

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 29 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24310079

研究課題名(和文)大強度ビームの2次元プロファイルとビームハローの超高感度同時計測装置の開発

研究課題名(英文)Development of a beam monitor of two dimensional beam profile and beam halo with high sensitivity for high intensity beams

研究代表者

橋本 義徳 (HASHIMOTO, YOSHINORI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・その他

研究者番号：10391749

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：J-PARCメインリングの大強度ビームのための測定装置の具体的設計と部分的製作を行った。内容は次の5点に要約される。(1) ビーム条件の検討及びバックグラウンドの測定から、十分な信号対ノイズ比を確認した。(2) 真空内で使うアルミ製主光学系を開発した。(3) リングの真空環境を悪化させない真空機器とインターロックの設計を行った。(4) ビームから見た装置のインピーダンスの計算を行い、ビームへ悪影響を及ぼす因子のないことを確認した。(5) 測定系を他のプロファイルモニターに使用しその有効性を実証した。真空容器の製作をH28年度中に言い、大強度ビームの測定を開始する予定である。

研究成果の概要(英文)：We performed the actual design and partial fabrication of this instrument for high intensity proton beams of the J-PARC Main Ring. The studied contents were summarized to five points as follows. (1) From the examination of the beam condition and the measurement of the background, we confirmed enough higher signal vs. noise ratio. (2) We developed the main optical system made of aluminum alloy to use in a vacuum. (3) We designed a vacuum system and the interlock which did not deteriorate the vacuum environment of the Main Ring. (4) We calculated the impedance of the apparatus for the circulating proton beam and it is confirmed that there was no factor which significant affects the beam. (5) We mounted the measuring equipment of a radiation-hardened image intensifier to other profile monitors and the effectiveness was demonstrated. The vacuum chamber is under fabrication and the beam measurement will be started by the end of the H28 year with the proton beam of power of over 450kW.

研究分野：加速器工学，ビーム診断

キーワード：大強度ビーム プロファイル ビームモニター 非破壊 ビームハロー

1. 研究開始当初の背景

大強度陽子ビームのための非破壊型の2次元ビームプロファイルモニターは実用化されていなかった。筆者らはその先駆的な仕事として、前回の科研費基盤(B)の研究において、窒素分子ジェットを用いたシート状のターゲットによるプロファイル検出方法の原理検証を行った。その時点で、さらに実用化するための研究はまだ十分に進められてはいなかった。また、本事業の申請時に提案された、特に大強度陽子ビームで深刻な放射化をもたらすビームハローの測定を非破壊で同時に検出する装置は、他に例を見ない先進的なビーム診断装置となることが期待された。

2. 研究の目的

大強度陽子ビームのプロファイルを計測する具体的な方法の確立とプロファイルの検出と同時にビームハローを検出するための方法の探索を行う。

3. 研究の方法

本装置の具体化にあたり、主要なテーマ5点とそれらの研究方法は次の通りである。尚これは大強度陽子加速器として J-PARC メインリング(MR)を対象としたものである。

(1) プロファイル測定時の微弱な光量の検討について、計測環境の条件をビーム条件の検討及びバックグラウンドの測定から明らかにする。

(2) 直径 100mm 程度の有効視野において微弱な光量の検出を行うための、真空内で使用する耐放射線性を持つ金属ミラーを用いた大口径光学系を開発するために、旋盤等の加工機での切削基礎試験等を行う。

(3) 窒素分子ジェット(JET)とその発生装置が加速器の周回リングの真空環境を極端に悪化させない方法の構築。主に差動排気系と装置の時間応答を考慮しての真空装置とインターロックの基本的計算と設計を行う。

(4) リングの周回ビームに影響を与えないような装置を設計し、ビームから見たインピーダンスの計算を行い評価する。

(5) 耐放射線性のイメージンテンシファイアと CMOS カメラまたは CID カメラによる測定装置の基礎試験を行い、評価する。

4. 研究成果

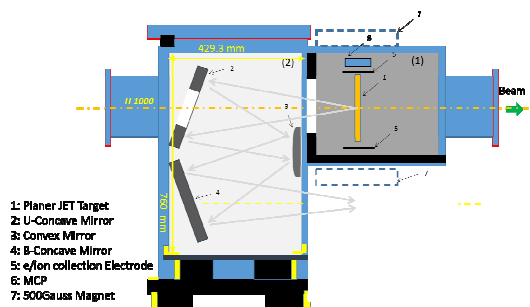


図 1. 装置概要 (衝突チェンバー垂直断面)

