

## J-PARC MR 30 kW ビームダンプ冷却系の設計

### DESIGN OF COOLING SYSTEM FOR 30 kW BEAM DUMP OF J-PARC MR

白形政司<sup>#,A)</sup>, 門脇琴美<sup>A)</sup>, 佐藤洋一<sup>A)</sup>, 西川雅章<sup>A)</sup>

Masashi Shirakata<sup>#,A)</sup>, Kotomi Kadowaki<sup>A)</sup>, Yoichi Sato<sup>A)</sup>, Masaaki Nishikawa<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> KEK/J-PARC

#### Abstract

The Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), located in Tokai-mura, Ibaraki Prefecture, has been upgrading its main ring equipment to achieve a beam intensity of 1.3 MW. The main ring has a dedicated beam dump for beam conditioning, but the upper capacity limit of 7.5 kW has imposed restrictions on efficient beam conditioning. Specifically, up to 17 shots per hour can be fired for high intensity beams of 320 trillion protons or more. To solve this problem, plans are underway to upgrade the capacity of the beam dump from 7.5 kW to 30 kW. With the increased capacity of the beam dump, a cooling system has become essential. The beam dump is cooled by a cooling system with nitrogen gas circulation. Details of the cooling system and the radioisotopes produced in the nitrogen gas by the beam are described here.

#### 1. 序

茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC では、主リング(以下、MRと略す)が 2024 年に当初の設計ビーム強度である 750 kW を達成したが、その後もさらなるビーム強度増強を目指して機器のアップグレードを継続中である。MR の次なる目標は、速い繰り返し周期 1.36 秒を短縮して一サイクルあたりの陽子数を 320 兆個まで引き上げることで、ビーム強度 1.3 MW を実現することである。MR はビーム調整のために専用のビームダンプを持っているが、7.5 kW という容量の上限値が効率的なビーム調整に対して制約を課すようになった。具体的には、陽子数 320 兆個以上の大強度ビームについては一時間あたり 17 ショット(安全マージンを考えると、実際は 15 ショット程度)以下しか撃つことができない。現在(800~900 kW 運転)においても、大強度ビーム調整時には、一時間あたりのショット数が 20 ショット程度に制限されている。この問題を解決するため、ビームダンプの容量を 7.5 kW から 30 kW にアップグレードする計画が進行中である。現在のビームダンプは自然放熱方式であるが、容量増加に伴い冷却システムが必須となる。ビームダンプの冷却には、窒素ガス循環による空冷システムを用いる。ここではガス空冷システムの詳細、およびビームによって窒素ガス中に生成される放射性同位元素についても詳述する。

#### 2. ビームダンプの増強

J-PARC MR には MR 単独でビーム調整をする際のビーム廃棄場所として、ビームダンプが用意されている。ビームダンプは加速器の MPS (Machine Protection System) 発報時の緊急のビーム廃棄先としても使用され、その容量は 7.5 kW である。現在ビームダンプの容量を 30 kW に増強する計画[1, 2]が進行中であり、2025 年度にダンプコアを製作、2026 年度にその設置を予定している。

<sup>#</sup> masashi.shirakata@kek.jp

ダンプコアの概念図を Fig. 1 に示す。現在の 7.5 kW ビームダンプは自然放熱方式のため冷却機構を持っていない。そのため 30 kW 増強時には、外部から冷却可能なダンプコアを持たせる。ダンプパイプと呼ばれる内径 738 mm のステンレスパイプが壁に埋まっており、この部分の構成は変えられないので、ダンプコアはこのダンプパイプ内部に設置される。ビームのエネルギーはダンプコアで熱に変えられ、外部から窒素ガスを循環することで効率的に熱を取り除く。ダンプコアは 1 m 長のグラファイトコアふたつと 50 cm 長の銅コア、およびそれらを収納して二重円筒構造を形成するステンレス(SUS304)製の円筒構造体により構成される。コアの構成は RAL (Rutherford Appleton Laboratory) の High Power Target Group により検討、最適化されたものである[3]。各コアには J タイプの熱電対を 4 つずつ取り付け、コア温度をモニターする。ダンプパイプの上流には、冷却用窒素ガス導入部を取り付ける。ガス導入部の最上流部には薄いビーム窓を設け、大気環境と隔離する。

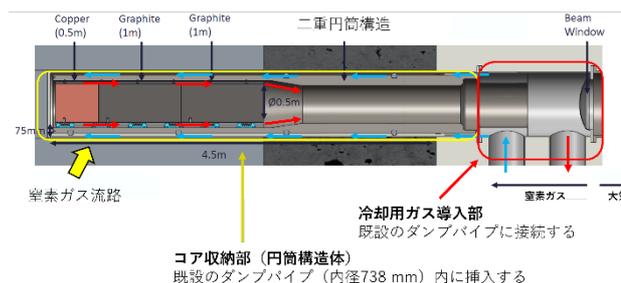


Figure 1: Schematic view of 30 kW beam dump.

