



総合講演・報告2

「第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計ガイドライン」研究専門委員会報告

(3) 系統別SDGの構築

日本原子力研究開発機構

久保 重信



発表内容

- 系統別SDGの作成方針
- 系統別SDGの概要
- 実質的回避と設計ガイドライン
- まとめ



安全設計ガイドライン(SDG)の検討フロー

各国の設計例

設計オプション

- ・受動的炉停止機構 (SASS等)
- ・受動的除熱機構 (DRACS等)
- ・他 (Na火災・Na水反応対策等)

設計条件セット

- ・想定事象
- ・設計限界の与え方
- ・試験性等

- IAEA NS-Gシリーズ
- ・ガイドの構成 (内容の包括性)
 - ・系統間取り合い

参考

参考

安全設計クライテリア (SDC)

[83クライテリア, 205パラグラフ]

- ・第4世代原子炉としての安全アプローチ
- ・SFRの安全上の特徴
- ・1F事故教訓の反映

参照
IAEA SSR-2/1 &
Safety Glossary

安全アプローチに関するSDG

- ・炉心反応度に関する事項と対策
- ・除熱機能維持に関する事項と対策

系統別SDG

- (特に“安全アプローチSDG”に関連したもの)
- ・炉心系 (炉停止系、炉構造を含む)
 - ・冷却材系 (崩壊熱除去系等を含む)
 - ・格納系 (格納バウンダリ等を含む)



「系統別SDG」の作成方針

- SDC で求められる設計要求に応えるための設計方策に関する推奨事項や設計条件等を具体的に示し、設計者がSDCに適合した設計を行うための一助とする。
- 「系統別SDG」では、SDC や「安全アプローチSDG」で示された考え方を、SFR の主要系統を構成する設備を設計する際に安全上考慮すべき事項のレベルにまで展開する。
- 現行軽水炉を対象としたIAEA NS-G シリーズを参考とし、これに記載レベルを合わせる。
- 炉心系、冷却材系、格納系の内、サポート系等を除く主要設備を対象とし、設備ごとに機能上の考慮事項とそれを実現するための設計方策を記述する。
- 実際に設計に適用するための実効的なものとするために、各国の設計概念や開発状況を把握し、念頭に置いた上で、推奨事項を記述する。
- 軽水炉と異なる第4世代SFRの特徴、各国の設計概念の違いを考慮して、14項目に絞った検討を行う。



◆14項目の論点

▪ 第4世代SFRとして特徴的で重要な14の事項を抽出

炉心系 ガイド	炉心燃料の健全性確保	①高温、高内圧、高照射環境に耐える燃料設計
	反応度制御	②炉心冷却性を確保するための炉心設計
		③能動的炉停止
		④受動的炉停止または固有反応度フィードバックを活用した炉停止
		⑤炉心損傷時の過大なエネルギーの発生防止と原子炉容器内保持冷却
冷却材系 ガイド	機器の構造健全性確保	⑥高温・低圧条件に耐える機器設計
	1次冷却材系に関する事項	⑦カバーガスとそのバウンダリ
		⑧液位確保対策
	ナトリウムの化学反応対策	⑨ナトリウム漏えい燃焼対策
		⑩ナトリウム-水反応対策
崩壊熱除去に関する事項	⑪自然循環の活用	
	⑫信頼性確保(多様性・多重性)	
格納系 ガイド	格納系の設計概念と負荷要因に関する事項	⑬格納バウンダリの形成と荷重
	格納バウンダリに関する事項	⑭中間冷却材系の格納機能



← 軽水炉と比較した設計上の特徴
 ← 日本の次世代SFRの設計概念

◆各論点に係る、SDGの日本案を構築



GIFにおける系統別SDGの検討の進め方

項目の選定

インプット

14項目を選定

- 炉心、炉心冷却材系、格納系の主な設備
- IAEA NS-Gの目次構成
- SDCの関連項目: Criteria 42bis ~ 58
- 安全アプローチSDG
- メンバー国における特有の設計