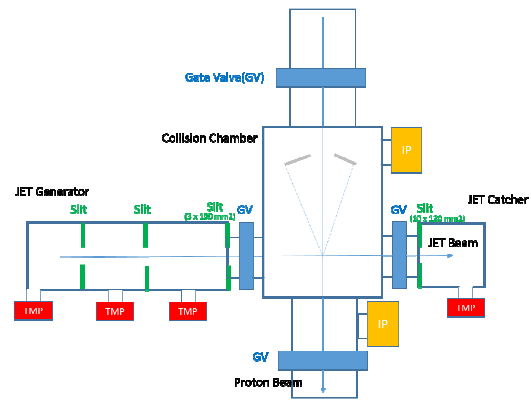


図 2. 装置概要 (水平断面)

最初に本研究による J-PARC MR における装置のデザインと概要を図 1-3 に示す。衝突チェンバーの要素 1 の窒素分子ジェットターゲット(圧力 5e-4Pa, 厚み 1-3 mm)に陽子ビームが衝突し発生する窒素分子の脱励起光を用いてビームプロファイル(ビームコア)を 2次元で測定する。光は図中左側の要素 2-4 の大口径光学系により衝突点の下方に集光される。集光地点は大気側であり、鉛ブロックでシールドされた測定装置がセットされる。ビームハローは、衝突で電離する窒素分子からの電子を収集して測定する。要素 5 の電極と要素 7 の電磁石による電子収集フィールドにより電子は発生点の垂直上方に導かれ、要素 6 の MCP に入射して増幅される。

図 2 で陽子ビームは、衝突チェンバーの中心を下方に向かう。これに対して、パルス状のジェットが左方から入射する。ジェットの生成装置はターボ分子ポンプとスリットを用いた 3 段の差動排気系で構成される。衝突点右方にはジェット捕獲用チェンバーがセットされる。衝突チェンバーには、4 方向にゲートバルブがセットされる。

図 3 に示す衝突点では、矩形で示したガスジェットパルス断面とその中央部に衝突するビームコアとビームハローの断面が描かれている。この図では特にハローの検出方法を模式的に示す。上述の外場(電場、磁場)により上方に導かれた電離電子は A, B をペアとする 2 組の左右の MCP で電荷増幅される。A, B では増幅度を独立に設定できる。MCP の後段の波長 530nm の緑色に発光する蛍光板(残光時間<100ns)で光信号に変換される。光は石英ガラス窓を介してファイバー光学系からマルチアノードタイプの光電子増倍管に

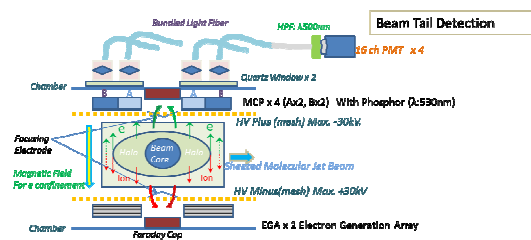


図 3. 衝突点と検出装置

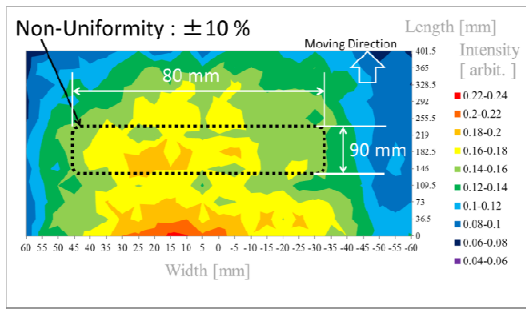


図 4. JET の密度分布

導かれる。最後に JET の現状を示す。本装置で用いる JET はテストベンチで密度分布を計測された。パルス状 JET を衝突点に相当する位置で、スリットとカバーを付けたイオンゲージで測定した。結果を図 4 に示す。±10% 以下の非均一性で、 $80 \times 90 \text{ mm}^2$  の領域があることを確認した。この面積で MR のビームをテールまでを含めて十分な領域を計測することが可能である。

