

超伝導空洞の磁気シールド

1. はじめに

超伝導加速空洞用磁気シールドでは、主にパーマロイ系の高透磁率材料で空洞を囲い、高透磁率材料中に磁力線を吸収し、空洞領域にある磁場を下げる方法（パンプシールド）がとられている。シールドすべき外場の主なものとしては地磁気で、50 μT 程度である。一方、空洞領域に許容される残留磁場の値は、空洞の運転周波数、加速勾配、運転温度、運転モード（パルス運転か連続運転か）等に依存するが、大体において百 nT のオーダーである。即ち、超伝導加速空洞では、空洞のある領域全域において地磁気を数百分の一程度に落とすことができる磁気シールドが要求され、材料の選択とシールド形状に工夫をこらした設計が必要となる。更に最近の大型超伝導空洞システムでは磁気シールドを超伝導空洞の直近に配置してコスト削減を図る傾向にあり、高透磁率磁性材料の低温磁気特性の研究も始まっている。本講義では超伝導加速空洞用磁気シールドの基本概念、材料特性、設計方針などについて説明し、実際に得られた磁気シールド効果について示す。

2. 磁気シールドの必要性

そもそも何故磁気シールドが必要なのか。それはニオブ空洞が超伝導状態に転移する際の残留磁場が超伝導空洞の表面抵抗 R_s を増加させてしまうからである。

この表面抵抗 R_s は式 (2-1) のように BCS 理論が導き出される抵抗値 R_{BCS} と空洞の表面状態がもたらす残留抵抗 R_{res} との和で表すことができる [1]。

$$R_s = R_{BCS} + R_{res} \quad (2-1)$$

R_{BCS} は超伝導体によって決まる係数 A 、ボルツマン係数 k_B 、絶対ゼロ度でのギャップエネルギー $\Delta(0)$ を使うと以下ようになる。

$$R_{BCS} = A \frac{\omega^2}{T} \exp \left[-\frac{\Delta(0)}{k_B T} \right] \quad (2-2)$$

例えばニオブの場合には式(2-2)は抵抗、温度、周波数の単位をそれぞれ $\text{n}\Omega$ 、K、GHz とした場合に次のような半実験式として表すことができる。

$$R_{BCS} = 2 \times 10^5 \frac{1}{T} \left[\frac{f}{1.5} \right]^2 \exp \left[-\frac{17.67}{T} \right] \quad (2-3)$$

これをニオブ（臨界温度 $T_c=9.2\text{K}$ ）で $f=1.3\text{GHz}$ の場合について具体的に図に示したものが Fig.1 である。比較のため R_{res} が $2\text{n}\Omega$ の場合についても同じ図にプロットしてある。例えば 4.2K 運転 ($T_c/T \sim 2.2$) の場合の R_{BCS} は $530\text{ n}\Omega$ であるが、運転温度を 2K ($T_c/T=4.6$) にまで下げると R_{BCS} は約 $11\text{n}\Omega$ まで下がる。温度を下げていくと R_{BCS} はどんどん小さくなり今度は R_{res} の項が効いてくるのが Fig.1 から読み取れる。従っていかに R_{res} を小さく抑えるか、ということが重要になって来る。小さく抑えたい R_{res} ではあるが、これが先にも述べたように、超伝導へ転移する際に磁場があることにより増大してしまう。超伝導状態へ転移する際に外場は量子化された磁束の形（磁束量子）で超伝導体の中にトラップされてしまう (Fig.2)。

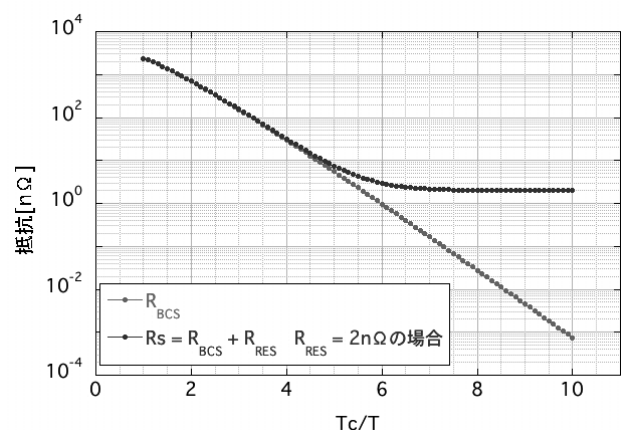


Fig. 1 ニオブ空洞の 1.3GHz 運転に於ける R_{BCS} と R_{res} が $2\text{n}\Omega$ の時の R_s

磁束のトラップはその中心に超伝導が壊れた常伝導コア (Fig.2 の normal core) があり、その周りを超伝導電子が渦を巻いている (Fig.2 の Supercurrents) というイメージで捉えることが出来る。このトラップされた磁束量子が超伝導空洞の表面抵抗を増加させてしまう。磁場のトラップによる R_{res} の増加は実験的に $0.35\text{n}\Omega/100\text{ nT}$ と言われている [2]。例えば地磁気程度の外場 (約 $50\mu\text{T}$: 500mG) を磁気シールドしない場合は残留磁場からの寄与だけでも $175\text{n}\Omega$ となり、超伝導空洞の運転は不可能となる。ここに磁気シールドが必要である所以がある。

