JAEA-Technology 2012-033



ナトリウム洗浄処理技術に関する経験・知見の整理

Accumulation of Experiences and Knowledge for Sodium Cleaning Treatment Technology

吉田 英一 平川 康 谷田部 敏男

Eiichi YOSHIDA, Yasushi HIRAKAWA and Toshio YATABE

大洗研究開発センター 技術開発部

Technology Development Department Oarai Research and Development Center

ł

November 2012

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政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。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根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 Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, 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, 2012

ナトリウム洗浄処理技術に関する経験・知見の整理

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 技術開発部 吉田 英一、平川 康、谷田部 敏男

(2012年9月21日受理)

日本原子力研究開発機構・大洗研究開発センターでは、これまで実験炉「常陽」、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向けて、ナトリウム機器や装置の開発、ナト リウム環境評価法の開発、構造健全性評価およびナトリウム取扱技術の開発等のためにナトリウ ムを使用した試験装置等を設計・製作して種々の研究開発試験が行われてきた。これまでに所期 の目的を達成された多くのナトリウム設備や機器は順次解体・撤去され、ナトリウム洗浄処理技 術に関する多くの経験・知見が蓄積されてきた。これらを今後のナトリウム試験設備の保守・補 修、改修等の計画策定や安全な作業実施および次世代炉の研究開発に活用していくために、これ までに実施されてきたナトリウム洗浄処理技術に関する経験や知見を横断的に整理・評価すると ともに、技術ポイントの提言をまとめた。

大洗研究開発センター; 〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

JAEA-Technology 2012-033

Accumulation of Experiences and Knowledge for Sodium Cleaning Treatment Technology

Eiichi YOSHIDA, Yasushi HIRAKAWA and Toshio YATABE

Technology Development Department Oarai Research and Development Center Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received September 21, 2012)

In O-arai Research and Development Center/JAEA, lots of sodium test facilities had been constructed and lots of tests using sodium had been carried out for the development of sodium component systems, the evaluation of sodium environmental effect for structural materials and the development of sodium technologies for the experimental reactor JOYO and the prototype reactor MONJU. As the first stage of research and development came to an end for these reactors, those sodium test facilities were dismantled and attached sodium was cleaned. Thus lots of experiences and knowledge of sodium cleaning treatment technologies has accumulated. In order to use those experiences and knowledge effectively for future maintenance and repair sodium technology and research on the next generation fast reactors, those of sodium cleaning treatment technologies for typical systems and components have been evaluated and knowledge related important topics has been rearranged. Based on those evaluation and rearrangement, technical guidelines of sodium cleaning treatment are proposed for the purpose of effective reference of the past experiences and knowledge.

Keywords: Sodium, Sodium Cleaning, Sodium Treatment, FBR

目 次

1	緒	言		
2	ナトリウム試験装置・機器等の解体と洗浄処理の経験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2			
	2.1	計測機器試験ループのナトリウム洗浄処理・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・		
	2.2	蒸気発生器メンテナンス技術実証試験におけるナトリウム洗浄処理・・・・・ 22		
	2.3	50MW 蒸気発生器 2 号機のナトリウム洗浄処理 ······ 36		
	2.4	50MW 蒸気発生器試験施設中間熱交換器のナトリウム洗浄処理 ・・・・・・ 41		
	2.5	大口径電磁流量計校正試験装置(SFCAT)のナトリウム洗浄処理・・・・・・ 59		
	2.6	炉容器ナトリウム中試験装置(SITR)のナトリウム洗浄処理・・・・・・ 66		
	2.7	大型ナトリウムポンプ試験装置(SPTL)のナトリウム洗浄処理・・・・・・ 75		
	2.8	原子炉容器遮蔽プラグ断熱試験装置(SPINTA)のナトリウム洗浄処理・・・・・ 85		
	2.9	2 重管蒸気発生器のナトリウム洗浄処理・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 103		
	2.10	大型コールドトラップのナトリウム洗浄処理・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 111		
	2.11	NaK 総合流動伝熱試験装置のナトリウム・カリウム合金の洗浄処理 131		
	2.12	小型試験材等のナトリウム洗浄・・・・・ 143		
3	機器	毎におけるナトリウム洗浄処理技術の整理・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・146		
	3.1	配管および弁		
	3.2	タンクおよび容器・・・・・ 148		
	3.3	ポンプ・・・・・ 149		
	3.4	コールドトラップ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 150		
	3.5	熱交換器および蒸気発生器		
	3.6	各種構造の試験体・・・・・ 151		
	3.7	NaK 機器 · · · · · · · · · · · · · · · · · 152		
4	ナト	リウム洗浄処理技術の検討と技術ポイントの提言 153		
	4.1	ナトリウムドレン条件の影響		
	4.2	ナトリウム付着量の予測と残留状況の把握・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・154		
	4.3	ナトリウムの安定化処理方法に係る検討と整理・・・・・・・・・・・・・・・・ 157		
	4.4	ナトリウム洗浄処理方法に係る検討と整理・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 161		
	4.5	ナトリウム洗浄処理施設および撤去・運搬に係る検討と整理・・・・・ 167		
	4.6	被洗浄物の切断・解体および残留ナトリウム除去に係る検討と整理・・・・・ 168		
	4.7	洗浄処理状況の監視と終了判断の検討		
	4.8	被洗浄物の洗浄処理後の廃棄および洗浄処理廃液の処理・・・・・・・・・・ 170		
5	結	言		
謝	辞…			
参考	今文献			

Contents

1.	In	troduction ······1
2.	Еx	xperience of sodium cleaning treatment technology
	2.1	Disassembly and sodium cleaning treatment of sodium instrumentation
		test loop ······4
	2.2	Sodium cleaning treatment demonstration of steam generator test
		apparatus ·····22
	2.3	Disassembly and sodium cleaning treatment of 50MW steam generator (No.
		2) test facility ····································
	2.4	Disassembly and sodium cleaning treatment of intermediate heat
		exchanger for 50MW steam generator test facility41
	2.5	Disassembly and sodium cleaning treatment of large electromagnetic
		sodium flow-meter calibration test loop
	2.6	Disassembly and sodium cleaning treatment of structural integrity test rig ······66
	2.7	Disassembly and sodium cleaning treatment of large-sized sodium pump
		test loop ·····75
	2.8	Disassembly and sodium cleaning treatment of shield plug heat insulation
		test apparatus ······85
	2.9	Disassembly and sodium cleaning treatment of double tube steam
		generator apparatus ······103
	2.10	D Disassembly and sodium cleaning treatment of large cold-trap
	2.11	l Disassembly and sodium cleaning treatment of NaK flow and heat
		transfer test loop ······131
	2.12	2 Sodium cleaning treatment of test specimen
3.	A	rrangement of experience and knowledge on sodium cleaning treatment
te	chno	blogy
	3.1	Pipe and solum valve 148
	3.2	Sodium tanks and vessels
	3.3	Sodium pump ····· 149
	3.4	Cold-trap ······150
	3.5	Heat exchanger and steam generator150
	3.6	Test section
	3.7	NaK loop ····· 152
4.	Di	is cussion and technical proposal for sodium cleaning treatment technology $\cdots \cdots 153$
	4.1	Influence of final sodium drain conditions153
	4.2	Presumption of remained sodium 154
	4.3	Sodium stabilizing treatment method by carbon dioxide157
	4.4	Sodium cleaning treatment method161
	4.5	Sodium washing processing institution167
	4.6	Demolition of test apparatus and sodium removal method168
	4.7	Surveillance and judgment under sodium cleaning treatment
	4.8	Management of apparatus and waste fluid after sodium cleaning treatment $\cdots 170$
5.	Co	onclusion 176
Ac	kno	wledgement 176
Re	efere	ence

1. 緒 言

日本原子力研究開発機構・大洗研究開発センター(以下、「原子力機構・大洗」という)におい ては、これまでに高速実験炉「常陽」および高速原型炉「もんじゅ」の開発に向けて、ナトリウ ム取扱の技術開発は勿論のこと、これらの技術を駆使して目的に応じた種々の試験装置を設計・ 製作ならびに試験運転を行い、ナトリウム機器の開発、ナトリウム中における材料特性評価や構 造健全性評価手法の開発等に係る多くの研究開発を進めてきた。

これらの試験装置には、一般の産業に使用されている設備や機器と異なり、消防法の危険物第 3類(自然発火性・禁水性物質)として法的な規制を受けている「ナトリウム(Na)」の他、「ナト リウム化合物(Na₂0, NaOH 等)」が残留、付着している。そのため、解体、廃棄に先立ち、ナトリ ウム試験装置や機器、部材等(以下、「ナトリウム機器等」という)に付着しているナトリウムや ナトリウム化合物の安全な洗浄処理が必要である。これまでに、所期目的を達成した多くのナト リウム機器等が逐次撤去・解体され、ナトリウム洗浄処理技術について豊富な経験や知見が蓄積 されてきた^{1)~9)}。それらの経験は今後のナトリウム試験施設および「常陽」や「もんじゅ」にお ける保守、補修、改造等の作業計画、および次世代炉の研究開発試験の機器設計や試験技術に活 かしていくことが重要である。そのためには、培われてきた経験、知見を整理することが必要で あるが、単に経験、知見の羅列にとどまらず、その経験、知見が容易に参照することのできるよ うに、集約されることが望ましい。

そこで、本報告書では上記の目的のために、ナトリウム洗浄処理技術に関する代表的な研究開 発用のナトリウム試験装置や機器(実機プラントの「常陽」や「もんじゅ」を除く)についての 経験実例をまとめるとともに、得られた豊富な経験および知見を横断的に整理し、それを踏まえ て、ナトリウム洗浄処理に係る技術ポイントをまとめた。実際には被洗浄処理物となるナトリウ ム機器等の構造や特性、さらにナトリウム付着状態などを十分に検討した上で適合した洗浄処理 手法が必要となるが、これらを検討する上、本報で整理された技術内容が今後のナトリウム機器 等の洗浄処理時における洗浄処理計画書の策定や、作業において留意すべき技術的な事項の参考 になるものと思われる。

2. ナトリウム試験装置・機器等の解体と洗浄処理の経験

ここでは、これまでのナトリウム洗浄処理技術に関する経験、知見を体系化するためのデータ ベースとして、過去に実施された数多くのナトリウム洗浄処理技術に関する経験や知見について 調査・集積した。表 2-1には、これまでに原子力機構・大洗のナトリウム技術開発関連の施設に おいて、ナトリウム試験装置等の改造や撤去等に伴ってナトリウム洗浄処理が実施されてきた主 要な試験施設および機器の例を示す。小規模な試験装置や機器から大規模な試験装置等まで豊富 な経験を有している。表に示した試験装置や機器のうち、特徴を有する代表的なナトリウム洗浄 処理経験という視点から〇印で示した試験装置または機器を選択し、そこで得られた経験・知見 を以下の各項で記載する。

まず初めに、2.1 項では比較的小規模なナトリウム試験装置の代表として、小口径のナトリウ ム配管や加熱器機器のナトリウム洗浄および貯蔵タンクからのナトリウム抜き取りと貯蔵タンク の解体・洗浄の経験例を記載した。2.2 項から 2.4 項では、50MW 級の蒸気発生器および過熱器に 関する解体・洗浄の経験例を、2.5 項から 2.8 項では、大規模なナトリウム試験装置の代表とし て、大型で複雑構造を有する機器等の解体・洗浄例を記載した。さらに、特徴的な解体・洗浄の 経験例として、2.9 項に 1 MW 級の 2 重伝熱管蒸気発生器の解体・洗浄を、2.10 項には解体・洗浄 が困難とされる大型コールドトラップの解体・洗浄を、および 2.11 項には常温で液体である NaK 共晶合金を取り扱った試験装置の解体・洗浄の経験例を記載した。最後の 2.12 項では、材料試験 片などの小さな被洗浄物を対象とした洗浄経験例を記載した。これら以外にも、表 2-1 に示した ように多くの試験装置等の解体・洗浄経験を有しており、これまでに得られている経験や知見は 豊富に構築されているものと考えられる。なお、ナトリウム洗浄処理に関する一般的な技術事項 に関しては「ナトリウム技術読本¹⁰⁾」に記載されているので参照されたい。また、ここでは取り 上げなかった実験炉「常陽」の洗浄経験¹¹⁾や海外における放射性ナトリウムの洗浄処理処分技術 ¹²⁰については別途報告されているのでこれらを参照されたい。

以下の各項においては、洗浄処理作業の流れを以下の統一的な記載手順(A~F)に従って述 べることとする。

A:洗浄処理条件の設定
B:洗浄処理方法の選定
C:洗浄処理施設の設定
D:洗浄処理前作業
E:洗浄処理作業
F:洗浄処理後作業

表 2-1 代表的なナトリウム洗浄処理経験の装置・機器リスト

施設名	本報の対象装 置等 ^{註)}	装置・機器名				
1MW蒸気発生器		1MW 蒸気発生器				
試験施設	○2.9項	2 重管蒸気発生器				
	(2.10 項付録)	1次系および2次系用コールドトラップ				
		50MW蒸気発生器1号機(蒸発器、過熱器)				
	○2.2項	50MW 蒸気発生器 2 号機 (蒸発器)				
	○2.3項	50MW 蒸気発生器 2 号機(蒸発器、過熱器)				
		50MW 蒸気発生器試験施設				
50MW蒸気発生器	○2.4項	中間熱交換器				
試験施設		機械式ポンプ(1次系用、2次系用)				
		補助炉心冷却系				
		加熱器				
	○2.10 項	大型コールドトラップ(1次系用、2次系用)				
蒸気発生器安全性		試験体 (RUN-1 より RUN-19 まで 15 体)				
試験施設		蒸気発生器安全性総合試験装置(SWAT-3) 含む DT				
熱流動試験施設		ナトリウム伝熱流動試験装置				
	○2.6項	「もんじゅ」炉容器ナトリウム中試験装置(SITR)				
	○2.5項	大口径電磁流量計校正試験装置(SFCAT)				
	○2.7項	大型(「もんじゅ」)ナトリウムポンプ試験装置(SPTL)				
ナトリウム機器	○2.8項	「もんじゅ」遮蔽プラグ総合断熱試験装置(SPINTA)				
構造第一試験室		ナトリウム液位校正試験装置 (SLCAT)				
		新型炉停止機構試験装置 (SASS)				
		供給純化系試験装置				
		配管ベローズ試験装置(PBTL)				
		制御棒駆動機構試験装置 (CRD)				
上门口上,松阳		小型熱過渡試験装置(STST)				
フトリワム機品・ 株法第二封除会		大流量電磁ポンプ試験装置(LIP)				
悟垣 舟 —		熱衝撃試験装置 (TST)				
	○2.11 項	NaK 総合流動伝熱試験装置				
	○2.1項	計測機器試験ループ				
		材料試験ループ1及び2				
キトリウル士術明		自己融着試験ループ				
ノトリリム仅州囲 怒笛山封殿会		炭素移行試験ループ				
光舟 武歌主		純度管理試験ループ				
		配管熱過渡試験ループ				
		浸漬試験ポット				
		ナトリウム中疲労試験ループ				
ナトリウム技術開		ナトリウム中クリープ試験ループ				
発第二試験室		ナトリウム浸漬試験ループ1及び2				
		溶接部熱疲労試験ループ				

註)〇印は本報で記載する解体・洗浄等に特徴を有する代表的な対象装置と、本文の項番号を示す。

2.1 計測機器試験ループのナトリウム洗浄処理

ナトリウム施設の効率的な運用の一環として、ナトリウム技術開発第一試験室に設置されてい た計測機器試験ループを解体撤去し、本試験ループが有していた一部の機能をナトリウム流動試 験施設の炉心機器熱流動試験装置(CCTL)に追加するために、そこで使用されていた機器を移設す ることとした。本試験ループは、高速炉の炉心上部計装を主体とした流量計や電磁ポンプの開発 のための各種特性試験、流量計や液位計の校正試験、各種試験体の浸漬試験等に使用されてきた。 試験体等を収納する試験容器を中心に、主循環系、補助循環系、精製系、貯蔵タンク等から構成 されている。試験容器は地上4階の架構に据え付けられ、貯蔵タンクは地下ピットに収められて いる。試験容器と貯蔵タンク間のヘッド差は約10mである。主循環系は3B、冷却系ラインは2B、 精製系は3/4Bの配管から成る。図2.1-1に本ループの系統を、試験容器および貯蔵タンクの構造 を図2.1-2、図2.1-3に示す。

本装置の解体とナトリウム洗浄処理作業は、貯蔵タンク内のナトリウムの抜取り作業、ナトリウム配管・機器、架台等の解体撤去、ナトリウム配管・機器のナトリウム洗浄処理作業から成る。

(1) 解体、ナトリウム洗浄処理作業の手順

試験容器内部には、複雑な構造物が設置されており、その表面にはドレン後のナトリウムが付着している。解体時には、これらのナトリウムの付着した構造物を部品レベルまで開放・解体しないと完全なナトリウムナトリウム洗浄処理作業ができないため、何れかの段階で大気中に曝されることになる。その際、ナトリウムが発火・燃焼する事象の発生が懸念されることから、その対策として化学的に安定な炭酸ナトリウム皮膜(Na₂CO₃)をナトリウムの表面に生成する安定化処理を施すこととした。安定化処理時に発生する水素の挙動(2Na + CO₂ + H₂O → Na₂CO₃ + H₂)や終了判断等に関して、より複雑な大型試験装置で適用予定の安定化処理に反映するための予備的な実験も兼ねている。洗浄処理作業の全体の手順を図 2.1-4 に示す。



図 2.1-1 計測機器試験ループの系統図



図 2.1-2 試験容器の構造

図 2.1-3 貯蔵タンクの構造

(2) 各作業の内容

A:洗浄条件の設定

A1:機器の再使用の有無

電磁ポンプ2台および電磁流量計3台は再使用するものとし、他の配管・機器は解体し廃 棄するものとする。

A2:別設置洗浄槽の有無の選定

既存の専用ナトリウム処理室に搬入して直接に被洗浄物を洗浄処理するため、別設置の洗 浄槽等の準備は必要ない。

A3:残留ナトリウムの状況、量の予測、観察

小規模のループであること、ドレン後のガス導通状況および被洗浄物の構造面から配管・ 機器内の残留ナトリウム量は比較的少量であると予測したが、最終的な判断は、配管・機器 の切断・開放時にナトリウムの付着状態を観察することによって行った。

B:洗浄処理方法の選定

被洗浄物は多種、多様の配管・機器から構成されており、一部の機器(電磁ポンプおよび 電磁流量計)は再使用される。また、残留ナトリウムの状況が配管・機器によって異なるた め、個々の配管・機器によりその洗浄処理方法を選定する必要がある。基本的には、燃焼処 理方法はナトリウム洗浄処理後被洗浄物が廃棄処分される場合で多量の残留ナトリウムが存 在し、かつ大気中水蒸気洗浄処理が困難または長時間を要する場合に、また、大気中水蒸気 洗浄処理方法は、洗浄処理後被洗浄物が廃棄処分される場合でナトリウムが被洗浄物の内表 面に薄膜状に付着している場合に採用された。また、洗浄後被洗浄物を再使用する機器の洗 浄処理にはアルコール洗浄処理方法が採用された。以下に個々の配管・機器に関するナトリ ウム洗浄処理方法を示す。



図 2.1-4 計測機器試験ループのナトリウム洗浄処理作業手順

1) ナトリウム配管

残留ナトリウムの量が少ないと予想されることから、3B、2B、3/4B いずれの配管についても大気中水蒸気洗浄処理方法を採用する。

2) 貯蔵タンク

貯蔵タンクの形状は外径 1,200、長さ 3,500mm、容積 3,3000で、ナトリウム抜取り配管と タンク底部に 20mm 程度の隙間があり、十数 kg の残留ナトリウムが存在することが予測さ れる。切断は容器内に窒素ガスを十分供給しながらプラズマ溶断にて行い、その後残量ナ トリウムを掻き出し、ナトリウムは燃焼処理し、部材は大気中で水蒸気洗浄処理する。 3)試験容器

構造上、容器下部に多少のナトリウムが残量すると予測される。そのため、切断は容器 内に窒素ガスを十分供給しながらプラズマ溶断にて行う。容器下部の鏡部については、ナ トリウム処理室内燃焼処理室で残量ナトリウムを溶融・燃焼処理後、水洗浄処理する。 4)ドレンタンク

ドレン配管とタンク下部との間に構造的な隙間があり、約 30kg のナトリウムが残留して いると予測される。切断は容器内に窒素ガスを十分供給しながらプラズマ溶断にて行い、 その後、多量に残留しているナトリウムを掻出し、ナトリウムは溶融・燃焼処理し、部材 は大気中で水蒸気洗浄処理する。

5) 電磁ポンプ、電磁流量計

再使用する電磁ポンプ 2 台および電磁流量計については、機器のアルカリ腐食を避ける ためにアルコール循環洗浄方法を採用し、廃棄する電磁ポンプ 1 台は大気中水蒸気洗浄処 理する。

6)加熱器

切断は容器内に窒素ガスを十分供給しながらプラズマ溶断にて行い、その後大気中水蒸 気洗浄処理する。

7) コールドトラップ

メッシュ部にナトリウムが付着しているため、容器の切断は容器内に窒素ガスを十分供 給しながらプラズマ溶断にて行う。メッシュ部は燃焼することを想定し、専用の燃焼室で メッシュに付着するナトリウムを溶融しながら燃焼処理する。容器は大気中水蒸気洗浄処 理する。

8) 冷却器

冷却器内にはナトリウムが薄膜状に付着していると予測される。バンドソーで切断し、 大気中水蒸気洗浄処理する。

9) ナトリウム弁

ベローズ部にナトリウムが付着していることが予測されることから、弁本体リップ溶接 部を切断し、本体部からステムを引抜き、ベローズ部は燃焼室にて溶融・燃焼処理する。 その後、大気中水蒸気洗浄処理する。

<u>C:洗浄処理施設の設定</u>

ナトリウム処理室に設置されている既存の洗浄処理装置を利用する。

1) 大気中水蒸気洗浄処理装置

ボイラー装置から水蒸気を、窒素ガス供給設備から窒素ガスを受給し、それらの混合蒸気 を発生させ、ナトリウムと水蒸気との化学的な反応性を緩和させながら行う。蒸気フローメ ータ、窒素ガスフローメータ、流調弁、配管、フレキシブルメタルホース、洗浄ノズル等で 構成される。

2) 燃焼処理装置

ナトリウムをプロパンガスバーナにより加熱・燃焼させる。燃焼時に発生するナトリウム酸 化物の白煙(エアロゾル: Na₂0, Na₂0₂)は排煙処理装置により捕集処理する。燃焼残渣であ る酸化物は散水処理等によりナトリウム水酸化物(NaOH)に変換し、その廃液は規程に準じ て中和処理槽で中和する。その作業手順および要領は以下のとおりである。

・燃焼室内の、加熱等により水分を取除いた受皿に被洗浄物を設置

・ガスバーナで被洗浄物を加熱しナトリウムを燃焼。エアロゾルは専用の排煙処理装置に にて処理して排煙

・金属製ヘラ等で撹拌しながらナトリウムを完全に燃焼

・作業者は防塵マスク、防護衣を着用

・ 燃焼処理終了後、 燃焼室内で 散水洗浄処理

・ナトリウム洗浄処理後の最終確認

D:洗浄処理前作業

D1: ナトリウムの確実なドレン

本試験装置は通常とおり重力落下ドレンの後に、各系統は不活性ガスによる導通検査を行 い、機器・配管系統にナトリウムが閉塞していないことを確認した。

D2: 貯蔵タンク内ナトリウムの抜取り(抜取り装置の設計、製作、設置、抜取り作業)

解体・洗浄するために、先ず貯蔵タンク内のナトリウムの抜取りを行った。抜取ったナト リウムは専用の貯蔵容器(ドラム缶)に充填して、ナトリウム貯蔵庫へ保管した。ナトリウ ム抜取りのための装置は、消防法に基づく危険物取扱施設の変更に伴う必要な申請を行い、 製作、据え付けた。

1)装置の概要

装置の系統図を図 2.1-5 に示す。以下の機器、設備で構成される。また、装置の設置状況 を図 2.1-6 に示す。

① 予熱·計測制御設備

抜取り配管、弁、フレキシブルメタルホース等の予熱制御およびドラム缶内のナトリウ ム充填量の把握を行う。予熱温度能力は 0~200℃(50℃/h)である。

管および弁

計測ループ貯蔵タンクとナトリウムドラム缶を連結し、ナトリウムをガス差圧によって ドラム缶へ移送する。

③ アルゴンガス供給系、真空系、ガス放出系

アルゴンガス供給系はフレキシブルメタルホースのナトリウムブローおよびドラム缶 内のガス置換に、真空系はナトリウム移送前のドラム缶内のガス置換に、ガス放出系はナ トリウム抜取り中のドラム缶内のガスの放出にそれぞれ使用される。放出ラインには、空 気の混入防止のため背圧弁が設置されている。計量器には規定重量の到達(ドラム缶内へ のナトリウム充填の終了)を知らせる警報および重量超過の出力接点を有し、重量超過で ナトリウム遮断弁を「閉」にするインターロックを有する。



図 2.1-5 ナトリウム抜取り装置系統図



図 2.1-6 ナトリウム抜取り装置の設置状況

2)ナトリウム抜取り作業

ナトリウム抜取り手順を図 2.1-7 に示す。ナトリウム温度は約 140℃で実施した。また、 抜取り作業の状況を図 2.1-8 に示す。作業エリアには鋼製の受け皿を床面に敷設し、万が一 のナトリウム漏れや飛散の拡大を防止するように講じた。ナトリウムのドラム缶への移送時 間は約 18 分/缶であり、貯蔵タンクからのナトリウム抜取り総量は約 2,750kg(約 2000の専 用ドラム缶 17 本) である。







図2.1-8 ナトリウム抜取り作業状況

D3:施設からの撤去およびナトリウム処理室への運搬・搬入

解体撤去工事全体の流れを図 2.1-9 に示す。ナトリウム配管・機器等の撤去は以下の順番で 実施した。撤去に当たっての切断はハンドソーを使用した。撤去された配管・機器等は適宜ナ トリウム処理室に運搬・搬入されてナトリウム洗浄処理された。

①補助系ライン
 ②循環系ライン
 ③循環系ライン
 ④ドレンタンクおよび貯蔵タンク
 ⑥ガス系ライン

ナトリウム配管・機器等の解体・ナトリウム洗浄処理は以下の要領で実施される。

1) 被洗浄物の種分け

被洗浄物は切断時に、その種類、形状および残存ナトリウム量に応じて以下の3種に識 別し、ナトリウム処理室での洗浄処理を行うまで一時保管場所に保管する。

- ① ナトリウムが閉塞しているもの
- ② 残留ナトリウムが比較的に多いもの
- ③ ナトリウムが内表面に薄膜状に付着しているもの
- 2)ナトリウム配管・機器等の切断

切断作業は、防護面、防塵マスク、防護衣、半長靴等を着用して実施する。

- 切断箇所は作業責任者が指示する。
- ② 切断箇所下部には鋼鉄製の受皿を設置し、周囲にはナトレックス消化剤をおく。
- ③切断は内部に不活性ガスをパージさせながら実施する。
- ④ 被洗浄物およびループ側の切断箇所には空気の混入を防止するためビニールキャップで養生する。
- 3) 被洗浄物の保管
 - ①保管エリアの床面に受皿を設置する。

②保管場所の周辺にナトレックス消火器を常備する。



図 2.1-9 解体撤去工事全体の流れ

D4:洗浄処理装置の準備

ナトリウム処理室の各洗浄処理装置については洗浄処理作業に当たって以下の準備をする。 1)大気中水蒸気洗浄処理装置

作業手順および要領は以下のとおりである。

・ボイラーを含む水蒸気洗浄処理装置を起動し、所定の水蒸気条件になるように暖機運 転を実施

- ・ 被洗浄物内部の残存ナトリウムの状況確認
- ・ 供給ラインをパージして窒素ガスの混合割合、混合水蒸気の乾燥が適切か確認
- ・ まず被洗浄物表面の昇温を目的に外表面を洗浄処理、ついで内部に流入
- ・ 随時作業を中断して残留ナトリウムの有無を確認
- ・ 機器洗浄処理終了後、残ナトリウムがないように周辺部も洗浄処理
- 洗浄処理作業責任者による洗浄処理終了の判断
- 水による最終洗浄処理

2) 溶融·燃焼処理装置

作業手順および要領は以下のとおりである。

- ・燃焼室内の、加熱等により水分を取除いた受皿に被洗浄物を設置
- ・ガスバーナで被洗浄物を加熱しナトリウムを溶融、燃焼
- ・金属製ヘラで撹拌してナトリウムを完全に燃焼
- ・作業者は防塵マスクを着用し、排煙舎利装置により排煙
- ・全ての溶融燃焼処理終了後燃焼室内のシャワー設備で水洗浄処理
- ・ナトリウム洗浄処理作業責任者による最終確認

E:洗浄処理作業

E1:水蒸気による洗浄処理

当初、ナトリウムの洗浄処理は大気中蒸気洗浄処理を計画していたが、内部に付着しているナトリウム量が極僅かで安全性が確保できることから散水による処理に切り替えた。

(3) 作業実績

1) 撤去作業の結果

計測機器試験ループの撤去前の全景の状況を図 2.1-10 に示す。撤去は前述のとおりの手順 で実施された。切断はハンドソーを使用して行われた。以下、主要な機器の撤去状況を示す。 主循環系ラインの配管の切断状況を図 2.1-11 に示す。冷却器はダクトカバーを取り外し、出 入ロヘッダーの配管を切断し、本体は出ロヘッダー、入ロヘッダー、伝熱管、ベンド部で切 断した。 加熱器の撤去状況および試験容器の入口配管切断の状況を図 2.1-12 に、貯蔵タン クを地下ピットから天井クレーンを使用して1階フ床上に吊り出した時の状況を図 2.1-13 にそれぞれ示す。



図 2.1-10 計測機器試験ループの撤去前の全景



図 2.1-11 主循環系ラインの配管および冷却器の切断



図 2.1-12 加熱器および試験容器入口配管の撤去



図 2.1-13 貯蔵タンクの吊り出し状況

2)ナトリウム洗浄処理作業の結果

以下に主要な機器のナトリウム洗浄処理作業状況を示す。

貯蔵タンク

保温材やヒータ、熱電対を取り外した後、ナトリウム処理室に搬入した。解体、洗浄処理 手順を図 2.1-14 に、および貯蔵タンクの解体および燃焼処理の様相を図 2.1-15 にそれぞれ 示す。貯蔵タンクを洗浄処理に適合した大きさになるように、プラズマ溶断にて切断した(図 2.1-15a)。この結果、タンク底部に約 15mm の厚さでナトリウムが残存しており、タンク胴の 上部にはナトリウムベーパが付着していた(図 2.1-15b)。このためタンク胴の上部は6分割 し、その後に付着しているナトリウムベーパ層をヘラ等で除去後、大気中水蒸気洗浄処理し た。ナトリウムの残存しているタンク下部(図 2.1-15c)については残存ナトリウムをバー ナで溶融燃焼処理の後、十分にナトリウム酸化物になった反応生成物を大気中水蒸気洗浄処 理した(図 2.1-15d)。貯蔵タンク内に残存していたナトリウムは約 15kg であった。

JAEA-Technology 2012-033



図 2.1-14 貯蔵タンクの解体、洗浄処理手順



(a) 貯蔵タンクのプラズマ切断

(b) 貯蔵タンクの内部開放



(c) 貯蔵タンク内の残存ナトリウム

(d)残量ナトリウムの燃焼処理

図 2.1-15 貯蔵タンクの解体および燃焼処理

② ドレンタンク

解体、洗浄処理手順を図 2.1-16 に示す。枕木上に仮置きして上部鏡部を周方向にプラズマ 溶断し、内部構造物を引き抜き、上部鏡部、胴については大気中水蒸気洗浄処理した。内部に ナトリウムが約 30kg 残存していたため、タンクの下部鏡部から 50cm 高さで切断し、残存して いるナトリウムを燃焼皿に小分けしてバーナにて溶融燃焼処理した。その状況を図 2.1-17 に 示す。



図 2.1-16 ドレンタンクの解体・洗浄処理手順



図 2.1-17 ドレンタンクの残留ナトリウム、溶融燃焼処理の状況

③ 試験容器

解体・洗浄処理手順を図 2.1-18 に示す。ナトリウム処理室の床面に横置きした状態で解体 した。容器上部蓋およびベローズフランジを取り外し、容器下部の鏡部を周方向にプラズマ 溶断した。鏡部は洗浄処理しやすいように細断した。洗浄処理は、ベローズフランジおよび 下部の鏡部は溶融燃焼処理(図 2.1-19)し、胴は大気中水蒸気洗浄処理した。



図 2.1-18 試験容器の解体・洗浄処理手順



図 2.1-19 試験容器の撤去、ベローズフランジおよび下部の鏡部の溶融燃焼処理

④ 電磁ポンプ (廃棄予定品)

電磁ポンプはダクト部を燃焼室に搬入して処理した。ダクト内にナトリウムが残留して いたため、出入口配管をバンドソーで切断した。ダクト内のナトリウムをバーナで溶融し 燃焼皿に溶出させた(図 2.1-20)後溶融燃焼処理した。処理後、ダクトをプラズマ溶断で 切断し大気中水蒸気洗浄処理した。



図 2.1-20 電磁ポンプの残留ナトリウムの燃焼皿への溶出状況

⑤ 加熱器

加熱器の解体、洗浄処理手順を図 2.1-21 に示す。横置きにして上部管板近くを周方 向にプラズマ溶断し、内部構造物を引き抜いた。外胴は下部鏡部を切断して大気中水蒸 気洗浄処理した。内部構造物のヒータは、管板上部の端子部および管板下部のヒータエ レメント部をバンドソーで切断し、管板については燃焼室で管板とヒータエレメント取 り付け部のクレビス部をバーナで加熱し、ナトリウムを溶融させ、ヒータエレメントを 引き抜いた。ヒータエレメントは大気中水蒸気洗浄処理で、管板は溶融燃焼処理後大気 中水蒸気洗浄処理にて行った。

⑥ コールドトラップ

コールドトラップの解体・洗浄手順を図 2.1-22 に示す。金網メッシュ部に多量のナ トリウムが残存していることが予想されるため、大気開放・解体作業時にナトリウムが 燃焼することを想定して燃焼室で実施した。上部平蓋近傍を周方向にプラズマ溶断し、 内部構造物のコイル配管およびメッシュ部を引き抜き、コイル配管および外胴は細断し て大気中水蒸気洗浄処理し、メッシュ部は溶融・燃焼処理後に大気中水蒸気洗浄処理し た。メッシュ部のナトリウム残存状態を図 2.1-23 に示す。

