

J-PARC MR における反跳中性子防護壁の検討

SHIELD DESIGN FOR THE SCATTERED NEUTRONS AT THE J-PARC MR

白形政司^{#, A)}

Masashi Shirakata^{#, A)}

A) KEK/J-PARC

Abstract

J-PARC MR has a two septum magnets and four kicker magnets for the beam injection. The beam collimation system in order to localize the beam loss is installed at the following area of kickers in the same straight section. Because the back scattered neutrons from the beam collimators were prevented by a quadrupole magnet between the kicker chamber and collimator, the radio activation of injection devices was expected to be small. However, after October 2012, the residual radiation dose at the plate on the box of the upside of kicker chamber began to increase, and it achieved over 1 mSv/h. We are afraid that the high radiation dose will prevent the kicker magnets from the necessary maintenance. Though the residual radiation dose keeps the acceptable level in May 2016, it may be a problem after the speed up of MR cycle. The reason of radio activation of kicker chamber and the design of neutron shield in order to avoid the activation of the chamber are reported in this paper.

1. はじめに

J-PARC MR は、Figure 1 に示す様に三回対称なリング型加速器であり、四極電磁石の通し番号を使ってリング一周にわたり 1 番地から 216 番地までのアドレス番号を割り当てられている。3 つの直線部のひとつを入射直線部と呼び、ビーム入射機器として 2 台のセプタム電磁石、4 台のキッカー電磁石を持っている。キッカー電磁石は 4 台がひとつの真空容器の中に収められ、6 番地に設置してある。同じ入射直線部において、キッカーすぐ下流の 7 番地からは、ビームロス局在化のためのコリメータを配置している。

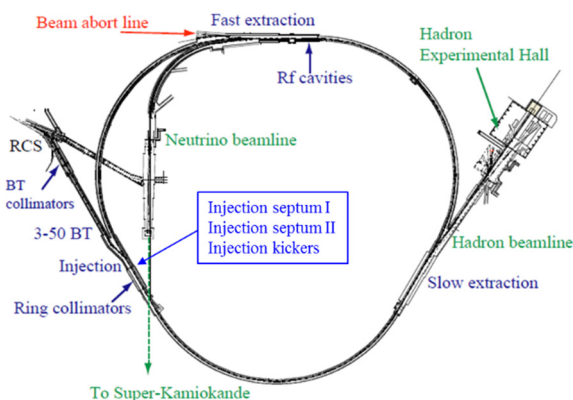


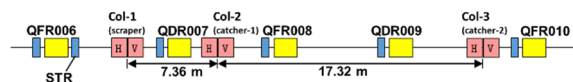
Figure 1: J-PARC MR.

コリメータから後方散乱で出てくる中性子は間にある四極電磁石 QFR006 によって阻まれ、入射機器を放射化する度合いは大きくないと考えられていた。ところが 2012 年 12 月以降、入射キッカーを収納するキッカーチェンバーの上面において徐々に線量が高くなり、1 mSv/h を超える残留線量を観測するに至り、これがメンテ

ナンス作業に大きな制約となる事が懸念された。2016 年 5 月現在で残留線量に特段の増加は見られていないが、今後 MR サイクルを倍増した際には障害となってくる可能性がある。ここではキッカーチェンバーを放射化する原因と、それを防止する中性子防護壁を検討した。

2. 入射キッカー周辺の残留放射線量

キッカー周辺での残留放射線量の増加が見られ始めた 2012 年に一体何があったかという、Figure 2 に示すようにビームコリメータシステムの大幅な設計変更[1] [2] をしている。MR のビームコリメータシステムは、当初ビームのハロー成分に散乱を与え、散乱されて外側に膨らんできた部分を下流の 2 台のキャッチャーで捉える散乱一捕獲方式を採用していた。これがビームロス許容量の大幅増強という必要に迫られ、すべてを捕獲型のコリメータで構成する方式に改めた。この際、散乱体であった最上流のコリメータ Col-1 を撤去し、吸収体である Col-A, B を導入している。その結果、Figure 3 のように入射キッカーから四極電磁石を一台挟んだすぐ後に中性子線源であるコリメータ(吸収体)が置かれることとなった。



