

しゃへい体等取出し時の原子炉容器内ナトリウム液位の
設定について

令和4年1月11日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

1. 第2段階の到達目標実現に向けた着目点

1.1 シャへい体等取出し作業

シャへい体等取出し作業は、第2段階のクリティカル工程の中で最も長期間を要する作業であり、第2段階の到達目標（バルクナトリウムの搬出を安全、確実、できる限り速やかに完了）を実現するためには、並行して実施するナトリウム拔出・搬出設備等の整備、プラント管理、設備点検等の諸作業と工程の取合い条件、投入資源等を調整しつつ、本作業を安全、確実、できる限り速やかに完了することが必要である。

シャへい体等取出し作業は、燃料体取出し作業と同様、燃料交換装置、燃料洗浄設備等を用いて原子炉容器に装荷されている合計 595 体のシャへい体等の炉心構成要素を炉外燃料貯蔵槽に取出し、燃料洗浄設備に移送、洗浄後、燃料池に移送する作業であり、以下の特徴がある。

- シャへい体等の取出し作業の全体期間は、シャへい体等を取出す実作業期間と設備点検期間に大別される。
- 燃料交換装置、燃料洗浄設備等の遠隔自動設備による取出し実作業の速度は、燃料体取出し作業（原子炉容器からの取出し約 6 体/日、洗浄約 2.5 体/日）と同様であり、シャへい体等 595 体の取出し実作業期間は 530 体の燃料体取出し作業時と同等程度となる。
- シャへい体等取出し作業は放射性固体廃棄物の移送作業であり、燃料体取出し作業時とは安全確保上の要求事項が異なる。そのため、安全確保上の要求事項を満たしつつ、取出し実作業の進め方と設備点検範囲を最適化することにより、ナトリウム搬出の早期化実現の可能性がある。

1.2 シャへい体等取出し作業における原子炉容器内ナトリウム液位の変更の意義

もんじゅの原子炉容器内の代表的なナトリウム液位としては、図1に示すNsL（原子炉容器通常液位）及びSsL（システムレベル）がある。

NsL は、通常運転時及び燃料交換時のナトリウム液位（EL33.05m）であり、

第1段階で燃料体取出し作業を実施した際の液位である。SsLは、メンテナンス時のナトリウム液位(EL29.85m)であり、ナトリウムの充填範囲をNsLに比べ大幅に限定でき、設備点検に要する期間の短縮化が可能である。

燃料体の交換においては、交換作業中に想定されるいかなる状態においても、燃料体をナトリウム中に保持し、冷却できるように、ナトリウム液位をNsLとしたが、冷却に関する安全要求のないしゃへい体等に関しては、ナトリウム液位をNsLとする安全上の要求はない。また、燃料交換装置の燃料移送動作自体は後述するようにナトリウム液位変更による問題はないことから、しゃへい体等取出し作業をSsLで安全、確実に実施できれば、設備点検に要する期間を短縮し、しゃへい体等取出し作業を早期に完了するとともにそれ以外の同時並行して行う作業に対しても作業制限緩和等の効果が期待でき、第2段階の到達目標の実現に大きく寄与することから、本資料では、SsL運用でのしゃへい体等取出しの成立性を検討した。

2. SsL液位でのしゃへい体等取出し作業の成立性検討

2.1 燃料交換装置の設計開発(原子炉容器内ナトリウム液位と燃料移送動作)

もんじゅの燃料交換方式は図2に示す単回転プラグ・固定アーム方式であり、回転プラグ上に設置される燃料交換装置は、炉内中継装置の燃料移送ポットと炉心内装荷位置の間の燃料体及び炉心構成要素の移送を行うための装置である。燃料交換装置はパンタグラフ開閉式であり、モックアップ試験装置を用いて空气中及びナトリウム中での開発試験を行い、構造、機能、材料上、十分使用可能であることを確認し、装置設計を実施した。その後、フルモックアップ装置等を用いて、パンタグラフ方式の動作、位置決め精度、燃料の挿入性・引抜性、偏心動作、セルフオリエンテーション機能、耐久性等を確認した上で、実機に採用した。フルモックアップ装置を用いた試験以降の主な試験と実機運用の実績を図3に示す。

燃料交換装置の摺動機構による可動部については、ナトリウム液位が変わると浮力、熱膨張量が変わるため、荷重判定、昇降ストローク等の設定値をナトリウム液位に応じて微調整する必要があるが、動作機能自体は気中、ナトリウム中

何れでも可能であることを装置設計段階で確認しており、図 3 に示すように、その後のフルモックアップ装置を用いた試験、総合機能試験において、SsL あるいはそれを下回るナトリウム液位で問題なく燃料移送が行えることを実証した。ナトリウム液位変更に伴う燃料交換装置の動作に影響を与える可能性のある因子についてのこれまでの試験における確認結果を参考資料に示す。

2.2 燃料交換装置の運用実績

図 4 に燃料交換装置による燃料交換、燃料取出しにおけるトルク値の実績を示す。これらは図 3 に示すように全て NsL 液位で実施され、ナトリウム純度は 2ppm 程度に保たれたものであり、不純物である化合物によるトルクへの影響は見られていない。

2.3 ナトリウム中、カバーガス中の不純物の影響

SsL 運用においては、1 次系を用いたナトリウム純化運転を行えないため、系統内に持ち込まれた不純物が蓄積し、ナトリウムとの反応生成物による摺動機構動作への影響の可能性が考えられるため、しゃへい体等の取出しを SsL で実施した際の不純物の影響を評価した。

(1) 原子炉容器内のナトリウムへの不純物混入原因

原子炉容器内のナトリウムへの不純物混入原因として考えられるものについて、しゃへい体等取出し作業における不純物混入量を評価した。(図 5)

① 系統内の不純物の溶出

本事象は、起動試験の初回温度上昇の際に確認されたが、それ以降は観察されておらず、系統内不純物の溶出は完了しているものと考えられることから、しゃへい体等取出し作業に関して、不純物混入原因とはならない。

② 燃料交換装置等の設置、撤去時の空気混入

図 5 に示す廃止措置第 1 段階における原子炉容器カバーガス中の窒素濃度

の推移において、燃料交換装置の据付時に窒素濃度が 800ppm 程度上昇しているものの、窒素濃度管理値 40000ppm（酸素濃度基準値 10ppm をもとに混入した空気中の酸素がナトリウム中に溶け込むとして算定した窒素ガス濃度）の 1/50 程度である。計算上は 0.2ppm 程度の酸素濃度上昇となるが、この前後のナトリウム中酸素濃度測定値に 0.1ppm レベルの変動は認められておらず、しゃへい体等取出し作業に関して、不純物混入量としては問題にならないレベルである。

③ カバーガス供給による持ち込み

1次アルゴンガス系の圧力調節等により、わずかではあるが給排気にて新鮮アルゴンガスが流入する。図5において、燃料体の取出しが完了した2019.11.29の窒素ガス濃度276ppmが次回の燃料体の取出し準備作業開始前の2020.12.02の窒素ガス濃度123ppmまで低下した原因が高純度アルゴンガスの流入によるものとして概算すると、この期間（1年間）に新鮮アルゴンガスが472m³流入したことになる。仮にアルゴンガス供給系に含まれる新鮮アルゴンガス中酸素濃度10ppm（実際は高純度アルゴンガスを使用しており1ppm以下）のアルゴンガスが年間472 m³流入すると仮定しても、系統内に持ち込まれる酸素量は6.74gである。原子炉容器内のナトリウム保有量370m³（334 t）に全て溶け込んだとして、酸素濃度の上昇は年間0.02ppm程度あり、ナトリウム純度低下に与える影響は十分小さい。

④ 受入れ燃料等による持ち込み

しゃへい体等取出し作業においては、模擬燃料体等の系統外からの持ち込みはなく、しゃへい体等取出し作業においては不純物混入原因とはならない。

⑤ 系統へのインリーク

1995年12月8日に発生した2次主冷却系Cループにおけるナトリウム漏えい事故の際、2次主冷却系Cループのナトリウムをドレンした。その後、1次主冷却系Cループのナトリウムもドレンし、原子炉容器内のナトリウム液

位を NsL から SsL に下げ、SsL において崩壊熱除去運転を継続した。原子炉容器内のナトリウム液位が SsL に低下している状態では、原子炉容器からの 1 次系ナトリウムのオーバーフローはなく、1 次冷却材の純化運転はできない状況となる。当時、ナトリウムの純化運転を長期間停止した経験はなく、1996 年 4 月と 1996 年 12 月に 1 次冷却材のナトリウム純度を測定した。その結果、ナトリウム中の酸素濃度測定値は、1995.12.11 : 2.4 ppm、1996.4.24 : 2.4 ppm、1996.12.18 : 2.4 ppm と、1 次系ナトリウムの純化運転を停止しても、ナトリウムの純度低下がほとんどないことを確認している。

また、1998 年 9 月に原子炉容器内のナトリウム液位を NsL に上げ、1 次系ナトリウムの純度を確認しているが、ナトリウム中酸素濃度は 2.7 ppm、酸素濃度の上昇は 0.3 ppm であり大きな変化はない。その後もナトリウムの純度低下はほとんど認められていない。よって、ナトリウム純化系停止によるナトリウムの純度低下は、1 年間で 0.2 ppm 程度を見込めば十分であると評価した。以上より、第 1 段階と同様に、系統内に不純物を持ち込まないよう管理することでナトリウムの純度は維持可能である。

(2) ナトリウム純度データからの推定

現在の 1 次系のナトリウム純度は、酸素濃度で 1.5 ppm である。しゃへい体等の取出しを 5 年とすれば、その間の酸素濃度上昇は 1 ppm 程度(0.2 ppm/年×5 年)、燃料交換装置等の据付・撤去作業を 3 回実施とすれば酸素濃度上昇は 1 ppm を下回る程度(0.2ppm/回×3 回)と推定される。200°Cのナトリウムの酸素溶解度を 10ppm 程度 (Eichelberger 式に従えば 11.7ppm) であることから、ナトリウム中に酸化ナトリウムが析出することはなく、ナトリウム純化系の運用を停止しても、しゃへい体等の取出しに必要なナトリウム純度は維持される。

(3) ナトリウム不純物の析出メカニズムの推定

図 6 に原子炉容器内の温度分布(原子炉容器のナトリウム液位が SsL の場合)と液体ナトリウムへの酸素の溶解度曲線、これをもとに想定される燃料交換装置の可動部表面に析出物が付着するまでのメカニズムを示す。

