

遮蔽用鉄材を再利用した四軸コリメータの製作

FABRICATION OF FOUR-AXIS COLLIMATORS REUSING SHIELDING IRON MATERIAL

白形政司^{#, A)}

Masashi Shirakata ^{#, A)}

^{A)} KEK/J-PARC

Abstract

At the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) in Tokai-mura, Ibaraki Prefecture, beam collimators have been installed in the beamline and in each accelerator ring to improve the quality of the proton beams handled. For the slow repetition synchrotron (MR), seven beam collimators are planned to be installed to increase the beam loss capacity of the beam collimators from 450 W to 3.5 kW. During the process, four of the collimators were retired in 2014 due to vacuum problems and had to be stored in the MR tunnel. Normally, when equipment with high residual radiation levels is retired, it is unlikely that it will be reused, but the residual radiation levels of these units have decreased sufficiently over the past six years because of the short beam exposure time. Also, after 2015, the beam collimators were redesigned and converted to four-axis. Although biaxial and quadruple-axis collimators are inherently incompatible because of the difference in the beam duct's range of motion, we were able to absorb the difference by devising the shape of the beam duct's peripheral components, and three quadruple-axis collimators were fabricated by reusing the shields of retired biaxial collimators. This succeeded in reducing the fabrication cost of the beam collimators while also drastically reducing the amount of steel material that would become radioactive waste. This paper describes the changes in the residual radiation dose of the retired biaxial collimators and the design of the four-axis collimators with reused shields.

1. 概要

茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC では、取り扱う陽子ビームの品質を上げるためにビームラインおよび二つの加速器リングそれぞれにビームコリメータを設置している。遅い繰り返しのシンクロトロン (MR) では、ビームコリメータでのビームロス容量を 450 W から 3.5 kW まで上昇させるために、散乱一捕獲型ビームコリメータ 3 台体制からワンパス型ビームコリメータ 7 台体制への整備[1]をすすめてきた。2014 年にワンパス型ビームコリメータを 6 台(Col-A~F)まで増設したところで 4 台が真空トラブルのためリタイアし、MR トンネル内で保管されることとなった。Col-C, D はまるごと 3-50BT ライン下流部に仮置きし、Col-E, F は台座を現場に残して C1 搬入棟地下に仮置きした。しかしながら、搬入棟地下は作業スペースを確保しなければならないことから、しばらくの後 Col-E, F はパーツごとにさらに分解され、加速器トンネル内の偏向電磁石下の空きスペースに収納されることとなった。

通常残留放射線量の多い機器がリタイアした場合、再利用されることはほぼ無いが、これらについてはビーム曝露時間が短かったため、2020 年までの 6 年間に残留放射線量が十分に下がった。一方、2015 年以降、ビームコリメータは設計を改め四軸化された[2]。二軸コリメータと四軸コリメータではビームダクトの可動範囲が異なるため本来互換性は無いが、ビームダクト周辺部材の形状の工夫で違いを吸収することができたため、リタイアした二軸コリメータの遮蔽体を再利用して三台の四軸コリメータを製作した。これにより、ビームコリメータの製作コストを

抑えつつ、放射性廃棄物となる鉄材を大幅に減らすことにも成功した。ここではリタイアした二軸コリメータの残留放射線量の変化と、遮蔽体を再利用した四軸コリメータの設計を紹介する。

2. 四軸コリメータの導入

2012 年に試験的に導入したワンパス型ビームコリメータ Col-A, B はビームのハロー成分を削り取る jaw 長が 300 mm と比較的短いうえ、jaw によって散乱された二次粒子成分を下流のコリメータで回収できることから、jaw に角度調節機能を持たせていなかった。しかし、MR コリメータのワンパス型への置き換えを進めるうえで必要とされる jaw が長くなり、現在は Col-A, B を除いて jaw の長さは 504 mm となっている。Jaw の上流端と下流端でビームサイズが有意に変化するが、ハロー成分を効率よく除去し、不要な散乱を少なく抑えるためには、jaw はビームエンベロープに平行でなければならない。ビームエンベロープに対するコリメータ jaw の角度調節能力の重要性が増したため 2015 年に Col-C, D をもどす際、四軸コリメータとして再設置することとなった。以降、製作されるコリメータはすべて四軸のものとなる。

