

汚染水処理二次廃棄物保管容器の健全性に関する調査

飯田芳久*1 中土井康真*1 山口徹治*1

東京電力株式会社福島第一原子力発電所において発生する汚染水処理二次廃棄物の長期的な保管のための技術的知見を蓄積することを目的として、東京電力株式会社から発表されている情報を汚染水処理二次廃棄物管理の観点でとりまとめた。そして、長期保管に際する保管容器の健全性に対する留意事項として、塩化物イオン共存および放射線下でのステンレス鋼製容器の腐食、酸性条件および活性炭共存下でのステンレス鋼製容器の腐食、およびスラリーを収納した高性能容器（HIC）の放射線劣化を抽出した。

Keywords: 汚染水処理, 二次廃棄物, ステンレス鋼, HIC, ポリエチレン

The information on the contaminated water treatment in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station announced by Tokyo Electric Power Co., Inc. (TEPCO) were summarized in terms of the management of the secondary wastes, for the purpose of accumulating technical knowledge for long-term storage of the wastes. Concerns for the long-term integrity of waste storage containers were pointed out as follows, corrosion of stainless steel containers exposed to radiation in the presence of chloride ions, corrosion of stainless steel containers under acidic conditions or in the presence of activated carbon, and radiation degradation of the high-performance container (HIC) in which slurry was stored.

Keywords: contaminated water treatment, secondary waste, stainless steel, HIC, polyethylene

1 緒言

東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故以来、原子炉建屋・タービン建屋内等の汚染水処理に伴い発生する水処理二次廃棄物の保管容器の保管量は増大している。保管の安全性について評価はされている[1]ものの、当該廃棄物は高濃度の放射性核種を含むため、ある程度放射能が減衰するまでの期間保管する可能性があることから、長期的な安全性について把握しておく必要がある。

各汚染水処理設備から発生する廃棄物は、吸着した放射性物質の崩壊熱により内部より発熱するため、計算コードにより保管時の温度評価が行われている[2など]。汚染水処理設備のうち、セシウム吸着装置（KURION）については、水処理二次廃棄物として発生する吸着塔について、水素ガス発生および容器材料であるステンレス鋼の腐食の観点から長期保管の安全性について検討が行われている[3,4]。また、第二セシウム吸着装置（SARRY）から発生する吸着塔の長期保管方策の検討として、実規模試験体を用いたCsの吸着分布試験および吸着コードによる解析が行われている[5]。

本調査ではKURIONおよびSARRYに加え、現在運用中である多核種除去設備（Advanced liquid processing system; ALPS）、増設多核種除去設備（Improved ALPS）、高性能多核種除去設備（High-performance ALPS）、RO濃縮水処理設備、モバイル型ストロンチウム除去装置、第二モバイル型ストロンチウム除去装置およびモバイル式処理装置を対象とし、当該廃棄物の処理および処分が行われるまでの長期的な保管のための技術的知見を蓄積することを目的として、東京電力株式会社から発表されている情報を汚染水処理二次廃棄物管理の観点でとりまとめ、長期保管に際する留意事項を整理した。

The survey for the integrity of containers for secondary wastes generated from contaminated water treatment by Yoshihisa IIDA (iida.yoshihisa@jaea.go.jp), Yasumasa NAKADOI, Tetsuji YAMAGUCHI

*1 日本原子力研究開発機構 安全研究センター 廃棄物安全研究グループ

Waste Safety Research Group, Nuclear Safety Research Center, Japan Atomic Energy Agency

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方2-4

(Received 21 October 2016; accepted 15 February 2017)

2 水処理二次廃棄物保管容器についての既往知見の整理

2.1 セシウム吸着装置（KURION）

汚染水処理経路の概要を Fig. 1 に示す。KURION は、吸着塔内部に充填された吸着材のイオン交換作用により、原子炉建屋・タービン建屋内から排出される汚染水に含まれる Cs 等の核種を除去する装置である。汚染水処理に伴い廃棄物として吸着塔が発生する。吸着塔はスキッド（円筒形の吸着塔を収容する直方体の枠組み）表面の線量当量率が 4mSv/h 程度になると交換される[2]。吸着塔は、重量約 15 トン、外径約 1.4m、高さ約 2.4m の円筒形容器で、内部にゼオライトまたはケイチタン酸塩を充填したステンレス鋼製の容器を、炭素鋼製の遮へい容器が覆う二重構造となっている。処理システムの概要を Fig. 2 に、使用される吸着材の種類を Table 1 に示す。改良により新たに Sr 吸着塔が装荷されており、これは後述する「モバイル型ストロンチウム除去装置」の Sr 吸着塔と同一仕様である[2,6]。

これらの吸着塔は、使用後、通水洗浄・水抜き・温風乾燥された後に、使用済セシウム吸着塔一時保管施設におい

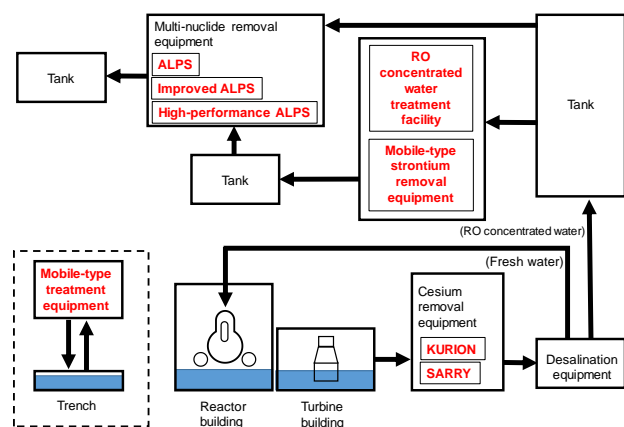


Fig. 1 Overview of contaminated water treatment. An accumulated water processing system (AREVA) is not a subject of this study, hence not shown in this overview

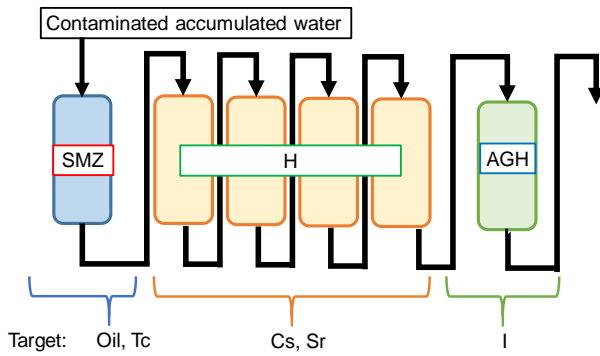


Fig. 2 Components of KURION

Table 1 Adsorbents used in KURION [6,9]

Abbreviation	Adsorbent	Main target
SMZ	Surfactant modified zeolite	Oil, Tc
H	Herschelite (chabazite type zeolite)	Cs
	TS-G (Silicotitanate)	Sr
AGH	Ag impregnated herschelite	I

て、遮へい機能を有するコンクリート製のボックスカルバート内に保管される。吸着塔の保管において、吸着した放射性物質の崩壊熱により内部から発熱することが想定される。計算コードを用いた解析では、ボックスカルバートにより保温された場合の吸着塔の温度は、発熱量をスキッド表面線量率の上限である 4mSv/h (Cs 吸着: 2×10^{15} Bq/塔) に相当する 583W, 外気温度を 27°C とした場合、吸着塔中心温度で最高 377°C, 遮へい体部分での最高温度は約 62°C と評価されている[2]。外気温度を 40°C (福島県の過去最高気温 39.1°C を切り上げ) とした場合でも、吸着塔中心部での最高温度は 390°C 程度であり、吸着塔内での発熱はゼオライト (耐熱温度 600°C) の健全性能や鉄の遮蔽性能に影響を与えるものではないと考えられている[2]。使用済みの Sr 吸着塔については、吸着した放射性物質の崩壊による発熱を入熱条件とし 1 次元の定常温度評価モデルを用いた評価において吸着塔の温度は、発熱量を 31.6W (Sr の吸着量 1.7×10^{14} Bq/塔に相当する発熱量), 外気温度を 40°C とした場合、吸着塔中心部で最高 130°C であり、太陽光からの入熱によるボックスカルバート上蓋の温度上昇を考慮した場合は最高約 143°C となった。また、炭素鋼製遮へい体の最高温度は約 62°C と評価されている[2]。この結果から、吸着塔内での発熱は吸着材の耐熱温度 200°C を超えないため、安全上の問題はないと判断されている[2]。