ヒータ入熱による原子炉容器内の上下の温度差は極めて小さく、ナトリウムの温度分布幅も小さいと考えられるが、純度管理値を超える領域では相対的に温度の低いところから溶解しきれない不純物の析出（液中析出）が始まるものと考えられる。特に約 160°Cのカバーガスと接するナトリウム液面は相対的に温度が低いと考えられ、ナトリウム中の不純物量が増加した場合、液面付近で不純物の析出（液面析出）が始まることが考えられる。

カバーガス中では、エアロゾルのナトリウムの析出（気中析出）に加え、ナトリウム中からカバーガス中に移動した機器表面に残留した不純物を含むナトリウムの温度低下による不純物の析出（付着 Na 析出）が考えられる。

析出物はその比重により、ポーラス状の軽いものは液面付近に、重いものは底面付近に移動するものと考えられ、機器がナトリウム、カバーガス間を上下に移動する際に液面付近の軽析出物が機器表面に付着することも考えられる。

これらを整理すると、機器への析出物付着のメカニズムは、気中付着析出、付着 Na 析出、軽析出物付着、液面付着析出、液中付着析出の 5 つのメカニズムが考えられる。（図 6）

（4）しゃへい体等取出しを SsL で実施する場合の不純物の影響評価

燃料交換装置の摺動機構による可動部の可動範囲とナトリウム液面の関係及び機器表面への析出物付着メカニズムとの関係を図 7 に示す。

何らかの原因でナトリウム化合物の影響が燃料交換装置の可動部に現れるような状況にあっては、カバーガスとナトリウムの間を移動するパンタグラフ又はグリッパにおいて、最初にトルク異常が顕在化すると推定されるが、原子炉容器内のナトリウム、カバーガス中の不純物は前述の通り、不純物の析出条件に比べてはるかに低いレベルで管理されている実績があり、しゃへい体等取出し作業で考えられる不純物混入量も問題とならないレベルであることから、純化運転を行わなくとも、燃料交換装置の運用に影響を与えることはないものと評価される。

なお、燃料体の処理において、燃料出入機のグリッパにナトリウム化合物の付着蓄積によるトルクの段階的な増加が発生したが、これは洗浄設備の湿分によ

り、機器表面に付着したナトリウム水酸化物が炉外燃料貯蔵槽のナトリウムに浸漬する際にナトリウムを取り込むことにより生じたものである。原子炉容器内の燃料交換装置の状況とは全く異なる環境条件で発生したものであることから、燃料交換装置では同様の影響は発生し得ない。

2.4 SsL 運用による効果 (図8)

廃止措置第2段階の到達目標実現に向けての SsL 運用によるしゃへい体等取出し作業の効果は、しゃへい体等取出し作業自体への効果と並行して実施する他作業への効果がある。

原子炉容器内ナトリウム液位が NsL の場合、約 840m³ の熔融ナトリウムを系統内に保有する。一方、SsL の場合、保有量は約 385m³ と半分以下となり、以下の設備にはナトリウムは充填しないことから、ナトリウム漏えいリスクの範囲が大幅に縮小する。

- 1次主冷却系設備
- 1次ナトリウム補助設備 (オーバフロー系、純化系、充填ドレン系)
- メンテナンス冷却系設備 (1次メンテナンス冷却系)
- 上記設備に関連する設備 (ナトリウム漏えい監視設備、予熱保温設備、計測制御設備)
- ナトリウム機器を冷却する設備 (機器冷却系設備)

また、これら設備を休止することにより、メンテナンス期間を短縮でき、しゃへい体等取出しの実作業期間の停止期間の短縮につながる。さらに、NsL 運用時に行っていた定期設備点検前後のナトリウムドレン・充填作業が不要となり、その期間を短縮できるとともに、ナトリウム充填期間における作業制限によりナトリウムドレンに合わせ実施が必要であった現場作業の自由度も高まり、プラント維持管理、設備保全・整備をより効率的に計画・実施できる。

ナトリウムの充填範囲を縮小することにより、運転員が監視する対象範囲を縮小することができる。さらに、ナトリウムの充填・ドレン操作には、多くの運

転員を必要としていたが、この操作が不要となるため、プラント運転員の業務が軽減するとともに、メンテナンスが必要な範囲も縮小するため、設備保全要員の業務も軽減する。これら業務軽減によって生まれた経営資源を、しゃへい体等取出し作業の体制強化、ナトリウム拔出・搬出設備整備、第3段階のナトリウム設備解体の事前検討に振り向けることで、第2段階達成目標実現に寄与できる。

2.5 成立性評価のまとめ

SsL 運用によるしゃへい体等取出し作業の成立性について検討した結果は、以下のようにまとめられる。

- 第2段階においては、燃料に関する安全上の要求はなく、SsL 運用による安全確保上の問題はない。
- 燃料交換装置は SsL 運用に設定値を調整すれば、問題なく機能し、作業実施上の問題はない。
- ナトリウム純度低下の程度は極めて小さく、不純物の影響による問題が生じることはないと評価される。
- SsL 運用によるナトリウム漏えい範囲の削減、しゃへい体等取出し作業期間短縮、並行実施する諸作業への効果等、SsL 運用実施によるメリットは大きい。
- 以上のように、廃止措置第2段階の到達目標実現に向けて多くのメリットを有する SsL 運用によるしゃへい体取出し作業については、実施上の具体的な問題は認められず、十分な成立性を有すると考えられるが、本作業が廃止措置第2段階のクリティカル作業であり、万が一、SsL 運用に伴う障害により長期停止することになれば、廃止措置全体工程に大きく影響を与えることから、実施に当たっては、工程管理上のリスク対策として、リカバリプランを合わせて準備することが必要と考えられる。

3. 対応方針

3.1 基本方針

SsL 運用によるしゃへい体等取出し作業の成立性についての検討結果を踏まえて、以下の対応をとる。

- SsL 運用によるしゃへい体等取出し作業を第 2 段階で実施することとし、燃料体取出し作業完了後に 1 次系に関連する諸設備を一部停止し、特別な保全計画により管理する。
- ナトリウム液位を SsL 運用としたことによる燃料交換装置動作への影響が生じた場合の大幅な工程遅延に関する工程管理上のリスクへの対策として、一部停止した 1 次系関連諸設備を用いた対応処置をできる限り速やかに実施できるようにリカバリプランを準備する。
- これらの第 2 段階でのしゃへい体等取出し作業を実施するために必要な事前準備を第 1 段階で実施する。

3.2 しゃへい体等取出しを SsL で確実に実施するための方策

上記 3.1 の方針に基づき、図 9 に示す対応策をとることにより、ナトリウム純度低下に関する工程管理上のリスクの最小化を図る。

(1) 不純物管理と低減のための方策

- 不純物分析

カバーガス中の窒素濃度を定期的に分析することにより、ナトリウム純度が所定のレベルに管理されていることを確認する。

- カバーガスの入替え

カバーガス中の窒素濃度増加、グリッパトルクの上昇の兆候等が見られる場合、不純物低減策として、カバーガスの入替えを行う。

- Na 温度条件変更

グリッパトルクの上昇の兆候等が見られる場合、原子炉容器のナトリウム温度条件を変更し、不純物析出の抑制を図る。

- 純化系運転

ナトリウム液位を SsL にしてしゃへい体等取出しを実施している際に純化が必要と判断した場合には、図 10 に示すようにメンテナンス冷却系及び充填ドレン系を用いて原子炉容器内の一部のナトリウムをオーバフロータンクに移送した上で、プラグギング計によるナトリウム中の酸素濃度測定、純化系循環運転による純化を必要に応じ繰り返す。さらに、ダンプタンクに固化されているナトリウムを溶融し、原子炉容器内のナトリウムと置換し、純度を改善する。

(2) 機器動作管理と影響緩和のための方策

- 機器トルク監視

パンタグラフ及びグリッパの駆動トルクをモニターすることにより、トルク異常の兆候を早期に検知する。

- ナトリウム中への浸漬による析出物再溶解

ナトリウム中に浸漬することにより、再溶解による析出物影響の抑制を図る。

- 液位変更 (NsL への変更)

ナトリウム液位を NsL に戻すことが機器動作への影響緩和上有効と考えられる場合には、特別な保全計画で管理されている一部停止中の 1 次系関連諸設備を必要に応じて復旧し、ナトリウム液位を NsL にして、しゃへい体の取出しを行う。

- 作業中止、機器洗浄

機器洗浄の必要があると判断した場合には、取出し作業を中止し、機器洗浄を行う。

3.3 事前準備の実施手順

SsL でのしゃへい体取出し作業を実施するため、図 11 に示す手順で第 1 段階に事前準備を実施する。

- 燃料交換装置の設定値変更

原子炉容器からの燃料体の取出しが完了した後、第 1 段階期間中に SsL でのしゃへい体等取出し作業の事前確認試験（1）を実施し、ナトリウム液位変更に伴う燃料交換装置の昇降トルク、昇降ストローク等の変化に応じて燃料交換装置の設定値変更を行う。

- しゃへい体取出しの実機確認

燃料体の燃料池への移送が完了した後、第 1 段階期間中に SsL でのしゃへい体等取出し作業の事前確認試験（2）を実施し、SsL でのしゃへい体の取出しを行い、計画通りに作業を実施できることを確認する。

- リカバリプランの準備

リカバリプランとしてナトリウム純化系運転或いは NsL でのしゃへい体取出しを早期に実施できるよう準備するため、設備の手直しを行い、必要な機能を有することを確認する。

- 体制整備

しゃへい体等取出し作業の体制を整備し、必要な教育、訓練等を行う。

4. まとめ（図 12）

バルクナトリウムの搬出を安全、確実かつできる限り速やかに完了するため、しゃへい体等の取出し作業時の原子炉容器ナトリウム液位を SsL とすることについて、安全性、燃料交換設備の設備設計・実績等をもとに検討し、以下の結果を得た。

