



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

安全設計クライテリア案

電力中央研究所

植田 伸幸



GIF-SFR 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

第1章 はじめに

- 1.1 背景と目的
- 1.2 SDCの策定方針

第2章 第4世代原子力システムとしてのSFRに対する安全アプローチ

- 2.1 GIFの安全目標と基本的安全アプローチ
- 2.2 安全に関する基本的考え方
 - 2.2.1 深層防護とプラント状態
 - 2.2.2 プラント状態と確率論的手法及び決定論的手法の関係
 - 2.2.3 受動的な安全特性の活用
- 2.3 第4世代SFRの安全アプローチ
 - 2.3.1 対象とするSFRシステム
 - 2.3.2 SFR特有のDECに対するアプローチ
 - 2.3.3 SFRの基本特性に応じたアプローチ
 - 2.4.4 東京電力福島第1原子力発電所事故からの教訓

第3章 設計における安全の管理

第4章 主要な技術クライテリア

- 基本的安全機能
- 深層防護の適用

第5章 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

第6章 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

用語集

付属書



SDC: 目次 (1/3)

第1章 はじめに

1.1 背景と目的

1.2 SDCの策定方針

3つの策定方針をまず定め、それに従って、GIFの下でSDCを構築

第2章 第4世代原子力システムとしてのSFRに対する安全アプローチ

2.1 GIFの安全目標と基本的安全アプローチ

GIFの安全原則を解説

2.2 安全に関する基本的考え方

2.2.1 深層防護とプラント状態

SDC主論点に係る、安全に関する基本的な共通認識を明確化

2.2.2 プラント状態と確率論的手法及び決定論的手法の関係

2.2.3 受動的な安全特性の活用

2.3 第4世代SFRの安全アプローチ

GIFの下で検討されるSFR概念

2.3.1 対象とするSFRシステム

2.3.2 SFR特有のDECに対するアプローチ

2.3.3 SFRの基本特性に応じたアプローチ

個別のクライテリアを導出する際の技術的な着眼点・ポイントについて解説

2.4.4 福島第一原子力発電所事故からの教訓



「第1章：序論」の概要

– 1.1 SDC構築の背景と目的

- GIFのSFRにおける安全設計に共通化が必要
- 第4世代炉SFRの安全設計で必要な要件を網羅
- SDCの想定ユーザーはGIFのSFR開発者、将来的にはGIF外のSFR開発者や規制機関/国際機関

– 1.2 SDCの策定方針

- GIF安全目標に対する方針
 - SDCは安全アプローチに関する将来のリファレンスとなる。
 - 最新の知見を反映する、設計オプションを限定することは意図しない
- 記述に関する方針
 - GIF性能目標を達成するためのクライテリアを、技術的背景を含めて記載
- 定義及び語彙に関する方針
 - IAEAのSSR2/1やSafety Glossaryを活用
 - Gen-IV SFR特有のものに注力して記述を充実化



「第2章：第4世代SFRの安全アプローチ」

– 2.1 GIFの安全目標と基本的安全アプローチ

- 安全性・信頼性に関わるGIFの目標、中立的な安全アプローチをベース

– 2.2 安全に関する基本的考え方

- DiDとプラント状態の定義はIAEAのものを適用
- プラント状態と決定論的手法及び確率論的手法の関係
 - 事象選定は、SFRの特徴を踏まえた決定論的方法、運転経験・許認可経験に基づいて行い、既存のPSA情報も活用。
 - 運転状態・DBAに対しては既存の安全関連技術を高めてより高い信頼性を獲得する。
 - DECに対しては運転状態・DBAへの対応方策に対して多様性を持つ方策を活用することでより高いロバスト性を獲得する。
- 受動的な安全特性の活用
 - 深層防護全体に渡って、バランスよく安全性を高めることが重要。
 - 受動的方策・固有安全の活用は、DECでの多様性を確保するための着眼点であり、動的安全系が機能しない場合でも、シビアアクシデントの終息や影響緩和に活用されるべき。



