

もんじゅ廃止措置の現況

戸澤克弘*1

もんじゅは燃料体が原子炉に存在する状態で廃止措置を開始したため、第1段階では2022年度までに原子炉からの燃料体取出しを最優先に実施する計画である。それまでの燃料体の連続処理実績が十分ではなかったことなどから、2018年度の燃料体の処理作業においては232件の不具合事象が発生し、燃料体の処理体数は当初計画の100体から86体となった。発生した不具合事象は3つの主な対策、「燃料出入機本体Aグリッパトルク上昇対策」、「燃料出入機本体Bグリッパトルク上昇対策」、「ソフトウェアの不具合等の対策」により対応した。その結果、2020年の燃料体の処理作業においては不具合事象の発生件数は27件と大幅に低減し、燃料処理体数は当初計画の130体を超えて174体の処理を完了できた。

Keywords:もんじゅ、廃止措置計画、燃料体取出し、燃料出入機

Since Monju started decommissioning activities with fuel assemblies still remained in the reactor core, the reactor defueling by FY 2022 is given first priority in the first stage of its decommissioning plan. According to the initial plan, the number of the subassemblies to be handled was 100, though the actually removed assemblies were total 86 because there were numerous troubles (as many as 232 incidents) encountered during the removing activities in FY 2018. The troubles were caused by scarce experience in continuously handling the assemblies and were dealt with by applying mainly three measures; “Countermeasure to increase the fuel gripper torque of the main body A of the ex-vessel fuel transfer machine”, “Countermeasure to increase the fuel gripper torque of the main body B of the ex-vessel fuel transfer machine” and “Countermeasure for the software defects”. As a result, the number of the incidents was significantly reduced to 27 and the number of fuel assemblies removed was increased to 174 from initially-planned 130.

Keywords: Monju, Decommissioning plan, Fuel handling, Ex-vessel transfer machine

1 もんじゅ廃止措置の概要

1.1 高速増殖原型炉もんじゅの概要

高速増殖原型炉もんじゅの施設概要を Table 1 及び Fig.1 に示す。「もんじゅ」はナトリウム冷却型高速中性子炉であり、発電プラントとしての性能を確認することを目的とする原型炉として建設された。炉心燃料体は MOX 燃料（ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料：Mixed Oxide Fuel）で構成されている。運転期間は約 40EFPD（全出力換算日：Effective Full Power Day）と短期間に留まっている。冷却系は、1次冷却系（放射性）、2次冷却系（非放射性）、水・蒸気系から構成され、ナトリウムと水が接触すると化学反応を起こし、熱と水素を発生するため、万が一蒸気発生器伝

熱管が破損した場合でもその影響が原子炉に及ぶことがないように2次冷却系を設置している。また、燃料体の取出し・装荷はナトリウムと空気との反応防止のため、原子炉の蓋を開放することなくナトリウム・アルゴンカバーガス雰囲気中の燃料取扱・貯蔵設備により、遠隔自動運転で実施する。

Table 1 Outline of Monju

炉型	ナトリウム冷却型高速中性子炉
定格熱出力	71.4 万 kW
定格電気出力	28 万 kW
燃料の種類	ウラン・プルトニウム混合酸化物
運転期間	40EFPD(全出力換算日)

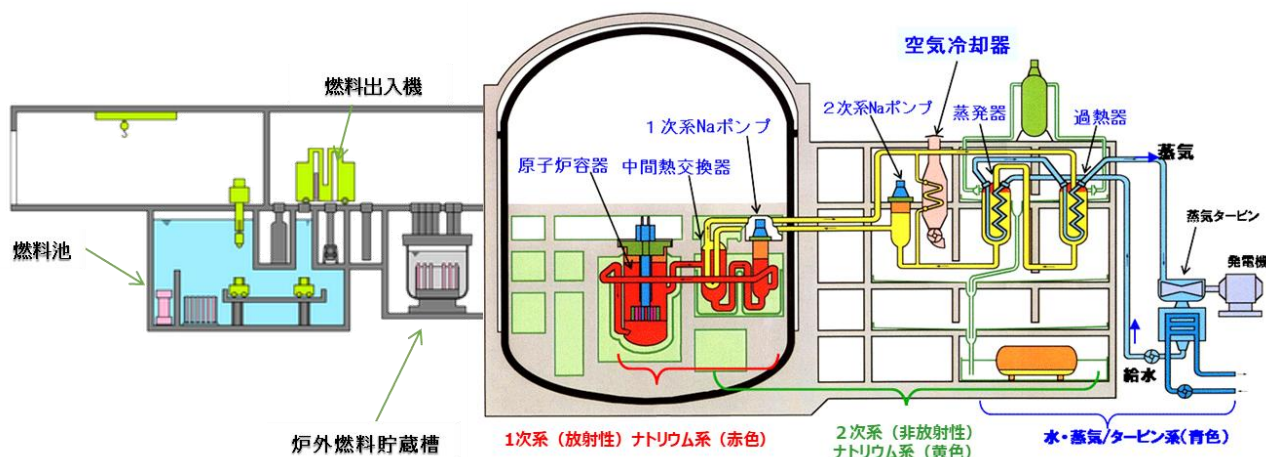


Fig.1 System concept of Monju plant

Current status of Monju decommissioning by Katsuhiro TOZAWA
(tozawa.katsuhiro@jaea.go.jp)

*1 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
Japan Atomic Energy Agency (JAEA)
〒914-8585 福井県敦賀市木崎 65-20

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第36回バックエンド夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

1.2 もんじゅ廃止措置の工程

高速増殖原型炉もんじゅは2016年12月に原子力関係閣僚会議において決定された、「『もんじゅ』の取扱いに関する政府方針」において、「運転再開せず、今後、廃止措置に

移行する」とされた。このため2017年12月に第1段階に重点をおいた廃止措置計画を認可申請[1]し、2018年3月に廃止措置計画が認可された。

軽水炉では、燃料体が原子炉から取出された状態から廃止措置となる。しかし、ナトリウムを冷却材に使用する高速炉では原子炉からの燃料体取出しに時間を要することから、原子炉及び炉外燃料貯蔵槽（以下「原子炉等」という）に燃料体が存在した状態から廃止措置開始となる。このため、廃止措置初期段階の基本方針として「化学的に活性なナトリウムと燃料体が共存する残留リスクを早期に低減する観点から、原子炉等から燃料体を取り出す作業を最優先で実施することとし、2022年度に燃料体取出しを完了させる」とした。なお、海外ではナトリウム冷却型高速中性子炉の廃止措置実績はあるものの、国内では初の経験となる。

廃止措置は、廃止措置期間全体を4段階（燃料体取出し期間、解体準備期間、廃止措置期間Ⅰ、廃止措置期間Ⅱ）に区分し、安全性を確保しつつ次の段階へ進むための準備

をしながら着実に進める。廃止措置の全体工程と現状の進捗を **Table 2** に、各段階での実施内容の概要[2]を **Table 3** に、第1段階（燃料体取出し期間）の工程[3]と現状の進捗を **Table 4** に示す。

①第1段階（燃料体取出し期間）：第1段階においては、原子炉に装荷されている燃料集合体370体と、炉外燃料貯蔵槽に貯蔵されている燃料集合体160体の合計530体を取り出し、洗浄処理して燃料池へ移送する。また、汚染の分布の評価を開始するほか、使用済燃料体やナトリウムの処理・処分の方法に係る計画について検討を行い、第2段階に着手するまでに廃止措置計画に反映して変更認可を受ける。

②第2段階（解体準備期間）：第2段階においては、汚染の分布に関する評価を継続するとともに、ナトリウム機器の解体準備及び水・蒸気系等発電設備の解体撤去に着手する。

③第3段階（廃止措置期間Ⅰ）：第3段階においては、

Table 2 Roadmap of Monju decommissioning [1]

	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	2017 ~ 2022	2023	~	2047
主要な実施事項	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	建物等解体撤去
	汚染の分布に関する評価	水・蒸気系等発電設備の解体撤去		
				放射性固体廃棄物の処理・処分

Table 3 Outline of the four implementation phases of Monju decommissioning plan [2]

①燃料体取出し期間 			
工事内容 ・燃料体の取出し（→燃料池） ・2次系ナトリウムの抜き取り（一時保管タンクの設置を含む） ・放射能の調査及び評価	安全対策 ・ナトリウムの火災防止 ・燃料取出し作業者の教育・訓練 ・防護具着用による被ばく低減策等	主な解体範囲 	安全対策 ・ナトリウムの火災防止 ・汚染防止囲い等の活用による粉じんの飛散防止 ・防護具着用による被ばく低減策等
③廃止措置期間Ⅰ 主な解体範囲 			
工事内容 ・ナトリウム機器の解体 ・水・蒸気系等発電設備の解体撤去（継続）	安全対策 ・ナトリウムの火災防止 ・遮蔽の設置、遠隔操作、防護具着用等による被ばく低減策等	主な解体範囲 	安全対策 ・汚染防止囲い等の活用による粉じんの飛散防止等
④廃止措置期間Ⅱ 主な解体範囲 			
工事内容 ・管理区域の解除 ・建物等解体撤去	安全対策 ・汚染防止囲い等の活用による粉じんの飛散防止等		

水・蒸気系等発電設備の解体撤去を継続するとともに、ナトリウム機器の解体撤去を行う。

④第4段階（廃止措置期間Ⅱ）：第4段階においては、管理区域の解除及び建物等の解体撤去を行う。

第1段階の6年間のうち4年目となる2020年10月時点では、2次冷却系ナトリウムの抜き取りを完了するとともに、原子炉から炉外燃料貯蔵槽へ100体の燃料体の取出しと、炉外燃料貯蔵槽から燃料池へ260体の燃料体の処理・移送を終えている。本稿ではとくに、Table 4に赤枠で示す燃料体の処理における不具合とその対策における工夫などを中心に第1段階の廃止措置の進捗を紹介する。

2 プラント状態と燃料体取出し作業及び燃料取扱設備の概要

2.1 現在のプラント状態と安全上の特徴

廃止措置の開始時点で以下のとおり、①未臨界性、②冷却性、③公衆被ばく、④ナトリウム漏えいのいずれに対しても安全上の問題がないことを確認している。

①未臨界性：現在のもんじゅの原子炉は、制御棒を全挿入状態とし、未臨界状態に継続的に維持されており、制御棒駆動機構を切り離して動作できない状態としているため予期せぬ臨界が生じる恐れはない。さらに、現時点までに取出した炉心燃料体の代わりに模擬燃料体（外観形状・寸法と重量を模擬した治具）を挿入しているため、制御棒を全て取出しても未臨界状態は維持される。

