

# DEVELOPMENT OF BEAM PROFILE MONITOR MEASURED BY TEMPERATURE DISTRIBUTION OF BEAM ABSORBER

Keizo Agari, Masaharu Ieiri, Yohji Katoh, Yoshinori Sato, Shinya Sawada, Yoshihisa Shirakabe, Yoshihiro Suzuki, Hitoshi Takahashi, Minoru Takasaki, Kazuhiro Tanaka, Akihisa Toyoda, Megumi Naruki, Hiroyuki Noumi<sup>A)</sup>, Erina Hirose, Michifumi Minakawa, Ryotaro Muto, Yutaka Yamanoi and Hiroaki Watanabe  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801  
A) Osaka University  
10-1, Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

## Abstract

Beam profile measurement by the distribution of temperature rise of the beam absorber has been tested in the present research. A prototype beam-absorber with 85 thermocouples attached at the surface of the absorber was fabricated and tested with 65-MeV proton beam at Research Center for Nuclear Physics, Osaka University. In the test experiment, beam profiles at the absorber up to 4 $\mu$ A were well agreed with those measured at the phosphor screen in front of the absorber.

## ビーム吸収体の発熱を利用したプロファイルモニタの開発

### 1. はじめに

J-PARC、LHCなどに代表される大強度加速器はビームを制御する電磁石・粒子モニタ・真空機器・ビームダンプ<sup>[1]</sup>・コリメータなどの機器に多大な放射・発熱が予想される。特にビームダンプ・コリメータのようなビーム吸収体は実験に使用しなかったビームや2次粒子を吸収するため、他機器より過酷な条件で運転される。

しかしこの大強度化によるビーム吸収体の多大な発熱をプロファイルモニタとして利用する。その方法としてはビーム吸収体の直接ビームを吸収する表面に等間隔に熱電対を設置し、ビーム入射前後による温度差を測定し、各測定点の温度勾配からビームの空間分布が把握することができる。

従来のビームラインではビーム吸収体前にプロファイルモニタを設置することにより、ビーム位置を確認しながら安全に吸収体へ入射していた。このモニタが利用可能なら、従来のモニタが不必要になり、その前後にあった真空膜・真空パイプ接続機器なども不必要になる。そして装置数の減少や熱電対が無機物で耐放射線性を有していることにより、故障確率が減り、メンテナンス・修理・修復時間も減少し、被曝作業も減少する。

このモニタが正確に動作するか、まずシミュレーションを行い、ビームによる発熱を計算し、実験可能か確認した。実験は大阪大学核物理研究センター(RCNP)リングサイクロトロン実験施設で行うため、このビーム性能を用い計算した。

次に大強度加速器のビーム吸収体に比べ形状の小さい実験モデルを製作し、RCNPで陽子ビームを用い実験をすることによりビームプロファイルモニタ

として利用できるか確認した。温度測定にはシース型熱電対を用い、発熱データは高速で測定できる計測器を使用した。実験ではビーム強度や電磁石でビーム位置を変化させ、ビームプロファイルが正確に測定できるか調べた。

### 2. シミュレーション

数値シミュレーションでは陽子ビームのエネルギー寄与による発熱を計算した。ビーム吸収体へのエネルギー寄与はMARS<sup>[2]</sup>で、発熱はMARSの計算結果を用い有限要素法(FEM)シミュレーションソフトANSYSにより計算した。ビーム性能は50MeV-1 $\mu$ A、 $6.24 \times 10^{12}$ [ppp]とし、ビーム形状はガウス分布で発熱を大きくするため標準偏差 $\sigma$ を±5mmとした。

ビーム吸収体は材質を熱伝導が低いステンレスとし、直径200mm、高さ250mmの円柱対称モデルとした。ビームを直接吸収する中心部には円錐状の空洞(直径40mm、高さ200mm)があり、実験時にはこの場所に熱電対を設置する。吸収体外周部の熱伝達係数は $10,1000$ [W/m<sup>2</sup>·K]としそれぞれ空冷・水冷を仮定し計算したが、数十秒では計算結果が全く同じになった。これはビームを吸収した初期では外周部の熱伝達の影響は受けず熱伝導による拡散のみが影響しているためで、今回の計算では熱伝達係数を $10$ [W/m<sup>2</sup>·K]とし、雰囲気温度は30°Cとした。

図1にシミュレーション結果を示す。結果より中心部の発熱温度は9.3[K]となり、プロファイルとして測定可能な温度上昇であることがわかる。また10秒間では熱伝導が外周部に及んでいない。

