

平成 26 年度

事故プラント廃棄物に係る規制基準の整備委託費

(水処理二次廃棄物の管理基準等の検討) 事業

報 告 書

平成 27 年 3 月

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

## 目次

	頁
1. はじめに .....	1
2. 水処理二次廃棄物保管容器の劣化等に関する技術要件の抽出及び整理 .....	3
2.1 水処理二次廃棄物保管容器の情報整理 .....	3
2.1.1 セシウム吸着装置 (KURION) .....	3
2.1.2 第二セシウム吸着装置 (SARRY) .....	5
2.1.3 モバイル式処理装置 .....	8
2.1.4 モバイル型ストロンチウム除去装置 .....	10
2.1.5 多核種除去設備 .....	13
2.1.6 高性能多核種除去設備 .....	17
2.1.7 水処理二次廃棄物の保管量について .....	19
2.1.8 汚染水に含まれる塩化物イオンについて .....	20
2.1.9 放射性物質の吸着量について .....	22
第 2.1 章 参考文献 .....	23
2.2 ステンレス鋼及びポリエチレンの劣化等に関する既往の 研究成果・知見の整理 .....	24
2.2.1 ステンレス鋼の劣化等に関する既往の研究成果・知見の整理 .....	24
2.2.2 ポリエチレンの劣化等に関する既往の研究成果・知見の整理 .....	29
第 2.2 章 参考文献 .....	44
2.3 実環境を想定したステンレス鋼の腐食試験の計画立案 .....	49
2.4 ステンレス鋼の腐食に関する解析コードの調査及び概念の構築 .....	51
第 2.3、2.4 章 参考文献 .....	58
3. まとめ .....	59
付録	

## 図目次

	頁
図 2.1-1 汚染水処理経路の概要図	3
図 2.1-2 セシウム除去装置 (KURION) の吸着塔外形図及び概要図	4
図 2.1-3 セシウム吸着装置 (KURION) 処理系統の概要図	4
図 2.1-4 セシウム吸着装置 (KURION) 吸着塔保管状況	5
図 2.1-5 ボックスカルバート内のセシウム吸着装置吸着塔の温度分布	5
図 2.1-6 第二セシウム吸着装置 (SARRY) 吸着塔の概要図	6
図 2.1-7 第二セシウム吸着装置 (SARRY) 処理系統の概要図	7
図 2.1-8 第二セシウム吸着装置 (SARRY) 吸着塔保管状況	7
図 2.1-9 第二セシウム吸着装置 (SARRY) 吸着塔の温度分布	8
図 2.1-10 モバイル式処理装置の処理系統の概要図	8
図 2.1-11 モバイル式処理装置の吸着塔外形図及び概要図	9
図 2.1-12 モバイル式処理装置の吸着塔保管状況	9
図 2.1-13 モバイル型ストロンチウム除去装置の系統構成図	10
図 2.1-14 モバイル型ストロンチウム除去装置のフィルタ・吸着塔の概念図	12
図 2.1-15 多核種除去設備の処理系統の概要図	13
図 2.1-16 多核種除去設備の処理カラムの概要図	14
図 2.1-17 多核種除去設備の処理カラムの保管状況	14
図 2.1-18 多核種除去設備の HIC の概要図	15
図 2.1-19 多核種除去設備の HIC 補強体の概要図	16
図 2.1-20 多核種除去設備の HIC 保管状況	16
図 2.1-21 高性能多核種除去設備多核種吸着塔の概要図	17
図 2.1-22 高性能多核種除去設備 多核種吸着塔保管状況	18
図 2.1-23 多核種吸着塔の温度分布	18
図 2.1-24 水処理二次廃棄物保管量の推移	19
図 2.1-25 淡水化処理前汚染水に含まれる塩化物イオン濃度の変化	20
図 2.1-26 KURION 及び、SARRY 吸着塔一本当たりの $^{137}\text{Cs}$ 吸着量	22
図 2.2-1 吸着塔内部で懸念される腐食の概要図	25
図 2.2-2 自然浸漬電位 ( $E_{ocp}$ ) の経時変化に及ぼす $\gamma$ 線照射 (400 Gy/h) と ゼオライト共存の影響	26
図 2.2-3 定常浸漬電位 ( $E_{sp}$ ) に及ぼす $\gamma$ 線量率とゼオライト共存の影響	26
図 2.2-4 ゼオライト共存環境における SUS316L の孔食発生電位 ( $V'_{C100}$ ) と 塩素イオン濃度の関係	27
図 2.2-5 60°C 大気飽和希釈海中におけるゼオライト (Herschelite) 共存環境 における SUS316L の孔食発生線図	27
図 2.2-6 ステンレス鋼熱交のチューブ材質と SCC 境界線との関係	28
図 2.2-7 温度と塩化物イオン濃度によるすき間腐食発生領域	28
図 2.2-8 ポリエチレンの合成スキーム	29
図 2.2-9 ポリエチレンの放射線劣化における反応メカニズム	30
図 2.2-10 線量率がポリエチレンの放射線酸化に及ぼす影響の概念図	31
図 2.2-11 プラスチック材料の引張り試験において得られる	

応力-ひずみ曲線の例	32
図 2.2-12 ポリエチレンの放射線劣化に及ぼす種類、製造方法の影響	32
図 2.2-13 ポリエチレンの放射線劣化に及ぼす添加剤(酸化防止剤)の影響	33
図 2.2-14 ポリエチレンの放射線劣化に及ぼす照射雰囲気の影響	34
図 2.2-15 ポリエチレンの放射線劣化に及ぼす照射温度の影響(空气中)	35
図 2.2-16 ポリエチレンの放射線劣化に及ぼす線量率、酸素濃度(分圧)の影響	36
図 2.2-17 ポリエチレンの放射線劣化に及ぼす水の影響	37
図 2.2-18 HIC 用ポリエチレンについて実施された耐放射線性 試験結果(引張り特性)	39
図 2.3-1 浸漬試験概要図	49
図 2.3-2 U ベンド試験片の形状例	50
図 2.3-3 すき間腐食試験片の形状例	50
図 2.4-1 ステンレス鋼製キャニスタの応力腐食割れに関する感度解析コード CANBEY1 の構成	51
図 2.4-2 ステンレス鋼製キャニスタの応力腐食割れ計算コード canisterSCC のフロー図	52
図 2.4-3 CRANP の計算フロー	55
図 2.4-4 PASCAL-NP のフロー	56
図 2.4-5 容器内部残留水の蒸発状態解析コードの概念図	57



## 表目次

	頁
表 2.1-1 セシウム吸着装置 (KURION) 吸着塔の構造及び材質 .....	4
表 2.1-2 第二セシウム吸着装置 (SARRY) 吸着塔の構造及び材質 .....	6
表 2.1-3 モバイル式処理装置吸着塔の構造及び材質 .....	9
表 2.1-4 SS フィルタの構造及び材質 .....	11
表 2.1-5 ウルトラフィルタの構造及び材質 .....	11
表 2.1-6 吸着塔の構造及び材質 .....	11
表 2.1-7 モバイル型ストロンチウム除去装置のフィルタ・吸着塔の吸着量、 最大表面線量率および最高温度 .....	13
表 2.1-8 HIC の構造及び材質 .....	15
表 2.1-9 高性能多核種除去設備吸着塔の材質及び構造 .....	17
表 2.1-10 水処理二次廃棄物保管量 .....	19
表 2.1-11 RO 濃縮水水質分析結果 .....	21
表 2.1-12 多核種除去設備における汚染水の状況 .....	21
表 2.1-13 高性能多核種除去設備における汚染水の状況 .....	21
表 2.2-1 工業分野で一般的に使用されるポリエチレンの分類例 .....	30
表 2.2-2 米国における高性能容器の主な認可要件 .....	38
表 2.2-3 HIC 用ポリエチレンの材料特性 .....	40
表 2.2-4 HIC 用ポリエチレンに対して実施された耐放射線性試験とその結果 .....	41
表 2.2-5 ポリエチレンの放射線劣化に関する研究における 試験条件・評価項目の比較 .....	41

## 1. はじめに

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。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、保管容器に一時的に保管する可能性があることから、その安全性について把握しておく必要がある。

当該廃棄物の処理及び処分が行われるまでの長期的な保管の可能性を考慮し、水処理二次廃棄物保管容器の材質であるステンレス鋼の腐食、ポリエチレンの劣化等の可能性を洗い出し、監視すべきポイント、講ずるべき措置、腐食評価の判断基準のための技術的知見を蓄積することを目的とする。

本件は原子力規制庁の「平成 26 年度事故プラント廃棄物に係る規制基準の整備委託費（水処理二次廃棄物の管理基準等の検討）事業」において、水処理二次廃棄物保管容器の長期的な保管における腐食及び劣化について、規制のための技術要件を抽出及び整理し、報告書として取りまとめるものである。

## 2 水処理二次廃棄物保管容器の劣化等に関する技術要件の抽出及び整理

### 2.1 水処理二次廃棄物保管容器の情報整理

水処理二次廃棄物保管容器及び付属装置の部位ごとの材質、設計、保管状況、保管容器の内部及び外部の環境条件、吸着材の仕様等について情報を抽出・整理した。汚染水の処理経路概要図を図 2.1-1 に示す。対象とする水処理二次廃棄物保管容器は、①セシウム吸着装置（KURION）の吸着塔、②第二セシウム吸着装置（SARRY）の吸着塔、③モバイル式処理装置の吸着塔、④モバイル型ストロンチウム除去装置の浮遊物質（Suspended Solid：略称 SS）フィルタ・ウルトラフィルタ・吸着塔、⑤多核種除去設備の処理カラム、高性能容器（HIC：High Integrity Container）及び⑥高性能多核種除去設備の吸着塔とした。

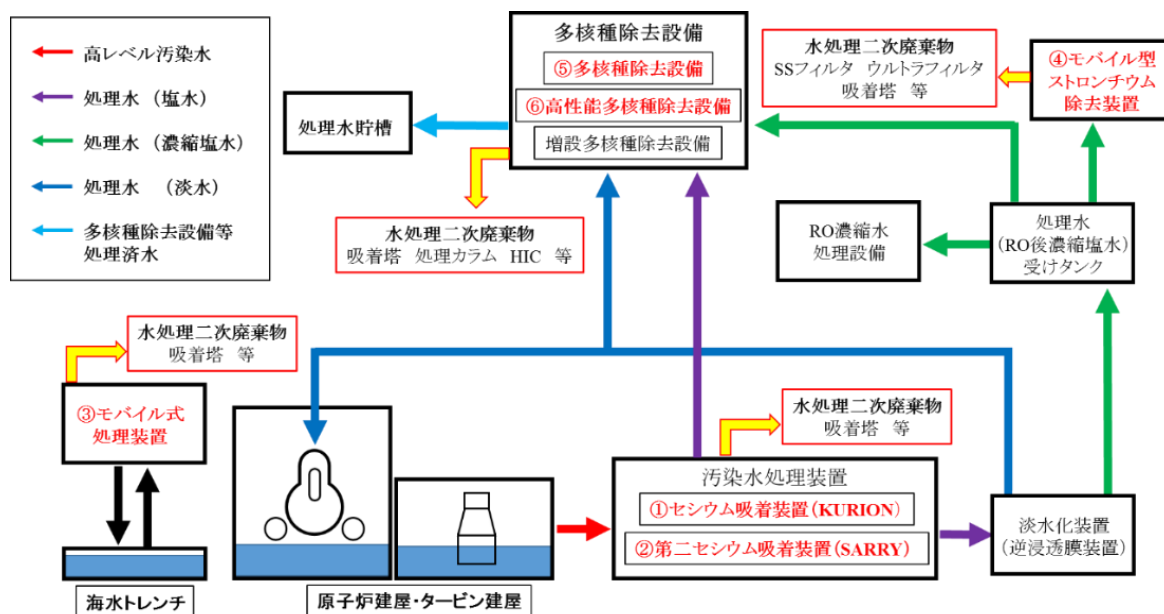


図 2.1-1 汚染水処理経路の概要図

#### 2.1.1 セシウム吸着装置（KURION）

セシウム吸着装置（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セシウム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（1ヵ月あたり6本程度）。吸着塔はスキッド（円筒形の吸着塔4本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<sup>(1)</sup>。

##### (1) KURION 吸着塔の材質及び構造

KURION の吸着塔は、重量約 15 トン、外径約 1.4m、高さ約 2.4m の円筒形容器で、内部にゼオライトを充填したステンレス製の容器を、炭素鋼製の遮へい容器が覆う二重構造となっている。構造及び材質を表 2.1-1<sup>(2)</sup>に示すと共に、また吸着塔の概要図を図 2.1-2 に示す<sup>(1)</sup>。

表 2.1-1 セシウム吸着除去（KURION）吸着塔の構造及び材質<sup>(2)</sup>

種類		縦置き円筒型	
寸法	胴外径	914.4	mm
	胴板厚さ	9.5	mm
	上部鏡板厚さ	50.8	mm
	下部鏡板厚さ	50.8	mm
	高さ	2119.3	mm
材質	胴板厚さ	ASME SA-240 TYPE 316/316L	
	鏡板	ASME SA-240 TYPE 316/316L	
	鏡板	ASME SA-240 TYPE 316/316L	

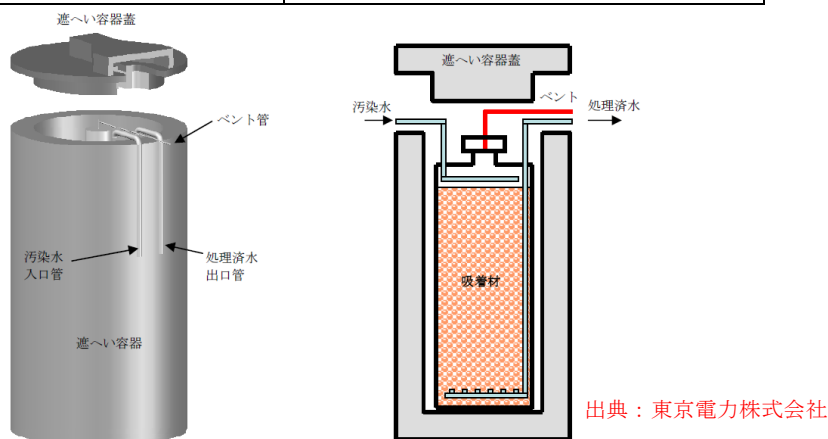


図 2.1-2 セシウム吸着装置（KURION）の吸着塔外形図及び概要図<sup>(1)</sup>

### (2) 吸着材の仕様

吸着塔は汚染水を以下に示す 3 種類の吸着材を充填した吸着塔に通すことでそれぞれの汚染物質を除去している。また図 2.1-3 に KURION の処理系統の概要図を示す。

- ・ SMZ (Surfactant modified zeolite、表面改質したゼオライト) : 油分、Tc を除去。
- ・ H (Herschelite、チャバサイト種のゼオライト)\* : Cs を除去。
- ・ AGH (Ag impregnated herschlite、銀を添加した Herschelite) : I を除去。

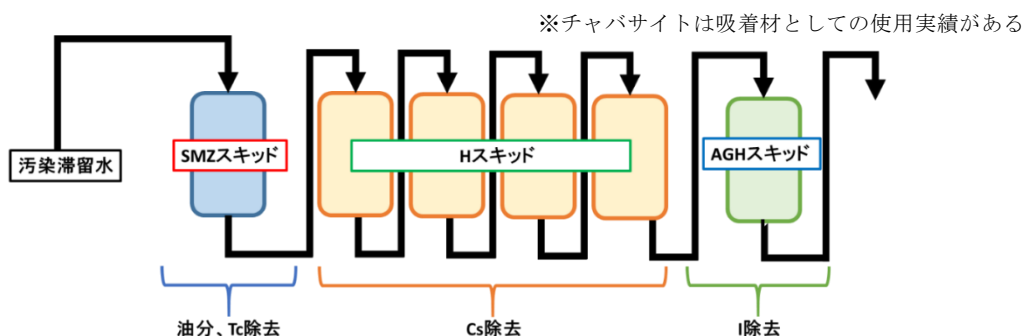


図 2.1-3 セシウム吸着装置（KURION）処理系統の概要図

### (3) 吸着塔保管状況

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。保管状況の外観を図 2.1-4 に示す。



図 2.1-4 セシウム吸着装置（KURION）吸着塔保管状況

保管される吸着塔は吸着した Cs の崩壊熱により内部より発熱するが、発生する崩壊熱は対流、輻射、伝導により大気へ放出されるよう設計されている。解析コードを用いた評価では、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 の際のセシウム吸着 ( $2 \times 10^{15}$ Bq/塔) による発熱量に相当する 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（コンクリート製ボックスカルバート内壁と考えられる）の最高温度は約 62°C と評価されている<sup>(1)</sup>。評価結果を図 2.1-5 に示す<sup>(1)</sup>。そのため吸着塔内での発熱はゼオライトの健全性（吸着材は 600°C 程度までは安定でセシウムは吸着材から離脱しない）や鉄の遮へい性能に影響を与えるものではないと考えられる<sup>(1)</sup>。

使用済の吸着塔は内部の水抜きを行い保管されているが、構造上すべての水を抜くことはできず内部に残留水が存在しており、海水由来の塩化物イオンが残存していると予想される。また、残留水が放射線分解することにより水素の発生が懸念されているため、保管中はベントを空けた状態で保管することにより可燃性ガスを大気へ放出する設計となっている。

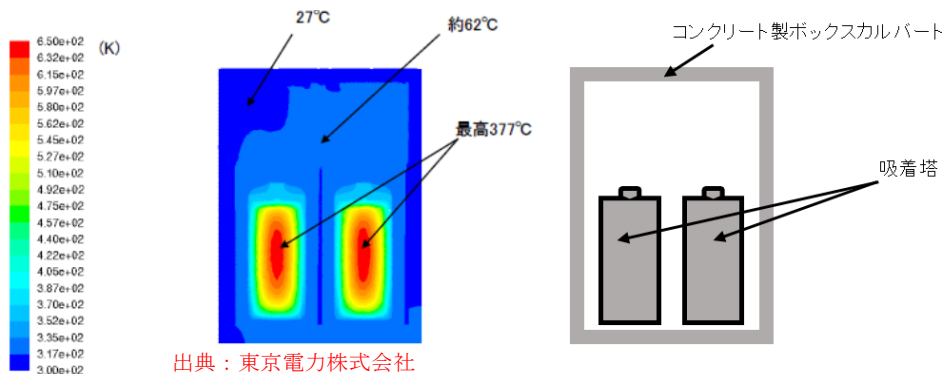


図 2.1-5 ボックスカルバート内のセシウム吸着装置吸着塔の温度分布<sup>(1)</sup>

## 2.1.2 第二セシウム吸着装置（SARRY）

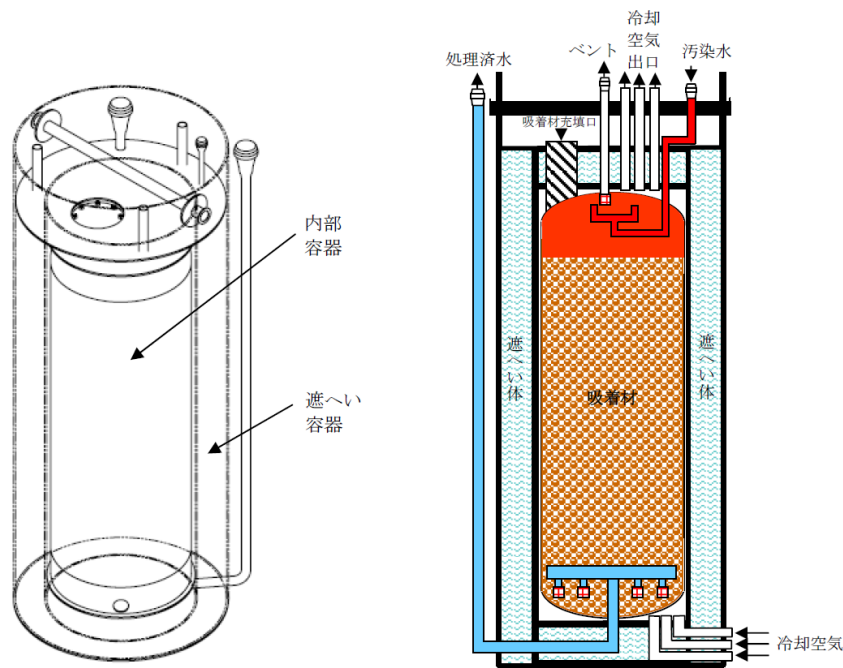
第二セシウム吸着装置（SARRY）は吸着塔内部に充填された吸着材のイオン交換作用により、原子炉建屋・タービン建屋内から排出される汚染水に含まれるセシウム等の核種を除去する装置である。汚染水処理に伴い水処理二次廃棄物として、吸着塔が発生する（1ヵ月あたり 10 本程度）。吸着塔は表面の線量当量率が 4mSv/h 程度になると交換される。

(1) SARRY 吸着塔の材質及び構造

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、遮へい容器は二重構造となっておりアニュラス部に鉛を充填している。構造及び材質を表 2.1-2 に示すと共に、吸着塔の概要図を図 2.1-6 に示す<sup>(1)</sup>。

表 2.1-2 第二セシウム吸着装置 (SARRY) 吸着塔の構造及び材質<sup>(1)</sup>

種類		縦置き円筒型	
寸法	胴外径	914.4	mm
	胴板厚さ	12	mm
	上部鏡板厚さ	-	mm
	下部鏡板厚さ	-	mm
	高さ	-	mm
材質	胴板	SUS316L	



出典：東京電力株式会社

図 2.1-6 第二セシウム吸着装置 (SARRY) 吸着塔の概要図<sup>(1)</sup>

(2) 吸着材の仕様

吸着塔は汚染水を以下に示す種類の吸着材を充填した吸着塔に通すことでそれぞれの汚染物質を除去している。また、図 2.1-7 に SARRY の処理系統の概要図を示す。

- ・クリノプチロライト : 固形分を除去する。
- ・チャバサイト : Cs を除去する。
- ・チタンケイ酸塩 : Cs を除去する。

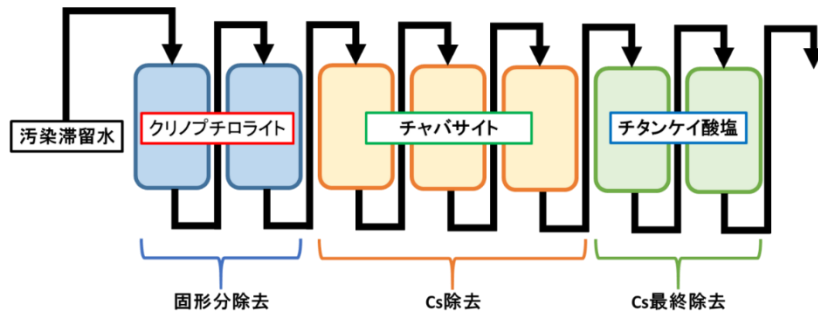


図 2.1-7 第二セシウム吸着装置（SARRY）処理系統の概要図

### (3) 吸着塔保管状況

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て架台（ラック）に設置され保管される。保管状況の外観を図 2.1-8 に示す。



図 2.1-8 第二セシウム吸着装置（SARRY）吸着塔保管状況

吸着塔は図 2.1-6に示すように鉛遮へい体に覆われた状態で保管されている。吸着したCsの崩壊熱により内部より発熱するが遮へい体上下には配管があり、内部空気温度が上昇して対流が発生することで外気が下部の入口配管から流入し、上部の出口配管から排出される構造により温度の上昇を防いでいる。

解析コードを用いた評価では、セシウム吸着量を  $6 \times 10^{15}$  Bq/塔、外気温度を  $40^{\circ}\text{C}$  と仮定した場合、大気への放熱が定常になる際の吸着塔中心部温度は約  $450^{\circ}\text{C}$  と評価されている<sup>(1)</sup>。解析コードを用いた計算による温度分布を図 2.1-9 に示す<sup>(1)</sup>。そのため吸着塔内での発熱はゼオライトの健全性(吸着材は  $600^{\circ}\text{C}$  程度までは安定でセシウムは吸着材から離脱しない)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<sup>(1)</sup>。使用済の吸着塔は内部の水抜きを行い保管されているが、構造上すべての水を抜くことはできず内部に残留水が存在しており、海水由来の塩化物イオンが残存していると予想される。

また、残留水が放射線分解することにより水素の発生が懸念されているため、保管中はベントを空けた状態で保管することにより可燃性ガスを大気に放出する設計となっている。



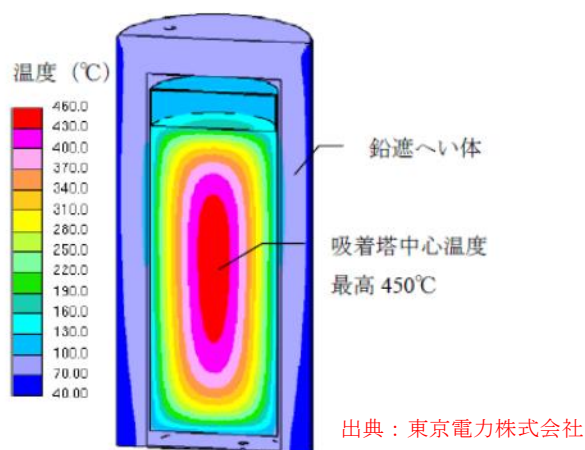


図 2.1-9 第二セシウム吸着装置 (SARRY) 吸着塔の温度分布<sup>(1)</sup>

### 2.1.3 モバイル式処理装置

モバイル式処理装置は、2号機及び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等の目的で設置された設備である。モバイル式処理装置は海水配管トレンチ内の滞留水を海側立坑等から汲み上げ、セシウム等の放射性核種を除去した後、山側立坑またはタービン建屋等へ移送している。モバイル式処理装置の処理系統の概要図<sup>(3)</sup>を図 2.1-10 に示す。

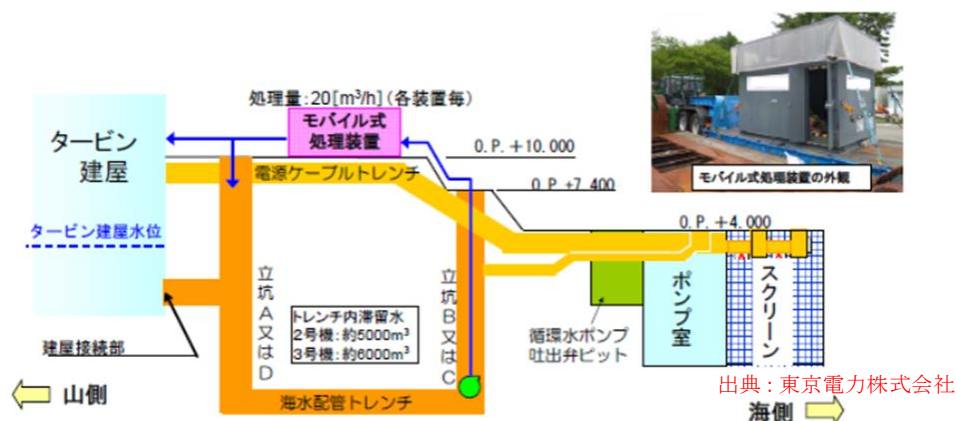


図 2.1-10 モバイル式処理装置の処理系統の概要図<sup>(3)</sup>

モバイル式処理装置は吸着塔により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セシウム及びストロンチウムの放射性核種を除去している。吸着塔表面線量等により吸着塔を交換するため、交換された使用済吸着塔が水処理二次廃棄物として発生する。

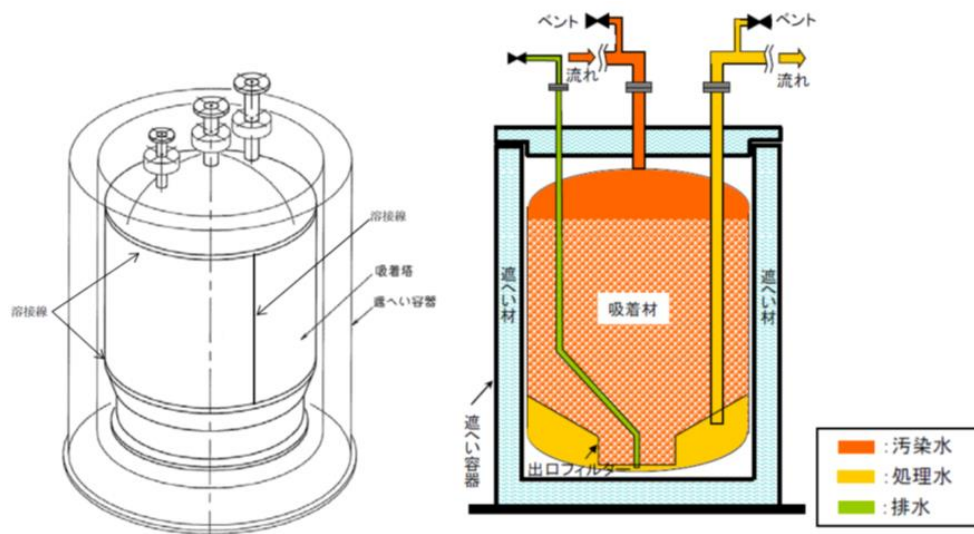
#### (1) 材質及び構造

モバイル式処理装置で使用する吸着塔は円筒形容器で、内部にゼオライト等を充填したステンレス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。構造及び材質を表 2.1-3 に示すと共に、吸着塔の概要図<sup>(1)</sup>を図 2.1-11 に示す。



表 2.1-3 モバイル式処理装置吸着塔の構造及び材質<sup>(1)</sup>

種類		縦置き円筒型	
寸法	胴外径	1,020	mm
	胴板厚さ	10	mm
	上部鏡板厚さ	-	mm
	下部鏡板厚さ	-	mm
	高さ	-	mm
材質	胴板	SUS316L	

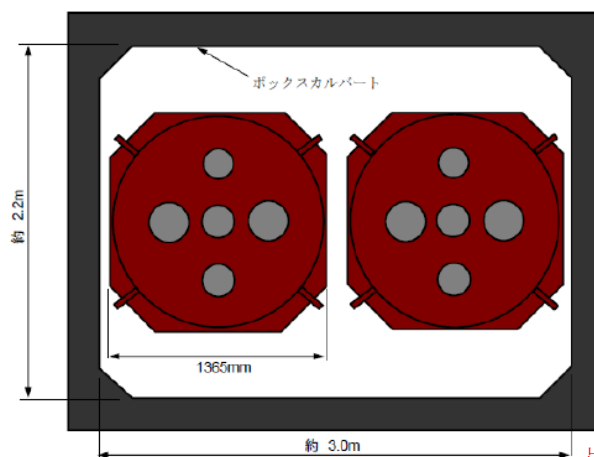


出典：東京電力株式会社

図 2.1-11 モバイル式処理装置の吸着塔外形図及び概要図<sup>(1)</sup>

## (2) 保管状況

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及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貯蔵する。なお、吸着塔は各ボックスカルバート内に2塔ずつ貯蔵される。保管状況<sup>(1)</sup>を図 2.1-12 に示す。



出典：東京電力株式会社

図 2.1-12 モバイル式処理装置の吸着塔保管状況<sup>(1)</sup>

保管される吸着塔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が、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℃ とすると塔あたりの発熱量が約  $2.3 \times 10^2 \text{W}$  の場合、吸着塔中心温度は約 160℃、遮へい体（コンクリート製ボックスカルバート内壁と考えられる）の最高温度は約 65℃ と評価されている<sup>(1)</sup>。

## 2.1.4 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は、逆浸透膜装置(Reverse Osmosis)の廃液（RO 濃縮水）に含まれている高濃度の放射性ストロンチウムを低減させる装置である。モバイル型ストロンチウム除去装置は、供給／混合スキッド、SS フィルタスキッド、ウルトラフィルタスキッド、吸着塔スキッド、計装制御スキッドで構成されている。モバイル型ストロンチウム除去装置の系統構成図<sup>(4)</sup>を図 2.1-13 に示す。

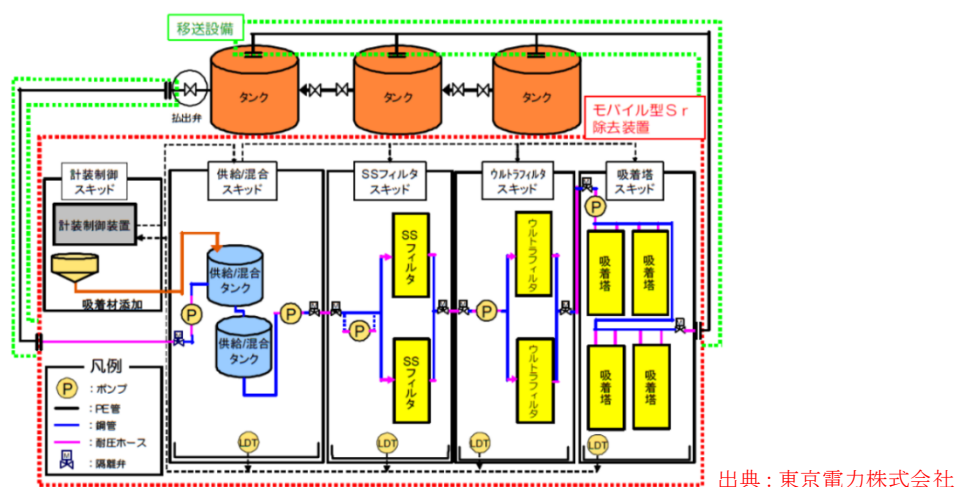


図 2.1-13 モバイル型ストロンチウム除去装置の系統構成図<sup>(4)</sup>

モバイル型ストロンチウム除去装置はまず、供給／混合スキッドで汚染水に吸着材粒子を添加・混合させてイオン状ストロンチウム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イオン状ストロンチウムを吸着した吸着材粒子及び汚染水に含まれる粒子状ストロンチウムを除去する。さらに SS フィルタで除去されなかった微粒子状ストロンチウム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吸着材を充填した多段の吸着塔に通水することによりイオン状ストロンチウムを除去している。汚染水処理に伴い SS フィルタ、ウルトラフィルタ及び吸着塔が水処理二次廃棄物として発生する。

### (1) 材質及び構造

モバイル型ストロンチウム除去装置で使用されている SS フィルタ及びウルトラフィルタはステンレス鋼製のフィルタハウジングに收容されている。さらにフィルタハウジングは炭素鋼製のライナーに收容されており、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。SS フィルタ、ウルトラフィルタ及び吸着塔について、材質及び構造を下記に示す。またそれぞれの構造の概念図<sup>(4)</sup>を図 2.1-14 に示す。

・SS フィルタ<sup>(4)(5)</sup>

フィルタ材質 : ポリプロピレン (PP)  
 フィルタ孔径 : 2.0 $\mu$ m (絶対ろ過精度)

表 2.1-4 SS フィルタの構造及び材質

種類		縦置き円筒型	
寸法	胴外径	558.8	mm
	胴板厚さ	6.4	mm
	上部鏡板厚さ	6.4	mm
	下部鏡板厚さ	6.4	mm
	高さ	1260.5	mm
材質	胴板	ASME SA-312 TP 316L	
	鏡板	ASME SA-240 TYPE 316L	

・ウルトラフィルタ<sup>(4)(5)</sup>

フィルタ材質 : ポリエーテルサルフォン (PES)  
 フィルタ孔径 : 10,000Da (約 3~4nm 程度)

表 2.1-5 ウルトラフィルタの構造及び材質

種類		縦置き円筒型	
寸法	胴外径	219.1	mm
	胴板厚さ	3.8	mm
	上部鏡板厚さ	3.8	mm
	下部鏡板厚さ	3.8	mm
	高さ	1219.2	mm
材質	胴板	ASME SA-312 TP316L	
	鏡板	ASME SA-403 WP316L	

・吸着塔<sup>(4)(5)</sup>

吸着材材質 : ケイチタン酸塩

表 2.1-6 吸着塔の構造及び材質

種類		縦置き円筒型	
寸法	胴外径	914.4	mm
	胴板厚さ	9.5	mm
	上部鏡板厚さ	50.8	mm
	下部鏡板厚さ	50.8	mm
	高さ	2119.3	mm
材質	胴板厚さ	ASME SA-240 TYPE 316/316L	
	鏡板	ASME SA-240 TYPE 316/316L	
	鏡板	ASME SA-240 TYPE 316/316L	

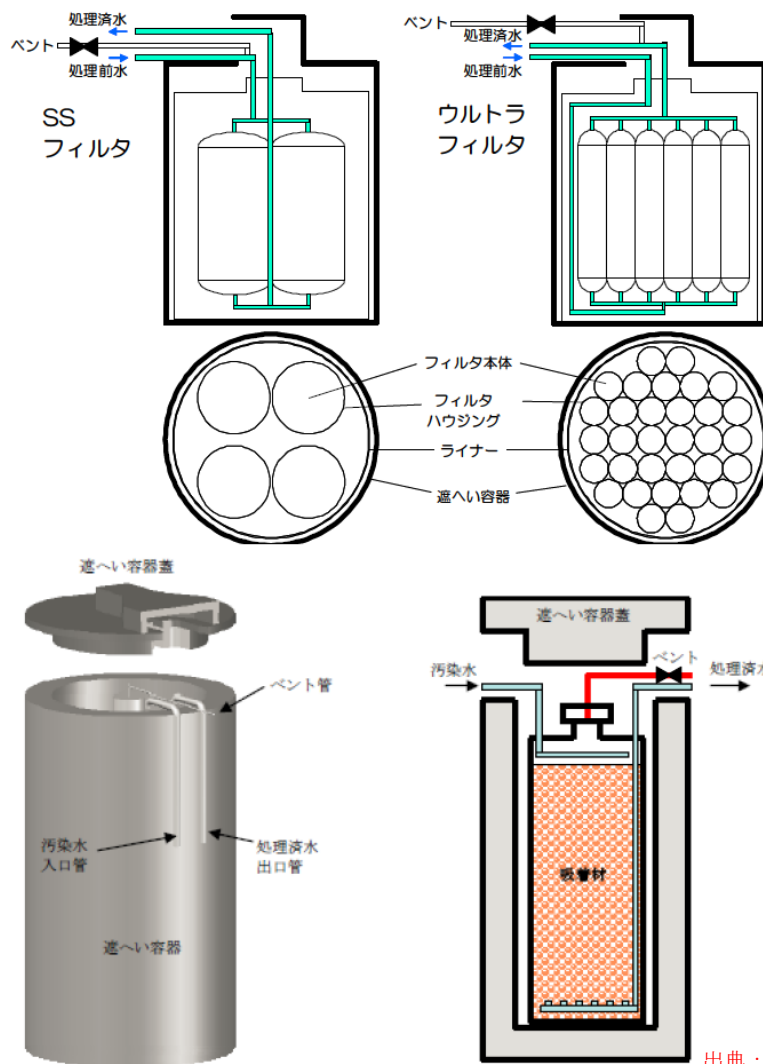


図 2.1-14 モバイル型ストロンチウム除去装置のフィルタ・吸着塔の概念図<sup>(4)</sup>

## (2) 保管状況

使用済のSSフィルタ、ウルトラフィルタ及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仮保管施設等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及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貯蔵・保管される。使用済フィルタ及び吸着塔の貯蔵時において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ことが予想される。使用済フィルタ・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、その結果SSフィルタ、ウルトラフィルタ及び吸着塔をコンクリート製ボックスカルバート内に貯蔵した場合の最高温度はそれぞれ112℃、120℃、143℃と想定される<sup>(4)</sup>。

モバイル型ストロンチウム除去装置のフィルタ・吸着塔の吸着量、最大表面線量率及び最高温度<sup>(4)</sup>を表2.1-7に示す。

表 2.1-7 モバイル型ストロンチウム除去装置のフィルタ・吸着塔の吸着量、最大表面線量率及び最高温度<sup>(4)</sup>

機器名称	捕捉・吸着 主要核種	捕捉・吸着量 (Bq/体) <sup>※1</sup>	最大表面線量率 (mSv/h) <sup>※2</sup>	最大表面線量率 (mSv/h) <sup>※3</sup>	最高温度 (°C) <sup>※4</sup>	耐熱温度 (°C)
SSフィルタ	Sr-90	$2.4 \times 10^{14}$	2.0	5.0	112	121
ウルトラフィルタ	Sr-90	$5.2 \times 10^{14}$	5.0	10.1	120	200
吸着塔	Cs-134 Cs-137 Sr-90	$5.2 \times 10^9$ $9.1 \times 10^9$ $1.7 \times 10^{14}$	5.0	7.4	143	200

※1 捕捉・吸着する主要核種の放射性濃度(処理対象水中の放射能濃度を高めに設定し、主要核種が各フィルタ・吸着塔に偏って捕捉・吸着された場合を想定した保守的な設定値)

※2 水抜き前の表面線量

※3 貯蔵時を想定した水抜き後の表面線量率

※4 貯蔵時を想定したコンクリート製ボックスカルパート内での夏場の最高温度

使用済フィルタ・吸着塔はエアブロー等により水抜きして貯蔵されているが、使用済フィルタ・吸着塔内部にもある程度の塩化物イオンが残留していると考えられる。また内部に残留した水が放射線分解することにより可燃性ガスが発生する可能性があるため、使用済SSフィルタ、及びウルトラフィルタは煙突効果による処理水の入口及び出口からの排気と給気により発生する可燃性ガスの濃度が可燃限界を超えない設計となっている。使用済吸着塔は処理水の入口、出口及びベント弁を開放し発生する可燃性ガスの濃度が可燃限界を超えない設計となっている。

### 2.1.5 多核種除去設備

多核種除去設備は、KURIONやSARRY等の汚染水処理設備で処理した後の、処理済水に含まれる放射性物質（トリチウムを除く）を十分低い濃度になるまで除去する事を目的としている。多核種除去設備は14塔の吸着塔及び2塔の処理カラムで構成されており、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）の種類が異なり、処理対象水に含まれるコロイド状及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。吸着塔に含まれる吸着材は所定の容量を通水した後、高性能容器（HIC：High Integrity Container）にて保管されるが、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（年間6体程度発生）。図 2.1-15に多核種除去設備の処理系統の概要図を示す。

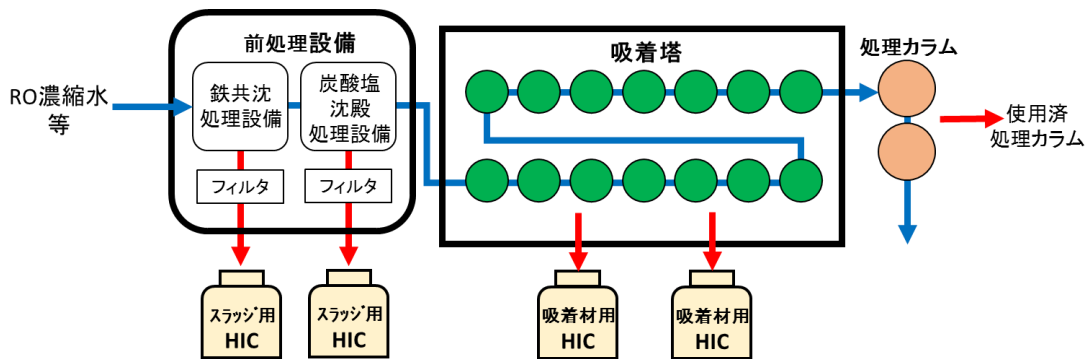
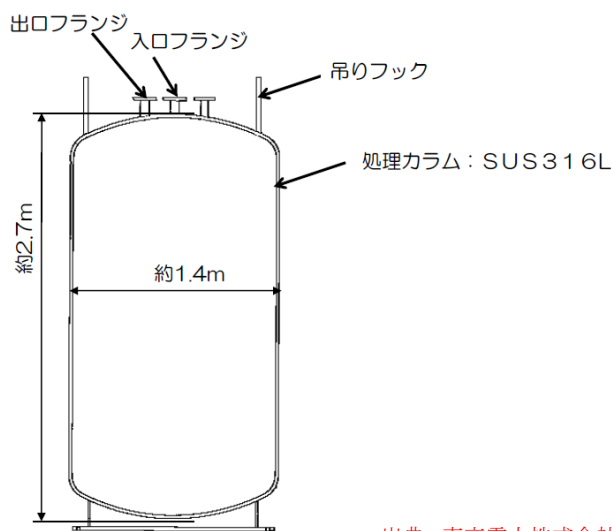


図 2.1-15 多核種除去設備の処理系統の概要図

### (1) 処理カラムの仕様及び保管状況

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。処理カラムの概要図<sup>(6)</sup>を図 2.1-16 に示す。



出典：東京電力株式会社

図 2.1-16 多核種除去設備の処理カラムの概要図<sup>(6)</sup>

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（ラック）に設置され保管される。保管状況の外観を図 2.1-17 に示す。

保管されている処理カラムは含まれる放射性物質の濃度が低く、容器内部から発生する崩壊熱は容器の健全性に影響を与えないと考えられている<sup>(7)</sup>。保管されている高性能容器及び処理カラムの中で、最も発熱量が大きいストロンチウム吸着材を収容する高性能容器の貯蔵時においても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。また使用後の処理カラムは水抜きして貯蔵されているが、保管される処理カラム内部にもある程度の塩化物イオンを含んだ水が残留していると考えられる。

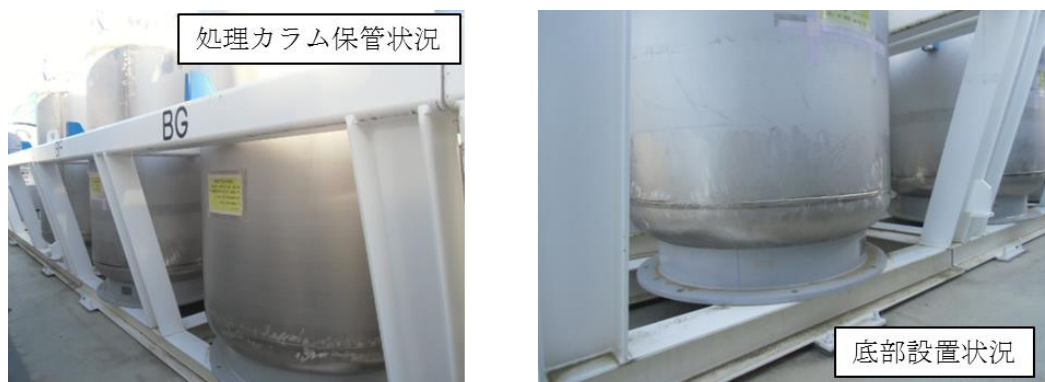


図 2.1-17 多核種除去設備の処理カラムの保管状況



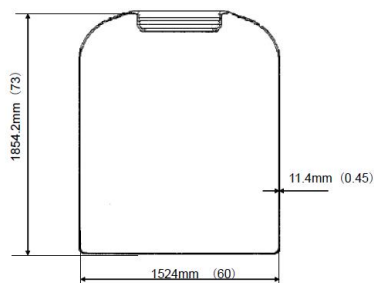
## (2) 高性能容器（HIC）の仕様及び保管状況

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、材質として使用されるポリエチレンは架橋ポリエチレンである。多核種除去設備において使用済の吸着材および沈殿処理生成物が收容される<sup>(7)</sup>。吸着材には活性炭、チタン酸塩、フェロシアン化合物、銀添着活性炭、酸化チタン、キレート樹脂が用いられ、それぞれコロイド、ストロンチウム(Sr)、セシウム(Cs)、ヨウ素(I)、アンチモン(Sb)、コバルト(Co)が吸着されている。吸着材は脱水処理の後HICに收容される。沈殿処理生成物は汚染水の前処理設備で発生する廃棄物であり、アルファ核種、Co-60、マンガン(Mn-54)、マグネシウム(Mg)、カルシウム(Ca)等を含む水酸化鉄との共沈物や炭酸塩のスラリーが排出される。HICの構造及び材質を表2.1-8に示すと共に、HICの概要図を図2.1-18に示す<sup>(7)</sup>。

表 2.1-8 HICの構造及び材質<sup>(7)</sup>

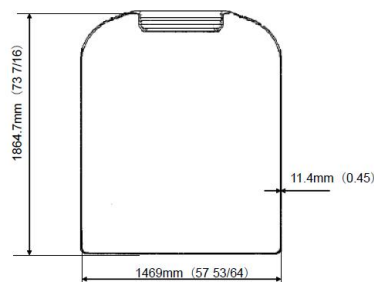
項目		仕様	
		高性能容器（タイプ1）	高性能容器（タイプ2）
材 料	本体	ポリエチレン	ポリエチレン
寸 法	外径	1,524 mm (60 インチ)	1,469mm (57 53/64 インチ)
	高さ	1,854.2 mm (73 インチ)	1,864.7mm (73 7/16 インチ)
	最小厚さ	11.4 mm (0.45 インチ)	11.4mm (0.45 インチ)
容 量		2.86 m <sup>3</sup>	2.61m <sup>3</sup>
最高使用圧力(内圧)		静水頭	静水頭
重 量	空重量	約 1.7 ton (補強体含む)	約 1.5ton (補強体含む)
	設計総重量	6.0 ton (收容物及び上蓋等付属品含む)	5.5ton (收容物及び上蓋等付属品含む)

カッコ内は製作値



カッコ内は製作値（インチ）

(a) 高性能容器（タイプ1）



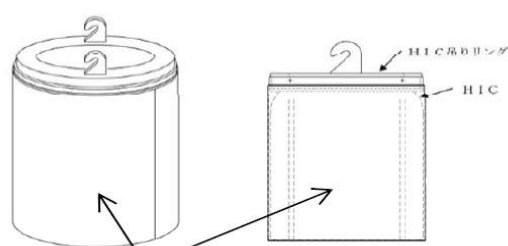
カッコ内は製作値（インチ）

(b) 高性能容器（タイプ2）

出典：東京電力株式会社

図 2.1-18 多核種除去設備のHICの概要図<sup>(7)</sup>

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。補強体の概要図を図 2.1-19 に示す。



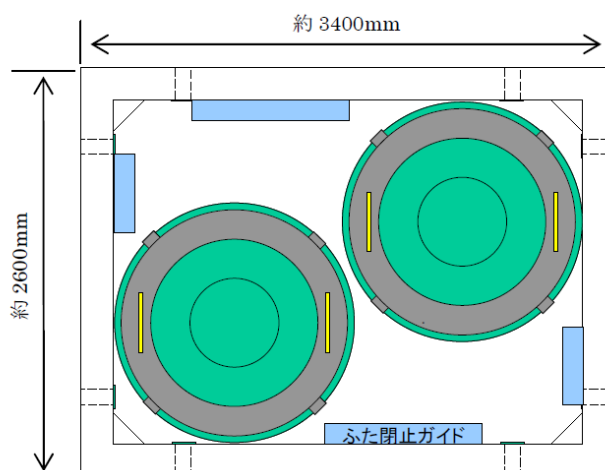
補強体 (SUS304, 304 相当製)  
「厚さ：側面10mm、底面20mm」



出典：東京電力株式会社

図 2.1-19 多核種除去設備の HIC 補強体の概要図<sup>(7)</sup>

使用済の吸着材等を收容した HIC はコンクリート製ボックスカルバート内で貯蔵する。なお、HIC は補強体取り付けられた状態で各ボックスカルバート内に貯蔵される。保管状況を図 2.1-20 に示す。



出典：東京電力株式会社

図 2.1-20 多核種除去設備の HIC 保管状況<sup>(7)</sup>

HIC は收容した吸着材等に含まれる放射性物質の崩壊熱により内部より発熱することが予想される。温度評価の結果、最も発熱量が大きいストロンチウム吸着材を收容する場合において HIC 容器表面温度は一時保管施設（第二施設）貯蔵時で約 60℃、一時保管施設（第三施設）貯蔵時で約 57℃となる<sup>(7)</sup>。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 容器表面温度は一時保管施設（第二施設）貯蔵時で約 73℃、一時保管施設（第三施設）貯蔵時において約 70℃となることから、崩壊熱による温度上昇は HIC の設計温度 76.6℃に対して低いと評価されている<sup>(7)</sup>。



## 2.1.6 高性能多核種除去設備

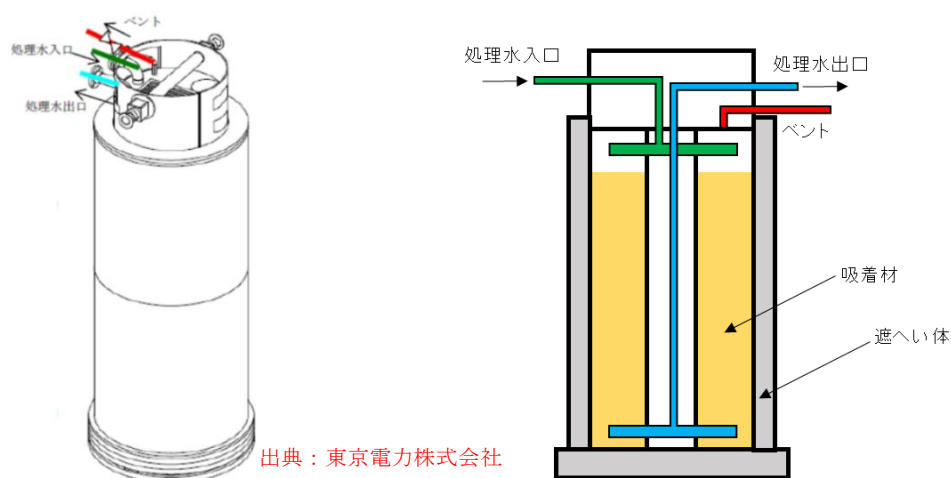
高性能多核種除去設備は KURION や SARRY 等の汚染水処理設備で処理した後の、処理済水に含まれる放射性物質（トリチウムを除く）を十分低い濃度になるまで除去する事を目的としている。高性能多核種除去装置は 20 塔の吸着塔で構成されており、除去対象核種に応じて吸着塔に収容する吸着材の種類が異なっている。処理対象水に含まれるコロイド状及びイオン状の放射性物質を分離・吸着処理する機能を有しており、吸着塔に収容する吸着材の構成は処理対象水の性状に応じて変更される。水処理二次廃棄物として吸着塔が年間 50 体程度発生すると考えられている。

### (1) 材質及び構造

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。材質及び構造を表 2.1-9 に示すと共に、それぞれの構造の概要図<sup>(8)</sup>を図 2.1-21 に示す。

表 2.1-9 高性能多核種除去設備吸着塔の材質及び構造<sup>(8)</sup>

種類		縦置き円筒型	
寸法	外胴内径	939.8	mm
	外胴板厚さ	12.7	mm
	内胴内径	330.2	mm
	内胴板厚さ	12.7	mm
	上部平板厚さ	76.2	mm
	下部平板厚さ	76.2	mm
	高さ	3632	mm
材質	外胴板	二相ステンレス (UNS S31803)	
	内胴板	二相ステンレス (UNS S32205)	
	上部平板	二相ステンレス (UNS S32750)	
	下部平板	※いずれかの材質を使用する	



出典：東京電力株式会社

図 2.1-21 高性能多核種除去設備多核種吸着塔の概要図<sup>(8)</sup>

## (2) 多核種吸着塔保管状況

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（ラック）に設置され保管される。保管状況の外観を図 2.1-22 に示す。



図 2.1-22 高性能多核種除去設備 多核種吸着塔保管状況

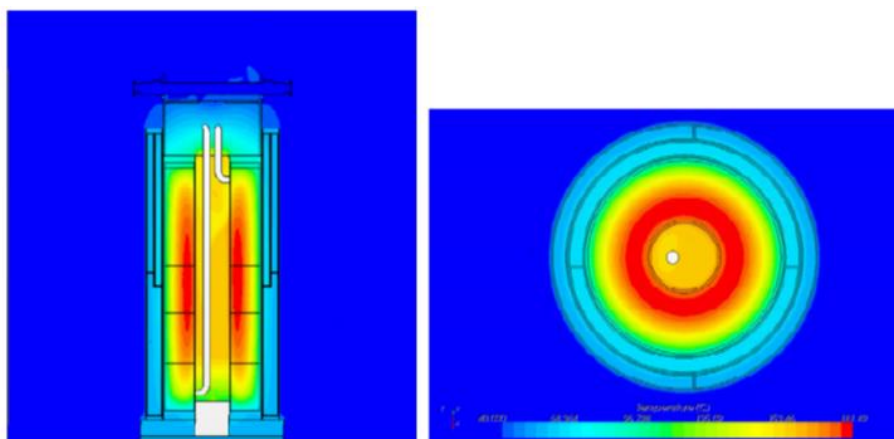


図 2.1-23 多核種吸着塔の温度分布<sup>(8)</sup> 出典：東京電力株式会社

吸着塔は鉛遮へい体に覆われた状態で保管されている。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、解析コードを用いた評価では、吸着塔内の最高温度は約182℃と評価された<sup>(8)</sup>。解析コードを用いた計算による温度分布を図 2.1-23に示す。

使用済の多核種吸着塔は淡水置換後に水抜きして貯蔵されているが使用済吸着塔内部にもある程度の塩化物イオンを含んだ水が残留していると考えられる。また内部に残留した水が放射線分解することにより可燃性ガスが発生する可能性があるため、多核種吸着塔はベント管と処理水入口側のノズルを開放して保管している。発生した可燃性ガスは空気との密度差により上昇しベント管から排出され、排出された可燃性ガスの体積に応じて処理水入口側ノズルから空気が流入すると考えられている。

## 2.1.7 水処理二次廃棄物の保管量について

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等に伴い発生する水処理二次廃棄物の保管量は増大している。また処理装置や設備の増加により廃棄物の種類も多様化している。図 2.1-24 に水処理二次廃棄物保管量の推移<sup>(9)</sup>を示すと共に、2014年11月～12月時点におけるそれぞれの設備・装置から発生した廃棄物の数<sup>(9)(10)</sup>を表 2.1-10 に示す。

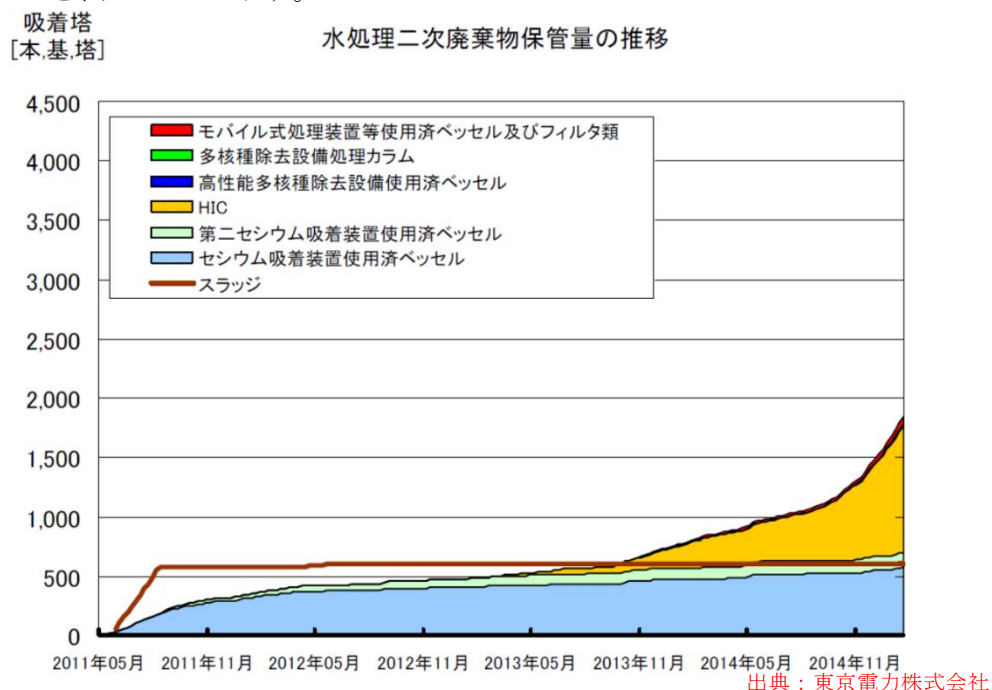


図 2.1-24 水処理二次廃棄物保管量の推移<sup>(9)</sup>

表 2.1-10 水処理二次廃棄物保管量<sup>(9)(10)</sup>

装置名	水処理二次廃棄物	保管数
セシウム吸着装置(KURION)	吸着塔	570 ※1
第二セシウム吸着装置(SARRY)	吸着塔	121 ※1
多核種除去設備	処理カラム	3 ※1
	HIC	779 ※1
高性能多核種除去設備	吸着塔	17 ※1
モバイル式処理装置	吸着塔	27 ※2
モバイル型ストロンチウム除去装置	SSフィルタ	8 ※3
	ウルトラフィルタ	0 ※3
	吸着塔	4 ※3

※1 2015.2.19時点の保管数

※3 2014.11.26時点の保管数

※2 2014.12.23時点の保管数

図 2.1-24 及び表 2.1-10 よりセシウム吸着装置（KURION）及び第二セシウム吸着装置（SARRY）から発生する吸着塔や、多核種除去設備から発生する HIC 等の保管量が特に多いことが分かる。これらの水処理二次廃棄物の保管量は今後も増え続けると予想される。

## 2.1.8 汚染水に含まれる塩化物イオンについて

原子炉建屋・タービン建屋内等の汚染水は東北地方太平洋沖地震による津波、炉心冷却水の流入、雨水の浸入、地下水の浸透等による、海水成分を含んだ高レベルの放射性汚染水である。汚染水処理施設及びそこから発生する水処理二次廃棄物保管容器等にも塩化物イオンが付着・残留することが懸念される。それぞれの汚染水処理施設で処理されている汚染水について以下に示す。

### (1) セシウム吸着装置（KURION）及び第二セシウム吸着装置（SARRY）

KURION 及び SARRY が処理している汚染水は、原子炉建屋・タービン建屋内から排出される汚染水である。KURION 及び SARRY で処理された汚染水は淡水化装置（逆浸透膜装置・蒸発濃縮装置）で塩分を除去された後、炉心冷却水として利用される。図 2.1-25 に KURION 及び SARRY で処理される汚染水（淡水化処理前の汚染水）に含まれる塩化物イオン濃度の変化<sup>(11)</sup>について示す。

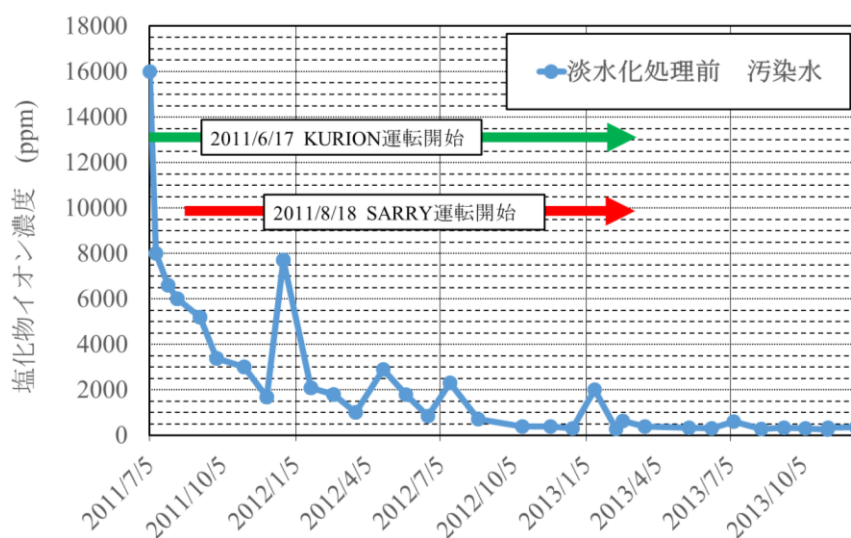


図 2.1-25 淡水化処理前汚染水に含まれる塩化物イオン濃度の変化

図 2.1-25 より、淡水化処理前の汚染水に含まれる塩化物イオンは、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。KURION によって処理された汚染水には 300~16,000ppm 程度、SARRY によって処理された汚染水には 300~8,000ppm の塩化物イオンが含まれていたと考えられる。水処理二次廃棄物である使用済の吸着塔は通水洗浄・水抜き・乾燥処理後に保管されているが構造上すべての水を抜くことはできず、内部に塩化物イオンを含んだ水が残留している。

KURION については処理対象水に含まれる塩化物イオン濃度は数百~16,000ppm 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 1/2000 程度に減少するという報告がある<sup>(12)</sup>。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 16,000ppm 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<sup>(13)</sup>、吸着塔内に残留する塩化物イオン濃度は数 ppm~200ppm 程度であると推定される。

## (2) モバイル式処理装置

モバイル式処理装置が処理している汚染水は2号機及び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である。処理対象である滞留水中の塩化物イオン濃度は、700ppm～17,000ppm程度とされている<sup>(1)</sup>。使用済吸着塔は淡水置換後に水抜きして貯蔵されているため、保管される吸着塔内部の塩化物イオンはある程度低減されていると考えられる。

## (3) 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が処理している汚染水はKURIONやSARRY等の汚染水処理設備で処理した後の汚染水が、逆浸透膜（Reverse Osmosis）装置により淡水化処理される際に発生するRO濃縮水である。RO濃縮水の塩化物イオン濃度は最大6,000ppm程度とされている<sup>(4)</sup>。RO濃縮水の水質分析結果の例を表2.1-11に示す<sup>(4)</sup>。

表 2.1-11 RO濃縮水水質分析結果<sup>(4)</sup>

放射性濃度 (Bq/cc)							塩化物イオン濃度 (ppm)
Cs-134	Cs-137	Co-60	Mn-54	Sb-125	Ru-106	Sr-90	
9.2E+00	1.60E+01	<1.8E+0	9.0E+00	7.7E+01	4.2E+01	1.5E+05	5,700

モバイル型ストロンチウム除去装置の使用済フィルタ・吸着塔は淡水で洗浄した後エアブロー等により水抜きして貯蔵されているため、内部に残留する塩化物イオンはある程度低減されていると考えられる。