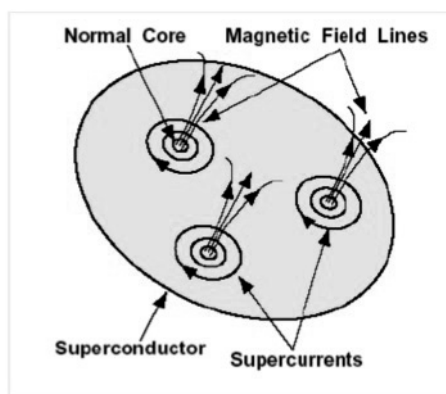


Fig.2 磁束トラップのイメージ

3. パッシブシールド

磁気シールド技術はその応用分野や、対象とする磁場により大きく異なるが、シールド方法で分類すると、1) シールドしたい空間をシールド材料で覆う方法 (パッシブシールド) と 2) シールドしたい空間に存在する磁場を打ち消すコイルを作り、その励磁によりシールドする方法 (アクティブシールド) がある。磁気シールドの設計にあたり、どの方式を選ぶかは、シールドすべき磁場の強さと許容残留磁場、シールドに求められる形状、使用法と使い易さ、製作費など種々の点を考慮して決める必要があるが、一般には、テスラオーダーの磁気シールドにはパッシブな超伝導シールドや、超電導コイルを用いたアクティブシールドが適し、地磁気オーダーの磁気シールドに

は高透磁率磁性材料を用いたパッシブシールドが適していると言える。

この章では超伝導加速空洞用磁気パッシブシールドを考える際にポイントとなる (1) 透磁率、(2) シールド係数と形状、(3) 低温用磁気シールド材料の特性、について述べる。

なお本テキストでは直流 (DC) 磁場に対する磁気シールドについて取り扱う。

3.1. 透磁率

超伝導加速空洞用磁気シールドでは、主に強磁性体高透磁率材料を用いたパッシブなシールドが使われている。パッシブシールドとは序章でも触れたように、シールドしたい領域を高透磁率材料で覆って磁力線を迂回させてしまう方法である (Fig. 3)。このパッシブシールドの考え方は古く 19 世紀から研究されている。この方法のデメリットはシールドしたい空間が大きくなるとそれを覆うために必要な材料の重量も増えるという点である。最近の超伝導空洞では磁気シールドをクライオスタット内の低温部に配置してコスト削減を図る傾向にあり、高透磁率磁性材料の低温特性が研究され始めている。

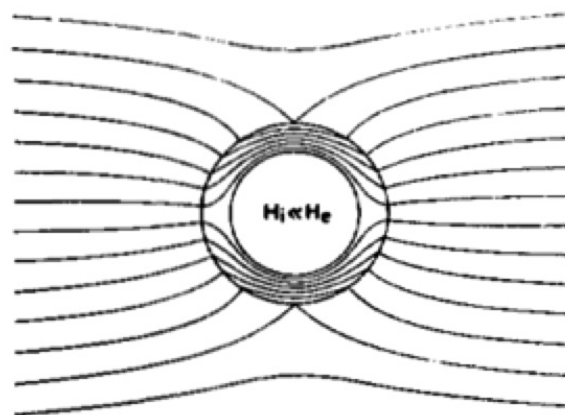


Fig.3 パッシブシールドのイメージ

ここで磁性体の透磁率について復習をする。透磁率は μ で表され式 (3-1) で表されるように磁束密度 B と磁場 H を関係付ける係数である。

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3-1)$$

強磁性体をゼロ磁場環境下で消磁したのち徐々に外部磁場を上げて行くときに得られる B と H の関係は Fig.4 の原点 $O \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C$ (初期磁化曲線) となる。外場が小さい時の傾きは大きいがある値に達すると磁束密度の増え方が小さくなりやがて一定値に近づく。この時の磁束密度を飽和磁束密度 (Fig.4 では C 及び F) と呼ぶ。

外場を下げていくと同じ経路はたどらず $C \rightarrow D \rightarrow E$ と別の経路をたどり良く知られたヒステリシスカーブを描く。外場がなくなっても磁束密度はゼロには戻らない (Fig.4 の D 及び G)。残留磁場を消すために必要な外場 (最初にかけた磁場とは反対の向き) を保持力と呼び Fig.4 では E にあたる。この B と H の関係を示した曲線を BH 曲線或いはヒステリシス曲線と呼ぶ。

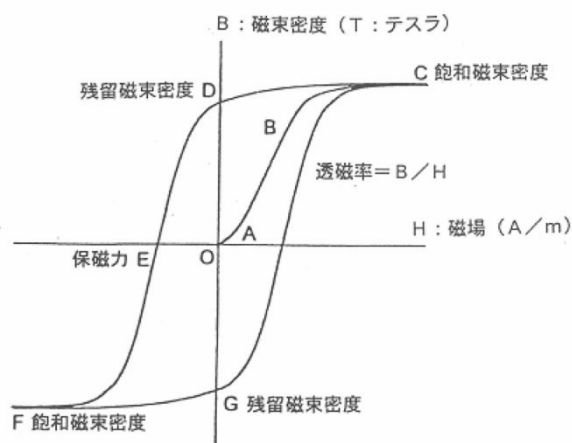


Fig.4 ヒステリシス曲線

Fig.5 には初期磁化曲線における透磁率を外場に対してプロットした図を示す。同じ材料でも外場によって透磁率が大きく変わること注目して欲しい。外場がゼロに近いところでの透磁率を初期透磁率、外場が段々大きくなり透磁率がピークに達した所の値を最大透磁率という。この二つの値はもちろんだが、最大透磁率を与える外場の値も磁気シールド材料を選ぶ時の最も重要なポイントとなる。シールドしたい外場の強さが最大透磁率を与える外場よりも非常に大きい (例えば一桁以上) とシールド材料内の磁束密度の飽和が

