弱磁性体である焼結鉾に対する磁気吸引浮上用電磁石の検討

正員 佐藤 修 一 (新日本製鐵)

正員 宮 健 三 (東京大学)

正員 山 田 一 (信州大学)

Considerations on Electromagnets for Magnetic Suspension of the Sinter Cake as Paramagnetic Material
Shuichi Sato, Member (Nippon Steel Corp.)
Kenzo Miya, Member (The University of Tokyo)
Hajime Yamada, Member (Shinshu University)

Permeability in down draft sintering process in steelmaking processes is well known not to be good because load of sinter cake oppress permeability in the lower layer of sintering bed. If the sinter cake as paramagnetic material could be suspended by magnetic force, it is expected that permeability will be improved. This paper presents theoretical and experimental characteristics of three magnets, i. e. electromagnet using permanent magnets, electromagnet using a high T_c superconductor as a permanent magnet and superconducting magnet in order to develop electromagnets for magnetic suspension of the sinter cake. The following results were obtained.

- (1) It was verified that the sinter cake as paramagnetic material having relative permeability of 1.2 ~ 1.8 could be suspended by the magnetic force.
- (2) Calculated values to the magnetic flux density and the electromagnetic force were agreed with measured values within the error of $\pm 10\%$.
- (3) As a result of comparison to above three electromagnets, it was clarified that performance of superconducting magnet is better than those of other electromagnets considering form saving energy and magnetic force.

キーワード：焼結鉾，磁気浮上，永久磁石，酸化物系超電導バルク，超電導電磁石

1. まえがき

鉄鋼プロセスにおける空気下方吸引式焼結機の通気性は、焼結鉾自身の荷重等による圧密化のため、悪化することが知られている。その結果、燃焼効率が低下し生産性、品質等に影響を与えている。

もし弱磁性体である焼結鉾を磁気浮上させることができるなら、通気性が改善できる^{(1), (2), (3), (4)}。

よって、焼結鉾の磁気吸引浮上を目的として①磁束の重量効果を狙って永久磁石を磁極に張り付けた永久磁石併用形電磁石、②酸化物系超電導バルクを磁化させて永久磁石とし磁極に張り付けた酸化物系超電導バルク併用形電磁石、③臨界温度以下で電気抵抗がゼロになる超電導現象を利用した金属系超電導電磁石の3種類の電磁石を試作または数

値解析で性能を評価した。本論文では、下記の内容について報告する。

- (1) 弱磁性体である焼結鉾の電磁力による磁気浮上の可能性について検討した結果。
- (2) 上記電磁石の発生磁束密度及び吸引力の計算法について検討した結果。
- (3) 上記電磁石の性能を比較し、磁気浮上用電磁石として最も有効な電磁石を検討した結果。

2. 焼結鉾の磁気特性と浮上可能性及び装置化課題

2.1 焼結鉾の磁気特性

焼結鉾の磁気特性は、焼結鉾を粉体にして振動試料型磁力計により測定し算出した。比透磁率は磁束密度0.2[T]で1.2 ~ 1.8 程度である⁽¹⁾。

2.2 焼結鈳の浮上可能性

2.2.1 浮上の基本原理

図1に磁気浮上焼結鈳製造法の動作原理を示した。同図において原料を移動させながら原料の表層に点火し、空気を上部から下部へ吸引しながら燃焼を下方へ進めて焼結鈳を生成させる段階で、電磁力により上部から非接触で焼結鈳を浮上させることにより下部原料への焼結鈳荷重及び負圧を軽減させる。

図1 磁気浮上焼結鈳製造法の動作原理

Fig.1 Principle operation of magnetically levitated sintering method.

焼結鈳の比透磁率は非常に低いが、磁界を印加すれば焼結鈳と大気との透磁率の差からエネルギー勾配が発生し焼結鈳を非接触で吸引浮上させることが原理上可能である。焼結鈳(透磁率 μ_r)が空気(上方向: z)に作用する単位断面積当りの力は、マクスウェルの応力式を簡略化した以下の式で計算できる。

$$F_z = \frac{B_z}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_r}\right) + \frac{\mu_0}{2} H_x^2 (\mu_r - 1) \dots (1)$$

