JAEA-Technology 2021-027 DOI:10.11484/jaea-technology-2021-027



# ナトリウム機器解体に係る経験及び技術集約

# - 100 m<sup>3</sup> 級大型タンクの残留ナトリウム低減技術-

Experience and Technology Consolidation Related to Dismantling Sodium Equipment - Technology to Reduce Sodium Remaining in 100 m<sup>3</sup> Grade Large Tanks-

早川 雅人 下山 一仁 宮越 博幸 鈴木 重哲

Masato HAYAKAWA, Kazuhito SHIMOYAMA, Hiroyuki MIYAKOSHI and Shigeaki SUZUKI

高速炉・新型炉研究開発部門 大洗研究所 高速炉サイクル研究開発センター 高速炉基盤技術開発部 Fast Reactor Fundamental Technology Development Department Fast Reactor Cycle System Research and Development Center Oarai Research and Development Institute Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development

日本原子力研究開発機構

January 2022

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。 本レポートの成果(データを含む)に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の 条件で利用してください。(<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja</u>) なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課 〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en</u>). Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under

the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2022

JAEA-Technology 2021-027

ナトリウム機器解体に係る経験及び技術集約 -100 m<sup>3</sup>級大型タンクの残留ナトリウム低減技術-

日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門 大洗研究所 高速炉サイクル研究開発センター 高速炉基盤技術開発部

早川 雅人、下山 一仁、宮越 博幸、鈴木 重哲\*1

(2021年11月4日受理)

日本原子力研究開発機構大洗研究所では、これまでに高速実験炉「常陽」や高速増殖原型炉も んじゅなどのナトリウム冷却型高速炉の研究開発に関わる多種多様なナトリウム環境下での試験 研究が実施されてきた。これまでに所期の目的を達成したナトリウム試験施設及び機器類の解体 撤去が順次進められ、豊富な経験や技術が蓄積されてきた。一方、試験研究に用いられてきた大 量の金属ナトリウムは新しい試験施設での再利用が図られ、その後、再利用された金属ナトリウ ムを内包してきた大型ナトリウムタンク類の解体が進められている。

これらの解体を安全かつ効率的に進めるためには、解体前にタンク内部(特に底部)に残留するナトリウムを極力低減することが重要である。このため、複数の100 m<sup>3</sup>級大型ナトリウムタン クについて、底部に残留するナトリウム量の低減を図ってきた。本報告ではこれまでに実施して きた残留ナトリウム低減に関わる技術や経験について述べる。

大洗研究所:〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 番地

\*1 菱和工業株式会社

JAEA-Technology 2021-027

Experience and Technology Consolidation Related to Dismantling Sodium Equipment — Technology to Reduce Sodium Remaining in 100 m<sup>3</sup> Grade Large Tanks—

Masato HAYAKAWA, Kazuhito SHIMOYAMA, Hiroyuki MIYAKOSHI and Shigeaki SUZUKI<sup>\*1</sup>

Fast Reactor Fundamental Technology Development Department Fast Reactor Cycle System Research and Development Center Oarai Research and Development Institute Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received November 4, 2021)

At the Oarai Research and Development Institute of the Japan Atomic Energy Agency, experimental studies in various sodium environments are being conducted in connection with the research and development of sodium-cooled fast reactors such as the experimental fast reactor Joyo and the prototype fast reactor Monju. The dismantling of sodium test facilities and equipment that have achieved their purpose has been carried out sequentially, and a wealth of experience and technology has been accumulated. On the other hand, a large amount of metallic sodium used for research and testing is being reused for new testing facilities, and the large sodium tanks that contained the metallic sodium are being dismantled.

In order to dismantle these tanks safely and efficiently, it is important to reduce the residual sodium inside the tanks (especially at the bottom) as much as possible before dismantling. Therefore, we have been working on the reduction of residual sodium at the bottom of several large sodium tanks of 100 m<sup>3</sup> class. This report describes the technologies and experiences related to the reduction of residual sodium that have been carried out so far.

Keywords: Fast Reactor, Large-scale Sodium Component, Dismantling Technology, Residual Sodium, Sodium Extraction Nozzle

<sup>\*1</sup> Ryowa Industrial co., ltd.

# 目 次

1. 緒言
2. 大型ナトリウムタンクの仕様と残留ナトリウム量の推定
2.1 大型ナトリウムタンクの仕様 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.2 残留ナトリウム量の推定 ・・・・・ 2
3. ナトリウム抜取り方法の検討及び抜取り条件 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3.1 残留ナトリウム低減の考え方 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3.2 抜取ノズルの設計 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3.3 抜取り装置の構成及び抜取り条件 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
4. ナトリウム抜取り結果及び低減技術の有効性検討 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 8
4.1 残留ナトリウムの抜取り結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
4.2 抜取り後のナトリウムの残量評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 8
4.3 残留ナトリウム低減技術の有効性評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
4.4 ナトリウム機器解体計画への反映 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
5. 結言
謝辞
参考文献

