

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 BEAM PROFILE MEASUREMENT USING CARBON NANOTUBE WIRES

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

Abstract

In the J-PARC Linac, the peak beam current is planning to increase from 40mA to 50mA, and we need to consider the influences of beam diagnoses because of a beam loading. Because the most serious problem is the wire-scan monitor (WSM) the direct interaction with the beams, we started to examine the materials to endure a thermal loading from a beam about WSM as a beam-profile measurement. It is known that carbon nanotubes (CNT) are made of graphite in a cylindrical shape and have a tensile strength not less than 100 times that of steel. The electric conductivity has higher than that of metals such as copper or silver, and hardness is endured thermally 3000°C in a vacuum circumstance. We applied the wires made of CNT to WSM and measured transverse profiles with a 3MeV negative hydrogen ion beam (H⁻). As a result, we obtained the equivalent signal levels and profiles compared with those taken by carbon wire made of polyacrylonitrile (PAN). We report the pulse waveform when CNT is irradiated with a H⁻ beam and the result of beam profile measurement. In addition, the surface of CNT after 3MeV beam operation was observed.

1. はじめに

J-PARC リニアックでは、ピークビーム電流 40mA でのユーザー利用運転を実施しており、今後 50mA 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うるワイヤー材料の検討が必要となった。これまでのビーム調整において、ピークビーム電流が 40mA、50mA の場合において、ビームの熱負荷による温度上昇から引っ張り強さが低下し、直径 30μm のタングステン製ワイヤーもしくは、タングステン製金メッキワイヤーが切断することがあった。そこで、熱的耐久性に優れ、温度上昇時の引っ張り強さの変化が小さい材料としてカーボンナノチューブ(CNT)ワイヤーに注目した。CNTはFigure 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[1]。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[2]。本件ではCNTワイヤーによるビーム試験を行い、信号の確認と、ビームの横方向プロファイル測定結果について報告する。

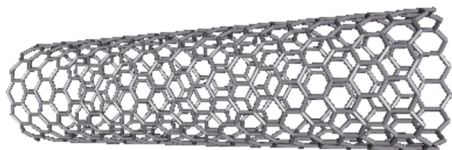


Figure 1: The molecular model of Carbon nanotube.

2. ビーム試験

ビーム試験は 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実施した。このビームラインは、RF 駆動イオン源で生成した負水素イオン(H⁻)を RFQ で 3MeV にビームを加速し、スクレーパーの照射試験、バンチシェイプモニタの評価試験、レーザー荷電変換のビーム試験などに使用している。Figure 2 にビームラインの概要を示す。試験に使用する WSM は、RFQ 出口から最も近い 4 極電磁石の下流側に設置した。実際の J-PARC リニアックのビームラインの RFQ 下流のマッチングセクションでは、3MeV の H⁻ビームを測定するため、使用する WSM のワイヤーはエネルギー・ストップングパワーが低くなるように、直径 7μm の径の小さいポリアクリルニトリルから製造したカーボンワイヤーを使用している。このカーボンワイヤーは複数の繊維束から取り出して使用するため、ワイヤー太さを均一にすることが難しいほか、肉眼で見えにくいいため、交換・修復するのは容易ではないという欠点がある。

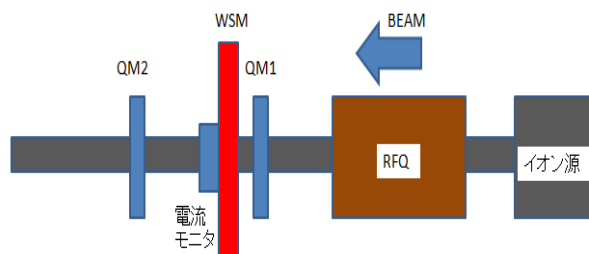


Figure 2: The beamline of RFQ-test stand.

