

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5回議題】

溶融炉心冷却対策に関する協議

2019.8.1

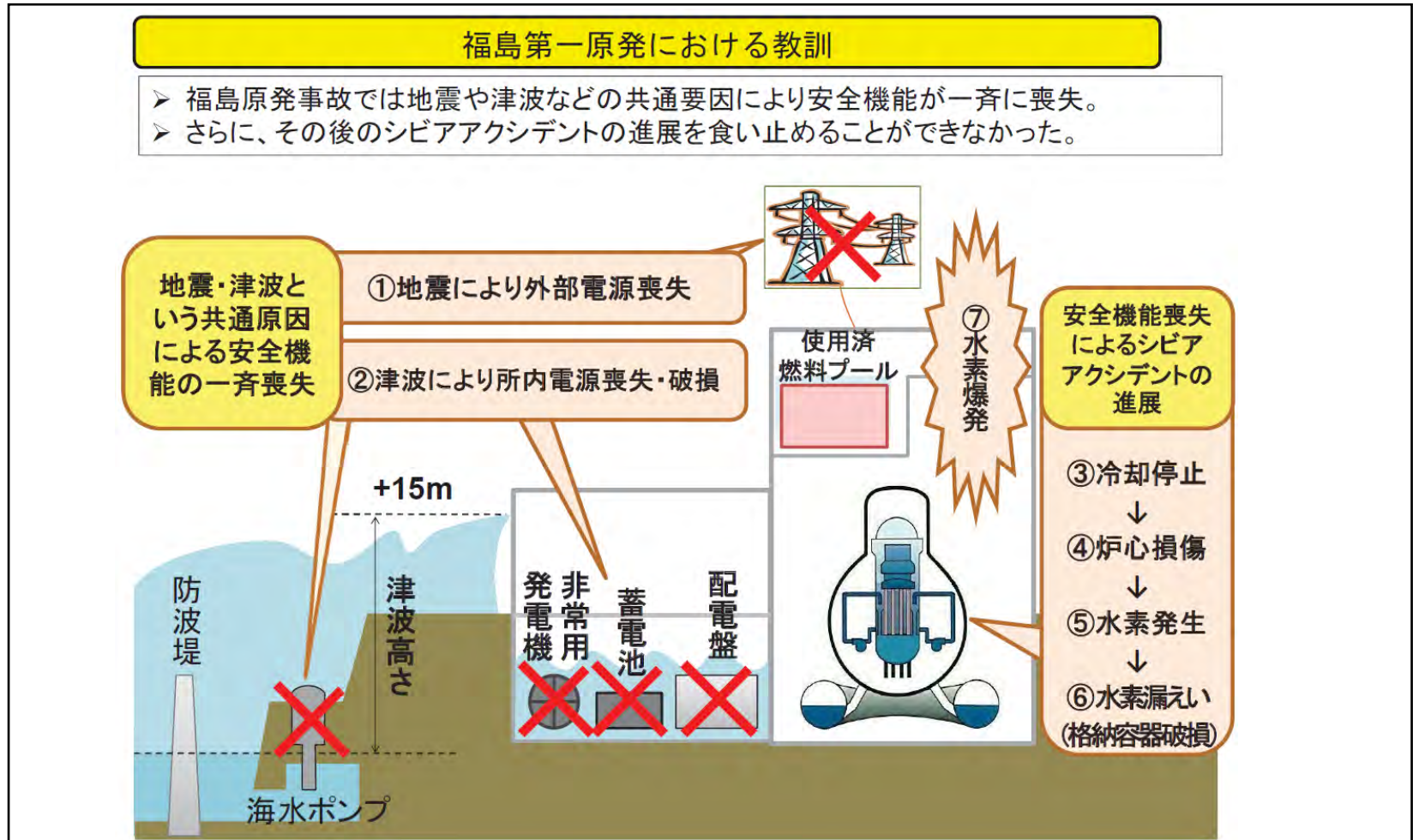
1. 軽水炉に必要なシビアアクシデント対応の安全機能要求
2. シビアアクシデント対策に係る論点の整理
3. 溶融炉心冷却対策に係る論点の整理
4. 溶融炉心冷却方式の整理
5. 格納容器破損防止対策としての溶融炉心冷却方式の評価
6. まとめ

