

加速空洞用真空容器の消磁手法の検討

STUDY OF DEMAGNETIZATION OF A VACUUM VESSEL FOR SUPERCONDUCTING RF CAVITIES

増澤美佳[#], 植木竜一, 大澤康伸, 川本崇, 土屋清澄
大学共同利用機関法人
高エネルギー加速器研究機構

Mika Masuzawa[#], Ryuichi Ueki, Yasunobu Ohsawa, Takashi Kawamoto, Kiyosumi Tsuchiya
Inter-University Research Institute Corporation
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Management of the ambient magnetic field is one of the key issues for a successful operation of superconducting RF cavities used in many particle accelerators. The tolerance for the ambient magnetic field depends on factors such as the operating RF frequency and acceleration gradient but it can be as low as several mG. The vacuum vessels are usually made of iron, which is expected to shield the magnetic field to some extent. There is another magnetic shield made of permalloy surrounding the cavities to reduce the ambient magnetic field to the desired level. The non-annealed iron vessel that we measured presented strong magnetization, creating a stronger magnetic field inside the vessels than the earth magnetic field. Demagnetization of the vessels was performed on-site using coils wound on the vessels. We demagnetized the vessels using two different patterns of coil windings. Demagnetization by different windings are compared and summarized in this report.

1. はじめに

超伝導加速空洞が組み込まれる真空容器には低コストであることと加工性の容易さから鉄製のものが使われることが多い。また鉄は高透磁率を有することから地磁気などの外部磁場をシールドすることができるのも鉄製真空容器の大きなメリットである。外部磁場は超伝導加速空洞の性能劣化の原因になるので[1, 2]磁気シールドで空洞を囲う必要がある。鉄製真空容器を第一弾の磁気シールドとして外部磁場を地磁気の数分の一程度に落とし、地磁気以下で性能が上がるパーマロイ系の高透磁率材料を第二弾の磁気シールドとして更に外部磁場を低減する方法が超伝導加速空洞の磁気シールドシステムとしてしばしば採用されている。磁気シールド材料についての性能特性、特に低温環境下での特性の研究も進められている[3, 4]。

空洞周辺の残留磁場は残留抵抗の原因になることから空洞周辺の磁場環境“magnetic hygiene”をいかに制御するかが空洞性能の向上にとって非常に重要である。Magnetic hygieneの制御には磁気シールドの材料の選択と形状の決定はもちろん重要だが、空洞周辺に使われる様々な部品の材質にも注意を払う必要がある。1mG程度のmagnetic hygieneを議論する際には溶接作業による磁性体の磁化や真空容器製作過程で発生した着磁についても注意を払い、着磁の程度によっては真空容器の消磁を行う。本論文では、着磁した真空容器の消磁方法の比較検討について報告する。

2. 真空容器の消磁の必要性

製作会社と製作時期が異なる二つの鉄製真空容器、STF Phase I 45MV/m用とPhase II CM2a用、について真空容器内残留磁場の測定を行った。本論文で報告する磁場測定にはBartington社製3軸フラックスゲート(Mag-03)を使っている。

2.1 磁場測定結果

Phase I用真空容器については容器内磁場測定及び容器内壁表面での磁場測定を行ったところ、外部磁場よりもむしろ磁場が高く第一弾磁気シールドの役目を果たしていないこと、磁場分布が真空容器形状から決まるものではなく局所的な磁化の影響を受けていること、が判明し報告した[5]。Fig. 1に当時測定された真空容器内壁表面の磁場分布を示す。地磁気の数倍に磁化された箇所のうち何箇所かは溶接箇所に対応しているが、そうでない場合もあった。製作過程で、例えば強力なマグチャックをつけたとするとこのような磁化は起こり得る。マグチャック使用の場合は外見上磁化の可能性があるかどうかかわからないのが難点である。

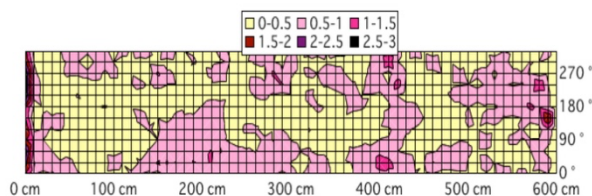


Figure 1: Magnetic field (in Gauss) measured at the inner surface of the vessel. Some high-field spots correspond to welding spots.

