

新型炉部会セッション「もんじゅ安全性の国際レビュー」

もんじゅ安全性の国際レビュー

International Review on Safety Requirements for Monju

山口 彰¹, *齋藤 伸三², *岡本 孝司¹, *可児 吉男³, *中井 良大²

¹東京大学, ²原子力機構, ³東海大学

1. 国際レビューの概要

2011年3月の東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故（以下「東京電力福島事故」という）を踏まえ、ナトリウム冷却高速炉等の研究開発段階発電用原子炉を対象とした重大事故を考慮した新規規制基準が2013年7月に施行された。

この基準については、原子力規制委員会はパブリックコメント等を踏まえ再度見直しをすることとしている（2013年6月12日第10回原子力規制委員会配布資料2より）が、日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という）はこれまでの知見を活かし、独自に「高速増殖原型炉もんじゅに関する重大事故を含む安全確保の考え方」を構築すべく、高速増殖炉の技術及び安全性評価に精通した専門家により「もんじゅ安全対策ピアレビュー委員会」（以下「委員会」という）を設置し、安全上の要求事項を報告書「高速増殖原型炉もんじゅの安全確保の考え方」（以下「安全確保の考え方」という）として取りまとめ、2014年7月に原子力規制委員会に提出した。

その後、「安全確保の考え方」の妥当性の確認を目的として、より広く専門家の判断を仰ぐため、海外の高速炉安全性の専門家による国際的な安全の考え方に基づく評価（国外レビュー）、及び国内の高速炉安全性の専門家による客観的かつ公正な評価（国内レビュー）、即ち、国際レビューを受け、その結果を報告書にまとめ、2015年9月に公表した（図1）。

国外レビューでは、中国、仏国、韓国、ロシア、米国、及びEU（欧州連合）から計9名のレビュー者を選任しており、いずれも各国の高速炉開発計画において安全設計・評価に責任ある立場、あるいは国際的組織を代表する高速炉安全性の専門家である。2015年5月には、東京で海外の専門家によるレビュー会合を、文部科学省と共同で開催した。

一方、国内レビューでは、「安全確保の考え方」を国内の専門家により第三者の視点から客観的かつ公正に評価してもらうために、公益財団法人原子力安全研究協会にレビューを委託した。同協会は、国内の高速炉の安全性専門家5名による委員会を設置して検討を行った。

原子力機構は、「もんじゅ」のさらなる安全性向上を図るために「安全確保の考え方」を十二分に斟酌する上で、「安全確保の考え方」について広く国内外の専門家の判断を仰ぎ、その妥当性について確認した。

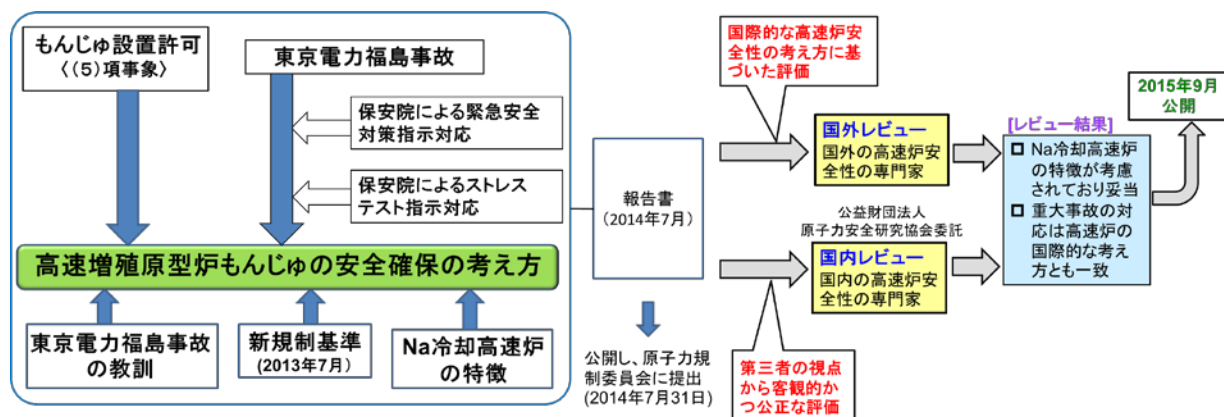


図1 国際レビューの全体フロー

2. 高速増殖原型炉もんじゅの安全確保の考え方

図2にナトリウム冷却高速炉（「もんじゅ」）の特徴を踏まえた「委員会」報告のポイントを示す。ナトリウム冷却高速炉の冷却材は、元々、熱伝達特性に優れ、高沸点（883℃：大気圧）であり発電のために1

