

J-PARC50Hz 試験用ダンプの放射線遮蔽設計検討

STUDY ON RADIATION SHIELDING DESIGN FOR THE 50 Hz TEST BEAM DUMP AT J-PARC

中野 秀仁^{#,A)}, 山本 風海^{A)}, 森下 卓俊^{A)}, 岡部 晃大^{A)}, 増川 史洋^{A)}

Hideto Nakano^{#,A)}, Kazami Yamamoto^{A)}, Takatoshi Morishita^{A)}, Okabe Kota^{A)}, Fumihiko Masukawa^{A)}

^{A)} J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

The J-PARC linac supplies negative hydrogen ion beams to the 3 GeV synchrotron at a repetition rate of 25 Hz. One of the future plans for the J-PARC accelerator is to increase the repetition rate to 50 Hz and use part of the beam for proton irradiation. When a new beamline is added, a beam dump is required for beam testing. In this poster, we report on an investigation of the existing linac beam dump and the design considerations for a new beam dump.

1. 研究背景

大強度陽子加速器施設(J-PARC)[1]では、リニアック加速器[2]の将来計画の1つとして繰り返し周波数を50 Hzに増強し、一部を陽子照射利用する計画が検討されている。現在、リニアックトンネルにはイオン源から加速空洞が並ぶラインが南北にあり、南の端から東側に3 GeV シンクロトロン(RCS)[3]行きのビームラインがある(Fig. 1)。その手前にもう1つビームラインを分岐できる空間が整備されている。核変換研究[4]や陽子照射試験[5]のために、リニアックの繰り返し周波数を現在の25 Hzから50 Hzに増強する計画が検討されている。半分のビームを既存のRCSに、もう半分を新施設に送るという運転である。新たに加速器を新設せずに、既存のリニアックにビームラインを追加することで、実験施設を増設するため期待されている。ビームラインを新設するにあたり、正しくビームが輸送できているかどうかを試験する必要がある。ビーム試験の為にビームダンプが必要になる。

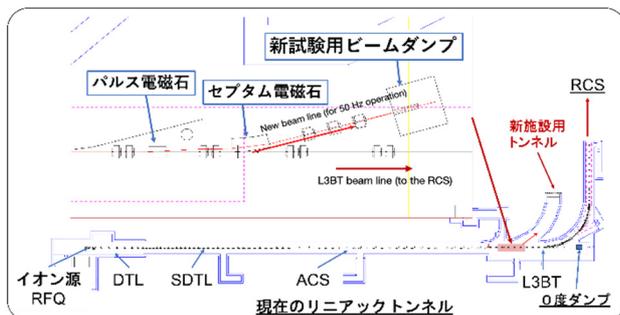


Figure 1: Overview of J-PARC Linac tunnel.

新ビームダンプに要求される事項は以下の3つである。

1. 十分な放射線への遮蔽
2. 軽量化
3. 将来的に撤去可能な残留放射能

1について、既存の0度ダンプと同程度の遮蔽能力であれば問題ないと判断した。0度ダンプとは、リニアック最下流に位置しているビームラインで、他にも何個かリニアックはビームダンプを設置しているが、0度ダンプ以外は

全てコンクリートの壁に埋め込まれている。0度ダンプはコンクリートに埋められておらず、それ単体でトンネルに設置されており、今回設置を検討しているビームダンプと似たような設置状況であるため、設計の参考にする。0度ダンプは許認可申請の為に放射線の遮蔽能力評価では、基準となる線量を大幅に下回る程の遮蔽設計がなされている。そのため、新たに設置するビームダンプに要求される遮蔽能力は、ビーム試験に必要なビーム容量での線量が既存の0度ダンプと同等であれば十分な放射線遮蔽能力があると判断した。

2について、新施設用トンネルは現在クレーンが設置されていないため、出来る限り軽量化する必要がある。1の十分な遮蔽能力を持ちつつ、遮蔽材を可能な限り削り重量を如何に軽くできるかを検討した。

3について、将来はビームラインを延伸し、陽子照射施設等を建設するために撤去する予定であることを考慮した。撤去の際の作業中や、その後ビームラインを設置して作業する際の被ばく低減の観点から、出来る限り残留放射能を低く抑える必要がある。

以上の要求を満たす新ビームダンプについて、既存のリニアック0度ダンプを参考にして放射線の遮蔽設計、放射化評価を行った。

2. 0度ダンプ

2.1 0度ダンプの概要

新ビームライン建設のためのビーム試験用ビームダンプを設計するにあたり、現在問題なく稼働している既存のビームダンプを参考にすることとした。リニアックはビーム試験やビーム調整に使用しているダンプは主に4つあり、ビームラインに対する角度で0度、30度、90度、100度の位置関係に設置されたビームダンプを使用している。その中でも0度の位置にあるビームダンプはリニアック最下流にあり、かつこれらのダンプの中では唯一コンクリートに埋め込まれていない(Fig. 2)。本来はビームラインの延伸も視野に入れて設計されたものであり、本研究で設計検討するビームダンプとコンセプトは非常に似通っている。また、事前調査により許認可申請の為に放射線の遮蔽能力評価では、基準となる線量を大幅に下回る程の遮蔽設計がなされていることが分かったため、0度ダン

