

## Operation of Magnets in a Large Vacuum Chamber under High Radiation Environment

Hitoshi Takahashi\*, Keizo Agari, Erina Hirose, Masaharu Ieiri, Yohji Katoh,  
Michifumi Minakawa, Hiroyuki Noumi, Yoshinori Sato, Yoshihiro Suzuki, Minoru Takasaki,  
Kazuhiro Tanaka, Akihisa Toyoda, Hiroaki Watanabe, Yoshikazu Yamada, Yutaka Yamanoi  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

In J-PARC, beam line elements downstream a production target are exposed to huge amount of radiation and heat. Especially, beam ducts are difficult to cool sufficiently without Tritium production. Therefore, magnets are placed in a large vacuum chamber. In order to reduce the residual radiation dose, the chamber lid and feedthroughs are 4-meter above the beam line, and radiation-shielding blocks are also inside the chamber. We have tested the magnet operation in a vacuum chamber. The magnet has worked successfully up to the current of 3000A.

### 超高放射線場の大型真空槽内での電磁石運転

#### 1. はじめに

現在、茨城県東海村で大強度陽子加速器施設 J-PARC の建設が進められている。その中のハドロン実験ホール (HD-hall) <sup>[1,2]</sup> では、50 GeV、750 kW の大強度陽子ビームを標的 T1 <sup>[3]</sup> に当て、そこから発生する種々の 2 次ビームを使って、ハイパー核実験、K 粒子稀崩壊実験など、様々な原子核素粒子実験が行われる。この 2 次粒子生成標的 T1 は、相互作用長で 30 % ビームロスに相当する厚さを持つ。従って、 $750 \times 0.3 = 225$  kW ものビームパワーが T1 標的に開放されるわけであるが、1 次陽子ビームのエネルギーが高いため、標的自身に落ちる熱量はその内のわずか 10 kW 程度であり、残りの 200 kW 以上はその下流のビームライン機器が受け止めることになる。そのため、標的直下流の電磁石などは、未曾有の高放射線場の中でこの膨大な熱量に耐えなければならない。

発熱に対する特別な措置を何も講じなかった場合、T1 直下流の電磁石は、磁極の温度が簡単にキュリー温度を越え、磁石として働かなくなってしまう。ヨークを水冷するだけでは除熱が追いつかない。これは、標的と磁石との間に、余計な粒子を遮るコリメータを置くことで解決できる。このコリメータは、磁石の代わりに大量の熱を受け止めることになるので、熱伝導の良い銅で作られ、ビーム中心から遠い側面を水冷することで、トリチウムの生成量を低く抑えながら中心の温度を下げるができるようになっていく。

しかし、このコリメータだけでは発熱を抑えられないビームライン要素がある。それは、ビームを通す真空ダクトである。真空ダクトは、磁石の磁極よりもビーム中心に近いので、発熱密度がより大きい上に、水冷しようとするれば大量のトリチウムが生成されてしまう。この問題を解決するために我々が採用したのが、大型の真空箱の中に電磁石を置く、と

いう方法である。

#### 2. 真空箱

施設の運用開始当初では唯一となる 2 次粒子生成標的をなるべく有効活用するため、T1 標的には複数の 2 次ビームラインが設置される。その内、荷電 2 次粒子ビームラインは、1 次陽子ビームラインから左 6 度に取り出される K1.8 ビームラインと、右 6 度に取り出される K1.1 ビームラインの 2 本がある。真空箱の中には、これら荷電 2 次ビームラインの最上流の電磁石と、前述のコリメータが設置される。

