

2020 年 2 月 19 日

「2020 年春の年会」原子力発電部会企画セッションでの発表について(報告)

1. はじめに

本 WG の活動成果を 2020 年春の年会で原子力発電部会の企画セッションとして発表する予定であるが、発表日時、講演詳細が決まったので、以下の通り、報告する。

加えて、2/6 に講演予稿を AESJ 事務局に提出したので添付に示す。

2. 発表予定

○ 日本原子力学会 2020 年春の年会

日程：2020 年 3 月 17 日(火) (2 日目)

時間：13:00～14:30 (90 分間、原子力発電部会の全体会議の後)

場所：福島大学 共通講義棟 M 棟 2F M-24 (J 会場)

3. 企画セッションのタイトル等

○ 企画セッションタイトル

「次期軽水炉の技術要件検討」WG 報告

より安全・合理的な設計を目指して

○ 座長予定：山口 彰(東大)

○ 講演タイトルと講演予定者：

(1) 次期軽水炉の技術要件を議論する上での論点 (15 分) (関電)佐藤 拓

(2) 抽出された論点に対する次期軽水炉の対応例 (15 分) (三菱重工)有田 誠二

(3) 次期軽水炉における深層防護の実装と技術要件について (20 分) (名大) 山本 章夫

(4) 総合討論 (30 分) (モデレータ) 山口 彰 (パネリスト) 山本 章夫、佐藤 拓、有田 誠二

4. 発表の予稿

添付1参照 (2020/2/6 に AESJ 事務局に提出済み)

以 上

原子力発電部会セッション

「次期軽水炉の技術要件検討」WG 報告
— より安全・合理的な設計を目指して —Working Group Report on "Technical Requirements for the Next Light Water Reactors in Japan"
- Toward Safer and Optimized Design -

(1) 次期軽水炉の技術要件を議論する上での論点

(1) Discussion Points of Technical Requirements for the Next Light Water Reactors

*佐藤 拓¹, 山口 彰², 山本 章夫³, 大神 隆裕¹, 有田 誠二⁴¹関西電力, ²東京大学, ³名古屋大学, ⁴三菱重工

1. はじめに

原子力発電部会に次期軽水炉の技術要件を広い見地から議論する WG を設立し、福島第一原子力発電所事故の教訓や既設炉の新規制基準適合性に係る審査(特定重大事故等対処施設審査も含む)の経験を踏まえ、次期軽水炉のより安全でより合理的な技術要件を検討してきた。本講演では、本 WG の概要及び議論の対象となる論点について紹介する。

2. 「次期軽水炉の技術要件検討」WG の概要

2-1. 本 WG 設立趣旨

2018 年 7 月に策定された第 5 次エネルギー基本計画において、2030 年に向けては、2014 年策定時の枠組みを踏襲してエネルギーミックス目標(原子力は 20~22%)は見直さず、原子力はエネルギー需給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源としての役割を堅持し、また、2050 年に向けては、原子力は実用段階にある脱炭素化の選択肢として安全炉などの開発を進める方針が示された。

2030 年以降の原子力の電源構成 20~22%を維持するのであれば、高速炉の実用化の目処が 2050 年代以降であることから、2030 年代に次期軽水炉の設置が望まれる。しかし、次期軽水炉の設置には現在の社会状況を踏まえると計画から運開まで 20 年近くの歳月が必要になると考えられるため、2030 年代の運開を想定すると、設置許可に向けた準備に取り掛かる必要があると考えられる。

一方、福島第一原子力発電所事故(1F 事故)の教訓として強化された現行の新規制基準は既設炉を対象としたものであるため、改造工事や可搬型設備の配備等に対応しているが、次期軽水炉の設置に当たっては、既設炉の対応に捉われず設計段階から柔軟な対策が取れる。そのため、次期軽水炉では、既設炉の新規制基準適合性に係る審査の経験も踏まえ、既設炉よりもより安全でより合理的な設計対応が可能になると考えられる。

そこで、2018 年 6 月に原子力学会原子力発電部会の傘下に WG を設立し、次期軽水炉のより安全でより合理的な技術要件について、広い見地から議論してきている。議論に当たっては、既設炉の新規制基準適合性に係る審査の経験を活かすことができることから、まずは再稼働している国内 PWR を対象とした。

2-2. WG メンバー

以下の通り、本 WG は、大学、研究機関、電気事業者、メーカーの技術者・研究者で構成している。

- WG 主査： 山口 彰(東大)
- WG 幹事： 山本 章夫(名大)、大神 隆裕(関西電力)、有田 誠二(三菱重工)
- WG 委員： 大学関係(7 名)、研究機関(3 名)、電力会社(4 名)、メーカー(5 名)

* Taku Sato¹, Akira Yamaguchi², Akio Yamamoto³, Takahiro Oogami¹, Seiji Arita⁴,

¹KEPCO, ²Univ. of Tokyo, ³Nagoya Univ., ⁴MHI

2-3. WG の全体工程及び議論する項目(本 WG の開催実績)

本 WG の設置期間は 2018 年 6 月～2020 年 5 月であり、WG 開催実績を以下に示す(合計 7 回開催)。

	2018 年度上期		2018 年度下期		2019 年度上期		2019 年度下期	
WG の全体工程		第 1 回 (7/23)	第 2 回 (10/31)	第 3 回 (1/28)	第 4 回 (4/24)	第 5 回 (8/1)	第 6 回 (11/8)	第 7 回 (2/19)
議題		議論する項目の抽出	恒設 / 可搬型 SA 設備	APC その他テロ対策	深層防護の実装	熔融炉心冷却対策	議論の総括	WG のまとめ(報告書等)

2-4. WG の検討プロセス (図 1 参照)