内容の構築

JAEAの例示

メンバー国による貢献

ピアレビュー&サマリ作成



- 各項目に対するメンバー国の設計に対する案
- 関連するSDC及び安全アプローチSDGを統合

系統別SDGドラフト作成

目次構成検討

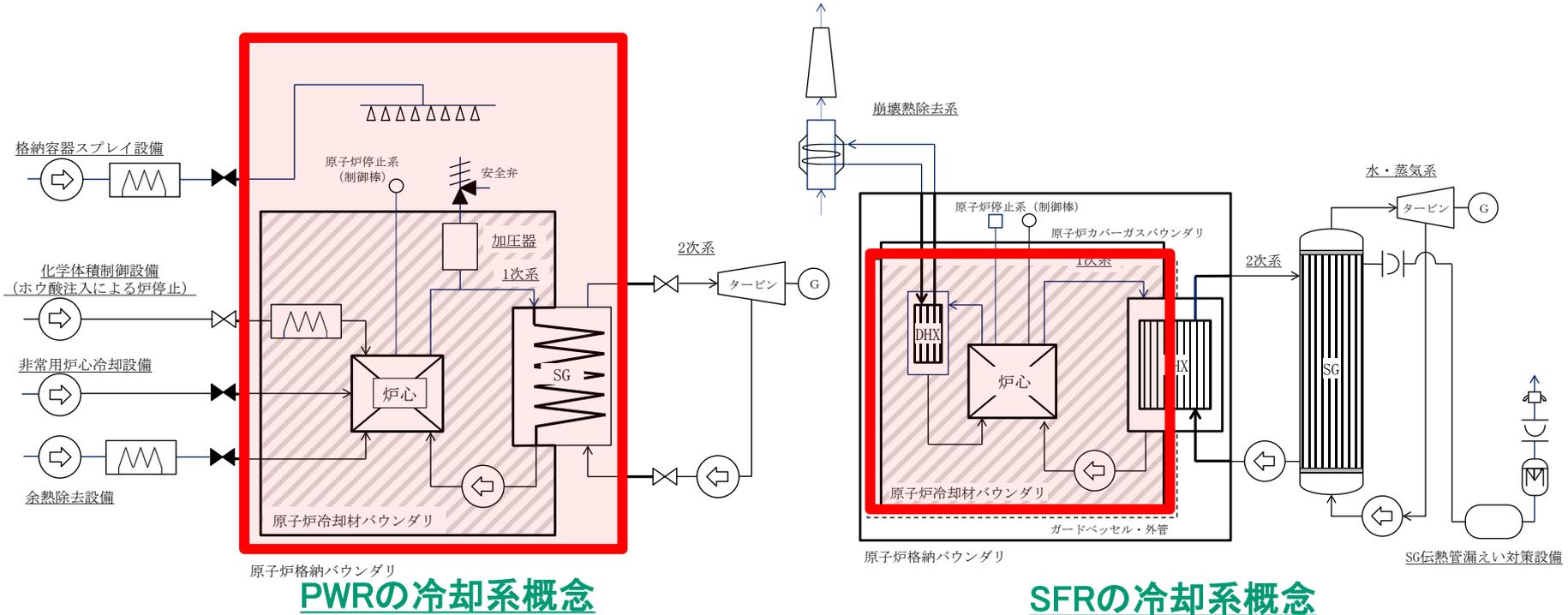
初版ドラフト作成

- 上記内容を主文とする
- NS-Gのその他の項目を再整理する

系統別SDG報告書完成

2017年中に系統別SDG報告書の初期ドラフトを作成し、2018年にファイナル版とする計画

軽水炉とSFRの特徴比較①



	PWR	SFR
冷却材	水（化学的に安定、透明、沸点低）	Na（化学的に活性、不透明、放射化、沸点高）
中間ループ	なし	あり（Na-水反応が生じた場合の炉心への影響を回避）
FPに対する障壁	原子炉冷却材バウンダリ	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
崩壊熱除去	余熱除去設備から補機冷却設備を介して、海水に放熱	独立したナトリウムループにより大気に放熱
系統圧力	1次系 > 2次系	1次系 < 2次系（2次系の方が圧力が高い）
冷却材漏えい	緊急炉心冷却系で注水	ガードベッセル等の静的機器で液位確保

