

液体水素浸漬冷却における MgB₂ ソレノイドコイルの負荷特性

The load characteristics of MgB₂ solenoid coil pooled in Liquid Hydrogen

石見 佳紀, 松本 太斗, 藤田 勝千, 白井 康之, 塩津 正博 (京大);

小林 弘明, 成尾 芳博, 稲谷 芳文, 野中 聡 (JAXA);

田中 秀樹, 児玉一宗, 鈴木 孝明 (日立製作所)

IWAMI Yoshiki, MATSUMOTO Taito, FUJITA katsuyuki, SHIRAI Yasuyuki, SHIOTSU Masahiro (Kyoto-Univ.);

KOBAYASHI Hiroaki, NARUO Yoshihiro, INATANI Yoshifumi, NONAKA Satoshi (JAXA);

TANAKA Hideki, KODAMA Motomune, SUZUKI Takaaki (Hitachi,Ltd)

E-mail: iwami@pe.energy.kyoto-u.ac.jp

1. 序論

本研究グループでは、液体水素冷却での MgB₂ 超電導機器の開発を目的とし研究を行っている[1]。本研究では、MgB₂ 短尺試験体及び、その線材を使用した 529 ターンのソレノイドコイル試験体を用いた実験を行った。これらの試験体を液体水素浸漬冷却において、液温 21 K~32 K、外部磁場 0 T~6 T の条件で通電・励磁試験を行い、臨界電流を求めた。さらに有限要素法磁界解析シミュレーションソフトウェア「FEMM」を用いた磁場解析を行い、ソレノイドコイルにかかる最大経験磁場を求め、MgB₂ ソレノイドコイルのロードラインを得た。

2. 試験内容

2.1 試験体

本実験で使用した MgB₂ 超電導線材 (日立製作所製) は In-situ PIT 法によって製作されており、直径 1.5mm、10 芯の多芯線構造となっている。短尺試験体では、全長 100 mm の MgB₂ 線材を使用し、両端を銅電極に半田付けした。さらに、ローレンツ力による変形を防ぐため、後ろから FRP 板で固定した。また 20 mm ごとに 3 つ電圧タップを取り付けた。(Fig.1 参照)

ソレノイドコイル試験体は、300 m の MgB₂ 線材を使用した、内径 120 mm、外径 190 mm、高さ 41 mm のコイルであり、Wind&React 法によって製作した。このコイルは 22 ターン×24 層+調整用 1 ターンの 529 ターンとなっている。また線材同士を絶縁するためにガラス編組を巻いており、ローレンツ力による線材の動きを防ぐためエポキシ樹脂で含浸した。電圧タップは、コイルの両端の銅電極に取り付けられている他、およそ 44 ターン毎に取り付けられている。(Fig.2 参照)

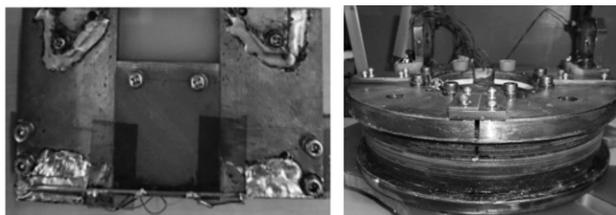


Fig.1 MgB₂ short sample Fig.2 MgB₂ solenoid coil

2.2 実験方法

試験体を液体水素で浸漬冷却した状態で、外部磁場、液温を任意の条件に設定し、通電試験を行った。通電電流としては、時間に対して線形に上昇する電流を与えた。臨界電流は、短尺試験体では 3 つの電圧タップの内真ん中のタップを、ソレノイドコイル試験体ではコイル両端の電圧タップを用いて評価し、1 μV/cm となる時の電流を臨界電流 I_c とした。

3. 実験結果

Fig.3 に磁場補正をかけた短尺試験体、ソレノイドコイル試験体の I_c - B - T 特性を示す。また、同図にソレノイドコイルの通電電流とコイルの発生する最大経験磁場の関

係を表すロードラインも示した。短尺試験体での I_c - B - T 特性とロードラインの交点は、コイルに流すことのできる最大電流の理想値を表している。実際には、巻線中の線材の微小な動きや、エポキシ樹脂の割れなどに起因する熱擾乱によって、この理想値より低い電流値でクエンチすることが多い。

Fig.3 を見ると、液温 21 K において、短尺での特性とソレノイドコイルの特性がほぼ一致しており、ソレノイドコイルは短尺と同等の性能を発揮しているということが分かる。しかし、液温が上がるにつれ、電流の大きいところでは、コイルの特性が短尺の特性より劣っているのが見て取れる。

これは、直接液体水素に冷却されている短尺試験体と違い、ソレノイドコイルはエポキシ樹脂含浸しているため、冷却効率が悪く、また液温が上がるということは臨界温度に近くなるため、わずかな擾乱でも温度が上がり、超電導が予想より早く破れたと考えられる。

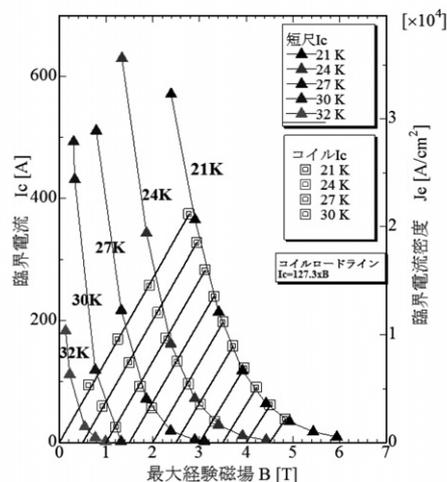


Fig.3 coil load line and I_c - B - T properties of short sample and solenoid coil

4. まとめ

液体水素浸漬冷却の条件で、MgB₂ 短尺試験体及び、MgB₂ ソレノイドコイルの臨界特性を得ることに成功した。さらに磁場解析を行い、ロードラインを得た。その結果、特に 21 K ではソレノイドコイルは短尺と同等の性能が発揮できるが、液温が上がるとコイルの特性は悪くなるということが分かった。

謝辞

本研究の一部は、JST 先端的低炭素化技術開発事業 (ALCA) の助成を受け実施したものである。

参考文献

- [1] K. Fujita, et al.: Abstracts of CSSJ conference, Vol. 94 (2017) p87

MgB₂ 大容量導体を用いた SMES コイルの安定性解析

Stability Analysis of SMES coil using large-scale MgB₂ conductor

谷貝 剛, 大久保 徹, 平 萌人, 上林 昌弘, 神保 茉那, 高尾 智明(上智大学); 平野 直樹(中部電力); 榎田 康博, 新富 孝和(KEK); 駒込 敏弘, 塚田 謙一(前川製作所); 恩地 太紀, 荒井 有気, 石原 篤, 富田 優(鉄道総研); 宮城 大輔, 津田 理(東北大); 濱島 高太郎(前川製作所)

YAGAI Tsuyoshi, OKUBO Toru, HIRA Moeto, KAMIBAYASHI Masahiro, JIMBO Mana, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); HIRANO Naoki (Chubu Electric Power Co Inc.); MAKIDA Yasuhiro, SHINTOMI Takakazu (KEK); KOMAGOME Toshihiro, TSUKADA Kenichi, (Mayekawa MFG Co. Ltd); ONJI Taiki, ARAI Yuki, ISHIHARA Atsushi, TOMITA Masaru (Railway Technical Research Institute); MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.); HAMAJIMA Takataro (Mayekawa MFG Co. Ltd)
E-mail: tsuyoshi-yagai@sophia.ac.jp

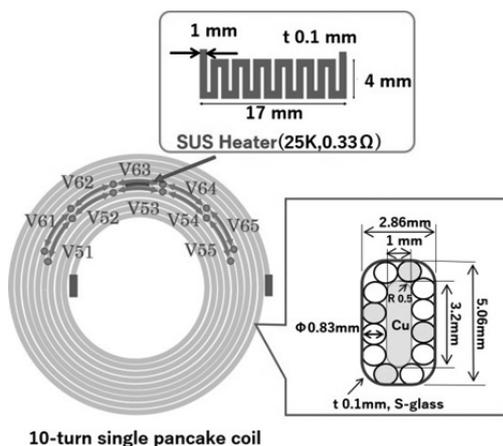
1. はじめに

現在市販されている MgB₂ 線材は高性能化が進んでおり、比較的低磁場(~5 T)において、実用的な電流密度が得られるようになった。液体水素温度よりも高い約 39K で超伝導転移する MgB₂ で構成された超伝導電力貯蔵装置(SMES)と、実現間近の水素社会における液体水素貯蔵・輸送ネットワークとを組み合わせる事によって、再生可能エネルギーによる低炭素電力システムの安定運用が可能になると期待され、我々のグループでは先進超伝導電力変換システム(ASPCS)を提案し、Bi 線を用いたコイルで実証試験を行ってきた。[1]

