

## J-PARC LINAC 負水素イオンビーム用 マルチレーザワイヤプロファイルモニタの開発

### MULTI-LASER-WIRE DIAGNOSTIC FOR THE BEAM PROFILE MEASUREMENT OF NEGATIVE HYDROGEN ION BEAM IN THE J-PARC LINAC

三浦昭彦<sup>#, A)</sup>, 吉本政弘<sup>A)</sup>, 岡部晃大<sup>A)</sup>, 山根功<sup>B)</sup>

Akihiko Miura<sup>#, A)</sup>, Masahiro Yoshimoto<sup>A)</sup>, Kota Okabe<sup>A)</sup>, Isao Yamane<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

In the J-PARC linac, the negative hydrogen ion beam is accelerated to be 400 MeV. The wire scanner monitor which is used for the transverse profile measurement is reliably operated in many accelerator facilities around the world. Because the heat loading on a metallic wire is getting increased in high-current beam tuning, we are focusing to use a laser wire system. An electron of the negative hydrogen ion is easily detached by a laser beam whose wavelength is adjusted to the wide cross section yield of the photo detachment by the Doppler-shift. In addition, we propose to use a new multi-laser-wire system. In the system, we use a pair of concave mirrors with different focus length to make multi-paths of the laser beam, and the beam waists of the laser paths are aligned in principle. In the paper, we propose the multi-laser-wire system and its application.

#### 1. はじめに

J-PARC LINAC では、負水素イオンビームを 400MeV まで加速し、下流の 3 GeV シンクロトロン(Rapid Cycling Synchrotron, RCS)に供給している。このビームは、ビーム振り分けシステムを導入し、核変換実験施設にも供給することが計画されている。大強度陽子加速器においてビーム損失を抑制するためのビーム調整は非常に重要であり、そのための重要な測定機器の一つがビームプロファイルモニタである。現在、タンガステン製のワイヤによるワイヤスキャナモニタ(Wire Scanner Monitor, WSM)をプロファイル測定に使用しているが、ワイヤの熱的耐久性の観点から大強度ビームでは使用が難しくなっている。そこで、大強度加速器ビームでも使用できるビーム非破壊型のレーザワイヤ法に着目した。負水素イオンの 1 つの電子の電離ポテンシャルは 0.75 eV と低いため、可視光域のレーザ光をドップラーシフトさせ、1 つの電子を剥ぎ取り、中性水素(H<sup>0</sup>)を生成するのに適した波長を容易に作成することができるため、比較的容易にレーザワイヤ法によるプロファイル測定システムを形成できる見込みがある<sup>[1]</sup>。これに加えて、焦点距離の異なる一対の凹面鏡を対面させ、鏡間に複数のレーザの光路(レーザワイヤ)を形成する新たな手法を検討した<sup>[2]</sup>。レーザ光のビームウエストを同一直線状に並ぶように光学設計することで、負水素イオンビームの進行方向にレーザ光路の面を平行に配置し、マルチレーザワイヤの様なビーム計測が可能となる。本発表では、マルチレーザワイヤをプロファイルモニタに適用する原理と、ビーム計測のためのシステムについて報告する。

#### 2. J-PARC リニアックのビーム構造

J-PARC リニアックでは、イオン源(IS)で生成した負水素イオンを 50 keV まで加速し、これを RFQ(Radio

<sup>#</sup> akihiko.miura@j-parc.jp

Frequency Quadrupole)加速空洞に入射して、3 MeV まで加速する。その後、DTL(Drift Tube Linac)、SDTL(機能分離型 DTL)、ACS(Annular-ring Coupled Structure)加速空洞に順次入射して、400 MeV まで加速し、入射ラインに設置した 2 台のデバンチャ空洞を用いてビームの運動量拡がりを低減させている(図 1)<sup>[3]</sup>。

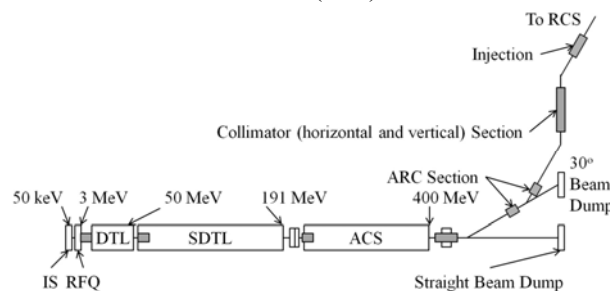


Figure 1: Beam-line layout of J-PARC linac.

