



資料2-1

科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会
原子力科学技術委員会もんじゅ研究計画作業部会（第6回）

H25. 1. 22

高速増殖炉/高速炉の安全性強化を目指した 研究開発について

平成25年1月22日

独立行政法人 日本原子力研究開発機構



高速増殖炉/高速炉の安全性強化を目指した研究開発の基本方針

IV. 高速増殖炉/高速炉の安全性強化を目指した研究開発について

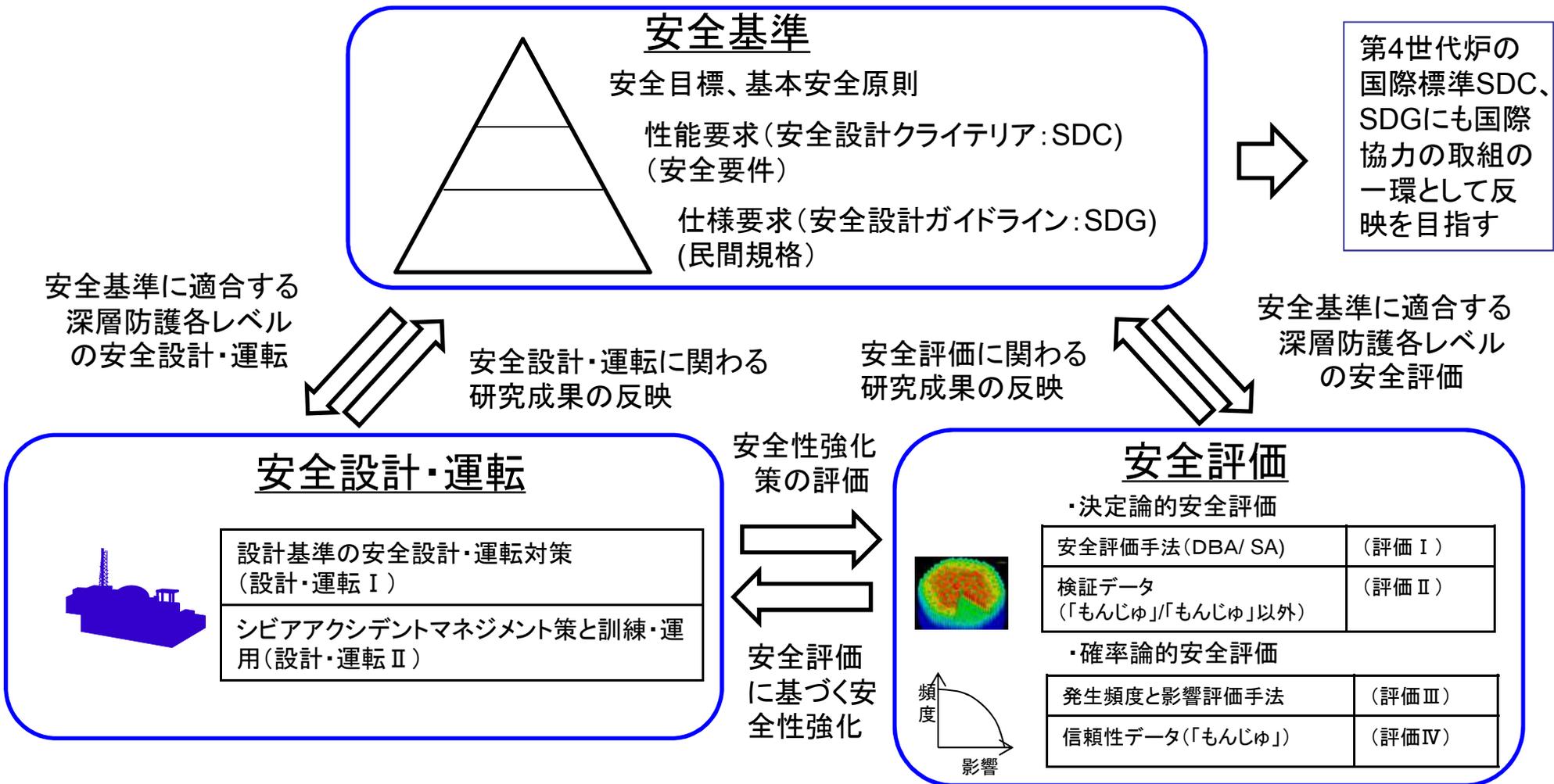
1. 検討の基本方針

- 高速増殖炉/高速炉の安全性の確保は、研究開発を行う際の大前提となる課題であり、安全性強化を目指した研究開発は、最優先に継続的かつ確実に取り組む必要がある。
- 我が国では、これまでも「もんじゅ」の設計・許認可等を通じて、設計基準事象のみならず、設計基準を超える事象の一部にも対応し得る高速増殖炉/高速炉の安全性確保のための技術体系を構築してきた。
- 一方、東電福島原発事故は、シビアアクシデントの発生防止及びシビアアクシデント発生時の緩和対応策の重要性を改めて提起したことから、高速増殖炉/高速炉に関わる深層防護のあり方を吟味する研究開発が必要である。特にシビアアクシデント発生後の緩和対応方策と緊急対応方策を検討することにより、高速増殖炉/高速炉の安全技術体系の強化を図ることが重要である。
- 「もんじゅ」は実存するプラントとして運転やアクシデントマネジメントの検討・訓練等を通じて高速増殖炉/高速炉全体の安全技術体系を構築するための研究開発の場を提供することができる重要な施設である。
- 一方で、炉心溶融時の基礎データ取得等の「もんじゅ」で行うことが困難な実験条件について、他の試験施設において実施したり、プラントシミュレーションによる原子炉の挙動解析等で行ったりすることも安全技術体系を構築するためには必要な研究開発である。
- これらを総合的に実施することにより、高速増殖炉/高速炉の安全技術体系の構築の実現を図ることが可能となる。このため、「もんじゅ」で実施する研究開発項目と「もんじゅ」以外で実施する研究開発項目に整理し、高速増殖炉/高速炉の安全性強化を目指した研究開発を実施する。

「もんじゅ」等の研究計画について(中間的な論点のとりまとめ) H24年12月より

高速増殖炉/高速炉の安全性強化を目指した 研究開発成果の体系化

研究開発成果は、「安全基準」、「安全設計・運転」、「安全評価」の3つの観点から集約し、互いに連携させつつ安全技術としての体系化を図る。すなわち、安全目標・基本安全原則に基づき、研究開発成果を踏まえ、高速増殖炉／高速炉の安全基準類を整備するとともに、安全基準に適合するよう研究開発を進め、安全設計・運転技術と適用を通じて得られる成果、及び安全評価手法・データと適用を通じて得られる成果を統合する。



