ビームロス低減のための 3 GeV シンクロトロンの漏洩磁場遮蔽の概要*

神谷潤一郎^{*1}・荻原 徳男^{*1}・林 直樹^{*1}
 發知 英明^{*1}・吉本 政弘^{*1}・金正 倫計^{*1}

Magnetic Field Shielding by Vacuum Chambers of Magnetic Material for Beam Loss Reduction

Junichiro KAMIYA^{*1}, Norio OGIWARA^{*1}, Naoki HAYASHI^{*1},
 Hideaki HOTCHI^{*1}, Masahiro YOSHIMOTO^{*1} and Michikazu KINSHO^{*1}

^{*1}Accelerator Division, J-PARC center, Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

(Received November 11, 2011, Accepted January 10, 2012)

One of the reasons of a beam loss in a high power accelerator is leakage magnetic field from a magnet at a close beam line, which distorts the beam orbit and makes the beam hit the wall of the beam pipe. The most effective way to shield such leakage field is to cover the beam by the magnetic materials at the nearest space. This means that beam pipes and bellows be made of the magnetic materials. We plan to apply this method to the vacuum chambers of the beam extraction section of the J-PARC 3 GeV synchrotron, where the effect of the leakage magnetic field to the beam orbit is evident. However, there is few proven evidence of the vacuum chambers made of magnetic materials. Therefore we clarify the problems in producing beam pipes and bellows, which satisfy the magnetic and vacuum performance. In this article, we deliver the over view of the magnetic shielding project and our approaches to the problems in producing the vacuum chambers of magnetic materials.

1. 背 景

加速器や核融合装置など真空容器中に荷電粒子ビームが存在する環境で、外部の不要な磁場を如何にして完全に遮蔽するかは、安定な粒子軌道を維持しビームロスを低減する上で必須の課題である。外部磁場を完全に遮蔽するには、ビームに最も近い場所で、周りを十分な透磁率を持った磁性材料で完全に覆うことが有効である。荷電粒子に最も近い物質は真空壁である。つまり真空壁を構成する真空容器を磁性材料化することが、完全な磁気遮蔽であるといえる。真空容器外部に磁性体を設置する手法もあるが、空間的制限により完全な磁気遮蔽が困難である、また材料が余計にかかる、といったデメリットがあり、真空容器の磁性材料化がより有効な手法であるといえる。しかしながら、そのような磁性材料製真空容器の製作実績は希少であり、評価実績は見当たらない。

そこで我々は、磁気遮蔽性能及び超高真空性能を兼ね備えた真空容器の開発を行うこととした。対象として、現在漏洩磁場によりビーム軌道に影響が出ている J-PARC 3 GeV シンクロトロン (RCS) 出射部¹⁾を選択し、対象箇所按要求さ

れる磁気遮蔽性能と真空性能を実現することを目標とした。

本稿ではまず計画の概要を示す。次に磁気遮蔽性能からの材料選択について述べる。さらに、選択した材料で真空容器 (ビームパイプ、ベローズ) を製作する上での課題とそれについての取り組みについて述べる。

2. RCS ビーム出射部の漏洩磁場遮蔽

本計画の目的は、出射ビーム輸送ラインの偏向電磁石からシンクロトロンへ漏洩している磁場を磁性材料製真空容器により遮断することである。該当箇所のレイアウトを Fig. 1 に示す。四重極電磁石を挟んだ合計長さ約 11 m の領域に対して、漏洩磁場遮蔽対策を適用する。適用する真空容器は、ビームパイプ、ベローズである。さらに並行して、磁気遮蔽性能を有するターボ分子ポンプの開発を進めている²⁾。この領域において、外部磁場 10^{-3} T に対して真空容器内で 1/10 未満となる磁気遮蔽性能を持つことがビームロスを防ぐ上で必要な磁気遮蔽性能である。

Fig. 1 Schematic layout of beam extraction section, where vacuum chambers and bellows of magnetic material are applied. Range A is the region, to which the calculation model of Fig. 2 is adopted.

* 平成23年11月16日 第52回真空に関する連合講演会で発表

^{*1} 日本原子力研究開発機構 J-PARC センター (〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4)

