

超電導磁石をどう使いこなすか？～磁気力制御技術の歩み～

大阪大学 大学院工学研究科 秋山 庸子

1. はじめに

磁気力制御技術は、強い力を遠隔で物質に作用させることができる強みを持つ。その応用先は、主に水質浄化、土壌浄化、資源循環、磁気ドラッグデリバリーシステムの4つに大別される。ここ約10年でかなり実用規模に近づいてきたものの、超電導磁石の持つ特有の課題も明らかになってきた。超電導磁石の磁場応用の一つとして位置づけられる磁気力制御技術のこれまでの歩みと将来性について、私なりの視点から総括したい。

2. 水質浄化のための磁気力制御技術の歩み

水質浄化で鍵となる技術は、磁気シーディング技術と、高勾配磁気分離（HGMS）技術である。前者は、マグネタイト等の強磁性体を分離対象物質に吸着または付着させることによって磁気的な“種付け”を行うことをいう。このことにより、磁場を印加した際に物質に作用する磁気力が小さい反磁性体や常磁性体も低磁場で分離できる。後者は、超電導磁石の磁場発生領域に強磁性のメッシュやボール等を配置することで強磁性体近傍の磁場勾配を高める手法であり、この手法により、水の高速度大量処理が実現できる。

磁気シーディング技術と高勾配磁気分離技術の融合によって、微生物をはじめ、製紙工場排水、染料、研磨廃液、重金属イオンなど、様々な汚染物質を取り除くことが可能であることが示された¹⁾。これらの技術は競合技術として凝集沈殿法や濾過法等が挙げられるが、添加薬剤が少なく二次廃棄物が少ないことが長所として挙げられた。一方で初期コストやメンテナンス性に課題が見られた。

次の段階として対象となったのがエネルギー関連の水処理である。特に、地熱発電において生成するスケール（シリカ析出物）、および火力発電所ボイラーの鉄系スケール（配管腐食物質²⁾の除去については、それぞれNEDOとALCAの大型プロジェクトとして研究開発が実施され、実際の発電所への組み込みを想定した現場での実証実験が実施された。これらの研究は、配管閉塞による事故や配管へのスケール付着による熱エネルギーの損失を防ぐための研究であり、特に火力発電所のスケールは磁気シーディング無しに分離可能であるため、実用に近い技術として注目された。いずれの体系も高温高压の水が

対象であり、かつ発電容量に合わせた高速の処理が求められたが、超電導磁石を用いた実験のスケールとしては最大規模の、室温ボア径φ400mm、最大磁束密度5Tの大型超電導磁石を用いた数十kg、水量12m³レベルの屋外大規模実験を含めた実証により（図1）、技術の適用可能性が実証された。また、火力発電所バイパス系への導入による現場実験にも成功した。これらの実験により技術実証がなされた一方で、超電導磁石の搬送や、屋外環境での連続稼働の難しさ、現場での安全確保などの課題も明らかになった。



図1 ボア径φ400mm超電導磁石を用いた火力発電所ボイラースケール除去の大型実験装置

3. 土壌浄化のための磁気力制御技術の歩み

2011年3月11日に起こった東日本大震災とそれに伴う福島第一原発事故は、磁気力制御技術に関わる研究者にとって大きな転換点となった。磁気力制御関係の研究者や技術者の中に、自分たちの持つ技術で福島復興に貢献したいという強い意識が広がっていったことは確かである。

磁気力制御技術の適用先として、放射性セシウムを含む除去土壌の減容化に主軸を置いた研究が行われた。土壌中の成分の中でも75μm以下の成分である粘土・シルトの表面積が大きいため放射能濃度が高い。この粘土・シルト分のうち、パーミキュライトをはじめとした2:1型粘土鉱物が構造的にセシウムイオンを大量に強く吸着する性質を持つことが事故前から農業分野で知られていた。粘土鉱物には2:1型と1:1型鉱物があるが、前者は常磁性体でありセシウムイオンを層間に強く吸着し、後者やシルト成分の多くは反磁性体であり、セシウムイオンをほとんど吸着しない。この性質に着目し、2:1型粘土鉱物のみを選択的に高勾配磁気分離法で捕捉し除去することで、土壌の放射能濃度を低減させる試みが行われた。最終的には実際の汚染土壌を用い

て50%程度の放射能濃度の低減³⁾が見られ、学術的にも既存手法に対して新規な手法として注目された。土壌の分散性、処理速度等の障壁があり実用化にはまだ至っていないが、淘汰管や旋回流との組み合わせなど、新たな磁気分離法の開発が現在も継続して行われている。

