



「もんじゅ」の安全性、信頼性の向上 にむけて

伊藤 和元 森山 正敏* 前田 太志

教習本部 高速増殖炉もんじゅ建設所

* 経営企画本部

資料番号：1-1

Improving the Safety and Reliability of Monju

Kazumoto TOU Masatoshi MORIYAMA* Hiroshi MAEDA

Monju Construction Office, Tsuruga Head Office

* Executive Office for the Policy Planning and Administration, Head Office

「もんじゅ」では、2次主冷却系ナトリウム漏洩事故の教訓と反省を踏まえて安全総点検を行い、抽出した課題に対する具体的な改善方策を検討した。この安全総点検は、設計の基本的な考え方に遡り、設備の健全性、異常発生時の検出、拡大防止策等の妥当性についての点検のほか、運転手順書や品質保証体系・活動の妥当性に関する点検等5分野について実施したものである。この結果、ナトリウム漏洩の早期検出、拡大防止及び影響緩和に関する種々の改善方策をはじめ、「もんじゅ」全体の安全性、信頼性の向上につなげるための設備改善、運転手順書等の改善、品質保証上の改善事項等を今後の改革方針としてまとめた。

Comprehensive safety review has been performed at Monju to determine why the Monju secondary sodium leakage accident occurred. We investigated how to improve the situation based on the results of the safety review.

The safety review focused on five aspects of whether the facilities for dealing with the sodium leakage accident were adequate: the reliability of the detection method, the reliability of the method for preventing the spread of the sodium leakage accident, whether the documented operating procedures are adequate, whether the quality assurance system, program, and actions were properly performed and so on.

As a result, we established for Monju a better method of dealing with sodium leakage accidents, rapid detection of sodium leakage, improvement of sodium drain facilities, and way to reduce damage to Monju systems after an accident. We also improve the operation procedures and quality assurance actions to increase the safety and reliability of Monju.

キーワード

高速増殖炉、もんじゅ、ナトリウム漏洩、安全総点検、安全性、信頼性、運転手順書、品質保証

FBR, Monju, Sodium Leakage, Comprehensive Safety Review, Safety, Reliability, Operation Manual, Quality Assurance

1. はじめに

高速増殖原型炉もんじゅ（以下「もんじゅ」という）においては、1995年（平成7）12月8日に発生した2次主冷却系ナトリウム漏洩事故の状況調査、原因究明等から明かとなった教訓や反省を踏まえ¹⁾、

- ① ナトリウム漏洩関連設備を中心とした点検
- ② 「もんじゅ」設備の設計から運用に至るまでの点検
- ③ 運転手順書等の点検
- ④ 研究開発成果、技術情報の反映の点検

⑤ 品質保証体系、活動の点検

を柱とする「もんじゅの安全総点検」に関する実施計画にそって、設備・システム全体、運転手順や品質保証の仕組みや活動等について点検を実施し、安全性、信頼性向上の観点から改善すべき課題、今後確認あるいは研究開発を進めるべき事項等を抽出した。特に、ナトリウム漏洩に対する安全性の向上につなげるための設備改善に係る課題については、具体的な改善方策を検討し、その効果を定量的に明らかにした。

また、2次主冷却系ナトリウム漏洩事故以降に

「もんじゅ」で経験したトラブル、東海事業所でのアスファルト固化処理施設火災・爆発事故等から抽出した点検の視点も、新たに追加して点検を進めた。

本稿では、もんじゅの安全総点検の概要とその結果抽出された諸課題に対する改善策の検討結果について紹介する。

2. もんじゅの安全総点検の概要

2.1 ナトリウム漏洩関連設備を中心とした点検

(1) 流力振動に対する健全性点検

ナトリウム漏洩事故の直接的な原因は、ナトリウム流動に伴い温度計さや細管が振動し、高サイクル疲労によりさや段付き部が破損したためである。このことから、系統内で流力振動の影響を受ける可能性のある温度計さや、ナトリウム内包壁を貫通するか構成している構造物(液面計等)、熱交換器伝熱管及びナトリウム中に内在する機器等を抽出整理し、流力振動に対する健全性を点検した。

点検に際しては、渦励起振動(カルマン渦、対称渦)、乱流励起振動、流力弾性振動、内部流体による振動、キャビテーション等を考慮し、機器の使用条件と形状に応じて、考慮すべき流力振動モードに対する共振回避・抑制条件、応力振幅、疲労評価等の判定条件との比較により健全性の点検を行った。

本点検のフロー及び結果を図1に示す。水・蒸気系温度計さやのうち4本が渦共振回避条件を満足しなかったが、このうち1本は設計時に誤った流速を使用したためであり、他は管台部の剛性等を考慮していなかったことが原因である。上記の温度計及び設計疲労限を満足しなかった温度計(18本)の計22本は、交換するか撤去することとした。また、これらの温度計はすべて同一形状であり、他に15本の同一形状の温度計及びサンプリングノズルが同様な使用条件(主蒸気系)のもとに設置されていることから、予防保全の観点からあわせて撤去あるいは交換することとした。

なお、一次主冷却系温度計及び炉外燃料貯蔵設備温度計については、念のため、内面目視点検、超音波探傷検査等により現場における健全性点検を実施し、欠陥が発生していないことを確認した。

(2) ナトリウム内包壁の健全性点検

冷却系統内でナトリウムを内包している機器・配管類及び事故時のみナトリウムに接する機器(ガードベッセル、ナトリウム・水反応生成物収納設備収納容器等)について、設計の基本的な考え方に遡り、内包壁としての構造健全性に対する設計要求事項の妥当性、実機が設備設計条件を満足したものとなっているか等について点検した。