次に本科研費における研究の主たる 5 項目について、以下に記す。

(1) 測定時のバックグラウンド(BG)の評価：

①ビームコアのプロファイル測定の際素分子の微弱な脱励起光を検出するためのイメージンテンシファイアの接続光学系やビームハロー測定の際光ファイバーや光電子増倍管(PMT)入口などでは、ビームロスにより生成された 2 次粒子が計測に影響をもたらす。本番でビームハロー信号の光転送に使用する石英大口径光ファイバーケーブル(フジクラ SC-400/440: コア径  $400 \mu\text{m}$  クラッド径  $440 \mu\text{m}$ , 50 m)によりビームロス信号を検出した。MR の直線部 A に位置する #2 (アドレス) に、本装置を設置することが決定しており、その位置のビームパイプにファイバーを巻き付けて高感度 PMT (Ultra-BiAlkali H10720) で検出した。380kW 程度の大強度ビームの場合にも、入射の時刻においてのみ数 mV のノイズレベルを超えた程度の信号が見えるだけ(図 5)で、極めて低レベルの BG である。この測定は、常時続けられている。

②Optical Stimulus Luminescence (OSL) 素子を用いたドーズ測定

MR-#2 の本装置設置位置に OSL 素子をにセットし加速器運転時の主に  $\gamma$  線のドーズを一定期間ごとに測定している。図 6 に MR-#2 の現在の様子を示す。ゲートバルブ(GV)に挟ま

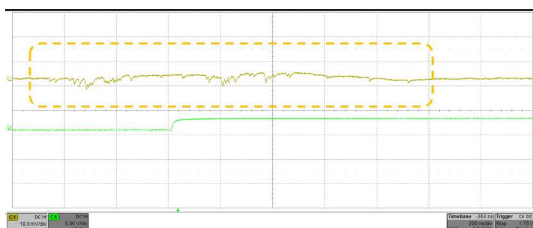


図 5. MR 入射時のビームロス(10mV/div, 200ns/div)

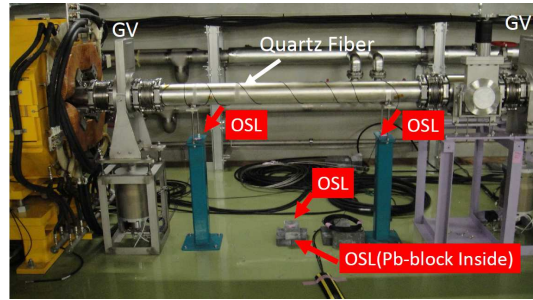


図 6. MR-#2 の光ファイバーと OSL 素子

れた約 2m の区間に H28 年度に本装置が設置される予定である。BG 測定用の石英ファイバーが真空パイプに巻き付けられており、図中 OSL と示した箇所が OSL 素子の測定位置である。たとえば、2 か月間にわたり大強度ビームをビームパワー 380~420kW で運転(計  $2.8 \times 10^{20}$  陽子の加速)した場合に、図の鉛ブロックの中と外では、それぞれ 0.8/3.1Gy を記録した。これは、MR 入射路に設置された Optical Transition Radiation (OTR) プロファイルモニターのカメラを鉛ブロックでシールドした箇所に置いたときの測定値 1.1Gy と近い値である。このように大変ビームロスが少ない場所であることがわかった。

(2) 大口径光学系とアルミニウム製球面ミラーの開発：

ビームコアのプロファイルの検出では真空内で発生する窒素分子からの微弱な脱励起光を用いる。これを大気中の測定装置まで損失なく導くための大口径光学系が必要になる。我々は、すでにチタンフォイルからの OTR を用いる 2 次元プロファイルモニターの開発において、Offner 光学系と称するオフアク

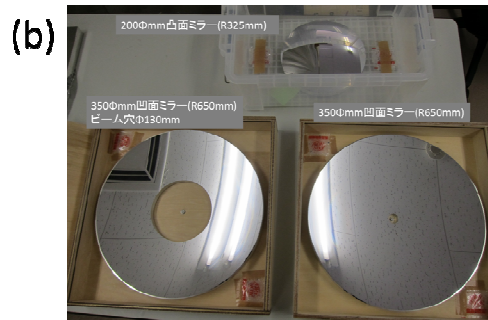
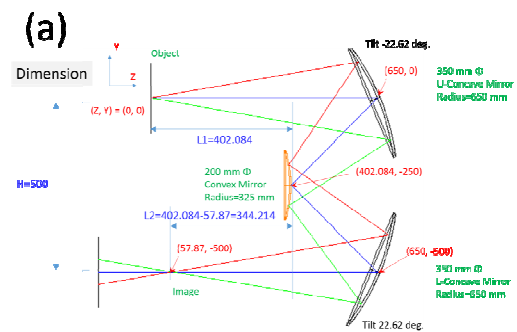


