

原子力発電部会 「次期軽水炉の技術要件検討」ワーキンググループ

【第2回議題】

恒設/可搬型SA設備の取り扱いに関する協議

R0: 2018.10.31

R1: 2019.1.28

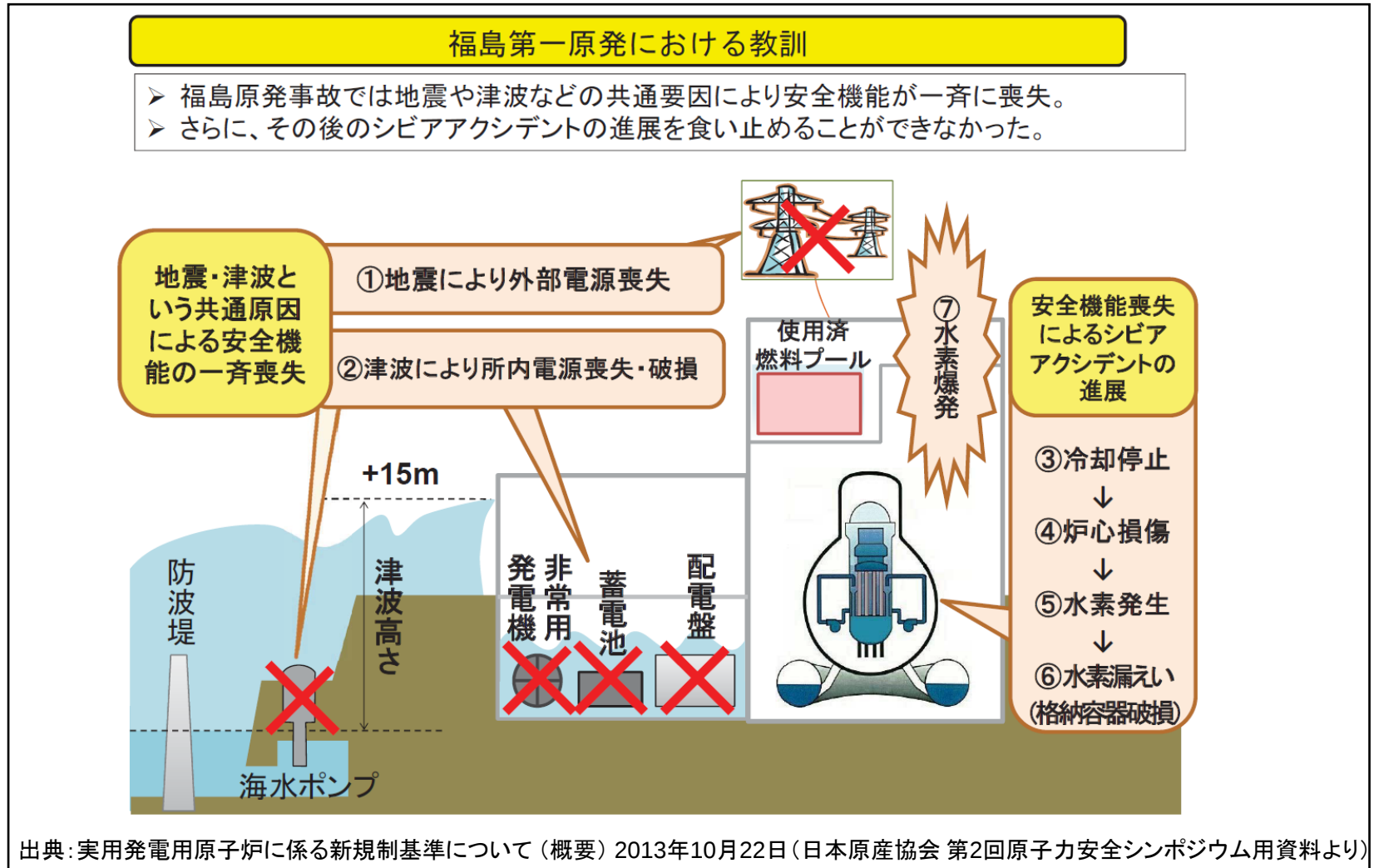
1. 軽水炉に必要なシビアアクシデント対応の安全機能要求
2. 恒設／可搬型シビアアクシデント設備に係る論点の整理
3. 恒設設備と可搬型設備の特徴的な差異について
4. 既設炉でのシビアアクシデント対応の考え方
5. 新設炉で考えられるシビアアクシデント対応の考え方
6. シビアアクシデント対策の最適化
7. まとめ

