

日本原子力学会2025年春の年会(オンライン開催) 新型炉部会セッション 2025/3/13

次世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計方針

(4) 次世代高速炉の主要な安全設計

－ 高速炉実証炉 －

三菱FBRシステムズ 日暮 浩一

2025.3.13

三菱FBRシステムズ株式会社

本報告は、経済産業省からの受託事業である「令和5年度高速炉実証炉開発事業」JPMT007143の一環として実施した成果を含む。

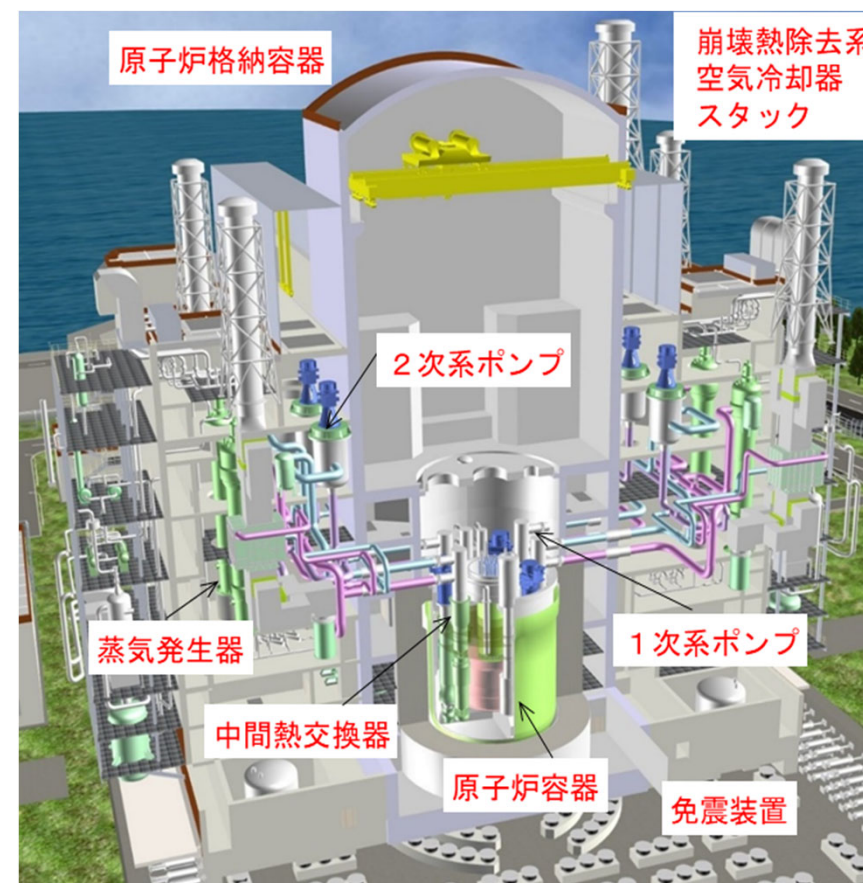
1. はじめに
2. 原子炉停止設備
3. 炉心冷却（崩壊熱除去）設備
4. 原子炉格納設備
5. ハザード対策：ナトリウム-水反応対策
6. 研究開発段階炉規則とのギャップ
7. まとめ

1. はじめに(1/3)

- 2024～2028年度にかけて**高速炉実証炉の概念設計**を行う計画であり、高速炉実証炉の概要として、主な仕様と主要機器の配置を示す鳥観図を示す。
- 安全設計においては、前稿「(3)次世代高速炉の安全設計の考え方」に基づいて具体化を図っており、ここではその概要を紹介する。

高速炉実証炉の主な仕様

項目	仕様
出力	60 万 kWe 級 (150 万 kWt)
炉心出口ナトリウム温度	550℃
炉心	酸化物燃料炉心または金属燃料炉心
原子炉停止系	独立 2 系統 (後備炉停止系に 受動的炉停止機能を設置)
主冷却系	中間熱交換器数及び 2 次系ループ数：4
崩壊熱除去系	自然循環式：5 系統 強制循環式：1 系統
原子炉建屋	3 次元免震建屋または水平免震建屋



高速炉実証炉の鳥観図

■ 「(3)次世代高速炉の安全設計の考え方」のポイント

● 高速炉の特徴に応じた安全設計の考え方

- 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。
 - ⇒ **原子炉停止設備**：能動的な原子炉停止系に**受動的な炉停止機構を組みこむ**
 - ⇒ **炉心冷却（崩壊熱除去）設備**：多重性・多様性を有する**崩壊熱除去設備に自然循環による除熱機能を組み込む**
- 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。
 - ⇒ **炉心冷却（崩壊熱除去）設備(深層防護レベル4b対策)**：特定重大事故等対処施設の機能を付加し、**あらかじめ設計に取り入れることで合理的な設計を追求**
- 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。
 - ⇒ **原子炉格納施設**：炉停止失敗系シーケンスによる重大事故に対して、**損傷した炉心を原子炉容器内で保持**し事象終息（IVR）させ、重大事故の過程で発生する**ガス状及び揮発性放射性物質については原子炉格納容器**で格納

1. はじめに(3/3)

