



「もんじゅ」点検期間長期化の要因分析及び 次世代高速炉の保全合理化案の提案 (2) ～低温停止期間における「もんじゅ」の保全計画分析～

Proposal of Maintenance Rationalization for Next-Generation Fast Reactors
based on the Analysis of the Prolonged Maintenance of the Prototype
Fast-Breeder Reactor in Japan, “Monju” (2)
～Analysis of Maintenance Plan of “Monju” in Reactor Cold Shutdown～

原子力機構	豊田 晃大	Kodai TOYOTA	Member
原子力機構	橋立 竜太	Ryuta HASHIDATE	Member
原子力機構	高橋 慧多	Keita TAKAHASHI	Non Member
原子力機構	矢田 浩基	Hiroki YADA	Non Member
原子力機構	高屋 茂	Shigeru TAKAYA	Member

It is necessary to implement reasonable maintenance based on characteristics of a nuclear power plant to achieve both high safety and high economic efficiency of the power plant. The prototype fast breeder reactor "Monju" spent most of the year on maintenance. It is important to identify causes of the prolonged maintenance of "Monju" and consider countermeasures for subsequent fast reactors. In this study, we investigate causes of the prolonged maintenance by analyzing the Monju's maintenance plan. Further, we make proposals for optimizing the maintenance of next-generation fast reactors to address the identified issues.

Keywords: Fast reactor, Monju, Maintenance, Sodium, Maintenance rationalization

1. はじめに

研究開発段階発電用原子炉である高速増殖原型炉もんじゅ（以下、もんじゅ）では、平成21年1月の保全プログラム導入以降、実用発電用原子炉並みの保全が要求された。平成22年8月に発生した炉内中継装置の落下事故以降、もんじゅではプラント停止期間が続いていたが、プラント停止中も燃料が炉心に装荷されていたため、燃料の崩壊熱を除去する除熱機能を確保する必要があった。もんじゅは冷却材であるナトリウムが常温で固体であるため、徐熱機能を確保するためにはヒータにてナトリウムを200℃に昇温した上で循環させる必要がある。そのため、もんじゅは低温停止中も付帯設備を含めた多くの設備を稼働していたことから、プラント運転時に近い形で設備の保全を行ってきた。

もんじゅは、設計の段階において定期点検期間を3か月と想定していた[1]。しかし、その後保安規定で定められた保全プログラムに基づく定期点検では、低温停止中に必要な点検だけで8か月もの期間を要していた[2]。もんじゅの次に開発される炉は高速炉の実用化に向けた最終段階となり、プラント稼働率等の経済性も重視されることから、安全性、信頼性を保ちつつ保全に必要な期間やコストを可能な限り抑えた保全の合理化が必須となる。

次世代高速炉の合理的な設計や保全の最適化を実現するためには、もんじゅにおける点検長期化の要因を分析し、課題の整理と対策案を検討することが重要となる。本論文では、高速炉の稼働率向上を目的に、保全合理化検討のための概略的分析の結果を報告する。

具体的には、もんじゅの保全に関する全体傾向の把握及び保全合理化の余地が大きいと考えられる保全内容を抽出するため、もんじゅ保全計画に記載されている点検タスクの情報を分析した。また、得られた分析結果に対し、保全合理化の提案を行った。

連絡先:豊田 晃大, 〒311-1393 茨城県大洗町成田町
4002 番地, 日本原子力研究開発機構,
E-mail: toyota.kodai@jaea.go.jp

2. もんじゅの概要

2.1 もんじゅのプラント概要

もんじゅの主な仕様を Table 1 に、概要図を Fig. 1 に示す。主冷却系は独立した 3 ループ (A ループ, B ループ 及び C ループ) で構成されている。炉心で発生した 714 MW の熱は、1 次ナトリウム冷却材で熱輸送され、中間熱交換器 (Intermediate Heat Exchanger, IHX) を介して非放射性的の 2 次ナトリウム冷却材に伝達される。この熱はさらに蒸発器 (Evaporator, EV) と過熱器 (Super Heater, SH) で水・蒸気へ熱交換され、ここで発生した蒸気 (温度 483 °C, 圧力 12.5 MPa, 3 ループ合計の全蒸気量約 1,100 t/h) で発電機の蒸気タービンを駆動し発電する。

低温停止中は、水・蒸気タービン系 (Water and Steam System) は休止しており、二次冷却系 (Secondary Heat Transport System) の補助冷却系 (Auxiliary Cooling System, ACS) に設置された空気冷却器を介して原子炉容器内の燃料から発生する崩壊熱を空气中に放熱している。また、原子炉容器 (Reactor Vessel, RV) 及び 1 次冷却系 (Primary Heat Transport System) 設備が設置されている原子炉格納容器 (Reactor Containment Vessel, RCV) 内にある部屋は、「窒素セル」と呼称され、1 次ナトリウム冷却材漏えい時のナトリウム火災の防止のため、ナトリウム充填中は窒素雰囲気を持している。