電流や冷却水、信号などのコネクタの脱着や真空シールなど、蓋での作業は人の手によるものが多い。従って、メンテナンス作業中の放射線被曝を減らすためには、真空箱の蓋とその周囲の残留放射線レベルをできる限り低くしなければならない。そこで、真空箱の蓋の位置を、ビームラインより 4 m 上のメンテナンス作業エリア (「サービススペース」と呼ばれる) の高さまで高くし、放射線遮蔽ブロックを真空の中に入れることにした。遮蔽体の厚さは 3 m あり、その内下 2 m が鉄、上 1 m がコンクリートである。コンクリート遮蔽体は、そのままでは放出ガスが多過ぎて真空内に入れるには適さないため、アルミ製密閉容器の中をコンクリートで充填したものをを用いる。真空箱の蓋には電流、水、信号の真空導入端子が設けられ、電流や冷却水は全てサービススペースから供給される。

図 1 に真空箱システム全体の概念図を示す。内部の様子が分かるように、真空箱本体の壁と内部遮蔽体を半分に切った図になっている。真空箱のビーム入口にすぐ T1 標的装置が接続される。遮蔽体まで容器内に収納することにした結果、真空箱の大きさは、長さ約 3 m、幅約 2.5 m、高さ約 5.5 m という大型のものになった。中に配置される電磁石やコリメータは、それぞれ上の遮蔽体と機械的に締結されて一体で吊り上げられるようになっており、個別に 1 台ず

\* E-mail: hitoshi.takahashi@kek.jp

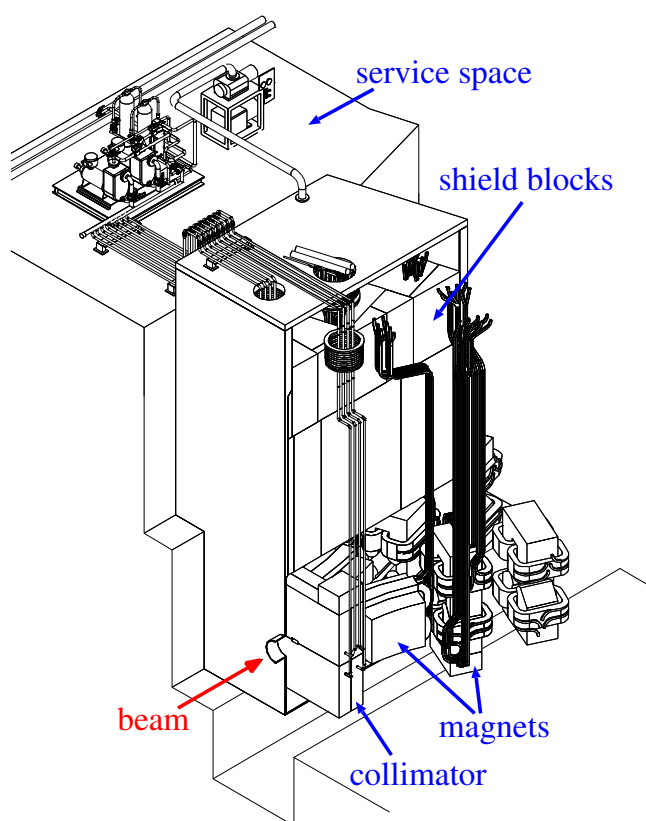


図 1: T1 標的部真空箱の概念図。



図 2: 真空運転試験用電磁石の写真。

つ出し入れ可能なモジュール構造になっている。

### 3. 電磁石真空運転試験

ビームラインで使用するのは 1000 ~ 3000 A クラスの大電流電磁石である。このような電磁石を真空中で安定に動作させられることを確認するため、実際に真空運転試験を行った。

#### 3.1 セットアップ

図 2 が試験に使用した電磁石の写真である。耐放射線性と真空中での放出ガス量を考慮して、コイルには無機絶縁ケーブル (MIC) を用い、鉄芯には防錆塗料を塗る代わりに化学ニッケルメッキを施した。磁石の上部には電気や水の導入端子の付いた小蓋が取り付けられ、この小蓋と真空容器本体の蓋との高さを合わせるためにベローズが付けられている。電気と水の真空導入端子は、KEK-PS K5 ビームライン Q1 磁石のコンクリート絶縁コイル<sup>[4]</sup>に使われた物と同じ物である。