MR のビームコリメータは、散乱体(Col-1)でハロー成分に散乱を与え、外側に出て来たところを後続の 2 台のキャッチャー(Col-2, Col-3)で捉える方式だった

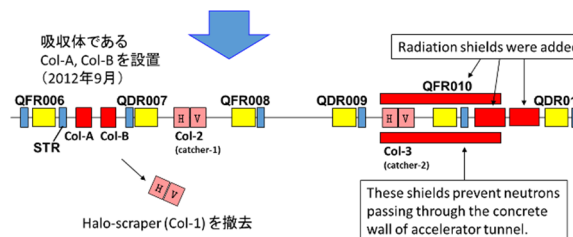


Figure 2: Concept change of MR beam collimation system.

[#] masashi.shirakata@kek.jp

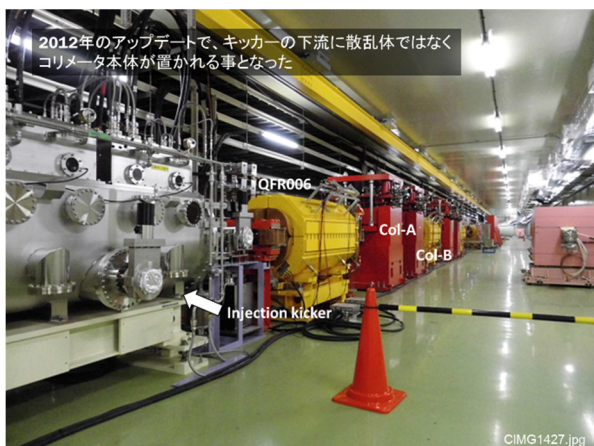


Figure 3: Layout of the injection kicker chamber and collimators A and B.

散乱体ではビームはほとんど吸収されずに通り抜けるため、二次中性子などの発生も少なく Col-1 周辺での放射化の問題は大して重要な話では無かった。これが Col-A, B ではそれぞれに 500 W までのビームロスを想定することから、Col-A, B 本体およびその上下流の四極電磁石 QFR006 と QDR007 の放射化については、詳しく検討がなされた。ただ、QFR006 のさらに上流にある入射キッカーについては、QFR006 が Col-A からの放射線の遮蔽 (厚さ 1.8 m 以上の鉄) になる事から、放射化はほとんど起きないと判断していた。

Figure 4 に、入射キッカー真空容器を示す。上流容器と下流容器にはそれぞれ 2 台のキッカー電磁石が収められており、双方を大口徑ベローズで繋いで全体でひとつの真空容器を形成している。入射キッカー周辺の残留放射線量は機器表面でも $10\sim 20 \mu\text{Sv/h}$ と低線量であったが、Col-A, B 導入後の 2012 年 11 月以降上昇が見られ、2013 年 1 月 30 日の測定では Box4 上面の Plate4 表面で $750 \mu\text{Sv/h}$ を記録し、その後 1 mSv/h を超えるまでになっている。放射化の原因を探るべく真空容器全体をサーベイしたところ、顕著な放射化が見られるのは上面 Plate (Box の蓋) に集中していることが判明した。これは天井方向から中性子が降り注いでいることを示唆している。この描像を確かめるため、PHITS コード[3]を用いて中性子の流れをシミュレーションした。結果を Figure 5 に示す。一次陽子ビームは左から右へ向かっており、Col-A から左へ出てくる中性子は後方散乱である。四極電磁石 QFR006 と Col-A の隙間から天井方向へ飛んだ中性子は天井で反射して、丁度キッカー真空容器の下流部に降りてくる構図となる。これがキッカー真空容器放射化の原因であり、天井からキッカー真空容器に中性子の雨が降り注いでいる事が確認された。同様の構図が左右および床方向でも考えられるが、通路方向は反射面までの距離が遠すぎる、また床方向は近すぎるため、放射化には寄与していない。よってキッカー真空容器の放射化を防ぐには、QFR006 と Col-A の隙間から天井方向へ向かう中性子の流れを断てば良い。次の節ではこれを実現する遮蔽体を検討する。

