

JNC TJ6420 2002-003

廃止措置技術選定方法
最適化システムの構築(II)

平成 14 年 3 月

株式会社ペスコ

目 次

1. 目的	1
2. 製鍊転換施設等の洗浄、除染、切断事例に関する基礎情報の収集.....	1
2.1 製鍊転換施設等の洗浄、除染、切断情報の整理・分析断事例.....	1
2.2 研究開発に基づく除染情報の整理・分析.....	1
3. ANN 除染技術選定評価に用いる入力パラメータの検討	9
4. ANN モデルによる除染技術選定の評価と応用検討	34
4.1 ANN モデルの設計	34
4.2 ANN モデルの出力値と評価	37
4.3 ANN モデル適用の課題	39
5. その他の技術選定評価への適用性検討	44
6. その他の技術選定評価手法の調査、検討	44

1. 目的

廃止措置技術選定方法最適化システムの構築の一環として、製鍊転換施設を中心とした洗浄、除染、切断技術について、現在進められている廃止措置事例から関連情報を整理・分析し、人工ニューラルネットワーク(ANN)に学習させることにより経験者と ANN の判定結果に相違がなくなるような検討を行い、今後の除染技術選定データベース構築に資する。また、必要に応じて ANN 以外の手法についての調査、検討も行う。

2. 製鍊転換施設等の洗浄、除染、切断事例に関する基礎情報の収集

2.1 製鍊転換施設等の洗浄、除染、切断情報の整理・分析断事例

a. ウラン廃棄物除染試験

これまでに行われたウラン廃棄物除染試験に関して、JNC 殿より開示いただいた資料を表 2-1 に示す。この中の重要な資料について整理し、更に、これらの各資料から対象試料の材質・形状・放射能状態、除染方法及び除染材等の観点から情報を抽出した結果を表 2-2 に示す。表 2-2 の資料 No.は、表 2-1 資料 No.を意味する。

各資料の情報を整理、取り纏めた結果を添付資料 1.に添付する。

b. ウラン製鍊転換設備の切断技術

施設の解体撤去作業は狭い放射線作業空間のなかで、汚染防護衣、マスク等を着用し安全確保を図りながら実施する必要がある。使用する工具も実績が豊富で信頼性の高いこと、作業上も頑丈で軽量、単純な構造で操作も容易なことが必要である。金属材料を主体とした切断工法には、機械的、熱的、爆破的切断等がある。この中で、製鍊転換施設で適用可能と考えられる切断工法について整理した。これらの情報を整理した結果を添付資料 2.に添付する。

機械的切断工法として砥石切断、ジグソー、バンドソー、ニブラ、パイプカッタ、ディスクカッタ、剪断機、サークラーカッタ、レシプロソーの 9 種類、熱的切断工法として、酸素ガス切断、プラズマアーク切断、レーザ切断の 3 種類について特徴を整理した。一般的に機械的切断は切断速度は遅いが、二次発生廃棄物が少なく、コストも安い。熱的切断は切断速度は速いがエアロゾル等二次発生廃棄物がありコストも高めである。

今回、開示いただいた資料には、ウラン製鍊転換設備における試験結果が含まれていなかったため、工具カタログ、Decommissioning Handbook、動燃技法等から情報を収集したものである。従って、ニューラルネットワークに適用するデータとしては、不充分なものであった。

2.2 研究開発に基づく除染情報の整理・分析

研究開発段階におけるウラン系化合物除染に有効と考えられる最近の情報について、化学的除染法としてフッ化物揮発法-IF7 法、廃液中 α 核種除去法、Ag (II) 除染法の 3 種類、物理的除染法として真空アーク除染法、レーザ除染法の 2 種類、物理化学的除染法として超臨界二酸化炭素法について整理した。整理した結果を添付資料 3.に添付する。

表 2-1 ヴラン廃棄物除染情報収集対象資料

1/5

	図書番号	タイトル	報告年月	資料作成者	備考
1	JNC ZJ6420 2000-001	精錬転換設備(湿式系)解体撤去方法の最適化に関する検討	2000 年 3 月	川崎重工株式会社	
2	JNCTJ6430 2001-001	レーザーによる切断可能性評価試験	2001 年 3 月	株式会社 東芝	
3	東京大学工学部総合試験所 年報 第 59 卷 (2000)	溶融塩電解法による使用済流動媒体からの U,F,P,TRU 分離に関する研究	原稿受付 日	寺井隆幸(JNC)、天本一平(JNC)、高信進(JNC)	
4	日本原子力学会 予稿	ウラン等放射性物質による汚染物からのウラン回収技術の検討 一金属廃棄物への溶融塩電解法の適用－	日本原子力学会「秋の大会」(2000 年 9 月 15 日～17 日、青森大学)		
5	日本原子力学会 予稿	ウラン等放射性物質による汚染物からのウラン回収技術の検討 一ケミカルトラップからのウラン分離回収技術－	日本原子力学会「秋の大会」(2000 年 9 月 15 日～17 日、青森大学)		
6	日本原子力学会 予稿	ウラン等放射性物質からのウラン回収技術の検討(I) 一金属廃棄物への溶融塩電化御方の適用－	日本原子力学会「秋の大会」(1999 年 9 月 10 日～12 日、新潟工科大学)		
7	日本原子力学会 予稿	ウラン等放射性物質からのウラン回収技術の検討(II) 一ケミカルトラップからのウラン分離回収技術－	日本原子力学会「秋の大会」(1999 年 9 月 10 日～12 日、新潟工科大学)		
8	日本原子力学会 予稿	廃止措置技術選定方法最適化システムの構築(1) -ANN 手法の適用可能性に掛かる検討			
9	日本原子力学会 予稿	UR6 転換反応炉内面の観察(1)			

表 2-1 ヴラン廃棄物除染情報収集対象資料

	図書番号	タイトル	報告年月	資料作成者	備考
10	日本原子力学会 予稿	UF6 転換反応炉内面の観察(2)			
11	日本原子力学会 予稿	超臨界水による有機溶媒の分解			
12	日本原子力学会 予稿	CaF ₂ 融物のセメント系材料への適用性			
13	日本原子力学会 予稿	超臨界水による難分解性物質の分解			
14	日本原子力学会 予稿	水蒸気改質法による難燃物処理の研究			
15	日本原子力学会 予稿	スクラップランフッ化処理技術の研究			
16	日本原子力学会 予稿	ウラン等放射性物質による汚染物からウラン回収技術の検討 一ケミカルトラップからウラン分離回収技術一			
17	日本原子力学会 予稿	ウラン等放射性物質による汚染物からウラン回収技術の検討 一金属廃棄物への溶融塩電解法の適用一			
18	日本原子力学会 予稿	精錬転換施設におけるレーザー切断技術の適用(I)			
19	JNC TJ6420 2000-005	放射性融物処理プロセスの評価検討	2000 年 7 月	住友金属鉱山株式会社	
20	JNC ZJ6410 2001-003	スクラップウランフッ化処理技術の検討	2001 年 3 月	石川島播磨重工業株式会社	
21	JNC ZJ6400 99-007	ウラン等放射性物質による汚染物からウラン等回収技術の調査検討	1999 年 3 月	株式会社東芝	
22	JNC ZJ6400 2000-001	溶融塩電解法による汚染物からのウラン等回収技術の検討	2000 年 3 月	株式会社東芝	

表 2-1 ウラン廃棄物除染情報収集対象資料

3/5

	図書番号	タイトル	報告年月	資料作成者	備考
23	ECS-AC-000148	溶融塩電解法による汚染物質からのウラン等回収技術の検討－最終報告－	平成12年6月13日	株式会社東芝	
24	JNC ZJ6400 2001-002	溶融円電解法による汚染物質からのウラン等回収技術の検討(II)	2001年2月	株式会社東芝	
25	JNC	流動媒体処理の検討(フッ化物処理のための熱力学的データの取得)	2001年3月	川崎重工株式会社	
26	JNC ZJ6400 2000-002	ケミカルトラップ充填物等からのウラン等分離・回収技術の検討	2000年3月	株式会社東芝	
27	JNC ZJ6400 2001-001	ケミカルトラップ充填物からウラン等分離・回収技術の検討(I)	2001年3月	株式会社東芝	
28		ケミカルトラップ充填物等からのウラン等分離・回収技術の検討－最終報告書－	平成12年6月13日	株式会社東芝	
29		CaF ₂ 殿物処理技術開発調査及び試験報告書	平成12年3月	(株)オーテック 環境事業部	
30		CaF ₂ 殿物処理技術開発技術開発	2000年12月	株式会社オーテック	
31		平成12年度 放射性廃棄物処理システム開発調査報告書(第2分冊)	平成13年3月	財團法人原子力環境整備促進・資金管理センター	
32		混合強酸除染法およびプラスチック除染法の評価検討 委託報告書	平成12年11月	日本ガイシ株式会社	

表 2-1 ヴラン廃棄物除染情報収集対象資料

4/5

	図書番号	タイトル	報告年月	資料作成者	備考
33	JNC ZJ6400 99-005	精錬転換施設廃止措置に係る検討 (核燃料サイクル開発機構 人形峰環境技術センター) (委託研究報告書)	1999年3月	東洋エンジニアリング株式会社	
34	JNC ZJ6410 2001-002	水蒸気改質法による放射性難燃物等の処理に関する調査 (核燃料サイクル開発機構 人形峰環境技術センター) (委託研究報告書)	2001年3月	石川島播磨重工業株式会社	
35		硝酸系廃液処理に関する検討 (核燃料サイクル開発機構 契約業務成果報告書)	2001年3月	三菱マテリアル株式会社	
36		有機酸還元溶解法除染技術の評価検討 (核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)	平成12年11月	株式会社東芝	
37		放射性廃棄物の再利用技術に関する調査検討 (核燃料サイクル開発機構 契約業務成果報告書)	平成12年11月	三菱マテリアル株式会社	
38	JNC ZJ6410 2000-004	回収ラン転換試験に係る運転経験情報の調査 (核燃料サイクル開発機構 委託業務報告書)	2000年11月	三菱マテリアル株式会社	
39		酸化・還元法除染技術の評価検討 報告書	平成12年11月	株式会社日立製作所	

表 2-1 ウラン廃棄物除染情報収集対象資料

	図書番号	タイトル	報告年月	資料作成者	備考
40		ウラン系廃棄物処理設備の設計・検討	平成 11 年 3 月	住友金属鉱山株式会社 エネルギー・環境事業部	
41	JNC ZJ6410 2000-001	UF6 転換設備に係る除染技術の調査及び解体 物量の評価	1999 年 3 月	川崎重工業株式会社	
42	JNC ZJ6420 99-003	ウラン市場の調査	1999 年 3 月	三菱重工業株式会社	
43		硝酸系廃液処理に関する検討	2001 年 3 月	三菱マテリアル株式会社	
44		CaF ₂ 濑物処理技術開発 (資料番号 3-1 の資料と同じ物)	2000 年 12 月	株式会社オーテック	
45		CaF ₂ 濑物処理技術開発	2000 年 3 月	株式会社オーテック	
46		フッ素系機械解体物の長期安定性に関する検 討	平成 13 年 3 月	東洋エンジニアリング株 式会社	
47		解体物物流管理に関するデータベース化の検 討 報告書	平成 13 年 3 月 21 日	株式会社 日本環境調査 研究所	
48	JNC TJ6430 2001-001	レーザーによる切断可能性評価試験 (資料番号 2 の資料と同じ物)	2001 年 3 月	株式会社 東芝	

表 2-2 ウラン廃棄物除染試験 (I)

資料 No	廃棄物		除染材	パラメーター
	対象試料	ウラン量		
2 1	金属 ①ステンレス板 無垢材、焼結材 ②モネル板 (Cu-Ni 合金) ③アルミニウム板		①LiCl-KCl-FeCl ₂ ②LiCl-KCl-CuCl ₂ ③LiCl-KCl-AlCl ₃	・金属 U、酸化物 U、母材 ・陰極電流密度 (A/cm ²) 0.05、0.1、0.2 ・通電量 (Ah) 10 μm、100 μm 腐食相当量
2 2	金属 ①L型、SuS 材 ②配管、SuS 材 20 φ、50 φ ③アルミニウム板		①LiCl-KCl-UCl ₃ ② " ③ "	・L型鋼と平板 ・20 φ と 50 φ 配管 ・アルミニウム板 ・腐食量 (通電量) 100 μm、300 μm ・超音波洗浄有無
2 4	金属 ①L型、SuS 材 ②配管、SuS 材 20 φ、50 φ ③バルブ (実汚染物) SuS 材 モネル材	③SuS、 30.59Bq/g モネル 3.83Bq/g	①LiCl-KCl-5%FeCl ₂	・金属の形状 ・塩活性剤 FeCl ₂ の効果 ・一括除染 (腐食) と繰返し除染 ・腐食量 (通電量) と除染効果 ・パイプ開口部と電極対峙
2 6	スクラップ ①使用済 NaF ペレット (含 UF ₄)	NaF 中 35%	NaCl-NaF ・ 0~100% 65~35	・溶融塩中ウラン濃度 7 → 1 w/o、1 → 0.1 w/o、<0.1 w/o ・NaCl-NaF 共晶塩の可能性
2 7	スクラップ ①使用済 NaF ペレット (含 UF ₆)	溶融塩中 U 6w/o~3.9w/o	NaF 単独塩	・UF ₆ →UF ₄ 還元工程の有効性
2 0	スクラップ ①NaF ペレット(含 UF ₆) スラッジ ②CaF ₂ (含フッ化 U)		①ClF ₃ 、F ₂ ② "	・反応温度、ガス濃度、反応時間、
3 1	スクラップ ①HEPA フィルター	U : 1~2 % UO ₂ : ~10 ⁵ ppm U ₃ O ₈ : 0.3~2×10 ⁴ ppm	①ClF ₃ ② "	・ClF ₃ ガスと試料接触法 通気式、バッチ式 ・ガス流速、1cm/s (10 φ 反応容器) 0.13, 0.06 cm/s (35 φ 反応容器) ・温度、100, 150, 200°C ・ClF ₃ 濃度、10, 20, 40, 100 v/o ・U 化学形、UO ₂ 、U ₃ O ₈ ・時間、360、720 分 ・粉碎有無
	②焼却灰 U ₃ O ₈	4~18% 1~2×10 ⁵ ppm	ClF ₃	通気試験 ・温度、100, 150, 200°C ・ClF ₃ 濃度、20, 40 v/o ・U 化学形、U ₃ O ₈ ・時間、260 分 ・ガス流速、1cm/s (10 φ 反応容器) 0.13, 0.06 cm/s (35 φ 反応容器) バッチ式 ・温度、200, 400 ・ClF ₃ 濃度、90 v/o ・時間、30 分 (複数回繰返し) ・粉碎有

表 2-2 ウラン廃棄物除染試験 (II)

資料 No.	廃棄物		除染法	パラメータ
	対象試料	ウラン量		
34	難燃性物質 ①塩ビパイプ ②テフロン ③FRP ④ゴム	非放射性 (模擬試験)	水蒸気改質法 〔水蒸気による 有機物分解〕	・組成分析 ・熱天秤試験 ・水蒸気改質試験 (5%O ₂ /N ₂ 、600°C、3h) ・温度、保持時間 ・減重比、減容比
35	硝酸系廃液	非放射性 (模擬試験)	有機還元分解法 (ホルムアルデヒド)	・硝酸濃度　　・塩酸濃度 ・ホルマリン量 ・有機物分解触媒
36	放射性ウラン 固体廃棄物 (金属)	物量、 8 E+5kg 放射能、 1.45E+10Bq	・CORD UV 法：イオン交換法 -DF≥1000 -HMnO ₄ * < 0.03% -(COOH) ₂ < 0.35% ・ギ酸還元法：沈殿濃縮法 -DF≥1000 -ギ酸(HCOOH) < 5% *サイクル廃棄物除染では不用	・除染法 ・除染設備数 ・イオン交換法と沈殿濃縮法 ・二次廃棄物量 ・安全性、運転保守性 ・処理コスト
39	放射性ウラン 固体廃棄物 (炭素鋼、 ステンレス鋼)	物量、 801 t 放射能、 7.45E+11 Bq	・HOP 法 -DF≥1000 ・ケース 1：イオン交換法、沈殿濃縮法 (COOH) ₂ 、1% KMnO ₄ 、0% ・ケース 2：イオン交換法、 (COOH) ₂ 、0.2% KMnO ₄ 、0.01% ・塩酸還元法 -ケース 1：DF≥1000、沈殿濃縮法 5% HCl+1% L-アスコルビン酸 -ケース 2：DF≥100、沈殿濃縮法 5% HCl+1% L-アスコルビン酸+インヒビタ ・硝酸電解法 -DF : 10~1000 -HNO ₃ > 4 モル	・還元除染と酸化・還元除染法 ・イオン交換法と沈殿濃縮法 ・処理年数と除染設備解体物量 ・二次廃棄物量 ・安全性・運転保守性 ・処理コスト

3. ANN 除染技術選定評価に用いる入力パラメータの検討

2. 整理した情報を基に、昨年度の検討した入力パラメータ、

1. 対象物幾何学形状
2. 付着物性状
3. 付着物の化学的性状
4. 目標とする除染レベル

に沿って、溶融塩電解除染法（資料 21、22、24）（表 3-1）、フッ化ガス除染法（資料 20、30）（表 3-2）、CORD UV 法とギ酸還元法（資料 36 と 39）（表 3-3）について、各々の ANN 入力パラメータを検討した。

今年度は、更に技術選定という観点から複数の技術に対して、ANN が評価値を出力できるネットワークの設計を試みた。使用する対象データとしては、溶融塩電解除染法とフッ化ガス除染法に関する試験データを使用することとした。なお、CORD UV 法とギ酸還元法については、検討及び情報調査のみであり、具体的な試験データではなかった。

パラメータは昨年度と同様にし、そのパラメータ値を実際の試験データから、次のようにした。また、注意すべき事項としては、昨年度の報告書にもあるように、除染技術そのものの特徴を示すパラメータは ANN の「学習」過程において ANN に組み込まれるべきものであり、入力するものではない、という事である。

各パラメータの値

1. 対象物材質
 - ① ステンレス
 - ② モネル板
 - ③ アルミニウム板
 - ④ 混合材 （フッ化ガス除染試験の資料に使われた、材料を特定できないものを混合材とした。）
2. 対象物幾何学形状
 - ① 平板
 - ② L型
 - ③ 配管
 - ④ バルブ
 - ⑤ フィルター 塊状
 - ⑥ フィルター 粉末
 - ⑦ 焼却灰 塊状
 - ⑧ 焼却灰 粉末
 - ⑨ 塊状スクラップ
 - ⑩ 粉末スクラップ
 - ⑪ 塊状スラッジ
 - ⑫ 粉末スラッジ

3. 汚染物化学的性状

- ① ウラン酸化物混合 (溶融塩電解除染試験において、ウラン酸化物と表記のため、 U_3O_8 か、 UO_2 か、判別できなかつたものをウラン酸化物混合とした。)
- ② ウラン金属
- ③ U_3O_8
- ④ UO_2
- ⑤ ウランフッ化物

4. 目標とする除染レベル (除染目的)

- ① DF 値 500 以上或いは、汚染物回収率 90% 以上
- ② DF 値 500~10 或いは、汚染物回収率 90~60% 以上

試験データでは、除染結果の値のみが示されているが、除染目標とし、上記の 2 ケースを設定した。評価は、データで与えられた除染結果と、それぞれの設計値を比較して行った。

以上に従って、試験データを整理したものを表 3-4 に示す。

表 3・1 溶融塩電解除去法に関する ANN 入力パラメータと実験データ (1)

溶融塩電解除染 — LiCl-KCl 塩法

(1) 学習データ ; 資料 21、22、24

(2) パラメータ

① 対象物性状

性 状	パラメータ値
ステンレス鋼	1
モネル(Cu-Ni 合金)	2
アルミニウム	3

② 対象物幾何学的形状

形 状	パラメータ値
平 板	1
アングル形	2
配 管	3
バ ル ブ	4

③ 汚染物化学的性状

化学的性状	パラメータ値
ウラン酸化物	1
ウラン金属	2

④ 目標除染レベル

D F 値	パラメータ値
500 以上	1
500~10	2
10 以下	3

⑤ ランク付け内容

ランク内容	ランク値
適合	1
不適合ではないが妥当でない (諸条件の考慮・検討が必要)	2
不適合	3

表 3-1 溶融塩電解除去法に関する ANN 入力パラメータと実験データ (2)

資料 21 金属板電解除染 (添付資料 1. 資料 21 の表一2)

検討項目	試料No.	化学形	電解塩	電流密度 A/cm ²	腐食量 (電気量) μm	放射能(cpm)		DF ₁	放射能 (cpm) c.超音波洗浄後	DF ₂	備考
						A 除染前	b 除染後				
SUS 板	1	酸化 U	*1	0.05	100	343.11(0.232)	1.624(0.232)	246	0.332(0.232)	3429	
	2	"	"	0.1	100	408.81(0.232)	—	—	0.396(0.232)	2491	
	3	"	"	0.2	100	444.84(0.232)	—	—	0.560(0.232)	1356	
	4	"	"	0.05	10	182.22(0.232)	1.502(0.232)	143	0.843(0.232)	302	
	5	金属 U	"	0.2	100	167.67(0.232)	—	—	0.452(0.232)	761	
Al 板	6	酸化 U	"	0.2	100	254.67(1.502)	37.500 (1.502)	7	39.870(1.502)	7	
	7	酸化 U	*2	0.2	100	1088.79(0.362)	289.592 (0.362)	4	342.768(0.362)	3	
	8	金属 U	"	"	"	1221.30(0.362)	—	—	471.386(0.362)	3	
モルタル板	9	酸化 U	*3	0.05	100	369.450(0.162)	—	—	0.284(0.162)	3027	
	10	"	"	0.2	"	327.81(0.162)	0.518(0.162)	920	0.368(0.162)	1591	
	11	金属 U	"	"	"	463.70 (0.162)	—	—	0.226(0.162)	7243	

*1 LiCl — KCl — FeCl₂ *2 LiCl — KCl — AlCl₃ *3 LiCl — KCl — CuCl₂DF₁=正味 a/b DF₂=正味 a/c () 内数値はバックグラウンド値

資料 22 金属加工材電解除染 (添付資料 1. 資料 22 の表一1. 図一1, 2, 3)

検討項目	試料No.	化学形	電解塩	電流密度 A/cm ²	腐食量 (電気量) μm	放射能(Bq/g)		DF	放射能(Bq/g) 超音波洗浄後		DF	備考		
						除染前	除染後		第1回	第2回				
SUS材 L型鋼	1	酸化 U	*	0.05	100	図—1								
	2	"	"	"	300									
配管 20φ	3	"	"	"	100	図—2								
	4	"	"	"	300									
50φ	5	"	"	"	100									
	6	"	"	"	300									
Al材 平板	7	"	"	"	100	図—3								
	8	"	"	"	300									

*K₂Cr₂O₇ — H₂SO₄ — H₂O₂

表 3-1 溶融塩電解除去法に関する ANN 入力パラメータと実験データ (3)

資料 24 金属電解除染

(1) 加工材

(表中の図は、添付資料 1. 資料 24 の図番)

検討項目		試料No.	化学形	電解塩	温度°C	電流密度A/cm²	腐食量(電気量) μm	放射能(Bq/g)		備考
除染前	超音波洗浄後									
S U	L型鋼	1	酸化 U	LiCl-KCl-5%FeCl₂	500	0.05	100+100+100	図-1		
		2	〃	〃	〃	〃	300(一括)			
S 材	20φ 配管	3	〃	〃	〃	〃	300(一括)	図-2		開口部陰極対峙
		4	〃	〃	〃	〃	〃			側面部陰極対峙
50φ 配管	5	〃	〃	〃	〃	〃	300 (一括)	図-3		開口部陰極対峙
		6	〃	〃	〃	〃	〃			側面部陰極対峙

(2) バルブ

(表中の図は、添付資料 1. 資料 24 の図番)

検討項目		試料No.	化学形	電解塩	温度°C	電流密度A/cm²	腐食量(電気量) μm	放射能(Bq/g)			備考		
超音波洗浄後 1回	超音波洗浄後 2回							超音波洗浄後 1回	超音波洗浄後 2回	ペローズ分解除染後 1回			
SUS 材	1	酸化 U	LiCl-KCl-5%FeCl₂	500	0.05	200	図-5、6、8、						
	2	〃	〃	〃	〃	300							
モネル 材	3	〃	〃	〃	〃	〃	100	図-5、7					
	4	〃	〃	〃	〃	〃	200						

資料 26 NaF ペレットの電解除去

(表中の図は、添付資料 1. 資料 26 の図番)

検討項目	試料No.	溶融塩中ウラン濃度%	電解塩		温度°C	電流密度A/cm²	電気量クーロン	溶融塩中ウラン濃度(w/o)	備考
			NaCl	NaF					
a)NaF 単独塩	1	20	—	100	850	—	—	—	
b)高濃度 U	2	9	65	35	700	0.2	26000	図-2	
c)低濃度 U	3	0.5	〃	〃	〃	0.05	3600	図-3	
d)中・低濃度 U	4	1.0	〃	〃	〃	〃	35000	図-4	

表 3-2 フッ化ガス除去法に関する ANN 入力パラメータと実験データ (1)

フッ化ガス除染 一 三フッ化塩素 (ClF_3) 法

(1) 学習データ ; 資料 20、31

(2) パラメータ

① 対象物性状

性 状	パラメータ値
フィルター	1
焼却灰	2
スクラップ	3
スラッジ	4

② 対象物幾何学的形状

形 状	パラメータ値
粉 末	1
塊 状	2

③ 汚染物化学的性状

化学的性状	パラメータ値
U_3O_8	1
UO_2	2
ウランフッ化物	3

④ 目標除染レベル

汚染物回収率	パラメータ値
90%以上	1
90~60%	2
60%以下	3

⑤ ランク付け内容

ランク内容	ランク値
適合	1
不適合ではないが妥当でない (諸条件の考慮・検討が必要)	2
不適合	3

表3-2 フッ化ガス除去法に関するANN入力パラメータと実験データ(2)

資料 20. スクラップ処理

I NaFペレット(添付資料1.資料20の表-3) (表中の図は、添付資料1.資料20の図番)

検討項目	試料No.	化学形	フッ化ガス	ガス濃度トール	温度(℃)	N ₂ バージ	粉碎	反応時間(分)*	回収率(%)	備考
a) 粉碎の影響	1	UF ₆	ClF ₃	600	400	×	×	30×5	46.4	図-1 2
	2	〃	〃	〃	〃	×	○	〃	99.7	
b) 温度の影響	3	〃	〃	〃	100	×	×	〃	4.8	〃
	4	〃	〃	〃	〃	×	○	〃	0	
c) 粉碎の影響	5	〃	〃	685	400	○	×	〃	83.7	〃
	6	〃	〃	〃	〃	○	○	〃	97.7	
d) ガス種類の影響	7	〃	F ₂	600	400	×	×	〃	48.6	〃
	8	〃	F ₂	〃	〃	〃	○	〃	0	
	9	〃	F ₂	〃	〃	〃	〃	〃	93	
		〃	↓	〃	〃	〃	〃	〃	97.7	
e) フッ化による色変化	10	〃	ClF ₃	〃	〃	×	○	60×1	—	図-3 4
	11	〃	F ₂	〃	〃	×	○	〃	—	

*反応時間：時間(分) × 回数

II CaF₂スラッジ(添付資料1.資料20の表-5) (表中の図は、添付資料1.資料20の図番)

検討項目	試料No.	化学形	フッ化ガス	ガス濃度トール	温度(℃)	N ₂ バージ	粉碎	反応時間(分)	回収率(%)	備考
a) 粉碎の影響	1	フッ化U	ClF ₃	600	400	×	×	30×5	96.5	図-3 4
	2	〃	〃	〃	〃	〃	○	〃	97.1	
b) 温度の影響	3	〃	〃	〃	100	〃	×	〃	35.9	図-3 4
	4	〃	〃	〃	〃	〃	○	〃	37.5	
	5	〃	〃	685	200	○	○	〃	62.9	
	6	〃	〃	〃	400	○	○	〃	86.2	
c) 反応時間の影響	7	〃	〃	〃	〃	○	×	30×5	—	Ref No6 図-3 4
		〃	〃	〃	〃	○	↓	↓	96.4	
		〃	〃	〃	〃	○	○	〃	—	
d) ガス種類の影響	8	〃	F ₂	〃	〃	×	○	〃	89.8	Ref No2 図-3 4

表 3・2 フッ化ガス除去法に関する ANN 入力パラメータと実験データ (3)

資料 31 ① HEPA フィルター (添付資料 1. 資料 31 の表一2) (表中の図は、添付資料 1. 資料 31 の図番)

検討項目	試料	化学形	ClF ₃ 濃度 (v/o)	温度 (°C)	反応時間 (分)	通気速度 (cm/s)	残存率	備考
a) ClF ₃ 濃度 と温度	No. 1	UO ₂	10	100	360	1	4.4E-2	図-1 2
	No. 2	"	20	"	"	"	4.1E-3	
	No. 3	"	100	"	"	0.23	4E-2	
	No. 4	"	10	150	360	1	2.3E-2	図-3 4
	No. 5	"	20	"	"	"	1.2E-2	
b) 化学形影響	No. 6	UO ₂	20	200	360	1	3.8E-2	図-5 6
	No. 7	U ₃ O ₈	"	"	"	"	2.6E-2	
c) 温度変化	No. 8	UO ₂	20	100 150	0-120 120-360	1	1.4E-3	図-7 8
	No. 9	"	"	150 100	0-120 120-360	"	2.3E-2	
	No. 10	"	"	100 150	0-120 120-360	"	7.6E-4	
	No. 11	"	"	100 150 200	0-120 120-240 240-360	"	1.2E-3	
d) ClF ₃ 濃度と 温度変化の影響	No. 12	UO ₂	20	100	0-120	0.13	3.0E-3	図-9 10
	"	20	150	120-240	0.13			
	"	40	200	240-360	0.06			
	No. 13	No.12 の再試験					3.7E-3	
	No. 14	U ₃ O ₈	20 20 40	100 150 200	0-120 120-240 240-360	0.13 0.13 0.06	1.1E-3	
e) 粉 碎 效 果	① 粉碎前	No. 15	UO ₂	20	100	0-120	0.13	8.0E-4
			"	20	150	120-240	0.13	
			"	40	200	240-360	0.06	
	② 粉 碎 後	第 1 回	"	20	100	0-30	0.13	図-11 12
			"	20	150	30-60	0.13	
			"	40	200	60-90	0.06	
			"	20	100	0-30	0.13	
		第 2 回	"	20	150	30-60	0.13	
			"	40	200	60-90	0.06	
	No. 16		No. 15 の再試験					1.7E-3

表 3-2 フッ化ガス除去法に関する ANN 入力パラメータと実験データ (4)

資料 31 ② 焼却灰 (添付資料 1. 資料 31 の表一7)

1. フィルターと同条件

(表中の図は、添付資料 1. 資料 31 の図番)

検討項目	試料	化学形	ClF ₃ 濃度 (v/o)	温度 (°C)	反応時間 (分)	通気速度 (cm/s)	残存率	備考	
a) フィルター試験と 同条件	No. 1	U ₃ O ₈	20	100	0-120	1	1.4E-3	図-14 15	
			20	150	120-240	"			
			40	200	240-360	"			
b) 高濃度 ClF ₃ ガス 維持時間延長	No. 2	U ₃ O ₈	20	100	0-120	"	5.2E-3	図-14 15	
			40	150	120-240	"			
			40	200	240-360	"			
c) 粉 碎 の 影 響	① 粉碎前	No. 3	U ₃ O ₈	20	100	0-120	"	4.5E-3	図-14 15
				20	150	120-240	"		
				40	200	240-360	"		
	② 粉碎後	"	"	20	100	0-30	"		
				20	150	30-60	"		
				40	200	60-90	"		
d) 試 料 粒 径 変 化	① 粉碎前	No. 4	U ₃ O ₈	20	100	0-120	"	1.3E-3	図-14 15
				20	150	120-240	"		
				40	200	240-360	"		
	② 粉碎後	"	"	20	100	0-30	"		
				20	150	30-60	"		
				40	200	60-90	"		
e) の 比 較	試料 No.14、15 と の 比 較	No. 5	U ₃ O ₈	20	100	0-120	0.13	9.8E-3	図-18 19
				20	150	120-240	0.13		
				40	200	240-360	0.13		

表 3-2 フッ化ガス除去法に関する ANN 入力パラメータと実験データ (5)

資料 31 ② 焼却灰 (添付資料 1. 資料 31 の表—7)

2. 共存元素のフッソ化への影響

(表中の図は、添付資料 1. 資料 31 の図番)

検討項目	試料	化学形	ClF ₃ 濃度 (v/o)	温度 (°C)	反応時間 (分)	通気速度 (cm/s)	残存率	備考
元素除去	No. 6 Na	U ₃ O ₈	20	100	0-120	1	8.2E·4	図-16 17
			20	150	120-240			
			40	200	240-360			
	No. 7 ~ No. 13	U ₃ O ₈	試験条件 No. 6 と同じ No.7 Mg, No.8 Ca No.9 Al No.10 Zn No.11 Fe No.12 Na No.13 Ca				5.8E·4 ~ 1.6E·2	図-16 17
			20	100	0-120	0.13	9.2E·4	図-18 19
			20	150	120-240	0.13		
通気試験	No. 14	U ₃ O ₈	40	200	240-360	0.06		
			"	90	400	360-390	0	図-18 19
			"	"	390-420	0		
			"	"	"	"		
通気試験	No. 15	U ₃ O ₈	20	100	0-120	0.13	8.0E·4	図-18 19
			20	150	120-240	0.13		
			40	200	240-360	0.06		
			"	90	200	360-390	0	
バッチ試験	"	"	"	400	390-420	0	図-18 19	図-18 19
			"	400	420-450	0		
			"	"	"	"		

表 3・3 CORD UV 法とギ酸還元法に関する ANN 入力パラメータと実験データ(1)

I. 化学除染法 — CORD UV 法、ギ酸還元法
学習データ： 資料 36、ウラン系廃棄物

I-1. 二次廃棄物発生量

(1) パラメータ

① 除染液処理法

方法	パラメータ値
イオン交換法	1
沈殿・分離法	2

② 処理期間

年数	パラメータ値
20	1
40	2

③ 稼動時間

時間/日	パラメータ値
8	1
24	2

④ 目標・二次廃棄物量レベル

2001 ドラム缶本数	パラメータ値
2000 以上	1
2000～1000	2
1000 以下	3

⑤ ランク付内容

ランク内容	パラメータ値
適合	1
不適合ではないが 妥当でない	2
(諸条件の考慮・検討要)	
不適合	3

I-2. 処理工数

(2) パラメータ

① 除染液処理法

方法	パラメータ値
イオン交換法	1
沈殿・分離法	2

② 処理期間

年数	パラメータ値
20	1
40	2

③ 稼動時間

時間/日	パラメータ値
8	1
24	2

④ 目標処理工数レベル

人・日数	パラメータ値
12000 以上	1
12000～10000	2
10000 以下	3

I-3. 処理コスト

(3) パラメータ

① 除染液処理法

方法	パラメータ値
イオン交換法	1
沈殿・分離法	2

② 処理期間

年数	パラメータ値
20	1
40	2

③ 稼動時間

時間/日	パラメータ値
8	1
24	2

④ 建設コスト（処理設備）

コスト(百万円)	パラメータ値
300 以上	1
300 以下	2

⑤ 運転コスト

コスト(百万円)	パラメータ値
1500 以上	1
1500～1400	2
1400 以下	3

⑥ 目標コスト・レベル

処理コスト(百万円/ル)	パラメータ値
2 以上	1
2 ～1.5	2
1.5 以下	3

⑦ ランク付内容

ランク内容	ランク値
適合	1
不適合ではないが 妥当でない	2
(諸条件の考慮・検討要)	
不適合	3

表 3-3 CORD UV 法とギ酸還元法に関する ANN 入力パラメータと実験データ(2)

II. 化学除染法 — HOP 法、塩酸還元法

学習データ： 資料 39、ウラン系廃棄物

II-1. 二次廃棄物発生量

(1) パラメータ

① 除染方法

試薬	パラメータ値
シュウ酸(ケース 1)	1
シュウ酸/過マンガン酸	
カリ(ケース 2)	2
塩酸	3

② 除染液処理方法

方法	パラメータ値
イオン交換法	1
沈殿・濃縮法	2

③ 対象物性状

性状	パラメータ値
SUS(100%)	1
SUS/CS(50%)	2
CS(100%)	3

④ 処理期間

年数(年処理量 t)	パラメータ値
20 (40)	1
40 (20)	2

⑤ 稼動時間

時間/日	パラメータ値
8	1
24	2

⑥ 目標・二次廃棄物量レベル

ドラム缶本数	パラメータ値
1500 以上	1
1500~1000	2
1000 以下	3

⑦ ランク付内容

ランク内容	パラメータ値
適合	1
不適合ではないが妥当でない (諸条件の考慮・検討要)	2
不適合	3

II-2. 処理工数

(2) パラメータ

① 除染方法

試薬	パラメータ値
同 左	

II-3. 処理コスト

(3) パラメータ

① 除染方法

試薬	パラメータ値
同 左	

② 除染液処理法

方法	パラメータ値
同 左	

② 除染液処理法

方法	パラメータ値
同 左	

③ 対象物性状

性状	パラメータ値
同 左	

③ 対象物性状

性状	パラメータ値
同 左	

④ 処理期間

年数(年処理量 t)	パラメータ値
同 左	

④ 処理期間

年数(年処理量 t)	パラメータ値
同 左	

⑤ 稼動時間

時間/日	パラメータ値
同 左	

⑤ �稼動時間

時間/日	パラメータ値
同 左	

⑥ 目標処理工数レベル

工数(人・日)	パラメータ値
20000 以上	1
20000~15000	2
15000 以下	3

⑥ 目標処理工数レベル

コスト(百万円)	パラメータ値
20 以上	1
20~10	2
10 以下	3

⑦ ランク付内容

ランク内容	パラメータ値
同 左	

⑦ ランク付内容

ランク内容	ランク値
同 左	

表 3-3 CORD UV 法とギ酸還元法に関する ANN 入力パラメータと実験データ(3)

III. 化学除染法 一 CORD UV 法、ギ酸還元法、HOP 法、塩酸還元法
学習データ： 資料 36、39、

III-1. 二次廃棄物発生量

(1) パラメータ

① 除染方法

化学試薬	パラメータ値
シュウ酸（ケース1）	1
ギ酸	2
シュウ酸過マンガン酸	
カリ（ケース2）	3
塩酸	4

② 除染液処理方法

方法	パラメータ値
イオン交換法	1
沈殿・濃縮法	2

③ 対象物性状

性状	パラメータ値
SUS(100%)	1
SUS/CS(50%)	2
CS(100%)	3

④ 処理期間

年数	パラメータ値
20	1
40	2

⑤ 稼動時間

時間/日	パラメータ値
8	1
24	2

⑥ 目標・二次廃棄物量レベル

ドラム缶本数	パラメータ値
2000 以上	1
2000～1000	2
1000 以下	3

⑦ ランク付内容

ランク内容	パラメータ値
適合	1
不適合ではないが妥当でない (諸条件の考慮・検討要)	2
不適合	3

III-2. 処理工数

(2) パラメータ

① 除染方法

試薬	パラメータ値
同 左	

III-3. 処理コスト

(3) パラメータ

① 除染方法

試薬	パラメータ値
同 左	

② 除染液処理法

方法	パラメータ値
同 左	

② 除染液処理法

方法	パラメータ値
同 左	

③ 対象物性状

性状	パラメータ値
同 左	

③ 対象物性状

性状	パラメータ値
同 左	

④ 処理期間

年数(年処理量 t)	パラメータ値
同 左	

④ 処理期間

年数(年処理量 t)	パラメータ値
同 左	

⑤ 稼動時間

時間/日	パラメータ値
同 左	

⑤ 稼動時間

時間/日	パラメータ値
同 左	

⑥ 目標処理工数レベル

工数(人・日)	パラメータ値
20000 以上	1
20000～15000	2
15000 以下	3

⑥ 目標コスト・レベル

コスト(百万円)	パラメータ値
20 以上	1
20～10	2
10 以下	3

⑦ ランク付内容

ランク内容	パラメータ値
同 左	

⑦ ランク付内容

ランク内容	ランク値
同 左	

表 3-3 CORD UV 法とギ酸還元法に関する ANN 入力パラメータと実験データ(4)
—評価データー

1. 資料 36 : CORD UV 法とギ酸還元法

(1) 対象廃棄物：ウラン系固体廃棄物：全量：800 t、全放射能：1.45E+10Bq

(表及び図は、添付資料 1. 資料 36 の表番及び図番)

検討項目	除染処理条件					CORD UV		ギ酸還元		備考		
	DF	容量 (t/月)	日数 (日/年)	期間 (年)	時間 (H/日)	イオン交換法	同左	沈殿分離				
①除染処理 必要設備数	1000	1	200	—	40	8	—	1	同左	—	表 7	
	"	"	"	—	40	—	24	1		—	(1)	
	"	"	"	20	—	8	—	1		—	(2)	
	"	"	"	20	—	—	24	1		—		
②処理設備 解体に伴う 二次廃棄物 発生量	"	"	"	"	"	"	"	20.341t	20.341 t	10t	表 4	
③化学除染 に伴う二次 廃棄物発生 量と放射能 (200 t ドラ ム缶当たり)	"	"	"	"	"	"	"	乾燥樹脂 2.67E03 本 2.638E06 (Bq/本)	焼却灰 1.91E01 本 3.676E08 Bq/本	同左	沈殿物 4.76E04 本 1.4602E05 Bq/本	表 8 (2) 図 4 — 5 — 8 — 9
④安全性・ 運転保守性								希薄溶液取扱容易 薬液調整時保護具 薬注系配管閉塞 防止	危険物、腐食性 取扱注意		表 9 (1) (2)	

表3-3 CORD UV法とギ酸還元法に関するANN入力パラメータと実験データ(5)

(5) 検討項目：除染作業人工数 (表は、添付資料1.資料36の表番)

表-10 (1) CORD法除染時の人工数評価

		処理年数 40年		処理年数 20年	
		運転時間 8時間	運転時間 24時間	運転時間 8時間	運転時間 24時間
U系	設備必要数	1	1	1	1
	各作業工程ごとの人工数(人/バッチ)	タンク内への除染対象物の収納 昇温 除染 分解・浄化 冷却・段取り替え	3 2 3 5 3	3 2 3 5 3	3 2 3 5 3
	1バッチに要する日数	3	2	3	2
	一日当たりの合計人工数(人/日)	5.3	8.0	5.3	8.0
	年間人工数(人/年)	200日稼動 1067	1600	1067	1600
	実質稼動年数(200日/年)	12	5	12	5
	総人工数(人)	12800	7660	12800	7360

表-10 (2) ギ酸還元法除染時の人工数評価

		処理年数 40年		処理年数 20年	
		運転時間 8時間	運転時間 24時間	運転時間 8時間	運転時間 24時間
U系	設備必要数	1	1	1	1
	各作業工程ごとの人工数(人/バッチ)	タンク内への除染対象物の収納 昇温 除染 移送 沈殿生成 rins	3 2 3 2 3 2	3 2 3 2 3 2	3 2 3 2 3 2
	1バッチに要する日数	2.25	0.87	2.25	0.87
	一日当たりの合計人工数(人/日)	6.7	17.2	6.7	17.2
	年間人工数(人/年)	1333	3447	1333	3447
	実質稼動年数(200日/年)	9	3	9	3
	総人工数(人)	12267	11030	12000	11719

(6) 検討項目：処理コスト評価 (表は、添付資料1.資料36の表番)

表-11 (1) CORD法コスト評価*

処理年数(年)		処理年数 40年		処理年数 20年	
		運転時間 8時間	運転時間 24時間	運転時間 8時間	運転時間 24時間
ウラン	建設コスト(百万円)	210	210	210	210
	運転コスト(百万円)	504	325	504	314
	人工	487	487	306	306
	設備更新	411	352	411	350
	小計(百万円)	1,612	1,374	1,431	1,180
	処理総量(トン)	800	800	800	800
	1トン当たりの処理コスト(百万円)	2.01	1.72	1.79	1.48
	合計(百万円)	25,400	17,885	25,403	17,741

表-11 (2) ギ酸還元法コスト評価

処理年数(年)		処理年数 40年		処理年数 20年	
		運転時間 8時間	運転時間 24時間	運転時間 8時間	運転時間 24時間
ウラン	建設コスト(百万円)	343	343	343	343
	運転コスト(百万円)	485	414	476	466
	人工	279	279	176	176
	設備更新	424	424	424	445
	小計(百万円)	1,531	1,460	1,418	1,430
	処理総量(トン)	800	800	800	800
	1トン当たりの処理コスト(百万円)	1.91	1.82	1.77	1.79
	合計(百万円)	24,194	22,094	24,751	22,224

*沈殿分離法でコスト算出

表3-3 CORD UV法とギ酸還元法に関するANN入力パラメータと実験データ(6)

2. 資料39:HOP法と塩酸還元法 (表或いは図は、添付資料1.資料39の表番及び図番)

2.1 HOP法

対象廃棄物：東海ウラン系廃棄物（ステンレス鋼、炭素鋼）全量801t、放射能7.45E+11Bq

(1) 化学除染に伴う二次廃棄物発生量

除染条件		対象廃棄物*		溶解 金属量 (t)	樹脂 (m ³)	ドラム缶数(本)				備 考			
試薬	DF	核種	金属			イオン交換		沈殿・濃縮					
						触媒	樹脂 →セメント固化	触媒	スラッジ →セメント固化				
ケース1: 還元剤 単独 (シュウ酸 1%)	≥ 1000 SUS:3μm CS:10μm	ウ ラ ン	①**	1.6	46	240	459	266	135	表 5			
			②	3.5	95	240	952	575	251				
			③	5.3	145	240	1446	885	368				
ケース2: 還元/酸化 繰り返し (シュウ酸 0.2% KMnO ₄ 0.01%)	≥ 1000 SUS:0.1μm CS:3.2μm	ウ ラ ン	①	0.1	21	240	207	—	—	表 5			
			②	0.1	42	240	424	—	—				
			③	1.7	64	240	641	—	—				

* 総量801t（操業262t、解体539t）：処理年数(年)40/20、年間処理量(t/年)20/40

** ①SUS:100% ②SUS/CS:50/50% ③CS:100%

(2) 除染作業工数

処理 量	期間 (年)	日 稼動 (H/ 日)	除染法			設備数 (セット)	運転 日数 (口/サイ クル)	作業工数(人・日)				備 考	
			試薬	DF	液 処理			監督	運転 員	作業者	濃縮 作業		
1バッ チ: 0.5t/日 全量: 801t	40 (20) ***	24	ケース 1*	\geq 1000	①**	1 (1)	1 (1)	3 (3)	3 (3)	6 (6)	—	12 (12)	表 9
					②	1 (1)	1 (1)	3 (3)	3 (3)	6 (6)	6 (6)	18 (18)	
			ケース 2*	\geq 1000	①	1 (1)	1.5 (1.5)	4.5 (4.5)	4.5 (4.5)	9 (9)	—	18 (18)	
	40 (20)	8	ケース 1	\geq 1000	①	1 (2)	3 (3)	3 (3)	3 (6)	6 (6)	—	12 (15)	
					②	1 (2)	3 (3)	3 (3)	3 (6)	6 (6)	6 (6)	18 (21)	
			ケース 2	\geq 1000	①	1 (2)	4.5 (4.5)	4.5 (4.5)	9 (9)	9 (9)	—	18 (22.5)	

注) * ケース1: シュウ酸(1%)単独サイクル ケース2: シュウ酸(0.2%)/KMnO₄(0.01%)繰り返しサイクル

** ①イオン交換法 ②沈殿濃縮法 *** ()内数値: 処理期間20年のケース

表 3-3 CORD UV 法とギ酸還元法に関する ANN 入力パラメータと実験データ(7)

(3) 廃棄物処理条件と廃棄物発生量、作業作業人工数

注 1) ケース1:シユウ酸濃厚一段処理、ケース2:過元・強化酸性洗浄

2) 吸着-イオーン交換樹脂吸着処理、溶離: 漂移処理
①:SUS(100%)、②:SUS(50%)/C/S(50%)、③:C/S(100%)

表 3-3 CORD UV 法とギ酸還元法に関する ANN 入力パラメータと実験データ(8)

2.2 塩酸還元法

対象廃棄物：東海ウラン系廃棄物（ステンレス鋼、炭素鋼）全量、801 t、全放射能、7.45E+11

(1) 塩酸還元法による除染条件と廃棄物発生量

項目	施設	東海 U 系		備考	
		ケース 1	ケース 2		
操業重量 (ton)		262		表 - 16、17 ケース 1： DF ≥ 1000 SUS: 3 μm CS : 20 μm ケース 2： DF ≥ 100 SUS: 0.3 μm CS : 2 μm	
解体重量 (ton)		539			
総重量 (ton)		801			
放射能 (Bq)		7.45E+11			
Ce-137 (Bq)		—			
処理年数		40, 20			
年間処理量 (ton/年)		20, 40			
除染条件	除染液組成	塩酸: 5% + L-アス コルビン酸: 1% + (インヒビタ)	塩酸: 5% + L-アス コルビン酸: 1% + インヒビタ		
	除染時間 (h)	~ 3			
溶解金属量 (ton)	① SUS(100%)	1.6	0.16		
	② SUS, CS(50%)	6.1	0.61		
	③ CS(100%)	10.7	1.07		
除染液量 (m ³)	①	342[III]	342[III]	I : 除染液の消耗より算出 II : 除染槽の線量当量率制限より算出 III : 除染槽の全放射能濃度制限より算出	
[]: 除染液量選定方法	②	342[III]	342[III]		
	③	465[I]	342[III]		
廃液量 (m ³)	濃縮廃液 (m ³)	①	27[8]	溶質主成分: 塩化ナトリウム	
	[]: 溶質量 (ton)	②	27[8]		
		③	37[11]		
	スラッジ含有廃液 (m ³)	①	10[3]	スラッジ主成分: 水酸化鉄	
	[]: スラッジ量 (ton)	②	39[12]		
		③	68[20]		
廃樹脂量 (m ³)	①	0.85[0.68]	0.80[0.64]	イオン交換樹脂による水洗水の浄化により発生する廃樹脂	
[]: 廃樹脂量 (ton)	②	1.03[0.82]	0.81[0.65]		
		③	1.10[0.88]		
ドラム缶量(本)	濃縮 → セメント固化	①	390[*]	固化容量: 廃液、廃樹脂 100L/ドラム缶 但し、放射能規制の場合の収納放射能は表面 2mSv/h として 4.8E+9Bq(Ce-137)/ドラム缶	
[]: 放射能規制有りの場合(本)		②	680[*]		
		③	1,070[*]		