「第2章：第4世代SFRの安全アプローチ」

– 2.3 第4世代SFRの安全アプローチ

• SFRの基本特性に応じたアプローチ

– 炉心・燃料

- » 高出力密度、高温ナトリウムなどの使用環境。
- » 最大反応度体系に無い、ボイド反応度が正になりうること、など

– ナトリウムの物理的・化学的特性

- » 沸点が高いこと、室温で凍結すること、不透明なこと、など
- » 化学反応性が高く、炉心安全への影響を避けるため2次系設置が必要、Na火災やNa-水反応への考慮が必要、など。

– 材料の使用環境

- » 高温・高照射量環境のため、クリープへの配慮が必要、など

– 低圧力状態での運転

- » 軽水炉のようなLOCAは無く、ECCSは不要。
- » 原子炉容器内での液位確保が冷却維持のために必要。



SDC: 目次 (2/3)

第3~6章にて、83のクライテリア、206のパラグラフを提示。

IAEA SSR2/1から変更の必要なし、と判断したものは、SSR2/1原文のまま維持。

第3章. 設計における安全の管理

クライテリア1~3

安全設計の管理体制についての一般的な記述。表現の修文のみ。

第4章. 主要な技術クライテリア

クライテリア4~12

– 基本的安全機能

基本的安全機能(止める・冷やす・閉じ込める)は同一定義

– 深層防護の適用

深層防護第4レベルの強化、受動的
安全機能の活用について記載

第5章. 一般プラント設計

クライテリア13~42

– 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

SFR特有の内部ハザードとDEC
対応、東京電力福島第一発電所
事故を踏まえた外部ハザード対応
強化について記載。

SFRの運転環境に対し、技術的配
慮を行うことを記載。



SDCの事例

- 第4世代炉安全性に係るクライテリア -

• クライテリア7: 深層防護の適用

– IAEA SSR 2/1 (現行世代発電炉)

- 原子力発電所の設計では、深層防護を採用しなければならない。深層防護のレベルは、実行可能な限り独立していなければならない。

– 4.11 設計 (a) – (f)...

– GIF-SFR SDC (第4世代ナトリウム炉)

- 原子力発電所の設計では、深層防護を採用しなければならない。深層防護のレベルは、実行可能な限り独立していなければならない。

放射性物質の著しい放出を実質的に排除するため、DiDレベル4が強化され、重大な炉心損傷と燃料取扱および貯蔵中における深刻な燃料破損の防止及び影響緩和のための関連する安全設計が組み込まれなければならない。

– 4.11 設計 (a) – (f)...

- » (g)安全性と信頼性を確保するため、原子炉停止や冷却に関して受動的な安全機能を取り入れることの利点について、十分に考慮しなければならない。



- 第4世代炉安全性に係るクライテリア -

• クライテリア20: 設計拡張状態

– IAEA SSR 2/1 (現行世代発電炉)

- 設計拡張状態は、許容できない放射線の影響がなく、設計基準事故より厳しい事故もしくは付加的な故障に持ちこたえられることのできる原子力発電所の安全能力を強化することによって、更なる原子力発電所の安全の改良するという目的をもって、工学的判断、決定論的評価および確率論的評価に基づいて検討をしなければならない。こうした設計拡張状態は、設計で取り組まれる追加事故シナリオの特定、および発生した際はそのような事故の防止もしくは緩和に関する現実的な対策のために、使用しなければならない。

– GIF-SFR SDC (第4世代ナトリウム炉)

- 設計拡張状態は、許容できない.... 事故の防止もしくは緩和に関する現実的な対策のために、使用しなければならない。

著しい放射性物質の放出を実質的に除外するため、炉心損傷を伴う重大な事故の発生防止及び/又は影響緩和を行い、格納機能を確保しなければならない。
また、燃料取扱及び貯蔵中における著しい放射性物質の放出を生じるような事故の防止及び/又は緩和がなされなければならない。



SDC: 目次 (3/3)

