

## 超伝導加速空洞用磁気シールドの低温測定

### LOW-TEMPERATURE MEASUREMENT OF MAGNETIC SHIELD FOR SC CAVITY

植木 竜一<sup>#,A)</sup>, 浅野 峰行<sup>A)</sup>, 今田 信一<sup>A)</sup>, 柳町 太亮<sup>A)</sup>, 山田 浩気<sup>A)</sup>, 岡田 昭和<sup>B)</sup>,  
土屋 清澄<sup>C)</sup>, 増澤 美佳<sup>C)</sup>, 宍戸 寿郎<sup>C)</sup>, 山本 康史<sup>C)</sup>, 加古 永治<sup>C)</sup>

Ryuichi Ueki<sup>#,A)</sup>, Mineyuki Asano<sup>A)</sup>, Shin-ichi Imada<sup>A)</sup>, Taisuke Yanagimachi<sup>A)</sup>, Hiroki Yamada<sup>A)</sup>, Terukazu Okada<sup>B)</sup>,  
Kiyosumi Tsuchiya<sup>C)</sup>, Mika Masuzawa<sup>C)</sup>, Toshio Shishido<sup>C)</sup>, Yasuchika Yamamoto<sup>C)</sup> and Eiji Kako<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Nippon Advanced Technology Co. Ltd.

<sup>B)</sup> K-vac

<sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

#### Abstract

Requirement of magnetic shield for superconducting (SC) cavity is to reduce the earth's magnetic field to about one-hundredth at helium temperature. Permalloy-R has an extremely high permeability for earth's magnetic field, and degradation of the permeability at a low-temperature is small as compared with the ordinal Permalloy materials. In this paper, we report shielding effect of the magnetic shield made of Permalloy-R (Tokin-shield), and the vertical test result of a 9-cell SC cavity mounted the Tokin-shield. Magnetic flux density in the Tokin-shield reduced to 4 mG (earth's magnetic field is 307 mG), and the estimated surface resistance due to trapping magnetic flux was an extremely small value that of about 1 nΩ. In addition, the results of the 9-cell SC cavity showed that the residual resistance was 12.2 nΩ and the unloaded Q value was  $2.13 \times 10^{10}$ . These results prove that the Tokin-shield has an enough performance as a magnetic shield for SC cavities.

#### 1. はじめに

超伝導空洞にとって外部磁場は空洞性能を著しく低下させる要因となる。磁気シールドは、超伝導加速空洞周辺に配置され空洞への外部磁場の侵入を遮断し空洞の性能劣化を防ぐ重要な役割を果たしている。地磁気に対して高い比透磁率を有するパーマロイ系の材料が磁気シールド材として使用される。しかし、磁気シールドとして一般的な Permalloy-PC は室温の比透磁率に比べてヘリウム温度における比透磁率が 1 桁近く減少する低温劣化が問題となる。

本論文では、ヘリウム温度において比透磁率劣化の小さいとされている材料を使って作製された磁気シールドの性能評価を行ったのでその結果を報告する。

#### 2. 超伝導加速空洞と磁気シールド

超伝導加速空洞の性能を評価する上で重要な値が Quality Factor (Q 値) である。Q 値は、空洞に蓄積されたエネルギー ( $W_s$ ) と空洞内表面で消費される高周波損失 ( $P_d$ ) の比によって計算され (式(1))、International Liner Collider (ILC) で使用される超伝導空洞においては、 $10^{10}$  オーダーの値が要求される。

$$Q = W_s / P_d \quad (1)$$

また、Q 値は形状因子 (G) と表面抵抗 ( $R_s$ ) の比で書き直することができる (式(2))。G は空洞形状によって決まる値であり、ILC 空洞の場合、その値は 277 Ω であ

