



新型炉部会セッション:「福島第一発電所事故の技術的知見と第4世代炉の安全性」:
報告2

安全設計要求の国際協調

(独)日本原子力研究開発機構

中井 良大



発表内容

- 緒言
- 国際安全設計クライテリア(SDC)の概要
- SDCにおける主要な安全設計要求
- SDCを巡る各国の動き
- まとめ



安全設計クライテリア(SDC)の構築の背景

- 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^[1]：
 1. 運転時の安全性と信頼性において優れていること
 2. 炉心損傷の頻度が極めて低く、その程度も小さいこと
 3. 敷地外緊急時対応の必要性が排除できるほど高い安全性を有すること
 - － 安全に対する基本的方策^[2]

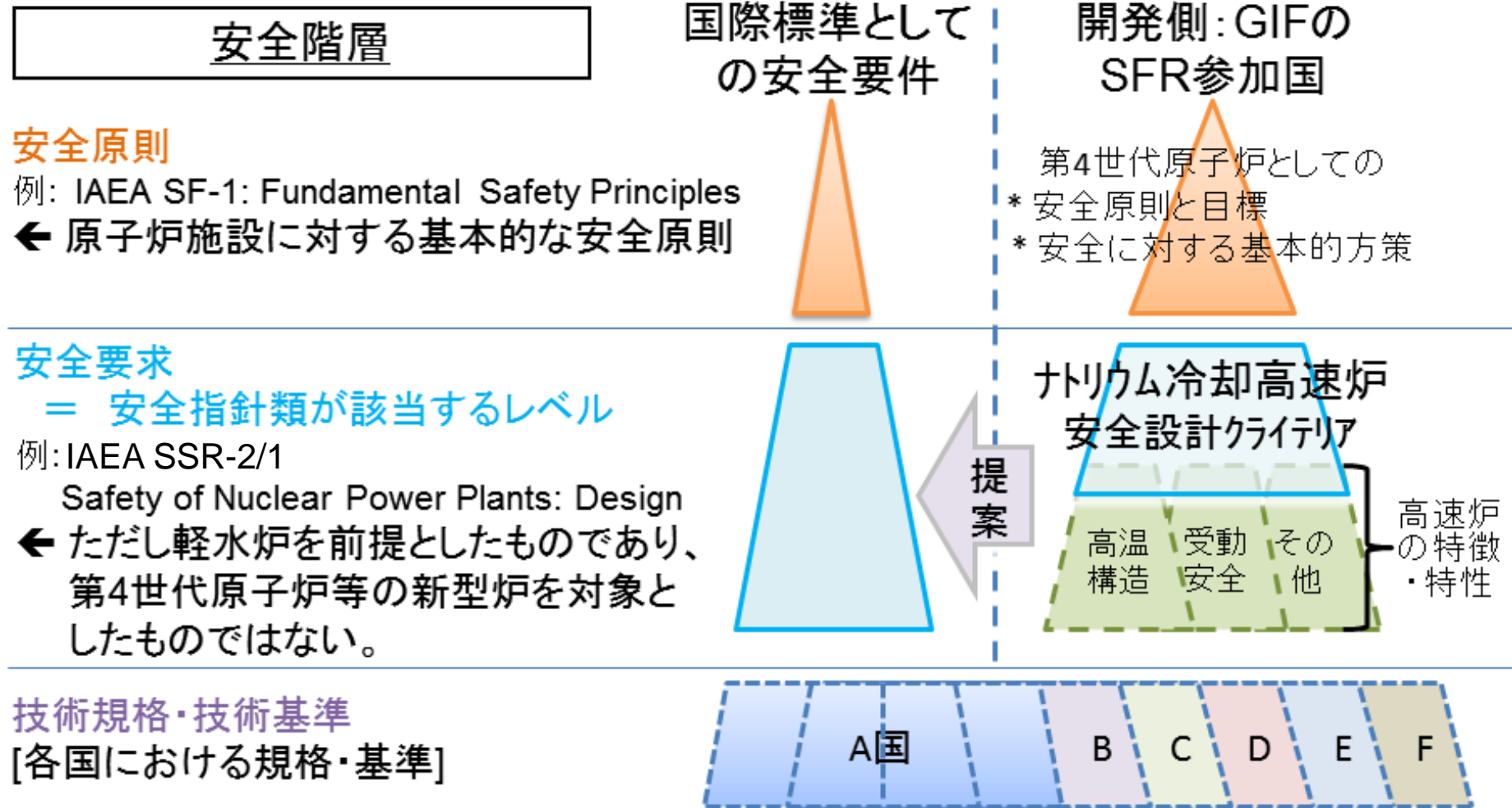
設計基準を超えた過酷な状態への設計対応も考慮
- 安全要求の国際的な共通化の現状

