



総合講演・報告3

「第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計クライテリア」特別専門委員会報告

# (3) 主要な論点についての考え方

東海大学  
可児 吉男



# 論点の背景

- 第4世代炉に対する安全性・信頼性に関する高位目標の特徴「敷地外緊急時対応の必要性を生じないこと」→深層防護の第4レベルの設計拡張状態に対する発生防止と影響緩和の強化
  - － 設計拡張状態の考え方とSFRへ適用した場合の主要安全設備への設計要求
    - 受動系の活用の考え方及び冗長性と多様性の要件
    - 事故管理方策の考え方
    - 従来の設計基準を超える厳しい外部起因事象に対する設計対策の考え方



# SDCの主要な論点

- 審議の過程において議論となった以下の事項について考え方を整理
  - 設計拡張状態の考え方とSFRへの適用(設計拡張状態と深層防護の関係、選定の考え方、設計方策が満足すべき要件、SFRへ適用した場合の個別系統設備への設計要求)
  - 受動系の活用の考え方(設計基準と設計拡張状態に対応するための受動系導入の必要性)
  - 冗長性と多様性の要件
  - 事故管理方策の考え方(built-inの設計と事故管理方策活用の関係、事故管理方策で想定するプラント状態の考え方)
  - 厳しい外部起因事象に対する設計対策の考え方



# 設計拡張状態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(PSA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)
    - 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)
- 受動的機構の活用
- Built-inを基本とするがAMも必要に応じ取り入れる



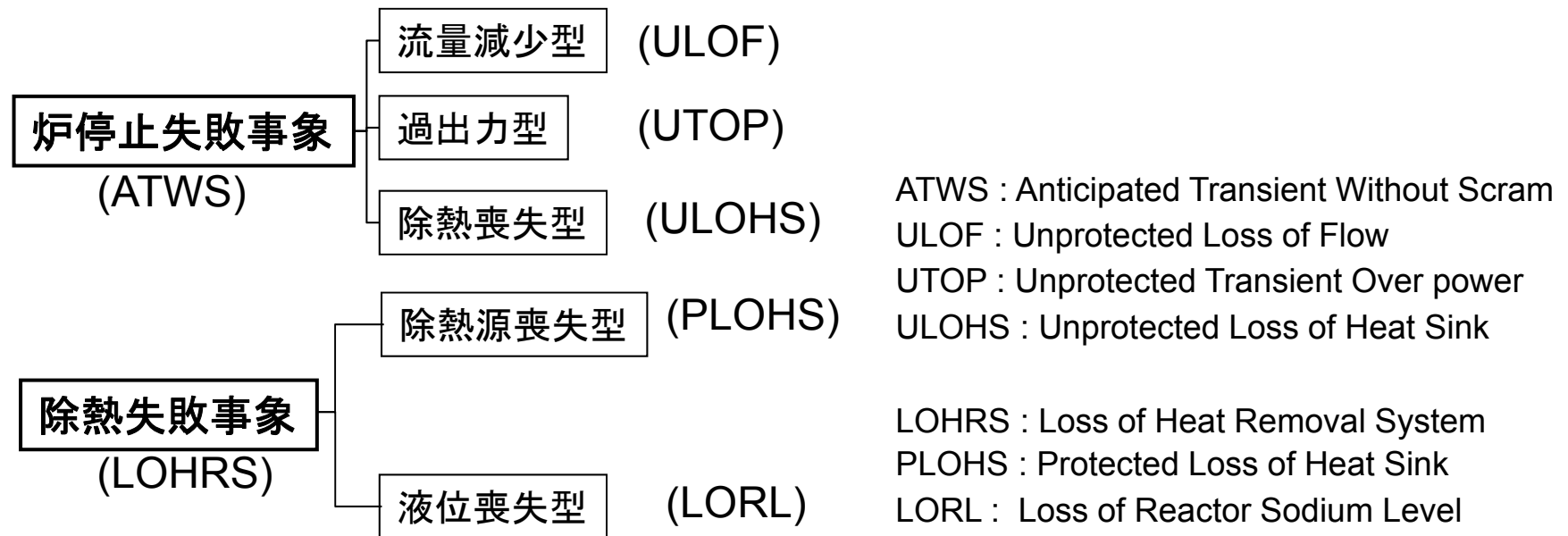
# クリフエッジの防止

- クリフエッジ効果：外力等のプラントパラメータがある閾値を超えることによってプラントの状態が急峻に変化し、厳しい異常な状態に進展すること、あるいはそのようなプラントの特性
- 多重障壁が一度に機能喪失し大規模放出に至る事態はクリフエッジ効果の顕在化に該当→このような事態に至らないように設計
- 発生を想定すると格納機能を確保しえない厳しい事象（例：厳しい再臨界による機械的エネルギー放出）については、個別の設計対策によって、その発生を実質的に排除
- SFRの設計の特徴を考慮して実質的排除すべき事象群及び、対応する設計対策が満たすべき要件を設定