参考 溶融炉心対策に係る海外の動向

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(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

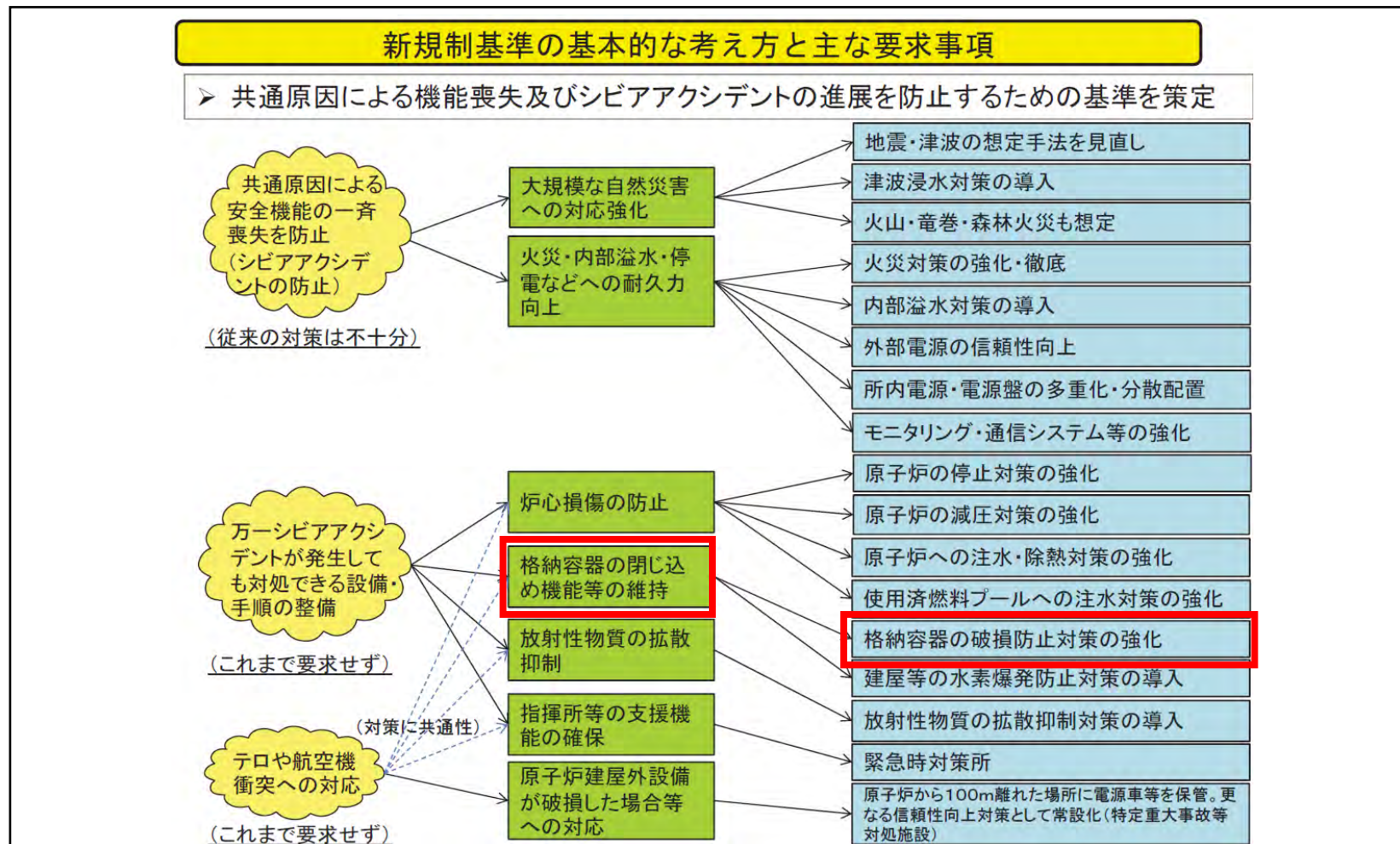


出典: 実用発電用原子炉に係る新規規制基準について (概要) 2013年10月22日 (日本原産協会 第2回原子力安全シンポジウム用資料より)

