



(2) 安全アプローチSDG案

JAEA

久保 重信



ご説明内容

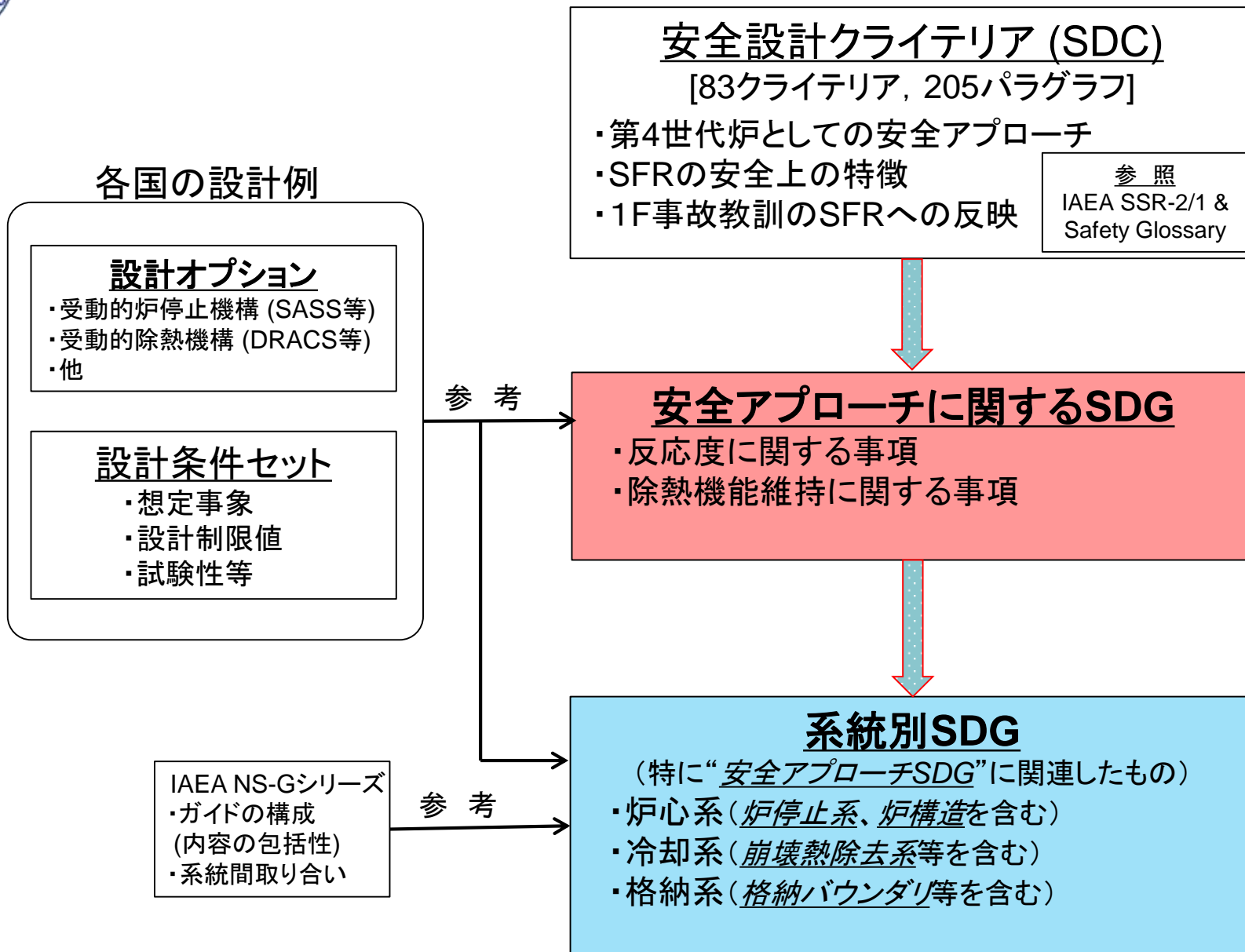
1. 安全アプローチSDGの着眼点
2. SFRの特徴を考慮したDEC対策の考え方
3. 反応度問題に関するガイドラインの概要
4. 除熱喪失問題に関するガイドラインの概要



