

福島第一原子力発電所事故の技術的知見と第4世代炉の安全性  
(日本原子力学会 2012 年秋の大会：新型炉部会企画セッション)

大阪大学 山口 彰 (企画セッション座長)

日本原子力学会新型炉部会は、ナトリウム冷却高速炉の安全性について、的確で偏見のない技術情報を学会並びに社会に対して発信をすることが大切であると考え、2012 年秋の大会にて特別セッションを企画しました。

第4世代炉は、将来のエネルギー安定確保における不透明さに備え、我が国並びに国際社会の長期にわたるエネルギー供給を確かなものとするための重要な基幹技術であるとの認識が共有されています。一方で、福島第一原子力発電所のシビアアクシデントの厳しさを踏まえ、その教訓と技術的知見を十分に斟酌した第4世代炉の安全性に対する取り組みを確立していくことが重要であることは論を待ちません。また、ナトリウム冷却炉の固有の特性や設計上の特徴の視点から、福島第一事故における技術的知見の意味合いを咀嚼し、安全向上に反映することも重要な視点となるでしょう。

本企画セッションでは、新型炉で国際的な枠組みとして検討中の安全設計基準の概要、第4世代炉としての福島第一事故の技術的知見への取り組み、シビアアクシデントマネジメントとその有効性と事故を踏まえた安全確保方策について報告しました。

最近の新聞報道によれば、第4世代炉はエネルギー安定確保のみでなく、高レベル放射性廃棄物の短寿命化や減容にもその意義が見出されているようです。どのようなミッションを担うにせよ、安全性をより確かなものにするこの本質的な重要性は変わることなく、第4世代炉の役割と安全に関する各位からのご意見をお待ちしております。

## 事故の技術的知見と第4世代 SFR の特徴

北海道大学名誉教授

杉山 憲一郎

### 1. 緒言

OECD 加盟国(34 カ国、約 12.5 億人)の 1 次エネルギー生産量は世界の約 40%である。その生産量の 6.3%は Renewable & Waste Energy であるが、内訳は Combustible Renewables & Waste が 4.9%である。脱原発を望む日本人が期待する Solar、Wind、Geothermal などは 1.4%である[1]。ドイツ、スペインの例で分かるように補助金の継続性に依存しており、エネルギー確保・環境制約・国力維持の総合的視点からその割合は決められるべきである。

本稿では、旧原子力安全・保安院が平成 24 年 3 月に発行した報告書「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」の分類に沿って知見の要点を示すと共に、ナトリウム冷却高速炉(SFR)への教訓となる内容について短い説明を加えた(太文字部)。

### 2. 事故の技術的知見と第4世代 SFR の特徴を踏まえた教訓

- ・ **外部電源設備について**：交流電源の確保の成否が発電所の安全確保の結果に大きな差異を生じたことを踏まえて、発電所から直接つながる変電所内までの信頼性向上と発電所内開閉所の耐震性向上に加えて、復旧作業に必要な資機材を準備し外部電源の復旧の迅速化が必要である。→**今後の信頼性向上方策に反映していく。**
- ・ **所内電源設備について**：共通要因故障による電源喪失の発生を防止するため、電気設備一式の位置的な分散、建屋の水密化による浸水対策の強化に加えて冷却方式の多様化(海水冷却と空気冷却)が必要である。非常用直流電源の長期間機能維持に加えて、事故後の対応・復旧を迅速化するために、外部からの供給の容易化、電気設備関係の予備品を備蓄しておくことが求められる。→**自然循環冷却系の状態監視用電源の多様性と信頼性が重要。**
- ・ **冷却設備について**：使用済み燃料プールを含め冷却設備の共通要因故障による機能喪失を防止するため、建屋等の水密化による耐浸水性や位置的分散、最終ヒートシンクの多様性の確保が求められる。注水機能を強化するため、隔離弁の駆動源喪失時の強制動作メカニズム導入などによる動作確実性の向上、駆動源の多様化、吐出圧の高いポンプ、建屋外の注水口の整備などによる代替注水機能の強化が必要である。初期対応において的確な判断が行えるため、炉心冷却を最優先すべき状況の判断基準を明確化し、そのためのハード(計装系、線量計、防護装備等)とソフト(操作手順書等)を整備すること。→**ナトリウム冷却材の凍結リスクを分析し防止・復旧できる方策の確立と厳しい環境での訓**

