



総合講演・報告4

「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

(4) 安全設計ガイドラインに適合した 設計概念

三菱FBRシステムズ

島川 佳郎



発表内容

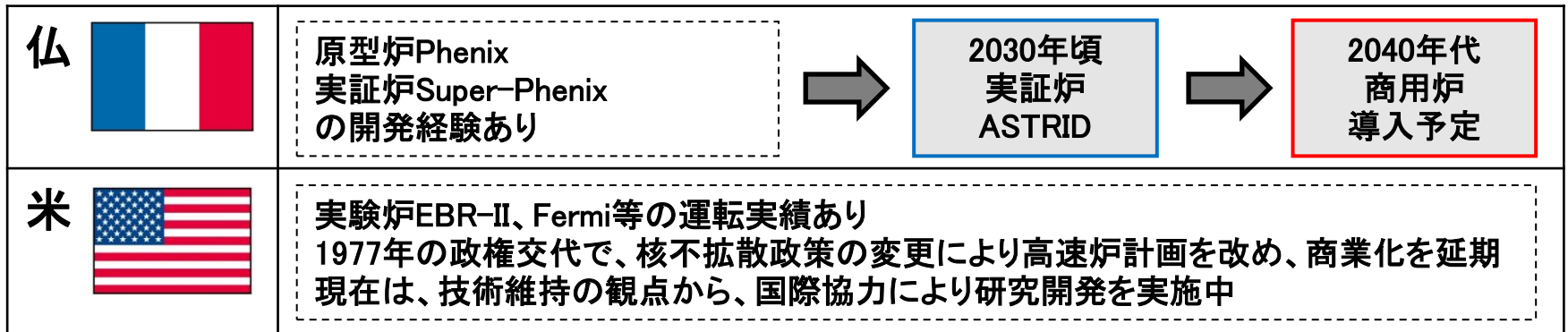
- 各国のSFR開発状況
- 各国の次期SFRの安全設計概念
 - 次世代SFR(日本)
 - ASTRID(フランス)
 - BN-1200(ロシア)
- 各国の次期SFRのSDC/SDG要件への適合性
 - ATWS系DECへの要件に対する適合性
 - LOHRS系DECへの要件に対する適合性
- まとめ



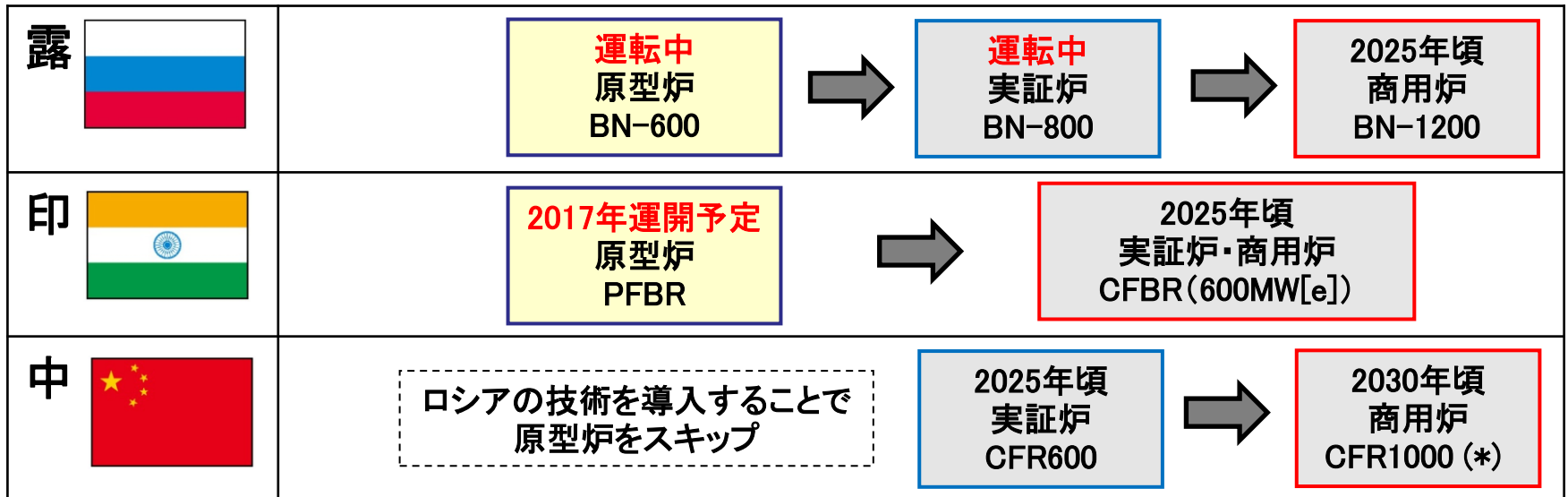
1. 各国のSFR開発状況 (1/2)