# Contents

1.	In	troduction	1
2.	Sj	pecification of a large sodium tank and estimation of the amount of residual sodium	2
2	.1	Specification of large sodium tanks	2
2	.2	Estimation of the amount of residual sodium	2
3.	St	udy of sodium extraction method and conditions for extraction	4
3	.1	Concept of residual sodium reduction	4
3	.2	Design of the nozzle for remove the sodium	4
3	.3	Configuration and removal conditions of removal equipment	6
4.	R	esults of sodium removing and examination of the effects of sodium reducing technology	8
4	.1	Result of residual sodium removing	8
4	.2	Evaluation of the amount of residual sodium after removed	8
4	.3	Evaluation the effectiveness of residual sodium reduction technology	9
4	.4	Reflection on dismantling plan for sodium equipment	9
5.	С	onclusion ·····	11
Ac	knc	wledgements ·····	12
Re	fere	nces	12

# 表リスト

表 2.1	大型ナトリウムタンクの仕様 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	13
表 3.1	抜取ノズルの予備試験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	13
表 3.2	残留ナトリウムの抜取り条件 ・・・・・	14
表 4.1	残留ナトリウムの抜取り結果 ・・・・・	14
表 4.2	残留ナトリウム高さによる残量評価 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	14

# 図リスト

図 2.1	50MW 蒸気発生器試験施設一次系ナトリウム貯蔵タンク(50MWSG-01)構造図 ・・・・・・	15
図 2.2	50MW 蒸気発生器試験施設二次系ナトリウム貯蔵タンク(50MWSG-02)構造図 ・・・・・・	16
図 2.3	もんじゅ遮蔽プラグ総合断熱試験装置ナトリウム貯蔵タンク(SPINTA)構造図 ・・・・	17
図 2.4	大型ナトリウムタンクの外観写真(手前から 50MWSG-01、50MWSG-02、SPINTA)・・・・	18
図 2.5	タンク内部の残留ナトリウム ・・・・・	19
図 2.6	充填ドレンノズルの設置位置と残留ナトリウム量の関係 ・・・・・・・・・・・・・	19
図 2.7	タンク内残留ナトリウム(50MWSG-01 抜取り前) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	20
図 3.1	抜取ノズル設置位置と残留ナトリウム量の関係 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	21
図 3.2	性能確認用抜取ノズル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	22
図 3.3	予備試験に用いた試験容器構造図及び外観写真 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	23
図 3.4	可動シール部構造図 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24
図 3.5	ナトリウムに対する酸素の飽和溶解度曲線 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	25
図 3.6	抜取ノズル製作図 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	26
図 3.7	ナトリウム抜取ノズルの閉塞防止対策 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	26
図 3.8	ナトリウム抜取り装置系統図 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	27
図 3.9	ナトリウム抜取り装置(上:抜取ノズル挿入部、下:抜取用ドラム缶接続部) ・・・・	28
図 4.1	SPINTA 用抜取ノズル先端メッシュ部外観写真(上:外面、下:内面) ・・・・・・・	29
図 4.2	検針棒による残留ナトリウム高さ測定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	30
図 4.3	ナトリウム抜取り後の残留ナトリウム状況(50MWSG-01) ・・・・・・・・・・・・・・	31
図 4.4	ナトリウム抜取り後の残留ナトリウム状況(50MWSG-02) ・・・・・・・・・・・・・・	32
図 4.5	ナトリウム抜取り後の残留ナトリウム状況(SPINTA) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・	33

This is a blank page.

## 1. 緒言

これまでにナトリウム冷却型高速炉開発に向けたナトリウム機器開発、構造材料や熱流動特性 に関する試験研究が、種々のナトリウム試験施設・装置を駆使して実施されてきた。その後、所 期の目的を達成した多くの大小ナトリウム試験施設・装置の解体撤去が順次進められ、豊富な経 験や知見が蓄積されている<sup>1)~5)</sup>。しかし、その多くはナトリウム試験装置の機器・配管類の解体 技術に関するものであり、100m<sup>3</sup>級の大型ナトリウム貯蔵タンク(以下「大型 Na タンク」という。) の解体に関する経験や知見が不足しているのが現状である。

試験装置の解体に当たり、系統及び機器内のナトリウムはドレン(排出)されていることが安 全性や作業効率性の面で重要である。通常、試験装置の機器・配管類の場合は構造的な滞留部位 を除き、ドレン系統が接続されているため十分なナトリウムドレンが可能である。一方、ナトリ ウムタンク(以下「Na タンク」という。)の場合は、試験装置へのナトリウムの供給や貯蔵・保管 を行う役目の機器であり、ドレン系統が設置されていない。このため、保有するナトリウムにつ いては、Na タンク内に設置された試験装置へのナトリウム供給及びナトリウムドレンを行う配管 (以下「充填ドレンノズル」という。)を使用して、他の容器へ移送することになる。しかし、こ の充填ドレンノズルは、高温のナトリウム流動による熱衝撃緩和を目的とした内部構造物への干 渉や配管自体の熱伸び等を考慮し、Na タンク底部から少し高い位置に設置されており、移送後も 底部にナトリウムが残留することとなる。特に、Na タンクが大型になるほど残留するナトリウム 量は増大し、100m<sup>3</sup>級では数百 kg から 1ton 程度と予想される。また、強度を確保するため構造が 厚肉となることから、解体時における切断・溶断などに伴う熱的影響が増大し、残留ナトリウム の発火・燃焼に至ることが懸念される。したがって、底部に残留する大量のナトリウムをできる 限り低減した上で、解体処理を行う必要がある。

