

カーボンナノチューブワイヤーを用いたビームプロファイル測定試験(3) —リニアック高エネルギー部におけるプロファイル測定— BEAM PROFILE MEASUREMENT USING CARBON NANOTUBE WIRES (3) - BEAM PROFILES IN HIGH ENERGY PART IN LINAC -

宮尾智章^{*, A)}, 三浦昭彦^{B)}
Tomoaki Miyao^{*, A)}, Akihiko Miura^{B)}
^{A)} KEK
^{B)} JAEA

Abstract

A wire scanner monitor (WSM) as a transverse profile monitor is used for the tuning of quadrupole magnets to suppress an excess beam loss and to realize a stable user operation in J-PARC linac. A wire with higher durability is required due to direct interaction with accelerated beam with increasing output power is increased. We focused on the carbon nanotubes as the material with high tensile strength and high electrical conductivity, and its hardness is endured thermally around 3000 °C. In the previous study, we applied a CNT-wire for the beam profile measurement using 3-MeV beam which has high beam stopping power. As a result, CNT-wire was confirmed to have a high durability and brings wider dynamic range compared with the profile taken by present tungsten fiber. In this study, we use 40-mA of peak beam current and applied CNT-wires to the WSM in the 191-MeV beam line which is lower stopping power to confirm the feasibility. We introduce the results of beam profile measurements taken by the CNT-wire and tungsten wire in 191-MeV beam line compared with those taken in 3-MeV beam line.

1. はじめに

J-PARC リニアックでは、ピークビーム電流 45 mA でのユーザー利用運転を実施しており、今後 50 mA 以上の運転を目指している。ピークビーム電流が上昇すると、その熱的負荷などにより、ビーム診断系の機器にも影響を及ぼすものがある。ビームの横方向プロファイルを測定するワイヤースキャナモニタ(WSM)は、直接ワイヤーをビームと相互作用することで信号を取得することから、より高い熱負荷に耐えるワイヤー材料の検討が必要となる。そこで、J-PARC リニアック棟内にある、高周波四重極型リニアック(RFQ)のテストスタンドビームラインでカーボンナノチューブ(CNT)ワイヤーの照射試験を実施し、ポリアクリルニトリルから製造したカーボンワイヤーと比較した。この結果、十分な信号強度が得られ、ビームエネルギー3 MeV に加速された負水素イオン(H⁻)ビームを実験の 5 倍の負荷をかけて照射しても充分耐えることができた [1,2]。CNT は Fig.1 のようなグラファイトを円筒状に丸めた物質で、直径、巻き方によって多様な性質を持っている[3]。CNT の大きな性質として、引っ張り強度は鋼鉄の 100 倍以上であり、電気伝導度は銅や、銀といった金属よりも高いことが挙げられる。さらに、熱的には真空状態で 3000°Cまで耐えられる物質として知られている[4]。本件では J-PARC リニアックに CNT ワイヤーを張った WSM にビームエネルギー191 MeV に加速された H⁻ビームを照射した場合のビームプロファイル測定結果と、ビーム電流による CNT ワイヤーの耐久に関して報告する。

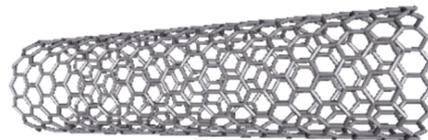


Figure.1: The molecular model of Carbon nanotube.

2. J-PARC リニアックでのビーム試験条件

J-PARC リニアックはイオン源で加速された H⁻ビームを RFQ、ドリフトチューブ型リニアック(DTL: Drift Tube Linac)、分離型ドリフトチューブリニアック(SDTL: Separated type Drift Tube Linac)により、191 MeV まで加速し、ビーム輸送ラインを通ったのちに環状結合(ACS: Annular Coupled Structure)型リニアックにより、400 MeV まで加速する。Figure 2 に本試験で使用する WSM を含むビームラインの一部を示す。WSM は 4 極電磁石に設置しており、ビームの横方向プロファイル測定から 4 極電磁石の電流値を決定し、ビーム径の最適化を行っている。CNT ワイヤーが張られた WSM は左側の WSM#1 に設置しており、ここでのビームのエネルギーは 191 MeV である。使用する CNT は日立造船(株)社製で直径は 100 μm である。一方、WSM#2 は直径 30 μm のタングステンワイヤーを張っている。