[*] : Cs-137 量すくなく、ドラム缶の表面線量当量率規制の必要なし

表 3-3 CORD UV 法とギ酸還元法に関する ANN 入力パラメータと実験データ(9)

(2) 廃棄物処理条件と処理人工数

表-19 除染洗浄処理工数 (東海ウラン系) 塩酸還元法

前提条件	処理総量(t)			80t			100t			100tまたは50t		
	SUS(%)	0	100	0	20	40	0または50t	20	40	0または50t	20	463
CS(%)												
処理年数		40			20							
年間処理量(t/年)	232			463			232			200		
年間操業日数(日)			200							8		
1日運転時間(h)	8	8	24	8	24	8	24	8	24	8		24
除染液量(m3)	465		465									
設備規模	1t/h当たり除染液量(m3/hイクル)	0.29		3.00								
設備能力倍率	1t/h当たり処理量(t/hイクル)	0.06		0.58								
設備基數	1t/h当たり除染液量(m3/hイクル)	1	1	1	0.33	2	1	1	0.67	1	1	0.67
所要人員	除染	4		4								
(人)	計測	3		3								
設備規模	1t/h当たり除染所要時間(h/hイクル)	3		3								
全t/h基數	1t/h当たり計測所要時間(h/hイクル)	4		4								
全t/h基數	1t/h当たり処理時間(h/hイクル)	4		4								
設備	1t/h当たり除染液量(m3/hイクル)	0.29	3.00	1.00	6.00	6.00	3.00	2.00	2.50	2.50	5.00	2.50
規模	1t/h当たり処理量(t/hイクル)	0.06	0.58	0.19	1.15	1.15	0.58	0.38	0.65	0.65	0.22	0.65
全t/h基數	1t/h当たり計測所要時間(h/hイクル)	14.406	1.393	4.133	4.179	697	697	2.090	1.232	1.232	3.697	616
全t/h基數	1t/h当たり処理時間(h/hイクル)	1.601	1.55	465	78	78	155	253	137	137	410	68
試算結果	1t/h当たりリバーガジ	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
1t/h当たり除染工数(人・hイクル)	C.50	5.17	5.17	1.72	10.34	10.34	5.17	3.45	5.86	5.86	1.95	11.71
1t/h当たり除染所要時間(h/hイクル)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
1t/h当たり計測所要時間(h/hイクル)	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
1t/h当たり処理時間(h/hイクル)	36	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
1t/h当たり除染工数(人・hイクル)	160	160	160	320	160	160	160	160	160	160	320	160
1t/h当たり計測工数(人・hイクル)	108	108	108	216	108	108	108	108	108	108	216	108
1t/h当たり除染処理工数(人・hイクル)	120	120	120	240	120	120	120	120	120	120	240	120
1t/h当たり除染日数(日/hイクル)	5.00	4.99	1.66	4.99	4.99	1.66	1.66	5.00	1.67	1.67	5.00	1.67
1t/h当たり計測日数(日/hイクル)	4.50	4.49	1.50	4.49	4.49	1.50	1.50	4.50	1.50	1.50	4.50	1.50
年間カット数	5.00	5.00	1.67	5.00	5.00	1.67	1.67	5.00	1.67	1.67	5.00	1.67
年間実働日数(日)	40	4	12	4	4	8	8	19	13	19	17	11
全工数(千人・日)	200	19	6	19	19	13	13	17	6	17	17	17
	78	8	8	23	4	8	8	11	7	7	20	7
												10

表3-3 CORD UV法とギ酸還元法に関するANN入力パラメータと実験データ(10)

(3) HOP法と塩酸還元法の安全性・運転保守性

安全性、運転保守性に関する整理表 (添付資料1.資料39の表-11、18)

除染方法	要因	安全性		運転保守性
		設備側	運転側	
HOP法	[除染液]還元剤としてシュウ酸、酸化剤として過マンガン酸カリウムを使用する。また、シュウ酸分解時に過酸化水素を使用する。	<ul style="list-style-type: none"> ・除染タンク及び配管フランジ部等からの漏洩に備え、漏洩防止パンを設ける。 ・除染タンクには、タンクレベル計を設置し水位を監視するとともに、レベル高の場合には循環ポンプ停止する等のインターロックを設ける。 	<ul style="list-style-type: none"> ・薬品取扱作業者は、薬品の性質、取扱方法及び緊急時の処理方法に対する教育を行う。 ・薬品取扱時には保護具（保護メガネ、ゴム手袋等）を着用し、作業する。 ・除染作業時においては、適宜漏洩等の有無を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・過マンガン酸カリウムは危険物としての貯蔵管理が必要となり、特化物としての作業環境管理を行う。 ・シュウ酸及び過酸化水素は一般化学薬品の取扱方法に準じた管理を行う。
	[温度]除染液昇温（～90℃）するため、除染液が循環する機器、配管表面が高温となる。	<ul style="list-style-type: none"> ・配管類は保温材を使用し火傷防止をばかり、高温注意等のステッカ等により、注意を促す。 ・電気ヒーターには安全装置を設け、過熱防止をはかる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・除染液の温度監視を行い適切な運転温度に保つ。 	<ul style="list-style-type: none"> ・自動温度制御装置の使用により温度コントロールが容易となる。 ・電気ヒーターの接液部等は特に健全性確認を徹底する。
	[分解ガス] シュウ酸及び過マンガニ酸カリウムの分解時に分解ガスが発生する。（発生するガスは二酸化炭素であり、放射性核種は含まれていない）	<ul style="list-style-type: none"> ・ベントユニットには、高温ガスを冷却する冷却器と HEPA フィルターを設けミストを除去する。 ・フィルターを通った気体は換気系に排気する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ベントユニットの運転状態を適宜確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・必要に応じてフィルターを交換する。
	[定期点検、取替]除染液の作用により、構成機器、配管の材料が溶解する。	<ul style="list-style-type: none"> ・配管、機器は、除染液の作用で急激な減肉が生じない材料を選定する。 ・ポンプ等の回転体は減肉が大きいため取替頻度を増加させる、あるいはコーティングを施す等の処理を行う。 ・配管、機器の配置及び構造計画は、定期検査及び取替えの作業性を考慮する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・配管の肉厚測定等を定期的に行い健全性を確認する。 ・運転中は除染液の漏洩の有無及び機器の運転状態を監視する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・定期的な検査により、交換が必要と判断された機器、部品については取替えを行う。
塩酸還元法	・高濃度薬剤(HCl, NaOH, H ₂ O ₂)の使用	<ul style="list-style-type: none"> ・高濃度薬剤の使用は除染液調整及び中和、還元剤分解時の薬液注入時である。薬剤タンクへの注入は移送ポンプを使用。 	<ul style="list-style-type: none"> ・濃厚薬剤取扱時には保護具（保護メガネ、マスク、ゴム手袋等）を着用し、作業する。 ・薬品取扱者に対しては、事前に化学物質等安全シート(MSDS)に基づき教育を行う。 ・作業時には、適宜漏洩等の異常の有無を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・使用する薬剤は特殊な物ではなく、人手は容易。
	・強腐食性薬剤（塩酸）の使用	<ul style="list-style-type: none"> ・塩酸に直接接触する部位にはチタン、テフロンランニング(3mm)等の耐食材を使用。 ・配管は取替性を考慮しフランジ取り合いでとする。 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業時には、適宜漏洩等の異常の有無を確認するとともに、定期的に容器、機器の損傷の有無を点検する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・漏洩等の異常ありの場合あるいは定期点検により損傷が見つかった場合は補修あるいは部材の交換を実施。 ・テフロンランニングの耐用年数は稼動部3年、静止部5年を想定。 ・廃液の塩酸回収電解槽イオン交換膜は1～2年で交換要。
	・塩酸蒸気の発生	<ul style="list-style-type: none"> ・除染槽内は常時吸引排気 ・排気はアルカリスクラバで塩酸除去後フィルターをと通り既設の排気系に放出。 	<ul style="list-style-type: none"> ・除染物の挿入、取り出し時以外は蓋を閉じる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・必要に応じてフィルターを交換。
	・高温部（廃液処理のうちの還元剤分解及び蒸発濃縮の温度は95℃～沸点である。）	<ul style="list-style-type: none"> ・高温部に直接作業者が触れないよう火傷防止を兼ねて保温材を取り付ける左記以外では、最も温度が高い部位でも50～60℃であり危険はない。 ・所定温度以上に加熱しないよう自動コントロールするが、万一本定温度以上に過熱した場合は電源を自動遮断。 		
	・除染液への放射能の蓄積	<ul style="list-style-type: none"> ・遙隔運転を可能とする。 ・表面線量当量率が上昇する機器には遮蔽を設置する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業は遙隔により、緊急時及び保守点検時以外は近づかない。 ・除染液の放射能濃度が所定値異常になったら除染液を交換。 	<ul style="list-style-type: none"> ・被ばく低減のため、保守点検時は可能な限り液を抜き、必要に応じて水張りして実施。

表3-3 CORD UV法とギ酸還元法に関するANN入力パラメータと実験データ(11)

(4) HOP法と塩酸還元法による処理条件とコスト評価

表-22(1) 東海ウラン系廃棄物のHOP法及び塩酸還元法による除染の経済性評価

除染法	HOP法 ケース 1																							
処理量 (ton)	801																							
二次廃棄物 処理法	イオン交換法										浸漬法													
材料組成 (%)	SUS 100		CS 100		SUS/CS 50/50		SUS 100		CS 100		SUS/CS 50/50		SUS 100		CS 100		SUS/CS 50/50		SUS 100					
処理期間 (年)	40		20		40		20		40		20		40		20		40		20					
1日稼動時間(h)	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8				
建設コスト (百万円)	5830	8180	8290	8290	5830	8180	8290	8290	5830	8180	8290	8290	5914	8274	8274	8274	8274	8274	5914	8274	8274			
運転コスト (百万円)	1799	1797	1615	1299	2030	2028	1746	1698	1946	1844	1682	1446	2142	2139	2139	1775	8606	3603	3608	5242	2873	2870	2500	
処分コスト (百万円)	1727	1634	1652	1652	4688	4685	4518	4518	3206	8236	3080	3080	821	692	692	692	1691	1763	1763	1763	1354	1226	1226	
単位処理量 当単価 (百万円/t)	8.62	6.23	6.00	6.73	9.51	8.51	6.39	6.02	9.71	6.41	6.12	5.91	10.06	6.76	6.98	6.49	11.88	8.59	8.71	8.26	10.97	7.67	7.50	7.34
単位処理量 当単価 (千円/ten) *	11680	8253	7936	7686	15666	12237	11920	11680	13710	10268	9668	9698	11082	7623	7748	7292	14248	10766	10911	10461	12680	9201	9325	8875

* 処分コストを含む

表-22(2) 東海ウラン系廃棄物のHOP法及び塩酸還元法による除染の経済性評価

除染法	HOP法 ケース 2														塩酸還元法 (HOP法、浸漬法と同等扱い)						
処理量 (ton)	801														801						
二次廃棄物 処理法	イオン交換法														塩酸回収-中和-浸漬						
材料組成 (%)	SUS 100		CS 100		SUS/CS 50/50		SUS 100		CS 100		SUS/CS 50/50		SUS 100		CS 100		SUS/CS 50/50		SUS 100		
処理期間 (年)	40		20		40		20		40		20		40		20		40		20		
1日稼動時間(h)	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	
建設コスト (百万円)	5830	8180	8290	8290	5830	8180	8290	8290	5830	8180	8290	8290	5914	8274	8274	8274	8274	8274	5914	8274	8274
運転コスト (百万円)	2210	2208	1926	1602	2284	2281	1999	1675	2248	2245	1868	1639	659	659	659	659	659	659	659	659	659
処分コスト (百万円)	1180	1027	955	955	2435	2382	2260	2260	1781	1878	1608	1608	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	3480	
単位処理量 当単価 (百万円)	10.08	6.74	6.51	6.11	10.13	6.88	6.60	6.20	10.08	6.79	6.56	6.15	8.21	4.91	5.09	6.03	6.03	6.03	6.03	6.03	
単位処理量 当単価 (千円/ton) *	11448	8021	7704	7299	13169	9741	9424	9019	12308	8580	8563	8158	12564	9258	9382	9382	9382	9382	9382	9382	

* 処分コストを含む

表3-4 溶融塩電解除染法 及び フッ化ガス除染法 試験結果のANN入力/パラメータ

1/4

資料番号	①対象物材質	入力パラメータ						評価(target)		
		②対象物幾何学形状 パラメータ値	③汚染物化学的性状 パラメータ値	④目標除染レベル パラメータ値 設定1 設定2	(DF値)	(実験値)	④が1 ④が2			
1. 溶融塩電解除染										
資料21 金属板電解除染	1 SUS板(無垢材)	1 平板	1 酸化ウラン	1 1	2	3429	1	1	1	1
	2 SUS板(無垢材)	1 平板	1 酸化ウラン	1 1	2	2491	1	1	1	1
	3 SUS板(無垢材)	1 平板	1 酸化ウラン	1 1	2	1356	1	1	1	1
	4 SUS板(無垢材)	1 平板	1 酸化ウラン	1 1	2	302	2	1	1	1
	5 SUS板(焼結材)	1 平板	1 酸化ウラン	1 2	1	761	1	1	3	3
	6 SUS板(焼結材)	1 平板	1 金属ウラン	1 2	1	7	3	3	3	3
	7 Al板	3 平板	1 金属ウラン	1 2	1	3	3	3	3	3
	8 Al板	3 平板	1 金属ウラン	1 2	1	3	3	3	3	3
	9 モネル板	2 平板	1 酸化ウラン	1 1	2	3027	1	1	1	1
	10 モネル板	2 平板	1 酸化ウラン	1 1	2	1591	1	1	1	1
	11 モネル板	2 平板	1 金属ウラン	2 1	2	7243	1	1	1	1
2. 金属加工材電解除染										
資料22 金属加工材電解除染	1 SUS材	1 アングル形	2 酸化ウラン	1 1	2	475	2	1	1	1
	2 SUS材	1 アングル形	2 酸化ウラン	1 1	2	536	1	1	1	1
	3 SUS材	1 配管(20φ)	3 酸化ウラン	1 1	2	1077	1	1	1	1
	4 SUS材	1 配管(20φ)	3 酸化ウラン	1 1	2	560	1	1	1	1
	5 SUS材	1 配管(50φ)	3 酸化ウラン	1 1	2	100	2	1	1	1
	6 SUS材	1 配管(50φ)	3 酸化ウラン	1 1	2	212	2	1	1	1
	7 Al材	3 平板	1 酸化ウラン	1 1	2	1	3	3	3	3
	8 Al材	3 平板	1 酸化ウラン	1 1	2	0	0	3	3	3
3. 金属電解除染										
資料24 金属電解除染										
(1) 加工材	1 SUS材	1 L型鋼	2 酸化ウラン	1 1	2	76000	1	1	1	1
	2 SUS材	1 L型鋼	2 酸化ウラン	1 1	2	29231	1	1	1	1
	3 SUS材	1 20φ配管	3 酸化ウラン	1 1	2	2500	1	1	1	1
	4 SUS材	1 20φ配管	3 酸化ウラン	1 1	2	1500	1	1	1	1
	5 SUS材	1 50φ配管	3 酸化ウラン	1 1	2	3333	1	1	1	1
	6 SUS材	1 50φ配管	3 酸化ウラン	1 1	2	10000	1	1	1	1
(2) バルブ	SUS材	1 バルブ	4 酸化ウラン	1 1	2	231	2	1	1	1
	モネル材	2 バルブ	4 酸化ウラン	1 1	2	432	2	1	3	3
	モネル材	2 バルブ	4 酸化ウラン	1 1	2	30	2	3	3	3

表3-4 溶融塩電解除染法 及び フッ化ガス除染法 試験結果のANN入力パラメータ

資料番号	入力パラメータ						評価(target)			
	①対象物材質	パラメータ値	②対象物幾何学形状	パラメータ値	③汚染物化学的性状	パラメータ値	④目標除染レベル	パラメータ値 設定1	パラメータ値 設定2	
2.フッ化ガス除去 資料20 スクラップ処理 (1)NaFペレット	1スクラップ 2スクラップ 3スクラップ 4スクラップ 5スクラップ 6スクラップ 7スクラップ 8スクラップ 9スクラップ 9'スクラップ	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	塊状 粉末 塊状 粉末 塊状 粉末 塊状 粉末 粉末 粉末	9 10 9 10 9 10 9 10 10 10	UF ₆ UF ₆ UF ₆ UF ₆ UF ₆ UF ₆ UF ₆ UF ₆ UF ₆ UF ₆	5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	(回収率) 46.4 99.7 4.8 0 83.7 97.7 48.6 0 93 97.7	3 1 3 3 2 1 3 3 1 1
(2)CaF ₂ スラッシュ	1スラッシュ 2スラッシュ 3スラッシュ 4スラッシュ 5スラッシュ 6スラッシュ アスラッシュ 8スラッシュ	4 4 4 4 4 4 4 4	塊状 粉末 塊状 粉末 塊状 粉末 粉末 粉末	11 12 11 12 12 12 12 11	フッ化ウラン フッ化ウラン フッ化ウラン フッ化ウラン フッ化ウラン フッ化ウラン フッ化ウラン フッ化ウラン	5 5 5 5 5 5 5 5	1 1 1 1 1 1 1 1	2 2 2 2 2 2 2 2	96.5 97.1 35.9 37.5 62.9 86.2 96.4 89.8	1 1 3 3 2 2 1 2
資料31 HEPAフィルター	1フィルター 2フィルター 3フィルター 4フィルター 5フィルター 6フィルター 7フィルター 8-1フィルター 8-2フィルター 9-1フィルター 9-2フィルター	4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	塊状 塊状 塊状 塊状 塊状 塊状 塊状 塊状 塊状 塊状 塊状	5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	UO ₂ UO ₂ UO ₂ UO ₂ UO ₂ UO ₂ U ₃ O ₈ U ₃ O ₈ UO ₂ UO ₂ UO ₂	2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 2	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	4.4E-02 4.1E-03 4.0E-02 2.3E-02 1.2E-02 3.8E-02 2.6E-02 1.4E-03 1.4E-03 2.3E-02 2.3E-02	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

表3-4 溶融塩電解除染法 及び フッ化ガス除染法 試験結果のANN入力/パラメータ

資料番号	①対象物材質	パラメータ値	入力/パラメータ		③汚染物化学的性状	パラメタ値	④目標除染レベル		(実験値)	(④が1 ④が2)
			②対象物幾何学形状	パラメタ値			パラメータ値設定1	パラメータ値設定2		
10-1	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	7.6E-04	-1
10-2	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	7.6E-04	1
11-1	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	1.2E-03	1
11-2	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	1.2E-03	1
11-3	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	1.2E-03	1
12-1	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	3.0E-03	1
12-2	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	3.0E-03	1
12-3	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	3.0E-03	1
13-1	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	3.7E-03	1
13-2	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	3.7E-03	1
13-3	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	3.7E-03	1
14-1	フィルター	4	塊状	5	U ₃ O ₈	1	1	1	1.1E-03	1
14-2	フィルター	4	塊状	5	U ₃ O ₈	1	1	1	1.1E-03	1
14-3	フィルター	4	塊状	5	U ₃ O ₈	2	1	2	1.1E-03	1
15-1	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	8.0E-04	1
15-2	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	8.0E-04	1
15-3	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	8.0E-04	1
15-4	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	8.0E-04	1
15-5	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	8.0E-04	1
15-6	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	8.0E-04	1
15-7	フィルター	4	粉末	6	UO ₂	2	1	2	8.0E-04	1
15-8	フィルター	4	粉末	6	UO ₂	2	1	2	8.0E-04	1
15-9	フィルター	4	粉末	6	UO ₂	2	1	2	8.0E-04	1
16-1	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	1.7E-03	1
16-2	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	1.7E-03	1
16-3	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	1.7E-03	1
16-4	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	1.7E-03	1
16-5	フィルター	4	塊状	5	UO ₂	2	1	2	1.7E-03	1
16-6	フィルター	4	塊状	6	UO ₂	2	1	2	1.7E-03	1
16-7	フィルター	4	粉末	6	UO ₂	2	1	2	1.7E-03	1
16-8	フィルター	4	粉末	6	UO ₂	2	1	2	1.7E-03	1
16-9	フィルター	4	粉末	6	UO ₂	2	1	2	1.7E-03	1

表3-4 溶融塩電解除染法 及び フッ化ガス除染法 試験結果のANN入力/パラメータ

資料番号	①対象物材質	入力パラメータ			評価(target)		
		②対象物幾何学形状	パラメータ値	③汚染物化学的性状	パラメータ値	④目標除染レベル	(実験値)
資料31	焼却灰						
1	焼却灰	4	塊状	7	U_3O_8	1	1.4E-03
2	焼却灰	4	塊状	7	U_3O_8	1	5.2E-03
3	焼却灰	4	塊状	7	U_3O_8	1	4.5E-03
3'	焼却灰	4	粉末	8	U_3O_8	1	4.5E-03
4	焼却灰	4	塊状	7	U_3O_8	1	1.3E-03
4'	焼却灰	4	粉末	8	U_3O_8	1	1.3E-03
5	焼却灰	4	塊状	7	U_3O_8	1	9.8E-03
6	焼却灰	4	塊状	7	U_3O_8	1	8.2E-04
7	焼却灰	4	塊状	7	U_3O_8	1	5.8E-4 ~ 1.6E-2
8	焼却灰	4	塊状	7	U_3O_8	1	5.8E-4 ~ 1.6E-2
9	焼却灰	4	塊状	7	U_3O_8	1	5.8E-4 ~ 1.6E-2
10	焼却灰	4	塊状	7	U_3O_8	1	5.8E-4 ~ 1.6E-2
11	焼却灰	4	塊状	7	U_3O_8	1	5.8E-4 ~ 1.6E-2
12	焼却灰	4	塊状	7	U_3O_8	1	5.8E-4 ~ 1.6E-2
13	焼却灰	4	塊状	7	U_3O_8	1	5.8E-4 ~ 1.6E-2
14	焼却灰	4	塊状	7	U_3O_8	1	9.2E-04
14'	焼却灰	4	塊状	7	U_3O_8	1	9.2E-04
15	焼却灰	4	塊状	7	U_3O_8	1	8.0E-04
15'	焼却灰	4	塊状	7	U_3O_8	1	8.0E-04

4. ANN モデルによる除染技術選定の評価と応用検討

ANN モデルの除染技術選定への応用を検討した。3.で検討したように、実際の試験データを扱った溶融塩電解除染法とフッ化ガス除染法に関する資料を使用し、2つの除染技術のどちらがより適切な技術であるかの評価をシミュレーションし、出力する ANN モデルについて検討を行った。

4.1 ANN モデルの設計

a. 出力パラメータの設定

ANN モデルを検討するに当たって、昨年度は、ある目的物を一つの方法で除染を行う場合の評価を行うモデルを検討したが、今年度は、1つの除染対象物に対して、2つの除染方法、各々の評価を行うモデルを検討した。すなわち、溶融塩電解除染及びフッ化ガス除染に対する評価として、2要素が出力される。

出力パラメータ

- ・ 溶融塩電解除染法に対する評価
- ・ フッ化ガス除染法に対する評価

各パラメータ値は、除染レベルの目標値と試験結果の比較により、

- ① 適合：目標レベルに達している。
- ② 不可能ではないが妥当ではない：目標レベルに達していないが考慮の余地あり
- ③ 不適：目標のレベルに達せず、考慮の余地も無い。

(実際の試験と異なる事例については、評価レベルを③とした。つまり、実際は、溶融塩電解除染による試験を行っているが、フッ化ガス除染を行ったと想定した事例、あるいはその逆の事例での評価レベル)

とした。

なお、3.で示したように、除染レベルの目標値は、入力パラメータの一つでなるが、実験実施時には定めていないため、便宜的に

- ① DF 値 500 以上或いは、汚染物回収率 90% 以上
- ② DF 値 500~10 或いは、汚染物回収率 90~60% 以上

と設定した。

b. ANN モデルの設定

ANN モデルは、昨年度と同じくバックプロパゲーションを採用し、入力パラメータ、出力パラメータより、次のようなネットワークを作成した。

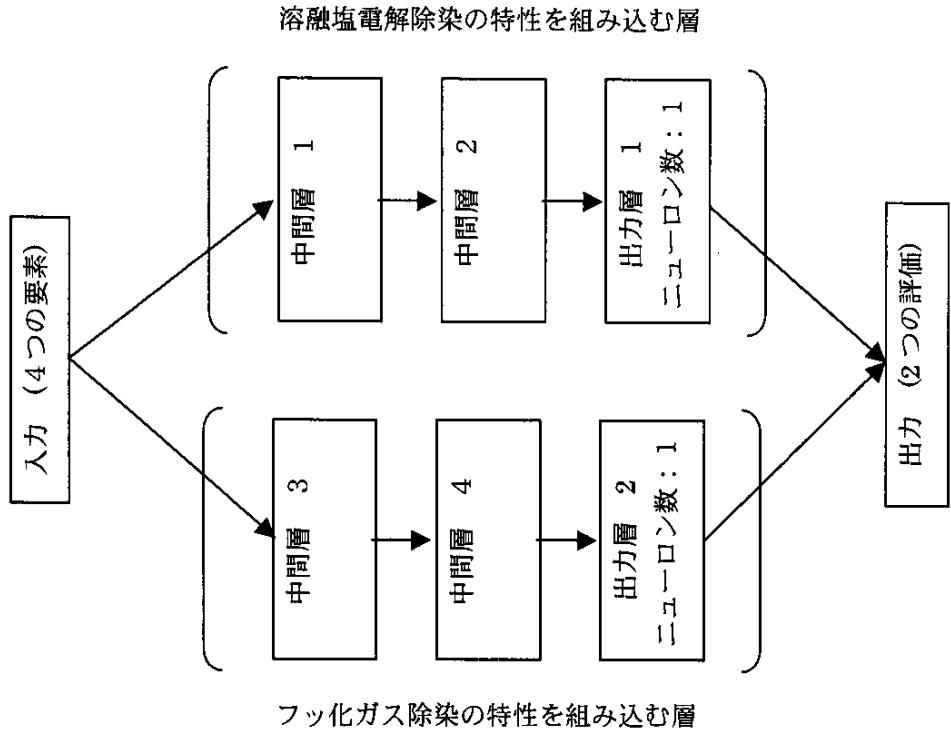


図 4-1 ANN モデルの構成概念

中間層 1、2 及び出力層 1 は、溶融塩電解除染の特性を反映し、中間層 3、4 及び出力層 2 は、フッ化ガス除染の特性が反映されるものと、期待した。

ANN 構成因子としては、中間層の数と、各々の中間層のニューロン数及び特性関数を選定する必要がある。

中間層の数： 昨年度の結果に従い、2 層とした。図 1 では、中間層は 4 層あるが、各々の除染方法を反映する層は、2 層づつになっている。

特性関数： バックプロパゲーションモデルでは、シグモイド関数、線形関数、パイバボリック・タンジェント関数が利用可能。

ニューロン数： この選定には、現在、決定的な方法は明確にされていないが、ダンプ法⁽¹⁾と試行錯誤法が最も良く使われている。^[1]

(1)ダンプ法 $\{(入力ニューロン数 + 出力ニューロン数) / 2\} \times \alpha, \alpha = 2$ (スムージング数で通常 1 か 2 が使われる。) により、ニューロン数を選定する方法^[1]

特性関数とニューロン数から、無数の ANN が構築できるが、次のようにケースを絞った。

- ・ [中間層 1、中間層 2、出力層 1] と [中間層 3、中間層 4、出力層 2] は、同じ組合せにする。
- ・ 特性関数は、上記の 3 種類の関数より、全部で 16 通りのパターンが考えられる。
- ・ 中間層のニューロン数は、ダンプ法により、 $\alpha=1$ とした場合の 3、 $\alpha=2$ とした場合の 6 が考えられるが、ここでは、更にその倍数の 12 と中間の 8 を選び、これ

らの組合せを考えた。

特性関数の組合せパターンを表 4-1、ニューロン数の組合せパターンを表 4-2 に示す。

c. ネットワークの評価値

① ANN"uran_1"(特性関数 : tansig-tansig-purelin、ニューロン数 : 6-6-1)

まず、ANN"uran_1"(特性関数 : tansig-tansig-purelin、ニューロン数 : 6-6-1)を、3 セットの教師データで 3 回の学習を重ねて行ったが、各学習後の誤差平均値に大きな変化は見られなかったので、この他のネットワークでは、学習は、教師データ 1 による学習のみとした。

② 最適なネットワークの選択

b. で設定した特性関数の各組合せ毎に、ニューロン数の組合せを変えたネットワークを作成し、学習・シミュレーションを行う形で進めた。

特性関数の組合せの内、出力層が tansig 及び logsig のものについては、数種類の組合せについて、学習・シミュレーションを行ったが、学習時では、そのパラメータ MSE 値が適切に収束さず、また、シミュレーションを行ってもその評価値はまったくそぐわないものであった。これらのネットワークの学習状況の出力例を、図 4-2 に示す。

(ネットワーク : 特性関数 tansig—tansig—tansig、ニューロン数 6-6-1)

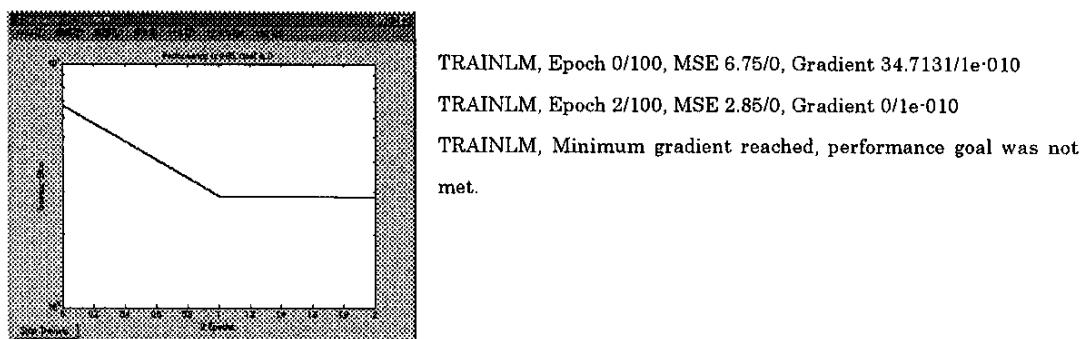


図 4-2 出力層が tansig 及び logsig のネットワークの学習状況

従って、特性関数組合せパターンは、出力層が purelin のものに絞り、各々のネットワークについて、学習とシミュレーションを行った。出力層を purelin に設定したネットワークの学習状況の出力例を図 4-3 に示す。

(ネットワーク：特性関数 tansig—logsig—purelin、ニューロン数 3-3-1)

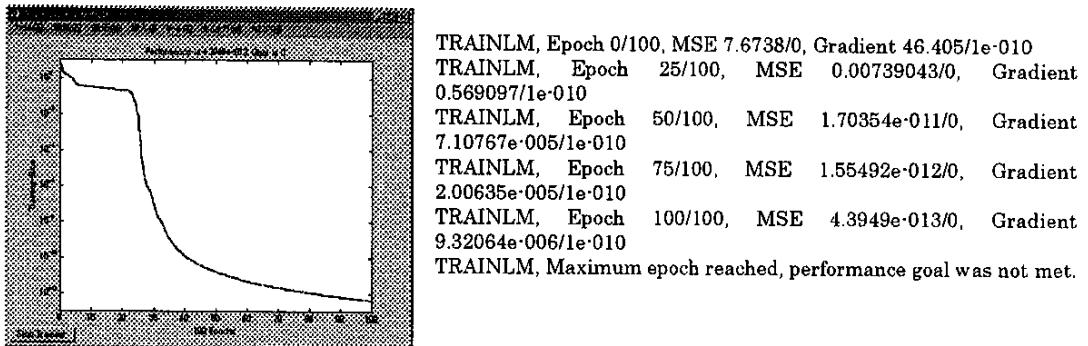


図 4-3 出力層が purelin のネットワークの学習状況

各ネットワークの出力値の誤差平均値を表 4-4 に、誤差平均値の小さいネットワークの出力及び誤差を表 4-5 に示す。

4.2 ANN モデルの出力値と評価

中間層及び出力層の特性関数組合せと、ニューロン数組合せを変えたネットワークの出力を行った。特性関数組合せのうち、出力層が purelin のものに限って行ったが、特性関数組合せとニューロン数組合せにより、かなりのケースになった。

まず、誤差平均値によって、様々なネットワークの特性関数やニューロン数の影響を見て、その中で評価の高いものについて各事例毎の出力値について検討する事とした、ここで、誤差平均値とは、ネットワークの出力値と実際の評価との差の絶対値の平均値の意味である。

(1) 特性関数とニューロン数の組合せの誤差平均への影響

様々なパターンの ANN 出力値の誤差平均値を、表 4-4 に示す。この表には、それぞれのネットワークの溶融塩電解除染法とフッ化ガス除染法、それぞれの誤差平均値と、これらを合わせた誤差平均値を示した。これより中間層の特性関数とニューロン数の組み合わせが ANN 出力値にどのように影響するかを見ると、次の事がわかる。

- ・ 誤差平均値は、0.3~1.0 に收まり、0.4~0.6 のものが多い。
- ・ 特性関数組合せパターン 25 の purelin-purelin-purelin では、ニューロン数を変えても、各ネットワークの学習精度はほとんど変わらず、また、出力値も一致していた。これは、線形関数(purelin)の特性を反映したものと思われる。
- ・ 特性関数組合せパターン 9 の tansig-tansig-purelin、の出力値がニューロン数を変化させた場合でも、安定して比較的小さい誤差であった。しかし誤差平均値が最も大きいパターン（ニューロン数が 3-3-1）も、この特性関数の組合せであった。
- ・ 特性関数組合せパターン 5 の tansig-logsig-purelin、パターン 16 の logsig-purelin-purelin、パターン 18 の logsig-tansig-purelin の組合せでも、安定して比較的小さい誤差平均値であった。
- ・ 中間層ニューロン数組合せでは、3 または 6 に設定したネットワークの誤差平均値が

比較的小さい値であった。しかし、特にパターン 10 の 6・3・1 の組合せでは、特性関数の組合せにより、誤差平均値が比較的小さいものと、比較的大きいものとに分かれた。

(2) 事例ごとの ANN 出力値

誤差平均値の小さいほうから 3 つのパターンの ANN 出力値と実際の評価との差を、表 4-5 に示す。これより次の事がわかる。

- ・ ネットワークの出力値と評価が 1 以上異なる場合は、それに似た入力パラメータ値を持つ教師データの target 値に近い出を行っている。
- ・ 入力パラメータ値及びその評価が、教師データに近い事例のネットワーク出力値は、比較的評価値に近い。
- ・ 実際の試験とは異なる除染方法を想定し、その評価を一様に 3 としたが、この事例のネットワークの出力誤差は小さい。これは、入力パラメータと、評価の相関が一定していたためと考えられる。

上記の、誤差が大きくなってしまった事例については、その原因として、実際の試験では、同じ入力パラメータで表現される対象物に対して、異なる試験パラメータ（温度・時間・除染物質等）により試験を行っているため、除染率が変わっているが、ANN モデルに適用する際には、試験パラメータによる区別が行われなかつた事が考えられる。

しかし、技術選定として、ANN でのシミュレーションを考えた場合、入力パラメータは、「対象物の特徴を示すもの」と「目標値」とし、「対象物に対してある技術を施した場合、目標値に対してどのような結果を示すか」が ANN の出力として出されるものと、考えられる。従って、今回の場合、各除染方法での最大除染率を教師データとし、ANN でのシミュレーション出力値も、個々の試験状況に依存する除染率の評価ではなく、ある対象物に対する最大評価と捉える必要がある。

(3) ANN モデルの適用性に関する評価

(1)、(2)の結果を総合すると、ANN の除染技術選定への適用に関して次のように評価できる。

- ・ ネットワークの特性関数を決定する方向性として、まず、ネットワークの学習を適度に収束させるためには、出力層に線形関数を利用しなくてはならない。
中間層を 2 層にする場合、2 層とも purelin を用いると、中間層のニューロン数による影響が無くなる。中間層には非線型関数を用いたほうが良い傾向を示す場合が多い。
- ・ ネットワークのニューロン数を決定する方向性として、やはり、最終的には試行錯誤法になるが、ダンプ法により範囲を狭めることができる。
- ・ ANN モデルを利用して 2 つの除染方法に対して、それぞれのシミュレーションを行い、評価を出力させることができ、それぞれの出力値は、ANN モデルの設定によって、教師データの特徴を良く反映させることのできるものであった。

のことより、2 つ以上の除染方法を複合的に評価するモデルが可能であると考えられる。

- ・ 除染技術選定という範囲で考えるならば、ANN の出力精度を高めるためには、試験状

況に依存する評価ではなく、除染方法に依存する評価という意味で、各除染方法における最大評価として捉える事がポイントとなる。

4.3 ANN モデル適用の課題

除染は、作業者や施設の安全確保を図りながら解体作業の効率化、解体物の再利用、発生廃棄物量の低減を図るために実施するものであるが、できるだけ廃止措置に係る費用を安くすることが必要である。そして、昨年度の報告書「4.2 技術選定方法の定式化」では、技術を選定する際の要素として、

- ① 除染対象物の特性
- ② 汚染物質の性状と形態
- ③ 除染係数
- ④ 除染時間
- ⑤ 被ばく低減量等の除染効率
- ⑥ 除染廃棄物と処分
- ⑦ 経済性
- ⑧ 安全性

などがあげられた。今回は、ANN モデルでシミュレーションを行った除染の事例は、各除染法検討のための試験結果を利用したものであるため、上記の要因のうち、①~③についての評価、及びシミュレーションであった。

ANN は「認知的な仕事」を得意としている。つまり、文字等のパターン認識や、経済予測や、天気予測のようなものであり、人間の脳の情報処理に類似した柔軟な情報処理技術に向いており、その分野でのアプリケーションが開発されている。

従って、廃止措置に係る技術選定の場合においても、上記の要因から、専門家がどのように判断によるかという事例をもとにして、技術選定の分野に ANN を応用することができるであろう。

参考図書

- [1] 「ニューラルネットワークの設計と応用」、Bahman Kermanshahi 著、株式会社昭晃堂出版、1999 年 6 月発行

表4-1 特性関数組合せパターン

番号	中間層1と3	中間層2と4	出力層1と2
1	tansig	tansig	tansig
2	tansig	tansig	logsig
3	tansig	logsig	tansig
4	tansig	logsig	logsig
5	tansig	logsig	purelin
6	tansig	purelin	logsig
7	tansig	purelin	purelin
8	tansig	purelin	tansig
9	tansig	tansig	purelin
10	logsig	tansig	tansig
11	logsig	tansig	logsig
12	logsig	logsig	tansig
13	logsig	logsig	logsig
14	logsig	logsig	purelin
15	logsig	purelin	logsig
16	logsig	purelin	purelin
17	logsig	purelin	tansig
18	logsig	tansig	purelin
19	purelin	tansig	tansig
20	purelin	tansig	logsig
21	purelin	logsig	tansig
22	purelin	logsig	logsig
23	purelin	logsig	purelin
24	purelin	purelin	logsig
25	purelin	purelin	purelin
26	purelin	purelin	tansig
27	purelin	tansig	purelin

表4-2 ニューロン数組合せパターン

番号	中間層1と3	中間層2と4	出力層1と2	
1	6	6	1	(ダンプ法、 $\alpha=2$)
2	3	3	1	(ダンプ法、 $\alpha=1$)
3	8	8	1	
4	12	12	1	(ダンプ法 $\alpha=2$ の倍数)
5	12	8	1	
6	12	6	1	
7	12	3	1	
8	8	6	1	
9	8	3	1	
10	6	3	1	
11	3	6	1	
12	3	8	1	
13	3	12	1	
14	6	12	1	
15	6	8	1	
16	8	12	1	

表4-3. ネットワークの学習に使用したデータ

塩:溶融塩電解除染試験によるデータ
F:フッ化ガス除染試験によるデータ

トレーニング1の教師データ 1

資料番号	塩	塩	塩	F	F	塩	塩	塩	F	F
	21	22	21	31	20	21	22	21	31	20
	(2)	(2)		(2)	(2)		(2)	(2)		(2)
	1	5	7	3	3	1	5	7	3	3

Input

Target

トレーニング2の教師データ 2

資料番号	塩	塩	塩	塩	塩	F	F	F	F	F	F	F	F	F
	21	22	22	21	21	31	31	20	20	20	21	22	22	21
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(2)	(1)	(2)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
	1	1	5	9	7	1	3'	2	3	4	1	1	5	9
	7	1	3'	2	3	4	1	1	5	9	7	1	3'	2
	3	4	1	1	5	5	5	5	5	5	2	3	4	4

Input

Target

トレーニング3の教師データ 3

資料番号	塩	塩	塩	塩	塩	塩	F	F	F	F	F	F	F	F	F
	21	21	22	22	24	21	21	31	31	31	20	20	20	20	20
	(2)	(2)	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)	(1)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)
	1	6	2	5	1	11	7	7	15	3'	5	4	3	2	5
											1	6	2	5	1
											11	7	7	15	3'
											-7	-7	-7	-7	-7

Input

Target

表4-4 ネットワーク出力値の誤差平均値

		特性関数組合せ パターン5		特性関数組合せ パターン7		特性関数組合せ パターン9		特性関数組合せ パターン14		特性関数組合せ パターン16		特性関数組合せ パターン18		特性関数組合せ パターン23		特性関数組合せ パターン25		特性関数組合せ パターン27	
		tansig- purelin	logsig- purelin	tansig- purelin	purelin- tansig	tansig- purelin	purelin- tansig	logsig- purelin	purelin- logsig	logsig- purelin	purelin- logsig	logsig- purelin	purelin- logsig	logsig- purelin	purelin- logsig	purelin- logsig	purelin- logsig	purelin- logsig	
		1.溶融塩電解 除染	0.3081	0.2411	0.2311	0.2184	0.2427	0.2753	0.4280	0.3331	0.3317	0.3317	0.3317	0.3317	0.3317	0.3317	0.3317	0.3317	
		2.フッ化ガス 除染	0.5392	0.4236 0.3902	0.3157 0.5098	0.3704	0.3848	0.4270	0.3984	0.6157	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.4765	
		1.溶融塩電解 除染	0.1832	0.2484	1.1611	0.2950	0.2401	0.2782	0.3365	0.3331	0.4450	0.4450	0.4450	0.4450	0.4450	0.4450	0.4450	0.4450	
		2.フッ化ガス 除染	0.4858	0.3345 0.6184	0.4334 0.8034	0.9823	0.4391	0.3667	0.3396	0.5700	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.6242	
		1.溶融塩電解 除染	0.2629	0.3072	0.3083	0.3023	0.3210	0.2725	0.2580	0.3331	0.5412	0.5412	0.5412	0.5412	0.5412	0.5412	0.5412	0.5412	
		2.フッ化ガス 除染	0.5085	0.3847 0.4031	0.3552 0.5520	0.4292	0.4279	0.4139	0.3895	0.4049	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5174	
		1.溶融塩電解 除染	0.2882	0.3659	0.2818	0.2515	0.3494	0.3605	0.3366	0.3331	0.3975	0.3975	0.3975	0.3975	0.3975	0.3975	0.3975	0.3975	
		2.フッ化ガス 除染	0.4843	0.3763 0.5899	0.4779 0.4829	0.3823	0.4213	0.4079	0.4003	0.4003	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.4660	
		1.溶融塩電解 除染	0.3404	0.3985	0.3323	0.2810	0.3020	0.3573	0.2977	0.3331	0.2612	0.2612	0.2612	0.2612	0.2612	0.2612	0.2612	0.2612	
		2.フッ化ガス 除染	0.5515	0.4480 0.5513	0.4749 0.4386	0.3844	0.3475	0.4062	0.4825	0.4492	0.5887	0.5887	0.5887	0.5887	0.5887	0.5887	0.5887	0.4250	
		1.溶融塩電解 除染	0.3378	0.3832	0.2634	0.2538	0.4184	0.2987	0.2377	0.3331	0.8310	0.8310	0.8310	0.8310	0.8310	0.8310	0.8310	0.8310	
		2.フッ化ガス 除染	0.7741	0.5559 0.5781	0.4796 0.5203	0.3918	0.4127	0.4571	0.3674	0.3684	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.6791	
		1.溶融塩電解 除染	0.2800	0.3545	0.2894	0.2671	0.3636	0.7540	0.2548	0.3331	0.3264	0.3264	0.3264	0.3264	0.3264	0.3264	0.3264	0.4437	
		2.フッ化ガス 除染	0.7135	0.4987 0.4998	0.4270 0.5450	0.4172 0.4646	0.3658	0.4816	0.5946	0.3771	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5611	
		1.溶融塩電解 除染	0.2695	0.3309	0.2952	0.3981	0.3035	0.2673	0.2540	0.3331	0.3198	0.3198	0.3198	0.3198	0.3198	0.3198	0.3198	0.4246	
		2.フッ化ガス 除染	0.5859	0.4177 0.5737	0.4523 0.5624	0.4288 0.5704	0.4843	0.3835	0.4032	0.3996	0.6958	0.6958	0.6958	0.6958	0.6958	0.6958	0.6958	0.7151	
		1.溶融塩電解 除染	0.2170	0.3008	0.3931	0.2708	0.3310	0.3035	0.2871	0.8310	0.8391	0.8391	0.8391	0.8391	0.8391	0.8391	0.8391	0.7151	
		2.フッ化ガス 除染	0.5427	0.3799 0.5527	0.4267 0.5335	0.4633 0.4965	0.3914	0.4965	0.4000	0.3837	0.8172	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	
		1.溶融塩電解 除染	0.7025	0.2620	0.2368	0.2612	0.2457	0.2286	0.7414	0.3331	0.4904	0.4904	0.4904	0.4904	0.4904	0.4904	0.4904	0.6469	
		2.フッ化ガス 除染	0.5849	0.8437 0.5214	0.3917 0.5272	0.3820 0.4529	0.3570 0.4921	0.3689	0.3785	0.5049	0.6958	0.6958	0.6958	0.6958	0.6958	0.6958	0.6958	0.6958	
		1.溶融塩電解 除染	0.2483	0.2493	0.2295	0.2394	0.2455	0.2775	0.3264	0.3331	0.4241	0.4241	0.4241	0.4241	0.4241	0.4241	0.4241	0.3994	
		2.フッ化ガス 除染	0.5557	0.4020 0.7702	0.5098 0.5591	0.3943 0.5823	0.4108 0.5102	0.3778 0.5617	0.4196	0.5093	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5568	
		1.溶融塩電解 除染	0.2677	0.2386	0.2450	0.2752	0.3275	0.2520	0.4156	0.3331	0.4759	0.4759	0.4759	0.4759	0.4759	0.4759	0.4759	0.6397	
		2.フッ化ガス 除染	0.5884	0.4280 0.5886	0.4126 0.5199	0.3825 0.5469	0.4110 0.4546	0.3910 0.5737	0.4128	0.5711	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.5145	0.8034	
		1.溶融塩電解 除染	0.4124	0.2431	0.2845	0.3990	0.3836	0.2648	0.4244	0.3331	0.2910	0.2910	0.2910	0.2910	0.2910	0.2910	0.2910	0.4033	
		2.フッ化ガス 除染	0.5970	0.5047 0.7582	0.5006 0.4409	0.3627 0.4839	0.4415 0.5893	0.4865 0.6313	0.4481	0.5750	0.6958	0.6958	0.6958	0.6958	0.6958	0.6958	0.6958	0.5156	
		1.溶融塩電解 除染	0.2815	0.3645	0.2424	0.3463	0.2556	0.3831	0.2861	0.3331	0.3259	0.3259	0.3259	0.3259	0.3259	0.3259	0.3259	0.4024	
		2.フッ化ガス 除染	0.6023	0.4419 0.6483	0.5064 0.4861	0.3643 0.5394	0.4428 0.6881	0.4718 0.4334	0.4082	0.4037	0.6958	0.6958	0.6958	0.6958	0.6958	0.6958	0.6958	0.6389	
		1.溶融塩電解 除染	0.2768	0.3083	0.2392	0.2784	0.2558	0.2843	0.3640	0.3331	0.3589	0.3589	0.3589	0.3589	0.3589	0.3589	0.3589	0.5051	
		2.フッ化ガス 除染	(0.4206)	0.3487 0.5680	0.4382 0.4182	0.3287 0.5547	0.4168 0.5024	0.3791 0.5239	0.4041 0.5983	0.4811	0.6958	0.6512	0.6512	0.6512	0.6512	0.6512	0.6512	0.6512	
		1.溶融塩電解 除染	0.2677	0.3037	0.2863	0.3364	0.3656	0.3378	0.4097	0.3080	0.3331	0.4279	0.4279	0.4279	0.4279	0.4279	0.4279	0.4279	
		2.フッ化ガス 除染	0.4997	0.3837 0.6298	0.4480 0.5504	0.4434 0.5168	0.4412 0.4915	0.4147 0.4682	0.4389 0.5420	0.4250	0.5145	0.4678	0.4678	0.4678	0.4678	0.4678	0.4678	0.4678	