参考 恒設／可搬型シビアアクシデント設備に係る海外の規制動向

1. 軽水炉に必要な機能要求(1／3)

✓ 福島第一原発事故の教訓

- 共通要因により安全機能が一斉に喪失
- シビアアクシデントの進展を食い止めることができなかった

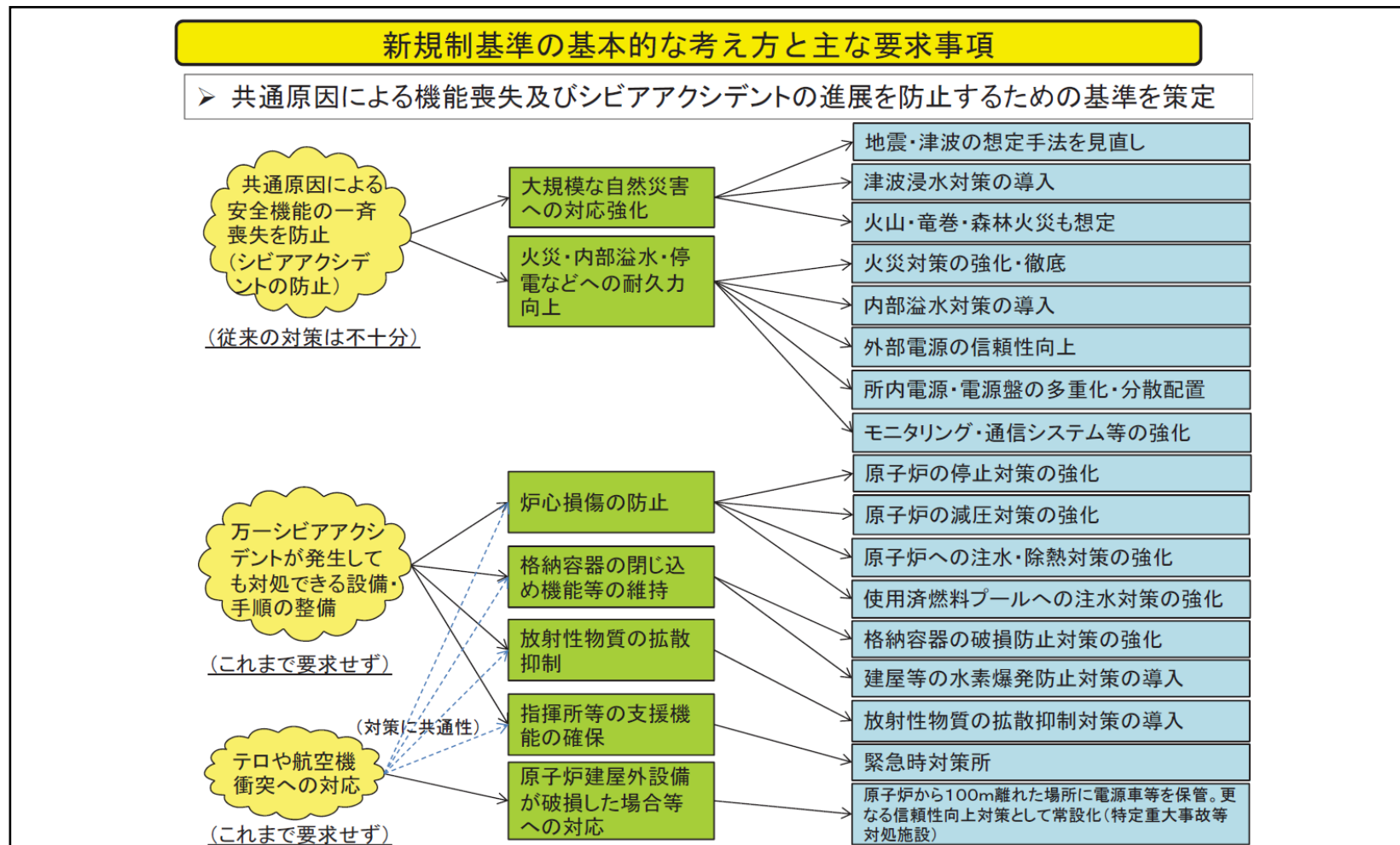


1. 軽水炉に必要な機能要求(2/3)

