

## 次期ヘリカル型核融合実験装置への適用をめざした 20 kA 級 HTS STARS 導体の開発

Development of 20-kA-class HTS STARS conductor to be applied to  
the next generation helical device

柳 長門 (NIFS); 寺崎義朗, 伊藤 悟 (東北大); 松永信之介 (総研大); 三戸利行, 田村 仁,  
濱口真司, 小野寺優太, 高畑一也 (NIFS); 橋爪秀利 (東北大)

YANAGI Nagato (NIFS); TERAZAKI Yoshiro, ITO Satoshi (Tohoku Univ.); MATSUNAGA Shinnosuke (SOKENDAI);  
MITO Toshiyuki, TAMURA Hitoshi, HAMAGUCHI Shinji, ONODERA Yuta, TAKAHATA Kazuya (NIFS);  
HASHIZUME Hidetoshi (Tohoku Univ.)

E-mail: yanagi@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

核融合科学研究所 (NIFS) では、1998 年から稼働している大型ヘリカル装置 (LHD) のプラズマ実験を完了する約十年後から新装置を建設する計画について検討を行い、プラズマ核融合コミュニティにおける議論を始めている。新装置の候補のひとつは、LHD と同じヘリオトロン磁場配位を有し、連続ヘリカルコイルに高温超伝導 (HTS) 導体を適用した装置である。これに用いる HTS 大型導体の候補のひとつが、単純積層型 STARS (Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure) 導体である[1]。本発表では、その開発経緯と今後の開発計画について説明する。

### 2. 20 kA 級 HTS STARS 導体の設計と開発計画

次期ヘリカル装置の仕様について現在のレファレンスは、ヘリカルコイルの大半径  $R = 3.3$  m、トロイダル磁場強度  $B = 4$  T である。大きさは現在の LHD ( $R = 3.9$  m) より小さくするものの磁場強度を LHD ( $B < 3$  T) より高くするとともに、閉じ込め磁場配位の最適化を導入する。これにより、プラズマの仮想的核融合出力密度を LHD より高く設定し、ヘリカル型核融合炉 FFHR の実現に向けた次ステップと位置付ける。この基本仕様において長時間定常プラズマの物理・工学研究を遂行するためには、ダイバータ磁場配位を確実に形成し、真空容器壁の温度を核融合炉条件に近い  $300^{\circ}\text{C}$  以上とすることが必要であり、このためにヘリカルコイル巻線には高い電流密度  $80$  A/mm<sup>2</sup> が目標として設定される。巻線導体候補のひとつである STARS 導体は、REBCO テープ線材を単純に積層して銅ジャケットとステンレスジャケットの中に収めたものであり、機械的に強固なことが最大の特長である。基本設計では導体内部に電気絶縁を設け、巻線ではステンレスジャケットを隣接する導体間で溶接して連結する。100 kA 級 STARS 導体の断面を Fig. 1(a) に示す。この導体の開発は 2005 年から始め、2014 年には長さ約 3 m の模擬導体サンプルを試作し、温度 20 K、磁場 5.3 T において電流値 100 kA を達成した[2]。今後、その縮小版として 20 kA 級導体の開発を行う。現在の設計例を Fig. 1(b) に示す。導体を扁平にしているが、これはヘリカル巻線が主にフラットワイズ曲げであることに注目し、巻線性を向上させる目的である。次期装置の高い電流密度を実現するため、無絶縁巻線も検討しており、このために内部絶縁を外している。

### 3. ヘリカル巻線方法の検討

ヘリカルコイルの巻線方法については、基本的には約 1 km 長さの長尺導体を製造し、LHD で適用したのと同様に巻線機を用いて連続成型加工による巻線を行うことである。ヘリカルに捩じりながらの巻線はエッジワイズ歪を伴い、FFHR のヘリカルコイルで検討すると最大で 0.1% 程度となる。これは十分に許容範囲には入るが、できるだけ小さくすれば、その分、巻線作業が容易になると考えられる。そこで、巻線部全体をエッジワイズ歪が最小になるよ

うに傾けることを検討している。Fig. 2 はその一例であり、エッジワイズ歪は最大 0.04% となっており、今後の最適化でもっと小さくできる可能性がある。一方、機械的ラップ接続を 1 ピッチごとに施す接続巻線についても検討しており、導体の低抵抗接続方法の開発が進展している[3]。

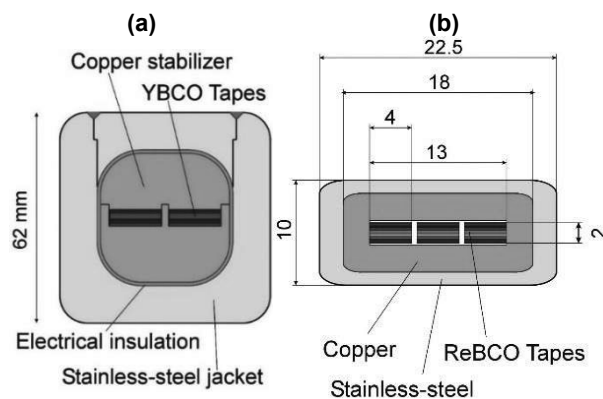


Fig. 1 Cross-sectional layout of the HTS STARS conductors to be applied to (a) the FFHR-d1 helical reactor and (b) the next generation helical device. Note that the scales are different.

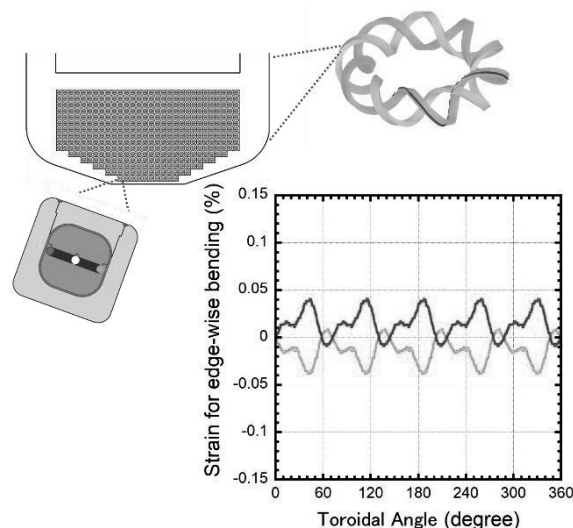


Fig. 2 Schematic illustration of the helical coil winding package for the FFHR helical coil. By tilting the conductor, the edge-wise bending strain can be minimized.

### 参考文献

- [1] N. Yanagi et al.: Nucl. Fusion **55** (2015) 053021.
- [2] Y. Terazaki et al.: IEEE Trans. Appl. SC. **24** (2014) 4801305.
- [3] S. Ito et al.: Fusion Eng. Des. **136** (2018) 239.

# 核融合実験装置用 FAIR 導体及び高温超伝導コイルの開発研究

## Development of FAIR conductor and HTS coil for fusion experimental device

三戸利行, 小野寺優太, 平野直樹, 高畑一也, 柳長門, 力石浩孝, 岩本晃史, 濱口真司, 高田卓, 馬場智澄 (NIFS); 筑本知子 (中部大学); 川越明史 (鹿児島大学)

MITO Toshiyuki, ONODERA Yuta, HIRANO Naoki, TAKAHATA Kazuya, YANAGI Nagato, CHIKARAISHI Hirota, IWAMOTO Akifumi, HAMAGUCHI Shinji, TAKADA Suguru, BABA Tomosumi (NIFS); CHIKUMOTO Noriko (Chubu Univ.); KAWAGOE Akifumi (Kagoshima Univ.); E-mail: mito@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

核融合科学研究所では、核融合実験装置に適用可能な大電流容量の高温超伝導導体及びコイルの開発研究を開始した[1]。高温超伝導の特徴を生かした高い安定性と高電流密度を両立でき、安全なコイル保護を可能とすることが目標である。その候補導体として、REBCO テープ線材と高純度アルミニウムシートを交互に積層し、円形断面のアルミニウム合金の溝部に入れ、蓋部を摩擦攪拌接合で接合した後で、電流分布の均一化及び機械特性の一様化を図るために導体に捻りを加えて製作する導体を開発している。摩擦攪拌接合 (Friction stir welding: FSW)、アルミニウム合金被覆 (Aluminum alloy jacket)、間接冷却 (Indirect cooling)、REBCO 積層テープ線材の頭文字をとった FAIR 導体の試作開発状況、液体水素を用いた間接冷却によるコイル冷却構造、2 次巻線をクエンチヒーターとして活用するクエンチ保護方式の概念設計について報告する。

### 2. FAIR 導体開発状況

FAIR 導体の断面構造を Fig. 1 に示す。幅 4mm、厚み 0.1 mm の REBCO テープ線を 2 列並べ、導体に捻り及び曲げを加えた際の機械的な緩衝材となる厚さ 0.5 mm 高純度アルミニウムシートを間に挟んで 10 層を積層する。試作では REBCO テープ線は溝部の上側、中間、下側の 6 枚のみとし、他の部分はステンレステープのダミー線を使用する。捻りピッチ及び曲げ半径を変化させた複数のサンプル製作し、液体窒素中で通電試験を行って、導体を捻って曲げを加えた際に内部の REBCO テープ線の特徴が劣化しない条件を明らかにする。次に高純度アルミニウムシートの厚みを 0.1 mm まで薄くし、REBCO テープ線と交互に 30 層積層 (4mm 幅の REBCO テープ線 60 枚) することで、温度 20 K、磁場 12 T で 12.5 kA の大電流容量導体を構成することができる。

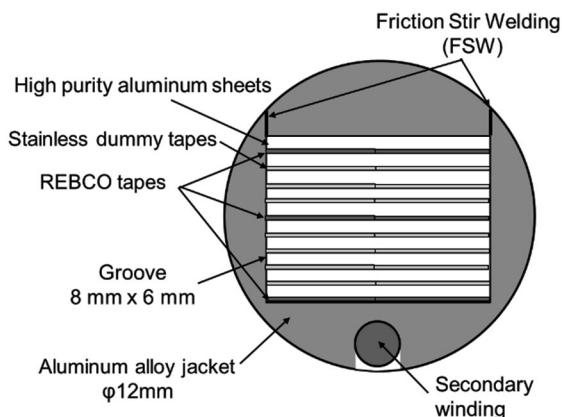


Fig. 1. Cross section of FAIR conductor

Fig. 2 に捻りピッチを導体長 1 m 当たり 2 回転として試作した FAIR 導体の断面写真及び導体長手方向の捻りの写真を示す。FSW 条件を最適化することで、導体に捻りを加えてもアルミニウム合金被覆部に割れ等が発生しないことを確認した。今後液体窒素中での通電試験を行う予定であり、実験結果については当日報告する。

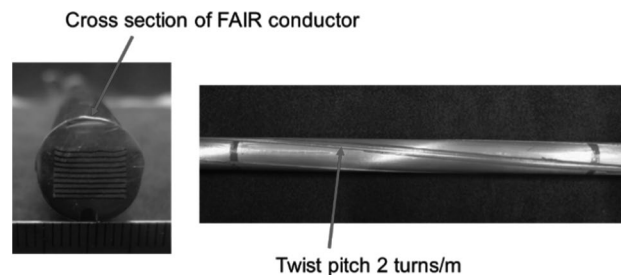


Fig. 2. Prototype FAIR conductor (twist pitch: 2 turns / m)

### 3. コイル構造

Fig. 3 に FAIR 導体を用いたプラズマ中心磁場 6 T、コイル最大磁場 12 T のヘリカルコイル巻線部の断面形状を示す。FAIR 導体は、ラジアルプレートの円形断面の溝部に収められ、蓋部を FSW で閉じてヘリカル形状のプレートコイルを製作する。プレートコイルの両側には間接冷却のための冷却パネルが配置され、液体窒素を用いて間接冷却される。複数のヘリカルプレートコイルを束ねることでヘリカルコイルを形成する。ラジアルプレート部を含む巻線部には当初目標 50 A/mm<sup>2</sup>、最終目標値として 80 A/mm<sup>2</sup> の高電流密度を想定しており、次の 3B-a03 で発表する 2 次巻線をクエンチヒーターとして用いた新しいコイル保護方式を用いて安全なコイルを実現する。

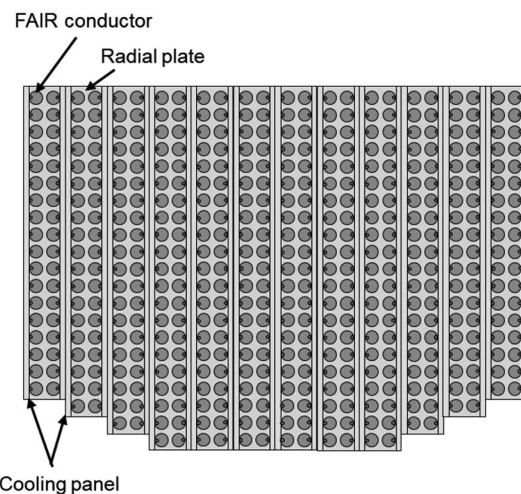


Fig. 3. Cross section of Helical coil windings

### 参考文献

1. T. Mito, et al.; Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 97 (2018) p.44

## 2 次巻線をクエンチヒーターとして用いた超伝導マグネット保護方式の検討 Quench protection strategy for using a secondary winding as a quench heater

小野寺 優太, 三戸 利行, 平野 直樹, 高畑 一也 (NIFS)

ONODERA Yuta, MITO Toshiyuki, HIRANO Naoki, TAKAHATA Kazuya (NIFS)

E-mail: onodera.yuta@nifs.ac.jp

### 1. はじめに

LHD の次期装置の候補として、高温超伝導 (HTS) を用いた連続巻のヘリカル装置が考えられている。この HTS コイルには  $80 \text{ A/mm}^2$  の高い巻線部電流密度が要求されており、クエンチ発生時のコイル保護が重要な検討課題となっている。そこで、本研究では、導体内の一部に電気絶縁した 2 次巻線を組み込み、2 次巻線をクエンチヒーターとして働かせ、常伝導部の発生を速やかに拡散して、巻線内の局所的な温度上昇を防ぐ、新しいコイル保護方式の有効性について検討を行った。

### 2. 方式

本手法は、クエンチ発生時に 1 次巻線に流れていた電流を電磁誘導によって 2 次巻線へと乗り移らせて減衰させるとともに、2 次巻線自体をヒーターとして機能させ、局所的な温度上昇の発生を防ぎ、常伝導部を速やかにコイル全体に広げることによって均温化を図る手法である。その際、2 次巻線であるクエンチヒーター用に外部電源を必要としないため高い信頼性を確保できる。また、Fig. 1 の回路図に示すとおり、2 次巻線の回路にはスイッチが取り付けられており、励磁時およびクエンチ検出時はスイッチを開いておくことで電磁誘導による 2 次巻線への電流の乗り移りを防ぐ。さらに、両コイルの鎖交磁束が同等であることから誘導電圧を無視でき、クエンチ発生時の電圧を高精度に検出することができる。

### 3. 解析結果

Fig. 1 に示す回路図より以下に示す回路方程式が導出でき、各巻線に流れる電流の時間変化を計算すると共に、有限要素法を用いて 2 次巻線による発熱の影響を解析した。

$$L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt} + I_1(R_1 + R_n) = 0 \quad (1)$$

$$L_2 \frac{dI_2}{dt} + M \frac{dI_1}{dt} + I_2 R_2 = 0 \quad (2)$$

Fig. 2 に解析対象とした HTS 導体断面の 2 次元モデルを示す。同モデルは次期装置用に考案された HTS 導体の候補である FAIR 導体の巻線部の断面構造を模擬している。1 次巻線の材質は HTS 線材と純アルミニウム、2 次巻線の材質は銅である。それぞれの巻線は電気絶縁されており、その周りをアルミニウム合金のラジアルプレートで覆っている。初期条件を 20 K、12 T とし、外部抵抗  $R_1$  を  $1 \Omega$ 、1 次巻線に  $12.5 \text{ kA}$  ( $=I_0$ ) の電流を印加されている状態からクエンチ検出後の各巻線の規格化した電流値 (実線) および温度 (破線) の時間変化の振る舞いを Fig. 3 に示す。解析結果から 1 次巻線の電流が 2 次巻線へと移ることでコイルの温度が上昇していることが確認できる。また、従来のホットスポットモデルによる計算では 1 秒後に 261 K まで巻線温度が上昇することに比べ、本手法では 1 次巻線の温度を 46 K に抑えられている。したがって、2 次巻線をクエンチヒーターとして用いる本手法がコイル保護に有効であることが示された。解析の詳細および局所的な発熱箇所を考慮した三次元解析の結果については当日報告する。