②冷却性：前述のように炉心燃料体は約40 EFPDの運転実績から燃焼度が低く、また、運転を停止して長期間を経たことから原子炉内の崩壊熱は燃料体の取出し開始前の時点で約30 kWと小さい。このため、崩壊熱は原子炉容器放散熱量（約50 kW）よりも小さく1次主冷却系、2次主冷却系及び補助冷却設備による崩壊熱除去機能は、安全上は要求されない。また、燃料体1体当たりの崩壊熱も最大で約0.2 kW/体と設計値2.2 kW/体の1/10以下であり、自然放冷により燃料被覆管制限温度以下に維持可能であるため、燃料体の取扱い時に強制冷却は必要ない。

③公衆被ばく：崩壊熱と同様に原子炉内の放射エネルギーは少

なく、設置許可時の事故想定に比べ放射エネルギーは4桁以上低い。このため設置許可時の代表事故である燃料取替事故に対応した事象として燃料池での使用済燃料の1体全ピン破損時に放出放射能の瞬時地上放散を想定しても敷地境界の実効線量は約 1.2×10^{-6} mSvと目安となる5 mSvを十分下回り、周辺の公衆に対して著しい公衆被ばくを与えない[1]。

④ナトリウム漏えい：万が一1次主冷却系または2次主冷却系でナトリウムが漏えいしたとしても、既存の対応策（ナトリウム漏えい検出設備による早期検知、カバー、トレイ及び堰の設置による漏えい範囲の制限など）によってナトリウム燃焼は適切に抑制される。

2.2 燃料体の取出し作業及び燃料体の処理作業の概要

「もんじゅ」の燃料体取出しは、原子炉から燃料体を取り出し炉外燃料貯蔵槽まで移送する「燃料体の取出し作業」と、炉外燃料貯蔵槽で一時的に貯蔵した後、炉外燃料貯蔵槽から燃料体を取り出し、燃料洗浄設備において付着したナトリウムを蒸気及び水によって洗浄し、燃料池の貯蔵ラックに貯蔵する「燃料体の処理作業」の2つの作業から構成される（Fig.2 参照）。各設備間の移送は燃料出入設備によって行う。

さらに燃料体を取り出した後の炉心位置には、燃料体の取出しを安全かつ確実にを行うために、燃料体の形状、重量等を模擬した模擬燃料体等を装荷する。模擬燃料体等は新燃料貯蔵設備を経由して炉外燃料貯蔵槽に搬入する（Fig.3 参照）。模擬燃料体等の各設備間の移送も燃料出入設備にて行う。

ナトリウムは不透明な液体金属であり、不活性なアルゴンカバーガス中にカメラを設置したとしても蒸発したナトリウムが付着して視認性が低下するため、ナトリウム中で取扱う原子炉内や炉外燃料貯蔵槽内、燃料体を移送する燃料出入設備などの燃料体の取扱い状況は直接見ることができない。このため、燃料体の取扱い時の運転操作は燃料取扱機器の動作時のトルクやストロークで規定の動作を行っていることを確認しながら、燃取系操作室より遠隔自動で行う。

冷却材のナトリウムは化学的に活性なため、炉外燃料貯

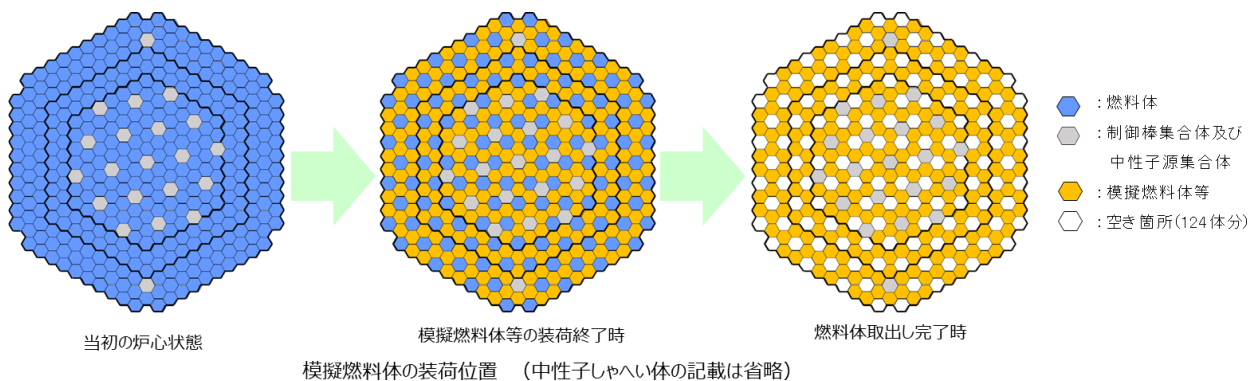
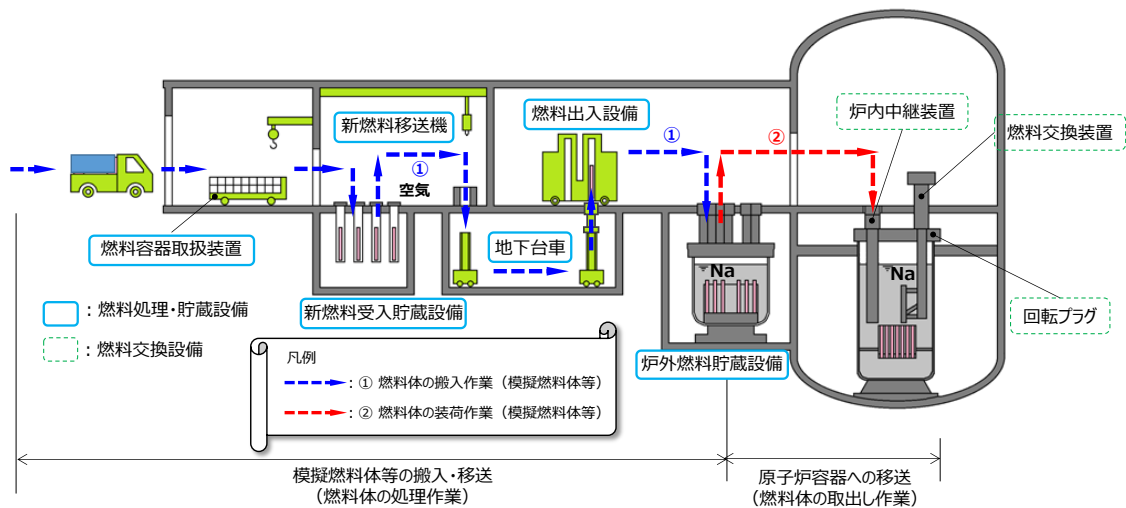
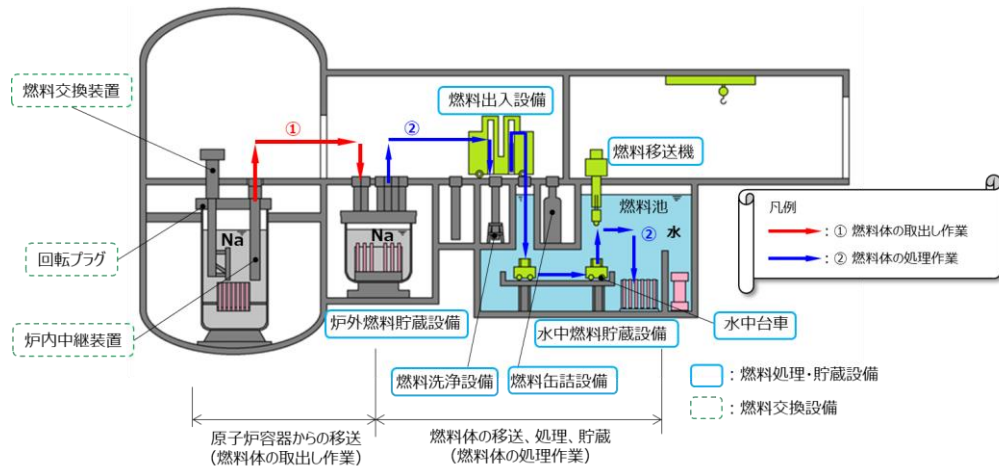
Table 4 Timeline for work in phase 1 (Fuel unloading) [3]

年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
第1段階における主な作業等	▽廃止措置に関する基本的な計画の策定					
	燃料体の処理（530体） （炉外燃料貯蔵槽→燃料池）	86体	174体	146体	124体	
	燃料体の取出し（370体） （原子炉容器→炉外燃料貯蔵槽）		100体	146体	124体	
	模擬燃料体の準備 （搬入→炉外燃料貯蔵槽）	103体	143体			
	燃料取扱設備の点検	燃料処理設備点検及び動作確認	回転プラグ点検及び動作確認			
	定期設備点検 （事業者自主検査）		燃料交換設備、燃料処理設備、ディーゼル発電機、原子炉補機冷却海水設備 他			
	2次系ナトリウムの抜き取り	一時保管用タンクの現地据付				
			▽抜き取り完了			

蔵槽から使用済燃料を移送する際に機器に付着残留したナトリウムが燃料洗浄槽の残留水分と反応しナトリウム化合物となること、ナトリウムが付着した機器から地下台車へ持ち込んだナトリウムが模擬燃料体等の移送時に化合物を

形成することがこれまで課題となっている。

また、現状は前述のとおり、原子炉内では炉心から燃料体を1体取出すごとに模擬燃料体等を1体装荷しているが、**Fig.4**に示す模擬燃料体等の部分装荷（一部の炉心位置に模



年度	2019年	2020年	2021年	2022年
炉心からの燃料体の取出し	2019.10 100 2019.12	2021.1 146 2021.3	2021.4 124 2021.6	2022.6

炉心からの燃料体の取出し工程

Fig.4 Partial loading of dummy fuel assemblies

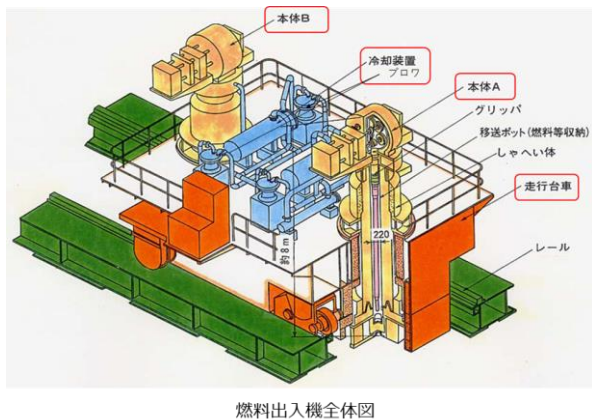
擬燃料体等を装荷せず、地震時にも全ての炉心位置で最低3面からの周りの炉心構成要素の支持が得られるような配列とする部分的な装荷方法)について安全上も、耐震性上も問題ないことを確認した結果、2022年に計画している第3回目の原子炉からの燃料体の取出しでは「②燃料体の装荷作業(模擬燃料体等)」(Fig.3 参照)を不要とすることを申請[4]し、2020年5月29日に原子力規制庁から認可された。なお、今後の模擬燃料体の必要体数は2020年までに炉外燃料貯蔵槽に搬入済みのため、次回2021年の第3回燃料体の処理以降はFig.3に記載の「①燃料体の搬入作業(模擬燃料体等)」も不要となり、燃料体の処理作業のリスク低減と廃棄物の低減(模擬燃料体が将来的に廃棄物にならない)を図ることができる。