表4-5 ネットワークの出力値と誤差

17

5. その他の技術選定評価への適用性検討

原子力施設の解体においては、鋼構造物の切断・撤去、コンクリート構造物の切断或いは粉碎解体が行われる。これらの部材等の切断や破碎解体には様々な工法が用いられている。このうちの粉碎工法の選定評価への一般的な ANN 適用について検討する。

まず、粉碎技術としては、

機械的技術

制御爆破、スチールボールまたは解体スクラブ、圧碎機工法、静的破碎剤、
ロックジャッキ工法、ハンドブレーカ

熱的技術

火炎工法

などがあり、各々の特徴がある。これらは、各々に対する評価として、除染技術の場合と同様に、ANN モデルに学習によって重み付けとして組み込まれる事になる。入力パラメータとしては、

- 対象物の特質を示すパラメータ
配筋の高低、或いは 放射化の有無等
- 作業環境の特質を示すパラメータ

粉碎作業を行える空間の大きさ等

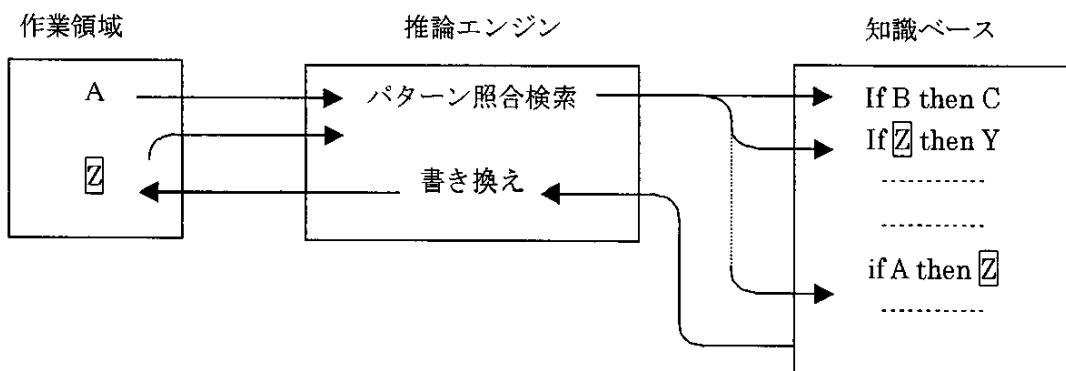
が考えられる。さらに、経済性や安全性についても入力パラメータとして考慮する事ができる。

どのようなケースに ANN を適用するにしても、ANN の能力は教師データの質及び量は係わってくるので、粉碎工法選定評価に適応する場合にも、十分な経験を分析し、優良な教師データを設定することが必要である。

6. その他の技術選定評価手法の調査、検討

人工知能技術としては、今回取り上げた ANN があるが、この他に「知識ベース」を構築し、それに基づき問題処理を行う技術として、「エキスパートシステム」がある。

ANN は専門家の評価過程を、学習を通してネットワークが習得するものであるが、エキスパートシステムでは、それらは、専門家の評価過程を「知識ベース」として取り込まれ、「推論エンジン」が、「作業領域」の問題或いは中間結果を参照し、「知識ベース」中からそれに応じた専門知識を見つけ出して利用するものである。



エキスパートシステムはこの他、マン・マシン・インターフェース、推論過程説明機構、知識ベース作成管理支援システム等から構成される。このシステムの長所としては、

- ・ 知識ベースの入れ替えによって汎用性を持たせることができる。
- ・ 知識の追加によって能力を高めることができる。

などがあげられるが、反面、知識ベースの作成が負担の多い作業になる。それは、専門家の持っている知識を一定のルールに従って記述して行く場合に、ある知識がそのルールで記述できるか否か、また、表面化していない専門家の知識をいかに表面化させるか、などである。

このシステムで実用化されたものには、血液感染症の診療治療に応用した MYCIN がある。^[2]

参考図書

[2] 「知識情報処理」、北橋 忠宏著、北森出版株式会社出版、1998年1月発行

添付資料 1. ウラン廃棄物除染試験

資料 20 スクラップウランのフッ化処理技術の検討

2001年3月 (IHI)

1. 目的

スクラップウランの処理技術として ClF_3 ガスを使用したウランフッ化処理の適応性確認試験を行う。

スクラップ試料として含ウラン NaF 模擬廃棄物、および含ウラン CaF_2 スラッジ実廃棄物について検討する。

2. 含ウラン NaF 模擬試料試験

(1) 試験条件 ; 表-1、2

試 料 ; NaF ペレットに UF_6 を 100°C で吸着調製。サイズ、重量不明

ウラン濃度 ; 3.49w/o (34900PPM)

試験装置 ; フッ化反応容器、ガス供給系統 (ClF_3 、 F_2 ガスボンベ)

オフガス処理系統 (ハロゲントラップ、ドライポンプ)

オフガス・スクラバー (水、 NaOH)、電気炉、ICP-MS

試験パラメーター ; 粉碎効果、温度、ガス種類 (ClF_3 、 F_2)、 N_2 パージ効果と
ウラン回収率

(2) 試験方法 ; 前処理し試料 NaF を電気炉で 120°C 加熱、乾燥→粉碎→試料 取付後反応容器を乾燥し 10^{-2} トールに減圧→フッ化試験。

(3) 結果 ; 表-3、図-1、2

1) 粉碎の影響 (No. 1, 2, 5, 6)

粉碎した方が回収率よい。

2) 温度の影響 (No. 1, 2, 3, 4)

100°C と 400°C の比較では、 100°C ではウランは初期濃度のまま、回収率 0 に等しい。 400°C で 84~100%。

3) 窒素パージの影響 (No. 2, 6)

N_2 パージしない方がウラン回収率 99.7% と高かった。 N_2 パージ有は 97.7% であった。

4) ガス種類の影響 (No. 7, 8, 9)

ClF_3 下では最も除染効率よく、U回収率が高い。

F_2 ガスでは粉碎なし試料の回収率は 48.6% であった。

$\text{F}_2 \rightarrow \text{ClF}_3$ ガスでは、 F_2 ガスのみで 93% の回収率。 ClF_3 ガスを追加して 97.7% の回収率を得た。

5) フッ化に伴う試料の色 (No. 10, 11)

実験中 NaF ペレットは ClF_3 ガスで橙色、 F_2 ガスで緑色に着色した。

プランク試験では ClF_3 で、ごく薄い緑色、 F_2 ガスで緑色であった。

(4) まとめ

- 1) ClF_3 ガス除染した結果 99.7w/o のウランを回収し、ウラン濃度は 84ppm まで低減した。
- 2) F_2 ガスで除染した結果、同一条件の ClF_3 の場合 (99.7%) に対し 93% のウラン回収率であった。
- 3) F_2 ガスで除染試料に更に ClF_3 での除染によって、約 97.7% まで低減できた。
- 4) 以上から NaF からウラン除染・回収には ClF_3 ガスが有効。

3. 含ウラン CaF_2 スラッジ実廃棄物試験

(1) 試験条件；表-4

試 料；ウランを含む CaF_2 スラッジ実廃棄物、サイズ、重量不明
ウ ラ ン 濃 度；0.92w/o (9200ppm)
試 験 装 置； NaF ペレットと同様
試験パラメーター； NaF ペレットと同様
粉碎、温度、ガス (ClF_3 , F_2) 、 N_2 パージ、反応時間とウラン回収率

(2) 試験方法； NaF ペレットと同様

(3) 結果；表-5、図-3、4

- 1) 粉碎および温度と回収率 (No. 1, 2, 3, 4, 5, 6)
粉碎効果はない。温度は上昇によって除染効果向上
- 2) 窒素パージと回収率 (No. 2, 6)
窒素パージあり (No. 6) の回収率は 86.2% に対し、窒素パージなし (No. 2) は 97.1% と高く、窒素パージなしも有効であった。
- 3) 反応時間と回収率 (No. 6, 7)
反応時間を 2 倍にすることで、回収率を 86.2% (No. 6) から 96.4% (No. 7) に上昇。
- 4) ガス種類と回収率 (No. 2, 8)
 ClF_3 ガスの最高回収率 97.1% (No. 2) を得たと同一条件で F_2 ガスを使用した場合は 89.8% (No. 8) で ClF_3 の有効性を示した。

(4) まとめ

- 1) ClF_3 ガス除染で 97.1% のウラン回収率を得た。
- 2) F_2 ガスで除染した場合、他条件を ClF_3 ガスと同じにして最高除染効率は 89.8%。
- 3) 以上からスラッジからウランを除染、回収するフッ化ガスとしては ClF_3 が効率的であることを確認した。

表-1 NaFのフッ化試験パラメータ

パラメータ						
No.	ガス種類	N ₂ バージ	反応器 温度 (°C)	反応器 圧力 (torr)	試料 の量 g	ガス流量の 比率 の量 ml/min
1	ClF ₃	X	400	X	600	0.1
2	ClF ₃	X	400	O	600	0
3	ClF ₃	X	100	X	600	0
4	ClF ₃	X	100	O	600	0
5	ClF ₃	O	400	X	600	0
6	ClF ₃	O	400	O	800	0
7	P ₂	X	400	X	600	0
8	P ₂	X	400	O	600	0
9	P ₂ , ClF ₃	X	400	O	600	0
10	ClF ₃	X	400	O	600	0
11	P ₂	X	400	O	600	0

*他の場合と同様、ClF₃分圧は 600, 800 torrとしたが無効ではないと考える。

表-2 スラッシュのフッ化は塩パラメータ

条件項目						
表-1			表-2			
No.	ガス種類	N ₂ バージ	反応器 温度 (°C)	ガス流量の 比率 の量 ml/min	試料 の量 g	ガス流量 の比率 の量 ml/min
1	ClF ₃	X	400	0	0.1	0.1
2	ClF ₃	X	400	0	0.1	0.1
3	ClF ₃	X	100	0	0.1	0.1
4	ClF ₃	X	100	0	0.1	0.1
5	ClF ₃	O	400	0	0.1	0.1
6	ClF ₃	O	400	0	0.1	0.1
7	P ₂	X	400	0	0.1	0.1
8	P ₂	X	400	0	0.1	0.1
9	P ₂ , ClF ₃	X	400	0	0.1	0.1
10	ClF ₃	X	400	0	0.1	0.1
11	P ₂	X	400	0	0.1	0.1

*他の場合と同様、ClF₃分圧は 600, 800 torrとしたが無効ではないと考える。

表-4 スラッシュのフッ化は塩パラメータ

パラメータ						
No.	フッ化ガス 種類	N ₂ バージ	反応器 温度 (°C)	ClF ₃ 分圧 (torr)	試料 の量 g	ガス流量の 比率 の量 ml/min
1	ClF ₃	X	400	X	400	0
2	ClF ₃	X	400	O	400	0
3	ClF ₃	X	100	X	100	0
4	ClF ₃	X	100	O	100	0
5	ClF ₃	O	400	O	100	0
6	ClF ₃	O	400	O	100	0
7	P ₂	X	400	O	400	0
8	P ₂	X	400	O	400	0
9	P ₂ , ClF ₃	X	400	O	400	0
10	ClF ₃	X	400	O	400	0
11	P ₂	X	400	O	400	0

*他の場合と同様、ClF₃分圧は 600, 800 torrとしたが無効ではないと考える。

表-5 スラッシュのフッ化は塩パラメータ

パラメータ						
No.	フッ化ガス 種類	N ₂ バージ	反応器 温度 (°C)	ClF ₃ 分圧 (torr)	試料 の量 g	ガス流量の 比率 の量 ml/min
1	ClF ₃	X	400	X	400	0
2	ClF ₃	X	400	O	400	0
3	ClF ₃	X	100	X	100	0
4	ClF ₃	X	100	O	100	0
5	ClF ₃	O	400	O	100	0
6	ClF ₃	O	400	O	100	0
7	P ₂	X	400	O	400	0
8	P ₂	X	400	O	400	0
9	P ₂ , ClF ₃	X	400	O	400	0
10	ClF ₃	X	400	O	400	0
11	P ₂	X	400	O	400	0

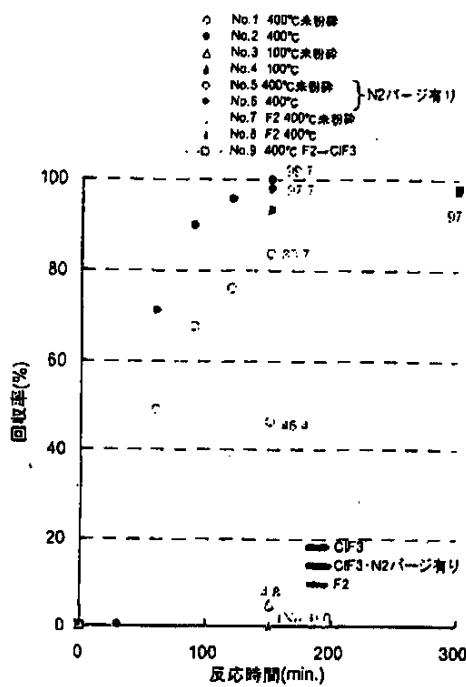


図-1 NaFペレットからのウラン回収率(時間依存性)

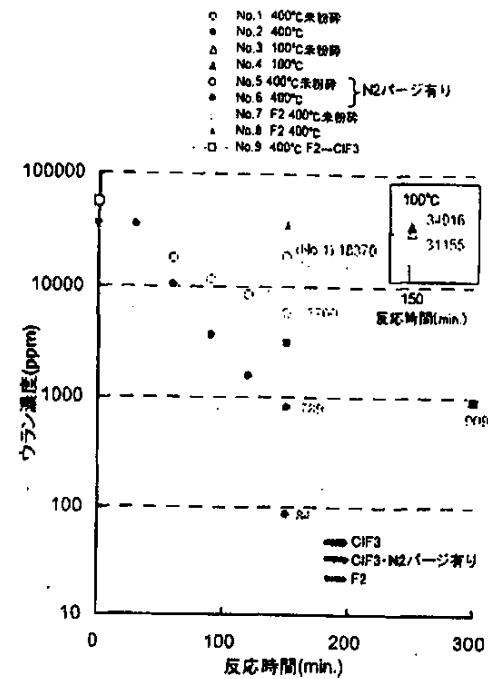


図-2 NaFペレットに含まれるウラン濃度(時間依存性)

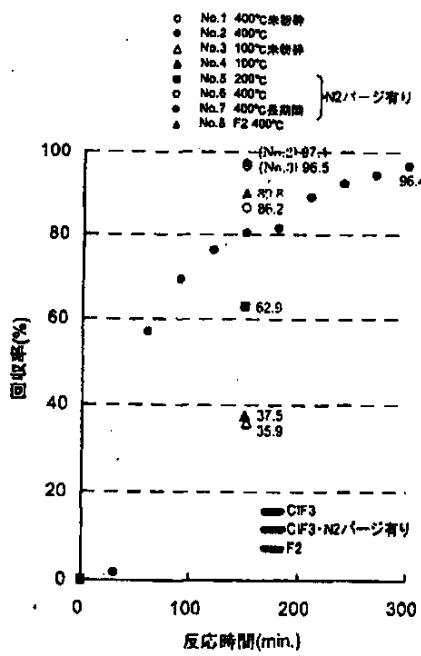


図-3 スラッジからのウラン回収率(時間依存性)

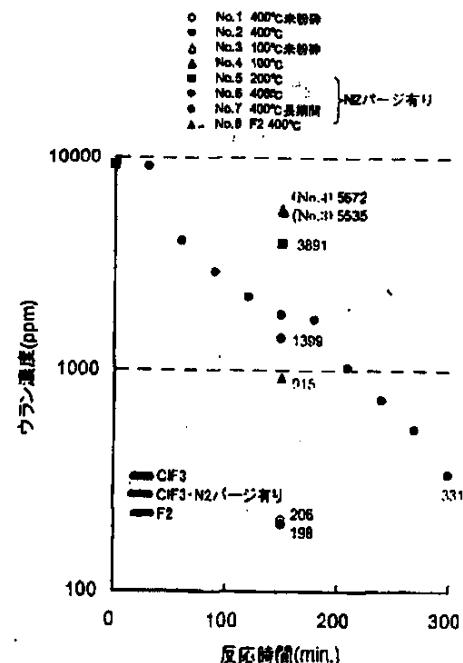


図-4 スラッジに含まれるウラン濃度の変化(時間依存性)

資料 21 ウラン等放射性物質による汚染物からのウラン等回収技術の調査検討
—溶融塩電解法—

2001年3月 (IHI)

1. 目的

ウラン製錬施設から発生するウラン汚染物の除染方法について調査・検討し、高ウラン回収率、2次廃棄物発生量の少ないことなどが期待される新しい電気化学的手法として溶融塩電解法の性能確認試験を行う。

2. 溶融塩電解試験

(1) 試験条件；表一1

試料；ステンレス板（無垢材、焼結材） $70^t \times 20^w \times 2^t$ mm

モネル板 (Cu・Ni合金配管材) "

アルミニウム板 (Al) "

ウラン電着；溶融塩： $\text{LiCl}-\text{KCl}-\text{UCl}_3$

- 極：模擬試料

+ 極：円柱状金属ウラン

試料表面に所定量の金属ウランを析出・電着させ、付着塩を水洗除去する。付着金属ウランの一部は大気中 100°C で加熱し、ウラン酸化物試料とする。

溶融塩；ステンレス材： $\text{LiCl}-\text{KCl}-\text{FeCl}_3$

モネル材： $\text{LiCl}-\text{KCl}-\text{CuCl}_2$

アルミニウム材： $\text{LiCl}-\text{KCl}-\text{AlCl}_3$

パラメーター；ウラン化学形態：金属、酸化物、母材

通電量 (Ah) : 母材表面腐食量にして、 $10 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$ 担当量

- 極電流密度 (A/D) : 0.05, 0.1, 0.2

材料： $\text{SuSS}304$ (無垢材)、 $\text{SuSS}304$ (焼結材)、アルミニウム、

モネル (Cu-Ni 合金)

(2) 試験方法；

電極：+ 極、サンプル - 極、低炭素鋼製丸棒

測定：試験後サンプルは水中超音波洗浄後、外観、重量、線量測定。

放射能測定は Ge 検出器による U-235 核種のカウント数測定。

全 α スペクトル測定によるバックグラウンド測定は実施せず。

(3) 試験結果とまとめ；

・試験結果：表一2、3、図一1に示す。

- ・ステンレス鋼（無垢材および焼結材）、アルミニウム、モネル材に溶融中で電着した金属ウランあるいは酸化ウランを模擬試料として溶融塩電解を実施した。
- ・ステンレス鋼無垢材、モネル材については金属ウランあるいは酸化ウランを、ほぼバックグラウンドレベルまで除染可能であった。
- ・ステンレス鋼（焼結材）については、最適電解条件を明確にすること、アルミニウムについては、試験中試料膨潤現象により除染効果が得られなかった。膨れ原因と本法の有効性の再確認が必要。
- ・溶融塩電解法によるウラン汚染金属の除染は可能であるが、電解後、水中超音波洗浄がより効果的である。しかし微量の極低レベルの2次廃棄物発生の予想されることから、水溶性ウラン廃液の経済的処理法の検討が必要。
- ・溶融塩電解法による除染ウランが酸化物の場合は電解槽の底部への蓄積が予想され効率よく回収するプロセスの構築が必要。

3. UF₆汚染金属の除染試験（参考資料）

①水ジェット+5MHN₃溶解+純水超音波+スチールプラス法 図-2 (1996秋の
分科会、原子力学会)

試料：UF₆コールドトラップ材（ステンレス製）、

結果：初期汚染濃度 30Bq/cm² → 0.3Bq/cm²

②気相法によるウラン廃棄物の除染 図-3 (1998春、原子力学会年会)

試 料：SS304 試験片を高温で UF₆に曝露し表面に UF_x を付着させたもの。

除染ガス：ClF₃ (30~400 torr) 、室温

結 果 α : 4.45×10Bq/cm² → 1.09Bq/cm² 超音波洗浄 → 4.32×10⁻⁴Bq/cm²

(初期)

(除染後)

(最終)

表一 1 試験条件

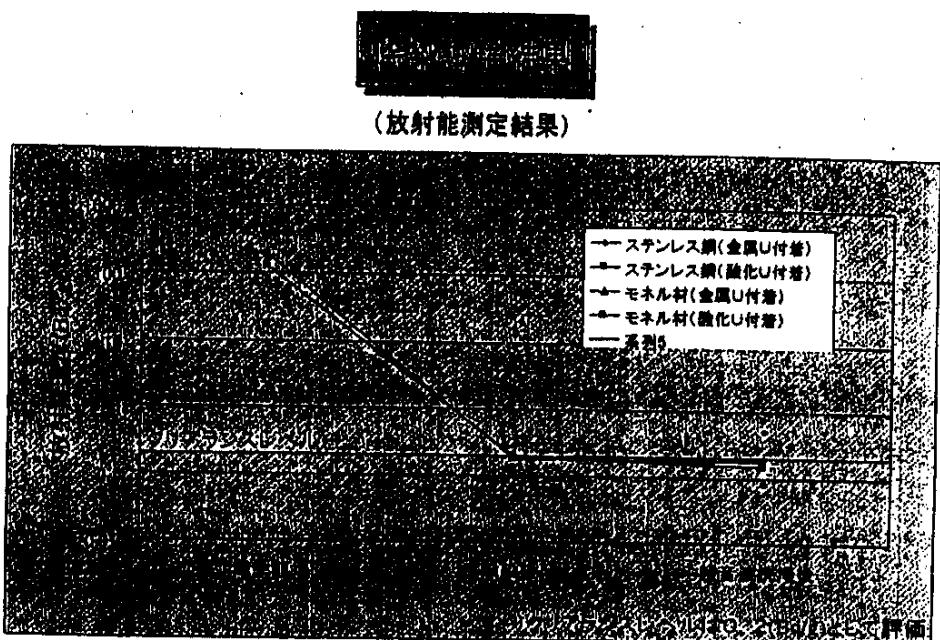
サンプルに付着させたウランの化学形態	通電量	電流密度 [A/cm ²]	材料				【凡例】 ○ 実施 - 実施せず
			ステンレス鋼 (SUS304)	焼結ステンレス鋼 (SUS304)	アルミニウム	モニル (Cu-Ni)	
付着なし (比較のためにウランを付着させていないサンプル)	電気量0 Ah (試験せず)	0	○	○	○	○	-
ウラン酸化物 (金属ウランを電析させた後、酸化させたサンプル)	母材表面を均一に100 μm 溶解させるのに相当する電気量	0.05	○ (サンプルNo.1)	-	-	○ (サンプルNo.9)	-
		0.1	○ (サンプルNo.2)	-	-	-	-
		0.2	○ (サンプルNo.3)	○ (サンプルNo.8)	○ (サンプルNo.7)	○ (サンプルNo.10)	-
		0.05	○ (サンプルNo.4)	-	-	-	-
金属ウラン (金属ウランを電析させたサンプル)	母材表面を均一に100 μm 溶解させるのに相当する電気量	0.2	○ (サンプルNo.5)	-	○ (サンプルNo.8)	○ (サンプルNo.11)	-

表二 2 検量測定結果

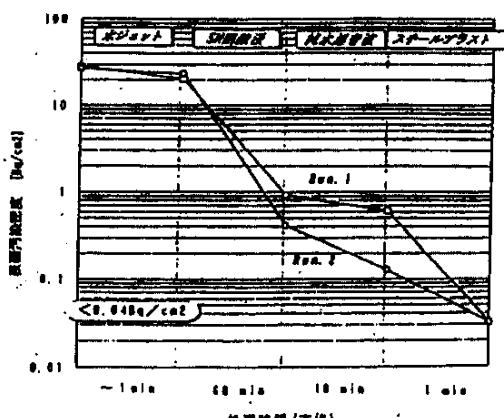
サンプルに付着させたウランの化学形態	通電量	電流密度 [A/cm ²]	測定時	材料				-は測定せず
				ステンレス鋼 (SUS304)	焼結ステンレス鋼 (SUS304)	アルミニウム	モニル (Cu-Ni)	
付着なし (比較のためにウランを付着させていないサンプル)	電気量0 Ah (試験せず)	0	バックグラウント[cpm]	-	-	-	-	-
ウラン酸化物 (金属ウランを電析させた後、酸化させたサンプル)	母材表面を均一に100 μm 溶解させるのに相当する電気量	0.05	試験前[cpm]	-	-	-	-	-
			試験後[cpm]	-	-	-	-	-
			超音波洗浄後[cpm]	-	-	-	-	-
			サンプルNo.1					サンプルNo.9
			バックグラウンド[cpm]	0.232				0.182
		0.1	試験前[cpm]	343.110				369.450
			試験後[cpm]	1.824				-
			超音波洗浄後[cpm]	0.332				0.284
			サンプルNo.2					
			バックグラウンド[cpm]	0.232				
金属ウラン (金属ウランを電析させたサンプル)	母材表面を均一に100 μm 溶解させるのに相当する電気量	0.2	試験前[cpm]	408.810				
			試験後[cpm]	-				
			超音波洗浄後[cpm]	0.396				
			サンプルNo.3		サンプルNo.6	サンプルNo.7	サンプルNo.10	
			バックグラウンド[cpm]	0.232	1.502	0.362	0.162	
		0.05	試験前[cpm]	444.840	254.870	1088.790	327.810	
			試験後[cpm]	-	37.500	289.592	0.518	
			超音波洗浄後[cpm]	0.560	39.870	342.768	0.368	
			サンプルNo.4					
			バックグラウンド[cpm]	0.232				

表一3 溶融塩電解法によるウラン汚染金属の除染効果

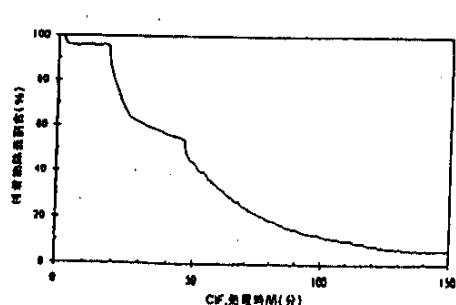
試料 No	溶解量 (μm)	電流密度 (A/cm ²)	材料	ウラン酸化物	ウラン金属
No1	100	0.05	SuS304 無垢材	<ul style="list-style-type: none"> ・100 μm 溶解相当量の電気量で試験前線量の0.5%程度まで低下、さらに超音波洗浄でバックグラウンドレベルになる (No1) ・10 μm 溶解でも超音波洗浄後、試験前線量の0.5%程度まで低下 (No4) ・ウラン除染効果は一極電流密度に殆ど依存しない (No1~3) ・超音波洗浄でバックグラウンドレベル程度まで除染可能 (No1~3) ・10 μm より 100 μm 溶解が除染効果大。電解前後で約2倍、超音波洗浄で約5倍の差がある (No1, 4) ・ウラン酸化物の法が金属より除染効果大 (No3, 5)。原因、酸化物は金属を水洗・酸化処理したため脱落し易い可能性あり。 	<ul style="list-style-type: none"> ・100 μm 溶解、超音波洗浄で試験前線量の0.3%程度に低下 (No5) ・除染効果は酸化物より悪い (No5)
No3 & No5 (金属 U)	100	0.2	"	<ul style="list-style-type: none"> ・超音波洗浄でバックグラウンドレベル程度まで除染可能 (No1~3) ・10 μm より 100 μm 溶解が除染効果大。電解前後で約2倍、超音波洗浄で約5倍の差がある (No1, 4) ・ウラン酸化物の法が金属より除染効果大 (No3, 5)。原因、酸化物は金属を水洗・酸化処理したため脱落し易い可能性あり。 	
No4	10	0.05	"		
No6	100	0.2	SuS304 焼結材	<ul style="list-style-type: none"> ・100 μm 程度溶解で試験前線量の15%程度に低下するが超音波洗浄でも効果なし、原因は多孔質による可能性あり。 ・線量低下には更に溶解量必要。 	実験なし
No7 & No8 (金属 U)	100	0.2	アルミニウム	<ul style="list-style-type: none"> ・100 μm 溶解で試験前線量の25%程度に低下するが、超音波の効果なし (No7) ・ウランの化学形態に無関係で除染効果なく、バックグラウンドレベルに不可能、原因は試料膨れによる多孔質化を推測。 	<ul style="list-style-type: none"> ・酸化物と同様、除染効果なし (No8)
No9	100	0.05	モネル (Cu-Ni 合金)	<ul style="list-style-type: none"> ・いずれの試料も試験後超音波洗浄後、試験前線量の0.2%以下でバックグラウンドレベル程度に低下 (No. 9~11) ・一極電流密度やウランの化学形態は除染性能に影響しない (No. 9~11) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ウラン化学形態は除染性能に影響しない (No. 11)
No10 & No11 (金属 U)	100	0.2%			



図一】



図二 ヨールドトラップ降粒試験



図三 CTF処理時の付着物除去率

除染処理による表面汚染密度の減少

	放射能表面汚染密度 (Bq/cm^2)	
	α 放射能	β 放射能
(UF4曝露後) CTF1除染処理前	4.45×10^1	未測定
CTF1除染処理後	1.09×10^0	未測定
(CTF1除染処理後) 超音波純水洗浄	4.32×10^{-4}	1.37×10^0

資料 22 溶融塩電解法による汚染物からのウラン等回収技術の検討

—金属汚染物の溶融塩電解法による除染—

2000 年 8 月 (東芝)

1. 目的

製鍊転換施設の機器解体、撤去に伴い発生する金属類は天然ウラン、回収ウラン及び微量の FP、TRU 等、放射性物質による汚染がある。ウラン等、除染回収技術として LiCl-KCl-UCl₃ 系溶融塩電解技術について実験的検討、プロセス成立性と概念構築を行う。

2. 溶融塩電解試験

(1) 試料調製方法

・試 料；

模擬サンプル：サンプル表面にウラン目標付着量 0.03g/cm² として通電量を決めウランを電着して調製

L 型ステンレス鋼 : 60mm^L × 40mm^W × 1mm^T 平板の長軸を中心に 90° 曲げ製作

ステンレス製配管 : 50mmID × 60mm^L × 2mm^T および 20mmID × 60mm^L × 2mm^T

アルミニウム板 : 60mm^L × 20mm^W × 2mm^T

・電着法；

電 解 液 ; LiCl-KCl 溶融塩

電 解 槽 ; 陽極 : ペンシル状金属ウラン 陰極 : 試料

ウラン電着量 ; L 型鋼、配管 ; 内面に 0.03g/cm² ウラン電着。電着後水洗
し電解液除去。電着サンプルは 100°C、
5 h 空気中加熱し付着した金属ウランを全
て酸化物とする。

アルミニウム板 ; 電着不可能のため粉末状酸化ウランをアル
ミニウム板片面に金属棒ですりつけて付着。

(2) 電解試験

1) 試験条件 ; 表-1

溶融塩 ; LiCl-KCl-UCl₃

電流密度 ; 0.05A/cm²

表-1 電解条件

電解条件 デスト サンプル	陽極電流密度 A/cm ²	溶解量 (μm)
1. L型板 (SuS)	0.05	100, 300
2. 20φ配管 (SuS)	"	" "
3. 50φ配管 (SuS)	"	" "
4. 平板 (Al)	"	" "

処理後、陽極サンプル水洗・塩除去しサンプル放射能測定

2) 結 果 図-1, 2, 3

①放射能測定

溶解後処理として水中超音波洗浄が効果ある。特に配管は有効。

L型板 (SuS) : 100 μm と 300 μm 溶解で U 除去差なし、1回の除染でクリアランスレベル < 0.2 □ /g は未達成。

300 μm 溶解を 2 回繰り返す（計 600 μm）溶解で 0.2 □ /g 以下達成。

配管 (SuS) : 20φ、50φとも 100 μm、300 μm の溶解で U 除去差なし

20φ管 : 100 μm 溶解で 0.16 □ /g (クリアランスレベル以下) となる。300 μm 溶解で 0.25 □ /g

50φ管 : 100 μm、300 μm 溶解でもクリアランスレベルまで除染できず、300 μm 溶解を追加し計 600 μm の溶解でも、やや低下した程度。

20φと 50φ配管の差は初期サンプル表面状態の差と考えられる。

平板 (Al) : アルミ材は除染不可能、溶融電解以外の方法を要検討。

②ウラン放射能とマスバランス 図-4

- 各サンプルの付着 U は 1 回の電解 - 300 μm で 97% 以上除去される。

- サンプルに残留したウランの 60-90% (初期放射能の 2-3%) は超音波洗浄廃液側に含まれる。

- 本テスト条件では電解 - 洗浄の 1 シリーズで 98.5% ~ 99.8% のウランが除去される。低除去率の L 型及び 20mmφ 配管サンプルはさらに 1 シリーズ (300 μm 溶解 + 超音波洗浄) 追加で除染効率 99.7% ~ 99.9% に達した。

- 確実にクリアランスレベル (0.2 □ /g) 以下にするには汚染面基準で 600 μm 相当の母材溶解が必要。

3) まとめ

- ・溶融塩電解法は複雑形状の汚染物であっても除染効果が大きく、ウラン等廃棄物をバックグラウンドレベルまで除染可能である。
- ・KCl-LiCl共晶塩に含まれる K には、天然放射能 K-40 が存在する。
人工放射性 K が混入した場合、分離困難となり塩自体が放射性廃棄物となる可能性がある。K を含まない代替塩として CsCl-LiCl(MP323°C)、RbCl-LiCl(MP、318°C) 等の塩が考えられるが、今後の課題。

3. α クリアランスレベル評価法の検討

α 線測定技術の選定要件

- 1) α 廃棄物を均一状態にすることでき、 $0.2 \beta \text{ d}/\text{g}$ のクリアランスレベル暫定値が測定可能のこと。

- 2) バックグラウンドレベルの検出感度と、取り扱い性が良好であること。

以上の要件をもとにアクティブ中性子法、 γ スペクトル法、ICP-MS 法について検討し ICP-MS 法が最適測定法であるとした。但し、測定サンプルは水溶液にする必要がある。

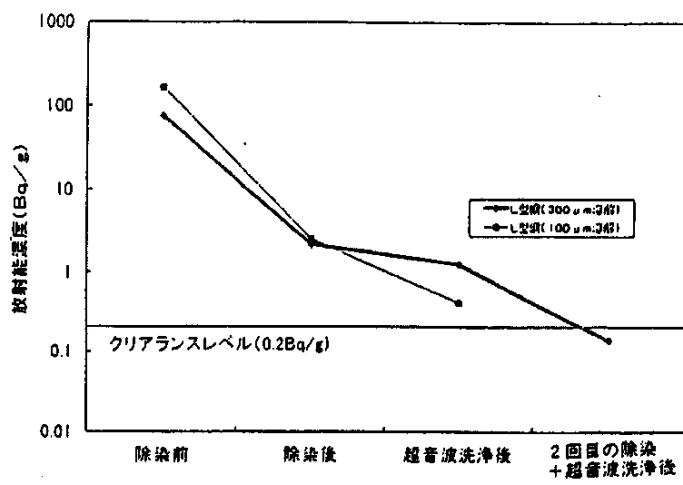


図-1 除染前後の放射能濃度(L型鋼)

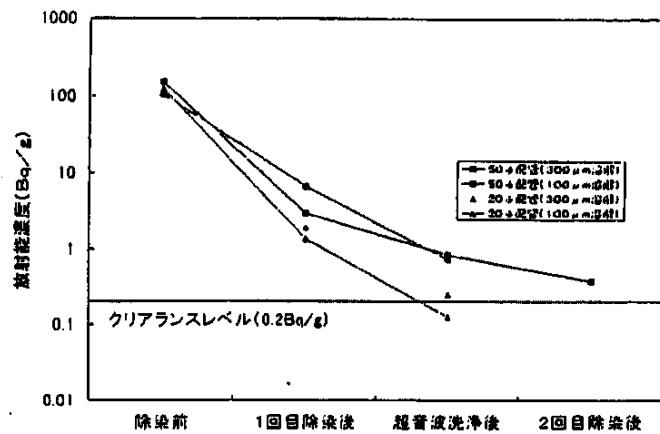


図-2 除染前後の放射能濃度(配管)

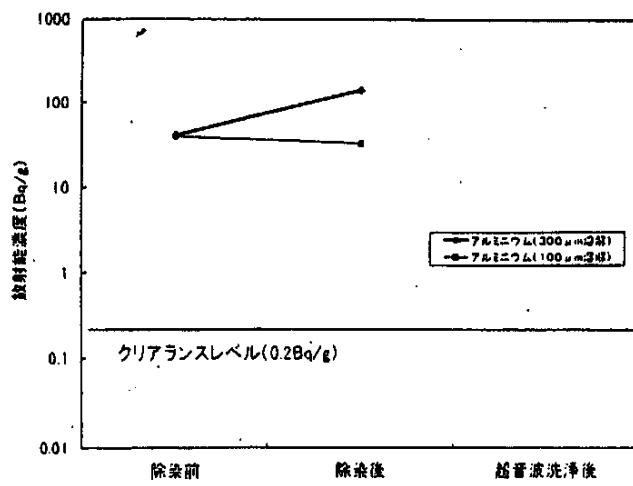


図-3 除染前後の放射能濃度(アルミニウム)

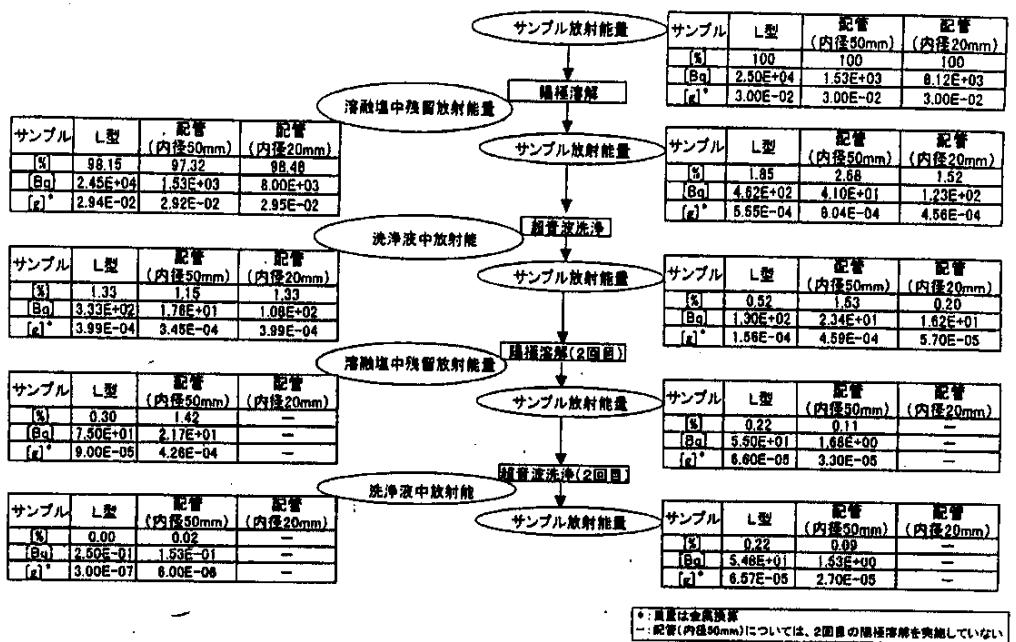


図-4 ウランの放射能およびマスバランス

資料 24 溶融塩電解法による汚染物からのウラン等回収技術の検討（II）

—実汚染金属廃棄物の溶融塩電解法—

2001年2月（東芝）

1. 目的

製鍊転換施設で発生したウラン化合物が付着した金属汚染物について溶融塩電解法によるウラン除染回収試験を行う。最適の電解電圧、電流、溶融塩の組成等使用条件を明確にし、電解装置の構造、周辺機器の実規模装置の概念構築、使用済塩の処理・再利用、経済性評価等を行う。

2. 模擬汚染物を用いた電解除染試験

(1) 試験条件 表-1

・模擬試料；L型SUS板：60mm^L×40mm^W×2mm^T 20.34g

90°曲げL型とする。

SUS配管：20mmID×60mm^L×2mm^T 68.73g

・溶融塩；LiCl-KCl-5%FeCl₂

(2) 試験方法

・汚染配管の取付法（+極）：①開口部を一極側に向けた場合

：②側面部を一極側に向けた場合

・陽極電流密度：陰極に対面させた汚染面の面積を基準に0.05A/cm²

・電気量：L型サンプル：①100μm溶解毎3回溶解
(計300μm)相当量

②300μm、1回で溶解相当量

配管サンプル：①300μm、1回で溶解相当量

・放射能測定：①テスト前に各サンプル測定。

②テスト後サンプル水洗し、塩除去後、Ge検出器

でγ線測定、更に超音波洗浄20分後再測定

(U-235、γ線スペクトルピーク185KeV測定)

(3) 結果

・表-2、図-1、2、3

3. 実汚染試料による電解除染試験

(1) 試験条件 表-3、図-4

・実試料：バルブ、NUPRO製ストップバルブ 繰ぎ手径-3/8インチ

材質、①ステンレス 251.45g ②モネル 236.12g

・放射能濃度：①ステンレス 30.59Bq/g ②モネル 3.83Bq/g

- ・バルブ分解：バルブ除染前に汚染可能性のない部分－ハンドル、ポンネット、アクチュエーターを分離しベローズ部分を開放状態にした。

- ・溶融塩： $\text{LiCl}\cdot\text{KCl}\cdot\text{FeCl}_2$ 500°C

(2) 試験方法

- ・電気量：約 $100\mu\text{m}$ 溶解目標に 7.09AH

- ・バルブ電解位置：バルブ開口部を一極に対峙

1 ハッチの電解（電力量 7.90AH）を 8 回に等分し、一極に対峙する開口部を入れ替え、バルブ入口側と出口側が均等除染されるようにした。

- ・放射能測定：電解後試料は水洗及び超音波洗浄し付着した塩を除去して測定。

試験前後の放射能はゲルマニウム検出器による γ 線測定 (U-235 γ 線スペクトル 185MeV)。

標準サンプラー同形バルブの内面に既知濃度のウラン溶液を添加・乾燥したものを使用。

(3) 結果

- ・表-4、図-5～8

- ・除染前後のバルブ入口と出口の汚染レベルは殆ど同じで差が無い。

モネル材、SUS 共、同じ傾向である。

- ・モネル製バルブは 1 回目の除染で 0.2Bq/g 、2 回目で 0.3Bq/g 以下となり、クリアランスレベル (0.3Bq/g) 以下になることを確認した。

- ・SUS バルブは $200\mu\text{m}$ と $300\mu\text{m}$ 溶解でも放射能濃度はほぼ同等で、除染効果は期待できなかった。そこでバルブのベローズ部分を切断分離し、さらに 2 回の除染でクリアランスレベル (0.3Bq/g) 以下に除染できた。

4. まとめ

(1) 模擬試料 (SUS 製 L 板、配管、アルミ板) 試験

①汚染表面に対し $300\mu\text{m}$ 溶解でクリアランスレベル (0.3Bq/g) 以下に達する。

②電解塩中の電解活物質 FeCl_2 は UCl_3 (昨年度テスト) より効果大。

除染効果は同一でも、電解後溶融塩中の U^{3+} の再付着が考えられる。Fe は非放射性でもあり Fe 使用が有効。

(2) 実試料バルブ試験

- ・モネル製バルブ

①2 回の電解 ($200\mu\text{m}$ 相当) でクリアランスレベル (0.3Bq/g) 以下に達する。

②バルブ内部も母材溶解で除染可能。

・SUS 製バルブ

①初期汚染レベルが高く 2 回 ($200 \mu\text{m}$ 溶解) 除染でクリアランスレベルの 10 倍程度までしか除染できない。更に除染しても効果無し。

原因—バルブ構造に起因

ベローズ内部にあるステムシャフトとバルブハウジングの運動部の隙間を介し、ベローズ内に侵入したウランが堆積。ベローズ内は袋状で電解除染でも電流が流れないため除染効果不良。

②バルブがガス系で使用され、狭隘部分の内部（袋状の部分）除染は困難。

③複雑形状の汚染物は、袋状構造部分を切断前処理して電解する必要あり。

表 1 模擬サンプルを用いた電解試験条件

試料形状	除染条件	汚染面積	電解電流密度	溶解厚さ		
				$100 \mu\text{m}$	$200 \mu\text{m}$	$300 \mu\text{m}$
L型鋼	繰り返し除染* ¹	12.0cm^2	$0.05/\text{cm}^2$	○	○	○
	一括除染* ²			—	—	○
50φ配管	配管開口部—陰極が対峙	94.2cm^2	$0.05/\text{cm}^2$	—	—	○
	配管側面—陰極が対峙			—	—	○
20φ配管	配管開口部—陰極が対峙	37.7cm^2	$0.05/\text{cm}^2$	—	—	○
	配管側面—陰極が対峙			—	—	○

* 1 : 試料溶解 $100 \mu\text{m}$ 相当の電解除染を 3 回繰り返し実施

* 2 : 試料溶解 $300 \mu\text{m}$ 相当の電解除染を 1 回実施

表 2 模擬サンプルの電解試験結果

サンプル	試験結果
L型鋼	① $100 \mu\text{m}$ 溶解ではクリアランスレベル (0.3Bq/g) 以下にならない。 ② $100 \mu\text{m}$ 毎 3 回、または $300 \mu\text{m}$ 溶解 1 回でクリアランスレベル達成。
配管	①開口部または側面を陰極側に向けた場合 20ϕ と 50ϕ とも $300 \mu\text{m}$ 溶解でクリアランスレベル以下達成。 ②超音波洗浄で電解除染直後放射能の 1/10 程度に低下した。

表3 実サンプル電解試験条件

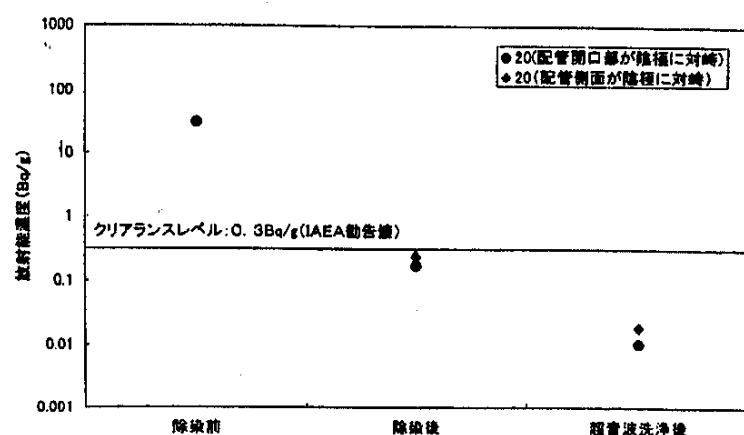
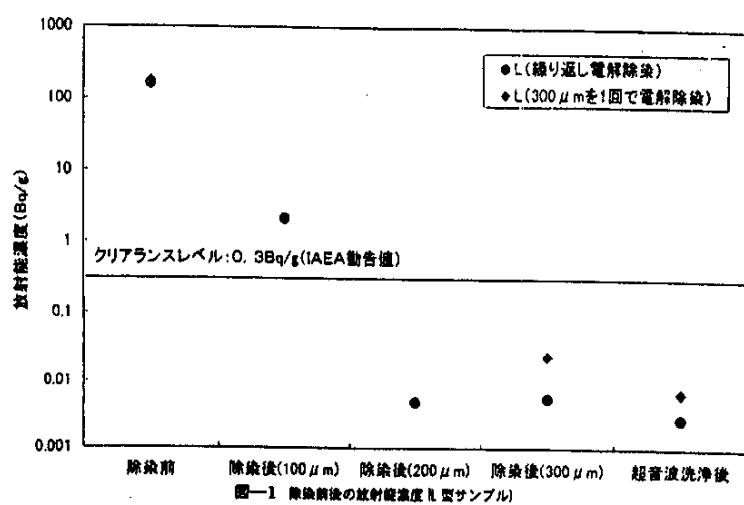
サンプル	材質	重量	電気密度 (A/cm ²)	電流 (A)	溶解量*
ストップバルブ	モネル	236.12	0.05	5.24	100 μm
	ステンレス	251.45	0.05	5.24	100 μm

* 1 バッチの電解（電気量 7.9AH）を 8 回に等分し、陰極に対峙する。

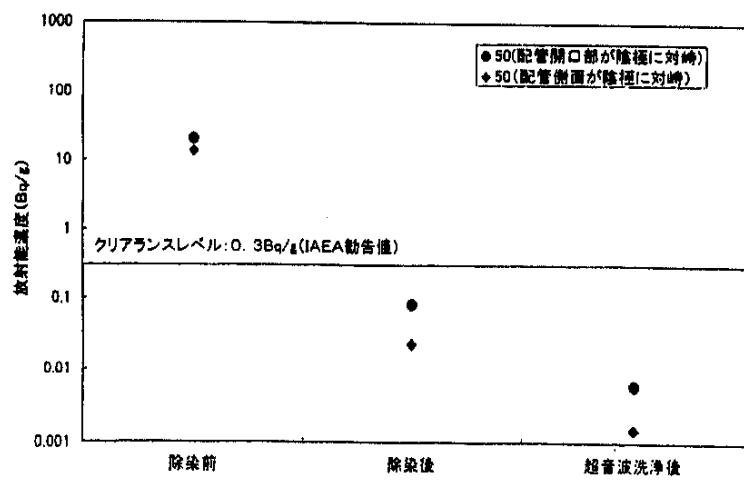
開口部を入れ替え、バルブ入口側と出口側が均等除染されるようにした。

表4 実サンプル電解試験結果

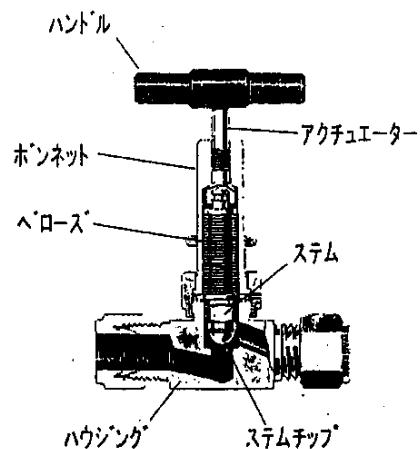
サンプル	放射能量 (Bq/g)					
	除染前	電解除染後			ベルローズ分離後	
		100 μm	200 μm	300 μm	1回 (100 μm)	2回 (200 μm)
モネル製バルブ	3.83	0.2	0.3	—	—	—
SUS 製バルブ	30.59	—	2.88	2.88	クリアランス レベル (0.3)	<0.3