3. 磁性材料の選択

本計画を進める上での課題の一つは材料の選択である。磁性材料は数多くあるが、まずフェライト系ステンレスである SUS430 に着目した。SUS430 は入手性がよく、低価格である。また溶接性や加工性も幅広く検証された材料である。ただし磁気遮蔽性能に効く比透磁率は 500~1000 程度とさほど大きくはない。しかし 10 mm 以上の厚みをとれば、目標としている磁気遮蔽性能を達成することは可能である。そのため、フランジ部には SUS430 を用いる方針とした。ベローズは 0.2 mm 程度の板を成型して製作する。またビームパイプ胴部の板厚は 3 mm 程度である。これらの薄板でも十分な磁気遮蔽性能を達成するために強磁性材料であるパーマロイ PC を選択した。パーマロイ PC は初透磁率 1 万以上あり、薄板でも良い磁気遮蔽性能が期待できる。これらの材料選択の結果、実際にどれほど外部磁場を遮蔽できるかの評価を行った。Fig. 1 A の範囲に対しモデル化を行い、実際の 2 倍以上である鉛直方向の外部磁場 $B_y = 2 \times 10^{-3}$ T に対し、ビームパイプ中心軸 (z 軸) に沿った磁場を計算した。比透磁率は実測に基づきパーマロイ PC は 80000, SUS430 は 700 とした。結果を Fig. 2 に示す。ベローズ部及び端部で磁場の増加があるが、外部磁場に対しては 100 分の 1 程度に抑えられている。この領域でビーム軌道に影響する磁場の積分値 $\int B_y dz$ は 2.1×10^{-5} Tm であり、外部磁場に対し 300 分の 1 未満に低減できることが分かった。

4. 真空課題

本項では、パーマロイ PC 及び SUS430 で真空容器、すなわちビームダクトやベローズを製作するうえでの課題と現状の取り組みについて述べる。磁性材料を用いて真空容器を作るうえで、現在我々の想定している真空課題と検証項目を以下に記す。

課題① 現状の真空性能の維持

(1-a) 表面積を低減するための表面研磨の検証

Fig. 2 Calculated magnetic flux density along the central axis of beam pipes in an external magnetic density of 2×10^{-3} T.

(1-b) 現状の圧力維持のためのガス放出速度の検証

課題② 欠陥のないビームパイプ、ベローズの製作

(2-a) 溶接性の検証

(2-b) ビームパイプ、ベローズの試作による健全性の検証

課題③ 磁気焼鈍の条件の確立と機械性能、真空性能への影響

(3-a) 磁気性能を回復させる熱処理条件の検証

(3-b) 上記熱処理が機械性能へ与える影響の検証

(3-c) 上記熱処理による真空性能向上の検証

課題①

現状の 3 GeV シンクロトロンビーム出射部におけるガス放出速度は、 10^{-8} Pam/sec 程度であると見積もられる³⁾。磁性材料製のビームパイプ及びベローズのガス放出速度に対しても同等な量を実現するために、表面研磨及びガス放出速度についての検証が必要である。

(1-a) 表面研磨について、400 番のバフ研磨後に化学研磨を施した各材料の表面粗さを測定した。化学研磨液は各材料に応じて配合を調整した。結果を Table 1 に記す。比較のため超高真空材料としてはメジャーなオーステナイト系ステンレス SUS316L についても示す。いずれの磁性材料についても、バフ研磨と化学研磨を組み合わせることで SUS316L と同等のフラットな表面を達成できることが分かった。

(1-b) ガス放出速度については、現在測定が進行中である。

SUS430 については、400 番バフ研磨をした試料の 100 時間後のガス放出速度は 2×10^{-8} Pa m/sec と、オーステナイト系ステンレスと同等であることが分かった。今後はパーマロイ PC についてもガス放出速度の測定を行っていく予定である。

課題②

二つ目の課題は、磁性材料という特殊な材料で欠陥のないビームパイプ及びベローズの製作が可能かということである。製作にあたっては数多くの検証すべき項目が考えうるが、これまで検証した実績がない溶接性、及び実機大真空容器の製作という項目に重点を置いた。

(2-a) パーマロイ PC, SUS430 という異種金属同士の溶接実績は現状ない。そのため、それらの溶接性の検証が必要である。ベローズを想定した 0.2 mm 厚のパーマロイ PC 板を、フランジを想定した SUS430 母材に溶接し溶け込み量を測定した。シールドガスにアルゴンと水素の混合ガスをもちい、溶接電流 15~20 A の場合に溶け込み量が 0.5

Table 1 Surface roughness of each material with buff polishing (#400) and chemical polishing.

Material	Ra, Rt [μ m]
SUS430	0.019, 0.25
Permalloy PC	0.019, 0.25
SUS316L	0.017, 0.36

mm と良好な結果が得られた。

(2-b) 磁性材料という特殊な材料での真空装置の製作が可能かを調べる最も確実な方法は、実際にビームダクト、ペローズという装置を製作し健全性を検証することである。そこで我々は、実機大のビームダクト及びペローズを製作することとした。現在製作を進めており、完成後は寸法精度、真空排気時の健全性を検証する予定である。

課題③

磁性材料のビームパイプ、ペローズを製作する際の切削加工、曲げ加工、ペローズ成型加工等により内部応力が生じる。このような内部応力は、残留磁場の増大、比透磁率の減少という磁気性能の劣化を引き起こす。内部応力を除去し磁気性能を回復させるために熱処理（磁気焼鈍）を行う。課題は熱処理条件を確立すること、さらにその熱処理が機械性能及び真空性能とマッチングが取れるかということである。

