

## Experiment of Optimal Filament Shape for the J-PARC H<sup>-</sup> Ion Source

Yuya Namekawa<sup>1,A)</sup>, Akira Ueno<sup>A)</sup>, Kiyonori Ohkoshi<sup>A)</sup>, Hidetomo Oguri<sup>A)</sup>, Kiyoshi Ikegami<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Atomic Energy Agency

2-4 Sirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

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

1-1 Oho, Tsukuba-city, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

The J-PARC H<sup>-</sup> ion source driven with a lanthanum hexaboride filament (LaB<sub>6</sub>-fil.) is successfully producing a stable beam for each J-PARC operation cycle of about 500 hours. However, its maximum peak H<sup>-</sup> ion current of 36 mA does not satisfy the requirement of 60 mA for the J-PARC design beam power of 1 MW. Although a J-PARC test ion source with a triple-hairpin tungsten filament (W-fil.) and with seeding cesium successfully produced 70 mA H<sup>-</sup> ion beam, its life-time of 100 hours was insufficient. In this paper, the result of a life-time test using two triple-hairpin W-fils. connected in parallel with a short distance is presented. During the test, the arc power was kept in a constant value of 15 kW, which should produce an H<sup>-</sup> ion current of more than 60 mA if cesium was seeded. Its life-time was estimated to be as same as the J-PARC-operation cycle (500 hours).

## J-PARC 負水素イオン源用フィラメントの最適化実験

### 1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) センタでは大強度陽子加速器<sup>1)</sup>の供用運転が行われている。現在 J-PARC で稼働中の負水素イオン源は、セシウム不使用、六ホウ化ランタンフィラメント(LaB<sub>6</sub>-fil.)一本使用で、1 か月の運転サイクル(運転時間約 500 時間)で連続かつ安定なビーム供給を実現している。本イオン源で達成している最大ビーム強度は 36mA<sup>[1]</sup>であるが、J-PARC 最終ビームパワー1MW の実現には 60mA が必要なため、供用運転中の実機と同構造のイオン源でビーム強度増加を目指した R&D を継続している。昨年までの実験で明らかになったことは、タングステンフィラメント(W-fil.)の場合、セシウム効果により 15kW(100V×150A)の低アーク電力で要求ビーム強度を十分満足するが、フィラメント寿命が短く要求性能を満足できないことである<sup>[2]</sup>。

本論文では、フィラメント寿命の改善が期待される形状の W-fil.を用いた寿命試験の結果を報告する。

### 2. 機器の構成と実験方法

トリプルヘアピン型 W-fil.設置時の負水素イオン源試験機の断面図を図 1 に示す。このイオン源は実機とほぼ同じ構造であるが、試験の自由度を高めるため、プラズマ生成室を直径 100mm から 120mm へ、深さ 132mm から 142mm へ各々拡大している。

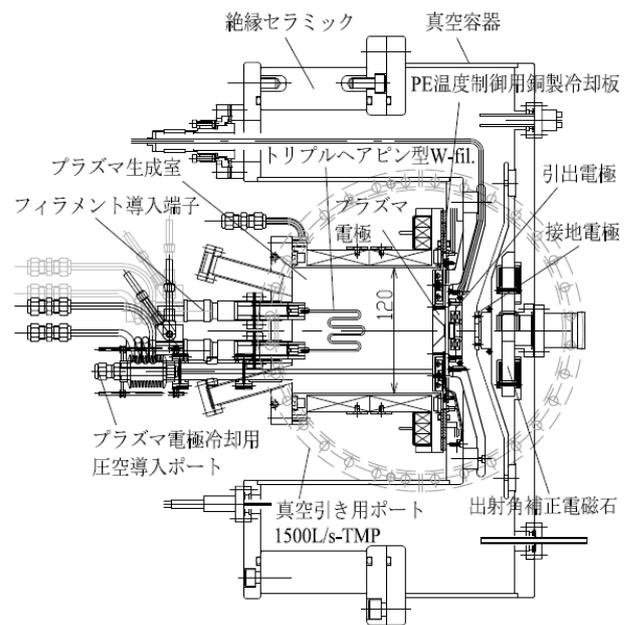


図 1. 負水素イオン源試験機断面図

W-fil. を使用した場合、十分なセシウム効果により要求ビーム強度を満足していること<sup>[2]</sup>から、長寿命化だけに特化し、セシウム不使用で実験を行った。

