

J-PARC 主リングのビームコリメータ 7 台体制

BEAM COLLIMATOR SYSTEM WHICH CONSISTS OF SEVEN UNITS IN J-PARC MAIN RING

白形政司^{#, A)}, 高野淳平^{A)}, 門脇琴美^{A)}

Masashi Shirakata^{#, A)}, Junpei Takano^{A)}, Kotomi Kadowaki^{A)}

^{A)} KEK/J-PARC

Abstract

At the J-PARC high-intensity proton accelerator facility in Tokai, Ibaraki Prefecture, beam collimators are installed in the beam transport lines and each accelerator ring to improve the proton beam quality. At the time of construction, the required beam loss capacity of the main ring (MR) beam collimator was 450 W. Due to the increasing beam intensity, the requirement is eventually increased to 3.5 kW. When the beam collimator physically removes the halo component of the beam, a large amount of high-energy γ -rays and neutron rays are emitted into the surroundings and must therefore be properly shielded using steel or concrete. The structure of the tunnel limits the maximum capacity per beam loss point to 500 W, so seven single-pass collimators are lined up to cope. The replacement of the collimators started in 2012 and has now almost reached the final form. The MR collimator system consists of two different types due to its historical background, and the control system is also divided into two parts. Thereat the overall configuration is summarized in this report.

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各加速器リングにビームコリメータを設置している。建設当初、主リング(MR)のビームコリメータに要求されたビームロス容量は 450 W であったが、ビーム強度増強のため必要量は最終的に 3.5 kW まで上昇した。ビームコリメータはビームのハロー成分を物理的に取り除く際、多量の高エネルギー γ 線、中性子線を周囲に放射するため、鉄やコンクリートを使って適切に遮蔽を行う必要がある。

トンネルの構造からビームロス一箇所あたりの最大容量が 500 W に制限されるため、シングルパス型のコリメータを 7 台並べることで 3.5 kW に対応する。2012 年からシングルパス型へのコリメータ置き換えを開始し、この度ほぼ最終形となった。MR コリメータシステムは歴史的経緯から二種類のコリメータ(2 軸型と 4 軸型)で構成されており、制御系もふたつに分かれているので、全体の構成をとりまとめて報告しておく。

2. MR ビームコリメータ

2.1 MR ビームコリメータの変遷

J-PARC MR で当初採用されたビームコリメータの形式は、英国 RAL の ISIS で用いられていた散乱体と吸収体による複合型[1]で、ビームロス容量は 450 W に設定されていた。これはビーム外周部に存在するハロー成分に 1 mm 厚程度の薄い金属を用いて散乱を与え、ビームコアから十分に離してから厚い金属に吸収させるという手法である。位相空間で見たビームハロー除去の様子を

Fig. 1 に示す。この方式の利点は、散乱体、吸収体である jaw の冷却が容易なことである。散乱体は薄いのでビームのエネルギーロスがほとんど無いいため、そもそもの発熱量が少ない。また、吸収体は空間的に広がったビームハローを受けるため、熱の集中が起こらない。J-PARC MR では水平方向、鉛直方向を一セットにまとめたコリメータユニットを製作し Fig. 1 の様に配置した。一組の散乱体ユニットと二組の吸収体ユニットがセットで、それぞれ Col-1, Col-2, Col-3 と呼んだ。

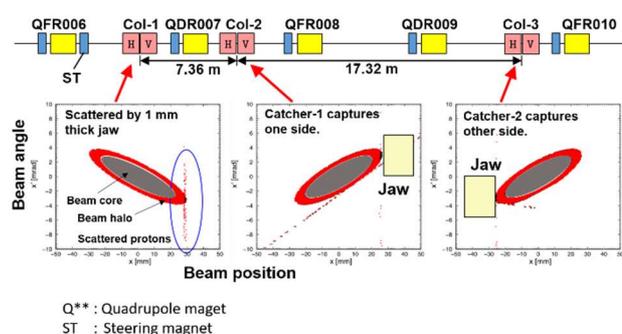


Figure 1: Schematic Diagram of the Scraper-Catcher Type of Beam Halo Removal System.

