再稼働及び特定重大事故等対処施設設置に向けた取組み

Efforts for Restart and Installation of Specialized Safety Facility

松尾 公彦*1
Kimihiko Matsuo

佐藤 知徳*2
Tomonori Sato

丹羽 隼*2
Hayato Niwa

福島第一原子力発電所事故を発端に，2013 年に新規制基準が施行された。国民の原子力発電への信頼回復に貢献すべく，当社はこれまで原子力発電所の安全性向上対策に取り組んできた。本報では，当社が取り組んできた再稼働に向けた支援体制構築，安全性向上工事事例及び更なる安全性向上のための特定重大事故等対処施設の支援内容について紹介する。これらの取組みを通して，当社は電力事業者とともにたゆまぬ原子力発電所の安全性向上への取組みを推進していく。

1. はじめに

日本国内では 54 基{PWR(加圧水型軽水炉:Pressurized Water Reactor):24 基，BWR(沸騰水型軽水炉:Boiling Water Reactor):30 基}の原子力発電所が稼働し電力を供給していたが，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)によって，各原子力発電所は停止を余儀なくされた。

本事故を機に原子力安全の考え方を見直すこととなり，2012 年に原子力規制庁が発足，2013 年に新規制基準が施行された。新たな規制基準では，福一事故を踏まえて外的誘因事象に対する共通要因による安全機能の喪失を防止する観点から以下の項目について対策が強化された。従来の規制基準と新規制基準の比較を図 1 に示す。

① 設計想定事象(地震，津波)への対策強化
② 自然現象(火山，竜巻，外部火災等)への対策強化，内部溢水対策の新設
③ 設計想定を超える事故(シビアアクシデント)対策の新設
④ テロ対策(意図的な航空機衝突やその他テロリズム等)の新設

本報では，2013 年に策定された新規制基準への適合を図るべく，許認可審査，使用前検査に対する電力事業者支援の取組みと，当社が検討，製作及び施工してきた PWR プラントの安全性向上対策について紹介する。また，新規制基準で要求される大型航空機の衝突及びその他のテロリズムに備えた安全設備である特定重大事故等対処施設について，その概要と取組み状況を紹介する。

2. PWR プラント再稼働に向けた当社の支援内容

2.1 福一事故を踏まえた当社の取組み

当社は東北地方太平洋沖地震が発生した 2011 年3月 11 日当日に対策本部を設置し，600 人規模の人員を投入し，PWR プラントにおける事故シナリオ検討，必要な改善策の立案を行った

*1 原子力セグメント安全高度化対策推進部 技術士(機械部門)
*2 原子力セグメント安全高度化対策推進部

(図2)。当社関係者は，原子力発電への信頼性低下及び電力安定供給の喪失という危機意識を持って，緊急安全対策，ストレステストなどの短期対応，更なる安全性向上のための中長期対策への対応を行ってきた。新規制基準に伴う工事計画認可申請助勢，設備の健全性評価及び安全性向上工事を並行して実施し，早期再稼働に貢献してきた。

