



日本原子力学会 2025年春の年会
新型炉部会企画セッション

次世代ナトリウム冷却高速炉の 安全設計方針

(3)次世代高速炉の安全設計の 考え方

久保重信 (JAEA)



次世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計方針

- 次世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計評価方針検討会における5回の審議を経て作成
- 新型炉部会ホームページにて公開中
(<http://www.aesj.or.jp/division/ard/documents/202502-Policy.pdf>)
- 主要設備として炉心燃料、原子炉構造、原子炉停止、原子炉冷却、原子炉格納に係る設備を対象とし、特に重大事故等の対策に焦点をあてて、次世代高速炉の安全設計の基本的考え方と、それに基づいた主要な設備設計の基本となる安全機能要求を示す。燃料取り扱い設備、計測制御設備、その他設備については別途整備する。

目 次

1. 背景と目的

2. 安全確保のための基本的考え方

- (1) 基本的な安全設計方針
- (2) 既存軽水炉と高速炉実証炉の特徴比較
- (3) 深層防護の考え方
- (4) ハザード対策の考え方
- (5) 特定重大事故対策の考え方
- (6) 大規模損壊対策の考え方

3. 主要設備の安全設計方針

- (1) 炉心燃料
- (2) 原子炉冷却材バウンダリ及び原子炉カバーガスバウンダリ構成機器
- (3) 原子炉停止設備
- (4) 炉心冷却（崩壊熱除去）設備
- (5) 原子炉格納設備

4. ハザード対策に関する安全設計方針

- (1) 内部と外部のハザード対策
- (2) ナトリウムの化学反応対策

5. 研究開発段階炉基準規則とのギャップ



次世代高速炉の基本的な安全設計方針

- ◆ 実験炉「常陽」、原型炉「もんじゅ」の経験、革新軽水炉の動向をふまえて安全設計概念を具体化していく。
- ◆ 第4世代原子炉国際フォーラムで策定した安全設計クライテリアを取り入れたものとする。

① 高速炉の安全上の特徴

原型炉「もんじゅ」を対象として策定された「高速増殖炉の安全性の評価の考え方」を参照

- 炉心は臨界体系を維持するために中性子の減速を要しない。
- 冷却系は低圧・高温、冷却材の沸点が高く系統加圧が不要、他方凍結に留意
- ナトリウムは化学的に活性であり、燃焼や水との反応に対する対策が必要

② 次世代高速炉の安全設計方針

新設であることの利点を活かして、設計段階から重大事故等の対策を設計に取り入れる。

- 重大事故等対策を含めて、必要な対策を設計に取り入れる。
- 実績のある能動的な安全設備に受動的な安全機能を組み合わせる。
- 原子炉容器内保持に重点をおいた格納概念
- 可搬型設備の有効活用



次世代高速炉の安全設計の特徴

◆ 新たな安全メカニズムを取り入れた高速炉の安全設計の枠組み（深層防護）

- 軽水炉と異なる高速炉の安全上の特徴（低圧高温の冷却系、高速中性子による臨界体系、ナトリウムの化学反応）
- 新たな安全メカニズム（受動的な炉停止機能と自然循環冷却機能、炉心損傷の影響を原子炉容器内に格納）

◆ 重大事故等対策

- **炉心損傷防止**：早期に異常を検知し、事象収束させる「能動的な安全防護設備」に加え、「受動的な安全機能」を追加して深層防護を強化
- **格納機能維持**：炉心損傷の影響を原子炉容器内に格納し、環境への放射性物質の放出抑制効果を大幅に強化

