

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11690

研究課題名（和文）水平電極式動電法による除染のためのフレキシブルイオン吸着電極の開発

研究課題名（英文）Development of flexible ion adsorption electrodes for decontamination by FEM-EK method

研究代表者

カビール ムハムドゥル（KABIR, MAHMUDUL）

秋田大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10422164

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：非放射性Csの除去および作製したイオン吸着電極によるCsの吸着の確認ができた。作製した電極の導電率は10マイクロS/mを数千倍まで達成し、Cs吸着能力ではゼオライト質量比10 wt%においておよそ2500 mg/kgの吸着量であった。フレキシブル性では、水分を加えることによって目標の80%以上のフレキシブル性を得ることができた。

フィールド試験では、福島大学と共同で、放射性土壌を用いて、FEM-EK法による除染効果を調べている最中、コロナ禍の影響で一部は実施できなかったものの、数回の実験では、自然環境下でもFEM-EK法によるCsや重金属の除去が可能であるとわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、自然汚染が大きな問題となっており、汚染土壌の修復が急務となっている。汚染土壌の修復技術の一つに動電学的処理法があり、一定区間の汚染土壌に金属板電極を垂直に設置し、その間に直流電圧を印加し、クーロン力により金属イオン（例えば、Cs、Pb、Cuなど）を陰極へ移動させ、汚染土壌を修復していく技術である。しかし、この方法の問題点として、陰極へ移動した金属イオンが排水とともに放流してしまう等の二次被害の恐れがある。そこで、申請者の研究グループでは動電学処理を行う新手法（FEM-EK法）を提案している。この手法では、処理後表土にある陰極だけを保管するため、大量の土壌の保管・管理はしなくても済む。

研究成果の概要（英文）：We were able to remove non-radioactive Cs and confirm the adsorption of Cs by the prepared ion adsorption electrode. The conductivity of the prepared electrode was several thousand times larger than 10 microS / m, and the Cs adsorption capacity was about 2500 mg / kg for the zeolite mass ratio of 10 wt% electrode. We were able to obtain more than 80% of the aim of flexibility of the electrodes by adding water.

In the field test, while investigating the decontamination effect by the FEM-EK method using radioactive soil in collaboration with Fukushima University, some tests could not be carried out due to the influence of corona virus pandemic situation, but in several experiments, It was found that the Cs and heavy metals can be removed by the FEM-EK method from the radioactive polluted soil.

研究分野：環境工学

キーワード：FEM-EK法 Cs ゼオライト イオン吸着電極

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

福島第一原子力発電所の事故は、福島を中心に放射性セシウム Cs を放出し、深刻な Cs 土壌汚染を引き起こした。現在、Cs 汚染土壌の回復が急務であるが、その除染作業は主に表土掘削に限られている。Cs は土壌表面の負電荷と静電気力により結合しているため、土壌表面に強固に吸着し、通常的环境では簡単には離脱しない。しかし、表土掘削の場合は、膨大に排出される汚染土壌の保管・管理という新たな問題を引き起こしている。また、汚染土壌の回復は、放射線環境下での作業であるため、安全・効率的・簡便に行える手法が必要である。通常の動電処理では、土壌から排出された水に溶解した Cs イオンを回収するが、その水の流動性制御や回収、さらに排出された水 (Cs 汚染水) の管理など、課題が多々あり、現場での実用化には至っていない。そこで、本研究グループでは、水平電極式動電法 (FEM-EK法) を提案し、その際に必要となるフレキシブル性イオン吸着電極を開発する。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は

(ア) 土壌からの重金属除去に実績のある動電処理法を改良した水平電極式動電 (FEM-EK) 法を用いて、Cs 汚染土壌の回復を行うこと、

(イ) 除去された Cs の保管・管理に適した、柔軟性及びイオン吸着性を有する動電処理用電極を、天然ゼオライトや籾殻くん炭などを原料に製造することである。

除去された Cs は動電処理用電極に吸着・固定・濃縮されるため、旧来の表土掘削による除染より、回収 Cs の保管・管理の面で優位性を持つ。本研究では、フィールド試験の実施に向けた基礎技術の確立を目指す。

