

# BWR プラントの再稼働支援への取組み

## Efforts to Support for Restarting BWR Plants



高永 恭平*1 Kyohei Takanaga	棕橋 泰明*2 Yasuharu Kurahashi
竹本 淳*3 Jun Takemoto	池田 祐人*2 Yuto Ikeda
斉藤 健太*2 Kenta Saito	

“GX”(グリーン転換フォーメーション:CO<sub>2</sub>を排出しないクリーンエネルギー中心への転換)実現に向けた2030年温室効果ガス排出量46%削減を達成するために、三菱重工株式会社はPWR再稼働支援の経験を踏まえてBWR再稼働を支援している。本報では、PWR再稼働支援で培った総合調整力及び知見・経験を活かして、新規規制基準に適合すべく取り組んでいるBWRプラントの安全対策工事の事例を紹介する。当社は、この取組みを通して、プラントの安全・安定運転に貢献していく。

### 1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震に伴う福島第一原子力発電所事故(以下、福一事故)を発端に実用発電用原子炉及び核燃料施設等に係る新規規制基準(以下、新規規制基準)が施行された。従来の規制基準と新規規制基準の比較は図1に示すとおりであり、事故の教訓と自然災害が多い日本の特徴を踏まえ、設計想定事象(地震、津波)のほか自然現象(竜巻、火山等)など広範囲に渡って対策が強化された。また、万が一の重大事故や意図的な航空機衝突等を考慮し、設計想定を超える事故(シビアアクシデント)対策やテロ対策(意図的な航空機衝突やその他テロリズム等)が規定された。