図 7. 大口径集光光学系とアルミ球面ミラー

シスの球面リレー光学システムを開発しており、集光率や収差が少ない利点があるため、本装置においても Offner 光学系を採用することにした。OTR 装置ではパイレックスガラス基材を研磨して製作した凹面や凸面にアルミニウムを蒸着して製作したが、MR の周回の大強度ビームにおいては、放射線やビームによる電荷の誘起による電流が大きい可能性があるために、パイレックスガラス(耐放射線強度 < 2kGy)ではなく金属製のミラーを開発することにした。求められる波面精度は、 $\lambda/10$  程度である。通常の精密旋盤で切削する方法には主に芯振れによる限界があるために、静圧空気軸受けを用いて固体摩擦を完全に無くし、空気流を層流化することで回転ムラを排除する方法を採用した旋盤による加工試験を行った。それでも超硬のダイヤモンドチップを用いても、SUS などの硬い金属では、チップのわずかな摩耗により特に切削速度が低速となるミラー中心部に乱れが生じてしまう。そのためチップの摩耗を小さくするためには、ミラーサイズを小さくするか、柔らかい金属を用いることになる。これらの基本試験を経て、純アルミニウム(A1050)で、乱れなく加工できる最大径としてミラー口径 350mm とする光学系を設計・製作することにした。製作したミラーの表面粗さは、Ra 30nm 程度であった(図7)。

(3) ジェット並びにジェット生成装置のトラブルが MR の真空中に及ぼす影響の評価：  
 ジェット装置を中心に本装置では、TMP を 4 台用いる。ジェットの生成におけるトラブルや TMP などの真空装置のトラブルが MR にダメージを与えると MR 本来の目的である各種素粒子実験に用いる大強度ビーム生成ができなくなる恐れがある。本装置ではそれらを避けるために細心の注意を取り、主にジェット通過路におけるスリットサイズを設定している。また図2におけるゲートバルブ(GV)の高速遮断(<1.5秒, 実行正味 0.8s)や TMP 排気部の電磁バルブの高速応答(<0.1秒)により、トラブルが発生した場合でも最小限に食い止める工夫がなされた。以下に示す重要