■ 「(3)次世代高速炉の安全設計の考え方」のポイント

● 深層防護の考え方

- 広義の独立性の考え方を適用する（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独立であること）。
⇒必ずしも深層防護のレベル毎に異なる設備を設けることなく、**設備の機能拡張や事故管理方策を適用**
- 深層防護レベル4bとして、レベル4aの措置が機能しない場合に、格納機能に対して負荷を与える状態を想定し、その影響を緩和する。
⇒**炉停止失敗系シーケンス**：再臨界回避方策と損傷炉心を原子炉容器内で保持するコアキャッチャー等の対策によって**原子炉容器内事象終息を指向**
⇒**除熱失敗系シーケンス**：事象進展は緩慢で**時間的余裕が大きいことを活か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

● ハザード対策の考え方

- 蒸気発生器（ナトリウムと水蒸気との熱交換器）における伝熱管漏えいに伴う**ナトリウム-水反応が炉心のハザードとならないように対策**する。
- 低圧系であること等を活かして、冷却材の漏えい時にも炉心冷却を確保するとともに、**ナトリウム燃焼が炉心のハザードとならないように対策**する。

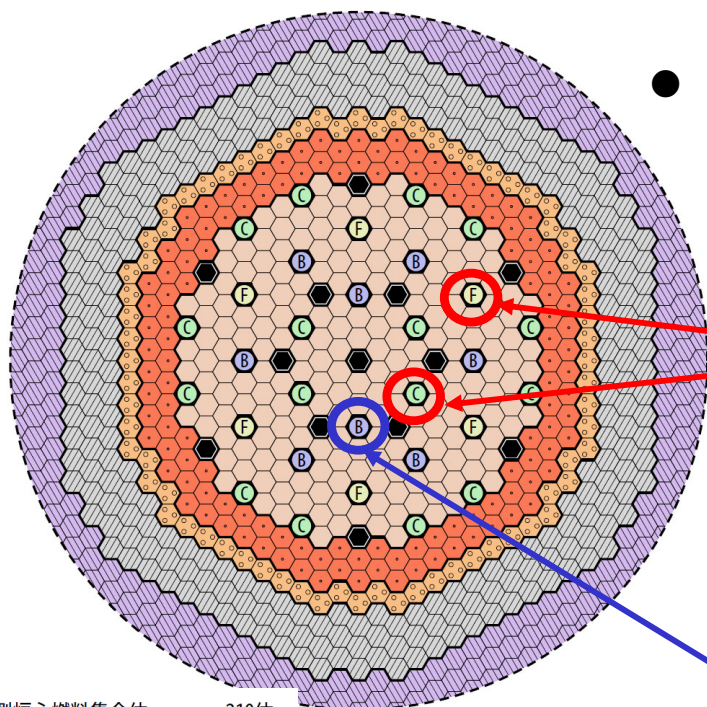
以上のポイントを踏まえた安全設計の状況を概説する

2. 原子炉停止設備(1/2)

- 【安全設計の考え方】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

能動的炉停止系

- **2系統の独立**した能動的急速炉停止系（主／後備炉停止系）を導入
- プラントの異常発生時は、**多重性を有し単一故障では機能喪失しない安全保護系の検出器**により異常を検知



