

ナトリウムを含む洗浄廃液の管理方針

令和4年9月7日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

- 炉心構成要素取出し作業(燃料体取出し作業、しゃへい体等取出し作業)では、炉心構成要素(燃料体、しゃへい体等)及び燃料取扱設備(燃料交換装置、燃料出入機等)の洗浄作業により、ナトリウムを含む洗浄廃液が発生する。
- ナトリウムを含む洗浄廃液を液体廃棄物処理系で処理した後の蒸発濃縮廃液の発生量が第2段階完了時点で廃液濃縮液タンクの貯蔵容量(13m³)を超えないことを確認した上で、当面の洗浄廃液の管理方針を示す。

表1 燃料体取出し作業におけるナトリウム付着燃料体の移送経路と洗浄廃液の発生場所(移送経路、廃液発生場所は、他の炉心構成要素も同じ)

| 燃料体の状態 | Na中保管 | 燃料体の取出し | | | Na中保管 | 燃料体の処理 | | 水中保管 |
|------------------|-------|------------------------|------------------------|--------------------------------|-------|--------------------------------|---------------------|------|
| 燃料体の移送経路 | ①炉心 | ②燃料交換装置 | ③炉内中継装置 | ④燃料出入機 | ⑤EVST | ⑥燃料出入機 | ⑦燃料洗浄設備 | ⑧燃料池 |
| 発生するナトリウムを含む洗浄廃液 | | 共通保守設備での燃料交換装置洗浄で発生【A】 | 共通保守設備での炉内中継装置洗浄で発生【B】 | 共通保守設備での燃料出入機、ドリップパン洗浄で発生【C,D】 | | 共通保守設備での燃料出入機、ドリップパン洗浄で発生【C,D】 | 燃料洗浄設備での燃料体洗浄で発生【E】 | |