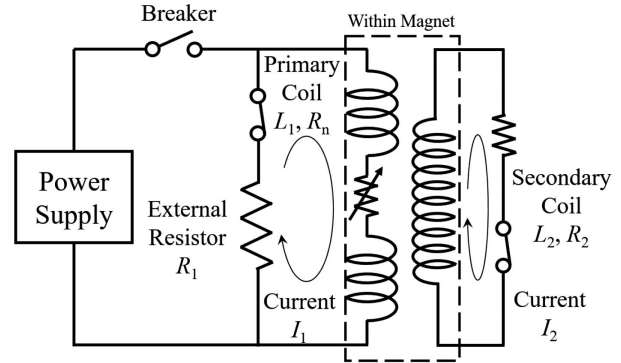


Fig. 1 Electric circuit diagram after quench detection

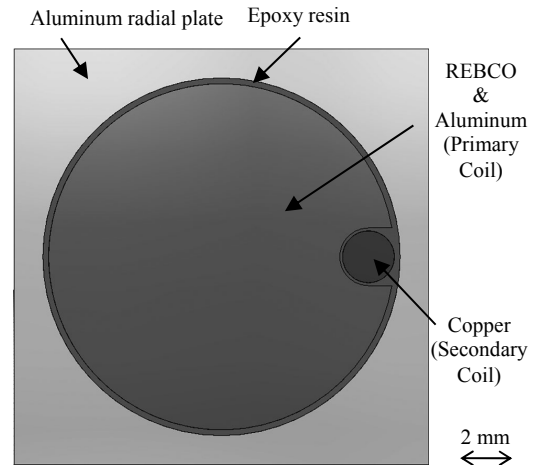


Fig. 2 Cross section geometry of HTS conductor used for finite element analysis

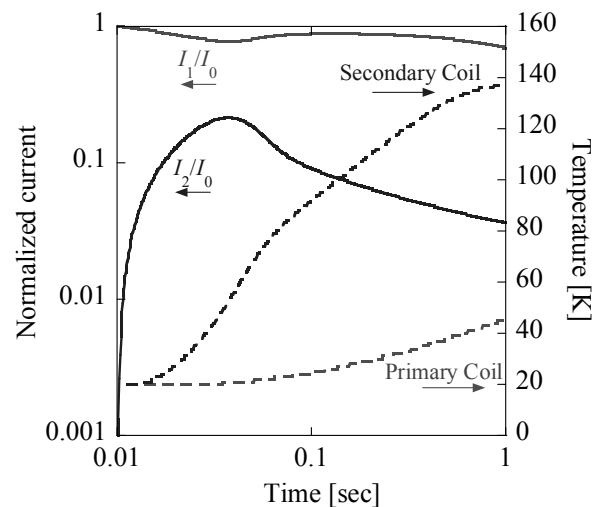


Fig. 3 Behavior of normalized current value (left axis) and temperature of each coils (right axis)

# 低融点金属含浸方式—WISE—による無絶縁 ReBCO マグネットの開発

Development of the no-insulation magnet by the WISE concept:  
ReBCO coil impregnated with low-melting-point metal

松永 信之介(総研大); 成嶋 吉朗, 小野寺 優太, 寺崎 義朗, 宮澤 順一, 柳 長門(NIFS)

MATSUNAGA Shinnosuke(SOKENDAI);

NARUSHIMA Yoshiro, ONODERA Yuta, TERAZAKI Yoshiro, MIYAZAWA Junichi, YANAGI Nagato(NIFS)

E-mail: matsunaga.shinnosuke@nifs.ac.jp

## 1. はじめに

NIFS ではヘリカル型核融合炉、および、次世代ヘリカル型核融合実験装置に用いるための大型 HTS 導体の開発が進められている。特に、次世代装置用の導体にはヘリカル形状への巻線性、および、運転環境下でコイル電流密度  $80 \text{ A/mm}^2$  以上を満たすことが求められている。宮澤らは革新的な巻線性を持つ HTS 導体を構成する方法として低融点金属含浸方式 (Wound and Impregnated Stacked Elastic tapes, WISE) を考案した[1]。複数本の ReBCO テープ線材をステンレス製のフレキシブルチューブに入れ、コイル形状への巻線後、低融点金属で含浸することで WISE 導体が構成される。また、WISE によって無絶縁(No-Insulation, NI)コイルを容易に構成できるため、ヘリカルコイルの NI オプションを検討するプラットフォームという一面もある。

## 2. 6 m WISE 導体を用いた NI マグネットサンプル

WISE 導体の成立性を調査するために 10 枚の ReBCO テープ線材 (SuperOx Japan 製、4 mm 幅、 $I_c > 100 \text{ A}@77 \text{ K}$ , s. f.) から構成される 6 m の WISE 導体を用いた NI マグネットサンプルを製作した (Fig. 1)。コイル形状は 2 層ソレノイドであり、インダクタンスは  $300 \mu\text{H}$  である。液体窒素浸漬 ( $77 \text{ K}$ ) にて励磁した結果、中心磁場  $0.074 \text{ T}@291 \text{ A}$  の発生を観測した。この実験値は輸送電流が全て導体に沿って流れているときの計算値と一致したことから、WISE 導体の成立性が確かめられた。一方、室温と  $77 \text{ K}$  の熱サイクルによって導体性能の劣化が見られた。5 回目の冷却時にはこの劣化はほぼ飽和した。この状態で励磁試験を行ったところ、 $20 \mu\text{V/cm}$  以上に相当する両端電圧を伴いながらもクエンチせずに中心磁場  $0.16 \text{ T}@800 \text{ A}$  の安定した定常通電を達成した。この結果は WISE 方式における低融点金属含浸プロセスによって強力な安定化効果が得られることを示唆している。なお、 $850 \text{ A}$  の電流印加ではクエンチが生じた。

SPEC モデル[2]を参考にした電気回路モデルを用いて、サンプルの定常運転における通電特性を解析した。得られた電界-電流特性を Fig. 2 に示す。非線形抵抗成分を  $n$  値モデルで与えて解析したところ、 $n$  値は 3.9、臨界電流値は  $640 \text{ A}$  であり、線材の臨界電流の総和である  $1 \text{ kA}$  に対して 6 割程度であった。

## 3. 今後の展開

現状の次期ヘリカル装置をターゲットとした WISE 導体の開発課題を列挙する。

- (1) 熱サイクルによる特性劣化の原因究明と改良
- (2) コイル電流密度  $80 \text{ A/mm}^2$  の達成
- (3) 充填された低融点金属がテープ線材に与えられるフープ応力による歪みを抑制するメカニズム足りえるかどうかの実証
- (4) WISE 導体のヘリカル巻線の原理実証
- (5) 長尺導体の成立性実証

特に、(1)、(5)を目的として、18 m WISE 導体を用いた  $300 \mu\text{H}$  級マグネットサンプル、および、様々な含浸条件における

導体サンプルの製作を進めている。2020 年以降に運転温度  $20 \text{ K}$ 、高磁場下の導体試験が計画されており、そこで(2)、(3)を達成することを目指している。また、3D プリント技術を用いて小型ヘリカルコイルフレームのモックアップを製作し、実際に WISE 導体を巻線することで(4)を実証する。

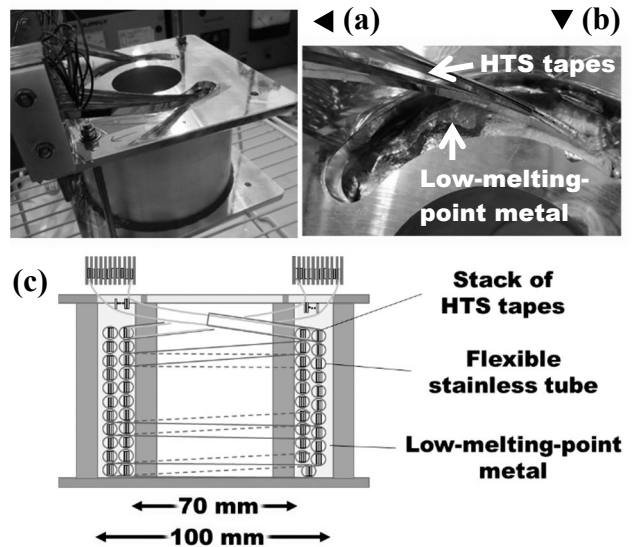


Fig. 1 No-Insulation ReBCO magnet sample with the WISE conductor of 6 m: (a) Entire magnet, (b) Impregnated tapes, (c) Schematic drawing.

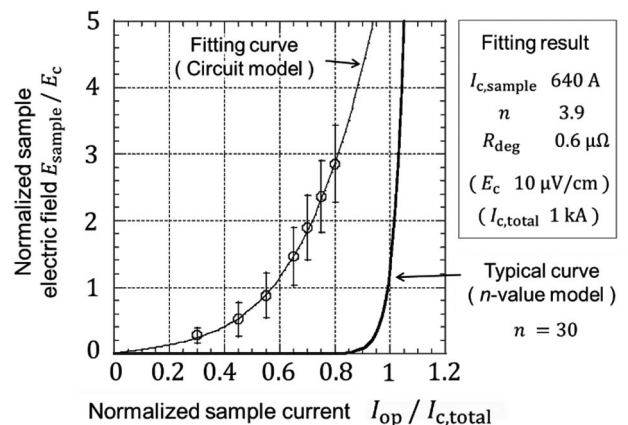


Fig. 2 Electric field vs. current characteristics of the WISE magnet sample for DC operation.

## 参考文献

- [1] 宮澤順一 他、核融合科学研究所 産学官連携 シーズ集 F1008、曲げやすく丈夫で冷やしやす高温超伝導導体
- [2] X. Wang et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 25(2015), no. 4601805, "Charging Behavior in No-Insulation REBCO Pancake Coils"

## ITER トロイダル磁場コイルの調達進捗 Progress of ITER TF coil manufacture

小泉 徳潔, 中平 昌隆, 松井 邦浩, 正木 圭, 井口 将秀, 梶谷 秀樹, 諏訪 友音, 櫻井 武尊, 中本 美緒(量研機構)  
 KOIZUMI Norikiyo, NAKAHIRA Masataka, MATSUI Kunihiro, MASAKI Kei, IGUCHI Masahide, KAJITANI Hideki,  
 SAKURAI Takeru, NAKAMOTO Mio (QST)  
 E-mail: koizumi.norikiyo@qst.go.jp

### 1. はじめに

量子科学技術研究開発機構(量研機構; QST)は, ITER における日本の国内機関として, ITER トロイダル磁場(TF)コイル[1](Fig.1:スぺア1個を含み19個.以下,TFコイルと記す.)のうち9個のTFコイル,19個分のコイル容器の調達を担当している。TFコイルは,ITERの超電導コイルの中でも最大の超電導コイルであり,かつ,製作の難易度も最も高いコイルである。本稿では,日本が担当しているTFコイル及びコイル容器の製作進捗を報告する。なお,TFコイルの製作手順の詳細等については,[1]を参照されたい。

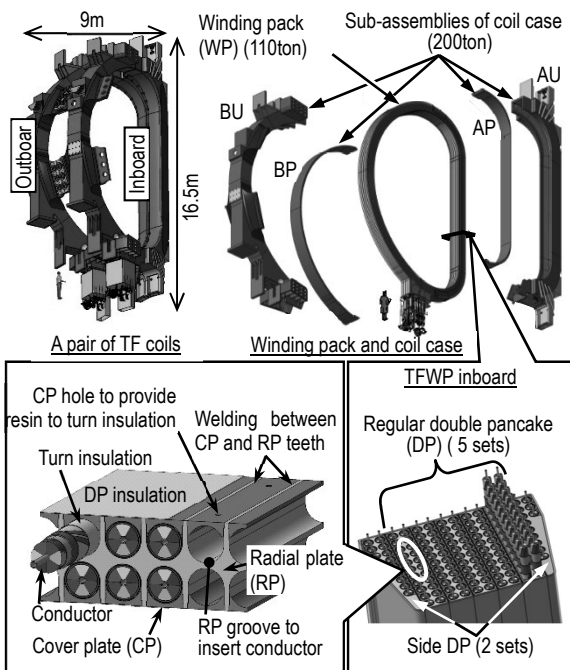


Fig.1 ITER TF coil and structures

### 2. 日本におけるTFコイル及び構造物調達体制

日本では,TFコイル5機及び欧州向け構造物の4機は三菱重工,三菱電機及び現代重工が協力して,TFコイル4機及び欧州向け構造物の6機は東芝が担当し,2025年のファースト・プラズマを達成できるように,調達を進めている。

### 3. 調達進捗

日本では,ダブル・パンケーキ(DP)の製作については,両製作メーカで量産体制に入っており,既に,35枚のDPが完成しており,7枚のDPを積層して構成される巻線部(WP)の製作を進めている。WPの製作状況は,以下の通りである。

- ・初号機 WP:製作完了し,80 K までのコールド試験も完了。  
以下に記す次工程(一体化)に移行済。
- ・2号機 WP:製作完了し,80 K までのコールド試験中。
- ・3号機 WP:WP含浸漬(Fig.2 参照)
- ・4、6号機 WP:DP 積層中

コイル容器においては,欧州分3機を欧州に納入済である。Fig.3に2018年12月に製作を完了した欧州分3号機目のコイル容器の写真を示す。図は, Fig.1のAUとBUの溶接継手の開先を $\pm 0.3\text{mm}$ の精度で仮合せした状態を示す。また,日本分コイル容器は,2機分の製作を完了している。

現在,完成した初号機 WP とコイル容器を一体化する作業を進めており,WPをコイル容器内部に挿入する作業を完了している(Fig.4)。



Fig.2 3<sup>rd</sup> TF coil WP after impregnation



Fig.3 3<sup>rd</sup> EU TF coil case



Fig.4 Insertion of WP in coil case

### 4. まとめ

日本では,9機のTFコイル,19基のコイル容器の製作を進めている。2機のWP,5機のコイル容器の製作を完成させ,初号機の一体化作業を進め,WPをコイル容器に挿入する作業を完了している。

### 謝辞

TFコイルの製作では,三菱重工,東芝,三菱電機,現代重工等多数のメーカに協力を頂き,技術的課題を解決しながら進めています。これらのメーカのご協力に感謝します。

### 参考文献

- (1) ITER TFコイル特集号: 低温工学, 47(2012) 135-139

# ITER-TF接続サンプルの接続抵抗の電流値依存性 Dependence of joint resistance on current for ITER-TF joint samples

今川 信作, 尾花 哲浩, 高田 卓, 濱口 真司, 力石 浩孝, 高畑 一也 (NIFS);  
梶谷 秀樹, 松井 邦浩, 小泉 徳潔 (QST)

IMAGAWA Shinsaku, OBANA Tetsuhiro, TAKADA Suguru, HAMAGUCHI Shinji, CHIKARAISHI Hiroataka,  
TAKAHATA Kazuya (NIFS); KAJITANI Hideki, MATSUI Kunihiro, KOIZUMI Norikiyo (QST)  
E-mail: imagawa@nifs.ac.jp