次の段階の MgB₂ SMES コイル実証には、MgB₂ 線を用いた大容量導体の開発およびコイル化技術開発が重要であると同時に、コイルの損傷を防ぎ、安全な運用を保証するため、安定性に関する知見が必須である。そこで本研究は、電力貯蔵用ダブルパンケーキコイル(DP coil)の半分のサイズの先行小型コイルを製作し、ヒータによる入熱で生じた常伝導部の伝播を観測して数値解析と組み合わせる事によって、MgB₂ 大容量導体およびコイルの安定性を解析する事を目的とする。

2. 素線、導体および小型コイルの仕様

MgB₂ 素線は Hypertech 社製で直径は 0.83mm である。素線の構造は、直径約 0.1mm のフィラメントが 30 本、同軸状に配置されており、20 K, 2 T での臨界電流密度は約 1260 A/mm² である。導体は、定格通電 600 A を想定し、全素線が常伝導転移したときの断熱温度上昇が 300 K に以下になるように、素線の銅比から追加に必要な銅の量を算出、導体の撚り易さを考慮して真鍮線を 4 本加え、幅 1mm, 高さ 2mm, R 0.5 mm のレーストラック形状銅マンドレルの周りにピッチ 51 mm で撚り線された大容量導体である[2][3]。これをコイル形状に巻き線してから熱処理するワインド・アンド・リアクト(W&R)法でコイル製作する。コイルの蓄積エネルギーは、リアクト&ワインド法で製作するコイルも含めて、内径 400 mm, 外径 603 mm の DP coil を、5 個積層して 30 kJ となる予定である。安定性試験用のコイルは、上述の SMES コイルの約半分のサイズ(内径 200 mm, 外径 320 mm)で 10 ターン巻きの W&R



先行小型コイルにて行った。導体および実験設定を Fig. 1 に示す。ヒータは 1 mm 幅の SUS 板がジグザグパターンになっており、20K での抵抗値は約 0.33 Ω である。両電極から最も遠い 5, 6 ターンの間のエポキシ絶縁部に挿入され、最大値 10A の方形パルス電流を供給して常伝導部を発生させる。常伝導転移の検出は、幅 5.1 cm で周方向および径方向に設置した電圧タップの電圧検出にて行った。両電極部にて温度計測を行い、運転温度が安定した事を確認して入熱試験を繰り返した。

3. 安定性解析

1次元の熱平衡方程式は、次のように表せる。

$$\gamma_d C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right\} + G(T, I_t) - Q(T, t) + G_d(x, t) \quad [\text{W/m}^3]$$

ここで、 γ_d は質量密度、 C は比熱、 $k(T)$ は熱伝導率である。これを解くことによって、導体軸方向の温度分布が得られる。Fig. 2(a)は、1次元熱平衡解析モデルの模式図である。従来の解析手法と異なるのは、ヒータからの入熱に、熱抵抗を導入したエポキシ絶縁層を通過する過渡熱応答を導入した点である。Fig.2(b)が計算結果の一例であり、6 A, 0.5 sec の入熱に対し、熱伝導率を 0.05 および 0.06 W/mK に設定して温度分布を算出、n 値モデル(n = 5.6)を用いて電圧に変換した。マークで示された実験結果の電圧立ち上がり幅に近い電圧波形が得られた事がわかる。詳細は講演にて発表する。

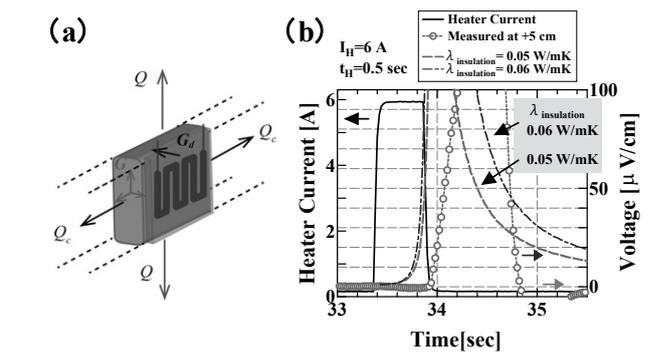


Fig.2 (a)Illustration of the model for heat balance analysis and the typical results of the calculation with various heat conductivities.

なお本研究は、科学技術振興機構 先端的低炭素化技術開発(ALCA)の助成を受けて行われている。

参考文献

1. D. Miyagi, et al. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 25, no. 3, Art. ID5700305, 2015.
2. 水野他, 第 95 回低温工学・超伝導学会 予稿集 p. 152
3. S. Mizuno, et al. IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 28, no. 3, Art. ID4602505, 2018

熱処理前に施す凹みが MgB₂ 素線の臨界電流に及ぼす影響Investigation on critical current properties of MgB₂ wire influenced by strains before heat treatment

桑原 優介, 神保 茉那, 上林 昌弘, 高尾 智明, 谷貝 剛(上智大学);

新富 孝和, 榎田 康博(KEK); 濱島 高太郎, 駒込 敏弘, 塚田 謙一(前川製作所); 平野 直樹(中部電力);

富田 優, 恩地 太紀(鉄道総合研究所); 菊池 章弘(NIMS)

Kuwabara Yusuke, Jimbo Mana, Kamibayashi Masahiro, Takao Tomoaki, Yagai Tsuyoshi (Sophia Univ.); Shintomi Takakazu,

Makida Yasuhiro (KEK); Hamajima Takataro, Komagome Toshihiro, Tsukada Kenichi (Mayekawa MFG. Co., LTD.);

Hirano Naoki (Chubu Electric Power); Tomita Masaru, Onji Taiki (Railway Technical Research Institute); Kikuchi Akihiro (NIMS)

E-mail: uchibosenkeiyu@gmail.com

1. はじめに

我々は MgB₂ 素線を用いた SMES の大容量化を検討している。そのためには複数の素線を撚り合わせることで容量を増大させる必要がある。その際、撚り線加工時に素線にかかる圧縮による凹みで臨界電流(I_c)が劣化してしまう恐れがある。

そこで本研究では、MgB₂ 素線を圧縮凹ませ、その後熱処理を施した試料の I_c 劣化率を評価した。導体としてはラザフォードケーブルを考えている。

ラザフォードケーブル中の MgB₂ 素線にできる凹みを再現するため、撚りピッチを素線間交差角度に換算し、その角度で MgB₂ 素線を互いに交差させながら上部から荷重を印加した。

2. 試料作製

試料は Hyper Tech 社製の MgB₂ 素線(線径 0.83 mm, フィラメント数 30 本, フィラメント占有率 20%, モネル被覆)である。MgB₂ 素線の内部構造とラザフォードケーブルの構成を Fig. 1 に示す。熱処理前各フィラメントには Mg と B の粉末が入っており、熱処理を施すことで MgB₂ に変化する。ラザフォードケーブル中の素線間交差角度を Fig. 2 に示す。ラザフォードケーブルの撚りピッチは 58, 69, 82 mm を想定しているため、対応する素線間交差角度 θ を算出すると 22, 18, 14 度である。

また、ラザフォードケーブルを撚りほぐした際素線に見られた凹みを荷重に換算したところ約 600 N だったため、600 \pm 200 N を素線に印加する荷重の範囲とした。

2 本の MgB₂ 素線(80 mm)を交差角度 θ で重ねて上部より荷重を印加することで表面が凹んでいる試料を作製し、熱処理を施した。

各交差角度 θ において、印加する荷重を変化させた場合の凹み量を Fig. 3 に示す。凹み量はマイクロフォーカス X 線 CT で断面を観察し計測した。

3. 測定条件

外部磁場は 0 T とし、冷却は冷凍機による伝導冷却で、設定温度は 29 K とした。測定区間は、試料中央の 40 mm であり、 I_c 基準は 1 μ V/cm とした。