リニアックでは、負水素イオンビームを 0.1~0.5 ms のパルスとして切り出し、さらに図 2 に示すような 500 ns くらいの楕円状ビームに整形して RCS に入射している。RFQ から SDTL までの加速空洞で、加速に用いる RF の周波数は 324 MHz ゆえ、負水素イオンのビームは、最小で 324 MHz (3.01ns)の時間構造を有している。

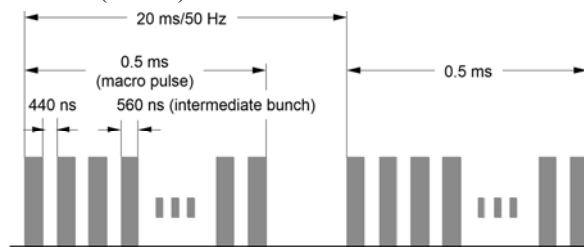


Figure 2: Time structure of pulsed beam in linac.

リニアックでは、加速空洞の種類やビームダクトの口径が変わる点、ビームの拡がりが大きく変わる上下流、RCSへ入射する8カ所に、ビームのプロファイルを揃えるためのマッチングセクションを設け(図1の灰色の部分)、各4台ずつのプロファイルモニタ(WSM)を設置している。また、リニアックのビーム調整の際に使用する4カ所のビームダンプの直前にも各1台のWSMを設置している。これらのWSMのビームが衝突するワイヤは、融点の高いタンダステンを使用し、熱解析の結果から、太さは $\phi 30 \mu\text{m}$ に決定した<sup>[4]</sup>。現在は、ピークビーム電流40 mAで運転を行っているが、J-PARCでは、RCSから出射したビームの出力を1 MWにするため、ピークビーム電流を50 mAにする予定である。このため、金属ワイヤを用いたWSMにはより高い熱的耐久性が求められることとなり、測定時に発生するビームロスの観点からも、ビーム非破壊のプロファイルモニタの実現が重要である。

### 3. マルチレーザワイヤの設計原理

#### 3.1 光共振器の形成<sup>[1]</sup>

図3の様な曲率半径の異なる二つの凹型球面鏡(Mirror 1と2)で構成する光共振器を考える。図の中心軸(axis)は、凹面鏡の中心を結ぶ直線であり、その共焦点(a)は二つの焦点距離の中間点にあるとする。Mirror 2(焦点距離 $f_2$ )の端に切欠きを設け、その背後から、中心軸に平行に光線を入射し、Mirror 1(焦点距離 $f_1$ )で反射させると、反射光は共焦点(a)を通過する。共焦点はMirror 2の焦点でもあるので、Mirror 2で反射したあと、中心軸に平行な光線になる。

また、反射光の中心軸からの距離 $x$ を考える。最初に入射した光線の中心軸からの距離を $x_0$ とすると、1回反射した光の距離 $x_1$ は、入射した光の距離( $x_0$ )の $f_2/f_1$ 倍となる。2回反射した光線の中心軸からの距離 $x_2$ は、 $x_1$ の $f_2/f_1$ 倍となるため、入射した光の距離( $x_0$ )の $(f_2/f_1)^2$ 倍になる。これを繰り返すと、共振器に入射した光線は、入射した光の距離( $x_0$ )を $f_2/f_1$ 倍に減らしながら次々と平行な光線を描いていく。したがって、 $n$ 番目の光線の中心軸からの距離は、次の様に記述できる。

$$x_n = (f_2/f_1)^n x_0 \quad (1)$$

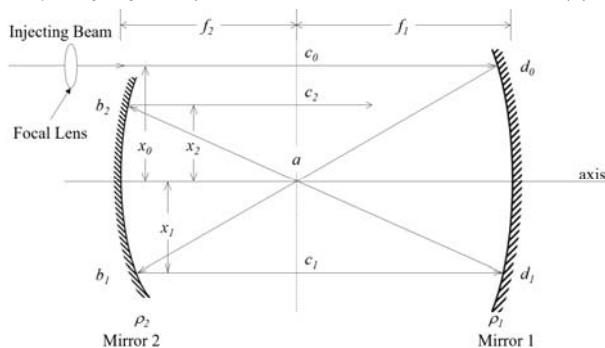


Figure 3: Asymmetrical confocal cavity and the paths of multiple laser beam.