練が重要。

・ **閉じ込め機能に関する設備について**：全交流電源喪失の場合でも、格納容器の加圧と過温を防止するため格納容器スプレイ機能と残留熱除去系等による除熱機能の多様性の確保、非常用ガス処理系等とベント配管系の分離性と号機間でのベントの分離性の確保、ベント系への放射性物質除去設備の追加と水素濃度監視・安全排出機能の追加。着実な低圧代替注水への移行手順の明確化、ベントの操作性向上が必要である。→炉心から水素発生がなく低圧系であるため閉じ込め機能性は優れているが、大規模な炉心溶融時の再臨界発生を回避できる設計対策（炉心外への溶融燃料の流出促進構造、等）の検証・確立が重要。

・ **指揮、通信・計装制御設備および非常事態への対応体制について**：指揮・通信設備の信頼性を向上させるため、事故時指揮所の確保・整備、非常時の電源確保対策を着実に実施すると共に、関係機関での対応を迅速かつ適切に行うため、情報共有システムの再構築と責任の明確化が求められる。プラントの状況を正確に把握するため、事故時における計装設備の信頼性の確保、プラント状態の監視機能の強化、事故時モニタリング機能の強化。加えて、非常時事態対応に係るマニュアルや設計図面等の必要な情報の整備、人員の確保・召集体制の構築、夜間や悪天候下等も含めた緊急時対応訓練等を実施すること。→実証炉段階であり既設軽水炉と異なった支援が必要であることから、ナトリウム取扱いと放射線の専門知識を持つ支援部隊・機関・企業との緊急時対応の緊密な合同訓練が重要。

・ **地震による設備・機器等への影響について**：止める・冷やす・閉じ込めるに係る安全上重要な機能を有する耐震Sクラスのうち主要な7設備（原子炉圧力容器、主蒸気系配管、原子炉格納容器、残留熱除去系配管、残留熱除去系ポンプ、炉心支持構造物および制御棒（挿入性））を地震応答解析により検討し、地震時および地震直後において安全機能を保持できる状態にあったと推定している。また、7設備以外の耐震Sクラスの機器・配管については現場確認が可能な福島第一発電所5号機で代表させ、解析・目視調査を行い安全機能が保持できる状態にあったと推定している。ただし、微小漏えいが生じるような損傷が安全上重要な機能を有する主要設備に生じたかどうかについては、現時点では明確ではない。→冷却材に液体ナトリウムを用いる第4世代SFRでは炉心へ直接海水を注入することはできない。このため炉心冷却材と崩壊熱除去系の循環機能の確保に万全を期すために免震技術による耐震設計余裕を確保することを基本に、ナトリウム・バウンダリーを形成する構造材料の健全性を定期的に確認するとともに定格運転時の状態監視技術を強化し、バウンダリーの健全性をより確実に護っていくことが重要である。それらに加え、水-蒸気系への海水を含む注水や窒素ガス注入による多様

な冷却手段を講じること等により崩壊熱除去機能に一層高い信頼性を確保していくことが重要である。

・津波による設備・機器等への影響について(著者が追加)：開放型海水ポンプのモーターが冠水により機能を喪失、非常用ディーゼル発電機、配電盤、蓄電池等の電気設備の多くがタービン建屋等の地下階に設置されていたため、建屋への浸水により殆んど同時に冠水し機能を失った。→海溝型 M9 地震の大規模変位エリア 3ヶ所から発生した津波が合体し約 15 m の津波となり来襲した F-1 と、約 7 m の津波が襲った F-2 を意見聴取会委員として視察、防潮堤を用意し十分な強度の水密扉を設け開口部がなければ津波に対する安全上重要な施設・機器の保護は可能と判断した。ナトリウム冷却炉では仮に定格運転時の冷却系である海水ポンプ等に冠水が生じても、炉心冷却系に直結し空気をヒートシンクとした自然循環空気冷却系が設けられていることから安全確保は可能である。