本報告では、研究開発に用いられてきた3基の100m<sup>3</sup>級大型Naタンクの解体に向けた残留ナト リウム量の低減技術について述べる。この技術は、解体処理に伴うナトリウム燃焼のリスク低減 に資することができるとともに、今後の廃止措置<sup>6)</sup>を進めている高速増殖原型炉もんじゅの大型 Naタンク等の解体に有益な知見が得られるものである。

#### 2. 大型ナトリウムタンクの仕様と残留ナトリウム量の推定

#### 2.1 大型ナトリウムタンクの仕様

対象となる大型 Na タンクは、50MW 蒸気発生器試験施設<sup>7)</sup>の一次系ナトリウム貯蔵タンク (以下「50MWSG-01」という。)、二次系ナトリウム貯蔵タンク(以下「50MWSG-02」という。) 及びもんじゅ遮蔽プラグ総合断熱試験装置<sup>8)</sup>のナトリウム貯蔵タンク(以下「SPINTA」とい う。)の計3基である。それぞれの大型 Na タンクは、高速増殖原型炉もんじゅの研究開発とし て試験系統部にナトリウムを安定供給するために長年用いられたものであり、所期の目的を達 成している。大型 Na タンクの仕様を表 2.1 に、構造図を図 2.1 ~ 図 2.3 に、外観写真を図 2.4 にそれぞれ示す。これらの大型 Na タンクは、外径約3,500~3,900mm、全長約8,000~11,000mm、 容積約 70~100m<sup>3</sup>、本体重量(内包 Na 重量除く)最大約 40ton と非常に大型である。材質は、 いずれもオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)で、試験系統部へのナトリウムの充填・ドレ ンを行うためのノズルやナトリウム液面監視用ノズルなどが設置されている。これらの大型 Na タンクは、1974~1975年度に運転開始され、累積約 40,000~46,000時間の運転履歴を有し ている。運転温度はいずれも約 200℃である。

#### 2.2 残留ナトリウム量の推定

- (1) 充填ドレンノズル位置から推定する残留ナトリウム量
  - 大型 Na タンクに保有されていたナトリウム(3 基合計約 190ton)は、冷却系機器開発試験施設マザー試験ループのナトリウム貯蔵タンクに移送され、再利用が図られている<sup>9)</sup>。しかしながら、ナトリウムの移送に使用した充填ドレンノズルの先端は、構造図によると底部から 90~110mm 程度の高い位置に配置されていることから、図 2.5 に示すように移送できなかったナトリウムが底部に残留していると予測される。これらの残留ナトリウム量について、 圧力容器用鏡板の計算式<sup>10)</sup>を参考とし容量計算を行った。

各タンクの充填ドレンノズルの設置位置(50MWSG-01 及び 50MWSG-02:110mm、SPINTA: 90mm)から計算の結果、図 2.6 に示す通り、室温時のナトリウム密度(0.97g/cm<sup>3</sup>)で換算す ると、各タンクの抜取り前の残留ナトリウム量は約 520~850kgであると推定される。

(2) 内部観察結果から推定する残留ナトリウム量

底部の残留ナトリウムの状況を確認するため、CCDカメラを上部管台から挿入し観察した。 50MWSG-01 タンクの映像記録例を図 2.7 に示す。

底部にはある幅を持って残留しているナトリウムが確認された。映像及び構造図の寸法か らナトリウムの残留幅を推定すると約1,200mm であり、残留ナトリウム量は概ね820kgと推 定される。この残留ナトリウム量は、前述した充填ドレンノズル高さから計算した値とほぼ 一致する。他の大型 Na タンク (50MWSG-02 及び SPINTA)でも同様なことが確認された。

このように、構造図及び観察により機器内部に残留するナトリウム量を把握しておくこと は、熱的影響が大きい切断・溶断を伴う解体工法での発火・燃焼防止対策や残留ナトリウム の処理・処分方法を検討する上で非常に重要であると考える。

## 3. ナトリウム抜取り方法の検討及び抜取り条件

#### 3.1 残留ナトリウム低減の考え方

Na タンクに残留するナトリウムの低減方法は、Na タンク上部の管台から抜取専用配管(以下「抜取ノズル」という。)を底部まで挿入してガス差圧によって別容器へ抜取る方法や、底部等に貫通孔を設けて自重によって排出させる方法などがある。後者の方法は、過去に内容積約 20m<sup>3</sup>の中規模タンクで経験を有する<sup>11)</sup>が、大型 Na タンクに対しては、厚肉(最大 37mm)構造であることによる貫通孔加工時の残留する Na への入熱による溶融漏えいや発火及び限られたスペースの中での重量級タンク移動に対する安全対策が非常に困難である。このため、前者の抜取ノズルを設置して抜取る方法を考案し、残留ナトリウムの低減を図ることとした。

抜取り後、タンク内に残留するナトリウムは可能な限り低減されていることが望ましく、残 留ナトリウム量は抜取ノズルの設置位置(タンク底面からの高さ)に影響を受ける。対象タン クにおける抜取ノズルの設置位置と残留ナトリウム量の関係を図3.1に示す。抜取ノズルの設 計に当たり、万が一、解体作業中に残留ナトリウムが着火した場合でも、これまでのナトリウ ム燃焼時の取扱技術<sup>12)</sup>をもとに仮設排煙処理設備や不活性ガス設備を用いて燃焼を抑制でき ること及び残留ナトリウムの処理・処分作業を安全かつ効率的に1日で完結できる(保管管理 を要しない)ことを前提条件とし、抜取り後の残留ナトリウム量の目標値を30kg以下にする ことを基本的な考えとした。

