超電導材料を用いた磁気遮蔽の研究 I

宮本郁生, 西嶋茂宏, 岡田東一, 吉和雅雄*, 岩田 章*

大阪大学産業科学研究所 大阪府茨木市美穂ヶ丘8-1
*川崎重工(株)低温研究室 兵庫県明石市川崎町

(1986年4月18日受理)

Study of Magnetic Shielding with Superconducting Materials I

Ikuko MIYAMOTO, Shigehiro NISHIJIMA, Toichi OKADA,

Masao YOSHIWA* and Akira IWATA*

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka

*Kawasaki Heavy Industries, Ltd., Kawasaki-cho, Akashi-city, Hyogo

(Received April 18, 1986)

Synopsis:

The magnetic shielding with superconducting materials have been studied aiming at the practical application of shieldings. The leakage of the magnetic field should be reduced in order not to induce undesirable effects on the measuring instruments. The shieldings were made by lead, niobium or NbTi wire and the shielding efficiency were compared experimentally in the field direction of parallel to the face of plate or cylinder axis (made by wire). The shield efficiency of the wire was best as expected. Furthermore from the engineering view point, the superconducting wires were decided to use the magnetic shieldings. The several types of network were constructed and the efficiency of shielding were examined with changing the density and structure of meshes. The magnetic field as high as 2T could be reduced to several hundreds gauss with the superconducting networks. It was, therefore, concluded that the superconducting networks are applicable to the practical magnet shieldings.

1. 緒言

近年, 超電導の研究が応用段階に入り, 超電導磁石の強力な発生磁場を利用した装置が考案され, その利用が検討されている^{1)~3)}. 超電導磁石の利用により容易に高磁場を得られるようになったが, 同時に磁石周辺の精密機器等に対して, そのもれ磁場が悪影響を及ぼす原因となってきた。そのため, 今後磁気遮蔽の必要性は, 増大していくと思われる。

磁気遮蔽にはいくつかの方法が考えられる^{4), 5)}. 磁場がそれ程大きくなければ, 高透磁率材を用いた強磁性遮蔽で充分である⁶⁾. しかし, 超電導磁石のように発生磁界が大きくなると, 磁場の強さは高透磁率材の飽和限界を越えてしまい遮蔽効果は低下してしまう。このような高磁場の遮蔽には超電導材料を利用した遮

蔽方法が有効であると考えられる。超電導の性質である完全反磁性と永久電流を利用した磁気遮蔽は, 強磁場に対しても高い遮蔽効果が期待でき, また軽量化の点でも有利であると考えられる。超電導遮蔽は NbTi や V₃Ga, Nb₃Sn 等の板状⁷⁾, 円筒管材料⁷⁾ またテープ材⁸⁾ や薄膜^{9), 10)} 等を用いて研究が行なわれている。本研究においては, 特に超電導線材による遮蔽方法を検討し, 高磁場遮蔽への応用を目的としている。

2. 超電導板状材料を用いた磁気遮蔽

まず超電導板状材料を用いて磁気遮蔽効果を測定した。測定装置を Fig. 1(a) に示す。超電導磁石を用いて磁界を発生させ, 磁石と同じクライオスタット内部, 液体ヘリウム中に遮蔽試料としての板状超電導材料を配置した。磁場はクライオスタット外部, 常温空

間で磁気センサーを用いて磁束密度として測定した。遮蔽材料には第Ⅰ種及び第Ⅱ種の超電導材料である、鉛、ニオブを用いた。試料は縦 500mm 横 160mm の板状で、厚さは鉛で 1.5mm、ニオブで 0.5mm である。遮蔽試料の枚数は、1 枚から 3 枚の範囲で変えて測定した。Fig. 1 (b)にこの磁石で発生される磁場分布及び試料の配置図を示した。この図では、中心磁場を 1 とした時の分布であり、 B_0 の場所で測定を行った。

この実験において磁気遮蔽の程度を示す基準として磁気遮蔽効果, $Seff$ を以下に示す式のように定義した。

$$Seff = \frac{B_w - B_s}{B_w} \tag{1}$$

ここで、 B_w は遮蔽体を取り付けない時の測定磁束密度を示し、 B_s は遮蔽体を取り付けた時の測定磁束密度である。定義上、 $Seff=1.0$ で完全な遮蔽が行われていることを示し、 $Seff=0$ で遮蔽が全く行われていないことを意味している。

Fig. 2 に、鉛及びニオブの板状材料を用いた磁気遮蔽効果を示した。横軸に印加磁界をとり、その印加

Fig. 1 (a) Measuring system of shielding efficiency on superconducting plate.
(b) Magnetic field distribution and position of shielding plate.