(1) 主要なSFR開発国の状況 [1]

増殖技術を習得済み、放射性廃棄物対策が中心



エネルギーセキュリティの観点から高増殖を指向、早期の本格導入を目指す



(*) FR17では「CCFR」[12]







1. 各国のSFR開発状況 (2/2)

(2) 各国の実用化戦略

FaCT(日) 

- ・2050～2060年頃の高速炉の本格導入
- ・安全性・信頼性、経済性、持続可能性及び核不拡散性に係る高い目標を設定 (GIFの目標とほぼ同等)

仏・露・印・中 将来の基幹電源として高速炉サイクルを活用 (共通)

国名	開発目標全般	持続可能性	経済性
仏 	安全性・信頼性、資源有効利用性、核不拡散性についてGIFと同様の目標を設定	放射性廃棄物の発生量の低減を重視 ・高い増殖比は当面不要	未設定
露 	安全性・信頼性、経済性、持続可能性についてGIFと同様の目標を設定	増殖性能を重視 ・露: 窒化物燃料 ・印・中: 金属燃料の導入も視野	軽水炉等と同等の経済性を目標
印 			
中 			

GIF: 第4世代原子力システム国際フォーラム



2. 各国の次期SFRの安全設計概念(1/5)

(1) 各国の次期SFR

各国次期炉の安全設計概念を調査

- **第4世代炉**(或いはそれに向けた実証炉)として設計していると推測
(SDC/SDGへの適合を意識していると考えられる)
- ①炉心設計、②受動的炉停止方策、③CDA対策、④液位確保方策
及び⑤除熱源確保方策の概要を示す

国名	名称	電気出力	型式	位置付け
日 	次世代SFR	750MW[e]	ループ型	実証炉
仏 	ASTRID	600MW[e]	タンク型	実証炉
露 	BN-1200	1220MW[e]	タンク型	商用炉
印 	CFBR	600MW[e]	タンク型	商用炉
中 	CFR1000	1000MW[e]	タンク型	商用炉

中国のCFR1000については設計情報が不明なので、調査対象外とした



2. 各国の次期SFRの安全設計概念 (2/5)

(2) 次世代SFR(日本)の安全設計概念 [5][6]

①炉心設計

- ・MOX燃料均質炉心

②受動的炉停止方策

- ・キュリ一点式電磁石による制御棒切離機構(SASS)を採用

③CDA対策

- ・ボイド反応度を6\$程度以下に制限(即発臨界防止)
- ・FAIDUSによる溶融燃料の早期排出(即発臨界防止)
- ・炉内コアキャッチャによる溶融燃料の原子炉容器内保持

④液位確保方策

- ・原子炉冷却材バウンダリの2重構造化(GV、外管)
- ・高い信頼性を確保して、RVとGVの2重漏えいを実質回避
- ・冷却系での2重漏えいを想定しても除熱確保できる設計

⑤除熱源確保方策

- ・SDG要件を満足する系統構成
 - ・自然循環能力の活用を重視
- PRACS(NC) × 2
DRACS(NC) × 1
補助炉心冷却系(FC) × 1

ATWS時の炉心損傷防止、炉心損傷時のIVR達成(格納機能確保)を図る
LORL起因、PLOHS起因の炉心損傷防止を図る

LORL : Loss of Reactor Sodium Level
PLOHS : Protected Loss of Heat Sink



2. 各国の次期SFRの安全設計概念 (3/5)