本 WG では、まずは、1F 事故の経験を踏まえ、次期軽水炉は設計段階から柔軟により安全でより合理的な安全対策を講じることが可能であることから、既設炉の安全対策の経験を踏まえ、最適化の余地の観点から議論の対象となる項目を整理し、論点を抽出した。次に、抽出した論点に対して、関連する海外の規制動向も参考にして次期軽水炉においてどのような対策を実施すべきなのか、既設炉よりもより安全でより合理的な設計方針はどうあるべきかを検討した。更に、検討した次期軽水炉の設計方針に対して、「社会と共存する魅力的な軽水炉の展望」調査専門委員会[1]でも議論された深層防護の実装の観点から妥当性を示すと共に、これら設計方針を実現するために望まれる技術要件をまとめた。

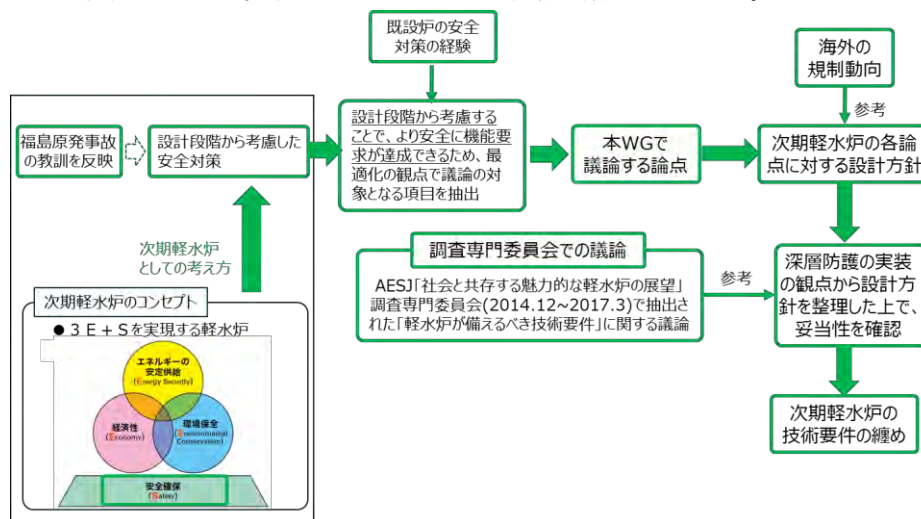


図 1 本 WG の検討プロセス

3. 議論の対象となる論点の抽出

3-1. 論点抽出の考え方

次期軽水炉では、設計段階から福島第一発電所事故の教訓及び新規規制基準で新設／強化された規制要求の考え方を踏まえて柔軟に対応し、最適化を図ることができる。その際、安全確保の思想として、既設炉と同じものと既設炉から変え得るものに分類できる。

上記を踏まえ、以下に論点の抽出の考え方を示す。

- ✓ 既設炉と同じものについては、実機設計で具体化する。
- ✓ 既設炉から変え得るものについては、既設炉の経験と深層防護等を参考に、最適化の観点から議論の対象として論点を抽出する。

3-2. 最適化の観点で議論の対象となる論点の抽出

福島第一発電所事故の教訓及び新規規制基準で新設／強化された規制要求の考え方に対し、既設炉の安全対策(シビアアクシデント(SA)対策、特重施設)を踏まえ、次期軽水炉への展開を図り、最適化の観点で以下の 3 つの論点を抽出した。(詳細は表 1 参照)

(論点 1)

既設炉の経験も踏まえ、恒設/可搬型 SA 設備の組合せに最適化の余地がある “SA 対策の機能要求”

(論点 2)

APC(AirPlane Crash)及びテロ対策は、設計段階から建屋頑健化、分散配置・区画分離の徹底など柔軟に対応可能であり、深層防護の実装の観点から最適化の余地がある “特重施設の機能要求”

(論点 3)

国内既設炉とは安全思想が異なる海外で実績ある対策の適用も選択肢として考えられる “国内での熔融炉心冷却対策の新技术の適用性”

4. 抽出された論点と議論内容

次期軽水炉として設計段階から柔軟に対応可能な項目として抽出された 3 つの論点に対して、議論する内容は以下の通りとした。

(1) SA 対策の機能要求(恒設/可搬型 SA 設備の取扱い)

- 既設炉では、SA 対策として可搬型設備を基本
- 次期軽水炉では、SA 対策の機能要求を整理した上で、恒設(信頼性、現場操作不要)と可搬型設備(柔軟性)のそれぞれの利点を踏まえた恒設/可搬型の最適な組合せを議論

(2) 特重施設の機能要求(APC その他テロ対策(特重施設)の取扱い)

- 既設炉では、特重事象 (APC、テロ等) 時に格納容器を防護するための施設として専用の特重施設を設置
- 次期軽水炉では、DBA/SA 設備に対し設計段階から特重事象も考慮した設備対応を議論

(3) 国内での熔融炉心冷却対策の新技术の適用性(熔融炉心冷却対策の取扱い)

- 既設炉では、ウェットキャビティ方式により熔融炉心を冷却
- 欧米の新設炉で採用実績のある熔融炉心冷却方式を含め、水蒸気爆発等の熔融炉心冷却に係る現象の不確かさの観点から、次期軽水炉における熔融炉心冷却対策の取扱いを議論

5. まとめ

本講演では、本 WG で議論の対象として抽出した 3 つの論点と議論の内容について報告した。次の講演では、抽出した論点に対する次期軽水炉の取り得る対応例を踏まえた設計方針について報告する。

参考文献

- [1] 日本原子力学会、「社会と共存する魅力的な軽水炉の展望」調査専門委員会報告書、2017 年 3 月
- [2] 原子力規制委員会 HP 掲載情報、「実用発電用原子炉に係る新規制基準について(概要)、2016 年 2 月