2.3 燃料取扱及び貯蔵設備の主要機器

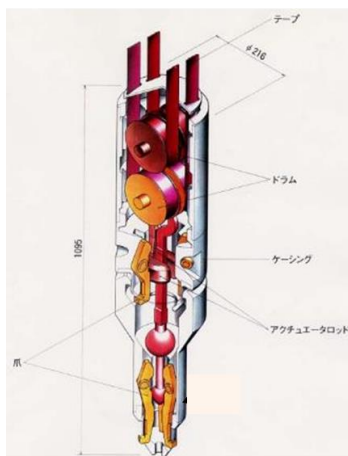
燃料体の処理に使用する主要機器である①燃料出入設備、②炉外燃料貯蔵設備、③燃料洗浄設備、④水中燃料貯蔵設備、⑤新燃料受入貯蔵設備について、以下に概要を紹介する。

2.3.1 燃料出入設備

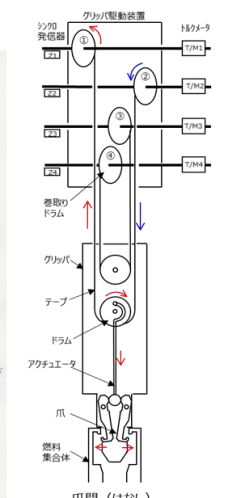
燃料出入設備(燃料出入機)は燃料体の床設備間の移送を行う設備である。本体Aではナトリウム及びアルゴンガス雰囲気下の燃料体を取扱い、本体Bでは水及び空気雰囲気



燃料出入機全体図



グリッパ拡大図(本体A)



グリッパ爪開閉駆動原理図(本体B)

Fig.5 Concept of Ex-vessel fuel handling machine

の燃料体を取扱う。Fig.5に示すように燃料体をつかみはなしするグリッパは4本のテープで吊り下げられており、昇降時には4本ともに同じ方向に動かし、爪開閉時には2本のみを送り出し・巻き上げて逆方向に動かすことで爪を動作させる。後述するように本設備の本体A及び本体Bのグリッパ爪開閉トルクの上昇が2018年度の燃料体の処理における最大の課題となった。

2.3.2 炉外燃料貯蔵設備

使用済燃料体の崩壊熱の減衰待ちと新燃料体(模擬燃料体等)の一時貯蔵を行うナトリウム中貯蔵設備である。燃料出入機の床ドアバルブへの接続位置と炉外燃料貯蔵槽(以下EVST(Ex-vessel fuel storage tank)と称す)の回転ラックの回転により貯蔵位置へ燃料体を位置決めする(Fig.6 参照)。燃料体等の貯蔵容量は約250体である。

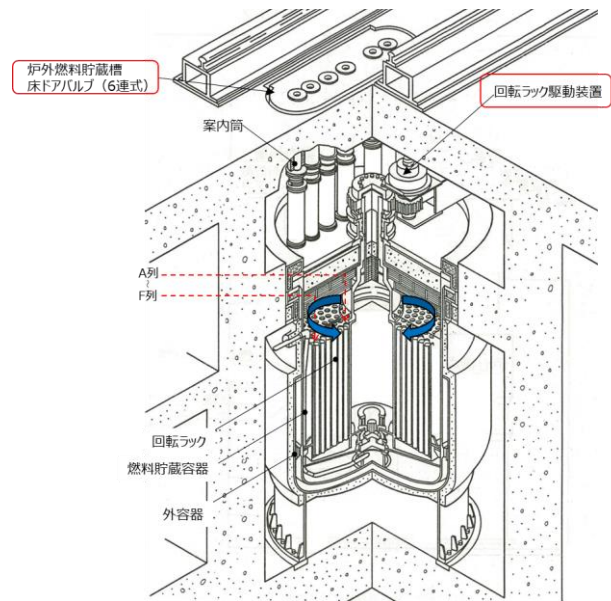


Fig.6 Concept of ex-vessel fuel storage tank

2.3.3 燃料洗浄設備

水中燃料貯蔵設備で貯蔵するため使用済燃料体の付着ナトリウムを除去する設備である。使用済燃料体の付着ナトリウムに蒸気を含む湿潤アルゴンガスを吹き付け、ナトリウム-水反応を緩やかにして不活性化(水酸化ナトリウムを生成)した上で、脱塩水を循環して洗い流す(Fig.7 参照)。本設備には燃料出入機の本体Aと本体Bの両方のグリッパがアクセスする。このためナトリウムが付着した本体Aのグリッパがアクセスする前に高温のアルゴンガスを循環する脱湿運転を実施して、ナトリウムの化合物生成を防止する設計となっている。しかし、後述のとおり本脱湿運転による燃料洗浄槽の乾燥が十分ではなく、本体Aグリッパの不具合が発生することとなった。

2.3.4 水中燃料貯蔵設備

洗浄及び缶詰後の使用済燃料体を水中台車と燃料移送機を用いて水中移送して、燃料池の貯蔵ラック中に貯蔵する設備である(Fig.8 参照)。高速実験炉「常陽」の実績から長期水中貯蔵時の燃料被覆管健全性を確認した[5]ことから、洗浄後の燃料の缶詰貯蔵を止め、裸貯蔵する方針に変更した。ただし、2018年度取出しの100体分(当初計画、

最終的には 86 体に変更)の燃料体は設計の確認のため当初

設計どおり缶詰缶に収納して貯蔵した。

2.3.5 新燃料受入貯蔵設備

新燃料体（模擬燃料体）を新燃料移送機を用いて空気雰囲気中で受入れ、新燃料貯蔵ラックに貯蔵する設備である（Fig.9 参照）。新燃料体（模擬燃料体）は地下台車でアルゴンガス雰囲気中に置換・予熱後に燃料出入設備に受け渡す。2.2 節に記載したとおり 2020 年の燃料体の処理で模擬燃料体の搬入を完了したため、2021 年以降の燃料体の処理では本設備は使用しない。

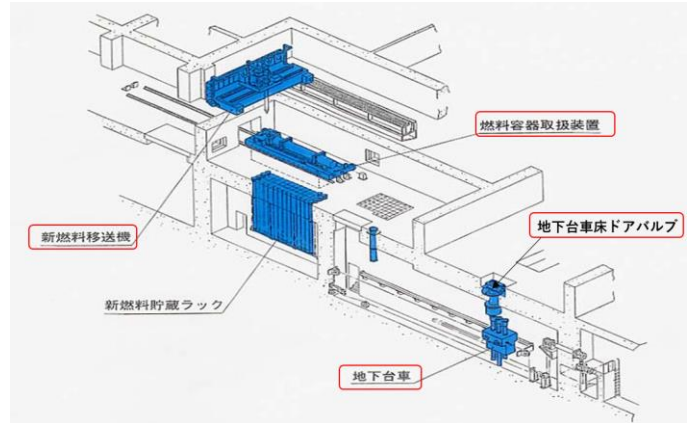


Fig.9 Concept of new fuel receiving and storage system

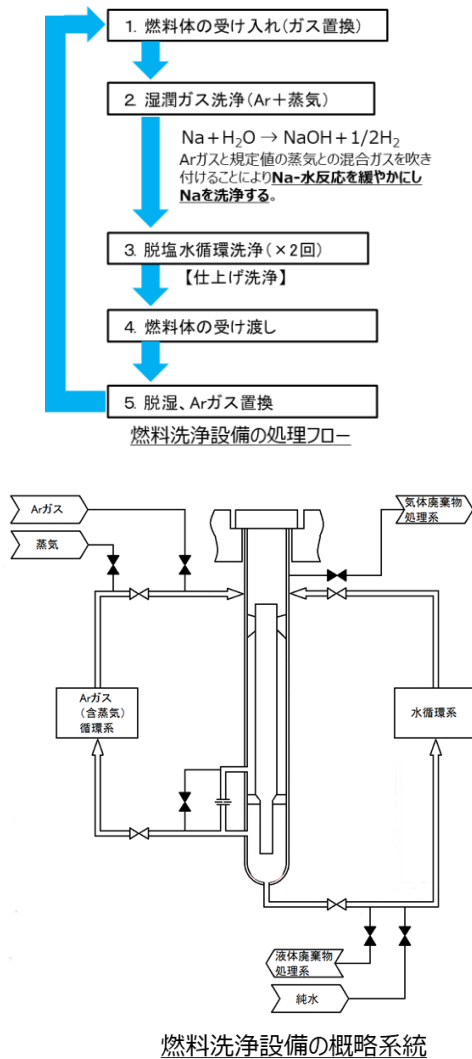


Fig.7 System concept and process flow of spent fuel cleaning system

3 2018 年度の燃料体の処理時の不具合

2018 年度の燃料体の処理開始前まで、燃料体の処理実績は 2 体しかなく、大量の燃料体を自動化運転で処理した実績がなかった。燃料体の処理開始前に操作員の訓練やリスク評価を行ったものの、結果として燃料体の処理においては大小各種の不具合が発生した。2018 年度の燃料体の処理の詳細スケジュールを Table 5 に示す。最初は燃料体の処理状況を確認する ITV カメラの視認性低下等により、燃料体の処理作業開始が 1 ヶ月程度遅れた（7 月→8 月）ところ

貯蔵ラック	貯蔵対象	貯蔵可能容量
缶詰缶A用	缶詰缶燃料体	1412体
缶詰缶B用	缶詰缶制御棒、 缶詰缶固定吸収体	747体
しゃへい体用	中性子しゃへい体 裸貯蔵燃料体	456体