軽水炉とSFRの特徴比較②

機器の構造健全性に関する事項

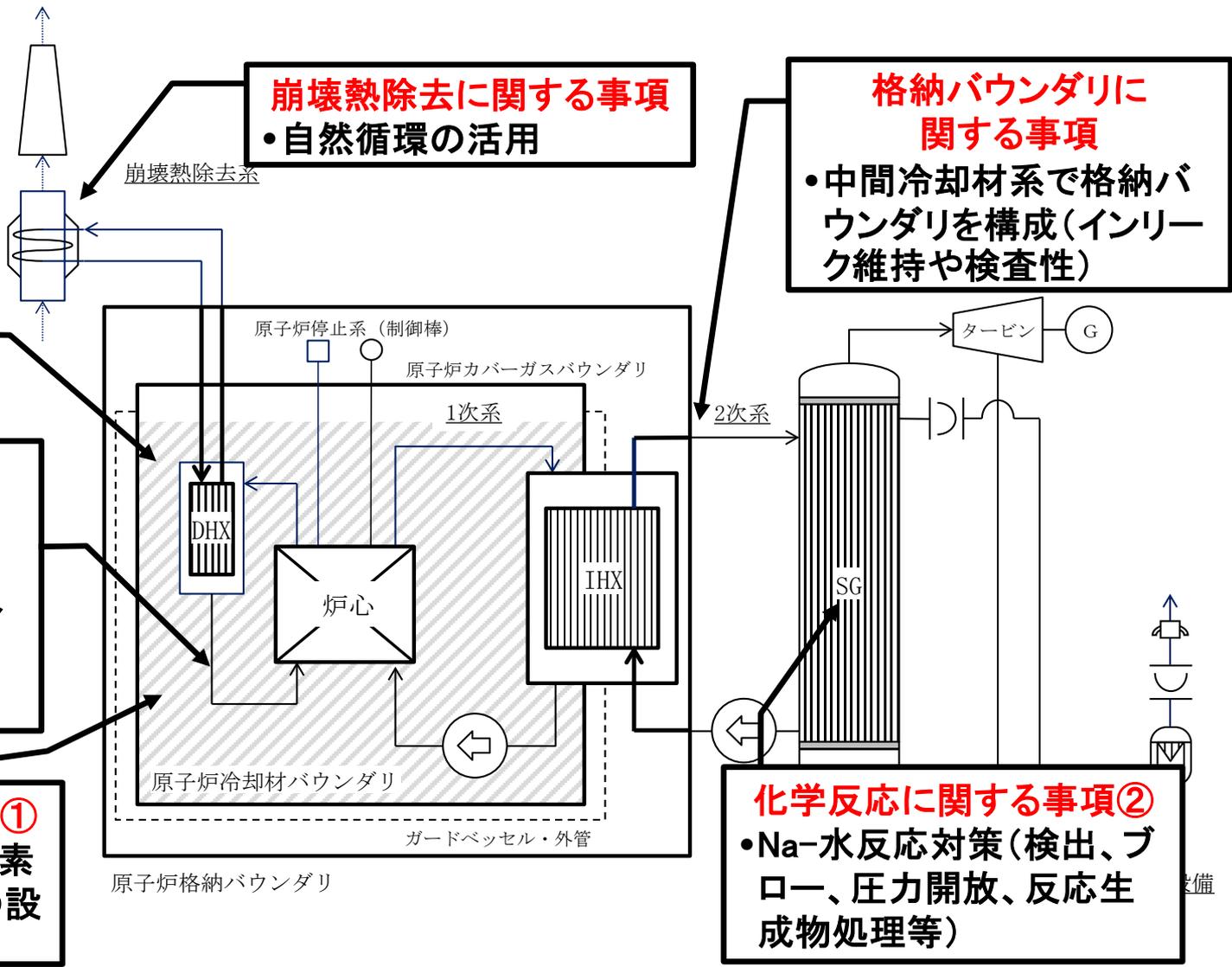
- 高温・低圧（熱膨張、クリープ特性、温度変化に伴う応力）

1次冷却材系に関する事項

- カバーガスバウンダリ
- ガードベッセル（及び外管）による液位確保

化学反応に関する事項①

- Na漏えい燃焼対策（窒素雰囲気化、防護構造の設置等）



崩壊熱除去に関する事項

- 自然循環の活用

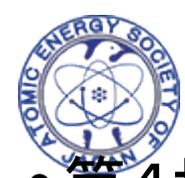
格納バウンダリに関する事項

- 中間冷却材系で格納バウンダリを構成（インリーク維持や検査性）

化学反応に関する事項②

- Na-水反応対策（検出、ブロー、圧力開放、反応生成物処理等）

設備



系統別SDGLレポート(ドラフト)

- 第4世代SFRの特徴に応じた14項目を展開したガイドラインを炉心系、冷却材系、格納系について構築
- 各国設計に対して共通に適用される事項を主文とし、各国設計に特有な事項を付属書及び添付資料でカバー。