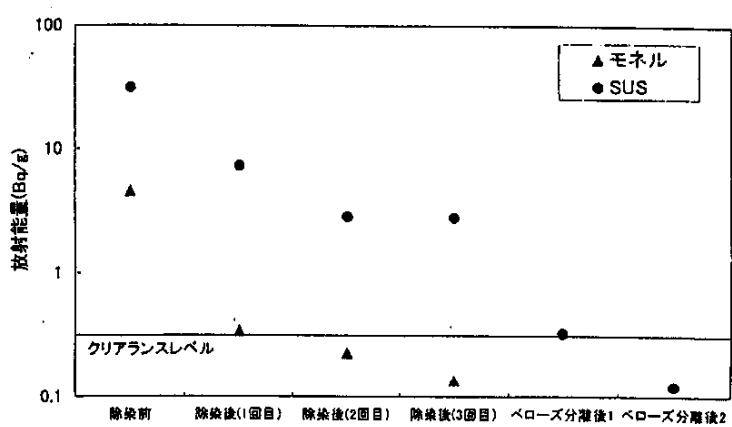
図一2 除染前後の放射能濃度 (φ 20 mm 計管)



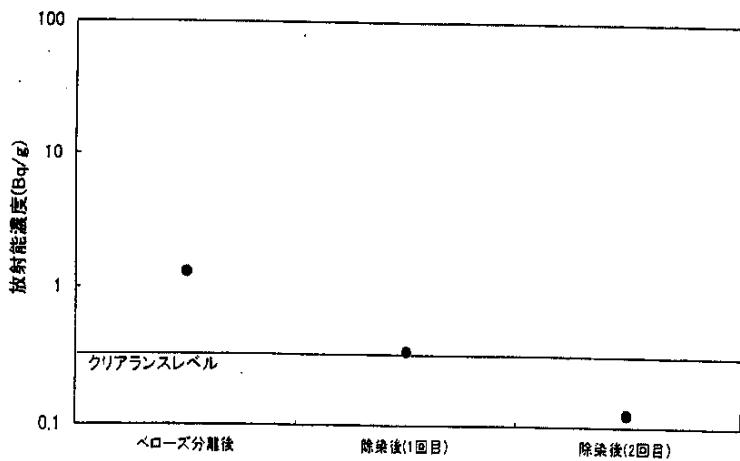
図一3 除染前後の放射能濃度 (φ 50 mm 計管)



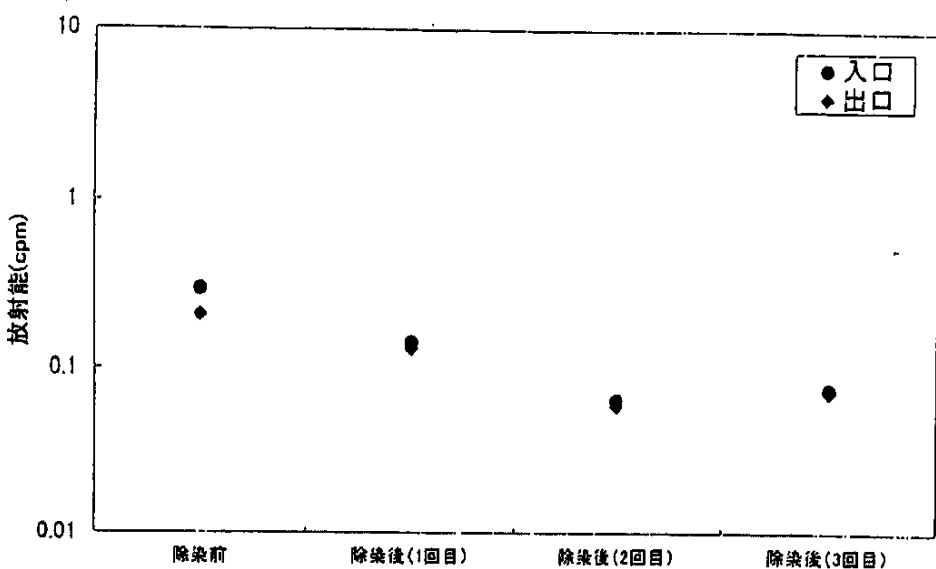
図一4 バルブの内部構造



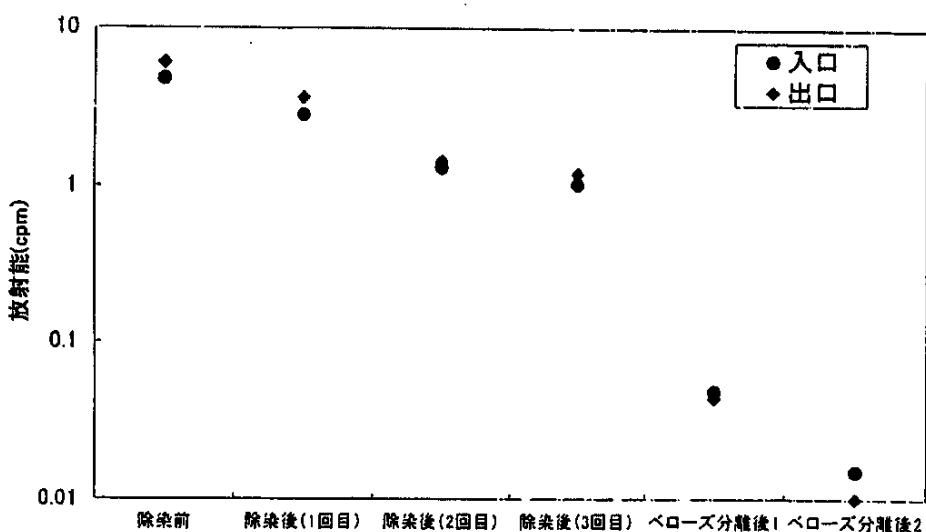
図一5 バルブの溶融塩洗浄除染結果



図一6 ベローズ分離後のSUSバルブ溶融塩洗浄除染結果



図一七 モネルバルブ除染前後の入口、出口開口部の放射能量



図一八 SUSバルブ除染前後の入口、出口開口部の放射能量

資料 26 ケミカルトップ充填物等からのウラン等分離・回収技術の検討
—使用済 NaF+NaCl 溶融塩電解法—

2000 年 3 月 (東芝)

1. 目的

オフガス処理に使用される NaF、MgF₂、活性アルミナ等ケミカルトップ材に含まれる U、FP、TRU 元素等の分離・除去技術として溶融塩電解法について試験、検討を行う。

2. 溶融塩電解試験

(1) 試験条件 ; 表一 1 図一 1

試 料 ; 使用済含 UF₄、NaF (JNC 提供)

溶 融 塩 ; NaCl+NaF

電 解 槽 ; グラファイト製るつぼ (84mm^{OD}×160mm^H、74mm^{ID}×155mm^H)
を電気炉 (常用 1000°C、max 1200°C) 中央の SUS 製保護容器内
に設置。

電 極 ; + 極 上部 Al₂O₃ シース付グラシーカーボン (3mm^{OD}×15mm^H)
- 極 上部 Al₂O₃ シース付低炭素鋼 (3mm^{OD}×10mm^H 及び
10mm^{OD}×15mm^H)、但し、高濃度ウラン塩ではステンレス鋼。

パラメーター ; 溶融塩組成、ウラン濃度、温度、電極形状、電流密度、電気量。

(2) 試験結果 ; 表一 2、図 2-5

図 - 5 に実験結果をもとにウラン回収プロセスの概念を示した。

(3) ま と め ; ケミカルトップ材 NaF 中のウランを溶融塩電解法で回収することが実
験的に可能であることを確認した。

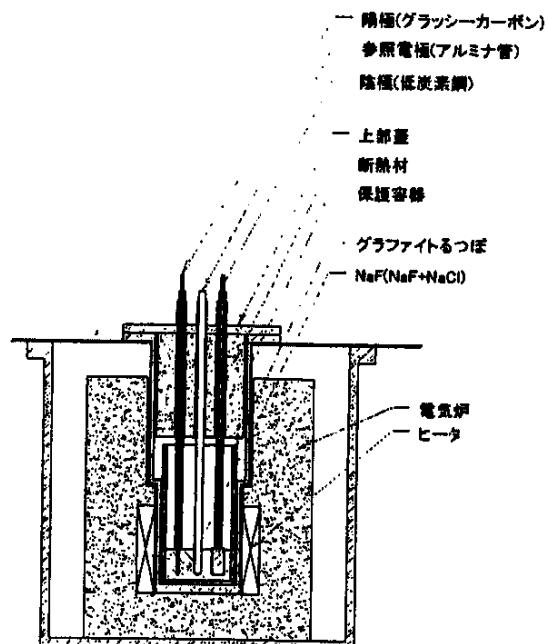
表一1 試験条件

Run	溶融塩組成(%)		U濃度 (%)	温度 (°C)	電極形状(D×L:mm)		電流密度 (A/cm ²)	電気量 (Coul)	備考
	NaCl	NaF			陽極	陰極			
1	-	100	20.0	850	3×30	15×3	- ^{a2}	- ^{a2}	NaF単独
2	65	35	9.0 ^{a1}	700	3×30	10×30	0.2	26,000	高濃度
3	65	35	0.5 ^{a1}	700	3×30	15×30	0.05	3,600	低濃度
4	65	35	1.0 ^{a1}	700	3×30	15×30	0.05	35,000	中・低濃度

1: 実験開始時の溶融塩中のウラン濃度分析結果から

2: 異温工程においてウランを含むと思われるペーパーの発生のため電解工程は中止

試験装置の概略		
陽極	材質	グラッシーカーボン
	形状	直径:3mm/長さ:30mm
陰極	材質	炭素鋼・ステンレス鋼
	形状	直径:3,10,15mm/長さ:30mm
るつぼ	材質	グラファイト
	形状	内径:74mm/深さ:155mm
	溶融塩深さ	約30mm

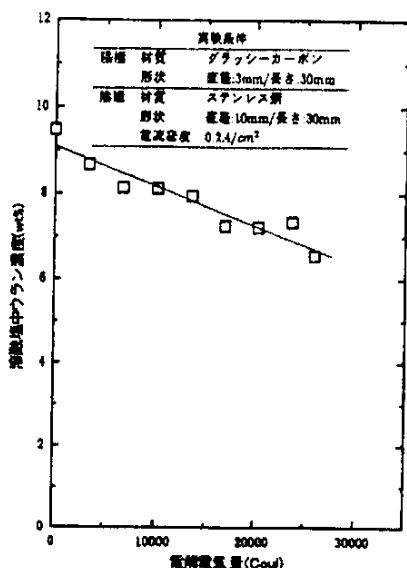


図一1 溶融塩电解試験装置の概要

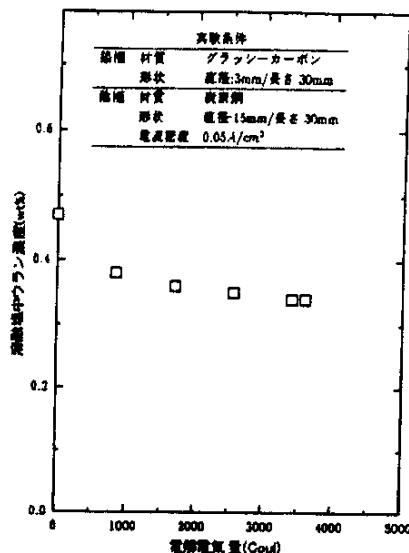
表2. 溶融塩電解法によるNaF中のウラン回収試験結果

Run	U 濃度(%)	溶融塩組成(%)		温度 ℃	結果
		NaCl	NaF		
1	20	—	100	1000	<ul style="list-style-type: none"> るつぼ保護容器上蓋上面に黄色UF₆化合物粉体生成 電極挿入貫通パイプ上端にも黄色粉体生成 ・加熱中止し、るつぼ検査。黒鉛るつぼ腐食確認。実験中止。前処理に還元工程必要。
2	9*	65	35	700	<ul style="list-style-type: none"> 電解中ウラン濃度変化し溶融塩電解法で高濃度U領域からU回収可能を確認。 +極；電極自体減肉なし、電極保持用アルミナ製さや管下端部減肉あり -極；溶融塩固着と針状析出物あり。 NaF単独塩よりNaCl添加で融点低下。
3	0.5*	65	35	700	<ul style="list-style-type: none"> 電気量に対するU濃度変化から低濃度U領域でも電解法でU回収可能を確認 +極；電極自体減肉なし、 -極；極微量析出物確認。
4	1.0*	65	35	700	<ul style="list-style-type: none"> 中濃度から低濃度Uを含む溶融塩からU回収可能を確認。 U濃度1%溶融塩に調製したケミカルトラップ充填物を電解によりU濃度0.1%以下に除染可能を確認。 +極；電極自体減肉なし、 -極；析出物あり。 電極および電極保存用アルミナさや管の溶融塩との界面に純白粒子の付着物あり。

*実験開始時の溶融塩中のウラン濃度分析結果



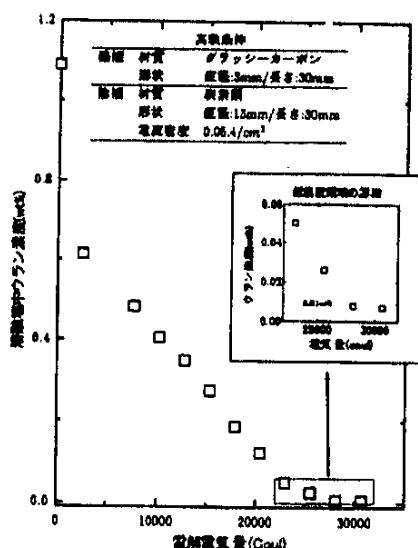
高濃度ウラン回収試験結果
(ケミカルト ラップ充填物(NaF)からのウラン分離技術の開発)



低濃度ウラン回収試験結果
(ケミカルト ラップ充填物(NaF)からのウラン分離技術の開発)

図-2 NaF中の高濃度ウランの溶出試験における溶出液中ウランの濃度変化

図-3 NaF中の低濃度ウランの溶出試験における溶出液中ウランの濃度変化



中/低濃度ウラン回収試験結果
(ケミカルト ラップ充填物(NaF)からのウラン分離技術の開発)

図-4 NaF中の中・低濃度ウランの溶出試験における溶出液中ウランの濃度変化

ウラン等分離・回収プロセスフロー(NaFの場合)

- ウラン等分離用物質が付着した使用済NaFについて
- (1) NaFに還元性ガスを流通させ付着物をUF₆(不揮発性)とする
 - (2) NaFに塩化物を添加し電解質の融点を下げ過渡温度を低温化する
 - (3) 溶融塩電解によりUを取出回収
 - (4) 回収したUを空気中でも安全な酸化物に転換し保管
 - (5) 電解後の塩に残留している塩類を電解回収
 - (6) 処理済NaFを安定な固体とする

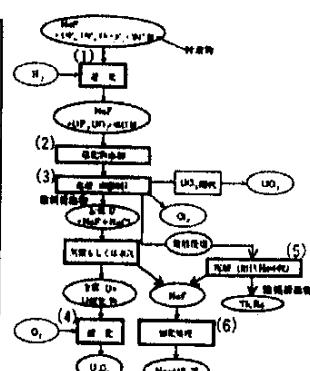


図-5

資料 27 ケミカルトップ充填物等からのウラン等分離・回収技術の検討（Ⅱ）
—使用済 NaF 単独塩による溶融塩電解法—

2001年3月（東芝）

1. 目的

①UF₆取扱施設オフガス処理材 NaF に含まれるウラン (UF₆) の回収を目的とし
NaF 単独塩による電解条件を検討する。

2. NaF 単独塩による溶融塩電解試験

・検討事項；前処理条件、電解条件、溶融塩組成

(1) 前処理還元試験 (UF₆ の UF₄ 還元)

1) 試験条件；

試 料；使用済含 UF₆.NaF … 100 g

還元ガス；Ar + 7 % H₂ … 200 l/min

温 度；最大値<500°C (UF₆ 撃発しない温度)

2) 結 果；

・加熱法

○常温—100°C ; UF₆ 撃発も HF ガス発生もなし。

" —200°C ; UF₆ 反応、HF ガス発生、確認。

UF₆ 色調やや変化する。H₂還元開始 200°C とする。

" —300°C ; UF₆ 撃発確認。

○ステップ加熱 図-1

300→500°C ; 50°C 每ステップ加熱し、各温度に約2時間保持すると、200
300°C と同様、UF₆ 撃発なく、還元反応が完全に進行。

3) 溶融塩電解用試料調製

試 料；含 UF₆、NaF … 200 g

還元ガス；Ar + 7 % H₂ … 400 l/min

温 度；500°C 2 時間

200°C 還元開始 2 時間保持

300°C 2 時間保持

300°C—500°C 50°C 每ステップ加熱、各温度で2時間保持。

(2) 溶融塩電解試験

1) 電解槽；含 UF₄.NaF 単独塩の電解では、NaF の融点 (993°C) が高いため
耐熱性るつぼが必要。検討の結果、前年度 NaF·Cl 系溶融塩で実績の

ある黒鉛るつぼを採用。

溶融塩；還元済含 $UF_4 \cdot NaF$ +純粹 NaF 、…300 g
設定温度 1050°C (NaF 融点 993°C)

2) 試験条件と結果 表一 1, 2. 図一 2 ~ 6

3) まとめ

①前処理工程

含 $UF_6 \cdot NaF$ 試料を Ar + 7% H₂ ガス還元により含 $UF_4 \cdot NaF$ にする前処理プロセスは実機適用可能である。

②ウラン回収率と電解条件

・ NaF 単独塩電解ではU回収率を評価できるデータ取得できず。

U回収率低下の原因

a. ⊖極析出物の脱落と再溶解

b. 析出と再溶解の同時進行。高温（1050°C）のため析出速度と比較し溶解速度が無視できない速さになっている。

・るつぼ材や陰極材の腐食

低電流密度（-極 0.2A/cm²、+極ガラス化黒鉛材使用可）に比べ、高低電流密度（-極 6 A/cm²、+極ガラス化黒鉛材使用不可）では材料腐食大。

③実機適用への評価

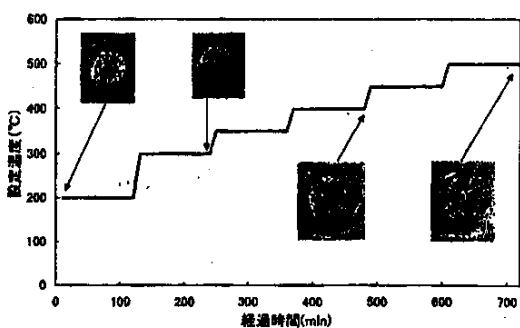
・除染性能については単独塩では難しい。

・廃棄物量はるつぼ等を含め運転温度が高くなると増加する。

・単独塩電解技術には材料等も含め課題が多い。

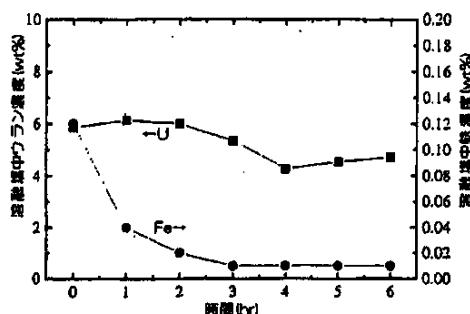
表一 電解によるウラン分離回収プロセスの性能評価試験の条件
(溶融塩温度:1050 °C)

実験番号	溶融塩調整			電解条件		備考
	塩總量(g)	NaF(g)	U濃度(wt%)	面積(cm ²)	密度(A/cm ²)	
1	300	100	5.1	9.4	0.2	NaCl 添加試験と同条件
2	Run-1に連続			9.4	0.2	るっぽ腐食対応(高純度黒鉛材)
3	300	100	5.1	9.4	0.2	低電流密度(高純度黒鉛棒)
4	Run-3に連続			69.7	0.2	陰極折出物落下確認(るっぽ陰極)
5	Run-4に連続			3.1	6.4	大電流密度陽(高純度黒鉛材陰極)
6	300	77	3.9	3.1	6.4	大電流密度陰(高純度黒鉛材陰極)

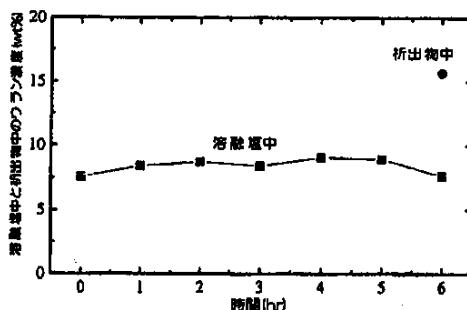


還元条件
還元ガス: Ar+7%H₂ ガス流量: 400ml/min 還元対象NaF量: 200g

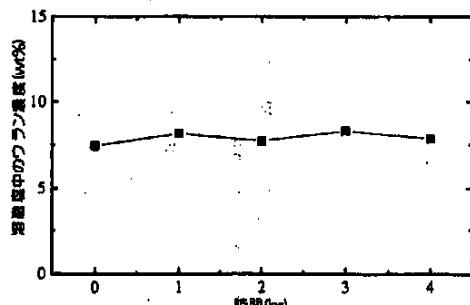
図一 NaFの還元操作と各工位でのNaFの還元状態



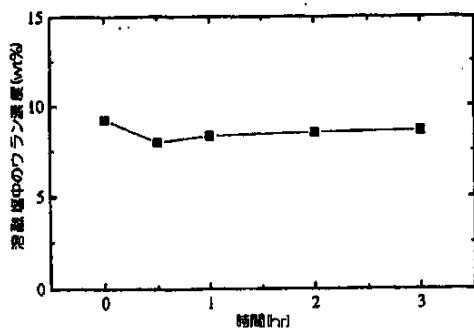
図二 溶融塩中のウランと鉄濃度の変化(Run-2)



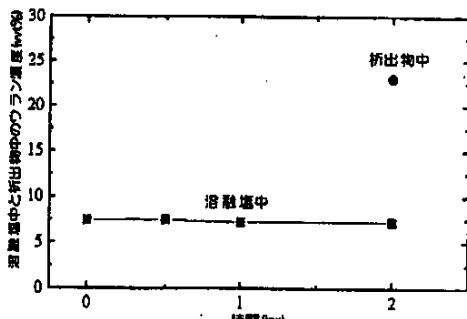
図三 : 溶融塩中のウラン濃度の変化(Run-3)



図四 : 溶融塩中のウラン濃度の変化(Run-4)



図五 : 溶融塩中のウラン濃度の変化(Run-5)



図六 : 溶融塩中のウランと鉄濃度の変化(Run-6)

表2. NaF単独塩によるウラン回収試験結果

実験番号	電 極		結 果	備 考
	陽極	陰極		
1	ガラス化黒鉛	低炭素鋼	・溶解塩中にあるつぼの黒鉛粉末混入と堆積。 ・温度計保護管破損、高温処理した黒鉛製品の発塵が原因。	前年度の NaCl+NaF 共晶塩と同一 電解条件
2	ガラス化黒鉛	低炭素鋼	・黒鉛粉末混入、発塵なし。 ・塩表面に一極から溶出した鉄が観察、るつぼ内面腐食なし。	実験1の黒鉛 粉末発生防止 テスト
3	ガラス化黒鉛	高純度 黒鉛	・溶融塩中U濃度低下観察されず。 ・一極；析出物落下による再溶解と析出物の直接再溶解による。	実験2の一極材溶出 防止テスト
4	ガラス化黒鉛	るつぼ (高純度 黒鉛製)	・溶融塩中U濃度低下観察されず。 ・一極；析出物落下と再溶解なし、 ・るつぼ(一極)底部と側面に析出物なし。 放冷中に析出物の直接再溶解による回収不良。 ・るつぼ内面腐食なし。	実験3の一極析出物 脱落・再溶解 確認テスト
5	ガラス化黒鉛 と るつぼ (高純度 黒鉛 製)	高純度 黒鉛	・実験中一極接続カラーレーザーで溶融塩中に鉄 が存在し実験2と同じになる。 ・溶融塩中U濃度低下観察されず。 ・一極に鉄の析出物、十極るつぼ内面腐食と 放冷固化した塩の一部が固着。	高電流密度で の一極析出物 の析出と 再溶解による 効果低下の 確認テスト
6	ガラス化黒鉛 と るつぼ (高純度 黒鉛 製)	高純度 黒鉛	・溶融塩中U濃度低下なし、塩表面に黒色 粉末観察。 ・十極ガラス化黒鉛激しく減損。 るつぼ内面腐食なし。	実験5の再試 験

資料 31 放射性廃棄物処理システム開発調査報告書
—サイクル廃棄物ウラン高度回収処理技術開発調査—
(汚染フィルター、焼却灰の ClF₃による除染法)

2001 年 3 月
(原子力環境整備促進資金管理センター)

1. 目的

ウラン製錬施設において発生するウラン汚染 HEPA フィルターおよび焼却灰について二次廃棄物低減とウラン回収が期待される乾式除染法として三フッ化塩素ガス (ClF₃) によるウラン除染効率についての試験および、生成する UF₆ および SiF₄ と未反応 ClF₃ を対象としてこれら気体の分離回収法について試験を行う。

2. 汚染 HEPA フィルターの除染試験

核燃料サイクル施設で使用されている HEPA フィルターはプレフィルターの後段に配置され、数 μm の粒径を有する酸化物ウランがフィルター表面に分布している。ウラン濃度は平均 1 ~ 2 % (プレフィルターを含む) で気流上流側と下流側で著しく濃度差を生じる。

(1) 試験条件と方法

模擬試料： 10mm ϕ 、35 mm ϕ (HEPA フィルターエレメントから切り取り)
に UO₂ または U₃O₈ 粉末吸着。

反応装置： ガス入／出口のフィルターは Ni 焼却フィルター固定し、ClF₃ ガスを反応。

オフガス処理： 1 段目純水洗浄でウラン、2 段目 NaOH 水溶液でハロゲン化合物 (スクラバー) ガスを回収。

ウラン分析： 1 段目、2 段目の洗浄液のウランを ICP-MS で分析。

残滓分析： 反応装置から試料を取り出し、重量測定後、全量を酸溶解し、ICP-MS でフッ素反応後の試料に残留するウラン濃度測定。

(2) 試験パラメーター 表-1

ClF₃ ガスと試料接触方法 (バッチ式、連続通気式)、ClF₃ ガス濃度、温度、反応時間、粉碎の有無。

(3) 試験結果 表-2、3、4 図-1～13

(4) まとめ

フィルターの除染後濃度をクリアランスレベル相当にするには次の 3 条件が必要。

- 1) 温度；100°C → 150°C → 200°C に各 2 時間ずつ保持。
- 2) ClF₃ 濃度；20v/o で 4 時間、40v/o で 2 時間保持。
- 3) ClF₃ ガスの試料と接触方式は、直接・連続循環式を採用し、接触効率の向上を

図る。

3. 焼却灰除染試験

核燃料サイクル施設の可燃性廃棄物を焼却処理した焼却灰中には、ウランが 4.1~18% も含まれている。平均的焼却灰に含まれる元素と同じ組成の模擬試料を調製しウラン除染試験を行う。

(1) 試験条件と方法

模擬試料；焼却灰類似組成の酸化物を混合し調製

成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	ZnO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ CO ₃	U ₃ O ₈
重量%	25	25	20	10	5	3	2	10

反応装置；通気試験用：フィルター除染装置と同じ

バッチ試験用：通気試験後さらにバッチ式試験用容器。

オフガス処理；フィルター除染試験と同じ

ウラン分析；フィルター除染試験と同じ

残渣分析；フィルター除染試験と同じ

(2) 試験パラメーター 表-5、6

ClF₃ガスと試料接触法（連続通気式、バッチ式）、ClF₃ガス濃度、温度、反応時間
粉碎の有無、共存元素。

(3) 試験結果とまとめ 表-7~13 図-14~20

1) フィルターと同一条件で 40v/o · ClF₃で長時間維持しても除染効果小、
除染後粉碎し再除染しても除染効果小。

2) Na,Ca の共存はウランが 100ppm 以上残留しフッ素反応を阻害する。Mg は
ウラン濃度 100ppm 近くまで除染できたが Na,Ca を除外した時の結果ほど低
減しない。Al,Fe はウランのフッ素反応に阻害要因なし。

3) 90%ClF₃ガスを使用し、高温(400°C)でのバッチ式除染でウラン濃度約 10ppm
まで除染できた。

4) フィルター除染での処理条件を改善し、400°Cバッチ処理の追加でウラン濃度
の低減ができ、クリアランスレベル近傍を達成した。(6.1ppm (0.6Bq/g)、
11ppm(1.0Bq/g))

表-1 フィルク燃焼試験の検査パラメータ

項目	パラメータ
温度	100°C, 150°C, 200°C
CIF ₃ ガス濃度	10, 20, 40, 100 vol.%
ウランの化学形	UO ₂ , U ₃ O ₈
時間	360min., 720min.
	90min./回(粉砕後)
通気速度	1cm ³ /s (反応容器φ10mm)
	0.13, 0.06 cm ³ /s (反応容器φ35mm)
試料の粉体	なし, あり

表-2 試験条件と結果(フィルタ) (1/2)

試験No.	データ比較の方法	CIF ₃ 濃度 (vol.%)	温度 (°C)	通気速度 (cm/sec)	U ₃ O ₈ 粉砕	試料重量(mg)		初期濃度 (ppm)	残存率	残留濃度 (ppm)
						試験前	試験後			
1	温度・ CIF ₃ 濃度依存性	10	100	—	—	10.7	6.8	1.2×10 ⁴	4.4×10 ⁻³	5369
2		20	100	—	—	10.4	6.8	1.2×10 ⁴	4.1×10 ⁻³ (注4)	478(注5)
3		100	100	0.23(注2)	—	10.5	6.3	9.6×10 ⁴	4.0×10 ⁻³	385
4		10	150	—	—	10(注3)	4.8(注3)	1.4×10 ⁴	2.3×10 ⁻³	3121
5		20	150	—	—	10.8	5.1	2.1×10 ⁴	1.2×10 ⁻³	2,497
6		20	200	—	—	10.4	4.9	6.6×10 ⁴	3.5×10 ⁻³	2,501
7		20	200	○	—	10.7	4.5	1.8×10 ⁴	2.6×10 ⁻³	476
8	試験中の昇温 温度変更の影響	20	100, 150(*3)	—	—	10.6	6.8	1.8×10 ⁴	1.4×10 ⁻³	267
9		20	150, 100(*4)	—	—	10.6	6.0	1.3×10 ⁴	2.3×10 ⁻³	3048
10		30	100, 150(*3)	—	—	10.3	6.8	6.2×10 ⁴	7.6×10 ⁻⁴	47
11		20	100, 150, 200(*5)	—	—	10.3	5.7	1.3×10 ⁴	1.2×10 ⁻³	17
12(注1)		20, 40(*1)	100, 150, 200(*5)	0.13, 0.06(*7)	—	63.8	32.7	4.0×10 ³	3.0×10 ⁻³	12
13		20, 40(*1)	100, 150, 200(*5)	0.18, 0.06(*7)	—	64.3	35.9	1.6×10 ³	3.7×10 ⁻³	5.0
14		20, 40(*1)	100, 150, 200(*5)	0.13, 0.06(*7)	○	64.4	35.8	3.9×10 ³	1.1×10 ⁻³	3.2
15		20, 40(*2)	100, 150, 200(*6)	0.13, 0.06(*8)	—	63.9	30.7	4.8×10 ³	8.0×10 ⁻⁴	3.4
16		20, 40(*2)	100, 150, 200(*6)	0.13, 0.06(*8)	—	63.9	31.0	3.1×10 ³	1.7×10 ⁻³	5.4

注1: No.12以後、試料袋をφ10mm→3.5cmに変更したため、通気速度が減少したが、CIF₃の使用効率は向上した。注2: CIF₃濃度を100vol.%としたため、CIF₃ガス流量コントローラの最大供給量を超過したため。

注3: フィルク重量が未測定。比較のため、No.5と同じ重量比で変化すると仮定した。

注4: 720分経過後の値(360分経過後は2.8×10⁻³)

注5: 720分経過後の値(360分経過後は3189 ppm)

(2段Bの洗浄瓶中のウランは検出不可であった。)

表-2 試験条件と結果(フィルタ) (2/2)

注釈番号	CIF ₃ 濃度(vol.%)	温度(°C)
*1	20(0~240min.), 40(240~360min.)	100(0~120min.), 150(120~360min.)
粉砕前	20(0~240min.), 40(240~360min.)	150(0~120min.), 100(120~360min.)
*2	粉砕1回目の後	100(0~60min.), 40(60~90min.)
粉砕2回目の後	20(0~60min.), 40(60~90min.)	100(0~30min.), 150(30~60min.), 200(60~90min.)
*3		100(0~120min.), 150(120~360min.)
*4		150(0~120min.), 100(120~360min.)
*5		100(0~120min.), 150(120~240min.), 200(240~360min.)
*6	粉砕前	100(0~120min.), 150(120~240min.), 200(240~360min.)
粉砕1回目の後	100(0~30min.), 150(30~60min.), 200(60~90min.)	
粉砕2回目の後	100(0~30min.), 150(30~60min.), 200(60~90min.)	

注釈番号	通気速度(cm/sec)
*7	0.13(0~240min.), 0.06(240~360min.)
粉砕前	0.13(0~240min.), 0.06(240~360min.)
粉砕1回目の後	0.13(0~60min.), 0.06(60~90min.)
粉砕2回目の後	0.13(0~60min.), 0.06(60~90min.)

表-3 ClF_3 ガス濃度の影響

項目	温度	内容
ClF_3 ガス濃度の影響	100°C 一定	ClF_3 濃度の大きい方が除染効率が向上した。
	150°C 一定	・100°Cに比べて、初期の除染速度が大きいことが分かった。 ・150°C、 ClF_3 10 vol%と 20 vol%では 100°Cと除染効率は同程度であった。
濃度変化と化学形の影響	・除染初期は 150°C 一定の条件で除染速度が高いが、除染効率に明確な差は見られない。 ・200°C 一定とした条件では、 U_3O_8 と UO_3 を比較しても除染効率に明確な差は見られない。	
温度の変更	100°C → 150°C	明確にウランの揮発速度が上昇し、除染効率が向上することを確認した。
	150°C → 100°C	温度変化のない試験と同等の結果であることを確認した。
温度、濃度変更の影響	試験中に、温度や ClF_3 ガス濃度を増加した時点での、ウランの揮発速度が増大することから、除染効率が向上することがわかった。	
	同条件下の UO_3 の結果と比較して、 U_3O_8 は除染効率が高いことが分かった。	
粉碎・練返しの影響	粉碎をしない条件と比べて除染効率は上昇した。	

表-4 フィルタ除染試験結果の代表例

項目	内容
除染条件の改善の影響	通気条件を採用するとともに、温度変化、濃度変化等の処理条件を改善し、効率的に除染が進んだことによって、クリアランスレベル相当を達成した。(UO_3 で 0.31Bq/g、 U_3O_8 で 0.29Bq/g)
化学形の影響	U_3O_8 ：試験開始から 200 分経過する前に揮発ウラン量が測定下限値未満に低減した。 UO_3 ：試験終了まで極微量 ($1 \mu\text{g}/\text{未満}/\text{時}$) のウランの揮発が継続する。 U(VI)で存在するウランの方が、 UF_6 に転換されやすい可能性がある。

注) 放射能濃度は、ICP-MS によって求めたウラン濃度(ppm)から、低濃縮ウラン(4.5%)の放射能濃度を基に算出した。

(a) ClF_3 ガス濃度の影響

i. 100°C一定の場合

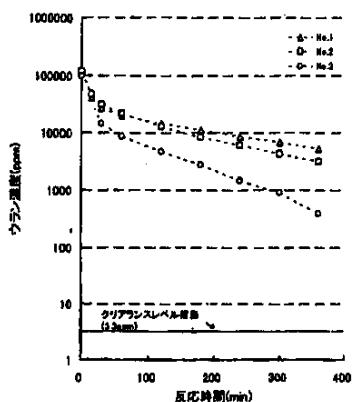


図-1 試料中ウラン濃度の時間依存性
(温度 100°C の場合)

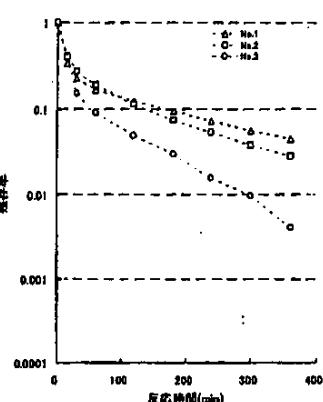


図-2 試料中ウランの挿序率の時間依存性 (温度 100°C の場合)

ii. 150°C一定の場合

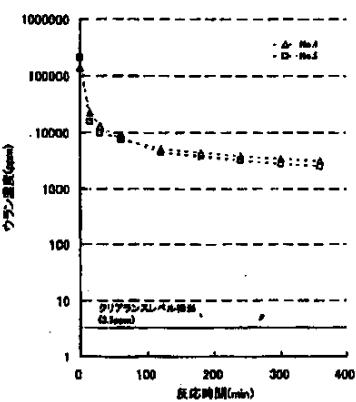


図-3 試料中ウラン濃度の時間依存性
(温度 150°C の場合)

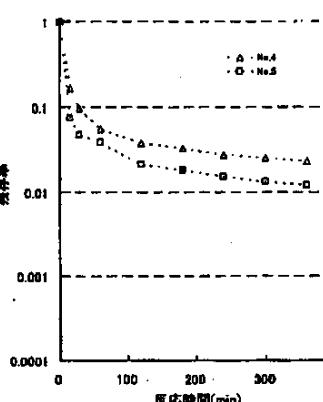


図-4 試料中ウランの挿序率の時間依存性 (温度 150°C の場合)

(b) 温度変化と化学形の影響

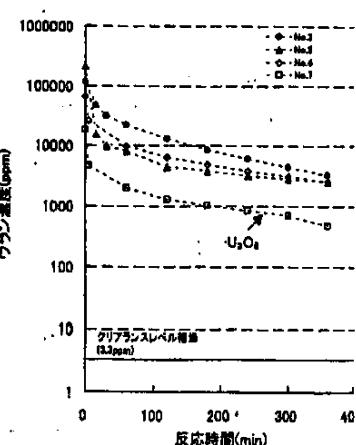


図-5 試料中ウラン濃度の時間依存性
(U_3O_8 と UO_2 の比較)

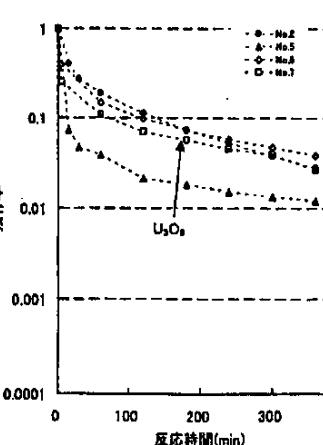
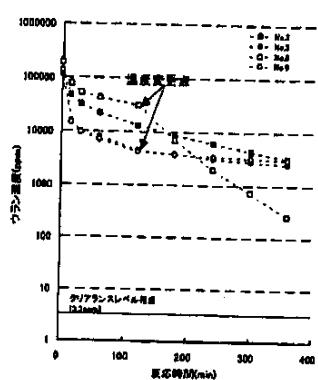
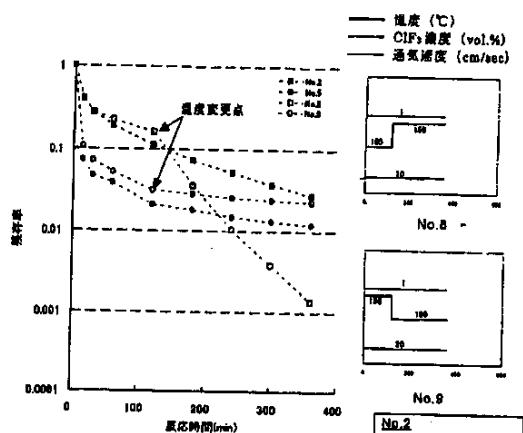
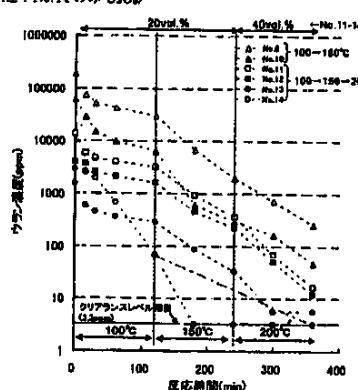
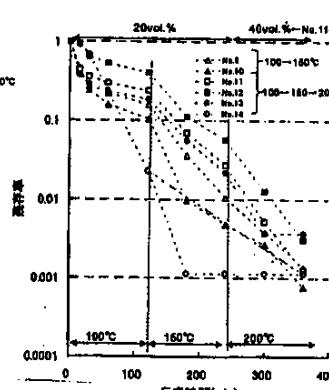


図-6 試料中ウランの挿序率の時間依存性
(U_3O_8 と UO_2 の比較)

(c) 試験中の温度・濃度変更の影響

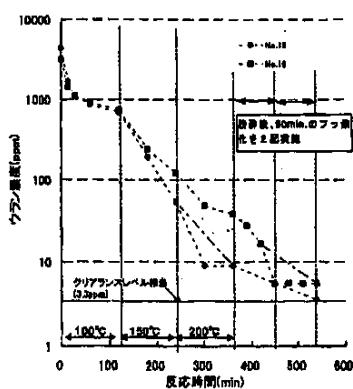
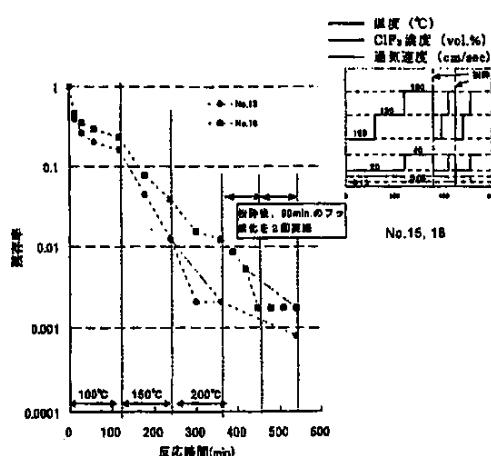
I. ClF₃ 濃度一定 (20vol.%) の場合図-7 試料中ウラン濃度の時間依存性
(ClF₃濃度 20vol.% の場合)図-8 試料中ウランの残存率の時間依存性
(ClF₃濃度 20vol.% の場合)

II. 温度・濃度変更の影響

(注: No.14 のみ U₃O₈)図-9 試料中ウラン濃度の時間依存性
(高溫・高濃度条件)注: - - - (一点鋼線) は実測値を除んで得た直線であり、
ウラン濃度が低く、マスバランスを取ることが困難な領域で適用する。図-10 試料中ウランの残存率の時間依存性
(高濃度・高濃度条件)

No. 12, 13, 14

(d) 粉碎・振り返しの影響

図-11 試料中ウラン濃度の時間依存性
(粉碎の影響評価)図-12 試料中ウランの残存率の時間依存性 (粉碎の
影響評価)

フィルタ除染試験結果の代表例

IAEA, 1987

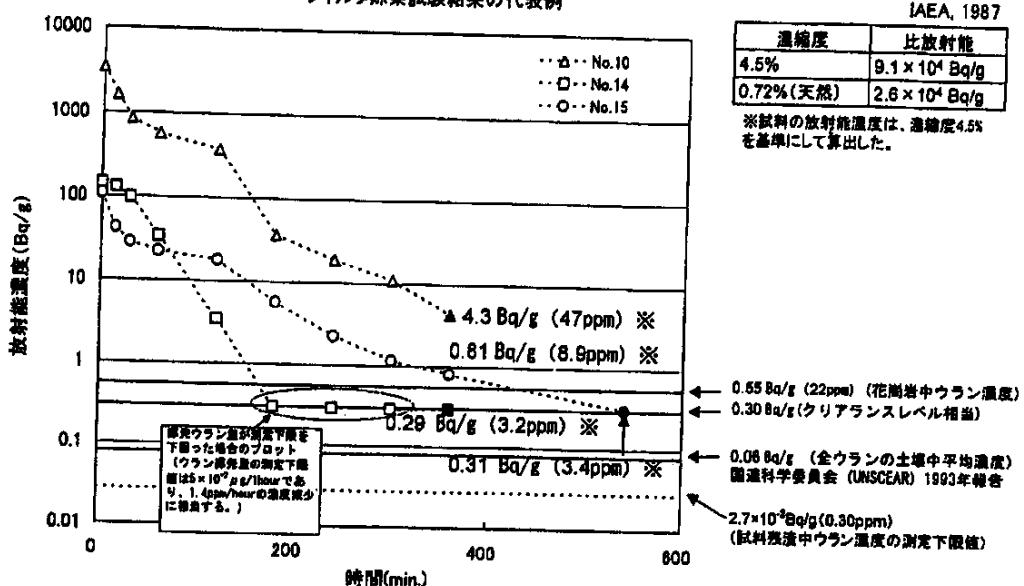


図-18 フィルタ除染試験結果の代表例

表-5 通気試験のパラメータ(焼却灰)

項目	パラメータ
温度	100°C, 150°C, 200°C
ClF ₃ ガス濃度	20, 40vol.%
ウランの化学形	U ₃ O ₈
時間	360min.
通気速度	1 cm/s (反応容器φ10mm) 0.13, 0.06 cm/s (反応容器φ35mm)
試料の粉碎	なし、あり
共存元素	試料から1種類ずつ元素を除く

表-6 パッチ試験のパラメータ(焼却灰)

項目	パラメータ
温度	200°C, 400°C
ClF ₃ ガス濃度	80vol.%
時間	30min. (繰り返しを数回)
試料の粉碎	あり

表-7 予備試験(フィルタと同条件)

試験No	データ比較の方法	ClF ₃ 濃度 (vol.%)	反応器温度 (°C)	通気速度 (cm/sec)	粉碎 処理	試料重量(mg)		初期濃度 (ppm)	残存率	残留濃度 (ppm)		
						試験前	試験後					
1	フィルタ試験と 同条件	20, 40	*1	*4	1	—	10.1	6.6	1.2×10 ⁴	1.4×10 ⁻³		
2	高ClF ₃ ガス濃度 維持時間延長		*2	*4		—	10.2	7.2	1.2×10 ⁴	5.2×10 ⁻³		
3	粉碎の影響		*3	100, 150, 200		○	20.3	12.4	1.4×10 ⁴	4.5×10 ⁻³		
4	試料粒径の変化に による影響		*3	*5		○	10.1	4.8	2.0×10 ⁴	1.3×10 ⁻³		
5	No.14, 15との 比較データ		*1	*4		0.13, 0.06	*6 (往復)	—	10.0	5.6	1.5×10 ⁴	9.8×10 ⁻³
注釈番号		ClF ₃ 濃度 (vol.%)										
*1		20 (0~240min.), 40 (240~360min.)										
*2		20 (0~120min.), 40 (120~360min.)										
*3	粉碎前	20 (0~240min.), 40 (240~360min.)										
	粉碎後	20 (0~60min.), 40 (60~90min.)										
注釈番号		温度 (°C)										
*4		100 (0~120min.), 150 (120~240min.), 200 (240~360min.)										
*5	粉碎前	100 (0~120min.), 150 (120~240min.), 200 (240~360min.)										
	粉碎後	100 (0~30min.), 150 (30~60min.), 200 (60~90min.)										
注釈番号		通気速度 (cm/sec)										
*6		0.13 (0~240min.), 0.06 (240~360min.)										

注6: 反応容器の内径を10mmから35mmに変更

表-8 予備試験(共存元素がフッ素化に与える影響の確認試験)

試験No	除去対象元素	ClF ₃ 濃度 (vol.%)	反応器温度 (°C)	通気速度 (cm/sec)	試料重量(mg)		初期濃度 (ppm)	残存率	残留濃度 (ppm)	阻害要因の有無
					試験前	試験後				
6	Na	20, 40(*1) 100, 150, 200(*2)	1	1	10.0	6.6	9.3×10 ⁴	8.2×10 ⁴	7.6	○
7	Mg				10.0	8.7	9.1×10 ⁴	1.6×10 ⁴	144	△
8	Ca				10.1	5.8	1.1×10 ⁴	1.2×10 ⁴	12.7	○
9	Al				10.0	6.1	1.6×10 ⁴	2.9×10 ⁴	466	×
10	Zn				10.0	6.6	1.5×10 ⁴	4.8×10 ⁴	719	×
11	Fe				10.0	7.1	1.2×10 ⁴	4.5×10 ⁴	534	×
12	Na				10.0	5.9	9.5×10 ⁴	2.8×10 ⁴	26	○
13	Ca				10.0	6.5	1.4×10 ⁴	5.6×10 ⁴	7.9	○

注釈番号	ClF ₃ 濃度 (vol.%)
*1	20 (0~240min.), 40 (240~360min.)
注釈番号	温度 (°C)
*2	100 (0~120min.), 150 (120~240min.), 200 (240~360min.)

