

J-PARC ハドロン high-p ビームライン用 高感度残留ガスプロファイルモニタの電場解析

ELECTRIC FIELD SIMULATION OF HIGH SENSITIVITY RESIDUAL GAS IONIZATION PROFILE MONITOR FOR J-PARC HADRON HIGH-P BEAMLINE

上利恵三[#], 里嘉典, 豊田晃久, 森野雄平, 小松雄哉, 秋山裕信

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

High Energy Accelerator Research Organization, KEK

Abstract

A beam profile monitor of B-line (High momentum beamline) split from primary proton beamline (6×10^{13} protons/spill) at J-PARC Hadron Experimental Facility is developed because of a lower beam intensity ($\sim 1 \times 10^{10}$ protons/spill) and a high radiation level. The measurement principle of the beam profile monitor is that ionized electrons generated by residual gas are converted into light with a phosphor screen, and then the light amplified with an Image Intensifier is taken with a camera. Uniformed electric field around passing beam region is required to accelerate the generated ionized electrons toward the phosphor screen with applied inner electrodes. Therefore, we calculated electric field with a FEM simulation code to establish the appropriate structure of the inner electrodes. This paper reports the numerical calculation result of electric field and the appropriate structure of the inner electrodes for the beam profile monitor at the B-line of J-PARC Hadron Experimental Facility.

1. はじめに

J-PARC ハドロン実験施設 (Fig. 1)[1]の B ライン(高運動量ビームライン)の建設は 2020 年に完了し、ビーム運転が開始された。ランバートソン電磁石[2]により、陽子ビームの一部($\sim 1 \times 10^{10}$ protons/spill)が B ラインに取り出され、残りの大部分の陽子ビーム (6×10^{13} protons/spill, 2021 年 6 月現在)が A ラインへ導かれ、それぞれの実験エリアで使用される。B ラインのビーム強度は低く、かつ真空度が 1 Pa と低いことにより、生成される電離電子は少ない。よって何らかの増幅が必要になるが、マイクロチャンネルプレートや電子管など増幅装置をビームライン近傍に設置すると、バックグラウンドが大きくなる。また増幅装置は放射線に弱いのでビームライン近傍には設置できない。よって通常の残留ガスプロファイルモニタ[3]でビームプロファイルの観測は困難になる。そこで B ラインでプロファイルモニタとして電離電子を蛍光体へ導き、光に変換・増幅させて測定する高感度残留ガスプロファイルモニタ[4]を開発している。

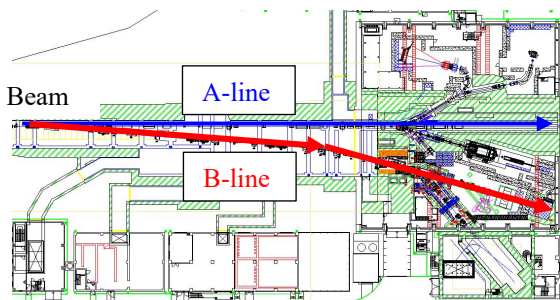


Figure 1: Drawing of J-PARC Hadron beamline.

2. 測定原理

高感度残留ガスプロファイルモニタの測定原理を Fig. 2 に示す。残留ガスで生じた電離電子を蛍光体によりバックグラウンドの低い光に変換し、イメージインテンシファイア (IIT) により光を増幅し、カメラで撮影してビームプロファイルを観察する。水平方向のビームプロファイルを観察するためには、水平方向は一樣で、鉛直方向は段階的に変化する空間電圧分布が必要であり、真空チェンバ内に電圧を印加した電極を設置する。今回は有限要素法解析ソフトウェアにより、ビーム周辺の内部電極、真空チェンバやダクトを含めたモデルを構築し、空間電圧分布を計算することにより、必要な空間一様性が得られる最適な内部電極の構造を調査した。

