

## J-PARC MR のコリメータ・ジョーの開発 DEVELOPMENT OF COLLIMATOR JAW OF J-PARC MR

魚田雅彦<sup>#</sup>, 堀洋一郎, 白形政司

Masahiko Uota<sup>#</sup>, Yoichiro Hori, Masashi Shirakata

High Energy Accelerator Research Organization

### Abstract

The jaw of beam collimator in J-PARC MR has been developed and renovated. At first, scatterer-catcher type collimator-system are used. The acceptable loss power was only 450 W. The jaw material was tantalum. Then the scatterer was changed to 2 compact collimators in 2012 because of the more acceptable 2 kW beam loss. In this system, the jaw plate was changed to L-shape block. In 2013, the collimator-2 are thrown away and 4 new collimators were installed. Then total 7 collimators and 3.5 kW beam loss was acceptable. The material of jaw was changed to tungsten. The surface of jaw is tilted in parallel to a beam envelope. In 2015, jaw duct and double-bellows ducts were separated with the flanges for simplicity. In future, a renaissance-scatterer will be installed to upper area of the first collimator.

### 1. はじめに

大強度陽子加速器J-PARCの主リングシンクロトロン(MR)は3回対称のラティスであり、3つの直線部はそれぞれ、A:入射及びコリメータ、B:遅い取り出し、C:加速と速い取り出しの役割を担う。直線部Aのビーム整形用のコリメータシステムは、入射キッカーの下流のQ電磁石以降の4つのドリフトスペースに置かれ、当初、全体の許容ロス量450Wの散乱・回収型が採用された[1]が、ビーム強度増強に伴い下流部への取りこぼしや全周に点在するアパーチャの狭い特定の機器で放射化が無視できない程度になりさらに進行することが予測されたため、2012年度に初段の散乱用機器を2台の回収用スクレーパへ変え4台全てを500Wのスクレーパとした計2kWの1-pass型へと変更した。その後ジョーの材質及び形状の改善と7台3.5kWへの増強(2013年)、ジョーのビームに対する位置調整軸として従来の平行運動に加え回転運動の採用による5台2.5kWへの改良(2015年)と変更が加えられ続、さらに散乱・回収型への回帰の試験と変更が加えられ続けている。このコリメータシステムの真空ダクトは、ジョーを真空内壁に貼り付けた角形断面のダクトで、ジョーの横方向の位置調整はダクトごと動かすことで実現している。移動距離が±10~30 mm 程度必要なため、角形ダクトの前後にはそれぞれ2つのベローズからなる横ずれ変位機構が置かれている。このコリメータ・ジョーを含むダクトの開発・進展状況を述べる。

### 2. コリメータの基本構成と構造の変遷

#### 2.1 ジョー

ここではジョーとは、積極的に周回ビームのハロー部分を衝突させ削り取る物体を指す。我々はその材質として高密度の金属(初期はタンタル、後の機種からはタングステン)を採用している。ジョーを含むコリメータダクトは高放射線環境下であるのでチタンとした。ジョーの位置調整に関しては、ジョーだけを真空槽内で動かす構造は、

移動機構がジョーに近くなり高放射線に曝されるため故障や交換のメンテナンスを考慮し採用せず、ジョーを含むダクトそのものを横方向に移動することとした。ジョーダクトの形状は、Ti板とジョーをHIP接合し、これをハローを削りたい辺(±水平 and/or ±垂直)とする角ダクトとした。ジョーは直接ハローに当てたいので真空側である。ジョーダクトの寸法は、ジョー部分の断面でアクセプタンスが  $81 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$  を確保するように決定した。

ジョーダクトは横方向に±15 mm 以上移動するので、入口出口フランジを固定点としジョーダクトとの間それぞれに横ずれを吸収するダブルベローズを設けた構造がダクトの基本構成となる。ダブルベローズの2つのベローズを繋ぐパイプやフランジ開口部は、もともとコリメータ部のβ関数が他の場所に比べ小さいことから、通常寸法である内径 130 mm で十分である。また、ベローズ部分はビームがベローズの窪みを見ないよう櫛状のフィンガーコンタクトによるシールドが施されている。