表-9 予備試験(バッチ試験)

試験No	試験条件	ClF ₃ 濃度 (vol.%)	反応器温度 (°C)	通気速度 (cm/sec)	粉碎處理 (回)	試料重量(mg)		初期濃度 (ppm)	残存率	残留濃度 (ppm)
						試験前	試験後			
5(注7)	通気試験 (No.14,15との比較データ)	20,40(*1)	100,150,200(*4)	0.13,0.06(*6)	-	10.0	5.6	1.5×10 ⁴	9.8×10 ⁻³	147
14	通気試験+ 400°Cバッチ試験	通気:(注8) バッチ:80(*2)	通気:(注8) バッチ:400	通気:(注8) 高温除染:0	2	10.0	5.9	1.2×10 ⁴	9.2×10 ⁻⁴	11
15	通気試験+ 200°C, 400°Cバッチ試験 (試料量をNiに変更)	通気:(注8) バッチ:90(*3)	通気:(注8) バッチ:200,400 (*5)		1(200°C) 2(400°C)	10.0	9.2 (注9)	7.6×10 ⁴	8.0×10 ⁻⁴	6.1

注7: 表-20の試験No.5を引用

注8: No.5と同条件とする

注9: 反応容器からの腐食物が流入した

注釈番号	ClF ₃ 濃度 (vol.%)
*1	20 (0~240min.), 40 (240~360min.)

注釈番号	温度 (°C)
*4	100 (0~120min.), 150 (120~240min.), 200 (240~360min.)
*5	200 (0~30min.), 400 (30~60min., 60~90min.)

注釈番号	反応時間
*2	80分×2回
*3	30分×3回

注釈番号	通気速度 (cm/sec)
*6	0.13 (0~240min.), 0.06 (240~360min.)

表-10 フィルタと同条件試験

実施内容	確認事項
40vol.%の ClF ₃ 濃度を長時間維持 (240~360分を 120~360分に変更)	除染効率の改善は小さい。
除染後の試料を粉碎して再除染	除染効率向上への効果は小さい。

表-11 共存元素がフッ素化に与える影響

除去元素	確認事項
Na, Ca	約 10ppm を達成したことから、同元素がフッ素化反応を阻害する特性があることが分かった。 (Na と Ca が共存するとウランが 100ppm 以上残留)
Mg.	100ppm 近くまで除染できたが、Na, Ca を除外した結果ほどに低減しない。
Al, Zn, Fe	フッ素化反応に対して阻害要素がない。

表-12 バッチ除染試験の影響

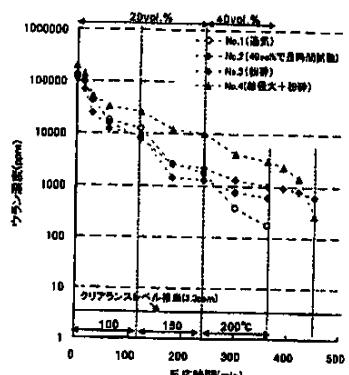
項目	内容
400°C除染	フッ素化反応を促進し、UF ₆ の蒸気圧を高めることを目的として400°Cにして処理したところ、約 10ppm まで除染できた。

表-13 焼却灰除染予備試験結果の代表例

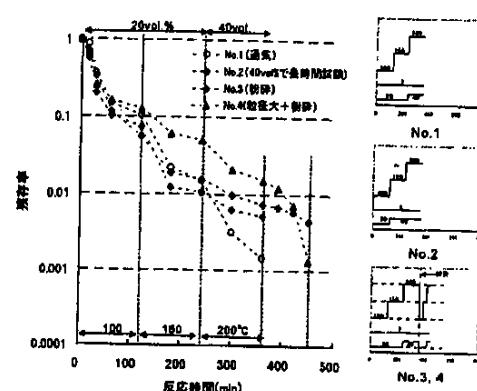
項目	確認事項
ウラン濃度低減の要因	(1) フィルタ除染試験で改善した処理条件を反映した。 (2) 400°Cバッチ処理を追加した。
除染後濃度	クリアランスレベル近傍を達成した。 (6.1ppm(0.6Bq/g), 11ppm(1.0Bq/g))

注) 放射能濃度は、ICP-MS によって求めたウラン重量濃度(ppm)から、低濃縮ウラン(4.5%)の比放射能 (9.1×10^4 Bq/g) を基に算出した。

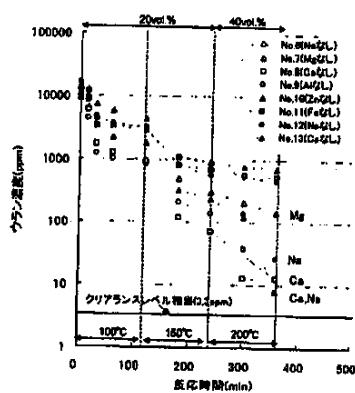
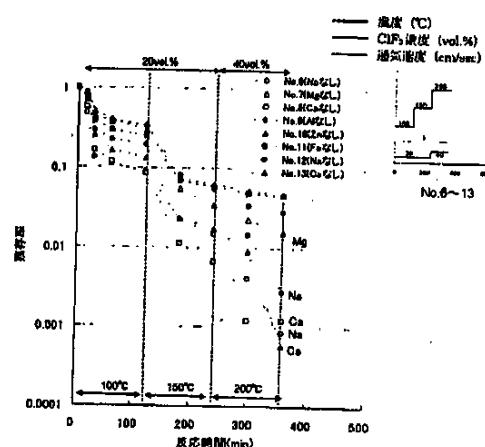
(a) フィルタと同条件

図-14 試料中ウラン濃度の時間依存性
(フィルタと同条件)

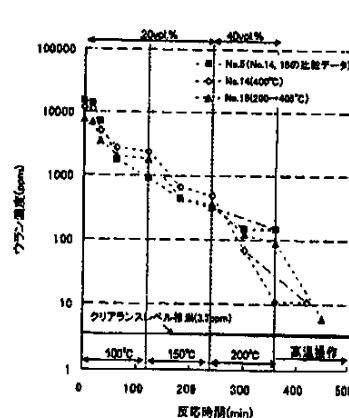
—— 溫度 (°C)
—— ClF₄ 濃度 (vol.%)
—— 通気速度 (cm/sec)

表-15 試料中ウランの残存率の時間依存性 (フィルタ
と同条件)

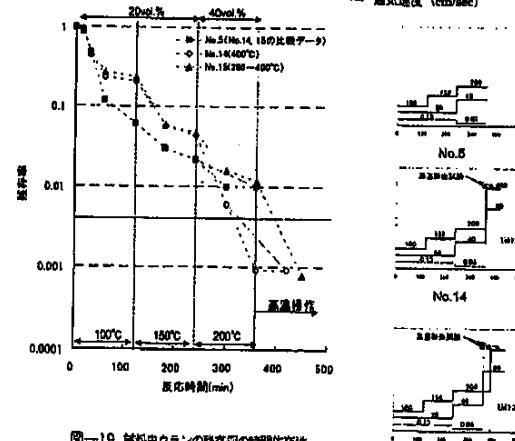
(b) 共存元素がブチル化に与える影響の追跡試験

図-16 試料中ウラン濃度の時間依存性
(共存元素の影響確認試験)図-17 試料中ウランの残存率の時間依存性
(共存元素の影響確認試験)

(c) 通気+バッチ挿入試験

図-18 試料中ウラン濃度の時間依存性
(通気+バッチ)

—— 溫度 (°C)
—— ClF₄ 濃度 (vol.%)
—— 通気速度 (cm/sec)

図-19 試料中ウランの残存率の時間依存性
(通気+バッチ)

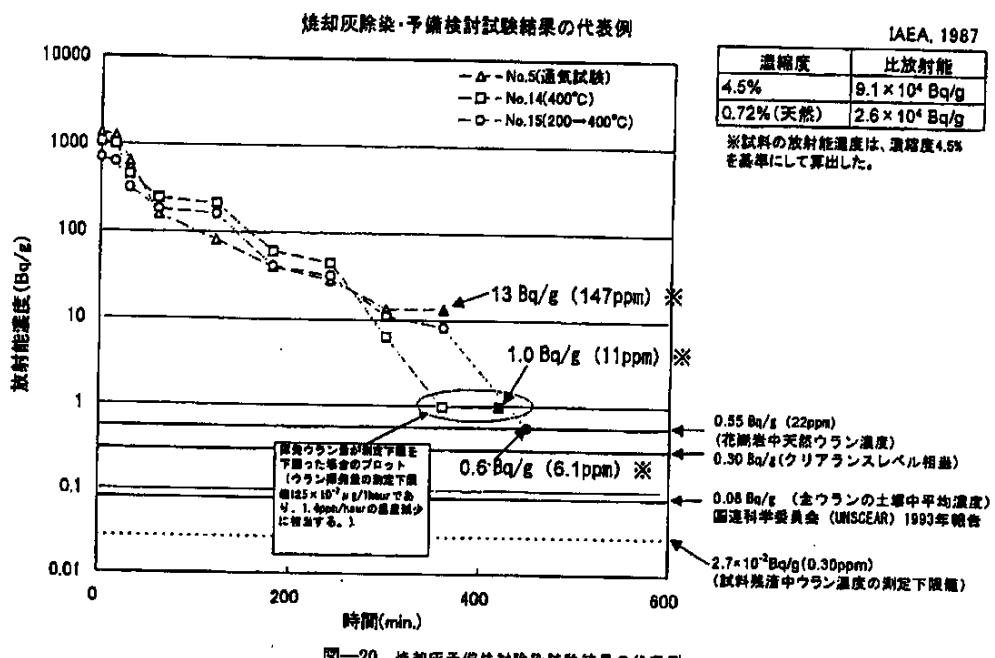


図-20 焼却灰予備検討試験結果の代表例

資料 34 水蒸気改質法による放射性難燃物質等の処理に関する調査

2001年3月 (IHI)

- 目的 製錬転換施設から発生する放射性難燃物（塩化ビニール、テフロン、ゴム手袋、高性能フルター等）の焼却処理はダイオキシン発生などの問題がある。代替処理技術の一つとして水蒸気改質法について、模擬試料による試験検討を行う。

2. 試験

- 試 料：8種類…
 - 塩化ビニール製パイプ（茶色、灰色）
 - テフロン（バルブ、ボルト）
 - F R P（繊維有・無）
 - ゴム（ラテックス手袋、ガスケット）

- 試験項目：組成分析、熱天秤試験、水蒸気改質試験

2.1 組成分析

- 分析項目：各試料分解により発生するガス組成および理論的減重比を推測するため次の組成分析を行った。

揮発分、灰分、炭素、水素、窒素、硫黄、塩素、フッ素、ポリマ定性分析。

- 結果 表-1, 2 図-1

①ラテックスゴム：揮発分、灰分の合計が99.1%で炭化物形成少ない。

炭素に対する水素の割合がモル比で1.6%であり、試料には他の合成ゴムの混合なし。

②テフロン：テフロンには2種類ある。

バルブ：ポリフッ化ビニリデン (PVDF)

水素含有、炭水化物10%残留。熱分解によるHF離脱により、炭素の二重結合形成が考えられる

ボルト：ポリテトラフルオロエチレン (PTFE)

すべての水素原子がフッ素で置換され、熱分解で全量が揮発する。

テフロンは重量の半分以上がフッ素で占められており、フッ素固定方法を含め検討必要。

③F R P（ガラス繊維有/無）：揮発分、灰分の合計100%、有機成分も殆ど揮発可能。ガラス繊維無しについては灰分32.5%あり、外観が黒色でないことから800°Cの燃焼に耐えるセラミック系の補強材が入っている可能性あり、強化材の組成確認が必要。

④塩化ビニール：組成の異なる2種類あり。

茶色：塩素系塩化ビニールで塩素含有率が多い。耐熱材として強化材が含まれ、炭化しやすい。

灰色：塩素化なしの塩化ビニールで揮発分は茶色より多い。

塩化ビニールの安定剤：Pb、Sn、Zn、Ba、Ca、Cd 等。灰分測定時にみな揮発する。

⑤ガスケット：揮発成分最も少ない。炭素分が非常に多く 900°Cに耐えることから カーボンブラック等の有機物系充填材が使用されている。

樹脂成分はエチレン・プロピレン・ジェンゴムである。

以上、各試料の基本構造式を図-1に示す。

2.2 熱天秤試験

(1) 試料と試験条件：表-3

(2) 試験結果：表-4

①ラテックスゴム：

- N₂と 5%O₂/N₂雰囲気で熱減重量 (TG) 曲線に差なし。
- 微量 O₂の影響前にはほぼ 100%ガス化した。500°C以上で 100%ガス化。

②テフロンバルブ (PVDF)

- 600°C昇温中に 60%がガス化。雰囲気の差なし。
- 微量 O₂に関係なく熱分解でガス化。塩化ビニールと同様脱ハロゲンにより HF が脱離したと考える。
- N₂雰囲気、600°C180 分保持：減重率 77.4%、ガス化不充分。
- 5%O₂/N₂雰囲気、600°C 50 分保持：減重率 100%。
- 500°C以下では N₂と 5%O₂は TG 挙動類似し、酸素はガス化反応に寄与しない。

③テフロンボルト (PTFE)

- N₂および 5%O₂双方の条件で完全ガス化。
- PTFE は PVDF の水素原子をフッ素置換 (図-1) しているためと考える。
- 分解開始温度は 600°C近辺であり、耐熱性のたかいことからテフロン類は高温での分解挙動データ取得必要。

④FRP 繊維有/無 (不飽和ポリエステル)

- N₂と 5%O₂雰囲気で大差なし。500°C近辺で 5%O₂の場合、有機物の炭化促進により重量減少率が小さくなる。
- 不飽和ポリエステルの分解温度は 450°C近辺で重量の急激な現象があることから、ガラス繊維充填物がなければ熱分解のみでガス化する。

⑤塩化ビニール (灰色ポリ塩化ビニール)

- 300°C近辺で第一分解。塩素と酸素が結合し塩化水素として脱離し大きな重

量減少あり。残留物は脱塩素によりポリエチレン構造形成。

- ・400°C近辺で第二分解。ポリエチレン構造の分解。
- ・N₂雰囲気：550°C付近から熱分解による炭化により重量減少。
最終的には揮発成分量と同じ 89%まで重量減少する。
- ・5%O₂雰囲気：400°C近辺から N₂雰囲気と違い重量減少（ガス化）進行。
酸素はポリエチレン骨格構造の分解に有効。

⑥塩化ビニール（茶色、塩素化塩化ビニール）

- ・塩化ビニール（灰色）と同様減重率 70%までは熱分析曲線上雰囲気の差なし。
- ・N₂雰囲気：600°C保持中殆ど重量減少なし。塩素を多く含む茶色塩化ビニールは塩素脱離により熱的安定な炭素鎖や炭化物の形成が大きいためと考える。
- ・微量酸素雰囲気：熱的安定な炭素鎖や炭化物はガス化速度にも影響し全ガス化時間は灰色塩化ビニールより長い。

⑦ガスケット（エチレン、プロピレン、ジェンゴム）

- ・塩化ビニールと同様、減重率 50%程度まで熱分析曲線上雰囲気の差なし。
- ・N₂雰囲気：600°C保持中殆ど重量減少なし。
- ・微量酸素雰囲気：重量減少速度遅く、模擬試料中で最も分解し難い。充填剤にカーボンブラック等分解速度の遅い有機物使用によると考える。
- ・ガスケット処理にはより高温、長時間を必要とする。

2.3 水蒸気改質試験

（1）試 料：3 試料

①ラテックスゴム手袋 ②塩化ビニール（灰色） ③ガスケット
テフロンは除外（石英ガラス製装置の破損回避のため）

（2）試験方法： 図-2

試 料：約 50 g を石英皿にいれ反応容器内に設置

雰囲気：5%O₂/N₂

温 度：100°C上昇後水蒸気供給開始とともに反応容器温度を徐々に上昇する。600°Cに到達時点で温度保持。

測 定：試験終了後、各廃棄物の処理残滓重量及び容量測定から減重比及び減容比を求めた。

（3）結 果：表-5

①ラテックスゴム手袋

- ・減重比、減容比とも大。熱天秤と一致。充分処理可能。
- ・600°C保持時間の短縮要検討

②塩化ビニール（灰色、継手）

- ・減重比大でラテックスゴム手袋と同じ。熱天秤試験とも一致。
- ・改質器出口に金属塩付着あり、実廃棄物処理装置では改質器入口に高温フィルター設置必要。
- ・この低沸点金属塩の挙動調査必要。

③ガスケット

- ・減重比が熱天秤試験減重比の約 $1/_{10}$ と小さい。
- ・理由：a. 残滓中のエチレン・プロピレン・ジェンゴム自体は分解したが、カーボンブラック等充填剤の酸化が進行しない。
b. 充填剤の酸化は熱天秤の場合に比べ試料重量に対する供給ガス量比が小さく酸化が進まなかつたと考える。

3. 今後の課題

(1) 熱天秤試験

- ①未測定試料の試験：テフロン等製品名称が同じでも材質、充填剤など組成の異なるものの熱分解特性等把握。
- ②最高温度変化による影響：ウラン廃棄物など放射性物質移行の観点から600°Cの低温ガス化でなく、最高温度変化による改質挙動、処理速度等の変化を確認。
- ③昇温速度変化の影響：熱天秤試験では 10°C/分とした。
炭化物形成への昇温速度の影響確認。

(2) 水蒸気改質試験

- ①テフロン等未測定試料の試験：装置が石英ガラスを用いたため除外したが、金属材料に改造して試験する。
- ②改質条件の最適化
- ③残滓組成の分析
- ④ガス化方式の検討 バッチ式または連続式等。
- ⑤耐食材料の評価
- ⑥放射性物質等の移行挙動と捕集、除去法試験。

4. 調査・試験計画 省略

表一 1 製品分析結果

試料名	ラテックスゴム (手袋)	テフロン (バルブ)	テフロン (ボルト)	FRP (繊維無し)	FRP (繊維入り)	塩化ビニル (茶色パイプ)	塩化ビニル (灰色パイプ)	ガスケット
主成分ポリマ	天然ゴム	ポリフッ化 ビニリデン	ポリテトラフルオ ロエチレン	不飽和 ポリエステル	不飽和 ポリエステル	ポリ塩化ビニル	ポリ塩化ビニル	エチレン・プロピ レンゴム
揮発分	97.4	88.3	99.9	65.6	57.8	75.8	87.6	49.6
灰分	1.7	<0.1	<0.1	32.5	42.2	<0.1	1.2	1.9
炭素	83.9	37.5	23.4	55.4	49.0	33.3	37.3	88.6
水素	11.5	3.0	—	5.1	4.8	3.7	4.8	6.6
窒素	0.2	—	—	<0.1	<0.1	—	—	0.1
硫黄	1.2	—	—	—	—	0.4	0.3	0.3
塩素	0.3	<0.1	—	—	—	54.9	40.3	0.1
フッ素	—	57.6	75.8	—	—	—	—	—

単位: wt%

表一 2 供試材の材質

製品名	テフロン	EPDM	硬質 塩化ビニル樹脂	硬質 塩化ビニル樹脂	硬質 塩化ビニル樹脂	超耐熱性硬化 塩化ビニル樹脂	超耐熱性硬化 塩化ビニル樹脂
使用部材	バルブ等	ガスケット等	フランジ	継手	パイプ	パイプ	継手
色	白	黒	灰	灰	灰	茶	茶
主成分 ポリマ	四フッ化 エチレン樹脂 (PTFE)	エチレン・プロピ レンジエン三元共 重合体(EPDM)	塩化ビニル レジン	塩化ビニル レジン	塩化ビニル レジン	塩素化塩化 ビニルレジン	塩素化塩化 ビニルレジン
配合比	100 (100%)	100 (51.5%)	100 (89.7~94.8%)	100 (89.7~93.8%)	100 (92.8~95.2%)	100 (88.5~92.5%)	100 (84.0~90.0%)
ポリマ	—	—	5~10 (4.7~9.0%)	8~10 (5.8~9.0%)	2~3 (1.9~2.8%)	3~5 (2.8~4.7%)	5~9 (5.2~7.9%)
安定剤	—	—	—	—	—	—	—
充填剤	—	84 (33.0%)	—	—	—	—	—
着色剤	—	—	0.5~1.5 (0.5~1.4%)	0.5~1.5 (0.5~1.4%)	0.1~0.15 (0.1%)	0.2~0.4 (0.2~0.4%)	0.5~1 (0.5~0.9%)
拘束剤	—	—	—	—	—	5~8 (4.4~7.4%)	5~9 (4.3~7.8%)
加硫剤	—	8 (4.1%)	—	—	—	—	—
促進剤	—	7 (3.6%)	—	—	—	—	—
その他	—	15 (7.7%)	—	—	—	—	—

表一 3 热天秤試験条件

試料	雰囲気ガス	分解温度	昇温速度	保持時間
①ラテックス手袋 ②テフロン(バルブ) ③テフロン(ボルト) ④FRP(繊維無し) ⑤FRP(繊維入り) ⑥硬質塩化ビニル(茶色) ⑦硬質塩化ビニル(灰色) ⑧ガスケット	①窒素 ②5vol%酸素/窒素	最高 600°C	10°C/分	3 時間

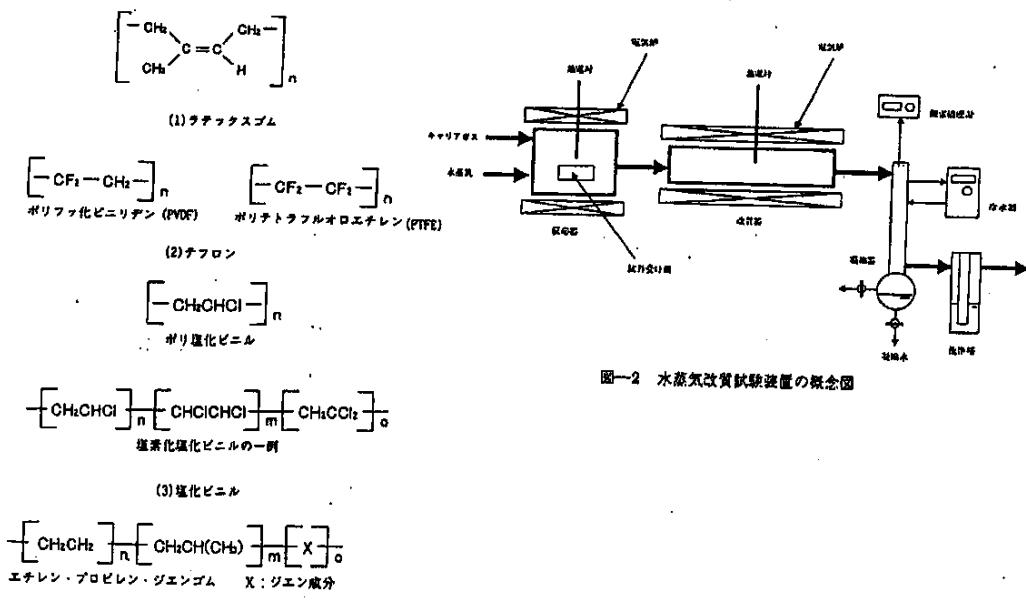
表一 4 热天秤試験結果

試料名	ラテックスゴム (手袋)	テフロン (バルブ)	テフロン (ボルト)	FEP (織維入り)	FEP (織維入り)	塩化ビニル (茶色パイプ)	塩化ビニル (灰色パイプ)	ガスケット
主成分ポリマ成分	天然ゴム	ポリフッ化 ビニリデン	ポリチトラフル オロエチレン	不飽和 ポリエチレン	不飽和 ポリエチレン	ポリ塩化ビニル	塩素化塩化ビ ニル	エチレン・プロ ピレン・ジエン ゴム
減量率 (wt%)	塩素	99.7	77.4	100	71.1	57.2	74.4	89.7
	Svolb酸素	99.6	99.9	100	71.2	60.2	99.8	96.9
減重比 (-)	塩素	330	4	>100	3	2	4	10
	Svolb酸素	250	100	>100	3	2	50	30
特異的 分解温度	塩素	350°C	500°C	800°C	200°C	200°C	300°C	270°C 450°C 500°C
	Svolb酸素	350°C	500°C	800°C	200°C	200°C	300°C	270°C 450°C 500°C
分解時間 [*]	塩素	50分	未確認 (240分以上)	200分	200分	未確認 (240分以上)	300°C 550°C	未確認 (240分以上)
	Svolb酸素	50分	100分	170分	70分	70分	70分	200分

*1:昇温時間の60分を含む。跳て、60分以下の場合は、昇温中に分解が終了。

表一 5 水蒸気改質試験結果

試料名	600°C 保持時間 (h)	重量 (g)		容積 (ml)		減重比 (-)	減容比 (-)
		試験前	試験後	試験前	試験後		
ラテックス ゴム手袋	2	49.86	0.82	200	3.4	61	59
塩化ビニル (灰色: 錠手)	2	48.34	0.97	70.68	5	50	14
ガスケット	5	50.37	11.13	47.25	24	4.5	2



図一 1 雜燃物 基本構造式

資料 35 硝酸系廃液処理に関する検討

(硝酸分解、脱窒ガス処理模擬試験)

2001年3月（三菱マテリアル）

1. 目的 製錬転換施設における含ウラン硝酸系廃液処理工程では、ウランをはじめ α 放射性物質やフッ素に加え、硝酸性窒素を除去し、瀬戸内法の排出基準に対応できる必要がある。本検討では硝酸液の分解、脱窒素操作に限定し、施設外放流可能レベルまでの処理技術調査と最適処理法を選定し、小型試験装置による実証性確認試験を行う。

2. 脱窒法及び脱窒ガス処理法の調査と最適処理法の選定。

(1) 一般的処理法（中和法）：硝酸系廃液をアルカリ溶液で中和、蒸発濃縮処理、固化体保管。

利点：開発要素なし、廃棄物量の減容比大。

欠点：放射性硝酸塩残渣が発生。酸化性固化体の長期保管は安全上問題。

最近は発生する硝酸塩を高温で炭酸塩に転換する開発が行われている。

2.1 調査対象の選定

・前提：中和法に替わって硝酸塩廃棄物を発生せず、単純な処理工程で硝酸根を窒素に変換あるいは変換に結び付けられる方法。

(1) 水溶液中の硝酸分除去法： 表-1,

①間接的分離回収法：中和蒸発法、イオン交換法、拡散透析法、溶媒抽出法等、排水中の硝酸分を直接分解または窒素への変換をしない法。

②直接的分離回収法：電気分解法、生物学的脱窒法、還元剤分離法、触媒分解法、熱分解法、超臨界分離法等。

・電気分解法と生物学的脱窒法は対象外。

プロセス設備複雑、大型化。設備維持管理負担大。

電気分解法：残窒素濃度を数百 ppm 程度まで低減できない。

生物学的脱窒法：硝酸根到達濃度数千 ppm まで。脱窒菌維持管理負担大。実績小。

・熱分解法、超臨界分離法は対象外。

両法は比較的高濃度硝酸根を完全に処理できる魅力がある。

熱分解法：焼却炉設置。1000°C付近で硝酸蒸気、NOx 排気取り扱い。多量の燃料消費。消防法対応必要。

超臨界分離法：高温、高圧（374°C、22MPa）必要。設備は第一種圧力容器管理、高圧ガス保安法対応必要。製錬転換施設の操作経験のない領域で対象外。

（2）対象処理法

検討に基づき、硝酸根分解と窒素ガスへの変換可能で製錬転換施設の運転経験を活かせる処理法として、還元剤分解法と触媒分解法を調査対象とした。

2.2 廃液中硝酸性窒素の高度処理法の調査

（1）還元剤分解処理

1) 有機還元剤法

方法は前回検討済み（報告書、JNCTJ6410-001, 平成10年度）

- ・有機還元剤：ギ酸、メタノール、蔗糖等のうち前回調査をもとにホルムアルデヒドを選定。
- ・ホルムアルデヒド分解法は有機的処理法で反応後の硝酸態窒素濃度を約1000ppm以下にできる。しかし実用的処理時間内で廃液も放流可能レベルまで低下可能か不明確。
- ・分解生成物NO_xガスをアンモニア還元で無害化窒素に出来る。触媒が実用化しているが反応状況変動によるNO_xガス濃度変動の関係が解決できれば処理プロセス成立可能性あり。
- ・有機剤還元法はガス化して分解消滅し残渣はない。

2) 無機還元剤法

- ・金属（Fe、Znなど）の硝酸溶解による硝酸分解反応、または排水中に生成する水素イオンの還元力をを利用する方法である。
- ・硝酸排水をイオン交換樹脂で金属イオン除去、高濃度硝酸にして金属鉄を接触させ分解する方法（特許）。硝酸と亜鉛を接触させ亜硝酸またはアンモニアまで還元後、触媒反応で窒素に転換する方法（特許）。還元試薬としてデバルダ合金（Cu50%、Zn5%、Al45%）を用いるとアルカリ中和後でも硝酸根の分解可能。
- ・無機還元剤法は自身は残渣源となる欠点がある。

（2）触媒分解処理

1) 液相分解法：表-2、図-1

①湿式酸化分解法

各種産業廃水、し尿、生物処理から排出される汚泥等を対象とした処理法。

- ・方法：加圧下酸素を吹き込み、廃水を触媒と接触酸化させ接触させ有機物、アンモニアなど無機物をCO₂、C、H₂O、N₂に転換する。

反応塔：160－360°C、運転圧力 15－120Kg/cm²（温度により）

アンモニア態窒素：完全分解し窒素として除去（表－2）例、アンモニア、亜硝酸アンモン、但し硝安は分解難しい。

硝酸根分解：メタノール等有機物と反応させ、全てアンモニアまで還元後湿式酸化分解する法（特許）や触媒により湿式酸化分解する法（特許）も開発されている。

- ・その他大気圧下で Pt 触媒を使用し硝酸と有機物の酸化分解反応を進行できる報告有。また金属 Pd と Cu-Pd 合金の混合物を触媒として常温常圧で廃水中に H₂ を吹き込み、硝酸を亜硝酸に変え窒素に還元する方法（特許）も開発されている。

本方法では放射性廃棄物処理の場合触媒の回収、再生が不可能で、二次廃棄物となる。廃水中重金属など触媒劣化成分の影響考慮必要。一方、廃水中重金属イオン除去処理法（特許）も開発されている。

2) 気相分解法

- ・硝酸廃液を加熱気化させ触媒により気相中で NO_x ガスに分解する。
NO_x ガスはアンモニアと反応させ N₂ に転換する（特許）。
硝酸分解温度 200～550°C。
- ・アンモニアによる燃焼排ガス中の NO 脱硝反応促進に必要な NO₂ 供給法として、硝酸を気相中で触媒反応させ分解して NO₂ を生成する方法（特許）が開発されている。

3) 還元剤分解法と触媒分解法の特徴

放射性廃棄物処理分野も含め、産業分野での適応実績から、いずれも差がつけ難い。

還元剤法：分解処理は処理後の到達窒素濃度の点で工夫が必要であると見られるが、比較的温和な条件で処理可能であることが大きな利点。
無機還元剤法は放流前に残渣源となる還元剤除去が必要、
有機還元剤法は自分自身分解ガス化し二次廃棄物源とならない利点あり。

触媒法：常温、常圧での開発例少ないが処理後の到達窒素濃度はそのまま放流可能レベルまで充分低下可能。

本検討では平成 10 年度に続き、ホルムアルデヒドを用いた硝酸の硝酸分解処理法の実証確認試験を行うことにした。

2.3 脱窒ガス（ホルマリンによる硝酸分解 NO_x ガス）処理法の物質収支

平成 10 年度報告（JNCTJ6410-99-001）のアンモニアによる選択的接触還元法で

用いる触媒回りの物質収支について検討した。反応塔通気量を把握し今後の検討指針とする。

(1) 前提フロー：表-3

表-3 上図に示す。概要は次の通り

原廃液受槽→計量→分解反応塔→加熱→NO_xガス排気（掃引空気による）→硝酸ミスト洗浄器→NO_x希釈→還元反応塔→NO_x還元無害化→排気
反応処理後の排気は予熱前の反応器導入ガスと熱交換した上で建屋排気系へ排出。

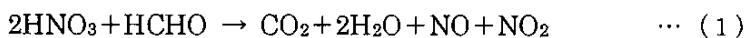
(2) 全体物質収支量

①硝酸分解ガス発生量

前 提；廃液処理量：100l/日

硝酸濃度：1.5N

硝酸分解反応：残硝酸濃度 0.1N (分解率 93.3%)



発生量；硝酸処理量：0.15kg モル/日 (NO_x換算 3.4Nm³)

NO_x発生量：3.14Nm³

②添加ホルマリン量

前 提；30%ホルマリン使用

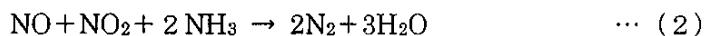
消費量；ホルムアルデヒド換算：0.075Kg mol の 30%ホルマリン

(質量 7.5kg) … 反応式 (1) より

③掃引空気、希釈空気量

・掃引空気：分解反応槽の NO_x排気、還元槽の反応熱による昇温制御。

前 提；NO_xガス分解反応：

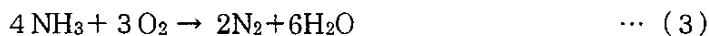


NO_xガス発生量：硝酸分解速度依存、ホルマリン添加速度に反応

NO_xガス還元分解：NO_xガス発生状況に対応し NH₃の添加流量
の調査必要。

簡単のためホルマリン注入開始後は一定量の NH₃供給。

・希釈空気：余剰 NH₃の酸化分解発熱は触媒反応器内での温度上昇（例、空気中 NH₃濃度 0.1%で反応器出口約 10°C 上昇）を 50°C 程度に抑制するため希釈空気導入必要。



・空気量：

希釈空気：NO_x濃度平均 5000ppm にできる量：626Nm³/日

掃引空気：希釈空気の 10%を分解反応槽に供給。

④添加アンモニア量：

NO_xに対し NH₃過剰率 5%とする。必要量 2.5kg/日

⑤還元反応槽入口ガス量

分解槽からの NO_x ガスはミスト洗浄器を経て過熱後還元塔に通気。

還元槽入口ガス量を多めに見積るため、水の NO_x 吸収は無視。

NO_x ガスは 50°C の飽和水蒸気を同伴すると考える。

還元反応槽入口ガス量：約 640Nm³/日

⑥還元反応槽出口ガス量

還元反応率：99%、

残余アンモニア：(3) 式で酸化分解されるとする。

出口ガス量：約 640Nm³/日

(3) 脱窒ガス処理試験で確認すべき事項

1) 還元反応塔触媒、充填量と還元反応の関係

・設定反応率 99% を達成できる触媒充填量

・反応温度と空間速度 (SV) による反応率の変化。

2) 過剰アンモニア酸化による NO_x 副生状況把握

物質収支では本項を考慮していない。実触媒でどの程度の温度から NO_x 副生が起こるかを把握。

3. 模擬廃液を用いた小型試験装置による実証性確認試験

(1) 硝酸分析試験と装置 図-2

装 置：反応器・耐熱強化ガラス製 1000m l

方 法：所定量の模擬硝酸廃液を反応器に充填 → 加熱 → ホルムアルデヒト滴下 → 反応生成 NO_x 濃度測定

分 析：生成 NO_x は排気トラップ前で一定流量の空気で希釈し濃度分析。

分析反応：2HNO₃ + HCHO → NO + NO₂ + 2H₂O + CO₂

(2) 試験条件と反応 表-4, 5, 6 図-3

①模擬硝酸廃液：表-4。

②反応溶液及び添加物質（硝酸分解用）

③ホルムアルデヒト液添加とサンプリング法：表-6 図-3

4 個に分け、投入時間約 15 分で徐々に投入、サンプリングポイントを図-3 に示す。

(3) 試験結果と考察：表-7

1) Run 1 と Run2

①硝酸濃度 1.5N 程度の場合

- ・ホルムアルデヒドだけで（触媒あるいは反応開始剤なし）90°C付近で硝酸分解反応を起す。

- ・NO_x発生時間：Run 1で約10分、Run2で約2分。

- ・硝酸濃度により反応時間までに誘導時間がある。

②ホルムアルデヒド添加量が硝酸分と当量の場合

- ・初期硝酸濃度によらず、分解反応後の到達全窒素濃度は5000mg/l(0.36モル/l)前後である。

- ・初期硝酸濃度が高い方が硝酸分解率有利。

- ・いずれのRunでも到達全窒素濃度は放流レベル以上で低下対策等必要。

2) Run 3

①硝酸廃液中で有機物分解反応促進触媒—シリカ担持Pt触媒使用の場合

- ・ホルムアルデヒド添加量が硝酸分と当量として硝酸分解率は向上し、到達全窒素濃度は触媒不使用の場合の1/4程度に低下。
- ・廃水が多量でなければ触媒を使用して全窒素濃度を希釈放流レベルに処理可能。

3) Run 4

①硝酸廃液中に硝酸濃度の50%濃度の塩酸が共存し、ホルムアルデヒド添加量も硝酸当量より過剰の場合

- ・全体酸濃度が1.5N程度でも硝酸分解反応は促進され硝酸分解率は向上する。

この場合、分解反応後の到達全窒素濃度は触媒がなくても200mg/l程度で水質汚染防止法排水基準（瀬戸内法適用地域、窒素濃度日間平均60mg/l）からみて放水可能レベル近くまで低下可能。

- ・硝酸系廃液に塩酸を共存させると硝酸根濃度に対し過剰の水素イオンが存在する。

塩酸が過剰であれば酸化反応活性の高い塩化ニトロシェルを生成しホルムアルデヒドによる分解反応は100%近く進行したとも考えられる。

- ・Run 4の結果からアルデヒドによる硝酸分解の際、塩酸を補うと硝酸の分解がほぼ100%進行する。

4) 製鍊転換施設の硝酸系廃液処理候補プロセス：図-4

Run 4の結果をもとに確認すべき点はあるが、硝酸系廃液処理プロセスの候補を図-4に示す。

- ・処理プロセス：硝酸排水 → 塩酸添加（濃度調製） → ホルマリン添加（硝酸分解） → NO_xガス分解（アンモニア分解処理） → 無害化
- ・ウラン除去：処理プロセス内で単独除去する場合—適切な酸濃度に調製し

ウラン除去処理

- ・ホルマリン除去：液中にホルマリンが残留すれば次亜塩素酸ソーダで酸化し分解中和する。PH および必要に応じ希釀水で窒素濃度調整し、処理済水として放流。

(4) まとめ

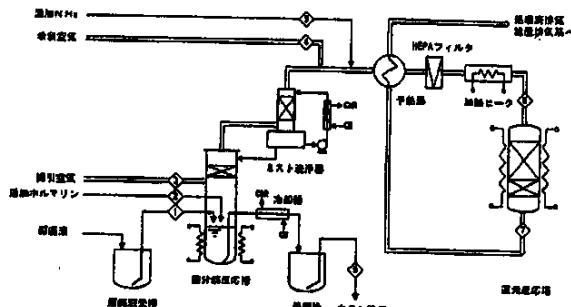
硝酸分解処理の実証性模擬試験結果からつぎのことが判明

- ① HNO_3 、1.5N、90°C近辺で反応開始剤等なしで、硝酸分解反応が生起する。
4～5時間の反応時間では、全窒素濃度約 5000mg/L であり排出レベルに達しない。
- ②シリカ担持 2%Pt触媒使用により上記全窒素濃度で 1/4 に低下可能。
- ③廃水中に HC 1 混合により反応時間 4～5 時間で全窒素濃度が 200mg/L になり放流可能レベルまで処理可能。

以上、製錬転換施設の硝酸系廃液処理法としてホルマリンによる分解処理法の実用可能性を実証した。

4. 今後の課題

- (1) 実廃液による試験
- (2) 分解反応槽の材質…硝酸と塩酸の混合反応条件下での耐食材料
- (3) 硝酸分解反応促進機構…水素イオン補給効果か、塩酸効果か、硫酸補給で可能か等。



物質名	1		2		3		4		5		6		7		8	
	量	単位	量	単位	量	単位	量	単位	量	単位	量	単位	量	単位	量	単位
CO ₂	19	kg/4	0.02												0.02	
HNC ₂	62	kg/4	0.48												0.63	
HCHO	30	kg/4	2.25												0.15	
H ₂ O ₂	16	kg/4	95.83	kg/4											35.33	
NO	30	kg/4														
NO ₂	48	kg/4														
CO	44	kg/4														
NH ₃	17	kg/4														
Air	28	kg/4														
H ₂ O ₂	16	kg/4														
全計	106.00	kg/4	1.50	kg/4			2.00	kg/4	7	kg/4	0.67	kg/4	10.8	kg/4	13.6	kg/4
濃度	1/4		100		5.5		—		0.28		0.43		100		0.44	
メタ	N ₂ /4		—		53		3.2		0.39		0.42		544		0.44	
濃度	kg/4		—		—		—		—		—		—		—	
相対			1.05												1.01	
相対濃度			21.0		25.0		35.0		28		20.0		300		25.0	
相対			NH ₃ /N ₂		NH ₃ /NO ₂		NO ₂ /NO		NH ₃ /NO ₂		NH ₃ /NO ₂		相対濃度		相対濃度	
相対			1.00		8.5		10		5000		5.0		0.10		0.24	
相対			200.0		(%)		(%)		(%)		(%)		(%)		(%)	
相対																

表-3 調査ガス処理に関する物質収支 (1日当たり処理量 100 L)

表-4 模擬硝酸廃液

Run	硝酸濃度 (N)	Fe 分含有量 (ppm)	液量 (ml)	備考
1	1.5	200	500	標準模擬廃液
2	3.0	400	500	腐被試験液模擬
3	1.5	200	500	触媒分解反応促進効果確認
4	1.5	200 含 Cl ⁻ /N	500	Cl ⁻ イオン含有模擬廃液

表-5 反応溶液及び添加物質

Run	ホルムアルデヒド 溶液 (w/o)	触媒	液量 (ml)	備考
1	37	—	55	標準模擬廃液 分解用
2	37	—	110	濃縮模擬廃液 分解用
3	37	Pt (洗浄剤) 30 g *	55	触媒分解反応 促進効果確認
4	L.5N 硝酸濃度 Fe 分 200ppm Cl ⁻ /N 含有		500	Cl ⁻ イオン含有 模擬廃液

*シリカ 3mm 粒担持 2%Pt触媒 (原研、硝酸系分析廃液中の有機物分析技術開発で使用されたものと同仕様)、反応後半で添加

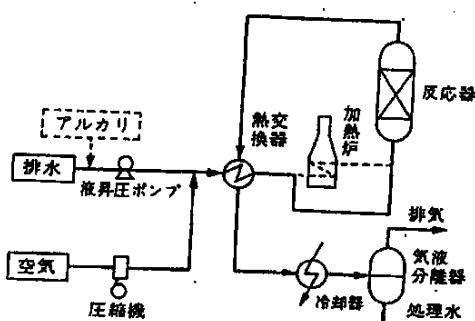
表一6 ホルムアルデヒド投入条件

Run	硝酸溶液種類×充填量 (添加物)	ホルムアルデヒド投入量 [ml]				
		合計量	分注 1回目	分注 2回目	分注 3回目	分注 4回目
1	1.5N × 500ml	55.0	5.5	16.5	22.0	11.0
2	3.0N × 500ml	110.0	11.0	33.0	44.0	22.0
3	1.5N × 500ml ※ Pt触媒 30g、分注 3回目直前投入	55.0	5.5	16.5	22.0	11.0
4	1.5N(Cl ⁻ 含) × 500ml	55.0	5.5	16.5	22.0	11.0

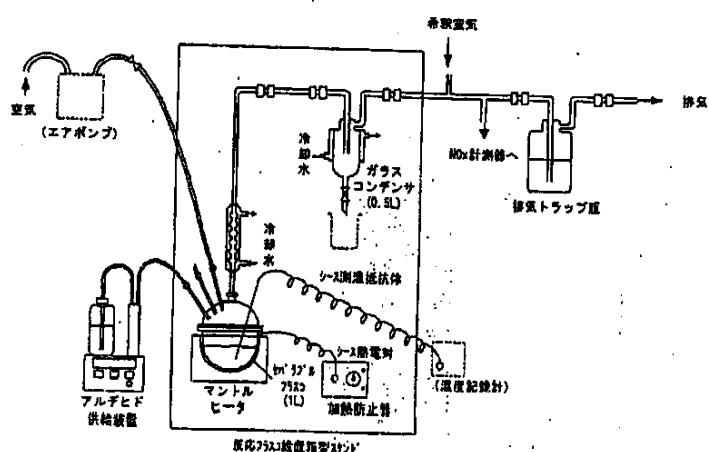
表一7 硝酸分解試験結果まとめ

項目	Run-1	Run-2	Run-3	Run-4
初期 条件	試験液量 500mL	500mL	500mL	500mL
	硝酸濃度 1.5 N	3.0 N	1.5 N	1.0 N
	塩酸濃度 —	—	—	—
	HCHO 添加量 0.756mol	1.523mol	0.756mol	0.756mol
	有機物分解触媒 使用せず	使用せず	後半 30g 添加	使用せず
試験 結果	硝酸分解率 74.7 %	89.5 %	94.1 %	98.6 %
	到達全窒素濃度 5050 mg/L	4620 mg/L	1290 mg/L	200 mg/L

注) 反応温度は、全ての Run で 90 ℃前後。



図一1 混式酸化処理のプロセス概略



図一2 貸与される試験装置の組立例 (破線図示器具、NOx測定器接続は含まず)

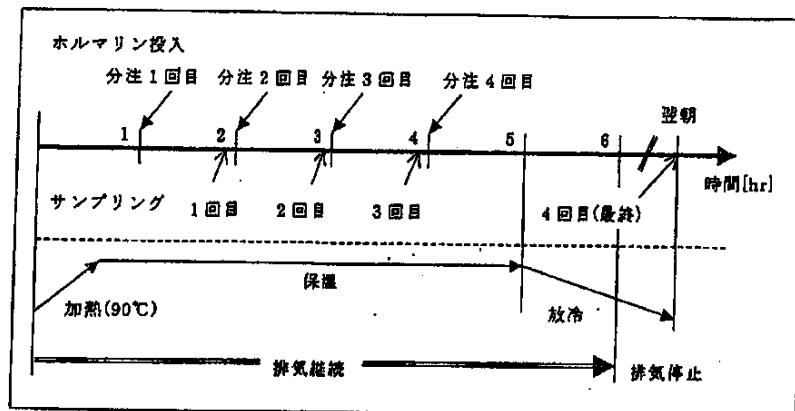


図-3 ホルムアルデヒド溶液の添加条件及びサンプリングパターン

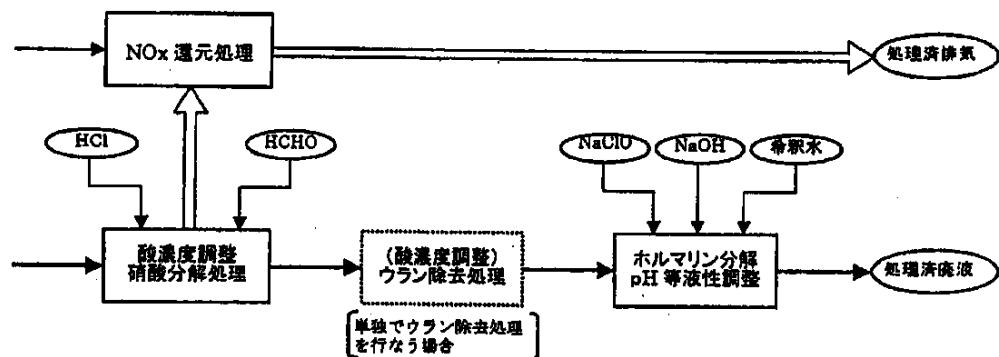


図-4 脱硝転換施設の硝酸系廃液処理処理プロセス

資料 36 有機酸還元溶解法除染技術の評価検討

2000年11月（東芝）

1. 目的

核燃料サイクル機構の関連施設—ウラン系、MOX 加工系、再処理系施設から発生する放射性固体廃棄物—可燃、難燃、不燃等保管廃棄物に対し原子炉の供用期間中除染に使用されている CORD 法及びギ酸還元法の適用について 除染性能、コスト等を定量的に検討、評価するに必要な情報を調査、評価する。

2. 対象廃棄物

ウラン系、MOX 加工系、再処理系施設から発生する放射性固体廃棄物のインベントリーを表-1 に示す。

本要約ではウラン系施設の廃棄物を主体とする。

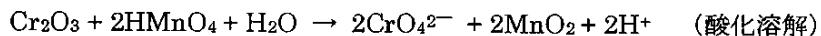
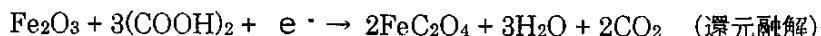
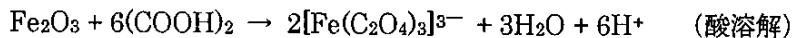
3. CORD UV 法

(1) 原子炉供用期間中除染

① 酸化と還元を繰り返すマルチステップ、マルチサイクル化学除染法

酸化剤 : HMnO₄、SUS 表面に高温で生成する Cr 酸化膜溶解

還元剤 : (COOH)₂、表面の放射性汚染物を酸溶解、還元溶解



② 除染

・試薬濃度 (希薄液) : HMnO₄ <300ppm、(COOH)₂ <3000ppm

// 温度 : 95°C

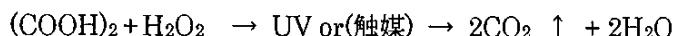
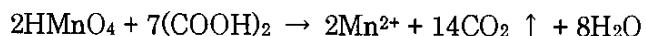
除染サイクルと時間 : 3 サイクル、1 サイクル 2~8 hr

除染係数 (DF) : 6~200

③ 廃液処理法 : HMnO₄ は(COOH)₂ で分解。

Mn²⁺ は放射性物質と共にカチオン交換樹脂に吸着。

COOH は紫外線(UV)で分解、廃棄物発生量少。



(2) 核燃料サイクル廃棄物の除染

①SUS : 原子炉のように高温水で使用されていないので酸化工程不用。

除 染 剤 : (COOH)₂ 0.3 ~0.4% (3000~4000ppm)

温 度 : 95°C

除染サイクル : 還元工程 1 サイクル/10 ~ 20hr

②炭素鋼 : シュウ酸第一鉄が生成し、除染対象物表面に析出し保護皮膜にならぬよう、隨時溶解したシュウ酸第一鉄を除去する。(カチオン交換樹脂を常設する)