1. はじめに

- 1.1. 背景及び目的
- 1.2. 系統別安全設計ガイドラインのスコープと構造

2. 炉心系のガイドライン

- 2.1 炉心燃料の健全性確保
 - 2.1.1 燃料要素及び燃料集合体
 - 2.1.2 炉心
- 2.2 反応度制御
 - 2.2.1 能動的炉停止系
 - 2.2.2 DEC時の炉停止

3. 冷却材系のガイドライン

- 3.1. 設計における全般的考慮事項
- 3.2. 1次冷却材系
 - 3.2.1 機器設計
 - 3.2.2 原子炉カバーガスとそのバウンダリ
 - 3.2.3 原子炉冷却材の液位確保
 - 3.2.4 ナトリウム漏えい・燃焼に関する対策
- 3.3 崩壊熱除去系
- 3.4 2次冷却材系

4. 格納系のガイドライン

- 4.1 格納系及びそれらの安全機能
- 4.2 格納系の全般的設計根拠
- 4.3 事故状態に対する格納系の設計
- 4.4 試験及び検査

付属書

- 燃料特性(酸化物、金属、窒化物)
- 燃料集合体の機械設計
- 反応度係数
- ナトリウム-水反応
- 崩壊熱除去系
- 隔離弁の構成例

添付資料

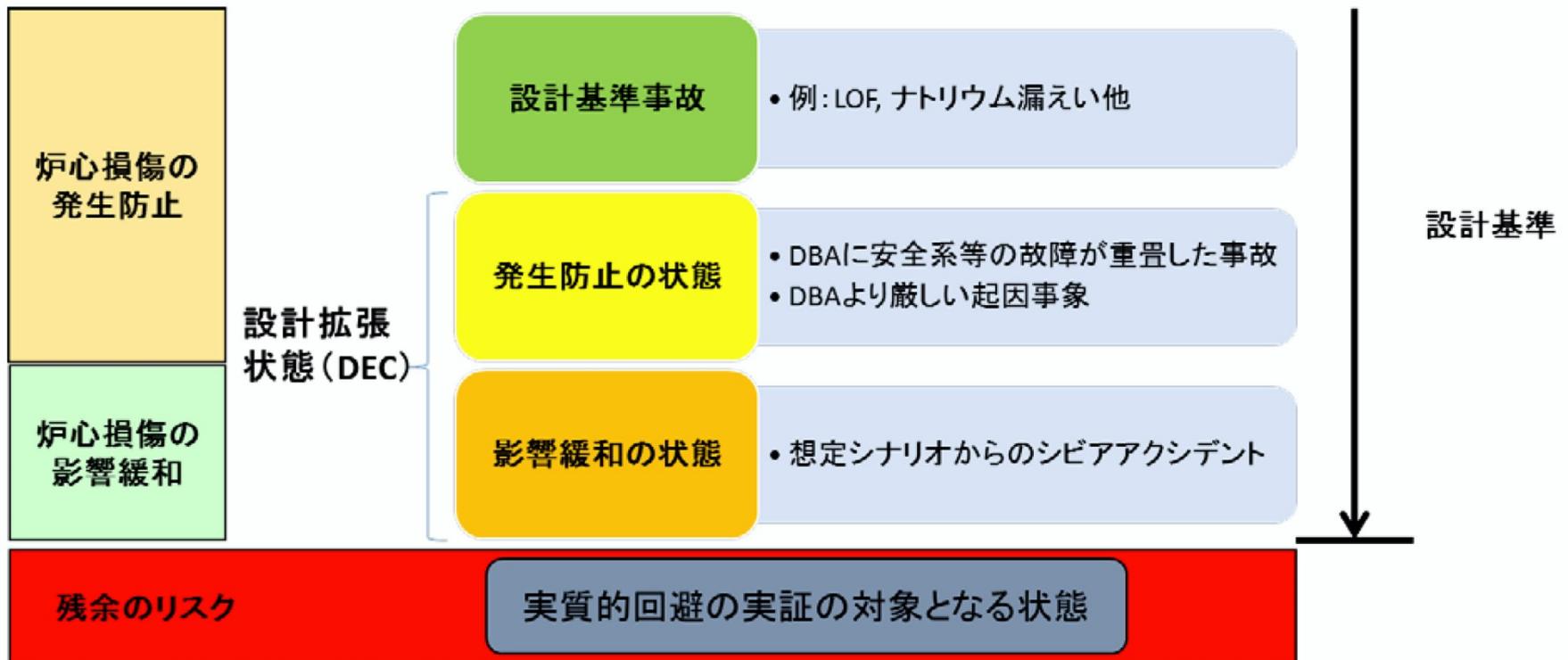
- 能動的な原子炉停止系
- 受動的反応度機構
- ナトリウム-水反応に関する設計対策
- 格納構造物の設計例