✓ 福島第一原発事故の再発防止に必要な機能要求

- 共通要因による安全機能喪失の防止
- シビアアクシデントの進展防止

➡ 具体的な要求事項を整理

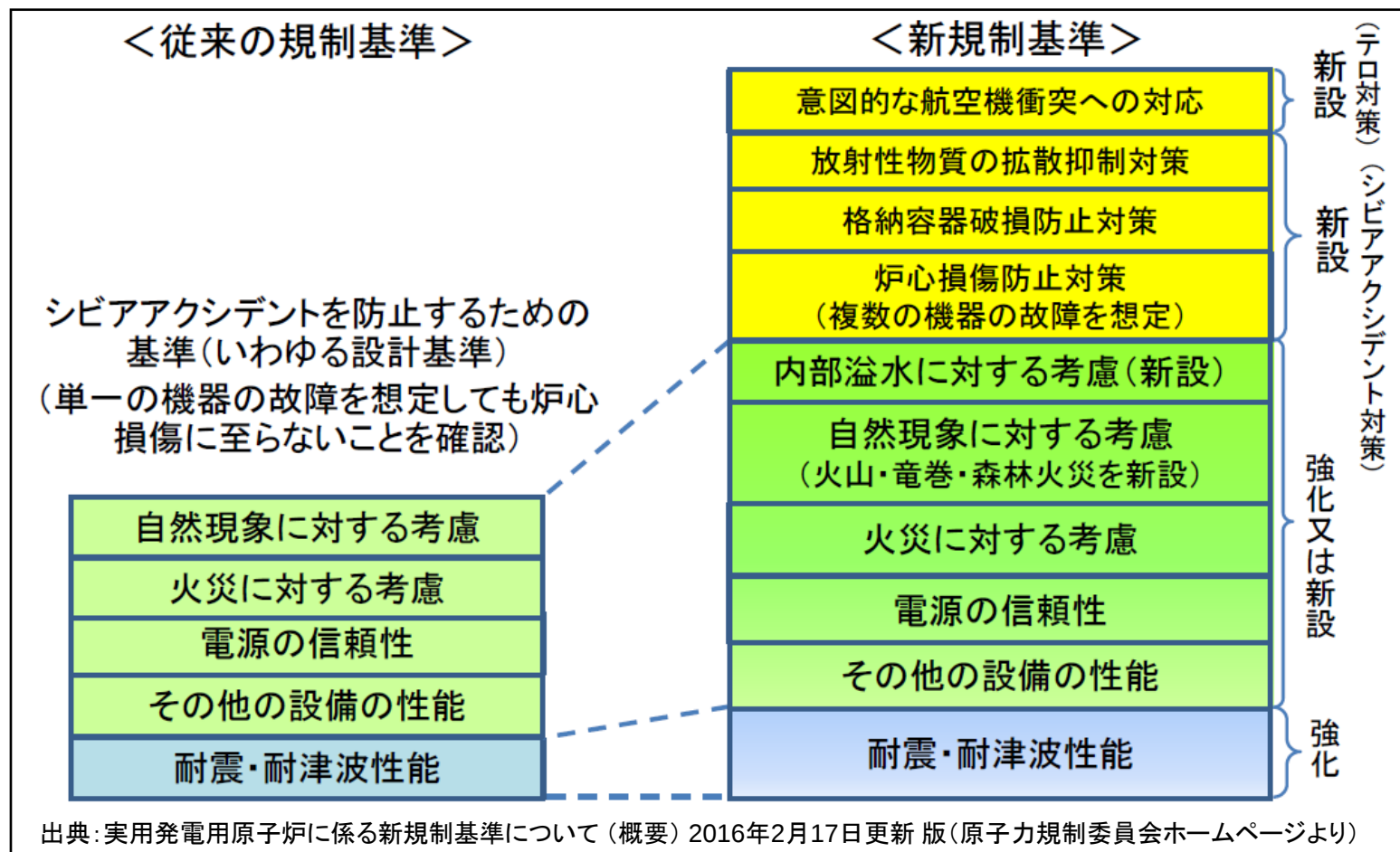


出典: 実用発電用原子炉に係る新規規制基準について(概要) 2013年10月22日(日本原産協会 第2回原子力安全シンポジウム用資料より)