表1 安全思想の観点からの論点抽出

	新規基準で新設／強化された規制要求	既設炉の安全対策	次期軽水炉への展開（論点抽出）	議論の対象
①	耐震・耐津波性能	◆ 発電所周辺の詳細な調査に基づく基準地震動の引き上げや、基準津波高さの評価を踏まえた対策(耐震補強、海水ポンプ室及びその周辺に防潮堤や止水壁を設置)を実施	◆ 設定した地震動に対する耐震性や津波高さに対する対策を設計段階から織り込むことで安全性を強化。但し、安全確保の思想は既設炉と同じとなり、裕度の更なる向上や頑健化(建屋壁の増厚、建屋の埋込効果、敷地のかさ上げによるドライサイト化)で対応するため、今後、実機設計で具体化していくこととする	—
②	電源の信頼性	◆ 外部電源ラインの追加(大飯 3,4 号機の例) ◆ SA 対応は可搬型設備での対応を基本とし、所内電源の多重化・多様化(空冷式非常用発電装置の配備、電源車の配備)	◆ 外部電源ラインは既設炉と同じ安全確保の思想で対応するため、今後、実機設計で具体化していくこととする ◆ SA 対応は既設炉の経験も踏まえ、次期軽水炉では恒設設備での対応を基本とすることが考えられ、既設炉から安全確保の思想を変え得るため、議論の対象として抽出	論点 1
③	火災に対する考慮	◆ 火災影響軽減対策設備（耐火シート、火災検知器／自動消火設備）の追加	◆ 内部火災対策を設計段階から織り込むことで安全性を強化。但し、安全確保の思想は既設炉と同じとなり、裕度の更なる向上(トレン間の区画分離を徹底した配置計画)で対応できるため、今後、実機設計で具体化していくこととする	—
④	自然現象に対する考慮	◆ 発電所周辺の詳細な調査に基づく火山灰到達の可能性、竜巻(風荷重、飛来物)、森林火災の影響評価・対策として、以下を実施 ◆ 火山対策: 外気取込口へのフィルタ設置 ◆ 竜巻対策: 防護ネットや鋼板で防護 ◆ 森林火災対策: 施設周辺に防火帯を確保	◆ 設定した火山、竜巻、森林火災に対する対策を設計段階から織り込むことで安全性を強化。但し、安全確保の思想は既設炉と同じとなり、裕度の更なる向上や頑健化(堅牢な建屋、防火帯等)で対応できるため、今後、実機設計で具体化していくこととする	—
⑤	内部溢水に対する考慮	◆ 溢水源からの溢水による影響(没水、被水、蒸気)を評価し、対策(壁、水密扉、堰等の設置)を実施	◆ 内部溢水対策を設計段階から織り込むことで安全性を強化。但し、安全確保の思想は既設炉と同じとなり、裕度の更なる向上(溢水区画の限定や配管等の耐震性強化、トレン間の区画分離を徹底した配置計画)で対応できるため、今後、実機設計で具体化していくこととする	—
⑥	その他の設備の性能	◆ アクセスルートの確保対策として、がれき撤去用重機(ブルドーザー)を配備 ◆ 緊急時対策所の耐性強化、通信の信頼性・耐久力の向上、計測系の信頼性・耐久力の向上	◆ アクセスルートの確保対策及び緊急時対策所の耐性強化等については、既設炉と同じ安全確保の思想で対応するため、今後、実機設計で具体化していくこととする	—
⑦	炉心損傷防止対策(使用済燃料プール内燃料損傷防止対策)	◆ SA 対応は可搬型設備での対応を基本とし、炉心冷却手段、SFP内燃料冷却手段、最終ヒートシンクを多様化	◆ SA 対策は既設炉の経験も踏まえ、次期軽水炉では恒設設備での対応を基本とすることが考えられ、既設炉から安全確保の思想を変え得るため、議論の対象として抽出	論点 1
⑧	格納容器破損防止対策	◆ SA 対応は可搬型設備での対応を基本とし、格納容器冷却・減圧・放射性物質低減手段および過圧破損防止手段の多様化 ◆ 溶融炉心を冷却する格納容器下部注水設備(ポンプ車、ホース等)の配備 ◆ 水素爆発防止対策設備の配備	◆ SA 対応の内、恒設/可搬型の取扱いについては同上 ◆ 溶融炉心冷却対策については、水蒸気爆発の可能性排除を考慮し、欧州の新設炉で適用されているドライ型の溶融炉心対策設備(安全思想が既設炉と異なる対策)の適用も選択肢として考えられることから議論の対象として抽出 ◆ 水素爆発防止対策は既設炉と同じ安全確保の思想で対応するため、今後、実機設計で具体化していくこととする	論点 1 論点 3
⑨	放射性物質の拡散抑制対策	◆ 可搬型設備での対応を基本として以下を配備 ・放水砲 ・放水砲用大容量ポンプ ・シルトフェンス	◆ 本項目は裕度の更なる向上で対応できるものであり、単独では本 WG の議論の対象としないが、深層防護の観点から、⑦炉心損傷防止対策、⑧格納容器破損防止対策と合わせて可搬型設備の取扱いの議論が必要であることから、議論の対象として抽出	論点 1
⑩	意図的な航空機衝突への対応	◆ 設計基準事故対処設備、重大事故等対処設備とは独立した特重設備を、本館から独立して配置	◆ 設計段階から建屋頑健化、分散配置・区画分離の徹底など柔軟に対応可能であり、機能要求への対応方法に対し、深層防護の実装の観点から最適化の余地(頑健な建屋への収容、分散配置)があり、既設炉から安全確保の思想を変え得るため、議論の対象として抽出	論点 2

原子力発電部会セッション

「次期軽水炉の技術要件検討」WG 報告
— より安全・合理的な設計を目指して —Working Group Report on "Technical Requirements for the Next Light Water Reactors in Japan"
- Toward Safer and Optimized Design -

(2) 抽出された論点に対する次期軽水炉の対応例

(2) Examples of the Next Light Water Reactor Design for Extracted Discussion Points

