

JAERI-Tech
2004-053



JP0450646



大強度陽子加速器用負イオン源のフィラメント寿命試験

2004年 7月

小栗 英知・滑川 裕矢

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

大強度陽子加速器用負イオン源のフィラメント寿命試験

日本原子力研究所東海研究所大強度陽子加速器施設開発センター

小栗 英知・滑川 裕矢

(2004年6月9日受理)

日本原子力研究所（原研）と高エネルギー加速器研究機構（KEK）が共同で推進する大強度陽子加速器計画（J-PARC）では、素粒子物理、原子核物理、物質科学、生命科学、原子力工学の分野において最先端の研究を行うため、世界最高の陽子ビーム強度を持った加速器群を建設することを目指している。この加速器用の負水素イオン源には、ビーム電流60 mA以上、エミッタンス $0.20 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 以下、デューティーファクター2.5 %のビーム引き出しが要求される。さらにイオン源には、連続500時間のビーム供給が必要とされる。

原研ではこれまで、大強度陽子加速器用のセシウム添加型負イオン源の研究開発を進めてきた。その結果、負イオンビーム電流72 mA、規格化RMSエミッタンス $0.15 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ の負イオンビーム引き出しに成功し、J-PARCに必要なイオン源の基本ビーム性能を達成した。今回は、イオン源の目標連続運転時間を実現するために、本イオン源のメンテナンス頻度を決める要因の一つであるソースプラズマ生成用フィラメント陰極について、寿命試験を実施した。その結果、アークパワー30 kW、デューティーファクター3 %の典型的な運転条件で、フィラメントの寿命が258時間であることを確認した。さらに、フィラメント電源とアーク電源の接続方法の変更やフィラメント形状の最適化により、フィラメント寿命を800時間以上に延伸できる見通しを得た。

Filament Lifetime Test of the Negative Ion Source for the High Intensity Proton Accelerator

Hidetomo OGURI and Yuuya NAMEKAWA

Center for Proton Accelerator Facilities
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 9, 2004)

The high intensity proton accelerator facility project (J-PARC) which is conducted jointly by JAERI and KEK aims to pursue frontier science in particle physics, nuclear physics, materials science, life science and nuclear technology, using a new proton accelerator complex at the highest beam power in the world. A negative hydrogen ion source for the project is required to produce a peak beam current of more than 60 mA and a rms emittance of less than $0.20 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ with a duty factor of 2.5 %. In addition, the ion source must be run for 500 hours continuously without maintenance.

At JAERI, the R&D works of the cesium seeded type negative ion source for the high intensity proton accelerator has been performed. As a result of the development, the negative ion beam current and the rms normalized emittance of 72 mA and $0.15 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ were achieved, respectively. These results show that the basic performance of the ion source satisfied the requirement of the project. A lifetime of the filament cathode is one of the main restrictions for the maintenance cycle of the ion source. To achieve the requirement of the continuous operation time, we started to perform a filament lifetime test. As the result of the test, we succeeded for 258 hours arc discharge operation at the arc power of 30 kW with the duty factor of 3 %. Moreover, the experiment results showed that there is a possibility of achievement more than 800 hours filament lifetime by change the connection between filament and arc power supply and the optimization of the filament shape.

Keywords: J-PARC, High Intensity Proton Accelerator, Negative Hydrogen Ion Source, Cesium, Filament, Lifetime, Tungsten

目次

1. はじめに	1
2. 実験装置	4
2.1. 負水素イオン源	4
2.2. テストスタンド	4
3. 実験結果と考察	10
3.1. フィラメント本数と寿命	10
3.2. フィラメント電源とアーク電源接続方法の違いによる寿命	12
3.3. フィラメント形状の最適化	14
3.3.1. 正負極異断面形状	14
3.3.2. フィラメント長	15
3.3.3. フィラメント径	15
3.4. アーク条件の依存性	16
4. まとめ	34
謝辞	35
参考文献	35

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Apparatus	4
2.1. Negative Hydrogen Ion Source	4
2.2. Test Stand	4
3. Experimental Results and Discussion	10
3.1. Lifetime and Number of Filament	10
3.2. Lifetime and Connection between Filament and Arc Power Supply	12
3.3. Optimization of Filament Shape	14
3.3.1. Different Cross Section Shape between Negative and Positive Leg	14
3.3.2. Filament Length	15
3.3.3. Filament Diameter	15
3.4. Dependence of Arc Discharge Condition	16
4. Conclusion	34
Acknowledgement	35
References	35

1. はじめに

日本原子力研究所（原研）と高エネルギー加速器研究機構（KEK）が共同で進めている大強度陽子加速器計画（J-PARC）は、ほぼ同時にスタートした米国のSNS計画と並ぶ世界の2大中性子源施設の一つとして、世界最高の陽子ビーム強度を持った加速器群を建設することを目指している。J-PARCは、図1に示す以下の加速器群で構成される[1]。

- ・ 400 MeV常伝導リニアック
- ・ 600 MeV超伝導リニアック
- ・ 3 GeV、333 μA (1 MW) 陽子シンクロトロン
- ・ 50 GeV、15 μA (0.75 MW) 陽子シンクロトロン

リニアックで400 MeVまで加速された陽子ビームを3 GeVシンクロトロン（以下、3GeV-PSと略す）に入射し、1 MWの強度をもつビームを生成して、原子核・素粒子物理、固体物理、物質科学、および構造生物学の分野の研究を展開する。これらの中で代表的なのは、陽子による原子核破碎反応で発生する中性子を用いた物質科学や構造生物学の研究で、従来のX線撮影や放射光を利用した測定では不可能だったタンパク質中の水素や水分子、またリチウム電池中のリチウム等の軽元素の姿を、中性子を利用して明瞭に捉え、物質の原子レベルの構造を解明することである。さらに、中性子以外にミュオンビームを用いた μSR （ミュオン・スピン・回転／緩和／共鳴）を始めとした物質科学の研究や、ミュオン触媒核融合研究も予定されている。これら3GeV-PSからのビームを用いた研究に加えて、リニアックのエネルギーを600 MeVに増強して加速器駆動核変換技術の開発研究に使用することも計画されている。

3GeV-RCSは50 GeVシンクロトロン（以下、50GeV-PSと略す）に対するブースターシンクロトロンの役割も果たし、3 GeVの陽子ビームを50GeV-PSに入射し、50 GeV陽子ビームを利用してK中間子ビーム、反陽子ビーム、ハイペロンビームおよび一次ビームを用いた原子核・素粒子物理の実験を行う予定である。K中間子ビームによって核物質中にストレンジ粒子を持ち込むことができ、これによって、ストレンジ粒子を不純物として注入した核物質を研究することができる。この他にも、CP対称性の破れを測定するK中間子の稀崩壊の測定、スーパーカミオカンデ検出器を用いてニュートリノ振動の測定なども計画されている。

3GeV-PSのビームパワー1 MWを達成するために、リニアックのピーク電流は50 mA、マクロパルスの時間幅は0.5 msec、3GeV-PSへのビーム入射繰り返し率は25 Hzと設定されている。将来的には、3GeV-PSとは独立に核変換実験施設にも25 Hzでビームを入射する必要があるため、リニアックでは最大50 Hzのビーム繰り返し率が必要となる。3GeV-PSでのビーム取り出しの都合上、0.5 msecのマクロパルスの内部でさらにビームのON/OFFを繰り返す必要があり、この繰り返しの周期は733 nsec、このうちビームONの長さが396 nsecである（このパルスを中間パルスと呼ぶ）。この2段階のパルス構造のうち、マクロパルスの形成はイオン源で行う。このようなリニアック要求性能から、J-PARCで使用するイオン源では、加速途中のビーム損失を考慮してピークビーム電流60 mA、デューティーファクター（パルスビームの時間幅と繰り返し率の積）

2.5 %の負水素イオンビーム引き出しが必要となる。また、J-PARCでは実験施設へ連続3週間（500 時間）のビーム供給を行う必要がある。イオン源もそれに対応させるために、フィラメント等の消耗部品の寿命は500 時間以上を確保しなければならない。J-PARC用負イオン源の要求性能の詳細を表 1に示す。

表 1 J-PARC用負イオン源の要求性能

Ion species	Negative hydrogen ion
Peak beam Current	60 [mA]
Beam energy	50 [keV]
Pulse length	0.5 [msec]
Repetition rate	50 [Hz]
Duty factor	2.5 [%]
RMS emittance	0.20 [$\mu\text{mm}\cdot\text{mrad}$]
Operation cycle	500 [hour]

原研では、これまでセシウム添加型負イオン源の設計・製作を行い、ビーム試験を進めてきた。その結果、負イオンビーム電流72 mA、規格化RMSエミッタンス0.15 $\mu\text{mm}\cdot\text{mrad}$ のビーム引き出しに成功し[2][3]、J-PARCに必要なイオン源の基本ビーム性能を達成した。そこで今回、イオン源の実用化に向けて目標連続運転時間を実現するために、本イオン源のメンテナンス頻度を定める要因の一つであるソースプラズマ生成用フィラメント陰極について、寿命試験を実施した。

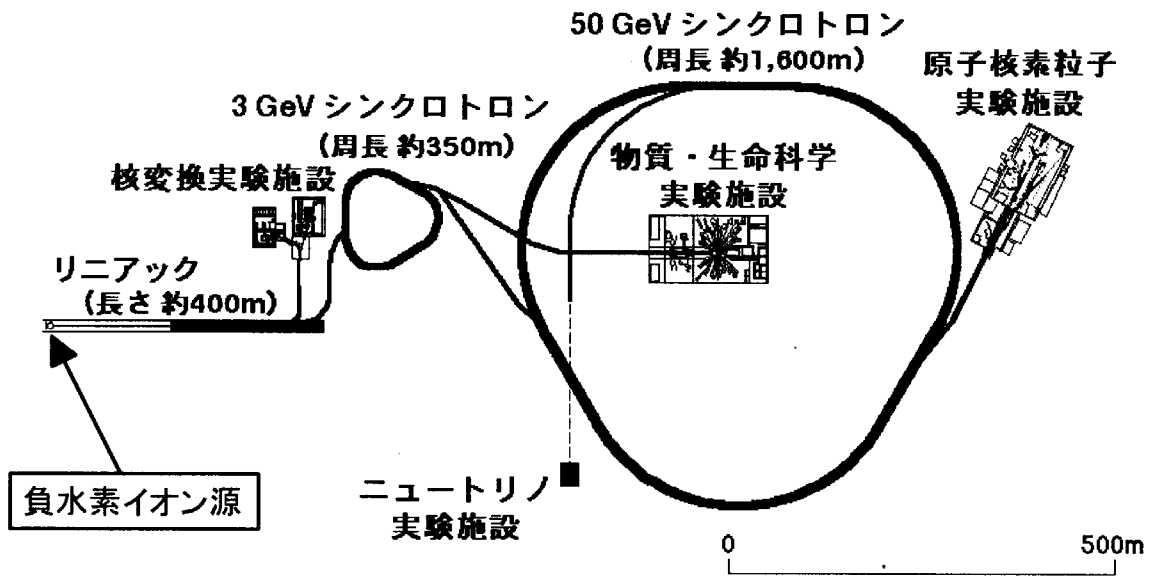


図1 大強度陽子加速器計画 (J-PARC) の加速器および実験施設の構成

2. 実験装置

2.1. 負水素イオン源

今回実験を行った負水素イオン源の全体構造を図 2 に示す。本イオン源は体積生成型負イオン源と呼ばれ、励起水素分子と電子との解離性付着反応を利用して放電プラズマ中で直接、負水素イオンを生成する方式である。さらに本イオン源では、より高い負水素イオンビーム電流を得るために、プラズマ生成室内にセシウム蒸気を添加している。

プラズマ生成室の形状は、直径150 mm、長さ200 mmの円筒型で、材質は無酸素銅である。生成室の側壁および上蓋には永久磁石を設置し、ソースプラズマ閉じ込め用のマルチカusp磁場と負イオン生成に必要なフィルター磁場を形成させている。プラズマ生成室の永久磁石溝の配置を図 3 に示す。永久磁石溝は側壁に11列有り、それぞれの列に16個の磁石溝が等間隔で同心円状に配置してある。上蓋には8個の磁石溝があり、側壁の最上部の磁石とマルチカusp磁場を形成するように配置してある。ソースプラズマ生成は、タングステン製フィラメント陰極を生成室内に挿入し、フィラメントと生成室間に最大150 Vの電圧（アーク電圧と呼ぶ）を印加してアーク放電を発生させて行っている。今回使用したフィラメントおよび導入端子の形状を図 4 に示す。フィラメント形状はヘアピン型であり、導入端子には先端のモリブデンチップに圧入して固定されている。本イオン源ではフィラメントを2本または3本使用するが、フィラメント加熱電源は1台であり、それらを並列に接続して通電する。

本イオン源のビーム引き出し系は、プラズマ電極、引出電極、および接地電極の3枚の電極で構成されている。プラズマ電極のビーム引き出し孔口径は、8 mm ϕ である。ギャップ長は、プラズマ電極-引出電極間を2.2 mm、引出電極-接地電極間を8.4 mmにそれぞれ調整している。各電極を支持するフランジ間にはアルミナセラミックス製絶縁スペーサーを用い、電気絶縁と真空保持を行っている。