## (4) 多核種除去設備及び、高性能多核種除去設備

多核種除去設備及び高性能多核種除去設備が処理している汚染水はKURIONやSARRY等の汚染水処理設備で処理した後の処理済水（RO濃縮水等）である。塩化物イオン濃度が高く、また前処理設備等での薬液注入により処理水のpHが変動する。多核種除去設備及び高性能多核種除去設備の処理水の情報を表2.1-12及び、表2.1-13に示す。

表 2.1-12 多核種除去設備における汚染水の状況<sup>(7)</sup>

設備	塩化物イオン濃度 (ppm)	pH
多核種吸着塔1～5塔	13,000	11.8～12.2
多核種吸着塔6～14塔 処理カラム	13,000	6～7

表 2.1-13 高性能多核種除去設備における汚染水の状況<sup>(8)</sup>

設備	塩化物イオン濃度 (ppm)	pH
高性能多核種除去設備	6,350	3.5～7.5

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、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考えられる。使用済の吸着塔は淡水置換後に水抜きして貯蔵されているため、保管される吸着塔内部の塩化物イオンはある程度低減されていると考えられる。

### 2.1.9 放射性物質の吸着量について

保管されている水処理二次廃物保管容器は汚染水から放射性物質を除去・吸着しているため内部に高濃度の放射性物質を含んでいる。2011/6/19～2013/4/2 の間に KURION 及び SARRY から発生した水処理二次廃棄物（吸着塔）1 本当たりの  $^{137}\text{Cs}$  吸着量の分布<sup>(14)</sup>を図 2.1-26 に示す。

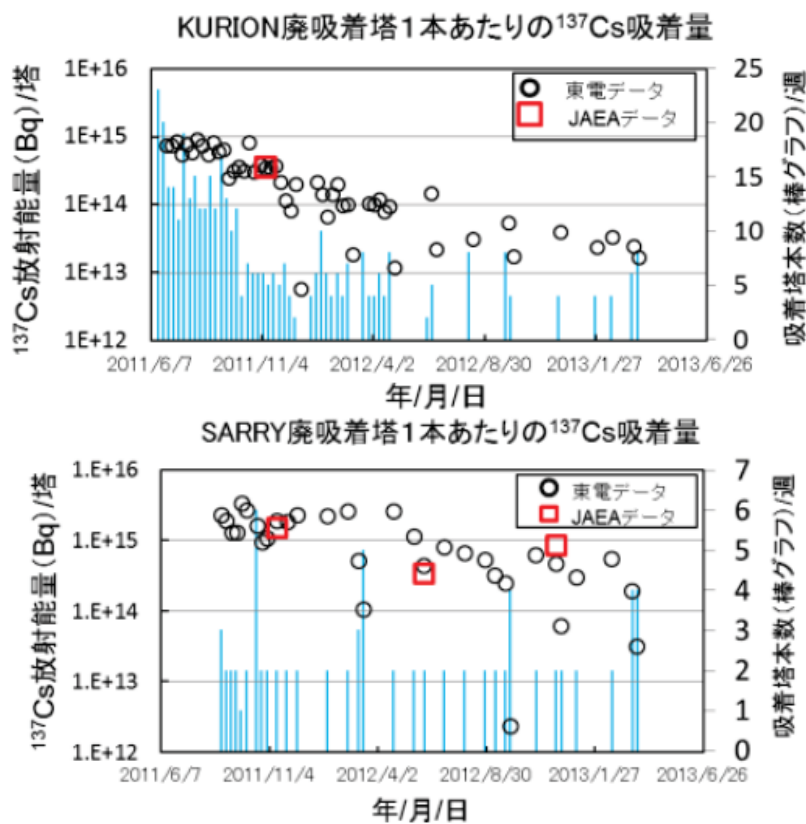


図 2.1-26 KURION 及び、SARRY 吸着塔一本当たりの  $^{137}\text{Cs}$  吸着量<sup>(14)</sup>

図 2.1-26 より、吸着量に多少のばらつきがあるが、吸着塔 1 本当たりの  $^{137}\text{Cs}$  吸着量を平均すると KURION 吸着塔で  $3.96 \times 10^{14} \text{Bq/本}$ 、SARRY 吸着塔で  $1.02 \times 10^{15} \text{Bq/本}$  である。

## 第 2.1 章 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 特定原子力施設の設計、設備 2.5 汚染水処理設備等  
[http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu14\\_j/images/141118j0101.pdf](http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu14_j/images/141118j0101.pdf)
- (2) 東京電力株式会社 セシウム吸着装置改造工事及び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  
[http://www.nsr.go.jp/disclosure/meeting/FAM/data/20140926\\_03\\_shiryō.pdf](http://www.nsr.go.jp/disclosure/meeting/FAM/data/20140926_03_shiryō.pdf)
- (3) 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  
[http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/20140327\\_02/140327\\_02\\_035.pdf](http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/20140327_02/140327_02_035.pdf)
- (4) 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  
[http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu14\\_j/images/140910j0102.pdf](http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu14_j/images/140910j0102.pdf)
- (5) 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 <http://www.nsr.go.jp/data/000054641.pdf>
- (6) 東京電力株式会社 東京電力公開資料 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
- (7) 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  
[http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu15\\_j/images/150203j0202.pdf](http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu15_j/images/150203j0202.pdf)
- (8) 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  
[http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu14\\_j/images/141118j0103.pdf](http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu14_j/images/141118j0103.pdf)
- (9) 東京電力株式会社 放射性廃棄物処理・処分スケジュール 2015.2.26  
[http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/images/d150226\\_12-j.pdf](http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/images/d150226_12-j.pdf)
- (10) 東京電力株式会社 モバイル型ストロンチウム除去装置の増設について 平成 26 年 11 月 27 日 [http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/141127/141127\\_01\\_016.pdf](http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/141127/141127_01_016.pdf)
- (11) 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 177 報)  
[http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11\\_j/images/110629l.pdf](http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110629l.pdf)
- (12) 佐藤博之ら、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
- (13) 佐藤博之ら、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」
- (14) 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 技術研究組合国際廃炉研究開発機構 [http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2014/11/140529\\_10.pdf](http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2014/11/140529_10.pdf)



## 2.2 ステンレス鋼及びポリエチレンの劣化等に関する既往の研究成果・知見の整理

### 2.2.1 ステンレス鋼の劣化等に関する既往の研究成果・知見の整理

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多数の水処理二次廃棄物が発生しているが、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されることになっている。

水処理二次廃棄物である吸着塔等の保管容器はステンレス鋼製であり主にSUS316Lが使用されているため、ステンレス鋼の劣化等に関する既往の研究成果・知見について以下に取りまとめた。

一部の吸着塔には二相系ステンレス鋼であるSUS329J3L相当材が使用されているがSUS316Lよりも耐食性が優れていることに加え現状の保管数も少ないことから本項はSUS316Lを対象とする。

#### (1) ステンレス鋼における腐食に対する懸念事項

ステンレス鋼に一般的に見られる腐食形態は全面腐食、局部腐食として孔食・すき間腐食のほか、応力腐食割れ(SCC)、粒界腐食などが挙げられる。これらの腐食形態の中でステンレス鋼の全面腐食は非酸化性酸である希硫酸、酢酸などにより生じやすいことが知られているので、水処理二次廃棄物の保管により想定される腐食形態からは除外できると考えられる。またSUS316Lは含まれる炭素量が低減されているため溶接熱影響があっても粒界Cr欠乏層は導入されていないと考えられるので、鋭敏化が主要因とされる粒界腐食は除外されることが考えられる。

ステンレス鋼の耐食性は表面に形成される不導体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Cl<sup>-</sup>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。

使用済吸着塔などの水処理廃棄物は淡水で置換・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。しかしながら内部の水をすべて取り除くことは難しく、ある程度の水が内部に残留していると考えられる。処理対象である汚染水には海水由来の塩化物イオンが存在していることから、この残留水中にもある程度の塩化物イオンが残留していると考えられる。KURIONの吸着塔については処理対象水に含まれる塩化物イオン濃度は数百～16,000ppm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が1/2000程度に減少するという報告がある<sup>(1)</sup>。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16,000ppm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<sup>(2)</sup>もあるため、吸着塔内に残留する塩化物イオン濃度は数ppm～200ppm程度であると想定される。そのため、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SCCの発生が懸念される。

また吸着した放射性物質の崩壊熱による温度の上昇や、放射線の影響により腐食が促進される可能性もある。さらに、崩壊熱により容器内部の残留水が蒸発する場合、塩化物イオンの濃縮や、残留水の蒸発後に内部に残留する塩分が潮解することにより発生する大気腐食の発生も懸念される。図2.2-1に保管される吸着塔内部で懸念される腐食についての概要図を示す。



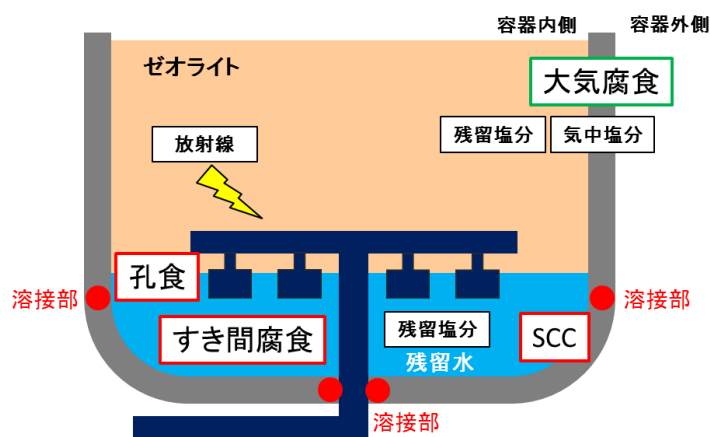


図 2.2-1 吸着塔内部で懸念される腐食の概要図

保管される容器内の腐食について考えるうえで、水がある程度の期間残る場合と、水が速やかに完全に蒸発してしまう 2 種類のシナリオを考える必要がある。

まず内部に残留水が存在する場合には洗浄後の残留水に含まれる塩化物イオン濃度は数 ppm～200ppm 程度と推定されるが、それにより孔食やすき間腐食、SCC といった局部腐食の発生が懸念される。また容器が腐食により破損した場合残留水が漏えいする危険がある。

次に残留水が完全に蒸発する場合では洗浄後の残留水に含まれる塩化物イオン濃度は数 ppm～200ppm 程度と推定されるが、水が蒸発することにより塩分が容器内部に残留する。この残留塩分が容器内部表面で潮解することにより大気腐食などの発生が懸念されるが、容器が腐食により破損した場合でも残留水が蒸発しているため小さな破損では内容物が漏えいする危険は少ないと考えられる。

以上のことから残留水中の塩化物イオンなどが原因となり発生する孔食やすき間腐食及び SCC などの局部腐食が水処理二次廃棄物の保管中におけるステンレス鋼の腐食に対する懸念事項であると考えられる。

## (2) 水処理二次廃棄物容器における孔食の発生について

残留水中の塩化物イオンなどが原因となり、ステンレス製容器に孔食の発生が懸念されるが、吸着材であるゼオライトと水の共存環境中において、放射線による腐食への影響を考慮する必要がある。

図 2.2-2 に 60℃大気飽和希釈海水( $\text{Cl}^-$  2,000ppm)中のゼオライト(Herschelite 及び Mordenite)共存環境中浸漬における 400Gy/h  $\gamma$  線照射下の SUS316L 鋼の自然浸漬電位の経時変化を示す。グラフより、 $\gamma$  線照射により SUS316L の自然浸漬電位は希釈人工海水への単純浸漬ならびに希釈人工海水とゼオライト共存環境中において貴化していることがわかる。図 2.2-3 に自然浸漬電位に及ぼす  $\gamma$  線照射線量率とゼオライト共存の影響を示す。 $\gamma$  線照射下においては単純浸漬ならびにゼオライト共存環境中浸漬ともに線量率の増加に従い自然浸漬電位が貴化している。これは、 $\gamma$  線照射線量率の増加に伴い水の放射性分解が進み、過酸化水素( $\text{H}_2\text{O}_2$ )などの酸化剤濃度が増加するためであると報告されている<sup>(3)</sup>。

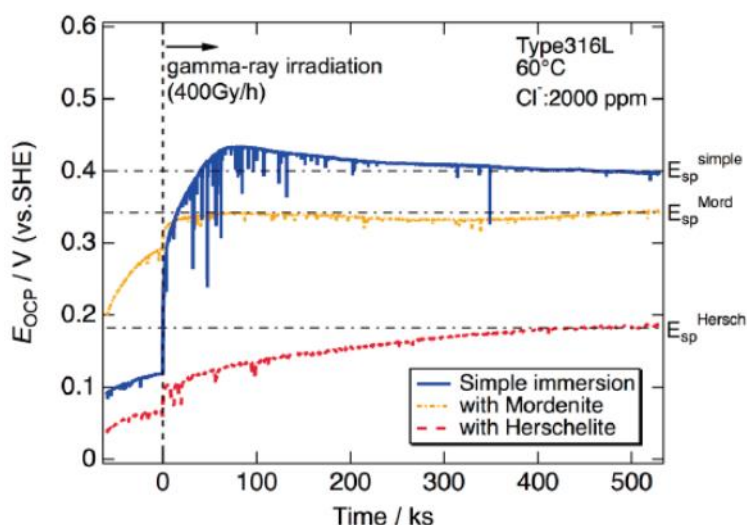


図 2.2-2 自然浸漬電位( $E_{OCP}$ )の経時変化に及ぼす  $\gamma$  線照射(400Gy/h)とゼオライト共存の影響<sup>(3)</sup>

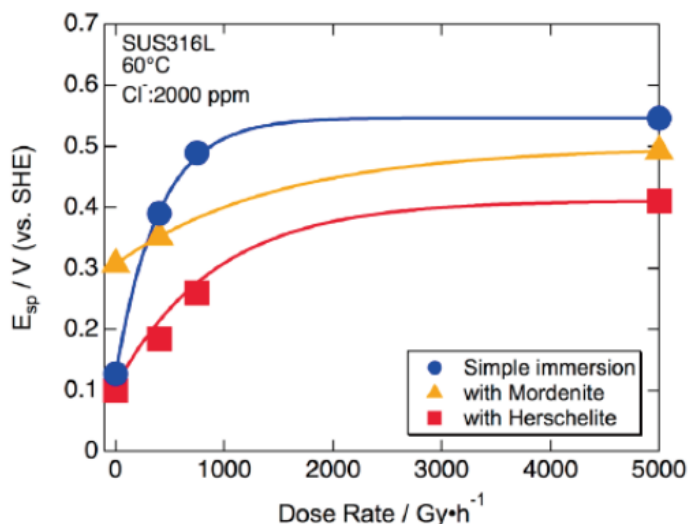


図 2.2-3 定常浸漬電位( $E_{sp}$ )に及ぼす  $\gamma$  線量率とゼオライト共存の影響<sup>(3)</sup>

SUS316L の自然浸漬電位は希釈人工海水中の単純浸漬に比べゼオライト共存環境の方が低く、ゼオライトの共存により  $\gamma$  線による電位の貴化が抑制されていることが分かる。これは、 $\gamma$  線照射下においてゼオライトが共存すると水の放射性分解で生成する  $H_2O_2$  の分解が促進することが報告されており<sup>(4)</sup>、 $H_2O_2$  濃度が低下して電位が卑化したためであると考えられている<sup>(3)</sup>。

塩化物が含まれた中性水溶液中でのステンレス鋼の孔食の臨界電位（これ以下の電位域で材料を使用すれば孔食の可能性がない電位）は、塩化物イオン濃度につれて低下することが知られている<sup>(6)</sup>。希釈人工海水への単純浸漬ならびに希釈人工海水とゼオライト共存環境中では共に塩化物イオン濃度の低下に伴い孔食発生電位が低下しているが、大きな差はないという報告がある<sup>(3)</sup>。図 2.2-4 に SUS316L の孔食発生電位の塩化物イオン濃度とゼオライト共存による影響について示す。図 2.2-5 に 60°C 大気飽和希釈海水中におけるゼオライト(Herschelite)共存環境における SUS316L の孔食発生線図を示す。

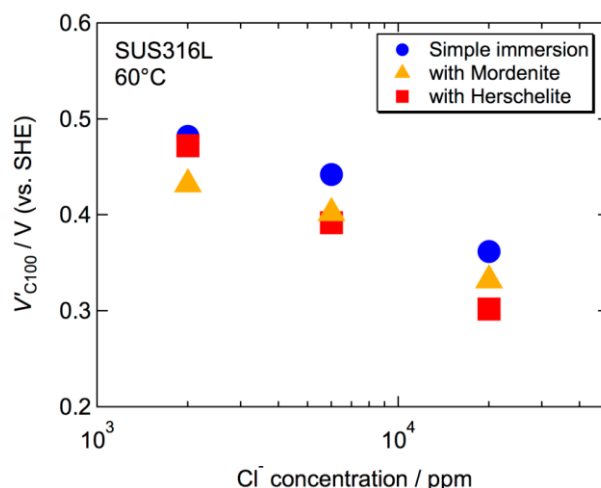


図 2.2-4 ゼオライト共存環境における SUS316L の孔食発生電位( $V'_{C100}$ )と塩素イオン濃度の関係<sup>(3)</sup>

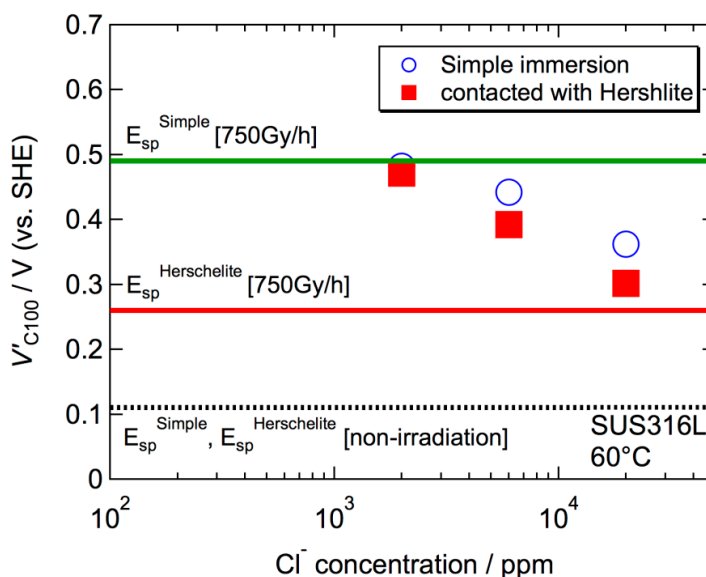


図 2.2-5 60°C大気飽和希釈海水中におけるゼオライト(Herschelite)共存環境における SUS316L の孔食発生線図<sup>(3)</sup>

$\gamma$ 線照射下では SUS316L 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局部腐食発生リスクが生じるが、ゼオライト(Herschelite)共存により電位の上昇が抑制され、塩化物イオン濃度が 20,000ppm 程度においても局部腐食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~200ppm 程度であれば、孔食が発生する可能性は低いと考えられる。

### (3) 水処理二次廃棄物容器における SCC、すき間腐食の発生について

塩化物イオンを含む環境では SUS316L などのオーステナイト系ステンレス鋼に応力腐食割れ(SCC)が生じる可能性がある。一般的に塩化物イオン濃度が高く、高温であるほど SCC は生じやすいとされている<sup>(6)</sup>。また SCC は外部からの引張応力だけでなく溶接や加工

に伴って金属に残される残留応力でも発生するため<sup>(7)</sup>、水処理二次廃棄物容器の溶接部近傍において SCC の発生が懸念される。

図 2.2-6 に示すのは多管式ステンレス鋼製熱交換器の冷却水による SCC について使用実績データを集計・解析して得た結果である<sup>(8)</sup>。この結果から SUS316L については温度が 100°C 以下では SCC が発生しにくいと考えられる。

つまり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~200ppm 程度かつ、容器は大気解放環境であり、残留水の温度が崩壊熱により上昇しても沸点(100°C)を越えないと仮定すれば、SCC の発生する危険性は低いと考えられる。しかしながら 100°C 以下では SCC は発生しないとは言い切れず、常温でも SCC の発生は報告されている<sup>(7)</sup>。今後容器内部の実際の温度、残留応力の程度や、蒸発による内部残留水の濃縮などの情報収集を継続しそれらを考慮した検討が必要であると考えられる。

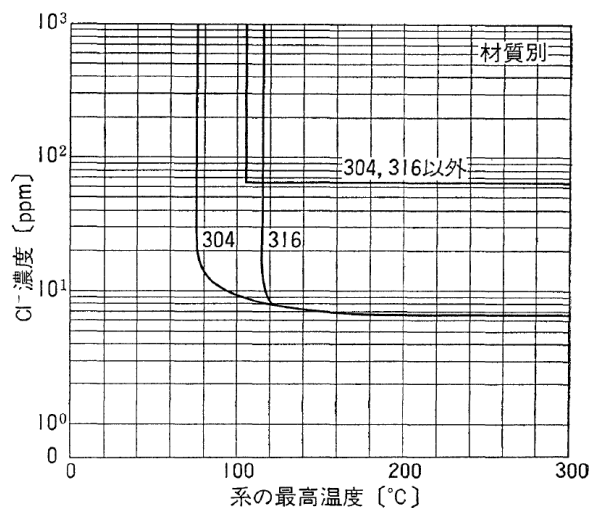


図 2.2-6 ステンレス鋼熱交のチューブ材質と SCC 境界線との関係<sup>(8)</sup>

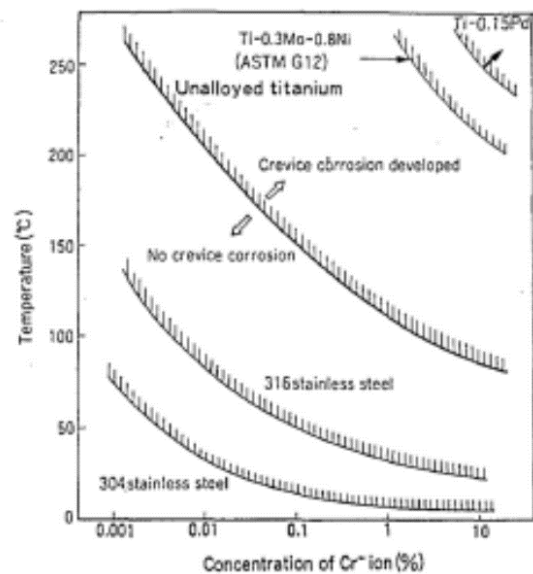


図 2.2-7 温度と塩化物イオン濃度によるすき間腐食発生領域<sup>(9)</sup>

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。図 2.2-7 に温度と塩化物イオン濃度によるすき間腐食発生領域を示す<sup>(9)</sup>。すき間が存在する場合、塩化物イオン濃度が高く、高温であるほど SCC は生じやすいことが分かる。この結果から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~200ppm 程度と仮定すれば、温度が 100°C 以下でもすき間腐食の発生が懸念される。

## 2.2.2 ポリエチレンの劣化等に関する既往の研究成果・知見の整理

本節では、多核種除去設備(ALPS; Advanced Liquid Processing System)から排出される水処理廃棄物を収容する高性能容器(HIC; High Integrity Container)について、長期的な保管の可能性を考慮した際の劣化評価の判断基準のための技術的知見を蓄積するため、容器材質であるポリエチレンの放射線劣化に関する既往の研究成果・知見を収集・整理し、取りまとめた。

### (1)調査内容および調査方法

本調査における調査内容は次の3点である。

(a)ポリエチレンの放射線劣化に関する既往の研究成果・知見

(b)HIC用ポリエチレンに関する既往の研究成果・知見

(c)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

本調査は主に文献調査により実施した。調査に当たり利用した文献情報検索システムは、日本原子力研究開発機構 JOPSS (JAEA Originated Papers Searching System)および国際原子力情報システム INIS (International Nuclear Information System)であり、検索キーワードとして「高性能容器(High Integrity Container)」、「架橋ポリエチレン(Crosslinked Polyethylene, XLPE)」、「高密度ポリエチレン(High Density Polyethylene)」、「放射線劣化(Radiation Degradation)」を選択した結果、全体で1857件がヒットした。この中からポリエチレンの放射線劣化に関するデータが含まれる資料を選択し、東京電力株式会社が発表している資料等と併せてその内容を精査し、既往の研究成果・知見を収集・整理した。これらの調査結果を基に、既往の研究における試験条件・評価項目を比較検討し、高性能容器の長期保管に係る劣化評価の判断基準のための技術的知見をまとめた。

### (2)調査結果

(a)ポリエチレンの放射線劣化に関する既往の研究成果・知見の整理

ポリエチレンは、エチレンを原料として触媒存在下での重合反応により合成される、熔融成形が可能な熱可塑性樹脂である(図 2.2-8)<sup>(10,11)</sup>。

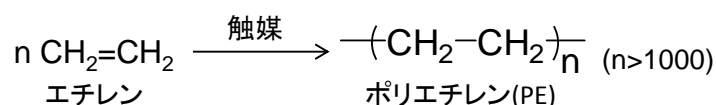


図 2.2-8 ポリエチレンの合成スキーム。

ポリエチレンは安価であり電気絶縁性や耐薬品性に優れることから、電力ケーブルや各種容器、配管等に応用されている。合成条件によって得られるポリエチレンの分子量や密度等の特性が変化するが、工業分野で一般に使用されるポリエチレンの分類例は表 2.2-1 のようになっている<sup>(10)</sup>。ここで、架橋ポリエチレン(XLPE)とは、中密度ポリエチレン(MDPE)や高密度ポリエチレン(HDPE)を過氧化物、シラン化合物、電子線照射、紫外線照射等を利用して架橋(分子鎖同士を繋ぐこと)処理を施したものであり、密度はMDPEやHDPEとほぼ同様である。密度は平均分子量と結晶化度によって決まる。結晶化度とは分子鎖が整列した結晶質相と分子鎖がランダムに存在する非晶質相の割合を表し、結晶質相が多いほど、すなわち結晶化度が高いほど、分子鎖が緻密に詰まり、密度は高くなる。

表 2.2-1 工業分野で一般的に使用されるポリエチレンの分類例。

名称		密度	主な用途
低密度ポリエチレン	LDPE	0.915~0.930g/cm <sup>3</sup>	食品包装用フィルム
中密度ポリエチレン	MDPE	0.930~0.940 g/cm <sup>3</sup>	配管
高密度ポリエチレン	HDPE	0.940~0.970 g/cm <sup>3</sup>	配管、ボトル
超高分子量ポリエチレン	UHMPE	~0.940 g/cm <sup>3</sup>	繊維、多孔質バッテリーフィルム
架橋ポリエチレン	XLPE	0.93 g/cm <sup>3</sup> ~	配管、ケーブル被覆

ポリエチレンの放射線劣化に関する既往の研究では、低密度ポリエチレン(LDPE)や架橋ポリエチレン(XLPE)等、様々な種類のポリエチレンについて、ガンマ線、電子線、中性子、イオンの幅広い線種を用いて、線量率、雰囲気、温度、添加剤の影響等を調べることにより、ポリエチレンの放射線劣化メカニズムと特性劣化挙動が明らかにされている。

図 2.2-9 に示すように、ポリエチレンの放射線劣化は主に酸化に起因する<sup>(12,13)</sup>。ポリエチレンに空気中で放射線を照射すると C-H 結合が切断され、反応活性種であるラジカル(R<sup>•</sup>)が生成する。この R<sup>•</sup> と酸素が反応し、ROO<sup>•</sup> が生成する。これがポリエチレン(RH)分子鎖と反応し、ROOH と R<sup>•</sup> を生成する。ここで生成する R<sup>•</sup> は再び酸素と反応して連鎖反応を引き起こす。この連鎖反応は自動酸化反応と呼ばれる。一方、ROOH の一部は放射線や熱等により分解し、RO<sup>•</sup> と <sup>•</sup>OH が生成する。RO<sup>•</sup> はポリエチレン分子鎖と反応し、ROH と R<sup>•</sup> を生成する。この R<sup>•</sup> は再び酸素と反応して連鎖反応を引き起こす。一方、この連鎖反応を停止する反応として、RO<sup>•</sup> + RO<sup>•</sup> → ROOR、RO<sup>•</sup> + <sup>•</sup>OH → ROOH、RO<sup>•</sup> + RH → ROH があり、いずれかの反応によってラジカルが消滅して連鎖反応が停止する。ここで、ROOH は比較的安定であるが一部分解し、最終的に ROOR、ROH を生成して安定化する。これら一連の反応の結果、ポリエチレン分子鎖が切断され、引張り特性(強度、伸び)等が劣化する。

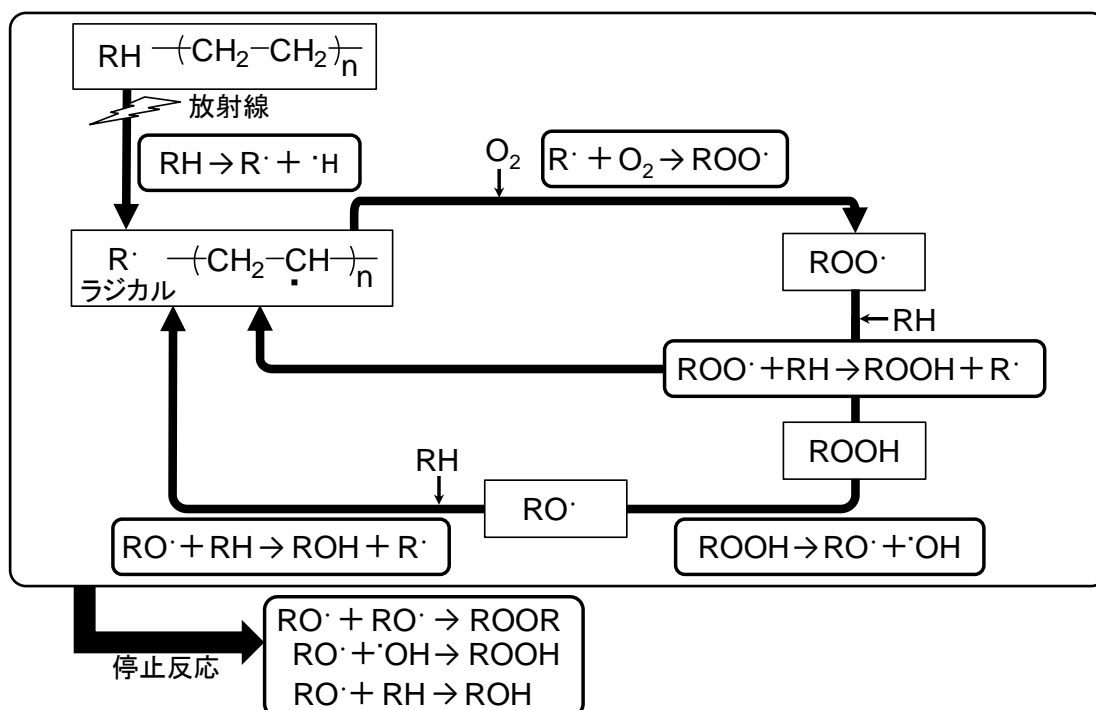


図 2.2-9 ポリエチレンの放射線劣化における反応メカニズム。

ポリエチレンの放射線酸化反応は、ポリエチレン中における酸素の溶解・拡散挙動と照射によるラジカルの生成挙動の関係に支配される<sup>(14)</sup>。酸素の溶解・拡散挙動はポリエチレンの結晶化度によって異なり、低結晶化度、すなわち非晶質相の割合が高いほど、酸素はポリエチレン中に溶解・拡散しやすくなる。このことはポリエチレンの種類や製造方法によって特性劣化が異なる原因の一つとなる<sup>(14,21)</sup>。また、一般に、ポリエチレンには耐久性を改善するための酸化防止剤や光安定剤等が配合されている。これらは、ラジカルの生成を抑制したり、生成したラジカルと反応してラジカルを消滅させたりするなど、自動酸化反応の進行を阻害する働きを持つ。これら添加剤の種類や配合比はポリエチレンの特性劣化に大きな影響を及ぼす<sup>(22-29)</sup>。

ポリエチレンの放射線酸化反応は酸素存在下で進行する。つまり、酸素の無い真空中で放射線を照射した場合、生成したラジカル同士が再結合して分子鎖間の架橋が起こる。このような場合、放射線の線量に対する特性劣化は酸素を含む雰囲気の場合と比較して抑制される<sup>(30-35)</sup>。また、温度が高くなるとポリエチレン中の酸素の溶解・拡散およびラジカルの生成・酸素との反応が促進されるため、照射時の雰囲気温度の上昇とともにポリエチレンの特性劣化は低線量域で顕著になる<sup>(22,36-39)</sup>。さらに、放射線の線量率はラジカルの生成挙動に影響を及ぼす因子である<sup>(14,40-50)</sup>。ポリエチレンに空气中で放射線を照射すると、放射線が透過する部分にラジカルが均一に生成する。一方、酸素はポリエチレンの表面から供給され、内部に拡散することによってラジカルと反応する。放射線の線量率が高く(数 kGy/h 以上)、供給される酸素量に対して過剰なラジカルが生成する場合、酸素は表面付近で全て消費され、内部まで拡散しない状態が生じる。酸素が届かない部分では、真空中で照射した場合と同様の反応が起こり、その結果、表面と内部で酸化される領域と酸化されない領域が生じる。これに対し、供給される酸素量に対してラジカル生成量が少ない場合、すなわち低線量率で照射した場合、余剰の酸素はポリエチレン内部まで拡散してラジカルと反応するため、ポリエチレン全体が均一に酸化される(図 2.2-10)。この結果、同線量と比較すると、低線量率で照射した場合の方が高線量率で照射した場合よりも特性劣化が大きくなる。

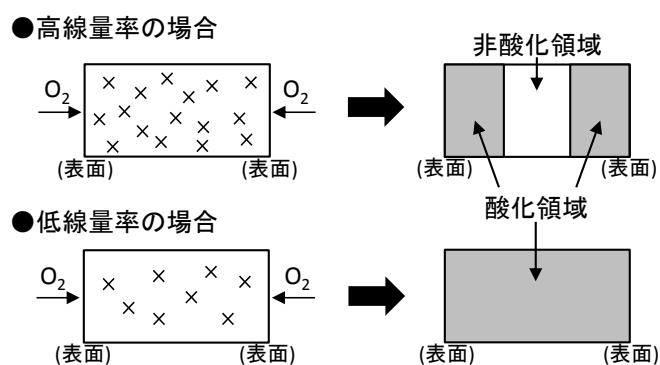


図 2.2-10 線量率がポリエチレンの放射線酸化に及ぼす影響の概念図。

本調査で選択した多くの資料では、放射線照射が空气中あるいは酸素中で行なわれていたが、水中で放射線照射を行なった報告もあった<sup>(51-53)</sup>。そこで、ポリエチレンの放射線酸化による特性劣化(放射線劣化)に影響を及ぼす因子として上述の様々な因子に水を加え、以下の6点について資料から抽出したデータを基に研究成果・知見を整理した。

- ①ポリエチレンの種類、製造方法の影響
- ②添加剤の影響

- ③照射雰囲気の影響
- ④照射温度の影響
- ⑤線量率の影響
- ⑥水の影響

研究成果・知見の整理に当たり、ほとんどの資料においてポリエチレンの引張り特性が評価されていることから、本報告書では主に引張り試験における破断時伸び、引張り強度、降伏強度のデータを抽出・整理した。図 2.2-11 はプラスチック材料の引張り試験において得られる応力—ひずみ曲線の例であるが、図より、破断時伸びは破断時の標線間距離と初期の標線間距離の差を初期の標線間距離で除して 100 を掛けた値であり、引張り強度は最大引張り応力、降伏強度は応力増加を伴わずにひずみが増加する最初の応力である。

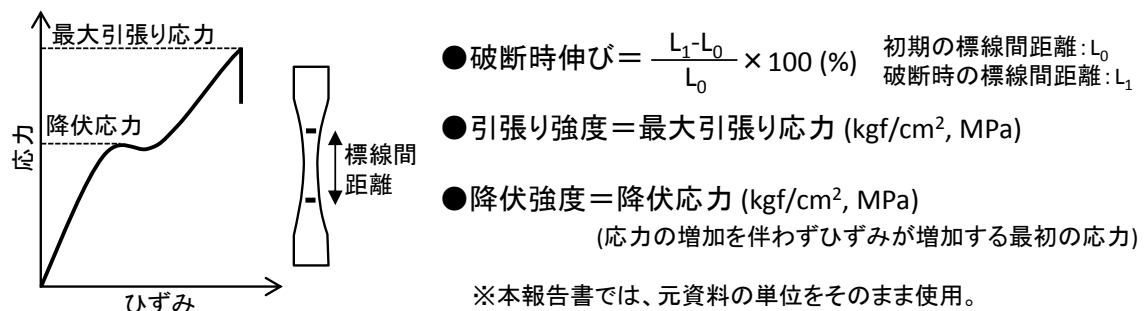


図 2.2-11 プラスチック材料の引張り試験において得られる応力—ひずみ曲線の例。

①ポリエチレンの種類・製造方法の影響

ポリエチレンの種類、あるいは製造方法(製造会社)によって、ポリエチレンの初期特性が異なることに加え、放射線劣化挙動も異なる<sup>(14-21)</sup>。図 2.2-12(a)に一例を示すが、低密度ポリエチレン(LDPE)と架橋ポリエチレン(XLPE)を比較すると、非晶質相の割合が多く密度が低い LDPE は XLPE よりも破断時伸びの初期値が約 200 % 高い<sup>(14)</sup>。しかしながら、図 2.2-9

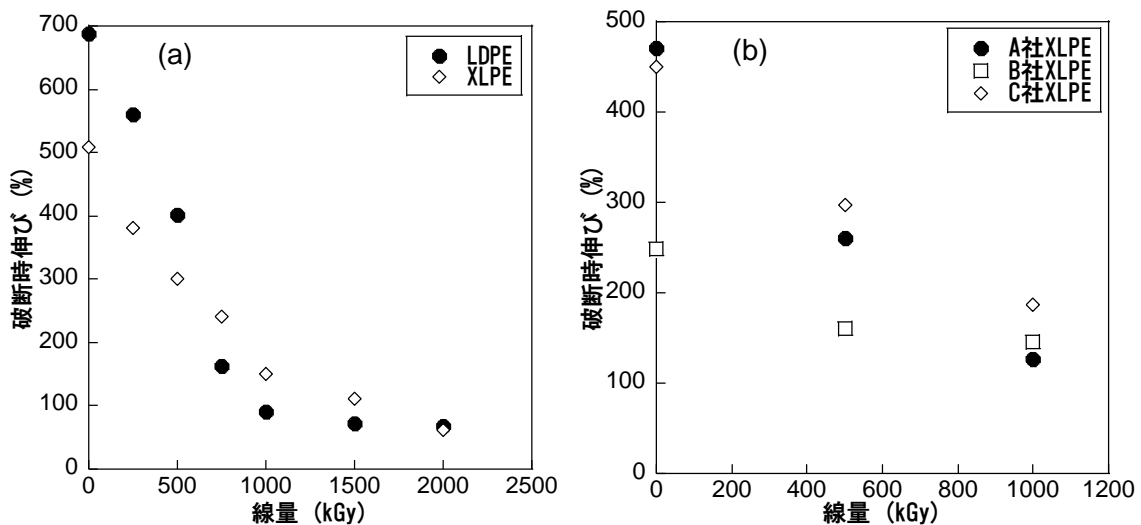


図 2.2-12 ポリエチレンの放射線劣化に及ぼす種類、製造方法の影響：(a) 低密度ポリエチレン(LDPE)と架橋ポリエチレン(XLPE)の比較、(b) 製造会社の異なる XLPE の比較。



に示した酸化反応は主に非晶質相で起こるため、放射線の線量に対する破断時伸びの低下は XLPE よりも大きい。また、工業分野で一般的に XLPE として分類される架橋ポリエチレンでも、製造会社、すなわち製造方法や添加剤が異なることによって、その放射線劣化挙動が大きく異なる。A 社、B 社、C 社の記述に留めるが、図 2.2-12(b)に示すように、破断時伸びの初期値とその変化が異なることが分かる<sup>(15)</sup>。一般に、ポリエチレンには耐久性を改善するための酸化防止剤や光安定剤等が配合されている。この添加剤の種類や配合比は企業秘密であり詳細を知ることは困難であるが、ポリエチレン製造会社によって異なると考えられる。これが初期特性や放射線劣化挙動の違いを生じる原因であると考えられる。

## ②添加剤の影響

図 2.2-13(a)は架橋ポリエチレン(XLPE)の放射線劣化に対する酸化防止剤の一種であるテトラキス[3-(3'-5'-ジ-*t*-ブチル-4'-ヒドロキシフェニル)プロピオン酸](商品名 : Irganox1010)の添加効果を示したものである<sup>(22)</sup>。酸化防止剤非配合試料(0 wt%)では、100 kGy 以上で破断時伸びが急激に低下するのに対し、酸化防止剤を 0.2、0.4 wt% 配合した試料では、破断時伸びの低下が 200 kGy 付近まで抑制されることが明らかにされている。300 kGy 程度の高線量域では、酸化防止剤が失活するため、配合比に関わらず破断時伸びの値は同程度になると考察されている。

図 2.2-13(b)は化学構造の異なる酸化防止剤を配合した架橋ポリエチレン(XLPE)について、10 atm 酸素中、室温、5 kGy/h の条件でガンマ線を照射後の破断時伸びの変化を示した結果

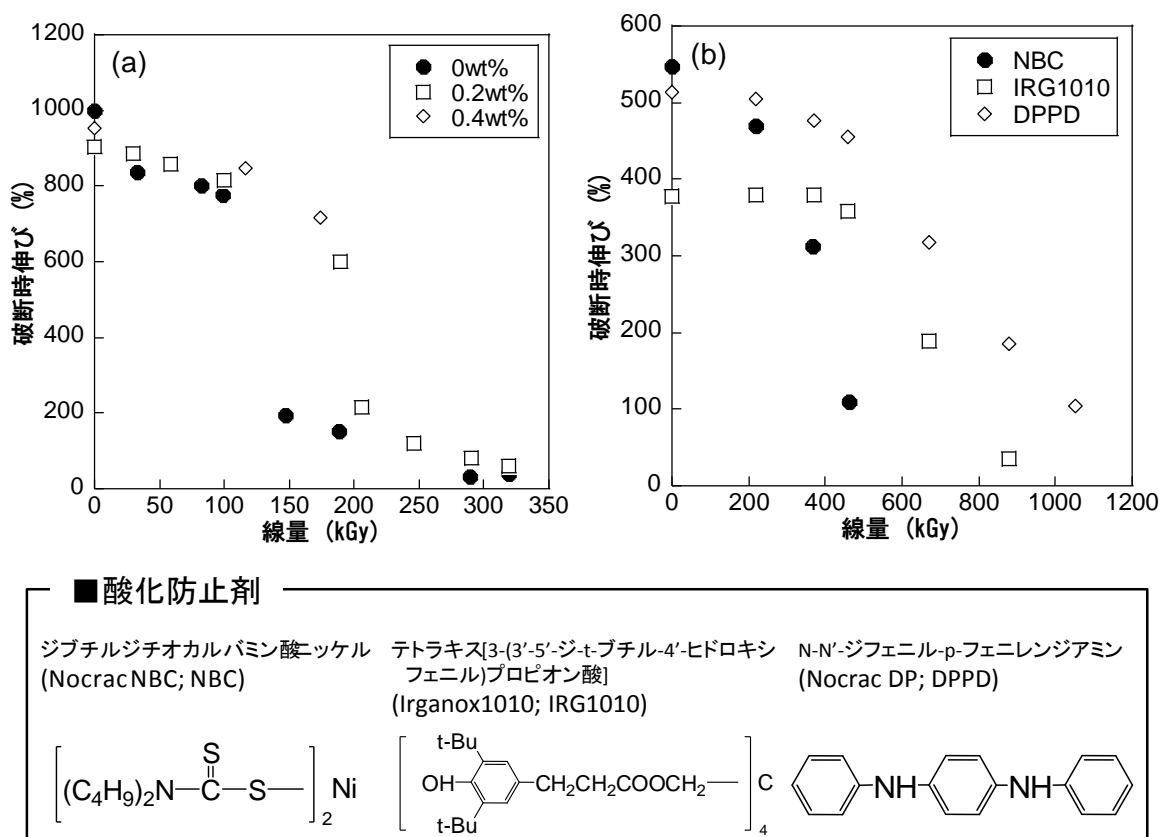


図 2.2-13 ポリエチレンの放射線劣化に及ぼす添加剤(酸化防止剤)の影響 : (a) 添加剤の配合／非配合の影響、(b) 添加剤の化学構造の影響。

である<sup>(23)</sup>。酸化防止剤の種類によって破断時伸びの初期値およびその変化が異なることが分かる。ここで用いられた酸化防止剤の化学構造は図 2.2-13(グラフ下側)に示す通りであり、それぞれ作用機構が異なる<sup>(28,29)</sup>。

イオウ系酸化防止剤であるジブチルジチオカルバミン酸ニッケル(Nocrac NBC; NBC)は、 $\text{ROOH} + \text{AX} \rightarrow \text{AX-O} + \text{ROH}$  の反応により過酸化物 ROOH を分解する。フェノール系酸化防止剤である Irganox1010(IRG1010)は、 $\text{R} \cdot + \text{AX} \rightarrow \text{RAX} \cdot$  (反応性の低い安定なラジカル) の反応によって炭素ラジカル( $\text{R} \cdot$ )を捕捉したり、 $\text{ROO} \cdot + \text{AX-H} \rightarrow \text{AX} + \text{ROOH}$  によってパーオキシラジカル( $\text{ROO} \cdot$ )を捕捉したりすることによって自動酸化反応の原因となるラジカルを減少させる。また、アミン系酸化防止剤である N-N'-ジフェニル-p-フェニレンジアミン(Nocrac DP; DPPD)は、パーオキシラジカル( $\text{ROO} \cdot$ )の捕捉に効く。

### ③照射雰囲気の影響

図 2.2-14 に、酸化防止剤を添加していない低密度ポリエチレン(LDPE)に、室温において、5 kGy/h の線量率でガンマ線を照射した後の引張り強度の変化に及ぼす照射雰囲気の影響を示す<sup>(30)</sup>。空气中(酸素分圧 0.2 atm)、酸素中(酸素分圧 10 atm)で照射した場合と比較して、真空中で照射した場合には約 800 kGy まで引張り強度が低下しないことが分かる。これは、真空中では、照射によって生成するラジカル同士が再結合して分子鎖間の架橋が起こることが原因であることが明らかにされている。

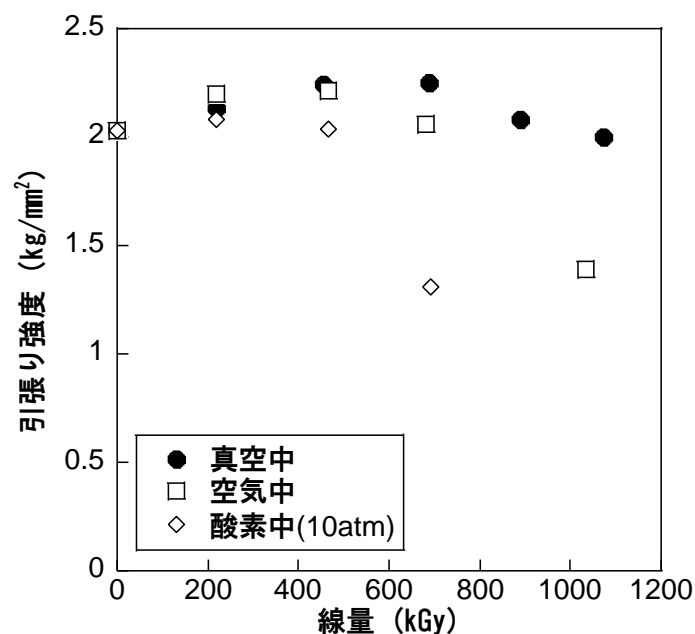


図 2.2-14 ポリエチレンの放射線劣化に及ぼす照射雰囲気の影響.

### ④照射温度の影響

図 2.2-15 は、酸化防止剤を添加していない架橋ポリエチレン(XLPE)に空气中、100 Gy/h でガンマ線を照射した場合の破断時伸びの変化に及ぼす照射温度の影響を示している<sup>(22)</sup>。室温、60℃、100℃と照射温度が高くなるにつれ、より短時間で破断時伸びが低下することが明らかにされている。

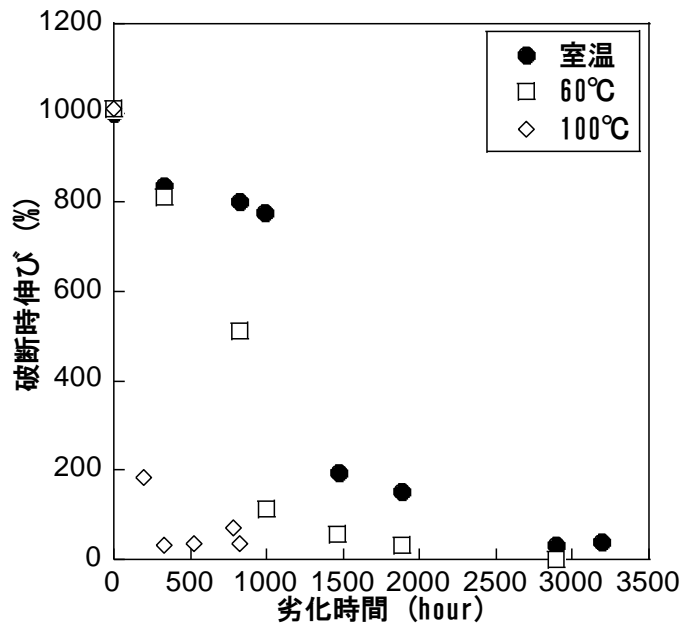


図 2.2-15 ポリエチレンの放射線劣化に及ぼす照射温度の影響(空气中).

#### ⑤線量率の影響

ポリエチレンの放射線劣化において、放射線照射時の線量率もまた重要な因子の一つである。1970年代に行なわれていた高分子材料の耐放射線性評価に関する研究においては、時間的な制約から一般的に 10 kGy/h 程度の線量率で放射線照射が実施されていた。しかしながら、原子力発電所等で 1 Gy/h 未満の低い線量率下で実際に使用されていたケーブル材料に関し、事前の耐放射線性評価試験では劣化が認められなかった低線量域において劣化が顕著である事例が報告され、それまでの加速試験の妥当性検討も含めて、線量率の影響を調べた結果が多数報告されている<sup>(14,40-50)</sup>。

ポリエチレンに空气中で放射線を照射すると、放射線が透過する部分にラジカルが均一に生成する。一方、酸素はポリエチレンの表面から供給され、内部に拡散することによってラジカルと反応する。この時、酸化が起こる表面からの厚さ  $L$  (cm) について、瀬口らによって以下の式が導出されている<sup>(14)</sup>。

$$L = \left( \frac{2D \cdot S \cdot P_{O_2}}{\Phi \cdot I} \right)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 $D$  ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) は酸素の拡散係数、 $S$  ( $\text{mol/g} \cdot \text{atm}$ ) は酸素の溶解度、 $\Phi$  ( $\text{mol/g} \cdot \text{Gy}$ ) は酸素の消費係数、 $P_{O_2}$  (atm) は酸素分圧、 $I$  ( $\text{Gy/s}$ ) は線量率である。酸素の拡散係数、溶解度、消費係数はポリエチレンの種類や温度等によって変化するが、酸化防止剤を含まない低密度ポリエチレン(LDPE)について、室温における酸素の拡散係数、溶解度、消費係数の値がそれぞれ、 $5.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $2.2 \times 10^{-6} \text{ mol/g} \cdot \text{atm}$ 、 $1.4 \times 10^{-9} \text{ mol/g} \cdot \text{Gy}$  であるとの報告がある<sup>(45)</sup>。これらの値を用いると、空气中(酸素分圧 0.2 atm)、線量率 10、0.5 kGy/h の条件では、式(1)により、表面からの酸化層の厚さはそれぞれの線量率に対して 0.01、0.05 cm となる。このことは、厚さ 0.1 cm (1 mm) の LDPE シートに空气中、室温において 0.5 kGy/h の線量率で放射線を照射すると、シートの両面から 0.05 cm 酸化されるため、シート全体が酸化

されることを意味している。瀬口らによる資料では、原子力施設の実際の放射線環境である 1 Gy/h を下回るような線量率においては、空気中でもケーブル絶縁用高分子材料の肉厚が 5～10 mm 程度までは材料全体が均一に酸化されるであろうと述べられている<sup>(14)</sup>。また、式(1)は、酸化層の厚さが酸素分圧  $P_{O_2}$  にも依存することを示している。すなわち、酸素濃度(分圧)を高くすることによって酸化層の厚さは大きくなる。図 2.2-16 に、厚さ 1 mm の LDPE シート(ただし、上述の LDPE とは製造会社が異なる)に様々な線量率・酸素分圧でガンマ線を照射後の破断時伸びの変化を示す<sup>(40)</sup>。空气中(酸素分圧:0.2 atm)、線量率 0.33 kGy/h の条件は試料全体が酸化される照射条件であるが、このデータを基準として、酸素分圧を 5 atm まで上げると線量率を 5 kGy/h まで上昇させても同様に試料全体の酸化が起こり、破断時伸びの低下が同様となることが明らかにされている。また、酸素分圧 5 atm の条件では、生成するラジカル量に対して十分な量の酸素が試料内部まで拡散するため、線量率を 1 kGy/h としても 5 kGy/h としても、試料全体が酸化されることが明らかにされている。すなわち、試料全体が酸化される照射条件では、放射線劣化に及ぼす線量率の影響は認められなくなる。

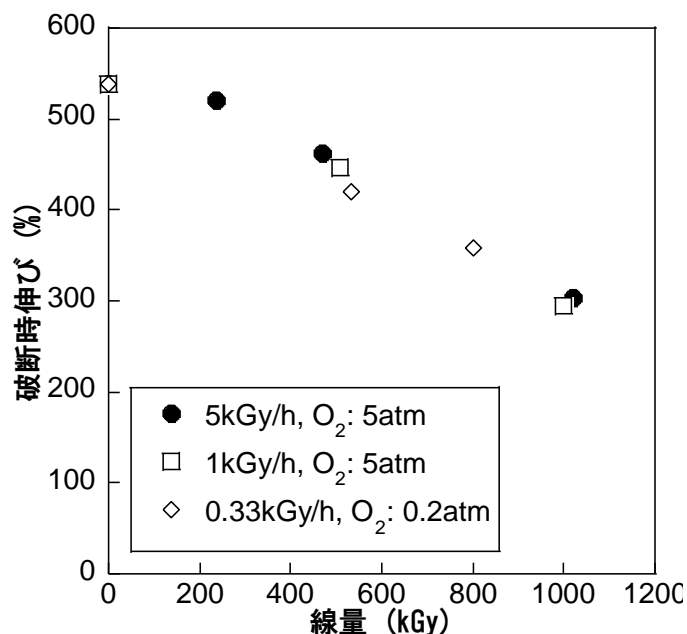


図 2.2-16 ポリエチレンの放射線劣化に及ぼす線量率、酸素濃度(分圧)の影響。

#### ⑥水の影響

図 2.2-17(a)は、酸化防止剤 Irganox1010 を 3 phr 含む 2 mm 厚の架橋ポリエチレン(XLPE)シートを 60°Cの水に浸漬した状態で、線量率 18 Gy/h でガンマ線を最大 136 kGy まで照射後、試料厚さ方向におけるカルボニル基の生成量を調べた結果である<sup>(51)</sup>。ここで phr(parts by weight per hundred parts by weight of resin)とは、樹脂重量を 100 とした場合の添加剤の配合重量である。カルボニル基  $-C(=O)-$ は XLPE が酸化されることによって生成する官能基であり、図 2.2-9 に示した反応メカニズムにおいて生成する ROOR あるいは ROOH に対応する。カルボニル基の定量は赤外分光分析法によって行なわれ、ピーク強度が高いほど生成量が多いことを示している。この図から、75 kGy から 136 kGy までの間でカルボニル基の生成量が急激に増加することが明らかにされた。これは、配合されている酸化防止剤が 75

kGy から 136 kGy の間に失活することが原因ではないかと考察されている。図 2.2-17(b)は線量率 18 Gy/h でガンマ線を 136 kGy まで照射後のカルボニル基の生成量と照射時の水温の関係を示した結果である。照射時の水温が高くなるにつれカルボニル基の生成量が増加するが、80°Cで照射した場合、カルボニル基がほとんど検出されない結果が得られている。これについて詳細は明らかにされていないが、80°Cでは、水の放射線分解生成物が酸化防止剤として働くのではないかと推測されている。このようなカルボニル基の生成量の違いに対応し、図 2.2-17(c)に示す線量に対する引張り強度の変化では、60°Cでの照射の場合に強度低下が最も大きくなる結果が得られている。また、引張り強度の低下が 80 kGy 以上で顕著になっているが、これは図 2.2-17(a)から、カルボニル基の生成量が急激に増加する線量域と対応していることが明らかにされている。

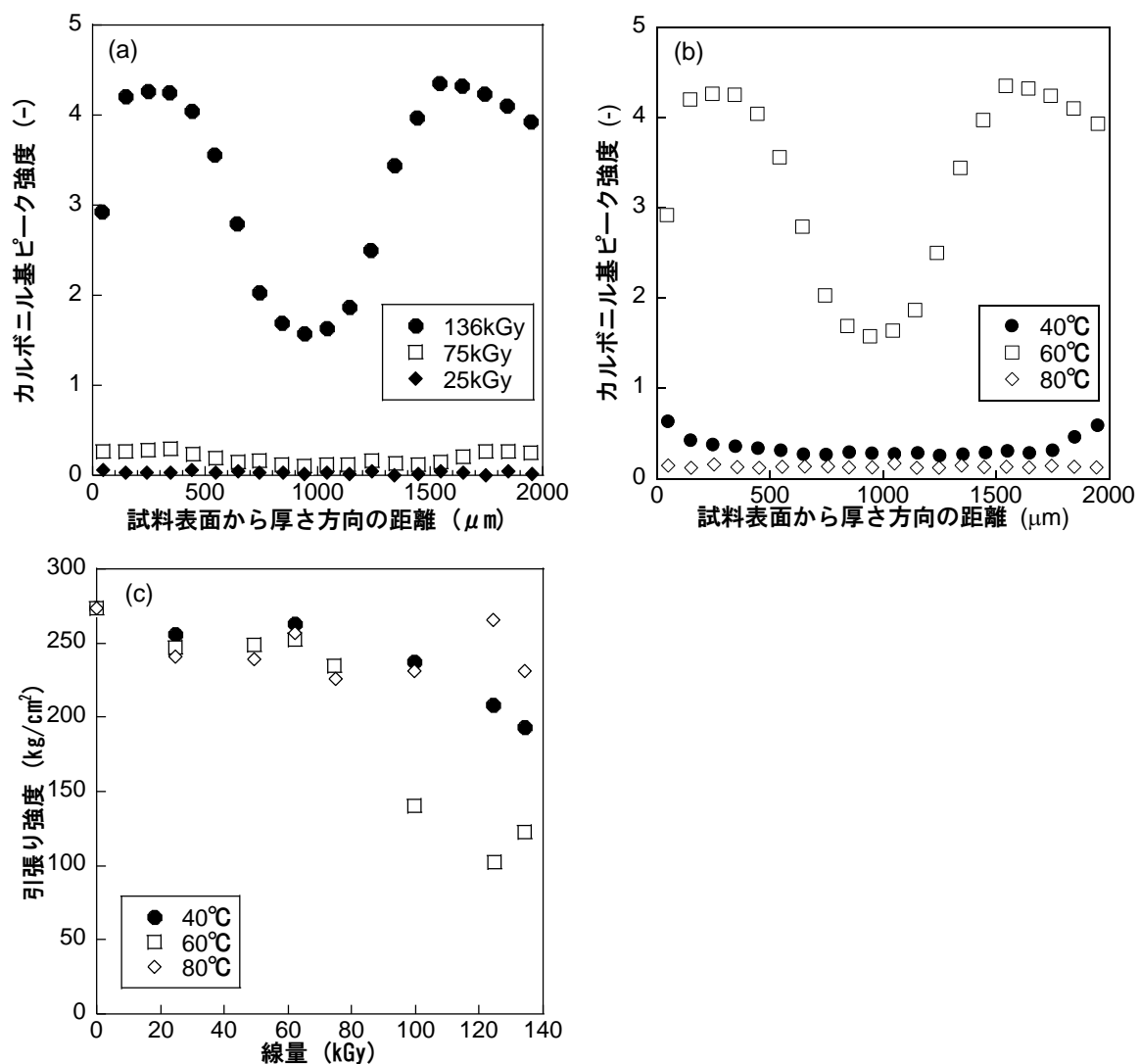


図 2.2-17 ポリエチレンの放射線劣化に及ぼす水の影響：(a) 水温 60°Cで照射した時の線量とカルボニル基生成量の関係、(b) 136 kGy まで照射した時の水温とカルボニル基生成量の関係、(c) 各水温における線量と引張り強度の関係。

以上のことから、ポリエチレンの放射線劣化に関する既往の研究成果・知見についての調査結果は次の通りである。

- ・ポリエチレンの放射線劣化は主に酸化に起因する。
- ・ポリエチレンの種類、製造方法(会社)、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。
- ・真空中等、酸素不在下では、ポリエチレンの放射線劣化は抑制される。
- ・酸素存在下では、高温ほど低線量で特性が劣化する。
- ・酸素存在下では、低線量率ほど低線量で特性が劣化する。
- ・試料全体が酸化される照射条件では、線量率の影響は認められなくなる。
- ・水／放射線環境下でもポリエチレンは酸化し、水温 60℃で照射した場合に劣化が最大となるとの報告がある。

### (b)HIC 用ポリエチレンに関する既往の研究成果・知見の整理

HIC は、米国原子力規制委員会(Nuclear Regulatory Commission; NRC)から権限を委譲されたサウスカロライナ州健康環境局(S. C. Department of Health and Environmental Control)が認可した低レベル放射性廃棄物保管容器であり、米国バーンウェル処分場で最終処分するための保管容器として利用されている。認可に当たり、表 2.2-2 に示す要件(一部を抜粋)を満たすこととされている<sup>(54-56)</sup>。このうち材料特性に関する要件は、1 MGy 以上の耐放射線性(300 年間の健全性)を有すること、貯蔵時の容器温度が 76.6℃以下であること、となっている。

表 2.2-2 米国における高性能容器の主な認可要件。

貯蔵場所	粘土層を掘ったトレンチ内
貯蔵期間	設計寿命として 300 年以上
耐放射線性	1MGy 以上(300 年間)
収容物含水率	1%以下
貯蔵時の容器温度	76.6℃ (170° F)以下
可燃性ガス発生への対応	内圧解放のためのベント設置
輸送に関する事項	A 型輸送容器

この要件を満たす材料として注目されたのが、安価で化学的安定性(耐腐食性)が金属材料よりも優れるポリエチレンであり、1980～1990 年代にかけて、広く放射線照射試験が実施され、特に Brookhaven National Laboratory (BNL)から数多くの報告書が発表されている<sup>(57-67)</sup>。ここでは BNL 報告書のデータを中心に、HIC 用ポリエチレンに関する既往の研究成果・知見を整理した。

BNL 報告書の中で対象とされていたポリエチレンは、架橋高密度ポリエチレン(Highly crosslinked high density polyethylene)である Marlex<sup>®</sup>シリーズ(CL-100、CL-200; 現 Chevron Phillips Chemicals 製)である。これらの材料に対し、引張り試験、クリープ試験、U ベンド試験、ストレスクラッキング試験、耐衝撃試験、生物分解試験、模擬廃液浸漬試験等による耐放射線性評価結果がまとめられている<sup>(58,62,63)</sup>。

図 2.2-18 に、Marlex CL-100、CL-200(3 mm 厚シート)に空气中、10～11℃でガンマ線を照射後の引張り特性の変化を示す<sup>(63)</sup>。ここで、CL-100 と CL-200 について、基本構造は同様であるが、原料が異なり、CL-200 の方が初期の破断時伸びが大きい特徴があると述べら

れている(図 2.2-18 (b)、(d)の初期値を参照)。試験時の線量率が異なるものの、いずれについてもその降伏強度は数十 kGy から 100 kGy 程度の線量域でほとんど変化していない(図 2.2-18 (a)、(c))。一方、破断時伸びは約 100 kGy までの線量域で低下が顕著であり、線量率が低いほど低線量で劣化が大きくなる結果が得られている。

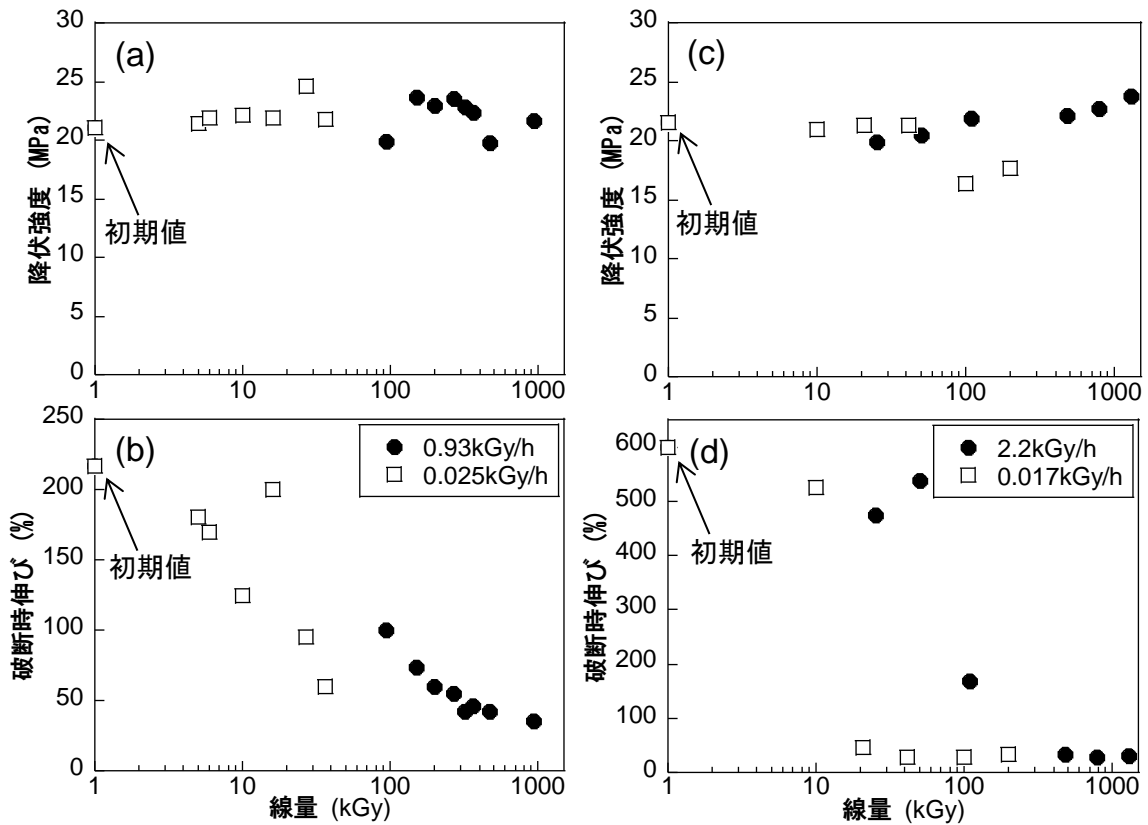


図 2.2-18 HIC 用ポリエチレンについて実施された耐放射線性試験結果(引張り特性): (a) CL-100 の降伏強度変化、(b) CL-100 の破断時伸び変化、(c) CL-200 の降伏強度変化、(d) CL-200 の破断時伸び変化。

この他、クリープ試験の結果、空気中でのガンマ線照射によってクリープ速度が低下するとともに破断時伸びが増加することが明らかにされている。U ベンド試験は、ポリエチレンシートを U 字に曲げて固定した状態でガンマ線照射等の各種処理を行ない、一定時間後にクラックの数を計測する試験である。この試験結果については、空気中低線量率でガンマ線を照射すると、クラックが発生しやすくなることが明らかにされている。また、ストレスクラッキング試験は、試験片に一定荷重または一定ひずみを与えた状態でガンマ線照射等の各種処理を行ない、一定時間後にクラック発生の有無を観察する試験である。プラスチック材料においては、初期段階でクラックが発生し、それが成長して破壊に至ることから、実用的なプラスチック製品の耐久性評価方法としてこの方法が広く用いられている。この試験結果も U ベンド試験と同様に、空気中低線量率でガンマ線を照射すると、短時間でクラックが発生し、成長することが明らかにされている。また、放射線照射後の耐衝撃試験も実施されており、100 kGy まで強度低下が見られないことが確認されている。さらに、生物分解試験や模擬廃液浸漬試験の結果、いずれの場合も引張り特性に大きな変化がないことが明らかにされている。



最終報告書では、これら一連の研究結果の総括として、以下の点が提言されている<sup>(63)</sup>。

- ・一連の試験における線量率は実環境よりも数十倍高いため、ポリエチレンの正確な寿命予測は困難である。
- ・実環境で容器にかかる応力は、材料を変形させるほど大きくない。ただし、試験データから、保管期間中の積算線量を 50 kGy 程度に設定することが望ましい。
- ・容器健全性評価のために、サーベイ用試験片を設置し、適宜取り出して評価する方法、あるいは使用中の容器から試験片を取り出して評価する方法を提案する。
- ・容器輸送時の落下事故に対し、十分な耐衝撃強度を維持する必要があるため、より低い線量率でのデータ取得が必要である。

### (c) 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

ここでは、東京電力株式会社が公表している資料を基に、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 ならびにその保管環境条件について取りまとめた。

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 は米国で認可されたものである<sup>(68,69)</sup>。ただし、米国では収容物の含水率が 1 vol% 以下であることが認可要件となっているが、ここで使用される HIC については、収容物の含水率は最大約 100 vol% である。HIC はステンレス鋼製補強体に収納され、さらに、コンクリート製ボックスカルバートに収納された状態で保管されている。HIC 導入にあたり、様々な条件での落下試験により健全性が評価され、収容物の漏れ等がないことが確認されている<sup>(68,70)</sup>。また、容器内部の最高温度は約 65°C、容器表面の最高温度は約 50°C、20 年間の保管期間中における最大積算線量は 46 kGy になると計算されている<sup>(70-72)</sup>。線量率は時間経過とともに減少すると考えられるが、最大積算線量の値から、20 年間の平均線量率は 0.26 Gy/h となる。

HIC は、直径約 1500 mm、高さ約 1800 mm、厚さが約 11 mm の円筒形容器であり、材質として使用されるポリエチレンは架橋ポリエチレンである。この材料特性として表 2.2-3 のようにまとめられている<sup>(73)</sup>。密度が 0.941 g/cm<sup>3</sup> であることから、架橋された高密度ポリエチレンであると推測される。

表 2.2-3 HIC 用ポリエチレンの材料特性.