2.2 もんじゅ機器の保全重要度及び保全方式の設定方法

Table 1 Main specification of Monju

Reactor type	Sodium-cooled fast breeder reactor
Thermal output	714 MW
Electrical output	280 MW
Fuel type	Plutonium-uranium mixed oxide (MOX)

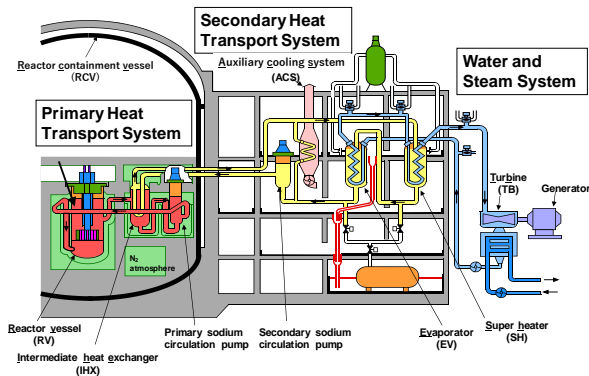


Fig. 1 Outline of Monju

本研究で分析に使用したもんじゅの保全計画は、JEAC4209 及び JEAG4210 に準拠して作成された。

JEAC4209-2007 では、保全の効果的な遂行のため保全重要度を設定することとしており、もんじゅにおいても Fig. 2 に示すもんじゅ特有系統の判定を含んだフローに従い保全重要度を設定し[3]、保全重要度に応じて以下のように保全方式を決定している。

- 機器の保全重要度 A : 時間基準保全 (Time Based Maintenance (TBM)) に、必要に応じ状態基準保全 (Condition Based Maintenance (CBM)) を追加する。
- 機器の保全重要度 B : TBM 又は CBM を選択する。
- 機器の保全重要度 C : 事後保全 (Break Down Maintenance (BDM)) を選定する。

上記の保全方法の説明は以下の通り。

TBM : 一定周期で点検, 部品交換, 更新を行う保全

CBM : 運転中の機器から異常の兆候を検知し, 適切な時期に処置を行う保全

BDM : 故障発生の都度, 補修を行う保全

なお, Fig. 2 中の PS-1, 2 及び MS-1, 2 は, 安全機能の重要度であり, もんじゅでは, 「発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針」 [4] 等を参考に, 軽水炉ともんじゅとの特徴の相違を考慮し, 機器の安全重要度をクラス 1~クラス 3 及びノンクラスで設定

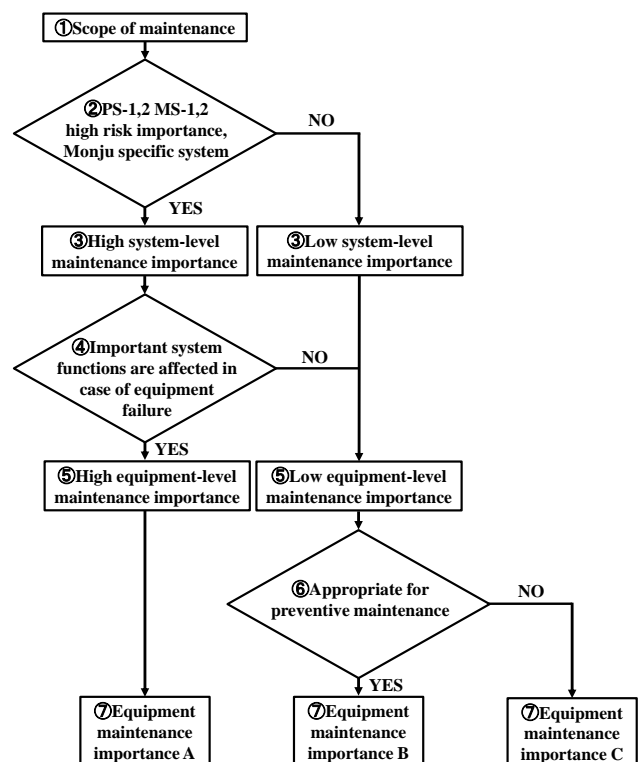


Fig. 2 Setting flow of maintenance importance for Monju

している。

3. もんじゅの保全計画

もんじゅは、以下の目標で保全プログラムが策定されている[3, 5].