◆ ナトリウム化学反応を含むハザード対策

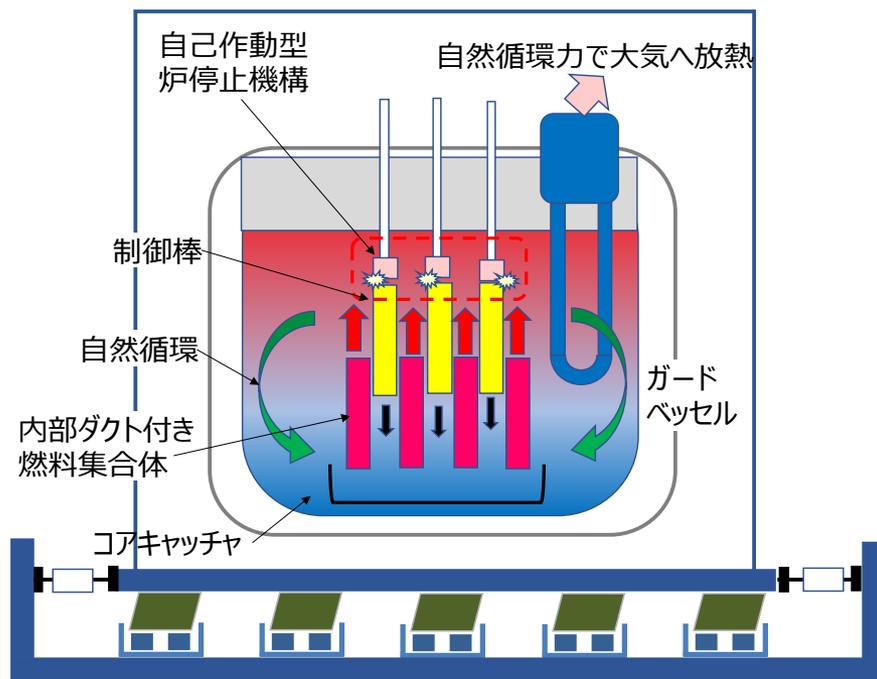
- 漏えいナトリウムの燃焼に対する設計対策（漏えい早期検出、配管の2重化、緊急ドレン、早期消火、水素発生等の抑制（床ライナ等））
- 蒸気発生器（SG）伝熱管からの水漏えい時のナトリウム水反応が炉心の安全性の脅威とならない設計対策（2次ナトリウム系の設置、漏えい早期検出、SG保有水の放出、給水隔離、圧力解放、反応生成物の処理等）

◆ 特定重大事故対策（重大事故等対処設備との共用の考え方を含む）

- 新たな安全メカニズムを活用した対策を原子炉施設にあらかじめ組み込む

◆ 原子炉建屋への免震技術の適用

- 耐震/免震設計の安全裕度の考え方



次世代高速炉の安全設計概念



既存軽水炉と次世代高速炉の特徴比較 (1/2)