淡水化処理工程を経る前の汚染水 (以下、「淡水化処理前汚染水」) 中の塩化物イオン濃度の変化[7]を Fig. 3 に示す。淡水化処理前汚染水中の塩化物イオン濃度は、淡水注入および脱塩処理により KURION 運転初期の 16,000ppm 程度から数百 ppm 程度まで徐々に低下していることがわかる。2011 年 6 月 19 日から 2013 年 4 月 2 日の間に KURION から発生した吸着塔 1 本当たりの ^{137}Cs 吸着量の分布[8]を Fig. 4 に示す。吸着量に多少のばらつきがあるが、吸着塔 1 本当たりの ^{137}Cs 吸着量を平均すると 4×10^{14} Bq である。

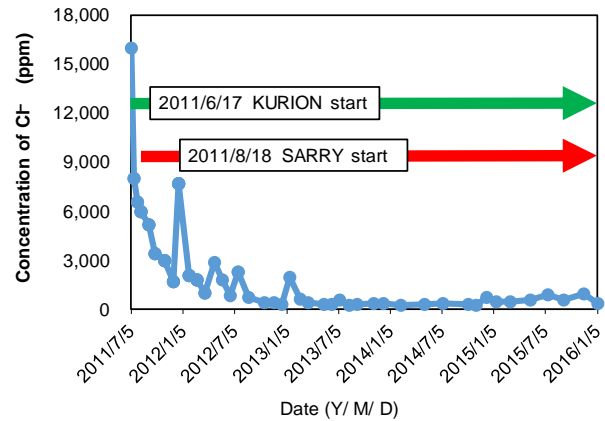


Fig. 3 Time-dependent change of the concentration of chloride in the contaminated water before desalination

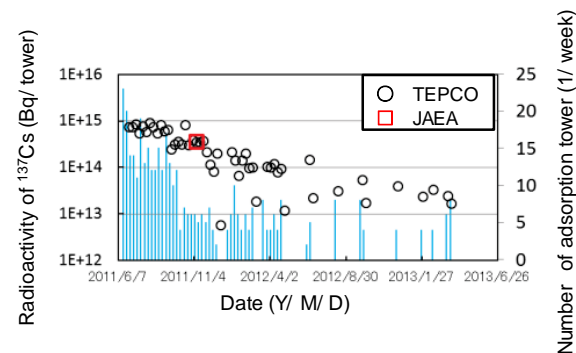


Fig. 4 Adsorption amount of ^{137}Cs per adsorption tower of KURION (marks) and generation of adsorption tower (bars), quoted from literature [8]

保管容器の材質、内容物、除去対象物、核種吸着量、保管時の最大温度および対象とする汚染水の水質 (塩化物イオン濃度、核種濃度および pH) について、後述する各処理設備の情報とあわせて Table 2 にとりまとめた。

2.2 第二セシウム吸着装置 (SARRY)

SARRY は KURION と同様、吸着塔内部に充填された吸着材のイオン交換作用により、原子炉建屋・タービン建屋内から排出される汚染水に含まれる Cs 等の核種を除去する装置である。汚染水処理に伴い水処理二次廃棄物として吸着塔が発生する。吸着塔は表面の線量当量率が 4mSv/h 程度になると交換される。汚染水の移送・貯留時におけるリスクの低減を図るため、SARRY に Cs および Sr を除去する吸着塔 (以下、「同時吸着塔」) を装荷することで、汚染水中の Sr の除去・低減が行えるようになった。吸着塔は、重量約 24 トン、外径約 1.4m、高さ約 3.6m の円筒形容器で、内部にゼオライトを充填したステンレス鋼製の容器を炭素鋼製の遮へい容器が覆う二重構造となっている。また、遮へい容器も二重構造となっており、アニュラス部に鉛を充填している。同時吸着塔は、吸着材容器が従来と同じ円筒形の構造 (TYPE-A) のものと、中空円筒形の構造 (TYPE-B1・B2) のものがある。TYPE-A は吸着材容器の外側の遮へい

Table 2 The information on the secondary wastes generated from the contaminated water treatment

Equipment	Storage container	Material of storage container	Content of storage container	Main target of removal	Maximum adsorbed amount of radionuclide (Bq/tower or Bq/m ²) [※]	Maximum temperature (°C)	Composition of water to be processed		
							CT (ppm)	Radionuclide (Bq/m ³)	pH
KURION	Adsorption tower	ASME SA240 TYPE316/316L	Herschelite	Cs, I	Cs: 2.0×10 ¹⁵	377	16,000 (2011/7)	No information	No information
			Ag impregnated herschelite	Sr	Sr: 1.7×10 ¹⁴	143	300 - 1,000 (later)	Sr-90: 1.4×10 ⁴ (2014/9/3)	No information
	Simultaneous adsorption tower	SUS316L	Chabazite (IE96)	Cs	Cs: 6.0×10 ¹⁵	450	8,000 (initial stage)	No information	No information
			Silicotitanate (IE911)	Sr, Cs	Sr: 1.2×10 ¹⁵ Cs: 2.1×10 ¹⁵	470	300 - 1,000 (later)		
SARRY	TYPE-B1 adsorption tower	ASME SA240 TYPE316L ASME SA312 TP316L	No information	Sr, Cs	Sr: 2.2×10 ¹⁵ Cs: 3.8×10 ¹⁵	340	300 - 1,000	No information	No information
				Sr, Cs	Sr: 2.2×10 ¹⁵ Cs: 3.8×10 ¹⁵	340	300 - 1,000		
	TYPE-B2 adsorption tower	ASME SA790 UNSS31803 etc.	Iron coprecipitation slurry	Co, Ni (heavy metal)	Mn-54: 1.7×10 ¹⁰ Co-60: 8.2×10 ⁹ Sr-90: 2.4×10 ¹³ etc.	60 (HIC surface)	13,000 (max)	No information	11.8 - 12.2 (pretreatment)
				Ca, Mg (Sr)	Sr-90: 8.7×10 ¹² etc.				
ALPS	HIC	Polyethylene	Carbonate slurry	Colloid	Mn-54: 3.9×10 ⁸ Co-60: 4.1×10 ⁸ Sr-90: 5.7×10 ¹² Sb-125: 2.2×10 ¹⁰ Cs-134: 2.6×10 ¹¹ Cs-137: 3.6×10 ¹¹ etc.	60 (HIC surface)	13,000 (max)	No information	11.8 - 12.2 (adsorption tower 1 - 5)
			Activated charcoal	I					
			Activated charcoal (impregnated with Ag)	Sr (M ²⁺)					
			Titanate	Cs					
			Ferrocyanide compound	Co (M ²⁺ , M ³⁺)					
			Chelate resin	Sb					
			Titanium oxide	Ru, Negatively charged colloid					
			Resin adsorbent	Ca, Mg (Sr)					
			Carbonate slurry	Colloid, I					
			Activated charcoal	Sr (M ²⁺)					
Improved ALPS	HIC	Polyethylene	Titanium oxide	Sb	Mn-54: 1.1×10 ⁹ Co-60: 1.1×10 ⁹ Sr-90: 1.1×10 ¹³ Sb-125: 1.4×10 ¹² Cs-134: 2.6×10 ¹¹ Cs-137: 3.6×10 ¹¹ etc.	60 (HIC surface)	13,000 (max)	No information	11.8 - 12.2 (pretreatment)
			Cerium oxide	I, Sb					
			Zeolite impregnated with Ag	I					
			Silicotitanate	Cs (Sr)					
			Resin adsorbent	Ru, Negatively charged colloid					

