

INFLUENCE OF THE PERMEABILITY OF VACUUM COMPONENTS ON ACCELERATOR MAGNETIC FIELDS

Tadashi Koseki^{A)}, Yoichiro Hori^{B)}, Kenji Shinoe^{C)}, Masahiro Katoh^{D)}

^{A)} Cyclotron Center, RIKEN, Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198

^{B)} Photon Factory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

^{C)} Institute for Solid State Physics, the University of Tokyo, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8581

^{D)} Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences, Myodaiji-cho, Okazaki, Aichi 444-8585

Abstract

Measured magnetic permeabilities of various vacuum components for particle accelerators are presented in this paper. Influence of the magnetic permeability on field uniformity of accelerator magnet is discussed.

真空機器の透磁率が磁場分布に与える影響について

1. はじめに

粒子加速器におけるビームの高度化に伴い、非磁性体の持つ微少な透磁率が電磁石の磁場分布に影響を与え、ビームの安定な供給に深刻な支障を来す場合が報告されている^[1]。蓄積リングの主電磁石においては、通常 10^{-4} オーダーの磁場の一様性が要求されるが、真空チェンバーや磁極内に設置されるベーキング用ヒータ類が高い透磁率を持っていると、その一様性を著しく損なうことがある。

ここでは、加速器で用いられているベーキング用のヒータ材や熱電対、あるいは真空チェンバー材が実際にどの程度の透磁率を持つのかを代表的なサンプルを測定して確認し、それらが磁石の中に置かれたときに磁場分布に与える影響について述べる。

2. ベーキング用機器類の透磁率

加速器の周辺でベーキングに用いられているヒータとしては、シースヒータ、ラバーヒータ、リボンヒータなどが一般的であろう。それらの典型的な製品（市販品）について、低透磁率計（LP-141, 電子磁気工業株式会社）を用いて測定した比透磁率を表1にまとめる。この測定器の本来の測定限界は、 $\mu_r \sim 1.001$ 以下であるが、ここでは実験室内の環境磁場の影響等を考慮して、最小値を1.002とした。

通常、ベーキングに用いられるヒータ類は、オーステナイト系の電熱用ニッケルクロム1種（非磁性）、または2種（弱磁性）を発熱材としているものが多く、したがって、表1にも示されているように、発熱部での透磁率はおおむね低い。ただし、リード線には耐熱温度が高い電気抵抗用ニッケル材（強磁性）の類が使用されることが多いため、発熱部の本体は透磁率が小さくとも、リード部の透磁率が非常に大きい場合がある（表1の試料1-4,1-5,1-7）。

シースヒータでは、シース材に用いるステンレス鋼が非磁性なので透磁率は通常小さいが、後で述べるようにステンレス鋼は加工歪み加わることによ

って磁性体になることが知られている。したがって、特に径の大きい（剛性の高い）シースヒータを折り曲げて使用する場合には、曲げ部分を磁極からできるだけ遠ざけて設置するなどの注意が必要である。

表1：各種ヒータ（市販品）の透磁率

No	名称／規格	発熱材	その他の材質等	非透磁率
1-1	シースヒータ 150W φ1.6mm	電熱用ニッケルクロム線1種	シース材: SUS316	本体<1.002 アダプタ～1.4
1-2	シースヒータ φ10mm	電熱用ニッケルクロム線1種	シース材: SUS304	本体～1.05
1-3	リボンヒータ 50 W 20×1000 mm	ステンレス鋼ファイバー (SUS304)	絶縁層: ガラス繊維 リード: ステンレス鋼	本体<1.002 リード<1.002
1-4	リボンヒータ 150 W 20×1000 mm	電熱用ニッケルクロム線2種	絶縁層: ガラス繊維 リード: ニッケル	本体<1.002 リード～1.28
1-5	リボンヒータ 250 W 35×1000 mm	電熱用ニッケルクロム線2種	絶縁層: ガラス繊維 リード: ニッケル	本体<1.002 リード～1.28
1-6	ラバーヒータ 65 W 25×130 mm	ニッケル合金箔	絶縁層: シリコンラバー リード: ニッケル	本体～1.1
1-7	ラバーヒータ 600 W 60×500 mm	電熱用ニッケルクロム線1種	絶縁層: シリコンラバー リード: ニッケル	本体<1.002 リード～1.17
1-8	フィルムヒータ 140 W 100×250 mm	ステンレス鋼ファイバー (SUS316)	絶縁層: ポリイミドフィルム	本体～1.02

