

環境放射能汚染の修復に向けた除染技術への取組

内閣府委託・除染技術実証試験の成果とその後の展望

岩田 将英^{*1}・清水 英樹^{*1}・阿部 敏之^{*2}・芝本 真尚^{*3}・佐藤 文則^{*1}・山本 達生^{*1}・佐々木 卓也^{*1}

Ongoing Environmental Decontamination technologies for Nuclear Accident Site in Fukushima

Evaluation of Demonstration Test Results of ^{137}Cs Remediation Technologies for the Liquid Wastes and Groundwater Clean Up that made use of Artificial Zeolite Blocks

Masahide IWATA, Hideki SHIMIZU, Toshiyuki ABE, Masanao SHIBAMOTO, Fuminori SATOH, Tatsuo YAMAMOTO, Takuya SASAKI

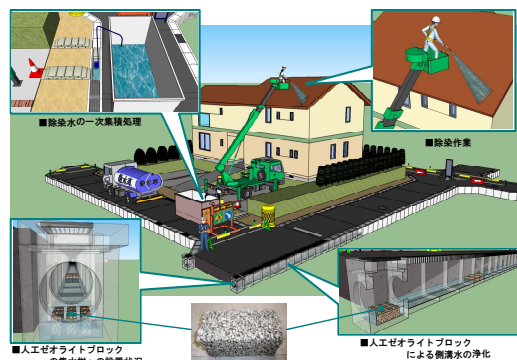


図-1 除染エリアにおける技術の活用イメージ

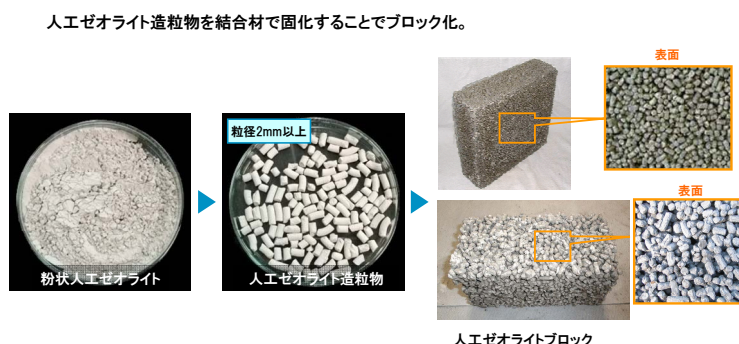


図-2 人工ゼオライトブロックの概要

研究の目的

福島第一原子力発電所の事故に伴って大量の放射性物質が環境中に放出され、国土、水域、食物、設資材など様々な媒体に影響が及んでいる。健全な国土の復旧、地域産業を含めた人々の暮らしを復興させるために不可欠となっている放射性物質の除染作業において、当該エリアで発生する洗浄水や未除染区域から流入する雨水などに含まれる放射性物質が、周辺の居住区域や農用地に及ぼす影響を低減させるため、当社開発の人工ゼオライトブロックを住宅地排水溝内に設置し、環境水中に溶存する放射性セシウムの吸着能を検証することを目的とした実証試験を実施した。本文では、まず、この実証試験で得られた知見について報告する。加えて、福島県内で除染に係る基礎的な実験を実施し、その中で得られた様々な知見を踏まえた上で、今後の除染技術に対する展望について論じるものである。

技術の説明

放射性セシウムに対し高い吸着能力をもつ人工ゼオライトを材料として、ポーラスコンクリート製造の技術を利用し、放射性セシウム吸着能力に優れたポーラスブロックを開発した。このブロックを水路や集水枡に設置することにより、住宅地や農地等を流れる水の除染を行うことができる。また、設置・交換等も容易に行える特長がある。本技術の検証のため、以下の項目について検討を行った。

- ・ CEC 測定による造粒物の吸着能力確認と、セシウム吸着カラム試験
- ・ 2 種類の現地実証試験（①模擬汚染水を用いた除染施工時における試験、②既存の水路に設置時における試験）

主な結論

- ・ 人工ゼオライトを造粒化や固結ブロック化しても、十分なセシウム吸着能力を確保できる。
- ・ 結合材を用いることで人工ゼオライトブロックの製品化が可能である。
- ・ ブロックは流水環境下においても長期耐久性を有する。
- ・ 除染作業時の汚染水や環境水において、懸濁物質(SS)に吸着されている放射性物質に加え、溶解性の放射性物質が水中に存在している場合に対して放射性物質の低減効果が期待できる。
- ・ 集水枡などに設置するだけで、環境水中の放射性物質を簡易に捕捉・低減することができる。

*1 本店 土木事業本部 土木設計・技術部 技術開発グループ

*2 本店 CDS プロジェクト室

*3 本店 土木部 環境技術グループ

環境放射能汚染の修復に向けた 除染技術の取組

岩 田 将 英^{*1} 清 水 英 樹^{*1}
 阿 部 敏 之^{*2} 芝 本 真 尚^{*3}
 佐 藤 文 則^{*1} 山 本 達 生^{*1}
 佐 々 木 卓 也^{*1}

要 旨

福島第一原子力発電所事故により放出された大量の放射性物質の除染が急務となっている。本報は、内閣府委託事業として実施された平成23年度除染技術実証試験事業と、著者らが独自で実施した除染に係る基礎的実験についてその成果をとりまとめたものである。

平成23年度除染技術実証試験事業にて、「人工ゼオライトブロックを用いた住宅地排水溝の除染技術」が、(独)日本原子力研究開発機構(JAEA)により選定され、その中で、人工ゼオライトブロックの放射性物質の捕捉能力を評価するために、室内試験と現地実証試験を実施した。室内試験では人工ゼオライトのセシウムに対する吸着性能を、現地実証試験では人工ゼオライトブロックの流水に対する放射性物質の捕捉性能をそれぞれ確認し、人工ゼオライトブロックが除染に対し有効であることが示された。

