は 2018 年3月に初号機を納入し，2020 年 10 月時点で計7基の現地据付，試運転を完了している。今後，上記の設置済分も含めて 20 台以上の GTG 設備の設置が計画されており，国内初の原子力発電所向け高耐震型非常用 GTG 設備として着実に実績を重ねている。

6. まとめ

当社は世界最高水準の新規制基準の要求を満たし，多様性，耐震性，信頼性を有するガスタービン発電機設備を新規に開発し，国内原子力発電所への納入工事を鋭意進捗中である。東日本大震災における原発事故の教訓から，有事にプラントを安全に収束するための電源の確保は，原子力発電所の安全性に重要な役割を担うことが改めて認識された。当社は信頼性の高いガスタービン発電機設備の製作，納入を通じて非常用電源の信頼性向上に努めると共に，ガスタービン発電機設備のみでなく，非常用ディーゼル発電機設備や電源車など様々な非常用電源をプラント仕様に応じて適切にシステム設計することで，非常用電源全体の信頼性向上を図り，ひいては原子力発電所の安全性向上に貢献していく所存である。

参考文献

(1) 緒方 善樹他，Initial Type Test Result of Class 1E Gas Turbine Generator System，(2013)，https://www.nrc.gov/docs/ML1400/ML14002A353.html