

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

TENSILE FRACTURE TEST OF METRIC WIRE OF BEAM PROFILE MONITORS

三浦昭彦^{#, A)}, 福岡翔太^{B)}, 宮尾智章^{C)}, 川根祐輔^{A)}, ニツ川健太^{C)}

Akihiko Miura^{#, A)}, Shota Fukuoka^{B)}, Tomoaki Miyao^{C)}, Yusuke Kawane^{A)}, Kenta Futatsukawa^{C)}

^{A)} J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{B)} Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba

^{C)} J-PARC Center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

J-PARC is one of high-brilliant accelerator facilities in the world. For the mitigation of the beam loss during a beam transportation, wire-based profile monitors are used to measure by both transverse and longitudinal beam profiles using wire-scanner monitors (WSMs) and bunch-shape monitors (BSMs). Signals are come from the direct interaction between metallic wire and negative-hydrogen ion beam and/or secondary electrons emitted from wire by the impact of beam particles. We have chosen the tungsten wire as a high melting-point material by estimation of heat loading during the impact of beam particles with wire. In addition, a spring is applied for the relaxing a sag under wire's own weight. A tensile fracture test is proposed by supplying an electrical current as a simulated beam-heat loading. As a result, we obtained the relation between the thermal limit to break down and tension loading of tungsten wire.

1. はじめに

J-PARC リニアックでは、高周波加速空洞を用いて、負水素イオンビームを 400MeV まで加速している。ビーム輸送中のビームロスを抑制するため、ワイヤ・スキャナ・モニタ(Wire Scanner Monitor: WSM)を用いて、ビームの進行方向に鉛直な方向のプロファイル測定するとともに、位相方向の拡がり測定するため、バンチ・シェイプ・モニタ(Bunch Shape Monitor: BSM)を用いて、加速空洞の振幅設定のチューニングに使用している[1, 2]。

これらのプロファイルモニタでは、加速したビームを金属ワイヤに直接相互作用させ、ワイヤ内に発生した電流や、ビームとワイヤの衝突により発生した 2 次電子を計測している。このため、モニタを設計する際、ビームによる熱負荷による温度を考慮し、融点の高い材料としてタングステンワイヤを採用した。また、ワイヤを金属製のフレームに固定する際、自重や温度上昇によるゆるみをばねによる引張りにより除去している。

J-PARC リニアックにおいて、ピークビーム電流をより大きくする際には、ワイヤの温度上昇に対し、引張り強さを確保できる条件でなければ、これが破断の要因になる。そこで、小型の真空チャンバで、ビームによる熱負荷を印加電流で模擬し、ワイヤにかかる荷重(張力)とワイヤ径をパラメータとした試験を実施した。本論では、ワイヤにかかる張力と破断に至る温度の関係について示す。

2. プロファイルモニタ用センサヘッドの構造

2.1 横方向プロファイルモニタ(WSM)

J-PARC リニアックでは、上流部から下流のシンクロトロンに接続するビームラインまでの 8 カ所の調整用セクションにおいて、各々 4 台ずつの横方向プロファイルモニタ(WSM)を設置し、4 極電磁石の調整に使用している[1]。設置位置のビームラインの径に従って、複数の口径の WSM を製作するとともに、設置位置でのビームエネルギー

ギーに基づいた熱解析により、ワイヤの太さを選定している。図 1 に J-PARC リニアックで使用している WSM センサヘッドの例を示す。

このセンサヘッドには、2 本のワイヤを固定している(図 1 内の赤及び青)。一方は、水平方向、もう一方は鉛直方向のプロファイル測定するためのものであり、ヘッド自体を 45° 傾けたチャンバに設置しているため、各々のワイヤも 45° 傾けている。フレームは金属製であり、ワイヤは碍子により絶縁している。各々のワイヤの一方は金属板に接続した後、被覆導線を通して、信号として計測する。他端は自重や温度上昇によるゆるみを除去するため、固定した金属板に、ばねを通して接続した。

ビームプロファイルの測定では、ビームがワイヤと直接相互作用することによってワイヤ内に発生した電流を測定している。このため、負水素イオンビームのプロファイルモニタにおいて、 10^{-4} から 10^{-5} という広いダイナミックレンジを実現している。ヘッド部の設計においては、ワイヤの材料の選択及び、太さとばねによる張力の選択が重要となる。

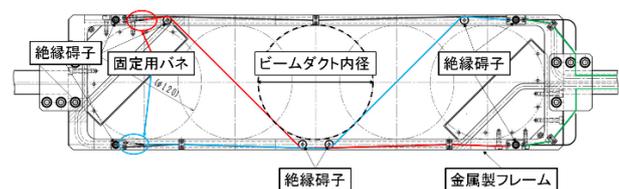


Figure 1: A WSM-sensor head and wires employed at beam lines in J-PARC linac. Red and blue lines are metallic wire mounted on a frame with ceramic insulators. Green lines are insulated cable.

