

JNC TJ6420 2002-004

# 廃止措置技術選定法最適化システムの構築

(核燃料サイクル開発機構契約業務報告書)

2001年3月

株式会社ペスコ

2001年3月

**廃止措置技術選定法最適化システムの構築**  
(核燃料サイクル開発機構契約業務報告書)

下吉 拓治\*

**要 旨**

核燃料サイクル開発機構人形峠環境技術センターでは、これまで実施してきた製錬、転換、濃縮という核燃料サイクルのアップストリームに係る技術開発を終了し、不要となった設備の廃止措置を段階的に進めている。設備の廃止措置で得られたデータはデータベース化し、今後、類似の核燃料施設の廃止措置に活用していくこととしているが、データベースの中から最も適切であると判断される技術を選択する手法として、ニューラルネットワーク(ANN)を適用させることについて検討を行い、その有効性を見出した。

---

本報告書は(株)ペスコが核燃料サイクル開発機構殿との契約により実施した業務の成果である。  
契約番号: 12C1282

核燃料サイクル開発機構担当部課: 人形峠環境技術センター 環境保全技術開発部 転換施設処理課  
報告者の所属: \* (株) ペスコ

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.目的 .....	2
3.ニューラルネットワークについて .....	3
3.1 ANNの理論 .....	3
3.2 ANNによる学習手順 .....	7
3.2.1 全体システム構成 .....	7
3.2.2 「学習」について .....	8
4.除染技術選定に関する基礎情報の収集 .....	9
4.1 除染実施例に関する情報収集整理 .....	9
4.1.1 文献調査結果概要 .....	9
4.1.2 サイクル機構関連情報 .....	15
4.2 除染技術選定方法の定式化 .....	16
4.2.1 技術選定における検討要因 .....	16
4.2.2 技術選定手順の検討 .....	19
5.ANNによる技術選定のモデル化 .....	31
5.1 除染技術選定モデル化 .....	31
5.2 ANNによる技術選定システムのモデル構築 .....	35
5.3 除染技術選定モデルにおけるANNの学習 .....	39
5.3.1 学習の前準備 .....	39
5.3.2 学習の結果について .....	40
6.総合評価 .....	
6.1 ANNによる「学習」結果についての総合評価 .....	43
6.2 廃止措置への人工知能技術導入についての検討 .....	46

資料-1)「除染法と適用事例－金属類の化学除染法－」

資料-2)「除染実施報告事例集」

## 1. はじめに

核燃料サイクル開発機構（以下、「サイクル機構」と記す）においては、新しい業務体制のもとに、廃止措置の技術開発を進めようとしている。その中で人形峠環境技術センターでは、これまで進めてきた濃縮に代表されるフロントエンド分野の技術開発という役目を終え、今後はこれらの既存施設の廃止措置が重要な任務となっている。軽水炉の廃止措置については世界的にも技術開発が進み、我が国においても日本原子力研究所のJ P D Rが廃止措置を終え、現在はガス炉ではあるが東海1号機の廃止措置計画も進みつつある。しかし、サイクル機構人形峠環境技術センターに代表される核燃料関連施設の廃止措置については、これから技術開発を進めていかざるを得ない分野となっている。従って、人形峠での廃止措置の実施経験は、我が国の原子力技術開発を進める上で、極めて貴重なものとなることが予想される。従って、それらの経験を今後の原子力技術開発に役立てるための手法を検討していくことも重要な課題である。

原子力施設の廃止措置は、それらの施設に放射性物質が内臓され、かつ放射能に汚染されているということを除けば、通常の産業施設の解体と基本的に異なるものではない。原子力施設における放射性汚染物質の除去は、施設の安全運転や廃止措置における安全確保を図る上で極めて重要であり、原子力発電所やその他の原子力施設が運転開始した初期の段階から様々な形の除染技術が開発され、実用化してきた。原子力施設の廃止措置では、施設解体に先だって原子炉の一次系統や核燃料施設の配管・機器等を対象として行う解体前除染、解体物の再利用・再使用を目的として徹底除染を行う解体後除染、さらに建屋・コンクリート等の表面汚染を除去する技術が実用化されている。このように、現状の除染技術は個々の基本技術としてはかなり多種多様に確立されていると考えられる。しかし、同じ原理の除染技術でも、除染対象物に対して適切に使用されたかどうかで、その効果は大きく変わるものである。従って、除染対象物によってどのような除染技術を選定していくかについて、何らかの手順を確立していく必要がある。

今年度は、原子力施設の廃止措置に係わる技術のうち、除染技術の選定をより適切な形で進めるための手順確立についてフィージビリティ研究を行った。

## 2. 目的

原子力施設の廃止措置は、除染、解体、減容、固化、処分という一連の工程を経て実施される。各工程には、様々な工法が存在しているが、対象施設の特徴に適した工法を選択していくことが必要である。工法や技術の選定に際しては、当該施設の運転経験や工法・技術に関する知識等に基づいて、総合的に判断されている。

サイクル機構では、今後様々な施設の廃止措置に取組んでいくことが予想され、そのプロセスは長期に渡るものとなると考えられる。これらの廃止措置活動で得られる知見は膨大になるものと予想され、それらを今後どのような形で蓄積し、かつ役立てていくかも重要な課題となっている。

本報告書では、今後増大していくものと予想される廃止措置活動の各工程において、どのような技術を選定したらよいか、その合理的な手法を確立することを目的とし、特に人工知能技術を利用するという観点からの検討結果についてまとめた。具体的には、廃止措置における除染技術の選定に、人工知能工学の技術を利用できないないかどうか、という観点から、本年度はフィージビリティ研究という立場でニューラルネットワーク（ANN）技術の適用可能性を検討した。即ち、各除染技術を廃止措置のある特定の場所に適用しようとする場合、適切なものなのかどうかをANNの技術手法を用いて判断させることについて、検討を行った。

実際の作業としては、まず様々な除染工事の実施例について調査を行った。その結果に基づいて各除染工法の特徴について整理を行い、またどのような観点で除染工法が選定されたのかについてまとめを行った。これをもとに、ANNを利用するための、除染技術選定のモデル化を行い、それによってANNにより技術選定を行わせるためのシステム構築を行った。

### 3. ニューラルネットワークについて

本年度は、フィージビリティ研究として、廃止措置技術のうち除染技術選定法の最適化を、ニューラルネットワーク（ANN）の技術を用いて行う手法の検討を行う。ここでは、ANNについて、その理論の概要を整理する。

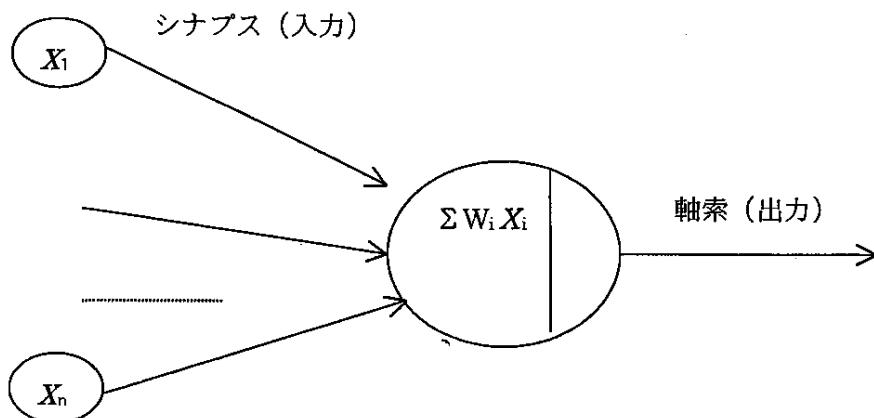
#### 3. 1 ANNの理論

ニューラルネットワーク（ANN : artificial neural network）の技術は、人間の脳細胞がどのような動き・作用を持っているかに関する研究から発展したものである。脳細胞がどのように結合しているかを想定することによっていくつかのモデル化の方法があるが、本フィージビリティ研究ではその中でも「階層型ニューラルネットワーク」と呼ばれるモデルを採用することとした。

##### 1) ニューロン

個々の脳細胞をニューロンと呼ぶが、ANNでは下図のようにモデル化する。

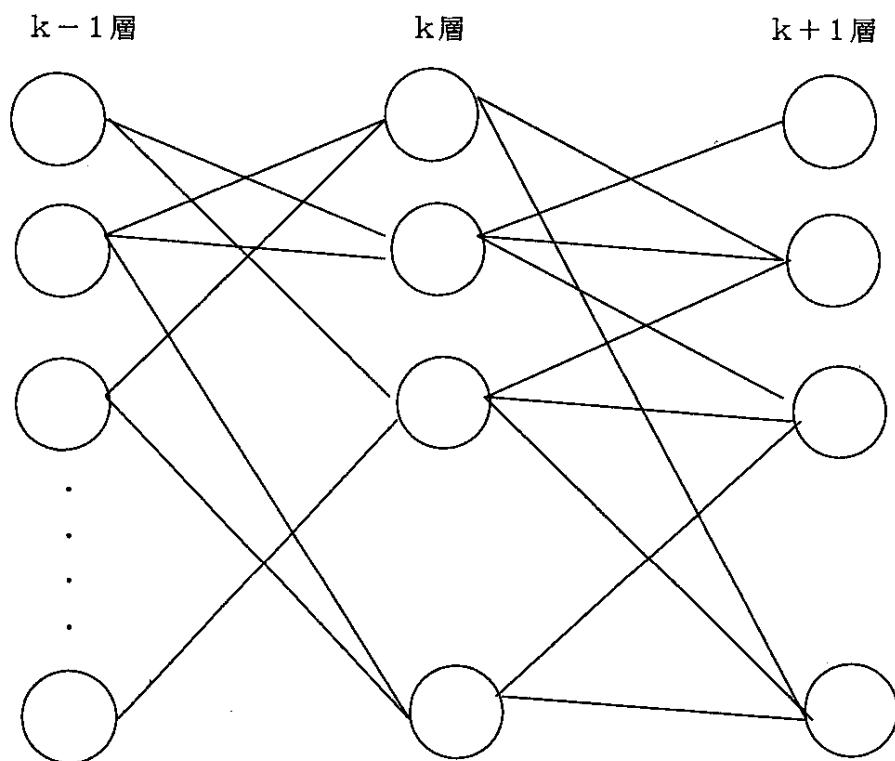
- ・細胞本体
- ・シナプス（他の細胞に結合してそれらの細胞からの信号を入力する）
- ・軸索（細胞本体からの信号を他の神経細胞へ伝えるためのもの）



各シナプスからの信号入力  $X_i$  の和が、ある一定以上になると軸索から次のニューロンへと信号が出力される。ニューロンへの各信号は、入力に際して結合荷重係数をかけた形で和を取るように数式上はモデル化されるが、この荷重係数の存在により後に示すように「学習」と呼ばれる機能を持つことになる。

## 2) ニューラルネットワーク（階層型ニューラルネットワーク）モデル

先に示したニューロンが複雑に結合したものが実際の脳細胞では実現されていると考えられており、各ニューロンにおける信号（電位や化学物質）の流れにより、人間の脳細胞活動（記憶、学習、思考などの活動）が行われているとされている。ANNでは、各ニューロンの結合の方法にいくつかのモデルがあり、本フィージビリティ研究では、それらの中でも階層型ニューラルネットワーク(Multilayer Neural Network)と呼ばれるモデルを採用する。これは、下図に示すように、ニューロンが層状に並んでおり、上下の層はシナプスで結合されているが、同じ層内のニューロンどうしは結合されていないとするモデルである。



階層型ANNでは、低層から高層へ向かって信号が伝達され、その過程で行われる信号処理により入力データから何らかの有益なデータを得るというものである。尚、同じ層内のニューロンどうしは結合されないが、上下の層の任意のニューロンと結合できるものとする。ただし、上下層の全てのニューロンとは必ずしも結合されている必要はないが、最低限、下層のニューロン1個、上層のニューロン1個と結合されている必要がある。

## 3) 階層型ANNの数式的表現

上記に示した階層型ANNを、実際にどのように処理するのか、その扱いを数式で表現する。

$$I_j^k = \sum_i W_{ij}^{k-1,k} O_i^{k-1} \quad (1)$$

$I_j^k$ : 第 k 層のニューロン j への総入力

$O_i^{k-1}$ : 第(k-1)層のニューロン i からの出力

$W_{ij}^{k-1,k}$ : 第(k-1)層のニューロン i から第 k 層のニューロン j への結合

荷重係数

ある特定のニューロンへの入力は、上記のようにその下層のニューロンの出力に結合荷重係数をかけて足し合わせたものとして定義される。この結合荷重係数に初期値を設定するが、「学習」の過程を通じて変更される。ニューロンからの出力は、総入力値による特性関数として表現され、例えば、以下のシグモイド関数がよく利用される。

$$O_j^k = f(I_j^k) = 1/[1 + \exp(-a(I_j^k - \theta_j^k))] \quad (2)$$

$\theta_j^k$ : 閾値

$a$ : 温度定数

#### 4) 階層型 ANNにおける「学習」

ANNの最大の特徴としては、より適切な「教師データ」による「学習」を通じて、その後はより正しい判断が可能になることが上げられる。「学習」という操作では、先に述べた結合荷重係数が変更されるが、その変更のロジックとしては誤差逆伝搬学習法（BP法：error back propagation）があり、このロジックが開発されたことが、ANNが注目されていることの一因ともなっている。

以下にそのロジックを示す。

$$\delta_j^M = (O_j^M - T_j) f'(I_j^M) \quad (3)$$

$M$ : 出力層におけるニューロンの個数

$f'$ : 先の出力特性関数の微分

$T_j$ : 出力層におけるニューロン j の望ましい出力（教師データ）

$O_j^M$  : 出力層のニューロン  $j$  の出力

$\delta_j^M$  : 出力層のニューロン  $j$  の誤差信号

この誤差信号を、下位の層で定義する

$$\delta_j^{k-1} = f'(I_j^{k-1}) \left( \sum_l W_{jl}^{k-1,k} \delta_l^k \right) \quad (4)$$
$$(k = M, M-1, \dots, 3)$$

上記の誤差信号を用いて、第( $k-1$ )層の結合荷重係数の修正量を以下の通りに定義する。

$$\Delta W_{ij}^{k-1,k}(t) = -\eta \delta_j^k O_i^{k-1} + \alpha \Delta W_{ij}^{k-1,k}(t-1) \quad (5)$$

$\eta$  : 学習率

$\alpha$  : 次に示す形で収束計算を行うので、その際に前回の変更量の変化を取りこみ、適切な形で収束させるための処置

上式(5)において、 $t$  は収束計算の回数を示す。式(3)、(4)、(5)を繰り返して収束計算を行うが、その収束の判定は以下の式で行う。

$$E = \sum_{j=1}^J \frac{1}{2} (O_j^M - T_j)^2 \quad (6)$$

式(6)で定義される  $E$  に対し、その値が例えば  $5 \times 10^{-5}$  未満になるまで収束計算を行うことになる。

### 3. 2 ANNによる学習手順

ANNの作動原理は先に述べた通りである。ここでは、特に「学習」という観点から、その手順について整理を行う。

#### 3.2.1 全体システム構成

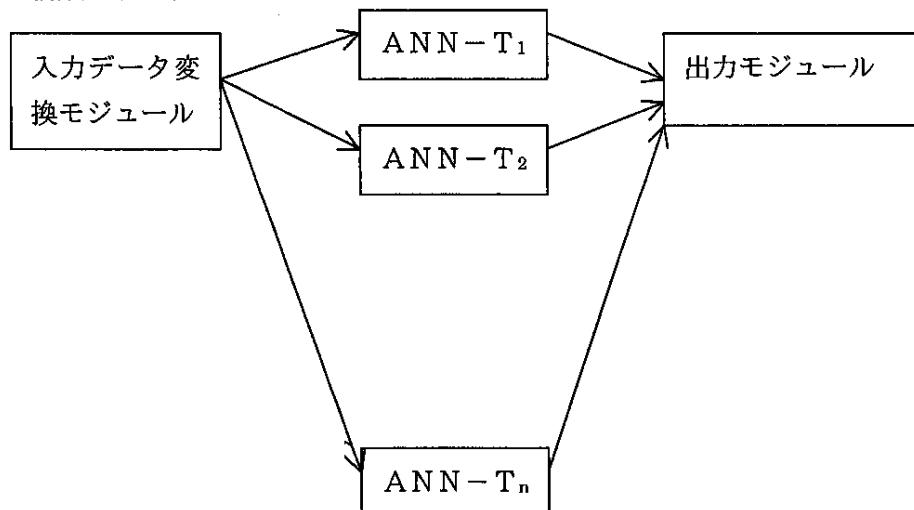
##### 1) 技術選定の最適化（技術のランク付け）

技術選定の最適化を、除染技術を適用する対象が与えられた場合に、「各技術を適用することに対する評価をランク付け」という形で実現する。即ち、除染技術を適用する対象物の条件を入力とし、当該除染技術を適用することの妥当性をランク付けという形で出力するのである。

##### 2) 技術選定のためのANNの基本構成

階層型ANNを用いて最適な技術選定を行うための基本構成としては、以下の形とする。

個々の除染技術毎にANNを構成し、除染対象物に関する条件を入力としてシステム全体を制御する構成とする。



上図において、ANN-T<sub>i</sub> が各除染技術に対する ANN を示しており、個々の技術毎に学習処理を行うこととなる。このようなモデル構成とすることにより、全体の取扱いの容易さや学習処理をより適切に実行できるものと考えられる。個々の ANN-T<sub>i</sub> におけるモデル構造としては、3層あるいは4層構造程度を考えており、出力層は1個のニューロンから構成されるものとした。

### 3.2.2 「学習」について

これまで既に「学習」という言葉を何度か使用してきたが、ここではその意味及び手順について整理する。

- ・除染技術  $T_i$  に関する ANN : ANN\_T<sub>i</sub>
- ・除染対象物を記述する入力データ : P<sub>i</sub>
- ・入力データ P<sub>i</sub> に対し、理想とする適切な出力 : L<sub>i</sub>

ANN\_T<sub>i</sub> に何らかの入力データ P<sub>i</sub> を入力すると、出力 O<sub>i</sub> が得られる。しかし、それが適切な値であるかどうかは分からぬ。そこで、理想とする適切な出力 L<sub>i</sub> (これを「教師」と呼ぶ) を用いて、ANN\_T<sub>i</sub> を訓練するわけである。

入力 P<sub>i</sub> と理想とする適切な出力 L<sub>i</sub> の組み合わせを用いて「学習」を行ったとする。その結果、別の入力 P<sub>j</sub> に対するこのシステムの出力 O<sub>j</sub> は、適切なものとなっている、とするのが ANN の基本的な考え方である。

#### i) 学習

- ・入力 P<sub>i</sub> に対して、理想とする適切な出力 T<sub>i</sub> の組み合わせ : {P<sub>i</sub>, T<sub>i</sub>} (i=1, ..., n)
- ・この組み合わせを用いて学習を行う

#### ii) 判断

- ・学習が終了した ANN\_T<sub>i</sub> に別の入力 P<sub>j</sub> を与え、その出力を O<sub>j</sub> とする
- ・この出力 O<sub>j</sub> は適切な値であると考える

上記の説明において、どのような入力と理想とする出力の組み合わせで、どれだけ学習を行えば、つぎから適切な判断ができるようになる（適切な出力が得られるようになる）かについては、全く分からぬわけである。即ち、ANN の理論は、「学習」をすれば適切な出力が得られるようになるであろう、との推測に基づいているのである。実際の学習においては、どのような入力・出力の組み合わせでどれだけ学習するかは、基本的に試行錯誤的に進める以外にないようである。この問題についての検討結果は、第 5 章で具体的に説明する。

## 4. 除染技術選定に関する基礎情報の収集

### 4.1 除染実施例に関する情報収集整理

原子力発電施設における化学除染は、原子炉一次冷却系統に付着、蓄積した放射性腐食生成物（クラッド）の除去方法として 1960 年代から種々の技術の開発と改良が行われ、系統除染、コンポーネント、機器、配管などの除染方法として使用されている。供用中除染では除染後の配管や機器の健全性が損なわれないことが必要であるが、廃止措置においては作業中の被ばく低減、解体作業の容易化、機器などの再利用、放射性廃棄物発生量の低減化等を目的として行われている。図 4.1 に廃止措置における除染概念を示した。

近年、供用中の化学除染法が廃止措置での除染方法としても重視されてきている。図 4.2 に化学除染法の代表例として CANDECON 法による除染プロセスの概念を示す。

情報収集は、原子力発電プラントの除染実績が非常に多く、また、廃止措置が活発に実施されている米国エネルギー省（DOE）を中心とした、海外情報及び国内原子力発電所での除染実施例について、文献、国際会議資料等をもとに実施した。核燃料サイクル開発機構の関連情報については、貸与された資料をもとに調査した。

#### 4.1.1 文献調査結果概要

##### (1) 海外における除染実施例概要

原子炉一次冷却系のクラッドの性状は構成材料、水質条件、運転履歴などによって異なる。BWR の構成材はステンレス鋼と炭素鋼であり、酸化雰囲気にある。PWR ではインコネルとステンレス鋼で、水素添加による還元雰囲気に置かれている。そのため、クラッドの性状は BWR と PWR とで大きく異なるので、除染方法も異なった技術が適用されている。

BWR の系統除染では、還元溶解が、PWR では酸化・還元溶解による 2 段階除染法が主に用いられている。表 4.1 と 4.2 に、原子炉の除染法として実用されている代表的な化学除染の除染剤組成、除染条件、特徴などを示す。また、各化学除染法の実施例を表 4.3、資料 1 と 2 に示した。

##### 1) 解体前除染

最近の原子炉施設の廃止措置においては、解体前の除染が重要視されている。特に、系統除染技術は、供用中除染に最も類似した技術である。供用中除染の最重要項目は、除染後の構成材料の健全性確保であるのに対し、廃止措置で求められる要件は以下の通りであ

る。

- a)解体作業時の作業被ばく低減。特に、系統除染作業時の内部及び外部被ばくの低減。
- b)解体作業の容易化と工期短縮。
- c)機器・設備等の再利用。
- d)廃棄物発生量の低減
- e)コスト低減

廃止措置での除染は、供用中除染と異なり構成材料の健全性を考えなくても良いが、濃厚液除染法で母材を腐食させることが必ずしも除染係数DF値を大きくするとは限らない。隙間や粒界に入った核種の除去は難しく、薬品の無駄と放射化母材の腐食増大を伴い、廃棄物量が増えることにつながる。また、濃厚液除染による汚染物質の再付着や廃液処理が困難という別の問題も発生する。そのため最近は、希薄液使用の多い供用中除染法が廃止措置除染法としても適用されている。

①米国では全系統化学除染が行われたのは、PWRについて1995年にIndian Point 2号機(975MWe, PWR)で、CADEREMとAP法を組み合わせ、5サイクルの繰返し除染を行ったのが最初である。その結果、平均DF値7.8、除去放射能は148TBq(3906Ci)で、約37kgの鉄酸化物を除去し、除染廃棄物としてイオン交換樹脂50m<sup>3</sup>程度で済んでいる。被ばく低減量も3500人・レムを達成している。供用中系統除染法は単体機器やサブシステムの除染技術とともに、廃止措置における除染技術としても適用されている。

一方、BWRでの全系統除染は、Brunswick原子力発電所(847MWe, BWR)において、燃料を除外してLOMI法による除染が実施された。廃棄物低減化にはELOMIX法(電気化学的LOMIイオン交換)技術を使用し、全系統除染が実施可能であることが示された。燃料を含めた全系統除染は今後の課題とされている。単体機器やサブシステムの除染は以前からCANDECON、CADEREM、LOMI法など多くの除染法が実施され、現在では一般的な保守作業の一つとして行われている。

②フランスではPWRが主流であり、除染法としてはフランス電力庁(EDF)と企業が共同開発したソフト化学除染法としてEMMA法が適用されている。主として、冷却ポンプインターナル(RCP)、CVCS熱交換器、炉冷却系配管等、単体機器やサブシステム等の除染に適用されている(表4.3参照)。

③ドイツではシーメンス・KWUの開発したCORD法及びCORD-UV法による化学除染が実績をつんでいる。全系統除染としては、1991年にBR-3(11MWe, PWR)で初めて実

施され、以降、VAK(16MWe, BWR)、MZFR(55MWe, PHWR)で CORD 法による化学除染が実施されている。CORD-UV 法による全系統除染としては、スウェーデンの Oskersham 原子力発電所(465MWe, BWR)、フィンランドの Loviisa 原子力発電所(465MWe, PWR)で実績がある。CORD 法や CORD-UV 法は系統除染のほか、蒸気発生器や RCP 等の単体機器やサブシステムの除染にも多くの実績を残し、供用中除染から廃止措置除染法としても多くの実績をつんでいる（表 4.3 参照）。表 4.4 に代表的な供用中除染法を示した。

最近の原子炉施設の解体前除染技術についてみると、特に、廃止措置が活発に進められている米国では、米国電力研究所 EPRI が開発した DFD (Decontamination for Decommissioning) 法、ドイツのシーメンス・KWU が開発した CORD-UV 法及び従来の除染技術を組み合わせた NP/CITROX/NP/LOMI 法など、供用中除染で使用されている技術の適用が増えている。それらの特徴と適用例を、表 4.5、表 4.6 に示す。これらの除染法は系統除染のほか、機器、コンポーネント類をクリアランスレベル以下まで除染し、再利用や再使用への適用実績も多くなっている。表 4.7 に廃止措置における種々の化学除染法について、系統除染及び機器・コンポーネント等の解体物除染に対する適用性を示した。

## 2)解体後除染

放射化部材を除き、解体前除染で十分除染できなかった設備機器に対し、次の目的で除染が行われる。

- a)汚染物による被ばく低減を図り、処理処分を容易化する
- b)放射性廃棄物量の低減化
- c)解体物の再利用と再使用

やや強力な化学除染、電解除染、機械除染、それらの組み合わせ除染等で、図 4.1 に示すような方法で徹底除染が行われる。徹底除染の可否は、除染コスト、廃棄物処理コスト、解体物の有効利用価値など、総合的判断によってなされる。

海外での解体後除染の実績と方法を、表 4.3 と資料-1 に示す。化学的除染法として、解体物の再利用や再使用に実績のある主な除染法は、一部の解体前除染法を除き、電解法と化学浸漬法である。

米国では Dresden 1 号機(210MWe, BWR)の制御棒駆動装置(CRD)80 個について、リン酸液による電解除染法を行っている。旧コードレックス社では同じくリン酸液を使用した

電解槽で BWR トーラスの炭素鋼 70t を除染してスクラップ市場に放出した。残留放射能の測定は、サーベイメータあるいは計測チャンバーで行っている。

ドイツでは Gundremingen A 号機(250MWe, BWR)の解体金属約 2000t を規制除外レベルまで除染してスクラップ市場に放出した。除染法は 40% リン酸溶液を使用した電解除染法である。

スウェーデンでは、化学浸漬法で Agesta 炉(12MWe, PHWR)の蒸気発生器を規制除外レベル以下に除染してスクラップ市場へ放出した。除染法は従来のセリウム(IV)系による REDOX 法と同じであるが、電解再生の替わりにオゾンを使用して 3 倍から 4 倍のセリウムに酸化再生している。廃棄物発生量も少なく、低コストになると報告されている。この除染法は、SODP(strong ozone decontamination process)法と呼ばれ、系統除染にも適用されている。

海外では、電解再生による硝酸・セリウム(IV)系あるいは硫酸・セリウム(IV)系による REDOX 法の発電炉への適用例は見られない。一方、解体前除染法として利用されている CORD 法、DFD 法などは解体後除染法としても適用され、解体廃棄物を規制除外レベル以下に除染してスクラップ市場へ放出している。

## (2) 国内における除染事例概要

### 1) 解体前除染

国内では、原子炉施設の廃止措置実績は少ない。JPDR、原子力船「むつ」の解役が唯一の実施例である。しかし、JRR-3 の改造工事、商業炉の SG 交換、炉心シュラウド交換など単体機器、サブシステム等の除染は実績がある。今後、日本原子力発電の東海 1 号機(166MWe, GCR)、核燃料サイクル開発機構の新型転換原型炉ふげん(165MWe, ATR)の廃止措置が予定されており、技術の蓄積が期待されている。

一方、供用中の除染については、海外の技術に加え、国内で開発された除染技術を実用炉に適用した実績がある（表 4.3、資料・1）。我が国では燃料を除く炉心を含めた原子炉冷却系全系統の化学除染実施例は、1989 年と 1991 年に「ふげん」発電所の定期検査時に A、B の 2 ループについて実施したのが最初である。除染法は国内で開発された KD203（希薄液法）が利用された。

商業用発電炉での系統除染は、浜岡原子力発電所 1 号機(540MWe, BWR)で、1993 年の定期検査時に実施された例が我が国初めての BWR 系統化学除染である。燃料はすべて炉心から取り出され、圧力容器は除染系統から隔離して除染が行われた。同発電所 3 号機

(1100MWe, BWR)についても、1号機での経験を活かし系統除染を実施している。除染法はいづれも CORD-UV 法が利用された。福島第一発電所 3号機(784MWe, BWR)では、1997 年に世界ではじめて圧力容器内炉心シュラウド、ジェットポンプ等の炉内構造物の取り替えが行われ、圧力容器を含めた原子炉一次系統の全系統化学除染が実施された。これは、燃料を除く BWR 全系統除染としては初めてであった。除染法は CORD-UV 法が適用され、DF 値 43 (炉底部) を達成している。その後、1998 年の 2 号機、1999 年の 5 号機の系統除染でも同じ除染法が採用されている。日本原子力発電、敦賀 1号機(357MWe, BWR)では、燃料を除いて、原子炉及び再循環系を含めた全系統除染が 1999 年に実施されている。除染法は HOP 法が適用され、DF 値 22 (炉底部) を得ている。