第3~6章にて、83のクライテリア、206のパラグラフを提示。

IAEA SSR2/1から変更の必要なし、と判断したものは、SSR2/1原文のまま維持。

第6章. 具体的なプラントと系統の設計

クライテリア42bis-82

- 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

SFR系統機器の安全設計全体への注意喚起事項のまとめ

高速炉の炉心特性、燃料設計、炉停止系(特にDEC対応)について記載

高速炉の冷却維持の方策、崩壊熱除去系(特にDEC対応)について記載

高速炉の格納バウンダリ構成を踏まえた格納系隔離等について記載

水/蒸気サイクルに加え、補完概念(超臨界CO₂サイクル)も踏まえた記述。

東京電力福島第一発電所事故を踏まえた、DEC時の計装や燃料プールの除熱強化について記載。



SFRの特性に対応したクライテリア

• 形状変化防止、気泡発生・流入防止

– クライテリア42bis) プラントシステム全体

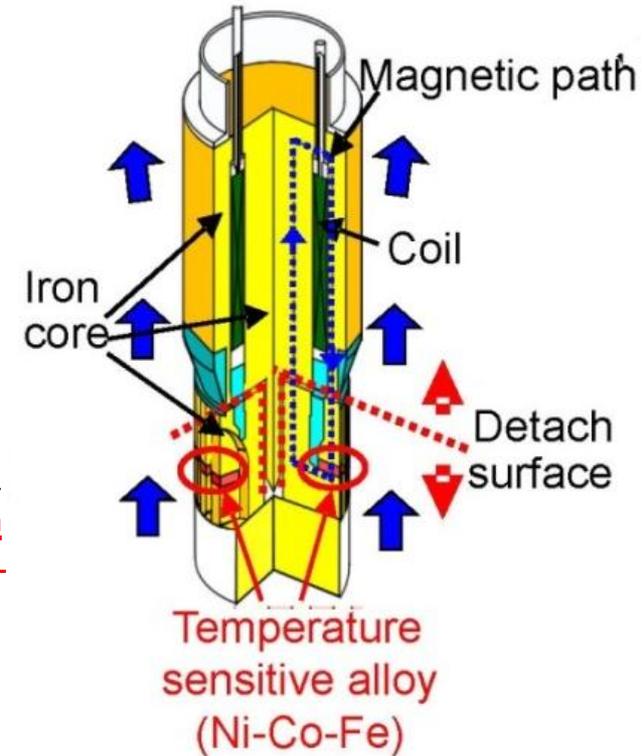
- 炉心が最大反応度体系でないため、炉心の形状変化により正の反応度印加が生じる可能性を考慮した設計
- Naボイド反応度が炉心中心領域で正でありうるため、Na沸騰やガス巻き込みにより正の反応度印加が生じる可能性を考慮した設計

– クライテリア44) 原子炉炉心の構造性能

- 過度な反応度変化を生じない炉心形状が維持される設計

SFRの特性に対応したクライテリア

- 炉停止系の信頼性向上
 - クライテリア44) 原子炉炉心の構造性能
 - 制御棒挿入性の確保
 - クライテリア46) 原子炉の停止
 - 少なくとも2つの多様かつ独立した系統
 - 設計拡張状態において、重大な炉心損傷防止のため、受動的あるいは固有安全特性による原子炉停止能力の確保



JSFRでの対応例

➤ 対応例 (JSFR)

- 能動的機能として、主炉停止系、後備炉停止系の2系統
- 受動的機能として、後備炉停止系にSASS(温度変化に伴う電磁石の保持力低下を活用した制御棒切り離し機構)



SFRの特性に対応したクライテリア

- クライテリア46: 原子炉の停止
 - IAEA SSR 2/1 (現行世代発電炉)
 - 6.9 原子炉を停止するための手段は、少なくとも2つの多様なかつ独立した系統で構成しなければならない。
 - GIF-SFR SDC (第4世代ナトリウム炉)
 - 6.9. 原子炉を停止するための手段は、少なくとも2つの多様なかつ独立した系統で構成しなければならない。
さらに、設計拡張状態に対して、重大な炉心損傷を防止し、かつ再臨界を長期にわたり防止するための受動的あるいは固有安全特性による原子炉停止能力がなければならない。