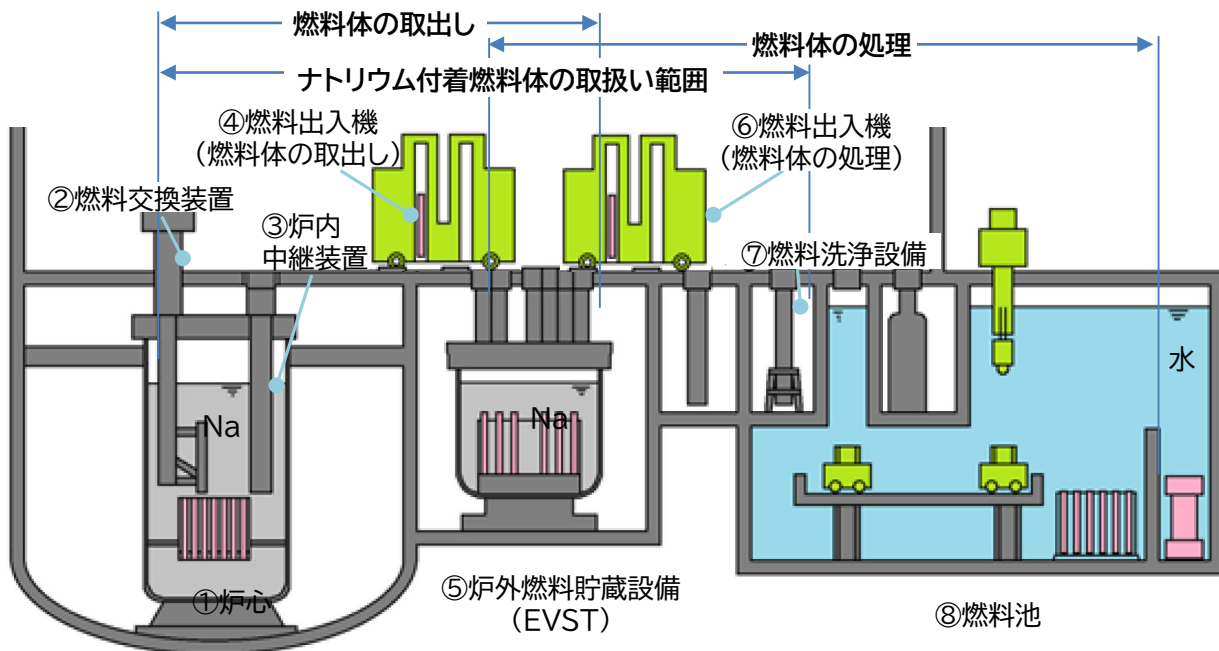


図1 燃料体取出し作業におけるナトリウム付着燃料体の移送経路

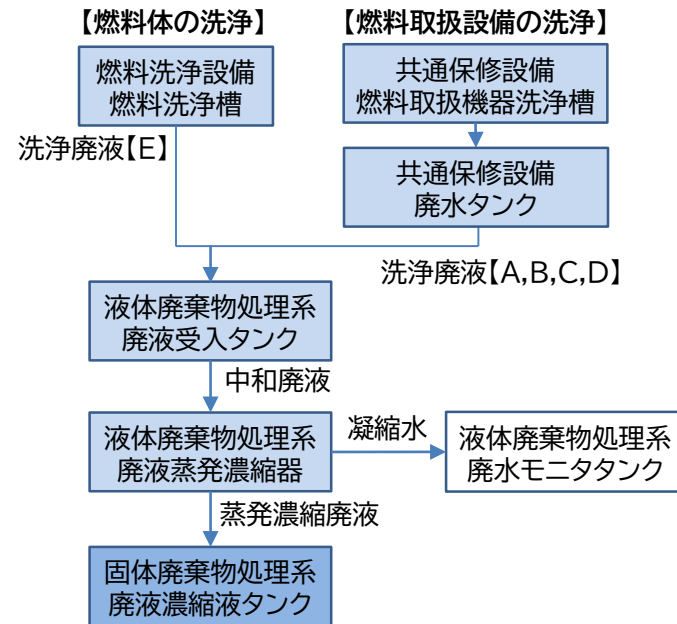


図2 燃料体取出し作業の洗浄廃液の処理フロー 2/9

- 炉心構成要素取出し作業において炉心構成要素に付着していたナトリウムは、一部が燃料取扱設備に移行し、残りは燃料洗浄設備に持ち込まれ、これらは洗浄廃液に移行する。(表2)
- 洗浄廃液へのナトリウム移行量は、燃料体取出し作業等における実績値(表3)をもとに、以下のように評価する。
 - 燃料取扱設備洗浄廃液(【A】~【D】):実績値をもとに、洗浄廃液量を保守的に評価するため、移行量の最大値を包絡するように、1回の洗浄当たり1000 gと設定し評価する。
 - 炉心構成要素洗浄廃液(【E】):集合体構造が異なることから、集合体種類毎に移行量を設定し評価する。