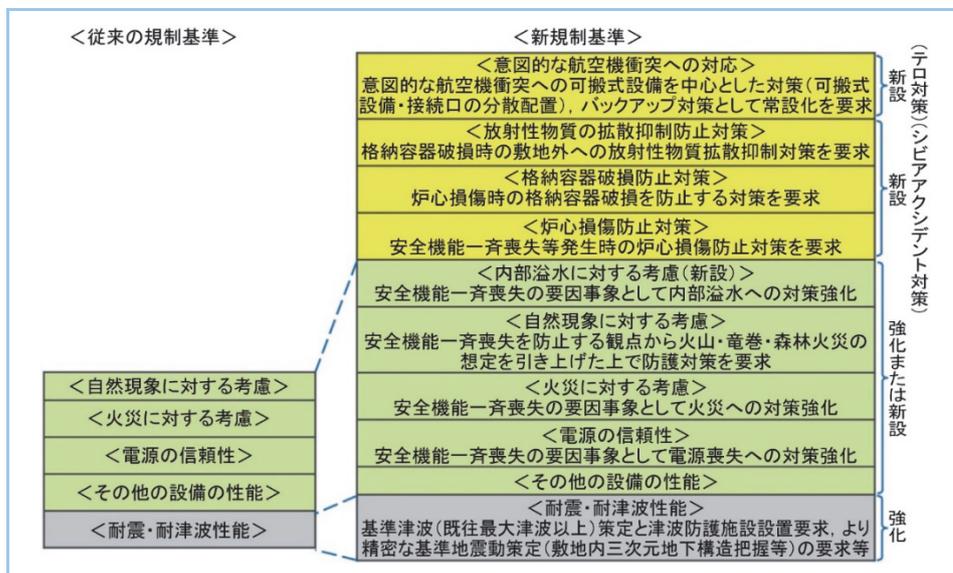


図1 従来の規制基準と新規規制基準の比較

\*1 原子力セグメント 軽水炉保全プロジェクト部  
\*3 原子力セグメント 機器設計部 首席技師

\*2 原子力セグメント プラント設計部



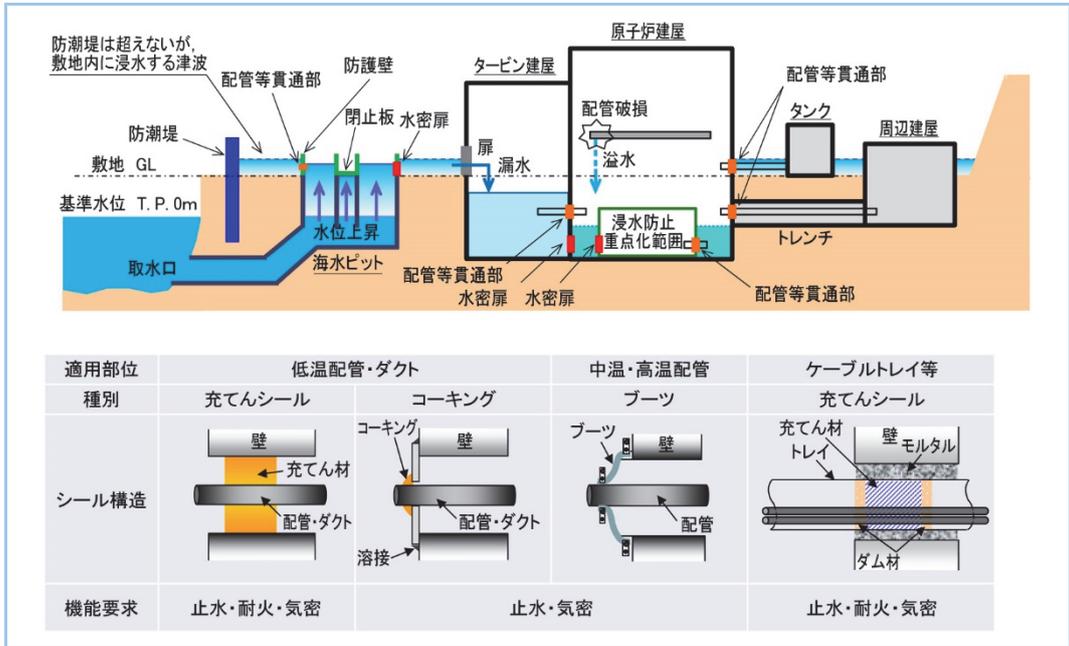


図3 原子力プラント建屋貫通部

2.3 竜巻対策設備について

新規制基準では、自然現象の一つである竜巻への防護措置が求められる。当社は PWR プラント向けに複数の対策設備を設計、製作、据付けしており、そこで得た知見・経験をベースとし、BWR プラントの再稼働を支援している。ここでは、BWR 支援実績のうち当社独自設計として、海水ポンプエリアの竜巻対策設備について紹介する。

一般的に、海水ポンプはコンクリート製のピット内に設置されており、竜巻発生時の風による影響は軽微である。しかしながら、ピット周辺の鋼材等が竜巻により浮き上がり、ピット上方の開口部からピット内へ飛来し、海水ポンプに衝突することで海水ポンプが機能損失する可能性がある。したがって、ピット開口部に竜巻対策設備を設置し、竜巻時に想定される飛来物から海水ポンプを防護する必要がある。

飛来物として想定される鋼材等の衝突速度は最大で約 50m/s であり、竜巻対策設備は飛来物が衝突したとしても損傷しない頑強な構造とする必要がある。一方、ピット開口部は各辺約 25m の矩形であり、鋼板やコンクリートのみで開口部を覆う場合、構造体は重量物となり、地震時の慣性力によって、大きな地震荷重が生じる。このため地震荷重低減を目的として、ピット開口部の広範囲に高強度の硬鋼線材製ネットを採用することで、竜巻対策設備の軽量化を図った。また、定着部にゴム支承(加硫ゴムと鋼板の積層構造)を採用した免震化により、設備の振動特性を意図的に長周期化させ、地震波と共振しない構造とした。図4に竜巻対策設備の構造を示す。

ゴム支承は、豊富な適用実績があり、技術検証済の道路橋用の技術をベースとし、新規制基準で要求される飛来物衝突時の構造健全性について検証した。具体的には、モックアップ試験にて、衝突した瞬間のゴム支承の剛性を取得し、それを飛来物衝突シミュレーション解析モデルに反映することで、衝突時のゴム支承の構造健全性を確認し、原子力設備として許認可を取得した。

また竜巻対策設備は、海水ポンプの定期点検の際に取り外す必要があり、フレームの両端はボルトで固定する設計としている。現地据付け時に、大型の竜巻対策設備をボルト穴に合わせて精度良く据付けするためには高い技術を必要とするが、工場製作時の仮組みにより据付位置を詳細に調整し、当社にて多数の実績を有する鋼製大型構造物工事での据付経験を活かし、現地工事を完遂した。