3. 台座の再利用

Figure 1 に MR コリメータの外観を示す。大きく台座と本体に分かれ、本体は上部の駆動機構と下部の遮蔽体から成る。Jaw を内蔵したビームダクトは遮蔽体のほぼ中央を貫通している。写真中、紫色の換装台車の上に乗っているのが本体である。MR コリメータの本体重量は 8 t 以上あるが、何らかのトラブルが発生した際、容易にラインアウトまたは交換できるようにするため、台座と換装台

[#] masashi.shirakata@kek.jp

車間で前面から本体を抜き差しできるカートリッジ方式となっている。そのため台座は再利用し、2015年に本体のみ二台を新作した。ただし、駆動軸の倍化に伴い電極の数が大幅に増えることから、マルチカップリングシステムの二組ある電気コネクタの極数を(48+18)極から(48+48)極に変更した。

旧 Col-E, F の台座を再利用し、新 Col-C, D として再設置した。なお、2017年に Col-D は Col-H として下流部に移設された。その後、2020年に二台(Col-D, G)、2022年に一台(Col-F)を追加製作するのであるが、後になるほど材料費、製作費が高くなる。そこで2020年度以降の製作では台座だけではなく、本体遮蔽体も再利用することを目論んだ。



Figure 1: MR beam collimator. (At the time of Col-E main part line out).

4. 本体遮蔽体の再利用

4.1 残留放射線量の推移

再利用する旧 Col-C, D, E, F は2014年前半のビーム運転に使用しており、当然放射化していた。2014年9月にラインアウトした当時の仮置きの様子を Fig. 2 に、残留放射線量を Table 1 に示す。Col-E については2014年の高線量部の測定記録が無いので、周辺測定の結果を

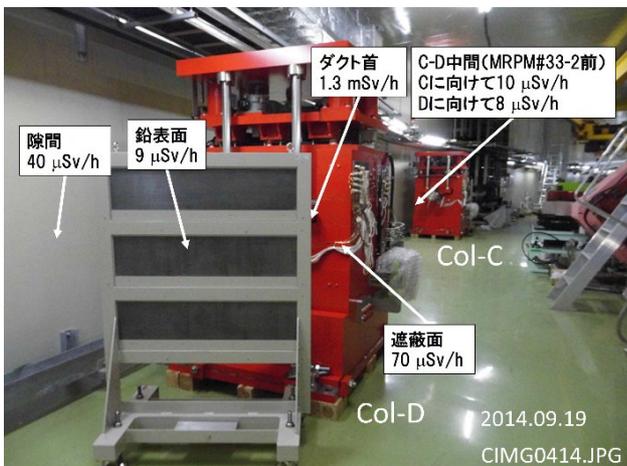


Figure 2: Temporary placement in a low radiation area.

参考値として載せている。ビームダクトが首を出している本体遮蔽体開口部では jaw からの γ 線が見えるため最も線量が高く、ミリシーベルトオーダーとなっている。ふつうは使えないレベルであるが、ビームに晒していた時間が短いため、時間が経てば相当の減衰をすると思込まれていた。2020年1月に再測定した際には $100 \mu\text{Sv/h}$ を下回っており、主たる線源となっているビームダクトとダクトカバーを取り除けば十分再利用できると判断された。遮蔽体背面や駆動機構周辺など、他の場所はいずれも $10 \mu\text{Sv/h}$ 以下であった。であれば、遮蔽体の周囲に一日中作業者がいても、作業被曝線量は許容できるものとなる。