磁界下における遮蔽効果を試料枚数によってとってある。遮蔽効果は、ニオブの方が鉛よりも高印加磁界まで高い値を示している。しかしニオブにおいても 0.2 T を越える印加磁界下ではすでに遮蔽効果を失ってしまい、鉛においては 0.08 T 以上で遮蔽効果はみられない。これらの印加磁界の値は、鉛、ニオブそれぞれの磁界磁束密度に相当する。超電導材料を用いた磁気遮蔽においては、遮蔽可能な印加磁界の大きさ、遮蔽限界が臨界磁場で与えられることがわかる。したがって、環境磁場が 1 T を越えるような高磁場遮蔽には、高 H_{c2} を持つ超電導体である、化合物系あるいは合金系の材料、 Nb_3Sn や $NbTi$ 等を用いる必要がある。また臨界磁場以下の印加磁界下で遮蔽効果を有する範囲では、鉛、ニオブともに枚数を増やすことにより遮蔽効果は向上している。高 H_{c2} 材料である第Ⅱ種超電導体では、 H_{c1} は低いために実際の遮蔽は混合状態を利用して行われる。混合状態では完全な遮蔽は期待できないために、この遮蔽体の枚数を増加していき段階的に蔽遮を行っていく積層化の方法が有効であると考えられる。積層化により環境磁場を適切な大きさの磁場に落とすために必要な遮蔽体の枚数は次式で与えられる。

$$n \leq \frac{B_w - B_n}{B_w - B_s}$$

ここで B_n は、目的とする磁場の大きさ、 $(B_w - B_n)$ は遮蔽することにより低下させる磁場の大きさを表し、 B_s は 1 枚の遮蔽体を用いた時の磁場である。 $B_n = 0$ の時、すなわち完全な遮蔽を行うために必要な枚数は (1) 式で定義した $Seff$ の逆数になる。 (B_s は B_w

Fig. 2 Shielding efficiency of the superconducting plates.

の関数でありかつ遮蔽体の形状と磁場分布との相関を考慮する必要があるので実際はもっと複雑になる。)

3. 超電導線材を用いた磁気遮蔽

超電導板状材料を用いて磁気遮蔽を行うためにはいくつかの問題点がある。板状材料はヒステリシス損失がおおきくなるので、板に垂直な方向の磁場に対しては不安定である。それゆえ、磁束跳躍を起こし、超電導破壊が生じる恐れがある。これを避けるためには、板状遮蔽体の厚さをできる限り薄くした薄膜状にしたり、安定化材中に埋め込むといった方法があるが、低磁場不安定性は残ると考えられる。

そこで、我々は、超電導線材を用いた磁気遮蔽方法を考案した。超電導線材ではすでに NbTi や V_3Ga 、 Nb_3Sn といった高 H_{c2} の材料が容易に入手できるし、磁場安定性も良く高磁界電流密度を持った材料が開発されている。このため超電導線材を利用して遮蔽を行う事は工学的見地からも有利と考えられる。

まず超電導線材をソレノイド・コイル状に巻いた遮蔽体を作製して遮蔽効果を測定した。測定装置を、Fig. 3(a), (b)に示した。Fig. 3(a)はコイルの円筒軸に平行な環境磁場を与える時の測定系で、Fig. 3(b)は円筒軸に垂直な磁場を与える時の測定系である。

用いた試料の形状を Fig. 4 に、また使用した線材の諸元は Table 1 に示した。ソレノイド・コイル型の遮蔽試料はその両端をはんだで接続した。遮蔽体の内径は 12mm、長さは 80mm でターン数は一層 150 ターンで一層、三層、五層の遮蔽体について実験を行った。遮蔽効果は、遮蔽体中央部で磁束密度を測定して式 (1) に従って得た。

Fig. 5 にこの遮蔽体の実験結果を示した。これは、遮蔽体の円筒軸に水平な磁場を印加した時の実験結果

Table 1 Specification of the multifilamentary superconductor.