SFRの特性に対応したクライテリア

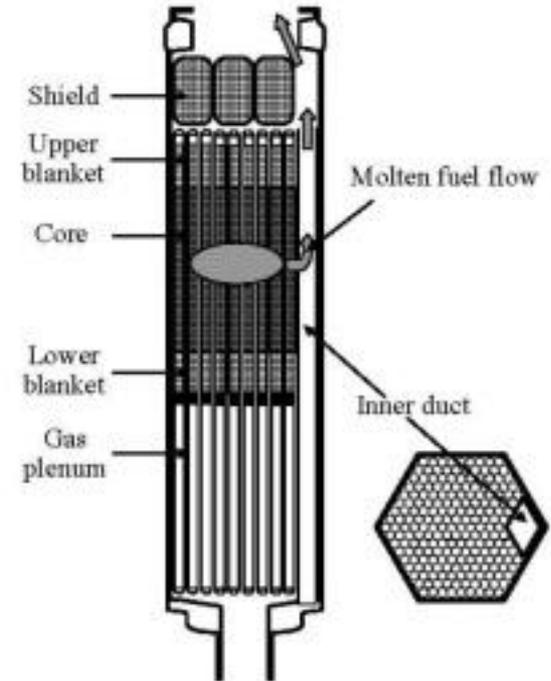
- 著しい炉心損傷状態での緩和策

- クライテリア44) 原子炉炉心の構造性能

- 設計拡張状態での著しい炉心損傷時における再臨界に伴う大規模な機械的エネルギー放出を防止する設計

- クライテリア47) 原子炉冷却材系の設計

- ATWSに対する原子炉冷却材系バウンダリ機能維持



FAIDUS:

Fuel Assembly with Inner Duct Structure

JSFRでの対応例



Na冷却材の特性に対応したクライテリア

- Naの化学的活性への考慮
 - クライテリア42bis) プラントシステム全体への要求
 - Naが化学的に活性なことに考慮した設計
 - 1次系Naと水/蒸気や他の作動流体との化学反応を防止するため、2次冷却系などの中間隔離系統の設置
 - クライテリア47) 原子炉冷却材系の設計
 - Na漏洩検出と化学反応の影響緩和
 - カバーガスバウンダリには不活性ガスを封入
 - 2次冷却系に対し、Naと水/蒸気等との化学反応への考慮
 - クライテリア58) 格納容器の状態の管理
 - Na燃焼、Na-コンクリート反応の防止・緩和
 - クライテリア80) 燃料取扱および貯蔵系
 - Na炉の特有機器として、Naを使う燃料貯蔵槽に対する要件



SFRにおける材料の使用環境に対応した要求

- 構造材の高温・高速中性子場での使用 及び Na冷却材との共存性
 - クライテリア43) 燃料要素と燃料集合体の性能
 - 高速中性子を含み予想される放射線レベルに耐えられる設計
 - クライテリア44) 原子炉炉心／クライテリア47) 原子炉冷却材系
 - クリープ特性、サーマル・ストライピング、高速中性子による変化や他の経年効果、ナトリウムとの共存性、低圧・高温の薄肉構造であることを考慮した設計
 - クライテリア31) 経年化管理
 - 設計寿命の決定に際し、高い運転温度、ナトリウム冷却材、高速中性子照射、脆化および劣化、また経年劣化の可能性の考慮



まとめ

- SDCの構成

- 第1~2章： 背景、目的、クライテリア策定方針など
- 第3~6章： クライテリア本文、及び、付随するパラグラフ

- SDC本文

- 現行軽水炉の安全要求：IAEA SSR 2/1を参考
- 第4世代炉の安全性、SFR特有のシステム構成、東京電力福島第一発電所事故教訓の反映の観点から、クライテリアを構築
- プラント全体に対する全般的な事項から出発し、各系統機器への個別の事項へと展開

- IAEA SSR 2/1からの変更点：

- クライテリア(全83)： 変更20、追加 2、削除1、変更なし60
 - 追加)ナトリウム冷却高速炉のプラント設計全般、ナトリウム予熱系
 - 削除)ECCS

- パラグラフ(全206)： 変更48、追加18、削除2、変更なし138