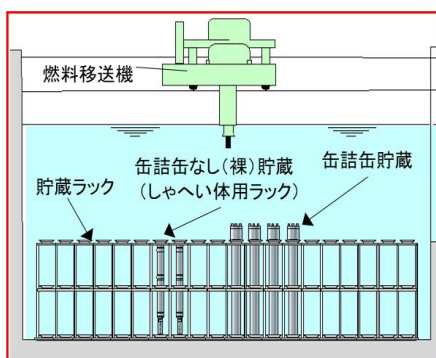


Fig.8 Concept of under-water spent fuel storage system

Table 5 Detail schedule of fuel handling in FY 2018

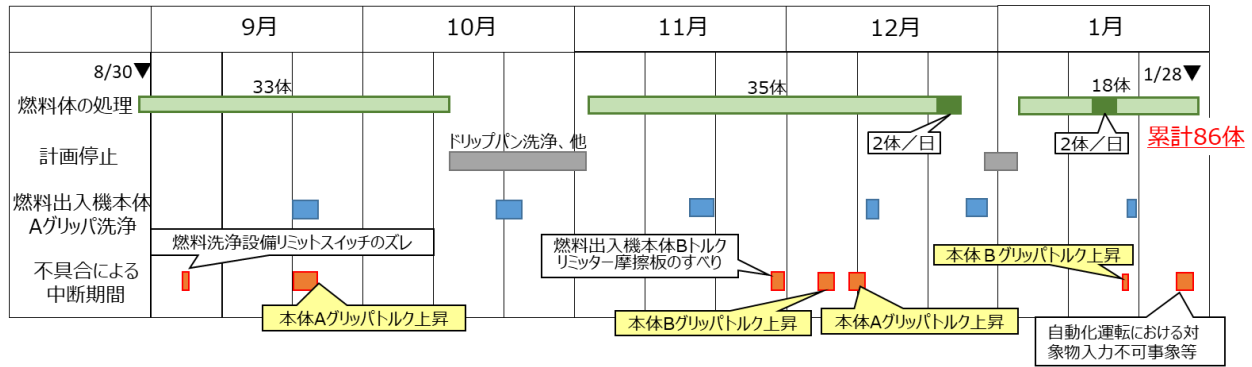


Table 6 Summary of problems experienced in fuel handling in FY2018

要因分類	主な対策を要する警報等	対策分類*1
機械異常	<ul style="list-style-type: none"> 燃料出入機本体Aグリッパのつかみはなし異常(Na等付着) : 8件 燃料出入機本体Aグリッパのクラッチ動作遅延 : 1件 燃料出入機本体Bグリッパのつかみはなし異常(トルク上昇) : 3件 燃料出入機本体Bトルクリミッター摩擦板の滑り : 2件 真空ポンプシール異常 : 2件 燃料出入機本体Aドアバルブのナトリウム付着 : 2件 グリッパ交換装置現場盤動作不可 : 1件 	設備対応 設備対応 設備対応 設備対応 設備対応 設備対応 設備対応
系統異常	<ul style="list-style-type: none"> EVSTブローダウン流量異常 : 1件 プレコートフィルタ通水不可 : 1件 	対策完了 (運用対応) 対策完了 (運用対応)
信号異常	<ul style="list-style-type: none"> 燃料洗浄設備のリミットスイッチのスレ : 1件 ガス置換排気時間超過による連動運転渋滞 : 6件 燃料洗浄槽配管予熱温度異常 : 2件 自動化運転における対象物入力不可 : 1件 自動化運転リセット後のCRT表示不具合 : 1件 燃料処理設備制御盤間の伝送異常等の起動条件不成立 : 3件 燃料移送機の連動運転渋滞 : 1件 警報発生時に自動化除外せず : 1件 クラッチ動作遅延ソフトの誤修正 : 1件 	設備対応 運用対応 設備対応 設備対応 設備対応 設備対応 設備対応 設備対応 設備対応
環境異常	<ul style="list-style-type: none"> 燃料缶詰装置監視用ITV保護ガラスの結露 : 2件 	今後不使用
その他	<ul style="list-style-type: none"> 監視用ITVモニタ画像での確認困難による缶詰缶回転操作 : 1件 貯蔵ラックターゲットプレート上の影 : 1件 燃料洗浄設備の脱塩水洗浄時の電気伝導度低下未了 : 1件 	今後不使用 設備対応 運用対応

*1：設備対応：設備対応（設備改善、補修・調整や予備品確保）の検討が必要な項目
 運用対応：運用対応（運用改善、手順書反映）の検討が必要な項目

Table 7 Summary of countermeasures for the problems

大分類	小分類	主な項目	方向性
設備対応	設備改善	<ul style="list-style-type: none"> 燃料出入機本体Aグリッパのつかみはなし異常（Na等付着） 燃料出入機本体Bグリッパのつかみはなし異常（トルク上昇） 燃料出入機本体Aグリッパのクラッチ動作遅延、ソフト誤修正 自動化運転リセット後のCRT表示不具合 自動化運転における対象物入力不可 燃料処理設備制御盤間の伝送異常等の起動条件不成立 燃料洗浄槽配管予熱温度異常 燃料出入機本体Aドアバルブへのナトリウム付着 燃料移送機の連動運転渋滞 警報発生時に自動化除外せず 	<ul style="list-style-type: none"> 頻度大で工程影響大⇒対策Aとして重点検討 燃料処理後半に頻度大、操作員負担大⇒対策Bとして重点検討 <p>主に自動化運転プログラムの修正等の対策が必要な各種不具合 ⇒対策Cとして種類別に検討</p>
	補修・調整、予備品確保	<ul style="list-style-type: none"> 燃料洗浄設備のリミットスイッチのスレ 燃料出入機本体Bトルクリミッター摩擦板の滑り 真空ポンプシール異常 グリッパ交換装置現場盤動作不可 貯蔵ラックターゲットプレート上の影 	<ul style="list-style-type: none"> 調整で復旧済み、予備品確保 補修で復旧済み、長納期のため予備品確保 分解点検とシール交換 補修予定 観察継続、除去方法検討
運用対応	運用改善	<ul style="list-style-type: none"> ガス置換排気時間超過による連動運転渋滞 燃料洗浄設備の脱塩水洗浄時の電気伝導度低下未了 	<p>主に自動化運転プログラムの修正等の対策が必要な各種不具合 ⇒対策Cとして種類別に検討</p>
	手順書反映	<ul style="list-style-type: none"> EVSTブローダウン流量異常 プレコートフィルタ通水不可 	対策完了 対策完了
対応不要		<ul style="list-style-type: none"> 燃料缶詰装置監視用ITV保護ガラスの結露 監視用ITVモニタ画像での確認困難による缶詰缶回転操作 	<ul style="list-style-type: none"> 缶詰処理は今後行わない 同上

から始まり、燃料体の処理開始後、自動化運転プログラムのバグや最適化不足に伴う自動化運転停止を初め、トルクリミッターの異常等の機器故障に伴う不具合、燃料出入機本体 A グリッパへのナトリウム付着及び燃料出入機本体 B グリッパのトルク上昇の発生に伴う複数回の処理作業工程の遅延などが発生した。最終的に合計 86 件（のべ 232 件）の不具合等（警報発報に伴う自動化運転の停止及び警報発報なしでの自動化運転除外）が発生（2.7 件/体）し、それに伴う操作員の作業負荷の増大と復旧及び対策のための工程遅延が発生し、2018 年度の当初の燃料体の処理計画 100 体（2018/7-2018/12）に対し、86 体の処理（2018/8-2019/1）で終了した。2018 年度の燃料体の処理作業で発生した不具合のリストを Table 6 に、発生した不具合の整理結果と対策方針を Table 7 に示す。同表から、複数回発生し、かつ工程遅れに至り重点対策が必要な不具合として、以下の 2 つの事象を抽出した。

【対策 A】燃料出入機本体 A グリッパトルク上昇対策

【対策 B】燃料出入機本体 B グリッパトルク上昇対策

また、その他の事象については以下の対策として整理して、ソフトウェア対策を中心に実施することとした。

【対策 C】その他ソフトウェア不具合等の対策

各対策については主要な内容の詳細と対策の結果について次章にて報告する。

重点対策が必要な対策 A 及び対策 B の事象について、発生しているトルクデータのうち、燃料出入機本体 A のグリ

ッパ爪開閉トルクの変動を Fig.10 に、燃料出入機本体 A の昇降トルクの変動を Fig.11 に、燃料出入機本体 B のグリッパ爪開閉トルクの変動を Fig.12 に、燃料出入機本体 B の昇降トルクの変動を Fig.13 に示す。本体 A ではグリッパ爪開閉トルクが使用中に徐々に増大して警報が発報しているのに対して、同じ駆動装置を使用するグリッパ昇降トルクにはトルク上昇がみられないことからグリッパ内部の爪開閉機構の抵抗が増加したことが爪開閉トルク上昇の原因と推定できる。一方、本体 B ではグリッパ爪開閉トルクの増加とグリッパ昇降トルクの変化が対応しており、グリッパ内部の爪開閉機構ではなく、駆動装置側の摺動部の抵抗増加に伴うトルクの上昇によるものと考えられる。詳細は次章にて報告する。

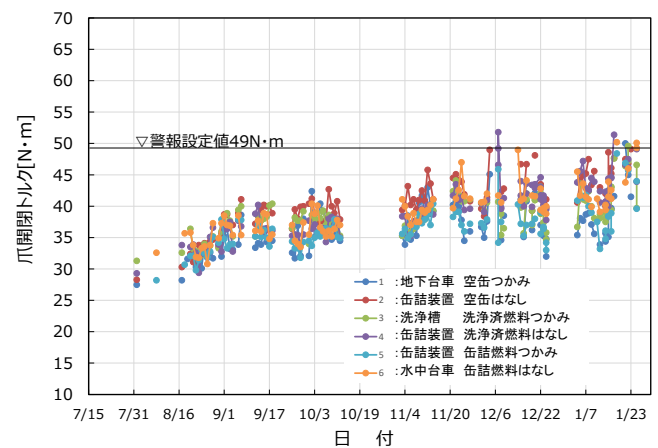


Fig.12 Gripper finger drive torque of the main body B of the ex-vessel fuel transfer machine in FY 2018

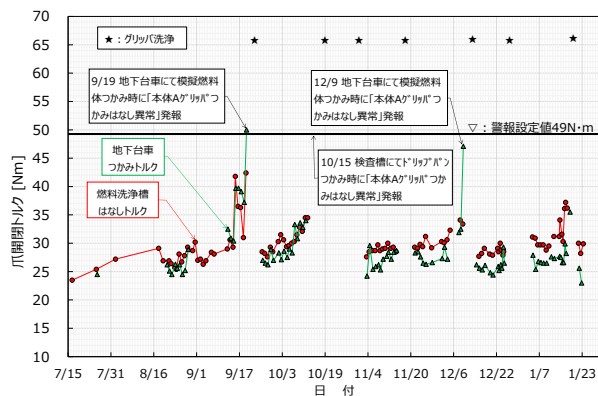


Fig.10 Gripper finger drive torque of the main body A of the ex-vessel fuel transfer machine in FY 2018

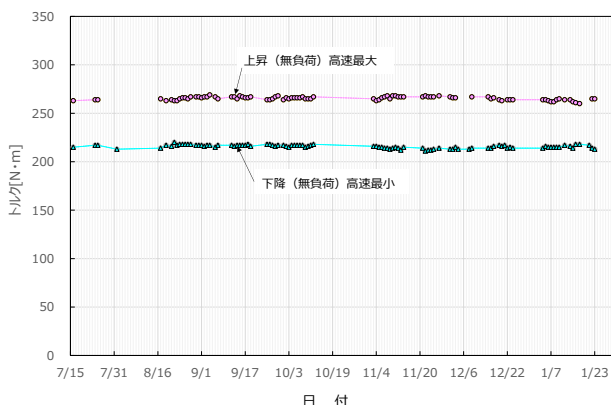


Fig.11 Gripper lifting torque of the main body A of the ex-vessel fuel transfer machine in FY 2018