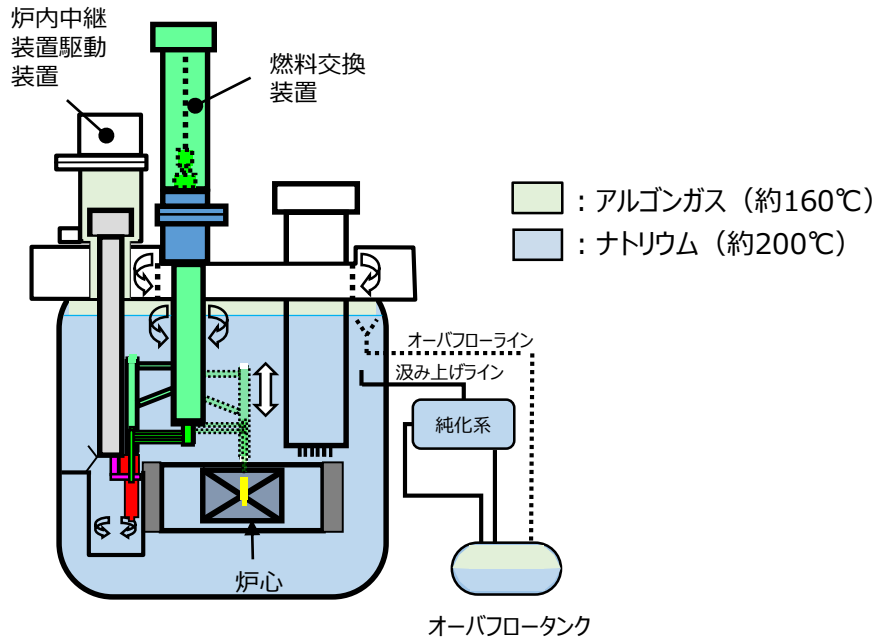
- SsL 運用でのしゃへい体等取出し作業についての安全確保上、作業実施上

の問題はない。

- 本作業が第2段階のクリティカル作業であることから、工程管理リスクへの対応として、純化運転或いは NsL でのしゃへい体取出しのためのリカバリプランを準備した上で、第2段階のしゃへい体等取出し作業を SsL 運用で行う。

以上

NsL (原子炉容器通常液位、EL33.05m)



SsL (システムレベル、EL29.85m)

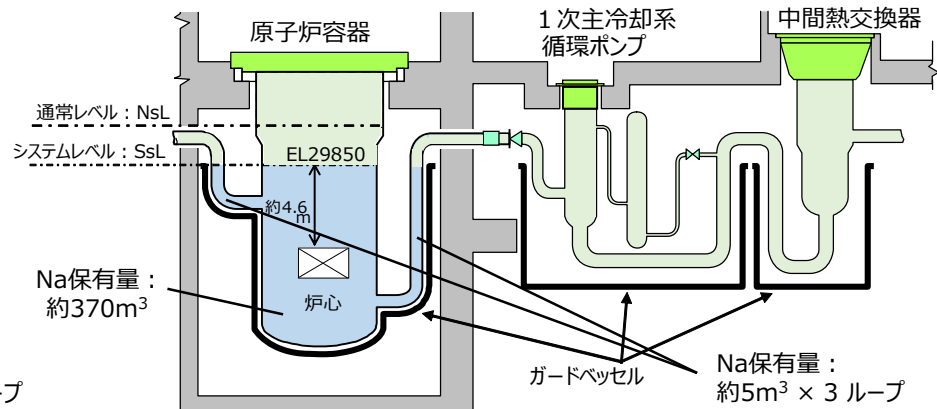
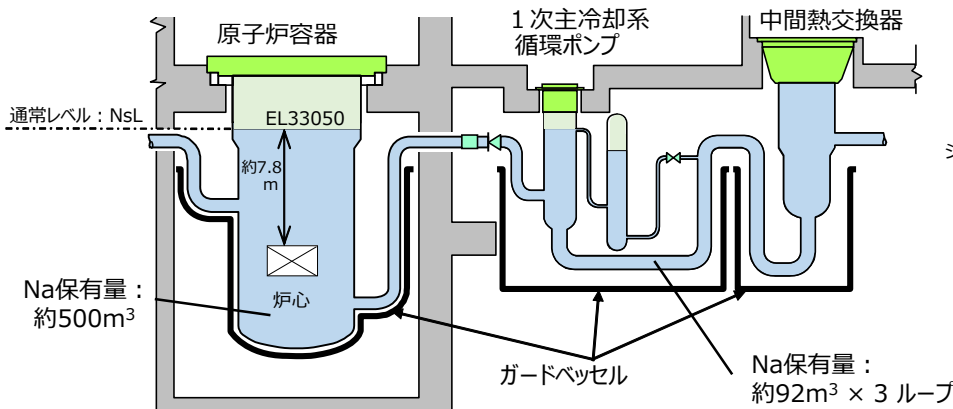
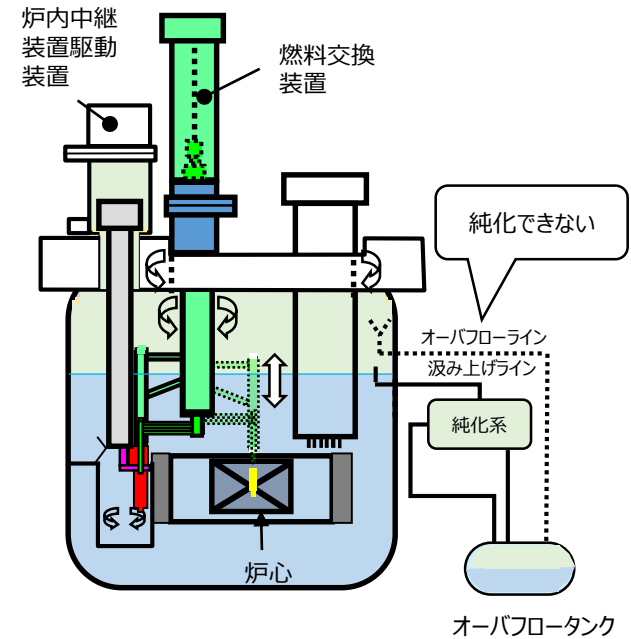


図1 原子炉容器ナトリウム液位(NsLとSsL)による燃料交換装置の使用条件、ナトリウム充填範囲の違い

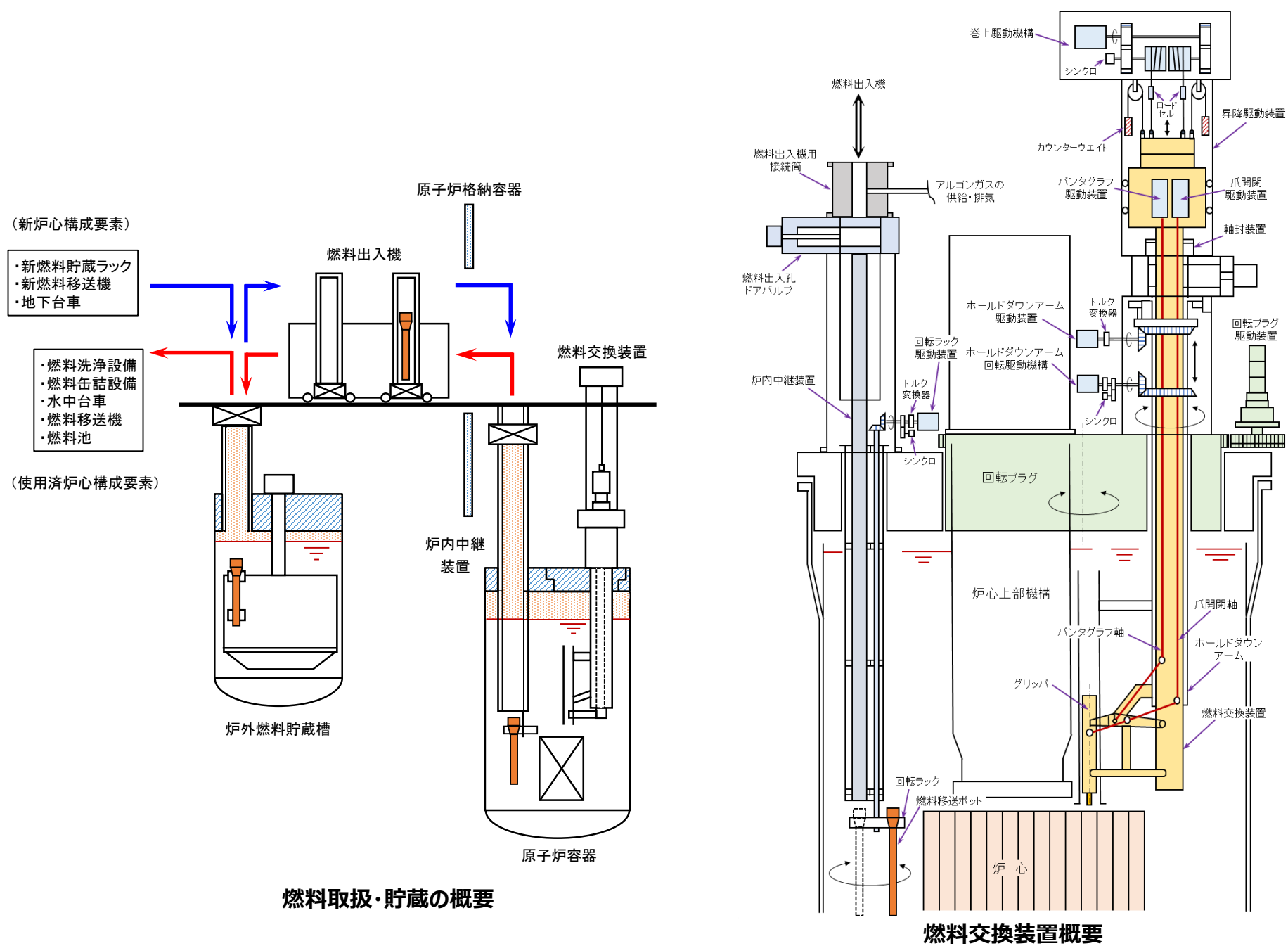


図2 もんじゅの燃料取扱の概要(ナトリウム液位はNsL)