1. 軽水炉に必要なシビアアクシデント対応の安全機能要求(2/3)

✓ 福島第一原発事故の再発防止に必要な機能要求

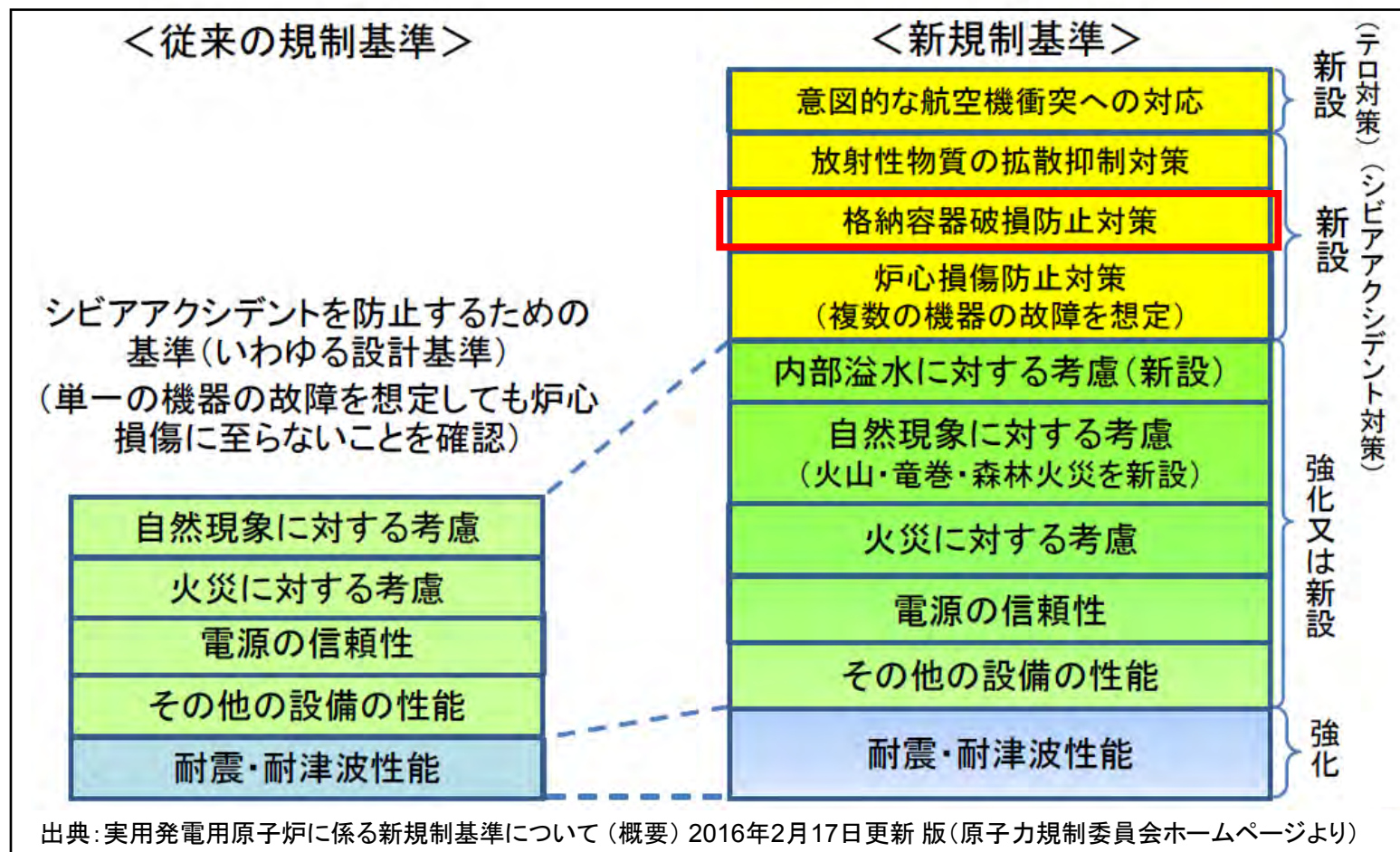
- 共通要因による安全機能喪失の防止
 - シビアアクシデントの進展防止
- 具体的な要求事項を整理



