キッカー電磁石に組込まれたフェライトの In Situ での脱ガス処理*

神谷潤一郎^{*1}・荻原 徳男^{*1}・西川 雅章^{*1}引地 裕輔^{*1}・柳橋 了^{*1}・菅沼 和明^{*1}

Development of an In Situ Bake-out Method for Outgassing Reduction of Kicker Ferrite Cores

Junichiro KAMIYA^{*1}, Norio OGIWARA^{*1}, Masaaki NISHIKAWA^{*1},
Yusuke HIKICHI^{*1}, Toru YANAGIBASHI^{*1} and Kazuaki SUGANUMA^{*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 27, 2012)

The usual way for reduce outgassing of a large structure in vacuum is to bake the whole vacuum chamber containing the structure. However, this method needs a huge heater capacity and there are limits caused by the heat expansion of the chamber. The solution is to raise the temperature of the structure inside without heating the vacuum chamber. This is achieved by installing a heat source inside the chamber and by inserting the heat shield between the structure and the chamber walls to direct the heat to the structure. In the particle accelerator field, it is often required to reduce outgassing of structures inside vacuum chambers. One example is a kicker magnet, which is installed in a vacuum chamber and consists mainly of ferrite and aluminum alloy. As known from former experience the main outgassing component from ferrite is water. We applied the above mentioned method to the outgassing reduction of such a kicker. We are able to direct most of the heat flow toward the kicker magnet by inserting the heat shielding plates and thus outgassing was successfully reduced.

1. はじめに

真空容器中の大型構造物を脱ガスする際は、大気側に設置した熱源で真空容器を昇温し、その輻射や伝導で構造物を昇温することは一般的に行われる手法である。しかしこの手法には膨大な容量の熱源が必要となる。また、容器の熱のびがあるため使用できる環境が制限される。真空容器を加熱することなく内部の構造物だけを昇温する手法こそが、省エネルギーで最も効率が良い手法といえる。そのためには、熱源を真空容器内部に持ち込み、熱源と真空容器の間を断熱し、構造物への輻射の熱流量を真空容器への熱流量よりも大きくすればよい。

加速器においても真空容器内の構造物のみを脱ガスしたいという要求は多々ある。真空容器内に設置された電磁石やビームコリメーターなどがその例である。我々は前述の手法を J-PARC 3 GeV シンクロトロンビーム出射用キッカー電磁石プロトタイプの脱ガスに適用した。キッカー電磁石のコアであるフェライトは多孔質な材料であり、気孔に水が吸着し続ける。そのためキッカー電磁石の放出ガスの主成分は水である¹⁾。このフェライトを in situ で水が脱離する温度まで昇温することが必要となる。

本稿では、実験装置を示した後、ヒーターを真空容器内に導入するという手法の有効性を示す。次にヒーターや輻射シールド板の条件を系統的に変えていき、より効果的に内部構造物が昇温できることを示す。最後に脱ガス効果の検証結果を示す。

2. キッカー電磁石フェライトからの脱ガス手法の検証

2.1 実験装置

実験装置の概念図を Fig. 1 に示す。

目標は放出ガス主成分である水を低減するためにフェライトを100℃以上に昇温すること、及び真空容器の熱伸びを防ぐために真空容器の温度上昇を20℃程度に抑えることとした。文献1)では電磁石組立前にフェライトを200℃で脱ガスした。今回は組立後の電磁石の脱ガスである。水を効果的に脱離するためには温度が高いほうが良いが、電極に用いているアルミ合金の引張強さ及び耐力の温度依存²⁾より、安全を見て100℃程度での脱ガスとした。

キッカー電磁石の主な構成材料は、磁石コアの Ni-Zn 系フェライト、電極板のアルミ合金 A5052材であり、それらが交互に並べられ、外側をアルミ合金及びステンレス板で箱

Fig. 1 Concept of experimental setup.

* 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)

Table 1 Main components of a kicker magnet prototype for J-PARC RCS.

Material	Density (g/cm ³)	Specific heat (J/kg·K)	Weight (kg)	Surface area (m ²)
Ferrite core	4.8	~600	222	5.5
Aluminum alloy (A5052)	2.7	~920	394	35
Stainless steel (SUS304)	7.9	~500	103	1.1

Fig. 2 Relative position of kicker magnet and heaters.