密度	0.941 g/cm <sup>3</sup>
耐環境応力亀裂性	1000 h 以上
曲げ弾性率	689 MPa
引張り強度	17.9 MPa
引張り伸び率	350%
軟化点	123°C
脆化温度	-90°C未満

この架橋ポリエチレンについて、耐放射線性試験が実施されている(表 2.2-4)<sup>(71,74,75)</sup>。HIC 製造メーカーによって実施された試験では、厚さ 12.7 mm の試料に空气中 10 kGy/h で最大 3000 kGy までガンマ線を照射後、引張り試験を行なった結果、100 kGy までは引張り強度および延性に有意な変化が無かったことが報告されている。また、試料寸法は明記されていないが、空气中、室温、1 kGy/h でのガンマ線照射試験後の引張り試験、シャルピー衝撃試験も行なわれており、いずれの特性も 100 kGy まで有意な変化が無かったことが報告さ

れている。また、ベータ核種の収容を考慮した 10 MeV 電子線照射試験も行なわれており、この場合、500 kGy までは有意な特性変化が無かったことが報告されている。

表 2.2-4 HIC 用ポリエチレンに対して実施された耐放射線性試験とその結果。

	ガンマ線照射 (HIC 製造メーカーにて実施)	ガンマ線照射	10MeV 電子線照射
試料	架橋 PE	架橋 PE	架橋 PE
寸法	88.9×203×12.7mm	- (記載なし)	- (記載なし)
雰囲気	空気	空気	- (記載なし)
温度	- (記載なし)	室温	室温
線量率・線量	10kGy/h, ~3000kGy	1kGy/h, ~500kGy	~2000kGy
評価	引張り試験	引張り試験 シャルピー衝撃試験	引張り試験 シャルピー衝撃試験
結果	100kGy まで有意な 特性変化なし	100kGy まで有意な 特性変化なし	500kGy まで有意な 特性変化なし

これまでに述べてきた(a)ポリエチレンの放射線劣化に関する既往の研究成果・知見、(b)HIC 用ポリエチレンに関する既往の研究成果・知見、(c) 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の調査結果を基に、既往の研究における試験条件・評価項目を比較検討した。表 2.2-5 は、本調査で調べた資料において実施された試験条件(線量率、温度、雰囲気)・評価項目と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 が置かれる実環境を並べたものである。この表において「HIC 用 PE」

表 2.2-5 ポリエチレンの放射線劣化に関する研究における試験条件・評価項目の比較。

		HIC 用 PE	東電試験	その他 PE	実環境
線量率 (Gy/h)		8.5~7×10 <sup>4</sup>	1×10 <sup>3</sup> ~1×10 <sup>4</sup>	5~1×10 <sup>5</sup>	0.26
温度		室温~150°C	室温	室温~175°C	max65°C
雰囲気	空気	●	●	●	空気/水
	真空	●		●	
	酸素	●		●	
	水			●	
物性評価	引張り試験	●	●	●	
	曲げ試験	●			
	クリーブ試験	●			
	ストレスクラッキング試験	●			
	シャルピー衝撃試験	●	●		
	ゲル分率測定	●		●	
	酸素溶解度・拡散係数評価	●		●	
	赤外分光分析			●	
	ガス分析	●		●	
	示差熱分析	●		●	

とは、BNL 報告書で対象にされた HIC 用ポリエチレンに関する試験、「東電試験」とは、東京電力の資料で報告されていた試験、「その他 PE」とは、これら以外のポリエチレンに関する試験、「実環境」とは、東京電力株式会社福島第一原子力発電所において HIC が使用される環境を示している。この表から、HIC 用 PE については、線量率 8.5 Gy/h から  $7 \times 10^4$  Gy/h、室温から 150°C の温度で、空気、真空、酸素中で各種データが取得されている。東京電力の試験では、 $1 \times 10^3$  から  $1 \times 10^4$  Gy/h の線量率で、室温、空気中において引張り試験とシャルピー衝撃試験が行われている。そして、その他 PE については、5 Gy/h から  $1 \times 10^5$  Gy/h の線量率、室温から 175°C の温度で、空気、真空、酸素に加えて水中でのデータが取得されている。一方、実環境では線量率が 0.26 Gy/h、最高温度が約 65°C と見積もられており、曝される雰囲気は空気と水である。

実環境と照らして、今回の調査により以下の点が明らかになった。

- ・ 既往の研究で得られているデータのほとんどが実環境よりも 1 桁以上高い線量率で評価された結果であること
- ・ HIC 用ポリエチレンに関して水／放射線環境下での試験データが無いこと
- ・ その他ポリエチレンに関して高温水中での照射試験が行なわれているが、容器としての健全性を測るストレスクラッキング試験等のデータが無いこと

これらのことから、HIC の長期保管に係る劣化評価の判断基準のための技術的知見を蓄積するために、ポリエチレン(架橋された高密度ポリエチレンが適していると考えられる)について、水／放射線環境下における引張り特性等の機械的特性劣化データ(温度、線量率、線量依存性)の取得が必要であると考えられる。このデータと空気／放射線環境下での機械的特性劣化データを併せて長期的な保管に係る技術要件を整理することによって、監視すべきポイント及び講ずるべき措置を検討することが必要であると考えられる。

### (3)まとめ

本節では、多核種除去設備(ALPS; Advanced Liquid Processing System)から排出される水処理廃棄物を収容する高性能容器(HIC; High Integrity Container)について、長期的な保管の可能性を考慮した際の劣化評価の判断基準のための技術的知見を蓄積するため、容器材質であるポリエチレンの放射線劣化に関する既往の研究成果・知見を収集・整理し、取りまとめた。得られた結果を以下にまとめる。

#### (a) ポリエチレンの放射線劣化に関する既往の研究成果・知見について

- ・ ポリエチレンの放射線劣化は主に酸化に起因する。
- ・ ポリエチレンの種類、製造方法(会社)、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。
- ・ 真空中等、酸素不在下では、ポリエチレンの放射線劣化は抑制される。
- ・ 酸素存在下では、高温ほど低線量で特性が劣化する。
- ・ 酸素存在下では、低線量率ほど低線量で特性が劣化する。
- ・ 試料全体が酸化される照射条件では、線量率の影響は認められなくなる。
- ・ 水／放射線環境下でも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るとの報告がある。

#### (b) HIC 用ポリエチレンに関する既往の研究成果・知見について

- ・ 研究対象となったポリエチレンは、架橋高密度ポリエチレン(Highly crosslinked high density polyethylene)である。
- ・ 引張り試験、クリープ試験、U ベンド試験、ストレスクラッキング試験、耐衝撃試験、生物分解試験、模擬廃液浸漬試験等による耐放射線性評価結果がまとめられている。ただし、水／放射線環境下において取得されたデータはない。

(c) 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

- ・ ポリエチレンが曝される雰囲気は、空気と水である。
- ・ 容器内最高温度は約 65℃、容器表面最高温度は約 50℃と見積もられている。
- ・ 20 年間保管した場合の最大積算線量は、約 46 kGy と見積もられている。

以上、(a)、(b)、(c)の調査結果を基に、HIC の長期保管に係る劣化評価の判断基準のための技術的知見を蓄積するために、ポリエチレンについて、水／放射線環境下における引張り特性等の機械的特性劣化データ(温度、線量率、線量依存性)の取得が必要であると考えられる。このデータと空気／放射線環境下での機械的特性劣化データを併せて長期的な保管に係る技術要件を整理することによって、監視すべきポイント及び講ずるべき措置を検討することが必要であると考えられる。

## 第 2.2 章 参考文献

- (1) 佐藤博之ら, 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).
- (2) 佐藤博之ら, 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」, (2014).
- (3) C.Kato, T.Satoh, Corrosion of The Stainless Steel In The Zeolite Containing Diluted Artificial Seawater Under Gamma-Ray Irradiation, Proc. NPC 2014, 10140, (2014).
- (4) Y. Kumagai, Decomposition of hydrogen peroxide by  $\gamma$ -ray irradiation in mixture of aqueous solution and Y-type zeolite, Radiation Physics and Chemistry, 97, 223, (2014).
- (5) 腐食防食協会編, 4.2 ステンレス鋼, 4.2.7 局部腐食, 「材料環境学入門」, 丸善 (1993), pp.85-86.
- (6) 日本防錆技術協会編, 防錆技術学校教科書 腐食理論 II.
- (7) 下平三郎, 腐食・防食の材料科学 (アグネ技術センター出版).
- (8) 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).
- (9) 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 Vol. 48, No.4., (1994).
- (10) D. B. Malpass, Introduction to industrial polyethylene properties catalysts processes, John Wiley and Sons Inc., (2010).
- (11) M. Tolinski, Additives for polyolefins getting the most out of polypropylene polyethylene and TPO, Elsevier, Amsterdam, (2009).
- (12) 西原一, 高分子の長寿命化と物性維持, シーエムシー出版, (2001).
- (13) 大澤善次郎, 高分子材料と複合材製品の耐久性, シーエムシー出版, (2005).
- (14) 瀬口忠男, 反町正美, 田村清俊, 各種高分子材料の耐放射線性 -実使用環境模擬の劣化評価-, JAEA-Data/Code 2009-018, (2009).
- (15) H. Schönbacher and, A. Stolarz-lzycka, Compilation of radiation damage test data part I : cable insulating materials, CERN 79-04, (1979).
- (16) M. Tavlet, A. Fontaine and H. Schönbacher, Compilation of radiation damage test data part II, 2nd edition : thermoset and thermoplastic resins, composite materials, CERN 98-01, (1998).
- (17) P. Beynel, P. Maier and H. Schönbacher, Compilation of radiation damage test data part III : materials used around high-energy accelerators, CERN 82-10, (1982).
- (18) H. Schönbacher and M. Tavlet, Compilation of radiation damage test data part I , 2nd edition : halogen-free cable-insulating materials, CERN 89-12, (1989).
- (19) B. S. Lee, P. Soo and D. R. MacKenzie, Development of radiation resistant electrical cable insulations, BNL-49748, (1993).
- (20) L. S. Ono, S. R. Scagliusi, E. E. L. Cardoso and A. B. Lugão, Gamma irradiation effects in low density polyethylene, 2011 International Nuclear Atlantic Conference (INAC), (2011).
- (21) D. Miličević, S. Trifunović, M. Popović, T. V. Milić, E. Suljovrujić, The influence of orientation on the radiation-induced crosslinking/oxidative behavior of different PEs, NIMB, 260, (2007), pp 603-612.

- (22) 金神雅樹, 栗原隆史, 布施則一, 水谷嘉伸, 本間宏也, 秀耕一郎, 岡本達希, 熱・放射線ストレスによる XLPE 絶縁体の機械特性の劣化 -酸化防止剤濃度の影響-, 電力中央研究所報告 研究報告 : H10014, (2011).
- (23) 瀬口忠男, 田村清俊, 工藤久明, 島田明彦, 杉本雅樹, 出崎亮, 大島武, 吉川正人, ケーブル絶縁材料の経年劣化研究, JAEA-Review 2012-027, (2012).
- (24) A. B. Reynolds and P. A. Wlodkowski, Comparison of antioxidants for combined radiation and thermal aging and superposition of radiation and thermal aging for EPR and XLPE, *Radiat. Phys. Chem.*, 38, 6, (1991), pp. 553-559.
- (25) T. Seguchi, K. Tamura, T. Ohshima, A. Shimada and H. Kudoh, Degradation mechanisms of cable insulation materials during radiation-thermal ageing in radiation environment, *Radiat. Phys. Chem.*, 80, 2, (2011), pp. 268-273.
- (26) A. B. Reynolds, J. W. Ray and P. A. Wlodkowski, Effect of antioxidants on aging of nuclear plant cable insulation, EPRI-NP-7140, (1991).
- (27) O. Gal, Lj. Novaković, V. Marković, and V. T. Stannett, Thermogravimetric studies of the thermooxidative stability of irradiated and unirradiated polyethylene part I . effect of antioxidant, *Radiat. Phys. Chem.*, 22, 3-5, (1983), pp. 627-634.
- (28) 大勝靖一, 高分子添加剤の基礎化学と材料設計, シーエムシー出版, (2008).
- (29) 春名徹, 高分子添加剤ハンドブック, シーエムシー出版, (2010).
- (30) T. Seguchi, K. Arakawa, M. Ito, N. Hayakawa and S. Machi, Radiation induced oxidative degradation of polymers-III: effect of radiation on mechanical properties, *Radiat. Phys. Chem.*, 21, 6, (1983), pp. 495-501.
- (31) Y. Hama, T. Oka, J. Uchiyama, H. Kanbe, K. Nabeta and F. Yatagai, Long-term oxidative degradation in polyethylene irradiated with ion beams, *Radiat. Phys. Chem.*, 62, (2001), pp. 133-139.
- (32) E. Suljovrujic, Post-irradiation effects in polyethylenes irradiated under various atmospheres, *Radiat. Phys. Chem.*, 89, (2013), pp. 43-50.
- (33) L. A. Jirackova, G. Papet and J. Verdu, Effect of radiochemical ageing on the tensile properties of high density polyethylene, *Eur. Polym. J.*, 25, 2, (1989), pp. 181-186.
- (34) R. L. Clough, K.T. Gillen, Investigation of cable deterioration inside reactor containment, *Nuclear Technology*, 59, 2, (1982), pp. 344-354.
- (35) K. T. Gillen and R. L. Clough, Occurrence and implications of radiation dose-rate effects for material aging studies, *Radiat. Phys. Chem.*, 18, 3-4, (1981), pp. 679-687.
- (36) L. D. Bustard, E. Minor, J. Chenion, F. Carlin, C. Alba, G. Gaussens and M. LeMeur, The effect of thermal and irradiation aging simulation procedures on polymer properties, NUREG/CR-3629 SAND83-2651, (1984).
- (37) 独立行政法人 原子力安全基盤機構 原子力システム安全部, 原子力プラントのケーブル経年劣化変化評価技術調査研究に関する最終報告書, JNES-SS-0903, (2009).
- (38) R. L. Clough, K. T. Gillen, Radiation-thermal degradation of PE and PVC: mechanism of synergism and dose rate effects, *Radiat. Phys. Chem.*, 18, 3-4, (1981), pp. 661-669.
- (39) 佐藤干城, 小林由紀, 吉田伸, 塩野武男, 田口徹, 一森康文, 低圧用電線・ケーブルの熱・放射線劣化機構の検討, 電気学会 誘導・絶縁材料研究会資料 DEI-96-139, (1996), pp. 63-70.

- (40) T. Seguchi, K. Arakawa, N. Hayakawa and S. Machi, Radiation induced oxidative degradation of polymers-IV. dose rate effects on chemical and mechanical properties, *Radiat. Phys. Chem.*, 18, 3-4, (1981), pp. 671-678.
- (41) P. Maier and A. Stolarz, Long-term radiation effects on commercial cable-insulating materials irradiated at CERN, CERN 83-08, (1983).
- (42) 岡本信一, 早川力, 竹谷千加士, 各種材料の放射線劣化に対する線量率効果, 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-82-112, (1982), pp. 37-47.
- (43) S. S. Cota, V. Vasconcelos, M. Senne Jr., L. L. Carvalho, D. B. Rezende and R. F. Côrrea, Changes in mechanical properties due to gamma irradiation of high-density polyethylene(HDPE), *Bra. J. Chem. Eng.*, 24, 2, (2007), pp. 259-265.
- (44) A. B. Reynolds, R. M. Bell, N. M. N. Bryson, T. E. Doyle, M. B. Hall, L. R. Mason, L. Quintric and P. L. Terwilliger, Dose-rate effects on the radiation-induced oxidation of electric cable used in nuclear power plants, *Radiat. Phys. Chem.*, 45, 1, (1995), pp. 103-110.
- (45) T. Seguchi, S. Hashimoto, K. Arakawa, N. Hayakawa, W. Kawakami, I. Kuriyama, Radiation induced oxidative degradation of polymers-I: oxidation region in polymer films irradiated in oxygen under pressure, *Radiat. Phys. Chem.*, 17, (1981), pp. 195-201.
- (46) K. Arakawa, T. Seguchi, N. Hayakawa and S. Machi, Radiation-induced oxidation of polymers. effect of antioxidant and antirad agent on oxygen consumption and gas evolution, *Polymer Chemistry*, 21, 4, (1983), pp. 1173-1181.
- (47) T. Seguchi and Y. Yamamoto, Diffusion and solubility of oxygen in  $\gamma$ ray irradiated polymer insulation materials, JAERI, 1299, (1986).
- (48) 栗原隆史, 高橋俊裕, 水谷嘉伸, 金神雅樹, 土肥謙次, 本間宏也, 岡本達希, 熱・放射線劣化させた架橋ポリエチレンケーブル絶縁材料の材料物性と微細構造分析, 電力中央研究所報告 研究報告 : H09017, (2010).
- (49) Y. Izumi, M. Nishii, T. Seguchi, K. Ema and T. Yamamoto, Effect of molecular orientation on the radiolysis of polyethylene in the presence of oxygen, *Radiat. Phys. Chem.*, 37, 2, (1991), pp. 213-216.
- (50) 瀬口忠男, 吉田健三, 酸素加圧下照射による電気絶縁材料の促進劣化, 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-82-113, (1982), pp. 49-55.
- (51) T. Matsui, T. Takano, S. Takayama, M. Ito and I. Narisawa, Degradation of crosslinked polyethylene in water by gamma-irradiation, *Radiat. Phys. Chem.*, 63, (2002), pp. 193-200.
- (52) 小山徹, 塚野隆, 濱義昌, 水・放射線暴露などによる高分子系素材の複合劣化挙動, *放射線化学*, 67, (1999), pp. 30-34.
- (53) 東村豊, 藤岡慎英, 狩野育志, 大貫勉, 渡辺清, ポリエチレンの浸水課電劣化におよぼす  $\gamma$  線照射の影響, 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-84-139, (1984), pp. 21-28.
- (54) H. Lowenberg and M. D. Shaw, Development of a composite polyethylene-fiberglass-reinforced-plastic high-integrity container for disposal of low-level radioactive waste, in "Environmental aspects of stabilization and solidification of hazardous and radioactive wastes", Ed by P. Côté and M. Gilliam, ASTM, Philadelphia. (1989), pp. 63-73.



- (55) R. E. Holzworth, R. L. Chapman, H. M. Burton and W. W. Bixby, Development of a high integrity container for storage, transportation, and disposal of radioactive wastes from Three Mile Island unit II, EGG-M-08081, (1981).
- (56) P. T. Tuite, High integrity container development, Proceedings of the fifth annual participants' information meeting DOE low-level waste management program (CONF-8308106), (1983), pp. 504-512.
- (57) H. Arora, K. J. Swyler, and R. Dayal, Properties of radioactive wastes and waste containers, Proceedings of the fifth annual participants' information meeting DOE low-level waste management program (CONF-8308106), (1983), pp. 325-337.
- (58) D. R. Dougherty, J. W. Adams, and R. E. Barletta, An evaluation of the radiation resistance of high-density polyethylene, BNL-NUREG-34425, (1984).
- (59) B. Siskind, D. R. Dougherty, and D. R. MacKenzie, Extended storage of low-level radioactive waste: potential problem areas, BNL-NUREG-36149, (1985).
- (60) B. Siskind, Potential problem areas: extended storage of low-level radioactive waste, BNL-NUREG-37068, (1985).
- (61) P. Soo, Effects of chemical and gamma irradiation environments on the mechanical properties of high-density polyethylene (HDPE), BNL-NUREG-40842, (1988).
- (62) P. Soo, C. I. Anderson and J. H. Clinton, A study of the use of crosslinked high-density polyethylene for low-level radioactive waste containers, NUREG/CR-5363 BNL-NUREG-52196, (1989).
- (63) P. Soo, L. W. Milian, M. G. Cowgill and T. M. Sullivan, The extended storage of radioactive ion-exchange resins in polyethylene high integrity containers, BNL-52429, (1994).
- (64) J. H. Heiser and P. Soo, Corrosion of barrier materials in seawater environments, BNL-62314, (1995), pp. 77-94.
- (65) P. J. Nigrey and T. G. Dickens, Comprehensive Testing to Measure the Response of Liner Materials to Hanford Tank Waste Simulant, SAND99-0419, (1999).
- (66) T. Sullivan, Waste container and waste package performance modeling to support safety assessment of low and intermediate-level radioactive waste disposal, BNL-74700-2005-IR, (2004).
- (67) A. Vokál, V. Plaček, B. Bartoniček and S. Konopásková, Long term behaviour of polyethylene high integrity containers under repository conditions, IAEA-TECDOC-1397, (2004), pp. 73-88.
- (68) 東京電力株式会社 多核種除去設備に関する補足説明資料, 2013.1.24, 特定原子力施設監視・評価検討会(第2回) 参考4.
- (69) 東京電力株式会社 高性能容器(HIC)の米国認証及び紫外線劣化影響について, 2014.2.21.
- (70) 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, 2014.5.2, 特定原子力施設監視・評価検討会(第21回) 参考5.
- (71) 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, 2013.1.24, 特定原子力施設監視・評価検討会(第2回) 資料4.
- (72) 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, 2012.9.5, 「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。

- (73) 経済産業省 原子力安全保安院 福島第一原子力発電所第1～4号機に対する「中期的安全確保の考え方」に基づく施設運営計画に係る報告書（その3）の変更、別紙4：5. 放射性液体廃棄物処理施設及び関連施設, 2012.8.2.
- (74) 東京電力株式会社 改良型 HIC 導入及び健全性確認について, 2013.12.25.
- (75) 東京電力株式会社 高性能容器のβ線に対する健全性評価について, 2014.7.3

## 2.3 実環境を想定したステンレス鋼の腐食試験の計画立案

2.1～2.2 節の情報及び知見をうけて、以下の腐食試験の計画を立案した。

実環境を想定しゼオライトと塩化物イオン共存環境における浸漬試験を実施する。塩化物イオンを含んだ残留水が蒸発・濃縮する環境を模擬し、SCC やすき間腐食などの局部腐食発生の有無を確認すると共に、懸念される放射線(γ線)の影響を調査することを目的とする。図 2.3-1 に試験概要図を示す。

### 腐食試験計画

- ・対象材 : SUS316L (SUS316L 溶接継ぎ手)
- ・試験片 : U ベンド試験片 (SCC 試験)  
: すき間付与試験片 (すき間腐食試験)
- ・試験環境 : ゼオライトと塩化物イオン共存環境  
希釈人工海水 (Cl<sup>-</sup> : 10ppm、200ppm、16,000ppm) + ゼオライト
- ・試験温度 : 室温～80℃
- ・試験時間 : 2000h (500h 経過ごとに途中評価を実施する)
- ・大気解放 : 有、無 (残留水が蒸発・濃縮を再現)
- ・γ線照射 : 有、無
- ・評価方法 : 外観観察 (顕微鏡観察) 割れ発生確認

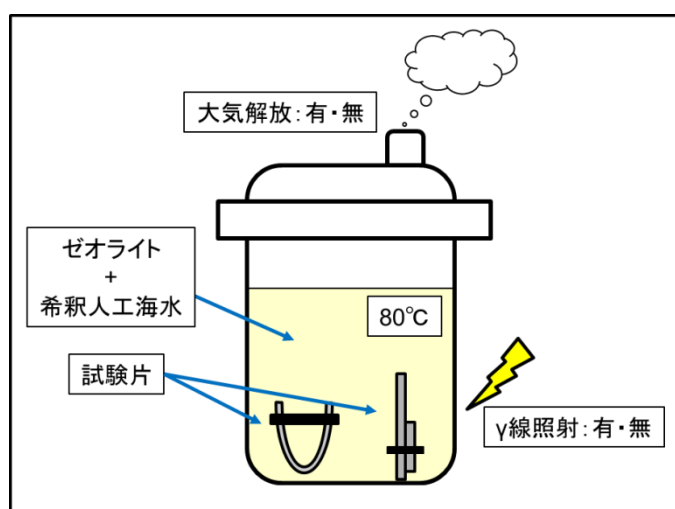


図 2.3-1 浸漬試験概要図

対象材としては水処理二次廃棄物として保管される容器に主に使用されている材質が SUS316L であることから SUS316L を選定した。試験片については SCC の発生を確認するために小規模の試験片で応力を付与することのできる U ベンド試験片(図 2.3-2)を、またすき間腐食を確認するためにすき間付与試験片 (図 2.3-3) を提案した。試験環境は実環境を模擬し、ゼオライトと塩化物イオン共存環境とするため希釈人工海水にゼオライトを浸しその中に試験片を浸漬させる。塩化物イオン濃度は水処理二次廃棄物保管において推定される洗浄後の残留水中の濃度の下限値 10ppm、上限値 200ppm、さらに洗浄されなかった場

合の 16,000ppm の 3 条件とした。また、温度は実際の環境が大気解放環境であるため、液温が沸点(100°C)を超えないと仮定し、室温～80°Cとした。

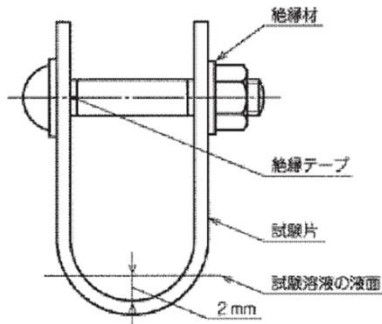


図 2.3-2 U ベンド試験片の形状例<sup>(1)</sup>

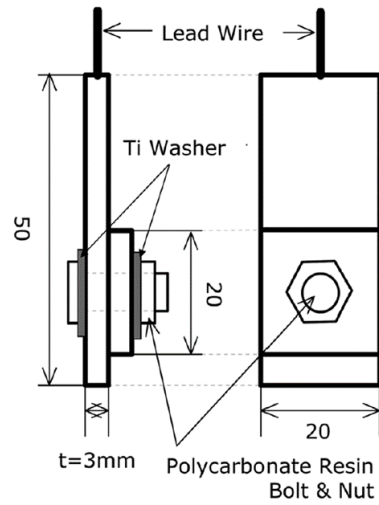


図 2.3-3 すき間腐食試験片の形状例<sup>(2)</sup>

試験期間は 500h 経過ごとに途中評価を実施し、試験片の発錆状態や割れの有無などを考慮して検討し最大 2,000h とする。なお試験の実施手順として、まず非照射下における試験を実施し試験方法の確認を行うとともに、その結果を考慮して照射下試験のパラメータ等の設定を実施した上で照射下試験を実施する事が適切であると考えられる。

## 2.4 ステンレス鋼の腐食に関する解析コードの調査及び概念の構築

ステンレス鋼の腐食に関する解析コードの調査を行った、以下に調査した解析コードについて示す。

### (1) CANBEY1<sup>(3)</sup>

ステンレス鋼製キャニスタの応力腐食割れ計算コードとして開発された。構成を図 2.4-1 に示す。入力データの一部を確立分布で与え、ラテン超方格法(LHS)により生成したパラメータセットを用いて SCC 発生時間を求め、SCC 発生時間が LHS で生成したどのパラメータに感度を有するかを統計解析するものである。パラメータセット生成モジュール(LHS)、ステンレス鋼製キャニスタの応力腐食割れ計算モジュール(canisterSCC)、統計解析モジュール(SPOP)の3つのモジュールからなっている。

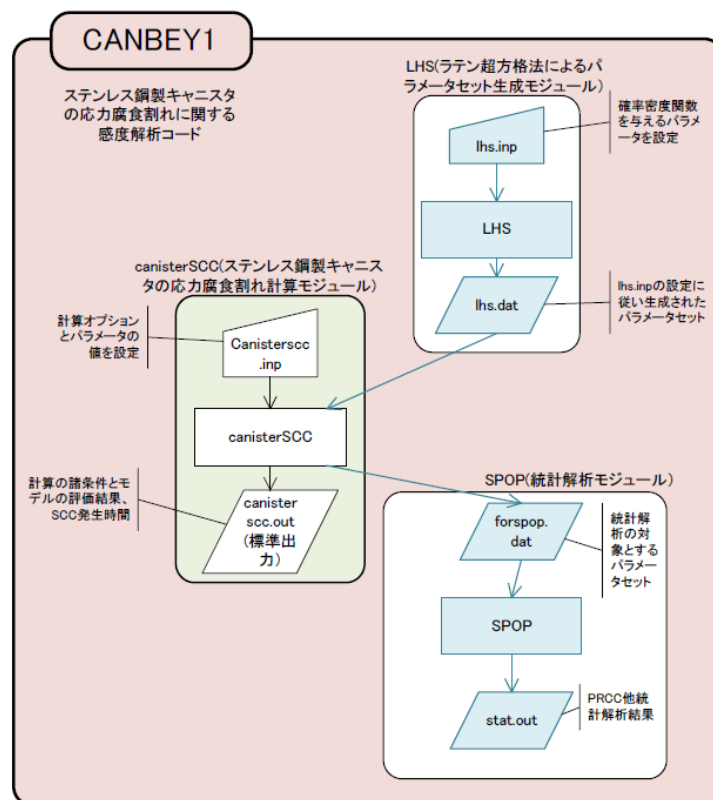


図 2.4-1 ステンレス鋼製キャニスタの応力腐食割れに関する感度解析コード CANBEY1 の構成<sup>(3)</sup>

ステンレス鋼製キャニスタの応力腐食割れ計算モジュール(以下canisterSCC)のフロー図を図2.4-2に示す。貯蔵開始からの年数tに対して2種類のモデル式のいずれかの条件を満たしたtをSCCの発生時間としている。モデル式は、付着塩分量がSCC発生限界付着濃度以上かつ、キャニスタ表面湿度が塩化マグネシウムの潮解湿度以上かつ、キャニスタ表面温度が103.5℃以下の場合(モデル1)、付着塩分量がSCC発生限界付着濃度以上かつ、キャニスタ表面温度が103.5℃以下の場合(モデル2)の2種類を選択するものである。①キャニスタ表面における付着塩分濃度、②SCC発生限界塩分濃度、③キャニスタ表面の相対湿度、④塩化

マグネシウムの潮解湿度、⑤キャニスタ表面の温度は後述の通りそれぞれ(1)～(6)式が与えられており、算出が可能である。材料、応力については、SCC発生限界濃度に材料因子、応力緩和因子として考慮されているが、環境因子についての評価がメインである。

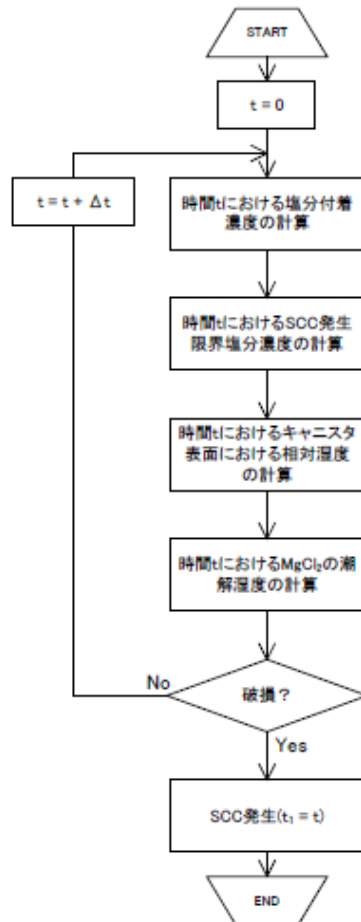


図 2.4-2 ステンレス鋼製キャニスタの応力腐食割れ計算コード canisterSCC のフロー図<sup>(3)</sup>

時間 $t$ (y)におけるキャニスタ表面における付着塩分濃度 $Q_1(t)$ ( $\text{mg}/\text{m}^2$  as Cl)

$Q_1(t)$ ( $\text{mg}/\text{m}^2$  as Cl)は、以下の(1)式で算出する。

$$Q_1(t) = r_{\text{ad}} \times t \quad \dots (1)$$

$r_{\text{ad}}$  : 塩分付着速度( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{y}$  as Cl)

塩分付着速度 $r_{\text{ad}}$  ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{y}$  as Cl)の算出式を以下に示す。

$$r_{\text{ad}} = A_5 \times 8766 \times C_{\text{Cl,air}} \quad \dots (1-2)$$

$C_{\text{Cl,air}}$  : 気中塩分濃度( $\text{mg}/\text{m}^3$ )

$A_5$  : 気中塩分濃度 $1\text{mg}/\text{m}^3$ の時の塩分付着速度( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{h}$  per  $\text{mg}/\text{m}^3$ )

この塩分付着速度は、キャニスタ外表面が流速 $0.3 \sim 1.4 \text{ m/s}$ の空気で自然冷却されること

を想定している。気中塩分濃度 $C_{Cl,air}$ は、以下の式(1-3)で算出する。

$$C_{Cl,air} = A_2 \cdot \exp(-0.693 \times x / A_3) + A_4 \cdot \dots \quad (1-3)$$

$x$  : 海岸からの距離(m)

$A_2$  : 気中塩分濃度 $C_{Cl,air}$ の距離依存成分の $x=0$ における値( $mg/m^3$  as Cl)

$A_3$  : 気中塩分濃度 $C_{Cl,air}$ の距離依存成分の半減距離 (m)

$A_4$  : 気中塩分濃度 $C_{Cl,air}$ の距離依存しない成分( $mg/m^3$  as Cl)

②時間  $t(y)$ における SCC 発生限界塩分濃度  $Q_2(t)(mg/m^2$  as Cl)

$Q_2(t)(mg/m^2$  as Cl)は、以下の式(2)で算出する。

$$Q_2(t) = \alpha \times k_{str} \times k_{rad}(t) \cdot \dots \quad (2)$$

$\alpha$  : 材料因子( $mg/m^2$ )

$k_{str}$  : 応力緩和因子(-)

$k_{rad}(t)$  : 時間 $t$  (y)における放射線影響因子(-)

・材料因子 $\alpha$

材料因子 $\alpha$ は、ステンレス鋼種の違いにより定まる定数であり、以下に示すような値をとる。

$\alpha = 800$  ( $mg/m^2$ ) for SUS304L

$\alpha = 1,000$  ( $mg/m^2$ ) for SUS329J4L

$\alpha = 4,000$  ( $mg/m^2$ ) for SUS316L

$\alpha = 10,000$  ( $mg/m^2$ ) for S31254

・応力緩和因子 $k_{str}$

決定論的解析においては、応力緩和策失敗確率と応力緩和失敗パラメータの設定に関わらず応力緩和は考慮しないものとして、常に $k_{str} = 1.0$ で評価を実施する。感度解析においては、応力緩和因子 $k_{str}$ は、応力緩和失敗確率 $p_{fail}$ と失敗パラメータ $A_6$ に関して、キャニスタ上部、下部に分けてそれぞれ以下のように設定する。

キャニスタ上部

$$k_{str} = 1.0$$

キャニスタ下部

$$k_{str} = 1.0 \quad A_6 < p_{fail} \text{ の場合}$$

$$k_{str} = 1,000,000 \quad A_6 \geq p_{fail} \text{ の場合}$$

$p_{fail}$  : 応力緩和策失敗確率

$A_6$  : 応力緩和失敗パラメータ



- 放射線影響因子 $k_{\text{rad}}(t)$

時間 $t$  (y)における放射線影響因子  $k_{\text{rad}}(t)$ は、以下のように設定する。

$$k_{\text{rad}}(t) = A_7 \quad t < A_8$$

$$k_{\text{rad}}(t) = 1 \quad t \geq A_8$$

$A_7$  : 放射線影響係数(-)

$A_8$  : 放射線影響終了年次(y)

### ③キャニスタ表面における相対湿度 $RH_{\text{can}}$ (%)

$RH_{\text{can}}$  (%)は、以下の(3)式で算出する。

$$RH_{\text{can}} = 100 \times p / p_{\text{eq}} \dots (3)$$

$p$  : 水蒸気圧(hPa)

$p_{\text{eq}}$  : 平衡水蒸気圧(hPa)

- 水蒸気圧 $p$ 及び平衡水蒸気圧 $p_{\text{eq}}$

水蒸気圧 $p$ 及び平衡水蒸気圧 $p_{\text{eq}}$ は、それぞれ以下の(3-2)、(3-3)式で算出する。

$$p = B_1(T + T_d)^2 + B_2(T + T_d) + B_3 \dots (3-2)$$

$$\log_{10}(p_{\text{eq}} / 1.33322) = 8.07131 - 1730.63 / (233.426 + T_{\text{can}}) \dots (3-3)$$

$p_{\text{eq}}$  : 平衡水蒸気圧(hPa)

$T$  : 気温(°C)(一日の最低気温 $A_1$  °Cを入力する。)

$T_d$  : 気温日較差(°)

$B_1$  : 水蒸気圧評価式2次項の係数

$B_2$  : 水蒸気圧評価式1次項の係数

$B_3$  : 水蒸気圧評価式定数項

$T_{\text{can}}$  : キャニスタ表面の温度(°C) (5)式参照

### ④ $MgCl_2$ の潮解湿度 $RH_{MgCl_2}$

$RH_{MgCl_2}$ は、以下の(4)式で算出する。

$$RH_{MgCl_2} = B_4 \times T_{\text{can}}^2 + B_5 \times T_{\text{can}} + B_6 \dots (4)$$

$B_4$  : 潮解湿度評価式2次項の係数

$B_5$  : 潮解湿度評価式1次項の係数

$B_6$  : 潮解湿度評価式定数項

$T_{\text{can}}$  : キャニスタ表面の温度(°C) (5)式参照

⑤キャニスタ表面の温度

キャニスタ表面の温度はキャニスタ上部、下部で異なる。キャニスタ上部温度の経時変化 $T_{can}^{上部}(t)$ は以下の式(5)、下部の温度の経時変化 $T_{can}^{下部}(t)$ は以下の式(6)で算出する。

$$T_{can}^{上部}(t)=100\exp(-0.693t/120)+80\exp(-0.693t/10)+20\exp(-0.693t)-4.6+T \dots(5)$$

$$T_{can}^{下部}(t)=100\exp(-0.693t/200)+60\exp(-0.693t/15)+30\exp(-0.693t)-30.6+T \dots(6)$$

t : 経過時間(年)

T : 気温(°C)(一日の最低気温 $A_1$ °Cを入力する)

上記の通り CANBEY1 は付着塩分濃度、温度等の環境条件パラメータから SCC が発生する期間を算出することが出来るため、水処理二次廃棄物として保管中の容器のうち塩分を含有する大気で冷却されるものの外表面における気中塩分に起因した SCC が発生するまでの期間及びその感度を解析することが可能であると考えられる。ただし評価する外表面の温度の経時変化のデータが必要である。

(2) CRANP<sup>(4)</sup>

CRANPはガラス固化体の周囲のキャニスタあるいはオーバーパックが地下水と接触することによって発生する腐食挙動を解析して、容器の封じ込め性能を評価することが可能であり、有限差分法によって、腐食源である地下水中の溶存酸素の挙動を解く拡散モデルである。地層処分に用いられる炭素鋼オーバーパック容器の腐食寿命を地下水による鉄の溶解反応に加え、地下水からの供給や放射線分解により発生する酸素に起因する鉄の溶解反応について、電極反応をモデル化することにより評価することが可能である。基本的な解析現象は、①地下水中の溶存酸素による均一腐食反応、②廃棄物からの放射線による地下水成分の放射性分解の影響、③処分場内の温度変化を考慮した拡散係数の変化、の3つである。CRANPの計算フローを図2.4-3に示す。

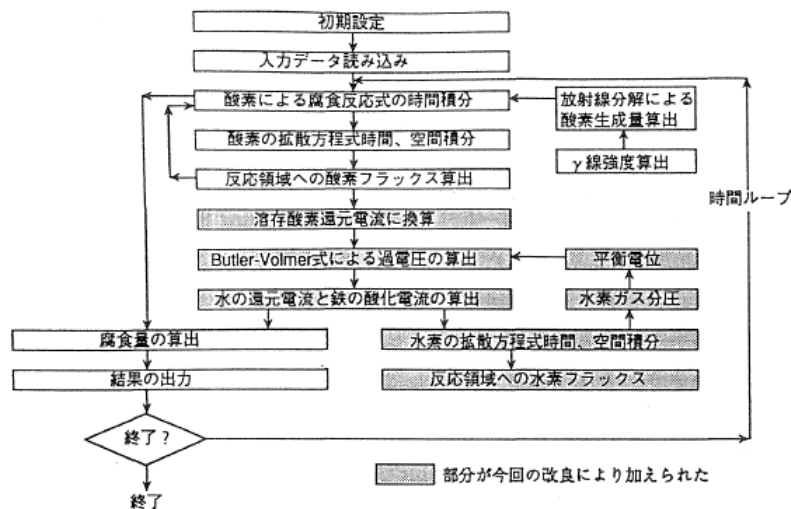


図 2.4-3 CRANP の計算フロー<sup>(4)</sup>

CRANPは基本的には炭素鋼の全面腐食についてのコードであり、局部腐食については取り扱っていない。また基本的に低酸素濃度状態において、酸素の拡散が腐食速度を決定すると仮定して（表面で溶存酸素全量が腐食に消費されると仮定）作成されている。水処理二次廃棄物として保管される容器はステンレス鋼製であり、また大気解放状態であることから、CRANPが対象としている材料・環境とは大きく異なっている。そのため、水処理二次廃棄物保管における腐食の評価にはこのコードをそのまま利用することは難しいと考えられる。

### (3) PASCAL-NP<sup>(5)</sup>

PASCAL-NPは、Ni 基合金異材溶接部に対する確率論的破壊力学解析コードである。Ni 基合金、ステンレス及び低合金鋼等から成る異材溶接部や原子炉圧力上蓋貫通部及び原子炉圧力容器底部スタブチューブのような複雑形状部において、SCCに伴う漏えいや破断等の機器類の破損確率をモンテカルロ法に基づき評価することが可能である。加圧水型原子炉 (PWR; Pressurized Water Reactor) におけるPWR 一次系水質環境中応力腐食割れ (PWSCC; Primary Water Stress Corrosion Cracking) 及び沸騰水型原子炉 (BWR; Boiled Water Reactor) におけるNi 基合金のBWR 水質環境中応力腐食割れ(NiSCC; Ni-based alloy Stress Corrosion Cracking) を対象として多様なき裂発生箇所、き裂方向を想定した解析機能を有するとともに材料強度、き裂進展速度及び残留応力分布等のばらつきを考慮して、き裂発生及びき裂進展評価、並びに破損確率解析を実施することができる。PASCAL-NP における解析種別はPFM とDFM に大別されている。PASCAL-NP の解析フローを図2.4-4に示す。

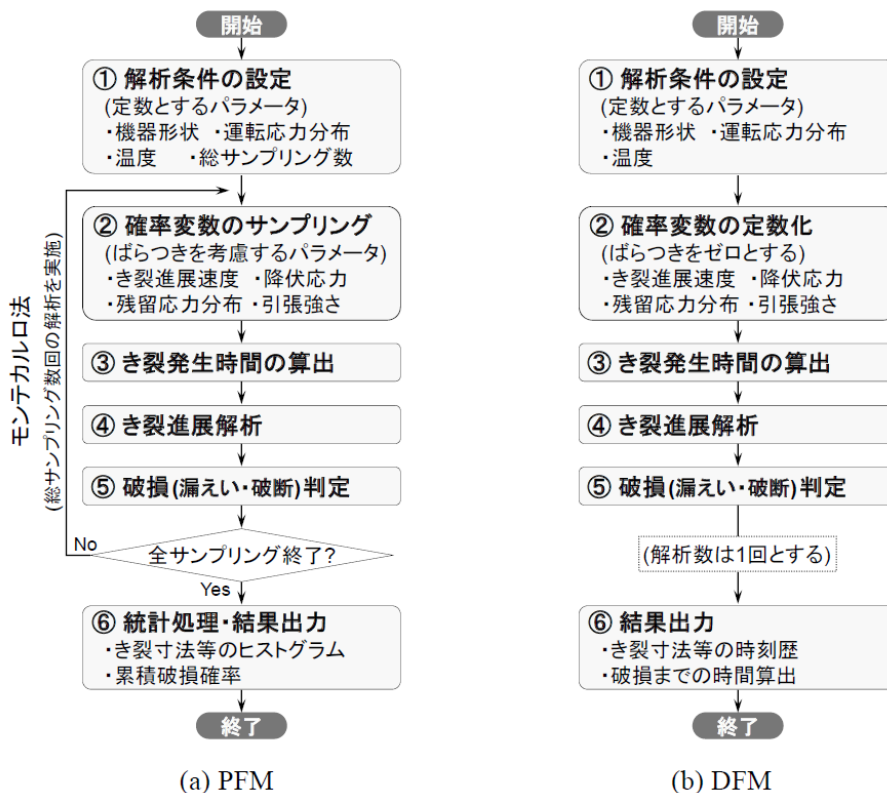


図 2.4-4 PASCAL-NP のフロー<sup>(5)</sup>

水処理二次廃棄物として保管される容器の内部環境は放射性物質の崩壊熱による温度上昇が懸念されるが、大気解放環境であるため残留水の温度は沸点(100℃程度)以下であると推定できる。また残留水中には海水由来の塩化物イオンなどが含まれている。

PASCAL-NP はPWR・BWR水質等の高温高压水中でのSCCを対象としているため、そのまま水処理二次廃棄物として保管される容器における腐食の評価に利用することは難しいと考えられる。

今回調査した3つのコードの中で、CANBEY1を使用することで保管中の水処理二次廃棄物容器の一部について、外表面におけるSCC発生までの期間とその感度の解析を実施することが可能であると考えられるが、既存の解析コードでは容器内部の残留塩分による局部腐食（孔食、すき間腐食等）の評価や内部に流入する気中塩分による大気腐食について解析することは難しいと考えられる。

保管容器の内部に残留している水は崩壊熱などにより蒸発すると考えられているが、現状では容器内部の詳細な状態を把握できておらず、蒸発までの時間や塩化物イオンの濃縮程度等についての状態を実際に把握することは難しいため容器内部の腐食に対する検討は困難である。今後容器内部の状態・環境について詳細な情報を調査するとともに、容器内部残留水の崩壊熱による蒸発状態を解析することのできるコード等の開発が望ましいと考えられる。概念図を図2.4-5に示す。

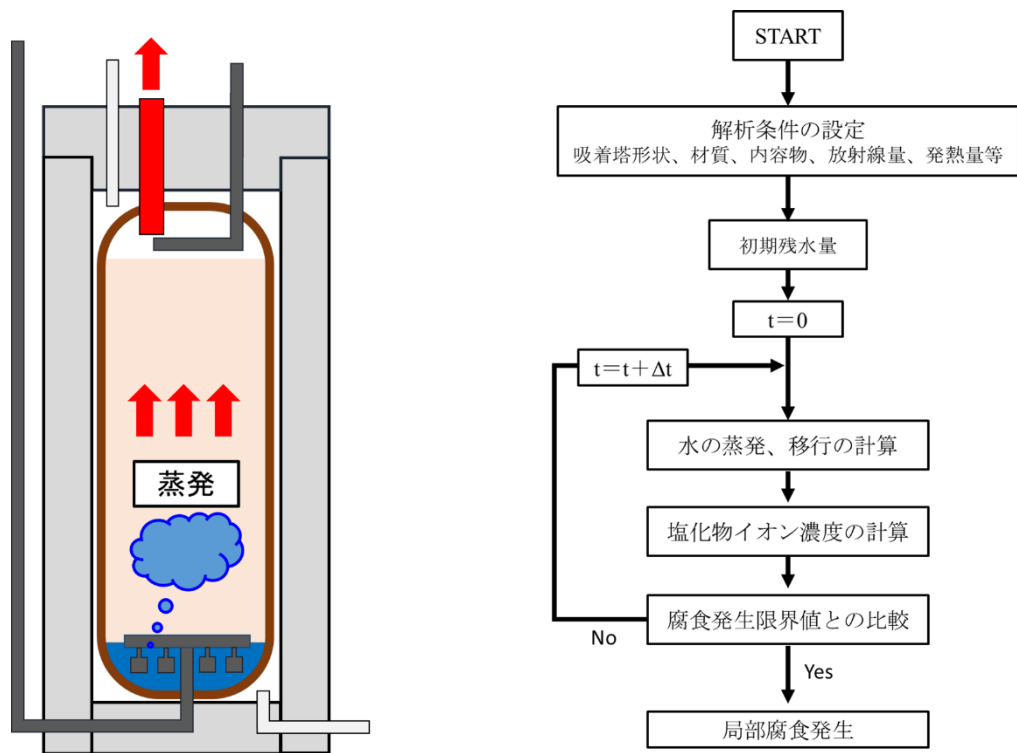


図 2.4-5 容器内部残留水の蒸発状態解析コードの概念図

### 第 2.3、2.4 章 参考文献

- (1) (財)日本規格協会, JISG0576 ステンレス鋼の応力腐食割れ試験方法, (2001).
- (2) 村橋亮ら, 海水系環境中におけるステンレス鋼のすき間腐食寿命推定, 新日鉄技報 第 389 号, (2009).
- (3) 日本原子力研究開発機構, 平成 26 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (中間貯蔵設備長期健全性等試験のうち実環境下でのキャニスタの腐食試験等) 事業 報告書, 平成 27 年 3 月, (2015).
- (4) (財)電力中央研究所, 「高レベル廃棄物地層処分の人工バリアシステムの安全評価」, (1993).
- (5) 宇田川 誠, 勝山 仁哉, 鬼沢 邦雄, Ni 基合金異材溶接部に対する確率論的破壊力学解析コード PASCAL-NP の使用手引き, JAEA-Data/Code 2013-013, (2013).

### 3. まとめ

本事業では水処理二次廃棄物保管容器の長期的な保管における腐食及び劣化について、規制のための技術要件を抽出及び整理することを目的に調査を行った。本報告書第2章1節に記載したとおり、水処理二次廃棄物保管容器及び付属装置の部位ごとの材質、設計、保管状況、保管容器の内部及び外部の環境条件、吸着材の仕様等について情報を抽出・整理した。第2章2節では、ステンレス鋼及びポリエチレンの劣化等に関する既往の研究成果知見を取りまとめた。また第2章3節では、1節、2節で整理した情報を基に実環境を想定したステンレス鋼の腐食試験の計画立案を行った。さらに第2章3節では、水処理二次廃棄物保管容器の保管環境で発生が想定されるステンレス鋼の腐食について評価が可能な腐食解析コードの調査を行い、その概要を取りまとめた。

事業の実施に当たっては有識者からなる実行委員会（4人、2回）を設置し意見を聴取するとともに（水処理二次廃棄物の管理基準等の検討専門部会）、本事業に関連する研究の最新動向を把握するため学会等に参加し、監視すべきポイント及び講ずるべき措置の適用性を検討した。

水処理二次廃棄物保管容器に関して情報を収集整理したが、容器内部の構造（溶接位置・内部配管・継ぎ手・すき間の有無等）の詳細情報は未だ入手できておらず、内部の状態や環境についても不明確であるため、引き続き調査・情報収集を実施する必要があると考えられる。

ステンレス鋼の腐食に関しては、容器内部に水が残留している場合、保管前の洗浄により内部塩化物イオン濃度がある程度低下していると仮定すると、腐食が発生する可能性は低いと考えられるが、高濃度の塩化物イオンが残留する場合やすき間となる構造が容器内部にある場合は局部腐食の発生が懸念される。また保管容器の内部に残留している水が崩壊熱等により蒸発した場合、蒸発による塩化物イオンの濃縮や蒸発乾燥後の塩分の残留、気中塩分による大気腐食等が懸念される。

ポリエチレンの劣化に関しては、長期保管に係る劣化評価の判断基準のための技術的知見を得るためには、水／放射線環境下における引張り特性等の機械的特性劣化データ（温度、線量率、線量依存性）の取得が必要であると考えられる。このデータと空気／放射線環境下での機械的特性劣化データを併せて長期的な保管に係る技術要件を整理することによって、監視すべきポイント及び講ずるべき措置を検討することが必要であると考えられる。

## 付録

# 「水処理二次廃棄物の管理基準等の検討に係る 情報の整理及び調査」 報告書



「水処理二次廃棄物の管理基準等の検討に係る情報の整理及び調査」  
報告書目次

1. 件名	1
2. 目的及び概要	1
3. 実施内容	1
4. 結果	
4.1. 水処理二次廃棄物保管容器の情報整理	3
4.2. ステンレス鋼の腐食に関する解析コードの調査	28
4.3. 文献情報の整理	37
4.4. ステンレス鋼の腐食に関する既往の研究成果・知見の整理	93

## 1. 件名

水処理二次廃棄物の管理基準等の検討に係る情報の整理及び調査

## 2. 目的及び概要

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。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、保管容器に一時的に保管する可能性があることから、その安全性について把握しておく必要がある。

当該廃棄物の処理及び処分が行われるまでの長期的な保管の可能性を考慮し、水処理二次廃棄物保管容器の材質であるステンレス鋼の腐食の可能性を洗い出し、監視すべきポイント、講ずるべき措置、腐食評価の判断基準のための技術的知見を蓄積することを目的とする。

本件は、水処理二次廃棄物保管容器の長期的な保管における腐食及び劣化について、規制のための技術用件を抽出及び整理し、報告書として取りまとめるものである。

## 3. 実施内容

### 3.1. 水処理二次廃棄物保管容器の情報整理

### 3.2. ステンレス鋼の腐食に関する解析コードの調査

### 3.3. 文献情報の整理

### 3.4. ステンレス鋼の腐食に関する既往の研究成果・知見の整理

## 4. 結果

### 4.1. 水処理二次廃棄物保管容器の情報整理

ご指定の水処理二次廃棄物保管容器及び付属装置の部位ごとの材質、設計、保管状況、保管容器の内部及び外部の環境条件（pH 等の化学的環境及び塩分濃度等）、吸着材の仕様及び今後の計画をまとめたものを表 1-1 に示す。

#### 1) 調査対象

セシウム吸着装置、第二セシウム吸着装置、第二セシウム吸着装置(同時吸着塔)、モバイル式処理装置、多核種除去設備、増設多核種除去設備、高性能多核種除去設備、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とした。

#### 2) 対象部位

多核種除去設備の処理カラム、高性能多核種除去設備の前処理フィルタ、モバイル型ストロンチウム除去装置の浮遊物質フィルタ、ウルトラフィルタ以外は吸着塔を対象とした。また、増設多核種除去設備は全て高性能容器(HIC)での保管となるため、これ以降調査対象から除外した。

#### 3) 材質

セシウム吸着塔、第二セシウム吸着塔、同時吸着塔の TYPE-A、TYPE-B1、モバイル式処理装置、多核種除去設備、モバイル型ストロンチウム除去装置、第二モバイル型除去装置の吸着塔は SUS316L または 316L 相当材を吸着塔容器材として構成されている。また、モバイル型ストロンチウム除去装置の浮遊物質フィルタならびに、ウルトラフィルタも SUS316L 相当材で構成されている。

第二セシウム吸着装置の同時吸着塔の TYPE-B2 は銅板に TYPE316L、UNS32205、UNS31803 が使用されているが、詳細については公表されていない。

遮へい材は炭素鋼、Pb 等が使用されている。

#### 4) 設計

図 1-1～1-6 に示す通りである。保管時にはいずれもベントまたは保管容器のベント孔により大気開放状態で保管されている。

#### 5) 保管状況

セシウム吸着装置、モバイル式処理装置、モバイル型ストロンチウム除去装置、第二モバイル型除去装置の吸着塔ならびに、モバイル型ストロンチウム除去装置の浮遊物質フィルタ、ウルトラフィルタは容器の遮へい効果が低いいためボックスカルバート内で保管される。第二セシウム吸着装置、多核種除去設備、高性能多核種除去設備は容器の遮へい効果が高いためそのままの状態でラックに保管されている。高性能多核種除去設備の前処理フィルタは可燃性ガス発生量が多いことが懸念さ

れるためコンクリート製または金属製の保管容器に収納してがれき類の一時保管エリアに保管されている。

#### 6) 保管容器の環境

##### ・内部環境

公表されている処理水の性状を**図表 1-1~1-4**、**表 1-2~1-8**、保管前のセシウム吸着塔の内部環境を**図 1-7**、保管時の温度を**図 1-8**、**1-9**に示す。

保管前の状況については、**図 1-7**で研究されているのみでありセシウム吸着塔以外については詳細不明であるが、吸着材体積の3倍程度の水を給水すると1000ppmCl<sup>-</sup>が約0.5ppmCl<sup>-</sup>まで低下しており、保管時の塩化物イオン濃度は低い水準の可能性はある。

##### ・外部環境

**図 1-10**の通り、建屋、屋根等は建設されていない様子であり、ラック保管されているものは大気暴露状態となる。

#### 7) 吸着材の仕様

**表 1-1**に示す通りであるが、第二セシウム吸着塔の同時吸着塔の吸着材、高性能多核種除去設備のフィルタ材質、第二モバイルストロンチウムの吸着材については公知ではないため不明であり、その他についてもノウハウに触れる部分があるようで詳細が不明なものが多かった。

#### 8) 今後の計画

**表 1-1**に示す通りである。

#### 4.1. の参考文献

- (1) 東京電力株式会社、福島第一原子力発電所第1~4号機に対する「中期的安全確保の考え方」に関する報告書（その1）（改訂）、2011年11月19日公表
- (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（変更認可申請：多核種処理水貯槽の増設）II 特定原子力施設の設計、設備、2.5 汚染水処理設備等、2014年12月18日公表
- (3) 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（変更認可申請）II 特定原子力施設の設計、設備、2.5 汚染水処理設備等、2014年10月10日公表
- (4) 日本原子力学会「福島第一原子力発電所事故により発生する放射性廃棄物の処理・処分」特別専門委員会編、「福島第一原子力発電所事故により発生する放射性廃棄物の処理・処分 平成25年度報告書」、別冊福島廃棄物情報、p19、2014年3月
- (5) 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（変更認可申請の一部補正）、II 特定原子力施設の設計、設備、2.16 放射性液体廃棄物処理施設及び関連施設、2015年2月5日公表

- (6) 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（変更認可申請）、II 特定原子力施設の設計、設備、2.16 放射性液体廃棄物処理施設及び関連施設、2.16.3 高性能多核種除去設備、2014年11月18日公表
- (7) 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、特定原子力施設の設計、設備、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、2014年9月10日公表
- (8) 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（変更認可申請）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、2014年12月12日公表
- (9) 日本原子力研究開発機構、「東京電力(株)福島第一原子力発電所に関わる廃棄物処理・処分技術開発」平成24年成果報告書、p5～8
- (10) Yamagishi Isao et al. Journal of Nuclear Science and Technology、vol51、(2014)、p1052
- (11) 佐藤博之ら、日本原子力学会「2014年春の年会」、p321
- (12) 東京電力株式会社、福島第一2、3号機海側トレンチ滞留水分析結果、2014年6月20日公表
- (13) 東京電力株式会社、(別添)福島第一原子力発電所第1～4号機に対する「中期的安全確保の考え方」に基づく施設運営計画に係る報告書(その1)(改訂)、5. 高レベル放射性汚染水処理設備、貯留設備(タンク等)、廃スラッジ貯蔵施設、使用済セシウム吸着塔保管施設及び関連設備(移送配管、移送ポンプ等)、2011年11月9日公表
- (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（変更認可申請）II 特定原子力施設の設計、設備、2.16 放射性液体廃棄物処理施設及び関連施設、2.16.1 多核種除去設備、2014年11月21日公表
- (15) 東京電力株式会社、福島第一原子力発電所多核種除去設備(ALPS)の概要等、2013年3月29日公表
- (16) 東京電力株式会社、高性能多核種除去設備における除去性能評価(経過報告)、2014年12月25日公表
- (17) 東京電力株式会社、廃炉・汚染水対策チーム会合 第12回事務局会議、資料3-7 放射性廃棄物処理・処分、2014年11月27日公表
- (18) 日本原子力学会「福島第一原子力発電所事故により発生する放射性廃棄物の処理・処分」特別専門委員会編、「福島第一原子力発電所事故により発生する放射性廃棄物の処理・処分 平成25年度報告書」、研究開発課題の抽出と解決に向けた考え方、p4.1.4、2014年3月
- (19) 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」2004年9月4日公表
- (20) 東京電力株式会社、「福島第一原子力発電所の廃炉・汚染水対策の現状」、2014年12月1日公表