表2 炉心構成要素取出し作業におけるナトリウム移行経路

| 作業名 移行ルート | 炉心構成要素の取出し作業 | | | | 取出し作業後の設備点検 | | | 処理前準備 | 炉心構成要素の処理作業 | | | 作業後点検 | |
|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|---|------------------|------------------------------|----------------------|--------------------------|---|---------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|
| | 経路② 燃料交換装置 収納、移送 | 経路③ 炉内中継装置 収納、移送 | 経路④ 燃料出入機 収納、移送 | ドリッパン 交換(27体 取出毎) | 燃料取扱機器 洗浄 | 交換、保管ド リッパン洗浄 (3個単位) | 燃料出入 定期事業 者検査 | 燃料出入機 洗浄(ドリッ パンなし) | 経路⑥ 燃料出入機 収納、移送 | 経路⑦ 炉心構成要素 洗浄 | 燃料出入機 洗浄(40体 処理毎) | 燃料出 入機洗 浄 | 保管ドリッ パン洗浄 (3個単位) |
| 燃料交換装置 | 炉心構成要素 からNa移行 | | | | 【A】洗浄廃液 へNa移行 | | | | | | | | |
| 炉内中継装置 | | 炉心構成要素 からNa移行 | | | 【B】洗浄廃液 へNa移行 | | | | | | | | |
| 燃料出入機 | | | 炉心構成要素 からNa移行 | 取出作業後、一緒に 洗浄。ドリッパン は一旦炉外燃料貯 蔵槽で浸漬ドレンを 行い、Na量を低減 して、燃料出入機に 再装荷 | 【C】洗浄廃液 へNa移行 | (炉外燃料 貯蔵槽の Na中に浸 漬) | 【C】洗浄廃 液へNa移 行 | 炉心構成要素か らNa移行 | 40体処理毎、又は 処理作業完了後、一 緒に洗浄。但し、ド リッパンは一旦炉 外燃料貯蔵槽で浸 漬ドレンを行い、Na 量を低減して、燃料 出入機に再装荷 | 【C】洗浄廃液へNa移 行 | | | |
| ドリッパン キャノン終 了時 | | 炉心構成要素 からNa移行 | | | | | | | | | | | 炉心構成要素か らNa移行 |
| ドリッパン キャノン途 中の交換 | | | 炉心構成要素 からNa移行 | (炉外燃料貯 蔵槽のNa中 で保管) | 浸漬ドレンで 残留したNa | | 【D】洗浄廃液 へNa移行 | | | | | | 【D】洗浄廃 液へNa移行 |
| 炉心構成要素 | | | | | | | | | | 【E】洗浄廃液 へNa移行 | | | |

表3 炉心構成要素取出し作業における洗浄廃液へのナトリウム移行量実績値

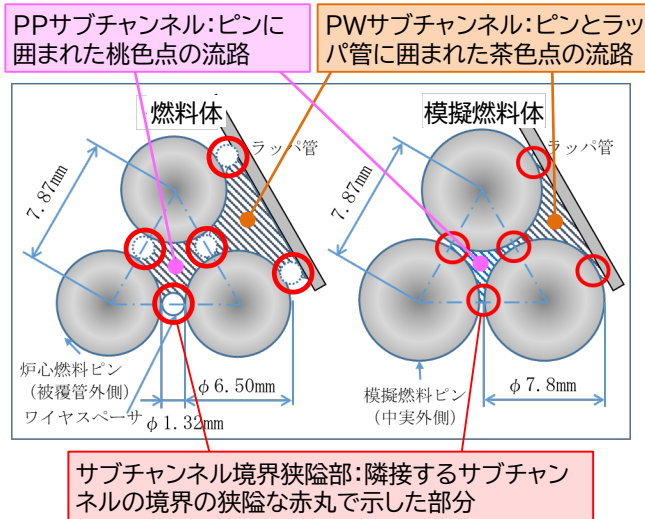
| | 【A】燃料 交換装置 | 【B】炉内 中継装置 | 【C】ドリッパン 入り燃料出入機 | 【D】ドリッパン3個 ※今後は新型を使用予定 | 【E】炉心構成要素(詳細は表5参照) ※今後は強制冷却無で実施予定 | | | |
|---------------|---------------|---------------|---------------------|---------------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------------|
| | | | | | 炉心燃料集合体 | ブランケット燃料集合体 | 制御棒集合体 | 中性子しゃへい体 |
| 移行量 (g/洗浄) | 504~ 588 | 435~ 516 | 363~695 | 396(新型3) 769(旧型1、新型2) | 最大186(強制冷却有86体) 最大245(強制冷却無164体) | 最大137(強制冷却無 150体) | 最大155(強制 冷却有13体) | 最大57(強制冷却無・ 試験用しゃへい体2体) |

炉心構成要素の構造上の観点

- 取出し作業において気中直立状態で取り扱われる炉心構成要素の表面に付着するナトリウムを3種類に分類する。(表4、図3)