当社は、今後もプラントの安全性を担保する防護対策設備を納入することで、電力のニーズに応え、原子力プラント全体の更なる再稼働支援に貢献していく所存である。

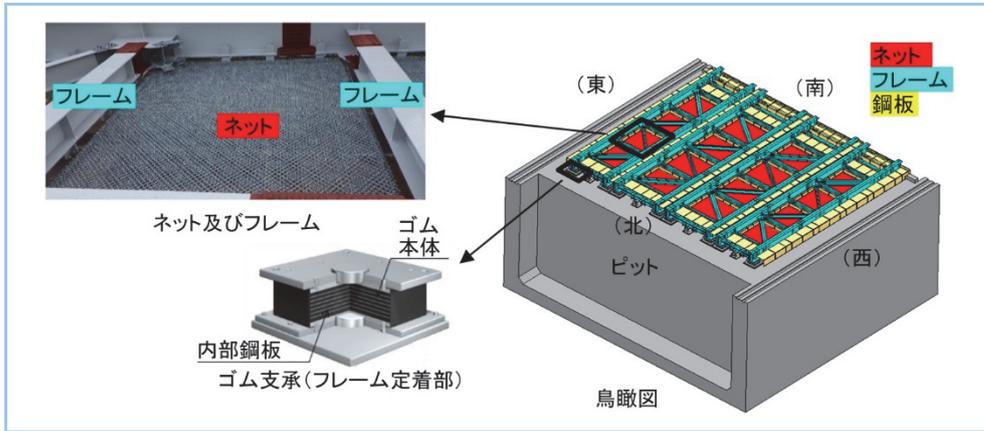


図4 海水ポンプエアダクト対策設備の構造

## 2.4 高性能火山灰フィルタ設備について

これまで当社は PWR 全再稼働済プラントの非常用ディーゼル発電設備(以下, DG)に対して高性能火山灰フィルタの試験検証, 設計, 据付け, 原子力規制委員会(以下, NRA)の審査助勢を対応してきた。PWR プラントでの再稼働支援の経験と実績を踏まえ, BWR の DG に対しても再稼働支援を実施している。本報では, BWR 向けに採用を検討している高性能火山灰フィルタの設備概要を紹介する。

新規規制基準による自然現象への対応として, 設備設計の際に考慮する必要がある火山灰濃度の規制要求が大幅に強化された(単位体積当たりの火山灰重量( $\text{g}/\text{m}^3$ )が従来から3桁規模の上昇)。高濃度火山灰条件下において DG の機能維持を求められる中, 降灰した火山灰が DG の機関内部に侵入し, 故障を誘発することによる非常用電源喪失が課題となった。そこで当社では, 長時間使用可能な高性能火山灰フィルタを開発し, DG の吸気ラインに設置することで課題を解決した。高性能火山灰フィルタの開発にあたって, PWR プラント毎の火山灰特性(粒径分布, 濃度等)を実際の火山灰の調合により模擬し, その供試灰にて当社研究所でフィルタ試験を実施し長時間使用可能であることを確認した。また, 目詰まりしても容易に清掃し再使用可能である事を検証した。

図 5 に設備概要を示す。高性能火山灰フィルタは大気中の粉塵の付着や経年劣化防止のため通常時は DG 吸気口に設置していない。気象庁からの火山灰警報発令後, プラントの敷地内へ高濃度の火山灰が到達する前に速やかに設置する運用としている。それらを実現するため, DG 吸気口にフィルタの設置を容易とする, フィルタアタッチメント又はフィルタコンテナを設置した。また, 発電所の対応員の負担軽減のため, 高性能火山灰フィルタ 1 個あたりのサイズを検討する際に発電所ユーザーの運用を考慮し, 持ち運びに最適かつ設置や交換に支障のない重量とした。

火山灰警報が発令後, 原子力プラントを安全停止するまで DG 機能を維持する必要があるが, 従来型のフィルタは火山灰をフィルタ内部に捕集するため, 降灰する大量の火山灰により短時間で目詰まりを生じてしまう。そこで, 火山灰をフィルタ外部に弾き返し, 目詰まりを起こしにくい金属メッシュフィルタを採用した。高性能火山灰フィルタの特徴として, 目の細かい伸線を織り込んだ金属メッシュをプリーツ形状に張る事で表面積を増加させ, フィルタ表面の目詰まりを起こしにくくしている。また, 金属メッシュは清掃が容易であり, 叩き落しや簡易的なエアブローで, 目詰まりしても再使用可能である。

BWR プラントでは, 図 6 に示すとおり, DG 吸気ラインと建屋空調ラインが共用され, 大容量の風量処理(火山灰の捕集)が必要となるプラントがある。そのようなプラントでは建屋空調(DG 吸気)の入口に粉塵等を除去する繊維メッシュ式の既存フィルタ(バグフィルタ)が設置されているが, 大量の火山灰を捕集すると短時間で捕集容量を超過してしまい, 捕集した火山灰重量で織

