

高速増殖原型炉もんじゅにおける燃料体取出し技術

Unloading and Handling Technology of the Fuel Assembly in Prototype Fast Breeder Reactor “Monju”

古賀 和浩 KOGA, Kazuhiro

高速増殖原型炉もんじゅは、現在、廃止措置の第1段階である燃料体取出し期間にある。燃料体取出しでは、富士電機が納入した燃料取扱設備が使用され、燃料体の処理などが予定どおり行われた。富士電機は、事業者のJAEAに技術員を派遣するなどの技術支援を行い、未経験の事象を克服しながら完遂に貢献した。また、燃料体取出しの実施により、その技術を実証した。今後も、燃料取扱設備の実機運転データを継続して取得する予定である。実機運転データを評価し、低炭素社会を担う新型炉として次期高速炉の当該設備の設計に反映することで、高速炉開発への貢献が期待できる。

The prototype fast breeder reactor Monju is currently in its first stage of decommissioning. The fuel handling facility system provided by Fuji Electric was used to unload and handle the fuel assembly as scheduled. Fuji Electric provided technical assistance, such as dispatching engineers to the JAEA, and overcame problems that has not arisen before to complete the project, thus proving our solid technology for the unloading and handling of the fuel assembly. We will continually acquire and evaluate actual operation data on the fuel handling facility system. Reflecting the results into the design will contribute to the development of next-generation fast reactors, which are essential part of supporting a low-carbon society.

1 まえがき

高速増殖原型炉もんじゅは、高速増殖炉（核燃料の増殖を狙った原子炉）の原型炉である（図1）。一般的な原子炉である軽水炉では冷却材に水を使用しているが、高速増殖炉ではナトリウム（液体金属）を使用している。

2016年にもんじゅの廃止措置移行が決定された。2017年6月に廃止措置の第1段階である“燃料体取出し^{（注）}”を開始し、2022年12月までの約5年半で完了する予定である（図2）。燃料体取出しでは、富士電機が納入した燃料取扱設備を使用し、2020年6月までに2回の“燃料体の処理”と1回の“燃料体の取出し”が予定どおり行われた（図3）。

富士電機は、事業者の国立研究開発法人 日本原子力研



図1 高速増殖原型炉もんじゅ
（写真提供：日本原子力研究開発機構）

区 分	第1段階 燃料体取出し期間	第2段階 解体準備期間	第3段階 廃止措置期間Ⅰ	第4段階 廃止措置期間Ⅱ
年 度	2018～2022	2023～2047		
主な 実施事項	燃料体取出し作業			
		ナトリウム機器の解体準備		
			ナトリウム機器の解体撤去	
	汚染の分布に関する評価			
		水・蒸気系など発電設備の解体撤去		
				建物など解体撤去
	放射性固体廃棄物の処理・処分			