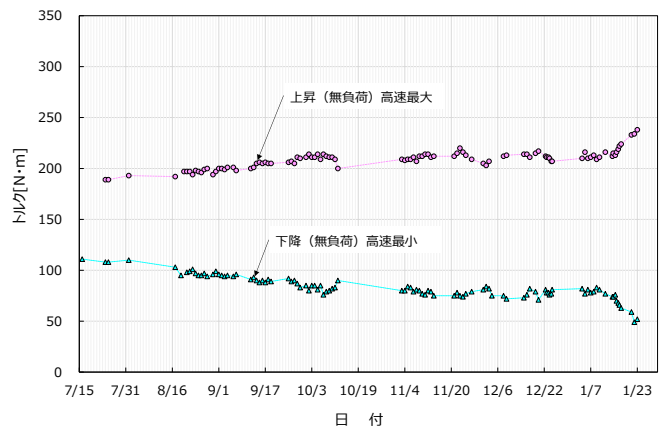


Fig.13 Gripper lifting torque of the main body B of the ex-vessel fuel transfer machine in FY 2018

4 不具合対策の効果と 2020 年の燃料体の処理

2018 年度の燃料体の処理における主な不具合への対策とその効果及び 2020 年の燃料体の処理の結果について詳細を以下に示す。

4.1 燃料出入機本体 A グリッパのトルク上昇対策

燃料出入機本体 A のグリッパトルク上昇は、3 章に記載

のとおりナトリウム中に浸漬するグリップ内部の爪開閉機構においてトルクが上昇しているものと想定された。このため、グリップ洗浄前のトルク上昇が発生しているケースとグリップ洗浄後にトルク上昇が発生していないケースのグリップのトルク変動履歴を比較したところ、トルクピークが同一ストロークで発生していることがわかった。さらに、このストロークは Fig.14 に示すグリップの爪とそれを駆動するアクチュエータの隙間が狭くなるストロークと一致した。この事実に基づきトルク上昇の要因分析を行った結果、トルク上昇が発生している要因は以下のとおりであると推定した。

- ・ EVST でグリップにナトリウムが付着し、露点の高い燃料洗浄槽で付着したナトリウムが化合物となる。
- ・ グリップ付着ナトリウム化合物の表面が湿分と結合して潮解した状態となり、次の燃料体を取り扱う際に、潮解したナトリウム化合物にナトリウムが付着する。
- ・ 爪を駆動するアクチュエータの昇降に伴いグリップの爪側面に付着したナトリウム化合物が爪とアクチュエータの隙間の小さい部分に堆積、または脱落して噛みこみ、トルク上昇（回数を繰り返すごとに上昇）が発生する。

この要因分析結果に基づき、以下の2つの対策を立案し、実施した。

- ① 燃料洗浄槽の燃料体受入れ前のガス置換対策
- ② 燃料洗浄槽の除湿対策

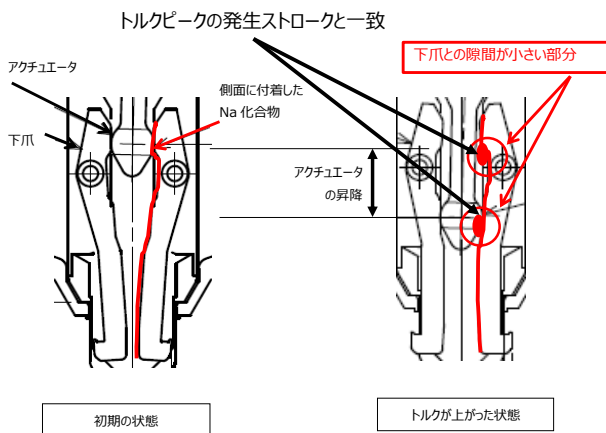


Fig.14 Conceptual diagram of sodium compound adhesion to gripper fingers

4.1.1 燃料洗浄槽の燃料体受入れ前のガス置換対策

燃料洗浄槽に EVST から燃料体をつかんで燃料出入機本体 A のグリップが接続する際に、燃料洗浄槽の露点温度を低下させることがグリップに付着したナトリウムの化合物生成を防止するためには重要である。従来は受入れ直前に燃料洗浄槽のガス置換（系統を真空引きした後、高純度アルゴンガスを供給する作業）を1回実施していたが、燃料体の処理休止時に燃料洗浄槽の露点温度計測を実施したところ、Table.8 のとおりガス置換2回、3回と繰り返し回数を増加させると露点温度が低下することがわかった。このため、燃料体の受入れ前のガス置換回数を2018年11月3日以降は2回、2018年11月21日以降は3回とした。その

結果、2018年12月9日に他設備の警報発報に伴いグリップが燃料洗浄槽で長時間保持された直後を除き、トルク高警報が出なくなった (Fig.10 参照)。グリップトルク高警報後に確認した洗浄前の外観と比べ、グリップの計画洗浄前に実施した外観観察ではグリップ表面のナトリウム付着量が少ないことが確認 (Fig.15 参照) されている。上記のガス置換回数の増加は2018年度の燃料体の処理では応急対応として自動化運転を除外して操作員の手動操作で実施していたが、操作員の負荷を低減するため2018年度の燃料体の処理作業が完了後に自動化運転プログラムの修正を行い、2019年以降は自動化運転の中で燃料体受入れ前のガス置換を3回実施するように改良した。

Table 8 Example of gas replacement frequency and dew point temperature before fuel reception

燃料洗浄槽の状態	露点温度 ¹⁾
ガス置換前	約-3℃
ガス置換1回目（従来）	約-9℃
ガス置換2回目（追加）	約-30℃
ガス置換3回目（追加）	約-48℃

1)露点温度は受入準備後に燃料を受入れるまでの時間に相当するガス置換後約30分の上部露点計の値を示す



Fig.15 Gripper observation situation

4.1.2 燃料洗浄槽の除湿対策

除湿運転後の燃料洗浄槽の湿分が高いことが根本的な原因と考えられることから、2018年度の燃料体の処理終了後に燃料体を用いないで洗浄運転を実施する空洗浄試験を行い、燃料洗浄設備の燃料洗浄槽及び系統配管部の温度測定

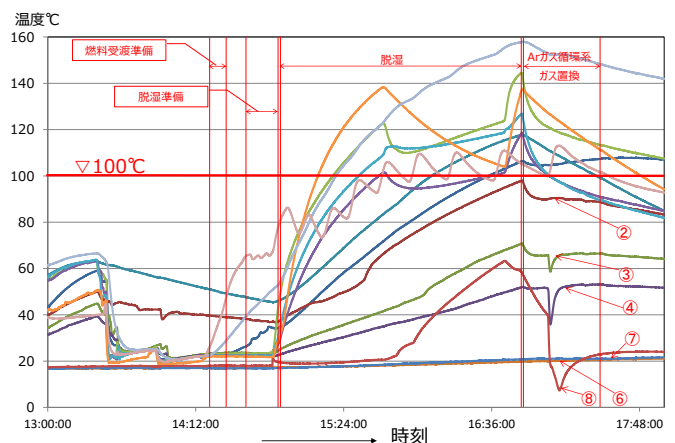


Fig.16 Temperature history of each part of spent fuel cleaning system

を実施した。その結果、Fig.16 に示すとおり、一部の配管及び燃料洗浄槽の温度が 100℃を超えない部位があることがわかった。このため水（液体）の状態では湿分が残留する

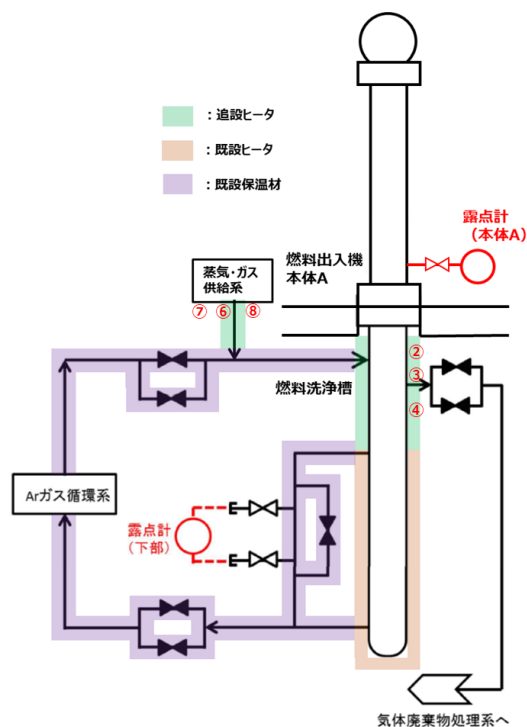


Fig.17 Additional location of heaters and heat insulating materials for spent fuel cleaning system

可能性があり、ガス置換では十分湿分が除去できない部位として下記 (Fig.17 参照) を摘出した。

- ・燃料洗浄槽上部、中部胴 (②③④)
- ・ガス供給配管 (止め弁まで⑥⑦⑧)

なお、○数字は Fig.16 及び Fig.17 中の赤色○数字の部位を示す。

これらの部位はいずれもヒータ及び保温材を設置していないことが確認されたことから、ヒータ及び保温材を追加設置して温度制御できるようにした。その効果を確認するため、除湿対策の効果確認試験として模擬燃料体を用いた燃料洗浄の自動化運転を実施した。本試験で燃料洗浄槽下部と燃料出入機本体 A 内部の露点温度を計測した結果を Table 9 に示す。なお、露点温度の計測位置は Fig.17 に示す

Table 9 Results of measuring the dew point temperature at the bottom of the fuel cleaning system and inside the fuel transfer machine unit A

(単位: °C)

月日	測定場所	受入準備 直前 * 1	燃料体受入後の経過時間		
			0 分間	5 分間	7 分間
12月26日	本体 A	-64	-35	-39	-39
	洗浄槽下部	-36	-28	-29	—
12月27日	本体 A	-62	-61	-40	-33
	洗浄槽下部	-33	-38	-44	—
12月28日	本体 A	-63	-60	-28	-24
	洗浄槽下部	-33	-41	-48	—

