

ビームラインにおけるキッカー電磁石エリアの真空性能向上

VACUUM IMPROVEMENT OF KICKER MAGNET AREA IN J-PARC 3GeV SYNCHROTRON

神谷潤一郎^{#, A)}, 柳橋亨^{A)}, 荻原徳男^{A)}, 金正倫計^{A)}

Junichiro Kamiya^{#, A)}, Toru Yanagibashi^{A)}, Norio Ogiwara^{A)}, Michikazu Kinsho^{A)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency, J-PARC

Abstract

Kicker magnet is one of the devices, which have large outgassing, in the J-PARC 3 GeV synchrotron. We have developed a new degassing method by which only kicker magnets in the accelerator beam line are baked out with limiting the temperature rise of the vacuum chamber to prevent unwanted thermal expansion of the chamber. By simply installing the heater and thermal radiation shield plates between the kicker magnet and the chamber wall, the heat flux to the vacuum chamber can be reduced. The result of the verification test using a prototype kicker magnet showed that each part of the kicker magnet was heated to above 120 °C with a small rise in the vacuum chamber temperature less than 30 °C. The outgassing rate was reduced to one tenth. A heater was designed to ensure reliability and easy maintainability. This bake-out system is under installation in the 3 GeV synchrotron beam line. A long with the increase of the pumping speed, the beam line pressure is expected to be fifteenth.

1. はじめに

J-PARC 3GeV シンクロトロン(3GeV Rapid Cycling Synchrotron : RCS)のビーム出射用キッカー電磁石は、主にフェライトのコアとアルミ合金の電極板から構成され、放電を防ぐために真空容器の中に設置されている[1]。フェライトは多孔質であり気孔に水が吸着するため放出ガスが多い。アルミ合金は適した表面処理をすれば、単位面積当たりの放出ガス速度はベーキングしない場合でも連続排気により 10^{-8} Pa m/s 以下になることは知られている。しかしキッカー電磁石 1 台当たりのアルミ合金の表面積は 36 m^2 にもなるため全放出ガス量はフェライトに比べても無視できなくなる。実際、Figure 1 に示すように RCS においてキッカー電磁石エリアは他のエリアより圧力が高く、排気にも時間がかかる。我々は、キッカー電磁石の脱ガスと、ポンプ追加による排気速度の増大によって、キッカー電磁石エリアのビームライン圧力改善を試みることにした。

まず、脱ガスについてであるが、一般的に真空容器内の装置の脱ガスをするには、真空容器の大気側に設置したヒーターで真空容器を加熱し、容器からのふく射や伝導で真空内の装置をベーキングする手法をとる。しかしこの手法を用いてビームライン上でキッカー電磁石を脱ガスする場合、真空容器の熱膨張が数 mm になるため、接続されている機器の破損、アラインメントのずれ、金属シールのリーク等の恐れがある。真空容器を昇温することなく、主たる放出ガスの元であるキッカー電磁石だけを昇温できれば問題は解決する。そのためには、真空内にヒーターを導入し、ヒーターと真空容器内壁の間に熱遮蔽板を設置し、ヒーターから真空容器への熱流束を減らせばよいと考えた。排気速度の増大については、キッカー電磁石用真空容器の未使用のポートに真空ポ

ンプを追加することとした。

本報告では、主に上述のヒーター導入式の脱ガス方式について述べる。まず上述の脱ガス手法の原理について述べた後、プロトタイプキッカー電磁石を用いて行った試験と結果について述べる。次に、加速器ビームラインへのヒーター・反射板の設置について述べる。最後に排気系の追加について説明し、展望を述べる。

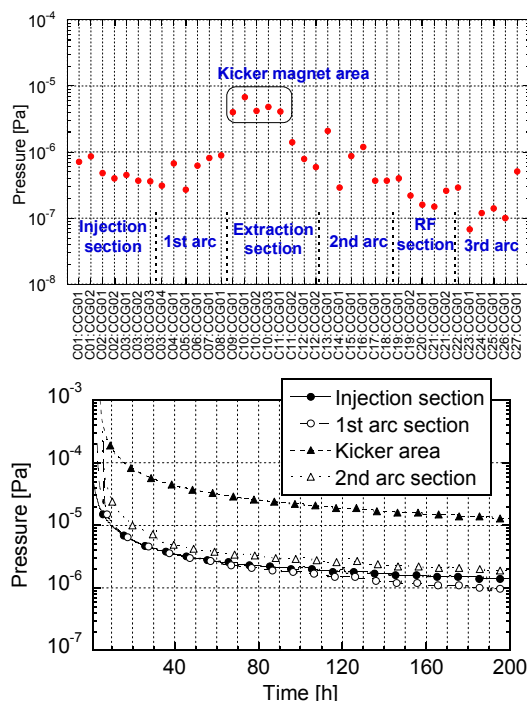


Figure 1: Beam line pressure distribution and pumping curve in RCS.