図2 廃止措置の全体工程

（資料提供：日本原子力研究開発機構）

〈注〉燃料体取出し：燃料体取出しは、“燃料体の処理”と“燃料体の取出し”を合わせた総称である。燃料体とは、原子炉に装荷する核燃料の取扱い用集合体である。

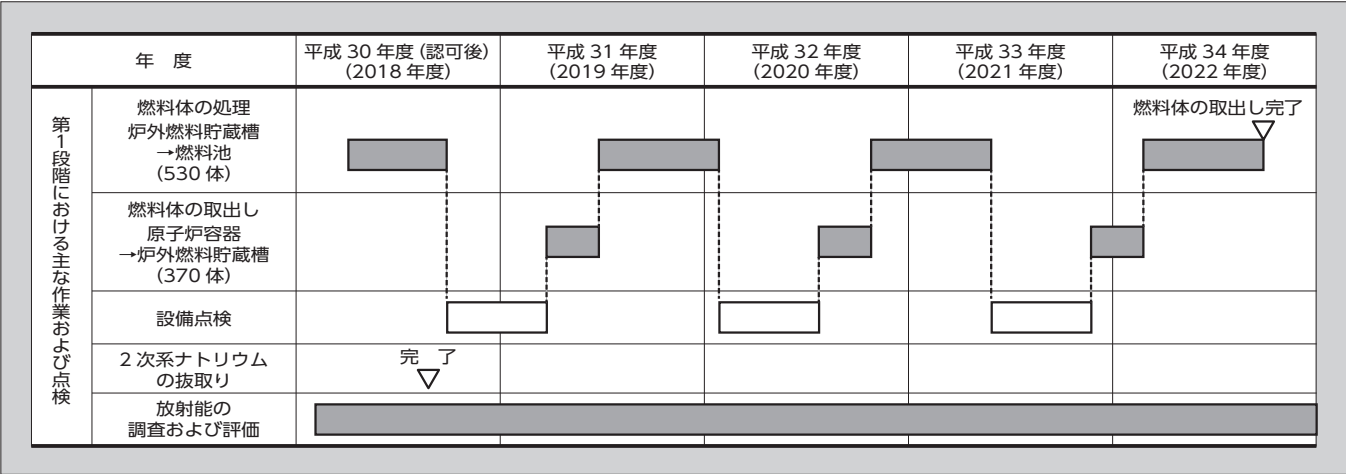


図 3 第 1 段階（燃料体取出し期間）の工程
（資料提供：日本原子力研究開発機構）

究開発機構（JAEA）に協力して技術員を派遣するなどの技術支援を行い、未経験の事象を克服しながらそれらの完遂に貢献した。

本稿では、燃料体取出しにおける燃料体取扱い操作の実施内容および技術の概要を述べる。

2 もんじゅの状況

廃止措置移行後のもんじゅでは、停止中の原子炉に燃料体などが装荷されたままである。国や自治体からは、燃料体や、水との反応性が高く危険物であるナトリウムの早期取出しが最優先事項として求められていた。

第 1 段階（～ 2022 年 12 月）で、全 530 体の燃料体の処理と、全 370 体の燃料体の取出し操作を完了する計画である。その中で、2020 年 6 月までに、合計 260 体の燃料体の処理と、100 体の燃料体の取出し操作を計画どおりに行った。

3 燃料体取出し技術

燃料体取出しに用いる燃料取扱および貯蔵設備を図 4 に示す。また、図 5 に燃料体取出しの移送経路を、表 1 に燃料体取出し作業の工程と使用する設備を示す。使用する設備には、燃料体の着脱、昇降、移送、冷却、洗浄、気密保持、遮蔽など、さまざまな機能が求められ、複数の設備が分担、かつ合理的に連携している。

また、燃料体取出しには、ナトリウム中や水中の燃料体を遠隔で安全に取り扱う高度な技術が求められる。特にナトリウムは液体金属であるため、ナトリウム中の燃料体の様子を目視できない。

燃料体などに付着したナトリウムは、空気中の酸素や水蒸気と極めて反応しやすいため、空気との接触を防止する必要がある。また、固化（凝固）を防止するために、常時 100℃以上に維持する必要がある。そのため、これらへの対応が燃料体の取扱いを難易度の高いものとしていた。