[#] nakano@post.j-parc.jp

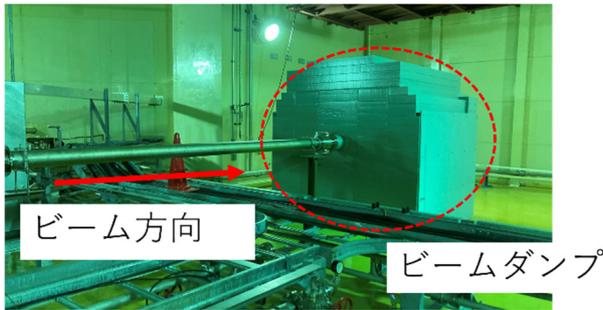


Figure 2: Picture of the J-PARC Linac 0-degree dump.

ブと同等の線量率を実現できる遮蔽能力があれば問題なく設置できると考え、0度ダンプを参考にした。Table 1に0度ダンプの情報を、Fig. 3に寸法を示す。

Table 1: Spec of the Linac 0-degree Dump

ビーム容量	600 W
入射陽子エネルギー	400 MeV
大きさ (高さ×奥行×幅)	2300 mm×2100 mm×2200 mm
ダンプ	黒鉛
遮蔽体	鉄
重量	約 6.6 t

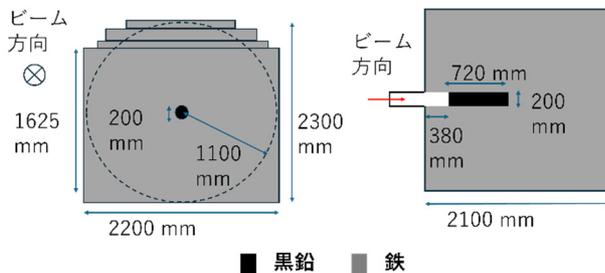


Figure 3: Size of the 0-degree dump.

2.2 PHITSを用いた線量率計算

モンテカルロ計算コード PHITS[6]を用いて0度ダンプに400 MeV陽子ビームが入射した際の粒子飛跡、線量率[Gy/source]、残留放射能を計算した。実際の0度ダンプを模擬した計算体系を作成した(Fig. 4)。①はビームダンプを上流側正面から見た図で、②はビームダンプ中心の長手方向の断面図である。中心に直径200 mm、奥行720 mmの炭素の領域を配置し、その周辺を直径2200 mmの鉄の遮蔽体で囲った簡易的な体系とした。その周辺は実際のトンネル内と同じ空気で満たした。ビームラインのダクト内に当たる部分は真空とした。ビームダンプ直前から400 MeV陽子ビームを入射粒子として生成した。計算に使用された物理モデルは核内カスケードモデルと蒸発モデルである。

Figure 5に計算された線量率[Gy/source]の位置による

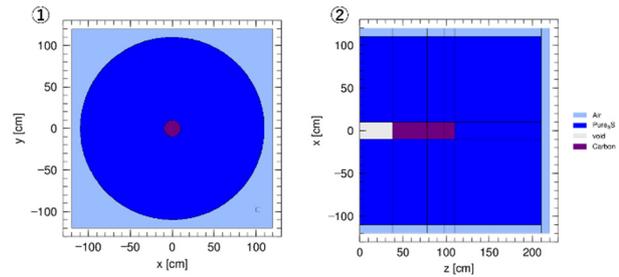


Figure 4: Calculation model of the 0-degree dump in PHITS. ①radial direction, ②longitudinal direction.

変化の推移を示す。遮蔽体の境界での線量率は半径方向で 1.23×10^{-18} Gy/source、長手方向で 1.23×10^{-18} Gy/sourceであった。新ビームダンプはビーム試験に必要なビーム容量で、これらの値を超えない程度に遮蔽体を削ることを検討する。

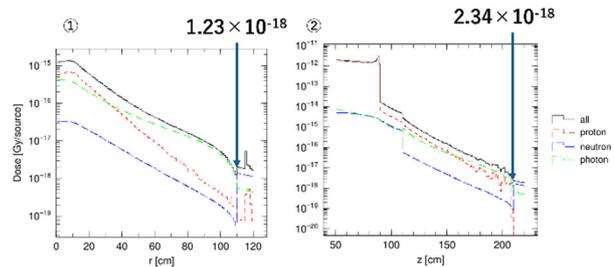


Figure 5: Results of calculated dose rate distribution for the 0-degree dump. ① radial direction, ② longitudinal direction.

