

原子カプラントの安全対策に向けた技術

内山隆弘*
小泉義夫*
清水 遼*

Technologies of Safety and Security Measures for Nuclear Plants

Takahiro Uchiyama, Yoshio Koizumi, Ryo Shimizu

要 旨

平成23年3月11日に発生した東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故を契機に、原子力規制委員会(NRA)が設置された。

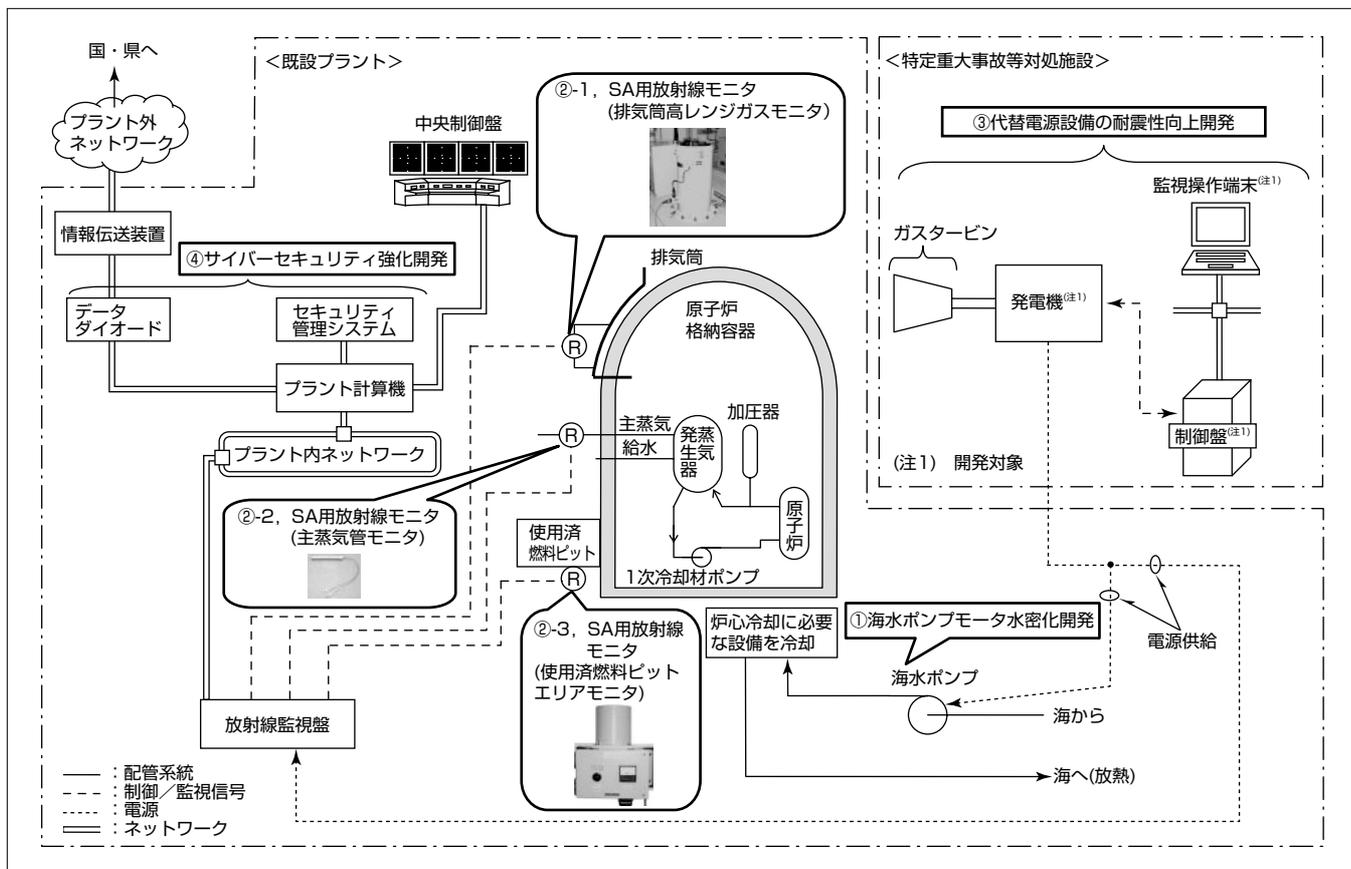
従来、原子力発電所のシビアアクシデント(SA)の発生を防止することを目的とした設計規準が制定されていたが、福島第一原子力発電所の事故を受けてNRAは、SA発生防止の強化に加え、更なる安全性向上のために従来は電力事業者の自主努力に委ねられていたSA発生時の対策やテロ対策を追加し、新規制基準(以下“新基準”という。)⁽¹⁾⁽²⁾としてまとめた。