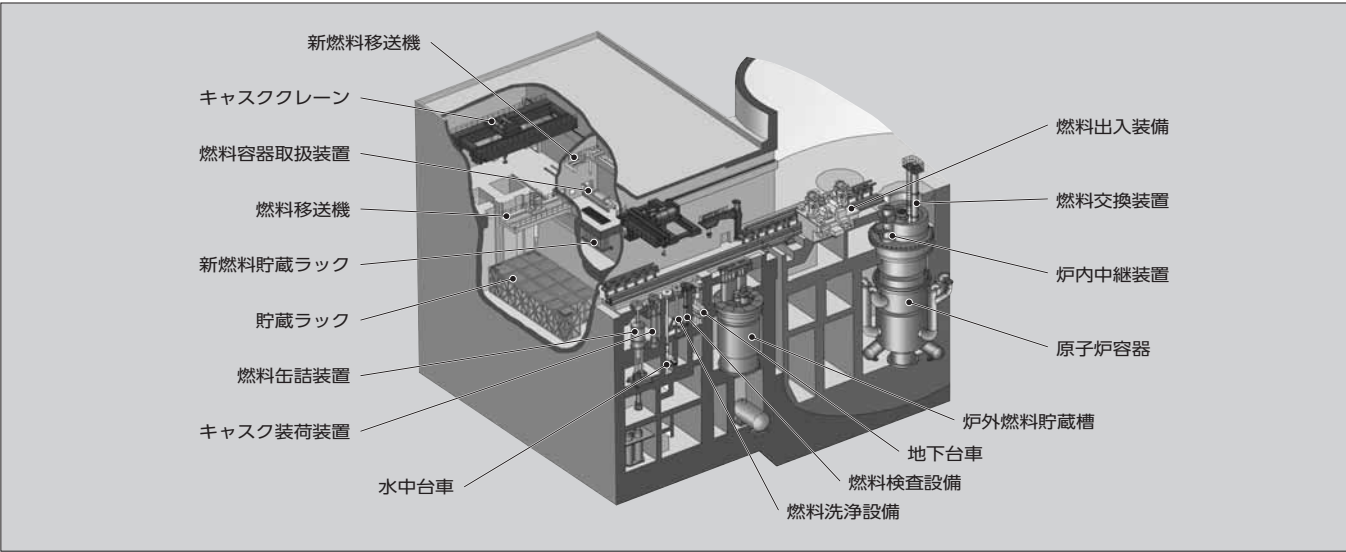


図 4 燃料取扱および貯蔵設備

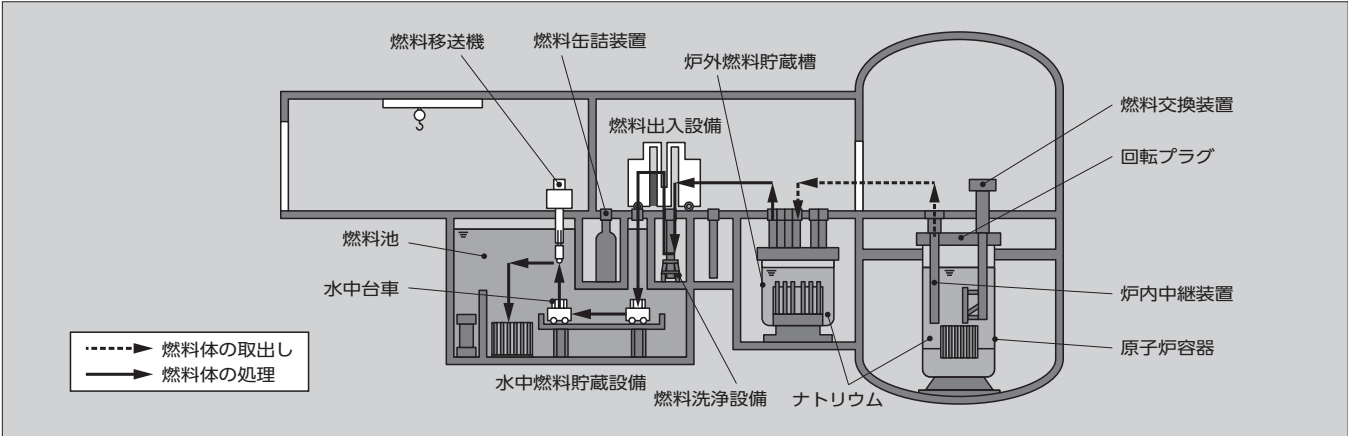


図5 燃料体取出しの移送経路

表1 燃料体取出し作業の工程と使用する設備

工 程	内 容	使用する設備
燃料体の取出し	燃料体を原子炉容器から炉外燃料貯蔵槽に移送すること	燃料交換設備
		燃料出入設備
		炉外燃料貯蔵槽
燃料体の処理	炉外燃料貯蔵槽に一時貯蔵していた燃料体を燃料洗浄設備に移送して付着ナトリウムを洗浄（除去）し、燃料池に貯蔵すること	燃料出入設備
		炉外燃料貯蔵槽
		燃料洗浄設備
		燃料缶詰装置
		水中台車、燃料移送機、貯蔵ラック
		地下台車、新燃料移送機、新燃料貯蔵ラック