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. 軽水炉に必要なシビアアクシデント対応の安全機能要求(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. シビアアクシデント対策に係る論点の整理

➤ 格納容器破損防止対策として考慮する必要がある破損モード

- ✓ 水蒸気爆発（炉内:ミサイル／炉外:圧カスパイク）
- ✓ 可燃性ガスの爆燃・爆轟（水素燃焼）
- ✓ 水蒸気による加圧
- ✓ 格納容器雰囲気直接加熱
- ✓ 格納容器への直接接触
- ✓ コンクリート浸食（MCCI）
- ✓ 貫通部過温破損

➤ 物理現象の影響の不確かさが大きい破損モード

- ✓ **MCCI**
- ✓ **水蒸気爆発**

（出典）「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」 原子力安全研究協会（平成11年7月）

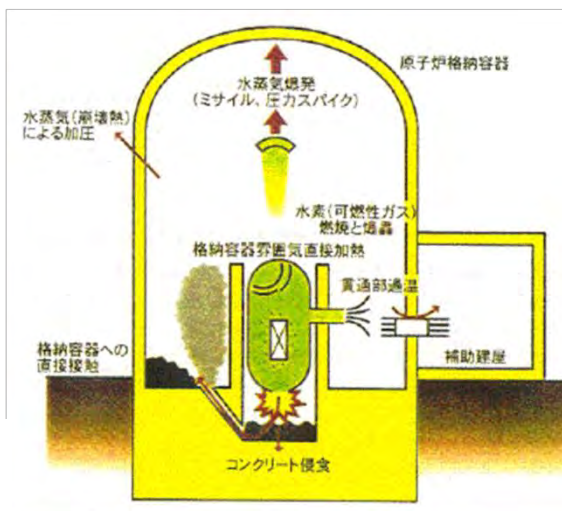
⇒いずれも極めて低い確率の現象として認識されている。

注記：水張によりMCCIによるコンクリート浸食のリスクは十分に低減していることを前提としている

格納容器の破損モード

（格納容器破損モード）

1. 水蒸気爆発
2. 可燃性ガスの爆燃、爆轟
3. 水蒸気による加圧
4. 格納容器雰囲気直接加熱
5. 格納容器への直接接触
6. コンクリート侵食
7. 貫通部過温破損



