

J-PARC 3 GeV シンクロトロンビームコリメータの故障原因究明作業

A FAILURE INVESTIGATION OF THE BEAM COLLIMATOR SYSTEM IN THE J-PARC 3 GEV RAPID CYCLING SYNCHROTRON

岡部晃大^{#,A)}, 山本風海^{A)}, 神谷潤一郎^{A)}, 高柳智弘^{A)}, 山本昌亘^{A)}, 吉本政弘^{A)}, 竹田修^{B)}, 堀野光喜^{A)}, 植野智晶^{A)}, 柳橋亨^{B)}, 武石健一^{A)}, 滑川裕矢^{A)}, 引地裕輔^{B)}, 加藤新一^{A)}, 高橋博樹^{A)}
Kota Okabe^{#,A)}, Kazami Yamamoto^{A)}, Junichiro Kamiya^{A)}, Tomohiro Takayanagi^{A)}, Masanobu Yamamoto^{A)}, Masahiro Yoshimoto^{A)}, Osamu Takeda^{B)}, Koki Horino^{A)}, Tomoaki Ueno^{A)}, Toru Yanagibashi^{B)}, Kenichi Takeishi^{A)}, Yuya Namekawa^{A)}, Yusuke Hikichi^{B)}, Shinichi Kato^{A)}, Hiroki Takahashi^{A)}

^{A)} Accelerator Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{B)} Nippon Advanced Technology Co.,Ltd.

Abstract

The most important issue is to reduce the uncontrolled beam loss in the high intensity hadron accelerator such as J-PARC proton accelerators. The J-PARC 3GeV Synchrotron (RCS) has a collimator system which narrows a halo of high intensity beam in the RCS. After startup of RCS in 2007, the collimator system of the RCS worked well. However, in April 2016, vacuum leakage at the collimator system occurred during the maintenance operation. When the failure collimator was detached from a beam line, it was identified that the collimator block inside the vacuum chamber had a residual dose of 40 mSv/h. To investigate a cause of the failure, we took apart iron shields of the collimator reducing exposed dose of workers. As a result of investigation work, we succeeded to identify the cause of the vacuum leakage failure. And we were able to reduce the worker dose to less than 50 μ Sv during the failure investigation work of the detached collimator. In this paper, we report the failure investigation of the beam collimator system in the RCS.

1. 序論

1.1 大強度陽子加速器におけるビームロスの抑制

J-PARC 3 GeV シンクロトロン(RCS)は、物質生命科学実験施設と主リングシンクロトロンに、最大 1 MW の大強度陽子ビームを供給している[1]。このような大強度陽子加速器では、加速過程におけるビーム損失を抑制し、メンテナンス時の残留放射線量を低減することは、作業員の被ばく線量を抑えて機器のメンテナンス性を担保すること、及び機器の故障率を下げるうえでも非常に重要である。ビームロス抑制の一つの指標として、所謂「Hands-on-maintenance」の条件がある。すなわち、ビームライン 1 m あたり 1 W のロス(1 W/m)量に抑える事が指標となる[2]。RCS ではビームロスの最小化を目指したビーム調整を行ってきたが、その一方で、大強度ビームは粒子間クーロン相互作用に起因する空間電荷効果と呼ばれる様々なビーム不安定性が顕在化する。さらに、RCS では荷電変換入射方式を採用しており、荷電変換膜による入射、周回ビームの散乱の影響によるビームロスは原理的に無くす事はできない。

従って、RCS には、ビーム損失を局所化し、機器の放射化を抑制するためにビームコリメータが設置されている (Fig. 1)。

1.2 RCS コリメータシステムの概要

RCS 用コリメータシステムとしては、2 ステージコリメーションと呼ばれる方式が採用されている[3]。このコリメータシステムは、1つのビームハロー散乱体部と5つの散乱したハローを回収する吸収体部とで構成されている。

散乱体部は他の加速器真空容器と比べて駆動装置にて口径を狭められるように設計されており、加速中に大振幅を持ったビームのハロー部はすべてコリメータ散乱体で散乱され、吸収体にて回収される設計となっている。

コリメータ散乱体によって散乱されたハロー粒子は、位相空間内において角度方向に広がる。その後、ベータatron位相が進むにつれて位置の変位が増大することによってビームコア部と分離され、下流に置かれたコリメータ吸収体にて吸収される。このため、散乱体からベータatron位相が 180 度進む間にビームロスを局所化させる事ができる。このように、RCS ではビームロスをコリメータに集中させ、他の機器の放射化を抑制するように設計されている。