1. 軽水炉に必要な機能要求(3／3)

- ✓ 福島第一原発事故を再発させないために必要な機能要求は、従来の規制基準に新設／強化される形で、新規制基準に取り込まれた

- 共通要因による安全機能喪失の防止 → 強化又は新設
- シビアアクシデントの進展防止 → 新設



2. 恒設／可搬型シビアアクシデント設備に係る論点の整理

- 新規規制基準で強化／新設された機能のうち、シビアアクシデント対策に対し、機能要求と深層防護の実装のあり方として以下の論点を抽出。下表の安全対策に対する恒設及び可搬型SA設備の取扱いについて議論する
- ✓ 新設炉では設計段階からシビアアクシデント設備の系統構成・配置の工夫などを柔軟に取込むことが可能であり、**最適化の余地**(DBA設備に対する多様性、独立性を有した恒設設備の位置的分散配置等)がある
 - ✓ 新設炉の取り得る選択肢として、設計拡張事象に対して人的過誤低減等を目的に多様性を有した**恒設設備を基本とした対応を主としつつ、フレキシビリティが高い可搬型を適切に組み合わせる**対応が考えられる

	議論対象	安全対策	既設炉での対応状況	新設炉の取りうる選択肢
②	電源の信頼性	所内交流電源強化 所内直流電源強化	多重性のある恒設非常用電源に加え、多様性のある恒設発電機＋可搬型発電機を追加 恒設バッテリーの容量増に加え、多様性のある可搬型直流電源＋第3系統目の恒設直流電源を追加	設計拡張事象に対して人的過誤低減等を目的に多様性を有した 恒設設備を基本とした対応を主としつつ、フレキシビリティが高い可搬型設備を適切に組み合わせる 対応が考えられる
⑦	炉心損傷防止対策(使用済燃料プール(SFP)内燃料損傷防止対策)	原子炉冷却機能喪失時の対策(高圧時) 原子炉減圧機能喪失時の対策 原子炉冷却機能喪失時の対策(低圧時) SFP内燃料冷却機能喪失時の対策 最終ヒートシンク喪失時の対策	全交流電源喪失かつ恒設直流電源喪失を想定し、タービン動補助給水ポンプによる冷却が出来るように可搬式バッテリーを用いた現場操作を行う。 駆動源として主蒸気逃し弁、加圧器逃し弁に可搬型設備(窒素ポンプ)を配備 冷却設備として恒設設備を配備。ただし、規制基準要求があり可搬型設備を配備。 SFP保有水維持のため可搬型設備での対応を基本とし、可搬型ホース及び送水車を配備 最終ヒートシンクへ熱を輸送するための可搬型大容量ポンプを配備	設計拡張事象に対して人的過誤低減等を目的に多様性を有した 恒設設備を基本とした対応を主としつつ、フレキシビリティが高い可搬型設備を適切に組み合わせる 対応が考えられる
⑧	格納容器破損防止対策	格納容器内冷却・減圧・放射性物質低減対策 格納容器過圧破損防止対策	可搬型注入ポンプや恒設電動注入ポンプによる格納容器スプレイ 可搬型大容量ポンプ車による再循環ユニットへの海水供給	設計拡張事象に対して人的過誤低減等を目的に多様性を有した 恒設設備を基本とした対応を主としつつ、フレキシビリティが高い可搬型を適切に組み合わせる 対応が考えられる
⑨	放射性物質の拡散抑制	放射性物質の放出抑制対策	可搬型設備での対応を基本とし、放水砲、放水砲用大容量ポンプ、シルトフェンスを配備	人的過誤低減等を目的に多様性を有した恒設設備による対応も可能であるが、事象想定が困難な大規模損壊等への対応としては 可搬型設備を基本とした対応 が考えられる(既設炉と同様)

