

セシウム動態に基づく汚染コンクリート瓦礫の除染・減容化技術に関する研究

Study on Decontamination of Building Materials and
Volume Reduction of Contaminated Rubble Based on Cs Dynamics

岡田 俊介, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏 (大阪大学)

Shunsuke Okada, Fumihito Mishima, Yoko Akiyama, Shigehiro Nishijima (Osaka University)

e-mail: okada@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

本研究では、福島第一原子力発電所の廃炉作業を対象とした建材瓦礫の除染・減容化手法を提案した。廃炉作業で発生する汚染瓦礫は、主に ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr による汚染が問題となっている。ここでは空間線量への寄与が大きい ^{134}Cs 、 ^{137}Cs を対象にした。Fig 1 に建材瓦礫除染・減容化の流れを示す。現在、廃炉作業に伴って約 56 万 m^3 もの高線量コンクリート瓦礫が発生すると推定されている。発生した汚染瓦礫は、粗破壊と鉄筋除去を行い、一部の低線量のものを除いて、コンクリート瓦礫として保管・管理される。先行研究により、Cs はコンクリート表面から数 mm 程度の深さに強固に吸着していることが明らかになっており[1]、保管対象になる高線量の汚染コンクリートに対して、表面研磨等の物理的手法による Cs 除染が有効であると考えられる。そこで本研究では、ボールミルを用いた表面研磨手法により、Cs が吸着したコンクリート表面を剥離する除染手法について検討した。これにより、除染後の瓦礫を数百～数千 Bq/kg まで除染し、路盤材や再生コンクリートとして再利用することで大幅な瓦礫減容化が可能であると考えられる。

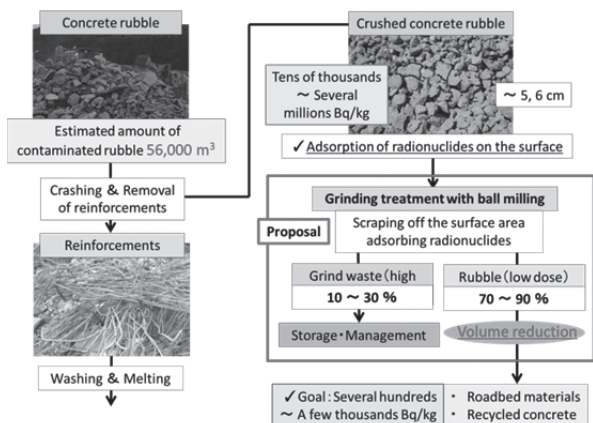


Fig 1. Diagram of decontamination and volume reduction

2. 実験方法

コンクリート片を 20 kBq/kg の ^{137}Cs 溶液に 24 h 浸漬し、模擬汚染コンクリート瓦礫を作製した。乾燥させた模擬瓦礫を模擬雨水 (Na^+ 、 K^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 $\text{Ca}^{2+} = 5 \text{ mg/L}$ 、 $\text{pH} = 5$) に 24 h 浸漬し、雨水によるウェザリング効果を再現した。その後 1~2 cm に破碎した模擬瓦礫 50 g、研磨剤(砂 2~3 mm) 50 g、蒸留水 200 mL を 500 mL アイボーイ容器に封入し、24 h ボールミル処理を行った(120 rpm)。模擬瓦礫、研磨剤、研磨屑に分離した後、それぞれの放射線量を Ge 半導体検出器(ORTEC)で測定し、線量低減率、減容化率を評価した。その後同様の条件で、24 h 追加ボールミル処理を行った。

3. 実験結果・考察

汚染瓦礫の比放射能の変化を Fig 2 に示す。48 h 後の線量低減率は 52 % であり、約 10000 Bq/kg の汚染瓦礫がボールミル処理により、約 4800 Bq/kg まで除染された。

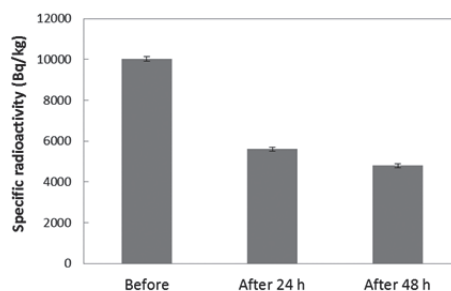


Fig 2. Change in Specific radioactivity

模擬瓦礫の様子を Fig 3、処理前後の質量変化を Fig 4 に示す。ボールミル処理により、瓦礫表面のセメント部分が剥離している様子が確認された。Cs はそのほとんどがセメント表面に吸着しており、研磨処理によって物理的に除去されたと考えられる。また模擬瓦礫の質量減損は約 20 % であり、処理後の汚染瓦礫を再利用することで、重量で 80 % 近い減容が期待できる。今後、ボールミルにより発生する廃水の凝集沈殿・磁気分離処理についても検討し、より効率的な除染・減容化プロセスの確立を目指す。

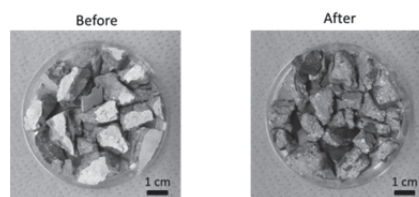


Fig 3. Appearance of contaminated rubble

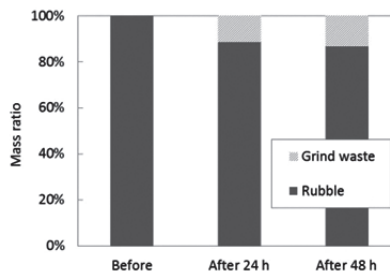


Fig 4. Change in mass ratio

参考文献

1. K. Maslova et al., Journal of Environmental Radioactivity, 125, pp.74-80, 2013

磁気分離法を用いた汚染土壌の減容化技術に関する研究

Study on Volume Reduction of Cesium Contaminated Soil by Magnetic Separation

行松 和輝, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏 (大阪大学)

YUKUMATSU Kazuki, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro (Osaka University)

E-mail: yukumatsu@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

福島第一原子力発電所事故により、大量の放射性物質が広範囲に拡散し、土壌などに沈着した。現在、表土剥ぎ取りなどの除染作業を行っているが、これに伴って最大 2200 万 m³にも及ぶ大量の汚染土壌が発生すると試算されている[1]。除染作業に伴って発生したすべての汚染土壌を中間貯蔵施設で保管する場合、中間貯蔵施設の建設に必要な広大な土地の確保や、汚染土壌の運搬に困難を伴う。したがって、大量の汚染土壌を効率的に減容化する手法の確立が求められている。

本研究では、汚染土壌を再利用が検討できる大量の低線量土壌と、安全な管理が求められる少量の高線量土壌に分離することを目標として汚染土壌の減容化手法の検討を行ってきた[2]。減容化プロセスを Fig.1 に示す。この手法ではセシウムを強固に吸着する常磁性体の 2:1 型粘土鉱物を、土壌分級と磁気分離法により選択的に分離、回収する。これにより、2:1 型粘土鉱物以外の土壌成分は低線量となるため、埋戻しまたは再利用することで大幅な汚染土壌の減容化が可能である。

2:1 型粘土鉱物は粒径数百 nm～数十 μm の粒子が存在し、本手法では 2:1 型粘土鉱物を高効率に分離することが求められる。しかし磁気分離法は、分離対象の粒径によって磁気力が大きく変化する。粒径の小さな粒子ほど比表面積は大きくなるため単位重量あたりのセシウム吸着量は大きくなるが、磁気力が小さくなるため、線量低減の目標値を達成するためには、粒径を考慮した磁場条件の最適化が重要である。そのため本研究では、粒径ごとの 2:1 型粘土鉱物の分離率について粒子軌跡計算を用いた検討を行った。

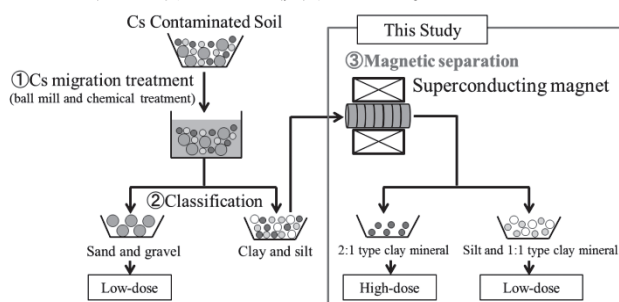


Fig.1 Flow diagram of volume reduction method

2. 実験方法

まず粒子軌跡計算を用いて、粒径ごとのバーミキュライトの分離率を算出した。粒子軌跡計算を行うために有限要素法解析ソフト ANSYS10.0 を用いて磁場解析と流体解析を行った。磁場解析では、印加磁場を 2, 5, 7 T の 3 種類について、流体解析では流速を 3.0 cm/s とした。この結果を利用して、磁気力とドラッグ力より 2:1 型粘土鉱物であるバーミキュライトに対する運動方程式を立て、オイラー法を用いてそれぞれの印加磁場に対して粒径を変化させて計算を行った。このとき、分離前の粒子の粒度分布の測定結果をもとに粒子軌跡計算を行った。

次に上記の方法で求めた分離率を実験的に確かめるために、実際にバーミキュライト粒子の高勾配磁気分離実験を行った。粒径が 75 μm 未満のバーミキュライト 5.0 g (巴工業

株式会社)に蒸留水 1.5 L 加え、固液比 1:300 の土壌懸濁液を調製した。超電導ソレノイド磁石を用いて、最大中心磁束密度 2, 5, 7 T を印加し、流速を 3 cm/s として高勾配磁気分離を行った。磁気フィルターとして SUS430 (線径 0.34 mm, 外径 36 mm, メッシュ数 20) のものを 5 mm 間隔で 30 枚設置した。それぞれについて 3 分間懸濁液を循環させた。分離後の粒子は吸引ろ過、乾燥後に質量を測定した。

