



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

# (1) 第4世代Na冷却高速炉における 安全設計クライテリア構築のアプローチ

三菱重工業株式会社

坂場 弘



## 発表内容

- 安全設計クライテリア(SDC)の位置付け
- 第4世代炉としての高い安全性の要求
- 構築に当たり参考とした軽水炉安全要求
- ナトリウム冷却高速炉の特徴を踏まえた要求
- 福島第一発電所事故の教訓及び国内外の規制動向の反映



## 第4世代原子炉に関わる国際フォーラム(GIF)

- 2030～2040年代の実用化を念頭に、安全性・信頼性・経済性等に優れた次世代炉として有望な6つの炉概念を選定
- ナトリウム冷却高速炉(SFR)
  - 原子力開発・利用先進国での運転・開発経験が豊富
  - 高い固有の安全性と高速炉としての特長を両立
  - 各種の革新的概念に対するR&Dの着実な進展
  - 他の炉概念に先駆け、概念設計段階へと進展
- 国際的ハーモナイゼーション
  - 安全性・信頼性に関わる共通の目標を達成するため、システム安全、燃料・材料、系統・機器などに関わる幅広い分野で国際協力・国際分担



# SFR安全設計クライテリア(GIF-SDC)

- GIFにおける最上位安全基準等
  - ロードマップ (2002)
    - 第4世代炉の安全性と信頼性に関する目標の設定
  - Basis for the Safety Approach (2008)
    - 炉型によらない安全構築の基本概念的提示
  - SFR System Research Plan (SRP) (2007)
    - ナトリウム冷却高速炉(SFR)の設計要求の概要
- これまで、SFR用の国際的な安全設計クライテリアは存在せず
- SFRの安全設計クライテリア(GIF-SDC)
  - GIFにて2011年から整備開始、2012年末完成
  - 安全目標及び安全構築の基本概念的実現
  - SRPの設計要求の具体化



# 安全階層におけるSDCの位置付け

## 安全階層

### 安全原則

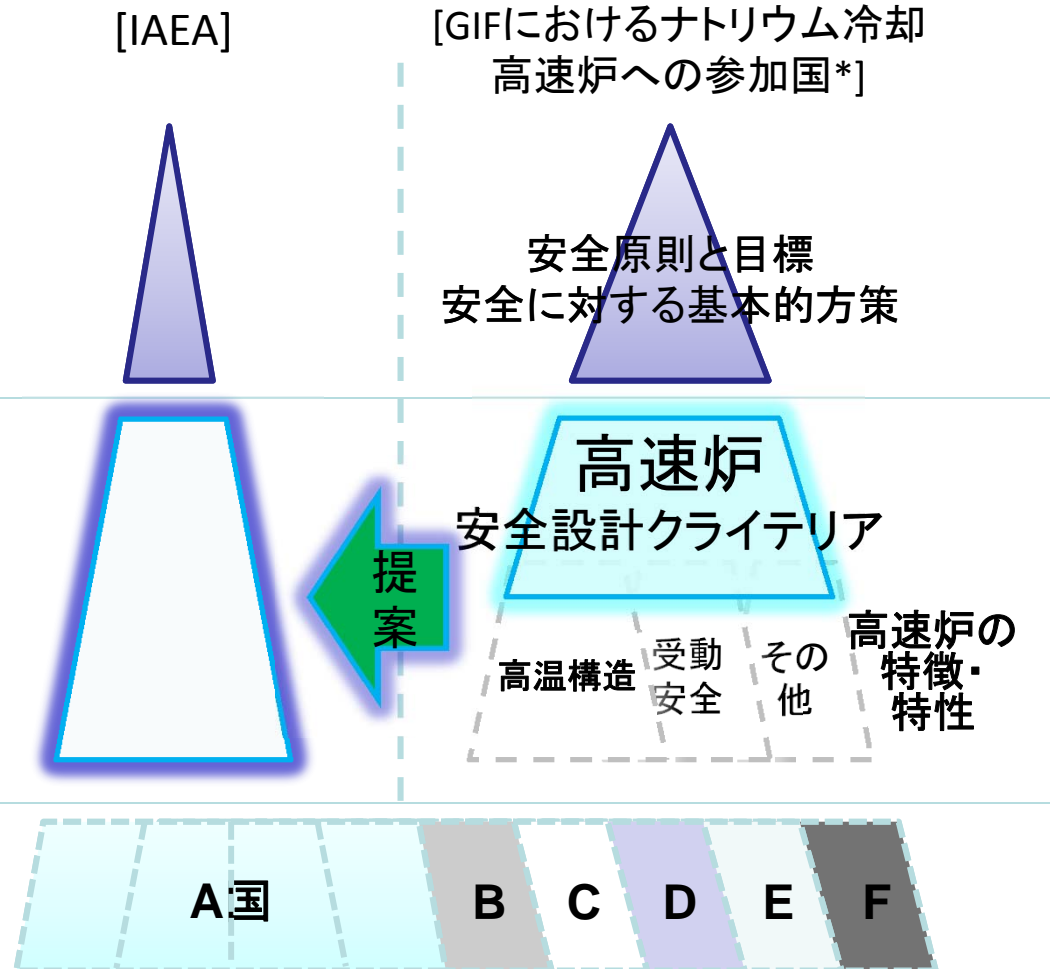
[e.g. IAEA SF-1:  
Fundamental Safety Principles]  
← 原子炉施設に対する基本的な安全原則