2.2. テストスタンド

本実験で使用したテストスタンドの概念図を図 5 に示す。テストスタンドは2つのビーム診断容器で構成され、それぞれの容器には排気速度2,200 L/secのターボ分子ポンプを1台ずつ設置している。また、ビームの中性化損失を低減するために、本イオン源のビーム引き出し系に排気速度1,300 L/secのターボ分子ポンプから成る差動真空排気系を設置し、ビームが通過するラインとは別のラインから残留ガスを排気している。負イオンビーム電流は、前方の真空容器に設置したファラデーカップを用いて測定している。

負イオン源とこれを駆動するための電源の接続方法を図 6 に示す。負イオン源用電源は、加速電源、引出電源、バイアス電源、アーク電源およびフィラメント電源で構成されている。このうち、加速電源、引出電源およびアーク電源はパルス電源であり、設定した遅延時間およびパルス出力時間に従ってイオン源に電圧を印加する。ただし加速電源の出力電圧は、イオン源電源の浮

遊容量の影響でパルス立ち下がり時間が数 msecと遅いため、ビームのマクロパルス形成は、アーク電源または引出電源のパルス電圧で行っている。各電源の典型的な運転シーケンスを図 7 に示す。この例では、フィラメント電圧とバイアス電圧を連続的にイオン源に印加し、トリガー信号と同時に加速電圧、その 1 msec後に引出電圧、さらにその 1 msec後にアーク電圧をそれぞれ印加してビームを発生している。このシーケンスでは、ビームのパルス幅はアーク電圧のパルス長で決まり、この例では 0.6 msecである。先に示したとおりビームの目標パルス長は 0.5 msecであるが、ビームのパルス波形が安定するまでにアーク電圧印加後 0.1 msec程度の時間を要するので、アーク電圧の印加時間は 0.6 msecとしている。

本イオン源は早い繰り返し率でビームを出力するため、時定数の長いフィラメント陰極の通電は連続で行う必要があり、それに伴ってフィラメントの蒸発も連続的に起こる。よってフィラメントの蒸発量をいかに低減するかが、フィラメント陰極の寿命を伸ばすために重要となる。

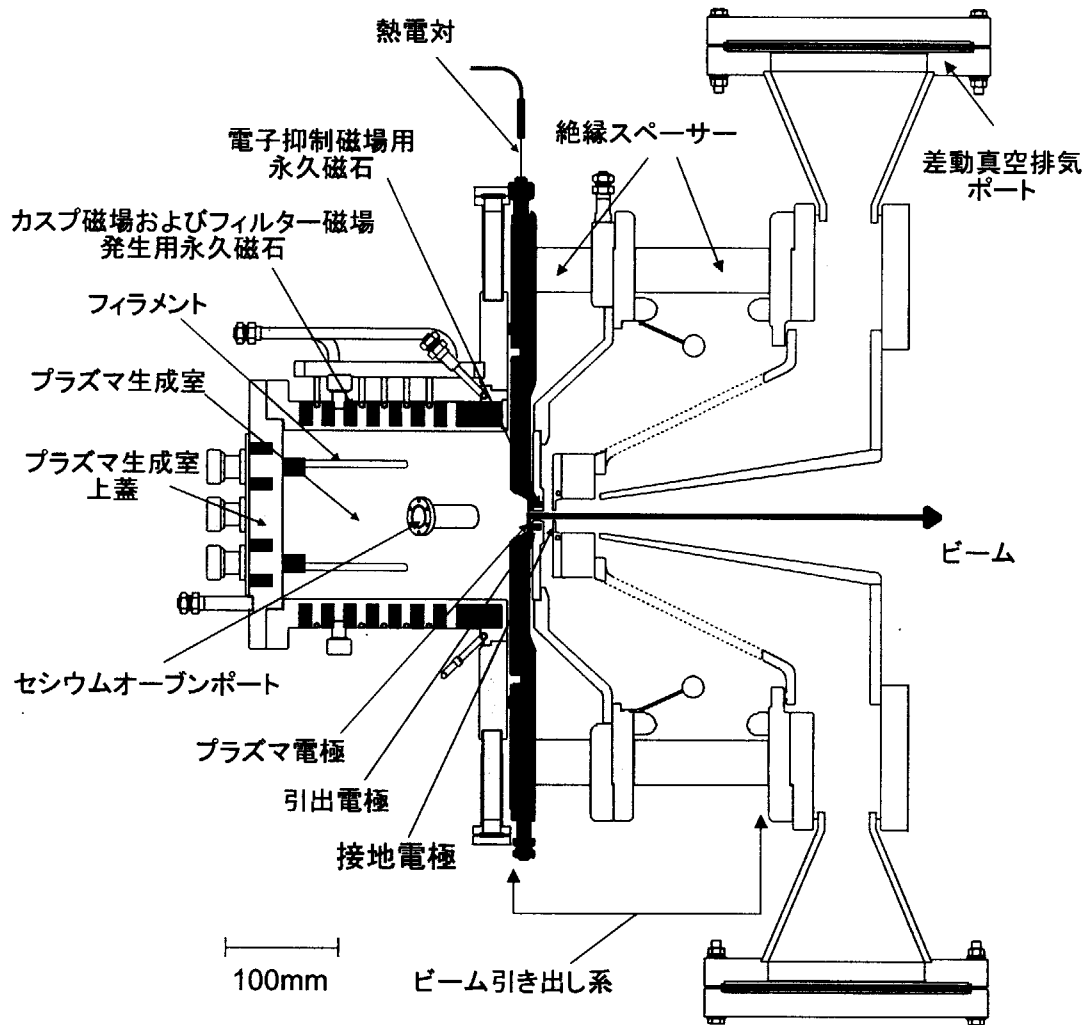


図2 本実験で使用した体積生成型（セシウム添加）負イオン源の全体構造

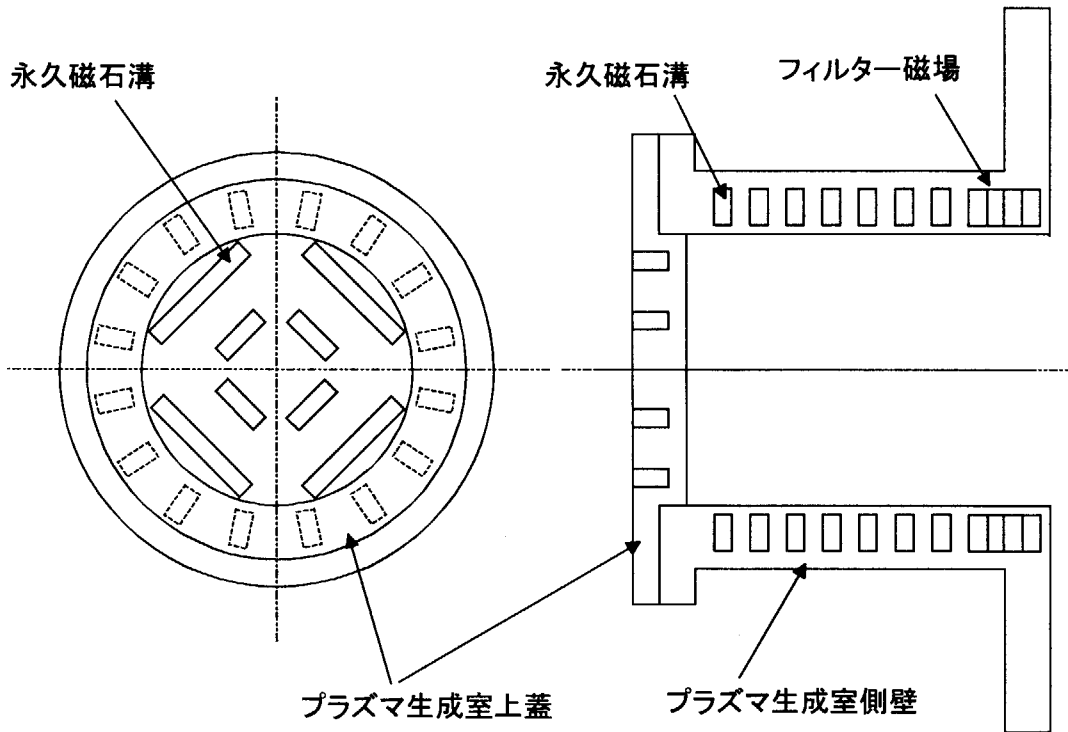


図3 プラズマ生成室の永久磁石溝の配置
(左図は生成室上蓋、右図は生成室側面の磁石配置)