用語集



実質的な回避(Practical Elimination)

- 実質的に回避すべき事故状態: その影響が、早期又は大規模な放射性物質の放出をもたらし得る特定の状態で、かつ受諾できる条件での設計対処が為し得ない状態は、実装された設計対策により実質的に回避しなければならない。このような状態は、設計上の特徴により物理的に発生不可能か、あるいは高い確信度で発生可能性が極めて低いということが実証されなければならない。実質的に回避すべき状態は残余のリスクの一部である。





実質的回避すべき事故状態の例

- ◆ 格納容器の性能を上回る規模の機械的エネルギーの放出を伴う過酷な事象（炉心が健全な状態下での出力の異常上昇（出力運転時））
 - 大規模な気泡流の炉心通過
 - 大規模な炉心コンパクション
 - 炉心支持構造の崩壊

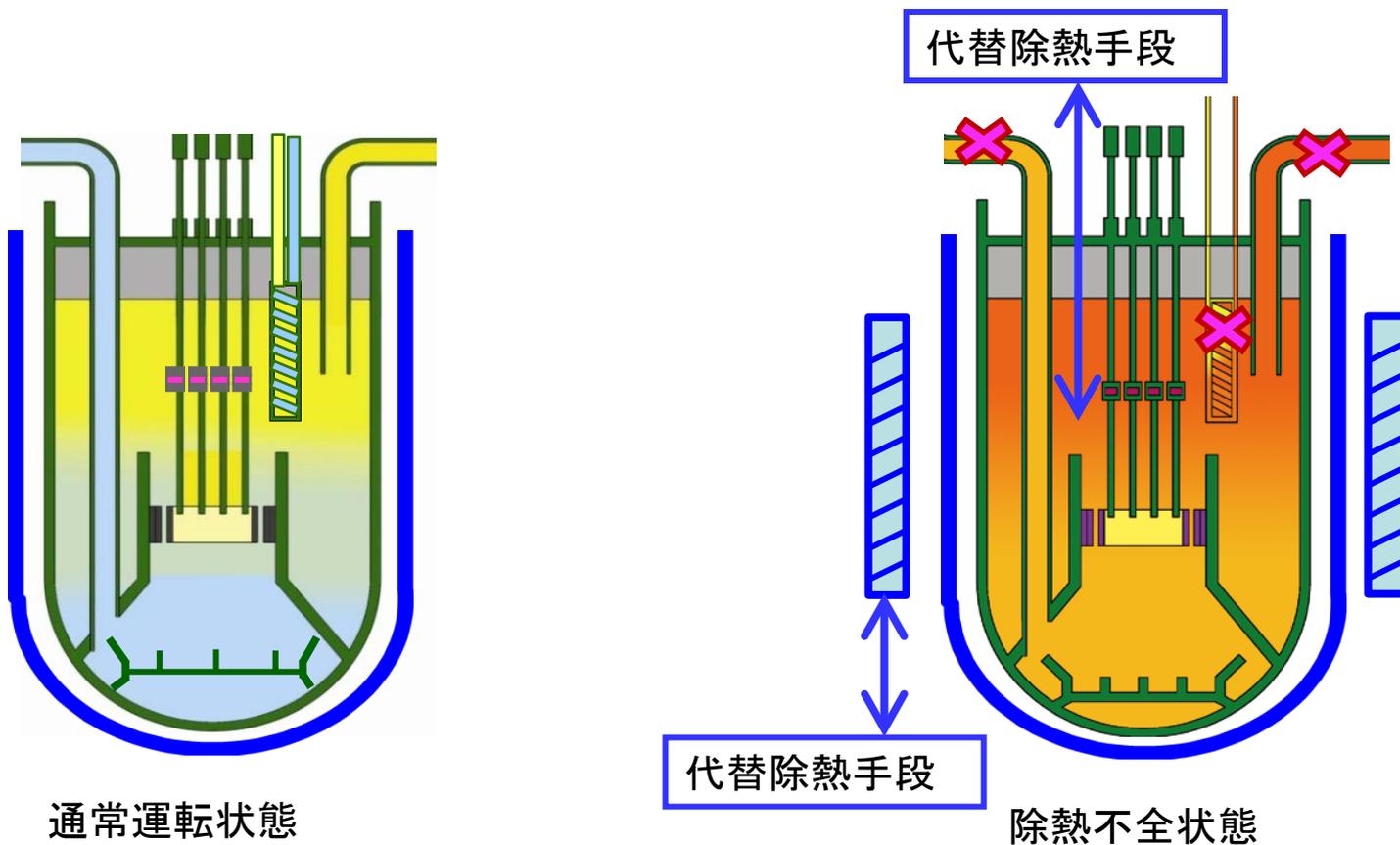
- ◆ 燃料損傷の危険性を伴う、格納容器破損に至る状態
 - 炉心損傷及び冷却材バウンダリ破損をもたらす崩壊熱除去機能の完全喪失
 - 冷却材液位喪失による炉心露出