### 安全要求

= 安全指針類が該当するレベル  
[e.g. IAEA SSR2/1:  
Safety of Nuclear Power Plants: Design]

### 技術規格・技術基準

[各国における規格・基準]



\* 日米仏欧韓中露



# 安全設計クライテリア(SDC)の検討フロー

第4世代高速炉としての高い安全性

- GIFにおける最上位安全基準等
- 安全目標(2002)、基本的方策(2008)

➤ 深層防護レベル4 対応の強化 等

## 高速炉の特徴

- 炉心特性
- ナトリウム冷却材
- 高温・低圧系 等

高速炉の特徴を踏まえた要求

## 具体化

全体構成・用語等定義

## 参考とした軽水炉安全要求

### IAEA SSR2/1

- 全体構成
- 深層防護の定義
- プラント状態の定義

## 国内外の規制動向

- 原子力安全委員会
- 原子力安全・保安院(NISA)
- IAEAギャップ分析 等

外部事象対策強化

## 福島第一事故の経験の反映

- 日本国政府報告書
- NISA技術的知見 等

## 本委員会の主要成果

SDCへ反映すべき事項の抽出

個々のクライテリアの考え方と適合条件の具体化

反映

GIF-SDC

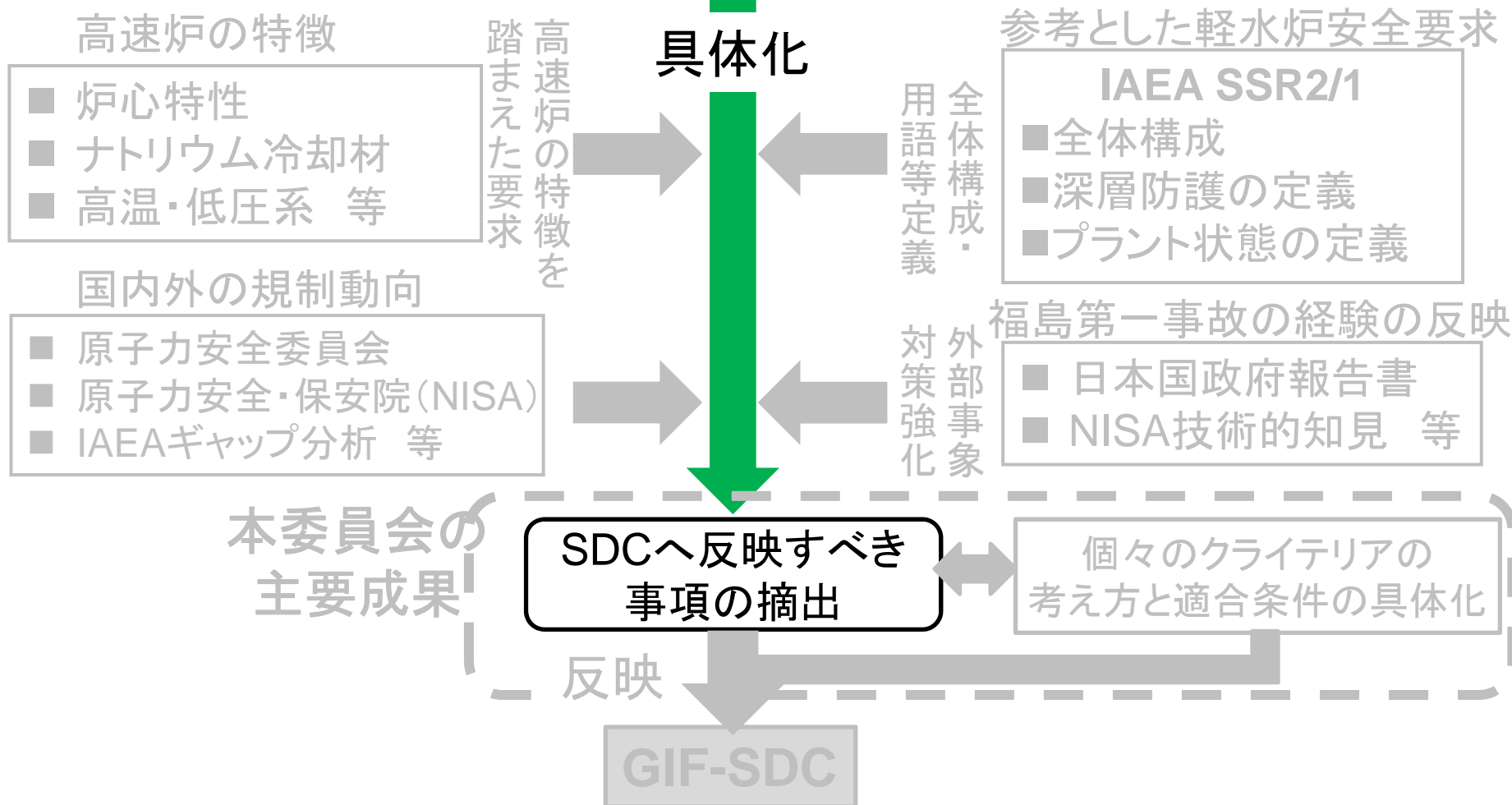


# 安全設計クライテリア(SDC)の検討フロー

第4世代高速炉としての高い安全性

**GIFにおける最上位安全基準等**  
■ 安全目標(2002)、基本的方策(2008)

➤ 深層防護レベル4 対応の強化 等





# 第4世代炉としての高い安全性の要求

## □ GIFにおける第4世代炉としての高い安全目標

### ➤ 安全原則と目標(2002):

- 運転時の安全性と信頼性において優れていること
- 炉心損傷の頻度が極めて低く、その程度も小さいこと
- 敷地外緊急時対応の必要性が生じないほど高い安全性を有すること

### ➤ 安全に対する基本的方策(2008):

- 設計条件を超えた過酷な状態への対応も考慮
- 受動的炉停止機構の活用

## □ 特別専門委員会にて特に論点となった事項

- 詳細は「報告(3) 主要な論点についての考え方」にて報告

### ➤ 設計拡張状態の考え方とSFRへの適用

### ➤ 事故管理方策の考え方





# 安全設計クライテリア(SDC)の検討フロー

第4世代高速炉としての高い安全性

GIFにおける最上位安全基準等  
■ 安全目標(2002)、基本的方策(2008)