主炉停止系制御棒（PCR）

用途：出力調整及び緊急炉停止
検出器：後備炉停止系と独立
（可能な限り多様化を図る）
保持方式：ラッチ機構（気中）
駆動力：ガス圧
落下方式：駆動軸との一体落下

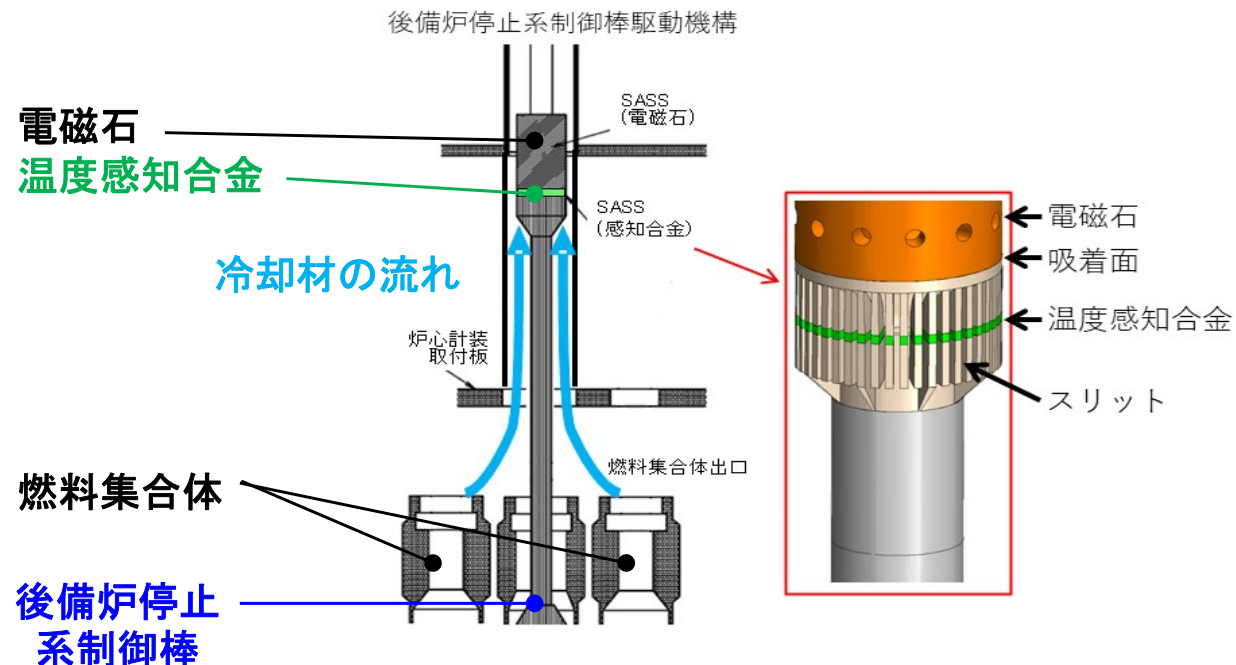
後備炉停止系制御棒（BCR）

用途：緊急炉停止
検出器：主炉停止系と独立
（可能な限り多様化を図る）
保持方式：電磁力（ナトリウム中）
駆動力：自重
落下方式：制御棒のみ落下

内側炉心燃料集合体	210体
外側炉心燃料集合体	126体
ブランケット燃料集合体	72体
粗調整棒	16体
微調整棒	6体
後備炉停止棒	8体
溶融燃料流出管	13体
中性子遮蔽体（ステンレス鋼型）	252体
中性子遮蔽体（B ₄ C型）	

受動的な炉停止機構

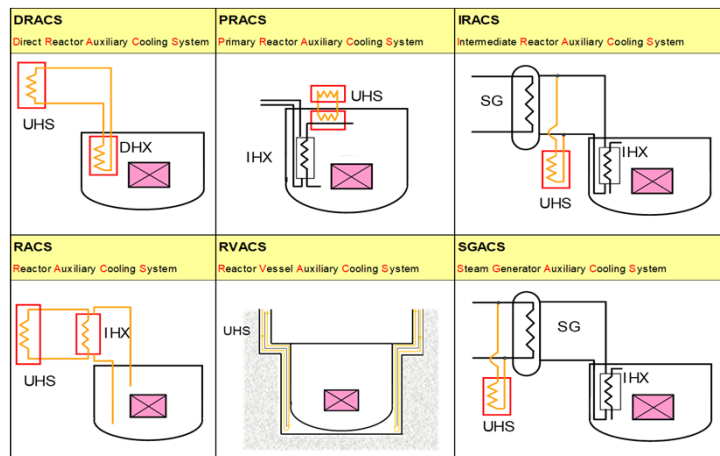
- 重大事故等の炉心損傷防止対策（深層防護レベル4a対策）として、能動的な安全設備に受動的な安全機能（自己作動型炉停止機構（SASS））を組み合わせる
- SASSは磁性体の温度がキュリー点を超えると電磁石の保持力が急激に低下する物理現象を利用
- 炉心出口温度の上昇により温度感知合金の温度が所定の値まで上昇すると後備炉停止系制御棒が受動的に落下



3. 炉心冷却（崩壊熱除去）設備(1/4)

- 【安全設計の考え方】多重性・多様性を有する崩壊熱除去設備に自然循環による除熱機能を組み込む

- タンク型炉に適合した受動的な**自然循環機能**を有する**多様**な除熱手段を導入



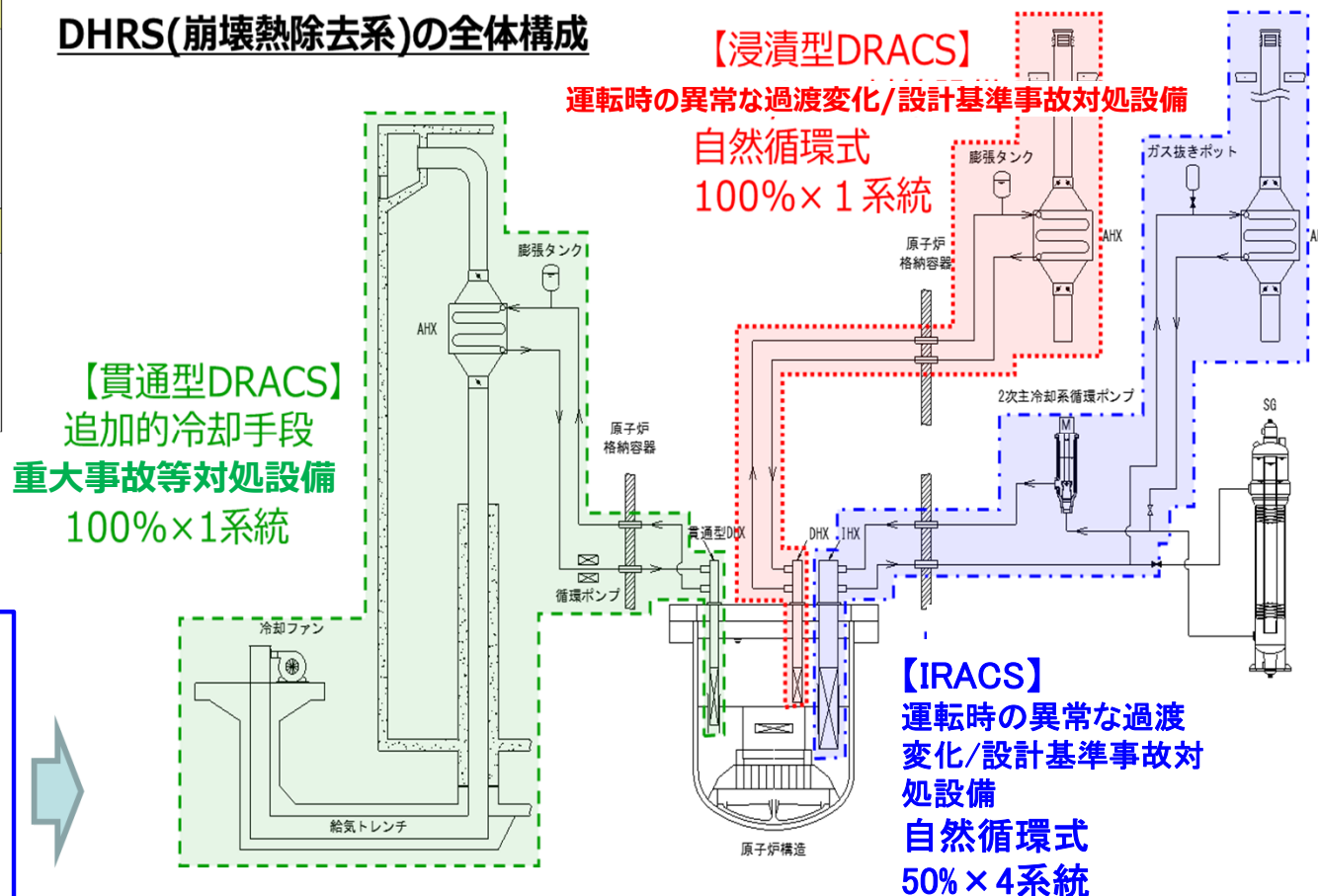
Ref.: S. Kubo et al., A conceptual design study of pool-type sodium-cooled fast reactor with enhanced anti-seismic capability, Bulletin of the JSME Mechanical Engineering Journal Vol.7, No.3, (2020)

