



「もんじゅ」等の安全性強化に関する研究開発について

平成24年11月21日

日本原子力研究開発機構

本資料での検討の範囲

第1回作業部会資料「研究計画策定に向けた検討事項」で記された、

「もんじゅ」の研究開発における検討事項

- 「高速増殖炉プラントとしての技術成立性の確認等の高速増殖炉の成果のとりまとめのために、「もんじゅ」でなければ達成できないことは何か、そのためにはどのようなプロセスが必要か」の内、安全性に関わる事項



「もんじゅ」以外の研究開発における検討事項

- 東京電力福島第一発電所の事故を受け、追加的に行うべき安全研究 は何か

上記2つの検討事項に加え、『従来から「もんじゅ」で実施して来た安全対策等も含めて総合的に安全に関して考えるべき』との委員からのコメントを踏まえて、

- 高速増殖炉の安全性強化に関する研究開発の進め方

を総合的に提示する。

なお、本研究開発分野において国際協力をどのように進めるかについても説明する。



安全性強化に関する研究開発の全体像

我が国では、「もんじゅ」の設計・建設・許認可を通して高速増殖炉の安全性確保の体系を構築してきた。今後は、東電福島第一(1F)の事故の経験も踏まえ、安全性確保に関わる研究開発を「もんじゅ」等で重点的に実施するとともに、AtheNa-SA試験等によりシビアアクシデント(SA)対策に対する検討を進め、高速増殖炉の更なる安全性強化に繋げる必要がある。また、その成果は安全設計クライテリア(SDC)、安全設計ガイドライン(SDG)へも反映。

「もんじゅ」で実施する
安全性強化の研究開発

東電福島事故の
教訓も踏まえ

「もんじゅ」の
設計・建設・許認可
を通して構築してきた
高速増殖炉の安全性確保
の体系

+

実証炉／実用炉
に向けて実施してきた
安全研究の成果

「もんじゅ」以外で実施する
安全性強化の研究開発

SA対策実践

- 外部事象(地震、津波等)への対策強化
- 全電源喪失事故への対策強化

安全関連試験や運転で得られる実データに基づく知見獲得

- 高速増殖炉の安全裕度の実証(自然循環試験等)
- 安全系の信頼性・ロバスト性等に関するデータ蓄積
- アクシデントマネージメント(AM)トレーニング

実プラントへの安全設計・評価手法の適用

- 設置変更届出に伴う安全設計・安全評価
- ストレステストでの高速増殖炉の安全裕度確認

高速増殖炉の安全技術体系を構築

第4世代炉の国際標準
SDC、SDGにも国際協力の
取組の一環として反映

SA解析・評価コード群の構築・精度向上
解析コード群の検証方策・検証データの体系化

AtheNa-SA試験等によるSA対策の有効性検討

SA対策の具体化(崩壊熱除去機能、閉じ込め機能の強化)

高速増殖炉の特徴を踏まえた安全確保の考え方について(1/2)

- 高速増殖炉は、一般的に、炉心及び冷却材特性等において、軽水炉と異なる物理的特徴を有することから、それらを考慮した安全確保対策、特にシビアアクシデント対策が重要。

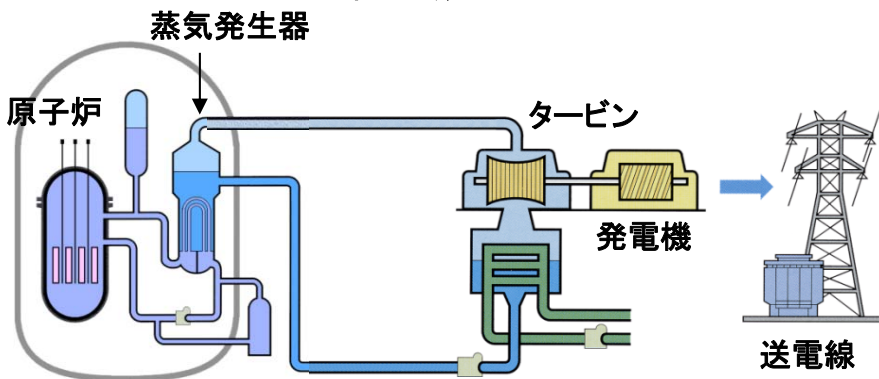
項目	軽水炉	高速増殖炉
炉心特性	ボイド反応度:負	ボイド反応度:正
冷却材特性	冷却材	水
	圧力	高い
	温度	約300℃
	自然循環性	小
化学的活性度	低い	高い