のように覆っている。電磁石全体は上部フランジに吊られるように真空容器に設置される。キッカー電磁石の主な構成材料を **Table 1** に示す。熱源はキッカー電磁石の側面及び底面に対して、それぞれ定格1.2 kW×2本、1.2 kW×1本のマイクロヒーターを真空容器のポートより導入した。マイクロヒーターは **Fig. 2** のように渦巻き状に形状を整え、広い面積でフェライトを昇温できるように工夫した。輻射シールド板はマイクロヒーターと真空容器壁の間に挿入した。フェライトの温度は側面ヒーターに近い箇所 (TC1)、フェライト中央 (TC2)、側面ヒーターから最も遠い箇所 (TC3) で測定した。真空容器は SUS304 製で、寸法は H 1 m×W 1 m×D 1.4 m である。0.42 m³/sec のターボ分子ポンプを排気系に用いた。真空容器とターボ分子ポンプ間はコンダクタンス0.54 m³/sec の L 字管で接続した。真空容器及びターボ分子ポンプ上部に取り付けた B-A 真空計で圧力を測定した。また、真空容器に設置した四重極質量分析計で放出ガスの成分を測定した。

2.1 フェライトの昇温の検証

Table 2 に各測定で使用したヒーター電力、及び挿入した輻射シールド板の枚数をまとめた。各測定においてヒーター温度は表面で550℃とした。その際の電力はヒーター1本当たり0.73 kWであった。まずヒーターを真空容器内に導入するという手法の有効性を検証するために、側面ヒーター2

Table 2 Heater power and number of heat shielding panels for each measurement.

Experimental No.	Heater power	No. of heat shielding panels
Exp. 1	side 0.73 kW×2	1
Exp. 2	side 0.73 kW×2, bottom 0.73 kW	0
Exp. 3	side 0.73 kW×2, bottom 0.73 kW	1
Exp. 4	side 0.73 kW×2, bottom 0.73 kW	3

Fig. 3 Temperature of ferrite cores, and vacuum chamber, combined with experimental room temperature during Exp. 1 shown in Table 2.

本を昇温して各部温度の測定を行った (Exp. 1)。結果を **Fig. 3** に示す。この測定により以下の結論を得た。

- フェライトを100℃まで昇温ができる。
- フェライトの温度むらはほとんどない。
- △ 昇温速度が遅い (TC2で1.47℃/H)。
- △ 真空容器の温度上昇がやや大きい (室温に対し26.2℃上昇)。

側面のヒーター2本、1.6 kW という少ない電力でフェライト全体をほぼ均一に100℃まで昇温することができたことで本手法が概ね有効であるといえる。ちなみに過去に真空容器外側に取り付けたヒーターによりベキキングを行った際は、10 kW もの電力を要した。改善すべきは△を付けた項目である。これらに対しては、1. 熱源をさらに導入する、2. 輻射シールド板を増やすという2種の対応を行い、それぞれの効果を測定した。1. についてはマイクロヒーターを底面からも導入し、ヒーター表面温度550℃で加熱した。結果100℃までの昇温速度を1.47℃/H から3.01℃/H まで向上することができた。2. についてこのヒーター条件で輻射シールド板を変えていって測定を行った。輻射シールド板の枚数と昇温速度の関係の測定結果を **Fig. 4(a)** に示す。昇温速度はフェライト中央 TC2 での測定値である。輻射シールド板を系統的に増やすことで真空容器への熱流量 Q' は、

$$Q' \propto (T_1 - T_2) \times 1/(n+1)$$

Fig. 4 Relation between the number of heat shielding panels and (a) rate of temperature rise of ferrite cores, (b) required heater power to reach a kicker magnet temperature up to 100°C, and (c) vacuum chamber temperature.

Fig. 5 Outgassing rate and mass spectrum during Exp. 4 in Table 2.

