超電導磁気シールド用 NbTi/Nb/Cu 多層複合材の開発

伊藤 郁夫^{*1)} 大塚 広明^{*1)} 南野 繁^{*2)}
清水 庸宏^{*2)} 佐々木 勉^{*3)}

1. はじめに

超電導応用技術においては、MRI、粒子加速器、磁気浮上列車等で強磁場を発生する超電導マグネットの台数が着実に増え、近年実用化が進展しつつある。これら超電導マグネットは高磁場化、大容量化の方向にあり、発生する漏洩磁場が人体または電子機器等に与える悪影響⁽¹⁾が重要な問題になっている。また外界の磁場擾乱が超電導コイルやその内部測定空間等に与える悪影響⁽²⁾⁽³⁾や、コイル内部で高均一磁場が要求される⁽¹⁾等の重要な問題も生じている。従来、これら超電導マグネットの磁気シールドは、直流磁場に対しては鉄ヨーク等の高透磁率材が主として用いられているが⁽¹⁾、その重量が広汎な普及の障害となっていた。また最近 MRI において普及したアクティブシールド法という超電導線材を利用した方法は、直流磁気シールドには適するが、電波雑音シールド性能は低い。この変動磁場については銅、アルミ等の高導電率材が効果がある⁽²⁾が、低周波磁場に対する特性が低い。また MRI では高均一磁場を得るためにシムコイルや鉄片を用いてかなり複雑な配置をさせている例⁽¹⁾もある。

磁気シールドには平面状⁽⁴⁾⁽⁵⁾、または円筒状⁽⁶⁾の超電導体が有効であることが従来から言われてきているが、筆者らは磁気シールド特性、超電導安定性を高めた NbTi/Nb/Cu 多層複合板および円筒を開発した。開発のポイントは上記諸問題に適用しうる特性の具備と、磁場漏洩の原因となる接継部を極力排除するための板の大面積化、円筒のシームレス化と

大サイズ化、および工業的に量産が容易な製造方法の開発である。

2. 製造方法と材料構造⁽⁷⁾

NbTi 超電導材と安定化銅を平面形状にするため、両者の交互多層構造とし、製造方法は密封クラッド圧延法を主とした。製造工程を図 1 に示す。素材は市販の Nb-46.5 wt%Ti 合金を用いた。途中の熱間圧延、熱処理時に Ti が Cu 中に拡散するのを防止するため、バリアー材として Nb 層を全界面に設けた。板厚 1 mm の多層材の断面写真を図 2 に、界面の SEM 写真とオージェ分析による拡散防止効果を図 3 に示す。厚さ約 10 μm の NbTi 層が 30 層と、最外層以外はほぼ同じ厚さの Cu 層からなり、銅と NbTi の断面積比は約 1.6 である。

図 1 多層複合板と多層複合円筒の製造工程。

* 新日本製鐵株式会社

1) 技術開発本部先端技術研究所新材料研究部主任研究員

2) 技術開発本部光技術研究部主任研究員

3) 新素材事業本部企画調整部技術企画室員

Development of NbTi/Nb/Cu Superconducting Multilayer Composite Materials for Magnetic Shielding; Ikuro Itoh, Hiroaki Otsuka, Shigeru Minamino, Tsunehiro Shimizu, Tsutomu Sasaki (Nippon Steel Corporation)

1994年 1 月 31 日受理

図2 多層複合板と多層複合円筒の断面構造.

またこの多層複合板は良好な成形性を有し、深絞りすることによって、全く接合のないカップ状円筒を得た。

3. 超電導磁気シールド特性

(1) 直流磁気シールド特性⁽⁷⁾

板厚 1 mm, 内径 20~40 mm, 長さ 45 mm のカップ状円筒 5 個を同心状に組合せ、超電導コイルのボアー中心に設置し、ホール素子をカップ底の上 4 mm の軸上に置いて、軸平行な外部磁場を印加した時の内部磁場の軸方向成分を測定し、直流磁気シールド特性を調べた。その結果を図 4 に示す。円筒 1 個当たり約 0.8 T のほぼ完全シールドが可能であり、4 個で約 3 T まで可能であった。軸上他の位置でも開口端付近を除いて高い効率でのシールドができた⁽⁷⁾。この特性は MRI、粒子加速器、磁気浮上列車といった実用システムの中でも十分使用可能なレベルであり、かつ従来材である鉄等

図4 同心状に組合せたカップ状円筒の直流磁気シールド特性.