高速増殖炉の安全確保の考え方

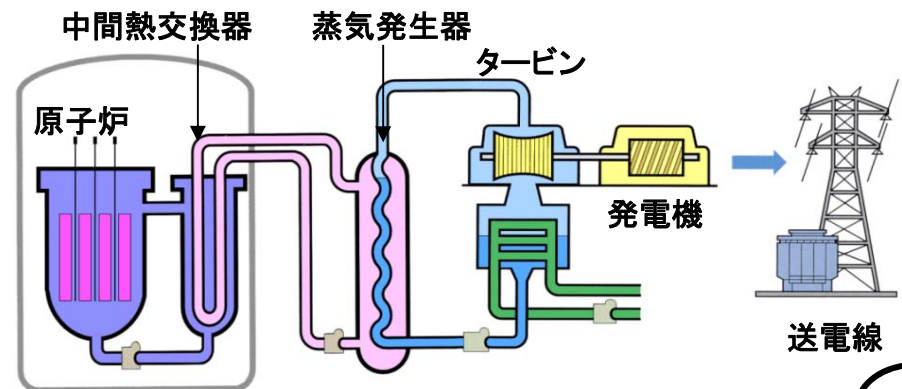
- 炉心損傷の発生を防止
- 仮に炉心損傷を想定しても放射性物質を格納
- Naの特長を活かした自然循環による除熱
- 配管破損を想定しても、液位を確保(冷却材注入が不要)
- ナトリウム燃焼、ナトリウム-水反応への考慮

SA対策

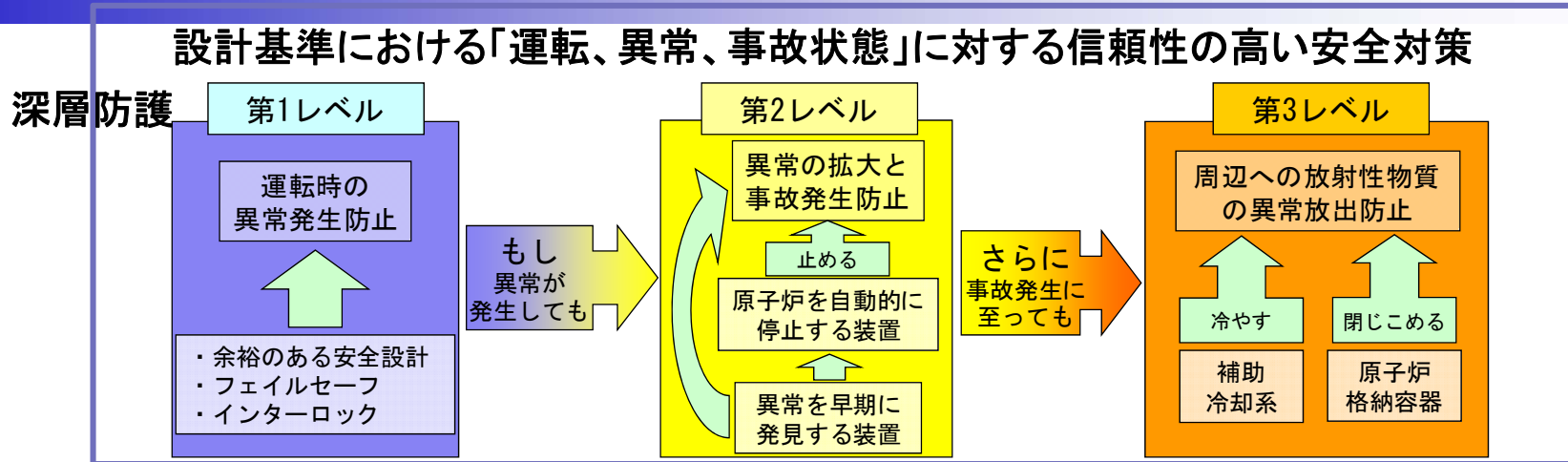
軽水炉(PWR)



高速増殖炉



高速増殖炉の特徴を踏まえた安全確保の考え方について(2/2)



「もんじゅ」の状況
(設計基準外事象にも十分対応できる高い実力を有する)

対策1: 止める

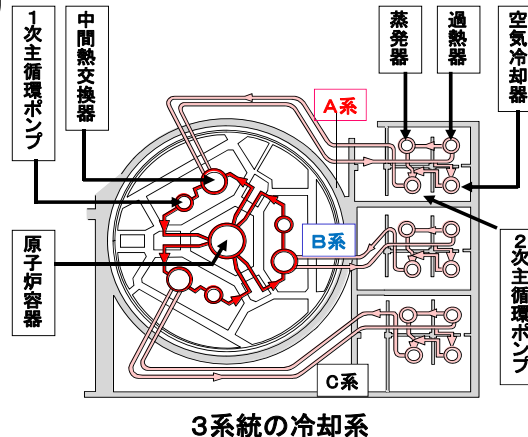
炉を止めるための制御棒は、メカニズムの異なる独立した2つのシステムにより構成されるとともに、フェイルセーフの設計によって、電源が喪失した場合にも確実に炉を停止。