*有田 誠二¹, 山口 彰², 山本 章夫³, 大神 隆裕⁴,
¹三菱重工, ²東京大学, ³名古屋大学, ⁴関西電力

1. はじめに

講演(1)で抽出した以下の3つの論点に対して、次期軽水炉の取り得る対応例を踏まえた設計方針について検討した。

- ① 恒設/可搬型シビアアクシデント(SA)設備の取扱い
- ② APC その他テロ対策(特定重大事故等対処施設)の取扱い
- ③ 溶融炉心冷却対策の取扱い

2. 恒設/可搬型 SA 設備の取扱いについて

2-1. 恒設設備と可搬型設備の特的な差異について

恒設/可搬型 SA 設備に係る論点を議論するに当たり、前提となる恒設設備及び可搬型設備のそれぞれの特性については原子力学会標準委員会の技術レポート[1]により既設炉をベースとして表1のとおり整理されており、①～③の特性では可搬型設備が有利であるとしている。

表1 恒設/可搬型設備の特性

特性	恒設設備	可搬型設備
①柔軟性	使用範囲が想定シナリオに依存	事故シナリオの不確かさに柔軟に対応可能
②配備期間	年単位での配備期間を要する	短期間で配備可能
③独立性	物理的・空間的分離に建屋、敷地の制約を受ける	物理的・空間的分離が容易
④必要な要員	少ない要員で動作が可能	要員、体制が必要
⑤手順書・訓練	手順書の整備、訓練が必要	負担が恒設設備より大きい
⑥対応時間	事故後短時間で投入	事故後の投入に時間を要する
⑦耐環境性	設置場所の環境条件の悪化による不動作の可能性あり	要員が耐えられる作業場所の環境（放射線、気温等）が必要
⑧信頼性	誤動作の可能性は設備の信頼性に依存	誤操作の可能性はあるが、設備の問題に柔軟に対応可能
⑨設備容量	大容量設備が可能	大容量設備の運用は困難

(凡例： 可搬型が有利、 恒設が有利)

2-2. 次期軽水炉における SA 対策の最適化

2-1 節では既設炉をベースとした恒設/可搬型の特性を示したが、次期軽水炉では設計段階から SA を考慮することが可能となるため、SA 設備に対する設計の観点で恒設/可搬型設備の優位性について、改めて表2に整理した。その結果、次期軽水炉では①柔軟性を除き基本的には恒設設備が有利であることを確認した。

* Seiji Arita¹, Akira Yamaguchi², Akio Yamamoto³, Takahiro Oogami⁴,¹ MHI, ² Univ. of Tokyo, ³ Nagoya Univ., ⁴ KEPCO

表2 次期軽水炉設計の観点での恒設/可搬型設備の比較

特性	次期軽水炉設計の観点での恒設/可搬型の比較
①柔軟性	既設炉に比べ、事故シナリオの不確かさのリスクは低減可能であるが、事故シナリオの不確かさへの備えの観点では可搬型設備が有利
②配備期間	新設であるため、設計から建設まで十分な期間を確保可能であり、恒設/可搬型のいずれとしても問題ない
③独立性	新設であるため、恒設でも建屋、敷地条件に合わせた区画分離の強化及び位置的分散により独立性の確保を設計に取り込むことが可能であり、恒設/可搬型のいずれとしても問題ない
④必要な要員	少ない要員で対応可能な恒設設備が有利
⑤手順書・訓練	手順書整備や訓練の負担が小さい恒設設備が有利
⑥対応時間	事象の早期収束、規模拡大防止の観点から、短時間で対応可能な恒設設備が有利
⑦耐環境性	機械設備の方が人体の許容被ばく線量に比べ放射線、温度等の環境に強く、厳しい環境においては恒設設備が有利
⑧信頼性	誤動作、人的過誤の可能性も配慮し信頼性を向上させた設備設計等の対応が可能であり、恒設設備が有利
⑨設備容量	大容量設備が必要な場合は恒設の方が有利

(凡例： 可搬型が有利、 同等、 恒設が有利)

2-3. 恒設／可搬型 SA 設備の取扱いに係るまとめ

次期軽水炉における SA 対策の最適な設備構成(恒設/可搬型設備の選択)のあり方について整理した。

次期軽水炉の SA 対策は設計段階から系統構成・配置の工夫などを取込むことで恒設設備を基本とした対応を主とし、かつ柔軟性が高い可搬型設備等を適切に組合せる。具体的には以下の通り。

- 設計上想定される SA の事故シナリオに対し、恒設設備により対処することが有効
 - ✓ 設計段階から内・外的事象を適切に考慮することで、十分な耐久力及び多重性、多様性、独立性を確保
 - ✓ 現場作業を不要とすることで、作業員負担の削減
 - ✓ 現場作業量及び作業員負担を低減することで、人的過誤のリスクを低減
 - ✓ 準備作業等の低減による早期の事故対応操作により時間的な裕度を確保
- 事故シナリオの不確かさへの備えとして、可搬型設備等の整備が有効
 - ✓ 可搬型設備の配備や常用設備、予備品の活用等により、柔軟性を確保
 - ◇ 設計上の想定を超える事象に対し柔軟な対応を図ることで、事象進展の緩和や時間的な裕度を確保

3. APC その他テロ対策(特定重大事故等対処施設)の取扱いについて

3-1. 新規規制基準における特定重大事故等対処施設の考え方

規制要求において、APC その他テロに対して対処できる施設として恒設の特定重大事故等対処施設(特重施設)を設置することが要求されており、可能な限り設計基準事故対処設備(DBA)/SA 設備との多重性又は多様性及び独立性を有し、位置的分散を図ることが要求されている[2]。さらに、規制要求において特重施設は格納容器(CV)破損防止機能を有することを要求されており、想定事象の違いはあるが SA 設備(CV 破損防止機能)と機能が重複している。

3-2. 次期軽水炉における APC その他テロ対策の最適化

次期軽水炉では設計段階から建屋頑健化や設備間の独立性等を考慮した APC その他テロ対策を織り込むことで、より安全でより合理的な対応を図ることが可能であることを確認した。次期軽水炉において、DBA/SA 設備についても APC その他テロ対策を考慮した設計とすることで、機能が重複している SA 設備 (CV 破損防止機能) と特重施設を統合してプラント全体として最適化が実現可能である (図 1)。