ここに、 B_z : 上方向磁束密度、 H_x : 水平方向磁界

2.2.2 浮上可能性探索試験

(1) 試験方法

図2に示す50[kg]焼結鈳を燃焼できる試験装置で焼結鈳の浮上可能性についての試験を実施した。焼結鍋試験装置は焼結鍋(SUS304製)、吸引プロア、点火バーナ、磁気浮上装置で構成される。焼結試験は試験鍋に原料として鉄鈳石粉を装入し表層部にバーナで着火した後下方からプロアにより吸引することにより焼結反応を下方へ進行させた。また、この装置は焼結層内の焼結鈳重量と吸引圧に基づく総合荷重に見合う電磁力を発生するように上面と側面に磁極を配置した設計とし試作した。表1に主仕様を示した。

(2) 試験結果

図3に定格電流通電時の3電磁石の吸引力-ギャップ特性を示した。50[kg]焼結鈳を常温で浮上させる場合、側面電磁石(P R型コイル)のみではギャップ30[mm]で完全磁気浮上できた。なお焼結層深さに応じて電流を調整し、焼結層内の焼結鈳重量と吸引圧に基づく総合荷重(最大約75[kg])に見合う吸引力を発生させ実際に燃焼試験を実施した

結果、焼結鈳は完全浮上し、焼結時間は最高30%短縮した。またその時焼結時間の短縮にもかかわらず歩留、強度の低下はなく、品質としては被還元性が向上し、RDI(熱間強度)が安定し、粒度分布はシャープになった^{(1), (2)}。

図2 電磁石を利用した50[kg]焼結鍋試験装置の概要図

Fig.2 Test equipment of 50[kg] sinter cake using electromagnets.

表1 焼結浮上試験装置の基本仕様

Table 1 Principal specifications of test equipment for sinter cake.

項目	数値 [単位]
名称	P H 型コイル P R 型コイル
型式	円筒型 円筒型
電流	90 [A] 90 [A]
巻数	560 [回] 720 [回]
外径	φ 280 [mm] φ 500 [mm]
内径	φ 190 [mm] φ 340 [mm]
高さ	460 [mm] 240 [mm]
外径	φ 320 [mm]
内径	φ 300 [mm]
層厚	600 [mm]

図3 3電磁石による吸引力のギャップへの依存性

Fig.3 Dependency of magnetic forces upon the length of gap.

2.3 装置実機化の課題

実機では側面の壁が鋳鋼製のため上面にしか電磁石を設置できない上に、連続ラインで焼結鉾が水平に移動するため電磁石の設置台数が多くなる。よって設備コスト及び消費電力を下げるためには高性能・省電力型の磁界発生装置が必要であり、以下に3方式の電磁石を検討した。

3. 各種電磁石の適用検討

3.1 3 電磁石の構造・特徴

3.1.1 永久磁石併用形電磁石

本電磁石の構造は、図4に示す通り電磁石の磁極表面に高性能永久磁石を張り付け、コイル及び永久磁石から発生する磁束の重畳効果を狙ったものである。こうした構造の電磁石は高性能・省電力を目的として最近実用化がされてきたが、そのほとんどの吸引対象が鉄板等の強磁性体である。小型電磁石の設計についてはあまり最適化がなされていないのが現状である。今回試作した電磁石はコイルの起磁力は約30[kA]である。また永久磁石は温度特性がよく高性能である残留磁束密度約1.1[T]、保磁力0.676[MA/m]のSmCo系の永久磁石を使用し、厚さを約30[mm]とした。

3.1.2 酸化物系超電導バルク併用形電磁石

酸化物系超電導バルク併用形電磁石は、図5に示す構造である。実機設備の電磁石形状は、焼結鉾が長方形のパレットで運ばれるため、長方形が望まれるが、現状の超電導バルクの実用サイズは円筒型でφ45[mm]、15[mm]厚さのものであるため、円筒型電磁石を採用した。高温超電導バルクはQMG法により作成されたYBaCuOバルクで、液体窒素により77[K]に冷却され超電導現象を発現する。フレームはS S鋼でE型断面である。高温超電導バルクの着磁手順は次の通りでありフィールドクーリングプロセスにより行った。常温で超電導体に1.2[T]の一樣磁界を印加した後、液体窒素により超電導体を冷却する。その後、磁場を0[T]まで線形に減少させる。このようにして磁化された超電導体を電磁石に据え、電磁石の起磁力を0[A]から10,000[A]まで上昇させた。

酸化物系超電導バルク(High Tc Superconductor)はピン止め効果により、磁気ヒステリシス現象を発現する。そのため履歴の違いによって、強磁性体のようにも反磁性体のようにも振舞う。超電導バルクが強磁性体となるように磁化させた場合、それは一種の永久磁石とみなせる。よって、前述した常電導の永久磁石併用形電磁石と同等な効果が期待されているがまだ実用化されていない。