3. 恒設設備と可搬型設備の特徴的な差異について

- 2項で整理した恒設／可搬型シビアアクシデント設備に係る論点を議論するにあたり前提となる恒設設備及び可搬型設備それぞれの特徴については、原子力学会により既設プラントをベースに表1のとおり整理されている
- 表1をベースとした既設プラントにおける恒設／可搬型設備の優劣比較を表2に示す。
④～⑨で恒設が有利であるものの、既設炉では特有の制約があり可搬設備を基本とする対応

表1 恒設／可搬の特徴※

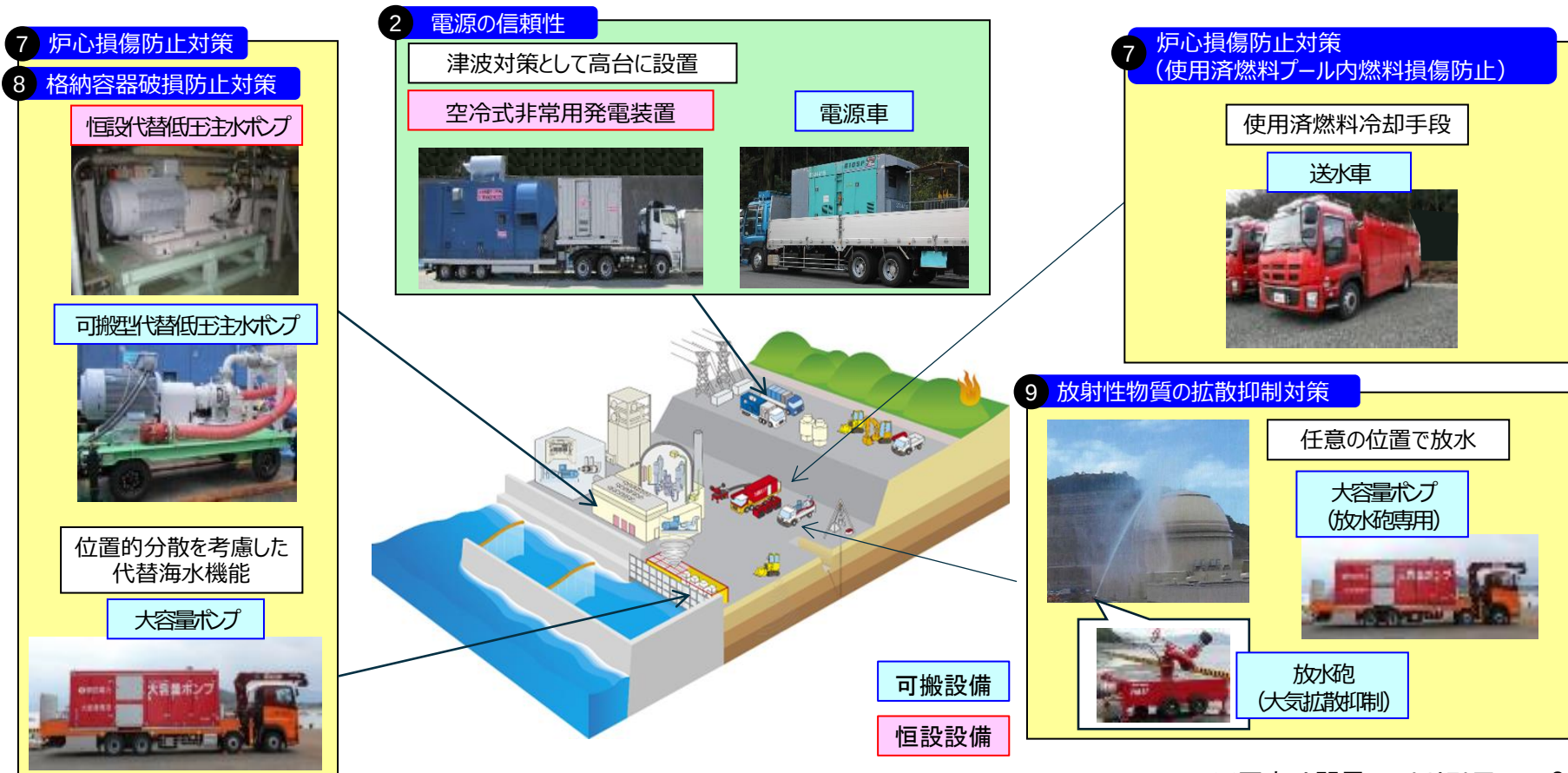
特性	恒設設備を主とする場合	可搬型設備を主とする場合
①柔軟性	使用範囲が想定シナリオに依存	事故シナリオの不確かさに柔軟に対応可能
②配備期間	年単位での配備期間を要する	短期間で配備可能
③独立性	物理的・空間的分離に建屋、敷地の制約を受ける	物理的・空間的分離が容易
④必要な要員	少ない要員で動作が可能	要員、体制が必要
⑤手順書・訓練	手順書の整備、訓練が必要	負担が恒設設備より大きい
⑥対応時間	事故後短時間で投入	事故後の投入に時間を要する
⑦耐環境性	設置場所の環境条件の悪化による不動作の可能性あり	要員が耐えられる作業場所の環境(放射線、気温等)が必要
⑧信頼性	誤動作の可能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