2.2 縦方向プロファイルモニタ(BSM)

J-PARC リニアックにおいて、加速周波数が 324MHz から 972MHz へ変化する中流部において、縦方向プロファイルモニタ(BSM)を使用して、ビームの位相幅(縦方向プロファイル)を測定し、位相幅を調整する加速空洞

[#] akihiko.miura@j-parc.jp

(バンチャ空洞)の振幅を決定している。

図 2 に、J-PARC リニアックで使用している BSM のセンサヘッドの例を示す。このセンサヘッドには、1 本のタングステンワイヤを固定しており、最大-10kV のバイアスを印加する。ワイヤの一方は固定用ばねに接続しており、他端はばねの長さを調節できる固定具に接続している。

ビーム位相幅は、ワイヤを鉛直な状態でビームの中心に移動し、ビームがワイヤと衝突することで発生する 2 次電子を、負のバイアスで加速し、電子増倍管に輸送して計測している[2]。このヘッド部の設計においても WSM と同様に、高温に耐えるワイヤの材料及び、太さとばねによる張力の選択が重要であり、合わせて、負のバイアスに耐える材質であることが重要である。

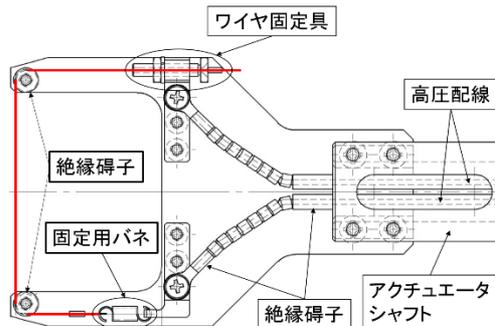


Figure 2: A BSM head to generate and accelerate secondary electrons. Red line is a metallic wire mounted on a frame with a spring for the tension control.

3. 耐久性評価試験

3.1 試験装置

ワイヤの耐久性評価試験装置を図 3 に示す。試験用の真空チャンバには、2 カ所にビューポートを設け、通電時、荷重時のワイヤの様子を観察することができる。2 カ所に真空ゲージを設置するポートを設け、1 カ所に中真空用のコンベクトロンゲージ、もう 1 カ所に高真空用の B-A ゲージを設けている。真空チャンバの一方に直接磁気浮上式のターボ分子ポンプを取り付け、10 分程度で 10^{-5} Pa 以下の圧力になるように構成している。

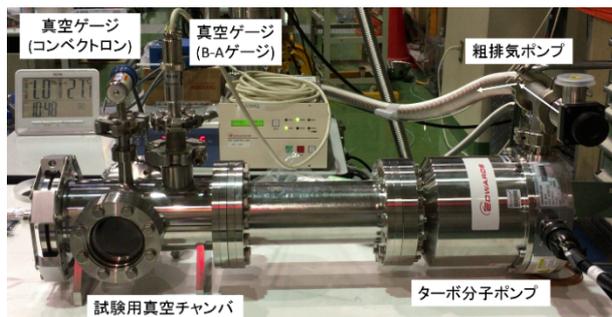


Figure 3: System configuration of tensile-fracture test.

試験用真空チャンバの内部を図 4 に示す。試験体となるワイヤは上部のホルダにねじによって固定し、ホルダにつけた溝に沿って垂下する。下部ホルダは上部ホルダより 5mm 長く作られており、これによって上部・下部のホルダがワイヤに接触し、通電状態を維持することがで

きる。下部ホルダが長いので、ワイヤは鉛直より約 5.7° 傾いている。ワイヤの下端には、カシメたチューブを通して重りを吊り、張力を印加する構造とした。

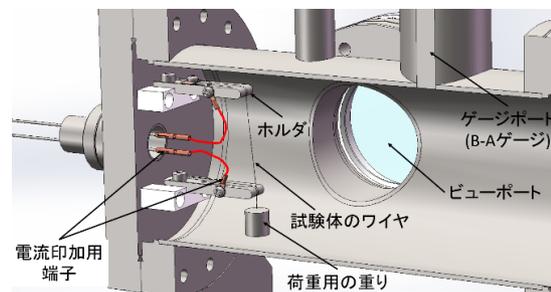


Figure 4: Inside structure of vacuum chamber.