PWR については、線量当量率が比較的低いこともあり、国内での系統除染の実施例はまだない。

機器・コンポーネント等の除染では、BWR、PWR 双方とも原子炉一次系統、廃棄物処理系等の配管や機器などの交換作業時に化学除染法、機械除染法など種々の方法が適用され実績がつまれている。化学除染法の適用実績についてみると、BWR では原子炉一次系から取り外した単品や、一次系から隔離して除染可能な機器・配管等での実績がある。特に適用実績の多い系統として、原子炉再循環系、炉水浄化系、残留熱除去系などのポンプや熱交換器がある。除染法としては、クリデコン法、TED-40 法、犠牲電極による還元溶解法などが採用されている。

実施例としては、敦賀 1号機の再循環ポンプ・インターナルを CORD 法で除染して DF 値 80、作業被ばく量を約 1/100、廃棄物発生量約 1/10 以下を達成している。東海 2号機(1100MWe, BWR)の浄化系、再生熱交換器の除染では、HOP 法による化学除染を 1999 年に実施している。福島第一原子力発電所では、水浄化系熱交換器の取り替え時の除染で TED-40 法、クリデコン法、CORD 法等、種々の化学除染法を試験している。CORD 法は他の除染法と比較して除染効果は同程度であるが、廃棄物発生量や作業被ばく量が 1/3 に低減できることから、有効な除染法と評価されている。

一方、PWR でも BWR と同様に、機器・配管等の除染が実施されている。1988 年以降、一次冷却材温度検出方式の変更に伴い、RTD バイパス配管撤去工事に化学除染が適用された。除染法は、PWR クラッド除染に通常適用される、酸化・還元の 2段ステップ法を採用し、DF 値約 10 を得ている。RCP インターナルの除染では、従来の濃厚液法による AP-AC 法から、1995 年以降、国産の希薄液化学除染 AP-KD212 法を適用し、大飯原子力発電所 3号機(1180MWe, PWR)で実施された。3 サイクルの化学除染により DF 値 10、除染時間 38 時間、水洗時間 2 時間で、濃厚液法に比べ除染時間を 3 日短縮、また、廃棄

物発生量も 1/10 に低減できたとされる。希薄液化学除染 KD212 法は、高浜 1、2 号機 (826MWe, PWR) の原子炉容器上蓋交換工事の除染にも適用され、その有効性が評価されている。

## 2)解体後除染

国内では、商用原子力発電炉の解体後除染の実績はない。しかし、JPDR の解体実施試験や技術開発において、電解法や化学浸漬法による実績はある。

一般に電解法は、配管、板材等の単純形状の除染に適用されており、熱交換器などの複雑形状物には強力化学除染法が適用される。強力化学除染法としては、強力な酸化剤であるセリウム(IV)を用いる Redox 法による除染法が適用されている。電解法については、JPDR の配管、板材等の単純形状の解体物を、電解液として 80% リン酸溶液及び 10% 硫酸溶液を使用して水浄化系 SUS 材、主蒸気系とコアスプレー系の炭素鋼について試験が行われた。電解法は徹底除染法として海外では実績があるが、細孔や隙間のある複雑形状物や溶接部では除染が難しいとされる。また、炭素鋼表面の鏽は前処理で除去しておく必要がある（資料-1）。サイクル機構では、ウラン使用履歴のある物品資材の電解法による除染で成果をあげている。

化学浸漬法については、JPDR 一次系統の部分除染に硫酸 - セリウム(IV)系による Redox 法を適用し、DF 値 300~1200、平均 900 を得ている（資料-1）。（財）原子力発電技術機構では、BWR と PWR から採取した実資料を使用し、硫酸・セリウム(IV)系での Redox 法について技術開発を行い、DF 値約  $10^4$  を得ている。

#### 4.1.2 サイクル機構関連情報

核燃料施設は原子炉施設と異なり、ウランやプルトニウムなどの核燃料物質による汚染が主体である。但し、再処理施設や照射済燃料を取り扱う施設では核分裂生成物が汚染源として加わる。汚染物は機器や配管などに沈着、堆積したり、固着したものが多い。従って、機械的除染法や水洗浄による除染法が有効な場合が多い（資料-2）。

ウラン転換技術開発施設では、天然ウランからの湿式転換工程の汚染は放射線量も低く、汚染物質の飛散防止を図りながら機械的除染法と水洗による方法が有効と考えられる。一方、再処理工場からの回収ウランを使用した乾式転換工程では、系統内の UF<sub>6</sub> の除染にはフッ化ハロゲンガス（IF<sub>7</sub>, ClF<sub>3</sub> 等）を用いた系統除染が必要と考えられる。臨界管理上の問題はないと考えられる。ウラン転換技術開発施設での除染作業データ、関係資料等、特に化学除染に関するデータはなく参考にできなかった。

## 4. 2 除染技術選定方法の定式化

### 4.2.1 技術選定における検討要因

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。除染コストは、作業計画、許認可、特許等の技術費、除染設備費、ユーティリティ費、運搬費、イオン交換樹脂費、試薬費、廃棄物処理費、除染作業費等の要素から構成される。除染技術の選定にあたっては、これらのコストを含めた総合的評価が必要である。しかし、文献調査からは技術的実施例がほとんどであり、コストという観点から評価した結果については情報が公開されていない。

最近、米国エネルギー省DOEは、廃止措置の産業化を図るため、所轄する研究施設の廃止措置を民間企業と共同プロジェクトの形で展開し、コスト評価を含めた実績と成果をもとに、商業的に利用可能な廃止措置技術を体系化し、評価を加えたかたちでデータベースの構築を進めている。廃止措置が低コスト効率的に実施できるよう、それらの成果を廃止措置工程で必要とする各テーマについて最適技術評価マトリックス( PAM: Preferred Alternatives Matrix)として公開している。これにより、無駄な技術開発費用を削減し、的を絞った形で廃止措置技術の選定あるいは開発が実施できることを目指している。表 4-8 に廃止措置PAMの例として、シートメタル、鋼構造物表面、ステンレス鋼ライナーの除染技術の最適技術評価マトリックスの事例を示す。コンクリート除染技術、切断技術等の廃止措置技術についても同様の形式で評価結果を公開している。さらに個々の技術の内容、コスト、実績評価報告書も、DOE のホームページ上で公開されている (<http://www.em.doe.gov/dd/>)。各技術は表 4-9 に示すような技術ランキング基準に基づいて評価されている。

DOEは、所轄する原子力施設の廃止措置を計画的に実施し、実績をもとに廃止措置技術の実用化の程度やコスト等の観点から定量的評価を行い、加えてそれらの各技術の使用経験に関するデータベースの情報をもとに各技術のランク付けを行っている。実績に基づく技術選定は、費用、廃棄物、安全性などを含めて技術の総合的評価が可能である。しかし、技術的観点から除染技術の選定を考える場合は、除染効率、発生廃棄物量、公害、作業リスクを含む安全性などが選定評価の対象になるとも考えられる。

以上の状況を踏まえ、原子炉施設の金属類を対象に化学除染に関する事例調査をもとに、除染技術の選定理由、根拠を分析して技術選定基準について検討を行った。

### (1)除染対象物の形状、材質、汚染状況、運転履歴、除染後の取扱い方

除染対象物が系統配管、塔槽類、ポンプ、バルブ等のうちどの解体物かにより、幾何学的形状、大きさ、材質等が異なってくる。それぞれの対象物に適した除染法が採用される（表4・3、表4・7参照）。また、除染後の対象物を、再利用、再使用するのかどうか、廃棄物として処分するのかどうか、そのときの処分方法をどうするのかどうかにより、除染方法が選択されることになる。

### (2)汚染物質の性状、形態、組成、核種、線量

PWRとBWRでは構成材料、一次冷却系の雰囲気が異なり、その結果生成される腐食生成物（クラッド）の性状も異なるので、それに適した除染方法も変わってくる。表4・10にPWRとBWRの一次冷却系配管クラッドの特徴を示した。一般に、BWRの一次冷却系構成材はステンレス鋼と炭素鋼であり、PWRはインコネルとステンレス鋼である。また、一次冷却系雰囲気は、BWRは酸化雰囲気で、PWRでは水素添加による還元雰囲気となっている。BWRのクラッドは、主として鉄酸化物であり、Feはほとんどが3価の状態にある。そのため、2価に還元して溶解しやすくする還元溶解法による除染法が適用される。

一方、PWRでは鉄の他にニッケル及びクロムを多量に含み、還元雰囲気中にある。クロム酸化物中のCrは3価の状態にあって難溶性のためクラッド中のCr含有率が15%以上の場合は6価に酸化して溶解除去した後、還元溶解を行う二段階除染法が主に用いられる。それらの除染法は、表4・1、表4・2に示した。また、核種や線量は除染法選択のほか作業被ばく量を評価する上からも必要である。

その他、無機酸（塩酸、リン酸、硝酸、硫酸等）、及び有機酸（亜硫酸、クエン酸、ギ酸、キレート剤（EDTA等））などの酸そのもので、金属酸化物を酸溶解する方法もある。

### (3)除染係数 - DF値

廃止措置における除染では、供用期間中除染と異なり除染後の母材の健全性については、再使用や再利用を除いて配慮する必要性は少なくなる。しかし、時間をかけて母材を腐食させることが、必ずしもDF値を大きくできることにならないことに注意すべきである。隙間や粒界に入り込んだ核種は除去困難であり、いたずらに腐食量をふやしたり除染試薬の無駄と廃棄物の増大、作業時間の無駄を招くだけである。また、DF値は元の線量率が高ければ大きい値が得られるが、小さい場合は大きいDF値を得ることは至難の技となる。除染による到達期待値を設定し、作業現場での作業許容時間を決めるのが得策となる。

### (4)除染作業時間

除染時間及び廃液処理時間を含めた除染作業時間が短いことは、工期短縮、作業被ばく低減の上から有利な除染法となる。各除染法の除染時間の概要は表 4・1、表 4・2 に示した。

#### (5)被ばく低減量

除染作業では作業現場に除染対象物以外の放射線源が存在する場合には、除染による DF 値に比例して作業者の受ける被ばく線量が低減するとは限らない。除染による被ばく線量低減量は次のように定義されている。

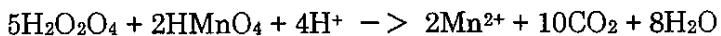
$$[\text{被ばく低減量}] = [(\text{除染しない場合に予想される被ばく量}) - (\text{除染した場合に予想される被ばく量})] - (\text{除染及び廃棄物処理に伴う被ばく量}) \quad [\text{人} \cdot \text{Sv}]$$

除染法を評価する上では、現場での実施例を蓄積し、それによって評価された除染法の適用が増大することになる。費用対効果比は次のように定義されている。

$$\text{費用対効果比} = \frac{\text{被ばく低減に要する費用}}{\text{被ばく低減量}} \quad [\text{円}/\text{人} \cdot \text{Sv}]$$

#### (6)除染廃液量と処理処分

除染技術開発当初の 1950 年代後半から 1970 年代前半頃までは、除染剤濃度 1w/o を超える濃厚溶液による AP-AC、AP-Citrox、TURCO-DECON などの除染法が適用された。しかし、除染後の洗浄廃液も含め大量の除染廃液の発生とその処理が困難で、固体廃棄物発生量も多いことから、1970 年代後半から現在の CANDECON に代表される希薄液法が適用されるようになった。近年、BWR の除染法として適用実績が増えている CORD 法は過マンガン酸(HMnO<sub>4</sub>)を用いる酸化除染工程と、亜硫酸(H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)を用いる還元工程を繰り返すマルチサイクル除染プロセスで、国内でも実機に適用されている。除染終了後の廃液処理工程では、残留する除染剤の過マンガン酸は亜硫酸により次の反応で CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、Mn<sup>2+</sup>イオンに分解し、酸性条件下でイオン交換樹脂で吸着させ固体廃棄物として処分する。



また、亜硫酸を紫外線により炭酸ガスと水に分解し、除染廃棄物量を減容できる方法もある（従来の方法の 1/10 以下に低減できる）。最近は、除染剤として廃液処理が容易な有機酸を適用したり、キレート剤の分解法として紫外線の他、湿式空気酸化、オゾン分解などの分解技術も検討されている。

#### (7)経済性

除染の費用は作業評価、許認可、特許等の技術費、除染設備費、ユーティリティ費、運搬費、イオン交換樹脂費、試薬費、放射性廃物処理費、除染作業費（人工数）などから構成される。

#### (8)安全性

作業者の安全確保、廃液、公害等環境影響のない除染技術である必要がある。

### 4.2.2 技術選定手順の検討

収集した除染事例に基づき、除染技術選定の基準としては、除染対象物の特性、汚染物質の性状と形態、除染係数、除染時間、被ばく低減量等の除染効率、除染廃棄物と処理処分、経済性、安全性などの要素をもとに総合的に選定することが必要となる。

技術選定は、以下の手順で進められることになる。

- ①除染の目的を明確にする。
- ②付着汚染物質の組成、量の調査、分析。
- ③除染対象物と周辺環境の調査（利用できる設備・機器類を明らかにする）。
- ④廃液、廃棄物対策の検討。
- ⑤実施費用の総合的評価。

除染技術選定の基本プロセスを図4-3に示した。

表4.1 代表的な還元溶解化学除染法の成分組成・除染条件・特徴

除染法 名 称	国 名 開発機関	濃希別	除染剤配合組成		除染条件			DF	特 徵
			組 成	濃 度	温度	時間	pH		
NS-1	アメリカ Dow Chemical (DOE)	濃	キレート剤 有機酸 インヒビタ 界面活性剤	7.0 wt %	120°C	100～ 200 h	3.7	50～ 100	濃厚溶液の代表的除染剤, DFが大, 低腐食性, 除染廃液量が多い
NS-1 dilute	アメリカ Dow Chemical IT	希	キレート剤 有機酸 インヒビタ 界面活性剤	0.7 wt %	120°C	24 h		20～ 50	希釈しても還元溶解能力は十分保持しているため, 液の再生はせず, 逆浸透膜処理で除染液を脱塩浄化する
Can-Decon (LND-101)	カナダ AECL LNL	希	有機酸(クエン酸) (シュウ酸) キレート剤	0.1 wt %	90～ 130°C	24 h	2.5	3～ 10	希薄溶液の代表的除染法, 除染液循環系内に再生用と脱塩浄化用樹脂塔を用いる
CANDEREM	カナダ LNL	希	有機酸(クエン酸) キレート剤	0.1 wt %	80～ 130°C				上記と同じ, 材料の腐食性を改善して Can-Decon よりマイルド
LOMI	イギリス CEGB BNL (EPRI)	希	バナジウム(II価) ピコリン酸 ギ酸 Na(pH調整)	12 mM 70 mM 80 mM 70 mM	80°C	2～ 6 h	4.8	～5	除染液循環系内で再生用と脱塩浄化用樹脂塔を用いる
Citrox	アメリカ	濃	シュウ酸 クエン酸ジアンモニウム 硝酸第二鉄 ジエチルチオ尿素	25 g/l 50 g/l 2 g/l 1 g/l	85～ 95°C	1～ 4 h		3～ 200	インヒビタは炭素鋼の腐食を抑制している
クリデコン KD-203	日本 栗田エンジニアリング	希	キレート剤 添加剤	0.1 wt %	80～ 120°C	24～ 48 h	5	3～ 10	除染剤を樹脂により再生, および最終脱塩浄化を行う
エバラデコン TED-40	日本 東芝 荏原工業洗浄	濃	キレート剤 有機酸 インヒビタ	～3 wt %	90～ 95°C	24 h		10～ 50	BWR の1次系コンポネントの除染実績多い 廃液は逆浸透濃縮・プラスチック固化処理可能
クリデコン KD-201	日本 栗田エンジニアリング	濃	キレート剤 添加剤	2～ 5 wt %	80～ 120°C	6～ 24 h	6	2～ 15	
犠牲電極電解 還元除染法	日本 日立製作所	濃	(炭素鋼製犠牲電極) + クリデコン KD-201	～3 wt %	90°C	16 h		23～ 65	酸溶液中で炭素鋼を腐食させる犠牲電極(+)に除染物を(-)側に接触させて母材腐食を抑え酸化皮膜の還元溶解を促進する

表4. 2 代表的な酸化・還元希薄溶液除染法の成分組成・除染条件・特徴

除染法 名 称	国 名 開発機関	step	除染剤配合組成		除染条件			DF	特 徴		
			組 成	濃 度	温度	時間	pH				
POD	イギリス CEGB BNL	phase 1	過マンガン酸カリウム 硝 酸	1.0 g/l 0.25 g/l	90°C	24 h	2.5	20~ 50	NPは酸性で酸化処理を行うのでAPのようなすすぎ洗浄が不要。各phaseごとに除染剤を添加注入していく。phase-3aと3bはいずれも可、phase-3aは再生せず、脱塩净化のみ、phase-3bは、除去剤の再生と終わりに樹脂脱塩净化を行う		
		phase 2	シュウ酸 硝 酸	1.4 g/l 1.5 g/l		0.5~ 1 h					
		phase 3-a	シュウ酸 クエン酸 水酸化ナトリウム	0.45 g/l 0.96 g/l 0.42 g/l	80°C	5~ 7 h	2.5				
		phase 3-b	シュウ酸 クエン酸	0.225 g/l 0.48 g/l	80°C	5~ 7 h	2.5				
NP- LOMI	イギリス CEGB BNL	step-1 (NP)	過マンガン酸カリウム 硝 酸	1.0 g/l 0.25 g/l	90°C	24 h	2.5	5~ 30	step の間ですすぎ不要 順次添加するだけ		
		step-2 (LOMI)	バナジウム (II) ピコリン酸 ギ 酸 水酸化ナトリウム	12 mM 70 mM 80 mM 70 mM	80°C	2~ 6 h	4.8				
PNS- Citrox	アメリカ PNS	step-1 (Citrox)	シュウ酸 クエン酸ジアンモニウム	0.25 %	90~ 95°C	8~ 12 h		10~ 30	カチオン樹脂による除染液再生、混床樹脂で脱塩净化 AP 溶液を先に注入酸化溶解統いて Remconx を注入酸化処理、除染終了後混床樹脂で脱塩净化		
		step-2 (AP)	水酸化ナトリウム 過マンガン酸カリウム	0.1 %	95°C	10 h					
			Remconx	0.1 %	95°C						
		step-3	Citrox	0.25 %	95°C	6~ 24 h					
CORD	ドイツ Siemens KWU	step-1	(酸化工程) 過マンガン酸	100~ 400 ppm	80~ 90°C	2~ 3 h	2.1 ~2.4	15~ 36	陰染中は陽イオン交換樹脂で溶出金属イオンの捕集を継続 step-1からstep-4までを3~5サイクル繰り返す 2次廃棄物量は僅少		
		step-2	(酸化剤還元分解工程) シュウ酸	シュウ酸を添加、残留過マンガン酸を炭酸ガスと水に分解、さらに過剰に添加、還元除染濃度に合わせる							
		step-3	(還元除汚工程) シュウ酸	0.2~ 0.3 wt %	80~ 95°C	3~ 6 h	2.2 ~2.7				
		step-4	(除染液分解処理工程)	除染液は紫外線照射分解装置を通して シュウ酸を炭酸ガスと水に分解する							
EMMA	フランス EDF	step-1	(酸化工程) 過マンガン酸カリウム 硫 酸 硝 酸	1.0 g/l 0.05 g/l 0.13 g/l	80°C	1回目 2回目 5 h	2.5	10~ 60	step-1と2の酸化と還元除染のサイクルを2サイクル繰り返す、各ステップでは超音波を併用する 廃液処理は、プロキュレーションによる沈殿分離処理、またはイオン交換樹脂による浄化		
		step-2	(還元除染工程) アスコルビン酸 クエン酸 シュウ酸	0.5~1g/l 0.5 g/l ~0.5 g/l	80°C	1回目 2回目 3 h	2.8 ~3.0				

表4.3 除染法と適用事例

除染法		実施プラント
系統除染		
解体前除染	1)LOMI法	SGHWR(蒸気発生重水炉、100MWe)一次冷却系除染(1980年以降) Quad Cities . 1(BWR, 833MWe) RWCS, RCSの除染 Quad Cities . 1(BWR, 833MWe) RWCS, RCSの除染 Dresden . 2 (BWR, 834MWe) RCS除染 Monticello (BWR, 569MWe) RCS除染 Quad Cities . 1(BWR-3型, 833MWe)一次系一括全体除染 Brunswick (BWR-4型, 847MWe)一次系一括全体除染 La Salle(BWR-5型, 1130MWe)一次系一括全体除染 SGHWR 高クロムクラッド用 NP/LOMI法実施(1984年以降) Surry(PWR, 840MWe)蒸気発生器チャネルヘッド(1982年) Monticello(BWR, 569MWe)主循環系配管2系統及び浄化系
	2)CANDECON	Dresden . 3 (BWR, 832MWe) JRR- 3(重水研究炉, 1MWt)一次冷却重水系統
	3)CANDEREM	米国 BWR, PWR の系統除染(1980~1984年) Monticello (WR, 569MWe) RHR, RWCS 除染
	4)CANDEREM+AP	Indian Point . 2(PWR, 975MWe)一次系統除染
	5)P O D 法	米国 PWR の部分系統除染(高クロムクラッドの除染) 40基以上の発電プラントで実施(1986~1992年)
	6)PNS-Citrox	Vermont Yankee(BWR, 540MWe)再循環系配管
	7)NS-1(濃厚液法)	Dresden . 1 (BWR, 510MWe)一次系全系統一括除染 Peach Bottom . 2 及び . 3(BWR, 1100MWe)再熱交換器(1977年) JNTR(研究炉) OWL-1 ループ系統除染(1978年) 東電福島第一発電所3号機(BWR, 784MWe)給水スーパーチャージャ除染(1980年)
	8)NS-1(希薄液法)	Pilgrim . 1(BWR, 696MWe) RCU 系統及び循環ループ除染(1984年)
	9)KURIDECON-203 (希薄液法)	ふげん発電所(ATR, 165MWe)冷却系A, B 2ループを系統除染(1989年、1991年) 敷賀1号機(BWR, 3567MWe)浄化系配管と浄化系ポンプ
	10)EMMA	EDF原子力保修センターでのRCP15基除染(1989年以降) Gravelines . 3(PWR, 951MWe) CVCS 熱交換器除染(1994年) Bugeys . 5(PWR, 917MWe) 熱交換器接触配管(1993) Dampierre (PWR, 937MWe)冷却系配管除染
	11)CORD (全系統除染)	BR-3 (PWR, 11MWe)一次系全系統除染 蒸気発生器1基、RCP 2基除染(1991年) VAK (BWR, 16MWe)一次系全系統除染(1993年) MZFR (PHWR, 55MWe)一次系全系統除染(1995年)
	12)CORD-UV (全系統除染)	Oskarshamn . 1(BWR, 465MWe)一次系全系統除染(1994年) Loviisa (PWR, 510MWe)一次系全系統除染(1994年) 浜岡1号機(BWR, 540MWe)再循環系統除染(1993年) 浜岡3号機(BWR, 1100MWe)再循環ポンプ出入口弁、配管系統(1996年) 福島第一3号機 圧力容器内シュラウド、ジェットポンプ等の炉内構造物交換作業(1997年)、世界初の炉内構造物交換作業
	13)DFD	Main Yankee炉(PWR, 900MWe)一次系統除染(RPV, SGを除く) Big Rock Point(BWR, 750MWe)一次系統除染
	14)HOP	敷賀1号機(BWR, 357MWe)一次系統及び再循環系統(1999年)
	15)ODP/SODP	Agesta (PHWR, 12MWe) 系統除染、ODP(軟除染用)、SODP(強除染用) コンポーネント機器等除染
解体後除染	1)CORD-UV	東海2号機(BWR, 1100MWe) 処理系再生熱交換器(1997年) 敷賀1号機(BWR, 357MWe) 再循環ポンプ(PLR)内部構造物交換、ポンプは再使用 敷賀2号機(PWR, 1160MWe) RCP インターナル(1997年)、CVCS 再生熱交換器(1999年)
	2)MOPAC	Dampierre(PWR, 937MWe) RCP インターナル除染
解体後除染	3)NP-KD201(濃厚液法)	福島第一 CUN 再生熱交換器
	4)NP-KD212	関西電力9発電炉(PWR) 一次冷却材温度測定バイパス配管、RCP インターナル除染
	5)犠牲電極還元法	福島第一(BWR, 784MWe) 再循環ポンプ(PLR)
	6)TED-40	国内BWR一次系ポンプ
	7)ストリッパブルコーティング	原子力施設全般における付着汚染除去にう使用
	8)DFD	Trojan (PWR, 1178MWe) 処理系熱交換器、グリーンホールドタンク3基
	9)HOP	東海2号機(BWR, 1100MWe) 処理系再生熱交換器(1999年)
	1)電解(研磨)法	Dresden . 1(BWR, 210MWe)制御棒駆動装置(CRD) Gundremingen Unit A (BWR, 250MWe) 約 2000t の解体金属を無拘束レベルまで除染 米国コードレックス社、BWRトーラスの炭素鋼 70t、再使用及び市場へ放出 動燃東海事業所、ウラン使用資材 JPDR(BWR, 12MWe)配管、板材等の単純形状物
	2)化学浸漬法 REDOX SODP	国内NUPECが、バルブ、ポンプ、熱交換器等複雑形状物で試験 JPDR(BWR, 12MWe) 一次系部分除染 Agesta(PHWR, 12MWe) 蒸気発生器

表4.4 代表的な供用中除染法

除染方法	Can-decon Can-derem	LOM I	CORD	HOP*
組成	クエン酸 (シュウ酸) EDTA	ギ酸バクム(Ⅰ) ピコリン酸 苛性ソーダ	過マンガン酸 シュウ酸	過マンガン酸塩 シュウ酸 ヒドラジン
使用濃度(%)	0.1~0.2	0.2~0.3	0.2	0.2
除染温度(°C)	105~125	80~90	90	90
除染時間(h)	17~75	3~10	酸化 2~3 還元 3~6	酸化 2~3 還元 3~6
酸化処理	APまたはNP	APまたはNP	酸化工程を含む	酸化工程を含むマルチステップ
作用機構	酸溶解:有機酸による還元溶解 強いキレート化作用	V(Ⅰ)による強い還元溶解 キレート化作用 溶存酸素を嫌うので短時間で 処理する必要あり	4段階プロセス ①過マンガン酸で酸化 ②シュウ酸によるMn化合物を 分解・中和 ③シュウ酸による酸溶解、還元 ④浄化	酸溶解:有機酸による還元溶解 ①酸化 ②還元 ③還元剤分解 ④浄化
特徴	カチオン性方式 Can-derem(シュウ酸を 除く) Remede(Fcイオン添加)	ELOMIX(電気化学的再生)	酸化処理不要化 溶解、再生方式(除染) ④浄化	③還元剤分解 ④浄化 低腐食性(pH2.5) 還元剤の触媒分解
改良	炭素捕獲インヒビター			

\*HOP法はHydrazine Oxalic acid and Potassium Permanganateの略

この他PNS-Citrox、POD、EMMAなど

表4.5 廃止措置のための最近の化学除染

除染法	NP/CITROX/NP/LOMI法	DFD法	CORD UV法
原理(特徴)	4工程を組合せた除染法	Fe系酸化物、母材をHB <sub>4</sub> で溶解し、(KMnO <sub>4</sub> )でCr系酸化物を溶解することで高いDFを得る。	Cr系酸化膜の酸化溶解(HMnO <sub>4</sub> )、Fe系酸化皮膜の選元溶解(シュウ酸)により高いDFが得られる。
除染プロセス	NP(通マンガン酸カリ) ↓ CITROX(クエン酸とシュウ酸) ↓ NP ↓ LOMI (半酸、バナジウム、ヒコリン酸等)	希薄HBF <sub>4</sub> (~80°C) ↓ 凈化*/HBF <sub>4</sub> 再生 ↓ <b>過マンガン酸カリ添加</b> ↓ <b>シュウ酸添加</b> ↓ <b>浄化*</b> ↓ イオン交換(混床) ↓ ドレン	シュウ酸/浄化* ↓ 過酸化水素添加(UV)**/浄化* ↓ <b>過マンガ酸添加</b> ↓ <b>シュウ酸添加</b> ↓ <b>過酸化水素添加/浄化*(UV)**</b> ↓ イオン交換(混床) ↓ ドレン
適用例	ヤンキーロー(PWR)	- ピックロックポイント(BWR) - メインヤンキー(PWR)	- コネチカットヤンキー(PWR) - ヴェルガッセン(BWR) - MZFR(重水炉: PHWR)

\*カチオン樹脂による浄化 \*\*UV: 紫外線照射によるシュウ酸分解

表4.6 最近の化学除染法と主冷却系統および機器コンポーネント除染結果

施設名	除染方法	対象物	除染結果				備考
			DF	DRF	除去量(Ci)	回収レジン(m <sup>3</sup> )	
ヤンキーロー	NP/CITROX/NP/LOMI	一次系(大型機器撤去後実施)	5	-	30	-	コスト\$1.2M
トロージャン	DFD	浄化系熱交換器	66	33	1.3	0.54	
		クリーン・ホールドタンク(3基)	-	3.6	0.5	1.35	
メインヤンキー	DFD	一次系(RPV、SGを除く)	31	15	100	15.0	
ピックロックポイント	DFD	一次系	27	10	420	15.7	コスト\$1.5M
コネチカットヤンキー	HP/CORD UV	一次系	15.9	10	129	12.6	