三菱電機は、新基準への適合に加え、更なる安全性向上

の実現に向け、電気計装分野で次の開発に取り組んでいる。

- (1) 津波による浸水時に海水ポンプを駆動可能とするための大型水密化モータ開発
- (2) 原子炉容器や格納容器損傷時に放出される高線量の放射線を計測可能な放射線モニタの開発
- (3) 発電所内電源確保の信頼性向上を目的とした代替電源設備の耐震性向上開発
- (4) サイバーテロ対策に向けたデジタル計装システムへのサイバーセキュリティ強化開発

当社はこれらの開発成果に基づき、原子カプラントの世界最高水準の安全性向上に寄与していく計画である。



原子カプラントの世界最高水準の安全性向上に寄与する技術

- (1) 耐震性を持った代替電源設備(図の③)／水中駆動を可能にした海水ポンプモータ(図の①)によって、原子カプラントの冷却機能を維持する。
- (2) 耐環境性を持った放射線モニタ(図の②)によって、SA発生時に放出される高線量の放射線を監視する。
- (3) プラント外ネットワークとの物理的分離、ウイルス対策を一括管理するセキュリティ管理システム(図の④)によって、サイバーテロ対策を行う。

1. ま え が き

平成23年3月11日に発生した東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故を契機に、NRAが設置された。福島第一原子力発電所の事故以前は、SA発生を防止するための設計基準が制定されていたが、更なる対策は電力事業者の自主努力に委ねられていた。しかし、福島第一原子力発電所の事故で、想定基準を超える津波によって安全機能が喪失し、その後のSA事象の進展を食い止めることができなかったことを受けて、NRAはSA発生防止の強化(表1の(1))に加え、SA発生時の対策やテロ対策(表1の(2))を追加し、新基準としてまとめた。

2. 安全対策に必要な技術開発

本稿では、電気計装分野での新基準への適合(表1の①～⑥)と、更なる安全性向上の実現に向けた次の技術開発について述べる。

(1) 海水ポンプモータの水密化(表1の③・⑥に対応)

福島第一原子力発電所の事故では津波による浸水のため海水ポンプが駆動せず、炉心冷却に必要な補機への冷却水供給が滞った。そのため、大規模な津波による浸水時も機能が維持できる大型水密化モータを開発している。

(2) SA用放射線モニタ(表1の③・④・⑤・⑥に対応)

現在の放射線モニタは冷却材喪失事象などによる事故時環境下での放射線量を計測できるが、新基準では原子炉容器や格納容器損傷時の過酷な環境における放射線計測を要求している。このため、高線量の放射線を計測可能なモニタを開発している。

(3) 代替電源設備の耐震性向上(表1の①・③に対応)

従来の発電所でも複数の非常用電源を設けているが、更なる電源の信頼性向上を目的とし、耐震性を向上させた代替電源設備を開発した。開発設備の特長は次のとおりである。

表1. 従来の規制基準と新基準との比較

	従来の規制基準 ^(注2)	新基準	本稿に関係する内容	従来の規制基準と新基準との比較
(1)	自然現象に対する考慮	自然現象に対する考慮(火山・竜巻・森林火災を新設)		強化・新設
	火災に対する考慮	火災に対する考慮		
	電源の信頼性	電源の信頼性	①	強化
	その他の設備の性能	その他の設備の性能 ^(注3)	②	
	—	内部溢水(いっすい)に対する考慮(新設)		新設
(2)	耐震・耐津波性媒	耐震・耐津波性能	③	強化
	—	意図的な航空機衝突への対応		新設(テロ対策)
	—	放射性物質の拡散抑制対策	④	
	—	格納容器破損防止対策	⑤	新設
	—	炉心損傷防止対策(複数の機器の故障を想定)	⑥	(SA発生時対策)

(注2) SA発生を防止するための基準

(注3) サイバーテロ対策を含む

- (a) 低周波数領域の振動に対して共振しないように機器の固有振動数30Hz以上(剛構造)を持つ。
 - (b) Ss地震動^(注4)に対して2倍の耐震裕度を持つ。
- (4) サイバーセキュリティ強化開発(表1の②に対応)

安全性向上を目的に、米国サイバーセキュリティ規制指針(Regulatory Guide 5.71: RG 5.71)⁽³⁾に適合したデジタル計装システムのサイバーセキュリティ強化開発を行っている。