表4 取出し作業中の炉心構成要素に付着するナトリウムの分類(燃料体の例)

| | 代表的な場所 | ナトリウム付着量に関する評価 |
|--------|---------------------------|--|
| 開放鉛直表面 | 燃料ピン及びラッパ管表面(狭隕部除く) | 表面全般に薄い付着が見られるが、総量としてはわずかと考えられる。 |
| 鉛直狭隕部 | 燃料ピン同士又は燃料ピンとラッパ管に囲まれた狭隕部 | ギャップが小さい部分において、長手方向にナトリウムが連続して残留する。炉心燃料用模擬体の試験(図4)では、クラスタ下端部にサブチャンネルの閉塞が観察された。 |
| 非鉛直部 | 部材上面の滞留・残留しやすい箇所等 | 付着量は、局部構造とナトリウムの濡れ性に大きく影響を受けるため、洗浄実績又は試験による確認が必要。 |

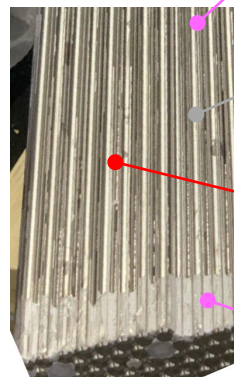


燃料体と模擬燃料体はともに169本クラスタ構造で、ピン配列ピッチも同じだが、模擬燃料体にはワイヤスパーサがないため、サブチャンネルが小さく、サブチャンネル境界狭隕部が長い。

図3 炉心燃料体と炉心燃料用模擬体の鉛直狭隕部



クラスタの頂部、中間部ではPPサブチャンネルの閉塞は見られない



模擬燃料ピンの開放鉛直表面にはわずかに付着が見られる

サブチャンネル境界狭隕部の長手方向に連続した付着が見られる

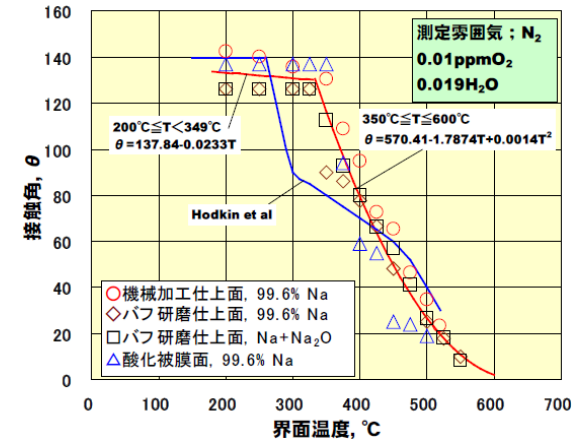
クラスタ下端部にPPサブチャンネルの閉塞が見られる

炉心燃料用模擬体の集合体試験後の状況

図4 試験体のナトリウム付着状況

ナトリウム物性上の観点

- 付着ナトリウム量は、部材表面上のナトリウム液滴の接触角で表される濡れ性に大きく影響を受ける。
- 接触角 θ が 0° に近いほど濡れ性がよく、 180° に近いほど濡れ性が悪い。
- 炉心構成要素取出し作業のナトリウム温度条件(約 200°C)においては、濡れ性は悪く、付着しにくい。
- ステンレス部材が高温を経験すると、ナトリウム濡れ性がやや良くなる。



出典1: JAEA-Review 2013-026, 材料分野におけるナトリウム技術報告 - 高温ナトリウム環境中の材料腐食・強度特性等について -

材質、温度により液体ナトリウムとステンレス部材の間の表面張力は変化する。ステンレス上で液体ナトリウムの接触角 θ は、温度 200°C で約 130° 、 500°C で約 30° と減少し、濡れ性が良くなる。ステンレス部材が一旦高温状態を経験すると表面の自由エネルギーが変わり、ナトリウム濡れ性がやや良くなる。