- (1) 点検時の機器の経年劣化状況や過去のトラブル等を踏まえた、保全活動の継続的な評価・改善を繰り返すことにより、原子力の安全性・信頼性を向上させる
- (2) ナトリウム冷却高速炉特有の設備(ナトリウム系設備, アルゴンガス系設備, 燃料取扱系設備等)の保全手法を確立する

また、保全プログラムは、以下に示す考え方を基本に策定した。

- (1) もんじゅの保全プログラムは軽水炉と同様に JEAC4209/JEAG4210 を参考に策定する
- (2) もんじゅは供用運転サイクルを通した運転保守の経験が皆無のため、高速実験炉「常陽」及び軽水炉等の知見を有効に活用し、予防保全を基本とする保全計画とする
- (3) ナトリウム機器は、ナトリウム環境での劣化をほぼ無視できるため、開放点検や分解点検は行わず、機能確認及び外観点検を主体とする

もんじゅは研究開発段階炉であり、保全プログラム策定時の保全計画には経済性の観点で不十分な点もあった。平成21年1月に保全プログラムを策定し、それ以降もんじゅでは保全プログラムに沿った保全を実施していたが、平成22年8月に炉内中継装置の落下事故が発生し、それ以降もんじゅはプラント停止期間が続いていた。

平成24年に保守管理不備が確認されて以降[1]の対応で、もんじゅの問題が整理され、脆弱な保全実施体制や、情報収集力等の不足、長期停止の影響等の他に、拙速な保全プログラムの導入等が指摘された[5]。この指摘により保全計画は抜本的に見直されることとなり、平成27年に原子力学会標準「原子力発電所の高経年化対策実施基準」やもんじゅプラント設計メーカーの知見を踏まえた技術根拠に基づき改訂された[6]。本研究ではこの改訂後の保全計画を分析した。

3.1 保全計画の分析方法

本研究では、次世代高速炉で合理的な保全を実現するための検討の第一段階として、もんじゅで計画されている保守点検(保全計画)を分析した。保全計画を「保全方式」と「点検周期」の観点で整理し、もんじゅの保全

に関する全体傾向を把握すると共に、保全合理化の効果が大きいと考えられる点検タスクを抽出した。

もんじゅの保全計画には、点検を行うために必要な系統の条件(制約条件)が付帯した点検タスクが存在する。この制約条件を満たすためのプラント操作が点検工程に影響を及ぼす要因であることから、制約条件にも着目して点検タスクを抽出した。抽出した点検タスクは、保全及び安全重要度と保全方式、点検周期、点検方法の観点で調査し、合理化のための提案を行った。

なお、もんじゅは平成30年3月に廃止措置計画が認可され[7]プラントに要求される保全内容も大きく変化していることから、廃止措置移行前の保全計画を分析するために、廃止措置移行前の最終版である平成29年度の保全計画を分析対象とした。

4. 保全計画の分析

もんじゅの保全計画では、保全を行う最小単位として約32,000の機器を定めているが、機器の数え方は系統ごとに一式と計上する場合や機器ごとに計上する場合、部品ごとに計上する場合など、保全を行う上での管理単位としていることに注意を要する。例えば、ナトリウム配管は系統ごとに一式で保全を行い、弁は弁体等の部品に分けて一個単位で保全を実施している。これは純度管理がなされた高純度ナトリウム環境では腐食が生じ難いことなどから、バウンダリを開放しての点検を不要としていることに基づいている。一方で、電気系機器や計装系機器では、点検対象をスイッチやアイソレータ等の部品に分けて点検タスクを設定している。

点検タスクは機器(または機器の部品)に対する点検項目ごとに設定されるため、約32,000の機器に対して約100,000個設定されている。例えば、1次主冷却系に設置されている電磁流量計(A1次主冷却系流量検出器)では、外観点検と特性試験、2つの点検タスクが設定されている。

保全計画の内、低温停止中に実施する点検を定めた特別な保全計画で管理する点検タスクは約85,000個あった。1章で既述のとおり、もんじゅはプラント停止中においてもナトリウムを循環させる必要があるため、低温停止状態であってもナトリウム循環に係る設備が稼働している。このため、上記約85,000個の点検タスクは通常運転時と同様の点検内容としており、低温停止状態で行う85,000タスクを分析することで、通常運転状態における保全の特徴及び課題の抽出が可能と判断できる。

従って、本研究においては平成29年度の保全計画に記

載されている，特別な保全計画で管理する約 85,000 タスクについての分析を行った。

4.1 保全方式の分析

もんじゅの特別な保全計画で管理されているタスク約 85,000 個を，保全重要度により整理した結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より，点検タスクの 9 割近くが保全重要度 A 又は B の TBM 管理であることがわかる。

Fig. 2 に示した通り，安全重要度の高い設備やもんじゅ特有設備，かつ，故障した場合に系統機能に影響を与える設備については保全重要度を A に設定するが，それ以外の設備については，Fig. 2 中の⑥における判定で保全重要度 B (TBM 又は CBM) と保全重要度 C (BDM) におかれる。もんじゅの保全計画を分析した結果，Fig. 2 中の⑥における判断で保全重要度 B を選択した機器が全体の 77% だったことに加え，その後に行った保全重要度 B の機器に対する保全方式の設定では TBM となる機器が過半を占め，CBM はほとんど選択されなかったことがわかった。

4.2 点検周期に関する分析

もんじゅの保全計画では，TBM で管理されている点検タスクの多くで，1 年 (12 Month (M)) を基準に，工程変更等による 4 M の管理余裕期間を設けて点検周期を設定している。