次章に、これらの(1)～(4)の開発内容について詳述する。

(注4) 地質構造的見地から、原子力施設周辺で発生する可能性がある最大の地震の揺れの強さのこと。

3. 技術課題と開発内容

3.1 海水ポンプモータの水密化

海水ポンプモータは、原子炉の運転に必要な補機冷却水を冷却するための海水を供給するモータである。津波によって海水ポンプモータが浸水した場合、現在のモータは防水モータではないため機能を喪失し、原子炉補機で発生した熱を最終的なヒートシンクである海に放出不可能となる。

このため、大規模地震で発生した津波によってモータが浸水した場合でも、機能を維持することを目的として、次の水密化仕様の海水ポンプを開発している。

- (1) 許容水深15m
- (2) 許容水中稼働時間12hr^(注5)

また、海水ポンプモータは原子力プラントの安全系設備であり、浸水時も余震に対して機能維持を要求されるため、水中でも耐震性を持つ必要がある。したがって、通常は気中、浸水時は水中での耐震性を満足する必要があり、従来にはない新規性の高いモータとなる。主要な新規開発項目について次に示す。

(1) 水密化仕様の検討

①軸シールの適用

完全密閉の観点から、軸部のシールに潤滑油を満たして外部に潤滑油が漏れ出る機構(メカニカルシール)を選定し、モータ内部への浸水防止を図った(図1)。

潤滑油の漏れ量を最小限にして保守性を向上させるために、気中及び水中でも外圧に対して常に一定圧力が加わるように潤滑油の圧力を制御する機構を設けた。

この状態で、気中、水中でのメカニカルシール単体検証を実施し、潤滑油の漏れ量、摺動(しゅうどう)面の磨耗量、発熱量等について所定の性能を持っていることを確認した。

②外被形式の検討

外被形式を全閉型の防水構造とした。全閉型としたことによって、気中、水中の両方での冷却を可能とするために、自ポンプで汲(く)み上げた海水の一部を使用して冷却する方式とした。これに

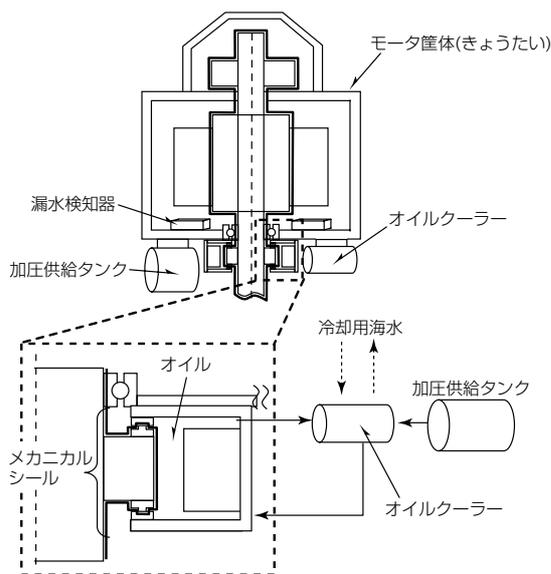


図1. メカニカルシール

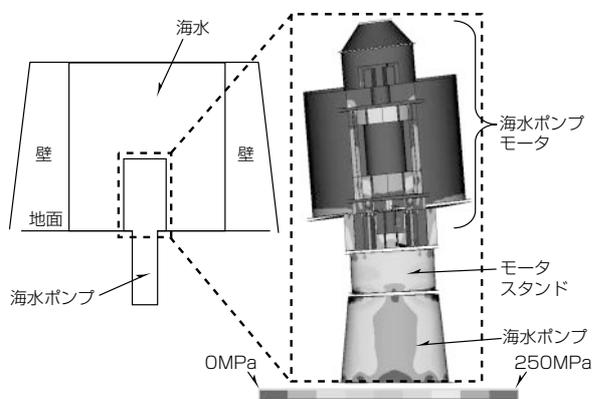


図2. 耐震・強度解析結果の一例

よって、新たな冷却水は必要なく、従来の空冷式海水ポンプモータから更新する際の工事物量削減を可能とした。

(2) 水中での耐震評価

水中での耐震・強度解析では、地震波に加えて水質量効果、水没による静水圧、振動による動水圧を考慮する必要がある。この課題に対して、構造検討→耐震解析評価→強度解析評価のルーチンを回すことで、任意の水位で基準地震動に耐え得る最適なモータ構造を開発した。水中時のポンプモータ各部にかかる水圧について、解析結果の一例を図2に示す。

