

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(4) BEAM PROFILE MEASUREMENT USING CARBON NANOTUBE WIRES (4)

宮尾智章[#]

Tomoaki Miyao[#]
KEK, J-PARC

Abstract

The J-PARC Linac is operated with a peak beam current of 50 mA, and we are aiming for an output of 1 MW or more from the 3-GeV synchrotron. To realize this, it is important to tune the electromagnetic current based on the beam profile measurement, and it is necessary to consider the influence of the load from the beam on the beam diagnostic system. As one of them, it is known as a substance that has a tensile strength 100 times higher than that of steel, an electrical conductivity higher than that of metals such as copper and silver, and can withstand up to 3000°C in a thermally anoxic state. We are conducting a beam test focusing on existing carbon nanotubes (CNTs). In this presentation, the beam profile was measured with 3-MeV negative hydrogen ion (H⁻) beam at the maximum peak beam current of 67 mA, and it was confirmed that measurement was possible without any problems. In addition, we also report the results of the comparison with the profile of carbon fiber and the dependence of beam energy.

1. はじめに

J-PARC リニアックでは、ピークビーム電流 50 mA でのユーザー利用運転を実施しており、3-GeV シンクロトロンから 1 MW 以上の出力を目指している。高品質なビームを供給するために、リニアック上流部でのビーム診断が必要不可欠である。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うるワイヤーとしてカーボンナノチューブ(CNT)を採用した[1]。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[2]。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[3]。本件では J-PARC リニアックに CNT ワイヤーを張った WSM にリニアック上流部におけるピークビーム電流 56-67 mA の 3-MeV 負水素イオン(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炭素繊維ワイヤーとの比較、ビーム電流による CNT ワイヤーの耐久結果に関して報告する。

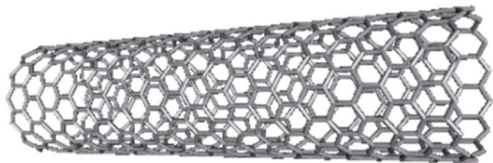


Figure 1: The molecular model of Carbon nanotube.

2. J-PARC リニアックでのビーム試験

J-PARC リニアックはイオン源で加速された H⁻ビームを高周波四重極型リニアック(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。これまで、RFQ テストスタンドビームラインでの試験、J-PARC リニアックでのビームエネルギー191 MeV、ピークビーム電流 60 mA でのビーム試験において、問題なく測定できていることを確認した[4]。本試験で使用するのは RFQ 空洞で加速され、DTL 空洞入口までのビーム輸送ライン(Medium Energy Beam Transport-line 1: MEBT1)で、ビームエネルギーは 3 MeV である。Figure 2 に MEBT1 のビームラインを示す。図の星印に WSM が設置され、RFQ 出口にある最上流部が J-PARC リニアックの中でも熱負荷が高い。WSM に使用しているワイヤー材質はφ7 μm の炭素繊維から日立造船(株)製のφ100 μm の CNT ワイヤーに張り替えているが、CNT に張り替えることで張力管理に気を使わずメンテナンス作業の効率化にもつながっている。本試験ではピークビーム電流 56-67 mA の H⁻ビームを照射したときのビームプロファイルを測定した。ビーム条件は、ビーム幅が 50-100 μs、繰り返しは 1-2.5 Hz で行った。

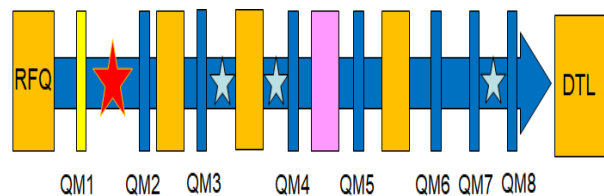


Figure 2: The beamline of MEBT1.

[#] tomoaki.miyao@j-parc.jp

3. 試験結果

3.1 ビーム電流による違い

ビーム電流が 67 mA でのビーム中心にワイヤーをセットして照射した場合のビーム電流波形(桃色)と WSM の出力波形(水色)の測定例を Fig. 3 に、ビーム電流が 56 mA との信号波形の比較を Fig. 4 に示す。ビームパルス幅に対応するように WSM が出力されていることがわかる。RFQ テストスタンドビームラインはビーム電流が 30 mA までであったため、同等の熱負荷をかけるにはビーム幅を 170-200 μs にして同様の測定を行う必要があった。この時、ビーム幅途中から加熱による熱電子の放出信号が見られていた[1]。今回の測定でビーム幅途中での波形の歪みが見られなかったのは、ワイヤーに照射している時間が前回の 50-60% 程度に抑えられることでワイヤーが加熱され過ぎずに測定できているものと考えられる。