除染に係る基礎的実験では、除染作業に伴う排水に対する人工ゼオライトブロックの放射性物質吸着試験、土壌洗浄試験、落葉・落枝等の除染廃棄物のチップ化による減容化試験を行い、それぞれの手法が、除染作業において有効であることが確認できた。

キーワード 除染／人工ゼオライト／放射性物質／土壌洗浄／水処理

目 次

- | | |
|------------------------------|---------------|
| 1. はじめに | 3. 除染に係る基礎的試験 |
| 2. 人工ゼオライトブロック
による除染技術の実証 | 4. おわりに |

ONGOING ENVIRONMENTAL DECONTAMINATION TECHNOLOGIES FOR NUCLEAR ACCIDENT SITE IN FUKUSHIMA

Masahide IWATA	Hideki SHIMIZU
Toshiyuki ABE	Masanao SHIBAMOTO
Fuminori SATOH	Tatsuo YAMAMOTO
Takuya SASAKI	

Synopsis:

The accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant after the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami had emitted a large amount of radioactive substances, and decontamination of them is required.

It is reported that removal of radioactive cesium from decontamination and environment water by artificial zeolite blocks, decrease of surface dose rate by general decontamination technologies and results of experimental study of decontamination technologies.

* 1 本店 土木設計・技術部 技術開発グループ * 2 本店 CDSプロジェクト室
 * 3 本店 土木部 環境技術グループ

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故により、大量の放射性物質が環境中に放出され、福島県内を中心として広範囲に沈着することとなった（図-1）。

事故に伴い国は、放射性物質対処特措法を 2011 年 8 月に公布した。その後、同法は基本方針や政省令の整備、除染特別地域の指定等を経て、2012 年 1 月に全面施行された。これにより、除染特別地域として警戒区域及び計画的避難区域に相当する地域が指定され、環境省が除染を進めていくこととなった。そして、国の基本的な考え方を示した除染特別地域における除染の方針（除染ロードマップ）が 2012 年 1 月に環境省により策定された²⁾。

この除染ロードマップでは、技術的知見の収集のための除染モデル実証事業、本格除染実施のために必要となる先行除染を経て、本格除染という工程が組まれている。表-1 に現時点（平成 24 年 8 月上旬）までの国直轄除染関係業務の発注状況について示す。

表-1 に示すように除染関連業務については、ゼネコンが中心となって受注しており、今後の大規模な本格除染についてもゼネコンに期待されている部分は大きい³⁾。

そこで本報では、前田建設の除染に対する取組について紹介する。

2. 人工ゼオライトブロックによる除染技術の実証

2.1 除染技術実証試験事業の概要

内閣府委託事業「福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務」の一部として、（独）日本原子力研究開発機構（以下、JAEA という。）により、除染を一層効率的・効果的に推進するため、今後の除染

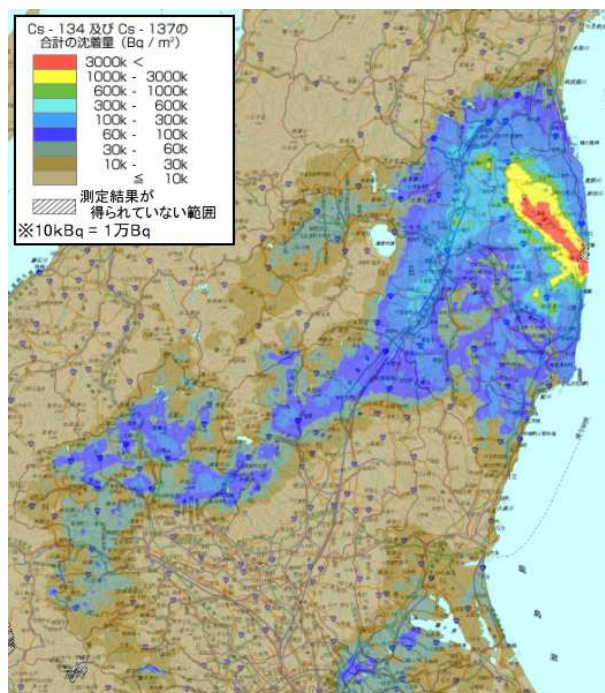


図-1 セシウム 134, 137 の沈着量合計（平成 23 年 11 月 5 日時点の値）¹⁾

作業に活用し得る優れた技術を公募により発掘し、除染効果、経済性、安全性等を確認する観点から、平成 23 年度除染技術実証試験事業が実施され、除染作業の効率化や除染除去物減容化等に関する 25 件が採択された⁴⁾。採択された技術を表-2 に示す。その中で、当社の震災前からの保有技術である人工ゼオライト⁵⁾を使用した除染技術が採択され、技術実証試験が実施された。本項は、その試験の成果について報告する。