高速増殖炉/高速炉の安全性強化に必要な技術の研究開発成果の体系化

安全性強化に必要な技術の研究開発成果の深層防護レベル上の位置づけ

深層防護	第1～3層	第4層(シビアアクシデント対策)	
目的	事故の発生と進展の防止、制御	著しい炉心損傷の防止	炉心損傷時の影響緩和(格納機能維持)
安全性強化に必要な技術及び対策の研究開発成果	<ul style="list-style-type: none"> 性能試験に基づく安全系等の設計・評価技術 (I-④) 	<ul style="list-style-type: none"> 受動的な安全特性である自然循環除熱等を利用した安全強化対策・評価技術等 (I-③) 	<ul style="list-style-type: none"> 炉心損傷対策・評価技術 (EAGLE等) (II-①) 冷却系機能喪失に関する安全性強化対策・評価技術 (AtheNa等) (II-②)
		<ul style="list-style-type: none"> 実機でのシビアアクシデントマネジメント策及び訓練の知識化 (I-①) (I-②) 	
	<ul style="list-style-type: none"> 実機運転に基づく、信頼性データ蓄積及びプラント設計・評価技術 (I-④) 		

「もんじゅ」の運転に基づくプラント性能評価及び信頼性データ、訓練等の「もんじゅ」によって得られる研究開発成果(表中青字で表示)、並びに、「もんじゅ」以外にて実施する安全性強化を目指した研究開発成果は、安全の基本的な概念である「深層防護」の階層に従って整理できる。

* 図中の番号は、4ページの研究開発項目の番号を示す。

高速増殖炉/高速炉の安全性強化に必要な技術の研究開発項目について

I. 「もんじゅ」で実施する安全性強化の研究開発

- ① 確率論的安全評価等によるシビアアクシデント評価技術の構築と安全性向上策の抽出
 - 地震等の外部事象を含む確率論的安全評価(PSA) (評価Ⅲ)
 - ストレストテストでの知見の集約 (評価Ⅰ)
- ② シビアアクシデントマネジメント策の充実とその実証的な確認や訓練・運用
 - シビアアクシデントマネジメント策の整備 (設計・運転Ⅱ)
 - シビアアクシデントマネジメント策の訓練・運用と改良 (設計・運転Ⅱ)
- ③ 自然循環試験による高速増殖炉の崩壊熱除去能力の実証 (設計・運転Ⅱ、評価Ⅰ,Ⅱ)
- ④ 設計基準ベースの安全設計・評価技術 (設計運転Ⅰ、評価Ⅰ,Ⅱ,Ⅳ)

II. 「もんじゅ」以外で実施する安全性強化の研究開発

- ① 炉心損傷時の再臨界の防止と事象の炉容器内終息を図るための研究
 - 炉心損傷時の挙動分析のための試験(EAGLE) (評価Ⅱ)
 - 炉心安全性評価手法の開発と整備 (評価Ⅰ)
- ② 損傷炉心燃料等を安定に冷却できる手段の多様化を行う研究
 - シビアアクシデント後の炉心冷却性に関するナトリウム試験(AtheNa) (評価Ⅱ)
 - シビアアクシデント対策冷却性評価手法の開発 (評価Ⅰ)
 - その他、蒸気発生器及び炉外事象等の安全性評価手法の確立とシビアアクシデント対策としての計測技術等の研究 (評価Ⅰ,Ⅱ、設計・運転Ⅱ)

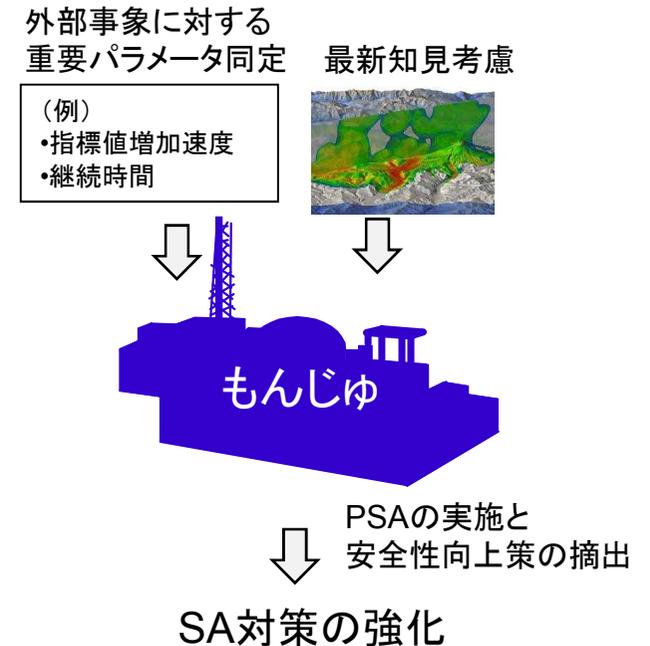
* 表中の括弧内の表記は2ページの安全設計・運転及び安全評価の分類を示す。

● 地震等の外部事象を含む確率論的安全評価 (PSA)

【目的】: 地震・津波等の幅広い外部事象を含むPSAを「もんじゅ」実機に対して実施し、リスク情報を利用して継続的に安全性向上策を抽出するとともに、それらを通じて、高速炉のシビアアクシデント(SA)の評価技術を構築する。

【方法】: 「もんじゅ」を運転することにより、ナトリウム機器の信頼性データを蓄積し、それらに基づく確率論的安全評価、及び実機でのプラントウォークダウン等による実機条件の取得等を踏まえ、ナトリウム冷却高速増殖炉の特徴を踏まえた安全性向上策を抽出する。

【反映先】: 継続的な安全性向上評価とシビアアクシデントマネジメント(SAM)策の充実を図るとともに、高速増殖炉特有のPSA評価技術を構築する。



● ストレストテストでの知見の集約

【目的】設計基準を超える想定に対する実機の耐性、安全裕度を確認する。

【方法】「もんじゅ」に対するストレステストで得られる安全性強化に関する知見を集約する。

【反映先】「もんじゅ」の安全性向上策の検討に活用するとともに、今後の高速増殖炉のSAM策検討のための安全技術基盤として活用する。



I.「もんじゅ」で実施する安全性強化の研究開発 (2/3)

②シビアアクシデントマネジメント策の充実とその実証的な確認や訓練・運用

- シビアアクシデントマネジメント策の整備(外部事象(地震、津波等)及び全電源喪失事故への対策強化等)

【目的】幅広い外部事象を含むシビアアクシデント事象シーケンスに対して、ナトリウム冷却高速増殖炉の特徴を踏まえたSAM策を検討し、安全性の向上を図る。

【方法】「もんじゅ」実機に対して、設計基準を超える外部事象等の幅広い事象に関する安全機能の維持・回復、影響緩和等の安全性向上策を整備し、最適評価手法による安全評価手法を整備し、有効性を評価するとともに、定期的にSAM策を評価・改善する。

【反映先】継続的な安全性レビューとSAM策の充実を図る。

- シビアアクシデントマネジメント策の訓練・運用と改良

【目的】SAM策に関する運転員等の操作等の習熟を高め、安全性の向上を図るとともに、それらの経験を知識化し、技術継承が可能な体系化を図る。

【方法】SAM策における運転員等の操作・対策の実施手順について、「もんじゅ」運転員等による訓練・運用を実施し、運転手順を含めたSAM策の改良を行うとともに、経験・知識の集約を図る。

【反映先】「もんじゅ」のSAM策への反映と高速増殖炉におけるSAMの実践のための安全技術基盤を構築する。

I 「もんじゅ」で実施する安全性強化の研究開発 (3/3)

- ③ 自然循環試験による高速増殖炉の崩壊熱除去能力の実証
- ④ 設計基準ベースの安全設計・評価技術

③ 自然循環試験による高速増殖炉の崩壊熱除去能力の実証

【目的】ナトリウム冷却炉の特徴である高い自然循環性能による崩壊熱除去を**実機スケールで実証**する。

【方法】「もんじゅ」性能試験において、原子炉トリップ後の自然循環除熱による崩壊熱除去試験を実施する。

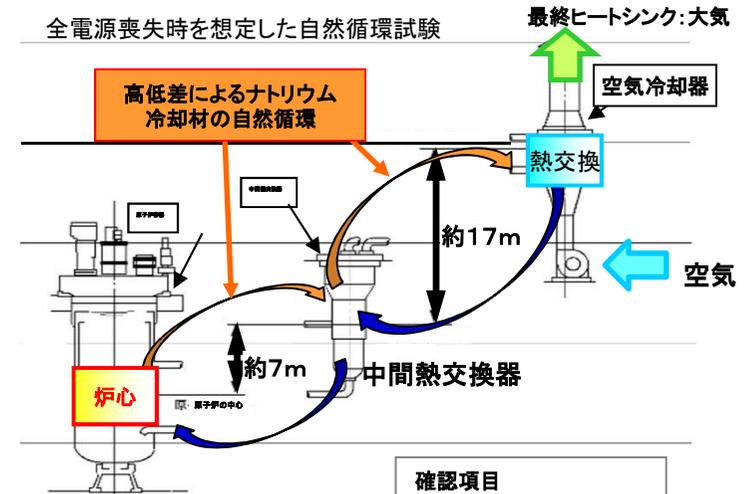
【反映先】**安全評価解析コード(プラント動特性解析コード)の検証**等へ反映する。

④ 設計基準ベースの安全設計・評価技術

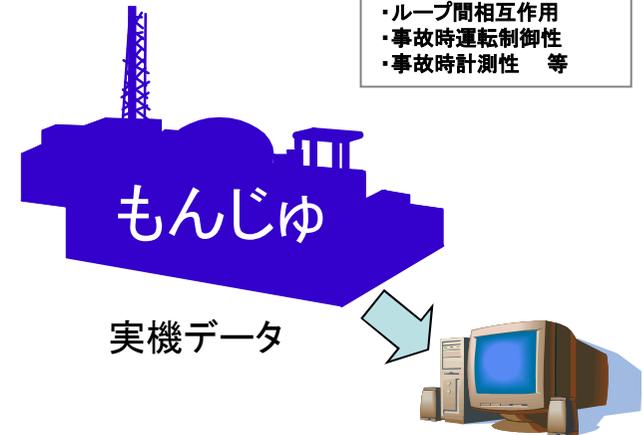
【目的】設計基準内の評価技術の確立のため、性能試験において**安全系等の設計評価及び蒸気発生器急速ブロー評価**等を実施する。

【方法】「もんじゅ」**実機**での性能試験や運転を通して、安全系の**信頼性データを蓄積・評価**する。また、「もんじゅ」性能試験の蒸気発生器ブローに係る試験により、**Na-水反応時の安全性**を評価する。

【反映先】実機により得られた信頼性データは、リスク情報に基づく**安全性向上策検討へ反映**する。蒸気発生器試験でのブロー特性データは設計の評価に反映する。



- 確認項目
- ・温度成層化
 - ・流動安定性
 - ・ループ間相互作用
 - ・事故時運転制御性
 - ・事故時計測性 等



- ・信頼性データ
- ・設計評価データ

● 炉心損傷時の挙動分析のための試験 (EAGLE試験等) の実施とSA評価技術の確立

【目的】炉心損傷時の挙動分析のための試験 (EAGLE試験等) により、再臨界防止策等の安全性強化方策の有効性を確認するとともに、**炉心損傷時の燃料挙動評価手法を確立**する。

【方法】**日、仏、カザフスタンの国際協力**により、カザフスタン国立原子力センター (NNC) のIGR試験炉と炉外試験装置、及び大洗研究開発センターのMELT試験装置において、炉内及び炉外での燃料溶融試験を実施するとともに、**SA評価コードの検証**を行う。

● 炉心安全性評価手法の開発と整備

【目的】SAの安全評価に用いる標準的手法としてSAS4A、SIMMERコードを整備する。

【方法】**SAS4Aコード**については、既実施の試験データを用いて体系的な検証を**日米仏の共同研究**として実施する。また、**SIMMERコード**については、EAGLE試験、MELT試験等を反映し**日仏の共同研究**として検証解析を実施する。



カザフスタンIGR試験炉



大洗研究開発センター

MELT試験装置

● SA後の炉心冷却性に関するナトリウム試験(AtheNa)の実施とSA評価技術の確立

【目的】大規模な炉外のナトリウム試験施設であるAtheNa施設により、炉心損傷時の冷却対策検討のための試験データの取得を行うとともに、炉心損傷時除熱評価手法を確立する。

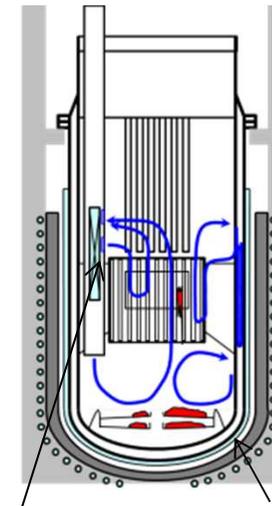
【方法】AtheNa施設を用いて、SA後の炉心冷却性に関するナトリウム試験を実施し、安全評価コードの検証を実施する。米、仏に加え、第4世代国際フォーラム(GIF)参加国による国際協力による実施を計画。

● 炉外事象安全性評価手法開発

【目的】原子炉容器外へ炉心溶融物が至る想定事象について、レベル2PSAや安全評価に用いる標準ツールとしてCONTAIN/LMRコードを整備する。

【方法】格納容器内諸現象を扱う解析モデルの機能確認、改良・検証を実施する。

● その他、蒸気発生器等の安全性評価手法の確立とSA対策計測技術等の研究を実施する。



炉容器内冷却

炉容器外面冷却

大洗 AtheNa施設



- ・電源: 7,000kVA
- ・クレーン: 120 ton
- ・ナトリウム: 260 ton
- ・試験部高さ: 約45m

コアキャッチャにおけるデブリ冷却特性、炉容器壁冷却系など多様な冷却システムのナトリウム試験を計画

「引き続き検討が必要な課題」

- 原子力規制委員会が今後策定する予定の新安全基準の動向を踏まえつつ、安全性を高めるために自ら取り組むべきことについて検討を行う。
- シビアアクシデント対策強化の研究開発を国際協力の下で行うため、GIFの枠組みの有効活用等も視野に入れつつ、具体的な検討を行う。

「もんじゅ」等の研究計画について(中間的な論点のとりまとめ) H24年12月より

「引き続き検討が必要な課題」に対する対応方針

- 今後策定される新安全基準で規定されるSAの防止・緩和策に関する安全要求について、高速炉の特徴を踏まえた適切な対策の考え方を整理し、それらの判断基準を整備するとともに、「もんじゅ」への適用を図っていく。
- PSA等の手法によって、定期的に最新知見を反映した安全性向上のための評価を実施し、継続的な安全性向上に自ら取り組んでいく。
- 炉心損傷時の挙動分析のための試験(EAGLE試験等)及びSA後の炉心冷却性に関するナトリウム試験(AtheNa)等について、それぞれ2国間協力、GIFの枠組み等の国際協力の有効活用を図るとともに、他にも継続的に国際的な連携の可能性を探っていく。

添 付

個別実施内容



I. 「もんじゅ」で実施する安全性強化の研究開発

- ① 確率論的安全評価等によるシビアアクシデント評価技術の構築と安全性向上策の抽出
- ② シビアアクシデントマネジメント策の充実とその実証的な確認や訓練・運用
- ③ 自然循環試験による高速増殖炉の崩壊熱除去能力の実証
- ④ 設計基準ベースの安全設計・評価技術

I. 「もんじゅ」で実施する安全性強化の研究開発

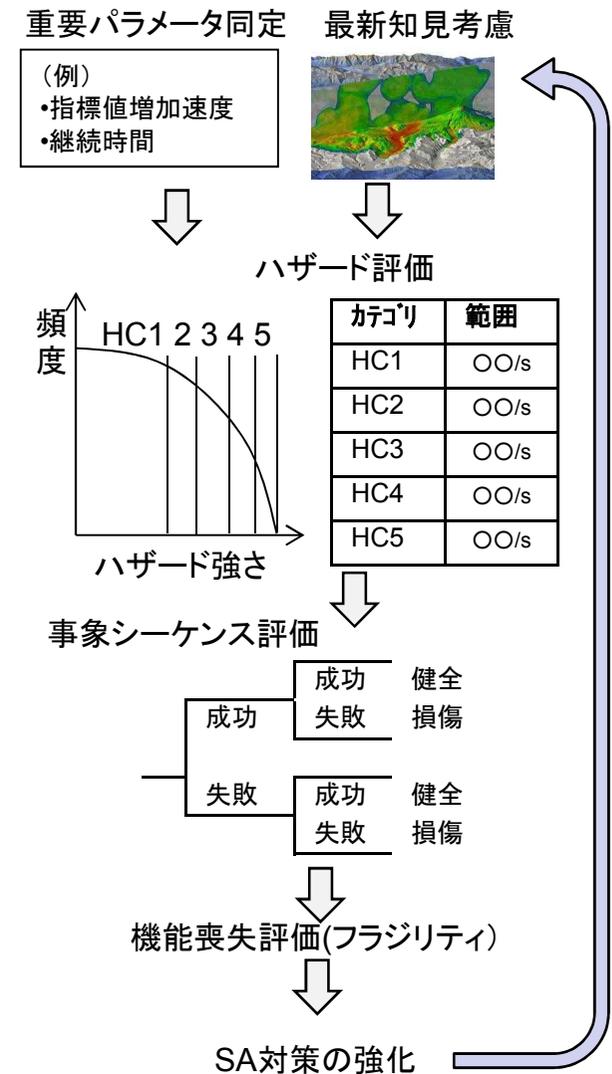
①確率論的安全評価等によるシビアアクシデント評価技術の構築と安全性向上策の抽出

●地震等の外部事象を含む確率論的安全評価(PSA)

【目的】:地震・津波等の幅広い外部事象を含むPSAを「もんじゅ」実機に対して実施し、リスク情報を活用して継続的に安全性向上策を抽出するとともに、それらを通じて、高速炉のシビアアクシデント(SA)の評価技術を構築する。

【方法】:「もんじゅ」を運転することにより、ナトリウム機器の信頼性データを蓄積し、それらに基づく確率論的安全評価、及び実機でのプラントウォークダウン等による実機条件の取得等を踏まえ、ナトリウム冷却高速増殖炉の特徴を踏まえた安全性向上策を抽出する。

【反映先】:継続的な安全性向上評価とSAM策の充実を図るとともに、高速増殖炉特有のPSA評価技術を構築する。



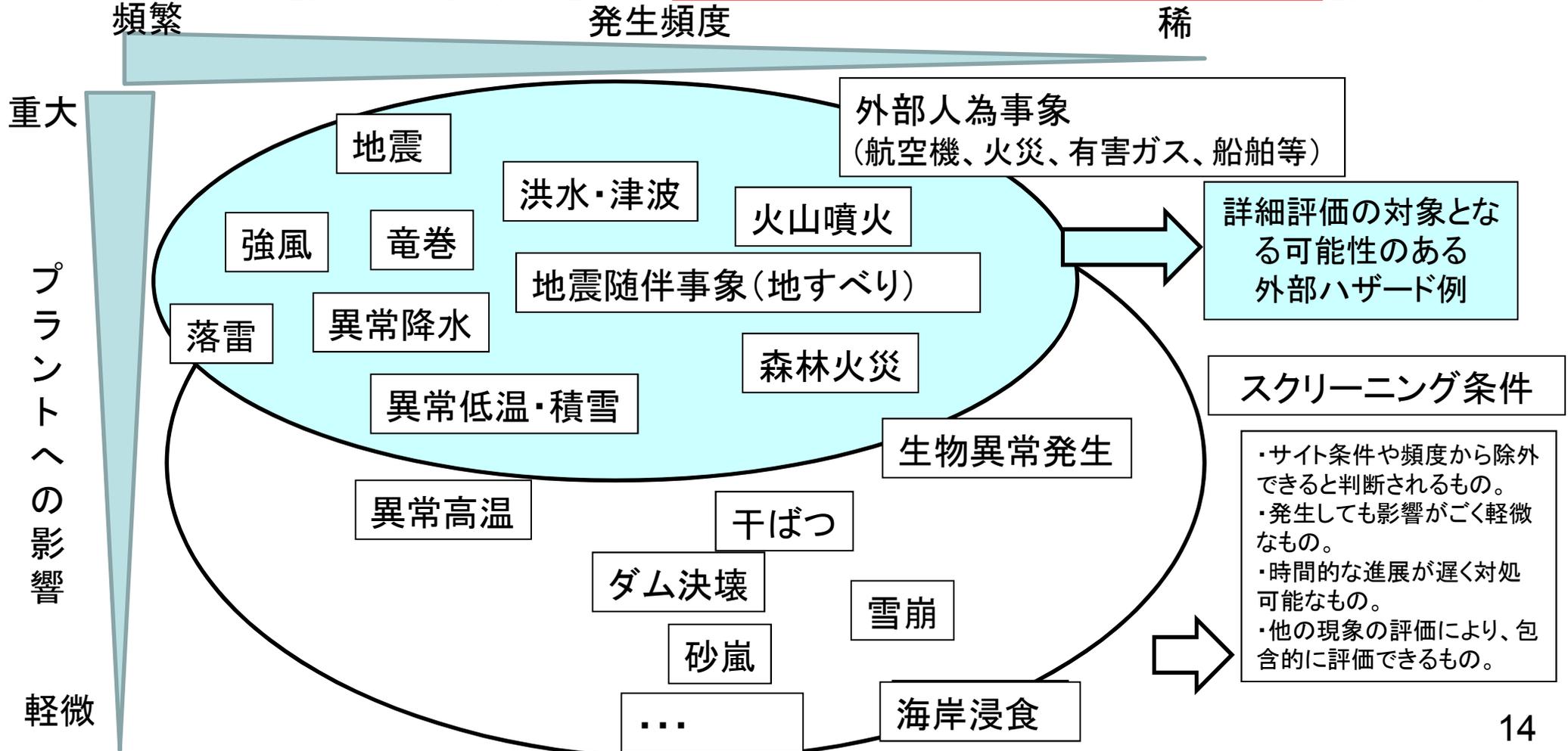
I. 「もんじゅ」で実施する安全性強化の研究開発

①確率論的安全評価等によるシビアアクシデント評価技術の構築と安全性向上策の抽出

●地震等の外部事象を含む確率論的安全評価(PSA) (続き)

【実施内容】

従来の内的事象を中心としたPSA評価に加えて、**地震・津波、さらには幅広い自然災害等の外部事象**について、発生頻度とプラントへの影響の観点から、詳細評価が必要なハザードの絞り込み(スクリーニング)を行い、PSAを実施する等の検討を進め、**高速炉の特徴を踏まえたPSA手法の整備と適用**を実施する。





I. 「もんじゅ」で実施する安全性強化の研究開発

①確率論的安全評価等によるシビアアクシデント評価技術の構築と安全性向上策の抽出

●ストレステストでの知見の集約

【目的】設計基準を超える想定に対する**実機の耐性、安全裕度を確認**する。

【方法】ストレステストで得られる安全性強化に関する知見を集約する。

【反映先】「もんじゅ」の安全性向上策の検討に活用するとともに、今後の高速増殖炉の**SAM策検討のための安全技術基盤**として活用する。

【実施内容】

<評価項目>

- ・地震
- ・津波
- ・地震と津波の重畳
- ・全交流電源喪失(SBO)
- ・最終ヒートシンクの喪失(LUHS)
- ・SBOとLUHSの重畳
- ・その他のシビアアクシデントマネジメント
(SA時通信手段、中央制御室環境、サポート系信頼性、SBO時Na漏えい等)

↳ JAEA報告書として**公開報告書**に取りまとめる。

I.「もんじゅ」で実施する安全性強化の研究開発

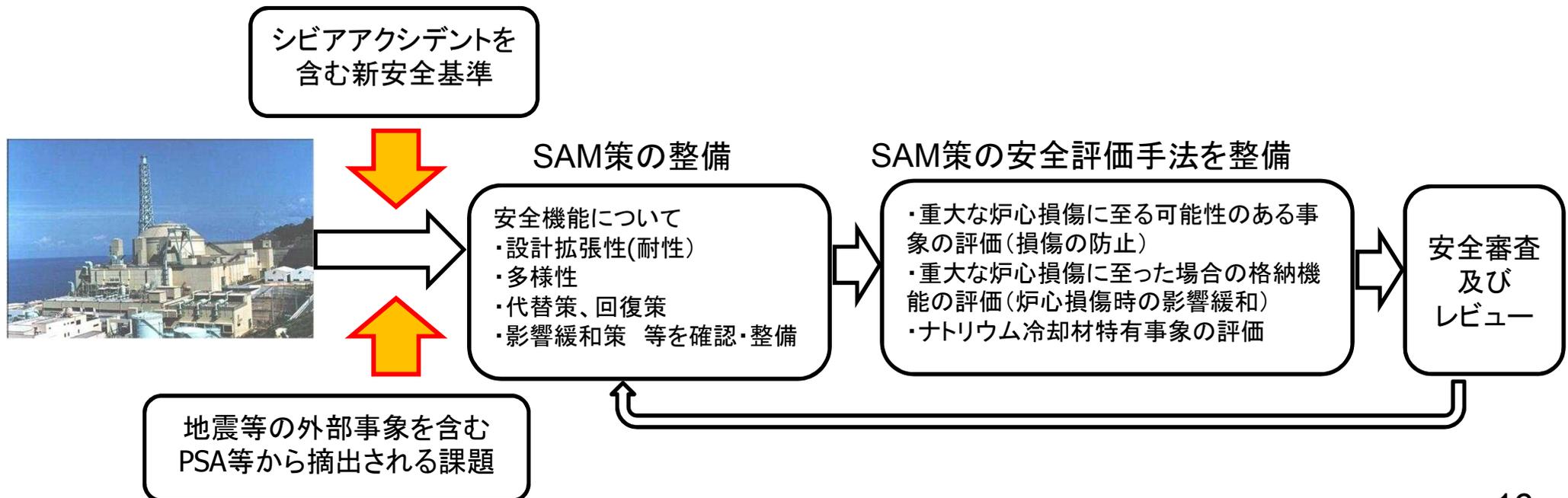
②シビアアクシデントマネジメント策の充実とその実証的な確認や訓練・運用

●シビアアクシデントマネジメント策の整備(外部事象(地震、津波等)及び全電源喪失事故への対策強化等)

【目的】幅広い外部事象を含むSA事象シーケンスに対して、ナトリウム冷却高速増殖炉の特徴を踏まえたSAM策を検討し、安全性の向上を図る。

【方法】「もんじゅ」実機に対して、設計基準を超える外部事象等の幅広い事象に関する安全機能の維持・回復、影響緩和等の安全性向上策を整備し、最適評価手法による安全評価手法を整備し、有効性を評価するとともに、定期的にSAM策を評価・改善する。

【反映先】継続的な安全性レビューとSAM策の充実を図る。





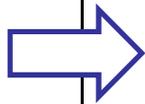
I.「もんじゅ」で実施する安全性強化の研究開発

②シビアアクシデントマネジメント策の充実とその実証的な確認や訓練・運用

●シビアアクシデントマネジメント策の整備(続き)

【実施内容】設計基準を超える事故が発生した場合について、事故シーケンスを分析し、炉心損傷の防止と影響緩和策を構築する。その際、**外的事象等によるシナリオレスな機能喪失が発生することも考慮**し、使用可能な対策をすべて活用する**多様性を高めたフレキシブルなSAM策**を充実する。それらの対策に対して、最適評価手法による安全評価手法を整備し、有効性を評価するとともに、**定期的にSAM策**を評価・改善する。

IAEA深層防護	1～3層	第4層(SA対策)	
	事故の発生と進展の防止、制御	著しい炉心損傷の防止	炉心損傷時の影響緩和(格納機能維持)
「もんじゅ」の主な安全対策(既存設備)	設計基準事故対策	・ 自然循環 による除熱等	・ 大型格納容器 によるエネルギー吸収等
SAM策 (恒設設備の追加を含めて、継続的に安全性向上を図る)	(事故時操作)	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">シナリオに準じた対策・操作 (事象シーケンス依存)(従来)</div>	
		<div style="text-align: center;">+</div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; display: inline-block;"> <フレキシブルな対策・操作> (外的事象等によるシナリオレスな機能喪失想定に対して使用可能なものをすべて活用し頑健性を向上) ・可搬型電源接続 ・水素爆発防止対策 ・空冷、SG冷却操作 ・除熱源復旧対策 ・ナトリウム火災対策 ・炉外燃料貯蔵槽冷却対策 等 </div>	



防災対策へ連結



I. 「もんじゅ」で実施する安全性強化の研究開発

②シビアアクシデントマネジメント策の充実とその実証的な確認や訓練・運用

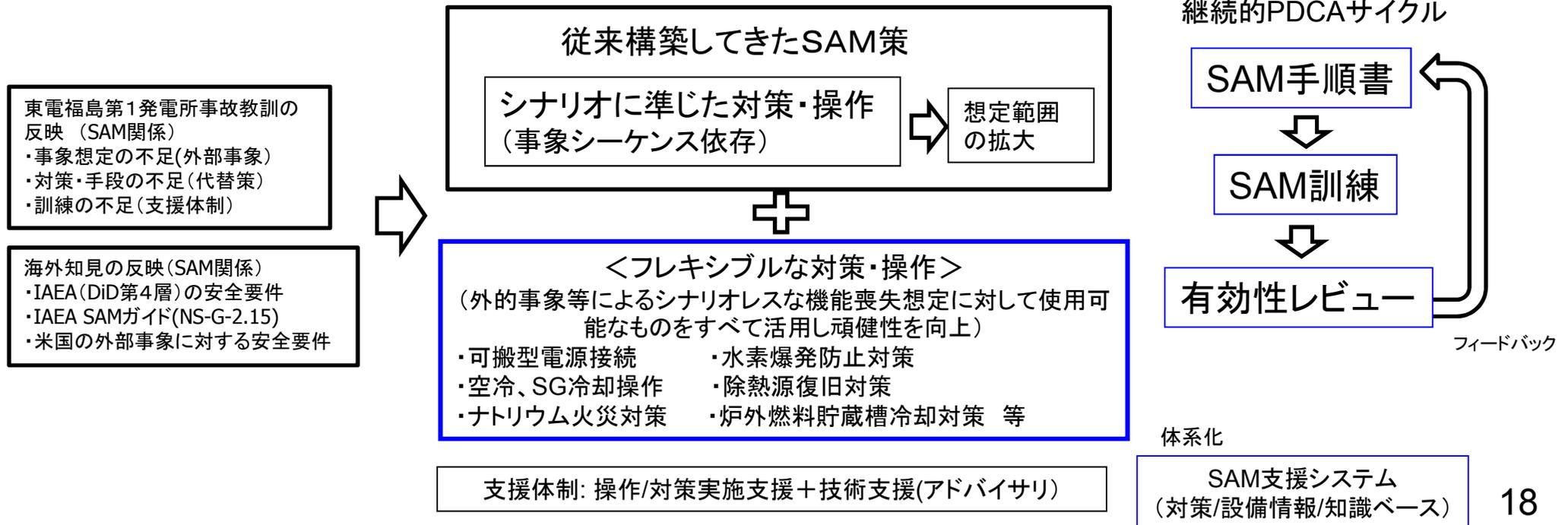
●シビアアクシデントマネジメント策の訓練・運用と改良

【目的】SAM策に関する運転員等の操作等の習熟を高め、安全性の向上を図るとともに、それらの経験を知識化し、技術継承が可能な体系化を図る。

【方法】SAM策における運転員等の操作・対策の実施手順について、「もんじゅ」運転員等による訓練・運用を実施し、運転手順を含めたSAM策の改良を行うとともに、経験・知識の集約を図る。

【反映先】「もんじゅ」のSAM策への反映と高速増殖炉におけるSAMの実践のための安全技術基盤を構築する。

【実施内容】事故教訓を反映したSAM策の整備と訓練とPDCAサイクル手法の構築

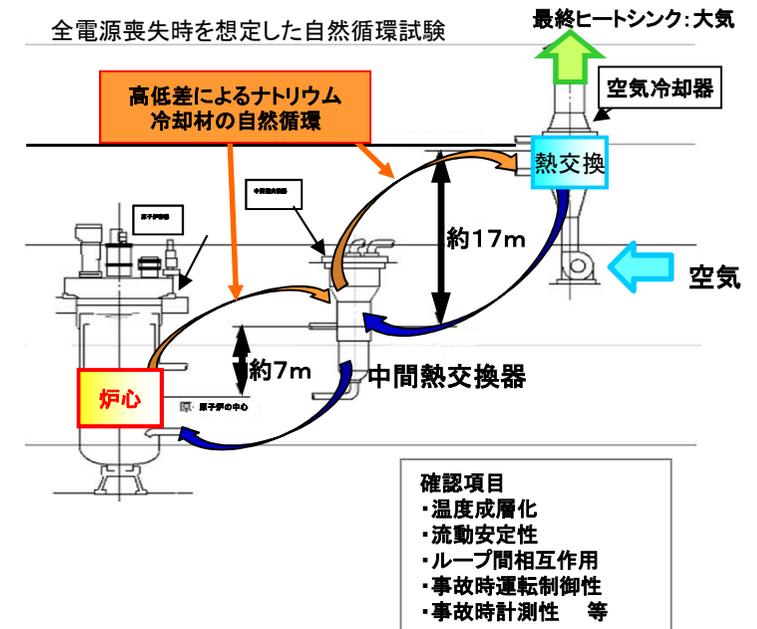


③自然循環試験による高速増殖炉の崩壊熱除去能力の実証

【目的】ナトリウム冷却炉の特徴である高い自然循環性能による崩壊熱除去を**実機スケールで実証**する。

【方法】**「もんじゅ」性能試験**において、原子炉トリップ後の自然循環除熱による崩壊熱除去試験を実施する。

【反映先】**安全評価解析コード(プラント動特性解析コード)の検証**等へ反映する。



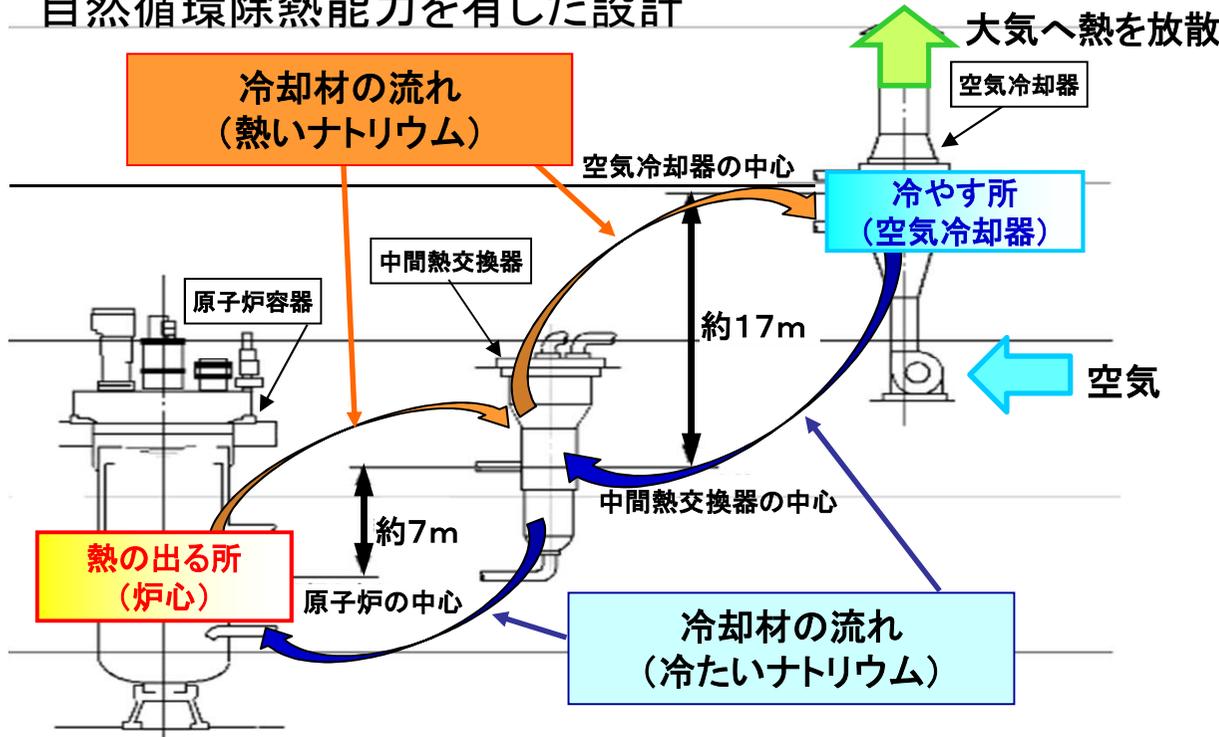
I. 「もんじゅ」で実施する安全性強化の研究開発

③ 自然循環試験による高速増殖炉の崩壊熱除去能力の実証

【実施内容(1)】:「もんじゅ」は、長時間の全交流電源喪失時等の設計基準を超える状態においても、SAM策として、自然循環による崩壊熱除去が可能である。その実証のため、自然循環除熱性能試験データを取得する。

目的及び概要: ・ 「もんじゅ」性能試験において、自然循環試験を実施
 ・ **全交流電源喪失時の炉心冷却手段として、自然循環によっても炉心崩壊熱除去ができ、安全にプラントが停止できることを実証**

自然循環除熱能力を有した設計



【高速炉の自然循環による炉心冷却】

- ① 空気冷却器を最終除熱源とすることから高所配置が可能で、伝熱中心差を大きくとることが可能
- ② 動的機器が少ないので、信頼性が高い
- ③ 冷却材が単相なので、安定して循環しやすい

【ループ型高速増殖炉の自然循環除熱性能を実証】

試験で確認する内容

- ① 自然循環冷却能力
自然循環により炉心崩壊熱が除去できることの確認
- ② 自然循環時運転特性
自然循環時のプラントの動特性の把握

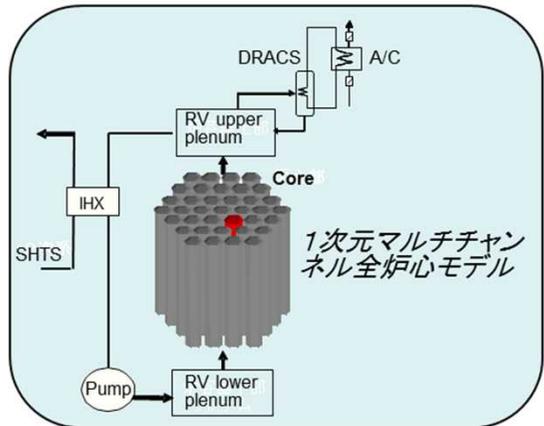
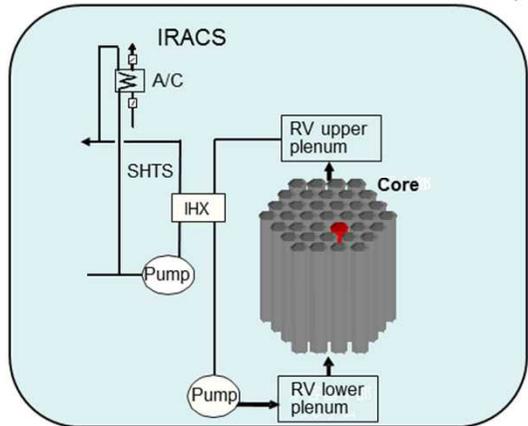
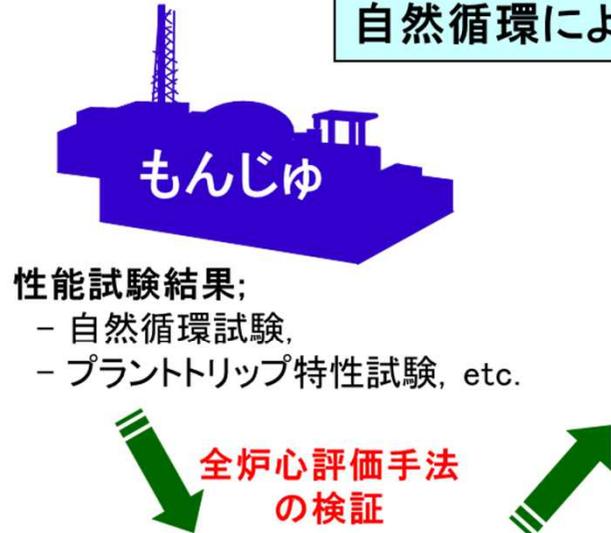
炉心と中間熱交換器、中間熱交換器と空気冷却器、それぞれの伝熱中心高さの差を適切に取ることで、十分な自然循環除熱能力を有する。

I 「もんじゅ」で実施する安全性強化の研究開発

③自然循環試験による高速増殖炉の崩壊熱除去能力の実証

【実施内容(2)】「もんじゅ」にて取得した実機スケールでのデータを活用し、安全評価解析コード(最適動特性解析モデル)、多次元解析コードの検証を実施する。

自然循環による崩壊熱除去評価手法の検証



反映

高速炉に関するシビアアクシデントに対する安全評価手法を確立

「もんじゅ」自然循環試験の位置づけ

- 熱伝達特性の相似性を示す無次元数(Pe :ペクレ数);
 $Pe_{もんじゅ} \approx (4/5)Pe_{大型炉}$
- 縮尺モデル試験による熱伝達特性検証の位置付け;
 $Pe_W > Pe_{もんじゅ} > Pe_{Na}$
 (Pe_W : 1/10 縮尺水試験, Pe_{Na} : 1/5 縮尺ナトリウム試験)

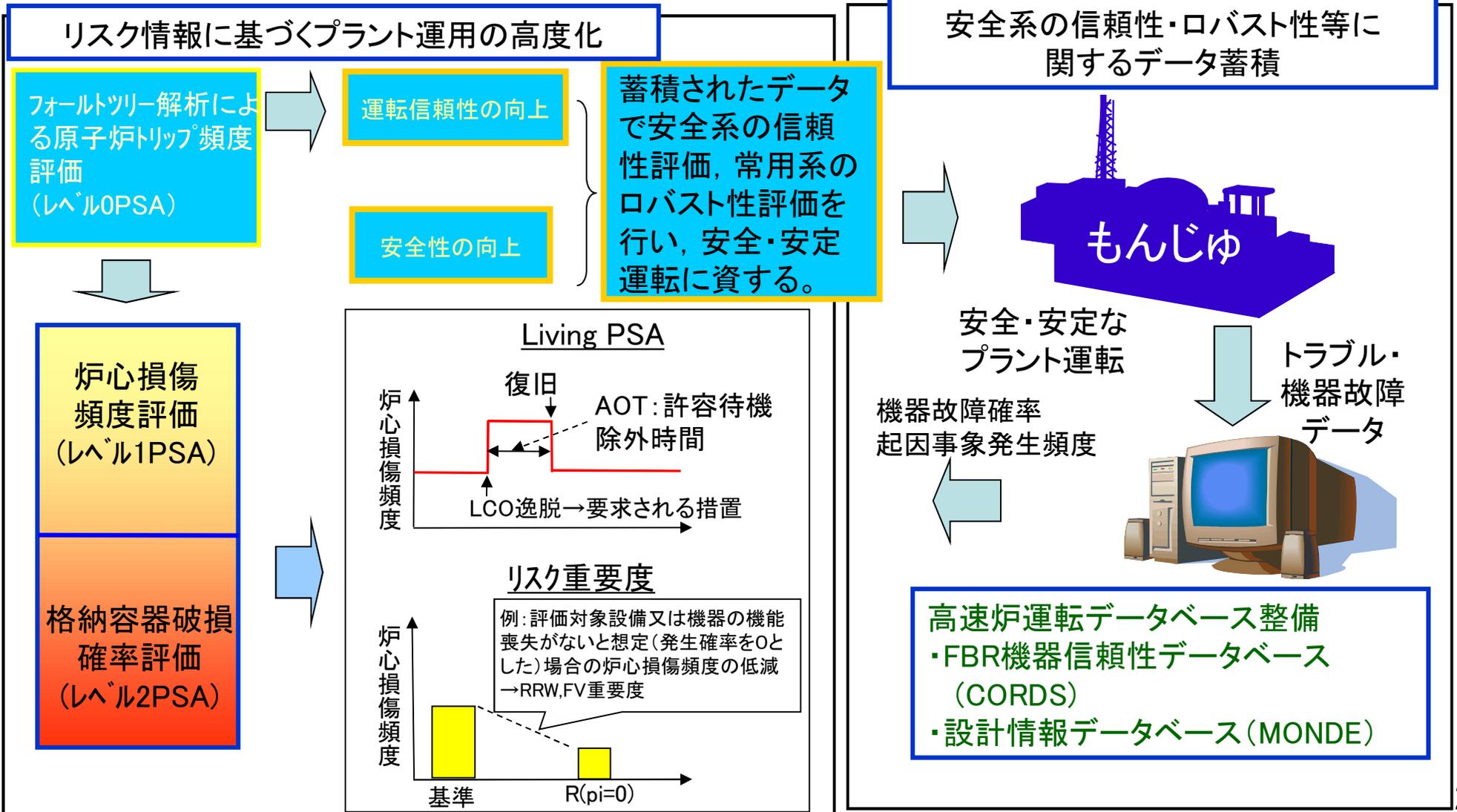
・自然循環特性は大型炉と同程度。
 ・縮尺試験の間にあるため、検証された解析コードにより予測可能。

I 「もんじゅ」で実施する安全性強化の研究開発

④設計基準ベースの安全設計・評価技術

● 安全系(計装、保護動作)の設計技術・評価技術

「もんじゅ」実機でしか得られない、安全系の信頼性・ロバスト性に関するデータを蓄積・評価して、リスク情報に基づくプラント運用の合理化を図る。





I.「もんじゅ」で実施する安全性強化の研究開発

④設計基準ベースの安全設計・評価技術

●ナトリウム-水反応防止/緩和設備の設計技術・評価技術

「もんじゅ」実機の性能試験において、蒸気発生器の伝熱管水漏えい模擬試験を実施し、所定のインタロックの動作によりプラントが安全に停止することを確認する。また、試験で得られる水・蒸気系統の減圧特性データを踏まえて、高温ラプチャ型伝熱管破損防止に対する急速ブロー特性の評価技術を確立する。

その他、各種最新の技術・基準等の知見を反映し、安全設計・評価技術を確立する。