1. 安全アプローチSDGの着眼点



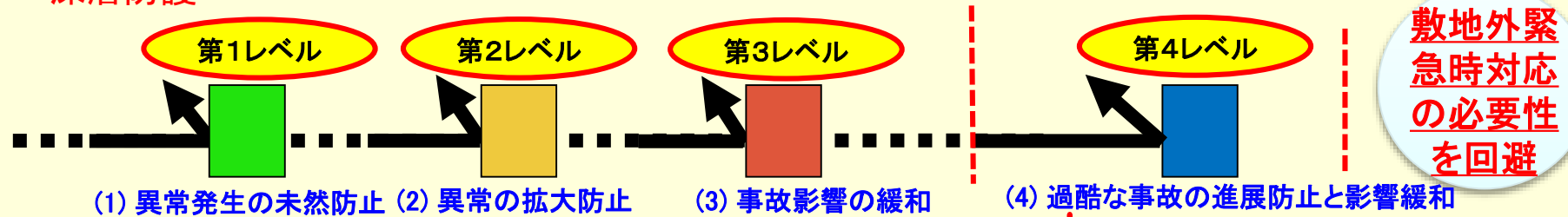
安全設計ガイドライン(SDG)の検討フロー



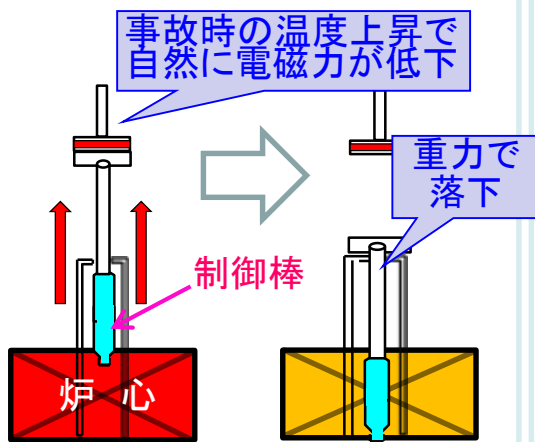
GIF SFRの安全確保の考え方[概要]

- ▶ 第4世代炉の国際標準としての高い安全性を確保。
- ▶ 深層防護の第1～3レベル強化による高い信頼性・安全性と、第4レベル強化による頑健な安全設計。
- ▶ 過酷な事故への設計対応として、受動的な安全機能及び重大な炉心損傷に対する設計対策を導入。
 - 「止める」に加えて、**自然に止まる機能**
 - 「冷やす」に加えて、**自然に冷える機能**
 - 「閉じ込める」に加えて、原子炉容器内・格納容器内で**自然に終息する機能**

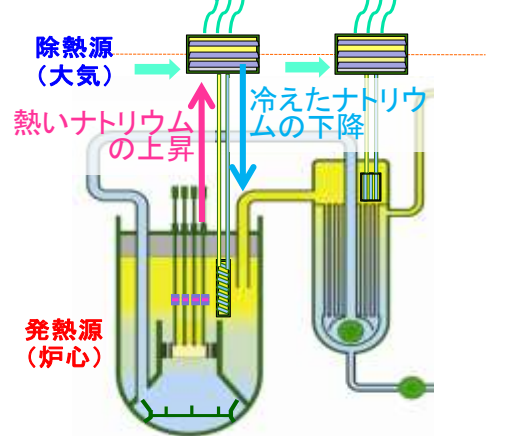
■ 深層防護



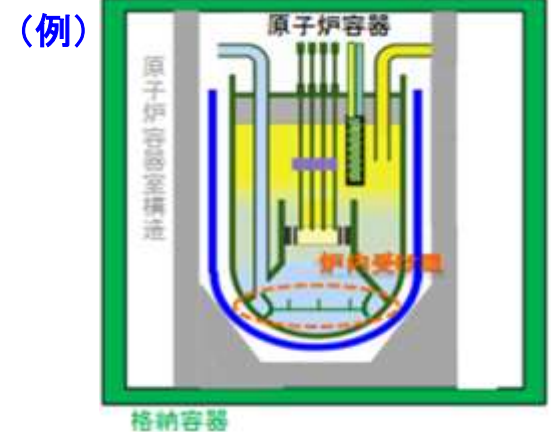
止まる



冷える



閉じ込める



▶ 異常時は、制御棒が自然に落下

▶ ナトリウムの自然循環と大気への放熱で冷却

▶ 燃料が溶けても原子炉及び格納容器で閉じ込め



安全アプローチSDGの着眼点

DECに対する設計については、想定すべき事象とそれに対する対策がプラント設計に与える影響は大きく、国際標準化のニーズが高い。

「安全アプローチSDG」としては、DECのうち、特に、SFRの炉心の反応度特性に関連した炉心損傷の防止と炉心損傷後の影響緩和に関する事項、ナトリウムを冷却材とする特徴に関連した除熱機能に関する事項に着目した検討が行われている。