(3) ASTRIDの安全設計概念 [5]

①炉心設計

- ・MOX燃料軸方向非均質炉心(CFV炉心)
- ・ボイド反応度を約0\$まで低下

②受動的炉停止方策

- ・LOF型ATWS事象対応
流体圧浮遊式制御棒(RBH)
- ・LOHS型ATWS事象対応(CPEM)

③CDA対策 [6]

- ・炉心領域からの溶融燃料排出機構(TT)
- ・炉内コアキャッチャによる溶融燃料の原子炉容器内保持(全炉心規模の損傷を想定)

④液位確保方策

- ・主容器(MV)に安全容器(SV)を設置
- ・MVとSVの2重漏えいをDECとして想定しても、炉心露出を回避し、除熱確保できる設計 [7]

⑤除熱源確保方策

- ・防護ライン法(LoD)の考え方に基づく系統構成
- ・多様性追求を重視
貫通型DRACS(FC)×2
浸漬型DRACS(NC)×3
RVACS(FC)×1

ATWS時の炉心損傷防止、
炉心損傷時のIVR達成(格納機能確保)を図る
LORL起因、PLOHS起因の炉心損傷防止を図る



2. 各国の次期SFRの安全設計概念 (4/5)

(4) BN-1200の安全設計概念 (2/3) [5][8]

①炉心設計

- ・MOX燃料/窒化物燃料炉心
- ・上部Naプレナム付き(推測)

②受動的炉停止方策

- ・流体圧浮遊式制御棒(PAZ-G)
- ・温度作動型制御棒(PAZ-T)

③CDA対策

- ・炉内コアキャッチャによる溶融燃料の原子炉容器内保持(全炉心規模の損傷は想定していないと推測)

④液位確保方策

- ・主容器(MV)に安全容器(SV)を設置(1次系全体をカバー)
- ・MVとSVの2重漏えいの想定の有無については不明

⑤除熱源確保方策

- ・4系統のDRACSで構成される崩壊熱除去系を検討
- ・自然循環除熱が可能な貫通型DRACSを検討中 [9]
- ・SDG要件とした「代替除熱手段」の有無は不明

ATWS時の炉心損傷防止を図る

炉心損傷時のIVR達成(格納機能確保)を図る(推測)

LORL起因、PLOHS起因の炉心損傷防止を図る(推測)



2. 各国の次期SFRの安全設計概念 (5/5)

(4) BN-1200の安全設計概念 (2/2) [8]

ロシアのSFR(BNシリーズ)の安全設計概念の推移



項目	BN-600	BN-800	BN-1200
受動的炉停止システム	なし	PAZ-G	PAZ-G及びPAZ-T
コアキャッチャ	なし	設置	設置(炉内)
事故時放出閉じこめ型	なし	なし	設置(詳細不明)
1次系のリークジャケット	部分的	部分的	1次系全体をカバー
崩壊熱除去系	水・蒸気系に設置	2次系に設置	1次系に設置
シビアアクシデント発生確率	1.7E-5/炉年	2.8E-6/炉年	5.0E-7/炉年

受動的炉停止方策を充実させるとともに、炉心損傷時のIVRを追求
液位確保方策と除熱源確保方策の信頼性向上を追求



3. 各国の次期SFRのSDC/SDGへの適合性 (1/4)

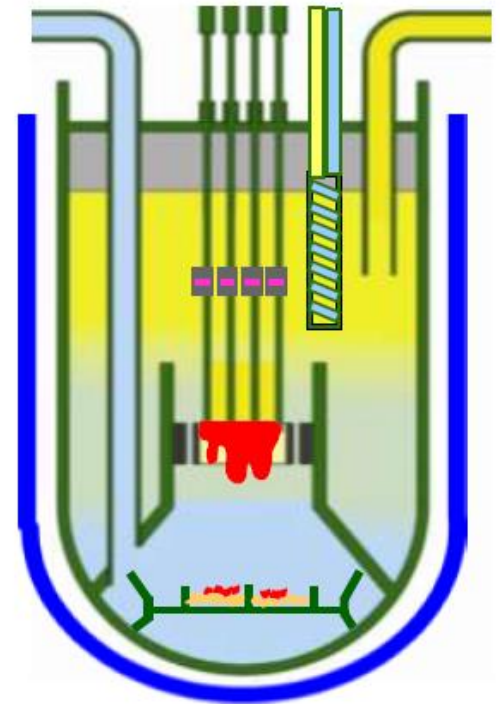
(1) ATWS系DECへの要件に対する適合性 (1/2)