➤ 深層防護レベル4 対応の強化 等

高速炉の特徴

- 炉心特性
- ナトリウム冷却材
- 高温・低圧系 等

高速炉の特徴を踏まえた要求

具体化

参考とした軽水炉安全要求

IAEA SSR2/1

- 全体構成
- 深層防護の定義
- プラント状態の定義

全体構成・用語等定義

国内外の規制動向

- 原子力安全委員会
- 原子力安全・保安院(NISA)
- IAEAギャップ分析 等

外部事象対策強化

福島第一事故の経験の反映

- 日本国政府報告書
- NISA技術的知見 等

本委員会の主要成果

SDCへ反映すべき事項の抽出

個々のクライテリアの考え方と適合条件の具体化

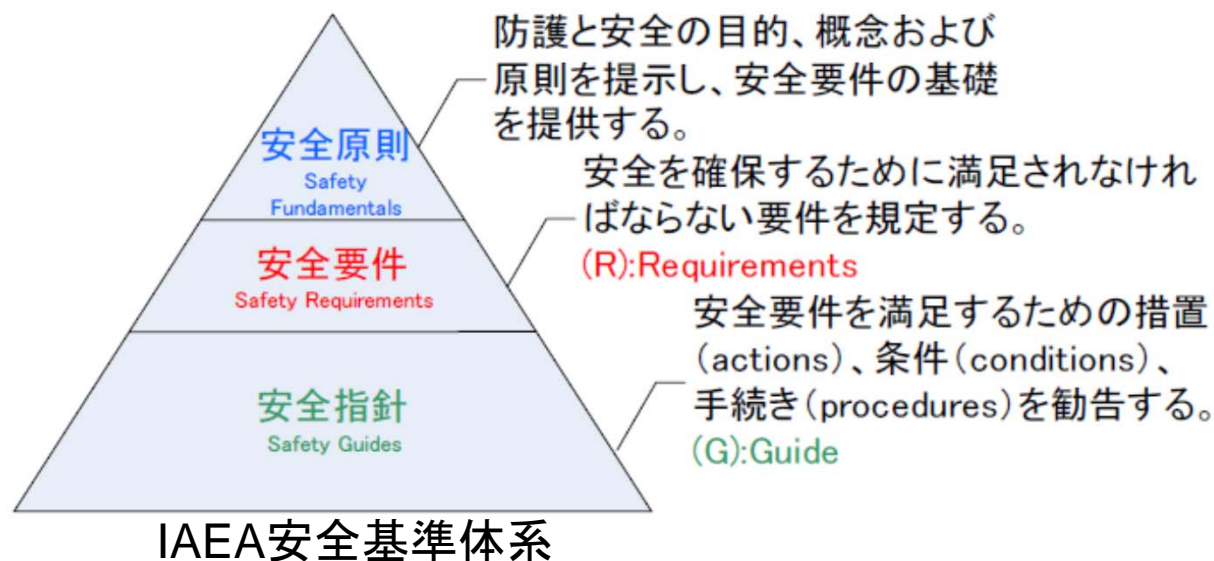
反映

GIF-SDC



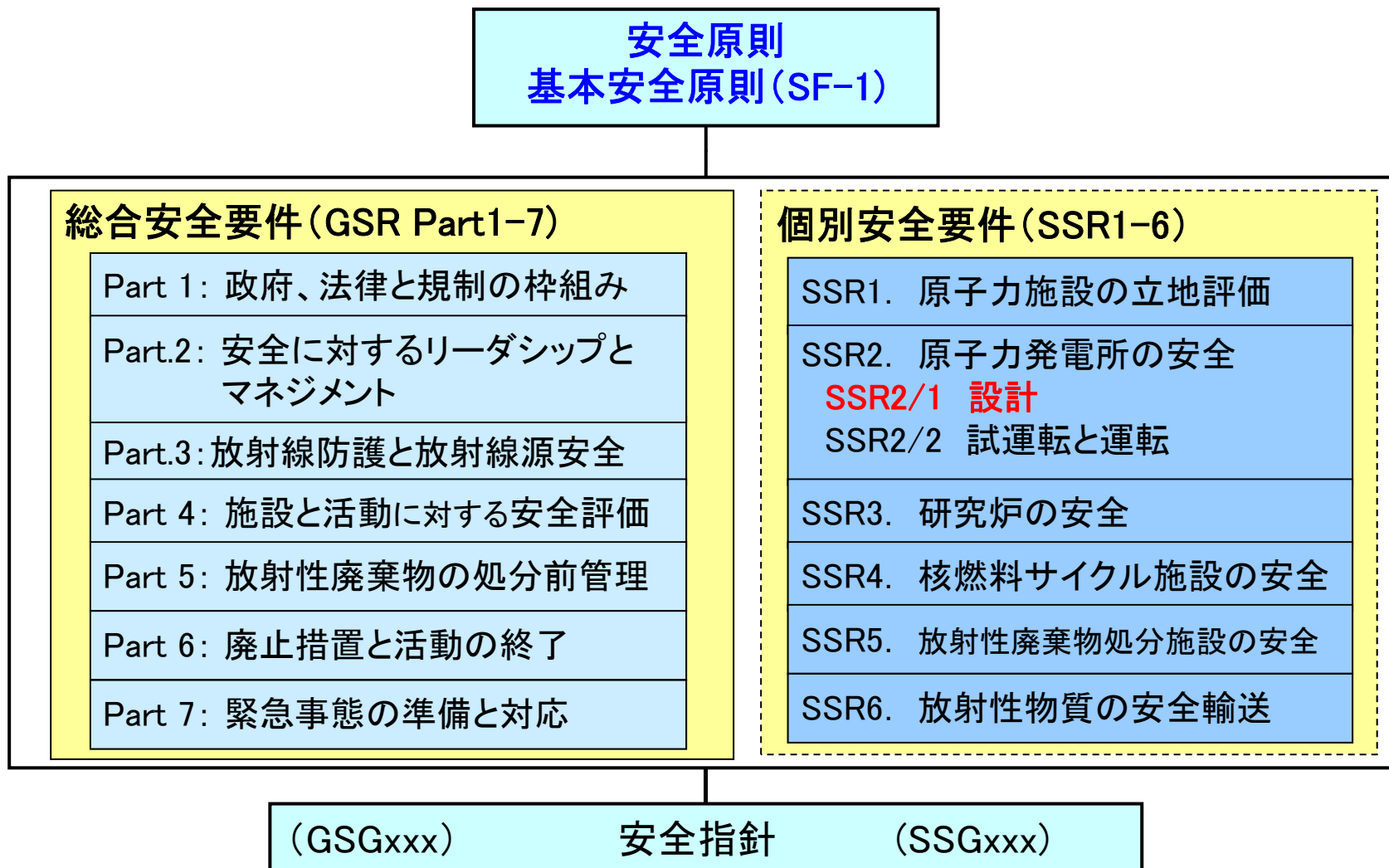
# SDC構築に当たり参考とした軽水炉安全要求

- IAEA安全要件「原子力発電所の安全：設計」SSR2/1 (NS-R-1改訂版)
  - 現行の発電用軽水炉を対象
  - 最大限の国際的な合意に基づいて策定
  - 第4世代SFR向けのSDCの雛形として適切と判断
- SDCの検討に当たり、SSR2/1の全体構成、用語・定義(深層防護、プラント状態等)を参考





# (参考) IAEA安全基準体系





# 安全設計クライテリア(SDC)の検討フロー

第4世代高速炉としての高い安全性

GIFにおける最上位安全基準等  
