

## 平成25年度補正予算「汚染水処理対策技術検証事業」 に係る補助事業者の成果報告

平成25年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業補助金」に係る補助事業として実施した「汚染水処理対策技術検証事業」について、以下の成果報告を受けた。

### (1) 海水浄化技術検証事業（採択5件）

海水中における、主として放射性セシウムや、放射性ストロンチウム等の浄化技術について、その除去性能を検証するため、実証試験を実施する。

#### ■ 三菱重工業株式会社

海水中の汚濁物質を除去する前処理装置と海水用に調整された独自の捕集材システムとを組み合わせた浄化システムの除去性能を検証。高い除去率（90%）を有し、港湾内海水（160000 m<sup>3</sup>）からのセシウム・ストロンチウムの除去を、1年間で達成可能（除染係数（DF = 除染前放射能濃度／除染後放射能濃度）> 10）と評価。また、目詰まり再生機構の導入により、濾過膜のメンテナンスフリーを実現するとともに、再生可能な吸着材の採用により、二次廃棄物の発生量は処理水量の0.5%以下になることを確認。

#### ■ IBC Advanced Technologies, Inc.

放射性核種の捕集について実績のある自社製の吸着材を採用し、これを導入した水中稼働式浄化システムの除去性能を検証。カラム試験から別途取得した吸着パラメータを用いて、港湾内海水（160000 m<sup>3</sup>）中のセシウムおよびストロンチウムの90%が200日間で除去可能と評価。また、吸着材を再生利用することにより、二次廃棄物の発生は、処理水量の7%以下になることを確認。

#### ■ 株式会社大林組

自然素材を活用して、セシウムだけでなくストロンチウムに対しても高い吸着性能を持つ捕集材料の開発を実施し、この除去性能、放射線耐性、二次廃棄物量を検証。試験海水（800 L）からの除去率は、操作・海水条件に応じて、セシウムに対して78.3～99.6%（10日間浸漬）、ストロンチウムに対して14～33%。また、電子線（100 kGy）に対する耐性ととともに、乾燥・炭化による減容化率（炭化で72%、乾燥で65%）から炭化が有効であることを確認。

#### ■ 株式会社アトックス、AREVA NC、株式会社 AREVA ATOX D&D SOLUTION

可燃性の吸着シートを新たに開発し、これを導入した水中可動式浄化システムについ

て、その除去性能と二次廃棄物量を検証。モックアップ試験から得られた海水(800 L)からの除去率は、セシウムに対して80%(6時間処理後)、ストロンチウムに対して75%(吸着塔4本、累積28時間処理後)。また、吸着シートの焼却試験から、重量比60%、体積比70~77%の減容化率を確認。

■ 日揮株式会社

セシウムとストロンチウムの化学特性の相違を考慮して、繊維状吸着材を新たに開発し、海水からのセシウムとストロンチウムの除去性能と二次廃棄物量を検証。海水への浸漬試験から取得した吸着パラメータを用いて、港湾内海水(160000 m<sup>3</sup>)からのセシウムとストロンチウムの除去を、1年で達成可能(DF > 10)と評価。また、焼却試験から、重量比92.5~95.9%の減容化率を確認。

(2) 土壌中放射性物質捕集技術検証事業(採択2件)

一定以上の塩化物イオン濃度下(200 ppm以上)における、土壌中の放射性物質(主として放射性ストロンチウム)捕集技術の捕集性能を検証するため、実証試験を実施する。

■ 株式会社アトックス、AREVA NC、株式会社 AREVA ATOX D&D SOLUTION

土壌中の放射性ストロンチウムに対する浸透式反応性バリア技術の捕集性能を検証。ストロンチウムの捕集性能試験から、高いDF値(10<sup>2</sup>~10<sup>5</sup>)を有する2つのゼオライト捕集材を特定。また、このDF値は、実土壌や地下水が共存した場合にも、ほぼ同じであることを確認。さらに、福島第一原発敷地内への適用性について、地質条件や地下水流動条件などを考慮した除染シミュレーションを実施し、システムの施工・管理方法を確認。

■ 日揮株式会社

高いストロンチウム捕集性能を有する繊維状の吸着剤(海水中での捕集率99%以上)を用いて、地下水中のストロンチウムを効率よく捕集・回収する仕組みを有する透過壁の構造およびその施工手順を確立。海水を含む地下水から、ストロンチウムを効果的に捕集出来ることを確認。また、焼却試験により、95%の減容化率を確認。さらに、福島第一原発敷地内への適用性について、地質条件や地下水流動条件などを考慮した除染シミュレーションを実施。実験室レベルの実証試験により捕集システムの成立性を確認。

(3) 汚染水貯蔵タンク除去技術検証事業(採択3件)

福島第一原発サイト内において、解体作業における作業員の被ばくを低減する観点から、複雑な構造を有する、ボルト締め型タンクにおいて、内部に貯留する汚染水

を排水し、解体する前の作業として行う除染作業について、除染性能を検証するため、実証試験を実施する。

■ 株式会社 IHI

複雑な形状のタンクの除染に超高压液体窒素技術を適用した際の除染性能と廃棄物回収性能を検証。部分モデルを使用した塗装剥離試験から、最適な運転条件を選定するとともに、開発した先端ツールのダスト回収性能を確認。上記の試験結果を踏まえ、福島第一原発敷地内のタンクを洗浄するための工程を提案。

■ 株式会社大林組

「ドライアイスブラスト」、「機械切削」、「ショットブラスト」の3つの除染技術を最適に組み合わせた遠隔除染装置の除染性能を検証。実タンクを用いた実規模試験から、液体廃棄物を発生させることなく遠隔除染が可能であることを示唆。また、タンクの方法・構造別に最適な除染技術の組み合わせを選定するとともに、除染に掛かる作業時間との関係を整理し、被ばく線量の低下に向けての除染作業計画を提案。

■ 株式会社神戸製鋼所

タンク底部の残留汚染水を浄化用水として再利用することで、汚染水を増やすことなく、タンク内部を除染するシステムの性能を検証。実機を想定した噴霧試験から、洗浄ノズルを選定するとともに、模擬付着汚染物質の洗浄試験から、システムの除染性能と最適条件を確認。

(4) 無人ボーリング技術検証事業

福島第一原発内のボーリング作業時における作業員の被ばくを低減させる観点から、高線量下での無人ボーリング性能を検証するための実証試験を実施する。

■ 株式会社大林組

ボーリング作業工程のうち①初期掘削、②コアリング掘削、③掘削を対象とした、衛星通信ネットワークを用いた遠隔操作ボーリングシステムを開発し、その成立性・実用性に係わる実証試験を実施。実際の掘削作業をとおして、無人ボーリング技術の成立性と実用性を確認し、①初期掘削、②コアリング掘削、③掘削で必要とされる現場作業の無人化を実現。福島第一原発敷地内での作業を想定した際の課題（衛星通信速度の改善、対象地盤の条件等に合わせた工法検討の必要性など）を抽出。

### 目的と目標

海水中のCs、Sr等の放射性各種を効率よく除去することができる新規捕集材と、海水を新規捕集材に供給する汚濁物質除去機構を組み合わせ、閉鎖海域での放射性物質回収システムに必要な技術を開発することを目的とする。

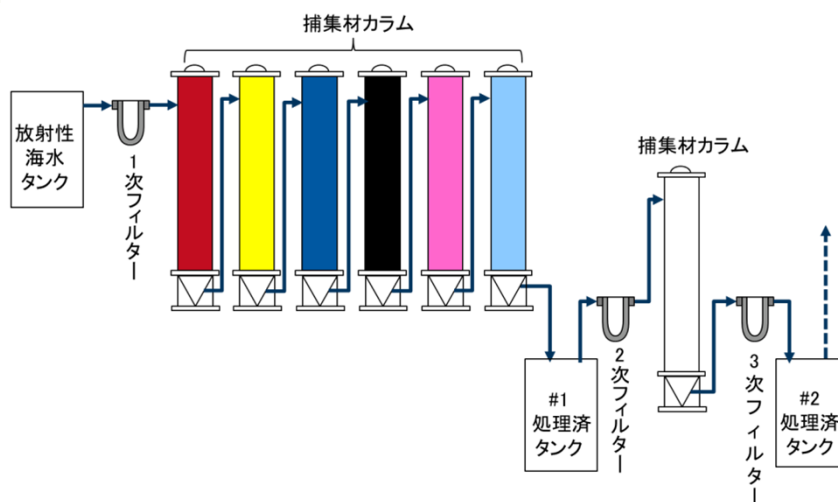
また、汚濁物質除去装置及び放射性核種捕集カラムを組み合わせた実証システムの設計・製作を行い、本システムによる吸着実証試験を実施することを目標とする。