本点検では、図2に示すフローに従い各段階で関連する設計関連図書等を照合することによ

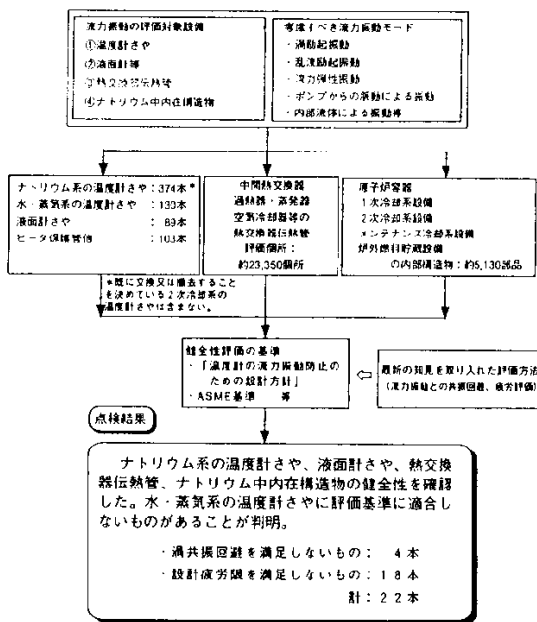


図1 流力振動に対する健全性点検

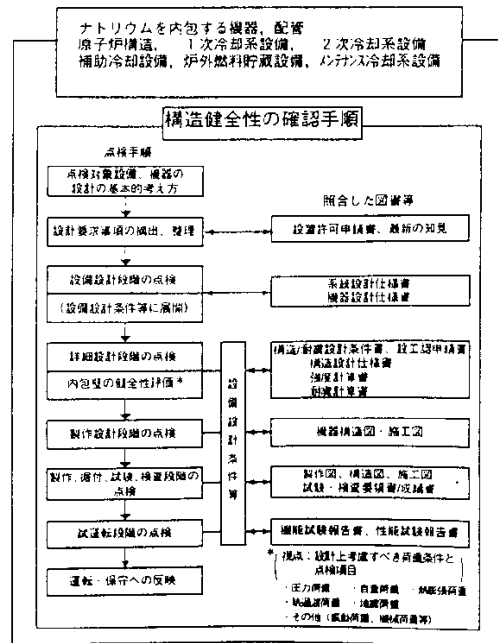


図2 ナトリウム内包壁の健全性点検のフロー

り、次の事項を確認した。

- ① 設計の基本的考え方から展開された設計要求事項が設置許可申請書に反映されていること。
- ② 設計要求事項が今回の事故、先行炉の事故・故障等の最新の知見に照らし、内包壁の健全性確保の観点から妥当なものとなっていること。また、設計要求事項が系統設計仕様書等により設備設計条件として適切に反映されていること。
- ③ 上記の設備設計条件が構造/耐震設計条件書、設工認申請書、機器構造図、製作図、施行図、試験検査成績書等に適切に展開され、製作設計、製作・据付、試験・検査及び試運転の段階へと継承・具体化されていること。

特に、想定すべき荷重条件の充足性、構造不連続部での評価が要求される適切な基準（構造等の技術基準、高温構造設計指針及び耐震設計基準）に従ってなされているかということに注意を払って点検した。

点検対象としたすべての機器について、次のことを確認した。

- ① 個々の設備の安全上の重要性を適切に考慮した機器種別、耐震性等の設計要求事項が定められており、それらが設備設計条件に展開されている。
- ② 材料、構造、強度等の設計要求事項が詳細設計、製作・据付、試験・検査等の各段階で確実に継承されており、各機器の強度評価が適切な基準によりなされている。

また、ナトリウム配管合流部での温度差が約70℃で下流側溶接部に破損を生じた海外炉での事例があることから、ナトリウム配管合流部21系統（45箇所）について、試運転段階で得られた実測値または設計値に基づいて温度ゆらぎに対する配管の健全性を評価した。この結果は図3に示すとおりである。合流するナトリウム温度差を温度変

動幅とした保守的な簡易評価の結果からは、材料の設計疲労限に対応する限界温度変動幅を上回る温度差となる箇所が6箇所（4系統）あることが判明した。これらのうちミキシングティ構造を採用している1次ナトリウム純化系プラグング計戻り合流部については、合流部の構造による温度差緩和効果を考慮すると限界温度変動幅を下回ることとなる。また、他の箇所についても詳細評価を行った結果、各合流部の温度差は限界温度変動幅を下回ることが確認できたが、念のためヒーターによる合流部低温配管の加熱等による温度差低減対策を講じることとした。

なお、上述の配管合流部の温度変動幅の緩和対策の効果確認に加え、「2.4 研究開発成果、技術情報の点検」からの抽出課題も考慮し、二次主冷却系配管熱変位、小口径配管、計装配管及びポンプ出口枝管の振動等について、今後の試運転段階で測定、確認を行うこととした。

(3) 漏洩の早期検出、拡大防止及び影響緩和に関する点検

ナトリウムを内包する一次主冷却系及び1次ナトリウム補助設備、二次主冷却系及び2次ナトリウム補助設備、炉外燃料貯蔵設備及びメンテナンス冷却系設備に関連するナトリウム漏洩検出設備、消火設備、換気空調設備、ナトリウム充填・ドレン設備、保温構造、ライナ、安全保護系、液面計、インタロック等の制御系及び中央監視制御システムについて点検した。

本点検は、「(2)ナトリウム内包壁の健全性点検」と同様な手順で行い、特に、今回のナトリウム漏洩事故の反省と教訓、先行炉での事故・故障等からの知見、さらには、大洗工学センターの燃焼実験の結果等も考慮して従来の設計要求事項に追加すべき事項を明らかにしたうえで改善策を策定した。また、ナトリウム漏洩の箇所、規模、形態等について様々なケースを想定し、周辺機器配置、システム間相互作用等を考慮した漏洩の影響程度を現場での機器配置確認及びナトリウム燃焼解析コード（ASSCOPS Ver.2.0）による解析により確認した。

本点検のフローと結果及び設備改善策の概要を図4に示す。現状設備を対象とした二次主冷却系ナトリウム漏洩燃焼解析の結果から、適切なプラント停止操作とそれに続く事故拡大抑制操作（換気停止及びナトリウムドレン）を行えば、高温溶融塩型腐食を仮定しても床ライナを貫通するような腐食のないこと、水素の蓄積による燃焼が生じないことが確認された。しかしながら、適切な裕度を確認するとの観点からは、中小規模のナトリ