発熱体としてステンレス鋼ファイバーを用いたヒータも比較的良好に使用されている。試料1-3のリボンヒータは、SUS304のファイバー線（ファイバーの太さは12μm）を使っている製品で、透磁率は低い。それに対して、試料1-8のフィルムヒータは、ステン

レス鋼ファイバーを発熱体としているものの、やや高い透磁率を持っている。この理由としては、ステンレス鋼ファイバーが加工の際に磁化したことが考えられる。

熱電対は、断面積が小さいので磁場への影響はそれほど大きくないと考えられるが、ビームダクトに常設する場合には透磁率に注意するべきである。表2にアルメル・クロメル、及び銅・コンスタンタン（いずれも市販品）の透磁率を測定した結果を示す。一般によく使われているアルメルは透磁率がかなり高く、表2に示した試料とは別に用意したφ0.5mmのアルメル線では $\mu_r \sim 1.05$ 程度であった。通常、熱電対ではそれを何本か束にして用いるか、あるいはさらに太い線材を用いているので、表のようになり高い透磁率を示すことになる。したがって、電磁石磁場の有効領域の中に直接アルメル線が入り込むような使い方は避けるべきであろう。

表2：熱電対の透磁率

No	名称	形式	比透磁率
2-1	アルメル・クロメル	被覆熱電対	本体 ~ 1.3 アルメル線リード ~ 1.3 クロメル線リード < 1.002
2-2	銅・コンスタンタン	被覆熱電対	本体 < 1.002 銅線リード < 1.002 コンスタンタン線リード < 1.002

次に、表1、表2に示した試料が実際に磁場の中におかれたときに、磁場分布にどの程度の影響を与えるかを調べる。ここでは真空紫外・軟X線高輝度光源 Super SORリングのR & D用として設計・製作された偏向電磁石モデル^[2]を用い、電磁石の磁極間にヒータ、熱電対等の試料を置いたときの磁場分布を、ホール素子を用いた3次元磁場測定装置^[2]によって測定した。

図1に、偏向電磁石の磁極間に、試料を置いた場合と何も置かない場合との磁場分布を示す。ここで、ホールと素子の垂直方向（vertical）の位置は、ギャップ中心 $Y=0$ である。また、このときの偏向電磁石の励磁電流はすべて525A、磁極中心での磁場強度は1.10Tである。図の横軸は偏向電磁石の縦方向（longitudinal）の座標で、 $Z=0$ が磁極の中心にあたる。図の縦軸は、試料の影響がない場所における磁束密度の値で規格化してある。図からわかるように、磁場分布の乱れは、透磁率の高い試料ほど大きく、高透磁率の部分の体積が大きいほど大きい。

図2に、偏向電磁石のギャップに試料1-2を置いた場合の、中心磁場強度0.2T、及び1.1Tにおける縦方向の磁場分布を示す。この試料はφ10mmのシースヒータであるが、表1に示した通りSUS304のシースがやや高い透磁率を持っており、しかもシースの表面積が大きいので、磁場分布に対する影響がかなり顕著な試料である。当然のことながら、電磁石の磁場分布に対する影響は、磁場強度が小さいときの方が大きくなっている。