次系圧力を上げる必要がなく、さらに、「もんじゅ」では静的なガードベッセルにより、事故時においても冷却材を原子炉容器内に維持できる設計としている。そのため、1次系冷却材の漏えい事故時においても軽水炉のように早期に炉心が露出することはなく、冷却のための減圧及び冷却材注入は不要である。また、液体で利用可能な温度範囲が広く、冷却材バウンダリが健全である限り「もんじゅ」では十分な自然循環冷却が可能な設計としている。さらに、系統ナトリウム及びプラント構造物の熱容量が大きいことから、事故時における温度の上昇は一般に緩慢であり、炉心の著しい損傷までに時間的な余裕（数時間から数十時間）があることから、運転員の手動操作による複数のアクシデントマネジメント（AM）策が可能である。一方、ナトリウム冷却高速炉は、設計基準を超える事故時においてナトリウムボイド反応度が正となりうること及び燃料集中による臨界性を考慮する必要がある。また、ナトリウム冷却材は空気や水に対して化学的に活性であることを考慮する必要がある。このようにナトリウム冷却高速炉は軽水炉と異なる特性を有することから、その安全確保に関する要件は軽水炉との特性の相違を十分に考慮する必要がある。

「もんじゅ」では、これまで上記の特性を踏まえて設計がなされ、安全審査において確認されてきた。特に、設計基準を超える事故についても重大事故に対する先取的な審査が行われており、炉心特性等を十分に考慮した対策が講じられていることが確認されている。しかしながら、今般の東京電力福島事故を踏まえれば、その教訓を反映する観点から、更なる安全対策の拡充を図ることが重要である。日本原子力学会の調査では重要設備に地震の揺れによる深刻な損傷はなかったとされているが、津波による浸水が交流、直流を含め全ての電源喪失をもたらし、電源が確保されることを前提とした AM 策が機能し

なかったことを重く受け止めなければならない。このため、地震、津波をはじめとする共通要因故障の原因となる外部ハザード全般への対策強化、長期的な事故対応に当たっては代替電源確保とそれらの位置的分散配置、全交流動力電源が喪失した状態における操作・管理・体制面（ソフト）を含めた AM 策の信頼性向上、格納機能の確保に関する詳細な確認、電源喪失時の通信・計装の強化、等に関し東京電力福島事故の教訓を反映し検討を行うべきである。また、それらの反映にあたっては、事象の選定等において確率的なリスク情報等を活用し、大規模な格納機能喪失に至るシーケンスは実質上除外されるように対策しなければならない。

「委員会」では、上記を踏まえ、高速増殖原型炉もんじゅに関する重大事故を含む安全確保の考え方として適切に対策を講じなければならない以下の 16 項目の要求をまとめた。

1. 原子力事故に対する人と環境の安全を確保する目的のため、深層防護概念に基づく事故の発生防止と影響緩和によって、原子力施設とその運用に起因する放射線から人と環境が受けるリスクを社会から受容される範囲に制限すること。
2. （原子炉停止系）：多重性又は多様性及び独立性を有した原子炉停止系を設けること。ナトリウム冷却高速炉では、制御棒による複数の独立した原子炉停止系を設けること。設計基準事故時において原子炉停止系のうち少なくとも一つは、原子炉を臨界未満にでき、かつ、臨界未満を維持できること。
3. （崩壊熱除去系）：原子炉容器内で発生する崩壊熱を除去し、最終ヒートシンクへ熱を輸送する設備を設けること。熱輸送系及び最終ヒートシンクは、その健全性及び機能を失わないようにすること。
4. （共通要因故障の回避）：共通要因故障に至る可能性のある内部火災、内部溢水に対して事象の発生と拡