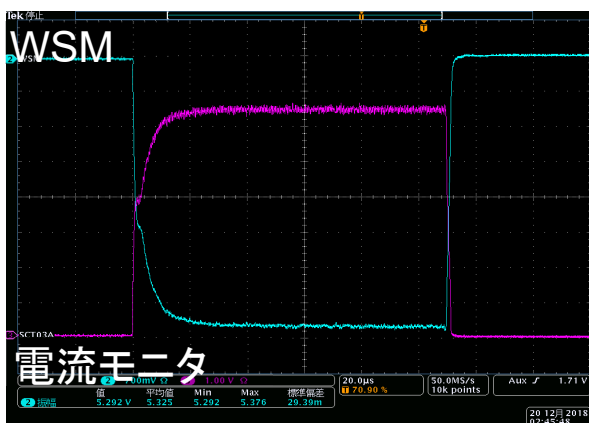


Figure 3: Example of waveform of WSM.

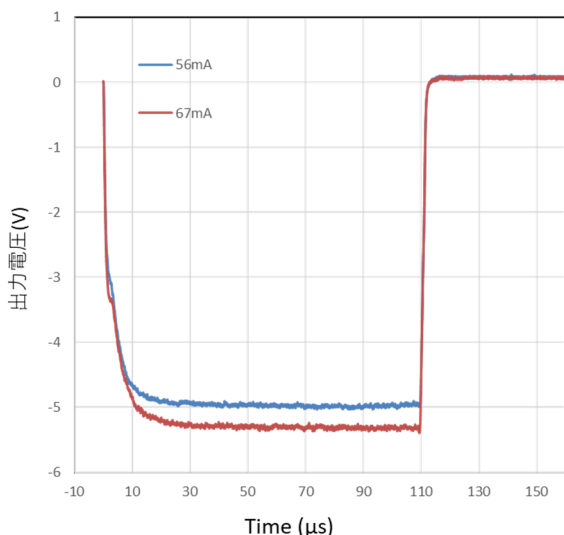


Figure 4: Waveform of WSM at 56 mA and 67 mA.

ビームプロファイルの波形を Fig. 5 に示す。ビーム電流が大きくなるにつれてプロファイルは多少大きくなるものの、ビーム中心部での信号波形で歪みが見られなかったことから、ビーム電流 67 mA の時でも問題なくプロフ

イルを測定することができた。MEBT1 に設置してある残りの WSM はビーム電流とビームのデューティーが下がるため、これ以上の熱負荷がなく、かつ、ビームプロファイルの S/N 比も問題なく測定可能である。

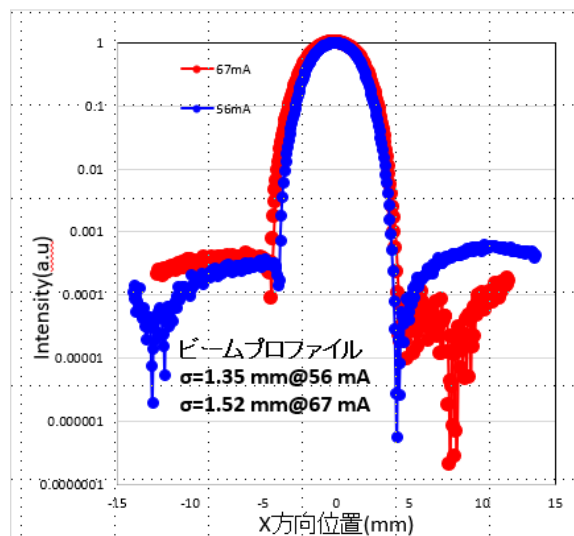


Figure 5: Beam profile of WSM at 56mA and 67mA.

3.2 炭素繊維との比較

$\phi 7 \mu\text{m}$ の炭素繊維と $\phi 100 \mu\text{m}$ の CNT ワイヤのビームプロファイルの比較は、前頁の Fig. 2 にある MEBT1 ビームラインの下流にある QM7 と QM8 にある WSM にて測定した。ここでのビーム電流は 53 mA、測定時のビームパルス幅は 50 μs 、繰り返しは 1 Hz で実施した Figure 6 にビームプロファイルの生信号波形を、Fig. 7 に信号波形の最小値で規格化したビームプロファイル波形を示す。出力電圧はワイヤー径の太さとビームとの衝突回数の違いから得られる信号電圧は炭素繊維が -0.4 V に対して CNT は -2.7 V 得られ、従来使用していた炭素繊維の 6.7 倍に向上した。これはワイヤーの抵抗に依存して、炭素繊維は 43 k Ω に対し、