#### 3.2 ビームウエストの形成

レーザビームはガウシアンビーム(TEM00 モード)と仮定する。焦点距離 $f$ の凸レンズの上流側距離 $f$ の位置に

ウエストを形成してレーザビームを入射すると、レンズの下流側距離 $f$ の位置にウエストが形成される。その時レーザビームの波長が $\lambda$ 、上流側ウエストの $1/e^2$ 半径が $w$ 、下流側ウエストのそれが $w'$ であると、次の関係がある。

$$ww' = \lambda f / \pi \quad (2)$$

この関係を用いて、焦点位置のビームの形状を制御する。図3の $c_0$ にウエストを形成するように凸レンズを設置し、ガウシアンビームを入射する。下流の $b$ 点にウエストが形成されるとすると、その $1/e^2$ 半径 $w_b$ は、次のようになる。

$$w_b = (\lambda f_1 / \pi) / w_0 \quad (3)$$

この関係から、Mirror 1で反射した後の $c_1$ 、Mirror 2で反射した後の $c_2$ でのウエストは、次のようになる。

$$w_1 = (\lambda f_2 / \pi) / w_a = (f_2 / f_1) / w_0$$

$$w_2 = (\lambda f_1 / \pi) / w_1 = (f_2 / f_1)^2 / w_0$$

これを繰り返すと $n$ 回反射後のウエストの大きさは以下のようになる。

$$w_n = (f_2 / f_1)^n w_0 \quad (4)$$

#### 3.3 可視光レーザによるマルチレーザワイヤ形成試験

可視光域のHe-Neレーザ(波長 $\lambda=515 \text{ nm}$ )で光共振器を作成し、マルチレーザワイヤを形成する試験を実施した。光学系の試験体系を図4に示す。

He-Ne Laser (515 nm, 2.4 eV, 300 mJ,  $M^2 < 1.2$ )

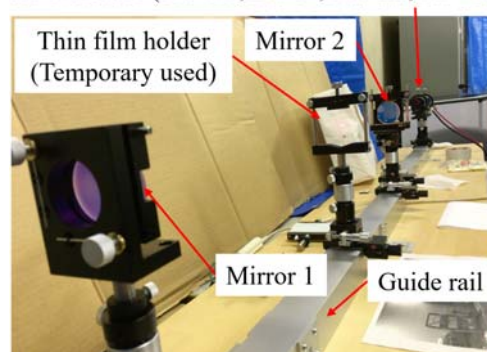


Figure 4: Optical set-up of asymmetrical confocal cavity.

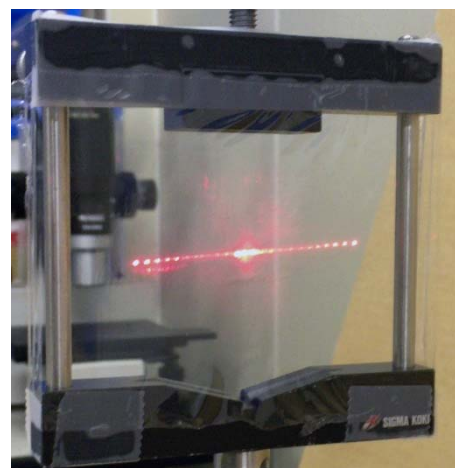


Figure 5: Beam spots of multi-laser-wire on thin film target.