[#] junichiro.kamiya@j-parc.jp

2. 熱源・熱遮蔽板導入式のベーキングのキッカー電磁石脱ガスへの適用

熱遮蔽の基本的な考え方では、温度及び輻射率が T_1 , ϵ_1 の無限平板から T_2 , ϵ_2 の無限平板へ向かう熱流束 q は、Stefan-Boltzmann 定数を σ として、

$$q = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (1)$$

で与えられる。平板間に n 枚の熱遮蔽板を挿入することで、真空容器へ向かう熱流束 q' は、

$$q' = \frac{q}{n + 1} \quad (2)$$

となる。そのため、ヒーターと真空容器の間に複数枚の熱遮蔽板を設ければ、真空容器への熱流束を遮断でき、真空容器の温度上昇を抑えた上で、キッカー電磁石の昇温ができる。温度の目標として、キッカー電磁石の各部温度を一般的な水の脱離温度より優位に高い 120 °C 以上にする、及び真空容器壁の温度上昇を 30 °C 以下にすることとした。

このような脱ガス方式の実証試験を行ったセットアップを Figure 2 に示す。実機と同等の形状のプロトタイプのカicker電磁石とキッカー電磁石が1台入る真空容器を用い、ヒーターと4枚の熱反射板をキッカー電磁石の下に設置した。R&D のヒーターは入手性や価格を考慮してシースヒーターを用いた。Figure 3 にフェライト及び真空容器壁の温度とヒーターへの入力電力の関係の測定結果を示す。真空容器壁の温度に関しては室温との差である。フェライト温度は 800 W 程度で 120 °C 以上、その際真空容器壁の温度上昇は 20 °C 未満であった。ヒーター電力 800 W 程度で、熱容量の大きなキッカー電磁石を 120 °C 以上に昇温できることも、熱源を直接真空容器中に導入している本手法ならではの利点である。以上のように、本手法で目標温度を達成できることに見通しがついた[2]。

実機ヒーターは、破損時の交換し易さを考慮し、既存のカicker電磁石用真空容器下方の空きポートから導入、取出しができる構造とした。空きポートの最小径である $\phi 130$ mm に収まり、1000 W 程度の電力を導入でき、かつ破損の恐れも少ないヒーター材料として、高硬度のグラファイトを選定した。Figure 4 にヒーターの外観を示す。電流はフランジを介して導入し、 $\phi 100$ mm の円盤型ヒーターに通電する。熱反射板にはヒーターが挿入できるように穴をあけるので、その穴から熱流束が漏れるのを防ぐために、ヒーター下方は熱遮蔽板を設けている。この熱遮蔽板はヒーター近傍で 1000 °C 程度の高温となるので、高融点金属であるモリブデン及びインコネルを用いている。キッカー電磁石の下に設置する熱遮蔽板は実機では5枚とした。輻射率が小さい程、遮蔽効率上がるため、熱遮蔽板表面はバフ研磨後電解研磨を施し光沢面とした。Figure 5 は実機ヒーターを用いた昇温試験の有限要素法による計算結果と測定結果である。先の実証試験の結果と同様、キッカー電磁石各部及び局部を除く真空容器において、目標温度を達成できている。但し、ヒーターが小型であるため、中央と端フェライトでは、50 °C 程度温度差がつく。Figure 6 に実機ヒーターを用いてプロトタイプ電磁石を脱ガスした結果を示す。縦軸

