

令和 4 年 5 月 17 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18306

研究課題名(和文)次世代大強度ビームの縦方向測定に向けた非破壊型ビームモニタの開発

研究課題名(英文)Development of Nondestructive Beam Monitor for Longitudinal Measurement of Next Generation High Intensity Beams

研究代表者

守屋 克洋(Moriya, Katsuhiko)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・研究職

研究者番号：70805324

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文): ビーム進行方向の分布幅を測定するために、J-PARCのような陽子加速器ではバンチシェイプモニタ(BSM)を用いる。ビームをワイヤに当て、生成した2次電子を収集することでビーム幅を測定する。しかし、大強度かつ低エネルギービームの測定では、ワイヤは破断しビームを測定できない。本研究では、ワイヤの代わりにガスと電極を用いた非破壊型BSMを製作し、ビーム試験を行った。試験の結果、2次電子は検出できなかったが、これは2次電子生成量が従来に比べて極めて少ないためである。本研究により、非破壊型BSMの実現には、ワイヤの代わりだけでなく2次電子検出機構の改良も必要であることが分かり、課題を明確にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

加速器ビームを計測する機器の課題は多様で、これまで測定できなかったものを測定することや、破壊型モニタから非破壊型モニタに変えること等である。本研究は両方の実現を目指すもので、加速器の安定化に繋がる研究である。これは更なる大強度加速器の実現が可能となり、学術的には稀な事象の発見に繋がる。また、加速器は基礎科学だけでなく、材料工学や医療、文化財研究等に利用されているため、加速器の安定化は科学の社会普及を円滑に進めることになり、社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文): To measure the distribution width in the beam travel direction, a bunch shape monitor (BSM) is used in a proton accelerator such as J-PARC. The beam width is measured by hitting the beam onto a wire and collecting the produced secondary electrons. However, when measuring high intensity and low energy beams, the wire breaks and the beam cannot be measured. In this study, we fabricated a nondestructive BSM using gas and electrodes instead of wires and conducted beam tests. As a result, the secondary electrons could not be detected, but this is because the amount of produced secondary electrons is extremely small compared to conventional BSM. This study clarified the issue, showing that the realization of a nondestructive BSM requires not only the replacement of the wire but also the improvement of the secondary electron detection mechanism.

研究分野：大強度ビーム力学

キーワード：ビームモニタ 加速器

1. 研究開始当初の背景

大強度陽子加速器施設は世界各地で稼働しており、稀な事象の発見や実験の効率化に向け、更なる大強度化に対する要求が高まってきている。大強度ビームを実現するためには、多くの粒子を生成するだけでなく、ビーム損失を抑える必要がある。ビームを構成する粒子数に関わらず、ビーム損失の許容量は同じである。例えば、現状の加速器において同程度の放射化で **10** 倍の出力を得る場合には、現状のビーム損失を **10** 分の **1** にしなければならない。また、大強度化が進むにつれ、ビーム自身に内在するクーロン斥力(空間電荷力)が増大し、低強度ビームでは問題にならなかったビームの不安定要因が顕在化することにより、ビーム損失も増大してしまう。これは空間電荷効果と呼ばれ、この研究は世界的に展開されており、更なる大強度化の核心をなす学術的研究課題である。線形加速器の加速空洞(RF)は、円形加速器よりビームに加える加速勾配が極めて大きく、例えば **J-PARC** の場合では **90** 倍以上にもなる。そのため、粒子の振動数が縦横両方向で同程度の値になり、かつ大強度出力時では空間電力に起因した共鳴条件の増大や空間電荷効果由来の縦横結合共鳴が生じる。これら为了避免するためには、大強度ビームの縦横両方向のビームサイズを測定し、適切な運転パラメータを実現しなければならない。線形加速器においてビーム縦方向分布を測定するためには、一般的にバンチシェイプモニタ(**BSM**)を使用する。**BSM** は、ビーム軌道にワイヤを挿入し、ビームと同じ時間構造を持った **2** 次電子をワイヤから生成することで、間接的に大強度ビームの縦方向分布を測定する装置である。しかし、低エネルギービームを測定する際、**BSM** のワイヤはビームの熱負荷に耐え切れず断線し、これまで縦方向分布を測定できなかった。