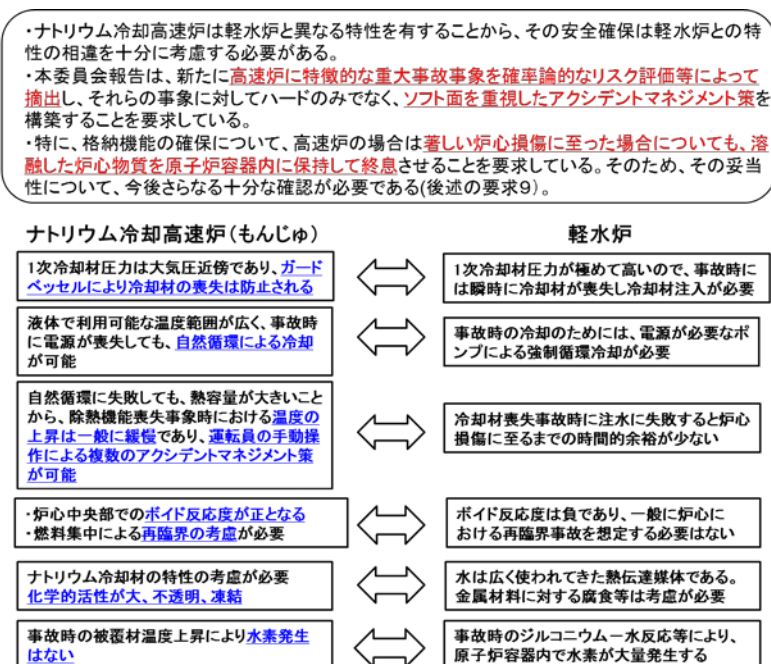


図2 ナトリウム冷却高速炉(もんじゅ)の特徴を踏まえた委員会報告のポイント

大を防止するため、必要な対応策が講じられていることを確認すること。対応が不十分である場合にはさらなる対応策を講じること。

5. (ナトリウム冷却高速炉に特有な事象)：ナトリウム漏えい、ナトリウム・水反応に関する十分な対応策を講ずること。2次系のナトリウム漏えい及び蒸気発生器の水漏えいに対し、従来の設備対応の妥当性、並びに設計基準を超える重大事故への進展のおそれについて検討し、必要に応じて設備対応等を適切に実施すること。
6. 炉心損傷事故に至る可能性のある原子炉停止失敗に起因する事象と除熱失敗に起因する事象について、安全機能の喪失状態及び事象進展を確率論的リスク評価（PRA）等も参考にして適切に考慮し、必要な設備対応（ハード）及び操作・管理・体制面（ソフト）での対応から成る適切な AM 策を講じること。
7. 原子炉停止機能喪失事象に対し、ナトリウム冷却高速炉の炉心特性から進展速度が一般に極めて速い事象であることを考慮し、設計の安全余裕について最新知見を用いて確認するとともに、設備面（ハード）及び操作・管理・体制面（ソフト）から成る適切な AM 策を講じること。
8. 「もんじゅ」の安全上の特徴から除熱機能喪失事象についての安全対応策は極めて重要であることから、設備の特徴を踏まえ設備面（ハード）及び操作・管理・体制面（ソフト）から成る適切な AM 策を構築すること。

9. 格納機能の喪失に至る事象を詳細に評価し、原子炉停止機能喪失事象及び除熱機能喪失事象について溶融燃料による原子炉容器破損の可能性は実質上除外されるように適切な AM 策を講じること(図3)。

(要求9)格納機能喪失対策

格納機能の喪失に至る事象を詳細に評価し、**原子炉停止機能喪失事象及び除熱機能喪失事象について溶融燃料による原子炉容器破損の可能性は実質上除外**されるように適切なAM策を講じること。