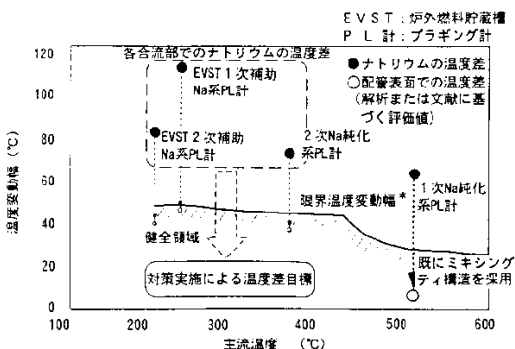


図3 配管合流部の温度ゆらぎに対する健全性評価

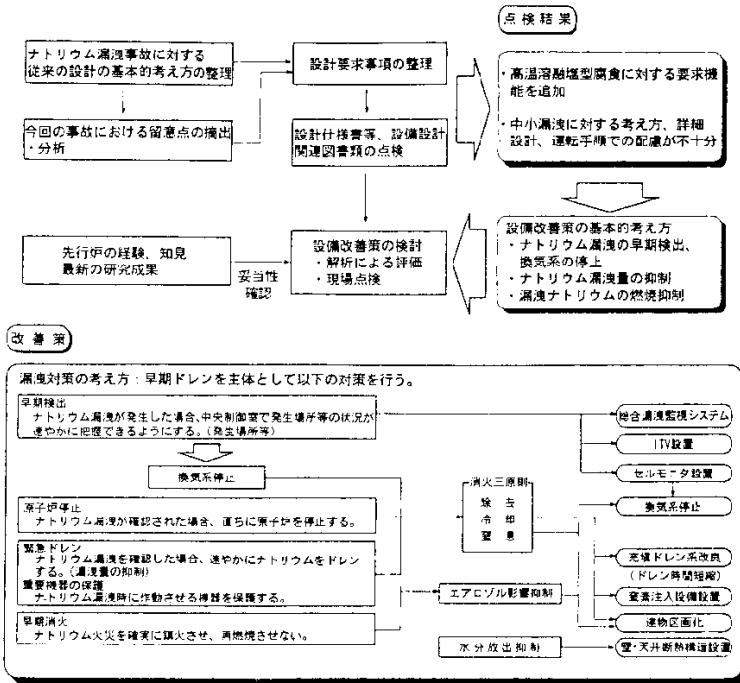


図4 漏洩の早期検出、拡大防止等の点検

ウム漏洩に対しても漏洩発生早期検出、換気系の早期停止、ナトリウム漏洩量の抑制、漏洩ナトリウムの燃焼抑制等の設備改善やそれらの適切な

運転手順書への反映が必要なることを抽出した。設備改善に係る課題に対する検討結果を、各設備ごとにまとめて表1に、二次主冷却系ナトリウム漏

表1 漏洩燃焼対策に係る改善策のまとめ

	2次主冷却系設備及び補助冷却設備	2次ナトリウム補助設備	2次メンテナンス冷却系	炉外燃料貯蔵槽冷却系及び同2次補助ナトリウム系	窒素帯閉気設備
ナトリウム漏洩の早期検出 (位置識別)	・ Na漏洩検出器 ・ セルモニタ ・ 蒸発器液面計	・ Na漏洩検出器 ・ セルモニタ	・ Na漏洩検出器 ・ セルモニタ	・ Na漏洩検出器 ・ セルモニタ ・ 膨張タンク液面計	・ Na漏洩検出器 ・ セルモニタ ・ 安全保護系 (原子炉格納容器床下帯 既気温度カードベッセル内漏洩Na液位等)
換気空調設備の早期停止	セルモニタ信号または蒸発器液位低低信号による自動停止	セルモニタ信号による自動停止	セルモニタ信号による自動停止	セルモニタ信号による自動停止	-
ナトリウムドレン機能の強化 (漏洩量抑制)	・ ボンプ入口部ドレンラインの施設 ・ ドレンライン配管の大口径化 ・ ドレン弁多弁化、遠隔電動操作化 ・ 保護カバー等の設置	・ ベント弁、コールドトラップドレン弁の遠隔電動操作化 ・ タンクカバーガス減圧 ・ 保護カバー等の設置	・ フリーズシール部の常時メルト運用 ・ ドレン弁等の遠隔電動操作化 ・ 保護カバー等の設置	・ フリーズシール部の常時メルト運用及び直列にドレン電動弁追加 ・ ドレン弁等の遠隔電動操作化 ・ 保護カバー等の設置	・ ドレン弁等の遠隔電動操作化 ・ エクステンション部に保護カバー等設置
燃焼の抑制	・ 床ライナ：建物との主歩回廊の裕度向上 ・ 区画化し窒素注入 (3区画化) ・ 圧力開放系 (圧力逃しライン等) ・ 空気を冷却器室下部キャッチメント区画化	同左 同左 (1区画)	同左 (床ライナ下断熱材なし) 同左 (1区画)	同左 (床ライナ下断熱材なし) 同左 (ABC 3区画、2次補助ナトリウム系はA区画)	- -
コンクリートからの水分放出抑制	壁・天井に断熱構造設置	同左	-	-	-
最終貯留	貯留室 (運通管、燃焼抑制板、ヒートシシク材)	漏洩した床ライナ上	漏洩した床ライナ上	貯留室、ガードベッセル内、炉外燃料貯蔵槽外容器内、床ライナ上	-
その他					
漏洩監視	・ ITV 総合漏洩監視システム	同左	同左	同左	・ ガスサンプリング型漏洩検出器の信号を総合漏洩監視システムで監視
エアロゾル拡散抑制	・ 早期換気停止、区画化	同左	同左	同左	-
現場点検の反映	・ 漏洩Naの飛散対策等	同左	同左 (壁・天井に鏡板設置) (窒素貫通管：セルモニタ設置)	同左 (壁・天井に鏡板設置) (共通配管室：常時窒素帯閉気化)	-

— : 改善箇所を示す。

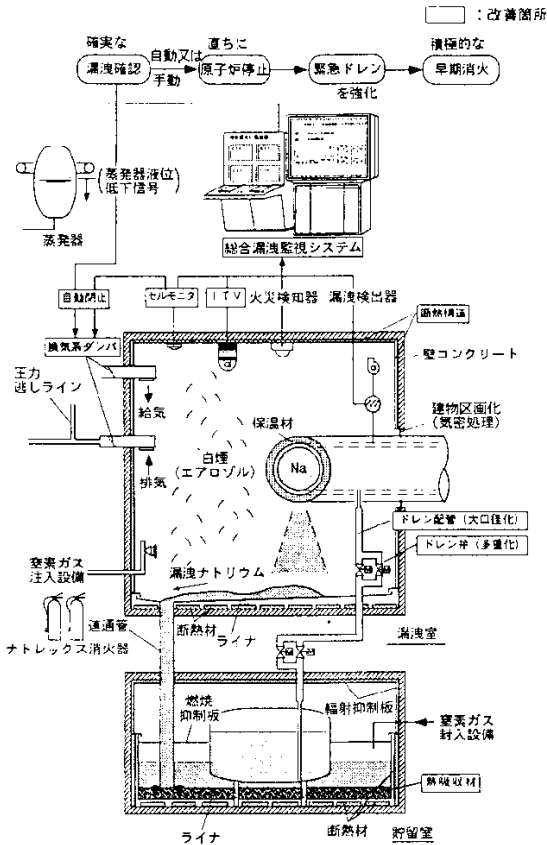


図5 2次ナトリウム漏洩に対する設備改善の概念図

洩に対する設備改善の概念及びASSCOPS Ver.2.0を使用した設備改善効果確認の解析結果をそれぞれ図5、6に示す。

また、ナトリウム漏洩に関する設備の改善とともに、従来の運転対応操作に加えて、セルモニタによる換気空調設備の自動停止の確認、ナトリウム漏洩発生区域における窒素ガス注入開始時の人的安全の確認等が必要になることから、設備改善策の設計を具体化する際に、運転手順書等に適切に反映することとする。

2.2 「もんじゅ」設備の設計から運用に至るまでの点検

「もんじゅ」の原子炉施設を対象に、再度安全性を確認することを目的として異常事象の発生防止、早期検出、拡大防止等の観点から設計の基本的な考え方に遡って整理し、それらが的確に継承・具体化され設計・製作、試験・検査等がなされているかを点検した。本点検は、異常発生時や通常運転時のシステム間相互の動作に着目したシ

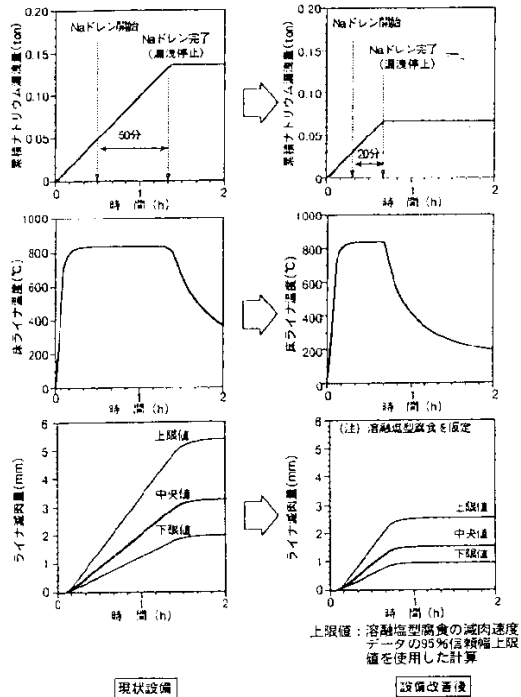


図6 設備改善の効果(配管室 ナトリウム漏洩率 0.1ton/hの例)〈窒素注入を行わない場合〉

ステムの点検とシステムを構成する個々の設備機器の機能に着目した設備機器の点検とで構成されるものである。

(1) システムの点検

通常運転時のシステム動作については、これまで実プラントでの試運転で経験していない40%から100%出力範囲での自動化運転を対象として動作ロジックを点検した。異常時のシステム動作については、設置許可申請書添付書類八及び十に記載の事故事象のうち下記の9事象について、実プラントが設置許可申請書に記載されている基本的な設計要求事項を満たしていること、基本的な設計要求事項ではないが実プラントが有している機能がより確実な異常の検知、拡大防止等に有効であること等を点検した。