る。そのため、Q 値が  $10^{10}$  を超えるためには 28 nΩ 以下に表面抵抗を下げる必要がある。

$$Q = G / R_s \quad (2)$$

表面抵抗は、BCS 理論から計算される抵抗 ( $R_{bcs}$ ) と残留抵抗 ( $R_{res}$ ) で表される (式(3))。  $R_{bcs}$  は、式(4)に示すように温度の関数となる。A は比例定数、 $\omega$  は RF 周波数、 $\Delta$  は 0 K におけるニオブのエネルギーギャップ、k はボルツマン定数、T は空洞温度である。

$$R_s = R_{bcs}(T) + R_{res} \quad (3)$$

$$R_{bcs}(T) = A \times \frac{\omega^2}{T} \exp\left(\frac{-\Delta}{kT_c} \cdot \frac{T_c}{T}\right) \quad (4)$$

これに対して、 $R_{res}$  はニオブ中の不純物や格子欠陥、残留磁場が原因となり生じる抵抗であり、温度によらず一定の値を示す。ニオブの超伝導空洞 (1.3GHz パルス運転) における  $R_s (=R_{bcs}+R_{res})$  の温度依存を Fig. 1 に示す。4 K における  $R_{bcs}$  は数百 nΩ であるのに対して、超伝導空洞の運転温度である 2 K 近くまで空洞が冷却されると  $R_{bcs}$  は、11 nΩ 程度まで減少する。9 セル超伝導空洞の残留抵抗は数 nΩ から十数 nΩ であるため、2 K 付近では  $R_{res}$  と  $R_{bcs}$  が同程度の値を示す。そのため、残留抵抗をいかに小さくするかが空洞の Q 値を向上させるための鍵となる。2 K における  $R_{bcs}$  が 11 nΩ 程度であるため、空洞の残留抵抗は 10 nΩ 程度にすることが目標となる。

残留抵抗の原因のひとつである残留磁場は、空洞が冷却され常伝導から超伝導に相転移する際、外部磁場が空洞内の欠陥等に磁束量子としてトラップされる<sup>[1]</sup>。この磁束量子が高周波により振動させられ

<sup>#</sup> nat-ueki@post.kek.jp

ることで磁気抵抗となり残留抵抗を増加させる。外部磁場に対する対策を行わない状態で空洞を冷却した場合、残留抵抗は 126 nΩ、空洞の Q 値は 10<sup>9</sup> オーダーと ILC 仕様より 1 桁低くなることが報告されている<sup>[2]</sup>。この外部磁場の影響を極力少なくし空洞内にトラップされる残留磁場を抑えるために重要な役割を果たすのが磁気シールドである。

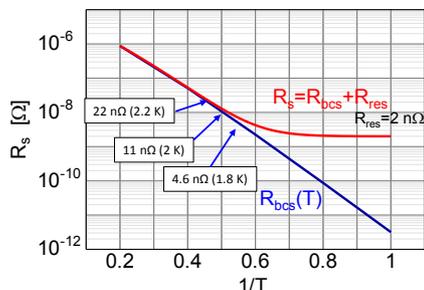


Figure 1: Temperature dependence of surface resistance ( $R_{res}=2 \text{ n}\Omega$ ).

超伝導空洞の外部磁場対策にはパッシブ磁気シールド法が用いられる。高い透磁率を有する磁気シールドは、空洞を覆うように配置され、シールドへ外部磁場を吸収させることにより空洞内への外部磁場の侵入を遮断し、空洞にトラップされる残留磁場を減少させる。ここで問題としている外部磁場とは主に地磁気であり、その大きさは数百 mG ほどである。残留抵抗を 10 nΩ以下にするためには、地磁気を数 mG 程度まで減らすシールド能力が必要となる。そのため、地磁気に対して高い透磁率を有するパーマロイ系の材料が磁気シールド材として使用される。しかし、パーマロイ系の材料は、ヘリウム温度まで冷却すると比透磁率が低下する低温劣化が起こることが知られており、室温における磁気シールド材として一般的に使用される Permalloy-PC は、ヘリウム温度まで冷却されると比透磁率が 1 桁近く減少することが報告されている<sup>[3]</sup>。超伝導空洞用磁気シールドは、超伝導空洞とヘリウムジャケットの間に配置され、液体ヘリウムによって 2 K まで冷却されるため、材料の低温劣化が原因となり磁気シールドの性能低下が生じる可能性が考えられる。そこで本論文では、低温劣化の小さいとされる Permalloy-R および VDM-7904<sup>[4]</sup>を材料とした磁気シールドを作製し、そのシールド能力の評価を行った。