## 1. はじめに

2018年までに8本のITER-TF接続サンプルの抵抗値測定試験を実施し、全てのサンプルにおいて要求値  $3\text{n}\Omega$ 以下を満足することを確認した。これらの試験において、電圧端子間の電位差が  $15\text{ kA}$ あたりからは飽和する現象[1]、および、電位差の増加率が低電流域では小さい現象が共通して観測されており、その挙動を説明するとともに要因について考察する。

## 2. 試験方法

9 T スプリットコイルと  $100\text{ kA}$  電流リードを有する大型導体試験装置への ITER-TF 接続サンプルの取付図を図1に示す。試験サンプルは、長さ  $1.5\text{ m}$  のケーブル・イン・コンジット(CIC)導体2本の下部が ITER-TF 実機と同じ接続部形状になっており、接続長は  $440\text{ mm}$  で最終撚りピッチ長に相当する。上部は、 $100\text{ kA}$  電流リードに接続される銅ブスバーと低抵抗で接続するため下部と同様の接続部形状であるが、試験装置の高さ制限のため接続長が  $325\text{ mm}$  に短縮されている。電圧端子は中央の通常部  $300\text{ mm}$  の中央と両端のコンジット表面に6点ずつ取り付けられており、各位置における往復導体間の電位差から下部接続部の接続抵抗を求めている。インダクタンスと渦電流の影響を排除するため、電流値  $1, 15, 30, 45, 60, 68\text{ kA}$  で3分間保持して電位差を測定し、各位置6点の平均電位差の電流値依存性(勾配)から抵抗値を求める方法により、 $\text{n}\Omega$ レベルの測定を可能としている。低電流域での電圧挙動を調べるため、3つのサンプルにおいては  $3, 6, 9, 12\text{ kA}$  でも測定した。

## 3. 試験結果と解析結果

下部接続部での電圧降下の代表例を図2に示す。図1の各断面(A, B, C)の6組の電圧端子間の偏差は  $15\text{ kA}$ あたりまでは電流値とともに  $0.01\text{ mV}$  程度まで大きくなるが、それ以上の電流値では偏差が拡大しない。コンジット表面に取り付けられた電圧端子は、近傍の超伝導素線の電位の影響を受けているはずなので、この電位差はCIC導体内の超伝導素線間の電位差を表していると考えられ、主に各素線の上部および下部接続部の銅スリーブとの接続抵抗の差によって生じると考えている。

900本の超伝導素線を3つの並列回路に置き換えた解析モデルを図3に示す。往復導体の片側だけのモデルであり、上と下の回路は、各々、上部接続部と下部接続部において接触抵抗が極端に小さい素線に対応し、中央の回路は残り898本の素線の集合体に対応している。 $R_{11}\text{--}R_{33}$ は超伝導素線と銅スリーブの接続抵抗であり、 $R_{11}$ と $R_{33}$ は電流値が臨界電流  $I_c$ に到達すると電流値が  $I_c$ 一定となるように抵抗値が変化する。 $R_{j1}\text{--}R_{j4}$ は素線間接触抵抗であり、 $10\text{ n}\Omega$ 程度であることが報告されている。図4に  $R_{33}$ を平均値の  $1/500$ ,  $R_{11}$ を平均値の  $1/10$ ,  $R_j$ を  $5\text{ n}\Omega$ , 臨界電流を  $2\text{ kA}$ とした場合の計算結果を示す。図2の実験値をかなり良く再現できることが分かる。しかしながら、サンプルによっては低電流域で負の電位が現れることがあり、解析モデルの改良が必要である。銅スリーブと素線の接続抵抗のパラツキによって銅スリーブには長手方向の電流も流れて電位差が生じていると考えており、その影響を加えることを検討している。

### 参考文献

1. S. Imagawa et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 28 (April 2018) Art. no. 4200405.

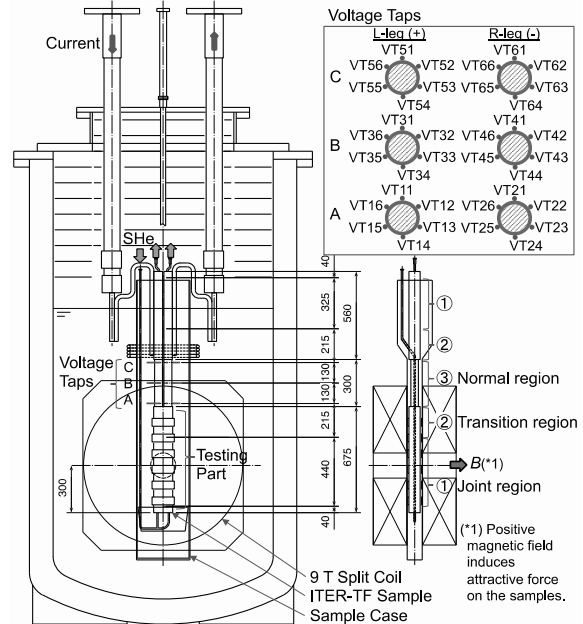


Fig. 1. Set up of an ITER-TF joint sample in the 9 T test facility.

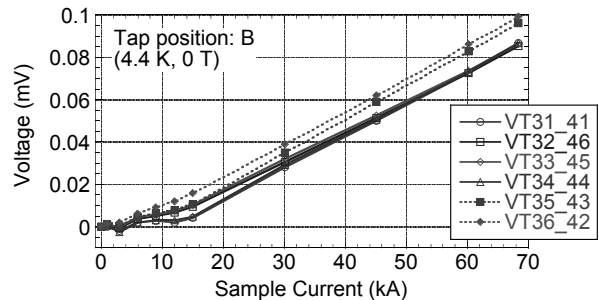


Fig. 2. An example of voltages averaged for last 30 s in each period of holding current at the positions B (see Fig. 1).

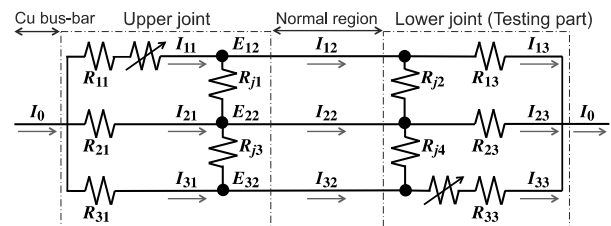


Fig. 3. An electric circuit model for one leg of a joint sample.

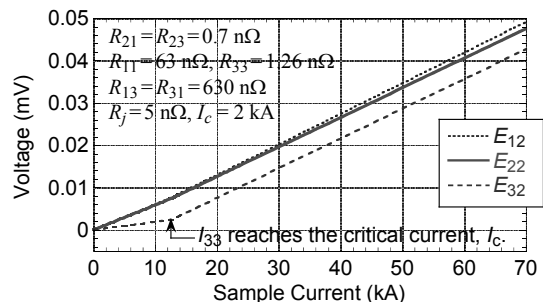


Fig. 4. A calculated result with the circuit model in Fig. 3.

## JT-60SA 中心ソレノイドの製作完了 Completion of Central Solenoid for JT-60SA

村上 陽之, 土屋 勝彦, 木津 要 (量研); 野元 一宏, 板敷 祐太郎 (三菱電機)

MURAKAMI Haruyuki, TSUCHIYA Katsuhiko, KIZU Kaname (QST); NOMOTO Kazuhiro, Itashiki Yutaro (Mitsubishi Electric)

### 1. はじめに

欧州と日本が共同で製作を進めている JT-60SA は、3 種類の超電導コイルが用いられ、トロイダル磁場コイルは欧州が製作を担当し、中心ソレノイド (CS) および平衡磁場コイルは日本が製作を担当する[1]。

18 個のトロイダル磁場コイルおよび 6 個の平衡磁場コイルの製作は完了し、2018 年秋までにトカマク本体へ組み込まれた。CS は 4 つのモジュールで構成され、各モジュールは直径 2 m、高さ 1.6 m の大きさで、個々のモジュールは 2018 年 3 月までに完成した[2]。その後、4 つのモジュールを積み重ね一体化し[3]、2019 年 3 月に CS の製作が完了した。完成した CS は、那珂核融合研究所に搬入され、2019 年 4 月現在、本体へ組み立てるための準備を進めている。

本発表では、CS の製作結果および JT-60SA の組み立ての進捗状況を報告する。

### 2. 中心ソレノイドの製作結果

CS は上から見ると円形をしているが、CS の形状が真円からゆがんで製作されると誤差磁場が発生し、トカマクに発生するポロイダル磁場もゆがみ、プラズマの形状や位置制御に悪影響を与える。そのため、CS の電流中心は真円度 4 mm 以下の巻線精度で製作することが要求された。

CS モジュールは導体の曲率を常時測定しながらコイルを巻線し、さらに理想的な曲率と測定した曲率を比較し、そのずれを逐次フィードバックすることで曲率を修正し、真円に近い形状となるよう製作した。巻線後の導体位置を周方向 40 度ごとに測定し、電流中心の径方向位置を評価した結果(図 1)、モジュール単体の真円度は 0.44 mm 以下であり、非常に高い精度で製作できたことを確認した。

CS モジュールの積層では、4 つのモジュールの中心軸をそろえる事が誤差磁場の発生を抑えるために重要であり、レーザートラッカーを用いて位置測定をしながらモジュールの積層を実施した。その結果、各モジュールの中心軸は最大 0.5 mm の誤差(真円度への影響は 1.0 mm)で積層することができた(図 2)。

モジュール単体の真円度に積層時の設置誤差を含めた、完成した CS の真円度は 1.44 mm となり、要求値の 4 mm に対して十分高い巻線精度を達成することができた。

### 3. JT-60SA の組み立ての進捗状況

CS は横倒しの状態で輸送され、輸送治具は輸送中や輸送後の立て起こし時にモジュール同士がずれることを防ぐため、9 方向から CS を挟み込み固定する構造とした。那珂核融合研究所の組立室に搬入された CS は、輸送中にモジュールがずれていないことを事前に取り付けた合いマークの一致等により確認し、その後組立室内で再度立て起こされた(図 3)。2019 年 4 月現在、JT-60SA 本体へ吊りこむための治具取り付けなど、本体組み立てのための準備を進めている。

CS の組み立てをもって、JT-60SA に用いられる全ての超電導コイルの組み立てが完了する。続いてコイルに電流を供給する超電導電流フィーダやサーマルシールド、クライオスタットなどの組み立てを進める予定である。JT-60SA は 2020 年 3 月に組み立てが完了し、その後超電導コイルの冷却など進め、2020 年 9 月より運転を開始する予定である。

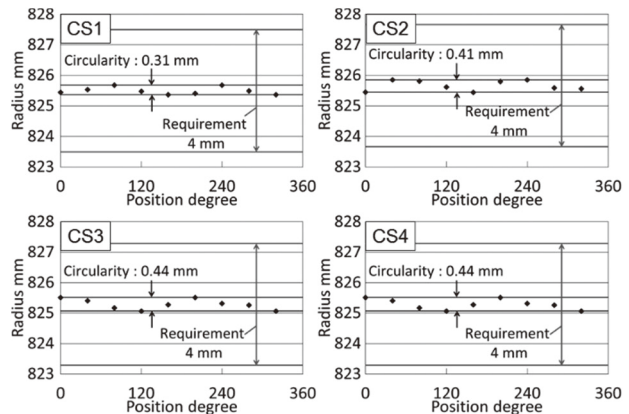


Fig.1 Circularity of CS modules

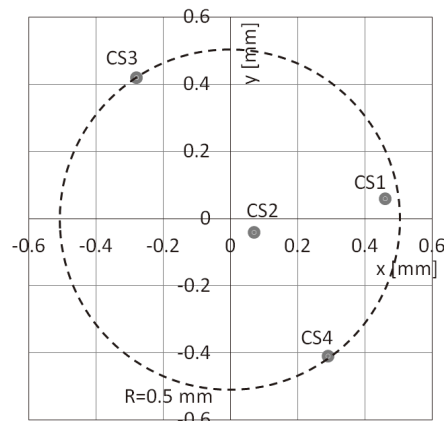


Fig.2 Position error on CS stacking

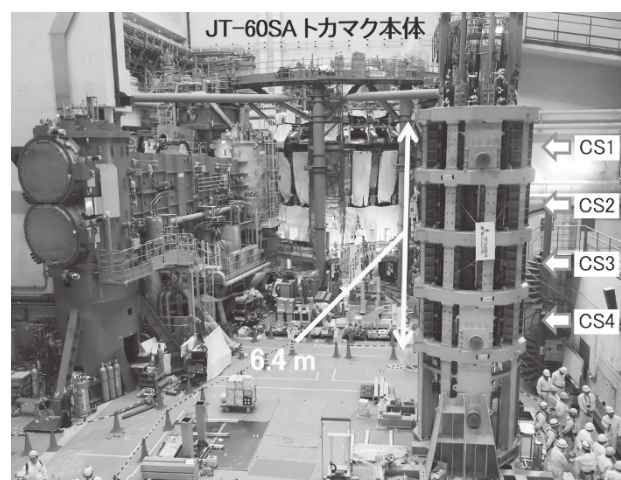


Fig.3 Delivered CS in JT-60SA main building

### 参考文献

1. Y. Koide, et al.: Nuclear Fusion, Vol. 55, (2015) 086001
2. H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.38
3. H. Murakami, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 97 (2018) p.46

# 核融合炉用超電導磁石絶縁材料の照射効果に関する研究 ～液体ヘリウム温度における機械的強度の変化～

## Study on Irradiation Effect of Insulating Materials for Superconducting Magnets ～ Change in Mechanical Strength at Cryogenic Temperature ～

赤澤 展人, 秋山 庸子(大阪大学); 西嶋 茂宏(福井工業大学)

Nobuto AKAZAWA, Yoko AKIYAMA (Osaka University); Shigehiro NISHIJIMA (Fukui University of Technology)

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

### 1. はじめに

現在建設中の核融合実験炉 ITER では高温のプラズマを超電導磁石で制御する方法を用いているが、この超電導磁石に用いられる絶縁材料は、極低温下で中性子線や二次放射線である $\gamma$ 線などが照射されながら電磁力が負荷される。絶縁材料に使用される高分子材料は、放射線感受性が高い上に、極低温下では低温脆化が起るため、機械的強度や絶縁性能が低下する可能性がある。

そこで ITER では、絶縁材料としてガラスクロスとポリアミドフィルムを積層し、樹脂を含浸・硬化させたハイブリッド複合材料を使用している。この絶縁材料の繊維を貫く方向(貫層方向)に負荷する応力は、弾性率の高いガラスクロスによって支持されるが、繊維に平行な方向(沿層方向)ではガラスクロスによって支持されないため、貫層方向に比べて強度は小さい。また低温での機械的強度などの物性の変化を調べるために、液体窒素を用いた研究は数多く行われてきたが、放射線を照射した試験片に対して、実使用環境に近い液体ヘリウムを用いた実験はほとんど行われていない。

そこで、本研究ではガラスクロスと樹脂のみで構成したガラス繊維強化プラスチック(GFRP)を作製し、 $\gamma$ 線による吸収線量と温度(室温、液体窒素温度、液体ヘリウム温度)を変化させて層間せん断強度(ILSS)を測定することで、照射効果の温度による変化を確認した。

### 2. 実験方法

まず硬化剤(Baxxodur EC 301, 三井化学ファイン) 32.2 g を混合したビスフェノール A 型エポキシ樹脂(JER-828, 三菱ケミカル) 100 g を 1 時間真空攪拌し、S-ガラスクロス(有沢製作所)を 45 枚積層したものに真空で含浸し、70°C で 2 時間、110°C で 3 時間熱処理をすることで硬化させ、GFRP を作製した。次に GFRP を、ILSS を測定するための形状である、Fig.1 に示す目違い切り欠き試験片に加工した。これらの試験片に $^{60}\text{Co}$ 線源を用いて、線量率 42 kGy/h、室温、大気雰囲気中で $\gamma$ 線照射することで、試験片に 10 MGy の吸収線量を与えた。これらの試験片を室温(300 K)、液体窒素温度(77 K)、液体ヘリウム温度(4.2 K)の 3 つの温度条件下で ILSS 試験を実施した。その後、試験片が破壊したときの応力を、層間せん断破壊が生じた箇所の断面積で除したものを ILSS として算出した。液体窒素、液体ヘリウムを用いた ILSS 試験の装置の概略図を Fig.2 に示す。

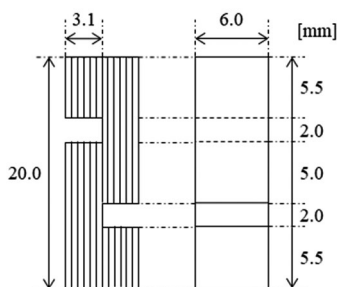


Fig.1 The specimens with double notches.