様々な冷却システム概念から以下を考慮してDHRSの構成を選定

- ・GIF-SDC/SDGの推奨事項
 - > 多重性・多様性の確保
 - > 自然循環能力の活用
 - > 設計拡張状態対応の独立の追加的冷却手段
- ・タンク型炉への適合性
- ・経済性

GIF-SDC/SDG: 第4 世代原子力システムに関する国際フォーラム-安全設計クライテリア/ガイドライン

DHRS(崩壊熱除去系)の全体構成



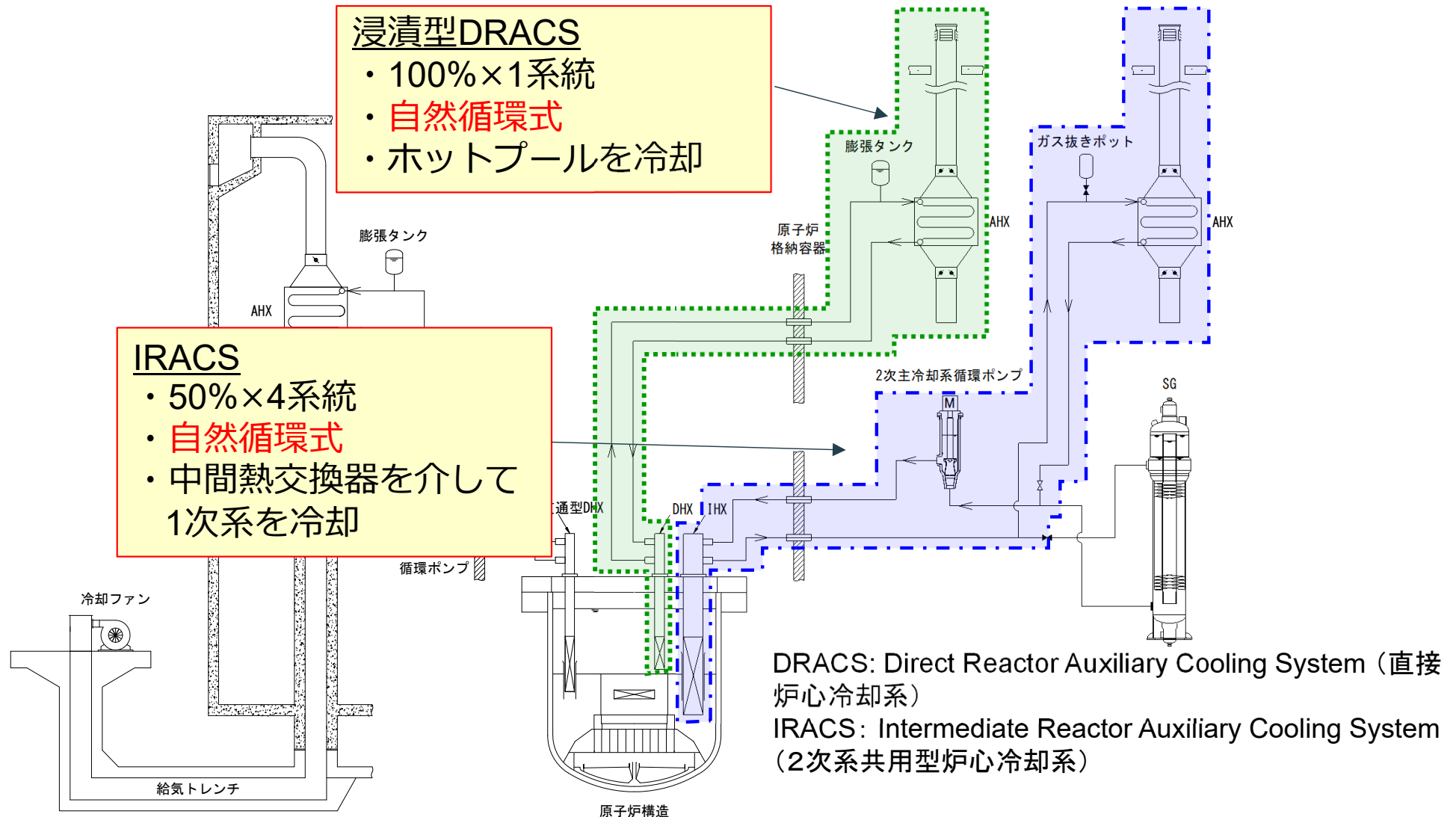
【参考】「高速炉の設計統合データベースの構築に係る設計検討 2021年度」p.3.2.2.4-ii 図2