➤ 新設炉では極めて低い確率の現象（MCCI、水蒸気爆発）に対しても、影響を考慮することが格納容器破損防止の観点で重要である。

➤ そこで、これら破損モードに共通する「溶融炉心冷却」について論点を抽出し、新設炉における溶融炉心冷却対策方針について議論する。

3. 溶融炉心冷却対策に係る論点の整理

- 新規制基準で強化/新設された機能(要求)のうち、溶融炉心冷却対策に係る設備の特徴として以下の論点を抽出。下表の安全対策に対する設計方針の取扱いについて議論する。
- ✓ 溶融炉心対策は、「炉内冷却」と「炉外冷却」に大別される。「炉内冷却」はIn-vessel Retention (IVR) としても知られ、また、「炉外冷却」は“ウェットキャビティ方式”と“ドライキャビティ方式”に分類される。
 - ✓ 国内では、速やかな溶融炉心冷却を指向するウェットキャビティ方式を採用し、再稼働審査で許可を得ている。海外では、水蒸気爆発リスク排除の観点から、配置・設計を見直して新技術(コアキャッチャ)を導入するドライキャビティ方式や、炉内に溶融炉心を保持して冷却水との接触を回避できるIVRを採用しているプラントもある。
 - ✓ 以上、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を論点とし、従来のウェットキャビティ方式に加え、新たにドライキャビティ方式(コアキャッチャ)やIVR(※)導入を選択肢に含めて、国内新設炉における溶融炉心対策のあり方について議論する。

	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
⑧	格納容器破損防止対策	溶融炉心冷却対策	ウェットキャビティ方式	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の適用も選択肢として考えられる

(※) なお、現行の新規制基準では、溶融した炉心燃料等が原子炉容器内で冷却・保持されない場合を想定し、RV破損を前提として、格納容器下部への注水設備を設置することを要求。

4. 溶融炉心冷却方式の整理(1／3)

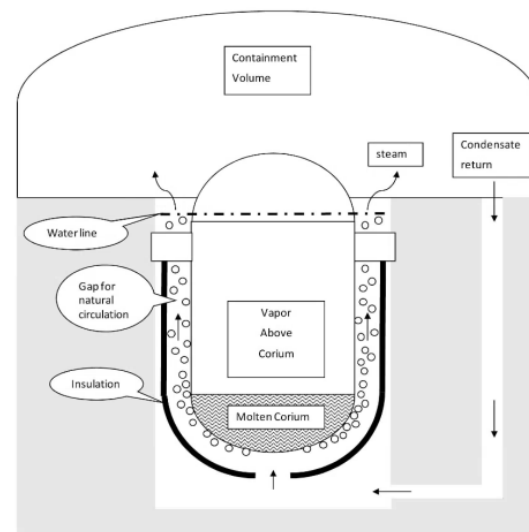
■ 炉内冷却 (In-vessel Retention: IVR)

原子炉容器破損前にキャビティを冠水させ、原子炉容器の外側から炉内の溶融炉心を冷却する方式。(許認可実績:AP1000(米国等)、VVER440(ロシア・フィンランド)等)

- キャビティを冠水させるだけのシステムであり、注水手段がシンプルで、かつ、注水の判断が容易。
- 原子炉容器内で溶融炉心を保持、冷却することから、MCCIは回避可能。
- 原子炉容器内で溶融炉心を保持、冷却することで、**炉外での水蒸気爆発は回避可能**。
- 原子炉容器破損前に原子炉容器を冠水させる必要あることから、相対的に早期の原子炉下部キャビティへの注水が必要だが、多様な手段で注水できる。
- 原子炉容器内の溶融炉心の状態(自然対流／成層化)、原子炉容器からの除熱性能(限界熱流束制限、対流冷却)等、**IVR成立性に係る物理現象の不確かさが大きいこと**(特に炉出力の増加に伴って成立が困難となる)が指摘されている。

(出典) T. G. Theofanous, et al., In-Vessel Coolability and Retention of A Core Melt, DOE/ID-10460, 1996
IRSN, Considerations Concerning the Strategy of Corium Retention in the Reactor Vessel, 2015

- ただし、炉外に溶融炉心が放出した場合は、ウェットキャビティ冷却方式と同様。



(出典) , G. Dewitt, et al., Experimental study of critical heat flux with alumina-water nanofluids in downward-facing channels for in-vessel retention applications, Nuclear Engineering and Technology, Vol 45, Issue 3, June 2013

4. 溶融炉心冷却方式の整理(2/3)