3.1 燃料体の処理

燃料体の処理工程では、炉外燃料貯蔵槽に一時貯蔵していた燃料体を燃料洗浄設備に移送して、付着したナトリウムを洗浄（除去）し、燃料池の貯蔵ラックに貯蔵する。

(1) 使用設備

燃料体の処理の操作では、燃料取扱および貯蔵設備（図4）のうち、次の設備を使用する。

(a) 燃料出入設備（図6）

燃料出入設備は、原子炉容器および各設備（炉外燃料貯蔵槽など）間で燃料体などを移送するもので、燃料体の処理の操作で主体となる設備である。この燃料出入設備は、次に示すようにナトリウムが付着した燃料体などを取り扱う燃料出入機本体 A、ナトリウム除去後の燃料体などを取り扱う燃料出入機本体 B の 2 基の取扱機や他の機器から構成されている。

① 燃料出入機本体 A

燃料体などをナトリウム中または、ナトリウム金属粒子が分散したナトリウムミスト雰囲気中に取り扱う機器で、本体内はアルゴンガスを気密保持している。

② 燃料出入機本体 B

燃料体などを水中または湿分雰囲気中に取り扱う機器で、本体内は空気を気密保持している。

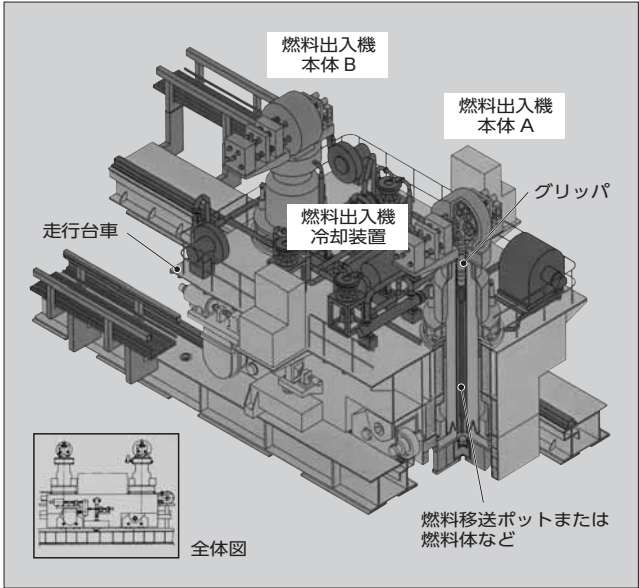


図6 燃料出入設備

③ 燃料出入機冷却装置

燃料出入機本体に収納した使用済燃料体の発熱に対して、冷却ガスを供給、排気（循環）する機器や配管などから構成され、本体 A 用と本体 B 用がある。

④ 走行台車

本体 A、本体 B および冷却装置を搭載して走行し、本体を各設備に精度良く位置決めする。

(b) 炉外燃料貯蔵槽

燃料体などの中継貯蔵、使用済燃料体の放射能減衰待ち貯蔵をナトリウム中で行う設備である。

(c) 燃料洗浄設備

使用済燃料体などに付着したナトリウムを蒸気および水で洗浄（除去）する設備である。この設備では、ナトリウムと水の急激な反応を防止するため、最初は蒸気を供給し、ナトリウムと水を徐々に反応させることとしている。