DRACS: Direct Reactor Auxiliary Cooling System (直接炉心冷却系)
IRACS: Intermediate Reactor Auxiliary Cooling System (2次系共用型炉心冷却系)

3. 炉心冷却（崩壊熱除去）設備(2/4)

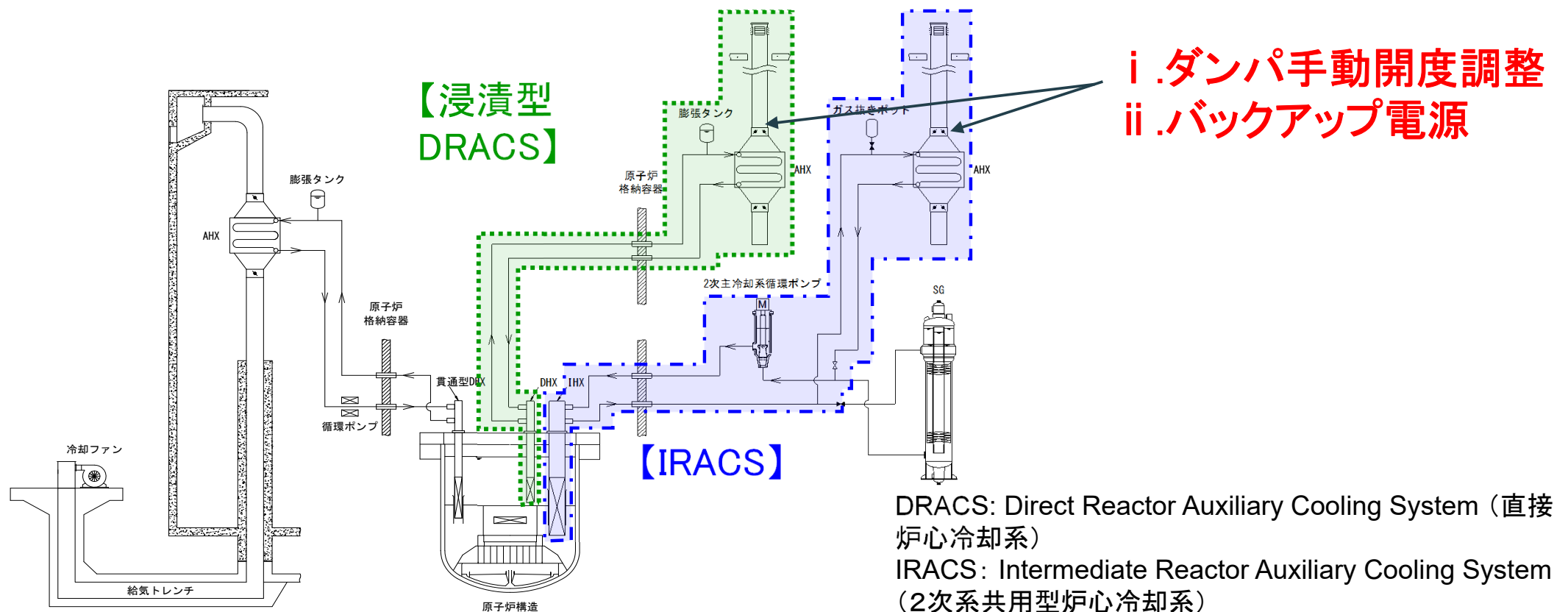
運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故対処設備

- 起因事象や単一故障を考慮しても、十分に崩壊熱除去が可能な容量を有する冷却手段を導入



重大事故等の炉心損傷防止対策（深層防護レベル4a対策）

- 炉心損傷までの時間余裕が大きい等の除熱失敗系シーケンスの特徴を踏まえ、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故に対処する崩壊熱除去系の機能拡張を図る
 - i .AM策として空気冷却器ダンパ固着に備えたダンパ手動開度調整を可能にする
 - ii .無停電電源枯渇に備えたバックアップ電源を確保する