### 3. まとめに代えて

資源・環境制約の大きい 21 世紀グローバル社会の中で、日本が安定的に持続可能な社会に移行していくためには、国家・地域・個人に関する中・長期的なリスクを総合的に議論できる環境(学校教育現場を含め)を作り出し、原子力発電のリスクのみに特化する議論を払拭して行く必要がある。この観点を含めて企画セッションでの PPT を用意した。本稿と併せてお目通しを頂きたい。

### 参考文献

1. IEA, Key World Energy Statics 2012

# 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

## 1. 緒言

第4世代原子炉に関わる国際フォーラム(GIF)では、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原子炉システムとして有望な6つの概念の開発協力を進めている。特に、開発及び運転経験が豊富なナトリウム冷却高速炉(SFR)は、各国において商業炉に向けた開発段階へ進展しており、GIFとしての共通の安全設計要求の整備が急務となっている。そこでGIFにおいて国際的な協調による安全設計クライテリア(Safety Design Criteria: SDC)の策定の取り組みを行っている。本報告では、その概要を説明するとともに、今後の国際標準としての活用について展望する。

## 2. 安全設計クライテリアの整備の背景と位置づけ

第4世代SFRの概念設計に際しては、GIFの安全目標を具現するSFRシステムとして満たすべき具体的な安全要件について、国際的な標準化が期待される。GIFでは、安全階層の最上位に位置するものとして、安全原則と安全目標<sup>1)</sup>及び安全に対する基本的方策<sup>2)</sup>が策定されている。一方、安全審査指針レベルに相当する安全設計要求としては、既存軽水炉を前提としたIAEA SSR 2/1に相当するような国際共通化が図られたものは第4世代炉について現状存在しないことから、第4世代SFRの構築物、系統および機器に対する安全設計要求を包括的・系統的にまとめたSDCの整備を行うこととなった。

GIFのSFR開発国としては日・米・仏・露・中・韓・EUが参加しており、各国からのメンバーに加えてIAEAからのメンバーも含めてGIFにSDCタスクフォースを組織し、2011年7月から活動を開始した。これに対応して、国内では、本学会において、「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」特別専門委員会を組織し、SDCの素案の検討を行った。これを基にGIFのタスクフォースへ素案の提示を行い、国際的な議論を主導した。GIFにおいては、これまで4回のタスクフォースを開催し、SDCのドラフトをまとめ、GIFの各組織からのレビューを通じてフィードバックを行い、最終的なドラフトとしてまとめつつある。

## 3. 安全設計クライテリアにおける基本的安全方策

SDC構築の着眼点は、1) 第4世代炉としてあるべき高い安全目標である「サイト外緊急時活動の必要性の排除<sup>3)</sup>」の実現、2) 基本的な深層防護(Defense-In-Depth)の考え方を踏襲した上で、深層防護第4層として、重大な炉心損傷の防止と影響緩和対策を安全設計に取り入れる<sup>4)</sup>ことを要求、3) 動的安全システムに加え受動的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にある。

構築に当たっては、IAEA の原子炉施設の安全：設計（SSR 2/1）を参考にした基本構成とし、第 4 世代炉としての高い安全性を具現化するとともに、SFR 特有の要件を取り込むこととしている。また、各国安全要件の動向を踏まえるとともに、福島第 1 原子力発電所（F1）の事故の教訓を反映する。

#### 4. 安全設計クライテリアの概要

SDC のドキュメントは、1. 諸言、2. 安全目的及び安全概念、3. 設計における安全管理、4. 主要な技術要件、5. 一般プラント設計（設計基準、安全解析等）、6. 個別プラント設計（炉心、炉停止系、冷却系、格納系等）で構成される。