### 事業の概要と特長

福一：福島第一原子力発電所

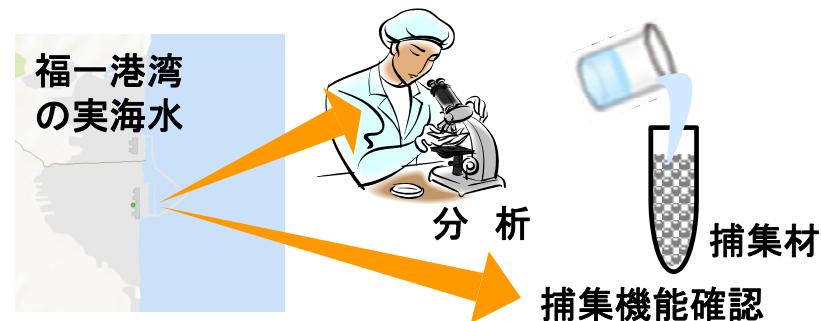
#### 実績のある海水除染技術

グループ会社等が開発した海水中の放射線核種 (Sr、Cs、I、Cd、Mn、Ce、Co) を除去できる捕集材カラム構成をベースに展開



#### 福一港湾海水除染への展開

- 汚濁物質除去装置用フィルタの長寿命化  
✓ 発電所港湾水質を考慮したフィルタ構成の検討



- 二次廃棄物抑制  
✓ Sr、Cs除去に最適化した捕集材への変更
- 作業時の被ばく低減  
✓ 捕集材の交換方式の最適化

## 得られた成果

実施項目	成 果
海水採取及び分析	<ul style="list-style-type: none"> <li>・福一海水を用いて汚濁物質や含有元素の分析を実施し、福一海水は通常海水の2/3に塩濃度が減少していることを確認。(Sr濃度の高い場所から採取)</li> <li>・汚濁物質(20<math>\mu</math>m以上)に全<math>\beta</math>線の最大で50%が吸着していることを確認。これはY-90と推定される。</li> </ul>
前処理装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・粗ろ過+精密ろ過の装置構成にて、数<math>\mu</math>mの除去性能を達成。</li> <li>・実証機に搭載し、1ヶ月以上の連続ろ過処理を確認済み。</li> <li>・目詰まり自動再生機構により、1年間メンテナンスフリーの目処を得ている。</li> </ul>
吸着材	<ul style="list-style-type: none"> <li>・主として、Csはモルデナイト、Srは合成ゼオライトで海水中でも捕集できる。</li> <li>・ただし、福一海水中のCsは含有量が低く、合成ゼオライトでも捕集ができる。</li> <li>・調整済ゼオライトの採用により、ゼオライト容積の200倍の海水を除去率90%以上で処理できる。(Sr,Cs) <math>\Rightarrow</math> 処理海水量に対する二次廃棄物の比率は0.5%以下を達成。</li> </ul>
実証機	実海水にて以下の処理を実施し、実機設計に必要な設計情報を得た。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・システムの連続運転評価(目標達成)</li> <li>・海水中天然Srの連続捕集性能評価(目標達成)</li> <li>・前処理装置、カラム装置のメンテナンス頻度確認(目標達成)</li> </ul>
システム提案 経済性評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・二次廃棄物の種類及び発生量を試算 吸着材再生方式による被ばく低減策を提案</li> <li>・設備及びランニングコストを試算</li> </ul>
浮体の基本設計	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コスト試算用に前処理装置や吸着材カラムを搭載する浮体の基本設計を実施</li> </ul>

## 1Fへの適用性・今後の課題

実機処理能力: 160,000m<sup>3</sup>/年 除去率90%

### 1 実証試験(処理能力: 6m<sup>3</sup>/h 稼働率80%)

- ・前処理装置浮体の制作(処理能力: 実機の25%)
  - ・吸着塔浮体の制作(1基)
  - ・吸着材再生処理設備の検討
- $\Rightarrow$  1年間の動作試験でシステムの必要能力を確認



### 2 実機運用(処理能力 24m<sup>3</sup>/h 稼働率80%)

- ・前処理装置浮体の増設工事(処理能力: 実機の100%)
- ・吸着塔浮体の増設(3基)
- ・吸着材再生処理設備の制作

## 汚染水処理対策技術検証事業 最終結果 <IBC Advanced Technologies, Inc.>

### 目的と目標

本事業の目的は、再生使用可能な SuperLig®605 と SuperLig®644の2種の樹脂を使用して福島原発港湾の16万トンの海水からストロンチウム(Sr)及びセシウム(Cs)を選択的に分離し得る能力を実証することである。

その目標は、疑似海水を使用して2種の樹脂の除染係数(DF)として表現されている樹脂の分離キャパシティーを確認することである。更に試験では浄化に必要な樹脂量、浄化のサイクル数及びその間に発生される回収核種を含む溶液の容積量を立証することである。プロジェクトの期間内外にあった多くの追加質問に対しIBC社は定性的な拘束力はないがベストの回答を行った。これらは懸濁粒子、油(量、性質は特定しない)、二次廃棄物(使用済み樹脂と回収核種の溶離溶液)の取扱いの選択肢、設置費用そして操作の詳細と線量拘束値を含んでいる。

### 事業の概要と特長

Sr及びCsそれぞれを選択する SuperLig®605 及び SuperLig®644は海中のスキップ(容器)中に設置される。海水は水中ポンプで流速が上げられ樹脂層を通過し処理時間が短縮される。樹脂は再生使用が可能であり、捕捉したスキップから取り出し通常の希酸溶液で溶離ができる。回収された核種の溶液は容積が少なく、高純度の溶液として集められ、安定した廃棄物の形態で一般の廃棄措置が可能である。

SuperLig®樹脂は従来の吸着剤では吸着阻害が起きるような高濃度の同様なイオン(Na, K, Ca, 等)が存在する溶液や複雑な化学液から目的の金属及びイオン(Sr, Cs)を除去する高い選択性を持っている。目的イオンは簡単に除去でき樹脂の再生使用ができる。樹脂は化学的に安定し、放射線耐性が良い。一度、スキップへ樹脂を充填すれば、全ての浄化が行われる間交換なしで再使用ができる。

再生フローシートは、本プロセスの適用により二次廃棄物の発生容積が非常に少なくすることを明らかにしている。

SuperLig®樹脂は様々な用途に合うよう開発された。本件で適用される2樹脂(SuperLig®605 はSr、SuperLig®644 はCs 除去用)はHanford Tank Clean Up プロジェクト(米国エネルギー省)の厳しい環境の中で使用され多くの放射線対応が実証されている。他のSuperLig®樹脂は金属抽出で金属産業で幅広く使用されている。本プロジェクトのSuperLig®樹脂は商業的にも公的にも認められ広範囲な実績がある。スキップの構想は英国Sellafieldの池の浄化を含む原子力の領域で広範囲に使用されている。

## 得られた成果

実験結果はSuperLig®605 及び SuperLig®644がそれぞれ要求されるDF 10を超えたDFsで、Sr 及び Cs を除去できることを確認できた。疑似試験では最終レベルがそれぞれ、Sr-90 に対して20 Bq/l以下、Cs-134, Cs-137 に対して1 Bq/l以下及び3 Bq/l以下が可能なことを示した。

陸上ポンプを使用しないで、港湾水は200日で処置ができる。その際の二次廃棄物は5750 m<sup>3</sup> の Sr 回収溶液と5355m<sup>3</sup> のCs 回収溶液となる。使用済み樹脂は凡そ15m<sup>3</sup>と22.36 m<sup>3</sup> のSuperLig®605 と SuperLig®644となる。使用済み樹脂はSr に対しては365日稼働で8.22 m<sup>3</sup> に減少できる。結果として浄化にはそれぞれCs は157回、Sr は252回の再生サイクルにて浄化できることを示唆している。

港湾水のプレフィルターの必要性は、懸濁固体又は油の粒子サイズの種類、濃度に依存する。本件ではスキップ中でのシングル濾過フィルターカートリッジ、又は電気凝固法装置など様々な選択肢がある。

回収核種の溶液の処理、措置は、シンプルな化学液であり従来方法で処理ができる。例えばグラウティング、ガラス固化等が利用できる。

SuperLig®製品は低レベルの二次廃棄物(約30m<sup>3</sup> の使用樹脂)を伴い200日の稼働で浄化できることを示す。Cs, Sr の海水イオン(Na, K, Ca, 等)から優秀な分離を示し、いかなる方法でも固定化可能な Sr, Cs を含む少量の回収核種の溶液にすることを示している。

## 1Fへの適用性・今後の課題

試験はSuperLig®605 と SuperLig®644が海水から Sr とCs を除去できることを明確に示した。この実績は福島港湾の海水の成功可能な浄化方法を示す。SuperLig®樹脂を使用する選択的除去は海水浄化の挑戦的解答である。樹脂は海水中の他のイオン(Na, K, Ca, 等)を除去せずに選択的に目標とするCs及び Sr の核種を除去する。樹脂は全ての除去基準を超えており200日で達成できる。再生フローシートは一回処理吸収剤に比べ非常に少ない二次廃棄物発生容積量になることを示している。

更には、工学的研究の確立スケジュール、設置費用も優れる。懸案事項は、海水の分析やSuperLig®樹脂を使用した小規模試験による懸濁する固体、油の量の影響等の調査である。