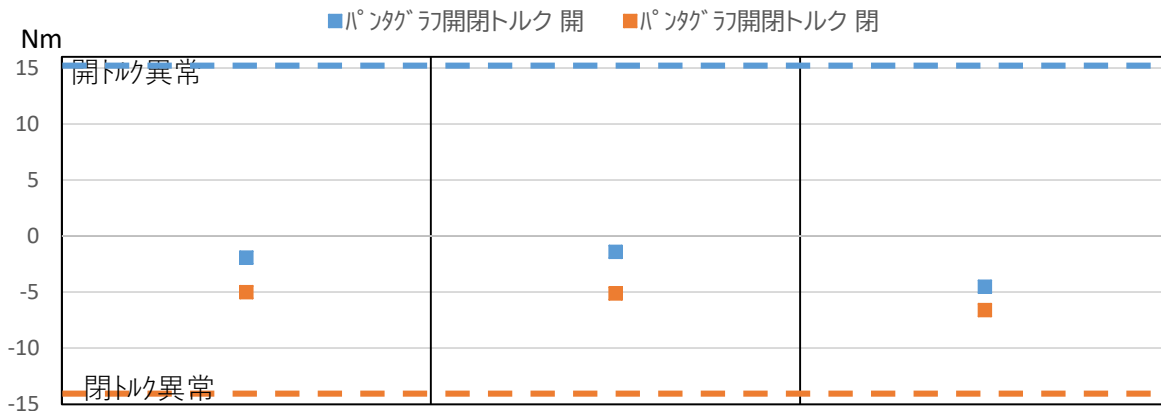
段階	試験・運用名	使用装置	交換対象物と実施操作 (体数)	試験・運用時の環境条件				試験、運用の内容、実績
				Na液位 (mm)*1	Na,Ar 温度(°C)	Na純度 (ppm)*2	Na流量 (m ³ /h)	
設計 検証	大気中動作試験 (1975)	フル モック アップ	模擬燃料(5体装荷相当)	0	常温	—	—	・機器単体は正常に動作
	高液位動作試験 (1976)		模擬燃料(3体装荷相当)	6800	Na250	3	75	・機器単体は正常に動作、 ・液位による浮力、熱膨張の影響を確認(荷重判定値は変更 する必要がある)
	高液位耐久試験 (1976~1978)		模擬燃料(1000体装荷相当)	6800	Na200	3	75	
	低液位動作試験 (1979)		模擬燃料(156体装荷相当)	2300	Na200 Ar180/150	2.8	24	
総合 機能 試験	大気中炉内燃料移送 試験(1991)	もん じゅ 実機	模擬燃料(10体分の交換に相当)	0	Ar 常温	—	—	・機器単体は正常に動作
	ナトリウム試験リ ハーサル(1992)		模擬燃料(9体分の交換に相当)	2800 (SsL)	Na約200 Ar約160	3~7	0	・機器単体は正常に動作、 ・液位による浮力、熱膨張の影響を確認(荷重判定値は変更 する必要がある)
	ナトリウム中燃料移 送試験(1992)		模擬燃料(10体分の交換に相当)	6000 (NsL)	Na200 Ar約160	3	735× 3	
実機 運用	初装荷炉心構成 (1993~1994)		実燃料(198体装荷)、 炉心構成要素(36体装荷)	6000 (NsL)	Na200 Ar約160	2	735× 3	・正常に動作 ・作業時のトルク異常は観察されて いない
	燃料交換 (2009~2010)		実燃料(122体交換) 制御棒(19体交換) 模擬体(1体装荷/取出)	6000 (NsL)	Na200 Ar約160	1.5	735× 3	
	燃料体取出し (2019~2022)		実燃料(370体取出)、 模擬燃料2(246体装荷)	6000 (NsL)	Na200 Ar約160	1.5	735× 3	・正常に動作 ・作業時のトルク異常は観察されて いない
計画	しゃへい体等取出し (2023~)		炉心構成要素(模擬燃料含む) (576体取出) 制御棒(19体取出)	2800 (SsL)	Na約200 Ar約160	— 注参照	0	(注)純化運転を行わないため、 これまでの実績よりも高くなるが、 増分は2ppm以下と評価

*1 炉心頂部からの高さ

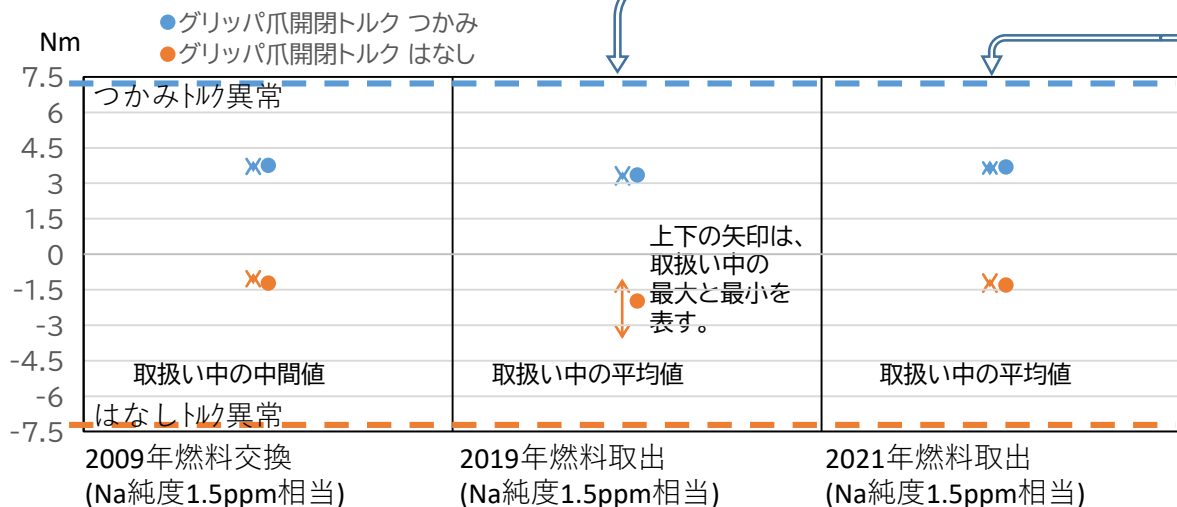
*2 Na中の酸素濃度

図3 燃料交換装置の試験、運用の使用条件と使用結果

パンタグラフ開閉トルク(試験、作業キャンペーンで集計)

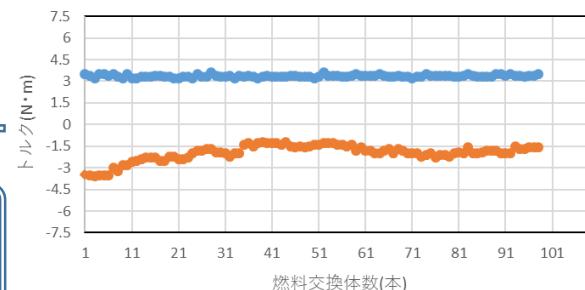


グリッパ爪開閉トルク(試験、作業キャンペーンで集計)

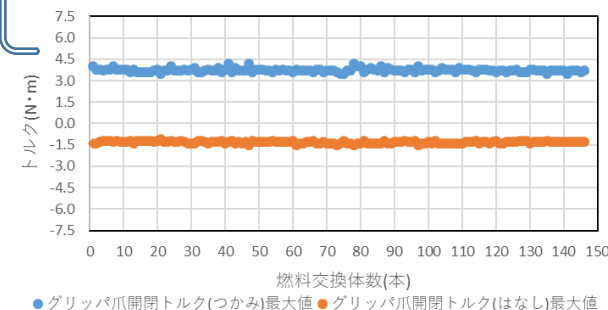


グリッパ爪開閉トルク(体数毎)