### 3. 測定方法

今回用意した磁気シールドは、Permalloy-R で作製された磁気シールド(Tokin-shield: NEC TOKIN Co.)と VDM-7904 で作製された磁気シールド(Ohtama-shield: OHTAMA CO., LTD.)である。Tokin-shield は、厚さによるシールド効果の違いを調べるため 2 種類のシールドを用意した。Fig. 2 に各シールドの図面と

写真を示す。Tokin-shield A (a)は、シールド厚 1.0 mm、シールド長 976 mm である。Tokin-shield B (b)は、シールド厚 1.2 mm、シールド長 956 mm である。Tokin-shield A および B は、上下 2 つのシールドを中央で重ね合わせ継ぎ目部分をビスで固定している。一方、Ohtama-shield (c)は、円筒形を長手方向に 2 分割した形のシールドをビスで固定しており、シールド厚 1.5 mm、シールド長 955 mm である。

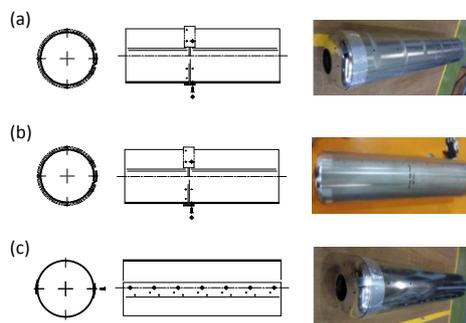


Figure 2: Three types of magnetic shield: (a) Tokin-shield A ( $t=1.0 \text{ mm}$ ). (b) Tokin-shield B ( $t=1.2 \text{ mm}$ ). Ohtama-shield ( $t=1.5 \text{ mm}$ ).

まず、磁気シールドのシールド効果を調べるため、シールド内の残留磁場強度測定を行った。Fig. 3 は、残留磁場強度測定装置の概略図である。

磁気シールドの両端には Permalloy-R で作製されたエンドシールドを取り付けた。これを拘束治具に固定した後、シールドの中心軸上に断熱真空された円筒型パイプを通し、その中に 3 軸フラックスゲート (Mag-03: Bartington)を設置した。これを KEK-STF 棟内のたて型性能測定用クライオスタット内に入れ、室温におけるシールド内の残留磁場強度を測定した。その後、クライオスタット内に液体ヘリウムを充填しシールド温度が 4.2 K に達したところで再びシールド内の残留磁場強度測定を行った。フラックスゲートは上下に 1280 mm 移動させることができる。測定の際は、シールドを縦断するように 20 mm ずつ移動させ、各場所の磁場強度の測定を行った。

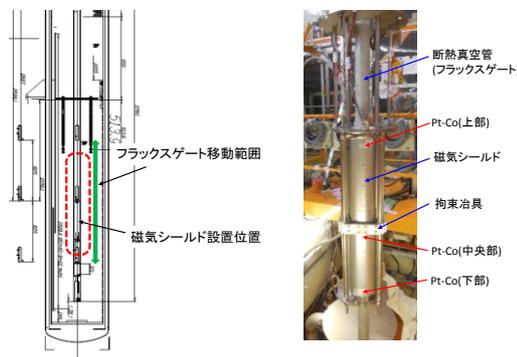


Figure 3: Schematic and picture of magnetic field measurement system.

測定された外部磁場強度( $H_e$ )とシールド内残留磁場強度( $H_i$ )を用いてシールド率( $S$ )を計算し、磁気シールドのシールド能力を評価した(式4)。

$$S = H_e/H_i \quad (4)$$

なお、有限長円筒形磁気シールドにおいてはシールドの軸方向の磁場の方が垂直方向の磁場よりシールド効果が小さいため<sup>[1]</sup>、本論文では  $z$  方向の磁場を用いてシールド率の計算を行っている。