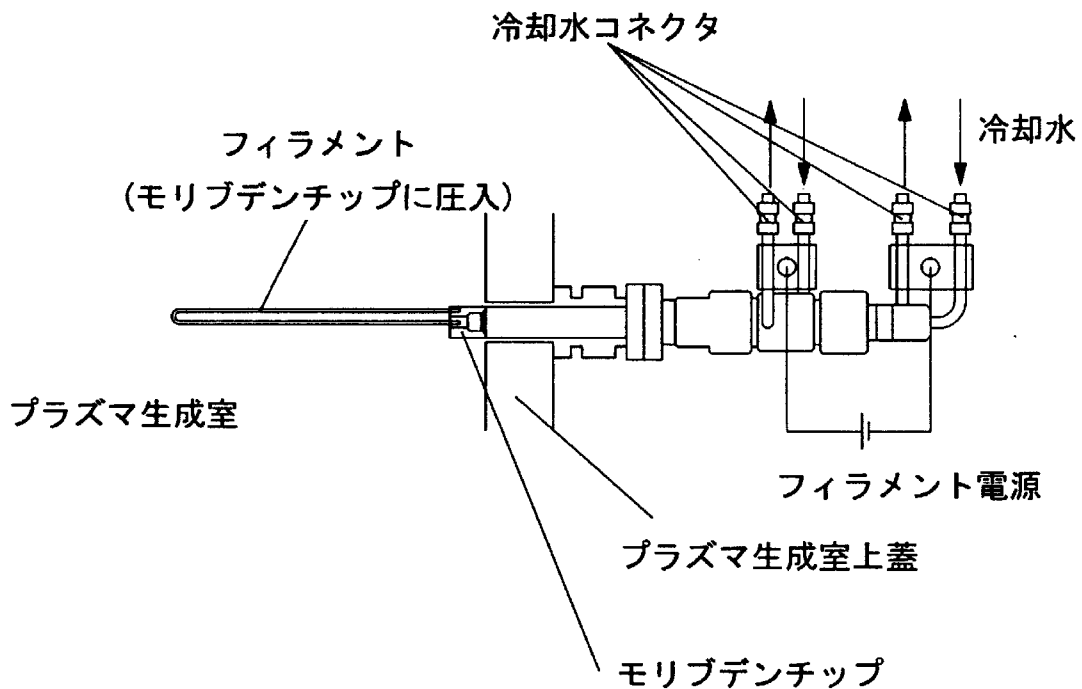


図4 フィラメントおよび同軸型フィラメント導入端子の構造

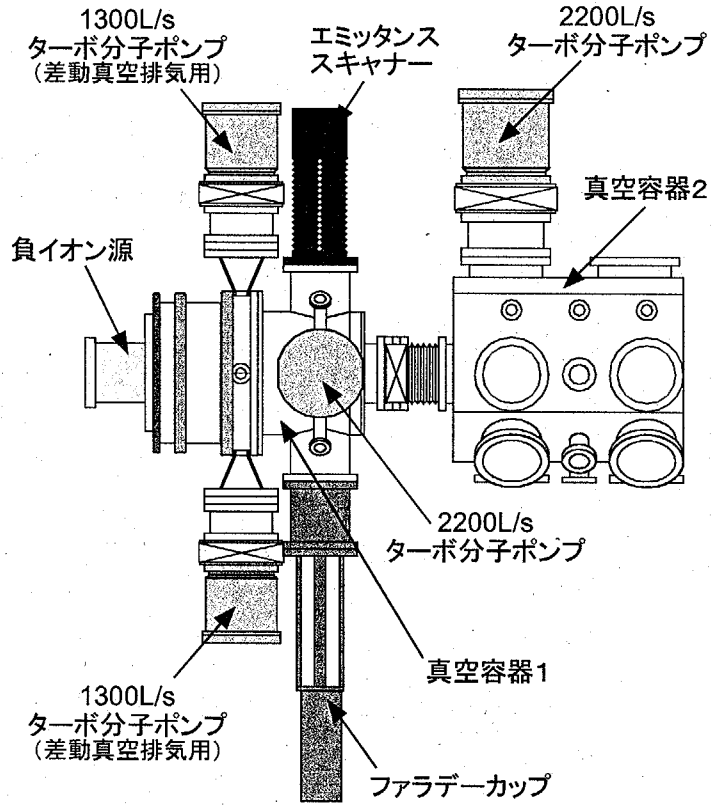


図5 イオン源テストスタンドの構造

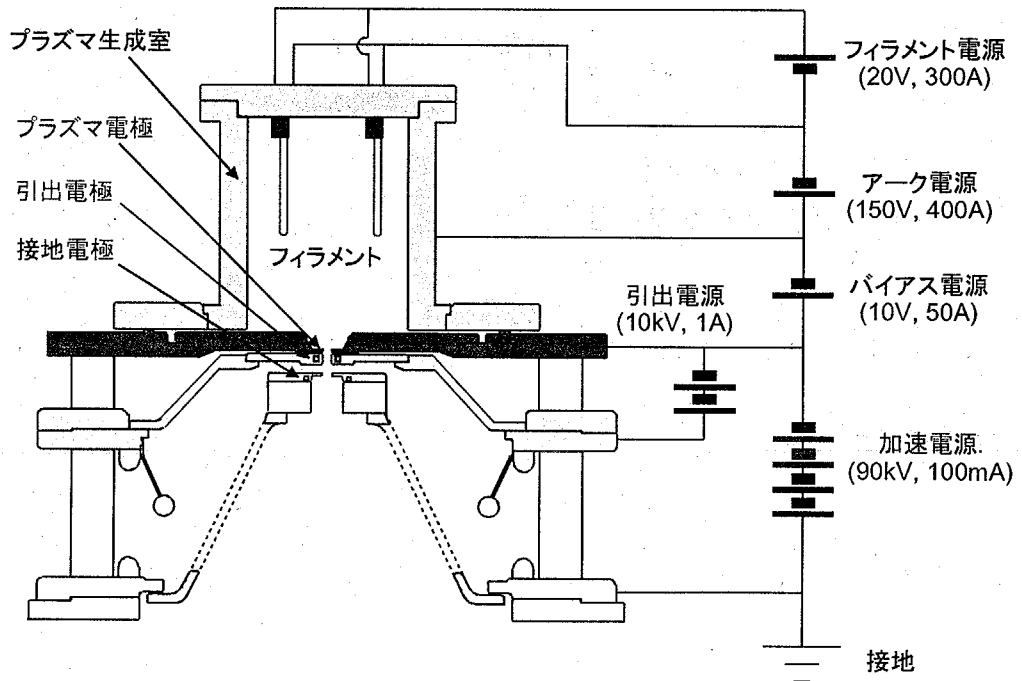


図6 負イオン源とイオン源用電源の接続方法

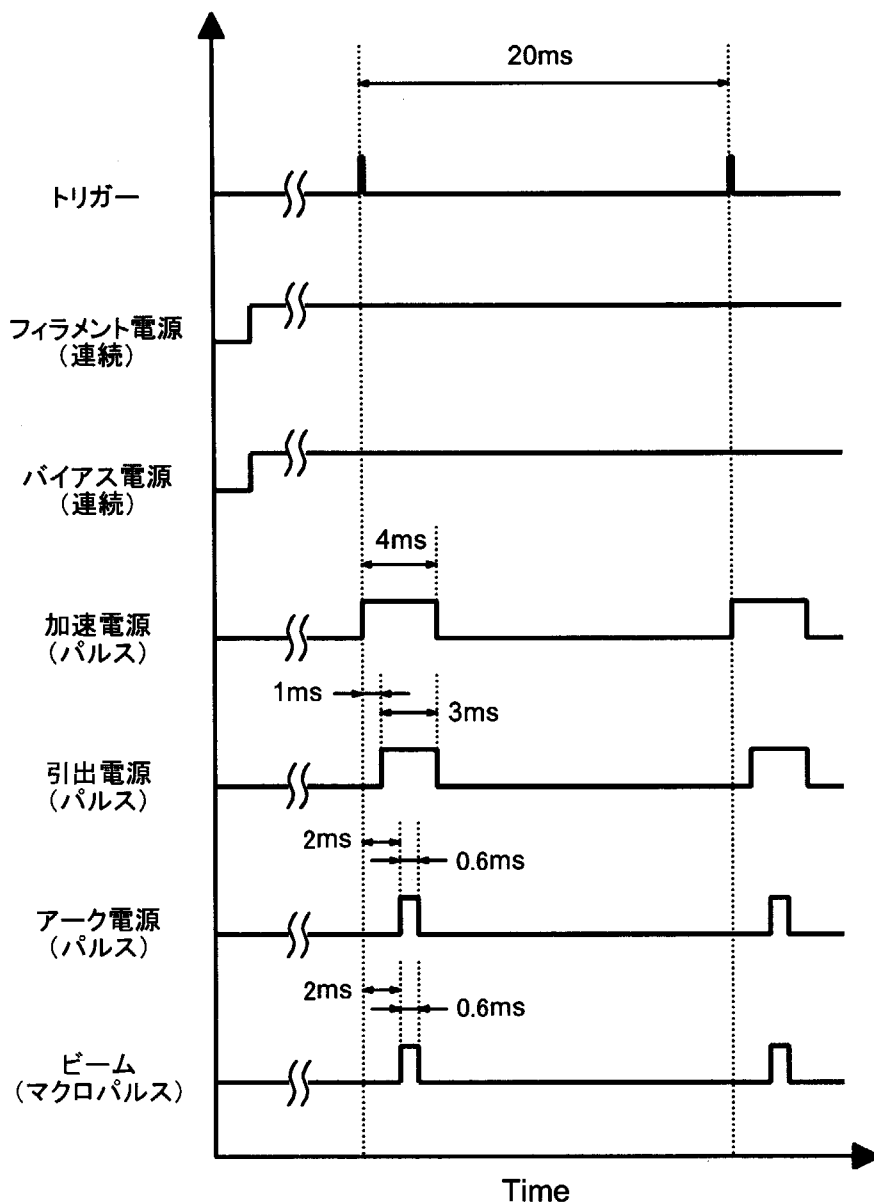


図7 負イオン源電源の典型的な運転シーケンス
 (ビームパルス幅=0.6 msec、繰り返し率=50 Hzの場合)

3. 実験結果と考察

本実験では、フィラメント寿命測定時はビームの引き出しは行わず、アーク放電のみの連続運転を行った。また、アーク放電プラズマを実際の負イオンビーム引き出し時と同様な条件にするために、アーク放電のみの運転であるが、セシウムを連続注入した。フィラメントの寿命時間は、フィラメント通電開始から使用フィラメントのうちどれか1本が断線するまでの時間と定義した。フィラメント形状は、太さ1.5 mm ϕ 、フィラメント長130 mmを基本形として使用し、実験の内容に応じて基本形と異なる形状のものを使用した。ここで示すフィラメント長とは、ヘアピン型フィラメントにおいて中央（頂点）から両端までの距離を示すこととし、両端間の距離（フィラメント全体長）の1/2となる。また、必要に応じてイオン源から負イオンビームを引き出して、フィラメント寿命向上のために最適化した各運転パラメータがビーム特性に与える影響を調べた。以下に、今回実施した実験の内容とその結果、考察について述べる。

3.1. フィラメント本数と寿命

本イオン源では高いアークパワーを得るために、フィラメントは温度制限領域で使用している。この場合、フィラメントから放出される熱電子の電流密度 J_{th} は、以下に示すRichardson-Dushmanの式で表すことができる。

$$J_{th} = A_0 \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right) \quad (3-1)$$

ここで A_0 はDushman定数、 ϕ は仕事関数、 k はボルツマン定数、 T はフィラメント絶対温度を示す。フィラメント材質がタングステンの場合、 $A_0=70 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{deg}^2)$ 、 $\phi=4.55 \text{ eV}$ となるので[4]、(3-1)式から、タングステンフィラメントの熱電子放出電流密度は以下のように表される。

$$J_{th} = 70 \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{5.28 \times 10^4}{T}\right) \quad (3-2)$$

(3-2)式を用いて、タングステンフィラメントの温度と放出電子の電流密度の関係をプロットした結果を図8に示す。また、タングステンの蒸発速度と温度の関係を図9に示す。今、全体長260 mm、直径1.5 mm ϕ のフィラメントを使用してアーク電流200 Aを得ることを考える。実際には、全長260 mmのうちモリブデンチップへの挿入部が片側5 mm程度ずつあり、この部分は電子放出が生じないが、ここではフィラメント全体から電子放出が生じると仮定する。この場合、フィラメントの全表面積は12.3 cm^2 なので、フィラメント表面からの放出電流密度は16.3 A/cm^2 となる。使用するフィラメント本数を1本とすると、この電流密度を得るのに必要なフィラメン

ト温度は図 8 より 3,020 K となり、このときの蒸発速度は図 9 より 1.3×10^{-6} g/(cm²・sec) である。使用フィラメント本数を増やすと 1 本あたりに必要な放出電流密度が下がるので、フィラメント温度が低くなり蒸発速度が下がる。使用フィラメント本数を変えたときの 1 本あたりの放出電流密度、温度および蒸発速度を表 2 にまとめる。また蒸発速度をフィラメント本数でプロットしたグラフを図 10 に示す。フィラメントの寿命が蒸発速度でのみ決まると仮定すると、フィラメント本数を増やすと寿命が向上すると考えられる。例えば、フィラメントを 2 本から 3 本に増やすことで蒸発速度が約半分となるので、寿命は 2 倍程度延びると予想できる。しかし 4 本以上では蒸発速度はあまり下がらないこと、本数が増えるとプラズマロスエリアが増えるためプラズマ生成効率が低下する、フィラメント加熱電源の電流容量が増加する、などのデメリットが生じることから、むやみに本数を増やすのは得策ではない。

表 2 フィラメント使用本数と、放出電流密度、温度および蒸発速度の関係

Number of filament	Emission current density for one FIL [A/cm ²]	FIL temperature [K]	Evaporation rate [g/(cm ² ・sec)]
1	16.3	3,020	1.3×10^{-6}
2	8.2	2,920	4.6×10^{-7}
3	5.4	2,860	2.4×10^{-7}
4	4.1	2,820	1.5×10^{-7}
5	3.3	2,790	1.1×10^{-7}

フィラメントが 2 本と 3 本の場合について、アーク電圧 150 V、アーク電流 200 A（アークパワー 30 kW）、デューティーファクター 3 %（パルス幅：0.6 msec、繰り返し率 50 Hz）の放電条件で長時間アーク放電運転を行い、フィラメントの寿命を測定した。その結果、フィラメント 2 本使用時の寿命は 63 時間であったのに対し、3 本使用時は 258 時間に達し、本数を 2 本から 3 本に増やすことで寿命が約 4 倍向上することが分かった。

それぞれの連続運転実験で使用したフィラメントを、全長にわたり 10 mm ステップでその径をマイクロメータで測定し、フィラメントの消耗状態を調べた。2 本使用時の結果を図 11 に、3 本使用時の結果を図 12 にそれぞれ示す。グラフの横軸の数値はフィラメント径の測定点を示し、ヘアピンの中央（頂点）を原点とし、フィラメント電源の負極側へ接続した方をマイナスの数値、正極側へ接続した方をプラスの数値で表している。両者に共通していることは、負極側の消耗が著しいことである。特に 2 本使用時の方がその傾向が強い。温度の計算から 2 本と 3 本では寿命は 2 倍程度異なると予想したが、これはフィラメントが全周にわたり均等に蒸発することを前提としている。実際にはフィラメントの負極側に放電電流が集中して流れることが、4 倍の寿命差が生じた原因と考えられる。

フィラメントの消耗過程を詳しく調べるために、使用する全てのフィラメントの正極端子側および負極端子側の通電ケーブルに電流測定用シャントをつないで、アーク放電 ON/OFF 時のフィラメント電流を測定した。アーク放電中の典型的なフィラメント電流波形を図 13 に示す。図では、3 本のフィラメントの正極端子側（図中では P と標記。記号に続く番号はフィラメント番

号) および負極端子側 (図中ではNと標記)、合計で6種類の波形が表示されている。アーク放電のパルス幅は0.6 msecであり、図 13では0.0 msecから0.6 msecの間でアークONとなっている。アーク放電中は、正極端子側のフィラメント電流は減少し、逆に負極端子側は増加している。これは、正極端子側はアーク電流がフィラメント加熱電流を打ち消す方向に流れるのに対し、負極端子側はアーク電流がフィラメント加熱電流に重畳する方向に流れるために生じた現象である。フィラメントの負極端子側の電流が多いとフィラメントの温度分布が不均一となり、負極端子側の温度が高くなるため、短時間で蒸発、溶断してしまうことになる[5]。

3.2. フィラメント電源とアーク電源接続方法の違いによる寿命

本イオン源のようにフィラメント陰極を用いてアーク放電プラズマを生成する方式では、負極端子側へのアーク電流の重畳はやむを得ないが、流れ込む電流量を低減することでフィラメント温度分布の不均一性を改善できれば、フィラメント寿命の向上が期待できる。その試みとして、フィラメント電源とアーク電源の接続方法に着目して検討を行った。両電源の2種類の接続方法を図 14に示す。上の図はフィラメント電源の負端子をアーク電源に接続した方法 (以下、この接続方法をNN接続と呼ぶ)、下の図は正端子を接続した方法 (以下、PN接続と呼ぶ) である。イオン源電源の多くはNN接続を採用している。その理由は、この接続方法の場合、アーク放電中にフィラメント電源に流れ込むアーク電流が、フィラメント電流と逆向きに流れるため、フィラメント電源の電流容量を決定する際にアーク電流を考慮しなくて良いからである。ところで、フィラメントの両端子に流れ込むアーク電流の割合は、フィラメント電源とアーク電源の接続点から、フィラメントの正負それぞれの端子までの電気抵抗の大きさで決まると考えられる。するとPN接続の場合、フィラメントの負端子側は、フィラメント電源の正負ケーブルの抵抗と電源内部抵抗が存在することになり、正端子側より抵抗値が大きくなるので、NN接続より負端子側への流れ込み量は少なくなることが期待できる。