#### 3.2 抜取ノズルの設計

底部に残留するナトリウム量を目標値 30kg 以下にする抜取ノズルの設置位置は、図 3.1 の とおりタンク底部から 12~16mm 以下となるが、据付誤差や抜取り時のガス巻き込みを考慮す ると更にタンク底部に近づける必要がある。また、抜取ノズルは、カバーガス空間に曝される 長さが約 4,200~4,600mm と長尺となり、かつ、外壁面からカバーガス雰囲気を介しての間接 予熱となるため、熱伝達の効率が悪く予熱温度が目標温度に達し難い。これにより、抜取ノズ ルがコールドポイントとなり、残留ナトリウム中に溶解している不純物が析出し閉塞する可能 性が高い。

これらの課題を考慮し、抜取ノズルの吸込み部先端部(以下「ノズル部」という。)形状、 抜取ノズルの設置方法及び不純物による閉塞防止について検討する。

(1) 抜取ノズルのノズル部形状

抜取り後 Na タンク内に残留するナトリウム量については、抜取ノズル吸込み部の設置高 さによって大きく変化するため、抜取ノズルの先端はなるべく底部に設置することが効果的 である。今回対象となる大型 Na タンクは、直径が約 3,500~4,000mm と大きいことから底部 が比較的平面に近い形状であり、ナトリウム溶融時にノズル部を底部に押し当てた際、安定 した状態で設置することが可能となる。また、抜取り時、ナトリウム液面がノズル部付近ま で低下すると、ノズル部周辺の液面が局所的に低下してガスを巻き込みやすくなり目標値ま でナトリウムを抜取ることができなくなる可能性があるが、これまでの知見<sup>13)</sup>において、 ガス巻き込み抑制にはベルマウス形状(ラッパ状)のように吸込み部の開口面積を広く取る ことや吸込み口付近に水平板を設置するなどして抜取り時の吸込み口付近の流速を抑える ことが有効と考えられる。

これらを参考に、底部に押し当てた際の安定性及び抜取り終了時のガス巻き込み抑制を考慮した2つのノズル部を考案し、抜取り性能について水を用いた予備試験を試みた。

各ノズル部の形状については図 3.2 に示すとおり、先端に広角の扇形の溝を掘った平板を 取り付けること及び吸込み高さが 3mm以下となることを基本に設計した。具体的に No.1 は、 先端形状を加工しない配管(円管)よりも開口面積を広く(約2倍)とるため4つの扇形の 溝を設けている。No.2 は、先端形状を加工しない配管(円管)と同程度の開口面積の扇形の 溝とし、ナトリウム吸込み部の高さを 1.5mm まで下げる設計としている。

予備試験は、水を張った円筒容器(内径 φ 149mm×高さ 300mm)の底部にノズル部を押し当 てるようにセットし、容器内を加圧しながら抜取り状況を確認した。試験容器構造図及び外 観写真を図 3.3 に示す。試験時の圧力及び抜取り流量は、実際のナトリウム抜取りと同様に なるようガス差圧約 0.04MPa 及び流量約 3L/min に調整した。試験はノズル部からのガス巻 き込みが生じるまで実施し、抜取り終了後、容器内の残水量を確認した。同条件の試験を 2 回実施した結果を表 3.1 に示す。

試験容器形状及び残水量から残水の高さ(残水深さ)を算出すると、最大でも1.9mm となり、いずれのノズル部構造においても良好な結果が確認され、抜取後の残留ナトリウム量の目標値(30kg以下)を満足する見通しを得た。これらのことから、より多く抜取ることができた No.2のノズル部形状を採用することとした。

(2) 抜取ノズルの設置方法

抜取ノズルは、4,000mm 程度かそれ以上に長く、室温から 200℃の予熱過程における温度 変化で 10mm 程度の熱伸びを伴う。また、抜取ノズル施工時のナトリウムは、常温のため固 相状態であることから残留ナトリウムを目標値まで抜取るには、予熱昇温により液相状態へ 変化させ温度が安定した後、ノズル部を底部まで押し込み再セットすることが有効となる。

このことから、抜取ノズルを固定する管台部に可動シール構造(ボアードスルー)を採用 し再セット可能な構造とした。ボアードスルーの継手部は、テフロンパッキン(PTFE 製)が 使用されており、耐熱温度は約260℃に制限され、耐ナトリウム性についても必ずしも優れ てはいないが、抜取ノズルの予熱温度をなるべく低く抑えて使用することにより、ナトリウ ムバウンダリを維持しながらノズルを可動させることが可能となった。これらの構造と実際 に使用したテフロンパッキンを図3.4に示す。

(3) 不純物による閉塞防止

ナトリウム抜取り時の抜取ノズル閉塞は、ナトリウム中に飽和状態で溶解している不純物 が影響し、僅かな温度低下で過飽和となり、コールドポイントに析出し閉塞する可能性があ る。