#### 2.2 コリメータダクト

##### 2.2.1 第1世代用(Col-1~3)

機械設計は3-50BTと同様に考えられ、MRのライン高が1 m で3-50BTより20 cm 低いことから移動機構が1軸しか取れなかったためH用、V用にジョーダクトが分かれていた。それぞれをダブルベローズで繋ぐため、1機のコリメータは図1のように両端フランジ間長さが 3300 mm と長大になった上にベローズ部品が6個ある節点の多いダクトになった。

3台のコリメータは Col-1 が散乱用(H用ジョーは外周側(+)に置かれ、V用ジョーは上側(+)に置かれた)で、外向きに散乱された粒子は位相で 10~20 度下流の Col-2 にて+側に置かれたジョーによって、また内向きに散乱された粒子は位相 160~170 度下流の Col-3 で-側に置

かれたジョーによって回収するという役割がある。ジョーの形状は Col-1 のみ最上流部に高さ 2 mm 厚さ 1 mm の爪が突き出た長さ 100 mm、残りは長さ 250 mm の板状のタンタルである(図2)。この散乱・回収方式は運転開始の2008年から2011年3月まで使用された。

<sup>#</sup> masahiko.uota@kek.jp

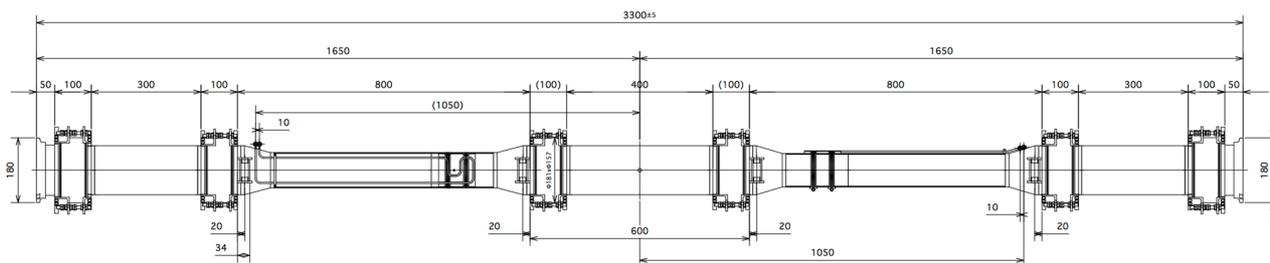


Figure 1: Collimator “Col-1”(2008–2011). The jaw for H is in left side and that for V is in right side.

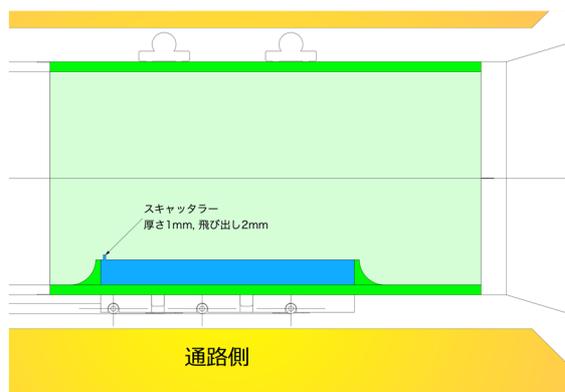


Figure 2: Scatterer’s structure. Blue block denotes tantalum jaw and green is titanium duct.