以上より計算で用いたビーム性能、ビーム吸収体の寸法・材質を採用し、RCNPで実験を行うことと

した。

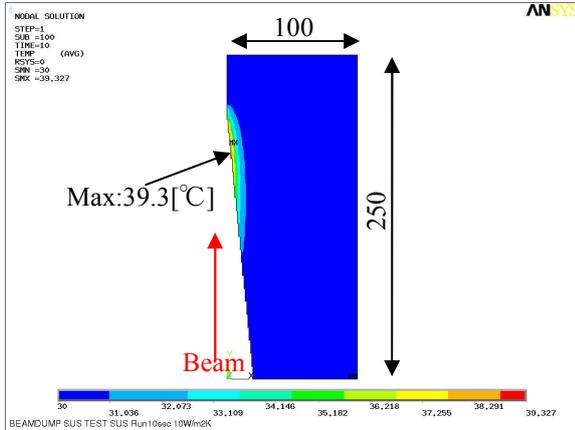


Figure 1 Result of FEM calculation

### 3. RCNP での実験

#### 3.1 実験装置

実験は大阪大学核物理研究センター、リングサイクロトロン実験施設 ENN コースで行った。陽子のビームエネルギーは 65[MeV]、強度は最大 4[ $\mu$ A]まで利用した。実験装置の概略を図 2 に示す。加速器から取り出された陽子ビームは真空パイプ、電磁石を通り、最終的にビーム吸収体に吸収される。ビーム吸収体は 200×200×250mm で、200×200×10mm の鉄板 25 枚から構成される。ビームを吸収する中心部にはビームを平均化して吸収できる円錐状の空洞（直径 40mm、高さ 200mm）が加工され、そこに熱電対が設置される。上流側 20 枚には 4 個の熱電対をビーム中心から上下左右に設置し、下流側 5 枚は中心に 1 個設置した。温度測定は K 型熱電対を用い、測定周期は 10[msec]である。ビーム吸収体上流には蛍光板を設置し、温度分布と比較した。

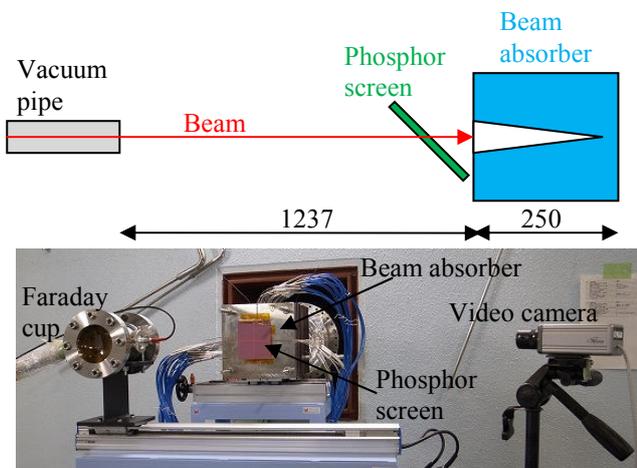


Figure 2 Experiment setup at RCNP

#### 3.2 ビーム強度依存性

ビーム強度を 0.1-4.0[ $\mu$ A]に変化させ、強度による温度分布の変化を調べた。ビーム照射時間を 5 秒に設定し、温度は照射から 5 秒後を使用し、ガウス分布でフィッティングした。x, y 方向は上流から見てそれぞれ上、右を正とする。

温度分布の結果を図 3,4 に示す。0.1[ $\mu$ A]ではビーム強度が低いために発熱が少なかったが、フィッティングすることによりプロファイルが確認できた。

ビーム吸収体上流に設置した蛍光板と温度分布を比較（図 5-7）した結果、下記の事がわかった。

- 水平方向のビーム中心は温度分布と蛍光板が 1.7mm 以内で一致したが、垂直方向は最大 4.2mm 離れた。
- 温度分布の標準偏差  $\sigma$  は水平、垂直方向ともに約 12mm であった。
- しかし蛍光板の  $\sigma$  は強度が上がるとつれ大きくなる傾向を示した。これは蛍光板のビーム中心部の輝度が飽和したためである。
- シミュレーションとは異なり実験ではビームが広がってしまった。これは真空膜や空気部分が 1.24m あり、そこで多重散乱したためであると考えられる。
- 図 7 より J-PARC ハドロン実験施設でのビームダンプ<sup>[3]</sup>と同様に温度によるガウス分布の積分 A はビーム強度に比例していることがわかる。
- 空洞へのビーム入射率は温度分布の中心と標準偏差  $\sigma$  より 86~89%が入射した。