Table 1: Residual Radiation Level

	2014 19 th Sep.	2020 Jan.
Col-C	Up: 2.3 mSv/h Dn: 4.5 mSv/h	Up: 46 $\mu\text{Sv/h}$ Dn: 86 $\mu\text{Sv/h}$
Col-D	Up: 1.3 mSv/h Dn: 1.8 mSv/h	Up: 16 $\mu\text{Sv/h}$ Dn: 28 $\mu\text{Sv/h}$
Col-E	< 0.1 mSv/h	< 10 $\mu\text{Sv/h}$ (2021 Nov.)
Col-F	Up: 0.9 mSv/h Dn: 0.5 mSv/h	< 10 $\mu\text{Sv/h}$ (2021 Nov.)

4.2 開口部の違い

Figure 3 に二軸コリメータ(旧 Col-C, D, E, F)と四軸コリメータ(現 Col-C, H)の遮蔽体開口部の寸法を示す。ビームダクト収納部はダクト保護のために 18 mm 厚の鉄製のダクトカバーで覆う形になっている。コリメータを四軸化する際 jaw サイズが変更され、それにともなってビームダクトの外形は $90 \times 106 \text{ mm}$ から $92 \times 110 \text{ mm}$ と変更された。隣接する四極電磁石の極性によって縦長置きにする場合と横長置きにする場合があり、コリメータのビームダクト収納部はどちらにも対応できるようにしてある。ビームダクト収納部の内法は二軸コリメータでは幅 $140 \times$ 高さ 142 mm 、四軸コリメータでは幅 $144 \times$ 高さ 144 mm となっている。当然ダクトカバーまでを含めた収納部の外形は四軸コリメータの方が大きい。遮蔽体の設計はビームダクトが必要な距離を物理的に移動できる様に、二軸コリメータでは収納部 176 mm 幅に対して 22 mm の隙間が空くように、四軸コリメータでは収納部 180 mm 幅に対して 27 mm の隙間を設けている。放射化物であるため遮蔽体を機械加工することはできず、当然このままでは二軸コリメータの遮蔽体を流用することはできない。検討の結果、最も簡単な解決策としてダクトカバーの減肉が提案されたが、ダクトカバーも遮蔽体の一部であるため、厚さ変更による影響を見積もった。結果、コリメータ下流における放射線量の変化は僅かであると見込まれたため、ダクトカバーの肉厚を 18 mm から 10 mm に減肉することで移動スペースを確保することとした。

T 字型の収納部上部の天板を納めるためのスペースは、二軸コリメータ遮蔽体の方が広く空いている。2015年に新規に四軸コリメータを設計した際、天板を 96 mm

から 50 mm に薄くしたのであるが、そのままダクト上部の隙間が大きくなりすぎる。上向きに飛んだ中性子が天井で反射してその先の機器を不必要に放射化するのはわかっている[3]ので、天板の厚さも最適化して 86 mm とした。

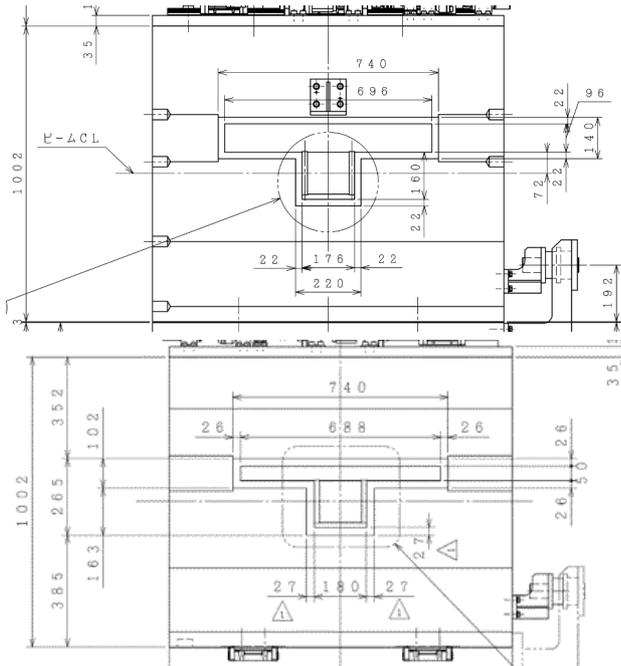


Figure 3: Opening for beam duct in the shielding. Top: biaxial collimator, Bottom: four-axis collimator.