#### 3. 窒素ガス循環コア冷却システム

##### 3.1 システムの概要

増強されたビームダンプのダンプコアは、外部から冷却する必要がある。コアの冷却方法には大きく分けて水冷と空冷の二つが考えられるが、ここで考慮すべきは冷媒中に生じる放射性同位元素、とりわけトリチウムの量で

ある。水冷方式は冷却効率の面では大きなアドバンテージがあるが、冷媒中に生じるトリチウム量が多くなる。CERN の陽子シンクロトロンブースターで容量 20 kW のビームダンプを空冷している例があり、J-PARC MR ではそれを参考とすることにした。熱源 30 kW を仮定すると、必要な風量  $Q$  [m<sup>3</sup>/h] は次式で与えられる[4]。

$$Q = \frac{3600 q}{\rho C_p \Delta T} \quad (1)$$

ここで  $q$  は装置発熱量[W]、 $\rho$  は気体密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $C_p$  は定圧比熱[J/(kg K)]、 $\Delta T$  は上昇温度[K]である。温度上昇 22°C を仮定すると、必要風量はほぼ 4000 m<sup>3</sup>/h となる。

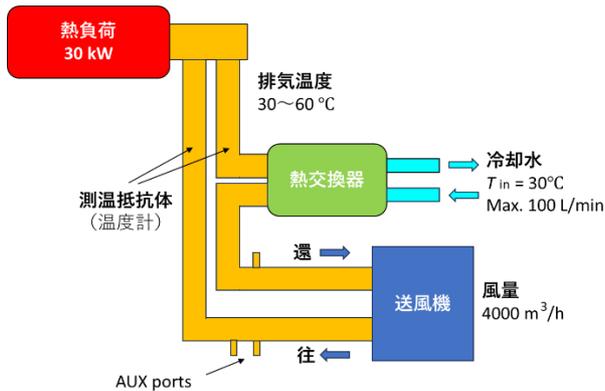


Figure 2: Overview of the dump-core cooling system.

ダンプコア冷却システムの概要を Fig. 2 に示す。送風機で窒素ガスを循環させ、気液熱交換器で除熱するシンプルな構成である。窒素ガス循環系の各要素は、250 A のパイプで繋ぐ。風路全体で見て、この 250 A パイプより狭い場所は銅コア周りの 50 cm 長と気液熱交換機(圧損 67 Pa)の領域だけである。ゆえにシステム全体の圧損は、250 A パイプが単一周しているものとして近似できる。送風機はビームの行き先としてビームダンプが指定されたら運転を開始し、行き先が外れたら一定時間運転した後、停止する。窒素ガス温度は、往きと還りの温度をモニターする。冷却水は、加速器本体の機器冷却用にすでに整備されている冷却水配管の 20 A ポートから調達する。この冷却水の往き温度は、30~32°C に調節されている。

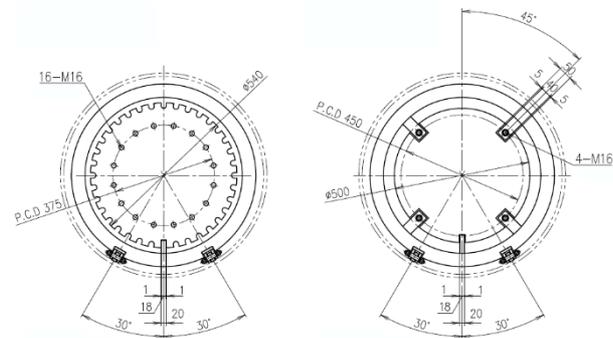


Figure 3: Cross-section view of dump cores.