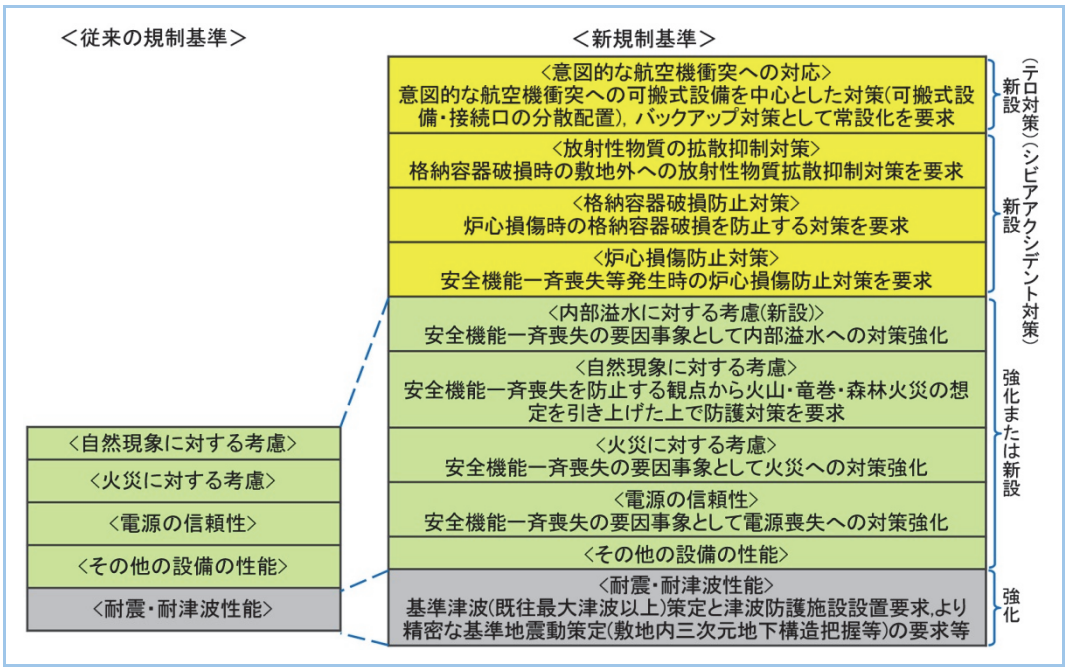

図 1　従来の規制基準と新規制基準の比較

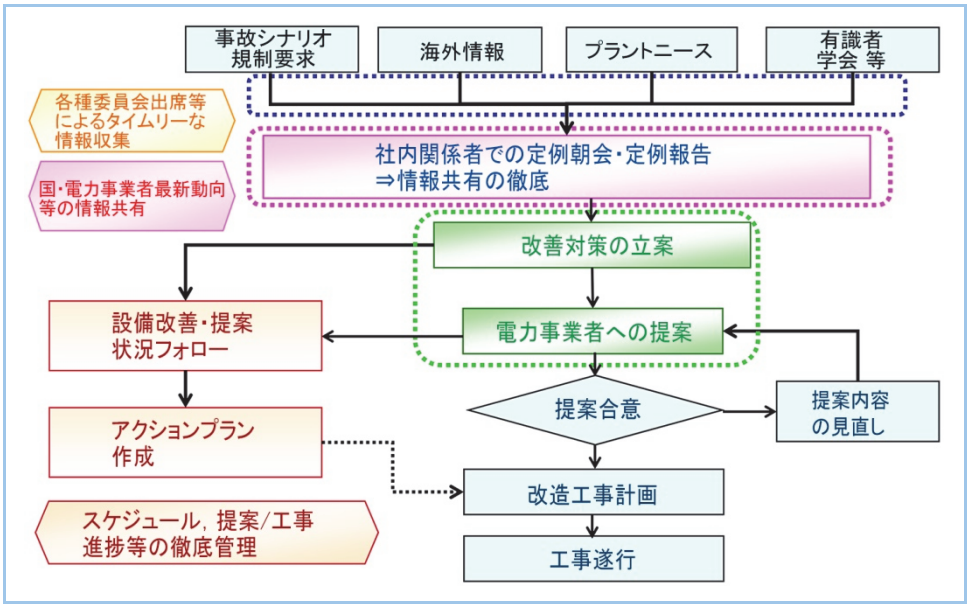

図 2　福一事故を受けた業務プロセス

(1)　支援体制構築

プラント状況の早期把握/プラントの早期復旧・安全確保に向け，設計・技術情報を電力事業者へ迅速に提供する技術支援を行うため，プラントメーカとして総力を挙げて対応する体制を構築してきた。

①　電力事業者の新規制基準適合性に係る審査対応への迅速な助勢
②　電力事業者の各プラントに対して当社技術者の派遣・駐在対応
③　社内に原子力安全対策のための拠点を神戸に設置

(2)　支援内容

プラントメーカとして電力事業者の新規制基準の対応状況，各プラントの設備改善の提案・

実施状況を一元掌握することにより，安全性向上対策の徹底した水平展開を実施した。定期的に最新の取組み状況を共有することで共通の問題意識を持ち，電力事業者と一体となってPWR プラント再稼働に向けて以下の支援を行ってきた。