4. 測定結果およびまとめ

測定結果を Fig. 4 に示す。これは、凹みを施していない試料の臨界電流を 100% とし、各交差角度 θ において 500, 600, 800 N の荷重を印加した試料の規格化臨界電流を示している。

Fig. 3, 4 を見比べると、凹み量に応じて臨界電流が劣化していく傾向が見られる。つまり、凹み量が増えていくにつれ内部の Nb バリアが破れ、Mg が漏れ出し Cu と反応してしまうことにより試料の劣化につながったと考えられる。今後、各試料の断面観察を通じて、フィラメントの損傷と臨界電流の劣化を定量的に評価していく。

謝辞

本研究は、JST 先端的低炭素化技術開発機構(ALCA)の助成を受け、実施したものである。

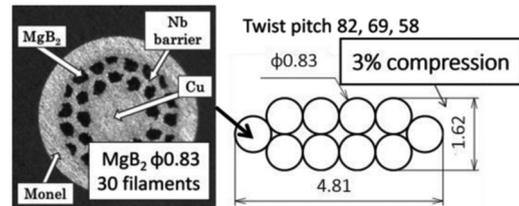


Fig. 1. Configuration of MgB₂ stranded cable⁽¹⁾

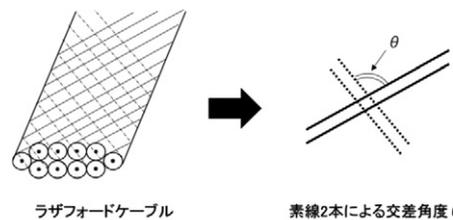


Fig. 2. The crossing angle in Rutherford cable⁽²⁾

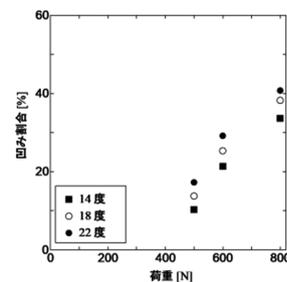


Fig. 3. Deformation of strand due to compressive load

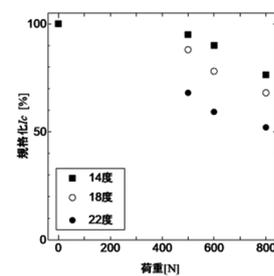


Fig. 4. I_c degradation due to compressive load

参考文献

- Sora Mizuochi et al., "Experimental Evaluation for Characteristics of MgB₂ Rutherford Cables with a Large Current Capacity," EUCAS2018, IMP4-03, Geneva, Sept.2017
- 桑原優介他, "熱処理前に施す凹みが MgB₂ 素線の臨界電流に及ぼす影響," 電学大全, 5-174, 九大, 2018 年 3 月

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 ～研究計画～

Removal of Iron Scale with Magnetic Separation from Feed-water in Thermal Power Plant -Research Plan -

西嶋 茂宏, 三島 史人(福井工業大学); 山本 隼也, 森 達也, 平松 まみ, 秋山 庸子(大阪大学); 岡田 秀彦, 廣田 憲之(物質・材料研究機構); 松浦 英樹, 難波 正徳(四国総合研究所); 関根 智一(荏原工業洗浄株式会社)
NISHIJIMA Shigehiro, MISHIMA Fumihito (Fukui Univ. Tech.); YAMAMOTO Junya, MORI Tastuya, HIRAMATSU Mami, AKIYAMA Yoko (Osaka Univ.); OKADA Hidehiko, HIROTS Noriyuki (NIMS); MATSUURA Hideki, NAMBA Seitoku (Shikoku Research Institute Inc.); SEKINE Tomokazu (Ebara Industrial Cleaning Co.,Ltd.)
E-mail:nishijima@fukui-ut.ac.jp

1. はじめに

本研究では、火力発電所の給水系の酸化鉄スケールを除去する超電導磁気分離システムを開発し、火力発電所の発電効率の低下を抑制し、CO₂の排出量を削減することを目的としている。

火力発電所においては、プラントの運転に伴って酸化鉄スケールが配管等に付着するため、主に以下の課題が発生している。それは、①ボイラー蒸発管の熱伝導率が低下し、蒸発管の温度を設定値まで上げるために必要な燃料の量が増加する(結果としてCO₂排出量の増加となる)。②ボイラー蒸発管の過熱・蒸気漏洩し、蒸発管の壊破を引き起こし、プラント停止となる危険性がある。③ボイラー差圧が上昇(配管抵抗の増大)し、給水ポンプの負荷が増大し、発電効率の低下となる。

この対策のため、全揮発性物質処理(AVT)あるいは酸素処理(OT)を施し、酸化鉄スケールの発生を抑制を行っているが、必ずしも完全ではなく、定期的に火力発電所を停止し、ボイラーの化学洗浄による酸化鉄スケールの除去を実施している。しかしながらこのプロセスは、火力発電所の稼働率の低下、処理に伴う多額の費用を要しており、効率的な酸化鉄スケールの処理が望まれていることが研究の背景にある。

2. AVT と OT

火力発電所の水処理法としては、前述したようにAVT法およびOT法がある。前者は微量のアンモニアでpH調整(9~9.7)をし、脱酸素剤(<7ppb)としてヒドラジンを添加する手法である。こうすることによりマグネタイト(Fe₃O₄)が安定な領域になるため、配管内面にマグネタイト被膜を形成させ腐食を防止することができる。しかしながらタービン部ではアンモニアの蒸発に伴う、pHの低下が理由で腐食生成物のオキシ水酸化鉄(FeOOH)などが生成し、ドレインあるいは復水器を通して主ループに持ち込まれる。(図1に給水系の概略図を示した。主ループ以外のそれぞれのタービンからの配管がドレインである。)この腐食性生物は、脱気器以降の高温(>150℃)部位で磁性を持つマグネタイト(Fe₃O₄)に変化し、ボイラー管に付着してスケールとなり、ボイラー管の伝熱性能を低下させ、発電効率の低下につながる。本手法は水処理の主流となっており、2016年現在でプラント数の約70%が本手法を採用している。

一方、後者のOT法は高度給水処理法と位置付けられており、アンモニアによる弱アルカリ条件下(8~9.3)で酸化剤として微量の酸素を注入する(20~200ppb)。本手法ではヘマタイト(難溶性鉄酸化物)を配管表面に析出させ、腐食、腐食生成物の溶出抑制(マグネタイトよりヘマタイトの溶解度が小)する手法である。しかし、ボイラー管へのヘマタイトスケールの付着による熱損傷の報告例があるなどヘマタイトスケールの除去も必要とされている。本手法は今後主流となると考えられる手法である。

いずれの手法においても酸化鉄スケールの効果的な除去が望まれており、その有力な手法として超電導磁気分離法が考えられている。

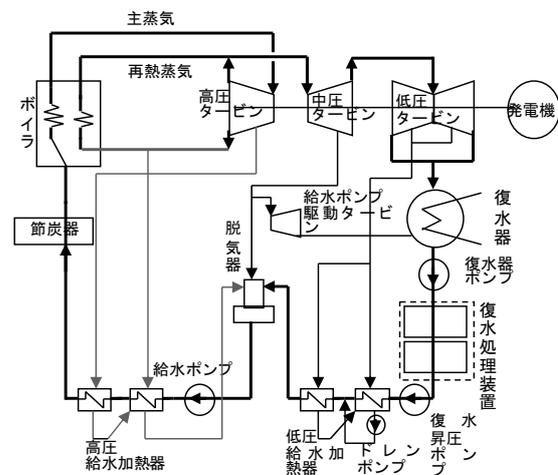


Fig. 1 Schematic diagram of a thermal power plant feedwater system

3. 全体計画

計画では、AVTとOTのケースに分け、またそれぞれを基礎研究、Off-Line研究、On-Line研究の3段階に分けて実施している。ここで、Off-Line研究とは、火力発電所の給水系に磁気分離装置をつなぎこむことなく、化学洗浄ループで酸化鉄スケールを除去する研究であり、On-Line研究は火力発電所の給水系に磁気分離装置をつなぎこんで実証試験するステージである。現在、AVTに関しては、基礎研究が終わり、Off-Line研究が始まったところである。一方、OTでは基礎研究の段階にある(表1)。