2. 研究の目的

1. 研究開始当初の背景で示した通り、従来の **BSM** は、ワイヤをビームラインに挿入するため、ビームの一部を機器に当て、ビームロスを伴う破壊型モニタであった。本研究では、従来の **BSM** で使用されているワイヤに代わる機構を提案し、ビーム強度に依存しない非破壊型縦方向ビームモニタを開発する。

3. 研究の方法

従来の **BSM** の検出機構を基にして **BSM** の改良を行う。これまではワイヤから **2** 次電子を生成し、ワイヤに印加したバイアス電圧を用いて **2** 次電子を検出器側に輸送していた。本研究では、**2** 次電子生成機構については、ワイヤの代わりに残留ガス等を用いる。**2** 次電子の輸送については、電極を新たに設けることで電場勾配を作る。つまり、従来のワイヤの代わりに、ガス導入機構と電極を製作し、ビームと同じ時間構造を持った **2** 次電子の生成を行う。本研究では、以下の手順で検討を進めた。**(1)**電極が作る電場勾配を均一かつ容易に実現するために、電磁場解析ソフト **CST-Studio** を用いて電極構造を検討する。**(2)**実機の製作を行い、ガスの導入ができたか、電圧が印加できたかオフライン試験で確認を行う。**(3)**ビーム試験を行うことで検証を行う。なお、ガス導入部付き電極以外の機器は、**J-PARC** が保有する **BSM** を使用する。

4. 研究成果

(1)電磁場解析ソフト **CST-Studio** を用いた電極構造の検討

CST-Studio を用いて電極構造を検討した。本研究では、電極構造を多段電極ではなく、単一電極にしながら均一な電場勾配を実現するために、厚めの電極板を円弧上に切削する方法を採用した。電極を円弧上にすることで、一部領域に並行電場を作ることができる。なお、薄い電極板を円弧上に变形させる方法も考えたが、製作精度が劣ることが判明したため、円弧切削を採用した。円弧切削の半径を最適化するために、**CST-Studio** を用いてパラメータスキャンを実施した。製作する電極は従来の **BSM** に設置できるだけでなく、ビームが通過する領域で均一な電場勾配を作る必要がある。既存の **BSM** を計算機上に再現し、新たに製作する電極を設置し、電場勾配を確認した。**CST-Studio** の計算例を図 **1** に示す。中央やや左側の円がビームダクトで、紙面手前から奥にビームは通過する。通過したビームは残留ガスと衝突し、**2** 次電子を生成する(図 **1** 青色参照)。ダクト左側に設けた単一電極を用いて、**2** 次電子を図 **1** の右側に輸送する。例とし

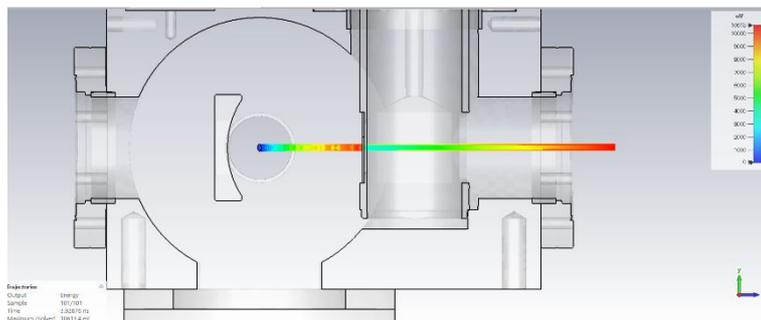


図 1 計算例

て得られた電場勾配を図 2 に示す。ビームが通過する領域に並行電場を作るために、図 2 では、検出器が設置された方向と直行する方向(紙面上下方向)の電場及びビームダクトの部分だけの電場を表示しており、この電場の強さが弱いということは、均一電場ができていることを示す。