① 電力事業者の新規制基準適合性に係る審査に向けたバックアップ
② 設備の健全性評価及び実証試験
③ 安全性向上工事の立案・管理・完工に向けた推進
④ 各プラントの特定重大事故等対処施設等の中長期対策の立案

2.2 設備の健全性評価及び実証試験

福一事故では，地震・津波の重畳により非常時用の電源が失われたこと(全交流電源喪失)及び炉心の冷却手段が失われたこと(最終ヒートシンク喪失)によって，炉心及び格納容器が高温高圧となり破損に至ったと考えられている。

新規制基準では従来よりも厳しい自然現象(地震，津波，竜巻等)に対して設備が健全であることを求められ，PWR プラントの安全上重要な設備に対して評価・実証試験にて安全性を確認した。その中には，評価に用いた民間規格の適用条件に原子力発電所設備が合致し，適切に評価できることを検証するために実施した実証試験等も挙げられる。ここでは，1次冷却ループの地震時の減衰定数が適切であることを確認する目的で実施した現地加振試験[(1)(2)]について紹介する。

1次冷却ループの地震時の減衰定数(3%)は，民間規格(JEAG4601-1991)に規定されているが，その根拠は3点支持の蒸気発生器を模擬した加振試験結果によるものである。海外の文献に基づくと2点支持の蒸気発生器を有する1次冷却ループでも同等の減衰定数を適用できると判断できるものの，その妥当性を再確認するため，実機プラントの蒸気発生器を用いた加振試験を実施した(蒸気発生器の支持点数の違いは図3参照)。

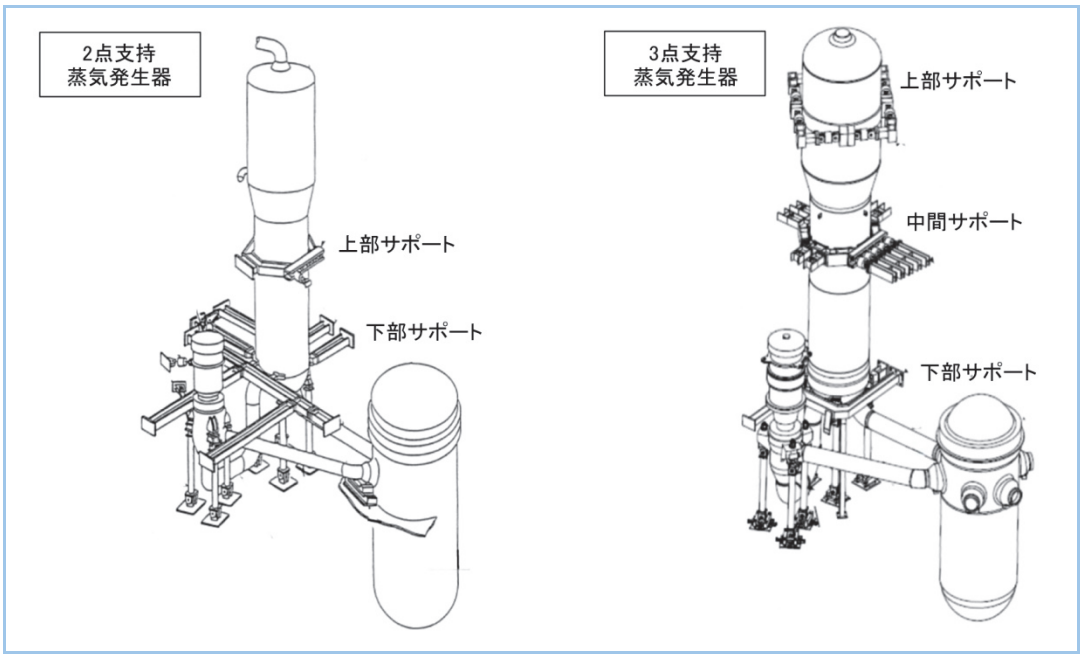

図3 蒸気発生器の支持点数の違い

審査期間中に加振試験データを取得するため，合理的な試験方法を新たに計画し，先行プラントでは打撃装置(三菱重工にて開発・製作)を用いた加振を行い，後続プラントでは蒸気発生器の上部に設置した反力型加振機による加振を行った(図4，5参照)。前例のない試験方法であったが，実機の蒸気発生器を適切に加振することができ，目標の減衰定数3%以上のデータを取得することにより，1次冷却ループの地震時の減衰定数(3%)が支持点数の違いによる影響はなく，妥当であることを再確認することができた。