③除染前処理条件 : 表-2

狭隘部(0.1mm 以下)はシュウ酸が浸透するよう切断又は拡大。塗装等の除去。

④除染方法の一例 (ループ式) : 図-1

a. 基本条件 : タンクの廃棄物容量 1 t、系統全体容積 3 m³

前処理工程と化学除染工程 : 図-2, 3

b. 方法 :

・化学除染では除染タンクに除染対象物(金属等)を収納し、蓋をして水張り終了後、循環ポンプで除染液を送る。昇温して 95°C 程度にする。

除染時間は 10~20 時間。SUS 腐食領域での除染は 除染後の酸化還元電位を制御し時間短縮可能。

・除染開始から終了まで系統内除染液の入れ替えなし。放射能や金属の溶出が鈍化したところで終了。

・除染終了後、除染剤は酸化剤添加と紫外線照射で分解。

除染剤分解後、金属廃棄物を取り出し、リンスタンクへ移し洗浄する。

・除染タンク内の水は最終浄化で純度を上げ再使用。何回か再使用後廃液としてろ過処理し、余剩水として排出する。この場合、二次廃棄物として発生するイオン交換樹脂は乾燥または焼却処理してドラム缶固化体として処分。

⑤除染効果と除染廃棄物量予測

a. DF : • 核燃料サイクル施設の試験データなし。

• 国内商用発電炉実績(供用中除染) : 6~200 対全 γ 核種

• 海外発電プラント : >1000 対 α 核種

• 核燃料サイクル施設(予測) : ~1000

b. 廃棄物重量・放射能収支と二次廃棄物 : (イオン交換樹脂処理法適用)

表-3、4 図-4、5

・除染の二次廃棄物量予測前提条件 : 表-3

・ウラン系廃棄物の重量収支と放射能収支 : 図-4、5

・使用する除染設備からの二次廃棄物量 : 表-4

・廃棄物量は化学除染の DF 値に大きく依存し、対象物の形状(単位重量あたりの表面積)にも依存する。

・核燃料サイクル施設の除染では酸化工程(MnO₂)は省略。シュウ酸

分解用の過酸化水素水だけでよい。

4. ギ酸還元除染法

(1) 基本概念

除染剤 : ギ酸(HCOOH) 5%(50000ppm)

除染温度 : 80-95°C

除染サイクル: 還元工程 1 サイクル

除染時間 : 8hr

除染反応 : $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{HCOOH} \rightarrow 2\text{Fe}(\text{HCO}_2)_3 + 3\text{H}_2\text{O}$

- ギ酸除染で生成するギ酸鉄はシュウ酸除染で生成する2価のシュウ酸鉄より溶解度大。対象物への付着がなく母材損傷少なく除染容易。しかしシュウ酸に比べ解離定数が2桁小さいので高濃度が必要。

- ギ酸還元除染法はサイクル除染が基本

- システムは CORD-UV 法と同じ。除染タンク中心に除染ループ構成。

- CORD-UV 法はシュウ酸第一鉄除去のためカチオン交換樹脂必要。しかし、ギ酸法は金属塩溶解度大。イオン交換樹脂の替わりに沈殿法可能。

(2) 除染方法の一例 (ループ式)

①除染前処理条件: CORD-UV 法と同じ (表-2)

②除染プロセス: 図-6、7

- ギ酸還元法のイオン交換樹脂による除染システムは CORD-UV 法と同じ (図-2)。沈殿分離法のシステム構成を示す (図-6、7)。

- プロセス (沈殿法): 除染対象物前処理 → 除染タンク → 水張り昇温 → 5% ギ酸注入除染 → 除染液分解タンク → 溶解金属沈殿 → 固液分離 → スラッジ・廃液・二次廃棄物処理

- 除染タンクの規模とループ構成は浄化系、排気系、紫外線照射装置がないほかは CORD-UV 法と同じ (図-1)。各機器の仕様も同じ。

- 分解タンクでは H_2O と紫外線により HCOOH が分解し高 PH となる。金属イオンは水酸化物として沈殿。溶解している分はアルカリ注入で沈殿させる。

- 除染廃液処理: アルカリ性にして溶解金属を完全沈殿。沈降分離後ろ過。上澄液は蒸発濃縮固化、凝縮水は再使用又は余剰水として排出。

- 二次廃棄物: フィルター、スラッジ、廃液固化体である。

(3) 除染効果と除染廃棄物量予測

①DF : 1000 と仮定。核燃料サイクル施設のデータなく、研究室レベルの実験では CORD-UV 法と同程度。

②廃棄物重量・放射能収支と二次廃棄物量:

- 除染・廃棄物量予測前提条件： 表-5
- 沈殿分離法による重量・放射能収支： 図-8, 9
イオン交換樹脂法の場合は CORD-UV 法と同じ。(図-4, 5)
- 除染設備から発生する二次廃棄物量は沈殿分離法約 10 t。イオン交換樹脂法約 20 t (表-4)。
- 廃棄物発生量は CORD-UV 法と同じく、DF 値や除染対象物の単位重量当たり表面積に依存。その他、本予測では軽水炉廃液処理実績に基づき蒸発濃縮倍率 100 倍、濃縮固化条件が 200 l ドラム缶当たり、120 l としているが濃縮廃液を乾燥後処理すればイオン交換樹脂の焼却処理よりやや多い位まで減少可。

5. CORD UV 法とギ酸還元法の比較

- (1) 除染法特徴： 表-6
-CORD UV 法はシュウ酸を使用するため、鉄は 2 個の第一鉄塩となり溶解度の小さい保護皮膜として析出する。カチオン交換樹脂による除去必要。しかしギ酸に比較し解析定数が 2 衍大きく低濃度除染剤で可能。
- (2) 廃棄物系統除染設備数 (ウラン系施設) 表-7
- (3) 前処理プロセス：表-2 (CORD-UV 法、ギ酸法共通)
- (4) 二次廃棄物発生量 (ウラン系施設) 表-8
沈殿分離法によるドラム缶発生量の多いのは上澄水による蒸発濃縮率 100 倍、濃縮廃液固化昇降率 200 l ドラム缶当たり 120 l とし、軽水炉廃液処理実績をもとにしたためである。
- (5) 安全性・運転保守性： 表-9
- (6) 除染作業工数： 表-10
- (7) 経済性： 表-11
稼動年数ケース別の各除染法の必要設備数、必要人工数を示すとともに、これらを基に設備コスト、運転コスト、処分費について示した。

表-1 金属・放射能インベントリー

施設	再処理系	MOX 系	ウラン系
金属量 (kg)	9.33×10^6	8.19×10^6	8.00×10^5
放射能 (Bq)	4.59×10^{15}	9.30×10^{16}	1.45×10^{10}
核種組成 (%)	SR-90; 18 Cs-137; 23 Pu-241; 17	Y-90; 18 Ba-137; 22 Pu-238; 1.8 その他; 1.2	Pu-241; 97 Pu-238; 1.8 U-234; 49 U-235; 2 U-238; 49

表-2 前処理プロセスの検討 (CORD 法/ギ酸還元法共通)

処理廃棄物の形態	除染上の問題点	前処理方法	具体的方法
0.1mm以下の隙間汚染	除染液が浸透しない。	隙間を広げる	分解もしくは切断 (汚染度合いによって一回除染を行い線量を下げるから実施)
タンクより大きい	タンクに入らない。	小さくする	切断、分解 (浸漬時に除染液中に完全に浸るタンクオーバーフローライン(高さ)以下)
配管	内面のみ汚染	配管内に液を流す	ループに組み込む
空気だまりができる構造	除染液と接触しない	空気抜きを行う	ペントライൻを付ける 穴を開ける
液滞留部	除染効率が落ちる	流れを作る	搅拌装置、超音波振動併用、噴出ノズル
工具等小物	流れのない部分へ滞留。	除染液の流れ部分に移動	バスケットに収納
塗料等塗布(含油汚れ)	汚染が金属面にない、もしくは汚染が覆われている。 除染時の温度で塗膜が軟化、溶解、分解。	塗膜もしくは油汚れの除去	プラスチック溶剤処理
ホットセル内保管物	除染装置への移動ができない	ホットセルより出せるようにする	ホットセル内に除染装置を組み入れる

表-3 CORD UV 法除染廃棄物予測前提条件

— イオン交換樹脂法 —

(1) 除染条件

設備稼働	運転		処理能力	系統容量	除染時間	母材溶解厚*
	年数	時間				
200 日/年	40 年	8 h/日 24 h	1t/パッチ	8m ³	10 h/パッチ	10 μ m

除染サイクル	リノス水量	除染温度	系統水 再利用	DF		
				前処理	化学除染	リノス
1 サイクル/パッチ	3m ³ /パッチ	95°C	5 回(パッチ) 再使用	1 (解体) 1.2 (包装剥離、水洗)	1000	2

*母材溶解厚 10 μ m は商業用原子力発電プラントのステンレス配管(高温部)の放射能浸透深さ

(2) 二次廃棄物量予測

① 設備更新						
タンク・配管	ヒータ	ポンプ	樹脂塔		フィルター 容器	UV ランプ
			カチオン	混床		
15 年	8 年	5 年	8 年	15 年	8 年	5000 h

② 壓縮対象機器と除染対象					
面積	形状	表面積	材質	放射能量	重量
2.6m ² (弁、ヘッダー ポンプ、UV 缶体)	3mm 厚 板材	42.2m ² /t	SUS CS	45×10 ¹⁰ Bq (U 系) 9.8×10 ¹⁰ Bq (MOX) 4.59×10 ¹⁰ Bq (再処理)	8.00×10 ⁶ kg (U 系) 8.19×10 ⁶ kg (MOX) 9.33×10 ⁶ kg (再処理)

③ 消耗品と交換樹脂					
消耗品			交換樹脂		
カートリッジフィルター	シェウ酸(0.35%)	過酸化水素	カチオン	アニオン	
1 基分 (50kg) / 5 パッチ	14.7kg/パッチ	5.9kg/パッチ	1.5Eq/L	カチオン量 の 5 倍	

④ フィルター性能とドラム詰め					
フィルター性能		ドラム詰め			
リーク率	捕獲	固化率			
放射能	面形分	面形分量	乾燥樹脂	焼却灰	
0.41	0	10kg/1 本	50kg/200L ドラム	200kg/200L ドラム	

表-5 ギ酸還元法除染廃棄物予測前提条件

— 沈殿分離法 —

表-4 設備から発生する二次廃棄物 (CORD法)

設備	材質	重量 (kg)	接液面積 (m ²)	廃棄物 (kg)
タンク	SUSにライニング	1700	(7.8)	8100
配管	SUS	+ 360	0.7	1080
ヒータ	SUSにライニング	82	(1.0)	410
UV 缶体	SUS	210	1.7	430
UVランプ(8本)	石英ガラス	0.1	—	128
ポンプ	SUS	340	0.2	2720
イオン交換樹脂塔	SUS	1300	(2.4)	10400
フィルタ缶体	SUS	0.1	(0.8)	1
合計		3893	2.6	20341

消耗品			蒸発濃縮性		
カートリッジ フィルター	ギ酸 (5%)	過酸化水素	水酸化ナトリウム	濃縮 倍率	キャリオーバー 率
1 基分 (50kg) / 5 パッチ	150kg/パッチ	5.9kg/パッチ	2.4kg/パッチ	100 倍	0 %

表-6 CORD UV 法とギ酸還元法の技術的特徴

除染法	除染剤	除染原理	除染対象	除染条件				廃液処理法	
				濃度(%)	温度(°C)	時間(h)	DF		
CORD (UV)法	発電 プラント 除染	ショウ酸 過マンガン酸	酸溶解・還元 溶解と酸化処理のマルチステップ、マルチサイクル	ステンレス鋼、ニッケル基合金、炭素鋼の付着クラッドおよび酸化被膜	ショウ酸 0.3%以下 過マンガ酸 0.03%以下	95°C	2~8 h/サイクル ×数サイクル	6~200 (供用中) 100以上 (除却)	ショウ酸は紫外線と過酸化水素で分解金属イオンはイオン交換樹脂に捕捉
	廃棄物 除染	ショウ酸	酸溶解・還元 溶解	ステンレス鋼、炭素鋼の付着クラッド	ショウ酸 0.3~0.4%	95°C	10~20時間 ×1サイクル	>1000	ショウ酸は紫外線と過酸化水素で分解金属イオンはイオン交換樹脂に捕捉もしくは沈殿生成
ギ酸還元法	ギ酸	酸溶解・還元 溶解	炭素鋼、アルミニウム、マリエージング鋼の付着クラッド	ギ酸 2~5%	80°C 以上	2~8 h	>100	ギ酸は紫外線(または鉄触媒)と過酸化水素で分解金属イオンはイオン交換樹脂に捕捉もしくは中和して固化	

表-7 (1) CORD法適用の場合の必要設備数

處理年数	40年		20年	
	運転時間8時間	運転時間24時間	運転時間8時間	運転時間24時間
量 處理系	處理能力 (ton)	9330	9330	9330
	處理年数(年)	40	40	20
	年間運転日数(日)	200	200	200
	一日の運転時間(h)	8	24	8
	1h当たりの處理量 (ton)	1	1	1
	1h当たりの必要日数	3.00	2.00	3.00
	試算結果 除染設備設計計算結果 (基)	3.5	1.4	7.0
	除染設備数 (基)	4	2	7
M O X 系	處理能力 (ton)	8190	8190	8190
	處理年数(年)	40	40	20
	年間運転日数(日)	200	200	200
	一日の運転時間(h)	8	24	8
	1h当たりの處理量 (ton)	1	1	1
	1h当たりの必要日数	3.00	2.00	3.00
	試算結果 除染設備設計計算結果 (基)	3.1	1.2	6.1
	除染設備数 (基)	4	2	7
U 系	處理能力 (ton)	800	800	800
	處理年数(年)	40	40	20
	年間運転日数(日)	200	200	200
	一日の運転時間(h)	8	24	8
	1h当たりの處理量 (ton)	1	1	1
	1h当たりの必要日数	3.00	2.00	3.00
	試算結果 除染設備設計計算結果 (基)	0.3	0.1	0.6
	除染設備数 (基)	1	1	1

表-7 (2) ギ酸還元法適用の場合の必要設備数

處理年数	40年		20年	
	運転時間8時間	運転時間24時間	運転時間8時間	運転時間24時間
量 處理系	處理能力 (ton)	9330	9330	9330
	處理年数(年)	40	40	20
	年間運転日数(日)	200	200	200
	一日の運転時間(h)	8	24	8
	1h当たりの處理量 (ton)	1	1	1
	1h当たりの必要日数	2.25	0.83	2.25
	試算結果 除染設備設計計算結果 (基)	2.6	1.0	5.2
	除染設備数 (基)	3	1	6
M O X 系	處理能力 (ton)	8190	8190	8190
	處理年数(年)	40	40	20
	年間運転日数(日)	200	200	200
	一日の運転時間(h)	8	24	8
	1h当たりの處理量 (ton)	1	1	1
	1h当たりの必要日数	2.25	0.83	2.25
	試算結果 除染設備設計計算結果 (基)	2.3	0.9	4.6
	除染設備数 (基)	3	1	5
U 系	處理能力 (ton)	800	800	800
	處理年数(年)	40	40	20
	年間運転日数(日)	200	200	200
	一日の運転時間(h)	8	24	8
	1h当たりの處理量 (ton)	1	1	1
	1h当たりの必要日数	2.25	0.83	2.25
	試算結果 除染設備設計計算結果 (基)	0.2	0.1	0.5
	除染設備数 (基)	1	1	1

表-8(1) 二次廃棄物の発生量・形態・処理方法

除染法	廃液 処理方法	二次廃棄物 発生形態	二次廃棄物発生量	廃液処理 方法	ドラム発生量
CORD (UV)法	イオン交換 樹脂	イオン交換 樹脂	2.18E+03m ³	乾燥固化 焼却固化	6.11E+04本 4.37E+02本
		貯槽 処理水	系統容量	既設廃液 処理系	なし
		二酸化炭素	系統容量と除染剤濃度	HEPAで ダスト処理	なし
半酸 還元法 共通	除染剤分解 金属酸化物析 出	スラッジ	上記ケースで8.73E+04kg	沈降分離	1.09E+06本
		沈殿生成用 NaOH	上記ケースで4.37E+04kg	蒸発濃縮	
		チカント水	系統容量	既設廃液処理系	なし
		二酸化炭素	系統容量と除染剤濃度	HEPAで ダスト処理	なし

イオン交換樹脂量の算定はがチオ交換容量: 1.56t/Lとし、浄化用混合樹脂中の7ニオノ交換量は全ガチオノ交換の半分と見括もった。

既設系統容量 : 3m³, 1ノンケード1tonの荷物を標準とした。

200Lドラム受け入庫

:乾燥出庫500kg/トランク、湿却灰200kg/トランク、スラッシュ150kg/トランク

表-8(2) 二次廃棄物発生ドラム缶本数

	貯蔵		焼却		沈降分離	
	固形化 ^{1/24} 本数	放射能 Bq/本	固形化 ^{1/24} 本数	放射能 Bq/本	固形化 ^{1/24} 本数	放射能 Bq/本
再処理	G-80	1.84E+10	3.11E+04	2.58E+12	5.55E+05	1.49E+09
	Y-80	1.84E+10		2.58E+12		1.49E+09
	Cs-137	2.35E+10		3.29E+12		1.80E+09
	Ba-137	2.29E+10		3.15E+12		1.82E+09
MO-X	Pu-241	1.74E+10	2.73E+04	2.42E+12	1.41E+09	
	Pu-238	2.29E+12		3.21E+14	4.87E+05	1.85E+11
	Pu-238	4.25E+10		5.89E+12	3.44E+09	
ウラン	U-234	6.78E+05	2.67E+03	8.49E+07	4.76E+04	1.49E+05
	U-238	1.78E+05		8.49E+07		1.49E+05
	U-235	1.87E+05		1.21E+08		6.09E+03
	合計	6.71E+04	—	4.37E+02	1.09E+06	—

表-9(1) 安全性・運転保守性 (CORD法)

除染法	安全性			運転保守性
	要因	安全対策	運転制	
CORD (UV)法	化学薬品	操作部の純粋状態 MSDS 漏洩監視機器	弁操作マニピュレーター 溶媒溶浴のため取扱容易	
	温度(火薬)	保護衣	立入り監査の制度	没収制で対応可能
	被ばく	被ばく率に2 度高い 出装置など操作 の配慮	放射能除去のタイミング 放射能除去のタイミング	設置スペース次第であるが操作室などの設置場所を床敷装着部から離す。 除油アーバ水平部への不溶解揮発の除去
	二酸化炭素	ハンターン設置 系統内負圧	ハンターンへの排泄禁止 ガス抜き時の注意	設計が作業環境への漏れを基本としている。
	露界	露界	事前ハンターン評価	危険性のある対象物は事前に確認可能
	外部	遮光	外部への光の漏れがない構造	
	調査	定期的な肉厚測定 と空気	過剰な肉厚溶解防止	0.1g、第一級圧力容器対象になる場合あり。
	調査	漏洩系の記録 記録	フランジ等による干渉 漏れ記録系の分解で対応	
	UVランプ 設置	ストレーナ設置	異物混入防止	運転中のUVランプ交換
	漏電	漏電検知器	空気ヒーリングの保守	
	漏液	オーバーフローライン	水位監視	オーバーフロー先の制約

表-9(2) 安全性・運転保守性 (ギ酸還元法)

除染法	安全性			運転保守性
	要因	安全対策	運転制	
ギ酸 還元法	化学薬品	操作部の純粋 MSDS	弁操作マニピュレーター 取扱注意(危険物、腐食性)	
	温度(火薬)	保溫材	立入り監査の制度	没収制で対応可能
	被ばく	種差草モニター 度高い 相殺塔など無害 の配慮	放射能除去のタイミング 放射能除去のタイミング	設置スペース次第であるが操作室などの設置場所を床敷装着部から離す。 除油アーバ水平部への不溶解揮発の除去
	二酸化炭素	ハンターン設置 系統内負圧	ハンターンへの排泄禁止 ガス抜き時の注意	設計が作業環境への漏れを基本としている。
	露界	露界	事前ハンターン評価	危険性のある対象物は事前に確認可能
	外部	遮光	外部への光の漏れがない構造	
	調査	定期的な肉厚測定 と空気	過剰な肉厚溶解防止	0.1g、第一級圧力容器対象になる場合あり。
	UVランプ 設置	ストレーナ設置	異物混入防止	運転中のUVランプ交換
	漏電	漏電検知器	空気ヒーリングの保守	
	漏液	オーバーフローライン	水位監視	オーバーフロー先の制約

表-10 (1) C O R D法除染時の人工数評価

		処理年数40年		処理年数20年	
		運転時間8時間	運転時間24時間	運転時間8時間	運転時間24時間
再処理系	設備必要数	4	2	7	3
	各作業工程ごとの人工数 (人/ハッチ)	タンク内への除染対象物の収納 昇温 除染 分離・浄化 冷却・液取り替え	3 2 3 5 3	3 2 3 5 3	3 2 3 5 3
	1ハッチに要する日数	3	2	3	2
	一日当たりの合計人工数(人/日)	21.3	16.0	37.3	24.0
	年間人工数(人/年)200日稼働	4267	3200	7467	4800
	実質稼働年数(200日/年)	35	27	20	18
	総人工数(人)	149333	87040	149333	87040
	設備必要数	4	2	7	3
	各作業工程ごとの人工数 (人/ハッチ)	タンク内への除染対象物の収納 昇温 除染 分離・浄化 冷却・液取り替え	3 2 3 5 3	3 2 3 5 3	3 2 3 5 3
	1ハッチに要する日数	3	2	3	2
MOX系	一日当たりの合計人工数(人/日)	21.3	16.0	37.3	24.0
	年間人工数(人/年)200日稼働	4267	3200	7467	4800
	実質稼働年数(200日/年)	31	24	18	16
	総人工数(人)	130887	76160	130987	76480
	設備必要数	1	1	1	1
	各作業工程ごとの人工数 (人/ハッチ)	タンク内への除染対象物の収納 昇温 除染 分離・浄化 冷却・液取り替え	3 2 3 5 3	3 2 3 5 3	3 2 3 5 3
	1ハッチに要する日数	3	2	3	2
	一日当たりの合計人工数(人/日)	5.3	8.0	5.3	8.0
	年間人工数(人/年)200日稼働	1067	1600	1067	1600
	実質稼働年数(200日/年)	12	5	12	5
U系	総人工数(人)	12800	7680	12800	7360

表-10 (2) ギ酸還元法除染時の人工数評価

		処理年数40年		処理年数20年	
		運転時間8時間	運転時間24時間	運転時間8時間	運転時間24時間
再処理系	設備必要数	3	1	6	2
	各作業工程ごとの人工数 (人/ハッチ)	タンク内への除染対象物の収納 昇温 移送 沈殿生成 リンス	3 2 2 3 2	3 2 2 3 2	3 2 2 3 2
	1ハッチに要する日数	2.25	0.87	2.25	0.87
	一日当たりの合計人工数(人/日)	20.0	17.2	40.0	34.5
	年間人工数(人/年)200日稼働	4000	3447	8000	6894
	実質稼働年数(200日/年)	35	39	18	19
	総人工数(人)	139733	133736	140000	133736
	設備必要数	3	1	5	2
	各作業工程ごとの人工数 (人/ハッチ)	タンク内への除染対象物の収納 昇温 移送 沈殿生成 リンス	3 2 2 3 2	3 2 2 3 2	3 2 2 3 2
	1ハッチに要する日数	2.25	0.87	2.25	0.87
MOX系	一日当たりの合計人工数(人/日)	20.0	17.2	33.3	34.5
	年間人工数(人/年)	4000	3447	6667	6894
	実質稼働年数(200日/年)	31	34	18	17
	総人工数(人)	122667	117191	122933	117881
	設備必要数	1	1	1	1
	各作業工程ごとの人工数 (人/ハッチ)	タンク内への除染対象物の収納 昇温 除染 移送 沈殿生成 リンス	3 2 3 2 3 2	3 2 3 2 3 2	3 2 3 2 3 2
	1ハッチに要する日数	2.25	0.87	2.25	0.87
	一日当たりの合計人工数(人/日)	6.7	17.2	8.7	17.2
	年間人工数(人/年)	1333	3447	1333	3447
	実質稼働年数(200日/年)	9	3	9	3
U系	総人工数(人)	12267	11030	12000	11719

表-11 (1) CORD法コスト評価

処理年数(年)		処理年数40年		処理年数20年	
		運転時間8時間	運転時間24時間	運転時間8時間	運転時間24時間
再処理	建設コスト(百万円)	840	420	1,470	630
	人工	5,880	3,700	5,880	3,700
	運転コスト(百万円)	1,840	731	1,610	609
	設備更新				
	消耗品	3,936	3,873	3,814	3,799
	小計(百万円)	12,496	8,724	12,774	8,738
	処理総量(ton)	9,333	9,333	9,333	9,333
MOX	1ton当たりの処理コスト(百万円)	1.34	0.93	1.37	0.94
	建設コスト(百万円)	840	420	1,470	630
	人工	5,158	3,239	5,158	3,250
	運転コスト(百万円)	1,840	731	1,223	609
	設備更新				
	消耗品	3,454	3,398	3,347	3,334
	小計(百万円)	11,292	7,788	11,198	7,823
ウラン	処理総量(ton)	8,189	8,189	8,189	8,189
	1ton当たりの処理コスト(百万円)	1.38	0.95	1.37	0.96
	建設コスト(百万円)	210	210	210	210
	人工	504	325	504	314
	運転コスト(百万円)	487	487	306	306
	設備更新				
	消耗品	411	352	411	350
	小計(百万円)	1,612	1,374	1,431	1,180
	処理総量(ton)	800	800	800	800
	1ton当たりの処理コスト(百万円)	2.01	1.72	1.79	1.48
	合計(百万円)	25,400	17,885	25,403	17,741

表-11 (2) ギ酸還元法コスト評価*

処理年数(年)		処理年数40年		処理年数20年	
		運転時間8時間	運転時間24時間	運転時間8時間	運転時間24時間
再処理	建設コスト(百万円)	658	343	1,130	500
	人工	5,544	5,334	5,553	5,334
	運転コスト(百万円)	782	279	782	279
	設備更新				
	消耗品	5,039	5,070	4,897	4,902
	小計(百万円)	12,022	11,026	12,362	11,015
	処理総量(ton)	9,330	9,330	9,330	9,330
MOX	1ton当たりの処理コスト(百万円)	1.29	1.18	1.32	1.18
	建設コスト(百万円)	658	343	973	500
	人工	4,867	4,675	4,876	4,699
	運転コスト(百万円)	782	279	679	279
	設備更新				
	消耗品	4,335	4,312	4,443	4,301
	小計(百万円)	10,641	9,609	10,971	9,780
ウラン	処理総量(ton)	8,189	8,189	8,189	8,189
	1ton当たりの処理コスト(百万円)	1.30	1.17	1.34	1.19
	建設コスト(百万円)	343	343	343	343
	人工	495	414	476	466
	運転コスト(百万円)	279	279	176	176
	設備更新				
	消耗品	424	424	424	445
	小計(百万円)	1,531	1,460	1,418	1,430
	処理総量(ton)	800	800	800	800
	1ton当たりの処理コスト(百万円)	1.91	1.82	1.77	1.79
	合計(百万円)	24,194	22,094	24,751	22,224

沈殿分離法でコスト算出

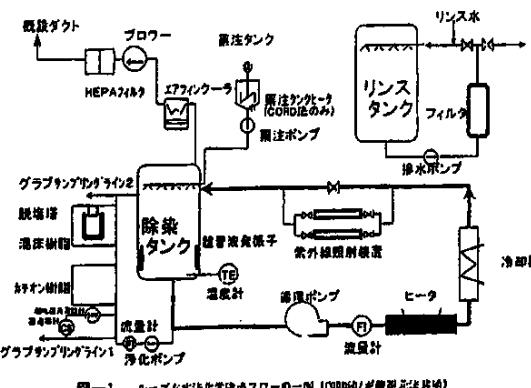


図-1 ループ式水法化学処理フローの一例 (COB法/ガラス窓方式)

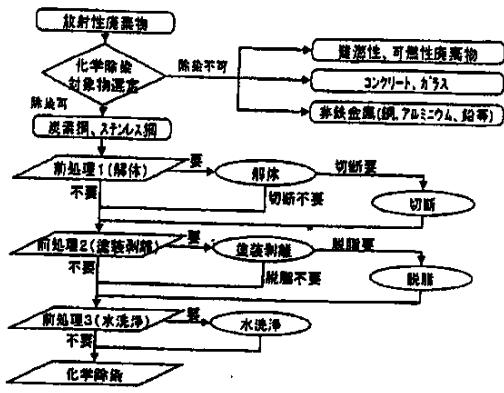


図-2 化学処理の前処理工程と化学処理工程のフロー(1) - COB法

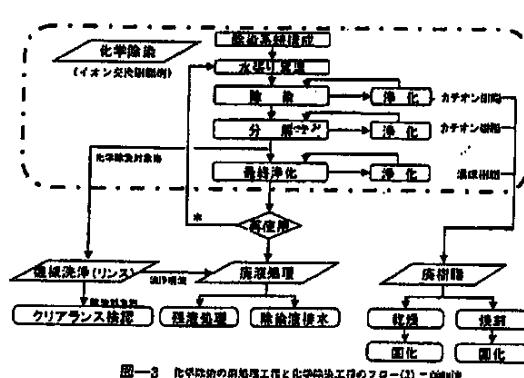


図-3 化学取扱の前処理工程と化学処理工程のフロー(2) - COB法

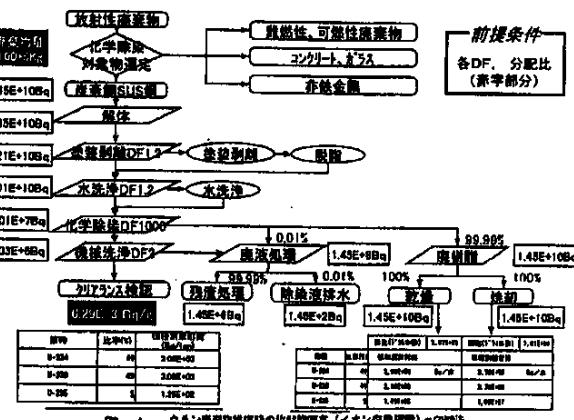


図-4 ウラン処理液度時の操作手順変更 (ガラス窓方式) - COB法

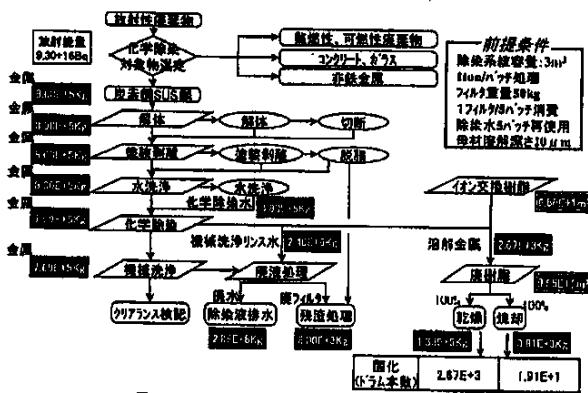
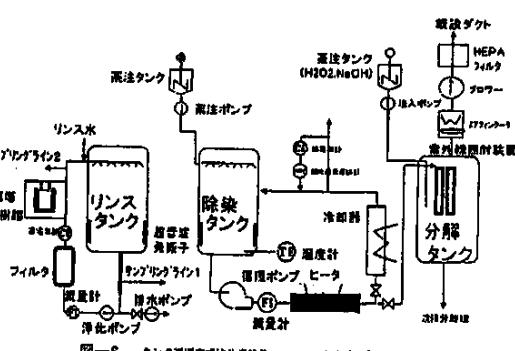


図-5 ウラン処理液度時の操作手順変更 (ガラス窓方式) - COB法



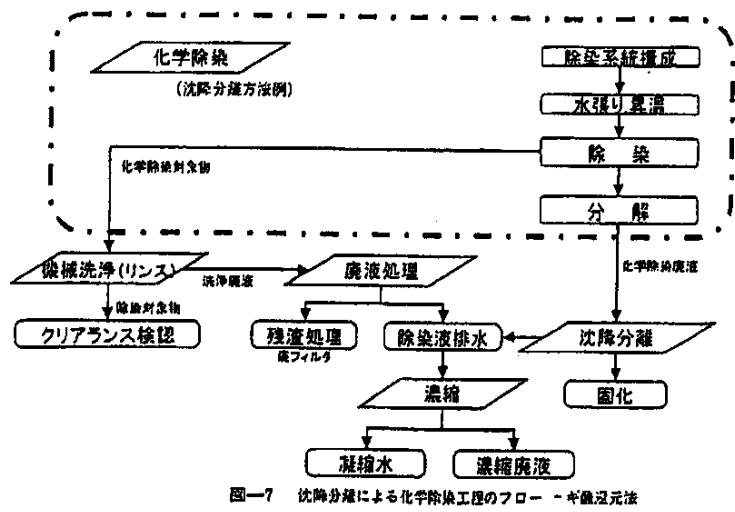


図-7 沈降分離による化学除染工程のフロー - キヤロ元法

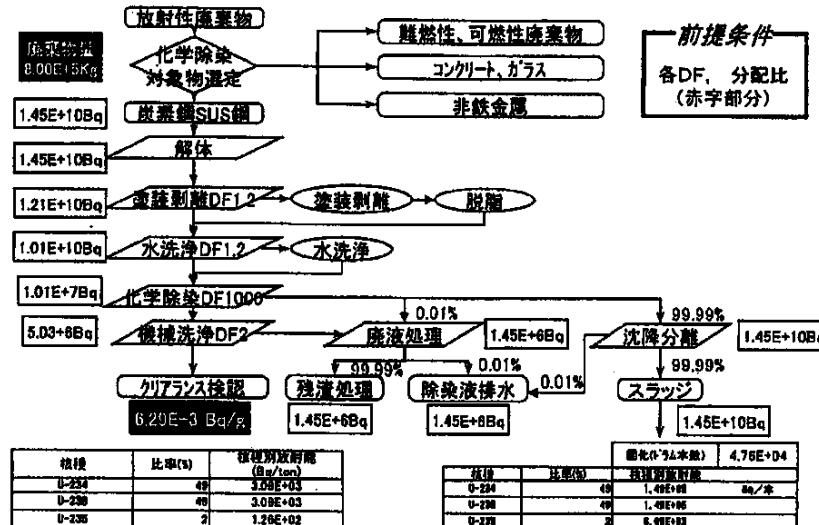


図-8 ウラン廃棄物処理時の放射能貯留(沈降分離) - キヤロ元法

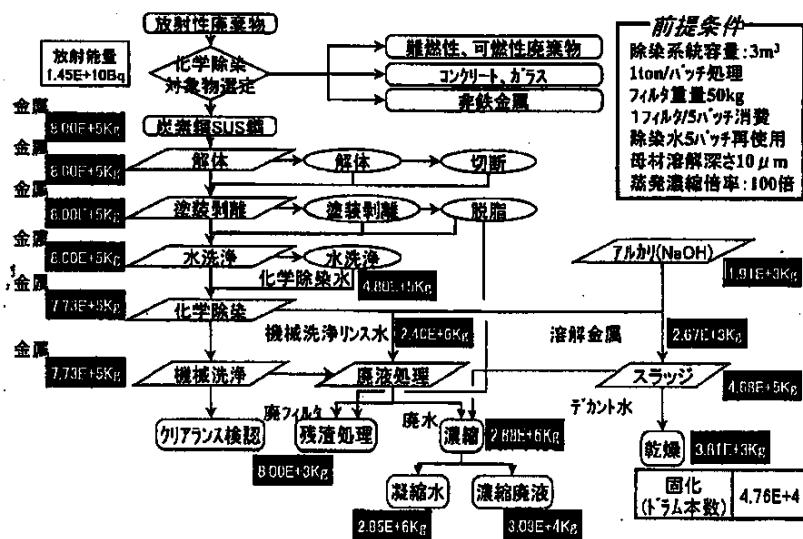


図-9 ウラン廃棄物処理時の並び取扱(沈降分離) - キヤロ元法

資料 39 酸化-還元法除染技術の評価検討

2000 年 11 月 (日立)

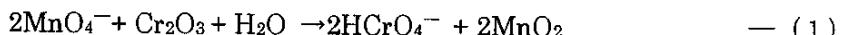
1. 目的 核燃料サイクル施設にはウラン系施設、MOX 加工施設、再処理施設等がある。これら施設から発生する放射性固体廃棄物は、可燃、難燃、不燃等に区分され、多種多様の放射性核種を含んでいる。ここではサイクル機構東海事業所で保管・管理するこれら廃棄物を対象とした。除染法として、運転中原子炉の系統除染に使用されている HOP 法（塩酸還元法、硝酸電解法を含む）を適用した場合の除染性能、コスト等の具体的、定量的な検討、評価に必要な情報調査を行う。

2. HOP 法

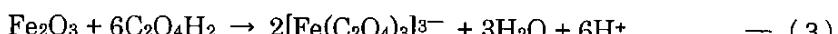
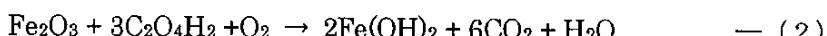
(1) HOP 法除染原理

1) 除染剤：酸化剤（過マンガン酸カリウム）と還元剤（シュウ酸）を使用。

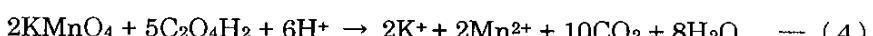
—酸化剤は Cr(III)を Cr(VI)に酸化し、付着物を溶解除去。



—還元剤は鉄酸化物中の Fe(III)を Fe (II) に還元する作用と、Fe(III)をシュウ酸錯体として取り込む安定化作用により付着物の溶解を促進する。



2) 除染剤の分解：KMnO₄ および C₂O₄H₂ は金属表面の付着汚染物を溶解除去すると共に、自身は分解、消滅して二次廃棄物となることを回避できる。



—炭素鋼のシュウ酸除染では、溶解した鉄とシュウ酸が反応し、シュウ酸鉄 (FeC₂O₄)皮膜を形成し、酸化物溶解の阻害が想定される。しかし、酸化工程で過マンガン酸カリウムによりシュウ酸鉄の除去が可能である。

(2) 除染工程とシステム

1) ドラム缶貯蔵廃棄物の全体処理フロー 図-1

—対象物を分別し、前処理（1）で金属類を解体、細断する。

前処理（2）で塗装剥離、脱脂を行い、その後除染を行う。

2) 除染システムフロー 図-2

—除染：過マンガン酸カリウムを用いる酸化工程とシュウ酸を用いる還元工程の組合せを基本とする。汚染の少ないものあるいは除染容易なものは、シュウ酸のみで洗浄する。

—除染液：除染期間中および除染剤分解中にイオン交換樹脂法で金属イオンを

吸着浄化して再利用、除染終了段階で洗浄が完了する。ただし、濃縮処理法で行うケースは浄化を行わないため洗浄操作が別途必要となる。

- (3) ケーススタディー 表-1
- 1) 除染対象物： 金属類（炭素鋼、ステンレス鋼）
 - 2) 除染係数(DF)：1000 以上
 - 3) ケース 1 : シュウ酸濃度：1%。除染剤 PH 低下させ水素イオンによる溶解促進、除染対象物母材をステンレス鋼相当で $3 \mu\text{m}$ 溶解が可能条件。
ケース 2 : シュウ酸濃度：運転プラント適用条件と同じ 2000ppm。
過マンガン酸カリウム濃度：十分な酸化力と炭素鋼のシュウ酸鉄除去可能な 100ppm を選定。
母材溶解量：ステンレス鋼相当で $0.1 \mu\text{m}$ とする。除染に伴う二次発生廃棄物量は低減可能。母材内部に浸透している汚染は除染効果不十分と想定。
—シュウ酸は過酸化水素と触媒により、二酸化炭素と水に分解する。除染で溶出した放射性金属イオンはイオン交換樹脂で除去。ケース 1 では溶解金属が多く、イオン交換樹脂法による回収では二次発生廃棄物量が多くなる。従って、除染液を濃縮し沈殿物として回収することで二次廃棄物量を低減できる。
- (4) 処理に伴う物質収支と二次廃棄物発生量
- 1) 物質収支評価：表-2、3、4、5 図-3
 - ①除染物質収支・二次廃棄物評価条件 : 表-2、3
 - ②除染液およびイオン交換樹脂交換頻度 : 表-4
—イオン交換樹脂の交換頻度は経験から判定。
カチオン樹脂、アニオン樹脂の通水流速(SV=)60l/h を選定（樹脂利用率約 75%）
 - ③触媒液交換頻度：
—濃縮法の場合：ふげん発電所経験；Fe 付着量 40g/l 触媒（付着率 50%）から、本実験では触媒量 75l/塔であるため、溶出 Fe 量を 3kg/塔（付着率 50%）で除して必要量を求めた。
—イオン交換樹脂の場合：1 回/年
 - ④触媒塔、廃樹脂量重量換算根拠
—樹脂密度（湿潤状態）：1kg/l（カタログの見かけ密度 0.78kg/l から推定）
—触媒塔重量：175l/塔（触媒塔重量 100kg/塔と触媒充填量 75l/塔から評価）
 - ⑤以上、各ケースの除染に伴う物質収支結果を図-3 に、また、化学除染に伴

う二次廃棄物発生量を表-5に示した。東海再処理系、MOXについても参考に示した。

2) 除染処理設備必要数 表-6、7、8

廃材の処理条件(表-6)をもとに、除染設備の処理容量を約0.5t/回と仮定し試算した。東海ウラン系除染処理設備の必要数を表-7に示した。

また、除染設備解体に伴い発生する廃材物量を表-8に示した。表-8、及び表-7の資料をもとに処理設備からの廃棄物発生量の総数を評価した。

3) 除染作業工数 表-9、10 図-4

除染作業手順および除染期間をもとに推定した作業工数を示した。(表-9)

また、除染処理による物質収支及び二次廃棄物発生量評価結果を東海ウラン系廃棄物除染について表-10に示した。除染に伴って発生する二次廃棄物量比較を図-4に示す。

4) 安全性・運転保守性 表-11

5) 総括

以上、HOP法により東海U系廃棄物を主体に検討し、次のことが明らかになった。

①U系廃棄物は再処理やMOX系施設の廃棄物に比べ量的に少ない。汚染も軽微で、除染設備容量、処理期間の最速化、除染時間、サイクル数、シュウ酸濃度、温度など作業簡素化が可能であり経済性向上を図る必要がある。

②二次廃棄物量は溶解金属を処理するイオン交換樹脂が80%以上を占める。

イオン交換樹脂法に替り濃縮処理法では濃縮スラッジ廃棄物量はイオン交換樹脂法より少なくなるが、高濃度の鉄が溶解した状態でシュウ酸分解を行うことから触媒使用量が増加する。

③ケース2の低濃度シュウ酸による還元・酸化の繰返し除染法は、二次廃棄物量を最少にすることが可能。また除染設備、人件費、消耗品、廃棄物等、総合的コスト評価でも有利。

④ケース2の経済性効果は炭素鋼比率の増加とともに向上。

⑤安全性の点から除染液は放射性、かつ腐食性のため漏洩防止が必要。除染機器下部に漏洩液受皿、タンクにレベル計設置、配管の定期的肉厚測定等安全確認が必要。

⑥今後実廃棄物を用いた除染確認が必要

3. 塩酸還元法

(1) 原理 表-12

- 軽水炉の解体前除染法として開発。ステンレス鋼酸化皮膜対象に DF100 以上の効果あり。比較的低温稼動の核燃料サイクル施設では、DF1000 以上の期待可能。
- 希薄液法と濃厚液法がある。廃棄物除染には濃厚液法が適合。軽水炉運転中の系統除染では濃厚液法でも塩酸濃度 2%程度、廃棄物除染では 5%である。希薄液法だと液の消耗が早く廃液量が多くなる。

(2) 除染法の技術的特徴とシステム 表-13、14 図-5

- 除染、水洗ともに浸漬法を基本とする。特徴を表-13、標準規模の仕様を表-14 に示す。塩酸還元法の除染システムフローを図-5 に示す。
- 廃液処理プロセス：塩酸 → L-アスコルビン酸分解 → 中和 → 沈殿分離 → 濃縮 → セメント固化を基本。

電気浸透法による廃液中塩酸回収及び L-アスコルビン酸分解法の採用で二次廃棄物量低減を図る。

- 除染条件：塩酸濃度 5%、L-アスコルビン酸濃度 1%
- 高 D F : インヒビタ（腐食抑制剤）添加なし。
- 母材溶解量 : SUS 3 μm、炭素鋼 20 μm

- 除染設備容量 : 処理量 0.5~0.7t/バッチ 除染液量 3~3.5 m³

(3) 物質収支と放射能収支（ウラン系廃棄物）

- 前提条件 : 表-15 廃棄物発生量、作業手順に大きく影響する除染液量算出に必要な前提条件を示す。具体的な数値については今後なお要検討。

- 物質収支 : 図-6、7、8、ウラン系廃棄物処理の例を示す。

- 放射能収支 : 図-9、10、11

- 水洗浄化で発生する廃樹脂量は除染廃棄物を除染タンクから引き上げた際、1 cm²あたり 1mg の除染液が付着し水洗タンクに搬入される。

- イオン交換樹脂交換頻度 : イオン交換樹脂塔容量 0.1 m³と仮定し、算出。

- 1 サイクル : 液調製から液交換までを 1 サイクルと呼ぶ。除染液交換はサイクル毎実施。

(4) 二次廃棄物発生量、形態と処理法の評価 表-16、17

ケース 1 : 標準除染条件で炭素鋼 20 μm、ステンレス鋼 3 μm、母材溶解

ケース 2 : インヒビタ添加。母材溶解 1/10 に抑制

(5) 安全性、運転保守性の評価 表-18

腐食性塩酸使用のため設備の接続部はテフロンライニング(3mm)や高耐食材

料チタン等の使用が必要。耐久性について静止部で5年以上、稼動部で3年以上を想定。

(6) 工程及び工数 (東海ウラン系廃棄物) 表-19

本工程の設備規模は表-14 の標準設備規模の仕様を基本にしている。これより大、小の設備規模により工数が大きく変わる。特に東海ウラン系廃棄物のように処理量が少ない場合、それに見合った小規模設備を使用すると、処理量の割に除染工数が大きく不適切となる。むしろ、稼動率をさげ標準規模とするのが得策と考える。

4. 硝酸電解法

(1) 原理

硝酸を電解液とし陽極に汚染金属廃棄物 (Ti バスケット)、陰極にステンレス容器として金属表面の汚染物を溶解し、放射性物質を電解液中に溶離させる方法である。

(2) 硝酸電解法の技術的特徴と除染廃液処理システムフロー 表-20、図-12

5. 除染後の放射能検認方法の評価 表-21

6. 経済性評価 (東海ウラン系廃棄物) 表-22

HOP 法、塩酸還元法について除染設備建設費、運転費用、処理費用等を試算し処理単位量当たりの費用と評価を表-22 に示した。

7. 今後の課題

HOP 法、塩酸還元法、硝酸電解法の技術的課題を表-23 に示す。

表-1 除染法の技術的特徴—HOP 法

除染法	ケース	ステップ/除染剤	除染原理	除染条件			廃液処理法
				濃度(%)	温度(°C)	時間(h)	
HOP 法	【ケース 1】 目標 DP ~1000 ・ステンレス 3 μm ・炭素鋼 10 μm	・還元除染 1サイクル ・還元剤 シュウ酸	・鉄系酸化物(Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ 等)及びその他付着物をシュウ酸にて還元溶解。	1	~90	~15	【イオン交換樹脂吸着処理】 ・除染剤は、触媒+還元化水素にて分解処理(ニ酸化炭素と水に分離) ・溶出した放射性金属イオンはイオン交換樹脂(カチオン樹脂)にて除去 ・純净水に含まれる少量の除染剤および溶解金属はイオン交換樹脂(陽床樹脂)にて浄化
	【ケース 2】 目標 DF ~1000 ・ステンレス 0.1 μm ・炭素鋼 3.2 μm	・還元 → 酸化 → 還元 → 酸化 → 還元 ・酸化剤 過マンガン酸カリウム ・還元剤 シュウ酸	・鉄系酸化物(Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ 等)及びその他付着物をシュウ酸にて還元溶解。 ・酸化・還元工程繰り返しによる溶解促進(シュウ酸鉄皮膜除去、等)	0.01 0.2	~90	~24	【ろ過処理】 ・除染液中の除染剤分解後、沈降分離および蒸発濃縮処理

注1) 界温、分解、浄化等を含んだ時間

表-2 除染条件と表面除染厚さ

除染係数	≥1000	
除染温度	90°C	
除染時間	10hr	
除染ケース	ケース 1	ケース 2
シユウ酸濃度	10000ppm	2000ppm
除染	SUS	3 μm 0.1 μm
厚さ	C S	10 μm 3.2 μm

表-3 除染時の物質収支および二次廃棄物発生量評価条件—HOP 法

施設		東海 U 系								
除染条件		【ケース 1】 シユウ酸: 10000ppm (還元処理→分解→浄化)					【ケース 2】 シユウ酸: 2000ppm 過マンガニ酸カリウム: 100ppm (還元→酸化→還元→酸化→還元→分解→浄化)			
放材態回収方法		イオン交換樹脂			蒸発液槽		イオン交換樹脂			
材料組成		SUS (100%)	SUS(50%) C/S(50%)	C/S (100%)	SUS (100%)	SUS(50%) C/S(50%)	C/S (100%)	SUS (100%)	SUS(50%) C/S(50%)	
評価結果	東海 U 系	図-3(1)	図-3(2)	図-3(3)	図-3(4)	図-3(5)	図-3(6)	図-3(7)	図-3(8)	図-3(9)

表一4 除染液およびイオン交換樹脂交換頻度 (HOP法)