表4.7 廃止措置における金属化学除染法の適用性

除染法	系統除染	解体物除染	除染法	系統除染	解体物除染
化学除染 (酸化溶解)			電気化学除染 磷酸液 硝酸液 硝酸液 - 電解研磨 硫酸ナトリウム		○ ○ ○ ○
ODP/SODP	○	○	ELDECON 法		○
Ce/H <sub>2</sub> S <sub>0</sub> 4 液		○	亜酸液		○
Ce/HN <sub>0</sub> 3 液		○	クエン酸液		○
(酸化還元溶解)			硫酸液		○
APCE/NPOX	○	○	その他電解質溶液		○
TURCO	○	○			○
CORD	○	○			○
CANDEREM		○			○
CANDECON					○
CONAP		○			○
AP/NP+LOMI(PWR 用)	○				
EMMA	○				
LOMI(BWR 用)	○				
リン酸液系		○			
泡沫法	○				
(除染試薬)					
硝酸		○			
硝酸+弗酸	○	○			
硝酸/弗化ナトリウム	○	○			
塩酸	○	○			
DECONA		○			

注) 上表のうち○印を付けたものが適用可

表4.8 除染技術PAMの一例

		Floors				Walls/Ceilings			
		Large Area		Small Area		Large Area		Small Area	
		1/32"	<1/32"	1/32"	<1/32"	1/32"	<1/32"	1/32"	<1/32"
<b>Chemical Extraction</b>									
<b>Caustic Treatment (Detergents)</b> <sup>a,b</sup>		⊗	●	⊗	●	⊗	●	⊗	●
<b>Chemical Extraction<sup>c</sup></b>		⊗	●	⊗	○	⊗	○	⊗	○
<b>Organic Acids<sup>d</sup></b>		⊗	●	⊗	○	⊗	○	⊗	○
<b>Strong Mineral Acids<sup>e</sup></b>		⊗	●	⊗	○	⊗	○	⊗	○
<b>Physical Methods</b>									
<b>Automated Grinding</b>		⊗	●	⊗	●	⊗	●	⊗	●
<b>Hand Grinding/Honing<sup>f</sup></b>		⊗	●	⊗	●	⊗	●	⊗	●
<b>Thermal</b>									
<b>Smelt Purification<sup>g</sup></b>		⊗	○	⊗	○	⊗	○	⊗	○
<b>Vacuuming/Blasting</b>									
<b>Centrifuge Cryogenic CO<sub>2</sub> Pellet Blasting<sup>h</sup></b>		⊗	●	⊗	●	⊗	●	⊗	●
<b>Grit Blasting<sup>i</sup></b>		⊗	●	⊗	●	⊗	●	⊗	●
<b>Hydroblasting<sup>j</sup></b>		⊗	●	⊗	●	⊗	●	⊗	●
<b>Ice Blasting</b>		⊗	●	⊗	●	⊗	●	⊗	●
<b>Shot Blasting<sup>k,l</sup></b>		⊗	●	⊗	●	⊗	●	⊗	●
<b>Ultra-high Pressure Water<sup>m</sup></b>		⊗	●	⊗	●	⊗	●	⊗	●

a detergents

b requires neutralization

c e.g., TechXtract

d well established for decontamination of stainless steel

e e.g., HCl, HNO<sub>3</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>; HNO<sub>3</sub> is traditionally used to remove uranium

f labor intensive

g economically best to do as part of recycled product production rather than just for pure cleanup

h centrifuge modification achieves higher pellet velocities for removal of fixed contamination

i water injection (air slurry blasting) and vacuum shrouds used to reduce airborne generation of conventional grit blasting; variety of different media available (e.g., sand, alumina, glass beads, soda, etc.)

j operation at < 10,000 psi

k metal shot recovered magnetically in a vacuum shroud

l e.g., Blastrac

m operation at > 10,000 psi

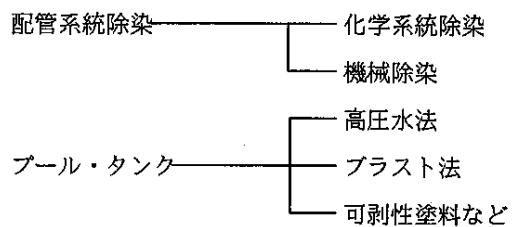
表4.9 廃止措置PAMの技術ランキング基準

Rank	Title	Criteria	
●	Preferred alternative	Technology is commercially available in this application. Lowest cost, best performance, and low risk.	Best
○	Probable alternative	Technology is commercially available in this application. Low cost, good performance, and low risk.	
○	Potential alternative	Technology is commercially available in this application. Acceptable performance, but medium cost and/or medium risk.	Cost Risk Performance
○	Possible alternative	Technology is commercially available. High cost or high risk (e.g., not proven in this application).	
○	Unlikely	Technology is commercially available. Limited performance or high cost or high risk.	
✗	Not applicable		Worst

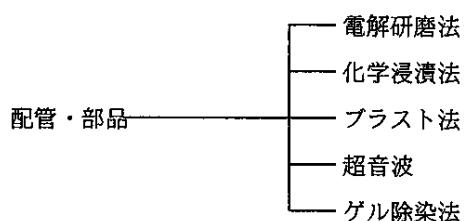
表4.10 BWR及びPWRの一次冷却系とクラッドの特徴

炉形		BWR	PWR
1次冷却系の特徴	炉水の液性	酸化性	還元性
	構成材料の接水面積比率 (燃料棒を含む)	ステンレス鋼 38~42 % 炭素鋼 16~20 % ジルカロイ 40~44 % ニッケル基合金 1 %以下	ステンレス鋼 4~6 % ジルカロイ 25~28 % ニッケル基合金 65~70 % その他の合金 1 %以下
クラッド(腐食生成物)	外層	$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (主成分) Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (主成分) NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
	内層	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (主成分) $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> Fe <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>
	化学組成比	Fe 80~90 % Ni 7~10 % Cr 1~10 %	Fe 20~40 % Ni 25~60 % Cr 15~45 %

1)解体前除染（従事者の被ばく低減）



2)解体後除染（鋼鋼材の再利用、放射性廃棄物の低減）



3)建屋除染（放射線管理区域指定解除、放射性コンクリート廃棄物の低減）

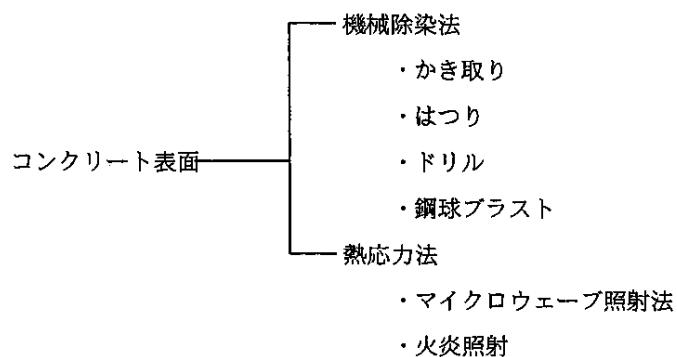


図4. 1 廃止措置における除染法の区分

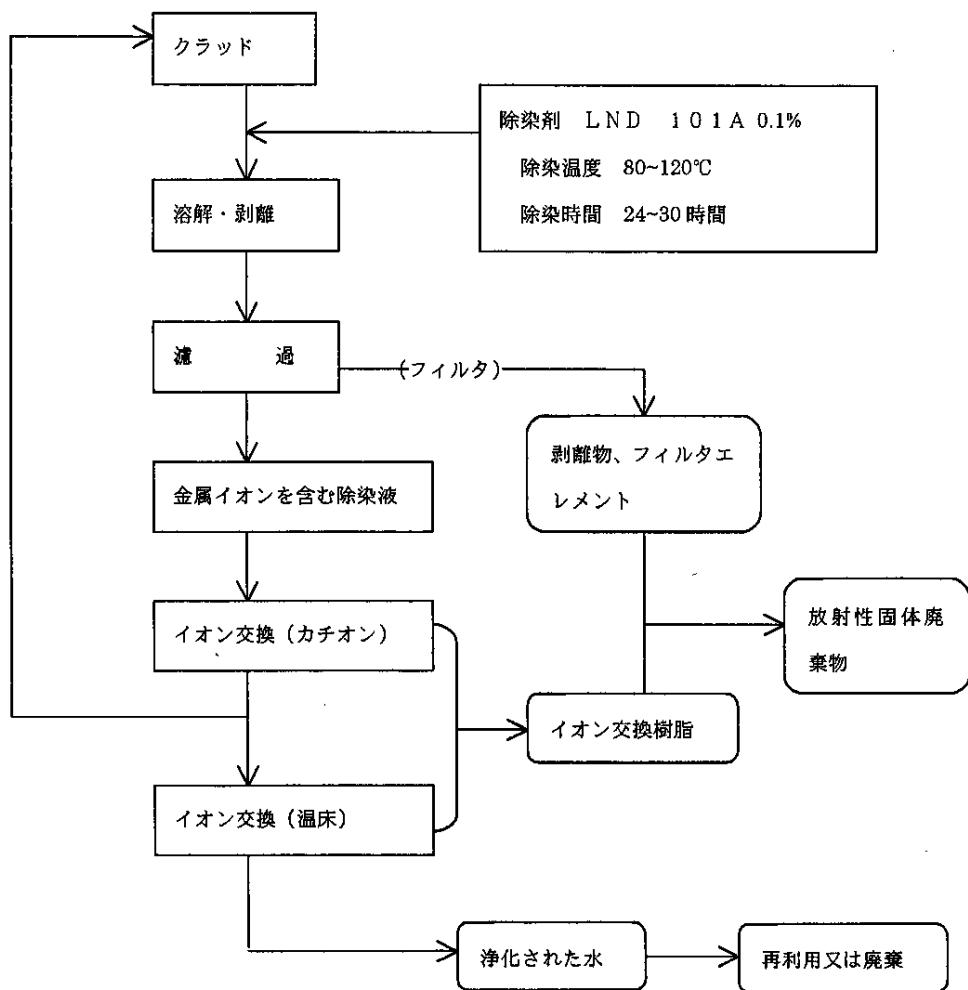


図4.2 CANDECON法による系統除染概念

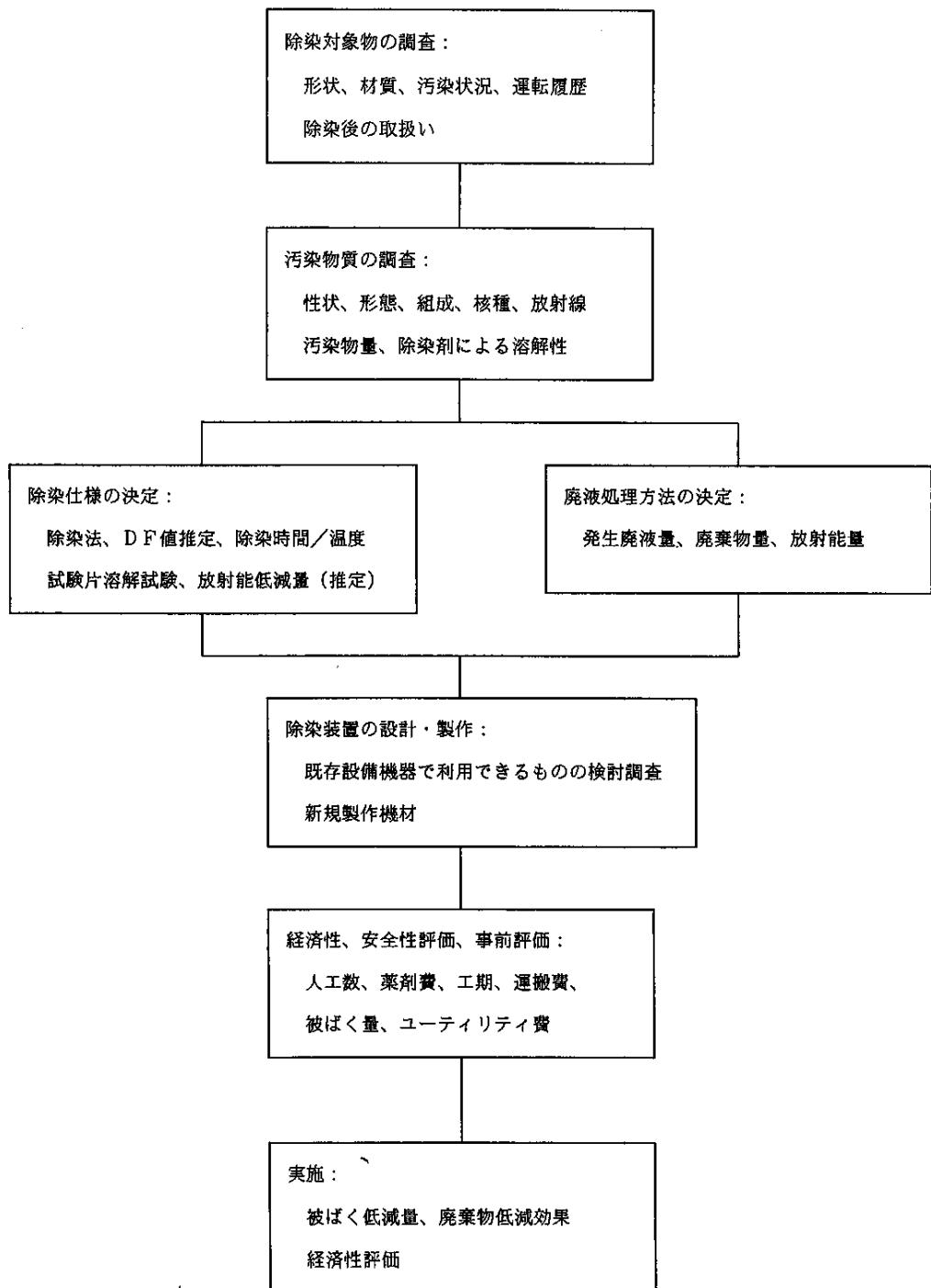


図 4.3 除染技術選定基本プロセス

## 5. ANNによる技術選定のモデル化

### 5. 1 除染技術選定のモデル化

人工ニューラルネットワーク（ANN）を用い、除染技術選定の最適化システムを構築するにあたって、まず除染技術選定のモデル化を行う。

#### (1)除染技術選定パラメータ

ANNの入力パラメータの決定に際しては、除染技術を適用しようとする状況を可能な限り適切に表現できるものを検討する必要がある。ここで注意しなければならないのは、除染技術そのものの特徴を示すパラメータを入力するのではないということである。即ち、除染する対象物の状況を記述するものをANNの入力パラメータとするのであり、各除染技術の特性を示すパラメータは、「学習」の過程を通じてANNの中に組み込まれるべきものである。

- ・除染技術を特徴付けるパラメータ
- ・除染技術を適用する対象物を記述するパラメータ

従って、除染技術選定のためのANNを構築するに際して、まず、除染技術を適用する対象物の状況を記述する情報を、ANN入力パラメータとして選定する必要がある。そこで、どれだけのパラメータがあれば、対象物の状況を正確に表現できるかが問題となる。ただし、完全に記述することは実質的には不可能であり、また、ANNの特性を考慮するとそれは必要ないことでもある。とは言っても、入力情報が不足していると「学習」によってもANNを満足のいくものに訓練していくことができない。

#### (2)除染対象物のモデル化

ある特定の除染技術を適用する対象物の状況が、以下のパラメータによって十分に記述されるものと仮定する。

- ・対象物幾何形状
- ・付着物性状（物理的性状）
- ・付着物の化学的性状（皮膜の化学的組成）
- ・目標とする除染レベル

##### ①対象物幾何形状

このパラメータは、どのようなものを除染しようとしているかを示すもので、以下の3種類のケースがあるとする。

対象物の種類	パラメータ値
配管系	1
タンク・槽類	2
コンポーネント	3

ある特定の除染技術が、その効果は別としても、どのような対象物にでも利用できるわけではない。例えば、原子炉一次系の除染方法として評価が確立され、その後の除染技術開発において影響を与えた CANDECON は、基本的には配管系を想定している。この手法をタンク・槽類、コンポーネントの除染に適用できない、というわけではないのであろうが、適性はかなり落ちてくることは明らかである。

### ②付着物性状（物理的性状）

軽水炉配管の場合は、強固な皮膜（クラッド）を形成していることが多々あり、その場合は化学的な手法による除染が適用されることになる。それに対し、実際に除染を行う場合その第一段階では、高圧ジェット水などによりルースな付着物を除去する処理を行うことが多い（機械除染）。即ち、そのような場合は、最初からいきなり化学的手法を用いることは適切ではないのである。従って、この付着物の性状は、除染技術選定において重要な役割を果たす。

付着物性状	パラメータ値
強固性が強い	1
ルースである	2

### ③付着物の化学的性状

BWR の一次系は酸化雰囲気中であり、配管を除染する場合は、基本的には還元剤で溶解処理を行う。これに対し PWR の場合は、水素による還元雰囲気中であり、酸化剤で溶解処理を行う。また、配管系の母材の成分との関係で、BWR の場合はクラッドの主成分は Fe、Ni の酸化物、PWR の場合は Cr 含有率が高い Fe、Ni、Cr の酸化物が主となり、その結果、除染で用いる試薬に課せられる用件がかなり異なってくる。即ち、Cr を多く含むクラッドの場合は、酸化剤による前処理で Cr を酸化溶解する必要がある。ただし、個々のプラントによって状況は異なり、BWR の場合でも Cr を多く含むクラッドを構成している場合があるとの報告もある。どちらにしても、クラッドが Cr を多く含むかどうかにより前処理が異なってくるので、特定の除染技術に対する評価は、クラッドの化学組成によってことなってくる。文献によると、クラッド中の Cr が 12% 以下の場合は還元剤のみで、これに対し 15% 以上になると酸化剤の前処理が必要とされ

ている。ここでは、還元処理が必要なもの、酸化処理が必要ものの2つを両極としてパラメータを設定する。

付着物化学的性状	パラメータ値
還元処理が必要 Fe	1
酸化処理が必要 Cr	2

#### ④目標とする除染レベル

除染の目的によって、どの程度除染する必要があるか異なってくる。また、除染技術によっても、どの程度まで除染できるのかがほぼ決まつてくる。例えば、原子炉の一次系除染で利用される CANDECON では、DF 値は 10 以下である。これは、供用期間中の一次系に何らかの損傷・腐食をもたらすものであつてはならない、という条件が課せられているからである。一方、廃止措置の場合は、そのような制限はなく、かなり強力な除染方法を用いることもできる。しかし、廃止措置の場合は一気に除染してしまうのではなく、何段階かに分けて除染を行うことがあり、原子炉一次系の除染の目的としては、とりあえず放射線のレベルを落とし、その後の切断・解体作業を容易にするという場合もある。従って、DF 値が 10 以下でも十分に役目を果たすのである。これに対し、切断・解体後に除染する場合は、金属を再利用することなどを目指すこともあり、場合によっては除染の目標レベルを高くする必要もある。除染レベルの程度を高くすることは、その一方で 2 次廃棄物を増やすことになるので、除染レベルの設定については十分な検討が必要である。

目標とする DF 値	パラメータ値
10 以下	1
10~20	2
20 以上	3

上記のパラメータは、便宜的に整数表示したが、②と③については、その中間的な場合も想定され、値としては例えば「1.5」などをとることも考えられる。

#### (3)除染技術の評価

ある特定の除染技術を、上述した除染対象物に適用しようとする場合を想定する。当該対象物にその除染技術を適用することに対し、その妥当性を評価してランク付けすることを目指す。そのような評価付けを行うことは、除染技術の特徴や対象物の状況、そして除染の目的を総合的に判断してなされるものである。言わば「工学的な判断」が入るわけであるが、その判断基準は与えられた情況とそれを判断する専門家の能力に依存することにな

る。

専門家によるいくつかの評価事例に基づいて、それらを「教師」としてANNの「学習」を行い、専門家と同じような評価付けが可能なようにすることを目指すのである。評価付け（ランク付け）をどの程度細かくするかは重要な問題である。ANNの適用事例として、ある証券会社の財務データに基づいて、5段階にランク付けするシステムの事例もある（高いランク付けから「AAA」、「AA」、「A」、「B」、「BB」の5段階）。それと同様なことを目標とするのであるが、今回は与えられた除染対象物に対するある特定の除染技術の適性を、フィージビリティ研究という位置付けから、3段階にランク付けできるようにANNを構築することを目的とする。

ランク付け	内 容
1	適する
2	不可能ではないが妥当ではない（諸条件を考慮して検討が必要）
3	不適

以下に、先の除染対象物を記述するための4種類のパラメータを定義したが、それらのパラメータ値とランク付けの事例を下記に示す。尚、下記のランク付け評価事例は、原子炉一次冷却系の除染に用いられる CANDECON を想定している。

CANDECONに対するランク付け例

対象物記述パラメータ	ケース 1	ケース 2	ケース 3
1)対象物幾何条件	1	3	1
2)付着物物理的性状	1	1	2
3)付着物化学的性状	1	1	1
4)除染レベル	1	1	2
ランク付け	1	3	2

上表のランク付けについては色々と議論が出てくるところであるが、フィージビリティ研究として、このようにランク付けできる、として議論を進めることとする。

## 5. 2 ANNによる技術選定システムのモデル構築

ANNにはいくつかのタイプがあり、目的に従ってANNの基本構成を決める必要がある。ここでは、4つのパラメータを入力し、それに対して出力が1つの階層型のANNを採用する。

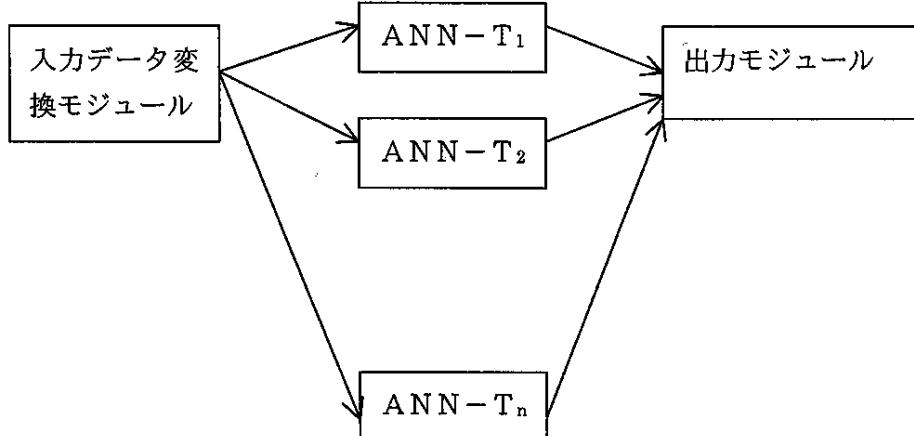
### (1)技術選定システムの全体構成

#### ①全体構成概要

- ・各除染技術毎にANNモデルを構築する
- ・ただし、各除染技術ANNにおいて、入力層の構造は可能な限り同一とする
- ・出力層のニューロン数を1とし、3段階程度にランク付けする

#### ②モジュール構成（将来目指す全体構成）

除染技術 $T_i$ のANN : ANN- $T_i$



注) 本システムで扱う全ての除染技術をひとまとめにして、大きなANNとして組上げることも可能ではあるが、上記のようなモジュール構成とすることで以下のような利点が考えられる。

- a)システム全体の取扱が容易である。
- b)各除染技術毎に「学習」を行うことになり、収束性等の観点からより適切な処理を行うことが可能である。
- c)必要に応じてモジュール化された除染技術ANNを追加・削除することも可能である。

### (2)個々のANNの構成

- ①入力層：4パラメータ（先の4つの対象物記述パラメータ）
- ②出力層：1点（ランク付け）
- ③中間層：1層あるいは2層（理論的な説明はできないが、結果的に中間層として2層

を採用した)

④ニューロン数：入力層及び出力層における要素数は問題の定義により必然的に決まるものであるが、中間層における要素数（ニューロンの個数）の決定法については、必ずしも理論的な根拠があるわけではない。ただし、中間層がなければ解けない問題があることは説明されている。入力層4要素に対し、最終的に中間層を8要素とした構成が、学習の成果を一番適切なものにすることができた。

⑤特性関数：階層型ニューラルネットワークの事例としては、テキスト・文献等ではシグモイド関数を用いた理論の説明がなされることが多い。これは、そもそも脳細胞のニューロンをモデル化する際に、出力が入力の階段関数に近いものであるということから、微分可能関数であるという特性を利用して採用されたものである。実際のANN工学の分野では、必ずしもシグモイド関数に限定せずにいくつかのタイプの関数を特性関数として利用する技術が開発されてきている。今回ANNの構築に際して導入したパッケージソフトでは、シグモイド関数の他に線形関数、ハイパボリックタンジェントが利用できるようになっており、後に述べるように、最終的に利用したものはハイパボリックタンジェントと線形関数の組み合わせである。これは、適切に「学習」を行うことができるものを試行錯誤的に試してみた結果である。

$$\cdot \text{シグモイド関数} : f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda x}}$$

$$\cdot \text{ハイパボリックタンジェント} : f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

$$\cdot \text{線形関数} : f(x) = \sum n_i x_i$$

上記のうち、  
1)入力層と第一中間層を結ぶ特性関数：ハイパボリックタンジェント  
2)中間層と出力層を結ぶ特性関数：線形関数  
とした構成が最も適切に学習を実施できた。

### (3)構成上の問題点について

さきほども述べたように、ANNの構成において、入力層と出力層は必然的にその構成が決まってくる。中間層に関しては、層の数や各中間層を構成するニューロンの個数については、それらが必要ということ意外、それらの規模（個数）を決定する理論的な手順はわかつていない。また、特性関数についても同様である。

今回の作業では、「学習」過程における試行錯誤により、中間層を2層、中間層のニューロンの個数を8個、そして特性関数としてハイパボリックタンジェントと線形関数の組み合

わせがもっとも良いことが判明した。別の組み合わせでよりうまくいく可能性もあるかも知れないが、これらの個数の決定が、ANNを構築していく上での今後の課題である。

#### (4)導入したANNパッケージについて

今回のフィージビリティ研究の目的から、ANN構築用パッケージを導入した。C言語等を用いてANNを開発することも可能ではあるが、本年度の予算及び作業時間の範囲という観点から、市販のANNパッケージを導入した。どのようなパッケージが市販されているかについて事前調査を行った結果、以下のパッケージを導入した。

・販売会社：サイバネットシステム株式会社

・商品名："Neural Network Toolbox"

"MATLAB for Math & Visualization"

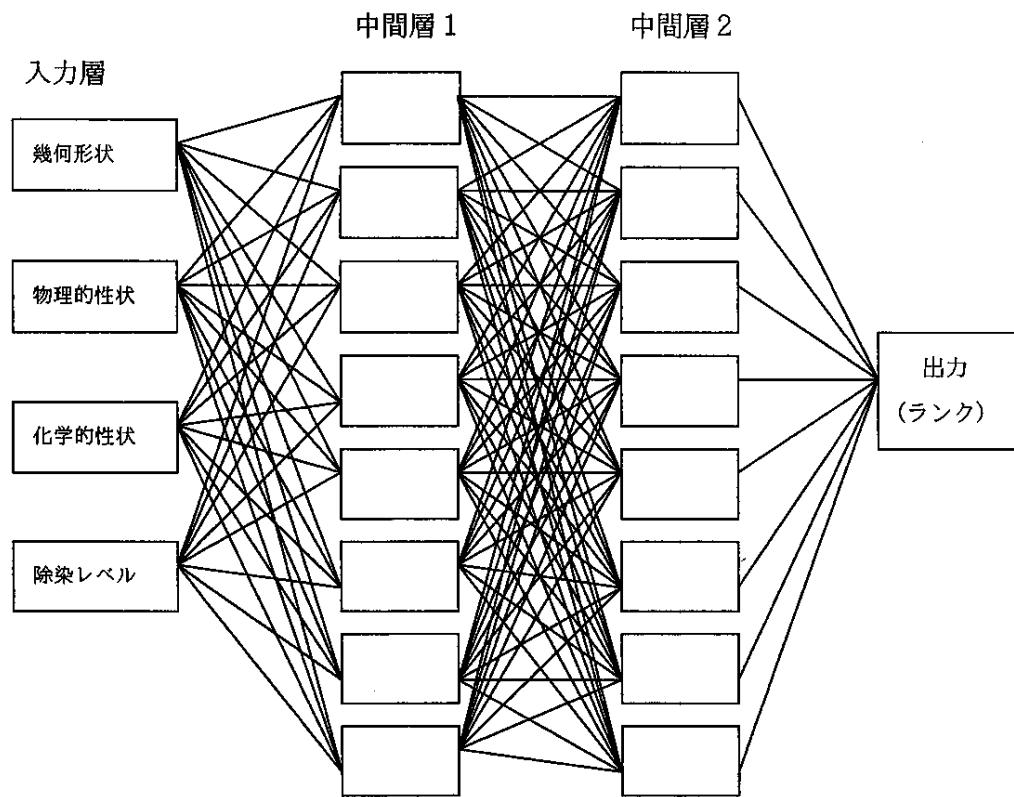
上記のうち、ニューラルネットは数値解析パッケージ MATLAB のアプリケーションとして開発されたものである。従って、上記2本のパッケージを導入する必要がある。