2.2 人工ゼオライトブロックを用いた除染技術

本除染技術は、当社が保有する人工ゼオライトの製

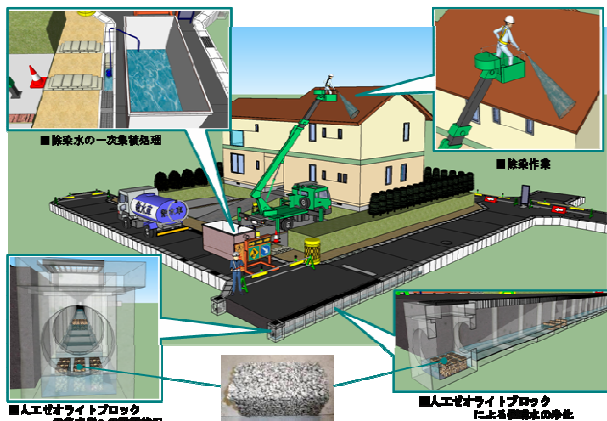
表-1 国直轄除染関係業務の発注状況³⁾

事業		対象
除染モデル実証事業	市町村グループA	南相馬市、川俣町、浪江町、飯館村
	市町村グループB	田村市、双葉町、富岡町、葛尾村
	市町村グループC	広野町、大熊町、楢葉町、川内村
概ね1地区あたり20ha		
先行除染	◆ 役場や公民館など	
	楢葉町役場周辺除染	楢葉町役場周辺の公的施設(約4ha)
	楢葉町公的施設等拠点施設除染	集会所5件(約0.2ha)
	田村市公的施設等拠点施設除染	集会所4件(約0.15ha)
	川俣町公的施設等拠点施設除染	中学校、公民館(約1.9ha)
	川内村公的施設等拠点施設除染	医療施設の付帯住宅(約0.46ha)
	大熊町公的施設等拠点施設除染	JA関連施設、ダム管理棟(約0.67ha)
	葛尾村公的施設等拠点施設除染	宿泊施設(約0.7ha)
	南相馬市公的施設等拠点施設除染	小高庁舎、消防署、上下水道施設および駐在所
	川俣町公的施設等拠点施設除染	小学校、幼稚園
	楢葉町公的施設等拠点施設除染(1)	焼却施設、集会所1件
	楢葉町公的施設等拠点施設除染(2)	集会所12件
	楢葉町大坂地区・乙次郎地区除染	大阪地区、乙次郎地区一帯(仮置き場の設置を含む)
	富岡町公的施設等拠点施設除染	消防署、警察署、水道事務所、土木事務所、地方会館など
	葛尾村公的施設等拠点施設除染	中学校、健康増進センターなど
	浪江町公的施設等拠点施設除染	警察署、消防署、宿泊・研修施設、水道施設
	飯館村草野地区等	草野地区、13事業所
	◆ 常磐道	
	常磐道除染モデル実証事業	常磐道(最大5km) 富岡町、浪江町、双葉町
	◆ インフラ施設	
	富岡町公的施設除染	し尿処理施設(約0.8ha)
本格除染	◆ 関係人の確認・把握	
	土地などの関係人調査	(南相馬市、楢葉町など11市町村)
	◆ 建物などの放射線モニタリング、建物の状況調査、物量調査	
	葛尾村事前調査業務	葛尾村全域
	川内村事前調査業務	川内村全域
	楢葉町事前調査業務	楢葉町全域
	田村市事前調査業務	田村市全域
	飯館村事前調査業務	飯館村全域
	南相馬市数量調査業務	南相馬市全域
	南相馬市線量・建物等損壊調査業務	南相馬市全域
	浪江町、川俣町数量調査業務	浪江町・川俣町全域
	浪江町線量・建物等損壊調査業務	浪江町全域
	川俣町線量・建物等損壊調査業務	川俣町全域
	双葉町、富岡町、大熊町数量調査業務	双葉町、富岡町、大熊町全域
	富岡町線量・建物等損壊調査業務	富岡町全域
	大熊町線量・建物等損壊調査業務	大熊町全域
	双葉町線量・建物等損壊調査業務	双葉町全域
	◆ 除染作業	
	除染作業	田村市全域
	除染作業	楢葉町全域
	除染作業	川内村全域
	除染作業	飯館村全域

朱書は、前田建設が受注している事業等

除染対象物	手法	特徴	実施者
土壌	熱処理	反応促進剤を用いた土壌の熱処理	太平洋セメント
		ポンプによる土壌の湿式分級	ロート製菓
		土壌の多段湿式分級	竹中工務店
	湿式分級	土壌の湿式分級(磨砕、篩、サイクロン)と一時保管法	熊谷組
		土壌の湿式分級と熱処理	日立プラントテクノロジー
		土壌の湿式分級+表面研磨、水処理	鴻池組
		土壌の湿式分級(高圧ジェット、マイクロバブル)、浮上分離処理	佐藤工業
	薬剤処理	土壌のシュウ酸処理+ゼオライト、フェロシアン化ニッケル処理	東芝
下水汚泥	可溶化	下水汚泥の可溶化とCs抽出	新日鉄
除染作業	乾式	吸塵式サnder、ストリップペイントによる水を使わない除染	志賀塗装
		ナノバブル水による除染	京都大学
	湿式	モルクラスターオゾン水による除染	ネイチャーズ
		超高圧水(280MPa)による除染	キテック
瓦礫	乾式	ウエットブラストによる道路の除染	マコー
		瓦礫の前処理としてのドライアイス処理(乾式分級)	環テックス
	湿式	瓦礫の水洗浄	戸田建設
水処理	播き処理	ゼオライトブロックによる捕集	前田建設工業
	処理	フェロシアン化鉄を利用した水処理	東京工業大学
植物	堆肥化	高温(100℃以上)堆肥化による植物の減容化	宇宙航空研究開発機構
		堆肥化(50～60℃)による植物の減容化	日本ミニヤ
木材	乾式	固化材(セメント)による木材の表面剥離	大成建設
	湿式	木材の洗浄による除染、焼却による減容化	郡山チップ工業
		木材、瓦礫の洗浄	ネオナイト
森林		森林の刈刈、除伐、間伐による空間線量低減	福島県林業研究センター
		森林除染作業(落葉吸引、モレノール)	
		セメント固化土の土木材料利用、アスファルトの再生骨材利用	大林組

本技術の利点としては、市街地の排水側溝や集水枡などに設置するだけで、放射性物質の吸着、除去が行える点である。図-2 に除染エリアにおける技術の活用イメージを示す。

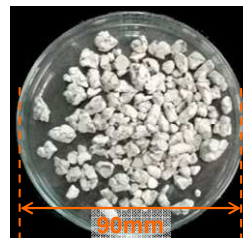


人工ゼオライトブロックは、粉体の人工ゼオライトを造粒物へ加工した後に、その造粒物をセメント等によるバインダーを用いて固めた多孔質のコンクリートブロックである。図-3 に人工ゼオライトとブロックの外観を示す。

Figure 1 shows three concrete specimens. (a) is a cylindrical specimen with a diameter of 90mm. (b) is a cylindrical specimen with a diameter of 50mm. (c) is a rectangular specimen with dimensions 100mm x 200mm x 100mm.