(例)原子炉停止機能喪失事象(ATWS系)の評価フロー

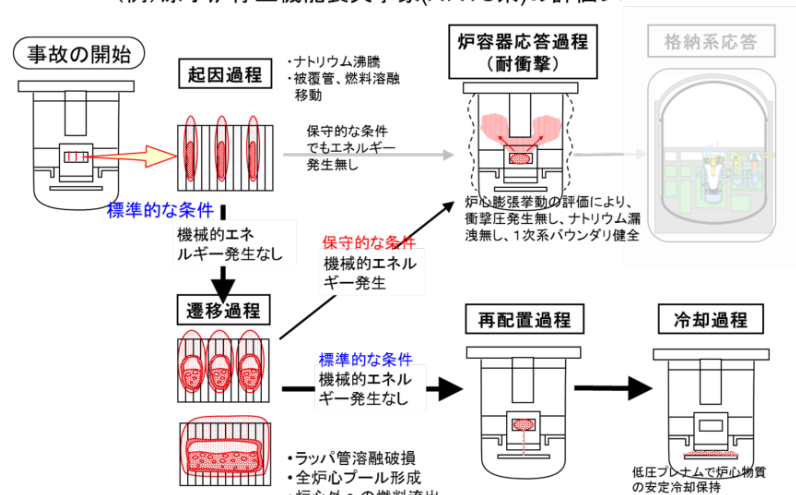


図3 16項目の要求の1例

10. 原子炉施設は、地震、津波、及びそれ以外の自然現象に対して、確率的評価手法等に基づきリスクを評価し、適切な余裕をもって安全が確保されるように設計による対応策を施すこと。設計想定を超える規模の自然現象に対してはその影響や設備の耐性を把握し、ナトリウム冷却高速炉の特徴を考慮した適切な AM 策を整備すること。
11. 故意による大型航空機の衝突、その他のテロリズムに対して、自然循環冷却ループや補助冷却系の配置等の設備上の特徴、並びに AM 策の有効性も考慮し重大事故の発生防止及び影響緩和策を講じること。
12. 設計基準を超える事象に対する合理的な安全対策の整備の観点から水素爆発を防止するため、水素濃度の測定、水素の外部への排出、意図的な小規模な水素燃焼等の適切な AM 策を、既存設備も活用し講じること。
13. 使用済燃料貯蔵槽（炉外燃料貯蔵槽及び燃料池）における燃料破損を防止するため、設備の特徴を踏まえた適切な AM 策を講じること。
14. 重大事故等発生時の中央制御室及び緊急時対策所の居住性を、ナトリウム冷却高速炉における事故の特徴に鑑みた適切なソースタームを想定し、運転員あるいは要員の被ばくの観点から遮蔽、換気等の設備を設計し、確保すること。
15. 重大事故時において必要とする原子炉及びプラントの状態を監視できる措置を講じること。重大事故等が発生した場合に監視するパラメータは、ナトリウム冷却高速炉の特徴及び想定される重要事故シーケンス等の事象進展と環境条件に鑑みて適切に選定すること。また、監視パラメータの重要性によって計測機器を分類し、耐震性を確保すること。
16. 重大事故発生時に的確な AM 対策を実施できるように必要な措置を講じること。重大事故に的確かつ

柔軟に対処できるよう、体制、手順、書類、資機材等を整備するとともに、教育、訓練を行なうこと。さらに、訓練等で評価された AM 策の有効性を適切に PRA に反映するとともに、PRA 等の結果を用いて、継続的に AM 策の有効性を向上させること。

3. 国内レビュー

原子力機構は、「委員会」にて策定した報告書「安全確保の考え方」について、より客観的な立場からの公正な評価を得るために、原子力機構以外の第三者機関（原子力安全研究協会）に委託して国内の専門家によるレビューを実施した。

図4に国内レビューの実施方法を示す。本レビューは5名の国内の専門家で構成される「もんじゅ安全性レビュー専門委員会」を設置して実施された。レビューにあたっては、高速増殖