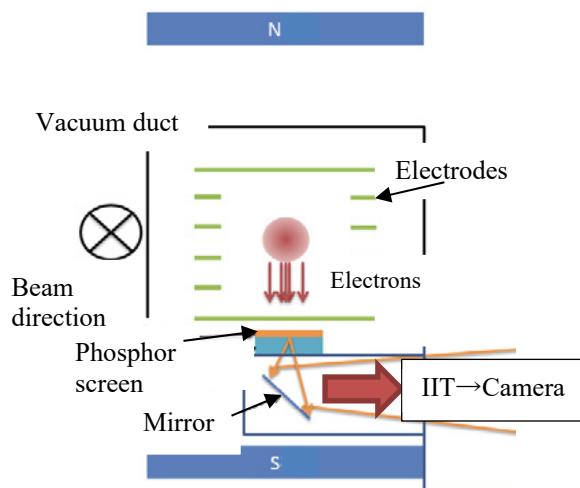


Figure 2: Schematic diagram of beam profile monitor.

[#] agari@post.kek.jp

3. シミュレーション

3.1 計算モデル

電圧を印加した内部電極による空間電圧分布の計算は有限要素法解析ソフトウェア ANSYS[5]を用い、行った。典型的な計算モデルを Fig. 3 (Fig. 2 と天地が逆) に示す。モデルは真空チェンバ中心から 1/4 対称とする。陽子ビームは Fig. 3 の赤色矢印のように通過し、その周辺で発生した電離電子は紫色矢印のように鉛直上方向へ収集される。発生した電離電子を蛍光体へ導くため、電圧を印加した内部電極を設置し、どのような空間電圧分布を得られるか計算した。内部電極はビームが通過する領域と蛍光体がある領域の 2 箇所ありそれぞれを便宜上、下部電極、上部電極と呼ぶこととする。円柱型の真空チェンバは半径 130 または 150 mm、直方体の真空ダクトは幅 200 mm、高さ 100 mm とし、長さはチェンバ中心から 500 mm とした。真空チェンバやダクトの内部は真空状態とし、比誘電率は 1 とした。また真空チェンバやダクトの外周はアースされているため、印加電圧を 0 V とした。真空チェンバやダクトの形状は Fig. 3 に固定し、3 種類の内部電極の計算モデルを構築し、静電場解析を行った。

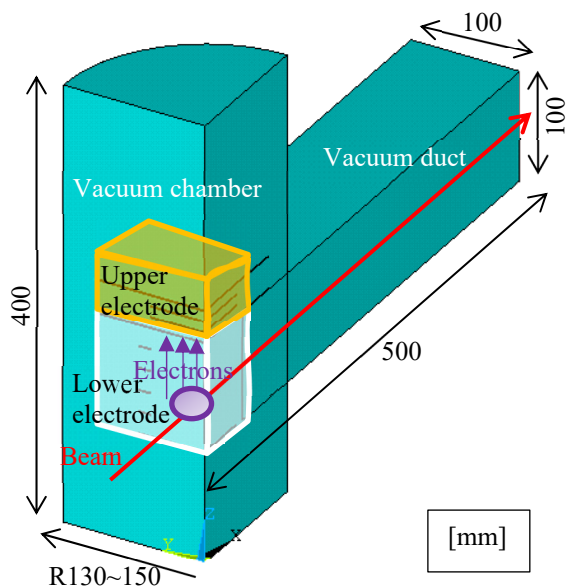


Figure 3: Typical simulation model of beam profile monitor.

目標とする空間電圧分布の条件は下記になる。

- ビームが通過する領域は水平方向が一様、鉛直方向が段階的に変化する空間電圧分布
- 放電が発生しない内部電極の構造 (例、角を丸めるなど)

3.2 モデル 1

モデル 1 の真空チェンバ (半径 150 mm) およびダクトは Fig.3 と同様な形状とし、内部電極は Fig. 4 の構造とした。下部電極は鉛直下から上方向へ -5 kV から -4.95 kV まで 10 V 間隔で、上部電極は -4.95 kV から 0 V を印加した。