3. 実験結果と考察

粒子軌跡計算より求めたそれぞれの印加磁場での分離可能な最小粒径を Table1 に示す。これより 7 T の磁場を印加することで粒径 1.3 μm 以上の粒子を、また 2 T の磁場を印加すると粒径 3.4 μm 以上の粒子を分離することが可能であることが分かった。これより小さな粒子を分離する必要がある場合、多段階式磁気分離を行う必要がある。例えば、2 段階目の磁気分離装置では線形の細いフィルターを用い、印加磁場を大きくすることでさらに小さな粒子の分離が可能になると考えられる。

また粒径ごとに求めた分離率をもとにフィルターを 30 枚重ねたときの分離率の計算結果と、実験2で求めた実験結果[2]を Fig.2 に示す。これより印加磁場を大きくすることで高い分離率を達成でき、粒子軌跡計算を用いた結果と実験結果がほぼ一致している。粒径ごとの粒子軌跡計算を用いてバーミキュライト粒子の分離率を予測できることが分かった。

今後は粒子軌跡計算を用いて、線量を目標値まで低減させるために必要な磁気分離条件の最適化を行い、それに基き超電導磁石を用いた実汚染土壌の磁気分離実験を検討する。

Table1 Separable minimum particle diameter by calculation

Magnetic field	Separable minimum Particle diameter [μm]
2 T	3.4
5 T	1.5
7 T	1.3

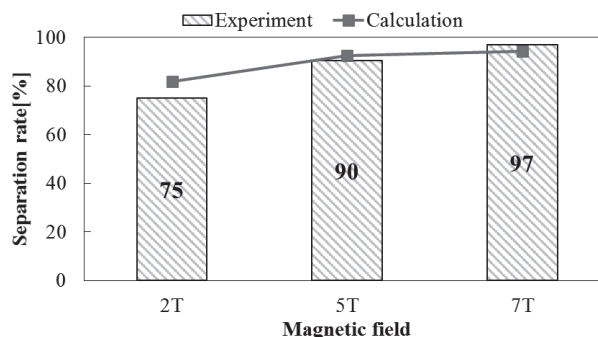


Fig.2 Separation rate at each magnetic field.

参考文献

- 環境省: 除染、中間貯蔵等の現状について、中間貯蔵除去土壌の現用・再生利用技術開発戦略検討会 (第1回)、平成27年7月21日
- K. Yukumatsu, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 91 (2015) p.50

ネオジム磁石磁気分離装置を用いた畜産廃水からのテトラサイクリン系抗生物質の選択除去

Selective separation of tetracycline antibiotics from livestock wastewater using a neodymium magnetic separator

高取 恵里, 井原 一高, 豊田 浄彦(神戸大学); 梅津 一孝(帯広畜産大学); 立嶋 正勝(NEOMAXエンジニアリング)

TAKATORI Eri, IHARA Ikko, TOYODA Kiyohiko (Kobe University); UMETSU Kazutaka (Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine); TATESHIMA Masakatsu (NEOMAX Engineering Co.)

E-mail: ihara@port.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

畜産業において抗生物質は、主として家畜の疾病予防および治療、そして成長促進を目的として使用されている。抗生物質の不適切な投与によって、薬剤耐性菌の発現が懸念されており、環境中への拡散防止のためには畜産廃水からの抗生物質の選択的な分離技術が求められる。磁気分離技術は、水処理分野における多様な応用が提案されている。その中に、抗生物質の磁気分離が挙げられる。磁気力による牽引を実現するため、抗生物質への磁性付与方法として、電気化学凝集と強磁性粒子の添加で構成される電気化学磁気シーディングがある[1]。抗生物質の排出源とされる畜産施設において、超伝導マグネットの設置は制約がある場合が多く、特に装置の可搬性が求められる場合は永久磁石が望ましい。超伝導マグネットと比較すると、磁束密度が低い永久磁石の場合、より大きな磁気力を確保するためには磁場勾配を拡大させる磁気フィルタが重要になる。本研究では、ネオジム磁石を用いた磁気分離装置を試作し、畜産廃水に含有する抗生物質の連続磁気分離を行った。磁気フィルタとして耐食性に優れたステンレス球を用いて、分離性能を評価した。

2. 実験方法

畜産施設から採取した実廃水(1.8 L)にオキシテトラサイクリン(OTC)を 100 mg/L、磁性粒子としてマグネタイトを 250 mg Fe/L になるように添加し、対象溶液とした。鉄電極を用いて 1.34 A で電流を流し、溶液に鉄イオンを溶出させ、電気化学磁気シーディングを行った。容積当りの投入電気量は 2400 C/L とした。

磁気分離にはネオジム磁石を用いた磁気分離装置を使用した(Fig.1)。磁気分離装置は、ネオジム磁石を 15 mm のギャップで対向させ、最大磁束密度は 0.6 T である(Fig.2)。磁気フィルタとしてステンレス球(SUS440C, Ø5.55)を用いた。この磁気分離装置に対し、流量 1.5 mL/s で磁気シーディング溶液を流した。

電気化学反応前の溶液と磁気分離後の溶液の OTC 濃度は高速液体クロマトグラフィ(島津製作所)を用いて測定した。また、磁気分離前後の溶液の鉄濃度は原子吸光光度計(日立, Z-2000)を用いて測定した。また水質汚濁の指標として、化学的酸素要求量(COD)を重クロム酸法で測定した。

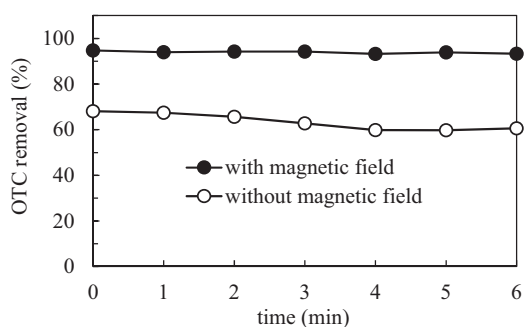


Fig.3 Removal rate of OTC on magnetic separation

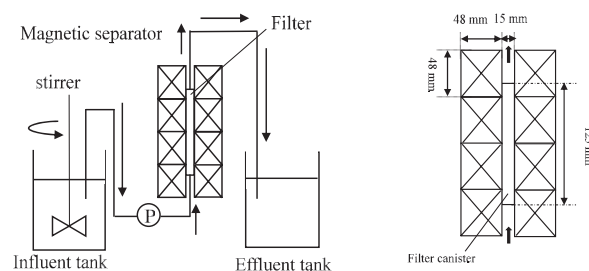


Fig.1 Magnetic separation system Fig.2 Magnetic separator (magnet and canister)

3. 結果および考察

磁場印加が分離に与える影響について、抗生物質の除去率を Fig.3 に、鉄成分の除去率を Fig.4 に示す。鉄成分は主として添加した磁性粒子と電気化学反応で溶出させた鉄イオン由来である。抗生物質の除去率は磁場を印加した場合平均 90%以上と優れていた。これはテトラサイクリン系抗生物質が鉄イオンと結合しやすい性質を持つことが寄与したと考えられる。磁場印加による除去率向上は鉄成分の方が顕著であった。上述の鉄成分が凝集し、磁気力によって効率的に捕捉されたと考えられる。また、本手法による有機物濃度の変化を評価するために COD 除去率を算出した。磁場を印加した場合は 44.9%, 磁場を印加しなかった場合では 23.0%であった。有機物濃度の除去率よりも抗生物質の除去率が顕著に高く、畜産廃水から選択的に抗生物質が分離されたことが示された。

4. まとめ

ネオジム磁石装置を用いて抗生物質の連続磁気分離を試みた。磁気フィルタに磁場を印加することによって除去率が向上したことから、ネオジム磁石によって形成される磁場空間が抗生物質除去に寄与されたことが示された。今後は、磁気フィルタ等を改善し、より実用的な条件での磁気分離を検討する必要がある。

参考文献

1. I. Ihara, et al.: Journal of Physics: Conference Series 156 (2009) 012034.

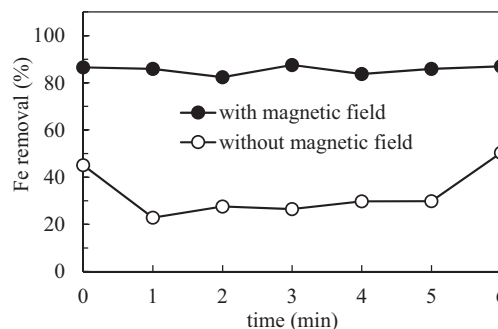


Fig.4 Removal rate of Fe on magnetic separation

磁気アルキメデス法による構造異性体の分離

Separation of Structural Isomer with Magneto-Archimedes Method

小林 剛之, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏(大阪大学)

KOBAYASHI Takayuki, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro(Osaka university)

E-mail:t-kobayashi@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

有機化合物を用いた製品の製造工程では、原料に含まれる構造異性体を分離・精製する必要があるが、精製用の蒸留塔が大規模であることや高エネルギー消費などの改善すべき課題を抱えている。本研究では、これらの問題を解決するために、磁気力を用いた構造異性体の分離を検討した。多くの構造異性体は反磁性を示すため、従来型の磁気力による牽引力の差を利用する磁気分離法では、構造異性体同士の分離は難しい。そこで、常磁性あるいは反磁性体の分離に有効とされる磁気アルキメデス法を用いて、構造異性体の一例として芳香族ジカルボン酸であるフタル酸とイソフタル酸、テレフタル酸(以下、フタル酸類, Fig.1)の分離を試みた。

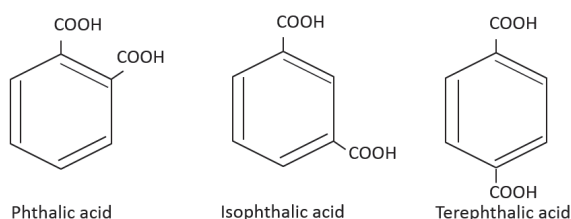


Fig.1 Structural formulas of phthalic acids.