1.3 コリメータ吸収体の構造

RCS コリメータは最大 4 kW のビームロスを吸収、許容できるように、その遮蔽体が設計された[4]。コリメータ吸収体の構造は、真空容器内部に散乱されたビームを吸収する上下左右 4 つの銅コリメータブロックを配置、ブロックを駆動機構にて動かし、その外側を 300mm の鉄遮蔽、さらにその外を 800mm のコンクリート遮蔽体で覆うハイブリッド構造となっている。これは、遮蔽体の内側を密度が大きくγ線への遮蔽効果の高い鉄、外側を放射化し辛いコンクリートとする事で、特に残留放射線の影響を下げる事を目的としている。この遮蔽体により、コリメータブロックから出てくる放射線量を 1/10000 程度まで低減できるよう設計されている。

1.4 RCS コリメータ吸収体の故障事象

このコリメータシステムは、2007 年の RCS ビーム調整開始以来、ビームロスの局所化に使用され、RCS 加速器機器の放射化を許容範囲に抑えることに成功していた

[#] kota@pos.j-parc.jp

2016/4 Abs.5故障

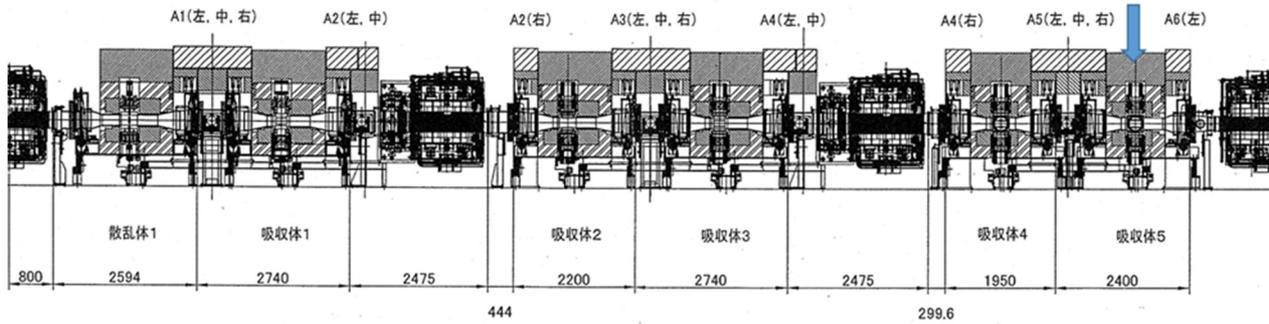


Figure 1: Schematic layout of the RCS collimator system.

[5].ところが、2016年4月の保守期間中に、6台あるコリメータの最下流の一台(abs.5)で真空リークが発生した。その経緯は文献[6]に詳細が記載されている。以下に、文献[6]から故障経緯を抜粋して記載する。

2016年4月5日午前中、コリメータブロック駆動機制御用VME(サブトンネル設置)の不具合対応を実施し、ネットワークハブ、VME制御CPU、VMEモータコントローラボード1枚を交換した。午後からの加速器運転に向けて動作確認を先頭から順次実施したところ、最下流の第5セカンダリーコリメータが、挿入及び引抜リミットまでの復帰動作はするが、任意の位置への移動ができない事が判明した。動作確認のため、数回挿入リミットと引抜リミットへの動作を繰り返したが、任意の位置への移動は相変わらずできなかった。この一連の動作確認の最中に大規模な真空リークが発生し、TMPが停止、コリメータセクションのGVが閉まった。

リーク発生の翌日に、音およびスニファ法によって故障箇所が第5コリメータ吸収体であることが判明した。この第5コリメータをビームラインから離脱して、他のコリメータで真空リークが発生していないことを確認したのち、離脱したコリメータをRCS加速器トンネル内の高放射化物保管室に移送した。コリメータ吸収体は重量物(遮蔽込みでおよそ30t)のため、偏向電磁石用のエアパレットで搬送する必要があり、エアパレットをコリメータ架台下に差し込む際に周辺のコンクリート遮蔽を撤去する必要があった。