Table 2 Continued

Equipment	Storage container	Material of storage container	Content of storage container	Main target of removal	Maximum adsorbed amount of radionuclide (Bq/tower or Bq/m ²)*	Maximum temperature (°C)	Composition of water to be processed		
							Cl ⁻ (ppm)	Radionuclide (Bq/m ³)	pH
High-performance ALPS	Adsorption tower	UNSS31803 (Two-phase stainless steel)	Ti-zeolite	Sr, Cs	Mn-54: 2.5×10 ¹⁰ Co-60: 2.1×10 ¹⁰ Sr-90: 3.4×10 ¹⁵ Sb-125: 1.6×10 ¹³ Cs-134: 1.7×10 ¹² Cs-137: 1.7×10 ¹² etc.	182	≈ 6,350 (RO concentrated water)	H-3: 3.9×10 ² Mn-54: 1.6×10 ⁻² Co-60: 3.5×10 ⁻¹ Sr-90: 2.5×10 ¹ Ru-106: 1.3×10 ⁻¹ Sb-125: 1.7×10 ⁰ Cs-134: 1.0×10 ⁻¹ Cs-137: 5.2×10 ⁻¹ (RO concentrated water)	3.5 - 7.5
			Activated charcoal impregnated with chelate	Co, Ni, Mn etc.					
			Cerium oxide	Sb					
			Resin adsorbent	Chelating agent, Ru etc.					
			Anion adsorbent	Anion etc.					
Ag-zeolite	I etc.								
Iron hydroxide	Ru etc.								
RO concentrated water treatment facility	Adsorption tower	ASME SA790 UNSS31803 (Two-phase stainless steel)	Same adsorbent as for high-performance ALPS (presumption)	Sr, Cs	Sr-90: 4.8×10 ¹⁵ Cs-134: 5.9×10 ¹¹ Cs-137: 5.9×10 ¹¹	182	≈ 6,350 (RO concentrated water)	Mn-54: 7.9×10 ⁻¹ Co-60: 6.6×10 ⁻¹ Sr-90: 5.0×10 ⁴ Sb-125: 2.5×10 ¹ Cs-134: 5.0×10 ⁰ Cs-137: 1.0×10 ¹	5.8 - 12.0
Mobile-type strontium removal equipment	SS filter housing Ultrafilter housing Adsorption tower	ASME SA312 TP316L	Polypropylene	Sr	Sr-90: 2.4×10 ¹⁴ Sr-90: 5.2×10 ¹⁴ Sr-90: 1.7×10 ¹⁴ Cs-134: 5.2×10 ⁹ Cs-137: 9.1×10 ⁹	112 120 143	< 6,000 (RO concentrated water)	Sr: 3.9×10 ⁴	No information
			Polyethersulfone	Sr					
			Silicotitanate (TS-G)	Sr					
Second mobile-type strontium removal equipment	Adsorption tower	ASME SA240 TYPE 316/316L	No information	Sr, Cs	Sr-90: 2.0×10 ¹⁵ Cs-134: 5.0×10 ¹¹ Cs-137: 1.5×10 ¹²	342	≈ 2,300 (RO concentrated water)	Sr-90: 7.2×10 ⁴ Cs-134: 7.7×10 ⁸ Cs-137: 2.0×10 ¹	No information
Mobile-type treatment equipment	Adsorption tower	ASME SA240 TYPE 316/316L	Activated charcoal (prussian blue) Silicotitanate (IE911) ET-201	Sr, Cs	Sr: 1.3×10 ¹⁵ Cs: 1.3×10 ¹⁵	160	700 - 17,000 (seawater in trench)	Cs: 9.5×10 ⁵	No information

*: Bq/m³ is used for ALPS, Improved ALPS and High-performance ALPS. The values of Sr and Cs show the total values of Sr-89 and Sr-90, and Cs-134 and Cs-137, respectively.

容器（二重筒構造）の中に鉛球等を充填する遮へい構造であり、TYPE-B1 は吸着材容器の外側を鉛板等で覆う遮へい構造、TYPE-B2 は吸着材容器の外側を鉛を鑄込んだ遮へいブロック等で覆う遮蔽構造となっている。処理システムの概要をFig. 5に、使用される吸着材の種類をTable 3に示す。

吸着塔は使用后、通水洗浄・水抜き・温風乾燥された後に使用済セシウム吸着塔一時保管施設において架台に設置され保管される。計算コードを用いた解析では、Cs吸着量を 6×10^{15} Bq/塔、外気温度を 40°C とした場合、大気への放熱が定常になる際の吸着塔中心部温度は約 450°C と評価されており[2]、ゼオライトの健全性や鉛の遮へい性能に影響を与えるものではないと考えられている[2]。同時吸着塔TYPE-Aについては、Cs吸着量を約 2.1×10^{15} Bq/塔、Sr吸着量を約 1.2×10^{15} Bq/塔、外気温度を 40°C と仮定した三次元解析の結果、吸着塔中心部の最高温度は 470°C と評価されている[2]。また、同時吸着塔TYPE-Bについては、Cs吸着量約 3.8×10^{15} Bq/塔、Sr吸着量約 2.2×10^{15} Bq/塔、外気温度を 40°C と仮定した三次元解析の結果、吸着塔中心部の最高温度は 340°C と評価されており、これらの同時吸着塔内での発熱も吸着材の健全性や鉛の遮へい性能に影響を与えるものではないとされている[2]。

淡水化処理前汚染水中の塩化物イオン濃度の変化[7]をFig. 3に示す。淡水化処理前汚染水に含まれる塩化物イオンは、SARRY運転初期の8,000ppm程度から数百ppm程度まで徐々に低下していることがわかる。2011年6月19日から2013年4月2日の間にSARRYから発生した吸着塔1本当たりの ^{137}Cs 吸着量の分布[8]をFig. 6に示す。吸着量に多少のばらつきがあるが、吸着塔1本当たりの ^{137}Cs 吸着量を平均すると 1×10^{15} Bqである。

2.3 多核種除去設備

多核種除去設備は、KURIONやSARRYで処理した後の逆浸透（Reverse Osmosis）膜装置の廃液（RO濃縮水；Fig. 1）に含まれる放射性物質（ ^3H を除く）を、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示」に定める周辺監視区域外の水中の

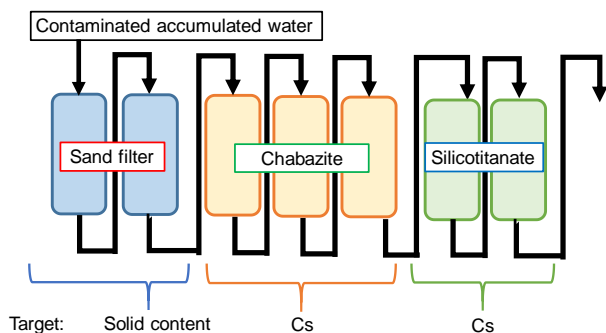


Fig. 5 Components of SARRY

Table 3 Adsorbents used in SARRY [10,11]

Adsorbent	Main target
Chabazite	Cs
Silicotitanate	Cs

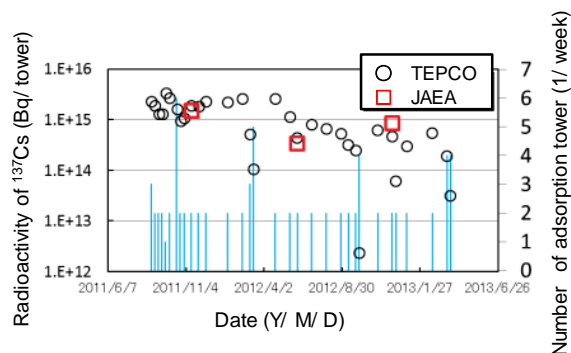


Fig. 6 Adsorption amount of ^{137}Cs per adsorption tower of SARRY(marks) and generation of adsorption tower (bars), quoted from literature [8]

濃度限度（以下、「告示濃度限度」）を下回る濃度まで低減する事を目的として設置されている[12]。処理システムの概要をFig. 7に示す[12,13]。前処理設備は、鉄共沈処理設備および炭酸塩沈殿処理設備で構成され、鉄共沈処理設備ではアルファ核種、 ^{60}Co および ^{54}Mn 等の除去を行う。炭酸塩沈殿処理設備では、後段の吸着塔においてSrの吸着を阻害する2価の金属イオン（ Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等）を除去する。前処理設備からは沈殿処理後の廃棄物として、上記核種と水酸化鉄との共沈物や炭酸塩のスラリーが排出される[12]。