2. 磁場発生源と媒質の検討

磁気アルキメデス法とは、磁場下・媒質中における分離対象の浮上高さの差を利用する分離手法である。磁場下・媒質中の粒子には、式(1)で表される磁気アルキメデス効果に基づく力 F が働く[1]。浮上位置では $F=0$ となるため、粒子の浮上位置は式(2)に示す磁束密度と磁束密度勾配との積(以下、浮上位置の磁場積)と磁場発生源が持つ磁場積分布とから算出される。式(1), (2)において、下付きの p と m はそれぞれ分離対象粒子と媒質、 χ は磁化率、 ρ は密度、 B_z は鉛直方向の磁束密度、 μ_0 は真空の透磁率、 g は重力加速度を表す。式(2)より浮上位置の磁場積は粒子の物性に差があれば異なるため、媒質と磁場発生源を調整すればあらゆる粒子を分離することが可能である。したがって、磁気アルキメデス法はフタル酸類の分離に限らず、他の構造異性体同士の分離にも応用可能であると考えられる。

$$F = \frac{\chi_p - \chi_m}{\mu_0} B_z \frac{\partial B_z}{\partial z} + (\rho_p - \rho_m)g \quad (1)$$

$$B_z \frac{\partial B_z}{\partial z} = - \frac{\rho_p - \rho_m}{\chi_p - \chi_m} \mu_0 g \quad (2)$$

フタル酸類は反磁性を示すため、常磁性媒質中で各々に鉛直上向きの磁気力を作用させ、浮上・分離することを検討した。フタル酸類と用いた媒質の密度と磁化率(Table.1)から算出される浮上位置の磁場積差が小さいため、磁場発生源として超電導ソレノイド磁石を用いた。超電導ソレノイド磁石は永久磁石と比較して、Fig.2 のように磁場積に対する高さの変化が大きい特徴を有するため、浮上位置の磁場積の差が小さい粒子同士の分離に適すると考えられる。最大磁束密度を 1 T とすると、鉛直方向の磁場積分布からイソフタル酸、フタル酸、

テレフタル酸の順に高く浮上すると算出された(Fig.2)。

Table.1 Density and susceptibility of the targets of separation and the medium.

	Density (kg/m ³)	Susceptibility (-)
Phthalic acid	1520	-1.55×10^{-5}
Isophthalic acid	1480	-1.22×10^{-5}
Terephthalic acid	1540	-1.13×10^{-5}
36 wt. % MnCl ₂	1410	8.82×10^{-4}

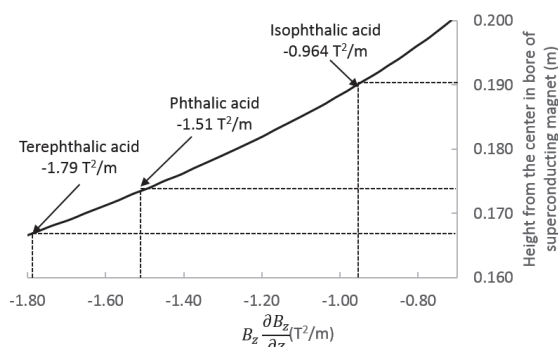


Fig.2 Calculation result of the product of vertical magnetic flux density and its gradient at each height and the difference of each sample's floating height.

3. 分離実験

上記の計算結果をもとに分離実験を行ったところ、磁石ボア内でフタル酸類のペレット(直径 3 mm)が 36 wt. % MnCl₂ 水溶液中を浮上し、各々の浮上位置に差が生じた(Fig.3)。浮上位置の差は Fig.2 の計算結果と比較して妥当といえるため、磁気アルキメデス法によるフタル酸類の分離可能性が示された。今後は、フタル酸類粉末の分離を試みる。

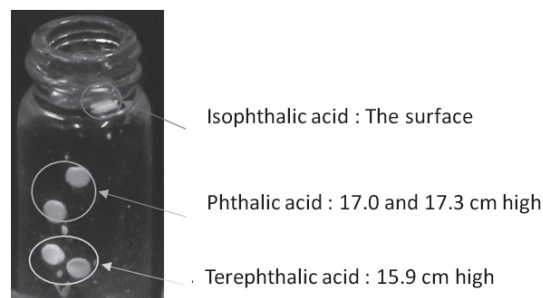


Fig.3 Result of phthalic acids pellets separation when the medium is a 36 wt.% MnCl₂ solution.

参考文献

- Y Ikezoe, T Kaihatsu, S Sakae, H Uetake, N Hirota, K Kitazawa: Separation of feeble magnetic particles with magneto-Archimedes levitation, Energy Conversion and Management, Volume 43, Issue 3, pp. 417-425, 2002.

温泉水中のシリカ除去用磁気分離装置の開発

Development of the magnetic separator for removing silica from hot spring water

三島 史人, 秋山 庸子(阪大院工); 佐々木 宗建, 阪口 圭一(産総研); 西嶋 茂宏(阪大院工)
MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko (Osaka University); SASAKI Munetake, SAKAGUCHI Keiichi (AIST);
and NISHIJIMA Shigehiro (Osaka University);
E-mail: f-mishima@see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

再生可能エネルギーの導入拡大が望まれる中、世界でも有数の地熱資源量を有する我が国では、地熱発電や温泉発電が大きな注目を集めている。本研究は地熱利用開発を促進する取り組みとして、地熱資源の有効活用のためのスケール除去技術の開発を行っている。

バイナリー・サイクル発電は、低温の熱資源を発電に用いており、その熱交換器にスケールが付着することが問題になっている。温泉成分の析出物としてスケールが熱交換器に付着し、熱変換効率を低下させ、発電の経済性を下げるため、このスケールの形成を未然に防ぐことが課題となっている。そこで本研究では、熱交換器通過前の熱水に対して、スケールが析出する前に無機凝結剤を添加してスケールの原因となるケイ酸を共沈させ、磁気分離法によって迅速に取り除くことを検討している。スケールが析出する前段において分離除去を行い、温泉水から非晶系シリカとして 150ppm 程度まで低減させることが可能な磁気分離装置の開発である。これにより少ない負荷で熱交換器等へのスケール付着を防止する解決手法の 1 つとなると考えている。

2. 温泉水を用いたピーカー実験および現地試験

温泉水を 85℃ に保温し、攪拌した状態でピーカー試験を行った。無機凝結剤は、塩化第一鉄 (FeCl₂) を使用した。無機凝結剤を添加した後、水酸化ナトリウムを用いて pH を調整し、シリカを含む水酸化鉄フロックを沈殿させた。その後、マグネタイトと高分子凝集剤を加えて磁気シーディングを行い強磁性シリカフロックとし、永久磁石 (ネオジウム磁石: 最大磁束密度 0.4T) で磁気分離を行った。Fig.1 にその磁気シーディングの工程を示した。無機凝結剤 0.5 mL/L を添加した時に、シリカ濃度が熱交換器通過後の温度における溶解度である 150 ppm 以下となった。この手法でスケールの析出を防止することができると思われる。

この実験結果をもとに、シリカスケール除去システムを設計し、分離機構の評価試験を実施した。処理量 5ton/h (実際は 200L/2min.) にて実際の温泉水 (九州地方、湯布院: シリカ濃度 480ppm) を用いたシリカ除去実験を行った。温泉 200L に対して無機凝結剤に塩化第一鉄水溶液を用い、2mL/L を添加し、水酸化ナトリウムで pH 調整後、微小なフロックに強磁性を付与させるためにマグネタイト 0.4 g/L を添加し、また粗大なフロックを形成させるために高分子凝集剤 4 mL/L を添加、攪拌して強磁性フロックを形成させた。

温泉水中に形成された粗大な強磁性フロックは磁気アシスト沈殿装置によって急速沈殿を行い、残った微細なフロックを高勾配磁気分離によって分離した。また、分離前後の Si の濃度はシリカ計 (HI770, HANNA Instruments) により計測した。

磁気分離装置による SiO₂ 除去率は、ピーカー試験のデータを再現できることが明らかになった。

3. シリカスケール除去システムの磁場発生源について

本現地試験では磁場発生源として、磁気アシスト沈殿装置には電磁石、高勾配磁気分離装置には永久磁石を用いて行った。高勾配磁気分離装置に関しては、微細なフロックを良好に捕捉し分離できていた。しかし、磁気アシスト沈殿装置については、電磁石 (銅コイル) を磁場発生源としたため、必要とする磁気力を発生できていないため、磁場発生源の上方を

浮遊する粗大な強磁性フロックを完全には磁気牽引できていなかった。そのため磁気アシスト沈殿装置での処理能力が十分に得られず、後段の高勾配磁気分離装置にも負荷をおよぼしていた。

シリカスケールには泉質によって沈降しやすい強磁性フロックの場合と、浮遊しやすい場合が本研究から確認されている。湯布院での泉質は後者であり、浮遊状態を考慮すると牽引するための磁気力が不足していたと考える。処理量が増加することで、磁気アシスト沈殿装置への負荷も増大することが予測される。強い磁場空間を広く形成するためには超電導磁石の導入も考えられるが、本件では強磁性フロックが浮遊する貯湯槽内を永久磁石が循環し、強制的に磁性フロックを分離する方法を検討中であり、本発表では再構築したシリカスケール除去システムについての報告を行う。

4. まとめ

本研究では、シリカスケールについて磁気力を利用して除去することを試み、およそ 90% のケイ酸を除去することに成功している。今後も実用化に向けて、コスト削減のための薬剤添加条件の検討と装置のスケールアップを行う予定である。

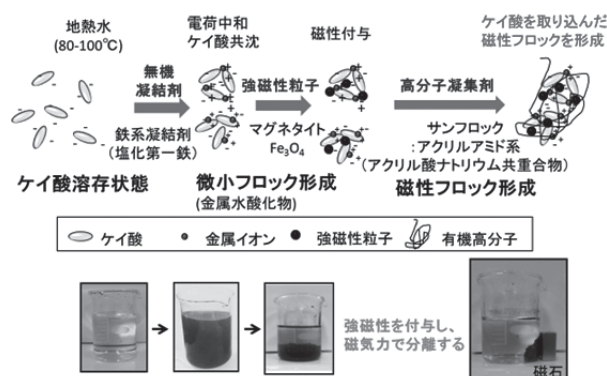


Fig.1 Magnetization seeding process of the silica.