続いて磁気シールドを 9 セル超伝導空洞に取り付け、STF 棟内のクライオスタットにおいてたて型性能測定(縦測定)を行った。測定は、我々が普段測定で使用する Cryo-shield (Fig. 4 (a))と超伝導空洞用磁気シールド Tokin-shield A (Fig. 4 (b))および B (Fig. 4 (c))、Ohtama-shield (Fig. 4 (d))の 4 種類である。まず空洞を 4 K から 2 K へ冷却を行う際の各温度での表面抵抗の測定を行い、空洞の残留抵抗を算出した。さらに、2 K における  $Q_0$ - $E_{acc}$  曲線の測定を行い、シールド性能の評価を行った。

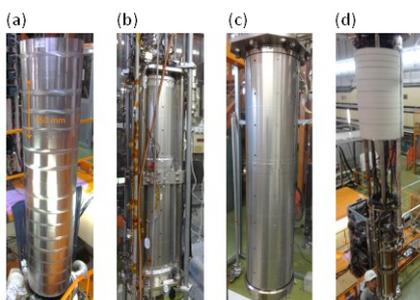


Figure 4: Mounted magnetic shield of cryo-shield (a), Tokin-shield (b), Tokin-shield (c), and Ohtama-shield (d).

#### 4. 磁気シールドのシールド効果

磁気シールド内の磁場強度測定の結果を示す。Fig. 5 は、磁気シールドを設置せず拘束治具のみで測定したクライオスタット内の地磁気の強度分布である。地磁気の  $z$  軸方向の磁場の大きさは 200 mG から 300 mG であった。

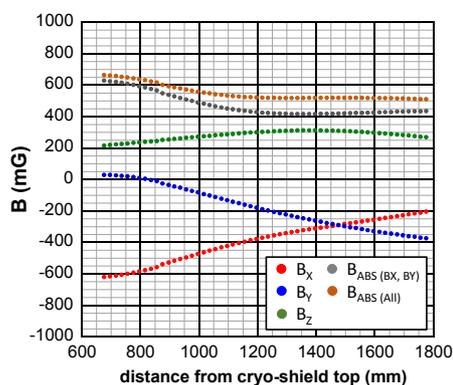


Figure 5: Residual magnetic field inside the cryostat without magnetic shield.

次に、Tokin-shield A を取り付けて測定した磁場強度分布を Fig. 6 に示す。300 mG 程度であった磁場強度がシールド両端で 700 から 900 mG に増加した。これは、磁場がシールドに吸収される際、シールドのエッジに磁場が集中するためと考えられる。シールド内に入ると徐々に磁場強度は減少し、シールドの上端から 250 mm 内側に入ったところで磁場強度が最小となった(Fig. 6 (b) A)。さらに、シールド中央に近づくにつれ再び磁場強度が大きくなり、シールド上端から 450 mm 程度入ったところでピークを示した(Fig. 6 (b) B)。ピーク位置は、シールドの継ぎ目部分と良く一致しており、継ぎ目部分で磁場の漏れが生じ磁場強度が大きくなったと考えられる。最小値を示した位置の磁場強度からシールド率の計算を行った。室温時の磁場強度は 2.7 mG で、シールド率は 104 と非常に高い。シールドを 4 K まで冷却すると磁場強度が 5.0 mG まで増加し、このときのシールド率は 56 となる。室温時に比べシールド率が減少しており、これは材料である Permalloy-R の低温劣化に起因したものであると考えられる。ただし、劣化が生じているものの磁場強度としては非常に低い値であり、超伝導空洞用磁気シールドとして十分な性能であると思われる。なお、加速器の運転温度である 2 K における測定を行ったところ、4 K とほとんど変化が見られなかったため、今回はすべて 4 K の測定データで議論を行っている。