また大阪大学の西嶋茂宏教授（現大阪大学名誉教授、福井工業大学）により、材料研究会として事故の翌年から福島県内で「福島復興支援ツアー」が立ち上げられたことも、本技術に関わる大きな成果である。福島第一原発や廃棄物処理施設等の現場見学と講演会を含む2日間のプログラムであり、COVID-19 影響での中止を除いて現在も毎年行われており、福島復興について低温工学・超電導の観点から見直す貴重な機会となっている。

4. 資源循環のための磁気力制御技術の歩み

水質浄化、土壌浄化とともに基礎段階ながら着実な進歩を遂げてきたのが資源循環の技術である。これは、廃棄物から有用物質を種類ごとに分離し、再利用することを目的とした磁気力制御技術である。前述の高勾配磁気分離が適用可能な場合もあるが、複数種類の物質を効率的に分離する手法として磁気アルキメデス法が挙げられる。磁気アルキメデス法とは、常磁性媒質を用いて、媒質に作用する見かけ上の下向きの重力を増加させることで、物質に作用する浮力を増加させ、磁化率と比重に依存する浮上高さの違いにより物質を分離する手法である。この手法は、無重力状態の再現や細胞の三次元構造の構築にも用いられている。

分離対象としては多様な材料の分離が検証されており、非鉄金属、蛍光体、プラスチック、構造異性体など有機・無機を問わず幅広い材料に適用可能であることが示されたが、資源循環への適用のためには、大規模な連続処理システムが必要とされる。安定した浮上を維持しながら流れの中で連続分離を行うことが本技術の課題となっている。特に水平方向の磁場の利用や、磁場勾配の形成が有効とされており、超電導磁石の設計者と連携した高度な磁場設計が有用であると考えられる。

5. 磁気ドラッグデリバリーシステムのための磁気力制御技術の歩み

ここまで述べてきた研究が主に、環境・資源・エネルギー分野への磁気力制御の展開であるのに対し、磁気ドラッグデリバリーシステムは唯一、医療分野への応用である。本技術は2つの方向性があり、一

つは細胞レベルでの導入、もう一つは臓器レベルでの精密集積である。

前者の研究には、遺伝子導入や無針注射などの医学的な研究と組み合わせた研究が行われ、従来の手法を持つ標的性をアシストする目的で磁場を用いるものである。in-vitro（試験管内の）実験により、従来の手法に対して磁場による遺伝子や薬剤の導入効率が向上することが確認された。

後者の研究は、血管に導入された磁性薬剤（強磁性粒子などで磁性を付与した薬剤）を誘導、集積するものであり、抗がん剤などの副作用の強い薬剤を磁場によって患部に誘導・集積させることにより、副作用を低減するものである。血管分岐での誘導から始まり、特定の臓器への集積¹⁾、先端部のみを強磁性化した磁性針で磁場勾配を増加させることによる臓器の一部への集積、回転磁場を用いた体内深部への集積⁴⁾、と展開を遂げてきた。磁場誘導のために用いられる酸化鉄粒子の特性から、MPI（磁気粒子イメージング法）や温熱療法との組み合わせも検討されている。しかし、とくに磁場による患部への誘導は、体内深部にある標的部位に強磁場を発生させる必要があり、また強磁性粒子の凝集による血管閉塞のリスクから、実際の人体を想定した現実的なシステムは構築できていない。

まずは前者のような医学的な既存手法を磁気力でアシストする形から実用に向けて開発を行っていくことが重要であり、そのためには医学系の研究者との密接な連携が必須であると思われる。

6. さいごに

磁気力制御技術は、社会に広く受け入れられる段階には残念ながら達していない。しかし超電導磁石の設計者と磁気力制御システムの開発者、そして現場の使用者との相互のシーズ・ニーズマッチングによって、実践的に使える磁気力制御システムに成長させることができるのではないかと考えている。将来的に持続可能社会に貢献する技術となるように、今後も人的ネットワークを広げながら試行錯誤を重ねていきたいと考えている。

7. 参考文献

- 1) T. Mori et.al: Prog. Supercond. Cryog.,**18** (2016) 23
- 2) Y. Akiyama et. al: Prog. Supercond. Cryog. **23** (2021) 12
- 3) 秋山庸子ら：低温工学 **55** (2020) 172
- 4) M. Kirimura et. al: IEEE Trans. Appl. Supercond.,**30** (2020) 440140