前処理された汚染水は14塔の吸着塔および2塔の処理カラムで処理される。除去対象核種に応じて吸着塔・処理カラムに収容する吸着材（活性炭、キレート樹脂等）の種類が異なっており、処理対象水に含まれるコロイド状およびイオン状の放射性核種を分離・吸着処理する機能を有している。使用される吸着剤の種類をTable 4に示す[12,13]。吸着材には活性炭、銀添着活性炭、チタン酸塩、フェロシアン化合物、キレート樹脂、酸化チタンおよび樹脂系吸着材が用いられ、それぞれコロイド、I, Sr, Cs, Co, Sb, Ruおよび負電荷コロイドが吸着される。これらの使用済吸着材が廃棄物として発生し、所定の容量の水を通した後脱水処理される。

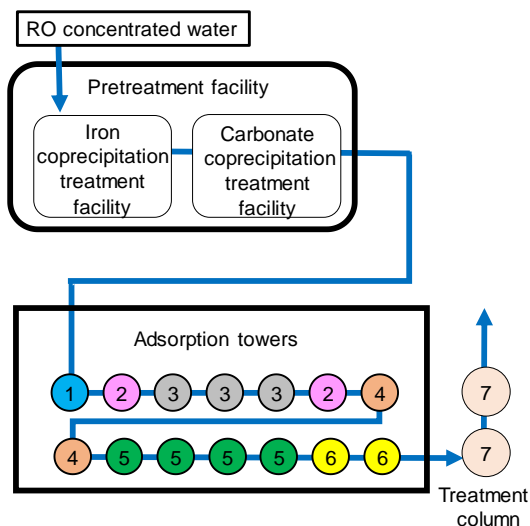


Fig. 7 Components of ALPS

Table 4 Adsorbents used in ALPS

Adsorption tower number	Adsorbent	Main target
1	Activated charcoal	Colloid
2	Activated charcoal (impregnated with Ag)	I
3	Titanate	Sr (M^{2+})
4	Ferrocyanide compound	Cs
5	Chelate resin	Co (M^{2+} , M^{3+})
6	Titanium oxide	Sb
7	Resin adsorbent	Ru, Negatively charged colloid

沈殿処理廃棄物および脱水処理された使用済吸着材は、高性能容器（HIC； High Integrity Container）にて保管される[12]。HICは直径約1.5m、高さ約1.8m、厚さが約11mmの円筒形容器であり、材質は架橋ポリエチレンである。HICには落下時の健全性を確保するため、ステンレス鋼製の補強体等が取り付けられている。廃棄物を収容したHICは補強体取り付けられた状態でコンクリート製ボックスカルバート内に貯蔵される。温度評価の結果、使用済みの吸着材あるいは沈殿処理生成物を収容する高性能容器、処理カラムのうち、最も発熱量が大きいチタン酸塩吸着材（Sr吸着材）を収容する場合において、HIC容器表面温度は一時保管施設である第二施設貯蔵時で約60℃、第三施設貯蔵時で約57℃であるとされている[12]。さらに夏期の太陽光からの入熱によるボックスカルバート上蓋の温度上昇を考慮しても、HIC容器表面温度は第二施設貯蔵時で約73℃、第三施設貯蔵時で約70℃であり、HICの設計温度76.6℃に対して低いと評価されている[12]。また、ポリエチレンは、95℃のクリープ試験において、長期間にわたり屈曲点が現れていないことから、想定される使用環境において貯蔵時の熱負荷における劣化はなく、温度について十分に余裕があると考えられている[12]。

処理カラムに含まれる吸着材は、所定の容量を通水した後処理カラムごと交換され、使用済セシウム吸着塔一時保管施設にて保管される。処理カラムは外径約1.4m、高さ約2.7mの円筒形容器で材質はSUS316Lである。容器内部に樹脂系の吸着材を充填しており、多核種除去設備において吸着塔を通った後の汚染水からRuや負電荷コロイドを除去することを目的とされている。使用後の処理カラムは内部吸着材の脱水を行い、使用済セシウム吸着塔一時保管施設において架台に設置され保管される。保管されている処理カラムは含まれる放射性物質濃度が低いため、崩壊熱は容器の健全性に影響を与えるものではないと考えられている[12]。

多核種除去設備によって処理された汚染水には、最大13,000 ppm程度の塩化物イオンが含まれていたとされている[12]。またHICに収容される廃棄物の核種吸着量は、

^{90}Sr で 10^{12} Bq/m³のオーダー、 ^{134}Cs および ^{137}Cs で 10^{11} Bq/m³のオーダーである[14]。

2.4 増設多核種除去設備

増設多核種除去設備は、RO濃縮水を早期に処理するため多核種除去設備の運転経験を踏まえた改良が行われ設置されている[15]。処理システムの概要をFig. 8に示す。前処理設備では、鉄共沈処理が削除され炭酸塩沈殿処理設備のみとなっている。また、吸着塔は18塔に増塔されている。吸着塔は処理対象水に含まれるコロイド状およびイオン状の放射性物質を分離・吸着処理する機能を有しており、吸着塔に収容する吸着材の構成は処理対象水の性状に応じて変更される[11]。吸着剤の種類をTable 5に示す。吸着材には活性炭、チタン酸塩、酸化チタン、酸化セリウム、銀添着ゼオライト、ケイチタン酸塩および樹脂系吸着材が用いられ、それぞれ、コロイドおよびI、Sr、Sb、IおよびSb、I、CsおよびSr、Ruおよび負電荷コロイドが吸着される。

沈殿処理廃棄物として炭酸塩のスラリーが排出され、HICにて保管される。使用済吸着材は所定の容量の水を通した後脱水処理され、HICにて保管される。HICの貯蔵方法は多核種除去設備と同様である。温度評価の結果、最も発熱量が大きいチタン酸塩吸着材を収容する場合においてHIC容器表面温度は約60℃となる[15]。さらに夏期の太陽光からの入熱によるボックスカルバート上蓋の温度上昇を考慮してもHIC容器表面温度は約73℃であり、HICの設計温度76.6℃に対して低いと評価されている[15]。

増設多核種除去設備によって処理された汚染水には13,000ppm程度の塩化物イオンが含まれていたと考えられる[15]。またHICに収容される廃棄物の核種吸着量は、 ^{90}Sr で 10^{13} Bq/m³のオーダー、 ^{134}Cs および ^{137}Cs で 10^{11} Bq/m³のオーダーである[14]。多核種除去設備に比べ、前処理設備から鉄共沈処理が削除された分、炭酸塩スラリーおよび吸着剤中の ^{90}Sr 量が増加している。

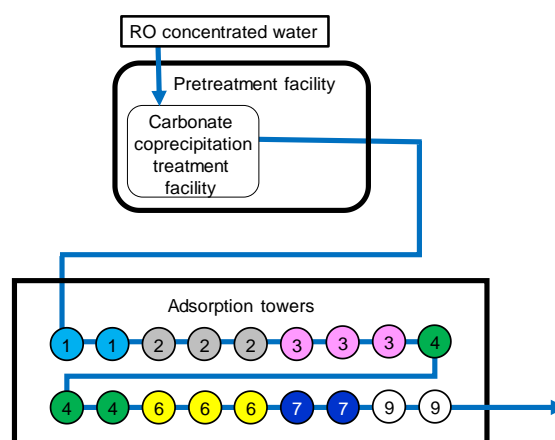


Fig. 8 Components of improved ALPS (adsorption tower 4 shows 4 or 5, and 7 shows 7 or 8)

Table 5 Adsorbents used in improved ALPS

Adsorption tower number	Adsorbent	Main target
1, 9	Activated charcoal	Colloid, I
2	Titanate	Sr (M^{2+})
3	Titanium oxide	Sb
4	Cerium oxide	I, Sb
5	Zeolite impregnated with Ag	I
6	Silicotitanate	Cs (Sr)
7, 8	Resin adsorbent	Ru, Negatively charged colloid