独立2システムの炉停止系

主炉停止系	後備炉停止系
制御棒・駆動軸一体落下 ガス圧加速	制御棒単体落下 スプリング加速

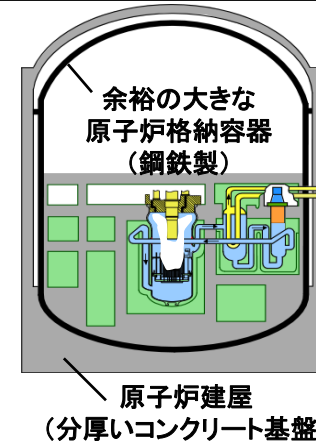
対策2: 冷やす

独立した3系統の冷却系のうち、1系統によって炉停止後の崩壊熱除去が可能。



対策3: 閉じ込める

多重化された隔壁(燃料被覆管、冷却材バウンダリ、余裕の大きな格納容器、分厚いコンクリート基盤の原子炉建屋)によって閉じ込め。





これまでのシビアアクシデント対策への取り組み

- 1970年～1980年代、高速増殖炉開発各国は、設計基準を超えるシビアアクシデントとしての炉心損傷に関する研究開発を精力的に実施。
- 我が国では、1980年11月、当時の原子力安全委員会は「高速増殖炉の安全性の評価の考え方」の中で、『「事故」より更に発生頻度は低い結果が重大であると想定される事象』（通称、(5)項事象）を設定。
- 「もんじゅ」は、安全審査時に、(5)項事象として炉停止失敗事象等について評価を実施し、放射性物質の放散が適切に抑制できることを確認し、審査・認可済み。これらを通じてシビアアクシデント評価技術の進展に貢献。

	設計基準事象	設計基準外事象	
軽水炉	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">異常な 過渡変化</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">事故</div> </div>	<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; text-align: center;">長時間 SBO*</div> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; text-align: center;">その他のアクシデントマネ ジメント対象事象*</div> </div> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>炉停止失敗事象等を想定しても放射性物質の放散を適切に抑制 (許認可審査済み) 進展速度が速く、運転員操作に期待できないATWS事象等</p> </div>
高速炉 (もんじゅ)	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">異常な 過渡変化</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">事故</div> </div>	<div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px; text-align: center;">長時間 SBO* (自然循環 除熱可能)</div> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; text-align: center;">(5)項事象</div> </div> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>除熱に失敗し熱的損傷に至るが、進展速度が遅く運転員による対処が可能な事象</p> </div>

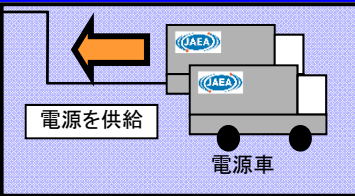
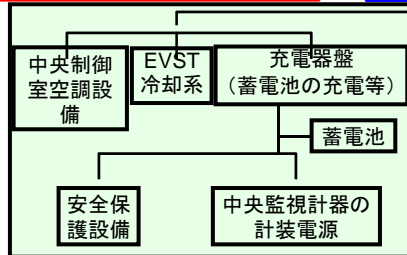
(*これまで自主保安だが、今後は規制対象)

「もんじゅ」における東電事故を踏まえた追加的安全対策の進捗状況(1/2)