Figure 2 に 2020 年 2 月に行なった CM2a 真空容器内のビームラインに沿って測定した磁場分布を示す。Btot、Btrans はそれぞれ磁場の絶対値、ビーム進行方向に垂直な磁場の強さを表す。本来なら鉄でシールドされているはずの真空容器内部に地磁気と同レベルの磁場が存在していることがわかる。またこちらの磁場分布も STF Phase I 真空容器同様、円筒形状では説明できない分布をしており、真空容器が局所的に磁化していることを示している。

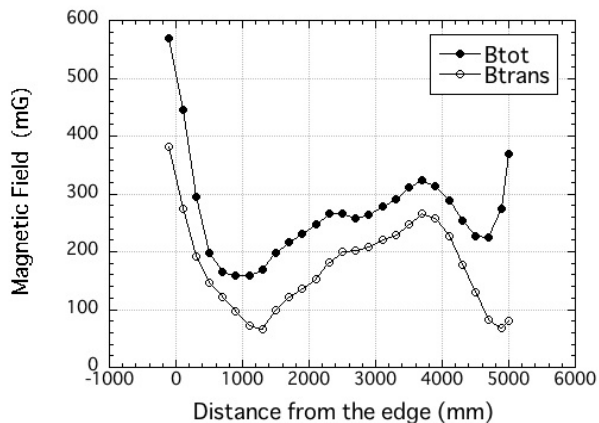


Figure 2: Magnetic field in the iron vessel measured along the beam line.

2.2 溶接による磁化

溶接 (TIG) 溶接によるステンレス (SUS304、SUS304L、SUS316、SUS316L) 及び高マンガン鋼、鉄 (SS400) の磁化について測定した。わずかな磁化の変化を見るため、測定はゼロガウスチェンバー内でフラックスゲートを用いて行なった。サンプルは 20 mm 幅、1.5mm 厚 (ただし高マンガン鋼については 2.4mm 厚) の突き合わせ TIG 溶接部分の磁化を Fig. 3 にまとめた。SS400 についてはフラックスゲートの測定レンジ最大値の 1 G を超えてしまい測定不可となっている。

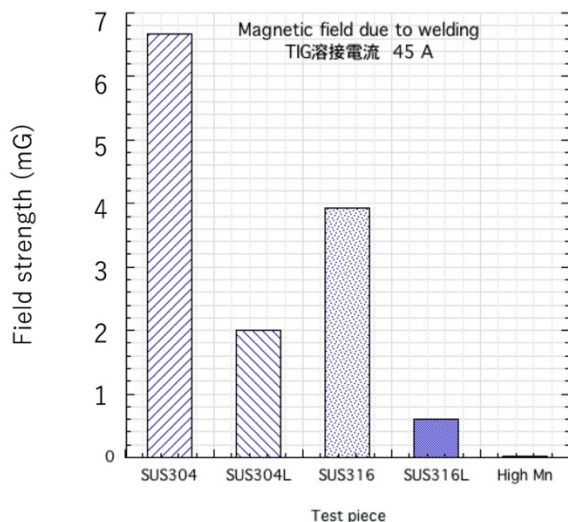


Figure 3: Magnetization of each test piece after welding.

3. 消磁

着磁した磁性体を消磁するには、熱消磁と交流消磁の 2 つの方法がある。現場に設置された真空容器を熱処理することは不可能なので、ここでは交流消磁によって着磁を消す作業を行なった。実際には Fig. 4 にあるようなゆっくりとした電流パターンで消磁コイルを駆動して真空容器の消磁を行なった。

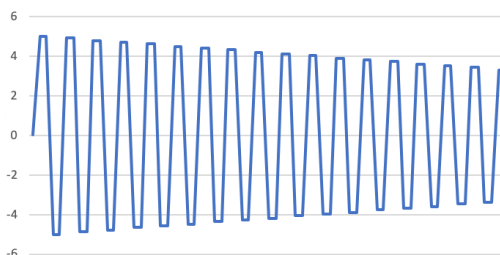


Figure 4: Current pattern used for demagnetization.