太さ φ1.8mm のトリプルヘアピン型 W-fil. 1本の寿命は約 100 時間という結果が得られており<sup>[2]</sup>、今回、図 2 に示すとおりこれとほぼ同一形状の W-fil. 2本を中心間距離 4.75mm の近接並列接続し寿命試験を行った。図 3 に実験に使用したトリプル

<sup>1)</sup> yuya.namekawa@j-parc.jp

ヘアピン型 W-fil.の形状図を示す。

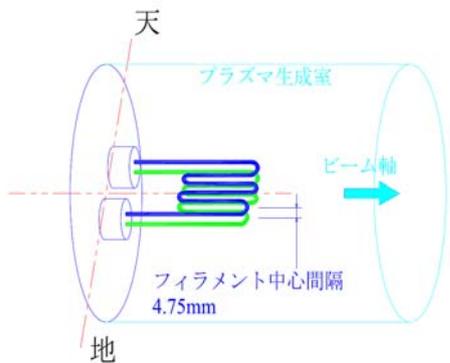


図2 W-fil 設置図

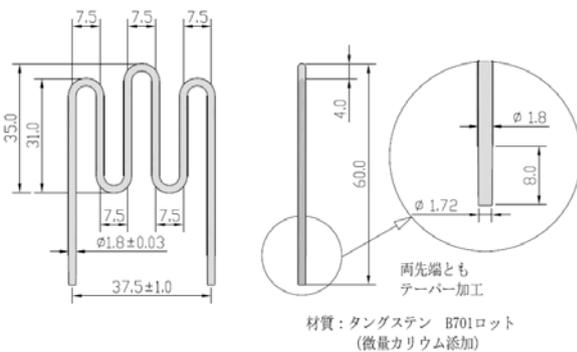


図3 W-fil.形状図

寿命試験時は、ビームの引き出しは行わず、セシウム添加時に J-PARC 第2期要求ビーム強度が可能なアーク電力 15kW (アーク電圧 100V, アーク電流 150A) 以上、及び、J-PARC イオン源運転と同一の Duty (パルス幅 700 μsec, 繰り返し 25Hz) で連続にアーク放電を行った。

これまでの W-fil.寿命試験の経験から、フィラメント加熱電流が使用開始時の 10%減となる時間が寿命とほぼ一致することがわかっている<sup>[2]</sup>ので、連続アーク放電運転時のフィラメント加熱電流の変化を測定した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 トリプルヘアピン型 W-fil.並列2本の寿命

連続アーク放電を行った寿命試験時の W-fil.加熱電流変化の測定結果を図4に示す。

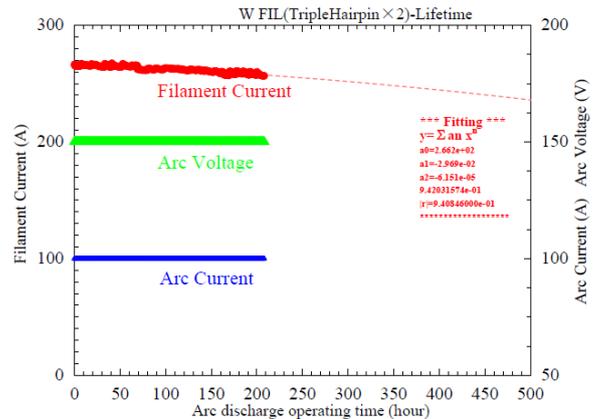


図4 W-fil.2 本使用時加熱電流時間変化

図中でアーク電圧、アーク電流が一定の値を示しているのに対し、フィラメント電流値が小刻みに上下しながら減少している理由は、アーク電流値を一定に保つためにフィラメント電流を微調整していることと、実験日毎の立ち上げ時にフィラメント加熱電流を多く必要とすること、運転時間の経過とともに W-fil.の体積(直径)が減少することなどである。他にも行うべき試験項目があるため、累計 208.5 時間迄の寿命試験で寿命評価を行った。これまでの W-fil.寿命試験の経験から、W-fil.加熱電流は 2 次関数で減少し、約 10%減少時に断線が発生することが分かっている。図4に点線で示したフィッティング曲線(運転開始時 266A、500 時間外挿値 236A)のとおり、フィラメント 2 本の寿命は約 500 時間と評価され、トリプルヘアピン型 W-fil. 1 本使用時の寿命である 100 時間の 5 倍の結果であった。