(d) 燃料缶詰装置

洗浄後の燃料体などを水缶詰する設備である。水缶詰とは、燃料缶詰装置において燃料体を水と共に缶詰缶に

封入することをいう。

(e) 水中台車、燃料移送機、貯蔵ラック

燃料出入設備から裸状態または缶詰缶に水缶詰した使用済燃料体などを受け入れ、所外搬出待ち貯蔵を水中で行うための設備である。

(f) 地下台車、新燃料移送機、新燃料貯蔵ラック

燃料体の処理の操作前に、所内に搬入された模擬体（燃料体の外形を模擬したもの）および缶詰缶を受け入れ、室内大気中で一時貯蔵を行うための設備である。

また、燃料体の処理では、模擬体および缶詰缶を燃料出入設備に受け渡す設備である。

(2) 燃料体の処理操作の概要

水缶詰する場合の燃料体の処理操作の概要は、次のとおりである。安全を確保するとともに複数の設備を連携できるようにするため、盤面上で点滅する押しボタンを押せば遠隔で自動化操作できる設計としている。

(a) 炉外燃料貯蔵槽は約 200℃の液体ナトリウムを保持している。この貯蔵槽に貯蔵した使用済燃料体を取り出し、洗浄そして水缶詰して貯蔵ラックに貯蔵する。

(b) 取り出した燃料体を貯蔵していた炉外燃料貯蔵槽の同じ位置に、新燃料貯蔵ラックに貯蔵していた模擬体を取り出して貯蔵する。炉外燃料貯蔵槽に装荷する前には、ナトリウムとの温度差を抑えるために予熱をする。

この燃料体と模擬体の取扱いは 1 体ずつ安全を確保して行いつつ総操作時間を短縮するため、(a)と(b)の工程をそれぞれ細分化して逐次操作や並行操作を適切に組み合わせた操作プログラムとしている。

(3) 燃料体の処理の実績

(a) 1 回目：2018 年 8 月～2019 年 1 月

燃料体 100 体の処理操作を目標とした。しかし、4 章で述べるようにいくつかの未経験の事象が発生したため、それぞれ 86 体の燃料体の処理と模擬体の移送にとどまった。

(b) 2 回目：2020 年 2 月～6 月

燃料体 130 体の処理操作を目標とした。1 回目の経験を踏まえた対策が効果を発揮し、計 174 体の燃料体の処理と、計 140 体の模擬体の移送を完遂した。

3.2 燃料体の取出し

燃料体の取出し工程では、原子炉（炉心）の燃料体を取り出して炉外燃料貯蔵槽に装荷（一時貯蔵）し、燃料体を取り出した後の炉心位置には、模擬体を装荷する。

(1) 使用設備

燃料体の取出しの操作では、燃料取扱および貯蔵設備（図 4）のうち、次の設備を使用する。

(a) 燃料交換設備

原子炉容器内のナトリウム中で燃料体などを移送する次の設備から構成される。

① 燃料交換装置

燃料体などを炉心から引き抜いたり、炉心に挿入し

たりする設備である。

② 炉内中継装置

燃料交換装置と燃料出入機本体 A の間で、燃料体などの受渡しを行う設備である。

(b) 燃料出入設備（図 6）

燃料体の取出し操作では、原子炉容器（炉内中継装置）と炉外燃料貯蔵槽の間で、燃料体などを移送する設備である。

(c) 炉外燃料貯蔵槽

(2) 燃料体の取出し操作の概要

燃料体の取出し操作は、燃料体の処理と同様に、遠隔自動で行う。

原子炉（炉心）の使用済燃料体を引抜き、移送して炉外燃料貯蔵槽に貯蔵する。この燃料体が装荷されていた炉心の同じ位置に、炉外燃料貯蔵槽に貯蔵した模擬体を取り出し、移送して挿入する。この燃料体と模擬体の取扱いは 1 体ずつ行い、操作フローは安全の確保と総操作時間の短縮を両立するため、工程をそれぞれ細分化して逐次操作や並行操作を適切に組み合わせた操作プログラムとしている。

(3) 燃料体の取出しの実績：2019 年 9 月～10 月

目標どおり、計 100 体の燃料体の取出しと、計 100 体の模擬体の移送を完遂した。

4 未経験の事象への対応

1 回目の燃料体の処理は、初めてとなる本格的な操作であった。そのため、多くの未経験の事象が発生した。主要な事象とその対策について述べる。

(1) ナトリウム化合物の付着によるトルク上昇

(a) 事象の概要

燃料体の取扱いは、燃料出入機本体 A（図 7）の内部のグリップ（図 8）の爪が開閉して燃料体などを着脱する。上部のグリップ駆動装置からのステンレステープの巻取りや巻出しによって、燃料体などの着脱と昇降を行う。このグリップ爪の開閉時のトルクが設計段階の想定値よりも上昇した。