2019年度燃料体の取出し



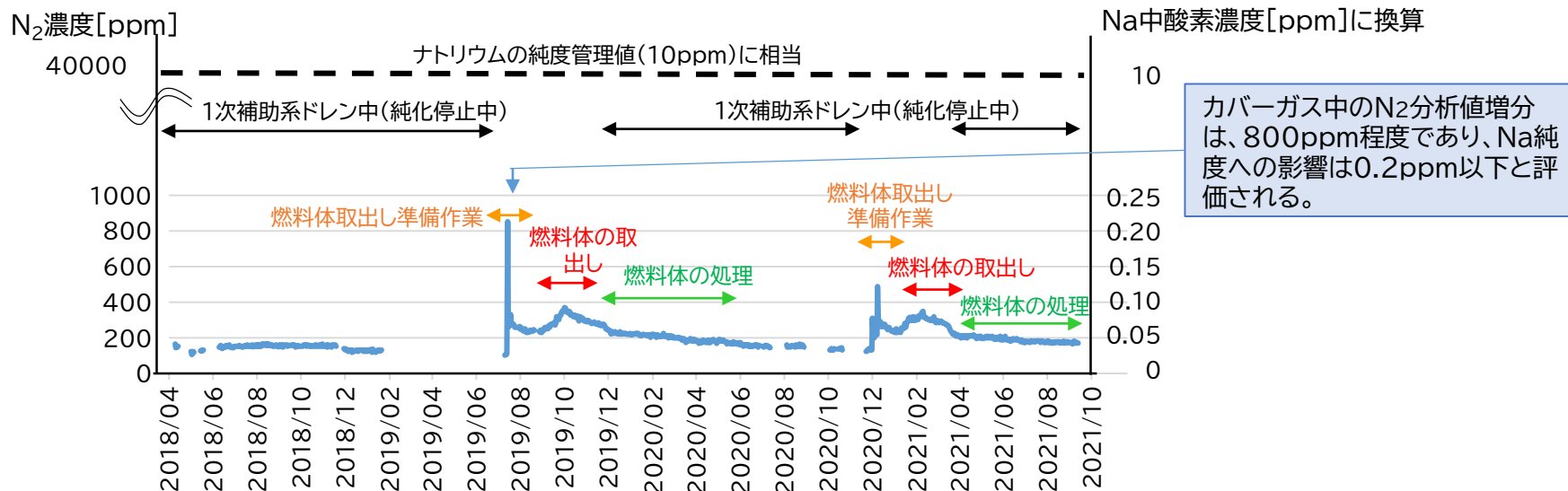
2021年度燃料体の取出し



注)トルクの値は1体取扱い中に変動するため、最大値を記載

図4 燃料交換、燃料取出し時の燃料交換装置のグリッパトルク値

廃止措置第1段階における原子炉容器カバーガス純度の推移

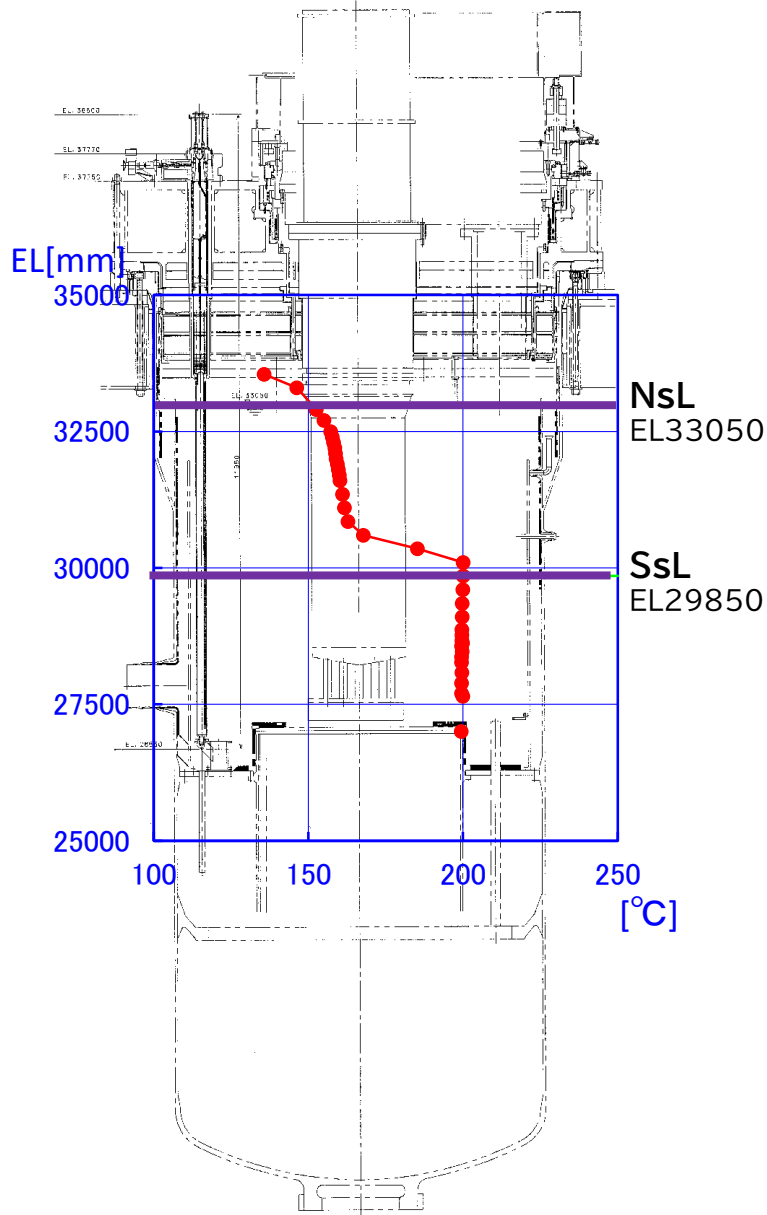


しゃへい体等取出し時における不純物混入の可能性評価

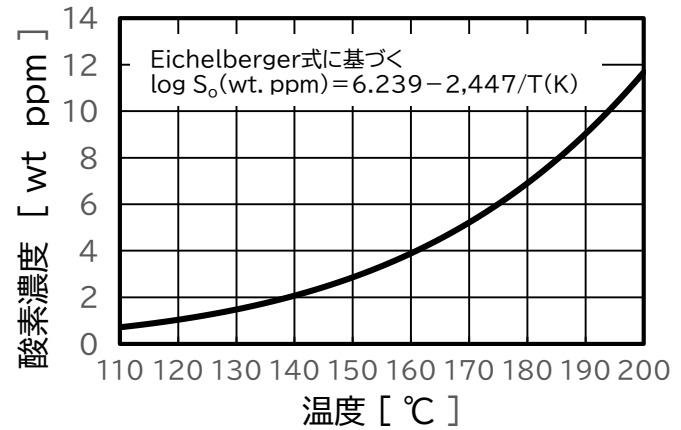
不純物混入原因	過去のプラント運用での実績	しゃへい体等取出しへの影響
①系統内不純物の溶出	起動試験の初回昇温時に系統内の不純物が溶出し、Na中酸素濃度が9ppmまで増加	なし(系統内不純物の溶出は完了しており、新たな溶出はない)
②燃料交換装置等設置、撤去時の空気混入	燃料交換、燃料取出し作業の都度、発生しているが、Na純度への影響は極めて限定的(上図参照)	問題ないレベル(これまでの実績からNa純度への影響は0.2ppm程度)
③カバーガスによる持ち込み	アルゴンガス供給系から供給されたアルゴンガス(年間500m ³ 程度)の不純物酸素が持ち込まれている	問題ないレベル(酸素10ppm含有Arガスを500m ³ 供給した場合のNa純度への影響は0.02ppm程度)
④受入れ燃料等による持ち込み	燃料交換、燃料取出し作業の都度、発生しているが、Na純度への影響は極めて限定的	なし(しゃへい体等取出し作業では系統外からの模擬燃料等の受入れはない)
⑤系統へのインリーク	原子炉容器ナトリウム液位をSSLに下げ、Na純化運転を停止した期間において、有意な純度低下は認められない	なし

図5 しゃへい体等取出し時における不純物混入の可能性評価

SsL時の温度分布(実測)



液体Naへの酸素の溶解度



不純物によるNa化合物の析出メカニズムの分類

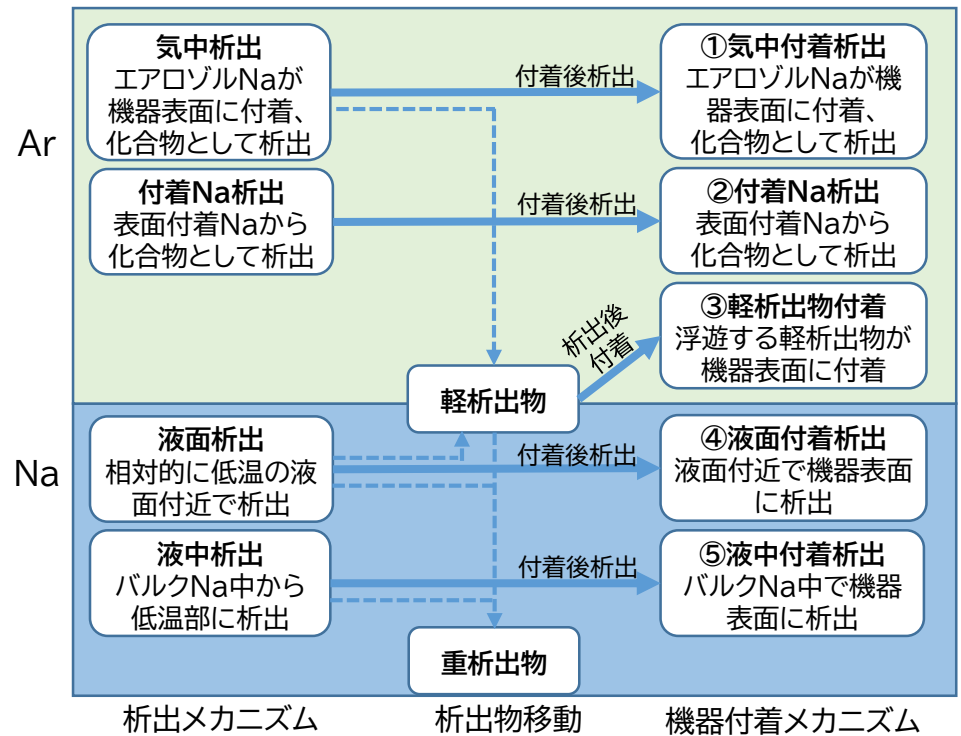
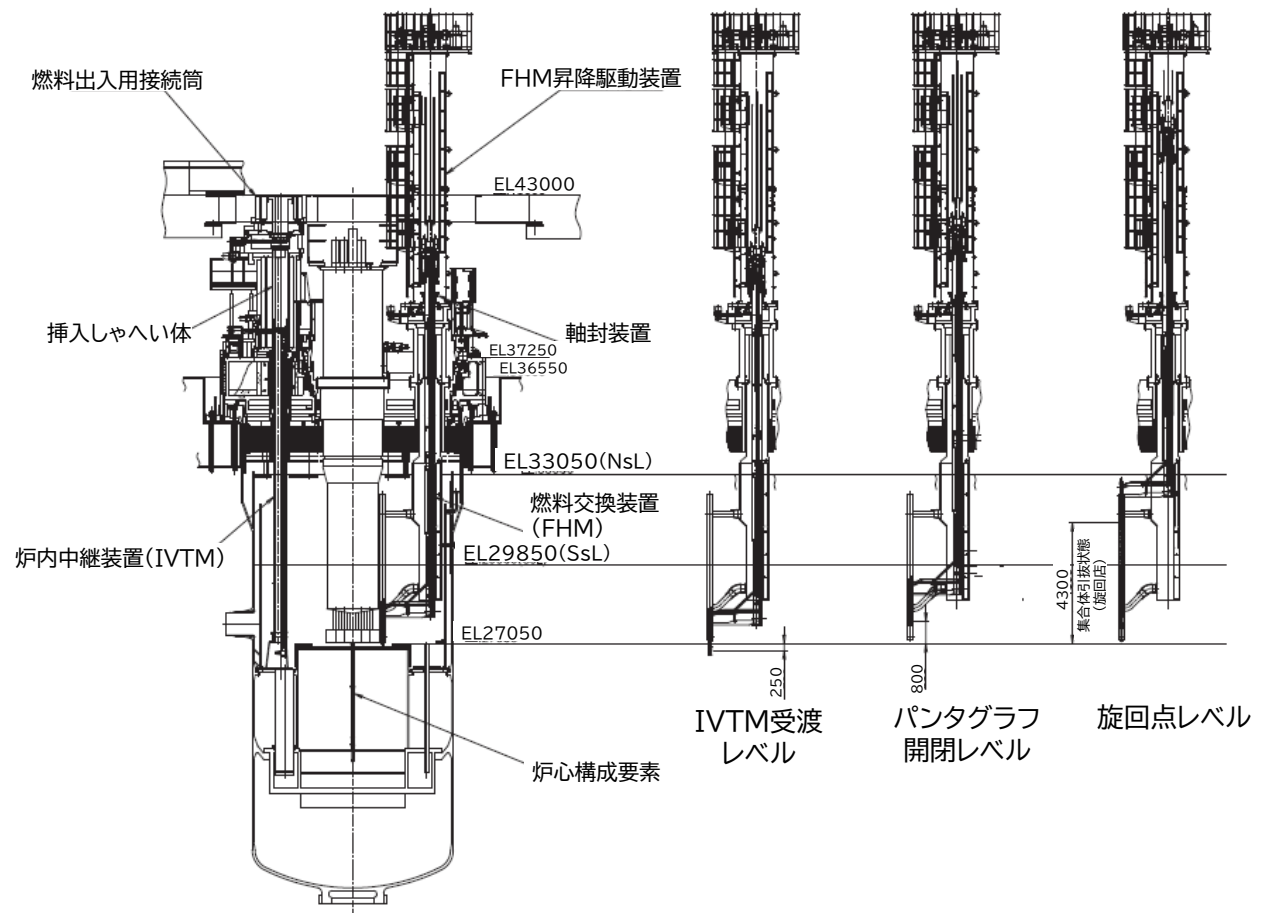