表1-1 水処理二次廃棄物保管容器の情報整理結果まとめ

対象	対象部位	材質	設計	保管状況	保管容器の環境		吸着材の仕様 *(18),(19)	今後の予定 *(20)	
					内部	外部			
セシウム吸着装置 KURION	吸着塔	吸着材容器: SUS316L 遮へい容器:炭素 鋼	図1-1	塔内水洗・温 風乾燥の後、 ボックスカル バート内で保 管。	図表1-1、1- 2、図1-7、1- 8	図1-10	ゼオライト(ハー シュライト、現在の 区分ではチャバサ イト-Na) 表面改質ゼオライト 銀吸着ゼオライト シリカサンド	1月～Sr除去	
第二セシウム吸着 装置 SARRY	吸着塔	吸着材容器: SUS316L 遮蔽容器:Pb	図1-1	塔内水洗・通 風の後、ラッ クにて保管。			ゼオライト(チャバ サイト) ケイチタン酸塩	不明	12月よりSr除 去運転中
SARRY(同時吸着 塔)	吸着塔	銅板 TYPE A: SUS316L TYPE B1: ASME SA240 TYPE316L、 ASME SA312 TYPE316L TYPEB2: ASME SA240 TYPE316L、ASME SA312 TYPE316L ASME SA240 UNS32205、ASME SA790 UNS32205、 ASME SA240 UNS31803、ASME SA790 UNS31803 遮へい材:Pb	図1-1、 1-2	水抜き・洗浄 後、ラックに て保管。			不明		
モバイル式処理装 置	吸着塔	吸着材容器: SS316L 遮へい材:Pb 遮へい容器: SS400	図1-2	滞留水をろ過 水で置換し、 水抜きした 後、ボックス カルバートに て保管。			紺青活性炭、ケイ チタン酸塩、ET- 201	試運転中 27年度上期 より導入予定	
多核種除去設備 ALPS	処理カラム	SUS316L	図1-3	脱水後、ラッ クにて保管。			活性炭 チタン酸塩 フェロシアン化合 物 Ag添着活性炭 酸化チタン キレート樹脂 樹脂系吸着材 対象外		不明
増設ALPS	対象外						対象外		
高性能ALPS	前処理フィ ルタ	炭素鋼 ASME SA 516 Gr.70(エポキシ ライキング付き)	図1-4	コンクリート製 または金属製 の保管容器 に収容してが れき類の一 時保管エリア に保管			表1-5～7、図 1-9	不明	ケイチタン酸塩
	吸着塔	UNS S31803、UNS S32205、UNS S32750 遮へい体:Pb	図1-4	淡水置換、水 切り後ラック にて保管					
モバイル型ストロ ンチウム除去装置	浮遊物質 フィルタ ウルトラフィ ルタ	SUS316L相当 SUS316L相当	図1-5 図1-5	内部を淡水で 置換し、ボッ クスカルバ ートにて保管。			図表1-3	ポリプロピレン ポリエーテルサル フォン	ケイチタン酸塩
	吸着塔	Alloy316/316L相当	図1-5						
第二モバイル型ス トロンチウム除去 装置	吸着塔	SUS316L	図1-6	図表1-4	不明	27年1月～稼 働予定			

# KURION

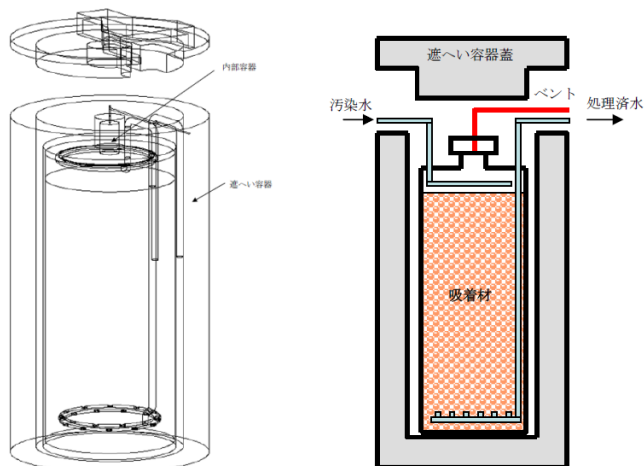


図 5.4 セシウム吸着装置の外観図

吸着材容器: SUS316L  
遮へい容器: 炭素鋼

# SARRY TYPE-A

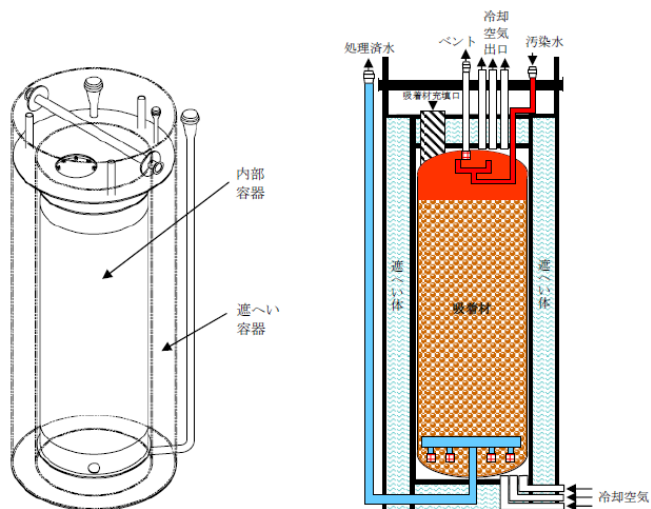
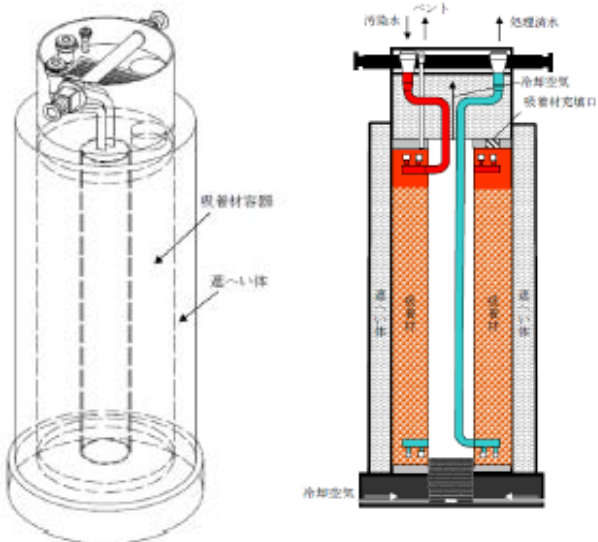


図-2 第二セシウム吸着装置の吸着塔外形図及び概要図

## TYPE-A

項 目		仕 様
構造		円筒形
材料	胴板	SUS316L
	遮へい材	Pb
	付属配管(鋼管)	SUS316L
寸法	外径	Φ914.4mm
	胴板(厚さ)	12mm
	付属配管(鋼管)	50A/Sch. 40
	(呼び径/厚さ)	80A/Sch. 40 (相当材を含む)

# SARRY TYPE-B1

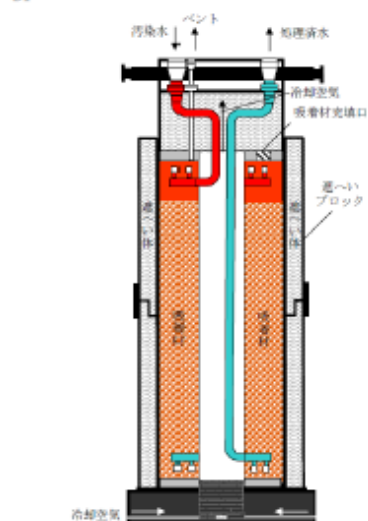
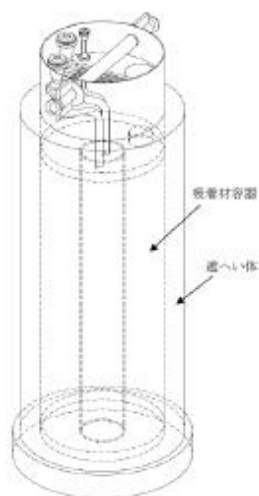


## (2)TYPE-B1

項 目		仕 様
構造		中空円筒形
材料	胴板	ASME SA240 TYPE 316L ASME SA312 TYPE 316L
	遮へい材	Pb
	付属配管(鋼管)	ASME SA312 TYPE 316L ASTM A312 TYPE 316L
寸法	外径(外筒胴)	Φ965.2mm
	内径(内筒胴)	Φ330.2mm
	胴板(厚さ)	12.7mm
	付属配管(鋼管)	50A/Sch. 40S (呼び径/厚さ)

図1-1 吸着塔構造(セシウム吸着装置・第二セシウム吸着装置)<sup>(1)(2)</sup>

## SARRY TYPE-B2



-B2

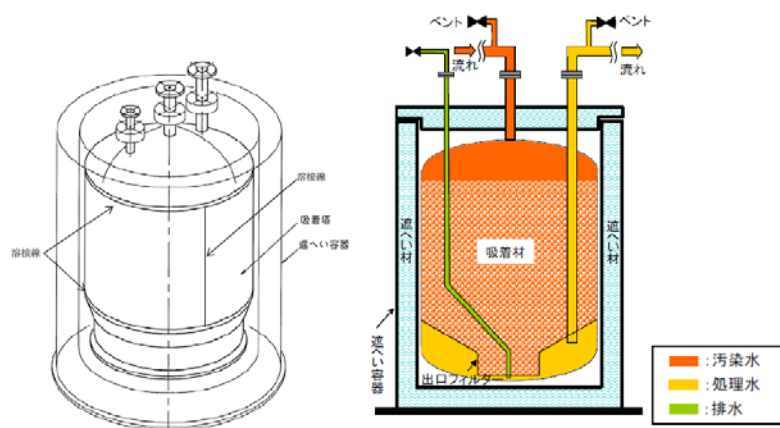
同時吸着 形図及び概念図 (TYPE-B)

項 目		仕 様
構造		中空円筒形
材料	銅板	ASME SA240 TYPE 316L ASME SA312 TYPE 316L ASME SA240 UNS S31803 ASME SA790 UNS S31803 ASME SA240 UNS S32205 ASME SA790 UNS S32205
	遮へい材	Pb
寸法	付属配管 (鋼管)	ASME SA312 TYPE 316L ASTM A312 TYPE 316L ASME SA790 UNS S32205 ASTM A790 UNS S32205 ASME SA790 UNS S31803 ASTM A790 UNS S31803
	外径 (外筒銅)	Φ965.2mm
	内径 (内筒銅)	Φ330.2mm
	銅板 (厚さ)	12.7mm
	付属配管 (鋼管) (呼び径/厚さ)	50A/Sch. 40S 80A/Sch. 40S

## モバイル式処理装置

## モバイル式処理装置 吸着塔の主要仕様

吸着塔部位	項目	仕様
吸着材容器	外径 (公称)	1,020mm
	厚さ (公称)	10mm
	材質	SUS316L
遮へい材 (容器内容物)	厚さ (公称)	130mm
	材質	Pb (鉛)
遮へい容器	内筒・外筒厚さ (側面) (公称)	6mm
	材質	SS400

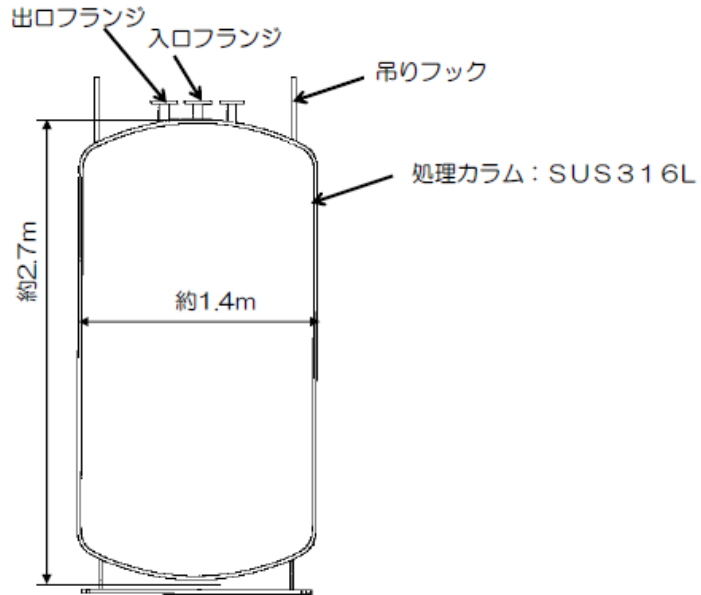


モバイル式処理装置の吸着塔外形図及び概要図

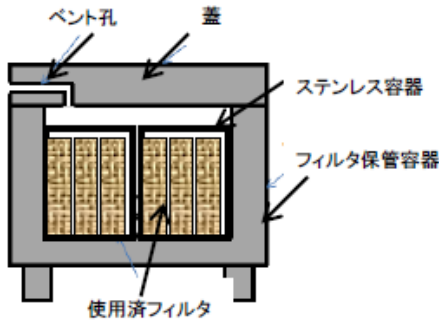
図1-2 吸着塔構造(第二セシウム吸着装置・モバイル式処理装置)<sup>(2)(3)</sup>



多核種除去設備 カラム



高性能多核種除去設備



フィルタ保管容器の概要図

①使用済みフィルタの貯蔵

前処理フィルタは、エアブロー等により水切りした後、容器から取り出し、ゴムシートが内張されたステンレス容器に收容する。さらに、遮蔽の観点から、コンクリート製の保管容器に收容して瓦礫類の一時保管エリアで貯蔵する。

②使用済み吸着塔は、エアブロー等により水切りした後、使用済み吸着塔を6体收容可能な保管用架台に固定し、使用済みセシウム吸着塔一時保管施設のボックスカルバート内に收容する。

(1)使用済みフィルタの貯蔵

使用済みフィルタの年間発生量は、約140m<sup>3</sup>(約2m<sup>3</sup>の容器で70個程度)と想定され、貯蔵先である瓦礫類の一時保管エリアの空き容量は、平成26年5月時点で2260m<sup>3</sup>である。使用済みフィルタを除く1~10mSv/hの瓦礫類は、H27年度末まで新たに8061m<sup>3</sup>発生する見込みであることから、使用済みフィルタの貯蔵容量がひっ迫する場合は、必要に応じて瓦礫類をエリアE2、F1、Q以外の一時保管エリア(線量区分1~30mSv/hの空き容量6633m<sup>3</sup>(H27年度末の想定)及び>30mSv/hの空き容量:12112m<sup>3</sup>(H27年度末の想定)を合わせた空き容量:18745m<sup>3</sup>(H27年度の想定))に貯蔵し、使用済みフィルタの貯蔵容量を確保する。

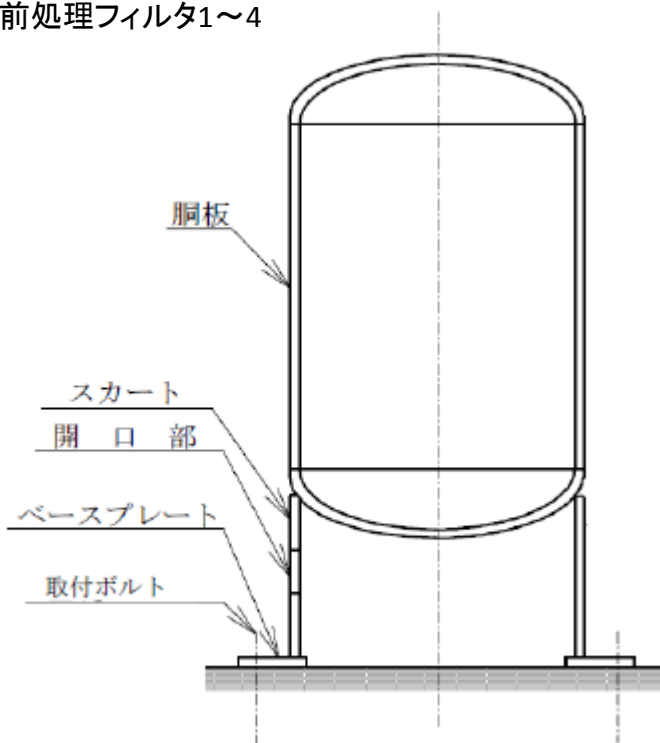
(2)使用済み吸着塔の貯蔵

使用済み吸着塔の年間発生量は、100基程度と想定され、ボックスカルバートを17基程度使用すると想定される。平成26年7月現在、使用済みセシウム吸着塔一時保管施設(第一施設、第四施設)におけるボックスカルバートの空き容量は300基程度であるため、他施設からの廃棄物発生量を考慮しても貯蔵に支障をきたすことはない。

図1-3 フィルタ、吸着塔構造(多核種除去設備・高性能除去設備)<sup>(4)(5)</sup>

# 高性能多核種除去設備

## 前処理フィルタ1~4



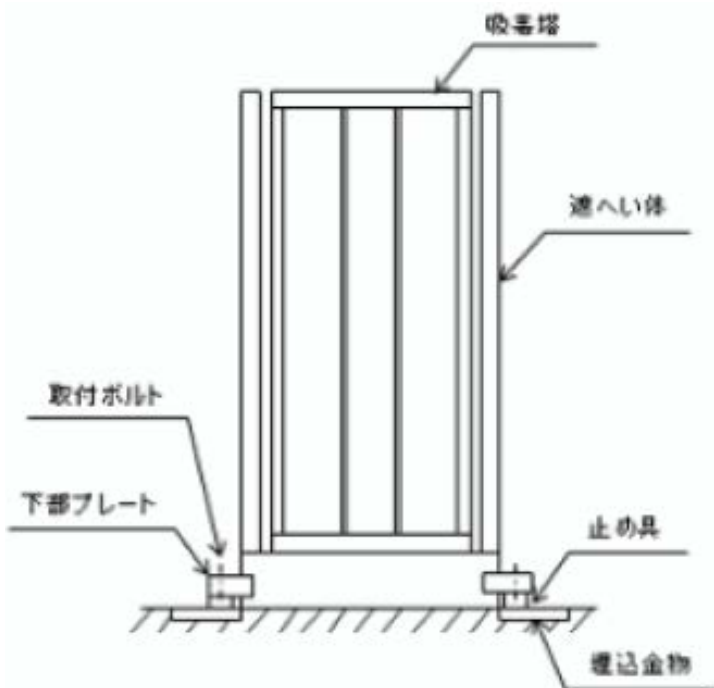
c. 前処理フィルタ 1

名 称		前処理フィルタ 1	
種 類	—	たて置円筒形	
容 量	m <sup>3</sup> /h/個	21	
最高使用圧力	MPa	1.03	
最高使用温度	℃	40	
主要寸法	胴 内 径	mm	901.7
	胴 板 厚 さ	mm	6.35
	上部平板厚さ	mm	63.5
	下部平板厚さ	mm	63.5
	高 さ	mm	2013
材 料	胴 板	—	ASME SA 516 Gr. 70
	上 部 平 板	—	ASME SA 516 Gr. 70
	下 部 平 板	—	ASME SA 516 Gr. 70
個 数	個	2 (1個予備)	

d. 前処理フィルタ 2~4

名 称		前処理フィルタ 2~4	
種 類	—	たて置円筒形	
容 量	m <sup>3</sup> /h/個	21	
最高使用圧力	MPa	1.03	
最高使用温度	℃	40	
主要寸法	胴 内 径	mm	901.7
	胴 板 厚 さ	mm	6.35
	上部平板厚さ	mm	63.5
	下部平板厚さ	mm	63.5
	高 さ	mm	1800
材 料	胴 板	—	ASME SA 516 Gr. 70
	上 部 平 板	—	ASME SA 516 Gr. 70
	下 部 平 板	—	ASME SA 516 Gr. 70
個 数	個	6 (3個予備)	

## 多核種吸着塔1~20



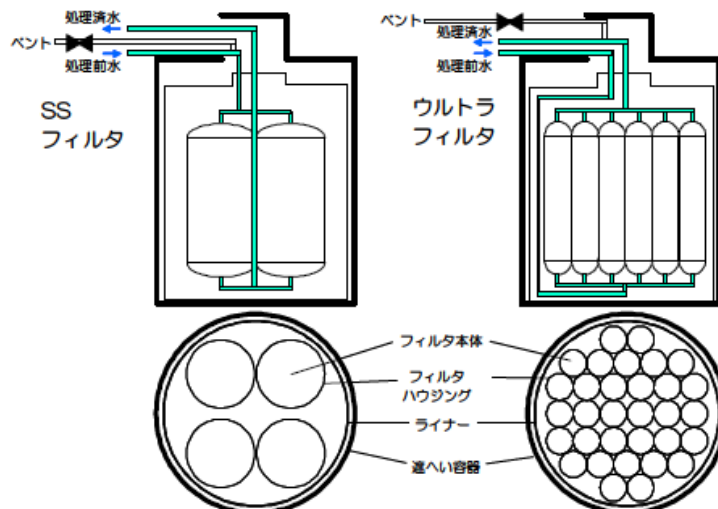
多核種吸着塔 1~20

名 称		多核種吸着塔 1~20	
種 類	—	たて置円筒形	
容 量	m <sup>3</sup> /h/個	21	
最高使用圧力	MPa	1.55	
最高使用温度	℃	40	
主要寸法	外 胴 内 径	mm	939.8
	外 胴 板 厚 さ	mm	12.7
	内 胴 内 径	mm	330.2
	内 胴 板 厚 さ	mm	12.7
	上部平板厚さ	mm	76.2
	下部平板厚さ	mm	76.2
	高 さ	mm	3632
材 料	外 胴 板	—	二相ステンレス (UNS S31803) 二相ステンレス (UNS S32205) 二相ステンレス (UNS S32750)
	内 胴 板	—	
	上 部 平 板	—	
	下 部 平 板	—	
個 数	個	20	

※現場状況等に応じて、いずれかの材質を使用する。

図1-4 フィルタ、吸着塔構造(高性能多核種除去設備)<sup>(6)</sup>

# モバイル型ストロンチウム除去装置

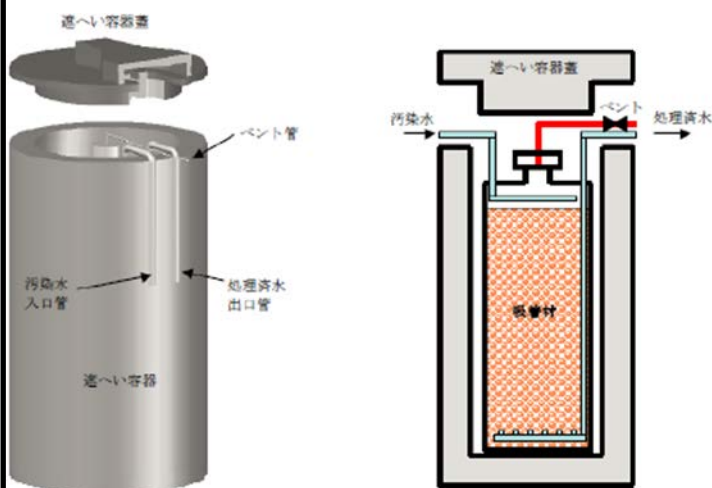


(2) 浮遊物質 (SS) フィルタ

名 称		浮遊物質 (SS) フィルタ	
種 類	—	縦置き円筒形	
容 量	m <sup>3</sup> /h/系列	12.5	
最高使用圧力	MPa	0.48	
最高使用温度	℃	40	
主 要 寸 法	胴外径	mm	558.8
	胴板厚さ	mm	6.4
	上部鏡板厚さ	mm	6.4
	下部鏡板厚さ	mm	6.4
	高さ	mm	1260.5
材 料	胴板	—	ASME SA-312 TP316L
	鏡板	—	ASME SA-240 TYPE 316L
個 数	個/系列	4	
系 列 数	系列	2 (運転時は1系列使用)	

3) ウルトラフィルタ

名 称		ウルトラフィルタ	
種 類	—	縦置き円筒形	
容 量	m <sup>3</sup> /h/系列	12.5	
最高使用圧力	MPa	1.03	
最高使用温度	℃	40	
主 要 寸 法	胴外径	mm	219.1
	胴板厚さ	mm	3.8
	上部鏡板厚さ	mm	3.8
	下部鏡板厚さ	mm	3.8
	高さ	mm	1219.2
材 料	胴板	—	ASME SA-312 TP316L
	鏡板	—	ASME SA-403 WP316L
個 数	個/系列	32	
系 列 数	系列	2 (運転時は1系列使用)	



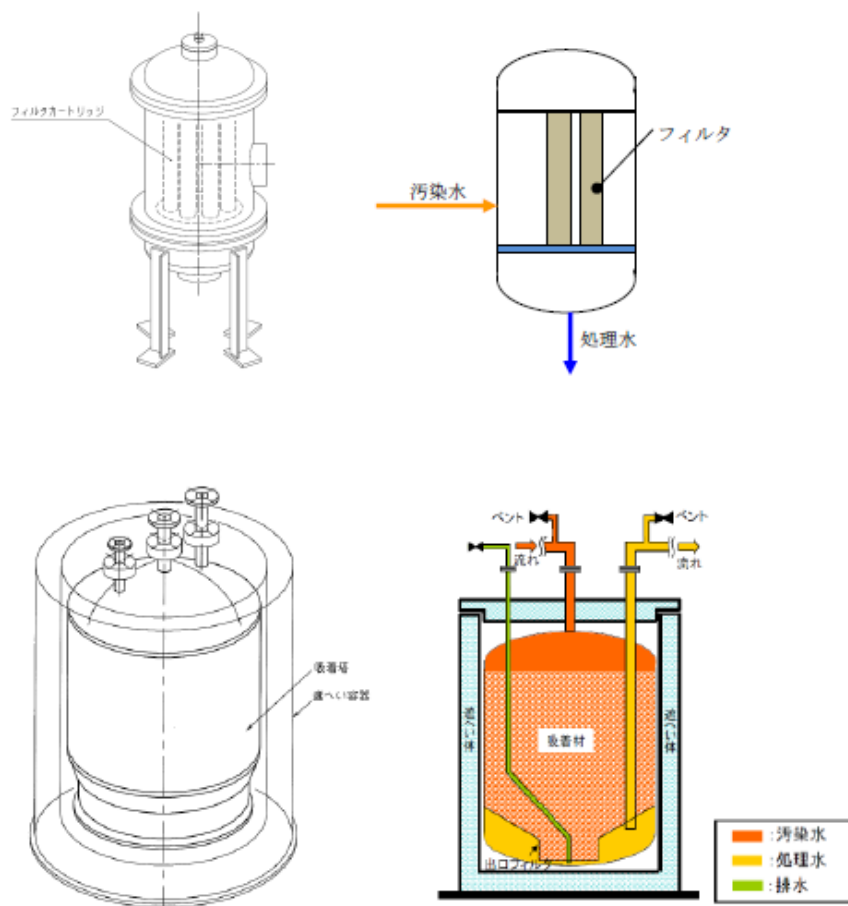
モバイル型ストロンチウム除去装置のフィルタ・吸着塔の概念図  
(フィルタは上図, 吸着塔は下図)

吸着塔

名 称		吸着塔	
種 類	—	縦置き円筒形	
容 量	m <sup>3</sup> /h/個	12.5	
最高使用圧力	MPa	0.90	
最高使用温度	℃	40	
主 要 寸 法	胴外径	mm	914.4
	胴板厚さ	mm	9.5
	上部平板厚さ	mm	50.8
	下部平板厚さ	mm	50.8
	胴高さ	mm	2119.3
材 料	胴板	—	ASME SA-240 TYPE 316/316L
	上部平板	—	ASME SA-240 TYPE 316/316L
	下部平板	—	ASME SA-240 TYPE 316/316L
個 数	個	4 (運転時は3個使用)	

図1-5 フィルタ、吸着塔構造(モバイル型ストロンチウム除去装置)<sup>(7)</sup>

## 第2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の前置フィルタ・吸着塔の概念図  
(前置フィルタは上図，吸着塔は下図)

### (2) 吸着塔

名 称		吸着塔	
種 類	—	縦置き円筒形	
容 量	m <sup>3</sup> /h/系列	20.0	
最 高 使 用 圧 力	MPa	0.98	
最 高 使 用 温 度	℃	40	
主 要 寸 法	胴外径	mm	1020.0
	胴板厚さ	mm	10.0
	上部鏡板厚さ	mm	10.0
	下部鏡板厚さ	mm	10.0
	高さ	mm	1806.0
材 料	胴板	—	SUS316L
	鏡板	—	SUS316L
個 数	個/系列	2	
系 列 数	系列	4	

図1-6 フィルタ、吸着塔構造(第二モバイル型ストロンチウム除去装置)<sup>(8)</sup>

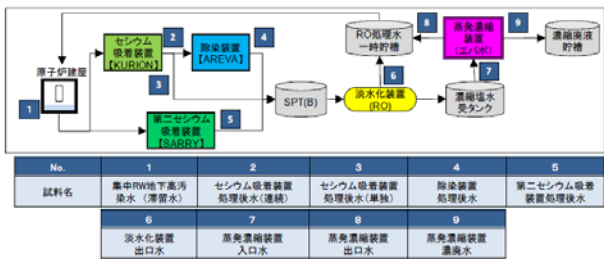
滞留水・処理水中のγ線放出核種濃度

No.	試料名	採取日	放射能濃度 (Bq/mL)				
			<sup>60</sup> Co 半減期 約 5.3 y	<sup>137</sup> Cs 半減期 約 30 y	<sup>241</sup> Nb 半減期 約 2.0×10 <sup>4</sup> y	<sup>152</sup> Eu 半減期 約 14 y	<sup>154</sup> Eu 半減期 約 8.6 y
1	集中RW地下高汚染水(滞留水)	2011年11月1日	4.9±0.4	(7.4±0.1)×10 <sup>5</sup>	<1.3×10 <sup>-1</sup>	<4.6×10 <sup>-1</sup>	<2.5×10 <sup>-1</sup>
2	セシウム吸着装置処理後水(連続)	2011年8月9日	(1.7±0.1)×10 <sup>1</sup>	(1.1±0.1)×10 <sup>4</sup>	<1.8×10 <sup>-1</sup>	<4.7×10 <sup>-1</sup>	<3.5×10 <sup>-1</sup>
3	セシウム吸着装置処理後水(単独)	2011年11月8日	7.4±0.1	7.7±0.1	<1.5×10 <sup>-1</sup>	<3.9×10 <sup>-1</sup>	<2.7×10 <sup>-1</sup>
4	除染装置処理後水	2011年8月9日	9.9±0.1	(5.3±0.6)×10 <sup>-1</sup>	<1.0×10 <sup>-1</sup>	<3.5×10 <sup>-1</sup>	<2.2×10 <sup>-1</sup>
5	第二セシウム吸着装置処理後水	2011年11月8日	(4.6±0.4)×10 <sup>-1</sup>	<2.7×10 <sup>-1</sup>	<1.6×10 <sup>-1</sup>	<5.0×10 <sup>-1</sup>	<3.2×10 <sup>-1</sup>
6	淡水化装置出口水	2011年11月1日	<6.0×10 <sup>-2</sup>	<1.3×10 <sup>-1</sup>	<5.6×10 <sup>-2</sup>	<2.3×10 <sup>-1</sup>	<1.6×10 <sup>-1</sup>
7	蒸発濃縮装置入口水	2011年11月1日	(1.4±0.1)×10 <sup>1</sup>	6.6±0.1	<1.3×10 <sup>-1</sup>	<3.9×10 <sup>-1</sup>	<2.5×10 <sup>-1</sup>
8	蒸発濃縮装置出口水	2011年11月1日	<6.1×10 <sup>-2</sup>	<1.3×10 <sup>-1</sup>	<5.7×10 <sup>-2</sup>	<2.1×10 <sup>-1</sup>	<1.5×10 <sup>-1</sup>
9	蒸発濃縮装置濃廃水	2011年11月3日	2.7±0.1	(5.3±0.1)×10 <sup>1</sup>	<8.7×10 <sup>-2</sup>	<4.8×10 <sup>-1</sup>	<2.1×10 <sup>-1</sup>

\* 2012年1月19日(試料受入日)補正值。

滞留水・処理水中のβ線放出核種濃度

No.	試料名	採取日	放射能濃度 (Bq/mL)				
			<sup>3</sup> H 半減期 約 12 y	<sup>14</sup> C 半減期 約 5.7×10 <sup>3</sup> y	<sup>36</sup> Cl 半減期 約 3.0×10 <sup>5</sup> y	<sup>41</sup> Ca 半減期 約 1.0×10 <sup>5</sup> y	<sup>65</sup> Ni 半減期 約 1.0×10 <sup>7</sup> y
1	集中RW地下高汚染水(滞留水)	2011年11月1日	(3.3±0.1)×10 <sup>3</sup>	<2.0×10 <sup>-1</sup>	<1.4×10 <sup>-1</sup>	<1.7×10 <sup>2</sup>	(6.3±1.0)×10 <sup>-1</sup>
2	セシウム吸着装置処理後水(連続)	2011年8月9日	(6.0±0.1)×10 <sup>3</sup>	No.1, 9が検出下限値未満のため分析せず*	No.1, 9が検出下限値未満のため分析せず*	No.1, 9が検出下限値未満のため分析せず*	1.5±0.1
3	セシウム吸着装置処理後水(単独)	2011年11月8日	(4.0±0.1)×10 <sup>3</sup>				(7.4±1.0)×10 <sup>-1</sup>
4	除染装置処理後水	2011年8月9日	(6.3±0.1)×10 <sup>3</sup>				(4.4±1.0)×10 <sup>-1</sup>
5	第二セシウム吸着装置処理後水	2011年11月8日	(3.3±0.1)×10 <sup>3</sup>				<3.8×10 <sup>-1</sup>
6	淡水化装置出口水	2011年11月1日	(3.9±0.1)×10 <sup>3</sup>				<3.1×10 <sup>-1</sup>
7	蒸発濃縮装置入口水	2011年11月1日	(6.1±0.1)×10 <sup>3</sup>				1.1±0.1
8	蒸発濃縮装置出口水	2011年11月1日	(5.4±0.1)×10 <sup>3</sup>				<3.2×10 <sup>-1</sup>
9	蒸発濃縮装置濃廃水	2011年11月3日	(6.2±0.1)×10 <sup>3</sup>	<2.0×10 <sup>-1</sup>	<2.6×10 <sup>-1</sup>	<1.1×10 <sup>2</sup>	<3.1×10 <sup>-1</sup>



汚染水処理設備からのサンプリング場所 (2011年11月)

No.	試料名	採取日	放射能濃度 (Bq/mL)				
			<sup>90</sup> Ni 半減期 約 7.6×10 <sup>4</sup> y	<sup>75</sup> Se 半減期 約 6.5×10 <sup>4</sup> y	<sup>90</sup> Sr 半減期 約 29 y	<sup>99</sup> Tc 半減期 約 2.1×10 <sup>5</sup> y	<sup>129</sup> I 半減期 約 1.6×10 <sup>7</sup> y
1	集中RW地下高汚染水(滞留水)	2011年11月1日	<1.1×10 <sup>-1</sup>	8.3±0.2	(2.9±0.1)×10 <sup>5</sup>	<3.2×10 <sup>-1</sup>	(2.5±0.1)×10 <sup>-1</sup>
2	セシウム吸着装置処理後水(連続)	2011年8月9日	<1.2×10 <sup>-1</sup>	2.7±0.1	(1.2±0.1)×10 <sup>5</sup>	<1.6×10 <sup>-1</sup>	(8.3±0.2)×10 <sup>-2</sup>
3	セシウム吸着装置処理後水(単独)	2011年11月8日	<1.1×10 <sup>-1</sup>	2.5±0.1	(2.0±0.1)×10 <sup>5</sup>	<1.7×10 <sup>-1</sup>	(2.7±0.1)×10 <sup>-1</sup>
4	除染装置処理後水	2011年8月9日	<1.1×10 <sup>-1</sup>	3.1±0.1	(1.2±0.1)×10 <sup>4</sup>	<1.7×10 <sup>-1</sup>	(8.5±0.1)×10 <sup>-2</sup>
5	第二セシウム吸着装置処理後水	2011年11月8日	<sup>63</sup> Niが検出下限値未満のため分析せず*	(1.6±0.1)×10 <sup>1</sup>	(1.0±0.1)×10 <sup>5</sup>	<1.6×10 <sup>-1</sup>	(1.3±0.1)×10 <sup>-1</sup>
6	淡水化装置出口水	2011年11月1日		(8.1±0.3)×10 <sup>-1</sup>	(4.0±0.1)×10	<5.3×10 <sup>-2</sup>	<2.1×10 <sup>-2</sup>
7	蒸発濃縮装置入口水	2011年11月1日	<1.5×10 <sup>-1</sup>	3.0±0.1	(2.3±0.1)×10 <sup>4</sup>	<1.6×10 <sup>-1</sup>	(1.8±0.1)×10 <sup>-1</sup>
8	蒸発濃縮装置出口水	2011年11月1日	<sup>63</sup> Niが検出下限値未満のため分析せず*	(7.8±0.3)×10 <sup>-1</sup>	(3.5±0.1)×10 <sup>1</sup>	<5.5×10 <sup>-2</sup>	<2.1×10 <sup>-2</sup>
9	蒸発濃縮装置濃廃水	2011年11月3日		(9.4±0.1)×10	(3.2±0.1)×10 <sup>3</sup>	<3.2×10 <sup>-1</sup>	1.3±0.1

\* 2012年1月19日(試料受入日)補正值。

図表1-1 内部環境(セシウム吸着装置・第二セシウム吸着装置)<sup>(9)</sup>

滞留水・処理水中の $\gamma$ 線放出核種濃度\*

No.	試料名	採取日	放射能濃度 (Bq/mL)				
			$^{60}\text{Co}$ 半減期 約 5.3 y	$^{137}\text{Cs}$ 半減期 約 30 y	$^{241}\text{Am}$ 半減期 約 2.0 $\times 10^4$ y	$^{152}\text{Eu}$ 半減期 約 14 y	$^{154}\text{Eu}$ 半減期 約 8.6 y
1	集中RW地下高汚染水(滞留水)	2011年11月1日	4.9 $\pm$ 0.4	(7.4 $\pm$ 0.1) $\times 10^5$	<1.3 $\times 10^{-1}$	<4.6 $\times 10^{-1}$	<2.5 $\times 10^{-1}$
2	セシウム吸着装置処理後水(連続)	2011年8月9日	(1.7 $\pm$ 0.1) $\times 10^1$	(1.1 $\pm$ 0.1) $\times 10^4$	<1.8 $\times 10^{-1}$	<4.7 $\times 10^{-1}$	<3.5 $\times 10^{-1}$
3	セシウム吸着装置処理後水(単独)	2011年11月8日	7.4 $\pm$ 0.1	7.7 $\pm$ 0.1	<1.5 $\times 10^{-1}$	<3.9 $\times 10^{-1}$	<2.7 $\times 10^{-1}$
4	除染装置処理後水	2011年8月9日	9.9 $\pm$ 0.1	(5.3 $\pm$ 0.6) $\times 10^{-1}$	<1.0 $\times 10^{-1}$	<3.5 $\times 10^{-1}$	<2.2 $\times 10^{-1}$
5	第二セシウム吸着装置処理後水	2011年11月8日	(4.6 $\pm$ 0.4) $\times 10^{-1}$	<2.7 $\times 10^{-1}$	<1.6 $\times 10^{-1}$	<5.0 $\times 10^{-1}$	<3.2 $\times 10^{-1}$
6	淡水化装置出口水	2011年11月1日	<6.0 $\times 10^{-2}$	<1.3 $\times 10^{-1}$	<5.6 $\times 10^{-2}$	<2.3 $\times 10^{-1}$	<1.6 $\times 10^{-1}$
7	蒸発濃縮装置入口水	2011年11月1日	(1.4 $\pm$ 0.1) $\times 10^1$	6.6 $\pm$ 0.1	<1.3 $\times 10^{-1}$	<3.9 $\times 10^{-1}$	<2.5 $\times 10^{-1}$
8	蒸発濃縮装置出口水	2011年11月1日	<6.1 $\times 10^{-2}$	<1.3 $\times 10^{-1}$	<5.7 $\times 10^{-2}$	<2.1 $\times 10^{-1}$	<1.5 $\times 10^{-1}$
9	蒸発濃縮装置濃廃水	2011年11月3日	2.7 $\pm$ 0.1	(5.3 $\pm$ 0.1) $\times 10^1$	<8.7 $\times 10^{-2}$	<4.8 $\times 10^{-1}$	<2.1 $\times 10^{-1}$

\* 2012年1月19日(試料受入日)補正值。

滞留水・処理水中の $\alpha$ 線放出核種濃度\*

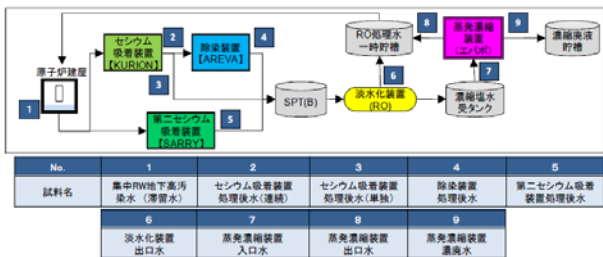
No.	試料名	採取日	放射能濃度 (Bq/mL)				
			$^{235}\text{U}$ 半減期 約 1.6 $\times 10^8$ y	$^{238}\text{U}$ 半減期 約 2.5 $\times 10^9$ y	$^{239}\text{Pu}$ 半減期 約 7.0 $\times 10^4$ y	$^{240}\text{Pu}$ 半減期 約 23 $\times 10^3$ y	$^{241}\text{Pu}$ 半減期 約 45 $\times 10^3$ y
1	集中RW地下高汚染水(滞留水)	2011年11月1日	<1.0 $\times 10^{-2}$	<2.5 $\times 10^{-3}$	<1.1 $\times 10^{-5}$	<4.3 $\times 10^{-5}$	<1.7 $\times 10^{-4}$
9	蒸発濃縮装置濃廃水	2011年11月3日	<9.4 $\times 10^{-3}$	<2.9 $\times 10^{-3}$	<7.4 $\times 10^{-6}$	<2.8 $\times 10^{-5}$	<9.2 $\times 10^{-5}$

No.	試料名	採取日	放射能濃度 (Bq/mL)				
			$^{237}\text{Np}$ 半減期 約 2.1 $\times 10^6$ y	$^{241}\text{Pu}$ 半減期 約 88 y	$^{242}\text{Pu}$ 半減期 約 2.4 $\times 10^5$ y	$^{243}\text{Pu}$ 半減期 約 6.6 $\times 10^5$ y	$^{244}\text{Pu}$ 半減期 約 14 y
1	集中RW地下高汚染水(滞留水)	2011年11月1日	<2.1 $\times 10^{-3}$	<5.8 $\times 10^{-3}$	<1.5 $\times 10^{-2}$	<1.5 $\times 10^{-2}$	<1.7 $\times 10^2$
9	蒸発濃縮装置濃廃水	2011年11月3日	<1.7 $\times 10^{-3}$	<1.3 $\times 10^{-1}$	<3.6 $\times 10^{-2}$	<3.6 $\times 10^{-2}$	<3.2 $\times 10^2$

No.	試料名	採取日	放射能濃度 (Bq/mL)				
			$^{242}\text{Pu}$ 半減期 約 3.7 $\times 10^4$ y	$^{243}\text{Am}$ 半減期 約 4.3 $\times 10^2$ y	$^{243}\text{Am}$ 半減期 約 1.4 $\times 10^2$ y	$^{244}\text{Am}$ 半減期 約 7.4 $\times 10^3$ y	$^{244}\text{Cm}$ 半減期 約 18 y
1	集中RW地下高汚染水(滞留水)	2011年11月1日	<1.1 $\times 10^{-2}$	<4.8 $\times 10^{-3}$	<2.2	<1.0 $\times 10^{-2}$	<2.2 $\times 10^{-3}$
9	蒸発濃縮装置濃廃水	2011年11月3日	<9.4 $\times 10^{-3}$	<1.1 $\times 10^{-2}$	<1.4	<6.8 $\times 10^{-3}$	<6.0 $\times 10^{-3}$

No.	試料名	採取日	放射能濃度 (Bq/mL)	
			$^{245}\text{Cm}$ 半減期 約 8.5 $\times 10^3$ y	$^{246}\text{Cm}$ 半減期 約 4.7 $\times 10^3$ y
1	集中RW地下高汚染水(滞留水)	2011年11月1日	<1.0 $\times 10^{-2}$	<1.0 $\times 10^{-2}$
9	蒸発濃縮装置濃廃水	2011年11月3日	<6.8 $\times 10^{-3}$	<6.7 $\times 10^{-3}$

\* 試料No.2から8はNo.1と9が検出下限値未満のため分析せず。2012年1月19日(試料受入日)補正值。

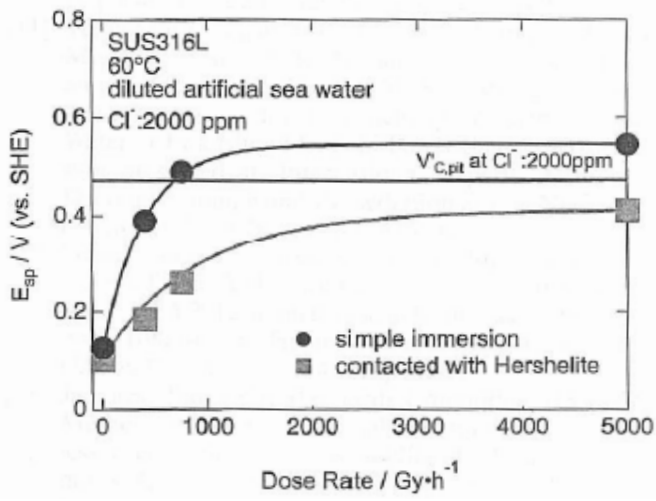


汚染水処理設備からのサンプリング場所 (2011年11月)

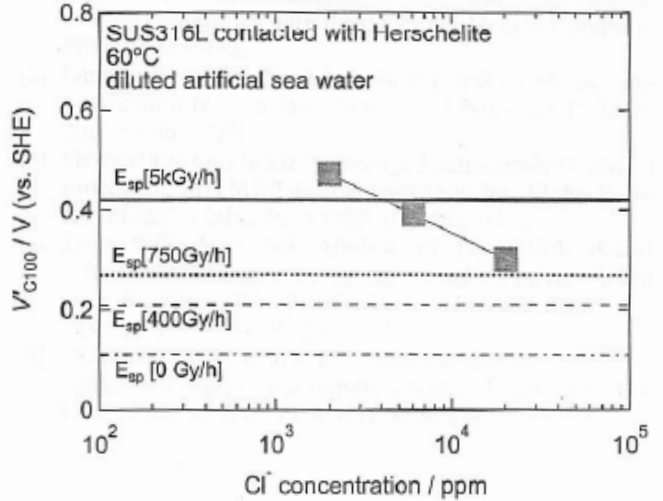
図表1-2 内部環境(セシウム吸着装置・第二セシウム吸着装置)<sup>(9)</sup>



ゼオライトが共存しない溶液では、放射線照射で過酸化水素が生成し $E_{SP}$ が上昇するが、ゼオライトが共存する場合は $E_{SP}$ の上昇が抑制されている。このため、ゼオライト共存時は局部腐食のリスクが軽減される(メカニズムは不明)。

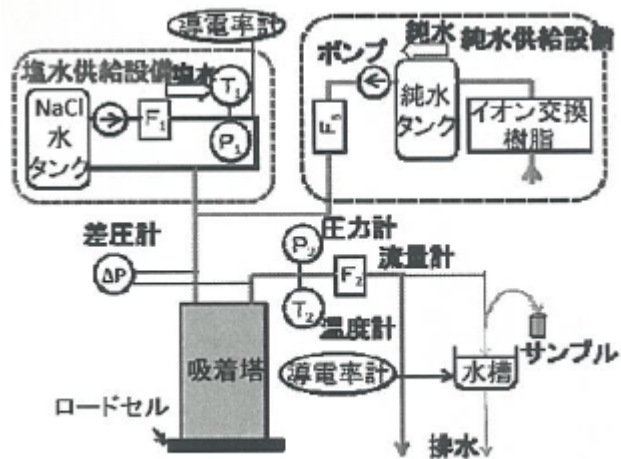


ゼオライト共存有無の自然電位の変化

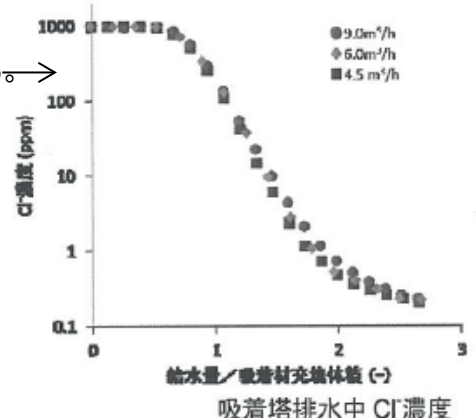


ゼオライト共存SUS316Lの海水中での電気化学的腐食試験

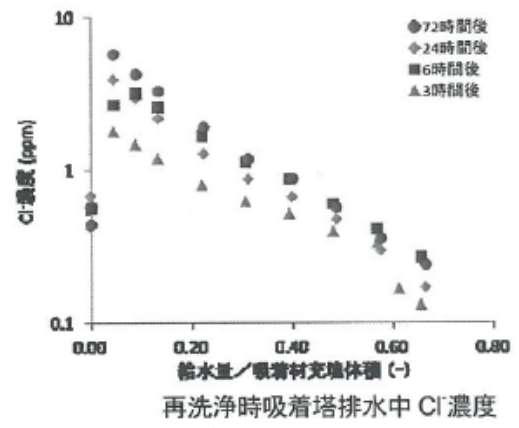
吸着材充填体積の約2倍で約0.5ppmまでCl-濃度が低下する。→



実機吸着塔を用いた洗浄試験装置模式図



吸着塔排水中 Cl濃度



再洗浄時吸着塔排水中 Cl濃度

図1-7 吸着塔内部環境(セシウム吸着装置)<sup>(10)(11)</sup>

表1-2 内部環境(モバイル式処理装置)<sup>(12)</sup>

福島第一2, 3号機海側トレンチ滞留水分析結果

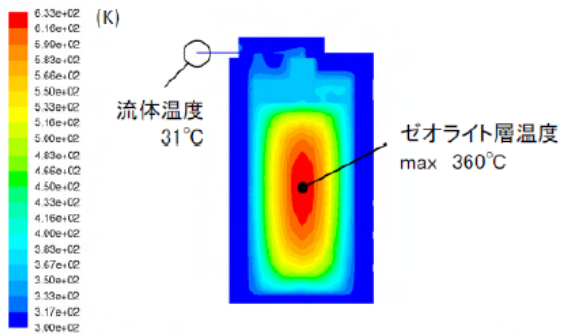
単位: Bq/L (塩素を除く)

	2号機			3号機		
	海水配管トレンチ立坑C(水深1m) (2号機 A)	海水配管トレンチ立坑C(水深7m) (2号機 A)	海水配管トレンチ立坑C(水深13m) (2号機 A)	海水配管トレンチ立坑B(水深1m) (3号機 A)	海水配管トレンチ立坑B(水深7m) (3号機 A)	海水配管トレンチ立坑B(水深13m) (3号機 A)
採取日	7月31日	7月31日	7月31日	7月31日	7月31日	7月31日
採取時刻	10:30	10:30	10:30	10:30	10:30	10:30
塩素(ppm)	700	700	7,500	16,000	17,000	17,000
Cs-134(約2年)	110,000,000	110,000,000	300,000,000	13,000,000	10,000,000	12,000,000
Cs-137(約30年)	230,000,000	240,000,000	650,000,000	26,000,000	22,000,000	24,000,000
その他						
全β	370,000,000	420,000,000	970,000,000	32,000,000	34,000,000	34,000,000
H-3(約12年)	2,400,000	2,400,000	4,600,000	360,000	340,000	350,000

\* 太枠内が今回公表データ(計測条件1000cpm未満での再分析結果)。他は平成25年8月1日、8月2日にお知らせ済み。

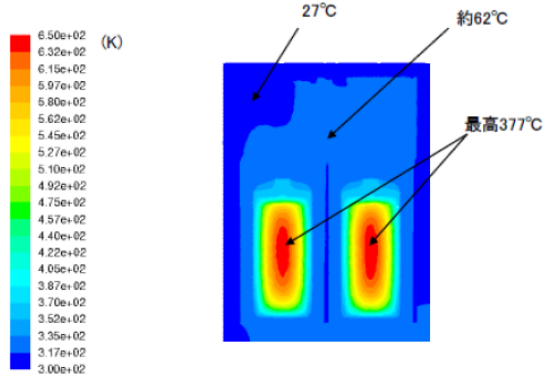
\* NDは検出限界値未満を表し、( )内に検出限界値を示す。



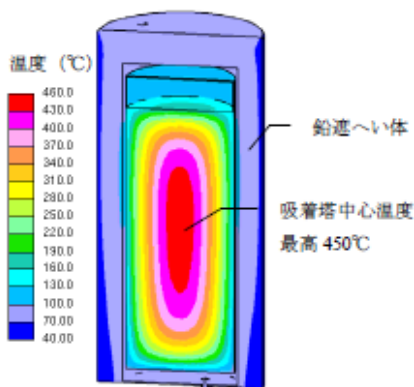


Contours of Static Temperature (k) ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbn5, spe, lam) Aug 05, 2011

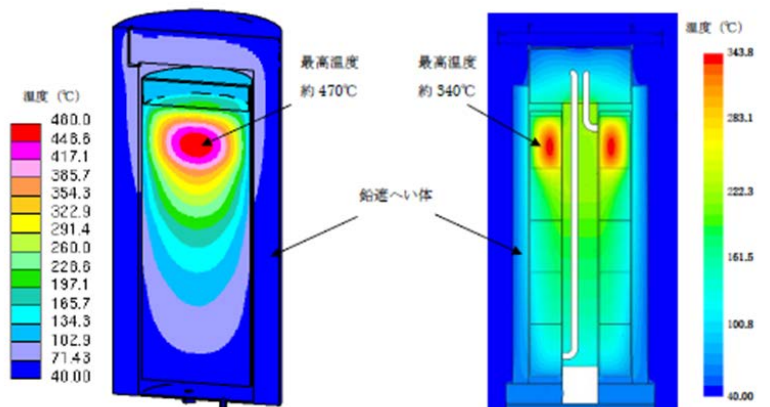
3次元解析計算によるセシウム吸着装置の吸着塔温度分布



ボックスカルパート内のセシウム吸着装置吸着塔の温度分布

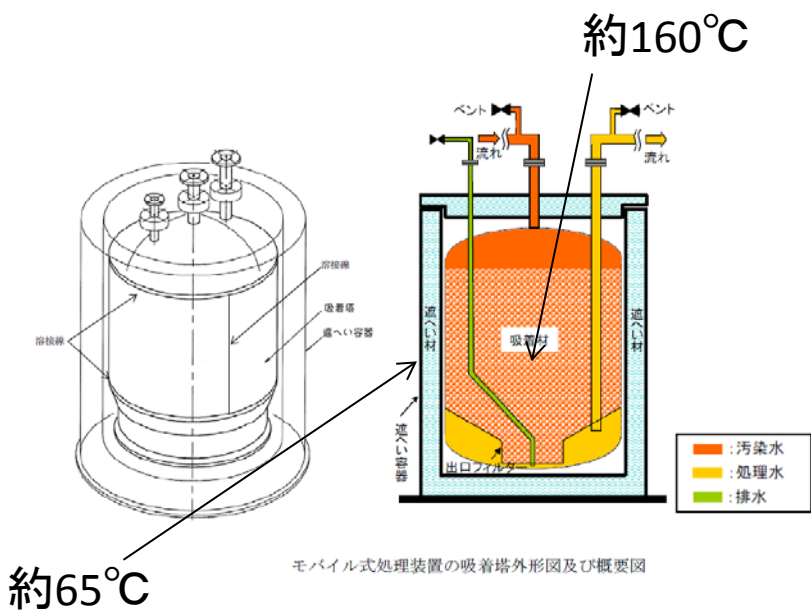


三次元解析による第二セシウム吸着装置吸着塔の温度分布



(TYPE-A) 三次元解析による同時吸着塔の温度分布

(TYPE-B) 三次元解析による同時吸着塔の温度分布



モバイル式処理装置の吸着塔外形図及び概要図

図1-8 吸着塔内部環境(セシウム吸着装置・第二セシウム吸着装置、モバイル式処理装置)(2)(3)(13)

表1-3 内部環境(多核種除去装置)<sup>(14)(15)</sup>

使用材料	使用範囲	塩化物イオン濃度[ppm]	常用温度[°C]	最大流速[m/s]	pH
ステンレス鋼 (SUS316L)	前処理ステージ I (バッチ処理タンク入口配管のみ)	13000	40	2.6	7
	前処理ステージ I (バッチ処理タンク入口配管以外)	13000	60	1.7	7.5~8.5
	前処理ステージ II	13000	60	2.8	11.8~12.2
	多核種吸着塔 1~5 塔目	13000	40	1.5	11.8~12.2
	多核種吸着塔 6~14 塔目 処理カラム~移送ポンプ	13000	40	1.5	6~7
炭素鋼	ALPS 入口~前処理ステージ I 移送ポンプ~ALPS 出口	13000	40	1.7	6~7

### (参考) 運転により見込まれる放射性物質の除去効果 (1/5)

■ 汚染水及び多核種除去設備処理済み水中の放射性物質の濃度及び告示濃度限度比<sup>※</sup>

	核種 (半減期)	① 伊規則告示濃度限度 (別表第2第六欄 周辺監視区域外の 水中の濃度限度) [Ba/cm <sup>3</sup> ]	汚染水 (RO濃縮水)		多核種除去設備 処理済み水	
			② 放射性物質の濃度 [Ba/cm <sup>3</sup> ]	告示濃度限度比 ②/①	③ 放射性物質の濃度 [Ba/cm <sup>3</sup> ]	告示濃度限度比 ③/①
1	Rb-86 (約19日)	4E-01	N.D. < 6.1E+00	1.5E+01	N.D. < 1.3E-03	3.3E-03
2	Sr-89 (約51日)	3E-01	1.2E+04	4.0E+04	N.D. < 2.8E-04	9.3E-04
3	Sr-90 (約29年)	3E-02	1.1E+05	3.7E+06	N.D. < 9.7E-05	3.2E-03
4	Y-90 (約64時間)	3E-01	1.1E+05	3.7E+05	N.D. < 9.7E-05	3.2E-04
5	Y-91 (約59日)	3E-01	N.D. < 1.6E+02	5.3E+02	N.D. < 4.5E-02	1.5E-01
6	Nb-95 (約35日)	1E+00	N.D. < 7.2E-01	7.2E-01	N.D. < 1.3E-04	1.3E-04
7	Tc-99 (約210000年)	1E+00	6.8E-02	6.8E-02	N.D. < 5.4E-05	5.4E-05
8	Ru-103 (約40日)	1E+00	N.D. < 1.1E+00	1.1E+00	N.D. < 1.5E-04	1.5E-04
9	Ru-106 (約370日)	1E-01	3.0E+01	3.0E+02	N.D. < 1.2E-03	1.2E-02
10	Rh-103m (約56分)	2E+02	7.7E-01	3.9E-03	N.D. < 3.1E-05	1.5E-07
11	Rh-106 (約30秒)	3E+02	3.0E+01	1.0E-01	N.D. < 1.2E-03	4.0E-06
12	Ag-110m (約250日)	3E-01	N.D. < 8.8E-01	2.9E+00	N.D. < 1.2E-04	4.0E-04
13	Cd-113m (約15年)	4E-02	N.D. < 3.3E-02	8.2E-01	N.D. < 4.5E-06	1.1E-04

※検出限界値未満 (N.D.) の核種は、検出限界値から告示濃度限度比を算出

## (参考) 運転により見込まれる放射性物質の除去効果 (2/5)

■ 汚染水及び多核種除去設備処理済み水中の放射性物質の濃度及び告示濃度限度比<sup>\*</sup>

	核種 (半減期)	①炉規則告示濃度限度 (別表第2第六欄 周辺監視区域外の 水中の濃度限度) [Bq/cm <sup>3</sup> ]	汚染水 (RO濃縮水)		多核種除去設備 処理済み水	
			②放射性物質の濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	告示濃度限度比 ②/①	③放射性物質の濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	告示濃度限度比 ③/①
14	Cd-115m (約45日)	3E-01	N.D. < 3.5E+01	1.2E+02	N.D. < 7.8E-03	2.6E-02
15	Sn-119m (約290日)	2E+00	N.D. < 1.2E+01	6.0E+00	N.D. < 2.8E-03	1.4E-03
16	Sn-123 (約130日)	4E-01	N.D. < 9.1E+01	2.3E+02	N.D. < 2.1E-02	5.3E-02
17	Sn-126 (約100000年)	2E-01	N.D. < 1.1E-01	5.5E-01	N.D. < 2.4E-05	1.2E-04
18	Sb-124 (約60日)	3E-01	N.D. < 5.7E-01	1.9E+00	N.D. < 2.1E-04	7.0E-04
19	Sb-125 (約3年)	8E-01	1.0E+02	1.3E+02	N.D. < 4.0E-04	5.0E-04
20	Te-123m (約120日)	6E-01	N.D. < 2.0E+00	3.3E+00	N.D. < 1.2E-04	2.0E-04
21	Te-125m (約58日)	9E-01	N.D. < 1.5E+02	1.7E+02	N.D. < 2.4E-02	2.7E-02
22	Te-127 (約9時間)	5E+00	N.D. < 1.1E+02	2.2E+01	N.D. < 1.7E-02	3.4E-03
23	Te-127m (約110日)	3E-01	N.D. < 1.1E+02	3.7E+02	N.D. < 2.4E-02	8.0E-02
24	Te-129 (約70分)	1E+01	N.D. < 1.8E+01	1.8E+00	N.D. < 1.1E-02	1.1E-03
25	Te-129m (約34日)	3E-01	N.D. < 2.5E+01	8.3E+01	N.D. < 3.8E-03	1.3E-02
26	I-129 (約16000000年)	9E-03	5.3E-01	5.9E+01	N.D. < 9.8E-04	1.1E-01

\*検出限界値未満 (N.D.) の核種は、検出限界値から告示濃度限度比を算出

## (参考) 運転により見込まれる放射性物質の除去効果 (3/5)

■ 汚染水及び多核種除去設備処理済み水中の放射性物質の濃度及び告示濃度限度比<sup>\*</sup>

	核種 (半減期)	①炉規則告示濃度限度 (別表第2第六欄 周辺監視区域外の 水中の濃度限度) [Bq/cm <sup>3</sup> ]	汚染水 (RO濃縮水)		多核種除去設備 処理済み水	
			②放射性物質の濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	告示濃度限度比 ②/①	③放射性物質の濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	告示濃度限度比 ③/①
27	Cs-134 (約2年)	6E-02	1.5E+01	2.5E+02	N.D. < 2.9E-04	4.8E-03
28	Cs-135 (約3000000年)	6E-01	N.D. < 5.5E+01	9.2E+01	N.D. < 9.7E-03	1.6E-02
29	Cs-136 (約13日)	3E-01	N.D. < 6.2E-01	2.1E+00	N.D. < 1.1E-04	3.7E-04
30	Cs-137 (約30年)	9E-02	2.0E+01	2.2E+02	N.D. < 3.6E-04	4.0E-03
31	Ba-137m (約3分)	8E+02	2.0E+01	2.5E-02	N.D. < 3.6E-04	4.5E-07
32	Ba-140 (約13日)	3E-01	N.D. < 3.7E+00	1.2E+01	N.D. < 5.0E-04	1.7E-03
33	Ce-141 (約32日)	1E+00	N.D. < 3.5E+00	3.5E+00	N.D. < 3.0E-04	3.0E-04
34	Ce-144 (約280日)	2E-01	N.D. < 1.6E+01	8.0E+01	N.D. < 9.2E-04	4.6E-03
35	Pr-144 (約17分)	2E+01	N.D. < 1.2E+02	6.0E+00	N.D. < 2.0E-01	1.0E-02
36	Pr-144m (約7分)	4E+01	N.D. < 1.4E+00	3.5E-02	N.D. < 2.4E-03	6.0E-05
37	Pm-146 (約6年)	9E-01	N.D. < 1.5E+00	1.7E+00	N.D. < 1.8E-04	2.0E-04
38	Pm-147 (約3年)	3E+00	N.D. < 8.5E+02	2.8E+02	N.D. < 6.9E-02	2.3E-02
39	Pm-148 (約5日)	3E-01	N.D. < 1.7E+00	5.7E+00	N.D. < 5.2E-04	1.7E-03

\*検出限界値未満 (N.D.) の核種は、検出限界値から告示濃度限度比を算出



表1-5 内部環境(多核種除去装置)<sup>(15)</sup>

## (参考) 運転により見込まれる放射性物質の除去効果 (4/5)

## ■ 汚染水及び多核種除去設備処理済み水中の放射性物質の濃度及び告示濃度限度比\*

	核種 (半減期)	①炉規則告示濃度限度 (別表第2第六欄 周辺監視区域外の 水中の濃度限度) [Bq/cm <sup>3</sup> ]	汚染水 (RO濃縮水)		多核種除去設備 処理済み水	
			②放射性物質の濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	告示濃度限度比 ②/①	③放射性物質の濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	告示濃度限度比 ③/①
40	Pm-148m (約41日)	5E-01	N.D. < 1.6E+00	3.2E+00	N.D. < 1.3E-04	2.6E-04
41	Sm-151 (約87年)	8E+00	N.D. < 8.9E-02	1.1E-02	N.D. < 2.4E-05	3.0E-06
42	Eu-152 (約13年)	6E-01	N.D. < 7.0E+00	1.2E+01	N.D. < 5.1E-04	8.5E-04
43	Eu-154 (約9年)	4E-01	N.D. < 1.2E+00	3.0E+00	N.D. < 3.2E-04	8.0E-04
44	Eu-155 (約5年)	3E+00	N.D. < 8.7E-01	2.9E-01	N.D. < 2.3E-04	7.7E-05
45	Gd-153 (約240日)	3E+00	N.D. < 2.6E-01	8.7E-02	N.D. < 2.2E-07	7.4E-08
46	Tb-160 (約72日)	5E-01	N.D. < 2.0E+00	4.0E+00	N.D. < 3.7E-04	7.4E-04
47	Pu-238 (約88年)	4E-03	2.2E-03	5.5E-01	N.D. < 6.6E-05	1.7E-02
48	Pu-239 (約24000年)	4E-03	2.2E-03	5.5E-01	N.D. < 6.6E-05	1.7E-02
49	Pu-240 (約6600年)	4E-03	2.2E-03	5.5E-01	N.D. < 6.6E-05	1.7E-02
50	Pu-241 (約14年)	2E-01	9.7E-02	4.9E-01	N.D. < 2.9E-03	1.5E-02
51	Am-241 (約430年)	5E-03	2.2E-03	4.4E-01	N.D. < 6.6E-05	1.3E-02
52	Am-242m (約150年)	5E-03	2.2E-03	4.4E-01	N.D. < 6.6E-05	1.3E-02