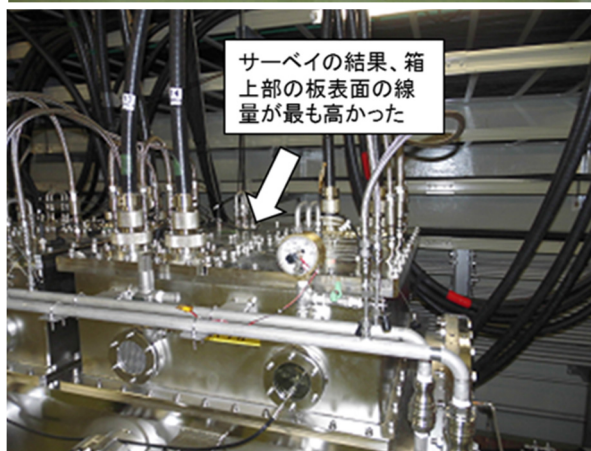
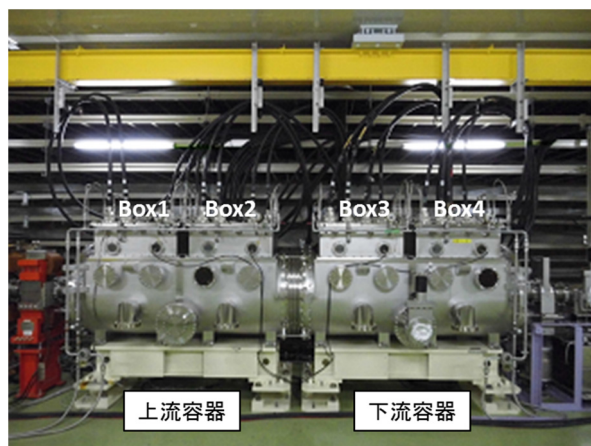


Figure 4: Vacuum chamber of injection kicker magnets.

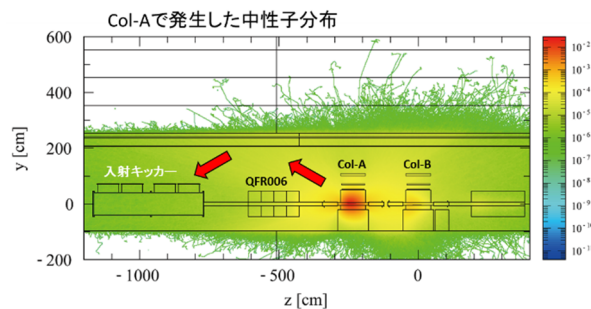


Figure 5: Neutron distribution from collimator A.

3. 遮蔽体の検討

3.1 遮蔽体材質の特徴

陽子加速器の構成機器を放射化するのには主にビームロスに伴い飛び出してくる二次中性子であるが、放射化の状況は各加速器により様々である。ただ、ここでは 3 GeV 陽子がビームコリメータに内蔵されたタンタル製の jaw に衝突するという特定の状況のみを考えればよく、ビーム入射時に jaw から放射される中性子に対する遮蔽体については、コリメータ下流の四極電磁石を保護するという観点で過去に様々な検討をしてきた。遮蔽体の材

料としては主に鉄、鉛、コンクリート、ポリエチレンを取り上げ、3 GeV 未満の中性子和 γ 線に対して遮蔽能力を調査した。それらについてのまとめを、Table 1 に示す。