### 3. 研究の方法

水平電極式動電法では、図 1 のように汚染土壌表面に陰極を配置し、陽極を土壌中 5-10cm に設置する。直流電圧を印加すると、陽極から土壌中の陽イオンが陰極側に、陰イオンが陽極側に移動し土壌から回収される。より効率的に土壌から Cs を回収する条件を求めため、印加電圧、水の導電率などをパラメータとし、排水中に含まれる Cs 濃度、土壌中の間隙水の pH や導電率を測定する。また、試験後の土壌に残留する Cs 量を測定することで、処理時間と Cs 残留量の関係を求める。土壌中の Cs の移動は土壌粒子の粒径により異なるため、粒径が 50~100  $\mu\text{m}$  及び 50  $\mu\text{m}$  以下の土壌に関して実験を行う。現状では、Cs 除染に数週間がかかるのに対し、本研究課題では、7-10 日間での Cs 回収が目標である。

安全に広範囲の除染を可能にする新動電処理法の効果を確認するために、図 1 のようなテーブルプラントを構築する。具体的には、下記のような実験項目を実施する。

1) 土壌の粒径やそのゼータ電位をパラメータとした模擬汚染地を構築する。土壌は Cs が吸着しやすい粘土やシルトを模擬した粒径とする。

2) 印加電圧を変化させた場合の動電処理の効果を確認する。将来的には太陽光電池などオンサイト電源を用いた電圧印加を考え、適切な印加電圧を求める。

3) 表土から陽極の深さを変えながら動電処理を行う。そのため、表土から 5-10cm 以内に陽極を設置し、Cs 回収の効果を確認する。また、陽極に用いる電極としてメッシュ状の電極や導電性を持つゲル状のものを用いる。陰極は 10cm×10cm とし、まずは金属板 (銅や鋼鉄) を用い

る。

4) 実験中においては、電流や土壌中の水分を常時計測し、Cs の回収効率の関連性を探る。また、土壌間隙水の pH、導電率を測定し、Cs イオンの動作を追跡する。

5) 試験後の土壌の Cs 量を測定する。

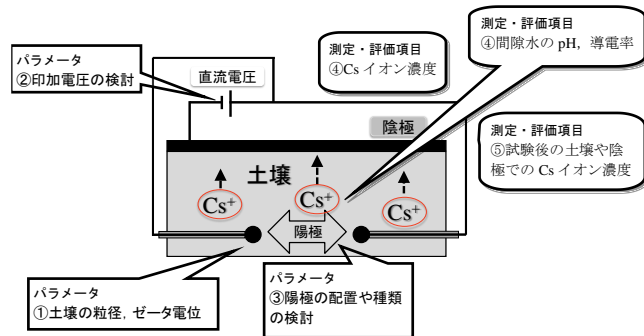


図1 水平電極式動電法 (FEM-EK法) の実験に必要なパラメータ

#### フレキシブルイオン吸着電極の開発

排出された Cs を陰極に吸着させることで、ある程度濃縮し、その後の保管を容易にする。Cs に対する高い吸着性を示す物質としては、ゼオライトや靱殻くん炭が知られている。ゼオライトは導電性を持たないため、ゼオライトとくん炭を主原料とした電極を製造する。その際に、各種電極原料の組成比試料の混合比、成型時の圧力、焼成温度をパラメータとし、電極の導電率を  $1000 \times 10^{-6} \text{ S/m}$  (電極に必要な導電率は  $10 \times 10^{-6} \text{ S/m}$  程度)、イオン吸着能を現状の 50% から 80% まで改善することを目指す。また、本研究課題の目標であるフレキシブル性を、例えば成型後電極に圧力を加えることで、電極にフレキシブル性を増すことを目指す。100% のフレキシブル性(つまり、使用後の電極を丸めることが可能)を目指し、Cs 回収後の保管に大いに役立てることが最終目標である。また、電気化学特性を求めることで、電極としての特性と製造パラメータへの関係を明らかにする。

本研究課題の新手法である水平電極式動電法では、陰極にCsを吸着させ、固定・濃縮させる。また、Cs回収後の電極の可搬性及び保管性を向上させるため、電極にフレキシブル性を与える。具体的には、下記のような実験項目を実施する。