■ 安全目標(2002)、基本的方策(2008)

▶ 深層防護レベル4 対応の強化 等

## 高速炉の特徴

- 炉心特性
- ナトリウム冷却材
- 高温・低圧系 等

踏まえた要求  
高速炉の特徴を

具体化

参考とした軽水炉安全要求

## IAEA SSR2/1

- 全体構成
- 深層防護の定義
- プラント状態の定義

全体構成・用語等定義

国内外の規制動向

- 原子力安全委員会
- 原子力安全・保安院(NISA)
- IAEAギャップ分析 等

外部事象  
対策強化

福島第一事故の経験の反映

- 日本国政府報告書
- NISA技術的知見 等

本委員会の  
主要成果

SDCへ反映すべき  
事項の抽出

個々のクライテリアの  
考え方と適合条件の具体化

反映

GIF-SDC



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



# 高速炉の特徴を踏まえた安全アプローチ

- 設計基準を超えた状況でも著しい炉心損傷を防止するための受動的炉停止機能
- 著しい炉心損傷に至った際の影響緩和のための再臨界対策、炉内終息技術
- ナトリウム冷却材の高い熱伝導率、高い沸点を利用した自然循環除熱
- 急速な冷却材喪失の起きない低圧システムを利用した液位確保による冷却性維持(ECCS不要)
- ナトリウム冷却材の高い化学的活性を考慮したナトリウム火災対策、ナトリウム-水反応対策
- クリープへの配慮が必要な高温構造システム
  