IAEA SSR-2/1等は現行世代の軽水炉を前提とした設計要求。
第4世代炉について国際共通化されたものは現状存在しない。

⇒ 第4世代SFRの安全要求を包括的・系統的に定めた
国際的に合意されたSDCが必要



安全階層におけるSDCの位置付け





SDC整備に関わる国際協調

- GIF SFR開発国によるSDC整備
 - GIF SDCタスクフォース[TF]
 - 参加国 日(議長)・米(共同議長)・仏・露・中・韓・欧・IAEA
 - 2010/10 GIF政策会合にて議長国日本から設置を提案
 - 2011/05 同会合にてSDC TF設置が承認
 - 2011/07～2012/07 第1～4回SDC TF会合開催
 - 2012/11 GIFシンポジウムにて紹介
 - 2012末～2013春までに、SDC完成及び承認の予定
 - AESJ特別専門委員会(2011～2012)において検討したSDC素案やその背景の考え方をGIF－SDC－TFに提示。

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における安全上位基準等
■ ロードマップ (2002)、BSA(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
- FBR特有の系統・機器

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
外部事象対策強化

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

1F事故経験の反映

- 日本政府報告書
- AESJ教訓と提言 等

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の全体構成

- ✓ 基本構成はSSR2/1を参考
- ✓ 第4世代炉としての安全性やSFR特有の系統・機器に着目して充実化

1. 序論
2. 安全のアプローチ
3. 設計における安全の管理
4. 主要な技術要件
 - 基本的安全機能
 - 深層防護の適用 等
5. 一般プラント設計
 - 設計基準(ハザード, DBA, DEC 等)
 - プラント寿命を通しての安全運転のための設計
 - 人的因子
 - その他の設計上の配慮
 - 安全解析
6. 具体的なプラントと系統の設計
 - プラントシステム全体
 - 炉心と関連機能
 - 原子炉冷却系
 - 格納容器構築物と格納容器系
 - 計測制御系
 - 非常用電源供給系
 - 補助系及び補機系
 - その他の出力変換系
 - 放射性排出物及び放射性廃棄物の処理
 - 燃料取扱・貯蔵系



SDCにおける基本的な安全方策

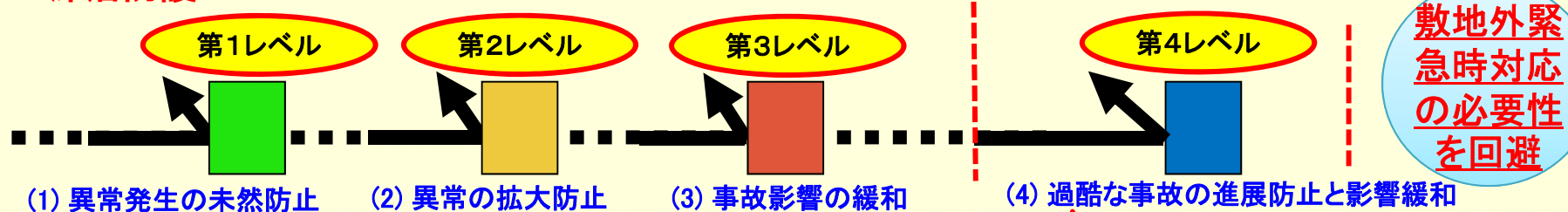
GIFの高い安全目標を実現するための安全アプローチ

- 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止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

GIF SFRの安全確保の考え方 [概要]