図5 液体ナトリウムの接触角の温度依存性

- 炉心構成要素の集合体構造の特徴と洗浄実績をもとに集合体種類毎にナトリウム付着量を評価した。
 - 各集合体の全長、全幅、外形構造は概ね共通。
 - 断面形状は集合体種類毎に異なるが、多数本クラスタ型、少数本クラスタ型及び単体構造型の3つのグループに大別でき、少数本クラスタ型及び単体構造型については、グループ内の構造類似性をもとに実績値からナトリウム付着量を評価。
 - 模擬燃料体については、ナトリウムが付着しやすい狭隙部が多いにも拘らず洗浄実績がないこと、今後の洗浄予定数が多いことから、模擬燃料体の実機洗浄試験(参考参照)を実施し、その結果をもとにナトリウム付着量を評価。

表5 今後洗浄処理を行う炉心構成要素各集合体の構造、洗浄実績等に基づくナトリウム付着量評価

| | 炉心燃料集合体 | ブランケット燃料集合体 | 模擬燃料体 | 制御棒集合体 | サーベイランス集合体 | 固定吸収体 | 中性子しゃへい体 試験用しゃへい体 | ブランケット燃料用模擬体 | 中性子源集合体 |
|--------------------------|--|---------------------------------|---|--|--------------------|--------------------|---|--------------------|--------------------|
| 集合体構造 | 多数本クラスタ型 | | | 少数本クラスタ型 | | | 単体構造型 | | |
| 集合体断面 | | | | | | | | | |
| 集合体構造の特徴 | 169本クラスタ | 91本クラスタ | 169本クラスタ ピンが太く、ピン間ギャップ等にNa残留の可能性(図3) | 19本クラスタ | 18本クラスタ | 7本クラスタ | クラスタ束を有さず、集合体部材を同心円状の配置。クラスタ型に比べ狭隙部が少ないことからナトリウム付着量は小さいと考えられる | | |
| 表面積概算 | 14.6 m ² | 10 m ² | 9.8 m ² | 5.9 m ² | 4.6 m ² | 4.7 m ² | 4.5 m ² | 3.8 m ² | 4.4 m ² |
| 洗浄実績とNa移行量【移行量の平均/最大(g)】 | 燃料体処理第1回(86体)【132/186】 ^{注1} 第2,3回(164体)【196/245】 | 燃料体処理第2,3回(150体)【102/137】 | — | 燃料体処理時に実施(13体)【129/155】 ^{注1} | — | — | 燃料体処理前の定事検(試験用しゃへい体2体)【51/57】 | — | — |
| 洗浄予定数 | 66体 | 58体 | 132体 | 19体 | 12体 | 6体 | 318体 | 108体 | 2体 |
| ナトリウム付着量評価値と設定根拠 | 250 g 処理条件が同じ第2,3回(最大245)を包絡 | 150 g 処理条件が同じ第2,3回(最大137)を包絡 | 250g 模擬燃料体の実機洗浄試験実績(149)が1体のみであり保守的に炉心燃料集合体の評価値で設定 | 240 g 炉心燃料集合体の実績より、強制冷却無しの場合は付着量が1.5倍になると想定し、強制冷却有の実績値ベース(155×1.5=232.5)を包絡 | | | 100 g 試験用しゃへい体に比べ、経験温度が高い中性子しゃへい体ではナトリウムの濡れ性が良く付着量大きい可能性があるため、実績値(57)に裕度を加えて設定 | | |

注1 強制冷却状態の燃料出入機に炉心構成要素が収納された。今後の炉心構成要素取出し作業は、移行量が多くなる傾向の強制冷却無し状態で燃料出入機に収納の予定。

- これまでのナトリウム洗浄実績値及び模擬燃料体の付着ナトリウム把握のための実機模擬燃料体洗浄試験の結果をもとに評価した結果、第1段階の燃料体取出し作業及び第2段階のしゃへい体等取出し作業に伴い発生する蒸発濃縮廃液は、既設の固体廃棄物処理系廃液濃縮液タンクで収容可能である。