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

リニアック中・高エネルギー部の WSM では、融点が高いタンダステン製ワイヤーを採用し、ビーム照射時の温度上昇、冷却のバランスから直径 $30\mu\text{m}$ のワイヤーを使用している[3]。また、自重や温度上昇時のゆりみを補正するために、ばねによる張力をかけた状態で張られている。ビーム照射時の温度上昇によって、引張強さが大きく低下した場合、このばねの張力によってワイヤーが破断する可能性がある[4]。そこでワイヤーを CNT ワイヤー製に替えることで、高温時の引張り強度も充分確保できる。このため、日立造船(株)社製の直径 $30\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ の 3 種類の CNT ワイヤーを用いて、H-ビームからの信号利得、プロファイル測定、ビーム照射後の表面観察を行った。CNT ワイヤーは外径 $10\sim 30\text{nm}$ 、5 層～10 層の複層 CNT を複数本より集めて製造したものである[5]。Figure 3 に CNT ワイヤーを WSM ヘッドに張った時の状態を示す。

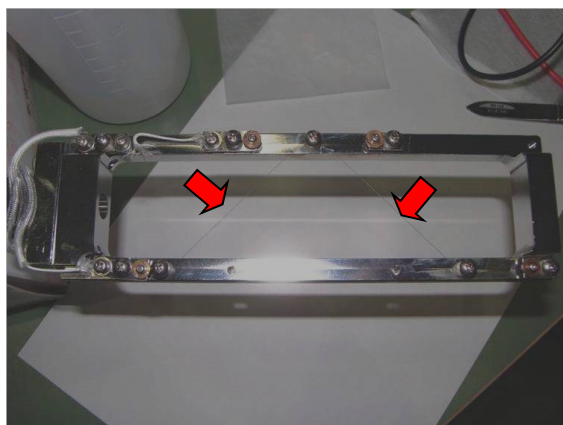


Figure 3: WSM-sensor head with CNT wires.

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、現在ビーム電流 40mA 、パルス幅 50 あるいは $100\mu\text{s}$ 、繰り返し 1 あるいは 2.5Hz のビーム条件で行われる。一方、RFQ テストスタンドビームラインでは RFQ 出口でのビーム電流が 30mA までに限られているため、本試験では、 30mA で測定時のビーム条件以上の熱量に相当するビーム条件を考慮し、パルス幅を $50\mu\text{s}$ 、 $100\mu\text{s}$ 、 $135\mu\text{s}$ (40mA 、 $100\mu\text{s}$ 相等)、 $170\mu\text{s}$ (50mA 、 $100\mu\text{s}$ 相等)、 $200\mu\text{s}$ (60mA 、 $100\mu\text{s}$ 相等)の 5 条件で実施した。繰り返しは通常の 1Hz の他に、CNT ワイヤーの耐久を確認するため、 5Hz で 4 分間ビームを照射する試験も実施した。

3. 試験結果

3.1 信号の確認

直径 $100\mu\text{m}$ の CNT ワイヤーを用い、水平方向のビーム強度が最も大きくなる位置で CNT ワイヤーに流れる電流を観測した。その波形を Figure 4 に示す。CNT ワイヤーに流れる電流は、H-ビーム由来の電子によるものと考えられ[3]、CNT ワイヤーは前置増幅器(プリアンプ)で増幅、電圧変換した後、オシロスコープにより計測している。Figure 4 では、約 -2.5V の出力電圧が見られる。これ