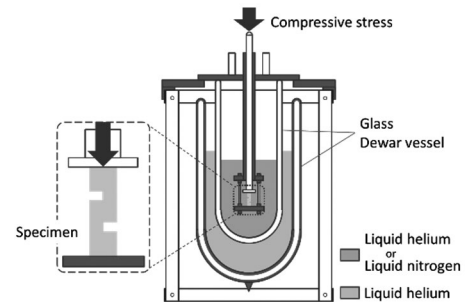


Fig.2 Experiment setup of ILSS measurement.

### 3. 結果と考察

実験結果を Fig.3 に示す。GFRP は吸収線量に関わらず、室温に比べて低温で ILSS が増加した。これは低温における剛性の増加によるものと考えられる。

また室温および液体ヘリウム温度では照射による ILSS の低下がほとんど見られなかったのに対し、液体窒素温度では、未照射のものと比較して 10 MGy で明らかに低い ILSS 値を示した。このことから液体窒素温度と液体ヘリウム温度では、照射による機械的特性への影響が異なる可能性が示された。

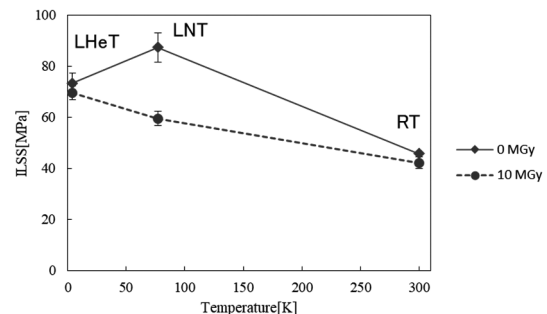


Fig.3 ILSS before and after irradiation at room (RT), liquid nitrogen (LNT) and liquid helium temperature (LHeT).

### 4. まとめ

S-ガラスクロスとエポキシ樹脂によって作製したガラス繊維強化プラスチックでは、室温に比べて低温では吸収線量に関わらず ILSS が増加することが分かった。また液体窒素温度では、未照射のものと比較して 10 MGy で明らかに低い ILSS 値を示した。ILSS の低下は照射による高分子の架橋密度や界面の状態の変化など、様々な因子が複合していると考えられるため、今後はマイクロな観点、マクロな観点でのそれぞれの影響についてさらに詳しく考察していく予定である。

### 謝辞

本研究の一部は自然科学研究機構核融合科学研究所の「NIFS 一般共同研究プログラム(NIFS19KERA014)」により実施いたしました。測定にあたり、同研究所の今川信作先生、岩本晃史先生にお世話になりました。この場を借りて御礼申し上げます。



## 磁気分離のメタン発酵法への展開とその活用法

### Introducing of magnetic separation to methane fermentation method and that application

江田 慎吾, 酒井 保藏, 荷方 稔之, 六本木 美紀(宇都宮大); サハ ミヒル ラル(Dhaka 大)

EDA Shingo, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki, ROPPOINGI Miki (Utsunomiya Univ.); SAHA Mihir Lal (Dhaka Univ.)

E-mail: sakai@cc.utsunomiya-u.ac.jp

#### 1. はじめに

メタン発酵法に磁気分離を適用した磁化メタン発酵(MMF)法は、微生物を高濃度に保持し、高い容積負荷での処理を可能とする。磁化活性汚泥(MAS)法と組み合わせて河川放流を可能な水質まで浄化できる高負荷対応の水処理プロセスを提案した。ベンチスケール実験により容積負荷  $2.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  (通常活性汚泥法の BOD 容積負荷  $0.5\text{--}1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  [1]) で COD 除去率 98% を得た。本方法は水処理施設の大幅なコンパクト化、曝気動力の削減に寄与しうる可能性がある。

有機性排水処理の方法である活性汚泥法は、排水を河川放流レベルまで処理可能な好気性処理法である。一方で施設占有面積の拡大、余剰汚泥処理の負担などの問題がある。また酸素供給のための曝気動力は水処理施設における消費電力の半分以上を占めるともいわれる。嫌気微生物を用いた水処理法であるメタン発酵法は、曝気が不要となる。メタン発酵法に用いられる消化汚泥は活性汚泥と同様にマグネタイトを添加するだけで磁気分離が可能となり、反応槽内に高濃度に保持することができる。メタン発酵法に磁気分離を適用した MMF 法は高い容積負荷に対応することができるほか、バイオガスも副生する。消化汚泥の増殖と死滅をバランスさせて汚泥の引抜きを大幅削減できると予想される。MMF 法の可能性を検証すると共に河川放流レベルまでの水処理を目指し MMF 法の処理水を MAS 及び CO 法で処理する高度処理も検討する。

#### 2. 方法

ベンチスケール実験装置を Fig. 1 に示す。流入する排水は  $2,000 \text{ mg-COD/L}$  の合成下水を調製し用いた。MMF 槽は容積 6 L であり、内部には水再生センターで採取した消化汚泥と同濃度のマグネタイトを加える。合成下水は反応槽内で処理され、流出部から処理水のみが流出する。汚泥は流出部に設置された回転磁石ドラム(直径 97 mm, 長さ 100 mm, 磁束密度 80 mT, 6 mm ピッチ多極プラスチック磁石)式の磁気分離装置により反応槽内に全量返送される。MMF からの処理水は中間槽へと送られる。容積は 1L であり還元性物質の除去を目的とした。中間槽からの流出水は MAS 槽へと送られる。容積は 5L, 研究室内で順養した活性汚泥と同濃度のマグネタイトを加える。MAS による処理を行った後、MMF 槽と同様に磁気分離で MAS と処理水に分離され、処理水は接触曝気(CO)槽へと送られる。CO 槽の容積はおよそ 2L, MAS 処理水のさらなる高度処理を目的とした。

#### 3. 結果及び考察

MMF 法では消化汚泥を  $27 \text{ g/L}$  (通常メタン発酵法の 2.7 倍) に高濃度化し、容積負荷  $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  での処理が可能であることが示されている[2]。容積負荷  $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 、約 450 日間の運転条件で約  $0.6 \text{ kg}$  の汚泥を引き抜いているが、活性汚泥法を適用した場合、汚泥転換率を 0.5 とすると  $8 \text{ kg}$  と予想されることから、1/13 以下へ大幅な削減を可能とする。

MMF からの流出水は COD が  $240 \text{ mg/L}$ 、黒く懸濁し、悪臭もあるため、河川放流を実現するために、MMF, MAS, CO 法を組み合わせる必要があった。処理試験の結果と従来法との比較を Table 1 に示す。MMF 法のみでは有機物除去性能が 91%であったのが、MMF+MAS 処理により 92%となった。さら

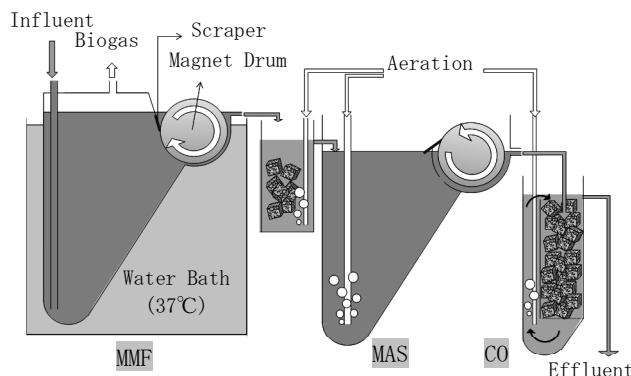


Fig. 1 Apparatus for Bench Scale Experiment

Table 1 Comparisons of MMF, MMF+MAS, MMF+MAS+CO and Other Conventional Process on COD Loading and COD Removal

	COD Loading [ $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ]	COD Removal [%]
MMF	6	91
MMF+MAS	3.3	92
MMF+MAS+CO	2.6	97
Methane Fermentation (Conventional Method)	1-3	60-90
Activated Sludge (Conventional Method)	0.5-1	95-

に CO 処理を行うことで 97%と高い除去性能が得られた。この時の容積負荷は標準的な活性汚泥法の適正負荷の 2.6 倍以上であり、高い容積負荷での処理が可能であった。本プロセスでは有機物の 91%を前段の MMF 法で処理を行うため、全体として曝気動力を削減することができる。また、MMF 法では処理過程において生成するバイオガスからエネルギー回収が可能である利点も挙げられる。

各プロセスの除去率に注目すると CO 法で全流入 COD の 5%を除去できているが、MAS 法では全流入 COD のわずか 1%であり、MAS 法は CO 法に比べ COD 除去への寄与が小さいことがわかる。MMF+CO 法での検証も必要と考えられた。

#### 4. おわりに

MMF, MAS, CO 法を組み合わせた処理では、通常の活性汚泥法の 2.6 倍以上となる容積負荷での運転を行い、97%と高い COD 除去率が得られた。最終的な処理水は我が国の一律排水基準を満たした。今後 MMF+CO 法での処理も検証したい。

#### 参考文献

- 公害防止の技術と法規編集委員会: 新・公害防止の技術と法規 2016 水質編, (2016) p.067
- S. Eda, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 96 (2018) p.62

## 磁気分離導入による高速下水汚泥消化プロセスの提案

### Proposal of high rate sewage sludge digestion process by introducing magnetic separation

王 悠琰, 酒井 保藏, 荷方 稔之(宇都宮大)

WANG Youyan, SAKAI Yasuzo, NIKAYA Toshiyuki(Utsunomiya Univ.)

E-mail:sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

#### 1. はじめに

下水処理に代表的な好気性処理法である活性汚泥法は、水の浄化と引き換えに、大量の汚泥廃棄物を排出する。下水汚泥は全産業廃棄物の約20%を占めるとされる。下水汚泥はメタン発酵法で半分程度に減らして(消化と呼ばれる)から脱水・焼却処理を行なっているが、本研究ではメタン発酵法の微生物に磁性粉を添加して磁気分離を導入した磁化メタン発酵法による高速処理を検討した。通常は10~20日とされるHRTを3.9日で汚泥処理を行なうことができた。

活性汚泥に磁性粉を添加すると磁気分離を適用でき、磁化活性汚泥法として研究を進められているが、メタン発酵に関与する微生物(消化汚泥)も、同様に、マグネタイトを添加して磁気分離でき、我々は磁化メタン発酵法と呼んでいる。磁化メタン発酵法を下水汚泥の消化プロセスに適用すると、投入される濃縮活性汚泥も磁気分離されるため、高濃度での消化処理が可能となる。処理水への消化汚泥の流出も磁気分離により大幅に抑制できると考えられる。

本研究では磁気分離による高濃度、高消化効率が可能となる磁化メタン発酵法で下水汚泥を処理するプロセスを提案し、処理性状を検証する。

#### 2. 実験方法

実験は Fig. 1 に示す装置で行った。投入汚泥は195日まで酢酸で、196日からスキムミルクで培養し、増殖分を用いた。磁性粉は反応槽内のMLVSSと同濃度になるように添加した。HRT3.9 d、発酵槽内の濃度、流出水のCOD<sub>Cr</sub>、TN、TOC、SS、濁度、pHと生成したガス量を測定した。

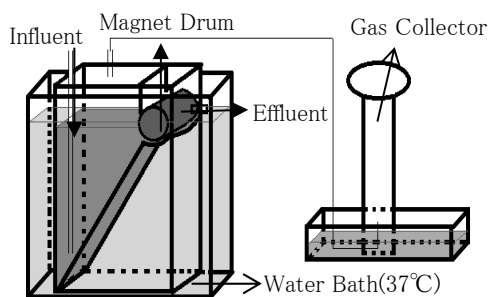


Fig. 1 Experimental Apparatus

#### 3. 結果と考察

反応槽汚泥濃度(MLVSS)変化を Fig. 2 に示した。MLVSS濃度は初期6 g/L程度から、約17 g/Lまで132日間でゆっくり増加した。この間、消化汚泥の引抜きは必要なかった。消化液と共に流失したSSを差し引いた投入した汚泥の累積MLVSS濃度は120 g/Lに達し、投入汚泥の約85%が消化されたことが示された。この時点で初期濃度6 g/Lまで汚泥を引き抜いても、投入した汚泥/引抜き汚泥比は約11であり、磁化メタン発酵法によって、馴養汚泥の余剰汚泥を1/11まで減量できた。汚泥の消化処理では、余剰汚泥については、1割~5割程度しか消化できないと言われており、磁化メタン発酵法は高速かつ高効率で汚泥の消化処理ができることが示された。

流出する消化液のCOD<sub>Cr</sub>変化を Fig. 3 に示した。流入の平均COD<sub>Cr</sub>は3.75 g/Lであった。消化液のCOD<sub>Cr</sub>は平均

0.29 g/L(磁性粉不足で微生物が漏れた166日の値を除く)消化液のろ過COD<sub>Cr</sub>は平均0.17 g/Lであった。消化されない有機SSが磁気分離されずに流出していることが示唆された。

TN、TOCの変化は Fig. 4 に示した。流出水のろ過TOCは平均20 mg/Lであった。流出水のTNは平均209 mg/Lであった。流入の汚泥濃度は平均3.6 g/Lであり、その5.8%は窒素で、それらがアンモニアとして流出したと考えられる。

バイオガスは理論発生量は分解した有機物から算出される理論生成量の40%であった。

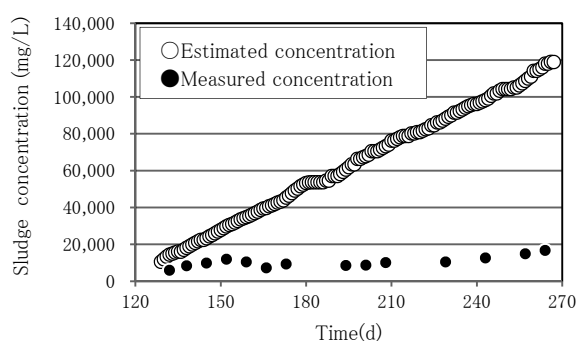


Fig. 2 The estimated and measured concentration of sludge in experimental

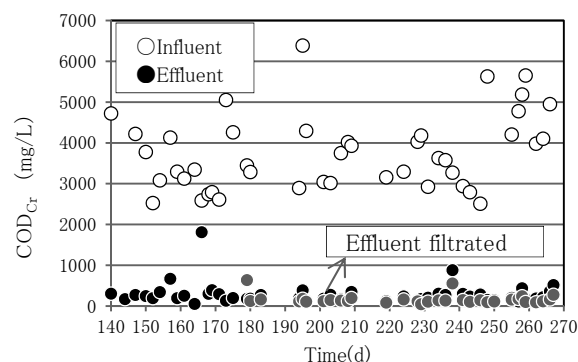


Fig. 3 The COD<sub>Cr</sub> of effluent

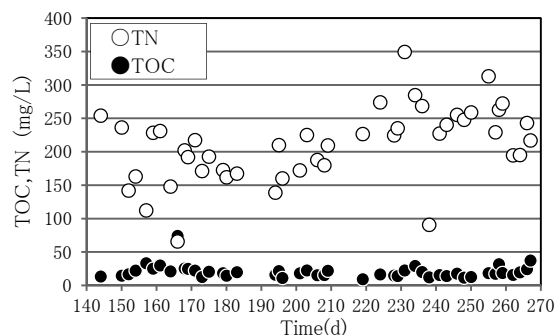


Fig. 4 The TOC and TN of effluent

#### 4. まとめ

磁化メタン発酵法は高効率で余剰汚泥処理ができることが示された。消化汚泥を引き抜いた場合でも、投入汚泥の90%以上を消化できることが示された。

# 食品工場での磁化活性汚泥法のフルスケール試験計画と実用化への戦略

## Design of full-scale test of magnetic activated sludge process at food factory and a strategy for the practical use

酒井 保藏, 大島 瑛美, 和久井 結太, 荷方 稔之 (宇都宮大)