フィラメント3本を使用して電源の接続方法を変えたときの、フィラメント電流のアークパワー依存性を図 15に示す。上のグラフがNN接続の測定結果、下のグラフがPN接続の測定結果である。測定時のアークパルス運転のデューティファクターは3% (0.6 msec幅&50 Hz) である。グラフの縦軸のフィラメント電流値は、使用したフィラメントに流れる電流の合計値である。図中の○および△は、横軸のアークパワーを得るために必要なフィラメント正極端子および負極端子の加熱電流である。また、●および▲は、アーク放電中の正極端子側および負極端子側のフィラメント電流をそれぞれ示す。図中のデータのうち、アークパワー50 kWのときについてフィラメント電流値を表 3にまとめる。2つの電源接続方法の結果を比較すると、両方でフィラメント加熱電流の差はほとんど無いが、アーク放電中の正端子側および負端子側のフィラメント電流はいずれもPN接続の方が低い。これは、フィラメント電源の接続を負端子側から正端子側に変えることで、フィラメント正端子側に流れ込むアーク電流が増加し、逆に負端子側に流れ込むアーク電流は減少したことを意味する。

表3 電源接続方法とフィラメント電流の関係 (アークパワー50 kW)

Method of FIL-ARC Power supply connection	NN connection	PN connection
Filament heating current (for one filament)	110 A	109 A
Filament current during arc discharge (for one filament)	P-Leg : 71 A N-Leg : 181 A	P-Leg : 41 A N-Leg : 151 A

アークパワー 45 kW、デューティーファクター6 % (本計画の目標デューティーファクターの2倍) のアーク条件で連続運転を行いフィラメントの寿命を測定した。その結果、NN接続の場合の寿命は46 時間であったのに対し、PN接続では83 時間に向上した。それぞれの運転後のフィラメントの消耗状態を、図 16 (NN接続) および図 17 (PN接続) に示す。両接続方法の正極端子側の消耗状態に着目すると、NN接続の場合は全体にわたって運転前の径寸法 (1.52 mm ϕ) から変化していないのに対し、PN接続の場合はフィラメント端 (約120 mm) から頂点 (0 mm) に向かって次第に細くなっており、正極端子側においても消耗が見られる。つまりPN接続では、NN接続に比べて負極端子側の局所加熱が緩和され、フィラメントの負極端子側における局所蒸発が軽減されたために寿命が延びたことが分かる。

それぞれの電源接続方法でデューティーファクターを変化させたときの、フィラメントへのアーク電流の流入量を、図 18および図 19に示す。測定時のアーク電圧は150 V、アーク電流は300 A (アークパワー : 45 kW) である。デューティーファクターは、図 7においてトリガー信号の繰り返し率の設定によって変化させている。NN接続の場合、デューティーファクターが3 %までは負極端子側も正極端子側も流入量は一定だが、それを超えると負極端子側は増加し、その分、正極端子側は減少する。デューティーファクター10 %ではそれぞれ低デューティーファクター時から30 Aずつ増加、減少している。PN接続時も同じ傾向を示すが、増減の割合は低く、デューティーファクター10 %時の負極端子側 (正極端子側) のアーク電流流れ込み量は、低デューティーファクター時から15 Aの増加 (減少) となっている。デューティーファクターが上昇すると負極端子側の流れ込み量が増加するのは、高デューティーファクターではフィラメントの正極端子側と負極端子側の温度分布の差がより著しくなり、ほとんど負極端子側しか放電に寄与しなくなることが原因と考えられる。この観点からも、PN接続の方がフィラメント寿命に対して有利であると言える。

次に、イオン源からビームを引き出して、電源接続方法の違いがビーム特性に与える影響について調べた。セシウム未添加状態 (Pure Volume) および添加状態 (Cs Seeded) での、負イオンビーム電流および引出電流 (イオン源の引出電極に流れ込む電子および負イオン電流を示す) のアークパワー依存性を、図 20に示す。本測定では、アーク電圧を150 V一定とし、フィラメント加熱電流を変えることでアーク電流を調整し、アークパワーを変化させた。セシウム添加の有無に係らず、負イオンビーム電流および引出電流のアークパワー依存性は、電源接続方法の違いによって顕著な違いは無いことが分かる。この結果から、フィラメントとアーク電源の接続による負イオン生成の違いはほとんど無いことが確認できた。

3.3. フィラメント形状の最適化

3.3.1. 正負極異断面形状

これまで、フィラメントの負極端子側のアーク電流流入量を低減する方法について述べてきたが、正極端子側についても小電流で負極端子側と同等の熱電子放出量が得られれば、負極端子側の負担が軽減され、フィラメント寿命の向上が期待できる。フィラメントの抵抗値が大きくなれば発熱量が増加するはずなので、フィラメントの正極端子側を再加工し、断面積を負極端子側より小さくしたフィラメントを製作した。オリジナル形状のフィラメント（同断面形状）と、改造型フィラメント（異断面形状）の構造を、図 21 にそれぞれ示す。今回、異断面形状フィラメントとして、正極端子側の幅が1.0 mm、1.3 mmおよび1.4 mmの3種類のフィラメントについて、寿命測定を実施した。その結果を表 4 に示す。測定時の運転条件は、アークパワー30 kW、デューティーファクター3%、使用フィラメント本数は2本である。

表 4 正負異断面形状フィラメントの寿命時間と断線場所

Filament Size		Achieved Lifetime	Cut Off Point
P-Leg	N-Leg		
1.0 mm	1.5 mm	2 hour	P-Leg
1.3 mm	1.5 mm	43 hour	P-Leg
1.4 mm	1.5 mm	119 hour	Top (center)
1.5 mm	1.5 mm	63 hour	N-Leg

1.0 mmおよび1.3 mmのように正極端子側を極端に細くすると、逆にこちらの方が断線してしまい、寿命が極端に短くなるという結果を得た。これは、本イオン源はパルス運転のため、アーク放電のOFF時間がON時間より長く、アーク放電電流よりもフィラメント加熱電流による正極端子側の加熱によって蒸発損耗が生じたためだと考えられる。異断面形状フィラメントの中で最も長い連続運転時間を達成したのは正極端子側が1.4 mmのときで、寿命は119 時間であった。両側とも1.5 mmのフィラメント（同断面形状）を2本使用して同条件で運転したときの寿命は、第3.1.章に示したとおり63 時間であったので、約2倍寿命が向上したことになる。119 時間運転後と63 時間運転後のそれぞれのフィラメント消耗状態の測定結果を図 22 に示す。正極端子側1.4 mmの異断面形状フィラメントでは、同断面形状フィラメントで観測されたような負極端子側のみの消耗は無く、正極端子側と負極端子側でほぼ同程度消耗していることが分かる。このように、フィラメントの正極端子側を細くすることも、フィラメントの寿命向上に寄与することが分かった。原研のJT60用正イオン源では、正極端子端を細くする代わりに負極端子側をテーパ状に太くしたフィラメントを実用している [5]。

3.3.2. フィラメント長

これまでの試験では長さが130 mmのフィラメントを使用してきたが、次に、長さ90 mm、110 mm、130 mmおよび150 mmの4種類について、寿命評価の観点からその特性を調べた。それぞれのフィラメントを3本使用したときの1本当たりのフィラメント加熱パワー密度と、そのとき発生するアークパワーの関係を、図 23に示す。フィラメント加熱パワー密度とは、使用フィラメントの単位体積当たりの加熱電力を示す。測定結果から、所要のアークパワーを得ようとする、長いフィラメントの方がパワー密度は低いことが分かる。またアーク放電中、フィラメントは加熱電力の他にアークパワーによっても加熱されるが、アークパワー密度（フィラメント単位体積当たりのアークパワー）は、太さの同じフィラメントであれば長いフィラメントほど低い。従って、フィラメント加熱パワー密度とアークパワー密度の相乗効果により、長いフィラメントほど蒸発損耗量が低く寿命が長いと考えられる。実際に上記の4種類のフィラメントについて実施した寿命測定結果を、図 24に示す。予想どおり、フィラメント寿命はフィラメント長にほぼ比例して増加することが分かる。

フィラメント長とビーム特性の関係を調べるために、上記4種類の長さのフィラメントについて、負イオンビーム電流および引出電流のアークパワー依存性を測定した。長さ110 mm、130 mmおよび150 mmの3種類の結果を図 25に示す。なお90 mmフィラメントの結果については、イオン源の最適ガス流量条件（負イオンビームのパルス波形がフラットになる条件）が他のフィラメントと大きく異なり、フィラメント長依存性だけの比較が難しいため除外した。負イオンビーム電流については、フィラメント長による顕著な差は見られない。これに対し引出電流の方は、長いフィラメントの方が高い傾向にある。これは、長いフィラメントでは高速電子が磁気フィルターを通り抜けてプラズマ電極付近に到達しやすいためである。引出電流が高いと、イオン源引出電極への熱負荷が大きくなり電極が破損する恐れがあるので、引出電流低減の観点からはフィラメントは短い方が良い。したがって、寿命と引出電流の両立性を考慮すると、本イオン源の最適フィラメント長は130 mm程度であると言える。

3.3.3. フィラメント径

これまでの試験では直径1.5 mm ϕ のフィラメントを使用したが、1.8 mm ϕ のフィラメントについても同様の連続運転を行い、両者の特性の違いを調べた。ただし、フィラメント電源の電流容量の制限から、1.8 mm ϕ の場合は2本のフィラメントを使用した。1.8 mm ϕ フィラメント2本使用時の、NN接続およびPN接続のフィラメント電流のアークパワー依存性を図 26に示す。測定時のアークパルス運転のデューティーファクターは、1.5 mm ϕ 実験時と同様に3 % (0.6 msec幅&50 Hz)である。アークパワー50 kWのときのフィラメント電流を表 5にまとめる。1.5 mm ϕ の結果と同様に、2つの電源接続方法では、両方でフィラメント加熱電流の差はほとんど無く、また、アーク放電中の正極端子側および負極端子側のフィラメント電流は、いずれもPN接続の方が低い。アークパワー50 kW（アーク電流400 A）を得るのに必要なフィラメント加熱電流は、

1.5 mm ϕ のときは110 A程度であるのに対し、1.8 mm ϕ では150 A程度と約1.4倍高い。これは1.8 mm ϕ フィラメントの体積が1.5 mm ϕ よりも大きいために加熱電力を多く必要とするからである。

表5 1.8 mm ϕ 使用時の電源接続方法とフィラメント電流の関係 (アークパワー50 kW)

Method of FIL-ARC Power supply connection	NN connection	PN connection
Filament heating current (for one filament)	152 A	150 A
Filament current during arc discharge (for one filament)	P-Leg : 91 A N-Leg : 255 A	P-Leg : 52 A N-Leg : 222 A

1.8 mm ϕ を2本使用して、アークパワー 45 kW、デューティーファクター6%のアーク条件で連続運転を行いフィラメントの寿命を測定した。その結果、NN接続の場合は21時間、PN接続の場合は38時間の寿命であった。第3.1.章で示したとおり、1.5 mm ϕ のときにフィラメントを2本から3本に増やすと寿命が4倍向上したので、この結果を1.8 mm ϕ に適用すると、PN接続の場合、3本使用時の寿命は152時間と見込まれる。同条件での1.5 mm ϕ の寿命の測定結果は83時間であったので、1.5 mm ϕ から1.8 mm ϕ に太さを変更することで、寿命が2倍程度向上すると予想できる。

3.4. アーク条件の依存性

アークパワー30 kWと40 kWの条件で、それぞれアーク電流を変えてフィラメント寿命を測定した。その結果を図 27に示す。測定時の使用フィラメント数は2本、フィラメント径は1.5 mm ϕ 、アーク放電のデューティーファクターは目標の2倍に相当する6.0%とした。グラフ中で、○はアークパワー30 kW、△は40 kWのデータをそれぞれ示す。30 kWの250 Aと300 A、40 kWの267 Aの測定については、データの再現性を確認するために、それぞれ測定を2回実施したが、どの場合も2つのデータ点が重なっており、データの再現性が非常に良いことが分かる。30 kW、40 kWともに、同じアークパワーでもアーク電流が低いほど、言い換えればアーク電圧が高いほど、フィラメントは長寿命であることが分かる。また同じアーク電流で比較すると、40 kWの方が30 kWよりも長寿命の傾向にあることが分かる。例えば、アーク電流300 Aのとき、アークパワー30 kWのときの寿命は約8時間であるのに対し、40 kWでは11時間である。30 kWおよび40 kWでそれぞれ長時間運転を行ったときの、フィラメント加熱電流（フィラメント2本の合計値）の時間変化を、図 28に示す。図中の●はアークパワー30 kWのデータ、▲は40 kWのデータをそれぞれ示す。アーク電流は、どちらも300 Aである。測定結果よりフィラメント加熱電流は40 kWの方が30 kWよりも低いことが分かり、これが40 kWの方が長寿命であることの理由であると考えられる。