コリメータを取り外した後の部分は直管ダクトを接続して、RCS加速器運転が可能な状況にした。その際、SADコードを用いたトラッキングシミュレーションによる評価を行い、故障した最下流のセカンダリーコリメータが無くともその前のコリメータを調整すれば現在のアーク部レベルのポイントロス(停止4時間後で $< 100 \mu\text{Sv/h}$ @コンタクト)が1箇所程度増えるだけで済みそうである、という結果が得られた。

その結果をもとに、速やかに利用運転を継続させるため、まず、4月から6月までの利用運転は直管ダクトで真空をつないだだけの状態で行い、夏季メンテナンス期間以降に本格的な対処をすることとなった。このように遮蔽体を設置せず直管ダクトのみの状態で、今後RCSのビームパワーを挙げた運転を行うと、そのダクトが 10mSv/h を超えて放射化し、保守作業に支障をきたすこと

が予想された。

2. コリメータの故障原因究明作業

2.1 コリメータ改良機の製作に向けて

前章で述べたように、コリメータシステムはRCSの残留線量を抑制するうえで非常に重要な機器であり、RCSの大出力化を目指すにはすみやかに故障したコリメータの代替器を製作する必要がある。ところが、故障したコリメータ、特にコリメータブロック部の表面残留放射線量は 40mSv と高度に放射化していた。そのため、容易には真空リーク発生個所の詳細な場所の特定、及び、故障原因究明のためのコリメータ遮蔽体解体作業が行えない状況にあった。しかし、次年度に改良機の製作、ビームラインへの据え付けを行うには、夏メンテナンス期間中に故障原因を究明し、それに対処した新コリメータの設計を開始しなければならなかった。

2.2 故障したコリメータの状況

故障したコリメータ(abs.5)は遮蔽体が装着された状態でRCS加速器トンネル内の高放射化物保管室に置かれている状態だった。リーク量が大きいと、取り外したコリメータに対して、単体でのリークディテクタを使用したリーク試験ができなかった。さらに、リーク箇所と思われる駆動機構周辺が遮蔽体内のためアクセスもできないことからリーク箇所の特定がすぐにはできない状況にあった。

2.3 コリメータ故障原因究明作業の手順

リーク箇所を特定するためには、故障したコリメータの遮蔽体部分を解体し、駆動部分をあらわにしなければならない。しかし、遮蔽体を解体すると作業区域が高線量化する恐れが高かったため、遮蔽体解体及びリーク箇所特定作業手順の検討が必要となった。Table 1はコリメータ故障原因究明作業の手順をまとめたものである。

故障したコリメータは解体時にクレーン、作業スペースが必要なため、RCS加速器トンネル内の搬入室で行った。作業期間は2週間ほどを予定し、時間経過による残留線量の低減を見込んで夏メンテナンス期間の最後2週間に作業期間を設定した。その際、高線量下での作業が予想されるため、管理区域入域者をコントロールし、不用意に外部業者が立ち入れない状況にして、RCSグループの自営にて作業を行った。

遮蔽体解体作業は、遮蔽体コンクリ部分、及び鉄遮蔽体部を撤去する。その際、遮蔽体上半分の解体は容易に行えるが、下半分の撤去は高度に放射化しているコリメータチェンバー及び駆動部分を持ち上げる必要が生じ、作業手順が複雑化することが予想された。そのため、先ず 4 つあるコリメータ駆動部のうち、上部と左右部のリーク原因究明作業を行い、状況に応じて、下部遮蔽体の撤去作業を行うこととした(Table 1)。

Table 1: Failure Investigation Process of the Collimator System

作業名	作業内容
①解体前準備作業	コリメータ内部の汚染物質スミア、駆動部ギア等部品取り外し、作業前放射線サーベイ
②コリメータの移動	エアパレットを用いて、搬入室に移動。
③遮蔽体解体作業	クレーンを用いて、コリメータ遮蔽体の上半分部分を解体し、駆動部部分をあらわにする
④残留線量サーベイ	リーク箇所特定作業前に、遮蔽体がない状態での作業エリアの線量をサーベイする
⑤リーク箇所究明作業	集音マイクや加圧スヌープ法にて、真空リーク箇所を特定する
(③)下部遮蔽体解体作業)	(上部及び左右部分の駆動部に大きな真空リーク箇所が見つからない場合、下部遮蔽体からコリメータチェンバーを取り外す)
(⑤)下部リーク箇所究明作業)	(上部及び左右部分の駆動部に大きな真空リーク箇所が見つからない場合、下部駆動部についてリーク箇所特定作業を行う)
⑥Heリークディテクタによる真空リーク試験	大きな真空リークを引き起こしている箇所を特定したのち、コンパウンドでリーク箇所をふさいで、リークディテクタにて他の箇所にも真空リークがないかを確かめる
⑦遮蔽体再組上	保管時の線量を抑えるため、解体した遮蔽体を再組み上げる
⑧高放射化物保管室に移動	遮蔽体を再組み上げたコリメータを保管場所である高放射化物保管室にエアパレットにて移動する