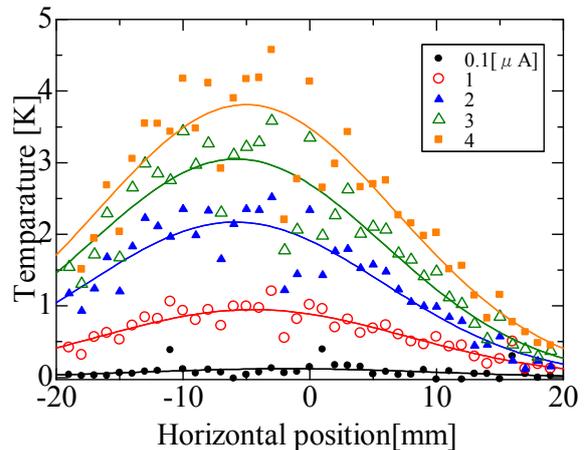


Figure 3 Horizontal temperature distributions with several intensities

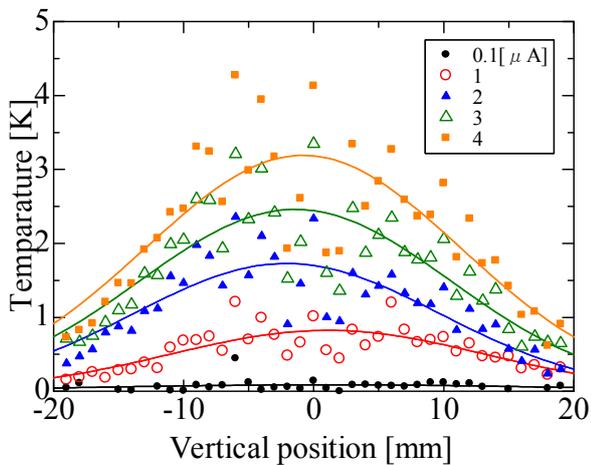


Figure 4 Vertical temperature distributions with several intensities

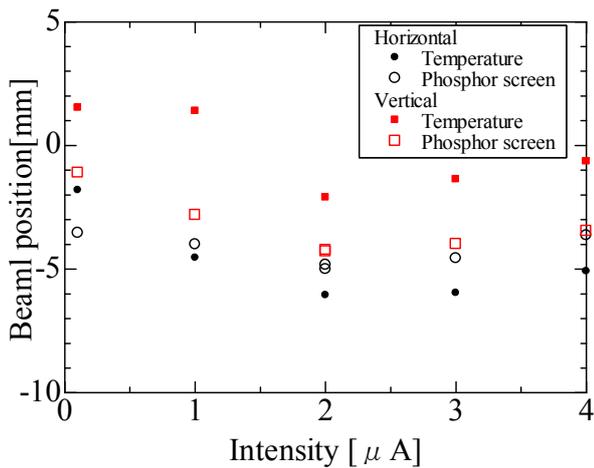


Figure 5 Beam positions with several intensities

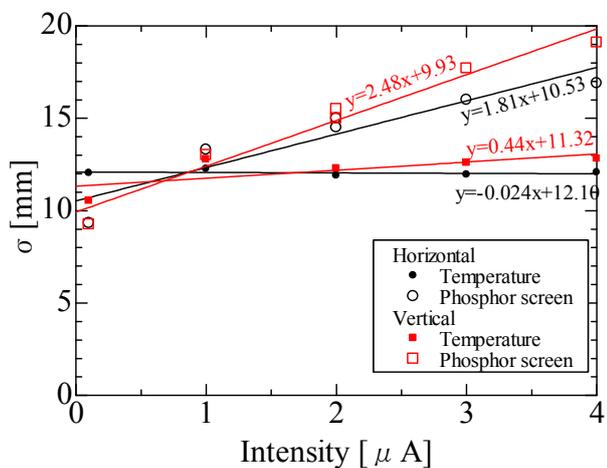


Figure 6 Beam sigma values with several intensities

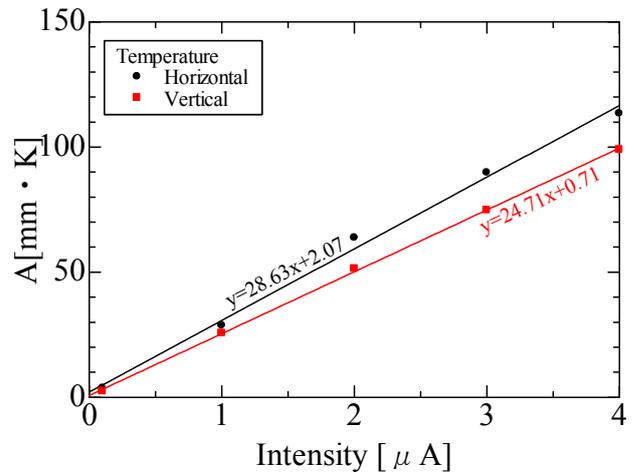


Figure 7 Gaussian area of temperature distributions with several intensities

### 3.3 位置依存性

次にビーム吸収体上流の偏向電磁石を使用し、ビーム中心を変えても正確に測定可能か調べた。ビーム強度は  $1[\mu\text{A}]$ 、電磁石の電流値を変化させ、水平、垂直方向のビーム中心を移動させた後、5秒間吸収体へ入射した。入射から5秒後の温度分布を図8,9に示す。また温度分布と蛍光板の結果の比較を図10,11に示す。結果として下記の事がわかった。