### 2.2.2 第2世代用(Col-A,B)

初期のコリメータ部でロス可能な量は 450 W しかなかったが、ビーム強度が上昇した時に全く対応出来ないのでコリメータ1台ごとに500Wのロスを受け入れるようにした。それと同時に、Col-1 は結局散乱させるためだけでコリメータでは無かったため積極的にロスさせられないことから、2012年の夏に Col-1 を撤去し、代わりにコンパクト化した岡持ち型コリメータ Col-A 及び B が開発[2]・設置され、計4台2kW体制(ジョーの並びは++++)になった。

Col-A, B では、移動機構が上部に移って2軸以上取れるようになったため、タンタル製のジョーは角ダクトの2辺に貼り付いたHV両用のL字型を採用した(図3)。長さを 300 mm に伸ばし、2次粒子散乱の分布を考慮し中央から上流側に 50 mm シフトさせ鉄シールドの中で上流に位置している。コリメータダクトの全長は移動部分が1つの角ダクトしかないので 2200 mm と短くなった。ただし、汎用性を考慮し A と B で同型としたので、接続用のベローズダクトを介して A と B が並ぶと、2つのコリメータの

間にベローズ部品が5個も並ぶ極めて無駄な構成になってしまった。

### 2.2.3 Col-C~F

2012年度までのさらに増すビーム強度の運転の結果、アーク部のアーチャがテーパ状に絞られる場所や、コリメータエリア下流直線部、さらにその下流のアークAの半分200mほどの領域での放射化が進行した[3]。そこで、アーク部のダクトのテーパ構造を無くしアーチャを広げる[4]と共に、さらにコリメータでの受け入れロスを回収効率よく増強するため、Col-2 と下流のドリフトスペースの代わりに Col-C~F を設置し計7台3.5kW体制とした。STRUCTによるシミュレーション結果から、ジョーの材質をタングステンへ、また長さを 500 mm へ変更し、削る向きは Col-3 が元々であることを束縛条件に最も回収効率が高い++++とした[5]。

さらにビームエンベロープに沿わせたほうが実効的な厚みが増し回収能力が上昇するので、ジョーの厚みを 3 mrad 傾斜させる加工を行った(図4)。実際の製作においては、タングステン は 100 mm ごとブロックに分割し、H用・V用に独立にチタン板にHIP接合した後それぞれを機械加工によって傾斜面を形成していったが、内部応力の開放による変形を補正しつつ少しずつ加工を行うなど相応の試行錯誤を要した。

実際の運転では2014年の3~7月に使用され、傾斜型及び数量増加により他のエリアへの取りこぼしが減りロスの局在化に貢献した[6]が、運転休止期間の8月から真空ダクトのベローズ受けのフランジ部分で真空リークが複数箇所発生したため、溶接不良と判断し残念ながら全台を撤去し、2012年度の4台2kW体制に戻ることになった。

### 2.2.4 第3世代用新 Col-C 及び新 Col-D

2015年には第3世代コリメータが開発された。移動機構として従来の平行移動の他に回転運動機構を設け、4

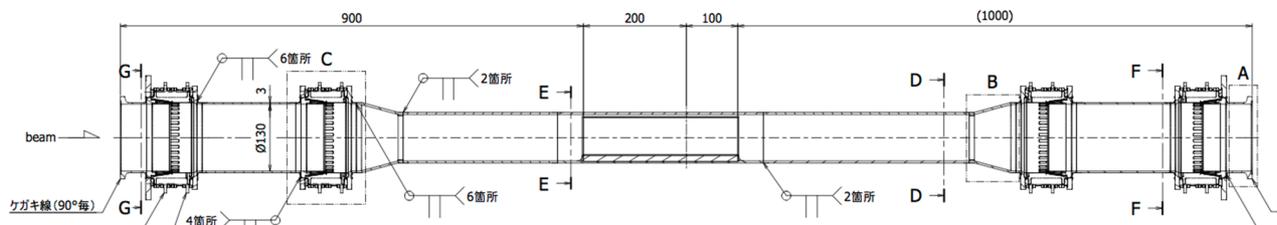


Figure 3: Col-A or Col-B duct(2012). The tantalum jaw is L-shaped.