MR の大強度化に伴い必要とされるビームロス容量は 2 kW, 3.5 kW と増えていった。MR トンネルの構造上の制限から複合型で実現できるビームロス容量は一セットを増設して二セット 2 kW が限度であったため、2012 年から吸収体を直接ビームに寄せてハロー成分を削り取るシングルパス方式によるハロー除去の試験を開始し、それ以後全数シングルパス型への置き換えが進むこととなった。シングルパス型コリメータをリング型加速器で使用する際にはビームによる jaw の破損対策と除熱が問題

[#] masashi.shirakata@kek.jp

となるが、KEKB や CERN-LHC でもシングルパス型のコリメータは採用[2]されている。世界のリング型ハドロン加速器で採用されているビームコリメータの状況を Table 1 にまとめる。なお、J-PARC RCS では複合型が採用されている。

Table 1: Beam Collimators in Ring Accelerators

J-PARC RCS	複合型
J-PARC MR	シングルパス型
CERN LHC	多段式シングルパス型
	2018 年から TCTW (Target Collimator Tertiary Wire)等の新方式も導入
ORNL SNS	複合型
RAL ISIS	複合型
GSI FAIR	複合型+Dynamic Vacuum
ESS-AR	多段式シングルパス型

MR コリメータシステムのシングルパス型への置き換えは、2012 年に散乱体であった最上流のコリメータ一台 (Col-1)を二台のシングルパス型コリメータ (Col-A, Col-B) に交換することから始まった。同時に吸収体であった下流の二台のコリメータ (Col-2, 3)も、シングルパス型コリメータとして直接ビームハローを除去するような運用に変えた。Col-A, B はひとつのユニットでビームの水平鉛直両方向のハローを除去するため、jaw は L 字型をしている。タンタル製で長さ 300 mm、厚さ 10 mm、幅 75 mm の形状を持ち、jaw 表面に傾斜は持たせていない。また、Col-2, 3 の jaw もタンタル製で長さ 250 mm、厚さ 10 mm、幅 80 mm で、同じく傾斜は持たせていない。2012 年秋から 2013 年春にかけての試験運用で、シングルパス型での運用に大きな問題は無いことが実証され、全体の置き換えが決定した。MR コリメータ 7 台の配置を Fig. 2 に示す。設置スペースとしては 8 台分あるが、Col-E を欠番としている。また、Col-H 下流には実験台を設け、複合放射線環境下の照射試験場として利用している。

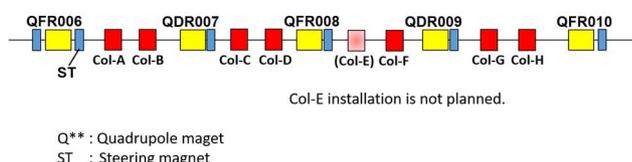


Figure 2: Layout of Seven Collimator Units in J-PARC MR.

2.2 コリメータの四軸化

2014 年までは jaw が上下左右に移動するだけの二軸コリメータを使用していたが、jaw 長を 500 mm に伸ばす際に jaw の傾きをビームエンベロープに沿わせる事が出来るよう、鉛直軸周りの回転とビーム方向の傾斜を調節

可能な四軸コリメータを開発した。Jaw の傾きをビームエンベロープに沿わせることで、二次粒子の下流への漏洩を最小化することができる[3,4]。Col-C, D, F, G, H が四軸コリメータであり、これらはタングステン製の jaw を採用している。Figure 3 に、ビームダクトと内蔵する jaw の寸法を示す。タングステン jaw はタンタル jaw とは異なり、100 mm 長のブロックで構成される。そのため各ブロック間に 1 mm のチタン材の隙間が存在し、jaw 部の全長は 504 mm となる。Jaw の厚さにはビームエンベロープに沿って 1.5 mm の傾きを持たせている。

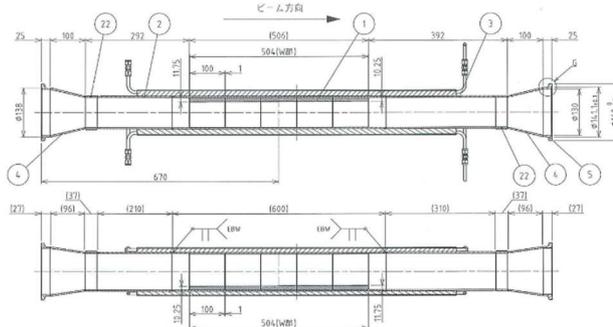


Figure 3: Beamduct Design for 4-axis Collimator.