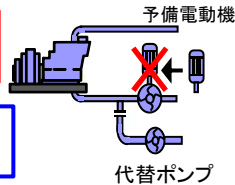
電源の確保

- 電源車及電源ケーブルの配置
【平成23年8月配備】300kVA電源車を2台
- 電源接続盤の設置
【平成24年5月末実施済】

- 非常用ディーゼル発電機代替空冷電源設備の設置
【平成25年3月末完了予定】
→電源車の電源容量に加え1ループ強制循環による炉心冷却を行う電源容量を想定



- 補機冷却海水ポンプ代替ポンプの配備
【平成24年2月末実施済】



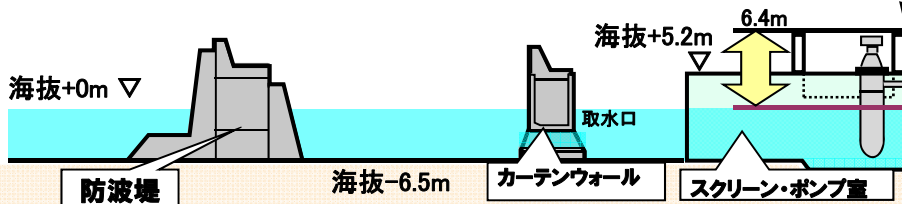
- 補機冷却海水ポンプ予備電動機の配備
【平成25年3月末完了予定】

海水冷却機能復旧対策の実施し、非常用ディーゼル発電機の迅速な復旧を果たす

- 海水浸入経路の調査実施
【平成23年3月実施】
- 海水浸入経路の止水対策の実施
【平成23年10月実施済】

※非常用ディーゼル発電機の補機類水没の可能性から

- 防水壁の補強(高さ1.2m、板厚増)
【平成24年3月実施済】



緊急時対応体制の強化

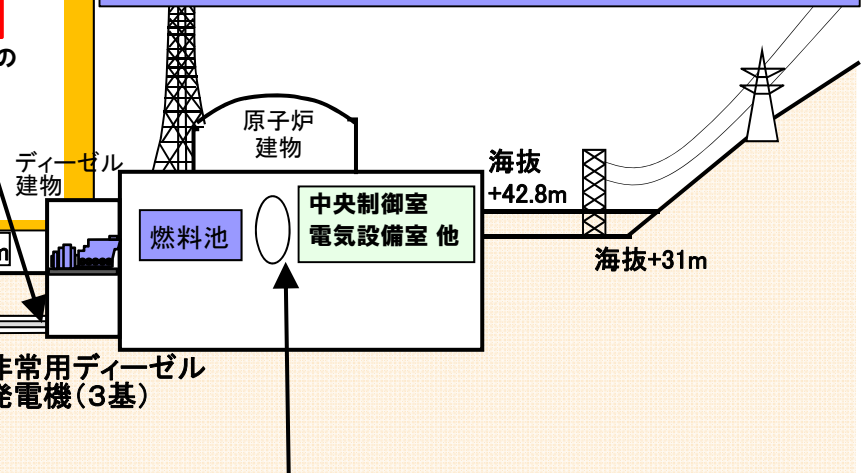
緊急時の燃料池の冷却確保※

- 消防車等による燃料池への給水手順の作成
【平成23年3月実施済】



※燃料池が沸騰することはない。蒸発による水量の減少を防ぐ

- 緊急時対応体制の強化(危機管理室設置)
【平成23年10月1日実施済】
- 津波対応体制の確立(電源車対応体制の確立)
【平成23年5月実施済】
- 運転シミュレータを用いた全交流電源喪失の訓練実施
【平成23年5月実施済】



冷却機能の確保

- 炉心冷却に関わる機器や設備の健全性確認
【平成23年3月実施済】
- 炉心、炉外燃料貯蔵槽の自然循環冷却の再確認
【平成23年3月実施済】

- 全交流電源喪失時の冷却機能に関する再確認解析
【平成23年7月27日確認済】
炉心、炉外燃料貯蔵槽ともに自然循環阻害要因はなく、自然循環冷却で崩壊熱を除去できることをシビアアクシデント対応等検討委員会(7/27、9/30)で報告、確認した。
【平成23年9月30日確認済】

- 弁操作性向上のための弁の保温材パッケージ化
【平成24年3月実施済】

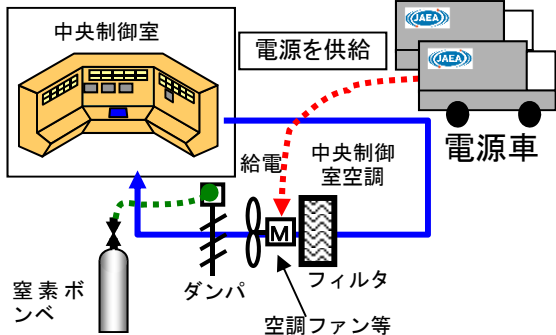
- 止める、冷やす、閉じ込める機能に関わる設備の安全機能確認
【平成23年度実施済、ただし閉じ込め機能については原子炉起動前に実施予定】

「もんじゅ」における東電事故を踏まえた追加的安全対策の進捗状況(2/2)

○中央制御室の事故時循環運転の確保

【平成23年8月実施】

電源車から中央制御室空調設備への給電、窒素ガスポンベによるダンパへの駆動ガス供給を整備



○PHS、無線機、衛星電話等を配備【平成23年6月実施済】

- ・ページング制御装置、PHS電話交換機及び専用有線通話機を電源車からの電源供給により使用可能とした。
- ・全交流電源喪失時に対応できる衛星電話機を3台増設した。
- ・構内無線機を更新し、長時間通信を可能とした。(電源車からの電源供給により充電可能)



○排気口の設置

【平成24年8月実施済】

「もんじゅ」では、水素が発生し蓄積するのは、SG伝熱管破損によるものであり、可能性は極めて小さいが、更なる信頼性向上のために原子炉補助建物屋上ハッチに排気口を設置した。