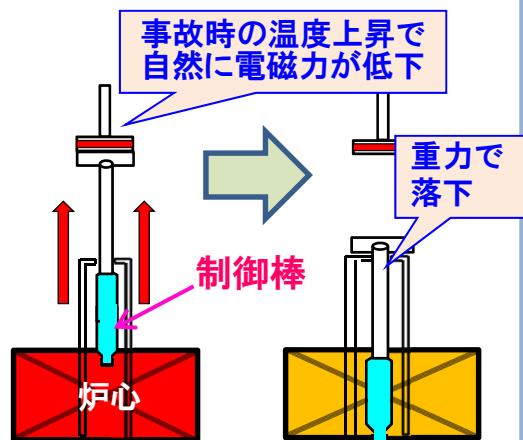
- 第4世代炉の国際標準としての高い安全性を確保。
- 深層防護の第1～3レベル強化による高い信頼性・安全性と、第4レベル強化による頑健的な安全設計。
- 過酷な事故への設計対応として、受動的な安全機能及び重大な炉心損傷に対する設計対策を導入。
 - 「止める」に加えて、**自然に止まる機能**
 - 「冷やす」に加えて、**自然に冷える機能**
 - 「閉じ込める」に加えて、原子炉容器内・格納容器内で**自然に終息する機能** ⇒ **避難不要**

■ 深層防護



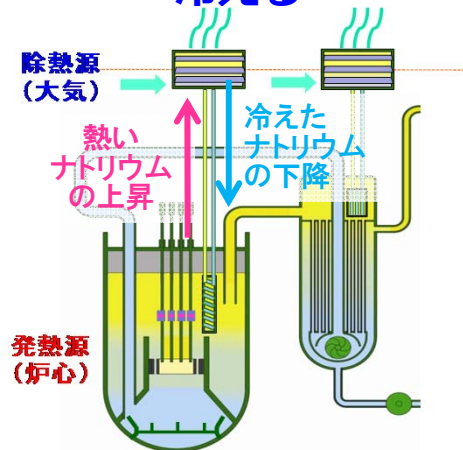
J
S
F
R
の
場
合

止まる



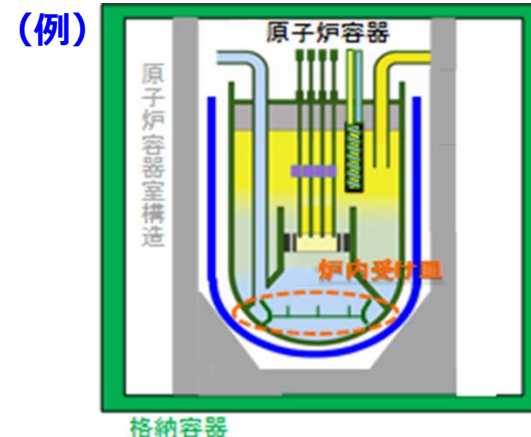
- 異常時は、制御棒が自然に落下

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

「Na冷却」「高速炉」の特徴の反映

- 炉心特性
 - － 最大反応度体系にない、炉心中心部近傍で正ボイド反応度
→再臨界による大規模の機械的エネルギーの発生防止
 - － ナトリウム冷却材
 - ✓優れた熱伝達特性と自然循環特性 → 自然循環を活用した崩壊熱除去
 - ✓化学的に活性 → Na漏えい対策、Na火災/Na-水反応対策
- 低圧条件下での運転
 - － LOCAに至らない (軽水炉:LWRのECCSは不要)
→ガードベッセル、外管等による液位確保
(LWRのインベントリ確保に相当)
- 高温/高照射量条件下での運転
 - － 構造材のクリープや照射効果を考慮した設計



福島第1原子力発電所事故経験のSDCへの反映

- DiDの強化
 - 除熱源喪失や全交流電源喪失への対応を明示
 - SAのPrevention/Mitigation機能の充実
 - 能動的安全システムの信頼性の強化に加え、SFR固有の受動安全性・固有安全特性を活用したより一層の充実化の明示、など
- 共通原因故障に対する耐性強化
 - 多様性の強化を図る設計対応、など
- 外部起回事象
 - SFR特長を反映した外部事象に対する耐性強化、など