- ◆ 燃料貯蔵施設内あるいはメンテナンスにより格納機能が動作しない状況における燃料破損

全除熱喪失と炉心露出の実質回避

設計基準に対応する除熱設備との共通要因で機能喪失しない、独立性の高い代替冷却設備で炉心冷却性を確保

炉心を満たすナトリウムは、原子炉冷却材バウンダリを構成する原子炉容器とバックアップとなるガードベッセルで保持



通常運転状態

代替除熱手段

除熱不全状態



崩壊熱除去の信頼性確保(多重性・多様性)

• 想定事象

- 崩壊熱除去機能喪失に至る外部事象(地震、竜巻、飛来物、極端な大気温度、津波、洪水等)の影響を設計上考慮する
- 外部電源喪失や動的機器の単一故障を考慮してもAOOやDBAに対して十分な炉心冷却機能を維持する

• 多重性・多様性

- 単一故障基準を満足するための多重性に加え、系統構成に多様性を持たせることを考慮する
- 物理的障壁又は物理的分離あるいは両者の組み合わせの考慮

• 凍結防止

- 待機運転時も微小流量による循環を可能とする
- 長期に亘る崩壊熱除去時はナトリウムの強制循環力を確保し、空気冷却器内での凍結防止を図る

AOO: Anticipated Operational Occurrence

DBA: Design Basis Accident

DEC: Design Extension Condition



崩壊熱除去の信頼性確保(多重性・多様性)

• DEC対策(機能拡張、代替冷却手段)

- DBAよりも過酷な事象、厳しい内部及び外部ハザード、長時間の非常用電源の機能喪失等を想定しても崩壊熱除去機能を確保
- 崩壊熱除去系(例: DRACSとPRACS)の機能を拡張
 - 崩壊熱除去系が故障した場合の回復操作が行えるように設備設計する。
 - 事故管理方策の手順を定める(エアーダンパの手動操作、代替電源の活用等)
 - 事故管理方策を実施するための時間的余裕や作業環境の維持
 - DEC事象に対する除熱容量の確保
- 崩壊熱除去系とは独立した代替冷却手段を導入
 - 共通要因故障により崩壊熱除去系とは同時に機能喪失しないこと (独立したループ構成、配置分離、防護障壁等)
 - 除熱容量とシステム構成はDECに対する設計限界を超えないこと

• 試験・検査性

- 原子炉の通常出力運転中の動的機器の定期機能試験

DRACS: Direct Reactor Auxiliary Cooling System

PRACS: Primary Reactor Auxiliary Cooling System



自然循環の活用

• 自然循環の適用方法

- ループの自然循環が喪失するレベルまで液位が低下した場合でも、原子炉容器内に設置する直接炉心冷却系による自然循環冷却を達成
- 崩壊熱除去機能の信頼度を向上させるため、崩壊熱除去系や、代替冷却手段に自然循環機能を適切に取り込む

• 1次系の考慮事項

- 過度な圧力損失の発生防止(弁を極力使用しない等)
- 出力運転状態から崩壊熱除去運転へのスムーズな移行

• 崩壊熱除去系の考慮事項

- 炉心と崩壊熱除去系熱交換器間の高低差の確保
- 十分なドラフト力確保のためのエアスタックの設置
- 最小限の設備(ダンパ等)による自然循環冷却の達成
- 現場の運転員操作による自然循環冷却の維持