DiD レベル1	DiD レベル2	DiD レベル3	DiD レベル4	DiD レベル5
プラント状態(設計上考慮)				
運転状態 Operational states		事故状態 Accident conditions		
通常 運転 状態 Normal operati on	運転時の異常 な過渡変化 Anticipated operational occurrences (AOOs)	設計基準事故 Design Basis Accidents (DBAs)	設計拡張状態 Design Extension Conditions (DECs) (シビアアクシデ ントを含む) (Including Severe Accidents)	サイト外 緊急時 対応 (設計外)

DiD: Defence-in-Depth(深層防護)

出典)「IAEA安全要件「原子力発電所の安全:設計」SSR2/1」を基に作成



2. SFRの特徴を考慮したDEC対策の考え方



軽水炉と比較した高速炉の特徴

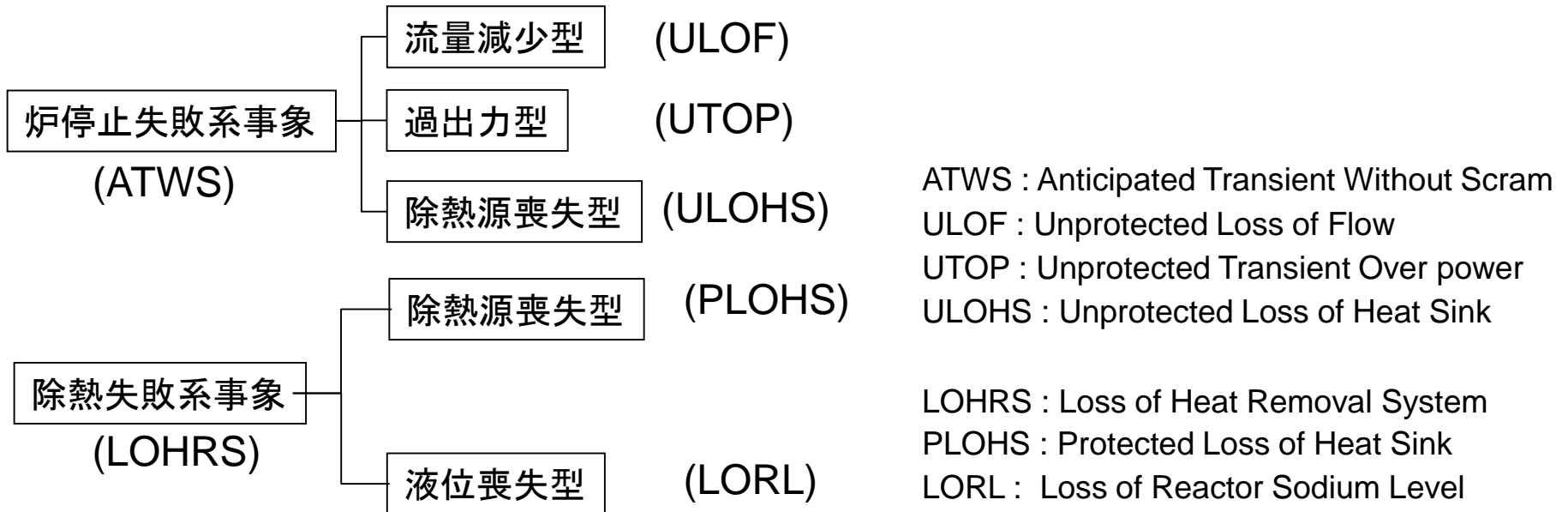
	軽水炉	ナトリウム冷却高速炉
炉心・燃料特性	<ul style="list-style-type: none">最大反応度体系冷却材喪失及び燃料溶融時に大きな正反応度挿入なし	<ul style="list-style-type: none">最大反応度がない体系炉心中心領域でNaボイド反応度正溶融燃料の集中で大きな正反応度
冷却材の特性	<ul style="list-style-type: none">水✓ 熱伝導率低✓ 低沸点 100°C(大気圧) 345°C(16MPa)✓ 化学的活性小	<ul style="list-style-type: none">Na✓ 熱伝導率高✓ 高沸点 883°C(大気圧)✓ 化学的活性大
原子炉冷却系圧力	<ul style="list-style-type: none">高圧(70~150気圧)	<ul style="list-style-type: none">大気圧と同程度(数気圧以下)
材料の使用環境	<ul style="list-style-type: none">比較的低温熱中性子場水冷却材	<ul style="list-style-type: none">高温(300~600°C)高速中性子場Na冷却材