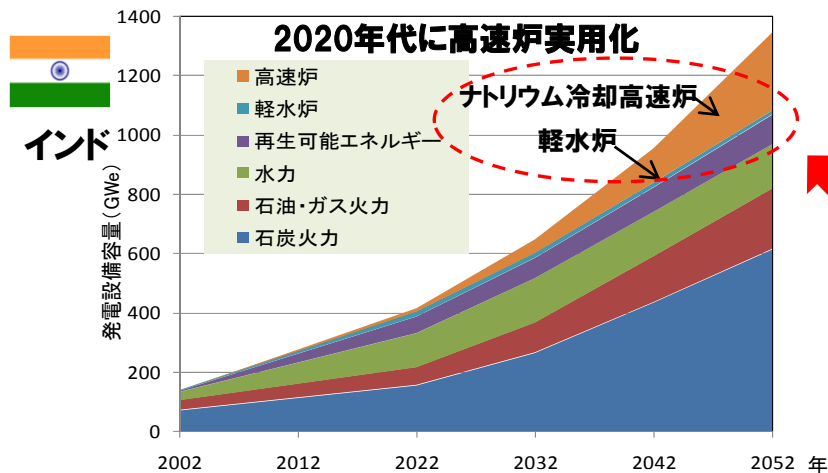
SFR安全の調和に関する国際協力

- 会合:「SFRのシビアアクシデントの発生防止と影響緩和」
 - JAEA主催/IAEA協賛、H24/6/12-13, 敦賀
- 概要:
 - SFRにおけるシビアアクシデントに対し、基本的な安全アプローチ(安全対策の考え方)と具体的対応策について、国内外の専門家により議論
- 参加者
 - 日:MEXT・大学・電力・メーカー・JNES・JAEA
 - 米:NRC・DOE、仏:ASN・CEA・EdF・AREVA、露:IPPE、中:CIAE、韓:KINS・KAERI、印:IGCAR・BHAVINI、欧:HZDR、Belgium、
 - IAEA



世界の原子力・高速炉サイクル利用計画

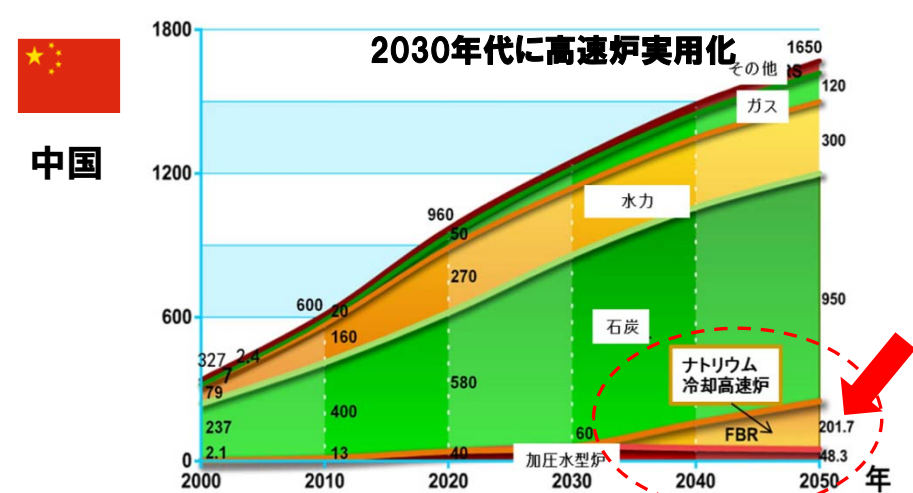
- アジア、特に中国、インドを中心に積極的な原子力利用拡大を計画。
2050年時点の原子力設備容量は、現在の日本に比して、中国：約5.5倍、インド：約6倍。
- 高速炉サイクル実用化計画はアジアを中心に着実に進行。
2050年時点の原子力設備容量の内、高速炉の割合は、中国：約80%、インド：約95%。
- 各国の目標値の実現可能性は不透明と思われるが、高速炉のニーズの高さは窺える。



2050年頃の原子力発電設備容量:約270 GWe*(うち高速炉約260 GWe*)