3. 新ビームダンプ

3.1 新ビームダンプの容量・寸法

新しいビームラインでビーム試験を行う際に必要なビーム条件を精査した結果、エネルギー400 MeV、ピーク電流50 mA、ビーム幅5 μ s、ビームパワー約5 Wが必要であると結論付けた。

ビーム容量600 Wの0度ダンプに比べて、ビーム容量が約1/100となるため、2.2で計算した遮蔽体の境界での線量率から約100倍となる点まで遮蔽体を削ることができると考えられる(Fig. 6)。

半径(r)方向で 1.23×10^{-18} の100倍となる 1.23×10^{-16} を下回る点は、38 cmの地点。長手(z)方向で 1.23×10^{-18} の100倍となる 1.23×10^{-16} を下回る点は、142 cmの地

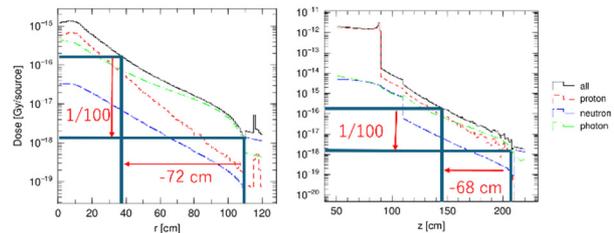


Figure 6: Reduction in shielding when the beam power is reduced to 1/100.

点。以上より、半径(r)方向では 72 cm、長手(z)方向では 68 cm 遮蔽体を削ることが可能となる。

3.2 線量率計算

3.1 で見積もった新ダンプで必要な遮蔽体厚さより、半径 38 cm、長さ 142 cm で PHITS の体系を再度作成し線量率の位置による変化の推移を計算した (Fig. 6)。再度作成した体系で遮蔽体の境界での線量率は半径方向で 1.06×10^{-16} 、長手方向で 1.86×10^{-16} であった (Fig. 7)。これらの値は、0 度ダンプの遮蔽体境界での線量率から約 100 倍となる半径(r)方向で 1.23×10^{-16} 、長手(z)方向 2.34×10^{-16} を下回る。

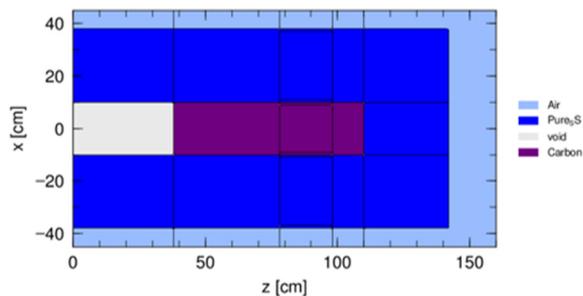


Figure 6: Longitudinal calculation model of the new dump in PHITS.

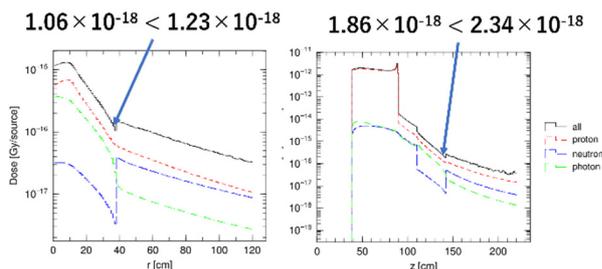


Figure 7: Results of calculated dose rate distribution for the new dump.

ビームパワー約 1/100 となる場合、遮蔽体を半径方向で 72 cm、長手方向で 68 cm 削っても 0 度ダンプと同等の線量率となることが確認できた。総重量は約 4.8 t となり、分割次第でクレーンが無くても扱える大きさである。

3.3 放射化評価

新たに作成した遮蔽体半径 38 cm、長さ 142 cm の体系で、ビームパワー 5 W で 24 時間運転した際のダンプの放射化評価を行った。冷却期間としては最長約 1 年間とした。

放射能計算を行う領域として、①炭素外側、②鉄内側、③鉄外側 3 つの領域を設定した (Fig. 8)。それぞれの領域で、ビーム照射後時間経過で減衰する放射能を計算した (Fig. 9)。

まず初めに、①炭素外側については、照射直後はある程度放射化したもののすぐに減衰し約 1 週間で 4 桁以上弱まった。炭素に 400 MeV 陽子ビームを照射しても寿命の短い放射性物質しか生成されないことが分かる。最も放射化したのは②鉄内側で、1 年間冷却した後の線量

率は $0.16 \pm 1.2 \times 10^{-4} \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h}$ となり、大きな問題となる残留放射能ではないことが確認された。③鉄外側は②鉄内側に比べて約 1 桁放射能が低く、同じく問題にならない残留放射能ではないことが確認された。