⑦ ナトリウム配管

ナトリウム付着状況に応じて水蒸気洗浄処理または溶融・燃焼処理した。ナトリウムが 配管内に薄膜状に付着している配管はバンドソーで1m程度に切断し、内部に閉塞が無いこ とを目視確認しながら大気中水蒸気洗浄処理した(図2.1-24)。ナトリウムが多量に付着又 は閉塞している配管は識別し、切断箇所に窒素ガスを吹き付け、燃焼防止を図りながらバ ンドソーにて切断した。その後に管内のナトリウムを溶融排出させ、燃焼処理を実施した。 ⑧ ナトリウム弁

ナトリウム弁(<2B弁)は、ベローズ内部にナトリウムが残存しているため、リップ溶 接部を切断して本体部からステムを引き抜いた。弁内部のナトリウムは溶融・排出し、燃 焼処理した。比較的口径の大きな3B弁は、ベローズ部に溶接されているガイドパイプをプ ラズマ溶断し、ベローズ内に滞留しているナトリウムを溶融・燃焼処理した。また、ナト リウムが明らかに閉塞している弁は、あらかじめ弁内のナトリウムを溶融・溶出させてか ら、上記と同様な手法で分解し、その後に溶融・燃焼処理した(図2.1-25)。









図 2.1-23 コールドトラップメッシュ部のナトリウム残存状態



図 2.1-24 ナトリウム配管の大気中水蒸気洗浄処理の状況



図 2.1-25 ナトリウム弁のナトリウム溶融燃焼処理状況

(4) まとめ

ナトリウム試験装置の解体を進める中で、事前検討した残留ナトリウム量や機器の内部構造の 情報から、それぞれに適した洗浄処理手法を行うことによって、大きな問題もなく作業を終える ことができた。本試験装置は比較的小規模であったが、タンク、加熱器やコールドトラップおよ びナトリウム弁等の多種にわたる機器類を行い、燃焼処理および水蒸気洗浄の手法を用い、解体 工法やナトリウム洗浄処理に関する多くの体験と知見を得ることができた。また、残留ナトリウ ムを含む貯蔵タンクの解体および洗浄処理の経験例は少なく、貴重な経験を得ることができた。 全体的に計画通りに進めることが出来たと考えられる。

2.2 蒸気発生器メンテナンス技術実証試験におけるナトリウム洗浄処理

大型機器、特に蒸気発生器においては、ナトリウム - 水反応の発生に伴う伝熱管損傷事故のト ラブル発生した場合、その後の運転再開に当たっては多くの困難が予想され、ナトリウム洗浄処 理、補修・改造等のメンテナンス技術の確立が重要な課題である。そのため、大型機器のメンテ ナンス技術の確立の一環として、蒸気発生器におけるナトリウム - 水反応発生後のメンテナンス 技術の実証に向けた蒸気発生器メンテナンス技術実証試験が実施された。この試験では、50MW 蒸 気発生器2号機の蒸発器を用いて、一部の伝熱管の管束部交換や、ナトリウム - 水反応に伴う構 造物の健全性検査等、一連の研究開発を実施するもので、伝熱管の管束部の胴部からの引抜きや 残留ナトリウムの洗浄処理技術などに係る試験が実施され、種々の経験が蓄積された。また、実 証試験の実施に先立っては、健全性確認検査および洗浄処理プロセス確認試験が実施され、ドレ ン条件による残留ナトリウムの把握等の基礎試験が実施された。

50MW 蒸気発生器は「もんじゅ」に使用される大型蒸気発生器の研究開発を目的に建設されたもので、「もんじゅ」のモックアップ(寸法比:約3/5、熱出力比:約1/5規模)であり、ヘリカル

コイル型蒸気発生器である。蒸発器 の高さは約 11m、胴径は約 1.7mで ある。蒸発器(2 号機)の構造概念図 を図 2.2-1 に示す。なお、蒸気発生 器の開発状況や構造については「ナ トリウム技術読本^{10」}」に記載されて いるので参照されたい。

(1) ナトリウム洗浄処理手順

当時は、50MW 蒸気発生器 2 号機 蒸発器は、技術実証試験の後に再 度試験実施のために再使用が予定 されていた。このため、伝熱管や 分離シュラウド等を含め、ナトリ ウム洗浄の影響による内外部構造 物へのダメージを極力抑えるよう に本蒸気発生器(蒸発器)のナト リウム洗浄処理作業が実施された。 1次洗浄は不活性ガス中水蒸気洗 浄、2次洗浄は純水を用いた洗浄、 および最終的に炭酸ガスによる安 定化処理の流れで行われた。こ れらの全体的なナトリウム洗浄 手順の流れを図 2.2-2 に示す。



図 2.2-1 50MW 蒸気発生器 2 号機蒸発器の概念図



図 2.2-2 ナトリウム洗浄処理作業の手順

(2) ナトリウム洗浄処理作業の内容

<u>A:洗浄処理条件の設定</u>

A1:機器の再使用の有無の確認

50MW 蒸気発生器蒸発器は今後の試験運転に備えて改造され、再使用することが前提になっている。

A2:別設置洗浄槽の有無の選定

施設に設置したままの状態ではナトリウム洗浄処理はできないことから、洗浄槽を別設置して実施する。この洗浄槽は輸送容器としても使用される。

A3:残留ナトリウムの付着状況、量の予測

本実証試験に先立って実施した洗浄処理予備試験で得られた知見に基づき、ナトリウム液面 下およびカバーガス部の機器表面および伝熱管支持部の単位面積当たりのナトリウム付着量 に表面積を乗じて、残留ナトリウム量が試算された。合計 4.7kg と予測された。

(1)一般表面	カバーガス部	36 (ı	m^2) 2	×0.5	(mg/cm^2)	$ imes 10^4$ =0. 2kg	
	液面下	416	(m^2)	×0.5	(mg/cm^2)	$\times 10^4$ =2.1kg	
(2) 伝熱管支持	 宇部	70	(m^2)	imes3. 1	(mg/cm^2)	$\times 10^4$ =2.2kg	
(3)クレビス音	ß					0.2kg	
合計						4.7kg	

ナトリウム洗浄処理に当たっては、被洗浄物の構造上、ナトリウムが特に残留し易い部位と して以下の箇所を考慮した。

- ・管板のセーフエンド部
- · 熱衝擊防止板
- ・内胴の補強パットと内胴のクレビス部
- ・各部のネジ・ボルト部
- ・ナトリウム入口リングヘッダ部
- ・伝熱管支持構造物(H型鋼)の接触クレビス部
- · 伝熱管支持金具部
- ・降水管バッフル板部
- ・ガスキル層部
- ・内部シェラウドパッドクレビス部

これらの箇所については、事前に多くの手段を用いて残留しているナトリウムの付着量や状況を観察、把握することが重要である。それを踏まえて、具体的な洗浄処理方法を選択し実施 する必要がある。洗浄処理の状況も随時観測し、十分に注意しながら洗浄処理作業を実施する ことが重要である。

B:洗浄処理方法の選定

洗浄処理の目的や機器の状況等を考慮して適切な洗浄処理方法を選定する。

選定に当たって重視する項目は①従来の作業での実績、②安全性、③完全な洗浄処理の可能 性であり、かつ機器の再利用や材料検査を行う場合は、残留ナトリウムと洗浄液(水蒸気)と の反応(2Na+2H₂0→2<u>NaOH</u>+H₂)で生成した水酸化ナトリウム(NaOH)等によるアルカリ腐食への考 慮で決定される。本ケースでは、機器の再利用を前提としていることから、ナトリウム洗浄処 理過程における留意事項はアルカリ腐食を発生させないことである。しかし、機器の規模が大 きいことから大量のアルコールが必要となり、万が一のアルコール燃焼火災を考慮すると、最 も有効と考えられるアルコール洗浄処理方法は好ましくない。このため、不活性雰囲気中で水 蒸気と不活性ガスを混合する水蒸気洗浄処理方式と、炭酸ガスによる安定化処理を組み合わせ た方法が採用された。窒素ガス雰囲気中で、窒素ガスに湿分を加えた湿り混合ガスによる粗洗 浄処理(1次洗浄処理)を行った後、純水にてリンス(2次洗浄処理)する。リンス処理で除 去できないと考えられるクレビス内の NaやNaOHは、湿り炭酸ガスと反応させ、 炭酸ナトリウム(Na₂CO₃)に転換させる 安定化処理(3次洗浄処理)をする。

 $\begin{array}{rcl} 2\mathrm{NaOH} \ + \ \mathrm{CO}_2 \ \rightarrow & \mathrm{Na}_2\mathrm{CO}_3 \ + \ \mathrm{H}_2 \\ \\ 2\mathrm{Na} \ + \ \mathrm{CO}_2 \ + \ \mathrm{H}_2\mathrm{O} \ \rightarrow & \mathrm{Na}_2\mathrm{CO}_3 \ + \ \mathrm{H}_2 \end{array}$

アルカリ腐食割れの防止の観点から、 洗浄処理の過程で材料の温度を図 2.2-3 に示すアルカリ腐食割れ領域の 温度に上昇させないようにすることが 必要である。本洗浄処理の実施に当たっ ては、70℃以下の温度となるように設定 した。

C:洗浄処理施設の設定

別設置洗浄槽の有無、選定した洗浄処 理方法、洗浄処理施設の設置場所、予算 等を考慮して洗浄処理施設を設計する。



図 2.2-3 アルカリ腐食割れの境界例¹³⁾

本ケースでは、50MW 蒸気発生器試験施設は今後の試験で再使用されることから、施設を洗浄処 理施設とすることはせず、空きスペースに別設置洗浄処理施設を設置することとした。不活性 雰囲気中で水蒸気と不活性ガスを混合するライン、炭酸ガスを注入するラインおよび洗浄処理 後のガスを処理するラインからなっており、図 2.2-4 にその基本系統図を示す。



2.2-4 洗浄処理設備の基本系統図

D:洗浄処理前作業

D1: ナトリウムの確実なドレン

本実証試験の実施までの蒸発器の通水運転時間は 9,513 時間、2 次ナトリウム系の運転時 間は 16,548 時間であった。通常運転時におけるドレン時の温度条件は 200℃であるが、本試 験では別途実施した健全性確認試験および洗浄処理プロセス確認試験の結果を踏まえて、残 留ナトリウムを最小にする目的で予熱温度 400℃に保持しつつドレンし、その後機器、配管 を 400℃の状態で 47 時間保持して、付着しているナトリウムを極力滴下、除去した。 D2: 胴からの管束の引抜

蒸気発生器のメンテナンス時には蒸気発生器管束部を本体胴より引き抜く必要があるが、 この作業は管束部を不活性ガス雰囲気内に保持した状態で実施される。以下の条件を満足し た引き抜き用キャスクが製作され、使用された。

① 大気と完全に遮断ができ十分な気密が保たれること

② 蒸気発生器管束部を透視観察できること

③ コンパクトで管束上部への装着が簡単にでき、引き抜き時に十分な伸長が可能なこと

④ キャスクを胴から切り離す際、胴部に対して空気混入が生じないこと



図 2.2-5 50MW 蒸気発生器 2 号機蒸発器管束 引き抜き用キャスクの構造

図 2.2-7 50MW 蒸気発生器、2 号機 蒸発器引抜き状況

⑤ 気密保持状態で管束上部平板のシート面の清掃、ダウンカマ部の各種検査および管束下 端部からのファイバースコープによる管束部の観察が可能なこと

採用されたビニール製キャスクの構造を図 2.2-5 に示す。管束引き抜きおよび洗浄槽への挿入 作業の工程を図 2.2-6 に示す。引抜き時の状況を図 2.2-7 に示す。



図 2.2-6 管束引き抜きおよび洗浄槽への挿入作業の工程

管束引抜き作業は2日間にわたって実施された。管束の温度は十分に下げられており、ナト リウムの滴下やキャスクへの付着は発生しなかった。初日に初期引抜き荷重を把握するため、 管束部を約 60mm引き上げた。この時の初期引き抜き荷重は 36ton であり問題のないことを 確認し、引き抜いた状態で翌日まで保持した。2日目に管束部は順調に引抜きが行われた。管 束のナトリウム付着状態を透明ビニル・キャスクから観察しながら、約4時間で引抜きを完了 した。作業中のキャスク内の不活性雰囲気は微圧計で圧力を監視し、大気圧以上(3~7mmAq) に接続しているガスボンベで圧力を調整した。管束引き抜き時に使用した透明ビニール製のジ ャバラ構造のキャスクは、気密性に一部難点があったものの透視性も十分であり操作性も良好 であった。窒素ガスの使用量も妥当であった。

D2:洗浄処理施設への設置

管束の引き抜き完了後、管束部を洗浄槽の真上に水平移動し、洗浄槽に設置されているビニー ル製接続キャスクへ接続したのち、キャスクのシール膜を開き洗浄槽と管束のキャスクを連結 させた。その後、吊り荷重を監視しながら管束を約3時間で徐々に洗浄槽へ挿入した。 E:管束洗浄処理作業

洗浄処理は不活性雰囲気中で、窒素ガスに水蒸気を加えた混合ガスにより粗洗浄処理(1次 処理)を行った後、純水にてリンス(2次洗浄処理)し、この処理で除去できないと考えられ るクレビス内の Na や NaOH を炭酸ガス(CO₂)と反応させ、Na₂CO₃に転換させる安定化処理(3次) 処理)を実施した。それぞれのナトリウム洗浄処理時の各種の制限条件を表 2.2-1 に示す。 E1:水蒸気による1次洗浄処理

窒素ガスと水蒸気との混合ガスをコントロールしながら水素濃度を指標として穏やかな反応 に保持して、材料がアルカリ腐食(割れ)を起こすことのない温度以下(裕度を含めて 70℃ 以下)に保ちつつ洗浄処理作業を実施した。1次処理の経過概要を図2.2-8に示す。

1次処理に要した期間は約4日間であり、1次処理により除去されたナトリウムの量は洗浄処 理潮解液のナトリウム分析結果から約7.0kgと評価された。蒸気発生器カバーガス部の洗浄処 理はナトリウム接液部よりも時間を要した。これは、蒸着したナトリウムが多かったためと考 えられる。1次洗浄処理での水蒸気量は、洗浄槽における窒素ガス(20Nm³/h)中の水素濃度を 1vol.%以下に抑えるために 0.3kg/hとし、反応が進行した場合には 2倍にするものとした。

項目	1 次洗浄処理	2 次洗浄処理	3次洗浄処理
了劫迟座	50℃(目標値)	冷水循環時 なし	30℃(目標値)☆☆☆
丁然温度		温水循環時 50 C(日 標値)	
	(1)管東メタル温度	1次洗浄処理と同一	(1)管東メタル温度50℃以
	70℃以下☆		下
友話判阻症	(2)排気中水素濃度		
台裡前腔恒	1vol.%以下☆☆		
	(3)洗浄槽内酸素濃度		
	1vol.%以下		
	(1) 水素濃度	(1)電気電導度	(1)排ガス中の水分濃度
	100ppm 以下	20μΩ/cm以下	1,000ppm 以下
洗浄処理終	(2)目視観察	(2)水素発生 なし	(2)目視観察
了判定	(3)洗浄処理時間	(3)ナトリウム濃度	
	12時間以上	1ppm 以下	
		(4) 目視観察	

表 2.2-1 ナトリウム洗浄処理における各種の制限条件

삾 図 2.2-3 に示した炭素鋼に対する SCC 発生可能の温度域への考慮

☆☆ 空気雰囲気中での水素の燃焼下限である 4vol. %以下に対して十分な余裕をとる。 ☆☆☆

別途実施した安定化処理結果において CO2 と NaOH の反応率が最大となる条件

E2:純水による2次洗浄処理

純水を充填して循環し、構造物表面のリンスを行ったが水素ガスの発生はなく順調に作業 できた。2次処理の経過の概要を図2.2-9に示す。2次処理に要した期間は約5日間であった。 2次処理時に伝熱管表面等に錆が発生したが、純水中の溶存酸素によるものと考えられ、純 水中の溶存ガスを脱気する必要のあることがわかった。 蒸気発生器のクレビス部(管台部等) を対象に減圧沸騰洗浄処理およびジェット水噴射による部分洗浄処理を実施した。

E3:炭酸ガスによる3次安定化処理

炭酸ガスを注入して苛性ソーダを炭酸塩化する3次処理については、事前に試験により予 備的な検討を実施して、各種の条件等を設定している。管束および洗浄槽が2次洗浄処理に よる水分で濡れた状態にあったため乾燥に長時間を要した。3次処理の経過の概要を図 2.2-10に示す。3次処理に要した期間は約6日間であった。長期間を要した要因のひとつと して洗浄槽の加熱不均一によりコールドポイントへの水蒸気の凝縮現象が上げられる。しか し、1次および2次処理で残存する可能性のある水酸化ナトリウムをアルカリ腐食(割れ)に 与える影響のない炭酸ナトリウムに転換するためには、水酸化ナトリウムが凝固する前(水 分が存在する状態)に炭酸ガスとの反応を行わせる必要がある。乾燥期間が長時間となった が、再使用時にアルカリ応力腐食(割れ)の発生はなく本処理は有効であったと考えられる。 加熱窒素ガスによる乾燥工程の経過の概要を図2.2-11に示す。



図 2.2-8 1 次処理の経過概要



図 2.2-9 2 次処理の経過概要
JAEA-Technology 2012-033







図 2.2-11 加熱窒素ガスによる乾燥工程の経過概要

各部位での洗浄処理前の状況を図 2.2-12 に示す。残留ナトリウムの付着は多少あるものの、ナ トリウムのドレン状況は良好であった。

ナトリウム洗浄処理後の各部位の観察状況を図 2.2-13(a)~(e)に示す。図 2.2-13(a)は 1 次 洗浄処理開始からほぼ 8 時間経過後のナトリウム残留の状況であり、図 2.2-13(b)および(c)は 16 時間経過した後のナトリウム洗浄処理状況を示す。多くは洗浄処理されたが、部位によって はナトリウムが多少残留している。図 2.2-13(d)および(e)は 2 次洗浄処理の冷水循環後の状況 であり、洗浄処理はほぼ完了し、ナトリウムの付着は見られない。

次に蒸気発生器内の付着ナトリウム量について、当初の予測値と洗浄処理後の実績値を比較 して表 2.2-2 に示す。実績値は廃水中のナトリウム量を測定したものである。実績値は予測値 よりも大きな値を示した。これは主にカバーガス領域での付着量を過少評価した点による。

JAEA-Technology 2012-033



図 2.2-12 各部位における洗浄処理前のナトリウム付着状況の観察



(a)ダウンカマ下端 U ベント部



(b) 引抜時管束部カバーガス部



(c)引抜時管束部カバーガス部



(d)伝熱管立ち上り部(カバーガス部)



(e)ダウンカマ部

図 2.2-13 各部位における洗浄処理後のナトリウム付着状況の観察

			予測値		実績値*1	
	区分	表面積		単位面積当		単位面積当
		(m^2)	付着量(kg)	り付着量	付着量(kg)	り付着量
				(mg/cm^2)		(mg/cm^2)
一般表面	カバーガス	36	0.2	0.6	1	2.8
	領域		0.2	0.0	1	
	ナトリウム	416	2.1	0.5	3.95	0.95
	浸漬領域					
伝熱管支持部		70	2.2	3.1	2.2	3.1
クレビス部		_	0.2			
合計		522	4.7	_	7.15	-

表 2.2-2 残留ナトリウムの当初予測値と洗浄処理後の実績値の比較

注 *1:合計値は洗浄廃水からのナトリウム量分析結果

F:洗浄処理後作業

F1:洗浄槽から引抜き、引続き実施される研究のための作業に継続

本実証試験においては、洗浄処理後の蒸気発生器管束部を工場にて点検、補修することとし たため、管束部を工場まで輸送する必要がある。管束部を,胴部とは別に別置きの洗浄槽内で 洗浄処理する場合は、洗浄槽をそのまま輸送容器として使用することが可能なことから、使用 した洗浄槽は、あらかじめ輸送容器として必要な構造設計が行われ使用された。

F2:廃水処理

施設の廃水に関する規定により基準の水質に中和し排水した。

(3)まとめ

事前に、管束引抜きの確認試験やナトリウムの洗浄処理方式のサーベイ、ナトリウムのドレン 条件とナトリウム付着量、ナトリウム化合物の材料に及ぼす影響などの関連した課題に関する予 備試験を実施し、それを踏まえて、蒸気発生器のメンテナンスに関する一連の総合的な実証試験 が実施された。その一環として、機器の再使用を前提としたナトリウムの洗浄処理が実施され、 以下に示す経験、知見が得られた。

- ・ 窒素ガスに水蒸気を加えた混合ガスによる粗洗浄処理(1次洗浄処理)、純水によるリンス(2 次洗浄処理)、炭酸ガス封入による安定化処理(3次安定化処理)の3段階からなるナトリウ ム洗浄処理方式の有効性を確認することができた。
- 付着ナトリウム量の予測方法の妥当性を、実績値により確認することができた。今後、今回のデータを使用することにより、より精度の高いナトリウム残留量の予測が可能となると考えられる。

2.3 50MW 蒸気発生器 2 号機のナトリウム洗浄処理

50MW蒸気発生器2号機(蒸発器および過熱器で構成)は蒸気発生器の開発や冷却系の総合的 な研究開発の役割を終え、1994年に試験施設とともに解体された。解体後は、過熱器・管束の一 部が展示用のカットモデルに供された。また、解体後には、主要な構造物について調査が行われ、 一部については材料試験が実施されている。50MW蒸気発生器のナトリウム洗浄処理は、すでに 50MW蒸気発生器1号機についての経験があり、また、前述の2.2項に示したメンテナンス技術 の開発の一貫として先行して実施された 50MW 蒸気発生器2号機の実証試験に係るナトリウム洗 浄処理の経験があり、これまでの経験を踏まえて計画、実施された。

(1) ナトリウム洗浄処理手順

基本的には図 2.3-1 に示す手順により進める。主な手順の流れは前述の 2.2 項と同様である。



図 2.3-1 ナトリウム洗浄処理作業の手順

(2) 洗浄処理作業の内容

A:洗浄処理条件の設定

A1:機器の再使用の有無

ナトリウム洗浄処理後は、過熱器・管束の一部が展示用のカットモデルに供され、また主要な構造については長期運転後の健全性を確認するための調査および材料試験が行われる。 A2:別設置洗浄槽の有無の選定

機器の一部である胴を洗浄槽として使用可能であり、別設置洗浄槽は必要としない。また、 施設も再使用せず解体されることから施設の一部を洗浄処理施設として使用することができ る。

A3:残留ナトリウムの状況、量の予測

蒸気発生器は構造上の特徴およびこれまでの実績から大量のナトリウムが残留することは ない。これまで多くの残留ナトリウム量は従来の実績値を踏まえて、各部の表面への平均の 付着量と表面積から試算できる。保守的に想定して、蒸発器と過熱器の残留ナトリウム量は、 それぞれ最大で約 24kg および約 20kg と予測された(各部の表面への平均の付着量の推定に ついては 2.4 項を参照)。

B:洗浄処理方法の選定

洗浄処理手方法として、不活性ガス中での水蒸気洗浄処理方法が採用された。これは蒸気発 生器の構造や従来の経験から予測して、内部に大量のナトリウムの残留する可能性は小さいこ と、また湿分とナトリウムとの反応により生成した苛性ソーダが、内部に滞留することなく排 出が可能なこと、および胴を洗浄槽として使用可能である等の理由による。

本方法は、窒素等の不活性ガスを満たした洗浄槽(胴本体にて代用)に水蒸気と窒素ガスの 湿り混合ガスを注入することによりナトリウムを水と反応させるものである。反応速度は、注 入する蒸気量や被洗浄物の温度を制御することで可能である。また、洗浄槽内の酸素の排除や 過大な温度上昇を避けることにより、腐食や応力腐食割れを抑制することが可能となる。

C:洗浄処理施設の設定

50MW蒸気発生器試験施設内に設置した洗浄処理装置を試験施設から切り離された蒸発器 および過熱器に接続した。図 2.3-2 に洗浄処理装置の系統図を示す。

洗浄処理装置は

- ① 0.3MPa の飽和蒸気を製造するボイラユニット系
- ② ボイラーから供給される蒸気と、窒素供給装置から供給される窒素を所定の比率で混合したガス系および脱塩水を蒸気発生器に供給する蒸気供給系、湿分除去系および水素測定系
- ③ 洗浄処理により発生した水素を大気に放出する排ガス系

の3つの系で構成されている。

<u>D:洗浄処理前作業</u>

D1:確実なナトリウムドレン

50MW 蒸気発生器試験施設は、蒸気発生器を含めて 1986 年 12 月に停止しており、それ以来不 活性ガス雰囲気下(Na 系: Ar ガス、水蒸気系: N₂ガス)で長期保管されてきた。最終停止時



図 2.3-2 洗浄処理装置系統図

においては運転再開を計画していたため、ドレン時における特別な配慮はなされておらず、通 常ドレン時と同じ約 200℃で実施されている。

D2:系統の真空引き、窒素ガスの供給等

洗浄処理に先立ち、全系統の真空引き、窒素ガス置換により系統内の酸素を排除した。

E:洗浄処理作業

E1:水蒸気による1次洗浄処理、E2:純水による2次洗浄処理、E3:炭酸ガスによる3次安定 化処理

ナトリウムと水との反応により発生する水素濃度を1%以下とするために、水1モルから 0.5 モルの水素が発生すると仮定して、0.3kg/hの蒸気を窒素ガスに混合して蒸発器に供給し た。排ガス系での水素濃度の計測値が一定あるいは降下した段階で、徐々に蒸気供給量を 60kg/hまで増加させた。蒸気と窒素ガスの混合ガスを蒸発器に注入するノズルは、蒸発器底部、 胴部、上部に設置されており、順次下部から上部に切り替えて注入した。洗浄処理中は下部の 排水ノズルから凝縮水をドレンする系統でサンプリングおよび中和滴定により排液中のナト リウム濃度を測定した。完了の判定基準は排ガス系の水素濃度がほぼ0%であること、および 排液中のナトリウム濃度が1g/0以下であることとした。

蒸気注入と洗浄処理に12日間を要した。これは、蒸気発生器の全てのノズルから蒸気を注入させ、判定基準である排ガス中の水素濃度がほぼゼロとなるまでに要した期間であり、安全確保を最優先とした結果である。図2.3-3に蒸気量と水素ガス濃度、図2.3-4に廃液中のナトリウム濃度の経時的な変化の状況を示す。

発生水素量から算出したナトリウム洗浄処理量は約8.4kg であった。一方、排液として放出 されたナトリウム量の算出結果は約23kg であった。このような違いが発生したのは、水素濃 度計測値の誤差および残留ナトリウムの一部が酸化物であったため、水との反応で水素が発生 しなかったことによるものと考えられる。

蒸気注入停止後、脱塩水を蒸発器に充填し、内表面に付着した苛性ソーダの洗浄処理を行った。この時の排水中のナトリウム濃度は数 mg/0であり、苛性ソーダの除去量は約 0.2kg であった。

洗浄処理終了後、脱塩水によるリンス、残留苛性ソーダの安定化を目的とした炭酸ガス封入 および加熱窒素ガスによる乾燥工程を経て全ての洗浄処理プロセスを終了した。窒素ガス置換 から蒸気洗浄処理、脱塩水によるリンス、炭酸ガス封入による安定化処理、乾燥工程の一連の プロセスに要した時間は約 21 日であった。所要時間の短縮化については洗浄処理の目的に沿 って検討することで可能となる。洗浄処理後の蒸気発生器の解体において、洗浄処理に起因す る損傷や伝熱管支持構造部における残留ナトリウムは観察されず、不活性雰囲気中での水蒸気 洗浄処理方法の有効性が確認された。

F:洗浄処理後作業

F1:解体作業等

本蒸気発生器の解体は、再使用を前提としないことから、いわゆる「あんこうの吊るし切り」 方法により、蒸気発生器は、架台に設置した状態で外胴から内部構造物に向かって順次プラズ マ溶断により解体した。洗浄処理後の解体には特段の問題は発生しなかった。

F2:廃水処理



排液は排水槽に貯められ、中和された後排水された。

図 2.3-3 蒸気量と水素ガス濃度の経時変化



図 2.3-4 廃液中のナトリウム濃度の経時変化

(3) まとめ

蒸気発生器については前項2.2 で示すように、ナトリウム洗浄処理等に係る実証試験が先行的 に実施され、これらの技術を活用することで大きな問題に繋がる事は発生しなかった。洗浄後の 伝熱管等の健全性確認(材料試験)や展示用モデルへの活用を考慮して、ナトリウム洗浄処理方 法としては不活性雰囲気中での水蒸気洗浄処理方法を採用した。この手法で、洗浄処理に起因す る損傷や伝熱管支持構造部等の狭隘部においても残留ナトリウムは観察されず、有効性が確認さ れたと思われる。

2.4 50WW 蒸気発生器試験施設中間熱交換器のナトリウム洗浄処理

中間熱交換器は、高速炉の1次系ナトリウムと2次系ナトリウムの間で熱を伝える熱交換器で ある。効率的に熱交換を行うために、大きな直径の外胴中に多数の小径の伝熱管からなる熱交換 部を設置している。伝熱管内外面ともナトリウムに浸漬されること、実機1次系ナトリウムは放 射化されている(本対象施設は非放射性)こと、カバーガス空間を有していること、ナトリウム の完全なドレンができない等の構造上の特徴を有しており、その解体・洗浄処理には困難が多い。 本中間熱交換器は1974年に50MW 蒸気発生器試験施設が建設されて以来、1986年に運転が終了す るまで、施設の重要な構成機器として運転が続けられた。その後、約11年間アルゴンガスを封入 した状態で維持管理され、1997年に50MW 蒸気発生器試験施設の解体・撤去にともなって中間熱 交換器も解体・ナトリウム洗浄処理された。運転中には何のトラブルも発生しておらず、補修等 も実施されていない。

50MW 蒸気発生器試験施設の中間熱交換器の構造を図 2.4-1 に示す。全長約 9m、上部胴の直径が

1.6m、下部胴直径が 1.3m、概略 重量約43トン(胴:16トン、 管束: 27 トン)の SUS316 製の 縦型シェルアンドチューブ型、 自由液面式中間熱交換器であ る。1次系のナトリウムは、胴 側を上部の流入ノズルより流 入し、管側を流れる2次系のナ トリウムと熱交換して下部流 出ノズルより流出する。2次系 のナトリウムは中央の下降管 を通り下部プレナムに流入し、 管板部で計2,044本の直管の伝 熱管に分配されて1次系のナ トリウムと熱交換しながら上 部プレナムに入り、4本のノズ ルより流出する。

本中間熱交換器は、伝熱管の 内外面ともナトリウムに浸漬 されていること、伝熱管の径 (外径15.9mm、肉厚1.2mm)が 小さいこと、1本約6.3mの伝 熱管を多数(2,044本)有する ことから、伝熱管の物量が大き いこと、1次系ナトリウムが自



図 2.4-1 中間熱交換器の構造

由液面を有するため、カバーガス空間が存在するなどの特徴がある。また、熱応力や熱衝撃を緩 和させるために、上部および下部プレナム部に熱遮へい板が設けられていること、伝熱管上部が サインカーブ状の曲管に変形していること、伝熱管下部に鏡板等が設けられているなどナトリウ ムを完全にドレンし難い構造となっている。

(1) 解体、ナトリウム洗浄処理作業の手順

中間熱交換器のナトリウム洗浄処理は図2.4-2に示す手順で実施される。



図 2.4-2 中間熱交換器の解体とナトリウム洗浄処理作業手順

(2) 解体、ナトリウム洗浄処理作業の内容

<u>A:洗浄処理条件の設定</u>

A1:機器の再使用の有無

50MW 蒸気発生器試験施設の解体・撤去にともなって解体するもので、再使用はしない。長期間の運転後の変形や損傷等構造上の問題点の観察は実施するが、材料試験等の計画はない。 A2:別設置洗浄槽の有無

炭酸ガスによる安定化の前処理は施設に据え付けた状態で可能であり、また、再使用をし ないことから特別な洗浄処理方法を考える必要はなく、ナトリウム処理室における大気中で の水蒸気洗浄処理方法が採用でき、特に別設置洗浄槽を必要としない。

A3:残留ナトリウムの状況、量の予測、観察

ここでは、保守側の設定として、ナトリウム接液部は、50MW 蒸気発生器験施設の配管、機器をナトリウム洗浄処理したときの実績値である 5.0mg/cm²(この値は閉塞した配管を含む保守側の値)を、カバーガス部については、2 号機 50MW 蒸気発生器の実績値である 2.8 mg/cm² をそれぞれ用いた。各部の表面積と、相当する部位の単位面積当たりの最大ナトリウム残留 量を乗じて得られた残留ナトリウム量は、1 次系側が約 55kg(合計の表面積約 981 m²)、2 次 系側が約 45kg(合計の表面積約 603 m²)合計約 100kg と予測された。

B:洗浄処理方法の選定

本中間熱交換器の解体、ナトリウム洗浄処理に当たっては、大型機器であること、大量のナ トリウムの残留が予想されること、構造的に水蒸気洗浄処理による洗浄処理廃液のドレンがで きないこと等の課題がある。

さらに上記A項の条件を考慮し、残留ナトリウムの大気中での万一の燃焼に配慮して、1 次 系側のナトリウムは中間熱交換器が試験施設に設置された状態で炭酸ガスによる安定化処理 を行った。その後、内胴を引抜き、第二ナトリウム処理室に運搬して高圧の水蒸気による大気 中水蒸気洗浄処理方法を主体としてナトリウム洗浄処理を実施することとした。塊状のナトリ ウムについては、金属へラにより掻取り等の機械的に除去し、ドレン溜り部等に残留している ナトリウムは溶融・燃焼処理する方法が併用された。

C:洗浄処理のための装置の設定

ナトリウム処理室およびそこに設置されているナトリウム洗浄処理施設を使用する。

<u>D:洗浄処理前作業</u>

D1: ナトリウムの確実なドレン

運転終了時点で解体等の予定が不明であったため、ドレンにあたっては特別な配慮はなさ れておらず、予熱温度 200℃、保持時間 24 時間で行われた。

D2:炭酸ガスによる安定化前処理

中間熱交換器が試験施設に設置された状態で、運搬時の燃焼を防止するために炭酸ガスに よる安定化処理を行った。その内容は以下の通りである。

①中間熱交換器内の真空引き(-0.92kg/cm²)

②1回目炭酸ガス封入 (→0.03 kg/cm²)

③約 10 時間保持 (→-0.33 kg/cm²)

④2回目炭酸ガス封入 (→0.35kg/cm²)

⑤約 22 時間保持 (→0.28 kg/cm²)

⑥3回目炭酸ガス封入 (→0.5kg/cm²)

D3:内部構造物の引抜

図 2.4-3 に内部構造物の撤去、解体、ナトリウム洗浄処理の全体の手順を示す。図 2.4-4 に内部構造物の撤去の手順を示す。図 2.4-5 に内部構造物の引抜きの状況を示す。