維フィルタが破損する可能性があった。この対策として火山灰の粒径に応じた捕集方法に変更することを検討した。その結果、火山灰重量の大半を占める大粒径の火山灰を高性能火山灰フィルタで捕集し、その後段に配置した繊維メッシュ式の既存フィルタ(バッグフィルタ)で小粒径の火山灰を捕集するハイブリッド構成により、BWR 特有の降灰環境で対応可能なシステムを構築した。その他、可搬型車両へ適用する火山灰フィルタアタッチメントの開発、設置など BWR プラントのさまざまな設備、構造にも柔軟に対応し高性能火山灰フィルタにて貢献していく所存である。

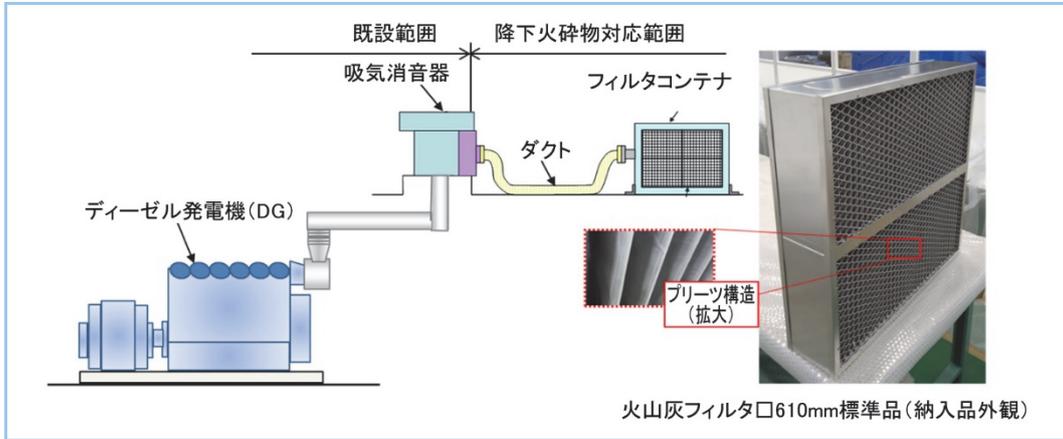


図5 高性能火山灰フィルタ 設備概要

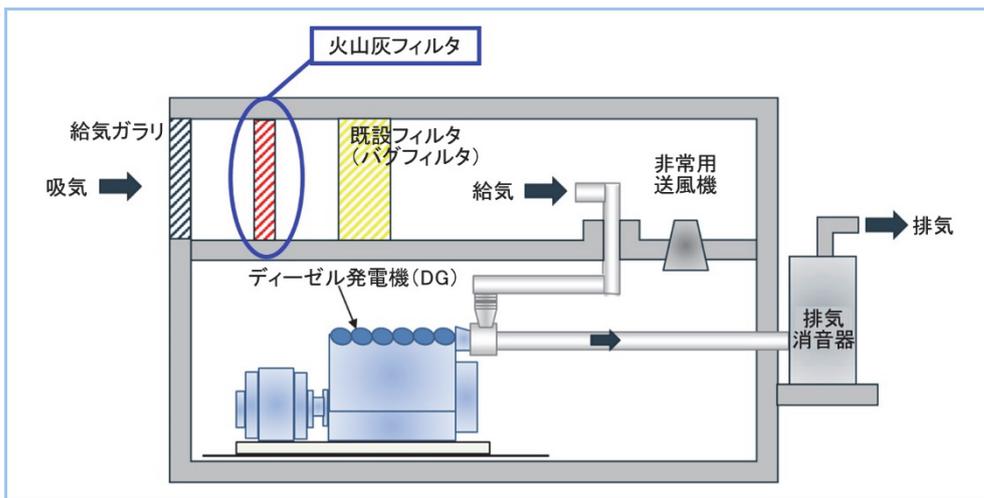


図6 BWR 建屋鳥瞰図

## 2.5 空冷電源設備について

新規規制基準では、原子力プラントに設置されている従来の非常用電源に対して多様性及び独立性(位置的分散)を有するバックアップ電源を追設することが要求された。そこで当社は既設の非常用 DG に対し、海水冷却システムを必要とせず、津波の影響を受けない高台にも設置可能な原子力プラント用の空冷式非常用電源を開発した。PWR の再稼働支援において、車載式/定置式の空冷 DG 及び空冷ガスタービン発電機(以下、GTG)を新規に設計・製作し、原子力レベルの耐震性・信頼性を有することを検証したうえで、NRA の認可を取得している。これらの電源ラインナップの拡充、許認可対応実績を活用し、BWR の支援にも取り組んでいる。本報では、当社が保有する空冷式非常用電源の設備概要を紹介する。