室内試験では、造粒化やブロック化に伴う人工ゼオライトの加工による吸着能力の変動を把握するため、陽イオン交換容量（以下 CEC という。）を指標としてその変化を確認した。また、安定型セシウムを用いたカラム吸着試験を実施し、セシウムに対する吸着能力の確認を行った。

CEC は、セミマイクロショーレンベルガー法⁶⁾に準じた方法で測定し、粉体の人工ゼオライト、造粒した人工ゼオライト、ブロック化した人工ゼオライトを対象とした。なお、ブロック化した人工ゼオライトについては、一度ブロック化したものを 2mm~5mm 程度まで破碎したものを試料とした。ブロック化したゼオライトを破碎したものを図-4 に示す。



カラム吸着試験は、次の手順にて実施した。外径 20mm (内径 17mm) のアクリルカラムに層厚 10cm となるように人工ゼオライト造粒物を詰め、その間隙には、イオン交換能に乏しい石英砂を充填させた。2.0mg/L の安定型セシウム (Cs-133) 水溶液を、カラム上部より、充填した

人工ゼオライト層が完全に浸漬するまで添加した。充填した人工ゼオライト層の上部が露出しないよう安定型セシウム水溶液を定期的に添加し、通水を続け、カラム通過後の流下液は、50ml ごとに採水し、セシウム濃度を原子吸光法にて測定した。試験は、充填したゼオライト重量の約 40 倍量を流下させた時点で終了とした。なお、試験は 2 連で実施した。試験装置の概要図を図-5 に示す。

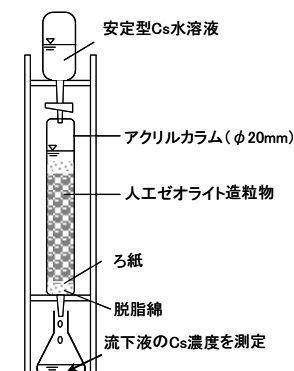


図-5 試験装置概要図

(2) 試験結果

試験に用いた人工ゼオライトの CEC 測定結果を一般的な粘土鉱物の CEC⁷⁾と共に表-3 に示す。表-3 より、粉状の人工ゼオライトを造粒物、ブロックへと加工するにつれ、人工ゼオライト含有量、比表面積の低下により、CEC は低下していくが、一般的な粘土鉱物と比べ、十分な CEC を保持しており、十分な吸着性能を有することが確認できた。

表-3 人工ゼオライトの CEC

鉱物種	人工ゼオライト			粘土鉱物		
	粉状	造粒物	ブロック	カオリン 鉱物	スメク タイト	イライト
CEC (cmol(+)/kg)	275	108	54	2	60	10

次に、カラム試験による人工ゼオライトの安定型セシウムに対する吸着能力確認試験の結果を図-6 に示す。数値は 2 連の平均値で示している。

図-6 より、セシウムの除去率は、通水初期で 90%、充填したゼオライト造粒物の重量に対し 20 から 40 倍量を通水した時点で 70 から 80%であった。なお、本試験終了時点におけるセシウムの累積吸着量は、人工ゼオライトの CEC に対し、0.1%未満であり、飽和（破過）するには十分な余裕があり、通水量を増やしても同程度の吸着率を維持することが予想される。

人工ゼオライトブロックを現地に設置する場合、その交換時期が非常に重要となる。ブロックの交換時期としては、ブロックに含まれるゼオライトの吸着サイトが全て使用され吸着能力が低下した場合（破過）と、放射性物質を吸着することでブロックの表面線量が上昇し、取扱いが困難になる場合の 2 通りが考えられる。

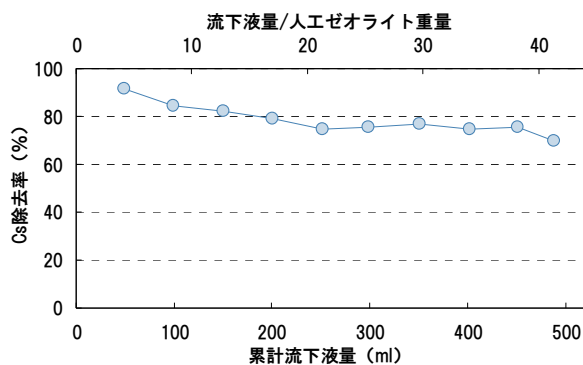


図-6 流下液量とセシウム除去率の関係

今回の試験では破過の兆候を示す変曲点は確認されず、吸着能力が大きく低下することは無かった。

本試験にて使用したセシウム濃度は、除染時の排水に含まれる放射性セシウム濃度よりも数千倍～数万倍程度のオーダーであるため、ブロックの吸着サイトが破過することは考えにくい。