SAKAI Yasuzo, OSHIMA Emi, WAKUI Yuta, NIKATA Toshiyuki (Utsunomiya Univ.);

NAKA Shoichi, TATESHIMA Masakatsu (NEOMAX Engineering)

E-mail: sakai@cc.utsunomiya-u.ac.jp

### 1. はじめに

磁化活性汚泥法(MAS 法)は 6 件のパイロットプラント試験実績がある。現在、約 400 m<sup>3</sup> 規模の曝気槽をもつ食品工場排水処理プラントでのフルスケール試験を計画している。そのため、先行してベンチスケール実験装置による MAS 法適応性試験を行ない良好な結果を得た。磁化活性汚泥法のフィージビリティを検証するため、今年度上半期にパイロットプラント試験、下半期にフルスケール試験を研究会方式で公開して行なう予定である。

磁気分離で活性汚泥法を運転する MAS 法は、バルキングや目詰まりなど固液分離トラブルが原理的に起こらず、維持管理の簡便な生物学的水処理法である。また、余剰汚泥引抜きを原則行わないため、汚泥処理のスペース、装置、手間、コストを削減できる利点を有する。しかしながら、磁気分離による生物学的水処理法は前例がなく、1990 年ごろに原理提案されて以降、実用化には長い時間を要している。

パイロットプラントは海外 1 件(界面活性剤排水)を含め、都市下水、養豚排水、酪農排水、調味料排水、弁当工場排水の 6 例があり、実排水を用いた MAS 法の適応性試験を行なうための標準ベンチスケール実験装置が開発されたのが 2008 年、可搬型パイロットプラントの提案が 2015 年、実用規模の磁気分離装置が試作されたのは 2017 年である。

MAS 法の実用化に必要な機材がほぼ整った現在、食品工場へのフルスケール試験を利用して、MAS 法の実用性を研究会方式で水処理企業や他の研究者と検証する。今回は、これまでの研究経過と今後の戦略について報告する。

### 2. 実験方法

MAS 法の実用化は次の 3 段階のステップによると予想される。1) ベンチスケール実験装置による現地の排水と活性汚泥を用いた適応性試験。2) パイロットプラントによるオンサイト適応性試験、3) 現場でのフルスケール試験・実機への導入。

今回のケースは、すでに活性汚泥法で運用されている食品工場への MAS 法導入である。対象となる活性汚泥プラントは上流側から、原水貯留槽、曝気槽(400m<sup>3</sup>)、沈殿槽からなる。原水 BOD は 1500~2000 mg/L、排水量は 60~130m<sup>3</sup>/日、放流水質は一律排水基準が適用されている。

2018 年 10 月から現地排水と活性汚泥を用いたベンチスケールでの適応性試験を開始した。ベンチスケール実験は曝気槽容積 5L、回転ドラム式磁気分離装置からなる MAS ベンチスケール実験装置を用いた(Fig. 1)。活性汚泥は実プラントの曝気槽から採取し、汚泥 MLVSS/マグネタイト濃度比 1:1 で適応性試験をスタートさせた。現地排水を1ヶ月に 1 回サンプリングし、冷蔵保存し、HRT:3.3 d で流入させた。BOD 容積負荷は 0.5~0.7kg/(m<sup>3</sup>・d)、余剰汚泥引抜きを行わずに 156 日間、MAS 法の適応性試験を行なった[1]。さらに、マグネタイトを安価なものに変えて、ベンチスケール適応性試験を再スタートさせ、現在、継続中である。

2019 年度の上半期に、オンサイトでの MAS 法パイロットプラント適応性試験、下半期にフルスケール試験を実施する予定である。パイロットプラントは 2.0 m φ × 3.0 m の円筒形 FRP 製タンクを用い、上部に標準大型磁気分離ユニット(Fig. 1)を設置して行なう予定である。パイロットスケールでの適応性試

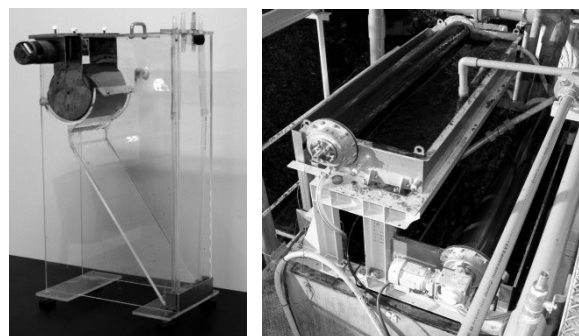


Fig.1 Photographs of a bench-scale experimental setup for MAS process(left side) and an unit of full-scale magnetic MAS separator(right side).

験をオンサイトで行なう他、現地の汚泥を用いた大型磁気分離ユニットの分離性能試験も行なう。

フルスケール試験では、パイロットプラントで用いた標準大型磁気分離装置を実プラントに移設し、曝気槽にマグネタイトを添加し MAS 法のフルスケール実験を行なう。初期濃度やマグネタイト添加量、汚泥引抜き量などはパイロット試験で検討した値を参考にする。

### 3. 結果と考察

ベンチスケール実験より、一律排水基準以下の処理水を得られることが示された[1]。しかしながら、食品製造プロセスからミョウバン由来の Al イオンが原水中に流入し、曝気槽で Al(OH)<sub>3</sub> として蓄積する可能性が示唆された。現行プロセスでは 15 m<sup>3</sup>/月程度の汚泥を引き抜いており、Al(OH)<sub>3</sub> の蓄積が抑制されている。MAS 法においても少量の汚泥を引き抜くことで Al(OH)<sub>3</sub> 蓄積を抑制し、同時に、曝気槽の汚泥平衡濃度(微生物の増殖と死滅がバランスする濃度)を下げ、磁気分離や曝気の負担を軽減できると考えられる。汚泥処理コストを抑えつつ、Al(OH)<sub>3</sub> の蓄積を抑制する工夫が検討項目となる。

パイロットスケール試験では、ベンチスケール実験で得られた最適条件でオンサイト試験を行なう。大型磁気分離装置はパイロットスケールの水量には過剰な性能を有するため磁石ドラムの一部を用いて実験を実施する予定である。また、この磁気分離装置は下水汚泥において 200 m<sup>3</sup>/d 程度の分離性能を示しており、現地の排水量 60~150 m<sup>3</sup>/d での分離性能をパイロットスケール試験で検討する予定である。現行の排水処理プラントは沈殿槽を有するため、1,000 mg/L 程度の MAS が漏出して、沈殿池で MAS の回収が可能であり、磁気分離/沈降分離のハイブリッド MAS 法の適用も検討できる。

この研究は電気学会「磁気力を活用した新たな環境技術のフィージビリティと超電導の役割調査専門委員会」の「磁気分離による水環境技術の社会実装研究会」として、水処理企業や大学研究者などに公開し、新技術である MAS 法のフィージビリティについて客観的に検証してゆきたいと考えている。

### 参考文献

1. Y. Wakui, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 98 (2019) 印刷中

## 磁化活性汚泥法における汚泥凝集性の磁気分離への影響

Influence of sludge flocculation to magnetic separation in magnetic activated sludge process

直井 裕哉, 酒井 保藏, 荷方 稔之, 六本木 美紀(宇都宮大); 中 聖一, 立嶋 正勝(NEOMAX エンジニアリング株)  
 NAOI Yuya, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki, ROPPOGI Miki (Utsunomiya Univ.);  
 NAKA Shoichi, TATESHIMA Masakatsu (NEOMAX Engineering)  
 E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

### 1. はじめに

活性汚泥に強磁性粉を添加し磁気分離する磁化活性汚泥法は、汚泥沈降性の影響を原理的に受けず運転管理が簡便化できる水処理法である。汚泥沈降性の影響を原理的に受けないため維持管理しやすい利点があるが、汚泥凝集性が低下すると汚泥の磁気分離性は悪化することがわかってきた。本研究では、磁気分離装置から流出する SS の除去法、汚泥の凝集性維持の手法について検討した。

磁化活性汚泥法は磁性粉をクローズドシステム化するため、余剰汚泥引抜きを行わない運転が適用される。水処理微生物は有機物を処理する過程で有機物の 5 割程度を同化して増殖するが、汚泥の全重量の 1/20 程度が毎日死滅分解(自己消化)するとされる。従って 1 日に流入する有機物量の 10 倍の微生物を反応槽に保持できれば、汚泥の増減が釣り合う。更に磁気分離は自己消化して発生する 5~10%の難分解性有機物を通過させるため、余剰汚泥引抜きなしでの運転を可能としている。

通常の活性汚泥法でも曝気槽を大きくして 10 倍程度の汚泥を保持すれば、類似条件となり、長時間曝気法として古くから知られているが、微生物の凝集性が低下し SS が増加するとされている。磁化活性汚泥法は磁性粉を保持できる凝集性微生物が反応槽に回収され増殖するため、凝集性低下の影響は抑制されているが、余剰汚泥引抜きなしで長期運転すると、流出水中の SS が増加する懸念が指摘されている。

本研究では実下水処理を 10 年以上継続してきた磁化活性汚泥法のパイロットプラントを用いて、流出する SS の後処理による処理水質の改善、磁化活性汚泥の凝集性改善の試みについて検討する。

### 2. 実験方法

実験は宇都宮市の水再生センターに設置した MAS 法パイロットプラント(8 m<sup>3</sup>)でおこなった。磁気分離装置は NEOMAX エンジニアリング製の回転ドラム型のものを使用した。ネオジム磁石をドラム(直径 16.5 cm, 長さ 150 cm)内に固定し、外側のドラムのみを回転させる二重構造となっている。汚泥が付着するドラム下部では 0.5 T, 汚泥を剥離するスクレーパー部分は 2 mT 以下の磁場に抑えられている。本実験では流量に対し磁気分離装置の性能が過剰なため磁気分離装置の一部を用いた。本実験で用いた磁化活性汚泥法のフロー図を Fig.1 に示す。流出 SS の後処理に沈殿槽を後段に設置した。60 日目までは汚泥返送の影響を調べるために沈殿槽で沈降した汚泥を曝気槽に全量返送した。60 日目以降は沈降した汚泥を返送せず廃棄し、同時に磁気分離装置流出水に凝集剤を加え沈殿槽に流入させ、沈殿槽流出水中の SS、リン酸濃度変化を調べた。凝集剤はポリ鉄を用い Fe : P=2 : 1 になるように加えた。

### 3. 結果と考察

Fig.2 に磁気分離装置流出水と沈殿槽流出水それぞれの SS と、沈殿槽による SS 除去率を示した。磁気分離装置流出水では一律排水基準をクリアしているだけであったが、沈殿槽を用いることで SS の約 7 割が除去され、宇都宮市の上乗せ

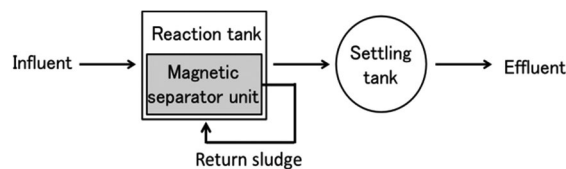


Fig.1 Magnetic activated sludge process flow

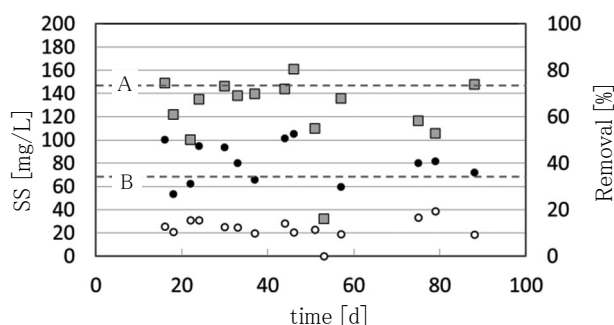


Fig.2 SS removal by settling tank. A: National minimum effluent standard, B: Utsunomiya city strict effluent standard, ■: Removal rate, ●: SS after magnetic separator, ○: SS after settling tank

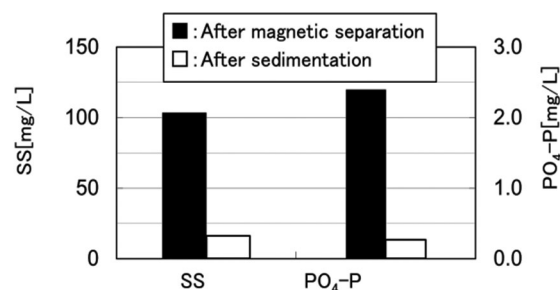


Fig.3 Removal of SS and PO<sub>4</sub>-P

排水基準 70 mg/L、東京都の上乗せ排水基準 60 mg/L をクリアした。

60 日目以降、凝集剤を用いた時の SS と PO<sub>4</sub>-P の除去結果を Fig.3 に示した。SS は約 8 割除去され、凝集剤添加で 1 割しか改善できなかったが、PO<sub>4</sub>-P は約 9 割除去できた。これはリン酸鉄として沈殿したと考えられる。沈殿はリンを多く含むため肥料製造のためのリン酸源として利用できる可能性があり凝集剤添加のコストを軽減できる。

曝気槽内の汚泥凝集性を改善することで、沈殿槽を後段に置かなくても磁気分離装置流出水 SS を減少させることができる。同時に汚泥フロックが粗大化することで磁気分離性の向上も期待できる。曝気槽に凝集剤を添加して凝集性を改善する実験を今後進めていく予定である。

### 4. まとめ

磁気分離後の処理水質を沈殿槽を用いることで改善でき、厳しい都市部の上乗せ排水基準に適用できることが示された。また、凝集剤を用いると SS とリンの同時除去も可能となった。

## 磁気保持脱水乾燥(MSDD)法による汚泥処理の検討 ～原理装置のシステム化～

### Consideration of sludge treatment by Magnetic Supported Dehydration-Drying (MSDD) method ～Systematization of principle device～

石井 将志, 酒井 保藏, 荷方 稔之 (宇都宮大)

ISHII Masashi, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki (Utsunomiya Univ.)