この電磁石を直径約 2 m、高さ約 1.2 m の真空容器内に設置し、ロータリーポンプとメカニカルブースターポンプを用いて真空に引いた。その中で磁石を励磁し、中心磁場と各部の温度を測定した。また、真空をブレークして大気圧に戻した後、同じ測定を行って結果を比較した。

#### 3.2 試験結果

真空度は約  $3 \times 10^{-3}$  Torr であった。これは実機で想定している真空度と同程度である。

ケーブル導体や、2つのコイルの導体間をつなぐブスバーなど、各所に熱電対を付け、3000 A を通電した時の温度上昇を測定した。そのうち、代表的な箇所を温度を図 3 に示す。測定を始めてすぐの頃の温度が段になっているのは、1000 A、2000 A、3000 A と順に電流を上げていったためである。最も高温になったのは、導体間をつなぐブスバーで、大気中で最高約 67 °C、真空中では最高約 70 °C であった。真空雰囲気にする事で、空気への放熱が無くなり温度上昇が高くなる心配があったが、大気中と真空中との差は約 3 °C と小さかった。これは、中空導体を使った直接水冷型のコイルであるため、冷却水による除熱が効率良く行われていることを示している。

磁場強度については、当初、ホール素子を磁極に固定して測定していた。しかし、真空中でホール素子の温度が上昇するために、真空中で励磁した方が大気中の場合よりも 1 % ほどホール電圧が低くなる結果になった。そこで、磁極間に収まるアルミ容器を用意して、その内部と真空容器の外とをフレキシブルチューブでつなげた。つまり、磁石自身は真空内にあるが、磁極と磁極の間だけ外の大气とつながっている、という状態にした。そして、そのアルミ容器の中に NMR プローブを設置して磁場強度を測定した。その結果、真空中で励磁した場合と大気中での場合とで、磁場強度は 0.1 % 以下の精度で一致することが確かめられた。また、少しずつ真空度を悪くしな

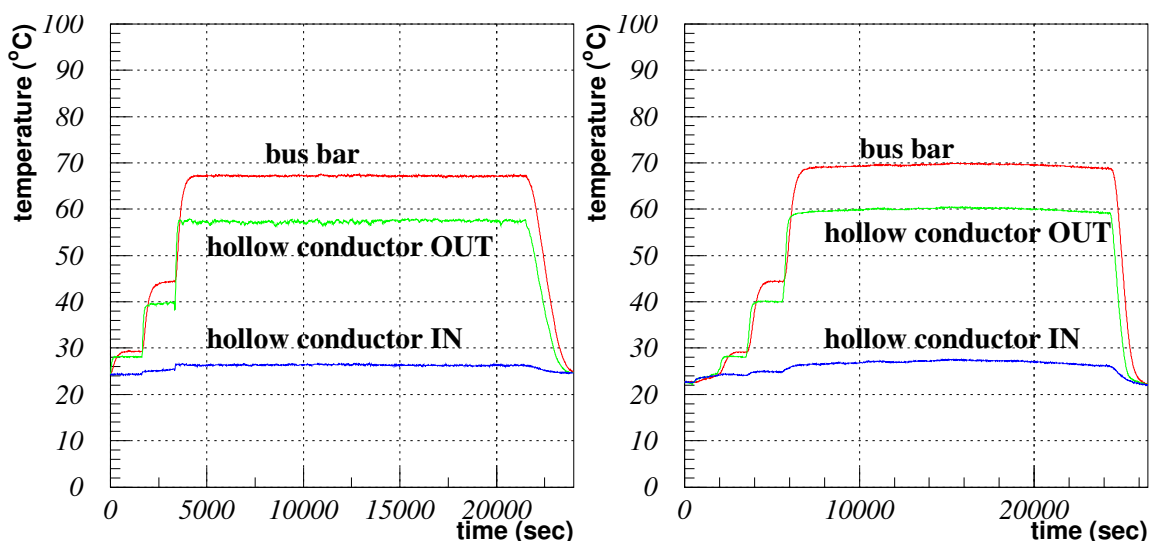


図 3: 大気中(左)及び真空中(右)での各部の温度。hollow conductor IN、OUT はそれぞれコイル導体の水入口側、出口側の温度、bus bar は2つのコイルの導体間をつなぐブスバーの温度を示す。

