

J-PARC メインリングビームダンプシステムの構成と現状

DESIGN AND STATUS OF CURRENT BEAM DUMP SYSTEM IN J-PARC MAIN RING

富澤正人 *^{A)}、橋本義徳 ^{A)}、魚田雅彦 ^{A)}、沼尻正晴 ^{A)}

Masahito Tomizawa*^{A)}, Yoshinori Hashimoto^{A)}, Masahiko Uota^{A)}, Masaharu Numajiri^{A)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization(KEK)/J-PARC Center

Abstract

The J-PARC main ring (MR) provides 30 GeV high intensity proton beams to the neutrino experimental facility and the hadron experimental facility. An abort beam line to the beam dump has branched from the MR to the opposite direction of the neutrino beam line. The abort beam dump was designed to accept 7.5 kW beam. The abort dump was constructed in 2004 and has been utilized for the beam operations since 2008 without any trouble. The design, structure and beam performance of the abort beam dump are here reported also for the planned future upgrade.

1. はじめに

J-PARC メインリング (MR) は、速い取り出しビームを利用するニュートリノ実験施設と遅い取り出しビームを利用するハドロン実験施設へ、それぞれ約 500 kW、50 kW の 30 GeV 陽子ビームを現在供給している [1,2]。MR のビームスタディー、利用運転中の異常検知によるビームアボートのために、ニュートリノビームラインとは反対側にアボートビームラインが用意されている。このアボートビームラインの下流端にはビームダンプが接続されている (Figure 1)。このビームダンプは以下に述べるようにトンネル躯体に埋め込まれており、強制冷却は行っていない。

MR におけるアボートビームラインの当初の目的は、

- ビームが MR で周回中に、MR や実験施設で異常が発生した場合に速い取り出しによってビームを廃棄する
- MR のビームスタディー時にビームを廃棄する

であった。最近、アボートビームラインには、プロファイルモニター [3]、COMET 実験のためのビームのバンチ構造を測定する extinction モニター [4] がインストールされビーム診断を行っている。さらには照射試験も実施されている。

アボートダンプの設計を行う上での前提条件は以下の通りであった。

- 平均ビームパワーは設計ビームパワーの 750 kW の 1% である 7.5 kW とする
- ダンプは冷却水等による冷却は行わず、遮蔽コンクリートが接する土壌からの自然冷却に頼る
- 真空ダクト、遮蔽鉄はコンクリートに埋め込む構造とする

将来にむけてアボートダンプに隣接するエリアに新実験施設を増設する可能性を配慮し (Figure 1)、その際のトンネルコンクリートはつり工事で発生する

放射化土壌の処理を回避するために、取り出し可能な遮蔽コンクリートブロックをトンネルコンクリートの外側に追加することになった。このため、アボートダンプの構造は最終決定直前に変更された。この再検討の結果、遮蔽鉄の重さは 800 トンから約 500 トンになった。

凡その建設スケジュールは以下の通りに実施された。

- 2003 年: ダンプ構造の検討・設計
- 2004 年 4 月: 遮蔽鉄の開札 (3-50BT トンネル分も含む 2765 トン)
- 2004 年 10-11 月 組み込み真空チェンバー製作、納品
- 2004 年 11-12 月 現地設置工事

アボートダンプは、2008 年の MR 稼働以降現在に到るまでトラブルもなく稼働を続けている。しかし近年になり、今後のビーム強度増強にむけてダンプの容量をアップグレードする検討が開始された [5]。本報告の目的は、このアップグレードも視野におきながら、現在のビームダンプの設計指針、構造、設計性能、運転の現状を明確にしておくことである。

2. アボートビームラインの概要

アボートビームラインは長さが 71 m と非常に長い (Figure 1)。異常発生時のビームをダンプに確実に導く必要性から、1 台の電源で DC 励磁される 4 極ダブレット 1 組のみを使うシンプルなビーム光学を採用することにした。入射エネルギーのビームサイズは大きいために、この 4 極ダブレットによって収束することによりビームをダンプに導く。一方加速されたビームはこの 4 極ダブレットによる収束はほとんど効かないが、ビームサイズが小さいため、ダンプまで輸送することが可能である [6]。Figure 2 は断熱減衰を仮定したときのダンプ位置でのビームサイズ (中心からの距離の最大値) を示している。3 GeV でのビームのエミッタンスは $54\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ を仮定している。全エネルギー範囲において、ダンプ位置でのビームサイズは MR のビームサイズに比較すると