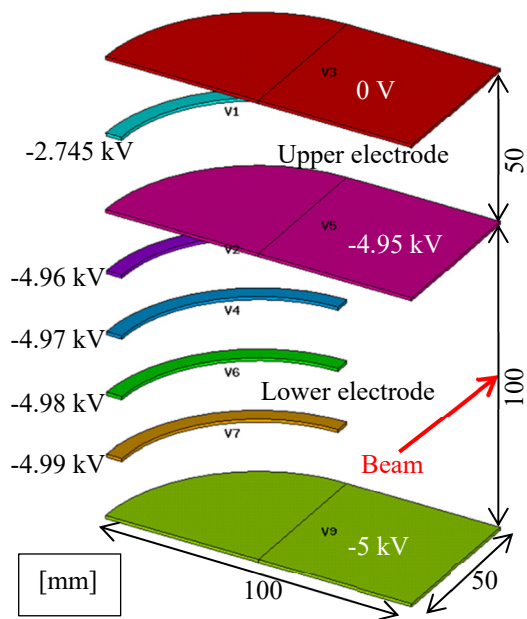


Figure 4: Schematic diagram of model-1 inner electrode.

下部電極の結果を Fig. 5 に示す。コンター図の電圧範囲は -5 k から -3.6 kV に設定した。図より、下部電極周辺の特にビームが通過する中心部で水平方向の電圧分布の一様性が見られなかった。これは -5 k から -4.95 kV までの電圧を印加した下部電極が、0 V でアースされた真空チェンバやダクトから影響を受けたためである。またビームが通過する領域の電極が湾曲しており、ビームが通過する領域から遠くなったためとも考えられる。

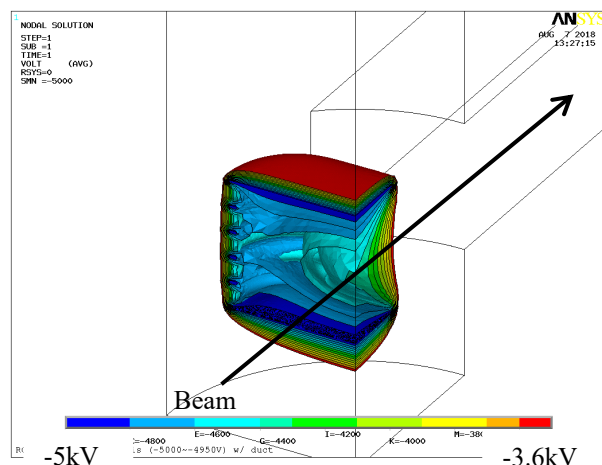


Figure 5: Electric field of model-1 simulation.

3.3 モデル 2

モデル 2 の内部電極の構造を Fig. 6 に示す。真空チェンバ(半径 150 mm)やダクトの外周部の寸法はモデル 1 と同様である。下部電極をビームが通過する領域に極力近づけるため、円弧形状から長方形へ変更し、印加電圧は鉛直下から上方向へ-100 から 0 V まで 20 V 間隔とした。また上部電極は電極間の距離を 50 から 20 mm に狭め、印加電圧は 0 から 5 kV とした。

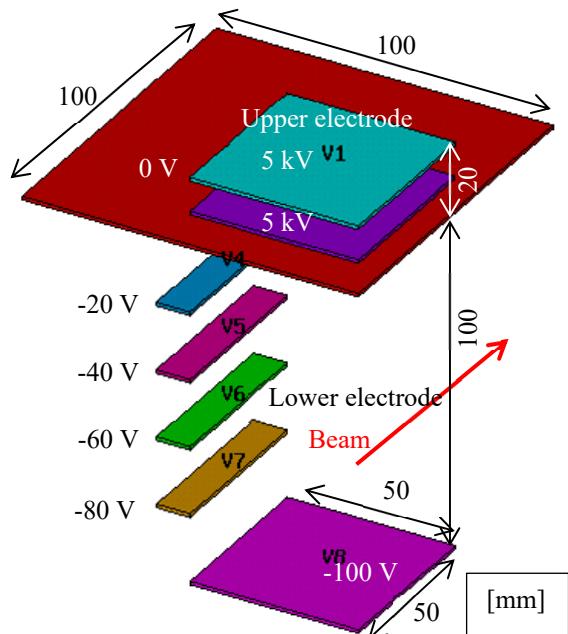


Figure 6: Structure of model-2 inner electrode.