内胴引抜きにあたっては、ナトリウム燃焼防止のため内胴の上部フランジ部に内胴引抜き用 の厚さ 0.3mm の酢酸ビニール製キャスクを取付け、酸素濃度計を上下 2 個所に設置し、キャ スク内部の酸素濃度が 3%以下になるようガス置換した。内胴の上部管板と胴フランジ部の ボルトナットを取外し、油圧ジャッキ (30ton×4 基)を用いて内胴と外胴のナトリウムをせ ん断した。この時内胴の引抜き荷重は設置した圧縮型ロードセルにより 52ton のせん断力を 目標値として監視した。この時のせん断力は次の方法で求めた。単位面積に当たりのせん断 力は、研究開発で得られた実績値¹⁴⁾である室温 20℃での値の 3.0 kg/cm²に 15%の余裕を入 れた 3.45 kg/cm²とし、せん断部の表面積としては、ピストンリング部およびピストンリン グ部のドレン溜り部と外胴との接触部とした。せん断による引抜き加重はこれらの値を乗じ て、28 トン、全体の引抜き加重はそこに内胴の重さ 24 トンを加えた 52 トンとした。実際に 測定したせん断荷重は 21ton であり、その荷重から逆算するとせん断力は約 2.7kg/cm²であ った。ナトリウム機器の解体時にナトリウム固着部分を引抜く際のナトリウムせん断力は約 3.0kg/ cm²とすることが妥当であると考えられる。引抜きの要領は以下の通りである。

①引抜き荷重は 52 ton を目標として徐々に加重を増加

②52tonまで加重を加えたら30分程度保持し、ロードセルにて加重の低下の有無を確認
③引抜けない場合は、推定引抜き荷重値を1.5、2.0、2.5倍した値を目標値に、荷重を増加

④荷重の低下傾向が認められたら油圧ジャッキの荷重の増加を停止し、低下傾向が安定す るまで荷重を保持

⑤荷重の低下傾向が安定したら、再度油圧ジャッキの荷重を増加され、約200mm 程度まで 内胴が引抜かれることを確認

ナトリウム固着部を切り離すために油圧ジャッキを用いる方法は引抜きストロークの調 整が容易であり、大きな引抜き荷重が想定される作業には適した方法であることが判った。 D4:内部構造物の運搬

図 2.4-6 に内部構造物の運搬の手順を示す。図 2.4-7 にその状況を示す。胴から内胴が引 抜かれたら、胴と内胴の間のビニールキャスクを 2 箇所で絞込み、テーピングし切断する。 内胴はビニールキャスク内に密閉された状態で、天井クレーンによって架台から運搬車両の 荷台へ吊り降ろされ、横置きに積載される。ナトリウム洗浄処理場所までの運搬時は、窒素 ガスボンベを運搬車両に乗せ固定し、キャスク内へ窒素ガスを供給する。

D5:必要により部品、機器、部位に分解または切断

分解または切断はナトリウムの残留状況により判断され、適宜実施される。切断は、熱に

よるナトリウムの燃焼を発生させないように、プラズマ溶断等は採用せず、原則的に熱によ る影響の少ない、パイプカッター、バンドソー、グラインダ等を使用する。外胴等の厚肉部 はアークガウジング(溶断機)により表面を掘り込んだ後、グラインダ等により最終切断を する。内部構造物のナトリウムの残留状況を観察して、燃焼の危険性の無いときにはアーク ガウジングやプラズマ溶断機を使用する。

D6:必要により掻取り等による残留ナトリウムの除去

内部構造物のナトリウム残留状況を図 2.4-8 に示す。表面に残留しているナトリウムは金 属製ヘラ等で除去する。



図 2.4-3 内部構造物の解体とナトリウム洗浄処理手順



図 2.4-4 内部構造物の撤去手順



図 2.4-5 内部構造物の引抜き



図 2.4-6 内部構造物の運搬手順



図 2.4-7 内部構造物の運搬



(内部構造物を引抜いた状態)

(カバーガス領域)

図 2.4-8 内部構造物の残留ナトリウム

<u>E:洗浄処理作業</u>

- E1:大気中水蒸気洗浄処理方法による洗浄処理
 - 内部構造物(管束部)の洗浄処理

ナトリウム洗浄処理作業の基本的な流れは水蒸気洗浄処理、解体、水洗浄処理である。解体・洗浄処理は、内胴外表面の水蒸気洗浄処理、内胴内面の水蒸気洗浄処理、内胴下部鏡部 および上部鏡部の切断・水蒸気洗浄処理、伝熱管内部および下降管内表面の水蒸気洗浄処理、 内胴解体・水洗浄処理の順で行なった。

内部構造物(管束部)のナトリウム洗浄処理の手順およびその概略内容を図2.4-9および 図2.4-10に示す。内胴の引抜きのため外胴とのリップ溶接部が開口されたことから、まず 内胴の表面全体を洗浄し、次いで内胴各部の洗浄処理が行われた。内胴の洗浄処理にあたっ ては、洗浄処理のための内胴解体は行わず、先に内胴の既存開口部と新たに開けた孔部より 水蒸気洗浄処理ノズルを差し込んで洗浄処理し、その後に解体した。これは、ナトリウムの 残留した状態で厚肉構造物を切断することが困難であること、大型機器の解体のためナトリ ウム残留物を洗浄処理しないで大気中保管することが困難であったためである。内胴下部の 鏡部はドレン管のサイホン切れによりドレンできないナトリウムが残留していたため、同鏡 部を切断解体し、ナトリウムの掻き出しや削り取りにより除去し、その後にナトリウム洗浄 処理を実施した。洗浄処理では、窒素置換による酸素濃度を3%以下に保持することにした。



図 2.4-9 内部構造物(管束部)のナトリウム洗浄処理手順(1)

① 内胴(管束)外表面全体の洗浄処理(推定残留 Na 量:約13.4kg)

- ・開口部周りおよびピストンリング部の塊状の残留 Na をヘラ等で除去後、内胴(管束) 外表面全体を水蒸気で洗浄処理
- ・内胴(管束)内部を窒素ガスで酸素濃度3%以下に置換



⑤管束解体·水洗浄処理

・下降管のセーフエンド部、下降管サーマルスリーブ内表面、ボルトネジ部等の洗浄 処理の困難な部位については解体時に随時洗浄処理

図 2.4-10 内部構造物(管束部)のナトリウム処理手順(2)

本ナトリウム洗浄処理に採用された、内胴内部に開口部から水蒸気を送り込み洗浄処理する 方法では、水蒸気注入量の制御が困難であり、凝縮水が直接残留ナトリウムと反応する現象が 発生した。これは作業員の危険を回避するために洗浄処理冶具を内胴開口部に差し込んだまま 水蒸気を送り込んで洗浄処理したため、水蒸気の状態が目視できなかったことによる。そのた め、長尺の洗浄処理ノズルを用い少量ずつ水蒸気を注入する方法に変更することによって、凝 縮水とナトリウムの反応を防止した。洗浄処理は一定時間ごとに採取した凝縮水に電気伝導度 の低下傾向が認められること、ファイバースコープ等による概観の目視により、ナトリウムの 残存のないことを確認して終了とした。伝熱管内部および下降管内表面の洗浄処理は、上部お よび下部管板の伝熱管孔内に伝熱管の洗浄処理専用に製作し、図 2.4-11 に示す洗浄処理ノズ ル冶具を取り付け、ノズルから水蒸気を注入することによって伝熱管1本毎に対して洗浄処理 を行った。内部構造物の洗浄処理状況を図 2.4-12 に示す。内胴底部には液滴上のナトリウム が多く残留していた。熱遮蔽板部のナトリウム洗浄処理状況を図 2.4-13 に示す。カバーガス 部のナトリウム残留状況および洗浄処理状況を図 2.4-14 に示す。内胴の引抜き時にはカバー ガス部の表面は白色をしていたが、時間が経つにつれて茶褐色化に変色した。内胴中間部のナ トリウム残留状況および洗浄処理後の状況を図 2.4-15 に示す。フイルム状に残留していたナ トリウムがきれいに洗浄処理された。



図 2.4-11 伝熱管内部および下降管内表面用の洗浄処理ノズル治具



図 2.4-12 内部構造物の洗浄処理



図 2.4-13 熱遮蔽板部のナトリウム洗浄処理

JAEA-Technology 2012-033



24



蒸気

窒素ガスによる 内部の滞留水素 ガスの希釈放出

図 2.4-14 カバーガス部の洗浄処理



水酸化ナトリ ウムの付着物 黒く見える部 分は溶断によ る焼け跡

図 2.4-15 内胴中間部の残留ナト リウムおよび洗浄処理後の状況

続いて外胴については、施設からナトリウム処理室への運搬、搬入を行い、ナトリウム洗浄 処理を実施した。洗浄処理の手順を図 2.4-16 および図 2.4-17 に示す。外胴部のナトリウム残 留状況と、外胴部のナトリウム除去作業の状況を図 2.4-18 に示す。外部胴の上部(カバーガス 層)にはナトリウムベーパが多く付着しており、水蒸気洗浄に先立ってヘラ等を用いてナトリ ウムの除去を行った。



(4)解体·水洗浄

図 2.4-16 外胴のナトリウム洗浄処理のイメージ図



図 2.4-17 外胴のナトリウム洗浄処理手順



(a)外胴部の残留ナトリウム



(b)外胴部のナトリウム掻きだし作業

図 2.4-18 外部胴の残留ナトリウムとその除去作業

外胴部のナトリウム洗浄処理について図 2.4-19 にそれぞれ示す。付着されていたナトリウムは、 蒸気洗浄によってほぼ完全に除去されている。また、専用治具を用いた伝熱管内面のナトリウム 洗浄処理の状況を図 2.4-20 に示す。



(a)外胴部のナトリウム洗浄処理



(b)外胴部のナトリウム洗浄処理後の状況

図 2.4-19 外部胴のナトリウム洗浄処理



図 2.4-20 伝熱管内面のナトリウム洗浄処理の状況

水蒸気洗浄処理および燃焼処理後の廃液重量と中和滴定から求めたナトリウム残留量を、予 測値と合わせて表 2.4-1 に示す。実際に残留していたナトリウム量は全体で約 60kg であり、 予測値の約 60%であった。この推定量の誤差は、単位面積当たりの残留量の保守的な見積りや ドレン溜の安全側での計算誤差によるものであった。カバーガス部では、計画時の予測ナトリ ウム残留量は約 7kg であったが、実際の残留量は約 34kg であった。大きな差が生じた原因は、 中間熱交換器の運転が長期にわたっていることや、改造工事により一次系側のナトリウムのカ バーガス中に不純物が混入し、カバーガス部にナトリウムおよび酸化ナトリウムが残留し易い 環境となっていたこと等によるものと推定される。なお、実績値には下部プレナム部および外 胴は除いている。また、外胴の廃液(ナトリウム処理量)が測定されていないこと、その他の 測定についても洗浄廃液が完全に回収できなかった点もあり、多少の誤差が含まれている。

約40ton以上もある大型機器のナトリウム洗浄処理を大気中で水蒸気洗浄処理を行うことは 国内で初めてのことであり、貴重な経験が得られた。炭酸ガスによる残留ナトリウムの安定化 処理は、万一のナトリウムの発火を防止する上で有効な手段であった。ナトリウムの残留量や 状態が完全に目視確認できないような場所を大気中水蒸気洗浄処理する場合、水蒸気と窒素ガ スの混合中の水蒸気量を少なくして水蒸気とナトリウムの反応状態を慎重に確認しながら作 業を進めることが重要である。また、水蒸気注入後ナトリウムと水蒸気の反応が始まるのに時 間遅れがあり、洗浄処理状況観察の際にはその時間遅れを考慮する必要がある。

NT.	立17 1字	推定值	実績値	単位当りのNa付
INO.		(kg)	(kg)	着量,(mg/cm ²)
1	内胴外表面(削取り Na)	1.4	4.3*1 (8.4)	
2	内胴外表面	1.4	2.0	
3	熱遮蔽板部洗浄	22.70	3.04	
4	内胴中間部	52.19	2.046	0.23
5	カバーガス部内部洗浄	7.03	34.225	13.7
6	外胴内表面(削取り Na)	2.36	5.0^{*2} (9.7)	
7	ドレン溜まり(下部プレナム部)	16.0	3.0	
8	伝熱管内面、下降管内表面	29.94	1.3	0.23
	(伝熱管直管部に限る)			
9	ピストンリング・ドレン溜り部	12.0	0.0	
	総ナトリウム量	約 102	約 60	約 3.6* ³

表 2.4-1 ナトリウム残留量の予測値と実績値

*1 削取ったナトリウムの殆どはカバーガス部のものである。削りとったナトリウムの多くは炭酸ナトリウムの化合物と推定されるが、それをナトリウム比重に換算して求めている。カッコ内の数値は実測重量である。

*2 削りとったナトリウムの殆どは外胴底部、カバーガス部のものである。削りとったナトリウムの多くは炭酸ナトリウムの化合物と推定されるが、それをナトリウム比重に換算して求めている。カッコ内の数値は実測重量である。

*3 総ナトリウム処理量を IHX の全表面積で除算した。但し、表中 No.7 のドレン溜まり 3.0kg におけるナトリウム量は除いた。

(3) まとめ

全長約 9m、伝熱管本数 2044 本で総重量約 43 トンの中間熱交換器について解体およびナトリウム洗浄処理を進める中で、以下のような経験・知見を得た。

・大型機器の炭酸ガスによる残留ナトリウムの安定化処理は初めての経験であったが、今回の解体洗浄が問題なく実施され、万が一のナトリウムの発火等を防止する上で安定化処理の効果が確認できた。

・中間熱交換器中胴の引抜きにおいて、ナトリウムのせん断力は「約2.7kg/cm²」であり、過去の 実験にて得られた値約3.0kg/cm²が妥当であることが確認された。

・機器に残留するナトリウムの実績値は予測値よりも下回ったが、保守的な事前評価がなされて おり、概ね妥当な予測評価であった。

2.5 大口径電磁流量計校正試験装置(SFCAT)のナトリウム洗浄処理

大口径電磁流量計校正試験装置(以下 SFCAT)は、「もんじゅ」の1次系、2次系および補助炉心 冷却系(ACS)流量計の実液校正を実施することを主目的に、併せて超音波流量計の特性把握を目 的に 1988 年に原子力機構・大洗の機器・構造第一試験室に設置された。運転は 1989 年に終了し、 1999 年に機器・構造第一試験室のナトリウム試験装置の解体・ナトリウム洗浄処理の一環として解 体・撤去された。

SFCAT の主要機器であるヘッドタンクの構造図および大口径配管(24B)引き回しルート図を図 2.5-1に示す。全体施設の系統図を図 2.5-2に示す。

本装置は、約 60m³ 容積のヘッドタンクと大口径(24B)配管で構成されている。ヘッドタンク 自体は3,600^{+×}6,000^{H×}19⁺mmの鏡付き円筒容器であり、ベース部を含めると最大径は4,100mm、 重量 11ton である。ヘッドタンク内には、多孔板とナトリウム液面計が取り付けられている。主 要配管は 24B と口径が大きいが、類似の配管のナトリウム洗浄処理については経験も多いことか ら、ここでは主要機器であるヘッドタンクについての解体・ナトリウム洗浄処理経験のみを示す。

(1) ナトリウム洗浄処理作業の手順

基本はタンクの洗浄であり、従来から多くの経験を有している。作業は、次の図 2.5-3 に示す 手順で実施された。

(2) ナトリウム洗浄処理作業の内容

<u>A:洗浄処理条件の設定</u>

A1:機器の再使用の有無

解体し廃棄するのが目的であり、再使用はしない。

A2:別設置洗浄槽の有無の選定

ナトリウム洗浄室に搬入して直接洗浄処理することが可能なため、別洗浄槽は必要としない。 A3:残留ナトリウムの状況、量の予測、観察

試験装置の解体を行う前に装置内部に付着・残留しているナトリウム量を試算した。試算 には、1997年10月に実施された50MW中間熱交換器(IHX)の解体・ナトリウム洗浄処理に於 いて取得された、ナトリウム接触部における単位面積当りのナトリウム付着量の平均値 0.23mg/cm²、およびカバーガス層部における平均値13.7mg/cm²を使用した。ナトリウム接触 部およびガス層部の面積を算出し、残留ナトリウム量を求めた。その結果、付着しているナ トリウム量は約4.0kgと予測された。洗浄処理に当たってあらかじめ試験容器の内部の状況 はファイバースコープにより観測された(図2.5-4)。

<u>B:洗浄処理方法の選定</u>

主要部は大型のヘッドタンク(3600⁺×5400⁺×19⁺mm)である。ヘッドタンク内部には、 数本の温度および液面計測用のセンサーと多孔板1枚が取り付けられている程度であり、切 断・解体はそれほど大きな困難は伴わない。また、ナトリウム付着量も4.0kg と少ない。こ れらの状況から、大気中水蒸気洗浄処理方法が採用された。大型バンドーによるヘッドタン クの切断後各部位ごとに洗浄処理された。

C:洗浄処理施設の設定

専用のナトリウム処理室に搬入して実施する。

D:洗浄処理前作業

D1: ナトリウムの確実なドレン

装置運転後の最終ドレンでは、装置の解体・ナトリウム洗浄処理が予定されていなかった ため、ナトリウムドレン時における特別な作業などは実施されていない。

D2: ヘッドタンクの撤去、ナトリウム処理室への運搬・搬入・解体

ヘッドタンクに接続されている配管の口径が24B(外径610mm)と大きいことから、配管の 切断には分割クラムシェルパイプ切断開先加工機(通称ローリングカッター)が使用された。

ヘッドタンク本体は、建屋に設置されている天井走行クレーン(60ton)を使用して吊り上 げ、1階フロアに用意した専用の運搬洗浄台車に仮置きした後にヘッドタンク下部スカート 部をガスおよびプラズマ溶断にて切断撤去した。

図 2.5-5(a)~(d)にヘッドタンクの架台への設置状況および解体・撤去状況を示す。下部ス カート部が撤去されたヘッドタンクを大型トレーラに積載し、構内のナトリウム処理施設へ 運搬し、ナトリウム処理施設内に設置した大型バンドソーを用いて内部の多孔板上部を切断 した。切断中は、付着ナトリウムの発火・発煙を抑制するためにヘッドタンク内に窒素ガス が連続供給された。

E:洗浄処理作業

E1: 散水によるナトリウム洗浄処理

当初、ナトリウム洗浄処理方法として大気中水蒸気洗浄法を計画していたが、解体後の内 部観察の結果、付着しているナトリウム量が極僅かであることが判明したことから、散水に よる洗浄処理に切り替えた。散水している時間は 30 分程度であり、水洗浄処理後のタンク内 面壁のブラッシング等の時間を含め、ナトリウム洗浄に費やした時間は約 90 分であった。ヘ ッドタンク内部および多孔板でのナトリウム付着状況を図 2.5-6 に示す。また、鏡部、ヘッ ドタンク上部、多孔板でのナトリウム洗浄処理の状況を図 2.5-7 に示す。散水による洗浄処 理では発火や発煙などの事象発生はなく、無事にナトリウム処理作が完了した。

<u>F:洗浄処理後作業</u>

F1:廃水処理

散水処理にて発生した洗浄廃液は、ナトリウム処理施設に設置されている中和装置を使用して塩酸により規定値内に中和した後に排水した。



図 2.5-1 SFCAT ヘッドタンク構造図および大口径配管(24B)引き回しルート図



図 2.5-2 大口径電磁流量計校正試験装置(SFCAT)の系統図



図 2.5-3 ナトリウム洗浄処理作業の手順



図 2.5-4 試験容器内部のファイバースコープによる観測



(a) ヘッドタンクの設置の状況





(c)ヘッドタンクの撤去の状況

(b) ヘッドタンクのナトリウム処理室への運 搬の状況



(d) ヘッドタンクの切断(メージと実施状況



図 2.5-5 ヘッドタンクの解体・撤去



(a) 内部のナトリウム付着の状況

(b)多孔板のナトリウム付着の状況

図 2.5-6 ヘッドタンク内部および多孔板のナトリウム付着状況



(a) ヘッドタンク鏡部の洗浄



(b) ヘッドタンク上部の洗浄



(c) ヘッドタンク多孔板の洗浄

図 2.5-7 鏡部、ヘッドタンク上部および多孔板のナトリウム洗浄処理の状況

(3)まとめ

ここでは、約 60m³容積のヘッドタンク(3600⁶×6000 ^H×19^t mm)を代表機器として取 り上げ、解体およびナトリウム洗浄を実施した。マイクロスコープによる内部観察および解体 後の内部開放観察の結果、内部に付着するナトリウム量は想定した量(約 4 k g)よりもかなり 少なかった。このため、安全確保した上で、大気中における散水洗浄によって計画的に比較的 容易に実施することができた。

2.6 炉容器ナトリウム中試験装置(SITR)のナトリウム洗浄処理

炉容器ナトリウム中試験装置(以下 SITR)は、「もんじゅ」炉容器上部(ナトリウム液面近傍付 近)用熱応力緩和構造の特性評価を目的に、1981年に完成し 1986年に所期目的を達成して運転 を終了した。1999年にナトリウム試験装置の解体・洗浄処理工事の一環として解体・撤去された。

SITR 試験装置は上部の直径約2m、高さ約6.4mの試験容器とこれにナトリウムを供給するルー プ系から構成される。SITR の主要機器である炉容器上部構造モデル(試験部)の構造図等を図 2.6-1 に示す。全体施設の系統図を図2.6-2 に示す。ここでは、そのうち比較的作業の複雑な試 験容器について、解体・ナトリウム洗浄処理の経験を述べる。

本装置は原型炉「もんじゅ」の液面近傍の構造を模擬したものであり、炉容器(容器本体)、プ ラグ、炉内構造物、ペデスタルで構成されている。炉容器の板厚、バケット部断面形状、Y ピー ス付け根からソールプレートまでの寸法は実機と同等であるが、直径が1/4に縮小されている。 また、炉内構造物はナトリウム容積を少なくする目的で組み込まれている中子と、それを支持す る支持胴で構成されている。試験部の最大径は約3,500mm,全長約6,000mm、総重量約20tonであ る。



図 2.6-1 SITR 炉容器上部構造モデル(試験部)の構造と架台取り付け状況




(1) ナトリウム洗浄処理作業の手順

試験容器内部には複雑な構造物が組み込まれており、その表面にはナトリウムが付着している。解体時に構造物を部品レベルまで解体しなければ完全なナトリウムの除去ができない。 このため、解体時に大気中に曝されナトリウムが発火・燃焼することを防止する目的で、ナトリウムの表面に炭酸ナトリウム皮膜を形成する安定化処理を施すこととした。図 2.6-3 に その手順を示す。





F1 : 機器の裁断・廃棄

F2:廃水処理

図 2.6-3 炉容器ナトリウム中試験装置(SITR)のナトリウム洗浄処理作業手順

(2) ナトリウム洗浄処理作業の内容

<u>A:洗浄処理条件の設定</u>

A1:機器の再使用の有無

解体し廃棄するのが目的であり、再使用はしない。

A2:別設置洗浄槽の有無の選定

ナトリウム洗浄室に搬入して直接洗浄処理するため、別設置洗浄槽は必要としない。

A3:残留ナトリウムの状況、量の予測、観察

試験装置の解体を行う前に装置内部に付着・残留しているナトリウム量を試算した。試算に は、1997 年 10 月に実施された 50MW 中間熱交換器 (IHX)の解体・洗浄処理作業で得られたナト リウム浸漬部における平均値 0.23mg/cm²、およびガス層部における平均値 13.7mg/cm²を使用し た。ナトリウム接触部およびガス層部の面積を算出し、残留ナトリウム量を求めたところ約 4kg と予測された。さらに、SITR には機器・部品構造上中子吊胴部に、ナトリウム液面の熱応力緩 和を目的としたバケットがあり、構造的にナトリウムのドレン後もナトリウムは滞留し、その 量は約 35kg と予測された。洗浄処理に当たってあらかじめ試験容器の内部の状況はファイバ ースコープにより観測された。

B:洗浄処理方法の選定

SITR のような大型かつ複雑な構造の試験装置のナトリウム洗浄処理手法としては、不活性ガ ス+水蒸気による不活性ガス中蒸気洗浄処理法が有効と考えられるが、本装置では内部に約 35kg の塊状ナトリウムを保有する部位があることからこの方法は安全上好ましくない。また、 アルコール洗浄処理は、多量の可燃性液体が発生しその廃液処理が容易ではないことから積極 的な採用は避けたい。そこで、装置内部に組み込まれている機器部品を個々に取り外し、大気 中で水蒸気洗浄処理する方式が最も有効であると判断された。この場合の注意事項として、機 器分解作業中にナトリウムの発火を抑制する必要があることから、不活性ガスを満たしたビニ ルバッグで機器を覆いナトリウムと空気との接触を防止する対策を講じた。なお、残存してい る約 35kg の塊状ナトリウムは掻き出しにて回収し、燃焼法にて処理処分することにした。

C:洗浄処理施設の設定

専用のナトリウム処理室を使用する。

D:洗浄処理前作業

D1: ナトリウムの確実なドレン

装置運転後の最終ドレンでは、装置の解体・ナトリウム洗浄処理が予定されていなかったた め、ナトリウムドレン時における特別な作業などは実施されていない。

D2: 配管の切断、ナトリウムに浸漬していない部位の撤去

試験容器に取り付けられている保温材および予熱ヒータ類を撤去した後、バンドソーおよび セイバーソーを使用して配管を切断した。

D3 : CCD カメラによるタンク内部観察

ナトリウムが残留していると予測される部位は、①構造的にナトリウムがドレンできず、残

留する部位(熱遮蔽板部、炉容器Yピース部、 整流板部、中子熱遮蔽板部、オーバーフロー ノズル部の5カ所)、②十分なドレンができな い可能性がある部位(狭隘部、水平部)、③ミ ストやベーパが付着する可能性がある部位 (カバーガス領域)などである。これらの部 位のおけるナトリウムの付着状況について、 図 2.6-4 に示すように CCD カメラにより観察 した。その一例を図 2.6-5 に示す。タンク内 部のナトリウム付着状況観察の結果、ナトリ ウム接液部およびガス層部には著しいナトリ ウムの付着はないことが確認された。 D4:ナトリウム処理室への搬入



図 2.6-4 CCD カメラによる内部のナトリウム 付着状況の観察イメージ

試験容器は、建屋に設置されている天井走行クレーン(60ton)を使用して吊り上げ(図 2.6-6)、 1階フロアに用意した専用の運搬洗浄台車に仮置きし、その後試験容器上部にある熱遮へい用 のカーボンブロックを撤去した。試験容器の運搬には大型トレーラを使用した(図 2.6-7)。 D5: ナトリウム安定化処理

図 2.6-8 示す安定化処理システムにより、試験容器に湿り炭酸ガスを注入し残留しているナトリウムの安定化処理を行った。安定化処理実施状況を図 2.6-9 に示す。



図 2.6-5 CCD カメラによるタンク内部のナトリウム付着状況





図 2.6-6 天井クレーンによる試験容器の吊上げ状況



図 2.6-7 試験容器のナトリウム処理室への搬送



図 2.6-8 SITR の安定化処理システム構成



図 2.6-9 SITR の安定化処理

安定化処理条件として以下を採用した。

- ・湿り炭酸ガス中湿度:~100%RH
- ・湿り炭酸ガスの供給量: 30~40 リットル/分
- ·水素濃度許容値:2%(爆発下限値の1/2)
- ・生成物確認: X R D による生成物同定、C C D カメラによる内部観察

装置内に供給する湿り炭酸ガスの水分量は、ドラム缶内で製造されたままの状態(ほぼ 100%RH)で使用した。湿り炭酸ガス供給量は装置内部の温度を監視しながら調整し、最終的に 30~40 リットル/分とした。発生する水素ガスの濃度管理は、爆発下限値の 1/2 に当たる 2%を 超える場合には湿り炭酸ガスの供給を停止し、窒素ガスによる希釈排気することにした。本作 業による炭酸ナトリウムの生成進行を確認するために、装置内部に塊状のナトリウムサンプル を挿入して定時的に採取し分析した。採取したサンプルについて、変化が生じた層の形成厚み 確認と XDR を用いて炭酸ナトリウム生成確認の同定分析を行った。

安定化処理時の水素ガス発生挙動は以下の通りである。処理前半部分では爆発下限値の4% を越える勢いの急激な上昇が見られ、湿り炭酸ガスの供給を中断し水素ガス放出のための希釈 ガス供給を頻繁に実施した。処理作業後半では、水素ガスの濃度上昇は穏やかであり、更なる 時間経過と共に濃度の低下が見られた。なお、装置内温度が急激に上昇することはなくほぼ一 定であった。ナトリウムサンプルを上述した水素濃度が低下した時点で採取し分析した結果、 Na₂CO₃の生成を確認した。

D6: 必要により必要部位を切断

胴部を輪切りにするために大型バンドソーにて切断作業を開始したが、試験容器内部ある片 持ちばり構造の各種ウエル等が切断歯との接触により暴れ切断歯を損傷させることから、切断 位置を変更するなどの措置を講じたために6時間ほどの長時間の作業となった。切断の模式図 および実施状況を図 2.6-10 に示す。



図 2.6-10 試験容器胴の切断模式図と切断実施の状況

D7:内部構造物の引き抜き

中子を主とする内部構造物はラフタークレーン車を使用して引抜いた。内部構造物や試験容 器内面に付着していたナトリウムは、安定化処理により完全に白色の化合物に変化していた。 構造的にナトリウムがドレンできない部位にある塊状ナトリウム部では、その表層に約2~ 5mm(目視計測)の皮膜が形成されていた。なお、ネジ部や差込部等の狭隘部においては、安 定化処理層が十分な厚みに生成されていないことが確認された。

D8:必要により掻き取り等による残留ナトリウムの除去

残存している約35kgの塊状ナトリウムは掻き出しにて回収し、燃焼法にて処理処分した。

E:洗浄処理作業

E1:水蒸気による大気中洗浄処理 付着している塊状ナトリウムの場合 は、安定化処理が内部まで到達してい ない可能性があるため、当初の計画通 り大気中にて窒素ガスを混ぜた水蒸 気によりナトリウム洗浄処理を実施 した。図 2.6-11 に水蒸気洗浄処理の 状況を示す。



図 2.6-11 試験装置内部の水蒸気洗浄の状況

<u>F:洗浄処理後作業</u>F1:機器の裁断・廃棄

洗浄処理終了後の試験容器および内部構造物のサーマルライナは、大型バンドソーで細断す る計画であったが、切断歯が当たる部位がテーパー部になっていることから、歯すべりにより サーマルライナに食い込まず切断作業が進行しないことからプラズマ溶断による切断に変更 した。

F2: 廃水処理

発生した洗浄廃液は塩酸にて中和処理し、ナトリウム処理室付帯設備にて排水した。

(3) まとめ

本試験装置は炉上部機構を模擬したものであり、解体・洗浄においては複雑な内部構造をひ とつひとつ分解しながら実施する必要があった。この分解作業は大気環境下で行わなければなら ず、ナトリウムの発火を抑制する手段として、ファイバースコープによる内部観察、湿り炭酸ガ スによる安定化措置を講じた。安定化措置によって容器表面は十分な被膜形成(目視で 2~5mm 程度)が得られたが、狭隘部やホルト部は十分な被膜形成が得られなかった。また、容器の直径 は約 2m、高さは約 6.4mと大きく、切断に約 6 時間を費やした。しかし、事前の十分な計画段 取りと慎重な対応によって解体とナトリウム洗浄処理を終えることができた。

2.7 大型ナトリウムポンプ試験装置(SPTL)のナトリウム洗浄処理

大型ナトリウムポンプ試験装置(以下、SPTL と略記) は、「もんじゅ」機械式ナトリウムポン プの実液性能把握を目的に1972年に完成し、1991年に所期目的を達成して運転を終了した。1999 年にナトリウム試験装置の解体・洗浄処理工事の一環として解体・撤去された。

SPTL の主要機器である「もんじゅ」1次系主循環ポンプモックアップ試験装置の概念図を図 2.7-1 に示す。全体施設の系統図を図 2.7-2 に示す。ここでは構造が複雑でナトリウム洗浄処理 に技術を必要とするモックアップ試験装置について記述する。

本ポンプは「もんじゅ」のフルモックアップの大きさであり、モータ部やカップリング部を除 き、全長が7750mm、アウターケーシングの外径が1800mm、総重量が約56トンである。その他、 モータ/ギヤ部、カップリング/メカシール部、アウターケーシングおよびシャフト、インペラ 等で構成されている。なお、本装置のカップリング部およびインペラ部を用いて、「もんじゅ」の 展示用機器としてカットモデルが作製され、「エムシースクエア」に展示された。



図 2.7-1 「もんじゅ」1次系主循環ポンプモックアップ試験概念図





(1) ナトリウム洗浄処理作業の手順

モックアップポンプは複雑構造であり、アウターケーシング内部には多数の部品が内蔵されて いる。これらの部品を単品レベルまで解体しなければ完全なナトリウム処理作業ができない。ナ トリウム洗浄処理作業の手順を図 2.7-3 に示す。



図 2.7-3 SPTL のナトリウム洗浄処理作業手順

(2) ナトリウム洗浄処理作業の内容

<u>A:洗浄処理条件の設定</u>

A1:機器の再使用の有無

解体し廃棄するのが目的であり、再使用はしない。本装置のカップリング部およびインペ ラ部は、「もんじゅ」の展示用カットモデルの製作に供される。

A2:別設置洗浄槽の有無の選定

洗浄方法として窒素ガス+水蒸気による不活性ガス中水蒸気洗浄処理方法が採用され、ア ウターケーシングを洗浄槽に代用することとした。ナトリウム処理室にて、必要に応じて機 器を切断しつつ、不活性ガス中水蒸気洗浄処理(必要により安定化処理を実施)する。その ため、別設置洗浄槽は必要としない。

A3:残留ナトリウムの状況、量の予測、観察

試験装置の解体を行う前に装置内部に付着・残留しているナトリウム量を試算した。試算 には、実績値であるナトリウム浸漬部における平均値 0.23mg/cm²、およびカバーガス層部に おける平均値 13.7mg/cm²を使用した。ナトリウム浸漬部およびカバーガス層部の面積を算出 し、残留ナトリウム量を求める。その結果、約 6.0kg のナトリウムが残留していると予測さ れた。洗浄処理に当たって予め試験容器の内部の状況はファイバースコープにより観測した。