Figure 4 に四軸コリメータの方向定義を示す。MR のリング内側から外側に向けて x 軸をとり、鉛直上向きに z 軸をとる。Jaw の平行移動では、この座標軸方向がプラスの向きとなる。この時、y 軸はビーム進行方向を指す。回転 θ と傾き ϕ はそれぞれ z 軸、x 軸に対して右ネジの進行方向をプラスとしている。それぞれの移動において、ステップモーターの回転方向は x, z, θ については時計回り (CW)、傾き ϕ についてはのみ反時計回り (CCW) がプラス方向への移動を与える。[†]

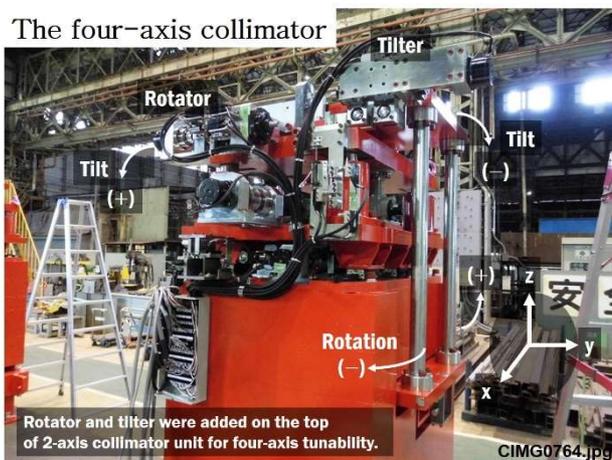


Figure 4: Definition of Collimator Axes.

ここでの軸方向の定義は jaw の取り付け方を表す際にも用いられており、ビームダクト内で jaw がリング外側ある

[†] このため、2017 年頃の報告資料には、傾き ϕ について定義が逆になっているものがある。

いは上側に取り付けてあるものをプラスと呼んでいる。Jaw の取り付け方は、水平方向、鉛直方向ともにプラス(+,+)かマイナスマイナス(-,-)のどちらかしかない。Col-A, B, D, G はプラスプラスのコリメータであり、Col-C, F, H はマイナスマイナスのコリメータである。Table 2 に状況をまとめる。タングステン jaw は前述の通り途中に 1 mm 幅のチタン層が四箇所入っているため、実際は 504 mm 長となっている。タンタルは東京電解株式会社、タングステン株式会社アライドマテリアルの製品 (HM-185 の W 含有率は 97%) である。

Table 2: MR Collimator Specifications

Name	axes	polarity	Jaw length [mm]	Material
Col-A	2	+,+	300	Tantalum (pure)
Col-B	2	+,+	300	Tantalum (pure)
Col-C	4	-,-	500 (504)	Tungsten (HM-185)
Col-D	4	+,+	500 (504)	Tungsten (HM-185)
Col-F	4	-,-	500 (504)	Tungsten (HM-185)
Col-G	4	+,+	500 (504)	Tungsten (HM-185)
Col-H	4	-,-	500 (504)	Tungsten (HM-185)

四軸コリメータではビーム入射路のコリメータシステム [5]と同じく、jaw 原点位置検出スイッチを持たせた。Jaw 位置は基本的にポテンショメータとステッピングモーターのパルス数で管理するが、校正が必要になった際に役に立つ。Figure 5 に例として、二軸コリメータと四軸コリメータの鉛直方向直線移動動作リミットスイッチの取り付け状況を示す。四軸コリメータでは、原点検出用にスイッチがひとつ多くついている。