したがって、ブロックの交換時期は、吸着能力の低下によるものではなく、安全に取り扱うことができるような濃度を目標として設定すべきであることが示唆された。

2.4 現地実証試験 1（模擬水路試験）

(1) 試験方法

除染排水のような環境水と比べ放射性物質濃度が高い水を対象とした放射性物質の除去試験を実施した。

除染排水が側溝や水路を流下すると想定し、水路や集水枡にブロックを設置することを模擬した試験装置を作成し、現地実証試験を行った。

当該地域の除染実施前の土壌（樋の出口などに堆積した比較的放射能濃度の高い土）と水を混合し、除染対象の水として使用した。土砂の配合量は、水 70L に対し、汚染土約 4kg の割合とした。また、人工ゼオライトブロックの通水回数は 4 回、流速は 10L/分とした。試験装置を図-7 に、試験実施状況を図-8 に示す。

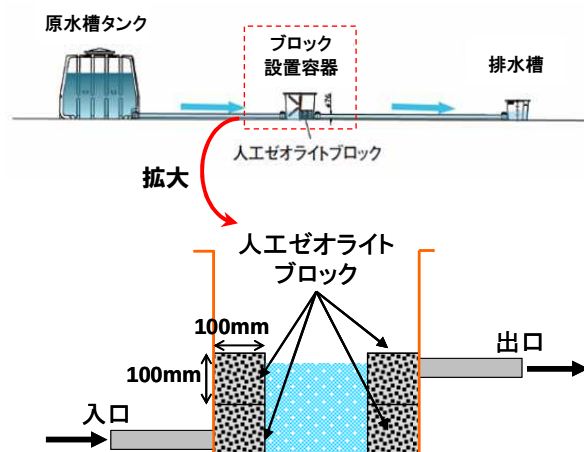


図-7 模擬水路試験装置



図-8 模擬水路設置状況

(2) 試験結果

通水前後の汚染水の放射性セシウム濃度を表-4 に示す。放射性セシウム濃度は、ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリーにより測定した。

表-4 に示すように、ブロックの通水前後で、47%の放射性セシウム濃度が低減しており、高濃度の放射性セシウムを含む水に対するブロックの除染効果が確認できた。

表-4 通水前後の放射性セシウム濃度

取水位置	放射性セシウム濃度 (Bq/L)			低減率
	Cs-134	Cs-137	計	
通過前(原水)	10,000	13,200	23,200	47.0%
通過後	5,200	7,100	12,300	

2.5 現地実証試験 2（現地集水枡設置試験）

(1) 試験方法

環境水を対象とした放射性物質の除去試験を実施した。

飯館村内の集水枡に人工ゼオライトブロックを約 1 ヶ月間設置（設置期間：平成 23 年 12 月 24 日～平成 24 年 1 月 24 日）し、期間終了後のブロックに含まれる放射性セシウム濃度を測定することにより、ブロックの吸着能力を確認した。なお、比較対象として、人工ゼオライトを含まない 7 号砕石を用いたポーラスブロックを同時に設置した。図-9 に集水枡へのブロックの設置状況を示す。

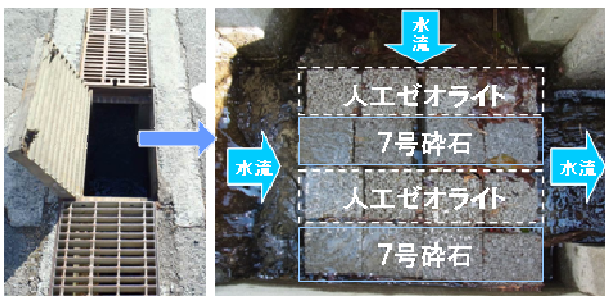


図-9 集水枡へのブロック設置状況

また、ブロックの放射性セシウム濃度は、ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリーにより測定した。測定時には、測定可能な形状とするため、必要に応じブロックの破碎等を行った。

(2) 試験結果

試験後の放射性セシウムの測定結果を表-5 に示す。なお、測定したブロックは、最上流側の中央部 2 つのブロックである。

表-5 より、現地の集水枡に 1 ヶ月間設置した人工ゼオライトブロックからは、砕石ブロックの 2 倍以上の放射性セシウムが検出された。

なお、この集水枡に流れ込む水の放射性物質濃度は、検出下限値未満であったが、1 ヶ月間の通水により一定量の放射性物質が吸着しており、わずかではあるが環境水中に放射性物質が含まれることが確認された。

また、試験は冬季に実施したが、ブロックは 1 ヶ月間の水路設置に十分な耐久性を示すことも合わせて確認できた。

7 号砕石ブロックにおいても、1 ヶ月間の通水により放射性物質濃度の上昇が確認された。7 号砕石ブロックは、イオン交換性能を持たないため、放射性物質が付着している懸濁物質を捕捉したことにより放射性物質濃度が上昇したと考えられる。一方、人工ゼオライトブロックについては、放射性物質が付着している懸濁物質に加え、環境水中に存在している溶解性の放射性物質を捕捉したため、7 号砕石ブロックよりも、試験後の放射性物質濃度の値が高くなったと推測される。

表-5 設置 1 ヶ月後の放射性セシウム濃度

試料	重量 (kg/ブロック)	放射性セシウム濃度 (Bq/kg)		
		Cs-134	Cs-137	計
ゼオライトブロック	2,191	1,341	1,775	3,116
7号砕石ブロック	3,548	563	757	1,320

2.6 除染技術実証のまとめ

除染技術実証試験で得られた知見を以下に示す。

- ・人工ゼオライトを造粒化や固結ブロック化しても、十分なセシウム吸着能力を確保できる。
- ・ブロックは流水環境下においても長期耐久性を有する。
- ・人工ゼオライトブロックは、放射性物質が付着している懸濁物質に加え、溶解性の放射性物質も捕捉することができるため、除染作業中の汚染水や環境水に対し、放射性物質の低減効果が期待できる。