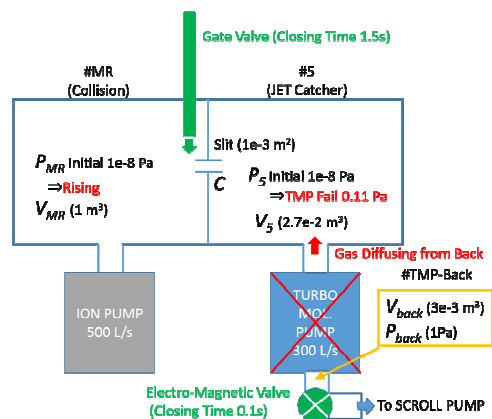


図 8. TMP 瞬時停止のトラブルの計算モデル

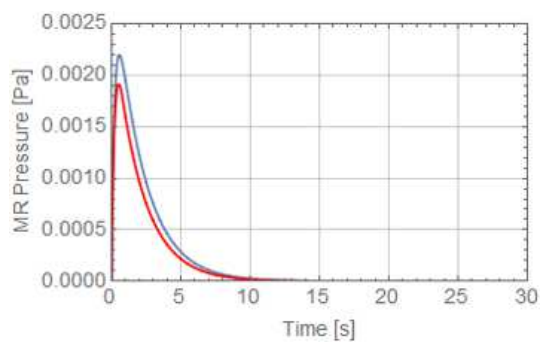


図 9. TMP トラブル時の MR の圧力変化

なトラブルの 2 例の評価を行い、深刻な影響を MR の真空環境に与えないことを確認した。

① MR の容器を兼ねる衝突チェンバーに隣接する TMP が瞬時停止するケース

図 8 には、衝突チェンバーと右隣にジェット捕獲チェンバーが示されている。捕獲チェンバーの TMP が瞬時にダウンした場合のシミュレーションを行った。TMP の排気フィンが破損するなどして瞬時に停止し、0.1 秒後にその排気側の電磁バルブがクローズした場合に、TMP と電磁バルブ間の容積  $0.003\text{m}^3$  のガス 1Pa が、チェンバーに流入するケースである。流入したガスは、衝突チェンバーとの境界部に設けたスリット(コンダクタンス  $0.116\text{m}^3/\text{s}$ )を介して MR 側に流入し、500L/s のイオンポンプで排気される。この場合の MR での計算された圧力変化を図 9 に示す。図には、青と赤のラインが示されている。青は、スリット部にある GV が動作しなかった場合、赤は 0.8s に GV がクローズした場合である。両者の差はほとんどない。これは、GV の動作時間までに大部分のガスが MR に流入したことを意味する。しかし、MR に隣接する TMP の瞬時停止のトラブルでは、MR での圧力は、 $10^{-3}\text{Pa}$  のオーダーまでしか悪化せず、10 秒後にはほぼ回復することを意味している。また排気側の電磁バルブに関してはノーマリーククローズタイプであるために遮断できない問題からはフリーである。

② JET 発生装置の窒素ガス導入のパルスバルブがクローズできないケース

図 10 に本装置のモデル化した真空容器と計算のためのパラメータを示す。#1~#3 はジェット生成装置の差動排気チェンバーであり、#4 は衝突チェンバー(MR)、#5 がジェット捕獲チェンバーである。各チェンバー間の隔壁にスリットがセットされており、 $C_n$  のコンダクタンスを持つ。それぞれのチェンバーでは、体積  $V_n$ 、ジェットビーム流量  $Q_{Bn}$ 、チェンバー間圧力差によるリーク流量  $Q_{Ln}$ 、圧力  $P_n$ 、ポンプ排気速度 STP or SIP をもつ。これらを図に示した関係式を用いて連立させて圧力をシミュレートした。パルスバルブがクローズできないトラブルの場合、窒素ガスの流入量として  $3e-2\text{ [Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}]$  を  $Q_1$  に用いた。ただし、この値はジェット発生装置での実験より求めた値の 10 倍の過大な量としてある。また、各隔壁のコンダクタンスは、図 11 に

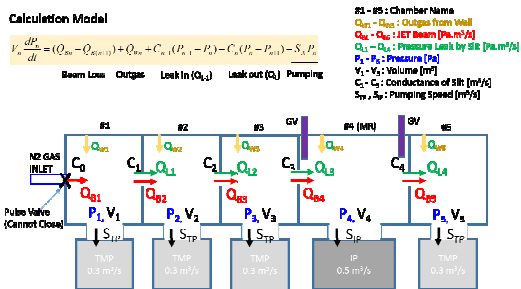


図 10. パルスバルブがクローズできないトラブルの計算モデル

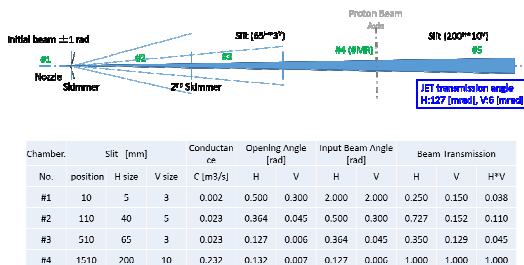


図 11. スリットとコンダクタンス

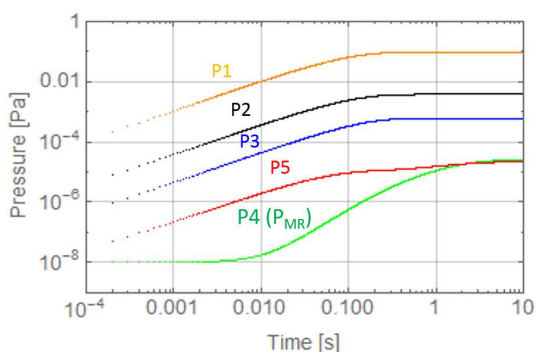


図 12. 各チェンバーの圧力の時間変化

示すジェット生成の役割を兼ねるスリットのサイズから計算している。計算で得た圧力の時間変化を図 12 に示す。トラブル発生から 1 秒後にはほとんど圧力は平衡状態となり、#4 のチェンバー (MR) の圧力は、 $2.5 \times 10^{-5}$  Pa となる。この値は MR の真空環境に大きな影響をもたらさないことがわかった。スリットの構成と差動排気系の効果が十分に高いことを意味していると思われる。インターロックとしてはトラブル検出後に GV をクローズさせる対応でよい。