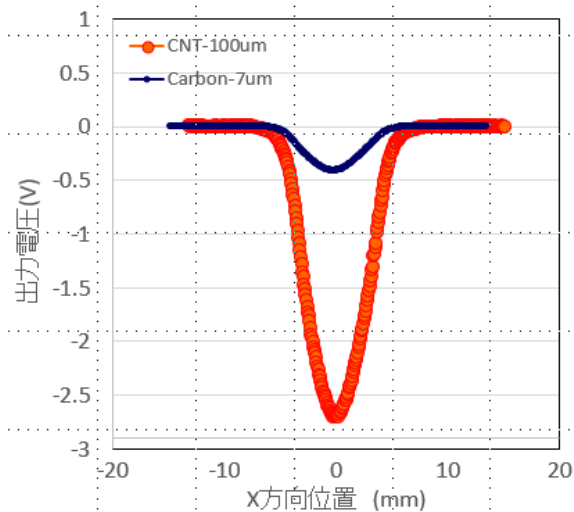


Figure 6: Waveform of WSM comparing $\phi 7 \mu\text{m}$ Carbon with $\phi 100 \mu\text{m}$ CNT.

CNT は 230Ω と $1/160$ に低減され、CNT に流れる電流量が増えたものと考えられる。ビームプロファイルは炭素繊維、CNT 共に 2.41 mm と観測されて S/N 比も大きな変化は見られなかった。この結果からワイヤーを張り替える場合は、 $\phi 100 \mu\text{m}$ の CNT ワイヤーの方が強く引っ張っても切れずに張ることが可能なため、作業メンテナンスの効率化にもつながる結果となった。

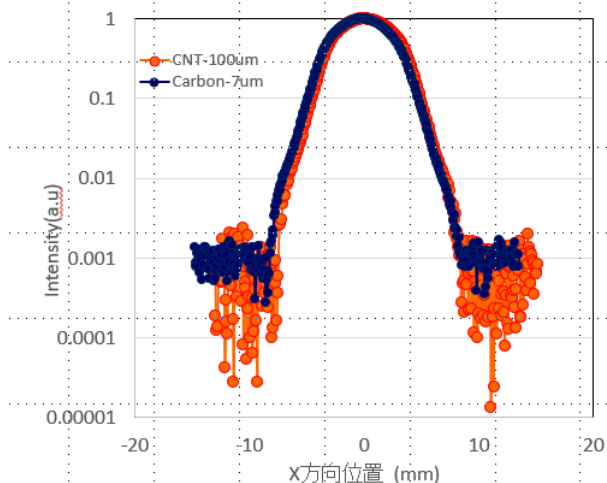


Figure 7: Beam profile of WSM comparing $\phi 7 \mu\text{m}$ Carbon with $\phi 100 \mu\text{m}$ CNT.

3.3 照射後のワイヤー抵抗

Hビームを照射前後のワイヤー抵抗を測定した結果を Table 1 に示す。照射前の抵抗が 233.3Ω に対し、 56 mA では 248.8Ω 、 67 mA 照射後は 256.5Ω であった。 56 mA 照射後は照射前に比べて 6.6% 増加、さらに 67 mA 照射後では 56 mA 照射後のワイヤーと比べて 3.1% 増加している。CNT の繊維が切れているものの、照射後の WSM ヘッドに張っている CNT を目視観察すると、目立った傷は見当たらなかった。今後も同様の照射試験を重ねて、CNT ワイヤーの寿命を検証する必要がある。

Table 1: Change of CNT Wire Resistance

照射前	233.3Ω
56 mA 照射後	248.8Ω
67 mA 照射後	256.5Ω

4. ビームエネルギー依存測定

4.1 測定条件

これまで、ビームエネルギー 3 MeV での Hビームを CNT ワイヤーに照射した試験結果を示したが、ここでは J-PARC リニアックで使用できるビームエネルギーを変えながらビームのプロファイルを測定した。WSM はビームダンプ近くの物を使用し、ビームエネルギーは $20\text{-}400 \text{ MeV}$ の範囲内で試験した。J-PARC リニアックではビーム調整のために Hビームを加速できる空洞の範囲を決