B: ナトリウム洗浄処理方法の選定

SPTL は過去に洗浄処理した経験があり、その時にはアウターケーシング内部にある構造物は ビニルバッグ方式で一度取り出し、専用の大型洗浄槽に組み込んで不活性ガス中水蒸気洗浄処 理方法により洗浄処理している。今回の洗浄処理もこの手法を採用する方向で検討を進めたが、 洗浄槽は既に処分されており、新たに洗浄槽を製作することはコスト削減の観点から望ましく ない。そこで、アウターケーシングを洗浄槽として活用できないかを検討した。その場合のメ リットとしては、内部構造物を引抜くことは必要なく、アウターケーシングと一体でナトリウ ム処理室に搬入して作業することができる。

過去に行われた洗浄処理では、洗浄槽内に水蒸気を約450kg供給した時点で発生水素濃度が 1%を下回っていたことから、今回の洗浄処理においてもほぼ同等の水蒸気量を供給する計画と した。

洗浄処理の初期の段階では、供給する水蒸気量を 0.3kg/h から段階的に 8kg/h まで増加させ、 最終段階では最大 60kg/h とした(窒素ガスの供給量は 20Nm³/h 一定)。なお、発生する水素濃 度が 1%(途中で 2%に変更)を越えた場合は水蒸気の供給を停止し、窒素ガスの供給量を増 やすこととした。洗浄処理の終了判断は、発生する水素が 0.1%以下程度に落ち着いた場合と定 め、その時点で炭酸ガス供給による乾燥処理工程に移るものとした。

C:洗浄処理施設の設定

ナトリウム処理室を使用する。洗浄処理には、50MW 蒸気発生器の解体にも使用された可搬型

水蒸気洗浄処理装置を使用する。洗浄処理に必要な水蒸気および窒素ガスは、ナトリウム処理 室に設置されている水蒸気供給設備および窒素ガス供給設備から取入れ、水蒸気供給ユニット を介して洗浄処理する機器に接続した。試験装置内部で発生した水素ガスは放出計ユニットに 導かれ、水蒸気セパレータにて湿分除去後に水素濃度計にて濃度測定を行う。この水素濃度が 任意設定値を越えた場合には、水蒸気の供給が停止され、窒素ガスブローによる希釈排気が行 われる。

D:洗浄処理前作業

D1: ナトリウムの確実なドレン

運転終了時点のドレンでは、解体・ナトリウム洗浄処理が予定されていなかったため、ド レン時における特別な配慮はされていない。

D2: 配管の切断、ナトリウムに浸漬していない部位の撤去

試験容器に取り付けられている保温材および予熱ヒータ類を人力により撤去した後、バン ドソーおよびセイバーソーを使用して配管を切断した。

D3 : CCD カメラによるタンク内部観察

試験装置内部のナトリウム付着状況を観察すると共に、内部構造物が製作図面と合致する ことを確認することを目的に CCD カメラを装置内に挿入したが、カメラの挿入経路が狭く、 ナトリウムが付着・残留していると予想される部位まで挿入、観察することはできなかった。 D4:施設からの搬出およびナトリウム処理室への搬入

試験装置を固定している基礎ボルトを撤去後、建屋に設置されている天井走行クレーン (60ton)を使用し、1階フロアに用意した専用の運搬洗浄台車に別途用意したラフタークレ ーンも使用して横置きに設置した。その状況を図 2.7-4 に示す。大型トレーラに試験装置を 積載し、ナトリウム処理室へ搬送・荷下ろした。ナトリウム処理室に設置されている天井走行 クレーンの容量は 10ton であることから、本装置の吊り上げが不可能であり、別途ラフター クレーン車を使用した。この状況を図 2.7-5 に示す。

E: 全体の洗浄処理

洗浄処理は7日間に渡り実施された。窒素ガスと水蒸気の供給に3日間、異常な水素ガスの発 生が継続したため炭酸ガスによる安定化と乾燥処理に2日間、残りは窒素ガス供給に費やされた。 E1: 不活性ガス中水蒸気洗浄処理

洗浄処理初日は最大 8kg/h で水蒸気が供給したが、水素の発生濃度が1%を越える挙動を 示すことから、実質の水蒸気供給時間は2時間程度であった。2日間の窒素ガス連続供給に より、内部に溜まっている水素の排出を行った。洗浄処理開始4日目は約4時間、5日目は 6時間程度水蒸気を供給した。水素濃度の管理値は当初1%を設定したが、洗浄が思うよう に進行させることができないことから2%に変更した。それでも、変更した管理上限値を超 える水素ガス濃度になることから、それ以上水蒸気洗浄処理を継続すると安全を確保できな いと判断し、洗浄処理作業を中止した。なお、装置内に供給した水蒸気量総量約 250kg であった。洗浄処理の状況を図 2.7-6 に示す。





図 2.7-4 試験装置の引抜きと搬出



図 2.7-5 ナトリウム処理室への搬入



図 2.7-6 不活性ガス雰囲気中の水蒸気洗浄処理

E2:炭酸ガスによる安定化・乾燥処理

多量の水素発生が継続したため、炭酸ガスを装置内に供給して水蒸気との接触により生成 された水酸化ナトリウムを炭酸ガスに転換する処理を開始した。炭酸ガスの供給・保持は作 業開始6~7日目に行い、その期間中も水素濃度の監視を継続した。

F: 切断機器・部品類のナトリウム処理

F1:大型バンドソーによる切断

試験装置は大型バンドソーにて、装置上部および下部の2カ所を切断した。図2.7-7 に切 断の状況を示す。また、図2.7-8 に切断後に試験装置内部の状況を示す。炭酸ガスによる安 定化・乾燥処理を実施した後の状況であり、ナトリウムは炭酸ナトリウムの状態になり、確 実に安定化がされている。



図 2.7-7 試験装置の切断



図 2.7-8 切断後の試験装置内部の安定化処理

F2:水蒸気洗浄処理

窒素ガス+水蒸気による不活性ガス中水蒸気洗浄処理が当初計画したプログラム通り実施 できず、途中で炭酸ガス供給による安定化処理に切り替えたため、内部にはまだ活性なナトリ ウムが残存しているものと思われた。切断後の内部観察の結果、ナトリウムはネジ部や差込部 等の狭隘箇所で見られたが、その他の部位には炭酸化物あるいは水酸化物になったナトリウム が観察された。大型の部品類の表面に形成された炭酸あるいは水酸化物は、機械的に剥離させ た後に水蒸気洗浄処理および水処理にて除去作業を実施した。また、ネジ部などの狭隘部があ る部品類に関しては、残留ナトリウムを掻出した後に水蒸気洗浄処理した。特に展示品として 再利用するインペラ、静圧軸受け等の下部にある部品類は、ネジ構造で取り付けられており、 その解体・ナトリウム処理に長時間を要した。図 2.7-9 に水蒸気洗浄処理の状況を示す。

G:洗浄処理後作業

G1:機器の裁断・廃棄

ナトリウム洗浄処理後の機器はプラズマ溶断にて行い廃棄処理した。

G 2: 廃水処理

タンクに溜められた洗浄処理水は、塩酸による中和処理を行い排水された。



(a)インペラ部の洗浄処理



(b) 胴部の水蒸気洗浄処理図 2.7-9 試験装置の水蒸気洗浄処理

(3)まとめ

1)洗浄処理条件の設定について

不活性ガス中水蒸気洗浄処理において、水素濃度が2%を越えるような挙動を示したことから、 当初立案した洗浄処理プログラムの通りに作業を進めることができなかった。以前に実施した 洗浄処理条件と異なる大きなポイントは2点ある。第1は洗浄槽の大きさ(空間)である。今 回は工事費用削減の観点からアウターケーシングを密閉洗浄槽として使用したがその容積は約 約15m³である。一方、前回は専用の大型洗浄槽を使用しており、その容積は約 30m³であった ことから、単純にガス空間で2倍の差がある。第2に作業を中断する水素濃度の設定値に差が あった。前回は水素濃度が4%に達した時点で作業を中断する条件を設定しており、水素濃度 3%台でも作業を継続していた。今回の洗浄処理では、空気雰囲気中での水素の燃焼下限値で ある4%以下の半分に当たる2%を作業中断のしきい値に定めており、上述の洗浄槽ガス空間 容積も含めると、今回設定した作業中断の条件は保守的であったと判断できる。

2) 解体に費やした時間の整理

試験装置解体・洗浄処理に費やした作業時間について、各作業の段取り換えなどの準備時間 を除くと総時間は約140時間であり、密閉洗浄処理と安定化処理の2つの作業で約半分の時間 を費やした。また、メカニカルシール部やインペラ部の分解にも長時間を要した。この原因は、 約20年前に試験装置と一緒に納入された分解専用の工具が紛失されていたことやネジ部など の狭隘部にナトリウムが残留していたことによる作業の遅れが考えられる。

2.8 原子炉容器遮蔽プラグ断熱試験装置 (SPINTA)のナトリウム洗浄処理

原子炉容器遮蔽プラグ断熱試験装置(以下、SPINTA と略記)は、「もんじゅ」の原子炉容器上部 構造を総合的に模擬した外径 4.3m、全長 13m、総重量約 100 トンの大型モックアップ装置である。 1975 年に製作・設置されて以来、約 8 年間にわたってそれぞれの機器の開発試験が実施され、試 験終了時点でナトリウムの付着量が最少になるようにドレン処置が施されている。その後、アル ゴンガス雰囲気下で約 16 年間維持管理された後、計画的な大型ナトリウム試験施設の解体・撤去 の一環として 1999 年に解体された。本項では、構造が複雑でナトリウム洗浄処理が技術的に難し いと想定された試験容器についての作業状況を記述する。

炉容器に相当する大型の試験容器本体には、燃料交換機、遮蔽プラグ、回転プラグ、模擬燃料 集合体、炉上部機構などが組み込まれており、深さ 15m の地下室にフロアレベルより吊り下げら れた状態で設置されている。試験容器の概要を図 2.8-1 に示す。SPINTA の装置全体のフローシー トを図 2.8-2 に示す。なお、試験容器のナトリウム液面は模擬燃料交換機の下部であり、それよ り上側はカバーガス雰囲気でありナトリウムベーパ付着域となる。SPINTA 試験容器の主要な内部 構造物の概要を図 2.8-3 に示す。代表的な構造物として、固定および回転プラグ、サーマルライ ナがあり、試験容器内部に組み込まれている。また、ナトリウム液面より 500mm 上部に熱遮蔽板 が 35 枚取り付けられている。プラグは、径方向が実機の 1/2.5 縮尺、軸方向は実寸大を模擬して いる。試験容器は全長が約 13,000mm、外径が 3,100mm の縦型円筒であり、重量は約 26ton である。



図 2.8-1 SPINTA 試験容器の概要



図2.8-2 原子炉容器遮蔽プラグ断熱試験装置(SPINTA)の系統図



(1) ナトリウム洗浄処理作業の手順

地下ピットから装置全体を同時に引抜くことは困難なため、装置内部に組み込まれている内部 構造物毎に分解・解体し、ナトリウム洗浄処理作業を行うこととする。各内部構造物の表面には ナトリウム(ベーパ含む)が付着していることから、ビニルバッグで内部構造物全体を覆い、窒 素ガスを充填しながら構造物の引抜きを行う。ビニールの損傷等により空気が混入するとナトリ ウムの発火が懸念されることから、各内部構造物の表面に付着している活性なナトリウムを炭酸 ナトリウムになる安定化処理を施すことで発火予防対策を講ずることとした。図 2.8-4 にナトリ ウム洗浄処理作業の手順を示す。



図 2.8-4 SPINTA のナトリウム洗浄処理作業手順

(2) ナトリウム洗浄処理作業の内容

<u>A:洗浄処理条件の設定</u>

A1:機器の再使用の有無

解体し廃棄するのが目的であり、ナトリウム洗浄処理後再使用はしない。

A2:別設置洗浄槽の有無の選定

ナトリウム処理室に搬入して直接洗浄処理することとし、別設置洗浄槽は使用しない。 A3:残留ナトリウムの状況、量の予測、観察

燃料交換機の下部は試験実施中ナトリウム中に浸漬していたが、その他の機器はナトリウム 液面の上部にあり、試験実施中はカバーガスの雰囲気中にあった。試験装置の解体を行う前に、 装置内部に付着・残留しているナトリウム量を予測した。その結果、約 48kg のナトリウム量 が付着していると予測された。

ナトリウム洗浄処理に当たって、あらかじめ試験装置の内部の状況を CCD カメラにより観測 する。同様の観察を炭酸ガスにより安定化処理の後でも実施し、ナトリウムの安定化の状況を 確認する。

B:洗浄処理方法の選定

従来、試験装置からナトリウムの付着した機器類を取り出す場合には、発火防止のために不活 性ガスを充填したビニールパックで機器全体を覆う方法が多く採用されている。しかし、遮蔽プ ラグには容易に発火し易いナトリウムベーパが多量に付着していることや試験容器からの引き 抜き作業が長時間に及ぶことから、ビニルバッグの損傷等によりバッグ内への空気混入が懸念さ れ、ナトリウム火災事象に至ることが予想された。そこで、機器・構造物の分解に先立って、装 置内に残留するナトリウムの表面に炭酸化合物皮膜を形成させる安定化処理を施し、ナトリウム 発火の予防策を講ずることにした。

安定化処理は化学的に活性なナトリウムを安定な炭酸ナトリウムに転換するものであるが、ナ トリウム (Na) と炭酸ガス (CO₂) を直接的に化学反応させて炭酸ナトリウム (Na₂CO₃) を形成させる には高温条件 (約 1,000 °C) が必須であり非現実的である。そこで、水酸化ナトリウムが炭酸ガス との接触で容易に炭酸化する性質を利用することとし、湿分を含ませた炭酸ガスを装置内部に供 給する手法を採用した。この手法では、まずナトリウムと湿分を反応させて水酸化ナトリウムを 形成させ、次にそれを炭酸ガスと反応させて炭酸ナトリウムに転換されるものである (2NaOH + $CO_2 \rightarrow Na_2CO_3 + H_2$)。炭酸ナトリウムを形成させる速度は炭酸ガス中の湿分量を調整すること により制御させるものとした。

試験容器内部に組み込まれている機器・構造物は、炭酸ガスによる安定化処理後に個々に試験 容器から引抜き、ナトリウム処理室に搬入後に洗浄処理に適した大きさに切断することにした。 なお、試験容器下部に多量に存在するナトリウムは、内部に組み込まれている機器・構造物を引 抜いた後の容器下部に仮蓋を溶接し、予熱ヒータにて加温しドラム管に移送ドレンすることにし た。 <u>C:洗浄処理施設の設定</u>

ナトリウム安定化処理のための装置構成を図 2.8-5 に示す。SPINTA へ供給する炭酸ガスは、 水を張った容器中にてバブリングさせることで湿分を含ませ、その湿度は露点計で連続計測しな がら調整した。また、ナトリウムと水の反応により発生する水素の管理は、容器内に供給するア ルゴンガス量を調整することで、水素濃度の上昇を抑制および希釈排気できるようにアルゴンガ ス系を構築した。



図 2.8-5 ナトリウム安定化処理のシステム構成

D: ナトリウム洗浄処理前作業

D1: ナトリウムの確実なドレン

1975年に製作・設置されて以来、約8年間にわたってそれぞれの機器の開発試験が実施され、 試験終了時点でナトリウムの付着量が最小になるようにドレンされた。

D2: 配管の切断、ナトリウムに浸漬していない部位の撤去

試験容器に取り付けられている保温材および予熱ヒータ類は、機械類に頼らず人力により撤 去した。試験容器とナトリウム循環系が接続されている配管はバンドソーを使用して切断した。 その際、その切断箇所には鋼板を溶接し閉止処理した。

D3: CCD カメラによる試験容器の内部観察

ナトリウム洗浄処理に当たっては、あらかじめ試験装置内部のナトリウム付着状況の観察お

よび内部構造物が製作図面と合致していることの確認のために、試験容器内部に CCD カメラを 挿入して確認した(図 2.8-6)。

試験容器底部にはドレンできなかった塊状の約1トンのナトリウムが観察され、その表面に は白色の化合物の形成が観察された。特に鏡部近傍には、白色化合物が筋状に成長していた。 炉心支持板等他の箇所に付着しているナトリウムは、ほとんどが薄い膜状であり、後工程のナ トリウム処理作業に支障をきたすようなものではなかった。カバーガス空間に設置された遮蔽 プラグの積層板にはパウダー状の蒸着ナトリウムが多量に付着していた。装置の内部構造物は 製作図面の通りであり、部品の変形や取付け員数の不足等は認められなかった。 D4:炭酸ガスによる安定化処理

SITR 等での経験を踏まえ、SPINTA での安定化処理条件を以下のように設定した。

- ・湿り炭酸ガス中湿度:~80%RH
- ・湿り炭酸ガスの供給量:100 リットル/分
- ・水素濃度許容値:2%(爆発下限値の1/2)
- ・生成物確認:XRD による生成物同定、CCD カメ ラによる内部観察

以下に安定化処理について具体的な実施状況を示 す。

○ 湿り炭酸ガスの供給量

SPINTA 試験容器内部のナトリウム付着面積は、 先行で実施した試験装置(SITR:約 63m² および SPS-CT:約 17m²(メッシュ部除く)より大きく約 340m²である。先行処理条件と同じ条件の湿り炭酸 ガス供給量では、安定化処理に費やす作業が長時 間に及ぶと推定されるために、先行処理条件の2 倍に当たる毎分約 80 %の湿り炭酸ガスを供給す ることにした。



図 2.8-6 CCD カメラによる 試験容器内部の観察イメージ

○ 湿り炭酸ガスの湿分

先行で実施した SITR での安定化処理では、湿り炭酸ガス製造部と被洗浄物は同じフロ アレベルに設置したことから、製造した湿り炭酸ガスの湿分が供給先の装置内部で結露な どの問題はなかった。しかし、SPINTA 試験装置の試験容器末端は地下 13mにあり、地上(フ ロアレベル)との温度差は約8~10℃にも達し、地上で製造された 100%RH の湿り分をその まま試験容器内に供給すると試験容器内部で凝縮することが懸念される。試験容器下部に は約1トンのナトリウムが残留しており、この凝縮した結露水との接触により水酸化ナト リウム水溶液が過剰に生成されるため、後工程で実施するナトリウムの抜取り作業に支障 を来すことになる。そこで、この温度差を考慮し結露水が発生しないように、試験容器内 部の湿度が 80%RH となるような湿り炭酸ガスを地上で製造し供給することとした。 ○ ナトリウム安定化処理の終了判断

湿り炭酸ガスによるナトリウム安定化処理の終了判断基準を策定する必要がある。下記 に示す5つの項目を判断材料とし、終了を判断した。その判断の妥当性にはグレーゾーン があると思われるため、最終的な判断は、装置内に残留しているナトリウムの直接目視観 察による、被膜の形成の確認によるものとした。

サンプル分析による判断: 安定化処理対象機器装置の内部に予め挿入したサンプル (ナトリウムブロック)を定時毎に採取し、サンプル表面に形成された生成物を分析する。 分析にはX線回折装置を用い、生成物が炭酸ナトリウム (Na₂CO₃)であることを同定する。 さらに、炭酸ナトリウムの被膜の厚さが 1 mm 以上であることを確認する。

発生水素濃度の低下による判断: 湿り炭酸ガス供給の初期段階においては、供給した 湿分(H₂0)とナトリウムは直接接触し水素を発生するが、安定化皮膜(Na₂CO₃)形成後は ナトリウムと湿分との反応は形成された皮膜を介して行われるため、水素発生量は低下す る。発生した水素濃度が低下しかつ低いレベルで安定する挙動を示したことを確認する。

排気側ガス中の湿度上昇による判断: 上記と同様、湿り炭酸ガス供給の初期段階と被 膜形成後においては、湿分の消費量に差が生じる。そこで、供給側と排気側の湿分を監視 し、排気側の湿分上昇傾向が認められ、かつ安定挙動を示すことを確認する。

CCD カメラによる内部目視観察: 上記の判断材料を基に、安定化処理を中断し、CCD カメラによる内部観察を行い処理前観察時の状況と比較して炭酸ナトリウム(らしき)の

結晶等が認められた場合は、処理終了とする。 挙動が認められなかった場合: 上記の挙動が 確認できるまでに相当の時間を有し、またこの ような挙動を示さない場合も考えられるため、 何らかの判断により安定化処理に要する時間 を制限する必要がある。そこで、付着・残存ナ トリウム量が全てNa₂CO₃化するのに必要な湿分 量を供給し終えた時間をもって作業終了とし た。塊状ナトリウムのようなある程度の厚みを もったものを完全に炭酸ナトリウム化するの には相当な時間を要するため、塊状部について はその表面より深さ方向に1mmの厚みのNa₂CO₃ が形成するのに必要な水分量を求めた。

安定化処理の概要図を図 2.8-7 に、その時 の水素発生挙動の時間推移を図 2.8-8 に示す。 また、対応状況を以下に述べる。



図 2.8-7 炭酸ガスによる安 定化処理のイメージ図



図 2.8-8 安定化処理時における水素発生挙動の時間推移

処理開始初日: 水素濃度は湿り炭酸ガスの供給の開始と共に徐々に上昇し、約5時間 後に1.2%まで上昇した。このため、希釈ガスであるアルゴンガスの供給を開始し水素濃 度を1%以下にした。その後、作業が夜間になることから、供給する湿り炭酸ガスの湿分 を80%から40%RHに変更した。なお、本作業で装置内に供給するガス量低下により水素濃 度が1.6%近くまで上昇したことから、アルゴンガスによる希釈排気作業も実施した。

処理開始2日目: 試験容器内に供給する湿分を80%RHに戻すと共に、試験容器内部に 挿入しておいたナトリウムサンプルの1片を採取した(処理開始約24時間後)。発生する 水素濃度は、湿度調整後に徐々に上昇する傾向を示したが、処理開始初日に見られた急激 な上昇挙動は認められなかった。この挙動から2日目夜間時の供給湿分は80%RHを維持す ることにした。採取したサンプルの表層には2~3mm 程の白色被膜が形成されており、そ の被膜はXRDによる同定で炭酸水素ナトリウム(NaHCO₃)と炭酸ナトリウム(Na₂CO₃) であることが示された。

処理開始3日目: 発生する水素濃度が約1.4%で落ち着き上昇や降下の挙動がみられないことから、湿り炭酸ガスの供給を一時停止し、ナトリウムサンプルを採取して安定化処理の進行性を確かめることにした(作業開始後:約50時間)。図2.8-9に50時間後に取出したナトリウムサンプルの状況を示す。サンプルの表層部にある生成物の厚みは作業開始2日目に採取したものより厚く、かつ指先が触れる程度でその生成物が崩れるまで乾燥されていた。また、CCDカメラを用いて装置内部を観察した結果、付着しているナトリウ

ムの表層はすべて白色の生成物に覆われていることを確認できたことから、安定化処理作 業をこの時点で終了することにした。なお、後工程の機器分解時には、プラズマ切断や吊 り上げ用フック溶接等の火気を使用する作業があることから、装置内に残留する水素ガス 排出のために、2日間アルゴンガスを連続供給した。

D5:内部構造物の引抜

ナトリウム安定化処理後、SPINTA内部に組み込まれている機器をナトリウム洗浄施設に運搬 するために、機器を分解しながらかつ分解された機器をアルゴンガスで充填した難燃性ビニル バッグで覆い、クレーンを用いて引抜き作業を実施した。

D6:施設からの搬出およびナトリウム処理室への搬入

D7:必要により部品、機器、部位に分解または切断

大容量の機器については取り扱いやすい大きさに切断してナトリウム洗浄処理を実施した。 D8:必要により掻取り等による残留ナトリウムの除去

残留ナトリウムの状況により、ナトリウムを掻取り除去する。



図 2.8-9 安定化処理後のナトリウムサンプル(50時間後)

E:洗浄処理作業

E1:水蒸気による洗浄処理

それぞれ取り出された機器や構造物は、ナトリウム処理室において大気中窒素ガス混合水蒸 気洗浄処理方法により洗浄処理した。これらの作業は従来から多くの経験を有しており、支障 なく実施された。回転プラグでは引き抜き作業を開始してからナトリウム処理作業が完了する まで 15 時間を費やし、サーマルライナでは4日間に及ぶ長時間作業となったが、この間にナ トリウム火災や燃焼が発生することはなかった。 ナトリウム試験施設や実プラントの改造・解体等で蒸着ナトリウムの発火や燃焼事象が問題と なるような場合には、ナトリウム安定化処理が有効であることが確認された。

F:洗浄処理後作業

F1:機器の裁断・廃棄

ナトリウム洗浄処理後の機器はプラズマ溶断により切断し廃棄処理した。

F 2: 廃水処理

ナトリウム処理室に設置されている装置により、タンクにためられた洗浄水は酸により中和 されて排水される。

(3) 代表的な構成機器のナトリウム洗浄処理

上記で述べた「D5からE1」に関する詳細な事項について、構成機器、部品毎に以下に示す。

① <u>200A および 500A 配管</u>

試験容器からの引抜き: 難燃性ビニルバッグで 200A および 500A 配管をそれぞれ被覆し、 バッグ内にアルゴンガスを供給しながら引抜いた。引抜き中、配管に付着しているナトリウ ムは潮解・発火することはなく、安定化処理の効果が現れていた。引抜きの状況を図 2.8-10 に示す。



図 2.8-10 500A 配管の引抜き



図 2.8-11 500A 配管のナトリウム洗浄処理

ナトリウム洗浄処理: 配管は、取扱い面や洗浄効率性を考慮した長さに裁断し、配管内 面のナトリウム洗浄処理を実施した。大気中窒素ガス混入水蒸気洗浄処理法により実施した が、安定化処理が施されていたため、洗浄時における発火等は見られなかった。図 2.8-11 に 洗浄処理の状況を示す。ビニルバッグ取り付けからナトリウム洗浄処理までに要した時間は 約7時間弱であった。

② 回転プラグおよび固定プラグ

回転プラグはプラグ本体とそれを格納する遮へい胴で構成されている。また固定プラグも 同様である。これら4つの構造物を順にビニルバッグで覆いながら引き抜き・ナトリウム洗 浄処理を実施した。ナトリウムの付着形態が予想に反していたことから、これらのナトリウ ム洗浄処理に膨大な時間を費やした。それぞれの遮へい胴には積層板が組み込まれており、 そこにナトリウムは液滴状に付着しているものと予想していた。過去に実施された同装置の 洗浄処理記録にも、積層板の隙間に残存するナトリウムのブリッジングはないと報告されて いる。しかし、CCDカメラなどでは観察できない部分に、積層板の隙間を埋め尽くす塊状のナ トリウムが残存していたことから、洗浄処理に長時間を要することとなった。塊状ナトリウ ムは燃焼処理するのが通例であるが、同部品は寸法・形状の制約から燃焼室へ搬入できない ことから、水蒸気洗浄処理によらざるを得ない。このため、洗浄処理効率は悪くなるが、蒸 気量を極力抑えて、多量の窒素ガスをブローしながら水蒸気洗浄処理を行った。作業時間は 回転プラグおよび遮へい胴で15時間、固定プラグでは21時間であった。

回転プラグの試験容器からの引抜きおよびナトリウム洗浄処理において、機器の引き抜き 作業時間はそれぞれ3時間程度で完了し、ナトリウムの発火の発生はなかった。図2.8-12に 回転プラグの試験容器からの引抜きと、その後のナトリウム洗浄処理の状況を示す。

回転プラグ遮蔽胴の試験容器からの引抜き状況を図 2.8-13 に示す。



図 2.8-12 回転プラグの引抜きおよびナトリウム洗浄処理



③ 回転プラグ遮蔽胴のナトリウム洗浄処理

回転プラグ遮蔽胴のナトリウム付着状況およびナトリウム洗浄処理状況を図2.8-14に示す。 ④固定プラグ遮蔽胴の試験容器

固定プラグ遮蔽胴の試験容器からの引き抜き状況を図 2.8-15 に示す。

⑤サーマルライナの試験容器

サーマルライナの試験容器からの引抜き状況およびナトリウム洗浄状況を図2.8-16に示す。







図 2.8-14 回転プラグ遮蔽胴の付着ナトリウ ムおよびナトリウム洗浄処理



図 2.8-15 固定プラグ遮蔽胴の試験容器からの引抜き



(a) サーマルライナの引抜



(b)残留ナトリウムの除去

(c)水蒸気洗浄

図 2.8-16 サーマルライナの引抜きおよびナトリウム洗浄処理

試験容器の試験施設からの引抜きおよびナトリウム洗浄処理作業は以下の手順で実施された。

- ・試験容器本体の施設からの撤去、吊り上げ
- ・トレーラへ荷積み
- ・ナトリウム処理室へ搬送
- ・試験容器の吊り上げ
- ・洗浄台車への荷下ろし
- ・大型バンドソーによる切断
- ・ナトリウム抜き取り
- ・ナトリウム洗浄処理

試験容器の試験施設からの引き抜きからナトリウム処理室への搬送の状況を図 2.8-17 に、 試験容器の切断、内部のナトリウム付着状況、ナトリウム洗浄処理状況を図 2.8-18 にそれぞ れ示す。写真から試験容器の大きさ、規模が伺える。



図 2.8-17 試験容器の引抜きおよびナトリウム処理室への搬送



台車へのセッティング





↑(a)試験容器の切断様子

←(b)試験容器内のナトリウム付着状況



(c)容器底部の残留ナトリウム

(d)水蒸気洗浄処理

図 2.8-18 試験容器の切断、内部のナトリウム付着状況、ナトリウム洗浄処理

(4) まとめ

「もんじゅ」の原子炉容器上部構造を模擬した SPINTA 試験装置(外径 4.3m、全長 13m、重量約 100 トン)を解体し、ナトリウム洗浄処理を実施した。内部構造物は複雑多様であるが、計画的な CCD カメラによる内部観察や湿り炭酸ガスによるナトリウム安定化処理を行うことで、安全に解体洗浄作業を進めることができた。安定化処理では、対象機器と同じ環境下にブロック状のナトリウムサンプルを配備し、定期的に観察することで被膜生成状態を確認した。安定処理作業は、湿分量と炭酸ガス量の配分によって反応により発生する水素濃度をコントロールしながら約50 時間程度の時間を費やしたが、解体・撤去ではこの安定化処理の効果が十分に発揮された。
2.9 2重管蒸気発生器のナトリウム洗浄処理

「もんじゅ」の次世代の蒸気発生器の開発の一環として、ナトリウムー水反応の発生を防止す る構造として2重管蒸気発生器が着目され、多くの研究開発が行われ、この概念の総合的な検証 を目的に1MWt 規模でのモックアップ試験が実施された。1991 年から 1995 年までの間に約 1.34 万時間運転された後、重要な課題である、長時間運転後の内部構造物の構造健全性や2 重管伝熱 管の経年変化の確認が実施された。試験終了後のナトリウム洗浄処理にあたっては、各部の材料 に影響を与えない方法を選定することが最優先事項との考えから、アルコール循環洗浄処理方法 が採用された。

試験に供された2重管蒸気発生器は全長22m、胴径0.3m、10本の2重伝熱管を有し、定格交換熱量1MWtのナトリウム-水熱交換器である。構造を図2.9-1に示す。

(1) ナトリウム洗浄処理手順

わが国において、これまでナトリ ウム洗浄処理方法としてアルコー ル洗浄処理方法に関して、数十リッ トルといった小規模で、かつ被洗浄 物を浸漬させての洗浄処理の実績 は多い。また、ここで採用した数 m³ 規模でかつ循環方法による洗浄 処理については、すでに Mod.9Cr-1Mo 鋼製の 1MWt 一体貫流 型ヘリカルコイル蒸気発生器 1MW での経験がある。その場合、機器が 小型であることからナトリウム処 理室のアルコール洗浄装置を使用 することができた。本ケースでは蒸 気発生器が長尺であることから、ナ トリウム処理室の装置は使用する ことができず、専用の装置を設置す ることが必要となる。その実施に当 たっては、特に安全に関して細心の 注意が要求される。図 2.9-2 に 2 重 管蒸気発生器のナトリウム洗浄処 理作業の手順を示す。



図 2.9-1 2 重管蒸気発生器の構造概念図



図 2.9-2 2 重管蒸気発生器のナトリウム洗浄処理作業の手順

(2) ナトリウム洗浄処理作業の内容

A:洗浄処理条件の設定

A1:機器の再使用の有無

試験終了後に長時間運転に伴う2重管蒸気発生器の内部構造物の構造健全性や2重管伝熱 管の経年変化を確認することが主要な試験目的であり、材料に影響を与えないナトリウム洗 浄処理方法を選定する必要がある。

A2:別設置洗浄槽の有無の選定

試験施設を使用することができ、別設置洗浄槽は必要としない。

A3:残留ナトリウムの状況、量の予測

これまでのヘリカル型蒸気発生器の例をベースに直管型伝熱管等の構造的特徴を考慮し、 残留ナトリウムの状況や量を予測した。

B:洗浄処理方法の選定

本洗浄処理において、その方法の選定にあたっては、最重要な条件として材料に腐食等の影

響を与えないこと、また、被洗浄物の大きさがあまり大き過ぎず使用アルコール量が数 m³程度 で本方法の適用の範囲内にあることが要求される。そのため、アルコール循環による洗浄処理 方法が採用された。本洗浄方法については、1MWt ヘリカルコイル蒸気発生器での経験がある が、機器が小型であることからナトリウム処理室のアルコール洗浄装置を使用することができ た。本方法では、特に可燃性のアルコールの使用に当たっての安全に関連した細心の注意が必 要である。

C:洗浄処理のための装置の設定

アルコール洗浄処理に関しては、ナトリウム処理室にアルコール洗浄処理施設が設置されて おり、そこに設置可能な規模の被洗浄物に関しては比較的容易に洗浄処理作業が可能である。 1MWt ヘリカルコイル蒸気発生器の洗浄処理はこの施設で実施された。しかし、本2 重管蒸気 発生器は全長 20m に達するためこの施設を使用することはできない。そのため、2 重管蒸気発 生器が据付けられている試験施設内に、アルコール循環洗浄処理装置を設置して実施すること が有効と判断された。採用されたシステムの系統図を図 2.9-3 に示す。本洗浄処理装置は圧力 開放系が付随したアルコールタンク、アルコール循環ポンプ、配管、真空系、可燃性ガス検知 設備、計測制御設備より構成され、排ガス設備はアルコール凝縮器、水素計、酸素計、系内真 空引き用真空ポンプ等からなる。残留ナトリウムとアルコールの反応熱は、2 重管蒸気発生器 伝熱管内へ冷却水を循環させて除熱された。使用されたアルコールは変性アルコール約 2.5m³ であった。洗浄処理に当たっては循環アルコール温度を 50℃以下に管理した。図 2.9-4 にアル コール循環洗浄処理装置の写真を示す。



図 2.9-3 アルコール循環洗浄処理装置の系統図



(a)アルコールタンク

(b)循環ポンプユニット

図 2.9-4 アルコール循環洗浄処理装置の外観

D:洗浄処理前作業

D1: ナトリウムの確実なドレン

過去の蒸気発生器における実績を踏まえて、残留ナトリウムを最少とする目的で、ナトリウムは 380℃でドレンされ、ドレン後 350℃で 52 時間保持され、アルゴンガスにより蒸気発生器内部を 2 回フラッシングされた。

