

J-PARC ハドロン実験施設におけるビームダンプ温度測定

TEMPERATURE MEASUREMENT OF BEAM DUMP AT J-PARC HADRON EXPERIMENTAL FACILITY

上利恵三[#], 里嘉典, 豊田晃久, 森野雄平, 秋山裕信

Keizo Agari[#], Yoshinori Sato, Akihisa Toyoda, Yuhei Morino, Hironobu Akiyama

High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

A beam dump at the J-PARC Hadron experimental facility was made of copper with coolant channels and surrounded with iron and concrete for radiation protection. Forty thermocouples were horizontally attached at the centre of the copper structure to measure the temperature distribution. The temperatures of the beam dump were measured with a Programmable Logic Controller (PLC). The beam position of the temperature distribution was in good agreement with that of Residual Gas Ionization Profile Monitor (RGIPM) at the beam dump during 37-kW and 44-kW beam operation. In addition, the area of the temperature distribution and the sum of the temperatures were approximately proportional to the beam intensity. This paper reports the temperature measurements and the data analysis of the beam dump at the J-PARC Hadron experimental facility.

1. はじめに

J-PARC ハドロン実験施設[1]では加速器により 30 GeV まで加速され、遅く取り出された陽子ビームを二次粒子生成標的[2]に照射し、発生した二次粒子を物理実験に使用している。実験やビーム調整時に使用されなかった陽子ビームはビームダンプ[3]に入射、吸収され、ビームダンプはエネルギーロスにより多大な熱や放射線が発生する。ハドロン実験施設では 2017 年 4 月に 44 kW の陽子ビームで連続運転に成功している。

2. ビームダンプ

ビームダンプ(図 1)は実験時使用されなかったビームを吸収する装置であり、陽子ビームのエネルギーロスによる多大な発熱や放射線の発生が懸念される。ビームダンプは陽子ビームを直接吸収する無酸素銅、その周辺に放射線遮蔽体として鉄、コンクリートから構成される。無酸素銅は陽子ビームを吸収し、エネルギーロスにより発熱する。無酸素銅は $2000 \times 2000 \times 5000 \text{ mm}$ で、この大きさで単体では製作不可能なため、ビーム軸方向に 20 分割、鉛直上下方向に 2 分割され、各無酸素銅ブロックは $2000 \times 1000 \times 250 \text{ mm}$ の大きさである。無酸素銅中心部には円錐状の空洞を作ることで発熱を平均化させる。また無酸素銅の冷却水配管は冷却水の放射化を抑えるため無酸素銅外周部に施される。

またビームダンプ無酸素銅コアの直接ビームを吸収する円錐状空洞表面に予め 36 個の熱電対が水平方向に設置され温度が測定できる。これよりエネルギーロスによる発熱の温度分布からビームプロファイルが確認できる。図 2 に無酸素銅コアの画像を示す。図の黄色の点は熱電対の設置場所を示している。

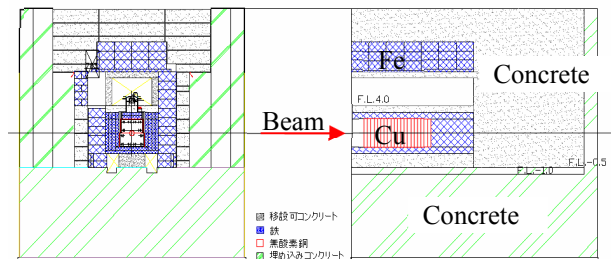


Figure 1: Schematic view of beam dump.

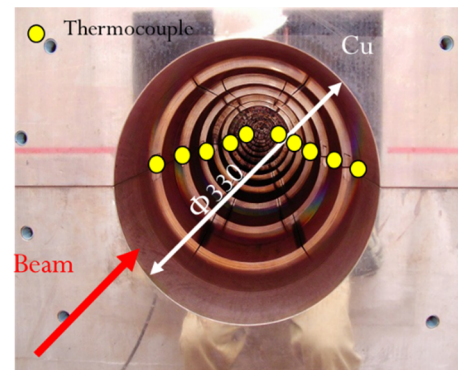


Figure 2: Photograph of the copper core of beam dump.

3. 温度測定方法

ビームダンプの温度測定機器として横河電機製 PLC である FA-M3V シリーズを使用している。

温度測定には温度モニタモジュールを使用した。ある上限値より温度が上昇した場合インターロック信号を出力するため、出力モジュールを使用している。使用したモジュールリストを表 1 に示す。温度測定は 0.1 [sec] 周期で行っている。

[#] agari@post.kek.jp

Table 1: Model Number of PLC Modules

Module	Model number
Sequence CPU	F3SP71-4S
Linux CPU	F3RP61-2L
Temperature monitor	F3CX04-0N
Output	F3YC08-0N