・選定理由：

- ①階層型ANNモデルを導入する予定であり、階層、各階層におけるニューロン数について実用上は制限がないに等しい（マシンの性能に依存）。
- ②モデルによって様々な伝達関数（特性関数）を利用可能であり、そのオープンシステムアーキテクチャによりカスタマイズが可能である。
- ③そのベースになっている MATLAB により、前処理や後処理等の付随するデータ処理を同じ環境下で行うことが可能である。また、今年度は ANN による最適化手法を開発するが、この分野で見込みのある Fuzzy 技術についてもこの MATLAB をベースにして構築が可能であるなど、技術選定法最適化システムとしての今後の発展性が高い。
- ④完成したシステムを C 言語に変換する方法もあり、サイクル機構内での使用に際して移植性が高い。

本パッケージでは、ANNの構築はコマンド入力あるいは構築を容易にするツールボックスとよばれるシステムも組み込まれており、試行錯誤的にANNを構築するのに最も適したパッケージとなっている。しかも、階層の数、ニューロンの数に実質的に制限がないに等しいため、可能性のあるANN構成について検討する際に自由度が高いものである。

(5)除染技術選定ANNの模式図



上図において、入力層の各要素、出力層の要素（ランク付け）にはそれぞれ意味があるが、中間層については、中間層そのものを含め、意義付けはないものとされているようである。結果的に、「良い教師（事例）」に基づいて適切な出力を出せるように「学習」を行うことができればよいのである。

## 5. 3 除染技術選定モデルにおけるANNの学習

前節で述べたANN除染技術選定モデルを用い、実際に適切な「教師」を想定して実際に学習を行った結果について述べる。尚、より適切な形で「学習」の効果が得られるように、中間層の構成を変えながら、試行錯誤的に「学習」を行った。

### 5.3.1 学習の前準備

#### (1)最終的に採用したANNの構成

中間層の構成を変えながら「学習」の効果を調べた。どのように学習を進めたかについては次節で述べるが、その結果最も適切と思われる中間層の構成は、以下の通りであった。

- ①層の数：2層
- ②各中間層における要素（ニューロン）の数：8個
- ③特性関数：
  - 入力層から第一中間層へ（ハイパボリックタンジェント）
  - 第一中間層から第二中間層へ（ハイパボリックタンジェント）
  - 第二中間層から出力層へ（線形関数）

上記の他には、層の数を1層にした場合、中間層の要素数を3～10個の範囲で変化させた場合、そして特性関数としてANNでよく用いられるシグモイド関数にした場合などを試行した。その結果、上記の組合せが最も適切と判断した。

#### (2)適切なランク付け事例－「教師」

ANNで学習を行わせる場合、入力と適切な出力（「教師」）についての数組が必要である。何組必要かは明確な理論はなく、試行錯誤的に進める必要がある。今回はフィージビリティ研究という位置付けもあり、仮想的に「入力」と適切な「出力」の組み合わせをつくり、それらによって、どのように「学習」を実施できるかどうかについて試してみた。基本的には、第5.1節で例示した入力と出力の事例を用いる。想定している除染技術は、軽水炉一次冷却系の系統除染技術として開発されたCANDECONである。まず、各入力パラメータとその値の範囲を以下に示す（第5.1節参照）。

入力パラメータ	値の範囲
1)対象物幾何条件	1～3
2)付着物物理的性状	1～2
3)付着物化学的性状	1～2
4)除染目的レベル	1～3

上表に基づいて、「学習」に用いる、仮想的な適切な出力（ランク付け）を以下に表形式で示す。

入力パラメータ	事例 1	事例 2	事例 3	事例 4	事例 5	事例 6
1)対象物幾何条件	1	3	1	1	1	3
2)付着物物理的性状	1	1	2	1	1	2
3)付着物化学的性状	1	1	1	2	1	2
4)除染目的レベル	1	1	1	1	3	3
出力（ランク付け）	1	3	2	2	3	3

### (3) ANNパッケージの「学習」処理上の特徴について

本システム構築にあたっては、先に述べたように、パッケージ化されたANNシステムを導入した。このパッケージは、「学習」に関しても、最新の処理ルーチンが組み込まれており、学習過程で必要となる収束計算がより適切に行われるよう、様々な計算手法を利用できるようになっている。ANNを特徴付ける「学習」の代表的な処理手法である、誤差逆伝搬学習法（第3.1節参照）についても、その変形手法でより効率的に処理できる手法として、Levenberg・Marquardt Back-propagation（LM法）があり、今回はその手法を用いた。また、「学習」する際に、入力と適切な出力（教師）の組合せについても、個々に「学習」処理を行うのではなく、収束計算の段階で以下の形で処理を行っている。

- ①個々の事例（入力と出力の組合せ）毎に学習処理を行い、その結果である特性関数における係数の修正データを別の形でとておく。
- ②個々の事例に基づく学習処理が終了した段階で、それぞれの係数修正データの平均をとり、それによって実際に係数の修正を行う。
- ③再度①からの繰り返し収束計算を行う。

即ち、入力と出力の組合せデータを一括処理することで、特定の事例における極端な修正を避けるような処理を行っている。尚、学習処理で修正の対象となる特性関数における係数やバイアスの初期値は、-1～+1の乱数を発生させる方法が採用されている。

#### 5.3.2 学習の結果について

##### (1) 「学習」の実施

前節で示した事例1～6を用いて学習を行った。収束計算7回で収束したが、学習を行うための手法をかえると、2000回収束計算を実施しても収束しないこともある。先に述べたLM法では収束計算7回程度で収まったが、この方法は計算機の主記憶容量が余裕が

ないと難しいとのことである。尚、使用した計算機は、主記憶容量が 128 Mバイトであった。

## (2)実施結果

「学習」の成果は、各事例の入力データを入力し、その出力値としてどのような値が出てくるかを見て、学習結果を確認することになる。結果としては、先の事例 1～6 で仮想的に設定した出力値を完全に再現できた。このような意味において、ここで採用した階層型 ANN は、「汎関数生成器」とも言える。

## (3)他の事例による学習成果の確認

「学習」によって、それに用いた事例の出力を再現できることに加え、他の事例入力データの場合でも、どれだけ妥当な出力が得られるかが問題となる。その結果の確認のため、以下の想定事例により確認を行った。

入力パラメータ	事例 11	事例 12	事例 13	事例 14
1)対象物幾何条件	2	1	1	1
2)付着物物理的性状	1	1	2	1
3)付着物化学的性状	1	1	2	1.5
4)除染目的レベル	1	2	1	1
出力（ランク付け）	1.75	2.6	3.0	1.46

上表の各事例について、以下にその出力結果について評価を行う。

### ①事例 1 1

学習で用いた事例 1 と事例 3 の中間的な事例であり、異なるのは、対象物幾何条件である。

事例 1 : 配管

事例 1 1 : タンク・槽類

事例 3 : コンポーネント

事例 1 1 の出力が “2” であれば理想的であるが、上表のように結果は “1.75” であった。しかし、ANN の特徴として、ある程度の誤差範囲を考慮する必要があるので、この場合は比較的妥当な範囲と判断される。

### ②事例 1 2

学習で用いた事例 1 と事例 5 の中間的な事例であり、異なるのは、除染目的レベルである。

事例 1 : DF 値 10 以下

事例 1 2 : DF 値 10～20

### 事例3 : DF値 20以上

事例1の出力が1（最適）、事例3の出力が3（不適）であることを考えると、事例1 2の出力としてはそれらの中央値“2”が想定されるとも考えられるが、実際には“2.6”であった。この結果の解釈は難しいが、構築したANNで想定した除染技術がCANDECONであることを考えると、この除染技術での除染レベルは通常は10以下であり、実質的にはDF値10以上は妥当ではない、と考えれば事例1 2の結果は比較的妥当な範囲となる。

### ③事例1 3

先の例①、②と異なり、学習で用いた事例の中間的なものというわけではない。付着物の物理的、化学的条件が、考えている除染技術 CANDECON では不適なものであることを考慮すると、この事例1 3における出力結果“3”（不適）は非常に妥当なものといえる。

### ④事例1 4

付着物の化学的性状が、必ずしも1あるいは2と割り切れない、中間的な場合を想定したものである。従って、学習における事例1（出力“1”）と事例4（出力“2”）の中間的な事例となり、この事例1 4における出力結果“1.46”は妥当な出力と考えられる。

## 6. 総合評価

本章では、前章で実施した「学習」の結果を踏まえてその総合評価を行い、廃止措置における技術選定での人工知能技術導入の適性について検討を行う。

### 6. 1 ANNによる「学習」についての総合評価

前章でANNによる除染技術選定システムを構築することが、原理的には可能なことを示した。本節では、実際に除染技術選定システムをANNの技術によって構築することを想定し、その問題点や妥当性について整理を行う。

#### (1) 実施した「学習」結果についての検討

前章で実施した「学習」により、設定した入力データに対し適切な形でランク付けを行うことができるようになることが可能なことが示された。ただし、どのような入力データと「教師」としての適切な出力との組合せで「学習」を行うかは、経験的に決めていく必要があることが判明した。また、適切な入力データと出力データの組合せを、どれだけ用意すれば良いかについても、試行錯誤的に進めていく必要がある。

今回はフィージビリティ研究ということで、入力データを4種類としてANNを構築したが、より現実的な除染技術選定のためのANN構築のためには、もう少し入力データの種類を増やすことも検討していく必要があり、除染技術ごとに入力データの構成を変えていく必要もある。しかし、「より適切な除染技術の候補」を抽出していく、という観点に立つならば、それほど入力データの種類を増やす必要もなく、除染技術毎にデータ構成を変える必要もないであろう。即ち、ANNを利用して候補となりうる除染技術を抽出しておき、最終的には除染対象物に対する総合的な判断に基づいて採用する技術を決定することが妥当である。

ANNを構築すること自体は、今回のフィージビリティ研究で採用したANNパッケージソフトにより、極めて容易な作業である。しかし、より現実的なシステムとするためには、「入力データ」構造及び「学習」の実行をより適切なものとする必要があるが、その作業は試行錯誤的に進められることは前章で述べた通りである。また、最終的にはどの程度妥当な「教師データ」を準備できるのか、そして学習を効果的に進めるための戦略をたてる必要がある。今回実行した試行錯誤的学習では、経験的には以下の戦略で学習を実施すれば、比較的良好な結果が得られた。

$X_{min}$ : 各入力パラメータの値を最小の値とした入力ベクトル

$P_{min}$ :  $X_{min}$  に対応する「教師」データ

$X_{max}$ : 各入力パラメータの値を最大の値とした入力ベクトル

$P_{max}$ :  $X_{max}$  に対応する「教師」データ

{ $X_{min}, P_{min}$ }及び{ $X_{max}, P_{max}$ }、そして可能ならばその中心的な入力・出力の組合せを加えた上で学習を実行することで、比較的妥当な結果が得られた。たまたま準備できた事例（入力と出力の組合せ）だけでは、適切な学習結果を得ることは出来なかった。即ち、どれだけ適切な事例を用意できるかによって、学習の結果が左右される。

## (2)除染技術選定プロセスの問題整理

今回実施した最適化システム構築の前段として、除染技術選定の現状について調査を行い、その結果について整理を行った。その内容については、第4章及び資料1、資料2で示した通りである。その中で明らかになったこととして、以下の点があげられる。

- ①これまで多くの除染技術が開発されてきたが、現在、それらのもの全てが利用されているわけではなく、比較的最新のものが主として利用されている。即ち、除染技術はこれまでの利用と改良により、最新のものがコストや廃棄物等の観点から比較的妥当なものとなっている。従って、実際にはそれほど選択の余地があるわけではない。
- ②ANNで必要となる妥当な事例、即ち「良い教師」となる事例が十分にそろっているわけではなく、今回収集した事例では各除染技術選定の理由がそれほど明確にはされていない。即ち、より適切な形で「学習」を行うことができない。従って、「学習」を行うために、適切な入力データと出力の組合せを作成していく必要がある。

廃止措置における除染技術ということで、技術選定の範囲としては、過去に開発され現在はほとんど利用されていない技術もその対象として含めることも可能である。しかし、想定される入力データに基づいて、それらの除染技術のランク付けについて個々に検討する作業が必要となり、学習に必要な事例の作成が困難になる可能性も出てくる。

## (3)技術選定へのANNの利用の妥当性について

今回実施したANNによる技術選定のフィージビリティ研究の結論としては、以下の点があげられる。

- ①ANNによる技術選定は十分に可能である。

②しかし、その結果の妥当性はどれだけ適切な「教師データ」を準備できるかに依存することとなる。

## 6. 2 廃止措置への人工知能技術導入についての検討

サイクル機構人形峠環境技術センターでは既に廃止措置が実施にうつされており、日々の作業の成果がデータベース等の形で蓄積されつつある。それらのデータは、汚染状況測定データ、除染結果、解体切断結果など、データの内容・形式という観点で極めて多岐にわたるものとなっている。これらのデータを廃止措置の実施経験として、他の燃料関連施設における廃止措置活動に役立てるためには、蓄積されている膨大なデータを、廃止措置に関する「知識」として利用できるように加工し、また、利用するための工夫が必要である。ここでは、それらのデータを人工知能工学の技術を利用して加工、あるいは利用するための工夫について、今年度実施したフィージビリティ研究の成果としてのまとめと、今後の活動に対する提案という形で述べる。

### (1)人工知能技術の特性について

現在実用化されている人工知能技術としては、信号処理的な性格を持つものと「知識」に基づいて問題の処理を行う知識ベースがある。前者は、問題を数値化し、数値データのまま処理を行うもので、その代表的な技術としてANNがある。ANNは問題を数値化し、問題を記述する入力データから、適切な出力を得るための、言わば汎関数的な意味合いをもっている。これに対し知識ベースのほうは、様々な問題における有用な情報を「知識」として蓄え、それに推論機構を組み込んで、何らかの判断・処理を行わせるというものであり、その代表例として、知識を「if then else」の形で表現したプロダクション・システムがある。

これらの人工知能技術にはそれぞれ特性があり、それぞれどのような問題にでも適用できるというわけではなく、状況によって使い分けていく必要がある。即ち、数値化が可能かどうか、if then else 的な知識として表現が可能なのかどうか、をまず検討していく必要がある。それによって問題をどのように定式化し、そして元データを加工していくかが決定される。例えば、今回のフィージビリティ研究では除染技術の選定をANNの技術を利用して実施したが、この場合は知識ベースの技術で処理することも可能である。しかし、問題によっては、信号処理的な手法あるいは知識ベース的な手法のどちらかがてきしている場合もある。

### (2)人形峠における廃止措置データベースの有効利用について

先に述べたように、人形峠環境技術センターでは廃止措置に関する様々な情報が大規模なデータベースとして蓄積されつつある。それらを人工知能工学の技術を利用して、より付

加価値をつけて役立てるために、以下の提案を行う。

### 1) ANNによる技術選定が可能な問題の検討

今回は除染技術選定にANNを適用したが、廃止措置自身には様々な問題が存在し、技術や何かの選定を行う場面というものが存在するものと考えられる。従って、人形峠環境技術センターで蓄積されつつある情報・データを検討し、その中でANNの技術を適用可能なものがないかどうかを検討し、実際に適用を試みる。その際には、今回の経験を役立てることが十分可能である。

### 2)知識ベースの導入

人工知能のもう一つの分野である、知識ベースの技術の導入を検討する。先と同様に、現在蓄積されつつデータベースの情報・データを検討し、知識ベースで処理可能なものがないかどうかを検討する。この場合は、例えば、知識ベース技術の一つであるプロダクション・システムの導入を前提として、市販のシステムの調査を行い、それを受け蓄積されつつある情報・データの「知識ベース」化を図る。

今回は人工知能技術の導入のためのフィージビリティ研究ということで、取合えずANNの導入を行ったが、廃止措置に伴い発生する情報・データの多種多様性を考えると、特定の手法に限定して作業を進めるにはリスクが伴うと思われる。従って、もととなるデータの多種多様性に対応するという意味からも、上記の2)の実施を併せて検討することが肝要である。

## 資料－1

「除染法と適用事例－金属類の化学除染法－」

## [資料-1]

### 「除染法と適用事例 -金属類の化学除染法-」

#### 1. 解体前除染

##### (1) 系統除染

###### 1) LOMI 法

LOMI 法は BWR の全系統除染に有効である。その除染液再生に ELOMIX 法（電気化学的 LOMI イオン交換法）を使用し廃棄物量低減化が可能である。

###### ① 英国 SGHWR (100MWe、蒸気発生重水炉、1968 年運転開始)

・対象：原子炉冷却系統、定検時に実施。

初期腐食防止剤入り Citrox 法除染を実施していたが効果が低下し、1980 年に LOMI 法に切り替えた。1984 年からは Cr リッチ層対策のため、酸化前処理を入れ、NP/LOMI を実施した。被ばく低減量は、150～200 人・レム／年となり、40% の低減化を達成した。

###### ② 米国 Surry 発電所 (840MWe、PWR)

・対象：蒸気発生器チャンネルヘッド

1980 年、SG 更新のためまるごと撤去するため、SG ユニットの除染研究の一環として、1982 年に NP/LOMI 法でチャンネルヘッドの除染を実施し、DF 値 20～30 を得た。更に、酸化前処理を含めた AP/POD 法を採用し、DF 値 68 を得た。

###### ③ 米国 Monticello 発電所 (569MWe、BWR)

・対象：主循環系配管 2 系統と浄化系

1984 年に実施。主循環配管の SCC トラブルによる配管工事のため、循環配管系は LOMI/NP/LOMI 法を適用して DF 値平均 23、浄化系は更に NP/LOMI を追加して DF 値平均 4 となった (DF 値 4 で追加効果なし、高 Cr 含有クラッドのため除染効果が低い)。

###### ④ 米国 Quadcities-1(833MWe, BWR-3 型)

・対象：BWR 一次冷却系全系統除染

炉内構造物への除染剤の影響調査を行った。

###### ⑤ 米国 Brunswick(847MWe, BWR-4 型)

・対象：BWR 一次冷却系統除染

除染剤の燃料影響調査の一環として燃料取出し後に除染試験。

###### ⑥ 米国 Lasalle(1130MWe, BWR-5 型)

・対象：BWR 一次系統除染

最新大型炉での系統除染実証試験。

## 2) CANDEREM法

- ・対象：CANDECON 法では材料腐食を生ずる場合の系統除染。
- CANDECON 法よりもマイルドな除染法。材料腐食をおよぼす蔥酸を除いている。
- 沸点以上での使用が有効である。米国で 1980～1984 年に BWR、PWR に適用された。
- 化学除染の実施件数を図 1 に示す。廃止措置の場合は、CANDECON 法で十分である。

上記のうち米国における LOMI 法と CANDEREM 法の除染結果の一例を次にまとめる。

除染法/適用例		対象	DF	工程回数	除去放射能量(TBq)	イオン交換樹脂廃棄物 (t)	被曝低減(人・rem)
LOMI 法	Quad-Cities-1 (833MWe,BWR)	RWCS	4.5	1	1.0	計 4870	NA
		RCS	6.4	1	2.4		NA
	Quard-Cities-2 (833MWe,BWR)	RWCS	4.2	1	1.3	計 3370	計 562
		RCS	7.8	1	3.4		
CANDEREM	Dresden-2 (834MWe,BWR)	RCS	16	入口 1 出口 1	3.0	3340	2000
	Monticello (569MWe,BWR)	RCS	12.1	1	4	計 6485	計 400
CANDEREM	Monticello	RHR	4.3	1	0.3		
		RWCS	4.1	1	0.11		

注) RWCS:燃料取替用水浄化系、RCS:原子炉冷却系、RHR:残留熱除去系

## 3) CANDEREM+AP 法

- ・対象：PWR 一次冷却系全系統除染
- ・適用例：Indian Point – 2(975MWe,PWR) 1995 年
- 米国最初の商業炉 PWR 全系統除染。
- ・プロセス：CANDEREM と AP 法を繰返し 5 工程で実施
- ・結果： 被曝低減量 (3500 人・レム)、除去放射能量(148TBq)  
廃棄物量 (除去酸化鉄量 37kg、廃イオン交換樹脂 50m<sup>3</sup>)  
DF 値(7.8)

## 4) CANDECON 法

- ・対象：軽水炉一次冷却系および浄化系

注) 応力腐食割れ防止策として、次の方法を適用

－ステンレス系：LND101A と共に使用

－炭素鋼系：LND101A から蔥酸を除去して使用。腐食抑制剤（イン

ヒビター) 添加。

・適用例：

①Dresden-3 (832MWe, BWR)

- ・再循環系に適用 (1983年)
- ・DF 値平均 7.6、除染時間約1週間
- ・廃棄物量 (イオン交換樹脂) 45ft<sup>3</sup>

②JRR-3 (1MWt、天然ウラン金属燃料、重水減速冷却型研究炉)

- ・一次冷却重水系に適用
- ・燃料要素、重水装荷状態での炉心改造工事による除染 (1983年)
- ・重水中、除染剤濃度 0.1w/o、温度 60°C
- ・除染作業中の工程管理  
　　重水系は温度、PH、導電率、AI濃度、全γ線量、EDTA濃度の管理  
　　ヘリウム系は重水濃度、炭酸ガス濃度管理
- ・浄化工程 (温度 43°C、8日間実施、重水導電率 0.6μS/cm、PH5)
- ・DF 値： ウランで約5、プルトニウムで約3
- ・線量率低下： 重水配管系約 30%
- ・放射線廃棄物量： イオン交換樹脂とフィルター等 4.12m<sup>3</sup>
- ・除染作業延べ人数 339人、総被ばく線量 3077mrem

5) P O D法

- ・対象：PWR での部分系統除染 (クラッド中のCr酸化物含有量が高い PWR)
- ・適用事例：1986～1992年に米国の原子力発電所 40基以上で、また他の国でも同数の除染を実施した。酸化 (AP または NP) - 還元の2試薬処理法、またはこの工程を繰り返す、マルチ・ステップ法で実施。被ばく低減は 130 人・レム以上で、132万ドルの費用低減の効果をあげたとされる。

6) PNS-Citrox 法

- ・対象：軽水炉一次冷却系統

PNS (Pacific Nuclear Service) 社開発

1984～1985年、米国の一次系除染の 40%がこの手法を使用した。従来の、濃厚液法 AP-Citrox 法と比較して、処理時間、使用除染剤量、発生廃棄物量、操作性も大きく改善された。

- ・適用事例：Vermont Yankee(540MWe、BWR)

再循環系配管に適用

单一除染時 DF 値 5～6 (高圧水ジェット除染併用で平均 13)

2次廃棄物量：イオン交換処理により除染廃液は全く発生なし

使用済イオン交換樹脂約  $1.8\text{m}^3$  発生  
使用済フィルタメント約 400 リットル発生

#### 7) NS-1 濃厚液法

- 対象 : BWR 一次冷却系除染

腐食抑制剤を含み、7w/o の除染剤を含む溶液使用

PWR 用には NS-3、炭素鋼用に NS-2 を適用

除染廃液は蒸発濃縮後プラスチック固化

- 適用例 :

① Dresden-1 号機 (210MWe, BWR) の GE タスク腐食疲労試験ループの除染

(1976 年)、及び Dresden-1 一次系全系統一括除染 (1984 年)

・ ループ除染 : Dresden 2、3 号機と Quad City 炉 (833MWe, BWR) の配管スプール及び Dresden 1 号機の炉内スラッジも除染系統内に含まれた

・ 系統除染 : 熱除去系は炭素鋼のため除外、BWR 最初の一括除染

除染	保有水量	除染温度	時間	全除去鉄量	除去放射能量	残放射線量	PH	DF
ループ	455 l	120-125°C	—	-	-	-	3.3-4.0	120
系統	$312\text{m}^3$	125°C	100h	295kg	779Ci	10mR/h (平均)	3.8	46-175

② Peach Bottom-3 及び-2 (1100MWe, BWR) の再生熱交換器 (1977 年)

	時期	保有水量	除染温度	時間	全除去鉄量	除去放射能	DF
3号機	1977.4	$2.4\text{m}^3$	120°C	48hr	1453g	10.6Ci	7.1
2号機	1977.9	$2.3\text{m}^3$	120°C	44hr	2100g	6.3Ci	5.0

③ 原研大洗 JMTR; OWL-1 系統除染 (1978 年)

・ 保有水量  $2.3\text{m}^3$ 、除染温度 120°C、PH 約 3.8、溶出鉄 98ppm

・ 除染 1 時間で予想以上の放射能溶出により廃液処理困難で中止

④ 東電福島第一発電所 3 号機 (784MWe, BWR) 用給水スパージャー除染 (1980 年)

・ 給水スパージャーを切断し、 $2\text{m}^3$  除染タンクでバッチ式除染

・ 保有水量  $2\text{m}^3$ 、除染温度 120-125°C、除染時間 100h、PH 約 3.8

・ DF 値平均 100~500

#### 8) NS-1 希薄液法

- 対象 : BWR 系統除染、除染剤濃度 0.7% で除染

- 適用例 :

Pilgrim 発電所(696MWe,BWR) : RCU 系統及び循環ループ除染 (1989 年)

	保有水量	除染温度	除染時間	除染放射能	DF 値
RCU 系	1.9m <sup>3</sup>	125°C	—	2-4 Ci	2-20
循環ループ	51m <sup>3</sup>	125°C	54h	79.7Ci	22-62

9)KRIDECON(KD)203 法 (希薄液法)

- 対象：一次冷却系と構成部材

酸化性雰囲気で生成したクラッド除染に適用

- 適用例：

①ふげん発電所 (165MWe, ATR)

- 冷却系用 A, B ループの系統除染 (日本で最初の系統除染)
- 除染液濃度 0.05~0.1%、120°C、除染時間 24 h
- DF 実績値 表 1

②原電 BWR 済化系配管と済化ポンプ

除染剤	除染剤濃度	主成分	pH	温度	除染時間	DF (炭素鋼)
配管 KD203	0.1%	EDTA	5.0	90°C	20h	1.3(平均)
ポンプ KD201*	5%	EDTA	6.5	90°C	25h	6

\* : 腐食抑制剤無添加、除染後ポンプは再使用せず

- 廃液処理

—系統配管廃液 (KD203) : 自然冷却後、イオン交換塔で系統保有水質が 1  $\mu$ S/cm 以下になるまで循環処理。処理液は済化系ポンプの濃厚除染液として使用。

—済化系ポンプ除染廃液はイオン交換塔で処理。

- 本作業の被ばく低減量 約 1.2 人・Sv

10)EMMA法

- 対象：PWR 一次系配管除染

酸化還元希薄液除染法

- 適用例：

①フランス EDF 原子力補修センターで 1989 年以降、RCP 1~5 基の除染を実施した。

- プロセス：酸化工程 15 h、還元工程 5h、洗浄工程 (高圧ジェット水)
- DF 値は 6~26

②Gravelines-3 発電所(951MWe,PWR)で、CVCS 熱交換器 (1990 年)

- DF 値 (平均 47.5)

- ③Bugey-5 発電所(917MWe,PWR)で、熱交換接続配管 (1993 年)
  - ・プロセス：酸化液 1m<sup>3</sup>/ループ、還元液 1m<sup>3</sup>/ループ、洗浄液 2m<sup>3</sup>/ループ
  - ・廃イオン交換樹脂：100 リットル/3 ループ
  - ・DF 値：50 以上
- ④Dampierre 発電所(937MWe,PWR)冷却系配管除染

#### 11) CORD 法

- ・対象：一次冷却系全系統除染、蒸気発生器、一次冷却材ポンプ(RCP)
- ・適用例：
  - ①BR-3(11MWe,PWR) 1991 年
    - ・プロセス：溶解金属はイオン交換樹脂で連続処理
    - ・廃棄物処理：HMnO<sub>4</sub> は Pt/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>触媒で酸化処理  
腐食生成物 23.6 kg (2.03TBq) 除去
  - ②VAK(16MWe,BWR)全系統除染 1995 年
  - ③MZFR(55MWe,PHWR)全系統除染 1995 年

#### 12) CORD-UV 法

- ・対象：一次冷却系全系統除染
- ・適用例：
  - ①Oskersham-1(465MWe,BWR) 1994 年
    - (対象) 運転後 22 年が経過し、圧力容器検査と修理のため、炉材料、炉内構造物を除く循環系統、表面積約 1500m<sup>2</sup>、除染液量 160m<sup>3</sup> を対象。  
材質 SUS304 鋼。
    - (方法) 炉心部分に深さ 5m まで除染液を満たす。循環、過熱、浄化は発電所のシステムを使用。薬品注入装置と UV 分解モジュールを備えた除染装置(AMDA)を接続。除染後、高圧水で洗浄した結果、表面汚染をスマア法で測定 (4Bq/cm<sup>2</sup> 以下)。
    - (廃棄物) 除去された腐食生成物約 30kg (2.3TBq)。炉水浄化系イオン交換樹脂 2.5m<sup>3</sup>。
    - (DF 値) 約 1000。除染前約 30mSv/h、除染後約 0.025mSv/h。
  - ②Loviisa(510MWe,PWR) 1994 年
    - (対象) 6 ループ型 VVER440 の系統除染。対象表面積 17000m<sup>2</sup>。
    - (方法) シーメンス社の UV スキッド 2 組取付けて除染。燃料を抜き、炉内構造物を入れたまま除染。
    - (廃棄物) 腐食生成物 291kg(41TBq)。陽イオン交換樹脂 8.5m<sup>3</sup>、陰イオン交換樹脂 22.5m<sup>3</sup>。UV 分解法により約 8m<sup>3</sup> の陰イオン交換樹脂使用

量を節約できた。

(被曝低減) 8 人・Sv。

③浜岡原子力発電所

- ・ 1号機(540MWe,BWR) :

再循環系統除染(1993年)

BWR 国内最初の系統除染

- ・ 3号機(1100MWe,BWR) :

再循環ポンプ出入口弁近傍配管系統除染(1996年)

(廃棄物)