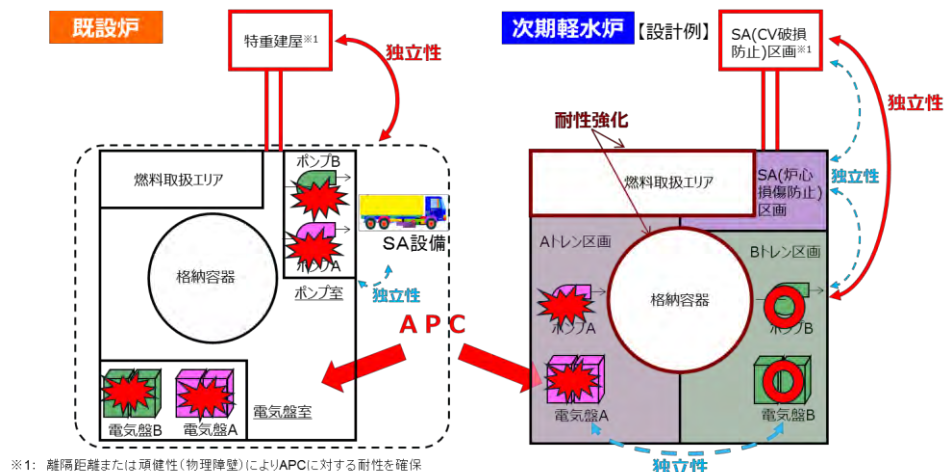


図1 既設炉と次期軽水炉における APC 対策について

3-3. APC その他テロ対策(特定重大事故等対処施設)の取扱いに係るまとめ

次期軽水炉における APC その他テロ対策の設備構成のあり方について整理した。

次期軽水炉の APC その他テロ対策は、同一の機能を持つ SA 設備(CV 破損防止機能)と特重施設を統合した設備構成とすることで全体最適化が実現可能となる。

- 建屋頑健化、または区画分離の徹底による防護性能と信頼性の向上が可能であり、CV 破損防止機能に対し、合理的に APC その他テロに対する耐性を確保可能
- DBA 設備のトレン間、DBA 設備と SA 設備間の独立性の強化により、同時に全ての炉心損傷防止機能を喪失することが回避できる可能性あり

4. 熔融炉心冷却対策の取扱いについて

4-1. 溶融炉心冷却対策に係る論点整理

炉心溶融後の CV 破損防止対策として考慮する必要がある破損モードは図 2 の通りであるが、原子力安全研究協会発行の SA 時の CV ガイドライン[3]によると、物理現象の不確かさが大きい破損モードは、コンクリート浸食(MCCI)と水蒸気爆発である。

そこで、MCCI 及び水蒸気爆発等の熔融炉心冷却に係る現象の不確かさを論点とし、海外で採用実績のある方式も選択肢に含めて、次期軽水炉における熔融炉心対策の取扱いについて議論した。

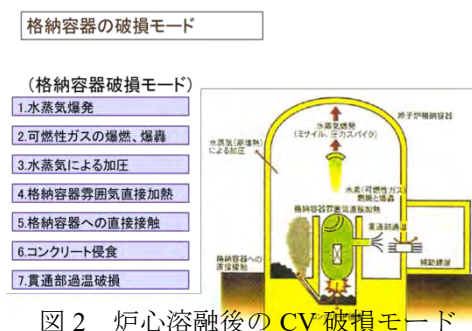


図2 炉心溶融後のCV破損モード

4-2. 溶融炉心冷却対策の取扱いに係るまとめ

MCCI 及び水蒸気爆発等の溶融炉心冷却に係る現象の不確かさ及びリスクの観点から、次期軽水炉における溶融炉心冷却対策に係る議論を表3の通り整理した。

表3 溶融炉心の各冷却方式における物理現象の不確かさ及びリスク

	炉内冷却(IVR)	炉外冷却（ウェットキャビティ方式）	炉外冷却（ドライキャビティ方式）
物理現象の不確かさへの対応	MCCI ：原子炉容器内に溶融炉心を保持することで、 MCCIを回避 水蒸気爆発 ：原子炉容器内に溶融炉心を保持することで、 炉外での水蒸気爆発は原理的に回避	MCCI ：溶融炉心をウェットキャビティに水没させることで、 MCCIを回避 水蒸気爆発 ：実機条件での水蒸気爆発による CV 破損の可能性が極めて小さいことを確認することで、 水蒸気爆発を確率的に回避	MCCI ：溶融炉心を専用設備に拡散させ注水冷却することで、 MCCIを回避 水蒸気爆発 ：炉外での水蒸気爆発について原理的に不確かさを大きく低減させることで、その発生を回避
リスク	IVR 成立性（炉出力が大きい場合、相対的に不確かさの影響が大きく、炉外への放出の懸念がある）	水蒸気爆発の影響（水蒸気爆発の発生の確率は極めて小さいものの、爆発の不確かさにより、CV 健全性への懸念がある）	溶融炉心の冷却性能（溶融炉心の安定化の不確かさ、システムの複雑化により、冷却性能の確保に懸念がある）

1F 事故の教訓は設計想定外の事象への備えであり、不確かさへの備えは重要であるが、IVR(In-Vessel Retention)方式、ウェットキャビティ方式、ドライキャビティ方式いずれも MCCI、水蒸気爆発の不確かさへの備えの観点では有効であると考ええる。但し、各方式にはそれぞれ固有の不確かさや特徴があり、リスクが存在する。

そのため、次期軽水炉においては、プラント特性・構造に応じて個々の物理現象の不確かさの低減度合い、各方式のリスクを考慮して溶融炉心冷却方式を選択し、炉心溶融時の CV 破損を防止できる設計とすることが重要である。その際、深層防護の実装の観点でバランスの良い防護性能となるように対策システムを設計することも重要である。

5. まとめ

本講演では、抽出した各論点に対して、既設炉の SA 対応の考え方及び課題を踏まえ、設計段階から柔軟に対応可能な次期軽水炉において、より安全でより合理的な対応例を検討した。各論点に対して、取得対応例を踏まえて導き出された設計方針は以下の通り。