SFRの特徴:

炉停止に失敗すると短時間で炉心損傷に至り、炉心の再臨界ポテンシャルが顕在化する恐れがある

ATWS系DECに対する要件:

- ・**炉心損傷防止**: 受動的な炉停止機能
又は固有の反応度フィードバック特性
を活用した出力低減機能を備え、炉
心損傷を回避して炉停止できること
- ・**格納機能確保**: 炉心損傷を想定しても、
原子炉冷却材バウンダリの機械的破
損を防止すること(IVR)






損傷炉心のIVRを達成



3. 各国の次期SFRのSDC/SDGへの適合性 (2/4)

(1) ATWS系DECへの要件に対する適合性 (2/2)

国名	名称	炉心損傷防止		格納機能確保	
日 	次世代 SFR	SASS	受動的方策の 導入・強化を 検討中	ボイド反応度制限 FAIDUS 炉内コアキャッチャ	IVR達成を 目指す方向で 検討中 (一部推測) 全炉心規模の 損傷を想定し ない炉もある と推測(露) [11]
仏 	ASTRID	RBH CPEM		ボイド反応度低減 TT 炉内コアキャッチャ	
露 	BN-1200	PAZ-G PAZ-M		ボイド反応度低減 炉内コアキャッチャ	
印 	CFBR	HSAR Ultimate Shutdown System 等		ボイド反応度低減 炉内コアキャッチャ	

3. 各国の次期SFRのSDC/SDGへの適合性 (3/4)

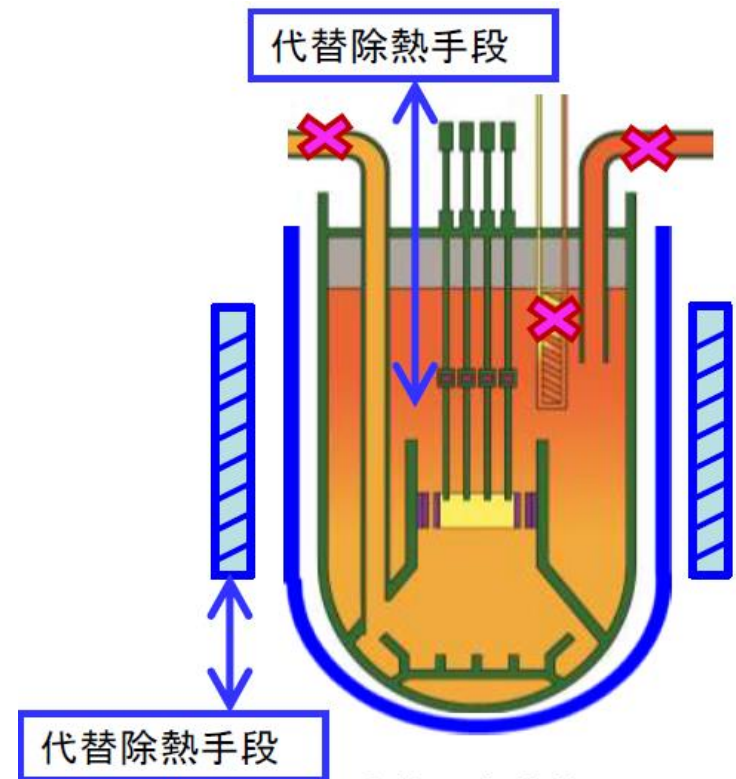
(2) LOHRS系DECへの要件に対する適合性 (1/2)