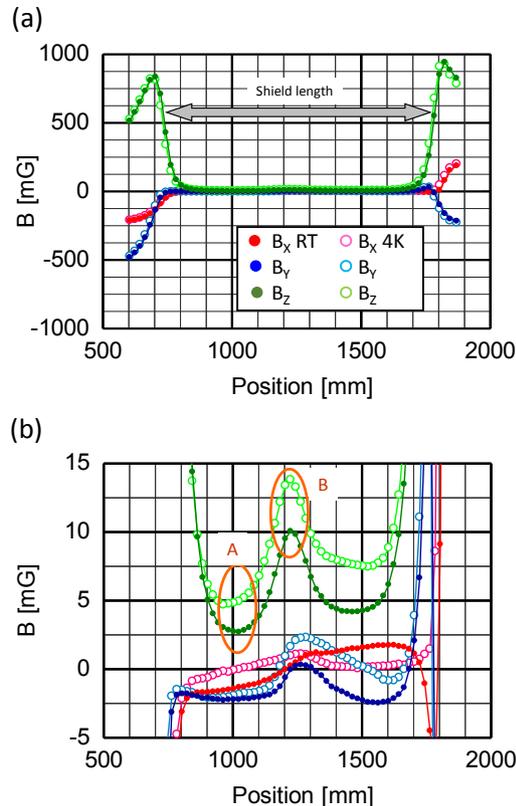


Figure 6: Residual magnetic field inside the Tokin-shield ( $t=1.0$  mm).

Fig. 7に Tokin-shield B 内の磁場強度分布を示す。Tokin-shield A 同様シールドの両端で磁場強度が大きくなり、シールド内に入っていきつれ徐々に強度は減少した。磁場強度の最小を示したのは、シールド下端から 350 mm 内側に入ったところであり (Fig. 7 (b) A)、シールド中央の継ぎ目部分において磁場の漏れが生じ磁場強度が増加した (Fig. 7 (b) B)。室温時の最小磁場強度は 1.6 mG であり、シールド率は 192 であった。これに対し 4 K における最小磁場強度は 4.0 mG、シールド率は 77 となった。Shield B も Permalloy-R の低温劣化によるシールド率の低下が見られた。しかし、Tokin-shield A に比べ室温と 4 K において高いシールド率を示した。円筒型磁気シールドにおいて垂直方向の磁場に対するシールド率は、シールドの厚さに比例することが知られている<sup>[1]</sup>。そのため、シールド厚の大きい shield B の磁場遮蔽効果が大きくシールド率が向上したと考えられる。

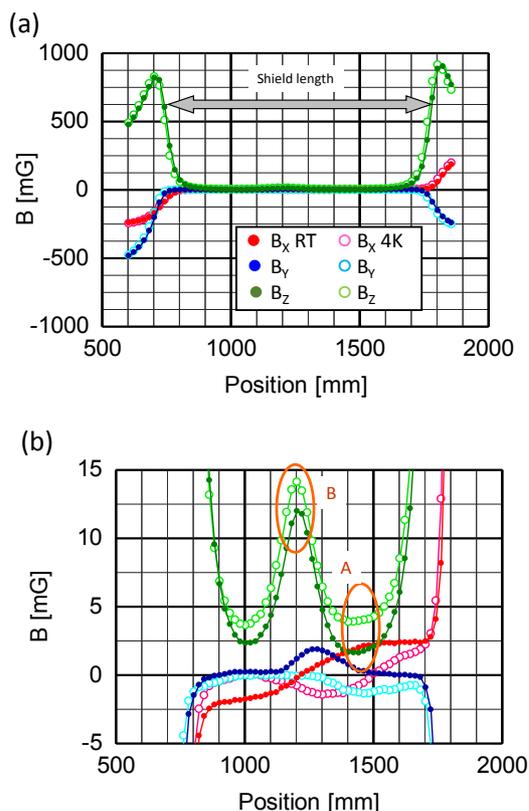


Figure 7: Residual magnetic field inside the Tokin-shield ( $t=1.2$  mm).

