

J-PARC 大強度化に伴う新ビームダンプの設計 THE DESIGN OF THE NEW BEAM DUMP FOR J-PARC MR UPGRADE

門脇琴美 *^{A)}、白形政司 ^{A)}

Kotomi Kadowaki*^{A)}, Masashi Shirakata^{A)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

In J-PARC Main Ring (MR), the number of shots during beam tuning with a high intensity beam is limited due to shortage of beam dump heat capacity. With the J-PARC MR upgrade for higher intensity, a new beam dump is planned to ease this limitation. The heat capacity of new beam dump is 30 kW. The new beam dump is designed to add the dump core and cooling mechanism into the existing beam dump. It will be planned air-cooled and dump core is made of copper. In this study, Computer Aided Engineering (CAE) analysis was conducted for two models of new beam dump core. As the results of calculation, it was evaluated that the model having cooling fins and legs was suited for dump core. The required cooling air flow rate was calculated to be more than 0.52 m³/s.

1. はじめに

J-PARC の Main Ring (MR) に設置されているビームダンプは MR アボートダンプと呼ばれており、その熱容量は 7.5 kW である [1]。近年は MR ビームの大強度化が進んでおり、ビームダンプの熱容量の観点から、大強度ビーム使用時のビーム調整でビームダンプに打つことができるショット数は 1 時間あたり 20 ショット程度に制限されている。J-PARC ではビームのさらなる大強度化が進められており、今後はこのビーム調整時の制限がさらに厳しくなることが予想される。そのため、ビームダンプの熱容量を増やすために新ビームダンプを製作することが計画されている [2]。

先行研究ではビームにより発生する熱量や放射性物質について評価が行われた。本研究では新ビームダンプの冷却に関する要求を整理し、ビームダンプの設計を行った。また、数値解析を行いダンプコアの構造および冷却性能を評価した。

2. ビームダンプ

2.1 既存のビームダンプの構造

既存の MR アボートダンプの構造を Fig. 1 に示す。外径 76.2 cm のダンプパイプの周辺に鉄およびコンクリートブロックを並べた構造になっており、ビームのエネルギーは鉄およびコンクリートブロックで吸収される。冷却装置は設置されておらず、ビームダンプの温度を遠隔でモニターするための温度センサーが数ヶ所設置されている。ダンプパイプおよびビームダンプはコンクリート壁に埋め込まれている。

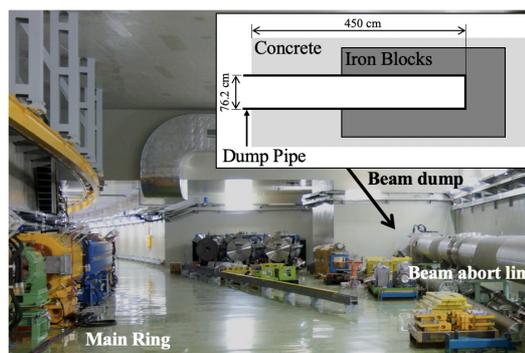


Figure 1: Structure of MR Abort dump.

2.2 新ビームダンプの構造

新ビームダンプの概要を Fig. 2 に示す。新ビームダンプは CERN の PS-Booster [3] を参考に設計された。新ビームダンプでは既存のダンプパイプを外枠として再利用し、その内部に新しいビームパイプを挿入する。新しいビームパイプの終端にダンプコアを設置してビームのエネルギーを吸収させ、ダンプパイプと新しいビームパイプの間に設置した冷却装置で冷却を行う。

新ビームダンプでは空気の吹き込みによる空冷方式のみ検討し、水冷方式は検討しない。これは冷却水の放射化が大きな課題となるためである。新ビームダンプでは室温の空気を冷却用パイプを通してダンプパイプ終端付近に送り込み、ダンプコアを冷却して温まった空気はビームパイプとダンプパイプの間を通過して加速器トンネル内に放出される。

2.3 ダンプコアの構造

先行研究ではダンプコアとして銅合金製の直径 50 cm の円柱を設定した。本研究では冷却効率がより高いと考えられる冷却フィンをもつ構造についても検討を行い、2 つの構造で比較を行った。本研究で検討