- 水平方向のビーム中心位置は温度分布と蛍光板がよく一致した。
- しかし垂直方向は定性的に一致したが、平均で  $3.3[\text{mm}]$ の差ができた。これは強度依存性でもこの傾向は見られた。
- 標準偏差  $\sigma$  はよく一致し、 $12\sim 13[\text{mm}]$ だった。
- 空洞への入射量は温度分布が  $80.9\sim 90.5[\%]$ 、蛍光板が  $83.8\sim 87.4[\%]$ であり、水平方向の偏向電磁石の電流が  $2[\text{A}]$ で最低値となった。

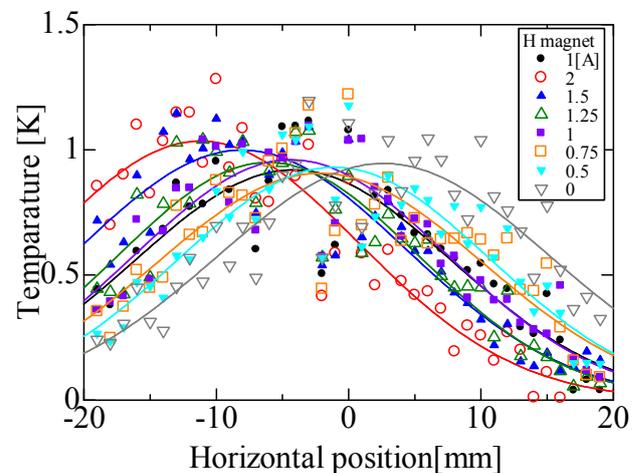


Figure 8 Horizontal temperature distributions at  $1[\mu\text{A}]$

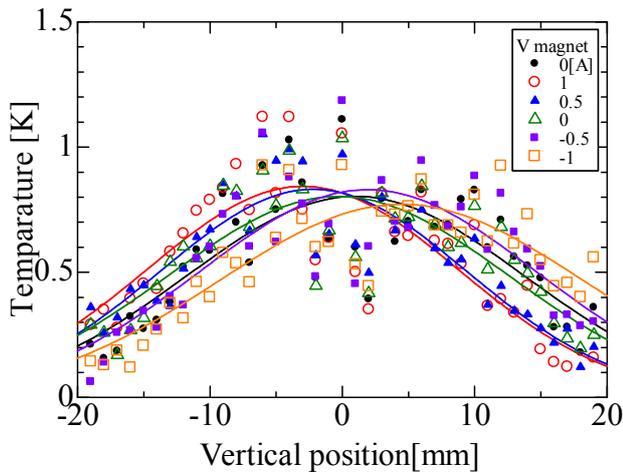


Figure 9 Vertical temperature distributions at 1 [μ A]

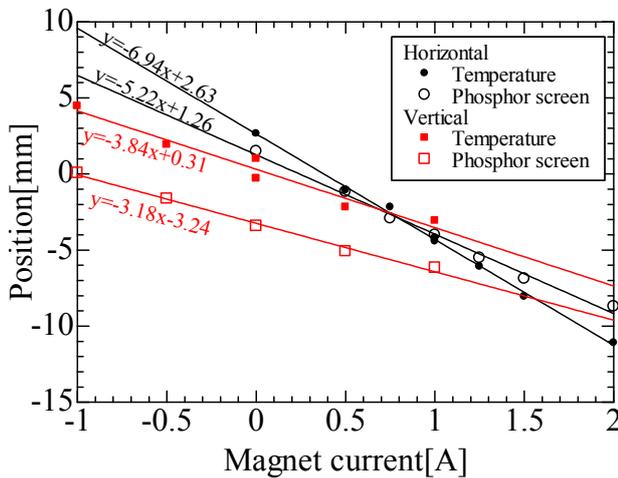


Figure 10 Comparison of beam positions at 1 [μ A]