3.1 消磁コイル 1

STF Phase I 用真空容器に消磁コイルを Fig. 5 のように巻き、Fig. 4 にある駆動電流パターンで消磁を行なった。消磁に必要なコイルの仕様、すなわちアンペアターンは鉄内で発生させる磁界から式(1)を用いて求めることができる。コイルのターン数を N 、電流を I 、平均磁路長を L とすると、鉄内の磁界 H は次のように表すことができる。

$$H[Oe] = \frac{N[\text{turns}]}{L[m]} I[A] \times \frac{4\pi}{1000} \quad (1)$$

例えば Fig. 5 にある真空容器の場合、真空容器の内径、外径がそれぞれ 0.96 m、0.98 m であるので平均磁路は 3.06 m となり 200 ターンのコイルを 5A で駆動した場合に発生させることのできる磁界は約 4 Oe となる。最大電流を 5A として消磁した結果を Fig. 6 に示す。ビーム進行方向に対して垂直な成分を Btrans、磁場の大きさを Btot、消磁前のデータを白抜きで表示してある。消磁により真空容器内の磁場が外場よりも下がったことが確認できた。

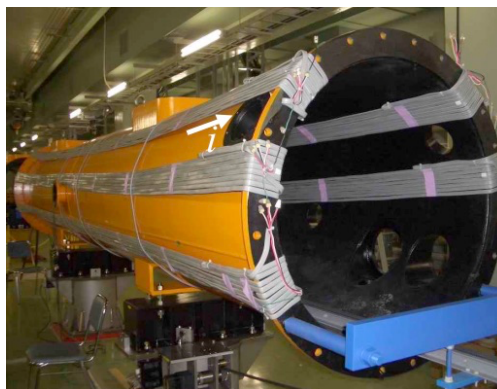


Figure 5: Demagnetization treatment setup for STF Phase I iron vessel.

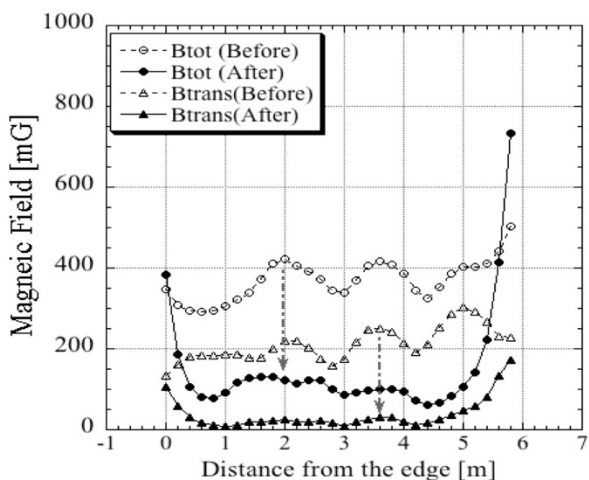


Figure 6: B_{tot} and B_{trans} along the iron vessel before (open circles and triangles) and after (solid circles and triangles) demagnetization.

3.2 消磁コイル 2

CM2a 用真空容器については Fig.7 にあるように円周方向にコイルを巻いた。この巻き方の最大のメリットはコイルを巻く際に真空容器の内側にアクセスする必要がないのでクライオモジュールの組み込みが終わった後に巻ける点である。磁気回路的には消磁コイル 1 の巻き方の方が効率よく鉄内に磁界を発生させることができる。消磁コイル 1 とほぼ同等の鉄内部磁界を発生させるために、72 ターンコイルを長手方向に 6 つ、両端部には 144 ターンコイルを巻いた。SuperKEKB 主リング六極電磁石補助コイル用に開発した一層 12 本のフラットケーブルを利用した (Fig. 8)。

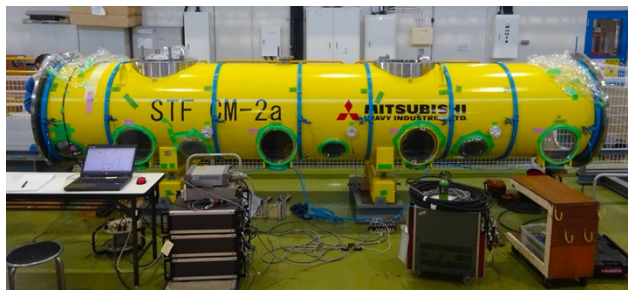


Figure 7: Demagnetization treatment setup for CM2a iron vessel.