Fig. 8に Ohtama-shield 内の磁場強度分布を示す。Tokin-shield の場合とは異なり、シールド内の磁場強度は中心に近づくほど小さくなり、シールド中央付近で最小値を示した (Fig. 8 (b) A)。これは、シールドの継ぎ目が存在せず、シールド両端以外の場所での磁場の侵入がないためと考えられる。室温における磁場強度の最小値は 1.9 mG でありシールド率は 158 となった。さらに、シールドを 4 K に冷却し測定し

たところ、最小磁場強度は 2.0 mG と室温とほぼ同等の磁場強度を示し低温劣化は見られなかった。

これらの結果から、Tokin-shield は低温劣化によるシールド率の低下が見られるものの、両シールドとも外部磁場を数 mG 程度まで遮蔽する能力を有することが明らかとなった。Tokin-shield の継ぎ目部分で生じた磁場の漏れにより磁場強度は最小値を示した場所に比べ 3 倍ほど大きい 15 mG (室温時 10 mG) に増加するが、得られた磁場強度から見積もられる磁気抵抗は数 nΩ であり、Tokin-shield、Ohtama-shield ともに超伝導空洞用の磁気シールドとして十分なシールド能力であると考えられる。

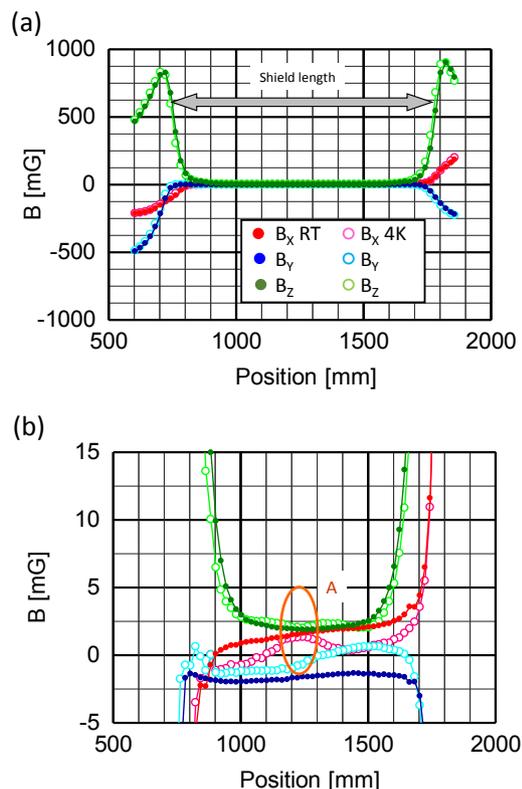


Figure 8: Residual magnetic field inside the Ohtama-shield.

## 5. たて型性能測定の結果

次に、磁気シールドを装着した 9 セル超伝導空洞のたて型性能測定の結果を示す。

Fig. 9 は、超伝導空洞に各シールドを取り付けた際の表面抵抗の温度依存 (Fig. 9 (a)) と加速電界に対する  $Q_0$  値 (Fig. 9 (b)) をプロットしたグラフである。我々が超伝導空洞の縦測定を行う際に使用する Cryo-shield (Fig. 9 (blue)) 内に空洞を取り付け測定したところ、表面抵抗は、13.0 nΩ、 $Q_0$  の最大値は  $1.97 \times 10^{10}$  であった。また、Tokin-shield B (Fig. 9 (Green)) を取り付けた場合の表面抵抗は 12.2 nΩ、 $Q_0$  の最大値は  $2.13 \times 10^{10}$  を示し、非常に良い結果が得られた。

しかし、Ohtama-shield (Fig. 9 (Orange))を取り付けた場合は、残留抵抗が  $14.9 \text{ n}\Omega$ 、 $Q_0$  の最大値が  $1.83 \times 10^{10}$  を示し、残留抵抗が少し大きい値を示した。これはシールドを空洞に取り付ける際、わずかではあるがシールドに隙間が生じ、磁場の漏れが生じたためと考えられる。しかし、両シールドとも  $Q_0$  が  $10^{10}$  を超える値を示していることから超伝導空洞用磁気シールドとして十分な性能であると言える。一方 Tokin-shield A (red) に関しては、シールドが空洞長に対して適切な長さでなかったため、磁気シールドとエンドシールドの間に  $5 \text{ mm}$  程度隙間が生じた。その結果、残留抵抗が  $28.7 \text{ n}\Omega$ 、 $Q_0$  の最大値が  $9.54 \times 10^9$  と他に比べ空洞性能が大きく低下した。このように、磁気シールドの取り付け方で空洞性能が大きく変化することが分かった。この結果は、磁気シールドの構造を決める上で非常に重要な情報である。9セル超伝導空洞はチューニングを行うと空洞の長さが作製した段階から数センチ変化する場合があるため、空洞によって必要となる磁気シールドの長さも変化する。そのため、空洞形状の変化に対応できるようなシールド構造を考慮し、磁気シールドに隙間が生じないような工夫が必要である。また、シールド長が適切であっても取り付け時に生じたわずかな隙間により空洞性能が低下してしまうため、シールドを取り付ける際にも細心の注意が必要である。