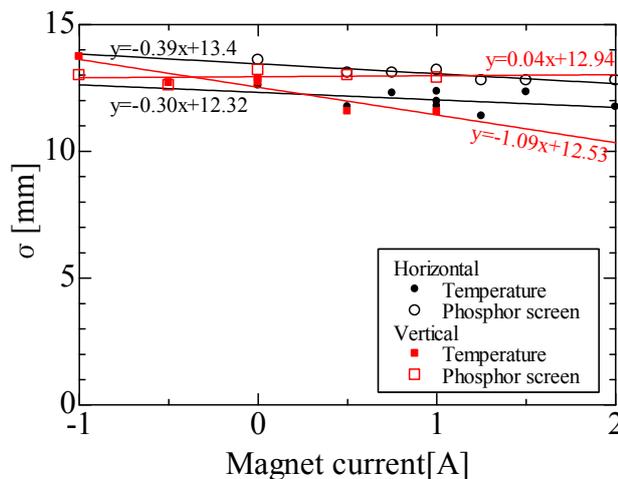


Figure 11 Beam sigma values at 1 [μ A]

#### 4. まとめ

ビーム吸収体の発熱を利用したビームプロファイルモニタを開発することにより以下の事がわかった。

数値シミュレーションより、

- 陽子ビームが 50MeV-1 μ A でステンレス製ビーム吸収体へ 10 秒入射することにより、温度が最大で 9.3[K]上昇し実験可能であることがわかった。
- 計算より実験モデルは 200×200×250mm の鉄を採用し、ビームを吸収する中心部には円錐状空洞を加工した。そこには実験時温度測定用の熱電対を設置した。

RCNP での実験でビーム強度を変化させた時、

- 大阪大学核物理研究センター、リングサイクロトロン実験施設で実験を行った。強度を変化させ、ビームプロファイルを測定した結果、水平方向のビーム中心は温度分布と蛍光板が 1.7[mm]以内で一致したが、垂直方向は最大 4.2[mm]離れた。
- 温度分布の標準偏差 σ は水平、垂直方向ともに約 12[mm]であった。しかし蛍光板の σ は強度が上がるにつれ高くなる傾向を示した。これは蛍光板のビーム中心部の輝度が飽和したためである。
- 温度によるガウス分布の積分 A はビーム強度に比例していることがわかる。
- 温度分布の空洞へのビーム入射率は 86~89%であった。吸収体上流にあった真空膜や空気部の影響でビームが広がったと考えられる。

偏向電磁石によりビーム位置を変化させた時、

- 温度分布と蛍光板は水平方向がよく一致したが、垂直方向が 3.3[mm]のずれが生じた。
- 標準偏差 σ はよく一致し、12~13[mm]だった。

#### 5. 謝辞

実験時にご協力頂いた大阪大学核物理研究センターのスタッフの皆様に感謝の意を表します。

一連の研究は、文部科学省科学研究費「若手研究(B): 22740184」によって支援されている。

#### 参考文献

- [1] K. Agari et al., "DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF THE BEAM DUMP FOR J-PARC HADRON HALL", Proc. of 2011 Intr. Part. Accel. Conf., pp.1608-1610, 2011. 9
- [2] N.V. Mokhov, "The Mars Code System User's Guide", Fermilab-FN-628(1995); O.E. Krivosheev, N.V. Mokhov, "MARS Code Status", Proc. Monte Carlo 2000, Conf., p. 943, Lisbon, October 23-26, 2000; Fermilab-Conf-00/181(2000); N.V. Mokhov, "Status of MARS Code", Fermilab-Conf-03/053(2003); N.V. Mokhov, K.K. Gudima, C.C. James et al, "Recent Enhancements to the MARS15 Code", Fermilab-Conf-04/053(2004); <http://www.fnal.gov/MARS/>.
- [3] 上利恵三等, "J-PARC HD-Hall ビームダンプの設計・開発(5)", 第 8 回日本加速器学会年会報告集, pp. 327-329, 2011. 8