WSM の信号系はワイヤーにビームが衝突した時に流れる電流を、プリアンプで電圧信号に変換し、増幅している。J-PARC リニアックでのビームプロファイル測定は、ビーム電流 40 mA~60 mA、パルス幅 50 あるいは 100 μs、繰り返しは 1 Hz のビーム条件で実施した。

*tomoaki.miyao@j-parc.jp

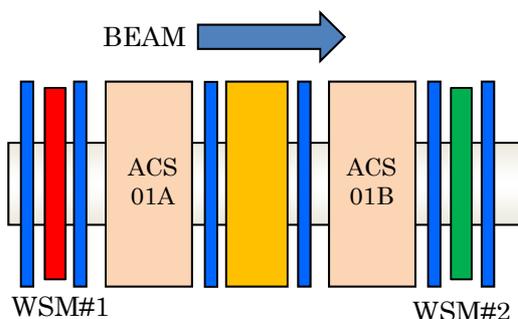


Figure 2: The beamline of J-PARC Linac.

3. 信号の比較

3.1 3MeV と 191MeV での信号比較

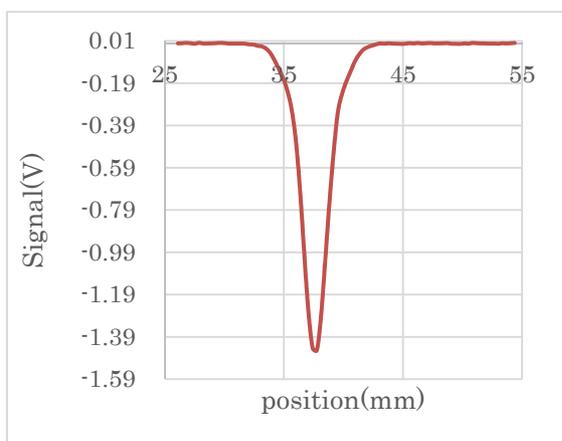
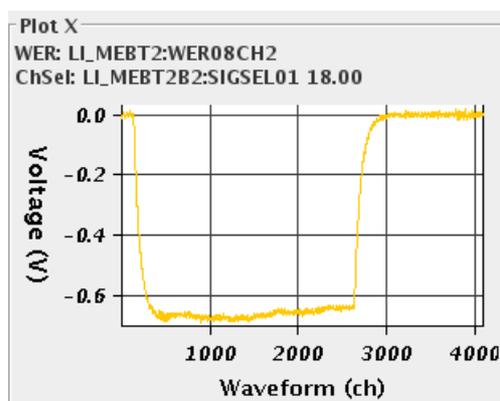


Figure 3: Beam signal and profile with CNT wire at 191 MeV.

Figure 3 に 191 MeV でのワイヤー信号波形と横方向ビームプロファイルの図を示す。ビーム電流は WSM 手前で 41.3 mA、マクロパルス幅は 100 μ s である。このとき、信号の出力は 0.65 V 程度出ているが、データ収集系の信号レンジを ± 2.5 V に収めなければならないため、プリアンプで出力された電圧に 6 dB のアッテネータを入れている。このため、実際の実出力電圧は 1.3 V 程度となる。Figure 4 に RFQ テストスタンドで照射した 3 MeV でのワイヤー信号波形を示す。3 MeV では出力が 2.4 V であり、

ビームエネルギーの低いほうが多く信号が得られるが出力電圧だけでは直接の比較ができない。そこで、出力電圧から CNT ワイヤーに流れる電流を見積もるため、プリアンプの電流電圧特性をとった。擬似電流源は ADCMT 製電圧・電流発生器 6240B を使用し、電流はパルス幅 100 μ s、繰り返し 1 Hz とし、条件はプリアンプの入力端子に 0.5 dB のアッテネータを入れた場合と、アッテネータ無しの 2 通りとした。その結果を Fig. 5 に示す。アッテネータなしと 0.5 dB アッテネータを入れたとき、プリアンプの電流電圧の関係式は出力電圧を V、入力電流を I としてそれぞれ

$$\begin{aligned} \text{no-att: } V &= 12.846 \times I + 0.0028 \\ 0.5 \text{ dB-att: } V &= 2.162 \times I - 0.0077 \end{aligned}$$

