

# 磁場産業の創生を目指して



随 筆

西 嶋 茂 宏\*

Aiming at Creation of Magnet Based Industry Complex

Key Words : Magnetic Force Control Technology, Magnet based Industries, Environment Conservation, Resource Recycling, Prevention of Energy Efficiency Reduction

## 1. はじめに

“磁場産業”とは耳慣れない言葉ではあるが、これは印字のミスでも何でもなく、“磁場”を使った地域産業を意味している。奇をてらった訳でもなく、実際、岩手県では平成11年度からのJST地域結集型共同研究事業として「生活・地域への磁気活用技術の開発～磁場産業の創生～」プロジェクトが行われた経緯がある[1]。数々の産業の芽となる知見が集積されている。そのプロジェクトと同様に開発してきた技術で、実際の地域産業にまで結びつけることができないかと考えてきた。現在は、福島汚染土壌の減容化を研究テーマの大きな柱に据えているが、いろいろな機器開発を行ってきた。資源回収、環境保全、エネルギー効率低下の抑制等の問題に、磁場を利用した技術、特に磁気力制御技術が寄与することが明らかになっている。ここでは、大きな流れとして磁場産業地域生産複合体（磁場産業コンプレックス）の可能性を目指しながら実施してきた研究・開発、特に機器開発について紹介したいと思う。以下、時系列ではなく応用分野ごとにまとめてみた。開発していた時を思い出し、その時々感想も織り込んで記載した。

## 2. 開発機器

### 2-1 粘稠媒体からの分離

まず手掛けたのが、2000年に行った、太陽電池スライス・マシンに利用するスラリーの再生である[2]。スラリー（粘稠性の研削オイル：粘度は $0.8\text{MPa}\cdot\text{s}$ 程度）は砥粒（SiC、 $\sim 30\mu\text{m}$ ）と混合され、加工部を冷却するとともに砥粒をワイヤーソーに付着させる役目を果たしている。加工を続けていくとシリコン粉末（ $< 1\mu\text{m}$ ）のため粘度が増加し、定期的に廃棄されていた。その中には再利用できる砥粒（SiC）が残存しており、この砥粒を回収する装置の開発である。従来は破碎された砥粒が加工性能を低下させているとの考えのもと、遠心分離で破碎砥粒を除去していたが、必ずしも加工性能の向上に結び付かなかった。そこで当方に依頼が舞い込んできたのである。検討の結果ワイヤーソーの鉄破片が砥粒の角を覆ってしまうことが、加工能力の低下につながる事が明らかになった。（原因究明に1年間を要した。担当者の思い込みや情報の小出しにより、問題の全体像を掴むことができなかったことが理由である。新しい機器開発のむつかしい点が、このような箇所にあることを初めて知った開発であった。）原因が明らかになったため、鉄が付着している砥粒を粘稠性のスラリーから分離すれば良いことになった。ここまで明らかになれば、手法は容易で、超電導磁石を利用して除去装置を製作し、所期の性能を発揮できることができた。

技術は確立したのであるが、太陽電池のスライシング技術が中国に移転されるとともに、技術そのものが遊離砥粒から固定砥粒（ワイヤーにダイヤモンド砥粒を付着させたワイヤーソー）に移っていった。技術の推移とともに時代に追い抜かれた技術となっていった。技術開発のスピードの重要性を痛感した開発でもあった。この技術を「粘稠物質からの強磁



\* Shigehiro NISHIJIMA

1952年10月生  
大阪大学大学院工学研究科原子力工学専攻（1982年）  
現在、福井工業大学 工学部 原子力技術応用工学 教授 工学博士  
原子力工学、超電導応用  
TEL：0776-29-2676  
FAX：0776-29-7891  
E-mail：nishijima@fukui-u.ut.ac.jp  
nishijima\_prf@yahoo.co.jp

性体粉末の分離技術」と捉えなおし、開発を続けた。実はシリコンの加工廃液は時間とともに固化していき約2週間で粘土状になってしまう。このような現象も参考にして食品や工業製品の粘稠媒質を対象とした技術開発を続けた。現在では6 Pa・s程度の粘稠物質（味噌やはちみつ程度）中の20  $\mu$ m程度の磁性体を高速に分離できる技術まで成長している [3]。化学・食品プロセスにおける異物の排除を想定している。