はプリアンプ入口に 0.5dB のアッテネータを入れて、減衰させているためであり、アッテネータがない場合には、 -8.6V の電圧が出力された。この大きさの信号では、プリアンプに入る電流が大きすぎ、プロファイルを測ることができない。つまり、CNT ワイヤーでの信号利得は、これまで使用してきた PAN 製のカーボンワイヤーより大きいことを示している。Figure 4 のピンクの波形が RFQ 出口にある電流モニタの波形、緑が WSM の信号波形である。パルス幅 $50\mu\text{s}$ での波形には、ビーム電流に近い水平な信号応答がパルスの終わりまで見られる。一方、パルス幅 $200\mu\text{s}$ で取得した波形は、パルスの前から中ごろまで水平な応答を示しているが、立ち上がりから $140\mu\text{s}$ のところから、緩やかに信号が減少(正側に変化)し始め、パルスの終わりまで変化が見られた。パルス幅が $170\mu\text{s}$ 及び $200\mu\text{s}$ の波形を比べた結果、いずれも $140\mu\text{s}$ から変化が見え始め、パルスの終わりまでこの変化が継続することが確認できた。

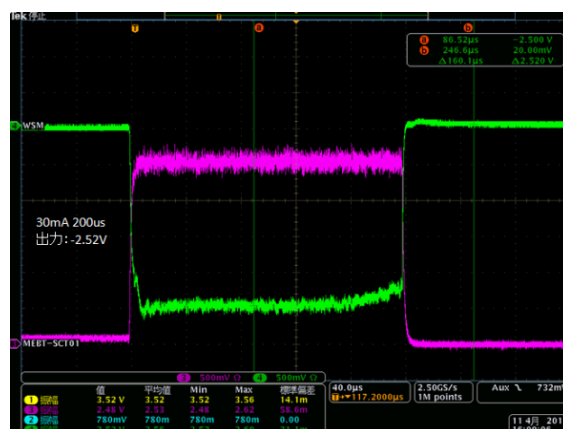
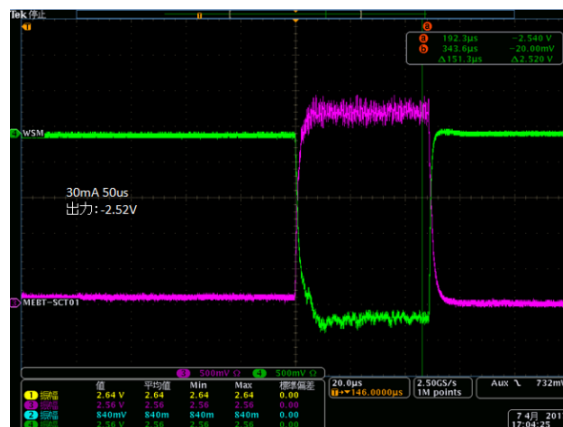


Figure 4: Signal wave form of H⁻ pulse taken by CNT wire of $100\mu\text{m}$ diameter.

Figure 5 に直径 $50\mu\text{m}$ の CNT ワイヤーでの出力波形をパルスの先頭を合わせて表示した。いずれのシュル直波形も、先頭から $10\mu\text{s}$ 以内で水平な出力信号があらわれ、 $120\mu\text{s}$ より長いパルスを押加したものでは、 $120\mu\text{s}$ から信号が減少(正側に変化)している。また、パルス幅が $170\mu\text{s}$ と $200\mu\text{s}$ の信号では、信号が正の側に逆転してい

る部分が見られる。特に、200 μ sの信号では、170 μ s付近まで、パルス幅 170 μ s の信号と同じ傾向で推移し、最後の 30 μ s では、正の信号のみが観測された。この現象は、直径 30 μ m の CNT ワイヤでも確認できた。

この現象を理解するため、PAN 製のカーボンワイヤでも同様の試験を行った結果を Figure 6 に示す。この結果、出力信号の大きさに違いが見られるものの、パルス幅が 120 μ s より長いパルスでは、120 μ s から正側へ信号が減少し始め、170 μ s より長いパルスでは、プラスの信号が確認できる。プラスの信号が出ている原因は、炭素繊維に特異な現象と考えているが、ワイヤの温度特性の評価など、さらなる検証が必要である。