* 1 : 洗浄槽については除湿運転後に一晩保持、本体Aについてはドアバルブ閉止後の受入準備直前にガス置換を実施し、その前の処理による湿分の影響を排除

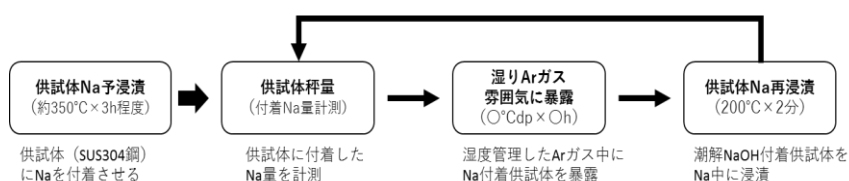


Fig.18 Outline procedure for sodium reattachment test

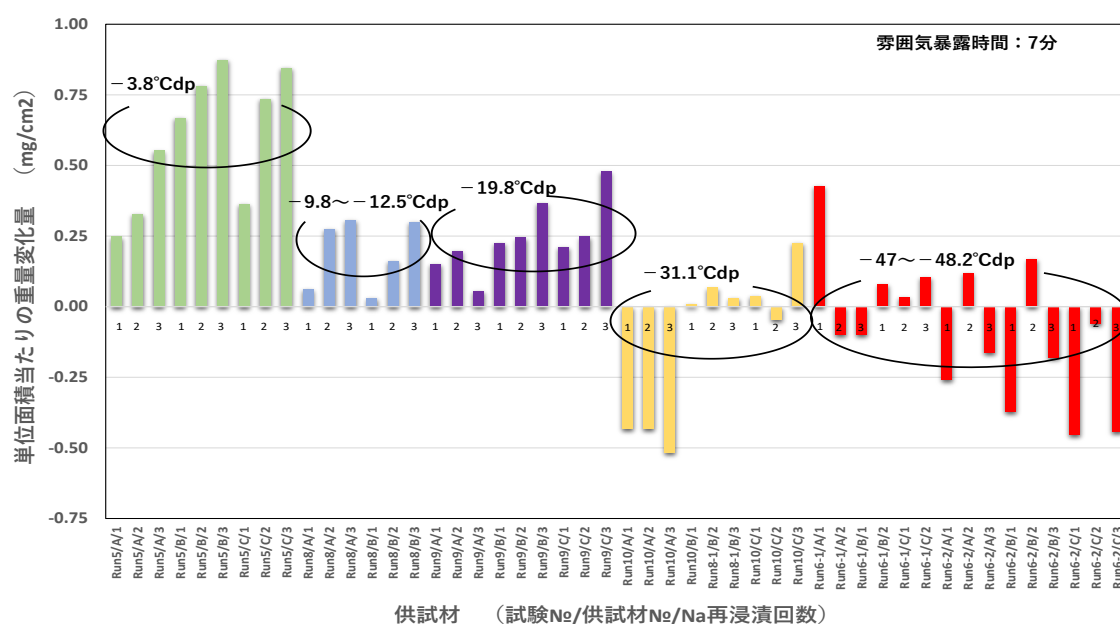


Fig.19 Result of sodium reattachment test

仮設露点計の位置である。燃料洗浄槽内部の露点温度は、除湿運転して一晩保持後も -30°C 以下で安定しており、2018年度のガス置換前の温度約 -3°C (Table 8 参照) に比べヒータ追加設置等により露点温度が大きく低減したことを確認した。また、燃料洗浄槽のガス置換後に本体 A を接続すると、本体 A の露点温度が接続時間 7 分間で -24°C 程度に一時的に上昇した。別途確認したところ、その後のグリッパ昇降によって内部のガスが攪拌されて露点温度が最大で 4°C 程度上昇することから、保守的に想定してグリッパ昇降後の本体 A の露点温度は最大で -20°C 程度になると評価した。

4.1.3 要素試験による除湿対策効果の確認

露点温度低減に伴うグリッパ付着ナトリウム及びナトリウム化合物量の変化の動向を確認するため、グリッパ構造材と同等の SUS304 の試験片を用いたナトリウム再付着状況を模擬した要素試験を実施した。Fig.18 に試験手順を示す。試験片を 350°C のナトリウム中に 2 時間浸漬して試験片が十分にナトリウムに濡れた状態とした後に付着ナトリウム量を測定し、その後 7 分間 (実機の本体 A グリッパの燃料洗浄槽への平均滞在時間に相当) 湿度管理したアルゴンガス中に暴露した後、再度 2 分間 200°C のナトリウム中 (EVST のナトリウムの温度及びグリッパ浸漬時間を模擬) に浸漬し、付着したナトリウム及び化合物の重量の変化を計測し、この処理を 3 回程度繰り返した。その結果は以下のとおりである (Fig.19 参照)。

- ①露点温度 0°C 近傍：繰り返し回数に比例してナトリウム及び化合物の重量が増大した。
- ②露点温度 -10°C ～ -20°C ：繰り返し回数に比例して増大した。ただし、増加速度 (量) が上記①の半分程度に制限された。
- ③露点温度 -30°C ～ -50°C ：繰り返し回数で重量が増大することはなく、むしろ低下する傾向が得られた。

この結果から、露点温度が低い場合には付着ナトリウム表面の化合物の生成速度が遅くなり、露点温度が -30°C 以下となった場合には繰り返し浸漬してもナトリウム及び化合物の付着量が増加していない。これは、化合物の生成厚みが付着ナトリウム表面の薄い層に留まるため、その層直下

には未反応の金属ナトリウム残り、ナトリウムへの再浸漬時にそれが溶融することにより、表層の化合物層が剥離するものと推察する。

したがって、前項の除湿対策の効果確認試験も考慮すると、本体 A 内部の露点が保守的に -20°C まで上昇した場合でもナトリウム化合物の生成速度が遅くなることが期待され、 -30°C 以下に維持された場合には、ナトリウム化合物の生成抑制が期待されることがわかった。

4.1.4 燃料出入機本体 A トルク上昇対策の効果確認 (2020 年の燃料体の処理の実績)

2020 年の燃料体の処理時のグリッパ爪開閉トルクの変動グラフを Fig.20 に示す。同図より 2020 年 2 月 14 日から 15 日に実施したグリッパ洗浄後は、16 体目～174 体目の 158 体の処理を行った間、爪開閉トルクが $25.0\sim 42.5\text{ N}\cdot\text{m}$ の範囲で安定していた。取扱い場所によるグリッパ爪開閉トルク値の差異はあるが、計画洗浄と計画洗浄の間で爪開閉トルクの上昇が再発することではなく、①燃料洗浄槽の燃料体受入前のガス置換対策と②燃料洗浄槽の除湿対策の 2 つの対策が有効であることが確認できた。なお、グリッパ昇降トルクについても大きな変動はなかった。

また、2020 年 2 月 12 日に発生した爪開閉トルク警報発報事象については、処理作業開始前にドリップパン (本体 A 内でドアバルブを閉止して燃料体を移送中に燃料体等から滴下するナトリウムを受けるための容器) のみの洗浄のために燃料出入機本体 A を燃料取扱機器洗浄槽に接続した際に、グリッパ表面に付着していたナトリウムが燃料取扱機器洗浄槽の湿分と反応してナトリウム化合物になったためトルクが上昇したことが原因と評価した。以降のドリップパンの洗浄時には同時に本体 A グリッパも洗浄していること、上述のとおり最初のグリッパ洗浄後にはトルク上昇が再発していないことから本評価は裏付けられたと考えている。

燃料洗浄槽の下部露点温度については燃料体の処理時にも計測を行った。その結果から、計測された燃料体受入れ前 (ガス置換後) の燃料洗浄槽の露点温度は 2 月の燃料体の処理開始当初は -30°C 以下であったが、3 月以降は -50°C 以下と非常に低い露点温度で安定した。また、燃料体受入前

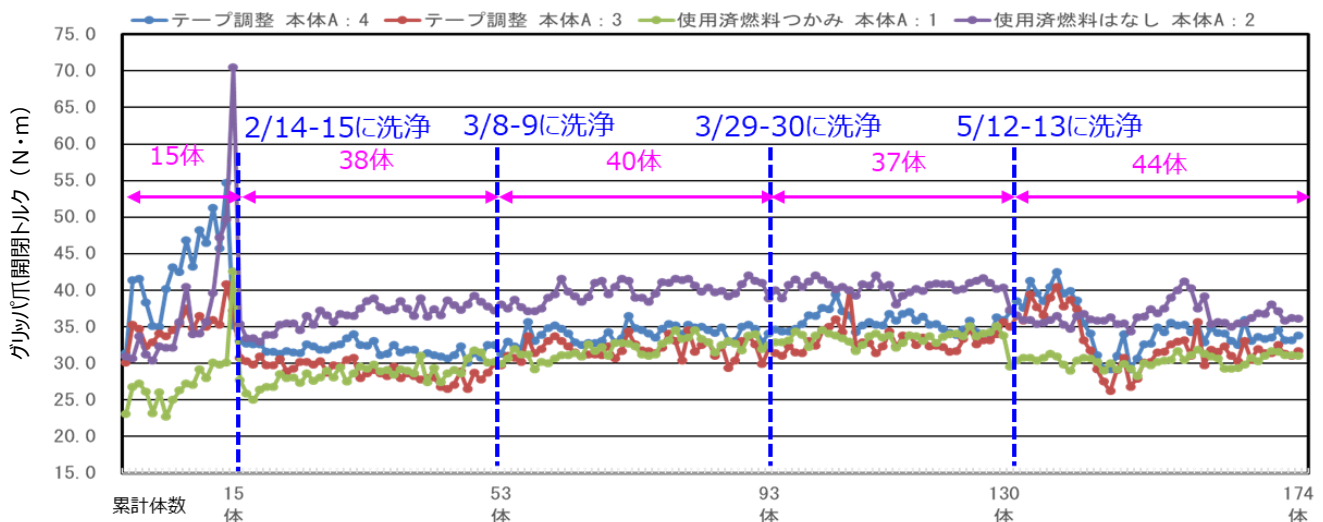


Fig.20 Gripper finger drive torque of of the main body A of the ex-vessel fuel transfer machine in 2020

(ガス置換後)の露点温度はいずれもナトリウム化合物の生成が抑制される -30°C 以下を満足していた。したがって、燃料出入機本体 A 内部の雰囲気露点温度も少なくとも3月以降は -30°C 以下に維持されたものと考えられる。この結果から除湿対策は十分に機能しており、本体 A グリッパ爪開閉トルクの上昇対策として有効であると評価する。

4.2 燃料出入機本体 B グリッパのトルク上昇対策

燃料出入機本体 B のグリッパトルク上昇は、3 章に記載のとおりグリッパ爪開閉トルクの増加とグリッパ昇降トルクの変化が対応しており、グリッパ内部の爪開閉機構ではなく、駆動装置側の摺動抵抗の増加によるトルクの上昇と推定した。爪開閉トルクの警報設定値は、2018 年度まではグリッパ内機構のトルク異常を早期に検知するため積み上げた各部のトルクのばらつきを考慮して $49\text{ N}\cdot\text{m}$ に設定されていた。しかし、駆動装置側の可動シール部等の摺動抵抗の増加により本来監視すべきグリッパ内機構のトルク上昇を直接に確認できない状態であった。無駄な警報の発報を防止するため、2018 年度の燃料体の処理終了後にグリッパ爪開閉トルクの警報設定値を「運転上の制限トルク」 $69\text{ N}\cdot\text{m}$ に見直した。その上で、トルク上昇の原因を調査するため駆動装置側の可動シール部等の各部の摺動抵抗を調査した。

4.2.1 燃料出入機本体 B のトルク上昇部位の調査

摺動抵抗が生じている可能性のある部品を Fig.21 に示す。同図より、対応する部位について分解点検時にそれぞれについて取り外し前後のトルク測定と状態観察を行い、トルク上昇部位を確認した。その結果を Table 10 に示す。同表より分解点検時の全体トルク $34\text{ N}\cdot\text{m}$ の約 2/3 を占めるメ