3.1.3 金属系超電導電磁石

本電磁石の構造は図6に示す通りである。超電導現象の一つとして、臨界温度以下において電気抵抗が完全にゼロになることがあげられる。電気抵抗がゼロのため電流を流しても熱の発生が無く大電流をロスなく送ることができる。又、大電流が流せるため空芯であっても強力な磁場発生装置を作ることができる。よって本プロセスに超電導電磁石を適用することにより、省電力のみでなく設備の小型・軽

量化等の利点がある。

3.2 磁束密度及び吸引力の測定試験

図7は、焼結鉾に対する吸引力測定試験の概略図を示した。発生磁束をホール素子プローブにより測定した。発生吸引力は、常温の焼結鉾の上部に設置した電磁石で磁気浮上させ、焼結鉾の下に設置した天秤計と電磁石に設置した4台のロードセルで測定した。電磁石としては永久磁石併用形電磁石または酸化物系超電導バルク併用形電磁石を使用した。

図4 永久磁石併用形電磁石の構造

Fig.4 Structure of the electromagnet using permanent magnets.

図5 酸化物系超電導バルク併用形電磁石

Fig.5 Structure of the electromagnet using a high Tc superconductor as a permanent.

図6 金属系超電導電磁石

Fig.6 Structure of the superconducting magnet.

図7 吸引力測定試験の概略図

Fig.7 Test equipment of magnetic force.

3.3 磁束密度及び吸引力の実験値と数値解析値との比較

3.3.1 数値解析方法

(1) 線材が発生する磁界分布の解析は、永久磁石併用形電磁石については汎用2次元有限要素解析ソフト(J-MAG 2D)で解析した。この場合の解析諸元は、要素数1750、接点数1846であり、計算機はワークステーションNSSUNを使用した。また、金属系超電導電磁石については、汎用有限要素解析ソフト(FLEDDY)を利用して3次元解析した。この場合の解析諸元は、要素数5148、接点数6118であり、計算機はスーパーコンピュータVP2200を使用した。

(2) 超電導バルク内の超電導現象の解析は、解析領域を超電導領域 Ω_{sc} 、強磁性体領域 Ω_m 、空気領域 Ω_a の3つに分割し、軸対称磁気ベクトルポテンシャル法を用いて行った。支配方程式はアンペールの法則、ファラデーの法則であり、高温超電導体の電磁気的特性は臨界状態モデルによって取り扱った。また、臨界電流密度の磁束密度に対する依存性を表すモデルはK_imモデルを用いた⁽⁵⁾。

3.3.2 実験値と数値解析値との比較

(1) 永久電磁石併用形電磁石

本電磁石の長手方向中央部における幅方向磁束密度分布をギャップ g をパラメータとした実測値と数値解析による計算値を図8に示した。端部誤差は大きくなるが、電磁石直下では計算誤差は小さい。

前述した(1)式より長手方向0.7[m]、幅方向0.37[m]の面積における吸引力を計算した結果と実測値を比較した結果を図9に示した。

焼結鈹の磁気特性のバラツキを考えると電磁力の計算値は実測値に非常によく一致していると言える。永久磁石併用形電磁石の吸引力と永久磁石の代わりに鉄フレームを設置した従来の銅線コイルのみによる電磁石の数値解析で計算した吸引力とを参考のため比較した。永久磁石併用形電磁石は従来型の電磁石に比べて高性能である。又、例えば吸引力が1.5[kN]の場合、起磁力が約60%程度であるので消費電力は約40%となり省電力効果があることが判った。

図8 永久磁石併用形電磁石の長手方向中央部の定格励磁磁束密度分布

Fig.8 Magnetic flux distribution of the electromagnet using permanent magnets.

 図9 永久磁石併用型電磁石による吸引力の起磁力依存性 ($g=30$ [mm], 作用面積 0.7 [m] $\times$ 0.37 [m])

Fig.9 Magnetomotive force dependency of magnetic force of the electromagnet using permanent magnets.

図10 酸化物系超電導バルク併用形電磁石の中心軸上での磁束密度

 Fig.10 Magnetic flux density of the electromagnet using a high T_c superconductor.