- ① 蒸気発生器伝熱管小漏洩
- ② 蒸気発生器伝熱管破損事故
- ③ 冷却材流路閉塞事故
- ④ 1次アルゴンガス漏洩事故
- ⑤ 主蒸気管破断事故/主給水管破断事故
- ⑥ 燃料取替取扱事故
- ⑦ 中間熱交換器伝熱管破損
- ⑧ 外部電源喪失

④ 気体廃棄物処理設備破損事故

点検の結果、実プラントが基本的な設計要求事項を満足していること及び自主保安の観点から実プラントに付加された機能が安全性、信頼性の向上に有効であることを確認した。また、さらに一層の安全確保を目的として、以下の改善事項を抽出した。

- ① 燃料取替取扱事故時における前警報発報段階での手動による換気系切替操作の異常時運転手順書への明記
- ② 警報処置手順書で扱われている中間熱交換器伝熱管破損事故時対応操作の異常時運転手順書としての整備
- ③ 気体廃棄物処理設備破損事故時の手動による廃ガス受入弁閉操作の異常時運転手順書への明記

(2) 設備機器の点検

本点検では、「もんじゅ」の原子炉施設（炉心、原子炉、原子炉停止系、原子炉格納施設、一次主冷却系、二次主冷却系等）26系統設備を対象に「2.1(2)ナトリウム内包壁の健全性点検」とほぼ同様の手法で点検した。また、火災区域及び確率的な安全評価の結果に基づいて設備の対応状況についても点検した。

点検の結果、各系統の設備機器の基本的な設計要求事項の反映状況や健全性維持の観点から、下記の事項を除いては問題点がないことを確認した。

1) 一次冷却系ナトリウム中酸素濃度管理

炉心燃料集合体の設計条件書では、燃料被覆管強度評価におけるナトリウム中酸素濃度を 3ppm として外面腐食を考慮しているのに対して、実プラントの管理では一次冷却系機器の設計条件である 10ppm を管理目標値としており不整合となっている。このことについては、現在までの試運転段階で使用した燃料集合体の被覆管腐食量を評価して問題のないことを確認しているが、原子炉施設保安規定、運転手順書の管理目標値を燃料設計の条件に合わせるよう改訂することとした。

2) 過熱器ウォーミングアップ時の湿分流入

試運転段階でのウォーミングアップ時に、加熱蒸気温度の低下により過熱器に湿分が流入することが観察されている。設計段階で行われた試験により同様な条件下では応力腐食割れは生じないことが確認されているが、湿分流入を極力少なくするため過熱器出口管板の近傍水室部にヒータを設置することとした。

2.3 運転手順書等の点検

通報連絡、教育訓練等、ナトリウム漏洩事故直

後から改善を実施してきているが、異常事象発生時の確実な対応を含め、原子炉施設を運転していくうえで必要な規定類や運転手順書の内容が適切であるかとの視点で点検した。

(1) 原子炉施設保安規定及び関連手順書類の点検

保安規定、保安規定運営要項及び関連する手順書類について、記載内容の適切性及び整合性、設計からの要求事項の反映状況、許認可事項との整合性等について点検した。この結果、当直長やプラント第一課長の役割を見直し保安規定に明示すること、異常時対応措置等の報告先を運営要項に明示する等の改善事項を抽出した。

(2) 事故対策規程及び関連規則類の点検

事故直後からの改善に加え、異常時体制への切替の円滑化、指揮命令系統の一元化、異常時体制の組織・構成員の役割分担の明確化、関連規則類の整合性、非常時に具備すべき器材の配備状況等について点検した。この結果、事故対策規程体系の見直しと整備、所内規則としての異常時対応マニュアル、通報連絡マニュアル等の整備等を進めていくこととした。

(3) 運転手順書類の点検

中小規模のナトリウム漏洩の判断基準が不明瞭であったこと、異常時運転手順書の「概要」・「フローチャート」・「細目」間の記載内容に不整合があったこと等の事故の反省点を踏まえ、運転手順書の構成・形態、記載内容の適切性、設計からの要求事項の反映状況、先行炉及び「もんじゅ」の運転経験の反映状況等について点検した。この結果、異常時及び故障時運転手順書は従来の三部作を廃止し一本に統合すること、チェックシートを採用し操作に漏れないようにすること、他の手順書の参照を不要とする手順書記載事項の充実、ナトリウム漏洩対策設備の改善を踏まえた種々の漏洩形態に応じた対応手順の整備、徴候ベースの運転手順書の将来的な導入等の改善事項を抽出した。

(4) 教育、訓練内容の点検

運転員のナトリウム取り扱い、消火訓練を定期的実施する等事故後から既に改善を図ってきているが、これらの改善に加え、異常時の対応に係る教育訓練内容の適切性、運転員に対する教育訓練内容の適切性等を点検した。この結果、さらに教育効果を向上するとの観点から、各種法令や安全協定等繰り返し教育すべき事項の計画的な実施、運転員に対する十分な教育訓練期間を確保するための6班3交代制の導入、シミュレータ設備の一層の充実等の改善事項を抽出した。

2.4 研究開発成果、技術情報の反映の点検

「もんじゅ」は研究開発段階の原子炉であり、設計製作にあたっては数多くの研究開発を実施し、それらを反映するとともに「常陽」の運転経験、海外FBRのトラブル事例等を反映してきた。ナトリウム漏洩事故の反省として、「もんじゅ」設計以降に規定された流力振動に関するASMEの追加基準に記載されている技術情報が反映されなかったことを踏まえ、様々な技術情報を収集整理し、「もんじゅ」への反映状況を点検した。

(1) 高速増殖炉にかかる研究開発成果の反映

動燃事業団（現：サイクル機構）及び他機関で実施した高速増殖炉開発に係る研究開発の成果報告書約16,000件を対象に点検した。このうち炉物理・核計装、機器・構造、計測・制御、ナトリウム技術、炉心・構造材料等「もんじゅ」に関連する技術分野のものは約15,000件であった。さらに、「もんじゅ」に反映すべき事項を含むものとして約3,000件に絞り、反映状況を点検した結果、約150件を反映状況の確認ができないものとして抽出した。これらの技術的内容は次の4項目に集約されるものであった。

- ① 容器液面近傍部ラチェット評価法による原子炉容器バケット部の強度評価
- ② 溶接継手評価法による一次主冷却系IHX上部管板一吊り胴溶接部の強度評価
- ③ ベローズ継手評価法による一次主冷却系IHXベローズの強度評価
- ④ 燃料物性の見直しによる燃料温度評価