2.5 高性能多核種除去設備

高性能多核種除去設備は、鉄共沈・炭酸塩沈殿処理による放射性物質の除去プロセスを採用せず、フィルタ・吸着材に放射性核種を濃縮吸着させ、廃棄物発生量を既設多核種除去設備（年間2,300m³）に比べ8割以上削減することを目指して設置された。また核種除去能力の向上として、対象の62核種について処理済水中濃度が告示濃度限度を下回るだけでなく、検出限界値未満であることを目標とした。さらに、既設設備で課題であった腐食の防止対策として、吸着塔材料に耐食性の高い二相ステンレス鋼を選定した[16-18]。処理システムの概要をFig. 9に示す[19]。SSフィルタおよびコロイドフィルタにより前処理された汚染水は20塔の吸着塔で処理される。除去対象核種に応じて吸着塔に収容する吸着材の種類が異なり、吸着材の構成は処理対象水の性状に応じて変更される。吸着剤の種類をTable 6に示す[19-20]。処理対象水に含まれる炭酸イオンはアルカリ環境下で炭酸塩（炭酸Ca、炭酸Sr）を形成し、炭酸Caの吸着材付着により吸着面積を低下させたり、炭酸Srの生成によりSrを吸着材に吸着されない形態に変化させたりするため、前処理前の処理対象水に酸（HCl）を添加して炭酸を揮発させる。さらに酸性条件ではCs/Sr同時吸着塔の吸着性能が低下するため、前処理後の処理対象水にアルカリ（NaOH）を添加して中和している（Fig. 9）。また、Srがキレート錯体を形成して吸着材に吸着しなくなるのを防ぐため、処理対象水中のキレートをキレート吸着塔により除去している。その際、処理対象水中ですでに生成しているSrキレート錯体を分離するため、酸を添加してpHを3.5に調整している[21]。

高性能多核種除去設備で使用されている多核種吸着塔は、内部に吸着材を充填した中空の円柱形の容器を鉛の遮へい体で覆う二重構造になっている。高性能多核種除去設備では、吸着塔がそのまま廃棄物となる。使用後の吸着塔は淡水置換しエアブローにより水切りした後、使用済セシウム吸着塔一時保管施設で架台に設置され保管される。吸着した放射性物質の崩壊熱により内部より発熱するが、計算コードを用いた解析では吸着塔内の最高温度は約182℃と評価されており[16]、吸着塔内の吸

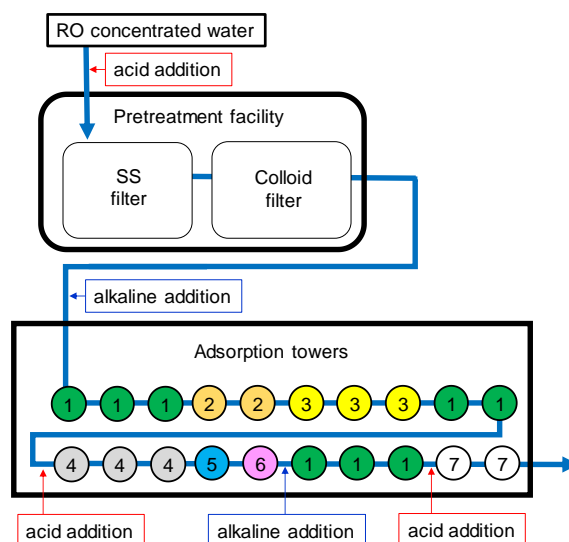


Fig. 9 Components of high-performance ALPS

Table 6 Adsorbents used in high-performance ALPS

Adsorption tower number	Adsorbent	Main target
1	Ti-zeolite	Sr, Cs
2	Activated charcoal impregnated with chelate	Co, Ni, Mn etc.
3	Cerium oxide	Sb
4	Resin adsorbent	Chelating agent Ru etc.
5	Anion adsorbent	Anion etc.
6	Ag-zeolite	I etc.
7	Iron hydroxide	Ru etc.

着材の耐熱温度（600℃）より低い。

高性能多核種除去設備によって処理された汚染水には6,350ppm程度の塩化物イオンが含まれていたと想定されている[16]。また吸着塔1本当たりの核種吸着量は、⁹⁰Srで10¹⁵ Bq/m³のオーダー、¹³⁴Csおよび¹³⁷Csで10¹² Bq/m³のオーダーである[14]。

2.6 RO濃縮水処理設備

RO濃縮水処理設備は前処理装置と核種除去装置で構成される。前処理装置は4塔の前処理フィルタで構成され、汚染水に含まれる浮遊物質を除去する。核種除去装置は5塔の吸着塔で構成され、除去対象核種に応じて吸着塔に収容する吸着材の種類が異なり、処理対象水に含まれるコロイド状およびイオン状の放射性物質を分離・吸着処理する。汚染水処理に伴い水処理二次廃棄物として、フィルタおよび吸着塔が発生する。使用されている前処理フィルタは、エポキシコーティングされた炭素鋼容器に収容されている。また、吸着塔は内部に吸着材を充填した中空の円柱形の容器を鉛の遮へい体で覆う二重構造になっている。なお、前処理フィルタのうち

水処理二次廃棄物として発生するのは内部のフィルタ部分のみであるが、フィルタの材質や構造の詳細は不明である。使用済のフィルタは内部を淡水で置換した後、エアブローにより水抜きされてからコンクリート製または金属製の保管容器に収容して瓦礫類の一時保管エリアに貯蔵される。使用済の吸着塔は内部を淡水で置換した後、エアブローにより水抜きされてから使用済セシウム吸着塔一時保管施設に保管される[22,23]。

使用済フィルタおよび吸着塔がそれぞれ貯蔵・保管される場合の温度評価の結果、フィルタおよび吸着塔の最高温度はそれぞれ約67℃、約182℃であると報告されている[22]。これらの温度は、フィルタおよび吸着塔内の吸着材の耐熱温度である130℃および600℃を超えていないため、材料の健全性に影響はないとされている。RO濃縮水の塩化物イオン濃度については最大6,350ppm程度とされている[22]。また吸着塔1本当たりの核種吸着量は、 ^{90}Sr で 10^{15} Bq/m^3 のオーダー、 ^{134}Cs および ^{137}Cs で 10^{11} Bq/m^3 のオーダーである[22]。

2.7 モバイル型ストロンチウム除去装置

多核種除去設備と平行してRO濃縮水に含まれている高濃度の放射性Srを低減させる目的で、モバイル型ストロンチウム除去装置が設置されている (Fig. 1)。処理システムの概要をFig. 10に示す[24,25]。供給/混合スキッドで汚染水に吸着材粒子を添加・混合してイオン状Srを吸着材粒子に吸着させ、その後SSフィルタスキッドにより吸着材粒子及び粒子状Srを除去する。さらにSSフィルタで除去されなかった微粒子状Srをウルトラフィルタスキッドにより除去し、最後に吸着塔スキッドによりイオン状Srを除去する。汚染水処理に伴いSSフィルタ、ウルトラフィルタおよび吸着塔が廃棄物として発生する。SSフィルタはポリプロピレン製、ウルトラフィルタはポリエーテルサルホン製であり、ステンレス鋼製のフィルタハウジングに収容されている。フィルタハウジングは炭素鋼製のライナーに収容されており、その外側は炭素鋼製の遮へい容器で覆われている。また吸着塔は、内部にゼオライトを充填したステンレス鋼製の容器を炭素鋼製の遮へい容器が覆う二重構造となっている。使用済のSSフィルタ、ウルトラフィルタおよび吸着塔は内部を淡水で置換した後、使用済セシウム吸着塔一時保管施設等