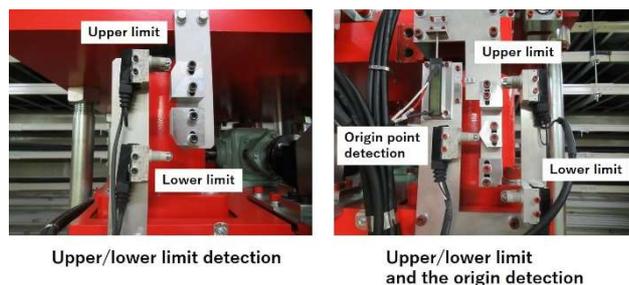


Figure 5: Limit Switches for Up-Down Motion.

2.3 マルチカップリング

シングルパス型コリメータの導入に当たっては、jaw が破損するリスクを避けられないためメンテナンス性を上げるための工夫がなされている。陽子加速器のコリメータ周

辺では高い残留放射線量が予想されることから、コリメータが何らかの不具合を起こした際に現場で修理対応する事は困難である。解決策は、故障したユニットを速やかに現場から撤去し、代わりとなるユニットを再び速やかに設置することである。これを実現するため、Col-A 以降のシングルパス型コリメータはすべて Fig. 6 に示す様に台座と本体にわかれ、LM ガイドレールを用いて台座と換装台車間で本体を人力でも容易に出し入れできる構造とした。その際、Fig. 7 の電気配線と冷却水配管を同時に着脱可能な仏スープリ社製マルチカップリングシステムを導入した。電気配線には 0.75~1.25sq のケーブルに対応するφ 1.6 mm ピンコンタクト(S01038008)とソケットコンタクト(S00819008)、水配管にはφ 6 mm の SPH06 コネクタを使用している。これらにより、20 分程度の作業時間でコリメータ本体のラインアウトが可能である。Col-A, B ではすでに使用年数が 10 年になるが、現在までに水漏れなどのトラブルは一度も発生していない。なお、四軸コリメータではマルチカップリングの電気コネクタを 18 極から 48 極のものに変更したため、二軸コリメータと四軸コリメータ間の互換性はない。



Figure 6: Rapid Exchangeable Mechanism.

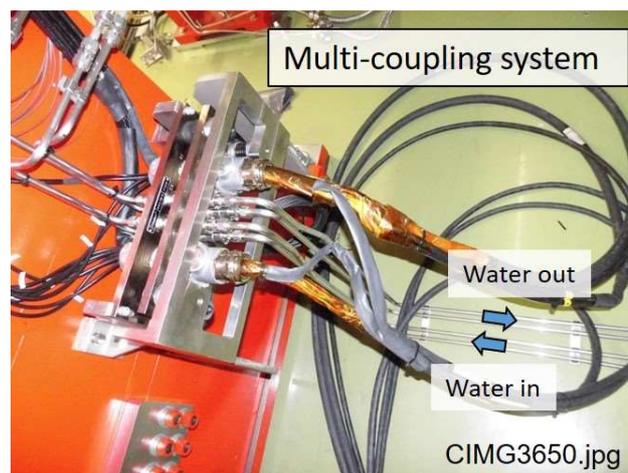


Figure 7: Multi-coupling System for Electricity and Cooling Water.

2.4 ポリエチレン遮蔽体

最上流に位置する Col-A から後方散乱してくる中性子がトンネルの天井に反射してビームライン上流部の入射キッカー容器の上面を放射化する問題が指摘されていた。これについては、効率的に中性子を遮蔽しつつ遮蔽体本体が放射化しないポリエチレン遮蔽体の導入を提案し[6]、2020年の夏に実際に導入した。Figure 8 にポリエチレン遮蔽体の設置状況を示す。Col-A 周辺は残留放射線量が通常 0.2 mSv/h 程度あるため作業時間に強い制約があるが、アルミ製フレームの採用やポリエチレンは 5 cm 厚のブロック構造とするなど各部を軽量化することで、クレーンやチェーンブロックを使用することなく手作業により短時間で撤去、再設置が可能となっている。Col-A の上流側ビームダクトに近接する部分でポリエチレンの変色が見られ、中性子をうまく遮蔽していると考えられる。この様なポリエチレンを利用した補助遮蔽は、トンネルの壁が薄い部分を保護する目的で Col-F の下流通路側にも設置されている。



Figure 8: Polyethylene Shield for the Protection of Beam Injection Kickers.