- 恒設/可搬型 SA 設備の取扱い
 - ✓ シビアアクシデント対策は、設計段階から系統構成・配置の工夫などを取込むことで恒設設備を基本とした対応を主とし、かつ柔軟性が高い可搬型設備等を適切に組み合わせる
- APC その他テロ対策(特定重大事故等対処施設)の取扱い
 - ✓ 建屋頑健化、または区画分離の徹底により、同一の機能を持つ、SA 設備（CV 破損防止機能）と特重施設を統合した設備構成とする
- 溶融炉心冷却対策の取扱い
 - ✓ 発生頻度は低い但不確かさが大きい現象（MCCI 及び水蒸気爆発による CV 破損）に対しても、影響の大きな現象の発生防止と、発生した場合の影響低減の観点から、炉心溶融時の CV 破損を防止できる設計とする

参考文献

- [1] AESJ-SC-TR005(ANX2):2015 標準委員会 技術レポート、
『原子力安全の基本的考え方について 第1編 別冊2 深層防護の実装の考え方』
- [2] 原子力規制委員会、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」42 条
- [3] 原子力安全研究協会、「次世代型軽水炉の原子炉格納容器設計におけるシビアアクシデントの考慮に関するガイドライン」、1999 年 7 月

原子力発電部会セッション

「次期軽水炉の技術要件検討」WG 報告
— より安全・合理的な設計を目指して —Working Group Report on "Technical Requirements for the Next Light Water Reactors in Japan"
- Toward Safer and Optimized Design -

(3) 次期軽水炉における深層防護の実装と技術要件について

(3) Implementation of Defense in Depth and Technical Requirements for the Next Light Water Reactors

* 山本 章夫¹, 山口 彰², 大神 隆裕³, 有田 誠二⁴¹名古屋大学, ²東京大学, ³関西電力, ⁴三菱重工

1. はじめに

講演(1)、(2)で報告された次期軽水炉の設計方針が適正化されていることを深層防護の実装の観点から評価・検討した。また、それらの設計方針を実現するための技術要件を取りまとめた。

2. 深層防護を議論するための前提条件

深層防護とは、不確かさへの備えとして、多種の防護策を組み合わせることで、全体としてできるだけ防護の信頼性を向上させるものであり、実装にあたっては、以下の方針[1][2]を用いることとする。

- ① 原子力安全の目的を達成するために貢献できる複数の防護の目的（防護レベル、護るべきもの）を設定する。
- ② 防護レベルの目的を達成するため、各防護レベルを突破されないための防止策と、防護レベルを突破された時の緩和策を設定する。
- ③ 異なった防護レベル間の防止策・緩和策は、「広義の独立性」を有するように設定する。

防護策の考え方について、「防護策全体の性能を高めるためには、各レベルが適切な厚みを持ち、各レベルの防護策がバランス良く講じられ、あるレベルの防護策に負担が集中しないことが重要である」とされている[2]。

また、新設炉に対する深層防護の考え方は様々な機関から提唱されているものの、本 WG においては、表 1 の通り、一例として IAEA が提唱する深層防護(アプローチ 2)[3]に基づき、次期軽水炉における深層防護の実装について検討した。

表 1 IAEA の提唱する深層防護（アプローチ 2）

深層防護レベル	深層防護の目的
レベル 1	異常運転および故障発生防止
レベル 2	異常状態の制御、故障の検知
レベル 3	DBA の制御
レベル 4a	炉心溶融を回避するための DEC (Design Extension Condition) の制御
レベル 4b	SA の影響を緩和するための DEC の制御
レベル 5	重大な放射性物質の放出による放射線影響の緩和

*Akio Yamamoto¹, Akira Yamaguchi², Takahiro Oogami³, Seiji Arita⁴,¹Nagoya Univ., ²Univ. of Tokyo, ³KEPCO, ⁴MHI

3. 深層防護の実装における留意事項

2章で述べた深層防護の実装の考え方を基に、具体的に次期軽水炉の設計へ展開する上で考慮すべき留意事項を「冗長性(多重性、多様性、独立性)」「層間の独立性」「外部ハザードへの耐性」「不確かさへの備え」の技術要件の観点で表2にまとめた。

表2 次期軽水炉の深層防護の実装における留意事項

技術要件	次期軽水炉の深層防護の実装における留意事項
冗長性	✓ 防護レベルに関係なく、同一の機能を持つ複数の設備が、同時に機能を喪失しない設計とする
層間の独立性	✓ 有効な層間の独立性を各深層防護レベル間に確保 ✓ あるレベルの防護策に負担が集中しないよう、各レベルの防護策をバランス良く講じる
外部ハザードへの耐性	✓ 設計段階から計画することにより、想定する外部ハザードに対して十分な耐性を確保（津波に対し、敷地嵩上げによるドライサイト化など） ✓ 外部ハザードの想定に対する不確かさへの対処として以下の設計を実施することで、既設炉に比べて信頼性の向上が可能 ・ 設計基準事故対処設備を含めて多様性を確保 ・ 可搬型設備等の整備（設備面/運用面を含む対応）
不確かさへの備え	✓ 外部ハザードだけでなく、事故シナリオの不確かさへの備えとして可搬型設備等（設備面/運用面を含む対応）を事象緩和に活用 ✓ 可搬型設備の共用化による運用性向上を図る ✓ 物理現象の不確かさに対しても対処する

4. 深層防護の適切な実装

2章で述べたIAEAの深層防護レベルを基に、3章で示した深層防護の実装における留意事項を考慮した次期軽水炉の設計方針を表3に整理する。これは次期軽水炉では設計段階から内的事象/外的事象/APCその他テロへの対応を各層に対し全て強化する方針であり、さらには設計上考慮するシナリオの不確かさへの備えも強化することにより、プラント全体としての信頼性を向上させることが可能となる。

表3 次期軽水炉の設計方針(既設炉から強化方針)