E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

#### 1. はじめに

磁気力を利用することで、瞬時に汚泥を磁石板表面に付着、濃縮させ、磁石板とともに水中から引き上げることができる。そのまま保持することで水のみが重力で落下し、汚泥を脱水、風乾することができる。我々はこの方法を磁気保持脱水乾燥(MSDD)法と名付け、10 cm 立方の空間に磁石板を5枚並べた装置を製作、原理実験を行った。汚泥の濃縮、乾燥時間や剥離方法などを調べ、原理装置のシステム化を検討した。

従来の沈降濃縮法は汚泥を0.5-2日かけて水分98%程度まで濃縮する。一方、MSDD法は汚泥を空中に取り出し、1分程度で水分95%程度まで濃縮する。さらにそのまま温風で乾燥することができる。近年、安価なマグネタイトが入手可能となり、マグネタイト添加コストが汚泥処理コスト削減効果により十分回収できる状況となった[1]。以上から、MSDD法が新たな汚泥処理技術として提案できると考えられた。しかし、実用的な装置を検討した場合、限られた空間に複数の磁石板を保持する必要がある。そのため本実験では10 cm立方の空間に磁石板を5枚並べ、そのシステム化を検討した。

#### 2. 実験方法

原理装置には1 Lの空間(10 cm × 10 cm × 10 cm)にゴム磁石板(10 cm × 10 cm × 0.2 cm,  $B_{max}$ : 80 mT)を5枚並べたものを使用した(Fig. 1)。汚泥は水再生センターの活性汚泥を馴養、濃縮し、所定濃度に磁性粉を加え用いた。ここに原理装置を3分間浸し、0.67-10 cm/sの速度で引き上げ、電子天秤で付着汚泥量を測定した。次に浸漬時間を0-60 sで変化させ、浸漬時間の影響を調べた。また、引き上げた原理装置を室温-76°Cの温風(4.1 m/s)で乾燥し、重量変化から乾燥時間、乾燥能力を算出した。

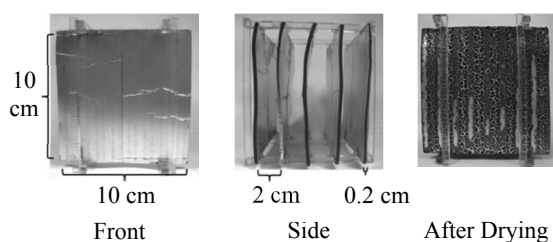


Fig. 1 Principle Device

#### 3. 結果と考察

##### 1) 引き上げ速度の影響

浸漬後の磁石板を0.67、1、10 cm/sの速度で引き上げたときの付着量は、17.3、17.3、14.5 gとなった。これは磁石を速く引き上げたときに、水流により磁石表面に付着していた汚泥が剥がれ落ちてしまうためと考えられた。よって磁石板は約1 cm/sで引き上げる必要がある。

##### 2) 浸漬時間の影響

1)から原理装置を1 cm/sで引き上げ、浸漬時間と汚泥付着量の関係をFig. 2に示した。汚泥付着量が飽和となる浸漬時間は、磁石板が1枚のときは20 s、5枚並べたときは、30 s必要であった。磁石板を2 cm間隔で多数並べた実用装置の場合も、浸漬時間は1分で十分と考えられた。

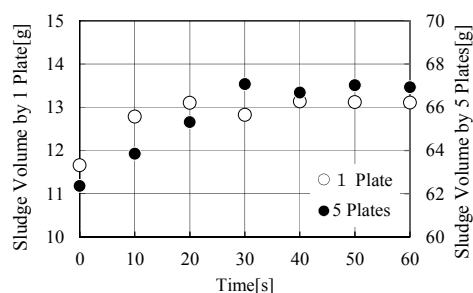


Fig. 2 Time Change of Sludge Volume

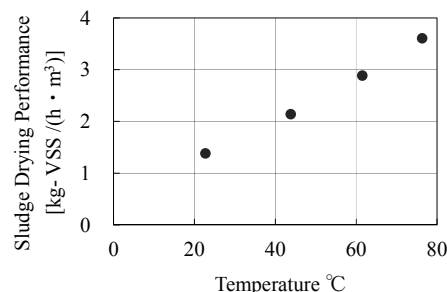


Fig. 3 Temperature Change of Sludge Drying performance

##### 3) 原理装置によるMSDD法の性能評価

引き上げ速度1 cm/s、浸漬時間30 sでMSDD法の性能を調査した。1 L(10 cm × 10 cm × 10 cm)の空間に引き上げられた汚泥は2.5 g-VSSであった。この汚泥に室温(湿度20%以下)、44°C、62°C、76°Cの温風を吹きかけると1.7h、1.3h、0.9h、0.6hで、水分2-9%の乾燥汚泥となった。乾燥汚泥は磁石表面にうろこ状に付着しており、容易に剥離することができた(Fig. 1)。これらの結果から乾燥能力を推算する。原理装置を1 m × 1 m × 1 mにスケールアップすると、磁石面積が1000倍となり、汚泥保持量は2.5 kg-VSS/m<sup>3</sup>、1時間当たりの乾燥能力は、Fig. 3に示すとおりとなった。76°Cの温風を用いた場合、汚泥乾燥能力は3.6 kg-VSS/(h·m<sup>3</sup>)となり、1 m<sup>3</sup>のMSDD装置を10 h/日運転することで、1日に3600 kg(水分99%、36 kg-VSS)の汚泥を水分10%以下の48 kgまで乾燥できる。

一方、従来法で脱水した場合(水分:80%)180 kgの脱水汚泥となる。よってMSDD法では汚泥を約1/4に減量できるため、汚泥処分費も約1/4となり、磁性粉のコストを相殺できるだけでなく、6割のコスト削減が期待できる。

##### 4. おわりに

磁気保持脱水乾燥(MSDD)法は、引き上げ速度1 cm/s、浸漬時間30 sのシステムで運転する必要がある。この条件における実験から、MSDD法がコンパクトかつ経済的な汚泥処理技術であると考えられた。

##### 参考文献

1. I. Masashi, et al.: Abst. of CSSJ Conference, Vol.96 (2018) p.60

## 磁化活性汚泥法と磁気保持乾燥法による余剰汚泥処理の軽減

### Reduction of excess sludge treatment by Magnetic Activated Sludge process and Magnetic Supported Dehydration-Drying method

小林 拓美, 酒井 保藏, 荷方 稔之 (宇都宮大学)

KOBAYASHI Takumi, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki (Utsunomiya Univ.)

E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

#### 1. はじめに

我々は水処理技術に磁気分離を適用して、技術革新を目指している。活性汚泥 (AS) 法に磁気分離を適用した磁化活性汚泥 (MAS) 法は、水処理に伴う汚泥の副生が 94%削減できる。さらに残りの 6%を磁気保持乾燥 (MSDD) 法によって、磁気力で濃縮・脱水して温風乾燥する、コンパクトかつ経済性に優れた汚泥処理法を提案する。この方法について、ベンチスケール実験で得られた結果により従来法との比較を行う。

MAS 法は磁気分離により曝気槽内の汚泥を高濃度化し、汚泥の増殖速度と自己消化による減少速度をバランスさせる。自己消化に伴う難分解性有機懸濁物質 (hard biodegradable-SS) は、磁気分離されず流出する。このように、磁気分離の選択分離性により、余剰汚泥引き抜きの必要が無く、余剰汚泥処理を軽減できる。一方で、h-SS の除去が課題の一つであった。そこで我々は、後段に沈澱池を用いることでこの課題を解決しようと考えた。

また沈澱池で除去した SS の処理に、MSDD 法を適用しようと考えた。従来の余剰汚泥処理では、沈降濃縮・脱水し、含水率約 80%で中間処理場に送られる。その後、乾燥・焼却が行われ最終処分場に送られる。MSDD 法では、磁気分離によって汚泥を濃縮したのち空気中に取り出す。その後送風によって乾燥するプロセスである。本方法はコンパクト性、経済性、省エネの面で、従来法より優れていることが原理実験でわかっている。

以上より本研究の目的は、ベンチスケール実験により、MAS 法と MSDD 法の組み合わせによる余剰汚泥処理の軽減効果を検討することである。

#### 2. 実験方法

MAS 装置は Fig.1 を用いた。磁石ドラムは、直径 10 cm、幅 10 cm、最大磁場 0.08 T のものを用いた。全期間で COD<sub>Cr</sub> 負荷は 1200 mg/(L・d) で行った。また、1~185 日までは COD<sub>Cr</sub> 濃度 300 mg/(L・d)、処理水量 20 L/d、186 日以降は濃度 4 倍、流量 1/4 で実験を行った。

MSDD 法による SS の処理に関しては、先行研究の結果をもとに計算を行った。SS を磁気シーディングするには凝集剤が必要である。このときリンの同時除去も行うため、凝集剤は理論量の 2 倍添加することとした。また、凝集汚泥:磁性粉の比は 1:0.2 と設定した。

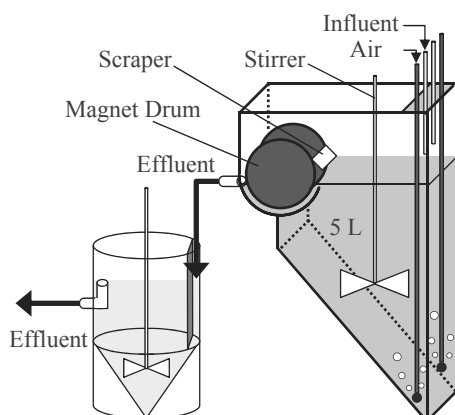


Fig.1 Apparatus for Bench Scale Experiment

#### 3. 結果と考察

##### (1) MAS 法による余剰汚泥処理の削減効果

MAS 法と従来 AS 法の余剰汚泥発生量を Fig.2 に示した。MAS 法の余剰汚泥発生量を処理水中の全 SS と考える。また AS 法の汚泥濃度は、標準的な 2000 mg/L、3000 mg/L と仮定した。この場合それぞれ 20 日間での余剰汚泥発生量は、7.2 g、6.3 g となった。MAS 法では 380 mg となり、94%余剰汚泥発生量を削減できた。また、SS 濃度は磁気分離後 10 mg/L であったが、そのうち 7 mg/L を沈澱槽で除去できた。

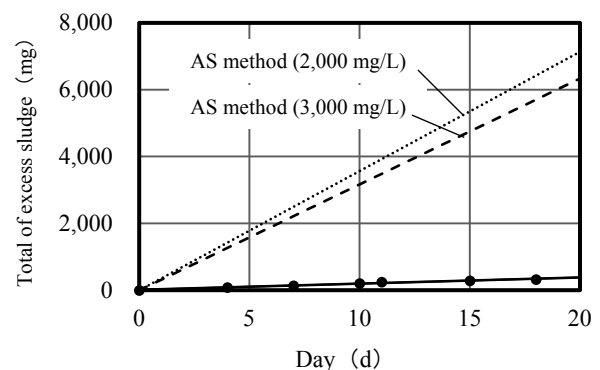


Fig.2 Total of Excess Sludge

##### (2) MSDD 法による余剰汚泥処理の削減効果

(1)の結果から、MAS 法と MSDD 法による余剰汚泥削減効果を処理水量 100 m<sup>3</sup>/d として計算した。沈澱 SS の濃度は 7 mg/L なので、乾燥重量で 0.7 kg/d となる。また、凝集剤の添加により Fe(OH)<sub>3</sub> が 3.3 kg/d と FePO<sub>4</sub> が 4.7 kg/d 発生する。以上より合計 8.7 kg/d が凝集汚泥として発生する。さらに含水率 10% より水分 1.2 kg/d を合わせた、合計 11.6 kg/d を最終処分場に送る。先行研究の結果、活性汚泥における乾燥速度は 1 m<sup>3</sup> の MSDD 装置を用いた時、23℃の送風で 1.38 kg/h であった。以上の結果から、1 m<sup>3</sup> の MSDD 装置で 23℃の送風により凝集汚泥を乾燥すると、6.3 h で処理できることが分かった。

以上の結果をもとに、Table.1 に従来法との比較を示した。本方法は従来法に比べ、汚泥量を約 1/3 に削減できる。また、脱水装置が不要なため、省スペース化も可能である。さらに、リンの同時除去も可能になる。

Table.1 Comparison with conventional method

	Sludge [t/y]	Dehydration Apparatus	Phosphorus Removal
MAS + MSDD	4.3	×	○
Conventional method	12.3	○	×

#### 4. まとめ

MAS 法と MSDD 法により余剰汚泥処理負担が軽減できることが示唆され、リンの同時除去も可能になった。

# 磁気分離法による火力発電所ボイラー給水中の酸化鉄スケール除去 ～実機へ向けた検討～

Removal of Iron Oxide Scale with Magnetic Separation from Boiler Feed-water in Thermal Power Plant  
- Conceptual design of practical systems -

岡田秀彦, 廣田憲之 (物材); 秋山庸子 (大阪大学); 三島史人, 西嶋茂宏 (福井工業大学);  
松浦英樹, 難波正徳 ((株)四国総合研究所); 関根智一 (荏原工業洗浄(株))

Hidehiko OKADA, Noriyuki HIROTA (NIMS); Yoko AKIYAMA (Osaka Univ.);

Fumihito MISHIMA, Shigehiro NISHIJIMA (Fukui Univ. Tech.);

Hideki MATSUURA, Seitoku NAMBA (Shikoku Research Inst. Inc.); Tomokazu SEKINE (Ebara Ind. Cleaning Co. Ltd.)

E-mail: OKADA.hidehiko@nims.go.jp

## 1. はじめに

本研究では火力発電所のボイラーや配管の圧力損失の増加やボイラー伝熱管の熱伝導率の低下等の原因である給水内の鉄酸化物スケールを削減することで、燃料の消費を減らし二酸化炭素の排出量を削減することを目的としている。そのための鉄酸化物スケールを除去する高勾配磁気分離装置の開発を行っている。

すでに、AVT 処理を行っている発電所のボイラー給水やスケールの分析などから、装置の設置個所や要求される条件などは得られており[1]、その磁気分離装置は以下の性能を満たす必要がある。

- ① 200℃ 20気圧で有効に動作すること
- ② 捕獲率90～95%以上
- ③ 洗浄間隔が長い
- ④ 圧力損失が小さい

①についてはすでに小規模な実験ではあるが、高温で磁気分離が可能であることは確認している[2]。さらに、室温実験で、②～④の条件を満たす装置の構造等の知見を得ることができ、先の発表[3]では実験結果から①の条件下での分離性能評価を行い、超電導マグネットを使った磁気分離が有効であることを示した。

本発表では、実機での洗浄間隔の延長の可能性とそれを実現する装置の性能評価を行ったのでその結果を報告する。

## 2. 大型化の検討

600MW 出力の火力発電所の高温高压ヒータードレインへの設置を想定し検討を行った。そのための主な条件を表 1 にまとめた。

Table 1 Conditions for estimations

Velocity of flow	Concentration of Fe	Diameter of matrix	Temperature
0.6 m/s	10 ppb	0.55 m	200℃

洗浄間隔の延長のためには、装置内の捕獲スケールの保持可能量を増やす必要がある。そのためには内部のマトリックス(本装置では金網)を増量し装置を大きくする必要がある。本研究では大型マグネットを仮定して装置の規模、性能などを磁気分離装置のモデルを使って推定した。但し、捕獲率と総捕獲量に関しては以下の仮定を用いている。

- ① 初期捕獲率は高温条件でシミュレーションにより求める
- ② 大型化しても単位面積当たりの総捕獲量は室温実験のデータを用いる

超電導マグネットの広い範囲に強磁場出せるという特徴を生かして、コイルから離れた弱い磁場の範囲までマトリックスを詰める構造とした。マトリックスは12枚一組の強磁性体の金網を40組設置した。長さは約2mとなり、想定したマグネットでは、その金網は1.5～0.1Tの磁場内に置かれる。

以上の条件で磁気分離装置の性能などを評価した。

## 3. 結果

得られた破過曲線の例を図1に示す。横軸は、経過日数である。実線は捕獲率、破線は平均捕獲率、点線は捕獲量を示す。平均捕獲率はその時までの全流入量に対する全捕獲量の比である。捕獲率は約8か月で低下し始める。その時点でスケールを約40kg(マグネタイト換算)捕獲している。

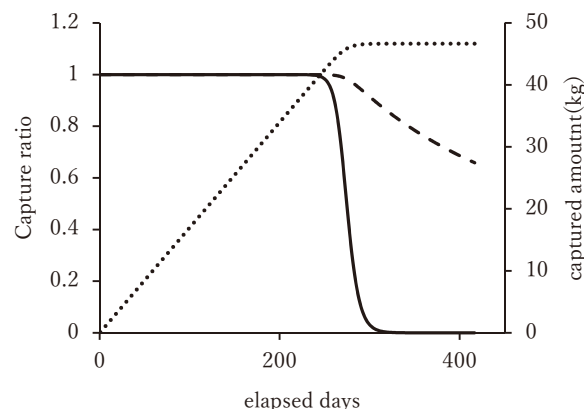


Fig. 1 Solid line shows capture ratio, dashed line average capture ratio and dotted line captured amount.