- 特別専門委員会にて特に論点となった事項
  - 詳細は「報告(3) 主要な論点についての考え方」にて報告
  - 受動系の活用の考え方(受動的炉停止機能、自然循環除熱)



# 国内外のSFRの安全設計の調査

- 各国のSFR(既設又は設計段階)の規模及び仕様を調査
  - ✓ 日: JSFR, もんじゅ
  - ✓ 仏: ASTRID, SUPER-PHENIX1, SUPER-PHENIX2, PHENIX
  - ✓ 米: SMFR, ALMR, CRBRP    ✓ 英: CDFR, PFR    ✓ 独: SNR-300
  - ✓ 中: CFR-1000, CEFR    ✓ 露: BN-1200, BN-800    ✓ 欧: EFR
  - ✓ 印: CFBR, PFBR    ✓ 韓: KALIMER-600, KALIMER-150
- 各国SFRの設計対応及び対策方針を調査
  - 炉心構成
  - 原子炉停止系
  - 原子炉冷却系(炉心損傷対策、液位確保対策、2次系ナトリウム-水反応対策、2次系ナトリウム漏洩対策)
  - 崩壊熱除去系
  - 原子炉格納施設
  - 燃料取扱及び貯蔵施設
- 上記調査結果を参考にしつつ、SFRの安全アプローチを具体化。
  - 詳しくは「報告(2) 安全設計クライテリア案」にて報告



# 安全設計クライテリア(SDC)の検討フロー

第4世代高速炉としての高い安全性

GIFにおける最上位安全基準等  
■ 安全目標(2002)、基本的方策(2008)

➤ 深層防護レベル4  
対応の強化 等

高速炉の特徴

- 炉心特性
- ナトリウム冷却材
- 高温・低圧系 等

踏まえた要求  
高速炉の特徴を

具体化

参考とした軽水炉安全要求

IAEA SSR2/1

- 全体構成
- 深層防護の定義
- プラント状態の定義

全体構成・  
用語等定義

国内外の規制動向

- 原子力安全委員会
- 原子力安全・保安院(NISA)
- IAEAギャップ分析 等

福島第一事故の経験の反映

- 日本国政府報告書
- NISA技術的知見 等

外部事象  
対策強化

本委員会の  
主要成果

SDCへ反映すべき  
事項の抽出

個々のクライテリアの  
考え方と適合条件の具体化

反映

GIF-SDC





# 福島第一発電所事故の教訓の調査

## □ 国内報告書類の調査

- 日本原子力学会による事故分析
  - 技術分析分科会「福島第一原子力発電所事故からの教訓」
  - 原子力国際シンポジウム(ISON2011)声明
- 日本国政府報告書(第1報、第2報)
- 原子力安全・保安院「東京電力福島第一原子力発電所事故の技術的知見について」

## □ 海外報告書類の調査

- IAEA: 福島第一原子力発電所事故調査団報告書
- 米国: NRC短期タスクフォースの検討結果



# 国内外の規制動向の調査

## □ 国内規制動向の調査

- 原子力安全委員会:
  - 安全審査指針類改定に係る検討
- 原子力安全・保安院:
  - シビアアクシデント規制の基本的考え方の検討

## □ 海外規制動向の調査

- IAEA:
  - 福島第一発電所事故に照らしたIAEA基準のギャップ分析
- 米国:
  - NRC短期タスクフォースの勧告に基づいた具体策の命令
  - FLEX: 多様性及び柔軟性のある緩和戦略
- EU:
  - ストレストテスト (ピアレビュー報告書 2012.4.25)
- 仏国
  - ハードンドコア概念による頑健性を有した建屋と組織
  - 緊急時即応部隊(FARN)の設置



## 事故教訓・規制動向を踏まえ反映すべき事項

- 事故教訓及び規制動向を踏まえ、SDC素案に反映させるべき事項を抽出
  - 外的事象等による共通要因故障への耐性を目的とした非常用電源系及び崩壊熱除去系の冗長性・多様性の強化
  - 長期の全交流電源喪失下での炉心冷却機能維持を目的とした崩壊熱除去系の強化
  - 水素爆発による格納容器の早期破損の防止を目的とした格納容器内の水素濃度制御機能の強化
  - 長期の全交流電源喪失下での燃料取扱及び貯蔵系の熱除去を目的とした状態把握・プラント管理機能の強化
  