カニカルシールトルク $23.5\text{ N}\cdot\text{m}$ が支配的であり、このトルクはシールメーカー設計想定値 $21.6\text{ N}\cdot\text{m}$ (摩擦係数 0.5 相当) を超える値であることがわかった。なお、スクレーパも表面荒れに伴い摺動抵抗が増加したが、全体トルクに占める割合は約 12% ($4.1\text{ N}\cdot\text{m}$) と小さい。

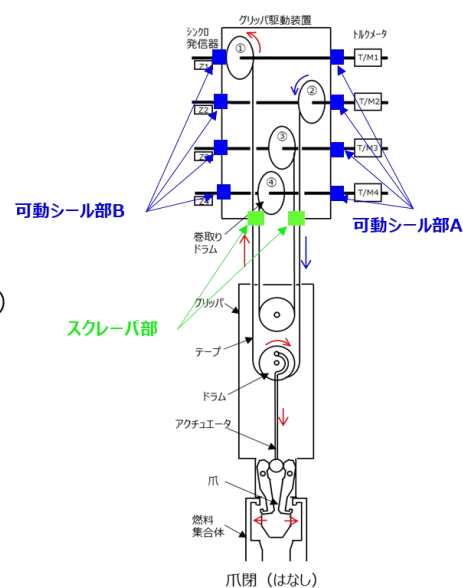
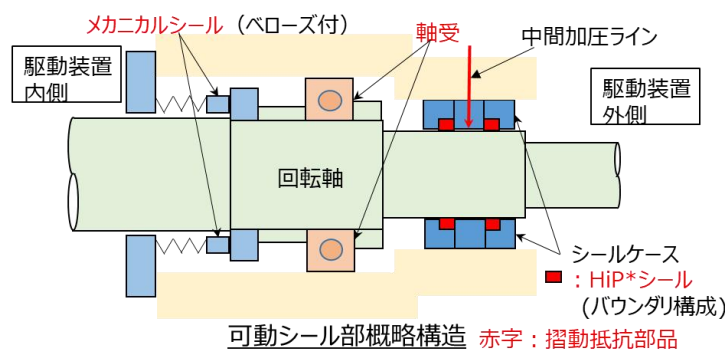
このため、対策として燃料出入機本体 B の①各摺動部品の交換と、②メカニカルシール単体のトルク特性の確認を行った。

Table 10 Torque value of each part at gripper drive mechanism during overhaul of ex-vessel fuel transfer machine

トルク要因	トルク評価値	設計値	備考
HiPシール	$3.2\text{ N}\cdot\text{m}$	$7.2\text{ N}\cdot\text{m}$	設計値は摩擦係数0.1相当
スクレーパ	$4.1\text{ N}\cdot\text{m}$	$0.8\text{ N}\cdot\text{m}$	設計値は摩擦係数0.2相当
軸受	$0.0\text{ N}\cdot\text{m}$	$0.0\text{ N}\cdot\text{m}$	
メカニカルシール	$23.5\text{ N}\cdot\text{m}$	$10.9\text{ N}\cdot\text{m}$	設計値は摩擦係数0.3相当
トルクモータ抵抗	$0.9\text{ N}\cdot\text{m}$	$0.0\text{ N}\cdot\text{m}$	テープゆるみ防止用の巻上げ
テープ巻上げ力	$2.3\text{ N}\cdot\text{m}$	$2.3\text{ N}\cdot\text{m}$	グリッパ内の爪開閉機構のトルク
合計	$34.0\text{ N}\cdot\text{m}$	$21.2\text{ N}\cdot\text{m}$	

4.2.2 燃料出入機本体 B の摺動部品交換後のトルク

燃料出入機本体 B の各摺動部品を交換後に測定したグリッパ爪開閉トルクとグリッパ昇降トルクの値を Table 11 に示す。同表より、爪開閉トルクは交換前の $34\text{ N}\cdot\text{m}$ から約 $12\text{ N}\cdot\text{m}$ 低下して $22\text{ N}\cdot\text{m}$ となり、2018 年度の燃料体の処理開始前よりも小さくなったことを確認した。本体 B グリッパ上昇時と下降時の昇降トルク差 (4 軸の摺動抵抗値の 2 倍に相当) も、交換前の $109\text{ N}\cdot\text{m}$ から約 $50\text{ N}\cdot\text{m}$ 低下して $59\text{ N}\cdot\text{m}$ となり、2018 年の処理開始前よりも小さくなり、正常に復旧したものと考えられる。



本体Bグリッパ駆動系の摺動部

Fig.21 Parts of gripper drive mechanism that may cause sliding resistance

Table 11 Gripper finger drive torque and gripper lifting torque after exchange of sliding parts

部位	対象トルク	トルク値 (Nm)		
		点検後	点検前	2018年の処理開始前*
本体B	①高速上昇トルク最大	169	200	189
	②高速下降トルク最小	110	91	108
	昇降トルク差(①-②)	59	109	81
	爪開閉トルクはなし動作時最大	22	34	33
本体A (参考)	①高速上昇トルク最大	264	262	264
	②高速下降トルク最小	211	224	215
	昇降トルク差(①-②)	53	38	49
	爪開閉トルクはなし動作時最大	20	28	25

* : 2018年7月から8月上旬の値

4.2.3 メカニカルシール単体のトルク特性

交換後の使用済みメカニカルシールについて、トルクレンチと治具を用いた簡易測定により、温度をパラメータにしたメカニカルシールのトルク特性を取得した。その結果を Fig.22 に示す。同図より温度が低下するとトルクが上昇する傾向を確認した。また、表面状態を確認するために表面洗浄を行う前は温度低下時のトルク上昇が大きく、表面洗浄後は温度低下に伴うトルク上昇が抑えられる傾向が確認された。この事実からトルク上昇にはシール表面の摩耗粉の影響が考えられ、動作を繰り返して摩耗粉が生成している環境では温度低下による影響が大きくなる可能性がある。

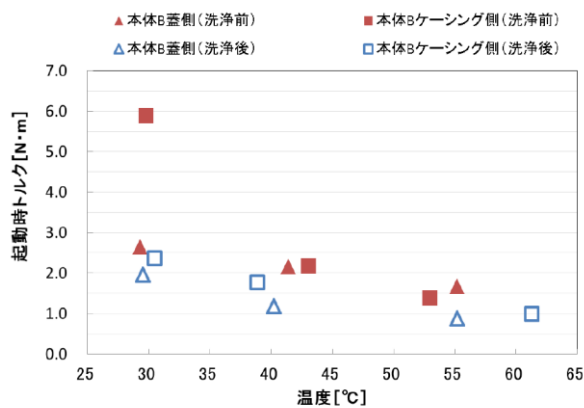


Fig.22 Torque characteristics of mechanical seals with temperature as a parameter by temporary torque measurement method

並行して連続作動(実動作を模擬して 5 rpm で 8 回転後、12 秒停止後逆方向に 8 回転後、12 秒停止の繰り返し)試験を実施できるトルク連続測定試験装置を製作し、約 20℃ の雰囲気中で 1,000 回のグripper 昇降(500 体の取扱いに相当)を模擬した連続動作を実施した。その結果を Fig.23 に示す。同図より取扱い体数(当初 130 体、最終的に 174 体)に十分余裕をみた 500 体相当の昇降動作を実施する中でトルク上昇は発生せず平均トルクはいずれも約 2.2 N·m と、判定

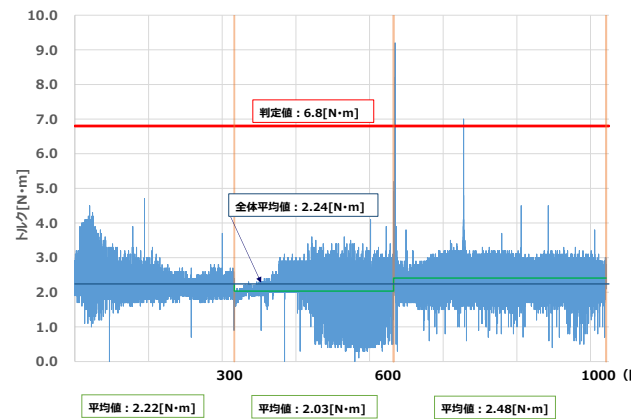


Fig.23 Continuous torque measurement result of mechanical seals by torque continuous measuring device

値 6.8 N·m に対して十分に低く安定していることを確認した。この結果から、連続作動に伴う摩耗粉の発生のみではトルク上昇は発生しないことがわかった。

一方、簡易測定によるトルク計測は夏期に実施したことから 30℃ 以上のデータのみであったため、トルク連続測定試験装置を用いて簡易測定よりさらに低い温度でのトルク特性を追加して計測した。その結果を Fig.24 に示す。同図より、燃料出入機での低速 (5 rpm)、間欠動作の使用条件において表面洗浄を実施して摩耗粉の影響がない状態でも 25℃ 以下では温度が低くなるほどトルクが上昇する傾向がみられ、低温になるほどトルクのばらつきも増加することを確認した。なお、このようなトルク特性についてはシールメーカーにも知見がないとのことであった。このため、トルク上昇の詳細な原因は不明であるが、トルク上昇が発生した場合にはメカニカルシール周りの温度を高く保持することが有効と想定された。

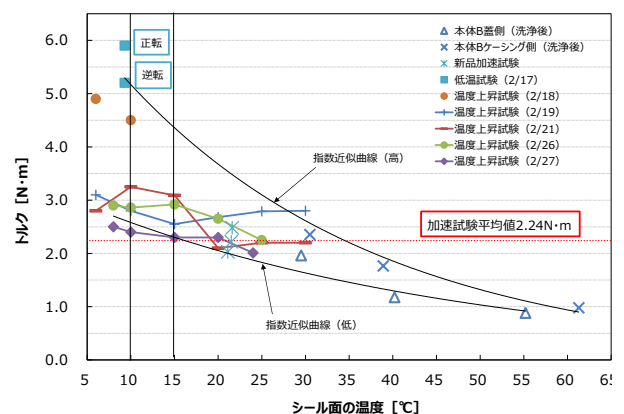


Fig.24 Torque characteristics of mechanical seals with temperature as a parameter by torque continuous measuring device

4.2.4 燃料出入機本体Bトルク上昇対策の効果確認(2020年の燃料体の処理の実績)

Fig.25 に 2020 年の燃料体の処理における燃料出入機本体 B のグripper 爪開閉トルクの変動を示す。2020 年 2 月から

開始した燃料体の処理では開始直後に燃料出入機本体Bの爪開閉トルクは当初の30 N・m程度から50 N・mを超えるレベルへの上昇傾向が確認された。メカニカルシールの周辺温度が15℃程度であったことから、15体目の処理後の2月16日にメカニカルシール周辺にハロゲンランプ照明を用いて20℃以上に加温したところ、爪開閉トルクが低下し安定した。3月後半に再度45 N・mを超えるレベルにトルク上昇がみられたため、ハロゲンランプ照明を追加して25℃以上に加温したところ、トルク値が再度40 N・m前後に低下、安定した。この結果、16体目～174体目の158体の処理を行った間、爪開閉トルクが約30.8～約49.9 N・mの範囲で推移し安定した。