重大事故等の除熱失敗系シーケンスの影響緩和対策（深層防護レベル4b対策）

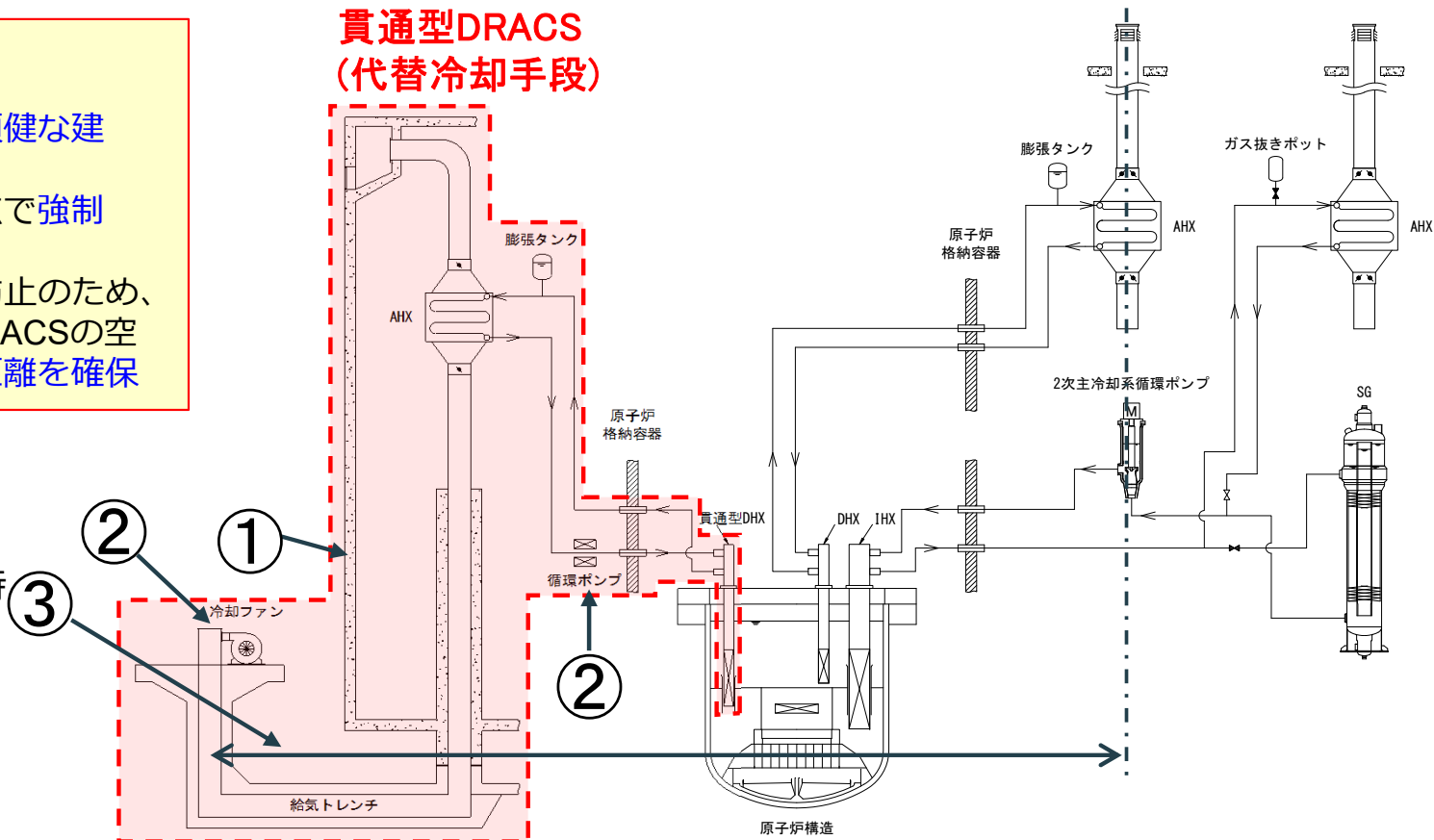
- 代替冷却手段を備えた設計としては、**共通要因故障を回避**するため、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故を対象とする崩壊熱除去系とは**独立**し、**位置的分散**を図り、**多様性**を備えた強制循環式の**貫通型直接炉心冷却系**（貫通型DRACS）1系統を導入する

貫通型DRACS

100%×1系統

- ① 系統構成機器を**頑健な建屋**内に配置
- ② **多様性**確保の観点で**強制循環式**を採用
- ③ 共通要因故障の防止のため、浸漬型DRACS/IRACSの空気取入口との**離隔距離**を確保

4b対策である貫通型DRACSに特定重大事故等対処施設の機能を付加



DRACS: Direct Reactor Auxiliary Cooling System
(直接炉心冷却系)