- 上記考え方を具体化したSDCの条文については、「報告(2) 安全設計クライテリア案」にて報告
- 特に、厳しい外部事象への設計対策については、「報告(3) 主要な論点についての考え方」にて報告



## まとめ

- SDCに盛り込まれるべき安全性の考え方
  - 第4世代高速炉としての高い安全性
  - 全体構成と用語・定義等については、IAEA安全基準 SSR2/1を参考
  - 高速炉の特徴を踏まえた設計要求
  - 福島第一発電所事故の教訓及び国内外規制動向の反映
  
  - 上記安全性の考え方を具体化したSDCの条文については、「報告(2) 安全設計クライテリア案」にて報告
  
- 特別専門委員会にて特に論点となった事項
  - 設計拡張状態の考え方とSFRへの適用
  - 受動系の活用の考え方
  - 事故管理方策の考え方
  - 厳しい外部事象に対する設計対策の考え方
  
  - 上記論点に対する特別専門委員会の検討結果については、「報告(3) 主要な論点についての考え方」にて報告



## 以下、補足資料



# SFRの開発状況

## 現在進行中の各国における新型SFR

- フランス： 第4世代炉プロトタイプ(ASTRID)を開発中
- 中国： 実験炉(CEFR)を運転開始
- インド： 原型炉1基(PFBR)を建設中
- ロシア： 実証炉クラス(BN800)を建設中  
商用炉クラス(BN1200)を開発中
- 米国： 小型高速炉を開発中
- 韓国： 原型炉(KALIMER)建設を計画中
- 欧州： ESFRプロジェクト



# SDCにおける基本的な安全方策

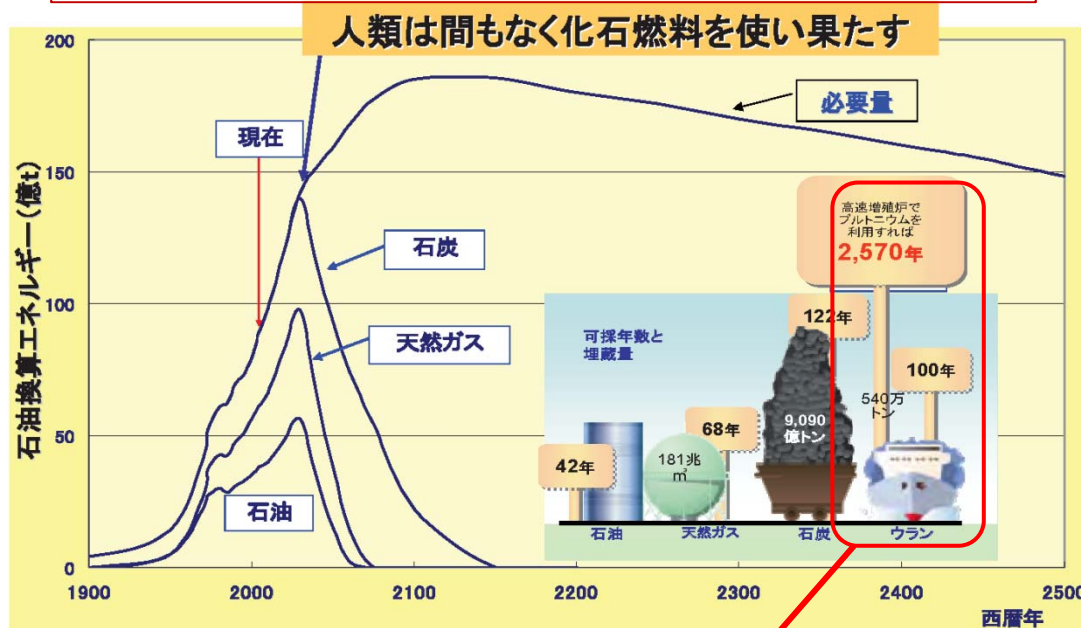
GIFでの高い安全目標を実現するため安全アプローチ

- I. 第4世代炉としてあるべき高い安全目標である「万一のシビアアクシデントにおいても敷地内事象終息を達成する高い安全性」の実現
- II. 基本的な深層防護 (Defence-In-Depth) の考え方を踏襲した上で、深層防護第4層としてシビア・アクシデントに対する防護対策及び緩和対策を安全設計に取り入れること (built-in) を要求
- III. 動的な安全システムに加え、受動的な安全性を積極的に活用し、高い信頼性とロバスト性を確保、など