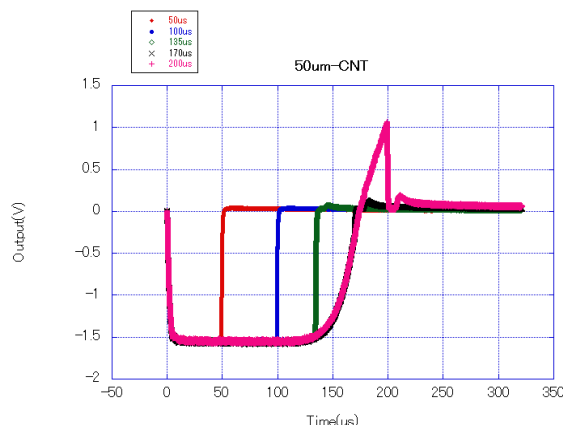


Figure 5: Output of Voltage of 50 μ m CNT wire compare with beam pulse-width.

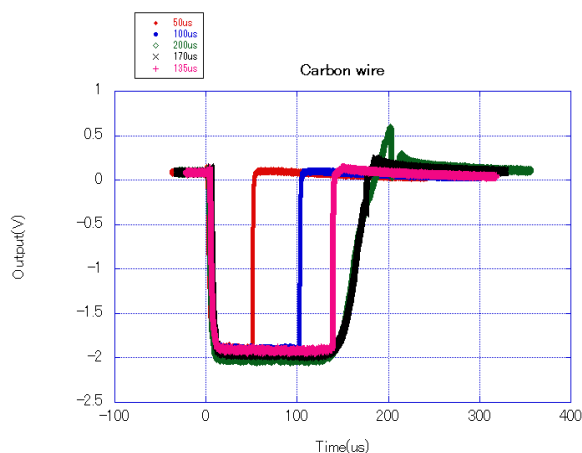


Figure 6: Output of Voltage of carbon wire compare with beam pulse-width.

3.2 ビームプロファイル

3.1 で示したように、CNT ワイヤからの出力電圧は約 -2.5V あるので、ワイヤの位置に対する信号の大きさをプロファイルに加工するには、十分な信号が得られていると言える。プロファイルの測定は、ワイヤを 0.5mm ステップで移動させ、移動量に対するパルス高をプロットす

る。このとき、パルス高は、信号の安定している部分と、バックグラウンドにそうとする部分の差分として定義した。Figure 7 に直径 50 μ m の CNT ワイヤと PAN 製カーボンワイヤで測定したビームプロファイルの比較を示す。CNT ワイヤはパルス幅 50~200 μ s の 5 パターンで取得したものも示している。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。全ての条件において、ほぼ同じプロファイルが得られており、PAN 製カーボンで取得したプロファイルとも相違はない。カーボンとの違いはバックグラウンド(強度 10^{-2} ~ 10^{-3} の部分)のばらつきが CNT の方が低めで一定であった。これかや、CNT ワイヤはより S/N 比が向上しており、今後のビームプロファイル測定にも充分使用できると考えられる。

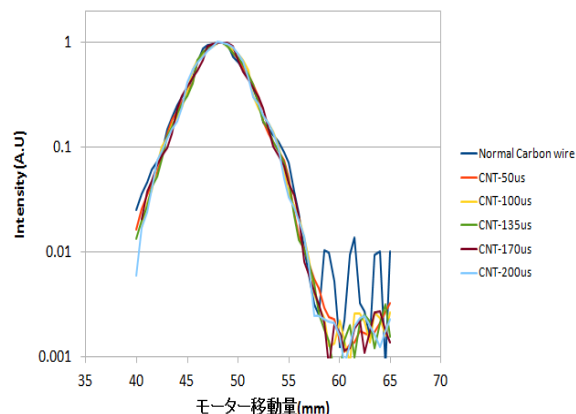


Figure 7: Beam profile with 50 μ m CNT wire.