ガイドレール上にレーザ発振器、及び焦点距離  $f_1(435 \text{ mm})$  と  $f_2(417 \text{ mm})$  の 1 対の凹面鏡を距離  $852 \text{ mm}$  離して設置した。いずれの凹面鏡の直径も  $50 \text{ mm}$  であり、ミラー 2 の一部(写真では、Mirror 2 の左側)に切欠きを入れている(切欠き半径  $23.0 \text{ mm}$ )。また、光共振器のビームウエストが並ぶ位置に透明なフィルムを保持した薄膜のターゲットホルダを設置し、レーザスポットを確認した。

結果を図 5 に示す。これによると、複数のレーザスポットが水平に並んでいる様子が目視により確認できた。

### 3.4 ビームウエスト形成部のレーザ強度

可視光レーザによるマルチレーザワイヤ形成試験により、複数のレーザスポットが、2 つの凹面鏡間に形成することが確認できたが、式(4)によるとそのビーム径は徐々に小さくなる。これに伴うレーザ光強度の変化をマイクロミラーで測定し、校正に使用する。マイクロミラーは、太さ  $30 \mu\text{m}$  の金線をオプティカルフラット基板により押しつぶして製作したもので、このミラー上でレーザ光を反射させ、フォトダイオードで  $c_0$  点から中心軸近傍まで測定した(図 6)。マイクロミラーをビームウエストの並ぶ軸の上でスキャンすることで、マルチレーザワイヤの 1 本毎の強度を測定することができる。

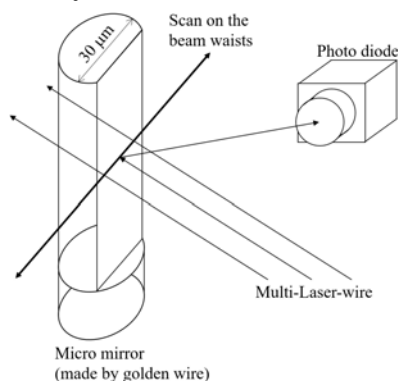


Figure 6: Image of laser intensity measurement.

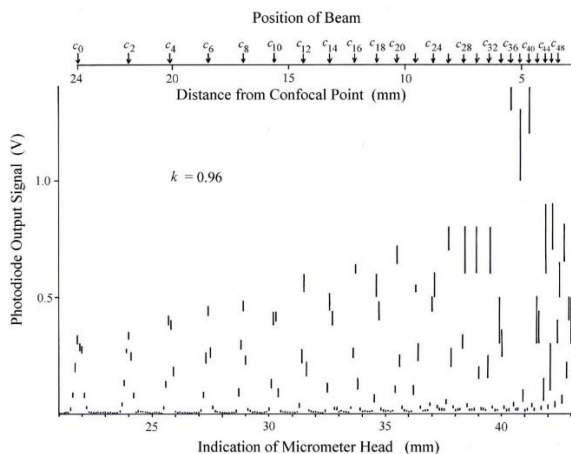


Figure 7: Position dependence of multi-laser-wire intensity.

各レーザ光の強度を測定した結果を図 7 に示す。図 7 の横軸はビームウエストが並ぶ軸上のレーザ入射軌道

の位置から、凹レンズの中心に向かってスキャンした座標を示し、縦軸にフォトダイオードで検出した信号の強度を示す。レーザワイヤは、中心軸に近づくに従って、徐々に細くなるため、フォトダイオードで検出する信号強度は大きくなる。この測定では、a 点の上側に 24 本のレーザスポットを観測することができた。a 点に近づくに従って、点同士が近くなるため、ビームは分離できなくなった。

## 4. マルチレーザワイヤプロファイルモニタ (Multi-LWPM) の設計

光共振器内に形成された平行なレーザビームが、出来るだけ多く負水素ビームを通過し、a 点を通過する斜めのレーザビームが負水素ビームと交差しないこと等を考慮する必要がある。したがって、プロフィールモニターは負水素ビームが複数の  $c_n$  点を含むように図 3 の中心軸より上半分あるいは下半分の片側を通るように配置する。このとき、負水素イオンビームの進行方向は紙面に対し鉛直(手前から奥)の方向になるように配置する。

### 4.1 レーザ波長の選択

J-PARC リニアックのマッチングセクションに設置した WSM では、最上流部で  $3 \text{ MeV}$ 、最下流部では  $400 \text{ MeV}$  のビームのプロファイルを測定している。このため、レーザワイヤによるプロフィールモニタにおいても同等以上の仕様が要求される。