表6 蒸発濃縮廃液の発生量の予測の前提とした今後の洗浄計画と洗浄当たりのナトリウム付着量(2022年8月15日現在)

| 洗浄対象 | 今後の炉心構成要素取出し作業に伴うナトリウム洗浄計画(洗浄回数) | | | | | | | | 付着量 評価値 (g/洗浄) | |
|--------|----------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|----------------------|-----------------------|
| | 第1段階 | 第2段階(しゃへい体等取出し) | | | | | | 合計 | | |
| | 第4回処理 | 第1回取出 | 第1回処理 | 第2回取出 | 第2回処理 | 第3回取出 | 第3回処理 | | | |
| 炉心構成要素 | 炉心燃料 | 66 | — | — | — | — | — | — | 66 | 100~ 250 (表5参照) |
| | ブランケット燃料 | 58 | — | — | — | — | — | — | 58 | |
| | 燃料以外 | 2 | — | 200 | — | 200 | — | 199 | 601 | |
| 燃料取扱設備 | 燃料交換設備 | — | 1 | — | 1 | — | 1 | — | 3 | 1000 |
| | 炉内中継装置 | — | 1 | — | 1 | — | 1 | — | 3 | 1000 |
| | 燃料出入機 | 5 | 1 | 6 | 1 | 6 | 1 | 6 | 26 | 1000 |
| | ドリップパン3個 | — | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 7 | 1000 |

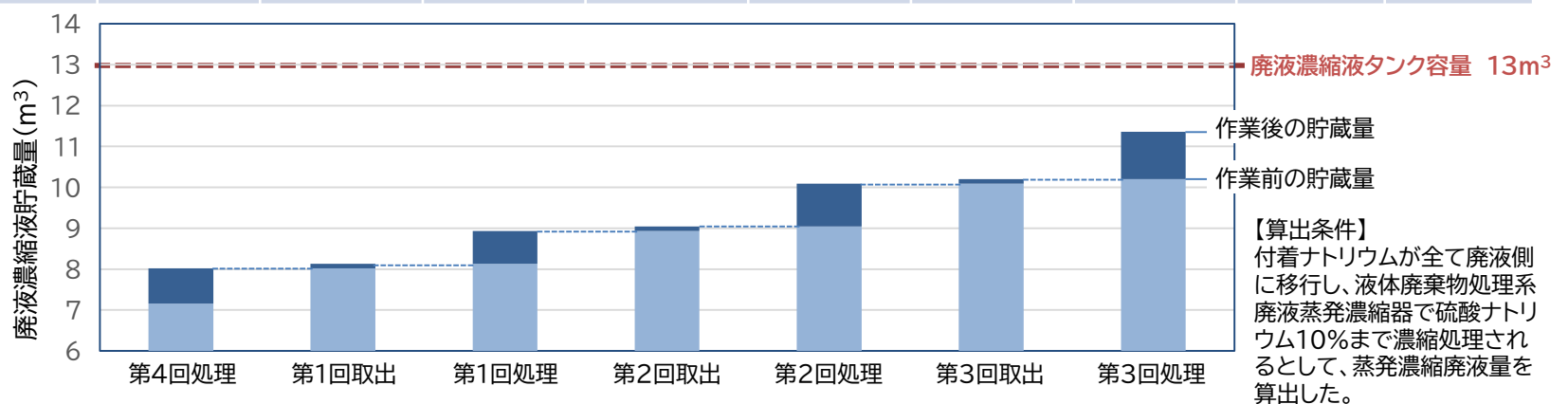


図6 蒸発濃縮廃液の貯蔵量の予測

- 第2段階で実施するしゃへい体等取出し作業で発生するナトリウムを含む洗浄廃液は、液体廃棄物処理系廃液蒸発濃縮器で濃縮処理し、蒸発濃縮廃液は固体廃棄物処理系廃液濃縮液タンクで貯留する。貯留能力上の問題とならないことは、今回の評価結果にとどまらず、今後も燃料洗浄設備での水素濃度及び共通保守設備の廃液分析により随時確認する。
- 貯留する蒸発濃縮廃液は、第3段階で発生するナトリウム設備解体に伴い発生するナトリウムを含む洗浄廃液の処理廃液とともに、プラスチック固化装置から更新する廃棄体化装置で廃棄体化することとし、解体計画とともに具体化検討を進める。