Figure 8: 12-turn flat cable used for demagnetization coils.

Figure 9 は消磁後の真空容器内の残留磁場の大きさをビーム進行方向に対してプロットしたものである。消磁の最大電流を 1A→2A→4A→5A→8A と徐々に上げていったが、最大電流が上がる、つまり鉄内に発生する磁界が大きくなるにつれて消磁効果が上がる。この時の最大電流は実験に使用した電源の容量で制限されている。また最大電流は同じ場合でも Fig.4 にある消磁パターンループの振幅を細かく刻んで最終的にゼロ A にする方が Fig. 10 にあるように消磁効果は上がる。例えば 0.4A で刻んだ場合と 0.005A で刻んだ場合とでは消磁効果で 15mG 程度の差が出る。0.05A と 0.005A ではそれ程大きな差はなかった。

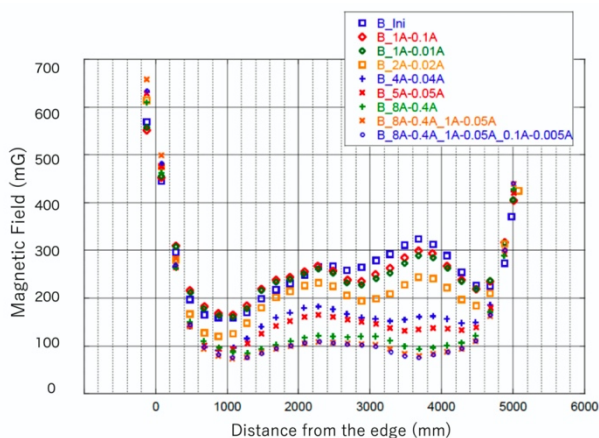


Figure 9: Magnetic field inside the CM2a iron vessel with different maximum current on the demagnetization coil.

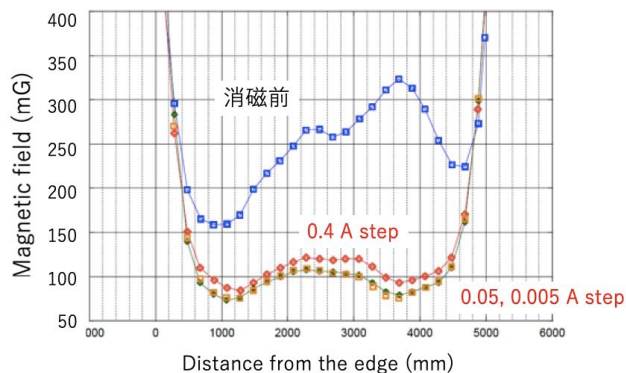


Figure 10: Magnetic field inside the CM2a iron vessel with different steps on the demagnetization coil.

消磁コイル 1 の場合も 2 の場合も、中心部では消磁が上手くできているが、端部はむしろ磁場が上がっている。通常超伝導加速空洞は端部よりも少し内側に配置されるので消磁後の磁場分布が加速空洞の性能に悪影響を及ぼすことは考えにくい。が、今後コイルの巻き方や、あるいは局所的に別のコイルを使う等の工夫をして端部の消磁、減磁について検討を進める。

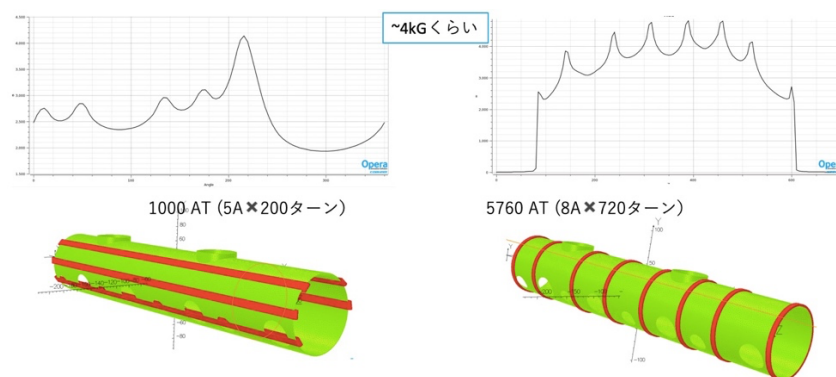


Figure 11: Magnetic field inside the iron vessel for two different types of coil windings for demagnetization.