○高線量対応防護服の確保

【平成23年6月実施】

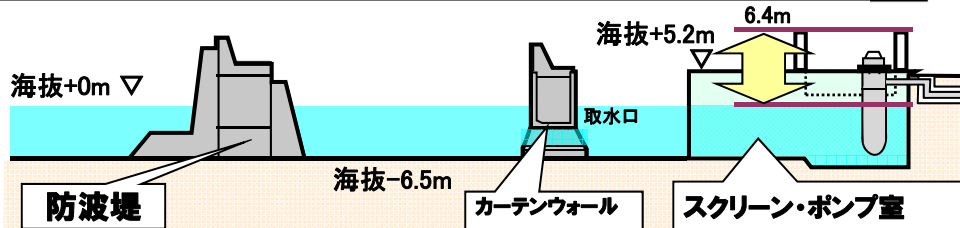
高線量対応防護服

- ・重量: 約18kg
- ・遮蔽能力: 約20%減、鉛2mm当量相当



○ヘッドライト等の配備

・1次召集要員等用に約120個のヘッドライトを配備した。



○ホイールローダの配備

【平成23年12月配備】

津波来襲後の所内アクセスルートを確保するため、がれき処理用の重機を配備



○緊急時に放射線管理業務に関する助勢体制整備

・助勢体制を構築するためのマニュアルを整備した。

国際的にナトリウム冷却高速増殖炉(SFR)の安全設計クライテリア構築や安全性強化の研究の必要性が認識され、「もんじゅ」の運転等による貢献への期待が確認された。

- SFRは、持続可能な有望なエネルギーオプションであり、400炉・年を超える運転経験あり。
- 東京電力福島第一原子力発電所の事故後、各国はSFRの開発を継続している。
- 最高レベルの安全性達成のために、福島事故からの教訓を共有することは極めて重要。
- 最先端の安全目標達成のため、安全設計クライテリアの国際的な構築が必要である。
- この問題に対する共通の努力は、第4世代国際フォーラム(GIF)においてIAEAとの連携のもとに既に始まっている。
- 各国の安全研究は、世界のSFRの安全レベルの向上に貢献するであろう。
- 高速増殖原型炉「もんじゅ」の設計は、シビアアクシデントがすでに評価され、その対策が取られている。
- 「もんじゅ」の再起動と運転は、大変貴重な経験を国際的なSFRのコミュニティに提供するであろう。



2012年6月、敦賀

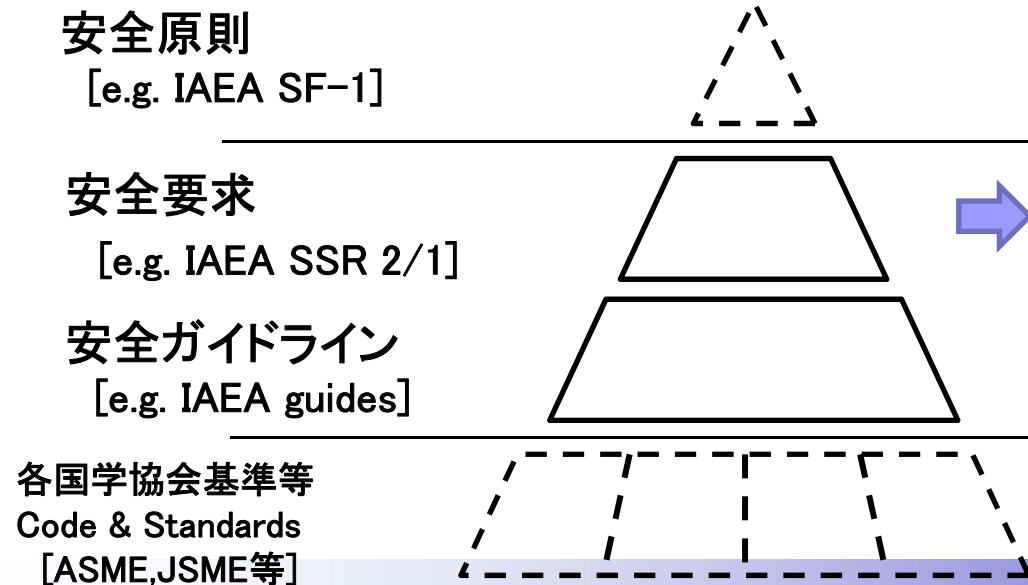


第4世代炉の安全設計クライテリア (SDC) の構築状況について

- ・我が国は、第4世代炉国際フォーラム (GIF) の場において、第4世代炉の高い安全性を実現する観点から、ナトリウム冷却高速増殖炉に関する**安全設計クライテリア (SDC)**について、国際的な共通化を推進するための取組みを主導している。
- ・高速増殖炉開発を進める諸国と連携し、東電福島第一発電所事故の教訓を踏まえたSDCの整備を進めるとともに、GIF-IAEA/INPRO協力等の場を通じてIAEAとの連携を深め、国際的な標準としての最高水準の安全基準の構築を目指しており、これにも我が国の高速増殖炉の安全性強化の研究開発成果の反映が期待される。