なお、5月15日からの一時的なトルク上昇は4月16日から5月15日に実施した中間点検時に加温用のハロゲンランプを停止し、周辺温度が20℃程度に低下したことが原因

と考えられる。4.2.3項に示したように連続作動にともなう摩耗粉等の発生と温度低下が重なることで、トルク上昇が発生したと考えられる。

4.3 不具合対策の効果と2020年の燃料体の処理のまとめ

2018年度の燃料体の処理で発生した不具合への対策とその効果のまとめをTable 12に示す。

【対策A】燃料出入機本体Aグリッパトルク上昇対策(ナトリウム化合物付着対策)では、燃料洗浄槽の除湿対策と自動化運転プログラムの修正(ガス置換回数の変更等)により、ナトリウム化合物の生成を低減できた。その結果、燃料体の処理開始前の機器洗浄槽への本体A接続に伴う不純物の影響により燃料体処理開始15体後にトルク上昇警報によりグリッパ洗浄を1回実施したものの、それ以降はトルク監視しつつグリッパ洗浄を計画的に運用(約40体程

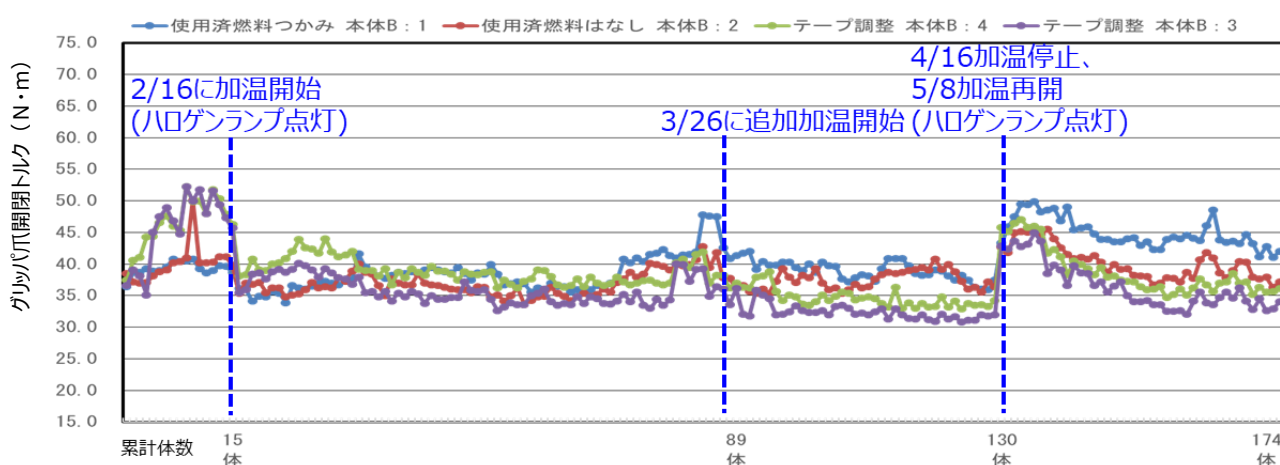


Fig.25 Gripper finger drive torque of of the main body B of the ex-vessel fuel transfer machine in 2020

Table 12 Summary of countermeasures and their effects for defects that occurred in the fuel handling in FY2018

2018年度燃料体の処理時の不具合		不具合対策の概要	効果(2020年燃料体の処理状況)
【対策A】燃料出入機本体Aグリッパトルク上昇対策 (本体Aグリッパへのナトリウム化合物付着に伴うグリッパのつかみはなしトルク上昇)		1)燃料洗浄槽の除湿対策 2)自動化運転プログラムの修正 (ガス置換回数の変更等)	・トルク上昇警報(1件)により、グリッパ洗浄を実施、その後はトルク監視によるグリッパ洗浄時期の計画運用により、警報の発報なし
【対策B】燃料出入機本体Bグリッパトルク上昇対策 (可動シール等のトルク増大に伴うグリッパのつかみはなしトルク上昇)		1)摺動部品の新品交換 2)要素試験によるトルク特性の確認 とそれに基づくシール部加熱対策	・加温によりトルク上昇のないことを確認 ・警報の発報なし
【対策C】その他ソフトウェア不具合等の対策 1)自動化運転プログラムの修正 2)燃料処理設備の制御盤間の伝送ノイズ対策 3)自動化運転の円滑な運用に資するための対策	① 自動化運転における対象物入力不可(燃取系計算機の不具合)	・燃取系計算機のプログラムバグ改修	・発生なし
	② 自動化運転リセット後のCRT表示不具合(過去状態の残存)	・燃取系計算機のプログラムバグ改修	・発生なし
	③ 燃料出入機本体Aグリッパのクラッチ動作遅延	・部品交換、制御プログラム改修	・発生なし
	④ 燃料出入機本体Aドアバルブのナトリウム付着によるシール漏れ (燃料体からのナトリウム滴下及び地下台車からの化合物吹き上がり)	1) 冷却系の停止による滴下量の削減 2) 追加対策: 地下台車の清掃	・一時的なナトリウム化合物の付着による漏れの発生(3件)あり ・地下台車の清掃以降は発生なし
	⑤ 洗浄水の電気伝導度高による自動化運転停止	・燃料洗浄追加手動操作の自動化	・発生なし
	⑥ 制御信号伝送異常等による自動化運転停止(伝送ノイズ)	・信号伝送システムの更新	・伝送ノイズ対策が十分でないと思われる伝送異常等の発生19件有るが、発生頻度は約1/10に低下(1.1件/体⇒0.1件/体)
	⑦ ガス置換時間超過による自動化運転停止(地下台車等)	・ガス置換方法の改良	・気圧の変動等により4件発生有るも発生頻度は低下(6件/86体⇒4件/174体)
	⑧ 燃料洗浄槽配管予熱温度異常による自動化運転停止	・配管予熱設備の改良(ヒータ追加)	・発生なし

度ごとに洗浄)したことにより、トルク値は安定しており、警報の発報はなかった。

【対策 B】燃料出入機本体 B グリッパトルク上昇対策(可動シールトルク異常対策)では、摺動部品の新品交換と要素試験によるトルク特性の確認(低温でのトルク上昇とばらつきの増大)及びそれに基づくシール部加温対策により、一時的なトルク上昇は抑制され、トルク値が安定していることを確認し、結果として警報の発報もなかった。

【対策 C】その他ソフトウェア不具合等の対策の主な結果は以下のとおりである。燃取系計算機のプログラムバグ改修により、ソフトウェアの不具合に伴う警報の発生は防止できた。また、燃料出入機本体 A ドアバルブのナトリウム付着によるシール漏れについては再発したものの、地下台車からのナトリウム化合物吹き上がりが原因と確認し、化合物除去の対策によりその後の再発は防止できた。制御信号伝送異常等による自動化運転停止やガス置換時間超過による自動化運転停止については、信号ノイズの影響や気圧の変動等の要因により完全な防止は難しいが、対策の実施により発生頻度は大きく低減(前者は約 1/10、後者は約 1/3)できた。

以上の対応により、燃料体の処理作業で不具合発生頻度は 2018 年度の 2.7 件/体(232 件/86 体)から 0.16 件/体(27 件/174 体)と大幅に低減することができた。

5 まとめ

高速増殖原型炉もんじゅは、燃料体が原子炉にある状態で廃止措置に移行することから 2022 年度までの第 1 段階において燃料体取出しを最優先に実施し、完了させることとした。

もんじゅにおける燃料体取出しのうち燃料体の処理作業は、2018 年度の処理開始までに 2 体の作業実績しかなく、大量に連続処理した実績がなかった。このため、2018 年度の燃料体の処理作業においては、86 件(のべ 232 件)の不具合等(2.7 件/体)が発生したために操作員等の負担が大きく、100 体の処理を計画していたが 86 体に留まった。

これに対して【対策 A】燃料出入機本体 A グリッパトルク上昇対策(ナトリウム化合物付着対策)、【対策 B】燃料出入機本体 B グリッパトルク上昇対策(可動シールトルク異常対策)、【対策 C】その他ソフトウェア不具合等の対策を実施し、発生した不具合の再発防止と発生頻度の低減を図った。これらの対策により、2020 年の燃料体の処理作業においては、不具合等の発生件数が 27 件(0.16 件/体)と大幅に低減し、6 月末までに 130 体処理との当初計画を上回り、6 月 1 日までに 174 体の処理を完了した。その結果、廃止措置計画において公開した 2022 年度までに 530 体の燃料体の処理を完了させるとの目標の達成に対し、実績に基づく確かな見通しを得た。

また、これまで国内において十分な運転実績がなかった、大型高速炉の燃料体を自動化運転によって大量に連続して処理する設備・機器の運転等に関する知見を習得し、大型高速炉における円滑な燃料体の処理を実現した。

今後、第 2 段階以降のナトリウムドレン、機器解体の計

画についても具体化検討を実施していく予定である。

謝辞

本報告内容は、日本原子力研究開発機構敦賀廃止措置推進本部において本部長を主査として推進している燃料体取出し検討会の元で燃料体取出し作業の不具合対策等を実施した設計ワーキンググループの成果をとりまとめたものである。設計ワーキンググループの成果は、もんじゅ燃料体取出しに係わる設備担当部門である廃止措置部燃料環境課の高木剛彦氏、浜野知治氏はじめ各課員、原因究明の試験研究を実施した敦賀総合研究開発センター高速炉プラント技術開発部ナトリウム技術開発グループの平川康氏、斎藤淳一氏、設備設計及び保守点検・改造を担当した富士電機株式会社の古賀和浩氏、鈴木和則氏はじめ各業務担当者、敦賀廃止措置推進本部廃止措置推進室技術グループで対策検討のとりまとめを担当した加藤修一氏(現:株式会社 IHI)の尽力により達成されたものである。ここに深く感謝する。

参考文献

- [1] 日本原子力研究開発機構: 高速増殖原型炉もんじゅ原子炉施設廃止措置計画認可申請書 平成 29 年 12 月 6 日、日本原子力研究開発機構 (2017)。
- [2] 佐久間, 大西: 高速増殖原型炉もんじゅの廃止措置に向けた取り組みについて、デコミッショニング技報. **58**, pp.48-55 (2018)。
- [3] 日本原子力研究開発機構: 高速増殖原型炉もんじゅ原子炉施設廃止措置計画変更届出書 令和 2 年 6 月 9 日、日本原子力研究開発機構 (2020)。
- [4] 日本原子力研究開発機構: 高速増殖原型炉もんじゅ原子炉施設廃止措置計画変更申請書の一部補正について 令和 2 年 4 月 24 日、日本原子力研究開発機構 (2020)。
- [5] 田地弘勝 他: 「常陽」MK-I 炉心燃料集合体(PPJX12)の照射後試験(1) 集合体及び燃料要素の非破壊試験, PNC-TN9410 84-126(1984)。