図6 原子炉容器のナトリウム及びカバーガスの不純物による燃料交換装置への影響

燃料交換装置の各可動部のSsL運用時の動作範囲

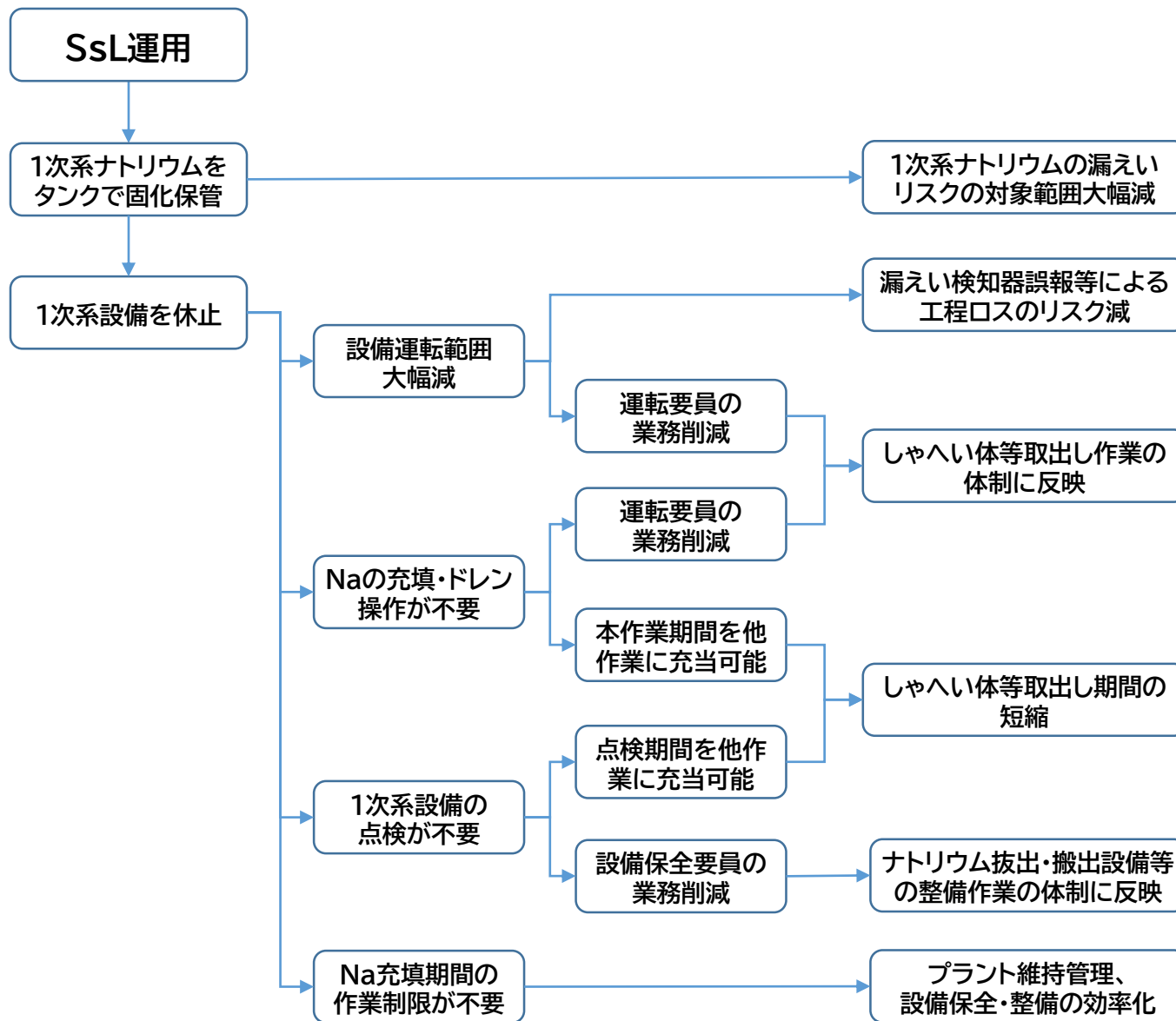


燃料交換装置の各可動部のSsL運用時の動作範囲別の析出物の付着メカニズム

可動部の動作範囲	該当部位	Na析出物の付着に至るメカニズム	付着物の軽減対策
160℃のAr中のみ	パンタグラフ軸上部、爪開閉軸上部等	①気中付着析出	—
待機時160℃のAr中、 ホールドダウン時 200℃のNa中	パンタグラフ、 グリッパ	最も早く析出物が付着すると考えられる。 ①気中付着析出、②付着Na析出、③軽析出物付着、④液面付着析出、⑤液中付着析出	Na温度上昇により、再溶解
200℃のNa中のみ	IVTM回転ラック等	⑤液中析出付着	Na温度上昇により、再溶解

図7 燃料交換装置の各可動部とナトリウム液位の関係

廃止措置を安全、確実、かつ、できる限り速やかに遂行する上での効果



安全性	確実性	迅速性
◎	○	
	○	○
○	○	○
		◎
○	○	○
○	○	○

図8 SsL運用でしゃへい体等取出し作業を行う場合の効果

不純物による機器動作への影響進展

不純物の低減対策

機器動作への影響緩和対策

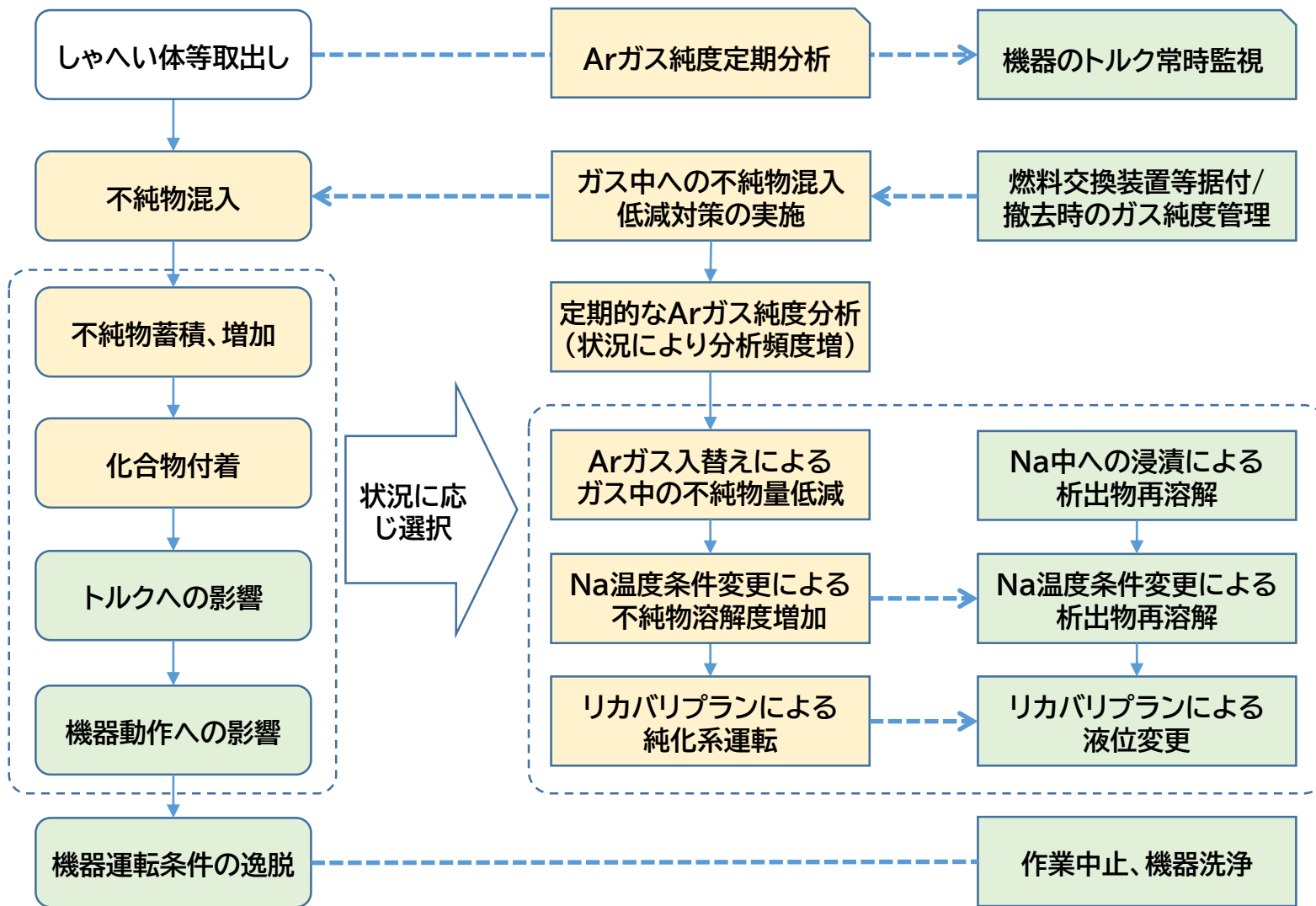
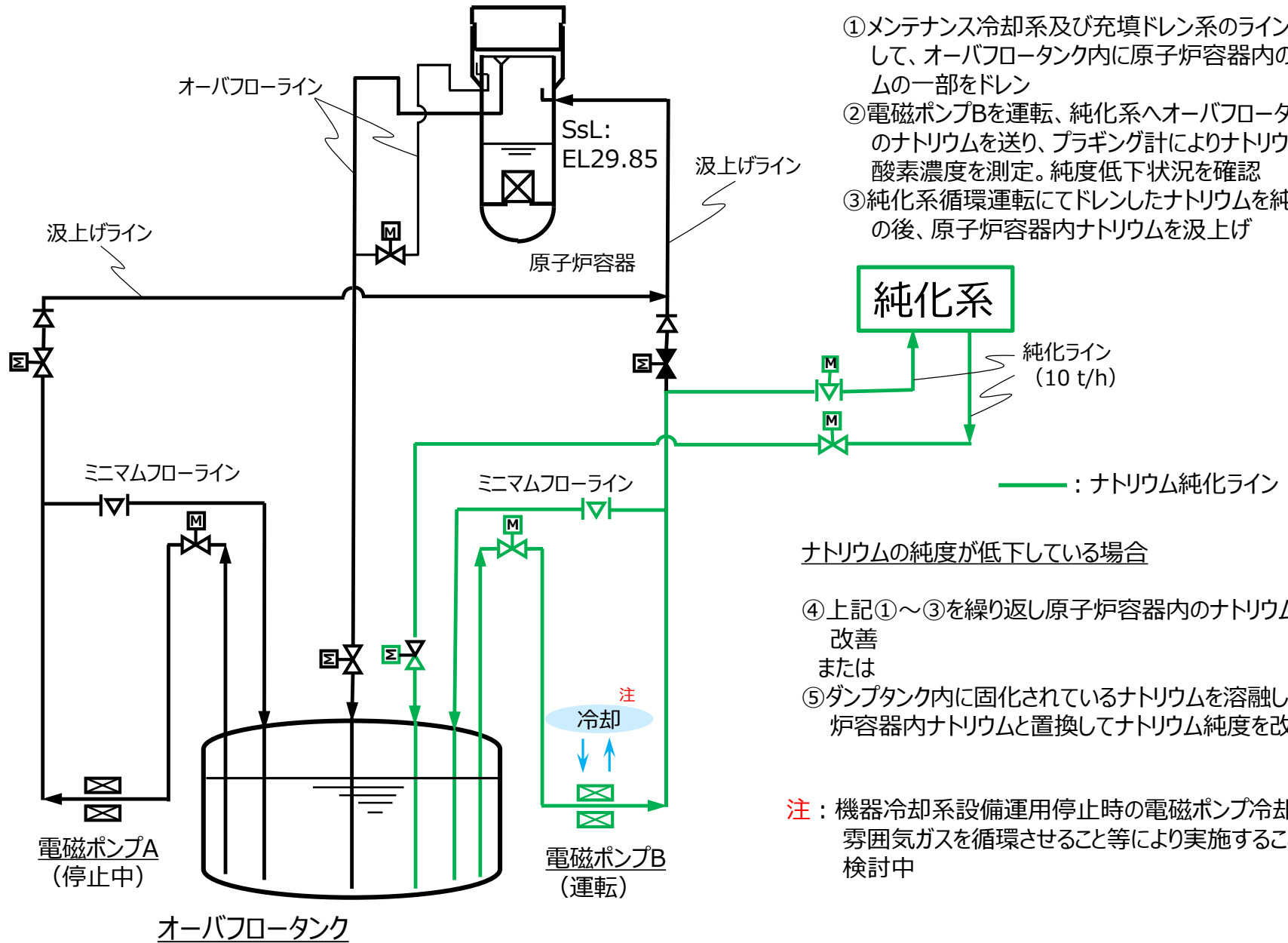