## 目的と目標

本検証事業は、海水中の放射性CsやSrの効率的な除去を達成することを目的とし、作業員の被爆抑制・二次廃棄物の発生抑制(減容)・低コスト化など、実際の浄化事業を円滑に進めるための下記目標を設定した。

- a) 浄化能力の検証と浄化性能を定量的に確認する
- b) 浄化に伴う二次廃棄物の発生量を抑制するための減容技術の検証と減容効果を定量的に確認する
- c) 浄化手法の容易性、安全性の検証とメンテナンス頻度、内容に関する定量的に確認する

## 事業の概要と特長

海水を汲み上げない条件のもとで、海水への吸着材浸漬による吸着方式(フローティング=システム)を提案し、採択された。海水中の放射性Cs およびSr の浸漬・回収にも、港湾閉塞を条件とした。

以下の実験をCold条件下で実施した。

- 1) 室内に設置したタンクを使用した閉鎖環境におけるタンク試験
  - 2) 港湾内(汚染されていない実際の港湾)における開放環境におけるフィールド試験
- また、
- 3) 海水温度の影響を室内ビーカー試験で確認
  - 4) 二次廃棄物の減容化検証を乾燥と炭化の手法を用いる試験で確認

試験に使用した吸着材の主原料は、海藻より抽出されるアルギン酸ナトリウムをベースとし、これにSrの吸着性能が期待されるバイノス粉末と、Csの吸着性能が高いと公知のフェロシアン化鉄を混入することで吸着材原型としたが、海水中での性状安定性に問題点が露呈したため、改良を施し、アルギン酸ナトリウムを活用した吸着材作製に至る新しい知財による改良型を検証に加えた。

吸着材原型の問題点解決に時間を要したため、追加試験で検証した改良型の最適設計には至らなかったが、ポテンシャルを秘めた材料であること(次頁)のご報告となった。



## 得られた成果

- 1) 吸着材の弱点であった気中・海水中における性状安定性・作業性の大幅な改善
- 2) 吸着材の優れたCs 吸着性能の確認
- 3) 吸着材のSr 吸着性能と、更なる改善可能見込みの確認  
(実証期間中の従来品改良が伴ったため、期間が逼迫し、最大性能の確証には至らなかった)
- 4) 上記吸着性能に対する海水温の影響が許容範囲内であることを確認
- 4) 吸着材がCs, Sr 以外の多核種・多元素を吸着することを確認
- 5) 吸着材の単位重量と吸着実効成分混入量の調整が自在なことを確認  
⇒ 作業員の被爆管理や運送費等のコスト節減に寄与する
- 6) 吸着材が電子線を照射しても分解しないことを確認
- 7) フローティング=システム(海水への吸着材浸漬による吸着方式)における  
タンク試験スケールによる実証可能限界を認識  
(実際の港湾に浸漬した吸着材の吸着数値が、室内タンク試験のそれに比して非常に優れている)
- 8) 減容率(重量)を、乾燥・炭化試験において、それぞれ確認  
(ダイオキシン発生が懸念されるため、焼却試験は未実施)

## 1Fへの適用性・今後の課題

### ☆ 課題

- 1) 吸着材の更なる改良として、Cs, Sr 最大吸着性能をもたらす最適設計の継続  
(新年度よりJAEAとの自社研究開発を再開予定)
- 2) 上記「得られた成果」7)に関連し、1Fにおける現地実証が必要

### ☆ 適用性

- 1) 吸着材の吸着を促進するため、低電力消費型の低速ポンプと簡易な曝気設備の必要最小数の設置が提案されるが、これには港湾環境維持改善の副次的効果も期待される
- 2) 吸着材の主原料であるアルギン酸ナトリウムは海藻より産出されるため、地場産業の活性化に寄与する可能性を秘めている

## 目的と目標

福島第一原子力発電所に隣接する港湾内への放射性汚染水の漏えいを踏まえ、海水中における、主として放射性Cs, Srの浄化除去性能を検証するため、実証試験を実施して技術の有効性を確認することを目的とする。

本検証試験結果により得られた知見及び技術に基づき、港湾内汚染海水(160,000m<sup>3</sup>)の放射能濃度を環境基準値以下(DF10)に低減する計画の実現性評価と、コスト、廃棄物両面における最適な計画の立案を目標とする。

## 事業の概要と特長

本事業では、港湾内海水を陸上に揚水することなく、海中で浄化処理を完結することを条件としている。よって、海中での使用に耐えうる水中浄化装置として、(仏)AREVA社製の水中浄化装置 NYMPHEA (Fig.1) を用いた浄化工法により、事業を計画した。加えて既存の吸着剤に対する性能評価を行い、海水環境下での効果的な吸着剤の選定と、それを用いた最適な運用を工法検討した。それらを踏まえ、実現性評価、コスト評価、発生廃棄物量評価を行った。

### 1. NYMPHEA技術の特徴

- ・汚染水の浄化処理工程の全てを水中で完結する。
- ・欧州の使用済燃料プール水循環浄化システムとして約20年の実績。
- ・装置メンテナンス及び吸着カートリッジの交換が容易で、様々な種類の吸着剤に対応可能。

### 2. 事業実施項目

#### 2.1 吸着剤基礎試験

- ・非放射性核種を用いた吸着剤の基礎試験(コールド試験)。
  - ・海水環境下におけるCs, Sr分配係数(Kd)、吸着容量の評価
  - ・吸着カートリッジへの適応性評価
- ・放射性核種を用いた吸着効果確認試験(ホット試験)。

#### 2.2 シート化

- ・吸着剤をシート化し吸着性能の向上を目指す。(Fig.2)
- ・吸着シートは可燃性とし、廃棄物低減を目指す。

#### 2.3 吸着カートリッジ製作及び評価

- ・小型NYMPHEAを用いた吸着性能の検証試験
- ・フィルター焼却試験による二次廃棄物の減容評価

#### 2.4 1Fに隣接する港湾内汚染海水への適用性評価

#### 2.5 事業実施に関わる全体コスト、発生廃棄物量の評価

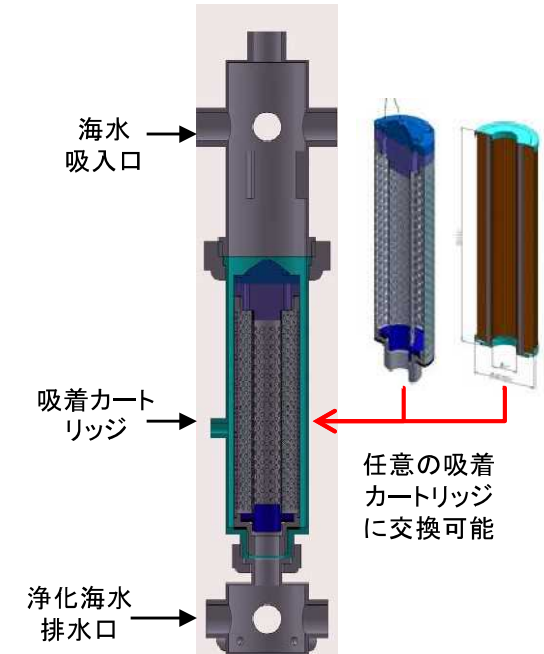


Fig.1 水中浄化装置 NYMPHEA

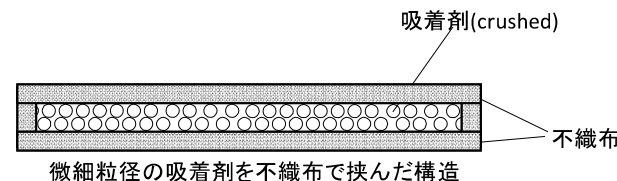


Fig.2 Sr吸着シート断面図

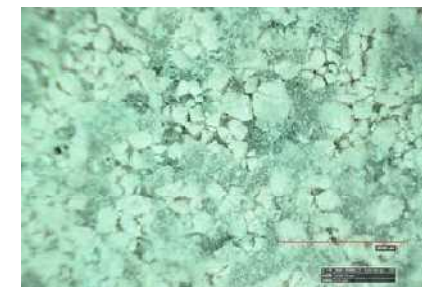


Fig.3 不織布上に定着された吸着剤

## 得られた成果

### 3. 実施結果

- 3.1 使用環境(海水)を考慮し、吸着剤候補(SS1~9)を選定すると共に、新型吸着剤(NS-B,NS-W)を試作。
- 3.2 選定、試作した吸着剤を用いた吸着性能試験を実施。
  - ・分配係数(Kd)バッチ試験(結果をFig.4 に示す)
  - ・吸着容量バッチ試験(結果をFig.5 に示す)
  - ・吸着性能/容量確認カラム試験
  - ・可燃性ゼオライトシート試作
  - ・吸着カートリッジ製作と焼却試験(Fig.6 参考資料)
- 3.3 RI施設(ホットラボ)におけるホット試験の実施。
- 3.4 小型NYMPHEAと実海水での循環浄化試験(Fig.7 参照)