本節では点検周期の面から分析を行う。点検周期ごとに点検タスクを集計した結果を Fig. 4 に示す。なお，Fig. 4 中，Others とは「燃料交換 1 回毎」や「使用前」等を指す。

Fig. 4 より，もんじゅの点検タスクでは 16M (1 年+4 M) に一度行う点検が多く，TBM での点検全体の約 34 % であった。さらに，16 M の次に多い周期は 40 M であることがわかり，これは 3 年+4 M に相当することから，も

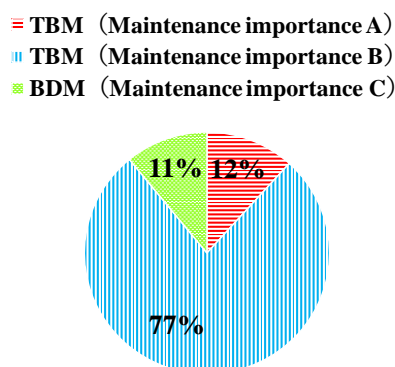


Fig. 3 The ratios of the number of each maintenance importance

んじゅが 3 ループの構成であることが反映されていると考えられる。点検タスク数の分布から，もんじゅでは 16 M や 40 M といった短い周期の点検が多数存在しているため，これらを設計や運用などの対策で長周期化できれば，保全の合理化につながると考えられる。

5. 点検周期 16 M の保全に関する分析

Fig. 4 より，もんじゅでは 16 M 及び 40 M に一度行われる点検が多くを占めていることがわかった。これらの点検タスクのうち，本研究では点検周期がより短く，かつ，点検タスク数が最も多い点検周期が 16 M の点検タスクに焦点を当てて分析する。

点検周期が 16 M の点検タスクを設備ごとに整理した結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より，点検周期が 16 M の点検タスク約 26,000 個のうち，約 9,000 個が諸設備に関する点検，約 3,500 個が 1 次冷却系設備の点検であることが分かる。ここで諸設備とは放射線監視設備やクレーン設備等の一般設備を指しており，これらの点検はもんじゅ及び高速炉に特有な機器に対するものではない。

よって，諸設備の次に点検タスク数が多く，高速炉特有の系統である，1 次冷却系設備の点検タスクに着目した。分析に当たっては制約条件が点検長期化の一因となっていることが分かっていることから[2]，制約条件を付帯する点検タスクに絞って保全の特徴を抽出した。

なお，本研究で分析の対象外とした諸設備等の設備や点検周期が 16 M 以外の点検タスクであるが，これらについても保全の合理化は重要であると考えており，別途軽水炉や他産業プラント等の点検タスクとの比較を行うことで保全内容や保全時期の妥当性を検討する必要がある。

5.1 制約条件に関する分析

もんじゅの 1 次冷却系設備で 16 M に一度行う点検に付帯している制約条件のうち，工程に影響を与える主なも

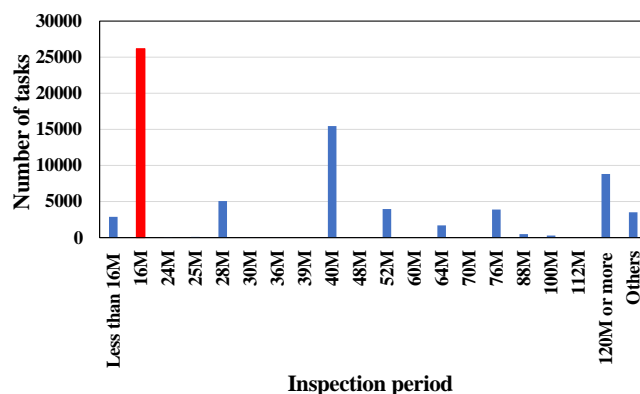


Fig. 4 Number of tasks by each inspection period

のは以下である。

- ・ナトリウムドレン
- ・窒素セル開放
- ・1次アルゴンガス系全停止

ここでナトリウムドレンとは、対象となる系統のナトリウムを抜き取る操作を指し、窒素セル開放とは窒素セル内に設置されている機器（以下、窒素セル機器）の点検に伴い、作業員がアクセスするために窒素セル内を空気置換する操作である。なお、ナトリウム火災防止のため窒素セル開放はナトリウム充填時には行われず、必然的に窒素セル開放はナトリウムドレンされた後に、窒素セル復旧はナトリウム充填前に実施される。1次アルゴンガス系全停止は、カバーガスとして用いているアルゴンガスを供給するための系統を停止させる操作を指す。

1次冷却系設備で16Mに一度点検を行う機器の多くは検出器や熱電対といった計測・制御に属するものであり、点検に付帯する制約条件はそれぞれの機器が設置されている系統や場所によって決定される。もんじゅ1次冷却系設備で点検周期が16Mの点検に付帯している制約条件とその制約条件が付帯しているタスク数の割合をTable 2に示す。