○高速増殖炉の安全設計クライテリアの位置づけ

国際的な安全基準の体系例



GIFにおける安全ドキュメント

Safety Goals [策定済み]

安全設計クライテリア

(Safety Design Criteria) [策定中]

+

More detailed Safety Design

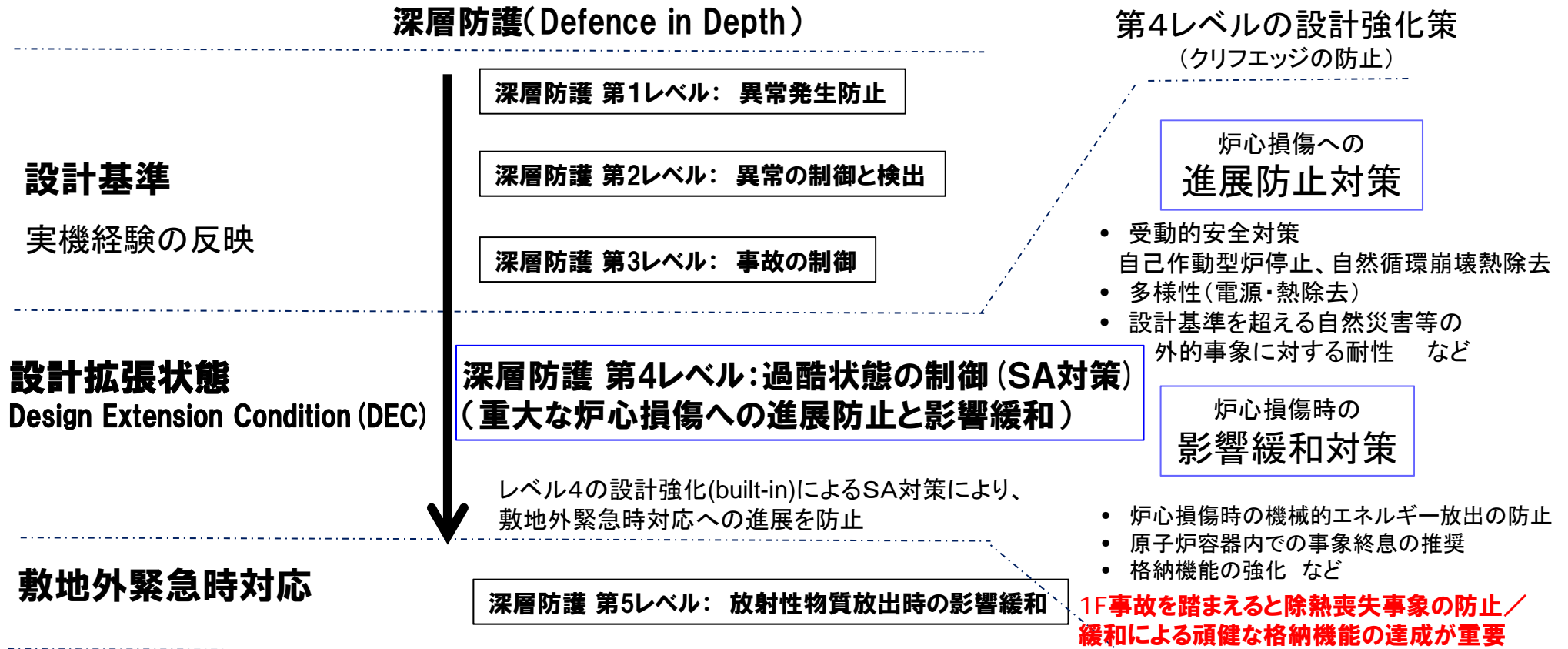
Guidelines (design options, design parameters, parameter range, limitations etc.)