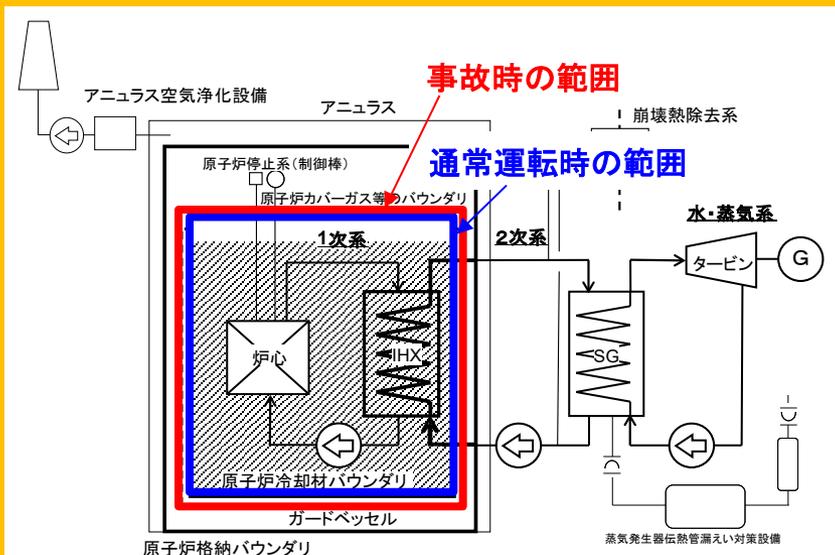
	高速炉	軽水炉(PWR)
	ナトリウム	軽水
冷却材	<ul style="list-style-type: none"> 高い熱伝導率・沸点：自然循環による崩壊熱除去 化学的に活性：不活性雰囲気化、Na漏洩に伴う燃焼対策、蒸気発生器でのナトリウム・水反応対策が必要 不透明：保守補修技術開発が必要 構造材料との優れた共存性 	<ul style="list-style-type: none"> 通常運転時の炉心冷却のために系統加圧が必要、事故時には圧力制御と注水等の除熱手段を確保 腐食を防止するための水管理
原子炉冷却系の温度(熱的ポテンシャル)	<p>高い (200~550℃)</p> <ul style="list-style-type: none"> 高温構造設計が必要 (過渡時の構造信頼性確保) ナトリウムの凍結防止のため系統温度を200℃以上に維持 	<p>低い (室温~320℃)</p> <ul style="list-style-type: none"> 高温構造設計は不要 長期運転に伴う脆性遷移温度の上昇に留意が必要
原子炉冷却系の圧力(機械的ポテンシャル)	<p>低い (数気圧以下)</p> <ul style="list-style-type: none"> 冷却材バウンダリ破損時にも、ガードベッセルで炉心冷却材液位を保ち冷却材喪失を防止するとともに、漏洩したNaの燃焼を防止 (タンク型炉は1次系配管は原子炉容器内に内包、格納容器内2次系配管破損は外管等で燃焼を防止) 低圧系なので制御棒が飛び出すことはない 	<p>高い (~150気圧)</p> <ul style="list-style-type: none"> 配管破断を想定すると短時間で炉心冷却材が喪失するため注水設備が必要。同時に、格納容器内に放散された高圧の冷却材に対して格納容器の健全性を確保できる設備対策が必要(格納容器スプレイ等) 冷却材圧力による制御棒の飛び出し(反応度事故)への対策が必要
	高速中性子 + 高富化度燃料	熱中性子 + 低濃縮ウラン燃料
中性子による核分裂反応(核的ポテンシャル)	通常運転時の制御はいずれも安定	
	<p>「異常な過渡変化」時に炉停止失敗を想定すると</p> <ul style="list-style-type: none"> 冷却材の沸騰によって、正の反応度(出力が上昇する)が投入される可能性、炉心燃料が損傷し、溶融した燃料が集中すれば大きな正の反応度(再臨界超過)から炉心出力が急増する可能性があるため、炉停止機能の強化と炉心損傷時の事故影響緩和と格納対策が必要 	<p>「異常な過渡変化」時に炉停止失敗を想定すると</p> <ul style="list-style-type: none"> 冷却材温度と圧力は増加するが、温度上昇によって原子炉出力は増加せず、事象進展速度は比較的遅くAMが可能 減圧操作や代替炉停止等によって炉心損傷を防止可能。



既存軽水炉と次世代高速炉の特徴比較 (2/2)