(2) 酸化物系超電導バルク併用形電磁石

超電導体単体による磁束密度分布に関して実験結果と実験と同様な条件で酸化物系超電導バルクを磁化させた場合の超電導体による磁束密度の数値解析結果を図10に示す。Kimモデルに於けるパラメータである J_{co} 、 B_{01} は、それぞれ $55[\text{MA}/\text{m}^2]$ 、 $0.1[\text{T}]$ とした。数値解析結果は、超電導バルク表面において測定誤差等により精度が悪いが、実用的なギャップ $10[\text{mm}] \sim 50[\text{mm}]$ において実験結果と良く近似しており、数値計算は妥当なものであるといえる⁽⁶⁾。

(3) 金属系超電導電磁石

図6に示した構造の超電導電磁石によるコイルから $175[\text{mm}]$ （但し、クライオスタットの厚さ $145[\text{mm}]$ ）離れた焼結鉕表層の発生磁束密度を数値解析した結果を図11に示した。コイル巻線は $2200[\text{回}]$ 、起磁力は約 $700[\text{kA}]$ である。常電導の電磁石に比べて発生磁界は強く、約1.5倍程度広い範囲に分布する。なお、現在試作による性能検証を計画中である。

図11 金属系超電導電磁石の磁束密度分布計算結果

Fig.11 Calculated results for magnetic field of superconducting magnet.

4. 考察

4.1 数値解析による装置の最適化検討

4.1.1 永久磁石併用形電磁石

電磁石と焼結鉕との距離を $g=30[\text{mm}]$ とし、定格通電した場合の永久磁石の種類、厚さによる吸引力特性の変化を検討した。現在の主な実用永久磁石はアルニコ磁石、フェライト磁石、Sm-Co 磁石、Nd-Fe-B 磁石の4種類である。前二者は保磁力も飽和磁束も小さく、例えばアルニコ磁石は吸引力で比較すると、希土類磁石に比べて約70%に低減する。Nd-Fe-B 系永久磁石を特性の温度変化を考慮して使用すれば本電磁石は最高の能力を発揮する。E型フレーム電磁石の内極・外極に張り付ける永久磁石の厚さは、 $50[\text{mm}]$ 以上になるとヨーク（磁極）が短くなり磁気抵抗が増加し、永久磁石の効果が飽和してくる。永久磁石は高価な

めコスト・パフォーマンスを検討する必要があるが、ほぼ $20[\text{mm}] \sim 30[\text{mm}]$ 程度が最適と思われる。

又、永久磁石の磁極表面への取付けは、可能なかぎりコイルの下面レベルからはみ出さない方がよい。数値解析の結果では、完全にはみ出して磁極の表面に張り付けただけに比べて、約10%程度吸引力が増加した。

4.1.2 酸化物系超電導バルク併用形電磁石

本実験では酸化物系超電導バルクをセットした磁場発生装置の発生磁場はセットしていない磁場発生装置の発生磁場に比べて低減する。その理由は、磁化した後に超電導体を磁場発生装置にセットしコイル電流を上昇させると外部磁場が上昇するため最初に磁化した時と逆向きの遮蔽電流が超電導体表面に生じるためである。数値解析による遮蔽電流密度分布からも実証できた⁽⁶⁾。

以上の考察から、超電導体の磁化を改良する必要がある。そこで超電導体の磁化を他の場所で行うのではなく、磁場発生装置にセットした後にフィールドクーリングプロセスにより磁化を行うことを考える。具体的には常温で超電導体を装置にセットしコイルの起磁力を $20[\text{kA}]$ 流し超電導体を冷却した後にコイルの起磁力を $10[\text{kA}]$ に低減させる。この改良された磁化方法による磁場発生装置のギャップ $10[\text{mm}]$ における磁束密度の数値解析結果を図12に示した。尚、比較のために超電導バルクの代わりに鉄フレームを設置した従来型電磁石の磁場分布を数値解析により計算した。磁場発生装置の作る磁場を高温超電導バルクにより効果的に強めることが出来る。又、その分だけコイル電流を下げて省電力化することもできる。

図12 改良された超電導バルク併用形電磁石の磁束密度

Fig.12 Magnetic field of improved electromagnet with a high Tc superconductor.

4.2 3 電磁石の性能比較

実機において焼結鉕をギャップ $30[\text{mm}]$ で浮上・保持させるためには、焼結鉕表層の平均磁束密度を約 $0.5[\text{T}]$ にする必要がある。数値解析により、約 $3[\text{m}] \times 3[\text{m}]$ の範囲で平均磁束密度 $0.5[\text{T}]$ を発生させる設備検討を行い、各電磁石の