## 4. まとめ

火力発電所に設置する実機を想定し、室温実験とシミュレーションを使ったモデルで、その性能の評価と装置の規模を検討した。この結果から、洗浄間隔を数か月に延長する事が可能であり、火力発電所のスケール除去を目的とする超電導マグネット用いた磁気分離装置は性能的にも装置的にも十分に実用化可能である事が分かった。

本研究の一部は日本科学技術振興機構 (JST) の先端的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」(JPMJAL1304)の助成を受けて実施したものである。

## 参考文献

1. Hidehiko Okada, et al.: IEEE Trans. Appl. Super., 26 3 (2016) 3701505
2. Nobumi Mizuno, et al.: IEEE Trans. Appl. Super. 25 3(2015) 3700804
3. 岡田秀彦 他、2018年春季第98回低温工学・超電導学会研究発表会、1D-p02

# 磁気分離法による火力発電所ボイラー給水中の酸化鉄スケール除去 ～大規模実験～

## Removal of Iron Oxide Scale with Magnetic Separation from Boiler Feed-water in Thermal Power Plant - Large Scale Experiment-

秋山 庸子(大阪大学);山本 隼也(元 大阪大学);三島 史人, 西嶋 茂宏(福井工業大学);  
岡田 秀彦, 廣田 憲之(物質・材料研究機構);松浦 英樹, 難波 正徳 ((株)四国総合研究所); 関根 智一 (荏原工業洗浄(株))  
Yoko AKIYAMA (Osaka Univ.); Junya YAMAMOTO (ex-Osaka Univ.);  
Fumihito MISHIMA, Shigehiro NISHIJIMA (Fukui Univ. Tech.); Hidehiko OKADA, Noriyuki HIROTA (NIMS);  
Hideki MATSUURA, Seitoku NAMBA (Shikoku Research Inst. Inc.); Tomokazu SEKINE (Ebara Ind. Cleaning Co. Ltd.)  
E-mail: yoko-ak@see.eng.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

火力発電所のボイラー給水系では、配管の腐食によって酸化鉄スケールが発生し、発電効率低下の一因となっている。本研究では全揮発性物質処理(AVT)を採用している火力発電所で発生する強磁性スケールを対象とした高勾配磁気分離法(HGMS)を用いたシステムについて検討した。HGMSでは定期的な磁気フィルターの洗浄が課題であったが、我々は、火力発電所の連続稼働中はフィルター洗浄を行わず、その間に生成するスケールを2年間捕捉・保持し続けることができる、大容量の磁気分離システムを提案した。

本研究では、火力発電所の給水系及び化学洗浄系統への高勾配磁気分離装置導入に向け、小規模体系(フィルター直径 50 mm)と大規模体系(フィルター直径 300 mm)で磁気分離実験を行った結果を比較することで、大規模 HGMS 装置の実現可能性と、スケールアップに伴う影響を検証した。ここでは実用の 1/7 スケール(目標スケール処理量 25 kg, 水処理速度 75 t/h)の大規模実験について報告する。

### 2. 実験方法

実験体系を図 1 に示す。本体系は室温ボア径 400 mm の超電導磁石、大型電動ポンプ(最大出力 150 t/h, 75 kW)、エゼクター、及び給水タンク、排水タンク(最大容量 各 12 m<sup>3</sup>)で構成される。給水タンクの水をポンプによって送水し、その一部をエゼクターに流入させ、マグネタイト(模擬スケール)を導入して懸濁液とした。超電導磁石ボア内に設置された磁気フィルターによって懸濁液を磁気分離し、排水タンクに流入させた。実験は小規模実験で適切な条件であることが示された、最大中心磁束密度 0.3T の付近の 0.1, 0.3, 0.5, 0.75T で行った。流速は火力発電所の導入箇所に合わせて 0.3 m/s(処理速度 75 t/h)とし、25 kg のマグネタイトを投入し(懸濁液濃度約 4000 ppm)、5 分間の磁気分離を行った。詳細な実験条件を Table 1,2 に示す。

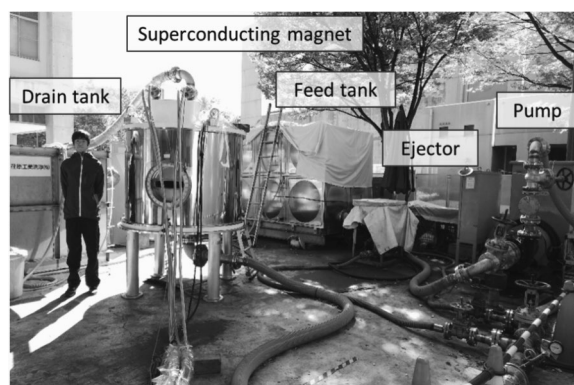


Fig.1 Whole view of experimental apparatus of large-scale experiment.

Table 1 Experimental conditions of large-scale experiment.

Flow velocity	0.3 m/s (75 t/h)
Maximum center magnetic flux density	0.1, 0.3, 0.5, 0.75 T
Average particle diameter of magnetite particles	8.8 μm
Input amount of magnetite	25 kg
Experimental time	5 min

Table 2 Filter conditions of large-scale experiment.

Filter material	Magnestain®
Filter diameter	300 mm
Wire diameter	1 mm
Mesh opening	3.2 mm
Number of filter sheets	150 (15 sheets × 10stacks)

### 3. 結果と考察

大規模実験で得た 1 スタック(フィルター15 枚)当たりの平均捕捉量と、直径 50 mm の同じフィルターを用いた小規模実験の捕捉量から推定した捕捉量を比較した。ここで推定捕捉量とは、小規模実験の捕捉量から、粒子の捕捉量がフィルターの断面積に比例すると仮定して算出したものである。実験値と推定値はエラーバーの範囲内でおおよそ一致し、粒子の捕捉がフィルターの断面積に比例することが示された。実験値がわずかに推定値を下回っていたが、これはフィルターと配管内壁との隙間から流出した粒子の影響であると考えられる。

また 1 スタックあたりの捕捉量は 0.3T 以上ではほぼ一定となり、その捕捉容量はおおよそ 2.5kg であった。今回実験を行った 10 スタックから成るフィルターユニット全体での総捕捉量は約 25 kg となり、これは実用に向けた目標捕捉量とほぼ一致する。また実規模(フィルター直径 800 mm を想定)での捕捉に向けて問題となる、フィルターの閉塞、捕捉率の著しい低下、不均一な捕捉などは、本実験条件の範囲では確認されなかった。

以上の結果から、実規模磁気分離装置を設計する上で、粒子の捕捉量をフィルターの断面積比から推定することができる可能性が示された。また今回大規模実験を行った体系では、システム上の大きな問題なく、目標とするスケール捕捉量を達成可能であることが実証された。

本研究の一部は日本科学技術振興機構(JST)の先端的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」(JPMJAL1304)の助成を受けて実施したものである。



# 磁気分離法による火力発電所ボイラー給水中の酸化鉄スケール除去 ～酸素処理スケールの凝集状態の解析～

## Removal of Iron Oxide Scale with Magnetic Separation from Boiler Feed-water in Thermal Power Plant – Aggregation State of OT Scale –

秋山 巧士郎, 秋山 庸子(大阪大学); 平松 まみ(元 大阪大学); 三島 史人, 西嶋 茂宏(福井工業大学); 岡田 秀彦, 廣田 憲之(物質・材料研究機構); 山地 豪, 松浦 英樹, 難波 正徳((株)四国総合研究所); 関根 智一(荏原工業洗浄(株))  
AKIYAMA Koshiro, AKIYAMA Yoko (Osaka Univ.); HIRAMATSU Mami (ex-Osaka Univ.); MISHIMA Fumihito, NISHIJIMA Shigehiro (Fukui Univ. Tech.); OKADA Hidehiko, HIROTA Noriyuki (NIMS); YAMAJI Tsuyoshi, MATSUURA Hideki, NAMBA Seitoku (Shikoku Research Inst. Inc.); SEKINE Tomokazu (Ebara Ind. Cleaning Co. Ltd.)  
E-mail: akiyama@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

火力発電所ボイラー給水系では、配管の腐食によって生じるスケールによって発電効率の低下が引き起こされる。そこで、高勾配磁気分離法(High Gradient Magnetic Separation, HGMS)による給水中のスケールの除去を検討した。本研究では、酸素処理(Oxygen Treatment, OT)適用の火力発電所から生じるスケールの凝集状態の解析を行った。生じるスケールは、常磁性粒子と強磁性粒子の混合物であり、その凝集状態は同種の粒子がそれぞれ別々に凝集している同種凝集か、異種の粒子が互いに凝集している異種凝集、あるいは粒子間に化学結合が生じて複合化している状態が考えられるが、そのいずれかであるかは明らかになっていない。

本研究では、給水系の中でスケール濃度が高く、かつスケールの磁化が高い低圧給水加熱器ドレンに磁気分離装置を設置することを想定している。この低圧給水加熱器ドレンから採取されたスケールと、その組成を模擬した鉄系酸化物の混合物を用いて、超電導バルク磁石による小規模磁気分離実験を行い、これらの結果を比較することで採取スケールの凝集状態について推察した。

### 2. 実験方法

模擬スケールは、分析した採取スケールの組成を基に、市販の試料を常温にて混合して調製した。磁場発生源には超電導バルク磁石を使用した。試料懸濁液は定量送液ポンプで送液し、超電導バルク磁石の上に設置した磁気フィルターを通過させた。実験条件を Table1 に示す。流速(87 mm/s)は、試料中の常磁性粒子が計算上は全く捕捉されない流速条件に設定した。磁気分離後、フィルターに捕捉された粒子とフィルターを通過した粒子の重量をそれぞれ測定して、捕捉率を算出した。また、それぞれの組成をメスbauer分光法によって分析した。

### 3. 結果と考察

磁気分離による粒子の捕捉率とその組成を Fig.1 に示す。模擬スケール、採取スケールともに常磁性粒子のうちそれぞれ 45.3%, 40.3%の粒子の捕捉が確認された。常磁性粒子が計算上は捕捉されない流速条件に関わらず、常磁性粒子が捕捉された要因としては、部分的に常磁性粒子と強磁性粒子の異種凝集が生じているためであると考えられる。また、採取スケールと模擬スケールの捕捉率が同様の傾向を示したことから、採取スケールは模擬スケールとほぼ同じ凝集状態であり、高温高圧条件下での異種粒子の複合化や異種凝集の促進は起こっていないことが確認された。

また模擬スケール、採取スケールともに常磁性粒子の全てを捕捉できなかったことから、OT スケールには常磁性粒子と強磁性粒子の同種凝集と異種凝集の両方が存在することが確認された。よって、HGMS で OT スケールを捕捉する際に

は、同種凝集している常磁性粒子も捕捉可能な装置設計が必要となることが明らかになった。そのためには、高磁場、高磁場勾配が必要となる。しかし、高磁場においては、強磁性粒子やそれを含む凝集粒子はフィルターへの過剰捕捉による閉塞が生じる可能性も示されている[1]。そのため、強磁性粒子および異種凝集粒子を閉塞が生じることなく捕捉し、かつ常磁性粒子も捕捉可能な装置設計が必要であることが示された。また模擬スケールによって採取スケールの捕捉を再現することが可能であることが示されたため、模擬スケールをモデル物質として用いることができることが示された。

Table1 Experimental condition of small-size magnetic separation experiment.

Flow velocity	87 mm/s
Flow path diameter	6 mm
Applied magnetic flux density (at Center of bottom surface of flow path)	3.1 T
Suspension concentration	100 ppm
Volume of feed-water	1 L
Filter shape	Wavy mesh
Filter material	SUS430 (Ferromagnetic)
Filter wire diameter	0.1 mm
Filter weight	1 g
Filter filling rate	23.6 %

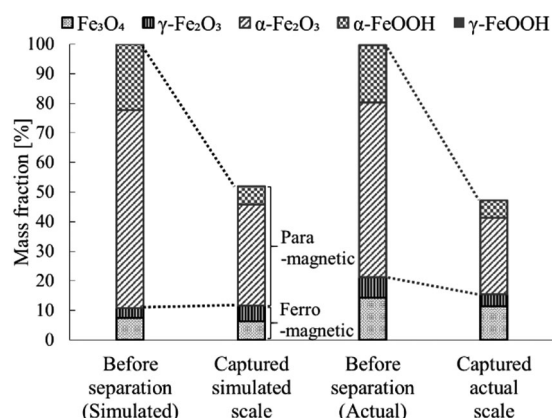


Fig.1 The separation efficiency and the composition of captured particles.

本研究の一部は日本科学技術振興機構(JST)の先進的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」(JPMJAL1304)の助成を受けて実施したものである。

### 参考文献

- [1] J. Yamamoto, et al.: Progress in Superconductivity and Cryogenics, vol.20, No.2(2018), p.6-10

# 磁気分離法によるエマルジョン排水の解乳化に関する研究

## Study on Demulsification of Emulsion Utilizing Magnetic Separation

須藤 稜平, 秋山 庸子(大阪大学)  
 SUDO Ryohei, AKIYAMA Yoko (Osaka University)  
 E-mail: sudo@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

工業用に使用される淡水のうち、16.3%が製品処理用・洗浄用に使用されている[1]。これは使用後、洗浄排水として排出される。洗浄排水は、油の微粒子が洗浄剤の主成分である界面活性剤に取り囲まれることで、排水中に安定に分散している乳化状態(エマルジョン)にある(Fig. 1)。エマルジョン排水から油分を除去するためには、エマルジョン状態を積極的に破壊する解乳化が有効である。そこで、本研究では再生利用可能な疎水性吸着剤である活性炭に磁性を付与した磁性活性炭(Magnetic Activated Carbon, MAC)により解乳化を行い、磁気力によってMACを回収することで、スラッジの少ないエマルジョン排水中の油分の除去法を検討した。

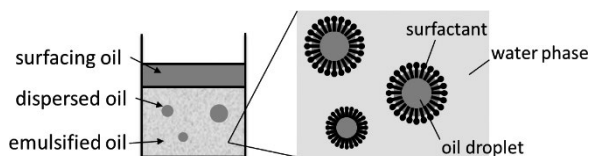


Fig. 1. State of oil in washing wastewater

### 2. 実験方法

本研究ではシクロヘキサンを油相とするエマルジョン模擬排水を排水のモデルとして用いた。まず、シクロヘキサンに界面活性剤(スパン 60)を添加し、超音波を照射することで溶解させた。次に蒸留水を添加し、ホモジナイザ(Heidolph 製)を用いて 20000 rpm で 1 分間攪拌することで、エマルジョン模擬排水を調製した。本実験では油分濃度がそれぞれ 10 mg/L, 20 mg/L の 2 種類の模擬排水を作成した。模擬排水に対し、あらかじめ 115°C で 3 時間乾燥させることで吸着物質を脱離させた MAC (MS エンジニアリング製)を添加し、攪拌翼を用いて攪拌速度 400 rpm、攪拌時間 60 分間の条件で攪拌して、MAC と油滴を接触させることで解乳化を行った。解乳化後、排水下部からハルパツハ磁石(NEOMAX エンジニアリング製)を用いて磁場を印加し、MAC を磁気分離した。この一連の処理における MAC の添加量を変化させて、処理前後の全有機炭素量(Total Organic Carbon, TOC)を測定し、MAC による油分除去の評価を行った。

### 3. 結果と考察

MAC の添加量を変化させた場合の処理後の TOC の推移を Fig. 2 に示す。ここで、処理前の TOC は油分濃度 10 mg/L の模擬排水については 1100 mg/L、油分濃度 20 mg/L の排水については 4500 mg/L 程度であった。油分濃度 10 mg/L の模擬排水は MAC と接触させることにより、環境省の水質汚濁防止法に定められている、工場排水に対する一律排水基準 COD 160 mg/L を TOC に換算[2]した 120 mg/L だけでなく、地方自治体が定めている、より厳しい基準値である上乗せ基準(TOC 換算で 7.5 mg/L 程度)も下回った。しかし、油分濃度 20 mg/L の模擬排水は、MAC の添加量が 1 g/L を超えると、一律排水基準を下回ったが、それ以上添加しても油分濃度が低下しなくなり、上乗せ基準を下回ることではできなかった。油分濃度が高い場合、一度に過剰量の MAC を添加しても、MAC の細孔の口が油滴によって、一様に埋められてしまうこ