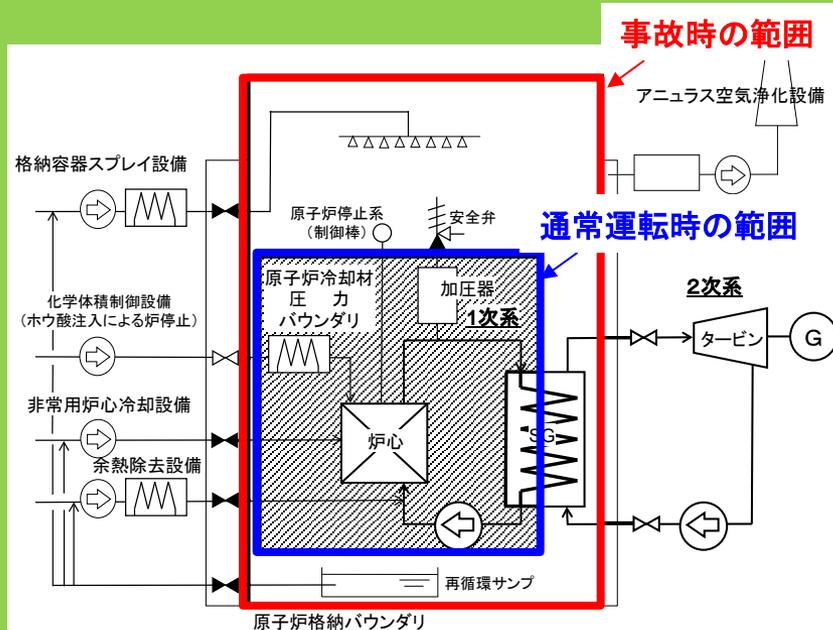
高速炉

- 低圧系であるため配管破断は発生し難く、炉心冷却材の液位確保が容易。漏洩したナトリウムはガードベッセル内に閉じ込められ、火災は発生しない。
- 配管破損が炉心損傷の代表事象にはならず、冷却材注入が不要であり、大気をヒートシンクとした自然循環冷却が容易
- シビアアクシデント時にはデブリを原子炉容器内で長期的に安定冷却でき、格納容器の放射性物質閉じ込め機能に与える影響は軽微



軽水炉(PWR)

- 大口径配管破断に伴う高圧冷却材の放出により、炉心冷却材喪失と格納容器内での温度・圧力を上昇させる
- 緊急炉心冷却設備の作動と、格納容器内の温度・圧力上昇を緩和する格納容器スプレイ等で炉心燃料と格納容器の健全性を確保
- シビアアクシデント時には、デブリを格納容器内で保持し、代替注水等で格納容器の損傷を防ぐ





次世代高速炉の深層防護の考え方 (1/6)

◆深層防護各レベルの目的は、次期軽水炉と同様

- (1) 原子力安全の目的を達成するために貢献できる複数の防護の目的を設定
- (2) 防護レベルの目的を達成するため、各防護レベルを突破されないための防止策と、防護レベルを突破された時の緩和策を設定
- (3) 異なった防護レベル間の防止策・緩和策は、「広義の独立性*」を有するように設定

◆深層防護に係る具体的な対応としては、高速炉実証炉の特徴に応じて事象選定し、各レベルの目標を達成できるように設計対策し、その有効性を評価

*：広義の独立性とは、「深層防護レベルが突破されるのを防止する手段の有効性が” independent”であること」と考えられる。

参考文献：次期軽水炉の技術要件と実現のための取り組み「次期軽水炉の技術要件検討」ワーキンググループ（フェーズ 2）報告書、2024年3月

深層防護レベル	深層防護各レベルの目的 (想定事象)
レベル1	異常・故障発生防止
レベル2	異常状態の制御、故障の検知 (運転時の異常な過渡変化)
レベル3	設計基準内への事故の制御 (設計基準事故)
レベル4a	炉心損傷を防止するための設計基準事故を超える状態の制御 (重大事故に至るおそれがある事故)
レベル4b	シビアアクシデントの影響を緩和するための設計基準を超える状態の制御 (重大事故)
レベル5	重大な放射性物質の放出による放射線影響の緩和



次世代高速炉の深層防護の考え方 (2/6)