3.3 CNT ワイヤに流れる電流値

CNT ワイヤに流れる電流値を求めるため、プリアンプに擬似電流を流して、プリアンプの電流-電圧特性を測定した。WSM のビームプロファイル測定と同条件にするため、入力には 0.5dB のアッテネータを入れている。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 1Hz とした。Figure 8 にプリアンプの電流-電圧特性を示す。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

$$V=2.162 \times I-0.0077$$

と書ける。ここでの V、I の単位は Figure 8 の縦軸、横軸と合致させている。よって、それぞれの直径の CNT ワイヤに流れる最大の電流は

100 μ m: 1.2mA
50 μ m: 0.7mA
30 μ m: 0.5mA

と推定できる。

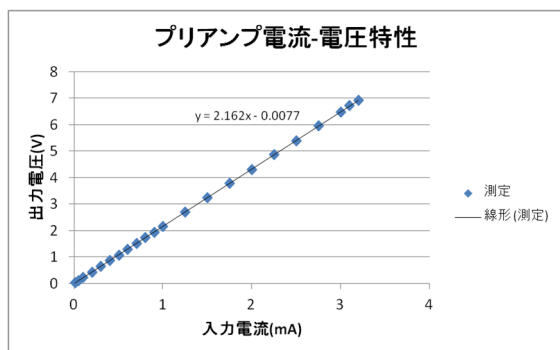


Figure 8: Current-voltage characteristics of WSM preamp.

3.4 CNT ワイヤー耐久試験

CNT ワイヤーの耐久試験は、水平方向のビーム強度が最も大きい位置にワイヤーを移動させてビームの繰り返しを5Hzで4分間照射した(Figure 9)。実際のプロファイル測定では、ワイヤーにビームが当たる時間は1分程度である。熱負荷が通常の5倍強いため、ワイヤーへの負担は大きいものの、100 μ m、50 μ m、30 μ m 全てのCNT ワイヤーで破損は確認できなかった。今後、さらにマクロパルス幅を広げ、照射時間を延ばした条件で耐久性評価試験を継続したい。

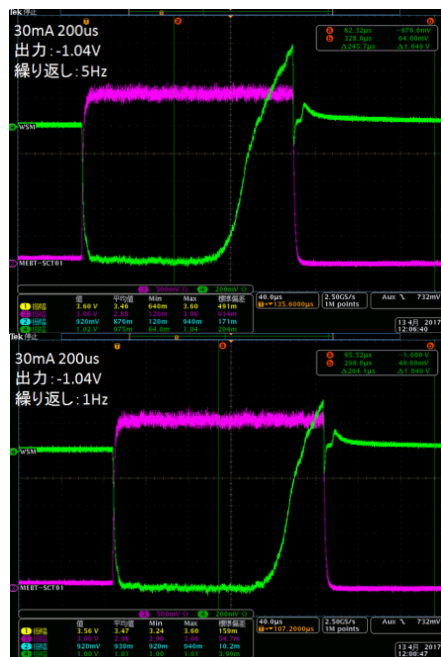


Figure 9: The endurance test of CNT wire.

3.5 照射前後のワイヤー出力電圧と抵抗値

Table 1 に CNT ワイヤーのビーム照射前後の抵抗値を示す。全ての CNT ワイヤーの照射後の抵抗値が上昇している。これは、3.4 の耐久性評価試験後のサンプルであるため、ビーム照射により、繊維状になっているCNTの一部が損傷しているためと考えられる。耐久性評価試験では、5倍以上の熱量に相当するビームを実施際の照射時間より長く照射したために生じたものであるが、プロファイル測定に影響を及ぼすほどの変化ではなかった。