E:洗浄処理作業

E1:アルコール循環洗浄処理

アルコール循環洗浄処理に先立ち、全系統の真空引き、窒素ガス置換により系統から酸素ガ スを排除した。被洗浄物である2重管蒸気発生器へのアルコール充填はアルコールタンクから 低温の状態で行った。充填完了後、循環ポンプ出口弁の調整によりアルコール流量を約700/min に保持し、アルコール温度15℃で5時間の循環運転を実施した。洗浄処理の進捗状態を確認す るため、アルコールタンク圧力、伝導度計によるアルコール伝導度のオンライン計測、サンプ リングしたアルコールの中和滴定によるナトリウム濃度計測、および蒸気発生器の入口温度計 測を実施した。アルコール洗浄処理の手順を図2.9-5に示す。アルコール洗浄処理時間とナト リウム洗浄量およびアルコール中ナトリウム濃度の変化を図2.9-6に示す。アルコール中ナト リウム洗浄量およびアルコール中ナトリウム濃度の変化を図2.9-6に示す。アルコール中ナト リウム濃度の変化が小さくなった洗浄処理開始6時間後に、加熱用の2重管蒸気発生器内給水 の温度を上昇させ、アルコール温度を約40℃まで上昇させて維持した。洗浄処理開始から24 時間後に洗浄処理を終了し、アルコールのドレン、窒素ガスによる乾燥とガス置換操作を実施 した。洗浄処理の所要時間は約24時間であった。洗浄処理の終了判断は以下による。

- ・洗浄アルコールの伝導度が2時間以上静定状態を保持
- ・アルコールタンク圧力が1時間以上静定状態を保持

・中和滴定法によるアルコール中ナトリウム濃度が3データ飽和状態を保持(1時間ご とにサンプリング)



図 2.9-5 2 重管蒸気発生器のアルコール洗浄処理手順

アルコール中のナトリウム濃度の変化から計算した付着残留ナトリウム量は、約 0.77kg で あった。これを単位表面積当たりの付着量に換算すると 1.2mg/cm²(ドレン不可部分を除いた ときは 1.1 mg/cm²) である。

本洗浄処理における結果を 50MW 蒸気発生器等他のデータと比較して表 2.9-1 に示す。残留 ナトリウム量は過去の実績の約 60~80%程度と少なく、構造の違いや高温によるドレン等が影 響した結果と考えられる。

洗浄処理後、2 重管蒸気発生器を2 分割して製作メーカに輸送し、解体検査を実施した。管 板部、2 重伝熱管部等の主要構造部における外観観察および液体浸透探傷検査を実施した結果、 異常は認められなかった。また、洗浄処理に起因する損傷や伝熱管バッフルプレート部等にお ける残留ナトリウムは観察されなかった。洗浄処理中もアルコールや蒸気系での操作上の問題 も特に発生することはなく、本アルコール循環洗浄処理方法の有効性が確認された。ただし、 コスト上の制約から本方式は小型の装置、機器のみへの適用が主体となる。ナトリウム洗浄処 理後に切断された蒸気発生器入口ナトリウム配管部のナトリウム付着状況を図 2.9-7 に示す。 十分な洗浄がされていることがわかる。

		50MW 蒸気発生器	1MW 蒸気発生器		
項目	過熱器1号機	蒸発器1号機	蒸発器2号機	一体貫流型 SG	2重管型 SG(*)
実施年月	1975 年 4-5 月	1975 年 4-5 月	1980年3-4月	1989年12月	1996年3月
Na 接液時間	4,200h	4,200h	16, 500h	7,600h	13, 440h
伝熱管材質	SUS304	2.25Cr-1Mo	2.25Cr-1Mo	Mod. 9Cr-1Mo	Mod. 9Cr-1Mo
重量	29ton	40ton	30ton	10ton	8ton
内表面積	$400 \mathrm{m}^2$	$500 \mathrm{m}^2$	522m ² (管束の	$107 \mathrm{m}^2$	$64m^2$
			み)		
Na ドレン条	300℃ドレン	300℃ドレン	400℃ドレン	390℃ドレン	380℃ドレン
件	300℃/47h 保持	300℃-47h 保持	400℃-47h 保持	390℃-47h 保持	350℃-52h 保持
洗浄対象	シェルごと	シェルごと	管束のみ	シェルごと	シェルごと
洗浄時間	9h	26h	192h	32h	24h
洗浄方法	水蒸気洗浄	水蒸気洗浄	水蒸気洗浄	アルコール循	アルコール循
			+純水リンス	環洗浄	環洗浄
Na 付着量	6kg	10kg	7kg	2kg	0.77kg
単位面積当					
り Na 付着量	1.5mg/cm^2	2.0mg/cm^2	1.4mg/cm^2	1.9mg/cm^2	1.2mg/cm^2

表 2.9-1 蒸気発生器のナトリウム洗浄処理における付着ナトリウム量の比較

(*)本洗浄処理作業における結果



図 2.9-6 アルコール循環洗浄処理におけるナトリウム濃度の変化



図 2.9-7 ナトリウム洗浄処理後の蒸気発生器入口配管

F:洗浄処理後作業

F1:建屋からの撤去、大型資材倉庫への搬入

2 重管蒸気発生器はナトリウム洗浄処理後、引続いて実施されるメーカの工場への輸送に備 えて、大型機材倉庫へ輸送し、一時保管した。1MW 蒸気発生器試験施設からの2 重管蒸気発生 器の撤去および倉庫への輸送状況を図 2.9-8 および図 2.9-9 に示す。

F2:廃液処理

廃液の約2.5m³は、ドラム缶に移送し、専門の廃棄物業者に委託して廃棄した。この時、廃 液の性状を明らかにした上で委託するように努めた。



図 2.9-8 試験施設からの 2 重管蒸気発生器の撤去



図 2.9-9 2 重管蒸気発生器の輸送と倉庫搬入

(3) まとめ

ここでは、2 重伝熱管蒸気発生器の長時間運転後の材料検査等を行うため、洗浄に伴う材料へ のダメージを極力少なくする手法として、アルコール循環洗浄の処理手法を用いて実施された。 洗浄処理は全長約 20m の長尺な被洗浄物を考慮して試験施設内で実施された。系統内の圧力、ア ルコールの伝導率やナトリウム溶解度を洗浄終了の判定基準とし、約 24 時間で洗浄処理を終え ることができ、有効性や安全性が確認された。アルコール中のナトリウム濃度変化から評価する と、付着ナトリウム量は単位面積当たり約 1. 2mg/cm² であった。この値は過去の蒸気発生器試験 体の洗浄処理で得られた値 (1.4~2.0mg/cm²) よりも小さかった。これは、高温ドレン (約 380℃) およびその後の高温保持 (約 350℃、52 時間) やガスフラッシングの効果により被洗浄物内のナ トリウムのドレン性が高まったものと考えられる。

2.10 大型コールドトラップのナトリウム洗浄処理

50MW 蒸気発生器試験施設の1次系コールドトラップは約11年間の運転中に1回交換された。 交換後、新設のコールドトラップは約1,720時間運転され、平成11年5月に50MW 蒸気発生器試 験施設の解体・撤去計画に伴って解体・ナトリウム洗浄処理された。捕獲されたナトリウム酸化 物やナトリウム水素化物等の多量な不純物を含むコールドトラップ内のナトリウムは、解体時に 空気と触れることによって容易に発火・燃焼する可能性が高く、その処理にあたっては十分な配 慮が必要である。

コールドトラップは、内部にナトリウム中の不純物を捕獲するための金属メッシュや熱効率向 上のためのエコノマイザ等を内包するとともに、ナトリウムを冷却し、また均一にメッシュ部を 流動させるため複雑な構造となっている。本項で記載するコールドトラップは、50MW 蒸気発生器 試験施設の1次系および2次系に設置されたもので、1次系コールドトラップの構造を図2.10-1 に示す。直径約1m、全長約4m、容積が2m³のワイヤメッシュデミスタを内蔵する縦型強制空冷 エコノマイザ内蔵型の大型コールドトラップである。2次系のコールドトラップも同様な構造で ある。

解体・ナトリウム洗浄処理の実施に当たって、従来実施してきた 大型コールドトラップでの経験を 調査、検討した。その結果を2.10-補足1に示す。また、1MW 蒸気発 生器施設の小型コールドトラップ 解体について2.10-補足2に示す。

(1) 解体・ナトリウム洗浄処理 手順

50MW 蒸気発生器試験施設大型 コールドトラップのナトリウム 洗浄処理作業の手順を図 2.10-2 に示す。ここには 2 次系コール ドトラップについて示している が、1次系コールドトラップで は内部構造物の引抜きができな かったことから、外胴を切断し たため手順に多少の相違がある が、大きな流れは同様である。 それについては本文中に記載す る。



図 2.10-1 50MW 蒸気発生器試験施設における一次系 コールドトラップの構造



図 2.10-2 コールドトラップのナトリウム洗浄処理作業の手順

(2) 解体・ナトリウム洗浄処理作業の内容

<u>A:洗浄処理条件の設定</u>

A1:機器の再使用の有無

50MW 蒸気発生器試験施設の解体・撤去にともなって廃棄するもので、再使用しない。

A2:別設置洗浄処理槽の有無の選定

再使用しないことから、特別な洗浄処理方法を考える必要はなく、大気中での溶融・燃焼処 理や水蒸気洗浄処理が採用できる。ナトリウム処理室での作業が可能で、特に別設置洗浄処理 槽は必要としない。

A3:残留ナトリウムの状況、量の予測、観察

本コールドトラップ内の付着ナトリウム量の推定には、コールドトラップ内のナトリウムを ドレンした後の解体洗浄処理時に、ナトリウムの残留量を測定した機器構造第一試験室コール ドトラップ2号機での実績が参考となる。そこでは、不純物の捕獲性能を評価するため、メッ シュ部の位置をパラメータとしてナトリウムをサンプリング、分析している。その結果、メッ シュ部の付着物の総量は約 87.5kg であり、メッシュ 1m³当たりに換算すると約 86kg/m³であ った。この結果から、1次系用および2次系用いずれのコールドトラップもメッシュ部の容量 が1.97 m³であることから、予測ナトリウム付着量は約 170 kg となる。1MW 蒸気発生器施設の コールドトラップの解体洗浄処理実績によると、No.1 コールドトラップで約 6.4kg、No.2 コー ルドトラップで約 6kg であった。メッシュ部の容量の比較から、本コールドトラップのナトリ ウム付着量を単純予測すると、No.1 コールドとラップ(メッシュ部容積 0.776 m³) でのデータ を踏まえると約 160 kg、No.2 コールドとラップ(メッシュ容積 0.249 m³) で約 48kg と予測 された。

B:洗浄処理方法の選定

これまでのコールドトラップの解体洗浄処理方法として実績や経験のある以下の方法について比較検討した。その結果を表 2.10-1 に示す。

①可搬型蒸気洗浄処理装置による密封型蒸気洗浄処理

- ②アルコール循環洗浄処理
- ③内部構造物を引抜き、パラフィン中で解体
- ④内部構造物を引抜き、大気中で解体
- ⑤内部構造物を少しずつ引抜きながら解体
- ④ 部構造物を引抜かないで、胴と内部構造物を交互に解体

従来、大型コールドトラップの解体・洗浄処理では、メーカに委託して、パラフィン溶解槽 でコールドトラップ全体を加熱し、ナトリウムを溶解流出させた後、パラフィン溶解槽内で解 体する手法が用いられてきた。この方法ではナトリウムを含んだパラフィンの処理が困難であ り、さらに、大量のパラフィンを取り扱う設備が必要となる。アルコール洗浄処理や水蒸気洗 浄処理では、高濃度の不純物を含む大量の残留ナトリウムが、表面積の大きいメッシュ部でア ルコールや水と急激に反応するため、急激な発熱や水素生成が生じ、その対処のためには大規 模な設備が必要となる。そこで、本コールドトラップの解体・洗浄処理では、安全かつ効率的 な方法として、解体中のナトリウム燃焼をあらかじめ想定して、計画的にナトリウムを燃焼さ せる方法を採用することとした。メッシュ部を少しずつ引抜きながら、少量ずつ残留ナトリウ ムを燃焼処理した後に、コールドトラップ本体を解体する方法である。本解体洗浄処理の最大 のポイントは、デミスタ部の発煙・発火を防止し、いかに安全にナトリウム洗浄処理を実施す るかにある。内部構造物の引抜きが不能の場合は、胴と内部構造物を交互に解体するか、胴の 上部を切断して、内部構造物を少量ずつ引抜く方法を採用する。

C:洗浄処理のための装置の設定

ナトリウム燃焼室を使用する。従来の燃焼室は、作業スペース確保の観点から狭すぎること から、燃焼室を拡張する改造を施した。

D:洗浄処理前作業

D1: ナトリウムの確実なドレン

本コールドトラップの場合は、ナトリウムが充填されたまま保管されている。そこで、コー ルドトラップをナトリウムの抜取り用架台に据え付け、予熱ヒータを取付けて約 200℃(ドレ ンナトリウム収納用ドラム缶の設計温度により制限された)で加熱溶融後、ナトリウム(化合 物)を本体下部のドレンラインからステンレス製のドラム缶に抜き取る操作を施した。1次お よび 2 次系コールドトラップ共にほぼ内容積(約 2m³)と同等量のナトリウムを抜き取ること ができた。このことから、ドレン温度の約 200℃については特に問題がなかったと評価できる。 D2:施設からのコールドとラップ撤去

D3: (第一工程): 上部鏡板、胴溶接部等切断、内部構造物の予備引き抜き

これ以降の解体・ナトリウム洗浄処理の作業手順を図 2.10-3 に示す。主要な作業における 状況を図 2.10-4 に示す。本手順は、順調に内部構造物が引抜くことができた場合に適用され、 2 次系のコールドトラップで採用された。

ナトリウム抜取り用架台に据え付けた状態で、グラインダで上部鏡板、胴溶接部等を切断す る。内部構造物の発火防止のため、切断部は順次アルミテープで密封養生する。内部構造物を 300~400mm 程度の予備的な引抜きによって、確実に引抜きの可能なことを確認し、再度元に戻 す。天井クレーン等で本体を架台から吊り降ろし、保管用架台に据付ける。

D4(第二工程):ナトリウム洗浄処理室への搬入、解体前準備

架台に据付けた状態でナトリウム処理室燃焼室内に搬入する。

解体用ナトリウム受皿の設置、ドレンノズルの窒素ガス供給ホースへの接続、解体作業中の 残留ナトリウムの発煙燃焼への対策等の解体前準備をする。

解体方法	至 所	短所	採用可否
密閉型蒸気洗浄	・密閉洗浄であるためメッシュ部を大気 中に曝す必要がなく、ナトリウム燃焼が 生じない ・ナトリウム処理後の解体洗浄となるの で、解体時の作業性が非常に良い	・容器内に残留するナトリウムが底部に落下し、凝縮水と急激な ナトリウムー水反応を生じる可能性がある。また、底部に蒸気/ ズルが配置されている場合、反応物(NaOH等)でノズル閉塞を生 じる可能性がある。 ・容器内に多量のナトリウムが残存していると、水素発生量(濃度)を制御し難い。	×
アルコール循環洗浄	・密閉洗浄であるためメッシュ部を大気 中に曝す必要がなく、ナトリウム燃焼が 生じない ・ナトリウム処理後の解体洗浄となるの で、解体時の作業性が非常に良い	 アルコール中のナトリウム溶解度は数%程度と少なく、残留ナトリウムをすべて溶解(反応)させるためには相当量のアルコールが必要になる。 水素発生量の制御のほかに、反応熱によるアルコールの温度上昇を制御する対応が必要になる。 洗浄処理に長時間を要する。 	×
内部構造物の引抜 き、パラフィン中で 解体	・ナトリウムの燃焼を抑制できて安全で ある。	 ・パラフィン中に溶解されたナトリウムを分離・回収する技術的な工夫が必要である。パラフィンの処理も困難である。 ・設備投資も必要であり、かつパラフィンを用いたコールドトラップの解体経験が乏しい(専門メーカに依頼する) 	×
内部構造物の引抜 き、大気雰囲気中で 解体	 ・全体的に作業性が良い ・ビニールバッグ法による内部構造物の 引抜き実績が豊富である 	 メッシュ部を大気雰囲気下に曝すために燃焼・火災が発生する 内部構造物の引抜きから洗浄作業まで1日作業を終了させる必要がある(引抜途中で放置できない) 	\bigtriangledown
内部構造物を少しず つ引抜きながら解体	 ・大気中に曝すメッシュ部位を制御可能であり、ナトリウムの燃焼・火災を防止できる。 ・万が一に燃焼した場合も胴部や防火カバーにて燃焼の防止(窒息消火)できる ・全体的に作業性が良い 	 夜間の保管方法に対する十分な安全対策を要する 	Ø
内部構造物を引抜か ずに胴と内部構造物 を交互に解体	 ・大気中に曝すメッシュ部位を制御可能であり、ナトリウムの燃焼・火災を防止できる。 ・万が一に燃焼した場合も胴部や防火カバーにて燃焼の防止(窒息消火)できる 	・夜間の保管方法に対する十分な安全対策を要する ・胴解体等に時間を要し、その間の燃焼・火災の可能性も増える ・作業性は良いとは言えない	0
註)コールドトラップの大き	きさ、構造や残留ナトリウム量によって評価も異なる。こ	ここでは大型コールドトラップを想定した内容である	

表 2.10-1 コールドトラップの解体・ナトリウム洗浄処理方法の比較

<u>E: 解体・洗浄処理作業</u>

E1 (第三工程):上部エコノマイザ解体

支持脚の切断、撤去。ドレンノズルから窒素ガスをブローしながら内部構造物を 300mm 程度引 抜く。グラインダ等により、上部エコノマイザとデミスタの間で内胴を切断し、エコノマイザお よび上部鏡板を解体する。窒素ガス混入水蒸気洗浄処理する。

E2(第四工程): バッフル板切断

タイロッドボルトおよび上部バッフル板と内胴溶接部を切断する。

E3(第五工程):バッフル板、デミスタ引抜き

バッフル板とワイヤメッシュデミスタを引抜き、前者を水蒸気洗浄処理、後者を燃焼処理する。 タイロッドと内胴を切断する。これを繰返し、デミスタ部を全て解体しナトリウム洗浄処理する。 E4(第六工程):バッフル板、デミスタ引抜き

内筒に引抜き用の穴をあけ、チェーンブロックによりメッシュ2ピース分を引抜く。バッフル 板とワイヤメッシュデミスタを引抜き、前者を水蒸気洗浄処理、後者を燃焼処理する。これを繰 返し、デミスタ部を全て解体しナトリウム洗浄処理する。

本解体・ナトリウム洗浄処理ではデミスタ部の発煙・発火を防止し、安全に実施することが重 要であるが、これを完全に実施することは困難であり、燃焼室で安全に燃焼してから解体、洗浄 処理することが効率的、かつ安全であることがわかった。

E5 (第七工程): 胴中央部、下部鏡板部切断

残った、胴中央部、下部鏡板部を切断する。

E6 (第八工程):水蒸気洗浄処理

切断した胴中央部、下部鏡板部を水蒸気洗浄処理する。

F:洗浄処理後処理

F1:廃材のスクラップ

廃材は水のシャワーでリンスした後に廃棄処理した。

F2:廃水処理

タンクに貯蔵された洗浄処理液は中和されて排水される。

なお、上記の E1 において、内部構造物の引抜きが不能の場合には、図 2.10-5 に示す作業手順 が採用される。ナトリウム処理室燃焼室内に搬入されたコールドトラップは、第二および第三工 程に示されたように、外胴の一部が切断され、その部分の内部構造物であるバッフル板とワイヤ メッシュデミスタ部が引抜かれ(図 2.10-3 の場合は上部の鏡板側から解体されるが、この場合は 下部の鏡板側から解体される)、バッフル板は水蒸気洗浄処理、ワイヤメッシュデミスタは燃焼処 理される。取外された外胴は、これを繰り返して全てのワイヤメッシュデミスタが解体・ナトリ ウム洗浄処理される。最後にエコノマイザ部が解体、洗浄処理され、あとは図 2.10-3 と同様であ る。2 次系コールドトラップは、当初の仮引抜きで引抜ける見通しが得られたことから、図 2.10-3 の手順によったが、第五工程の時点で、内部構造物の引抜きが不能と判明したため、それ以降の 作業は図 2.10-5 に示す手順によって解体、洗浄処理された。

胴部の切断は、当初はグラインダを用いたが、放熱フィンの切断に時間を要したため、その部 分はガス溶断により取除いた。このとき、コールドトラップ内部のデミスタから発煙が発生して 自然発火したため、窒素ガスのパージ量を増してから一旦作業を中断し、燃焼の状況を観察した。 その後も燃焼が継続したため、燃焼室内にて意図的にコールトトラップ内のナトリウムを燃焼さ せ、ナトリウム酸化物に性状を変えた後に。外胴をプラズマプラズマ溶断機で切断した。燃焼の 発生は想定内であり、十分な火災防止対策を施すと同時に、事前に解体作業中の残留ナトリウム の発煙、発火に対する処理手順を徹底した上で作業を実施した。ナトリウム火災、一般火災に備 えて、十分な消火設備の配備、適切な防護具の着用を徹底することが重要である。

(3) 50MW 施設コールドトラップ解体洗浄のまとめ

大型のコールドトラップについて、従来経験のない空気雰囲気中での解体・ナトリウム洗浄処理方 法を採用し、多くの経験を得ることができた。デミスタ部の発煙、発火の防止が最重要課題であると 考えられが、今回多くの場面で発煙、発火を経験することとなった。燃焼室で安全に燃焼させてナト リウムが処理された状態でその後の作業を実施することが、かえって安全性、効率の面から有効であ ることが確認された。

メッシュ部の解体は、コールドトラップを横倒しにした状態で、内部構造物を少しずつ引出して取 除く方法と、胴部の上半分を細切れ上に取除いた後に内部構造物を引抜く方法の両者を経験した。効 率的には前者は1日で作業を実施できたのに対して、後者では3日必要であった。これらの作業の途 中でナトリウムの発煙、発火を経験したが、燃焼が終了してから安全に作業を再開できた。当初の予 定では、メッシュ部のナトリウムの発煙、発火の防止の観点から、胴や内部構造物の切断にはグライ ンダ等の火気を用いない方法で実施したが、メッシュ部のナトリウムが殆ど燃焼し尽くした後には、 プラズマ溶断機を用いて解体することにより、作業効率を飛躍的に改善することができた。

また、本コールドトラップの解体洗浄処理で苦労した点は、メッシュ部を積極的に燃焼処理するため、ナトリウムが発煙・発火・燃焼した場合の安全対策処置である。特に設備対策として、既存のナトリウム燃焼処理室に長さ約4.3mのコールドトラップを横倒し搬入すると、奥行き約4mの燃焼室内に収納し切れず、さらに解体作業スペースや解体物の保管スペース等も確保することが困難であった。このためナトリウム燃焼室の入口通路部に鉄板等を張り付け、仮設の燃焼室に改造して対応した。

ナトリウムの残留付着量については、定量的な計測は実施しなかったが、洗浄前のドレンが有効で あったため、当初の予想よりかなり少量であったと考えられる。特に、1次系用コールドトラップで はデミスタ部や胴部等では表面に薄く付着している程度であった。デミスタ部内部には一部付着物が 見られた。2次系用は胴とデミスタ部の隙間にナトリウム等の付着、閉塞が見られた。

2次ナトリウム系用コールドトラップの全体の作業に要した時間は4日間であり、また1次ナトリウム系用コールドトラップでは1日間で完了した。これらの作業時間は、概ね予想していた範囲内であった。



図 2.10-3 内部構造物の引抜きによるコールドトラップの解体と洗浄処理の手順

JAEA-Technology 2012-033



エコノマイザ管解体



デミスタ引抜き前



バッフル板解体洗浄



燃焼室内コールドトラップ配置



エコノマイザ管解体



デミスタ解体



デミスタ(ワイヤーメッシュ)解体



デミスタ発煙状況

図 2.10-4 (1/2) 大型コールドトラップの解体と洗浄処理の作業状況



デミスタ(ワイヤーメッシュ)解体



デミスタ解体



燃焼室内状況





バッフル板解体



デミスタ燃焼状況



ワイヤーメッシュ燃焼処理

蒸気洗浄処理 図 2.10-4(2/2) コールドトラップの解体と洗浄処理の作業状況



図 2.10-5 内部構造物の引抜き不可時のコールドトラップの解体と洗浄処理の手順

(4) 大型コールドトラップ解体洗浄処理経験の調査

コールドトラップの解体洗浄処理の経験に関して、機器構造第一試験施設内コールドトラップ1 号機、同2号機、「常陽」2次ナトリウム純化系仮設コールドトラップについて調査した。大型コー ルドトラップの主要仕様を表2.10-2に、得られた経験の概要を表2.10-3に示す。いずれも本体をパ ラフィン溶解槽に入れてナトリウムを洗浄処理し、その後水蒸気洗浄処理している。 (1)機器構造第一試験施設内コールドトラップ(大型CT-1号機)

解体洗浄処理手順を図 2.10-6 に示す。コールドトラップを移動タンク貯蔵所として認可を受け て、メーカの工場へ輸送し、ナトリウムをドレンしない状態で胴部の解体を行い、ナトリウムサン プリングを実施した。ナトリウムサンプリング後、本体をパラフィン溶解槽に入れ、125℃まで加 熱した後ナトリウムを溶解流出させた。本体をパラフィン槽から引き上げ、窒素冷却伝熱管を解体 した。再度デミスタをパラフィン槽に入れ、デミスタ外胴、デミスタ本体を解体した。デミスタ部 のロールメッシュはパラフィン槽内でロールを解き、その後水蒸気洗浄処理した。 (2)機器構造第一試験施設内コールドトラップ(大型 CT-2 号機)

解体洗浄処理手順を図 2.10-7 に示す。ナトリウムをドレンした状態でメーカの工場へ輸送し、 底部胴(構造上ナトリウムのドレンができない部分)を切り離し、本体をパラフィン溶解槽に入れ、 約 120℃まで加熱してナトリウムをコールドトラップ内のナトリウムを溶解・排出させた。また、 ビニルバッグを活用して本体内の内装物を引き抜き、窒素ガスで冷却しながら伝熱管を解体した。 ビニルバッグを用いてデミスタ外胴からデミスタ本体を引き抜き、デミスタを再度パラフィン槽に 戻して解体した。デミスタを引き上げ、メッシュ部の一部をサンプリングして、その他は蒸気洗浄 処理した。

	運転時	内容積	メッシュ線径	メッシュ充填	メッシュ容	ドレン	付着密	付着物
	間(h)	m ³	(mm)	密度 kg/m³	積(m ³)	条件	度 Kg/m ³	量 kg
大型 CT	12,000	0.9	0.28	200	?	ドレン		
[熱流動施設]						無		
大型 CT-1 号機	21, 540	2.6	0.2	200	1.5	ドレン		
[機器1施設]						無		
大型 CT-2 号機	23,000	2.86	0.245	254	1.02	ドレン	86	87.5
[機器1施設]						温度不明		
大型 CT-1 次系	1,710	2	0.245	192	1.97	ドレン		
[50MW 施設]						200°C		
大型 CT-2 次系	2, 450	2	0.2-0.3	200	?	ドレン		
[50MW 施設]						200°C		

表 2.10-2 大型コールドトラップの主要仕様

熱流動施設: ナトリウム熱流動試験施設、機器1施設; 機器構造第一試験施設

50MW 施設: 50MW 蒸気発生器試験施設

の概略手順	いンセず シク貯蔵所としての許可を リング実施 部構に入れ、約125°C加 非出(2日間) 非出(2日間) ・デミスタ内師の解体は燃焼防 解体 、デミスタ本体をパラフィン たのためにパラフィン溶解槽内 、デミスタ本体をパラフィン にて実施 治内にて実施	マレンせず ック貯蔵所としての許可を リング管を打ち込んでNa アング管を打ち込んでNa 出した後、大気中にて解体を実 離世(36時間) ご胴を長手方向に切断・解 怪処理を実施	バン実施済 に専門メーカへ搬送 ボレン不可な箇所)を切断 さか同はパラフィン溶解槽 山、不活性ガス管理を実施 の引抜き の引抜き 「デミスタの解体はパラフィン溶 解槽内にてすべて実施 (ール状のデミスタか分解。
実施年月 (所要日数) 解体洗净((1)撤去前のCT内NaはF (2)撤去したCTを移動タン 得て、専門メーカへ搬送 (2)撤去したCTを移動タン (3)胴を解体し、Naサンプ (3)胴を解体し、Naサンプ (4)CT本体をパラフィン溶 (4)CT本体をパラフィン溶 (4)CT本体をパラフィン溶 (5)窒素冷却伝熱管群を1 (5)窒素冷却伝熱管群を1 (5)窒素冷却伝熱管群を1 (5)窒素冷却伝熱管群を1 (5)窒素冷却伝熱管報を(6)デミスタの期体は溶解 (7)デミスタの解体は溶解 (8)ロール状のデミスタを5 	 (1)撤去前のCTP4Naitド (2)撤去したCTを移動グ、 得て、専門メーカへ搬送 (3)胴に孔を開け、サンプ (3)胴に孔を開け、サンプ (3)胴に孔を開け、サンプ (5)上下鏡板を切断、次に (5)上下鏡板を切断、次に (6)デミスタを解体し、燃頻 	 (1)撤去前のCT内Nair (2)撤去したCTを許可後(2)撤去したCTを許可後(3)底部胴(構造上でNair (3)底部胴(構造上でNair (3)底部胴(構造上でNair (3)底部胴(構造上でNair (4)ビニルレバッグ法にて内i (4)ビニルレバッグ法にて内i (5)外胴からデミスタ本体に (5)デミスタを引き上げ、ロ (7)デミスタを引き上げ、ロ
解体目的	不純物捕獲特性及び 捕獲分布の調査等	 不純物浦獲特性及び 19< 抽獲分布の調査等 	不純物捕獲特性及び 捕獲分布の調査等
主要仕様	 (1)概略寸法 950×4340L(mm) 950×4340L(mm) (2)主要目 (2)主要目 (2)主要目 ・強制循環型窒素ガス冷却式 ・内容積: 約1.5m³ ・デミスタ容積: 約1.5m³ 	 (1)概略 寸法 850×3528L(mm) 850×3528L(mm) (2)主要目 (2)主要目 ・強制空冷式 ・内容積:約1.3m³ ・デミスタ容積:約1.3m³ 	 (1)概略 寸法
機器名	大型コールドトラッ プ1号機(機器構 造第一試験施設)	仮設コールドトラップ(常陽)	大型コールドトラップ2号機(機器構造第一訳)験施設)

表2.10-3 大型コールドトラップ解体で得られた経験の概要





(5) 1MW 蒸気発生器用コールドトラップの解体・洗浄処理経験

50MW 蒸気発生器コールドトラップの解体・ナトリウム洗浄処理に先駆けて、1MW 蒸気発生器用 コールドトラップ2基の解体・ナトリウム洗浄処理を行った。ナトリウム洗浄処理前に炭酸ガスを 封入して安定化処理を行っており、その効果が注目された。

No.1 コールドトラップは直径約 0.4m×長さ約 1.83m、容積約 0.12m³の縦型強制空冷式であり、 No.2 コールドトラップは直径約 1m×長さ約 3.63m、容積約 1.05 m³のエコノマイザ内蔵強制空冷 式である。

(1)安定化処理

1MW 蒸気発生器試験施設のナトリウム系アルゴンガス供給系に炭酸ガスボンベを接続し、既設の真空ポンプによりナトリウム全系統の真空引きを行い、炭酸ガスを正圧まで封入し、約 130 日保持した。

(2) 解体·洗浄処理状況

①1MW 蒸気発生器試験施設 No.1 コールドトラップ

コールドトラップの解体・ナトリウム洗浄処理状況を図 2.10-8 に示す。

- ・ ナトリウム燃焼室内で胴体およびデミスタ部をプラズマ溶断で切断した。
- ・ 胴体の一部切断時にデミスタの一部が発煙発火した。作業を中断して発煙燃焼の終息待ちし、勢いの弱まった段階で胴の一部をプラズマ溶断で縦割りに切り取り、デミスタ部露出、バーナで加熱してデミスタ部の燃焼を促進させた。
- ・ デミスタ部の燃焼が終息後、デミスタを取り出し、バーナで加熱燃焼した。
- 燃焼終了後に散水して最終処理した。切断した胴体はその都度蒸気洗浄処理実施した。
- ・ 解体洗浄前後の重量差から求めたナトリウム残留量は約 6.4kg であった。

②1MW 蒸気発生器試験施設 No.2 コールドトラップ

コールドトラップの解体・ナトリウム洗浄処理状況を図 2.10-9 に示す。

・ ナトリウム処理室にて胴体とエコのマイザ管をプラズマ溶断で切断した。

・ 胴体の一部切断時に、デミスタの一部が発煙、発火した。作業を中断して窒素ガス吹き 付けにより燃焼を抑制した。作業を継続したが再度発煙、発火した。窒素ガス吹き付けの抑 制効果が小さいために、エコノマイザを切り離し後、デミスタ部を燃焼室にて燃焼処理した。

・ デミスタ部の燃焼終息後、燃焼室内で胴、鏡部、デミスタをプラズマ溶断で切断し解体 した。デミスタ部のナトリウムは燃え尽きていた。

 ・ デミスタ部のみ取り出し、ガスバーナにて再度燃焼させた。燃焼終了後に散水して最終 処理した。切断した胴体についてはその都度水蒸気洗浄処理を実施した。コールドトラップの解体洗浄前後の重量差から求めたナトリウム残留量は約6kgであった。

JAEA-Technology 2012-033



図 2.10-8 1MW 蒸気発生器試験施設 No.1 コールドトラップの 解体・ナトリウム洗浄処理状況(1/2)

JAEA-Technology 2012-033



図 2.10-8 1MW 蒸気発生器試験施設 No.1 コールドトラップの 解体・ナトリウム洗浄処理状況 (2/2)



図 2.10-9 1MW 蒸気発生器試験施設 No.2 コールドトラップの 解体・ナトリウム洗浄処理状況 (1/2)



図 2.10-9 1MW 蒸気発生器試験施設 No.2 コールドトラップの 解体・ナトリウム洗浄処理状況(2/2)

2.11 NaK 総合流動伝熱試験装置のナトリウム・カリウム合金の洗浄処理

ナトリウム/カリウム共晶合金(NaK)総合流動伝熱試験装置は、原型炉「もんじゅ」の設計段階 でコアキャッチャ冷却系の1次冷却材にNaK-78の使用が検討されたことから、その取扱技術、流 動特性、純化特性、各種構成機器の性能特性に関する知見を得る目的で、NaK総合流動試験装置 が1976年9月に完成した。その後、熱交換器の流動伝熱特性の確認のために装置が改造され、NaK 総合流動伝熱試験装置として1979年3月に整備された。試験は1981年10月に終了し、その後は NaKをダンプタンクにドレンした状態で維持管理されてきた。2000年1月~2月に、当初の研究 目的を達成し、試験装置が解体撤去された。