(注5) 東日本大震災を受け、引き津波までの浸水時間を想定した。

3.2 SA用放射線モニタ

新基準では、原子炉容器や格納容器損傷時の過酷な環境で放出される高線量域の計測要求がある(表2)。その要求を満足するため、使用済燃料ピットエリアモニタ、排気筒高レンジガスモニタ、主蒸気管モニタの3つのモニタ(要旨の図)を開発中である。

このうち、排気筒高レンジガスモニタの計測レンジ拡大について述べる。

新基準で要求される幅広いレンジの放射線量を測定可能

表2. SA用放射線モニタの計測レンジ

モニタ名称	従来計測レンジ	新基準要求レンジ
使用済燃料ピットエリアモニタ	1.0~ 1.0×10 ¹¹ μSv/h	1.0~ 1.0×10 ¹¹ μSv/h
排気筒高レンジガスモニタ	1.9×10 ¹ ~ 3.7×10 ⁶ Bq/cm ³	1.9×10 ¹ ~ 3.7×10 ¹¹ Bq/cm ³
主蒸気管モニタ	5.0×10 ¹ ~ 1.0×10 ⁷ μSv/h	5.0×10 ¹ ~ 1.0×10 ¹¹ μSv/h

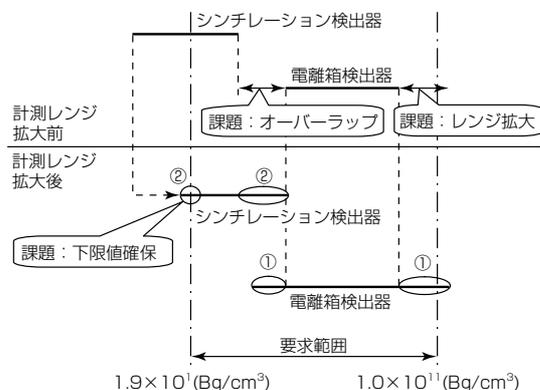


図3. 排気筒高レンジガスモニタ計測レンジ

とするため、低線量域を計測するシンチレーション検出器と、高線量域を計測する電離箱検出器を組み合わせる方法を採用した。この方法の課題は、電離箱検出器の上下限計測レンジを拡大させること、及び両検出器のレンジがラップしないため、シンチレーション検出器と電離箱検出器の計測レンジ間をオーバーラップさせることが必要となる。よって、次の開発を実施した。

- (1) 電離箱検出器の計測レンジについて、電離箱検出器の検出感度が最も高くなるサンプリング容器の構造と検出器の配置を決定し、測定レンジの上限と下限の拡大を図った。サンプリング容器構造と検出器配置をモデル解析で評価した結果、電離箱検出器を中央に配置することで計測レンジを上限と下限側に1桁ずつ拡大することを確認した(図3の①)。
- (2) シンチレーション検出器の電離箱検出器と計測レンジをオーバーラップさせ、かつ要求下限値も測定可能とするためには、計測レンジを全体的に上限側へシフトさせる必要がある。レンジをシフトさせるために、検出器有感部に入射する放射線量を評価し、有感部面積を1/10に決定することで、レンジ2桁分を上限側へシフトすることを可能とした(図3の②)。