報告では、全体の進捗状況等を報告する。

Table 1. Progress of each research

	AVT	OT
Basic Research	Completed	In progress
Off-Line	In progress	Under planning
On-line	Under planning	Under planning

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。

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 ～フィルター設計～

Removal of Iron Scale from Boiler Feed-water in Thermal Power Plant by Magnetic Separation ~Design of matrix~

岡田秀彦, 廣田憲之 (物材); 山本隼也, 平松まみ, 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 (四国総研); 関根智一 (荏原工業洗浄)
OKADA Hidehiko, HIROTA Noriyuki (NIMS); YAMAMOTO Junya, HIRAMATSU Mami, AKIYAMA Yoko (Osaka Univ.); MISHIMA Fumihito, NISHIJIMA Shigehiro (Fukui Univ. Tech.); MATSUURA Hideki, NAMBA Seitoku (Shikoku Research Inst. Inc.); SEKINE Tomokazu (Ebara Ind. Cleaning CO. Ltd.)
E-mail: OKADA.hidehiko@nims.go.jp

1. はじめに

本研究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。そのために、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、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すでに検討した[1]。また、それに適応される磁気分離装置は、以下の性能を満たす必要があると考えている。

- ① 200℃ 20気圧で有効に動作すること
- ② 捕獲率90%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]。本発表では主に磁気分離装置を構成するスケールを直接捕獲するマトリックスの構造についての最近の実験とシミュレーションによる研究結果を報告する。

2. 室温実験

火力発電所用の磁気分離装置に適したマトリックスの構造を得るために室温で以下の条件で実験を行った。スケールの模擬粒子として粒径 3.8 μmのマグネタイト粒子を用い、濃度 10 ppm の懸濁液を 0.6 m/s で流した。磁場は 2 T である。

マトリックスはマグネステン[3]製の線径 1 mmの針金を編んだ直径5 cm の金網を 12 枚を一組として作り、それを並べて実験を行った。図1はその 12 枚一組の写真である。長さは約 5 cmである。

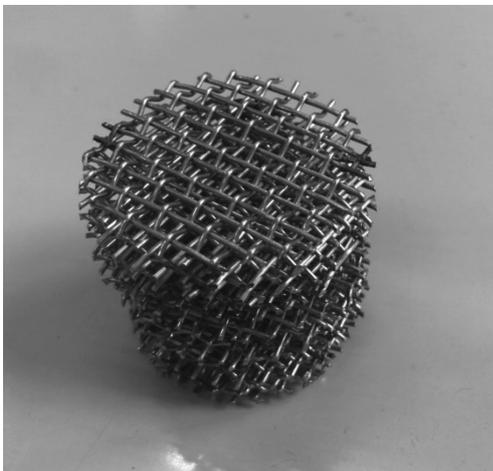


Fig.1 A set of 12 wire sheets.

3. 実験結果

12枚のマトリックスでの実験の破過曲線を図2に示す。●は実験値、実線はシミュレーションの結果である。縦軸は捕獲率(%)である。横軸はマグネタイトの積算投入量(g)である。マグネタイトは水に濃度 10 ppm で懸濁させた。

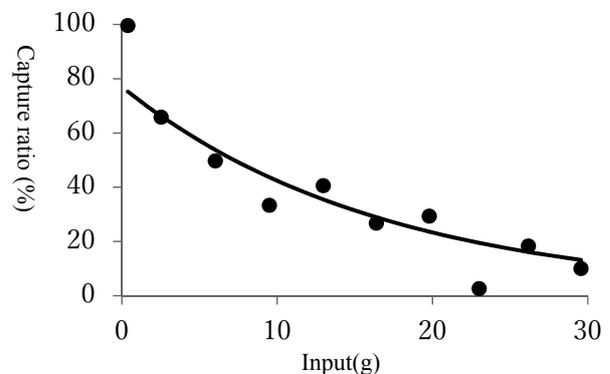


Fig. 2 Breakthrough curve for 12 wire sheets. Dots shows experimental results and the solid line shows a simulation result.

4. 高温での性能評価

高温での実験が難しいため磁気分離の評価は、室温での実験を基にした高温のシミュレーションによって評価した。

火力発電所の高圧ヒータードレンに同じ 12枚のマトリックスを 5組並べたマトリックスを設置した場合の性能を推定したところ、1か月の平均捕獲率が 90%以上になるという結果が得られた。

以上の事から、超電導マグネットを使った磁気分離装置が、火力発電所でのスケールの削減に有効であることが分かった。

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. Hidehiko Okada, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 26 3 (2016) 3701505
2. Nobumi Mizuno, et al.: IEEE Trans. Appl. Super. 25 3(2015) 3700804
3. <http://www.taishin-kogyo.co.jp/>

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に関する研究 ～大規模実験～

Removal of Iron Scale from Boiler Feed-water in Thermal Power Plant by Magnetic Separation - Large-scale Experiment -

山本 隼也, 森 達也, 平松 まみ, 秋山 庸子(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㈱)
YAMAMOTO Junya, MORI Tatsuya, HIRAMATSU Mami, AKIYAMA Yoko (Osaka University); MISHIMA Fumihito,
NISHIJIMA Shigehiro (Fukui University of Technology); OKADA Hidehiko, HIROTA Noriyuki
(National Institute for Material Science); MATSUURA Hideki, NAMBA Seitoku (Shikoku Research Institute Inc.);
SEKINE Tomokazu (Ebara Industrial Cleaning Co.,Ltd.)
E-mail: yamamoto@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

AVT(All Volatile Treatment)を採用している火力発電所ボイラー給水系では、配管の腐食によってマグネタイトを主成分とするスケールが発生し、ボイラーの熱交換器内壁に付着することにより発電効率の低下が引き起こされる。そこで、超電導磁石を用いた高勾配磁気分離法によるスケール除去システムを検討してきた。本研究では、2 台の磁気分離装置を並列して接続し、発電所が約 2 年間の連続稼働中に発生する 120 kg のスケールを全量捕捉するシステムを提案する。このシステムでは、1 台の HGMS 装置あたり 60 kg のマグネタイトの捕捉が求められるが、先行研究は数 10 g 程度の捕捉実験であり[1]、実用化に向けてはスケールアップ実験が求められる。そこで本論では、φ400 mm 超電導ソレノイド磁石を用いて、実機の約 1/7 スケールの磁気分離実験を行い、装置の実用性の検証と、スケールアップに伴って発生する課題の抽出を行った。

2. 実験方法

Fig.1 に実験装置の模式図を示す。φ400 mm 超電導ソレノイド磁石のボア内に φ300 mm のフィルターを設置し、給水タンクと回収タンクの高差差を用いてマグネタイト懸濁液を上から下に流して磁気分離実験を行った。マグネタイト粒子は濃縮タンクから薬注ポンプを介して吸水タンク出口付近に送られ、主系統に投入される。用いたマグネタイト粒子は Sample1 (三井金属鉱業㈱)であり、一次粒子径 2 μm, 平均粒子径 6.8 μm, 飽和磁化 0.58 T である。ここでは、1 台の実機捕捉量目標値 (60 kg) の 1/7 である 8.6 kg の捕捉を目標とし、10 kg のマグネタイト粒子を投入した。フィルターには、マグネステン®製(飽和磁化 1.1 T)、線形 1 mm、目開き 3.2 mm の平織りフィルターを用い、フィルター間には SUS304 製の線径 1 mm、目開き 14 mm 溶接金網をスペーサーとして設置した。フィルターとスペーサーを交互に 15 枚ずつ重ねてワイヤーで結束したものを 1 スタックとし、10 スタック設置した。設置されたスタックは流入側からスタック 1 とし、流出側をスタック 10 とした。

実験時は最大中心磁束密度 2 T を印加し、2.5 分間の磁気分離実験を行った。実験中は 15 秒ごとに流量を測定し、懸濁液の平均流速を求めた。実験後に消磁してフィルターを取り出し、捕捉されたマグネタイト粒子を高圧洗浄機で回収し、乾燥機で 60°C、72 時間以上加熱して乾燥重量を測定した。

3. 結果と考察

実験後のフィルターの様子を Fig. 2 に示す。流入側のスタック 1 の周縁部にマグネタイト粒子が集中的に捕捉され、後段になるほど捕捉量が減少している事が分かる。これにより圧力損失が増加し、フィルターを設置し磁場を印加せずに懸濁液を流した場合の平均流速 34 cm/s に対し、平均流速が 15 cm/s まで低下した。