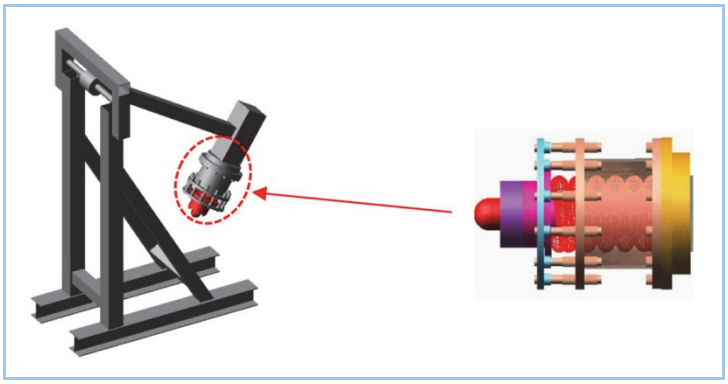

図4　打撃装置（先行プラント）

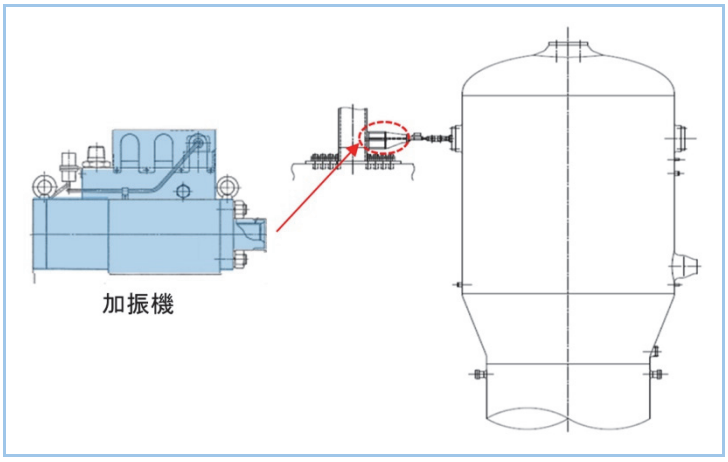

図5　蒸気発生器壁上部に設置した加振機（後続プラント）

2.3　安全性向上工事の実施内容

福一事故を受け，新規制基準では設計基準を超える重大事故（シビアアクシデント）に対処し，炉心損傷や格納容器破損の防止及び放射性物質の拡散を抑制するための設備強化が求められた。具体的には以下のような各種の設備改造工事及び新規設備設置工事を実施している。

（1）電源強化対策

地震や津波等により発電所の非常用電源が喪失し重大事故が発生した場合において，炉心の著しい損傷の防止及び格納容器の破損を防止するために必要な電源を，既存の設備に加え，更なる安全性向上のため電源容量を増加するべく，以下の対策を講じている。

① 既存蓄電池の容量増強もしくは予備蓄電池の増設(※1)。既設常用系蓄電池からの給電/電源車または小型発電機の活用による多様化を実施。対策の概略図を図6に示す。

(※1)所内蓄電池の負荷切り離しを行わずに8時間，必要な負荷以外を切り離して更に 16 時間の合計 24 時間にわたり電気の供給が可能となる容量を増設。

② 耐震性のある空冷式発電機を高台に設置することで電源の多様性を確保(※2)。津波による非常用電源喪失時でもプラントの安全停止に必要な電源容量を非常用の交流系，直流系に供給できる電源構成に変更。対策の概略図を図7に示す。