炉心損傷事故の特徴(1/2)

SFRの炉心損傷事故は、
炉停止失敗系事象(ATWS)と除熱失敗系事象(LOHRS)に大別される。

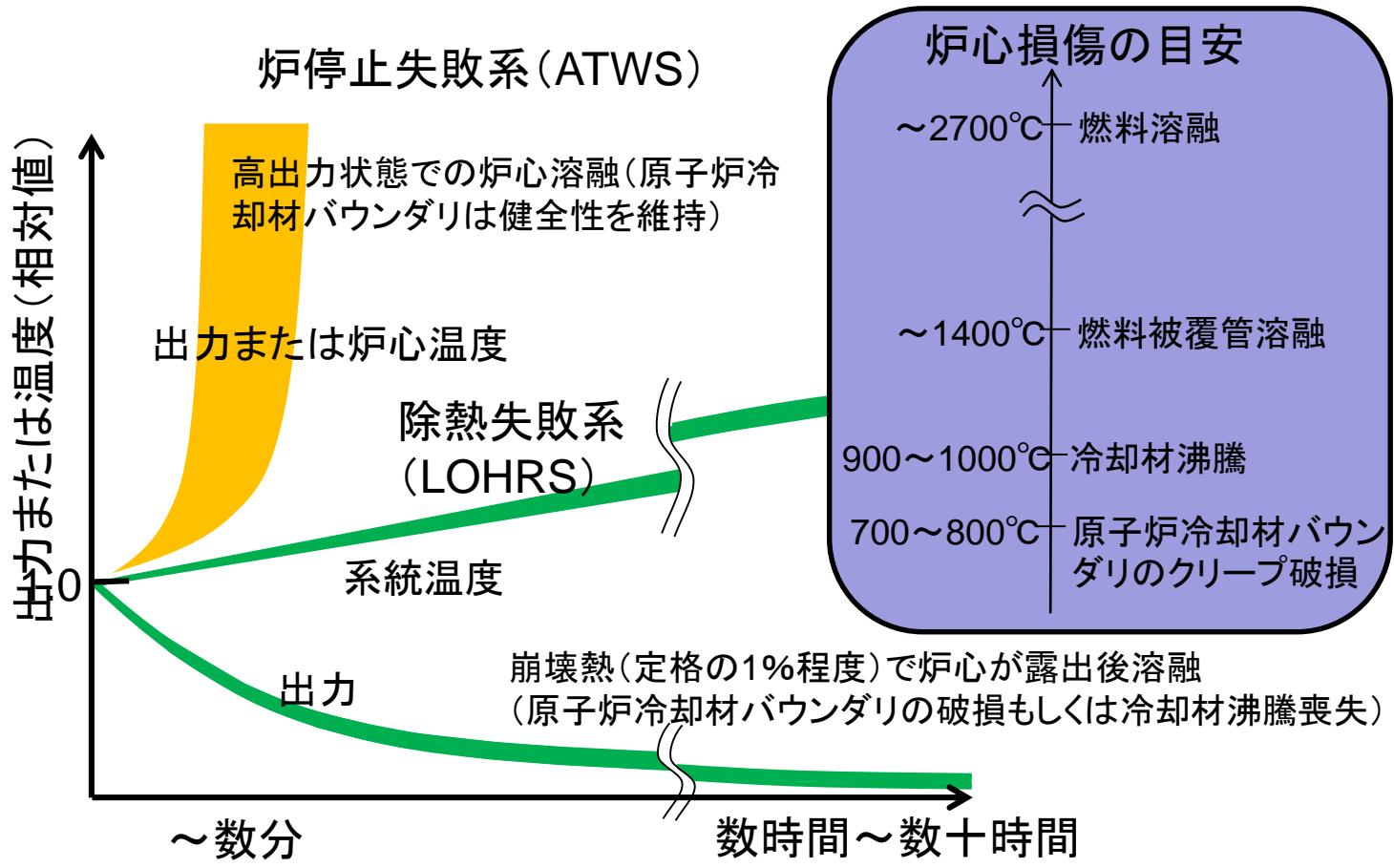
炉心損傷事象の分類





炉心損傷事故の特徴(2/2)