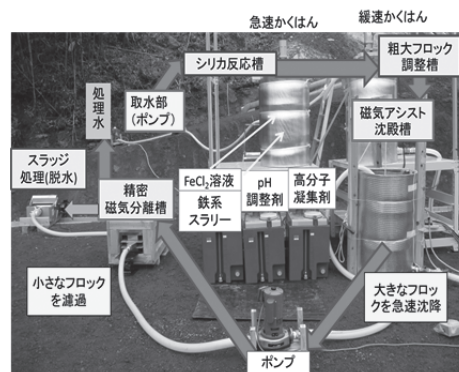


Fig.2 Silica removal system by magnetic separation, Local experiment in Yufuin.

謝辞

本研究は、平成 25-27 年度 NEDO「地熱発電技術開発事業」における「低温域の地熱資源有効活用のためのスケール除去技術の開発」の一環として委託を受け実施したものである。

超電導磁石を用いた高勾配磁気分離法による火力発電給水中のスケール除去に関する研究—磁気フィルターの設計—

Study on removal of iron scale from feed-water in thermal power plant with magnetic separation —Design of magnetic filter—

柴谷 沙織, 中西 基裕, 水野 信洋, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏(阪大); 岡田 秀彦, 廣田 憲之(NIMS); 松浦 英樹, 前田 龍己(四国総研); 重本 直也(元四国総研)

SHIBATANI Saori, NAKANISHI Motohiro, MIZUNO Nobumi, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro (Osaka University); OKADA Hidehiko, HIROTA Noriyuki (NIMS); MATSUURA Hideki, MAEDA Tatsumi (Shikoku Research Institute Inc.); SHIGEMOTO Naoya (Retire Shikoku Research Institute Inc.)
E-mail: shibatani@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

CO₂ 排出量削減のために火力発電所の効率を向上する方法のひとつとして、本研究では超電導磁石を用いた高勾配磁気分離法 (High Gradient Magnetic Separation, HGMS) を提案している。これは給水中のスケールを磁気力によって除去するシステムであり、高温高压条件で利用可能な給水処理手法である。これまでに、火力発電所を想定した高温高压条件 (200°C、20 atm) における HGMS 実験で、模擬スケールの除去率 98% を達成している^[1]。本手法の実用化に向けた課題のひとつは連続運転期間の長期化である。そこで本研究は、磁気フィルターの設計を行うことで長期的なスケール除去に適した HGMS システムを開発することを目的とした。ここではシミュレーションと実験により磁気フィルターの設計を行った結果を報告する。

2. 実験方法

まず、ANSYS® Ver.10.0 を用いて有限要素法による磁気フィルター近傍の磁場解析と流体解析を行った。この解析結果を用いて、スケールの主成分であるマグネタイト粒子 (粒径 4 μm) の軌跡を時間発展で計算した。この計算結果を基に磁気フィルターの配置を決定し、マグネタイト粒子 (平均粒径 4 μm、飽和磁化 0.4 T) の HGMS 実験を行った。マグネタイト懸濁液 (10 ppm) をポンプによって 0.6 m/s でソレノイド型超電導磁石 (印加磁場 2 T) のボア内に設置された磁気フィルター (亜鉛メッキ鉄、内径 51 mm) に流入させ、連続的に磁気分離を行った。磁気分離層前後で定期的に懸濁液のサンプリングを行い、鉄濃度を測定することで分離率の時間変化を算出した。また、磁気分離層前後の圧力を観測することで圧力損失の時間変化を得た。

3. 結果

同じ目開きの磁気フィルター (線径 0.34 mm、20 メッシュ、12 枚) を設置した場合の実験結果を Fig.1 に示す。圧力損失の上昇に伴って分離率が低下する結果となった。これはマグネタイトが上流のフィルターに集中的に付着したためと考えられる。次に、各フィルターのマグネタイト捕捉量が均等になるよう、シミュレーション結果を基に磁気フィルター (線径 1.0 mm、メッシュ数 2,4,6,10、計 12 枚) の目開きが下流ほど小さくなる構造とした結果を Fig.2 に示す。Fig.1 と比較して圧力損失の上昇と分離率の低下を抑制することに成功した。これは磁気フィルターの設計によって各フィルターのマグネタイト捕捉量の偏りが解消されたためと考えられる。また、25 分間磁気分離を行った後のマグネタイト総捕捉量は、Fig.1 の場合で 11.2 g であったのに対し、Fig.2 の場合で 12.4 g となった。この結果から、磁気フィルターの設計によってマグネタイトの総捕捉量が増加することが確認された。これらの結果から、粒子軌跡シミュレーションと HGMS 実験により、室温条件での長期的連続処置に適した磁気フィルターの設計に成功したといえる。また、圧力損失をモニタリングすることで、高効率

にスケール除去を行うための磁気フィルターの逆洗に適切な時期を判別することが可能であると考えられる。

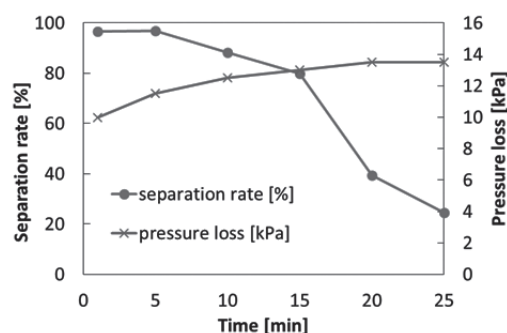


Fig.1 Temporal change in separation rate and pressure loss (Identical filters)

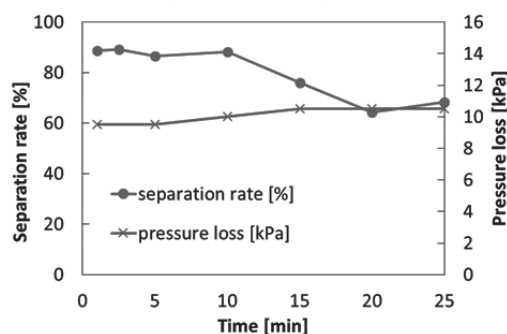


Fig.2 Temporal change in separation rate and pressure loss (Various mesh filters)

4. まとめ

火力発電所給水系のスケール除去のための HGMS 装置において連続運転期間を長期化させるために、磁気フィルターの設計を行った。粒子軌跡シミュレーションと超電導磁石を用いたマグネタイト粒子の HGMS 実験によって、室温条件でのフィルター設計に成功した。このフィルター設計手法を高温高压条件下で適用することで、火力発電所給水系における長期的なスケール除去に適した HGMS 装置は実現可能であると考えられ、発電に伴う CO₂ 排出量の削減に貢献すると期待される。

謝辞

本研究の一部は科学技術振興機構 (JST) の先端的低炭素化技術推進開発 (ALCA) 「磁気分離法による発電所ボイラー給水中の酸化鉄除去」の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) N. Mizuno, et al. : IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 25 (2015) No. 3

磁気分離法による火力発電給水中のスケール除去に関する研究 ～酸化鉄スケールの化学形態と磁気分離効率～

Removal of Iron Oxide Scale from Feed-water in Thermal Plant by Using Magnetic Separation ～Chemical Form of the Scale and Efficiency of Magnetic Separation～

中西 基裕, 水野 信洋, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏 (大阪大学);
岡田 秀彦, 廣田 憲之 (物材機構); 松浦 英樹, 前田 龍己 (四国総研); 重本 直也 (元四国総研)
NAKANISHI Motohiro, MIZUNO Nobumi, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro (Osaka Univ.);
OKADA Hidehiko, HIROTA Noriyuki (NIMS); MAEDA Tatsumi (Shikoku Research Institute);
SHIGEMOTO Naoya (Retired Shikoku Research Institute)
E-mail: nakanishi@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

火力発電の発電効率低下の要因として、酸化鉄スケールが配管壁面に付着することで熱交換効率を低下させることが挙げられる。火力発電所ではスケールの発生を抑制するために全揮発性処理(AVT)や複合給水処理(CWT)といった処理を施しているが、完全にはスケールの発生を防止できていない。そのため、本研究グループでは酸化鉄スケールを磁気分離により除去することを検討している。効率的な磁気分離のためには酸化鉄スケールの物理的性質を考慮する必要がある。酸化鉄は組成によって磁氣的性質が大きく異なるため、磁気分離装置を設置する際には各々の火力発電所給水中のスケールの組成や形態を明らかにしておくことが重要である。しかしながら、火力発電所給水中のスケールを直接分析することは容易ではなく、分析のためには発電所を長期に停止しなければならない。また、スケールは給水中を沈着、剥離を繰り返しながら循環しており、絶えずその組成や形態は変化していると考えられる。そこで、本研究ではAVT、CWTを用いている火力発電所給水中に存在する酸化鉄スケールの組成、形態を推定することを目的として、給水系の一部を想定した高温高圧循環装置を用いてスケール生成実験を行うことを検討している。本研究では、まず火力発電所高温部を模擬した圧力容器内で生成した酸化鉄粒子の成分分析及び粒度分布測定を行い、高温環境におけるスケールの成分及び酸化鉄粒子の凝集について考察した。

2. 実験方法

Fe²⁺を含む溶液とFe³⁺を含む溶液それぞれに、(i)アンモニアと還元剤であるヒドラジンを添加してAVTを模擬した溶液と、(ii)アンモニアのみを添加してCWTを模擬した溶液を調製した。これら4種類の溶液を圧力容器に封入した後24時間加熱し、火力発電所給水系の高温部を模擬した。180℃で加熱し調製した酸化鉄粒子のXRDスペクトルを測定し、成分を同定した。また、AVTを想定して180℃、230℃の2つの温度条件において加熱した酸化鉄粒子の粒度分布測定を行った。

3. 結果と考察

調製した酸化鉄粒子の成分を同定した結果をTable 1に示す。(i)AVTを模擬した溶液ではマグネタイトとヘマタイトが生成した。(ii)CWTを模擬した溶液ではマグヘマイトとヘマタイトが生成した。また、高温条件(>180℃)においてマグヘマイトはヘマタイトへと熱転移する。

Table 1 Products of each condition.