Table 1: Shield Characteristics

材質	遮蔽効率	放射化の影響	主な放射化生成物
鉄	2位	ビーム運転時はポリエチレンの次に線量が低い 冷却時に下降し、その後ほぼ一定	Cr51 Mn54 Fe55 V48 V49 Co56 Sc46 Mn52 Ar37 P33 S35 Be7 P32 Ca45 H3 Na22 Sc47 Sc44 Ti44 Ar39 Si32 Sc48 Mn53 Ca41 C14 Cl36 Al26 Be10 その他57種類は冷却時に消滅
鉛	1位	ビーム運転時は他の材質に比べ線量は最も高い 冷却時は右肩下がり、3日後に鉄よりも下がる	Tl202,Au195,Ir187,Hg203,Ir186m,Ir189m,Hf175,Ta178,W178,Bi205,Os185,Re183,Yb169,Tl204,W181,H3,Nb95, Rh103m,Sr89,Zr95,Eu147, Tm167,Er165,Ru103,Dy159,Lu171,Yb171m,Gd151,Pb205m,Xe127,Rb86,O s189m,Tel21,Eu146,Sr85,Gd153,Bi206,Gd146,Lu173,Eu149,Be7 その他119種類 その他331種類は冷却時に消滅
コンクリート	3位	ビーム運転時は鉛の次に線量が高い 冷却後に下降し、その後はやや右肩下がり	Be7 Ar37 Cr51 Na22 H3 Mn54 Fe55 P33 V48 P32 S35 V49 K40 C14 Mn52 Ar39 Al26 Cl36 Be10 Mn53 その他64種類は冷却時に消滅
ポリエチレン	4位	ビーム運転時は他の材質に比べ線量は最も低い 冷却時に下降し、その後ほぼ一定	Be7 H3 Be10 その他12種類は冷却時に消滅

金属は中性子のみならず γ 線に対しても遮蔽能力が高いが、それ自身の放射化が最大の問題となる。生成される放射性同位元素の種類が多く、なかには長寿命の各種も複数含まれるからである。Figure 6 に各材質の放射化と放射性同位体の減衰の様子を示す。縦軸は、同一体積の対象物質内に生成された放射性同位体の総和である。鉛は鉄に比べても多くの放射性同位体を生成するが、残留放射線量は時間が経つと鉄よりも低くなる。遮蔽能力が高く残留線量が低いというのは優れた特徴であるが、重いということと廃棄時の取り扱いが面倒なのが難点である。中性子に対しては水も良い遮蔽体であるが、

漏洩が起きる可能性があることと大量の水を放射化することへの抵抗があるため、J-PARC MR では検討の対象から外している。

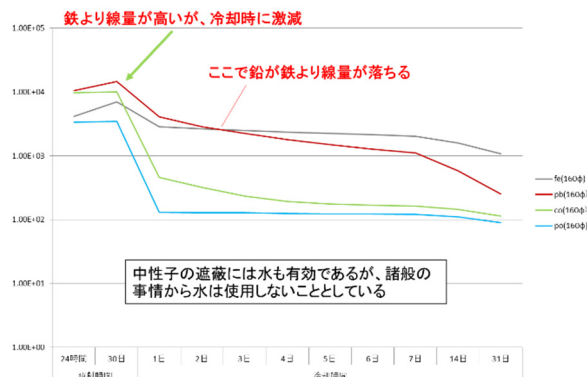


Figure 6: Radio activation and cooling of the shield materials.

機器保護のために遮蔽する対象は中性子と γ 線であるが、今回考慮すべきものに以下の点がある。

- 天井で跳ね返ってくるのは、ほとんどすべて中性子である。
- 金属製の遮蔽体は、それ自身が強い γ 線源になりうる。
- メンテナンス時に遮蔽体の一時撤去が必要になることもあるが、現場には1トン以上の重量を扱えるクレーンが無い。

これらを踏まえ、遮蔽体の材質としてポリエチレンを選定した。四極電磁石の保護を考える際は、中性子と γ 線の双方を遮蔽する必要があったため複合材料による遮蔽体を検討していたが、今回は単一材料の遮蔽体を採用する。