ケース	廃液処理法	廃品および溶出放射能の除去	水洗・洗浄操作	除染液の交換	樹脂の交換*
ケース1	イオン交換樹脂法	1回毎に還元除染中はカチオン樹脂で浄化、還元剤分解終了後に混床樹脂で浄化。浄化後の水は純水に戻る。	不要	不要	必要
	濃縮法	1回毎に廃除染液濃縮およびスラッジ分離の上澄み液および水洗洗浄液は、混床樹脂で浄化。浄化後の水は純水に戻る。	必要	不要	必要
ケース2	イオン交換樹脂法	1回毎に還元除染中はカチオン樹脂で浄化、還元剤分解終了後に混床樹脂で浄化。浄化後の水は純水に戻る。	不要	不要	必要

* イオン交換樹脂への負荷不純物は下表に示す化合物を想定しています。

時期	樹脂塔	吸着不純物
廃化工程	—	—
還元工程	カチオン塔	K ⁺ 、Mn ²⁺ 、Fe ²⁺ 、その他溶解物、放射能
還元剤分解工程	カチオン塔	K ⁺ 、Mn ²⁺ 、Fe ²⁺ 、その他溶解物、放射能
浄化・洗浄工程	混床塔	K ⁺ 、Mn ²⁺ 、Fe ²⁺ 、CrO ₄ ²⁻ 、[Fe(C ₂ O ₄) ₃] ³⁻ 、CaO ₄ ²⁻ 、その他溶解物、放射能

表一5 化学除染に伴う二次廃棄物発生量評価結果 HOP法

項目	施設	高処理系	東浦Max系	東浦U系	備考	
廃棄質量(tan)		2716	1906	262		
操作質量(tan)		6551	6640	538		
貯留量(tan)		8267	8548	801		
貯留率(Gs-137 Ba)		2.2E+14	6.1E+14	—	Gs-137	
處理年数		40/20	40/20	40/20	40年處理/20年處理	
年間処理量(tan/年)		233/484	214/428	20/40	40年處理/20年處理	
【ケース1】除染条件	除染サイクル	還元剤濃度 シラク除菌度:10000ppm			・放射能規制なし/規制有り(表面2mSv/h) ・規制なし:濃度器量100L/ドラム缶 ・規制有り:4.8E+9Bq(Gs-137)	
	除染剤	シラク除菌度:10000ppm				
	温度(°C)	90				
DF≥1000 SUS:3μm CS:10μm	溶解金属量(tan)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	16 40 61	17 37 57	5.3	
	樹脂量(m ³)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	531 1101 1172	489 1016 1542	46	
	ドラム缶量(本)	表面 一セメント固化 (1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	5308/45833 11018/45833 16724/45833	4893 10158 15423	458 952 1446	
	溶解金属量(tan)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	1584/45833 2808/45833 4252/45833	1442/- 2682/- 3921/-	135/- 251/- 368/-	
	樹脂量(m ³)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	960/3072 960/6550 960/10240	960/2833 960/6138 960/9443	240/266 240/375 240/695	
	ドラム缶量(本)	表面 一セメント固化 (1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	3012/45833 5524/45833 8036/45833	2777/- 5094/- 7411/-	207 424 641	
	溶解金属量(tan)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	— — —	— — —	・放射能規制なし/規制有り(表面2mSv/h) ・規制なし:濃度器量100L/ドラム缶 ・規制有り:4.8E+9Bq(Gs-137)	
	樹脂量(m ³)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	— — —	— — —	・放射能規制なし/規制有り(表面2mSv/h) ・規制なし:濃度器量100L/ドラム缶 ・規制有り:4.8E+9Bq(Gs-137)	
	ドラム缶量(本)	表面 一セメント固化 (1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	— — —	— — —	・放射能規制なし/規制有り(表面2mSv/h) ・規制なし:濃度器量100L/ドラム缶 ・規制有り:4.8E+9Bq(Gs-137)	
	溶解金属量(tan)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	— — —	— — —	・放射能規制なし/規制有り(表面2mSv/h) ・規制なし:濃度器量100L/ドラム缶 ・規制有り:4.8E+9Bq(Gs-137)	
	樹脂量(m ³)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	— — —	— — —	・放射能規制なし/規制有り(表面2mSv/h) ・規制なし:濃度器量100L/ドラム缶 ・規制有り:4.8E+9Bq(Gs-137)	
【ケース2】除染条件	除染サイクル	還元→酸化→還元→酸化→還元			・イオン交換樹脂吸着/濃縮処理	
	除染剤	過塩素酸カリウム:100ppm, シラク酸:2000ppm				
	温度(°C)	90				
	溶解金属量(tan)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	0.8 10 20	0.7 9 18		
DF≥1000 SUS:0.1μm CS:3.2μm	樹脂量(m ³)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	301 552 804	278 509 741	21 42 64	
	ドラム缶量(本)	表面 一セメント固化 (1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	3012/45833 5524/45833 8036/45833	2777/- 5094/- 7411/-	207 424 641	
	溶解金属量(tan)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	— — —	— — —	・放射能規制なし/規制有り(表面2mSv/h) ・規制なし:濃度器量100L/ドラム缶 ・規制有り:4.8E+9Bq(Gs-137)	
	樹脂量(m ³)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	— — —	— — —	・放射能規制なし/規制有り(表面2mSv/h) ・規制なし:濃度器量100L/ドラム缶 ・規制有り:4.8E+9Bq(Gs-137)	
	ドラム缶量(本)	表面 一セメント固化 (1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	— — —	— — —	・放射能規制なし/規制有り(表面2mSv/h) ・規制なし:濃度器量100L/ドラム缶 ・規制有り:4.8E+9Bq(Gs-137)	
	溶解金属量(tan)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	— — —	— — —	・放射能規制なし/規制有り(表面2mSv/h) ・規制なし:濃度器量100L/ドラム缶 ・規制有り:4.8E+9Bq(Gs-137)	
	樹脂量(m ³)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	— — —	— — —	・放射能規制なし/規制有り(表面2mSv/h) ・規制なし:濃度器量100L/ドラム缶 ・規制有り:4.8E+9Bq(Gs-137)	
	ドラム缶量(本)	表面 一セメント固化 (1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	— — —	— — —	・放射能規制なし/規制有り(表面2mSv/h) ・規制なし:濃度器量100L/ドラム缶 ・規制有り:4.8E+9Bq(Gs-137)	
	溶解金属量(tan)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	— — —	— — —	・放射能規制なし/規制有り(表面2mSv/h) ・規制なし:濃度器量100L/ドラム缶 ・規制有り:4.8E+9Bq(Gs-137)	
	樹脂量(m ³)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	— — —	— — —	・放射能規制なし/規制有り(表面2mSv/h) ・規制なし:濃度器量100L/ドラム缶 ・規制有り:4.8E+9Bq(Gs-137)	
	ドラム缶量(本)	表面 一セメント固化 (1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	— — —	— — —	・放射能規制なし/規制有り(表面2mSv/h) ・規制なし:濃度器量100L/ドラム缶 ・規制有り:4.8E+9Bq(Gs-137)	
	溶解金属量(tan)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	— — —	— — —	・放射能規制なし/規制有り(表面2mSv/h) ・規制なし:濃度器量100L/ドラム缶 ・規制有り:4.8E+9Bq(Gs-137)	
	樹脂量(m ³)	(1)SUS(100%) (2)SUS, CS(50%) (3)CS(100%)	— — —	— — —	・放射能規制なし/規制有り(表面2mSv/h) ・規制なし:濃度器量100L/ドラム缶 ・規制有り:4.8E+9Bq(Gs-137)	

表-6 廃材の除染処理ケーススタディ条件

— 設備処理能力 0.5 t/日 —

処理期間	40年(パターン1)/20年(パターン2)	
年間稼動日数	200日	
運転	24時間(パターン3)/8時間(パターン4)	
目標DF	1000以上	
	ケース1 (溶解量SUS:3μm、CS:10μm)	ケース2 (酸化・還元の繰り返し)
	シュウ酸:1000ppm 過マンガン酸カリウム:0ppm	シュウ酸:2000ppm 過マンガン酸カリウム:100ppm
	廃棄物処理 ①イオン交換樹脂 ②濃縮	廃棄物処理 ③イオン交換樹脂
廃棄ドラム条件	総量率規制無/規制有(2mSv/h)	

表-7 東海U系除染設備必要数－HOP法

項目	パターン1(40年間処理)				パターン2(20年間処理)			
	パターン3(24時間運転)		パターン4(8時間運転)		パターン3(24時間運転)		パターン4(8時間運転)	
	ケース1	ケース2	ケース1	ケース2	ケース1	ケース2	ケース1	ケース2
処理总量(ton)	801		801		801		801	
処理年数	40		40		20		20	
年間処理量(ton/年)	20		20		40		40	
年間操業日数	200		200		200		200	
1パッチ当たりの処理量(ton)	0.5		0.5		0.5		0.5	
1パッチ当たりの必要日数(日)	1	1.5	3	4.5	1	1.5	3	4.5
除染設備数計算結果(セット)	0.2	0.3	0.6	0.9	0.4	0.6	1.2	1.8
除染設備数(セット)	1	1	1	1	1	1	2	2
サイクル数(回)	1602	1602	1602	1602	1602	1602	801	801

表-8(1) 除染設備の解体に伴う廃棄物発生量(40年、12ヶ月処理) — HOP法

	重量 (kg)	取替え頻度 ^① (回/年)	取り替え回数 (回/40年)	ユニット数 (セット)	総重量 (kg)	ドラム缶 ^② (本)	備考
給油タンク	800	5	8	1	6400	64	
循環ポンプ	100	1	40	1	4000	40	
電気ヒータ	800	2	20	1	16000	160	
温床樹脂塔	400	5	8	1	3200	32	
カチオン樹脂塔	400	5	8	1	3200	32	
過酸化水素注入ポンプ	50	5	8	1	400	4	
触媒塔 ^③	—	—	—	—	—	—	
ペントユニット	300	5	8	1	2400	24	
計測機器(電磁炉、pH等)	10	5	8	1	80	0.8	
洗浄分離槽	800	5	8	1	6400	64	
廃液貯蔵槽	1000	5	8	1	8000	80	
配管	1000	5	8	1	8000	80	
弁類	250	5	8	1	2000	20	
合計(廃液処理)	—	—	—	—	45880	458.8	
合計(廃油処理)	—	—	—	—	56880	568.8	

表-8(2) 除染設備の解体に伴う廃棄物発生量(20年、12ヶ月処理)

	重量 (kg)	取替え頻度 ^① (回/年)	取り替え回数 (回/20年)	ユニット数 (セット)	総重量 (kg)	ドラム缶 ^② (本)	備考
給油タンク	800	5	4	1	3200	32	
循環ポンプ	100	1	20	1	2000	20	
電気ヒータ	800	2	10	1	8000	80	
温床樹脂塔	400	5	4	1	1600	16	
カチオン樹脂塔	400	5	4	1	1600	16	
過酸化水素注入ポンプ	50	5	4	1	200	2	
触媒塔 ^③	—	—	—	—	—	—	
ペントユニット	300	5	4	1	1200	12	
計測機器(電磁炉、pH等)	10	5	4	1	80	0.8	
洗浄分離槽	800	5	4	1	3200	32	
廃液貯蔵槽	1000	5	4	1	4000	40	
配管	1000	5	4	1	4000	40	
弁類	250	5	4	1	1000	10	
合計(廃液処理)	—	—	—	—	22840	228.4	
合計(廃油処理)	—	—	—	—	28440	284.4	

表-9 除染作業工数 — HOP法

1 設備	項目	パターン1(40年間処理)				パターン2(20年間処理)			
		パターン3(24時間運転)		パターン4(8時間運転)		パターン3(24時間運転)		パターン4(8時間運転)	
		ケース1	ケース2	ケース1	ケース2	ケース1	ケース2	ケース1	ケース2
再処理系	イオン交換(個)	3	3	4	7	7	11	5	6
	運転日数(日/サイクル)	1	1	1.5	3	3	4.5	1	1.5
	監督(人・日)	3	3	4.5	3	3	4.5	3	3
	運転員(人・日)	9	9	18	21	21	48.5	15	15
	作業者(人・日)	6	6	9	12	12	27	6	18
	運搬作業(人・日)	—	6	—	6	—	6	—	12
	合計(人・日/サイクル)	18	24	31.5	36	42	81	24	30
	セット数(個)	3	3	4	7	7	10	5	6
	運転日数(日/サイクル)	1	1	1.5	3	3	4.5	1	1.5
	監督(人・日)	3	3	4.5	3	3	4.5	3	3
東海Mox系	運転員(人・日)	9	9	18	21	21	45	15	15
	作業者(人・日)	6	6	9	6	6	18	6	9
	運搬作業(人・日)	—	6	—	6	—	6	—	12
	合計(人・日/サイクル)	18	24	31.5	30	38	67.5	24	30
	セット数(個)	1	1	1	1	1	1	1	2
	運転日数(日/サイクル)	1	1	1.5	3	3	4.5	1	1.5
	監督(人・日)	3	3	4.5	3	3	4.5	3	3
	運転員(人・日)	3	3	4.5	3	3	4.5	3	3
	作業者(人・日)	6	6	9	6	6	9	6	9
	運搬作業(人・日)	—	6	—	6	—	6	—	6
東海U系	合計(人・日/サイクル)	12	18	18	12	18	18	12	18
	セット数(個)	1	1	1	1	1	1	1	2
	運転日数(日/サイクル)	1	1	1.5	3	3	4.5	1	1.5
	監督(人・日)	3	3	4.5	3	3	4.5	3	3
	運転員(人・日)	3	3	4.5	3	3	4.5	3	3
東海U系	作業者(人・日)	6	6	9	6	6	9	6	9
	運搬作業(人・日)	—	6	—	6	—	6	—	6
	合計(人・日/サイクル)	12	18	18	12	18	18	12	18
	セット数(個)	1	1	1	1	1	1	1	2
	運転日数(日/サイクル)	1	1	1.5	3	3	4.5	1	1.5

注) 除染作業者は下記にて構成する

- (1) 監督 : 各種1人
 (2) 運転員 : 各種3人/1人
 (3) 作業員 : 1~5ユニット2人、6~10ユニット4人、11~15ユニット6人、16~20ユニット8人、21~25ユニット10人
 (4) 運搬作業員: 1~5ユニット2人、10~19ユニット4人、20~29ユニット6人

表-10 東海Ⅲ系廃棄物の除染における設備、消耗品、二次廃棄物および作業者数評価結果 一HOP 法

運搬条件	運動時間	人一人	吸水率/ 1/2 ¹⁾	吸水量/ m ³ ²⁾	廃棄品				ドーム缶発生量				作業人工 人・日/サイクル (人・日)			
					①/② (基準) ニードル (ml)	シウウ酸 乳化剤 (ml)	硫酸ナトリウム (kg)	硫酸ナトリウム (kg)	イオウ交換 樹脂(L)	ガリバ 樹脂(L)	硫酸ナトリウム (kg)	硫酸ナトリウム (kg)				
40年/20年	24h/8h	1	吸着	1	67	—	481	240	2373	459	0	240	457	1,155 1602 19,224		
40年	24h	1	吸着	1	67	—	481	240	92134	952	0	240	457	1,649 1602 19,224		
40年	24h	1	吸着	1	67	—	481	240	142183	2373	1,446	0	240	457	2,142 1602 19,224	
40年	24h	1	運搬	1	67	—	481	266	1187	2373	0	135	266	589 910 1602	28,836	
40年	24h	1	運搬	1	67	—	481	575	1187	2373	0	251	575	569 1,395 1602	28,836	
40年	24h	1	吸着	1	67	—	481	885	1187	2373	0	368	885	569 1,821 1602	28,836	
40年	24h	2	吸着	1	40	—	817	240	18612	7120	260	0	240	457	957 1602 28,836	
40年	24h	2	吸着	1	40	—	817	240	40625	7120	477	0	240	457	1,174 1602 28,836	
40年	24h	2	吸着	1	40	1	817	240	62339	7120	895	0	240	457	1,391 1602 28,836	
40年	8h	1	吸着	1	67	—	481	240	3867	2373	459	0	240	228	927 12 1602	19,224
40年	8h	1	吸着	1	67	—	481	240	92834	2373	952	0	240	228	1,420 12 1602	19,224
40年	8h	1	吸着	1	67	—	481	240	142183	2373	1,446	0	240	228	1,914 12 1602	19,224
40年	8h	1	運搬	1	67	—	481	268	1187	2373	0	135	266	284 685 1602	28,836	
40年	8h	1	運搬	1	67	—	481	575	1187	2373	0	251	575	284 1,111 1602	28,836	
40年	8h	1	運搬	1	67	—	481	885	1187	2373	0	368	885	284 1,537 1602	28,836	
40年	8h	2	吸着	1	40	—	817	240	18912	7120	260	0	240	228	729 18 1602	28,836
40年	8h	2	吸着	1	40	—	817	240	40625	7120	477	0	240	228	946 18 1602	28,836
40年	8h	2	吸着	1	40	—	817	240	62339	7120	695	0	240	228	1,163 18 1602	28,836
20年	24h	1	吸着	1	67	—	481	120	3867	2373	459	0	120	228	807 12 1602	19,224
20年	24h	1	吸着	1	67	—	481	120	92834	2373	952	0	120	228	1,300 12 1602	19,224
20年	24h	1	吸着	1	67	—	481	120	142183	2373	1,446	0	120	228	1,794 12 1602	19,224
20年	24h	1	運搬	1	67	—	481	268	1187	2373	0	135	266	284 685 1602	28,836	
20年	24h	1	運搬	1	67	—	481	575	1187	2373	0	251	575	284 1,111 1602	28,836	
20年	24h	2	吸着	1	67	—	481	885	1187	2373	0	368	885	284 1,537 1602	28,836	
20年	24h	2	吸着	1	67	—	481	120	18912	7120	260	0	120	228	609 18 1602	28,836
20年	24h	2	吸着	1	67	—	481	120	40625	7120	477	0	120	228	1,300 18 1602	28,836
20年	24h	2	吸着	1	67	—	481	120	62339	7120	895	0	120	228	1,794 18 1602	28,836
20年	8h	1	吸着	1	67	—	481	240	3867	2373	0	251	575	284 1,111 1602	28,836	
20年	8h	1	吸着	1	67	—	481	240	92834	2373	952	0	240	228	907 15 801	12,015
20年	8h	1	吸着	1	67	—	481	240	142183	2373	1,446	0	120	228	1,300 15 801	12,015
20年	8h	1	運搬	1	67	—	481	268	1187	2373	0	135	266	284 685 21 801	12,015	
20年	8h	1	運搬	1	67	—	481	575	1187	2373	0	251	575	284 1,111 21 801	12,015	
20年	8h	2	吸着	1	67	—	481	885	1187	2373	0	368	885	284 1,537 21 801	12,015	
20年	8h	2	吸着	1	67	—	481	120	18912	7120	260	0	120	228	809 22.5 801	18,023
20年	8h	2	吸着	1	67	—	481	120	40625	7120	477	0	120	228	826 22.5 801	18,023
20年	8h	2	吸着	1	67	—	481	120	62339	7120	895	0	120	228	1,043 22.5 801	18,023

注 1) ケース: シュウ酸濃度一級処理、ケース2: 過元・塩ビ繊維処理

2) 吸着: オン交換樹脂吸着、運搬: 運搬・運搬処理

3) ①: SUIS(100%)、②: SUS(50%)、③: C/S(100%)

表-11 安全性、運転保守性に関する整理表

除染方法	要因	安全性		運転保守性	
		安全対策			
		設備側	運転側		
HOP法	【除染液】 除元剤としてシュウ酸、酸化剤として過マンガン酸カリウムを使用する。また、シュウ酸分解時に過酸化水素を使用する。	<ul style="list-style-type: none"> 除染タンクおよび配管フランジ部等からの漏洩に備え漏洩防止パンを設ける。 除染タンクには、タンクレベル計を設置し水位を監視するとともに、レベル高の場合には循環ポンプ停止する等のインターロックを設ける。 	<ul style="list-style-type: none"> 商品取扱作業者は、薬品の性質、取扱方法および緊急時の処置方法に対する教育を行う。 商品取扱時には保護具(保護メガネ、ゴム手等)を着用し、作業する。 除染作業時においては、適宜漏洩等の有無を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 過マンガン酸カリウムは危険物としての貯蔵管理が必要となり、特化物としての作業環境管理を行う。 ・シュウ酸および過酸化水素は一般化学薬品の取扱方法に準じた管理を行う。 	
	【温度】 除染液を昇温(~90°C)するため、除染液が循環する機器、配管表面が高温となる。	<ul style="list-style-type: none"> 配管部は、保温材を使用し火傷防止をはかり、高温注意のステッカ等により、注意を促す。 電気ヒータには安全装置を設け、過熱防止をはかる。 	<ul style="list-style-type: none"> 除染液の温度監視を行い適切な運転温度に保つ。 	<ul style="list-style-type: none"> 自動温度制御装置の使用により温度コントロールが容易となる。 電気ヒータの接液部等は特に健全性確認を徹底する。 	
	【分解ガス】 シュウ酸および過マンガ酸カリウムの分解時に分解ガスが発生する。(発生するガスは二酸化炭素であり、放射性核種は含まれていない)	<ul style="list-style-type: none"> ベントユニットには、高温ガスを冷却する冷却器とHEPA フィルターを設けミストを除去する フィルターを通った気体は換気系に排気する。 	<ul style="list-style-type: none"> ベントユニットの運転状態を適宜確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 必要に応じてフィルターを交換する。 	
	【定期点検、取替】 除染液の作用により、機器、配管の材料が溶解する。	<ul style="list-style-type: none"> 配管・機器は、除染液の作用で激しい減肉が生じない材料を選定する。 ポンプ等の回転体は減肉が大きいため取り替え頻度を増加させるあるいはコーティングを施す等の処置を行う。 配管・機器の配置および構造計画は、定期検査および取替えの作業性を考慮する。 	<ul style="list-style-type: none"> 配管の肉厚測定等を定期的に行い健全性を確認する。 運転中は除染液の漏洩の有無および機器の運転状態を監視する。 	<ul style="list-style-type: none"> 定期的な検査により、交換が必要と判断された機器、部品については取り替えを行う。 	

表-12 除元除染法開発の経緯と除染の原理

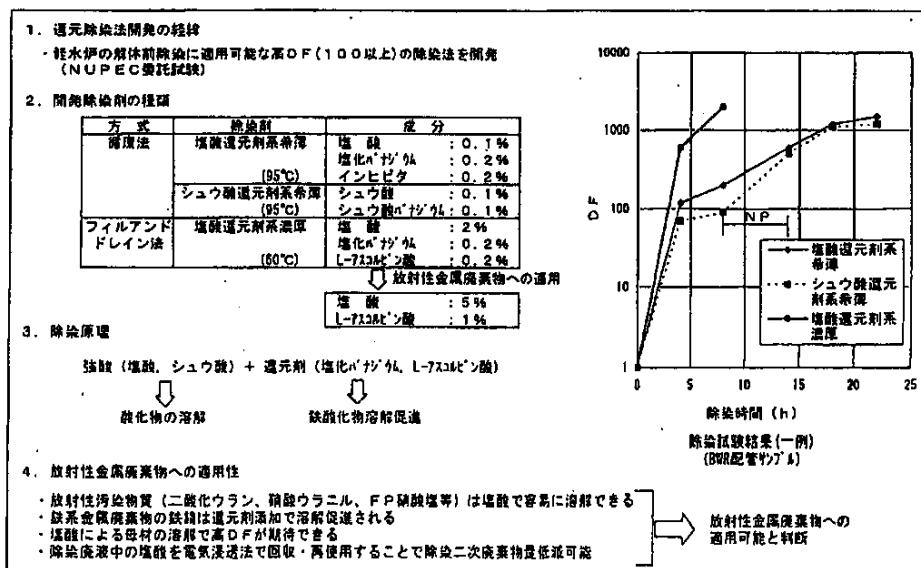


表-13 塩的還元法の技術的特徴

除染法	除染剤		除染原理及び特徴	除染条件			廃液処理法
	成分	濃度(%)		温度(°C)	時間(h)	堆肥DF	
塩酸還元法	塩酸	5	・塩酸を主剤とし、これに還元剤(L-アスコルビン酸)を添加	50~60	2~3	100~	・電解再生—
	L-アスコルビン酸 (インヒビタ)	0.5~2 0~0.5	・放射能汚染物質(二硫化ウラン、硝酸ウラニル及びFPの硫酸塩等)は塩酸により容易に溶解			1000	・還元剤分解—中和
			・鉄系金属異物は錆錠が発生し易く、放射能汚染の除去には錆錠も除去することが必要。還元剤は錆錠の溶解を著しく促進				—沈殿分離—洗浄
			・塩酸で母材を溶解させることにより高いDFが期待できる				—ヒート処理
			・自燃DF: 1,000				
			・母材溶解量(予想値):				
			ステンレス鋼 3 μm, 鉄素鋼 20 μm				
			必要に応じてインヒビタの添加で母材の溶解量をコントロール				
			・除染液中の塩酸は電解再生して再使用。これにより廃液2次廃棄物量の低減が可能				

表-14 D.F.:1,000を得るための母材溶解量設定規則(塩酸還元法)

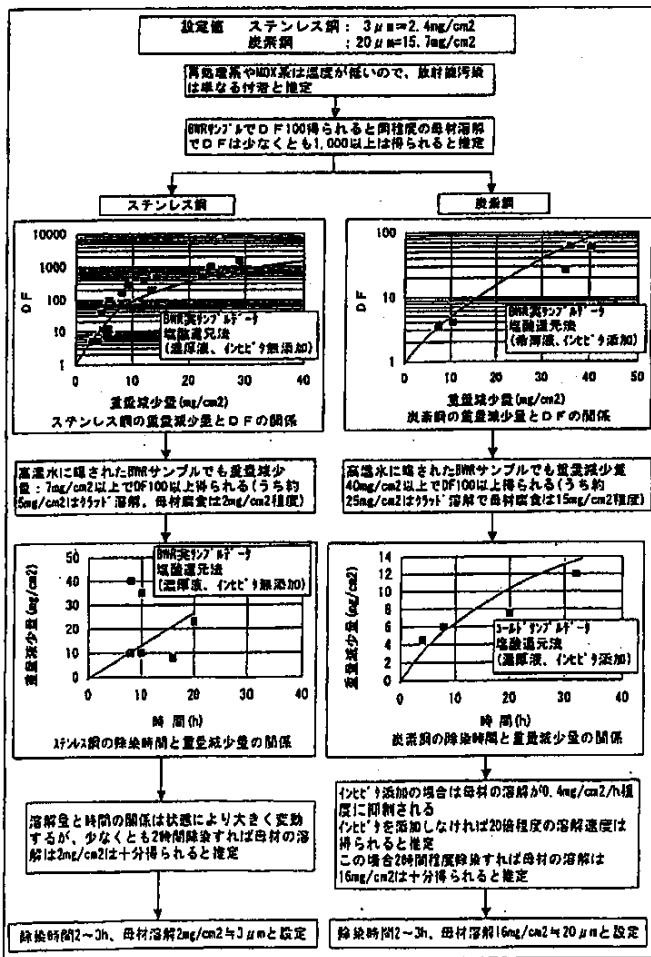
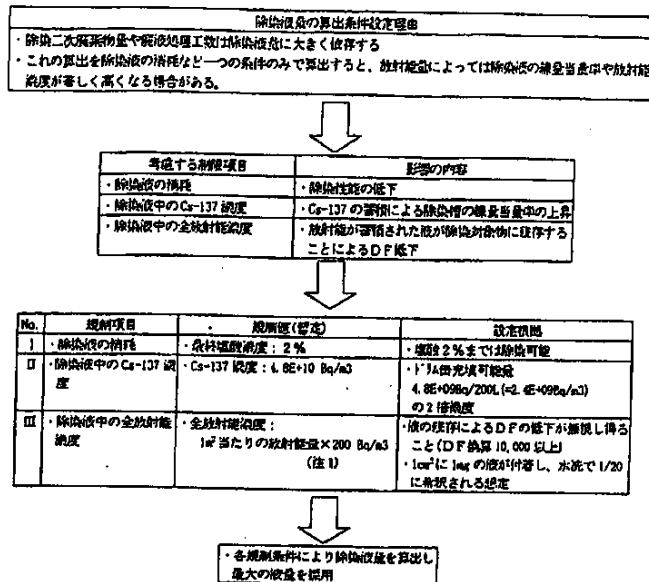


表-15 除染液量の算出条件（塩酸還元法）



注1:

除染液中全放射能濃度制限値算出式
 $a/\sqrt{b} = DF$,
 $b = c \times d \times e \quad \rightarrow$ 左記2式より d を算出
 a : 除染前単位表面積当たり放射能量 (Bq/m²)
 b : 除染液現状による単位表面面積当たりの既存放射能量 (Bq/m²)
 DF : 規制条件によるDF負荷値 (=10,000)
 c : 水洗後の単位表面面積当たりの除染液の貯存量 (=1 μL/cm²=10⁻⁶m³)
 d : 除染液中全放射能濃度 (Bq/m³)
 e : 水洗により貯存量の水洗により減少する割合 (=1/20)

表-16 除染時の各ケースにおける廃棄物発生量比較（塩酸還元法：ケース1）

項目	建設	再処理系	東海MOX	東山U系	備考
過剰重量 (ton)		2716	1806	262	
軽体重量 (ton)		6351	6,840	529	
総重量 (ton)		9,267	9,546	801	
放射能 (Bq)		$9.58E+14$	$7.37E+15$	$7.43E+11$	
Cs-137 (Bq)		$2.20E+14$	$1.04E+08$	—	
処理年数	40, 20	40, 20	40, 20	40, 20	
年間処理量 (ton/年)	232, 463	214, 427	20, 40		
(ケース1) 除染条件	除染液量 除染時間 (h)	濃度: 5% + L-7336ビン類: 1% + (インヒビタ) -3			
DF ≥ 1000 SUS: 3 μm CS: 20 μm	溶媒金属量 (ton)	① SUS(100%) ② SUS, CS(50%) ③ CS(100%)	18 71 124	17 66 114	1.6 0.1 10.7
	除染液量 (m3)	① 〔〕: 除染液量選定方法	5,088 [Ⅲ] 5,088 [Ⅳ] 5,377 [Ⅰ]	3,652 [Ⅲ] 3,632 [Ⅳ] 4,859 [Ⅰ]	342 [Ⅲ] 342 [Ⅳ] 465 [Ⅰ]
	廃液量	① 〔〕: 廃液量 (ton)	408 [122] 408 [122] 431 [129]	283 [84] 293 [84] 397 [102]	27 [8] 27 [8] 37 [11]
	スラッジ含有濃度 (m3)	① 〔〕: スラッジ量 (ton)	118 [35] 453 [138]	109 [33] 410 [125]	10 [3] 39 [12]
	廃樹脂量 (m3)	① 〔〕: 廃樹脂量 (ton)	788 [238]	728 [218]	88 [20]
	ドラム缶量 (本)	① 〔〕: 放射能削減剤一セメント化 ありの場合 (本)	5,400 [45,800] 8,800 [45,800]	4,200 [+] 7,300 [+]	0.45 [0.88] 1.01 [0.81]
		②		390 [+] 680 [+]	1.10 [0.88]
		③	12,400 [45,800]	11,400 [+]	1,070 [+] (回転率: 廃液、廃樹脂100L/ドラム缶 但し、放射能削減剤の場合の収納放射能は表 面2mSv/hとして4.8E+09g(Cs-137)/1.5m缶)

〔+〕: Cs-137量少なく、トム缶の表面積当量率削減の必要なし

表-17 除染時の各ケースにおける廃棄物発生量比較(塩酸還元法:ケース2)

項目	施設	再処理系	東海MOX	東海U系	備考
汚染重量(ton)		2715	1906	262	
解体重量(ton)		6.551	6.640	539	
焼却重量(ton)		8.257	8.546	801	
放射能(Bq)		9.58E+14	7.37E+14	7.43E+14	
Ce-137(Bq)		2.20E+14	8.08E+08	—	
處理年数		40, 20	40, 20	40, 20	
年間処理量(ton/年)		232, 463	214, 427	20, 40	
(7~12)除染条件	除染液組成	塩酸:5%+L-TA36E ⁺ 酸:1%ナインヒビタ			
除染時間(h)		~3			
溶解金属量(ton)	① SUS(100%)	2	2	0.16	
DF:100 SUS:0.3 μm CS:2 μm	② SUS, CS(50%)	7	7	0.61	
	③ CS(100%)	12	11	1.07	
除染液量(mJ)	①	5,000 (U)	3,652 (III)	342 (III)	I:除染液の消耗より算出
[]:除染率既定方法	②	5,000 (U)	3,652 (III)	342 (III)	I:除染液の標準当量率制限より算出
	③	5,000 (U)	3,652 (III)	342 (III)	II:除染槽の全液体濃度制限より算出
廃渣量	①	406 ([22])	293 ([88])	27 ([8])	廃棄主成分:塩化ナトリウム
[]:溶質量(ton)	②	406 ([22])	293 ([88])	27 ([8])	
	③	406 ([22])	293 ([88])	27 ([8])	
Xフランジ溶有液量(mJ)	①	12 ([4])	11 ([3])	1 ([0.3])	スラッジ主成分:水酸化鉄
(mJ):スラッジ量(ton)	②	45 ([14])	42 ([13])	4 ([1.2])	
	③	79 ([24])	75 ([22])	7 ([2.0])	
廃油量(mJ)	①	9 ([7])	9 ([7])	0.60 ([0.64])	(ガソ燃焼排煙による水洗水の浄化により発生する廃油量)
():廃油量(ton)	②	9 ([8])	9 ([7])	0.61 ([0.65])	
	③	10 ([8])	9 ([7])	0.63 ([0.66])	
ドラム缶量(本)	液体	4,400 (45,800)	3,200 (+)	300 (=)	固化収容:液体, 廃油量 100L/ドラム缶
():放射能規制	一セント固形化	4,700 (45,800)	3,500 (+)	330 (=)	粗し, 放射能規制の場合の収納放射能は表通りの場合(本)
	青りの場合(本)	5,100 (45,800)	3,800 (=)	360 (=)	粗2mSv/hとして4.8E+08(Bq/Ce-137)/1.3mSv

[]:Ce-137量少なく、ドラム缶の収納数量当量率規制の必要なし

表-18 塩酸還元法の安全性、運転保守性

除染法	要因	安全対策		運転保守性	
		設備側			
		設備側	運転側		
塩酸還元法	・高濃度薬剤(HCl), NaOH, H ₂ O ₂ の使用	・高濃度薬剤の使用は陥没液調査及び中和、還元剤分解等の薬液注入時である。 陥没液への注入は移送ポンプを使用	・陥没液剤貯蔵庫は保護領域、マスク、ゴム手袋を着用 ・薬品取扱者に対しては、事前に化学品質等安全シート (SDS) に基づき教育を実施 ・作業時に適宜面液等の異常の有無を確認する	・使用する薬剤は特殊なものではなく、入手は容易	
	・強腐食性薬剤(塩酸)の使用	・塩酸に直接接触する部位にはゴム、チタンライニング(3met)等の耐薬材を使用 ・配管は取り替え性を考慮し、フランジ取り合いとする	・作業時に適宜面液等の異常の有無を確認するとともに、定期的に容器、配管の損傷の有無を点検する	・面液等の異常ありの場合あるいは定期点検により損傷が見つかった場合は補修あるいは部材の交換を実施 ・チタンライニングの耐用年数は採油部 3 年、静止部 5 年を想定 ・廃液の塩酸回収槽や槽内交換頭は 1 ~ 2 年で交換要	
	・塩酸蒸気の発生	・除染槽内は常時吸引排気 ・排気は打羽リバーブで塩酸除去後排気を通して既状の換気系に放出	・除染物の導入、取り出し時以外は蓋を閉じる	・必要に応じて7メートルを交換	
	・高温部(脱液処理のうちの還元剤分解及び高見清掃の温度は95℃～沸点である)	・高温部に直接操作者が付れないよう火傷防止を兼ねて保護材を取り付ける左記以外では最も温度が高い部位でも50~60℃であり危険はない ・所定温度以上に過熱しないよう自動リセットするが、万一所定温度以上に過熱した場合は電源を自動遮断			
	・除染液への放射能の蓄積	・連続運転を可能とする ・表面線量当量率が上昇する際には遮蔽を設置する	・作業は遮蔽により、緊急時及び保守点検以外は近づかない ・除染液の放射能濃度が所定値以上になったら除染液を交換	・淡く低減のため、保守点検時は可能な限り液を抜き、必要に応じて水張りして実施	

表-19 除染廃液処理工数(東海ウラン系) 塩酸重元法

處理数量(t)		801										
SUS (%)		0										
CS (%)		100										
处理年数		40										
年間処理量(t/年)		232										
年間稼働日数(日)		200										
1日運転時間(h)	8	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	
貯蔵容量(m3)	485	485										
設備規格	標準	11(1)当たり処理量(m3/11h)	0.28	3.00	3.00	0.28	3.00	0.28	3.00	0.28	3.00	
		ハザード当たり処理量(t/h/11h)	0.06	0.56	0.56	0.06	0.56	0.06	0.56	0.06	0.56	
所要人員	施設	1	1	1	0.33	2	1	1	0.33	2	1	
(人)	計画	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	
運送距離	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
(A)ガラス当たり施設所要時間(h/11h)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
(B)ガラス当たり計画所要時間(h/11h)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
(C)ガラス当たり運送所要時間(h/11h)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
試算結果	設備	11(1)当たり処理量(m3/11h)	0.28	3.00	3.00	1.00	8.00	6.00	3.00	2.00	2.50	
	規模	ハザード当たり処理量(t/h/11h)	0.06	0.56	0.56	0.19	1.15	1.15	0.56	0.38	0.85	0.85
運送	14,406	1,393	1,393	4,178	697	697	1,393	2,090	1,292	1,232	3,687	
運送距離	1,501	155	155	485	78	78	155	233	137	137	419	
運送時間	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	
11(1)当たり運送時間(h/11h)	0.50	5.17	5.17	1.78	10.34	10.34	5.17	3.45	5.16	5.16	1.95	
11(1)当たり運送時間(日/11h)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	
11(1)当たり運送時間(月/11h)	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	
11(1)当たり運送時間(年/11h)	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	
11(1)当たり施設工数(人・h/11h)	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	
11(1)当たり計画工数(人・h/11h)	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	
11(1)当たり計画工数(人・h/11h)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
11(1)当たり施設工数(人・h/11h)	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	
11(1)当たり計画工数(人・h/11h)	5.00	4.98	4.98	1.68	4.89	4.89	1.68	1.68	5.00	1.67	1.67	
11(1)当たり計画工数(日/11h)	4.50	4.48	4.48	1.50	4.49	4.49	1.50	1.50	4.50	1.50	1.50	
11(1)当たり計画工数(月/11h)	5.00	5.00	5.00	1.67	5.00	5.00	1.67	1.67	5.00	1.67	1.67	
11(1)当たり計画工数(年/11h)	40	40	40	12	4	4	8	12	3	3	10	
年間実働日数	200	19	6	19	19	19	13	19	17	6	17	
年間実働時間(日)	78	6	2	23	4	6	6	11	7	7	20	
全工数(千人・日)	78										10	

表-20 電解電解法の技術的特徴

除染法	電解液		除染原理	除染条件			廃液処理法
	成分	濃度		温度(°C)	時間(h)	機定°F	
硝酸電解法	硝酸	>4mol	<ul style="list-style-type: none"> 電解液を陽極、陰極を被塗装物(チップ)として、被塗装物の表面層を溶解し、放射性物質を電解液中に溶離させようとする方法である。 電極反応 陽極反応 $\text{Fe} - 2e^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ (溶解反応) $\text{H}_2\text{O} - 2e^- \rightarrow 1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+$ (O_2ガス発生) 陰極反応 $\text{NO}_3^- + 3\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (NO_2ガス発生) 被塗装物に電極を接触する必要がなく追掃操作が容易である。 陰極から水素が発生しないので安全性に優れる。 電解液が希硝酸なので廃液の処理が容易 	常温	約2	100~1000	硝酸回収-濃縮-セメント化 または、 硝酸回収-一般廃液処理系

表-21 除染処理後の放射能検認方法の調査、評価結果

項目	概要(原安委了承内容)	適用のための条件	除染処理後への適用性
廃棄体破砕分析法	廃棄体から試料を採取して、これを放射化分析し、当該廃棄体中の放射能濃度を決定する方法	廃棄体製作後に放射能濃度決定のためのサンプリング。分析を廃棄体一体毎にを行い、個々の廃棄体の放射能濃度を決定する。	・固体状廃棄物の廃棄体一体毎のサンプリング分析は、非現実的である。 ・廃棄体の代表サンプルの採取方法が難しい。
原廃棄物分析法	固型化処理直近プロセス廃棄物から試料を採取してこれを放射化分析し、廃棄体中の放射能濃度を決定する方法	均一性状の原廃棄物と見なせる形態(粉碎・壊碎等)とした上でバッチを代表する廃棄物をサンプリング。分析し、同一バッチの廃棄体群の放射能濃度を決定する。	・除染処理後の廃棄物の場合、均一性状とするための破碎処理は、非現実的である。
非破壊外部測定法	廃棄体の外部から非破壊測定し、当該廃棄体中の放射能濃度を決定する方法	廃棄体の外側から測定可能な核種($\text{Co-60}, \text{Cs-137}$ 等)を、1号埋設廃棄体(均質・均一固化体)及び2号埋設廃棄体(充填固化体)と同様に非破壊測定する。	・除染処理後の廃棄物の核種組成や処分容器の形状等に合わせた測定装置の新規開発が新たに必要となる。
スケーリングファクタ法	代表サンプルの放射化分析から得られる確測定核種と key 核種の相関関係と個々の廃棄体外部からの非破壊測定結果を組み合わせて当該廃棄体中の放射能濃度を決定する方法。	key 核種濃度と確測定核種の相関関係に基づき SF を設定し、key 核種濃度を用いて確測定核種の濃度を決定する。	・サンプリング・分析を行う必要がある。 ・過度に保守的となる可能性がある。 ・除染処理後の廃棄物の核種の間に、相関関係があることを証明する必要がある。 ・除染処理を行った場合、除染率数に応じた設定を行う必要がある。
平均放射能濃度法	代表サンプルの放射化分析から得られる平均的な放射能濃度から当該廃棄体中の放射能濃度を決定する方法	单一機器・部材の汚染状況はほぼ一定であり、放射能濃度は平均的な取扱いが可能であると考え、平均放射能濃度を決定する。	・除染処理後の廃棄物の放射能濃度が、一定幅の中に収束するかどうかを証明する必要がある。 ・サンプル・分析による確認が必要である。→サンプル数、発生時期。
理論計算法	原子炉燃焼計算等により理論的に当該廃棄体中の放射能濃度を決定する方法(生成機構及び物理化学的挙動が同一と見なせる核種間の組成比を決定し、他の方法で求めた核種放射能濃度との一定比率	分布を考慮したパラメータを用いた放射計算を行い、各核種の絶対値を決定する。若しくは組成比を求め、他の方法で求めた核種放射能濃度との一定比率で目的核種を決定する。	・除染処理後の廃棄物に適用するのは困難である。

表-22(1) 東海ウラン系廃棄の HOP 法及び塩酸還元法による除染の経済性評価

処理法	HOP 法 ケース 1																							
処理量 (ton)	801																							
二次廃棄物 処理法	イオン交換法										塩酸法													
材料組成 (%)	SUS 100				CS 100				SUS/CS 50/50				SUS 100				CS 100		SUS/CS 50/50					
処理時間 (年)	40		20		40		20		40		20		40		20		40		20					
1 日稼働時間 (h)	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8				
運送コスト (百万円)	5830	3190	3290	3290	5850	3190	3290	3290	5830	3190	3290	3290	5914	3274	3874	3874	5914	3274	3874	3874				
運搬コスト (百万円)	1799	1797	1815	1820	2030	2026	1748	1559	1646	1644	1653	1448	2145	2189	1775	3805	3803	3842	2873	2870	2609			
処分コスト (百万円)	1727	1624	1682	1682	4686	4695	4518	4518	3200	3236	3090	3090	821	692	692	692	1801	1763	1763	1765	1354	1296	1236	
単位処理費 単価単価 (百万円/t)	9.32	6.18	6.00	6.73	9.61	6.81	6.39	6.02	9.71	6.41	6.12	6.91	10.08	6.76	6.98	6.48	11.88	6.59	6.71	8.26	10.97	7.67	7.34	
單位処理量 単価単価 (千円/tm)	11680	8258	7830	7806	15665	12337	11920	11860	13710	10285	9986	9986	11082	7623	7746	1292	14365	10706	10911	10461	12860	9201	9325	8975

* 処分コストを含む

表-22(2) 東海ウラン系廃棄の HOP 法及び塩酸還元法による除染の経済性評価

処理法	HOP 法 ケース 2												塩酸還元法 (HOP 法、液槽法と同等扱い)					
処理量 (ton)	801												801					
二次廃棄物 処理法	イオン交換法												塩酸回収—中和—濃縮					
材料組成 (%)	SUS 100				CS 100				SUS/CS 50/50				全 品					
処理時間 (年)	40		20		40		20		40		20		40		20		40	
1 日稼働時間 (h)	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8	24	8
運送コスト (百万円)	5820	3180	3290	3290	5830	3190	3290	3290	5830	3190	3290	3290	5914	3274	3874	3874		
運搬コスト (百万円)	2310	2208	1928	1602	2284	2281	1999	1875	3248	2245	1963	1859	659	659	659	659		
処分コスト (百万円)	1180	1027	965	965	2435	2322	2260	2260	1781	1678	1606	1606	3480	3480	3480	3480		
単位処理 費単価 (百万円/t)	10.08	8.74	6.61	6.11	10.18	6.88	6.60	6.20	10.08	8.79	6.66	6.15	8.21	4.91	6.03	5.03		
単位処理 費単価 (千円/tm) ＊	11448	8021	7704	7299	18109	9741	9424	9019	12308	8880	8663	8168	12554	9258	9882	8382		

* 処分コストを含む

表-23 (1) 技術的課題の抽出 (HOP法)

項目	技術的課題	解決方法	開発計画
除染性能 (除染率) (除染速度)	有機性による除染法は、母材の溶解力が弱いため、金属培養液まで浸透した母材に対しては十分である。分離率が得られるか否かの確認ができるない。十分な除染率が得られない場合は、除染剤濃度の増加あるいは除染時間の延長を伴う。	ホット試験用いた除染試験を行い、平成13年度以降に下記試験を行う。 (1) 基礎試験 ・除染性能確認 (2) ミニ除染試験 ・除染装置仕様確認 ・廃液の処理特性確認 (試験装置は、既作品を適用可能)	
二次廃棄物 (発生量) (形態)	各種汚染物がシラク鉱液に溶解した場合の形態およびイオン交換樹脂による回収速度が不明。イオン交換樹脂による回収できない放射能が存在する場合は、溶解法を採用する必要が生ずる。	ホット試験用いた除染試験を行い、平成13年度以降に下記試験を行う。 (1) 基礎試験 ・除染性能確認 (2) ミニ除染試験 ・除染装置仕様確認 ・廃液の処理特性確認	
安全性	触感毒性が不明。	触感の寿命を推定するため、実験室において加速試験を行う。	
運転保守性	Puおよびリの取扱について安全上の検討が必要。	法令上および技術的安全上の取扱を規定する。	平成13年度以降行う試験データを含めて取扱上の注意点を抽出する。
処理設備寿命評価	運転・保守性は操作中除染の過伝送から評価が可能。	モックアップ試験により、運転・保守性を確認する。	平成14年度以降、実規模試験を行う。 (試験装置の一部は、既作品を適用可能)
	長期運転耐久性評価がないため、記載・既得の寿命確認が困難。ポンプ等の回転機器に際しては、長期連続運転評価がないため寿命確認が困難。	ホット試験用いた耐久性試験により、放熱速度を評価。 モックアップ試験により、寿命を確認する。	平成13年度以降基礎試験、ミニ除染試験を行う。 平成14年度以降実規模モックアップ試験を行う。

表-23 (2) 技術的課題の抽出 (技術選定法)

項目	技術的課題	解決方法	開発項目
除染性能 (除染率) (除染速度)	・廃酸性汚染によるDF1,000以上達成できることの確認 ・除染液によるDF低下	・各種実験用ホットサンプルによる除染DFの確認 ・除染液の放射能濃度を測定し、それ以上で作成	・R1含有率の付着による射出能力の水洗試験
二次廃棄物 (発生量) (形態)	・過酸化水素によるL-TGAビン酸分解の確認 (H-TGA、有機酸の分解は既経験) ・二次廃棄物の燃焼(特に、PE等表面燃焼量を測定した場合)	・L-TGAビン酸分解のための条件の把握 ・燃焼判定材の標準燃焼炉による、燃焼対象燃焼の最適化	・L-TGAビン酸分解試験
安全性			
運転保守性			
処理設備寿命評価	・廃酸性汚染浴槽に対するテフロンライニング材の腐食、劣化 ・廃酸性汚染浴槽のイオン交換膜の劣化	・定期的に劣化の有無を検査し、異常ある場合は修理あるいは機器を交換 ・テフロンライニングの漏水性を明確にし、劣化速度が早い場合はテグン等の高耐久材を使用 ・定期的に劣化の有無を検査し、劣化した時は交換	・テフロンライニング材の腐食Pの腐食性試験 ・電解槽の長時間運転試験

表-3-3 技術的課題の抽出 (电解電解法)

項目	技術的課題	解決方法	開発計画
除染性能 (除染率) (除染速度)	ホット試験データがない。	・電解電解法の基本特性の確認 ・ホット除染作による溶解特性	① 電解電解法の電解強化(溶解)特性 ② 溶液浴の形態に対する電流密度分布特性 ③ O ₂ 、NO _x ガス発生特性 ④ 超音波振動による付着物剥離効率
二次廃棄物 (発生量) (形態)		・ホット除染作による二次廃棄物発生量把握	① 除染剤の形態に対する電流密度分布特性
安全性		電解槽周辺の塗封	① 陽極バスケットと被除染材との接触法の最適化検討 ② 陰極(対極)の配置構造 ③ 運搬作可能な電解槽構造
運転保守性			
処理設備寿命評価			