3.3 消磁方法の比較

消磁コイル 1 と消磁コイル 2 による発生磁界プロファイルについて Opera3D 計算を用いて比較した (Fig. 11)。消磁コイル 1 については鉄内部の磁場を円周方向について、消磁コイル 2 については長手方向についてプロットしてある。計算には一部簡略化した CM2a 真空容器モデルを使っている。真空容器に開けられたチューナー用のアクセスホールなどを避けるため消磁用コイルは均等には巻いていない。消磁コイル 1 も 2 もどちらも鉄内部ではそれぞれのコイルに印加した最大電流で 4kG 程度の磁界が発生している。

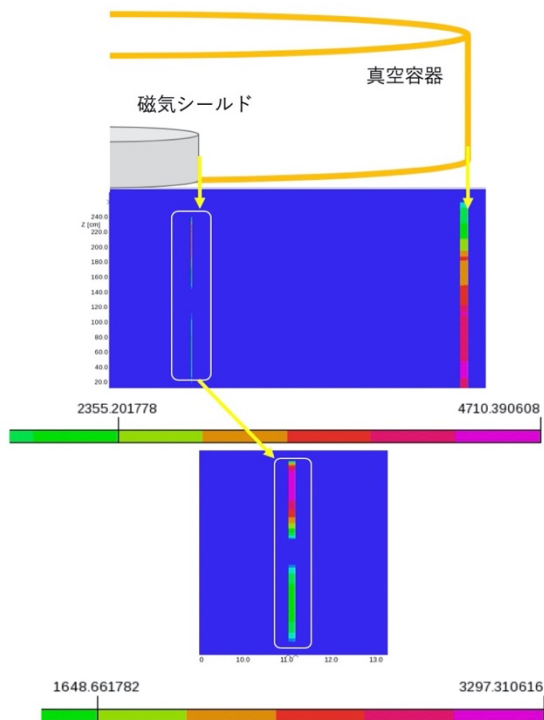


Figure 12: Magnetic field inside the magnetic shield made of permalloy and iron vessel. The magnetic field inside is calculated to be > 4kG in the iron vessel and > 3kG in the magnetic shield made of permalloy placed inside the iron vessel.

次に真空容器の中に第二弾磁気シールドがインストールされた場合について Opera2D で計算を行なった (Fig. 12)。磁気シールド材料(パーマロイ系)の透磁率が Fig. 13 にあるように地磁気の 1/10 以下の環境下で 100000 以上と非常に大きいため、磁気シールド内にも大きな磁界を発生させることが出来る。従って、磁気シールドが着磁していても鉄製真空容器程度の着磁であれば消磁コイル 2 のようなコイルを使って鉄製真空容器と同時に消磁することが可能であると考える。

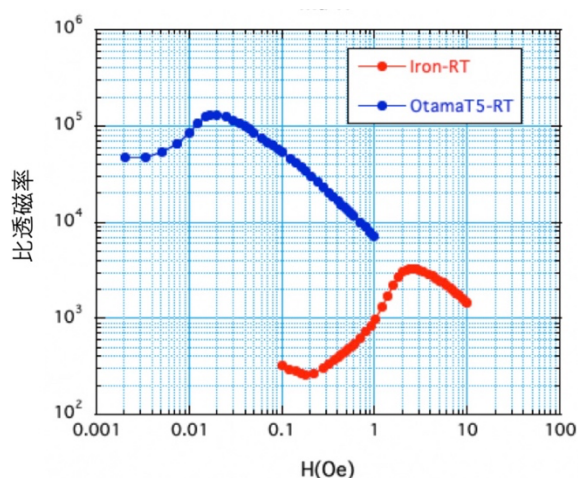


Figure 13: Permeability data taken at the room temperature for iron and permally (Ohtama-T5) used for the simulation in Fig.12.