本コリメータ故障原因究明作業は高線量下での作業が予測されたため、放射線管理チームとの作業前打ち合わせ(作業手順、予想被ばく線量等)を密に行った。作業手順についてはあらかじめ(作業開始時の5か月前程前から)関係者で議論を行い、準備した。遮蔽体解体作業については、図面、現場確認をもとに手順を作成、必要な機材、人員の見積もり、準備を行った。リーク箇所特定方法については、

- コリメータ本体に近づいて作業する必要がないよ

- 確実にリーク箇所を特定できるようにするため、
- 1. コリメータ真空容器両端の解放部を封止して、真空粗びき、収音マイクを用いて、リーク箇所を特定する方法
- 2. コリメータ真空容器を加圧して、スヌープ法(泡を吹きかけて様子を見る)によりリーク箇所を特定する方法

の2種類の手法について、あらかじめオフラインで有効性の試験(集音マイクの動作試験等)を行った。上記2つの手法は、作業時にコリメータ本体に近づき過ぎることがなく、また、一つでリーク箇所が分からずとも、もう一方の手法でリーク箇所の特定が見込める。作業前にあらかじめ内部をスミアして結果を放管に提出し、作業許可を得た。

原因究明作業は、まず、両側面部分と上のコリメータ部のリーク調査を行い、もし、下部分に大きなリークがあるようならば、下部遮蔽体の撤去作業に移ることとした。このように、故障原因究明作業の内容が多岐に亘るため、それぞれに作業責任の取りまとめを置いて作業手順書の作成、リスクアセスメントを実施し、準備と実際の作業を進めた。

本作業で目標とした作業員一人当たりの被ばく線量上限値は、一日で $500 \mu\text{Sv}$ 以下、全作業工程で 1mSv である。作業時における予期せぬ被ばく線量の増大を抑えるため、各作業員の APD(警報付きポケット線量計)の値を記録しつつ、作業を行った。

2.4 コリメータ遮蔽体解体作業

Figure 2 は RCS 搬入室に移動した状態の故障したコリメータ吸収体(Abs.5)の写真である。この段階では遮蔽体はコリメータチェンバーに装着されている状態である。



Figure 2: Photograph of the failed collimator.

クレーンを用いてコリメータコンクリート遮蔽体、及び、上部鉄遮蔽体を解体した。解体作業ではコリメータブロック周辺(コリメータチェンバーの中央部分)に近づく必要がないため、作業員の想定被ばく線量は、前もって行った残留線量サーベイ結果をもとに $10 \mu\text{Sv}$ 程度と予

想していた。実際の被ばく線量は最大でもその値以下だった。Figure 3 は上部遮蔽体を撤去した状態でのコリメータの全景写真である。



Figure 3: Photograph of the failed collimator without radiation shields.

Figure 4 はあらわになったコリメータチェンバー中央部分の拡大写真である。ビームは写真の左部分ラッパ状のダクト内を右に向けて通過する。写真より上部及び左右部のコリメータブロック駆動部分が目視できる。遮蔽体を撤去した段階(Fig. 4)で目視可能な大きな故障箇所は見つからなかった。

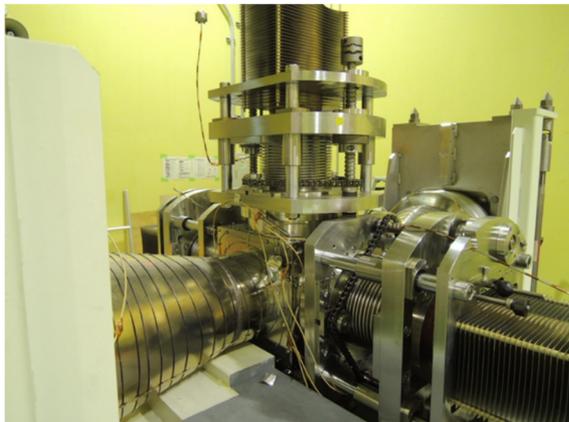


Figure 4: Photograph of the failed collimator chamber.