今回抜取りを行う大型 Na タンク内に残留するナトリウムの不純物濃度(酸素)は、2.5~ 11.7ppm の範囲であることが確認されており<sup>9)</sup>、図 3.5 に示す飽和溶解度曲線<sup>14)</sup>から求める プラグ(閉塞)温度は150℃~200℃となる。したがって、抜取ノズルの温度を200℃以上に 保持することが必要である。しかしながら、大型 Na タンクへ設置する抜取ノズルの一般的 な予熱は、タンク外壁面に設置されたヒータによるカバーガス雰囲気を介した間接予熱とな るため、熱伝達の効率が悪く、予熱不足によるコールドポイント発生が懸念される。このた め、抜取ノズルを二重管構造とし、内管の外側に予熱ヒータを設置することで温度を200℃ 以上に保ち、不純物析出による閉塞を防止する設計とした。今回製作した抜取ノズルの製作 図を図 3.6 に示す。抜取ノズルの全長は対象タンクの寸法に合わせ設計し、内管(外径 12.7mm)はナトリウム流路、外管(外径25.4mm)は内管に取り付けた予熱ヒータ及び温度管理 用熱電対とナトリウムとの接触を防止する二重構造である。

また、残留ナトリウム中には試験装置の保守・補修等により混入した空気や湿分により生成されるナトリウム不純物が析出・固化してできるナトリウム化合物(NaOH、Na<sub>2</sub>0等)が存在している可能性があり、抜取ノズルの閉塞を招くことも予想される。このため、図 3.7 に示すようなノズル部にステンレス製のメッシュ(#20、線径 0.6mm)を取付け、抜取り時のノズル部閉塞を防止する対策を施した。

#### 3.3 抜取り装置の構成及び抜取り条件

抜取り装置の系統は、上記で検討製作した抜取ノズルを各大型 Na タンクへ設置後、3 基の タンクを SUS304 配管 (1/2B) で連結し、共通ヘッダー(外径 48.6 mm×厚さ 3 mm)を介して UN 規 格・基準に適合した鋼製ドラム缶 (0.2m<sup>3</sup>)(以下「ドラム缶」という。)に残留するナトリウム を抜取る構成とした。ドラム缶は、共通ヘッダーを介して 2 缶を並列に設置し、抜取り操作が 連続的に行える設計とした。抜取り装置の系統図を図 3.8 に示す。

抜取り時のナトリウム温度は、ナトリウム中に溶け込む不純物量を抑えるため、150℃に設 定し、系統温度は抜取り時のナトリウム温度以上に昇温することで閉塞防止効果を図るため 200℃以上の設定とした。このことから、系統の最高使用温度は、250℃としている。

ナトリウムの抜取りはガス差圧法にて行い、大型 Na タンクの圧力調整及び抜取り終了時に 行う系統フラッシング操作のため、ガス系設備を設置した。抜取り時の圧力は、大型 Na タン クの水頭を考慮し約 0.05MPa で加圧する。このため、系統の最高使用圧力は 0.1MPa としてい る。また、抜取り作業中は、ガス差圧維持のためドラム缶内を微正圧になるよう調整する必要 がある。この際、ナトリウム蒸気を大気に直接放出しないよう、ドラム缶の排気系統の出口に ベーパートラップを設置している。

抜取ノズル挿入部や抜取り用ドラム缶の接続部には、図 3.9 に示すフレキシブルホース(ス テンレス製伸縮ホース)を採用し、温度変化に伴う熱伸びの緩和及びドラム缶交換後の配管再 接続時の効率化を図った。また、ドラム缶下部に台秤を設置し、抜取り中の重量変化を連続監 視するとともに、危険物の運搬容器の基準に余裕をもたせ、ドラム缶容積の約 85%の位置(一 缶当たり約160kg)に熱電対を設置し、オーバーチャージを防止している。

抜取り時のナトリウムの漏えい対策は、ナトリウム系統配管及びドラム缶下部に鋼製受皿を 設置するとともに、系統配管の溶接部、機械的継手部及びフレキシブルホース下部に電気短絡 式の検知器を取り付け、ナトリウム漏えいを早期に検知する設計とした。

温度制御設備として、各大型 Na タンク及び抜取系統にはナトリウムを 200℃以上に溶融可 能な電気式予熱ヒータ及び保温材を施工し、予熱ヒータの温度制御は大型 Na タンク毎、系統 毎に独立させ、それぞれの温度状態を監視できるよう設計している。抜取り系統の予熱昇温速 度は概ね 50℃/h とした。なお、抜取り用ドラム缶は、ナトリウム受け入れ後冷却固化させる ため予熱は行わない設計とした。

これらの考えを基に製作した抜取り装置を用い、表 3.2 に示す抜取り条件で残留ナトリウムの抜取りを実施した。ナトリウムの抜取り速度は約 3~5kg/分となるよう弁の開度調整を行い、 ドラム缶の制限重量(160kg 未満)まで充填した。充填されたドラム缶は、内部のガス圧力を調 整しながら固相状態になるまで冷却した後、指定場所に移動・保管した。

#### 4. ナトリウム抜取り結果及び低減技術の有効性検討

#### 4.1 残留ナトリウムの抜取り結果

今回製作した抜取ノズルを用いて、各大型 Na タンクからドラム缶ヘナトリウムの抜取りを 行った。ナトリウム抜取り過程においては、ドラム缶の重量変化及び温度変化を遂次監視し、 ノズル部からのガス巻き込みをもって完了と判断した。各大型 Na タンクからのナトリウム抜 取り量の計測結果を表 4.1 に示す。