Table 2において、制約条件無しとなっている点検タ

クが対象とする機器はナトリウムやアルゴンガスを内包しておらず、プラント操作なしで作業員が立ち入ることができる場所に設置されている。ナトリウムドレンまたは1次アルゴンガス系全停止の制約条件が付帯した点検タスクはそれぞれナトリウムとアルゴンガスを内包する機器、またはその設備に付随する機器を対象としている。

一方、Table 2において約42%と最も多くの割合を占めているナトリウムドレンかつ窒素セル開放の制約条件が付帯している点検タスクは、ナトリウムを内包する機器のうち、窒素セル機器及びそれに付随する機器を対象としている。

1次冷却系設備において点検周期が16Mの点検タスクでは、ナトリウムドレンかつ窒素セル開放という制約条件が最も高い割合を占める。また、この制約条件にはナトリウムドレンと窒素セル開放という2つの制約条件が付帯しているため保全合理化の余地が大きいと考えられる。よって、次節においてはナトリウムドレンかつ窒素セル開放という制約条件が付帯している窒素セル機器の点検タスクについてさらなる分析を行う。

5.2 保全重要度、安全重要度による窒素セル機器の点検タスク整理

点検周期16Mかつ窒素セル機器の点検で、ナトリウム

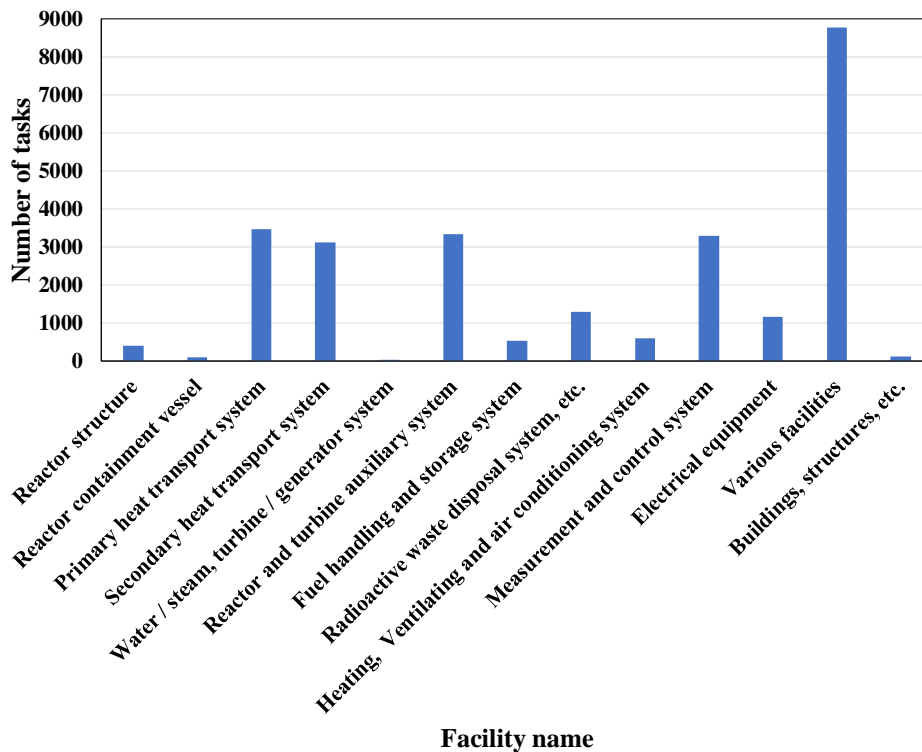


Fig. 5 Number of inspection tasks for equipments that performs inspection once every 16 M

Table 2 Percentage of tasks with constraints in inspection once every 16 M of primary heat transport system

Constraints	Percentage
No constraints	25.18
Sodium drain	25.73
Sodium drain and Air / nitrogen replacement	41.64
Primary argon gas system stop	7.45

Table 3 Classification of tasks with constraints by safety and maintenance importance

	Safety importance Class 1	Safety importance Class 2	Safety importance Class 3 or Non-class
Maintenance importance Class A	26 tasks	—	—
Maintenance importance Class B	—	—	1421 tasks
Maintenance importance Class C	—	—	—

ドレンと窒素セル開放の制約条件が付帯している点検タスクは 1447 タスクであった。これらの点検タスクを保全重要度と安全重要度で分類した結果を Table 3 に示す。Table 3 で整理された 1447 タスクの機器を以下に示す。ただし、簡単のために類似の機器をグルーピングした。

保全重要度 A かつ安全重要度 1 の機器

- ・電磁ポンプ (2 タスク)
- ・温度検出器 (18 タスク)
- ・流量検出器 (6 タスク)

保全重要度 B かつ安全重要度 3 以下の機器

- ・予熱用熱電対 (1134 タスク)
- ・温度検出器 (15 タスク)
- ・ブラギング計 (2 タスク)
- ・流量検出器 (2 タスク)
- ・ガス圧力検出器 (4 タスク)
- ・液位検出器 (7 タスク)
- ・サンプリングポンプ (21 タスク) ※
- ・止め弁 (108 タスク)
- ・差圧式 (漏えい) 検出器 (DPD: Differential Pressure Detector) ディストリビュータ (21 タスク) ※
- ・DPD スイッチ (21 タスク) ※
- ・ナトリウムイオン化式 (漏えい) 検出器 (SID: Sodium Ionization Detector) プリアンプ (21 タスク) ※
- ・DPD 及び SID 変換器 (63 タスク) ※
- ・回転速度検出器 (2 タスク) ※