表2 既設炉における恒設／可搬の比較

既設プラントにおける恒設／可搬型設備の優劣比較
柔軟性が高い点で、想定を超える事象に対しては可搬設備が有利。
早期のSA対策が求められる既設炉においては、短期間で配備可能な可搬設備が有利。
既設炉においては、既存建屋形状や配置等の制約があり、可搬設備が有利。
少ない要員で対応可能な恒設設備が有利。
手順書整備や訓練の負担が小さい恒設設備が有利。
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。
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。
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。更に、地震や津波等の外部事象も含め十分な設計裕度や信頼性を確保した設計とすることも可能。
大容量設備が必要な場合は恒設の方が有利

4. 既設炉でのシビアアクシデント対応の考え方

- 福島第一原発事故での教訓を踏まえ、既設炉におけるシビアアクシデント対策は、想定を超える事象が発生した場合に**柔軟に対応できる可能性がある可搬型設備を主として整備**
- 一方で、**可搬型設備では対応が困難なケース**（「事故の進展が早く早急な対応が必要な事象が発生するケース（大LOCA等）」や、「アクセス性や環境条件が著しく悪く作業員による対応が困難なケース」）**に対して、恒設設備による対策も整備**



既設炉の可搬型設備の例

5. 新設炉で考えられるシビアアクシデント対応の考え方

＜新設炉におけるシビアアクシデント対策の基本的な考え方＞

新設炉では設計段階からシビアアクシデント設備の系統構成・配置の工夫など柔軟に対応可能である。新設炉での原子炉の安全機能（燃料損傷防止、格納容器破損防止、放射性物質の拡散抑制）に求められる技術要件への対応方針案について以下に纏める

要件	新設炉の対応方針案	既設プラントでの対応
多重性/ 多様性	➤ シビアアクシデント設備の設置により多重性を確保することで、ランダム故障に対する防護レベルの信頼性を向上 ➤ 多様性を有したシビアアクシデント設備の設置により共通要因に対する防護レベルの信頼性を確保	➤ シビアアクシデント設備の設置により多重性を確保することで、ランダム故障に対する防護レベルの信頼性を向上 ➤ 多様性を有したシビアアクシデント設備の設置により共通要因に対する防護レベルの信頼性を確保
独立性	➤ 同一の機能を持つ恒設設備（DBA設備及びシビアアクシデント設備）に物理的方法等（区画分離の強化又は配置設計段階からの考慮による位置的分散）による独立性を確保することで、共通要因に対する防護レベルの信頼性を向上	➤ シビアアクシデント設備に主として可搬型設備を採用し、物理的方法等（隔離による位置的分散）による独立性を確保することで、共通要因に対する防護レベルの信頼性を向上
外部事象 への耐性	➤ 国内の厳しい地震条件にも耐えうるように恒設設備を設計することで耐震性を強化 ➤ 想定津波高さ以上に敷地レベルを嵩上げし、ドライサイト化することで恒設設備の耐津波性を強化 ➤ 頑健な建屋内に恒設設備を配備することで、竜巻への耐性を強化	➤ 可搬型設備を採用して、地震応答の異なる場所への保管により耐震性を確保 ➤ 可搬型設備を採用して、高台への保管等により耐津波性を確保 ➤ 可搬型設備を分散配備することで竜巻への耐性を確保