次にアーク電流を350 A一定として、負イオンビーム電流および引出電流のアーク電圧（アークパワー）依存性を測定した。その結果を図 29に示す（セシウム未添加状態）。負イオンビー

ム電流、引出電流ともに、アーク電圧とともに増加することが分かる。しかし、負イオンビーム電流については、アーク電圧が高くなると増加率が次第に下がる傾向がある。これは、アーク電圧の上昇に伴い磁気フィルターを通り抜けてプラズマ電極付近に到達する一次電子量が増え、この電子による負イオンの消滅量が増加するために生ずると考えられる。

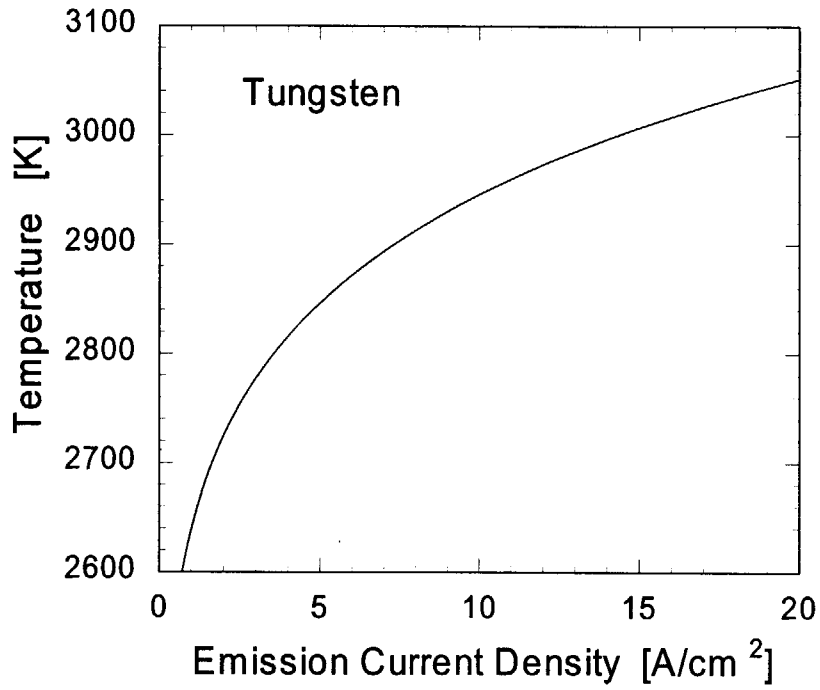


図8 タングステンの温度と電子放出電流密度の関係
(Richardson-Dushmanの式)

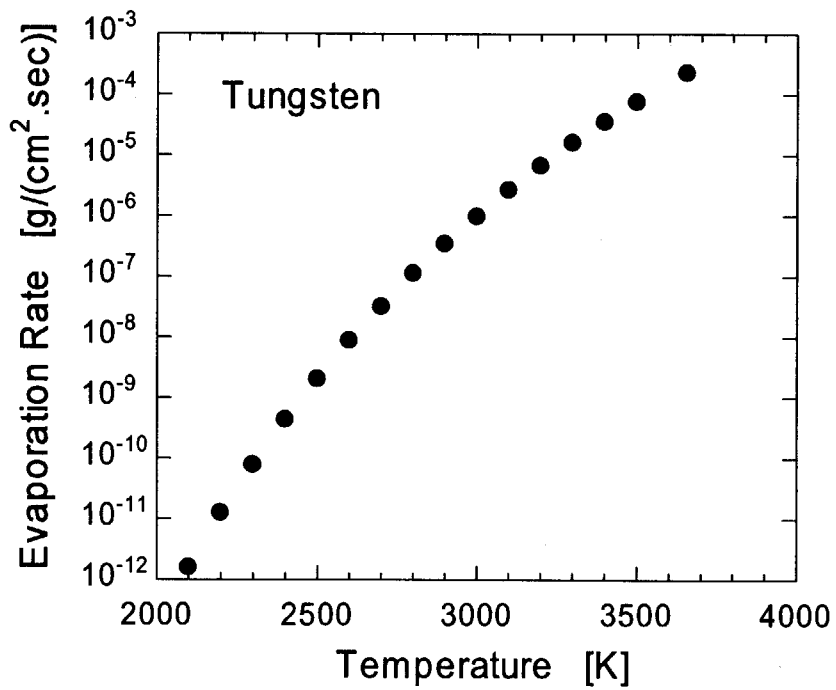


図9 タングステンの蒸発速度と温度の関係

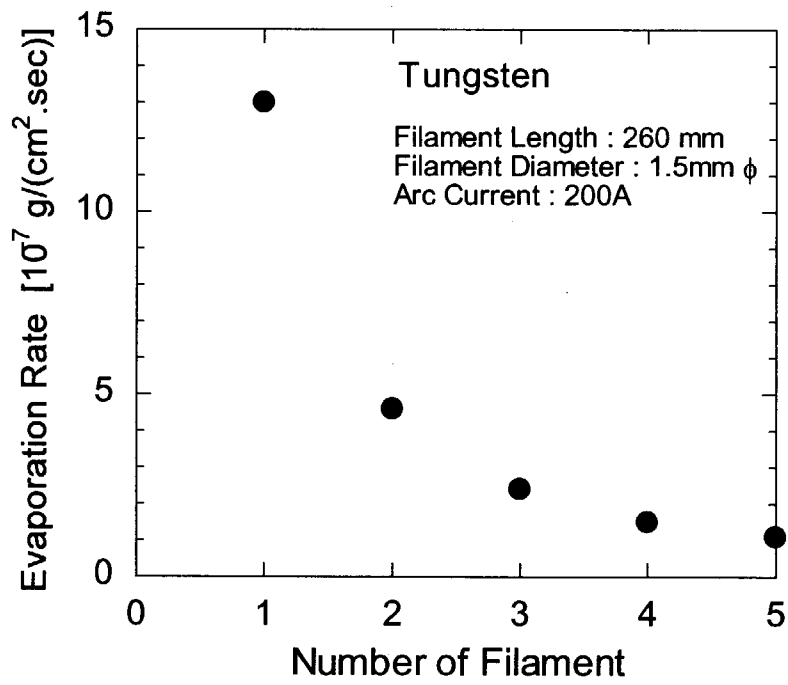


図10 使用タングステンフィラメントの1本あたりの蒸発速度と使用本数の関係

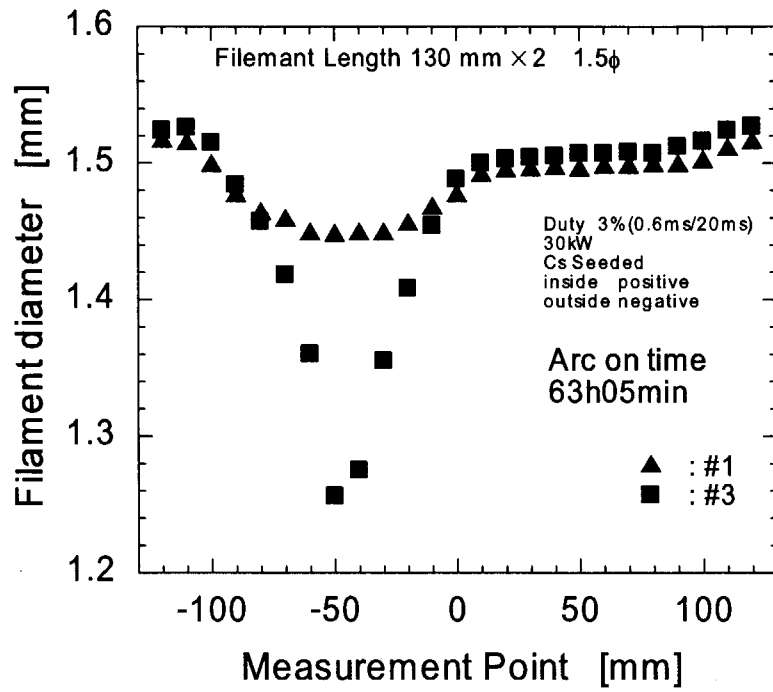


図 11 フィラメント 2 本使用時のフィラメント消耗状態

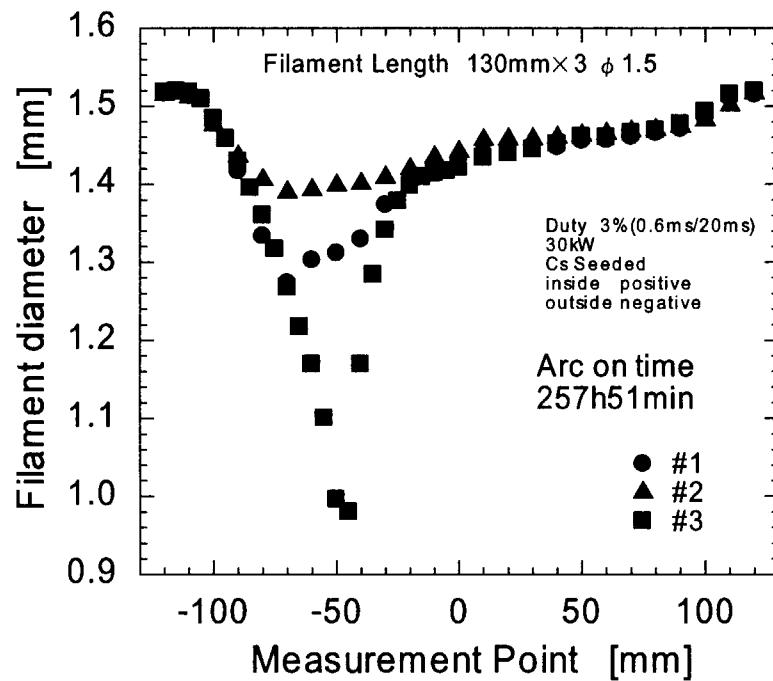


図 12 フィラメント 3 本使用時のフィラメント消耗状態

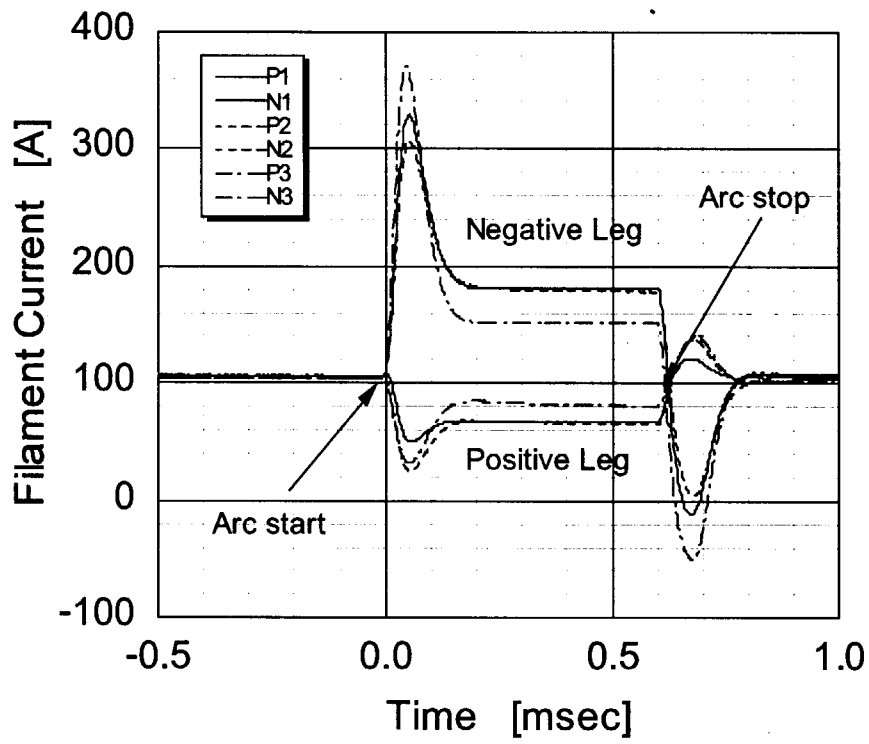


図13 3本のフィラメントの正極端子および負極端子側の電流波形
 (図中のPは正極端子端、Nは負極端子端、それらの横の数値はフィラメント番号を示す)