4. まとめ

超伝導加速空洞において高 Q 値を達成するためには、残留抵抗の原因となる残留磁場の低減、つまり good magnetic hygiene の実現が重要である。そのためには空洞が組み込まれるクライオモジュールの内部磁場、すなわち空洞にとっての外部磁場の強さと分布を評価して適切な磁気シールドを設計する必要がある。

外部磁場の主な要因は地磁気であり、このレベルの磁場に対しては鉄製真空容器が第一弾の磁気シールドとして利用できるはずであった。ところが実際

に磁場測定してみると、納入された真空容器 2 台とも磁化していることが判明した。溶接や工場でのマグチャック利用による着磁等が原因であったと推測される。

そこで真空容器の消磁方法について検討し消磁を実施した。具体的には 2 通りの磁界の発生方法(2 通りの消磁コイルの巻き方)を用いて行い、どちらのコイルの巻き方でも真空容器の消磁ができることを確認した。

また実際の透磁率データを用いた計算の結果、コイルの巻き方によっては真空容器だけではなく、内部の磁性体、例えばパーマロイ系の第二弾磁気シールドの消磁も同時に可能であることがわかった。因みに、LCLS-II では試験的に真空容器と内部の同時消磁を試みている[6]。内部同時消磁方法については空洞等が組み込まれたモジュール一式に磁場かけることになるので、より細やかな磁場マッピングを行ってその安全性と効果について検討する必要がある。

空洞周辺の磁場マッピングについては、現在常温及び低温下での異方性磁気抵抗センサー(Anisotropic Magneto-Resistance Sensor, AMR)を用いた磁場マッピング装置の検討が進められている[7]。またこの AMR センサーを利用した磁場マッピングシステムの開発は超伝導空洞による磁束 trap の仕組みの解明にも役立つことが期待されている[8]。

今回の消磁手法だとどちらのコイルの巻き方でも容器端部については逆に磁化が進んでしまうという難点がある。端部、あるいは局所的により強く磁化した場所の消磁方法についても引き続き検討する。

真空容器がそもそも着磁しないように製作工程の管理を厳しくする、例えば製作過程に於けるマグチャック使用禁止、溶接箇所を極力減らす、アニールの実施等を仕様を組み込む事も可能ではある。しかしながら、仕様を厳しくすることは往々にしてコストアップに繋がる。また工場からの輸送過程やモジュールの組み込み過程での磁化もありうるので、消磁コイル、あるいはブスバーを用いた設置現場での最終的な消磁は量産体制におけるコストダウンを図る上で有効であると考えられる。

参考文献

- [1] T. Kubo, "Physics and Challenges of Superconducting Cavities for Particle Accelerators and Theoretical Implication towards Higher Performance: Invitation to the world of superconducting cavities," 低温工学 54 巻 4 号、2019.
- [2] E. Kako, "Technologies for Superconducting RF Cavities," 「加速器」 Vol.13, No.1&2, 2016.
- [3] M. Masuzawa *et al.*, "Magnetic Shielding: Our Experience with various Shielding Materials," Proceedings of SRF2013, Paris, France.
- [4] M. Masuzawa *et al.*, "Magnetic shielding for superconducting RF cavities," *Supercond. Sci. Technol.* 30 034009, 2017; <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aa570b>
- [5] M. Masuzawa *et al.*, "Study of Magnetic Shield for the STF Cryomodules," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, June, 2008.
- [6] Saravan K. Chandrasekaran and Anthony C. Crawford, "Demagnetization of a Complete Superconducting Radiofrequency Cryomodule: Theory and Practice." IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Jan, 2017.
- [7] R. Ueki *et al.*, "Development of Magnetic Field Mapping Measurement System Using Magneto-Resistive(MR) Sensor," Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July31-August 3, 2019.
- [8] T. Okada *et al.*, "Development of a Temperature and Magnetic Field Mapping Apparatus for Superconducting Cavities at KEK," Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July31-August 3, 2019.