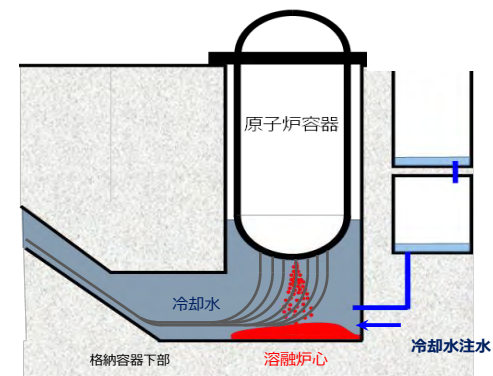
■ 炉外冷却（ウェットキャビティ方式）

原子炉容器破損前にキャビティを冠水させ、冷却水中に溶融炉心を放出することによって冷却。（許認可実績：従来型PWR（各国）、APR1400（韓国・米国等）等）

- キャビティを冠水させるだけのシステムであり、注水手段がシンプルで、かつ、注水の判断が容易。
- 既設炉における国内再稼働審査においては、著しいMCCIには至らず、対策の有効性を確認。
- 溶融炉心を冷却水中に放出することから、**水蒸気爆発の懸念が完全には排除できないが、既設再稼働審査では実機での爆発発生の可能性は極めて小さいとの結論。**
 - ✓ 外部トリガー（起爆事象）がない
 - ✓ 冷却水のサブクール度が小さい
 - ✓ 溶融炉心の過熱度が小さい

（出典）大飯3/4号機 重大事故等対策の有効性評価 添付資料3.3.1。炉外実験で自発的な水蒸気爆発が観測された事例は、外部トリガーあり、冷却水サブクール度が十分に大きい、溶融炉心の過熱度が著しく大きい何れかの条件に該当する場合に限定される。

- 原子炉下部キャビティへの早期注水が必要となるが、多様な手段で注水でき、既設炉に広く採用される。



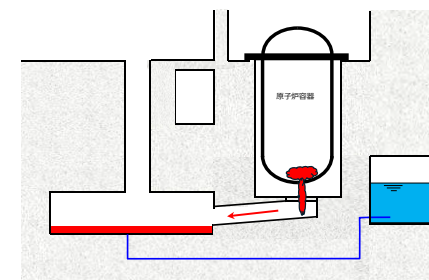
既設炉（PWR）の例

4. 溶融炉心冷却方式の整理(3／3)

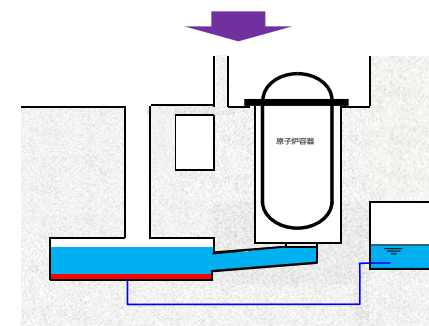
■ 炉外冷却（ドライキャビティ方式）

溶融炉心をドライ状態にあるキャビティに拡散した後に、冷却水を供給して溶融炉心を冷却する方式。（許認可実績：EPR（欧州等）、VVER1000（ロシア等）等）

- 専用設備（コアキャッチャ）を原子炉容器下方に設置する溶融炉心対策であり、コアキャッチャに溶融炉心を拡散して冷却することから、溶融炉心冷却に係る不確かさを低減、格納容器ベースマットのMCCIは発生しない。
- 溶融炉心を水中に放出しないため、**炉外での水蒸気爆発の発生リスクを大きく抑制**。
- 原子炉容器破損前に溶融炉心を冷却するための早期水張が不要であり、かつ、溶融炉心を拡げることで冷却性の向上が可能。
- **炉心溶融物の安定化（溶融炉心と犠牲材コンクリートの混合）に不確かさが存在**（設計の成立性は海外炉で検証済み）
- 溶融炉心拡散前のドライキャビティの維持、溶融炉心拡散後の冷却と**溶融炉心冷却プロセスが相対的に複雑**（新設炉では設計段階から考慮する事でパッシブ技術の採用等により運転員負担を軽減し、信頼性の高い注水システムの設計が可能であり、海外炉に採用されている）