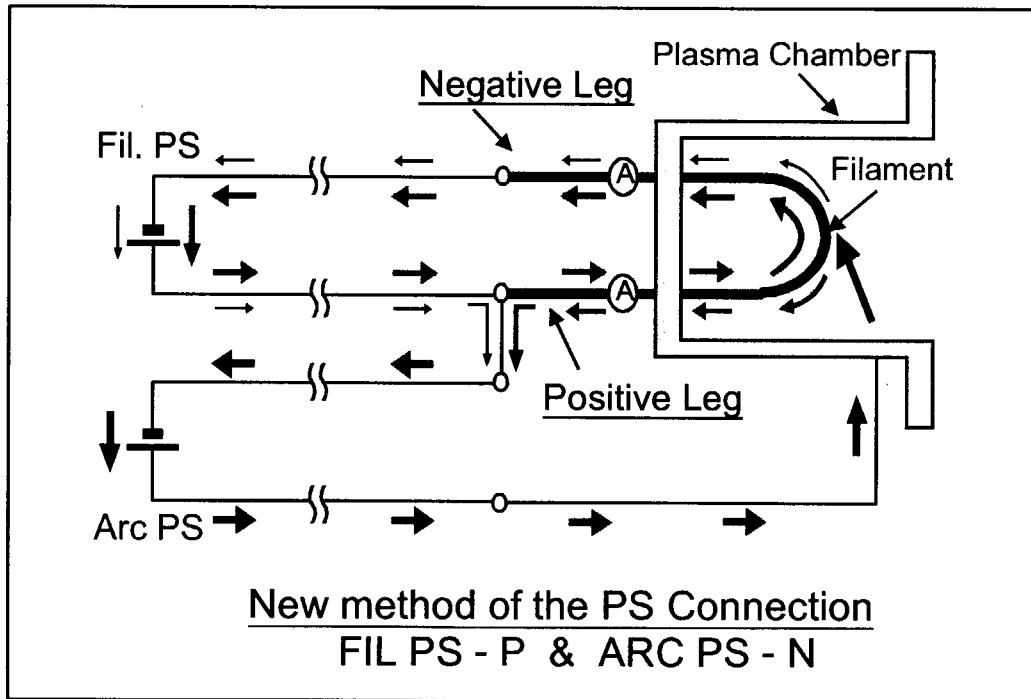
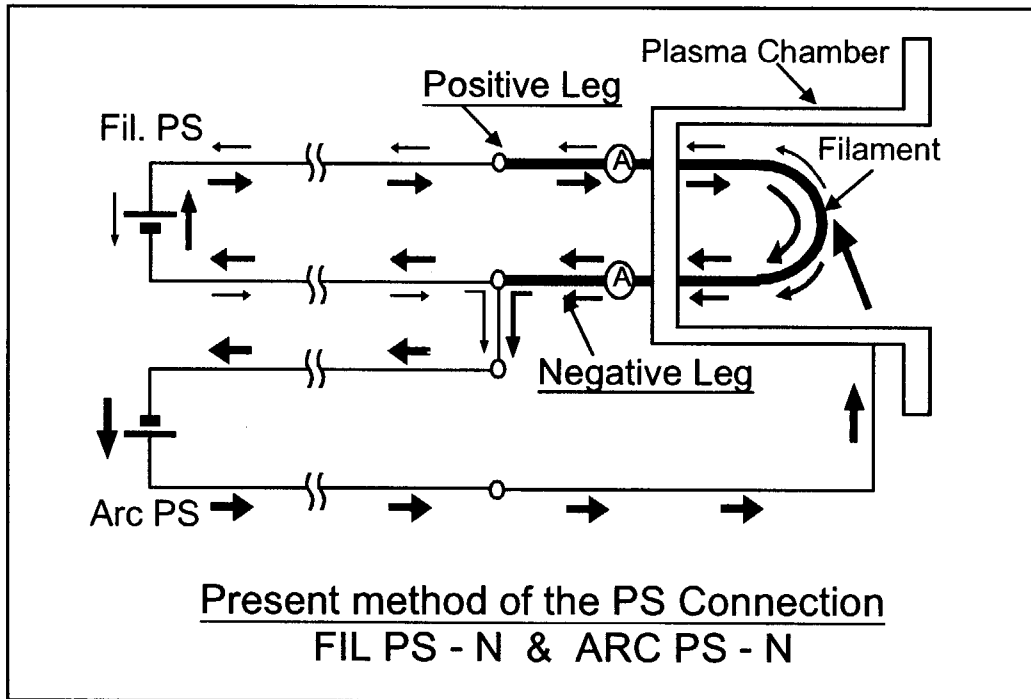


図 14 フィラメント電源とアーク電源の2種類の接続方法
(上図はNN接続、下図はPN接続)

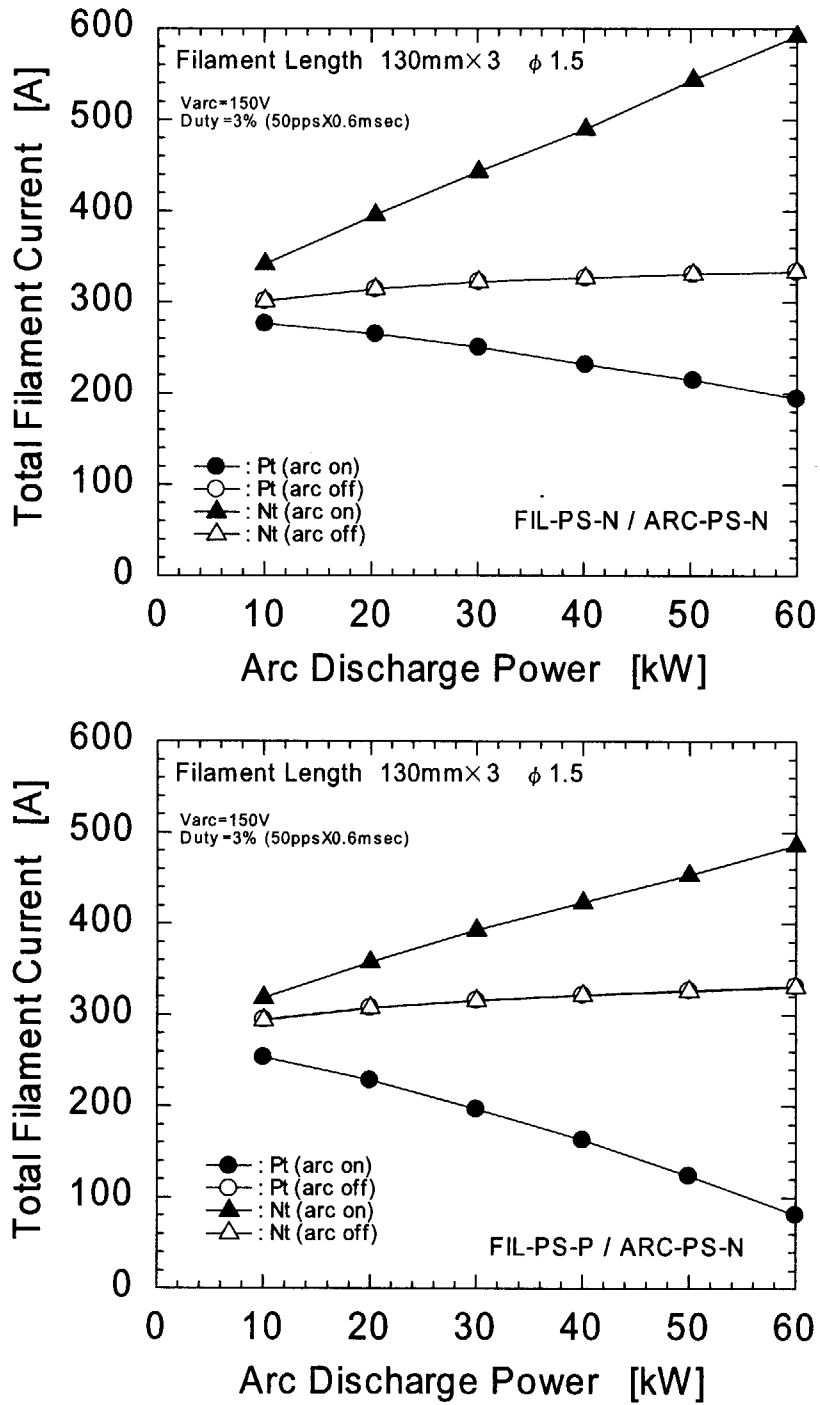


図 15 フィラメント電源とアーク電源の接続方法によるフィラメント電流の違い
(上図はNN接続、下図はPN接続)

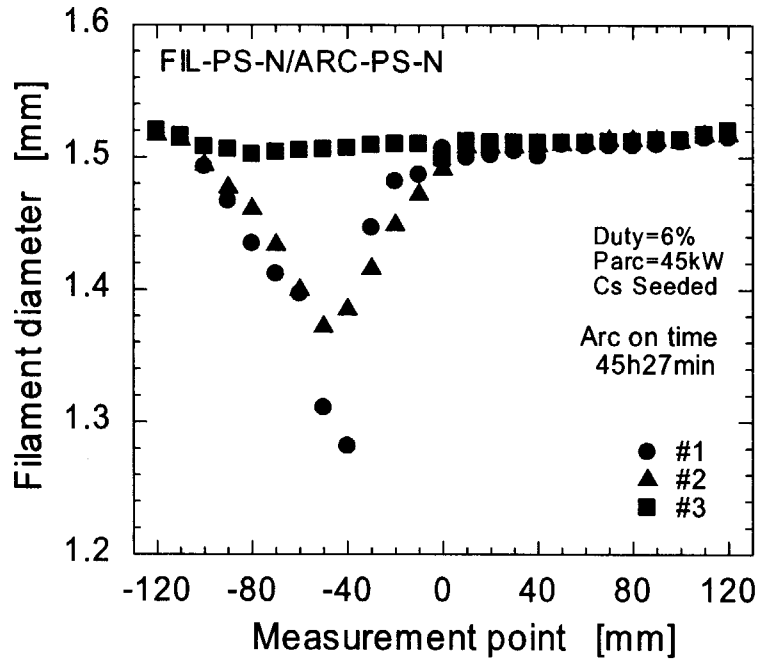


図 16 NN接続時のフィラメント消耗状態

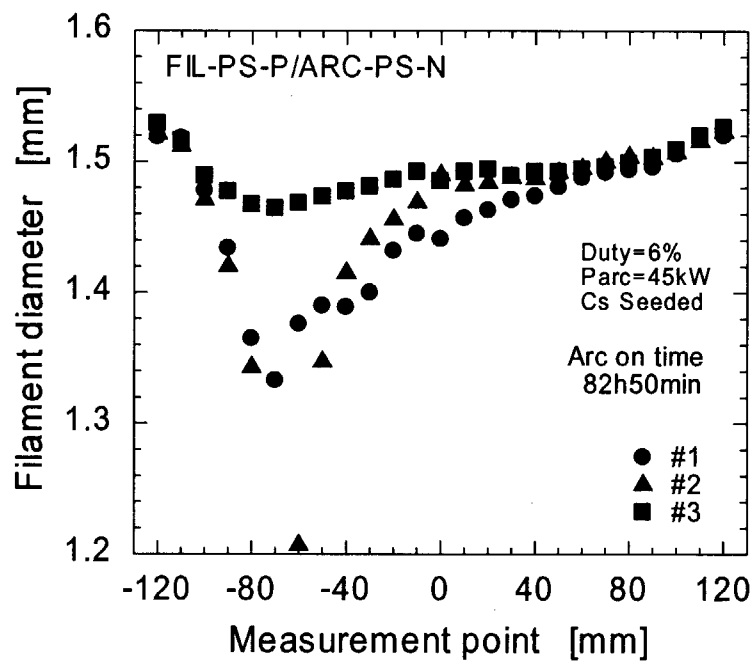


図 17 PN接続時のフィラメント消耗状態

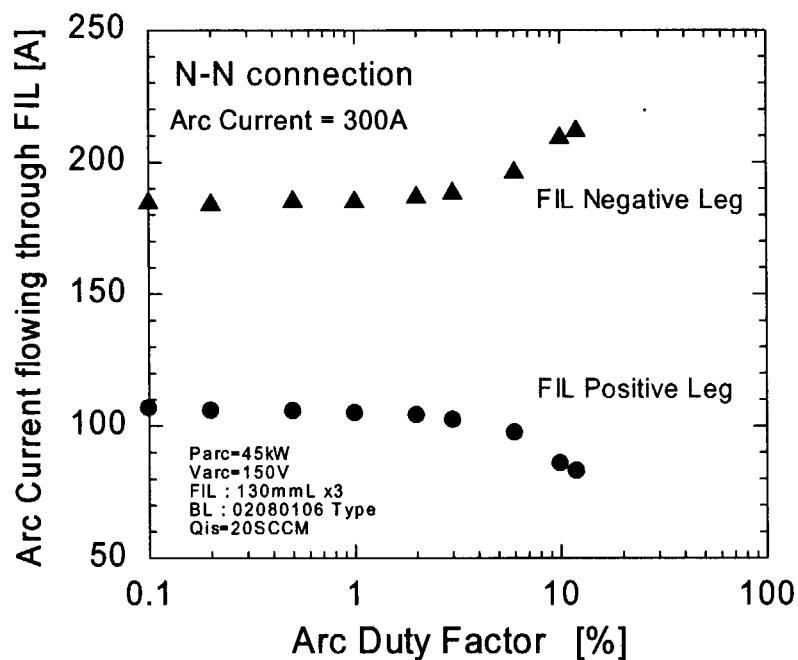


図 18 正極端子側および負極端子側のアーク電流流入量のデューティファクター依存性 (NN接続の場合)