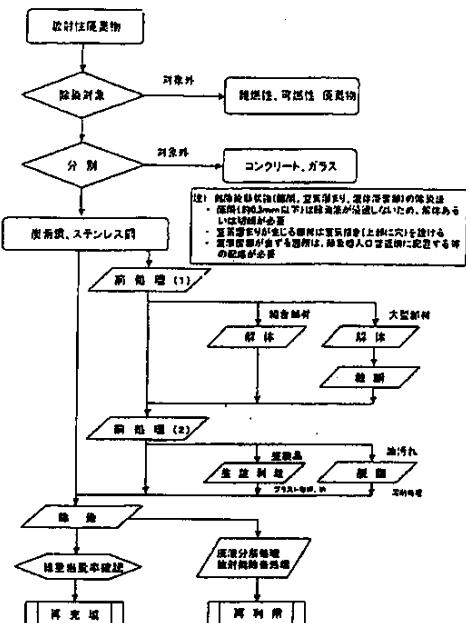


図-1 除染全体処理フロー（HOP法）

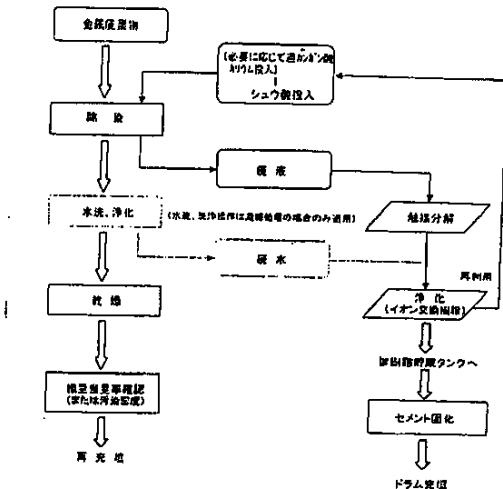


図-2 除染システムの設定（HOP法）

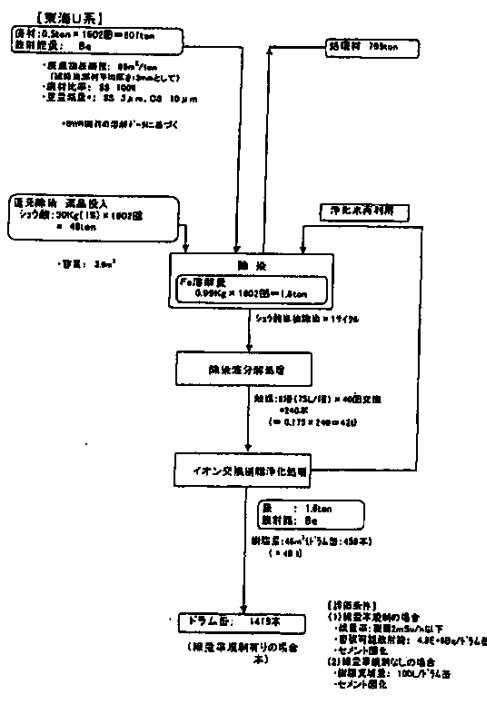


図-3(1) 東洋圏実施時に伴う物質収支の評価（ケース1/イオン交換処理/SUSS05）
(HOP法)

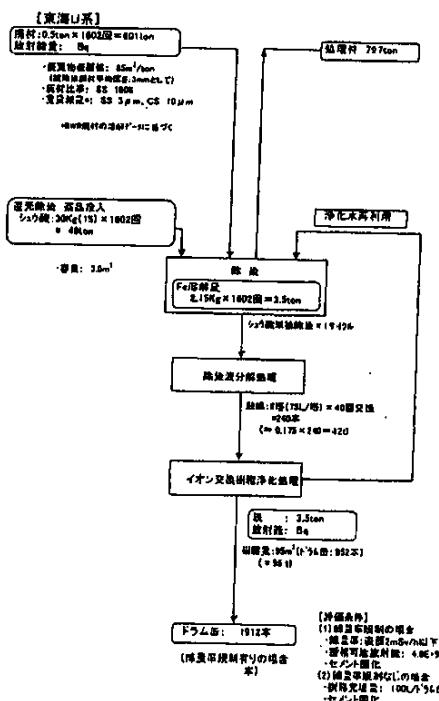


図-3(2) 東洋圏実施時に伴う物質収支の評価（ケース1/イオン交換処理/SUSS05 脱着率50%）

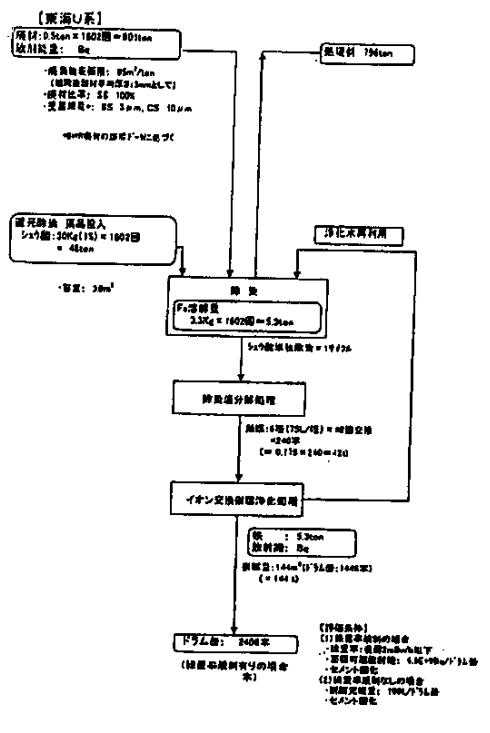


図-3(3) 東海リ系除染に伴う物質収支の評価（ケース1/カシオペア/波素鋼100t）

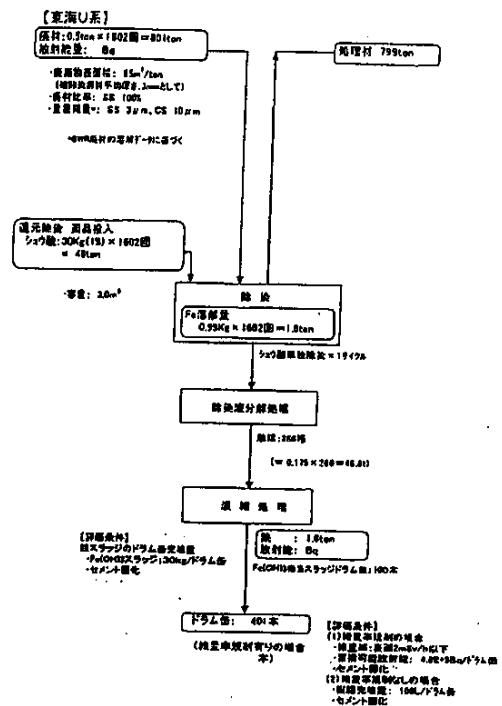


図-3(4) 東海リ系除染に伴う物質収支の評価（ケース1/液縮処理/SUS100）

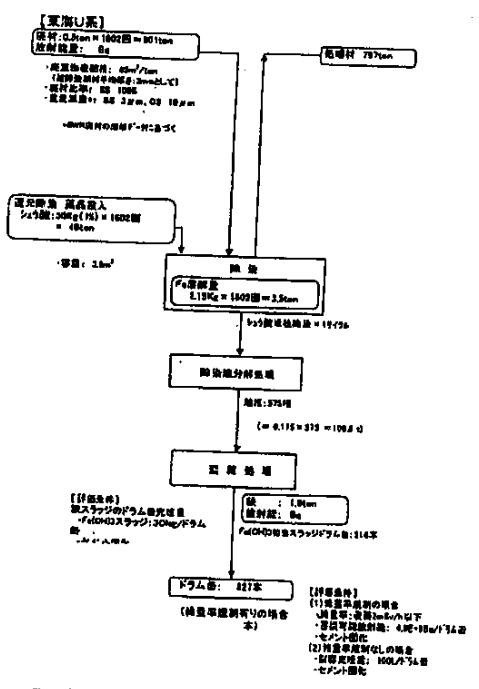


図-3(5) 東海リ系除染に伴う物質収支の評価（ケース1/深埋缶/SSUS09/波素鋼50t）

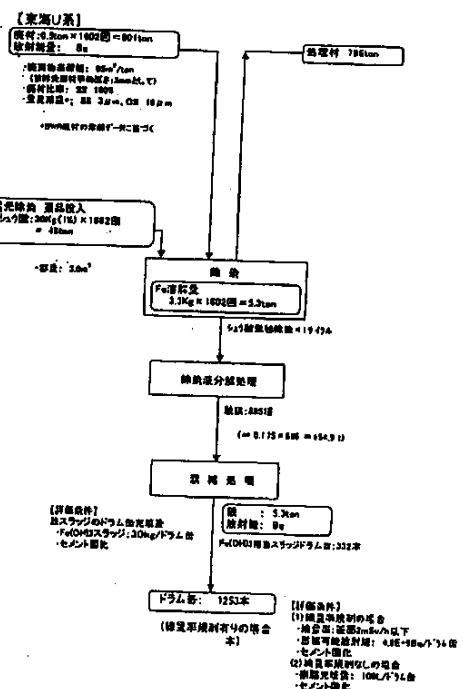


図-3(6) 東海リ系除染に伴う物質収支の評価（ケース1/深埋缶/波素鋼100t）

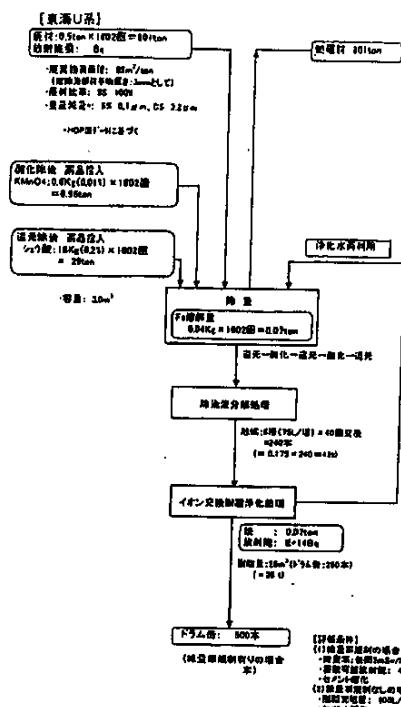
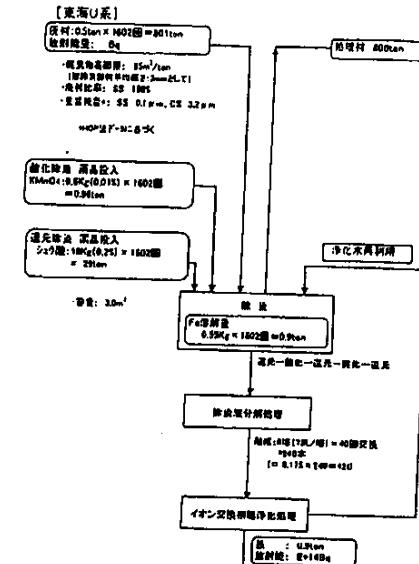
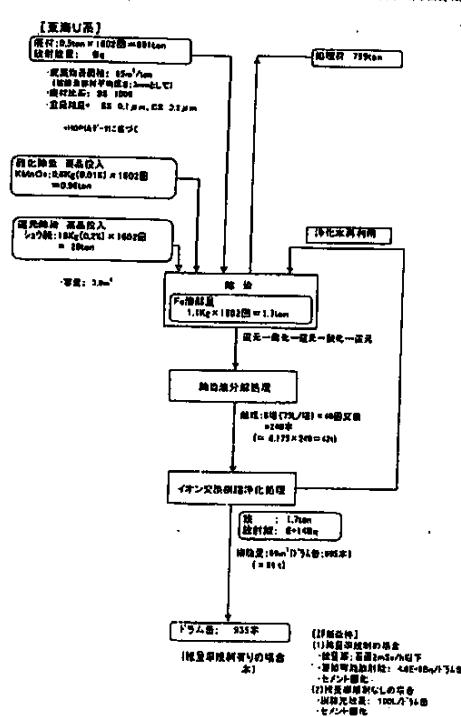


図-3(7) 基準化系統樹に係る物种数の推移 (ケース3) (a) 対照地帯 (b) 植生地帯



セメント固化



实验报告第3章物理量的测量(1)——用米尺和游标卡尺测物体的长度

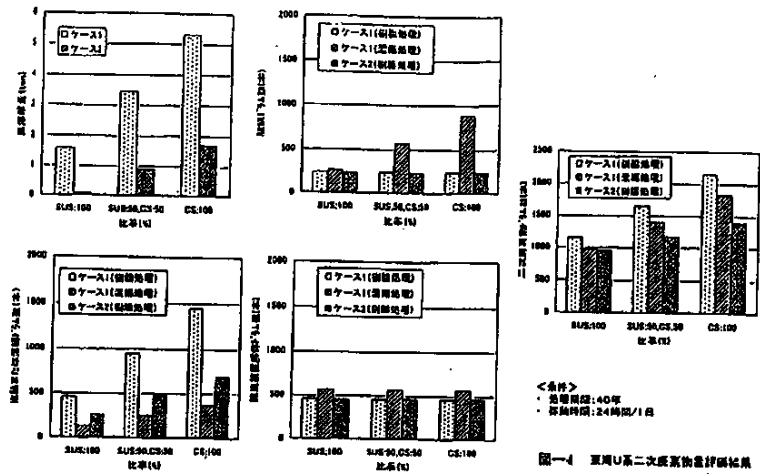


図-4 亜鉛U系二次廃棄物量評価結果 (HOP法)

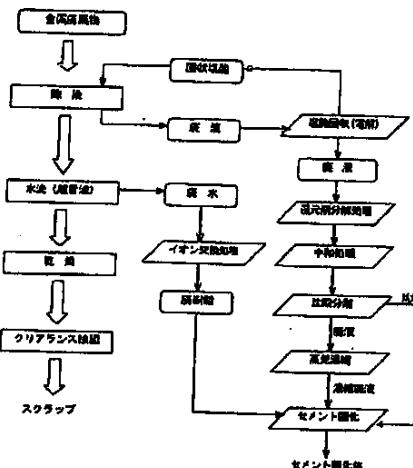


図-5(1) 治療・処理システムフロー (塩酸還元法)

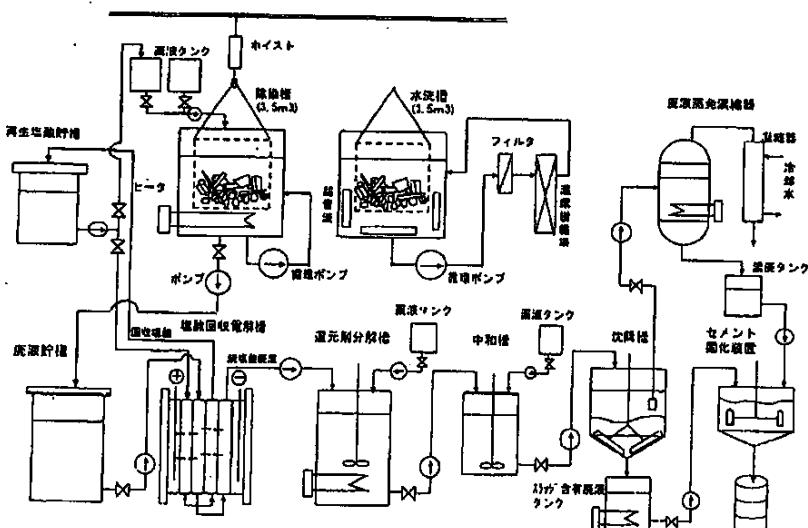


図-5(2) 金属廃棄物除染装置フロー (塩酸還元法)

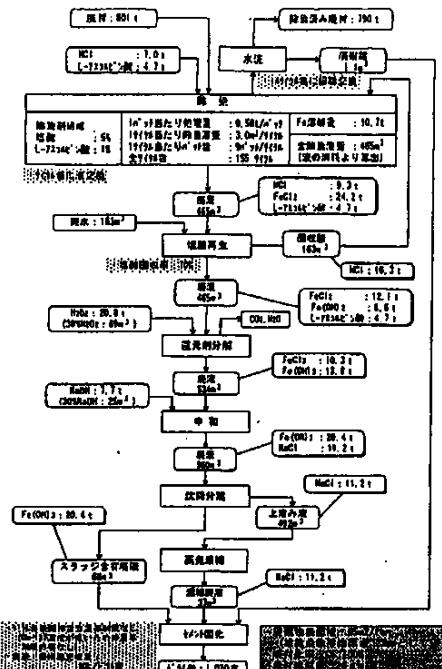


図-6 除染、廃液処理の物質収支(廃液選元法)
(対象施設: 東洋ウラン系、廃棄物材質: 放棄類100%)

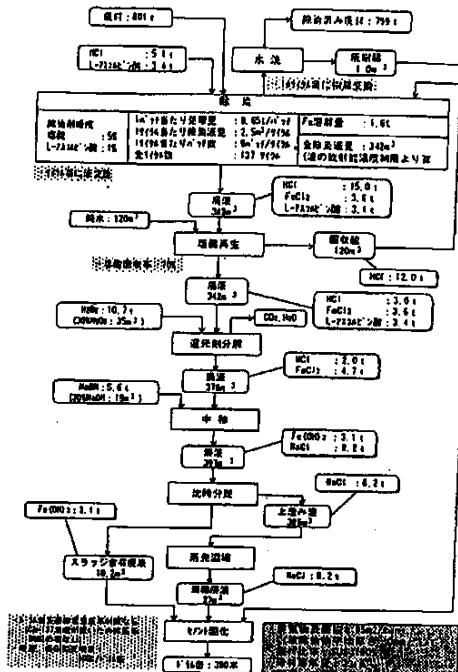


図-7 除染、廃液処理の物質収支(廃液選元法)
(対象施設: 東洋ウラン系、廃棄物材質: ステンレス100%)

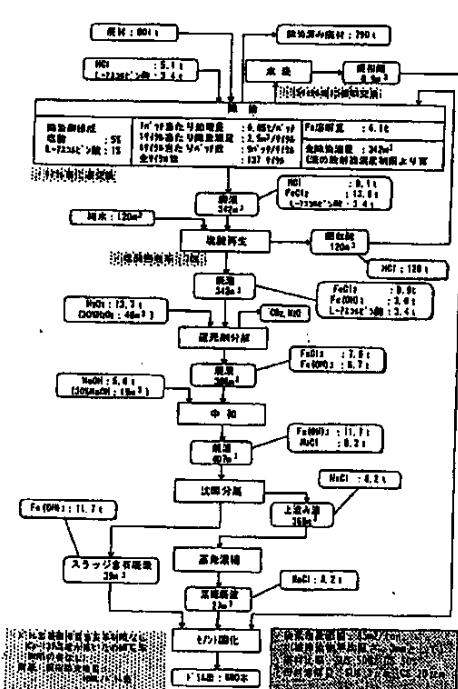


図-8 除染、廃液処理の物質収支(廃液選元法)
(対象施設: 東洋ウラン系、廃棄物材質: 放棄類50%、ステンレス50%)

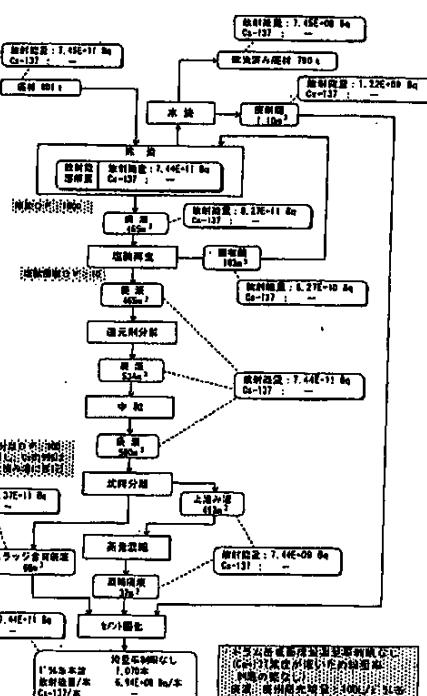


図-9 除染、廃液処理の物質収支(廃液選元法)
(対象施設: 東洋ウラン系、廃棄物材質: 放棄類100%)

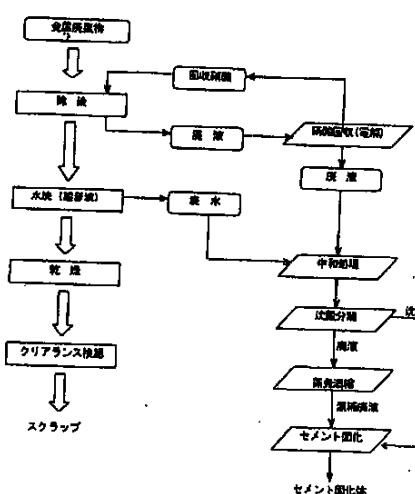
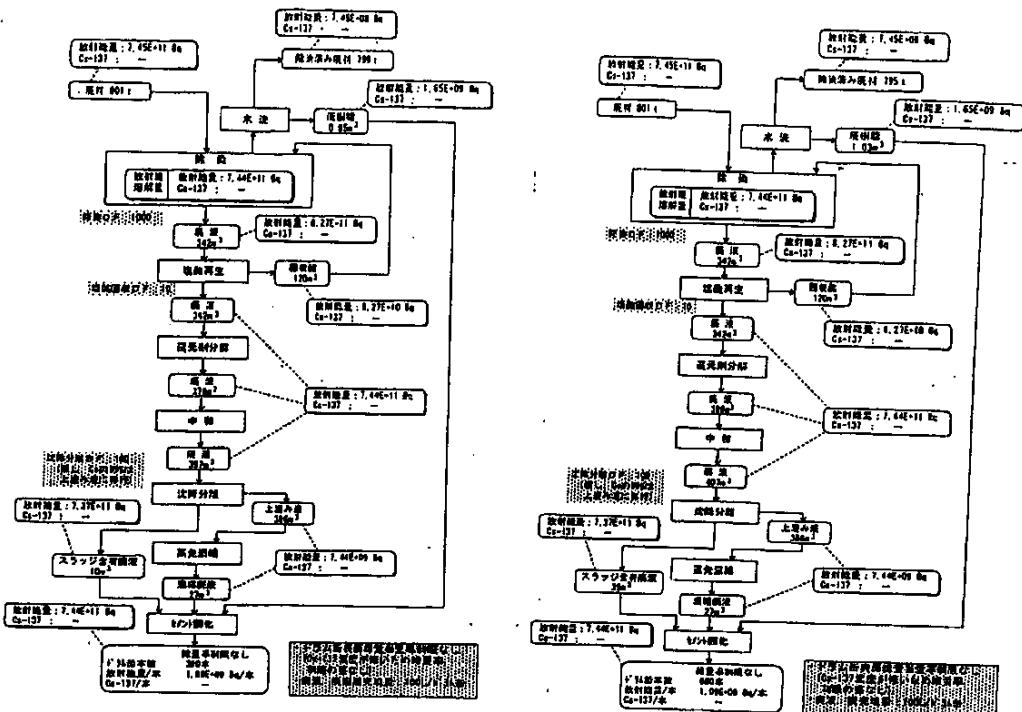


図-12 液体・液渣処理システムフロー (放射性廃水)

添付資料2 ウラン製錬転換設備の切断技術

切断技術特徴

番号	項目	内 容
1	分 類	機械式切断
2	技 術 名 称	砥石切断（カッタネット）
3	技 術 概 要	円形砥石を対象物に押し付け高速回転切断
4	特 徵	肉厚切断にはクサビが必要。局所排気必要。
5	適 用 材 料	FRP 金属 配管 角材 アングル L鋼
6	作 業 環 境	気中 / 水中
7	最大肉厚 / 直径	肉厚 FRP 24mm、外形：管 115mm φ、角材 100×100mm、アングル 110×110mm、L鋼 50×50mm
8	切 断 速 度	
9	二 次 廃 物	中、粉塵、切断屑
10	コ ス ト	低
11	実 績	配管工事等、
12	転換施設対象設備	T904
13	出 典	工具カタログ

切断技術特徴

番号	項目	内 容
1	分 類	機械式切断
2	技 術 名 称	ジグソー
3	技 術 概 要	幡挾の刃を持つ糸ノコギリ、複雑な曲線、直線の切断可能
4	特 徵	可搬型、配管、板材等適。厚肉切断難。
5	適 用 材 料	全金属、FRP(薄肉用)、木材、
6	作 業 環 境	気中 / 水中
7	最大肉厚 / 直径	肉厚:軟鋼板 10mm、アルミ板 20mm、FRP 14mm、木材 135mm.
8	切 断 速 度	
9	二 次 廃 棟 物	少、粉塵
10	コ ス ト	低
11	実 績	使用実績多
12	転換施設対象設備	R401、V202、V203、V204、V207、V208、V233、V234、V304、V305、
13	出 典	工具カタログ

切断技術特徴

番号	項目	内 容
1	分 類	機械式切断
2	技 術 名 称	バンドソー
3	技 術 概 要	定置式：被切断面を固定し切断線にそって鋸刃を回転し切断。 現場からの解体物切断に有効。 携帯用：固定された被切断物に沿い鋸刃を押し付け、回転させて切断。
4	特 徵	束ねられた材料の同時切断可。定刃の寿命短。交換回数多。アイスソー工法は対象物内を水張りし、凍結させて切断。エアロゾル防止とソープレード冷却効果を図る工法。工期が長くなる。切断屑回収容易。二次廃棄物量少。
5	適 用 材 料	炭素鋼+ライニング配管 (CS、SUS) 定置式：配管、板材。
6	作 業 環 境	気中 / 水中
7	最 大 肉 厚 / 直 径	複合材：サイズ 炭素鋼 (14mm ^t) +ライニング (3mm ^t) 程度 CS/SUS：サイズ 定置式：□1300mm 程度 携帯用：170×80mm 程度
8	切 断 速 度	定置式：15—80 m/分 携帯用：送り 50mm / 分
9	二 次 廃 棄 物	少、切削粉 20—32cm ³ /m (板厚 20mm)、10-25kg/m ² (独)
10	コ ス ト	低
11	実 績	ベルギーBR-3炉や独 KKN 施設、VAK、KRBA では蒸気乾燥器 3m ϕ のタービン部材切断に使用。
12	転換施設対象設備	小型、V405、V414、V05、V06、
13	出 典	IAEA TRS No.395, State of the Art Technology for Decontamination and Dismantling of Nuclear Facilities.

切断技術特徴

番号	項目	内 容
1	分 類	機械式切断
2	技 術 名 称	ニブラ
3	技 術 概 要	パンチと打ち抜きの高速繰り返し動作で切断。駆動は電動式と圧空式、手動式がある。遠隔化可能
4	特 徵	複雑形状の鋼材切断可。
5	適 用 材 料	炭素鋼/ステンレス鋼、アルミニウム、グラスファイバー、プラスチック、板材
6	作 業 環 境	気中 / 水中
7	最大肉厚 / 直径	軟鋼 6mm厚。SUS 5mm厚。
8	切 断 速 度	約 1.2m / 分 (軟鋼 6mm または SUS 5mm 板厚の場合)
9	二 次 廃 棄 物	少量のエアロゾル発生。デbris。
10	コ ス ト	低
11	実 績	米国エルクリバー炉のシュラウド切断、SUS 2.4mm、ジルカロイ 1.6mm
12	転換施設対象設備	
13	出 典	Decommissioning Handbook

切断技術特徴

番号	項目	内 容
1	分 類	機械式切断
2	技 術 名 称	パイプカッタ
3	技 術 概 要	フレームの中に回転ローラと特殊鋼製切断刃を有する治具をパイプ外表面に手動、電動、油圧または圧空で圧着させ、回転しながら切断。
4	特 徴	可搬型手動回転式が市販品で利用可能。鋼材の塑性域切断のため、二次廃棄物が少なく、粉塵発生も少ない。遠隔化可能。カッタ着脱スペースが必要でまた多少時間がかかる。電動式の他、油圧式のものも開発されている。
5	適 用 材 料	すべての鋼材、パイプ
6	作 業 環 境	気中
7	最大肉厚 / 直径	手動式：肉厚 1.5mm 鋼管、ステンレス管、銅管 16~66mm ϕ 動力式：回転速度 20~50rpm 圧着力 1.5~5 Mg 肉厚 40mm (SUS)、外径 350mm
8	切 断 速 度	中 (2~3 分で切断可)
9	二 次 廃 棄 物	少
10	コ ス ト	低
11	実 績	配管工事等で使用
12	転換施設対象設備	系統配管
13	出 典	一般工具カタログ、Decommissioning Handbook

切断技術特徴

番号	項目	内 容
1	分 類	機械式切断
2	技 術 名 称	ディスクカッタ
3	技 術 概 要	回転ローラと特殊鋼でできた円盤状の刃先を有する治具を配管内表面に圧着させ、回転しながら塑性変形で切開するように配管を切断。
4	特 徵	切断屑など発生するが二次廃棄物量少なく回収も容易。埋設配管、貫通部内配管等、特殊な場所での配管を内部から切断可能。
5	適 用 材 料	すべての鋼材、パイプ
6	作 業 環 境	気中
7	最大肉厚 / 直径	配管：外形 324mm φ、肉厚 17.4mm (3B)、切断時間 2.5 分 肉厚 33.3mm (1.5B)、切断時間 2.8 分、圧着力約 5 トン
8	切 断 速 度	
9	二 次 廃 棄 物	少
10	コ ス ト	低
11	実 績	JPDR 遮蔽壁内配管切断
12	転換施設対象設備	配管類
13	出 典	デコミッショニング技報第 15 号 (1996 年 2 月)、RANDEC

切断技術特徴

番号	項目	内 容
1	分 類	機械式切断
2	技 術 名 称	剪断機
3	技 術 概 要	通常のはさみと同じ原理で作動する特殊鋼製2枚刃あるいはカッタによって切断。
4	特 徵	軽量、可搬型、手動で切断もでき一般工具として市販品が出ている。圧空、油圧、電動式もあり金属の裁断、コンクリートの切断に使用でき、遠隔化容易、操作容易。
5	適 用 材 料	すべての鋼材、小径パイプに適。タンク不適。
6	作 業 環 境	気中 / 水中
7	最大肉厚 / 直径	肉厚 6 mm 以下、配管直径約 50mm 以下
8	切 断 速 度	軟鋼 4.6~6.1m / 分 切断能力 5 mm (軟鋼)、1.2mm (SUS)
9	二 次 廃 棄 物	少
10	コ ス ト	低
11	実 績	伊 Garigliano 炉で遠隔水中切断 (SUS12.7mm ϕ 肉厚 2.77mm 水力 9000PSI) 米 LaCrosse 炉で圧空式遠隔水中切断で肉厚 1.6mm の SUS 製シラウド切断 仏 再処理施設 (AT-1) の細管・油圧剪断機切断 英 BFNLL 沈殿プラントの直径約 12mm と 25mm の配管切断。
12	転換施設対象設備	
13	出 典	Decommissioning Handbook

切断技術特徴

番号	項目	内 容
1	分 類	機械式切断
2	技 術 名 称	サークラーカッタ
3	技 術 概 要	円盤状ディスクの外周に超硬材料の切断刃を放射状に焼付け回転切断。装置は配管等の外表面に切断刃をあて円周上を切断。
4	特 徵	本カッタには定置式、可搬式、遠隔式があり、駆動は電動、空気圧、油圧あるいは手動方式がある。精密加工用のクラムシェル型旋盤、ヒンジ式カッタ、回転カッタ、及び手動カッタがある。ヒンジ式、回転式及び手動カッタは狭隘な場所での使用可能。回転カッタは口径 400mm 程度までの配管切断では周囲 100mm 程度の空間が必要。手動カッタは適当な間隔があれば、水路、水中、爆発の可能性のある環境や頭上、配管ラック等どんな場所でも使用可能。機械的切断のため火災の心配は少なく二次廃棄物処理も比較的容易。厚肉切断はカッタ刃を変えることで対応可能。
5	適 用 材 料	全金属、配管、タンク。
6	作 業 環 境	気中 / 水中
7	最大肉厚 / 直径	肉厚 70mm 以下、パイプ及びタンク直径 6 m 以下
8	切 断 速 度	中
9	二 次 廃 棄 物	少、冷却水、ドロス、エアロゾル
10	コ ス ト	低
11	実 績	カリグリアノ炉 (BWR、伊) 及びグンドルミングン (BWR、独) の配管切断。
12	転換施設対象設備	
13	出 典	Decommissioning Handbook IAEA.TRS、No.286 : Decontamination and Demolition of Concrete and Metal Structures During the Decommissioning of Nuclear Facilities.

切断技術特徴

番号	項目	内 容
1	分 類	機械式切断
2	技 術 名 称	レシプロソー
3	技 術 概 要	固定枠の一端あるいは両端に鋸刃をしっかりとしつけ固定する。切断対象物に超硬材料の切断刃をあて電動、圧空あるいは手動で往復運動により切断する。
4	特 徵	切断機構が単純で切断刃の修理、交換が容易。作業準備時間も短く、被爆低減可能。一般産業用工具で原子力界でも利用されている。火災の危険性も低減でき、汚染管理上も容易。コストも安価。可搬型、遠隔型、固定型いずれも利用に便利。
5	適 用 材 料	全金属、板材、鉄筋、アングル、チャンネル等、プラスチック材等。
6	作 業 環 境	気中 / 水中
7	最大肉厚 / 直径	炭素鋼 肉厚 6mm 以下、パイプ直径 115mm 以下 SUS 肉厚 2 " パイプ直径 40 "
8	切 断 速 度	
9	二 次 廃 棄 物	少、切断粉約 10cm ³ / m (板厚 6mm)、冷却水、ドロス、
10	コ ス ト	低
11	実 績	ベルギーBR-3炉の配管。米国 PNL の配管 (圧空式)。
12	転換施設対象設備	R401、V202、V203、V204、V207、V208、V233、V234、V411、V412
13	出 典	Decommissioning Handbook

切断技術特徴

番号	項目	内 容
1	分 類	熱的切断
2	技 術 名 称	酸素ガス切断
3	技 術 概 要	ガス火炎で切断部加熱溶断。酸素ガスとアセチレンガスでドロス除去。
4	特 徵	炭素鋼切断に適用。SUS、銅合金に不適。ライニングは除去後切断。安価。軽量。機械的切断より切断速度大。エアロゾル発生
5	適 用 材 料	炭素鋼、板、アングル、配管等、薄肉 SUS
6	作 業 環 境	気中 / 水中
7	最大肉厚 / 直径	板厚 350mm 程度。全配管 (SUS 内張り管は事前除去)。タンク (炭素鋼のみ)
8	切 断 速 度	0.1~1 m / 分 (板厚 5~50mm の場合)
9	二 次 廃 棄 物	中、ドロス 80cm ³ / m (板厚 20mm の場合) 発生エアロゾル対策必要。
10	コ ス ト	低
11	実 績	配管工事等
12	転換施設対象設備	大型、V415、V416、V301、V302、V303、V304、V305、
13	出 典	Decommissioning Handbook

切断技術特徴

番号	項目	内 容
1	分 類	熱的切断
2	技 術 名 称	プラズマアーク切断
3	技 術 概 要	被切断物と電極間にアーク放電させ、アークエネルギーにより溶断。アシストガスとして Ar+H ₂ 、圧空、Ar+N ₂ 、等。
4	特 徵	切断材料選定容易。切断速度速い。トーチ部が軽量。携帯用手持ち式装置も有。
5	適 用 材 料	炭素鋼、ステンレス鋼、アルミニウム、ジルコニウム、インジウム。
6	作 業 環 境	気中 / 水中
7	最大肉厚 / 直径	肉厚 CS / SUS / Al 約 177mm 以下 (水中約 100mm 以下) Z _R / In 約 100mm 以下、直径 : パイプ、タンク制限なし。
8	切 断 速 度	0.5m / 分 (板厚 20mm の場合)
9	二 次 廃 棟 物	多、ドロス約 60m ³ / m (板厚 20mm の場合)。 20~40kg / m ² (独グレドレミングン炉)。 切断粉 : 0.1~3mm φ。
10	コ ス ト	中
11	実 績	肉厚約 40mm、径約 200mm パイプを約 30 分で切断。 シッピングポート炉冷却系配管と装置撤去。HEPA フィルタ付排気装置で空気汚染管理。
12	転換施設対象設備	
13	出 典	Decommissioning Handbook

切断技術特徴

番号	項目	内 容
1	分 類	熱的切断
2	技 術 名 称	レーザ切断
3	技 術 概 要	高出力密度の YAG レーザのもつ遠赤外線ビームを対象物に集光し、非接触、無反力で熱切断する技術。不活性ガス (He, CO ₂ , N ₂) あるいは活性ガス (O ₂ 、空気) をアシストガスとして、レーザ光と共に高速で吹きつけドロスを除去。
4	特 徵	すべての金属、コンクリート等に有効。光ファイバーで集光でき遠隔操作と狭隔な場所での使用可能。炭素鋼では酸素または少量の空気をアシストガスに使用すると発熱反応により、切断速度、深さが向上する。切断巾狭く二次廃棄物は少ないが、エアロゾル発生があり排気設備必要。
5	適 用 材 料	全金属、コンクリート、プラスチック、複合材料等。
6	作 業 環 境	気中 / 水中
7	最大肉厚 / 直径	最大肉厚 : SUS 110mm、MS 90mm、Al 25mm。
8	切 断 速 度	高
9	二 次 廃 棄 物	中、ドロス、エアロゾル。
10	コ ス ト	高
11	実 績	10KW レーザ : 複合材 (鋼材 900mm ^t + 保温材 200mm ^t)、 切断速度 0.05m / 分 1.5KW レーザ : 複合材 (SUS400 材、25mm ^t + FRP2mm ^t)、
12	転換施設 対象 設 備	塔槽類、配管等
13	出 典	日本原子力学会「2001 年秋の大会」、N69、N72. (2001 年 3 月)。Decommissioning Handbook.

添付資料 3. 研究開発に基づく除染情報の整理・分析

ウラン系化合物除染技術—研究開発段階

番号	項目	内 容
1	分 類	化学的除染法
2	技 術 名 称	フッ化物揮発法-IF ₇ 法
3	対象廃棄物	ウラン系廃棄物、滞留ウラン
4	技 術 概 要	ウラン濃縮プラントでは長期間運転により反応性の高い原料の UF ₆ は遠心分離機部品と反応して、回転安定性に影響を与える固体ウラン化合物 UF ₅ を生成する。遠心分離機を運転しながら CIF ₃ で除染する場合分子量が 92しかないため遠心分離機部品と反応して、回転不安定性が出てくる可能性がある。七フッ化ヨウ素 IF ₇ の分子量は 260 あり、回転運転上は問題なく UF ₅ との反応性もよいことから除染ガスとして IF ₇ を使用するする技術。
5	特 徴	カスケード内の遠心分離機を運転状態にし、IF ₇ を導入する。フッ化ガスを各遠心分離機内の固体ウラン化合物 UF ₅ が反応して生成する UF ₆ 及び IF ₅ はカスケード内で分離し分子量の小さいを IF ₅ 及び未反応の IF ₇ はカスケード製品側から排出される。分子量の大きい UF ₆ はカスケード廃品側から回収除染する。分子量の小さいを IF ₅ 及び未反応の IF ₇ はカスケード製品側から排出される。IF ₅ はフッ素ガス F ₂ と反応させ IF ₇ としカスケードへ供給再利用する。
6	R&D 概要	IF ₇ と UF ₅ との反応も良く、処理システム検討の結果は特に問題なく、ウラン系廃棄物処理法の一つと考えられる。IF ₇ 、CIF ₃ 、BrF ₃ 、BrF ₅ などフッ化ガスを用いた乾式除染法は遠心法プラントのみならず他プラントの幅広い応用が期待される。今後実験的確認が必要。
7	出 典	日本原子力学会「2000 年春の年会」要旨集 K61 1093 p、2000 年 3 月

ウラン系化合物除染技術—研究開発段階

番号	項目	内 容
1	分 類	化学的除染法
2	技 術 名 称	廃液中 α 核種除去法
3	対象廃棄物	α 核種を含む放射性廃液
4	技 術 概 要	使用済燃料再処理廃液中のウランを含む α 核種を除去処理し非TRU化する。処理済溶液は酸とアルカリに分解し、再利用できる技術開発。
5	特 徵	α 廃棄物を非TRU化し廃棄物管理の軽減、二次廃棄物量の低減
6	R&D 概要	<p>①試料：再処理工場低レベル廃液及び極低レベル廃液</p> <p>②除染法：低放射性廃液に硝酸と亜硫酸ナトリウム、硝酸銀を添加しAgIとして沈殿除去。さらにHNO₃を添加し脱炭酸化し、Fe(NO₃)₃によってU、Pu等α核種 セリウム等$\beta\gamma$核種を共沈させ、限外ろ過膜で分離する。その後ろ過液をPH7とし、Fe(NO₃)₃でアンチモンを共沈除去。更にろ過液をチタン酸ナトリウムでSr、Ca、Mg、シアン化コバルトカリウムでCsを吸着除去。処理済液の最終処理はイオン交換法を行う。</p> <p>③除染係数</p> <p>低レベル廃液 (Bq / ml) : 原液/処理液 : 1.6E+2/3.7E-4 = 4.3E+5</p> <p>低レベル廃液 (Bq / ml) : 原液/処理液 : 8.8E-1/5.5E-3 = 1.6E+2</p>
7	出 典	動燃技報 No.96 1995、

ウラン系化合物除染技術—研究開発段階

番号	項目	内 容
1	分 類	化学的除染法
2	技 術 名 称	Ag (II) 除染法
3	対象廃棄物	ウラン汚染雑固体、配管系統、等
4	技 術 概 要	硝酸銀溶液中で銀の一価イオン[Ag(II)]を陽極酸化し銀の二価イオン[Ag(II)]を連続的に生成させる。生成した[Ag(II)]と水との反応で生成する最も強酸化性の水酸基(OH)ラジカルを利用して、放射性固体廃棄物の汚染表面を酸化溶解する新しい複合除染法。
5	特 徴	除染対象物の形状に依存しないで均一に除染可能。除染対象物に付着する油脂、塗装等有機物の分解可能。系統除染や除染廃液中の銀も回収可能。二次廃棄物発生量が極めて少ない。
6	R&D 概要	<p>①試料：SUS表面にヤスリで傷つけ UO₃粉末を強制的に擦り込んだ後3N硝酸に12時間浸漬したものを模擬試料</p> <p>②除染法：最適条件下で生成した[Ag(II)]除染液の入った浸漬槽に試験片を入れスターラーで攪拌しながら除染する。</p> <p>③除染係数：DF 約 10³ 除染前平均放射能、1.6Bq / cm² 除染後平均放射能、2×10⁻³Bq / cm² 試験開始後約30分でDF=約1000に達し以降時間的変化なし。</p> <p>④海外状況：欧米でも開発中。</p>
7	出 典	<ul style="list-style-type: none"> ・デコミッショニング技法。No.20, 1999 ・Nuclear Radwaste News. Sept.28, 2000 ・Proc of Safe Waste 2000, Vol. 2, 2000

ウラン系化合物除染技術—研究開発段階

番号	項目	内 容
1	分 類	物理的除染法
2	技 術 名 称	真空アーク除染法
3	対象廃棄物	金属固体廃棄物
4	技 術 概 要	真空下汚染金属を陰極としアーク放電によって表面のウラン汚染物、皮膜等に陰極点(点状に発生する放電部)が優先的に形成される。陰極点の高エネルギー密度によって汚染部分が蒸発除去され除染が行われる。
5	特 徵	表面除染廃棄物をクリアランスレベル以下に移行できる可能性がある。除染処理速度も速く高除染が期待される。蒸発した汚染物は攪拌板及びフィルターにより回収される。
6	R&D 概要	①試料：鉄、アルミニウム、チタン、SUS304 ②除染法：模擬試料によるコールド試験、金属試料を真空チャンバー内でアーク放電（～120A）させ金属表面の蒸発剥離量測定。 ③除去速度（ $\mu\text{g}/\text{クーロン}$ ）：Fe 74、Al 81、Ti 36、SUS304 107
7	出 典	日本原子力学会「2000年秋の大会」要旨集 J5、596 p、2000年9月

ウラン系化合物除染技術一研究開発段階

番号	項目	内 容																	
1	分 類	物理的除染法																	
2	技 術 名 称	レーザ除染法																	
3	対象廃棄物	金属、非金属（コンクリート、有機材料等）表面汚染物、																	
4	技 術 概 要	表面汚染物と母材の光吸収係数及びアブレーション（表面剥離）の差を利用し汚染物のみを除去する。レーザエネルギー密度を変化させ付着物のみの除染等、除去深さの制御が可能。二次廃棄物発生量が少ない。 主要設備：YAG または CO ₂ レーザ、二次生成物回収設備																	
5	特 徴	YAG レーザは光ファイバー導光、CO ₂ レーザはミラー導光により遠隔操作可能。水中使用も可能。二次廃棄物量少。エアロブル発生。																	
6	R&D 概要	①試料：クロムメッキ膜（厚さ約 2 μ m）の除去及び UF ₆ 反応生成物付着試料。 コンクリート、プラスチック ②除染法：金属表面除染 Nd-YAG レーザ使用。 雰囲気：大気、窒素、希ガス、真空 ③ 除染剥離性能 <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>a 金属表面 Cr 膜：真空、Ar ガス雰囲気、約 5 J/cm² で照射で殆ど除去される。N₂、大気中では約 40% 除去。 UF₆ 試料：α、検出限界以下、DF > 10³</td> </tr> <tr> <td>b コンクリート表面：YAG レーザ (~ 2 KW) 試験体：床、壁、天井、隅部 レーザ出力：600W、80mm/ 分、ビーム径 13mm φ 表面剥離深さ：1 回照射約 4mm、2 回照射約 10mm、 3 回照射約 4mm</td> </tr> <tr> <td>c 塗装表面</td> <td>厚さ (μ m)</td> <td>照射エネルギー (J/cm²)</td> <td>除去体積 (mm³/S)</td> </tr> <tr> <td>エポキシ樹脂</td> <td>60~90</td> <td>2.08~4.16</td> <td>0.77~2.50</td> </tr> <tr> <td>塩化ビニール樹脂</td> <td>約 45</td> <td>2.08~4.16</td> <td>1.16~2.57</td> </tr> </table> ④完成度実績：原子力利用では基礎試験段階（国内）産業界では航空機体の自動塗装除去（米国）他、実用化段階				a 金属表面 Cr 膜：真空、Ar ガス雰囲気、約 5 J/cm ² で照射で殆ど除去される。N ₂ 、大気中では約 40% 除去。 UF ₆ 試料：α、検出限界以下、DF > 10 ³	b コンクリート表面：YAG レーザ (~ 2 KW) 試験体：床、壁、天井、隅部 レーザ出力：600W、80mm/ 分、ビーム径 13mm φ 表面剥離深さ：1 回照射約 4mm、2 回照射約 10mm、 3 回照射約 4mm	c 塗装表面	厚さ (μ m)	照射エネルギー (J/cm ²)	除去体積 (mm ³ /S)	エポキシ樹脂	60~90	2.08~4.16	0.77~2.50	塩化ビニール樹脂	約 45	2.08~4.16	1.16~2.57
a 金属表面 Cr 膜：真空、Ar ガス雰囲気、約 5 J/cm ² で照射で殆ど除去される。N ₂ 、大気中では約 40% 除去。 UF ₆ 試料：α、検出限界以下、DF > 10 ³																			
b コンクリート表面：YAG レーザ (~ 2 KW) 試験体：床、壁、天井、隅部 レーザ出力：600W、80mm/ 分、ビーム径 13mm φ 表面剥離深さ：1 回照射約 4mm、2 回照射約 10mm、 3 回照射約 4mm																			
c 塗装表面	厚さ (μ m)	照射エネルギー (J/cm ²)	除去体積 (mm ³ /S)																
エポキシ樹脂	60~90	2.08~4.16	0.77~2.50																
塩化ビニール樹脂	約 45	2.08~4.16	1.16~2.57																
7	出 典	日本原子力学会「2000 年春の年会」要旨集 G34、900 p 2000 年 3 月 同 上 「2000 年秋の大会」要旨集 J7、598 p 2000 年 9 月 デコミッショニング技報、No22. 2000 (財) デコミッショニング研究協会																	

ウラン系化合物除染技術—研究開発段階

番号	項目	内 容
1	分 類	物理化学的除染法
2	技 術 名 称	超臨界二酸化炭素法
3	対象廃棄物	ウラン廃棄物、UO ₂ 、U ₃ O ₈ 等
4	技 術 概 要	反応容器（50–60°C、100–200気圧）中で廃棄物中のウランを反応剤（硝酸-TBP錯体）と反応させる。生成したウラン-TBP錯体を超臨界状態のCO ₂ 中に溶解させ、回収容器（常温、常圧）中でCO ₂ を気化させウラン-TBP錯体を回収する技術。
5	特 徴	廃棄物中のウランを硝酸溶解して化学的に回収する従来法では除去困難で、二次廃棄物発生量が多量となる。本法はCO ₂ や反応剤の回収が容易で再利用可。二次廃棄物発生なし。ウラン除去後の廃棄物は水分、試薬を含まず処分簡単。廃棄物中ウランを1/300～1/10000まで効率よく除去可能。
6	R&D 概要	<p>①試料：標準的海砂50g(20–30メッシュ)とUO₂またはU₃O₈100～200mgを混合した試料</p> <p>②除染法：HNO₃/TBPモル比：4.5:3. 含ウラン海砂とHNO₃-TBP反応剤混合後60°C反応炉内で20MPa下のCO₂流体をSyringeポンプをつかい3.5cm³/分で流し、その中にプランジャーポンプを使用してHNO₃-TBP錯体を0.3cm³/分で注入し約20分間混合反応させる。反応槽出入口コックを閉じ、60–90分間静置後、常温常圧に戻して回収。</p> <p>③除染係数：UO₂ 350、U₃O₈ 10000、</p>
7	出 典	J・Nucl. Sci Technol. 38 (6), 461 (2001)