* kadowaki@post.kek.jp

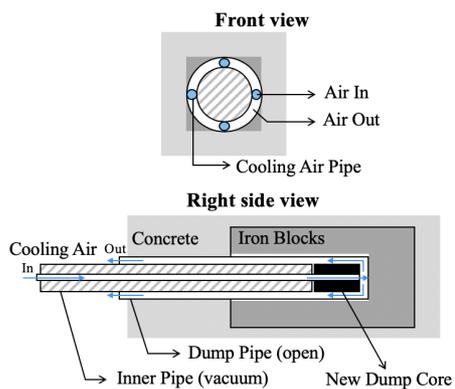


Figure 2: Structure of New Beam Dump.

したダンプコアの構造を Fig. 3 に示す。モデル A は円柱、モデル B はモデル A に冷却フィンと自重を支えるための 2 本の脚部を追加した構造である。冷却フィンは脚部および冷却用パイプを設置する部分以外に 60 枚設置している。冷却フィンの厚さは 8 mm、長さは 115 mm である。ダンプコアの長さは両モデルとも 100 cm とし、材質は銅合金とした。

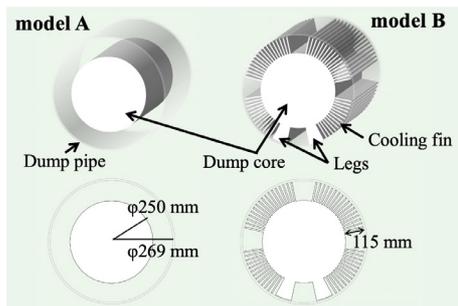


Figure 3: Models of new dumpcore.

3. 計算方法

3.1 空冷に関する要求

新ビームダンプではビームのエネルギーは主にダンプコアに吸収され、発熱したダンプコアは空気の強制対流により冷却される。目標とするビームダンプの熱容量は 30 kW である。先行研究から、モデル A に 30 kW のビームを 1 時間照射した場合のダンプコア全体の温度上昇は約 93 °C と計算される。

まず、空冷が可能か検討する。強制対流による空冷の場合、空気が 1 秒で持ち去ることのできる熱量 Q_{air} は空気の温度差 ΔT_{air} 、比熱 C_{air} 、密度 ρ_{air} 、流量 V_{air} を用いて式の通り求められる。

$$Q_{air} = \Delta T_{air} \rho_{air} V_{air} / C_{air} \quad (1)$$

$Q_{air} = 30 \text{ kJ}$, $\Delta T_{air} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho_{air} = 1.17 \text{ kg/m}^3$, $C_{air} = 1.01 \text{ kJ/kg/}^\circ\text{C}$ として必要な空気の流量を求めると、 $V_{air} = 0.52 \text{ m}^3/\text{s}$ となる。ただし空気の物性値は 30 °C のものを用いた。新ビームダンプの構造上の制限から、冷却用パイプの直径は最大で 9 cm 程度

となる。冷却用パイプを 4 本設置する場合、 V_{air} を達成するためには冷却用パイプ内の空気の流速はそれぞれ 20 m/s 以上となれば良い。

次にダンプコアの熱伝達係数を検討する。ダンプコアの表面積を $A \text{ m}^2$ 、熱伝達係数を $h \text{ W/m}^2$ 、ダンプコアと空気の温度差を $\Delta T'$ とすると、ダンプコアから失われる熱量 $Q_d \text{ W}$ は

$$Q_d = A \Delta T' h \quad (2)$$

となる。 $Q_d = 30 \text{ kW}$, $\Delta T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ とすると、ダンプコアの表面積から熱伝達係数の下限値を求めることができる。Table 1 に必要な熱伝達係数の下限値を示す。モデル A では約 150 W/m²、モデル B では約 18 W/m² である。一般に空気の対流による熱伝達係数は自然対流で 5-25 W/m² 程度、強制対流では 20-300 W/m² 程度とされており、モデル B では下限値を容易に達成できると予想される。