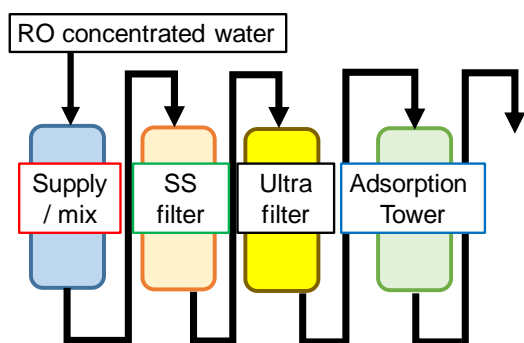


Fig. 10 Components of mobile-type strontium removal equipment

において内部の水抜きを行い、使用済セシウム吸着塔仮保管施設および使用済セシウム吸着塔一時保管施設のコンクリート製ボックスカルバート内で保管される。

使用済SSフィルタ、ウルトラフィルタおよび吸着塔を対象に、コンクリート製ボックスカルバート内に乾燥状態で貯蔵される場合の温度評価が行われており、最高温度はそれぞれ112℃、121℃、143℃と評価されている。SSフィルタ、ウルトラフィルタおよび吸着塔内のフィルタ材料の耐熱温度はそれぞれ、121℃、200℃、200℃であることから、材料の健全性に影響を与えるものではないとされている[24]。RO濃縮水の塩化物イオン濃度については最大6,000ppm程度とされている[24]。また吸着塔1本当たりの核種吸着量は、 ^{90}Sr で 10^{14} Bq/m^3 のオーダー、 ^{134}Cs および ^{137}Cs で 10^9 Bq/m^3 のオーダーである[24]。

2.8 第二モバイル型ストロンチウム除去装置

モバイル型ストロンチウム除去装置に加え、RO濃縮水貯蔵リスクの更なる低減のため、第二モバイル型ストロンチウム除去装置が設置されている。処理システムの概要をFig. 11に示す。前置フィルタにて汚染水の浮遊物質の粗取りを行ない、後段の吸着塔によって汚染水に含まれるSrの除去を行う[26,27]。汚染水処理に伴い廃棄物として吸着塔が発生する。第二モバイル型ストロンチウム除去装置で使用する吸着塔は円筒形容器で、内部にゼオライト等を充填したステンレス鋼製の容器を炭素鋼製の遮へい容器が覆う二重構造となっている。また、遮へい容器は二重筒構造となっており、内部の鉛等により吸着塔表面で 1mSv/h 以下となるよう十分な遮へい能力を有している。なお、第二モバイル型ストロンチウム除去装置で使用する吸着塔は、後述する「モバイル式処理装置」の吸着塔と同一仕様である[26]。使用済吸着塔は内部を淡水で置換し、内部の水抜きを行なった後に使用済セシウム吸着塔仮保管施設および使用済セシウム吸着塔一時保管施設のコンクリート製ボックスカルバート内で保管される。

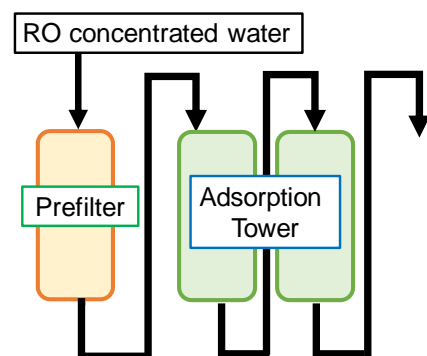


Fig. 11 Components of second mobile-type strontium removal equipment

ボックスカルバートにより保温された場合の吸着塔の温度は、外気温度を40℃、塔あたりの発熱量を約360Wとすると中心部で約329℃、太陽光からの入熱による温度上昇を考慮しても約342℃となり、吸着材の耐熱温度

600℃より低いことから安全上の問題はないと判断されている[26]。また、RO濃縮水の塩化物イオン濃度については2,300ppm程度とされている[26]。また吸着塔1本当たりの核種吸着量は、 ^{90}Sr で 10^{15}Bq/m^3 のオーダー、 ^{134}Cs で 10^{14}Bq/m^3 のオーダーおよび ^{137}Cs で 10^{12}Bq/m^3 のオーダーである[26]。

2.9 モバイル式処理装置

モバイル式処理装置は、2号機および3号機の海水配管トレンチに滞留している高濃度の汚染水に含まれる放射性物質濃度を低減する目的で設置されており、吸着塔により高濃度汚染水に含まれるCsおよびSrを除去している[28]。吸着塔に収容するCs除去用吸着材として、ケイチタン酸塩に加え紺青活性炭を使用する計画が東京電力株式会社から発表されている[29]。水処理二次廃棄物として使用済吸着塔が発生する。モバイル式処理装置で使用する吸着塔は円筒形容器で、内部に吸着材を充填したステンレス鋼製の容器を炭素鋼製の遮へい容器が覆う二重構造となっている。また、遮へい容器は二重筒構造となっており、内部の鉛等により吸着塔表面で 1mSv/h 以下となるよう十分な遮へい能力を有している。使用済の吸着塔は、使用済セシウム吸着塔仮保管施設等において内部の水抜きを行った後、使用済セシウム吸着塔仮保管施設および使用済セシウム吸着塔一時保管施設のコンクリート製ボックスカルバート内で保管される。

ボックスカルバートにより保温された場合の吸着塔の温度は、外気温度を 40°C 、塔あたりの発熱量を約 230W とすると、吸着塔中心で約 160°C 、遮へい体部分で最高約 65°C と評価されている[2]。そのため、吸着塔内での発熱は吸着材の健全性（紺青活性炭は 200°C 程度、その他の吸着材は 600°C 程度まで安定）や鉄の遮へい性能に影響を与えるものではない。

また、処理対象である滞留水中の塩化物イオン濃度は、 $700\text{ppm}\sim 17,000\text{ppm}$ 程度とされている[2]。また吸着塔1本当たりの核種吸着量は、Sr、Csともに 10^{15}Bq/m^3 のオーダーである[2]。

3 保管容器の健全性に対する留意事項と今後の検討課題

3.1 塩化物イオン共存および放射線下でのステンレス鋼製容器の腐食

水処理二次廃棄物である吸着塔等の保管容器は主にステンレス鋼製であり、材質として主にSUS316Lが使用されている。KURION、SARRY、モバイル式処理装置および多核種除去設備において、事故発生後の初期段階で塩化物イオン濃度およびCs濃度の高い汚染水の処理を行っているため、ステンレス鋼の腐食が懸念される。処理対象水に含まれる塩化物イオン濃度は数百 $\sim 16,000\text{ppm}$ 程度であるが、保管前の洗浄により内部塩化物イオン濃度は $1/2,000$ 程度に減少するという報告がある[30]。ただし吸着塔内部に洗浄効果の低い領域の存在も確認されており、初期濃度を $16,000\text{ppm}$ とした場合、実機洗浄操作により吸着塔内の残

存塩化物イオン濃度は 200ppm 程度と推定する報告もあるため[31]、吸着塔内に残留する塩化物イオン濃度は数ppm $\sim 200\text{ppm}$ 程度であると推定される。

ステンレス鋼の耐食性は表面に形成される不動態被膜の化学的な安定性に依存しているが、塩化物を含む環境においては塩化物イオンによって不動態皮膜が破壊され、ステンレス鋼に種々の形態の局部腐食が発生することが知られている[32]。使用済吸着塔などの水処理廃棄物は通水洗浄された後エアブローにより水抜きした状態で保管されているが、内部の水をすべて取り除くことは難しく、ある程度の塩化物イオンを含む水が内部に残留していると考えられる。残存塩化物イオンの影響により、接液部では孔食や、内部構造上すき間が存在するならばすき間腐食の発生、溶接などによる残留応力が生じている場合は応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking; SCC）の発生が懸念される。

孔食については、ガンマ線影響によりSUS316Lステンレス鋼の自然浸漬電位が上昇し孔食発生電位を超えることで発生リスクが生じるが、核種吸着剤であるゼオライト（Herschelite）が共存することにより電位の上昇が抑制されるため[33]、塩化物イオン濃度が $2,000\text{ppm}$ 程度においても発生リスクを低減することが出来ると考えられる。このことから使用済吸着塔などの水処理廃棄物の残留水に含まれる塩化物イオン濃度が数ppm $\sim 200\text{ppm}$ 程度であれば、孔食が発生する可能性は低いと推察される。

すき間腐食については、水処理二次廃棄物容器内部の詳細な構造の情報が公開されていないため、すき間腐食の原因となる構造上のすき間が存在するかは不明であるものの、使用済吸着塔などの水処理二次廃棄物の残留水に含まれる塩化物イオン濃度が数ppm $\sim 200\text{ppm}$ （ 0.02% ）程度と仮定すれば、すき間が存在する場合、温度が 100°C 以下でもすき間腐食の発生が懸念される[34]。