これらのうち①～③は実証炉用として詳細な設計評価手法が提案されたことを受けたものであり、念のためこれらの手法を「もんじゅ」に適用して評価した結果、表2に示すように問題のないことを確認した。④については、熔融限界線出力試験等により燃料温度評価に関する新知見も得られつつあり、これらの知見について検討した結果、「もんじゅ」の燃料設計を見直す必要はないと考えられるものであるが、今後も引き続いてデータの拡充、評価手法の改良を進めながら評価を実施していく。

(2) 高速実験炉「常陽」の運転経験

「常陽」の運転経験については、1979年（昭和54）から大洗工学センターの実験炉部と本社の高速増殖炉開発本部との間で、また、1989年（平成元）からは高速増殖炉「もんじゅ」建設所も加わり、「もんじゅ」技術開発検討会、燃料取扱技術情報交流会等を通じて技術情報の継承がなされてきている。本点検では、1996年（平成8）までに

表2 実証炉用設計詳細評価手法の「もんじゅ」への適用評価結果

評価項目	評価部位概念図	評価概要
容器液面近傍部ラチェット評価法による原子炉容器バケット部の強度評価		液面熱ラチェットによって生じるひずみを評価した結果、ラチェットは進行せずに停止し、累積非弾性ひずみは0.13%と評価され、「高速原型炉第1種機器の高温構造設計指針」に定められている許容値である1%より小さく、判定基準を満足しており、問題ないことを確認した。
溶接継手評価法による一次主冷却系IHX上部管板一吊り胴溶接部の強度評価		新評価法によるクリープ疲労損傷は、0.47であり、基準値0.6を満足しており、問題ないことを確認した。
ベローズ継手評価法による一次冷却系IHXベローズの強度評価		ラチェット変形を新評価法で評価すると許容領域内となること、また、座屈を新評価法で評価すると座屈圧力は1.36kgf/cm ² となり、最大外圧よりも大きく、問題のないことを確認した。

まとめられた「常陽」の運転保守経験に関する技術情報の「もんじゅ」への反映状況を点検した。

約650件の技術情報の中から内容の類似するものを集約したうえで23件の詳細点検事項を抽出して点検した結果、いずれも適切に反映されていることを確認した。制御棒のスエリング及び吸収体ペレットのリロケーション対策については、現状の「もんじゅ」での制御棒の使用計画からは「常陽」と同様な事象が生じることがないことを確認しているが、「常陽」での研究開発状況を踏まえながら制御棒の長寿命化の検討に取り組んでいく。

(3) 国内外プラントの運転経験

海外FBR、「常陽」、「ふげん」及び国内軽水炉の主要な事故・故障事例や海外軽水炉の火災事故事例に関する約950件の技術情報を調査、分析して同様な事象の発生防止対策について「もんじゅ」での対応状況を点検した。インタロック、材料の腐食対策等明らかに対策がとれているもの以外の事例（86件）については、特に詳細な点検を行った。

この結果、他の点検からの抽出課題と重複するが、設備改善課題として次の3件を抽出した。

- ① 温度計さやの振動対策
- ② 微調整棒駆動機構の駆動荷重増加対策
- ③ 配管合流部での温度ゆらぎ対策

なお、配管熱変位に対する健全性及び配管振動に対する健全性については、これまでの試運転段階で問題のないことを確認しているが、今後の試運転段階でも確認していく事項とした。

また、事故・故障事例の直接的な反映とは異なるが、最近の軽水炉での動向、「もんじゅ」での経験等を踏まえ4件の改善検討事項を抽出した。

- ① 循環水ポンプの無注水化
 - ② 補機冷却海水配管の腐食防止塗装
 - ③ モニタリングポスト及びモニタリングステーションの耐雷性の向上
 - ④ ディーゼル発電機清水及び潤滑油冷却伝熱管の保守性向上のためのU字管から直管への変更
- (4) 「もんじゅ」におけるこれまでの試運転経験の水平展開

総合機能試験開始以降に「もんじゅ」で経験し、法令・通達や協定に基づいて報告した事故・故障について、発生当時の要因分析、対策内容の妥当性をその後の運転経験を踏まえて再評価するとともに1998年(平成9)5月までに発行された保修票を分類・整理して点検した。あわせて、試運転段階の経験を基に提出された設備改善にかかる提案、試験実施当時の担当者からの聴き取り調査により抽出された改善を要する事項等の分析・整理を行った。

事故・故障の対策内容、水平展開については、以下の5事象を対象に再評価を行い、それらの妥当性を確認した。

- ① 二次主冷却系配管熱変位対策
- ② 水・蒸気系フラッシュタンク圧力低下事象
- ③ 性能試験中における原子炉自動停止
- ④ 二次主冷却系循環ポンプボニーモータ温度上昇
- ⑤ 制御用圧縮空気設備圧縮機自動停止

約1,000件の保修票による「もんじゅ」機器の保修状況の調査からは、安全上の問題となるものではないが、共通的な事象として真空ポンプのブレードの劣化、排水処理配管の内外面腐食、ボイラ水面計ガラスの熱疲労による破損等を抽出し、今後の点検周期、部品交換時期の適正化に反映していくこととした。

試運転段階での運転・試験・保守の経験から提案された設備改善にかかる提案(設備改善シート)については、平成9年3月までの間に約270件が

提出されていたが、77件が未実施のまま残されていた。ここでは、計画外のプラント停止の防止、プラント信頼性の向上、作業安全性の向上等の観点から検討を加え、未実施分の案件に対して以下のように対処方針を整理した。

- ① 計画的に順次改善することが望ましい案件 23件
 - ② 今後の運転実績を踏まえて要否を判断する案件 22件
 - ③ 現時点で実施不要とする案件 32件
- これらのうち①については表3に示すとおりである。