真空リーク箇所特定作業に移る前に、遮蔽体を撤去した状態での、作業エリアの放射線線量サーベイを行った。その結果を Figure 5 にまとめている。全体的にコリメータブロックに近いチェンバー中央部分の残留線量が高い傾向が見られた。チェンバーから 30cm 離れた場所(1 foot distance)の線量は $20 \mu\text{Sv}$ 以下と想定より低い値が観測された。これは、時間経過による残留線量の低下に起因するものと考えられる。実際に故障時には 40mSv であったコリメータブロックの表面残留線量は、遮蔽体解体時には 11mSv に減衰していた。

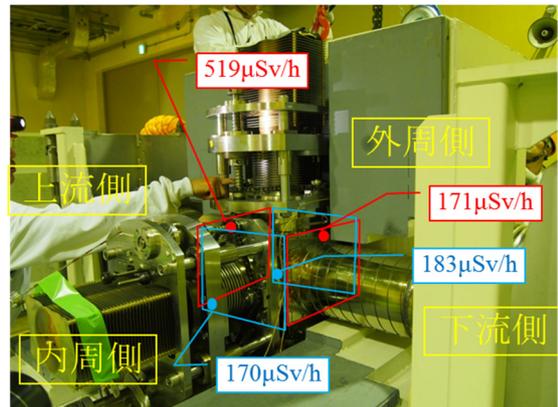


Figure 5: Results of the radiation dose survey for failed collimator.

2.5 リーク箇所究明作業

目視にて真空リーク箇所の特特定ができなかったため、まず、コリメータチェンバー両端の解放部を封止し、真空粗びきして、集音マイクを使用しておおよそのリーク箇所の特特定作業を行った。その時の様子を Figure 6 に示す。本作業では集音マイクとして超音波リークディテクターカメラを使用した。この手法の利点は音でおおよその場所を判定でき、被ばくを抑えるために離れた場所からも測定できることである。また、このリークディテクターカメラはリーク箇所の音の大きさをカメラの色で把握できる機能を持つことから、作業時間の短縮に役に立った。



Figure 6: The aspect of a work to specify vacuum leakage point.

集音マイクにておおよそのリーク箇所を特定した後、コリメータチェンバーを加圧して、スヌープ液を使用したスヌープ法による詳細なリーク箇所の特特定作業を行った。その際の様子を Figure 7 に示す。

スヌープ法によるリーク箇所特定作業の結果、上部コリメータブロック駆動部にて、コリメータブロックと真空容器外の冷却フィンを接続する円筒型の銅ブロックと駆動フランジとの溶接部分(この場所は真空境界部分でもある)に大きな真空リークが発生していることが判明した。

特定した真空リーク発生箇所をコンパウンドにてふさぐ

と、ターボ分子ポンプが運転できる状況までコロメータチェンバー内の真空度が改善した。その状況で He リークディテクタを用いて、真空リーク試験を行った結果、その他の箇所でも真空リークがないことを特定した。

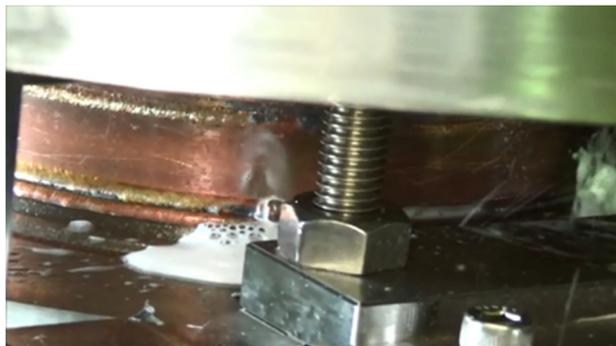


Figure 7: The state of vacuum leakage point with snoop method.