第 4 世代炉の国際標準として高い安全性を確保するため、深層防護の各レベルの強化、特に第 4 のレベルに対して、炉心損傷の防止及び緩和に関する built-in での安全機能を要求する等、既存炉よりも高い安全性を求めている。SFR は炉心特性として、最大反応度体系にないこと、炉心中心部近傍で正のボイド反応度となりうることから、再臨界による大規模の機械的エネルギーの発生防止を要求する。ナトリウムを冷却材として使用することに関連して、低圧条件下での運転であることから、冷却材漏えい時の静的な冷却材液位確保が行える一方、その化学的な反応が基本的な安全機能に影響を与えないことが要求される。また、多様性を高める方法として、受動的な原子炉停止機能、自然循環を活用した受動的な崩壊熱除去機能を設計に取り入れることとしている。

#### 5. 安全設計クライテリアの活用

世界的にみれば、アジア、特に中国、インドの急速な原子力利用拡大と SFR の積極的な導入が見通されており、ロシア、フランスについても着実な SFR の開発が行われている。本年 6 月に敦賀で開催された「SFR のシビアアクシデントの発生防止と影響緩和」会合では、SFR 開発国全てと IAEA から専門家が参加し、シビアアクシデントの基本的アプローチと具体的方策が議論された。会合では国際的な SDC 整備の重要性が認識され、GIF の SDC 整備の取り組みは、国際的な安全性の維持・向上に貢献できると期待される。また、IAEA と連携して国際的な SDC の共有化を図ることにより、国際標準として活用されることが期待されるというメッセージがまとめられた。

#### 6. まとめ

第 4 世代 SFR の安全設計要求の国際協調を図るため、GIF において SDC の整備を進めている。SDC 素案は本学会の特別専門委員会において検討し、GIF における SDC 検討タスクフォースへ提案され、その後の多国間での議論を経て、いわゆる国際標準としてまとめられつつある。これらの活動が IAEA における安全基準化も含め、さらに国際標準としての位置づけが与えられるよう推進する。また、現在開発中の SFR については、SDC との比較分析を行い、第 4 世代炉としての高いレベルの安全性が確保されることを通じて、こうした活動がグローバルな

安全確保に貢献することが可能となる。

#### **参考文献**

[1] A Technology Roadmap, GIF-002-00 (2002),

[2] Basis for the Safety Approach, GIF/RSWG/2007/002 (2008).

# シビアアクシデント対策を取り入れた第4世代SFRの安全設計アプローチ — JSFR Approach —

日本原子力発電株式会社  
小竹 庄司

## I. 序論

ナトリウム冷却型高速増殖炉（以下、SFR という）である原型炉「もんじゅ」に続く実証炉の概念設計研究ならびに実用化に向けた研究開発においては、第4世代炉のSFRとして、安全確保を前提とした資源有効利用と環境負荷低減性ならびに核拡散抵抗性を備え、かつ基幹電源として経済的競合性を確保できることを開発目標としている。

安全設計にあたっては、これまでの世界各国のSFRの運転実績に基づく安全に対する知見と、シビアアクシデント関連を含む炉心安全やナトリウム安全の多くの研究成果を基盤とした上で、福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえ、第4世代SFRが満足すべき実効性のある安全設計クライテリアを構築し、各国で共有していくことが重要である。また、「もんじゅ」で発電炉としての運転実績を積み、事故管理方策を含むシビアアクシデント対策を具体化していくことも不可欠である。

## II. 安全確保の基本的考え方

第4世代SFRの設計における安全確保は、軽水炉と同様に深層防護の考え方である「異常発生防止」「異常の拡大防止」「事故の影響緩和」に基づくことに加え、福島第一原子力発電所事故では除熱手段が確保できなくなり、炉心損傷に至ったことを踏まえ、シビアアクシデントを含む「炉心損傷の防止と影響緩和」の強化、すなわち、DEC (Design Extension Conditions: 設計拡張状態) に対してSFRの特徴を踏まえた強化を図る。これによって、「サイト外緊急時活動の不要化」（放射性物質大規模放出の実効排除）を目指している。