(3-a) まずは磁気性能を回復させる熱処理条件を検証する必要がある。ペローズの成型加工により磁気性能の劣化が発生すると予想できることから、パーマロイ PC 材製ペローズ（ $\phi 40$ mm, $t 0.2$ mm）を各温度で熱処理し、外部磁場に対するペローズ内部の磁場を測定した。結果を Fig. 3 に示す。未処理の場合に対して熱処理を施したペローズは磁気遮蔽性能を回復できている。さらに 700°C よりも 850°C , 900°C での熱処理のほうが、磁気遮蔽性能が優れていることが分かった。

(3-b) 熱処理により材料強度は低下する。そのため磁気性能回復のための熱処理により強度が低下した材料で機械強度上問題ないか検証する必要がある。まず、ビームパイプ、特に応力が集中する箇所がある排気ポート付ビームパイプ（長さ 800 mm, ダクト径 400 mm, 排気ポート径 270 mm）について有限要素法による応力計算を行った。結果、大気圧による最大応力は排気ポート付根部分で発生し、約 30 MPa であった。次に引張試験によって熱処理を施した材料の降伏点の測定を行った。材料や熱処理温度によっては降伏点が見えない結果となったのでその場合は 0.2% 耐力を導出した。Fig. 4 に熱処理温度と降伏点もしくは 0.2% 耐力の測定結果を示す。各熱処理は数 Pa の真空炉で 10 時間行った。パーマロイは 800°C 以上、SUS430

Fig. 4 Relation between a yield point and a temperature in a heat treatment.

Fig. 5 Thermal desorption spectra of water without heat treatment and with heat treatment of 850°C for 10 hours. The sample are $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times t 1\text{ mm}$, the rate of temperature ramping is $0.2^{\circ}\text{C}/\text{sec}$.

Fig. 3 Magnetic flux density at the center of a permalloy bellows whose size is $\phi 40$ mm, 1140 mm, and $t 0.2$ mm. External magnetic field is generated by solenoid coils. The magnetic flux density when the solenoid coils are not excited is subtracted as a back ground.

は700℃以上の熱処理で降伏点もしくは0.2%耐力が優位に減少する。しかし大気圧による最大応力30 MPa に対しては熱処理後でも6倍程度の安全率があることがわかり、熱処理を行っても強度上問題がないという結論を得た。

(3-c) 真空性能については、磁気性能回復のための熱処理が真空性能向上にも有効となるのではないかと考えた。そこで昇温時でも 10^{-3} Pa 未満の圧力下で熱処理を行った試料を用い、昇温脱離スペクトルの測定により真空性能の向上を検証した。注目したのは常温での排気において系の圧力を決める水の脱離である。特に活性化エネルギー100～110 kJ/mol の脱離が室温での排気においての系内の圧力を決めている。この脱離の活性化エネルギーは昇温脱離スペクトルのピーク温度90～120℃に対応する⁴⁾。そこで文献⁴⁾にならい、昇温脱離スペクトルで試料温度120℃での水の量に着目して検証を行った。熱処理を行わない試料及び 10^{-3} Pa 以下の真空炉で850℃ 10時間熱処理後、大気中で2週間保管した試料についての質量数18のイオン電流($\propto$ 水の脱離速度)の温度変化の測定を行った。各試料について水の昇温脱離スペクトルを **Fig. 5** に示す。パーマロイ PC, SUS430両試料について、熱処理を行うことで水の脱離速度を2分の1から3分の1まで低減することができる。

5. ま と め

RCS ビーム出射部への漏洩磁場を磁性材料製真空容器で遮蔽する計画の概要及び課題について述べた。以下に本稿のまとめを示す。

- (1) 磁性材料としてパーマロイ PC, SUS430を組み合わせることで、互いの長所を生かし、欠点を補う方針とした。これら材料の組み合わせで、必要な磁場遮蔽性能を満たせることを計算により示した。
- (2) 現状の真空性能維持、欠陥のない真空容器の製作、それらを満たした上での磁気性能回復処理とのマッチングという3つの課題を設定し、検討の現状を述べた。現状否定的な結果はなく、本計画の遂行が期待できる。

〔文 献〕

- 1) M. Yoshimoto, J. Kamiya, M. Watanabe, T. Takayanagi, T. Togashi, T. Ueno, M. Kuramochi, H. Hotchi, P. K. Saha, H. Harada and M. Kinsho: *Proceedings of European Particle Accelerator Conference*, Genoa, Italy, (2008) 3626.
- 2) N. Ogiwara, J. Kamiya, T. Yanagibashi, Y. Hikichi and M. Nishikawa: *J. Vac. Soc. Jpn.*, **55** (2012), in press.
- 3) N. Ogiwara, M. Kinsho, J. Kamiya, K. Yamamoto, M. Yoshimoto, Y. Hikichi, K. Kanazawa, K. Mio, Y. Takiyama and K. Suganuma: *Vacuum*, **84** (2010) 723.
- 4) S. S. Inayoshi: *Shinku*, **50** (2007) 228.