4.3 その他

2015 年の四軸コリメータ導入時、ダブルベローズ機構と一体型であるそれまでのビームダクト設計を改め、jaw を含む角形ダクトとダブルベローズ機構とを分離した。再利用する遮蔽体には Fig. 4 に示す様にダブルベローズの先を保持するビームダクト支持腕が存在するが、これらはすべて取り外した。

背面のマルチカップリングシステムからステッピングモータ、ポテンショメータ、リミットスイッチへの配線が倍

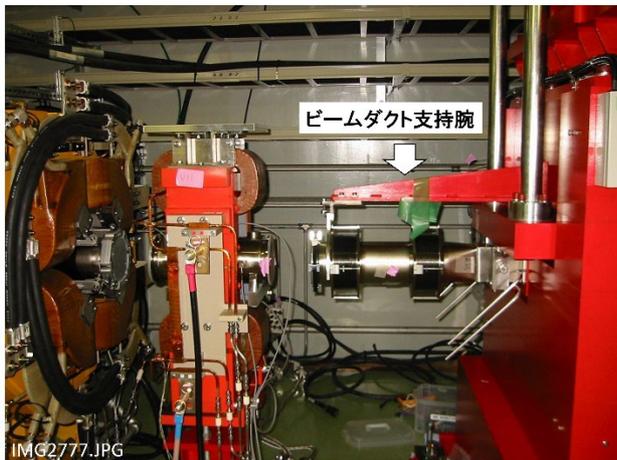


Figure 4: Beam duct support arm.

増することから、遮蔽体前面の配電盤もサイズアップしている。配電盤固定用のネジ穴も開け直すことはできないので、配電盤の方に追加の取り付け穴を空けることで対応した。

5. 結論

5.1 遮蔽体再利用のメリット

MR コリメータシステムの、現時点での最終形となる 7 台体制の完成は一部部品の遅れから 2024 年以降になる見込みであるが、そのうちの 3 台について 2020 年に 2 台、2022 年に 1 台の四軸コリメータを製作する際、2014 年にトラブルによりラインアウトした二軸コリメータの本体遮蔽体を再利用した。近年材料費、製作加工費が大幅に値上げする中、相応のコストダウンが実現できたと考える。ここでいうコストには四軸コリメータユニットの製作コストに加えて、放射化鉄として将来必要となるであった遮蔽体の処分費用が含まれる。放射化した鉄遮蔽体はそのままでは加速器トンネル内で無駄なスペースを占有するうえ、放射性廃棄物として将来処分に大きなコストがかかる。鉄材の再利用は、貴重なトンネル内スペースの確保に資するとともに廃棄物削減による費用面、環境面でのメリットも大きい。

5.2 残存鉄材

再利用可能な二軸コリメータの鉄遮蔽体はもう一組あるが、偏向電磁石下の空きスペースに収納しており、とりあえず許容範囲内である。残留放射線量は下がっており、将来において利用されることもあると思われる。

参考文献

- [1] M. J. Shirakata *et al.*, “New Arrangement of Collimators of J-PARC Main Ring”, THAM4Y01, HB2016, Malmö, Sweden, July. 3-8, 2016, pp. 543-547.
- [2] M. Shirakata, Y. Sato, “J-PARC MR におけるビームコリメータの 4 軸化とビームロス応答”, WEP083, PASJ2017, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 1077-1080.
- [3] M. Shirakata, “J-PARC MR における反跳中性子防護壁の検討”, WEOL07, PASJ2016, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp. 213-217.