捕捉された粒子の乾燥重量を測定すると、スタック 1 での捕

捉量は 4.5 kg、スタック 2-4 の合計捕捉量は 2.2 kg であり、スタック 5 より後段のフィルターにはマグネタイトはほとんど捕捉されていなかった。10 kg のマグネタイトを投入したが、実験後濃縮タンクに 2.3 kg のマグネタイトが残留していたことを考慮すると、実質の投入量 7.7 kg に対して捕捉量は 6.7 kg であり、捕捉率は 87% と計算された。後段のフィルターはほとんど粒子を捕捉しておらず、捕捉能力にはまだ余裕があるため、フィルター全体をより有効に活用することで、閉塞を解消して実機の目標を達成することができる可能性が示された。現在はこの結果に基づき、印加磁場やフィルターの見開きの調整によって捕捉量分布の均一化について検討している。

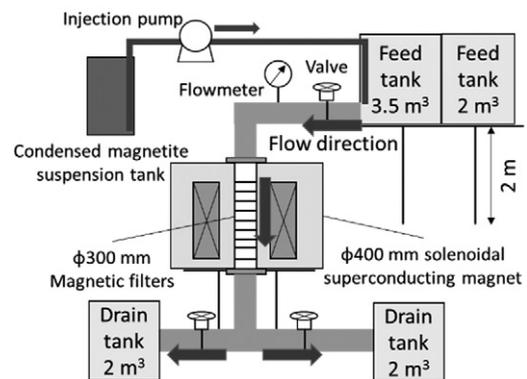


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

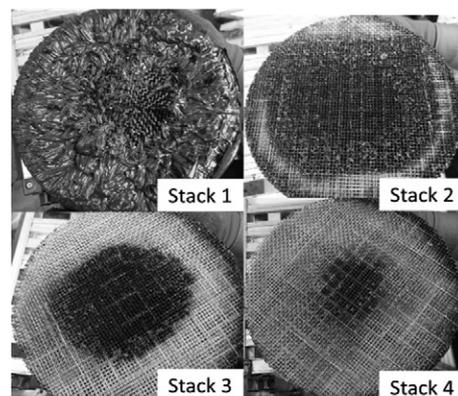


Fig. 2 Appearance of each filter stack after the experiment.

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

- [1] S.Shibatani, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.26, No.4, 3700304 (2016).

水処理技術への磁気分離適用の可能性とその実用性

Potential of application of magnetic separation to water treatment process and that practicality

酒井 保藏, 荷方 稔之(宇都宮大学); 三浦 大介(首都大東京)

SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki (Utsunomiya Univ.); MIURA Osuke (Tokyo Metropolitan Univ.)

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

1. はじめに

磁気分離応用を取り巻く環境は急速に発展している。磁性粉は 1/5 の価格で入手可能となり、永久磁石装置ではあるが、200m³/日の汚泥磁気分離装置が同等規模の沈殿槽より安価に入手可能となりつつある。磁気分離が、活性汚泥法や凝集分離法、汚泥の濃縮脱水など様々なプロセスで、従来技術と経済的に競合できる状況となっている。本発表では、これら、磁気分離の水処理技術への適用研究の現状を報告し、超電導磁気分離の適用についても議論したい。

2. 磁性粉のコストダウン

水処理の対象となる汚濁物質のほとんどは強磁性でない。効率的な磁気分離を行うために、分離対象物と強磁性粉を一体化し、大きな磁気力を発生させる。この操作を磁気シーディングと呼んでいる。磁気シーディングは対象を限定されがちな磁気分離を汎用的な技術にするためにも重要である。磁気シーディングにはマグネタイト(Fe₃O₄)が有用と考えられる。鉄と酸素の化合物で有害金属を含まず、砂鉄として土壤中に広く分布する安全な物質であり、常温で酸化されず、化学的に安定で水に溶けない。また、強磁性材料として、高い磁化率を有する。2010 年頃までマグネタイトは 500~1000 円/kg であったが、近年、100~200 円/kg で入手できるようになった。鉄やアルミ系の無機凝集剤が、それぞれ有効成分である Fe や Al₂O₃ の重量当たり 500~1000 円/kg であるのに対して、マグネタイトは 1/5 である。凝集分離法は、沈降分離や浮上分離と組合せるが、凝集剤に対して 1:1 でマグネタイトを投入して、磁気分離を導入しても、マグネタイトのコストは凝集剤コストの 2 割に過ぎない。磁気分離が高速で回収汚泥を高濃縮でき、沈殿池や浮上分離槽、汚泥濃縮槽が不要となることを考慮すると経済的に十分な競争力を持っていると考えられる。

3. 磁気分離装置の標準化

我々は、現在、永久磁石による 200 m³/d の汚泥磁気分離装置を開発中である。プロトタイプを製作し、磁化活性汚泥を各種条件



Fig. 1 Real Scale Magnetic Separator (200 m³/d)

で実際に分離して、性能評価と改良を進めている。この装置は標準的な汚泥の磁気分離装置として、分離性能を予測できるようにする予定である。価格も同等性能の沈殿槽より安価になると予想され、性能とコストを設計段階で提示できる。

マグネタイトのコストダウンにより、磁化活性汚泥法や凝集磁気分離プロセスが経済的に競合技術に対して、十分な競争力を持つようになったにも関わらず、実用化に至らない理由の一つとして、性能や価格を予想するための実用磁気分離装置や周辺システムが開発されていないことが挙げられる。水処理プラント企業やユーザーにとって、従来法と比較でき

ない新しいプロセスを評価できない。比較のための磁気分離装置の性能や価格の情報は実用化に必須であると言える。これらの情報の欠如が、磁気分離による水処理プロセスが実用化に至っていない主な理由となっていると考えられる。

性能やコストが見積もれる 200 m³/d の標準的な汚泥磁気分離装置が開発できれば、2000 m³/d 程度までの水処理施設は 10 台程度の磁気分離装置を流量に応じて並列運転することで対応できる。大部分の工場排水処理施設で、磁気分離導入後の性能やコストが見積もれるようになると予想される。

大型磁気分離装置は活性汚泥に磁気分離を導入するために開発されているが、同様に、広く利用されている凝集処理法に磁気分離を導入するためにも流用でき、凝集磁気分離プロセスの仕様やコストを設計段階で見積もることが可能となると予想される。

4. 磁気分離導入の付加価値

活性汚泥法に磁気分離を導入した場合、磁気分離装置は汚泥を 10 秒程度で分離するためコンパクトであり、沈殿池の敷地を節約できる。また、汚泥を高濃度に分離できるため、反応槽に汚泥を大量に保持して、自己消化率を高め、余剰汚泥を引抜かずに運転できる。汚泥処理は水処理費用の大きな部分を占めており、これらのメリットは大きい。

凝集処理法に磁気分離を導入した場合、沈殿池や浮上分離槽が不要となり、敷地の節約が期待できる。磁気分離された汚泥は分離と同時に高濃縮されており、汚泥濃縮槽も不要となる。分離された汚泥は強磁性であり、脱水プロセスに磁気力を利用した効率的なプロセスを開発できる余地が生じている。我々は磁気力を利用して、汚泥を脱水、乾燥するプロセスを検討中である。汚泥をほぼ水分ゼロまで乾燥できるため、汚泥が減量され、汚泥処分費を 1/4 程度に節約できる。廃熱が利用できれば、温室効果ガスの大幅削減にも寄与できる可能性がある。

排水処理費用は企業の大きな負担であり、節約につながる新技術への期待は大きい。新規プロセスへの磁気分離の導入だけでなく、磁気分離導入のインシャルコストを 3~4 年で償却できる条件を提示できれば、様々な現行の水処理プロセスに磁気分離法が導入される機会も十分期待できる。