# SFRのDEC(炉心損傷事象の類型化)

- SFRの特徴を考慮して、決定論的に選定・評価(PSAを参照)

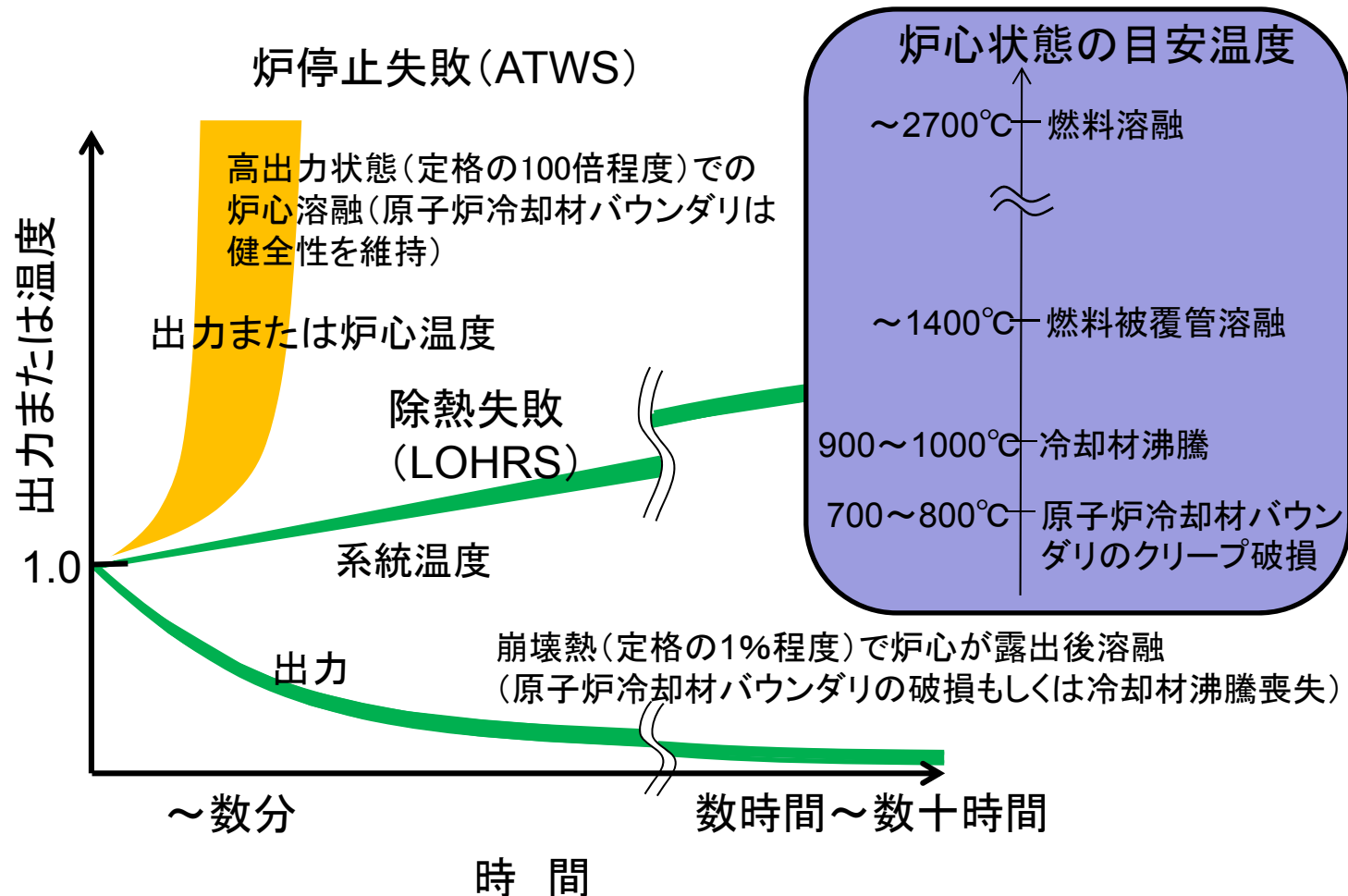


- 事象推移はATWSとLOHRSで大きく異なるため、それぞれの特徴に応じた対策が必要。



# SFRの炉心損傷事象の特徴

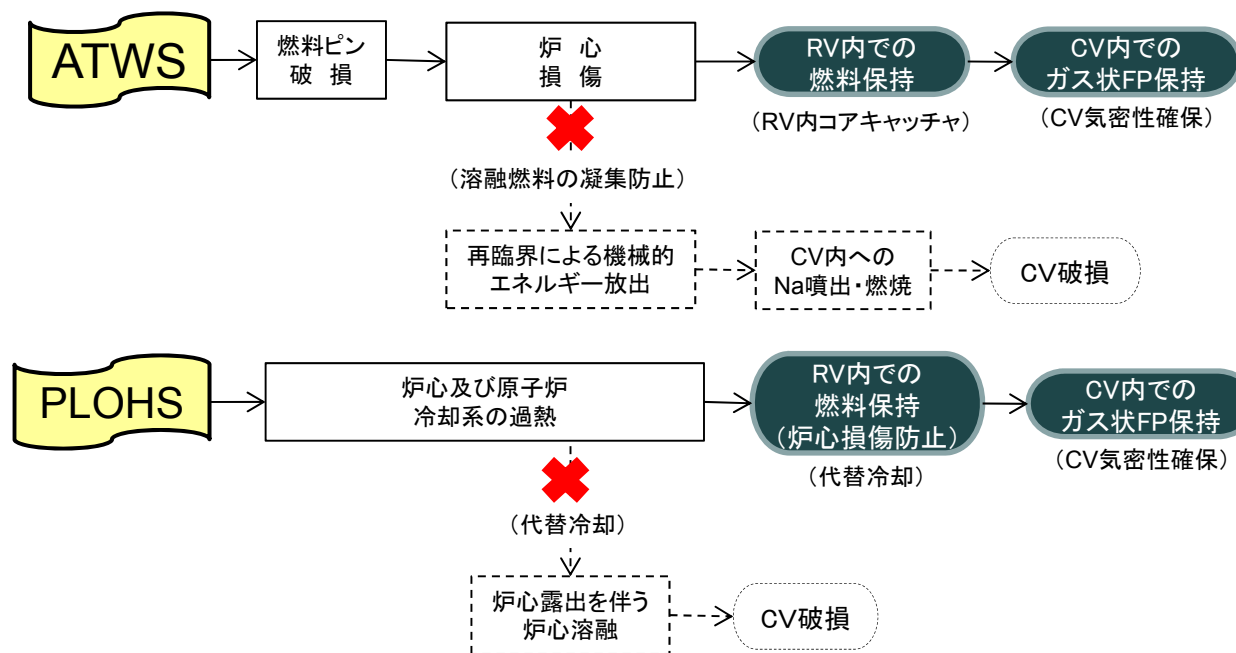
- ATWS: 短時間で炉心損傷の可能性
- LOHRS: 時間余裕大





# 想定状態ごとの基本的要件

- ATWS: 受動的炉停止と損傷炉心の格納(機械的エネルギー放出を設計対策により排除、損傷炉心の原子炉容器内保持)
- PLOHS: ナトリウムの自然循環の活用、多様な冷却手段の確保によって炉心冷却し格納機能を確保(炉心損傷防止)
- LORL: 静的機器の信頼性確保により炉心損傷を防止