Conductor	Nb-Ti-Zr-Ta
Conductor diameter	0.33mm
Filament diameter	0.03mm
Filament number	61
Twist pitch	10mm

Fig. 4 Solenoidal shielding coil.

Fig. 5 Shielding efficiency with the solenoidal shield made by superconducting wire.

である。三層、五層のいずれの遮蔽体も 2 T の印加磁界下で、 $Seff$ が 0.95 以上という高い遮蔽効果を示している。低磁場側で遮蔽効果が低くなっているのは、磁場を印加した初期段階において磁石の残留磁化 70 Gauss 程度が遮蔽体内部に侵入したために (1) 式で与えた定義上、遮蔽効果が低くなったためである。したがって、事実上は低磁場においても遮蔽効果は、高磁場側と同程度またはそれ以上であると考えてよい。ここで用いた NbTi や Nb_3Sn 等の超電導体は、数 T 程

Fig. 3 Measuring system for shielding efficiency; (a) parallel (b) vertical field to the shield axis.

度の磁場の遮蔽においては充分高い H_{c2} (NbTi $\sim$ 10 T, Nb $_3$ Sn $\sim$ 20T) を持つので、高い遮蔽効果が期待できる。また遮蔽効果は遮蔽体の作れる磁場、すなわち、 J_c や層数並びにターン数で決定される。

この遮蔽体では、両端をはんだで接続してあるが、この接続部の長さが遮蔽効果に影響する。Fig. 6に、接続長さの遮蔽効果への影響を示した。この図では、横軸に印加磁界、縦軸に遮蔽体内部への磁束の侵入をそれぞれ磁束密度でとってある。図中、一点鎖線で示したもの(a)は、接続長さを5mmにしたもので、実線で示したもの(b)は、接続長さを80mmにしたものである。この時の励磁速度は2.2T/secである。励磁中は、遮蔽体内部への磁束侵入は、ともにほとんどみられない。印加磁界2.2Tで一定に保った時には、接続長さ5mmの方は、遮蔽体内部への磁束の侵入が生じ、最終的には外部磁場とほとんど同程度になった。これは、接続長さが短かいと接続部に抵抗が生じ、永久電流が減衰するため、磁束の侵入が生じることが原因と考えられる。これを防ぐには、接続部の長さを充分とる必要がある。Fig. 6中、(b)の接続長さ80mmのものは、2.2Tの磁場の定常状態下に300秒放置しても磁束の侵入は0.1T以下しかみられなかった。

また円筒軸に垂直な磁場を印加した時は、この遮蔽体では、ほとんど遮蔽効果を示さなかった。この結果より、ソレノイド・コイル型磁気遮蔽体は、遮蔽体の円筒軸に水平な磁場に関しては、2T以上の高磁場でも充分遮蔽体として使用が可能であることが判った。しかし非一様磁場の遮蔽においては、ソレノイド・コイル型遮蔽体では不十分であることも判明した。

4. 網目状磁気遮蔽体

ソレイノド・コイル型遮蔽体では、非一様磁場の遮蔽は困難である。しかし、実際に遮蔽を行う必要のある磁場は、方向が様ではないのが一般である。このような一様でない方向性を持つ磁場を遮蔽するために網目状遮蔽体を考案した。さらにこの遮蔽効果を測定し、実用磁場への応用を検討した。

網目状遮蔽体を、Fig. 7に示した。網目状遮蔽体とは、超電導線材を用いてあんだ網を利用しようというものであり、あらゆる方向の磁束に対して遮蔽ループを持たそうというものである。実験では、Fig. 7のように網を円筒状に巻き、この円筒軸に水平方向及び垂直方向の磁場中で、それぞれの方向の遮蔽効果を調べた。用いた測定装置は、Fig. 3に示した装置と同じも

Fig. 6 Flux penetration through the connected area; (a) connected length : 5mm (b) 80mm.