に従って減少する．ここで、 T_1 は熱源温度、 T_2 は真空容器壁温度、 n は輻射シールド板の枚数である．当然構造物への熱流量は増し、フェライトの昇温速度を4.68°C/Hまで向上することができた．ここで、キッカー電磁石を昇温するのに消費された熱量を算出する．キッカー電磁石の各材料の重さ、比熱をTable 1にまとめた．キッカー全体の温度はフェライトの温度と同等と仮定する．これらと電磁石が100°Cになるまでの時間より、キッカー電磁石の昇温に使われた単位時間当たりの熱量を算出した結果をFig. 4(b)に示す．図中に全ヒーター出力のうち、キッカー電磁石の昇温に使われた割合を示す．輻射シールド板を増やすことで70%以上という大部分の電力がキッカー電磁石を昇温する為に使用できていることが分かる．Fig. 4(c)に真空容器の昇温温度と輻射シールド板の枚数の関係を示す．輻射シールド板の枚数増加に従い、真空容器の温度上昇が効果的に低減され、輻射シールド板3枚で20°C以内の温度上昇に抑えられた．以上のように熱源を真空容器内に直接導入し、適切な輻射シールド板

を設けるという本手法によって、真空中構造物を効果的に昇温できることが実証できた．

2.2 脱ガス効果の検証

熱処理による放出ガスの低減について示す．ガス放出速度はFig. 1に示した2つのB-A真空計とその間のコンダクタンスより算出した．Table 2のExp. 4における放出ガス速度をFig. 5に示す．温度はFig. 1のTC2で測定したフェライトの温度である．ヒーターをONにした時間を時間軸の原点とした．図中A, B, Cにおける質量スペクトルを示す．キッカーの主構成材料であるフェライト及びアルミの表面積は真空容器に比べて優位に大きいこと、及び真空容器の温度上昇は20°C程度であることから放出ガスのほとんどはキッカー構成材料から脱離したものだといえる．本手法を用いた脱ガス処理により、ガス放出速度及び水の分圧ともに1/10にまで低減することができた．ガス放出速度の曲線に囲まれた面積から、この処理により99.6 Pam³ (N₂)のガスをキッカー電磁石から脱離し排気できたといえる．ここで脱

ガス処理後の放出ガスが電磁石からのものか、真空容器からのものかを検証してみる。真空容器材料である SUS304 の代表的な単位面積当たりのガス放出速度は $\sim 1 \times 10^{-8}$ Pam/s である^{3,4)}。真空容器表面積は $\sim 8 \text{ m}^2$ であるので真空容器からのガス放出速度は $\sim 1 \times 10^{-7}$ Pam³/s である。脱ガス後のガス放出速度は $\sim 2 \times 10^{-6}$ Pam³/s なので、大部分はキッカー電磁石からの放出ガスであるといえる。今回は昇温及び熱遮蔽の試験である。実機適用の際には昇温状態を長時間保持し、より徹底して脱ガスを行う予定である。

3. ま と め

真空容器内部に持ち込んだヒーターで真空中構造物を脱ガスする手法を開発し、キッカー電磁石に対して実証試験を行い以下の結果を得た。

- (1) 省エネルギーで昇温することが可能である。
- (2) 輻射シールドを挿入することで真空容器側への熱流量を抑え、大部分の熱流量をキッカー電磁石の昇温に用いることができる。

- (3) 本手法による昇温でキッカー電磁石材料からの放出ガスを効果的に低減することができる。

現在この手法をシンクロトロン内に設置されたキッカー電磁石の脱ガスに適用することを検討中である。5 台ものキッカー電磁石を、既設系の限られたポートからヒーターを導入して昇温するためには、ヒーターの形状や輻射シールド板の構造等検討課題がある。今後はこれらの課題を検証し、実機の in situ での脱ガスを目指していく。

〔文 献〕

- 1) J. Kamiya, M. Kinsho, N. Ogiwara, M. Kuramochi, T. Ueno, T. Takayanagi, O. Takeda, M. Watanabe, Y. Yamazaki and M. Yoshimoto: *Shinku*, **50** (2007) 371.
- 2) Japan Aluminium Association: *Handbook of Aluminium*, ver. 6 (2001).
- 3) K. Saito, Y. Sato, S. Inayoshi and S. Tsukahara: *Vacuum*, **47** (1996) 749.
- 4) S. S. Inayoshi, Y. Sato, K. Saito, S. Tsukahara, Y. Hara, S. Amano, K. Ishizawa, T. Nomura, A. Shimada and M. Kanazawa: *Vacuum*, **53** (1999) 325.