## 2-2 水処理

次に手掛けたのが、製紙工場廃水処理である [4]。2001年から2004年にかけて実施したが、製紙工場廃水の600 ppm程度のCOD成分（主にセルロース、接着剤、印刷インク等の有機物）を100 ppm以下にすることが目的である。このレベルであれば、工場内で再利用できることが分かっていた。初期は廃水の排出基準であるCOD40 ppmを目指していたが、経済的観点から目標値を再設定した。（技術的には可能であるが、水処理として経済的に見合わないことが明らかになったのが理由である。）処理量は日量2000トンである。COD除去は磁気シーディングの手法を利用して実施した。この手法は、強磁性体の酸化鉄粉末（マグネタイト）を廃水に混合することで、COD成分をマグネタイトに吸着させる技術で、その後、いろいろな分野で応用される技術となった。本システムで超電導磁石を利用した理由は、磁場強度を上げることが理由ではなく、1T（10000G）程度の磁場を広い空間（400 mm  $\phi$ ）に発生させるためである。超電導磁石のメリットとして強磁場発生が注目されがちであるが、むしろ中程度の磁場強度

（1～2T）の磁場を広い空間に発生させることにあつたことを認識させられた開発であつた。この開発を通して、磁場を利用した排水処理技術の基礎が確立した。

完成したシステムを工場に導入したのであるが、強磁場についての知見は作業員にとって初めてで、フォークリフトが磁石に吸引されるという事象があつた。実用化にあつては、作業員に強磁場の扱いについての教育が重要であることを認識させられた。本技術と同様の技術で、2008年にはドラム缶洗浄水の浄化装置を開発している。この場合は、高温超電導バルク磁石を利用したことが新規な点である [5]。図1に磁気シーディング装置とバルク超電導磁石の写真を示した。処理量が30 t/hと小さいため、むしろ設置面積を小さくする工夫がなされている。本開発においても、現場の作業員の方々と行き違いがあつた。作業員の方々にとっては従来技術を生業とされているので、新技術が導入されると仕事そのものがなくなってしまうのではないかという危惧を持たれたようであつた。このため必ずしも積極的な協力は得られなかったように思われる。相手の立場を理解し、コミュニケーションを図ることの重要性を改めて思い直している。

2013年から2015年には地熱資源（温水）利用のため、地熱水からのシリカの除去を行った。近年、注目されているのがバイナリー発電である。いわゆる地熱発電よりも深度の浅い熱源を利用した発電法で、その探査・掘削が容易になるメリットがある。一方で、利用できる熱水温度が低いため、水より沸点が低い媒体でタービンを動かすバイナリー発電が



図1

採用される。一般に、地熱熱水は高温高压であるので、いろいろな成分が溶解している。地上に出てきたときには、それらの溶解度が低下し析出することになる。本開発では、シリカに注目し、バイナリー発電に使用される熱水の中からのシリカスケール除去を行った。前述の磁気シーディングの手法を用いて、強磁性体上にシリカを析出させ、それを磁場で回収する方法を採用した。今回は、永久磁石を用いたシステムを構築した。ベルトに装着した永久磁石を、熱水が流れる流路に沿って磁石を移動させる。この磁石で熱水から磁気シーディングされたシリカを分離するシステムである。事業者（温泉の所有者が多い）が、収益をあげられる程度のランニングコストに抑えることが開発の目的である。技術的には達成できたのであるが収支はほぼ同じ。実用化システムの困難さを実感した開発であった。

この開発においては、思いもしなかった出来事が巻き起こった。協働していた企業の運営が思わしくなく必ずしも積極的ではなくなったことである。技術開発は企業の明日を担うものではあるが、今の経営が思わしくない場合は実施できなくなる。当たり前前の事であるが、実際に身の回りで起こるとは思っていなかったのである。

2013年からは火力発電所の給水中からの酸化鉄スケールの除去のための装置を開発している [6]。給水はスケール発生を防ぐ目的で、pHや酸化還元電位を制御する方法が取られているが、必ずしも完璧ではない。このため酸化鉄スケールが発生し、ボイラーの熱交換率を低下させたり、最悪の場合は破損させる場合もある。そこで、超電導磁気分離システムを給水系に導入し、酸化鉄スケールを除去する検討を行っている。現在は、実規模のシステムのモックアップを開発しているところである。図2は発電用ボイラーではないが、工場のヒーターボイラーに小型の超電導磁石を連結させて、スケール除去の実験を行った様子である。トラブルでボイラーが停止するのではないかと大いに心配したが、無事、ひと月程度の実験を終了した。ただ、予想していなかった問題も発生した。超電導磁石の冷凍機の冷却水中で藻が発生し、冷却水の循環を阻害したことである。実際に現場に置いてみなければ分からないトラブルがあるものだと感心した。このような事案は