• 配管設計に関する考慮事項

- 自然循環の活用を考慮した配管の配置設計

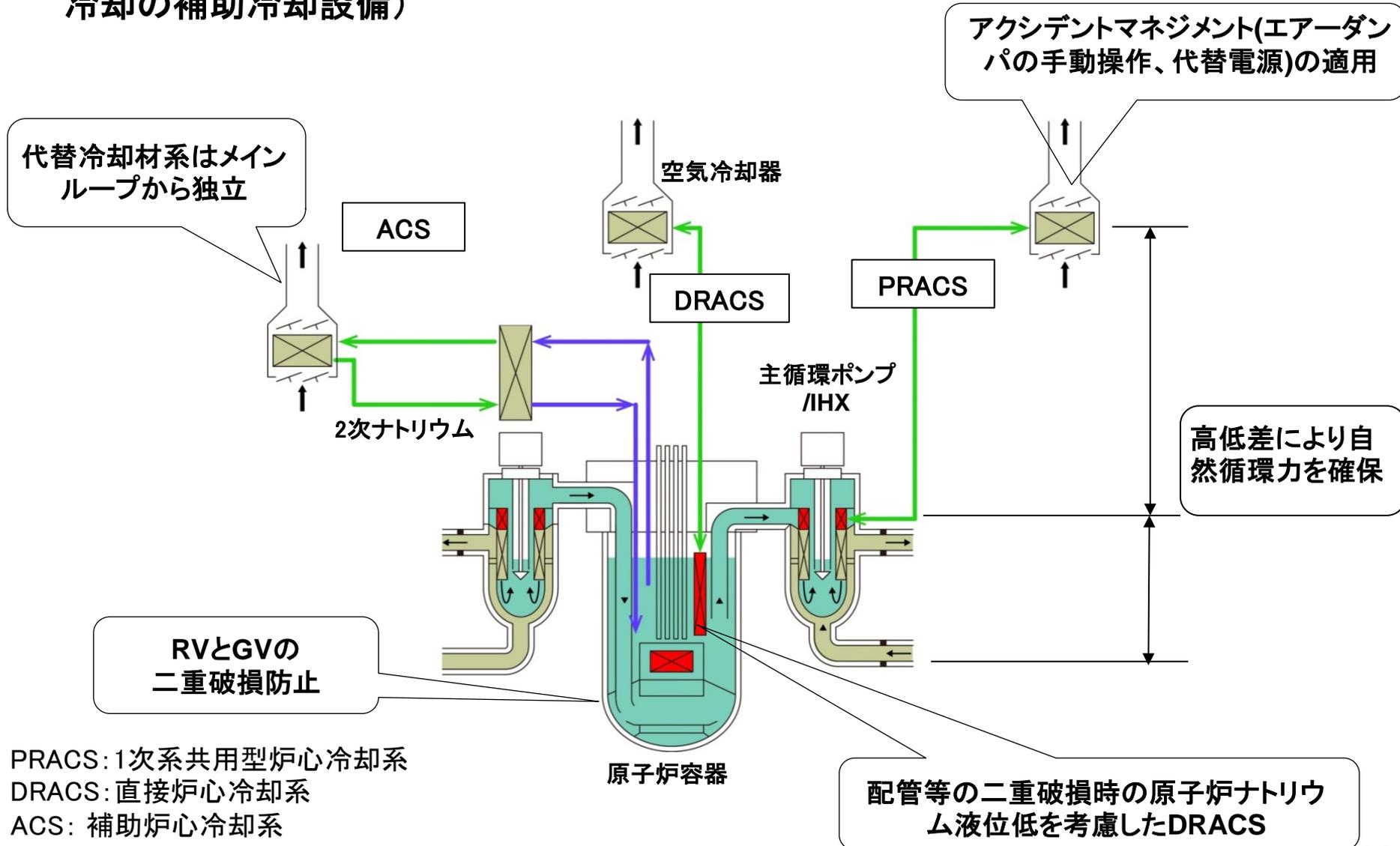
• 試験・検査性

- 自然循環除熱機能の確認(冷温停止状態から強制循環を終了させる場合の温度や流量の確認)