(※2)7日間にわたり電気の供給が可能となる容量。

（2）炉心損傷防止，格納容器破損防止対策

福一事故では，前述の通り，地震・津波の重畳により非常用電源が喪失したことにより，炉心の冷却機能が喪失し，原子力圧力容器と原子炉圧力容器に接続する配管で構成された原子炉冷却材圧力バウンダリが高温・高圧となり，炉心損傷と格納容器損傷に至った。既設設備として設置している炉心冷却機能が同時に喪失し，重大事故が発生した場合において，これを補う多様な冷却手段を確保するべく，以下の対策を講じている。

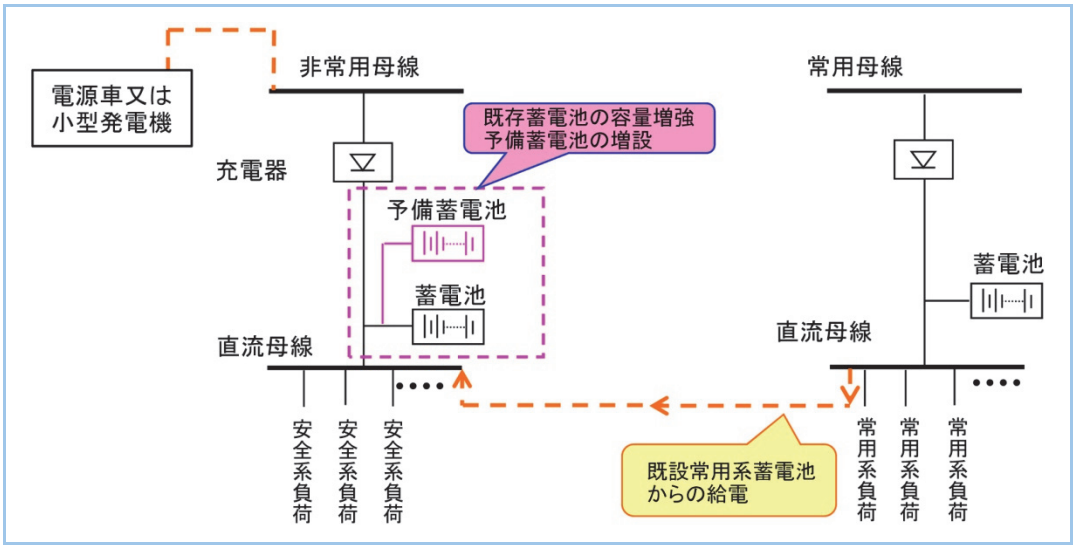

図6　蓄電池給電時間の長時間化対策概略図

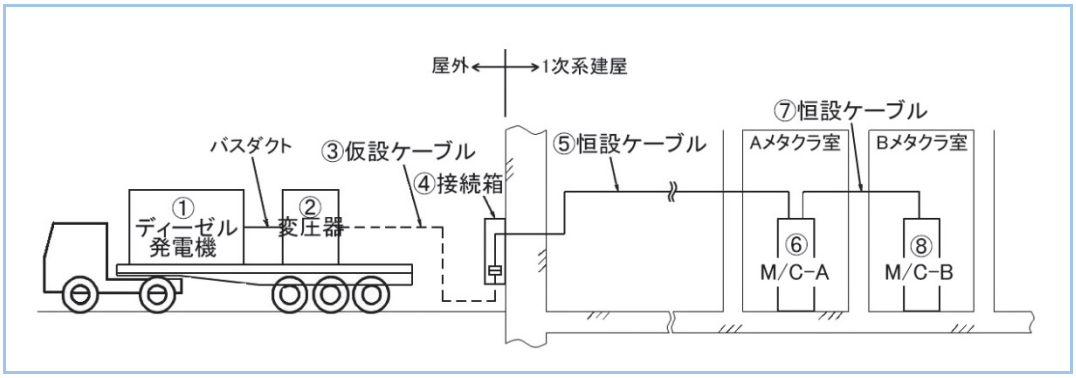

図7　空冷式非常用発電装置概略図

① 原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時の原子炉冷却

原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧状態下で，設計上想定した冷却設備（タービン動補助給水ポンプ）の自動起動が失敗した場合に備えて，手動起動ができるように改造。また，タービン動補助給水ポンプが機能喪失した場合でも炉心の減圧・冷却を，充てん/高圧注入ポンプによる注水及び加圧器逃がし弁からの排水（1次系のフィードアンドブリード）にて実施するよう，運用面を明確化。