【参考】「高速炉の設計統合データベースの構築に係る設計検討 2021年度」p.3.2.2.4-ii 図2

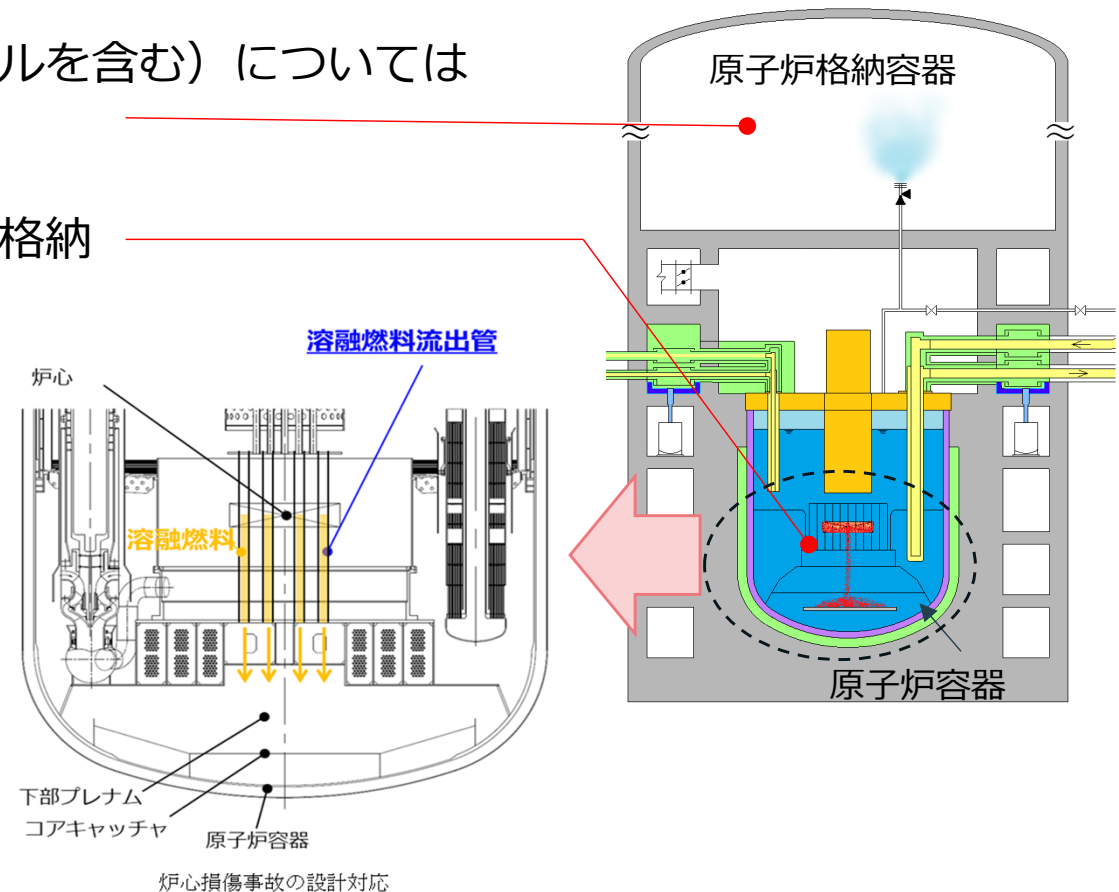
4. 原子炉格納設備

- 【安全設計の考え方】 炉停止失敗系シーケンスによる重大事故に対して、損傷した炉心を原子炉容器内で格納し事象終息させるための設備を設け、重大事故の過程で発生するガス状及び揮発性放射性物質については原子炉格納容器で格納

重大事故等の炉停止失敗系シーケンスの影響緩和対策（深層防護レベル4b対策）

- ガス状及び揮発性放射性物質（エアロゾルを含む）については原子炉格納容器で格納
- 損傷した炉心については原子炉容器内で格納

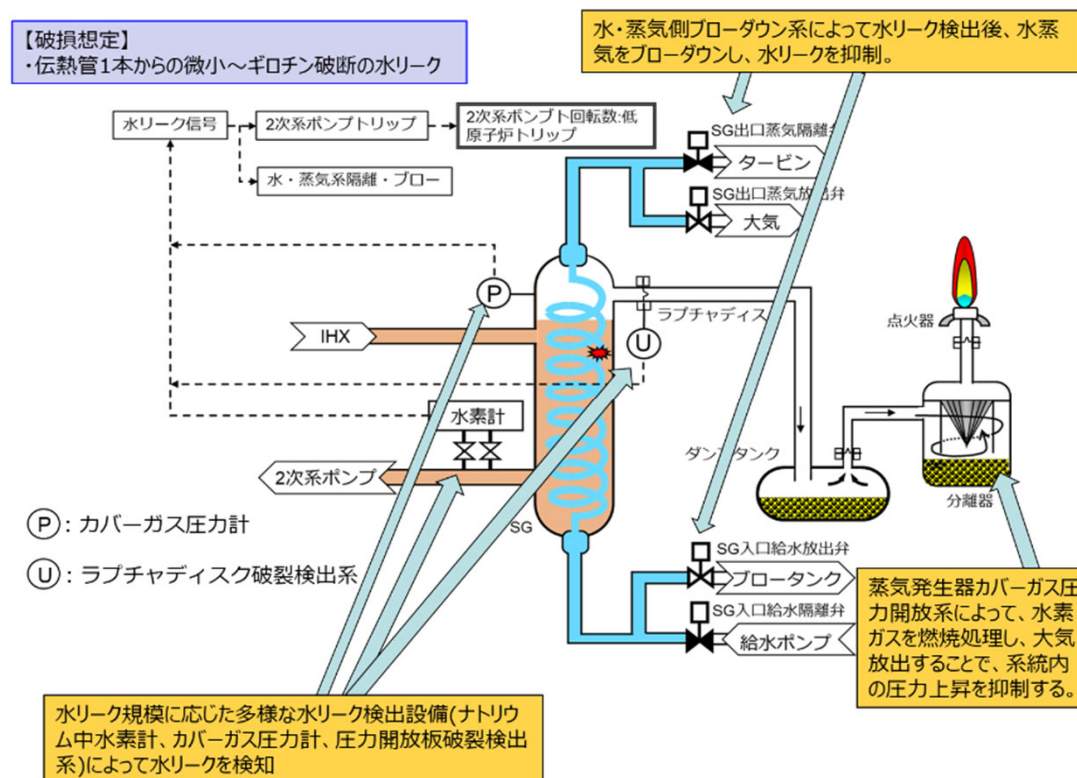
- ↓
- 溶融燃料の凝集による厳しい再臨界を回避するため、溶融燃料の炉心領域外への流出を促進するよう、炉心内に溶融燃料流出管を設置
 - 原子炉容器内事象終息のために、炉心領域から流出した損傷炉心物質と原子炉容器の直接接触を防止して、損傷炉心物質を原子炉容器内で長期的に安定冷却・保持する必要があり、原子炉容器内にコアキャッチャを設置