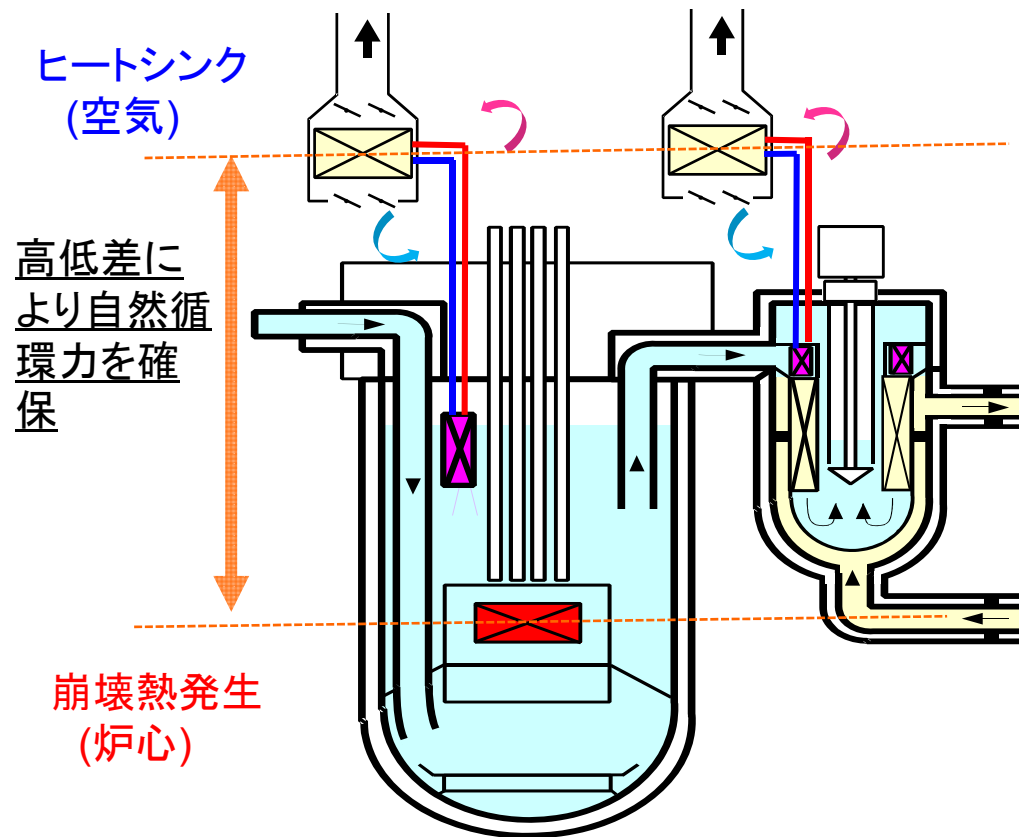




# PLOHS対策(1/3)

大気放熱する自然循環型の崩壊熱除去系を主体とした冷却システム

JSFR(実用化概念)の例



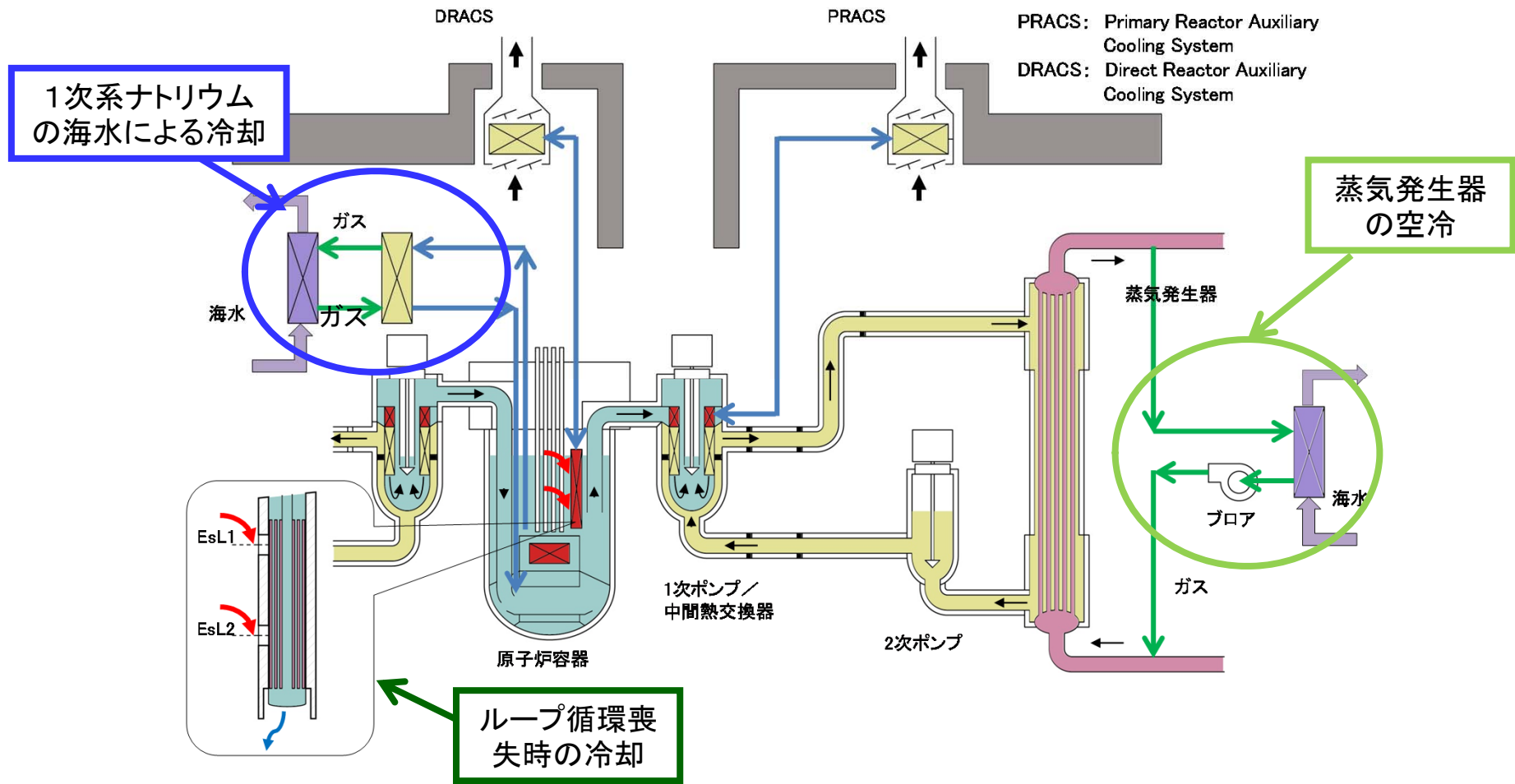
- 系統を切り替えることなく、炉停止直後から低温停止状態への移行、さらには長期間の冷却に対応することができる。
- 唯一の操作機構である空気冷却器のダンパーについては、多重化によるバックアップや手動操作を可能とすることで機能喪失を防止できる。
- 外部飛来物に対しては、建屋による防護と分散配置によって機能喪失を防止できる。