### 4. 得られた成果

- ・適用性評価の結果に基づき、港湾内汚染海水の効果的な浄化工法を検討し具体的な提案を行なった。
- ・可燃性シートを吸着カートリッジに用いることにより、焼却処理による廃棄物削減が可能となった。
- ・海水環境下でのCs, Srの効果的な吸着工法が確立された。



Fig.4 吸着分配係数Kd比較

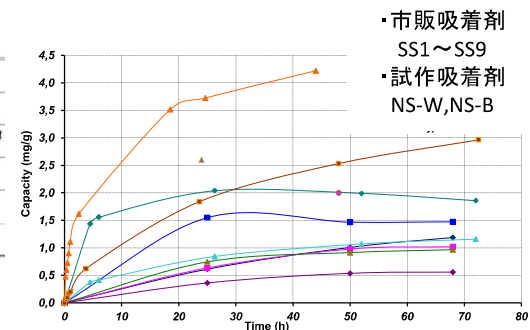


Fig.5 吸着容量比較



Fig.6 吸着カートリッジと焼却結果

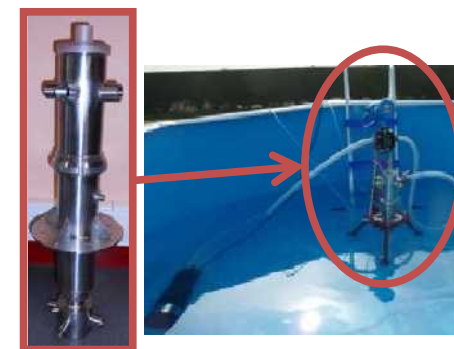


Fig.7 NYMPHEA 浄化試験

## 1Fへの適用性・今後の課題

### 5. 1Fへの適用性

- 5.1 吸着剤の性能評価に基づき必要なカートリッジ本数を算出。算出数からNYMPHEA等の資・機材数量を求めた。(Table.1)
- 5.2 NYMPHEA設置のプラットフォームの概略設計、コスト算出、適用性評価
  - ・港湾内へのプラットフォーム設置の実現性を確認した。(Fig.8)
  - ・海水と共に吸入する海生生物の除去方法について検討し対策を得た。
  - ・プラットフォーム製作費と年間運用コストを試算し、1Fへの適用性を評価した。

### 6. 今後の課題

- 6.1 発生廃棄物量の削減と、吸着剤コストの最適化。
  - ・研究段階の吸着剤(NS-W, NS-B)の量産化と、安価な生産プロセスの検討
  - ・可燃性シート及び吸着カートリッジへの加工費削減と、更なる高性能吸着シートの開発
- 6.2 実機スケールにおける港湾内環境への適用性評価
  - ・運転性、メンテナンス性の評価、環境への適合性評価

Table.1 要求される資・機材の集計

吸着剤	セシウム用	ストロンチウム用
	CS1	SS6 フィルター
必要カートリッジ本数	224	56,310
吸着剤廃棄物量	25 ton	2,668 ton (焼却前)
		1,149 ton (焼却後)
NYMPHEA台数	35 台	
プラットフォーム数	6 基	

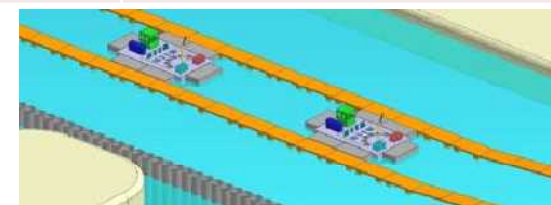


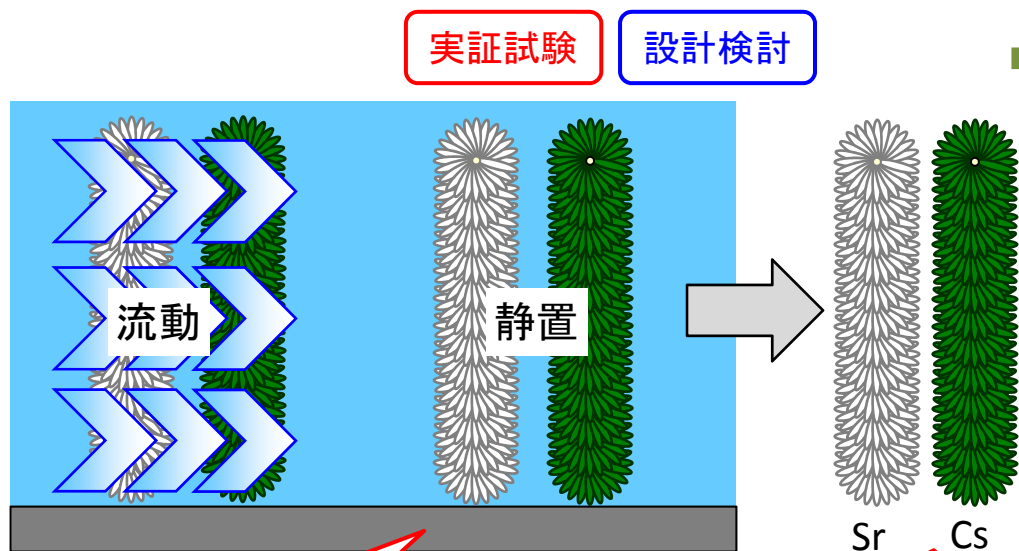
Fig.8 NYMPHEAプラットフォームの湾内設置イメージ

目的と目標

1～4号機取水路前開渠部を対象とした場合の海水中の放射性セシウムおよび放射性ストロンチウム浄化技術について、実証試験を通じ、以下を検証する。

- 除染性能実証 → 設定した目標性能を満足すること
- 二次廃棄物処理を含めたプロセス提案 → システムおよびコスト的に合理性を有すること

事業の概要と特長



■ 実証試験により得られた結果をもとに、概念設計を実施。

- ✓ 除染性能の評価
- ✓ 二次廃棄物の処理を含め、トータルのシステムとして、その成立性を評価・検証

吸着繊維

- 吸着性能
  - 吸着容量
  - 吸着速度

二次廃棄物

- 減容処理
  - 焼却
- 一時保管
  - 洗浄
  - 乾燥

概念設計

- プロセス設計
  - 静置 or 流動 システム
  - 交換頻度
- 機器設計
  - 設置、回収、保管
  - 手順
- コスト評価
  - 初期費用
  - 運転費用

## 得られた成果

吸着繊維の性能を評価し、その結果に基づいて除染システムの概念設計を実施した。

- 吸着性能評価試験より、吸着繊維の除染性能を確認した。
- 焼却試験より、使用済吸着繊維量を燃焼により大幅に減容可能なこと示した。
- 概念設計として、開渠部(閉鎖系を前提)の除染について、DF=10を1年間で達成するために必要なシステムを検討した。
  - ✓ 検討システムによる除染効果(海水中濃度変化)を計算により示した。(図2)
  - ✓ 設計情報を整備した。(表1)
- 吸着性能のさらに高い新規吸着繊維について、基本性能を評価した。

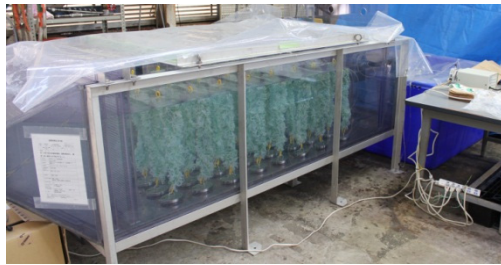


図 吸着性能評価試験の様子  
(パイロット装置)

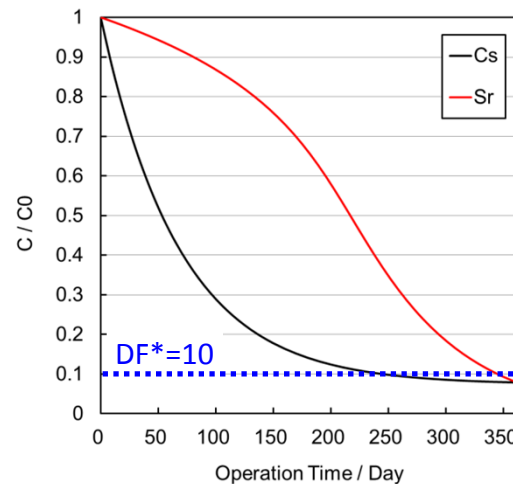


図 浄化設備による除染シミュレーション

\*DF: 除染係数

表1 概念設計情報

- 吸着平衡・速度式
- 運転条件
  - ✓ 吸着繊維使用量
  - ✓ 交換頻度・接触時間
- 海水浄化設備概念
- 海水浄化設備配置計画
- 機器リスト
- 作業フロー
- 物質収支計算書
- 作業時の実効線量
- 廃棄体の表面・1 m地点線量
- 輸送・保管時遮蔽厚さ
- コスト