実験室系で、波長が  $\lambda_{LF}$  のレーザ光が速度  $\beta c$  ( $c$  は光速)の負水素イオンビームと角  $\alpha$  で衝突する時、ビーム粒子の静止系での光の波長  $\lambda_{PRF}$  は Doppler 効果により、

$$\lambda_{PRF} = \lambda_{LF} / \gamma(1 + \beta \cos \alpha) \quad (5)$$

と表される。

ここで、負水素イオンの光吸収電離断面積の波長依存性を図 8 に示す。図に示すように波長  $800 \text{ nm}$  の付近で最大約  $4 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$  の反応断面積を有することがわかる。したがって、負水素イオンビームのエネルギー ( $\beta$ ) に対し、使用するレーザの波長 ( $\lambda_{LF}$ )、入射角度 ( $\alpha$ ) を適当に選択することで、式(5)より断面積の大きな波長を作ることができる。

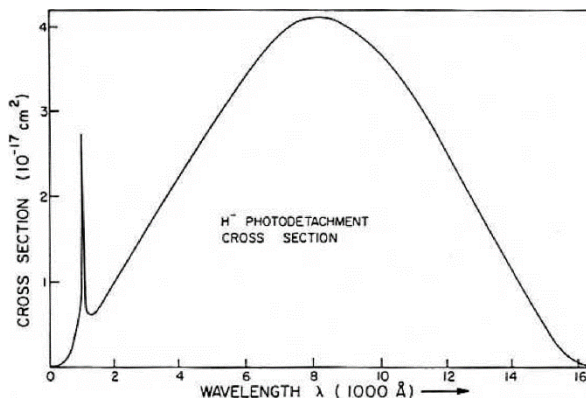


Figure 8: Photo-detachment crosssection of negative hydrogen ion [5].

## 4.2 光学系の設計

光学系に使用する2つの凹面鏡の曲率半径、焦点距離は光学系全体の大きさを決めるだけではなく、式(1)、(4)に示すように、焦点距離の比がレーザワイヤ間の距離、レーザ光の太さを決める。WSMによる測定では、J-PARC リニアックでプロファイル幅が最も小さくなる部位は、ACS セクション上流部であり、このビームをガウシアンフィットした場合のRMSビームサイズは最小約2.0 mmである(図9)<sup>[4]</sup>。また、この図では、ビーム強度が1桁下がったあたりにビームハローが見られる。プロファイルモニタでは、このようなハローの出現を観測することも重要な機能の一部であると言える。

WSMと同等の測定結果を得るためには、ビームの進行方向に対して鉛直に(図の横軸)、0.1~0.5 mm幅でワイヤを移動する必要があり、ハローを観測するためにはダイナミックレンジが2桁以上必要である。図3の中心軸より上より半分の偶数番( $c_0, c_2, c_4, \dots, c_{2n}$ )のレーザワイヤをプロファイルモニタに使用する場合、レーザワイヤを0.1 mm程度シフトするためには、 $x_0, x_2, x_4, \dots, x_{2n}$ の間隔が0.1 mmになるように式(1)の $f_2$ と $f_1$ の比を決定する。式(1)によれば、 $f_2$ と $f_1$ ( $f_2 > f_1$ )の比が大きいほど、狭い間隔でレーザワイヤが並ぶことを意味している。

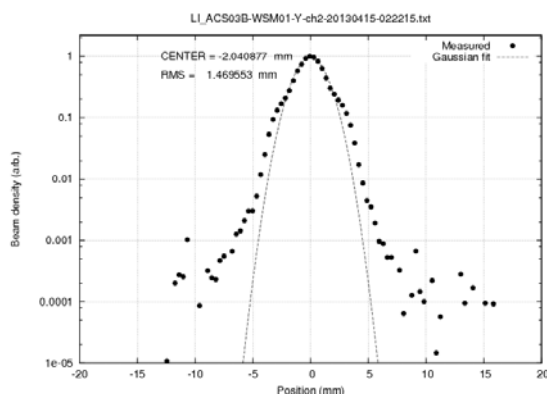


Figure 9: Minimum transvers profile of linac beam with 191 MeV taken by WSM.