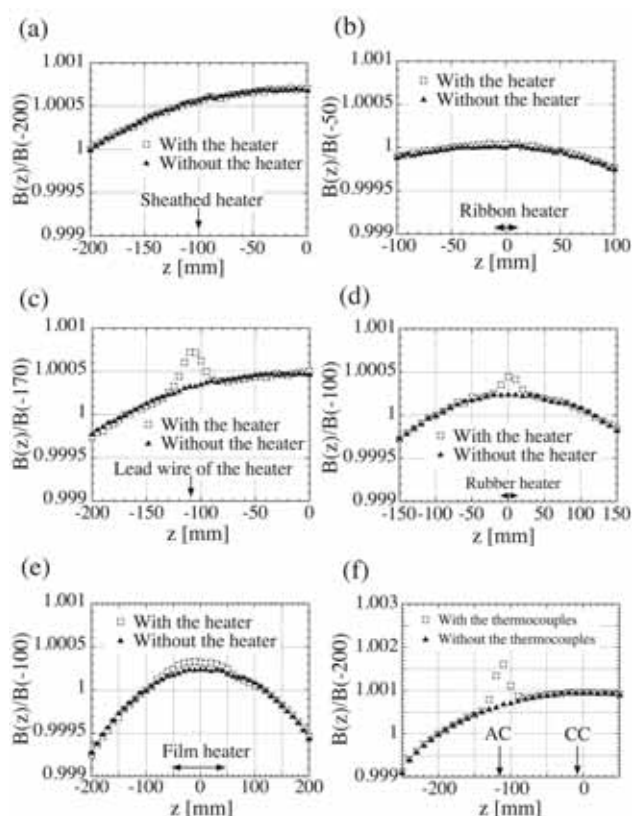


図1：試料の有無による偏向電磁石の磁場分布。
(a)試料1-1、(b)試料1-3、(c)試料1-5のリード部、
(d)試料1-6、(e)試料1-8、(f)試料2-1及び2-2。

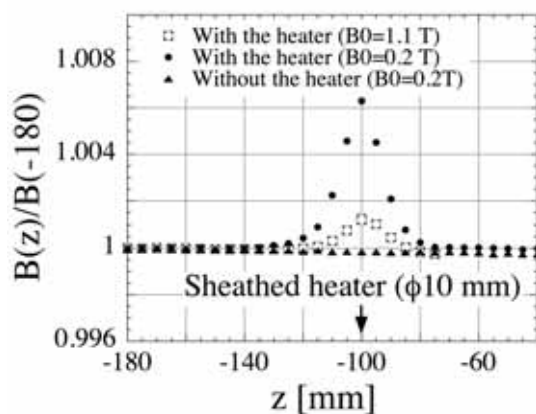


図2：試料1-2の有無による磁場分布。

3. 真空チェンバーの透磁率

従来、加速器用真空ダクトとしてはオーステナイト系ステンレス鋼が数多く用いられてきた。ステンレス鋼は本来非磁性だが、冷間加工や溶接加工に伴って透磁率が上昇することがある。

ニッケルやクロムの含有量が多く安定で分解しにくいもの（SUS310など）は冷間加工による透磁率の変化が小さいとされているが、SUS304やSUS316ではかなり高い透磁率になることが少なくない。また、

真空ダクトの製造でよく用いられるTIG溶接の場合、ステンレス鋼の溶接には、高温割れを防ぐために適量（通常は2~6%程度）のフェライト組織を含む溶接材料を選ぶことが多いので、注意が必要である。ただし溶接材にフェライト組織が出ない組成を選ぶことによって透磁率上昇を抑えることが可能であり、たとえば、インコネル625（約60%のニッケル含有）を用いたTIG溶接ではSUS316Lでも透磁率の上昇は小さいとする報告もある^[3]。

加工によって増加した真空チェンバーの透磁率が磁場の一様性に与える影響を実際に評価するため、図3に示すテストチェンバーを製作した。これは、SUS316の圧延板（厚さ3mm）2枚に90度の曲げ加工を施し、それをTIG溶接によって接合したもので、垂直面の片側はホール素子を挿入するために開口してある。この溶接には、溶接棒としてD308を使用した。D308は、通常はSUS304の溶接に用いられる溶接材^[4]で、適量のフェライト組織を含む。図3にはチェンバー表面の透磁率の測定結果をあわせて示したが、90度の曲げ部、及び溶接部で、加工によると思われる透磁率の上昇が見られている。