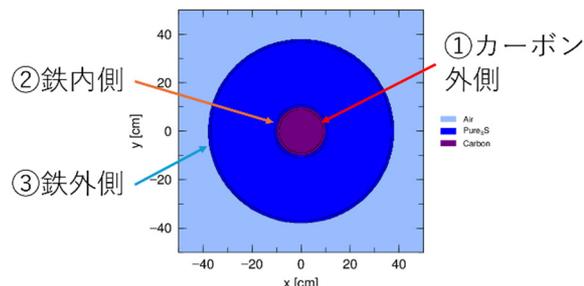


Figure 8: Regions for which radioactivity was calculated: (1) outside carbon, (2) inside iron, (3) outside iron.

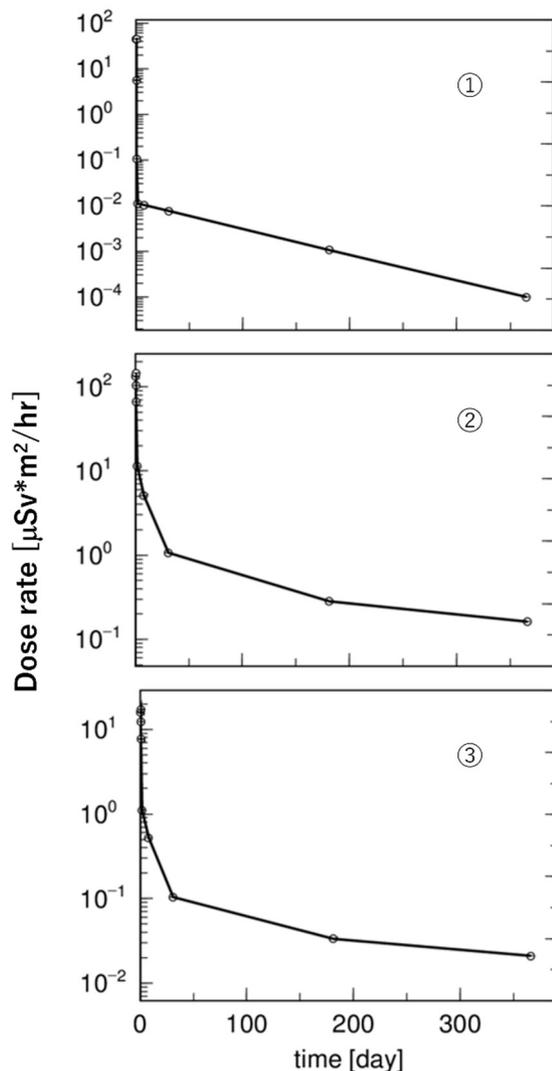


Figure 9: Radioactivity decay over time after beam irradiation at (1) outside the carbon layer, (2) inside the iron layer, and (3) outside the iron layer.

4. まとめ

J-PARC リニアックで新設が検討されているビームラインに設置するビームダンプの放射線遮蔽設計を行った。似たコンセプトで設計された既存の0度ダンプを調査し、想定される線量率から最も小さくできるビームダンプの大きさを導出した。ビーム容量600 Wの0度ダンプに対し、新ダンプは約1/100の5 Wのビームパワーが新ビームラインのビーム試験に必要であると結論付けた。鉄の遮蔽体に関して、半径方向で72 cm、長手方向で68 cm削っても0度ダンプと同等の線量率を実現できることを確認した。また、再構成した計算体系で残留放射能の計算を行った。ビームパワー5 Wで24時間運転した後約1年冷却期間を取るという条件下では、大きな問題となる残留放射能ではないことを確認した。今回得られた結果を基に、更に設計検討を継続する。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki, “Accelerator Technical Design Report for High-intensity Proton Accelerator Facility Project, in: J-PARC”, JAERI-Tech 2003-044 (KEK Report 2002-13).
- [2] Hasegawa, Kazuo. “Progress and Operation Experiences of the J-PARC Linac”, Proc. of LINAC 2016.
- [3] K. Yamamoto *et al.*, “Design and actual performance of J-PARC 3 GeV rapid cycling synchrotron for high-intensity operation”, J. Nucl. Sci. Technol., 2022, 59.9: 1174-1205.
- [4] S. Meigo *et al.*, “Conceptual design of proton beam transport system for ADS facilities at J-PARC”, J. Nucl. Mater., 2014, 450.1-3: 8-15.
- [5] S. Saito *et al.*, “Conceptual study of Post Irradiation Examination (PIE) Facility at J-PARC”, JJAEA-Technology 2023-025, 2024.
- [6] T. Sato *et al.*, “Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33”, J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127-135 (2024).