は単位面積当たりの放出ガス速度である。脱ガスによって、 10^{-9} Pa m/s 台へ低減できた[2]。

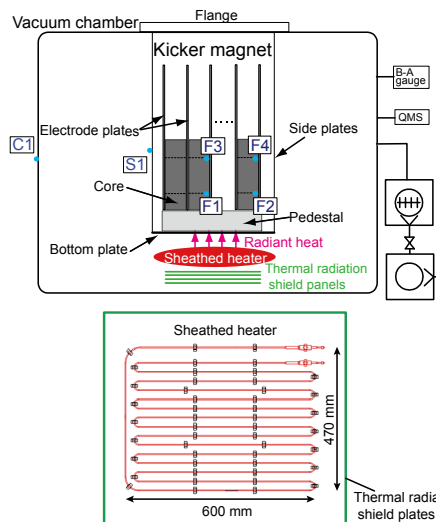


Figure 2: Experimental setup for verification test using a prototype kicker magnet and a test vacuum chamber.

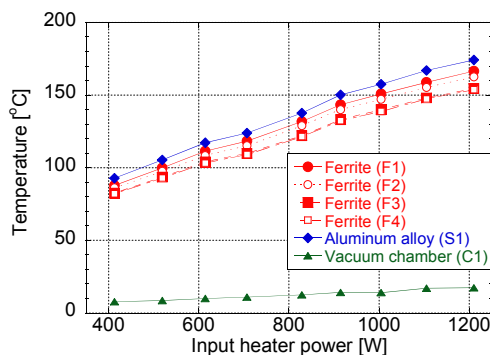


Figure 3: Input heater power dependence of temperature of the ferrite cores and vacuum chamber. Copyright 2016 American Vacuum Society.

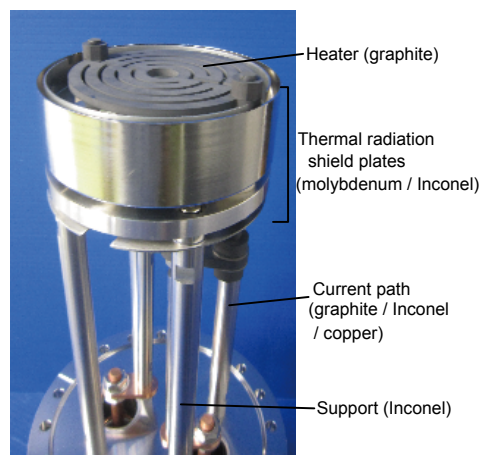


Figure 4: Appearance of actual graphite heater. Copyright 2016 American Vacuum Society.

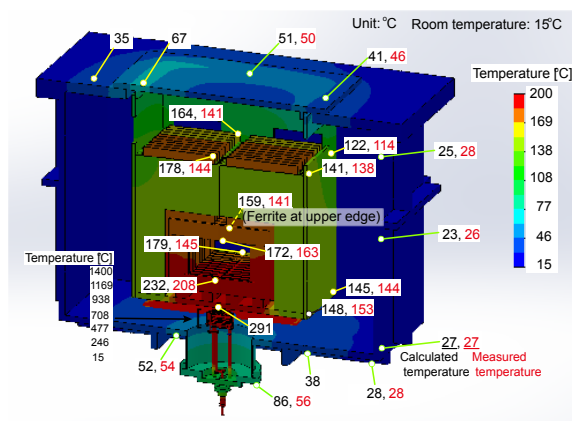


Figure 5: Calculated and measured temperature distribution using the graphite heater. Copyright 2016 American Vacuum Society.

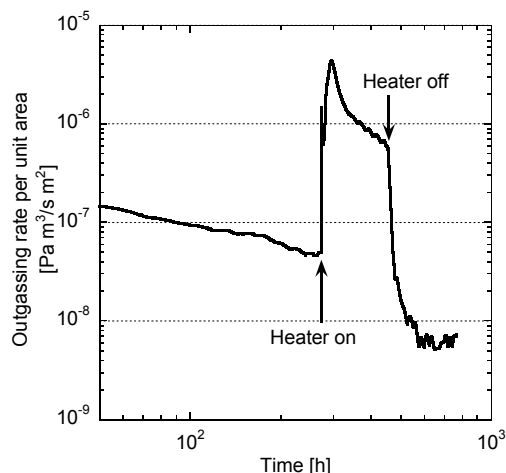


Figure 6: Result of the kicker magnet degassing by the new bake-out method with graphite heater. Copyright 2016 American Vacuum Society.