3. 制御システム

3.1 制御盤と中継盤

MR コリメータでは jaw の変位に山洋電機社製 5 相ステッピングモーター 103F8581-7041 とモータードライバ FS1W075P00 の組み合わせを採用している。モータードライバは放射線に対して非常に脆弱なため主トンネル内には置けないが、モーターとドライバ間の距離には制限があるのであまり遠く離すことも出来ない。この問題を解決するため、Fig. 9 の様に第一電源棟サブトンネル内に中継盤を設けている。中継盤はモータードライバの他にポテンシオメータ信号変換器、PLC 制御モジュールを内蔵し、jaw の位置検出やリミットスイッチによるオーバーラン防止などを中継盤内で閉じて行っている。これにより、制御盤を設置する第一電源棟から現場へのケーブルを電力線、制御線各1本ずつと大変少なくすることができた。

制御の大元には、第一電源棟ローカル制御室内の 19 インチラックに 4U サイズの制御盤(二軸コリメータ用と四軸コリメータ用のふたつがある)を設置している。制御盤は、主電源スイッチ、中継盤用電源供給スイッチ、Remote/Local 切り替えボタン、PLC 制御システムとローカル操作用タッチパネルで構成される。システムの電力供給は、単相 200V(単相 100V でも動作可能)の系統である。二軸コリメータでは、制御盤から中継盤への電力線に 3C-2sq ケーブルを一本、制御線には KMC12C01 ケーブル(FA-Link ケーブル)を一本使用している。また四軸コリメータでは、制御盤から中継盤への電力線に 3C-3.5sq ケーブルを一本、制御線には 2P-0.75sq ケーブルを一本使用している。中継盤は太陽計測株式会社によって製品化(製品名:ステッピングモーターコントローラ中継 BOX ST-FGRB-004)されているが、現在の社会情勢から横河電機社製 PLC モジュールと日本航空電子社製丸形コネクタ N/MS-A/B シリーズ(他社製の互換品を含む)が入手困難となっており、追加調達が難しくなっている。

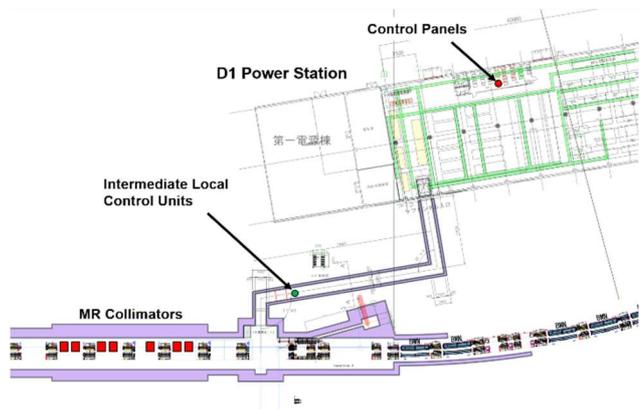


Figure 9: Layout of Collimator Control Units.

3.2 二つの制御系統

MR コリメータは、歴史的経緯から制御系が二つに分かれている。二軸コリメータ Col-A, Col-B の制御系と四軸コリメータ Col-C, Col-D, Col-F, Col-G, Col-H の制御系である。どちらも第一電源棟のローカル制御室内に設置された制御盤から、サブトンネル内の中継盤に指令を出す構成になっている。二軸コリメータ中継盤は、一台の中継盤で Col-A, Col-B 両方を制御する。一方四軸コリメータ中継盤は、中継盤一台がコリメータ一台を制御し、中継盤を数珠つなぎにすることで複数のコリメータを制御する。この構成図を Fig. 10 に示す。中継盤同士の接続も、電力線と制御線各一本である。二軸コリメータ中継盤 ILCU 2a は 12 個のモータードライバを内蔵しているが、現在はそのうちの 4 つのみを使用している。