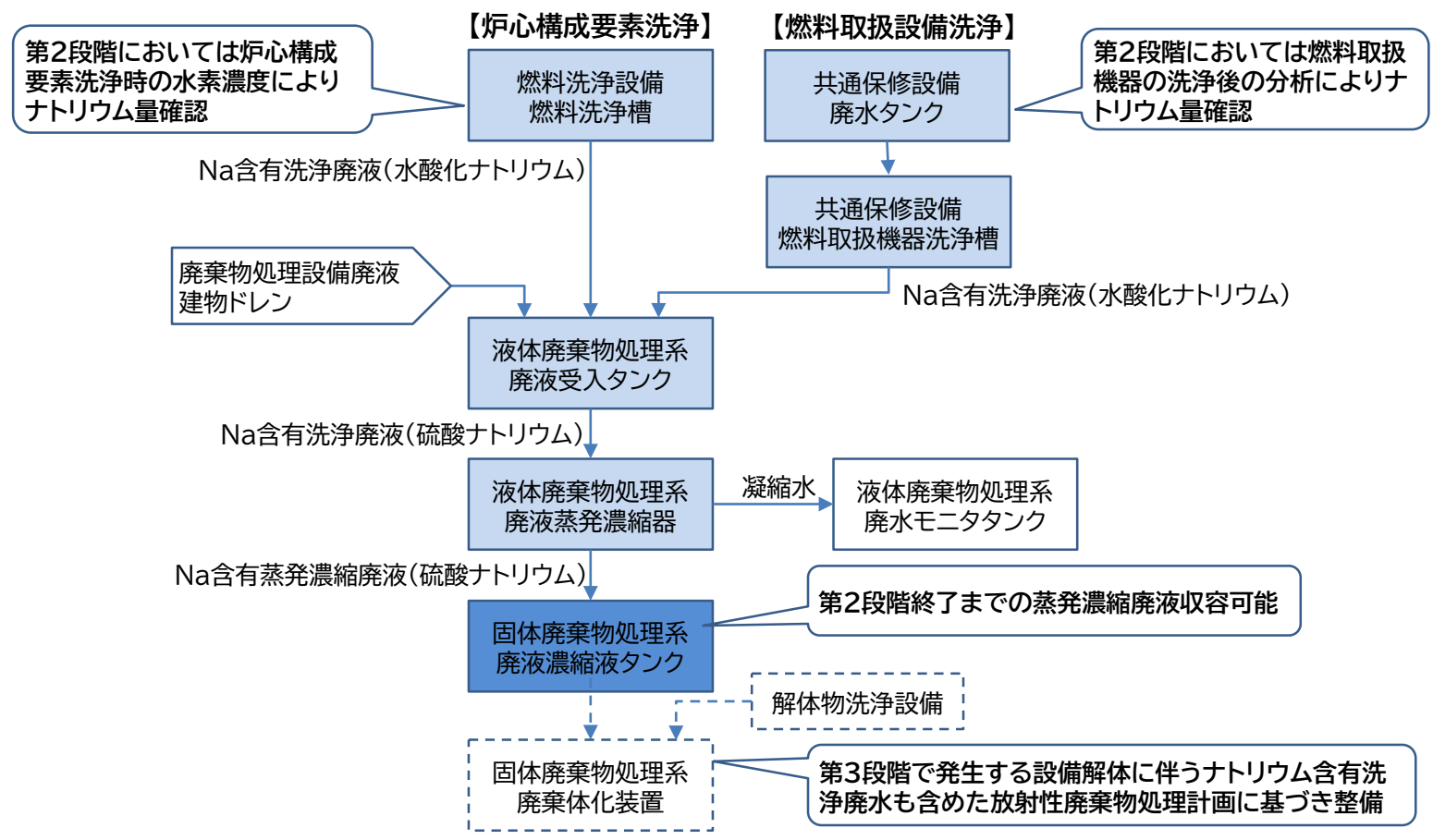


図7 ナトリウムを含む洗浄廃液の処理フローと今後の管理の考え方

- 炉心構成要素取出し作業(燃料体取出し作業、しゃへい体等取出し作業)では、炉心構成要素及び燃料取扱設備の洗浄作業により、ナトリウムを含む洗浄廃液が発生する。
- ナトリウムを含む洗浄廃液を液体廃棄物処理系で処理した後の蒸発濃縮廃液の発生量が第2段階完了時点で廃液濃縮液タンクの貯蔵容量(13m³)を超えないことを確認した。
- 貯留能力上の問題とならないことは、今回の評価結果にとどまらず、今後とも燃料洗浄設備での水素濃度及び共通保守設備の廃液分析により随時確認する。
- 貯留する蒸発濃縮廃液は、第3段階で発生するナトリウム設備解体に伴い発生するナトリウムを含む洗浄廃液の処理廃液とともに、プラスチック固化装置から更新する廃棄体化装置で廃棄体化することとし、解体計画とともに具体化検討を進める。

- 模擬燃料体の実機洗浄試験では、第2段階でのしゃへい体等取出し作業と同じ条件で模擬燃料体を洗浄した結果、ナトリウム付着量は149gとなった。
- 第2段階で洗浄処理する132体の模擬燃料体のナトリウム付着量の評価値は、洗浄廃液量を保守的に評価するため、実機での洗浄実績が1体のみであることを考慮して、炉心燃料集合体の評価値250g/体で設定する。

表 模擬燃料体の洗浄性確認試験結果とナトリウム付着量の設定

| | | 模擬燃料体の洗浄性確認のための試験 | | | 【参考】 炉心燃料集合体の 評価 |
|----------------------|------|--|--|---|---|
| | | 要素試験 (2021年4月～6月実施) | 集合体試験 (2021年12月実施) | 実機洗浄試験 (2022年8月実施) | |