とや、MAC の凝集が起こることによって油分濃度が低下しなかったと考えられる。以上のことから、高濃度のエマルジョン排水に対して、MAC による油分の除去を行う場合、Fig. 3 に示すような、二段階の処理システムが適していると考えられる。第一処理槽においては、高濃度の排水が流入するため、MAC の油吸着量が大きくなり、MAC は浮上油とともに回収される。ここで回収された MAC は、再生処理を行う必要がある。第二処理槽においては、流入する排水の濃度が低いため、MAC の油吸着量が小さいと考えられる。よって、MAC を磁気分離により回収し、高濃度の排水が流入する第一処理槽にそのまま返送することで、少ない MAC の添加量で油分濃度を低減が見込まれる。

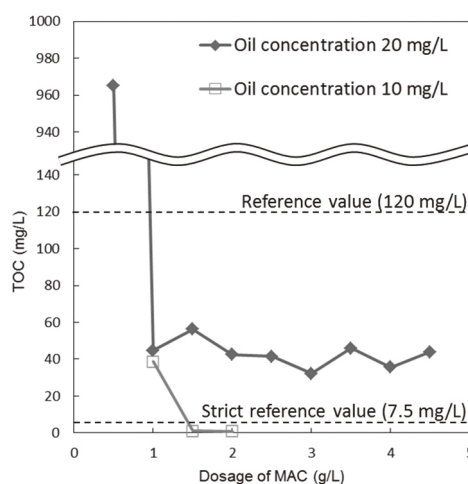


Fig. 2. Effect of MAC dosage on the residual oil concentration

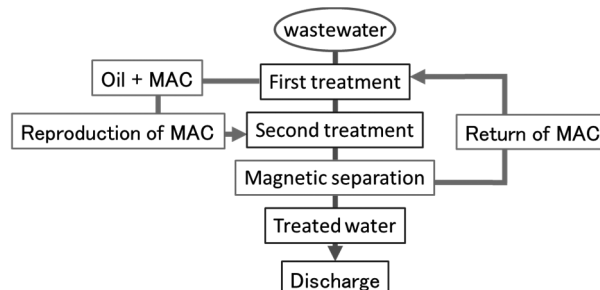


Fig. 3. System of emulsion wastewater treatment by MAC

### 4. まとめ

本研究ではシクロヘキサンを油相とした 2 種類のエマルジョン模擬排水に対し、MAC を接触させることで解乳化を行った。また、外部磁場を排水下部から印加することで MAC の磁気分離に成功した。今後は MAC の回収、再生を含めた排水処理システム全体の設計を行う必要がある。

### 参考文献

- 経済産業省、平成 26 年工業統計表「用地・用水編」
- 平川周作, 清水信彦, 堀就英, 鳥羽峰樹, 有機物指標と無機イオン成分を用いた廃棄物最終処分場関連水の特性評価, 環境化学, 27 巻 2 号 2017 年 p.23-28

# 泥水中における重金属イオンの微視的動態に関する研究

## Study on Microscopic Dynamics of Heavy Metal Ions in Muddy Water

小西 佑典, 秋山 庸子(阪大)

KONISHI Yusuke, AKIYAMA Yoko (Osaka University)

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

### 1. はじめに

東京五輪やリニア中央新幹線の開通等に関連する大規模工事により、自然由来の重金属によって汚染された土壌を含む水(泥水)が大量に発生すると予測されている。本研究では、重金属イオンを吸着しやすい土壌中の微小鉱物に着目し、汚染土壌を含む泥水の pH を調整することで、汚染土壌中に元来含まれる特定の微小鉱物に重金属イオンを吸着させ、磁気分離によって除去する、新たな泥水浄化手法を検討している。ここでは、基礎的検討として、土壌中の各微小鉱物への重金属イオンの吸着量と pH 依存性について評価した。

### 2. 提案する手法

本研究で提案する泥水浄化手法のフロー図を Fig.1 に示す。重金属イオンは土壌中の微小鉱物に吸着しやすいため、まず湿式分級によって汚染濃度の低い礫や砂を分離する。残った微小鉱物を含む汚染泥水に対して pH 調整を行うことで、鉱物表面の状態を変化させ、常磁性体の鉱物のみ、あるいは反磁性体の鉱物だけに重金属イオンを吸着させる。その後、超電導磁石を用いて、汚染泥水を常磁性体と反磁性体に分離する。この手法の実現のためには、重金属イオンの微小鉱物への吸着挙動を明らかにする必要がある。そこで本研究では、常磁性体・反磁性体への重金属イオンの吸着量や、その pH 依存性を評価した。

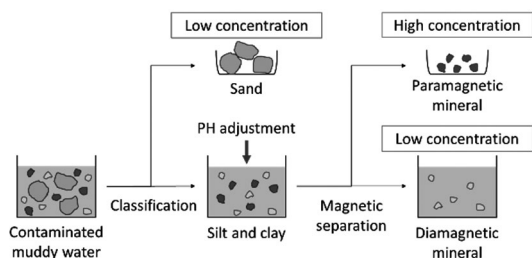


Fig.1 The method of heavy metal removal proposed in this study.

### 3. 実験方法

本研究では、自然由来の重金属として泥水からの検出事例の多い、カドミウムとヒ素を対象とした。10 ppm の Cd 溶液および As 溶液を各 100 mL 調製し、硝酸またはアンモニウム水溶液を添加して pH 調整を行い、所定量の微小鉱物を添加した。微小鉱物の種類を Table 1 にまとめる。本実験では、1:1 型粘土鉱物としてカオリナイト、2:1 型粘土鉱物としてバーミキュライト、酸化鉄としてヘマタイトを、それぞれの代表的な鉱物として添加した。その後、24 時間振とうさせ、0.45  $\mu\text{m}$  のメンブレンフィルターで吸引濾過したのち、濾液中の Cd 濃度および As 濃度を ICP 発光分光分析装置(ICP-AES)によって測定した。

Table 1 Main types of micro minerals.

Main types of micro minerals	Magnetic properties	Main micro minerals
1:1 type clay minerals	Diamagnetic	Kaolinite, Halloysite
2:1 type clay minerals	Paramagnetic	Vermiculite, Illite
Iron oxide, Iron hydroxide	Paramagnetic	Hematite, Goethite

### 4. 実験結果

各微小鉱物 1 g 当たりのカドミウム吸着量(mg/g)と pH の関係を Fig.2 に示す。高 pH 側で、バーミキュライトへの吸着量が他の鉱物と比較して顕著に大きいことが確認された。バーミキュライト等の 2:1 型粘土鉱物は、結晶構造中の陽イオンの一部が価数の小さい別の陽イオンに置換されているため、永久電荷と呼ばれる負の電荷をもつことが知られている。そのため、陽イオン(Cd<sup>2+</sup>)として存在するカドミウムイオンを多く吸着したと推察される。

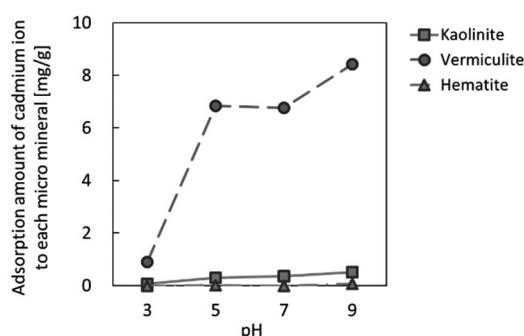


Fig.2 Adsorption amount of cadmium ion as a function of pH.

一方、各微小鉱物 1 g 当たりのヒ素吸着量(mg/g)と pH の関係を Fig.3 に示す。低 pH 側で、ヘマタイトの吸着量が他の鉱物と比較して大きいことが確認された。微小鉱物は、周囲の pH に依存して表面電荷が正負に変化する変異電荷をもつ。ヘマタイトの等電点(pH=7)は層状ケイ酸塩鉱物の等電点(pH=2)よりも高いため、中性付近より酸性側では、ヘマタイト表面は正に帯電しやすく、陰イオン(H<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub><sup>-</sup>等)として存在するヒ素イオンを多く吸着したと推察される。

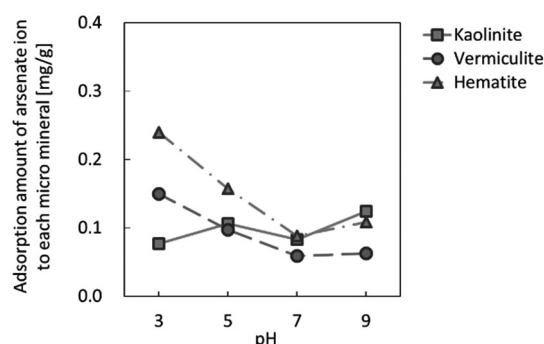


Fig.3 Adsorption amount of arsenate ion as a function of pH.

### 5. まとめ

本研究では、カドミウムとヒ素を対象として微小鉱物への吸着実験を行い、各微小鉱物への吸着量と pH 依存性について評価した。その結果、カドミウムは高 pH 側で、常磁性体である 2:1 型粘土鉱物への吸着量が大きく、ヒ素は低 pH 側で、常磁性体である酸化鉄・水酸化鉄への吸着量が大きいことが明らかになった。今後は、2 種類以上の重金属が共存している場合での吸着量への影響や、分離に適切な pH について検討する。

# 流体制御による磁気分離法の高度化

## Examination of advanced magnetic separation method using fluid control

三島史人, 島先優弥, 西嶋茂宏(福井工業大学)

Mishima FUMIHIITO, Yuuya SHIMASAKI and Shigehiro NISHIJIMA (Fukui University of Technology)

E-mail: f-mishim@fukui-ut.ac.jp

### 1. はじめに

磁気分離法は乾式・湿式条件下で、水や土壌の環境浄化や有価物回収などに利用されている。強磁性体を分離対象とした場合においては、高勾配磁場を形成することで永久磁石を利用しても十分な分離能力を持つ。しかしながら、常磁性物質の分離においては超電導磁石の強力な磁場を用いることが必要とされており、さらには常磁性物質の高速大量処理において高効率な分離をすることが課題となっている。従来の磁気分離法は主として、分離対象物の懸濁媒体(作業媒体)の流れによるドラッグ力と磁気力との力のバランスを制御して分離力としているが、本研究では常磁性物質の高速大量処理における高効率化をめざし、淘汰管を用い鉛直上向きの流れ条件下で分離対象物の重力とドラッグ力のつり合いを利用し、ドラッグ力の影響を極力抑え、直接的に磁気力が分離対象物に作用する磁気分離法の高度化を図った。

本発表では、計算と実験によりこれらの検討を行った結果について報告する。

### 2. 淘汰管の原理

淘汰管は粒子の沈降速度と装置下部から流入した懸濁液の上昇速度との関係により、微粒子を粒径により選別する装置である。淘汰管内の粒子には、流体によるドラッグ力、浮力と重力が働く。この粒子に作用する合力を式[1]に示す。また、この式から流体の速度 $v_f$ を0としたときに導かれる粒子の沈降終端速度 $v_s$ を式[2]に示す。

$$F_D = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_p - \rho_f)g - 6\pi\eta r(v_f - v_p) \quad [1]$$

$$v_s = \frac{2r^2(\rho_p - \rho_f)g}{9\eta} \quad [2]$$

ここで、 $r$ は粒子半径[m]、 $\rho_p$ は粒子の密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $\rho_f$ は流体の密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $\eta$ は流体の粘度[Pa・s]、 $v_f$ は流体の速度[m/s]、 $v_p$ は粒子の速度[m/s]を示す。

この粒子の落下終端速度 $v_s$ が、流体の上昇速度 $v_f$ よりも大きいまたは一致する場合、粒子は流体の流れに逆らって、淘汰管で停滞または沈降して、装置内に残留する。また、この粒子の落下終端速度 $v_s$ が、流体の上昇速度 $v_f$ よりも小さい場合、粒子は流体の流れに乗って、淘汰管装置より系外に排出される。

### 3. 淘汰管による色ガラスの分級

実験装置として、内径20mm、長さ1mの塩ビパイプ管を用いた淘汰管を作製した。装置底部にはSUS304の球を整流器として配置した。平均粒径180 $\mu$ mと300~600 $\mu$ mの色ガラスを試料とし、色ガラスの分級実験を行った。

流速の決定については、式[2]に従い、分離対象粒子(粒径180 $\mu$ m)が釣り合う速度を計算し、実験の流速を3.5cm/s付近に設定した。また、この条件下でのレイノルズ数は、700程度であり層流となっている。色ガラスの分級実験の様子とその実験装置の模式図を図1に示す。分離対象として、ふるいにより粒径を選別した粒径180 $\mu$ mと300~600 $\mu$ mの色ガラスを、淘汰管内(流体停止時)に投入した。ガラス粒子沈降後、淘汰管下部から定量送液ポンプ(EYELA RP-1000)を用いて流速3.5cm/sで送液し、その後、ガラス粒子が浮上し留まる様子を観察した。

図の写真に示すように、粒径が小さい180 $\mu$ m付近のガラスは上部20~40cm付近(図中灰色)に分布し、また、粒径300~600 $\mu$ m付近のガラスは装置下部0~20cm付近(図中黒灰色)に分布した。実験の結果から、管内の流速(0.35m/s)を制御することで、任意の粒径のガラス粒子の位置を制御(浮遊させること)できることが確認できた

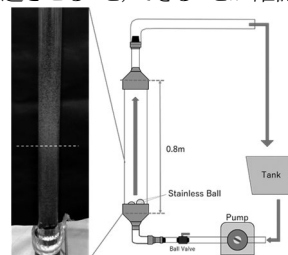


Fig.1 Schematic illustration of experimental equipment (The broken line in the figure is near the boundary between 180  $\mu$ m and 300  $\mu$ m glass)

### 4. 淘汰管を利用した色ガラスの磁気分離

本実験では、常磁性を示す黒色ガラス(平均粒径180 $\mu$ m、体積磁化率 $3.17 \times 10^{-4}$ )を用いた。前の実験のように流速3.5cm/sで送液し、粒径180 $\mu$ m付近のガラス粒子を淘汰管の上部40cm付近に浮遊させた。さらに、淘汰管の高さ40cmの位置の側面に、最大磁束密度1.3Tの永久磁石回路を配置して浮遊するガラス粒子の磁気分離を行った。その実験の様子と磁石回路に捕捉されたガラス粒子の写真を図2に示す。

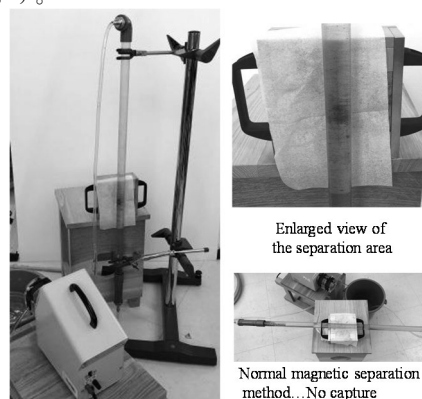


Fig.2 Picture of advanced magnetic separation method

淘汰管で流速制御した色ガラスは磁気分離されたが、同じ条件(流速、磁場条件)で通常の磁気分離を行うと、磁気分離はできなかった。これらの結果から、淘汰管を用いた流速制御下での常磁性粒子の磁気分離法の有用性を確認できた。

### 5. まとめ

本研究では小規模な淘汰管を作製し、磁気分離実験を行い良好な結果を得た。現在は淘汰管をスケールアップした検討を行っている。また、今後はさらに精密な流量制御化や高勾配磁気分離化を継続して行ってゆく予定である。

本研究は福井工業大学学内特別研究費の助成を受けて実施したものである。