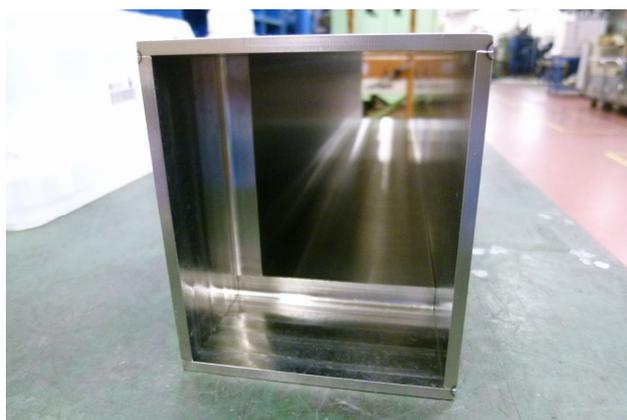


Figure 4: Col-C-F's L-shaped tungsten jaw structure are shown. Each horizontal plate and vertical plate was joined with titanium by HIP, then the surface inclined by cutting, then titanium plates were welded to a square duct.

軸制御によりH面V面それぞれの位置及び傾斜を独立に制御できるようになり、Col-2の位置に新Col-CとDを設置しCol-A~DとCol-3による5台2.5kW体制とすることになった。そこで、旧Col-C~Fの反省を踏まえ、ベローズ部分が単純化するよう、2台のコリメータだけのダクトとその前中後に3つのダブルベローズダクトをフランジで接続することにした(図5)。コリメータダクトのアーパチャはtuneや $\beta$ 関数の変更に伴ってビームの包絡線が多少変更しても対応するようやや大きめにした。タングステンのジョーは旧C~Fと同様に500mmで3mradの傾斜を持つ。

ダブルベローズダクトに関しては、コリメータの外側の短尺タイプ、CとDの間の長尺タイプで、最大の横変位は37.5mm及び75mmを確保することを設計条件とした。これは駆動機構が誤操作や故障によりCとDで反対向きに運動してしまった場合のリミッターでの変位量である。この時ベローズ部の変形角は約6度であり、内部のフィンガーコンタクトについて接触を保ちかつ壊れないよ

うに、内筒をラップ状に開き気味にし、各部の寸法を最大変形時を考慮して注意深く決定した。

ベローズとコリメータダクトがフランジで分離したことで、フランジ脱離・接続作業における作業者の被曝対策が必須となっており、作業用移動式放射線シールド盾などの新たな開発が今後必要である。

### 2.3 スキャッターの復興

ビーム包絡線に沿わせた Col-C, D(及び早期に撤去された E, F)の傾斜型ジョーの有効性ははっきりし、またビーム調整の精密化によってパンチ形状をある程度制御できるようになり、本来シンクロトロンに向いている散乱・回収型への回帰の模索としてスキャッターチェンバをコリメータエリアのさらに上流の入射キッカー直後に設置する案が浮上している。現在ビーム包絡線に傾斜が合っていない Col-A, B は、ジョーの上流(H)及び下流(V)の角から当たり始めるため、積極的なハロー回収のため近づけると散乱しすぎて下流コリメータで回収しきれなくなる、1周(以上)回ったハローがA, Bに当たりロスが増えるなど、実質スキャッター兼用であり均等なロス分布を目指す制御が困難となっている。そこで、Col-A, Bはキャッチャー専用として働いてもらうために Col-A のさらに上流にスキャッターを置く。その試験機を今夏設置し、秋以降のスタディで効果を検証する予定である。

### 3. おわりに

MRのコリメータのジョーとダクトについての開発と発展を俯瞰した。全体の変遷のまとめを図6に、また現在のコリメータエリアの様子を図7に示す。コリメータの改良、調整はロスの局在化による他のエリアの保護の観点で極めて重要であるので、今後もビーム調整によって得られた知見を元に改良を進めていく。