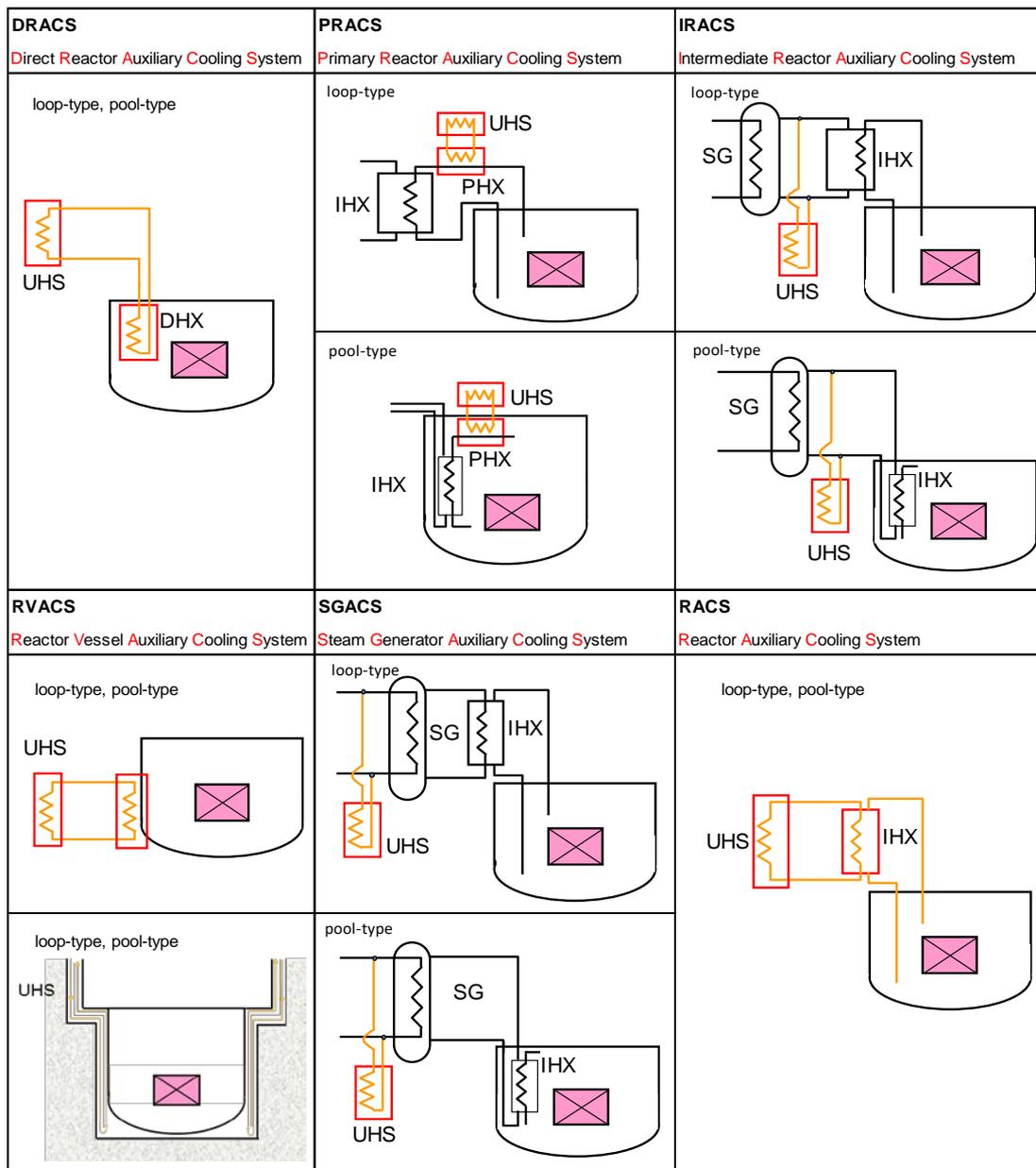
日本の次世代SFR設計概念

- DRACS、PRACSとその機能拡張、及び代替冷却手段(独立ループを構成する空気冷却の補助冷却設備)





崩壊熱除去系の系統構成のバリエーション





まとめ

- 炉心系、冷却材系、格納系の主要設備を対象とした第4世代SFRの安全設計ガイドラインを日本が主導して構築
- 第4世代国際フォーラムの検討タスクフォースへの日本案提示に先立ち、本委員会で検討を行い、有識者の意見を反映
- 全除熱喪失と炉心露出を実質回避するための設計推奨事項を具体化

本報告は、経済産業省からの受託事業である「平成27年度高速炉等技術開発」、「平成28年度高速炉国際協力等技術開発」及び「平成29年度高速炉の国際協力等に関する技術開発」の成果を含む。