事象推移は、ATWSとLOHRSで大きく異なるため、それぞれの事象の特徴に応じた対策が必要





反応度問題、除熱喪失問題とは？

- ナトリウム冷却高速炉(SFR)の特徴を踏まえて、設計基準事故や設計拡張状態に関する安全設計ガイドラインを構築するにあたって着目すべき事項
- 反応度問題: SFRの炉心は最大反応度体系にないこと
→ 炉停止失敗からの炉心損傷に対してどのように設計対策すべきか(ATWS対策)
- 除熱喪失問題: SFRではナトリウムの液位確保と炉心とヒートシンク間の循環によって崩壊熱を除去 → 除熱喪失からの炉心損傷に対してどのように設計対策すべきか(LOHRS対策)



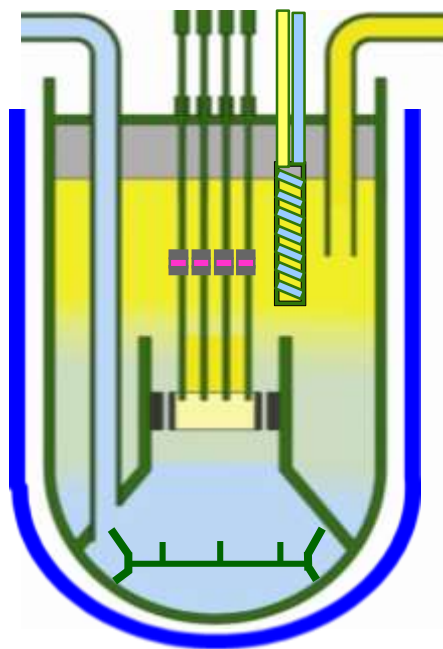
DECに対するアプローチ

- SFRの特徴を考慮して、決定論的に選定・評価（PRAを参照）
 - カテゴリ1（炉心損傷防止）
 - 事象シーケンスを追跡し安全機能の失敗要因を分析
 - カテゴリ2（格納機能確保）
 - 炉心損傷時の影響緩和または、炉心損傷への進展の緩和
 - 異常の進展の結果として至りうるプラント状態からの事象推移を分析
- クリフエッジの防止（大規模放出に至りうる事象を実質排除）
- 受動的機構または固有特性の活用
- Built-inを基本とするがAMも必要に応じ取り入れる
- 原子炉容器内終息（IVR）の追求

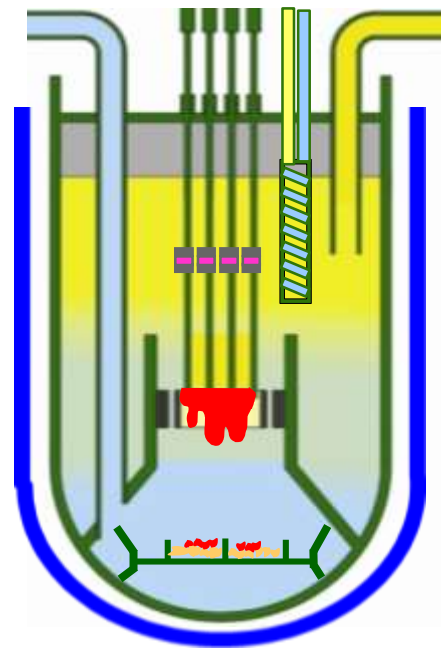


原子炉容器内保持 (IVR) の追求 (1/2)

ナトリウム冷却高速炉では、液体ナトリウムを保持して炉心冷却を維持する原子炉容器内事象終息 (IVR: In Vessel Retention) が重要であり、軽水炉と異なる IVR の概念と設計要件を国際的な SDC/SDG に取り入れることが重要