# PLOHS対策 (2/3)

SFRでは崩壊熱除去機能をさらに強化するため、様々な代替冷却手段をとらうる。

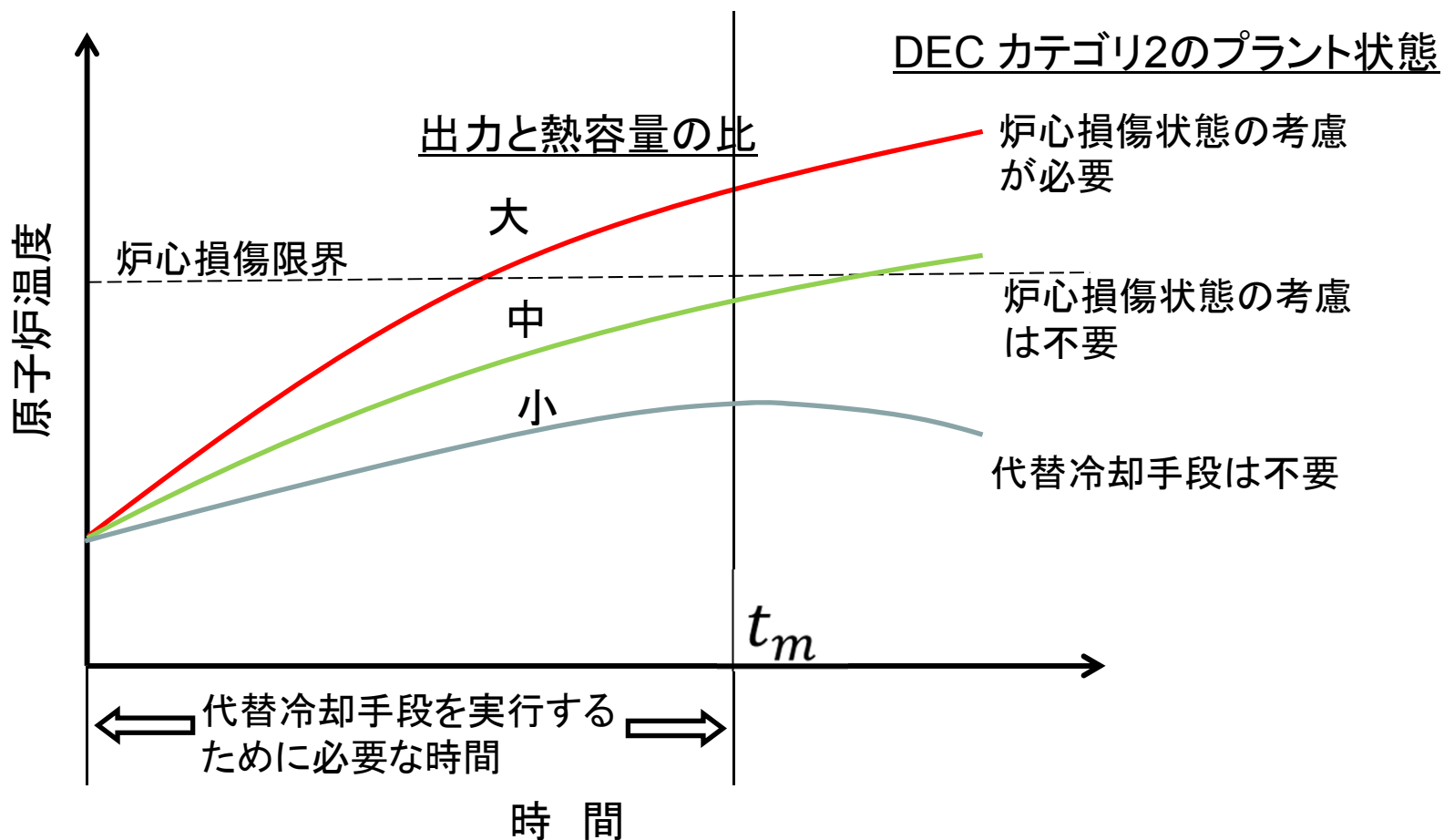
代替手段の例





# PLOHS対策(3/3)

プラントの出力／熱容量比と代替冷却手段実行に要する時間の関係に応じてカテゴリ2で想定すべきプラント状態は決定されるべき。





## 格納容器の耐性確保

- SFRでは、燃料破損に伴って水素が発生することはないが、漏えいナトリウムあるいは燃料デブリとコンクリートの接触によって水素が発生するため、漏えいナトリウムの大規模燃焼と合わせて、これらの事象を防止あるいは緩和することが格納機能確保上求められる。
- 具体的要件：
  - 原子炉容器の高圧破損：再臨界に伴う機械的エネルギーの発生を防止して、格納容器内への多量のナトリウムの噴出・燃焼、高温溶融物の噴出を防止
  - ナトリウムの大規模燃焼：冷却材バウンダリの大規模破損に伴うナトリウムの大規模スプレー燃焼を防止
  - 水素燃焼：ナトリウムとコンクリート、燃料デブリとコンクリートの接触を防止して、水素発生を防止
  - 雰囲気圧力・温度による静的負荷：格納容器構造物の耐荷重能力及び保持能力超過を防止



# 受動系の活用の考え方

- 既存の動的安全システム：冗長性と実現可能な範囲で多様性を取り入れ済→さらなる多様性強化のためには、動的安全システムに受動的方策を取り入れて両者を適切に組み合わせることが有効
  - 動的安全システム：即応性が高く、異常な過渡変化や事故時の影響を緩和する能力が高い。
  - 受動的方策はプラントの温度等の状態量がある程度逸脱した段階からその効果が現れ始めるため、応答がやや緩慢
- DBAに対しては主として動的安全システムで対応し、そこに受動的方策を取り入れることによって、動的安全システムが機能しない過酷なプラント状態においても、自然に原子炉停止し、崩壊熱が除去できるように設計することが適切