3.2 数値解析

3.1 節で求めた要件を満たすため、解析ソフトウェア ANSYS Mechanical, ANSYS fluent (ANSYS.inc) を用いた有限要素法による数値解析を行った。

まず、モデル B についてダンプパイプ内にダンプコアを設置した場合の構造解析を行った。ダンプパイプの材質は構造用鋼、ダンプコアの材質は銅合金としてダンプコアの自重による変形および応力を評価した。

次に、3.1 節で求めた熱伝達係数を達成できるかを検討するため、流体解析を行った。モデルを簡素化するため空気はダンプパイプ終端から流入するとし、冷却用パイプおよびその内部は計算領域から除外した。流入時の流速は、冷却用パイプとダンプパイプ終端の断面積の比から 1.2 m/s と設定した。また、ダンプコアの一部を抜き出してさらに簡素化したモデルを用いて熱流体解析を行った。流入空気の温度は 30 °C、ダンプコアの温度は 130 °C とした。

最後に、ダンプコアの伝熱解析を行った。ダンプコア表面の熱伝達係数を全て一定値とし、発熱を与えて温度変化を評価した。雰囲気温度および初期温度は 30 °C とした。ダンプコアの発熱は白形ら (2019)

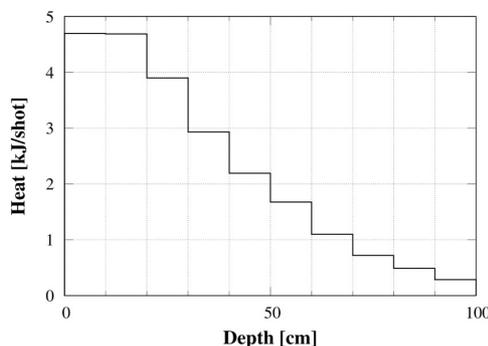


Figure 4: Distribution of generated heat. Data is referred from M. J. Shirakata *et al.* (2019).

により計算された陽子ビームによる発熱分布を元に

Table 1: Property of the Dump Core

| Model | Number of fins | Surface area $A \text{ m}^2$ | Minimum heat transfer coefficient $h \text{ W/m}^2$ |
|-------|----------------|---------------------------------|---|
| A | 0 | 1.96 | 153 |
| B | 60 | 16.4 | 18.2 |

設定した。モデルに与える発熱は、30 kW 相当のビームによる全発熱量がダンプコアの半径 10 cm 内の部分に分布するように設定した。Fig. 4 にダンプコアに与えた熱分布を示す。横軸はビーム入射面からの距離である。ビームの連続運転による発熱を模擬するため、0.1 秒間の発熱を 1.18 秒ごとに 255 回（約 300 秒間）与えた。その後は発熱を与えず、発熱開始から 600 秒後まで計算を行った。

4. 結果と考察

4.1 構造解析

Figure 5 に構造解析の結果を示す。変形量は実際の 5000 倍として表示され、比較のために変形前のモデルが黒枠で示されている。脚部の変形およびその影響によるダンプコア全体の沈み込みは無視できる程度であった。変形が最大となったのは冷却フィンが自重により変形した部分であり、変形量の最大値は約 $3.1 \mu\text{m}$ であった。変形量がごくわずかであり、変形による冷却フィン同士の接触も起こらなかったため変形による影響は無視できると考えられる。

応力が大きくなったのは脚部および冷却フィンの付け根であった。最大値は 0.33 MPa であり、銅合金の許容曲げ応力 35 MPa、許容圧縮応力 40 MPa と比較して十分小さい値であった。

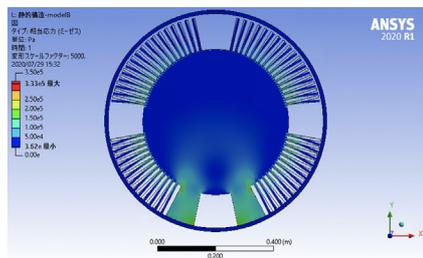


Figure 5: Total deformation and equivalent stress.