空冷 DG は、機関、発電機とその付帯設備を大型のラジエータで空気冷却しながら発電するシステムである。既設の水冷 DG に比べ電源容量は小さいものの、パッケージ化された DG を車載することで事故時に移動可能な電源としても使用できる(図 7)。既設の水冷 DG は、海水を冷却水として使用するため設置場所が制限されるが、空冷式は立地制限を受けないメリットがある。新規規制基準で求められた耐震性は、一般的な車両設備に要求される耐震性能と比べ前例のない

厳しいものであった。そのため、当社では DG 含む車両設備一式で加振試験を行い、加振後の車両及び DG の試運転により機能維持を確認することで耐震性を有することを実証した。これらの実証を完了した空冷 DG は、車載式/定置式合わせ PWR 向けに 50 台以上納入済みであり、BWR 向けにも 10 台以上を納入予定である。

空冷 GTG は、エンクロージャ内に燃焼用空気と冷却用空気を取り込むことで、機器を空気冷却しながら発電するシステムである(図 8)。水冷 DG とは内燃機関の原理が異なり、かつ冷却方式が空冷であることから、共通のメカニズムによる故障を防ぐという観点で多様性を有している。原子力プラントに GTG を導入する場合は、新規基準の耐震基準を満足する必要があるが、世界的に見ても原子力要求レベルの耐震性を検証した GTG は存在しておらず、評価手法が確立されていなかった。そこで、FEM 解析(Finite Element Method:有限要素法)を用いて GTG の地震時の挙動を再現し、タービンロータ等の機関主要部位における健全性を確認した。更には、DG 向けの米国規格 IEEE-387 に基づく信頼性検証試験に準じた実機テストを行い、運転機能の健全性を実証した。その結果、NRA の認可を取得し、PWR 向けに 14 台、BWR 向けに 3 台の GTG を納入し、今後 BWR 向けに更なる納入を予定している。

当社は、新規基準に適合した発電機設備の製作、納入を通じて、非常用電源の信頼性向上に努めると共に、空冷 DG/GTG といった豊富な電源ラインナップを活用し、PWR/BWR 問わず様々なプラント仕様に適応させたシステム設計により電力のニーズに応え、原子力プラント全体の更なる再稼働支援に貢献していく所存である。



図7 車載式 空冷 DG の構造

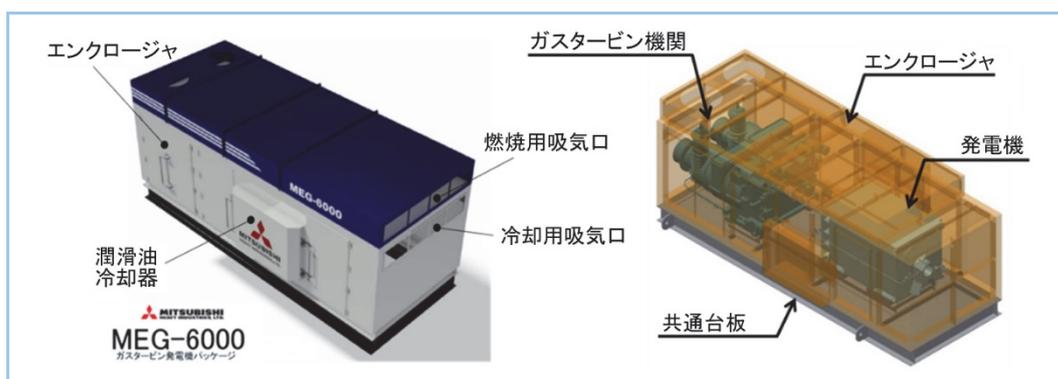


図8 空冷 GTG の構造

### 3. まとめ

当社は、福一事故後の安全対策工事の確実な遂行により 12 基の PWR プラントの再稼働実現に貢献してきた。これまでの再稼働支援で培った総合調整力及び知見を活かして BWR プラントについても、再稼働及び特定重大事故等対処施設の設置を支援している。今後も、当社は BWR プラントの確実な再稼働実現を支援し、国民の原子力発電への更なる信頼回復と 2030 年温室効果ガス排出量 46%削減の前提である原子力の発電比率 20~22%を達成すべく、原子力発電所(PWR/BWR プラント)の安全・安定な運転実現に貢献していく。