3. 除染に係る基礎的試験

除染作業に係る基礎的な情報の収集を目的として、当

該地域の土壌や、除染作業により発生した水等を用いて福島県内にて各種試験を実施した。本項では、その結果と知見を報告する。

なお、本試験において、放射性セシウム濃度の測定（Bq/kg, Bq/L）は、ゲルマニウム半導体検出器を用いたガンマ線スペクトロメトリーにより行った。

3.1 実施内容

除染排水を対象としたゼオライトブロックによる水処理、側溝に堆積している土壌に対する分級洗浄及び落葉・落枝の減容化の3種の試験を実施した。実施内容を表-6に示す。

表-6 実施内容とその目的および概要		
名称	目的	実施概要
①ゼオライトブロックによる排水処理	除染作業に伴う放射性物質の拡散防止	凝集沈殿や固液分離といった水処理後の排水を対象とし、排水側溝へブロックを設置
②土壌洗浄試験	土壌洗浄法の効果を実証する基礎的なデータ収集と、洗浄効果を上昇させるための補助工法の効果確認	側溝に堆積している土壌等に対する分級洗浄の実施 補助工法として、マイクロバブル洗浄の実施
③落葉・落枝の破碎減容化試験	除染により大量に発生すると予想される森林除去物を対象とした減容化効果の確認	落葉・落枝を対象とし、簡易なウッドチップパーによる減容化試験の実施

3.2 ゼオライトブロックによる除染作業時の排水処理

除染作業に伴い発生する排水等を対象として、人工ゼオライトブロックによる放射性物質の除去、吸着試験を行った。試験は、水路内に人工ゼオライトブロックを設置し、ブロックに吸着した放射性セシウム濃度を測定することにより行い、設置期間は、23日間であった。

(1) 供試試料

人工ゼオライトブロックは、実証試験事業で使用したものと同様であり、その大きさは 100mm×100mm×200mm である。

(2) 設置場所および試験方法

ブロックは、3箇所の水路に設置した。水路①は水処理済みの除染排水が流れる水路であり、水路②は除染の影響を受けない環境水が流れる水路、水路③は水路①と水路②が合流した水路となっている。図-10 にブロックの設置状況を示す。

水路①では、1列あたり2本として、計3列を配置、水路②では、1本1列として4本（4列）設置した。水路③では、1列あたり4本のブロックを配置し、最上流部には6列を1つのグループとし、それ以降は3列を1グループとして設置した。以下、上流側から順にグループ1、

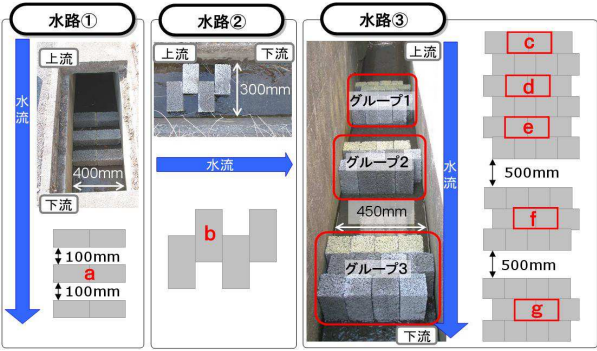


図-10 人工ゼオライトブロックの配置と設置状況

表-7 原水の放射性セシウム濃度

試料名	放射性セシウム濃度(Bq/kg)		
	Cs-134	Cs-137	計
水路①	N.D.	10	10
水路②	N.D.	N.D.	N.D.
水路③	N.D.	10	10

検出下限値：10Bq/L, N. D. は検出下限値未満を示す。

2、3と称す。処理する水については、事前に放射性セシウム濃度を測定した。測定結果を表-7に示す。

試験後に、ブロックを回収し、放射性セシウム濃度の測定を行った。また、ブロックの再利用等の可能性を把握するため、ブロックを高圧水にて洗浄を行い、夾雑物や粗めの土壌粒子を除去した後のブロックの放射性セシウム濃度を測定した。同時に洗浄時の付着物の重量測定も実施した。

(3) 試験結果

試験後のゼオライトブロックの放射性セシウム濃度と洗浄時の付着物重量を表-8に示す。

表-8より、水路③で最も高い値となった。これは、水路①は常に水が流れているわけではなく、処理済みの除染排水が一定期間ごとに放流されている。そのため、総通水量としては、水路③に設置したブロックが最も多かったことが理由と考えられる。

表-8 ゼオライトブロックの放射性セシウム濃度

試料名とブロック位置	放射性セシウム濃度 [Cs134、137合計] (Bq/kg)		付着物重量 (g/本)
	23日間 設置後	洗浄後	
a 水路① 2列目	5,910	1,080	33
b 水路② 2列目	3,140	700	38
c 水路③ グループ1 1列目	9,460	920	51
d 水路③ グループ1 3列目	8,900	800	43
e 水路③ グループ1 5列目	9,110	1,090	60
f 水路③ グループ2 2列目	5,810	1,440	49
g 水路③ グループ3 2列目	6,030	1,540	42

また、水路①と水路②の合計が水路③に近い値となっていることから、水路①で水に含まれる放射性物質を完全に除去できていないと考えられる。放射性物質を完全に除去するためには、設置本数を増やす必要があることも示された。

水路③においては、上流側で高い値となっている。一方、下流側のグループ 2, 3 のブロック間では大きな差が見られなかった。

洗浄後のブロックの放射性セシウム濃度は、下流側のグループ 2, 3 の方が高い値となった。また、グループ 1 でも下流側の方が高い傾向にあった。放射性物質の多くは夾雑物等に付着している状態で存在しているといわれており、付着物の量が多い上流側で放射性セシウム濃度も高くなったと考えられる。

次に、洗浄後にもブロックに残っている放射性セシウムをブロックに直接吸着しているセシウムであると仮定すると、上流側のブロックでは夾雑物等に付着しているセシウムが主であり、上流側のブロックが夾雑物等の捕捉により、ブロックの交換基の表面が閉塞し、その後は粒子径の大きな夾雑物は捕集するが、溶存態として存在する放射性セシウムは下流側へ流下し、下流側で溶存態のセシウムを捕集したと推定できる。