1) ゼオライトと導電助剤としてのカーボン、活性炭、靱殻くん炭などを種々の混合比で混ぜる。この際に、ゼオライトの粒径も変化させる。

2) 電極を真空引きして成型し、乾燥する。その後、既存の圧力成型機を用いて電極に圧力を加えながら電極を作製する。電極作製時にアバカ、化学合成などのバインダーを用いる。

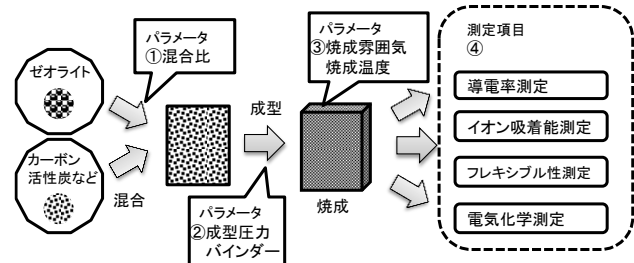


図2 100%フレキシブルイオン吸着電極の開発

3) 成型後の試料を様々な雰囲気、温度で焼成する。(電気炉は既存設備)

4) 完成した電極の導電率、イオン吸着能、柔軟性や強度などを測定する。そのため、既存設備の電気化学計測システム HZ-7000 に新たにインピーダンス分析ボードを設置する。

最終的には、製造した動電処理テーブルプラントの陰極に、フレキシブル電極を組み込み、動電処理を行う。この際、印加電圧などを変化させ、Cs がフレキシブル電極で回収できることを確認する。現場での実証試験へ向けて、陰極の大型化(例えば、50cm×50cm)を図り、Cs の吸着を確認する。

#### 4. 研究成果

図3にイオン吸着電極を用いた FEM-EK 法実験装置の構成を示す。実験結果の具体的な数値を省略するが、実験計画通りにイオン吸着電極の作製に成功した。図4にイオン吸着電極の写真の一例を示す。図3の装置を用いて FEM-EK 法実験を行う。実験期間は7日間、印加電圧は電界

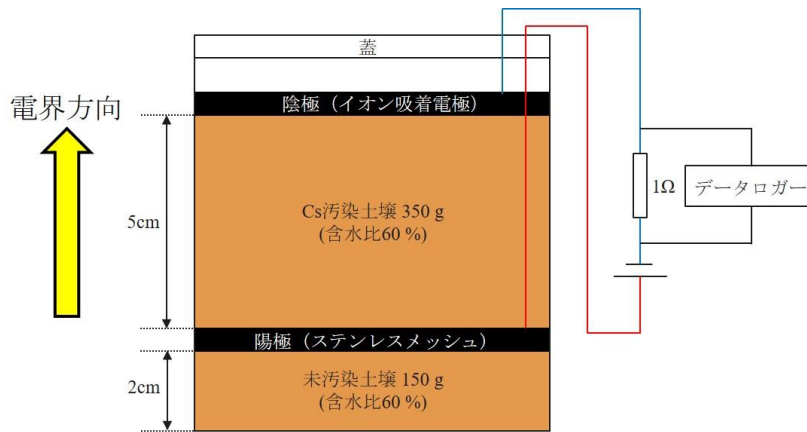


図3 FEM-EK 法実験装置の構成

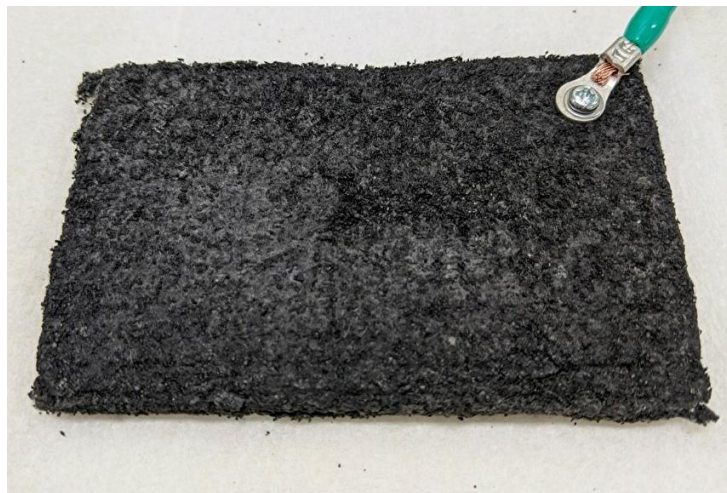


図4 イオン吸着電極

が 200 V/m となるように 10 V とした。また動電処理の効果の確認のためコントロールとして電圧を印加しない実験装置を別途用意した。コントロールにも陽極と陰極を設置し、同時に実験を行った。また、福島大学と共同でフィールド試験を試みた。