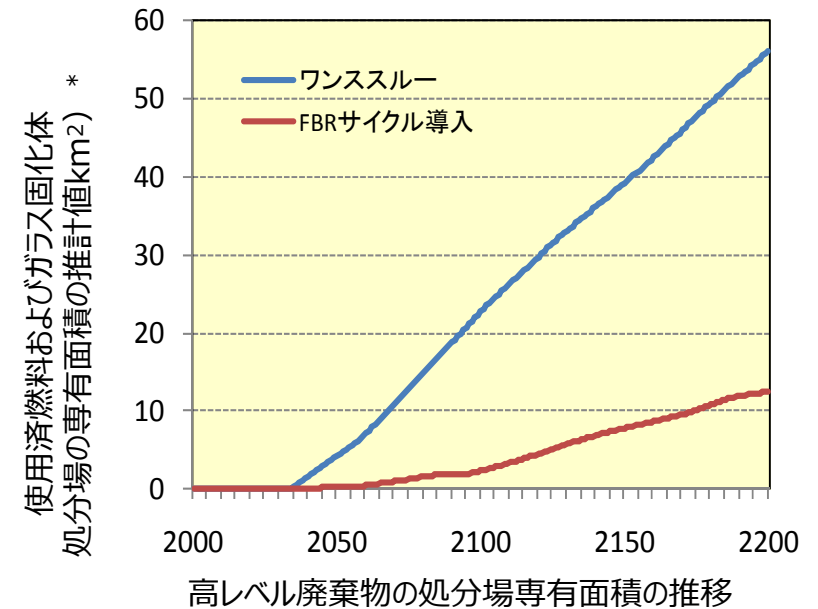


# 高速炉サイクルを導入する必要性

## ウラン資源の有効利用とエネルギーの安定供給



## 放射性廃棄物による負荷の低減



ウラン資源を使いきるまでの年数

~100年

~数千年

軽水炉  
利用の場合

FBR利用の  
場合

出展: Uranium 2009: Resources, Production and Demandより原子力機構作成

## 世界的な高速炉開発

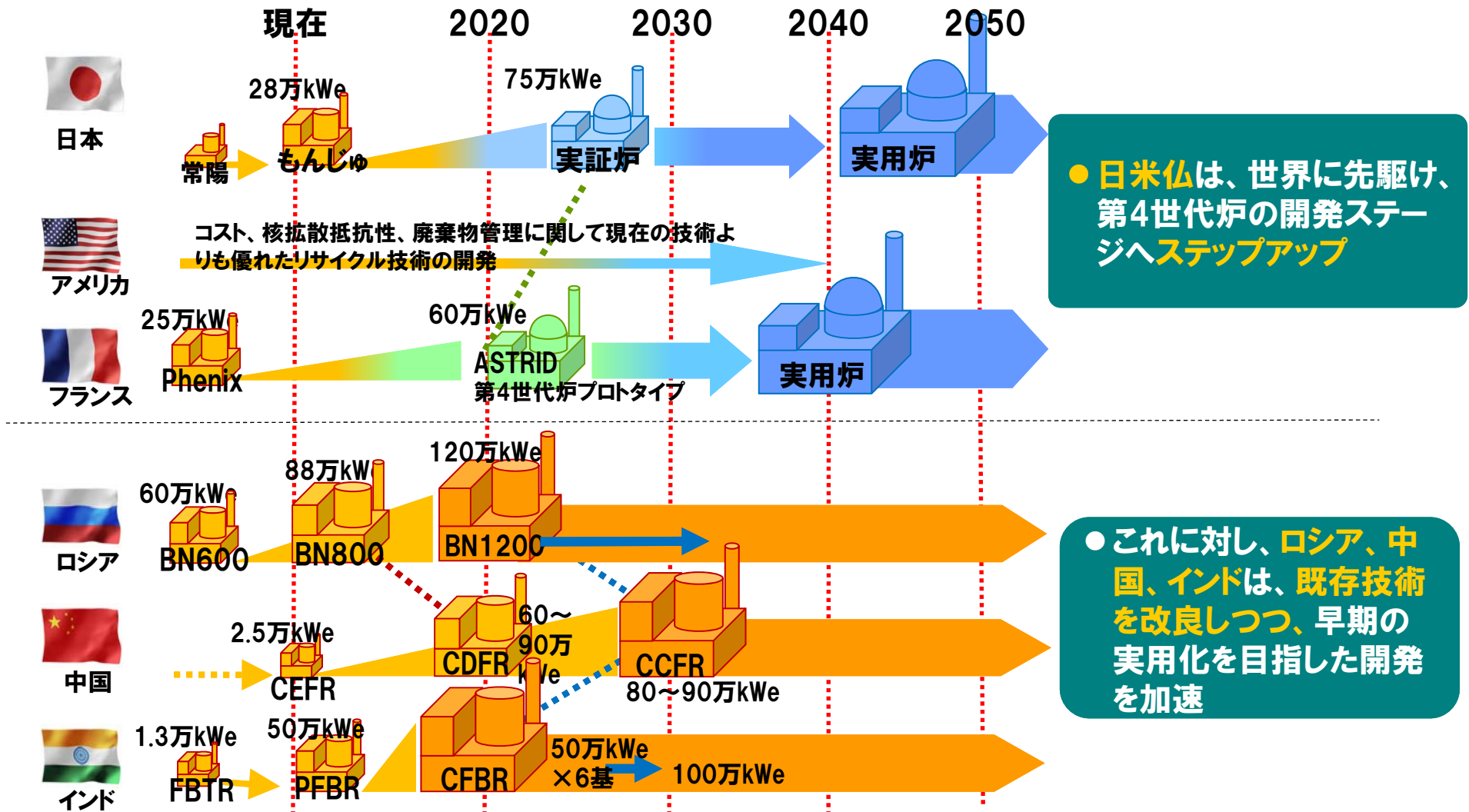






# 高速炉開発を巡る今後の世界情勢

- 露、中、印は2030年頃の実用化を目指して開発、仏も2040年頃から第4世代炉を導入予定



● 日米仏は、世界に先駆け、第4世代炉の開発ステージへステップアップ

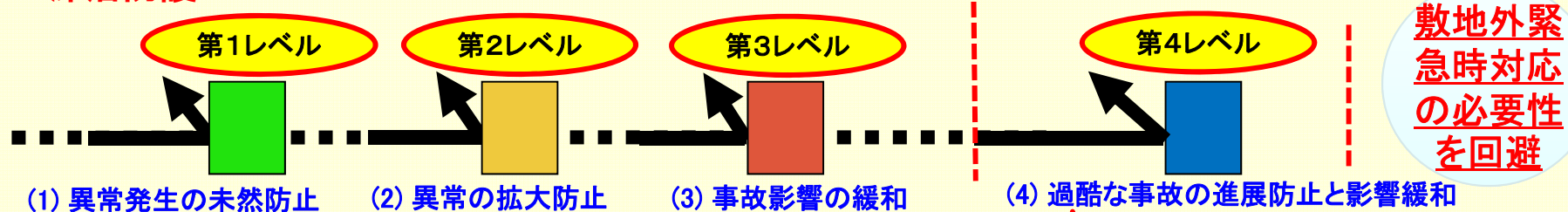
● これに対し、ロシア、中国、インドは、既存技術を改良しつつ、早期の実用化を目指した開発を加速



# GIF SFRの安全確保の考え方 [概要]

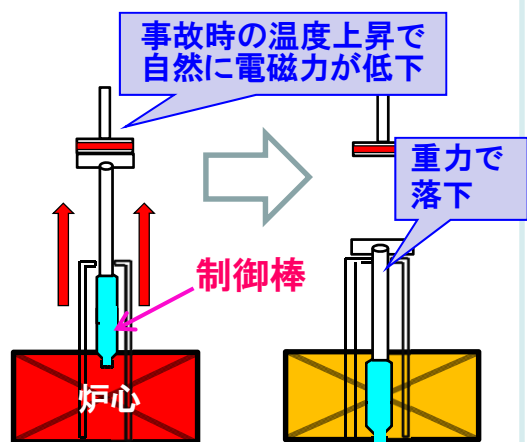