除染廃液処理：浸出金属（イオン交換樹脂で除去）

除染剤の蔥酸（紫外線で炭酸ガスに分解、イオン交換樹脂で除去）

廃棄物：イオン交換樹脂、フィルター（UV法により廃棄物量は1/10に低減）

(DF値) 36 (1号機)、6 (3号機)

対象物	除染面積	除去放射能	除去金属量	廃棄物発生量	DF値
1号機	162m <sup>2</sup>	530GBq	21kg	約1800l	36
3号機	64m <sup>2</sup>	250GBq	2.7kg	約660l	6

④福島第一発電所 3号機(784MWe,BWR)

(対象) 原子炉内圧力容器ジュラウド、ジェットポンプ等炉内構造物

(プロセス) 除染面積：圧力容器+再循環系統 1200m<sup>2</sup>

除染時間：約8時間

除染剤：蔥酸約2000ppm、過マンガン酸約100ppm

除染系統内に交互に加え3サイクル繰り返す

最終系統浄化：蔥酸濃度が検出限界以下までとする

(廃液処理) 過マンガン酸は蔥酸で分解、イオン交換樹脂で除去

蔥酸は紫外線UVで炭酸ガスと水に分解

溶出金属約72kg(約10TBq)はイオン交換樹脂で除去

(DF値) 平均43

13) DFD法(米国電力研究所EPRI)

対象：系統除染及び機器、コンポーネント除染

特徴：Fe系酸化物、母材をHBF<sub>4</sub>で溶解し、KMnO<sub>4</sub>でCr系酸化物を溶解することで高いDF値を得る。

適用例：

- ①Main Yankee 炉 (900MWe,PWR)、一次系統 (RPV,SG を除く) 除染
- ②Big Rock Point 炉 (750MWe,BWR) 一次系統除染

#### 14) H O P 法

対象：系統除染及び機器・コンポーネント除染

HOP(Hydrazine, Oxalic Acid, Potassium Permanganate)法

工程： 1 サイクル [昇温、酸化除染 (KMnO<sub>4</sub>)、還元除染 (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)]  
3 サイクル繰り返し後、還元剤分解、最終洗浄

(CORD 法と HOP 法の比較)

	還元ステップ	酸化ステップ	除染剤分解
CORD 法 福島第一 2、3 号機 全系統除染	シュウ酸： 2000ppm pH=1.8	HMnO <sub>4</sub> ： 300ppm	UV 分解
HOP 法 敦賀 1 号機 全系統除染	シュウ酸： 2000ppm ヒドラジン： pH=2.5(目標) 炭素鋼の腐食抑制	KMnO <sub>4</sub> ： 200ppm 廃棄物低減	過酸化水素 + 触媒

(上記の各方法には、さらに機械除染を組み合わせて除染効果を高める)

適用例：

- ①敦賀 1 号炉 (357MWe, BWR)、原子炉及び再循環系統除染 (1999 年)
- ②東海 2 号炉 (1100MWe, BWR)、浄化系再生熱交換器除染 (1999 年)

#### 15) O D P / S O D P 法

対象：系統除染及び機器・コンポーネント除染

O D P : Ozone Decontamination Process

軽い除染法として供用期間中系統除染に適用

S O D P : Strong Ozone Decontamination Process

強力除染法で、系統及び機器コンポーネント等の廃止措置除染法として適用。硝酸・セリウム(IV)系除染剤であり、オゾンでセリウム(III)を酸化再生する。

適用例：Agesta 炉(12MWe, PHWR)の系統除染及び蒸気発生器の除染

## (2)コンポーネント・機器等の化学除染

### 炉内における実績

- ・RCP（一次冷却材ポンプ）インターナル除染：Kuridecon(KD)液
- ・RTD（測温抵抗体）デバイス配管除染：NP-AC(Nitric Acid Permanganate-Ammonium Citrate)法

\*NP-AC 法：ステンレス鋼の付着クラッド除染用

- ・NP 液で酸化前処理、水洗後、5w/oAC 液で除染する 2段階除染法
- ・温度 85~95°C、時間 1~4h、DF 値約 50（再付着なしのとき）
- ・廃液処理：混床イオン交換樹脂で脱塩し、廃樹脂は固化処理  
樹脂容量は、除染系統と同容量必要

### 1)CORD-UV 法

- ・対象：原子炉再循環ポンプ
- ・適用例：原電敦賀 1号機 (357MWe,BWR) の原子炉再循環 (PLR) ポンプ内部構造物交換。交換後、ポンプ再使用
- ・結果： DF 値 平均 80  
ポンプ表面除染前後線量当量率：16mSv/h → 0.2mSv/h  
被ばく低減率：1/100
- ・廃棄物量と処理：  
溶解金属放射能はイオン交換樹脂で除去  
廃樹脂 250 リットル、浄化水 3m<sup>3</sup>で廃棄物発生量は従来の 1/10 以下になる
- ・材料健全性： 悪影響なし

### 2)MOPAC 法

- ・対象：一次冷却材ポンプ (RCP) インターナル
- ・適用例：Dampierre(937MWe,PWR)
- ・プロセス：超音波の届かない裏面などは効果が小さい
- ・廃液処理： 80 リットル、イオン交換樹脂塔で処理
- ・DF 値： 6 ~ 2 6

### 3)NP-KD201 法（濃厚液法）

- ・対象：熱交換器
- ・適用例：東電福島第一発電所、CUW（冷却材浄化系）再生熱交換器  
材質はステンレス鋼（連結管：炭素鋼）  
閉ループで循環除染、温度 90°C、時間 24 h、DF 値 9.6（平均）

結果を表 2 に示す

#### 4)NP-KD212 (濃厚液法)

- ・対象：PWR 一次系撤去配管
- ・適用例：関電 9 原子炉の一次冷却材温度検出(RTD)バイパス配管  
配管（口径 1-3”、材質オーステナイト・ステンレス鋼、形状は複雑、除染後廃棄体とする）  
工程：酸化前処理 (NP) ->水洗->還元処理(KD212)->水洗（以上を反復）

除染剤	濃度	PH	温度	時間
NP	0.1%	2	90°C	8h
KD212	5.0%	3.4	90°C	4h

DF 値 (10~20)

放射能 (除染前 40~60mSv/h、除染後 2~6mSv/h)

#### 5)犠牲電極還元除染法

- ・対象：機器、部品等の除染
- ①方法：酸化皮膜中の Fe(III)は溶解しにくく、還元して Fe(II)イオンとして溶解し易くする。ステンレス鋼、インコネル等の表面に生成している酸化皮膜を炭素鋼の接触により還元溶解を促進する方法（図 2、図 3）
- ②特徴：母材の溶解電位以上の電位に保持するため、母材を溶解させずに酸化皮膜を効果的に溶解する
- ・適用例：東電福島第一発電所 PLR（再循環）ポンプ  
犠牲電極還元除染 + K D 2 0 1 法  
温度 90°C、時間約 16 時間、DF 値平均 40（表 2）

#### 6)エバラデコン TED-40 法

- ・対象：PLR ポン、PHR ポンプ、CUW ポンプ、CUW 熱交換器等、一次系統から独立して取り外し可能な機器部品
- ・特徴： TED-40 (EDTA を主剤として除染係数が高い)  
TED-93 (硫酸ベースとし、除染剤、廃棄物処理が容易)  
対象物を再利用する場合は、腐食防止剤（インヒビター）使用  
除染温度は 100°C 以下で使用
- ・適用例：
  - ①国内 BWR、一次系ポンプ（表 3）

- ②D F 値：10 以上、最近は Fe-Ni コントロールが進み、プラントの低線量化から、所定 D F 達成に除染時間が長くなる傾向がある
- ③廃液処理：キレート剤を主剤とし使用液量も少ないため、全量プラスチック固化。除染対象物の保有水量が多い場合は、RO（逆浸透装置）により濃縮後固化する場合もある。

#### 7)ストリッパブルコーティング法

- ・対象：機器、床面、架台等、比較的広い面の除染
- ・方法：汚染面にキレート剤を含む剥離性塗料を塗布し、一定時間後、剥離面に汚染物質を吸着して除去する方法
- ・特徴：
  - ①汚染物の飛散拡大防止、内部被ばく防止にも役立つ
  - ②水性エマルジョン系塗料では、乾燥後も常時水に浸漬していると、塗膜膨潤軟化により剥離困難となる
  - ③現場重合型ゴム塗料を使用した防水型ストリッパブルコーティング塗料（ISOLOCK300）は、原子炉建屋内キャビティウェル等の水張り前養生及び水抜き後の除染に適用
- ・適用例：BWR 炉内構造物補修工事で使用した遮蔽作業用架台除染
  - ①除染法：ALARA DECON
  - ②架台表面除染係数

表面汚染密度と除染係数

除染部	除染前(Bq/cm <sup>2</sup> )	除染後(Bq/cm <sup>2</sup> )	D F
側部外面	$7.4 \times 10^2 \sim 1.5 \times 10^4$	$3.0 \times 10^{-2} \sim 2.6 \times 10^{-1}$	$8 \times 10^3 \sim 3 \times 10^6$
側部内面	$1.9 \sim 3.0 \times 10$	$2.6 \times 10^{-2} \sim 7.4 \times 10^{-2}$	$3 \times 10 \sim 1 \times 10^3$
上面	$5.6 \times 10^{-1} \sim 1.9$	$3.0 \times 10^{-2} \sim 2.6 \times 10^{-1}$	$7 \sim 4 \times 10$
下面	$<2.2 \times 10^{-2} \sim 7.4 \times 10$	$<2.2 \times 10^{-2} \sim 5.6 \times 10^{-2}$	$1 \sim 30$

- ③実績 除染面積 50m<sup>2</sup>  
 総人工数 176 人・時間  
 発生廃棄物 18kg

#### 8)D F D 法

- 対象：機器、コンポーネント等の除染
- 特徴：Fe 系酸化物、母材を HBF<sub>4</sub> で溶解し、KMnO<sub>4</sub> で Cr 系酸化物を溶解することで高い D F 値を得る。
- 適用例：Trojan(1178MWe, PWR)浄化系熱交換器、グリーンホールドタンク 3 基の

除染等。

9) HOP法

対象：機器・コンポーネント等の除染

適用例：日本原子力発電東海2号機(1100MWe, BWR)浄化系再生熱交換器(1999年)

10) ODP／SODP法

対象：系統除染、機器・コンポーネント除染

適用例：Agesta炉(12MWe, PHWR)の蒸気発生器の除染

## 2. 解体後除染法

解体物の再利用、廃棄物区分管理の軽減、クリアランスレベル以下まで除染して無条件解放をするための除染である。供用中の除染のように、除染対象物の再利用を考えない。化学除染法としては、電解除染法と浸漬化学除染法が主たる方法として実績がある。

### (1) 電解（研磨）法

- ・対象：配管、ポンプ、弁、板等の単純形状物
- ・方法：除染対象物を陽極として電解し、金属表面の汚染を電気化学的に溶解除染する方法。電解液としてリン酸（50%以上）、硫酸（15%）、硫酸ナトリウム（10%以上）等が使用される（図4、図5、図6）。
- ・特徴：

	腐食性	取扱性	溶解度	使用例	廃液処理
リン酸系	小	易	大	多	中和、固化
硫酸系	大	難	大	少	中和、濃縮、固化
硫酸ナトリウム系	小	易	小	少	濃縮、固化

- 電解法と機械的研磨を組合せた電解複合研磨法も使用されている
- 細孔、隙間、複雑形状物、溶接部、熱切断時金属スパッター等の付着部は機械的前処理が必要

#### ・適用例：

①Dresden-1(210MWe,BWR)の制御棒駆動装置(CRD)

80個のCRDについてリン酸液で電解除染

DF値：

平均放射線量	除染前	除染後	DF値
$\gamma$ (R/h)	3.6	1.8	2.0
$\beta$ (rad/h)	6.7	0.43	15.6

②米国コードレックス社、BWRトーラスの炭素鋼 70t

- ・対象物：大きさ6インチアングル、8インチIビーム、10インチパイプ等トーラスから切り出し、5フィート以下の長さに調整

塗膜は非引火性有機塗料剥離液を入れた4'×7'×4'槽で、約1時間浸漬後水洗除去

- ・電解槽：磷酸液使用。4'×7'×4'の電解槽内で10~20分通電。

・DF値：90%以上を持出し規準（スミヤ法で100dpm/100cm<sup>2</sup>以下、直接測定値0.05mR/h以下）以下とし、回収金属として売却。

- ・廃液：セメント固化

### ③動燃東海事業所のウラン使用資材、物品

対象物：H型鋼、配管、パルプ、ポンプ、タンク、鉄板等 13 t (1983年7月)

### ④原研J P D R (配管、板材等単純形状解体物)

・対象物：炭素鋼、ステンレス鋼

・電解液：80%磷酸、及び10%硫酸の2種類

温度 RT-60°C、電流密度 0.1~0.2A/cm<sup>2</sup>

・DF値：SUS鋼 直管 (30分で検出限界 0.2Bq/cm<sup>2</sup>以下)

溶接部 (溶解金属の固着部を機械的除染で除去可能)

L棒 (内部陰極工夫が必要)

炭素鋼 表面のサビはサビ除去の前処理が必要

除染処理時間が長い (図5、6参照)

### ⑤Gundremingen Unit A(250MWe,BWR) 解体金属再利用除染

・対象物：配管、コンポーネント、ポンプ等約2000トンの除染

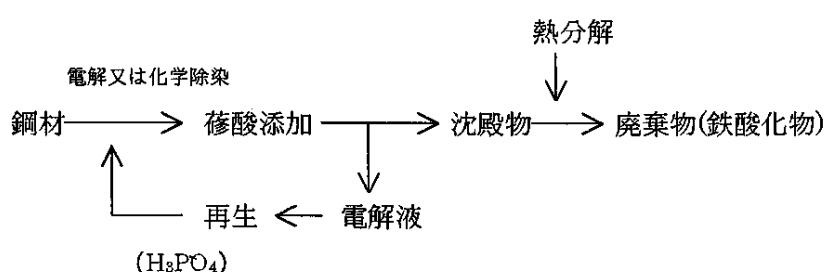
・電解液：40%磷酸溶液

・工程：電解槽2基、最大6000A、電解時間2~4h/パート

スポット汚染は機械的除染法採用

電解液再生法として磷酸を加える

Co-60は磷酸鉄として沈殿除去、磷酸は再生利用



汚染金属の約50%を無拘束解放レベルに除染できた。

## (2) 化学浸漬法

- ・方法：解体撤去した配管、機器、コンポーネント、部品等を化学除染液に浸漬し、機器表面に付着したクラッド等汚染物を溶解除去する。
- 除染対象物の材質、汚染状況によって除染剤を選定でき、高い除染効果が得られる。また、耐食性除染装置の使用により強力な除染剤の使用が可能となり、除染効果を高めることが可能。

- 除染液には無機酸、有機酸などが利用される（表4）。
- 電解除染法に比べ10倍以上の除染時間が必要で、除染液の強制流動が有効である。

・適用例：

①NUPECによる硝酸セリウム(IV)系Redox法の開発試験

対象：バルブ、ポンプ、熱交換器等複雑形状物

方法：前処理（クラッド等汚染物、ペイント、油分等をプラスト法で除去）  
本除染（単純形状のものは電解除染法、複雑形状のものは浸漬化学除染法を用いる）

後処理（超音波洗浄）

試料（BWR、PWRの実試料）

除染液：硝酸セリウム液（80°C、硝酸濃度2モル、Ce(IV)濃度0.4モル）

DF値： $\sim 10^4$

②原研JPDRでの硫酸セリウム(IV)系Redox法の開発試験

対象：JPDR一次系統（部分除染）

除染液：

H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 濃度	Ce(IV)濃度	温度	処理時間	再生法
0.25モル	2ミリモル	70~80°C	106h	電解法

廃棄物処理：電気透析法、イオン交換樹脂

DF値：300~1200（平均900）

廃棄物処理： 固体（イオン交換樹脂、イオン交換膜、カートリッジフィルター）

液体（濃縮廃液、再生希硫酸（回収））

③Studsvik RadWaste AB社での硝酸セリウム系ODP/SODP法

対象：Agesta炉(12MWe, PHWR)の蒸気発生器

方法：除染液のセリウム(III)の再生に従来の電解法に替り、オゾンを使用。2次廃棄物量の低減、クリアランスレベル(1Bq/g)以下の除染が室温で可能である。

実績： 除染面積(SG) 400m<sup>2</sup>、放射能 800Bq/g(Co-60)

除染液 SODP(4m<sup>3</sup>)、温度 室温、除染時間 72時間

除染量 金属表面 7μm 深さ

除染後、金属溶融処理を行って再利用のため市場放出、SGの80%を再利用。

表1. 除染係数

部 位	A ループ除染 (1989年)			B ループ除染 (1991年)		
	除染前線量当量 (mSv/h)	除染後線量当量 (mSv/h)	除染係数	除染前線量当量 (mSv/h)	除染後線量当量 (mSv/h)	除染係数
蒸気ドラム	2.42	0.91	2.7	2.58	0.71	3.6
下降管	2.03	0.24	8.5	1.92	0.36	5.3
マニホールド	0.89	0.19	4.6	0.84	0.14	6.0
再循環ポンプ	1.11	0.17	6.5	1.11	0.23	4.8
下部ヘッダ	3.05	1.18	2.6	2.16	0.41	5.3
入口管	5.78	2.41	2.4	4.28	1.19	3.6
上昇管	5.93	0.96	6.2	4.31	0.37	11.6

表2. 実機での適用実績

プラント	1F-4	1F-4	1F-4	2F-2	1F-4	1F-4								
実施時期	1983年 (第1回実験)	1986年 (第7回実験)	1989年 (第9回実験)	1990年 (第5回実験)	1990年 (第10回実験)	1992年 (第11回実験)								
対象部位	PLRポンプ(B) 回転体、水中給受	PLRポンプ(B) 回転体、水中給受	PLRポンプ(A) 回転体、水中給受	PLRポンプ(B)回転体	PLRポンプ(A)(B) 回転体、水中給受	CUW再生熱交換器								
台数	1基	1基	ポンプ 1基 エコ介 2個	1基	2基	3基								
主要材質	ステンレス鋼	ステンレス鋼	ステンレス鋼	ステンレス鋼	ステンレス鋼	ステンレス鋼 (連絡管:炭素鋼)								
除染法	犠性電極(炭素鋼)接触 + クリデコン201	犠性電極(炭素鋼)接触 + クリデコン201	犠性電極(炭素鋼)接触 + クリデコン201	犠性電極(炭素鋼)接触 + クリデコン201	犠性電極(炭素鋼)接触 + クリデコン201	NP + クリデコン201 <前処理>								
温度	90°C	90°C	90°C	90°C	90°C	90°C								
時間(h)	(水中給受) 36 (回転体) 16	(水中給受) 16 (回転体) 16	(水中給受) 16 (回転体) 16 (エコ介) 16	16	(A水中) 16 (A回転) 16 (B水中) 16 (B回転) 16	24								
効果	DF(平均) 50 除去放射能量(Bq) 1.5E+10	25 4.4E+9	30 3.9E+10	20 1.3E+10	78 3.0E+10	41 2.2E+10	19 1.9E+10	13 (8.9E+9)**	45 8.5E+9	23 3.2E+10	65 6.3E+9	40 3.1E+10	19.6 -9.9E+10	
方 式	タンク浸漬	タンク浸漬	タンク浸漬	タンク浸漬	タンク浸漬	タンク浸漬	閉ループ循環							
備 考	* 除染液分析結果(イオン成分)に基づき算出 ** イオン成分のみで算出しているが、スラッジ分多く参考値 *** NP : Nitric acid - Permanganate <硝酸、過マンガン酸カリウム>													

表3. 日本における化学除染の実績

プラント名	Aプラント	Bプラント	Cプラント	Dプラント
運・施設	58年	60年	59年	60年
機器名	RHRポンプ式	PLRポンプ (インペラ・シャフト・軸封)	PLRポンプ (インペラ&シャフト)	CUWポンプと配管
台数	1台	1台	1台	2台
主要材料	炭素鋼	ステンレス鋼	ステンレス鋼、銅青鋼	ステンレス鋼、炭素鋼
系統流量	約10t <sup>3</sup>	約1t <sup>3</sup>	約1t <sup>3</sup>	約1t <sup>3</sup>
除染方法	オンライン循環方式	タンク浸没循環方式	タンク浸没循環方式	オンライン循環方式
条件	TED-40	TED-40	TED-40	TED-40
平均表面流量(除染槽)	160 m <sup>3</sup> /h (425m <sup>3</sup> /h受)	170m <sup>3</sup> /h (220t/h受)	170m <sup>3</sup> /h (3500m <sup>3</sup> /h受)	160 m <sup>3</sup> /h (33 t/h受)
平均表面流量(除染槽)	47 m <sup>3</sup> /h	55 m <sup>3</sup> /h	215 m <sup>3</sup> /h	310 m <sup>3</sup> /h
平均DF	3.4	50.2	22.1	10.3
放射能除去率	44.5% <sup>a</sup> ±50% <sup>b</sup>	150% <sup>c</sup>	66% <sup>c</sup> ±58% <sup>d</sup>	100% <sup>e</sup>
クラッド主材	7.9 kg <sup>f</sup> ±F.e	0.55 kg <sup>f</sup> ±F.e	0.33 kg <sup>f</sup> ±F.e	0.19 kg <sup>f</sup> ±F.e
除染廻路処理方法	——プラスチック固化 (塗装廻路)	プラスチック固化	プラスチック固化	プラスチック固化
物質	脱塩	脱塩	脱塩	脱塩
処理	——プラスチック固化 (塗装廻路)	——プラスチック固化 (塗装廻路)	——プラスチック固化 (塗装廻路)	——プラスチック固化 (塗装廻路)
固定化ドラム再生本数	9本	11本	13本	9本
全貯液内量	0.37 m <sup>3</sup> /t <sup>3</sup> (~0.47m <sup>3</sup> )	0.059 m <sup>3</sup> /t <sup>3</sup> (~0.13m <sup>3</sup> )	0.036 m <sup>3</sup> /t <sup>3</sup> (~0.13m <sup>3</sup> )	0.125 m <sup>3</sup> /t <sup>3</sup> (最大)
評価	①現地工事の実証。 ②除染処理装置の性能実証。 ③除染剤使用量が少くないかつたため除染効果はやや低い。	タンク浸没循環方式による除染の除染効果の実証。	オンライン循環方式による除染の除染効果の実証。	6.24 kg/cd (最大)

表4. 化学除染液配合組成及び使用条件一覧 (1/2)

除染剤記号	化学薬品名	化学記号	配合組成	使用条件			備考
				mol	g/t	hr	
a) Phos	りん酸 インヒビター	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1.3	130	1~4	8.5	ハニレス鋼と炭素鋼における炭素鋼における腐食を抑制することとはむずかしい。
b) OX	ショウ酸 インヒビター	H <sub>2</sub> (COO) <sub>2</sub>	0.9~1.0	90~100	1~4	8.0	リン酸第1級鉄鋼の沈着の除去は大変困難である。
c) Sul	スルファミン酸 インヒビター	HOSO <sub>2</sub> NH <sub>2</sub>	0.9	90	1~4	4.5~8.0	ショウ酸溶液は、十分に腐食抑制されていないと、炭素鋼を腐食し、表面に膜状の不溶性沈殿物を形成する。そして、除去の効力を減少させる。
d) 硝酸 インヒビター		HNO <sub>3</sub>	(10~35%) vol% conc HNO <sub>3</sub>	30	2~4	室温	炭素鋼とアルミニウム系を除するための除去剤のうちでもっとも効果的なものの1つである。
e) Sulfox	硫酸 シュウ酸 Nフェニルチオ尿素	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> (COO) <sub>2</sub> C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NHC <sub>6</sub> NH <sub>2</sub>	0.3 0.1 0.0026	9 1	0.4~1.0	4.5~7.0	ショウ酸は、時には効力増強剤として添加されるが、これはアルミニウムやジルコニアムに対してもははじい腐食剤となる。
f) OPP	ショウ酸ナトリウム 過酸化水素 過酢酸	Na <sub>2</sub> (COO) <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (COO) <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> COOOH C <sub>9</sub> H <sub>7</sub> NO	0.25 0.025 0.5 0.007	32 2.3 50* 1	1~4	8.0	ステンレス鋼に用いられる。炭素鋼には腐食大。FP除染に用いる。
g) OPC	ショウ酸アンモニウム クエン酸アンモニウム 過酸化水素	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HC <sub>6</sub> H <sub>4</sub> O <sub>7</sub> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.4 0.16 0.34	50 38 35*	1~4	9.5	炭素鋼、ステンレス鋼、イソコネル、ジルカロイ-2、アルミニウム兼用、炭素鋼表面の除染や锈取り、およびスケール除染に用いられる。
h) OPF	ショウ酸 フッ化水素酸 過酸化水素	H <sub>2</sub> (COO) <sub>2</sub> HF H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.4 0.1 0.1~1.0	36 2 10~100**	1~4	9.0~9.5	放射性汚染の高温ガス(H2500°C)に曝されたステンレス鋼表面の除染用、ステンレス鋼、イソコネルの除染に適する。
i) ODS	過酸化水素 スルファミン酸 アセトアニリド EDTA ヘキサメチレントライソン	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> HOSO <sub>2</sub> NH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> CONHCH <sub>2</sub> H <sub>5</sub> (-CH <sub>2</sub> N(CH <sub>2</sub> COOH) <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> N <sub>4</sub>	0.09 0.12 0.011 0.011 0.007	3 12 1.5 3.5 1		15.0	炭素鋼には腐食性大。 高温水に曝されているステンレス鋼ループ系の後燃料破損による汚染を伴なう場合の除染用で、1液処理として用いる。
j) AP	水酸化ナトリウム 過マンガン酸カリ EDTA	NaOH* KMnO <sub>4</sub>	2.5 0.2	105 32	1~2	10.5	通常は重曹ベースト水溶液として作られる。
k) AC	クエン酸二ナモニウム	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HC <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>7</sub>	0.4	100	1~4	8.5~9.5	ステンレス鋼表面に生成するクロム酸化物の溶解除去の前処理剤。(100g NaOH + 30g KMnO <sub>4</sub> + 870g H <sub>2</sub> O 腐食抑制が施されていない場合は、炭素鋼には腐食性である。

その2

表4. 化学除染液配合組成及び使用条件一覧 (2/2)

除染剤記号	化 学 製 品 名	化 学 記 号	配 合 組 成			使 用 条 件	備 考
			mol	g/t	hr		
l)	チエノ酸二アンモニウム EDAT N-フェルチオ尿素	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HCO <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>7</sub> (-CH <sub>2</sub> N(CH <sub>2</sub> COOH) <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NHC <sub>2</sub> NH <sub>2</sub>	0.4 0.012 0.03	100 0.4 4.5	— 1~4	85	フェニルチオ尿素あるいは他の感食抑制剤は、今日でも、炭素繊維の感食減少に寄与している。
m)	ショウ酸 チエノ酸二アンモニウム 硝酸第2鉄 ジエチルチオ尿素	H <sub>2</sub> (COO) <sub>2</sub> (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HCO <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NHC <sub>2</sub> NH <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.3 0.2 0.01 0.01	25 50 2 1	— 1~4	85	炭素繊維の感食が非常に低く、炭素繊維の存在下でも比較的安定している。数時間も炭素繊維に高温(85°C)接触した後でも沈殿を形成しない。铁酸化物ニッケル酸化物の溶解除去。APにつづく2nd stepに用いる強力な除染剤として広く用いられている実績が多い。
n)	過酸化水素 重炭酸ナトリウム 炭酸ナトリウム EDTA 8-ヒドロキシキノリン	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> NaHCO <sub>3</sub> Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (-CH <sub>2</sub> N(CH <sub>2</sub> COOH) <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>9</sub> H <sub>11</sub> NO	0.25 0.25 0.25 0.013 0.006	8.5 21 27 3.8 0.9	— 1~2	60	燃料要素破損後の除染におけるファーストステップとしてUO <sub>2</sub> を溶解するために使用される。 とくに、比較的大きな微粒子については、ショウ酸一過酸化水素と同様に効果的でない。
o)	三酸化クロム	CrO <sub>3</sub>	0.01	1	—	—	UO <sub>2</sub> の溶解や除染のために用いられる。
p)	フッ化水素酸 硝酸	HF HNO <sub>3</sub>	— 20.0%	— 3.0%	— 2.5	室温	腐食性大きい。 短時間使用。
q)	ショウ酸 フッ化水素酸 過酸化水素	H <sub>2</sub> (COO) <sub>2</sub> HF H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.4 0.1 0.02	36 2 2**	1~4	95	高温ガス(H=500°C)に曝された放射性汚染を伴うヘチマヘスペード面の除染用、ステンレス鋼、インコネルに用いられる。炭素繊維、シリカロイー2、アルミニウムには腐食が大きい。
r)	キレート剤 有機酸 インヒビター	—	—	7.0%	100~200	120	シングルステップ法としてドレスデン1号炉用除染剤として開発されたもので、既、クロムおよびニッケルの酸化物を溶解除去する。
s)	Can-Decon LND-101	キレート剤 有機酸	—	—	~20	80~120	除染液中に溶出した金属イオンをカチオン樹脂で吸着再生し、溶出する金属イオンがなくなるまで循環処理する。 除染終了後除染槽を泥底す脫塗壁面で回収する。 Candu炉での実績があり、迅速に除染できることと、化学除染液が生じないのが特徴である。

