



総合講演・報告2

「第4世代ナトリウム冷却高速炉の安全設計ガイドライン」研究専門委員会報告

# (3) 第4世代原子炉システムに係る 国際フォーラム(GIF)における 各国の検討状況

日本原子力研究開発機構

岡野 靖



# 発表内容

□ 各国における次世代SFR開発の概況

□ 次世代SFRにおける安全設計

➤ 設計対応例

– 受動的炉停止系

– 自然循環除熱系

➤ SDC/SDGとの整合性に関する状況

□ まとめ



# 現在 運転・建設・開発中の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  
実証炉(CFR-600)の設計開始
- インド： 実験炉(FBTR)を運転中  
原型炉1基(PFBR)を建設中  
商用炉クラス(CFBR)を計画中
- ロシア： 実験炉BOR60/原型炉BN600を運転中  
実証炉クラス(BN800)が初臨界  
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(PGSFR)建設を計画中
- 欧州： ESFRプロジェクト



# 各国次世代SFRの開発状況

## □ GIF-IAEA SFR安全性ワークショップ\*

➤ 第4回会合、2015/6月、於IAEA本部

➤ 主な議題:

– SDCレポートの国際レビュー(IAEA・米NRCコメント)

– SDC/SDGに整合する次世代SFR安全性確保の考え方

– SDG/SDG実現のための次世代SFRの設計オプション

➤ 参加者:

– SFR開発側: 日米仏露中韓印欧

– 規制側: 米露

– メーカー: 日立GE、WH、AREVA、OKBM

\* <http://www.iaea.org/NuclearPower/Meetings/2014/2014-06-10-06-11-TM-NPTD.html>



# 「SDC/SDGに整合する安全設計」のポイント

- 設計拡張状態(DEC)に対する設計対応方策
  - DEC事象リスト
  - ATWS系・LOHRS系個別の設計対策
- 受動安全特性の活用方法
  - 受動的/固有特性による炉停止
  - 自然循環による崩壊熱除去
    - 動作原理の多様性、系統数(多重性)、など
- 事故状態の実質的回避(PE: Practical Elimination)
  - PE事象の摘出とリスト、個別設計対策の具体化
- 高速炉の安全上の特性に関連した事項
  - 炉心反応度特性・ボイド反応度係数に関連した制約



# SDC/SDGにおける個別要求と各国の対応

## (1) 受動的炉停止と固有の反応度特性

### 1. 受動的炉停止機構

JSFR(日) 大型MOX燃料	ASTRID(仏) 中型MOX燃料	BN1200(露) 大型 MN/MOX	PGSFR(韓) 小型金属燃料
SASS (キュリ一点 切離機構)	流体圧浮遊式, キュリ一点切離 機構	流体圧浮遊式	熱膨張切離機構

### 2. 固有の反応度特性

JSFR(日) 大型MOX燃料	ASTRID(仏) 中型MOX燃料	BN1200(露) 大型 MN/MOX	PGSFR(韓) 小型金属燃料
出力係数 負	← 出力/流量係数 負	← ←	← ←



# SDC/SDGにおける個別要求と各国の対応

## (2) 炉停止失敗からの炉心損傷の影響緩和

### 1. 著しい機械的エネルギーの発生防止

JSFR(日) 大型MOX燃料	ASTRID(仏) 中型MOX燃料	BN1200(露) 大型 MN/MOX	PGSFR(韓) 小型金属燃料
ボルト反応度制限 集合体からの溶融 燃料排出機構	← 炉心領域からの溶 融燃料排出機構	(不明) x	(不明) x

### 2. 原子炉容器内での保持と冷却

JSFR(日) 大型MOX燃料	ASTRID(仏) 中型MOX燃料	BN1200(露) 大型 MN/MOX	PGSFR(韓) 小型金属燃料
溶融燃料移行経路	←	(不明)	(不明)
コアキャッチャ	←	←	←