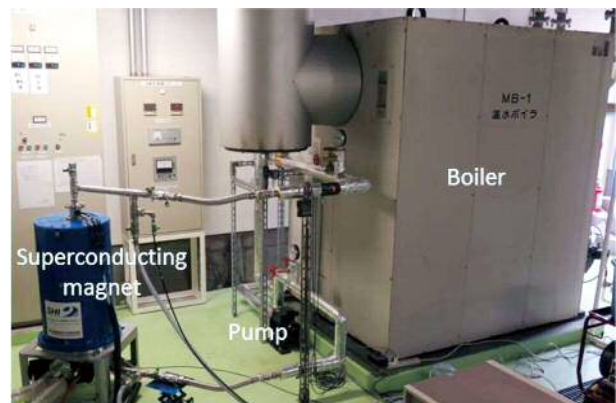


図2

会社の方々にとっては当たり前前の事であろうと、技術者の方々の苦勞の一端を垣間見たような気がしたことを覚えている。

### 2-3 薬剤配送システム

医療応用にも展開を見せている [7]。2005年から2006年には、磁気誘導薬剤配送システムへの応用を検討した。がん治療等では薬剤をがん局所に集中することが望まれるが、この薬剤集中を体外の磁場によって実現しようとする試みである。薬剤に見立てた、100 nm 程度の大きさのマグネタイトを生体に投与し、体外からの磁場で誘導・蓄積する実験を実施した。ラットを利用した実験や、ブタ（体重36kg、体長1m程度）を利用した実験を実施し、良好な結果を得た。図3は手術アームに設置した高温バルク超電導磁石の写真である。磁場による遠隔操作が可能でありかつコンパクトであることが高温バルク超電導磁石を利用した理由である。実用化までには薬剤開発が必須であるとのコメントを受けており、こちらの方は残念ながら進んでいない。薬剤の研究者たちとさらなる開発を進めていきたいと思っている。

初期の実験では、ラットを使用した実験を実施していた。実は担当していた学生が、「ラットがつぶらな瞳で私を眺めるんです！」と私に言いに来た。なんとかなだめて実験を続けるように言ったのであるが、他の研究室に移っていった。工学部の学生にとって、哺乳類の生き物を使った実験は抵抗が高いらしい。実際、自分が実験する立場になったら、実施できるかどうか自信はない。それ以降、テーマを与える前に生物は大丈夫かと尋ねることを心がけている。



図3

## 2-4 資源再生

資源再生、資源回収についても本技術は成果を挙げた。2011年にレアアース（酸化セリウム）のリサイクル技術を開発した[8]。本技術は、磁気アルキメデス法を利用した技術である。磁気アルキメデス法とは、常磁性媒質中に混合物質が存在している場合、それに磁場を印加することで、混合物それぞれの磁化率と比重の関係で、特定物質のみを浮上させることができる技術である。原理は、磁場印加のため常磁性媒質が等価的に重くなり、混合物質に働く浮力が大きくなることである。酸化セリウムはガラスや液晶の研磨に利用される研磨剤である。これら製品には最終工程で研磨が必要であるため、酸化セリウムの懸濁液が研磨媒体として利用される。酸化セリウムそのものは研磨作業後、水処理の際、凝集剤とともに廃棄される。（研磨作業後の水処理のため、通常、凝集沈殿法が利用される。）この廃棄スラッジの中から、セリアを分別回収する手法を開発したのである。磁場は超電導磁石を利用して発生させている。残念ながら（？）その後のレアアースの価格の暴落で、企業の開発モチベーションが下がり、実用化までは達していない。社会情勢に研究が左右されるという現実と直面した開発であった。しかしながら、このシステムの開発により資源回収分野の磁気力制御技術の実用化の条件が見えてきたと思っている。

## 2-5 汚染土壌の減容化

2015年から2016年にかけては、磁場を利用した福島汚染土壌の減容化について技術開発を行っている[9]。この研究のスタートは、著者が原子力工学出身であることが大きく関与している。原子力を志した研究者としては軽視できないテーマであった。福島での汚染土壌は、2200万 $\text{m}^3$ に及ぶと推定されており、その減容化が大きな課題となっている。現在はCsが問題となっており、検討している手法は以下の要領である。Csは粒径の小さな粘土に多く吸着しているので（放射性同位元素のみならず重金属も同じ）、まず分級により粒度の小さな粘土・シルトを分離する。Csはカオリナイト（反磁性）のような1:1粘土鉱物には弱く吸着し、パーミキュライト（常磁性）のような2:1粘土鉱物には強く吸着する。このため高勾配磁気分離法を利用すれば、Csを高濃度に強く吸着している常磁性体の2:1粘土のみを分離できることになる。そこで、福島の南相馬市に超電導磁石を持ち込み、磁気分離実験を行ったところ、良好な結果を得ている（図4）。ただ、田畑のような土壌では、有機物が多く、有機物がいわば接着剤のような役割を果たし、団粒構造を成しており、2:1粘土鉱物のみ分離が困難になることが明らかになった。現在は、磁気分離に供するた