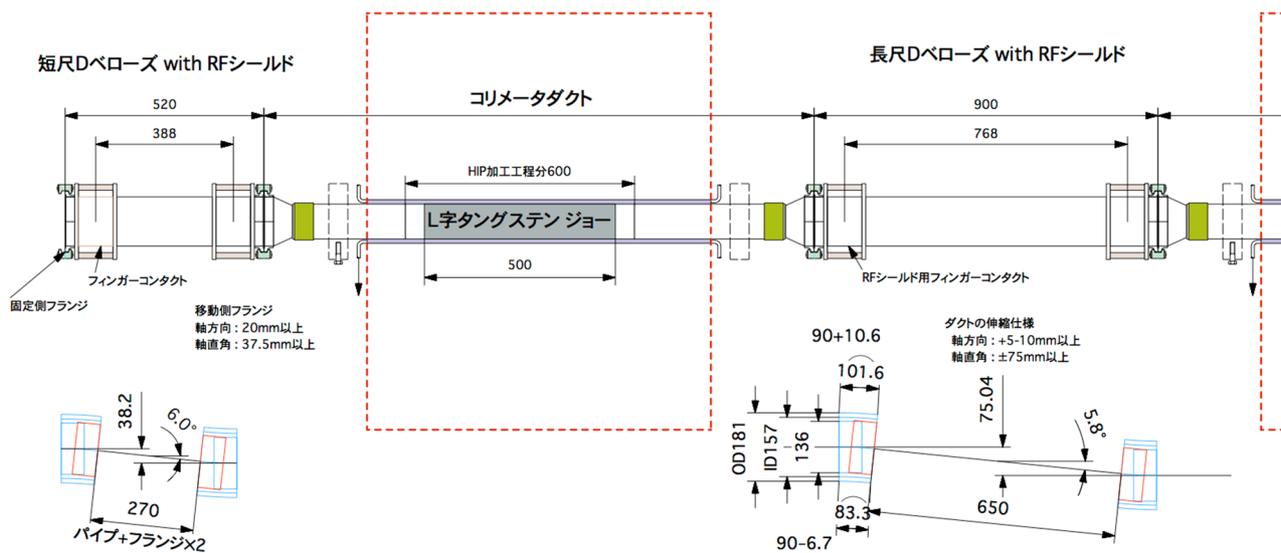


Figure 5: New Col-C and 2 double-bellows ducts(2015). The new Col-D duct is next to the long d-bellows duct.

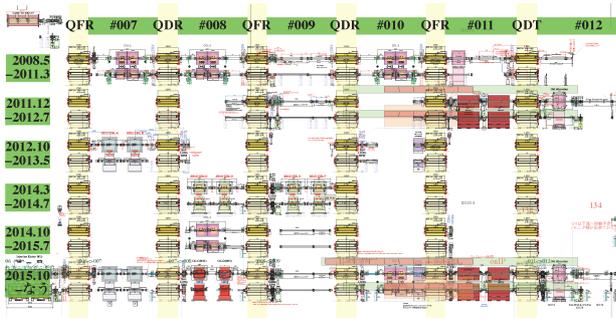


Figure 6: The changes of collimator area.



Figure 7: Collimator area 2016 Summer.

## 参考文献

- [1] M. Tomizawa *et al.*, Proceedings of PAC07, TUPAN051, 2007;  
<https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/p07/PAPERS/TUPAN051.PDF>
- [2] M. J. Shirakata *et al.*, Proceedings of IPAC2011, THPS035, 2011;  
<https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2011/papers/thps035.pdf>
- [3] K. Satou *et al.*, Proceedings of PASJ10, SAP084, 2013;  
[http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj10/proceedings/PDF/SAP0/SAP084.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj10/proceedings/PDF/SAP0/SAP084.pdf)
- [4] M. Uota *et al.*, Proceedings of PASJ2015, THP118, 2015;  
[http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP1/THP118.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP1/THP118.pdf)
- [5] J. Takano *et al.*, Proceedings of PASJ9, WEPS018, 2012;  
[http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj9/proceedings/PDF/WEPS/WEPS018.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/WEPS/WEPS018.pdf)
- [6] Y. Sato *et al.*, Proceedings of PASJ2014, MOOM01, 2014;  
[http://pasj.jp/web\\_publish/pasj2014/proceedings/PDF/MOOM/MOOM01.pdf](http://pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/MOOM/MOOM01.pdf)