(b) 原因の推定

実際にグリップを目視確認したところ、グリップの表面には多くのナトリウム化合物が付着しており（図 9）、この付着物が爪の開閉などを阻害していることを確認した。燃料体などを取り扱うとグリップやステンレステープにナトリウムが付着し、この付着したナトリウムが水酸化ナトリウムや酸化ナトリウムなどの化合物となって固化し、各摺動部を固着させてトルクが上昇した。

燃料洗浄設備の洗浄工程では、洗浄終了後に燃料洗浄槽内の水を排水し、燃料出入機本体 A からナトリウムが付着した燃料体を受け入れるために燃料洗浄槽内を乾燥させる。しかし、乾燥工程やガス置換が十分ではない場合、本体 A と燃料洗浄槽が接続した際に、グリップなどが露点の高い雰囲気さらされたり、本体 A 内に湿分が移行したりしたことが原因であると推定した。

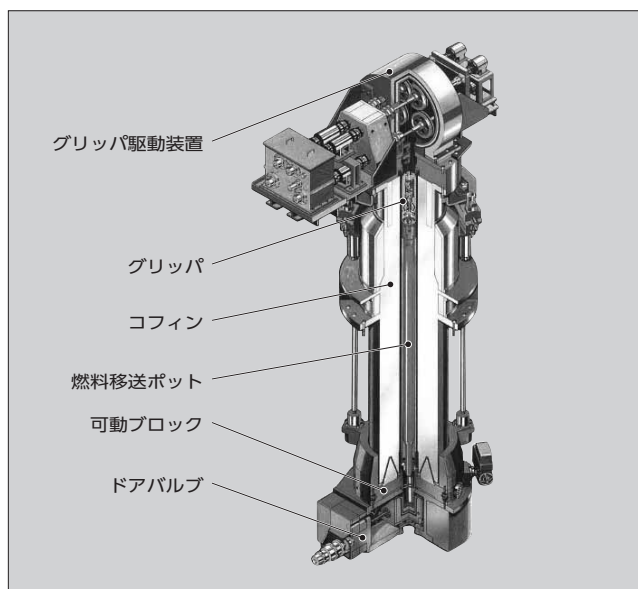


図7 燃料出入機本体 A
(本体 B も基本的には同一構成)