\*: NaOHの代りにKOHを用いることができる。

\*\*: 30%過酸化水素水溶液

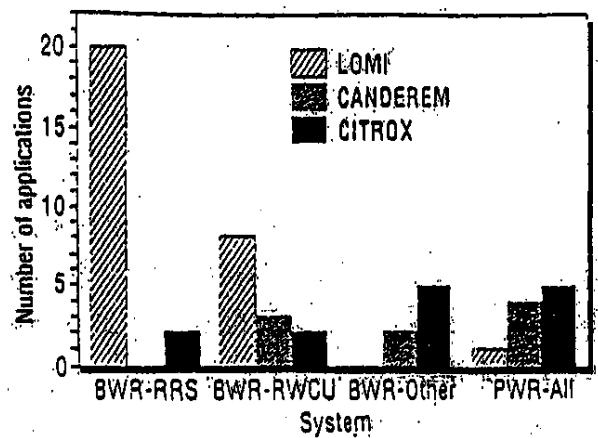


図1. 除染対象機器・系統と方法

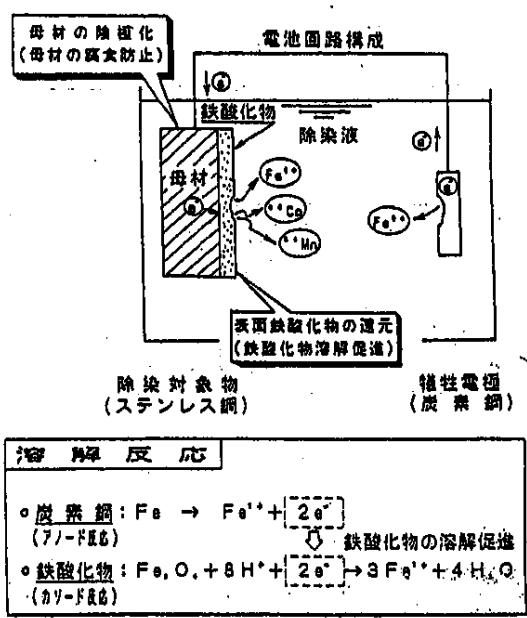


図2. 犠牲電極接触による鉄酸化物溶解機構

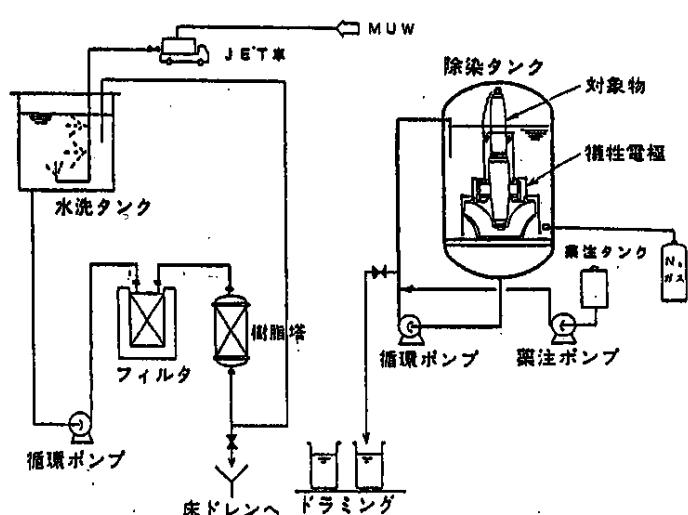


図3. ポンプ化学除染装置概要

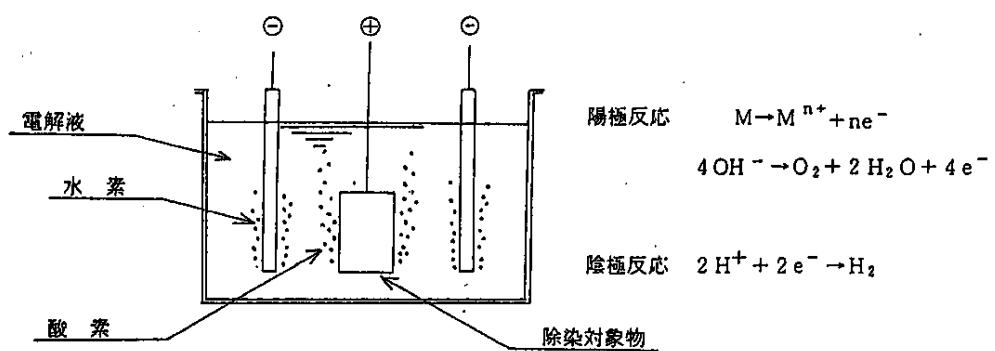


図4. 電解研磨除染法原理

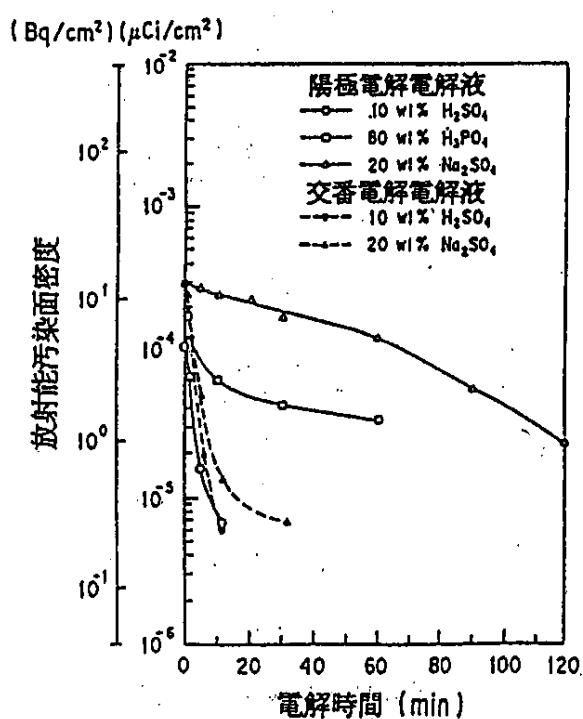


図5. 炭素鋼の電解研磨除染特性の比較

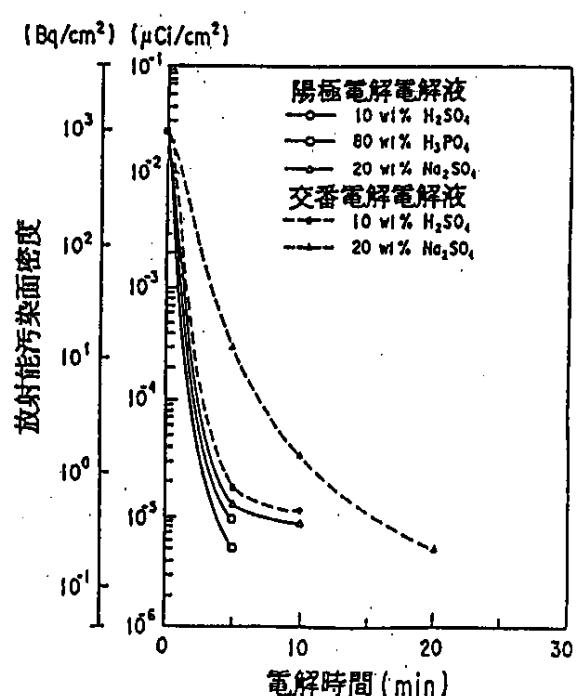


図6. ステンレス鋼の電解研磨除染特性の比較

**資料－2**

**「除染実施報告事例集」**

## 資料-2.1

タイトル：「BWR及びPWRの一次冷却系除染試薬候補」

“Candidate Reagents for Activity Reduction in BWR and PWR Primary Systems”

出典：

著者：A.B. Johnson, Jr., B. Griggs, R.L.Dillon

(1)目的：BWR、PWR一次冷却系配管の放射能低減のため、BWRから3件のサンプル、PWRから7件のサンプルの実試料について貫流式実験装置(OTTF)を使用して有効試薬を検討。

### (2)試薬としての基準

- ①一次系配管表面の放射性物質の除去と浮遊化
- ②除染剤とその分離生成物による配管腐食の最小化
- ③除染剤は熱的・放射線的に安定、一次系運転条件下で無害
- ④イオン交換、濾過での放射能除去が容易
- ⑤中性子束下で強力な放射化核種を生成しない

### (3)試薬候補の選択法

- ①除染技術評価と期待試薬の特性調査
- ②従来の試薬は有機酸、キレート剤、少数例として無機酸
- ③有機酸やキレート剤の単独あるいは組み合わせ試験の実施
- ④酸化した実験材料でビーカーあるいは貫流式実験装置でのコールド試験後、原子炉からの実試料を用いたホット試験の実施

### (4)実験装置

除染実験装置をFig.1に示す。

除染試薬加熱(90~180°C)、流量~120ml/分(線速1m/分)

### (5)BWR用試薬と結果

Table 1.に試薬等のBWRでの試験条件を、BWR試料による試験結果をFig.3に示す。

実試料出所：Vermont Yankee炉、Millstone炉、Quad Cities炉の放射性304ステンレス鋼配管

(試験条件及び結果概要)

a. 混合試薬：0.001M HEDTA(ヘキサエチレンジアミン四酢酸)

- 0.0005M Citric Acid (クエン酸)
- 0.0005M Oxalic Acid (しゅう酸)
- b. 試験条件： 温度 180°C、PH 3.6
- c. Co-60 除去率： Vermont Yankee ~88%
- (300 分後) Millstone ~94%
- Quad Cities ~60%
- d. BWR炉にはヒドラジン等による還元剤添加が有効
- e. イオン交換による放射性汚染物除去には、強力錯体を形成する EDTA、NTA (二トリロ三酢酸) より HEDTA が有効
- f. 流速、流量、温度は溶出元素の浮遊状態、濾過に関係し、除染効果に影響する。
- g. キレート剤は焼く 140°C以下のPWR条件下では、熱的、放射線的分解は許容範囲である。
- h. 今後さらに検討必要。

#### (6) PWR用試薬と結果

Table2 にPWRでの試験条件を、Figure 3.に結果概要を示す。

- a. 選別試験：種々の試薬で浸漬試験
- b. 単一試験：実状での OTTF での試験
- c. 実試料 : PWR・蒸気発生器、Inconel 600  
 Indian Point 2 --- WH 800 MWe PWR 試料  
 炉試料
- d. BWRで有効な試薬必ずしもPWRで有効でない
- e. Co-60 除去は  $\text{Fe}^{+2}$  より  $\text{Cr}^{+2}$  添加が有効、金属イオン還元剤を含む低 pH、キレート剤試薬がPWR蒸気発生器細管除染に有効
- f. EDTA による除染効果はPWRはBWRより悪い (Table 3.)
- g. 除染方法については、PWRはBWRよりさらに検討必要

Table 1. ステンレス鋼製BWR配管試料に対する試験試葉

Reagents Tested on Radioactive 304 Stainless Steel BWR Pipe Specimens

Reagent	Range of Conditions			Redox Conditions	Remarks
	Concentration Molarity (a)	Temp °C	pH		
NTA	0.002	180	5.5	~300 ppb O <sub>2</sub>	Vermont Yankee
EDTA	0.00002 to 0.002	90 to 180	3.5, 5.5, 7.5	~300 ppb O <sub>2</sub>	Vermont Yankee
EDTA	0.002	180	5.5	a) 43 ppm O <sub>2</sub> b) N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (low O <sub>2</sub> )	
EDTA	0.001	90	3.3 to 3.6	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Vermont Yankee (Beaker test only)
Oxalic Acid	0.0005				
Citric Acid	0.0005				
HEDTA	0.001	120	3.5	<50 ppb O <sub>2</sub>	Millstone, Quad Cities,
Oxalic Acid	0.0005	150		N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Vermont Yankee
Citric Acid	0.0005				
Oxalic Acid	0.002	120 to 150	3.5	<50 ppb O <sub>2</sub> N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (MS/QC) NH <sub>4</sub> OH (VY)	Millstone, Quad Cities, Vermont Yankee
HEDTA	0.002	120 to 150	5.5	<50 ppb O <sub>2</sub> NH <sub>4</sub> OH	Vermont Yankee

(a) Conversions-molarity to ppm

NTA 0.002 M = 382 ppm  
EDTA 0.002 M = 584 ppm  
HEDTA 0.002 M = 556 ppm

Oxalic Acid 0.0005 M = 45 ppm  
Citric Acid 0.0005 M = 105 ppm

Ms = Millstone-1

QC = Quad Cities-1

VY = Vermont Yankee

Table 2. インコネル600 製PWR蒸気発生器細管試料に対する試験試葉

Reagents Tested on Radioactive Inconel-600 PWR Steam Generator Tube Specimens

Reagent	Range of Conditions			Redox Conditions	Remarks
	Concentration Molarity	Temp °C	pH		
EDTA	0.002	180 150 105	5.5, 9.0	a) ~0.3 ppm O <sub>2</sub> b) ~40 ppm O <sub>2</sub> c) 0.004 M N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> d) 50 and 100 ppm H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> e) H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> /LiOH	Specimens for I-4-3OHL and IP2(a) I-4-3OHL-2 IP2-3-2
NTA	0.002	180	5.5	~0.3 ppm O <sub>2</sub>	I-4-3OHL-3
DTPA	0.002	180	5.5	~0.3 ppm O <sub>2</sub>	I-4-3OHL-3
EDTA	0.001	180	5.5, 3.5	a) ~0.3 ppm O <sub>2</sub>	I-4-3OHL-4, IP2-3-3
NN <sub>4</sub> Cit.	0.0005	90		b) 100 ppm H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	I-4-3OHL-4, IP2-3-3
NH <sub>4</sub> Oxal.	0.0005				
EDTA/Lactic Acid	.001/.001	180	5.5	~0.3 ppm O <sub>2</sub>	IP2-3-4
DCTA/Citric Acid	.001/.001	180		~0.3 ppm O <sub>2</sub>	IP2-3-4A
Salacilic Acid	.002	180		~0.3 ppm O <sub>2</sub>	IP2-3-4B
Gluconic Acid	.002	180		~0.3 ppm O <sub>2</sub>	IP2-3-4C
HEDTA <sup>(b)</sup>	.002	180		~0.3 ppm O <sub>2</sub>	IP2-3-4D
Acetohydroxamic Acid	.002	180		~0.3 ppm O <sub>2</sub>	IP2-3-4E
Dihydroxybenzoic Acid	.002	130		~0.3 ppm O <sub>2</sub>	IP2-3-4H
Mendelic Acid	.002	180		~0.3 ppm O <sub>2</sub>	IP2-3-4I
EDTA	.002	180		O <sub>3</sub>	
EDTA	.002	180	3.5, 5.5, 4.8	a) 50 ppm Fe <sup>++</sup> b) 20 ppm Cr <sup>++</sup>	IP2-3-4L Mod. Rate IP2-3-5 Rapid Rate
HEDTA <sup>(c)</sup>	.002	180	3.5	a) 0.8 to 1.2 ppm O <sub>2</sub> b) N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	IP2-3-7
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> LiOH <sup>(d)</sup>					

(a) 180°C, pH 3.5 and 5.5, ~0.3 ppm O<sub>2</sub>.

(b) OTTF run segments also attempted using HMDA, TTHA, PDTA separately.

(c) Several combinations: HEDTA + O<sub>2</sub>; HEDTA + H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>/LiOH; same with O<sub>2</sub>; H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>/LiOH, 2 ppm.

(d) Added to simulate PWR coolant: 2000 ppm boron as H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, LiOH, 2 ppm.

Table 3. 原子炉一次系に取付けたBWR及びPWR試料の放射能除去率比較

試薬: 0.002M EDTA, pH 5.5 及び 3.3, 温度 180°C、試薬流量: 115~125 ml/分

Comparison of Activity Removal Rates for One  
BWR and Two PWR Specimens Filmed in Reactor  
Primary Systems. Reagent and Conditions:  
0.002 M EDTA, pH 5.5 and 3.3, 180°C; Flow,  
115 to 125 ml/min

Specimens	Activity Removal Rate % Per Min.	
	pH 5.5	pH 3.5
BWR, Specimen Y-5 $^{60}\text{Co}$	1.9 <sup>(a)</sup>	
BWR, Specimen Y-13 $^{60}\text{Co}$		2.4 <sup>(a)</sup>
PWR, Specimen I-4-30HL-2 $^{60}\text{Co}$	0.037	0.065
PWR, Specimen IP-3-2		
$^{58}\text{Co}$	0.020 <sup>(b)</sup>	0.033 <sup>(b)</sup>
$^{60}\text{Co}$	0.020	0.033

(a) Rates for the first ~20 min; average rate over  
the first 150 min (to 85% activity Removal) is  
0.57%/min for Y-5 and Y-13

(b) Corrected for Decay; initial separation of the  
 $^{58}\text{Co}$  and  $^{60}\text{Co}$  curves exceeds effect of decay.

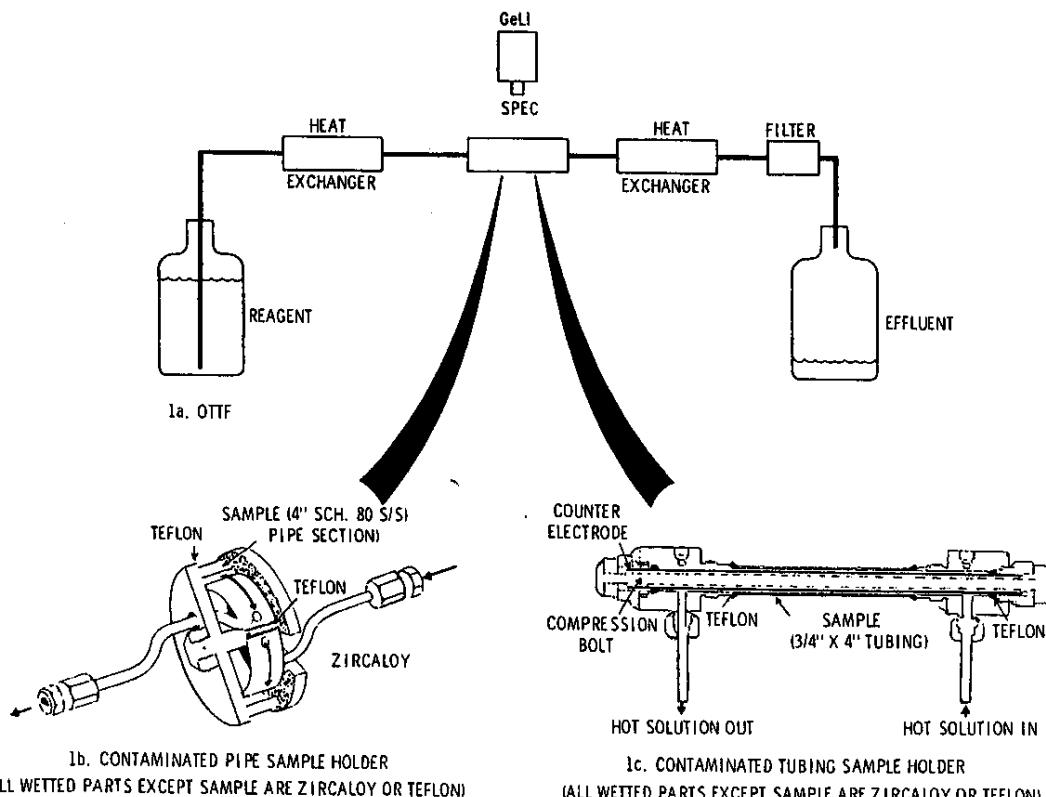
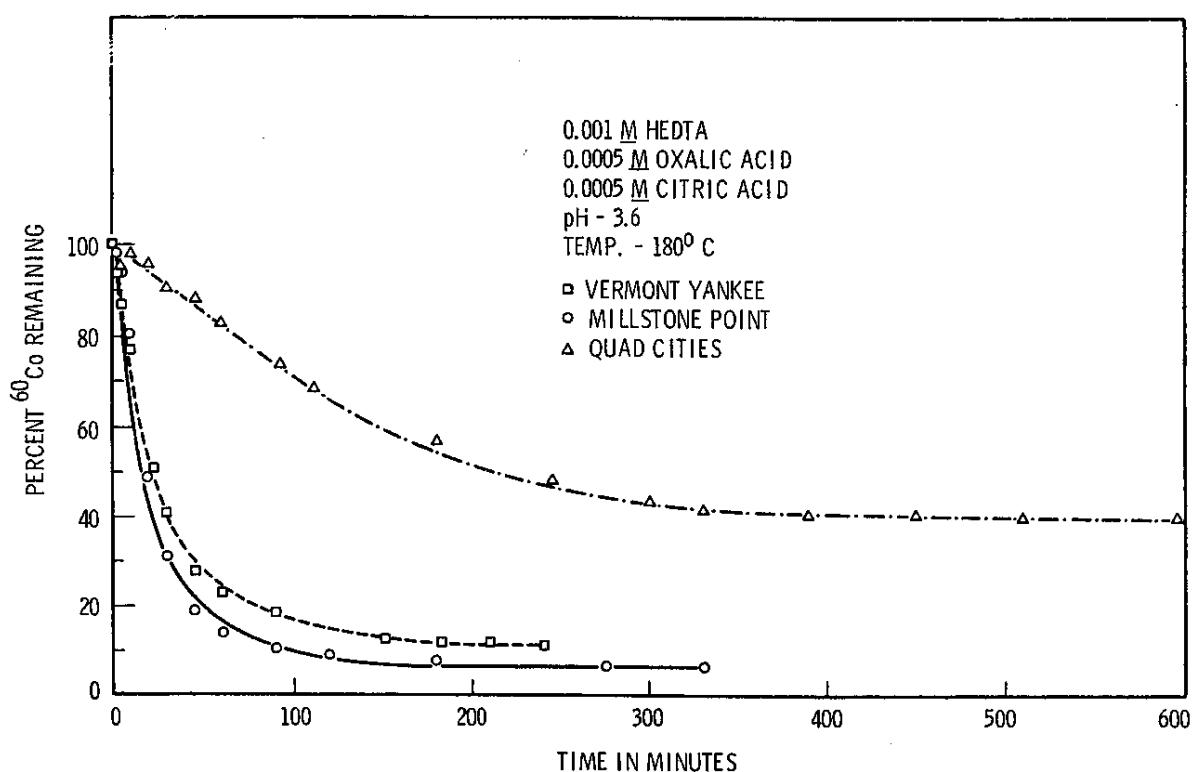


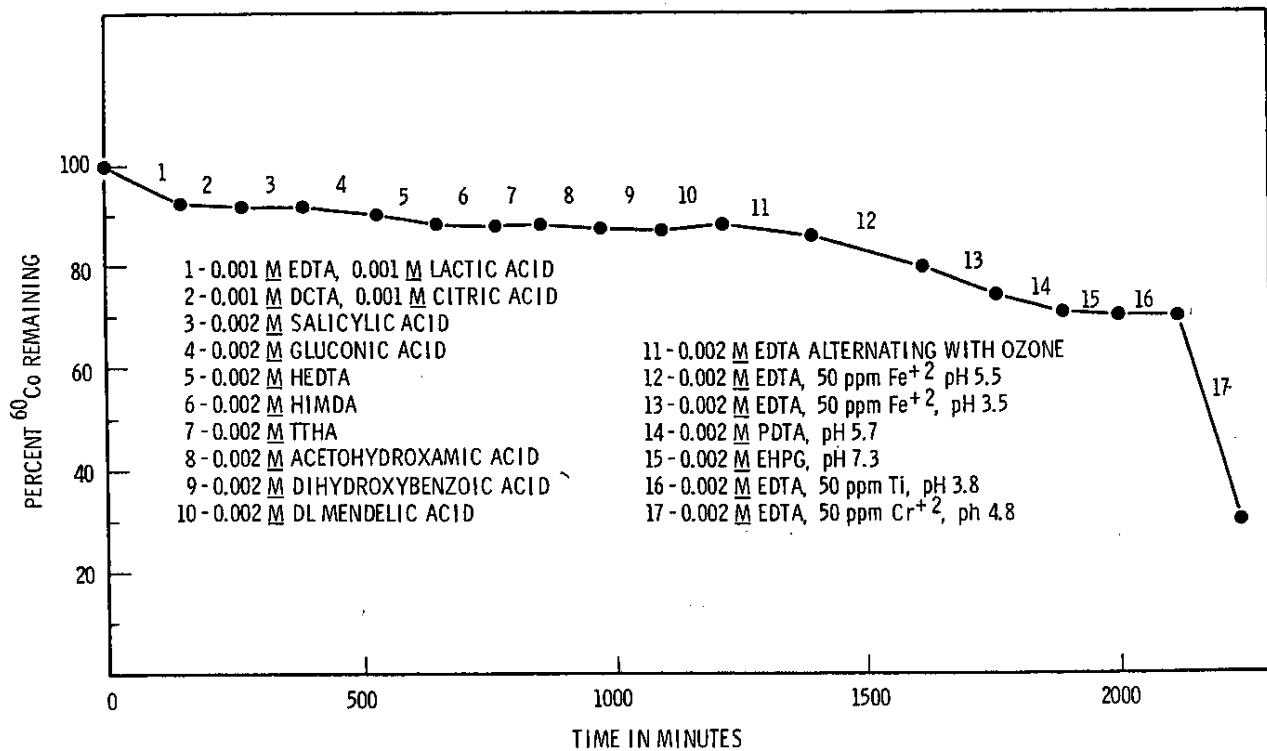
Figure 1. OTTF Configuration and Specimen Holders

Figure 1. 除染実験装置概要



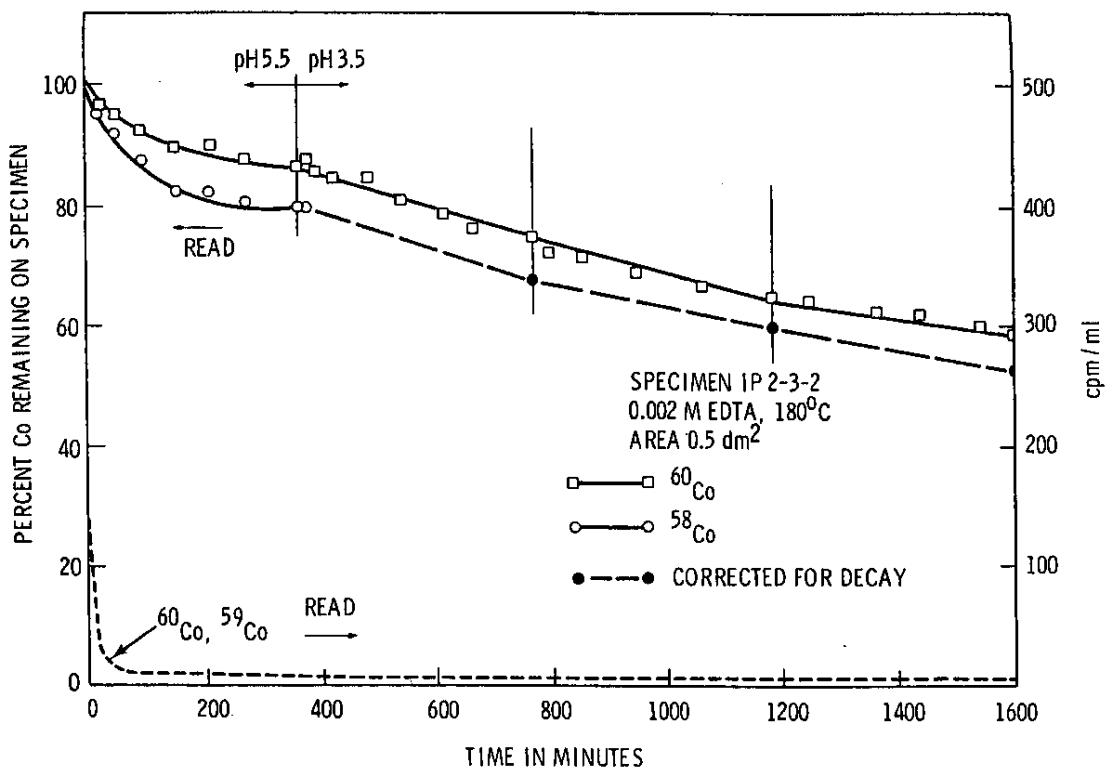
Decontamination of BWR Four Inch Pipe Specimens in OTTF; Material is 304 Stainless Steel

Figure 2. BWR配管試料による除染時間と残留コバルト-60（試料はステンレス鋼304）



Decontamination of PWR Specimen IP2-3-4; Temperature 180°C; Material Inconel-600

Figure 3. PWR試料による除染時間と残留コバルト-60（温度 180°C、インコネル-600）



OTTF Decontamination of PWR Steam Generator Tube Specimen (Activity and Isotope Concentration vs. Time); Material - Inconel-600

Figure 4. PWR 蒸気発生器細管の除染実験結果（放射能濃度 VS. 時間、試料はインコネル-600）

## 資料-2.2

タイトル：「PHWR 除染に対する設計上の考慮」

"Design Considerations for PHWR Decontamination"

出典：

著者：W.B. Stewart, T.S. Drolet (Ontario Hydro)

(1)目的：炉外熱輸送系統（蒸気供給系等）のメインテナンス、運転時の被ばく防止に有効な放射能除染技術の開発。AECL と OH (オンタリオハイドロ社)との協同研究。

### (2)設計上のオプション

- ①材料の仕様を厳しくし、放射性核種となる不純物を少なくする
- ②冷却材の不純物除去、精製率向上
- ③冷却材の化学特性の改善－腐食生成物発生と付着の最小化

### (3)技術開発概況

- ①一般的除染技術をもとに開発
- ②有機酸濃度を 6~10%にして試験
- ③重水系では化学試薬中の水素により重水が汚染するため高濃度の酸性プロセスは好ましくない。
- ④有機酸濃度 6~10%で試験