銅コア、グラファイトコアの断面を Fig. 3 に示す。グラファイトコアには円筒構造体に固定するための支え板が四方向から伸びている。コアを収納する内筒の内法は直径

58 cm、コアの直径は 50 cm であり、銅コアについては冷却用のフィン構造を持たせている。二重円筒間の隙間は 250 A パイプの断面積よりも広く、コア周辺に十分な風量を提供できる。

流路各部の断面積と風速を Table 1 に示す。流路が最も狭くなるのは銅コアの横であり、風速は約 22 m/s となる。発熱量はグラファイトコアの方が大きいですが、そこでも風速 16 m/s 以上を確保している。250 A パイプの 4000 m<sup>3</sup>/h における圧損は 2500 Pa/100 m なので[5]、本システム全体の圧損は 800 Pa 程度と見積もられる。

Table 1: Apertures and Wind Velocities

Place	Cross-section area [cm <sup>2</sup> ]	Wind velocity [m/s]
250A pipe	561.6	19.8
Between pipes	645.9	17.2
Copper side	508.9	21.8
Graphite side	678.6	16.4
Center	2642.1	4.2

### 3.2 窒素ガス中の生成放射性同位元素

ダンプコアを冷却する窒素ガスは、ダンプダクト前半部において陽子ビームが直接貫通する。またコアが放射する大量の二次中性子に晒されるため、核破砕により放射性同位元素が生成される。ほとんどのものは半減期が短いため数日中に消失するが、半減期 53.2 日の Be-7 と半減期 12.3 年の H-3 (トリチウム) は窒素ガス中に残留する。

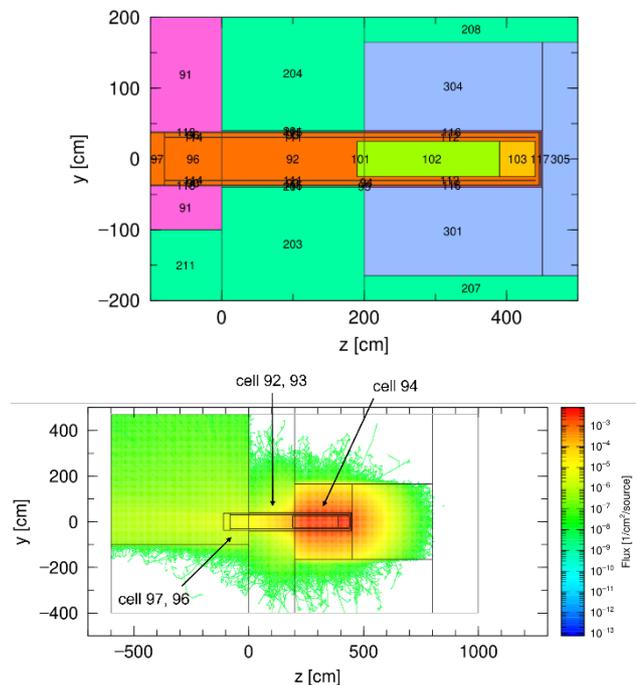


Figure 4: Estimation of neutron flux with PHITS simulator. Up) Structure around dump-cores. Down) Secondary neutron distribution from the dump-cores with 30 GeV proton beam.

Figure 4 に PHITS ver.3.x[6]により算出された中性子分布を示す。ダンプコア周辺をいくつかの領域(cell)に分け、そこで生成される放射性同位元素の総量を dchain[6]を用いて評価した。Cell 92, 96, 97 は内部を 30 GeV の陽子ビームが貫通する。Cell 94 はコア周辺、cell 93 は二重円筒の隙間(窒素ガスの行き流路)に対応する。Table 2 に、各セルにおける Be-7 と H-3 の濃度をまとめる。冷却用ガス導入部を含めたダンプコアにおける窒素ガス流路の体積はほぼ 2 m<sup>3</sup> であり、循環冷却システム本体とダンプコアまでの配管の和もほぼ同じ体積であると仮定する。それらの部分は陽子ビームからも二次中性子からも遠いが、放射化の度合いが cell 93 と同じ環境であるとして安全側に評価した。ビーム調整時間を年間 500 時間とし、その間 30 kW で運転を継続したと仮定すると、ビーム停止から 24 時間後の Be-7、H-3 の総量はそれぞれ 6.6 × 10<sup>8</sup> Bq、4.3 × 10<sup>7</sup> Bq となる。

Table 2: Density of Isotopes

Cell	Neutron flux [n/cm <sup>2</sup> s]	Density (Be-7) [Bq/cc]	Density (H-3) [Bq/cc]
92	3.307e+09	3.153e+02	14.72
93	5.086e+09	9.875	0.9454
94	7.989e+10	4.321e+02	42.64
96	4.174e+08	3.437e+02	12.99
97	1.834e+08	2.574E+02	10.41