多重性、多様性については、新設炉/既設炉ともに考え方は同じであり、同等。独立性、外部事象への耐性については、シビアアクシデント設備に対し、設備構成（恒設／可搬型設備の選択）に最適化の余地がある

6. シビアアクシデント対策の最適化(1/5)

- 新設炉で設計段階からシビアアクシデントを考慮した場合のシビアアクシデント設備に対する設計の観点で恒設／可搬型設備の優位性を下表に整理
- その結果、**新設炉では柔軟性を除き基本的には恒設設備が有利**
 なお、内部事象(火災、溢水等)、外部事象(地震、津波等)への裕度を十分に確保する設計とする等の事故シナリオの不確かさのリスクを大幅に低減が可能であるが、**柔軟性の観点で劣る**

特性	恒設を主とする場合	可搬を主とする場合	新設炉設計の観点での恒設／可搬の比較
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	既設プラントに比べ、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設備が有利
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	新設炉においては設計から建設まで十分な期間を確保可能であり、恒設／可搬のいずれとしても問題ない
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	新設炉のため恒設でも建屋、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／可搬のいずれとしても問題ない
④必要な要員	少ない要員で動作が可能	要員、体制が必要	少ない要員で対応可能な恒設設備が有利
⑤手順書・訓練	手順書の整備、訓練が必要	負担が恒設設備より大きい	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	事故後短時間で投入	事故後の投入に時間を要する	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	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	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	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
⑨設備容量	大容量設備が可能	大容量設備の運用は困難	大容量設備が必要な場合は恒設の方が有利

凡例: 可搬が有利 同等 恒設が有利

6. シビアアクシデント対策の最適化(2/5)

- 新設炉では柔軟性を除き基本的には恒設設備が有利
- 各特性の優劣比較のうち、新設炉でのシビアアクシデント対策の設備構成において、可搬型設備と同等又は恒設設備が有利と判断した項目について以下に纏める

【可搬型設備と同等な項目】

<②配備期間について>

新設炉においては、設計から建設まで十分な期間を確保可能



新設炉の場合、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同等

<③独立性について>

新設炉では設計段階から建屋、敷地条件に合わせ区画分離の強化及び位置的分散を図ることで独立性の確保可能



新設炉の場合、設計段階から配慮可能であり、恒設/可搬型のいずれとしても同等

6. シビアアクシデント対策の最適化(3/5)

【恒設設備が有利な項目】

<④必要な要員について>

設備を恒設化することで遠隔操作が可能となり、より少ない要員で対応が可能

恒設化により遠隔操作とすることでラインアップ作業等を不要化し、少ない要員で対応が可能



現場作業等の作業量の低減 ⇒ 作業要員負担の削減

<⑤手順書・訓練について>

設備を恒設化することで、手順書整備や訓練の負担低減が可能

可搬型設備では、周辺環境の整備を含めた対応要領の煩雑化が想定され、手順書や訓練も複雑化するが、恒設設備で対応することで、制御室から一貫した操作・監視が可能となることや、情報の一元化が可能となり、運転操作の簡素化が図られる



手順書のシンプル化や訓練の負担軽減
情報管理の一元化、情報伝達の迅速化 ⇒ 人的過誤のリスクを低減

<⑥対応時間について>

設備を恒設化することで、準備時間が少なくなり、早期の事故対応操作が可能となり、事象の早期収束、規模拡大防止が可能

既設炉では可搬型設備のラインアップ等の作業が必要であったが、恒設化により遠隔操作が可能となり、準備時間が少なくなる



早期の事故対応操作が可能 ⇒ 時間的な裕度の確保

6. シビアアクシデント対策の最適化(4/5)

<⑦耐環境性について>

放射線、温度等の環境に強い恒設設備とすることで、厳しい環境下においては作業要員を必要とする可搬型設備に比べて有利

恒設設備とすることで、空間線量や温度等の環境影響の悪化に対する耐性の向上や現場操作の削減による作業員負担が軽減



作業不要あるいは作業量の大幅低減

⇒ 作業要員負担の削減、人的過誤のリスクを低減



既設炉における放射線環境下での作業の例

<⑧信頼性について>

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

恒設化による遠隔操作とすることで現場操作を削減し、信頼性の向上が可能



現場操作の削減 ⇒ 人的過誤のリスクを低減



既設炉における現場でのラインアップ作業の例

<⑨設備容量について>

大容量設備が必要な場合は恒設の方が有利

可搬型設備では、大容量設備の運用は困難であるが、恒設設備では大容量設備での対応が可能であり、作業員負担が軽減



作業量の低減 ⇒ 作業要員負担の低減

※写真は関電HPより引用

6. シビアアクシデント対策の最適化(5/5)