事象区分の定義とそれに応じた事象・設計対策例

想定事象	定義	事象例	設計対策例
レベル2 運転時の異常な過渡変化	通常運転時に予想される機械又は器具の単一の故障若しくはその誤作動又は・・・(省略)	<ul style="list-style-type: none"> 外部電源喪失 1次ポンプトリップ 等 	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉停止：能動系による緊急炉停止、または手動トリップ 炉心冷却：能動系による炉停止後の除熱（受動的機能の活用も可）
レベル3 設計基準事故	発生頻度が運転時の異常な過渡変化より低い異常な状態であって、当該状態が発生した場合には多量の放射性物質が放出するおそれのある・・・(省略)	<ul style="list-style-type: none"> 炉内配管破損に伴う炉心冷却材流量減少 制御棒の異常な引き抜き 気泡通過 蒸気発生器伝熱管破損 等 	<ul style="list-style-type: none"> 格納：被覆管破損に伴うガス状放射性物質の放出抑制 ナトリウムの化学反応の抑制 <p>※炉停止と冷却はレベル2と共通</p>
レベル4a 重大事故に至るおそれがある事故	(省略)・・・炉心の著しい損傷に至る可能性がある事故シーケンスグループ	<ul style="list-style-type: none"> ATWS系（流量喪失型、過出力型、除熱源喪失型） LOHRS系（液位低下型、崩壊熱除去のための除熱源喪失型） 	<ul style="list-style-type: none"> ATWS系：受動的機構による緊急炉停止 LOHRS系：設計基準を超えるプラント状態における炉停止後の除熱、ガードベッセル等静的機器による液位確保
レベル4b 重大事故	<p>上記の事故シーケンスグループに対する措置が機能しない場合において、格納機能を有する系統・構築物に負荷を与える事故の状態（高速炉特有の提案）</p> <p>※軽水炉では、炉心が著しく損傷した場合において、格納容器に負荷を与える状態と定義</p>	<ul style="list-style-type: none"> ATWS系（ULOF、UTOP、ULOHS） PLOHS系 	<ul style="list-style-type: none"> ATWS系：原子炉容器内での損傷炉心の保持・冷却、格納容器による放射性物質の放散抑制 PLOHS系：運転時の異常な過渡変化、設計基準事故及び重大事故に至るおそれがある事故の手段と同時に機能喪失しない代替手段によって炉心及び原子炉容器を冷却

● ATWS系：炉停止失敗系事故シーケンス ● LOHRS系：除熱失敗系事故シーケンス ● PLOHS系：LOHRS系のうち除熱源喪失系事故シーケンス
 ● ULOF：流量減少型炉停止失敗事象 ● UTOP：過出力型炉停止失敗事象 ● ULOHS：除熱源喪失型炉停止失敗事象



次世代高速炉の深層防護の考え方 (3/6)

◆ 深層防護レベル4bの考え方

深層防護4aの措置が機能しない場合において、**評価対象とする事故シーケンスの進展によって格納機能に対して負荷を与える状態を想定**する。

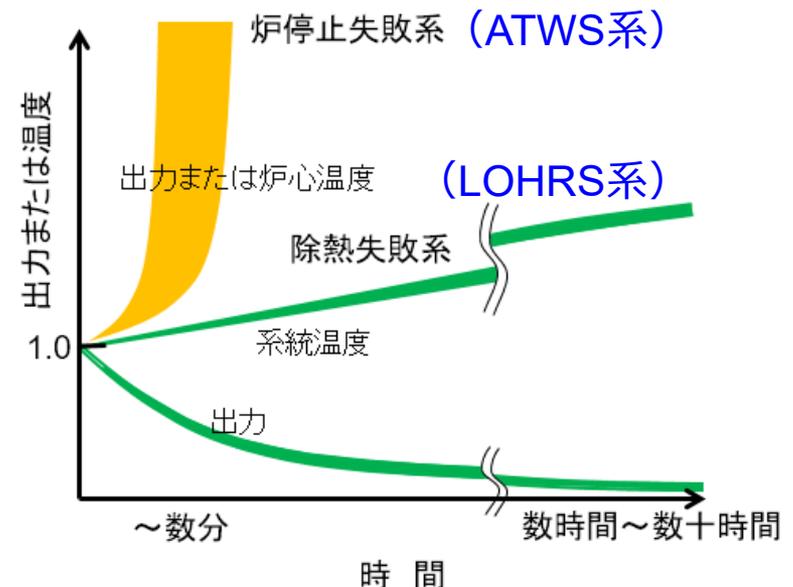
• 炉停止失敗系 (ATWS系)

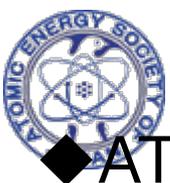
– 異常発生時に、能動的炉停止(レベル2~3対策)と受動的炉停止(レベル4a対策)の失敗が重畳することを想定する事象シーケンス

• 除熱失敗系 (LOHRS系)

- PLOHS (除熱喪失) : レベル2~3の除熱対策の機能喪失とレベル4aのアクシデントマネジメント対策の失敗が重畳することを想定する事象シーケンス
- LORL (液位喪失) : RVの機能喪失に対しては同等の信頼性を有するGVで対策することから重大事故から除外