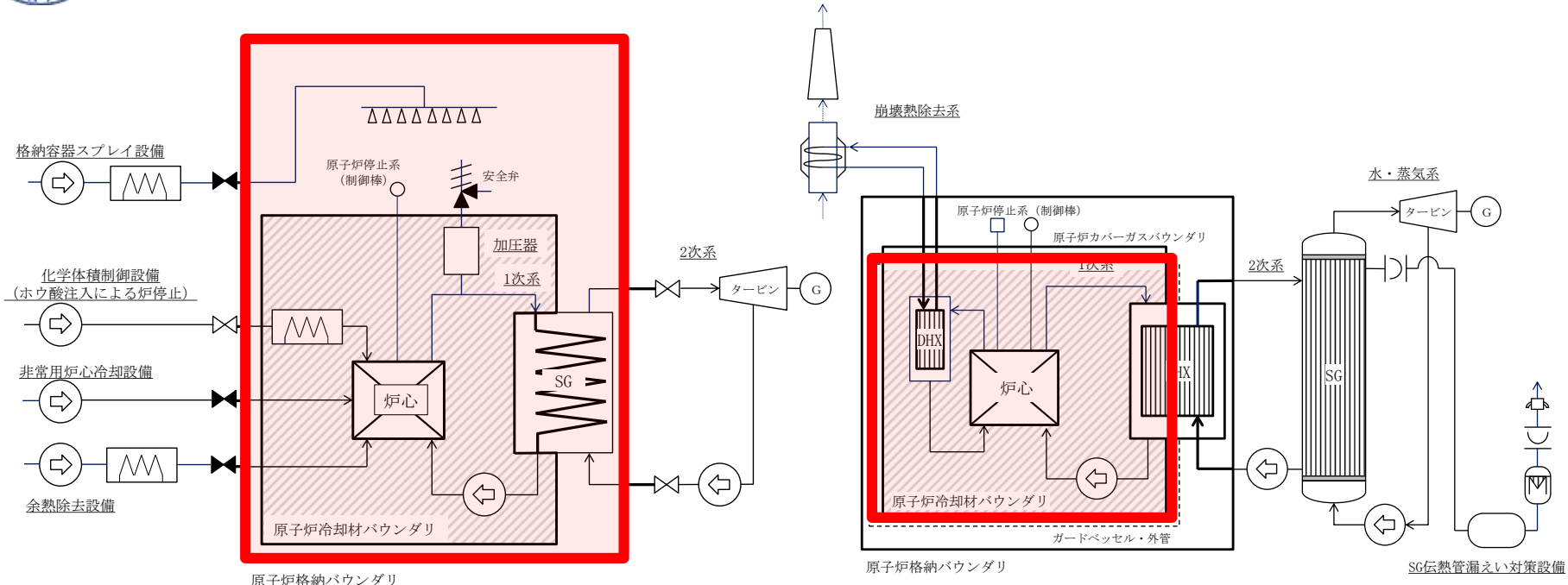


通常運転状態



炉心損傷時のIVR

原子炉容器内保持 (IVR) の追求(2/2)



PWRの冷却系概念

SFRの冷却系概念

	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
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冷却材確保



3. 反応度問題に関するガイドラインの概要



ATWSに対する要件

- カテゴリ1: 動的な炉停止失敗時に、受動的な炉停止機構または、固有の反応度フィードバック特性により炉心損傷を回避して炉停止できること。
- カテゴリ2: 炉心損傷を想定しても、エナジェティクスを防止して、原子炉冷却材バウンダリの機械的破損を防止すること。冷却性及び格納機能を確保すること。



受動的炉停止に関する要件(カテゴリ1)

- 自然現象に応答して作動すること(検出系と外部動力を不要とする)
- ATWS3事象(LOF、TOP、LOHS)に対して有効な対策を揃えること
- 動的炉停止機能の異常の影響を受けないこと
- 通常運転の妨げとならないこと、異常の起因とならないこと
- 炉停止達成と維持、作動後のプラント状態の監視ができること



固有の反応度フィードバックに関する要件 (カテゴリ1)

- ATWSに対して固有反応度特性で炉停止する場合、炉心出力係数、温度係数、出力／流量比係数が負でなければならない。
- 固有の反応度フィードバックで出力を除熱とバランスさせるとともに、炉停止達成のための手段を設けること。
- ULOFにおいては、冷却材温度係数は主要な正の反応度要因となりうるので、炉心径方向膨張等の負の反応度効果によって補償できる範囲に抑制すべきである。この観点から、ナトリウムボイド反応度は正であっても良いが適正に制限されるべきである。



炉心損傷時の影響緩和(IVR達成)の要件(カテゴリ2)

設計に依存して幅広い事故スペクトルが考えられるが、事故の過程は凡そ以下のよう
に分類できる。

- 起因過程: ラツパ管が破損するまで
- 遷移過程: 安定冷却状態におちつくまで
- 事故後冷却過程: 長期冷却状態

起因過程

冷却材沸騰と燃料破損による即発臨界を防止すること ($\rho_{\text{net}} < 1 \$$)。このため、
正の冷却材ボイド反応度は、ドップラー、燃料軸方向膨張、破損燃料の分散の反
応度によって打ち消されること。