## 1Fへの適用性・今後の課題

- 実環境下における吸着繊維の長期(1年以上)浸せき時の影響評価
- 設備運転性の確認
- 新規吸着繊維のさらなる性能検証

# 汚染水処理対策技術検証事業 最終成果

## (土壤中放射性物質捕集技術検証事業) < (株)アトックス AREVA NC (株)AREVA ATOX D&D SOLUTION >

### 目的と目標

浸透式反応性バリア(Permeable Reactive Barrier, PRB)による放射性ストロンチウム(Sr)の捕集性能を検証するため、いくつかの捕集材を用いた捕集性能試験を行い、福島第一原子力発電所(1F)への適用性を評価する。

### 事業の概要と特長

#### 1. PRB技術の概要及び特徴

- ◆ 重金属等による環境汚染を修復するため、欧米で20年以上の実績。
- ◆ 地中に注入した捕集材に放射性物質を捕集し地下水流による汚染の拡散防止(図1)。
- ◆ 注入点の数によりバリアサイズを調整でき、地下80mまで施工可能。

#### 2. 事業の概要

##### 2.1 捕集性能試験

土壤中放射性Srの捕集性能を検証するため、表1に示す①～③の捕集性能試験を行った。

表1 各捕集性能試験の比較

	① 捕集性能基礎試験	② 捕集性能試験	③ 捕集性能確認試験
試験目的	各捕集材の捕集性能に係る基礎データを評価	放射性Srに係る除染係数を評価	1F敷地内に類似した土壌・地下水を用い、捕集性能を確認
試験方法	バッチ法、カラム法(図3)	カラム法	カラム法
捕集材	ゼオライトA(2種類)(図2) アパタイト(4種類) 骨粉、鉄粉など	ゼオライトA(2種類) アパタイト(1種類)	ゼオライトA(2種類) アパタイト(1種類)
土壌	試験用標準砂	試験用標準砂	いわき硅砂
模擬地下水	海水と地下水を混合	海水と地下水を混合	2F敷地内の地下水(深度40m)と海水を混合
添加したSr等	非放射性Sr (初期濃度1300 $\mu$ g/L)	放射性Sr(Sr-85) (初期濃度100kBq/L)	非放射性Sr (初期濃度1300 $\mu$ g/L)

##### 2.2 福島第一原子力発電所の土壌への適用性評価

上記捕集性能試験の結果を踏まえ、福島第一原子力発電所の土壌への適用性を評価した。

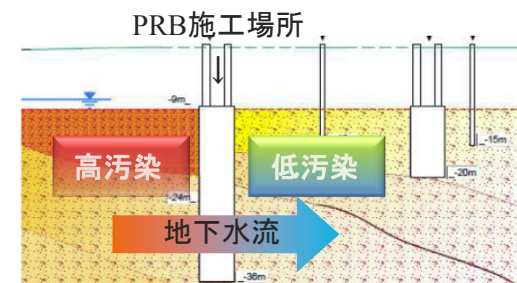


図1 PRB技術による土壤中放射性物質捕集のイメージ



図2 捕集材の例(ゼオライトA)

カラム全長	300mm
カラム容量	623mL
透水流量	約0.25mL/min
捕集材添加量	0.5wt%

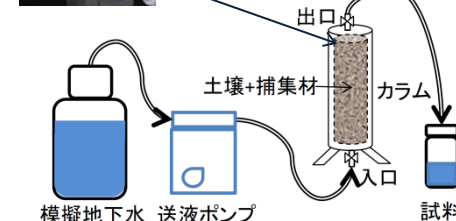


図3 カラム法による捕集試験

## 得られた成果

### 3. 事業の成果

#### 3.1 捕集性能試験結果

##### ①捕集性能基礎試験(表2 ①)

- ◆ゼオライトA(2種類)のSr捕集容量は高く、最も効果的。
- ◆アパタイトのSr捕集容量は中程度。

##### ②捕集性能試験(表2 ②)

- ◆ゼオライトA(2種類)のSr-85除染係数は高く最も効果的。
- ◆アパタイトとゼオライトAを組み合わせることで、ライフタイムの延長、コスト削減に寄与することが可能。

##### ③捕集性能確認試験

- ◆1F敷地内に類似した土壌及び地下水を用いた場合でも上記と同等の結果が得られた。

表2 各捕集材の捕集容量及びSr-85除染係数(一例)

捕集材	①Sr捕集容量	② Sr-85除染係数*1)			
		0.2L/g*2)	0.5L/g	1.0L/g	1.5L/g
ゼオライトA-1	高	$1 \times 10^5$	$1 \times 10^5$	$1 \times 10^4$	$7 \times 10^2$
ゼオライトA-2	高	$1 \times 10^5$	$1 \times 10^5$	$4 \times 10^3$	$1 \times 10^2$
アパタイト	中	$2 \times 10^4$	$1 \times 10^1$	$2 \times 10^0$	$1 \times 10^0$
アパタイト +ゼオライトA	—	$1 \times 10^5$	$1 \times 10^5$	$1 \times 10^5$	$1 \times 10^5$

\*1) Sr-85除染係数＝模擬地下水のSr-85初期濃度(100kBq/L)÷カラム出口試料のSr-85濃度

\*2)単位L/gは捕集材1gあたりの模擬地下水透水量であり、1.0L/gは透水開始から約12日後に相当する。

## 1Fへの適用性・今後の課題

### 3.2 福島第一原子力発電所の土壌への適用性評価

1Fの地層構造、土質及び地下水流動等を考慮しPRBの適用性を評価した。

#### ①PRBの施工

- ◆捕集材はアパタイトとゼオライトAを組み合わせる。
- ◆観測孔No.2-6の半径15m～20m、深さ14mまで PRBを施工する(図4)。

#### ②放射性Srの捕集

- ◆観測孔No.2-6から地下水を汲み上げることにより、地下水中の放射性SrをPRBに捕集する。
- ◆PRBによる捕集効果は最長25年間持続する。

### 4. 今後の課題

- ①1F敷地内の土壌及び地下水試料を用いたラボスケール捕集試験
- ②PRB施工に係るコスト評価
- ③1F敷地内における試験施工及び3～6ヶ月間のモニタリングによる捕集性能の確認

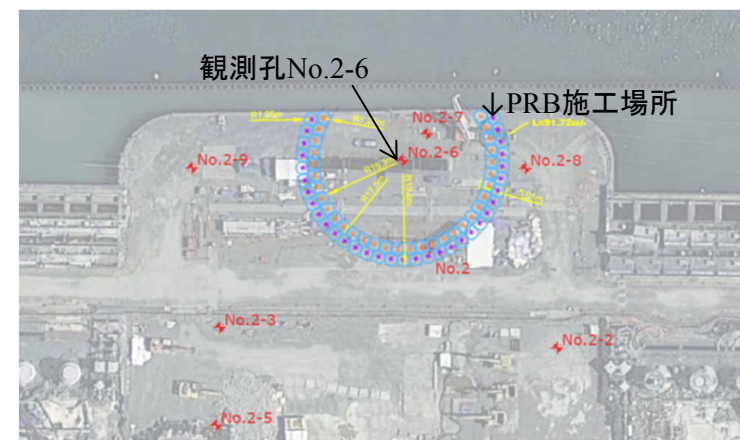


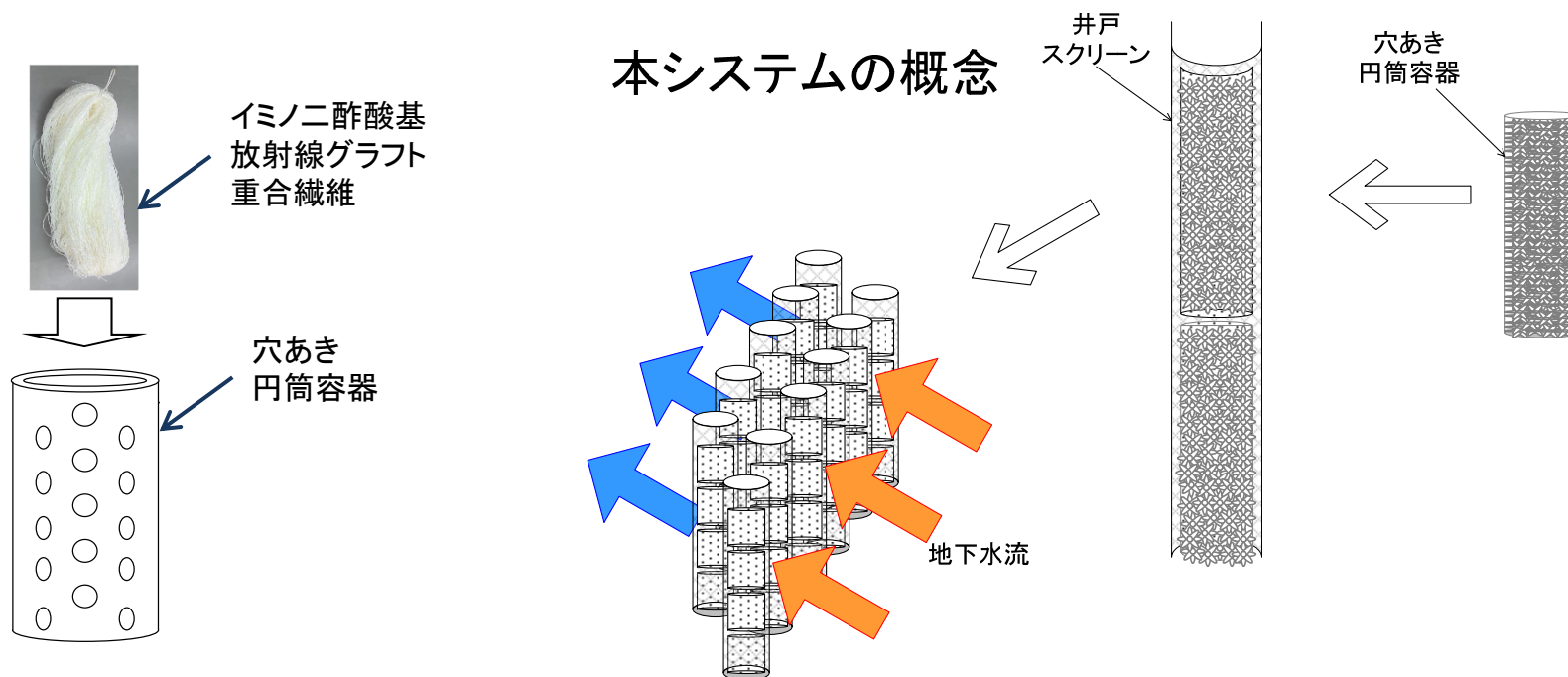
図4 福島第一原子力発電所への適用例  
(2,3号機取水口付近)