SCCについては、使用済吸着塔などの水処理二次廃棄物の残留水に含まれる塩化物イオン濃度が数ppm $\sim 200\text{ppm}$ 程度かつ、容器は大気解放環境であり、崩壊熱により残留水の温度が上昇しても沸点（ 100°C ）を越えないと仮定すれば、SUS316L材についてはSCCの発生する危険性は低いことが文献[35]から推定できる。しかしながら常温でのSCC発生が報告されている例もあり[32]、 100°C 以下でSCCが発生しないとは言い切れない。

ステンレス鋼の腐食に関し、今後も容器内部の実際の温度、残留応力の程度や内部残留水蒸発による塩化物イオン濃度上昇の程度などの情報を収集し、それらを考慮した検討が必要である。

3.2 酸性条件および活性炭共存下でのステンレス鋼製容器の腐食

高性能多核種除去設備にはpH3.5の酸性条件で使用される吸着塔がある。また、重金属吸着材としてキレート材添着活性炭が使用されているため、活性炭の触媒酸化作用によるステンレス鋼の腐食が懸念される。東京電力株式会社、日立GEニュークリア・エナジー株式会社および東芝株式会社により、高性能多核種除去設備で使用される二相系ステンレス鋼の実環境における腐食試験

が実施されている[18]. 実汚染水を用いた 1,500 時間の浸漬試験結果から、塩化物イオン濃度 3,630ppm, 温度 40°C, pH7.7 の中性環境下では SUS316L および二相系ステンレス鋼 (SUS329J4L, S39274 および S32750) にはすき間腐食の発生は確認されず、良好な耐食性が示されている。また、銀添着活性炭および pH3.6 の酸性環境下でも二相系ステンレス鋼にはすき間腐食の発生は確認されず、良好な耐食性を示しており、活性炭共存および酸性 (pH3.6) 環境下で実機適用可能であると考えられている[18]. しかしながら、二相系ステンレス鋼の腐食すき間再不動化電位測定からは、実環境 (塩化物イオン濃度 ≤ 6,000ppm, 温度 ≤ 40°C, pH7) において溶接部にすき間腐食が起こり得ると評価されている[18]. また、二相系ステンレス鋼溶接部の腐食発生寿命について、中性の pH 条件であれば耐食性が 76 年以上維持できるものの、pH 3.5 の場合は 16 年~26 年程度と試算されている[18]. 上記の腐食試験では溶接部についてもすき間腐食の発生が認められていないものの、吸着塔の長期保管に際してはすき間腐食の発生に注意が必要である。

なお、同試験での酸性条件および活性炭共存条件において、SUS316L ステンレス鋼材にはすき間腐食が発生している[18]. 平成 27 年 4 月 27 日に原子力規制委員会に受理された「福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画」の変更認可申請において、高性能多核種除去設備の吸着塔の材質に SUS316L 材が使用されることが示され、同年 6 月 29 日に認可された。同材は活性炭を収容する吸着塔および低 pH 条件での吸着塔では使用しないこととされている[19]ものの、使用環境 (塩化物イオン濃度 6,350ppm, 温度 0~40°C, pH7~10) においても腐食発生の可能性は否定できないことから定期的な点検・保守を実施するとされている[36].

また、モバイル型ストロンチウム除去装置のウルトラフィルタにポリエーテルサルフォンが使用されている。ポリエーテルサルフォンの放射線劣化により亜硫酸が生成し、大気中で酸化されることで硫酸が生成して酸性環境となる可能性があり[37]、フィルタハウジング材であるステンレス鋼の腐食に影響するおそれがある。さらに、モバイル式処理装置において紺青活性炭を吸着材として用いる計画があった[29]. 実際に用いられたかどうかは不明であるが、使用されているとすればステンレス鋼腐食への影響について検討する必要がある。

3.3 スラリーを収納した HIC の放射線劣化

多核種除去設備、増設多核種除去設備において用いられている、炭酸塩スラリーおよび鉄共沈スラリーを収納した HIC の放射線劣化 (材料の機械的特性の変化) が懸念される。ポリエチレンの放射線劣化は主に酸化に起因し、ポリエチレンの種類、製造方法、添加剤の種類・配合比により、初期特性と放射線劣化挙動が異なる。水が共存する環境においても放射線によりポリエチレンは酸化し、水温 60°C で照射した場合に劣化が最大となっている事例がある[38]. 東京電力株式会社福島第一原子力発電所で使用される HIC とその保管環境について、容器

の最高温度は約 71°C[39,40]、20 年間保管した場合の最大積算線量は、ガンマ線で約 46 kGy と見積もられている[41]. また、HIC 材料である架橋高密度ポリエチレンについて、耐放射線性試験では 100 kGy までは引張り強度および延性に有意な変化は認められていない[41]. ただし、水/放射線環境下において取得された耐放射線試験データはないため、水/放射線環境下における引張り特性等の機械的特性変化データ (温度、線量率、線量依存性) の取得による HIC 健全性の再確認が必要である。なお、ポリエチレンの種類、製造方法、添加剤の種類・配合比により機械的特性の初期値や変化の程度が異なることが予想されるが、これらの情報は非公開のため、機械的特性変化データ取得においては注意が必要である。

平成 27 年 4 月 2 日、定期的実施している HIC の漏えい有無確認において、使用済セシウム吸着塔一時保管施設 (第二施設) のボックスカルバート内床面にたまり水が確認され、HIC 内の水が溢れ出たものと判断された。たまり水が確認された HIC の内容物は、増設多核種除去設備より発生した炭酸塩沈殿物スラリーであることが確認された[42]. この原因として、HIC 内で水が放射線分解されて水素等のガスが発生し、保管中に沈降して密度を増したスラリー内でガス成分が抜け切らずにスラリー一部の体積が膨張し、この結果、HIC 内の上澄みの水面が上昇して HIC 上部のベント孔から水が押し出されたと推定されている[43]. 増設多核種除去設備では前処理において鉄共沈処理が削除されているが、その結果炭酸塩スラリー中の核種濃度が上昇した事も要因の一つと考えられる。現在、スラリーの安定化処理 (脱水処理) について検討が進められている[44]ものの、スラリーを脱水してできるケーキの保管方法の検討状況は不明である。

4 結言

福島第一原子力発電所事故における汚染水処理二次廃棄物の長期保管のため、東京電力から発表されている情報をとりまとめ、長期保管に際する留意事項を整理した。本報告は、当該廃棄物の長期保管のための基盤情報の整備に資するものである。

謝辞

本研究の一部は、原子力規制委員会原子力規制庁受託事業「平成 27 年度原子力発電施設等安全技術対策委託費 (水処理二次廃棄物の管理基準等の検討) 事業」で実施したものである。また情報収集において城戸蓉子氏、橘真由美氏には多大な協力をいただいた。深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 東京電力株式会社: 福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 II 章 特定原子力施設的设计 (2012).
<http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/6019786/www.tepc>