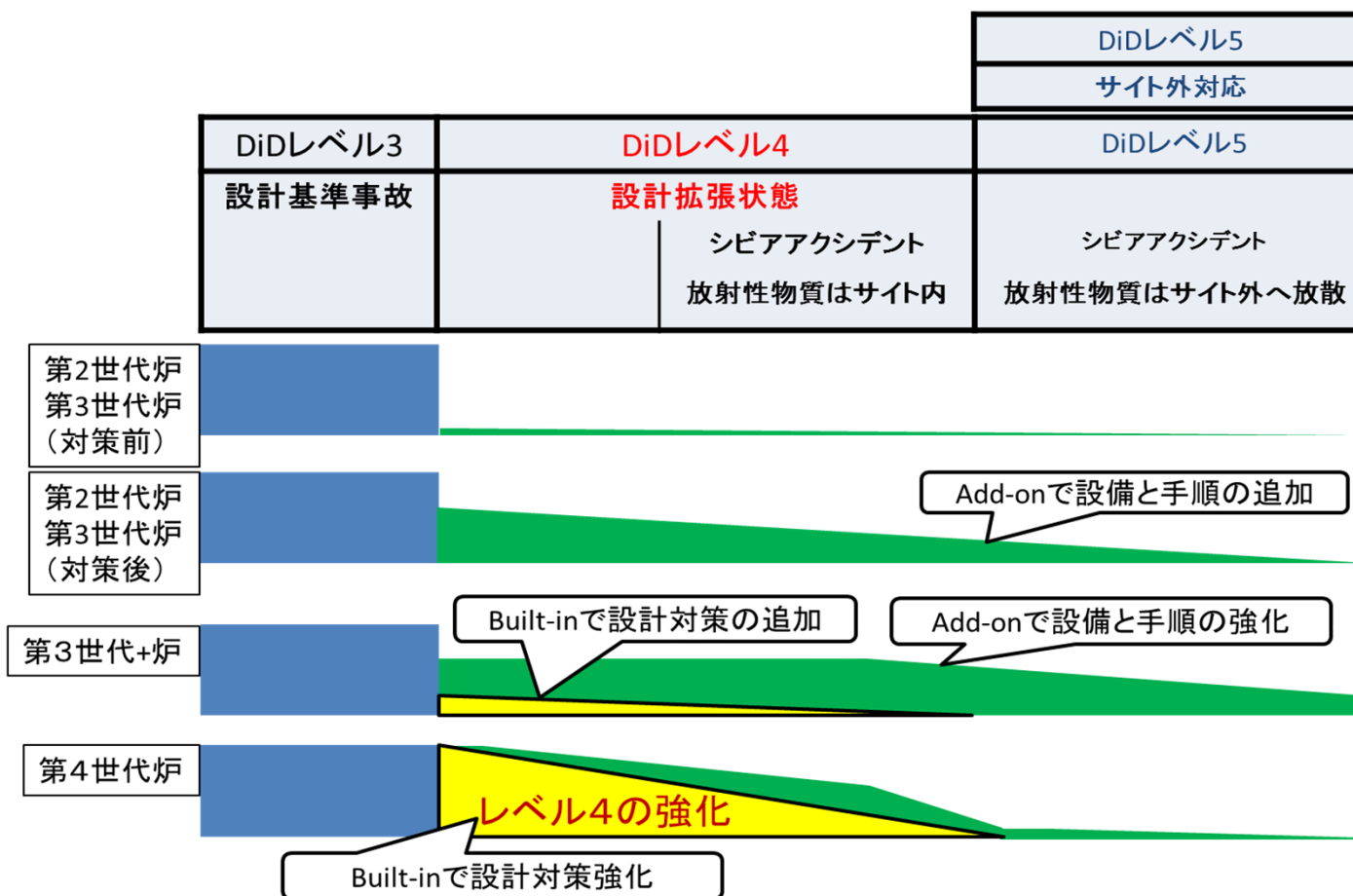
## 事故管理方策の考え方(1/2)

- 設計拡張状態への設計対策には、Built-inの設計対策に加えて、事故管理方策への対応を前提としたものが含まれる。
- 事故管理方策は、予期せぬプラント状態に陥った場合の緩和手段を提供→従来のシナリオベースの設計対策に加えて、シナリオを想定しないアプローチに基づくべき。
- プラント状態の診断結果と使用可能な設備の状況に応じて柔軟に対応できるよう事故管理方策とその手順を用意。
- 設備の安全重要度や深層防護上の位置づけに関わらず利用可能なものは利用することを検討すべき。



# 事故管理方策の考え方(2/2)

- 第4世代炉においても、事故管理方策を検討する上では、レベル5 (サイト外に放射性物質が放散される事態) についても対象に含める必要がある。→ただし、レベル4の強化によって局限化





# 厳しい外的事象の考え方

- 地震を含む外的事象に対して、設計基準を超える条件を考慮して設計対策
- 対策の要件は、主要安全設備（その機能喪失が炉心損傷に直結しうる設備と事故を終息させるために必要な設備）の裕度確保あるいは物理的分離を含めた防護→DEC対策を含めた内的事象に対する設計対策の有効性を確保
- SFRでは、主冷却系機器に加えて、ナトリウムを冷却材に用いる燃料貯蔵設備（EVST）、ダンプタンクを含めた補助ナトリウム系統についても、その破損が大規模なナトリウム火災につながらないように耐震性を確保する必要あり。
- 最終ヒートシンクを大気とできるため、津波や洪水に対してはヒートシンクの確保が容易な一方、飛来物に対する防護手段が必要。





## まとめ

- 「第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計クライテリア」特別専門委員会では、第4世代SFRの安全設計クライテリア構築に資する検討を実施
- 主として、以下を含む設計拡張状態の考え方とSFRへ適用した場合の主要安全設備への設計要求に関する議論を行い、考え方を整理
  - 受動系の活用の考え方及び冗長性と多様性の要件
  - 事故管理方策の考え方
  - 従来の設計基準を超える厳しい外部起因事象に対する設計対策の考え方