上記方針の理由 : 軽水炉では、炉心損傷後に発生しうるシビアアクシデント現象は異常の起因に寄らず同種のものとなり、炉心損傷の起因となる事故シーケンスの依存性は顕著となはならないのに対して、高速炉では、**ATWS系とLOHRS系で事故シーケンスの進展が大幅に異なるため、炉心損傷時のプラント状態が大きく相違**する。





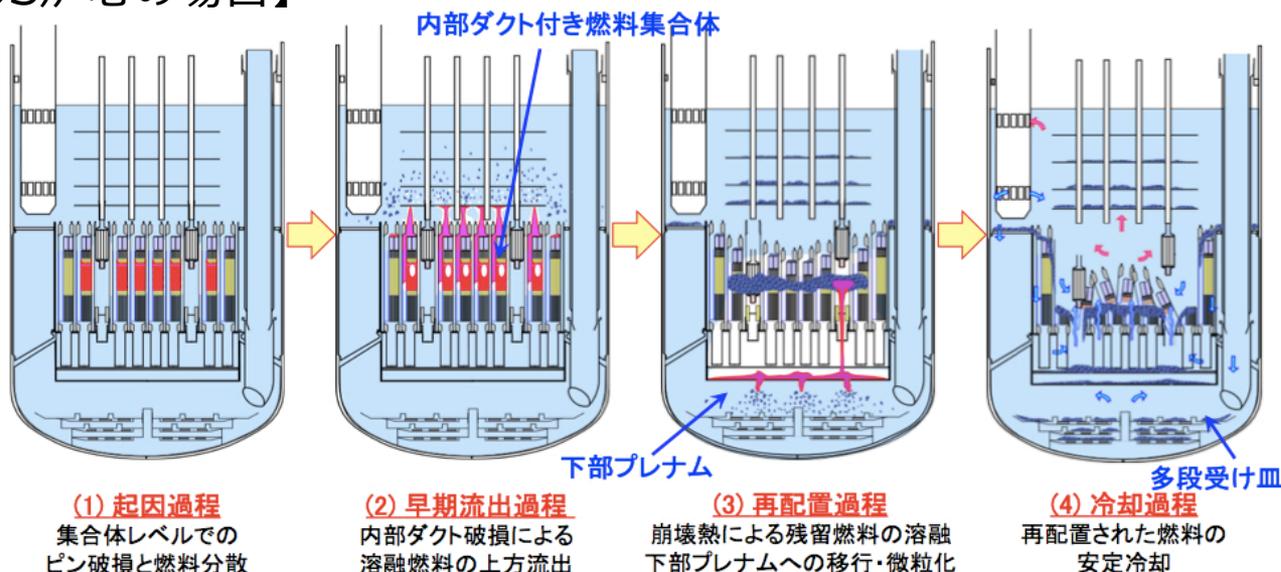
次世代高速炉の深層防護の考え方 (4/6)

◆ATWS系事象のレベル4bの考え方

仮に炉心損傷に至っても、冷却材の沸騰による即発臨界や溶融燃料の集中による厳しい再臨界を防止して、損傷炉心物質を原子炉容器内で保持・冷却する (**原子炉容器内事象終息 (IVR : In Vessel Retention)**)

- ATWS系は異常時に炉停止失敗することにより、事象が急峻に進展して炉心損傷に至る事象であるが、炉心損傷したとしても、損傷炉心はナトリウムに浸かった状態にあり、原子炉容器内の冷却材の循環による損傷炉心の冷却が可能。そのため、適切な設計対策によって**損傷炉心を原子炉容器内で保持**することが**実効性のある安全対策**となる。
- 事象の過程で放出される**ガス状及び揮発性放射性物質は原子炉格納容器内で保持**するが、閉じ込め機能に与える影響は比較的小さいため軽水炉のような格納容器内冷却は不要。

【FAIDUS炉心の場合】





次世代高速炉の深層防護の考え方 (5/6)

◆ LOHRS系事象のレベル4bの考え方

LOHRS系事象では炉は停止するため、冷却材の大きな熱容量により事象進展は緩慢で時間的余裕が大きく、この**時間余裕を考慮して多様な除熱手段を備えることで、炉心損傷の進展を緩和**する。