* masahito.tomizawa@kek.jp

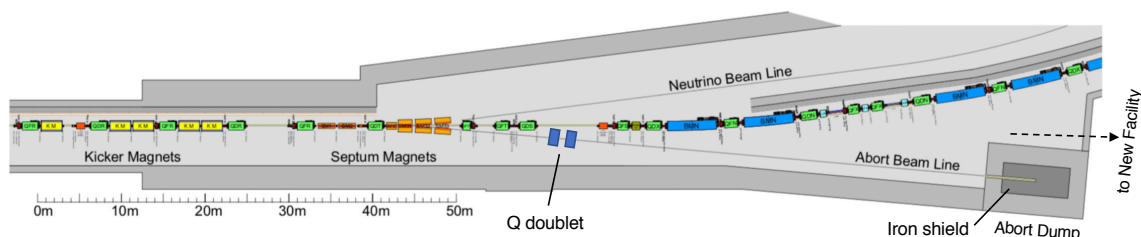


Figure 1: Abort beam line and the beam dump.

非常に大きくなっている。このことにより、ビームによる真空ダクト端や遮蔽鉄に発生する瞬時の熱応力が緩和される。真空ダクトの内半径は 369 mm とサイズに余裕を持たせている。ビームの軌道のずれや想定より大きなサイズのビームへの対応が可能である。また、ダンプの真空ダクトに真空的なトラブルが生じた場合にこの真空ダクトの内側に少し径の小さい真空ダクトを挿入する余地を与える。

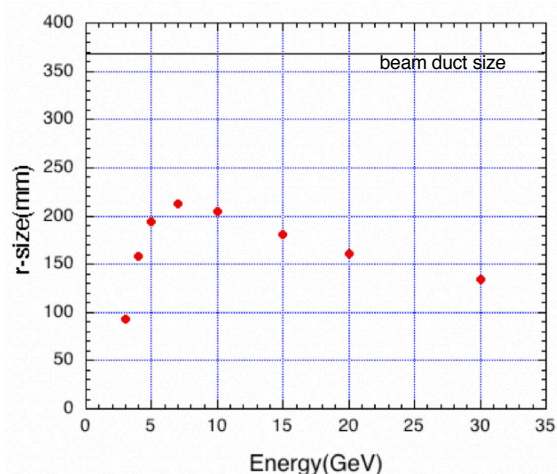


Figure 2: Beam radius as a function of extracted beam energy.

3. 放射線遮蔽

ビームがダンプに入射することによって発生する放射線は、鉄とその周辺のコンクリートにより遮蔽される。鉄の遮蔽能力は高いが、鉄の量を増やすと建設コストが増える。最終的に約 500 トンの鉄が使われた。Figure 3 は、MARS コード [7] により計算されたダンプ内部の線量分布である（岡山大学 吉村浩司氏による）。コンクリートと土壌の境界の最大線量は 1 mSv/h となった。土壌の放射性物質濃度の規制免除値から決められた点線源の基準値 11 mSv/h [8] をクリアしている。Figure 4 はダンプ地上部の線量を MARS のつなぎ計算により評価したものである。ダンプ地上部は放射線管理区域に設定されており線量の上限は $25 \mu\text{Sv/h}$ となるが、この評価による線量は $6.9 \times 10^{-5} \mu\text{Sv/h}$ となり十分に小さな値となっている。MARS の計算で使われた鉄の密度は、裕度を持たせて 7.2 g/cm^3 を選んでいる。

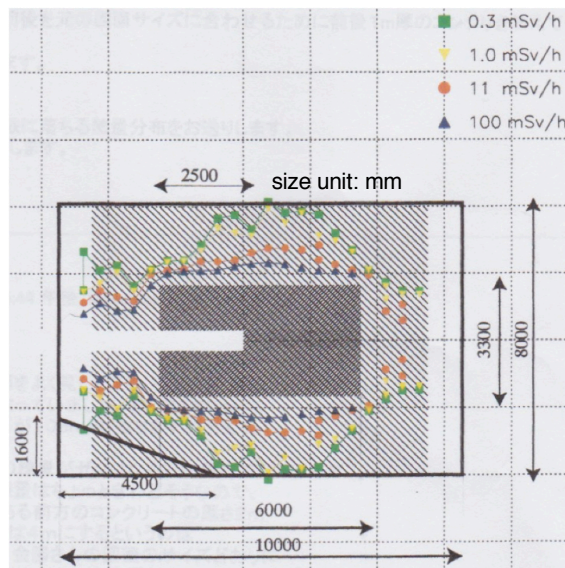


Figure 3: Radiation Dose in the concrete around the iron.