4.2 流体解析

Figure 6(a) に流体解析の結果を示す。モデル A, B のコア周辺の流速の平均値はそれぞれ約 2.6 m/s, 4.1 m/s であった。この値を流入速度として、ダンプコアの一部について熱流体解析を行った。出口の温度分布は Fig. 6(b) の通りである。モデル A では空気に熱がほとんど伝わっていないことが分かる。モデル A, B それぞれの空気の出口温度の平均値は約 34 °C, 88 °C であった。

また、Fig. 6(a) から得られた平均流速を用いて、それぞれのモデルについて次の手順で熱伝達係数を

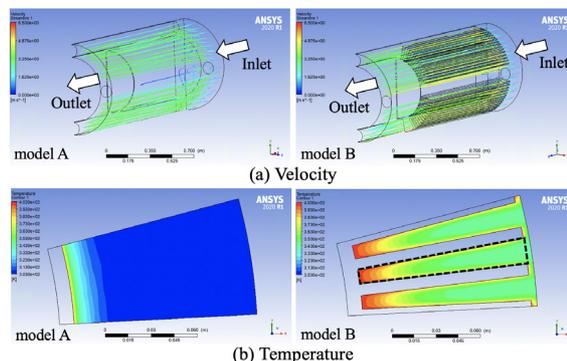


Figure 6: Results of CFD analysis.

計算した。

流体の熱伝達係数 h 、熱伝導率 k 、流路の代表長さ L からヌセルト数 Nu は次式のように定義される。

$$Nu = hL/k \quad (3)$$

円管内の強制対流（乱流時）について、 Nu はレイノルズ数 Re 、プラントル数 Pr 等を用いた近似式により求められることが知られている。その中の一つである Gnielinski の式を用いて Nu は次式のように表すことができる。

$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (4)$$

$$f = \{0.79 \ln(Re) - 1.64\}^{-2} \quad (5)$$

f は摩擦係数である。Eq. (3), Eq. (4) を連立させることで h を求めることができる。モデル B については Fig. 6(b) の破線部に示す部分を一つの流路とみなし計算を行った。各モデルの熱伝達係数はそれぞれ $h_A = 8.6 \text{ W/m}^2$, $h_B = 20 \text{ W/m}^2$ と求められた。この結果から、モデル B で目標とする熱伝達係数を達成できることが分かった。

4.3 伝熱解析

モデル B について伝熱解析を行った。4.2 節から、ダンプコア表面に与える熱伝達係数は 20 W/m^2 とした。Fig. 7 にダンプコアの温度分布、Fig. 8 に温度の時間変化を示す。

最高温度となるのはダンプコア前面部の中心部であった。ダンプコア前面部はビームが入射するため発熱量が最も大きいからだと考えられる。最低温度となるのはダンプコア背面部の脚部先端であった。これはダンプコア背面部付近は発熱量が少ないこと

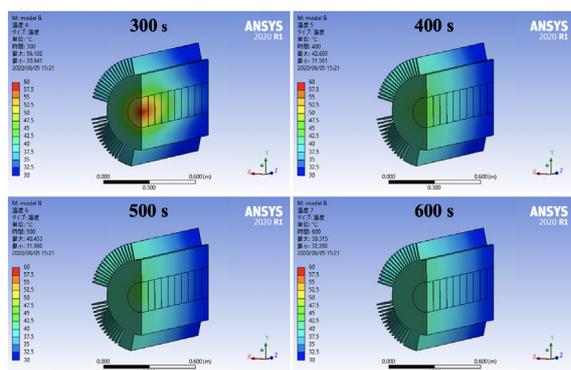


Figure 7: Distribution of dumpcore temperature.