# 捕 捉



# ATWSに対する設計要件

- カテゴリ1: 受動的な炉停止機構により炉心損傷を回避して炉停止できること。(ここで「受動的」に限定するのは、設計基準に対しては、より応答性が良く実績のある能動的な機構で対応することを前提としているため)
- 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(実効排除)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。
- より具体的には設計ガイドに記載する必要あり



# PLOHSに対する設計要件

- 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
- より具体的には設計ガイドに記載する必要あり



# LORLに対する設計要件

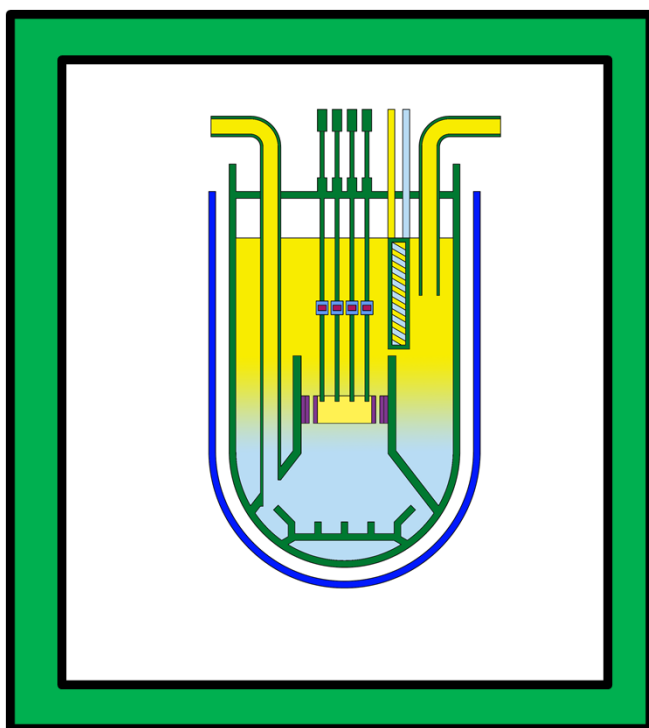
- カテゴリ1: 原子炉容器とガードベッセルの信頼性を確保して2重漏えいを防止すること、ループ側の漏えいを想定しても冷却性を確保して炉心損傷を防止すること。
- カテゴリ2: 上記の失敗によって発生するプラント状態を想定しても、冷却性及び格納機能を確保すること。
- ただし、カテゴリ1の対策の失敗が実質なしと判断できる場合、炉心損傷を想定不要とできる。
- より具体的には設計ガイドに記載する必要あり



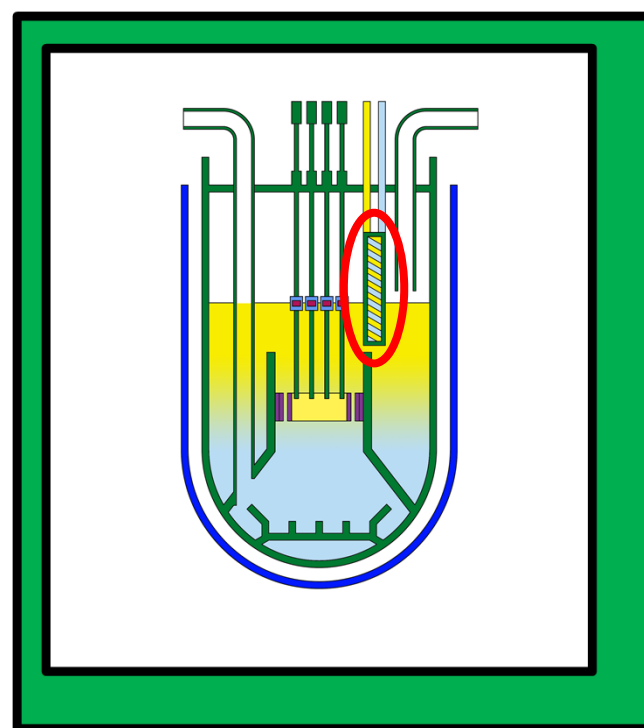
# LORL対策(冷却材液位の確保)

- ・ SFRでは、バウンダリ破損に伴う冷却材漏えいに対して、ガードベッセル等で冷却材の確保が可能。
- ・ JSFRでは、配管も含めて2重化し、バウンダリ破損時の冷却材循環に必要な液位(EsL)を確保。

健全状態



サイフォンブレーク状態



原子炉容器内の熱交換器で除熱可能