		NH ₃ addition (15℃)	After heating (180℃)	High temperature condition (180℃～)
(i). AVT (hydrazine+NH ₃)	Fe ²⁺	ferric hydroxide	Magnetite	Magnetite
	Fe ³⁺	ferric hydroxide	Magnetite Hematite	Magnetite Hematite
(ii). CWT (NH ₃)	Fe ²⁺	ferric hydroxide	Maghemite	Maghemite Hematite
	Fe ³⁺	ferric hydroxide	Hematite	Hematite

水酸化鉄とヘマタイトが常磁性であるのに対し、マグヘマイトとマグネタイトは強磁性であるため、AVTを用いている火

力発電所では給水温度180℃以上の高温部において磁気分離を行い、CWTを用いている火力発電所では給水温度180℃程度の部分において磁気分離を行うことで効率よくスケールの磁気分離を行える可能性が示唆された。

また、AVTを想定して調製した酸化鉄粒子について、超音波処理を施し凝集が解消された状態の粒度分布をFig.1に、採取したままの状態の粒度分布をFig.2に示す。Fig.1から、180℃と230℃で作成した酸化鉄粒子のメジアン径はいずれも4.4 μmであり、温度環境による大きな差は見られなかった。それに対して、Fig.2から、凝集した状態の酸化鉄粒子のメジアン径は180℃で7.9 μm、230℃で14 μmであり、温度によって凝集した状態の粒径(二次粒径)が大きく異なることが分かった。このことから、磁気分離装置設置箇所の検討においては、スケールの磁氣的性質だけでなく形態も重要な要素であることが示された。実際の火力発電所給水中では流れの影響が存在すると考えられるため、高温循環装置での模擬実験が有用であると言える。

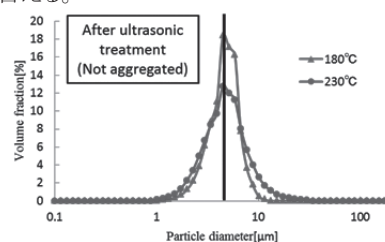


Fig.1 Particle size distribution of after ultrasonic treatment.

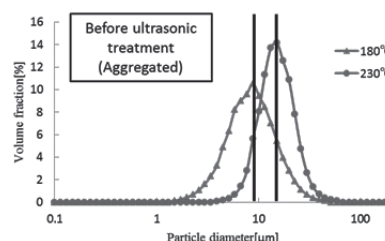


Fig.2 Particle size distribution of before ultrasonic treatment.

4. まとめ

本研究では、高温環境におけるスケールの成分及び酸化鉄粒子の凝集について考察することを目的として、火力発電所高温部を想定して調製した酸化鉄粒子の成分分析及び粒度分布測定を行った。その結果、スケールは処理、給水温度によって成分及び二次粒径が異なることが分かった。今後は、高温高圧循環装置を用いてスケール生成実験を行い、流れの存在する環境における酸化鉄スケールの組成及び形態を推定する。

謝辞

本研究の一部は科学技術振興機構(JST)の先端的低炭素化技術推進開発(ALCA)「磁気分離法による発電所ボイラー給水中の酸化鉄除去」の助成を受けて、実施したものである。

超電導磁石を用いた磁気分離による火力発電所給水中のスケール除去

Removal of scale from feed-water in thermal plant using superconducting magnetic separation

水野 信洋, 柴谷 沙織, 中西 基裕, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏(大阪大学);

重本 直也(元四国総合研究所); 松浦 英樹, 前田 龍己(四国総合研究所); 岡田 秀彦, 廣田 憲之(NIMS)

MIZUNO Nobumi, SHIBATANI Saori, NAKANISHI Motohiro MISHIMA Humihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro (Osaka university); SHIGEMOTO Naoya (Retired Shikoku research institute); MATSUURA Hideki, MAEDA Tatsumi (Shikoku research institute); OKADA Hidehiko, HIROTA Noriyuki (NIMS)

E-mail: mizuno@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

近年、火力発電の利用率が増加している。その結果、CO₂排出量も増加したため、その対策が必要とされている。そこで配管やボイラーに析出している酸化鉄スケールが熱交換効率を低下させていることに着目した。本研究では、CO₂排出量を削減するために、火力発電所給水中のスケール除去による熱交換効率改善と発電効率の向上を目指す。

AVT(全揮発性処理)を行っている火力発電所の低温部では、溶出した鉄が鉄イオンまたは弱磁性の微小な酸化鉄粒子となっている。一方で高温部ではスケールの主成分はマグネタイトであり、スケールの粒径や磁化率も大きい。このことから、従来の手法である低温部に設置された電磁フィルターによるスケール除去よりも、高温部における磁気分離によるスケール除去の方が効果的である。そこで本研究では、火力発電所の給水の配管に適用するため、広い空間で均一な磁場を発生させることができる超電導磁石を用いた高勾配磁気分離を採用し、高温状態において大量かつ連続的なスケール除去が可能な方法の検討を行った。

2. 実験方法

高温部での高勾配磁気分離について検証を行うため、2基の压力容器を配管(内径:3.1 mm, SUS316)で繋ぎ、压力容器内の差圧によって流れを作り、高温高压条件を保った状態で磁気分離を行った。実験装置の写真を Fig.1 に示す。磁気分離部は压力容器を繋ぐ配管の途中に設置した。

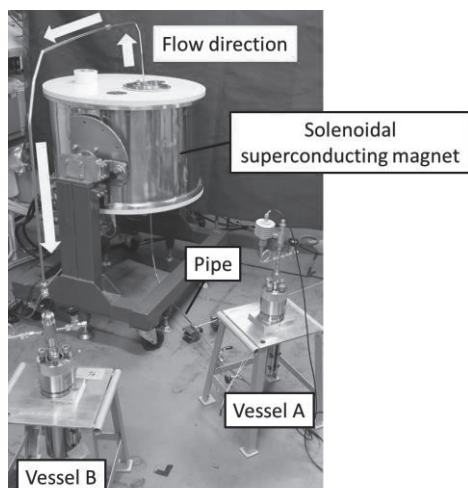


Fig.1 The experimental system.

压力容器 A に濃度が 50 mg/l の酸化鉄粒子の懸濁液を 350 ml、压力容器 B に蒸留水を 50 ml 入れ、A を 235°C、B を 200°C に加熱した。加熱後の内圧は A が 2.9 MPa、B が 1.4 MPa であった。加熱後に压力容器間に配置したバルブを開くことで、差圧により懸濁液を A から B へと流した。この時の平均流速は 0.7 m/s であった。懸濁液の酸化鉄粒子には、ヘマ

タイト粒子とマグネタイト 80 wt.%, ヘマタイト 20 wt.%の混合粒子を使用した。この混合粒子は、実際のスケールを模擬したものである。また、マグネタイト粒子の粒径は 1.5 μm、ヘマタイト粒子の粒径は 1.4 μm であった。

磁気分離部内のフィルター(φ 6.3 mm×90 mm, SUS430)の線径は 0.1 mm である。磁場発生源には、ソレノイド超電導磁石を用い、印加磁場は 0.5、1、2 T の 3 通りで行った。

磁気分離後に、フィルターに捕捉された酸化鉄粒子と磁気フィルターを通過した酸化鉄粒子を回収し、酸溶解した後に誘導結合プラズマ原子発光分光分析装置(ICP-AES)を用いて鉄濃度を計測し、分離前後の鉄濃度の変化から分離率を算出した。

3. 実験結果と考察

それぞれの磁場における分離率を Table.1 に示す。実際のスケールを模擬した混合粒子において、2 T の磁場を使用した場合、98 %の分離率を示した。また、常磁性体であるヘマタイトも、2 T の磁場を使用時に、約 70 %の分離率を示した。この実験結果から、高温高压条件における超電導磁石を用いた高勾配磁気分離によるスケール除去の可能性を示すことができた。

Table.1 Magnetic separation efficiency.

Magnetic field [T]	Hematite [%]	Mixed particles [%]
0.5	47	88
1.0	68	96
2.0	69	98

4. まとめ

本研究では、高勾配磁気分離による火力発電所の高温部における給水中のスケール除去を試みた。その結果、2 T の磁場によって、除去が困難な模擬スケール中のヘマタイトを除去し[1]、高い分離率によってスケール除去を行うことができた。今後は、磁気分離後の磁気フィルターの洗浄方法や、高温高压条件における連続的な磁気分離実験について検討を行う予定である。

5. 謝辞

本研究の一部は日本科学技術振興機構(JST)の先端的低炭素化技術推進開発(ALCA)「磁気分離法による発電所ボイラー給水中の酸化鉄除去」の助成を受けて、実施したものである。

参考文献

- Hiroyuki Fujishiro et al.: *Physics: Conference Series* 234 032015, 2010

海面下におけるヘリカル型海流 MHD 発電機の流動特性

Hydraulic characteristics of helical-type seawater MHD power generator under sea level

竹内 吾翼志, 山本 周平, 武田 実(神戸大学); 松本 真治(NIMS)

TAKEUCHI Atsushi, YAMAMOTO Shuhei, TAKEDA Minoru (KOBUE Univ.); MATSUMOTO Shinji (NIMS)