と書ける。よって、ワイヤーに流れる電流は 3 MeV のとき、1.1 mA に対し、191 MeV では 0.11 mA と推定され、CNT ワイヤーに流れる電流値は 1/10 となった。

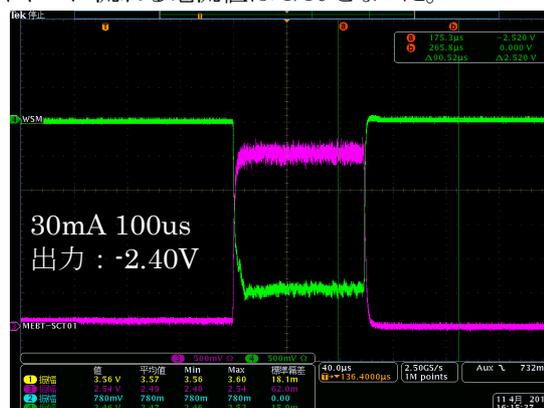


Figure 4: Beam signal and with CNT wire at 3 MeV.

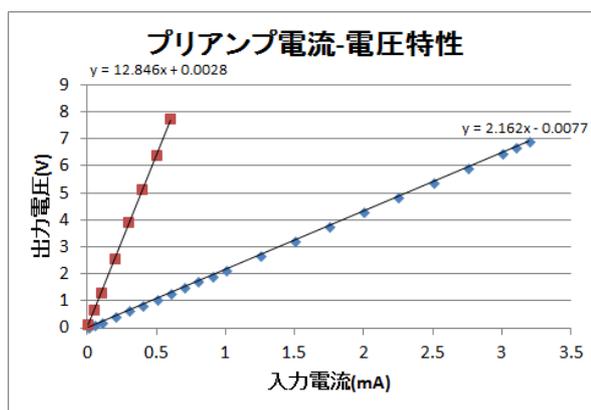


Figure 5: Current-voltage characteristics of WSM preamp.

直径 100 μ m の CNT ワイヤーに 3 MeV、191 MeV の H-ビームが照射されたときのエネルギー損失を見積もると、ベーテブロッホの式から

$$-\frac{dE}{dx} = Dz^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{(2m_e c^2)^2}{I^2} * \frac{\beta^4}{1-\beta^2} \right) - \beta^2 \right] \dots (1)$$

と書ける。ここで $D=0.3071$ (MeV*cm²/g)、 $Z=6$ 、 $A=12$ 、 $m_e c^2 = 0.511$ MeV、 I は平均イオン化ポテンシャルで

カーボン¹は 78 eV、 β は相対論的速さである。CNT の密度 ρ は 0.56 g/cm³ とした。計算結果を Fig. 6 に示す 3 MeV、191 MeV のエネルギー損失はそれぞれ、0.60 MeV、0.023 MeV となり、ビームエネルギーが上がると、エネルギー損失は 1/25 になる。計算上では CNT ワイヤーが直径 100 μm の断面が充填されているのに対し、実際のワイヤーは 5 層から 10 層のワイヤーになっているために、エネルギー損失が計算結果より過小評価されているものと考えられる。

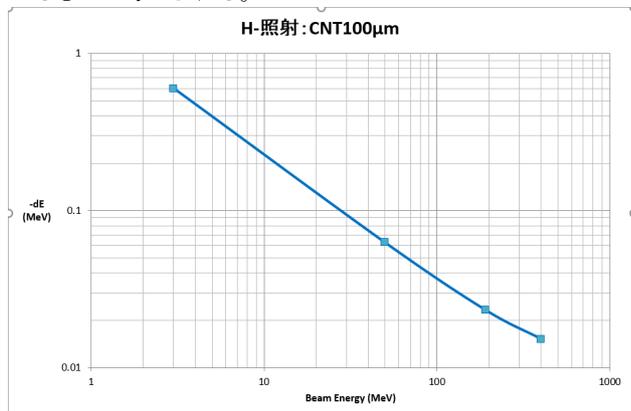


Figure 6: Beam loss from CNT depending on H- beam energy.