下部電極の計算結果を Fig. 7 に示す。コンター図は -100 から 0 V の範囲で設定した。下部電極では水平方向に一様な電圧分布が得られ、モデル 1 から改善されたことがわかった。これは下部電極の印加電圧を変更し、0 V にアースされた真空チェンバやダクトからの影響が少なくなったためである。また 0 V の上部電極は他の電極より面積を大きくするよう変更し、5 kV の上部電極から下部電極への影響を極力少なくできたためでもある。

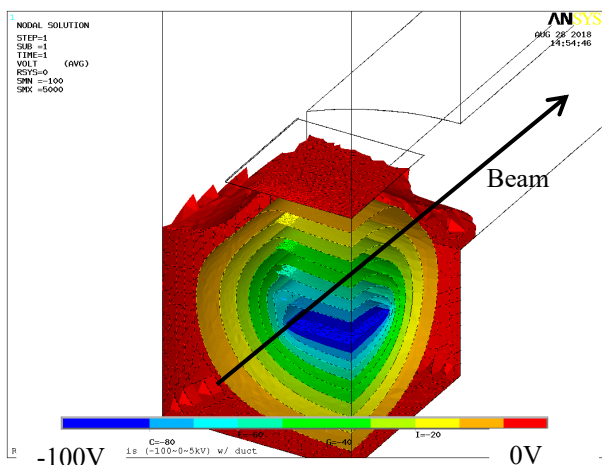


Figure 7: Simulation result of model-2 electric field.

3.4 モデル 3

モデル 3 の内部電極の構造を Fig. 8 に示す。実機サイズにより近づけるため、真空チェンバの半径は 130 mm に変更した。最下部電極はビーム中心からの距離を 50 から 60 mm に変更した。上部電極の印加電圧は 0 から 5 kV とし、真空チェンバやダクトの影響を排除するため、さらに上部に 0 V の大きな電極を追加した。また放電を防ぐため上部電極は角を丸めている。

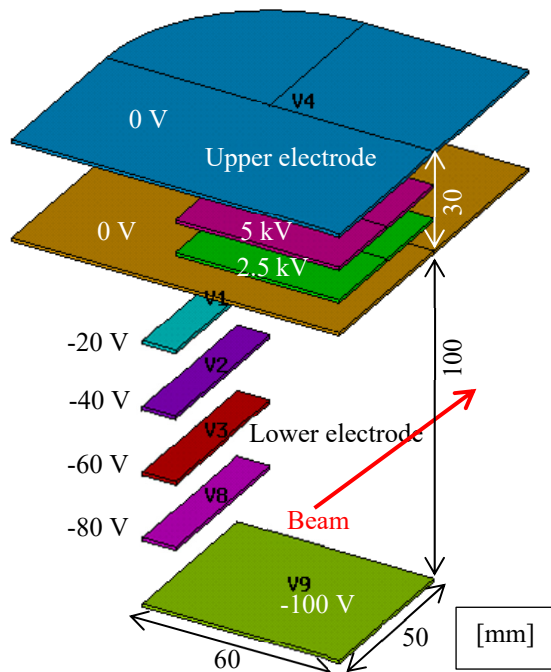


Figure 8: Schematic diagram of model-3 inner electrode.