#### 4-1 電流値

FEM-EK 法実験中の電流値の経時変化を図 5 に示す。電圧印加直後の電流値は 5.5 mA 程度の電流が流れた。その後時間経過に伴い電流値の減少がみられ、実験開始から一日経過時点で、電流値は 3 A 前後でほぼ一定になった。これは水の電気分解による電極の劣化や陽極付近で水素イオン、陰極付近で水酸化物イオンが生じ、土壌中に pH jump が形成された可能性や間隙水のイオン濃度が低下したため、電流値が低下したと考えられる。

#### 4-2 Cs 濃度

土壌の Cs 濃度を調べた結果、陰極に近い土壌の層ほど、Cs 濃度が高くなっていることがわかった。これは動電処理の効果によって Cs が土壌上層へ移動したためだと考えられる。一方、電圧を印加していないコントロールの土壌では、土壌の層では Cs 濃度の値に特徴的な違いはなかった。イオン吸着電極の Cs 濃度を計測した結果、電圧を印加しないコントロールの電極の Cs 濃度の約 5 倍の Cs の吸着が確認できた。

以上の結果から、本条件において FEM-EK 法による土壌内の Cs の移動および、イオン吸着電極

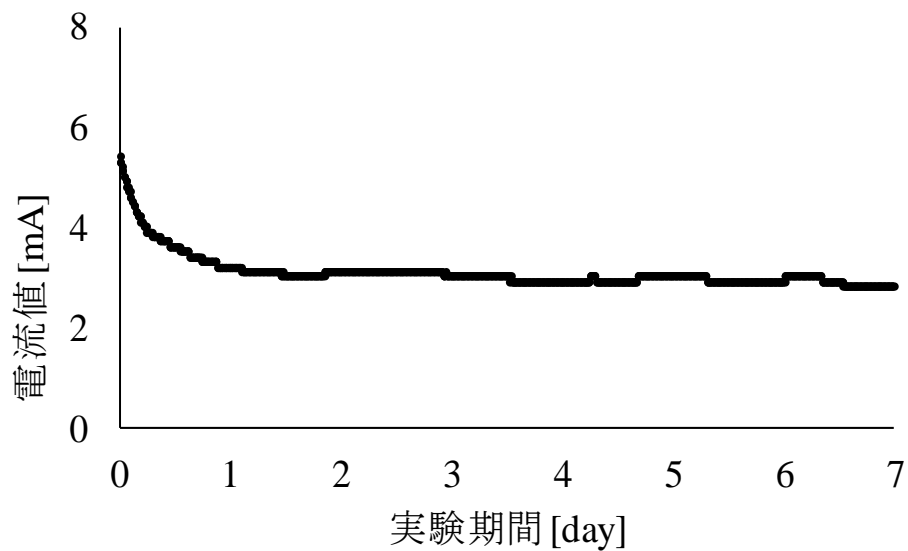


図5 電流値の経時変化

へのCs吸着を確認した。

#### 4-3 フィールド試験の実施

当該研究課題の2年目（2019年）の11月から福島大学と共同でFEM-EK法による汚染土壌からCsの除去についてフィールド試験を実施してきた。コロナ禍で移動制限などによる一部の計画が実施はできなかったものの、FEM-EK法およびフレキシブル性電極の可能性は十分確認できた。詳細な結果については業績等を参照されたい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Takuya Abe, Mahmudul Kabir, Kouki Sakurada, Masahiro Minowa	4. 巻 9
2. 論文標題 A Modified Measurement Method of Electrical Properties for ZnO Microvaristors by Direct Measurements	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 古谷 優, 遠藤 雅也, カビール ムハムドゥル, 水戸部 一孝	4. 巻 140
2. 論文標題 EDS元素分析を用いた磁気-フェライト処理によるタンパク質抽出法の検証	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 128-129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 櫻田 光貴, カビール ムハムドゥル, 阿部 拓也, 箕輪 昌啓	4. 巻 140
2. 論文標題 過電流ストレスによるZnOマイクロバリスタの表面変化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 54-55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Seiji Kumagai, Yusuke Abe, Tomoaki Saito, Takuya Eguchi, Masahiro Tomioka, Mahmudul Kabir, Daisuke Tashima	4. 巻 437
2. 論文標題 Lithium-ion Capacitor Using Rice Husk-derived Cathode and Anode Active Materials Adapted to Uncontrolled Full-pre-lithiation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Power Sources	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 阿部 拓也, カビール ムハムドゥル, 櫻田 光貴, 箕輪 昌啓 電気学会論文誌B	4. 巻 139
2. 論文標題 直接計測によるZnOマイクロ粒子1個の電氣的耐久試験の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 503-504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masaya Endo, Mahmudul Kabir, Noboru Yoshimura	4. 巻 8
2. 論文標題 Cell Fractionation and Extraction of Protein from Activated Sludge by Using Ferrite Particles' Motion Controlling System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 84-89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejia.8.84	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 李 承霖, カビール ムハムドゥル, 吉村 昇	4. 巻 138