② 原子炉冷却材圧力バウンダリの減圧

原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧状態下で，設計上想定した減圧設備（加圧器逃がし弁及び主蒸気逃がし弁）の駆動源が喪失した場合でも，炉心の著しい損傷を防止，格納容器の破損を防止するため，駆動源である圧縮空気供給設備の代替設備として窒素ボンベを新規に設置する多様化を実施。

③ 原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時の原子炉冷却

原子炉冷却材圧力バウンダリが低圧状態下で，設計上想定した冷却設備（炉心注入設備）が機能喪失した場合でも，炉心の著しい損傷の防止及び格納容器の破損を防止するため恒設及び可搬式の代替炉心注入ポンプ設備を新規に設置。

④ 格納容器内の冷却

設計上想定した格納容器内への注水による冷却機能（格納容器スプレイポンプ）が機能喪失した場合でも，格納容器内の高温状態を防止するため，恒設の代替格納容器注水ポンプ設備を新規に設置。

⑤ 格納容器の過圧破損防止

炉心の著しい損傷による水の蒸発によって，格納容器内が高圧となり破損することを防

止するため，空気の自然対流により外力を用いず格納容器内を減圧（除熱）する熱交換器（格納容器再循環ユニット）への注水機能を補強。

⑥ 格納容器下部の溶融炉心冷却

炉心の著しい損傷が発生し，原子炉容器外に落下した溶融炉心を冷却するために必要な冷却水を貯水する設備（連通管）を新規に設置。

⑦ 水素爆発による格納容器の破損防止

炉心の損傷により発生した水素が格納容器内に滞留し，水素爆発が発生することを防止するため，発生した水素と酸素を結合し水蒸気に変換する静的触媒式水素再結合装置（PAR）及び水素を計画的に燃焼させ水素濃度を低減させる装置（イグナイタ）を新規に設置。