E-mail: 151w515w@stu.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

近い将来におけるエネルギー問題を解決する方法の一つとして、当研究室では超伝導技術を応用した海流 MHD(Magneto-Hydro-Dynamics)発電の研究を行ってきた[1][2]。海流 MHD 発電とは、ファラデーの電磁誘導の法則により、作動流体である海水が磁場を横切る際に発生する起電力を取り出して行う発電である。現在では磁場の有効利用、超伝導マグネットの大型化及び強磁場化を目指して、流路をヘリカル状にしたヘリカル型の研究が精力的に行われている。特に、最近では電極を1ターンごとに分割して発電を行う電極分割式が考案され、発電機内部の流速分布を測定し、1ターンごとの発電特性を調べ、発電機全体の性能向上を図る研究が進んでいる。本研究では、回流水槽およびヘリカル流路モデルを用いて、疑似的な海面下における発電機内部の流速測定を行い、流速分布及び発電機内部に流れ込む流量を評価した。

2. 発電原理

Fig.1 にヘリカル型海流 MHD 発電の原理図を示す。ヘリカル型発電機は、ヘリカル状仕切り板と同軸二重円筒状の電極及びソレノイド型超伝導マグネットで構成されている。発電機には軸方向に磁場が印加され、仕切り板に沿う流路内でヘリカル流へと変えられた海水が通過することにより、ファラデーの電磁誘導の法則に基づいて起電力が発生する。この起電力が海水の電気分解電圧を超えると半径方向へ電流が流れる。このとき発電機を外部負荷につないでおけば出力を得ることができる。

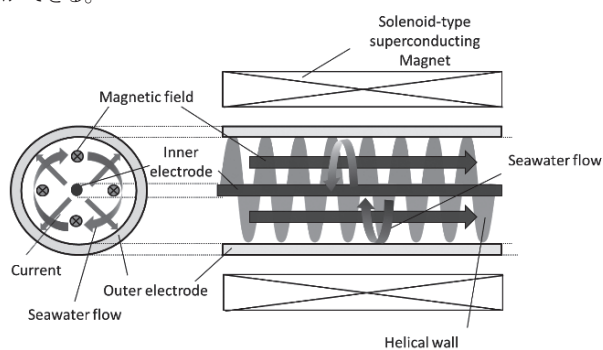


Fig.1 Principle of helical-type seawater MHD power generation.

3. 実験装置と実験方法

発電機を模擬したヘリカル流路モデル(4回転)の上流、及び下流側に円錐台の線形テーパーを取り付けた場合と取り付けない場合の2通りで実験を行った。流路モデル上部に開けた測定孔から5孔ピトー管を挿入し、差圧の計測結果から各地点での流向、流速を計算した。測定点はそれぞれ計12ヶ所とした。測定は各測定点で3度行い、それらの平均値を用いて流速分布の3次元化を行った。実験は、回流水槽内に上記のヘリカル流路モデル、及び線形テーパーを設置して行った。なお、回流水槽では、閉水路内で水を循環させ、観測部において流速1m/sに設

定した一様流を発生させた。

4. 実験結果と考察

Fig.2 に線形テーパーを付けていない場合の3D流速分布図を、Fig.3 に線形テーパーを付けた場合の3D流速分布図を示す。これらと比べると線形テーパーを付けた場合1st turn、2nd turn では流速が増加し、4th turn では流速が低下した。4th turn で流速が低下した原因は、下流側の線形テーパーの影響と考えられる。発電機の電極を設置する場所は、比較的流速が速く、流れが安定した2nd turn が望ましい。また、実際の海流中に発電機を設置したと想定した場合、線形テーパーを付けない場合で理論流量の28.8%が発電機内部に流入し、線形テーパーを付けた場合で理論流量の7.4%が発電機内部に流入した。

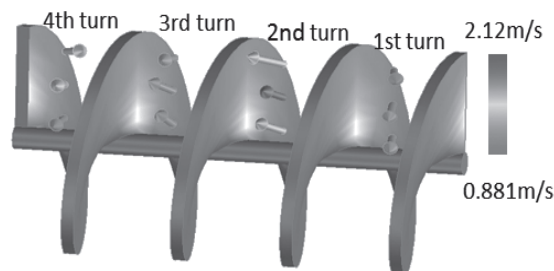


Fig.2 Flow velocity distribution chart (without linear taper).

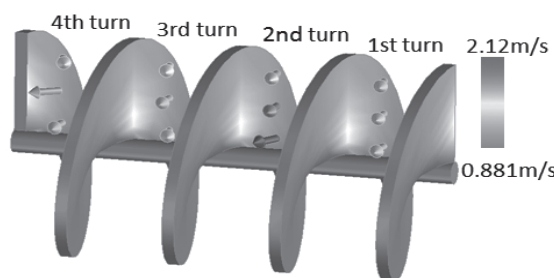


Fig.3 Flow velocity distribution chart (with linear taper).

5. まとめ

上流側に線形テーパーを付けた場合、1st turn、2nd turn で流速の増加がみられた。今後の課題としては、下流側の線形テーパーの形状の改良、実験時にヘリカル流路モデルをより深く設置すること、ヘリカル流路モデルを大型化した実験を行うことなどが挙げられる。

謝辞

本研究の一部に対して、科研費基盤研究 A(24246143)の援助を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- Minoru TAKEDA *et al.* : Proc. ISME 2011, B5-1 PAPER.
- Minoru TAKEDA *et al.* : J. JIME, Vol.49, No.3, pp.113-117 (2014).

海流 MHD 発電機特性に及ぼす電磁ブレーキの影響と電気分解特性

Influence of electromagnetic brake on characteristics of seawater MHD power generator and electrolysis characteristics

山本 周平, 竹内 吾翼志, 武田 実(神戸大); 松本 真治(物材機構)

YAMAMOTO Shuhei, TAKEUCHI Atsushi, TAKEDA Minoru (Kobe Univ.); MATSUMOTO Shinji (NIMS)

E-mail: 141w535w@stu.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

今日、火力発電への依存が強まり、将来的な化石燃料の枯渇や環境問題が懸念されている。そのため、環境に優しい再生可能エネルギーによる発電が期待されている。本研究では超伝導技術と海洋エネルギーを利用した海流 MHD(Magneto-Hydro-Dynamics)発電の基礎研究^[1]を行ってきた。将来的な出力向上を目指して強磁場化、大型化に向けた研究が進められている中、高出力化により小型発電機では確認できていない新たな損失が発生することが懸念されている。その一つに、出力に依存し海流と逆向きに作用する電磁体積力(電磁ブレーキ)が挙げられる。また海流 MHD 発電では発電時に海水の電気分解が起こるが、この電気分解は磁場中で行われるため、ゼロ磁場中で行われる通常の電気分解とは特性が異なる可能性が指摘されている。そこで本研究では、高出力状態を再現し、海流の圧力損失と温度変化を測定することで電磁ブレーキの影響を調べ、さらにゼロ磁場時と磁場印加時の電気分解電圧等を調べることで磁場が電気分解特性へ及ぼす影響を調べることを目的とした。

2. 海流 MHD 発電と電磁ブレーキの原理

海流 MHD 発電機には、流路内に二つの電極が平行に設置されており、その電極間を流れる海水に対して直交する様に超伝導マグネットから一様な磁場を印加することで、ファラデーの電磁誘導の法則に基づいて起電力が発生する。この起電力が海水の電気分解電圧を超えると、フレミング右手の法則に従い電流が流れる。この際、発電電流と印加磁場によりフレミング左手の法則に従い電磁体積力が作用する。この電磁体積力は Fig.1 に示すように海水の流れとは逆向きに働くため、本研究では電磁ブレーキと呼ぶ。

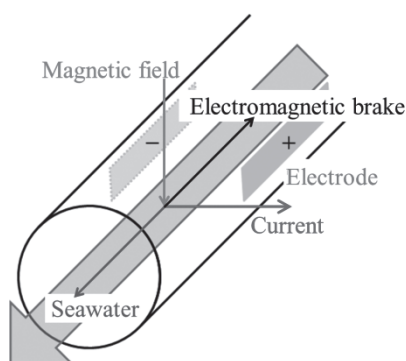


Fig.1 Relationship between seawater, magnetic field, current and electromagnetic brake.

3. 実験装置と実験方法

実験用に作製した発電セル(電極間距離 13 mm, 有効電極形状 13×40×0.2 mm, 白金電極使用)を 10 T 級クライオスタットの室温ボア内に水平に設置し、さらに電源装置を発電セルの各電極と接続することで発電セル内を強磁場・高出力状態にすることを可能とした。これにより電磁ブレーキを発生させることが可能となる。一様な磁場を印加した状態で電極間に印加する電圧を変化させながら、発電セル内での圧力損失

と海水の温度変化及び回路内に流れた電流の関係を測定し、ゼロ磁場下で行った同様の実験の結果と比較することで電磁ブレーキの影響と電気分解特性に及ぼす磁場の影響を調べた。電源装置により電圧を発電時と同方向に印加する向きを順方向、発電時と逆に電圧を印加する向きを逆方向と定義し、各方向で 0.0~30.0 V を印加した。また印加した磁場の大きさは 0~10 T で外部抵抗 10 Ω, セル内流速 5 m/s, 海水の電気伝導率 5 S/m とした。

4. 実験結果と考察

一例としてゼロ磁場下と 8 T, 9 T 及び 10 T を印加した時の、印加電圧と電流の関係を測定し比較したところ、電気分解が起こり始める 0~3.0 V 間では電流の流れ方に差が見られた。特に電気分解電圧は、ゼロ磁場時より磁場印加時の方が小さく、磁場が電気分解特性に影響を及ぼす可能性が得られた。

Fig.2 に示す電流と圧力損失の関係を見てみると、ゼロ磁場下では圧力損失はほぼ一定であるが、磁場印加時に、印加電圧の向きが順方向では圧力損失が線形的な増加を示し、逆方向では線形的な減少を示した。また、発電セル内での海水温度の変化を測定したところ、ゼロ磁場下と磁場印加時で異なる傾向は得られず、電磁ブレーキによる海水温度への影響は確認できなかった。このことから、電磁ブレーキは圧力損失として海流の運動エネルギーを損失させることが分かった。

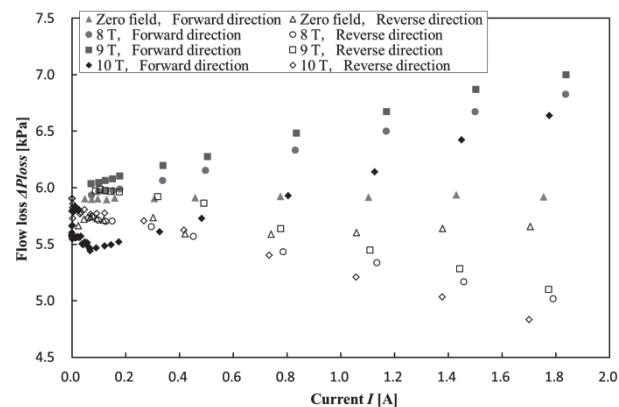


Fig.2 Relationship between current and flow loss.