図9 原子炉容器のナトリウム及びカバーガスの不純物による燃料交換装置への影響への対策



- ①メンテナンス冷却系及び充填ドレン系のラインを利用して、オーバーフロータンク内に原子炉容器内のナトリウムの一部をドレン
- ②電磁ポンプBを運転、純化系へオーバーフロータンク内のナトリウムを送り、プラグング計によりナトリウム中の酸素濃度を測定。純度低下状況を確認
- ③純化系循環運転にてドレンしたナトリウムを純化。その後、原子炉容器内ナトリウムを汲上げ

ナトリウムの純度が低下している場合

- ④上記①～③を繰り返し原子炉容器内のナトリウム純度を改善
または
- ⑤ダンプタンク内に固化されているナトリウムを溶融し、原子炉容器内ナトリウムと置換してナトリウム純度を改善

注：機器冷却系設備運用停止時の電磁ポンプ冷却は、雰囲気ガスを循環させること等により実施することを検討中

図10 SsLでのしゃへい体等取出しにおいてリカバリプランのナトリウム純化を行う場合の対応(1/2)

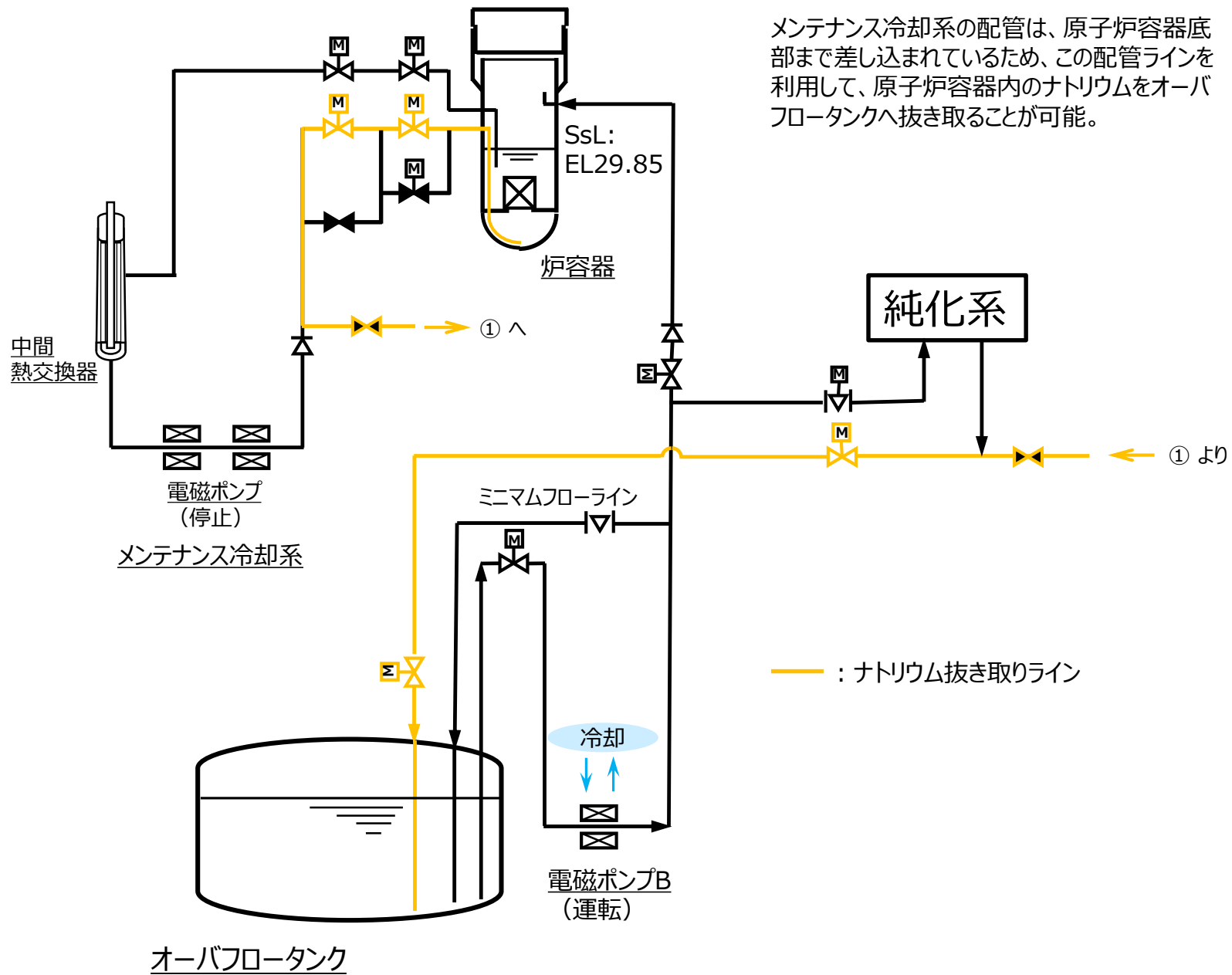


図10 SsLでのしゃへい体等取出しにおいてリカバリプランのナトリウム純化を行う場合の対応(2/2)