表3 計画的に改善することが望ましい案件

No.	件名	改善概要(目的)	改善効果
1.	バキュームブローカ作動時のC/V換気系ファントリップについて	C/V内負圧防止対策	プラント信頼性
2.	2次系予熱温度警報の中央警報への取組み	2次系予熱温度警報の中央制御室への表示化	
3.	2次純化系他予熱ヒータノットの改造	配管合流部に温度差がつかないように予熱制御ロジックを変更	
4.	軸受冷却水システムパイプ補給純水量増設用流量積算計設置	軸受冷却水の水質管理上、定量的なフロー量把握のため積算流量計設置	プラント機能
5.	1次アルゴンガス系の圧力損失増加対策	1次アルゴンガス系V/T出口部へのNaベーパー用交換式フィルタの設置	
6.	炉外燃料貯蔵設備予熱制御システムの改善	EVST予備制御電源のバックアップ化及び非常用電源ヒータ範囲の拡大化	
7.	燃料洗浄設備の脱運転の改善	燃料洗浄槽内の温分低減対策	運転操作性
8.	所内補助蒸気設備ブロータンクベント管の延長について	大気放出蒸気の水蒸気系計装品への経路を回避するための大気放出ベント管を延長	
9.	中和排水ポンプシール水低減について	無用な排水量を低減するため、シール水供給ラインにポンプ運転信号と連動した自動弁設置	
10.	安全保護系動作表示器設置	安全保護系機器盤への状態表示器設置	作業安全性
11.	蒸発器補助蒸気供給弁の型式変更	蒸発器補助蒸気供給弁ストロークの実操作使用範囲への整合化	
12.	EVST系Naサンプリング装置操作盤の警報について	EVST系Naサンプリング装置警報の燃取操作室への表示化	
13.	燃料出入機グリッパヒータ警報回路追加	燃料出入機グリッパヒータの異常監視のための警報回路の追加	作業安全性
14.	補助ボイラ設備改造(給水タンク給水方法の変更)	給水タンク液位の不要な警報を防ぐための給水配管の太径化等	
15.	燃料缶詰室開口部の足場設置	燃料缶詰室開口部に作業安全のための足場を設置	
16.	コンデミ薬品(塩酸、苛性ソーダ)タンク廻りに洗浄設備の設置	コンデミ薬品(塩酸、苛性ソーダ)タンク廻り身体洗浄設備の設置	保守性
17.	薬液注入装置廻りの洗浄設備の設置について	薬液注入装置廻り身体洗浄設備の設置	
18.	補助ボイラ設備改造(ボイラ室の手洗い場の設置)	ボイラ室に薬品使用時の手洗い場を設置	
19.	取水設備系取水フィルタ清掃架台等の設置	取水設備系取水フィルタ清掃のための架台及び昇降用梯子の設置	保守性
20.	メンテナンススクリーン操作の遠隔化	メンテナンススクリーン操作の遠隔化	
21.	局部遮蔽体の設置(1次Na純化系)	線量当量率低減のため、遮蔽体設置	
22.	小型監視点検器の設置	将来の放射線上昇に伴いアクセス困難な場所に点検用カメラ及び走行レール設置	保守性
23.	ディーゼル発電機清水及び潤滑油冷却器管束部の交換	ディーゼル発電機清水及び潤滑油冷却器管束部の汚生生物付着による減肉対策	

(5) 「もんじゅ」の安全評価データ

設置許可申請書添付書類中には、当時の基本設計をもとに行った安全解析結果が記載されている。本点検では、現時点においては設計・製作が完了するとともに試運転データが蓄積されていること、解析評価モデルについての研究開発が進展し新たな知見が得られていること等を踏まえて、設置許可申請書に記載の以下の全事象（33事象）を対象に当時の安全評価データの妥当性（保守性）を点検した。

- ① 運転時の異常な過渡変化事象（12事象）
- ② 事故（16事象）
- ③ 技術的には起こるとは考えられない事象（3事象）
- ④ 重大事故及び仮想事故（3事象）

点検の結果、「蒸気発生器伝熱管破損事故」を除く33事象については、当時の安全評価データは最新データと有為な差がないこと、有為な差があるものでも当時のデータは保守側に設定されていたことを確認した。

「蒸気発生器伝熱管破損事故」については、高温ラプチャー挙動評価モデル等の最新知見に基づき、特に水・蒸気系のブローダウン時の高温ラプチャー現象をさらに詳細に検討する必要があることが判明した。なお、安全総点検以降、「もんじゅ」用伝熱管材料強度試験等を実施し、それらのデータを基に最新の解析手法を用いて詳細解析が行われ、高温ラプチャーによる伝熱管の破損伝播は生じないことが再確認された。想定条件によっては安全裕度が小さくなる場合もあることから、今後は適切な安全裕度確保の観点から設備上の改善を検討する。

(6) 「もんじゅ」に適用された規格、基準類の改訂等に係る技術情報の反映の点検

安全上重要な構築物、系統及び機器の設計や検査等に用いた規格・基準類を対象として、「もんじゅ」の詳細設計以降の改訂内容を調査し、それらの「もんじゅ」への反映の要否について点検した。

約2,000の法令等の条項、約10,000の国内外規格等から「もんじゅ」設備の設計・製作に考慮、反映すべき改訂情報として約100件の技術情報を抽出して点検した。その結果、管及び管群の流力振動評価に対するASME規格の改訂情報以外には「もんじゅ」実機設備はそれぞれ改訂後の内容に対しても余裕をもったものとなっていること等から新たに反映が必要な事項はないことを確認した。

2.5 品質保証体系・活動の点検

温度計さやの折損を防止できなかったのは設

計・製作管理が不十分であったこと等がナトリウム漏洩事故の反省点として、指摘されている。このことから、「もんじゅ」の設計から試運転に至るまでの品質保証体系とその活動状況について点検した。

(1) 設備の設計・製作等に係る品質保証体系・活動の点検

動燃事業団の「もんじゅ」関連部門及びメーカーの設計管理、製作管理等について、「原子力発電所の品質保証指針」（JEAG4101-1993）に記載されている要求事項に今回の事故の反省から抽出した項目を付加して確認すべき事項を整理し、点検した。その結果、動燃事業団では体系化されたシステムにより品質保証活動が行われていたが、温度計さやの設計管理や据付後の管理が不十分であったことから、今後の品質保証活動を確実なものとするために設計審査を含めた要領類のさらなる充実を図っていく必要があること等を抽出した。また、メーカーにおいても体系化されたシステムにより活動が行われていることを確認したが、ASMEの改訂情報が設計担当者に伝達されていなかったこと、温度計さやを含む配管系の設計レビューにおいて段付き構造に対しての指摘がなされなかった等の問題点を抽出した。なお、これらメーカーに対する指摘事項は、事故以降既に適切な改善措置がとられていることを確認した。

(2) 運転手順書等の作成・改訂に係る審査、承認体制の点検

運転手順書の作成・制定・改訂は所内規則等に基づき実施され、必要なものが整備されていることを確認した。しかし、制定、改定にかかる審査方法が明確にされていないことから、運転手順書等の審査基準を明確にしたうえで、さらにFBR特有事項については大洗工学センターの有識者の意見を求めるよう運転手順書管理マニュアルを改訂することとした。

(3) 教育訓練体系の点検

各課共通の教育、運転員教育ともに階層に応じた教育目標を明確にして取り組んでいること、ナトリウム漏洩事故後においてはナトリウム取り扱い訓練を強化する等の改善を行っていること等を確認した。教育訓練の計画立案及び実施は担当課長の責任のもとで行われており、実績の評価、反映のシステムが明確になっていないことから、所の教育担当を新たに設けて教育訓練の実施状況を把握しながら活動の推進を図ることとした。

(4) 試運転時の運転体制の点検

「もんじゅ」の試運転に際しては、「もんじゅ」

建設所内に試運転の実施体制を構築し、各種委員会を設けて原子炉主任技術者、関係各課室の協力のもとで大洗工学センター及びメーカー技術者の支援を受けて実施してきたことを確認した。さらなる改善策として、異常時の運転支援体制の強化が必要であることから、今後再起動までに検討して具体的な改善を図る。

(5) 最新技術情報等の反映に係る実施体制の点検

最新技術情報等の反映の仕組みと活動状況については、研究開発部門との技術交流、トラブル事例の評価・分析、反映に係る体系的な取組がなされてきたことを確認した。しかしながら、「もんじゅ」は研究開発段階にある原子炉であることを踏まえて、最新の研究開発成果等の技術情報を評価検討する体制、方法等についてさらに改善する必要があることを認識し、新法人移行後は、国際技術センターとの連携のもとで、効率的な運営を図っていく。