\*検出限界値未満 (N.D.) の核種は、検出限界値から告示濃度限度比を算出

## (参考) 運転により見込まれる放射性物質の除去効果 (5/5)

## ■ 汚染水及び多核種除去設備処理済み水中の放射性物質の濃度及び告示濃度限度比\*

	核種 (半減期)	①炉規則告示濃度限度 (別表第2第六欄 周辺監視区域外の 水中の濃度限度) [Bq/cm <sup>3</sup> ]	汚染水 (RO濃縮水)		多核種除去設備 処理済み水	
			②放射性物質の濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	告示濃度限度比 ②/①	③放射性物質の濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	告示濃度限度比 ③/①
53	Am-243 (約7400年)	5E-03	2.2E-03	4.4E-01	N.D. < 6.6E-05	1.3E-02
54	Cm-242 (約160日)	6E-02	2.2E-03	3.7E-02	N.D. < 6.6E-05	1.1E-03
55	Cm-243 (約29年)	6E-03	2.2E-03	3.7E-01	N.D. < 6.6E-05	1.1E-02
56	Cm-244 (約18年)	7E-03	2.2E-03	3.1E-01	N.D. < 6.6E-05	9.5E-03
57	Mn-54 (約310日)	1E+00	1.1E+00	1.1E+00	N.D. < 1.1E-04	1.1E-04
58	Fe-59 (約45日)	4E-01	N.D. < 9.1E-01	2.3E+00	N.D. < 2.1E-04	5.3E-04
59	Co-58 (約71日)	1E+00	N.D. < 7.0E-01	7.0E-01	N.D. < 1.2E-04	1.2E-04
60	Co-60 (約5年)	2E-02	8.6E-01	4.3E+01	N.D. < 1.8E-04	9.0E-03
61	Ni-63 (約100年)	6E+00	4.3E+00	7.2E-01	N.D. < 1.2E-02	2.0E-03
62	Zn-65 (約240日)	2E-01	N.D. < 1.0E+00	5.0E+00	N.D. < 2.6E-04	1.3E-03

 告示濃度限度比  
 総和 (62核種) : 4.1E+06

 告示濃度限度比  
 総和 (62核種) : 6.9E-01

\*検出限界値未満 (N.D.) の核種は、検出限界値から告示濃度限度比を算出

表1-6 内部環境(高性能多核種除去装置)<sup>(6)(16)</sup>

## 二相ステンレス鋼を使用する範囲の環境

二相ステンレス鋼	使用範囲		
	塩化物イオン 濃度 [ppm]	常用温度 [°C]	pH
	6, 350	0~40°C	3.5~7.5

## ■ 高性能多核種除去設備における除去性能評価 (1/5)

	核種 (半減期)	炉規則告示濃度限度 (別表第2第六欄 周辺監視区域外の 水中の濃度限度) [Bq/cm <sup>3</sup> ]	処理対象水 (H8A工 リアタンク) の放射 能濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	処理済水		備考
				放射能濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	告示濃度限度比	
1	Rb-86 (約19日)	3E-01	< 1.6E+01	< 1.4E-03	< 5E-03	
2	Sr-89 (約51日)	3E-01	< 4.1E+03	< 8.9E-05	< 3E-04	
3	Sr-90 (約29年)	3E-02	9.2E+04	< 1.6E-04	< 5E-03	
4	Y-90 (約64時間)	3E-01	9.2E+04	< 1.6E-04	< 5E-04	Sr-90と放射平衡
5	Y-91 (約59日)	3E-01	< 3.8E+02	< 4.7E-02	< 2E-01	
6	Nb-95 (約35日)	1E+00	< 1.9E+00	< 1.7E-04	< 2E-04	
7	Tc-99 (約21000年)	1E+00	評価中	評価中	評価中	
8	Ru-103 (約40日)	1E+00	< 2.7E+00	< 1.5E-04	< 2E-04	
9	Ru-106 (約370日)	1E-01	2.4E+01	7.7E-03	8E-02	
10	Rh-103m (約56分)	2E+02	< 2.7E+00	< 1.5E-04	< 8E-07	Ru-103と放射平衡
11	Rh-106 (約30秒)	3E+02	2.4E+01	7.7E-03	3E-05	Ru-106と放射平衡
12	Ag-110m (約250日)	3E-01	< 2.1E+00	< 1.6E-04	< 5E-04	
13	Cd-113m (約15年)	4E-02	< 1.3E+04	評価中	評価中	

## ■ 高性能多核種除去設備における除去性能評価 (2/5)

	核種 (半減期)	炉規則告示濃度限度 (別表第2第六欄 周辺監視区域外の 水中の濃度限度) [Bq/cm <sup>3</sup> ]	処理対象水 (H8A工 リアタンク) の放射 能濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	処理済水		備考
				放射能濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	告示濃度限度比	
14	Cd-115m (約45日)	3E-01	< 9.6E+01	< 7.6E-03	< 3E-02	
15	Sn-119m (約290日)	2E+00	< 2.3E+02	< 1.9E-02	< 1E-02	Sn-123の放射能濃度より評価
16	Sn-123 (約130日)	4E-01	< 2.3E+02	< 1.9E-02	< 5E-02	
17	Sn-126 (約10000年)	2E-01	< 2.0E+01	< 7.7E-04	< 4E-03	
18	Sb-124 (約60日)	3E-01	< 1.9E+00	< 2.9E-04	< 1E-03	
19	Sb-125 (約3年)	8E-01	3.0E+01	< 4.9E-04	< 6E-04	
20	Te-123m (約120日)	6E-01	< 4.0E+00	< 2.1E-04	< 4E-04	
21	Te-125m (約58日)	9E-01	3.0E+01	< 4.9E-04	< 5E-04	Sb-125と放射平衡
22	Te-127 (約9時間)	5E+00	< 2.3E+02	< 1.5E-02	< 3E-03	
23	Te-127m (約110日)	3E-01	< 2.4E+02	< 1.5E-02	< 5E-02	Te-127の放射能濃度より評価
24	Te-129 (約70分)	1E+01	< 3.4E+01	< 2.1E-03	< 2E-04	
25	Te-129m (約34日)	3E-01	< 6.4E+01	< 3.9E-03	< 1E-02	
26	I-129 (約1600000年)	9E-03	7.1E-02	< 9.1E-04	< 1E-01	

表1-7 内部環境(高性能多核種除去装置)<sup>(16)</sup>

■ 高性能多核種除去設備における除去性能評価 (3/5)

	核種 (半減期)	炉規則告示濃度限度 (別表第2第六欄 周辺監視区域外の 水中の濃度限度) [Bq/cm <sup>3</sup> ]	処理対象水 (H8A工 リアタンク) の放射 能濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	処理済水		備考
				放射能濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	告示濃度限度比	
27	Cs-134 (約2年)	6E-02	< 3.0E+00	< 1.5E-04	< 3E-03	
28	Cs-135 (約3000000年)	6E-01	3.4E-05	< 1.1E-09	< 2E-09	Cs-137の放射能濃度より評価
29	Cs-136 (約13日)	3E-01	< 1.9E+00	< 1.3E-04	< 4E-04	
30	Cs-137 (約30年)	9E-02	5.5E+00	< 1.8E-04	< 2E-03	
31	Ba-137m (約3分)	8E+02	5.5E+00	< 1.8E-04	< 2E-07	Cs-137と放射平衡
32	Ba-140 (約13日)	3E-01	< 9.0E+00	< 5.3E-04	< 2E-03	
33	Ce-141 (約32日)	1E+00	< 7.2E+00	< 3.5E-04	< 4E-04	
34	Ce-144 (約280日)	2E-01	< 3.4E+01	< 1.6E-03	< 8E-03	
35	Pr-144 (約17分)	2E+01	< 3.4E+01	< 1.6E-03	< 8E-05	Ce-144と放射平衡
36	Pr-144m (約7分)	4E+01	< 3.4E+01	< 1.6E-03	< 4E-05	Ce-144と放射平衡
37	Pm-146 (約6年)	9E-01	3.6E+00	< 2.1E-04	< 2E-04	
38	Pm-147 (約3年)	3E+00	< 3.7E+01	< 4.5E-03	< 2E-03	Eu-154の放射能濃度より評価
39	Pm-148 (約5日)	3E-01	< 5.6E+00	< 7.4E-04	< 2E-03	

■ 高性能多核種除去設備における除去性能評価 (4/5)

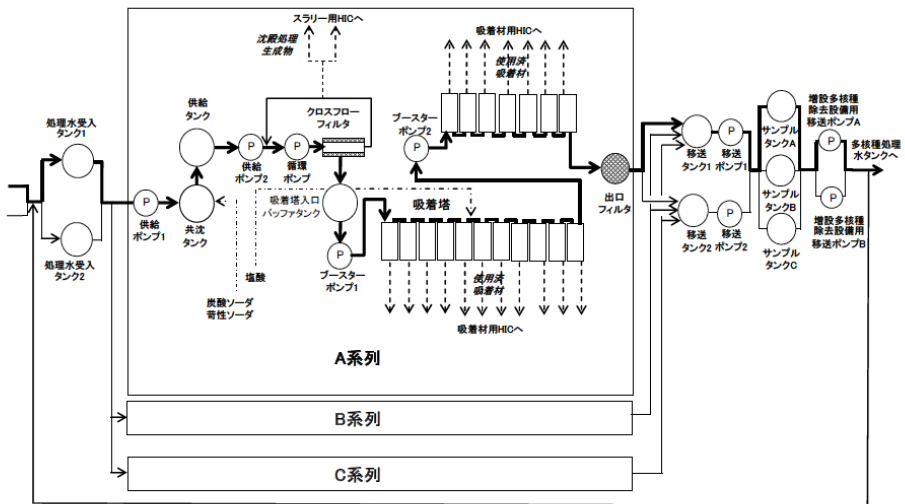
	核種 (半減期)	炉規則告示濃度限度 (別表第2第六欄 周辺監視区域外の 水中の濃度限度) [Bq/cm <sup>3</sup> ]	処理対象水 (H8A工 リアタンク) の放射 能濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	処理済水		備考
				放射能濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	告示濃度限度比	
40	Pm-148m (約41日)	5E-01	< 2.2E+00	< 1.3E-04	< 3E-04	
41	Sm-151 (約87年)	8E+00	< 3.0E-01	< 3.7E-05	< 5E-06	Eu-154の放射能濃度より評価
42	Eu-152 (約13年)	6E-01	< 1.1E+01	< 6.7E-04	< 1E-03	
43	Eu-154 (約9年)	4E-01	< 3.5E+00	< 4.3E-04	< 1E-03	
44	Eu-155 (約5年)	3E+00	< 2.5E+01	< 9.2E-04	< 3E-04	
45	Gd-153 (約240日)	3E+00	< 2.0E+01	< 7.5E-04	< 3E-04	
46	Tb-160 (約72日)	5E-01	< 5.9E+00	< 4.5E-04	< 9E-04	
47	Pu-238 (約88年)	4E-03	< 9.2E-03	< 8.4E-05	< 2E-02	全α放射能の測定値に 包絡されるものとし評価
48	Pu-239 (約24000年)	4E-03	< 9.2E-03	< 8.4E-05	< 2E-02	全α放射能の測定値に 包絡されるものとし評価
49	Pu-240 (約6600年)	4E-03	< 9.2E-03	< 8.4E-05	< 2E-02	全α放射能の測定値に 包絡されるものとし評価
50	Pu-241 (約14年)	2E-01	< 3.7E-01	< 3.4E-03	< 2E-02	Pu-238の放射能濃度から評価
51	Am-241 (約430年)	5E-03	< 9.2E-03	< 8.4E-05	< 2E-02	全α放射能の測定値に 包絡されるものとし評価
52	Am-242m (約150年)	5E-03	< 2.5E-04	< 2.3E-06	< 5E-04	Am-241の放射能濃度より評価

## ■ 高性能多核種除去設備における除去性能評価 (5/5)

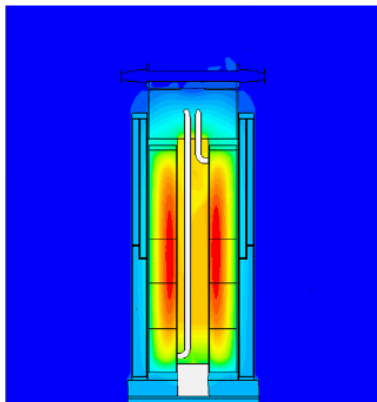
	核種 (半減期)	炉規則告示濃度限度 (別表第2第六欄 周辺監視区域外の 水中の濃度限度) [Bq/cm <sup>3</sup> ]	処理対象水 (H8Aエ リアタンク) の放射 能濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	処理済水		備考
				放射能濃度 [Bq/cm <sup>3</sup> ]	告示濃度限度比	
53	Am-243 (約7400年)	5E-03	< 9.2E-03	8.4E-05	2E-02	全α放射能の測定値に 包絡されるものとし評価
54	Cm-242 (約160日)	6E-02	< 9.2E-03	8.4E-05	1E-03	全α放射能の測定値に 包絡されるものとし評価
55	Cm-243 (約29年)	6E-03	< 9.2E-03	8.4E-05	1E-02	全α放射能の測定値に 包絡されるものとし評価
56	Cm-244 (約18年)	7E-03	< 9.2E-03	8.4E-05	1E-02	全α放射能の測定値に 包絡されるものとし評価
57	Mn-54 (約310日)	1E+00	< 1.4E+00	< 1.1E-04	< 1E-04	
58	Fe-59 (約45日)	4E-01	< 2.3E+00	< 2.3E-04	< 6E-04	
59	Co-58 (約71日)	1E+00	< 1.7E+00	< 1.3E-04	< 1E-04	
60	Co-60 (約5年)	2E-01	< 1.2E+00	< 1.6E-04	< 8E-04	
61	Ni-63 (約100年)	6E+00	評価中	評価中	評価中	
62	Zn-65 (約240日)	2E-01	< 2.5E+00	< 2.3E-04	< 1E-03	
全α			< 9.2E-03	< 8.4E-05	—	

多核種除去設備:HICの最高温度は約73℃との記載のみであるが、最も発熱量の多いストロンチウム吸着材の評価であり、これ以下と推定される。

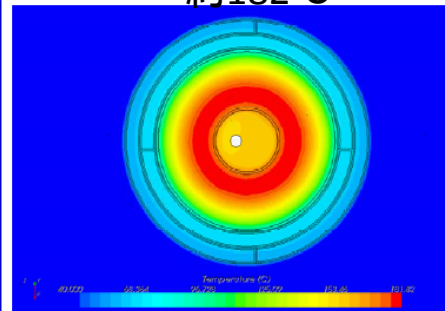
増設多核種除去設備の水処理2次廃棄物は全てHICへ。



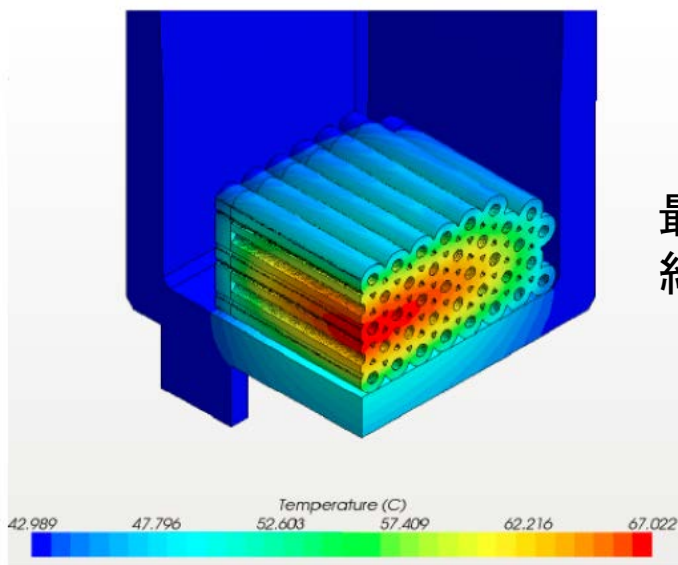
[http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu14\\_j/images/141118j0102.pdf](http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu14_j/images/141118j0102.pdf)



最高温度  
約182℃



吸着塔温度評価結果

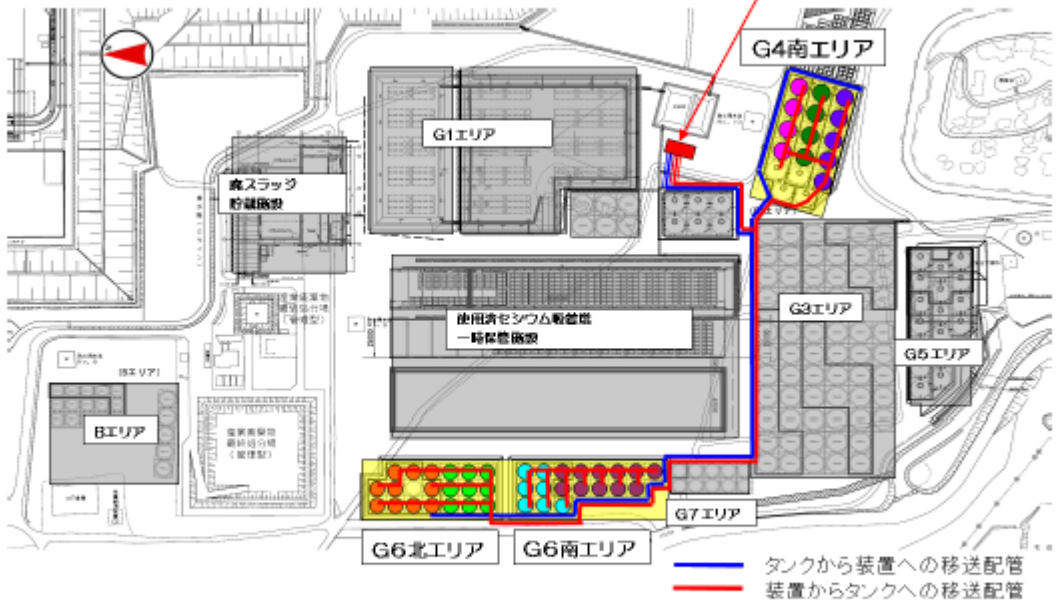


最高温度  
約67℃

フィルタ温度評価結果

図1-9 内部環境(多核種除去設備・増設多核種除去設備、高性能多核種除去設備)<sup>(6)</sup>





モバイル型ストロンチウム除去装置配置概要

(図中のモバイル型ストロンチウム除去装置設置場所は、当初処理対象(図中の色塗りしたタンク)である

G4 南エリア、G6 南エリア及びG6 北エリアタンクの近傍に設置を予定しており、処理対象タンクの変更により移動する場合がある。

なお、処理対象とするタンクは、図中の色塗りしたタンクである。)

G4 南エリア、G6 南エリア及びG6 北エリアの  
水質分析結果 (平成 26 年 2 月 19 日採取)

	放射能濃度 (Bq/cc)							性状	
	Cs-134	Cs-137	Co-60	Mn-54	Sb-125	Ru-106	Sr-90	Cl (ppm)	Ca (ppm)
G4南	<2.1+0	2.5+0	<1.1+0	<1.2E+0	2.1E+1	1.2E+1	3.9E+4	610	80
G6南	<2.3+0	2.1+0	<1.9+0	<1.2E+0	1.5E+1	2.0E+1	5.8E+4	600	88
G6北	<6.7E-1	8.5E-1	<2.7-1	<4.0E-1	4.0E+0	-	1.0E+4	230	30

モバイル型ストロンチウム除去装置のフィルタ・吸着塔の  
吸着量、最大表面線量率および最高温度

機器名称	捕捉・吸着 主要核種	捕捉・吸着量 (Bq/体) ※1	最大表面 線量率 (mSv/h) ※2	最大表面 線量率 (mSv/h) ※3	最高温度 (℃) ※4	耐熱 温度 (℃)
SS フィルタ	Sr-90	2.4×10 <sup>14</sup>	2.0	5.0	112	121
ウルトラ フィルタ	Sr-90	5.2×10 <sup>14</sup>	5.0	10.1	120	200
吸着塔	Cs-134	5.2×10 <sup>9</sup>	5.0	7.4	143	200
	Cs-137	9.1×10 <sup>9</sup>				
	Sr-90	1.7×10 <sup>14</sup>				

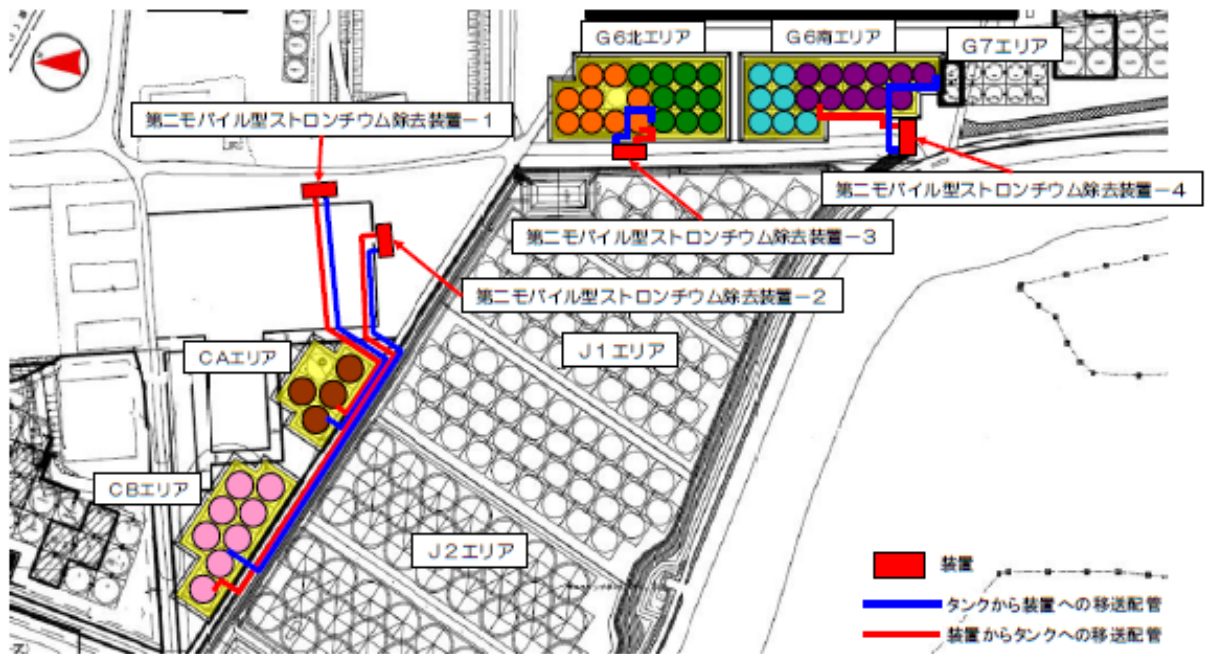
※1 捕捉・吸着する主要核種の放射能濃度 (処理対象水中の放射能濃度を高めに設定し、主要核種が各フィルタ・吸着塔に偏って捕捉・吸着された場合を想定した保守的な設定値)

※2 水抜き前の表面線量率

※3 貯蔵時を想定した水抜き後の表面線量率

※4 貯蔵時を想定したコンクリート製ボックスカルパート内での夏場の最高温度

図表1-3 内部環境(モバイル型ストロンチウム除去装置)<sup>(7)</sup>



第二モバイル型ストロンチウム除去装置配置概要

(図中の第二モバイル型ストロンチウム除去装置設置場所は、処理対象(図中の色塗りしたタンク)である

CAエリア、CBエリア、G6南エリア及びG6北エリアタンクの近傍に設置を予定しており、処理対象タンクの変更により移動する場合がある。

なお、処理対象とするタンクは、図中の色塗りしたタンクである。)

CAエリア、CBエリア、G6南エリア及びG6北エリアの  
水質分析結果(平成26年2月19日採取)

	放射能濃度 (Bq/cc)							性状	
	Cs-134	Cs-137	Co-60	Mn-54	Sb-125	Ru-106	Sr-90	Cl (ppm)	Ca (ppm)
CA	7.7E+0	2.0E+1	<9.6E-1	<1.6E+0	3.7E+1	2.3E+1	7.2E+4	2200	157
CB	<2.2E+0	3.2E+0	<7.6E-1	<1.3E+0	2.3E+1	1.5E+1	4.3E+4	975	113
G6南	<2.3E+0	2.1E+0	<1.9E+0	<1.2E+0	1.5E+1	2.0E+1	5.8E+4	600	88
G6北	<6.7E-1	8.5E-1	<2.8E-1	<4.0E-1	4.0E+0	-	1.0E+4	230	38

第二モバイル型ストロンチウム除去装置の吸着塔の

吸着量、最大表面線量率および最高温度

機器名称	捕捉・吸着 主要核種	捕捉・吸着量 (Bq/体) ※1	最大表面 線量率 (mSv/h) ※2	最高温度 (°C) ※3	耐熱 温度 (°C)
吸着塔	Cs-134	$5.0 \times 10^{11}$	0.028	309	600
	Cs-137	$1.5 \times 10^{12}$			
	Sr-90	$2.0 \times 10^{15}$			

※1 捕捉・吸着する主要核種の放射能濃度(処理対象水中の放射能濃度を高めに設定し、主要核種が吸着塔に偏って捕捉・吸着された場合を想定した保守的な設定値)

※2 貯蔵時を想定した水抜き後の表面線量率

※3 貯蔵時を想定したコンクリート製ボックスカルバート内での夏場の最高温度

図表1-4 内部環境(第二モバイル型ストロンチウム除去装置)<sup>(8)</sup>

図1-10 外部環境<sup>(17)</sup>





## 4.2. ステンレス鋼の腐食に関する解析コードの調査

原子力機構殿からご指定いただいた解析コードの概要を以下に示す。

### 1) CANBEY1

ステンレス鋼製キャニスタの応力腐食割れ計算コードとして開発された。構成を図2-1に示す。入力データの一部を確立分布で与え、ラテン超方格法(LHS)により生成したパラメータセットを用いてSCC発生時間を求め、SCC発生時間がLHSで生成したどのパラメータに感度を有するかを統計解析するものである。パラメータセット生成モジュール(LHS)、ステンレス鋼製キャニスタの応力腐食割れ計算モジュール(canisterSCC)、統計解析モジュール(SPOP)の3つのモジュールからなっている。

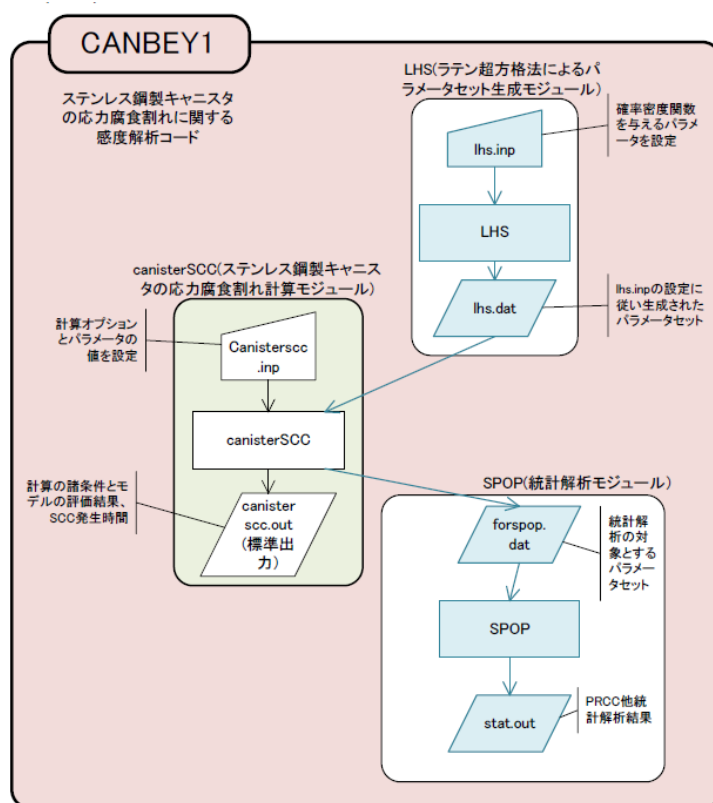


図2-1 ステンレス鋼製キャニスタの応力腐食割れに関する感度解析コードCANBEYの構成<sup>(1)</sup>

ステンレス鋼製キャニスタの応力腐食割れ計算モジュール(以下canisterSCC)のフロー図を図2-2に示す。貯蔵開始からの年数 $t$ に対して2種類のモデル式のいずれかの条件を満たした $t$ をSCCの発生時間としている。モデル式は、付着塩分量がSCC発生限界付着濃度以上かつ、キャニスタ表面湿度が塩化マグネシウムの潮解湿度以上かつ、キャニスタ表面温度が $103.5^{\circ}\text{C}$ 以下の場合(モデル1)、付着塩分量がSCC発生限界付着濃度以上かつ、キャニスタ表面温度が $103.5^{\circ}\text{C}$ 以下の場合(モデル2)の2種類を選択するものである。①キャニスタ表面における付着塩分濃度、②SCC発生限界塩分濃度、③キャニスタ表面の相対湿度、④塩化マグネシウムの潮解湿度、⑤キャニスタ表面の温度は後述の通りそれぞれ(1)～(6)式が与えられており、算出が可能である。材料、応力については、SCC発生限界濃度に材料因子、応力緩和因子として考慮されているが、環境因子についての評価がメインである。

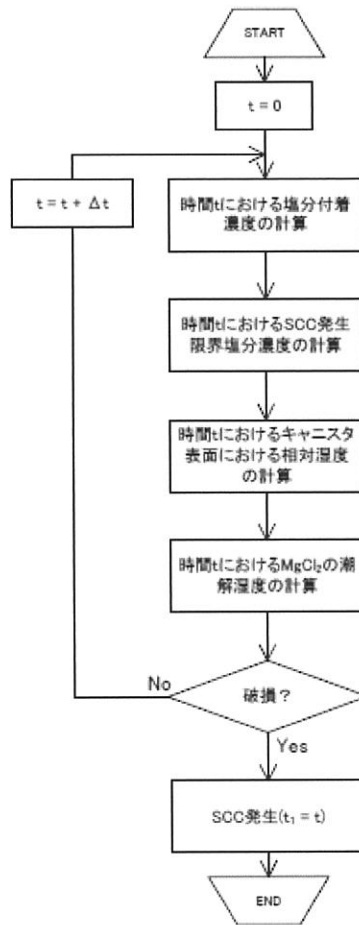


図2-2 ステンレス鋼製キャニスタの応力腐食割れ計算コードcanisterSCCのフロー図<sup>(1)</sup>

①時間 $t$  (y) におけるキャニスタ表面における付着塩分濃度 $Q_1(t)$  ( $\text{mg}/\text{m}^2$  as Cl) は、以下の (1) 式で算出する。

$$Q_1(t) = r_{\text{ad}} \times t \quad \dots (1)$$

$r_{\text{ad}}$  : 塩分付着速度 ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{y}$  as Cl)

塩分付着速度 $r_{\text{ad}}$  ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{y}$  as Cl) の算出式を以下に示す。

$$r_{\text{ad}} = A_5 \times 8766 \times C_{\text{Cl, air}} \quad \dots (1-2)$$

$C_{\text{Cl, air}}$  : 気中塩分濃度 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )

$A_5$  : 気中塩分濃度 $1\text{mg}/\text{m}^3$ の時の塩分付着速度 ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{h}$  per  $\text{mg}/\text{m}^3$ )

気中塩分濃度  $C_{\text{Cl, air}}$  は、以下の式 (1-3) で算出する。

$$C_{\text{Cl, air}} = A_2 \cdot \exp(-0.693 \times x/A_3) + A_4 \quad \dots (1-3)$$

$x$  : 海岸からの距離 (m)

$A_2$  : 気中塩分濃度  $C_{\text{Cl, air}}$  の距離依存成分の $x=0$ における値 ( $\text{mg}/\text{m}^3$  as Cl)

$A_3$  : 気中塩分濃度  $C_{\text{Cl, air}}$  の距離依存成分の半減距離 (m)

$A_4$  : 気中塩分濃度  $C_{\text{Cl, air}}$  の距離依存しない成分 ( $\text{mg}/\text{m}^3$  as Cl)

②時間 $t$  (y)におけるSCC発生限界塩分濃度 $Q_2(t)$  (mg/m<sup>2</sup> as Cl)は、以下の式(2)で算出する。

$$Q_2(t) = \alpha \times k_{str} \times k_{rad}(t)$$

$\alpha$  : 材料因子 (mg/m<sup>2</sup>)

$k_{str}$  : 応力緩和因子 (-)

$k_{rad}(t)$  : 時間 $t$  (y)における放射線影響因子 (-)

・材料因子  $\alpha$

材料因子  $\alpha$  は、ステンレス鋼種の違いにより定まる定数であり、以下に示すような値をとる。

$$\alpha = 800 \text{ (mg/m}^2\text{) for SUS304L}$$

$$\alpha = 1,000 \text{ (mg/m}^2\text{) for SUS329J4L}$$

$$\alpha = 4,000 \text{ (mg/m}^2\text{) for SUS316L}$$

$$\alpha = 10,000 \text{ (mg/m}^2\text{) for S31254}$$

・応力緩和因子  $k_{str}$

決定論的解析においては、応力緩和策失敗確率と応力緩和失敗パラメータの設定に関わらず応力緩和は考慮しないものとして、常に $k_{str} = 1.0$ で評価を実施する。感度解析においては、応力緩和因子 $k_{str}$ は、応力緩和失敗確率 $k_{fail}$ と失敗パラメータ $A_6$ に関して、キャニスタ上部、下部に分けてそれぞれ以下のように設定する。

キャニスタ上部

$$k_{str} = 1.0$$

キャニスタ下部

$$k_{str} = 1.0 \quad A_6 < p_{fail} \text{ の場合}$$

$$k_{str} = 1,000,000 \quad A_6 \geq p_{fail} \text{ の場合}$$

$p_{fail}$  : 応力緩和策失敗確率

$A_6$  : 応力緩和失敗パラメータ

・放射線影響因子  $k_{rad}(t)$

時間 $t$  (y)における放射線影響因子  $k_{rad}(t)$  は、以下のように設定する。

$$k_{rad}(t) = A_7 \quad t < A_8$$

$$k_{rad}(t) = 1 \quad t \geq A_8$$

$A_7$  : 放射線影響係数 (-)

$A_8$  : 放射線影響終了年次 (y)

③キャニスタ表面における相対湿度RH<sub>can</sub> (%)は、以下の(3)式で算出する。

$$RH_{can}=100 \times p/p_{eq} \dots (3)$$

p : 水蒸気圧 (hPa)

p<sub>eq</sub> : 平衡水蒸気圧 (hPa)

・水蒸気圧p及び平衡水蒸気圧p<sub>eq</sub>

水蒸気圧p及び平衡水蒸気圧p<sub>eq</sub>は、それぞれ以下の(3-2)、(3-3)式で算出する。

$$p=B_1(T+T_d)^2+B_2(T+T_d)+B_3 \dots (3-2)$$

$$\log_{10}(p_{eq}/1.33322)=8.07131-1730.63/(233.426+T_{can}) \dots (3-3)$$

p<sub>eq</sub> : 平衡水蒸気圧 (hPa)

T : 気温(°C) (一日の最低気温A<sub>1</sub> °Cを入力する。)

T<sub>d</sub> : 気温日較差 (°C)

B<sub>1</sub> : 水蒸気圧評価式2次項の係数

B<sub>2</sub> : 水蒸気圧評価式1次項の係数

B<sub>3</sub> : 水蒸気圧評価式定数項

T<sub>can</sub> : キャニスタ表面の温度(°C) (5)式参照

④MgCl<sub>2</sub>の潮解湿度RH<sub>MgCl<sub>2</sub></sub>は、以下の(4)式で算出する。

$$RH_{MgCl_2}=B_4 \times T_{can}^2 + B_5 \times T_{can} + B_6 \dots (4)$$

B<sub>4</sub> : 潮解湿度評価式2次項の係数

B<sub>5</sub> : 潮解湿度評価式1次項の係数

B<sub>6</sub> : 潮解湿度評価式定数項

T<sub>can</sub> : キャニスタ表面の温度(°C) (5)式参照

⑤キャニスタ表面の温度は、キャニスタ上部、下部で異なる。キャニスタ上部温度の経時変化T<sub>can</sub><sup>上部</sup>(t)は以下の式(5)、下部の温度の経時変化T<sub>can</sub><sup>下部</sup>(t)は以下の式(6)で算出する。

$$T_{can}^{上部}(t)=100 \exp(-0.693t/120)+80 \exp(-0.693t/10)+20 \exp(-0.693t)-4.6+T \dots (5)$$

$$T_{can}^{下部}(t)=100 \exp(-0.693t/200)+60 \exp(-0.693t/15)+30 \exp(-0.693t)-30.6+T \dots (6)$$

t : 経過時間(年)

T : 気温(°C) (一日の最低気温A<sub>1</sub> °Cを入力する)

## 2) CRANP

ガラス固化体の周囲のキャニスタあるいはオーバーパックが地下水と接触することによって発生する腐食挙動を解析して、容器の封じ込め性能を評価するモデルである。有限差分法によって、腐食源である地下水中の溶存酸素の挙動を解く拡散モデルである。基本的な解析現象は、1) 地下水中の溶存酸素による均一腐食反応、2) 廃棄物からの放射線による地下水成分の放射性分解の影響、3) 処分場内の温度変化を考慮した拡散係数の変化、の3つである。CRANPの計算フローを図2-3に示す。

基本的には全面腐食についてのコードであり、局部腐食については取り扱っていない。ただし、腐食孔が小さければ、仮にそれがガラス固化体にまで直接貫通するものであっても、その孔を通して放出される各種のフラックスは極めて小さく、ガラス固化体から浸出した量の極一部しか放出されないとされている。

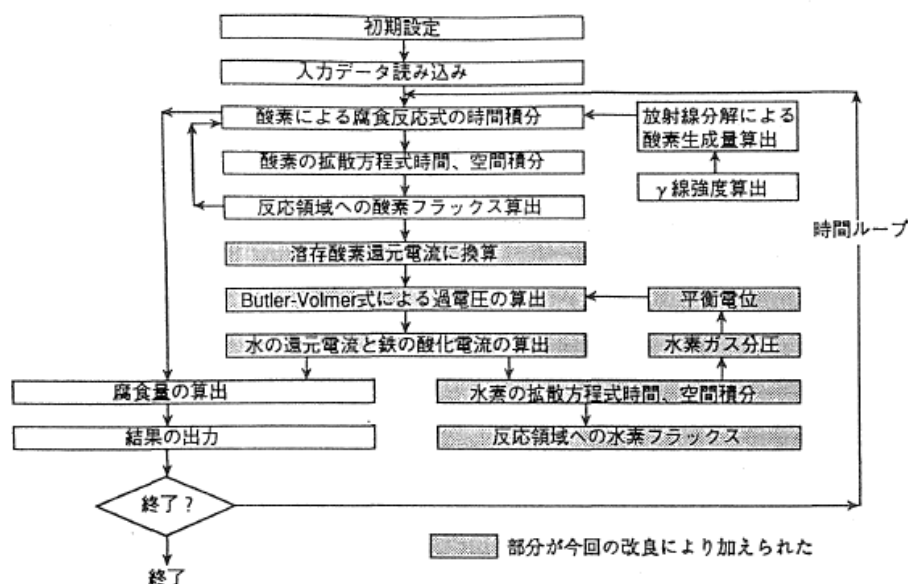


図2-3 CRANPの計算フロー<sup>(2)</sup>

## 3) CORCOP

処分後の炭素鋼オーバーパックに発生することが想定される全面腐食、局部腐食および応力腐食割れの発生、進展に起因する破壊時期を評価するためのモデルである。寿命評価モデルの構成図を図2-4に示す。オーバーパックの間隙水のpHが脱不動態pHを上回り不動態化した場合はすきま腐食の進展量を評価し、不動態化しない場合は全面腐食や炭酸塩環境における応力腐食割れの進展量を評価するものである。

### ・すきま腐食評価モデル<sup>(4)</sup>

図2-5に、炭素鋼オーバーパック腐食寿命評価モデルにおけるすきま腐食評価のフローを示す。炭素鋼の定常腐食電位と腐食すきま再不動態化電位を予測モデルにより



算出する。定常電位が腐食すきま再不動態化電位を上回った場合にすきま腐食が発生し、この時間を局部腐食の発生時間とする。炭素鋼の定常腐食電位の経時変化は(7)、(8)式であり、腐食すきま再不動態化電位予測モデル式は(9)式である。また、すきま腐食の進展速度は0.5mm/yと設定されている。

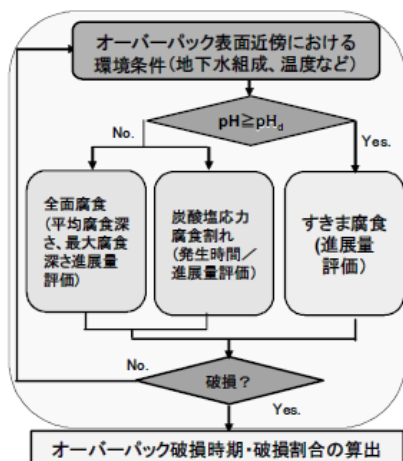


図2-4 炭素鋼オーバーパック腐食寿命評価モデルの構成図<sup>(3)</sup>

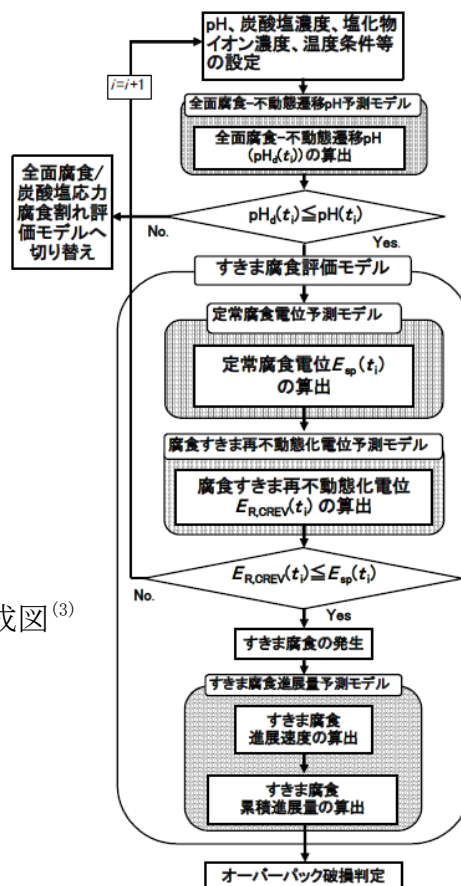


図2-5 炭素鋼オーバーパック腐食寿命評価モデルの構成図<sup>(4)</sup>

A. 大気平衡、大気吹込み条件

$$E_{SP}(t) = 0.44 - 0.031 \cdot \text{pH}(t) \dots (7)$$

B. 低溶存酸素条件

$$E_{SP}(t) = -0.48 - 0.015 \cdot \text{pH}(t) \dots (8)$$

$E_{SP}(t)$  : 廃棄体の処分後時刻  $t$  (y) における定常腐食電位 (V vs. SHE)

$\text{pH}(t)$  : 廃棄体の処分後時刻  $t$  (y) における溶液中 pH

$$E_{R, CREV}(t) = E_0 + a_R \cdot \log_{10} [Cl(t)] / [C(t)] \dots (9)$$

$E_{R, CREV}(t)$  : 廃棄体の処分後時刻  $t$  (y) における腐食すきま再不動態化電位 (V vs. SHE)

$Cl(t)$  : 廃棄体の処分後時刻  $t$  (y) における溶液中の塩化物イオン濃度 (mol/l)

$C(t)$  : 廃棄体の処分後時刻  $t$  (y) における溶液中の炭酸イオン濃度+炭酸水素イオン濃度

$E_0, a_R$  : 最小二乗法により決定する係数

・応力腐食割れ評価モデル<sup>(3)</sup>

応力腐食割れに影響を及ぼす代表的な環境として炭酸塩環境を想定した評価モデルが整備されている。炭素鋼の腐食電位が、割れが発生する腐食電位の下限值と上限値の間に存在し、且つ、き裂先端部の応力拡大係数 $K$ が、き裂進展が開始する応力拡大係数の下限値 $K_{th}$ を上回るとき裂進展が開始するとされている。進展速度は経験式を用いて算出されている。

全面腐食についても評価されているが、本案件の目的とは異なるため省略した。

以下のコードはコベルコ科研にて調査を実施し、原子力機構殿に了承を得てまとめたものである。

4) IGSCCによる配管破断確率の評価手法<sup>(5)</sup>

BERGMANらは、粒界応力腐食割れ(IGSCC)発生可能性のある原子力配管溶接部の破壊確率を評価するモデルを提案している。このモデルでは、亀裂発生速度、初期亀裂長さ、供用期間中検査の有効性及び亀裂貫通後の漏洩率のランダム特性が考慮されている。初期亀裂長さの確率密度関数等はスウェーデンにおけるステンレス鋼周溶接部の72件のIGSCC事例から評価されている。割れに対する腐食の影響等については考慮されていない。

5) CSP(Corrosion Simulation Program)<sup>(6)</sup>

CSPは、1995年よりAmoco、Chevron、DuPont、Exxon、GRI、ICI、Mobil、Shell、三菱化学の日米欧9社がコンソーシアムの形で支援し、米国OLI Systems Inc.社が開発を行ってきた腐食現象の理論的予測シミュレータである。電気化学の理論に電解質溶液の熱力学理論と物質移動および材料表面上での吸着・脱着現象に関わる化学工学理論を統合することにより、任意の溶液条件における材料の腐食傾向を定量的に推察予測することを目的として設計されている。

局部腐食予測モデルは、孔食を例として挙げると、まずは腐食電位を求め、次に再不動電位を求めそれらを比較し、再不動電位の方が高ければ孔食の発生を防げるという考え方である。再不動電位は塩素イオンに代表される攻撃的化學種の濃度および温度と共に低下し、硝酸イオンに代表される抑制的化學種の濃度と共に上昇することが知られており、混合溶液環境では両者のバランスによって決まる。**図2-6**に示される孔の底部において、金属 $M$ は金属ハロゲン化物 $MX$ 相の下で活性腐食を受

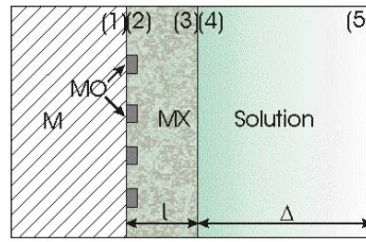


図2-6 孔の底部における材料表面の概念図<sup>(6)</sup>

けるが、再不動態化の過程では金属酸化物相MOを生成する。この時測定される電位低下は図中(1)～(5)の各境界の電位差の和として表され、再不動態化の限界条件における活性溶解電流密度、不動態生成電流密度、不動態保持電流密度および材料表面被覆率を用いて(10)式のように表される。

$$1 + \sum_j \left[ \left( \frac{i_p}{i_p} - 1 \right) \frac{l_j''}{i_p} \right] \theta_j^{n_j} \exp(\xi_j FE_{rp}/RT) = \sum_j k_j'' / i_p \theta_j^{n_j} \exp(\alpha_j FE_{rp}/RT) \cdots (10)$$

ここで  $E_{rp}$ 、 $i_{rp}$  は再不動態化電位とその電流密度、 $i_p$  は不動態保持電流密度、 $\theta$  は各化学種の材料表面被覆率、 $k''$ 、 $\alpha$ 、 $n$  は攻撃的化學種の電気化学反応速度定数、透過係数、反応時数、 $l''$ 、 $\xi$  は抑制的化學種の電気化学反応速度定数、透過係数である。 $k''$ 、 $l''$  は更に活性化自由エネルギーを用いて表される。

その他、材料熱履歴や進展速度についても推算予測できるようになっている。

#### 6) 反応拡散泳動を考慮したすきま腐食の数値シミュレーション<sup>(7)</sup>

塩化物イオン環境下でのすきま腐食の進展について、電気泳動、拡散、化学反応と形状変化を考慮した数値解析手法である。すきま初期進展解析では、マイクロピット発生によりピット周辺部が強酸化し不動態皮膜が破壊、電流密度の増加、強酸性領域のすきま口方向への拡大進展、すきま口近傍における金属の集中溶出が再現できている。

#### 4.2. の参考文献

- (1) 株式会社ヴィジブルインフォメーションセンター、「ステンレス鋼製キャニスタの応力腐食割れに関する感度解析ツールの作成」、p2-1～2-5、p3-1(2014)
- (2) 財団法人電力中央研究所、「高レベル廃棄物地層処分の人口バリアシステムの安全評価」、p18(1993)
- (3) 独立行政法人日本原子力研究開発機構、「平成21年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査研究報告書」、p2-8～2-14(2010)
- (4) 独立行政法人日本原子力研究開発機構、「平成19年度 放射性廃棄物処分の長期的評価手法の調査研究報告書付録」、p8-9～8-19(2008)

- (5) M. Bergman, et. al.、Int. J. Pres. Ves. & Piping、74、p239-248(1997)
- (6) 田中耕太郎、「第271回例会 電解質の熱力学に基づく腐食・防食現象のシミュレーション技術」、日本材料学会 腐食防食部門委員会資料、(2009)
- (7) 天谷賢治ら、第61回材料と環境討論会、(2014)、D-209

#### 4.3. 文献情報の整理

文献情報の整理まとめを表 3-1~3-4 に示す。

#### 4.3で貸与いただいた文献リスト

##### 1章

(1) R. M. Meyer, K. Sorensen and B. Hanson, A review of NDE methods for detecting and monitoring of atmospheric SCC in dry cask storage canister for used nuclear fuel, CORROSION/2013, Paper No. 02541, (2013), NACE.

(2) 平成22年度 中間貯蔵施設に係る最新動向調査に関する報告書, 独立法人 原子力安全基盤機構, 平成23年8月.

(3) 平成23年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (中間貯蔵設備長期健全性等試験) 報告書, 財団法人 電力中央研究所, 平成24年3月.

(4) C. Haney, Policy Issue Information : Plan for the long-term update to the waste confidence rule and integration with the extended storage and transportation initiative, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, SECY-11-0029, Feb. (2011).

(5) Standard review plan for dry cask storage systems, United States Nuclear Regulatory Commission, U.S.NRC NUREG-1536 Jan. (1997).

(6) Standard review plan for renewal of spent fuel dry cask storage system Licenses and Certificates of compliance Final Report, U.S.NRC NUREG-1927, Mar. (2011).

(7) A. Machiels, Climatic corrosion considerations for independent spent fuel storage installations in marine environments, EPRI 1013524, June (2006).

(8) F. King, Container materials for the storage and disposal of nuclear waste, CORROSION, Oct. (No. 10), Vol. 69, P986 (2013).

(9) 平成20年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (中間貯蔵設備等長期健全性等試験のうち貯蔵設備長期健全性等調査) 報告書, 財団法人 電力中央研究所, 平成21年3月.

(10) A. Turnbull, K. Mingard, J. D. Lord, B. Roebuck, D. R. Tice, K. J. Mottershead, N. D. Fairweather and A. K. Bradbury, Sensitivity of stress corrosion cracking of stainless steel to surface machining and grinding, Corrosion Science, Vol. 53, Issue 10, p3398, (2011).

(11) A. Kosaki, Evaluation method of corrosion of conventional stainless canister under oceanic air environment, Nuclear engineering and Design, Vol. 238, No. 5, p1233, (2008).

(12) コンクリートキャスクを用いる使用済燃料貯蔵施設 (中間貯蔵施設) に係る技術検討報告書、総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核燃料サイクル安

全小委員会、原子力安全保安院、平成16年6月.

(13)NRC Information Notice 2012-20 : Potential chloride-induced stress corrosion cracking of austenitic stainless steel and maintenance of dry cask storage system canisters, NRC Information Notice 2012-20 (November, 2012).

(14)Identification and prioritization of the technical information needs affecting potential regulation of extended storage and transportation of spent nuclear fuel, United States Nuclear Regulatory Commission, U.S.NRC Draft Report for Comment, May 2012.

(15)T.Saegusa, K.Shirai, T.Arai, J.Tani, H.Takeda, M.Wataru, A.Sasahara and P.L.Wilson, Review and future issues on spent nuclear fuel storage, Nuclear Engineering Technology, Vol.42, No.3, p237, June(2010).

(16)R. L. Sindelar, A. J. Duncan, M. E. Dupont, P. -S. Lam, M. R. Louthan, Jr. and T. E. Skidmore, Materials aging issue and aging management for extended storage and transportation of spent nuclear fuel, U.S.NRC NUREG/CR-7116, Nov. (2011).

(17)白井孝治, 谷純一, 三枝利有, コンクリートキャスク方式による使用済燃料貯蔵の実用化研究—304Lステンレス鋼キャニスタの塩化物応力腐食割れ防止に対する成立性評価—, 電力中央研究所 研究報告 : N10035, 平成23年5月.

(18)伊藤千浩, 加藤治, 三枝利有, 使用済燃料輸送・貯蔵キャスクの長期密閉性能試験, 原子力会和文論文誌, Vol. 2, No. 2, p158, (2003).

(19)O. E. Albores-Silva, E. A. Charles and C. Podovani, Effect of chloride deposition on stress corrosion cracking of 316L stainless steel used for intermediate level radioactive waste containers, Corrosion Engineering, Science, and Technology, Vol. 46, No. 2, p124(2011).

(20)D. B. Rigby, Evaluation of the technical basis for extended dry storage and transportation of used nuclear fuel, U.S. Nuclear Waste Technical Review Report December 2010.

(21)O. K. Chopra, D. Diercks, D. Ma, V. N. Shah, S-W Tam, R. R. Fabian, Z. Han, Y. Y. Liu, Managing aging effects on dry cask storage systems for extended long-term storage and transportation of used fuel Rev.1, Argonne National Laboratory, September 30, 2013.

## 2章

(1) 第2章局部腐食、(社)腐食防食協会編 腐食防食ハンドブック、p. 57-68

(2)深谷祐一、篠原 正、ステンレス鋼のすきま内模擬液の溶液特性、材料と環境 2007講演集 p. 311-314 (2007)

(3)腐食防食協会編、3.2 孔食、すきま腐食、「材料環境学入門」、丸善(1993), pp. 29-36.

- (4) 腐食防食協会編、4.2 ステンレス鋼 4.2.7 局部腐食、「材料環境学入門」、丸善(1993) , pp.85 - 86.
- (5) 石原靖子、元田慎一、鈴木揚之助、辻川茂男、自然海水中で貴化したステンレス鋼自然電位に及ぼす環境条件の影響、材料と環境, 44(1995) 355 - 363.
- (6) 明石正恒、ステンレス鋼のMICについて、第114回腐食防食シンポジウム資料、腐食防食協会(1997) pp.109-118.
- (7) A. J. Sedriks、4. pitting 4.5 Effects of the environment、“Corrosion of stainless steels” , 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc. (1996), pp. 147-162.”
- (8) 45と同じ。
- (9) R. P. Vera Cruz, A. Nishikata, T. Tsuru、Pitting corrosion mechanism of stainless steels under wet-dry exposure in chloride-containing environments、Corrosion Science, Vol. 40, Issue1, p125, (1998)
- (10) A. J. Sedriks、4. pitting 4.3 Effects of composition、“Corrosion of stainless steels” , 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc. (1996), pp. 112-125.
- (11) A. J. Sedriks、4. pitting 4.3 Effects of microstructure、“Corrosion of stainless steels” , 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc. (1996), pp. 125-146.
- (12) E. G. Webb, R. C. Alkire、Pit initiation at single sulfide inclusions in stainless steel I. electrochemical microcell measurements、J. Electrochem. Soc., 149 (2002), B272-B279.
- (13) I. Muto, Y. Izumiyama, N. Hara、Microelectrochemical measurements of dissolution of MnS inclusions and morphological observation of metastable and stable pitting on stainless steel、J. Electrochem. Soc., 154 (2007), C439-C444.
- (14) I. Muto, D. Ito, N. Hara、Microelectrochemical investigation on pit initiation at sulfide and oxide inclusions in Type 304 stainless steel、J. Electrochem. Soc., 156 (2009), C55-C61.
- (15) T. Sutter, E. G. Webb, H. Boehni, R. C. Alkire、Pit initiation on stainless steels in 1 M NaCl with and without mechanical stress、J. Electrochem. Soc., 148 (2001), B174-B185.
- (16) E. G. Webb, R. C. Alkire、Pit initiation at single sulfide inclusions in stainless steel II. Detection of local pH, sulfide, and thiosulfate、J. Electrochem. Soc., 149 (2002), B280-B285.
- (17) J. O. Park, S. Marsh, H. Boehni、Effects of temperature and chloride concentration on pit initiation and early pit growth of stainless steel、J. Electrochem. Soc., 149 (2002), B34-B39.
- (18) E. G. Webb, T. Sutter, R. C. Alkire、Microelectrochemical measurements of the dissolution of single MnS inclusions, and the prediction of the conditions for pit initiation on stainless steel、J. Electrochem. Soc., 148 (2001),

B186-B195.

(19) E. G. Webb, R. C. Alkire, Pit initiation at single sulfide inclusions in stainless steel III. Mathematical model, J. Electrochem. Soc., 149 (2002), B286-B298.

(20) "P. Schmuki, H. Hildebrand, A. Friedrich, S. Virtanen, The composition of the boundary region of MnS inclusion in stainless steel and its relevance in triggering pitting corrosion, Corrosion Science, Vol. 47, Issue 5, p1239, (2005)"

(21) "D. E. Williams, M. R. Kilburn, J. Cliff, G. I. N. Waterhouse, Compositional changes around sulfide inclusion in stainless steels, and implication for initiation of pitting corrosion, Corrosion Science, Vol. 52, Issue 11, p3702, (2010)"

(22) 井上裕滋、海水中でのステンレス鋼溶接金属の選択腐食、材料と環境, 41 (1992) 833-835.

(23) 中原正大, 尾崎敏範、Q&A オーステナイトステンレス鋼の大気側からのSCC発生の特徴と原因、Zairyou-to-Kankyo, 40, 363-364 (1991)

(24) 東茂樹、幸英昭、村山順一郎、工藤赳夫、ステンレス鋼の耐食性に及ぼす溶接スケールの影響、材料と環境, 39 (1990) 603-609.

(25) 塩原国雄、ステンレス鋼の前処理表面と腐食試験、腐食防食協会(1979)

(26) C. Garcia, F. Martin, P. de Tiedra, Y. Blanco, M. Lopez, Pitting corrosion of welded points of austenitic stainless steels studied by using an electrochemical minicell, Corrosion Science, Vol. 50, Issue 1, p1184, (2008)

(27) S. Girija, K. Mudali, R. K. Dayal, B. Raj, Surface protection of Type 316LN in neutral chloride solution, Materials Performance, January (2009), 70-74.

(28) 辻川茂男、オーステナイトステンレス鋼の塩化物応力腐食割れにおけるすきま腐食の役割、材料と環境, 47, 2~14 (1998)

(29) 元田慎一、ほか7名、ACM型腐食センサで測定した海洋性大気腐食環境条件の年変化、材料と環境, 44, 218-225 (1995)

(30) 中田潮雄、森田大、辻川茂男、建築物の付着海塩量とSUS304の耐食性、第47回材料と環境討論会講演集、p. 17-20 (2000)

(31) (財) 日本ウエザリングテストセンター調査研究委員会、[VI] 環境因子、「材料の耐候性データ集 CD-ROM版」、(財) 日本ウエザリングテストセンター (2007).

(32) D. Knotkova, K. Kreislova, S. Dean, Eds., 3. Results 3.1 Environmental data, "ISOCORRAG International atmospheric exposure program: Summary of results", ASTM Data Series 71, ASTM International (2010), pp. 10-15.

(33) B. S. Phull, S. J. Pikul, R. M. Kain, "Marine Corrosion in Tropical Environments", ASTM STP 1399, S. W. Dean, G. H-D. Delgadillo, J. B. Bushman,



- Eds., American Society for Testing and Materials (2000) 343 - 357.
- (34) 元田慎一、篠原 正、鈴木揚之助、辻川茂男、海洋性大気に曝露したステンレス鋼の発錆におよぼす付着海塩量と相対湿度の影響、材料と環境、50、162-169 (2001)
- (35) Y. Tsutsumi, A. Nishikata, T. Tsuru, Monitoring of rusting of stainless steels in marine atmospheres using electrochemical impedance technique、J. Electrochemical. Soc., 153 (2006), B278-B282.
- (36) 遅沢浩一郎、ステンレス鋼の耐候性、防食技術、29 (1980), 403-409.
- (37) R. M. Kain, B. S. Phull, S. J. Pikul, 1940 'till now - long term atmospheric corrosion resistance of stainless steel and other nickel containing alloys, "Outdoor Atmospheric Corrosion", ASTM STP 1421, H. E. Townsend. Ed. American Society for Testing and Materials International (2002) 343
- (38) D. Wallinder, I. Odenevall Wallinder, C. Leygraf, Influence of surface treatment of Type 304L stainless steel on atmospheric corrosion resistance in urban and marine environments, CORROSION, Mar. (No. 3), Vol. 59, p220 (2003)
- (39) 武藤 泉、杉本克久、屋外大気腐食環境のモデリングとそれに基づく定露点型サイクル腐食試験法の開発、材料と環境、47、519-527 (1998)
- (40) ISO、Corrosion of metals and alloys - Accelerated cyclic corrosion tests with exposure to synthetic ocean water salt deposition process - "Dry" and "wet" conditions at constant absolute humidity、ISO 16539: 2013
- (41) D. de la Fuente, 他4名、Methods for salt contamination of steel corrosion products: A characterization study、Materials and Corrosion, 58 (2007) 781 - 787.
- (42) 武藤 泉、佐藤栄、伊藤 叡、海浜環境におけるステンレス鋼の孔食進展挙動と耐穴あき性評価法、材料と環境、42、714-720 (1993)
- (43) 住宅の腐食・防食 Q&A、丸善、p. 223-224 (2004) (社)腐食防食協会編
- (44) 腐食防食協会編、5章 環境 5.2 大気腐食、「材料環境学入門」、丸善(1993), pp. 161 - 164.
- (45) Charles R. Southwell, J. D. Bultman, Allen L. Alexander、Corrosion of Metals in Tropical Environments - Final Report of 16-Year Exposures、Materials Performance, July (No. 7), p9, (1976)
- (46) E. A. Baker, W. W. Kirk, Long-term atmospheric corrosion behavior of various grades of stainless steel in rural, industrial, and marine environments, "Corrosion Testing and Evaluation: Silver Anniversary Volume", ASTM STP 1000, R. Baboian, S. W. Dean, Eds., American Society for Testing and Materials (1990) 177 - 190.
- (47) J. R. Kearns, M. J. Johnson, P. J. Pavilk, J. R. Kearns, M. J. Johnson, P. J. Pavilk, "Degradation of Metals in the Atmosphere", ASTM STP 965, S. W. Dean,

- T. S. Lee, Eds., American Society for Testing and Materials (1988) 35 - 51.
- (48) E. A. Baker, T. S. Lee, Long-term atmospheric corrosion behavior of various grades of stainless steel, "Degradation of Metals in the Atmosphere", ASTM STP 965, S. W. Dean, T. S. Lee, Eds., American Society for Testing and Materials (1988) 52 - 67.
- (49) "武藤 泉、杉本克久、屋外大気腐食環境のモデリングとそれに基づく定露点型サイクル腐食試験法の開発、材料と環境、47、519-527 (1998) "
- (50) 押川 渡、糸村昌祐、辻川茂男、篠原 正、SUS430-Ag 対ACM型腐食センサにおけるステンレス鋼の腐食挙動、第42 回腐食防食討論会講演集 p.437-440 (1995)
- (51) "武藤泉、紀平寛、塩化物イオンを含む液滴下でのステンレス鋼の孔食成長機構、材料と環境、44 (1995), 505-512."
- (52) 押川渡, 糸村昌祐, 篠原正, 辻川茂男, NaCl, MgCl<sub>2</sub>または海塩を付着させたステンレス鋼における恒湿大気中での侵食深さ、材料と環境, 49 (2000), 690-695.
- (53) "松海光帆子, 西方篤. 水流徹、ステンレス鋼の孔食特性に及ぼす塩化物イオン濃度と液滴厚さの影響、材料と環境' 99予稿集, A-104 (1999), 13-16."
- (54) 松海光帆子, 西方篤, 水流徹、乾燥過程におけるステンレス鋼の孔食発生の限界塩化物イオン濃度と水膜厚さのモニタリング、第47回材料と環境討論会予稿集, A-112 (2000), 37-38.
- (55) Y. Tsutsumi, A. Nishikata, T. Tsuru, Initial stage of pitting corrosion of type 304 stainless steel under thin electrolyte layers containing chloride ions, J. Electrochemical. Soc., 152 (2005), B358-B363.
- (56) S. Hastuty, A. Nishikata, T. Tsuru, Pitting corrosion of type 430 stainless steel under thin chloride solution droplet, Corrosion Science, 52 (2010), 2035-2043.
- (57) 56と同じ。
- (58) G. S. Frankel, 他6名、Potential control under thin aqueous layers using a Kelvin probe, Corrosion Science, 49 (2007), 2021-2036.
- (59) B. Maier, G. S. Frankel, Pitting corrosion of bare stainless steel 304 under chloride solution droplet, J. Electrochemical Soc., Vol.157, Issue 10, c302 (2010)
- (60) "Y. Wang, W. Wang, Y. Liu, L. Zhong, J. Wang, Study of localized corrosion of 304 stainless steel under chloride solution droplets using the wire beam, Corrosion Science, Vol. 53, Issue9, p2963, (2011)"
- (61) 大久保勝夫、保温断熱材による応力腐食割れ、防食技術, 30, 705-715 (1981)
- (62) "中村寿和、山本勝美、賀川直彦、海塩粒子を含む大気中でのオーステナイトス

- ステンレス鋼の応力腐食割れ、84春期学術講演大会講演予稿集 C-204 (1984) ”
- (63) 梅村文夫、松倉伸二、中村英之、川本輝明、ステンレス鋼の常温大気中応力腐食割れに関する暴露試験結果と実験室的検討、Boshoku Gi jutsu, 36, 571-577 (1987)
- (64) ”川本輝明、オーステナイト系ステンレス鋼の外面応力腐食割れに関する実態調査、Boshoku Gi jutsu, 37, 30-33(1988) ”
- (65) 笠原晃明、小向茂、オーステナイト系ステンレス鋼の海塩粒子応力腐食割れの表面処理による防止法の実験室的評価、防食技術, 34 (1985), 355-357.
- (66) 中原正大、高橋克、ステンレス鋼の外面応力腐食割れ事例、防食技術, 35 (1986), 467-470.
- (67) 湿潤大気応力腐食割れ (ASCC)、腐食・防食ハンドブック 腐食防食協会編, p 105 善株式会社 (1999)
- (68) M. Takemoto, T. Shinohara, M. Shirai, T. Shinogaya, External stress corrosion cracking (ESCC) of austenitic stainless steel、Materials Performance, June (1985), 26.
- (69) K. L. Money, W. W. Kirk, Stress corrosion cracking behavior of wrought Fe-Cr-Ni alloys in marine atmosphere、Materials Performance, July (No. 7), p28 (1978)
- (70) R. M. Kain, Marine atmospheric stress corrosion cracking of austenitic stainless steels、Materials Performance, Dec. (No. 12), p60, (1990)
- (71) R. M. Kain, Ambient temperature SCC of stainless steel in high-pressure hose connectors、Materials Performance, March (2000), 96.
- (72) B. K. Shah, P. K. Rastogi, A. K. Sinha, P. G. Kulkarni, Failures of austenitic stainless steel components during storage、Materials Performance, April (1993), 65-67.
- (73) J. B. Gnanamoorthy, Stress corrosion cracking of unsensitized stainless steels in ambient-temperature coastal atmosphere、Materials Performance, Dec. (No. 12), p63, (1990)
- (74) J. E. Truman, K. R. Pirt, A note on the corrosion produced under deposit of chlorides on austenitic stainless steel、Corrosion Science, Vol. 17, Issue1, p71 (1977)
- (75) R. Smart, C. C. Naish, A. M. Pritchard, Corrosion principles for the assessment of stainless steel radioactive waste containers、SA/EIG 14924/C010 (2006).
- (76) 庄司三郎、大中紀之、古谷保正、斉藤 隆、ステンレス鋼の大気腐食割れに及ぼす湿度の影響、防食技術、35、559-565 (1986)
- (77) ”庄司三郎、大中紀之、室温におけるステンレス鋼の大気腐食割れに及ぼす湿度および塩化物の種類の影響、防食技術、38、92-97 (1989) ”
- (78) ”中山 元、平野 隆、小林俊二、酒井忠嗣、加熱を受ける海塩粒子付着環境下

の密封容器用金属材料の耐食性におよぼす合金種依存性の検討、第48回材料と環境討論会講演集、p. 143-146 (2001) ”

(79) 中山 元、平野 隆、小林俊二、酒井忠嗣、海塩粒子環境下の加熱を受けるステンレス合金の耐SCC感受性におよぼす合金種依存性、および溶接の影響、第49回材料と環境討論会講演集、p. 313-316 (2002)

(80) 中山 元、藤原寛明、加熱を受ける金属容器の温度勾配環境下での湿潤大気応力腐食割れ感受性、第51回材料と環境討論会講演集、p. 195-196 (2004)

(81) ”谷 純一、新井 拓、黛 正巳、中間貯蔵用ステンレス鋼の大気中塩化物SCC評価、第51回材料と環境討論会講演集、p. 191-194 (2004) ”

(82) L. Casares, T. S. mintz, M. M. Bayssie、 、 Atmospheric stress corrosion cracking susceptibility of welded and unwelded 304, 304L, and 316L austenitic stainless steels commonly used for dry storage containers exposed to marine environments, U. S. NRC NUREG/CR-7030 (October, 2010)

(83) T. S. Mintz, L. Caseres, D. S. Dunn, M. Bayssie、 、 Atmospheric salt fog testing to evaluate chloride induced stress corrosion cracking of Type 304, 304L, and 316L stainless steel、 、 CORROSION/2010, Paper No. 10232, (2010), NACE.