問題になり、また反対に小さすぎると効率のよいシールドは出来ない。

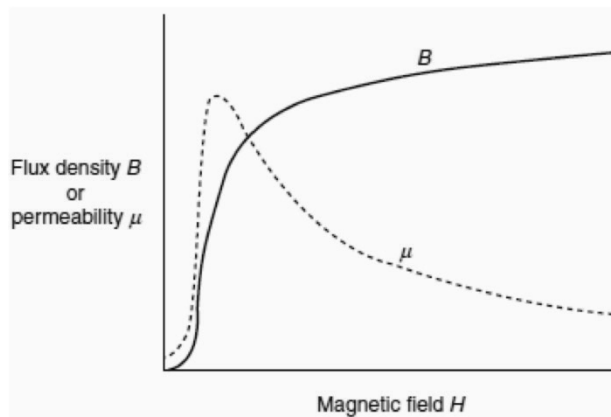


Fig.5 透磁率

常温地磁気環境下での磁気シールドによく使われるパッシブシールド材料にパーマロイ (permeability + alloy) がある。パーマロイはニッケルを重量比で 35~80%含む、ニッケルと鉄の合金でニッケルの含有量により更に分類されている。磁気シールドとしてよく出回っているものは PB 材 (ニッケル成分の重量比 40~50%) や PC 材 (ニッケル成分の重量比 70~85%) で、ミューメタルもパーマロイ PC 材の一種である。これらの、通常常温で使用される磁気シールド材料は液体ヘリウム温度では磁気特性が劣化することが知られている。劣化の度合いは材料に依るが常温時に比べて初期透磁率や最大透磁率で半分以下になるものもある。従って超伝導加速空洞用の磁気シールドを設計する場合には透磁率の温度依存性を考慮する必要がある。

低温用に開発された磁気シールド材は何種類か市場に出回っているが、それらに共通する特長はニッケル成分の重量比が~80%と高めで、他にモリブデンや銅が数%、残りの~15%が鉄という成分比になっているという点である。また熱処理温度も 1150°C程度とパーマロイ材の処理に比べてやや高めである。これら低温用材料では低温での初期透磁率で~60000、最大透磁率で~100000 が期待できる。但し低温用磁気シールド材は常温用のものより少し高価である。

ではパーマロイ系の材料と低温用の材料、純鉄の透磁率を比べてみよう。

Fig.6 にミューメタル、パーマロイ PC、パーマロイ R (これは低温用材料) 及び鉄の室温と液体窒素温度及び液体ヘリウム温度に於ける透磁率測定結果をプロットした[3]。最大透磁率がパーマロイ系では 100000 を越えるのに対し鉄ではそれより二桁程落ちる。また透磁率が最大となる外場もパーマロイ系の方は数[A/m]であるのに対し鉄では数百[A/m]と二桁違う。従って地磁気程度のシールドにはパーマロイ系が適しており、鉄はそれよりも強い磁場のシールドに適しているということがわかる。またパーマロイ R は低温でも高い透磁率を有している。

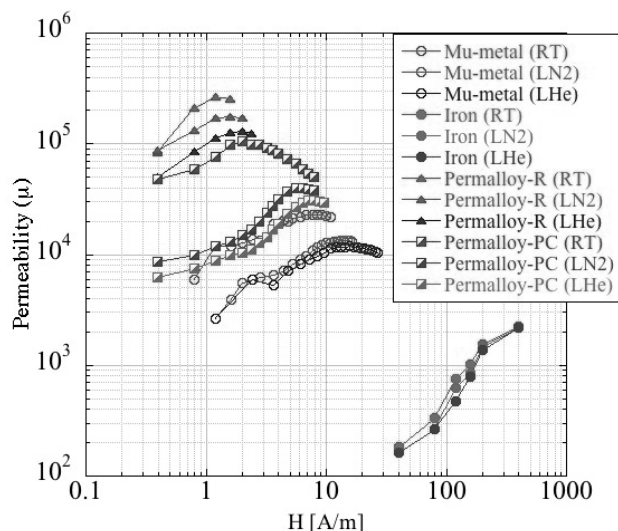


Fig.6 パッシブシールドでよく使われる材料の透磁率測定値。RT、LN2、LHe はそれぞれ室温、液体窒素、液体ヘリウム温度での透磁率を示す

3.2. シールド率 (シールド係数) と形状

空洞磁気シールドの許容残留磁場は空洞の運転周波数や空洞の加速勾配、そして運転モード (パルス運転か連続運転か) に依存するが、例えば数百 nT のオーダーである。このテキストでは地磁気を数百 nT のオーダーまでシールドすることを念頭に話を進めることにする。

磁気シールドを設計する時に意識しなければならないのはシールド率 (シールド係数) である。

これは次式の外部磁場 H_e と磁気シールド内磁場 H_i の比で定義される。

$$S = H_e / H_i \quad (3-2)$$

例えば地磁気環境下に置かれた加速空洞の許容残留磁場が数百 nT の場合には目標とするシールド率 S は 100 のオーダーになる。このようなシールド率を得るにはどうしたらよいか、無限長円筒シェルを例にして見積もってみよう。実は S は無限長円筒シェルの場合、円筒に垂直な外場に対するシールド率は円筒の厚みを d 、直径を D 、比透磁率を μ とした場合に

$$S = \mu d / D \quad (3-3)$$

で表すことが出来る[4]。例えば透磁率 50000 の材料で作られた直径 500mm、厚み 1mm の円筒の垂直磁場に対するシールド率は 100 となる。透磁率が一定の場合、シールド率は材料の厚さに比例するのでシールド率を 2 倍にしたければ厚みを 2 倍にすればよい。ただし、実際には透磁率は Fig. 5 に示すように外場の関数であってコンスタントではない。設計時には数値計算をしておく方が安全ではある。

以上は無限円筒に垂直な外場に対するシールド率の見積もりであったが、では平行な外場に対するシールド率はいくつになるか？

答えは 1 である。つまりシールド効果はない。お互い平行の関係にある磁場と円筒の境界は永遠に平行のまま、という訳である。実際の磁気シールドは有限長であるので平行磁場に対するシールド効果もある。ここで直径 D 、長さ L の有限長円筒シェルについて考察する。垂直磁場と平行磁場に対するシールド率をそれぞれ S_t 、 S_L とした場合、その比の q ($\equiv S_L / S_t$) は Fig.7 のようになる[4]。ちなみにこの円筒モデルの両端は開いたままである。