から磁場を測定したところ、前述の真空度  $3 \times 10^{-3}$  Torr から大気圧まで、どの真空度でも磁場強度に変化は無かった。

#### 4. まとめと今後

大強度陽子加速器施設における、生成標的の下流の真空ダクトの冷却問題を解決するため、真空ダクトを磁極間に置く代わりに、大型真空箱の中に電磁石を入れるシステムを採用した。メンテナンス時の残留放射線量を減らすために、真空箱の蓋や電流導入端子をビームラインより4 m上の高さに置き、放射線遮蔽ブロックも真空箱の中に入れることにした。テスト用の電磁石と真空容器を用いて、実際に真空中での励磁試験を行った。その結果、3000 Aまでの電流を流して電磁石を運転することに成功した。大気中での運転時と真空中での運転時とで、温度の違いは約  $3^\circ\text{C}$  程度であった。また、NMRプローブによる測定で、両者の磁場強度の違いは0.1%以下であることを確かめた。

今回、中空導体を使った直接水冷型コイルを用いて真空中での励磁に成功したが、我々は現在、中実導体を使った間接水冷型のコイル<sup>[5]</sup>の真空通電試験を行っている。間接水冷型は直接水冷型に比べ、電気と水が完全に分離されているため絶縁パイプが不要で強度的な信頼性が増す、コイルの総体積に占める冷却水の容積を小さくできトリチウム生成量を減らせる、といったメリットがある。しかし、除熱効率の点では直接水冷型よりも劣り、特に空冷の効かない真空中ではその差が顕著になるので、それをいかに克服するかが課題となっている。

また、今回の真空励磁試験では、蓋の開閉等の作業性について特に考慮していなかった。しかし、実機では、メンテナンス中の被曝量をできる限り減らすためには、遮蔽体を入れて残留放射線を小さくするだけではなく、現場で人が行う作業時間を極力短

くすることが必須である。そのため、水や電気の即脱着コネクタを採用して迅速な蓋の開閉が可能となるように、真空導入部の構造を改造し、現在試験を進めているところである。

#### 5. 謝辞

この研究は、文部科学省科学研究費補助金若手研究(B) No.15740166、基盤研究(A) No.15204024、および基盤研究(B) No. 15340084の支援を受けて行われた。

#### 参考文献

- [1] 田中万博, 他, “KEK-JAERI Joint Project 大強度陽子加速器計画 原子核素粒子実験施設建設グループ ハドロンビームラインサブグループ 中間報告書” KEK-Internal 2002-8, July 2002.
- [2] 田中万博, 他, “J-PARC 大強度陽子加速器施設 原子核素粒子実験施設建設グループ ハドロンビームラインサブグループ 第2次中間報告書” KEK-Internal 2004-3, July 2004.
- [3] Y. Yamanoi, *et al.*, “Design of the production target for slow extraction beam lines at K-hall”, Proceedings of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, October 2001, p.393-395.
- [4] K. H. Tanaka, *et al.*, “Development of Radiation-Resistant Magnets for High Intensity Beam Lines”, Proceedings of the 11th International Conference on Magnet Technology (MT11), August 1989, p.725-730, KEK Preprint 89-82.
- [5] K. H. Tanaka, *et al.*, “Development of Radiation-Resistant Magnets for JHF Project”, IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol.12, p.278-281, 2002, Proceedings of the 17th International Conference on Magnet Technology (MT17), September 2001.