SFRの特徴:

Na沸騰までの温度上昇余裕が大きく炉心損傷に至るまでの時間余裕が大、また、高い自然循環能力を有し、静的機器による液位維持が可能

LOHRS系DECに対する要件:

- ・炉心損傷防止: RVとGVの信頼性を確保して炉容器液位を確保(LORL防止)するとともに、崩壊熱除去系の機能強化や独立性の高い代替手段により冷却性を維持(PLOHS防止)して、炉心損傷を 実質回避すること






炉心損傷を防止しIVR達成



3. 各国の次期SFRのSDC/SDGへの適合性 (4/4)

(2) LOHRS系DECへの要件に対する適合性 (2/2)

国名	名称	LORL防止		PLOHS防止	
日 	次世代SFR	RVとGVの高信頼度確保(2重漏えい実質回避)	LORL 起因の 炉心損傷を 実質回避 (一部推測)	自然循環能力活用 代替冷却手段確保	PLOHS 起因の 炉心損傷を 実質回避 (一部推測)
仏 	ASTRID	MVとSVの2重漏えい時にも炉心露出回避			
露 	BN-1200	不明			
印 	CFBR	MVとSVの高信頼度確保(2重漏えい実質回避)			
				多様性追求を重視 自然循環能力活用	
				自然循環能力活用	
				自然循環能力活用 追加的系統の追設	



4. まとめ

- (1) 各国の次期SFRの安全設計の概要を調査した。
- (2) 各国とも、安全対策の強化を図る方向で検討を進めており、**総じて、SDC/SDGの要件を満足する方向で安全設計が進んでいると考えられる。**日本の高速炉技術(安全関連R&Dに基づくハード技術・安全設計方針等のソフト技術)を国際的に示すとともに、**各国の次期SFRの安全性向上に貢献できた**と考える。
- (3) 第4世代SFRを称する以上は、SDC/SDGの要件を満足する必要がある。個別の安全対策における要件への適合性については、**今後とも、各国の次期SFRの設計をフォローしてゆく必要がある。**

本報告は、経済産業省からの受託事業である「平成27年度高速炉等技術開発」、「平成28年度高速炉国際協力等技術開発」及び「平成29年度高速炉の国際協力等に関する技術開発」の成果を含む。



参考文献

- [1] 世界と日本の高速炉開発について(平成28年4月1日 JAEA)
- [2] “French Transition Scenarios Toward a Symbiotic Nuclear Fleet” ,ICAPP2016-15732 (CEA)
- [3] “A Preliminary Study of P&T Scenario on a Sustainable Energy System in China” ,FR17, IAEA-CN- 245-110 (CIAE)
- [4] “Study on the sensitivity analysis of the installed capacity and the high-level waste generation based on closed nuclear fuel cycle” ,FR17, IAEA-CN-245-Cx2 (CIAE)
- [5] 第7回SDG研究専門委員会資料 系統別SDGのポイント(各国概念)(2016年1月12日)
- [6] “France-Japan Collaboration on the Severe Accident Studies for ASTRID : Outcomes and Future Work Program” ,ICAPP2017-17378 (CEA,JAEA,AREVA,MFBR)
- [7] “Current trends for Sodium Fast Reactors design options -An industrial perspective-” ,FR13
- [8] “Evaluation results of BN-1200 compliance with the requirements of Generation IV and INPRO” ,FR17, IAEA-CN-245-399 (OKBM,IPPE)
- [9] “Integrated R&D to Validate Innovative Emergency Heat Removal System for BN-1200 Reactor” ,FR17, IAEA-CN-245-416 (JSC-OKBM)
- [10] “Advanced Design Features of MOX Fuelled Future Indian SFRs” ,FR17, IAEA-CN-245-300(IGCAR)
- [11] “Safety Assurance for BN-1200 Power Unit During Accident” ,FR17, IAEA-CN-245-385(Afrikantov OKB Mechanical Engineering)
- [12] “Research,Development and Deployment of Fast Reactor and Related Fuel Cycle in China” ,FR17, IAEA-CN-245-585 (CIAE)