3. 加速器キッカーエリアの圧力改善

3.1 ビームラインへの脱ガス系の設置

ビームラインに設置された真空容器内に熱反射板を設置するためには、一度キッカー電磁石を吊上げ、真空容器の外に出さなくてはならない。加速器トンネルの既設クレーンは揚程が少ないため、吊り上げ治具を設置しての作業となる。すなわち作業手順は、1) 吊り上げ治具の設置、2) キッカー電磁石の吊り出し、3) 反射板の設置、4) ヒーターの設置、5) キッカー電磁石の再設置、である。さらに 1)、2)の作業の前には安全な足場をくみ上げる。これらは、大型機器の取り扱いと真空機器の取り扱いの双方が関係する作業である。Figure 7 に熱反射板とヒーターの設置作業の手順を記す。2014年に8台のキッカー電磁石中1台に対してヒーター・熱反射板を設置した。今年2016年に残り全てのキッカーに対して熱反射板とヒーターの設置作業を行っている。

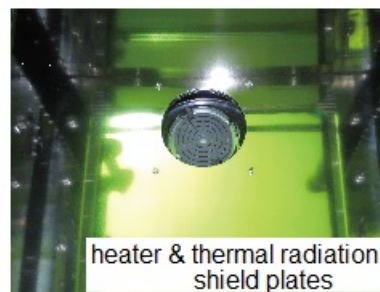


Figure 7: Procedure for installation of the thermal radiation shield plates and heater.

3.2 排気系の追加とビームライン圧力改善の展望

圧力 P 、放出ガス速度 Q 、排気速度を S の関係は、

$$P = Q/S \quad (3)$$

である。そのため、ビームラインの圧力 P を低くするには、脱ガスによる放出ガス速度 Q の低減に加え、ポンプの追

加により排気速度 S を増加させることが効果的である。排気速度の増加は、ベーキング中に脱離するガスを排気する能力を増やすことになるため、効果的な脱ガスにもつながる。ポンプとしては、1) 比較的高い圧力から超高真空まで一定の排気速度を維持できる、2) 定常時及びベーキング時に放出ガスをため込まずに排気できる、という理由からターボ分子ポンプを採用した。本ターボ分子ポンプは RCS の他箇所でも本排気系として利用している耐放射線性能を有するものである[3]。排気速度 $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ のターボ分子ポンプを 2 台増加し、計 5 台のポンプで 8 台のキッカー電磁石のエリアを排気する。脱ガスと組み合わせてどの程度のビームライン圧力となるか、おおざっぱに評価してみる。Figure 6 よりキッカー電磁石からの単位面積当たりの放出ガス速度は $5 \times 10^{-9} \text{ Pa m/s}$ 程度となる。キッカー電磁石 1 台当たりの総表面積は 42 m^2 程度である。よって 8 台のキッカー電磁石からの放出ガスは $1.7 \times 10^{-6} \text{ Pa m}^3/\text{s}$ となる。一方ポンプの排気速度とポンプと真空容器管の配管のコンダクタンスから実行排気速度は $0.85 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度である。ポンプが 5 台あることを考慮して、ビームラインの圧力は式(3)より、 $4 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ である。現状よりも 1 桁低いビームライン圧力を達成することが期待される。

4. まとめ

ビームラインに組み込まれたキッカー電磁石を真空容器の熱膨張を抑えた上で脱ガスするために、熱源と熱遮蔽板を真空容器内に設置するベーキングする手法を開発し、実機への設置を行っている。本手法を用いてキッカー電磁石温度 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 、真空容器温度上昇 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下という目標を達成した。排気系の増加と併せて現状より 1 桁低いビームライン圧力の達成が見込まれる。

最後に、キッカー電磁石に代表される放出ガスの多い真空装置に対して、ビームライン上で如何にして脱ガスするかは、いずれの加速器でも課題であるが、本手法が少しでも役に立てば大変幸いである。

参考文献

- [1] J. Kamiya, T. Takayanagi, and M. Watanabe, Phys. Rev. Spec. Top.-Accel. **12**, 072401 (2009).
- [2] J. Kamiya, N. Ogiwara, T. Yanagibashi, M. Kinsho, and Y. Yasuda, J. Vac. Sci. Technol., A **34**, 021604.
- [3] K. Wada, T. Inohara, M. Iguchi, N. Ogiwara, K. Mio, and H. Nakayama, J. Vac. Soc. Jpn. **50** (2007) 452.