5. まとめ

磁場が電気分解特性に影響を及ぼす可能性を得た。また電磁ブレーキは、圧力損失として海流の運動エネルギーを損失させるように影響することを明らかにした。

謝辞

本研究の一部に対して、科研費基盤研究 A(24246143)の援助を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1. M. Takeda, *et al.*: Fundamental Study of Helical-Type Seawater MHD Power Generation with Partitioned Electrodes, J. JIME, Vol.49, No.3 (2014) pp.113-117.

無針注射器と磁気力を用いた遺伝子導入に関する基礎的研究

Fundamental Study on Gene Transfer utilizing Magnetic Force and Jet Injectors

長谷川 崇志, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏, 中神 啓徳(大阪大学)

HASEGAWA Takashi, MISHIMA Fumihito, AKIMAYA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro, NAKAGAMI Hironori (Osaka Univ.)

E-mail: hasegawa@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

現在、遺伝子ワクチン療法の研究が進められている。この治療法は治療用遺伝子を生体に投与し、細胞内で発現させた抗原タンパクを基に治療効果を得る手法であり、感染症やがんに対する新しい免疫法として、臨床応用への期待が高まっている。しかし、免疫応答において重要な免疫細胞への遺伝子導入効率が低いことが臨床応用への障害となっており、免疫細胞が多い皮内での遺伝子導入に対して有効な遺伝子ワクチン送達技術が求められている[1]。そこで本研究では、磁場印加型薬剤送達システム(MDDS: Magnetic Drug Delivery System)を用いた効果的な遺伝子ワクチン導入法の開発を目的とし、無針注射器による薬剤投与と磁気力による磁性薬剤の拡散制御を併用した皮内における高効率な遺伝子導入の可能性を検討した。

本研究では MDDS の手法として、投与する遺伝子に超常磁性粒子を結合させ、永久磁石を用いて磁場を印加することで磁気力により拡散を抑制し、遺伝子と細胞との接触確率を向上させることで、細胞による遺伝子の取り込みを促進し、遺伝子導入の促進を図った。また、磁場中における磁性薬剤の磁気凝集を防ぐために、薬剤投与には無針注射器を用いた。

無針注射器とは、ノズルから薬液を高圧で射出し、薬液を瞬時に生体組織内に注入する注射器である。一般に用いられる注射針を介した投与と比較して、薬液が生態組織内で広範囲に拡散しやすいことから、磁性薬剤の凝集を防止できると期待される。Fig.1 に本研究で用いた無針注射器と一般的な有針注射器によりゼラチンゲルに薬液を注入した際の薬液の分布を撮影したものを示す。Fig.1より無針投与により、薬液を広範囲に拡散できることが分かる。本研究では、バネの弾性力による瞬間的な圧力上昇を利用した無針注射器(ShimaJET, 島津製作所)を用いた。

無針注射器による薬剤投与と磁気力による磁性薬剤の拡散制御を併用した遺伝子導入法の有効性を評価するため、レポーター遺伝子を用い生体への遺伝子導入実験を行った。

2. 実験方法

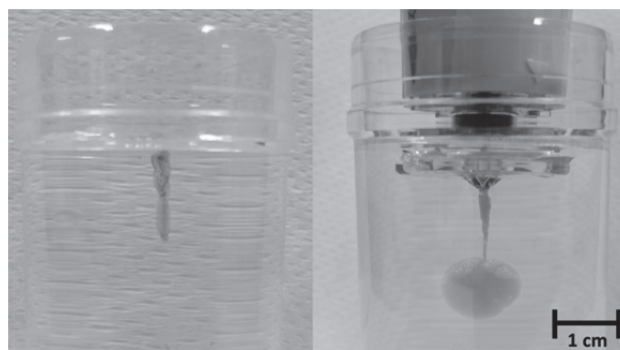
無針投与と磁気力制御の併用による遺伝子導入効率への影響を調査するために、超常磁性粒子(平均粒径: 160 nm)と結合させたルシフェラーゼレポーター遺伝子 50 μ g をラットの背中皮膚に無針投与したのち、ネオジウム永久磁石(表面最大磁束密度: 0.5 T)を用いて 30 分間磁場を印加した。その後 24 時間飼育して遺伝子の発現を待ち、摘出した皮膚および筋肉中のルシフェラーゼ量を定量した。

3. 実験結果と考察

無針注射器を用いた磁場印加型遺伝子導入実験の結果を Fig.2 に示す。遺伝子単体を投与した場合に比べ、遺伝子に超常磁性粒子を結合させて磁場条件下に置いた場合では皮膚においては遺伝子発現量が約 1.7 倍に増加し、筋肉においては 10 分の 1 以下まで減少した。遺伝子に磁性粒子を結合させ外部磁場を印加することにより、皮膚では組織内の遺伝子量が増加することで細胞による遺伝子の取り込みが促進され、筋肉では組織内の遺伝子量が減少することで取り込みが抑制されたことが示唆される。この要因として、投与後に

細胞間に存在していた遺伝子が磁気力により表面方向に誘導された、あるいは磁気力により細胞間における遺伝子の拡散が抑制された可能性が考えられる。

皮内での遺伝子発現量が増加したことから、本手法が遺伝子ワクチン導入として有効である可能性が示されたが、磁場印加条件などを詳細に検討することで更なる遺伝子導入効率の向上が期待できる。



needle injection

jet injection

Fig.1 Distribution of liquid injected into gel

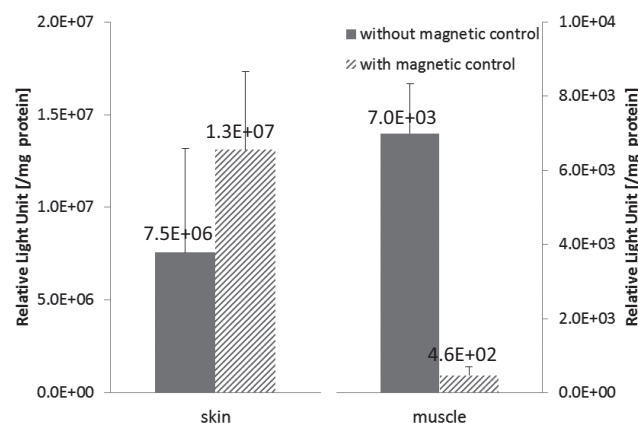


Fig.2 Luciferase activation with and without magnetic field

4. 結論

本研究では、MDDSを用いた効果的な遺伝子ワクチン導入法の検討を目的とし、ラットの背中皮膚への遺伝子導入実験を行った。その結果、皮膚において遺伝子発現量が増加し、無針投与と磁気力制御を併用することによる遺伝子導入効率の向上の可能性が示された。

また、磁性体の粒径や外部磁場に関して詳細な設計を行うことで更なる遺伝子導入効率の向上が期待できる。

参考文献

- John J. Donnelly, Jeffrey B. Ulmer, John W. Shiver, Margaret A. Liu, DNA vaccines, Annu. Rev. Immunol. 1997.15:617-48

航空機での超伝導応用の可能性について_配電ケーブル Superconducting Power Applications for Aviation – DC distribution cable

山口 作太郎(中部大学);岡井 敬一(東京大学)

YAMAGUCHI Satarou, OKAI Kei-ichi

E-mail: yamax@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

航空機での電力利用が急速に進んでいる。現在の動向は圧縮空気、油圧、メカ（機械系）などでの動力を全て電力に置き換えることが主である。重量と消費電力のグラフをFig. 1に示す[1]。最近の例ではB787であり、同規模の従来の航空機に比べて自重当たり10倍近い電力が使われ、省エネルギー化が進んでいる。この動向をMEA (More Electric Aircraft)と呼んでいる[2]。最終的にはエンジンも電動化し、電気モータ推進システムが目標になっていて、Airbus, Boeingなど欧米メーカーで具体的な検討が進んでいる。これをEA (Electric Aircraft)と呼んでいる[3]。また、リチウムイオン二次電池電源の小型航空機も既に飛んでいる。そして、最終的には、機体形状も従来から大きく変わり、空力特性が大幅に改善される設計案が複数発表されている。

一方、航空機はアースが取れないので、大電力を利用では低電圧・直流利用が望ましい。そして、軽量化が優先事項である。このため、超伝導の特長である低電圧・大電流が得意で、小型化ができることが念頭に超伝導応用が検討されている。また、地球温暖化防止対策の一環として、炭酸ガス排出が少ないエンジンの開発が望まれている。本講演では、航空機の電動化のための条件やその中で超伝導の有用性を検討し、近未来の適用可能性について直流配電ケーブルについて議論する。

2. 超伝導システムの基本構成

炭酸ガスを排出しない自動車に燃料電池(FC)を用いるシステムの開発が現在精力的に行われているが、FCを航空機に応用する実験も同時に進んでいる。水素を液体水素で貯蔵すると温度は20K程度になるので、この冷熱を利用できれば航空機に冷凍機を持ち込む必要がない。冷凍機は一般には重く、消費電力も大きいので、合理的な選択である。また、液体水素を燃料として利用するので、気化熱も温度保持に利用できるので、配電ケーブルの断熱性能も地上で利用する超伝導ケーブル等と比べて容易と思われる。つまり、飛行時間程度液体水素があれば良いからである。また、FCのエネルギー効率是一般にはガスタービンに比べて高いので、FCを航空機の補助動力装置として利用すれば、大規模な液体水素タンクは不要であろう。また、場合によってはガス化した水素をFCで利用するのではなく、ジェットエンジンで利用してもよいであろう。以上をまとめて、Fig. 2にシステム構成を示す。