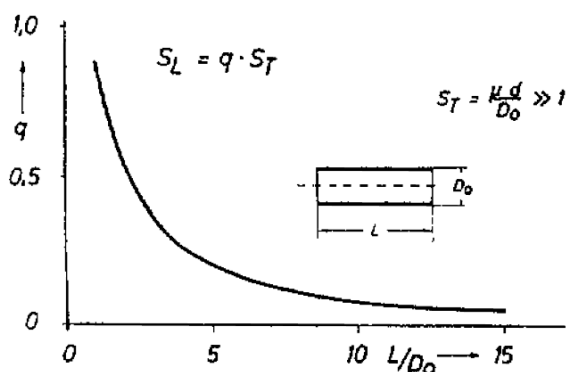


Fig.7 有限長円筒シェル（蓋無し）に於ける垂直磁場と平行磁場の磁気シールド率の比

有限長の円筒型磁気シールドで両端開放の場合には平行磁場に対する磁気シールド率は垂直磁場に対するそれよりも数～数十倍劣る。これを補うには両端に適当な形状の蓋をつければよい。超伝導空洞の磁気シールドの端部には例えば Fig.8 にあるような蓋を付けて両端からの磁場のしみ込みを防ぐような設計にする。Fig.8 の上の図では9連空洞と磁気シールドの両方が描かれているので両者の位置関係が、また下側の図からは主要部の円筒型シェルと両端の蓋の様子がわかる。蓋のデザインはカプラー等との取り合いとも絡んでくるので所謂「ひな形」というものはない。因に、Fig.8 の円筒シールドは内径 221mm で、厚み 1.2mm のパーマロイで出来ているのでこのシールドの垂直磁場に対するシールド率は透磁率を 50000 とした場合 $50000 \times 1.2/221 \sim 270$ となっている。

空洞用磁気シールドの形は円筒型である必要はない。例えば cERL のメインライナック加速空洞の磁気シールドは Fig.9 にあるように矩形型のもも採用している。このように実際の磁気シールドには空洞周辺機器へのアクセス用の穴が開けられている。パッシブ磁気シールドではシールドしたい空間を覆うことが重要なのでシールドを設計する立場からすると穴の存在は歓迎されない。穴がどうしても必要な場合には以下のような手当をする：空洞周辺機器で混み合うスペースで出来ることは限られるが（1）出来る限りパッチを当てる、（2）穴にカラー（煙突）を立てる、

等。これらの手当により穴の効果を軽減することが出来る。実際にどれだけの効果が出るかについては磁場計算を行って確認することが出来る。講義ではこの穴対策について述べる予定である。

Fig.9 の磁気シールドのシールド効果についての計算結果を Fig.10 に示す。計算により穴の直下では磁場のしみ込みはあるが（ $1.5 \mu\text{T}$ 程度）許容値は越えておらず、ほとんどの場所では $1 \mu\text{T}$ 以下にシールドされている。この磁気シールドについては低温での磁場測定を実施していないので残留磁場の直接的なデータはないが、実機に於いても空洞性能が出たことから計算通りのシールド効果が得られたと考えている [5]。

なお、この磁場計算は次のセクションで触れる低温用磁気シールド材の低温での透磁率データ、及び空洞が設置される場所での実際の地磁気の測定値を使って行っている。

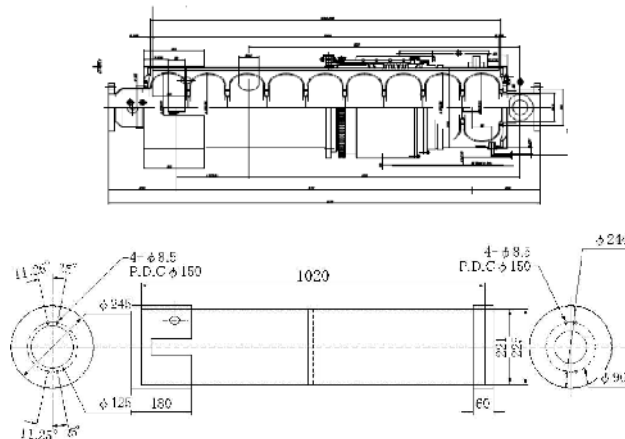


Fig.8 円筒シェルタイプの磁気シールド

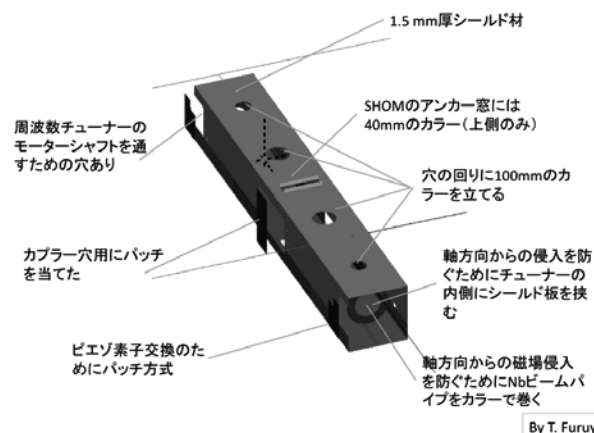


Fig.9 矩形タイプの磁気シールド

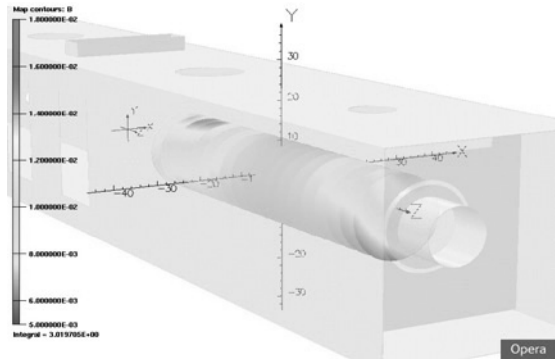
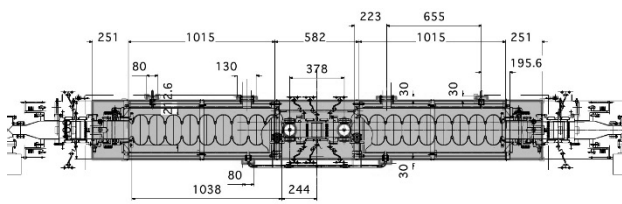