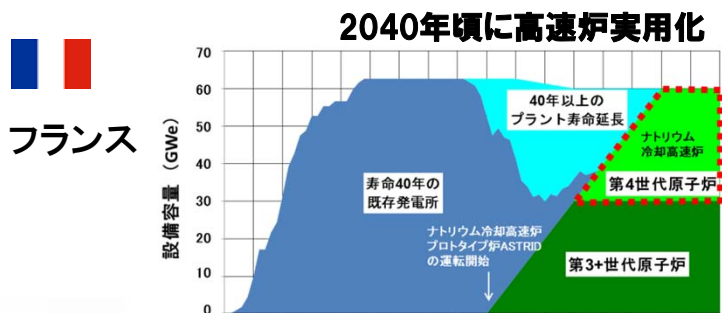
*海外からの軽水炉の輸入量を見込んで現在見直し中とのこと

出典: Anil Kakodkar, "Nuclear Energy in India- Retrospect and Prospects", An International Journal of Nuclear Power-Vol.18, No.2-3



2050年頃の原子力発電設備容量:約240~250 Gwe (うち高速炉約200 GWe)

出典: Xu Mi, "Fast Reactor Development for a Sustainable Nuclear Energy Supply in China", International Conference On Fast Reactors And Related Fuel Cycles: challenges And Opportunities (FR09)



2020年代に高速炉実用化

ロシア

2050年頃の原子力発電設備容量:
約100 GWe(うち高速炉約40 GWe)

出典:

• Vladimir Kagramanyan, "PANEL 1, Economics and Performance of Fast Neutron Systems", International Conference On Fast Reactors And Related Fuel Cycles: challenges And Opportunities (FR09)

• Palmiro Villalibre, "Summary Progress Status of INPRO CP FINITE", IAEA Consultancy Meeting to Prepare an INPRO Collaborative Project, "Synergetic Nuclear Energy Regional Group Interactions Evaluated for Sustainability"

出典: Pierre Frigola, "PANEL 2, Five GIF criteria Five International challenges," (発表スライドの中で仏国EDFの試算を紹介), International Conference On Fast Reactors And Related Fuel Cycles: challenges And Opportunities (FR09)



キーメッセージ(抜粋)

- 安全設計クライテリア
 - SFRが同時に最先端の安全目標を達成するために、国際的なレベルで調和させることが必要。この問題に対する共通の努力(国際協調によるSDCの整備)は、第4世代国際フォーラムにおいてIAEAとの連携のもとに既に始まっている。
 - SDC整備に関連して国や国際レベルでの安全関連研究開発は、世界のSFRの安全レベルの向上に貢献。
- 運転経験や教訓に基づく研究開発
 - 数十年にわたるSFR運転経験を集積し、福島NPSでの事故の経験を共有することが極めて重要。研究開発は運転経験や教訓を踏まえて実施しなければならない。



キーメッセージ(抜粋)

- SFRの安全アプローチと安全対策
 - 例えば、炉心反応度フィードバック、低圧の冷却材、熱慣性が大きいこと、高沸点、最終的な除熱源が空気であること、自然循環など、SFRの優れた安全特性に基づいたアプローチと対策が取られるべきである。
- シビアアクシデント
 - 福島NPS事故を受けて、シビアアクシデント・マネジメントの改良とともに、SFR設計にシビアアクシデントの発生防止と影響緩和のための革新的な取り組みを組み入れることが極めて重要であることを再確認。



SDCを巡る各国の動き

- GIFの下でSDCレビュー
 - SFR開発国: 日、米、仏、露、韓、中、欧
 - リスク・安全WG: 上記に加えて、加、フィンランド、英、スイス
 - SIAP: 上級者産業界助言パネル
- IAEAを通じたSFR安全に関わる協力
 - GIF SFR開発国に加えて、IAEA/INPRO、インド
- SDCと各国炉やSFR標準との関連(例)
 - 仏: ASTRIDとSDCとの比較分析の計画を表明
 - 中: SDC素案に対して、中国内専門家会合を開始し、総括コメントを提示
 - 米: 国内用にSFR安全設計基準(ANS54.1)を策定しており、比較検討を実施



まとめ

- AESJ特別専門委員会にて、2011年度から2年間の予定で、第4世代SFRを対象とした安全要件に関する検討が進められている。
- SDC素案については、GIFの場でSFR開発国の協調により国際的議論が行われており、IAEAとの連携も図られている。
- 上記の活動をさらに推進(例:IAEAでの安全基準化)することで、SDCの国際標準化が図られる。
- 現在世界で開発・設計中のSFRについては、SDCとの対比による第4世代炉とのギャップ分析を通じて安全性の向上が図られる。