目的と目標

本事業では、吸着材を内包して地下水中の放射性ストロンチウムを効率よく捕集・回収する仕組みを有する透過壁の構造、施工手順を確立するとともに、捕集性能の評価を行った。

事業の概要と特長

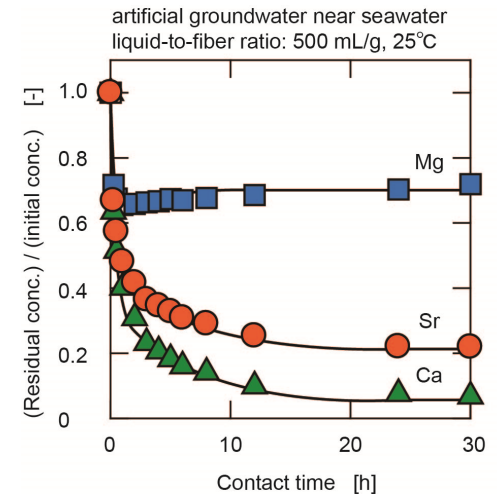
吸着材として無機イオン濃度が高い土壌環境中においてもストロンチウムの捕集効率の高いイミノニ酢酸を採用した。また、吸着サイトが飽和する場合に備え、吸着材を取り出し可能な透過壁を検討した。



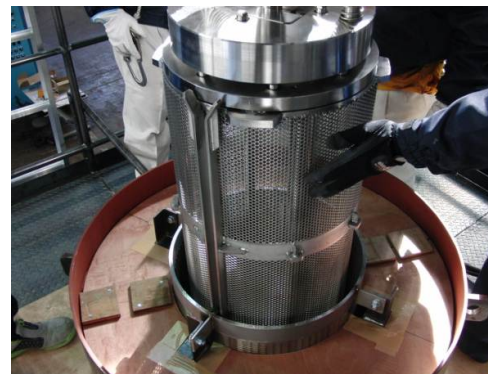


## 得られた成果

- ・ 吸着材性能評価試験により、海水成分が多い地下水中でも吸着繊維のストロンチウム吸着性能が高く、かつ反応速度が十分に速いことが確認された。
- ・ 燃焼試験により、使用済み吸着繊維を燃焼することで大幅に減容することが可能であることがわかった。
- ・ 地下水流動解析により、サイトの状況を把握して吸着繊維を適切な位置に配置できればストロンチウムを捕集できることがわかった。
- ・ 吸着繊維を容易に交換できる構造の内筒を試作し、水槽内で作動試験を行った。
- ・ 地下を模擬した試験装置で小規模実証試験を行うことにより、本事業で検討したシステムにおいて、吸着繊維に汚染地下水が流れ込む構造となっていることが確認できた。

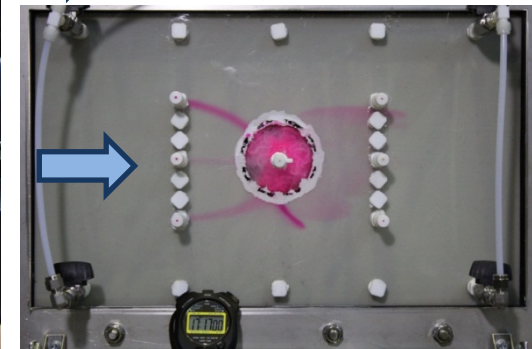


Sr溶液残存量の経時変化



内筒作動試験の様子

→ : 水の流れ方向



小規模実証試験の様子

## 1Fへの適用性・今後の課題

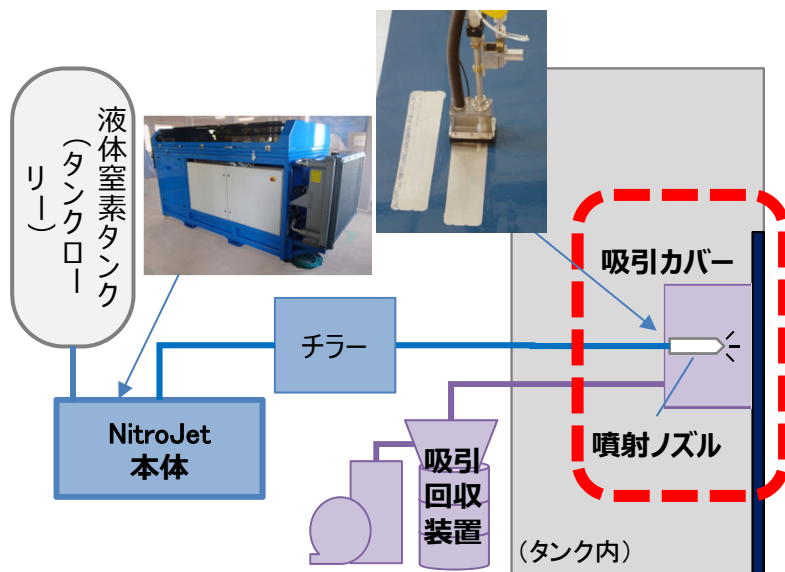
- ・ 井戸周囲の充てん砂の透水性の調整
- ・ 外筒－内筒間のガイド設置数の増加と製作精度のバランス
- ・ 透過壁を設置するエリアの地下水流動状況の把握
- ・ 吸着繊維のさらなる性能向上

目的と目標

水を使わない超高压液体窒素除染技術(NitroJet®)による複雑な構造のボルト締型タンク除染に関して、除染性能(除染速度・除染係数 Df・廃棄物回収性)を部分モデルを用いて検証する。

事業の概要と特長

【事業全体概要】



NitroJetプロセスイメージ

①複雑形状部への対応

タンク部位を平面/曲面/2面角部/3面角部/接続部/ボルト部に分類。  
②～⑤の試験・開発は各々の形状に対応した吸引カバーを開発して実施。

②除染速度の確認(コールド試験①)

各タンク部位形状に対して、パラメータ(圧力・走査速度・スタンドオフ)を振った塗装剥離試験を行い、剥離速度データを取得。

③先端ツール開発・扱い機構の確認

高回収率を達成するため、遠隔操作で操作しても各対象部位にフィットするような先端ツールを開発。

④廃棄物回収率、遠隔操作性の確認(コールド試験②)

先端ツールを用いたダストの回収率確認試験を行い、各タンク形状部位に対する回収率データを取得。  
また、タンクの部分モックアップを用いて除染デモンストレーションを実施し、遠隔操作性を確認。

⑤除染係数 Df の確認(ホット試験)

各タンク部位形状に対して、放射性トレーサを使用した除染試験を行い、除染係数Dfデータを取得。

【NitroJet®の特長】

- 水を使わないドライプロセスであり、液体廃棄物を出さない。
- 除染能力は他の方法と同等以上。
- 除去した汚染物を飛散させず回収可能。
- 噴射部が軽量であり遠隔対応が容易。
- 窒素を使用しているため環境影響の心配がない。



## 【実施結果】

### ①複雑形状部への対応

タンク部位を平面/曲面/2面角部/3面角部/接続部/ボルト部に分類し、試験を実施した。

### ②除染速度の確認(コールド試験①)

タンクの複雑な形状に合う吸引カバーを開発し、最適な運転パラメータと剥離速度を取得した。狭隘形状部(2面角部、3面角部等)には、干渉せず寄り付ける小型ガンが有効であることがわかった。