次に、均一電場を得やすい条件で、ビームが通過する領域に電子を生成し、検出器側にどのように輸送されるかについて調べた。電極の切削半径や切削深さを変えたとき、電子ビームがどのように輸送されるかまとめた結果を図 3 に示す。横軸は 2 次電子生成初期位置から検出器側までの移動距離、縦軸は電子ビーム輸送時の鉛直方向の電子ビームの広がり(rms 値)を表す。切削深さ 0mm は平板を意味し、この時の電子ビームは広がりながら輸送される。右側に輸送された電子ビームは、時間構造を維持したまま輸送できているが、並行電場で引き出せていないため、電子の検出効率は落ちる。一方、切削深さ 10mm の場合、電子ビームは収束しながら輸送される。この場合、検出器までまとまった電子ビームが輸送されるため検出効率は増すが、電子ビームの時間構造がわずかに歪む。本研究では、電子の時間構造を変えずに、電子の収集効率を上げるため、平行に輸送できた切削深さ 6mm の結果を採用することにした。この計算により、電極の大きさが 80mmx40mmx10mm で、図 4 の電極を製作した。

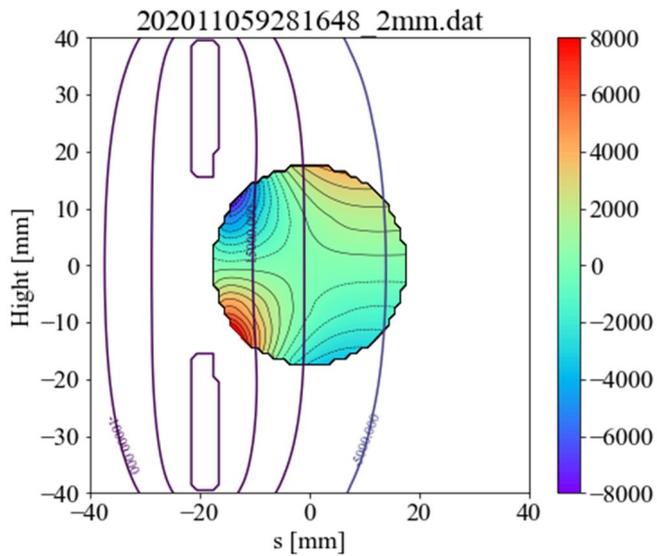


図 2 電極が作る電場

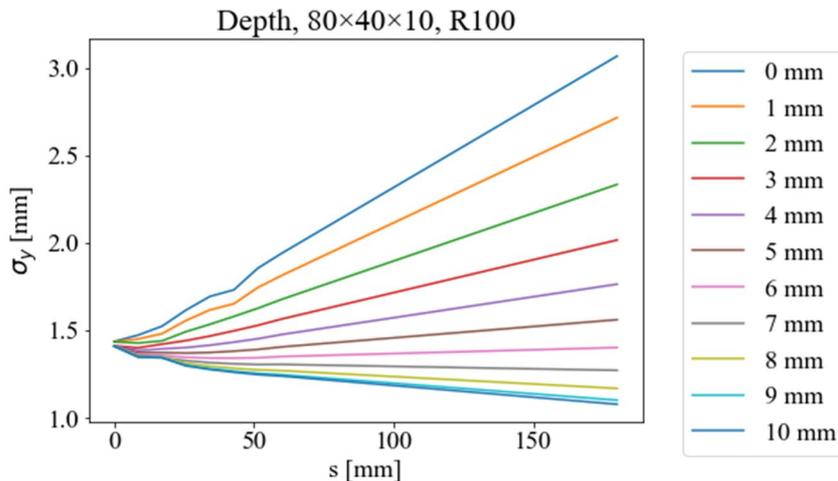


図 3 切削深さと電子ビーム輸送時の広がり

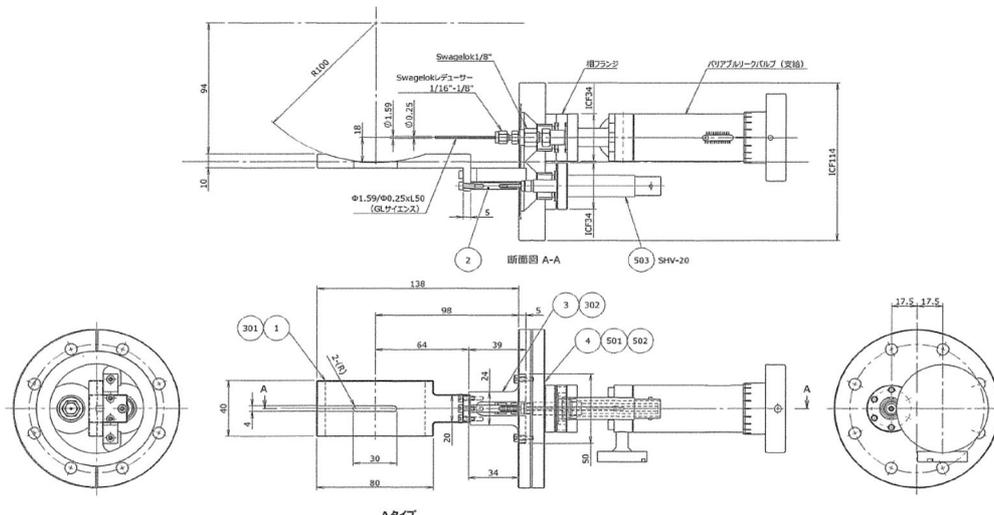


図 4 製作したガス導入部付き電極

(2)オフライン試験

オフライン試験では、製作した機器が既存の **BSM** に組み込めることを確認した。電極への高圧印加やガス導入等、製作した機器が正しく動作することを確認した。

(3)ビーム試験