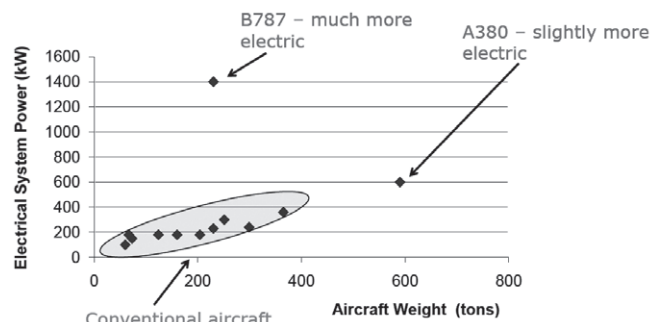


Fig. 1 Electric Power versus Aircraft Weight [1]

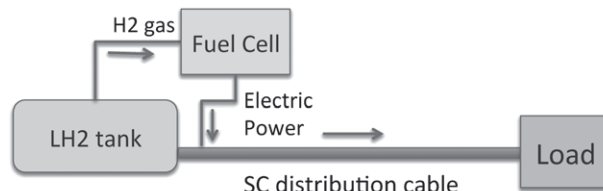


Fig. 2 A liquid hydrogen and fuel cell system for aviation.

3. 配電ケーブルの仕様目標と課題と展望

Airbus 社によると、配電ケーブルの仕様目標は当面は 1.0g/m/A であり、最終的には 0.1g/m/A である。一方、現在の市販の高温超伝導テープ線材の多くは 10g/m 前後であり、20K 程度では 1kA の電流を超伝導状態で流すことができる。したがって、線材だけであればオーダーとして、

$$0.01\text{g/m/A}$$

程度となる。したがって、配電ケーブルは断熱 2 重管を入れても原理的には Airbus 社の目標値は達成できそうである。また、航空機へのケーブル長は 100m 程度と思われるので、冷媒循環ポンプは使わなく、浸漬冷却となる。そして、高電圧を使わないので、電気絶縁も簡単になる。

一方、Fig. 1 のように、B787 のシステムで 1.4MW ほどの電力を使うので、電圧を DC200V とすれば 7kA となる。更に、B777 では推進に 40MW ほど使うので、電気モータを推進に使うと、電流は 200kA となり、極めて大きくなる。このような大電流を電力変換器で高速スイッチングすると、大きなノイズ発生が予測され、航空機への搭乗時に携帯電話の電源を切ることまで求められることから、航空機の運転制御系への大きな脅威になる可能性がある。このため、電力変換器の設計検討では十分な注意が必要になる。特に、アースが使えない状況であり、更に落雷もあるので、安全対策は十分な考慮が必要である。そして、電力変換器の重量、体積及び冷却も検討課題である。

謝辞

JAXA の小島孝之、田口秀之氏には多くの協力を頂いた。ここに記して感謝を表す。

参考文献

- Jon Clare, "Example of More Electric Aircraft Research in the Aerospace Research Center", Univ. of Nottingham.
- 岡井敬一, 渡辺紀徳, 「航空機エンジン電動化に向けた現状と展望」日本ガスタービン学会誌, Vol. 42, No. 1, p. 24 (2014).
- 岡井敬一, 渡辺紀徳, 「航空機エンジン電動化の最新研究状況」日本ガスタービン学会誌, Vol. 43, No. 1, p. 184 (2015).

実時間デジタルシミュレータを用いたハードウェア閉ループ試験： システム事故時の過電流通電を想定した高温超伝導線材の過渡的挙動に関する考察 Hardware-in-the-loop Simulation Using Real-time Digital Simulator: Investigation of Transient Behavior in HTS Tape under Overcurrent Transportation at Fault in Power System

東川 甲平, 浦崎 祥悟, 井上 昌睦 (九大); 福本 祐介, 富田 優 (鉄道総研); 木須 隆暢 (九大)
HIGASHIKAWA Kohei, URASAKI Shogo, INOUE Masayoshi (Kyushu Univ.);
FUKUMOTO Yusuke, TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute); KISS Takanobu (Kyushu Univ.);
E-mail: kohei@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導電力機器の信頼性の確保において、事故時の挙動の把握は最も重要な項目の一つである。通常このような過負荷試験の際には、システム事故によって想定される過電流を試算しておき、そのような電流パターンによる機器の試験が行われる。一方、機器側の過電流通電時のインピーダンスの急激な変化などは上記に反映されないため、システムと機器の相互作用を担保した上での試験手法が求められている。そこで本研究では、実時間デジタルシミュレータ(RTDS)を用いたハードウェア閉ループ試験(HILS)により、システムとの相互作用を反映した上での超伝導線材の過電流通電時の過渡現象を評価した。

2. 方法

Fig. 1にHILSの概略を示す。超伝導電力機器において線材由来の非線形電流輸送特性は同機器の最も大きな特徴を表すものであり、実際の超伝導線材の特性を同機器の特性として反映することを目的としている。実規模システムの解析はRTDSによって行い、規模調整を通じて電流と電圧の瞬時値をリアルタイムで(50マイクロ秒ごとに)通信することにより、超伝導ハードウェアの規模が小型のものであっても、実規模相当のシステム内挙動を評価することができる。具体例として、直流き電システムに超伝導限流器(SFCL)の導入をした際のモデルをFig. 2に示す。RTDSによって実規模システムで計算された電流値を電流容量の比(1.7 kA→60 A)を考慮して希土類系高温超伝導(RE-123)線材に通電し、この際に線材に発生した電圧を線材長の比(80 mm→1.6 km)を考慮してSFCLの発生電圧としてフィードバックする。以上により、一般に定量モデル化の困難な事故時の過電流通電時の超伝導線材の過渡的挙動をそのままシステム解析に反映できるシステムを構築した。

3. 結果・考察

き電線が時刻 0.2-0.4 s において地絡することを想定した際の電流波形をFig. 3に示す。SFCLがない場合は8 kA程度の事故電流が流れるものを想定したものであるが、超伝導線材によってSFCLを表現したことにより、事故電流が大幅に低減されている様子がわかる。本線材の臨界電流は60 Aであるが、事故発生直後に140 A程度の過電流が流れており、これによってFig. 4に示すような電圧を発生することでSFCLの限流機能として表現することができている。ここで、電流波形と電圧波形の双方に着目すると、電流は0.2 s程度で最も大きくなり、そこから一度減少していくが、電圧は逆に上昇していることがわかる。これは線材の温度が上昇していることを示している。さらに、0.35 s付近からは電流が微増するが、電圧は逆に微減している。これは、線材の温度が再度低下したことを示している。このように、過電流通電時の現象はシステム内挙動で決まる発熱と冷却条件のバランスが複雑に関与する過渡現象となり、本システムによってそれらのすべてを反映する試験が可能となった。

謝辞

本研究は、JSTの戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」の一環として実施するとともに、日本学術振興会の科研費(26630113)の助成を得て行ったものである。

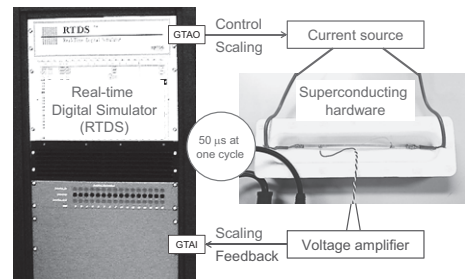


Fig. 1. Schematic for hardware-in-the-loop simulation (HILS) by the combination of real-time digital simulator (RTDS) and superconducting hardware.

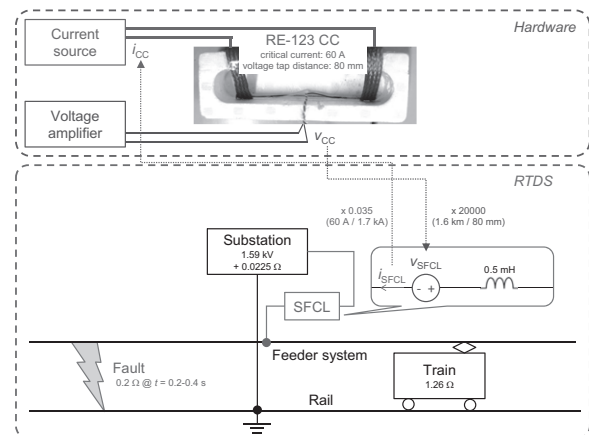


Fig. 2. Model for the HILS using RE-123 coated conductor for SFCL in a DC railway system.

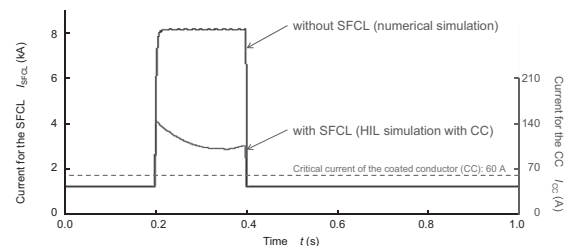


Fig. 3. Fault current waveforms without SFCL and with SFCL obtained by the HILS.

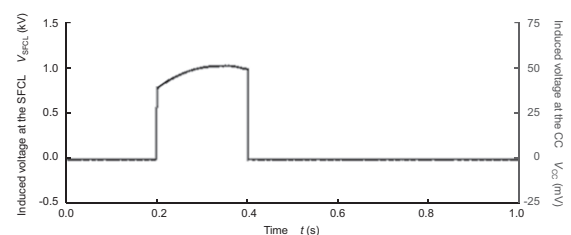


Fig. 4. Voltage waveforms induced in the RE-123 coated conductor and the corresponding values for the SFCL.