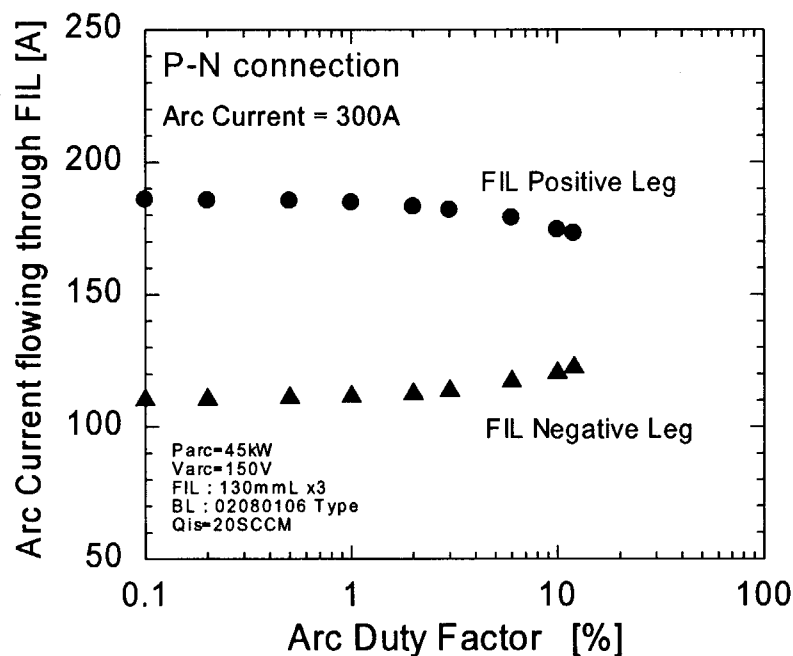


図 19 正極端子側および負極端子側のアーク電流流入量のデューティファクター依存性 (PN接続の場合)

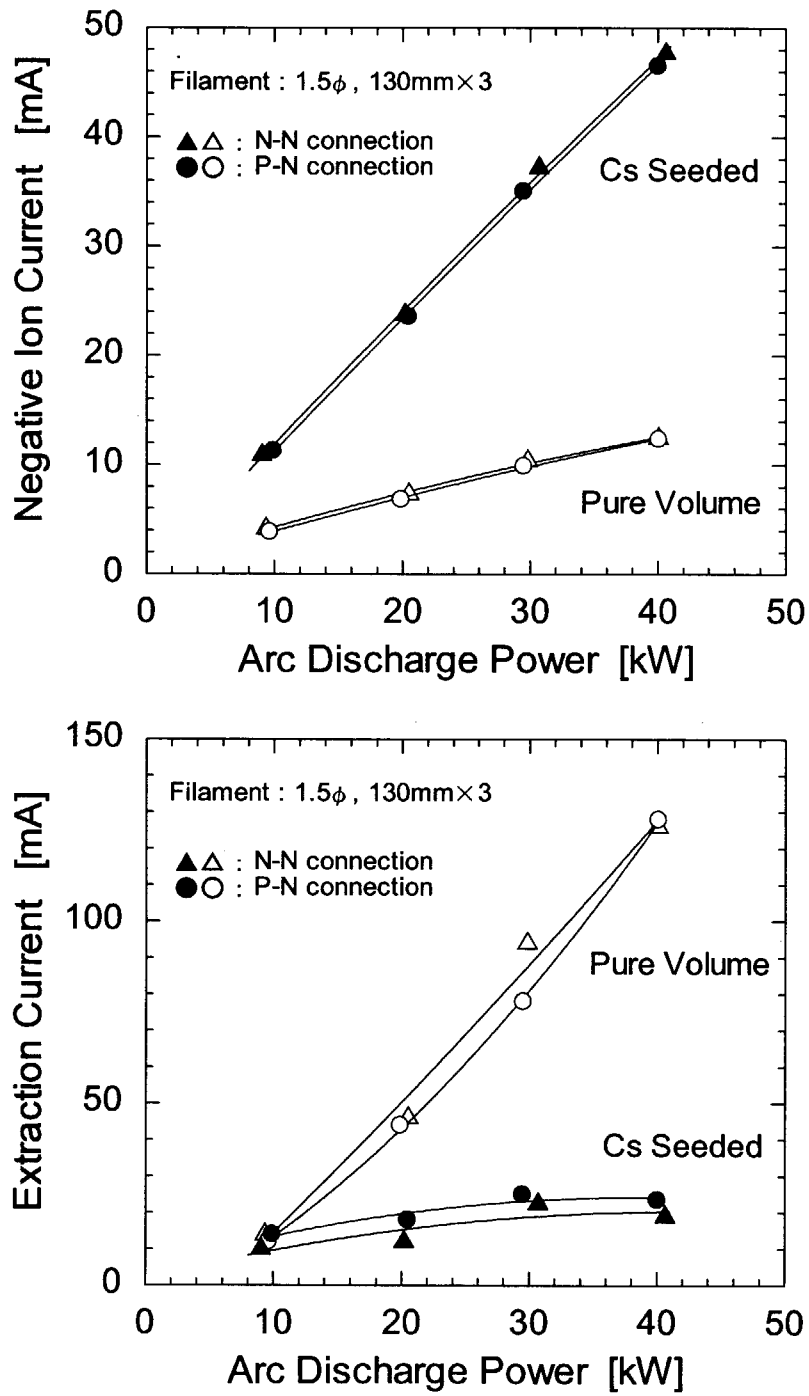
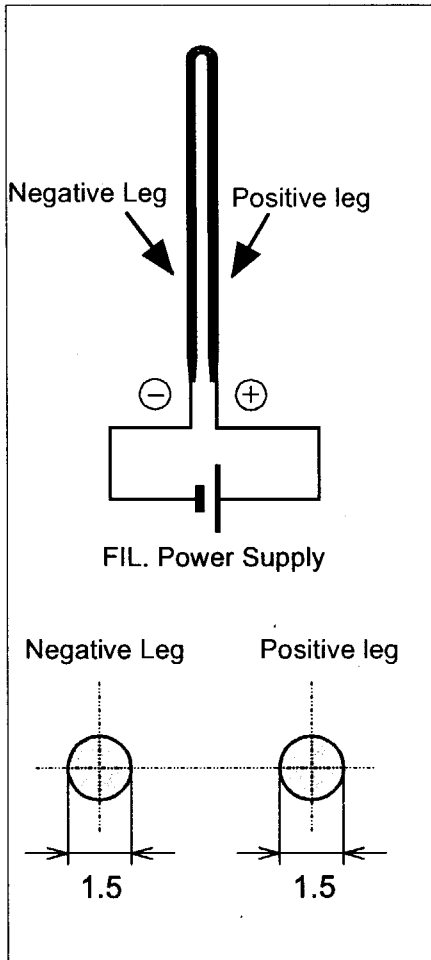
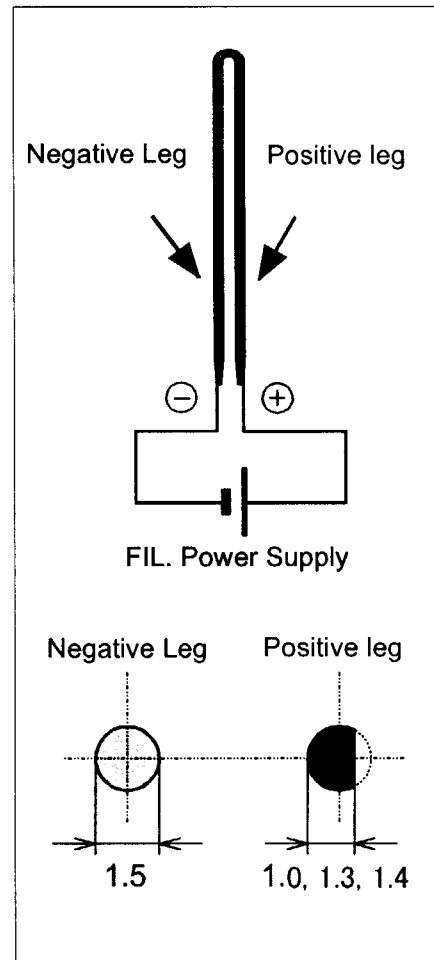


図 20 NN接続およびPN接続時の負イオンビーム電流（上図）および引出電流（下図）の
アークパワー依存性

(Pure Volume : セシウム未添加状態、Cs Seeded : セシウム添加状態)



Original Shape



Revised Shape

図 21 同断面形状 (左図) と異断面形状 (右図) フィラメントの構造図

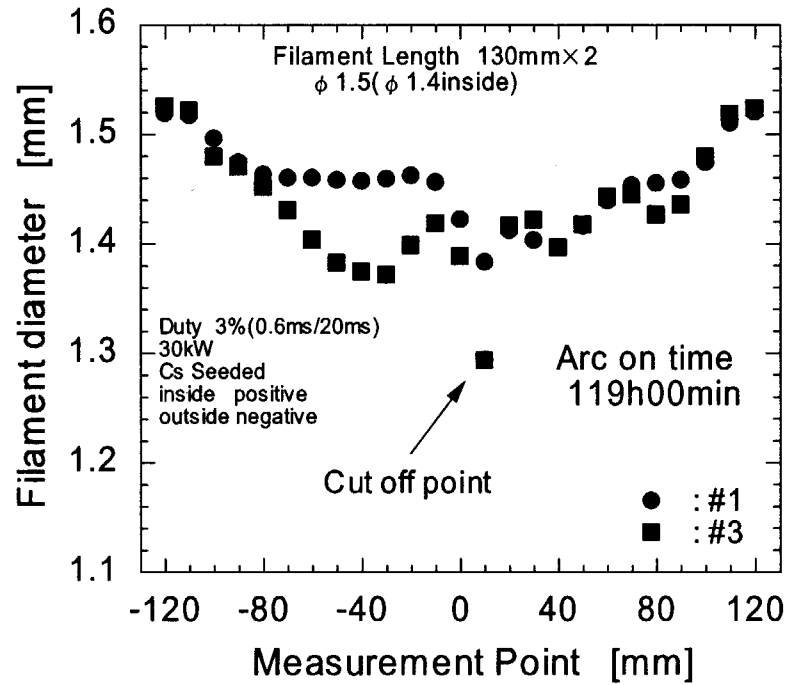
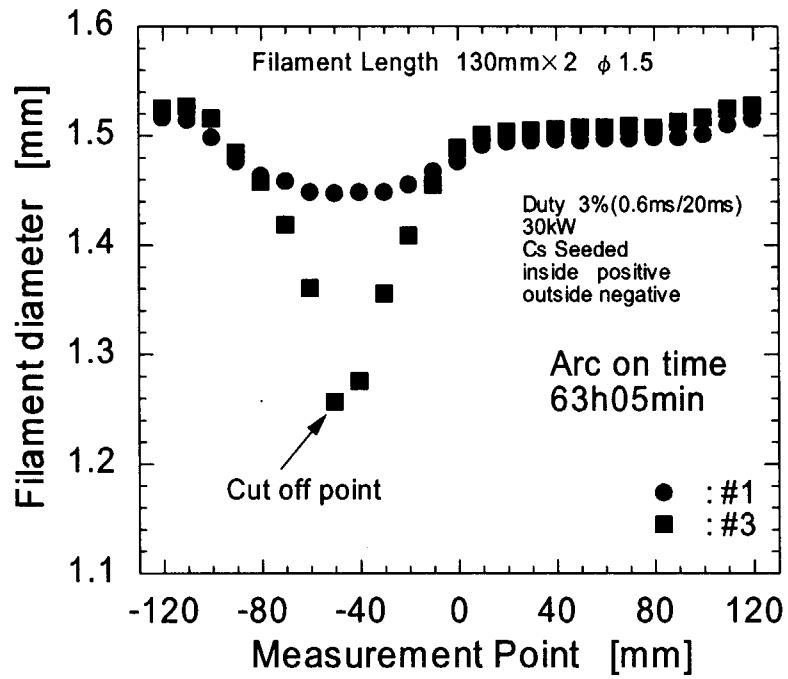


図 22 フィラメント寿命測定後のフィラメント径測定
(上図は同断面形状、下図は異断面形状フィラメントの結果)