5. 超電導磁気分離の役割と水処理適用のための要件

永久磁石による実用の標準磁気分離装置は 200 m³/d を目標としており、下水処理のような 1 万 m³/日を超える排水処理では性能が不十分と予想される。2000 m³/d 程度の大流量の磁気分離装置を 0.5 億円程度で市販できれば、大流量の水処理施設では多数の並列運転が必要な永久磁石磁気分離より超電導磁気分離が優位となると予想される。大流量の汚泥懸濁液を分離するには、分離回収した汚泥を高速で排出する機構が不可欠である。分離対象となる汚泥懸濁液が 5000 mg-有機物/L の場合、1.4 m³/min の分離水を排出する一方で、数万 mg/L の濃縮汚泥(標準的な活性汚泥の 10 倍~20 倍濃度)を約 300 L/min の流量で排出する能力が要求されると予想される。高勾配磁気分離装置とは発想が異なる、新たな原理装置の案出が期待されている。

磁気力を利用する経済性に優れた新たな汚泥の脱水・乾燥プロセスの提案

Proposal of new economical sludge dewatering / drying process by magnetic force application

石井 将志, 酒井 保藏, 荷方 稔之, 六本木 美紀 (宇都宮大)

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

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

1. はじめに

我国の産業廃棄物中の汚泥は 43%を占める[1]。この汚泥は脱水、乾燥、焼却によって中間処理され、多くのコスト、エネルギーが費やされている。活性汚泥は磁性粉を吸着させることで磁気分離が適用でき、分離汚泥を磁石板とともに空中に取り出すことも可能である。我々はここに温風を吹き付けるなど新たな汚泥の脱水・乾燥プロセスを提案し実用性を検証した。その結果、従来法より経済性に優れ、設置面積も節約できることがわかった。

磁気分離は、強磁性物質だけでなく、活性汚泥や凝集汚泥など様々な物質に磁性粉を混合することで適用できる。また最近、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もほとんど問題となくなっている。遠心脱水や加圧脱水と異なり、磁気力により汚泥は上向きや横向きに引っ張りながら水を重力で落下させることができるため、原理的に優れた脱水法と言える。また汚泥を磁石表面に薄く保持し、短時間で乾燥できると予想され、磁気力を利用した脱水・乾燥プロセスが、新たな汚泥処理法として提案できると考えた。

2. 実験方法

実験にはネオジム円板磁石(φ10 mm×3 mm)を板状に並べ、アルミ製の粘着テープでシールしたものを使用した(Fig.1)。汚泥は水再生センターの活性汚泥を馴養したものをを用い、所定濃度になるよう磁性粉を加え、磁化活性汚泥とした。これに磁石板を浸し、3分後ゆっくり引き上げ、磁石板上に付着した汚泥を自然乾燥または 20-81℃の風を吹き付け乾燥させた。このときの質量変化を連続測定し、水分変化を算出した。

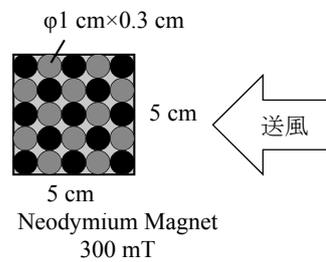


Fig.1. Magnet

3. 結果と考察

汚泥に磁石を浸漬するとただちに汚泥が付着した。これを引き上げ、30 s 程度水分を落下させるだけで付着汚泥は水分 94-95%となった(Fig.2)。現行プロセスでは、沈降濃縮により 0.5-2 日かけ、水分 98-99%としていたが、磁気分離を利用することで数秒から数十秒で、より高濃度に濃縮できることが示された。空中に引き上げた汚泥は磁性粉/汚泥比が 0.2 の場合、20-81℃の温風で、最短 1 時間程度で水分 2-9%まで乾燥可能であった(Fig.2)。このときの汚泥の質量変化を Fig.3 に示した。現行プロセスでは脱水後水分 80%の状態ですら汚泥を処分するのにに対し、磁気力を利用した濃縮・脱水プロセスでは乾燥汚泥の水分を 2-9%とすることが

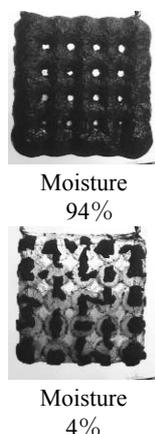


Fig.2. Change of Sludge Appearance

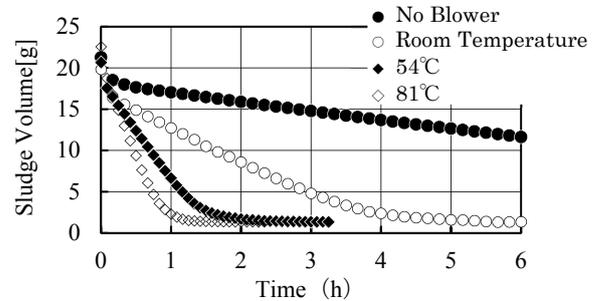


Fig.3. Change of Sludge Volume

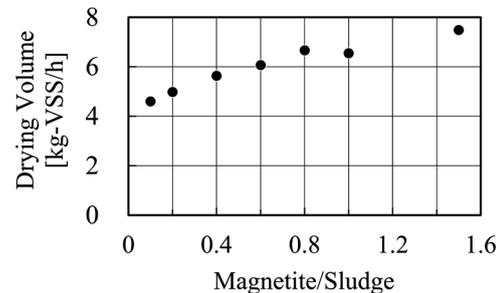


Fig.4. Change of Drying Volume

できるため、汚泥が 1/4 に減量化し、処分費も 1/4 に削減できる。さらに今回使用した磁性粉は 200 円/kg と安価であり、現行プロセスにおいて濃縮・脱水を効率よく行うために添加されている凝集剤などが不要となることから、本プロセスにおける汚泥処理コストは磁性粉コストを相殺し、それ以上の経済性が期待できると考えられた。

1 m³ の空間に磁石板を 20 枚並べた原理装置を仮定すると、81℃の温風を使用した場合、乾燥量は 5.0 kg-VSS/h と考えられた。1 日 20 回の運転した場合、固形分濃度 1% の濃縮汚泥約 11 トンを水分 20%まで乾燥できると推算された。また磁気力を利用した汚泥の脱水・乾燥プロセスでは汚泥の濃縮・脱水・乾燥処理を一貫して行うことができ、従来法よりも省スペースとなると考えられた。

磁性粉/汚泥比を 0.1-1.5 の間で変化させた場合の乾燥量の変化を Fig.4 に示した。磁性粉/汚泥比を 1.0 から 0.2 の 1/5 にまで減らしても、汚泥乾燥速度は 76%維持されている。これは、磁石板への付着量が減少する一方、乾燥時間が短縮されるためである。経済性を考慮すると磁性粉/汚泥比は 0.2 程度が適切と考えられた。

4. まとめ

磁気力を利用した汚泥の脱水・乾燥プロセスは、汚泥の空中への引き上げを可能にし、水分の落下による濃縮や乾燥の効率化により、従来法より経済的かつ、省スペースに処理できることがわかった。磁気力を利用した新たな汚泥の脱水・乾燥プロセスの有用性が示唆された。

参考文献

1. Ministry of the Environment · Ministry of Land, Infrastructure and Transport: Global Warming Countermeasure Manual on Sewerage (2015.3) p.60-62

食品工場排水の下水放流前処理プロセスへの磁化活性汚泥法の適用 ～パイロットプラントでの検討～

Application of Magnetic Activated Sludge Process to Pretreatment Process of Discharging Food Industrial Wastewater to Sewerage ~Feasibility study at pilot plant~

小林 拓美, 酒井 保藏, 武藤 勇希, 荷方 稔之, 六本木 美紀(宇都宮大学); サハ ミヒル ラル(ダッカ大学);
花井 洋輔, 中田 栄寿(富士電機(株)); 長沼 拓磨, 中埜 智之(アグリフーズ(株))
KOBAYASHI Takumi, SAKAI Yasuzo, MUTO Yuki, NIKATA Toshiyuki, ROPPOGI Miki (Utsunomiya Univ.);
SAHA Mihir Lal (Dhaka Univ.); HANAI Yosuke, NAKADA Eiju (Fuji Electric Co.,Ltd);
NAGANUMA Takuma, NAKANO Tomoyuki (Agrifoods Co.,Ltd)
E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

磁気分離を導入した生物学的な水処理法である磁化活性汚泥(MAS)法は、固液分離トラブルがほとんどなく、運転管理が容易である。余剰汚泥の引き抜きも行わないため、汚泥処理負担も軽減される。本研究では、食品工場の下水前処理プロセスへの適用を、オンサイトのパイロットプラントで検証した。その結果、沈降分離を用いる従来活性汚泥法に比べ、磁気分離導入によってコストや設置面積で優位になることが示された。