NaK を使用した装置の解体・洗浄処理は初めての経験であることから、事前に様々な観点から作 業手順、安全性が検討された¹⁵⁾。使用された NaK は NaK-78 で、ナトリウム(22wt%)とカリウム (78wt%)の合金である。基本的性質をナトリウム(Na)とカリウム(K)と比較して表 2.11-1 に示す。

本装置は、NaK系(1次系)、2次冷却系、冷却水系、アルゴンガス系および純化系/冷却空気系 (フロン冷却系、空気系)から構成され、そのうち NaK系は、図 2.11-1の鳥瞰図に示すように、 2つの系統に区分される。ひとつは、主循環ポンプ→加熱器→ヘッドタンク→電磁流量計の循環 経路と真空蒸留 NaK サンプリング装置で構成される機器性能確認試験部、もうひとつは、熱交換 器系循環ポンプ→熱交系加熱器→NaK—有機媒体熱交換器→熱交系電磁流量計の循環経路で構成 され、NaK—有機媒体熱交換器の流動伝熱特性確認試験部である。NaK系は最大 3B 口径の配管で 構成され、総延長は 93m である。主要構成機器の仕様を表 2.11-2 に示す。加熱器(横置円筒型、 容器内に 9本のヒータを挿入)、冷却器(空冷式、3B 配管に冷却フィンを溶接付)、熱交系加熱器 (縦置円筒型、容器内に 48 本のヒータを挿入)、NaK—有機媒体熱交換器(シェルアンドチュウブ の縦置円筒型、胴側に NaK を、管側に有機媒体(商品名サーム s800)使用、SUS304HTB、外径 21.7m、 肉厚 1.2m の伝熱管 19 本を正角形配列)の構造図を図 2.11-2 に示す。

	Na K			共晶 NaK				
原子番号	11	19			Na	К		
原子量	22. 98977	39.098	組	重量 wt.%	22.8	77.2		
			成	原子 at. %	33. 4	66.6		
				モル分率	0. 334	0.666		
融点, ℃	97.82	63. 2			-12.65			
沸点, ℃	881.4	756. 5	785					
密度,kg/m ³	880	770	801					
比熱, kcal ∕kg℃	0.312	0. 185	0. 213					
熱伝導率,kcal/mh℃	65.8 35.0 22.0							
熱拡散率, m²/h	0. 2402	0. 2531	0. 129					
電気抵抗率,μΩcm	17.6	27.3	51.0					
引火点, ℃	約 280-290		約 230					
燃焼の特徴	炎の高さ、白煙の発生状態等はナトリウムと NaK で大差ない							
湿った地面への滴下し	常温の NaK を湿った地面に滴下すると、直ちに小さな爆発音と煙を発							
た場合の特徴 生して燃焼。ナトリウムに比較して活性が高い								

表 2.11-1 Nak の物理的性質



図 2.11-1 NaK 総合流動伝熱試験装置の鳥瞰図(NaK 系)

表 2.11-2 NaK 総合流動伝熱試験装置の主要構成機器の仕様

機器名	数量		主 要 仕 様
NaK 系ダンプタンク	1基	形式	横置円筒型
		容量	1. 1m ³
		外形寸法	$\phi 962 \mathrm{mm} \times \mathrm{L1700 \mathrm{mm}} \times \mathrm{t6 \mathrm{mm}}$
NaK 系ヘッドタンク	1基	形式	横置円筒型
		容量	0. 5m ³
		外形寸法	$\phi 697 \mathrm{mm} \times \mathrm{L1100 \mathrm{mm}} \times \mathrm{t6 \mathrm{mm}}$
NaK 系加熱器	1基	形式	横置円筒型
		外形寸法	ϕ 165. 2mm $ imes$ L2400mm $ imes$ t5mm
NaK 系冷却器	1基	外形寸法	ϕ 165. 2mm $ imes$ L3050mm $ imes$ t5mm
NaK 系主循環ポンプ	1基	外形寸法	$\phi 800 \mathrm{mm} imes \mathrm{D600 \mathrm{mm}} imes \mathrm{H650 \mathrm{mm}}$
		重量	450kg
		内部機器	冷却ブロア
NaK 電磁流量計	1基	外形寸法	L326mm imes D206mm imes H208mm
		重量	26kg
NaK 系ベーパートラップ	2 基	外形寸法	ϕ 114. 3mm $ imes$ H1000mm
NaK 熱交系加熱器	1基	形式	横置円筒型
		外形寸法	ϕ 318.5mm \times L2410mm \times t10.3mm
NaK 熱交系循環ポンプ	1基	形式	AC ファラデー型
		外形寸法	L800mm×D600mm×H650mm
NaK 熱交系電磁流量計	1基	形式	永久磁石型
		外形寸法	L206mm×D326mm×H208mm
NaK 有機媒体熱交換器	1基	形式	縦置円筒型
		外形寸法	ϕ 216. 3mm \times H3660mm \times t8. 2mm
純化系冷却空気設備	1式	外形寸法	$L1500$ mm \times D1000mm \times H2200mm
純化ユニット		内部機器	電磁ポンプ、電磁流量計、冷却器
			配管、コールドトラップ(φ412mm×
			L1300mm×t6mm)
純化系冷却空気設備	1式	外形寸法	$L1000$ mm \times D600mm \times H1700mm
プラギング計		内部機器	電磁ポンプ、電磁流量計、冷却ファン
			配管、オリフィス、エコノマイザ、ストレーナ等
純化系冷却空気設備	1式	形式	2 重配管
エコノマイザ		外形寸法	$L1625$ mm \times D950mm \times H150mm
	- 5	配管	一次側φ16.7mm、二次側φ28mm
純化糸冷却空気設備	1式	形式	空伶型
ブレクーフー		外形寸法	$L1077.4$ mm \times D874mm \times H400mm
		内部機器	冷却ブロア



(1) NaK 洗浄処理作業の手順

ナトリウムに比較して NaK の取扱経験が希少なことから、ナトリウムとの比較で NaK の化学 的特性や取扱いを十分に把握して作業の手順を検討することが必要である。このため、取扱い の教育・訓練を兼ねて特性の確認のための試験を実施した。その中で得られた、NaK の取扱に おける留意点は以下の通りである。

①融点がナトリウムの約98℃であるのに比べて約-12.6℃と低く、常温で液体であるため、 機器内面への付着は極めて少なく、切断時の発火、燃焼は比較的少ない。しかし、残留してい る場合には容易に流出して発火、燃焼する。凝固による流出の停止は期待できない。内部構造 物の引抜き等にあたっては加熱の必要がなく、作業性はよい。

②カリウムを78%含むことから、ナトリウムに比べて化学的に活性であり、空気や水との反応が激しい。NaK を鉄板やコンクリートの上に滴下した場合、乾燥状態では爆発的な反応や発 火は発生しないが湿った状態ではNaK に水分が接触すると瞬間的に爆発的な反応をする。

③NaK を空気の混合した窒素ガス雰囲気に曝すと表面に酸化物が生成され、大気雰囲気にさ らされると超酸化物となる。これらは発熱反応であり、容器の液面を動揺させながら低酸素ポ テンシャル環境と高酸素ポテンシャル環境に交互して曝すと、温度が上昇して発火にいたる場 合がある。NaK が発火した場合、窒素による消火は窒素との化学的な反応が生じるために不適 切である。アルゴンガスによる十分な置換により発火、燃焼を防止することができる。

これらの留意点を踏まえて、NaK の処理に当たって想定される危険性は以下の通りである。 これは基本的にはナトリウムの場合と同様であるが、より激しいものとなる恐れがある。つま り、配管切断中における空気混入等による NaK と水分の反応によって生じる水素ガスの爆発の 発生、配管、機器内に多量の NaK の残存する時、切断中における NaK の空気中への流出による 燃焼の発生、および NaK の取り扱い中に肌に直接接触したときのアルカリ火傷の発生が考えら れる。解体、洗浄処理の作業手順を図 2.11-3 に示す。安全対策として、NaK の特性を踏まえた 十分な火災防止対策を施すと同時に、事前に解体・洗浄処理中の残留 NaK の発煙、発火に対す る処置手順を施して作業する必要がある。また、NaK 火災に備えて、十分な消火設備の配置、 適切な防護具の着用を徹底することが重要である。

(2) 解体、NaK 洗浄処理作業の内容

A:洗浄処理条件の設定

A1:機器の再使用の有無

解体撤去するもので、いずれの機器についても再使用することはない。

A2:別設置洗浄槽の有無の選定

ナトリウム処理室燃焼室で直接燃焼処理する。

A3: 残留 NaK の状況、量の予測

常温で液体であり、構造的な滞留部を除けば配管・機器等の表面への付着は少ない。構造 的な残留部については、当該部の体積から残留 NaK 量を予測した。



図 2.11-3 NaK 総合流動伝熱試験装置の解体、洗浄処理作業の手順

B:洗浄処理方法の選定

配管・機器等の解体時に表面状況を観察した付着状況から、燃焼処理を採用した。

D:洗浄処理前作業

D1: NaK の確実なドレン

長期の停止期間を伴っており、特別な留意はしていない。

D2:ループ内アルゴンガス置換

NaK系の弁を開として、既存のガス供給・排気系により真空引きを行い、その後にアルゴンガスを充填し、ガス置換をする。

D3: ループ内配管・機器のアルゴン導通確認

弁の開閉で構成した各系統について、ヘッドタンクから加圧し、ダンプタンクのアルゴン ガス圧力の変化やガスのバブリング音にて導通を確認する。

D4:ダンプタンク内 NaK の抜取り

基本的にはナトリウムと同様な手順(ダンプタンクをアルゴンで加圧してドラム缶に抜取る)で特に問題はない。約 600kgのNaK が 5 本のドラム缶に移送された。抜取り後にタンクの底部には約 13kgのNaK が残留しており、解体、処理時に抜取り、処理した。

D5:配管切断、機器隔離

切断部からの NaK の流出防止を意識して、配管の切断は水平部で行うこととし、マーキン グの上、ループへの空気の混入を防止することに留意して、ループの上部から順次実施した。 切断は、図 2.11-4 に示す手付きビニールバッグ(簡易型グローブ)にアルゴンガスを供給 しながら行われた。切断にはバンドソーを使用した。この方式は、ビニルバッグ内でのバン ドソーを使用しての作業性、受け皿に NaK が流出した際の作業性が悪い点が挙げられた。NaK 系配管について配管の切断開口部はポリエチレン製キャップとビニールテープで閉止した。 万一の流出 NaK を受けるための金属製の受皿の設置や消火器の配備等火災防止への十分な 留意の上実施された。

D6:施設からの解体・撤去およびナトリウム処理室燃焼室へ搬入

切断された配管・機器は、ナトリウム処理室へ搬入された。

E:解体·洗浄処理作業

E1:解体、溶融燃焼処理

ダンプタンク、熱交換系加熱器、NaK-有機媒体熱交換器の解体手順を図 2.11-5~7 に示 す。解体にはバンドソーを使用した。

解体にあたって、NaK の流出が発生したのは NaK-有機媒体熱交換器の入口配管切断時の みであり、流出した NaK はビニルバッグ内に保持された。構造的に NaK の残留の生ずる箇所 では、NaK は配管、機器を傾けるだけで容易に排出でき、また、配管、機器の壁面には NaK の付着はほとんどなく、燃焼による処理は困難なく実施された。 ナトリウム処理室における各機器での NaK 処理量を表 2.11-3 に示す。最大のものは NaK - 有機媒体熱交換器で 2.25kg であり、合計約 4.6kg であった。解体・洗浄処理の状況を図 2.11-8 に示す。

F:洗浄処理後作業

F1:機器の細断・廃棄

機器は特に問題なく細断・廃棄された。

F2:廃液処理

NaK はカリウムを含む合金であり、カリウムは天然放射性核種(⁴⁰K)を含む。そのため、 NaK 洗浄処理廃液は濃度が排出基準⁽³⁾(1.8×10⁻³Bq/cm³)以下になるように水で15,000倍に 希釈して排水する。ナトリウム処理室でのNaK 洗浄処理廃液処理計画によって、NaK の累積 処理量が1kgに達する前に廃水ピット内を満水(15m³以上)として排水した。毎日のNaK 処 理量は、重量測定、少量で測定できない場合には目測で実施した。



Ar ガスボンベ

図 2.11-4 手付きビニルバッグによる配管切断方法
No.	配管・機器等	NaK 処理量, g
1	・ダンプタンク内 NaK 抜き取りに使用した配管、弁	3
2	・サンプリングタンク、ベーパートラップ、配管、弁	3
3	・ヘッドタンク、ベーパートラップ、配管	1,000
	・電磁流量計、配管、弁	
4	・冷却器、配管、弁	1
5	・加熱器、配管、弁	300
	・純化ユニット(コールドトラップなど)	
	・エコノマイザ、配管	
6	・プラギング計	2
	・プレクーラー	
7	・熱交換系加熱器	50
	・熱交換系電磁ポンプ、配管、弁	
	・電磁ポンプ、配管、弁	
	・電磁流量計、配管、弁	
8	・NaK 有機媒体熱交換器のNaK 抜き取り	2,250
9	・NaK 有機媒体熱交換器配管、弁	1,000
10	・ダンプタンク、配管	10
	(ダンプタンクの NaK 抜き取り後)	
	NaK 処理量の合計	4.619

表 2.11-3 解体および洗浄処理における NaK 処理量

1. 本体鏡部の中心にNakドレン用の 2. 鏡部より本体側へ約50mmの箇所を 3. 本体側部をプラズマで切断する 穴を空け1Bの配管および弁を プラズマで切断する 取り付け、Nakをドレンする







図 2.11-7 NaK-有機媒体熱交換器の解体手順

JAEA-Technology 2012-033



ダンプタンクの観察試料の 取出しと内部状況の確認





熱交換系加熱器 ヒータ束の引抜き

熱交換系熱交換器の撤去



NaK-有機媒体熱交換器 残留NaKの抜取り

図 2.11-8 NaK 系配管·機器の解体・洗浄処理

(3)まとめ

・配管の切断は内部をアルゴンガス置換したビニルバッグ内で実施することが有効である。た だし、作業の準備に手間がかかること、内部で機械工具等を使用する際の作業性が悪い等の問 題点がある。

・NaK は常温で液体のため、バーナ等による加熱の必要はなく作業性がよい。また、配管を傾けるだけでNaK は流出するため配管の表面等への付着はほとんどなく、洗浄処理も不要である。 構造的にNaK の残留しやすい部位に関してはその流出の内容に留意した作業が必要である。

・配管・機器での残留 NaK の量は合計約 4.6kg であった。残留 NaK の処理を適切に行うと、配管・機器への NaK の付着はほとんどなく、その処理は燃焼室での燃焼処理で十分であった。

・NaKの取扱にあたって、ナトリウムに比較して特に留意すべき点は解体時のNaKの流出であり、その他はかえって取扱やすいといえる。

2.12 小型試験材等のナトリウム洗浄

ここでは、ナトリウム環境が及ぼす影響を評価するために、ナトリウム中で試験された短冊状 の腐食試験片や中実丸棒の材料強度試験片などの、小型形状の試験片に係るナトリウム洗浄につ いて述べる。

小型形状の試験片やその冶具等は、ナトリウム処理室以外の指定したエリア(換気を有するフ ード等)で、仕上げ洗浄として、付着ナトリウム等の洗浄作業が作業要領書に従って実施される。 これは、①研究目的(ミクロ観察等)の面から材料表面の洗浄度を高めることや、②試験治具の 構造的な面から微細隙間部の洗浄が十分にできず、洗浄に多大な時間を要することへの配慮から なされるものである。洗浄方法の多くは、アルコール(試薬)洗浄方法が適用される。本来であ れば、粗洗浄はナトリウム処理室で、その後の最終的な精密洗浄はナトリウム処理室以外の指定 エリアで行うことが望ましい。

(1) 洗浄作業の考え方

ナトリウム処理室以外の指定エリア(換気を有するフード等)におけるナトリウム洗浄処理 の適用条件の目安(考え方)は以下の通りである。ただし、明らかにナトリウムが付着してい る場合や、研究目的の上で精密洗浄が必要とされない場合は適用されない。明らかにナトリウ ムが付着している場合には、ナトリウム処理室等の設備が完備された場所で再洗浄を行い除去 することになる。

- ・ 概ね1リットル以下(ビーカーレベル)のアルコール等の洗浄液で洗浄完了が可能である
 こと。
- ② 目視で、明らかに塊状のナトリウム付着物(概ね1mm以上の粒子等)が存在しないこと。
- ③ 構造的に分解・開放ができず、隙間部に滞留すると予想されるナトリウム量(あるいは構造上の隙間部体積)が1cm³以下(ナトリウムと水の反応による水素発生量の目安約600cc、空気中における水素の燃焼下限の管理目標値4%以下)であること。

代表的な試験片の例を図 2.12-1 に示す。ここで実施されている殆どは材料試験・分析に供 する小形状の試験片レベルである。

(2) 作業の手順

基本的な作業手順を図 2.12-2 に示す。指定エリアでのナトリウム洗浄を実施する前に、付着状況や作業手順等を確認し、洗浄中においてはアルコール温度や反応状況を常に確認することが重要である。必要に応じて仕上げ洗浄を行う。洗浄後は十分な乾燥を施し、それぞれの目的に応じて供することになる。

(3) 作業のヒント

材料試験や分析に供することを前提とした場合、ナトリウム洗浄処理に係るポイントは以下 のようである。 ・指定エリアに持ち込み前に、粗洗浄を実施して表面等に付着しているナトリウムを排除する。 この粗洗浄は、基本的にナトリウム処理室で実施するのが安全面で望ましい。

・洗浄液には、材料への影響を極力小さくするために、アルコールを使用する。仕上げ洗浄に は試薬級のアルコールを用いるのが望ましい。

・専用の洗浄容器にアルコールを注ぐ。この場合は被洗浄物が完全に浸される液位とする。その後、静かに速やかに被洗浄物を浸漬する。

・洗浄中は洗浄容器の雰囲気を窒素等の不活性ガスで置換し、換気するとより安全性が高まる。
 ・より洗浄効果を高める場合には、超音波洗浄機を用いる。これまでの経験例では、20分程度を2回以上繰り返していることが多い。

・必要に応じて洗浄液を交換し、反応の無いことを確認して洗浄終了とする。

・洗浄終了後は十分な乾燥(温風乾燥等)を行い、材料試験や分析に供するまで保管する。真 空デシケータ等への保管が最適である。



図 2.12-1 代表的な試験片形状(単位:mm)



図 2.12-2 基本的な作業の手順

3. 機器毎におけるナトリウム洗浄処理技術の整理

ナトリウム試験施設においては、それぞれの目的・機能を有する多数の機器により装置系統が 構成されている。同一の目的・機能を有する配管・機器においても、装置の目的や規模に応じて様々 な構造や形状を有する。ナトリウム洗浄後の使用目的や構造等によって洗浄処理方法は異なるが、 これまでは解体・廃棄を目的としたものが多い。第2章で取上げて記述した装置や機器のナトリウ ム洗浄経験をまとめると、表 3-1 の通りである。ここでは、これらの施設や機器を構成している 機器毎に、ナトリウム洗浄処理に係る経験・知見について横断的に整理する。

記載	装置、機器名称	被洗浄物の洗浄処理後	構成機器
章節		の使用目的等	
		2 台の電磁ポンプ	配管、各種計測器、試験容器(タ
	当上 汨山 北松 马马马子 酥金	再使用、その他解体・	ンク)、貯蔵タンク(タンク)、ド
0.1	山一一つ。	廃棄	レンタンク(タンク)、電磁ポンプ
2.1			(2 台保管・再使用、1 台廃棄)、
			加熱器、コールドトラップ、冷却
			器、弁
		メンテナンス実証試験	蒸気発生器(蒸発器)
	蒸気発生器メンテ	としてナトリウム洗浄	
0.0	ナンス実証試験	処理、試験後検査、材	
2.2	(50MW 蒸気発生	料試験用試験片採取、	
	器2号機蒸発器)	一部解体後廃棄、他改	
		造後再使用	
	50MW 苏气戏开盟	試験後検査、材料試験	蒸気発生器(蒸発器、過熱器)
0.9	9. 县城 (基文明) 温	用試験片採取、過熱器	
2.3	2 万 機(烝光岙、迥	展示モデル製作、その	
	杰哈	後解体·廃棄	
	50MW蒸気発生器	解体·廃棄	中間熱交換器
2.4	試験施設		
	中間熱交換器		
	大口径電磁流量計	解体·廃棄	配管、各種弁、各種計測器、ヘッ
2.5	校正試験装置		ドタンク(タンク)
	(SFCAT)		

表 3-1(1/2) 各装置・機器におけるナトリウム洗浄処理の概要

表 3-1(2/2) 各装制	置・	•	機器におけるナ	·ŀ	、リ	ウム	洗浄処理の概要
----------------	----	---	---------	----	----	----	---------

記載		被洗浄物の洗浄処理後	構成機器
章節	装直、機器名称	の使用目的等	
	「もんじゅ」炉容	解体·廃棄	配管、各種弁、各種計測器、炉容
2.6	器ナトリウム中試		器モデル試験容器
	験装置(SITR)		
		カップリング部とイン	配管、各種弁、各種計測器、「もん
	大型(「もんじゅ」)	ペラ部は展示用カット	じゅ」1 次系主循環ポンプモック
2.7	ナトリウムポンプ	モデル製作に使用、そ	アプ試験体
	試験装置(SPTL)	の他は解体・廃棄	
		解体・廃棄	配管、各種弁、各種計測器、「もん
	「もんじゅ」遮蔽		じゅ 遮蔽プラグ総合断熱試験装
	プラグ総合断熱試		置(500A 配管、模擬回転プラグ、
2.8	験装置(SPINTA)		回転プラグ遮蔽胴、模擬固定プラ
			グ、固定プラグ遮蔽胴、サーマル
			ライナ)
		試験後検査、材料試験	1MW2 重管蒸気発生器
2.9	2 重管蒸気発生器	用試験片採取その後解	
		体·廃棄	
		解体·廃棄	50MW 用 1 次系用、2 次系用コー
			ルドトラップ、ナトリウム機器・
	大型コールドトラ		構造第1試験施設コールドトラッ
2.10	ップ		プ(2基)、「常陽」2次ナトリウム
			系仮設コールドトラップ、1 MW 蒸
			気発生器試験施設コールドトラッ
			プ (2 基)
		解体・廃棄	小口径配管、各種弁、各種計測器、
			主循環電磁ポンプ、ヘッドタンク、
	NaK 総合流動伝熱		雷磁流量計(2基)、熱交換器系循
2.11	試驗装置		環ポンプ、加熱器、コールドトラ
			ップ、NaK—有機媒体執交換器
			真空蒸留 NaK サンプリング装置
		↓ 材料試験	小型形状試験片、付随する冶具
2.12	小型形状被洗浄物		武料調整機材

3.1 配管および弁

ナトリウム試験装置で適用されるナトリウム配管は、ナトリウムとの共存性や高温強度特性、 および施工性(含む溶接)の観点から、主にステンレス鋼製が適用され、ナトリウム配管は運転 後のドレン性に配慮して僅かな勾配(1/50前後)をつけて敷設される。このため、ナトリウム 配管内に残留するナトリウムの量は、きちんとドレンされ、系統内のガス導通の確認がなされて いれば極僅かであり、ナトリウム洗浄処理に対する大きな問題にはならない。一般に、洗浄処理 や廃棄の作業性、取扱の利便性に配慮し、配管を適切な長さ(例えば、数十 cm から 1-2m 前後) に切断して、大気開放状態の水蒸気洗浄処理方法を採用して洗浄処理される。配管の切断長さは、 洗浄水や水素ガスが配管内に滞留せずに、かつ配管内部が確認できる開放状態にすることが重要 である。洗浄時における被洗浄物の向きにも注意が必要である。洗浄後は、洗浄処理を確実にす るために、水による十分なリンスや浸漬を実施する。残留ナトリウムが極端に少ないことが確認 できる場合には、切断後に直接散水する洗浄処理方法が採用されることもある。一方、万が一に 配管内に多量のナトリウムが残留(閉塞状態)している場合には物理的に除去することが困難で あり、この場合はバーナ等の加熱によって配管内のナトリウムを溶解・排出させ、その上で排出 されたナトリウムは燃焼処理、配管は蒸気洗浄をすることが有効である。配管の再使用や材料検 査を考える場合には、水分による配管表面のアルカリ腐食に留意する必要があり、アルコールに よる洗浄方法が適切である。また、ナトリウム洗浄処理後に十分な乾燥を行い、配管内に不活性 ガスを封入して、空気との接触を防止して保管することが必要である。

一方、ナトリウム弁は多くはベローズシール型であり、構造上から弁内のナトリウムを完全に ドレンすることが困難であり、ナトリウムが残留することを前提としてナトリウム洗浄処理を行 う必要がある。ナトリウム洗浄処理後に弁を再使用しないで廃棄する場合には、2.1項で記述し たように、弁内のナトリウムを溶融・排出し、その上で燃焼処理するのが有効である。3/4B~2B 程度の小型弁はリップ溶接部を切り離し、弁本体(ボディ)からステムを引き抜き、ベローズ部 内に滞留しているナトリウムを燃焼処理する。3B 弁はベローズ部に溶接されているガイドパイ プをプラズマ溶断し、ベローズ内のナトリウムを燃焼処理する。このような作業は配管に比較し て解体に時間を要するため、作業計画の段階で十分な裕度を見積る必要がある。

ナトリウム洗浄処理後に弁を再使用する場合は、事前に除去して残留ナトリウムを極力排除し た後に、アルコール浸漬洗浄処理方法や窒素混入水蒸気洗浄処理方法を採用して、徐々に洗浄処 理する方法が有効である。弁はシステムを構成する基本の構成機器であり再使用した経験もある が、再使用する場合には弁の健全性(特にベローズや弁座リーク)を検査することが重要である。

3.2 タンクおよび容器

ナトリウムタンクには、試験ベッセル、貯蔵タンクおよびヘッドタンク(膨張タンク)等があ り、その使用の目的や大きさは多様である。ナトリウムタンクにはドレン用の配管、液面計や温 度計等の計測器、多孔板や熱衝撃板等が設置されているが、基本的な構造は比較的に単純である。 ナトリウム洗浄処理において留意することは、構造によってタンク内のナトリウムがドレン(抜 き取り)されずに残留することがあること、カバーガスの領域が存在する場合にはガス層部の壁 面に燃焼し易いナトリウム蒸気が多く付着されていることである。設計製作図面や運転履歴等に より残留箇所や残留のナトリウム量を予測し、さらに洗浄処理の面から効果的な箇所で切断する。 切断の際には空気混入を抑制するために、タンク内部から不活性ガスを流しながら行うのが良い。 底部等の残留ナトリウムは、切断・開放後にできるだけ工具等で掻き出し、ガスバーナ等により 燃焼処理をすることが有効である。構造が比較的単純であることから、ナトリウム洗浄処理の作 業は、大きな問題もなく実施されている。タンクの内部に残留している多量のナトリウムの抜取 り作業については、2.1項に記述されており、その抜取り装置の構成は参考となろう。

特徴的なタンクの解体経験としては、蒸気発生器安全性総合試験装置(SWAT-3)のダンプタン ク(15tonのナトリウムを保有)の解体がある。このダンプタンクは蒸気発生器伝熱管における ナトリウムー水反応試験を実施したものであり、注入された約1.5m³の水とナトリウムとの反応 から生成された大量のナトリウム化合物、主に、酸化ナトリウム(Na₂0)、水酸化ナトリウム(NaOH) が含まれている。それらの化合物が解体作業に及ぼす影響を十分調査・検討し、安全かつ効率的 な作業の実施が重要である。タンク解体における特徴的な点は、空気との反応による発火・燃焼 を防止するために、残留するナトリウム上部に乾燥砂を覆い、その上でタンク解体・開放および ナトリウムの処理を行ったことである。その詳細は下山らの報告書^{8),16)}を参照されたい。

3.3 ポンプ

大型の機械式ナトリウムポンプのナトリウム洗浄処理に関しては、大型ナトリウムポンプ試験 装置(SPTL)および 50MW 蒸気発生器試験施設の1次系と2次系の主循環ポンプの経験を有する。 機械式ナトリウムポンプの構造上の特徴は、ナトリウム中軸受け部、ノズル部は多数の部品から 構成される複雑な構造と、ナトリウム液面を有し、ポンプの上部はカバーガスにさらされるため、 燃焼し易い蒸気からの凝縮ナトリウムが存在することである。

特に各備品に分解しながら、狭隘箇所に残留しているナトリウムを注意深く洗浄処理すること が必要となる。2.7 項で述べた SPTL のナトリウムポンプ洗浄処理では、窒素ガス+水蒸気の混 合による不活性ガス中水蒸気洗浄処理と、途中から炭酸ガス供給による安定化処理を実施した。 大型バンドソーによる切断後内部を観察した結果、ネジ部などの狭隘部に洗浄処理できなかった ナトリウムが残存しているのが観られた。試験装置解体・洗浄処理に費やした作業時間は、各作 業の段取り換えなどの準備時間を除くと140時間程であり、その内、密閉洗浄処理と安定化処 理の2つの作業で約半分の時間を費やした。

また、メカニカルシール部やインペラ部の分解・洗浄にも長時間を要した。これは展示用カッ トモデル製作に供されるため、品質保持として慎重に実施した結果、長時間の洗浄処理時間を費 やした一因と思われる。単なる洗浄後に廃棄することであれば、窒素ガス+水蒸気による不活性 ガス中水蒸気洗浄処理の採用も必要なく、大気中の水蒸気洗浄処理の採用が可能であり、ネジ部 などの狭隘部に残存していたナトリウムの処理も溶融・燃焼処理や水蒸気洗浄処理を多用するこ とで作業の合理化が図られるものと思われる。

3.4 コールドトラップ

多くのナトリウム試験装置においては、ナトリウムの純度管理を目的としてコールドトラップ が設置されており、そのナトリウム洗浄処理の経験例も比較的多い。しかし、コールドトラップ のナトリウム洗浄処理は最も難解であり、洗浄手順や安全上の注意を十分に払う必要がある。

初期の段階では、コールドトラップの不純物除去効率等の性能評価を目的としてメッシュ部位 に捕獲された不純物分析が行われ、この際にコールドトラップの解体および洗浄処理が実施され た。パラフィン溶解槽でコールドトラップ全体を加熱し、ナトリウムを溶解・流出させた後、パ ラフィン溶解槽内で解体する手法が用いられた。この方法ではナトリウムを含んだパラフィンの 処理が困難であり、さらに、大量のパラフィンを取り扱う設備が必要であった。このような分析 試料を採取する等の特別な目的での解体経験例を除くと、コールドトラップは解体・ナトリウム 洗浄処理後に廃棄することが大半であり、安全性を確保した上で効率的な方法を採用することが 重要点となる。基本的にはメッシュ部位に捕獲された不純物は空気に触れると燃焼し易いため、 燃焼を想定した上での洗浄処理となる。2.10 項の 50MW 蒸気発生器試験施設の大型コールドトラ ップの場合は、コールドトラップの空気中への開放時の火災の防止を目的として炭酸ガス封入に よる安定化処理を行い、内部構造物を少しずつ引抜きながら溶融・燃焼処理する方法が採用され た。内部構造物を少しずつ引抜くことができない場合には内部構造物を引抜かないで、胴と内部 構造物を交互に解体する方法が採用された。解体持の部材の切断に当たっては、発生する熱を極 カ少なくすべく注意が払われた。これらの方法では、コールドトラップに堆積しているナトリウ ム等が大気に触れて生ずる燃焼を極力抑えて、安全に洗浄処理することが最優先にされている。 燃焼を抑えるために、窒素を封入することが行われた。しかし、あるケースでは、切断時の熱の 発生のため、燃焼が発生し、窒素の封入にもかかわらず燃焼の防止ができず燃焼を継続させた経 験例もある。 燃焼は事前の想定内として対策が施されていたため、 ナトリウム処理室の燃焼室に て問題なく終了した。これまでの経験例から、コールドトラップの洗浄処理時は燃焼することを 前提として、排煙処理設備を有するナトリウム燃焼室内での作業や燃焼抑制の対策を十分に行い、 燃焼処理方法の採用を図ることが有効である。

3.5 熱交換器および蒸気発生器

いずれの機器においても、その構造上の特徴は、比較的小径の多数の伝熱管(あるいは類似な 管)で構成されていることであり、また、その伝熱管を束ねる管板を有する。そのため、この管 板部分に残留ナトリウムが存在する場合がある。構造によってはドレンがされずに伝熱管に多量 のナトリウムが残留することもある。また、伝熱管の支持構造部やナトリウムの流路を構成する ためのバッフル板の設置等により、ナトリウムが残留しやすい部位が存在する。そのため、ナト リウム洗浄処理に当たっては、設計製作図書にて構造の確認や、ファイバースコープによる事前 の当該箇所の観測等により残留ナトリウムの位置や量を的確に予測しながら実施することが肝 要である。 中間熱交換器には、構造上ナトリウムを完全にドレンできずに残留する箇所(鏡部)が存在す るが、その部分を切断解体してナトリウムを掻き出しや削り取りにより除去し、あとは大気中水 蒸気洗浄処理で問題なく洗浄処理することができた。また、胴部に液面が存在することから、カ バーガスにさらされている部位が存在し、燃焼し易いナトリウム蒸気の残留している場合があり、 留意が必要である。

一方、蒸気発生器のナトリウム洗浄処理の経験は少なくない。「もんじゅ」用の蒸気発生器の 開発として、まず1MW 規模のモックアップが製作され、各種の試験が実施された。運転の初期に 2回、小規模な水漏えいが発生し、その補修のために内部の管束部が胴から引抜かれ、ナトリウ ムが洗浄処理され、水漏えい箇所の補修が行われた。運転終了後はナトリウム洗浄処理後、試験 後検査や材料試験のための試験片が採取された後解体・廃棄された。引続いて「もんじゅ」の 1/5 の規模の 50MW 蒸気発生器の1号機が製作され、約1年間の各種試験の後ナトリウム洗浄処 理後、試験後検査や材料試験のための試験片が採取された後解体・廃棄された。続いて 50MW 蒸 気発生器2号機が製作され、途中の段階で、蒸気発生器のメンテナンス技術を総合的に評価する 目的で蒸発器を使用した"蒸気発生器メンテナンス実証試験"が実施され、ドレン条件による残 留ナトリウム量の検討や炭酸ガスによる残留ナトリウムの安定化処理法等の基礎的な関連試験 を含めて総合的なナトリウム洗浄処理に関する開発が行われた。その後、長期の運転・試験の後 ナトリウム洗浄処理され、解体・廃棄された。実証炉用の蒸気発生器として2重管蒸気発生器が 検討され、その研究のため1MW 規模でのモックアップ試験体が製作され、各種試験の後、運転終 了し、アルコール循環方法を採用してナトリウム洗浄処理され、試験後検査や材料試験のための 試験片が採取され解体・廃棄された。