また、凹面鏡の間隔は、

$$L = f_1 + f_2 \quad (6)$$

となるように配置する。つまり、各々の焦点距離の場所が共焦点となる配置とする。レーザ光は光速  $c$  で  $c_n$  点を通り、Mirror 1 と 2 の間を2往復した後に  $c_{n+2}$  点に戻る。つまり、レーザ光は速度  $c$  で約  $4L$  の距離を進むことになる。加速する負水素イオンビームは324 MHzのRFで加速しているため、3.01 nsごとにビームバンチが存在する。このビームバンチにレーザ光が同期し、図3の共焦点(a)を斜めに通るレーザに同期しないようにするためには、 $c_0$  から  $c_2$  までレーザ光が進む時間  $4L/c$  と、324 MHz(3.01 ns)が時間的に一致している必要があるため、324 MHzの整数倍( $n$ )と一致する条件、(7)式を満たす必要がある。

$$4L/c = n/(324 \times 10^6) \quad (7)$$

この(7)式において、適当な  $n$  を選ぶことで、 $n$  番目に現れるビームバンチにレーザを照射することができる

もに、(6)により適当なミラーの間隔を決めることができる。たとえば、 $n$  が 3, 4, 5 であれば、 $L$  は各々69.4, 92.5, 115.7 cmになる。したがって、加速するビームの9.03, 12.04, 15.05 nsのバンチにレーザを同期することになる。電子検出器では、この時間ごとにレーザで剥離した電子が検出され、その電子の数に比例した信号を出力するため、3.01 nsの整数倍の時間と  $x$  座標(実空間の距離)を対応しすることで、プロファイルを描くことができると考えられる。加速器ビームラインへの設置のしやすさを考慮すると、凹面鏡の間隔  $L = f_1 + f_2$  は1 m程度とすることが望ましいと考えられる。

## 4.3 剥離電子の検出

レーザビームと負水素イオンビームとを衝突させると、容易に電離する1つの電子と中性の水素原子( $H^0$ )が生成する。剥離した電子を負水素イオンビームのプロファイルとするために、剥離電子の検出は光電子増倍管などの検出器を使用する。

山根<sup>[9]</sup>によれば、レーザビームとして波長515 nmで、レーザのパルス継続時間(半値幅に相当)を  $\tau_l = 1$  ns、レーザパワー  $E_l = 100 \mu\text{J}$  のグリーンレーザを用いる場合を仮定すると、剥離した電子の数はおよそ  $10^8$  個となる。この値はオーダーを与える程度の推定値であるが、この程度の収量が期待できれば、プロファイルモニタとして使用できると考えられる。

レーザで分離した電子の速度は、ビーム中の負水素イオンと同じであり、そのエネルギーは負水素イオンの1/1840である。例えば、400 MeVの負水素イオンビームの場合、同じ速度の電子のエネルギーは218 keVであり、負水素イオンビームと一緒に飛翔する電子は、数百ガウス程度の磁場により容易に元のビームから分離できる。分離した電子は元のビームと同じような形状を維持した電子ビームとして電子検出器に導くことができるため、その信号をプロットすることでプロファイルに変換することができる

## 4.4 レーザの安定性に関する要求

加速する負水素イオンビームに対しては、(7)式で選択した  $n$ 、及び使用するレーザワイヤの本数( $l_w$ )に対し、

$$t = 3.01 \times n \times l_w \quad (8)$$

の時間、レーザが安定した強度で発振している必要がある。しかし、この間に負水素イオンビームのパルス形状が変動する場合は、多数回の平均を取るなどの方法で、統計的に精度の高いプロファイルに変換することができる。

## 4.5 校正

図7に示すように、レーザワイヤの  $c_0, c_2, c_4, \dots, c_{2n}$  について、各々レーザ光の強度が異なるため、相互作用するビーム量、すなわち分離する電子の数が変わってしまう。このため、図7から測定した信号の強度から、強度が一致するような係数を算出し、これを取った電子検出器の出力に校正係数として乗じる必要がある。したがって、開発するプロファイルモニタには、真空系の中に、図7の様な強度比が得られるような測定系を備えている必要がある。