Fig. 7 Shielding network made of superconducting wires.

ので、使用線材も同一のものである。

この実験結果を Fig. 8(a), (b) に示した。Fig. 8(a)は遮蔽体の円筒軸に対して水平方向の磁場を与えた時の結果で、(b)は垂直方向の磁場を与えた時の結果である。いずれも高い遮蔽効果を示していないが、これは、層数、ターン数が小さいためと、接続個所に生ずる抵抗による磁束の侵入の影響が大きいためと考えられる。この実験から、高磁場を遮蔽するには、次の各点を考慮して遮蔽体を設計すればよいことが明らかになった。

- 1) 網目密度の高密度化
- 2) 層数の増加
- 3) 線材の大容量化
- 4) 接続長さを長くする
- 5) 接続個所を減らす

以上の点を考慮して、1 T程度の環境磁場を遮蔽するための遮蔽体を作製した。

Fig. 9に高磁場用網目状遮蔽体を示した。線材を大容量化するため三本撚線を用いた。接続長さを長くす

Fig. 8 Shielding efficiency of the shielding network.

Fig. 9 Network for high field shield.

Fig. 10 Shielding efficiency of the network.

るためには一本の燃線で、矩形を描きながら同一平面内でずらし梯子状のリボンを作り、このリボンを円筒状に巻くことにより網目状遮蔽体を作った。

この遮蔽体の実験結果を、Fig. 10 に示した。円筒軸に平行な磁場に対しては、1.0T 程度の環境磁場まで、 $Seff$ は 0.9 以上の高い遮蔽効果が得られている。また垂直な磁場にたいしても、0.5T 程度の環境磁場で、 $Seff$ は 0.6 を得ている。垂直磁場に対しての遮蔽効果が水平磁場の値より小さいのは、有効な遮蔽ループが水平磁場よりも少ないためであり、層数を増やす

ことによって遮蔽効果の向上は充分期待できる。

5. 結論

超電導遮蔽は高磁場の遮蔽に期待できるが、板状遮蔽体を用いる時は、NbTi や Nb₃Sn 等の高 H_{c2} 材料で薄膜の積層化が有効である。また利用のしやすさや磁場安定性の面から線材を用いた方が良いと考えられる。線材を用いた遮蔽体としてはソレノイド・コイル型遮蔽体が考えられ、一様な方向の磁場であれば比較的容易に数Tの遮蔽が行える。一様でない磁場に対しては、網目状遮蔽体が有効であり、実用化が

期待される。

今後は、この網目状遮蔽体内部の有効遮蔽空間の決定や、さらに内径の大きな遮蔽体の作製等に取り組む必要がある。

この論文は MT-9 に発表した内容に加筆、訂正をしたものである。またこの研究の一部は科研費 No. 60050044 の補助を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) D. L. Atherton and A. R. Eastham: IEEE Trans. Magn. **MAG-11** (1975) 627
- 2) D. L. Atherton and A. R. Eastham: Adv. Cryo. Eng. **21** (1976) 1
- 3) J. Ferreirinho and D. G. Blair: Cryogenics **19** (1979) 702
- 4) 小笠原武, L. Boesten: 低温工学 **8** (1973) 135
- 5) O. Keiha, M. Pukki, S. Peltinen, J. Ilumoniemi and J. Heino: IEEE Trans. Magn. **MAG-17** (1982) 260
- 6) T. Ohara: Bull. of electro Lab. **45** (1981) 240
- 7) D. V. Gubser, S. A. Wolf, T. L. Francavilla, J. H. Classen and B. N. Das: IEEE Trans. Magn. **MAG-21** (1985) 320
- 8) A. Shimizu, M. Inoue: IEEE Trans. Magn. **MAG-17** (1981) 2146
- 9) 佐藤, 佐治, 岩田: 神戸商船大学紀要 2 類 **29** (1981) 187
- 10) 佐藤, 佐治, 岩田: 神戸商船大学紀要 2 類 **30** (1982) 185
- 11) T. Okada, K. Takahata and S. Nishijima: CEC-ICMC, Boston, DZ-4 (1985)