<①柔軟性について>

柔軟に対応可能な可搬型設備等※を整備することで、内部事象、外部事象に対する事故シナリオの不確かさへの対応能力を向上

可搬型設備等を配備することにより、事故シナリオの不確かさによる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、事象進展の緩和等を図る



事故シナリオの不確かさへの対応能力向上

⇒ 事象の進展の緩和、時間的裕度の確保

※:新設炉における可搬型設備等について

新設炉における可搬型設備等とは、柔軟に対応が可能な設備全般をいい、ポンプ車、電源車等のいわゆるモバイル設備に限定せず、以下の設備面や運用面に考慮した設計をいう

○可搬型設備等の例

➤ 設備面

- ・ 可搬型設備の配備、及び可搬型設備の容量を他の事象緩和に使用可能な容量を確保する等の設備仕様共通化
- ・ 炉心注入配管やCVスプレイ配管への接続用座、仮設タイラインの設置
- ・ 複数のインターフェイス(異なる高さ、配置への設置を含む)設置や接続が容易な共通の接続方式の採用

➤ 運用面

- ・ 常用設備の活用、モータ等の予備品を活用した設備復旧、等
- ・ シビアアクシデントマネジメント(SAM)の活用を含めた手順書を整備し、教育・訓練を実施

7. まとめ

新設炉におけるシビアアクシデント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。

- 新設炉の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、且つ柔軟性が高い可搬型設備等を適切に組み合わせる。具体的には以下の通り。
 - 設計上想定されるシビアアクシデント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・外部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、**作業要員負担の削減**
 - ✓ 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**

以上の整理を踏まえ、新設炉でのより安全でより合理的な技術要件として深層防護の実装のあり方を検討していく（第4回に実施予定）

参考 可搬型設備に係る海外の規制動向

➤ 可搬型設備に対する海外の規制要求は以下の通り

- IAEA の要求事項およびガイド
 - IAEA SSR-2/1 Rev.1 Paragraph 6.28B, 6.45 A, 6.68
 - ✓ 格納容器からの熱除去(6.28B)、電源供給(6.45A)、SFPへの水補給(6.68)に対して、可搬型設備が安全に使用できるように設計考慮するよう要求あり。但し、これら可搬型設備は必ずしもサイト内に保管しておく必要は無いとの注記有り。
 - IAEA-TECDOC-1791 Chapter 10 “USE OF NON-PERMANENT EQUIPMENT FOR ACCIDENT MANAGEMENT”
 - ✓ 可搬設備は設計拡張事象(DEC)でカバーされない状況での有効な手段として考慮されると解説されている。
- 米国「1F事故を踏まえた短期タスクフォース(NTTF)」の「緩和戦略」対応
 - 本命令では、設計基準を超える外部事象を緩和するため、①初期段階(恒設設備で対応)、②過渡段階(可搬もしくは恒設設備で対応)、③最終段階(サイト外リソースの調達)の3段階のアプローチを要求
 - 設計基準を超える外部事象後の炉心、格納容器、SFP冷却を維持・回復するためのガイドンス及び戦略を作成、実施及び維持などを要求
 - この勧告に対して、産業界(NEI)はFLEX(多様かつ柔軟な対応方策)を提案
 - ✓ 電源及び冷却水の維持または主要な安全機能を修復するための可搬型設備(可搬式ポンプ、発電機、バッテリー、バッテリー充電器、コンプレッサ、ホース、カップリング、その他の補助設備・器具など)
 - ✓ 多様な場所に機器を配置することによって、そのサイトで予測される厳しい自然現象から可搬型設備を合理的に防護

➤ 設計上想定されるシビアアクシデントに対し恒設設備により対処し、事故シナリオの不確かさへの備えとして可搬型設備を整備する新設炉の考え方を否定するような海外要求は見当たらない