4. ビームダンプ温度解析

4.1 解析方法

今回はビームダンプ温度について解析を行った。解析したすべてのデータはビーム繰り返し時間が 5.52 [sec]、取り出し時間が約 2 [sec]である。

定常のビーム運転時には加速器やハドロン実験施設の装置トラブルなどにより、頻繁にビーム運転が停止する。ビームダンプの温度が飽和したデータを得るため、ビーム運転が 3 時間以上連続的に行われた温度データを選択し、解析した。

解析は水平方向の温度分布から加重平均より計算されたビーム中心位置、温度分布の台形面積、温度 36 点の合計値を算出した。ガウス分布にフィットさせた中心位置も出力した。また中心位置の比較のため、ダンプ上流側に設置されている 2 台の残留ガス型プロファイルモニタ (RGIPM) [4]により、幾何学的にダンプでのビーム中心位置を算出した。ここでダンプ上流側にある RGIPM の中心位置はガウス分布にフィットすることにより出力している。図 3 にビームダンプ、RGIPM の設置位置を示す。

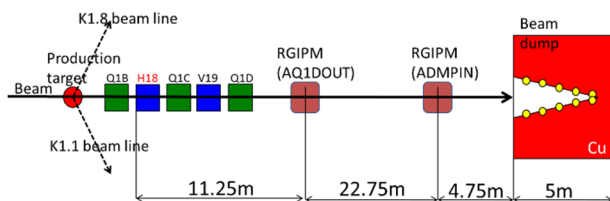


Figure 3: Schematic diagram of the primary beam line at J-PARC Hadron experimental facility. Red box and dark red boxes illustrate beam dump and RGIPMs respectively.

4.2 37kW ビーム運転

まず 2017 年 6 月に行われた 37 kW ビーム運転の温度データを解析した。8 時間 37 分間連続でビーム運転したデータを選択した。

図 4 にビームダンプの温度分布を示す。縦軸は温度、横軸は熱電対が設置された水平方向位置である。青点は実測した発熱温度 (ΔT) で、青線は温度分布をガウス分布でフィットした曲線である。運転時の平均ビーム強度は 4.3×10^{13} [ppp]であった。

図より、 ΔT の最高温度は 14 [K]で、中心位置が -8.08 [mm]であった。温度分布が左右非対称であるため、ガウス分布に正確にフィットできていない。温度分布が左右非対称なのは、加速器から取り出される時に静電セパレータによる影響を受けたためである。

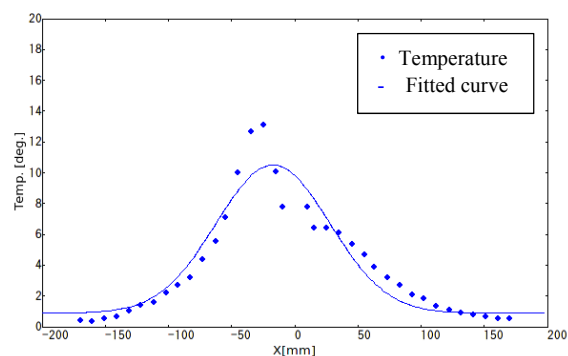


Figure 4: Typical graph of horizontal temperature distribution at beam dump during 37-kW beam operation.

図 5 にビーム中心位置のトレンドグラフを示す。図の緑点は加重平均により計算されたビーム中心位置、赤点はガウス分布にフィットし出力された中心位置、青点は RGIPM から幾何学的に算出された中心位置である。

加重平均と RGIPM により得られた中心位置がよく一致していることがわかった。温度分布が非対称であるため、ガウス分布の中心位置は RGIPM と一致しないことがわかった。

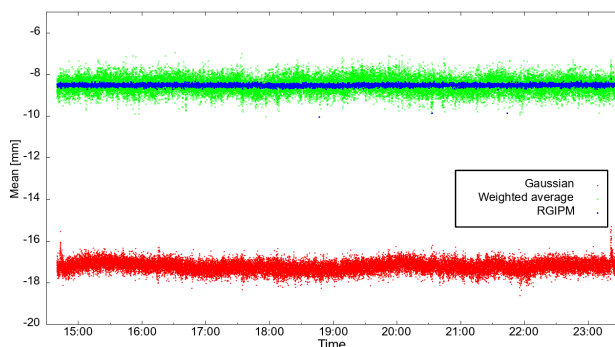


Figure 5: Trend graph of horizontal beam position at beam dump during 37-kW beam operation. Green, blue and red point illustrate the beam positions of weighted average, RGIPM and Gaussian fit respectively.