[今後の構築を検討中]

今後の安全強化方針の考え方について

■ 深層防護(DiD)概念を重視

⇒ DiD第1～3レベルの「設計基準」に対する実機の設計・運転経験の反映
 DiD第4レベルである「設計拡張状態」に対する設計強化を具体化



高速増殖炉の設計基準の安全対策への「もんじゅ」成果の反映の考え方について

深層防護

設計基準事故

- 深層防護 第1レベル: 異常発生防止
- 深層防護 第2レベル: 異常の制御と検出
- 深層防護 第3レベル: 事故の制御

設計拡張状態

深層防護 第4レベル: 過酷状態の制御
(シビアアクシデント対策)

重大な炉心損傷への進展防止対策

受動的安全対策設備
(例)・自然循環崩壊熱除去
・自己作動型炉停止機能

重大な炉心損傷時の影響緩和対策

- ・炉心損傷時の機械的エネルギー放出の防止
- ・原子炉容器内での事象終息
- ・SA時除熱対策による格納性強化

設計基準の安全設計 ／評価根拠への反映

プラントとシステムの安全設計

- プラントシステム全体
- 炉心と関連機能
- 原子炉冷却系
- 格納容器構築物と格納容器系
- 計測制御系
- 非常用電源系
- 補助系及び補機系
- その他の出力変換系
- 放射性排出物及び放射性廃棄物の処理
- 燃料取扱・貯蔵系

安全評価

- ⑥安全評価技術
← 安全評価コード検証、設計裕度を反映

「もんじゅ」成果・経験の反映

- ①ナトリウム化学的特性の考慮
← 「もんじゅ」でのナトリウム取扱技術、保守補修経験データを反映
- ②高速炉炉心特性の考慮
← 「もんじゅ」での炉心・反応度特性、燃料燃焼特性データを反映
- ③高温構造物の健全性に対する考慮
← 「もんじゅ」での設計・サーベランス、検査経験データを反映
- ④Na炉特有のカバーガス系、連続漏洩監視、Na凍結防止技術、電源負荷特性
← 「もんじゅ」での運用経験データを反映
- ⑤Na冷却材の放射化の考慮、放射性腐食生成物の移行挙動、EVST運用
← 「もんじゅ」での計測・評価データを反映

高速増殖炉のSA対策強化のための研究の考え方について

「もんじゅ」を用いた研究開発

- 実機スケール規模での**自然循環試験**によるデータの取得
- 国際的ベンチマークによる**安全評価コード検証**
- **地震や津波**等を含むSAの事象進展及び頻度を実プラントで**PSA (確率論的安全評価)**により評価
- **シビアアクシデント・マネジメント** (炉心損傷防止及び影響緩和対策)の**整備**及び実プラントでの**訓練**

設計・評価コードの体系化



原型炉「もんじゅ」

設計拡張状態における安全設計・評価への反映

設計基準事故

深層防護 第1レベル: 異常発生防止

深層防護 第2レベル: 異常の制御と検出

深層防護 第3レベル: 事故の制御

設計拡張状態

深層防護 第4レベル: 過酷状態の制御 (シビアアクシデント対策)

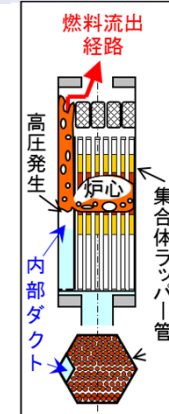
重大な炉心損傷への進展防止対策

受動的 safety 対策設備
(例)・**自然循環崩壊熱除去**
・自己作動型炉停止機能

重大な炉心損傷時の影響緩和対策

- ・炉心損傷時の機械的エネルギー放出の防止
- ・原子炉容器内での事象終息
- ・SA時除熱対策による格納性強化

SA対策の具体化

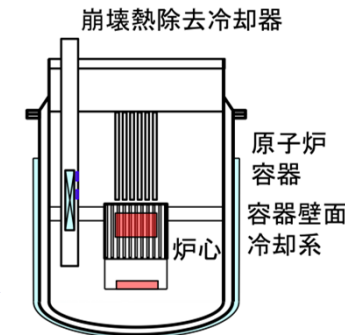


カザフスタン IGR試験炉

実炉における溶融炉心物質の流出挙動試験 (EAGLE試験)