従って、今回大規模な真空リークが発生した箇所が上部駆動部の銅ブロックと駆動フランジ溶接部分であることが分かった。

本作業において故障したコロメータの真空リーク箇所が上部駆動部であったことが確認できたため、下部遮蔽体の解体作業は行わずに済んだ。また、本作業における作業員の最大被ばく線量は、 $50 \mu\text{Sv}$ 以下であり、目標とした値よりも大幅に低く被ばく線量を抑えることができた。

3. コリメータの真空リーク発生原因の推定

真空リークの発生箇所が銅ブロックと駆動フランジ溶接部分であること、及び、真空リーク発生時の状況から、我々は今回の大規模な真空リークを伴うコロメータ故障は真空チェンバー内にてコロメータブロックが衝突したことによるものと推定している。故障したコロメータ吸収体は、駆動範囲を限定するリミットスイッチ以上の範囲でコロメータブロックを駆動した場合、チェンバー内部にてコロメータブロック同士が干渉することを確かめた。実際の故障事象は以下のような流れで発生したものと考えられる。

1. コリメータ制御システムの不調(駆動リミットスイッチを認識しない)
2. コリメータ本体が想定外の挙動(想定駆動範囲外の動作)
3. 真空ダクト内部でコロメータ本体(上部と側面部)が干渉、衝突(コロメータ撤去後に実機で干渉することを確認した)
4. リーク箇所(溶接部)に負荷がかかった(Figure 8)
5. 溶接部が割れてしまい、真空リークが発生した

今回の大規模な真空リーク事象がコロメータブロックの駆動制御不具合に起因するものならば、現在稼働中の他のコロメータでも発生し得る。そこで同様の事象が発生しないようにするため、既設コロメータに関しては、制御系の見直しを図った。具体的には今回異常が発生した VME のモータコントローラに変えて、故障後に検証試験を行い、VME よりも安定である事が確認できた横河の PLC に入れ替えた。さらに、コロメータ駆動ソフト

ウェア内に駆動範囲を制限する機構を設けた。

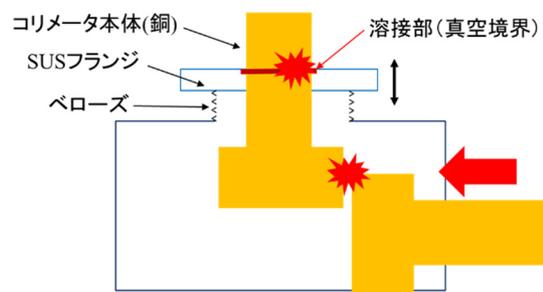


Figure 8: Schematic view of accident of the RCS collimator.

4. まとめと今後

2016年4月に RCS コリメータにて大規模な真空リーク事象が発生したことから、2016年夏季メンテナンス期間中に、故障したコロメータの故障原因究明作業を行った。故障したコロメータは高度に放射化していたため、遮蔽体解体及びリーク箇所特定作業手順の検討を綿密に行った。故障原因究明作業の内容が多岐に亘ることから、それぞれに作業責任の取りまともを置いて、準備と実際の作業を進めた。その際、本作業における作業員一人当たりの被ばく線量上限値を全作業工程で 1mSv 以下に抑えることを目標とした。故障原因究明作業の結果、今回の大規模な真空リーク発生箇所は上部コロメータブロック駆動部の同ブロックと駆動フランジの溶接部分であることが判明した。その結果をもとに、今回のコロメータ故障事象は駆動制御器の不具合によって真空チェンバー内にてコロメータブロックが衝突したことに起因するものと推定した。また、本作業における作業員の最大被ばく線量を、 $50 \mu\text{Sv}$ 以下に抑えることができた。

2017年夏季メンテナンス期間中に、本結果をもとにコロメータブロックがチェンバー内で干渉しないコロメータ吸収体を新たに製作し、RCS にインストールする予定である。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki ed., "Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Project, J-PARC", KEK Report 2002-13, JAERI-Tech 2003-44.
- [2] N. Nakao *et al.*, "MARS14 Shielding Calculations for the JPARC 3 GeV RCS", KEK Report 2004-1 (2004).
- [3] J. B. Jeanneret, "Optics of a two-stage collimation system", Phys. Rev. ST Accel. Beams 1, 081001 (1998).
- [4] K. Yamamoto *et al.*, "The beam collimator system of JPARC rapid cycling synchrotron", Proc. of 42nd ICFA Advanced beam dynamics workshop, HB2008. (2008).
- [5] K. Yamamoto *et al.*, "Present Status of Beam Collimation System of J-PARC RCS", Proc. of 10th Biennial European Particle Accelerator Conference (EPAC06), (2006).
- [6] K. Yamamoto *et al.*, "A MALFUNCTION OF THE BEAM COLLIMATOR SYSTEM IN J-PARC 3 GEV RAPID CYCLING SYNCHROTRON", Proc. of 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan. pp. 314-318 (2016).