(84) T. S. Mintz, X. He, L. Miller, R. Pabalan, Y-M. Pan, L. Caseres, G. Oberson, D. Dunn、 、 Coastal salt effects on the stress corrosion cracking of type 304 stainless steel、 、 CORROSION/2013, Paper No. 02494, (2013), NACE.

(85) T. S. Mintz, D. S. Dunn、 、 Atmospheric chamber testing to evaluate chloride induced stress corrosion cracking of Type 304, 304L, and 316L stainless steel、 、 CORROSION/2010, Paper No. 10232, (2010), NACE.

(86) T. Prosek, A. Iverson, C. Taxen、 、 Low temperature stress corrosion cracking of stainless steels in the atmosphere in presence of chloride deposits、 、 CORROSION/2008, Paper No. 08484, (2008), NACE

(87) ”白井幸治、谷純一、三枝利有、 、 コンクリートキャスク方式による使用済燃料貯蔵の実用化研究—304Lステンレス鋼キャニスタの塩化物応力腐食割れ防止に対する成立性評価—、

電力中央研究所研究報告 : N10035, 平成23年5月. ”

(88) G. Oberson, D. Dunn, T. Mintz, X. He, R. Pabalan, L. Miller、 、 US NRC-Sponsored Research on stress corrosion cracking susceptibility of dry storage canister materials in marine environments-13344, WM2013 Conference, February 24-28, Phoenix, Arizona, USA.

### 3章

(1) ISO 9225:2012, Corrosion of metals and alloys-Corrosivity of atmospheres

-Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres,  
I S O.

(2) J I S Z 2382 : 1998、大気環境の腐食性を評価するための環境汚染因子の測定、日本工業標準調査会.

(3)K.Suzuki, I.N.Robertson、Atmospheric chloride deposition rate for corrosion prediction on OAHU, Research Report UHM/CEE/11-02, (May, 2011).

(4)E.L.Montgomery, J.C.Curran, M.L.Calle, M.R.Kolody, Timescale correlation between marine atmospheric exposure and accelerated corrosion testing-Part2, CORROSION/2012, Paper No.0001730, (2012), NACE. (July, 2011)

(5)N.Drew, Analysis of chloride deposition rates relevant to ILW stores, NSTS/GEN/REP/0023/05, (March, 2005).

(6)K.M.A.Hossain, S.M.Easa, Spatial distribution of marine salts in coastal region using wet candle sensors, JRRAS, 7(3), p228, June 2011.

(7)E.A.L.Costa, V.P.Campos, L.C.P. da Silva Filho, H.A.Greven, Evaluation of the aggressive potential L.C.P. da Silva Filho, H.A.Greven potential of marine chloride and sulfate salts on mortars applied as renders in the Metropolitan Region of Salvador-Bahia, Brazil, J. of Environmental Management, p1060, 90(2009)

(8)片脇清士, 守屋進, 箕作光一, 飛来塩分量の特性と測定方法, 守屋進, 箕作光一 プレストレストコンクリート, Vol.27, No.1, Jan., p68, (1985).

(9)M. Takebe, M. Ohya, N. Hirose, R. Adchi, Y-S. Ago, K. Doi, Y. Iwatani, Difference in precipitation rates of air-borne salts collected by the dry gauze method and the Doken tank method, Corrosion Science, Vol.52, Issue9, p2928, (2010).  
Vol.52, Issue9, p2928, (2010)

(10)Y-S Chen, H-J Chiu, Y-W Chan, Y-H Chang, C-C Yang, The correlation between air-borne salt and chloride cumulated on concrete surface in the marine atmosphere zone in north Taiwan, J. of Marine Science and Technology, Vol.21, No.1, p24, (2013) .

(11)亘真澄, 加藤央之, 工藤聡, 大島直子, 和田耕治, 高橋毅, コンクリートキャスク貯蔵実用化のための気中塩分量評価—既存の金属キャスク貯蔵設備での気中塩分計測—, 電力中央研究所研究報告 : N O 6 0 2 2, 平成19年5月.

(12)H.Guan, A.J.Love, C.T.Simmons, O.Makhnin, A.S.Kayaalp, Factors influencing chloride deposition in a coastal hilly area and application to chloride deposition mapping, Hydrology and Earth System Science, 14, p801, (2010)

(13)S.Benassai, S.Becagli, R.Gragnani, O.Magand, M.Proposito, I.Fattori, R.Traversi, R.Udisti, Sea-spray deposition in Antarctic coastal and plateau

- areas from ITSE traverse, J. of Environmental Management, p1060, 90(2009).
- (14) F. Corvo, T. Perez, L. R. Dzib, Y. Martin, A. Castaneda, Outdoor-indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres, Corrosion Science, Vol. 50, Issue 1, p220, (2008).
- (15) W. A. McKay, J. A. Garland, D. Liversley, C. M. Halliwell, W. I. Walker, The characteristics of the shore-line sea spray aerosol and the landward transfer of radionuclides discharged to coastal sea water, Atmospheric Environment, vol. 28, No. 20, p3299, 1994.
- (16) S. Feliu, M. Morcillo, B. Chico, Effect of distance from sea on atmospheric corrosion rate, CORROSION, Vol. 55, No. 9, p883, (1999).
- (17) R. D. Klassen, P. R. Roberge, M. A. Tullmin, Modeling of aerosol transport as an aid to corrosivity assessment, CORROSION/1999, Paper No. 00489, (1999), NACE.
- (18) M. J. Ten Harkel, The effect of particle-size distribution and chloride depletion of sea-salt aerosols on estimating atmospheric deposition at a coastal site, Atmospheric Environment, Vol. 31, No. 3, p417, 1997.
- (19) M. Morcillo, B. Chico, L. Mariaca, E. Otero, Salinity in marine atmospheric corrosion : its dependence on the wind regime existing in the site, Corrosion Science, Vol. 42, Issue 1, p91, (2000).
- (20) 亘真澄, コンクリートキャスクのキャニスター表面付着塩分量評価 (その2) — 実環境での気中塩分量および付着塩分量測定試験 —, 電力中央研究所研究報告 : N 1 1 0 2 8, 平成 2 4 年 4 月.
- (21) G. A. King, D. J. O'Brien, The influence of marine environments on metals and fabricated coated metal products, freely exposed and partially sheltered, "Atmospheric Corrosion", ASTM STP 1239, W. W. Kirk, H. H. Lawson, Eds., American Society for Testing and Materials, (1995) p167.
- (22) S. T. Matthes, G. R. Holcomb, S. D. Cramer, B. C. Covino, S. J. Bullard, Atmospheric corrosion and chloride deposition to metal surfaces, CORROSION/2004, Paper No. 04306, (2004), NACE.
- (23) A. Machiels, Effect of marine environments on stress corrosion cracking of austenitic stainless steels, EPRI 1011820 June(2006).

#### 4章

- (1) B. Hanson, Gap analysis to support extended storage of used nuclear fuel, Nuclear Waste Technical Review Board, Fall 2011 Board Meeting, Salt Lake City, Utah, U. S. Department of Energy, September 13, 2011.
- (2) S. DePaula, G. Oberson, Regulatory issue resolution protocol (RIRP) pilot: Marine atmosphere stress corrosion cracking (SCC), U. S. NRC, April 12, 2012

- (3) T. Ahn, G. Oberson, S. DePaula, Chloride-induced stress corrosion cracking of austenitic stainless steel for dry storage of spent nuclear fuel, Corrosion, Passivity, and Energy : A Symposium in Honor of Degby Macdonald PRIME 2012, The Electrochemical Society, Honolulu, Hawaii, U.S.NRC, October 7-12, 2012.
- (4) M. Wataru, Spent fuel management in Japan and key issues on R&D activities, INMM Spent Fuel Management Seminar, CRIEPI, Arlington, Virginia, U.S.A., 14-16 January, 2013.

表3-1 結果まとめ(1-1~21、1/5)

論文番号	著者	材料		応力 試験片形状	環境			試験結果
		供試材			塩分濃度	附着方法	温度/湿度	
1-1	R.M.Meyer et.al Corrsin 2013 Paper No.2541				—			DCSCsの保管期間延長の可能性を考える上で必要となるESCOCの検出及びモニタリングに対する超音波探傷法等非破壊検査法のレビュー。
1-2	独法)原子力安全 全基盤機構 (H23年8月)				—			海外の中間貯蔵施設に係わる最近の安全評価手法及び規制動向に関して、(1)米国の使用済燃料管理状況、(2)米国以外の各国の同状況の調査結果の報告。
1-3	財法)電中研 (H24年3月)	γ系ステンレス鋼 (304L、316L)		溶接部近傍の 引張残留応力	表面附着海塩濃 度	実環境暴露	温度/相対湿度に 強く依存	2.5技術的課題の抽出で、使用済燃料のコンクリートキャスク貯蔵方式の、γ系ステンレス鋼キャスク表面のSCC対策として、①SUS329J4L、YUS270、②溶接部の残留応力の低減、③附着塩分量の低減の3方法から2つの対策を講ずることと提言している。
1-4	C.Haney.				—			廃棄物貯蔵容器の貯蔵期間の延長化基準の作成計画に関するNMSSからの情報公開であり、健全性試験の具体的な情報は無し。
1-5	U.S.NRC NUREG-1536 Jan.(1997)				—			Spent Fuel Project Office(U.S.NRC NMSS)が連邦規制コード10CFR Part72「使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の独立貯蔵に関する認可要件」等を整理して作成した「乾式キャスク貯蔵システムの標準審査指針」である。
1-6	U.S.NRC NUREG-1927 Mar.(2011)				—			本SRPはNRCのreviewerが、ガイダンスを許可する際の安全性フェックに使用することを目的に提供された。



表3-1 結果まとめ(1-1～21、2/5)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度	附着方法	温度/湿度	
1-7	A.Machiels	—	—	—	—	—	研究室及び実環境での研究に実機と構成品による実環境中での試験によって、実海浜環境の周囲温度下でオーステナイト系ステンレス鋼のSCCが起り得ることが実証されたと報告。但し、試験方法等の詳細不明。
1-8	F.King	—	—	—	—	—	低及び高レベル使用済み燃料の貯蔵及び処分両者を結び付けて評価した腐食関連の論文の評価結果で、対象材料は銅・炭素鋼・鋳鋼、ステンレス鋼、チタン合金及び高ニッケル合金で、全面腐食、局部腐食、ESCC及びMICの発生の可能性を論じている。
1-9	電中研	・JIS G4304(329J4L) ・ASME SA-240MS31254-2001E	・き裂発生限用引張試験片: GL=5×30、全長=100、厚さ=1.5～2.0mm ・1.2及び1.5σ <sub>y</sub>	0.1～10g/m <sup>2</sup>	国内の気象データより想定される最高の絶対湿度を30g/m <sup>2</sup> と定め、その空気がキャニスタ表面に流入した場合の相対湿度を求め、右記の4条件	50°C/35%RH 60°C/25%RH 70°C/15%RH 80°C/15%RH	(1)中間貯蔵施設長期健全性緊急評価試験として①耐力腐食割れ特性評価、②瞬時漏洩評価試験及び(2)金属金属がスワット長期密封性能確認試験を実施しており、(1)発錆限界塩分: 329J4L→0.3g/m <sup>2</sup> 、S31254→0.5g/m <sup>2</sup> 、(2)き裂発生限界塩分: 329J4L→1g/m <sup>2</sup> (2g/m <sup>2</sup> で発生)、S31254→10g/m <sup>2</sup> (き裂発生無し)の結果を得た。
1-10	A.Turnbull et.al	304 stainless steel	・4点支持法 ・付加荷重=2.9kN→表面応力210MPa	試験片表面にMgCl <sub>2</sub> 水溶液薄膜を形成(実環境を模擬)	MgCl <sub>2</sub> を含むメノール溶液中に dosingした試験片を右記条件の恒温高湿槽に設置。	60°C/45%RH	海浜大気を模擬した条件下での304ステンレス鋼のSCC感受性に及ぼす表面仕上げの影響を調査した結果、試験片表面の幅方向及び縦方向に研磨した場合及び同機械加工(フライス盤)した試験片は孔食を経由したSCCが生じたが、仕上げ研磨(#240)した場合はSCCは認められず。
1-11	Akio Kosaki 電中研	304、304L、316LN	・4点支持法: 1.5t×10w×65φmm ・付加荷重: 0.5&1.0PS	surface of specimen is the saturated NaCl concentration	右記を参照	60°C/95%RH filled with NaCl steam mist	キャニスタ用の既存の304、304L、316LNの実環境暴露と加速腐食試験の結果、304の孔食&すきま腐食速度は20&30μm/y、沖縄県宮古島での暴露試験による304&304LのSCC伝播速度は1.2E-12～1.8E-11m/s(0.6～9.0MPam <sup>1/2</sup> のK値の範囲)、加速試験では、1.0E-10～3.5E-9m/s(0.5～30MPam <sup>1/2</sup> のK値の範囲)であった。

表3-1 結果まとめ(1-1~21、3/5)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度	附着方法	温度/湿度	
1-12	総合資源 エネルギー調査会	引用文献): 文 献リスト3の34 410、22Cr、 430、304	—	304鋼の局部腐食 に対する限界塩 分附着量: $4 \times$ $10E-2g/m^2$	—	・局部腐食に対す る臨界湿度: 15~ 20%	本報告書は、「コンクリートキャスク」による使用済燃料貯蔵施設を対象に、安全審査に際して技術的に重要な基本的事項及び技術的に考慮すべき事項を取りまとめたもので、腐食関連の技術要件では冷却空気による塩分付着が原因のESCCの防止対策として、高耐食性材の使用、塩分付着環境の改善等が講じられた設計であることと、同考慮事項ではSCCによる密封機能喪失の防止対策及び局部腐食/SCCの確認方法が挙げられている。
1-13	NRC Information Notice 2012-20	—	—	—	—	—	NRCが、連邦規則コードの認可者らに対して、新しい技術情報として、「オーステナイト系ステンレス鋼の塩化物誘起SCCの可能性及び乾式キャスク貯蔵システムのキャスタのメンテナンスの喚起を促すための情報(IN2012-20)。
1-14	NRC Draft Report for Comment	—	—	—	—	—	使用済燃料の乾式キャスク貯蔵施設の貯蔵(使用)期間を120年に延すという要求に対して、NRCそのスタッフが、可能性に影響する技術的要求項目を検討し、ステンレス鋼のSCC、キャスクのホルトの腐食、SCC及び脆化及び機械的な劣化の機構等々の解明に着手すべきと結論している。
1-15	T.Saegusa et al.	—	—	—	—	—	金属製及びコンクリート製キャスクの貯蔵技術の安全性について、CRIEPIが幾つかの使用済燃料の中間貯蔵に対する実証試験に関する研究計画を通して立証してきた。本論文はそれら研究プログラムをレビューしたものである。今後の刊行物にはキャスク構成要素及び高燃焼後燃料の長期安全性が含まれる。

表3-1 結果まとめ(1-1~21、4/5)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度	附着方法	温度/湿度	
1-16	U.S.NRC NUREG/CR- 7116 SRN-STI-2011- 00005	Type304&304L	—	—	—	—	使用済核燃料の乾式キャスク貯蔵施設の貯蔵(使用期間を120年以上に延ばす技術的ベース)に関するこれまでのissueを検証するために、ISFSIs用DCSSのSSCsにおける構成材料の劣化(aging=経年変化)を評価した結果についての報告書。乾式キャスク貯蔵システムにおけるキャスク用材料の孔食、SCCも評価している。
1-17	白井孝治ら	SUS304L鋼板 (厚さ:試験①: 2、試験②:10、 試験③&④:直 径100×厚さ13 の円盤を径180 の中空円盤に嵌 め込み溶接した もの (単位:mm)	①全長98mm、 GL:8w×300定 荷重引張試験片 ←試験A:YS× 0.1~0.5; 2000h、試験B: YS×0.02~1.0; 5000h、 ②長さ220、幅 20、厚さ10mmの 4点曲げ試験片 ←270MPa ③&④溶接残留 応力の除去の有 無	①定荷重SCC試験: 0.2~0.5g/m <sup>2</sup> as Cl <sup>-</sup> ②き裂進展試験:試 験片中央に20μLの 人工海水を付与(比 較検討試験では同 量の飽和MgCl <sub>2</sub> 水溶 液付与) ④溶接残留応力緩和 効果確認試験: 5g/m <sup>2</sup> as Cl (304L の限界塩分量閾値 の5倍)	①定荷重SCC:試 験片裏面に取り付 けたヒータにより 80°Cとした状態で、 pH8.2の人工海水 を散布して調整 ②き裂進展試験: 試験片中央に20 μLの人工海水を 付与(比較検討試 験では同量の MgCl <sub>2</sub> 溶液を付与) ④残留応力:①と 同様	①50°C/35%RH ②80°C/35%RH ④80°C/35%RH	使用済核燃料のコンクリートキャスク貯蔵方式の実用化において、キャスク表面のSCCによる密封機能の喪失がない設計や検査技術の実証が残された課題となっていることから、SUS304製キャスクのSCC対策シナリオを構築し、その成立性を評価すると共に、キャスク溶接部の残留応力改善工法がSCCに及ぼす影響を評価している。
1-18	伊藤千ら	実物大コイルスワ リング 1)上層被覆材: Al 2)下層 " :In 600 3)スワリング:In X750	キャスク蓋部実 物大モデル	—	—	①1次ガasketの 最高温度:160°C (内部ヒータで加熱。 ORGEN2より経年 変化を算出) ②環境側:10~ 38°C	電中研・実験棟内にて1990年から蓋部実物大モデルを用いた使用済燃料貯蔵キャスクの長期密封性能試験を実施中であるが、本報では、11年間に渡る試験結果では漏れは無く(Heリーク試験)、また、Larson-Millerパラメータを用いた評価結果から40年間密封性能の健全性は保持されると評価されたとしている。

表3-1 結果まとめ(1-1~21、5/5)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度	附着方法	温度/湿度	
1-19	O.E.Albores-Silva et al.	AISI316L	U-bend試験片 (75×15): 曲げ半径: 12 mm(表面はwet bead blast 処理)	①10~32,000 μ g/cm <sup>2</sup> at 30 & 50°C-RH ②10~17,500 μ g/cm <sup>2</sup> at 50°C -60%RH	種々濃度の MgCl <sub>2</sub> 水溶液を マイクロピペットに より50 μgの液 滴を試験片頂 上表面に滴下	①30&50°C-RH ②50°C-60%RH	中ハル放射性廃棄物貯蔵容器用としてのType316LのAISCCに及ぼす塩化物堆積の影響を検討した結果、AISCC発生に対する塩化物(MgCl <sub>2</sub> )濃度の閾値は、50&30°C-平衡RH(~30%RH)下で、それぞれ10及び25 μg/cm <sup>2</sup> であり、50°C-60%RH下ではそれらより高い堆積ハルが要求された。AISCC感受性は水膜の堆積、厚さ及び連続性が影響を及ぼすとされている。
1-20	D.B.Rigby		—	—			本報は、商業使用済原子燃料の60~120年間及び120年以上の超長期の乾式貯蔵とその後の輸送に関する現状の知識を、そのレビューに基づいて、長期貯蔵及び輸送における信頼性を改善するために必要な幾つかの研究領域(分野)を提案している。その中に、より長期貯蔵を可能にするために、燃料の冷却と貯蔵システム内に存在するヘリウムが確かに腐食機構を抑制することが実証できる技術開発も含まれている。
1-21	O.K.Chopra et al.			—			本報は、原子力プラントの経年変化の管理方法とライセンスの更新のための“Generic Aging Lessons Learned”、NUREG-1801と同様のアプローチに続いて、使用済燃料の超長期貯蔵・輸送のためのDCSSs(乾式貯蔵キャスクシステム)/ISFSIs(独立使用済燃料貯蔵施設)に及ぼす経年変化の影響の管理方法に関連したissuesを検査したものである。この報告は5つの章と使用済燃料の乾式キャスク貯蔵システム用AMPs(経年変化管理プログラム)に対する品質保証に関するappendixを含んでいる。

表3-2 結果まとめ(2-1～88、1/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境		試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法 温度/湿度	
2-1	腐食防食協会編 「腐食防食ハンド ブック」	SUS304 SUS316 その他	平板(電極)	0.01～10wt.%	水溶液 20～280°C	内外の文献から、自然電位(E <sub>sp</sub> )関連(10件)、孔食関連(46)、すきま腐食関連(38件)、局部腐食機構関連(31件)を引用し、304、316鋼等々の孔食電位: V <sub>CPIT</sub> 、腐食すきま再不動電位: E <sub>CR,REV</sub> 等各種臨界電位と自然電位(E <sub>sp</sub> )との関係やそれらに及ぼす水溶液温度、塩素イオン量、pH、D.O.等の影響、更に、それら腐食機構を説明している。
2-2	深谷祐一ら	SUS304の合金成分であるFe、Cr、Niの塩化物及びCr(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	—	CrCl <sub>3</sub> 、FeCl <sub>2</sub> 、NiCl <sub>2</sub> 、Cr(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> のそれぞれ0.0001～4mol/dm <sup>3</sup>	水溶液 25°C	SUS304鋼のすきま内液を模擬した金属塩化物溶液のpH挙動および錯イオン形成挙動などの溶液特性を検討し、SUS304鋼のすきま内模擬液のpHは、[CrCl <sub>3</sub> ]=0.02mol/dm <sup>3</sup> までの濃度域で、Cr <sup>3+</sup> の加水分解のみに支配されることや、Cl <sup>-</sup> との錯イオン形成を含むCrCl <sub>3</sub> 溶液の平衡状態図と溶液pHの計算値との関係などを報告している。
2-3	腐食防食協会編 「材料環境学入門」	SUS304、316鋼	平板(電極)	[Cl <sup>-</sup> ] 0.1～10wt.%	水溶液 20～90°C	文献2-1を簡略化したもので、内容は殆ど同じ。但し、本書では、3.2.3局部腐食対策の項が記載されており、E <sub>SP</sub> <V <sub>c</sub> となるような材料/環境の組合せの選択が第一義的に重要であることから、高級材料の選定による高V <sub>c</sub> 化、脱気あるいはすきま腐食に対してはすきま構造、カスケード材質の変更などの対策が実際に採用されていると述べている。
2-4	腐食防食協会編 「材料環境学入門」	α系: 444、γ系: 304、316L、2相系: 329J1、329J2L、その他	平板(電極)	[Cl <sup>-</sup> ] 0.1～10wt.%及び自然海水	水溶液 25～80°C	文献2-3の4.2ステンレス鋼4.2.7局部腐食に記載されたものであり、α系: SUS444、γ系: 304、316L、2相系: 329J1、329J2Lの孔食臨界電位及びすきま腐食臨界電位の温度依存性、常温の自然海水環境におけるステンレス鋼の孔食臨界電位V <sub>CPIT</sub> 及び“ふじつぼ”付着試験片のすきま腐食臨界電位の合金組成依存性の各データから、孔食に対しては鋼中[Cr+Mo]量を高めることより免疫化できるが、すきま腐食に対しては合金組成の改良による免疫化は極めて困難であるとしている。

表3-2 結果まとめ(2-1～88、2/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境		試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	
2-5	Y.Ishihara et al.	厚さ1.5～2mmの316ステンレス鋼CPチタン(JIS 1種)	—	①自然海水 ②滅菌海水 ③人工海水 ④0.3～4.5wt.%、pH:2～10	水溶液	静岡県清水市折戸湾の自然海水に浸漬した316L及び純Tiの自然電位貴化の季節変動及び電位貴化試験に及ぼす温度、pH、塩分濃度、印加電位の影響を調べた結果、1)E <sub>SP</sub> 貴化は春～秋に起こり易く、冬に起こり難い、2)光が電位貴化試験のE <sub>SP</sub> 維持に必要ではない、3)E <sub>SP</sub> 貴化はpH及び当初のE <sub>SP</sub> 値に依存するなどが推察されたとのこと。
2-6	明石正恒ら	Type304, 316L, 22Cr-14Ni-2.5Mo-N	—	—	Type304ステンレス鋼の定常腐食電位E <sub>SP</sub> は最大で0.3V貴化、腐食すきま再不動電位E <sub>R,OREV</sub> は最大で0.5V卑化する可能性がある。	ステンレス鋼の所謂“微生物腐食”についての文献レビューであり、その本質は、自然水環境におかれたステンレス鋼が、その表面に成長した微生物コロニーの下ですきま腐食にあるとし、自然水環境中に生息するある種の微生物が、その生息活動に起因して定常腐食電位E <sub>SP</sub> の貴化と部腐食臨界電位V <sub>c</sub> の卑化とを同時に実現する場合にすきま腐食が発生することを、内外の25の文献を引用して説明したものである。
2-7	A.J.Sedriks	主としてType 304、316。その他フェライト系(430)、2相系、スーパーステンレス鋼(6XN、254SMO)	—	海水及び塩化物濃度:10～20,000ppm	水溶液	左記の書籍の4. 孔食 4.5 (ステンレス鋼の孔食に及ぼす) 環境の影響として、4.5.1カソード反応、4.5.2塩化物イオン、…4.5.5温度、或る種のbiofilm、…4.5.10人体液の10項目についての文献レビュー結果からの解説である。
2-8	2-45と同じ。	—	—	—	—	腐食電位・孔食電位、孔食発生限界塩化物イオン濃度等の測定結果を引用。

表3-2 結果まとめ(2-1～88、3/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-9	R.P.Vera et al.	SUS430、 SUS304	左記2種ステンレス鋼板(厚さ2 and 3 mm)より8×8(or 10×10)×2or3mmの試験片を切り出し特殊な電極を作成。	1、2、5M NaCl	試験片電極表面に0.5mm厚さの1M NaCl 水溶液を1h保持(wet)後、30°C-(67±3)%RH下で7hで乾燥(dry)させるサイクル繰り返し。	左記	ステンレス鋼の海洋大気環境下での孔食機構を研究するために、2種のステンレス鋼について、塩化物水溶液中1h浸漬⇄30°C-67±3%RH下7hのwet-dry cycle条件下での腐食速度及び腐食電位をACインピーダンスとポテンシオスタトを用いて、同時に連続して測定することによって、『孔食の発生は乾燥過程で塩化物が濃縮し臨界濃度に達した後の乾燥過程で始まることから、大気腐食における薄い水膜の存在が孔食の発生・進展を促進することに寄与する』ことが分かったとしている。
2-10	A. J. Sedriks	オーステナイト系、フェライト系、二相系、マルテンサイト系及び析出硬化系ステンレス鋼	—	—	—	—	文献2-7の20数ページ前、4.孔食 4.3 (ステンレス鋼の孔食に及ぼす)成分の影響についての解説。4.3.1オーステナイト系、4.3.2フェライト系、4.3.3二相系、4.3.4マルテンサイト及び析出硬化系ステンレス鋼の孔食に及ぼす成分の影響を述べている。耐孔食性改善には、オーステナイト系及び二相系はCr、Mo、Nが、フェライト系、マルテンサイト系及び析出硬化系はCr及びMoの増加、添加が有効である。
2-11	A. J. Sedriks	オーステナイト系、フェライト系、二相系、マルテンサイト系及び析出硬化系ステンレス鋼	—	—	—	—	文献2-10の続きで、4.孔食 4.4 (ステンレス鋼の孔食に及ぼす)ミクロ組織の影響についての解説。オーステナイト系ではMnS、 $\delta$ -フェライト、 $\sigma$ 相及び $\chi$ 相、 $\epsilon$ 相、鋭敏化及び溶接金属、鋳造、冷間加工、レーザー加工など特殊表面加工などの影響を紹介している。
2-12	E.G.Webb et al.	304SS	平板	0.05～2M NaCl	微小電気化学	—	(1)塩化物イオンの濃度が上がるとステンレス鋼中の硫化物が溶解する比率が上がる。また、硫化物が溶解する電位が下がる。 (2)塩化物が含まれない溶液でも硫化物は溶解するが塩化物は触媒効果を示しているようである。 (3)チオサルファイドが塩化物と共存すると、硫化物の溶解比率が高くなる。 (4)浅い介在物は明瞭なピットが生じず、深い介在物は明瞭なピットが生成する。介在物の方位がピット生成のカギとなっている。

表3-2 結果まとめ(2-1～88、4/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-13	I.Muto et al.	Type303	平板	0.1M NaCl	微小電気化学	—	0.1 M NaCl中では、0.3-0.4VでMnSが溶解しはじめ、0.5Vで孔食が生じる。また、MnS周辺に約1 $\mu$ mの多角形の不明瞭なピットがMnSと母材の界面に多量に発生した。MnSの溶解とClイオンの相乗効果で腐食が加速される。
2-14	I.Muto et al.	TYPE304L (3条件の熱処理)	平板	0.1、3M NaCl 3M MgCl <sub>2</sub> 8M LiCl	微小電気化学	20°C	1353K→1573Kに焼鈍温度を変えると、0.1 M NaCl中の巨視的な孔食電位は0.41V→0.55Vに変化した。 熱処理温度1353Kでは、3-8M Cl <sup>-</sup> 中では介在物と母材の界面で不明瞭なピットが生成した。 1673Kで熱処理された酸化物系介在物のサンプルは6M、1.25Vまでは明瞭な孔食は発生しなかった。8M LiCl中では介在物と母材の境界にピットが生成した。



表3-2 結果まとめ(2-1~88、5/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-15	T.Sutter et al.	304SS (Sの量が3種類)	平板 (セルに応力が 付与できるよう な仕組み)	0.1、1M NaCl	微小電気化学	20°C	<p>200 μmの微小電気化学では、5個の介在物(～5 μm)を含む材料を使用した。0.1M NaCl応力付与すると無しより孔食電位が150mV卑側に移行する。</p> <p>介在物を含まない材料を100 μmの電極を用いて測定した結果、1M NaCl中では応力付与あり、なしのいずれでも孔食は発生しなかった。孔食電位と応力の関係については、MnSの影響が大きいようである。</p> <p>1個の大きな介在物を含む材料を100 μmの電極を用いて測定した結果、1M NaCl中では浅い介在物は不明瞭なピットしか生じないが、深い介在物は明瞭なピットが生じた。浅い介在物はマトリックスと介在物の界面に溶解は生じず、試験後は介在物の端が欠けていた。ただし、浅い介在物でも応力を付与するとクラックは発生していた。応力を付与するとMnSの溶解電位が卑になりさらに溶解が進む。</p> <p>3 μm深さのクラックでpH2、6M Cl-の際に明瞭なピットが生成した。応力無負荷での浅いMnSは明瞭なピットが認められない。0.5 μm深さのすきまでは、pH2.5、1.5M Cl-では明瞭な孔食は生じなかった。</p>
2-16	E.G.Webb et al.	304SS	平板	0.1M NaCl	微小電気化学	—	<p>微小電気化学測定結果では、約200mVで介在物の溶解がはじまっているが、それは明瞭なピットではない。それより賣になるとpHも急激に低下し、約500mVでは電流も増加し、pHも振幅が大きくなり一時的に0.5程度になる。最終的にはpH2.4程度で安定し、分極後は明瞭なピットは認められない。明瞭なピットが認められたものは、pHが0まで低下しているようである。</p>

表3-2 結果まとめ(2-1～88、6/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-17	J.O.Park et al.	AISI304	平板	0.01、0.1、1、5、 10	微小と通常サイ ズの電気化学	RT、60、90°C	0.8cmφの面積では沢山の介在物を含んでおり、孔食電位が卑側である。 微小電気化学測定結果より、室温、0.01、0.1MCl <sup>-</sup> 濃度の低塩化物濃度でも初期ピットが生成している間にMnSの溶解も生じていることがわかった。これによりMnSの化学溶解が基材の溶解に影響を及ぼしていることがわかった。それ以上の温度、濃度では金属の溶解が早すぎて明瞭なMnSの影響が認められなかった。10MCl <sup>-</sup> 、5M、90°Cでは介在物と母材の界面に沢山の腐食痕が認められた。 温度が上がるとMnSの溶解電位が卑側にずれ、孔食電位も卑側にずれる。
2-18	E.G.Webb et al.	SUS304	平板	1MNaCl	微小電気化学ホ ルダ	20°C浸漬	①浅い大きなMnS上での分極測定結果は、約200mVで溶解しているような電流ピークがあった。試験後光学顕微鏡で若干の溶解が確認されたが、ピットはなかった。 ②展伸している深いMnS上での分極測定結果は、約250mVで溶解しているような電流のピークがあった。孔食電位は約430mVである。 ③MnSが認められないものは1000mVまで活性ピークが認められなかった。 ④微小なすきまへの硫化物、塩化物の濃縮により臨界の脱不動電位がきまるようである。ピットが生成する臨界のすきまは約1μmである。

表3-2 結果まとめ(2-1～88、7/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-19	E.G.Webb et al.	ステンレス鋼	—	—	—	—	ステンレス鋼の孔食電位のシミュレーションの数学モデルが広められている。仮説のカギとして塩化物の存在する状態でチオ硫酸塩が臨界濃度まで濃縮すると脱不動態化し孔食が発生し、塩化物は介在物の分解の触媒となる。計算のパラメータとしては実測値や文献値などを用いた。 実験と計算を統合させた結果からアプローチすると、孔食発生は、MnSとSSの界面の微小すきま内にチオ硫酸塩が臨界濃度まで累積することによる。
2-20	P.Schmuki et al.	DIN1.4305 (18-9-0.25S)	—	10%FeCl <sub>3</sub> 浸漬	浸漬	室温 × 10min	FeCl <sub>3</sub> 浸漬では、いずれも介在物の周囲または内部から溶解がはじまった。 直接的には介在物のどの部分から溶解がはじまるか、基材の組成と関係がないようである。
2-21	D. E. Williams et al.	316L	—	—	—	—	高解像度SIMS解析により、ステンレス鋼中の殆どのMnS介在物はその周りに厚さ100nmまでのFeサルファイドの濃縮した量を伴っているのが見いだされ、それは恐らく鋼の製造中において凝固点を通過する冷却過程で形成されたと思われる。そして、その量は、ステンレス鋼の孔食発生に対する臨界的な役割を有しているようである。これを110件の文献を引用して論じている。
2-22	井上裕滋	各種ステンレス鋼	各種ステンレス鋼の母材及び溶接材	【引用文献】 ① 50g/lFeCl <sub>3</sub> +1/20HCl ② 10%FeCl <sub>3</sub> ③ ①に同じ ④ 6% FeCl <sub>3</sub> +1/20HCl	水溶液	【引用文献】 ① 80°C-24h ② 5-85°C-?h ③ 35°C-48h ④ ?°C-24h	腐食防食協会発行「材料と環境」に会員から、 「Type316Lの共金溶接構造物を常温海水中で使用したところ、溶接金属に限定して孔食状腐食が発生したが、その原因と対策を教示してほしい」との質問に対する回答。通常のγ系ステンレス鋼では、溶接凝固時及び変態時の成分偏析やCr炭化物析出により、Cr、Moなどの濃度低下部(γ相。Δフェライトは逆に濃化)で孔食が発生することが紹介されている。

表3-2 結果まとめ(2-1～88、8/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-23	中原正大ら	SUS304, SUS316	化学プラント等 の配管や槽	海塩粒子の濃縮	結露	大気	文献2-22と同様のQ&Aで、SUS304や316等の外面応力腐食割れ(ESCC)の発生条件や防止対策についてあり、“ESCCには、タイプI型(塩化物イオン濃縮型とも言いきま腐食経由のTGSCCで、100°C程度の金属表面で発生)とII型(鋭敏化型とも言いい材料の鋭敏化によるIGSCCで、50°C位下で主に常温で発生。必ずしも保温材が無くとも起り得る)とが知られており、対策は、塗装、材料選択など。”
2-24	東 茂樹ら	SUS316L、 SUS444、 SUS329J2L	TIG溶接及び 溶接模擬熱処理 試験片	0.1～1.0%Clイオン (NaCl にて調整)	水溶液	30、60°C	ステンレス鋼の耐食性に及ぼす溶接スケールの影響を実験室的に調べたもので、TIG溶接及び熱処理により酸化スケールを形成させた試験片についてNaCl水溶液中における孔食電位と自然電位の測定及び酸化スケールの性状分析の結果、溶接模擬熱処理材の孔食電位は600～700°Cの低温加熱により生成したスケールの場合が最も低下し、孔食電位測定後の表面スケール中のCr濃度も最も低く、また、TIG溶接HAZ部において孔食が集中して発生した部位も、最高加熱温度がその温度域であると推察されるとしている。
2-25	塩原国雄	SUS304、 SUS316	湿式&乾式エメ リー紙(#500) 研磨及びフッ 硝酸による酸 洗を行った孔 食電位測定用 電極	3.5%NaCl	水溶液	30°C	SUS304及び316ステンレス鋼の孔食電位に及ぼす前処理の影響を検討した結果、①両鋼とも孔食電位V <sub>c</sub> は湿式、乾式の差異は無い、②SUS304の酸洗面のV <sub>c</sub> は研磨面より僅かに高いが、SUS316では逆転する、③SUS316のV <sub>c</sub> はSUS304のそれより高いが、SUS316酸洗面はバラツキが大きく、平均値ではSUSのそれより70mVほど高いものの、最小値のV <sub>c</sub> はSUS304のそれと同程度である、としている。
2-26	C.Garcia et al.	AISI304、 AISI316L 溶体化処理、 鋭敏化	平板	1MH <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +5N NaCl	微小電気化学	30±1°C	304より316Lの方がすべての部位(母材、HAZ、溶接線、溶接部)で耐孔食性が高い。通常サイズの分極結果は、局部測定結果をすべて含んでいるようであった。

表3-2 結果まとめ(2-1～88、9/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	附着方法	温度/湿度	
2-27	S.Girjia et al.	Type316LN	平板	0.5M NaCl	浸漬	室温	研磨仕上げより酸洗処理、酸洗処理よりも、酸洗処理＋不動態化処理材の方が孔食電位が高くなった。オージェ分析によると、表面のCr濃度が高くなるほど孔食電位が貴側に推移した。 それぞれの孔食電位は、旋盤仕上げまま:152mV、酸洗処理:631mV、酸洗処理＋不動態化処理材:865mV。
2-28	辻川茂男	SUS304	変動応力(回転曲げ 1300rpm、空气中疲労限界 247MPaより低い応力振幅 143MPa)	1N H2SO4＋ 0.5M NaCl(pH約3)	水溶液	25°C	1997年5月に開催された「腐食防食協会主催「材料と環境'97」講演大会での記念講演として、東京大学 辻川教授が「オーステナイトステンレス鋼の塩化物応力腐食割れにおけるすきま腐食の役割」について講演したものを基に、加筆して総合論文として、材料と環境に掲載されたもの。中性液での孔食電位近傍でのSCCき裂発生は食孔・すきまなどの局部アノードからのみ発生すること、孔食に比べてすきま腐食のほうが局部腐食が起り易く、且つき裂発生も起り易いこと、中性実環境では圧倒的にすきま腐食経路型になること、すきま付与試験片、特に、スポット溶接試験片では、実液に浸漬するだけで当該環境でのSCC感受性を評価できるとのことである。
2-29	元田慎一ら	—	基板の炭素鋼板(64×64×0.8mm)上に厚さ30～35μmのSiO <sub>2</sub> またはBN <sup>+</sup> ストを介して厚さ30～40μmのAgペーストを印刷したACM型腐食センサ。	海塩粒子	海岸大気	東京商船大学の臨海実験実習所(静岡県清水市)海岸から距離8m、高さ2m暴露台上に海方向上向き30°に設置。	1992年7月～1993年6月の1年間の結露時間は3,454h(39%)、降雨時間は1,705h(20%)、両者合計時間としての濡れ時間は5,159h(59%)、清水での海塩付着は上向き30°の暴露条件で1992年10月を除くと0.01～0.1g/m <sup>2</sup> 、対応する結露が起こる臨界湿度は80～50%であり、本ACM腐食型センサで測定できる付着塩量は湿度ヒストグラムのデータと合せてステンレス鋼の発錆可能性を判定するための環境条件としても役立つとしている。

表3-2 結果まとめ(2-1～88、10/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-30	中田潮雄ら	SUS304 (海塩粒子の 付着捕集のため、SUS304製 屋根や外壁と しての SUS304)	—	海塩粒子	海岸～50kmの各 大気	沖縄、日本海、 太平洋及び瀬戸 内海沿岸から10 m～数十kmに点 在する建築物の 屋根や外装で、 且つ、雨水の当 たる部位と軒下・ 軒裏に区別	試験結果  建築物の付着海塩量の実態を調査し、SUS304の適用 範囲を解析した結果、軒下・軒裏の付着海塩量 (mg/dm <sup>2</sup> )は、=-0.21+飛来海塩量(mdd)であるこ と、また、SUS304の発錆限界付着量は1mg/dm <sup>2</sup> であ り、海岸からの距離が日本海側では約10km、太平洋 側では約5km、瀬戸内海沿岸では約500m以上の地域 への適用が好ましいなどとしている。
2-31	(財)日本ウエザリング センター	—	—	海塩粒子	海岸大気	銚子、宮古島、 西原(沖縄県)及 び旭川	日本ウエザリングセンターが、金属や高分子などの暴露試 験を実施した左記の各試験場の環境因子全11項目 (気温、相対湿度、日照時間、濡れ時間、降水時間、 降水量、風速、全日日射量、紫外線日射量、海塩粒子 量:mgNaCl/m <sup>3</sup> ・d、硫酸酸化物量:mgSO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ・dについ て、計測&調査した結果を年平均又は年積算としてま とめたもの(但し、気温、相対湿度、風速、日照時間、 降水量及び全日日射量はそれぞれ近傍の気象台の 結果)。
2-32	D.Knotkova et al.	記載なし	記載なし	暴露	暴露 世界各地	暴露	・平均SO <sub>2</sub> 濃度測定(μg/m <sup>3</sup> ):日本→銚子7.7、 東京14.6、沖縄11.1 ・平均濡れ時間(h/year):銚子5706、東京2173、 沖縄3903 ・平均NaCl付着量(mg/m <sup>2</sup> /day):銚子66.8、東京4.8、 沖縄130.0
2-33	B.S.Phuil et al.	鉄 炭素鋼 亜鉛めっき鋼 板	平板	暴露	暴露 KUREビーチ	暴露	重量減からの腐食速度、海塩粒子の付着量を測定し ているがレビュアーのためデータは少ない。

表3-2 結果まとめ(2-1~88、11/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-34	元田慎一ら	SUS410、 22Cr-0.8Mo、 SUS430、 SUS304(304は 2B、その他は Baの表面仕上 げ)	50×50mmに切 り出した各ス テンス鋼板と Fe/Ag-対ACM 型センサ及び温 湿度センサを各 箇所に暴露	付着海塩量	海洋性大気	東京商船大学の 臨海実験実習所 (静岡県清水市) の海上筏海岸か ら約30m沖合に 浮設)及び陸上の 揚水ポンプ室(海 岸から約 3m)に暴露。	4種ステンレス鋼を、ACMセンサ出力と相対湿度RHを測定しながら、部位と期間を異にする42条件で暴露したRHとから得る付着海塩量Ws並びにRHに基づいて各ステンレス鋼の発錆条件を求めた結果、実環境で測定した(Ws、RH)条件と発錆の有無との関係に基づいて、発錆条件を鋼種毎に決定でき、限界発錆条件(Ws*/g/m <sup>2</sup> 、RH*/%)は、SUS410鋼は(5×10 <sup>-3</sup> 、45)、22Cr-0.8Mo鋼は(5×10 <sup>-1</sup> 、38)、430鋼と304鋼は(4×10 <sup>-2</sup> 、43)であったとのこと。
2-35	Y.Tutumi et al.	SUS304 SUS430	10×10を樹脂 に埋め込み	暴露 田園、海岸、海 岸からやや離れた ところ	暴露 日本3か所	暴露	さびびが成長するのは海岸部ではSUS304が35～75%RH、SUS430が35%以上であった。304は75%以上ではさびびが増えない。 交流インピーダンスのRS-1 10kHz値は海塩粒子と濡れ時間を測定可能である。Rp-1 10mHzは孔食を監視するのに適している。
2-36	遅沢浩一郎	410、430、 304、316など (21種類のス テンス鋼を供試 している文献 もある)	—	—	—	—	ステンレスの耐候性についての解説。ステンレス鋼の大気暴露試験結果に関する国外17文献及び国内8文献からまとめたもので、孔食深さや外観レイトイングナンバによる評価を実施しており、中性塩化物水溶液中での耐孔食性に対する合金元素の影響がそのまま耐候性にも当てはまるが、環境が厳しい川崎(臨界工業)と穏やかな東京(住宅)ではその影響が少なく、中間の厳しさ東京(工業)では合金元素と環境の影響が大きくなることが示されている。
2-37	R.M.Kain et al.	Type201、 202、301、 302、304、 308、309、 310、316、 317、321、 347、410、 416、430	平板	長期暴露 Kure ～60年	暴露	暴露	オーステナイトステンレス鋼の15年暴露後の平均孔食深さはType347が86、Type321が66、Type308が41、Type301が41、Type302が31、Type304が28、Type309が28、Type317が28、Type316が25、Type310が10μmであった。 断面観察は15年のもののみ、表面粗さならびに光沢計で評価されている。

表3-2 結果まとめ(2-1~88、12/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-38	D.Wallinder et al.	TYPE304L 溶体化処理材 硝フッ酸酸洗 #600ペーパー 水素中光輝焼鈍	平板	暴露 都市部と海岸	暴露	暴露	<ul style="list-style-type: none"> <li>XPS:試験前は溶体化処理ままと酸洗のCr比率が高い。7か月暴露後は都市部より海岸部で表面にCrの濃縮が高くなった。</li> <li>分極抵抗:試験前は酸洗と光輝焼鈍の抵抗が高い(腐食速度の逆数)、(良)光輝焼鈍と酸洗&gt;溶体化処理&gt;研磨。</li> <li>接触角:光輝焼鈍材の濡れ性が高い(SiO<sub>2</sub>が表面に生成?)。</li> </ul> <p>その他、環境の塩の付着性等も評価されている。</p>
2-39	武藤 泉ら	①大気暴露材の付着物分析用: 22Cr-6Mo ②大気暴露試験用: SUS304	① 80×60×1mm (1500番湿式研磨) ②150×70×1mm (1500番湿式研磨)	付着海塩量	①沖繩県具志頭村の暴露試験場(海岸から50m) ②千葉県君津市戸崎の暴露場(田園環境)	<p>その他、塩化物水溶液の乾燥・吸湿挙動、気象計測、定露点型サイクル腐食試験及びサイクル腐食試験を実施し、</p>	<p>海浜大気腐食環境のモニタリングとそれに基づく定露点型サイクル腐食試験法の開発を目的に、左記各種試験・評価を実施。それらの結果、</p> <p>(1)海浜大気環境におけるステンレス鋼の付着塩溶液は海水と等しいNa<sup>+</sup>/Mg<sup>2+</sup>比を有するNaCl-MgCl<sub>2</sub>混合水溶液である、</p> <p>(2)大気との平衡状態におけるこの混合水溶液の塩化物イオン濃度は環境の相対湿度により定まる、</p> <p>(3)3日間程度の短期間では、大気の露点はほぼ一定(±5K)とみなせる、</p> <p>(4)海浜地域における屋外大気腐食は環境の状態は、海塩付着量、露点、材料温度の日変化により記述でき、また、これらのにより再現できる、などと報告している。</p>
2-40	ISO16539	規格のため該当なし	—	—	—	—	—



表3-2 結果まとめ(2-1～88、13/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-41	D.de la Fuente et al.	mild steel	平板	5%NaCl	①salt fog ②インパクト試験 ③滴下試験	①35℃ ②10～80℃ ③記載なし	Salt fog cabinet contamination法が、従来の均一な投与方法より、大気暴露状態の塩化物の分布状態をより忠実に再現できている。Salt fogキヤビネットの平均的な塩化物イオン濃度レベルは鋼上のコンタミ量をよく制御できるため、野外活動にて鋼とコーティングの臨界濃度を制御するのに便利である。 極微量または微量のコンタミの再現にはいわゆるインパクト試験や滴下試験がよく適合する。インパクト試験の塩の結晶は50nm～2μmであり、滴下試験の5～10μmより小さい。これらの試験は、基本的なラボ試験で鋼とコーティングの界面を液滴でつなげてしまうようなものに適している。
2-42	武藤泉ら	①大気暴露試験: Fe-11Cr～Fe-25Cr-13Ni-0.8Moの10鋼種 ②海水CCT試験: Fe-11Cr～Fe-25Cr-13Ni-0.8Moの7鋼種	左記①、②とも100×150mm	JIS H 0521のガゼ法で計測した平均海塩粒子量が15mg・m <sup>-2</sup> ・day <sup>-1</sup>	暴露試験片を南向きに配置し、30°の勾配を付けて暴露	1978年～1988年にかけて兵庫県赤穂市の海岸から150mの地点で1～10年間大気暴露	海浜環境におけるステンレス鋼の孔食進展挙動と耐穴あき性評価方法を検討した結果、海浜環境での孔食進展則は、 $\log D_1 = 0.6 \log t_1 + a$ 但し、 $D_1$ :最大孔食深さ(μm)、 $t_1$ :暴露年数、 $a$ :定数( $a = 2.24 - 0.056 Y_1$ 、 $Y_1 = [\text{Cr}] + 2[\text{Mo}]$ )である( $Y_1$ は、耐穴あき性合金指標)、また、海浜環境でのt年後の最大孔食深さは、 $\log D = 0.6 \log t + 1.14b$ 但し、定数bは、工海水CCT試験での最大孔食深さ(μm)を縦軸、サイクル数を横軸として両対数プロットした際の縦軸切片の値であるとしている。
2-43	腐食防食協会 編: 住宅の腐食・防食Q&A	Fe-11Cr～Fe-25Cr-13Ni-0.8Moの10鋼種	—	—	—	米国、英国、日本の各地(工業、準工業、重工業、臨界工業、都市・工業、海岸、海上、田園地域で且つ、海からの距離を25m～4kmまで変えている)	上記文献(2-42)とその著者らが翌年(1994)に発表した文献(腐食防食'94講演集、D-102、p.353-356、腐食防食協会)及び米国、英国、日本の各地での5～18年間の大気暴露試験によって得られた430、304、316の食孔深さデータ(ステンレス鋼便覧第3版、p.308(1995))等と合せて、各種ステンレス鋼の各地における大気暴露腐食試験による孔食深さが $D = A t^b$ ( $\log D = 0.6 \log t + a$ )に従うことを紹介している

表3-2 結果まとめ(2-1～88、14/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-44	腐食防食協会編 「材料環境学入門」	SUS410S、 430、434、 304、316	—	—	勝浦(海岸)、尼崎(工業)、東京(都市)、広(寒冷積雪)における10年間の暴露試験によるR.N.、腐食量及び最大孔食深さの経時変化及びその他6地域を含めた最大孔食深さと40年後の推定最大孔食深さを評価。	我が国におけるステンレス鋼の最長26年間にわたる大気暴露腐食試験結果をまとめ、10年間暴露における孔食深さは、その進行は暴露初期に速く、年と共に緩慢になること、その試験を基にした40年後の最大孔食深さ推定値は、最大で0.3mm以下である(データからは、尼崎での430鋼の0.205mm、304鋼は、徳山での0.129mmとなっている)と紹介されている。	

表3-2 結果まとめ(2-1~88、15/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境		試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法 温度/湿度	
2-45	C.R.southwell	Lead Nickel Monel Monel Nickel silver Copper-nickel Silicon Silver bronze Phosphor bronze Aluminum bronze Commercial bronze Low brass Cartridge brass Naval brass Muntz metal Manganese bronze Copper-nickel Valve metal Tin bronze Nickel-tin bronze Zinc Aluminum AA 1100 Aluminum AA 8090T Magnesium AZ31X Magnesium AZ61X Carbon steel Copper bearing steel Copper bearing iron Nickel steels Chromium steels Low alloy steels Ingot iron Wrought iron Cast steel Gray cast iron Austenitic cast iron Stainless steels Galvanized steel Zinc sprayed steel Lead coated steel Aluminum sprayed steel	平板	大量の単独浸漬 暴露 大量のガルバ ニツク	暴露 暴露、自然浸漬 南国の湖、海 バナマなど	<p>単独浸漬16年</p> <p>鉛の全面腐食度(最大局部浸食):海水浸漬 4.9mils(48)、平均潮位浸漬2.9mils(34)、湖水浸漬 1.1mils(28)、海岸暴露0.79mils(&lt;5)、島暴露0.56mils(&lt;5)</p> <p>炭素鋼の全面腐食度(最大局部浸食):海水浸漬 62.2mils(貫通)、平均潮位浸漬46.2mils(109)、湖水浸漬 28.7mils(94)、海岸暴露15.81mils(123)、島暴露 11.98mils(26)</p> <p>ステンレス鋼の全面腐食度(最大局部浸食):海水浸 漬0.8mils(貫通)、平均潮位浸漬0.1mils(36)、湖水浸漬 0.6mils(&lt;5)、海岸暴露0.00mils(&lt;5)、島暴露0.00mils(&lt;5)</p> <p>ガルバナニツク16年</p> <p>316:炭素鋼:2×9:9×9</p> <p>ステンレス鋼:海水浸漬0.1mils(消失)、平均潮位 0.1mils(175.4)、湖水浸漬0.0mils(44.4)、炭素鋼: 49.5g/m<sup>2</sup>(0)、43.7g/m<sup>2</sup>(0)、32.4g/m<sup>2</sup>(0)</p> <p>316:炭素鋼:9×9:2×9</p> <p>ステンレス鋼:海岸暴露98g/m<sup>2</sup>、島暴露53g/m<sup>2</sup>、炭素 鋼:海岸暴露7298g/m<sup>2</sup>、島暴露2295g/m<sup>2</sup></p>

表3-2 結果まとめ(2-1～88、16/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境		試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	
2-46	E.A.Baker et al.	Material 201 soft CR 201 1/4 CR 201 1/2 CR 201 3/4 CR 201 soft 2B 202 soft CR 16-16-1 soft CR 16-16-1 1/2 CR 301 soft CR 301 1/4 CR 301 1/2 CR 301 3/4 CR 302 soft CR 302 1/4 CR 302 soft 2B 302 No. 4 Q 302 No. 7 Q 304 soft CR 304 soft 2B 304L soft 2B 316 soft CR 316 soft 2B 316L soft 2B 321 soft 2B 347 soft 2B 410 annealed No. 2 430 soft CR	試験片形状	長期暴露 農業地区、海岸	アメリカ6か所 暴露	<p>① 田園地帯またはそれに近い清浄な環境では、自然に表面が洗浄されて初期状態に保たれる。</p> <p>② 工業地帯では経年的に空中から塵が付着するが、表面を洗浄することでほぼ初期状態に保つことが可能である。オーステナイト系ではエッチピット、フェライト、マルテンサイト系は孔食とエッチピットが生じる可能性がある。</p> <p>③ 田園地帯または工業地帯では、材料の組成や表面仕上げなどにかかわらず、26年見た目にはほとんど腐食が認められない。</p> <p>④ 海岸から近い腐食性の高い地域では、クロム、ニッケル、モリブデン量や海岸からの距離によって腐食の挙動が支配される。さびは最初の2～5年で落ち着き、その後は若干サイクルする。表面をスクラブなどで取り除くか硝酸で洗浄すると表面は初期状態に近づくが、若干変化している。暴露後に引張試験も実施していた。</p>

表3-2 結果まとめ(2-1~88、17/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境		試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法 温度/湿度	
2-47	J.R.Kearns et al.	<p>AISI Type/ Tradename</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. "Straight-c 405 409<sup>b</sup> 430<sup>c</sup></li> <li>2. "Straight-c 410 439 439L<sup>a</sup> 441<sup>b</sup> 442 446</li> <li>3. High-chrom 434<sup>a,c</sup> 444<sup>b</sup></li> <li>4. Molybdenu 444<sup>b</sup></li> <li>5. High-chrom Alloy 26-1S<sup>b</sup> E-BRITE<sup>®</sup> AL 29-4<sup>a,c</sup> AL 29-4C<sup>®</sup> AL 29-4-2<sup>®</sup></li> <li>6. AISI 200<sup>g</sup> 201 201L<sup>a</sup> 202 205</li> <li>7. Molybdenu 216 Austenitic<sup>1</sup></li> <li>8. Austenitic<sup>1</sup> 301 303 304 304L 309 310</li> <li>9. Molybdenu 316 316L<sup>a</sup> 317L<sup>a</sup></li> <li>10. "Stabilized" 321 347</li> <li>11. Martensitic ALMAR 362<sup>b</sup> AM 363</li> <li>12. High-nickel AL 90-10<sup>a,c</sup> AL-6X<sup>a</sup> AL-6XN<sup>®</sup> AL-6XN<sup>®</sup> A 286<sup>b</sup></li> <li>13. Precipitatio</li> </ol>	平板	長期暴露	長期暴露 ガルバニックも実 施	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大気中の腐食速度はステンレス鋼のクロムとモリブデン量に依存する。</li> <li>・29Cr-4Mo、20Cr-24Ni-6Moのような高合金は10年の海岸暴露でも腐食を生じない。</li> <li>・鋭敏化材は海岸暴露で腐食を加速させる。</li> <li>・ステンレス鋼の種類や表面仕上げにより、光沢などが変化する。</li> <li>・ガルバニックは、マグネシウムと304をリベット止めしたもので激しく生じた。その他、マグネシウム、青銅、銅、アルミでも生じた。</li> </ul>

表3-2 結果まとめ(2-1～88、18/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境		試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	
2-48	E.A.Baker	Type201、16-16-1、301、302、304、304L、316、316L、321、347、410、430	平板 スポット溶接 エリケソニック プ	長期暴露 26年	暴露 26年間	<p>Type201: 海岸から25mでは30～50%のさびに覆われて、0.01mm深さ以下のピットも発生していた。溶接部にはピットがたくさん認められた。250mでは2%～20%のさびに覆われて、0.01mm以下のピットも発生。溶接部には端の隙間部にピットが発生していた。</p> <p>TYPE202: 海岸から25mでは40～60%のさびに覆われて、0.01mm以下のピットも発生。溶接部には沢山のピットが認められた。250mでは1～5%のさびに覆われて、0.01mm深さ以下のピットが発生していた。溶接部にはピットも認められたが限定的であった。</p> <p>16-16-1: 25mでは40～65%のさびに覆われて、0.01mm以下のピットが発生していた。溶接部には最大0.22mm深さのピットが発生していた。250mでは6～10%のさびに覆われて、0.01mm以下のピットが発生していた。溶接部には隙間に最大0.06mm深さのピットが発生していた。</p> <p>Type301: 海岸から25mでは30～60%のさびに覆われて、0.01mm以下のピットが認められた。溶接部にはすき部の最大0.18mm深さのピットがたくさん認められた。250mでは5%のさびに覆われて、0.01mm以下のピットが発生していた。溶接部には0.01mm深さの非常に少量のピットが認められた。</p> <p>Type302: 海岸から25mでは30～60%のさびに覆われて、0.01mm以下のピットが認められた。溶接部には最大0.2mm深さのたくさんピットがあった。250mでは、1～3%のさびに覆われて、0.01mm以下のピットがあった。溶接部には、0.01mmの非常に少量のピットが認められた。</p> <p>Type304: 海岸から25mでは20%さびで覆われて0.01mm以下のピットがあった。304Lもおなじ。溶接部は最大0.1mm深さのピットがたくさん発生。250mでは5%、304Lは2%のさびで覆われて、0.01のピットあり。ピットは最大0.06mmのものが隙間部にあった。</p> <p>Type316: 冷間圧延材は20%、2B材は5%のさびで覆われた。0.01以下、0.01mmのピットが発生。316L (SOFT2B)は20%のさび、0.01mm以下のピット。溶接部は最大0.14mmの大量のピットが発生。250mで冷間圧延材は1%、2B材はさびは無かった。ピットは0.01mm以下。316L材はさびもピットも無かった。溶接部には0.01mm深さの小さいピットと隙間腐食があった。</p> <p>Type321、347: 明瞭な腐食なし。</p> <p>Type410、430: 発錆もピットも多数発生。</p>

表3-2 結果まとめ(2-1~88、19/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	附着方法	温度/湿度	
2-49	2-39とダブリ	—	—	—	—	—	—
2-50	押川 渡ら	SUS430-Ag ガルバニックカップ	64×64mmの市 販SUS430鋼を 基板とし、 基板との絶縁 を保つために 導電ペースト (Ag)を絶縁層 (BN)の上に積 層印刷した ACM型腐食セ ンサ	Cl <sup>-</sup> 附着量: 1.25 × 10g/m <sup>2</sup>	実海水及び MgCl <sub>2</sub> 溶液(20μl) をセンサ表面に滴 下し、シカゲル中 で乾燥させた後、 相対湿度を変化 させる。	RH30~90	SUS430-Ag対ACM型腐食センサを用いて、塩化物イオンを含んだ水滴下でのステンレス鋼の腐食挙動、特に進展過程について検討し、発生していたピットの進行が、一度停止すると、発生できる条件下においても再進展することは困難になり、また、孔食が発生できない湿度においても、進展できる可能性があることを示した。
2-51	武藤 泉ら	SUS430, 444, 304, 316	25×25× 1or2mm (片面バブによ る鏡面仕上 げ)	0.87mol/kg-95% RH 1.96mol/kg-85% RH 2.78mol/kg-75% RH 3.53mol/kg-65% RH 4.18mol/kg-55% RH 4.90mol/kg-45% RH 5.79mol/kg-33% RH	左記の重量モル濃 度になるように、 MgCl <sub>2</sub> 水溶液を用 いて、298Kにお いて相対湿度が 33~95%の水蒸 気と試験中の水 が平衡するよう に、予備試験の 結果に基づき調 整した。	33~95%RH 25°C	ステンレス鋼表面にMgCl <sub>2</sub> 水溶液の液滴を形成し、湿潤大気中での腐食を模擬した環境をつくり、その孔食成長挙動を解析した結果、液滴下に発生する孔食の深さの対数と時間との対数との間には直線関係が成立する。但し、孔食深さ進展は実環境に比べて格段に速く、実環境でのステンレス鋼の耐性は、孔食成長速度の大小よりも発生や停止などに支配されているものと考えられること、濃厚MgCl <sub>2</sub> 水溶液の液滴下でのステンレス鋼の孔食成長は、金属のアノード溶解反応律速であり、また、孔食内溶解電流が従来言われている孔食成長の下限界電流密度(1mA/cm <sup>2</sup> )以下になっても成長し続けることが分かったなどとしている。