3.3 PLC 通信モジュールの代替わり

制御盤と中継盤間の通信は横河電機社製 FA Link H モジュール F3LP02-0N を使用して行っているが、この製品は 2019 年に廃番となり、翌 2020 年にはサポートも終

了した。MR コリメータシステムでは制御盤 2 台、2 軸コリメータ中継盤 1 台、4 軸コリメータ中継盤 5 台で計 8 個の F3LP02-0N を使用している。後継である F3LP32-0N は下位互換性を有していないため、現在は手持ちの F3LP02-0N をメーカーに支給することで古いモジュールでの統一を実現しているが、いずれすべてを F3LP32-0N に総入れ替えする必要がある。幸いソフトウェアは上位互換性があるため単にモジュールの差し替えだけで事足りるはずであるが、2020 年から続く品不足により現在、F3LP32-0N の入荷見通しはまったく立たない状況である。

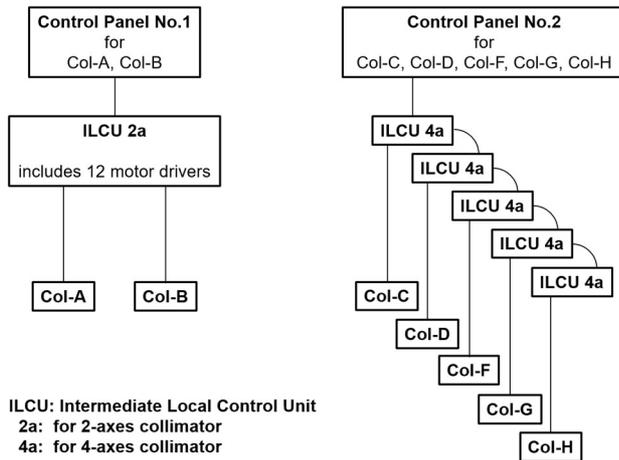


Figure 10: Block Diagram of Collimator Control System.

4. まとめ

J-PARC MR は 2012 年からシングルパス型ビームコリメータ 7 台体制を構築してきたが、2023 年の Col-F インストールによりついに最終形に到達する。この間様々な R&D が進み

- シングルパス型コリメータの可用性と信頼性の確立
- Jaw 駆動機構の四軸化
- マルチカップリングシステムの耐久性の実証
- コリメータにおけるビームロスを積極的に用いた複合放射線環境による照射試験場の開発

などの有用な技術を確立できた。MR コリメータシステムは、2022 年 10 月時点で 4 台体制から 6 台体制となり、11 月からの MR 大強度陽子ビーム利用運転に役立つものと考えられる。

参考文献

- [1] 日本加速器学会, “加速器ハンドブック”, April 2018.
- [2] F-X. Nuiy et al., “DESIGN AND PROTOTYPING OF NEW CERN COLLIMATORS IN THE FRAMEWORK OF THE LHC INJECTOR UPGRADE (LIU) PROJECT AND THE HIGH-LUMINOSITY LHC (HL-LHC) PROJECT”, Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, May. 14-19, 2017, pp. 80-83;

- <http://accelconf.web.cern.ch/IPAC17/papers/mopab006.pdf>
- [3] M. Shirakata et al., “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”, Proceedings of PASJ14, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 1077-1080; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/WEPO/WEPO83.pdf
 - [4] M. Shirakata et al., “J-PARC 3-50BT ビームコリメーションの現状”, Proceedings of PASJ9, Osaka, Japan, Aug. 8-11, 2012, pp. 645-648; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/WEPS/WEPS092.pdf
 - [5] M. J. Shirakata et al., “UPGRADE OF RADIATION SHIELD FOR BT COLLIMATORS”, Proceedings of IPAC2010, Kyoto, Japan, May. 23-28, 2010, pp. 4246-4248; <http://accelconf.web.cern.ch/IPAC10/papers/thpec081.pdf>
 - [6] M. Shirakata, “J-PARC MR における反跳中性子防護壁の検討”, Proceedings of PASJ13, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp. 213-217; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2016/proceedings/PDF/WEOL/WEOL07.pdf