DECでは特に、炉心冷却を確保する設備と、これを含めた安全設備を動作させるために必要な電源や冷却系統が、地震や津波等の共通要因によって機能喪失しない対策が必要である。安全設備の多様性の強化として、能動的な安全設備の多様性強化に加え、安全機能發揮のために必要な機器を簡素化できる受動的機構の導入によって安全性向上を図る。また、DECに対する設計対策を予め組込み、設計合理化を図れる「Built-in」を実現するため、安全設計上の特徴を有効に活用して受動的に「止まる」「冷える」ようにする。これらの対策により、DECにおいても運転員の負担を軽減した安全確保が可能となる。

また、ナトリウムの化学反応についても、深層防護の考え方を適用し、これまでの経験を踏まえて炉心安全性へ波及しない頑健性を確保する。



### Ⅲ. JSFR の安全設計アプローチ

JSFR では、「もんじゅ」等の実績を踏まえた技術を基盤とするとともに、包括的な安全設計アプローチを行う。具体的には、DEC も含めた深層防護の実現手段として「止める」「冷やす」「閉じ込める」の各機能を以下のとおりに強化する。

#### (1) 能動的炉停止系と受動的炉停止系（「止める」と「止まる」）

既存技術である 2 つの独立した能動的炉停止系（主炉停止系と後備炉停止系）に加えて、受動的炉停止系として SASS（Self Actuated Shutdown System：自己作動型炉停止系）を導入する。能動的炉停止系の不動作を想定しても、冷却材温度上昇の際には、温度感知合金を用いた制御棒保持機構が切り離されるキュリー点（磁性が急減する温度）電磁石方式によって、制御棒が重力落下して炉停止する。

#### (2) 崩壊熱除去系の多重性、多様性（冷やす）

SFR の特徴である炉心出入口の高い温度差とナトリウムの高い熱伝導度によって、崩壊熱除去系は電源がなくとも動作する自然循環冷却による大気放熱が可能であり、その基本的性能を「常陽」にて実証している。JSFR では、崩壊熱除去系を多重化するとともに、除熱源に海水を選択可能とする方式など、代替冷却手段をとり得ることで多様性を有した設計が可能である。特に、崩壊熱除去では炉心冷却材の液位確保が重要であることから、ナトリウムバウンダリの二重化とナトリウム漏洩の早期検知の徹底、そして高応力部位等のバウンダリの健全性確認を定期的に行う。また、配管及び外管との間隙部における状態監視技術を高度化し、バウンダリの健全性確認に対する信頼性を向上するとともに、免震技術を導入して構造物の信頼性を高めていくことが重要である。

#### (3) 炉心損傷時の再臨界回避（閉じ込める）

LWR と異なり低圧である SFR では、格納機能確保に対する課題は、炉心損傷時に熔融燃料が大規模に凝集し、それによる即発臨界から機械エネルギーが放出され、その結果、原子炉容器上部プラグ部などからナトリウムが噴出・燃焼する可能性に対する影響の緩和である。近年の炉心損傷時に発生する諸現象や熔融燃料の運動挙動に関する研究成果によって、炉心反応度等の適切な炉心設計により、炉心損傷初期に即発臨界に至ることは回避できることがわかってきている。JSFR ではさらに、FAIDUS（Fuel Assembly with Inner Duct Structure：内部ダクト付燃料集合体）を用いることで、熔融燃料の炉心外への早期排出による再臨界回避技術を開発しており、炉心から排出された熔融燃料は、炉内コアキャッチャーにより分散状態を保持され、炉内で冷却される。

### Ⅳ. まとめ

第 4 世代 SFR の安全性は、これまでの SFR の設計及び運転経験を基礎として、設計基準

を越える過酷なプラント状態（設計拡張状態）を想定しても格納容器への脅威にならずに事象終息する特性を備えることが求められる。高速炉におけるシビアアクシデントに関する国際的な研究開発の今後の展開と、「もんじゅ」で得られる運転実績とシビアアクシデント・マネジメント対策やこれらの運用方策を参考に、次期炉の安全性をより向上させていくことが可能となる。