また、 $c_0, c_2, c_4, \dots, c_{2n}$  が正しく同期するよう、 $c_0$  のタイミングをオンラインモニタリングで決める方法、324 MHz

の整数倍( $n$ )に同期させるレーザ光のタイミング、 $c_0$ と $c_2$ 、 $c_2$ と $c_4$ との時間的間隔が 324 MHz に合うよう調整できる機構を考える必要がある。

## 5. まとめ

山根ら<sup>[2]</sup>により提案された光共振器により、マルチレーザワイヤを作成し、それをプロファイルモニタに適用する方法を示し、J-PARC リニアックの仕様とこれまで使用してきた WSM により測定されたビームプロファイルの結果を参考に、ビーム計測のために必要な条件の一部を示した。

電子の検出にあたっては、レーザワイヤで十分な数の電子数を負水素より分離できることが見込めるが、負水素イオンビームを加速する際には、イントラビームストリッピングや残留ガスとの衝突などの物理過程により、電子が分離し、中性の水素原子とともにビームライン中を飛んでいる。極端にエネルギーの異なる電子は、偏向電磁石で弁別することが可能であるが、レーザで分離した電子と近いエネルギーを持つ電子は、測定においてノイズ源となり、ダイナミックレンジを低減する大きな要因となりうる。タイミングシステムと合わせて、今後の検討を要する部分である。

このマルチレーザワイヤプロファイルモニタで、例えば 20 数本のレーザワイヤを作った場合、このすべてが負水素イオンビームと相互作用するには、(8)式より負水素イオンビームが 300 ns あればよいことになる( $n$ を4とした場合、 $t = 289$  ns)。これは図 2 の 1 つの楕形のバンチ (intermediate bunch) で十分に測定が可能であり、RCS にビームを入射しているユーザ利用運転の際にもオンラインモニタリングができる可能性を示している。また、0.1~0.5 ms のパルス (macro pulse) には多数の楕形バンチがあることから、1 つのマクロパルス中で複数回の測定ができる可能性がある。これは、RF 加速空洞において、比較的長いパルスにおける RF の安定性を診断することもできるなど、このレーザプロファイルモニタの実現のメリットは大きいと考えられる。また、単レーザワイヤや金属ワイヤによりビームプロファイルを測定する際には、ワイヤ自体を移動 (スキャン) する必要がある。しかし、この方法は 2 つのミラーの焦点距離を適切に選ぶことで、ワイヤ間に距離を作製できることから、機械的な駆動機構を必要としない。このため、より簡素なシステムとなりコストダウンや機器故障の低減を図ることができる。

まず、試験的に 3 MeV リニアックに向けての応用を考える。3 MeV の負水素イオンビームのプロファイル計測には、太さ約 7  $\mu\text{m}$  の炭素線を使用している<sup>[7]</sup>。これは、密度の高い金属線では、3 MeV のビームの粒子が線内で停止し、破損する事例が見られたためである。このため、リニアックの上流部のビームラインでの使用用途も見込め、既に 3 MeV リニアック加速器による加速試験も行われている<sup>[8]</sup>。ここでの実証試験を経て、リニアックの高エネルギー部への展開を検討する。

## 参考文献

- [1] 山根功ほか, 加速器 13 巻 2 号, 80, (2016).
- [2] I. Yamane *et al.*, KEK Report 2009-9, November 2009, A.
- [3] Y. Yamazaki *et al.*, J-PARC Design Report, JAERI-ech 2003-2004, KEK Report 2002-13.

- [4] A. Miura *et al.*, to be published by Journal of Korean Physics Society, (2016).
- [5] L. M. Branscomb, "Physics of the One-And-Two-Electron Atoms", North-Holland, (1968).
- [6] 山根功, 「J-PARC 400 MeV H<sup>-</sup>ビーム用 Multi-Laser-Wire Profile Monitor」, 加速器誌投稿中, (2016).
- [7] A. Miura, "Progress of beam instrumentation in J-PARC", Proc. of IBIC2012, MOIA02, (2012).
- [8] 平野耕一郎ほか, 本学会予稿集 MOP005, (2016).