5. ハザード対策：ナトリウム-水反応対策

■ 【安全設計の考え方】 蒸気発生器（ナトリウムと水蒸気との熱交換器）における伝熱管漏えいに伴うナトリウム-水反応が炉心の脅威とならないこと

- 蒸気発生器伝熱管からの水漏えいに伴うナトリウム-水反応が発生した場合でも、炉心に直接影響を及ぼさないように2次系を設ける
- ナトリウム-水反応に伴う反応生成物による影響（圧力上昇、水素ガスの蓄積、水素以外の反応生成物の影響等）が、炉心の安全性や周辺環境に影響を及ぼさない設計とする
- 水リーク規模に応じた多様な水リーク検出設備（ナトリウム中水素計、カバーガス圧力計、圧力開放板破裂検出系）を設ける
- 水側の隔離及びブロー、2次ポンプトリップといった事象終息のためのシーケンスを自動作動させる
- 蒸気発生器カバーガス圧力開放系によって、水素ガスを燃焼処理し、大気放出することで、系統内の圧力上昇を抑制する
- ナトリウム-水反応が重大事故シーケンスの起因事象とならないように、ナトリウム-水反応対策設備の裕度を確保する（ナトリウム-水反応の影響緩和方策の多重性又は多様性及び独立性の確保）



ナトリウム-水反応対策設備（設計基準）

6. 研究開発段階炉規則とのギャップ(1/2)

- 高速炉実証炉の設計は「研究開発段階発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成25年6月19日制定）に準拠しつつも、**ナトリウム冷却炉の特徴を考慮した合理的で効果的な安全設計対策を指向**しており、現状の設置許可基準規則とは必ずしも合致しない部分がある（研開炉設置許可基準規則とのギャップのうち特徴的なものを以下に例示）

研開炉則条項	ギャップ
第 51 条 （原子炉格納容器下部の溶融炉心を冷却するための設備）	【規則】 原子炉格納容器の下部に落下した炉心を冷却するために必要な設備を要求 【実証炉の方針】 重大事故等の対応として、<u>炉停止失敗型事象(ATWS)</u>と<u>除熱系喪失型事象(LOHRS)</u>においては深層防護レベル 4b の方策を以下とし、<u>原子炉容器内事象終息が達成可能</u>とすることで、<u>格納容器と燃料の直接接触が生じない設計</u>とする。 ➤ ATWS : 炉心損傷を考慮しても、<u>損傷炉心物質を原子炉容器内で保持し、崩壊熱除去系により子炉容器内ナトリウムを冷却</u> ➤ LOHRS : 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故、重大事故防止を対象とする崩壊熱除去系とは<u>独立した代替冷却手段により原子炉容器内ナトリウムを冷却</u> 【説明性】 高速炉では、<u>格納機能の一部を原子炉容器がになう設計思想</u>であり、設計成立性を<u>試験データやリスク解析を含む解析評価</u>等に基づいて示す。

6. 研究開発段階炉規則とのギャップ(2/2)

- 高速炉実証炉の設計は「研究開発段階発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（平成25年6月19日制定）に準拠しつつも、**ナトリウム冷却炉の特徴を考慮した合理的で効果的な安全設計対策を指向**しており、現状の設置許可基準規則とは必ずしも合致しない部分がある（研開炉設置許可基準規則とのギャップのうち特徴的なものを以下に例示）

研開炉則条項	ギャップ
第 56 条 （緊急停止失敗時に炉心の著しい損傷及び原子炉格納容器の破損を防止するための設備）	【規則解釈】 炉心の著しい損傷として、原子炉冷却材バウンダリの健全性を維持できない機械的エネルギーが生じる炉心損傷状態を挙げており、これを防止することを要求 【実証炉の方針】 炉心損傷時に<u>溶融燃料を炉心領域外に流出させる設備</u>を導入し、大規模な溶融燃料領域の形成を回避することで、上述のような<u>厳しい機械的エネルギーの発生を防止</u>する設計とする。 【説明性】 溶融燃料を流出させる設備の有効性を<u>試験データと解析評価</u>等に基づいて示す。

- 前稿「(3)次世代高速炉の安全設計の考え方」に基づいて、安全設計の具体化を図っており、以下の内容につき、その概要を紹介した。
 - 原子炉停止設備
 - 炉心冷却（崩壊熱除去）設備
 - 原子炉格納設備
 - ハザード対策：ナトリウム-水反応対策
 - 研究開発段階炉規則とのギャップ
- 安全機能に係る主要設備の特徴としては、「能動的な原子炉停止系に加え、受動的炉停止機構の設置」「自然循環冷却を活用した崩壊熱除去設備の設置」「原子炉容器内事象終息を指向した炉心損傷対策設備の設置」があげられる
- ナトリウム-水反応対策としては、炉心に直接影響を及ぼさないようにするとともに、重大事故シーケンスの起因事象とならないように、裕度を確保した対策設備とする
- 高速炉実証炉の設計は現状の設置許可基準規則とは必ずしも合致しない部分があり、特徴的なギャップについて例示した

三菱FBRシステムズ