さらに、ナトリウム中への大規模な水漏えいに関する試験開発の目的で蒸気発生器安全性総合 試験装置(SWAT-3)が製作され、「もんじゅ」を模擬した約1/2.5の規模の管束部モデルを用い た試験が実施され、大規模水漏えい試験後に湿り窒素ガスによりナトリウム洗浄処理が実施され た。

このように、多くのナトリウム洗浄処理の実績が蓄積された。蒸気発生器は構造的にナトリウ ムのドレン性が優れており、ナトリウムの多量な付着や残留もなく、ナトリウム洗浄処理全体に わたって特別の問題の発生もなく、ナトリウム洗浄処理に関する各種の技術の蓄積がされた。再 使用を前提として 50MW 蒸気発生器 2 号機蒸気発生器を使用した "蒸気発生器メンテナンス実証 試験"では窒素ガス+水蒸気による不活性ガス中水蒸気洗浄処理方法が採用され、またナトリウ ム洗浄処理後に材料試験片の採取が重要な目的である 2 重管蒸気発生器ではアルコール循環方 法が採用され、いずれも目的が達成されている。洗浄処理後再使用せず解体・廃棄する場合には 大気中での水蒸気洗浄処理方法が採用され、特に問題もなく作業を行われた。

3.6 各種構造の試験体

「常陽」や「もんじゅ」の各種機器のナトリウム中での構造健全性を確認することを目的に多 くのモックアップ試験装置が製作され、研究開発の後、ナトリウム洗浄処理、解体・廃棄された。 これまで記載してきた中間熱交換器や機械式ポンプ、蒸気発生器以外の代表的なものとして、大 口径電磁流量計校正試験装置(SFCAT)、「もんじゅ」炉容器ナトリウム中試験装置(SITR)、「も んじゅ」遮蔽プラグ総合断熱試験装置(SPINTA)等がある。実機を模擬して、なおかつ試験の目 的達成のためにモデル化されており、その形状は複雑多岐に渡っている。目的の試験終了後、ナ トリウム洗浄処理され、いずれも、再使用の計画はなく、解体・廃棄された。

そのため、ナトリウム洗浄処理にあたっては安全で効率的な方法の採用が優先され、基本的に は大気中での水蒸気洗浄処理方法が採用された。多量のナトリウムが残留している部品について は燃焼処理が有効であった。施設からの撤去やナトリウム処理室への運搬、搬入時の万一の燃焼 に備えて、炭酸ガスによる残留ナトリウムの安定化処理がなされた。

これらの機器のナトリウム洗浄処理作業を効率的に進める上での留意事項としては、部品レベルに分解・開放し、作業性の良い寸法に切断しながら、ナトリウム洗浄処理を進めることである。 大気開放での水蒸気洗浄処理方法が有効であることが示された。

計測機器類としては温度計(熱電対)、流量計、圧力計、レベル計、酸素計、水素計等で、そ の構造は多種多様である。温度計、圧力計、レベル計、酸素計、水素計等は直接ナトリウムと接 液される構造と、さや管(ウェル管)内に挿入され接液されない構造がある。再使用を目的とす る場合には、アルコール等により丁寧に洗浄後、不活性ガス中に保管する。勿論、再使用する前 には校正試験や機能確認試験を行うことが前提である。電磁流量計や電磁ポンプは付属部分を除 けばダクト部は配管と同様な扱いとなり、ナトリウムに接液する部分におけるナトリウム洗浄方 法は基本的に配管と同様である。洗浄後に再使用する場合には、その性能や機能に悪影響を与え ないように、変形や材料の腐食防止等に十分な注意が必要である。再使用される電磁ポンプのア ルコール循環法によるナトリウム洗浄処理が採用された経験例もある。その他の計測器等では、 極微量な付着量であればアルコール等で拭取る方法も有効である。

3.7 NaK 機器

NaKの取扱における留意点は、①融点がナトリウムの約98℃に比べて約-12.6℃と低いことから常温で液体である。そのため、機器内面への残留は極めて少ないことから切断時の発火、燃焼は比較的少ない。しかし、残留している場合には容易に流出して発火、燃焼が発生し、凝固による流出の停止は期待できない。②カリウムが78%含むことから、ナトリウムに比べて化学的に活性であり、空気や水との反応が激しい。鉄板やコンクリートの上にNaKを落とした場合、湿った状態ではNaKと水分が接触すると瞬間的に爆発的に反応する。

このことから、NaK の場合はナトリウムと異なり、配管等の切断時に NaK を大気中に流出させ ないことであり、この点に留意して作業を進める必要がある。例えば、解体時の切断は上部(高 い位置)から行うことや、切断時における残留 NaK の流出を想定して不活性ガス中のビニールバ ック内で行うことが必要である。配管・機器等の解体時に NaK を抜取った後の表面への残留はほ とんどないため特に問題なく処理することができている。

4. ナトリウム洗浄処理技術の検討と技術ポイントの提言

ナトリウム洗浄処理にあたって、被洗浄物の種類やナトリウム洗浄処理後の再利用または廃棄 等の選択、ナトリウムの残留状況やナトリウム洗浄処理方法および処理施設等考慮すべき事項が 多岐にわたっている。これまでの経験からナトリウム洗浄処理の全体的な流れは末尾に示す図4-1 に整理でき、ナトリウム洗浄処理の計画書の作成や具体的な作業の実施に当たって検討すべき技 術的な重点事項を摘出することができる。

ここでは、今後の機器等の保守・補修および解体撤去等の作業に反映していくために、これま で培われてきたナトリウム洗浄処理技術や知見を横断的に分析・検討するとともに、基本的な技 術ポイントをとりまとめ、提言する。

4.1 ナトリウムドレン条件の影響

本報で記載している大半の試験装置や機器においては、最後の運転停止時には解体・撤去の計 画が明確になっていなかったために、ナトリウム洗浄処理を意識した高温のナトリウムドレンの 配慮はなされておらず、通常行われている比較的低温域(200℃前後)でのナトリウム温度でド レンしている場合が多かった。しかし、解体やナトリウム洗浄処理等の計画が明確になっている 施設の運転を終了する場合には、最終のナトリウムドレン条件等をナトリウム洗浄処理のやり易 い残留ナトリウムの少ない条件に設定することができる。特に、予め解体・撤去等に伴いナトリ ウム洗浄処理の実施が明確になっている場合には、被洗浄物となる装置や機器・配管内の残留ナ トリウム量が最少となるように、計画的に最終的なドレン条件を設定して実施する。設備的に可 能な範囲でナトリウム系統の予熱温度が高い状態でドレンを行い、確実なガスブローによる系統 の導通を確認し、その状態で一定時間保持することが有効である。

ナトリウムドレン条件の影響に関しては、蒸気発生器メンテナンス技術実証試験および洗浄処 理プロセス確認試験でデータが得られており、より高温(3-400℃程度)でドレンし、かつ高温 で長時間予熱保持後プラントを停止することが有効であることが示されている。しかし、ドレン 時のナトリウム温度を高くし、その後も高温で保持時間を長くすることは、工期やコストがかか ることから、安易に温度を高くし、保持時間を長くすることは絶対条件となならない。

最終的なナトリウムドレン条件として、通常運転時におけるドレン時の 200℃前後に対して、 50MW 蒸気発生器 1 号機では、ナトリウムドレン温度が 300℃、その後 300℃で 47 時間保持、ま た 50MW 蒸気発生器メンテナンス技術実証試験(2.2項)では、ナトリウムドレン温度が 400℃その 後機器、配管を 400℃で 47 時間保持した。2 重管蒸気発生器(2.9項)においては、過去の蒸気発 生器における実績を踏まえてナトリウムは 380℃でドレンされ、ドレン後 350℃で 52 時間保持さ れ、アルゴンガスにより蒸気発生器内部を 2 回フラッシングされた。いずれの場合もドレン状況 は良好であった。その他の試験装置・機器においては、ドレン温度約 200℃で行われている。50MW 蒸気発生器試験施設中間熱交換器(2.4項)では、ドレンにあたっては特別な配慮はなされておら ず、ドレン温度 200℃、保持時間 24 時間で行われている。これまでの経験例では、ドレン温度 400℃と 300℃とで顕著な差異が認められず、300℃以上(通常のコールドトラップ運転温度より 100℃以上の差)であれば十分であると考えられる。

また、次項に述べるように、ドレン条件により決定されるナトリウムの接液部分やカバーガス 部では残留ナトリウムの絶対量は少なく、いずれの場合もナトリウム洗浄処理上特に支障の生じ たケースはなく、問題なく洗浄処理されている。ナトリウム洗浄処理の観点からは、機器の表面 に付着して残留するナトリウムよりも、構造的に残留しやすい箇所(構造的にドレン出来ない箇 所)での残留ナトリウムが量的にもより大きく、問題となる。これらのことから、施設での最終 的なナトリウムドレン条件による残留ナトリウム量がナトリウム洗浄処理上クリティカルな影 響を及ぼすことはないであろうと推察され、ナトリウムのドレン時の条件については、全体の作 業工程や経費、施設の状況を考慮して適切な範囲での高温ドレン、適切な予熱保持温度、時間と することが求められる。特に、放射性ナトリウムの洗浄処理を行う場合には、洗浄処理廃液を最 少にすることが重要な課題であることから極力残留ナトリウムを少なくすることが必要となる。

一方、コールドトラップにおいては、高温ドレンによって内部のナトリウムのドレン性が高ま るが、温度を高めることでナトリウム中の不純物の溶解量が増大し、ドレンと同時にメッシュ部 に捕獲されている不純物もドレンタンク内に混入されることになり、好ましい状態ではない。で きるだけ他系統に影響無いようにコールドトラップの単独ドレンが適切である。2.10 項に述べ た 50MW 用大型コールドトラップの解体経験では、コールドトラップ内のナトリウムはドレンせ ずに、解体・撤去後に加熱溶融して内部の不純物を含むナトリウムをドレン(抜き取り)してい る。この場合、コールドトラップの内容積(約 2m³)とほぼ同等量のナトリウムを抜取ることが でき、その後のナトリウム洗浄処理のために有効であることが示されている。

これまでの経験・知見から、系統内のナトリウムをできるだけ少なくするためのドレン条件の 目安として、以下を推奨する。

- ・ドレン温度 : 300℃以上
- ・ドレン後ガス導通確認(必要に応じてガスブロー): 系統毎
- ・ドレン後保持: 300℃以上、数十時間(1-2日程度)

4.2 ナトリウム付着量の予測と残留状況の把握

ナトリウム洗浄処理を進めるに際しては、機器配管等に付着あるいは残留するナトリウムの予 測や把握が最も重要である。ナトリウム洗浄処理に当たって装置や機器内のナトリウムを最終的 にドレンしても、ナトリウムに曝された装置や機器の表面には長期の運転によりナトリウムが付 着し、また、その構造上ドレンができず残留するナトリウムが存在する。ナトリウムの洗浄処理 方法の設定および安全で効率的な洗浄処理作業の実施に当たっては、それぞれの装置や機器の特 徴を把握し、ナトリウム接液部やカバーガス部における付着ナトリウム、および構造上多量に残 留していると考えられる箇所での残留ナトリウム量の予測が必要である。ナトリウム接液部やカ バーガス部での付着ナトリウム量は、過去の経験値などから求まる単位面積付着量を乗じること によって推定することができる。また、構造的に残留する部位は、それぞれの装置や機器の詳細 な設計構造図面等により推定することができる。適正な保守性を持って、個々の系統や部位毎に 予測することが重要である。

ナトリウムの洗浄処理方法の選定においては、洗浄後の再使用の有無が支配的な因子となる。 被洗浄物が再使用されない場合には、ナトリウム洗浄処理方法として大気中での水蒸気洗浄処理 方法や溶融・燃焼方法などを採用することができ、安全性が確保できれば処理方法の選択肢も広 い。表面付着ナトリウムの量は、従来実施されてきた多くの機器や配管でのナトリウム洗浄処理 作業での経験や測定結果を踏まえて行われることとなる。安全な洗浄処理作業のためには、構造 上ドレンができなく多量に残留しているナトリウムや狭隘部での洗浄処理し難い部位での残留 ナトリウムへの留意が重要で、そのような箇所での状況を事前に予測し、ファイバースコープに よる観測等により見極めながら作業することが有効である。

被洗浄物の機器等を再使用する場合には、アルコールを用いた手法を採用することが多く、ア ルコールの処理能力や取扱量を最小とすることが要求されることから、表面付着ナトリウムおよ び構造上残留しているナトリウム量をなるべく精度よく予測する必要がある。

残留ナトリウム量の予測にあたっては、表4.2-1に示すデータが参考となる。これらの値は、 これまでの洗浄処理の経験から得られたもので、ナトリウム洗浄処理後の処理廃液から中和滴定 などの分析によって評価された値である。内表面積が400~520m²と大きい50MW 蒸気発生器につ いては、1号機では300℃のドレン、その後300℃で47時間保持したが、その時の単位面積付着 量は1.5および2.0mg/cm²であり、2号機では400℃のドレン、その後400℃で47時間保持され た場合、単位面積付着量は1.4mg/cm²であった。内表面積が64~107m²と小さい1MW 蒸気発生器 では後者と同様なドレン条件に対して単位面積付着量は1.2 および1.9 mg/cm²(単位面積付着 量はナトリウム接液部およびカバーガス部を総合した値であることに留意が必要)であった。ド レン温度が200℃といった低温での定量的なデータがなく厳密な評価ができないが、300℃と 400℃のドレン温度で顕著な差異がないことから、表面の付着ナトリウム量とドレン温度の関係 は、それほど明瞭に表れないかも知れない。

一方、伝熱管の付着ナトリウム量は、ナトリウム接液部とガス層部と明らかな差異がみられて いる。50MW 蒸気発生器2号機の場合は、ナトリウム接液部で0.95 mg/cm²、ガス層部では2.8mg/cm² となっている。同じく中間熱交換器(IHX)伝熱管では、ナトリウム接液部で0.23 mg/cm²、ガス 層部では13.7mg/cm²であった。伝熱管支持部(接液部)では3.1 mg/cm²で、それ以外の機器・ 配管の接液部では5.0mg/cm²であり、ナトリウム接液部の場合は部位による大きな差異はないよ うである。ガス層部で付着ナトリウム量のばらつきは、ガス層部の温度分布やナトリウムとガス 層部の温度差、あるいはナトリウム接液面からの蒸気量の差異(運転温度の差異)などの影響が 考えられる。これらの結果から、通常の機器の連続部における付着ナトリウム量の予測に当たっ ての単位面積付着量としては、ナトリウム接液部については 1~5 mg/m²を、カバーガス部約 14 mg/m²が推奨される。大規模な機器においても、ナトリウム付着総量は 6~10kg と予測され、単位面積付着量の多少の相違によりナトリウム洗浄処理上クリティカルになるようなことは生じないといえよう。この値はあくまでも構造的に連続部についての値であり、実際には構造上ナトリウムが残留しやすい部位についての推定が大きな影響を与えることとなるが、その量を正確に推定することは困難である。それぞれの機器について、構造図を参考としながらナトリウムの滞留しやすい部位を想定して、その構造から残留ナトリウム量を推定することとなる。

なお、コールドトラップについては別途残留ナトリウムを推定することが必要となるが、50MW 蒸気発生器試験施設の1次系、2次系のコールドトラップ解体においては、機器構造第一試験室 のコールドトラップ2号機におけるメッシュ部の位置をパラメータとしてサンプリング、分析し た結果を参考として予測されている。つまり、メッシュ単位体積(1m³)当り 86kg/m³に安全率 を乗じた値が採用された。1MW 蒸気発生器試験施設のコールドトラップの残留ナトリウムの実績 値も同様の値となっている。

試験機器等	部位	測定值(mg/cm ²)	備考
	蒸発器接液部	0.95	接液+ガス層部の平
50MW 蒸気発生器試	蒸発器ガス層部	2.8	均:1.4mg/cm ²
験装置	伝熱管支持部	3.1	
	機器・配管	5.0	
	IHX 接液部	0.23	
	1IHX ガス層部	13. 7	
	一体貫流型2重伝熱管型		
1MW 蒸気発生器試	(接液+ガス層部)	1.2	
験装置	一体貫流ヘリカルコイル型		
	(接液+ガス層部)	1.9	
50MW 蒸気発生器試	蒸発器	2.0	
験装置(1 号機)	過熱器	1.5	
機器構造試験施設	大型コールドトラップ		86kg/m ³ (メッシュ体
			積当り)

表 4.2-1 沈伊処理辞駛から氷められた機益・配官等の付有ナトリー	フム量
--------------------------------------	-----

これまでの経験・知見から、ナトリウムドレン後の機器配管等に付着する残留ナトリウム量を 予測する場合には、以下の値を推奨する。なお、付着ナトリウム量は、洗浄処理の対象部位の表 面積に単位面積当たりの付着量を乗ずることにより求めることができる。予測は、試験装置や機器の運転温度や構造等を考慮した上で、安全率(係数)を乗じて保守的な評価を与えるようにす ることが適切である。

・ナトリウム接液部: 1~5mg/cm²(×安全率)
・カバーガス層部: 14mg/cm²(×安全率)
・伝熱管支持部および同等の構造部: 3.5mg/cm²(×安全率)
・コールドトラップ(体積当たり): 90kg/m³(×安全率)
・製作構造上の残留部: 対象機器毎に製作図面等で予測

4.3 ナトリウムの安定化処理方法に係る検討と整理

構造物の付着ナトリウムは不活性ガス雰囲気では安定であるが、空気中に開放されると空気中 の水分と反応し、必要条件が整うと発火に至る場合がある。したがって、機器の解体・開放やナ トリウム洗浄処理のための運搬に際し、できるだけナトリウムの空気との接触をさけるように工 夫する必要がある。これまで大型試験装置の機器引抜きや解体等の作業においては、不活性ガス を充填した難燃性のビニルバッグを用い、機器全体を包み込むことにより空気との接触をさける 方法を採用していたが、万が一にビニルバッグが損傷した場合には空気混入による発火・燃焼が 懸念される。また、ビニルバッグを介した解体作業には非常に手間(時間)がかかる。このため 複雑な構造物等は炭酸ガスを用いることにより表面に炭酸ナトリウムからなる安定な皮膜を形 成させて空気との接触を遮断し、洗浄処理機器を大気中に開放しても付着したナトリウムが燃焼 しないように安定化させる方法が取られる。

ナトリウムの状態により以下に示す反応が生ずる。

1) ナトリウムが酸化している場合

酸化ナトリウムと炭酸ガスは容易に反応するため、炭酸ガスを封入するだけでよい。

 $Na_2 0 + CO_2 \rightarrow Na_2CO_3 \cdot \cdot \cdot (1)$

2) ナトリウムが苛性ソーダ(水酸化ナトリウム)になっている場合

炭酸ガスを封入し、次のような反応をさせて水酸化ナトリウムを安定な炭酸ナトリウムに する。

 $\begin{array}{rcl} \mathrm{Na} & \mathrm{OH} + \mathrm{CO}_2 & \rightarrow & \mathrm{NaHCO}_3 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & (2) \\ \mathrm{2Na} & \mathrm{OH} + \mathrm{CO}_2 & \rightarrow & \mathrm{Na}_2\mathrm{CO}_3 + \mathrm{H}_2\mathrm{O} & \ddots & \ddots & (3) \\ \mathrm{3Na} & \mathrm{OH} + \mathrm{CO}_2 & \rightarrow & \mathrm{Na}_2\mathrm{CO}_3 + \mathrm{NaHCO}_3 + \mathrm{H}_2\mathrm{O} & \ddots & (4) \end{array}$

3) ナトリウムの場合

炭酸ガスとナトリウムを直接反応させるためには、かなり高い温度(1000℃程度)が必要 なために、現実的ではない(5 式)。これまでの経験では、水分を含ませた湿り炭酸ガスによ って水酸化ナトリウム→炭酸ナトリウムにする方法が多く採用されている(6 式)。ただし、 この場合には水素ガスの発生を伴うため、その対策を十分に行う必要がある。また、乾燥空 気によって酸化ナトリウムを形成させ、その後の炭酸ガスにて炭酸ナトリウムを形成させる 手法もあるが、空気に含まれる水分の排除に注意を払う必要がある(7、8 式)。

 $2Na + 2CO_2 \rightarrow 1/2Na_2CO_3 + 1/2CO \cdot \cdot \cdot \cdot (5)$ 註) 高温域で反応 $2Na + CO_2 + H_2O \rightarrow Na_2CO_3 + H_2 \cdot \cdot \cdot \cdot (6)$ $Na + O_2(乾燥) \rightarrow Na_2O \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (7)$ $Na_2O + CO_2 \rightarrow Na_2CO_3 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (8)$

代表的な経験例として SPINTA の場合を以下に示す。本ケースにおいては、機器内に湿分 を含ませた炭酸ガスを供給し、ナトリウムを水酸化ナトリウムに転換し、最終的に炭酸ナト リウムにする方法を選択した。図 4.3-1 に Na 安定化処理するための機器システムの構成例を 示す。試験装置へ供給する湿り炭酸ガスは、水を張った容器内に炭酸ガスをバブリングさせ ることで製造した。その製造した湿り炭酸ガス中の湿度は、露点計にて計測・管理した。ナ トリウムと水の反応により水素が発生するため水素濃度計、装置内の温度を計測する熱電対 を設置した。なお、反応進行により発生した水素が 2%を超えた時点で屋外へ希釈排気するた めのアルゴンガス(または窒素ガス)の供給および排気ラインを設置した。また、安定化処 理の状況の把握のために、被洗浄物の湿り炭酸ガスの湿分、温度、水素濃度などを監視した。

ナトリウム安定化処理の終了判断は、サンプル分析による判断、発生水素濃度の低下によ る判断、および排気側ガス中の湿度上昇による判断を基本とした。サンプル分析は、内部に 予め挿入したサンプル(ナトリウムブロック)を定時毎に採取し、サンプル表面に形成され た生成物を分析して炭酸ナトリウム(Na₂CO₃)の生成状態を確認する。水素濃度は、濃度の低 下と低いレベルで安定する挙動を示したことを確認する。さらに、排気側ガス中の湿度上昇 は、供給側と排気側の湿分を監視し、排気側の湿分上昇傾向が認められ、かつ安定挙動を示 すことを確認する。最終的には、CCD カメラによる内部観察を行い処理前観察時の状況と比 較して炭酸ナトリウム(らしき)の結晶等の形成有無を念のために確認し、安定化処理の終 了とした。これまで機器のナトリウム洗浄処理において採用された炭酸ガスによるナトリウ ムの安定化処理の実施概要を表 4.3-1 に整理して示す。

ナトリウム安定化処理システムの構成や終了判断は、上記に示した SPINTA の例が標準的 な参考となり、安定化処理過程における管理条件等は以下を推奨する。ただし、このような 安定化処理は表面を Na₂CO₃等で覆うことにより内部のナトリウムと外気との接触をしゃ断す る効果によるもので、ナトリウムの残留状態によっては内部には未反応のナトリウムが残存 している可能性がある。ナトリウム安定化処理後には、この点を考慮したナトリウム洗浄処 理法が適用されることになる。

・炭酸ガス中湿度: ~80%RH 暫定(個々の被洗浄物の状況をみて設定)
・水素濃度: <2%(水素爆発下限値の1/2)
・終了判断: 発生水素濃度と湿分濃度の変化挙動
*補足条件: Na サンプル分析結果(Na₂CO₃生成と被膜厚み)



図 4.3-1 ナトリウム安定化処理システムの構成例

記 載 項	施設·機器名称	洗浄処理の目的等	安定化処理の実施概要			
2.2	蒸気発生器メンテ ナンス実証試験 (50MW 蒸気発生器 2 号機蒸発器管束 部)	メンテナンス実証 試験としてナトリ ウム洗浄処理、試 験後検査、材料試 験用試験片採取、 一部交換後再使用	窒素ガス+水蒸気による1次洗浄処理、純水 リンスによる2次洗浄処理の後、管束部等 のクレビス部に残留するナトリウムを炭酸 ガスによる安定化処理(約6日間)の実施。 加熱窒素ガスによる乾燥を実施。電気伝導 度や水素発生量、Na濃度で洗浄終了の判定			
2.4	50MW蒸気発生器試 験施設中間熱交換 器	解体·廃棄	解体・輸送時の燃焼防止のために、装置を 設置した状態で3回にわたり炭酸ガスによ る安定化処理を実施。圧力の低下が見られ たことから安定化されたことを確認			
2.6	「もんじゅ」炉容 器ナトリウム中試 験装置 (SITR)	解体·廃棄	SPINTAの予備試験を兼ねて以下の条件で実施。希釈ガスとしてアルゴンガスを使用。 ・湿り炭酸ガス中湿度:~100%RH ・湿り炭酸ガス供給量:30~400/分 ・水素濃度:<2%(爆発下限値の1/2) ・安定化状態の確認:XRDによる生成物 同定、CCDカメラによる内部観察			
2. 7	大型(「もんじゅ」) ナトリウムポンプ 試験装置(SPTL)	カップリング部と インペラ部は展示 用カットモデル製 作に使用、その他 は解体・廃棄	不活性ガス混合水蒸気処理で水素濃度が 2%を超えたために、安全確保のために炭酸 ガス供給による安定化処理(6~7日間)を実 施。水素濃度の挙動を監視。			
2.8	「もんじゅ」遮蔽 プラグ総合断熱試 験装置 (SPINTA)	解体·廃棄	 湿り炭酸ガスで安定化処理を実施(約50時間)。安定化処理条件を以下のように設定。 希釈ガスはアルゴンガスを使用。 ・湿り炭酸ガス中湿度:~80%RH ・水素濃度:<2%(爆発下限値の1/2) ・湿り炭酸ガスの供給量:1000/分 ・生成物確認:XRDによる生成物同定、 CCDカメラによる内部観察 			

表 4.3-1 ナトリウム安定化処理の実績概要

4.4 ナトリウム洗浄処理方法に係る検討と整理

(1) ナトリウム洗浄処理方法

冷却材として多量のナトリウムを取り扱うプラントや試験施設においては、保守・修理・ 試験・検査・廃棄等の作業によって機器、部材、試験体等に付着したナトリウムやナトリウ ムと水および空気等との反応生成物を除去(洗浄処理)しなければならない。ナトリウムは 化学的に活性度が高く、水とは爆発的に反応することもあり、ナトリウムの洗浄処理にあた ってはナトリウムの性質を十分に理解し、その性質をうまく利用して安全かつ効果的に、さ らに熱や腐食などで機器を損なわないように行うことが求められる。

ナトリウム洗浄処理においては、水素ガス、エアロゾル(ナトリウム酸化物)などが発生 するほか、条件によっては発火や爆発の可能性もあるため、作業環境を整備し、専用の処理 施設などを有効に利用して安全に十分配慮して実施することが肝要である。

本報では記載しなかったが、放射性ナトリウムの場合は更なる配慮が必要である。特に、 ナトリウム中には放射性腐食生成物(CP)や、場合によっては核分裂生成物(FP)が含まれ ており、ナトリウム洗浄処理では、被ばくの防止、放射性物質の放出防止や放射性廃液、廃 ガス処理に対応した施設を用いることなどが必要となる。

これまでに種々の洗浄処理方法が実施されてきた。その方法を大別すると、物理的方法と化学的方法がある。

物理的な方法;

①高温油(パラフィンなど)によりナトリウムを融解する方法

②外部予熱(ヒータ、ガスバーナーなど)によりナトリウムを溶融する方法

③真空蒸留方法

化学的方法;

- ①水蒸気洗浄処理方法(大気中、真空中、不活性ガス中洗浄処理方法を含む。)
- ②アルコール洗浄処理方法(循環、浸漬洗浄処理方法を含む。)
- ③アンモニア洗浄処理方法
- ④ 水洗浄処理方法(温水および温水減圧沸騰、超音波、電気分解洗浄処理方法を含む。)
- ⑤ 燃焼処理方法
- ⑥ 炭酸ガス処理方法

それぞれの処理方法の特徴概要を表 4.4-1¹⁰⁾に示す。

(2) ナトリウム洗浄処理方法の選定

ナトリウムの付着した機器、部品等の洗浄処理作業は、ナトリウム取扱い技術の中でも危険を伴う作業であり、その洗浄処理方法の選択はいろいろな角度から検討し、総合的判断により決定すべきである。洗浄処理方法を選択するに当たっては以下に示す項目について検討する必要がある。

ナトリウム洗浄処理作業の実施に当たって、採用される洗浄処理方法は以下の条件を満足 しなければならない。 ①予想されるナトリウムの化学的反応等に対して洗浄処理作業の安全性が確保されること。

②ナトリウムが確実に除去され、洗浄処理後に実施される被洗浄物の保守、点検、検査、 改造、廃棄等の作業に支障がないこと。

③被洗浄物が再使用される場合、ナトリウム反応生成物(特に NaOH)による機器の材料へ 損傷を与えないこと。

④被洗浄物および洗浄処理廃液のスクラップおよび廃棄により環境への影響を与えないこと。

また、洗浄処理方法を選択する上での被洗浄物の特性上考慮すべき事項および技術的な 視点から見た検討事項は以下の通りである。

①洗浄処理目的、洗浄処理した機器を再使用するか、廃棄するか

②機器の種類、形状、大きさ

③ナトリウムの付着量および付着状態

④安全性

⑤洗浄の確実性(完全な洗浄が可能か、多量のナトリウムの処理が可能か、複雑な形状や 隙間形状への効果は)

⑥経済性

⑦洗浄処理後の廃液の処理

⑧実績、既存の洗浄処理用施設が存在するか

さらに、関連法規上の問題についても留意する必要がある。

本報告書で取上げたナトリウム洗浄処理方法とその概要を表 4.4-2 に示す。これらの装置・機器でのナトリウム洗浄処理方法の設定に当たっての基本的な考えは次の通りである。

機器等の再利用がない場合には、主に大気中における窒素ガス混入水蒸気洗浄処理方法が 採用されている。また、被洗浄物を適切な大きさに切断した状態で燃焼処理する方法も簡便 な方法であることから、多数の採用実績がある。多量に残留している部位でのナトリウムは 集められて溶融・燃焼処理される。いずれの洗浄処理方法を採用した場合にも、ナトリウム が確実な除去を確認する意味を含めて水洗浄処理をする。機器の解体・開放時や搬送中の残 留ナトリウムの燃焼を防止する場合には、炭酸ガスによる安定化措置方策が採用されている。 また、燃焼処理室での燃焼処理に当たって、窒素ガスを吹き込んで燃焼をコントロールする こともなされた。コールドトラップの内部メッシュ構造のようなナトリウムが燃焼する可能 性の高い場合は、十分な排煙処理の可能なナトリウム燃焼室で実施され、特別な問題は発生 していない。

機器等の再使用や材料分析等が目的の場合は、アルコール浸漬法およびアルコール循環法 が採用される。しかし、大型な被洗浄物の場合には大量のアルコールの使用と、その洗浄処 理廃液の処理が困難になる。またアルコール燃焼も想定した対策も必要である。アルコール 洗浄処理法が採用できない場合には、不活性ガス中水蒸気洗浄処理法が採用されている。 これまでの経験および知見を踏まえて、化学的なナトリウム処理方法を選定する上で参考 となる選定の基本的な流れを図 4.4-1 に、処理方法の評価例を表 4.4-3 にそれぞれ示す。こ こで提言する図表は目安であり、ナトリウム処理の目的や被洗浄物の特徴を明確化にした上 で、処理方法を選定することが重要である。安全面を除けば、ナトリウム洗浄処理方法の選 定に係る支配的な要素は、被洗浄装置・機器のナトリウム洗浄処理後の利用目的であると考 えられ、再利用が目的の場合は、機器等の健全性への影響(腐食、変形、損傷等)を配慮す る必要がある。

なお、「ナトリウム転換処理手法」として、大量なナトリウム処理手法に関する技術開発の 検討も行われている¹⁷⁾。これは、100℃の水酸化ナトリウム水溶液中(濃度 45~50wt.%)に ナトリウムを一定量で注入して、水溶液温度や濃度等を制御管理しながら安定な水酸化ナト リウムに転換処理する技術である。現状ではナトリウムの注入速度約 10kg/h 程度まで可能な 技術とされている。数トンを超えるような大量ナトリウムの処理処分として期待されている 手法である。



図 4.4-1 ナトリウム洗浄処理方法の設定フロー図

		洗浄処理・処理方法	主な利点	注意点、欠点など
	1	高温油によりナトリウム を融解する方法	 1. 安全にナトリウムを分 離できる。 2. 排煙処理装置不要。 	 完全な洗浄処理ができない。 廃油処理が必要。
物理的除去	2	外部予熱によりナトリウ ムを溶融する方法	 1. 多量のナトリウム処理 に適している。 2. 廃棄物がナトリウムだ けである。 	 1. 予熱設備が必要。 2. ナトリウムが発火する 可能性あり。 3. 表面腐食が増大することがある。
五 方 法	3	真空蒸留洗浄処理方法	 試験装置に取り付けた 状態で除去できる。 安全である。 	 ベーパートラップ、真空 ポンプなどの機器、予熱 装置などを必要とする。 洗浄処理時間が長く完 全な洗浄処理ができな い。
	1	 水蒸気洗浄処理方法 1)大気中で実施する方法 2)不活性ガス中で実施する方法 3)水蒸気と不活性ガスの 混合ガスを用いる方法 	 1. 安価である。 2. 廃棄物の処理が比較的 容易。 3. ほぼ完全な処理ができ る。 4. 実績が大である。 	 1. 水素の空気との反応に 注意が必要。 2. アルカリ腐食を引き起 す可能性あり。 3. 排煙(廃ガス)、廃水処 理装置が必要。
	2	アルコール洗浄処理方法 1)アルコール浸漬法 2)アルコール循環法	 反応速度がゆるやかである。 ほぼ完全な処理ができる。 アルカリ腐食を引き起こす可能性が少ない。 実績が大である。 	 廃アルコールの処理が 必要。 洗浄処理時間が長い。 アルコールの引火に注 意を要する。
化	3	アンモニア洗浄処理方法	1. 安全である。 2. 実績が少ない。	アンモニアの処理が必要。
1学的方法	4	水洗浄処理方法	 安価である。 完全に洗浄処理ができる。 最終洗浄処理として用いる。 複雑形状、隙間形状の場合に効果大である。 	 急激な処理の場合、洗浄 処理物に損傷を与える 場合あり。 残留ナトリウム量大の とき注意が必要。 実績の少ない洗浄処理 方法もある(温水、温水 減圧沸騰、超音波、電気 分解洗浄処理方法)。
	5	燃焼処理方法	水素の発生がないので安 全に処理できる。	1. 排煙、廃液処理装置など の設備を必要とする。
	6	炭酸ガス処理方法	1. 安全、簡便である。 2. 炭酸ナトリウムを生成 するのでアルカリ腐食を 起すおそれが少ない。	 1.反応時間が長く、ナトリ ウム量が多いと完全に 炭酸化し難い。 2.反応生成物を除去する ための洗浄処理工程を 必要とする。