# SDC/SDGにおける個別要求と各国の対応

## (3) 除熱源多様化・多重化による炉心損傷の防止

### 1. 受動的な崩壊熱除去機能（自然循環除熱）

JSFR(日) 大型MOX燃料	ASTRID(仏) 中型MOX燃料	BN1200(露) 大型 MN/MOX	PGSFR(韓) 小型金属燃料
DRACS (FC+NC) + PRACSx2 (FC+NC)	DRACS (NC x 2 or 3) (FC x 2 or 3)	DRACS (NCx4)	DRACS(NC)x2 + DRACS(FC+NC) x2

### 2. 代替除熱系統（DEC専用）の設置

JSFR(日) 大型MOX燃料	ASTRID(仏) 中型MOX燃料	BN1200(露) 大型 MN/MOX	PGSFR(韓) 小型金属燃料
独立ループ型	GV外面冷却	(不明)	2次系/蒸気系





# SDC/SDGにおける個別要求と各国の対応

## (4) 液位低下による炉心露出の防止

### 原子炉容器(RV)からのNa漏洩対策

JSFR(日) 大型MOX燃料	ASTRID(仏) 中型MOX燃料	BN1200(露) 大型 MN/MOX	PGSFR(韓) 小型金属燃料
ガードベッセル設置 高信頼性確保	← GV外部容積制約	← (不明)	← 高信頼性確保

## (5) 格納容器の構成

JSFR(日) 大型MOX燃料	ASTRID(仏) 中型MOX燃料	BN1200(露) 大型 MN/MOX	PGSFR(韓) 小型金属燃料
矩形一体型で 構成	炉上部室+GVで 構成	(コンファインメント)	炉上部室+GVで 構成



# SDC/SDGにおける個別要求と各国の対応

## (6) 実質的回避(PE)

- ✓ PEの考え方はほぼ一致。選定した各事象に対し個別に対策する。
- ✓ 溶融燃料の原子炉容器(RV)貫通をa prioriに想定し設計対策を施す国は無い。
- ✓ PEリスト(議論中)
  1. 著しい機械的エネルギー放出を伴う事象
    - I. 健全炉心の大規模コンパクション
    - II. 炉心支持構造の大規模な損壊
  2. 燃料損傷リスクを伴って格納容器破損に至る状態
    - I. 崩壊熱除去機能の完全喪失
    - II. 炉容器内液位の著しい低下による炉心の露出
  3. 燃料貯蔵プールにおける使用済み燃料の溶融



# SDC/SDGにおける個別要求と各国の対応

## (7) 蒸気発生器(SG)伝熱管破損に対する裕度確保

- ✓ バウンディング解析の設定条件は設計者依存
- ✓ 機構論的な現象評価が基本という議論

## (8) 炉心反応度特性に関連する安全上の制約

- ✓ DBAにおける要件:
  - ✓ 出力運転状態での炉心反応度の出力係数 負
- ✓ DECにおける反応度要件:
  - ✓ 全反応度(各反応度効果の合計)  $< 1\$$
  - ✓ 特定の反応度係数に対して数値的な制約を設けることは技術的に不適切という認識で一致(不適切な例: 全炉心のポイド反応度係数を負)
  - ✓ 「受動的炉停止」の場合: 事故時の反応度変化を相殺できる価値
  - ✓ 「固有の反応度特性」の場合: 出力係数、出力/流量比係数、炉心等温係数(入口温度に対する係数)が負



# まとめ

## □ 各国SFRの運転・建設・開発の現状

- ロシア・中国・インドに於いて特に活発

## □ 各国次世代SFRの検討状況

- SDC/SDGとの整合性が、各国が次世代SFRの安全設計を進める上での主眼点となっている。

### ➤ SDC/SDG適合設計

#### – 対策上の一致点

- ✓ DEC対応としての受動的炉停止機構・系統の設置
- ✓ PE事象(PVメルトスルー、など)
- ✓ 反応度： DBA時(出力係数負)、DEC時(全反応度 $<1\%$ )

#### – 対策上の不一致点(あるいは不明点)

- ✓ 格納系の機能要求
- ✓ 溶融燃料の炉心領域からの積極的な排出機構の設置