深層防護レベル	深層防護の目的	防止策（例）	緩和策（例）	既設炉の論点整理を踏まえた次期軽水炉の強化方針				
				想定事象への対応（次頁を参照）				不確かさへの備え（PE [※] への配慮）
				内的事象	外的事象 内部ハザード 外部ハザード	APCその他テロ		
レベル1	異常・故障発生防止	外部ハザード由来のリスクの低い立地の選定	安全余裕を含む適切な設計					
レベル2	異常状態の制御 故障の検知	異常発生防止	異常の段階で検知・収束		・ 独立性（区画分離）の強化	・ 建屋の耐性強化 ・ 独立性（区画分離）の強化		
レベル3	DBAの制御	DBA基準逸脱の防止	工学的安全施設による事故の収束	・ 多重性の強化 ・ 恒設設備による管理・運用性の向上			・ 建屋の耐性強化 ・ 独立性（区画分離や、分散配置）の強化による耐性向上	
レベル4a	炉心熔融を回避するためのDECの制御	重大事故の防止	格納容器内において事故を収束		・ 恒設設備による管理・運用性の向上			
レベル4b	SAの影響を緩和するためのDECの制御	格納容器破損を防止	放射性物質の放出を抑制	・ 独立性（区画分離）の確保	・ 独立性（区画分離）の確保			
レベル5	重大な放射性物質の放出による放射線影響の緩和	放射性物質の大規模放出を防止	敷地外緊急対応	—	—	—	—	・ 不確かさへの備えとして、可搬型設備等を事象緩和に活用することで、信頼性を向上 ・ 可搬型設備の仕様共通化等により運用性を向上

※ PE(Practically Eliminate)については、IAEAの原子力発電所の原子炉格納系の設計(NS-G-1.10)、同安全設計要求(SSR-2/1)によれば、早期或いは大規模放射性物質の放出に繋がるシーケンスをPEとすべきであり、それは“ある状態が発現する可能性は、物理的に発生し得ない、あるいは、高い信頼水準で極めて発生しがたいと判断される場合、「実質上除外される」と考えられる”と定義されている[4][5]。本WGでのPEはこれに従った解釈とする。

また、2章で示した通り、防護策全体の性能を高めるためには、各レベルが適切な厚みを持ち、各レベルの防護策がバランス良く講じられ、あるレベルの防護策に負担が集中しないことが重要である。この観点で既設炉（新規規制基準制定後）と次期軽水炉の防護性能のイメージを図1、2に示す。既設炉ではCV破損防止策を特に強化されているが、次期軽水炉では各深層防護レベルをバランスよく設計しており、プラント全体の信頼性が向上している。

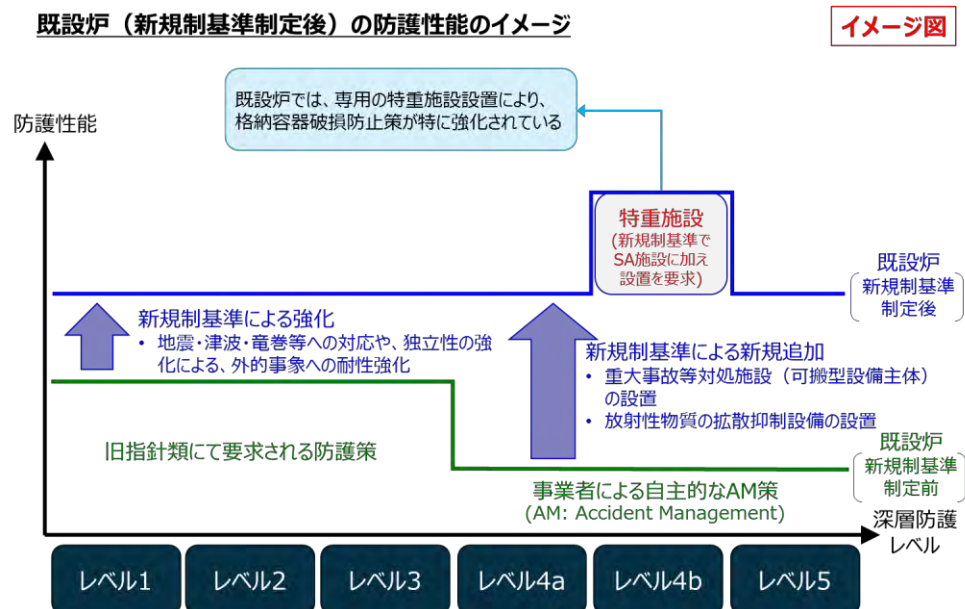


図1 既設炉(新規規制基準制定後)の防護性能のイメージ

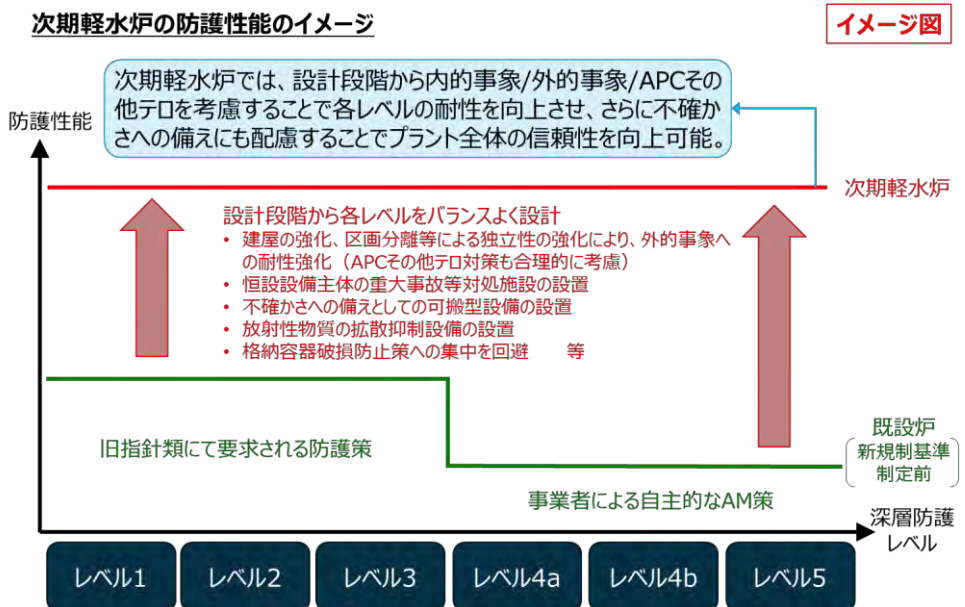


図2 次期軽水炉の防護性能のイメージ

以上、次期軽水炉では設計段階から適切な安全対策を講じることで深層防護全体としての実効性を合理的に向上させることができる。より安全でより合理的な次期軽水炉の設計方針は以下の通りとなる。