3 基の大型 Na タンクからの残留ナトリウム抜取り期間は、予熱時間を含めて正味8日間で、 抜取り量の合計は 1,533.6kg(ドラム缶で合計 11 本)であった。抜取り操作は、ドラム缶へ の抜取系統を2系統設置したことで継続的に行うことができた。また、接続部にフレキシブル ホースを採用したことにより、抜取ノズルの可動範囲を拘束することなく、ドラム缶の交換操 作を安全にかつ効率的に行うことができた。

抜取りに使用したノズル部の金網メッシュの外観写真の一例を図4.1に示す。金網メッシュ の内側に僅かな量のナトリウム付着が観察された。これは、抜取り終了後に抜取ノズル内面に 付着していたナトリウムが滴下したものであり、メッシュ外側には目視できるような塊状のナ トリウム化合物の付着は無かった。また、今回の抜取り操作においてナトリウム流量が低下す るなど閉塞の兆候はみられず、概ね3~5kg/分の安定した状態で抜取ることができた。

#### 4.2 抜取り後のナトリウム残量評価

(1) 検針棒による残留ナトリウム計測

ナトリウムの残留高さは、図 4.2 に示すとおり、先端がドリル状になった長尺の検針棒を タンク上部管台からナトリウム固相内まで挿入し、検針棒に付着したナトリウムの長さを測 定し確認した。測定結果は、50MWSG-01 で約 7mm、50MWSG-02 で約 1mm、SPINTA で約 10mm で あった。これらの高さを基に、圧力容器用鏡板の計算式<sup>10)</sup>を参考に抜取り後における残留 ナトリウム量の評価を行った。室温時のナトリウム密度(0.97g/cm<sup>3</sup>)を用いて算出した残留 ナトリウム量は、50MWSG-01 で約 13kg、50MWSG-02 で約 1kg、SPINTA で約 22kg であった。 50MWSG-01 及び SPINTA タンクの残量については、50MWSG-02 タンクに比べ若干多かったが、 ノズル部をタンク底部に設置する際に生じた僅かな誤差と考えられ、当初目標としていた抜 取り後の残ナトリウム量目標値の 30kg について満足する結果であった。

(2) 内部観察

抜取り後における底部の残留ナトリウムの状況について、CCD カメラを用いて観察を実施 した。残留ナトリウム状況を図 4.3~図 4.5 に示す。抜取り前の状況 (図 2.7 参照) に比べ、 熱衝撃緩和板の底部や既存の充填・ドレンノズルの下部にそれぞれ隙間が観察されたことか ら、残留ナトリウムが抜取られ減少していることが確認できた。

また、残留するナトリウムを観察すると、50MWSG-02タンクに比べ、50MWSG-01 及び SPINTA タンクに残留するナトリウムの表面には凹凸が見られたことからナトリウム化合物等が存 在していた可能性があるが、抜取り時にノズルが閉塞することは無かったため、ノズル部の 閉塞防止対策が有効であったと推察する。

#### (3) 検針棒による残留ナトリウム計測の有効性

検針棒による残留ナトリウム計測の有効性を評価するため、大型 Na タンク解体時にスケ ールを用いて残留ナトリウム高さを実測した。各タンクによって全長が異なるため、軸方向 におけるタンク中央位置より一定の間隔(約1~2m)毎に3箇所以上測定し、平均高さを求 めた。測定箇所によって数 mm 程度のばらつきがみられたが、残留ナトリウム高さは、50MWSG-01 で約7.1mm(10点の平均値)、50MWSG-02で約4.0mm(8点の平均値)、SPINTAで約12.3mm (3点の平均値)であった。

これらの残留ナトリウム高さを基に、圧力容器用鏡板の計算式<sup>10)</sup>を参考に残量評価を行った。評価結果を表4.2 に示す。それぞれの残留ナトリウム高さから算出した残量は、50MWSG-01 で約14kg、50MWSG-02 で約4kg、SPINTA で約29kg であり、抜取り後(解体前)に検針棒を用いて計測した残留ナトリウム高さより算出した残量とほぼ同等の結果であった。このことから、検針棒を用いた残留ナトリウムの高さ測定及びタンク内部の映像確認は、解体前における残量評価に対して有効であると考えられる。

なお、大型 Na タンクの解体・処理技術などの詳細については次報にて報告予定である。

#### 4.3 残留ナトリウム低減技術の有効性評価

今回製作した抜取ノズルを使用することで、各大型 Na タンクに残留していた数百 kg から 1ton 程度の残留ナトリウムを約 29kg 以下まで低減することができ、燃焼抑制や残留ナトリウ ムの処理・処分作業の効率化の観点で設定した目標値 30kg 以下を達成できる見通しを得た。 これは、今回考案したガス巻き込みを抑制するノズル部形状(広角の扇形状溝付の平板)及び 抜取ノズル取付部の可動シール構造並びに不純物による閉塞防止効果(予熱ヒータ内挿の二重 管構造及びメッシュ設置)が有効に機能したことによるものと考える。また、Na タンク解体 前のナトリウム残留量の評価として、検針棒を用いた残留ナトリウムの高さ測定及び内部映像 確認による方法の有効性が確認され、評価した結果は機器解体時の安全性向上及び作業効率化 に資すると思われる。