- 崩壊熱除去系統は、原子炉冷却材系に接続し、大気をヒートシンクとする2次ナトリウムループで構成し、液体ナトリウムを循環させることで崩壊熱を除去する。
- 原子炉冷却材系への接続位置や熱交換器の形式等に多様性を持たせるとともに、ポンプやブローを用いた強制循環機能に加えて、受動的な機能として自然循環機能を持たせる。
- 水蒸気系の設備も崩壊熱除去に活用することも可能。
- 多様な冷却設備を分散配置し独立性を確保する。

レベル2,3対策

- 安全系である多重性・多様性・独立性を考慮した崩壊熱除去系を、単一故障と外部電源喪失を考慮して設計基準事故に対処できるように設計する。

レベル4 a対策

- 上記設備の機能拡張（自然循環機能の組込みや設備容量や運転温度に余裕を持たせることなど）、事故管理方策の取り入れ等によって、複数手段の共通要因による機能喪失を防止し、設計基準を超える過酷なプラント状況に対処できるように設計する。

レベル4 b対策

- レベル4aまでの手段と同時に機能喪失しない独立性の高い除熱手段によって炉心及び原子炉容器を冷却できるように設計する。

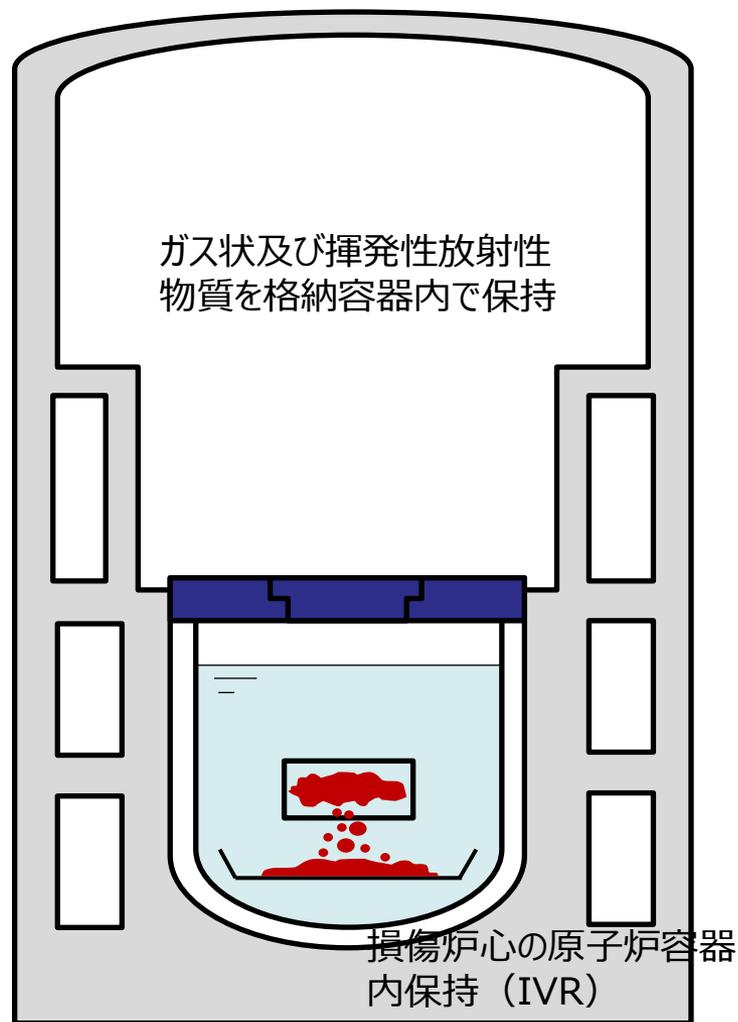


次世代高速炉の深層防護の考え方 (6/6)