3.2 試験パラメータ

本試験は、J-PARC リニアックのクライストロンギャラリ内の室温 $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 、真空圧力 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Pa の下で実施した。試験体となるワイヤとして、融点の高いタングステン製を使用し、直径は $\phi 20, 30 \mu\text{m}$ 、荷重は $\phi 80 \mu\text{m}$ ワイヤの常温における引張り強さ(約 600cN)を参考に、5、10、25、50g の重りを複数用意した。また、通電電流は、10mA から 10mA ステップで上昇し、ワイヤが破断するまで印加した。なお、本試験では、各電流において、1 分間の保持を基準とし、その電流における電圧・抵抗の測定を行った。

4. 耐久性評価試験結果

4.1 ワイヤ温度の推定

ワイヤをホルダに取付けた直後に抵抗値を測定し、これを室温における抵抗値とした。これを用いて、電流を印加した際の温度を(1)式より推定した。

$$T = \frac{R \frac{S}{\rho_0 l} - 1}{\beta} = \frac{R}{R_0} - 1 \quad (1)$$

ここで、 β はタングステンワイヤの抵抗値に関する温度係数であり、これはカタログ値より $5.3 \times 10^{-3} (1/^\circ\text{C})$ である。 R は抵抗値 (Ω)、 R_0 は室温での抵抗値、 ρ_0 は室温での電気抵抗率 (Ωm)、 S は断面積 (m^2) を表す。つまり、印加電流をパラメータとし、その際の電圧を測定することで抵抗値を算出し、 R/R_0 と β から温度を推定することとした。投入電力も、電流及び計算した抵抗値から算出した。

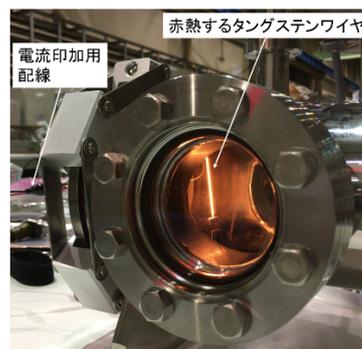


Figure 5: View of tungsten wire during a test.

4.2 直径 20 μm ワイヤにおける試験結果

実験中のタングステンワイヤの外観を図 5 に、取得したデータの一部を表 1 に示す。この例では、直径 20 μm のワイヤに 20g の重りを取付け、10mA から電流を上げていき、180mA まで達したところで、ワイヤが破断した。これと同様に、ワイヤに取付ける重りを 5g、10g、 \dots 、100g まで変化させ、破断に至る電流・電圧を測定した。破断に至る電流と荷重の関係を図 6、温度と張力の関係を図 7 に示す。

WSM 使用時、ピークビーム電流 40mA において、直径 100 μm のワイヤでは、信号電流は約 0.2mA であった [1]。図 6 より、0.2mA の信号電流による温度上昇は小さく、引張強度の変化は考慮する必要はないことを示している。

図 7 では、式(1)を用いて算出した温度が 1000 $^{\circ}\text{C}$ を越える領域においては、20cN 程度の小さな荷重であっても、破断に至るような強度まで、引張強度が低下することを示している。

Table 1: Examples of Test Results (Wire Diameter of 20 μm , Weight of 20 g)

電流 (mA)	電圧 (V)	抵抗 (Ω)	印加電力 (mW)	推定温度 ($^{\circ}\text{C}$)
10	0.065	6.5	0.65	15.7
60	1.16	19.3	69.6	419.3
120	3.72	31.0	446.4	786.2
180	7.40	41.1	1332	1104.1

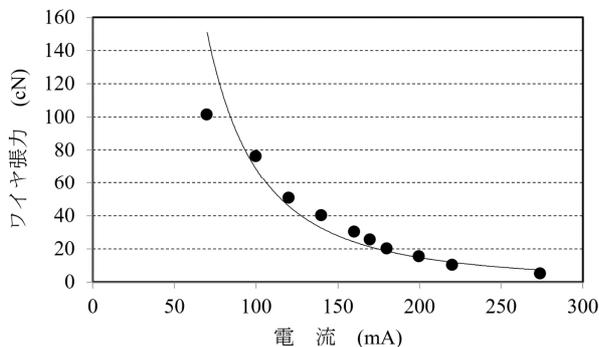


Figure 6: Tensile fracture strength of $\phi 20 \mu\text{m}$ wire with electrical current.