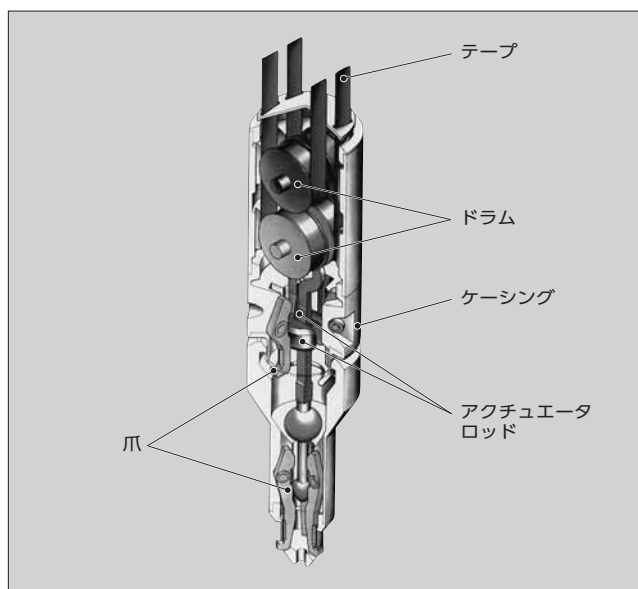


図8 燃料出入機本体 A グリップ

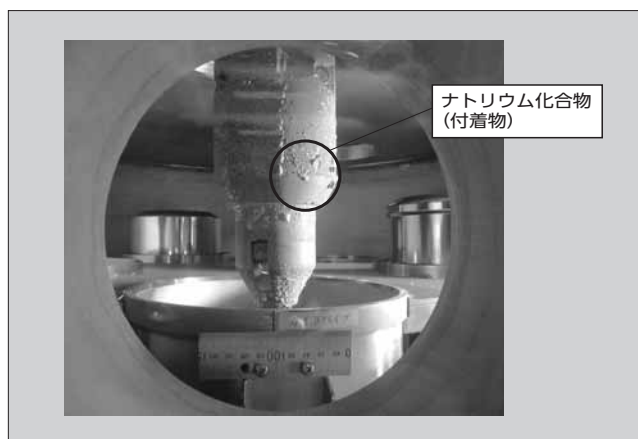


図9 グリップ下部の外観

そこで、燃料洗浄槽内の露点温度を測定したところ、洗浄後の乾燥が十分ではないことが分かった。燃料洗浄槽内の乾燥不足による残留湿分により、グリップなどに付着したナトリウムが化合物化したと判明した。

(c) 対策の実施

燃料洗浄槽内の乾燥機能を強化するため、燃料洗浄槽や近傍の配管にヒータおよび保温材を追加するとともに、総操作時間が長くない範囲で乾燥工程の時間を長くしたり、ガス置換回数を増やしたりすることとした。これらの対策を講じてから、2 回目の燃料体の処理に臨んだ。

(d) 対策の効果

2 回目の燃料体の処理では、1 回目で確認されたような異常なトルク上昇は初期に一度確認されたものの、それ以降は確認されず、安定したトルクを示した。

また、燃料洗浄槽内の露点温度も -60°C 以下まで低下して安定するようになり、明らかな改善が確認された。

(2) ナトリウム化合物付着によるドアバルブ全閉不良

(a) 事象の概要

燃料体の取扱いでは、燃料体を本体内に収納後、下部のドアバルブを全閉する。しかし、このドアバルブの全閉状態が不完全であったため、弁座のシール漏れが発生した。

(b) 原因の推定

ドアバルブ弁体上に滴下したナトリウムが弁体とケーシングの間の隙間に浸入して水酸化ナトリウムや酸化ナトリウムなどの化合物となって固化し、弁体の動きや弁座のシール性を妨げたものと考えた。化合物の生成の原因は、前項のグリップ爪の開閉時のトルク上昇の場合と同様に湿分の除去が不十分であったことである。

(c) 対策の実施

前項と同様に燃料洗浄槽内の乾燥工程を改善した。

(d) 対策の効果

2 回目の燃料体の処理では、1 回目で確認されたようなドアバルブ全閉不良は一度もなく、安定したドアバルブの開閉を確認した。

5 あとがき

高速増殖原型炉もんじゅにおける燃料体取出し技術について述べた。富士電機は、燃料体取出しにおいて、国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構に協力して燃料体取扱い操作期間において技術員を派遣するなどの技術支援を行い、未経験の事象を克服しながら完遂に貢献した。

また、燃料体取扱い操作を通して燃料体取出し技術を実証した。各取扱い操作では、燃料取扱設備の実機運転データを取得済みであり、今後も引き続き取得する予定である。今後実機運転データを評価し、低炭素社会を担う新型炉として次期高速炉の当該設備の設計に反映し、メーカーとして積極的に高速炉の開発に貢献する所存である。

参考文献

- (1) 古賀和浩ほか. 高速増殖原型炉もんじゅ 廃止措置と燃料体取出し作業に向けて. FAPIG. 2018, No.194.
- (2) 古賀和浩ほか. 高速増殖原型炉もんじゅ 燃料体取出し作業の開始. FAPIG. 2020, No.196.
- (3) 原子力規制委員会. もんじゅ廃止措置安全監視チーム会合資料.



古賀 和浩

高速炉もんじゅなどのエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社発電プラント事業本部発電事業部原子力バックエンド技術部。





＊本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。