では不可能だった強磁場シールドが約 2 桁軽い材料で可能となった。

(2) 磁場均一化効果⁽⁸⁾

(1)の多層材と同じ構造を有するが、板厚だけ 0.19 mm である板を、間を絶縁しながらロール巻きして両端開放円筒とし、超電導コイルのボアー中に両者の軸が一致するように挿入し、円筒内中心に置いたホール素子で軸方向成分を測定した結果を図 5 に示す。横軸は中心からの軸上距離、縦軸はロール巻円筒がない場合の、コイル中心の磁場を 100% として規格化した値である。ロール巻円筒によって軸中心磁場が 25% ほど低下するが、磁場均一空間が約 10 倍広がった。この効果は約 0.5 T までみられた。

(3) 交流磁気シールド特性⁽⁹⁾

板厚 0.5 mm, 内径 15 mm, 長さ 90 mm の両端開放円筒 1 個を、超電導コイルのボアー中心に設置し、周波数 40~500 Hz の交流磁場を軸に平行に外部より印加して、円筒内

図3 Nbバリアー層のSEM断面写真(a)とオーギュライン分析によるTi拡散防止効果(b).

図5 ロール巻き円筒の磁場均一化効果.

図6 両端開放円筒の交流磁気シールド特性.

中心に置いたサーチコイルで軸方向成分を測定し、交流磁気シールド特性を調べた。その結果を図6に示す。40~50 Hzでは印加磁場 1000 Grms まで 0.1 Grms 未満に低減でき、シールド比 10^4 以上であったが、電源容量の限界でこれ以上の磁場印加は不可能だった。また比較のため同サイズの銅円筒でも測定したが、40~100 Hz の低周波領域ではほとんどシールド効果がなく、500 Hz でも約半分しかシールドできなかった。上記多層複合円筒は非常に細長い(アスペクト比 6)ので深絞りとしピニングを併用して加工した。

4. 実用化と将来性

上記3種類の特性を、超電導マグネットを利用したシステムにおいて有効に活用するには、板、円筒ともに大サイズ化が必要である。密封クラッド圧延法および深絞り法は、設備によるサイズ上、量産上の制約限界が大きく、生産性も高いので、大サイズ化および量産化に適した方法といえる。本開発品は表1に示したように、超電導シールド材としては最大級のサイズを有し、かつ更なる大型化も比較的容易である。

また表1に示すように、直流シールドと磁場均一化特性においては従来品の最高レベルの性能を凌駕しており、かつ

表1 従来品と比較した本開発品の特徴.

項 目	本 開 発 品	従 来 品
ほぼ完全シールドした直流磁場	3.0 T	2.2 T ⁽¹⁰⁾ (NbTi 材での最高値)
超電導体ロール巻円筒による磁場均一化	0.5 T まで10倍向上	交流0.035 T まで ほぼ円左 ⁽¹¹⁾
ほぼ完全シールドした交流磁場	≥ 1000 Grms ($f=40\sim 50$ Hz)	高温酸化物材では 100 Grms 未満 ⁽¹²⁾
板*の面積	2.4 m ²	1 m ² 未満 ⁽⁵⁾
シームレス円筒*の内径	200 mm	11 mm ⁽¹³⁾

*: 従来品の板、シームレス円筒のデータは、ともに数 kG レベル以上の直流磁気シールド能力を有するものに限定。

変動磁場シールド特性も良好であるので、今後の超電導応用市場拡大の趨勢の中で、大きな役割を果たしていけるものと期待されている。

5. 特 許

本件関連で登録1790043他出願13件。国外出願は米欧1件。

文 献

- (1) P. A. Sanger: IEEE Trans. Magn., **MAG-21**(1985), No. 2, 440.
- (2) 岩松 勝, 鈴木栄司, 戸来年樹, 根本 薫, 岸川昭彦: 第48回1992年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, (1992), 283.
- (3) I. Mano: 11th Int. Conf. Magnet Tech., **1**(1989) 1.
- (4) H. W. Weber, G. P. Westphal and I. Adaktylos: Cryogenics, **1**(1976), 39.
- (5) 小川倉一, 吉竹正明, 西垣 和, 杉岡孝雄, 井上 勝, 大谷光平, 佐藤 学, 佐治芳郎, 戸田博章, 福井滋夫, 大森康有: 1992年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, (1992), 121.
- (6) 小笠原 武: 低温工学, **8**(1973), No. 4, 135.
- (7) I. Itoh, T. Sasaki, S. Minamino and T. Shimizu: IEEE Trans. Appl. Supercon., **3**(1993), No. 1, 177.
- (8) 佐々木 勉, 岩田圭司, 大塚広明, 伊藤郁夫: 第49回1993年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, (1993), 253.
- (9) 大塚広明, 伊藤郁夫: 第50回1993年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, (1993), 210.
- (10) 宮本郁生, 西嶋茂宏, 岡田東一, 吉和雅雄, 岩田 章: 低温工学, **21**(1986), No. 4, 205.
- (11) D. Hechtfisher: J. Phys. E: Sci. Instrum., **20**(1987), 143.
- (12) J. Karthikeyan, A. S. Paithankar, K. P. Sreekumar, N. Venkatramani, V. K. Rohatgi: Cryogenics, **29**(1989), No. 9, 915.
- (13) D. U. Gubser, S. A. Wolf, T. L. Francavilla, J. H. Classen, and B. N. Das: IEEE Trans. Magn., **MAG-21**(1985), No. 2, 320.