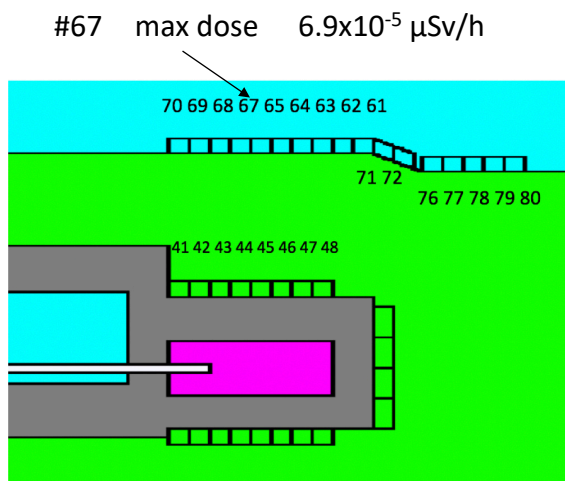


Figure 4: Radiation dose on the ground surface above the dump.

4. ダンプの製作

ダンプの遮蔽鉄はネットでは 491 トンである。これらの鉄はコストの観点からスラブ材と一部 SS400 材が使用された。これらの鉄は、RCS から MR へのビーム輸送系の八間道路下のトンネルに使われる遮

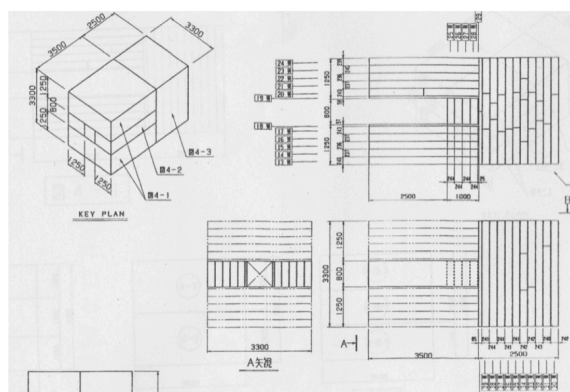


Figure 5: An assembly drawing of iron plates for the dump.

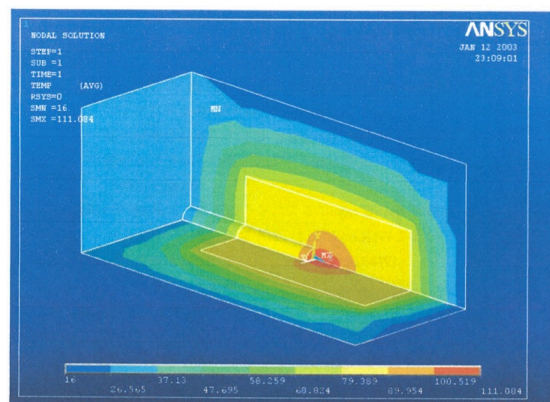


Figure 6: Temperature distribution in iron and concrete shieldings.

蔽鉄分も含む合計 2765 トン分に含まれて調達された。スラブ材は大きさがまちまちのため現場で溶断し整形することも行われた。Figure 5 は遮蔽鉄の組図である。ビームが遮蔽鉄の隙間を極力見ないように組み方が工夫された。スラブ材、SS400 材を組む際に隙間に可能な範囲で砂鉄をいれている。この遮蔽鉄には、真空ダクトを挿入するための 800×800 mm の四角の空間が開けられている。

埋め込み用真空ダクトは、長さ 5 m、内径 $\phi 738$ mm で、厚さは強度的余裕を持たせて 12 mm のものを選んだ。真空ダクトの材質は、NOx 等による腐食を考慮して SUS304 ではなく SUS316L を選んだ。下流側は円板がダクトに溶接され、トンネル側は金属 O リングを想定した真空フランジが取り付けられている。真空ダクトの内面の表面処理は脱脂洗浄のみとした。また 15A の SUS316L 配管 2 本がこの真空ダクト外面に取り付けられている。これらの配管は真空ダクト下流端付近で解放になっている。一方トンネル側はスエジタイプのコネクターが取り付けられている。この配管は、NOx 等による腐食を防ぐためと熱の除去のために用意されたが、現在に至るまで使用されたことはない。

温度を計測するための熱電対は、クロメルアルメルで SUS316L ケースに収納されており、無機絶縁ケーブル (MIC) 構造となっている。真空ダクトの下流端板に溝を掘り 2 箇所、また遮蔽鉄の下流面に 2 箇所、ケースを点溶接することにより取り付けられている。温度補償導線はそれぞれ真空ダクトと遮蔽鉄面に沿わせてトンネル内に導入している。