4.3 44kW ビーム運転

次に 2017 年 4 月に行われた 44 kW ビーム運転の温度データを解析した。連続で 6 時間 14 分間運転した時の温度データを選択した。運転時の平均ビーム強度は 5.1×10^{13} [ppp]であった。

図 6 にビームダンプの温度分布を示す。 ΔT の最高温度は 16 [K]で、加重平均のビーム中心位置は -9.65 [mm]であった。37 kW 時と同様にビームプロファイルは非対称になっている。

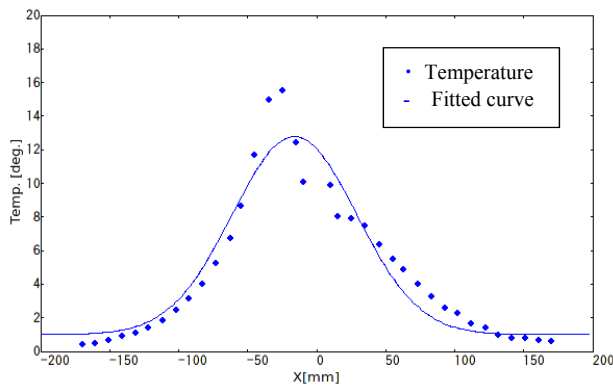


Figure 6: Typical graph of horizontal temperature distribution at beam dump during 44-kW beam operation.

図 7 にビーム中心位置のトレンドグラフを示す。37 kW と同様に加重平均および RGIPM から得られた中心位置がよく一致していることがわかった。特に 14:30~15:30 では加重平均と RGIPM の中心位置は同期して+側に移動している。しかしビームが非対称であるためガウス分布にフィットし出力した中心位置は RGIPM と一致しなかった。

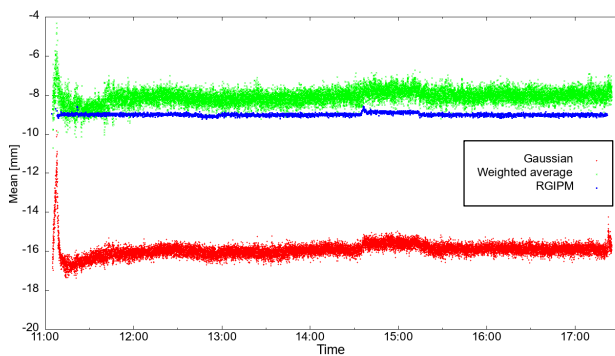


Figure 7: Trend graph of horizontal beam position at beam dump during 44-kW beam operation.

4.4 ビーム強度依存性

温度分布の台形面積、温度 36 点の合計値とビーム強度の関係を調査した。調査対象はビーム強度が $3.0 \times 10^{13} \sim 5.1 \times 10^{13}$ [ppp]である。

結果を図 8 に示す。図の赤四角は温度分布の台形面積、緑三角は温度 36 点の合計値である。縦軸は赤四角が面積、緑三角が温度、横軸は両方とも主リングでのビーム強度を表し、これらの点を線形近似した。

図より温度分布の台形面積や温度 36 点の合計値はビーム強度に比例していることが分かる。線形近似は台形面積が $y = 2.95 \times 10^{-11} x + 7.96$ 、温度の合計値が $y = 3.64 \times 10^{-12} x - 15.4$ になった。

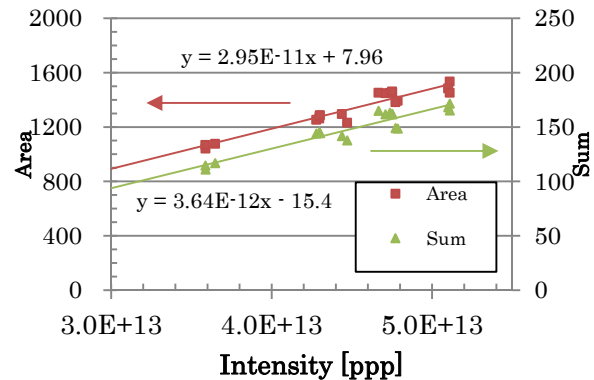


Figure 8: Plot of area and sum of temperatures vs beam intensity.

5. まとめ

J-PARC ハドロン実験施設でビーム運転時のビームダンプ温度測定、解析を行った結果、以下のことが分かった。

- 温度分布の加重平均により計算された中心位置は上流に設置された RGIPM から幾何学的に計算された中心位置とほぼ一致した。
- 温度分布が非対称であるため、ビーム中心位置はガウス分布にフィットしたものを使用すべきではない。
- 温度分布の面積や温度の合計値はビーム強度に比例している。

参考文献

- [1] K. Agari *et al.*, "Secondary charged beam lines at the J-PARC hadron experimental hall", Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP), Volume 2012, Issue 1, 1 January 2012, 02B009 (16 pages).
- [2] H. Takahashi *et al.*, "Indirectly water-cooled production target at J-PARC hadron facility", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, September 2015, Volume 305, Issue 3, pp. 803-809.
- [3] K. Agari *et al.*, "Development and Construction of the Beam Dump for J-PARC Hadron Hall", Proceedings of the 2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC), San Sebastian, Spain, Sep. 4-9, 2011, pp. 1608-1610.
- [4] Y. Sato *et al.*, "Development of Residual Gas Ionization Profile Monitor for High Intensity Proton Beams", IEEE Nuclear Science Symposium Conference, Puerto Rico, Oct. 23-29, 2005, pp. 1043.