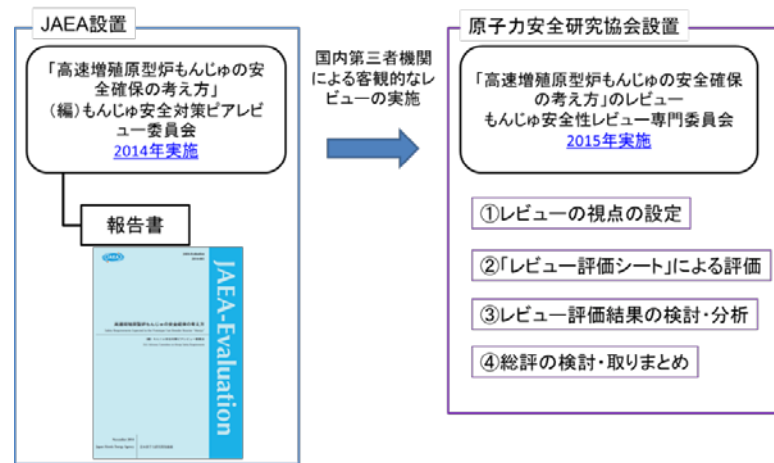


図4 国内レビューの実施方法

炉の安全性に関する技術的専門家個人としての視点からレビューを行い、新型炉部会の「研究開発段階発電用原子炉安全設計方針検討会報告書」に示された論点を参照することとされた。

専門委員会としてのレビュー結果のまとめを以下に示す。

- (1)東京電力福島事故の教訓を踏まえた高速増殖原型炉もんじゅの安全確保の考え方について、ナトリウム冷却高速炉の安全上の特徴を十分に考慮しつつ適切な整理がなされており、ナトリウム冷却高速炉であるもんじゅに対する安全確保の方針及び要求事項は妥当なものと考えられる。
- (2)従来の原子力発電所の安全確保の考え方では、設計の妥当性を判断するために設計基準事故を想定してきたが、東京電力福島事故を教訓として、更に、それを超える事故に対しても対策を取る必要がある。このような設計基準事故を超える事故に対しても、まず、原子炉施設の地震、津波等に対する対策の強化や電源車等を配備することにより重大事故の発生を防止する。さらに、万一、重大事故等に至った場合にも放射性物質の拡散を抑制するため格納機能を確認することとしており、このような2段階の対策を講じることは国際的にみても一般的なアプローチであり妥当である。
- (3)格納機能確保の考え方については、原子炉容器の損傷や溶融貫通が生じないように、原子炉容器内で溶融炉心を冷却、保持（IVR、In-Vessel Retention）すると言う考えが示されている。これは、より信頼性・確実性が高いリスク抑制方策になり得ると考えられ、追求すべき妥当なアプローチである。
- (4)規制要求レベルへの対応に留まらず、継続的なリスク低減努力が重要である。PRA 等を活用し、外的事象を含め様々な事象（シーケンス）の発生可能性について幅広く検討分析を行い、リスクプロファイルを包括的に把握しつつ、合理的に達成可能なリスク低減方策を不断に追求していくことが求められる。

4. 国外レビュー

原子力機構は、「委員会」にて策定した報告書「安全確保の考え方」について、国際的な評価を受けるために、海外の専門家によるレビューを実施した。本レビューでは、中国、仏国、韓国、ロシア、米国、及びEUから計9名の専門家を選任しており、いずれも、第4世代原子力システム国際フォーラム（GIF）や国際原子力機関（IAEA）等の国際協力プログラムにおける重要メンバーとして活躍している。レビューにあたっては、「安全確保の考え方」において、高速炉特有の重大事故の防止と影響緩和に関する考え方をまとめた第4章及び前述の16項目の要求をまとめた第7章について英訳したものを各レビュー者に送付し、受けたレビュー結果をまとめたレビューサマリ案を事前に作成した上でレビュー会合を開催して審議を行った。

レビュー会合では、ATWS 評価等が最新知見を反映したものであることが確認されるとともに、レビューサマリについて技術的な討議が行われた。ロシアとフランスのレビュー者から、集合体入口の瞬時完全閉塞も考慮すべきとの指摘があったが、会合において議論した結果、「もんじゅ」の場合は発生確率が無視