計算結果を Fig. 9 に示す。コンター図は -100 から 0 V の範囲で設定した。モデル 2 と比較し、さらに水平方向の電圧分布の一様性が見られたため、このモデルを実機に採用することにした。

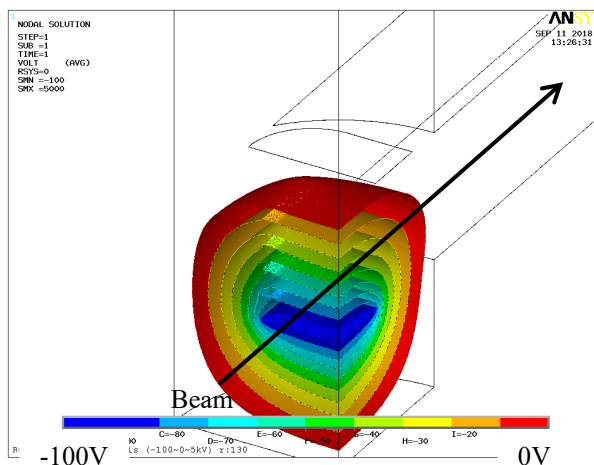


Figure 9: Electric field of model-3 simulation.

4. 内部電極

モデル 3 の構造を採用し、製作された内部電極を Fig. 10 に示す。構造物や内部電極は放電を防ぐため、極力角を丸めている。蛍光体周辺の板状の電極は電離電子を極力通過させるため、メッシュ形状にし、電圧を印加している。この内部電極は B ラインに設置され、陽子ビームを使用し、ビームプロファイル測定可能か試験が行われる。

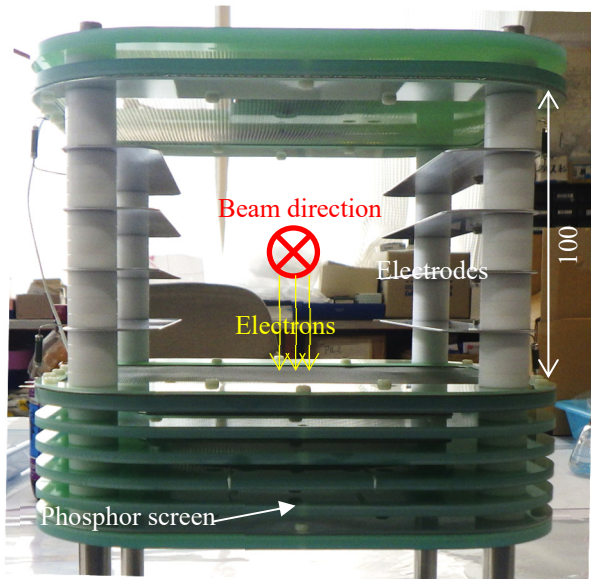


Figure 10: Photograph of inner electrodes.

5 まとめ

高感度残留ガスプロファイルモニタの内部電極による空間電圧分布を有限要素法ソフトウェアで計算したことにより、下記のことになった。

- アースされた真空チェンバやダクトの影響を少なくするため、ビームが通過する周辺の下部電極の印加電圧を 0 V に近い値にすることにより、水平方向に一様で、鉛直方向に段階的に変化する電圧分布が得られた。
- 蛍光体周辺の上部電極の上下をアースされた大きな電極で挟むことにより、下部電極の電圧分布や真空チェンバへの影響を少なくすることができた。
- モデル 3 を基礎とした内部電極を製作した。製作した内部電極を含む高感度残留ガスプロファイルモニタはビームラインへの設置が完了し、現在ビームプロファイル測定できるか陽子ビームを使用し調査している。

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費基盤研究 (B)(18H01238) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] K. Agari *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys., 2012, pp 02B009-1 – 02B009-16.
- [2] R. Muto *et al.*, “Development of Lambertson Magnet and Septum Magnets for Splitting 30-GeV Proton Beam in Hadron Experimental Facility at J-PARC”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity VOL. 26, NO. 4.
- [3] Y. Sato *et al.*, “Profile Measurements of Proton Beam with Residual Gas Ionization Profile Monitors at J-PARC Hadron Facility”, 第 8 回日本加速器学会年会プロシーディングス, pp. 485-487.
- [4] A. Toyoda *et al.*, “Development of high sensitivity Residual Gas Ionization Profile Monitor for J-PARC Hadron beamline”, 第 16 回日本加速器学会年会プロシーディングス, pp. 498-500.
- [5] <https://www.ansys.com/>