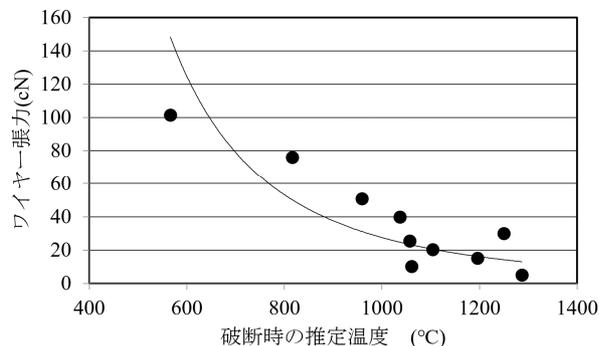


Figure 7: Tensile fracture strength of $\phi 20 \mu\text{m}$ wire with estimated Temperature.

4.3 直径の異なるワイヤにおける試験結果

図 8 に直径 30 μm ワイヤにおける破断時の温度と張力の関係を 20 μm のグラフに重ねて示した。直径 30 μm ワイヤの関係は、直径 20 μm の直線に比べ約 25%高い温度まで耐性があることがわかる。これより、ワイヤの張力に対する温度の耐久性についての傾向の確認ができた。

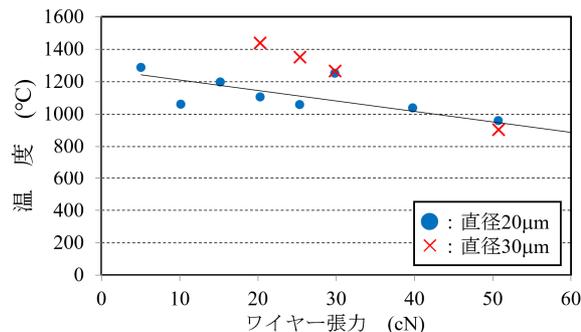


Figure 8: Tensile fracture strength of $\phi 20 \mu\text{m}$ and $\phi 30 \mu\text{m}$ wire with estimated temperature.

5. まとめ

リニアックでのピークビーム電流を上昇することに備え、ワイヤ取付け時の張力、ビーム負荷による温度上昇を模擬した実験を行い、直径 20 μm 、30 μm に対する張力と破断に至る温度の関係を得た。この実験により、ビーム電流が大きいとワイヤ取付け時の低い張力であっても破断する可能性が示された。ビーム電流が上昇してもワイヤが健全であるためには、ワイヤにかかる張力は低めにしておくことが必要であるとともに、径も太いものを選択したほうが良いことが分かった。

ワイヤにかかる張力の最低値は、ワイヤの自重によるたわみを補正するため、カテナリ曲線による推定から、20cN 程度であることから、現在は 20cN 程度の荷重をかけることとしている。また、ピークビーム電流 50mA におけるビーム運転条件での温度解析から、温度に関する 50%程度のマージンを含め、直径は 30 μm 以下であることが望ましいという結論を得た [1]。この知見と、図 8 の結論より、直径 30 μm かつ 20cN の荷重を現在の設計に採用した。しかしながら、直径の異なるワイヤに関するデータは十分とは言えない。このため、更に高い耐久性を得るためには、異なる条件での試験を重ね、精度の高い安全領域を見極めるほか、異なる材料に目を向ける必要があると考える。特に、高温で引張り強さの低下が少なく、信号利得の大きな材料が望ましい。そこで、カーボンナノチューブワイヤや、シリコンカーバイトワイヤなどの適用も視野に入れて改善を図る [3]。

参考文献

- [1] A. Miura *et al.*, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 69, No. 6, September 2016, pp. 1005-1013.
- [2] 三浦昭彦ほか、「J-PARC リニアック用パンチ・シェイプ・モニタの開発」、日本加速器学会年会、2013 年 8 月、SAP088.
- [3] 宮尾智章ほか、「カーボンナノチューブワイヤを用いたビームプロファイル測定試験」、日本加速器学会年会、2017 年 8 月、TUP086.