3.3 土壌洗浄

土壌の減容化技術の 1 つとして、土壌洗浄技術がある。土壌洗浄は比較的安価で処理が可能な技術であり、除染廃棄物の減容化が急務となっている現状では有望な技術である。そこで、現地作業所内の泥状の側溝堆積物や表層の土壌を供試試料とし、土壌洗浄試験を実施した。

(1) 供試試料

図-11 に示す側溝堆積物や表層土壌を採取し、それらを混合し供試試料とした。なお、混合時に枯草、落葉落枝、ビニール片及び金属片等は除去した。

供試試料の放射性セシウム濃度を表-9 に、粒径加積曲線を図-12 にそれぞれ示す。図-12 に示すように本供試試料は、粘土・シルト分を 25%程度含む砂質土であった。なお、土壌を採取した地点周辺の 1m 空間線量率は、約 0.7~0.8 μ Sv/h であった。

(2) 試験方法

所定量の供試試料を採取し、同重量の洗浄水を加え、ハンドミキサーを用い供試試料と洗浄水を 1 分間攪拌混合させた。攪拌後、ステンレス製ふるいをを用い土壌を 5 画分に分級し、その後供試試料に対し半分量の水ですすぎ洗浄を実施した（以後、ここまでの工程を分級洗浄とする）。土壌の画分は、粒径 2mm 以上、2mm~0.85mm、0.85~0.25mm、0.25mm~0.075mm、0.075mm 以下とした。分級後の画分について、放射性セシウム濃度の測定を行い、土壌洗浄による放射性セシウムの低減効果を確認し



図-11 採取土壌（左：側溝堆積物，右：表土）

表-9 供試試料の放射性セシウム濃度

	放射性セシウム濃度 (Bq/kg)		
	Cs-134	Cs-137	計
供試試料	109,000	148,000	257,000

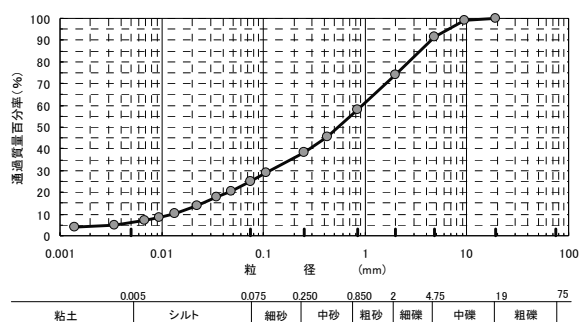


図-12 供試試料の粒径加積曲線

た。また、低減効果の向上を目的として、分級洗浄を行った土壌に対し気泡混入水（マイクロバブル水）とコンクリートバイブレータを用いた土壌洗浄（以後、気泡水洗浄とする）についても合わせて実施した。洗浄後の放射性セシウム濃度について測定を行った。

(3) 試験結果

土壌洗浄試験の結果を表-10 に示す。分級洗浄、気泡水洗浄後の画分の結果に加え、対象画分以上を累積した場合の放射性セシウム濃度の低減率を示す。なお、0.075mm 以下の画分については、計算により濃度を算出した。

表-10 土壌洗浄結果

分級画分	画分ごとの低減率(%)		累積低減率(%)		土壌分布比率(%)	減容化率(%)
	分級洗浄	気泡水洗浄	分級洗浄	気泡水洗浄		
>2mm	84.1	90.8	84.1	90.8	25.7	25.7
2mm~0.85mm	76.9	88.0	81.3	89.7	16.4	42.1
0.85mm~0.25mm	60.0	72.7	74.6	84.3	19.4	61.5
0.25mm~0.075mm	-12.0	13.3	58.9	71.5	13.6	75.1
<0.075mm	-177.6	-215.5	—	—	24.9	—

—は、原土壌よりも濃度増加を表す

分級洗浄により、2mm 以上の画分については、約 84% の低減が確認できた。また、0.25mm 以上の中砂程度までであれば、約 60% の低減率であった。濃度の低減率は粒径が小さくなるにつれ低下し、0.25mm 以下では、初期濃度よりも高い濃度に濃縮されていた。また、対象画分以上を累積した場合の低減率は、0.25mm 以上で約 75% となった。なお、この時の減容化率は、61.5% であった。気泡水洗浄では、分級洗浄からさらに低減率を高めることが可能となっており、2mm 以上の画分において 90% を超える低減率となった。また、分級洗浄では濃度低減が認められなかった 0.25mm～0.075mm の画分においても濃度を低減することが可能であった。

次に、図-13 に放射性セシウムが洗浄により画分へ移行した割合を示す。分級洗浄後では、試料に含まれていた放射性セシウムの約 70% が 0.075mm 以下のスラリー分へ移行しており、0.25mm 以下の画分を含めると約 84% の放射性セシウムが細砂以下の部分に移行していた。気泡水洗浄後では、細粒分への移行割合がさらに大きくなり、0.075mm 以下のスラリー分に約 79%、0.25mm 以下を含めると 90% 以上の放射性セシウムが移行していることが確認できた。

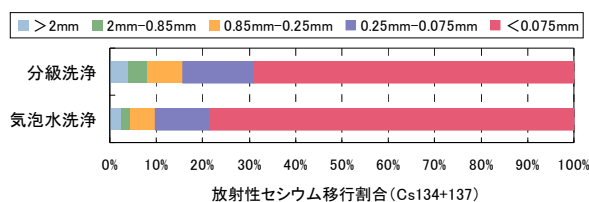


図-13 洗浄における放射性セシウム移行割合

上記の結果から、本試験に供した試料のような砂質土を土壤洗浄によって、粒径 0.075mm 以上の土壤を 1,000Bq/kg 以下にまで低減させることを仮定した場合、初期濃度として分級洗浄では 2,400Bq/kg 程度、気泡水洗浄では 3,500Bq/kg 程度の土壤が処理対象となる。また、0.25mm 以上の土壤を 1,000Bq/kg まで低減させる場合、分級洗浄で 3,900Bq/kg 程度、気泡水洗浄では、6,400Bq/kg 程度となることが予想される。