### (4)CAN-DECON 法－希薄溶液による CANDU-PHW 用除染法として開発

- ①利点－除染効率良好
  - －発電所スタッフで実施可能
  - －系統に残留した重水冷却材と一緒に使用可能
  - －除染時間が短くて有効
  - －配管腐食なく悪影響なし
  - －2 次廃棄物処理容易
- ②特徴－CAN-DECON 法での熱輸送系に入る化学試薬量
  - 最大添加量・・・1g/KgD<sub>2</sub>O (0.1%濃度)
  - －腐食粒子や溶解物質の冷却材へのとり込み容易  
粒子はろ過により、溶解物質はイオン交換樹脂で除去
  - －試薬や残りの溶解腐食生成物は最終の清澄工程で混床イオン交換樹脂で除去する
  - －熱輸送系（蒸気供給系など）の除染には水抜き、フラッシングが不用、高濃

度試薬を使用する通常除染法にくらべ、補助設備不要

- 試薬の再生は試薬量を最小にでき、同時に、放射性廃棄物は樹脂やろ材に捕集される。基本的には液体廃棄物を扱わないので処分の単純化が可能
- Gentilly-1, Douglas Point 炉の全系統除染法として実用している
- CAN-DECON の除染係数は強力な除染法より小さいが、短期間で安価に発電所スタッフによって実施可能

#### (5) Douglas Point での CAN-DECON 使用結果 (Table 1)

- ①炭素鋼の除染効果が大きく、230-250Ci の Co-60 を除去、処理
- ②除染に起因する装置の誤作動あるいは故障などなし
- ③除染作業中の被ばく 10 レム以下
- ④除染後、予定補修作業期間の被ばく量を 150-180 人レムに低減した
- ⑤原子炉停止後除染し、再スタートまで 72 時間で達成
- ⑥熱輸送系の平均リーク率は増加せず

#### (6) Pickering の CAN-DECON 精製装置と設計要件

熱輸送系概要図を Fig.1 に、精製装置概要を Fig.2 に示す。

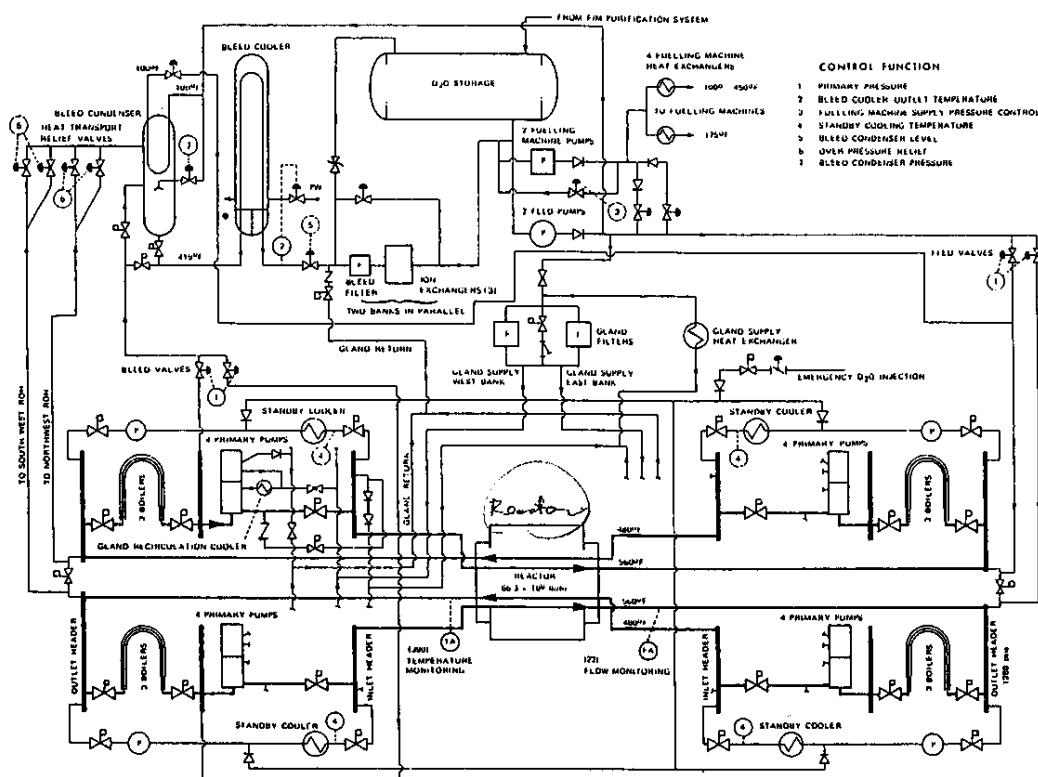
- 4 基のイオン交換塔とカートリッジ式フィルターを使用し、系統全体を遮へいし、除染中あるいは除染後近接区域での放射線量を 0.6mR/h 以下にしている。

Table 1.除染前後における汚染状況

SUMMARY OF RADIATION FIELD MEASUREMENTS

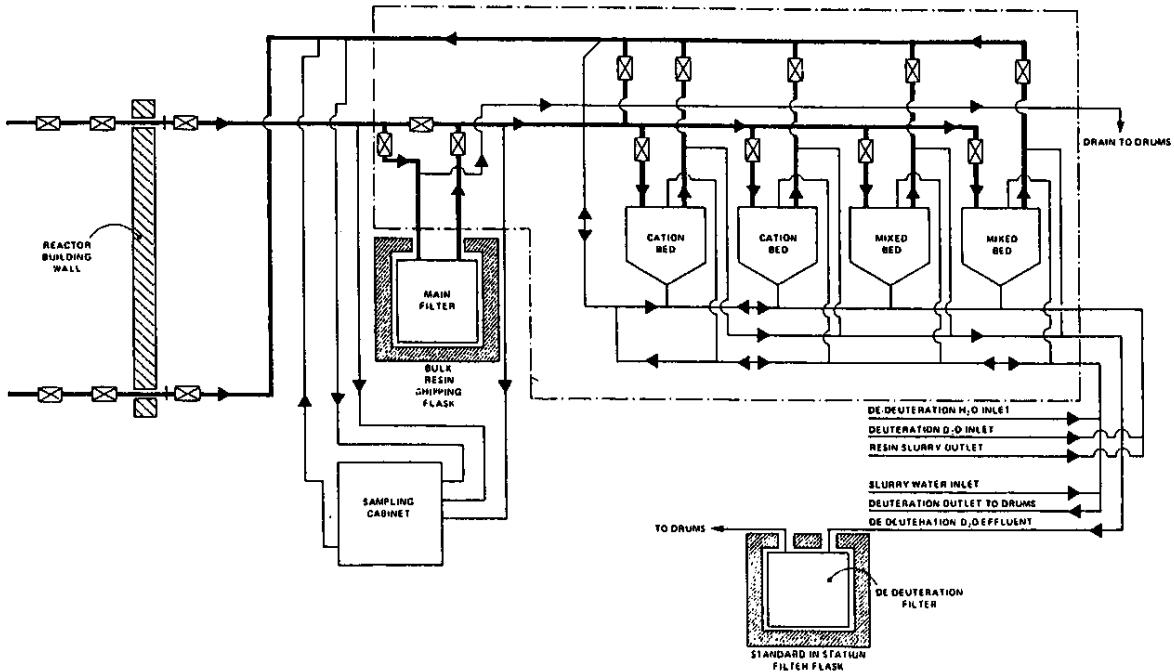
Location	Before CAN-DECON mR/h	Immediately After CAN-DECON mR/h	1 Year After CAN-DECON mR/h
Walkway at Feeder Cabinets	2000 - 3000	300 - 500	285 - 700
East Fuelling Machine Vault*	1900 - 7900	650 - 850	685 - 1470
West Fuelling Machine Vault*	1600 - 5800	420 - 970	515 - 1045
Lower Main Circu- lating Pump Area (Affected by Fields from Monel Boilers)	800 - 4000	500 - 1400	500 - 1750
Contact with Boiler Cabinets (Average)	520 - 1300 (810)	320 - 875 (540)	300 - 850 (530)

\* Measurements taken vertically up the center of the reactor face at 1.2 metres from the end-fittings.  
Fields increase with height as the feeder cabinet region is approached.



Pickering Heat Transport Systems

Figure 1. ピカリング発電所における熱輸送システム概要



Candecon Purification System Flow Diagram

Figure 2. CANDECON 精製システムフロー

## 資料－2．3

タイトル：「トリチウム用グローブボックス施設の撤去」

“Decommissioning of a Tritium Glove Box Facility”

出典：

著者：C. L. Folkers, S.F. Homann et al. (Lawrence Livermore Lab.)

(1)目的：トリチウム使用グローブボックス（9基～8m<sup>3</sup>）、および500t水圧プレスの再利用を目的とした撤去、その他ガス精製装置、GBエアロック接続フード（3基）等付属設備撤去

### (2)履歴

- ー トリチウム取扱量：1g
- ー 金属（Li, U, Ti, Zr, Ce 等）水素化物（トリチウム、重水素、軽水素）の研究
- ー 作業：破碎、粉碎、ふるい分け、重量測定、プレス、試験（熱分析、組織観察他）
- ー 汚染：トリチウムガス（HT）—ガス精製装置（Pd触媒）で除去  
トリチウム水（HTO）—モレキュラーシーブで捕集（5A, 140Kg層）

### (3)除染計画

- ① 防護具（衣）：H<sup>3</sup>汚染、吸入防止のため4回／時間交換  
1.75ミルポリエチレン肩掛け手袋、5ミルPVC手袋と木綿製作業衣  
(手袋2重着用)
- ② 排気系…0.75m/s
- ③ バイオ分析
- ④ 空気汚染連続モニター：β線計測、イオンチャンバー
- ⑤ H-3 室内平均濃度<10μCi/m<sup>3</sup>  
(デコミ期間中)  
[ 室内350μCi/m<sup>3</sup>になることあり  
10分で<10μCi/m<sup>3</sup>に下げる ]

### (4)トリチウム汚染状況

用途別許容汚染レベルをTable 1に、除染後の汚染状況をTable 2に示す。

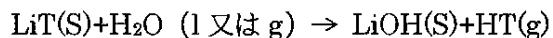
### (5)安全評価

仮想事故：1g トリチウム水（HTO）放出として、サイト外被ばく量30mRem以下  
(モレキュラーシーブ捕集でこれ以上にならない)

## (6)除染法と解体

### ①方針

－金属トリチウム化合物は  $H_2O$ ,  $O_2$  と反応しトリチウムを放出する。



但し  $TiT_2$  のような水素化物は安定であり、物理的分解除去が必要。

－安定なトリチウム化合物粒子の除去に水溶性洗剤を使用すると、不安定物質と反応しグローブボックスをトリチウムガス (HT) で汚染する。水使用は制限必要。

－付着汚染除去にはケロシンや鉱油を使用する。

### ②グローブボックス内機器撤去

－汚染トリチウム量の事前評価

－細断し 45L 缶に密封。缶のふたはシリコン系密封剤 (Silastic Sealant) でシールし、テープをはる。

－缶外表面は鉱油で拭きとり、フラッシュフードに移動し、プラスチックバッグで密封して 55 ガロン容器に保管 (トリチウムはプラスチックバッグを浸透する可能性あり)

### ③グローブボックス (GB) 除染 (Figure 1.)

－鉱油で先ず洗浄

－ケロシン洗浄つぎに洗剤入りケロシン洗浄

－水スプレーで反応性トリチウムを分解

－水と洗剤で 2 回洗浄

－GB 内をアルゴン雰囲気から空気雰囲気に置換、水洗 2 回

－窓、グローブ除去、周辺を水溶性洗剤で洗浄

－GB 全体を水溶性洗剤で洗浄

－GB とフランジ切離し

－除染のポイント

(I) 繰返しごとく落として目標レベル ( $2000\text{dps/cm}^2$ ) 以下に出来る

(II) ボックスコーナー部は高圧ノズルで水スプレー除染

(III) 水使用にあたり大型モジュラーシーブのバルブを開け、ボックス内にドライヤーを取り付けた。正規の精製系プロワー、触媒は HT ガスか HTO になるよう調整した。GB 内は数百 ppmO<sub>2</sub> を含むアルゴン雰囲気であり、水使用に対し制限がなくなり作業が容易になった。

(IV) ケロシンに無水性非イオン界面活性剤 (例えば商品名 2v/o Triton CF-10-オクチルフェノールベンジルエーテル等) を入れ数種の試験検討をした。なお、付着汚染除去にケロシンに優るものはなかった (Figure 1.)

(V) 大部分の GB 除染がおわったのち、BOX 内は約 30 日間空気を吹き込んだ。この間に窓やグローブ撤去、BOX 内表面の拭きとりをした (Fig.3 K)。トリチ

イウム增加はなくエアロック表面に僅かの増加があった。

④窓、グローブ、付属品撤去

除染目標レベル 2000dps/cm<sup>2</sup> 以下にして撤去

撤去時可搬型アクリル製フードを排気フロワーと一緒に使用し、汚染拡大防止を図った。

⑤ガス精製装置の撤去

窓と同じ、パイプは細断しキャップをして処分

⑥グローブボックス部の分離

GB 上のフランジ (10×15cm) を空気流の中ではずし、フランジの下はプラスチックシートをはった。フランジは除染ゴムガスケットも撤去処分、作業区域は空気流を増やし汚染拡大防止を図った。

(7)特記事項

①スミヤー紙の改良

グリセロールを湿らせた綿棒を使用した。GB 内汚染測定は綿棒をガラス瓶に入れバッグインし、サンプリング後プラスチックバッグ内に密封し、バッグアウト後測定した。

②原位置充填塔ドライヤ

通常のモレキュラーシーブの代わりに安価で、GB 内で使用可能な一時的乾燥塔を作成して使用した。乾燥剤の取り替えが容易で効果があった。GB 内の雰囲気水分を 2 時間で 30000ppm から 2000ppmH<sub>2</sub>O に下げる事ができた。

③バイオ分析

- ・最低、週単位で採尿検査、激しい作業時は毎日採尿検査を実施。
- ・全作業者積算線量 420mrem (6ヶ月間)
- ・個人最大被ばく線量 110mrem (6ヶ月間)
- ・規定内の線量で作業完了

④ゴムガスケット

エアロック扉その他から数個のガスケット (材質 BUNAN) を回収して検査した。ガスケット内のトリチウム (2mCi/g) で 11 年間照射されたが、多少の硬化現象が観察されたものの性能上問題なく、再使用可能であった。

(8)結論

GB 内トチチウム除染では、以下の作業が有効であった。

①繰り返し洗浄。

②最初は有機溶媒 (ケロシンなど)、次に水と洗剤で除染。これにより汚染濃度を 6 衍下げ、約 10~100dps/cm<sup>2</sup> に下げる事ができた。

③臨時にBOX内に設置した充填式乾燥塔は、安価で乾燥剤の交換も容易で水使用量制限を解除できた。

Table 1.用途別トリチウム汚染許容レベル

Maximum Levels of Tritium Surface Contamination Allowed for Various Uses.

Item	Maximum Allowable Level (dis/s·cm <sup>2</sup> )
Equipment for unrestricted use, including general public <sup>a</sup>	1
Equipment or furniture, use limited to offices within our tritium facility <sup>a</sup>	2
Equipment or furniture, use limited to laboratories within our tritium facility <sup>a</sup>	20
External surfaces of equipment to be sent to SLL for use in their tritium facility	2
Internal surfaces of equipment to be sent to SLL for use in their tritium facility	2000 <sup>b,c</sup>

<sup>a</sup>Taken from Ref. 5.

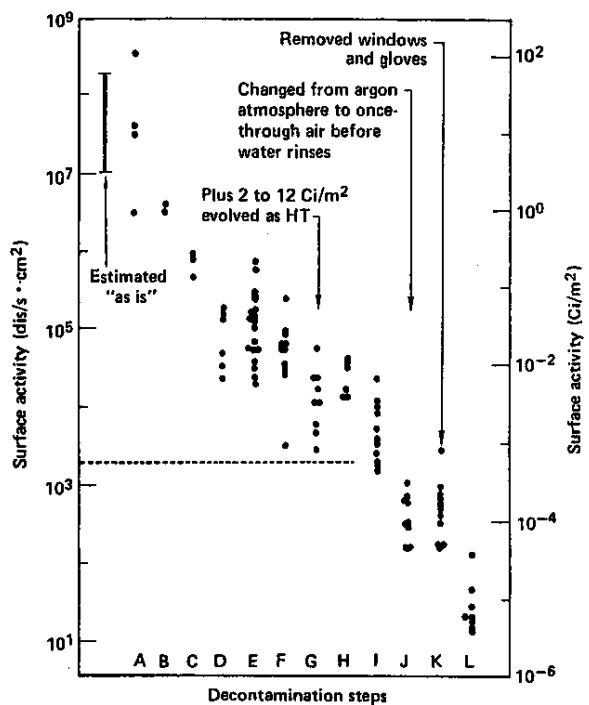
<sup>b</sup>Each glove-box section also limited to total (absorbed plus swipable) tritium of  $1 \times 10^{12}$  dis/s ( $\sim 25$  Ci).

<sup>c</sup>Enclosed during shipment; required continuous ventilation except during shipment; required protective clothing during work.

Table 2.トリチウムを11年間使用後のグローブボックスの汚染状況

Tritium Contamination Levels in a Research Glove-Box Facility After Exposure of Glove Box to Solid Tritium Compounds for Over 11 Years.

Item	Measured Contamination Level
Molecular-sieve bed, 140 kg type 5A, tritium stored as HTO	$\sim 9 \times 10^4$ Ci (estimated)
Equipment and surfaces inside glove box	$0.3$ to $30 \times 10^7$ dis/s·cm <sup>2</sup> (1 to 100 Ci/m <sup>2</sup> )
Equipment and surfaces inside flush hoods	$0.7$ to $800 \times 10^3$ dis/s·cm <sup>2</sup> (0.2 to 200 mCi/m <sup>2</sup> )
External surfaces of glove box, purification system, nearby walls, floor, and furniture	$0.4$ to $8$ dis/s·cm <sup>2</sup> (0.1 to 2 $\mu$ Ci/m <sup>2</sup> )
Vacuum pump oil, pump used to recover hydrogen isotopes	$\sim 150$ mCi/l
Vacuum pump oil, pump used for glove-box atmosphere	1 to 30 mCi/l
Argon atmosphere inside glove box	$\sim 0.2$ Ci/m <sup>3</sup>



Glove-box internal-surface contamination as reduced by decontamination procedures. Area below dashed line shows target level of activity for shipment off site. The decontamination steps are:

A measured "as is"	F 2% Triton CF-10 with kerosene
B mineral oil	G water spray
C kerosene	H, I 2% X-100 with water
D kerosene	J water rinses (2)
E various detergents with kerosene	K air flush 30 days
	L swish; water and methanol rinse

Figure 1.除染後のグローブボックスの内部表面汚染状況

## 資料－2.4

タイトル：「H F E F / S アルゴンヌ霧囲気セルの除染と改造」

“Decontamination and Refurbishment of the Hot Fuel Examination Facility South (HFEF/S) Argon Cell”

出典：

著者：J.P. Bacca, R.L. Brookshier et al. (Argonne National Laboratory)

(1)目的：アルゴンヌ国立研究所のホットラボ HFEF/S のセル内設備・機器の補修・更新撤去のための除染

### (2)履歴

①セル内はアルゴン霧囲気で、1964年運開、1977年秋に停止して除染を開始した。E B R-II の炉心金属燃料の製造と乾式再処理、高速炉用燃料・材料の照射後試験を行ってきた。

②燃料：5% Fission+Uranium Metal, 5回ほどリサイクルする

Burnup 1 atomic %/サイクル、Pu: 0.06%  $^{239}\text{Pu}$ /サイクル

長寿命 FP:  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ - $^{137m}\text{Ba}$ , 他少量  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{155}\text{Eu}$  を含む。

### (3)施設 (Figure 1.)

セル内表面は炭素鋼でライニング、その表面は亜鉛引きされ、固定されている。内装設備は 5 t ブリッジクレーン 2 基、340 kg ブリッジ固定電動マニピュレータ 6 基、遮蔽窓 14 基。セル内表面積約  $1140 \text{ m}^2$ 。

### (4)除染法

#### ①遠隔除染

汚染放射能の強いセル内機器除染のため開発した遠隔技術を使用した。

i) 機器付着汚染：圧搾空気除染後、高圧水及び手拭き作業により除染。

ii) 床面汚染

・乾式法：電動式マニピュレータで床面を治具を使って遠隔ブラッシング、捕集は真空吸引

・湿式法：乾式除染後実施。セル床面を泡沫除染剤 TURCO#5865 (商品名) でぬらし、除染廃液は遠隔真空掃除機で捕集してドラム缶収納した。廃液は、Safe-T-Set (商品名) と混合して固化体として廃棄物管理施設に搬出。全床面湿式法を 2 回繰り返して実施。

#### ②直接除染

遠隔法でセル内入域可能レベルまで除染した後、作業者による直接除染法に切り換えた。特に、セルや設備機器の形状が複雑で、また遠隔法や特殊除染液で損傷する系統は手作業除染を実施。ANL-Westには大量の廃液処理設備がないため、湿式除染に工夫が必要であった。

i) 真空吸引・湿式法

[設備機器]

遠隔除染ができない天井、高所壁面ブリッジレール棚、レール、クレーンブリッジ、電動マニピュレータなどは、移動式高架台を設置して湿った布で拭き取り除染を実施。

[床面]

- Water Radiac Wash（商品名）を利用してブラシで繰り返しこすって落とした。  
時々、家庭用研磨剤入り洗剤も使用。
- Turco 発泡剤 (#5865) と一緒に動力式床面スクラバーも併用。
- 除染作業で発生した廃液は、真空吸引により 55 ガロン (0.24m<sup>3</sup>) 缶に捕集して、Safe-T-Set 剤で固化し固体廃棄物として処分。
- ホットスポット汚染は、グリス溶剤で繰り返し除染した。
- 一般的除染方法が適度に効果をあげた。

ii) 塗装剥離法

セル天井、壁、床面に Turco Water Base Latex (#5931)-ストリップブルコーティングを空気式スプレーガンで吹き付け、一定時間浸漬後、剥離する方法を実施した。しかし、剥離が困難で有効でなかった。

iii) 高圧ジェット水

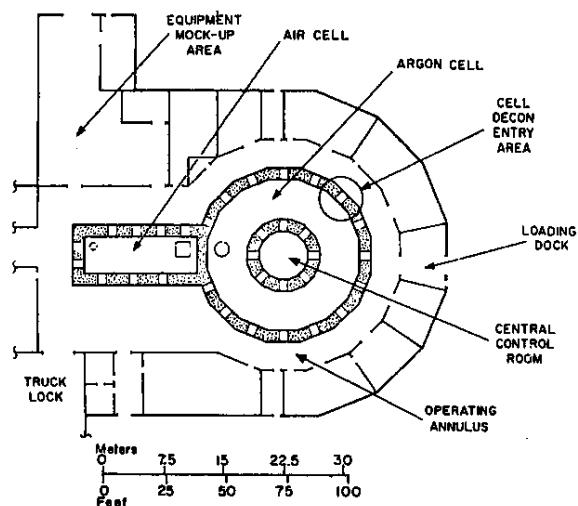
- 廃液処理上、固有の問題があるが試験した。除染効果があり有効であった。一般的セル内除染法として採用した。廃液量をできるだけ少なくするため、有効なノズル先端と壁面最大距離を決めて実施。送水量 0.25 リットル/s (2000psi=14Mpa) とした。
- 水の飛散防止には、ノズル周りにシュラウド取付けが有効であった (Figure 2.)。スプレー幅 150mm に調整。
- スプレーは水平移動で 50% オーバーラップで実施。水使用量は平均 19 ℓ/m<sup>2</sup>。
- スプレー時、セル窓、マスタンスレーブマニピュレータ、電気ケーブル等はカバー取付けを行った。
- セル内作業 2 人 / 1 入室。1人がウォータージェットスプレー、1人は真空吸引とサンプポンプを動かしドラム缶への捕集作業を行った。捕集水はセル壁貫通孔からセル外の 3.8m<sup>3</sup> トレーラータンクに移送し、廃液処理場に搬出処理した。

(5) 放射能測定

遮蔽及び非遮蔽の TLD と電離箱を使用し、除染後の放射能測定を行った。遮蔽は厚さ 5mm の Al を使用。

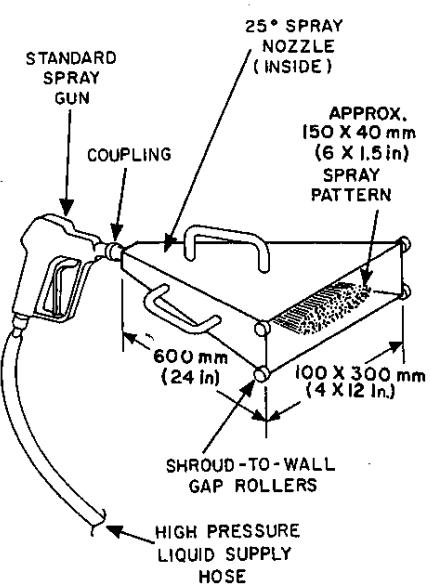
(6)安全問題その他

- ・除染廃棄物への燃料混入による臨界管理。
- ・被ばく防止対策（教育、防護具、給排気等）。
- ・作業管理（放射線モニタリング、作業出入り管理、異常時対応等）。



Plan View of HFFEF/South Hot Cells

Figure 1.ホットセル施設配置図



High-pressure Spray Gun and Shroud

Figure 2.高压ジェット水装置概要

## 資料－2．5

タイトル：「グンドレミング発電所の一次系部品の現場除染」

“In Situ Decontamination of Parts of the Primary Loops at the Gundremmingen Nuclear Power Plant”

出典：

著者：N. Eickelplasch, and M. Lasch

### (1)目的

1次系ループの再循環ポンプと2次系蒸気発生器の間にある、安全端子(safe ends)部分の切断・溶接工事前の配管除染。

### (2)作業状況予測

- ・線量と工事時間 800mR/h, 800時間以上
- ・被ばく予想 650man·rem

### (3)腐食層の状況

- ①層構造 表面(赤色)：ブラッシング除去可能  
下層(灰色)：薄層、化学除去法(研磨除去不可)
- ②クラッド成分 Fe, Ni 酸化物 (Figure 1.及び Figure 2.参照)  
マグネット、スピネル型  
線量～ $5\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$

### (4)化学除染法

改良型A P A C法 (KWU-APAC法)

(Alkaline Permanganate Ammonium Citrate)

- ①酸化剤(過マンガン酸アルカリ溶液)で90～100°C、2時間処理
- ②冷水洗浄
- ③除染液(Ammoniated Citric Acid - Oxalic Acid, EDTA混合溶液)で90～100°C、6時間処理、使用量約2m<sup>3</sup>。
- ④水洗
- ⑤ ①～④操作を繰り返す
- ⑥酸化剤6回、除染液2回繰り返し使用可能  
除染廃液は錯体形成のため処理不能、タンク貯蔵

(5)結果

除染係数 DF 10~19(在来法 APAC 法 DF 4)

線量 800mR/h → 50mR/h に低減

$\text{Fe}_3\text{O}_4$	67 %
Ni O	29 %
Cr, Cu, Zn, Co	< 4 %

Chemical Analysis of the Oxides

Figure 1.酸化物の化学組成

HLP	shut down	7 months later
Cr 51	27d	~ 5%
Mn 54	300d	8%                  18%
Fe 59	44d	~ 5%
Co 58	70d	50%                  7%
Co 60	5a	30%                  75%
total activity [ $\gamma$ ]	-5-10 $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$	-4-5 $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$

Radiochemical Analysis of the Crud

Figure 2.クラッドの化学組成

## 資料－2. 6

タイトル：「ハンフォード施設の除染とデコミに関するコスト／リスク／便益解析の概要」  
“Summary of the Development of a Cost/Risk/Benefit Analysis for the  
Decontamination and Decommissioning”

出典：

著者：R.A. Sexton, and J.P. Melvin

### (1)目的

- ①Z施設のD & D方法検討
  - 4ケースについてコスト／リスク／便益解析と評価 (Table 1)
- ②D & Dの最終目標、放射能レベル値の設定が重要因子

### (2)Z施設状況

- ①大型プルトニウム加工施設、全床面積 240000ft<sup>2</sup>、8つの施設からなる。加工施設、研究所、管理棟、貯蔵施設、総合廃棄施設、200ft 煙突等 (Figure 1.)。
- ②Pu、Am で汚染されている。
- ③再処理工程からの硝酸プルトニウム溶液から金属 Pu を生産する施設。
- ④236Z 施設；Pu 金属還元時のスクラップや廃溶液から Pu 回収、再利用施設。
- ⑤1948 年着工、1949 年運転開始。

### (3)D & D 検討法 (Pu 施設)

- ①基本条件：10nCi/g 以上の TRU 廃棄物をできるだけ低減
- ②TRU 処分法：回収可能な形式で 20 年間埋設、その後再処理して永久処分する。
- ③除染法：振動研磨法、電解研磨法
  - ・振動研磨法：  $\alpha - 10\text{nCi/g}$  以下に可能  
表面汚染 - 1000dpm/100cm<sup>2</sup> 以下は不可能
  - ・電解研磨法：  $\alpha - 10\text{nCi/g}$  以下は不可能  
表面汚染 - 1000dpm/100cm<sup>2</sup> 以下に可能  
溶接部除染可能

### (4)D & D 法決定基準

- 正味コスト、個人被ばく量、サイト外リスクの 3 因子
- 1)コスト基準 ①除染量
  - ②廃棄物管理（処理、処分、輸送）
  - ③残存汚染施設の維持管理