めて測定することができる。例えば、RFQ 空洞から SDTL 空洞まで加速の位相に合わせると 191 MeV のビームを CNT ワイヤーに照射することになる。材質との比較として $\phi 30 \mu\text{m}$ のタングステンワイヤーを使用し、ビーム電流は $8\text{-}9 \text{ mA}$ の低いビーム電流とした。Figure 8 に CNT ワイヤーのプロファイル測定結果を、Fig. 9 にタングステンワイヤーのプロファイル測定結果を示す。金属導体であるタングステンはすべてのビームエネルギーにおいて Hビームからワイヤーに衝突して電流が流れて負信号として検出されたのに対し、CNT ワイヤーは高い電気伝導度を示すものの、金属に近い性質と半導体に近い性質の両用を持っている。エネルギーが高くなると信号が正信号として検出され、 171 MeV での測定では負信号として検出された。この結果から CNT ワイヤーを使用するにあたって最適化されるビームエネルギーの範囲を指定しなければならないと考えている。さらにビーム電流を変化させた場合のプロファイル測定の応答や、CNT ワイヤーにバイアス電圧をかけることで 2 次電子放出を変化させた測定試験も行う必要がある。CNT から取り込まれる電子量放出される 2 次電子放出量との関係は現在解析中である。

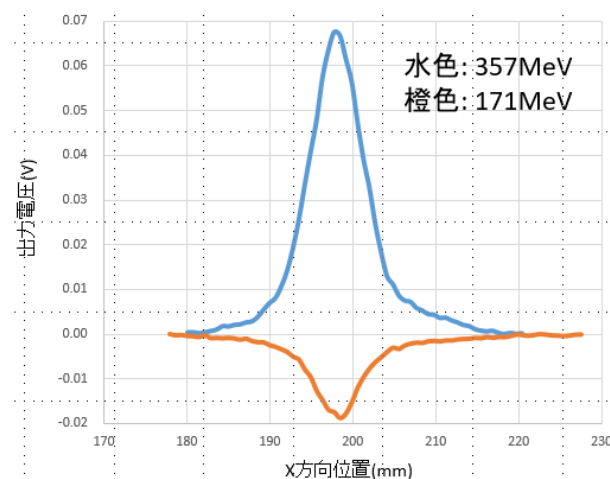


Figure 8: Beam profile using CNT wire.

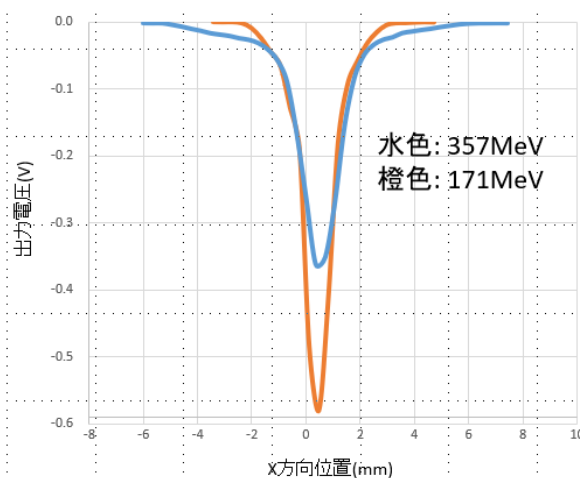


Figure 9: Beam profile using Tungsten wire.

5. まとめ

J-PARC リニアック上流部にある MEBT1 に設置した WSM において、ビームエネルギー 3 MeV の H-ビームを照射した。ピークビーム電流は 56 mA、67 mA の 2 パターンとも WSM の出力信号はビーム幅途中に見られる出力波形の歪みは見られず、プロファイルについても問題なく測定することができた。今後信号波形が歪むケースが出てきた場合は CNT ワイヤーにバイアス電圧をかけた状態で熱電子放出を抑制できたうえでの測定を考えている。特に最上流部の WSM は J-PARC リニアックの中でも一番熱負荷の強いところであるが、照射後のワイヤーの抵抗値の変化は数%以内に収まり、外見上の傷も見られなかった。今後はワイヤーの寿命を検証していきたい。また、CNT ワイヤーに張り替える前の $\phi 7 \mu\text{m}$ の炭素繊維を使用した場合の比較は、出力信号が 6.7 倍にまで向上し、プロファイル測定においても、同等の値が得られた。ワイヤーを張り替えるときも CNT の場合は張力管理を気にせずメンテナンスの作業効率も上げることができた。ビームエネルギー依存測定については出力信号が反転するところが見られ、CNT ワイヤーを使用する最適なビームエネルギーを探る必要がある。さらに、ビーム電流を上げた場合とバイアス電圧をかけたときの信号変化がみられるかどうかを検証していきたい。

参考文献

- [1] A. Miura *et al.*, “APPLICATION OF CARBON NANOTUBE WIRE FOR BEAM PROFILE MEASUREMENT OF NEGATIVE HYDROGEN ION BEAM”, IPAC2018, Vancouver, BC, Canada.
- [2] <http://www.org-chem.org/yuuki/nanotube/nanotube.html>
- [3] K. M. Liew *et al.*, “Thermal stability of single and multi-walled carbon nanotubes” Phys. Rev. B 71 (2005).
- [4] 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(3)」, 第 15 回日本加速器学会年会.