Table 1: CNT Wire Resistance Change by Beam Operation

| ワイヤーY径(μ m) | 出力電圧(V) | ワイヤー抵抗 | 試験後の抵抗 |
|------------------|---------|-----------------|-----------------|
| 100 μ m | -2.4V | 285.4 Ω | 298.1 Ω |
| 50 μ m | -1.6V | 1.009k Ω | 1.037k Ω |
| 30 μ m | -1.2V | 2.543k Ω | 2.650k Ω |

| ワイヤーX径(μ m) | 出力電圧(V) | ワイヤー抵抗 | 試験後の抵抗 |
|------------------|---------|-----------------|-----------------|
| 100 μ m | -2.6V | 318.9 Ω | 332.4 Ω |
| 50 μ m | -1.5V | 1.212k Ω | 1.278k Ω |
| 30 μ m | -1.1V | 2.866k Ω | 3.073k Ω |

3.6 照射後のワイヤー画像

ビーム照射後のワイヤーの表面をレーザー顕微鏡で観察した。使用した顕微鏡は Olympus 製 LEXT OLS4100 で、倍率は50倍とした。ビーム照射前後でワイヤーの抵抗値が増えていることからワイヤーの一部の繊維が切れたものと考えられるが、Figure 10 に示すような画像ではビームによる大きな損傷は観測できなかった。

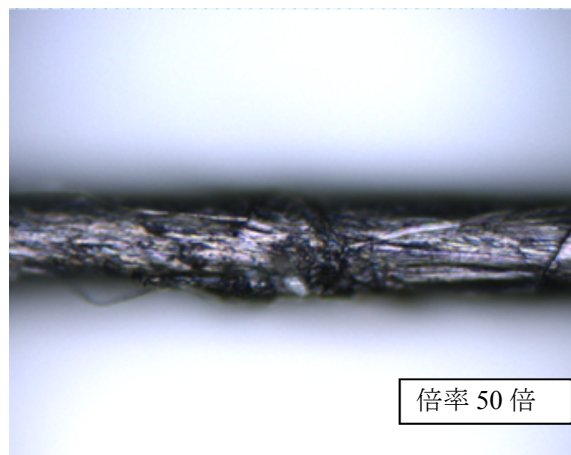


Figure 10: Microscope image of CNT wire after beam operation.

4. まとめ

熱的耐久性に優れたワイヤーの材料を調査し、複数の径を持つ CNT ワイヤーで 3MeV の Hビームのプロファイル測定、耐久性評価試験を実施した。この結果、PAN 製の従来のカーボンワイヤーでのプロファイルと比較してもほぼ同等の信号が得られ、バックグラウンドが小さくなり、S/N 比の向上につながった。さらに、耐久性評価試験では通常の5倍の熱負荷をかけてもワイヤーの健全性は大きく変化しないことが確認できた。CNT はよじれからの復元性も高いため、従来の PAN 製のカーボンワイヤーやタングステン素線に比べ、取扱いが容易になる。これは、ワイヤーの張り替え時間を考えると、優位特性であるため、今後の有望な材料の1つであると考えられる。

今後は、J-PARC リニアックの高エネルギー部においてビーム試験を行い、信号利得の大きさを確認するとともに、信号が得られる物理過程に関する理解を深めてい

く。また、高エネルギービームにおける損傷状況の評価を進めるなどの評価試験等を継続したい。

謝辞

本ビーム試験を実現するにあたり、CNT ワイヤーを提供していただいた日立造船(株)、RFQ テストスタンドビームラインでビームタイムを提供していただいた平野耕一郎氏に感謝御礼申し上げます。

参考文献

- [1] <http://www.org-chem.org/yuuki/nanotube/nanotube.html>
- [2] K. M. Liew *et al.*, “Thermal stability of single and multi-walled carbon nanotubes” *Phys. Rev. B* 71 (2005).
- [3] A. Miura *et al.*, “Beam Profile Monitor for Intense, Negative, Hydrogen-Ion Beams in the J-PARC Linac”, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 69, No. 6, September 2016, pp. 1005~1013.
- [4] 三浦昭彦ほか、「ビームプロファイルモニタ用金属製ワイヤの耐久性評価試験」、本学会、TUP083.
- [5] 日立造船 CNT 仕様・物性データ;
<http://www.hitachizosen.co.jp/technology/cnt/specification.html>