試験研究による妥当性確認
安全設計・評価コードの構築

- SAに至った場合も、除熱喪失に陥らない手段の開発



大洗 AtheNa施設 Na試験

- 多様性の高い除熱手段とその熱流動特性
- 炉容器外面冷却、等

高度なSA対策技術の実証を推進

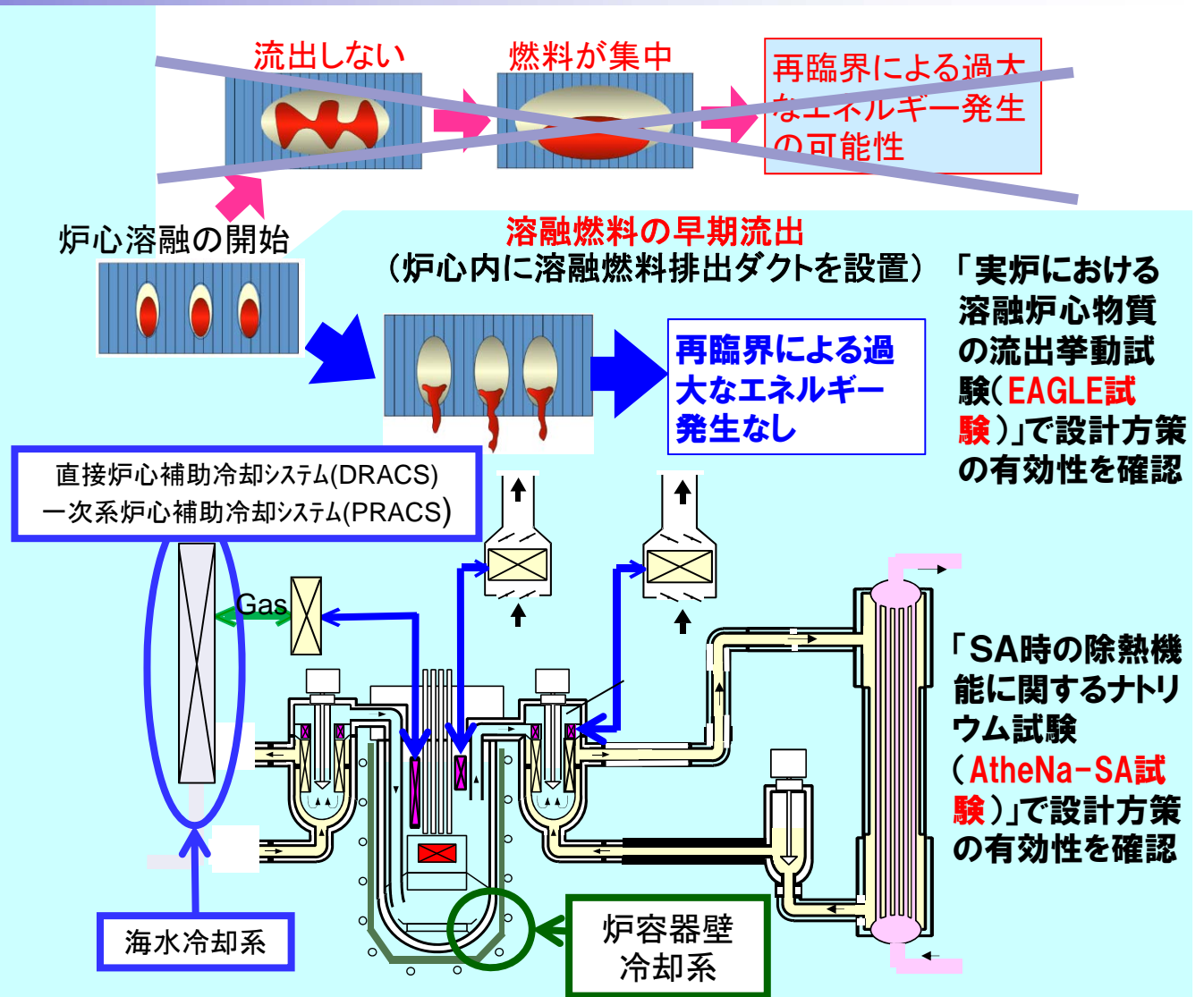
国際協力による高速増殖炉のSA対策強化のための研究の考え方について

■ 将来に向けた取り組み

- 溶融燃料を早期に流出させる設計方策とSA時の除熱機能強化策の採用により、高速増殖炉としての高い安全性を有する格納系の設計を可能とする。
- 設計方策の有効性を実験的に確認し、将来に向けたシビアアクシデント対策検討に資する。

■ 国際協力による研究開発

- **AtheNa-SA試験**は、多様な炉心冷却対策を検討するための実験データの取得を目的とし、**米、仏**に加え、**GIF参加国**との国際協力による実施を計画
- **EAGLE試験**はSAの炉容器内終息に関する試験データの取得を目的とし、**カザフスタン、仏**との国際協力により実施中。



SA時の除熱機能強化策の例

■ 安全性強化に関する研究開発

□ 「もんじゅ」における研究開発

- 性能試験・プラント運転経験に基づく安全性に関わる知見の獲得
- SA (シビアアクシデント) 関連試験、SA対策を含む実機経験及び安全評価
- SAMマネジメント (SAM) の整備及び運用経験

□ SAに関する試験研究 (EAGLE、AtheNa-SA)

- 試験研究成果に基づく安全設計・評価コード群の構築
- 解析コードの検証手法の体系化及び検証データのデータベース化 (検証データの精度向上のための試験関連技術の開発を含む)

□ 国際的に求められる安全対策の具体化

- もんじゅの実機経験・取得知見及びSA研究成果に基づくSA対策の最適化
- SDC・SDGの構築に必要な安全設計・評価の具体的要求事項の整備

⇒ 上記の成果を基に、我が国の高速増殖炉の安全技術体系を構築