3.4 落葉・落枝減容化

放射性物質が拡散した面積のうち、森林の占める割合は膨大であり、そこから発生する廃棄物も莫大な量になると考えられている。そのため、森林に係る除染廃棄物の減容化は除染を進める上で非常に重要である。そこで、できるだけ簡便な減容化技術として、落葉や落枝の破碎・チップ化による減容化を試みることにし、落葉・落枝を対象とした減容化試験を実施した。

(1) 試験方法と試験結果

図-14 に示す小型（処理能力 300～400kg/h）の木材チッ



図-14 小型チップパー

パー（破碎機）を使用し、森林廃棄物の減容化を行った。森林の除染により発生した廃棄物 1m³（フレコンバッグ 1 袋）を対象とし、減容化試験を実施した。

減容化試験の結果を表-11 に、試験写真を図-15 にそれぞれ示す。

落葉・落枝の破碎により、51.7% 程度減容化できることが確認できた。ただし、本試験ではチップパーへの落葉・落枝の投入作業は、全て手作業で行う必要があったため、非常に時間効率が悪かった。実際の除染工事等にて同機械を導入する場合、前分別等の前処理が必須となると考えられる。

表-11 減容化試験結果

	容積 (m ³)	減容化率 (%)
減容化前	1.12	51.7
減容化後	0.54	



図-15 試験状況（上：減容化前、下：減容化後）

3.5 除染に係る基礎的試験のまとめ

基礎的試験にて得られた知見を以下に示す。

・ゼオライトブロックによる排水処理試験では、水路に設置するだけで、放射性物質を除去することが可能であった。また、ブロックの設置位置により、吸着する放射性物質の形態が異なることが示唆された。本試験では、下流側のブロックからも放射性物質が検出されていることから、全量を捕捉できてはおらず、設置本数については現地の状況に応じ判断する必要があると考えられる。

・土壌洗浄試験では、分級洗浄により、2mm 以上の土壌粒子では約 84%、0.25mm 以上の土壌では約 60%程度の放射性物質濃度を低減することが可能であった。気泡水を用いた洗浄により、さらなる放射性物質の低減も可能であった。

・落葉、落枝の減容化試験では、破碎により約 51%の減容化が可能であった。

4. おわりに

本報では、前田建設における除染技術への取組について紹介してきた。今後の本格除染において、本報にて報告した知見が有効に活用されれば幸いである。

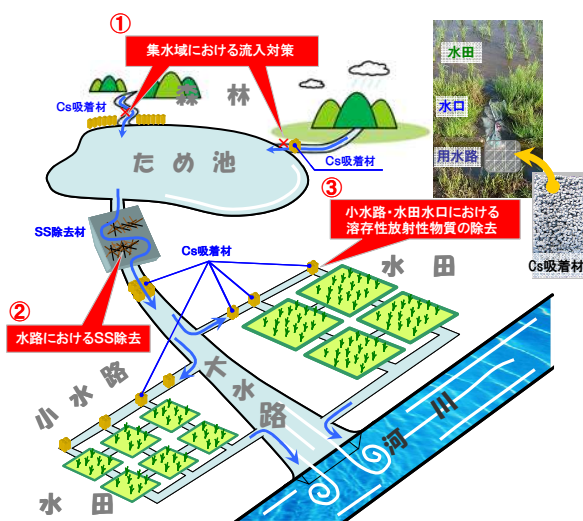


図-16 人工ゼオライトブロックを用いた農地への放射性物質流入対策

また、本報で紹介した人工ゼオライトブロックであるが、今後は除染作業に伴い発生する排水だけでなく、大きな社会問題となっている農地への適用を検討している。

山林等から水を介しての流出が予想される放射性物質を、集水域での流入部や水路、水田水口等にて、吸着・除去させることにより、農地への流入抑制を図るものである（図-16）。本技術が、今後の被災地の農業再生への一端を担うことを願っている。

なお、2の実証事業は、本文中にも記載したが、内閣府委託業務「福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務」の一部として、（独）日本原子力研究開発機構より公募・採択された平成 23 年度「除染技術実証試験事業」の中で得られた成果をまとめたものである。試験の実施にあたり、様々なご助言をいただいた同機構福島技術本部各位ならびに多大なご協力をいただいた飯館村役場産業振興課各位に対し、末筆ながら感謝の意を表すものである。

参考文献

- 1) 文部科学省：放射線量等分布マップ，
<http://ramap.jaea.go.jp/map/map.html>
- 2) 環境省：「除染特別地域における除染の方針（除染ロードマップ）」の公表について，
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=14747>
- 3) 奥野慶四郎：除染業務をけん引する土木の力，日経コンストラクション，2012.7.9，pp.62-67
- 4) （独）日本原子力研究開発機構ホームページ：
<http://www.jaea.go.jp/fukushima/index.html>
- 5) 新井祐二，田窪祐子，阿部敏之，石田良二：オートクレーブ反応槽による石炭灰を原料としたゼオライト合成およびイオン交換技術に関する実用化の検討，前田建設技術研究所報 Vol. 43，pp.115-122，2002
- 6) 土壤環境分析法編集委員会：土壤環境分析法，博友社，pp.208-211，1997
- 7) 久馬一剛：最新土壌学，朝倉書店，pp.76，1997