文 献

発生磁束密度及び消費電力で評価した結果を図13に示した。永久磁石併用形電磁石は起磁力80[kA],ヨーク長さ3[m],幅0.74[m]で図4に示した構造のものを4台使用した。酸化物系超電導バルク併用形電磁石は、バルクサイズ $\phi 100$ [mm],外径 $\phi 600$ [mm]で図5に示した構造のものを25台使用した。金属系超電導電磁石は、3.3.2(3)で述べた仕様、構造のものを1台使用した。また、永久磁石併用形電磁石の永久磁石の代わりに鉄フレームを設置した従来形電磁石の解析を行い比較した。なお、従来形電磁石は、起磁力110[kA]で構造、サイズは永久磁石併用形電磁石と同じである。今回検討した磁場発生装置は、従来形電磁石に比べて超電導バルク併用形電磁石を除いて各々高性能で省電力効果がある。その中でも発生磁束密度及び省電力効果から判断すると10[kW]程度の冷凍機用圧縮機の電力が必要であるが金属系超電導電磁石が最も有効であることが判明した。なお超電導バルク併用形電磁石は、現状では超電導バルクの外部磁場に対する臨界電流特性が低いため必要磁束密度の確保が出来ない。

図13 従来型電磁石に対する各種電磁石の性能
(目標平均発生磁束密度0.5[T]の場合)

Fig. 13 Performance of various magnets.

5. あとがき

鉄鋼プロセスにおける空気下方吸引式焼結機の通気性は、弱磁性体である焼結鈹を磁気吸引浮上させることができれば、改善が期待できる。そこで、焼結鈹の磁気吸引浮上を目的として、永久磁石併用形電磁石、酸化物系超電導バルク併用形電磁石及び金属系超電導電磁石の3種類について実験及び数値解析で性能を検討し、下記の成果を得た。

(1) 比透磁率 1.2~1.8 の弱磁性体である焼結鈹でも電磁力によって磁気浮上が可能であることを確認した。

(2) 焼結鈹の磁気吸引浮上のための各電磁石による発生磁束密度と吸引力を誤差10%以内で算出できる計算法を確立した。

(3) 上記3種類の電磁石の性能比較から、現時点では金属系超電導電磁石が最も有利であることを明らかにした。
(平成6年7月25日受付, 平成6年10月12日再受付)

- (1) 稲角 忠弘, 藤本 政美, 佐藤 修一, 佐藤 啓二
: シンターケーキ荷重の磁力制御特性, 材料とプロセス, Vol.6, No.4, pp.904(1993)
- (2) 稲角 忠弘, 藤本 政美, 佐藤 修一, 佐藤 啓二
: 磁力によるシンターケーキ荷重制御焼結の効果, 材料とプロセス, Vol.6, No.4, pp.905(1993)
- (3) 佐藤 修一, 佐藤 啓二, 宮 健三, 山田 一
: 弱磁性体の非接触磁気吸引浮上電磁石の検討, リニアドライブ研究会, LD-94-28, pp.17-26(1994)
- (4) 佐藤 修一, 藤平 幸一, 塚本 修巳, 山田 一
: 焼結鈹の非接触磁気吸引浮上制御方式の基礎的考察, リニアドライブ研究会, LD-94-43, pp.103-112 (1994)
- (5) N.Takeda, M.Tsushima, M.Uesaka & K.Miya
: "A numerical analysis of electromagnetic field in Type-II superconductors", Proceeding of ISEM Nagoya, Vol. 3, pp.125-128(1992).
- (6) T.Uchimoto, Y.Yoshida, K.Miya & S.Sato
: "Study on Intensification of Magnetic Field Using High Tc Bulk Superconductor", Proceeding of the second Japanese-Czechoslovakia Joint Seminar of Applied Electro-magnetics in materials, Vol.2, (1994) in press.

佐藤 修一 (正員)

1950年11月生。1974年3月九州工業大学工学部電気工学科卒業。同年4月新日本製鐵入社。誘導加熱装置及びその鉄鋼プロセスへの応用に関する研究開発, 設計に従事。63年から主としてリニアモータ, 強磁場発生装置の超電導化とその鉄鋼プロセスへの応用に関する研究開発に従事。

宮 健三 (正員)

1940年6月生。1964年3月東京大学工学部卒, 1969年東京大学工学系大学院博士課程終了, 1983年東京大学工学部教授(原子力工学研究施設), 工学博士。核融合炉工学, 応用電磁気学の研究に従事。日本AEM学会会長, 日本原子力学会核融合工学部会副会長。

山田 一 (正員)

1933年4月生。1959年東京工業大学大学院修士課程終了後, 同年信州大学工学部に勤務し, 1984年同大学教授。工学博士。電磁力回路の解析に興味をもち, リニアモータ, 電磁センサおよび電磁駆動型人工心臓の研究に従事。日本応用磁気学会, 日本人工臓器学会, 非破壊検査協会, IEEE等の会員。広島大学医学部教授(併任)。