3.2 タングステンとの比較

タングステンワイヤーでプロファイル測定をすると信号は 6 dB アッテネータを抜いた場合、3.1V 出力され、プリアンプの電流-電圧特性から、ワイヤーに 0.24 mA の電流が流れる。これは直径 100 μm の CNT ワイヤーの 2 倍電流が流れることになる。電流が多く流れるとはいえ、ビームプロファイルを極端に細くして測定すると、熱が集中して切れてしまうケースが見受けられる。タングステンと CNT とのビームプロファイルの波形の比較を Fig. 7 に示す。S/N(信号対ノイズ)比を見るために、最大電圧で規格化している。ビームコアのプロファイルはほとんど差が見られないが、タングステンのバックグラウンドが 10^{-4} レベルに対し、CNT は 10^{-3} レベルと 1 桁高くなっている。この原因は解明できていないが、ビームの横方向調整には問題なく使えるものと考えられる。

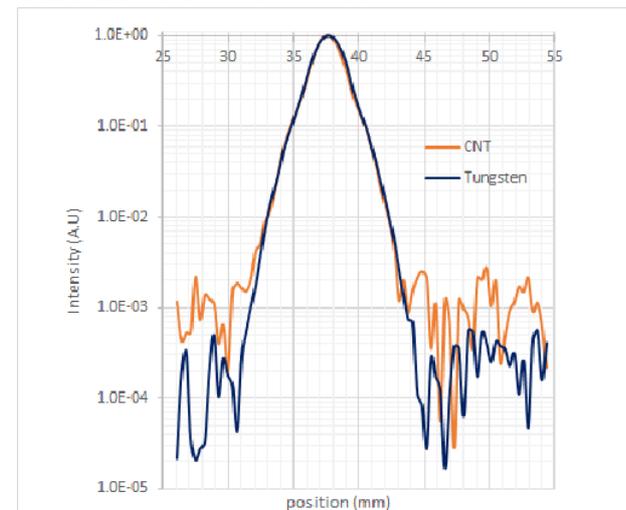


Figure 7: Beam profile compared with Tungsten wire.

3.3 ビーム電流による違い

J-PARC リニアックではユーザー運転向上のためにビーム電流 60 mA での調整運転が実施されている。RFQ テストスタンドでのビーム試験では熱負荷を 60 mA、マクロパルス幅 100 μs 相当のビーム照射でも外見の損傷は見られなかった。[1, 2] 今回は J-PARC リニアックに設置した WSM の CNT ワイヤーにビーム電流を 55 mA、60 mA、マクロパルス幅は 50 μs で、マクロパルスをさらにくし形構造のビームで照射した。実際測定したときのビーム電流はそれぞれ、54.0 mA、61.6 mA であった。このときのビームプロファイルの結果を Figure.8 に示す。55 mA で出力電圧が 0.44V、60mA で 0.68V と電流が上がると出力電圧も上がる結果となった。ビーム電流が上がることによって CNT によって H-ビームから剥ぎ取られる電子が増えることを表している。ビーム電流 60 mA で測定中のマクロパルスの波形を Fig.9 に示す。RFQ テストスタンドではビームのマクロパルスが広がると、CNT が加熱されて熱電子が出て信号が減っていく現象が見られたが、ビーム電流が 30 から 60 mA に上昇しても熱電子が出るような現象は見られなかった。その後、CNT ワイヤーのヘッドを目視確認したが、外見に異常は見られなかった。

ビーム照射前後のワイヤーの抵抗値を Table.1 に示す。40 mA でのビーム照射後は抵抗値が下がっているように見えた。原因は CNT ワイヤーの片端がばねでつながっていて、ビーム照射と同時に接触抵抗が改善されたと考えられる。一方で 55 mA、60 mA のビームを照射した後は抵抗値が上がっていて、RFQ テストスタンドでの照射前後で抵抗値が上がったことと再現していた。今後はビーム電流 60~70 mA、ビームエネルギー 3 MeV でのビームプロファイル測定と、ACS 空洞より下流側のビームエネルギー 400 MeV で同様の測定を実施したいと考えている。