磁気分離を行うMAS法は、沈降分離を行う従来活性汚泥法に比べ、固液分離速度が速く、省スペース化が可能である。また、余剰汚泥の引き抜きが無いため汚泥処理負担を軽減でき、固液分離トラブルの要因となる糸状菌も系外に流出するプロセスのため、運転管理が容易な水処理法といえる。

MAS法の適用が考えられる場面の1つに、小規模な食品工場排水がある。下水道の受け入れ基準を超える排水を下水道へ放流する場合、前処理を行う必要がある。しかし従来の活性汚泥法は、運転管理に専門的知識が必要であり、余剰汚泥処理が必要になるため、小規模な食品工場にとって負担になる。本研究では、これらの課題を解決するためMAS法の適用を提案する。また、有機物及び窒素の除去率向上の効果があるとされているパチルス菌を添加した、パチルス磁化活性汚泥(B-MAS)法についても検討した。

本研究の目的は、パイロットプラントにおける現地排水への適用可能性の検証、従来の活性汚泥法とMAS法及びB-MAS法の比較により、MAS法、B-MAS法の従来法に対する優位性を確認することである。

2. 実験方法

現地の工場に可搬型のパイロットプラント実験装置(1.5^m³)を設置し、実排水の連続処理実験を行った(Fig.1)。磁気分

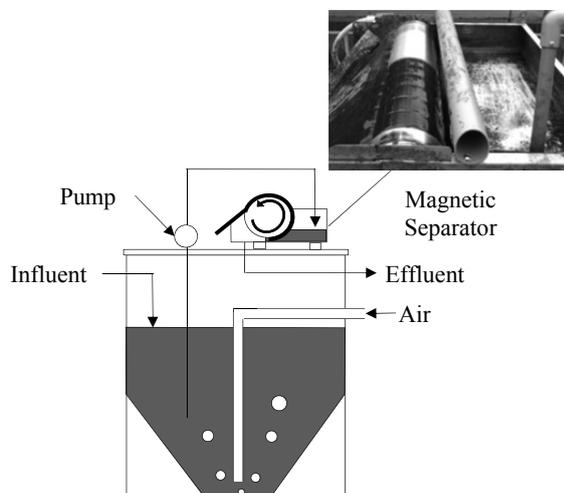


Fig.1. Pilot Plant of MAS Method

離装置は NEOMAX エンジニアリング(株)製 NCS-24 ベースの装置一台を用いた。磁石ドラムは直径 165 mm、幅 640 mm、表面最大磁場 0.5 T である。開始から 140 日前後まで B-MAS 法で処理を行い、その後パチルス属細菌を維持する活性剤の添加を停止して処理を行った。

3. 結果と考察

(1)パイロットプラント試験

曝気槽内 MLVSS 濃度は、活性剤の添加停止前は 8,000 ~ 16,000 mg/L で、停止後は約 10,000 ~ 19,000 mg/L で推移した。実験期間中、余剰汚泥の引き抜きは必要なかった。このことから、余剰汚泥のゼロエミッションが達成できたと考えている。また、流出水中の磁性粉濃度は平均して 18 mg/L であり、磁気分離装置によって良好に固液分離が行われていることが確認できた。流出水中の SS 濃度は十分に下水道の受け入れ基準 600 mg/L を達成できた。

(2) MAS 法と従来の活性汚泥法の比較

条件を 100 m³/d の前処理施設への導入として、沈降分離を行う従来活性汚泥法と磁気分離を行う MAS 法を比較した。表を Table.1 に示した。

沈降分離が 1~3 時間程度かかるのに対し、磁気分離は 10 秒程度で完了することから、MAS 法では沈澱池を小型の磁気分離装置に変換でき、大幅な省スペース化につながる。また、活性汚泥法は沈澱池及び汚泥脱水装置が必要になる。一方 MAS 法では、大掛かりな土木工事が必要な沈澱池に比べ安価に磁気分離装置を設置できるほか、汚泥脱水装置も不要になり、インシャルコストを約 1 千万円削減できる。さらに、磁気分離を用いる MAS 法では汚泥発生量を抑制できるため、汚泥脱水装置電力や汚泥処理費用も節約でき、ランニングコストも抑えられる。以上のことから、MAS 法は従来の活性汚泥法に比べ、設置面積やコストの面において優位であるといえる。

Table.1. Comparison between MAS Method and Activated Sludge Method

	Area [m ²]	Initial cost [10 ⁶ yen]	Running cost [10 ⁶ yen/year]
MAS Method	25	40	6
AS Method	47	50	10

4. まとめ

オンサイトのパイロットプラント試験により、磁気分離を用いる MAS 法及び B-MAS 法の食品工場排水への適用可能性を検証し、沈降分離を用いる従来活性汚泥法との比較を行った結果、MAS 法、B-MAS 法の優位性が示された。これらの優位性は高濃縮、高速分離、選択分離の磁気分離の利点に由来するものである。本研究は H29 年度環境賞・優秀賞を受賞した。

廃水からエネルギーを回収できるメタン発酵プロセスの磁気分離による高速化

Acceleration by magnetic separation of methane fermentation process to recover energy from wastewater

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, ROPPONGI Miki (Utsunomiya Univ.); SAHA Mihir Lal (Dhaka Univ.)

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

1. はじめに

磁化メタン発酵法は、磁気分離により微生物を高濃度化することでメタン発酵プロセスを高速化できる方法である。本研究では模擬排水を用いたベンチスケールで実験を行い、高速化の可能性を検証した。磁気分離により微生物濃度は従来メタン発酵法の 2.7 倍にまで高濃度化され、処理速度が従来の半分にまで短縮できる可能性がある。有機物除去率も 89%と高い値が得られ、エネルギー回収のできる水処理技術として期待できる。

有機廃水の処理方法には大きく分けて、嫌気性生物によるメタン発酵法と好気性生物による活性汚泥法がある。メタン発酵法は主に濃厚な廃水を対象とした方法であり、有機物の大部分がメタンガスに転換されエネルギーとして利用することができるという利点がある。一方で、処理速度は活性汚泥法よりも劣るとされる。処理速度の改善は微生物を高濃度化することで可能であり、その例としてUASB法がある。UASB法は微生物が高密度化されたグラニュール汚泥を用いることで通常の方法よりも濃い廃水の処理を可能とするが、維持管理には専門知識を必要とする [1]。

嫌気性微生物を高濃度化する方法の一つに磁気分離がある。嫌気性微生物はマグネタイトを加えるだけで磁気分離を行うことができるようになる。磁気分離は微生物を高濃度化できる、分離も高速である。コンパクトな磁気分離装置でありながら、高濃度の微生物を反応槽に維持できる可能性がある。本研究では、磁気分離を導入した磁化メタン発酵法を提案する。本実験では模擬排水を用いたベンチスケールでの実験を行い、磁気分離による嫌気性微生物の高濃度化、処理の高速化、高効率化について検証を行った。

2. 方法

本実験に用いたベンチスケール実験装置を Fig. 1 に示す。反応槽は水浴内に設置し、中温メタン発酵の最適温度である 37°Cとした。反応槽内の汚泥は、市水再生センターで採取した消化汚泥を使用し、磁性粉は MLVSS との質量比が 1:1 となるように加えた。磁性粉を吸着した汚泥は、回転する磁石ドラム(直径 97 mm, 長さ 100 mm, 表面最大磁束密度 80 mT, 6 mm ピッチの多極プラスチック磁石を巻きつけたもの)に引き寄せられる。磁石ドラムに引き寄せられた汚泥は、スクレーパーにより反応槽内へと戻され、処理水のみが流出する。実験期間中の汚泥の引き抜きは原則として行わない。バイオガスは水上置換法にて回収した。模擬排水は、ポリペプトンとグルコースを重量比 1:1 で含み、その他必要な無機栄養塩類を添加したものを使用した。模擬排水の濃度及び水理学的滞留時間(HRT)を変化させることで、容積負荷を4段階に変化させた(1, 2, 4, 6 kg-理論 COD/(m³・d))。MLVSS(微生物濃度の指標)、全有機炭素、バイオガス生成量、流出水中の浮遊物質濃度及び磁性粉濃度の分析を行った。