### 4. 考察

W-fil. は高いアークパワーを得るため温度制限領域で使用している。この場合 W-fil.から放出される熱電子電流密度は以下に示す Richardson-Dushman の式で表すことができる。

$$J_{th} = A_0 \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right)$$

ここで  $A_0$  は Dushman 定数、 $\phi$  は仕事関数、 $k$  はボルツマン定数、 $T$  はフィラメントの絶対温度を示す。フィラメント材質が W の場合  $A_0=70A/(cm^2 \cdot deg^2)$ 、 $\phi=4.55eV$  となり<sup>[3]</sup>、W-fil.の熱電子放出電流密度は以下のように表わされる。

$$J_{th} = 70 \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{5.28 \times 10^4}{kT}\right)$$

トリプルヘアピン型 W-fil.1 本あたりの全長は 213mm で、表面積は 12.04cm<sup>2</sup>である。取り付け部には電子放出に寄与しない片側 5mm 程度ずつのモ

リブデンチップ挿入部があるが、W-fil.全体から電子放出が生じていると仮定する。アーク電力 15kW を出力するとき必要なアーク電流値は、アーク電圧は 100V とすると 150A である。そのときトリプルヘアピン型 W-fil.表面からの放出電流密度は 1 本使用時で  $12.5\text{A}/\text{cm}^2$ 、2 本使用するのであれば 1 本あたりはその半分の  $6.2\text{A}/\text{cm}^2$  となる。このときのフィラメント表面温度は、Richardson-Dushman の式よりそれぞれ、2978K、2878K となり、またフィラメント蒸発速度は文献 4 よりそれぞれ  $8.3 \times 10^{-7}\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sec})$ 、 $2.9 \times 10^{-7}\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sec})$  となる。フィラメント寿命は、蒸発速度のみで決まると仮定すると、使用するフィラメント本数を 1 本から 2 本にすることで、2.9 倍程度向上が見込める。しかし今回の実験結果では、5 倍のフィラメント寿命向上が得られており、他にフィラメント寿命向上のメカニズムが存在すると考えられる。

通常、フィラメントは全体が一様に損耗することではなく、フィラメント加熱電源接続のマイナス端側の損耗がプラス端よりも激しい。これはマイナス端側に、フィラメント加熱電流に対し、アーク電流が重畳するからである。この一例を図 5-a に

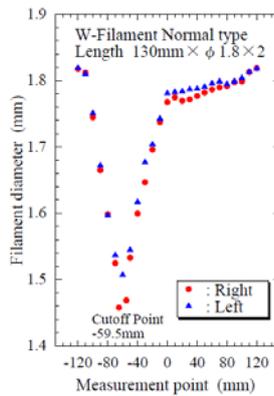


図 5-(a) シングルヘアピン

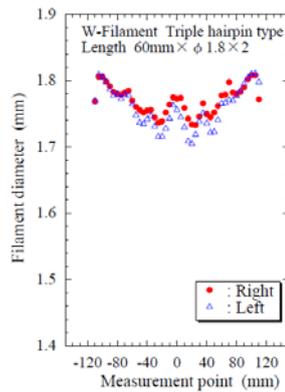


図 5-(b) トリプルヘアピン

示す。このデータはシングルヘアピン型 W-fil.2 本をフィラメント間距離 91mm で使用し、断線後の各部の直径をマイクロメーターで測定した結果である。グラフの横軸は、フィラメントの中心（シングルの場合はヘアピン頂点）を 0 とし、フィラメント電源のマイナス側に接続する方をマイナス、その逆をプラスとしている。図 5-a の場合は、マイナス端にみが著しく損耗していることが分かる。今回寿命試験を行ったトリプルヘアピン型 W-fil.2 本場合の 208.5 時間運転後の測定結果を図 5-b に示す。結果は図 5-a と明らかに異なっており、両端ともに同程度の損耗が見られる。これは、図 5-a では 2 本のフィラメント間距離が 91mm なのに対し、図 5-b では 4.75mm と近接しているため、フィラメント同士の傍熱効果が作用し、プラス端とマイナス端の温度差が改善されたからだと考えられる。2 本の