- 早期もしくは大規模な放射性物質放出に至る状態を実質的に排除(PE)できるように設計
PEとなる事故シナリオや物理現象の不確かさに対しても備えを講ずる

- ✓ 設計段階から外部ハザードを考慮することで、各レベルの耐性を向上
- ✓ 建屋頑健化、または区画分離の徹底を図ることで、トレン間及び設計基準対象設備と SA 設備間の独立性を強化
- ✓ 恒設設備を主体とすることで、管理運用性を向上
- ✓ 物理現象の不確かさ等にも配慮した熔融炉心冷却対策
- ✓ 事故シナリオの不確かさへの備えとして、可搬型設備等により柔軟性を確保
- バランス良い防護策
 - ✓ CV 破損防止機能に集中していた防護策の最適化
 - ✓ SA 設備の恒設／可搬型の組合せを最適化することで、作業員負担を軽減し、人的過誤のリスク等を低減

5. 次期軽水炉の設計方針を実現するための技術要件

4 章で述べたより安全でより合理的な次期軽水炉の設計方針を実現するための技術要件を表 4 の通り整理した。

表 4 次期軽水炉の安全確保のための技術要件

	新規制基準で新設／強化された規制要求	安全確保のための技術要件
①	耐震・耐津波性能	設定した地震動に対する耐震性や津波高さに対する対策を設計段階から織り込むこと（建屋壁の増厚や敷地ドライサイト化など）
②	電源の信頼性	設計段階から位置的分散配置等の系統構成・配置の工夫などを取込むことで 恒設設備を基本とした対応を主とし、かつ柔軟性が高い可搬型設備等を適切に組み合わせること
③	火災に対する考慮	内部火災対策を設計段階から織り込むこと（区画分離の徹底など）
④	自然現象に対する考慮	設定した火山、竜巻、森林火災に対する対策を設計段階から織り込むこと（堅牢な建屋構造、防火帯の確保など）
⑤	内部溢水に対する考慮	内部溢水対策を設計段階から織り込むこと（高エネルギー配管のルーティングエリア限定、配管等の耐震性強化、区画分離など）
⑥	その他の設備の性能	想定される対策を設計段階から織り込むこと（瓦礫撤去用重機の配備、緊急時対策所の耐震性強化、通信／計測系の信頼性・耐久性の向上 等）
⑦	炉心損傷防止対策（使用済燃料プール内燃料損傷防止対策）	設計段階から位置的分散配置等の系統構成・配置の工夫などを取込むことで 恒設設備を基本とした対応を主とし、かつ柔軟性が高い可搬型設備等を適切に組み合わせること
⑧	格納容器破損防止対策	設計段階から系統構成・配置の工夫などを取込むことで 恒設設備を基本とした対応を主とし、かつ柔軟性が高い可搬型設備等を適切に組み合わせること また、熔融炉心冷却対策としては、極めて低い確率の現象に対しても、影響の大きな現象の発生防止と発生した場合の影響低減の観点から 炉心熔融時の CV 破損を防止 できる設計とすること
⑨	放射性物質の拡散抑制対策	放射性物質の拡散抑制対策については、想定を大きく超える事象への対応となるためフレキシビリティの観点から可搬型設備（放水砲、シルトフェンス等）での対応を基本とすること。また、 可搬型設備の仕様共通化等により運用性の向上 を図ること
⑩	意図的な航空機衝突への対応	故意による大型航空機衝突を想定し、 建屋頑健化または区画分離の徹底により、燃料損傷あるいは CV 破損を防止 すること

6. おわりに

本 WG では、次期軽水炉の設計方針を実現させるための技術要件をまとめた。

- 福島第一発電所事故の教訓を踏まえ、次期軽水炉においてより安全でより合理的な安全対策が可能となり得る項目として3つの論点を抽出し、深層防護と整合する設計方針を議論。
 - ✓ 恒設/可搬型 SA 設備 : 恒設が主体、不確かさ・柔軟性の観点から可搬型設備等を装備
 - ✓ APC その他テロ対策(特重施設) : SA 設備(CV 破損防止)と特重施設を統合
 - ✓ 熔融炉心冷却対策 : 不確かさが大きい事象に対しても対応
- 上記の論点を取り入れ、次期軽水炉に対する技術要件を整理。
- 本 WG での議論をより具体化するために、今後以下のような検討が望まれる。
 - ✓ 次期軽水炉の安全の考え方を踏まえた新設向けの規制要求
 - ✓ 防護レベルの性能目標に係る検討

参考文献

- [1] 日本原子力学会、「社会と共存する魅力的な軽水炉の展望」調査専門委員会報告書、2017 年 3 月
- [2] AESJ-SC-TR005(ANX2):2015 標準委員会 技術レポート、
『原子力安全の基本的考え方について 第1編 別冊2 深層防護の実装の考え方』
- [3] IAEA-TECDOC-1791 “Considerations on the Application of the IAEA Safety Requirements for the Design of Nuclear Power Plant”, 2016
- [4] IAEA NS-G-1.10, “Design of Reactor Containment Systems for Nuclear Power Plants”, 2004
- [5] IAEA SSR-2/1 (Rev.1), “Safety of Nuclear Power Plants: Design”, 2016