※の機器は窒素セルには設置されていない。

保全重要度 A かつ安全重要度 1 の機器のうち、電磁ポンプの点検は、簡易点検であり、この簡易点検は

- (1) 作業準備
- (2) アイソレーション確認
- (3) -1 電磁ポンプ点検 (外観点検)
- (3) -2 電磁ポンプ点検 (特性試験)
- (3) -3 電力調整装置点検
- (4) アイソレーション復旧確認
- (5) 電磁ポンプ点検 (機能・性能試験)
- (6) 後片付け

の大きく 6 段階に分けられている。このうち、特性試験、機能・性能試験では絶縁抵抗の測定等を行っていた。電磁ポンプ以外の機器では、1 次主冷却系流量検出器で導通試験が行われている他は全てが外観点検であった。

保全重要度 B かつ安全重要度 3 以下に分類されている機器の点検タスクでは、1421 タスク中 1134 タスクが予熱用熱電対を対象とした外観点検であった。この予熱用熱電対の外観点検は窒素セルでの点検のうち最も多くの割合を占める。

予熱用熱電対の外観点検を行う際の作業手順は、作業準備、外観点検、後片付けであり、外観点検では傷、歪、発錆、結露、変色等がないことを確認する。この際、配管等に取り付けられた保温材は外さず、外観に明らかな異常がないことを確認する。

予熱用熱電対は点検時以外窒素雰囲気下に設置されている設備であるため、発錆や変色等の劣化は生じ難いと考えられるが、もんじゅでは、16 M に一度予熱用熱電対の外観点検を実施する運用としていたことがわかった。

また、保全重要度 B かつ安全重要度 3 以下の機器で予熱用熱電対以外のサンプリングポンプ、止め弁、DPD ディストリビュータ、DPD スイッチ、SID プリアンプ、DPD 及び SID 変換器、回転速度検出器は窒素セル外に設置されているが、窒素セル開放と同時期に点検を行う運用としている。このうち、サンプリングポンプ以外の機器は、外観点検以外の点検として警報確認試験、作動試験等の機能・性能試験が行われていた。

窒素セル機器の点検項目をグラフにまとめると Fig. 6 のようになり、約 90 % の点検が外観点検であることが分かった。

5.3 分析結果のまとめ

本研究ではもんじゅで実施されている点検周期 16 M の点検のうち、ナトリウムドレンかつ窒素セル開放の制

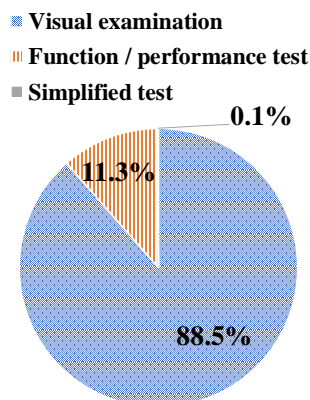


Fig. 6 The ratios of the number of each maintenance method

約条件が付帯している窒素セル機器の点検タスクに焦点をあて、点検タスク数、安全重要度及び保全重要度、点検作業内容の観点で分析した。分析の結果、窒素セルには安全重要度クラス1かつ保全重要度Aの機器に対する点検タスクと、安全重要度クラス3以下かつ保全重要度Bの機器に対する点検タスクが存在し、そのほとんどが後者であった。また、安全重要度クラス3以下かつ保全重要度Bの機器の内、約80%が予熱用熱電対の点検であることがわかった。

窒素セル機器の点検で16Mに一度行われているものは外観点検、機能・性能試験、簡易点検であり、その内90%程度が外観点検であった。残り約10%のほとんどが機能・性能試験であり、簡易点検は電磁ポンプに関連する2タスクのみであった。今回の分析から、もんじゅでは機器の外観点検、機能・性能試験及び簡易点検を行うために16Mに一度ナトリウムドレンと窒素セル開放を実施していたことがわかったが、平成29年度の点検では、ナトリウムドレン及び窒素セル開放の操作に開始と復旧合わせて約2か月を要しており、制約条件が点検期間長期化の一因となっていた[2]。このため、今回抽出したナトリウムドレンと窒素セル開放を要する電気設備及び計装品関連の点検タスクの点検周期を設計や運用などにより見直すことができれば、保全の合理化が可能である。また、制約条件自体を除去するプラントの設計や運用方法を検討することも保全合理化に資するといえる。

なお、本報告は、保全計画を分析対象として全般的な課題の抽出を目的としたものであり、作業量、所要時間の分析及びクリティカルパスに関する分析を実施していない。このため次段階の分析として上記についての分析を実施し、保全作業の標準化や、クリティカルパスと制