Fig.10 cERL メインライナック磁気シールド計算結果。最大残留磁場は穴の直下で 1.5 μ T 程度

3.3. 低温用磁気シールド材料の特性

低温特性が良いとされているいくつかの磁気シールド材料について透磁率の低温特性を評価したので紹介する。評価した材料名とその製造元及び熱処理元を Table 1 にまとめた。またこれらの材料の透磁率データを室温と液体ヘリウム温度についてそれぞれ Fig.11 と Fig.12 に示す。どの材料も低温では透磁率が下がってしまうが、パーマロイ R は他に比べて低温での劣化の割合が少なく液体ヘリウム温度でも最大透磁率が 100000 を越えている。しかし、残念なことに筆者の知る限りではこの材料と同性能のものは現段階では入手出来ない。製造元でも同等品の製造を試みているが性能の再現には至っていない（ここではパーマロイ R と区別してパーマロイ R new と呼ぶ）。パーマロイ R の次に性能がよいのが Aperam Alloys 社（フランス：元 ArcerlorMittal）製の Cryophy である。この材料については安定供給可能であることから我々は cERL メインライナック加速空洞の磁気シールドに Cryophy を採用した。

Table 1 低温用磁気シールド材料

材料名	製造元／熱処理元
パーマロイ R	トーキン (株)
パーマロイ R(new)	トーキン (株)
Cryoperm 10	VACUUMSCHMELZE/トーキン
Cryophy	Aperam Alloys
A4K	ArcerlorMittal/Amuneal

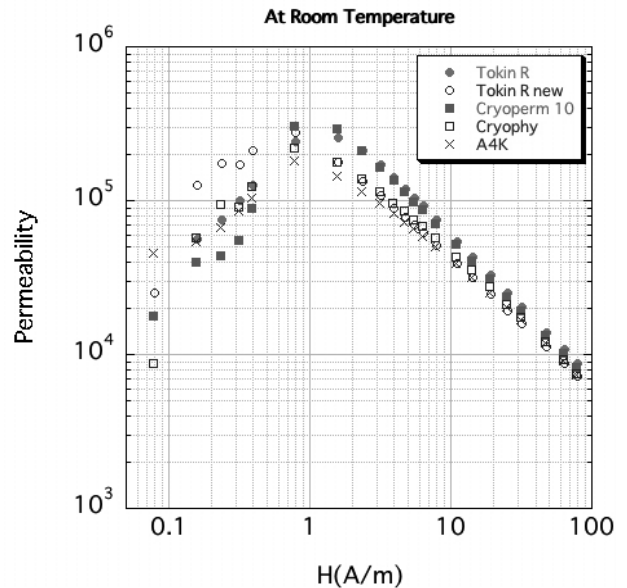


Fig.11 室温での透磁率

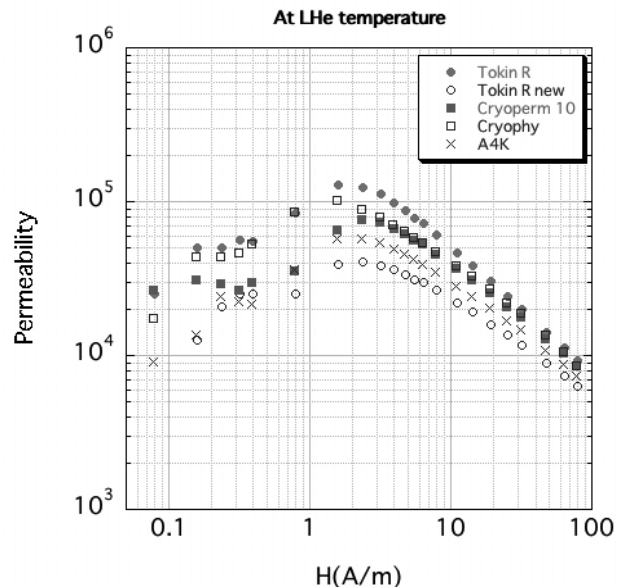


Fig.12 液体ヘリウム温度での透磁率

3.3.1. 材料の選定について

低温での透磁率（の劣化）がそれぞれの材料に依って異なることがわかった。地磁気環境下の超伝導加速空洞用磁気シールド材料としては、今のところ Cryophy が最も適しているようではあるが、透磁率が見劣りする分を式(3-3)にもあるように材料の厚みを増やして補う、という考え方もある。厚みでどのくらい「挽回」できるかについて、例として有限円筒シェルを円筒に平行な磁場（50 μ T: 500 mG）に置いた時の円筒中心での液体ヘリウム温度環境下での残留磁場を PC 材、Ceryophy、Cryoperm10 についてそれぞれ円筒シェルの厚みを変えて計算した。結果を Fig.13 に示す。これを見ると Cryophy 1mm の性能を Cryoperm10 で出そうとする場合には、厚みを約 2.5 倍に増やさなければならないし、PC 材では更に増やさなければならないことがわかる。コストパフォーマンスを考慮してケースバイケースでの材料選定が必要となる。Cryophy の単価は PC 材のおよそ 3 倍（購入する量によるのであくまでも参考）と聞いているので、その場合は厚みで稼ぐよりは材料費にかけた方がよさそうではある。但し良い材料を選定しても次節で述べるようにハンドリングを誤ると元も子もない。