- ④施設資産又は、除染後再利用可能な不動産
- 2)被ばく基準 ①除染時の被ばく  
②廃棄物管理時の被ばく  
③残存施設の維持管理に伴う被ばく
- 3)サイト外リスク  
①施設解体後の汚染リスク  
②処分廃棄物のリスク  
③除染事故によるリスク
- 上記リスクと現状施設のリスクを比較検討  
リスク表示方法：man·rem と被ばく確率の積で表示

#### (5)計算プログラム

次のサブルーチンで構成

- ①施設情報：Z プラント 400 室、10 万以上のデータ必要、放射性／非放射性区分
- ②サイト外線量：公衆被ばく評価（仮想事故等）
- ③D & D 作業：6 グループ区分、各グループはサブグループよりなる
- ④ユーティリティーモデル：施設の回収、再利用価値、撤去費、施設維持管理等の被ばく量評価

#### (6)データ収集と分析

計算入力データの収集

#### (7)D & D 作業区分

- 1)一般区分 ①グローブボックスとフードの除染と撤去  
②各種機器撤去  
③配管除染と撤去  
④導水管の除染と撤去  
⑤換気系の除染と撤去  
⑥構造物除染
- 2)サブグループ  
各区分は小グループに分類

#### (8)コスト評価

- 1)施設情報をもとに各サブグループ内で実施に必要なユニット当たりの人工数と人工数あたりのコストをもとに評価する。コストは 1979 年現在のドル価格で評価する。
- 2)各サブグループのコストは多数の実施ユニットの積算として評価する。

- 3)各サブグループは以下の荷重ファクターを考慮する。
- ①4人組必要の有無
  - ②防護服、顔面マスクの着用の有無
  - ③Z-プラント作業での安全要求追加事故の有無
  - ④技術的サポート及びその他機能によるサポートの有無
  - ⑤高所作業有無
  - ⑥その他
- 4)計算機には最終の残存放射能許容レベルを入力する。コンピューターは施設情報データをもとに、最終目標放射能レベルを満足するかチェックする。不合格の場合はそれ以下にする除染法を追跡し、目標達成法を見出す。
- 5)汚染レベルが許容レベルを超える場合はの処置法
- ①各目的に対し優先する基準が指定される。  
例：外表面は受入可能なレベルでも、全GBと配管・ダクト等、内表面に汚染がある場合は、無制限再利用基準は適用されない。
  - ②各サブルーチンには決まったDF（除染係数）がある。重要な優先基準がない場合は、コンピューターは許容レベルに表面除染できる十分な高DFのサブグループを探し出してくる。  
例：ペンキ塗装のコンクリート壁が汚染していた場合、そのレベルが許容レベルの2倍の場合、DF=2のサブグループ“手作業除染”の除染法が表示される。許容レベルの50倍の汚染では、DF=100のサブグループ“研磨材入りプラスチック除染法”を選択してくる。
- 6)D & Dの方法が決定すれば作業スケジュールと適切なエスカレーション要因を考慮してコスト評価を行う。

#### (9)作業被ばく計算

##### 1)除染工程

- ①施設維持管理時被ばく
  - ユティリティサブルーチンモデルで計算
  - 年間全身被ばく量から計算
  - ・残存汚染放射能目標値（規定）から平均線量率 (man·rem/h) の推定
  - ・年間運転保守時間（個人当たり）設定 h/y
  - ・被ばく量 = 平均線量率 × 年間運転保守時間
- ②除染作業時被ばく
  - D & D作業の各サブグループの被ばく計算
  - 人工数 (man·h) × 被ばく率 (内・外部) (rem/man·h)
  - ・外部全身被ばく量

- a.室内線量率 室内放射線モニター、線量ベース
  - b.近接線量率 各G B内、R I在庫量ベース
  - c.全身被ばく量 上記 a.と b.の合計
- ・内部吸入被ばく量  
因子：各サブグループの空気汚染（表面汚染レベルと気流による）レベル、ア  
イソotope組成、作業者呼吸率、防護要因係数（マスク等）、被ばく時間。

#### (10) サイト外リスク

各D & D作業でのリスク評価

1) 基本ケース 対象：停止中の放射能施設

在庫放射性核種とその量、事故の可能性、公衆災害リスク

2) リスク区分 施設自体のリスク（閉鎖中）

D & D作業によるリスク

廃棄物処分リスク（処分廃棄物）

3) リスク評価  $\Sigma$ （事故確率×予想災害規模）

4) 線量換算 P N L計算コードによる

被ばく人口×被ばく量

50年先以上のリスク評価は無意味。建物の老朽化、気象、人口等の諸条件が変化する。

P u、A mの半減期は長く、建物の寿命中でもリスク変化はないと考える。

#### (11) 結果

まだ結論は出ていないが、次の比較はD & D実施上有効と考える。

①年間リスク低減に対し、1回のリスク増加

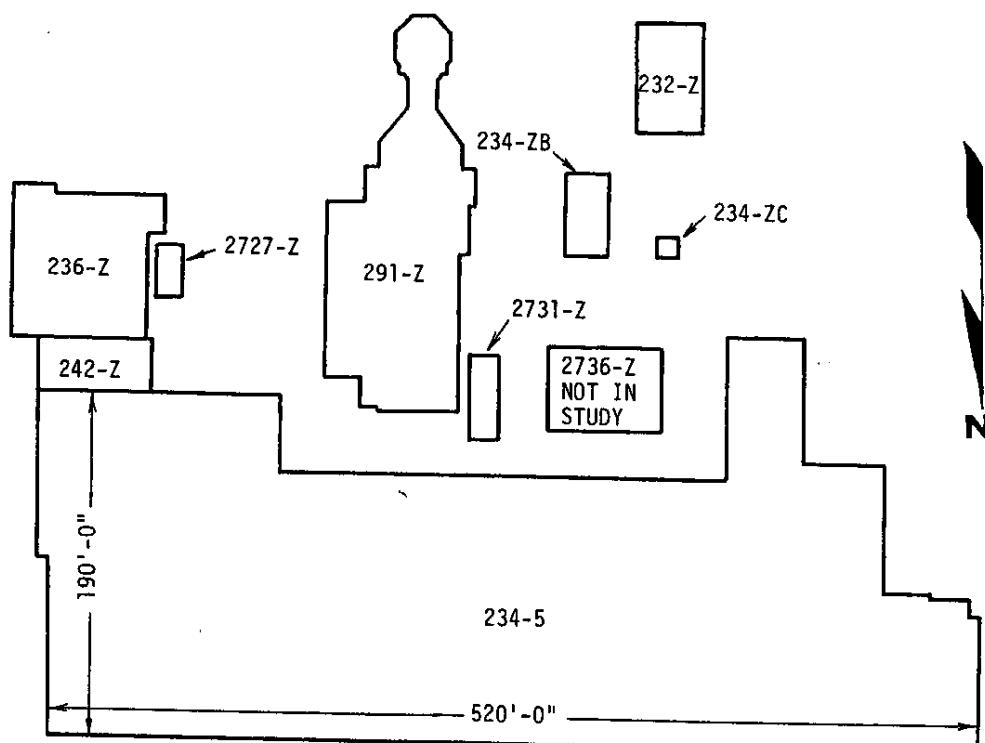
②年間維持管理被ばく対D & D被ばく

③正味放射線リスクの減少対D & Dコスト

④年間維持管理コスト低減対D & Dコスト

Table 1.除染後の利用目的別の除染目標

	Typical Permissible Use	Fixed	Removable
1) Unrestricted	Office Space	200dpm/100cm <sup>2</sup> $\alpha$	20 dpm/100cm <sup>2</sup> $\alpha$
	Storage Space	0.02 mrem/hr	200 dmp/100cm <sup>2</sup> $\beta, \gamma$
2) Conditional	Analytical Lab	2000dpm/100cm <sup>2</sup> $\alpha$	20 dpm/100cm <sup>2</sup> $\alpha$
	Storage of Contained Rad. Materials	0.1mrem/hr	200 dpm/100cm <sup>2</sup> $\beta, \gamma$
3) Restricted(use)	Low Level Decontamination Facility	20,000dpm/100cm <sup>2</sup> $\alpha$	20 dpm/100cm <sup>2</sup> $\alpha$
	Packaging of Low Level Rad. Waste	0.2 mrem/hr	200 dpm/100cm <sup>2</sup> $\beta, \gamma$
4) Restricted (Non-Use)	No Permissible Use The Facility is isolatede	Deactivated Facility - No D&D	



Buildings Included In Cost/Risk/Benefit Analysis

Figure 1.コスト／リスク／便益評価の対象となった施設の配置図

## 資料 - 2 . 7

タイトル：「除染法のLWR放射性廃棄物処理システムに与える影響調査」

"The Impact of Decontamination on LWR Radioactive Waste Management Treatment Systems"

出典：

著者：G.R. Hones et al.

### (1)目的

LWR供用期間中のLWR運転保守作業で行われる除染法が廃液処理システムに与える影響を調べる。

### (2)調査

#### 1)機械的除染法

流体又は研削材、研削技術使用の流体による除染法・廃液処理系

- ①沈殿タンクで大粒子分離：大粒子によるパイプ、構造材損傷防止
- ②廃液濾過、濾液は廃液処理施設で処理：系統への影響なし
- ③機械的除染法の放射線被ばく量に関する定量的情報なし。

本法は、一次系ループの限られた場所で使用され、発生液量が少量で影響も小さい

- ④本法は高放射性クラッド蓄積部分で使用

廃液は高放射性、被ばく量も大きくなる。被ばく率や関連した問題は他の除染法と共通。

#### 2)希薄液除染法

弱酸又は弱酸塩、有機キレート剤を除染液として使用。除染液の酸化特性を変え、クラッドが表面から溶出しやすいように改良して使用する。

##### ①試薬

柔軟な試薬、腐食抑制剤などを使用し、除染中の母材腐食防止を考慮する

硝酸：炭素鋼腐食量 0.6mg/cm<sup>2</sup>·hr

400系SS //

##### ②除染例

###### i) CAN-DECON (0.1%w/o 化学試薬)

・腐食量 (Table 1)

・1次系ループに酸化剤を加えると腐食増大、短時間除染により腐食防止

・実証 Douglas Point 1：ほとんど除染による材料腐食なし

REDOX循環、低PH、熱衝撃、機械衝撃によっても腐

## 食量不変

### ③廃液処理（固化法）

- セメント固化法、尿素一ホルムアルデヒド（UF）法、アスファルト固化法、ビニールエステル法（DOW 法と同じ）が使用される。
- セメント固化、アスファルト固化、プラスチック固化法はイオン交換樹脂の固化に適している。
- 固化法は一般に保守管理が難しい。

### ④被ばく量

#### ・CAN-DECON

イオン交換、濾過工程での作業被ばくが主となる

廃液 → フィルター工程 (500Ci/フィルター)

→ イオン交換工程 (100ft<sup>3</sup>/基、3000Ci/基)、除去 Co-60 の量は約  
10<sup>4</sup>Ci

#### ・被ばく量 (Table 2)

樹脂処理：遠隔操作必要、遮蔽必要

フィルター・カートリッジ処理：遠隔操作必要、遮蔽必要

0.1~40R/hr(平均 6.5R/hr)

### 3)濃厚液除染法

一種類あるいは複数の溶液を用い、5~10%濃度の試薬を使用する。高濃度のため、除染後、一次系配管水洗に大量の液量を必要とする。

①試薬：磷酸、AP-Citrox (2段階法：過マンガン酸アルカリ液除染およびクエン酸・亜硫酸・それらの塩で除染)、NS-1 (Dow Chemical Co.)

#### ②除染法

a)磷酸法  
・腐食抑制剤入り高温磷酸液の長期炉内残留は不可。雰囲気温度によるが、SUS 腐食率は 25 μm/year 以下。  
・腐食抑制剤入り磷酸の炭素鋼腐食量 (Table 3)  
・非抑制磷酸と炭素鋼の室温塩触不可

#### b)AP-Citrox 法

・AP 法：SUS(300, 400 シリーズ)還元雰囲気での系統除染に可  
炭素鋼：腐食量小、約 6 μm/day (105~110°C)  
クロム板、表面硬化処理合金：腐食大、防止用水洗必要、残留液でアルカリ腐食割れ発生。

注) AP 法は強力酸化剤であり、有機化合物との接触不可。

- ・Citrox 法：単独、あるいはクエン酸塩、亜硫酸化合物として使用可能  
クエン酸アンモニウムは炭素鋼の腐食大 (Table 4; 20mg/cm<sup>2</sup>·hr, 25 μm/hr)。腐食抑制剤で軽減可能。
- ・実績：オンタリオハイドロ CANDU 炉 (Table 5)  
6% DECON. TRURCO 4512A(抑制剤入り、クエン酸-亜硫酸混合液使用)  
85 °Cで使用

c)NS-1 法

- ・1020 炭素鋼、低合金鋼(Cr, Mo)、400 系 SS (腐食量 25~125 μm/y)
- ・300 系 SS (腐食量 < 125 μm/y)
- ・銅、ニッケル、クローム、ハステロイ、ステライト (低腐食量)
- ・温度効果大：INCOLOY800 205 度Fで 175 μm/y  
275 度Fで上記の約 10 倍
- ・応力腐食割れ有り：0.12w/o 以上の Fe<sup>+3</sup>, Cr<sup>+6</sup> を含む除染液は銳敏化処理済み脱スケール (descaled) 304SS に粒界応力腐食割れ発生。  
銳敏化処理済みスケール付着 304SS は、同一除染液で鉄、クロームの添加なしでもクラック発生。

③廃液固化処理法

- a)磷酸法：磷酸濃度 8~10%で強酸  
吸収剤（ゼオライト等）とセメントで混合固化

b)AP-Citrox :

- ・中和剤と化学試薬を混合、過マンガン酸を二酸化マンガンに還元し、放射性物性を沈殿分離除去後固化
- ・アンモニア発生防止のための中和剤混合比が重要
- ・セメント固化上問題はない。但し、ビチウメント処理は強い酸化剤である二酸化マンガンのため有害である
- ・尿素アルデヒドとビニールエステルは化学的に類似しており、プラスチック固化も可能性あり

c)NS-1 :

- ・ビチウメント法との両立性に関する情報なし
- ・尿素フォルムアルデヒド又はセメントとの両立性なし

④廃液貯蔵能力

- a)濃厚液除染では、1 系統容積分の洗浄水量が必要。廃液量大となる。  
b) 1 段除染で 2 系統分の廃液発生 (約 200000 ガロン)  
2 段除染で最低 6 系統分の貯蔵容量必要

⑤被ばく量

- a)DRESDEN-1 : 濃厚液除染法適用し、冷却系、廃液処理系、維持管理除染、廃液処

- 理、固化処理等で被ばく
- b)汚染の形態：沈殿物、スケール、スラッジが蒸発缶壁、熱交換器伝熱管底部液溜部等に発生
- c)高線量箇所：  
  廃液処理系配管は遮蔽が必要  
  配管湾曲部の沈殿部  
  廃液濃縮工程
- d)固化廃棄体表面線量：  
  平均 0.185R/hr (Table 6.)

### (3)コスト評価

除染コストに影響する要因

- 1)許認可費用：施設コストの 25~100%、環境影響考慮
- 2)設計：台風、地震等基準適合の必要性、最大で 650 ドル/ft<sup>2</sup>
- 3)機械的除染：設備や遮蔽コストが不明確、局部除染に適用（タンク等）、廃棄物発生量少ない
- 4)希薄液除染法：  
  ・除染用に 4 基のイオン交換塔必要、その内 1 基は除染試薬の再生用、遮蔽体が必要  
  ・付属ポンプ、フィルター、廃樹脂貯蔵庫必要

#### ①手作業除染施設 (Figure 1.)

- ・設備（処理系を含む）コスト 約 2.6M ドル
- ・汚染浸透防止 約 0.8M ドル
- ・炉内配管工事 約 0.5M ドル

#### ②遠隔除染法 (Figure 2.)

被ばく量減少、投資増大 約 4.4M ドル

その他、浸透防止対策、炉内配管工事の費用を上記に追加

#### 5)濃厚液除染法

- ①腐食問題等（材料、効率、貯蔵制限、遮蔽等）があり、現状は不適
- ②必要設備：10 万ガロンタンク 6 基、蒸発缶、ポンプ、固化・ドラム缶封入設備等

#### 6)実績

DRESDEN 1 号炉 手作業除染施設 (Figure 3.) 設備費 650 ドル/ft<sup>2</sup>

全体約 29M ドル

遠隔除染施設 (Figure 4.) 設備費約 38M ドル

### (4)除染の安全対策

- 1)一般対策： 安全に関する基準等遵守、目標管理、作業管理
- 2)試薬対策： 安全性、毒性について知識と教育
- 3)火災防止： 試薬及びその操作での火災防止

- 4)安全対策：
  - ・教育の徹底、定常運転作業と異なるため原子炉への接近法、廃棄物処理法等について教育が必要
  - ・長期間作業に対する作業者のストレス対策
- 5)組織体制：非定常作業、班編成、異質作業員の共同作業等への対策
- 6)緊急時対策：一般対策外の事項に対応
- 7)機械的除染：除染液中の金属粒子による被ばく増大、水素ガス発生対策
- 8)希薄液除染：キレート剤、亜酸等の体内摂取は有毒であるので注意
- 9)濃厚液除染：40トン以上の廃液発生、廃液処理・処分対策、発生するアンモニア対策も必要

#### (5)廃棄物処分法上の問題

- 1)除染廃棄物特徴：発生量大、放射能量大であり固化処理が必要
- 2)被ばく低減：輸送、重量、形状を工夫
- 3)処分場：現在国内には3箇所のみで、サイト内一時保管が必要である。被ばく防止と遮蔽を行い、埋設基準以下にして一般公衆被ばく防止を図って保管することが必要。

#### (6)結論

- LWRの除染廃棄物処理について、現場調査を含め以下の事項が判明した。
- 1)N-炉、DRESDEN炉以外の発電所廃液処理系統は改良が必要。
  - 2)除染廃液固化処理用試薬と除染廃液中の試薬は両立しない。
  - 3)廃棄物処理系からの大量の濃縮廃棄物の処分は、取扱い上、貯蔵上、輸送上受け入れ処分サイトにとって問題あり。
  - 4)現在廃棄物処理系統の使用材料は、濃厚液除染法で使用する化学除染試薬との両立性に問題あり。
  - 5)現状の廃棄物処理系統は、濃厚液除染法に対し問題がある。イオン交換塔が小規模で、希薄液除染法による高放射性廃棄物取扱い上も遮蔽不足。遠隔操作も難しい。
  - 6)除染系統については、プラント設計段階から考慮していく必要がある。機器配置、スペース、保守管理、改良等を考慮する。
  - 7)除染中、一次系配管からのリーク廃液の回収、取扱い方の検討が必要。
  - 8)固化体のサイト内保管は、設置許可変更が必要。
  - 9)被ばく低減、高効率運転等、除染の長期的利益に対する費用は、除染費、設備改造費、炉停止期間、作業被ばくなどの直接費とバランスが必要（費用対効果）。
  - 10)除染時の安全確保、特に長期作業に伴う作業者の健康管理、ストレス除去、教育訓練などが必要。

Table 1. C AND E C O N除染による母材腐食量

Materials	Average Penetration Rate $\mu\text{m}/\text{h}$
Carbon Steel	0.28
410 Stainless Steel	0.08
316 Stainless Steel	0.02
Monel-400	0.03
Nickel	0.02

Table 2. コンテナ中の使用済樹脂による被ばく線量率

Waste Type	Container	Typical Surface Exposure Rate(R/h)	Average
Decontamination	Drum	210~900	
Decontamination	Cask	400~1300	
PWR	Drum	13~56	
PWR	Cask	0.5~1000	615
BWR	Drum	6.2~27	
BWR	Cask	0.33~200	90

Drum: 55-Gallon, Cask: 150Cubic Feet

Table 3. リン酸中の炭素鋼腐食率 ( $\mu\text{m}/\text{d}$ )

Material	Average Corrosion
ASTM A-216 WKA	41.6
ASTM A-105 GR II	41.2
SAE 4140	58.3
ASTM A-515 GR 70	39.0
ASTM A-615	51.7
ASTM A-234 CRWP II	67.4
ASTM A-1603	65.2
Time of exposure	15~30 min
Temperature	67~82°C
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> concentration	7~10%

Table 4. クエン酸アンモニウム溶液<sup>a)</sup>中の腐食抑制剤が炭素鋼の腐食に及ぼす影響

Inhibitor	Concentration(g/liter)	Average Corrosion(mg/cm <sup>2</sup> ·hr)	
		60°C	85°C
None	-	0.14	5.1
Phenylthiourea	5	0.2	1.0
Acridine	1	0.2	0.7

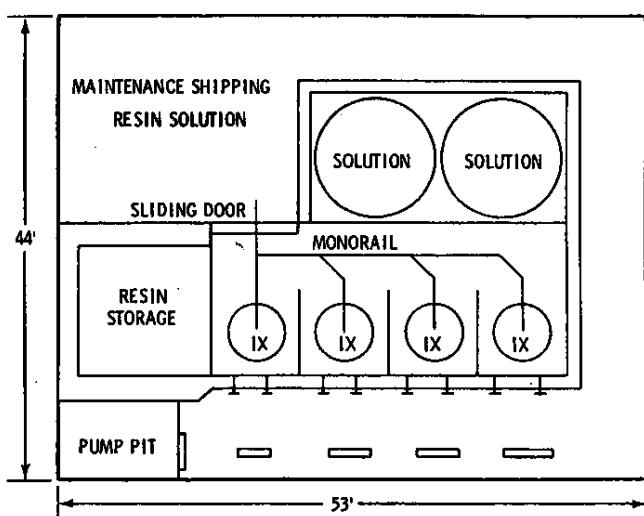
a) 8wt%  $(\text{NH}_4)_2\text{HC}_6\text{H}_5\text{O}_7$

Table 5. 腐食抑制剤入りクエン酸 - 蔗酸混合溶液による部材の除染による腐食データ

Material	Corrosion Rate(μm/d)
304 Stainless Steel	0.6
410 Stainless Steel	2.4
Aluminum Bronze	6
17-4 PH	10.8
Tungsten Carbide	6
Nickel	8.4
Chrome Plating	0.6

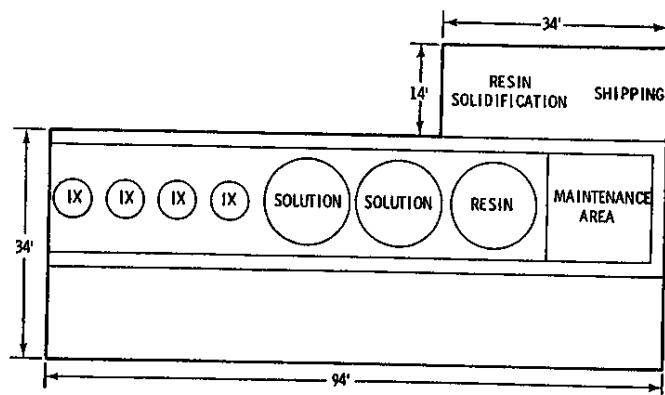
Table 6. ドラム缶中の固化廃棄物による被ばく線量率

Description of Waste	Exposure Rate(R/h): Surface
Decontamination Waste	10~25
Normal Solidified Radwaste	0.00005~1(Average 0.185)



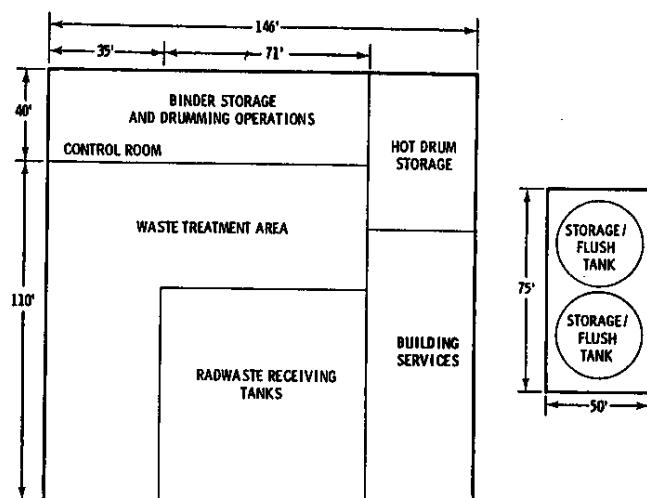
Four Column Hands-On Radwaste Facility  
Dilute Process

Figure 1. コラム型手動操作廃棄物処理施設希釈プロセス



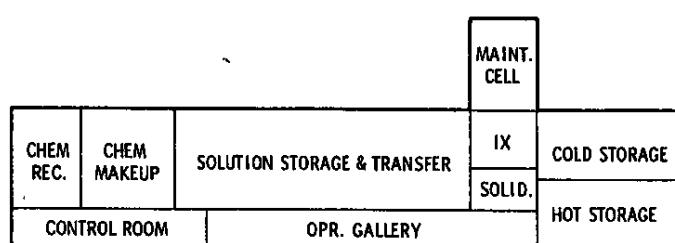
Four Column Remote Radwaste Facility  
Dilute Process.

Figure 2. 4基コラム遠隔操作型廃棄物希釈プロセス



Radwaste Facility at Dresden-1

Figure 3. ドレスデン原子力発電所における放射性廃棄物施設配置図



Remote Radwaste Facility  
Concentrated Process

Figure 4. 遠隔操作型放射性廃棄物処理施設濃縮プロセス

## 資料－2.8

タイトル：「オコニー原子力発電所の冷却ポンプの除染と修理」

“Reactor Coolant Pump Recontamination and Refurbishment at Oconee”

出典：Radwaste Solution Jan/Feb. 2000

著者：Tom Shiel et al.

### (1)要旨

オコニー原子力発電所(887MWe, PWER)の一次冷却系ポンプは、25年間の運転でキャビテーションによる羽根の損傷が発生。除染、修理を行い、新規購入した場合の半分の価格で再利用できた。10万ドル相当の節約とポンプ等設備の廃棄をしなくて済んだ。

### (2)除染設備とシステム

#### 1)設備

500ガロン調製タンク（除染液と水洗液貯蔵）、除染タンク、ポンプ、  
化学試薬注入系、サンプリング系、イオン交換塔（4基）、冷却塔HEP-MP、  
ヒーター

2)除染：冷却ポンプはターンテーブル上で回転しながら、除染タンクにある数百のスプレーノズルから除染液を噴射させる。

- ・除染ポンプ：500ガロン／分の容量で除染液循環
- ・試薬注入系：ダイヤフラムポンプ、混合機、ステンレスタンクから構成
- ・放射能測定と腐食モニタ試験片：タンク内に設置

### (3)除染方法

NITROX-E法(PNサービス社特許)

- ①NP（硝酸過マンガン酸塩水溶液）除染
- ②REMCON（商品名、有機酸希薄液）除染
- ③イオン交換塔（陽イオン交換樹脂で金属放射性核種除去）

除染液は加熱。①、②ステップを繰返し除染。(Figure 1.)

除染後、系統洗浄、温度を150度F以下にする。

DF値は平均で10。

被ばく低減量：3人・レム／ポンプ、除染日数：約3日／3基ポンプ

ポンプ寿命：プラントと同寿命（60年）

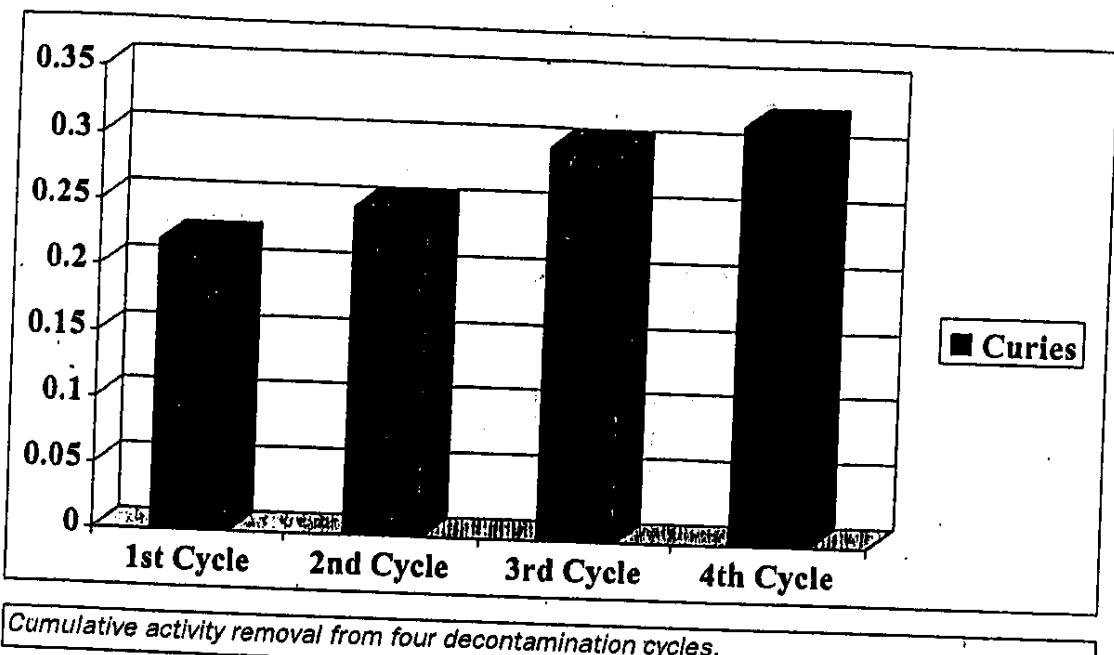


Figure 1.除染サイクルと除去放射能量