遷移過程

溶融燃料のコンパクションによる即発臨界を防止すること ($\rho_{\text{net}} < 1 \$$)。このた
め、溶融燃料の炉心外への排出、中性子吸収材の炉心への混入、破損燃料の
炉心内での冷却等の手段を講じること。

原子炉容器内で安定冷却状態に移行すること。

事故後冷却過程

損傷炉心を再臨界を防止しつつ原子炉容器内で安定冷却状態で保持すること。
長期冷却のためのヒートシンクと冷却パスを確保すること。

原子炉冷却材バウンダリは損傷炉心物質からの熱負荷と燃料と冷却材の熱的相互
作用(MFCI)によって発生する圧力を含む機械的荷重に耐えること。



4. 除熱喪失問題に関するガイドラインの概要



PLOHSに対する要件

- カテゴリ1: 設計基準事象に対応する崩壊熱除去系の機能拡張、あるいは、代替手段により炉心損傷と原子炉冷却材バウンダリの過熱破損を防止して冷却できること。→設計基準を超える状態においても崩壊熱除去機能が確保できるようにする。
- カテゴリ2: 上記の冷却失敗によって発生するプラント状態を想定しても、別の代替手段により冷却性及び格納機能を確保すること。→「別の代替手段」は、カテゴリ1が機能しない場合でも機能すること。
- 極端な外部ハザードとその影響(長期の全交流電源喪失状態等)の考慮、受動的熱除去能力の活用、多様性確保等
- 除熱手段が完全に喪失する状態を実質回避(Practically eliminate)して、冷却を確保



LORLに対する要件

- カテゴリ1: 原子炉容器とガードベッセルの信頼性を確保して2重漏えいを防止すること、ループ側の漏えいを想定しても冷却性を確保して炉心損傷を防止すること。
- カテゴリ2: 上記の失敗によって発生するプラント状態を想定しても、炉心露出を防止すること。(カテゴリ1の失敗が実質回避できる場合は不要)
- 炉心が露出する状態を実質回避 (Practically eliminate) して、冷却を確保



実質的な回避

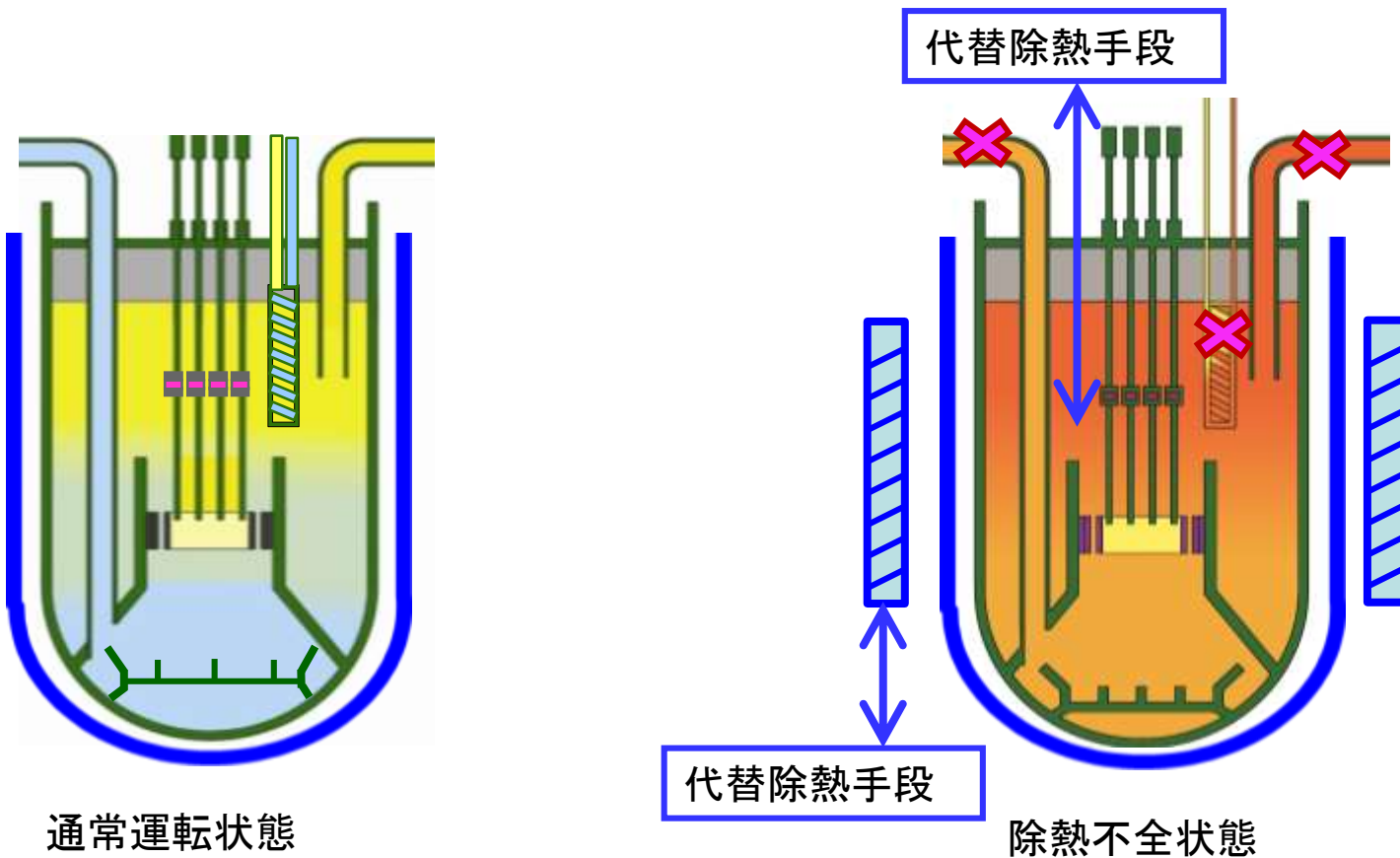
- 大規模な放射性物質の放出となる可能性がある炉心損傷を伴う状態で、それが発生した場合、それを緩和するための合理的な設計対策が困難なものについては、物理的に発生しないか、又は高い信頼度で極めて発生し難いと考えられるように設計対策を施すこと。