ビーム試験では、**2**次電子の検出が出来なかった。これは、ワイヤに比べてガスの密度が極めて小さいため、**2**次電子がほとんど生成されなかったためと思われる。ワイヤを用いた従来の方法と比較した結果を表 **1** に示す。

表 **1** ワイヤと電極による違い

	ワイヤ	電極
密度	19.25 g/cm³	1.86 × 10⁻²⁵ g/cm³ (10⁻⁴ Pa を想定)
電子ビーム輸送方向	360 度	一方向
2 次電子生成領域	100 μm (ワイヤ径)	約 2mm (ビームサイズ)
電子検出量(割合)	1	10⁻²²

2次電子が検出器まで到達する量は、概算で従来のワイヤに比べて約 **22** 桁の乖離があることが分かった。既存の **BSM** の検出方法では、この **22** 桁も少ない電子を検出することは難しい。よって、**S/N** のノイズを減らした新しい検出方法を採用しなければ、信号が検出できないことを意味する。

本研究により、非破壊型ビームモニタを実現するには、以下が必要であることが分かった。

ワイヤの代わりとなる **2**次電子生成機構

2次電子を輸送するための均一な電場勾配

従来の **BSM** とは異なる **2**次電子検出機構

本研究では、**均一な電場勾配** 及び **2次電子生成機構** を解決した。非破壊型ビームモニタを具体的に形にするためには、**2次電子検出機構** が必要であることが明確になり、ビーム強度に依存しない非破壊型縦方向ビームモニタの実現に向けて道筋を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 守屋克洋
2. 発表標題 J-PARCリニアックの縦方向分布測定とその課題
3. 学会等名 ビーム物理研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------