溶融炉心拡散前（ドライキャビティ）



溶融炉心拡散後（溶融炉心冷却）

（出典）Fischer, M., The severe accident mitigation concept and the design measures for core melt retention of the European Pressurized Reactor (EPR), Nucl. Eng. Des., 230, pp169-180, 2004

5. 格納容器破損防止対策としての溶融炉心冷却方式の評価

新設炉におけるシビアアクシデント時の格納容器破損防止対策としての溶融炉心冷却方式について、各方式の議論の結果を整理した。

	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)
設計方針	- 炉内での冷却 - バウンダリ維持を重視	- 炉外での冷却 - 早期の冷却を重視	- 炉外での冷却 - MCCI、炉外での水蒸気爆発の回避を重視
設計原理	溶融炉心放出前にキャビティへ注水 RV外壁から溶融炉心冷却	溶融炉心放出前にキャビティへ注水 RV外キャビティ水中で溶融炉心冷却	溶融炉心をドライ状態で拡散させて冷却拡散した溶融炉心に注水
物理現象の不確かさへの評価	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、その発生を抑止※
設計の特徴	- シンプルなシステム(注水方法、注水タイミング) - 多様な手段で注水可能 - 炉内に溶融炉心を保持	- シンプルなシステム(注水方法、注水タイミング) - 多様な手段で注水可能	- 溶融炉心を拡げることで冷却性の向上 - 相対的に複雑なシステム(溶融炉心を一旦ドライ状態で維持し拡散後に注水)
残余のリスク	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、爆発の影響の不確かさにより、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)
実装における設計上の配慮	- 炉出力に応じた、炉内構造物・RV壁伝熱性、注水・除熱促進の構造の確認 - IVR不成立の場合は、ウェットキャビティ方式移行の成立性の確認	- 新設炉としての水蒸気爆発の確率が既設同様十分低いことの確認 - 注水方法の信頼性(流路・設備の多様化)	- 溶融炉心の安定化の検証(犠牲材コンクリートとの混合など、成立性は海外新型炉で検証済み) - 注水方法の信頼性(流路の確保、注水のタイミングをパッシブ化することによる運転員負担の軽減)
許認可実績	- AP1000(米国等) - VVER440(ロシア・フィンランド)	- 従来型PWR(各国) - APR1400(韓国・米国等)	- EPR(欧州等) - VVER1000(ロシア等)

※: 炉内での水蒸気爆発については、確率的に排除している

6. 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を論点とし、国内新設炉における溶融炉心冷却対策のあり方について議論を整理した。

- 福島第一の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。また、新設炉では設計段階から格納容器内の構造、系統構成等の工夫など柔軟に取り込むことが可能であることから、**新設炉では極めて低い確率の現象(MCCI及び水蒸気爆発)に対しても、物理現象の不確かさを考慮した設計とする。**
 - ✓ IVR、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。
 - ✓ 但し、溶融炉心冷却方式の各方式にはそれぞれに固有の不確かさや特徴があり、方式の選択に当たってはプラント特性・構造に応じて、**個々の物理現象の不確かさの低減度合い、各方式の残余のリスクを考慮しつつ、深層防護の実装の観点でバランスのよい防護性能となるように対策システムを設計することが重要。**

新設炉の溶融炉心冷却対策については、各方式の国内プラントへの適用性に対し、今後システムの有効性を検証していくことが重要

参考 溶融炉心対策に係る海外の動向(1/3)

【IAEA】IAEA TECDOC 1791

- ✓ APPENDIX 4 Chapter 4 “LARGE STEAM EXPLOSION”において以下のように示唆
 - 格納容器バリアを損傷させるような水蒸気爆発を排除するために溶融炉心を水中に落とし込む事を避ける方法が好ましい (For eliminating steam explosions that could damage the containment barrier, the preferred method is to avoid dropping of molten core to water in any conceivable accident scenarios.)