- ▶ 第4世代炉の国際標準としての高い安全性を確保。
- ▶ 深層防護の第1～3レベル強化による高い信頼性・安全性と、第4レベル強化による頑健的な安全設計。
- ▶ 過酷な事故への設計対応として、受動的な安全機能及び重大な炉心損傷に対する設計対策を導入。
  - 「止める」に加えて、**自然に止まる機能**
  - 「冷やす」に加えて、**自然に冷える機能**
  - 「閉じ込める」に加えて、原子炉容器内・格納容器内で**自然に終息する機能** ⇒ **避難不要**

## ■ 深層防護



J  
S  
F  
R  
の  
場  
合

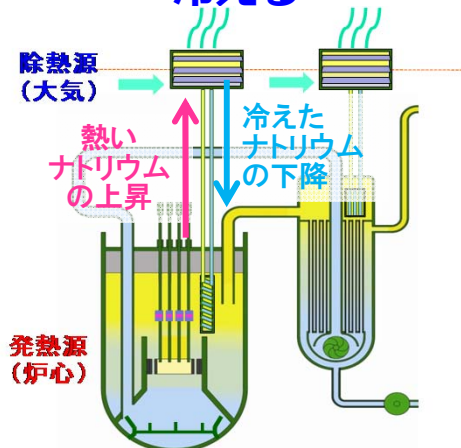
### 止まる



▶ 異常時は、制御棒が自然に落下

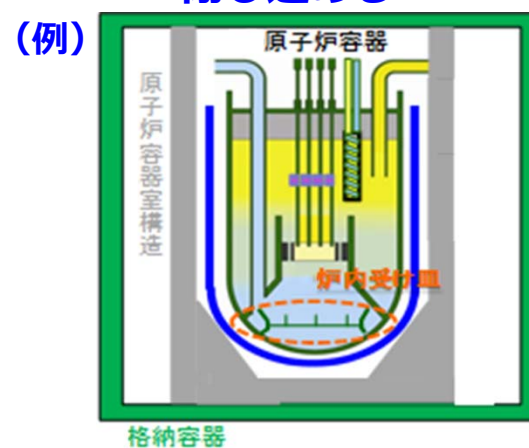
日本原子力学会 2013年 春の年会 近畿大学

### 冷える



▶ ナトリウムの自然循環と大気への放熱で冷却

### 閉じ込める



▶ 燃料が溶けても原子炉及び格納容器で閉じ込め⇒敷地外緊急時対応の必要性を回避