これら炉心損傷防止及び格納容器破損防止対策の全体概略図を図8に示す。

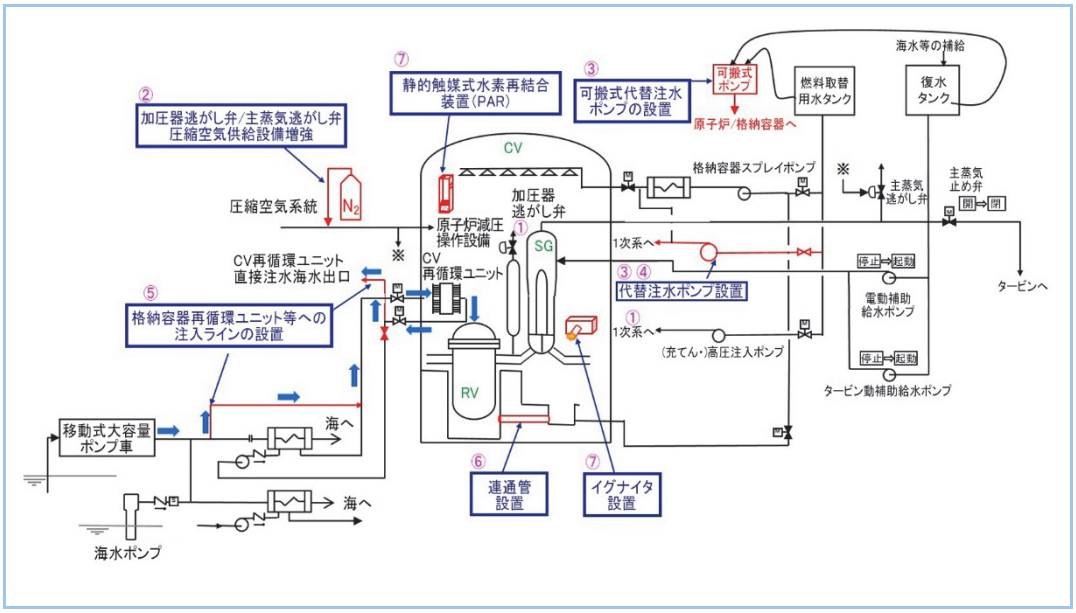

図8 炉心損傷防止及び格納容器破損防止対策全体概略図

(3) 津波対策

新規制基準では，2002 年土木学会式で算出される津波高さに福一事故の経験を反映し，更なる保守性（＋9.5m）を考慮した基準津波高さを想定した。基準津波高さ以下の建屋貫通部について，津波侵入防止機能を確保すべく，複数の津波止水構造（充てんタイプ，コーキングタイプ，ブーツタイプ）を開発してきた。これら新規に開発した津波止水構造を建屋貫通部に施工することで，発生した津波が建屋貫通部を通じ内部に侵入し非常用の電源及び炉心冷却機能の喪失を引き起こさないよう，安全性向上を図っている。開発・施工した津波侵入防止構造概要図を図9に示す[(3)]。

3. 特定重大事故等対処施設について

3.1 特定重大事故等対処施設の概要及び法令要求について

特定重大事故等対処施設は，故意による航空機衝突やその他のテロリズムにより，炉心の著しい損傷が発生した場合に原子炉格納容器の破損を防止し，放射性物質の放出を抑制するための施設であり，再稼働の工事計画の認可後5年以内に新規に設置することが法令で規定されている。

特定重大事故等対処施設は，以下の機能を有する設備である（図 10）。

① 原子炉冷却材圧力バウンダリ減圧操作機能

② 炉内溶融炉心冷却機能

③ 格納容器下部溶融炉心冷却機能
④ 格納容器冷却機能
⑤ 格納容器減圧機能
⑥ 水素制御機能
⑦ サポート機能(電源・計装・通信設備)
⑧ 関連設備(減圧弁・配管)
⑨ 緊急時制御室