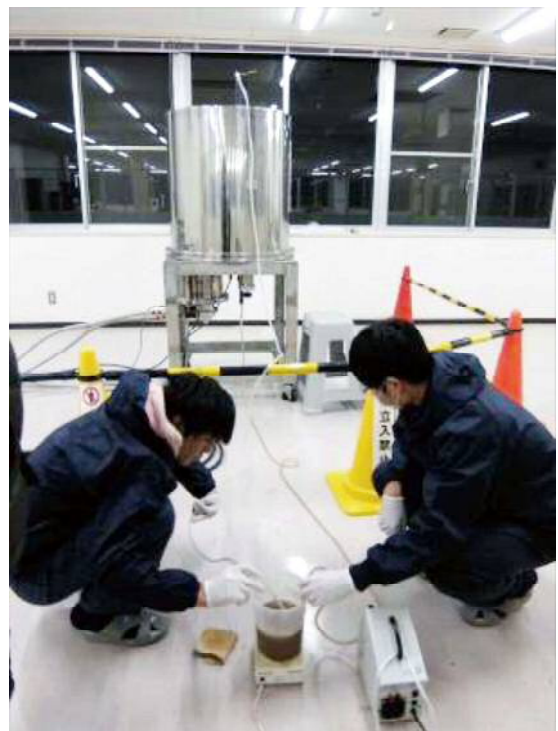


図4

めの土壌の前処理方法の開発を行っている。

福島に何度も足を運んでの実験で、現地の方々と交流が続いている。頭が下がる思いをしたのは、農家の方で放射線取扱主任の資格を取った方が居たことである。かなり難しい国家資格であるが、福島での農業再開を目指して放射性物質や放射線の勉強をされたのである。その気持ちに思い及ぶたびに、自分のすべき仕事があるところの思いを新たにすることを覚えている。

### 3. おわりに

ここで紹介した事例は、機器開発が主とした研究であるため、基本は、企業との共同のプロジェクトであり、外部資金を獲得したために可能となった機器開発である。ここで記述した技術以外にも、基礎研究は行ってきておりいろいろな方面への応用が芽吹いている。磁気力応用技術はその汎用性が高く、工夫次第で地域企業との連携は可能と思っている。

「磁場産業」の夢は、岩手の地域結集のプロジェクトから受け継いでいる。日本発の磁場産業、うれしい夢である。まわりまわって、福島復興まで繋がればと思っている。皆様のご支援、ご助言をお願いするものである。

### 参考文献

1. <http://www.jst.go.jp/chiiki/15nennsi/15-data11.pdf>
2. S. Nishijima, Y. Izumi, S. Takeda, H. Suemoto, A. Nakahira and S. Horie, Recycling of Abrasives from Wasted Slurry by Superconducting Magnetic Separation, IEEE Trans. Appl. Supercond., 13, 2, 1596-1599 (2003)
3. S. Hayashi, F. Mishima, Y. Akiyama, S. Nishijima, Study on High Gradient Magnetic Separation for Selective Removal of Impurity from Highly Viscous Fluid, IEEE Trans. Appl. Supercond., 21, 3, 2055-2058 (2011)
4. S. Nishijima, S. Takeda, Research and Development of Superconducting High Gradient Magnetic Separation for Purification of Wastewater From Paper Factory, IEEE Trans. Appl. Supercond., 17, 2, 2311-2314 (2007)
5. F. Mishima, Y. Akiyama, S. Nishijima, Research and Development of Magnetic Purification System for Used Wash Water of Drum", IEEE Trans. Appl. Supercond., 20, 3, 937-940 (2010)
6. H. Okada, K. Imamura, N. Hirota, T. Ando, S. Shibantai, N. Mizuno, M. Nakanishi, F. Mishima, Y. Akiyama, S. Nishijima, H. Matsuura, T. Maeda, N. Shigemoto, Development of a magnetic separation system of boiler feed water scale in thermal power plants", IEEE Trans. Appl. Supercond., 26, 3, 3701505 (2016)
7. S. Nishijima, F. Mishima, Y. Tabata, H. Iseki, Y. Muragaki, A. Sasaki, N. Saho, Research and Development of magnetic drug delivery system using bulk high temperature superconducting magnet, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 19, 3, 2257-2260 (2009)
8. K. Hashiguchi, F. Mishima, Y. Akiyama, E. Maeda, S. Nishijima, Magnetic Separation System for Recovery of Glass Polishing Agent, IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, 3, 3700204 (2013)
9. K. Yukumatsu, N. Nomura, F. Mishima, Y. Akiyama, S. Nishijima, Study on Volume Reduction of Cesium Contaminated Soil by Magnetic Separation, IEEE Trans. Appl. Supercond., 26, 4, 3700604 (2016)