#### 4.4 ナトリウム機器解体計画への反映

現在廃止措置を進めている高速増殖原型炉もんじゅを始め、大型ナトリウムプラントに設置 された各機器の残留ナトリウム状況を想定すると、主要機器にはドレン機構が設けられている 場合が多いが、エコノマイザ内筒下部やコールドトラップ下部のように内部構造やドレンノズ ルの位置によっては物理的にナトリウムが残留する機器が考えられる。更に、これらの機器が 大型である場合、残留ナトリウムは大量となり、解体時におけるナトリウム燃焼に伴うリスク が高まる。

今回考案した抜取ノズルは、対象機器の大きさによって長尺となるため、設置するための空

間が必要となるが、残留ナトリウム部へアクセス可能な箇所(予備管台やドレンノズル内部等) に設置できれば、大幅にナトリウムを低減することが可能となり、ナトリウムドレン構造を有 していない大型機器解体処理時の安全性向上及び作業効率化が期待できる。

## 5. 結言

大型 Na タンクの解体において、底部に残留するナトリウムを可能な限り低減することは、解体時のナトリウム発火・燃焼を抑制するとともに、残留ナトリウムの処理・処分作業を安全かつ 効率的に進めるために効果的な手段である。今回は 100m<sup>3</sup> 級大型 Na タンク(3 基)を対象に、専 用のナトリウム抜取ノズルを設計・製作し、これを用いて底部に残留するナトリウムの低減技術 を試み、以下の知見が得られた。

- (1) 抜取ノズルのノズル部に対し、底部に押し当てた際の安定性及び抜取終了時のガス巻き込み抑制を考慮した扇形状溝付平板構造を考案し、更に、抜取ノズルを固定する管台部に可動シール構造(ボアードスルー)を採用したことで、熱伸びの回避やナトリウムの相状態に合わせた設置が可能となり、残留していた数百kgから1ton程度のナトリウムを、それぞれ約29kg以下まで低減できることを確認し、解体作業中に残留ナトリウムが着火した場合についても、仮設排煙処理設備や不活性ガス設備を用いた燃焼抑制や残留ナトリウムの処理・処分作業を安全かつ効率的に1日で完結させるための目標値30kg以下を達成できる見通しを得た。また、抜取ノズルを二重管構造とし、内管部に予熱ヒータを設置することで温度を一定以上に管理でき、不純物析出による閉塞を防止することができた。
- (2) 抜取後の大型 Na タンク内部の検針棒による測定結果及び映像確認により、残留ナトリウムが大幅に減少していることが確認され、残留ナトリウムの高さは1~10mm であることが予測された。この予測値は、対象タンクの解体時に測定した値(4~12mm)と概ね合致しており、解体前におけるナトリウムの残量評価手法として有効であることが確認できた。
- (3) 廃止措置を進めている高速増殖原型炉もんじゅを始め、大型ナトリウムプラントに設置された主要機器にはドレン機構が設けられている場合が多いが、内部構造やドレンノズルの位置によっては物理的にナトリウムが大量に残留し、解体時におけるナトリウム燃焼に伴うリスクが高まる。今回考案した抜取ノズルは、残留部位へアクセス可能な箇所(予備管台やドレンノズル内部等)に設置できれば、残留ナトリウムを大幅に低減することが可能であり、大型機器解体処理時の安全性向上及び作業効率化が期待できる。

#### 謝辞

今回の残留ナトリウムの低減技術の検討及び確認に当たり、多大なご指導及び助言を頂いた原 子力機構 0Bの吉田英一氏に深く感謝致します。

また、残留ナトリウム低減技術の確認作業にご協力を頂いた東興機械工業株式会社の関係者の 皆様に深く感謝致します。

#### 参考文献

- 吉田英一ほか、ナトリウム洗浄処理技術に関する経験・知見の整理、JAEA-Technology 2012-033, 2012, 177p.
- 2) 平川康ほか,大型ナトリウム機器の解体・洗浄手法の開発,サイクル機構技報 No.15, JNC TN1340 2002-001, 2002, pp. 27-39.
- 3) 軍司稔ほか,高速炉大型ナトリウム機器の解体・洗浄 50MW 中間熱交換器(IHX)の解体・洗 浄, JNC TN9410 99-013, 1999, 65p.
- 4) 軍司稔ほか,50MW 蒸気発生器試験施設中間熱交換器(IHX)の解体・洗浄記録, JNC TN9450 98-009,1998,141p.
- 5) 永井桂一ほか,50MW 蒸気発生器試験施設の解体撤去;大型コールドトラップの解体洗浄,JNC TN9410 2000-003,1999,52p.
- 6) 佐久間祐一ほか、高速増殖原型炉もんじゅの廃止措置に向けた取組みについて、デコミッショニング技報 第58号,2018, pp.46-55
- 7) 田中健二, 50MW 蒸気発生器 1 号機の試験について, 動力炉技報 No. 16, PNC TN134 75-04, 1975, pp. 42-55
- 8) 深田富敬ほか,高速増殖炉研究開発の概況(5)-炉体構造・機器(1982年迄)-, PNC TN241 83-21,1983,513p.
- 9) 今村弘章ほか,大量ナトリウムの施設間移送, JAEA-Technology 2015-020, 2015, 85p.
- 10) 日本鏡板工業, 圧力容器用鏡板の計算式について, TECHNICAL INFORMATION FOR HEADS VOL. 1, 2008, p. 3
- 下山一仁, SWAT-3の解体とナトリウム化合物の処理, サイクル機構技報 No. 13, 2001, JNC TN1340 2001-009, pp. 33-40.
- 12) 今津彰ほか,ナトリウム技術読本, JNC TN9410 2005-011, 2005, p. 6. 5-1-6. 5-26
- 13) 江連俊樹ほか,ガス巻きこみ現象に関する基礎的研究;自由表面渦による非定常ガス巻き込 み現象の評価, JAEA-Research 2006-067, 2006, p. 1.
- 14) 動力炉・核燃料開発事業団 高速増殖炉開発本部、ナトリウムに対する酸素の溶解度標準曲線、PNC TN241 76-05, 1976, 8p.