3. 結果及び考察

実験結果及び活性汚泥法、メタン発酵法、UASB法の文献値を Table 1 で比較する。

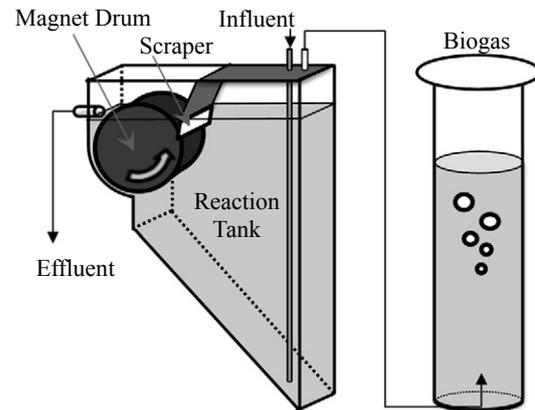


Fig. 1 Apparatus for Bench Scale Experiment

Table 1 Comparisons of Magnetic Methane Fermentation Process and Other Conventional Processes on COD Loading, HRT, MLVSS and COD Removal Rate [1]

	COD Loads [kg/(m ³ ・d)]	HRT [d]	MLVSS [g/L]	COD Removal [%]
Magnetic Methane Fermentation	6	1/3	25	89
Activated Sludge	0.5~1	~1	2~5	95~
Methane Fermentation	1~3	10~30	10	60~90
UASB	10~20	1~3	50	60~90

理論 COD 負荷量を比較すると活性汚泥法及び従来メタン発酵法の 2~12 倍の有機物を処理することが出来た。HRT は活性汚泥法の同等以上である 1 日以下にまで短縮することができた。MLVSS は従来のメタン発酵法だと 10 g/L とされているが、本実験では磁気分離により 27 g/L にまで高濃度化できた。微生物が高濃度化されたことにより、高負荷処理及び高速化に対応することができるようになったと考えられる。TOD 除去率は 89%とメタン発酵法として高い除去率を示した。

4. おわりに

磁気分離を導入は微生物を高濃度化することで、従来のメタン発酵法の 2~6 倍に高速化できることが分かった。このことから磁化メタン発酵法はエネルギーの回収ができる高速水処理技術としての期待ができる方法である。

参考文献

1. 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) 77-85

ローレンツ力を利用した分離装置による海水からの魚卵の分離

Separation of fish eggs from seawater by using a Lorentz-force-type separator

赤澤輝彦, 上村直輝, 岩本雄二, 梅田民樹 (神戸大)

AKAZAWA Teruhiko, UEMURA Naoki, IWAMOTO Yuji, UMRDA Tamiki (Kobe Univ.)

E-mail: akazawa@maritime.kobe-u.ac.jp

1. 序論

船舶が軽荷時に船体を安定させるために積み込むバラスト水は、荷物を積み込む港で放出されるため、本来その海域に生息しない生物を持ち込むことになり、生態系に影響を与えるという問題を起こしている。バラスト水の処理方法として、塩素等の化学薬品を用いた処理が行われているが、水生生物の卵や種には化学的耐性の強いものがある。バラスト水からこれらを除去する方法の確立が求められている。

ところで、本研究室ではローレンツ力(F_L)を利用した海水・油分離装置の研究を行っている。この分離装置の動作原理は以下のとおりである。海水が流れる角筒のダクトに対向する1組の電極板を取り付け通電する(Fig.1)。このとき海水流れと同じ方向に磁場を印加すると、海水には F_L が作用する。一方、不導体である油には F_L が作用しないため、海水から反作用を受ける。電極板の下流側に分離板を設けると、油の濃度の下がった海水流れ(A)と、油の濃度が上がった海水流れ(B)に分離できる。つまり、電気伝導率の違いで作用する F_L が異なることを利用した分離法である。この分離方法の利点は、フィルターを用いないため連続運転可能で運転時に廃棄物を出さず、また、簡単な構造であるため、メンテナンスが容易という特徴も持っている。この分離装置をバラスト水の処理に利用可能ではないかと考えた。分離装置を製作し、魚卵を用いて分離実験を行い、海水からの水生生物の分離の可能性を調べることが本研究の目的である。

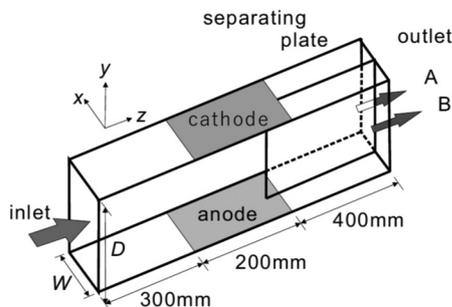


Fig.1. Schematic diagram of the oil-seawater separator.

2. 実験方法

本研究で作製した分離装置は、電極間距離 $D=27\text{mm}$ 、電極幅 $W=16\text{mm}$ 、海水流路(z)方向の電極板長さ L が 200mm である。電極板の最下流部 24mm 以降のダクトには、流路を2等分するように仕切り板を設けている。電極区間と仕切り板を 24mm 重複させるのは、分離性能を向上させるためである。海水には 1A の電流を通電した。磁場は z 軸方向を正の印加方向とし、分離空間中心と超伝導磁石の磁場中心を一致させた。また、分離装置入口の平均流速 u が 10cm/s となるよう流量計を使って流入する海水量を調整した。

3. 実験結果と考察

海水だけを分離装置に流し、海水出口 A, B から排出される海水量 Q_A , Q_B をそれぞれ計測した。排出される海水の偏りを流量比 $R_w = Q_B / (Q_A + Q_B)$ を用いて評価した。Fig.2 に R_w の磁場依存性を示す。零磁場で等しかった A 側, B 側の海水排出量は、磁場を印加すると、分離空間の海水に

F_L が作用するため偏りが生じる。この排水の偏り R_w は、 2T までの低磁場領域で印加磁場に対しほぼ一定であるが、 2T 以上の高磁場領域では、印加磁場に対して直線的に増大する。低磁場での分離空間海水流れと高磁場領域での海水流れが異質なものである可能性を示唆している。本研究で発生させたローレンツ力積力の範囲内で、 R_w は $\pm 6\%$ の変動に抑えられており、魚卵を用いた分離実験を行っても問題ないと判断した。

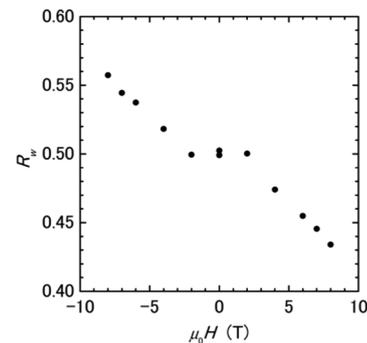


Fig.2. $\mu_0 H$ dependence of R_w .

次に、海水に飛び魚の卵を混ぜ合わせ分離実験を行った。出口 A, B から排出された卵の個数をそれぞれ N_A , N_B として卵分離比 $R_e = N_B / (N_A + N_B)$ を用いて評価した。測定結果を Fig.3 に示す。零磁場において R_e は、ほぼ 0.5 であり卵の海水への注入は上手くできていることがわかる。低磁場領域である 2T での R_e は 92% という高い値を示し、ほぼ出口 A 側からのみ卵が排出されていることが分かった。さらに磁場を上げた 4T では、 84% まで R_e が下がり、その後、磁場増大とともに単調に R_e は増加することが分かった。2~4T での磁場増大に伴う R_e の減少は、卵が排出される B 側の海水流量が磁場増大とともに減少する効果によるものと考えられる。分離空間での海水流れを明らかにすることで分離性能のさらなる改善が図れることが示唆される。

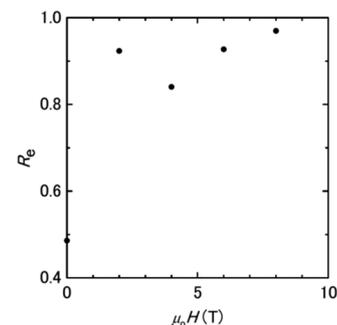


Fig.3. $\mu_0 H$ dependence of R_e .

4. まとめ

飛び魚の卵に対して分離装置は良好な性能を持ち、バラスト水の浄化装置としての潜在性を持つことがわかった。