【米国】NRC SECY-93-087

- ✓ 1章“SECY-90-016 Issues”H項“Core Debris Coolability”において以下を要求
 - デブリ拡散のためのキャビティ床スペースの確保 (provide reactor cavity floor space to enhance debris spreading)
 - 冷却促進のためのキャビティ注水手段の設置 (provide a means to flood the reactor cavity to assist in the cooling process)
 - CVライナや構造物への保護(必要あれば) (protect the containment liner and other structural members with concrete, if necessary)
 - 炉心ーコンクリート反応による環境条件(圧力、温度)に対するCVの24時間の耐性と不確定性に対する余裕の確保 (ensure that the best estimate environmental conditions (pressure and temperature) resulting from core-concrete interactions do not exceed Service Level C for steel containments or Factored Load Category for concrete containments, for approximately 24 hours. Ensure that the containment capability has margin to accommodate uncertainties in the environmental conditions from core-concrete interactions)

参考 溶融炉心対策に係る海外の動向(2/3)

【欧州(WENRA)】

“Reactor Safety Reference Levels”(January 2008)

- ✓ Appendix F “Issue : Design Extension of Existing Reactors” 4.章“Protection of the containment against selected beyond design basis accidents”の4.7項において以下のよう
に要求
 - 合理的に実施できる範囲で、溶融炉心による格納容器の劣化は、防止または緩和されるべき(Containment degradation by molten fuel shall be prevented or mitigated as far as reasonably practicable)

“Reactor Safety of new NPP designs”(March 2013)

- ✓ Position 5: “Practical elimination”において水蒸気爆発などの格納機能を脅かす燃料溶融のシーケンス(Fuel melt sequences challenging the confinement)に対して以下のよう
に要求
 - 格納容器機能の損傷が実質的に排除されることを示さなくてはならない(It has to be shown that the failure of the containment function resulting from these events is practically eliminated)

【欧州(フィンランド)】YVL B.6 “Containment of a nuclear power plant”

- ✓ 3.10 “Management of reactor debris in a severe reactor accident”で以下を要求(パラグラフ343)
 - デブリの冷却確保 (The debris of a damaged reactor shall be cooled in such a way that release of radioactive substances to the containment atmosphere can be effectively reduced)
 - デブリの熱からの格納容器健全性の維持(the heat radiated from the debris will not endanger containment integrity)

参考 溶融炉心対策に係る海外の動向(3/3)

【欧州(フランス)】Decree No. 2007-534 “Decree Authorising the Creation of the “Flamanville 3”, Basic Nuclear Installation” (10 April 2007)

- ✓ III章“Basic safety functions”のIII-3.3節“Containment guaranteed by the buildings”において以下のように要求
 - 格納容器基礎部の貫通を避けるため、原子炉からの溶融放射性物質を長時間にわたり回収冷却できる装置を設置すべき(In order to prevent the basement of the containment system to be perforated in case of accident involving core meltdown, a suitable long-term system shall be implemented in order to collect and to cool any molten radioactive material resulting from the nuclear reactor)

【欧州(英国)】Safety Assessment Principles for Nuclear Facilities (2014 Edition Revision 0)

- ✓ FAULT ANALYSIS(FA)で以下を要求(パラグラフ611)
 - SA解析でPEを立証すべき(the SAA should form part of demonstration that potential severe accident states have been ‘practically eliminated’)
 - PEとする事象は、特に(溶融炉心の挙動のような)物理現象への限定的な知見に基づく不確定性を考慮した個別の評価を実施すべき(Each instance where practical elimination is claimed should be assessed separately, taking into account relevant uncertainties, particularly those due to limited knowledge of extreme physical phenomena (eg the behaviour of molten reactor cores))



IAEA TECDOC-1791で水蒸気爆発に対するドライ型コアキャッチャーへの示唆があるものの、その他欧米の規制文書として溶融炉心冷却方式についての具体的な規定はないと解釈する。