この(1),(2)の開発を実施し、2つの検出器を組み合わせることで、低線領域から高線領域までの幅広い放射線量の監視を実現した。

3.3 代替電源設備の耐震性向上

(1) 発電機の耐震性向上

負荷投入時の電圧降下を要求値内にするためには、固定子及び回転子内の鉄心を大きくする(短絡比を上げる)こと

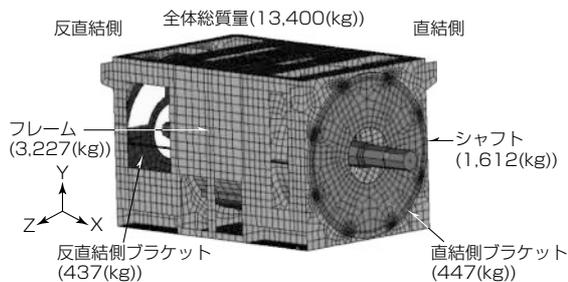


図4. 発電機の3Dモデル

表3. 評価結果

設備	耐震要求	結果
発電機	<ul style="list-style-type: none"> 固有振動数30Hz以上 水平：1.64G (Ss×2) 鉛直：1.08G (Ss×2) 	<ul style="list-style-type: none"> 固有振動数：30Hz以上 JEAC4601-2008の評価手法を準用し、静的解析を行い、耐震要求を満足することが確認できた。
ガスタービン制御盤	<ul style="list-style-type: none"> 固有振動数30Hz以上 水平：6.23G (Ss×2) 鉛直：1.88G (Ss×2) 	<ul style="list-style-type: none"> 固有振動数：30Hz以上 機器の機能維持加速度は、“水平：10G”“鉛直：2G”であり、耐震要求を満足している。
発電機制御盤	<ul style="list-style-type: none"> 固有振動数30Hz以上 水平：3.71G (Ss×2) 鉛直：1.58G (Ss×2) 	<ul style="list-style-type: none"> 固有振動数：30Hz以上 機器の機能維持加速度は、“水平：5.2G”“鉛直：2G”であり、耐震要求を満足している。
監視操作端末	<ul style="list-style-type: none"> 固有振動数30Hz以上 水平：8.26G (Ss×2) 鉛直：1.88G (Ss×2) 	<ul style="list-style-type: none"> 固有振動数：30Hz以上 盤内に収納するパネルコンピュータの加振試験を実施し、機能維持加速度は、“水平：10G”“鉛直：2G”であった。耐震要求を満足している。

が有効である一方、発電機の共振を防止し耐震性を向上させるためには、回転子を極力小さくすることが求められる。

この条件を同時に満たすために、電圧降下の要求値から求められる鉄心物量を算出し、回転子の固有振動数が、共振を防止する値(発電機の回転周波数より十分大きい値)となるように回転子の自重バランスと軸受スパンを考慮し、最適構造を決定した。これらの検討によって、性能要求と耐震要求を同時に満足する発電機を開発した。

なお、耐震評価は、原子力発電所耐震設計技術指針(JEAC 4601-2008)⁽⁴⁾に準じて、固有値解析(解析モデルを図4に示す)、及び対象部位の耐震評価を実施して耐震要求を満足することを確認した(結果を表3に示す)。

(2) 制御盤の耐震性向上

制御盤の耐震性を向上させるためには、補強部材の追加や鋼材板厚の増加等が有効であるが、過度な対策による保守作業性の悪化や、制御盤内の温度上昇を防止する必要がある。このため、従来の耐震盤の固有値解析を実施することで、補強すべき必要最低限の部位を明確にし、次の対策と評価を実施した。

(a) 補強対策

左右方向の揺れに対して、盤中央部にアクセス性を考慮した仕切り板を設置することで、耐震補強を実施した。また据付けを強固にするため、盤低部外側の溶接に加え、盤底部内側の溶接が可能な盤構造とした(図5)。

(例) 【ガスタービン制御盤】

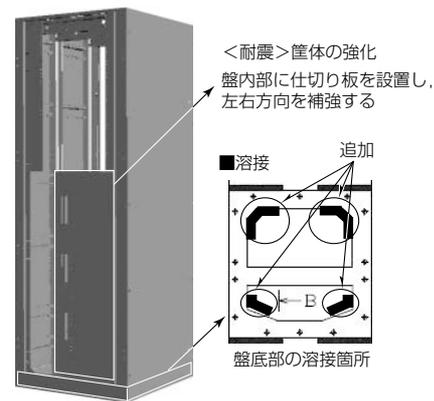


図5. ガスタービン制御盤の強化方法

(b) 保守作業性/熱解析評価

三次元CADによって、盤内構造を立体的に表現することで、盤フレームと盤内機器の干渉がないこと、保守手順のシミュレーションを実施し、メンテナンス性に問題のない補強対策であることを評価した。また盤内の熱解析によって、盤全体の過度な温度上昇や、部分的な高温箇所がないことを評価した。

これらの対策によって、固有振動数30Hz以上、Ss地震動に対して2倍の耐震裕度を持つ制御盤を実現した(結果を表3に示す)。

3.4 サイバーセキュリティ強化

当社は米国原子力プラント向けに、RG 5.71に適合した物理的な一方向通信を実現するデータダイオード、及び監視対象装置のセキュリティを統合管理するセキュリティ管理システムを開発している(この特集号の“米国原子力プラント向けデジタル計装システムの規制対応活動”(p.23)を参照)。

国内でも新基準にサイバーテロ対策が追加されているため、この開発成果を国内システムに展開し、プラントの更なる安全性向上に寄与する。

4. む す び

新基準に適合し、原子力プラントの安全性向上に寄与する4つの技術について述べた。今後は、これらの技術を国内原子力プラントに導入し、原子力の安全性向上に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 原子力規制委員会：新規制基準(設計基準)骨子
- (2) 原子力規制委員会：新規制基準(重大事故対策)骨子
- (3) Regulatory Guide 5.71 : Cyber Security Programs for Nuclear Facilities (2010)
- (4) 原子力規格委員会：原子力発電所耐震設計技術指針(JEAC4601-2008)