表 4.4-1 主な洗浄処理方法の種類と特徴¹⁰⁾

記載 項	施設·機器名称	採用された洗浄処理方法
2.1	計測機器試験ル ープ	・配管:Na付着状況に応じて水蒸気洗浄処理、または溶融・燃焼処理 ・試験容器:ベローズ、フランジ、下部鏡部は溶融・燃焼処理、胴は 大気中水蒸気洗浄処理 ・貯蔵タンク:胴上部は付着しているNaをヘラ等で除去後、大気中 水蒸気洗浄処理、タンク下部は残存Naをバーナで溶融・燃焼処理し、 後大気中水蒸気洗浄処理 ・ドレンタンク:上部鏡部、胴は大気中水蒸気洗浄処理、下部鏡部に 残存しているNaをバーナで溶融し、その後溶融Naを燃焼皿に小分け して燃焼処理、その後大気中水蒸気洗浄処理 ・電磁ポンプ:ダクト内Naをバーナで溶融し燃焼皿に排出後燃焼処 理。その後、ダクトを大気中水蒸気洗浄処理、また再使用するものは アルコール循環洗浄処理 ・加熱器:外胴は大気中水蒸気洗浄処理、ぎた再使用するものは アルコール循環洗浄処理 ・加熱器:外胴は大気中水蒸気洗浄処理 ・コールドトラップ:コイル配管および外胴は大気中水蒸気洗浄処理、 メッシュ部は溶融・燃焼処理後大気中水蒸気洗浄処理 ・ナトリウム弁:弁解体して溶融・燃焼処理
2.2	蒸気発生器メン テナンス実証試 験(50MW 蒸気発 生器 2 号機蒸発 器)	以下の4段階で実施 ・1次洗浄処理:不活性ガス中水蒸気洗浄処理 ・2次洗浄処理:純水によるリンス ・3次処理:炭酸ガスによる安定化処理 ・4次処理:加熱窒素ガスによる乾燥
2.3	50MW 蒸気発生器 2 号機(蒸発器、 過熱器)	窒素ガスを満たした洗浄槽として胴本体を利用して水蒸気と窒素ガ スの混合ガスを注入する不活性ガス中水蒸気洗浄方法を採用。専用の 洗浄処理装置を設置して実施。
2.4	50MW 蒸気発生器 試験施設中間熱 交換器	主に大気中水蒸気洗浄処理方法を採用。多量に塊状に残留している Na はヘラ等で機械的に除去。鏡板部の多量の Na は溶融・燃焼処理。
2.5	大口径電磁流量 計校正試験装置 (SFCAT)	計画では大気中水蒸気洗浄の予定であったが、ファイバースコープ、 目視により観察して付着 Na が極少量であることが判明したため散水 による方法に変更して実施。
2.6	「もんじゅ」炉 容器ナトリウム 中 試 験 装 置 (SITR)	計画では大気中水蒸気洗浄処理の予定であったが、ファイバースコー プ、目視により観察して付着 Na が極少量であることが判明したため 散水による方法に変更して実施。Na の存在する部位は水蒸気洗浄処 理。

表 4.4-2(2/2) これまでに実施されたナトリウム洗浄処理方法

記載 項	施設·機器名称	採用された洗浄処理方法
2. 7	大型(「もんじゅ」) ナトリウムポンプ 試験装置(SPTL)	アウターケーシングを洗浄槽として不活性ガス洗浄方式を採用。 洗浄作業の途中で水素濃度が2%を超えたために、炭酸ガスによる 安定化処理を実施。解体・開放後は、大気中水蒸気洗浄処理を実施。
2.8	「もんじゅ」遮蔽 プラグ総合断熱試 験装置 (SPINTA)	洗浄に先立って炭酸ガスによる安定化処理実施。その後、構成 機器、構造物を個々に容器から引抜き、洗浄処理に適した大きさ に切断。窒素ガス混入の水蒸気処理にて付着ナトリウムを除去。 塊状で残留する多量のナトリウムは燃焼法にて処分。
2.9	2 重管蒸気発生器	アルコール循環方式により、専用の洗浄施設を設置して実施。
2.10	50MW 蒸気発生器試 験施設大型コール ドトラップ	Na 燃焼処理を実施。解体中の Na 燃焼を想定し、排煙処理設備を有 する専用施設内で実施。
2.11	NaK 総合流動伝熱 試験装置	NaK の付着がほとんどなかったため、燃焼処理方法により処理を実施。
2.12	小型形状被洗浄物	マニュアル化されているアルコール洗浄方式を採用して実施。

表 4.4-3 主な化学的洗浄処理方法の選択目安

洗浄処理方法	実 績	安全性	除去性	効率性	廃液処理 性	材料影響 度/腐食性	備考
水蒸気洗浄処理方法 ・大気中水蒸気洗浄 ・不活性ガス中水蒸気洗浄 (含む水蒸気/ガス混合)	0	△ 水素対策	0	0	○ 中和処理	×	 ・不活性ガス混合水 蒸気洗浄処理が優位 ・換気に配慮
アルコール洗浄処理方法 ・浸漬方法 ・循環方法	0	△ 発火対策	0	△ 反応穏や か	△ 専門メーカ 委託	0	 ・大量アルコール使用時 に留意 ・循環方法は設備対応が必要
水洗浄処理方法 (水洗、散水)	0	△ 水素対策	0	0	○ 中和処理	×	・付着量が少ない場 合に適する
燃焼処理方法	0	△ 排煙対策	0	0	○ 中和処理	×	 ・燃焼物(酸化物)の 処理が必要 ・排煙処理設備が必要 要

○: 良好(適正) △:中間(どちらともいえない) ×:悪い(適正とはいえない)

4.5 ナトリウム洗浄処理施設および撤去・運搬に係る検討と整理

ナトリウム洗浄処理施設には、基本的には取扱い上の法的許可を受け、かつ排水設備や排煙 設備等が整備されている指定施設「ナトリウム処理施設」を設定する。既存のナトリウム処理 施設では、溶融・燃焼方法、アルコール処理方法および大気中窒素ガス混合水蒸気方法等によ る処理が可能である。大型構造機器などの指定施設内への持ち込みが物理的に不可の場合は、 法的な許可を得て取扱いエリアを設定し、専用の洗浄処理設備を設計製作することになる。こ の場合は、あらゆる角度から洗浄処理において想定される事象を分析し、その安全対策を講じ る。特に、解体・撤去やナトリウム洗浄処理過程におけるナトリウムの発火・燃焼やその環境 影響等に配慮して施設を設定する。また、被洗浄物の持ち込みが物理的に不可な場合、許可を 受けたエリア内で洗浄処理し易い大きさ、形状に解体・切断を行い、指定のナトリウム処理施 設内に持ち込んでナトリウム洗浄処理を行う手法も有効である。洗浄処理施設(場所)の設定 は、解体・撤去およびナトリウム洗浄処理に係る計画立案の過程で、作業の流れや方策を具体 化して決定するのが適切である。

一方、被洗浄処理物を施設から撤去する場合、配管や装置・機器が比較的に小規模で、出入 口の配管を切断して施設に設置されている天井クレーンを使用して撤去可能な場合は、配管切 断部分を閉止溶接や栓を設置する等によりナトリウム接液部を容易に空気から隔離できるた め、作業にあたって特に問題はない。車両によりナトリウム洗浄処理施設に運搬、搬入し、ナ トリウム処理室の天井クレーンを使用して機器等を切断したり、内部構造物を抜出してナトリ ウム洗浄処理を実施する。

しかし、装置・機器が大規模で、内部構造物を容器から抜出す作業などが必要な場合は、ナ トリウム接液部を容易に空気に曝し発火を招かないように十分な対応を施すことが必要とな る。50MW 蒸気発生器メンテナンス実証試験では、ナトリウム洗浄処理後に蒸気発生器を再使用 するため、内部のナトリウムが空気と接触しないように細心の注意がされ、特別のビニールを 使用しながら蛇腹構造の管束引抜き用キャスクを製作して実施された。50MW 蒸気発生器試験施 設中間熱交換器や SITR、SPTL、SPINTA 等では、ナトリウム洗浄処理後機器を再使用しないた め、空気遮断用のキャスクには取扱が簡易なビニルバッグを使用して実施された。引抜き作業 もロードセルで引抜き荷重を観測しながら細心の注意のもとで実施された。引抜き荷重につい てはあらかじめ予測しておくことが望ましく、せん断力×接触部表面積で試算することが可能 である。50MW 蒸気発生器試験施設中間熱交換器においてはこの時の引抜き荷重を以下の方法で 求めた。単位面積に当たりのせん断力は、研究開発で得られた実績値である室温 20℃での値の 3.0 kg/c m に 15%の余裕を入れた 3.45 kg/c m とし、せん断部の表面積としては、ピストン リング部およびピストンリング部のドレン溜り部と外胴との接触部とした。装置や機器により 適切なせん断部の表面積を設定することが必要となる。引抜かれビニルキャスクに入れられた 被洗浄物は、洗浄用の架台に設置されて、運搬車両により洗浄処理施設へ運搬、搬入される。 その間、いずれの場合も万一のビニルキャスクの破損による空気の侵入に備えてキャスク内に 不活性ガスが供給され、内部は以下の例のような適切な状態に保持される。

- ・50MW 蒸気発生器メンテナンス実証試験:微圧計にて大気圧以上(3~7mmAq)
- ・50MW 蒸気発生器施設中間熱交換器:酸素計により酸素濃度を監視3%以下
- ・「もんじゅ」遮蔽プラグ総合断熱試験装置(SPINTA):アルゴンガス充填

4.6 被洗浄物の切断・解体および残留ナトリウム除去に係る検討と整理

被洗浄物の切断・解体時は、ナトリウム洗浄処理における被洗浄物の取扱い性や洗浄効率性 に配慮して行う。例えば、水蒸気洗浄処理では水蒸気の滞留部がない構造・形状に開放するこ とや、切断はできるだけ不活性ガスを流入できる経路を残しながら空気の混入を抑制できる順 序で実施する、あるいはナトリウム滞留部位のないカバーガス層部から切断開放するなどの計 画的な配慮を行うのが適切である。

2章で取上げた各種の装置・機器でのナトリウム洗浄処理時の機器切断方法の実績を表4.6-1 に示す。状況に対して各種の切断方法が採用されている。経験の少ない時点では、切断作業に 伴う熱の発生によるナトリウム燃焼防止のためパイプカッター、バンドソー、グラインダ等の 使用を基本としている。ナトリウムの付着状況を観測して問題のない場合はアークガウズング やプラズマ溶断採用が採用されるが、その場合にも特にナトリウム燃焼の発生はなく、それら の使用による問題は発生していない。コールドトラップといったナトリウム化合物の多量に残 留している場合にもプラズマ溶断を採用してナトリウム化合物の燃焼が発生したが、燃焼の発 生を前提としてナトリウム燃焼室で作業を実施したため結果として問題は発生していない。

これらの経験を踏まえて、被洗浄物の切断に関して総合的に以下のことが言える。 被洗浄物の切断は、ナトリウム洗浄処理方法としてアルコール洗浄処理方法、または不活性ガ ス中窒素ガス混入水蒸気ナトリウム洗浄処理方法が採用された場合には、基本的にナトリウム 化合物が付着していない状態での作業となるため、通常の切断作業と変わることがない。ただ し、この場合には被洗浄物は再使用または各種の検査等に供されることに留意して切断作業を する必要がある。その他のナトリウム洗浄処理方法が採用される場合には、切断作業が洗浄処 理の前および後に実施される場合がある。被洗浄物の大小や構造等に状況によって切断作業が 洗浄処理後に実施される場合がある。被洗浄物の大小や構造等に状況によって切断作業が 洗浄処理後に実施される場合には、前述の場合と同様ナトリウム化合物の付着のない状態での 作業となり、また基本的に被洗浄物は再使用されず廃棄されることが多くプラズマ溶断といっ た効率的な方法を採用しても切断作業に特別な問題は発生しない。ただし、被洗浄物が大きい ことやその他の理由で、洗浄処理の前に切断作業を実施する場合には、ナトリウム化合物が付 着した状態での作業となり、切断作業に伴う被洗浄物の高温化によりナトリウム化合物の燃焼 の発生がありうるため、この点に対する十分な安全上の考慮が必要となる。この場合には被洗 浄物は解体・廃棄されることから、燃焼の発生に伴う構造材料への影響については考慮する必 要はなく、あくまでも作業に伴う作業員の安全への配慮が最優先事項となる。

一方、装置や機器内のナトリウムを最終的にドレンしても、ナトリウムに曝された装置や機器の表面には長期の運転によりナトリウムが付着し、また、その構造上ドレンができず残留するナトリウムが存在する。ナトリウム洗浄処理作業の実施に当たって、作業員の安全性を確保

し作業の効率化を図るためには、残留しているナトリウムを事前に可能な限り物理的に取除い ておくことが有効である。その方法としてはヘラ、タガネ等を使用した削り取り除去法、金属 スクレーパ等を使用した掻き取り除去法がある。除去されたナトリウムは別容器に回収し単体 で処理される。アルコール洗浄処理方法を採用する場合には洗浄処理廃棄物を少なくする観点 から重要である。大気中水蒸気洗浄処理方法や溶融・燃焼処理方法を採用する場合には、残留 ナトリウムの洗浄処理に及ぼす影響は比較的に少ないが、その効率化のために事前の除去が望 ましい。50MW 蒸気発生器中間熱交換器の場合を例に示すと、内胴(管束部)外表面の洗浄処理 に当たって、開口部周りおよびピストンリング部に塊状の残留ナトリウムが存在したため、ヘ ラ等で除去した。また、下部の鏡部に多量の残留ナトリウムが存在したのでヘラ等で掻き取り および削り取った。SPINTA においても、サーマルライナや試験容器本体のカバーガス部の表面 に層状のナトリウムの付着が存在していたため、同様な方法を講じた。

4.7 洗浄処理状況の監視と終了判断の検討

ナトリウム洗浄処理状況の監視は、安全かつ確実に効率良く実施するために必要不可欠な事 項であり、その監視情報が洗浄処理の終了判断の技術根拠となる。監視すべきひとつの重要項 目は、水蒸気洗浄処理やアルコール洗浄処理等におけるナトリウムとの反応によって水発生す る水素(ガス)である。

Na + $H_20 \rightarrow Na0H + 1/2H_2$ (水蒸気洗浄処理の例) Na + $C_2H_50H \rightarrow C_2H_50Na + 1/2H_2$ (アルコール洗浄処理の例)

いずれも処理過程で発生する水素の監視が重要なポイントであり、処理中における水素爆発 を抑制するために、水素濃度を空気雰囲気下での燃焼下限値の 1/2 以下(<2%)に監視する ことを推奨する。定量的な監視が不可の場合は、不活性ガスを流入させて発生する水素ガスを 排出させる。作業は広い空間で十分な換気を有することがポイントである。この他、不活性ガ ス中水蒸気洗浄処理の場合は窒素ガス流量や水蒸気流量、被洗浄物の温度の監視を必要に応じ て行う。洗浄処理の終了の判断は、水素発生が 60 分目安に継続的に観察されないこと、排水 中ナトリウム濃度 1ppm 以下または排水中電気伝導度 20 μ Ω/cm 以下が推奨される。最終的に は目視観察によってナトリウムが完全に除去されていることである。

また、アルコール洗浄処理においては、水素以外に、アルコールの温度を監視する。アルコ ール(エタノール)の沸点は78.32℃であり、水よりも低い温度で沸騰して気化するために発 火し易いため、常に洗浄処理過程でアルコール温度を監視することが重要なポイントとなる。 アルコール循環洗浄処理を採用する場合は、アルコールタンク圧力、アルコール伝導度、中和 滴定によるアルコール中ナトリウム濃度を監視する。最終的な洗浄終了の判断は、洗浄アルコ ールの伝導度またはアルコール中ナトリウム濃度が2時間以上にわたって静定状態を保持して いることを推奨する。 燃焼処理の場合は、多量のエアロゾルの発生を伴うために、十分な排煙処理能力を有する指定の施設内で行い、完全に燃焼が終了することを監視する。つまり、ナトリウムが酸化ナトリウム(Na₂0)や過酸化ナトリウム(Na₂0₂)になるまで監視する。ナトリウムの燃焼速度は、概ね 30kg/h・m²と評価されているが、撹拌によって十分に燃焼を促進させることがポイントとなる。 炎や白煙の発生状況を目視で監視しながら、撹拌を施しても炎や白煙の発生がないことを終了の判断とする。

2Na+ $1/20_2 \rightarrow Na_20$ (酸化ナトリウム) 2Na + $0_2 \rightarrow Na_20_2$ (過酸化ナトリウム)

これまでに実施されてきた実績に基づく不活性ガス中水蒸気洗浄処理の実施状況の監視項 目、作業場の制限値、洗浄処理終了の判定の基準例を表 4.7-1 に示す。監視項目としては、窒 素ガス流量、水蒸気流量、排気中水素濃度、排水中ナトリウム濃度、管束メタル温度、予熱温 度その他である。制限値としていずれの場合も排気中水素濃度が採用されており、空気中の水 素ガスの燃焼下限濃度である 4vol.%に対して十分な安全余裕をとり 2vol.%としている。

4.8 被洗浄物の洗浄処理後の廃棄および洗浄処理廃液の処理

いずれのナトリウム洗浄処理方法で洗浄処理が実施された場合も、その後で、純水あるいは 水によるリンス、乾燥を行い、被洗浄物のナトリウム洗浄処理が確実に実施されていることを 確認する。装置・機器の解体物については、再利用を目的にしたものは指定の保管場所に保管 し、その他は指定の保管場所に廃棄する。

ナトリウム洗浄処理後に発生する廃液は強アルカリ性でそのまま一般排水すると水質の汚 濁により環境破壊につながる。洗浄処理廃液の廃水の基準は環境法の水質汚濁防止法および大 気汚染防止並びに都道府県産業廃棄物処理要項により規制されており、それを遵守せねばなら ない。大洗研究開発センターでは、具体的には環境管理要領において「一般排水溝における放 出規制」が定められており、基準値をpH5.8~8.6に設定している。洗浄処理廃液の処理には、 中和、再生、燃焼等があるが、主に不燃性廃液は中和後排液し、可燃性廃液は燃焼処理が行な われる。

(1) 中和処理

ナトリウム洗浄処理中および洗浄処理後の廃液の排水作業に先立って中和処理が行われる。 中和剤には一般に塩酸が使用されている。

廃液の排水作業に伴う中和処理; ナトリウムの水・蒸気・温水洗浄処理によって生じる廃 液の中和処理方法は、それらの廃液に塩酸(市販 25~30%)を徐々に加えつつ攪拌し、水 素イオン濃度を pH 計で測定し、液が中性(pH5.8~8.6)であることを確認した上で排水す る。図 4.8-1 に排水処理装置の一例を示す。

中和滴定; 酸や塩基の水溶液の濃度を知るため、酸と塩基とが同当量ずつ混合したこと

を指示薬で用いて確認ことを滴定中和といい、廃液によるナトリウムの洗浄処理量の推定に 用いられる。

(2) 廃液処理

廃水処理; ナトリウム洗浄処理後の廃液は強アルカリ性なので水質を調査したのち中和 処理して排水する。

アルコール廃液処理; アルコールは排水中の COD 規制*1によりそのまま排出し、河川等 に放出するのは不適切である。非放射性アルコールの処理方法としては次の方法がとられる。 ①少量であれば燃焼し、残渣を化学処理する。

②廃液からナトリウム分を分離処理してアルコールを回収し再使用に供する。

③廃液を回収保管し、産業廃棄物処理業者に処理を依頼する。

廃アルコールの燃焼は、廃アルコールを直接バーナ等で燃焼させる方法である。大量の場合、 廃アルコール処理は都道府県知事が許可した産業廃棄物処理業者に処分依頼する。



図 4.8-1 排水処理装置の構成概要例

表 4.6-1(1/2)	各種装置	・機器のナ	トリ	ウノ	い洗浄処理時の切め	f方法の実績
--------------	------	-------	----	----	-----------	--------

記 載 項	施設·機器名称	洗浄処理後の 使用目的等	切断方式
2. 1	計測機器試験ループ	 2 台の電磁ポン プ再使用、その 他解体・廃棄 	 ①貯蔵タンク:プラズマ溶断 ②ドレンタンク:プラズマ溶断 ③試験容器:プラズマ溶断 ④電磁ポンプ:バンドソー、処理後、ダクトをプラズマ溶断 ⑤加熱器:プラズマ溶断、内部構造物のヒータはバンドソーで切断 ⑥コールドトラップ:プラズマ溶断 ⑦ナトリウム配管:バンドソー ⑧ナトリウム弁:プラズマ溶断
2. 2	蒸気発生器メンテナ ンス実証試験(50MW 蒸気発生器2号機蒸 発器)	メンテナンス 実証トリウム た浄処理、試験 後検査、材料試 験用試験片採 取、一部解体後 廃棄、他改造後 再使用	蒸気発生器管束を引抜くためのナトリ ウム入口配管は再使用されることから パイプカッター、バンドソー、グライン ダを使用。 管束取換工事はナトリウム洗浄処理後 工場にて実施されたため通常の切断方 法を採用。
2. 3	50MW 蒸気発生器2号 機(蒸発器、過熱器)	試験後検査、材 料試験用試験 片採取、過熱器 展示モデル製 作、その後解 体・廃棄	全体をナトリウム洗浄処理後、解体は再 使用しないことからプラズマ溶断にて 吊るし切り。
2.4	50MW 蒸気発生器試 験施設中間熱交換器	解体·廃棄	熱によるナトリウム燃焼防止のため原 則としてはパイプカッター、バンドソ ー、グラインダを使用。ナトリウムの付 着状況を観測して問題のない場合はア ークガウズングやプラズマ溶断採用。
2.5	大口径電磁流量計校 正試験装置(SFCAT)	解体·廃棄	ヘッドタンク接続配管(24B)は大口径 のため分割クラムシェルパイプ切断開 先加工機を使用。ヘッドタンクはハンド ソーにて切断。
2.6	「もんじゅ」炉容器 ナトリウム中試験装 置 (SITR)	解体·廃棄	胴部は大型ハンドソーにて切断。 配管はバンドソーおよびセイバーソー 使用。

表 4.6-1(2/2) 各種装置・機器のナトリウム洗浄処理時の切断方法の実績

記 載 項	施設·機器名称	洗浄処理後 の使用目的等	切断方式
2. 7	大型(「もんじゅ」) ナトリウムポンプ試 験装置(SPTL)	カップリング 部とインペラ 部は展示用カ ットモデル製 作に使用、その 他は解体・廃棄	あらかじめ炭酸ガスによる安定化処理 を実施。切断、解体はナトリウム洗浄処 理後に実施されたためプラズマ溶断を 採用。
2.8	「もんじゅ」遮蔽プ ラグ総合断熱試験装 置 (SPINTA)	解体·廃棄	あらかじめ炭酸ガスによる安定化処理 を実施。切断、解体はナトリウム洗浄処 理後に実施されたためプラズマ溶断を 採用。
2.9	「常陽」MK-Ⅲ冷却系 改造工事2次冷却系 撤去機器	解体·廃棄	ガス溶断機、ハンドソー、チップソーに て切断後ナトリウム洗浄処理。
2.10	2 重管蒸気発生器	試験後検査、 材料試験用試 験片採取その 後解体・廃棄	切断、解体はアルコール洗浄処理後実 施。
2. 11	50MW 蒸気発生器試 験施設大型コールド トラップ	解体·廃棄	 ・当初の予定ではグラインダ採用、しかし、効率が悪いため状況を判断して他の方法を採用 ・放熱フィンの切断にガス溶断を採用、ナトリウムの発煙、着火発生 ・外胴の切断に、ナトリウム残留の少量のことを確認の上プラズマ溶断を採用 ・付着ナトリウムは極力へラ等で除去 ナトリウム燃焼の発生を前提として ナトリウム燃焼室で作業を実施したため燃焼発生したが特に問題はない。
2.12	NaK 総合流動伝熱試 験装置	解体·廃棄	・バンドソー使用。
2.13	小型形状被洗浄物	材料試験	なし

試験装置名		蒸気発生器メンテナンス実証試験			50MW 蒸気発生器	大型ナトリウムポンプ試
		(50MW 蒸気発生器 2 号機蒸発器)			2 号機(蒸発器、	験装置(SPTL)
					過熱器)	
244 2 A		1 次処理	2 次処理	3 次浄処理	1次洗浄処理(窒	炭酸ガスによる安
洗浄	処埋万法	(窒素混	(純水)	(炭酸ガス	素混合水蒸気)	定化処理後大気中
		合水蒸気)		安定化)		水蒸気方法
		・予熱温度	・管束メタ	アル温度・	・窒素ガス流量	・窒素ガス流量
		窒素ガス流	量 ・水蒸気	〔流量 ・炭	・水蒸気流量	・水蒸気流量
		酸ガス流量 ・排気中水素濃度 ・			・排気中水素濃	・排気中水素濃度
	監視諸量	排気中の水分濃度 ・排水中電気伝			度	・その他
		導度 ・排水中ナトリウム濃度 ・			・排水中ナトリ	
		洗浄槽内水位 ・洗浄槽内水温 ・			ウム濃度	
	1	洗浄槽内酸素濃度			・その他	
	・管束メタ	70℃以下	70℃以下	50℃以下		
	ル温度					
	・排気中水	1%vol 以	1%vol 以			1%vol(途中で 2%
制	素濃度	下	下			vol に変更)以下
限	•洗浄槽内	1%vol 以	1%vol 以			
値	酸素濃度	下	下			
	• 予熱温度	50°C	50℃(冷			
	(目標値)		水循環時			
			なし)			
	• 排気中水	100ppm 以	水素発生		水素発生なし	0.1%vol以下(途
	素濃度	下	なし			中で炭酸ガス安定
						化処理方法に変
						史)
終	・排水甲ナトリ		1ppm 以下		1g/0以下	
ſ	<u>り</u> 4仮及 ・北水中電		00 0			
の判定	· 亦小中电 気伝道度		$20 \mu \Omega$			
	、日相知家	住田	/Cm 以下 住田	(本田		
	• 口倪観宗	使用	使用	使用		
	- 701 伊 观 埋 時間	12 时间以 L				
	· 地ガマ巾	<u> </u>		1000mm []]		
	水分濃度			TOOODDM 以		
	小刀収及			l l'		

表 4.7-1 不活性ガス中における水蒸気洗浄処理の監視、終了の判定(実績例)


図 4-1 ナトリウム洗浄処理の全体流れ

大洗研究開発センターにおいては、これまでに所期の研究開発の目的を達成した種々のナトリ ウム試験装置や機器等が解体・撤去され、多くのナトリウム洗浄処理技術(非放射性ナトリウム) に係る経験および知見が構築されてきた。過去に実施されてきた豊富な経験と知見を整理すると ともに、これらを横断的な視点から検討し、ナトリウム洗浄処理時に留意すべき重要事項や技術 提言についてまとめた。本報でまとめられた経験や知見は、今後行われるナトリウム試験施設の 保守・補修等に伴うナトリウム洗浄処理計画の策定および次世代炉の開発に向けた研究開発など に大いに役立つものと考えられる。

謝 辞

本報の成果は、これまでに実施されてきたナトリウム洗浄処理作業における経験や実績をベー スにまとめたものであり、実際に作業に携われ、数多くの技術開発や知見を残された先輩諸氏を はじめ、多くのナトリウム技術関係の方々に感謝の意を表します。また、これまでに得られた多 くの経験や知見の情報を整理する上で、土屋 毎雄氏(前核燃料サイクル機構、退職)に多大な 協力を得ました。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 平川 康、仲井 悟、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 (2002)
- T. Tsuchiya, T. Fukuda, et al, Review of Japanese activities in the field of maintenance and repair of LMFBR steam Generators, IAEAIWGFR/53 Specialist Meeting on Repair of LMFBR Steam Generators, O-arai, Japan, June 4-8 (1984)
- 3) 石川 興暢、小野島 貴光、永井 桂一、計測機器試験ループの解体撤去、JNC TN9410 2000-014 (2000)
- 4) 軍司 稔、山本 晋平、他、高速炉大型ナトリウム機器の解体・洗浄—50MW 中間熱交換器(I HX)の解体・洗浄、JNC TN9410 99-013 (1999)
- 5) 軍司 稔、山本 晋平、他、50MW 蒸気発生器試験施設中間熱交換器(IHX)の解体・洗浄 記録、PNC TN9450 98-009 (1998)
- 6) 永井 桂一、赤井 昌紀、谷田部 敏男、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 (2000)
- 7) 軍司 稔、平川 康、他、NaK 総合流動伝熱試験装置の解体・洗浄、JNC TN9410 2001-023 (2001)
- 8) 下山 一仁、柴崎 洋一、蒸気発生器安全性総合試験装置(SWAT-3)の解体、JNC TN9410 2001-020 (2001)
- 9) 亀井 満、小貫 修、中本 香一郎、「常陽」 炉容器モックアップ試験装置の解体撤去、動燃 技報,53号(1984)
- 10) 核燃料サイクル開発機構: "ナトリウム技術読本"、JNC TN9410 2005-011 (2005)
- 11) 石井 貴之、磯崎 和則、他、「常陽」MK-3 冷却系改造工事、2次冷却系撤去機器の解体・ ナトリウム洗浄作業、JNC TN9410 2002-013 (2002)
- 12) 中山 富佐雄、他、放射性ナトリウムの洗浄・処理処分技術等に関する調査、JNC TN9420 2005-001 (2005)
- 13) (財) 腐食防食協会編、腐食防食データブック(1995)
- 14) 山本 研、他、固体および蒸着ナトリウムの機械的強度試験(第3報 引張試験)、日本原 子力学会秋の分科会予稿集 1977 巻1号、J200223、p. 272(1977)
- 15) 平川 康、他、ナトリウム洗浄技術開発 溶融 NaK 洗浄基礎実験、JNC TN9400 2001-079 (2001)
- 16) 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)
- 17) 松本 寿之、他、大量ナトリウムの安定化処理に関する技術開発、ナトリウム転換基礎装置 の開発、JAEA-Technology 2007-035(2007)

This is a blank page.

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例 表1. SI 基本単位

甘木県	SI 基本単位			
基个里	名称	記号		
長さ	メートル	m		
質 量	キログラム	kg		
時 間	秒	s		
電 流	アンペア	Α		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	モル	mol		
光 度	カンデラ	cd		

组立量		SI 基本単位	
和立里		名称	記号
面	積	平方メートル	m ²
体	積五	立法メートル	m ³
速さ,速	度 >	メートル毎秒	m/s
加速	度 >	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波	数每	毎メートル	m ⁻¹
密度,質量密	度 =	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面 積 密	度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比 体	積ゴ	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密	度フ	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強	さフ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) ,濃	度刊	モル毎立方メートル	mol/m ³

第一の「「濃度」」の「ホルー」」の「加加」」 豊度 (a)、濃度 モル毎立方メートル mol/m³ 量濃度 キログラム毎立法メートル g^{\dagger} 加加/m³ 度 カンデラ毎平方メートル cd/m²折率 (b) (数字の) 1 1 透磁率 (b) (数字の) 1 1 質 輝 屈 透磁 比

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのこと を表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	SI 組立単位					
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方		
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m		
立 体 角	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 ^(b)	m^{2}/m^{2}		
周 波 数	(ヘルツ ^(d)	Hz		s ¹		
力	ニュートン	Ν		m kg s ^{"2}		
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²		
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²		
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{-3}$		
電荷,電気量	クーロン	С		s A		
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹		
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{2} kg^{1} s^{4} A^{2}$		
電 気 抵 扩	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$		
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$		
磁床	(ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$		
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹		
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$		
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K		
光 束	[ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd		
照良	ルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd		
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹		
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	m ² s ⁻²		
カーマ		C, j	0/11g	111 0		
線量当量,周辺線量当量,方向 地線量当量,個人線量当量,	シーベルト (g)	Sv	J/kg	$m^2 s^2$		
融 表 活 州	カタール	kat		e ⁻¹ mol		
RX 215 10 1		nat		5 1101		

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
(o)剤光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス選びを大しに使用される。セルシウス度とケルビンの 単位の大きさは同一である。したかって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば認った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4. 単位の	中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S. S.	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ^{'3}
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘 電 卒	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁 卒	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{2} kg s^{3} = m^2 kg s^{3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{3} s^{1} mol$

表 5. SI 接頭語								
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号			
10^{24}	ヨ タ	Y	10^{-1}	デシ	d			
10^{21}	ゼタ	Z	$10^{.2}$	センチ	с			
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m			
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ			
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n			
10^{9}	ギガ	G	$10^{\cdot 12}$	ピョ	р			
10^{6}	メガ	М	$10^{.15}$	フェムト	f			
10^{3}	キロ	k	$10^{\cdot 18}$	アト	а			
10^{2}	ヘクト	h	$10^{.21}$	ゼプト	z			
10^{1}	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	У			

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60s		
時	h	1h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(п/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad		
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, l	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
トン	t	1t=10 ³ kg		

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの						
名称				記号	SI 単位で表される数値	
電	子 オ	、ル	Ч	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダ	ル	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統-	一原子	質量単	〔位	u	1u=1 Da	
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m	

	表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位							
	名称		記号	SI 単位で表される数値				
バ	_	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa				
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa				
オン	グストロ・	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m				
海		里	М	1 M=1852m				
バ		\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²				
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s				
ネ		パ	Np	ロ光伝しの粉はめた眼接は				
ベ		ル	В	51単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。				
デ	ジベ	ル	dB -	X19X ± 17 AC44 (19 A 11 6				

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位							
名称	記号	SI 単位で表される数値					
エルク	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J					
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N					
ポアフ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s					
ストークフ	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$					
スチルフ	sb	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²					
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm 2 10 ⁴ lx					
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$					
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$					
ガウジ	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$					
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≜ (10 ³ /4π)A m ⁻¹					
(a) 3 元系のCCS単位系とSIでけ直接比較できかいため 笙母 [△							

3元系のCGS単位系とSI Cは は対応関係を示すものである。

			表	10.	SIに 属	属さないその他の単位の例
	3	名利	К		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
ν	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
ν				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\nu}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	r		ル	i.		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	系	カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	Ц		IJ	_	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
ŝ	ク			\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています