

高速増殖炉のシビアアクシデントに対する安全性強化に関する 研究開発について

第3回作業部会宿題対応

平成24年11月30日

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

シビアアクシデントに対する安全性強化に関する 研究開発の基本的考え方について

高速増殖炉は開発初期からシビアアクシデント対策を考慮

- 高速増殖炉開発各国は、開発初期から設計基準事故に加えて、これを超える事象想定であるシビアアクシデントに関する研究開発を精力的に実施してきた。
- すなわち、炉心が反応度最大体系でないことなどの高速増殖炉の特徴を踏まえた上で、当時の原子力安全委員会は、軽水炉と同様に動的機器や静的機器の故障を仮定した設計基準事故を設定するのみならず、『「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）を評価することを、安全審査指針「高速増殖炉の安全性の評価の考え方」（1980年11月）の中で、設定した。
- これを受け、「もんじゅ」は、安全審査時に、設計基準事故を超える(5)項事象として炉停止失敗事象等についてシビアアクシデント評価を実施し、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・許可されている。
- 加えて、これらの評価等を通じて整備されたシビアアクシデント評価技術を用いて、確率論的安全評価(PSA)を実施し、シビアアクシデントに至る事象を洗い出し、設計段階から自主保安としてシビアアクシデントマネジメント策を整備してきた。



東電福島第一原子力発電所事故を教訓にしたシビアアクシデント対策強化の基本的考え方

- 東電福島第一原子力発電所の事故では、設計上の想定を超える外部事象により炉心の冷却機能が失われ、放射性物質の放散に至ったことを踏まえ、高速増殖炉においても外部事象を起因とするシビアアクシデントの対策を、高速増殖炉の安全上の特徴も考慮し、防止と緩和の観点から分析を行い、確実なものにする必要がある。加えて、内部事象を起因とするシビアアクシデントの対策についても、さらに一層確実なものとする必要がある。
 - 設計基準を超える幅広い外部事象に対する耐性・対策を強化
 - 効果的なシビアアクシデントマネジメント策により電源や炉心からの冷却の多様性を強化
 - 特に、外部動力を要しない受動的な安全機能の活用が安全性の確保上重要
 - 今後のシビアアクシデント強化策の具体化に向けては、国際的に開発を目指している炉出力規模（「もんじゅ」の数倍）も考慮し、炉心損傷時の再臨界防止策や炉心損傷時の多様な冷却手段を検討するための技術基盤整備の研究開発が重要



シビアアクシデントに対する安全性強化に関する 研究開発の基本方針について

東電福島第一原子力発電所事故の経験を踏まえた高速増殖炉のシビアアクシデント(SA)に対する安全性強化に関する研究開発として、「もんじゅ」で実践的な研究開発を実施するとともに、SA試験等により過酷なSAを模擬し、これに対する対策の検討を進める。両者を通じて、高速増殖炉の更なる安全強化を実現する。

「もんじゅ」で実施する安全性強化の研究開発

「もんじゅ」では、

- 設計基準を超える想定に対し、プラントの耐性を高めるために、「もんじゅ」の**シビアアクシデントマネジメント策を充実させ、その実証的な確認や訓練・運用**を通じて「もんじゅ」自体の継続的な安全性向上を図るとともに、その知見を高速増殖炉の安全技術基盤として整理すること
- 実プラントのシビアアクシデントに対するプラント耐性の評価や地震や津波等の外部事象も含め**確率論的安全評価等を総合的に実施**することにより、「もんじゅ」の安全性向上に反映するとともに、**シビアアクシデント評価技術を構築**すること

が重要である。

これらの実証、実践及び評価は、「もんじゅ」の運転と具体的なプラント配置、系統機器の性能及び運転員等の体制やプラントの運転操作手順の確立により初めて可能になるものである。

「もんじゅ」以外で実施する安全性強化の研究開発

シビアアクシデントに対する今後の**安全強化対策**の検討にあたっては、「もんじゅ」を活用した研究開発に加え、「もんじゅ」では模擬できない過酷な状況での試験研究を行う必要がある。具体的には、

- **炉心損傷時に炉の出力に依存せず、再臨界による機械的なエネルギーの発生を防止し、事象の炉容器内終息を図るための研究**
- **シビアアクシデント時にも冷却材の液位を確保し、自然循環除熱等を活用し、損傷した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**

が重要である。炉外試験は、詳細な解析コードの検証に役立つ精緻な物理量の計測が可能という利点もある。



シビアアクシデントに対する安全性強化に関する 研究開発項目について

(1)「もんじゅ」で実施する安全性強化の研究開発項目

①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)
- 高速増殖炉の安全裕度の実証(自然循環試験等)
- シビアアクシデントマネジメント(SAM)の訓練・運用と改良

②確率論的安全評価等による総合的な安全評価の実施とシビアアクシデント評価技術の構築

- 地震・津波等を含むSA事象進展及び頻度をPSA(確率論的安全評価)により評価を実施
- ストレステストでの高速増殖炉の安全裕度確認

(2)「もんじゅ」以外で実施する安全性強化の研究開発項目

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

- 炉心熔融時の挙動分析のための試験(EAGLE)の実施とSA評価技術の確立

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

- 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

③シビアアクシデント対策強化の具体化

- 「もんじゅ」の実機経験・知見取得及びSA研究成果に基づくSA対策の確立(最適化)
- 国際標準の安全設計クライテリア・安全設計ガイドラインの構築とこれに必要なSAに関わる安全設計・評価の具体的要求事項の整備

①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(SAM)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: 設計基準を超える外部事象を含む幅広いシビアアクシデント事象に対して、ナトリウム冷却高速増殖炉の特徴を踏まえたSAMを検討し、安全性の向上を図る。

方法: 設計基準を超える外部事象及び長期的な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の検討を実施し、SAMを更新する。

反映先: 継続的な安全性レビューとシビアアクシデントマネジメント策の充実を図る。

外部ハザード(例)

- ・地震、津波
- ・森林火災
- ・火山噴火
- ・異常気象
(積雪、強風、降雨等)



安全機能について

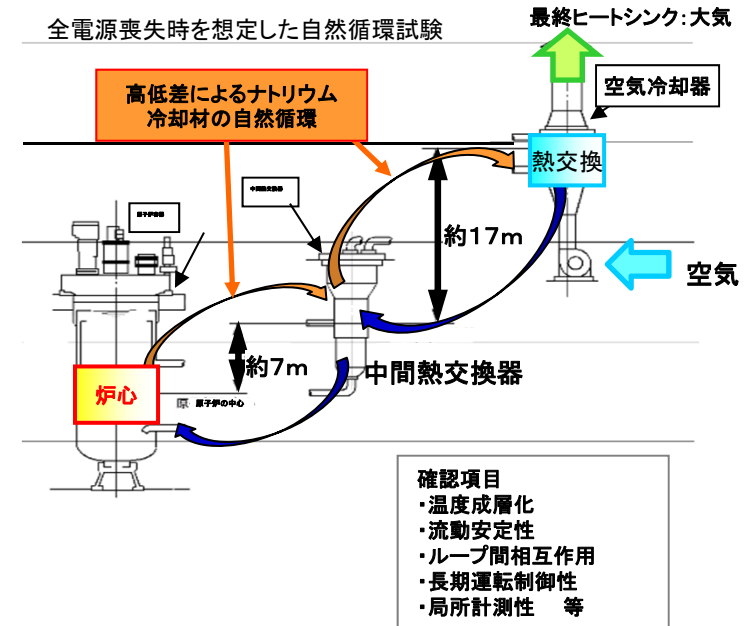
- ・耐性
- ・多様性
- ・代替策、回復策
- ・影響緩和策 等を確認・整備

●高速増殖炉の安全裕度の実証(自然循環試験等)

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: 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。



●シビアアクシデントマネジメント(SAM)の訓練・運用と改良

目的: シビアアクシデント対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: シビアアクシデント対策として構築したAM 策について、運転員等の操作・対策の実施手順に関する実プラントを用いた訓練・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。

②確率論的安全評価等による総合的な安全評価の実施とシビアアクシデント評価技術の構築

●地震・津波等を含むSA事象進展及び頻度をPSA(確率論的安全評価)により評価を実施

目的: 幅広い外部事象を含むPSAを実施し、ナトリウム冷却高速増殖炉の特徴を踏まえた対策を継続的に検討し、安全性の強化を図る。

方法: 国際的にも貴重なナトリウム機器の信頼性データの蓄積とそれらに基づく確率論的安全評価、及びプラントウォークダウン等によって、安全性の強化策の検討を実施する。

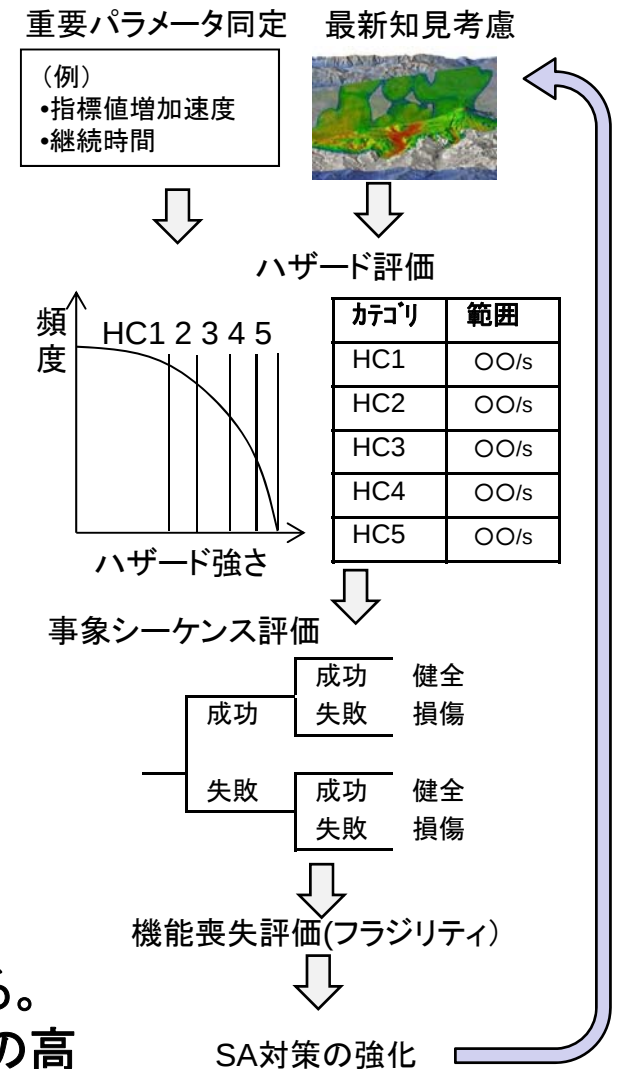
反映先: 継続的な安全性向上評価とSAMの充実を図るとともに、高速増殖炉特有のPSA評価技術を構築する。また、高速増殖炉のシビアアクシデント対策検討のための安全技術基盤として活用する。

●ストレステストでの高速増殖炉の安全裕度確認

目的: 設計基準を超える想定に対する耐性、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」の安全強化策の検討に活用するとともに、今後の高速増殖炉のSAM検討のための安全技術基盤として活用する。



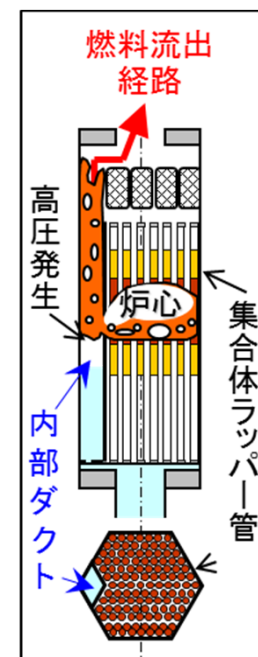
①炉心損傷時の再臨界の防止と事象の炉容器内終息を図るための研究

● 炉心溶融時の挙動分析のための試験(EAGLE)の実施とSA評価技術の確立

目的: 実炉における溶融炉心物質の挙動試験(EAGLE試験)により、再臨界防止策等の設計方策の有効性を確認するとともに、炉心溶融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IGR試験炉において、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。

反映先: 炉心溶融時の燃料挙動を把握し、事象の炉容器内終息の実験的裏付けの取得及びSA評価コードの検証へ反映する。



EAGLE試験



カザフスタン
IGR試験炉

早期燃料排出技術の確立

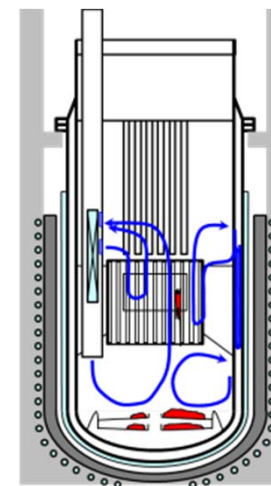
②損傷炉心燃料等を安定に冷却できる手段の多様化を行う研究

● 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(AtheNa)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。

反映先: 多様なSA時除熱手段の設計・評価及びSA評価コードの検証に反映する。



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

大洗 AtheNa施設

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

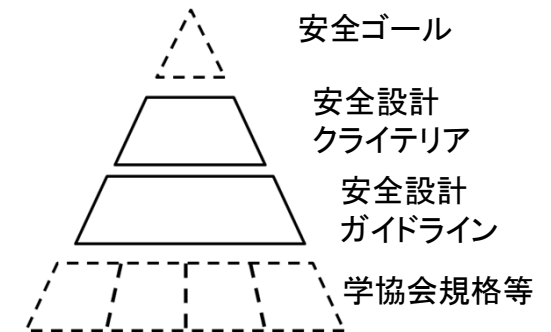
③シビアアクシデント対策強化の具体化

●「もんじゅ」の実機経験・知見取得及びSA研究成果に基づくSA対策の確立(最適化)

目的: 高速増殖炉の特徴を踏まえたシビアアクシデント対策強化を具体化する。

方法: 「もんじゅ」のSA対策の設備及び運用上の経験と、個々のSA研究成果を反映してSA対策の最適化を検討する。

反映先: SA対策検討の技術基盤として確立するとともに、国際的な安全設計クライテリア及び安全設計ガイドラインを検討するための技術基盤として活用する。



●国際標準の安全設計クライテリア・安全設計ガイドラインの構築とこれに必要なSAに関わる安全設計・評価の具体的要求事項の整備

目的: 国際標準の安全設計クライテリア・安全設計ガイドラインを構築するため、参照すべき網羅的、具体的な安全要求事項を整備する。

方法: シビアアクシデント対策の技術基盤を基に、SA対策を強化した高速増殖炉の構築物、系統及び機器に対して安全設計及び評価の具体的要求事項を整備する。

反映先: SA対策検討の技術基盤として整備するとともに、国際標準の安全設計クライテリア及び安全設計ガイドラインの構築に反映する。

添付資料

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。

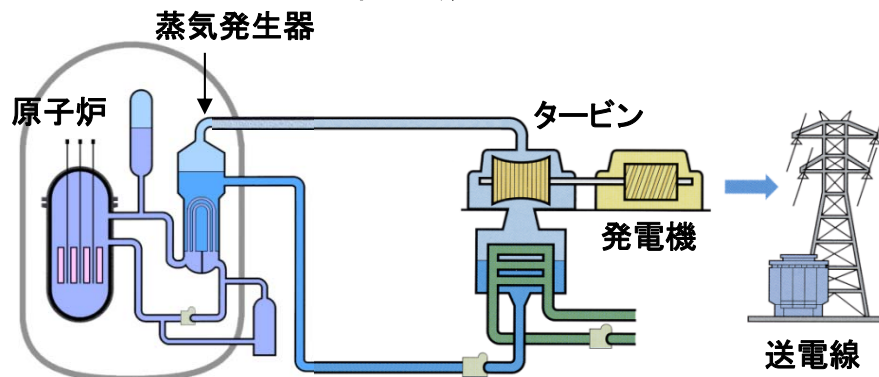
項目	軽水炉	高速増殖炉
炉心特性	ボイド反応度: 負	ボイド反応度: 正
冷却材特性	冷却材	水
	圧力	高い
	温度	約300℃
	自然循環性	小
	化学的活性度	低い
		ナトリウム
		低い
		約500℃
		大
		高い

高速増殖炉の安全確保の考え方

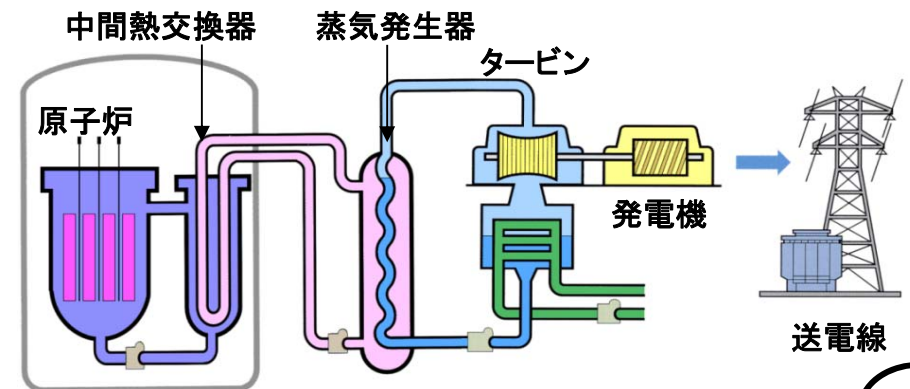
- 炉心損傷の発生を防止
- 仮に炉心損傷を想定しても放射性物質を格納
- Naの特長を活かした自然循環による除熱
- 配管破損を想定しても、液位を確保(冷却材注入が不要)
- ナトリウム燃焼、ナトリウム-水反応への考慮

SA対策

軽水炉(PWR)



高速増殖炉



設計基準対策の考え方

対策1: 止める

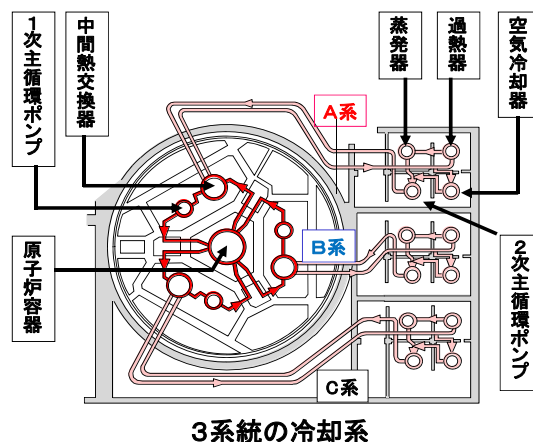
炉を止めるための制御棒は、メカニズムの異なる独立した2つの系統により構成されるとともに、フェイルセーフの設計によって、電源が喪失した場合にも確実に炉を停止。

独立2系統の炉停止系

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

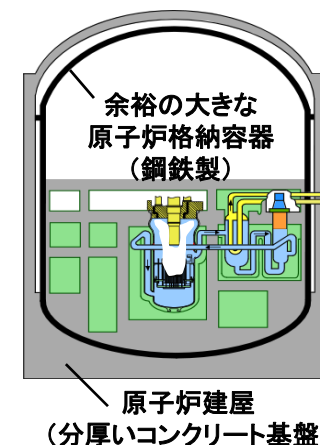
対策2: 冷やす

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。配管破損時には低圧系であることから、低所にガードベッセルを設け、静的に冷却材液位を確保



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。



シビアアクシデント対策強化の考え方

炉心損傷を想定した場合、高速炉炉心が反応度最大体系でないことから、再臨界による大きな機械的エネルギーの発生防止が重要

SA時においても冷却材液位を確保し、崩壊熱除去について自然循環等を活用し多様化すること、及び、炉心溶融した場合でも、溶融炉心物質をナトリウム中で微粒子化させ、ナトリウム中に保持することが重要

SA時に想定される機械的負荷、ナトリウム等の化学反応による熱的影響に対して格納機能が喪失することなく、放射性物質の放散が適切に抑制されることが重要