表3-2 結果まとめ(2-1～88、20/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境		試験結果	
				塩分濃度(as Cl)	付着方法 温度/湿度		
2-52	押川 渡ら	PRE値16.5の SUS430～PRE 値38.6の U-20(27Cr- 3.5Mo)の9種 類のステンレス鋼 (表面仕上げ は何れも2B)	50 × 50mm	海塩: 13.9g/m <sup>2</sup> NaCl: 12.7g/m <sup>2</sup> MgCl <sub>2</sub> : 12.7g/m <sup>2</sup>	試験片表面上9カ 所に各種塩化物 溶液を5μl滴下 して径約3mmの 液滴シシカゲル入 リデジケーター(RH10% 以下) 中に約1日置き乾 燥させる。	1995年5月から 1995年4月まで の1年間の沖縄 県西原町のRHの 実測結果におけ る最低RHの 30%、最高RHの 76%及びそれらの 中間の50%とし た。	1)海塩またはMgCl <sub>2</sub> 付着の場合、SUS430は RH50%、SUS304はRH33%で侵食を受け易い。 2)海塩付着ではSUS430・SUS304鋼ともRH75%で は侵食されなかった。 3)NaCl付着ではSUS430・SUS304鋼ともRH33、50、 75%の何れの相対湿度でも侵食されなかった。 4)RH33%での海塩およびMgCl <sub>2</sub> 付着下の試験にお いて、耐孔食性指標([%Cr]+3.3[%Mo]+16[%N]) がそれぞれ31.9および37.5以上のステンレス鋼で侵 食が認められなかった。
2-53	松海光帆子ら	SUS304	6 × 6 × 2mm	Cl <sup>-</sup> 濃度: 4～ 9mol/l	アクリル製セル内に 設置したエポキシ 樹脂埋め込み試 料に4～9Mに調 整したMgCl <sub>2</sub> 水溶 液の液膜を形成 した。その際、液 膜が乾燥しない ように、液膜と同 濃度のMgCl <sub>2</sub> 水 溶液をセル室の 底部に導入して いる。	温度: 300K 湿度: 各Cl <sup>-</sup> 濃 度のMgCl <sub>2</sub> 水 溶液と平衡す るRH(4M-80% ～9M-40%)	ステンレス鋼の孔食特性に及ぼす液膜中の塩化物イオン 濃度及び液膜厚さの影響を検討。その結果、 (1)孔食→再不動態下繰返しタイプの場合、孔食→不 動態への遷移は液膜が厚いほど起こり易く、逆に 不動態→孔食への遷移は液膜が薄いほど起こり 難いこと (2)孔食成長タイプ1の場合、孔食発生時間は液膜厚 さに関係しないこと、また、孔食発生時間の逆数 と塩化物イオン濃度の関係からSUS304鋼の孔食 発生の臨界塩化物濃度は6Mであること (3)孔食成長時の腐食電位は液膜の厚さと関係があ り厚さが薄いほど電位は貴になること などが分かった。
2-54	松海光帆子ら	SUS304	6 × 6 × 2mm	[Cl <sup>-</sup> ]3M～6.5M	—	—	SUS304鋼表面に液膜を形成させ、その腐食電位を測 定し、その変化より孔食発生のモニタリングを、また、測定 系に設置した2枚のPt電極間の溶液抵抗(Rs)を測定 し、液膜厚さおよび塩化物イオン濃度をモニタリングすること によって、SUS304鋼の孔食発生水溶液膜での孔食発 生、液膜厚さ及び臨界塩化物イオン濃度 (6mol/l)での孔食発生誘導時間の決定が可能となる としている。



表3-2 結果まとめ(2-1～88、21/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-55	Y. Tsutsumi et al.	SUS304	6 × 6 × 2mmの電極	[Cl <sup>-</sup> ]3M～飽和濃度(10M弱)	ステンレス鋼電極表面に4種厚さの1M MgCl <sub>2</sub> 溶液膜を形成させた後、300Kのチャンバ内で種々速度で乾燥させ、その過程で、腐食電位を測定	300K	塩化物イオンを含む薄い液膜下におけるtype304ステンレス鋼の孔食発生挙動を調査した結果、(1)本提案方法は、海浜大気腐食のような塩化物含有薄液膜下で進展するステンレス鋼の孔食の評価に適用できる。(2)乾燥速度が5.8%RH/hの場合、食孔が進展するときの最少塩化物イオン濃度は5.8Mである。(3)前処理として3-5Mの塩化物イオン濃度溶液に浸漬すると、海浜大気環境下での耐孔食性は改善される、ことなどが報告されている。
2-56	S. Hastuty et al.	Type430	50 × 50 × 3tmm #1000SiC研磨仕上げ	(1)MgCl <sub>2</sub> 水溶液: ([MgCl <sub>2</sub> ] <sub>0</sub> =0.5, 5.50mM) × (液量V <sub>0</sub> =0.5, 5.0, 10, 50, 100, 200 μl) (2)人工海水	1)first stage:鋼表面に溶液を滴下後、95%RHに15h保持 2)second stage:その後、RHを95%から85, 75, 65%に減少させ、各条件下での孔食発生確率を調べる。	300K	海浜大気環境における孔食発生に対する臨界湿度及び発錆の機構を明らかにする目的で、MgCl <sub>2</sub> 溶液の液滴下でのtype430鋼の孔食に対する臨界湿度は～80%RHであり、それは塩化物濃度4Mに相当する。海浜大気中における孔食による発錆は相対湿度80%以下で生じる (2)液滴の厚さと直径の減少につれて孔食の発生確率は減少するが、それは有効なカソード領域が減少するためである (3)塩化物水溶液の液滴の下で浅い食孔が形成されるが、それは食孔が水平方向に優先的に進展することを示していることなどが分かったとのこと。
2-57	S.Hastuty et al.	Type430	平板	0.5、5、50mM MgCl <sub>2</sub>	液滴をマイクロピペットで滴下 0.5、5.0、10、50、100、200 μL	27°C/95%RHから段階的に湿度を下げていく。95→85→80→75→65%RH。	①430の孔食臨界湿度は80%以下で4Mの臨界塩化物濃度と対応する。海浜環境での錆に起因する孔食もRH80%以下で生じる。 ②孔食の見込みと孔食の直径は液滴の直径と厚みが減ると、減少する。これは有効なカソード面積が減少するからである。 ③浅いピットが塩化物液滴下で形成されると、優先的に横方向のピットができるのを指し示している。

表3-2 結果まとめ(2-1~88、22/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-58	G.S.Frankel et al.	type304、 304Lss	φ 1mmワイヤ 平板	A: 0.7~1M NaCl B: 0.5M MgCl <sub>2</sub>	滴下	A: 95%RH B: 33%RH	<p>①A、B法どちらも測定可能であった。</p> <p>②水膜の厚みにより、カソード反応の酸素拡散限界電流が変わる。</p> <p>③水膜や電解質の厚みにより破壊電位は変わらなない。しかし、ピットが発生すると薄い膜のイオン強度は増加し、湿潤環境中では水の吸着が増加する。</p> <p>④時間の経過と共に水膜が薄くなる。塩化物の濃縮が臨海値を超えると孔食が始まる。</p>
2-59	B.Maier et al.	SS304	平板	0.44 or 2.5M MgCl <sub>2</sub> 比較として 2.5、3.0、3.5、 4.0、4.5、or 4.9M MgCl <sub>2</sub> 浸漬	滴下 2、4、6μL	34to~100%RH	<p>ケルビンプローブ</p> <p>①ピットの生成は大きい液滴より小さい液滴の方が早い。</p> <p>②初期の塩化物の濃縮は3~8.4Mの間である(初期が0.88Mの場合)。</p> <p>③低塩化物濃度での孔食の可能性は小さい液滴より大きい液滴の方が高い。これは大きな液滴ほど欠陥に当たると可能性が高いからである。</p> <p>④カソード電流は時間と共に減少した。</p> <p>⑤ピットの安定性(id)は薄い溶液中で電位制御された電位?より低い。</p> <p>⑥液滴下のピットは初期は横方向に進展し、欠陥から遠く離れていた。ピットはear-shapeの孔に向けて限られた範囲で連なっていた。</p>
2-60	Y.Wang et al.	304ss	樹脂中に12本のワイヤが埋め込んである	1M NaCl	マイクロピペットで滴下	25±1°C/96%RH	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガルバニック電流の分布は異質である。アノード電流のピークはステンレスワイヤやビーム電極の表面に現れ、時間の経過と共に、いくらかのアノードは消失し、残ったアノード部の腐食が加速される。</li> <li>・主な腐食サイトは液滴の端面であり、TPBゾーン(gas/droplet/metalの界面)で、急激なカソード反応が生じた。</li> </ul>

表3-2 結果まとめ(2-1～88、23/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境		試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	
2-61	大久保勝夫	SUS304、316、347	溶接、ロール成形溶接、曲げ加工後溶接、機械加工まま等による引張残留応力や熱応力など	SCC発生近傍のステンレス鋼表面に濃縮した量: 6400、800、40～600、347ppmなど	保温材中への雨水等の侵入による溶出Cl <sup>-</sup> の濃縮	保温断熱材によるオーステナイト系ステンレス鋼の応力腐食割れ(外面応力腐食割れ= External Stress Corrosion Cracking, ESCC)についての解説。断熱材の使用分野から見たSCC問題につて、事例を中心にその特徴と対策を紹介しており、保温材下や当て板部などの構造的すぎま部、温度としては100°C前後(70～130°C)、塩化源は、雨水による保温材中のCl <sup>-</sup> 溶出であり、乾湿繰返しによる濃縮などが重畳して生じるTGSCCである。環境側、材料側からの対策についても言及している。
2-62	中村寿和ら	厚さ4mmの市販の板材で、SUS304:12、25.50%、SUS304L:19、32.55%の冷間圧延後、500～650°C×3h、非冷間圧延材は500～800°C×0.1～10hの鋭敏化熱処理を施した。	左記の処理材から75×10×2mmの短冊状試験片を採取し、半径6mmのU曲げ及び二重U曲げとし、後者は隙間部に石英ウールを詰めたもの。	噴霧溶液: 1% NaCl及び1%NaCl + 0.5% <chem>H2O2</chem> 水溶液	35°Cの1%NaCl及び1%NaCl + 0.5% <chem>H2O2</chem> 水溶液を3h噴霧し、75°C×7h乾燥	海塩粒子を含む大気によるIGSCCの評価試験方法の検討と共に、SUS304及びSUS304LのIGSCC感受性及ぼす冷間加工及び粒界鋭敏化の影響を調べた結果、 (1)乾湿繰返しの改良型塩水噴霧装置によるSCC試験は、実フラットで発生した海塩粒子を含む大気中のIGSCCを良く再現していた (2)SUS304は鋭敏化処理前の冷間加工によってIGSCC感受性が著しく増大するが、50%の強加工では鋭敏化が抑制されIGSCC感受性が生じなくなった (3)SUS304Lは304に比べてIGSCC感受性が極端に低かった等とのこと。
2-63	梅村文夫ら	SUS304	・U字曲げ試験片: 3tmmの冷延材を鋭敏化熱処理650°C×2h&5h。 ・定荷重試験片: 10φmm丸棒を鋭敏化熱処理650°C×5h。	・大気暴露 ・実験室: NaCl、 <chem>MgCl2</chem> 及び食用天然塩の飽和溶液	・暴露試験: (1)雨ざらし、(2)透明アクリル板の覆の下、(3)鉄板の覆の下	海岸近くの環境下でステンレス鋼の大気中SCC長期暴露試験を行うと共に、大気中SCCを模擬した乾湿繰返し試験や定荷重試験で、IGSCCが発生する各種条件を検討し、 (1)SCCが発生する条件として雨ざらしより、直接雨が当たらない条件の方が厳しいことが確認された (2)そのような環境下で割れが発生する材料の鋭敏化度は再活性化率≧5%である (3)大気中でのSCCには塩の乾燥の程度を支配する条件(温度、湿度、塩の吸湿性等)が重要 (4)海塩粒子中には若干の <chem>MgCl2</chem> が含まれるため割れ易い、などとのこと。

表3-2 結果まとめ(2-1~88、24/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境		試験結果
				塩分濃度(as Cl)	附着方法 温度/湿度	
2-64	川本輝明	304,304L,316,316L,310S,321,SCS14, HK40,SS41の事例があるが304の事例が多い。	—	損傷部近傍の表面に附着したCl <sup>-</sup> 量: 100~数10,000ppm	—	化学工学協会が実施したオーステナイト系ステンレス鋼のESCCに関する態調査(110件のアンケート調査)結果であり、保温材の有無に分類して、ESCCの発生位置、使用材料、プロセス流体温度、使用年数、割れ形態と金属組織、同温度、保温材及び保温材カバラーの種類、Cl <sup>-</sup> の影響、孔食及び発錆の有無毎にESCC発生傾向を解析している。
2-65	笠原晃明ら	SUS304(5tmmの冷間圧延材)に、650°C×24hの鋭敏化熱処理を施した後、75×10×2tmm、半径8mmのU曲げ試験片を採取した。	試験曲げ部表面に処理無しを含め、サンドブラスト等6種類の表面処理を実施。処理表面の応力:ジョウブラスト3種: -50kg/mm <sup>2</sup> , その他の3種: +53kg/mm <sup>2</sup> .	人工海水	50°Cの人工海水を100日間連続噴霧	海岸で使用されるオーステナイト系ステンレス鋼の海塩粒子によるSCCを阻止する方法として、アルミホイルでラッピングする方法が有望であることを実験室的に確認したとのことである。
2-66	中原正大ら	使用開始後10年目に貫通欠陥の発生が認められた高温(最高400°C、常用380°C)の気体を取り扱うSUS304製容器。	使用された約半分の期間は常温に放置。積算された高温使用時間は54,000時間。損傷は主に上部鏡板の周溶接線近傍に存在。	本装置はケイ酸カルシウム保温材が施工されており(損傷発生時のCl <sup>-</sup> 濃度分析値は200ppm以下)屋外に設置のため雨水に濡れる状態。	—	380°C程で使用したSUS304容器の損傷は、 (1)装置の使用中に進行した鋭敏化(Ra値≧10%)に起因する外表面からの粒界型のSCCであり、装置の休止中に発生した (2)同装置が380°Cと比較的低温で鋭敏化した過程は、溶接熱影響による軽度の鋭敏化が使用温度において低温鋭敏化により進行した (3)EPR試験法を用いて鋭敏化度を評価する場合、塑性加工を受けた部位等において結晶粒内の溶解が生じ、再活性化率が真の粒界鋭敏化度を示さない場合があるため、試験後の試料表面状態を合せた評価が必要とのこと。

表3-2 結果まとめ(2-1～88、25/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-67	腐食・防食ハンドブック 腐食防食協会編	ステンレス鋼	溶接残留応力	海塩粒子	—	—	湿潤大気応力腐食割れ(ASCC: atmospheric stress-corrosion cracking)の概説。海岸付近の屋外環境に設置されたステンレス鋼製配管や塔槽類が常温の湿潤大気側から生じる応力腐食割れであり、主に、結露による水膜形成と乾燥との交番条件、材料の溶接による鋭敏化及び引張残留応力の3因子が重畳した場合に発生すると説明している。
2-68	M.Takemoto et al.	AISI 304ss	C-ring 溶接管	100ppm～ 10000ppm	浸漬	50～105℃	①ESSCに最も有害なイオンはCl <sup>-</sup> とF <sup>-</sup> であり、初期に存在するイオンや大気中、保温材や反応により出てくるものがあり、臨界濃度は非常に低い。 ②表面温度が105℃以下でESSCは生じ、Cl <sup>-</sup> 、F <sup>-</sup> 、SxOyの量にも依存する。Cl <sup>-</sup> イオンは高温程攻撃的で、F <sup>-</sup> イオンは80℃以下で鋭敏化材に攻撃的になる。 ③ESSCは防止できるが稼働中のプラントでは現状をモニタリングする必要がある。
2-69	K.L.Money et al.	AISI201、301、302、304、304L、309、310、316、incolnel600、incoloy800、825、carpenter20Cb-3	U曲げ、3点曲げ、片持ち梁曲げ	海岸から25mまたは250m	大気暴露	大気暴露	①溶体化処理材、冷間加工材は海岸環境ではSCCを生じなかった(5年)。 ②溶接材と鋭敏化熱処理材は鋭敏化熱処理材の方が割れに対して感受性が高く、鋭敏化熱処理はフィードドテストを模擬できていない。 ③高合金は耐SCC性が高い。 ④鋭敏化材の耐SCC性はC含有量と反比例する。これは鋭敏化材が臨界C量以下ではSCCを生じない可能性を示している。 ⑤溶体化処理材は塑性変形量の50%、耐力を超える曲げ応力が加わらうともSCCが発生しない。 ⑥本報で実施した厳しい海岸環境3か所では、場所によるSCC感受性の違いは認められなかった。

表3-2 結果まとめ(2-1～88、26/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-70	R.M.Kain	Type303、316	植込みボルト 6.5by1.1cm	暴露	250m-Kure beach	暴露	1950年から開始された暴露試験結果、303は締付トルク108-122N・m、316は98-102N・mで割れが生じた。
2-71	R.M.Kain	TYPE302と303 の間の組成	実機のコネク タ	海水	内面に流れてい る	外気温	快削鋼などのMoを含まず、MnSが多量に含まれるステンレス鋼のSCC発生下限温度は50°Cより低い。
2-72	B. K. Shah et al.	①type304L ②type304	①実機PHWR ②配管を周方 向に溶接し たもの ③実機	①不明 ②不明 ③不明	①実機、海岸環 境 ②実機環境 ③海岸環境	①不明 ②不明 ③不明	①粒内SCCが生じた。 ②粒界SCCが生じた。 ③粒内SCCが生じた。
2-73	B.Gnanamoorthy et al.	type304、304L	φ4mmヒータ、 φ10in配管な ど	実機環境不明	実機環境不明	実機環境不明	高温、湿潤、海岸環境で表面に鉄イオンが存在するとTGSCCの起点となる。その範囲は25～32°C、70～80%RH、8～45%NaClmg/m <sup>2</sup> /day。
2-74	J.E.Truman et al	302S25	tube 残留応力	・はんだのフラック クスA～E(塩化 亜鉛を含む) ・塩化物7種類: NaCl、CaCl <sub>2</sub> 、 MgCl <sub>2</sub> 、CuCl <sub>2</sub> 、 SnCl <sub>2</sub> 、NiCl <sub>2</sub>	記載なし	外気温、40、50、 60、70、80°C	①外気温～60°C:flaxでは1日後に錆のシミが発生。 ②70°C:リキッドflaxは急にシミができたが、ペーストは500～1200時間後にシミができた。 ③80°C:すべてのflaxで長期間試験500～1200h後にシミが認められた。 ④塩化物について、塩化カルシウム、塩化マグネシウム、塩化亜鉛以外の塩化物物は全温度ですぐに表面が乾燥した。上述の3種類は50°C以上で乾燥した。 ④外気温中では全温度でシミがあり、上述の3種類は40°C、塩化カルシウム、マグネシウムは50°Cでもシミがあった。 ⑤SCCはflaxA～Dでは40°C～80°Cの範囲で生じ、塩化物では塩化銅(60°C)、塩化亜鉛(40～60°C、80°C)にて生じた。

表3-2 結果まとめ(2-1~88、27/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-75	R.Smart	ステンレス鋼 全般について	U曲げ パイプの残留 応力 など	記載なし	記載なし	—	<p>レビュー</p> <p>①大気中で広く建築用に使われているオーステナイトステンレス鋼はSCCを生じない。ただし、鋭敏化や埋め込まれたイオンにより50-60°Cより低い温度にてSCCが生じることもある。</p> <p>②ASCCの発生は相対湿度が臨界レンジになるか、付着塩化物の組成(MgCl<sub>2</sub>、CaCl<sub>2</sub>、ZnCl<sub>2</sub>など)などに依存する。臨界湿度は高温では広い範囲となる。これはASCCの臨界湿度の説明として引用される。</p> <p>③オーステナイトステンレス鋼がASCCを生じる要因は鋭敏化、冷間加工、高S、すぎみや埋め込まれたイオンなど様々であるがそれらは必須条件ではない。</p> <p>④保管、処分後のキヤニスターの劣化に対しては、たくさんの対抗策がとられている。</p>
2-76	庄司三郎ら	SUS304,SUS316L	Uバンド(8R)試験片	人工海水 NaCl MgCl <sub>2</sub> CaCl <sub>2</sub> ZnCl <sub>2</sub>	Uバンド試験片の登頂部12ヶ所に、0.5規定の各塩化物水溶液5μlを滴下し、自然乾燥させたものを高温高湿槽に設置	50 & 70°C / 5-90%RH	<p>海塩粒子等の塩化物存在下でのステンレス鋼の大気腐食割れに対する湿度の影響を実験室的に調べた。</p> <p>(1)塩化物の種類により、それぞれ固有の湿度で最も割れ易く(RHmax)、これより高湿度では割れ難くなる。これは塩化物の吸湿性に基づく液膜の塩化物濃度の差により生じるもので、RHmax付近では飽和溶液或いは飽和溶液と結晶の混合溶液が形成され、高湿度では濃度の低い液膜が形成される</p> <p>(2)海水の割れ発生作用はMgCl<sub>2</sub>に支配され、RHmaxは30%付近、海水存在下の防食湿度は20%RH付近であるとのこと。</p>

表3-2 結果まとめ(2-1～88、28/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-77	庄司三郎ら	SUS304、316L	U曲げ	13 μg/mm <sup>2</sup>	5 μを滴下	室温/飽和	<p>①大気SCClには湿度が大きな影響を及ぼし、塩化物固有の湿度で最も割れやすいこと、海水の割れ発生作用はMgCl<sub>2</sub>に支配されることが室温でも証明された。ただし、室温では塩化物の飽和溶液平衡湿度付近でのみ割れが発生する。</p> <p>②室温ではNaCl中では割れないが、MgCl<sub>2</sub>中では30～40%RHで割れが発生する。</p> <p>③割れの定常的進展速度は、塩化物の飽和溶液平衡湿度に対応する湿度で大きく、高湿度では小さい。</p> <p>④最も割れ易い濃度あるいは、これに近い濃度の液膜が形成される湿度における割れ発生作用強さは、塩化物の種類で異なる。概して飽和濃度の高い塩化物ほど割れ発生作用が強い。</p>
2-78	中山元ら	SUS304、鋭敏化304、316L、317J4L、329J4L、YUS270、Alloy825、Alloy625、HastelloyC22	U曲げ	4.5%NaCl+5.2%CaCl <sub>2</sub> +16.2%MgCl <sub>2</sub> +8.5%KCl	浸漬、U曲げの頂部に滴下	60°C、60°C / 35%RH	<p>いずれもCr+3.3Molに依存して耐食性が高くなり、YUS270は加熱を受ける海塩粒子環境下において本試験環境下ではSCC感受性がない。</p>
2-79	中山元ら	-主：US270、YUS270溶接 -比較材：304、鋭敏化304、Alloy825、SUS329J4L、SUS836L、alloy625、Hastelloy-C22	U曲げ	4.5%NaCl+5.2%CaCl <sub>2</sub> +16.2%MgCl <sub>2</sub> +8.6%KCl	U曲げの頂部に滴下する。	60°C / 35%RH	<p>①YUS270溶接部は1か月試験で、発錆、孔食、SCCは発生せず溶接部の耐食性は低下しなかった。</p> <p>②苦汁塩滴中の不動態化状態(腐食していない)電位は+0.4V vs.SHE.</p> <p>③Cr+3.3Molに依存して孔食電位が貴側に移行する。</p> <p>④SUS340は不動態化状態電位より孔食電位が卑側にあるため、孔食が発生し、YU270は孔食電位に近いため孔食や発錆が認められ、SUS836Lは孔食電位が貴側にあるため腐食しなかった。</p>



表3-2 結果まとめ(2-1～88、29/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-80	中山元ら	YUS270	U曲げ	苦汁濃度等記載なし	苦汁塩滴を逆Uの頂部に滴下	試験片温度: 60°C 雰囲気温度及び湿度: 60°C/35%RH 30°C/90%RH	60°C/35%RHではわずかな発錆とその部分でのき裂が認められた。試験片温度60°C/環境温度30°C×90%RHでは発錆もき裂も認められなかった。
2-81	谷 純一ら	SUS329J4L(母材部、溶接部)、YUS270(母材部、溶接部)、SUS304L	引張試験片 SUS329J4L: 0.5~1.2σ <sub>y</sub> YUS270:0.5~1.5σ <sub>y</sub>	約10g/m <sup>2</sup>	試験片の平行部には辺縁を除いて50μlの人工海水を塗布し室温で乾燥させた。	80、70、60°C /35%RH	<b>SCC試験</b> 80°C、35%RHの条件化では、SUS329J4L、YUS270は22000時間後も割れが認められず、SUS304Lは早ければ250時間後に割れが生じた。
		SUS329J4L(母材部、溶接部)、YUS270(母材部、溶接部)	引張試験片 SUS329J4L: 0.5~1.2σ <sub>y</sub> YUS270:0.5~1.6σ <sub>y</sub>	約10g/m <sup>2</sup>	試験片の平行部には辺縁を除いて50μlの人工海水を塗布し室温で乾燥させた。	80°C/35%RH	<b>SCC発生条件</b> 試験開始後1000時間以内のSCC発生挙動を調べた。いずれの供試材もすぎま腐食または、孔食による食孔は12h程度で発生し、30h程度では食孔を起点としたき裂の発生も認められた。
		SUS329J4L、YUS270、SUS316L	試験後引張試験片	0.1、1.0、5.0g/m <sup>2</sup>	人工海水を噴霧	80°C/10、15、20%RH	<b>発錆試験</b> 発錆の臨界条件は60°Cでは20~25%RH、70°C、80°Cでは10~15%RHに存在すると考えられる。
		—	—	—	—	—	<b>海塩の濡れ挙動</b> ACMセンサーを利用した海塩の臨界濡れ湿度を調べ、80°CにおいてRH=23%、70°CにおいてRH=25%、60°CにおいてRH=30%という値を得た。

表3-2 結果まとめ(2-1～88、30/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-82	U.S.NRC	304、304L	U曲げ (single、W、溶 接材)	①salt spray 15s噴霧、 90minholdを4回、 209minhold、 480mindry ②salt fog 5minfog、 60minambientを4 回、DRY100min、 湿度増加 125min、高湿度 55min、 Dry180min	左記	環境:25°C、30°C サンプル:25、 93、176°C 43、95、135°C	①saltspray:25°CでSCCなし、93°C、176°CでSCC が生じた。 ②salt fog:43°C、304、304Lは粒界、粒内SCCが 4週間後に発生、316Lが32週目にSCCが生じる。 ③すぎまは悪影響を及ぼさない。 ④85、120°C304、304L、316LにSCCなし32週では 85°CでHAZIにデボジットあり。120°Cではなし。 ⑤Saltfogではやや外気より高い温度でのみSCCが 生じる。 ⑥32～128週でSCCが生じる。 ⑦ラフな試験である。
2-83	T.S.Mintz et al.	304SS 304LSS 316LSS	U曲げ (single、W、溶 接材)	人工海水 ASTMD1141	FogとDryのサイ クル	43、85、120°C	・304SS、304LSS、316LSSいずれも120、85°Cは割 れなし、43°Cで割れる。

表3-2 結果まとめ(2-1~88、31/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-84	T.S.Mintz et al.	304SS (溶体化処理 材、鋭敏化処 理材、溶接材)	U曲げ	人工海水 0.1、1、10g/m <sup>2</sup>	Saltfog: 27°C × 5min Hold: 27°C × 15min ただし試験片は 90°Cに加熱され ている。	湿度サイクルテ スト 温度: 35、45、 52°C 湿度: 高湿度 → 30g/m <sup>2</sup> AH、ドラ イ → 不明	<b>サイクルテスト</b> ・10g/m <sup>2</sup> 人工海水付着材は1か月試験で、溶体化処 理材、鋭敏化処理材に35、45、52°Cで割れ発生、 4か月試験では鋭敏化処理材も35、45°Cで割れ 発生。 ・1g/m <sup>2</sup> 人工海水付着材は1か月試験で、溶体化処 理材に35、鋭敏化処理材に35、45°Cで割れ発生、 4か月試験では溶体化処理材、鋭敏化処理材に 35、45°Cで割れ発生。 ・0.1g/m <sup>2</sup> 人工海水付着材は1か月試験で3種類とも 割れなし、4か月試験で、溶体化処理材に45°Cで 割れ発生、鋭敏化処理材、溶接化処理材に35、 45°Cで割れ発生。
		305SS (溶体化処理 材、鋭敏化処 理材、溶接材)	U曲げ	人工海水 0.1、1、10g/m <sup>3</sup>	Saltfog: 27°C × 5min Hold: 27°C × 15min ただし試験片は 90°Cに加熱され ている。	恒温・恒湿テスト 温度: 45、60、 80°C、 湿度: 22、25、 30、35、40、 44%RH	<b>恒温・恒湿テスト</b> ・60°Cでは溶体化処理材、鋭敏化処理材ともに 22%RH以上で1か月で割れ発生。ただし、22%RH 以下では割れもピットも発生しなかった(10g/m <sup>2</sup> 人工海水付着材)。 ・80°Cでは35%RHを超えると1か月で溶体化処理材、 鋭敏化処理材ともに割れが発生する(10g/m <sup>2</sup> 人工 海水付着材)。

表3-2 結果まとめ(2-1～88、32/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	附着方法	温度/湿度	
2-85	T.S.Mintz et al.	304SS 304LSS 316LSS	U曲げ (single、 double- 304LSSは除く)	人工海水 ASTM D1141-52	塩水噴霧 (modified GM9540P)	温度:25°C、 93°C、176°C(カー トリッジヒーター)	25°Cで割れは認められなかった。  93°Cの結果:304SSは1か月、2か月試験でsingle、wとも6体全てに割れ発生。304LSSは1か月、2か月試験でsingleが3体全てに割れ発生。316LSSは1か月試験で、singleの1/3に割れ発生、wは3体全てに割れ発生、2か月試験で、single、wともに6体全てに割れ発生。  176°Cの結果:304SSは1か月試験でsingleが1/3、wが3体全てに割れ発生、2か月試験でsingle、wともに6体全てに割れ発生。304LSSは304LSSは1か月試験でsingleに割れなし、2か月試験でsingleの1/3に割れ発生。316LSSは1か月でsingle、wともに2/3に割れ発生、2か月で2か月試験でsingle、wともに6体全てに割れ発生。

表3-2 結果まとめ(2-1～88、33/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境		試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法 温度/湿度	
2-86	T.Prosek et al.	S30400 S31603 N08904 S31254 S32101 S32304 S32205 S32750	U曲げ  滴下時は飽和の塩化マグネシウム、塩化カリウム、塩化ナトリウム、第二塩化鉄	U曲げの頂部に六滴の液滴をのせる。合計の液量は約66μl、第二塩化鉄は液量が半分	温度:20、30、40、(50-塩化力ルシウム、塩化マグネシウムのみ)°C 湿度:30、50、70%RH	S30400: 50°Cの15～30%RHで割れ発生、40°Cの30%RHで割れ発生(塩化ナトリウム、第二塩化鉄以外)、30°Cの30%RHで割れ発生(塩化カルシウム、塩化マグネシウム) S31603: 50°Cの15～30%RHで割れ発生、40°Cの30%RHで割れ発生(塩化カルシウムのみ)、30°Cの30%RHで割れ発生(塩化カルシウムのみ) まとめ S30400のSCC発生範囲は、塩化マグネシウム30°C×22～44%RH、10molCl <sup>-</sup> /kgH <sub>2</sub> O以上、40°C×20～67%RH、7molCl <sup>-</sup> /kgH <sub>2</sub> O以上。塩化カルシウム30°C×12～49%RH、10molCl <sup>-</sup> /kgH <sub>2</sub> O以上、40°C×7～69%RH、7molCl <sup>-</sup> /kgH <sub>2</sub> O以上。 S31603のSCC発生範囲は、塩化カルシウム30°C×12～40%RH、12molCl <sup>-</sup> /kgH <sub>2</sub> O以上、40°C×7～39%RH、12molCl <sup>-</sup> /kgH <sub>2</sub> O以上。

表3-2 結果まとめ(2-1～88、34/34)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
2-87	白井幸治ら	SUS304L	定荷重 バネを装着し たジグを用いた	人工海水(pH8.2) 0.2～5g/m <sup>2</sup>	微粒子を噴霧し、 試験片表面に付 着した塩水的が 合体しないように 調整。	50°C、35%RH	き裂発生の臨界塩分量は約0.8g/m <sup>2</sup> asClであった。 (臨界応力は降伏応力の0.1倍未満-根拠が?)
		SUS304L	4点曲げ 初期応力 270MPa	人工海水または 塩化マグネシウ ム溶液 10g/m <sup>2</sup>	液を滴下(20μL)	80°C、35%RH	<ul style="list-style-type: none"> <li>人工海水付与のき裂進展速度は<math>2.2 \times 10^{-12} \sim 1.6 \times 10^{-11}</math> m/s</li> <li>塩化マグネシウムのき裂進展速度は<math>2.4 \times 10^{-10}</math> m/s</li> </ul>
		SUS304L溶接 試験体	残留応力 ただし、表面 の半分に3種 類の残留応力 除去緩和処理 を実施	人工海水 4g/m <sup>2</sup>	散布	80°C、36%RH	残留応力を施さない場合は1000時間で割れ発生、その他の緩和処理は割れ発生なし。
2-88	G.Oberson et al.	type304 (溶体化処理 材、鋭敏化処 理材)	U曲げ	人工海水 ASTM D1141-98 0.1、1、 10g/m <sup>2</sup> of salt	エアロゾルを噴 霧	温度: 27、35、 45、52、60°C 絶対湿度: 12～ 16g/m <sup>2</sup> 実環境に 合わせて湿度サ イクルを与えてい る。	<b>自然環境の絶対湿度模擬試験</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>27°Cで割れなし(塩は潮解している様子)。</li> <li>35、45°Cでは0.1g/m<sup>2</sup>の塩濃度で4か月で割れ発生。鋭敏化材の割れ感受性は溶体化材より高い。</li> <li>52°Cの10g/m<sup>2</sup>は1か月以内に割れ発生、1g/m<sup>2</sup>は継続試験中。</li> <li>60°Cの10g/m<sup>2</sup>はテスト中で調査できなかった。</li> </ul>
						温度: 60、80°C 湿度: 40、35、 30、25、22%RH- 60°C 40、30、28%RH- 80°C (割れるまで湿度 を段階的に下げ	<b>高温試験</b> 60°C-25%RH、80°C-28%RHで割れが生じることが確認できた-潮解が若干生じれば、潮解温度より低くともSCCは生じる。
				人工海水 ASTM D1141-98 1、10g/m <sup>2</sup> of salt	滴下	温度: 35、45、 52°C、 湿度: 約30g/m <sup>3</sup>	<b>応力水準の影響</b> 実施中で結果なし。

表3-3 結果まとめ(3-1～23、1/5)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	附着方法	温度/湿度	
3-1	ISO 9225-2012			—			SO <sub>2</sub> または塩化物の捕集方法について。
3-2	JIS Z 2382-1998			—			SO <sub>2</sub> または塩化物の捕集方法について(ほぼ上述のISOと同じ)。
3-3	K.Suzuki			—			ハワイでの環境調査。
3-4	E.L.Montgomery	UNS10100	平板	①大気暴露+人工海水 ②5%NaCl	①大気暴露 ②間欠海水噴霧 ③ASTM B117-salt fog	①、②大気暴露 ③35°C	ケネディ宇宙センターは150～3550mg/m <sup>2</sup> /d、平均で3550mg/m <sup>2</sup> /dの塩化物物が付着した。塩化物物の濃縮には温度や湿度や湿度などが関与する。またSO <sub>2</sub> はすぐに堆積する。 3種類の試験を実施した結果、暴露試験との相関をとるには長期間の実施が必要であることが示唆された。 異なる試験方法で試験を実施すると、異なる腐食生成物が生成する。
3-5	N.Drew			—			アメリカバークレー発電所での環境調査。
3-6	K.M.A.Hossain			—			ハンガリアイッシュでの環境調査。
3-7	E.A.L.Costa			—			ブラジルでの環境調査。
3-8	片脇 清士 et al.			—			飛来塩分量の測定方法について。ガーゼ法と開発した土研法の比較を実施した。

表3-3 結果まとめ(3-1～23、2/5)

論文番号	著者	材料 供試材	応力		環境		試験結果
			試験片形状	塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
3-9	M.Takebe et al.			—	—		島根県松江市にてドライガアーゼ法と土研法の比較を実施した。
3-10	Y-S Chen et al.			—	—		台湾での環境調査。
3-11	巨真澄ら	—	—	結果に示す	環境調査	環境調査	<p>◎福島第一原子力発電所での環境調査</p> <p>①気中塩分濃度: <math>64 \mu\text{g}/\text{m}^3</math> (平均風速25m/s、給気口高さ約1.3mでの測定)</p> <p>②飛散塩分量の予測モデルを製作した。</p> <p>③キヤスク表面の付着塩分量: 濡れガアーゼによる拭き取りで、キヤスク表面の等価塩分付着密度を測定し、<math>0.05 \sim 0.26 \text{g}/\text{m}^2</math> と測定された(蓄積期間3か月、海から80mの位置)。付着物の成分はCa、Cl、K、Mg、Na、Pb、S、Si、Znで、主要物質はNaClとCaSO4であった。</p>
3-12	H.Guan et al.			—	—		オーストラリアでの環境調査。
3-13	S.Benassai et al.			—	—		南極での環境調査。



表3-3 結果まとめ(3-1～23、3/5)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度	
3-14	F.Corvo et al.	炭素鋼	平板	大気暴露	大気暴露	大気暴露	キューバでの炭素鋼の腐食速度：屋外6か月暴露で1154.65g/m <sup>2</sup> 、12か月で3566.2g/m <sup>2</sup> 、18か月で全てが腐食生成物となった。シエルター内6か月暴露で307.6g/m <sup>2</sup> 、12か月1127.9g/m <sup>2</sup> 、18か月暴露で1510.5g/m <sup>2</sup> の腐食量であった。 ハバナのコヒマルでの炭素鋼の腐食速度は、6か月で85.96g/m <sup>2</sup> 、12か月で125.35g/m <sup>2</sup> 、24か月で281.57g/m <sup>2</sup> 、メキシコのカンペチエでは6か月で59.27g/m <sup>2</sup> 、12か月で94.66g/m <sup>2</sup> 、24か月で116.46g/m <sup>2</sup> の腐食量であった。
3-15	W.A.McKay et al.			—			イギリスカンブリア州の海側の環境調査。
3-16	S.Feliu et al.	Steelのみ SUS該当なし 環境調査が 主	平板	大気暴露	大気暴露	大気暴露	いずれの地域でも海岸地域から200m離れると急に腐食速度が低下する。
3-17	R.D.Klassen et al.			—			汚濁成分の分配について。
3-18	M.J.Ten Harkel et al.			—			海岸地域からの汚濁成分の分配や粒子のサイズについて。

表3-3 結果まとめ(3-1～23、4/5)

論文番号	著者	材料 供試材	応力		環境			試験結果
			試験片形状	塩分濃度(as Cl)	附着方法	温度/湿度		
3-19	M.Morcillo et al.				—			スペインでの環境調査。
3-20	巨真澄				—			銦子での環境調査。
3-21	G.A.King et al.	軟鋼 低合金鋼	平板	大気暴露	大気暴露	大気暴露		オーストラリアでの環境調査、厳しい海岸環境ではシェルター内の暴露結果の方が厳しく、通常の暴露の方が若干腐食量が小さくなった。炭素鋼は29.9～36.2 μm/year、低合金鋼は29.7～39.8 μm/yearの腐食速度を示した。
3-22	S.T.Matthes et al.	SUS304	平板	大気暴露	大気暴露	大気暴露		Albany: 浸食深さなし Newport: 海岸から0マイルで端面腐食 海岸から3マイルでは腐食なし

表3-3 結果まとめ(3-1～23、5/5)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境		試験結果
				塩分濃度(as Cl)	付着方法 温度/湿度	
3-23	A.Machiels	SUS304、316 等	実機など	大気暴露など	—	<p>海岸環境で生じるオーステナイトステンレス鋼のSCCは次の5つの要因の影響を受ける。①湿度と濡れ時間②飛来汚染物質(塩化物、二酸化硫黄、二酸化炭素など)③距離、高度、方向、小屋内か否か④温度⑤大気中での太陽光や風。また次の5つはSCCを促進する効果がある。①冷間加工組織②鋭敏化組織③表面のイオン汚染④すぎまとすぎま腐食⑤孔食</p> <p>長期貯蔵の計算プログラムを作成している。</p>

表3-4 結果まとめ(4-1~4)

論文番号	著者	材料 供試材	応力 試験片形状	環境			試験結果	
				塩分濃度(as Cl)	付着方法	温度/湿度		
4-1	B.Hanson	該当なし	—	—	—	—	アメリカエネルギー省の紹介。	
4-2	S.DePaula et al.	SUS304 SUS304L SUS316L	U曲げ (single、W、 溶接)	記載なし	salt fog	43°C、85°C、 120°C	43°Cのみ全ての鋼種で割れ発生。 その他の温度は割れなし。 304、304Lは4週、316Lは32週で割れ発生。	
		SUS304	U曲げ (single、W、 溶接)	1 or 10g/m <sup>2</sup>	人工海水塗布	35°C、45°C	素材まま、鋭敏化材は3週間で粒界割れ発生。 溶接材は割れなしであるがinterdendritic attack が発生。 0.1g/m <sup>2</sup> 、35°Cでは微細なピットが発生。	
4-3	TAhn et al.	SUS304?	U曲げ	10g/m <sup>2</sup>	記載なし	60、80°C	60°C、40%RH(塩化マグネシウム、海水の臨界湿度に近いたまは若干高い条件)で割れ発生。 80°C、40%RH(塩化マグネシウム、海水の臨界湿度より十分高い条件)で割れ発生。	
		Type304	U曲げ 鋭敏化材	5~30g/m <sup>2</sup>	記載なし	10~120°C、 0~100%RH	45°C、0.1g/m <sup>2</sup> 以上で割れ発生。	
4-4	M.Wataru	S30403	低歪性圧縮 加工(LPB)あり、なし	10g/m <sup>2</sup>	記載なし	80°C、35%RH、 1000Hr	LPBあり:SCCなし LPBなし:SCCあり	
		S30403 HV305、247	丸棒	0.2~5g/m <sup>2</sup>	記載なし	記載なし	HV247材は0.6g/m <sup>2</sup> で割れなし。 HV305材は0.8g/m <sup>2</sup> を超えると割れ発生。	
		S30403	モックアップ キャニスタ	4g/m <sup>2</sup>	記載なし	記載なし	80°C、35%RH、 1000Hr	SCC発生(溶接線から±5mm)
		S30403	4点曲げ	10g/m <sup>2</sup>	記載なし	記載なし	80°C、35%RH	初期き裂進展速度 $1.6 \times 10^{-3}$ m/h その後のき裂進展速度: $5.8 \times 10^{-5}$ m/h

#### 4. 4. ステンレス鋼の腐食に関する既往の研究成果・知見の整理

##### 4. 4. 1 既往の研究成果・知見の整理

4. 1. 節で述べた通り、水処理二次廃棄物保管容器である各種吸着塔のほとんどに、その構成材料として SUS316L ステンレス鋼が使用されている(表 1-1)。

それらの外表面は海洋性大気暴露状態であり、海塩粒子及び大気中水分・水蒸気の付着及び結露による塩化物水溶液液膜の形成によって腐食の発生が懸念されるが、これについてはコンクリートキャスク貯蔵におけるステンレス鋼製キャニスタの腐食問題とほとんど同様であり、それらの腐食に関する既往の研究成果・知見の整理については既に JAEA 殿で実施されているところである。

一方、各種吸着塔の内部環境については、本問題の発生が僅か 4 年弱前であり、それらの内部環境条件や SUS316L ステンレス鋼内表面の腐食については検討の緒に就いたばかりであることから、公表された情報はそれほど多くは無い<sup>(1), (2)</sup>など。

従って、3. 4. 節で述べた、a. ~f. の腐食に関する考慮すべき事項のうち、f. コンクリート接触面の腐食の発生及び進展は外表面の問題であり、海洋大気暴露との関連で調査したが、それ以外の a. ~e. については吸着塔内に残留した塩化物水溶液中での腐食が問題となることから、個々の影響因子の重要度、影響因子間の相互作用等に関する知見の調査・整理を行い、監視すべきポイント及び講ずるべき措置を検討した。さらに、それら結果を踏まえて実環境を想定した腐食試験の計画・立案を行った。

##### a. 内在塩分および飛来塩分による腐食の発生と進展

###### ①ステンレス鋼の局部腐食

一般に、ステンレス鋼は通常の水環境中では不動態を示すが、ハロゲンイオン、その中でも水環境には必ず含まれる塩化物イオン( $\text{Cl}^-$ )が存在する環境では、孔食、すきま腐食および応力腐食割れなどのいわゆる“局部腐食”を起す場合がある。これらステンレス鋼の局部腐食についての知見は多くの成書などに纏められている<sup>(3)-(8)</sup>。

特定の環境/材料の組合せごとに孔食、すきま腐食、応力腐食割れのそれぞれの局部腐食の生起に対する臨界電位  $V_c$  が存在し、これ以下の(これより卑な)電位域で材料を使用すれば局部腐食の可能性はない。図 4-1<sup>(6)</sup>に模式的に示すように、局部腐食臨界電位  $V_c$  と当該材料の当該環境における自然腐食電位  $E_{sp}$ (完全不動態化金属の  $E_{corr}$  定常値)とを比較することにより、当該材料の当該環境における使用条件を明らかにすることができる。即ち、 $E_{sp}$  が  $V_c$  よりも高い電位域では局部腐食の可能性はあるが、 $E_{sp}$  が  $V_c$  よりも低い電位域ではその可能性はない。

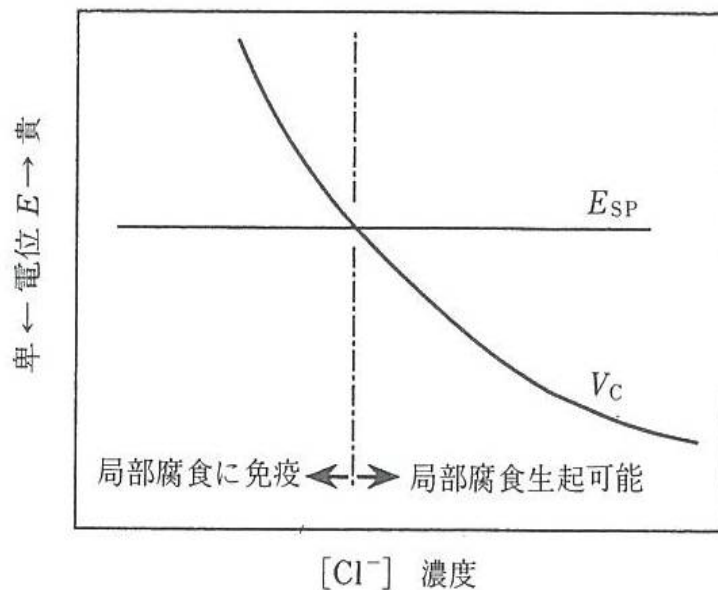


図4-1 腐食臨界電位 $V_C$ と当該材料/環境系における $E_{SP}$ との比較による可使用条件の評価(模式図)<sup>(5)</sup>

②ステンレス鋼の自然腐食電位 $E_{sp}$

図4-2<sup>(5)</sup>に、所定のpHに調整した空気飽和の模擬地下水(1mol/L[ $\text{HCO}_3^-$ ])中におけるステンレス鋼とチタンの安定した(不動態状態を保っている)最も貴な電位=自然腐食電位: $E_{sp}$ のpH及び温度依存性を示す。この図から、ステンレス鋼の $E_{sp}$ は-0.059V/decadeのpH依存性を示すが(中性のpH7のときが+0.32V vs. SHE、弱アルカリのpH10のときが+0.14V vs. SHE)、金属種あるいは温度依存性は小さいことが分かる。

図4-3<sup>(11)</sup>は、図4-2<sup>(5)</sup>の $E_{sp}$ データ(無菌環境におけるものである)に、微生物が存在する自然の海水、淡水、あるいは土壌環境でのステンレス鋼及びチタンの $E_{sp}$ データを重ね合せたものであるが、ステンレス鋼の $E_{sp}$ は微生物の作用により上方に平行移動され、0.3~0.4V程度の電位貴化が明瞭に現れている。

この微生物の生息活動に起因する $E_{sp}$ 貴化機構の代表的な模型として、好気性細菌の代謝反応によって生成される過酸化水素 $\text{H}_2\text{O}_2$ の還元反応が溶存酸素の還元反応に重畳されることによるとする説がある。 $\text{H}_2\text{O}_2$ の還元反応の平衡電位は

$E_{eq}^{\text{H}_2\text{O}_2} = 1.77 - 0.059\text{pH} + 0.0295 \log \text{CH}_2\text{O}_2$ と高く、電位貴化に十分寄与できるとするものであると説明されている<sup>(11)</sup>。

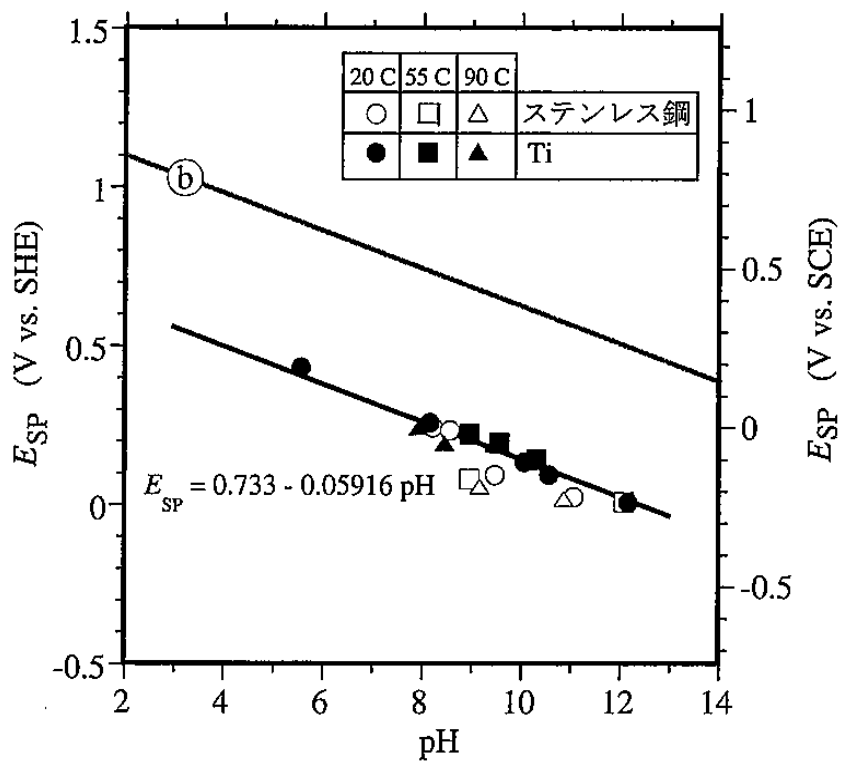


図4-2 ステンレス鋼などのE<sub>SP</sub>のpH依存性<sup>(5)</sup>

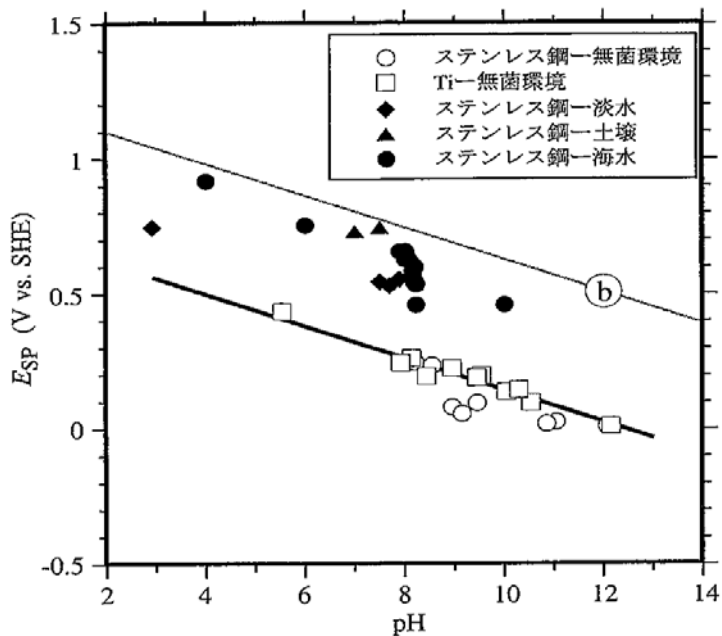


図4-3 自然の海水、淡水、土壌中における定常腐食電位E<sub>SP</sub>の貴化データ<sup>(11)</sup>

### ③ステンレス鋼の孔食・すきま腐食の機構

不動態化しているステンレス鋼の自由表面上において腐食がある特定の場所だけに集中して腐食孔を生じ、他は不動態を保っているような腐食形態を孔食(pitting)という。また、金属表面上に非自由表面を形成する金属合わせ部、付着物の下などで進行するような腐食形態をすきま腐食(crevice corrosion)という。これらはいずれも塩化物水溶液環境下で生じることが多い。孔食とすきま腐食はいずれも基本的には同一表面に活性態と不動態が共存するいわゆる活性態-不動態電池による局部腐食である。

孔食とすきま腐食の形態および機構は、とくにその発生過程において多少の相違はあるものの、成長過程はほとんど同一である。すなわち、孔食においては腐食が進行することにより物質移動の障害因子を生成するのに対し、すきま腐食では初めから他の異物によって障害因子が形成されて存在する。従って、同一環境条件で孔食とすきま腐食の生じ易さを比較すると、後者のほうが圧倒的に起りやすく、実用装置材料の腐食問題としてはすきま腐食のほうが重要であるといえる。

典型的な孔食の形態は図4-4<sup>(9)</sup>に示されているが、通常ステンレス鋼に生じる孔食はこのようにふた付きのもの(covered pit)が多い。

孔食が発生するには、不動態化金属の電位  $E_{sp}$  をその臨界孔食電位  $V_{c, PIT}$  よりも貴な電位まで上昇させることが必要である。孔食の発生にはすきま腐食の場合より高い電位(強い酸化性)を必要とする。

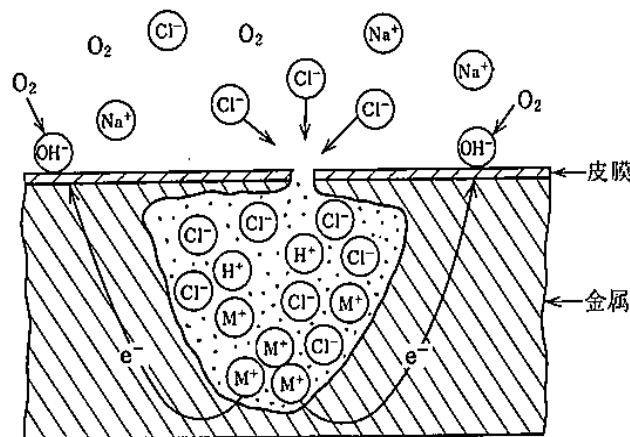


図4-4 孔食の成長過程の模式図<sup>(9)</sup>

ステンレス鋼の塩化物溶液中におけるアノード分極曲線の測定例を図4-5<sup>(9)</sup>に示す。図中の電位  $E_z$  以上で皮膜の破壊と補修による電流の振幅が見られ、更に貴に分極すると孔食電位  $V_c$  以上で安定な孔食の発生による電流の急増が観察される。孔食の成長段階においては、金属のアノード溶解により生じた  $Fe^{2+}$ 、 $Cr^{3+}$ 、 $Ni^{2+}$  などが加水分



解して $H^+$ を生成すると共に、このようなカチオン過剰なアノード溶解部の電気的中性を保つため電気泳動によって $Cl^-$ イオンが濃縮し、食孔内の溶液のpHが低下し、活性溶解により局部腐食が進展することになる。上述の図4-4はそのような進展状態を示している。

一方、すきま腐食の発生と成長過程では、まず、すきま内での溶存酸素の消費によるすきま外自由表面との間で酸素濃淡電池が形成され、次いで、上記の孔食と同様、すきま内でのアノード溶解に基づく金属イオン溶出イオンの加水分解及び $Cl^-$ イオンの濃縮によって隙間内溶液のpH低下が生じる。そして、不動態/活性態移転のpH (depassivation pH= $pH_d$ ) 以下で不動態皮膜の破壊が生じ、活性溶解が生じ、さらにpHが低下し活性溶解が進むことによって、すきま腐食が進展する。そのような成長過程の状況を図4-6<sup>(9)</sup>に示す。

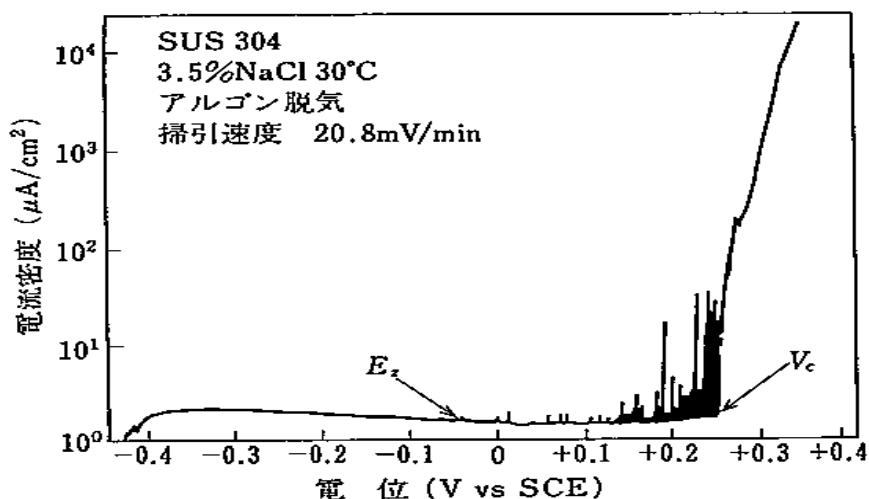


図4-5 塩化物溶液中におけるアノード分極曲線の測定例<sup>(9)</sup>

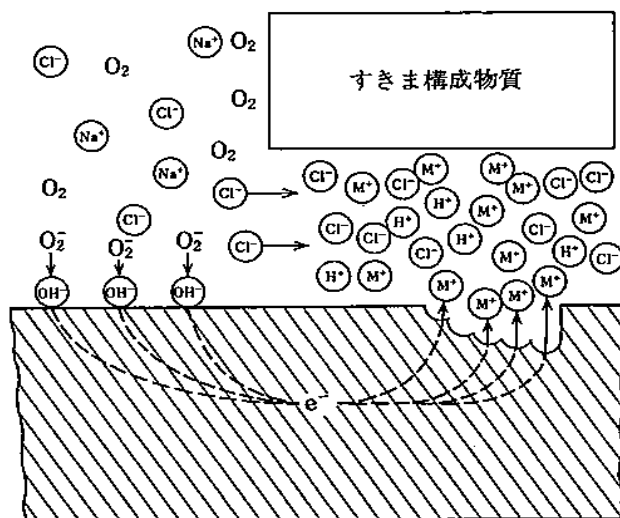


図4-6 すきま腐食の成長過程の模式図<sup>(9)</sup>

④ステンレス鋼の孔食およびすきま腐食臨界条件

先述したように、中性近辺の塩化物水溶液中におけるステンレス鋼の自然腐食電位  $E_{sp}$  は  $Cl^-$  濃度や溶液温度などには依存しないが、ステンレス鋼の局部腐食はそれらの影響が著しく大きい。

図 4-7<sup>(5)</sup>に、304 鋼の孔食臨界電位  $V'_{C,PIT}$  およびすきま腐食臨界電位  $V'_{R,CREV}$  に及ぼす塩化物イオン濃度の影響(試験温度は 25 および 30°C)を示す。両電位とも塩化物イオン濃度につれて卑側に移行するが、 $V'_{R,CREV}$  は  $V'_{C,PIT}$  に比べて著しく低く、従って、実際の構造物にあっては、構造上の、あるいは付着物下のすきま構造の存在は不可避であることから、孔食よりもつばらすきま腐食が問題になることは上述の通りである。

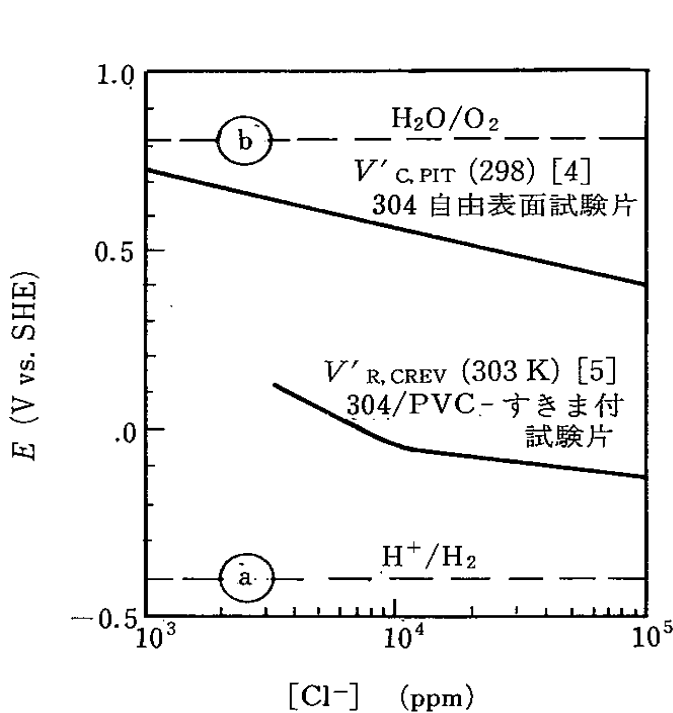


図4-7 304鋼の孔食臨界電位  $V_{C,PIT}$  及びすきま腐食臨界電位  $E_{R,CREV}$  測定結果の例<sup>(5)</sup>

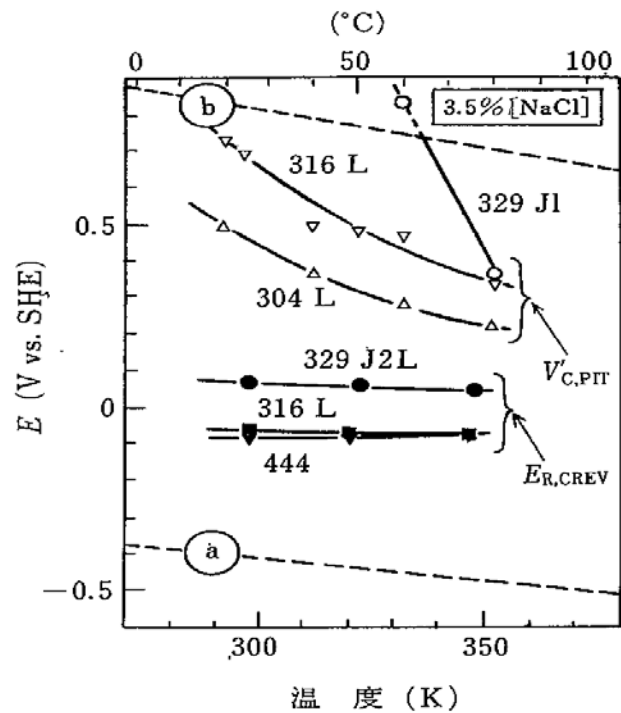


図4-8 3.5%NaCl水溶液における各種ステンレス鋼の孔食臨界電位  $V_{C,PIT}$  およびすきま腐食臨界電位  $E_{R,CREV}$  の温度依存性<sup>(7)</sup>

また、海水相応濃度の 3.5%NaCl 水溶液における各種ステンレス鋼の  $V'_{C,PIT}$  および腐食すきま再不動態化電位  $E_{R,CREV}$  の温度依存性を図 4-8<sup>(7)</sup>に、常温の自然海水環境におけるステンレス鋼の  $V'_{C,PIT}$  および“ふじつぼ”付着試験片の  $E_{R,CREV}$  の合金組成依存性を図 4-9<sup>(7)</sup>に示す。図 4-2 に示したように、中性自然水環境におけるステンレス鋼の  $E_{sp}$  は+0.30vsSHE 程度であるから、316 L 鋼程度以上に Cr および Mo を添加することにより、50°C 程度までの海水環境で耐孔食性を保証できるが、すきま腐食は