3.2 遮蔽体の形状

入射キッカーを放射化しているのは、天井で反射してキッカー上部から降り注いでくる中性子である。左右および床方向からの回り込みは少ない。よって Col-A から天井への流路を断てばよいが、上方のみを塞ぐと堰き止められた分が QFR006 に集中して QFR006 の被爆量を増やすことになる。これを防ぐため、遮蔽体は QFR006 - Col-A 間に壁状に設置する。現場での扱いやすさと自身の放射化を極力抑えるという観点から、遮蔽体にはポリエチレンを採用し、フレームにも軽量のアルミを使用する。四つ程度に分割できる構造とし、各部はハンドリフターで扱える程度(1トン未満)の重量に留める。遮蔽体の幅は120cm前後、高さは160~240cm、厚さは30cmと60cmで検討した。

4. 遮蔽効果

遮蔽体を設置することで Col-A からの中性子の流れにどのような変化が出るかを、Figure 7 および 8 に示す。遮蔽体が無い場合、入射キッカー真空容器の下流部にやや黄色い(中性子束が多い)部分がかかっているが、遮蔽体により中性子の流れが堰き止められている様子が見

て取れる。天井方向へ向かう中性子は、yz 図を見ると遮蔽体より上流側にはあまり出て行けなくなっている。一方左右方向はがら空きであるが、左右からキッカー真空容器を含むビームライン上に回り込む中性子はほとんど無いことが、xz 図からうかがえる。これによると遮蔽体の幅についてはもっと狭くても良い。しかし、遮蔽体は上下 200 cm と背が高いので、構造体としての安定を保つためには幅を 120 cm 程度持たせておくのが適当である。

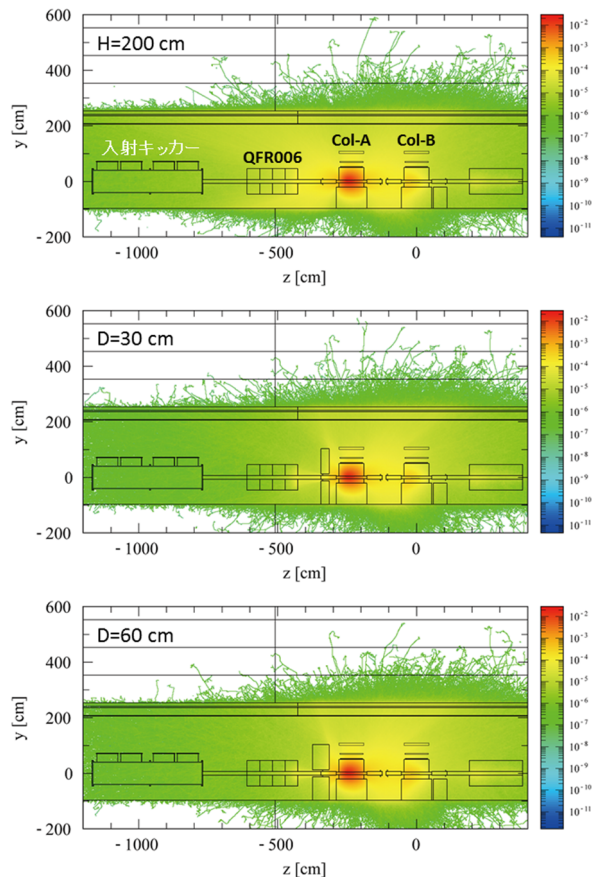


Figure 7: Neutron distributions w/o neutron shield in yz-plane (H=200 cm).

Figure 9 に、各条件下での遮蔽結果をまとめた。横軸は Col-A から近い順に QFR006 下流部分、キッカー真空容器上部の Box4, Plate4, ..., Box1, Plate1 である。縦軸は、それぞれの位置での中性子線量比を遮蔽体が無い場合を基準にして表している。四極電磁石 QFR006 に対する遮蔽量は、遮蔽体形状に依らず厚さのみで決まっている。中性子線量は 30 cm 厚で半減、60 cm 厚で 1/3 以下になる。Box と Plate に対する遮蔽は、中性子線量において 30 cm 厚で 1/3、60 cm 厚で 1/5 くらいが見込める。この結果から、30 cm 以上あれば一応必要な遮蔽量が得られるという事になる。ただ、キッカー真空容器の各部において、遮蔽体の高さに比例して線量が単調減少すると予想したが、事はそう単純では無い。特に遮蔽体厚が 30 cm の時には、真空容器上流部で遮蔽体が高いほど中性子線量も多いという、想定と逆の結果も見られる。この事から、遮蔽体厚は 60 cm ある方が良い。現