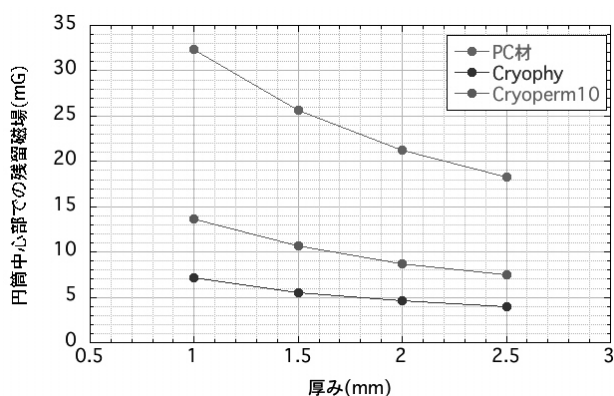


Fig.13 残留磁場と磁気シールドの厚み

3.3.2. 熱処理について

この節では熱処理によって材料の性質がどのような影響を受けるか、について述べる。磁気シ

ールド材の熱処理は通常水素雰囲気下で行う。熱処理温度は材料に依り、それぞれ製造元から推奨されている温度があるが大体において 1150°C 近辺である。Fig.14 に推奨温度の 1170°C とそれより少し低い 1100°C で熱処理した Cryophy サンプルの透磁率データを示す。面白いことに室温では 1100°C でも 1170°C でもほとんど差がない。しかし液体ヘリウム温度では熱処理の“たった” 70°C の差が 2 倍近くとかなり大きな差となって出て来る。

次に Cryophy の複数のサンプルを使って透磁率の冷却速度依存性を調査したので結果を紹介する。試験で使用した工業用炉の事情からこの試験時の熱処理温度は 1100°C とまりである。通常の PC 材を処理する時と同様の冷却速度をケース 1、それより 30% 速く冷やした場合をケース 2、供給元の推奨速度での冷却をケース 3 としてそれぞれの冷却パターンを Fig.15 にプロットした。この 3 パターンで熱処理したサンプルの透磁率データを室温と液体窒素温度について Fig.16 に示す。低温で性能が出たのは予想通りケース 3 の推奨速度の場合であった。以上より、低温用材料は低温での磁気特性が最大になるよう、熱処理パターンが決められており、このレシピを守らないと期待された性能は出ないという訳である。材料の供給元と磁気シールドの加工・熱処理元が別会社の場合にはこの点に注意することが重要である。

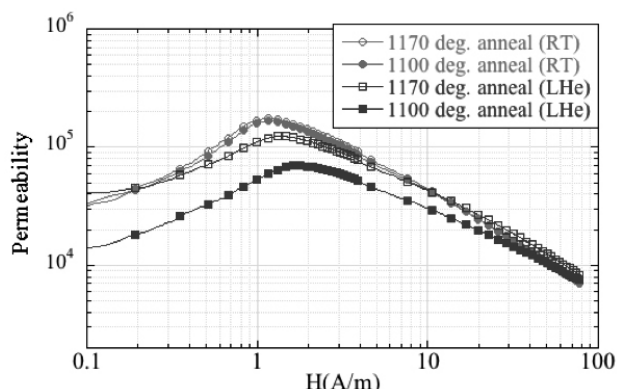


Fig.14 熱処理温度依存性。赤、青はそれぞれ室温、液体ヘリウム温度での透磁率に対応

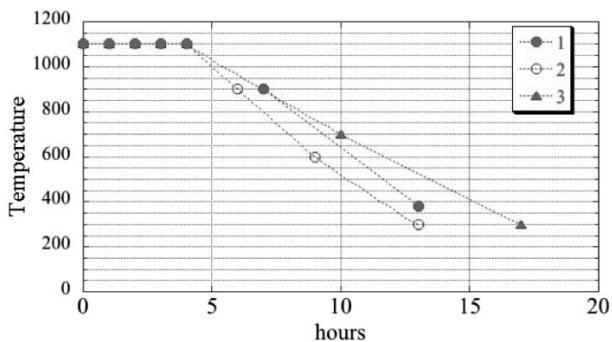


Fig.15 冷却速度依存性試験パターン

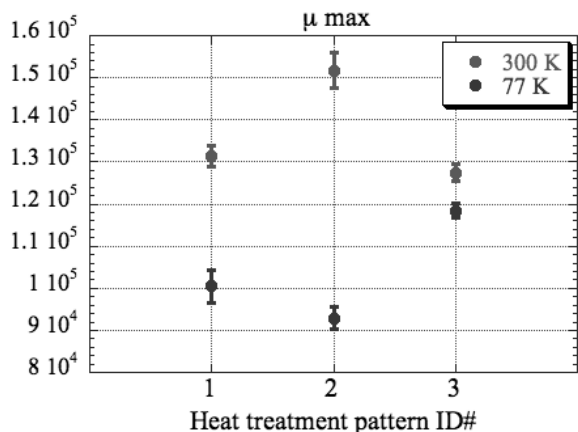


Fig.16 最大透磁率 (赤：室温、青：液体窒素温度)