このチェンバーを先に述べた偏向電磁石モデルの磁極間ギャップに挿入し、Y=0における水平方向（horizontal）の磁場分布を測定した（図4）。

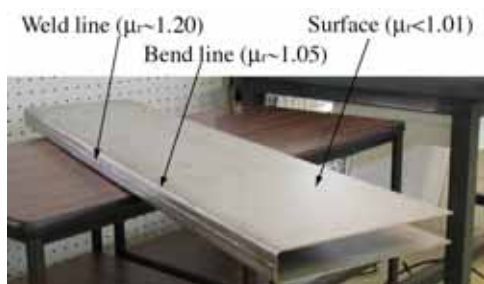


図3：SUS テストチェンバー



図4：磁場分布測定（テストチェンバー有り）

図5に、テストチェンバーの溶接箇所が磁極中心からX=-28mmに位置するようにダクトを置いた場合、及びダクトがない場合の磁場分布を示す。このときの偏向電磁石の励磁電流は先に述べたベーキング用品の場合と同じく525Aである。図には、POISSON

による2次元磁場計算の結果もあわせて示した。ここで、「チェンバー有り」の計算は、テストチェンバーの形状と透磁率の測定結果を反映した簡単なモデルを用いて行っている。チェンバーがあると、溶接箇所の周辺で付近の磁力線が溶接箇所に引き込まれることによって、磁束密度が次第に小さくなっていく。そして溶接箇所のごく近傍から磁束密度は急激に増加する。

図5で「チェンバー有り」における計算と測定結果を比較すると、磁力線が溶接部に引き込まれ磁束密度が減少していく様子がよく一致している。溶接部近傍における磁束密度分布の変化は、溶接ビード内の透磁率分布やビードの体積にも依存するため、計算と測定の厳密な比較は必ずしも容易ではないが、単純なモデルによる評価でも傾向はよく再現される。加速器の真空チェンバーの設計にあたり透磁率の影響を見積もる必要がある場合には、POISSON等を用いた磁場解析はかなり有効な指針になりうる。

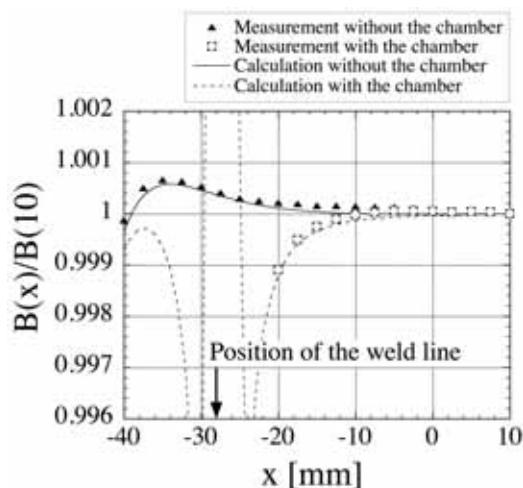


図5：SUSテストチェンバーの有無による水平方向磁場分布。チェンバーの溶接箇所は磁場中心から-28mmの位置。

謝辞

有益な議論をしていただいた日立造船（株）の高間俊秀氏、助川電気工業（株）の小室高志氏、物性研の中村典雄氏、理研の後藤彰氏、磁場測定の際にご協力いただいた物性研の工藤博文氏に感謝します。

参考文献

- [1] 例えば、宮本他、「STB-ringへのビーム入射」核理研加速器&ビーム物理研究会「リング入射用全段加速器の諸問題と入射ビームの物理」, 2002年3月, p. 91.
- [2] T. Koseki *et al.*, Proc. 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, 2001, p. 3609.
- [3] 高間、土屋（日立造船）「低透磁率ステンレス材料ー透磁率測定実験報告書ー」, 1999年10月.
- [4] 「ステンレス鋼被覆アーク溶接棒」 JIS Z 3221, 1989.