| 試験方法、条件 | | 燃料ピン1本(150mm)、7本(150mm)の試験体をNaに浸漬後に吊り上げ、Naの付着状況を確認 Na温度：200℃ 吊り上げ速度：6m/min | 燃料ピン169本(300mm)の試験体をNaに浸漬後に吊り上げ、残留したNa量を測定 Na温度：200℃ 吊り上げ速度：6m/min | 実機にて模擬燃料体(燃料ピン169本)を洗浄 通常処理条件(燃料出入機の強制冷却なし、Na温度：200℃、吊り上げ速度：6m/min) | 実機にて炉心燃料集合体(燃料ピン169本)を洗浄 通常処理条件(実機洗浄試験と同じ) |
| Na付着量 | ピン | ①開放鉛直表面(ラッパ管を除く) ②鉛直狭隘部 | 付着状況の確認のみ実施 | 31g(最大) | 250g(評価値) 通常処理条件の第2、3回キャンペーン(最大245g)を包絡する値 |
| | ピン以外 | ③非鉛直部 ④ラッパ管 | ピン以外の形状を模擬していないためデータ無し | ピン以外の形状を模擬していないためデータ無し | |
| 第2段階での模擬燃料体のNa付着量の設定 | | — | <ul style="list-style-type: none"> ● 模擬燃料体に付着するNa量が、設備持ち込み制限の500g/体以下であることを確認するための試験 ● ピン部分の付着量は実機のピン長さ(1610mm)に等倍して最大165gと評価 ● ピン部分以外のナトリウム残留量を構造が同様な燃料体と同じと仮定して、燃料体の評価値の250g/体(ピン部分も含む)にピン部分を加算して模擬燃料体全体を試算すると415g/体と評価 | <ul style="list-style-type: none"> ● 通常操作により得られた評価値であり、第2段階の燃処理においても同様になると予測 ● しかし、実機での洗浄実績が1体のみであり、洗浄廃液量を保守的に評価するため、炉心燃料集合体の評価値250g/体で設定する | — |