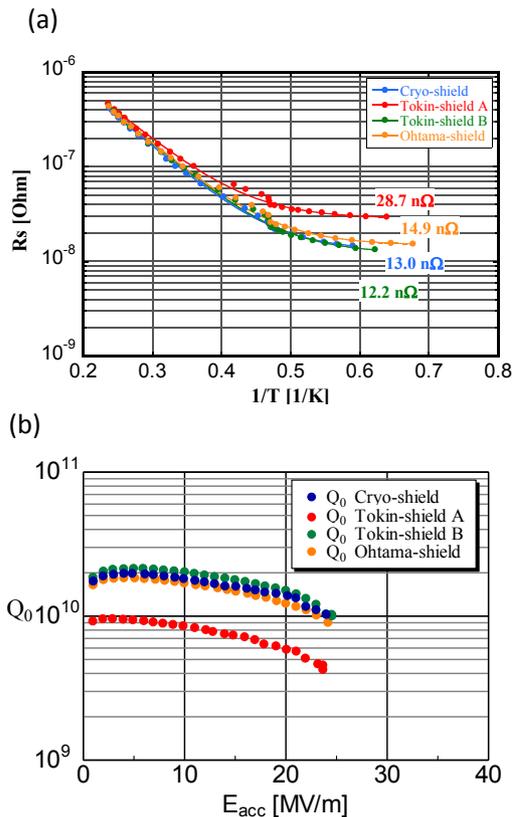


Figure 9: (a) Temperature dependence of surface resistance and (b)  $Q_0$ - $E_{\text{acc}}$  plots in the vertical test of 9-cell cavity with four types of magnetic shield.

## 6. まとめ

Permalloy-R および VDM-7904 を使って作製された磁気シールドの性能測定を行った。室温におけるシールド率は全てのシールドで  $100$  ( $1.6 \sim 2.7 \text{ mG}$ ) を超える値であったが、ヘリウム温度においては材料の特性である透磁率の低温劣化を反映し、Tokin-shield はシールド率が  $60 \sim 80$  ( $4 \sim 5 \text{ mG}$ ) に減少した。また、シールドの継ぎ目部分において磁場の漏れが生じ、継ぎ目周辺の磁場強度が  $15 \text{ mG}$  程度まで増加した。しかし、縦測定の結果、Tokin-shield B および Ohtama-shield を取り付けた超伝導空洞の残留抵抗は十数  $\text{n}\Omega$ 、 $Q$  値は  $10^{10}$  ( $@20 \text{ MV/m}$ ) を超えており、超伝導空洞用磁気シールドとして十分な性能を有することがわかった。また、シールドにわずかな隙間が存在するだけで、空洞性能を悪化させるため、空洞の形状に対して自由度を持って対応できるようなシールドの構造を考慮することも重要である。

## 参考文献

- [1] A. J. MAGER., "Magnetic Shield", IEEE Transactions on Magnetics Volume Mag-6 (1970).
- [2] E. Kako., "超伝導空洞の基礎", OHO'14, Tsukuba, Japan (2014).
- [3] K. Tsuchiya et al., "Cryomodule Development for Superconducting RF Test Facility (STF) at KEK", Proceeding of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland (2006) 505-507.
- [4] M. Masuzawa et al., "Magnetic Shielding: Our Experience with Various Shielding Materials" Proceedings of SRF2013, Paris, France (2013) 808-811.
- [5] T. Shishido et al., "Frequency Tuning of Accelerating Mode in STF Baseline SC Cavities" Proceedings of the 3<sup>rd</sup> annual meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Japan (2006) 865-867.