約条件の関係などについても検討を行う必要がある。

6. 分析から得られた保全合理化に関する考察

本章においては、点検周期16Mの点検を行っている窒素セルにおける保全を対象に、分析結果を元に保全合理化の対策を検討する。

6.1 安全重要度及び保全重要度の合理化に関する考察

原型炉であるもんじゅでは、機器の保全重要度及び保全の方式をFig. 2で示したフローに従い設定した結果、Fig. 3で示したようにTBMが全体の約90%となった。

これに対し次期炉においては、重要度の設定及び保全方式の設定に関し、リスク評価等を精緻化し定量的な判断に基づき適切に設定することでCBMやBDM等他の保全方式で管理する運用に変更すれば、TBMで管理する点検タスクの数を減らすことが可能であると考えられる。また、窒素セル機器の安全重要度及び保全重要度と、その点検タスク数の関係はTable 3に示した通りである。これらの機器に対しては適切なリスク評価を行うことで保全重要度Aに属する機器を保全重要度Bに移行したり、保全重要度Bに属する機器の点検方式をTBMからBDMに変更するといった保全の合理化が考えられる。

米国では、リスク情報を活用した10CFR50.69[10]を導入することで保全の合理化を行っている事例があるが、わが国においても今後の高速炉開発ではリスク情報を活用した保全の合理化が重要であることが今回の結果からも明らかとなった。

6.2 点検周期の合理化に関する考察

もんじゅは我が国最初の発電機能を備えた高速炉であるために、高速炉プラントにおける機器の経年劣化に関する知見が不十分な点がある。もんじゅ建設に係る研究開発で経年劣化の研究が行われたことに加え、保全プログラム策定の一環として専門家による劣化メカニズム評価を行ったものの[5]、もんじゅを含む高速炉機器の経年劣化評価には未だ合理化の余地が十分に残っている。とりわけ点検周期の設定は、保全経験の蓄積が合理化に与える影響が大きいと考えられる。

本研究で整理した窒素セル機器のうち、最も多くの割合を占める予熱用熱電対は16Mに一度外観点検を行うこととなっていたが、今後もんじゅの廃止措置に伴い予熱用熱電対の経年劣化に関する知見が蓄積されれば、実証炉以降の高速炉では予熱用熱電対の点検周期を劣化の実績に基づいて適切に設定し、外観点検の16Mという周

期を延長できる可能性がある。また、もんじゅにおけるこれまでの保守経験で異常が発見されていない機器に対しては、次世代高速炉において保全を設定する際に、もんじゅと同様の点検をする場合であっても、もんじゅでの保全実績から点検周期の延長を行うことが考えられる。

上記のように予熱用熱電対以外にも保全実績や廃止措置に伴う劣化に関する知見の蓄積により点検周期を長期化させることができる機器が多数存在すると考えられる。次期炉においては、これら蓄積した知見を基にしつつ、点検周期を過剰に短く設定することなく、安全性や信頼性を確保したうえで適切な時期に点検を設定することで保全合理化を行うことが重要である。

6.3 点検方法の合理化に関する考察

窒素セル機器の点検タスクを分析したところ、約90%が外観点検であり、残りの約10%のほとんどが絶縁抵抗測定等の機能・性能試験であることが分かった。

上記の点検に対しては近年の技術発展がめざましいAI (Artificial Intelligence) やIoT (Internet of Things) の技術を活用、若しくはこれら技術とCBMを組み合わせることで保全の合理化が見込める。例えば、インフラ構造物の分野では、カメラで撮影した構造物の映像から劣化や損傷を可視化する技術[11]が開発されている。また、ガス採掘の分野ではバルブからの圧力及び振動データにスペクトル解析を実施しニューラルネットワークによる故障予測を実施、適切な時期に機器の保修、交換を行うことで\$1,000万以上のコストを削減した事例[11]も存在する。

高速炉においても、固定カメラやレール上を移動するカメラ等を用いて取得した画像・映像のデータと、AIによる画像診断技術を組み合わせることで、外観点検を自動化することが可能になることが考えられるほか、上記の手法を用いることで、TBMで実施していた外観点検をCBMに変更することも考えられる。また、機能・性能試験に関しても、異常診断技術等を計装類に組み込むことで、保全方式の変更や作業の大幅な合理化が期待できる。窒素セルでの点検では、ナトリウム漏えい時の火災防止のためにナトリウムドレンと窒素セル開放の制約条件が付帯しており、これが点検長期化の一因になっているが、窒素セル機器の管理をCBMとすることで、ナトリウムドレンと窒素セル開放をせずに点検を行える可能性がある。但し、AIやIoTの導入には課題も存在する。例えば、カメラで取得したデータを画像診断技術で処理するためには、外観点検で検知することを想定している腐食等の劣化を画像診断技術で判断できることを実証することが今