(6) 品質保証活動体制の点検（含自主保安強化）

上述の品質保証上の改善方針を的確に具体化、実践していくためには、品質保証体制が妥当なものとなっていること、また、確実に職員に徹底していくことが重要である。このため、

- ① 「もんじゅ」の品質保証活動の推進体制は適切なものとなっているか
- ② 品質保証体系及び活動が「もんじゅ」全体に浸透していくようになっているか
- ③ 「もんじゅ」の品質保証活動が適切に評価され、その結果が確実に反映できるようになって

いるかについて点検した。

点検の結果、品質保証委員会での課題解決への取組の強化、品質保証に関する教育訓練の一層の充実、国際標準に照らした評価によるさらなる安全性・信頼性の取組の強化の必要性を抽出した。これらに対する主要な改善方針は以下の通りであるが、一部のものについては既に改善活動がなされている。

- ① 本社に品質保証推進室（現：品質保証推進部以下同様）。を、「もんじゅ」建設所に「もんじゅ」品質保証推進本部（現品質保証推進Gr）を設置し、活動の強化を図っている。
- ② 業務における10の要求品質を設定し、改善活動を展開中である。
- ③ 要求品質達成状況を確認し、改善プロセスに必要な指導を理事長診断会等で実施中である。
また、第三者からの客観的評価を受けるため、世界原子力発電事業者協会（WANO）のピアレビューを受けること等を検討する。

3. 「もんじゅ」の改革方針

もんじゅの安全総点検の結果抽出された課題に対する改善策と事故後に表明した改善策を事故再発防止のための設備改革、運転手順書の改革及び安全管理体制の改革に加え、今後、反映する事項及び研究開発課題を柱とする事項に整理し、「もんじゅ」の改革方針として、表4のように取りまとめた。

表4 「もんじゅ」の改革方針(1)

【設備改革】		改善策の内容	改善効果
ナトリウム漏洩対策設備としての改善	温度計さやの改善	・2次冷却系の温度計さやの交換（42本）及び増設（5本） ・水・蒸気系温度計さやの交換または増設（37本）	決力振動による破損防止
	ナトリウム蒸気監視設備の改善	・火災検知システムとしてのセルモニタの増設 ・ITV（遠隔監視用テレビカメラ）の設置 ・総合漏れ監視システムの設置	・漏れの早期発見 ・運転員判断の支援
	漏洩の拡大防止・影響緩和対策の改善 （2次主冷却系等）	・ナトリウムドレン機能の強化（ラインの追加、配管の大口径化、弁等の耐熱保護）によりドレン滞留時間を短縮化 ・ナトリウムを貯留しているタンクカバーガム圧力の降圧操作の追加 ・インターロック信号による換気系の早期自動停止 ・建物の区画内への窒素ガス注入による確実な鎮火（窒素ガス注入設備の設置、建物の区画化） ・壁、天井への断熱構造（一部断熱）の設置 ・空気冷却器室下部のナトリウム配管接続部の区画化 ・風速ナトリウムが流れ込む貯留室への排気取付の設置	・ドレン滞留による漏洩抑制 ・燃焼抑制とエアロゾルの拡散抑制 ・コンクリートからの水分蒸発の抑制 ・燃焼抑制 ・温度低下促進による熱的影響の緩和
職業露出低減の改善（1次主冷却系等）	・総合漏れ監視システムの設置 ・ナトリウムドレン機能の強化（弁の電動化及び動力カバーの設置）	・運転員判断の支援 ・運転操作性の向上	
FBR特有設備関連の改善	・燃焼抑制燃焼抑制の燃焼促進の追加対策 ・1次アルゴンガス系の圧力損失増加対策 ・プラグイン割合調整の温度差緩和対策 ・燃料洗浄設備の予熱制御システム改善 ・燃料洗浄設備の脱湿運転の改善 ・高気発生機 補助蒸気供給弁の型式変更 ・燃焼促進機の設置 ・小型監視系補修の設置	・荷重増加の原因排除のための分解点検、その結果を反映した設備、運用方法の改善 ・圧力増加の原因排除のための分解点検、その結果を反映した設備、運用方法の改善 ・ヒータ温度の設定変更、ヒータの追加設置等により、ナトリウム合金の温度差の緩和 ・バックアップ計装機、非常用電源への接続による予熱用電源の確保 ・場所ヒータ、保溫材の設置により燃料洗浄槽の乾燥乾燥工程を短縮化 ・補助蒸気供給弁も小型流量調整弁に変更 ・1次ナトリウム純化系の通流に原因を調べたい物を設置 ・1次オーバフロータンク室に供用期間中継運用として小型監視系補修機を設置	・プラント信頼性の向上 ・設備運用の効率化 ・燃料洗浄槽の運転操作性の向上 ・作業者の負担を低減

表4 「もんじゅ」の改革方針(2)

【運転手順書及び教育訓練の改革】			
主な改善策	改善策の内容	改善効果	
FBR特有の事項の改善	ナトリウム漏洩時の対応の改善	・総合漏洩監視システム導入による原子炉の確実なトリップ ・原子炉トリップ後の速やかなナトリウムドレン ・ナトリウムドレン後の速やかな窒素注入	事故時安全性の向上
	異常・事故時の手順書の明確化	・チェックシート方式を採用した手順書の運用 ・種々の漏洩形態に応じたナトリウム漏洩対応手順の整備	確実な異常時対応
	試運転経験を反映した手順書の明確化	・シミュレータによる実際の構図を活かした判断項目の定量化 ・1次冷却材ナトリウムの結露管理目標の設定	運転信頼性の向上
	拠拠ベースの手順書の導入	原因を特定せず進展する状況に応じて対応操作を定める手順書の導入	事故時対応操作の強化
	手順書の審査体制の強化	大洗工学センター等の有識者の参加	幅広い知見の取り込みによる手順書の充実
運転員教育訓練の改善	・教育訓練の手引きの整備/繰り返し訓練の実施 ・管理者及び判断者の教育訓練 ・十分な教育訓練期間の確保(8班3交代制の導入) ・シミュレータ評価機能の更なる充実	運転員の資質の向上 ヒューマンエラーの防止	

【安全管理体制の改革】		
主な改善策	改善策の内容	改善効果
事故対策規程の整備	・事故対策規程、関連規則、マニュアルの体系的整備 ・事故時の対応体制の整備・明確化(現地主導・本社支援)	迅速で確実な事故時対応
品質保証活動の強化	・本社品質保証推進室及び「もんじゅ」品質保証推進本部による業務全体の品質向上 ・教育委員会の活性化による教育の充実(教育担当による実施状況の把握、フォローアップ) ・品質保証関連業務の体系的な整備による活動の充実(設計審査要領に基づく監査や設計審査等) ・各機器の運転保守データの蓄積による、故障・トラブルの予防保全の強化 ・運転保守で発生するトラブル対策の確実な反映 ・運転経験情報、研究開発情報及び各種規格・基準類、最新技術情報の収集と反映に係る体制の整備 ・世界原子力発電事業者協会のピアレビューの導入 ・定期的な安全レビューの導入検討	トラブル発生低減に向けたしきみの強化 安全管理レベルの維持・向上
技術的能力の強化と継承	・現場重視の技術者の育成 ・設計・運転情報のデータベース化による「もんじゅ」技術の体系的利用及び伝承 ・研究棟の活用による研究開発部門との密接な連携と交流 ・電力との連携強化、国際協力によるトラブル事例等の情報交換	安全性、信頼性、運転管理能力の向上