できる程度に小さく、その影響は ATWS 事故に代表される全炉心事故に十分包絡されと見る見解がまとめられた。

国外レビューにおける主要な結果を以下に示す。

- (1) 重大事故の想定は、ナトリウム冷却高速炉の特徴を踏まえ、系統的かつ包括的に実施されており、安全確保の基本的考え方は妥当なものである。
- (2) 原子炉停止に失敗して炉心が溶融しても、炉心物質は原子炉容器内に保持され、原子炉容器の健全性が確保されることが、様々な不確かさも考慮して適切に評価されている。この IVR シナリオは、ナトリウム冷却高速炉の持つ固有の安全性と信頼性の高い崩壊熱除去能力を反映したものであり、高速炉安全における最新の国際的な考え方にも一致する。
- (3) 「もんじゅ」では、全電源喪失のような設計基準を超える事故においても、自然循環可能な設計となっており、崩壊熱の除去が可能である（図5）。また高速炉では系統圧力が低いため、炉心冷却に必要な冷却材液位が十分確保でき、除熱が失敗した場合でも、炉心損傷に至らしめない多重な対策を施す時間的余裕は十分あると評価される。これらのことから、「もんじゅ」の格納機能確保を炉心損傷防止により達成するという考え方は妥当である。
- (4) 東京電力福島事故の教訓を反映して、設計基準を超える地震・津波などの外的事象に対し、高速炉の構造物、系統及び機器の耐性と設計上の特徴を考慮しつつ、PRA を利用して安全確保策を策定することとしており、外的事象に対する要求事項は妥当なものである。

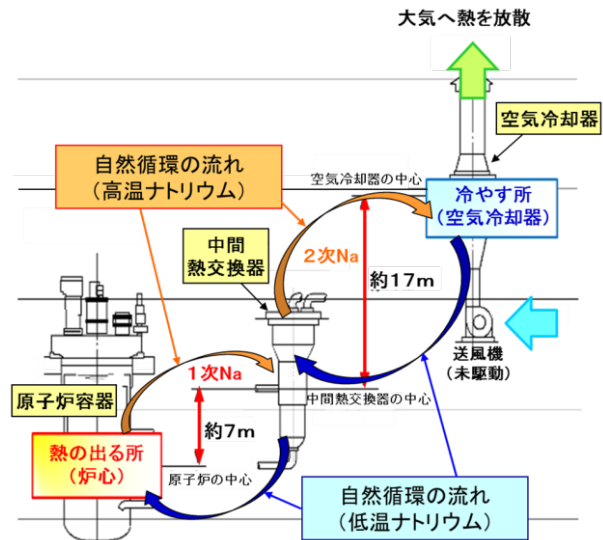


図5 自然循環による崩壊熱除去

5. まとめ

原子力機構は、「安全確保の考え方」について広く国内外の専門家のレビューを受け、その妥当性について確認した。下記に主なレビューコメントを示す。

- (1) 「安全確保の考え方」で述べられている安全上の要求事項は、東京電力福島事故の教訓と、ナトリウム冷却高速炉の特徴を十分に考慮されたものであり、妥当である（国外、国内）。
- (2) 事故時に制御棒が挿入できないことにより原子炉を停止できずに炉心の燃料が溶ける重大事故が発生した場合でも、溶けた燃料は原子炉容器の中に安定して保持されることは、高速炉の最新の国際的な考え方とも一致している（国外）。この様な事故が発生しても、溶けた燃料を原子炉容器の中で長期的に冷却して、留めようとする考え方は妥当である（国内）。
- (3) 「もんじゅ」は、電源がなくなりポンプが動かなくても、ナトリウムの温度差によって生じる密度の違いにより、冷却材が原子炉や配管の中を流れ、最終的に大気へ熱を放出することにより炉心燃料の崩壊熱を冷やせるしくみになっている。この冷却手段を有していることから、万一、全ての電力供給がなくなっても、燃料は溶けることなく原子炉容器の中で保持できるとする考えは十分受け入れられる（国外、国内）。
- (4) 自然現象（地震、津波、竜巻、火山、森林火災等）など外部からの様々な脅威に対し、個別の脅威について講じなければならない対策を明らかにしていく手法は妥当である（国外、国内）。また、規制側の安全要求を満たすだけでなく、事業者として自ら継続的にリスクを低減させていくことも重要である（国内）。

*Akira Yamaguchi¹, Shinzo Saito², Koji Okamoto¹, Yoshio Kani³ and Ryodai Nakai²

¹Univ. of Tokyo, ²JAEA, ³Tokai Univ.