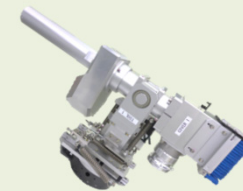
塗装剥離試験の様子



塗装剥離後の一例

### ③先端ツール開発・倣い機構の確認

各形状に合う先端ツールを開発し、倣い機構が動作することを確認した。



先端ツールの一例



先端ツール動作確認試験の様子

### ④ダスト回収率、遠隔操作性の確認(コールド試験②)

先端ツールを用いたダスト回収率を確認した。また、タンクの部分モックアップを用いた除染デモンストレーションを行ない、遠隔操作性を確認した。



回収率確認試験の様子



線量率計測の様子

### ⑤除染係数 Df の確認(ホット試験)

放射性物質を用いた除染試験で、高いDfを得ることを確認した。また、複数回除染した場合の除染効果も確認した。

## 【NitroJet®を用いた1Fタンクの除染工法】

コールド試験①で得た剥離速度を適用し、1Fタンクを除染するための工程を検討した。また、タンク周辺の機器配置、複数のタンクを効率よく除染する工法を検討した。

## 【今後の課題】

- 除染速度の向上  
除染工程短縮の観点から、除染速度のさらなる向上の検討が必要である。
- アクセス困難な部分へのアプローチ  
タンク内のアクセス困難な狭隘部へのより効率的なアプローチを検討する必要がある。
- 回収率向上  
ダスト回収率をさらに向上させ、二次汚染をより低減することが必要である。
- ケーブルマネジメント  
実除染工事でのケーブルマネジメントを計画的に行う必要がある。

# 汚染水処理対策技術検証事業 最終成果 <大林組>

## 目的と目標

目的：汚染水貯蔵タンク解体作業員の被ばく防止

目標：①高い除染性能により解体作業時の線量を極力低減

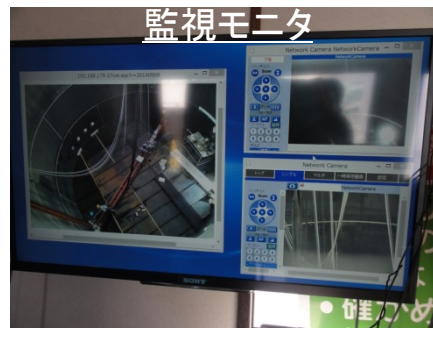
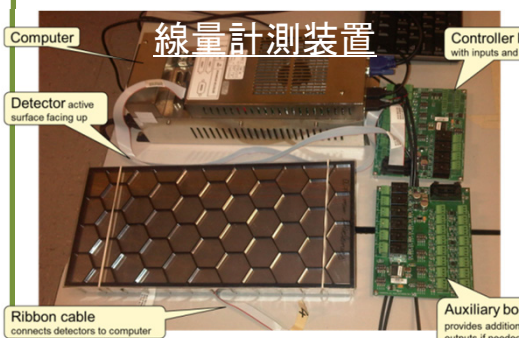
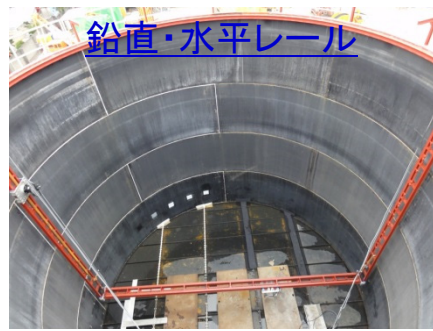
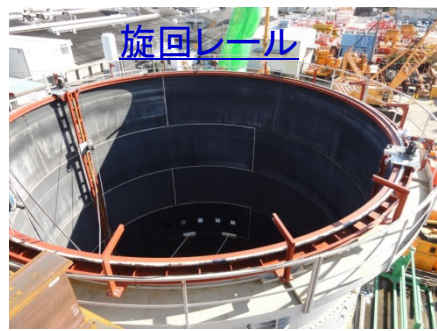
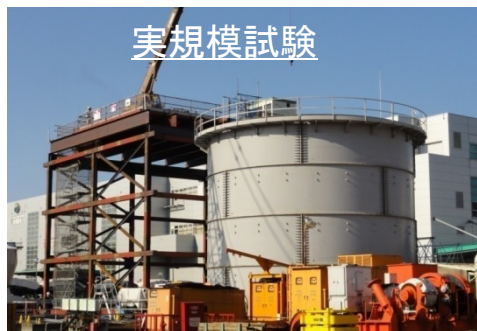
②除染作業に従事する作業員の被ばくを極力低減

③除染に伴う液体廃棄物のゼロ化と固形廃棄物の抑制

④フランジ構造への対応・道路から離れたタンクへのアクセス方法の提案、作業歩掛の取得

## 事業の概要と特長

1. 除染方法：ショットブラスト、ドライアイスブラスト、機械切削の3種を最適に組み合わせた除染装置
2. 遠隔除染：設置～設備撤去まで作業員がほとんど立ち入る必要のない遠隔操作による除染
3. 実規模：実サイトでの適用性と歩掛を確認するための実タンクを用いた実規模試験
4. 廃棄物：液体廃棄物を発生しない
5. 二次汚染：除染による汚染拡大を徹底防止



## 得られた成果

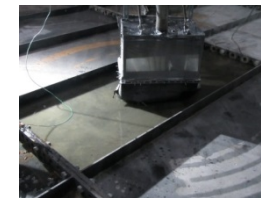
1. 水を使用しない3種類の除染方法の組み合わせで遠隔除染可能な見通しを得た
2. 各除染方法の適切な適用対象の区分を次のように設定。a. ドライアイスブラスト：タールエポキシ樹脂塗装面、b. ショットブラスト：シーリング・止水シート・アスファルトルーフィングに滲入した汚染、c. 機械切削：側板の上下端
3. 種々の継手/フランジ構造に対応
4. 除染に要する時間を試算するデータの取得
5. 除染装置の適正化（除染装置の小型化、複合機能⇒機能の個別化）及び線量計測装置の適正化（計測ユニットケースへの収納）
6. 除染装置による廃棄物回収、ブラスト材回収・再利用可能性を確認
7. 除染装置による残留水回収除去を確認
8. 実規模試験により、仮設設置、除染作業、仮設移設・撤去の歩掛を取得
9. 構台上からの作業安全性を確認
10. 除染時間短縮を目的とした、複数チームによる除染作業計画を策定

表－除染順序・除染時間

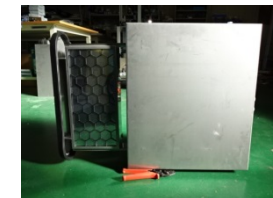
順序	部位	除染方法	対象面積・長さ	除染時間
①	側面目地	ショットブラスト	目地面積=29.3m <sup>2</sup>	8.1時間
②	底面目地	ショットブラスト	継手長さ=43m	1.2時間
	底面回収	(グリッド材の回収)	底面積=116.8m <sup>2</sup>	4.9時間
③	側面側板	ドライアイスブラスト	側面積=406.1m <sup>2</sup>	32.2時間
④	底面底板	ドライアイスブラスト	底面積=116.8m <sup>2</sup>	18.5時間



除染装置小型化



残留水回収



計測ユニットケース



底面計測

## 1Fへの適用性・今後の課題

- 適用性：①道路から離れたタンク群中央部のタンクへも適用可能  
 ②金属腐食面、フランジボルト周囲の除染が可能  
 ③無人での残留水の除染前排水が可能
- 課題：①実環境による除染効果・歩掛の確認  
 ②現地の雨除け、堰、配管等に対応した仮設構造の改造  
 ③システム全体のコンパクト化  
 ④ショットブラスト材の最適化による固体廃棄物量の削減

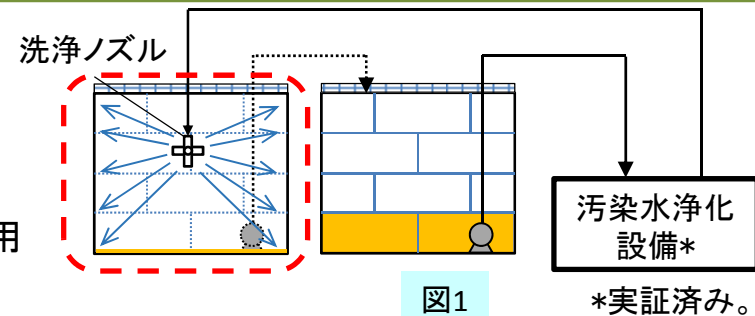
目的と目標

除染システムのコンセプト:

- ・作業員被ばく低減 高線量汚染水が残留したタンク内での作業なし
- ・汚染水を増加させない  
タンク残留汚染水を汚染水浄化設備で浄化後、洗浄水として活用

本事業の目標:

- ・汚染水貯蔵タンクに残留した汚染水を再利用した除染システム(図1枠内)の除染性能の実証



\*実証済み。

事業の概要と特長

除染システムの特長

- ・新たな汚染水の発生なし(タンク底部残留汚染水を浄化後、洗浄水として活用)
- ・湿式除染方式であり、除染・解体時にダストが飛散しないため、解体が容易
- ・タンク内には搬出入容易な洗浄ノズルとポンプの設置のみで除染作業が可能

事業の概要(図2)