【今後の確認事項】		
主な課題	内容	目標
・ブラギング計合流部の温度産線対策の効果確認	温度産線対策のための設備改善の効果を確認	ナトリウム配管合流部の健全性確認
・ナトリウム蒸着抑制対策の確認	燃蒸分解点域等でのナトリウム蒸着状況の確認や機能の評価健全性を確認	今回の対策の妥当性確認
・2次冷却系配管の熱変位測定及び小口径配管の振動特性	熱変位や振動の有無とその特性を測定し健全性を確認	ナトリウム配管の健全性確認
・海水ポンプ(循環水系)の1台停止による原子炉への影響確認	海水ポンプを1台停止させたときの影響を確認	海水ポンプ停止時の安全性確認

【今後の研究開発等の課題】		
主な課題	内容	目標
・高気発生器伝熱管破損時の伝熱管健全性評価の改良	材料データの拡充や水・蒸気ブローを含むナトリウム・水反応時の解析手法の高精度化を進め、詳細評価やそれに基づく設備改善の検討	適切な安全裕度の確保
・燃料物性の長直し等による燃料温度評価法の改良	国内外の燃料溶融に係る試験結果の反映と燃料温度評価方法の改良を踏まえた「もんじゅ」燃料最高温度の評価	「もんじゅ」燃料の安全裕度の確認
・高温ナトリウム化合物溶融体による腐食に関する研究	種々の高温ナトリウム化合物溶融体による構造材腐食速度、腐食機構等に関する試験データの蓄積	ライナ健全性の評価精度の向上
・ナトリウム温度測定技術の高精度化	熱電対を配管表面に装着した配管表面取付型温度計や超音波方式温度計について、測定精度や応答速度に関する試験データの蓄積	「もんじゅ」への適用性についての検討
・制御棒の長寿命化	「常陽」の制御棒の開閉状況を踏まえた「もんじゅ」制御棒の長寿命化の検討	制御棒の寿命向上
・炉内ナトリウム中機器の検査方法の検討	ナトリウム中可視化技術の開発(濾過センサー、信号処理技術の高精度化)、ロボット技術の開発	ナトリウム中機器の検査、作業性の向上

3.1 設備改革

(1) ナトリウム漏洩対策設備としての改善

ナトリウム漏洩の発生防止、早期検出、拡大防止及び影響緩和のための改善策であり、これらの設計、製作・据付、検査等については、今後整備強化する品質保証体系に基づき実施し、「もんじゅ」の安全性と信頼性の確保に万全を図ることとした。

2次冷却系の温度計きやについては、今後不要と考えられる温度計6本を撤去し、必要な42本については交換することとした。交換する温度計の改良案を図7に示す。

(2) FBR特有設備関連の改善

プラントの信頼性、運転操作性向上等をめざし、アルゴンガス系、燃料洗浄設備等を改善すること

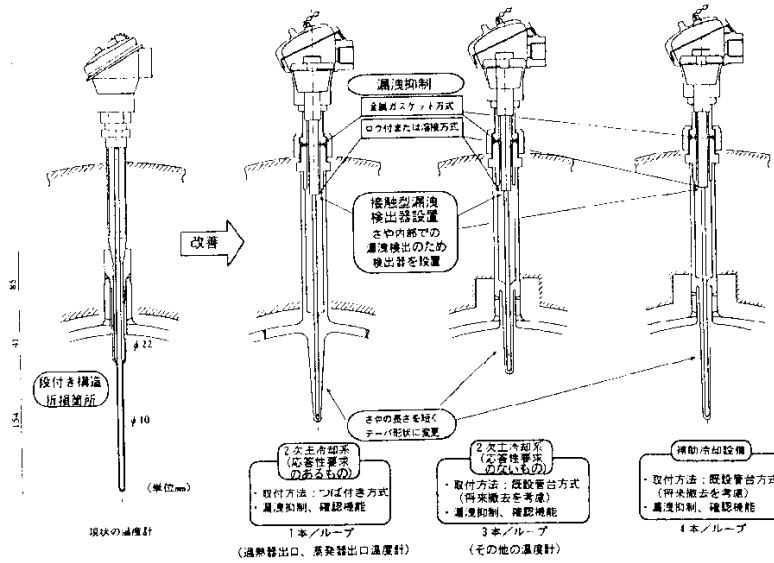


図7 2次冷却系の改良温度計

とし、今後計画的に実施していく予定である。

3.2 運転手順書及び教育訓練の改革

(1) 異常時対応手順の改善

事故後、改訂・運用している異常時運転手順書について、総点検での抽出課題を踏まえ、運転員が異常時に対応する際の判断、異常時の運転操作がより確実に行えるよう、手順書全般について今後改善を進めていく。

(2) 運転員教育訓練の改善

運転員個人の能力を向上させるとともに、運転直としての能力を向上させるために、机上訓練、シミュレータ訓練、実技訓練の体系的な改善やシミュレータ設備機能のさらなる充実を進めていく。

3.3 安全管理体制の改革

施設の安全運転と維持を最優先し、危機管理が適切に行える組織、体制作りを行う。

プラントの安全かつ安定な運転と維持管理を支える「もんじゅ」の品質保証活動について、今回の総点検の結果を踏まえて、品質保証活動の実施とさらなる向上を図るものとする。また、最新技術情報の収集・反映のための体制の確立、技術的能力の強化と継承を組織的に行い、第三者機関のピアレビューを受けること等により安全管理体制のさらなる向上を図る。

3.4 今後の確認事項

念のために確認する事項や安全性・信頼性をさ

らに向上させるため将来に向けて必要な課題を抽出した。これらについては今後具体化を進めていく。

3.5 今後の研究開発等の課題

「もんじゅ」の安全性・信頼性の向上のための研究開発課題については計画的に実施し、「もんじゅ」に反映していく予定である。

4. おわりに

約1年半を費やして実施した「もんじゅの安全総点検」では、ナトリウム漏洩関連設備、その他FBR関連設備、水蒸気系等の従来技術の延長と考えられる設備等「もんじゅ」設備全般についての改善事項を数多く抽出し、その改善方針を策定した。また、運転手順書類や品質保証関連の改善事項についても対応方策を検討した。これらについては、改善した品質保証体制、体系のもとで確実な具体化を進め、「もんじゅ」の運転再開までに必要な許認可手続きを含め、実施していく計画である。

今後の運転段階において確認すべき事項については、「もんじゅ」試運転計画の見直し検討段階で、確実に計画へ反映し、「もんじゅ」の安全性、信頼性を再確認していく。

参考文献

- (1) 動力炉・核燃料開発事業団高速増殖炉もんじゅ建設所: “40%出力試験中における2次冷却系ナトリウム漏えい事故について(第6報報告書)もんじゅの安全総点検実施結果報告書(平成10年5月)”, (1998).