3.3.3. 性能劣化について

磁気シールド材料は非常にデリケートである。特に機械的ひずみに非常に敏感で熱処理後には余計なストレスがかからないよう慎重に取り扱う必要がある。ストレスがかかった場合の透磁率測定データを2種類のパーマロイ材 (図中表記の“P”と“R”) について調べた。結果を Fig.17 に示す。なおここで歪み ρ は Fig.18 にあるような治具を用いてサンプルを意図的に曲げることにより発生させている。次式で Δt はサンプルの厚み、 R は Fig.18 にある押し型ブロックの曲率半径である。

$$\rho = \frac{\Delta t}{R} \quad (3-4)$$

この実験から、どちらの材料のサンプルでも0.5%の歪みですでに最大透磁率が半分以下に落

ち、3%に至っては一桁以上も悪化することが判明した。また別のグループの実験で床上~1m からサンプルを落としたところ、透磁率は半分になったという報告がある。これらを元に戻すには再熱処理が必要になる。従って、現場での磁気シールドアセンブリの際には落としたり曲げたり等で余計なストレスがかからないよう、細心の注意が必要である。

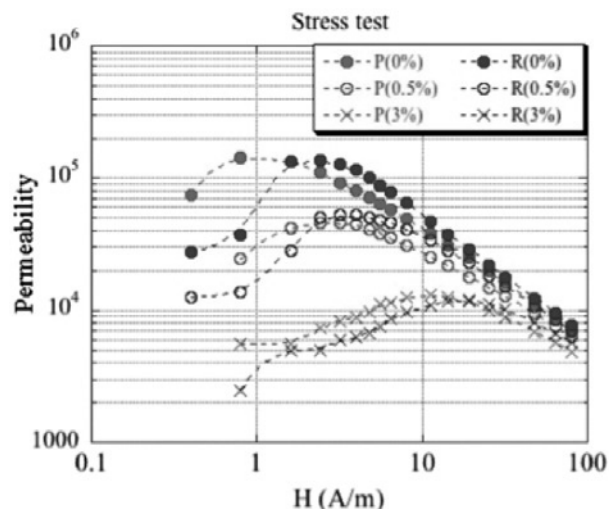


Fig.17 歪みを与えた場合の常温での透磁率劣化。() 内の数字が歪み度を表す

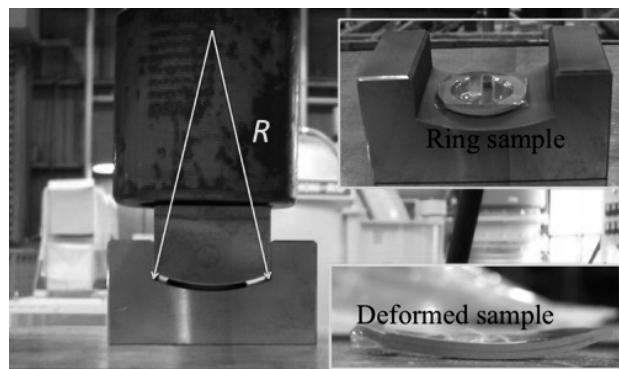


Fig.18 歪みを作るための治具

4. 残留磁場測定

最後に磁気シールド内の液体ヘリウム温度での残留磁場測定データの一例を示す。この測定に使った磁気シールドは Fig.19 にあるように厚み1mm、長さ約1mの円筒型をしておりパーマロイR材からできている。磁場測定は縦型測定クライオスタット内に測定用に用意したウォームボア

の中でセンサー（フラックスゲート）を移動しながら行った。

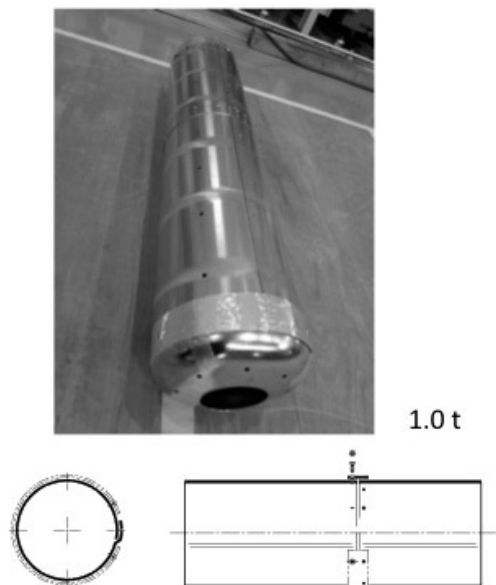


Fig.19 残留磁場測定を行った磁気シールド

4.1. フラックスゲートセンサー

ここでセンサーについて紹介する。マイクロテスラあるいはそれ以下の磁場の精密測定にはフラックスゲートセンサーが適している。Table 2 に測定技術とおおよその対応領域を示す。ホール素子を使ったセンサーは手軽であるが温度依存性が大きくゼロ点校正が難しい（結局のところゼロガウスチェンバー、つまりミニシールドの中の残留磁場をゼロとみなしてしまう）ので磁気シールド内の残留磁場測定には向かない。

Table 2 センサーと測定範囲

	測定範囲(T)				
	1.E-14	1.E-10	1.E-06	1.E-02	1.E+02
フラックスゲート					
SQUID					
ホール素子					
NMR					
サーチコイル					

フラックスゲートセンサーの測定原理について説明する[6]。フラックスゲートセンサーはパーマロイなどの高透磁率磁性材料でできたコアに

一次コイルと二次コイルを巻いたもので、一次側コイルに正弦波電流を流すことによりコアを励磁して外部の直流磁界によって生じる二次側の出力電流から磁界強度を求めるものである。ここでコアに透磁率が高く小さな外場でも容易にコアの中の磁束が飽和する材料を用いていることがポイントである。コアの磁化特性を Fig.20(a) に示す。このコアに外磁場 H_0 がかけると一次側の電流はその分オフセットして Fig.20(b) の赤線ようになる。これによる B の波形は飽和により Fig.20(c) の様に片側がつぶれた形になるのでこの歪みを検出すれば H_0 を検出することが出来る。この場合、正のピークが小さくなり負のピークが絶対値としては大きくなるような歪みかたなので、Fig.20(d) にあるように周波数 f の正弦波とその2倍波 $2f$ の足し合わせでこの歪み（赤線）を表現することが出来る。従って元の正弦波の倍周波数成分の振幅を抽出することにより外部磁場のこのコア方向の磁場成分が得られる訳である。フラックスゲートセンサーの短所はコイルの熱膨張やコア材料の特性のためのドリフトや温度特性を生じる点であり、絶対精度では核磁気共鳴よりも劣る。