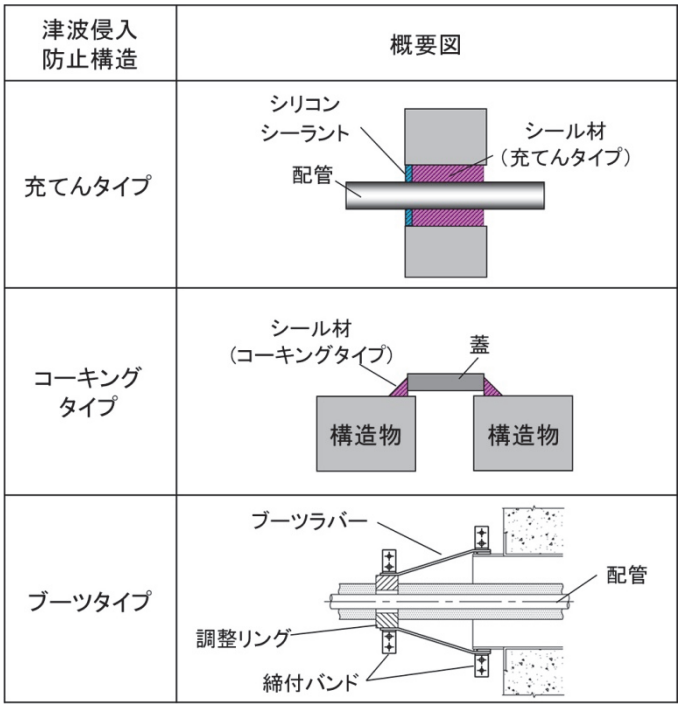

図9 シール構造概要図

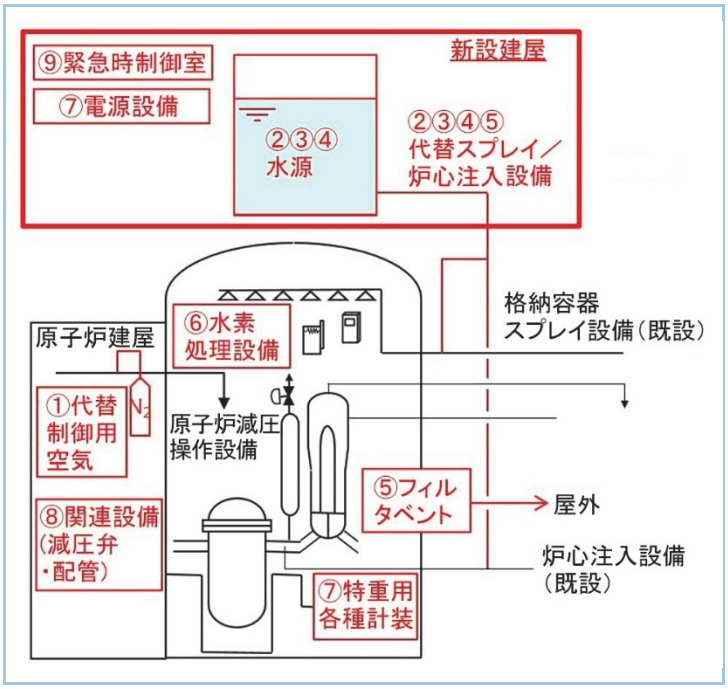

図 10 特定重大事故等対処施設の概念図

3.2 各プラントの当社支援内容について

2020 年9月時点で, 川内 1/2 号, 玄海 3/4 号, 高浜 1/2 号, 高浜 3/4 号, 伊方3号については, 特定重大事故等対処施設の工事計画の認可を取得し, 本格的な工事フェーズへ移行してお

り，当社は新設となる建屋・トンネル/立坑を含む全体計画～既設建屋内工事を含めて対応している。また，大飯 3/4 号，美浜3号は工事計画認可に向けて，原子力規制庁の審査を継続中であり，当社は審査の技術的支援（耐震評価等）をしている。さらに，電力事業者・三菱・ゼネコン一丸となり，全体工程短縮についても検討中である。（PWR プラントの特定重大事故等対処施設の審査状況は表1参照）

表1 PWR プラントの特定重大事故等対処施設の審査状況（2020 年9月時点）

電力殿	プラント	設置許可申請 （申請時期／許可時期）	工認申請 （申請時期／認可時期）
関西電力	高浜 3/4	2014.12.25／2016.9.21	2017.4.26／2019.8.7
	高浜 1/2	2016.12.22／2018.3.7	2018.3.8／2020.2.20
	美浜 3	2018.4.20／2020.7.8	2020.7.10
	大飯 3/4	2019.3.8／2020.2.26	2020.3.6
九州電力	川内 1/2	2015.12.17／2017.4.5	2017.5.24／2019.4.12
	玄海 3/4	2017.12.20／2019.4.3	2019.5.16／2020.8.26
四国電力	伊方 3	2016.1.14／2017.10.4	2017.12.7／2020.3.27
北海道電力	泊 3	2015.12.18	未
	泊 1/2	未	未

：設置許可／工認認可取得　：審査中

4. まとめ

当社は，福一事故後の支援体制構築や安全性向上工事の確実な遂行により9基の PWR プラントの再稼働を実現してきた。再稼働に向けた審査継続中の PWR プラント（泊 1/2/3 号，敦賀2号）の支援を継続することに加えて，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することにより，国民の原子力発電への信頼回復と原子力発電所の安全・安心運転の実現に貢献していく。

参考文献

(1) Hiroaki, S. et al., “On-Site Vibration Test Of PWR Reactor-Coolant Loop In Application For Construction Plan License After Great East Japan Earthquake”, SMiRT-24.
(2) Ishiguro, T. et al., “On-Site Vibration Test for Measuring Damping Ratio of PWR Reactor Coolant Loop”, ASME PVP 2017.
(3) 三菱重工業株式会社,原子力発電プラントにおける貫通部シールの水密性能検証試験, MHI-NES-1067