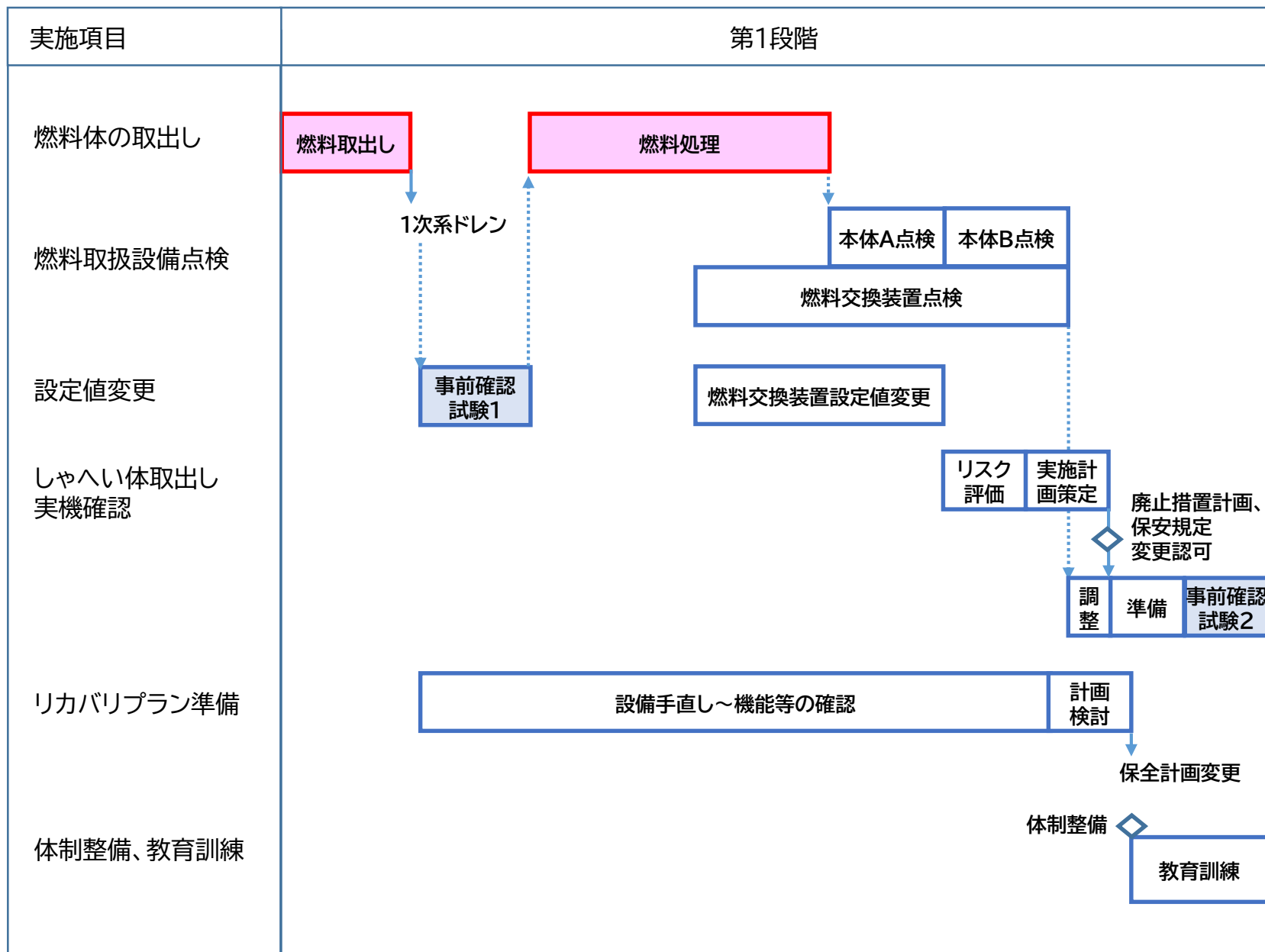


図11 SsLでのしゃへい体等取出しに向けた第1段階での事前準備実施手順

1. 第2段階の到達目標実現に向けた着目点

第2段階の到達目標と主要作業
・バルクナトリウム搬出を安全、確実、できる限り速やかに完了
・クリティカル工程はしゃへい体等取出し作業と体制整備を含むナトリウム抜出・搬出作業

しゃへい体等取出し作業の特徴

・原子炉容器内のしゃへい体等595体を取り出し
・燃料体取出し作業と類似した作業だが、燃料関係の安全要求なし

燃料体取出し完了後のナトリウム設備の安全機能 図1

・冷却に関する安全要求なく、1次系をドレンするSsL運用により、点検期間短縮等の工程の迅速化が可能
・SsL運用ではナトリウム純化系の運転ができず、純度管理が課題

SsL運用の成立性の検討
・しゃへい体等取出し作業を安全、確実、できる限り速やかに完了する方策として、SsL運用によるしゃへい体等取出しの成立性を検討

2. 1～2.3 燃料交換装置の設計、運用実績及び考察

燃料交換装置設計開発 図2 図3

・SsLでの燃料移送機能確認済

燃料交換装置運用実績 図4

・これまでのNsL運用で不純物析出によるトルクへの影響なし

ナトリウム純度 図5

・考えられる混入経路による不純物量は問題とならないレベル

不純物の影響機構 図6 図7

・原子炉容器の酸素による摺動機構への影響は極めて小さく、問題とならない
・燃料体の処理中に燃料出入機で顕在化した湿分の影響によるトルク上昇は、燃料交換装置では発生しない

2.4, 2.5 SsL液位でのしゃへい体等取出し作業の成立性

安全確保上の問題なし

・燃料の冷却、損傷防止に関する要求なし

燃料交換装置の作業実施上の問題なし

・SsLでの移送機能は設計確認、試験で確認済
・純化しなくても、不純物による問題の影響なし

結論

・安全確保上、設備上の問題はなく、ナトリウム漏えいリスク低減、工程短縮に大きな効果がある。
・本作業が第2段階のクリティカル作業であり、万一障害が発生すれば廃止措置全体工程に大きな影響を与える可能性があることから、工程管理リスク対策としてリカバリプランの準備が必要。

ナトリウム漏えいリスク低減 図8

・漏洩リスク範囲を大幅に削減
工程短縮効果及び他作業への効果
・1次系点検不要のため、しゃへい体等取出し実作業と競合する点検期間を短縮でき、他作業との取り合い条件を大幅に緩和可能

3. 対応方針

基本方針 図9 図10

・SsL運用でのしゃへい体取出しを第2段階で実施し、1次系関連諸設備を一部停止し、特別な保全計画で管理する。
・工程管理上のリスクへの対応策として、特別な保全計画の一部停止設備を用いた対応処置を速やかに実施できるよう、リカバリプランを準備する。
・そのために必要な事前準備を第1段階で実施する。

廃止措置第1段階での事前準備 図11

・SsL運用に向け設定値最適化
・SsLでのしゃへい体取出しを実機で確認
・リカバリプランの設備手直し、機能確認
・体制整備、教育・訓練

廃止措置第2段階での対応策

・SsL運用でしゃへい体等取出し作業
・トルク監視で異常の徴候を早期検知
・リカバリプラン実施可能

図12 SsLでのしゃへい体等取出しに関するまとめ

燃料交換装置等のSsL運用に伴う影響と過去の試験結果の比較

設備	動作	影響に関する事前評価	過去の動作検証結果 SKS_Na中燃料移送試験(SsL) (1992.4.2-4.15)	過去の動作検証結果 フルモックアップ_Na低液位動作試験(EsL) (1979.10-11)
浮力低下による影響	燃料交換装置	昇降機構	SsLでの浮力影響を考慮し計画値から見直して正常動作。 NsL時：不吊り1450kg/吊り1650kg →判定値1520kg SsL時：不吊り1530kg/吊り1700kg →判定値1580kg	モックアップ NsLと大差なく正常動作。 吊り不吊り判定に関する試験は未実施。
		ホールドダウンアーム上下	SKS_NsLと大差なく正常動作。動作トルクは増加。 NsL時：上昇1.4kgm、下降0.4kgm SsL時：上昇1.5kgm、下降0.85kgm	モックアップ NsLと大差なく正常動作。動作トルクは増加。 NsL時：上昇-2.1ton、下降-1.85ton EsL時：上昇-2.35ton、下降-1.85ton (荷重を測定。実機FHMと構造が異なりパーシリングリンク機構となっている。)
	回転ブラグ	持上げ	SKS_NsLと大差なく正常動作。	モックアップ NsLと大差なく正常動作。
燃料出入機本体A	グリッパ昇降、爪開閉	影響は無視できる SsLの場合、昇降テーブル部の浮力が減少により昇降トルクが数Nm増加するが、吊り不吊り判定値392Nmに対して、十分な裕度がある。	未実施	未実施

設備	動作	影響に関する事前評価	過去の動作検証結果 SKS_Na中燃料移送試験(SsL) (1992.4.2-4.15)	過去の動作検証結果 フルモックアップ_Na低液位動作試験(EsL) (1979.10-11)
熱収縮に伴う影響	燃料交換装置	パンタグラフ開閉	SKS_NsLと大差なく正常動作。 NsLと差は開側で+3mm(許容差は開-0 ⁺ +10)、閉側は0mm。	モックアップ NsLと大差なく正常動作。 (パンタグラフ開閉位置のずれ量に関するデータなし)
		グリッパ爪開閉	SKS_NsLと大差なく正常動作。	試験初期に爪開中に過負荷発生。ロッドの昇温に時間遅れがあるため。予熱23時間経過後にはモックアップ NsLと大差なく正常動作。
		感知ロッド動作	SKS_NsLと大差なく正常動作。	試験初期につかみはなし準備点検が不動作。ロッドの昇温に時間遅れがあるため。予熱23時間経過後にはモックアップ NsLと大差なく正常動作。
		昇降機構	SKS_NsLと大差なく正常動作。 NsLと昇降位置の差は上限で比較すると3mm。	モックアップ NsLと大差なく正常動作。 NsLと昇降位置の差は1~2mm。
		ホールドダウンアーム上下	SKS_NsLと大差なく正常動作。	モックアップ NsLと大差なく正常動作。
		ホールドダウンアーム旋回	SKS_NsLと大差なく正常動作。	モックアップ NsLと大差なく正常動作。
炉内中継装置	回転ラック旋回	影響は無視できる 収縮分(約3mm)はユニバーサルジョイント部で吸収される	SKS_NsLと大差なく正常動作。	モックアップ NsLと大差なく正常動作。
燃料交換装置+回転ブラグ	位置決め	有 約1mm減少。許容偏心量20mm範囲内。動作試験で検証する計画。	SKS_NsLと大差なく正常動作。 NsL時：偏心は最大7.4mm SsL時：偏心は15mm以内に収まっていることを確認。	モックアップ NsLと大差なく正常動作 液位変更に伴う偏心量の変化はゼロではなく十分に小さかった。
燃料出入機本体A	グリッパ昇降、爪開閉	影響は無視できる SsLの場合、昇降テーブル部が11mm縮小するが、下限設定値に40mmの許容範囲があるので、十分な裕度がある。	未実施	未実施

設備	動作	影響に関する評価 (SsLによってNa中動作からガス中動作となり摺動抵抗が増加しないか)	過去の動作検証結果 SKS_Na中燃料移送試験(SsL) (1992.4.2-4.15)	過去の動作検証結果 フルモックアップ_Na低液位動作試験(EsL) (1979.10-11)
Na中からガス中へ露出に伴う摺動抵抗の影響	燃料交換装置	パンタグラフ開閉	SKS_NsLと大差なく正常動作。	モックアップ NsLと大差なく正常動作。
		グリッパ爪開閉	SKS_NsLと大差なく正常動作。 NsL時：開0.58kgm、閉-0.07kgm SsL時：開0.57kgm、閉-0.05kgm	モックアップ NsLと大差なく正常動作。 NsL時：開0.75kgm、閉-0.65kgm EsL時：開+0.9kgm、閉-0.6kgm
		感知ロッド動作	SKS_NsLと大差なく正常動作。	モックアップ NsLと大差なく正常動作。