①洗浄ノズルの選定と特性把握

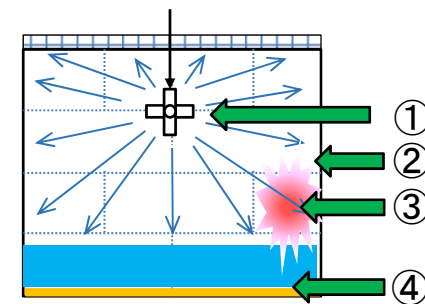
洗浄ノズル仕様の設定、洗浄ノズルの選定  
タンク内面全面が洗浄可能であることの確認

②壁面付着放射性化合物の特性把握および洗浄効果

除去対象核種の選定、洗浄水による除去性の評価  
模擬汚染物質、試験片による洗浄試験実施、除染性能の確認

③腐食部の評価 腐食試験による腐食部に取り込まれる放射エネルギーの測定と、腐食部除染の要否の検討

④底部残留水の洗浄水による希釈効果 底部残留水の洗浄水による希釈効果の試験確認



\*汚染水浄化設備は、  
実汚染水を用いた現地試験にて実証済み。  
既存設備の利用も可能。

図2

## 得られた成果



写真1

試験片

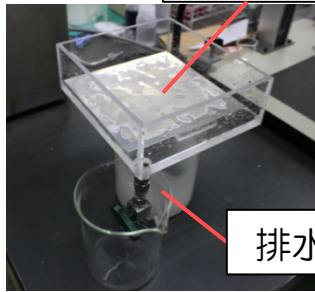
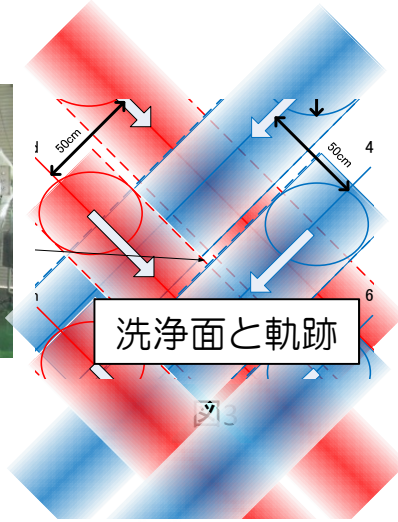


写真2



洗浄面と軌跡

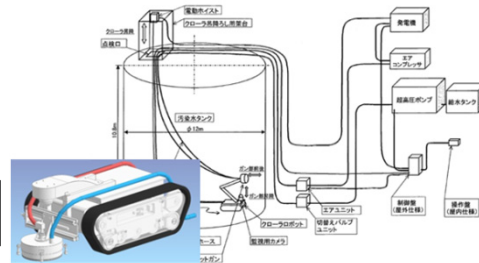


図4

### ①洗浄ノズルの選定と特性把握

- ・実機相当距離で噴射試験を実施し、受圧面の面積や圧力を測定した。(写真1)
- ・シミュレーションおよび洗浄面測定試験より、タンク全面洗浄できることを確認した。(図3)

### ②壁面付着放射性化合物の特性把握および洗浄効果

- ・模擬汚染物質を付着させた試験片の洗浄試験を実施し、付着物をほぼ全て除去できることを確認した。(写真2)

### ③腐食部の評価

- ・局所的な腐食に対しては、作業員のタンク解体時の被ばくへの影響は小さく、除去の必要はなしと評価した。
- ・高線量部がある場合は、既存技術(高圧水等)で対応可能と評価した。(図4)

### ④底部残留水の洗浄水による希釈効果

- ・トレーサ入りの模擬液に洗浄ノズルから洗浄水を噴射し、攪拌可能な水深を確認した。

## 1Fへの適用性・今後の課題

### ①適用性

- ・タンク内に設置する機器は、洗浄ノズルやポンプ等のコンパクトな設備のため、ハンドリングが容易。
- ・タンクエリアでは洗浄ノズルやポンプの接続のみ。汚染水浄化設備はモバイル方式とすることで現地工事が不要。
- ・底部に残留した汚染水の濃度を低減でき、解体作業等での汚染水移送時のリスク低減が可能。

### ②今後の課題

- ・既存の汚染水浄化設備を使用した場合、取合いや制御方法の検討が必要。

目的と目標

《目的》 掘削中の突発的な被ばくを回避することおよび高線量下作業における被ばく時間の低減により熟達した作業員を安定的に確保すること

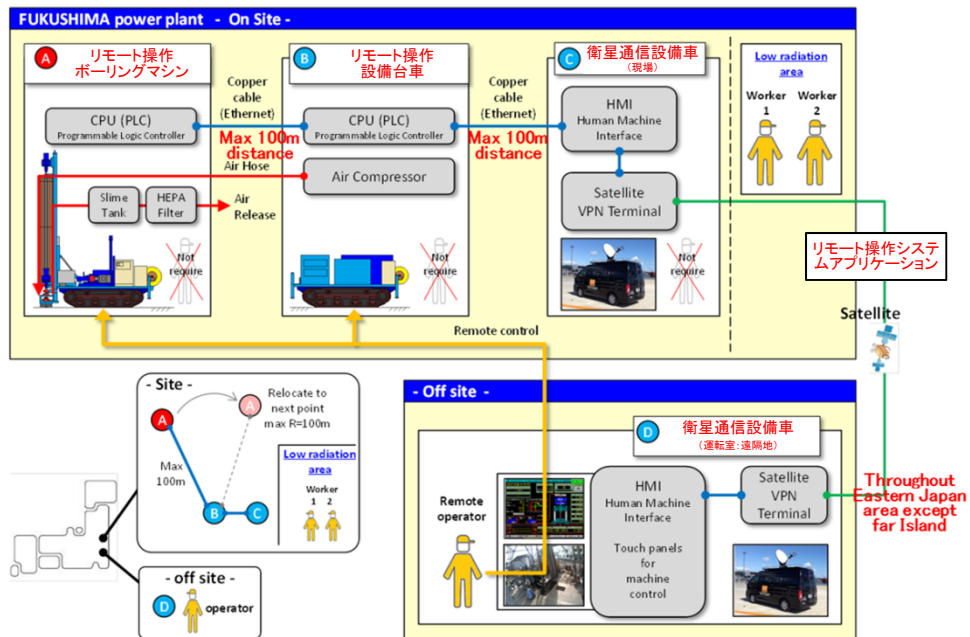
《目標》 無人ボーリング技術の開発、およびその施工品質・効果の確認・検証をととして、開発技術のシステムとしての成立性、現場への適用性を確認し、課題を抽出することで、さらなる技術の改善に資すること

事業の概要と特長

《事業の概要》

衛星通信ネットワークシステムを利用したリモート操作ボーリングシステムの開発

リモート操作ボーリングシステム



《事業の主な特長》

- (1)一般的なボーリング作業工程(①設備設置、②初期掘削、③口元管設置、④コアリング掘削、⑤拡掘、⑥ケーシング設置、⑦設備撤去)のうち、主に掘削作業(②④⑤)に特化した無人ボーリング技術を開発し、掘削作業時の被曝線量を低下する。
- (2)通信衛星ネットワークを活用することで、信号の混線の問題を解消し、遠隔地からのリモート操作を可能にする。
- (3)設備のユニット化、自走機能を付加することで省スペース化、作業効率の向上を図る。
- (4)エア・ミスト掘削を考慮したシステム開発により、二次廃棄物の発生抑制を図る。



## 得られた成果

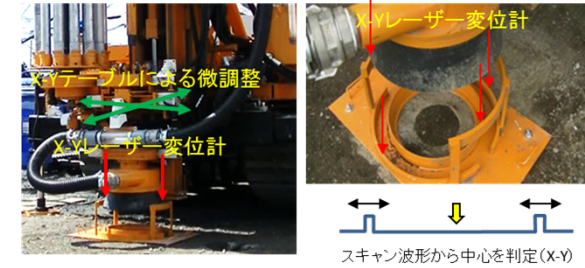
### 開発・検証技術1 遠隔制御・監視、データ取得技術



### 開発・検証技術2 ロッドハンドリング技術



### 開発・検証技術3 位置決め機構



### 開発・検証技術4 地質概要の把握(掘削くずの捕集)



### 開発・検証技術5 ユニット化



これらの技術の開発・検証を行い、本事業の目標であるシステムの成立性・実用性の確認および1Fへの適用に向けた課題の抽出を行った

## 1Fへの適用性・今後の課題

### 《1Fへの適用性》

1. 設備のユニット化および自走機能により、運搬、移動、設置等の機動性に優れている
2. 通常の無線を用いない(有線もしくは衛星通信)ため混線による不具合が発生しない。
3. 地質条件によるがエアリー・ミスト掘削を採用することで二次廃棄物の発生を抑制できる

### 《今後の課題》

#### 1.開発機械特有の課題

- 本システムを用いた掘削作業には事前の訓練が必要
- 衛星回線の通信速度の改善
- システムの需給バランスとアフターケア体制の構築

#### 2.一般的な課題

- 地質条件・深度等による泥水掘削への切替えの必要性
- 使用済み機械の処置、処分