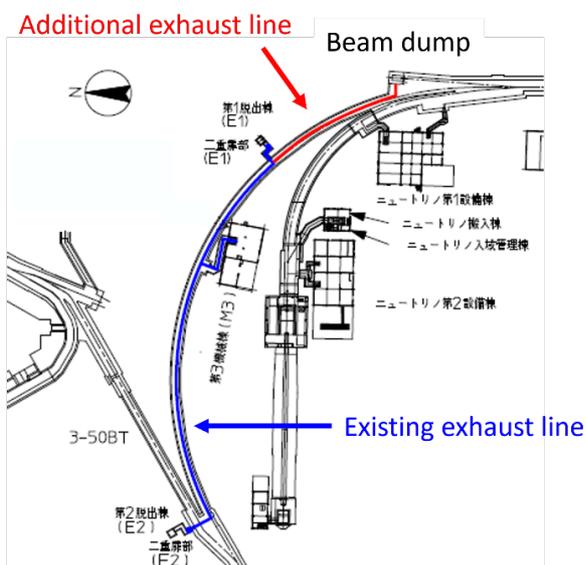


Figure 5: Exhaust lines in the MR tunnel.

冷却システム内部に蓄積した Be-7 と H-3 は適宜ガス分析によりその総量を確認し、適切な時期に排気される。窒素ガスの排気系統を Fig. 5 に示す。MR トンネル内にはトンネル内の空気が外部に漏れないための中間排気設備のパイプが設置されており、ビームダンプからの排気は第一脱出棟サブトンネルからの中間排気経路に合流させる。窒素ガスは中間排気の空気と混ざって、第三機械棟の排気ポートから大気中に安全に放出される。ビ

ームダンプで生成された Be-7 と H-3 の排気システム全体への寄与は、軽微であるため問題とならない。

### 3.3 インターロック

ダンプコア冷却システムでは、熱電対および测温抵抗体を用いて常時ダンプコア本体と循環窒素ガスの温度をモニターする。異常を検知した際は MPS を発報してビーム運転を停止する。その際、冷却用窒素ガスの循環は止めない。熱源となるビームの供給を止めればそれ以上の温度上昇は起きず、窒素ガスの循環継続は安全側の動作だからである。コア本体に取り付ける J タイプ熱電対の耐熱温度は 480°C である。MPS を発報する温度閾値は 300°C 以下とする予定であり、耐性は十分にある。また、ひとつのコアに 4 つずつ取り付けることで、十分な冗長性を持たせている。

本システムにおけるインターロックは、温度インターロックのみである。送風機の動作を確認するため、動力系コンタクトの接点を監視する。なお、送風機には軸動力特性がリミット性のもを使用するため、オーバーロードの危険性はない。

## 4. まとめ

- MR のビームダンプ容量を 7.5 kW から 30 kW に増強する。このため、既設のダンプパイプの中にダンプコアを挿入、設置する。
- ダンプコアは外部からの循環窒素ガスにより冷却する。窒素ガス循環システムは、送風機、気液熱交換器からなるシンプルなシステムである。
- 窒素ガスは気液熱交換を介して、加速器の機器冷却水により冷却する。
- 陽子ビームおよび二次中性子により窒素ガス中に生成される放射性同位元素のうち、残留するものは Be-7 と H-3 である。これらは適切な時期に既存の排気システムを経由して外界に放出される。その際、放射線による問題は生じない。

## 参考文献

- [1] M. J. Shirakata *et al.*, “Re-Design of the Abort Beamline in J-PARC MR”, The 4th J-PARC Symposium (J-PARC2024), Mito, Japan, Oct. 14-18, 2024 (to be published).
- [2] M. J. Shirakata *et al.*, “Radiation Design of New 30 kW Beam Dump of J-PARC Main Ring”, Proc. 10th International Particle Accelerator Conference (IPAC2019), Melbourne, Australia, May 19-24, 2019, pp. 2005-2008. doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPT032
- [3] H. Hotchi, “Beyond 1 MW operation of J-PARC main ring”, The 4th J-PARC Symposium (J-PARC2024), Mito, Japan, Oct. 14-18, 2024 (to be published).
- [4] H. Osawa, “ファンの基礎と選定(使い方)”, SANYO DENKI Technical Report No.40 Nov. 2015, [https://www.sanyodenki.com/archive/document/corporate\\_data/technicalreport/2015/TR40\\_p03\\_Cdiv.pdf](https://www.sanyodenki.com/archive/document/corporate_data/technicalreport/2015/TR40_p03_Cdiv.pdf)
- [5] “技術資料”, Mitsuya F&B Corporation, 2019, [https://www.mitsuyaj.co.jp/dcms\\_media/other/mitsuyafan-technote.pdf](https://www.mitsuyaj.co.jp/dcms_media/other/mitsuyafan-technote.pdf)
- [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). doi:10.1080/00223131.2023.2275736