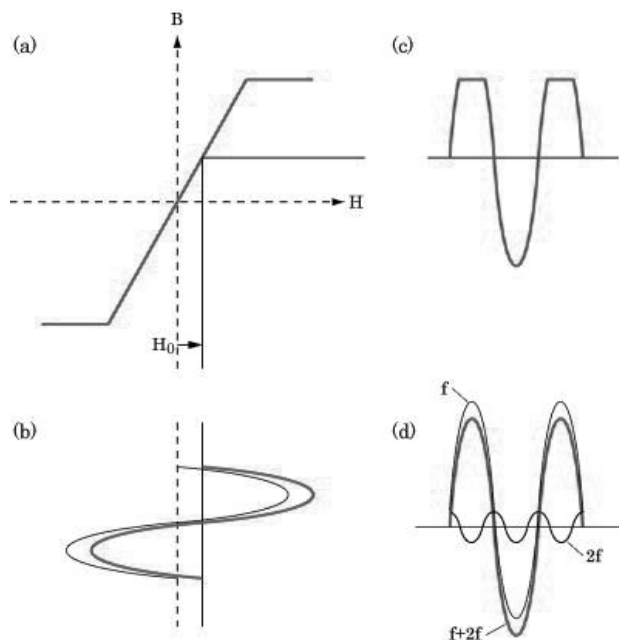


Fig.20 フラックスゲートの原理

4.2. 残留磁場

Fig.21 は液体ヘリウム温度で測定した磁場の絶対値をシールド端部からの距離を横軸にとってプロットしたものである。シールド内の空洞が設置される場所で残留磁場が数 μT 以下を達成している。端部で磁場が急激に高くなっているのはパッシブシールド特有のもので、外部の磁束をシールドの入り口で集めているためである。このあたりが避雷針に似ていて、この磁束が集まってくる部分が肝心の空洞に近すぎると危険である。中央部のややシールドが悪い場所は Fig.19 のジョイント部に対応している。ジョイント部はなるべく少なくする方がよいが、材料のロール幅や熱処理炉の大きさ等から、(ジョイント部なしで作れる) 磁気シールドパーツの大きさには限界がある。パーツを組んで磁気シールドを作る場合にはジョイント部にパッチを当てる等をして隙間をなるべく小さくするような工夫をする。

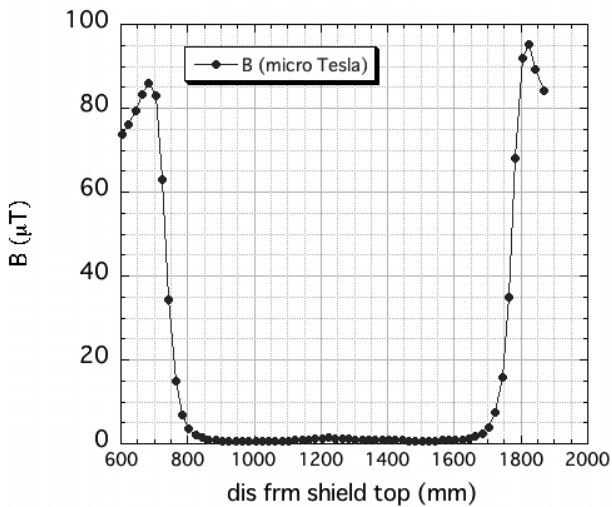


Fig.21 磁気シールド内の残留磁場

5. まとめ

磁気シールドの設計にあたり、どの方式を選ぶかは、シールドすべき磁場の強さと許容残留磁場、シールドに求められる形状、使用法と使い易さ、製作費など種々の点を考慮して決める必要がある。超伝導加速空洞用磁気シールドでは、主にパーマロイ系の高透磁率材料で空洞を囲い、高透

磁率材料中に磁力線を吸収し、空洞領域にある磁場を下げる方法 (パッシブシールド) がとられている。シールドすべき外場の主なものは地磁気で、場所にも依るが $50\mu\text{T}$ 程度である。一方、空洞領域に許容される残留磁場の値は、空洞の運転周波数、加速勾配、運転温度、運転モード (パルス運転か CW 運転か) 等に依存するが、大体において μT あるいはそれ以下のオーダーと言われている。即ち、超伝導加速空洞では、空洞のある領域全域において地磁気を数百分の一程度に落とすことができる磁気シールドが要求され、材料の選択とシールド形状に工夫をこらした設計が必要となる。更に最近の大型超伝導空洞システムでは磁気シールドを超伝導空洞の直近に配置してコスト削減を図る傾向にあり、高透磁率磁性材料の低温磁気特性の研究も始まっている。本テキストでは超伝導加速空洞用磁気遮シールドの基本概念、材料特性、設計方針などについて説明し、実際に得られた磁気シールド効果についても紹介した。

参考文献

- [1] 古屋貴章「超伝導空洞の基礎」,OHO'06 テキスト 6-1
- [2] 加古永治「超伝導空洞の高周波設計」,OHO'06 テキスト 7-1
- [3] “K. Tsuchiya et.al., “Cryomodule development for superconducting RF Test Facility (STF) at KEK,” Proc. of the 2006 European Particle Accelerator Conference, Edinburgh, Scotland, 26-30 Jun 2006,pp.505-507.
- [4] A. J. Mager, “Magnetic Shields,” IEEE Transactions on Magnetism Volume:Mag-6 (1970).
- [5] <http://accl.kek.jp/topics/topics130222.html>
- [6] <http://www.n-buturi.co.jp/service/burying/gradiometer.html>