常温でも避けられないこと、鋼中[Cr+Mo]量を高めても、孔食に対しては免疫化できるが、すきま腐食に対しては極めて困難であるとしている。

一方で、各種ステンレス鋼のすきま腐食臨界塩化物イオン濃度/温度データとして、**図 4-10**<sup>(11)</sup>が報告されている。この図から、316L 鋼のすきま腐食の可使用限界塩化物イオン濃度/温度は、約 10ppmCl<sup>-</sup>/150°C、200ppmCl<sup>-</sup>/60°C、1,000ppmCl<sup>-</sup>/25°C および 316L 鋼より高 Cr 高 Mo である 329J4L 鋼 (25Cr-3Mo) は 1,000ppmCl<sup>-</sup>/55°C であるとしており、上記図 4-9 のデータとはかなりの相違が認められる。但し、それはバラツキ等ではなく、すきま構造やすきま構成材等々の違いによるものと考えられ、より詳細な調査が必要である。

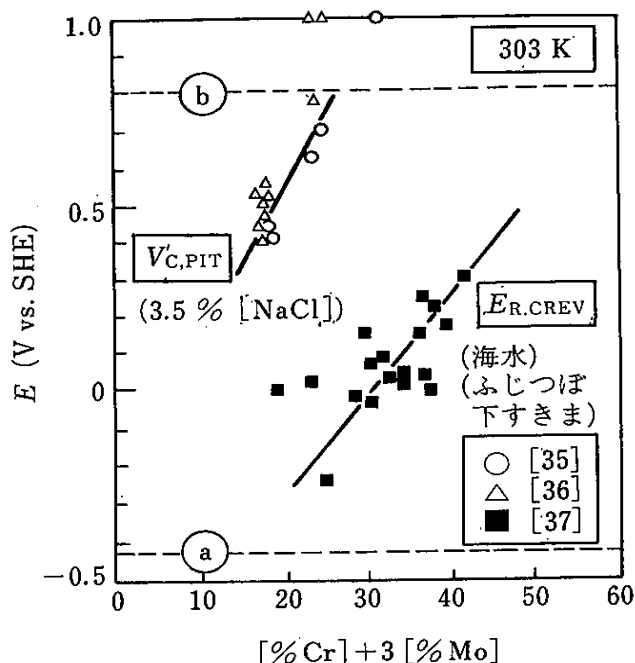


図4-9 常温の自然海水環境におけるステンレス鋼の孔食臨界電位及び“ふじつぼ”付着試験片のすきま腐食臨界電位の合金組成の影響<sup>(7)</sup>

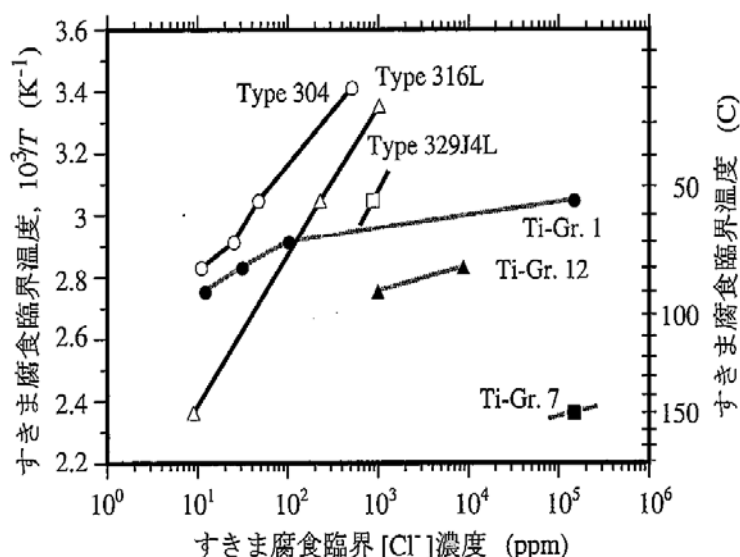


図4-10 各種ステンレス合金のすきま腐食臨界塩化物イオン濃度/温度図<sup>(11)</sup>

#### ⑤ ステンレス鋼の応力腐食割れとその臨界条件

ステンレス鋼は、自然海水や Cl<sup>-</sup>イオンを含む淡水などの中性塩化物水溶液中において、上述の孔食およびすきま腐食以外に、当該ステンレス鋼に引張応力が負荷された状態の場合には応力腐食割れ(stress corrosion cracking、以下、SCC と略す)を起すことが広く知られている。

SCC の進展機構は、APC(Active Pass Corrosion:活性経路腐食)機構、TR (Tarnish Rupture:変色皮膜破壊)機構、および HE (Hydrogen Embrittlement:水素脆化)

機構の三つに分類される<sup>(4)</sup>。

上記中性塩化物水溶液環境系では ACP 型であり、**図 4-11**<sup>(4)</sup>に模式的に示すように、孔食、すきま腐食等の局部腐食を経由して生起するのが通常である。そして、進展しつつある局部腐食においては、食孔あるいは腐食すきま内の液性変化により、活性先端が再不動態化できない条件が維持されつつ、活性先端の大速度活性溶解が継続し、不動態化している外表面のカソード反応がこれを支えるという構図が成立している。引張応力の作用下で、後述するような速度論的必要条件が達成された場合に、局部活性先端から応力腐食き裂が生起し、SCC として進展する。定常進展しつつある応力腐食き裂においては、外表面側からき裂先端に向かってき裂側壁の再不動態化が進行し、常にき裂先端部のみが活性溶解する条件が達成されている<sup>(4)</sup>。

孔食、すきま腐食と同様に、SCC にもその臨界電位が明確に存在する。中性塩化物水溶液環境におけるステンレス鋼の SCC 臨界電位  $V_{c, scc}$  測定例を**図 4-12**<sup>(4)</sup>に示す。304 鋼、316 鋼とも、その  $V_{c, scc}$  は  $Cl^-$  濃度の増加(約  $2 \times 10^2 \sim 2 \times 10^5$  ppm)に従って、約  $+0.1 \sim -0.15$  V vs SHE まで直線的に低下するようである。

また、80°C の NaCl 水溶液環境における 316 鋼のすきま付き DCB 試験片の定電位保持試験を実施し、腐食すきまが発生し、そのまま進展を続けるか(●印)、進展しつつある腐食すきまから SCC き裂が発生/進展するか(×印)、あるいは不動態を保持し続けるか(○印)を調べた結果が**図 4-13**<sup>(6)</sup>に示されている。図中[1]で示した実線は、同一環境の応力無負荷試験片に対して求められた腐食すきま再不動態化電位  $E_{R, CREV}$  であり、これから、すきま試験片における応力腐食き裂発生臨界電位  $V_{c, scc}$  は、当該  $E_{R, CREV}$  と一致することがわかる。すなわち、自由表面試験片あるいはすきま試験片における  $V_{c, scc}$  は、 $E_{R, PIT}$  あるいは  $E_{R, CREV}$  とそれぞれ一致することがわかる。

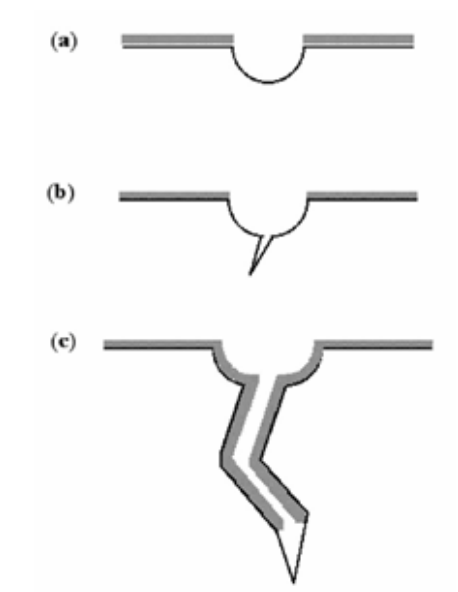


図4-11 活性経路腐食(APC)機構による応力腐食き裂進展<sup>(4)</sup>

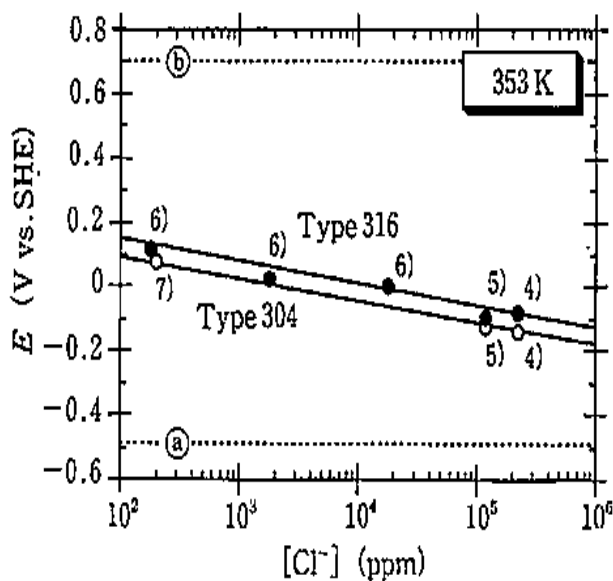


図4-12 中性塩化物水溶液中での316鋼の  $V_{c, scc}$ 測定例<sup>(4)</sup>

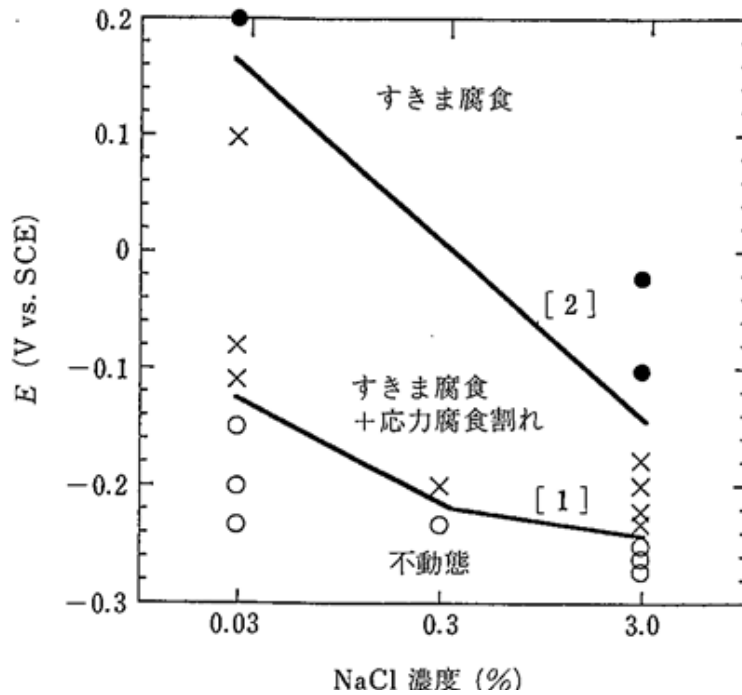


図4-13 80°Cの中性[NaCl]環境における316鋼のSCCき裂発生の有無(×/○)と腐食すきま再不動態化電位との関係<sup>(6)</sup>

食孔あるいは腐食すきま進展速度は電位依存性を示すが、SCC進展速度は電位に依存しないから、**図4-14**<sup>(6)</sup>に模式的に示すように、応力腐食き裂進展速度 $\dot{a}$ が食孔あるいは腐食すきま進展速度を上回る条件範囲では局部腐食形態はSCCを伴い、下回る条件範囲内では孔食のみあるいはすきま腐食のみとなる。

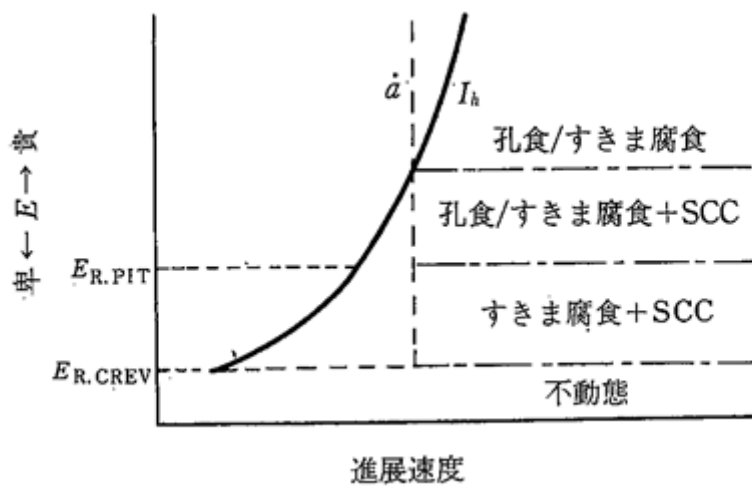


図4-14 局部腐食/応力腐食割れ領域と進展速度との対応(模式図)<sup>(6)</sup>

310S (25Cr-20Ni) 鋼/80°C、[MgCl<sub>2</sub>]水溶液系の孔食、すきま腐食、応力腐食割れ領域図を図 4-15<sup>(6)</sup> (a) に示す。図のそれぞれの電位-[MgCl<sub>2</sub>]濃度の組合せにおける局部腐食溶解(進展)速度  $I_h$  を求め、これを縦軸に目盛ったものが同図<sup>(6)</sup> (b) である。 $I_{h, PIT}$ 、 $I_{h, CREV}$  はそれぞれ  $E_{R, PIT}$  あるいは  $E_{R, CREV}$  直上の電位における  $I_h$  の値を示す。また、斜線ハッチで示した水平線は発生したき裂の進展速度であって、食孔経由型あるいは腐食すきま経由型のいずれでも等しく、かつ電位、濃度に依存しないことが分る。すなわち本図から図 4-15 が現実に実現していることが理解される。

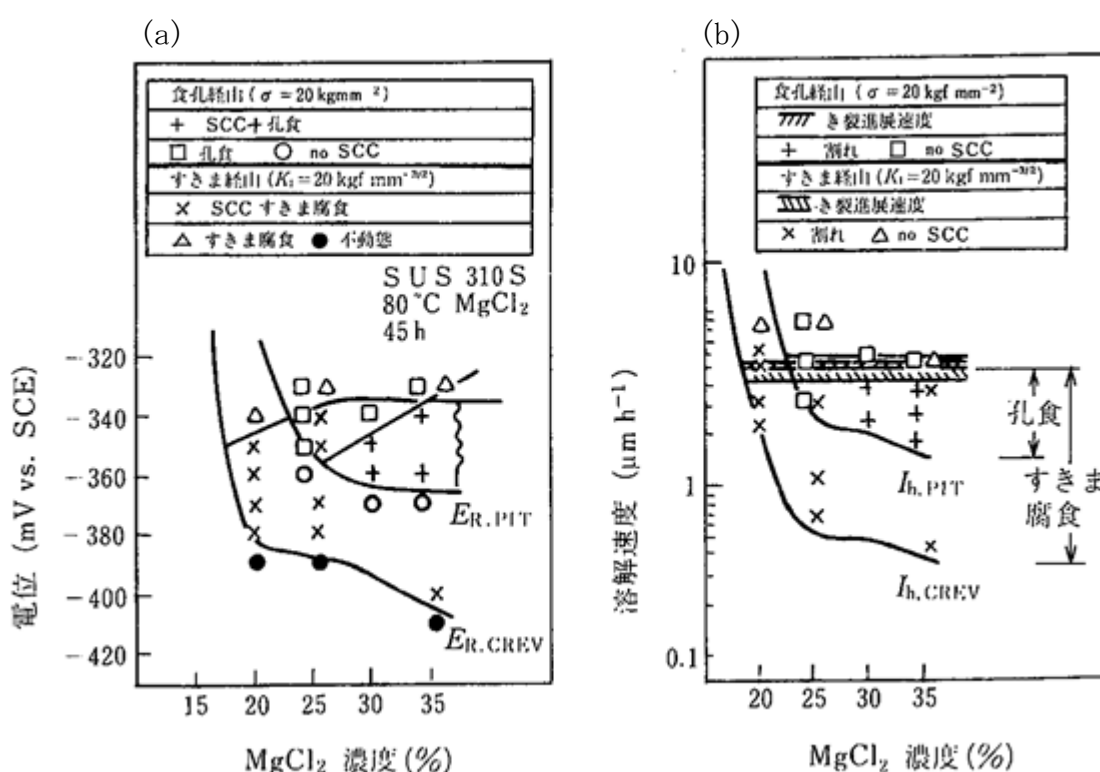


図4-15 電位-[MgCl<sub>2</sub>]濃度(a)および溶解速度-[MgCl<sub>2</sub>]濃度(b)における310S鋼の局部腐食、応力腐食割れ領域図<sup>(6)</sup>

#### b. 孔食等による吸着塔容器の破損

ステンレス鋼の塩化物応力腐食き裂進展速度はき裂先端の応力拡大係数、電極電位、あるいは塩化物イオン濃度には強く依存せず、もっぱら温度に強く依存することが知られている。各研究者らが求めた応力腐食き裂進展速度  $da/dt$  (m/s) の温度依存性データをまとめたものが図 4-16<sup>(4)</sup> に示されており、図中 1~4 で表示した塩化物応力腐食き裂進展速度は強い温度依存性を示し、100°C付近で  $10^{-9}$ m/s のオーダーにあつて、ほぼ  $100\text{A/m}^2$ 、すなわち約  $100\text{mm/yr}$  に相当している。

また、塩化物を含む水環境での 304 鋼について、代表的腐食形態ごとの腐食速度が 図 4-17<sup>(8)</sup> のように示されている。局部腐食の進展速度は、化学装置用 A 級耐食材の基準としての 0.1 mm/yr より 1 桁以上大きいことが分る。

この図では、すきま腐食の進展速度は約 1~10 mm/yr、孔食の進展速度は約 10~10<sup>3</sup>mm/yr 以上、応力腐食割れの進展速度は約 3~10<sup>3</sup>mm/yr 程度であり、上記した図 4-14、図 4-15 に示したように、環境条件次第(酸化力の強い環境中で、Esp が貴側に上昇し、孔食のみが発生・進展する高電位領域)で、応力腐食き裂進展速度より孔食進展速度の方が大きい領域が存在する。

従って、環境条件として、酸化力が強く、温度が高い塩化物環境において、すきま腐食、孔食およびそれら腐食形態を経由した応力腐食割れの何れによっても、吸着塔容器の破損は起こり得る可能性がある。その場合の破損形態は、それらの腐食によって食孔やき裂が進展して行き、容器外面に小さな貫通孔あるいは貫通き裂が顔を出し、その時点では極めて少量のリークが生じることが考えられ、時間の経過とともに貫通孔・貫通き裂が増加および拡大してリーク量が増加して行くものと思われる。

従って、例えば、吸着塔容器と遮蔽容器との間に流入させる冷却空気の出口での放射線々量率や水蒸気量の急激な変化を経時的に計測することによって、損傷発生時点を検知できる可能性も考えられると共に、監視項目の 1 つになるかもしれない。

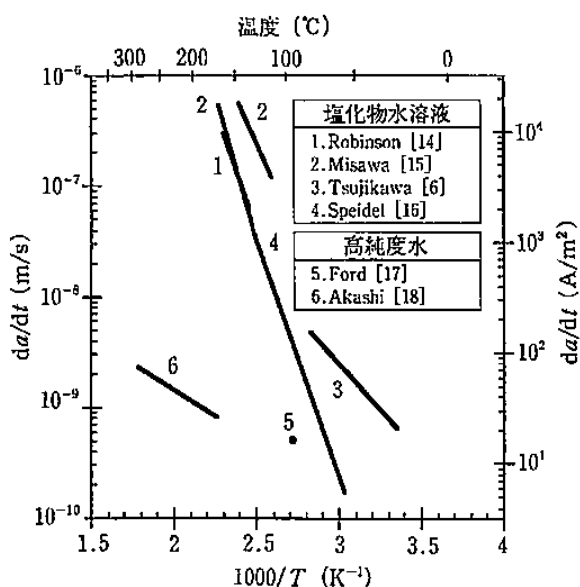


図4-16 応力腐食き裂進展速度の温度依存性データ<sup>(4)</sup>

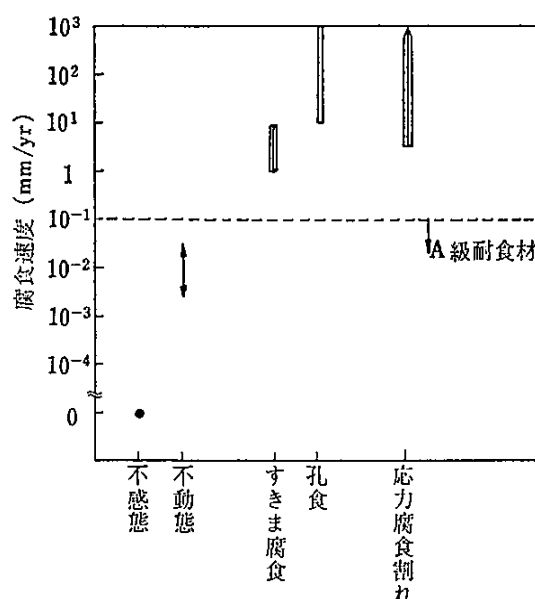


図4-17 各種腐食形態における腐食速度(304ステンレス鋼)<sup>(8)</sup>

c. 溶接部における腐食の発生及び進展

オーステナイト系ステンレス鋼はフェライト系やマルテンサイト系ステンレス鋼に比べて溶接性に優れることは広く知られている。ただし、溶接後の溶着金属部の組織が100%オーステナイトでは高温割れあるいは凝固割れと称する溶接割れが発生することがあり、その防止策として溶着金属部に約5~10%の $\delta$ -フェライトをその組織に残留させている。また、Type304や316鋼では、溶接熱影響部(HAZ)の結晶粒界にCr炭化物の析出に基づくCr欠乏層が生成するいわゆる鋭敏化が生じ、耐粒界腐食性や耐孔食性が劣化するが、これらに対しても、低炭素( $\leq 0.030\%$ C)ステンレス鋼(Type304L、316Lなど)や安定化ステンレス鋼(Type321や347鋼)の使用により防止されることも古くから知られている。

しかしながら、表4-1<sup>(12)</sup>や図4-18<sup>(13)</sup>に示すように、溶接部に生成する $\delta$ -フェライトは耐孔食性を劣化させ、その原因がフェライトフォーマー元素であるCr、Moなどが $\delta$ -フェライト中に偏析し、その一方で、オーステナイト中ではそれら元素濃度が減少、すなわち耐食性が低下し、孔食の起点となるためであることが知られている。

以上のように、溶接部では耐食性向上元素の偏析等に起因して耐孔食性が劣化するが、それら以上に重大な影響を及ぼす事象として、応力腐食割れの応力要因となる溶接熱影響部に形成される引張残留応力の出現がある。図4-19<sup>(14)</sup>にSUS304鋼の冷間加工材を溶接した場合の残留応力分布を示すが、図より、溶接線方向応力に冷間加工度に応じて約40~60kgf/mm<sup>2</sup>もの非常に大きな引張残留応力が形成されており、冷間加工を施していない場合でも、約22~23kgf/mm<sup>2</sup>の耐力を少し超える程度の引張応力が残留することが分る。

表4-1 18Cr-10Ni-2.5Mo-0.16N鋼の耐孔食性に及ぼす $\delta$ -フェライトの影響<sup>(12)</sup>

Heat Treatment	Volume % Ferrite	Pitting Potential <sup>a</sup> (Volts vs. S.C.E.)	Corrosion Rates <sup>b</sup> (mdd)
1120°C/1 h	0	0.30	7.6
1345°C/0.5 h	0.55	0.19	154.0
1345°C/0.5 h + 1120°C/6 h	0	0.29	4.0

<sup>a</sup>1 M NaCl solution purged with nitrogen at 45°C.  
<sup>b</sup>10%FeCl<sub>3</sub> · 6H<sub>2</sub>O + 0.1N HCl at 25°C.



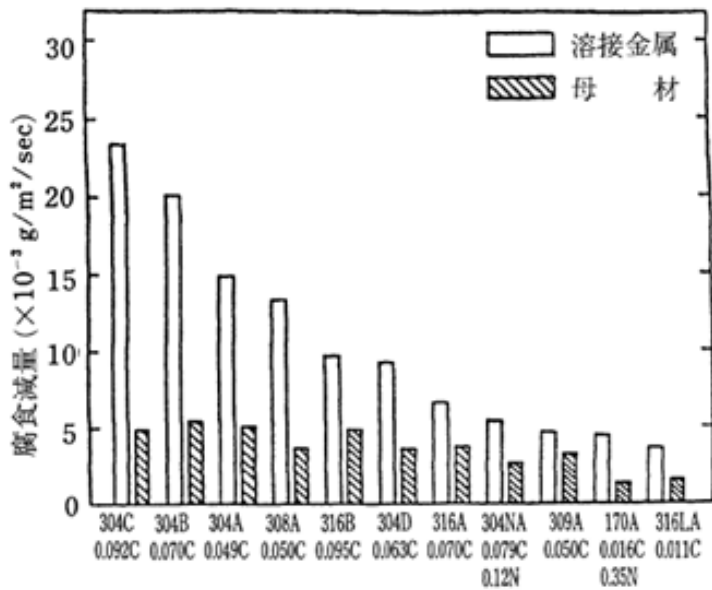


図4-18 各種Y系鋼溶接金属及び母材部の耐孔食性 (試験溶液:80°C/5%FeCl<sub>3</sub>+1/20N-HCl、試験時間:24時間) <sup>(13)</sup>

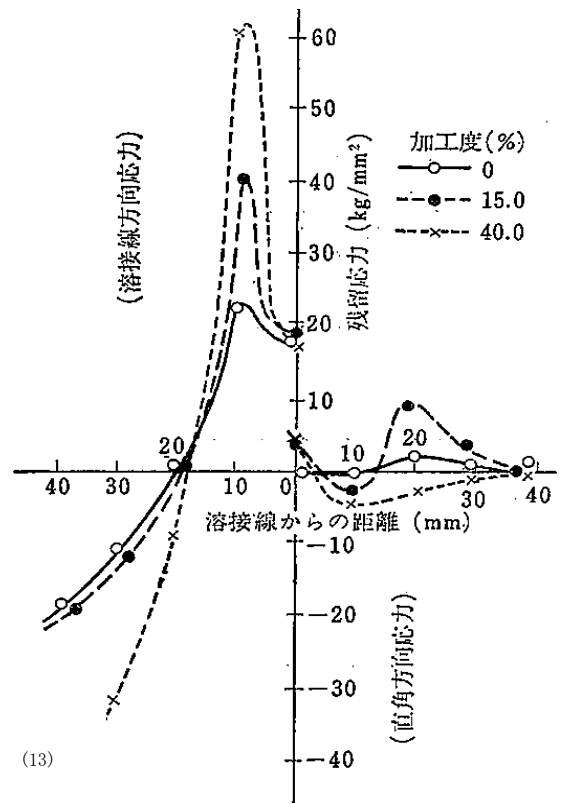


図4-19 SUS304鋼板(6tmm)の冷間加工材を溶接した場合の残留応力分布 <sup>(14)</sup>

APC 機構による応力腐食き裂発生下限界応力は概して低く、304 ステンレス鋼母材部の塩化物応力腐食き裂発生下限界応力は、**図 4-20**<sup>(15)</sup>に示すように、100MPa 程度、また、304 ステンレス鋼の溶接ままでは、**表 4-2**<sup>(16)</sup>に示すように、僅か 5.5 kgf/mm<sup>2</sup> 程度であって、いずれのデータからも材料の耐力(～21kgf/mm<sup>2</sup>)に比べてきわめて低い。

Type316L 鋼製吸着塔容器において、耐力値を超えるような高い引張応力が存在する箇所は溶接塔胴体と鏡との周溶接部などであろうが、本吸着塔では、応力腐食割れ発生に必要な、“材料、環境、および引張応力の3要因”のうち、応力腐食き裂発生のための力学的条件を常に満足していると考えなければならない<sup>(6)</sup>。従って、吸着塔容器内環境条件次第によって、**図 4-1**に示したように、局部腐食臨界電位 **V<sub>c</sub>** が自然腐食電位 **E<sub>sp</sub>** よりも貴になるような材料の選択あるいは環境の制御を図る必要がある。

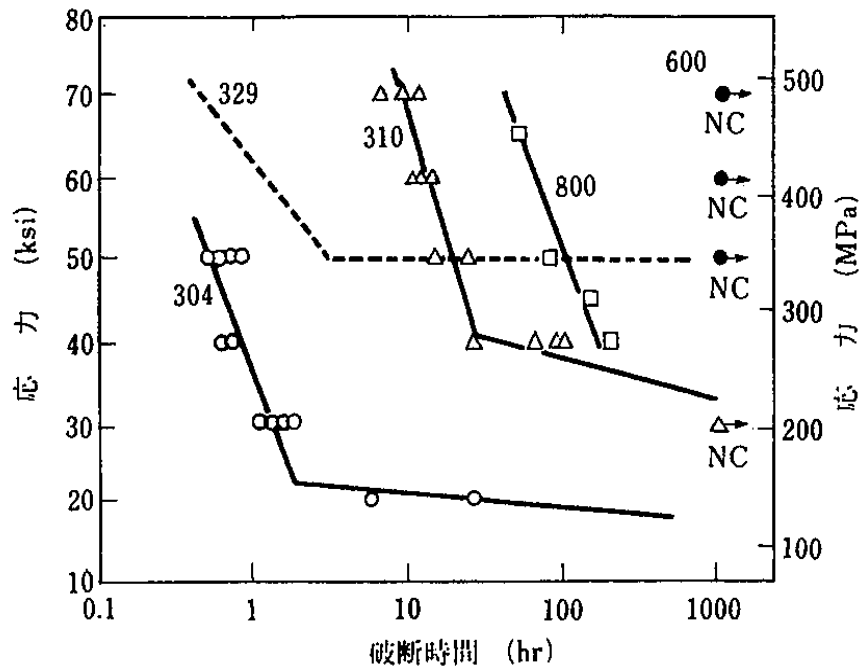


図4-20 沸騰45% $MgCl_2$ 溶液(145°C)中における応力腐食割れ感受性<sup>(15)</sup>

表4-2 試験片の種類と応力腐食割れ(沸騰42% $MgCl_2$ )限界応力<sup>(16)</sup>

	ショット径	ショット 圧力	アーク 高さ	硬さ	残留 応力	$\sigma_{th}^*SCC$
A	300	6.5	0.2	370	- 37	19.6
B		3.5	0.14	360	- 51	18.3
C	400	5.5	0.17	320	- 46	22.2
D		6.5	0.18	330	- 38	19.5
E		3.5	0.17	340	- 47	19.3
F	500	5.5	0.23	355	- 60	19.4
G	600	5.5	0.25	400	- 50	19.3
H	as welded		-	190	+ 35	5.5
I	PWHT 600°C		-	180	+ 3.3	7.5
J	PWHT 900°C		-	160	+ 8	11.0
K	PWHT 1,050°C		-	155	+ 4	13.0
L	400	5.5	0.16	340	- 43	21.5
	グラインダ後ピーニング					
	$\mu m^\#$	kgf/cm <sup>2</sup>	mm	$H_v$	kgf/mm <sup>2</sup>	kgf/mm <sup>2</sup>

(注) PWHT : 溶接後の熱処理, \* 応力腐食割れ限界応力

d. & e. 水分の放射性分解及び吸着塔内容物共存中の腐食等への影響

福島原発事故の滞留水処理で使用済みとなった吸着塔は塩分腐食を防ぐために、内部を淡水で洗浄し保管されているが、微量の塩分が残留している可能性があり、吸着塔構造材料である SUS316L ステンレス鋼等の腐食が懸念されるとのことから、原子力機構殿では洗浄効果の検証試験<sup>(1)</sup>やγ線照射下における塩分を含むゼオライト中のステンレス鋼の腐食挙動<sup>(2), (17)</sup>の試験等が進められている。

図 4-21<sup>(1)</sup>および図 4-22<sup>(1)</sup>は、KURION 社製 Herschelite 吸着材を充填した吸着塔に 1, 650ppm の NaCl 水 (1, 000ppmCl<sup>-</sup>相当) で満水にした後、体積流量 4.5~9m<sup>3</sup>/h で 3m<sup>3</sup> の純水を給水して洗浄し、排水からサンプル水を採取し、Cl<sup>-</sup>量を分析した結果および 9.0m<sup>3</sup>/h で洗浄後、3~72 時間放置した後に再洗浄した際の吸着塔排水中 Cl<sup>-</sup>濃度測定を行った結果を示したものである。

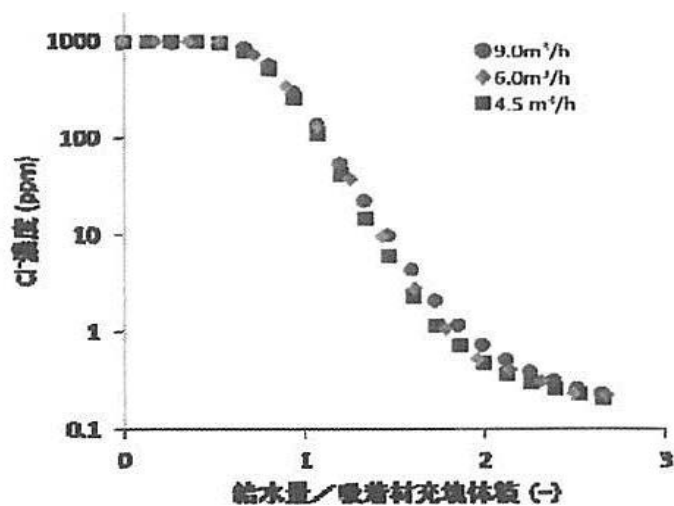


図4-21 吸着塔排水中Cl<sup>-</sup>濃度<sup>(1)</sup>

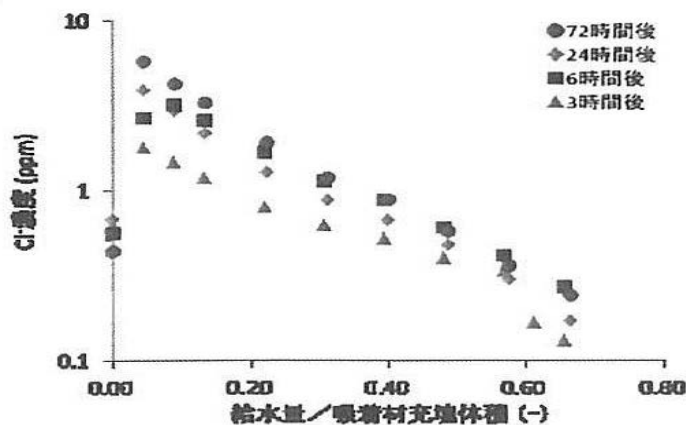


図4-22 吸着塔排水中Cl<sup>-</sup>濃度<sup>(1)</sup>

図 4-21 から、実機流量条件を含む本試験範囲において、Cl<sup>-</sup>濃度の減少傾向はほぼ同様であり、吸着材充填体積の約2倍の通水量で1,000ppmから0.5ppm以下まで低下、すなわち1/2,000まで低下することが分かったとのことである。

また、図 4-22 から、9.0m<sup>3</sup>/hで洗浄後、3~72時間放置後には放置した時間により再洗浄によるCl<sup>-</sup>濃度の増加(0.5ppm以下であったものが約2~7ppmに増加)が見られたが、それは吸着塔内に洗浄効果が小さい部分があるためとしている。

以上のことから、淡水で洗浄した後の使用済み吸着塔の底部には、少なくともCl<sup>-</sup>濃度が10ppm以上の希釈海水が溜まっていることや自己発熱によりその残水の濃縮、すなわちCl<sup>-</sup>濃度の上昇が懸念される。

また、今回調査の対象機器である水処理二次廃棄物保管容器の一つであるセシウム吸着塔にはSUS316L鋼が用いられているが、初期の滞留水には海水が含まれていたことから塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)による局部腐食が懸念され、そしてγ線発熱による温度の上昇と放射線による腐食加速の可能性があることから、γ線照射下における希釈人工海水を含んだゼオライト中のSUS316L鋼の腐食挙動(γ線照射下定常自然浸漬電位( $E_{sp}$ )及び局部腐食発生電位(孔食発生電位  $V_{c100}$ ))が検討されている<sup>(16)</sup>。

その結果、**図 4-23**<sup>(17)</sup>に示すように、γ線照射下においては線量率の増加に従い、定常自然浸漬電位  $E_{sp}$ (本報告では約500ks後の自然浸漬電位を  $E_{sp}$ としている)が上昇し、局部腐食発生リスクが高まるが、ゼオライト共存系ではγ線照射による  $E_{sp}$  の上昇が抑制され、且つ、Herschelite 共存系の方がMordenite 共存系より抑制作用が大きいことが認められたとし、その現象は、γ線照射線量率の増加により水の放射線分解が進み、過酸化水素(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)等の酸化剤濃度が増加するためと考えられるが、高線量率(5kGy/h)ではこの電位の貴化が止まる傾向があったとしている。

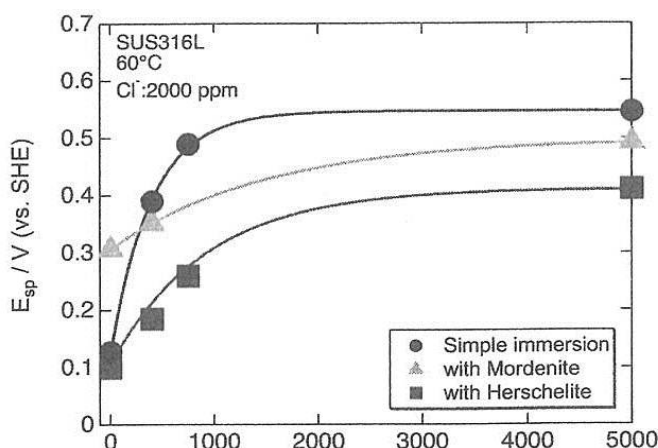


図4-23 定常自然浸漬電位( $E_{sp}$ )に及ぼすγ線量率とゼオライト共存の影響<sup>(17)</sup>

また、60°C大気飽和希釈人工海水中 ( $\text{Cl}^-$ :2,000ppm)における Herschelite 共存系の SUS316L 鋼のアノード分極曲線の  $\gamma$  線照射の影響について、**図 4-24**<sup>(17)</sup>に示すように、非照射と 400Gy/h 照射下のアノード分極曲線はほぼ一致している、すなわち、孔食発生電位  $V_{c100}$  は  $\gamma$  線照射の影響を受けにくいことを示しているとしている。ただし、5kGy/h 照射下のアノード分極曲線は腐食電位が孔食発生電位  $V_{c100}$  を超えているため、不動態域が現れないで、急激な電流の立ち上がり(すなわち、腐食電位で孔食が発生している)が認められたとのことである。

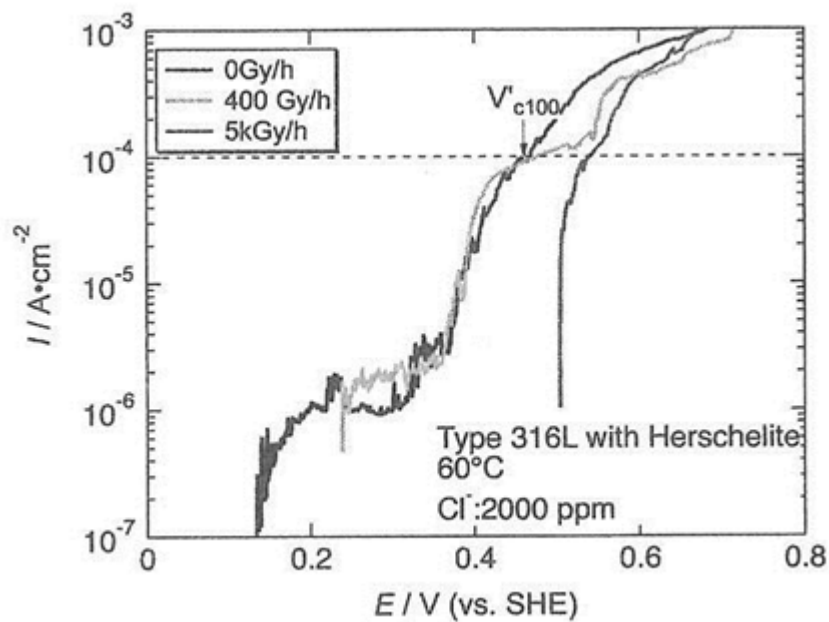


図4-24 Herschelite共存系60°C大気飽和希釈人工海水中 ( $\text{Cl}^-$  : 2kppm)におけるSUS316L鋼のアノード分極曲線の  $\gamma$  線照射の影響<sup>(17)</sup>

さらに、同環境条件におけるゼオライト共存系の SUS316L 鋼のアノード分極曲線の測定結果(図 4-25<sup>(17)</sup>)から、孔食発生にはバラツキが生じることから、単純浸漬とゼオライト共存との孔食発生電位  $V_{c100}$  には大きな違いは無く、ゼオライト共存の影響は小さいと考えられること、そして、上記 2,000ppm、20kppm に加え、6,000ppm Cl<sup>-</sup> イオン濃度の 60°C、ゼオライト共存系人工海水中での孔食発生電位  $V_{c100}$  測定結果を 図 4-26<sup>(17)</sup> に示すように、単純浸漬ならびにゼオライト共存系ともに Cl<sup>-</sup> イオン濃度の増加に伴い孔食発生電位  $V_{c100}$  は低下した。

以上の結果を、著者らは 60°C 大気飽和希釈人工海水中における Herschelite 共存系 SUS316L 鋼の局部腐食発生線図として 図 4-27<sup>(17)</sup> のように示しており、“まとめ”として、 $\gamma$  線照射下における塩分を含むゼオライト中の SUS316L ステンレス鋼は、 $\gamma$  線照射線量率の増加に従って、定常自然浸漬電位  $E_{sp}$  が貴化し、低い Cl<sup>-</sup> イオン濃度においても局部腐食発生リスクが高まるが、Herschelite 共存により、 $E_{sp}$  の貴化が抑制され局部腐食発生リスクを低減することが分ると説明している。

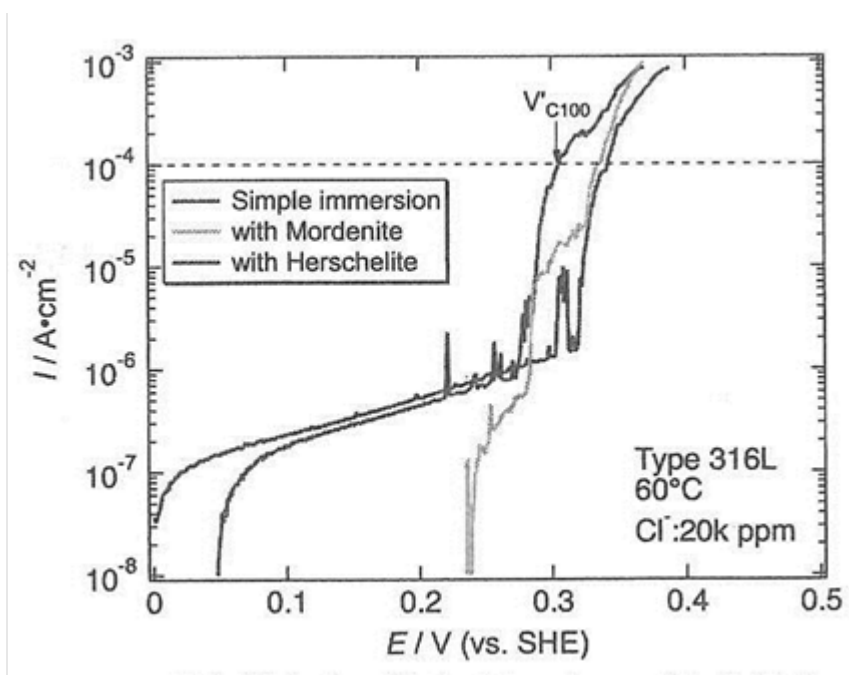


図4-25 大気飽和人工海水(Cl<sup>-</sup>:20kppm)におけるSUS316L鋼のアノード分極曲線に及ぼすゼオライト共存の影響<sup>(17)</sup>

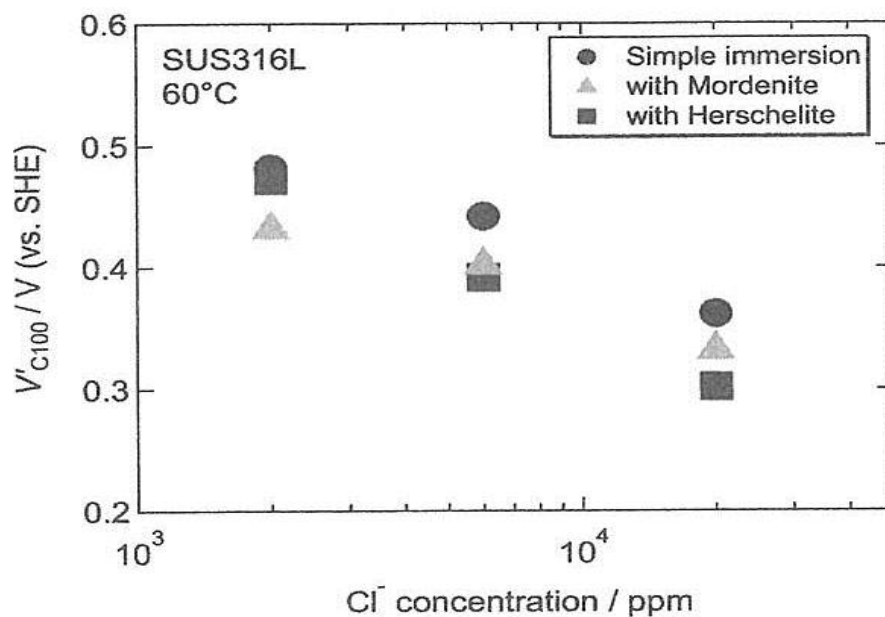


図4-26 ゼオライト共存系におけるSUS316L鋼の局部腐食発生電位( $V'_{C100}$ )と塩素イオン濃度の関係<sup>(17)</sup>

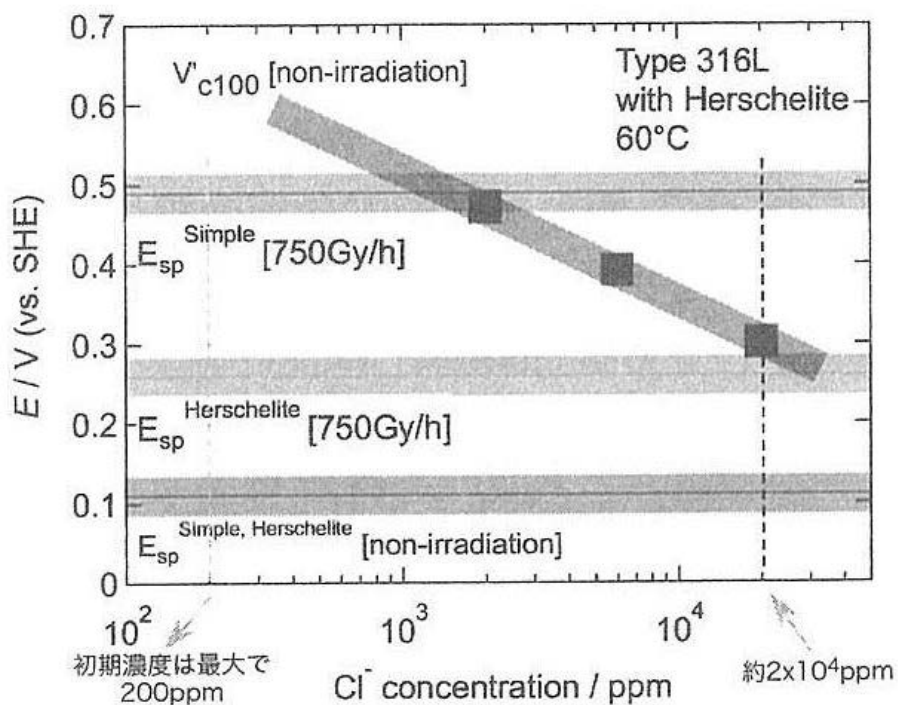


図4-27 60°C大気飽和希釈人工海水中におけるHershelite共存系SUS316L鋼の局部腐食発生線図<sup>(17)</sup>

上述したように、 $\gamma$ 線照射線量率の増加に従って  $E_{sp}$  が貴化するのは、水の放射線分解により過酸化水素が増加するためであると推察しているが、軽水炉においても、放射線照射により水が分解し、最終的に酸素や過酸化水素などの金属を腐食させる酸化種が生成することが以前より知られており、また、今回の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<sup>(17)</sup>においても、室温のスラッジを含む海水中における炭素鋼の腐食速度の評価試験の一環として、

図 4-28<sup>(18)</sup>に示すように、照射線量 0.1~1.0kGy/h の線量率下約 2 週間の照射により、~約 5ppm の過酸化水素 ( $H_2O_2$ ) が検出されたとの報告がなされている。

また、これも上記したように、ゼオライト共存系では  $\gamma$ 線照射による  $E_{sp}$  の貴化が抑制されるのは、[文献]Y.Kumagai : Radiation Physics and Chemistry, 97 (2014) p. 223-232<sup>(19)</sup>を引用し、ゼオライトの共存により、水の放射線分解で生成する過酸化水素 ( $H_2O_2$ ) の分解が促進するため  $H_2O_2$  濃度が低下して(図 4-29<sup>(19)</sup>参照)、 $E_{sp}$  が卑化したものと考えられるとのことである。

加藤ら<sup>(16)</sup>は、以上のことから、「廃ゼオライト吸着塔は使用後に塩分腐食を防ぐために、内部を淡水で洗浄し保管されているが、自己発熱により吸着塔の残水濃縮による  $Cl^-$ 濃度の上昇が懸念される。吸着塔内の環境は不明な点が多いが、長期保管にあたっては、放射線量、温度、残水量、 $Cl^-$ イオン濃度等の塔内環境の推定を行うことが必要と思われる。」と述べている。

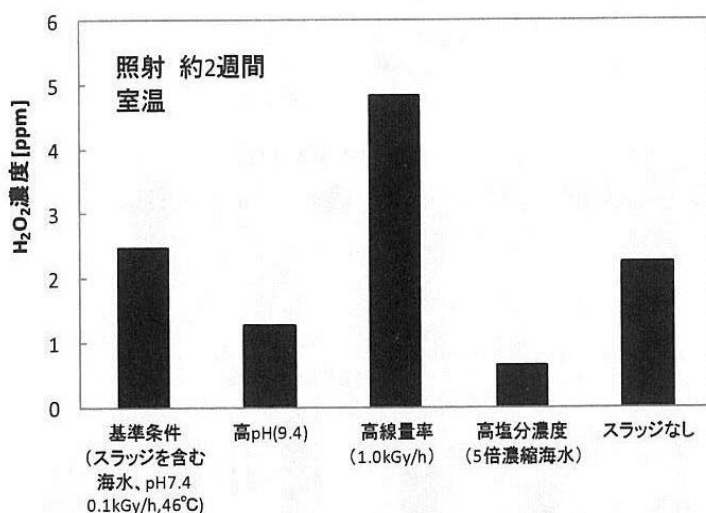


図4-28 各条件における $H_2O_2$ 濃度の比較<sup>(18)</sup>

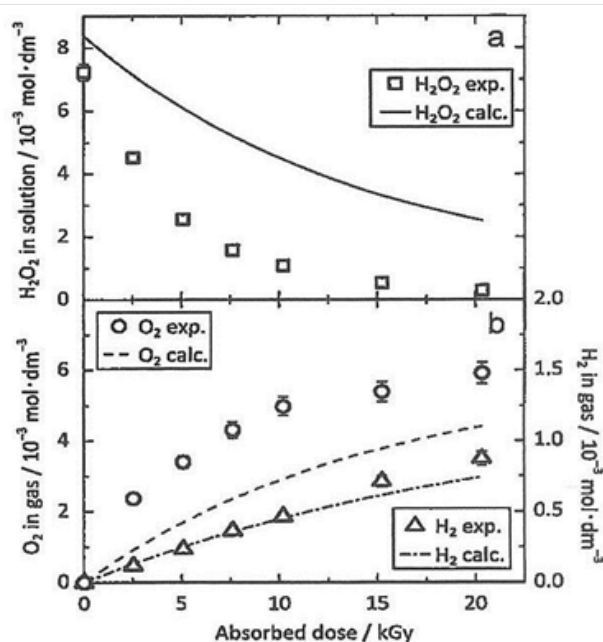


図4-29 Measured concentrations of(a)  $H_2O_2$  in the supernatants and(b)  $O_2$  in the headspace gases of the mixtures of 6.2g NaY and 14cm<sup>3</sup> aqueous  $H_2O_2$  solution after irradiation by  $\gamma$ -rays Curves show the calculated results considering no effect of NaY.<sup>(19)</sup>



f. コンクリート接触面の腐食の発生および進展

健全なコンクリートと炭素鋼が接触し、その界面に水が存在する場合、水のpHはアルカリとなることが推察されるためボックスカルバートに明瞭な腐食は生じないと思われる。ただし、塩化物が環境中に存在する場合は、**図4-30**<sup>(20)</sup>の通り腐食が発生する可能性がある。コンクリートが中性化により劣化した場合は腐食が発生する可能性は更に高くなるものと思われる。

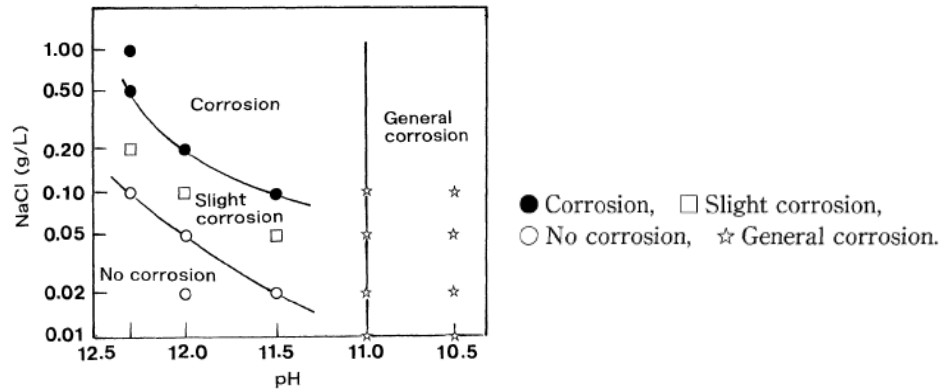


図4-30 炭素鋼の腐食に及ぼすpHと塩化物イオンの濃縮の関係<sup>(20)</sup>

モバイル型ストロンチウム除去装置、第2モバイル型ストロンチウム除去装置のフィルタならびに吸着塔はSUS316L製であり、これがボックスカルバートに収容される。アルカリ性の環境下でステンレス鋼は塩化物による腐食に強いとされている。

SUS304は、**図4-31**<sup>(20)</sup>の通り(本結果は、試験後の試験片にマルチクレビス治具凸部に接する部分に複数以上の明確な腐食=すきま腐食を示した場合を“corrosion”、1~2個の浅いすきま腐食を生じた場合を“Slight corrosion”、腐食を生じなかった場合を“No corrosion”と区分している)、pH12.5では15%NaClでも腐食は発生せず、pH11.5では10%NaCl以下では腐食が発生せず、15%であっても軽微な腐食であったが、pH7では3%NaClでもすきま腐食が発生したと報告している。

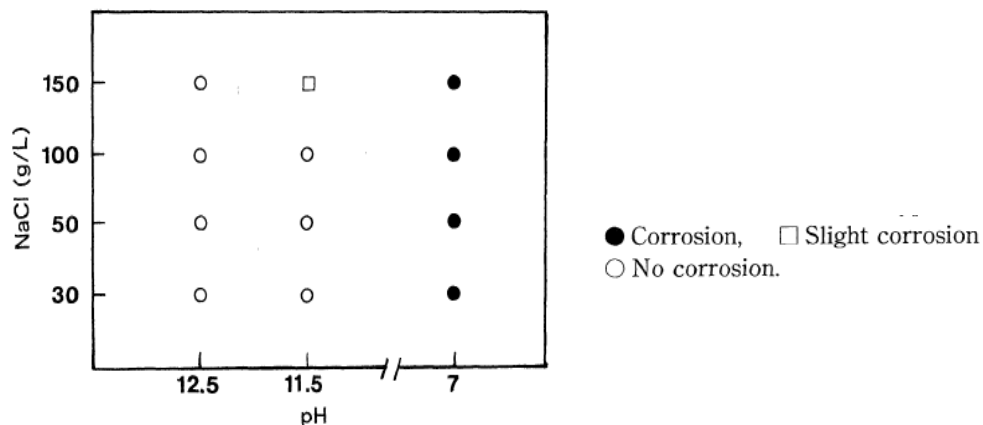


図4-31 SUS304の腐食に及ぼすpHと塩化物イオンの濃縮の関係<sup>(20)</sup>

従って、コンクリートの中性化が生じるとすきま腐食や孔食等の局部腐食を生じる危険性がある。以上はボックスカルバート内に水が入り込んだ場合であるが、実際にはそのような検討はされていないため生じるのか否か不明である。

ボックスカルバート内に水が入り込み、中性化と共に塩化物イオンが濃縮した状態が起こり得るとしても、中性の塩化物水溶液中におけるステンレス鋼に起こる可能性のある腐食は、すきま腐食や孔食等の局部腐食であって、それについては本節冒頭のa.項で詳述に検討した通りであり、その結果や上記結果からも、ステンレス鋼については、特に、コンクリートとの接触によって生じ得る腐食は重要度が低いと考えられる。

#### 4.4.2 既往の研究成果・知見の整理結果のまとめ

ステンレス鋼の腐食に関する既往の研究成果・知見について、使用済みの吸着塔の内部及び外部の考慮すべき事項である環境条件が、単独あるいは相互作用的に吸着塔構成材料のSUS316Lステンレス鋼の腐食に及ぼす影響を調査・整理した。その結果は上述の通りである。結果の要約を以下に箇条書きにする(4.1～4.3節の調査結果も含む)。

- ① 使用済みの吸着塔の内部には、汚染水処理によってセシウム等の核種を多量に吸着したゼオライトと、塔内塩分洗浄後でも 200ppm 程度の Cl<sup>-</sup>イオンが残存した中性近傍の水溶液とが共存しており、かつ、放射線発熱による温度上昇が生じることから、現状では、ステンレス鋼が局部腐食を起す可能性を完全に否定しきれない。
- ② 吸着塔の外部は大気腐食環境であり、Cl<sup>-</sup>イオン濃度の相違、ゼオライトとの接触がないこと、線量率及び温度も異なることが考えられるが、本質的には、塩化物を含む水膜下での局部腐食が問題となる。この問題は使用済み燃料の乾式貯蔵におけるステンレス鋼製容器であるキャニスターの腐食問題として、別途、検討が行われている。
- ③ 吸着塔の主用構成材料である SUS316L ステンレス鋼は、沸騰以下の塩化物を含まない中性近辺の水溶液中では不動態状態に在り、実質的には腐食を起さないが、塩化物濃度、酸化剤濃度、及び温度の兼ね合いによっては、孔食、すきま腐食、及び APC 型応力腐食割れのいわゆる、局部腐食が生じ得る。
- ④ それぞれの局部腐食の生起に対する臨界電位が存在し、局部腐食の発生していない不動態状態での浸漬自然電位  $E_{sp}$  がそれら局部腐食発生臨界電位  $V_c$  を超える

か否かで、それら腐食の発生の有無が決定される。

- ⑤ 一般的な環境では、酸化剤としては、大気中の酸素ガスが水溶液に溶解したいわゆる溶存酸素 ( $O_2$ ) が主なものであるが、本吸着塔内環境では溶存酸素に加えて、水の放射線分解による過酸化水素 ( $H_2O_2$ ) が生成し、酸化力が強まる。
- ⑥ しかも、線量率の増加に伴い  $H_2O_2$  濃度も上昇し、それに伴って  $E_{sp}$  の貴化も大きくなり  $V_c$  を超えて局部腐食発生の可能性が高まる。しかしながら、その  $E_{sp}$  の貴化はゼオライトの共存により抑制される。

以上のことから、廃ゼオライト吸着塔等の長期保管にあたっては、放射線量率、温度、残水量、 $Cl^-$  イオン濃度等の塔内環境の推定を行うことが必要<sup>(12)</sup>であり、一方で、それら環境因子の組合せ条件下での SUS316L ステンレス鋼の電気化学的試験＝定常自然浸漬電位  $E_{sp}$  と孔食、すきま腐食、塩化物応力腐食割れの局部腐食臨界電位(それぞれ、 $V_c$ , PIT,  $E_R$ , CREV,  $V_c$ , SCC) の測定及び現実的に可能な範囲の長期浸漬試験を行い、それぞれの局部腐食に対する臨界放射線量率、臨界温度及び臨界  $Cl^-$  イオン濃度を求める必要がある。

そして、監視すべきポイント及び講ずるべき措置としては、少なくともそれら局部腐食の発生の有無を決定する 3 種類の数値、塩化物イオン濃度、放射線量率、過酸化水素濃度、吸着塔内面温度の測定(推定)及びそれらの低下方法等が考えられる。

#### 4.4.3 腐食試験の計画立案

廃ゼオライト吸着塔等の主な構成材料である SUS316L ステンレス鋼(母材部及び溶接部)の孔食、すきま腐食及び塩化物応力腐食割れに及ぼす放射線量率、温度、 $Cl^-$  イオン濃度およびゼオライト共存の影響を検討するための試験計画(案)を提示する。

- 1) 目的 : SUS316L ステンレス鋼(母材部及び溶接部)の孔食、すきま腐食及び応力腐食割れに及ぼす放射線量率、過酸化水素濃度\*1、温度、 $Cl^-$  イオン濃度およびゼオライト共存の影響を検討する。

\*1: 水の放射線分解によって生成する過酸化水素を直接試験溶液に添加することによって、放射線照射の代替試験方法とする。

- 2) 供試材料 : SUS316L ステンレス鋼(母材及び溶接材)、ゼオライト。

3) 試験片：平板試験片、すきま腐食試験片、single & double U-bend 試験片(隙間の有無)。

4) 試験条件：

① 予備試験；過酸化水素の分解速度測定試験；30, 60°C、 $2 \times 10^5 \text{ ppmCl}^-$  (人工海水)、ゼオライトの有無、分析用液サンプリング間隔 0.5、1、2、5、10h。

②  $E_{sp}$  の測定；大気開放、30, 60°C、 $2 \times 10^5 \text{ ppmCl}^-$  (人工海水)、ゼオライトの有無、放射線の有無(放射線ありの場合は線量率 3 段階)、ゼオライトの有無、 $\text{H}_2\text{O}_2$  濃度；0~20ppm(仮)、浸漬時間 500h(但し、①の予備試験で決定する所定時間経過毎に溶液を更新する)。

③  $V_c$ ,  $PIT$ 、 $E_R$ ,  $CREV$ 、 $V_c$ ,  $scc$  の測定；大気開放、30~80°C、 $10 \sim 2 \times 10^5 \text{ ppmCl}^-$  (希釈人工海水)、ゼオライトの有無、放射線の有無(放射線ありの場合は線量率 3 段階)、過酸化水素；0~20ppm(仮)。

④ 孔食試験；③と同様の条件。但し、試験時間は 720h(仮)とする。

⑤ すきま腐食試験；③と同様の条件。但し、試験時間は 720h(仮)とする。

⑥ 応力腐食割れ試験；③と同様の条件。但し、試験時間は 2, 160h(仮)とする。

#### 4.4. の参考文献

- (1) 佐藤博之ら、日本原子力学会「2014年春の年会」、p. 321
- (2) Yamagishi Isao et al、Journal of Nuclear Science and Technology、Vol. 151、No. 7-8、p. 1044-1053 (2014)
- (3) 腐食防食ハンドブック、腐食防食協会編、第Ⅱ編、第2章、p. Ⅱ-2-1-Ⅱ-14 (2000)
- (4) 腐食防食ハンドブック、腐食防食協会編、第Ⅱ編、第7章 環境助長割れ、7.1 応力腐食割れ、p. Ⅱ-7-1-Ⅱ-7-15 (2000)
- (5) 材料環境学入門、腐食防食協会編、丸善、3章 腐食形態、3.2 孔食、すきま腐食、p. 29-36 (1993)
- (6) 材料環境学入門、腐食防食協会編、丸善、3章 腐食形態、3.3 応力腐食割れ、p36-43 (1993)
- (7) 材料環境学入門、腐食防食協会編、丸善、4章 材料、4.2 ステンレス鋼、4.2.7 局

- 部腐食、p85-86&136 (1993)
- (8) 防食技術便覧、腐食防食協会編、日刊工業新聞社、p. 31-47 (1986)
- (9) ステンレス鋼便覧 第3版、ステンレス協会編、日刊工業新聞社、p. 256-270 (1995)
- (10) 中山 元ら、腐食防食'93講演集、'93D - 108、p. 415-418、腐食防食協会(1993)
- (11) 微生物腐食入門、腐食防食協会編、丸善、p. 233-242 (2004)
- (12) A. J. Sedriks、"Corrosion of stainless steels "、2nd ed.、 John Wiley & Sons、Inc. pp.125-146 (1996)
- (13) 井上裕慈、Zairyo-to-Kankyo、Vol. 41、 p. 833-835 (1992)
- (14) ステンレス鋼便覧、長谷川正義監修、日刊工業新聞社、p. 350 (1973)
- (15) 小若正倫、"金属の腐食損傷と防食技術"、アグネ、p. 334 (1983)
- (16) 加藤千明ら、材料と環境2014講演集、腐食防食学会、D-310、p. 403-406
- (17) ステンレス鋼便覧 第3版、ステンレス協会編、日刊工業新聞社、p. 459 (1995)
- (18) 日本原子力開発機構、東京電力(株)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 ー平成24年度成果報告書、JAEA-Review 2013-064、p. 26 (2014)
- (19) Y. Kumagai、Radiation Physics and Chemistry、**97** (2014) p. 223-232
- (20) 松島巖、Zairyo-to-Kankyo、Vol. 51、pp. 463-466 (2002)

以上