タンク名称	50MWSG-01	50MWSG-02	SPINTA
試験装置	50MW 蒸気発生器	50MW 蒸気発生器	もんじゅ遮蔽プラグ
	試験施設	試験施設	総合断熱試験装置
用途	一次系ナトリウム	二次系ナトリウム	ナトリウム貯蔵タンク
	貯蔵タンク	貯蔵タンク	
タンク形状	全長:11,080mm	全長:7,980mm	全長:8,500mm
及び材質	内径:3,450mm	内径:3,450mm	内径:3,900mm
	肉厚 : 胴部 32mm	肉厚 : 胴部 29mm	肉厚:胴部18mm
	鏡部 37mm	鏡部 34mm	鏡部 18mm
鏡板の形状	2:1 正半だ円体形	2:1 正半だ円体形	皿形
材質	SUS304	SUS304	SUS304
タンク容積	約 98 m <sup>3</sup>	約 69 m <sup>3</sup>	約 95 m <sup>3</sup>
ナトリウム保有	約 74 m <sup>3</sup>	約 60 m <sup>3</sup>	約 78 m³
量(常温時)※	(約66 ton)	(約 55 ton)	(約70 ton)
運転開始年	1974 年度	1974 年度	1975 年度
積算運転時間	約 40,000 h	約40,000 h	約 46,000 h
運転温度	約 200℃	約 200℃	約 200°C

表 2.1 大型ナトリウムタンクの仕様

※ナトリウム密度 (0.97g/cm<sup>3</sup>) 換算

		No.1 ノズル	No.2 ノズル
☞水县["]	1回目	31	23
/ 次小里[g]	2回目	33	24
残水量から換算した残水高さ[mm]		約 1.8~1.9	約 1.3~1.4

表 3.1 抜取ノズルの予備試験結果

項目	設定値	
抜取りナトリウム温度	約 150 °C	
抜取り装置系統及び抜取ノズル温度	約 200 ℃	
ガス圧制御(タンク)	約 0.05 MPa	
ガス圧制御(ドラム缶)	0.03 MPa以下(微正圧)	
抜取り速度	約 3~5 kg/分	
抜取り量	最大 160 kg/缶	

表 3.2 残留ナトリウムの抜取り条件

表 4.1 残留ナトリウムの抜取り結果

タンク名称	抜取り量
50MWSG-01	771.1kg(5 本)
50MWSG-02	323.1kg(3 本)
SPINTA	439.4kg(3 本)

表 4.2 残留ナトリウム高さによる残量評価

タンク	タンク 残留ナトリウム高さ [mm]		
名称	抜取り後	解体時 (平均値)	[kg]
50MWSG-01	7.0	7.1	約 13~14 <sup>※</sup>
50MWSG-02	1.0	4.0	約 1~4*
SPINTA	10.0	12.3	約 22~29※

※ナトリウム密度(0.97g/cm<sup>3</sup>)換算











図 2.4 大型ナトリウムタンクの外観写真(手前から 50MWSG-01、50MWSG-02、SPINTA)



図 2.5 タンク内部の残留ナトリウム



図 2.6 充填ドレンノズルの設置位置と残留ナトリウム量の関係



<観察位置②>

図 2.7 タンク内残留ナトリウム (50MWSG-01 抜取り前)



図 3.1 抜取ノズル設置位置と残留ナトリウム量の関係









<可動シール部の取付け外観及び構造概略図>



<可動シール用パッキン(テフロン)>

図 3.4 可動シール部構造図



図 3.5 ナトリウムに対する酸素の飽和溶解度曲線<sup>14)</sup>



図 3.6 抜取ノズル製作図



図 3.7 ナトリウム抜取ノズルの閉塞防止対策



図3.8 ナトリウム抜取り装置系統図



図 3.9 ナトリウム抜取り装置(上:抜取ノズル挿入部、下:抜取用ドラム缶接続部)





図 4.1 SPINTA 用抜取ノズル先端メッシュ部外観写真(上:外面、下:内面)







図 4.3 ナトリウム抜取り後の残留ナトリウム状況 (50MWSG-01)





図 4.4 ナトリウム抜取り後の残留ナトリウム状況 (50MWSG-02)





図4.5 ナトリウム抜取り後の残留ナトリウム状況 (SPINTA)

This is a blank page.