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



崩壊熱除去設備の多重性、多様性、独立性

多重性

- 例えば、起因事象として1系統故障、長期間運転における静的機器の単一故障を考慮すれば、 $100\% \times 3$ 系統または、 $50\% \times 4$ 系統

多様性と独立性

- 物理的に起こりうる阻害要因に対して機能確保できること
 - 運転モード(強制循環と自然循環)
 - 位置的分離、構造的分離
 - システム構成(DRACS, PRACS等の組み合わせ)
 - 機器設計
- 独立性の高い代替除熱手段の確保(カテゴリ2)

事故管理方策の適用

阻害要因

- 内的／外的ハザード：地震、強風、火山灰降下、異常気象、外部飛来物、内部飛来物、外部火災、内部火災等
- 長期の全交流電源喪失
- ナトリウムの凍結
- 多重故障等の厳しい内的事象



原子炉容器とガードベッセルの2重破損の実質回避

原子炉容器(RV)とガードベッセル(GV)は、最高レベルの信頼性を有するように、設計・製作・設置・維持・検査されること。

• 従属故障の防止

- GVは、原子炉容器からのナトリウム漏えいに起因する熱負荷に耐えること。
- GVは、漏えいナトリウムを長時間保持する状態下で、地震などの機械的負荷に耐えること。
- GVは、破損したRVによって発生しうる干渉に耐えること。(熱膨張や地震による振動等を考慮)

• 共通要因故障の防止

- RVとGVの支持構造を実行可能な限り分離すること。もしくは、支持構造の共通部分の故障を防止すること。
- 製造時の共通要因による構造欠陥を防止すること。
- 地震を含む内的／外的ハザードに対し十分な余裕を確保すること。



まとめ

安全アプローチSDGとして、SFRの特徴を考慮したDEC対策の考え方と反応度問題／除熱喪失問題に対するガイドラインの構築を進めている。

- ・ DEC対策の考え方: Built-inの設計対策、受動／固有の安全特性、IVR
- ・ 反応度問題(炉心損傷防止): ATWS3事象(LOF、LOHS、TOP)に対して有効な受動または固有の炉停止機能を揃える
- ・ 反応度問題(炉心損傷時の影響緩和): 冷却材の沸騰、溶融燃料集中化による機械的エネルギー発生を防止、原子炉冷却材バウンダリ機能と損傷炉心冷却機能を確保(IVR)
- ・ 除熱喪失問題: 全除熱喪失と炉心露出を実質回避するため、物理的に起こりうる阻害要因に対して機能確保、特に、独立性の高い代替手段を確保