- o.co.jp/cc/press/betu12_j/images/121207j0104.pdf
- [2] 東京電力株式会社：福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 II 特定原子力施設の設計、設備 2.5 汚染水処理設備等 (2016).
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu16_j/images/1/160129j0601.pdf
- [3] 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構，日本原子力研究開発機構：「汚染水処理に伴う二次廃棄物の長期保管方策の検討」－廃ゼオライト及び廃スラッジ保管の安全性－。廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議（第4回）（2014年3月27日）(2014).
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/20140327_02/140327_02_023.pdf
- [4] 日本原子力研究開発機構，東京電力株式会社：福島第一原子力発電所事故に係わる廃棄物処理・処分技術開発－平成24年度成果報告書－。JAEA-Review 2013-064 (2013).
- [5] 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構：平成26年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発）」中間報告（平成28年4月）(2016).
http://irid.or.jp/_pdf/201509to10_12.pdf?v=4
- [6] 東京電力株式会社：セシウム吸着装置改造工事及びビストロンチウム吸着塔導入に伴う実施計画変更について（平成26年9月26日）(2014).
<https://www.nsr.go.jp/data/000054744.pdf>
- [7] 東京電力株式会社：福島第一原子力発電所における高濃度の放射性物質を含むたまり水の貯蔵及び処理の状況について(第1報～第235報)(2016).
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/1106291.pdf
- [8] 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構：固体廃棄物の処理・処分に係る研究開発（平成26年5月29日）(2014).
http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2014/11/140529_10.pdf
- [9] 東京電力株式会社：除染装置（吸着塔）の設備概要（平成23年6月17日）(2011).
https://www4.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_110617_04-j.pdf
- [10] 三村均：高汚染水からのCsおよびSrの選択的分離および安定固化。日本保全学会 特別講演，仙台，平成25年5月16日(2013).
www.jsm.or.jp/branch/news/H25/pdf/news2-01.pdf
- [11] 池田昭：福島原発事故復興促進への化学工学の寄与福島第一原子力発電所汚染水処理の概要と今後の取組。化学工学会 第81年会，大阪，平成28年3月13～15日(2016).
http://www.scej.org/docs/act-eve/organization/org-fukushima/20160325_ikedaf.pdf
- [12] 東京電力株式会社：福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 II 特定原子力施設の設計、設備 2.16.1 多核種除去設備 (2015).
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu15_j/images/151102j0201.pdf
- [13] 東京電力株式会社：水処理設備、及び水処理二次廃棄物保管施設の概要について（平成25年7月2日）(2013).
<https://www.nsr.go.jp/data/000059589.pdf>
- [14] 東京電力株式会社：「福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画」の補正箇所－3 特定原子力施設の保安－ 第3編(保安に係る補足説明) 2.2 線量評価 (2016).
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu16_j/images/1/160204j0110.pdf
- [15] 東京電力株式会社：福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 II 特定原子力施設の設計、設備 2.16.2 増設多核種除去設備 (2016).
<http://www.tepco.co.jp/press/release/2016/pdf/160705j0103.pdf>
- [16] 東京電力株式会社：福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 II 特定原子力施設の設計、設備 2.16.3 高性能多核種除去設備(2014).
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu14_j/images/141118j0103.pdf
- [17] 東京電力株式会社，日立GEニュークリア・エナジー株式会社，株式会社東芝：高性能多核種除去設備整備実証事業の概要（2013年11月29日），高性能多核種除去設備タスクフォース（第1回）(2013).
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/131129/131129_03d.pdf
- [18] 東京電力株式会社，日立GEニュークリア・エナジー株式会社，株式会社東芝：高性能多核種除去設備の検討状況について～事業の成果～，高性能多核種除去設備タスクフォース（第6回）（平成27年3月30日）(2015).
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/koseinou_tusk/2015/pdf/150330_01c.pdf
- [19] 東京電力株式会社：高性能多核種除去設備吸着塔の仕様変更（材質追加）について（平成27年4月30日）(2015).
<https://www.nsr.go.jp/data/000106164.pdf>
- [20] 東京電力株式会社，日立GEニュークリア・エナジー株式会社，株式会社東芝：高性能多核種除去設備整備実証事業ラボ試験及び検証試験計画と進捗について（平成26年2月28日），高性能多核種除去設備タスクフォース（第2回）(2014).
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140228/140228_02d.pdf
- [21] 東京電力株式会社，日立GEニュークリア・エナジー株式会社，株式会社東芝：高性能多核種除去設備の検討状況について，高性能多核種除去設備タスクフォース（第6回）（平成27年3月30日）(2015).
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/koseinou_tusk/2015/pdf/150330_01d.pdf
- [22] 東京電力株式会社：福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 II 特定原子力施設の設計、設備 2.38 RO 濃縮水処理設備 (2015).

- http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu15_j/images/151117j0203.pdf
- [23] 東京電力株式会社：RO濃縮水処理設備設置に伴う実施計画申請の概要（平成26年10月23日）（2014）。
<https://www.nsr.go.jp/data/000054904.pdf>
- [24] 東京電力株式会社：福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 II 特定原子力施設の設計、設備 2.37 モバイル型ストロンチウム除去装置等（2015）。
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu15_j/images/150209j0506.pdf
- [25] 東京電力株式会社：「モバイル型ストロンチウム除去装置等」に係る実施計画の内容について（平成26年9月4日）（2014）。
<http://www.nsr.go.jp/data/000054641.pdf>
- [26] 東京電力株式会社：福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 II 特定原子力施設の設計、設備 2.39 第二モバイル型ストロンチウム除去装置等（2015）。
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu15_j/images/150209j0508.pdf
- [27] 東京電力株式会社：第二モバイル型ストロンチウム除去装置等の設置について（平成27年1月9日）（2015）。
<https://www.nsr.go.jp/data/000096850.pdf>
- [28] 東京電力株式会社：主トレンチ（海水配管トレンチ）内汚染水処理状況について（平成26年3月27日）、廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議（第4回）（2014）。
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/20140327_02/140327_02_035.pdf
- [29] 東京電力株式会社：モバイル式処理設備の実実施計画の補足説明（平成25年10月10日）（2013）。
<https://www.nsr.go.jp/data/000060211.pdf>
- [30] 佐藤博之 他：廃ゼオライトの長期保管方策の検討ーゼオライト吸着塔を用いた塩分洗浄挙動評価（第1報）ー。JAEA-Research 2013-042（2013）。
- [31] 佐藤博之 他：廃ゼオライトの長期保管方策の検討（5）廃ゼオライト吸着塔の実機流量塩分洗浄試験，日本原子力学会 2014年春の年会，東京，3月26～28日，H24（2014）。
- [32] 下平三郎：腐食・防食の材料科学，アグネ技術センター，東京，（1999）。
- [33] 加藤千明 他：ガンマ線照射下における希釈海水を含むゼオライト中ステンレス鋼の局部腐食挙動，日本原子力学会和文論文誌 **14(3)**，181-188（2015）。
- [34] 杉崎康昭，泊里治夫：製塩装置材料としてのチタンの耐食特性。日本海水学会誌 **48(4)**，273-280（1994）。
- [35] 水使用ステンレス熱交換器使用実績データ処理分科会，多管式ステンレス鋼製熱交換器の冷却水による応力腐食割れ，防食技術，Vol. 29, No. 7,（1980）。
- [36] 東京電力ホールディングス株式会社：実施計画【2.16.3 高性能多核種除去設備吸着塔の仕様変更（材質追加）】の実実施計画変更に係る説明について（平成28年6月3日）（2016）。
<https://www.nsr.go.jp/data/000153492.pdf>
- [37] Shintani, H.: Study on radiation sterilization-resistant polysulfones fabricated free from Bisphenol A. *Trends Biomater. Artif. Organs.* **18 (1)**, 36-40（2004）。
- [38] Matsui, T. et al.: Degradation of crosslinked polyethylene in water by gamma-irradiation. *Radiat. Phys. Chem.* **63**, 193-200（2002）。
- [39] 東京電力株式会社：使用済セシウム吸着塔一時保管施設（第三施設）の設置について（平成26年5月2日），特定原子力施設監視・評価検討会（第21回）（2016）。
<http://www.nsr.go.jp/data/000051083.pdf>
- [40] 東京電力株式会社：第2回意見聴取会「多核種除去設備・地下貯水槽・地下水バイパス等」に対する委員等からのコメントへの回答（平成24年9月5日），「第3回東京電力福島第一原子力発電所における中期的な安全確保及び信頼性向上に係る意見聴取会」別添資料（2012）。
<http://www.tepco.co.jp/cc/direct/images/120905b.pdf>
- [41] 東京電力株式会社：多核種除去設備の運転開始に当たっての安全性評価（平成25年1月24日），特定原子力施設監視・評価検討会（第2回）（2013）。
<https://www.nsr.go.jp/data/000050821.pdf>
- [42] 東京電力株式会社：ボックスカルバート内の高性能容器蓋外周部のたまり水について（平成27年4月22日），特定原子力施設監視・評価検討会（第34回）（2015）。
<https://www.nsr.go.jp/data/000104664.pdf>
- [43] 東京電力株式会社：HIC上のたまり水発生の原因と対策の検討・実施状況（平成27年12月4日），特定原子力施設・放射性廃棄物規制検討会（第1回）（2015）。
<https://www.nsr.go.jp/data/000132073.pdf>
- [44] 東京電力株式会社 福島第一原子力発電所の最近の状況（平成27年7月29日）（2015）。
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/images/c150729_03-j.pdf