◆レベル4bでの原子炉格納機能の考え方

高速炉重大事故の事象シーケンスの特徴を踏まえ、ATWS系とLOHRS系毎に対策を講ずることで、実証炉では、ATWS系だけでなく、LOHRS系についても原子炉容器内事象終息（IVR）を追求し、**重大事故時にも損傷炉心がナトリウムから露出しない**ように対策する。その上で、**原子炉格納容器と相まって、重大事故の影響を抑制**する。

重大事故時にも**原子炉容器内でナトリウムに浸漬された状態で損傷炉心を保持するとともに原子炉格納容器でガス状及び揮発性放射性物質の放散を抑制**する（原子炉容器ないしガードベッセルが格納機能の一部を担う）



原子炉格納設備



次世代高速炉のハザード対策と特定重大事故等対策

◆内部と外部のハザードに対して安全機能が確保できるように対策する。

- ハザードによって脅かされる安全設備の裕度確保・防護等
- ナトリウムの化学反応が安全設備の脅威とならないように対策

◆特定重大事故対策

- 故意による大型航空機衝突、テロ等を想定しても機能する冷却設備を高速炉の特徴を考慮して原子炉施設本体に組み込む

ハザード対策

- | | |
|-----------|----------|
| ● 内部ハザード | ● 外部ハザード |
| ✓ 一般火災 | ✓ 地震 |
| ✓ ナトリウム火災 | ✓ 津波 |
| ✓ 内部溢水 | ✓ 強風 |
| など | ✓ 落雷 |
| | など |

- ・対策：
- ✓ 影響を受ける安全設備の裕度の確保
 - ✓ 影響を受ける安全設備の防護、物理的分離
 - ✓ ハザードの影響緩和 等

特定重大事故等対策

- 故意による大型航空機の衝突
- テロリズム

代替冷却手段

- ・原子炉建屋との離隔距離の確保
- ・頑健な建屋に収納



次世代高速炉の特定重大事故対策

軽水炉と次世代高速炉の特重施設に求められる機能の比較

- 特重施設に求められる機能は、重大事故時に求められる機能と同じであり、圧力制御、注水に関わる軽水炉の機能は適用されない。
- ATWS系の炉心損傷時の格納機能維持対策は除熱機能を除き、原子炉容器内の設備で対応するため、高速炉実証炉の特重施設に求められる機能は、サポート機能と制御機能を除けば、炉内の損傷炉心冷却機能となる。(水素濃度制御は、必要性を検討)

軽水炉		高速炉実証炉	
要求機能	設計対策 (例)	要求機能	設計対策
原子炉冷却系バウンダリ減圧機能	• 原子炉減圧操作設備	—	—
炉内の溶融炉心冷却機能	• 原子炉内への低圧注入設備	炉内の損傷炉心冷却機能	• 設計基準対象設備と分離・独立し、APC時にも同時に機能喪失しない崩壊熱除去設備
格納容器下部に落下した溶融炉心の冷却機能	• 格納容器下部への注水設備	—	—
格納容器内の冷却・減圧・放射性物質減衰機能	• 格納容器スプレイへの注水設備	—	—
格納容器過圧破損防止機能	• 格納容器圧力逃がし装置	—	—
水素爆発による格納容器破損防止機能	• 水素濃度制御設備	—	—
サポート機能	• 電源設備、計装設備、通信連絡設備	サポート機能	• 電源設備、計装設備、通信連絡設備
格納容器破損防止設備の制御	• 緊急時制御室	格納容器破損防止設備の制御	• 緊急時制御室



まとめ

次世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計方針を提示

- 軽水炉と異なるナトリウム冷却高速炉の安全上の特徴に基づいた安全設計
- 新設であることの利点を活かして、設計段階から重大事故等の対策を設計に取り入れる。
 - ◆ プラント全体の安全性を向上させるために、実績のある能動的な安全設備に受動的な安全機能を組み合わせる。
 - ◆ 重大事故時に損傷炉心を原子炉容器内で保持することとし、原子炉容器が格納機能の一部を担う格納概念とする。
 - ◆ 故意による大型航空機衝突、テロ等の意図的な人為事象を想定しても機能する冷却設備を原子炉施設本体に組み込む。

この安全設計方針を高速炉実証炉の設備設計に展開していく