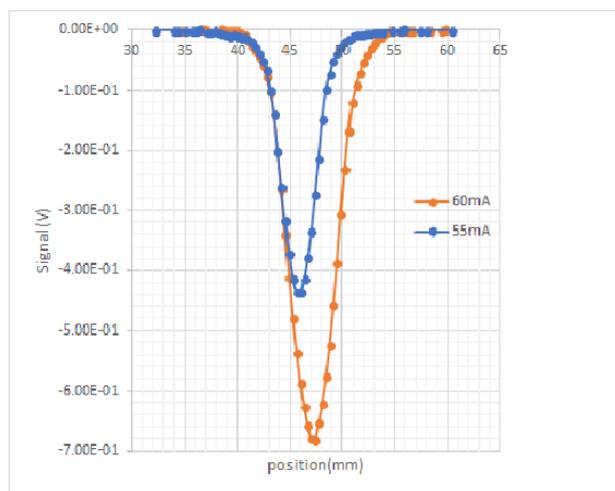


Figure 8: Beam profile of beam current at 55 and 60 mA.

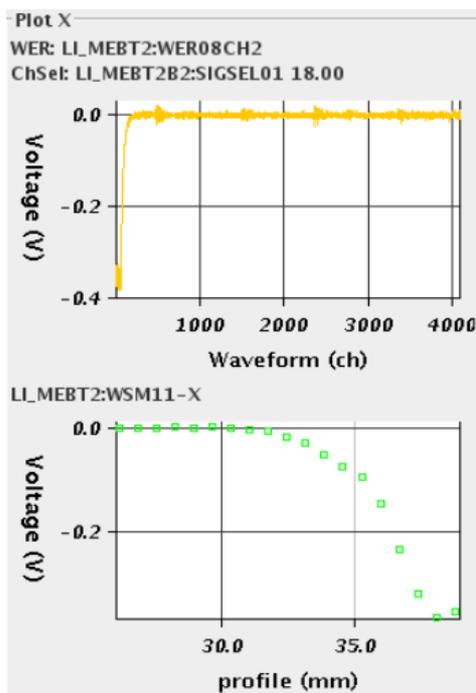


Figure 9: Measuring beam profile and macro pulse.

Table 1: CNT Wire Resistance Changed By Beam Operation

ワイヤー抵抗	照射前	40mA照射後	60mA照射後
ワイヤーX	564.8Ω	497.0Ω	549.7Ω
ワイヤーY	510.0Ω	454.8Ω	461.3Ω

4. まとめ

J-PARC リニアックに CNT ワイヤーを張った WSM を用いて、ビーム試験を実施した。ビームエネルギー 191 MeV の H-ビームでは 3 MeV の H-ビームと比較して、CNT ワイヤーからの信号電流が 1/10 に下がった。また、タンゲステンワイヤーと比較して出力電圧は半分で、S/N 比が 1 桁低いものの、ビームの横方向測定には問題なく使用できると考えている。さらに、ビーム電流を 55 mA、60 mA で測定できることも確認できた。今後は J-PARC リニアックの上流側 (3 MeV の H-ビームでかつ 60~70 mA) でのプロファイル測定、耐久性試験と、ACS 空洞より下流側でビームエネルギー 400 MeV の H-ビームでも同様の測定を実施したい。

参考文献

- [1] T. Miyao *et al.*, 「カーボンナノチューブワイヤーを用いたビームプロファイル測定試験」、第 14 回日本加速器学会年会, 2017, pp.572-576.
- [2] A. Miura *et al.*, “APPLICATION OF CARBON NANOTUBE WIRE FOR BEAM PROFILE MEASUREMENT OF NEGATIVE HYDROGEN ION BEAM”, IPAC2018, pp. 5022-5025, Vancouver, BC, Canada.
- [3] <http://www.org-chem.org/yuuki/nanotube/nanotube.html>
- [4] K. M. Liew *et al.*, “Thermal stability of single and multi-walled carbon nanotubes” Phys. Rev. B 71 (2005), 075424.