場のスペースや重量を考慮して、50~60 cm 厚程度のものを製作するべきであろう。

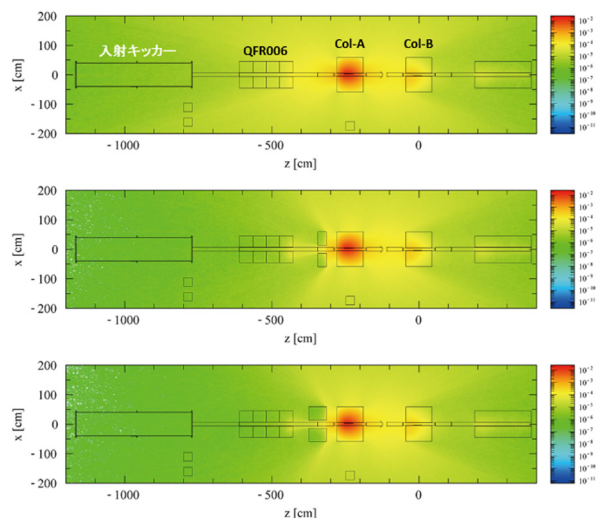


Figure 8: Neutron distributions w/o neutron shield in xz-plane (W=120 cm).

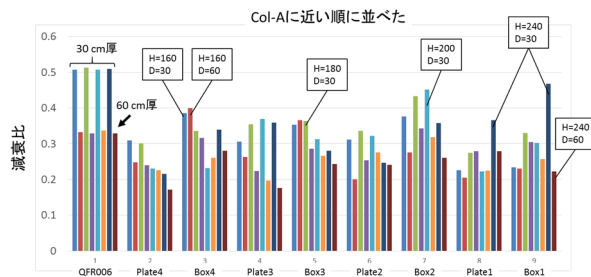


Figure 9: Comparison of shielding effects.

5. まとめ

5.1 判明した問題

- 2012 年のコリメータの入れ替え以降、入射キッカー周辺の残留線量が増加した。
- 入射キッカー真空容器の放射化は上部 Box 上の Plate でもっとも強く、真空容器上面から放射化していることが明らかとなった。
- コリメータ A 上流部から後方散乱で出て来た中性子の流れのうち、QFR006 との隙間から上部に放射されたものが天井で反射されて入射キッカーに降り注いでいた。
- 天井以外の方向では、床や壁までの距離が近すぎたり遠すぎたりして、反射された中性子がキッカーに届かなかつたり、あるいは拡散して放射化にあまり寄与していない。

5.2 対応

- QFR006 とコリメータ A の間に上部を塞ぐように遮蔽体を設置することを考える。
- 遮蔽体の材質には、放射化による残留線量が極め

て少なく、軽量で取り扱いも容易なポリエチレンを採用する。

- QFR006 を保護するため、遮蔽体は床から高さ約 2 m の壁型とする。
- 新規遮蔽体を設置することで、入射キッカー上部の Box, Plate における中性子量を 30 cm 厚の遮蔽体でほぼ 1/3、60 cm 厚の遮蔽体で 1/5 にすることが出来ると見込まれる。ただし、30 cm では応答が不規則(厚さが足りない)と思われ 50 cm 以上を推奨する。

参考文献

- [1] M. J. Shirakata *et al.*, THPS035, Proc. of IPAC2011, San Sebastián, Spain, Sep. 2011, pp. 3496-3498.
- [2] M. J. Shirakata *et al.*, THAM4Y01, Proc. of HB2016, Malmö, Sweden, Jul. 2016, to be published.
- [3] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta and L. Sihver, Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013).