と、脚部の熱容量が冷却フィンに比べて大きく温度が上昇しづらいことが原因だと考えられる。

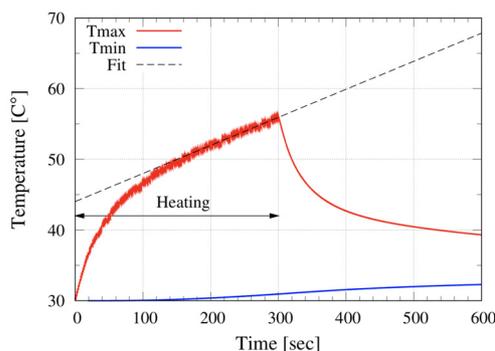


Figure 8: Maximum and minimum temperature. The dashed line indicates the fitting function Eq. 6.

最高温度 T_{max} は発熱終了時（約 300 秒）に最大値 56.2 °C になり、発熱終了後に急激に低下した。Fig. 7 において 300 秒から 400 秒までの温度分布が急激に変化することから、この急激な変化は熱伝導によりダンプコア全体に熱が伝わったためだということが分かる。 T_{max} はその後徐々に低下し、600 秒時点で最小値 39.3 °C となった。Fig. 7 において 400 秒以降では温度分布の変化が小さくなることから、ここでは熱伝達が温度変化の主なプロセスであると推測される。

最低温度 T_{min} は発熱開始から約 120 秒後まではほとんど変化しなかった。その後は徐々に上昇し、600 秒時点で最大値である約 32.3 °C となった。これはダンプコア中心部から脚部先端まで熱が伝わるのに時間がかかったからだと考えられる。

T_{max} の時間変化をみると、180 秒から 300 秒の間では線型になっているように見える。最小二乗法により一次関数でフィッティングを行うと、 T_{max} を次式で表すことができた。

$$T_{max} = 0.040t + 44.02 \quad (6)$$

ただし t は発熱開始からの経過時間である。Eq. (6) を用いて 1.18 秒周期で 1 時間、すなわち 3051 回発熱させた場合の T_{max} を推定すると約 187 °C となっ

た。これは充分許容できる値である。また、実際にはビームダンプにこのような長時間の連続照射を行う可能性はほぼなく、間隔を空けて短時間照射する場合がほとんどである。これらの理由から、本研究で設計した新ビームダンプは運用に充分耐えられると考えられる。

5. まとめ

J-PARC のビーム大強度化に伴い、ビームダンプの熱容量不足による大強度ビームを用いたビーム調整の制限が課題となっている。そのため、熱容量を増加させた新ビームダンプの製作が計画されている。既存のビームダンプに銅合金製のダンプコアや冷却装置等を追加で設置し、新ビームダンプとする予定である。新ビームダンプが目標とする熱容量は 30 kW であり、強制対流による空冷を行う。

本研究では新ビームダンプに対する冷却の要求を整理し、設計した新ビームダンプについて数値解析による評価を行った。解析の結果、ダンプコアの構造は円柱状のコアに冷却フィンと脚部を設けたモデルが適切であると分かった。30 °C の空気をダンプコア付近に 0.52 m³/s で送り込むことによって目標とする熱容量を達成できると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、KEK の石井恒次氏、魚田雅彦氏、佐藤洋一氏、外山毅氏、橋本義徳氏、堀洋一郎氏には議論に参加いただき、非常に有用なコメントをいただいた。また、JAEA の金正倫計氏、山本風海氏をはじめとする RCS グループの方々、KEK の杉本拓也氏には ANSYS の使用について多大なるご協力をいただいた。この場を借りて感謝いたします。

参考文献

- [1] Acc. Group JAERI/KEK, KEK-Report 2002-13, JAERI-Tech 2003-044, J-PARC 03-01 (2003); <https://cds.cern.ch/record/747209/files/34072617.pdf>
- [2] M. J. Shirakata *et al.*, "Radiation design of new 30kW beam dump of J-PARC Main Ring", Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference, Melbourne, Australia, May. 19-24, 2019, pp. 2005-2008; <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPTS032>
- [3] M. Calviani, "High capacity beam dump for accelerator", in Slide at the International Workshop on Future Potential of High Intensity Accelerators for Particle and Nuclear Physics(HINT2016), Tokai, Japan, Dec. 2016; <https://kds.kek.jp/indico/event/22193/session/3/contribution/30>