5. ダンプの温度

アポートダンプのビームによる温度上昇の評価は ANSYS [9] により行われた。コンクリートがトンネル本体室側と接するところの温度は 30°C、土壌との境界の温度は地下水の温度の目安である 16°C とした。50 GeV のエネルギー、平均ビームパワー 8.154 kW の陽子ビームによる各場所でのエネルギー寄与は、MARS の計算結果を使った。Figure 6 は、以上の条件で計算された熱平衡状態におけるダンプの温度分布である。鉄遮蔽の最大温度は、真空ダクト端の直下流の部分で 111°C となっている。土壌に接す

る付近のコンクリートの温度の最大値 (下流端) は 80°C となり、コンクリートの強度を保つための温度の目安値に到達している。

Figure 7 は 30 GeV に加速されたビームをダンプに廃棄したときの実際の温度上昇例である。5.1 kW で約 9 時間照射後に約 15 時間ビームを止めた後、5.2 kW で 12 時間照射している。2 回目の照射で真空ダクト端の温度は 105°C まで上昇している。この照射においてはまだ温度は平行状態に達していないが、ビーム停止後の温度下降から時定数は約 24 時間と見積もれる。ただし真空ダクトは遮蔽鉄への熱的接触が弱く、遮蔽鉄側の時定数をそのまま反映しているかどうかは疑問である。一方、土壌と接する遮蔽鉄下流端では、照射前の温度は 22~23°C となっており、仮定した 16°C より高いものの、照射によってまったく上がっていない。温度一定の束縛条件の正当性を示すものとも考えることもできるが、さらに長時間照射したときに温度上昇が観測されるかどうかは興味があるところである。この測定例は過去の運転で温度上昇が最大になったときのものを選んでいる。

6. まとめ

2004 年に設置された J-PARC メインリング (MR) のアポートダンプの設計、構造、実際の運転例での

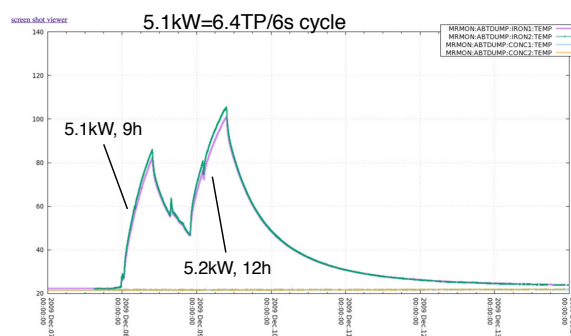


Figure 7: Temperature rise at the beam duct end by 30 GeV proton beams.

温度上昇について報告を行った。アボートダンプは冷却を行わないシンプルな構造であることもあり、2008年のMR稼働以降現在に到るまでトラブルもなく稼働を続けている。MRのビームパワーアップ計画に対応し、スタディー等の効率化のための容量アップを目指して、アボートダンプのアップグレードの検討が行われている。

参考文献

- [1] S. Igarashi, “CHALLENGES TO HIGHER BEAM POWER IN J-PARC: ACHIEVED PERFORMANCE AND FUTURE PROSPECTS”, Proceedings of International Particle Accelerator Conference, Albuquerque, Melbourne, Australia, 2019, pp.6.
- [2] R. Muto *et al.*, “CURRENT STATUS OF SLOW EXTRACTION FROM J-PARC MAIN RING”, Proceedings of International Particle Accelerator Conference, Albuquerque, Melbourne, Australia, 2019, pp.2311.
- [3] Y. Sato, *et al.*, “Operation of a new multi-ribbon beam profile monitor in the beam abort line of J-PARC main ring”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sep.2-Sep.4, 2020, FRPP17.
- [4] H. Nishiguchi *et al.*, “EXTINCTION MEASUREMENT OF J-PARC MR WITH 8 GEV PROTON BEAM FOR THE NEW MUON-TO-ELECTRON CONVERSION SEARCH EXPERIMENT – COMET”, Proceedings of International Particle Accelerator Conference, Albuquerque, Melbourne, Australia, 2019, pp.4372.
- [5] K. Kadowaki, *et al.*, “The design of new beamdump for J-PARC MR upgrade”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sep.2-Sep.4, 2020, WEPP02.
- [6] M. Tomizawa *et al.*, “NEW OPTICS DESIGN OF INJECTION/FAST EXTRACTION/ABORT LINES OF J-PARC MAIN RING”, Proceedings of the Particle Accelerator Conference, Albuquerque, New Mexico, USA, 2007, pp.1508.
- [7] MARS code; <http://www-ap.fnal.gov/MARS/>
- [8] T. Masumura *et al.*, “大強度陽子加速器計画施設の概略遮へい計算システム”, JAERI-Data/Code 2000-026, 2000年6月.
- [9] ANSYS; <https://www.ansys.com/ja-jp>