フィラメントを近接させたことで傍熱効果によりプラス端も放電に寄与したことが、フィラメント全体が放電に有効に使用され、寿命が向上したと考えられる。

2 本のフィラメントを近接させることにより、温度の不均一性が改善されることは分かったが、お互いのフィラメントから発生する磁場の影響によりフィラメントからの電子放出が阻害される懸念がある。二次元磁場計算コード (Poisson) [5] で計算したトリプルヘアピン型 W-fil.1 本(フィラメント加熱電流 147A)及び 2 本(フィラメント加熱電流 133A)の使用時の磁場分布を、図 6-a 及び図 6-b に

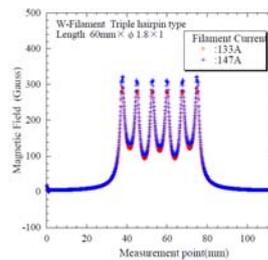


図 6-a 表面磁場  
トリプルヘアピン型  
W-fil.1 本

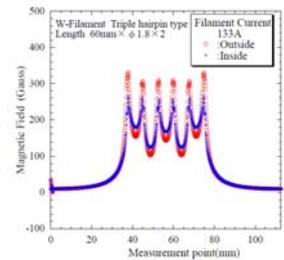


図 6-b 表面磁場  
トリプルヘアピン型  
W-fil.1 本

それぞれ示す。また、磁場計算結果から得たフィラメント表面の磁場分布図を図 7-a 及び図 7-b に示す。図中の数字は、各フィラメントの上下左右位置の表面磁場強度 (単位は Gauss) である。



図 7-a Poisson による二次元磁場計算結果  
(トリプルヘアピン型 W-fil.1 本 147A)

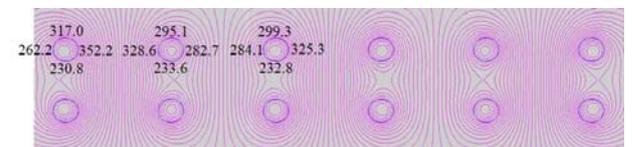


図 7-b Poisson による二次元磁場計算結果  
(トリプルヘアピン型 W-fil.2 本 133A)

図 6-a と図 6-b を比較すると、2 本のフィラメントを近接させてもフィラメント周辺の磁場はほとんど変わらないことがわかる。さらに図 7-b からは、トリプルヘアピン型 W-fil.2 本近接並列接続時、2 本が対向する側の磁束密度は減少していることが分かった。つまりフィラメントを近接させることで、温度の不均一性の改善のみならず、フィラメント周り磁場の抑制効果も発生するため、5 倍という飛躍的な寿命向上が得られたと考えられる。

## 5. まとめ

今回の実験からわかったことは、トリプルヘアピン型 W-fil. 2本の近接並列接続することで、フィラメント同士の傍熱効果にてフィラメント全体の熱分布のバラつきが解消され、さらにフィラメント周り磁場の抑制効果も発生し、フィラメント全体を効率良く使用できることである。この手法により、J-PARC イオン源に要求される寿命 500 時間を達成できる見通しを得たことになる。

## 参考文献

- [1] H.Oguri,et al, PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS - ACCELERATORS AND BEAMS 12, 010401 (2009)
- [2]Y. Namekawa, in Proceedings of the Particle Accelerator Society Meeting 2009, fpps03, p.845
- [3] K.N.Leung,P.A.Pincosy and W.Ehlers, Rev.Sci.Instrum.55(1984)1064
- [4] H.Oguri in JAERI-Tech 2004-053
- [5]Reference Manual for the Poisson/Superfish Group of Code