(4) 陽子ビームから見た装置のインピーダンス、ウェイクフィールド等の評価：

図 13 に示すチェンバーと Offner 光学系を用いて、MR の周回陽子ビームから見た進行方向のインピーダンスを CSTstudio により計算した (図 14)。MR の基本 RF 周波数は、1.7MHz であるためその領域で不安定性などの問題となるような目安としての 100MHz 以下で  $100 \Omega$  以上となるような因子は見当たらない。また、MR の設計値である 750kW 相当の周回ビ

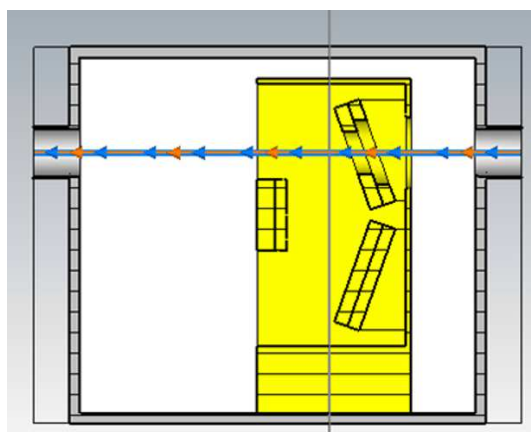


図 13. インピーダンス計算用装置モデル

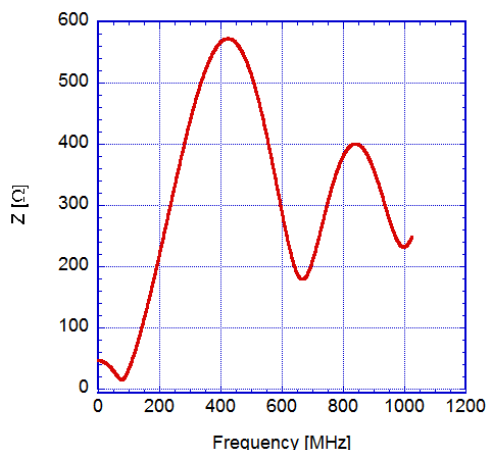


図 14. ビームから見た装置のインピーダンスームについて、ビームハロー検出のためのジェットの窒素分子から電離した電子を収集する場合に、収集電磁場の最適化の計算を行うと共に、そのときに見られるビームが周囲に誘起するウェイクフィールドを含む電磁場による電子収集軌道のズレを CSTstudio で評価した。ビームサイズ ( $\sigma$ ) は、9 mm とした。計算のモデルを図 15 に示す。Gap  $\pm 75$ mm の収集電極間に  $\pm 30$ kV の電圧を与え、電場に平行に 0.05T の磁場を与えることで電子収集軌道のズレが最小となることが分かった。電子をビームの高さ方向の中心平面で、ビームの外側の 10mm から 22.5mm (X) の位置でビーム通過と同時に発生させたときに、上方 75mm にある電極にどの程度のズレをもって到達するかを計算した結果を、図 16 に示す。ズレは最大 0.3 mm に収まっていること

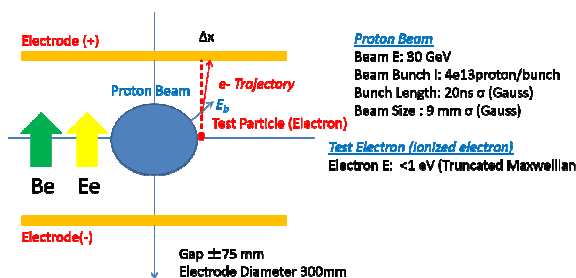


図 15. 電子収集時の外場と軌道ズレの計算のモデル

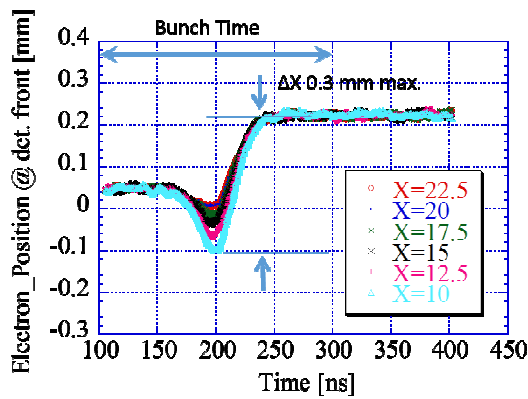


図 16. ビーム中心軌道から 10～22.5 mm で発生した電子が電極に到達したときのズレがわかる。ビームバンチの通過時間に発生するウェイクフィールドの影響によりこの程度のズレの時間変化が生じていると考えられる。