2. 論文標題 室内照明において昼光利用のため窓に設置するブラインド状反射板の角度調整に関するシミュレーション	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 416-421
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masaya Endo, Mahmudul Kabir	4. 巻 7
2. 論文標題 Excess Activated Sludge Treatment with Ferrite Particles and Electro Magnets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Engineering Sciences & Research Technology	6. 最初と最後の頁 251-256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mahmudul Kabir, Yoshitaka Hatakeyama, Shunsuke Nakajima	4. 巻 17
2. 論文標題 Manufacturing Method of Cathode Electrode for FEM-EK Process to Adsorb Cesium (Cs) Ion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Environment and Pollution Technology	6. 最初と最後の頁 237-241
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 田村 健太郎, 渡部 陽介, カビール ムハムドゥル, 佐藤 友祐
2. 発表標題 水平電極式動電 (FEM-EK) 法に用いる電極の開発に関する研究
3. 学会等名 日本素材物性学会令和元年度年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡部 陽介, 田村 健太郎, カビール ムハムドゥル, 佐藤友祐
2. 発表標題 非放射性Csの濃度測定法に関する研究
3. 学会等名 第8回環境放射能除染研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金田 穂乃果, 斎藤 貴広, 佐藤 理夫, 田村 健太郎, 渡部 陽介, カビール ムハムドゥル, 佐藤 友祐, 松本 悠里
2. 発表標題 水平電極式動電法による森林除染の検討
3. 学会等名 第10回 福島地区CEセミナー
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 カビール ムハムドゥル
2. 発表標題 水平電極式動電(FEM-EK)法：新たな除染技術の試み
3. 学会等名 静電気学会東北・関西・九州支部合同研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mahmudul Kabir, Kentaro Tamura, Yosuke Watanabe, Yusuke Sato and Noboru Yoshimura
2. 発表標題 Study on Decontamination of Cs from Soil by Using FEM-EK Process
3. 学会等名 The International Council on Electrical Engineering ICEE 2020 (開催中止) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古谷 優・今 佑輝・遠藤雅也・カビールムハムドゥル
2. 発表標題 低温下における磁気-フェライト処理法による活性汚泥からのタンパク質の抽出
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤凌太・カビールムハムドゥル・高橋俊秀
2. 発表標題 アオコおよび活性汚泥を用いた微生物燃料電池（MFC）に関する研究
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿部拓也, 小倉一步, 櫻田光貴, カピールムハムドゥル, 箕輪昌啓
2. 発表標題 ZnOマイクロバリスタ/エポキシ複合体の電気特性の測定
3. 学会等名 電気学会 誘電・絶縁材料/電線・ケーブル合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 カピールムハムドゥル
2. 発表標題 ゴミから発電
3. 学会等名 第2回秋田ヒューマン・エネルギー研究会(招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

カピール研究室 <a href="http://kc6.ee.akita-u.ac.jp/">http://kc6.ee.akita-u.ac.jp/</a>  電気電子工学コース <a href="http://www.ee.akita-u.ac.jp/">http://www.ee.akita-u.ac.jp/</a>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	吉村 昇  (Yoshimura Noboru)  (60006674)	秋田大学・名誉教授・名誉教授    (11401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------