後の課題である。

また、先進モニタリング技術を用いて異常の兆候を検知し、保全の時期を適切なものにするためには、温度、振動、流量等種々の時系列データと異常または劣化メカニズムの相関を確認する必要がある。これらのデータは、今後もんじゅの廃止措置及び解体に伴う分析等を通して取得・蓄積を実施する他、高速炉特有機器を想定し、種々のナトリウム試験装置から取得することで検討を進める。

6.1節で示した、リスク情報を活用した保全の合理化に加え、今後は最新の技術を点検に組み込むことによる保全の合理化も必要になると考えられる。本章の考察では保全合理化検討の一例として、窒素セルにおける保全の合理化を検討した。ナトリウムドレン/充填及び窒素セル開放/再置換の操作に合計約2か月を要した実績からも、16Mに一度実施する窒素セル機器の点検を不要とする、若しくは点検時の制約条件を不要とすることができれば、保全合理化の効果は顕著であると考えられる。

7. まとめ

もんじゅではほとんどの点検がTBMで管理されており、その中でも16Mに一度の周期で行われる点検が多かった。また、点検に付帯する制約条件が点検長期化の要因のひとつとなっていることから、本研究では16Mに一度行う点検のうち、ナトリウムドレンと窒素セル開放の制約条件が付帯している窒素セル機器の点検タスクを対象として分析を行った。その結果、分析対象のほとんどが安全重要度クラス3以下、保全重要度Bのものであり、それら機器の点検内容はほとんどが外観点検で残りの多くは機能・性能試験であった。

以上の分析結果をもとに、安全重要度及び保全重要度、点検周期、及び点検方法の観点から高速炉の保全合理化に資するための考察を行った。考察の結果、適切なリスク評価に基づく重要度の合理化及び重要度の低い機器の点検をBDM管理とする合理化、保全経験の蓄積による点検周期の合理化、最新技術を用いた点検方法の合理化を提案した。

今後の課題として、以下の二つを考えている。

一つ目は、今回分析の対象外とした点検タスクについての検討である。具体的には、長周期の保全及び高速炉特有ではない機器に関する保全についての検討である。

長周期の点検については、今後は分析する点検周期を拡充し、点検頻度は低くても多大な時間を要するために点検年度では大きな負荷となっている点検タスクについ

での調査を行う必要がある。

高速炉特有でない機器については、今回の分析でも諸設備の点検が 16 M の多数を占めていたことが分かっており、これらの機器について保全の合理化を検討する必要がある。具体的には、軽水炉や他産業プラント等での保全との比較により保全の合理化を図っていく。

二つ目の課題としては、個々の点検タスクに着目した検討である。今回は全般的な課題の抽出を目的とした分析のため、個々の点検に必要な費用や点検期間等の分析を行っていない。このため、今後はこれらについて詳細な分析を行う必要がある。

上記の課題に対し、もんじゅで実施される保全の周期設定方法に関する分析やもんじゅの保全データを用いた保全作業の標準化に関する分析を実施することで、高速炉全体の保全合理化をについて検討することができる。

参考文献

- [1] 敦賀総合研究開発センター，“高速増殖原型炉もんじゅ；その軌跡と技術成果”，JAEA-Technology 2019-007, (2019).
- [2] 橋立他，“高速増殖原型炉もんじゅの点検期間に関する課題の分析～(1) プラントの運用方法に関する分析～”，第 16 回保全学会学術講演会予稿集, 2019.
- [3] 日本原子力研究開発機構，“高速増殖原型炉もんじゅ安全性総点検に係る対処及び報告について（第 5 回報告）”，2010.
- [4] 原子力安全委員会，“発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針”，2009.
- [5] 仲井他，“高速増殖原型炉「もんじゅ」-保守の軌跡と成果”，第 16 回保全学会学術講演会予稿集, 2019.
- [6] 敦賀本部 高速増殖炉研究開発センター，“高速増殖原型炉もんじゅ技術年報(平成 24 年度)保守管理上の不備の措置命令対応”，JAEA-Review 2013-032, 2013.
- [7] 「もんじゅ」の在り方に関する検討会，“「もんじゅ」の運営主体の在り方について”，2016.
- [8] 日本原子力研究開発機構，“「核原料物質，核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第 36 条（現第 43 条の 3 の 23）第 1 項の規定に基づく保安のために必要な措置命令について（平成 25 年 5 月 29 日 原管 P 発第 1305293 号）」に対する対応結果報告（改訂）”，28 原機（も）248, 2016.
- [9] 原子力規制委員会，“高速増殖原型炉もんじゅ原子炉施設廃止措置計画の認可について”，原規規発第

1803282 号.

- [10] EPRI, “Program on Technology Innovation: 10CFR50.69 Implementation Guidance for Treatment of Structures, Systems, and Components”, EPRI Technical Report 1011234, 2006.
- [11] 日本保全学会，“第 19 回保全セミナー AI 導入による保全の技術革新に向けて”，JSM SEM 019, 2019.

(2020年2月25日受理，2021年3月4日採択)