(5) 耐放射線性イメージインテンシファイア (I. I.) を用いたプロファイル測定装置のトンネル内試験：

MR へのビーム入射路における OTR を用いたプロファイルモニターの測定装置として、本装置の測定装置を代用させることで、遠隔での基本試験を行った (図 17)。(1) で示したように、本装置の設置位置 MR-#2 とほぼ同じ程度の放射線環境であり、ローカル制御室からのケーブル距離も 400 m で同じ程度である。H13 年度の本装置に関する科研費基盤 (C) で開発した耐放射線性 I. I. に高ダイナミックレンジの CMOS カメラを取り付け、鉛 50mm とポリエチレン 50mm のシールドに収めている。I. I. の高圧 (最大 7kV) を 50 Ω 系で 400m 転送するためには、大型の電圧可変型のパルス電源が必要となるために、コントローラを改良して、5V 程度の入力パルスの波高でゲインも応答するようにした。400m 遠隔から加速器トンネル内に送る入力パルスには、絶縁アンプを付けることでグラウンド電圧の差異によるノイズの混入を防止した。また、放射線に比較的強い CMOS カメラ (<2kGy) は、ギガビットのイーサネットで、途中光ケーブルを用

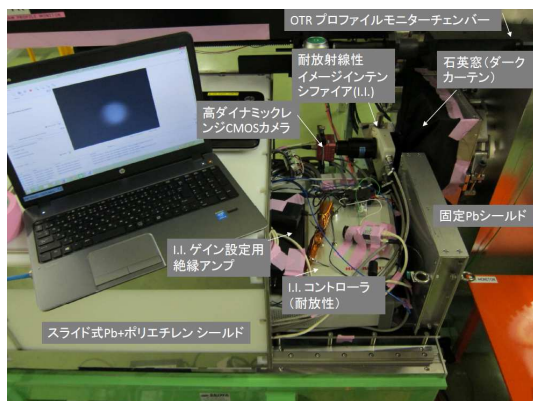


図 17. OTR プロファイルモニターの測定セットとして本装置の測定装置の試験を実施

いた LAN から操作とデータ転送を行うことにした。このような装置で、約 2 年にわたり OTR プロファイルモニターの測定を行っているが、高いダイナミックレンジと高いゲインにより、また雑音が極めて少ない環境での鮮明なデータ取得を行うことができています。本装置でもこのセットとほぼ同等の質でプロファイル測定が可能になると思われる。

以上を主な研究・開発の結果として示したが、大強度陽子加速器にトンネル内で遠隔で、放射線も考慮したシステムにすることに関して大きな進展があったと言える。衝突チェンバーの製作が遅れているが、H28 年度中には製作を完了させ設置と、最初のビーム計測を行う予定である。

#### <引用文献>

- ① 橋本義徳, 武藤 豪, 外山 毅, ”大強度ビームのための非破壊型 2 次元実像ビームプロファイルモニターの検出器の開発”, 平成 18～19 年度科学研究費補助金基盤研究 (B) 研究成果報告書, 平成 22 年 4 月 21 日。

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 3 件)

- ① Y. Hashimoto, Y. Hori, T. Morimoto, S. Muto, T. Toyama, K. Yoshimura, T. Fujisawa, T. Murakami, K. Noda, D. Ohsawa, DEVELOPMENT OF A BEAM PROFILE MONITOR USING NITROGEN-MOLECULAR JET FOR INTENSE BEAMS, Proc. of IBIC12, 2012, 511-514.
- ② Y. Hashimoto, Y. Hori, T. Morimoto, T. Toyama, M. Uota, T. Fujisawa, T. Murakami, K. Noda, D. Ohsawa, DEVELOPMENT OF A BEAM PROFILE MONITOR USING A NITROGEN MOLECULAR JET FOR THE J-PARC MR, Proc. of IBIC13, 2013, 848-851.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

橋本 義徳 (HASHIMOTO, Yoshinori)  
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・前任技師  
研究者番号：10391749

##### (2) 研究分担者

外山 毅 (TOYAMA, Takeshi)  
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授  
研究者番号：30207641

堀 洋一郎 (HORI, Yoichiro)  
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授  
研究者番号：80183937