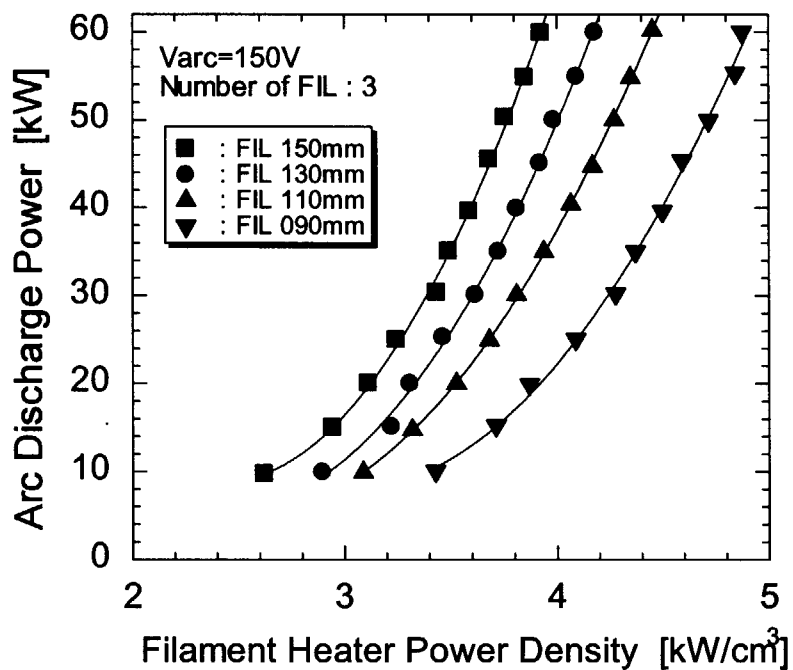


図 23 フィラメント加熱パワー密度（フィラメント 1 本当たり）とアークパワーの関係

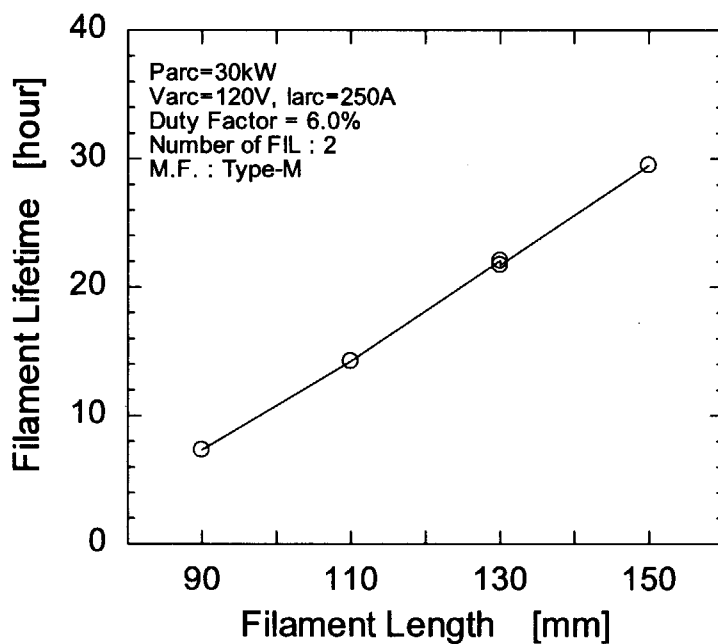


図 24 フィラメント寿命とフィラメント長の関係

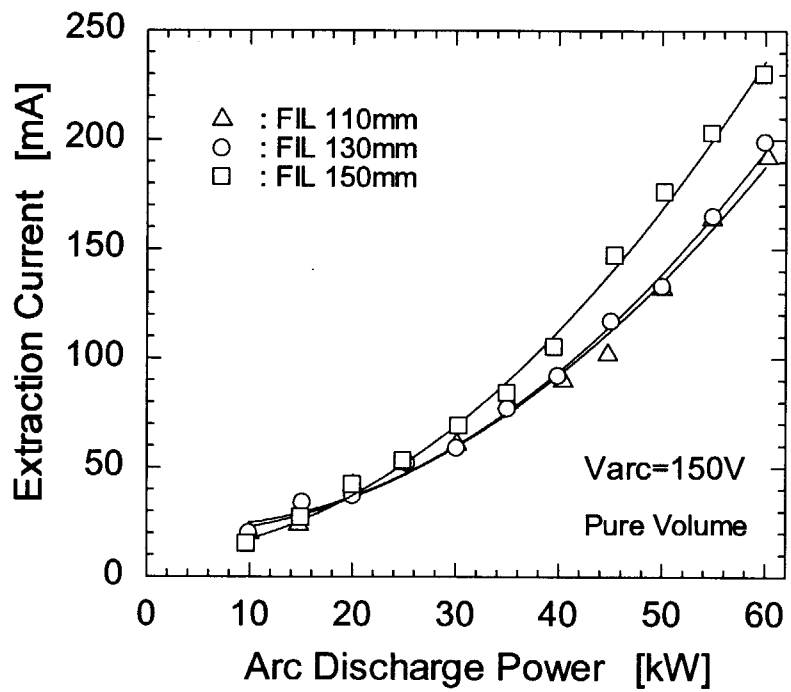
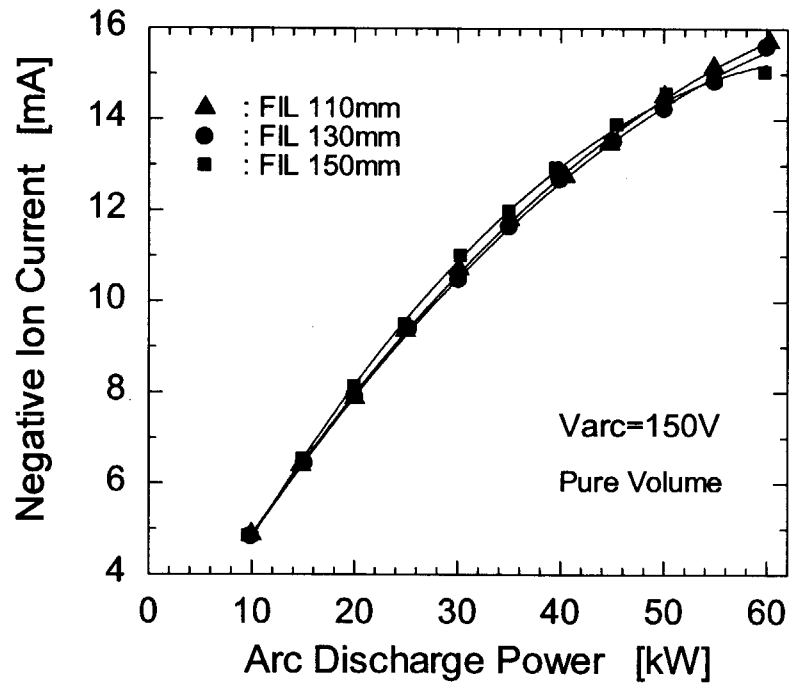


図25 フィラメント長110 mm、130 mm、150 mmの負イオンビーム電流および引出電流のアークパワー依存性

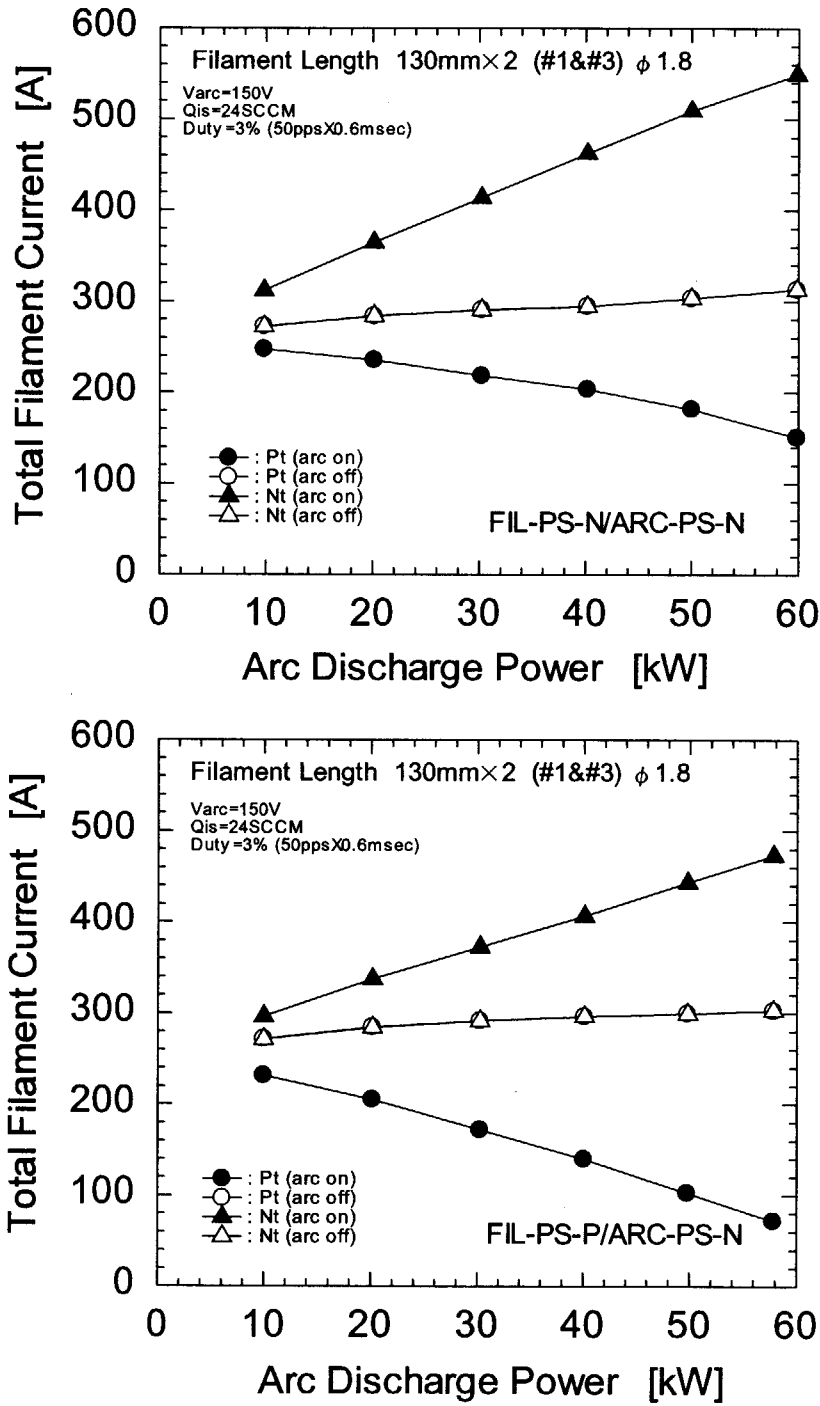


図 26 1.8 mm φ フィラメント使用時の、フィラメント電源とアーク電源の接続方法によるフィラメント電流の違い
(上図はNN接続、下図はPN接続)

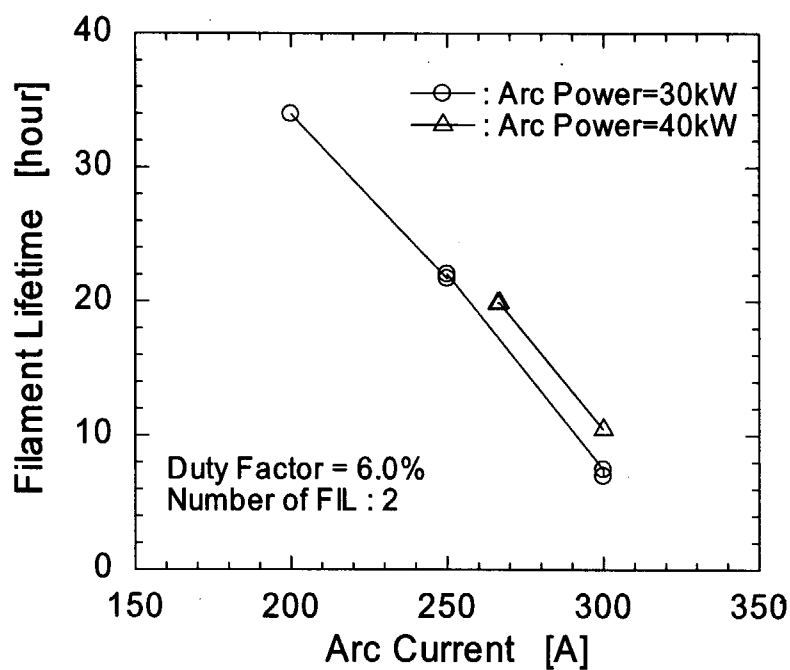


図 27 フィラメント寿命とアーク電流の関係
(フィラメント本数：2本、デューティーファクター：6.0%)

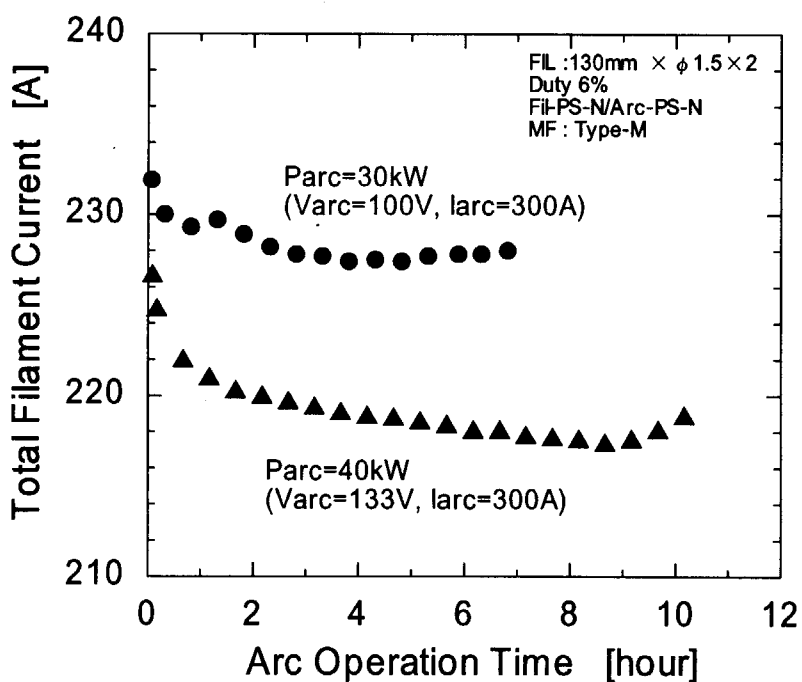


図 28 フィラメント加熱電流 (フィラメント2本分) の時間変化
(アーク電流：300 A、フィラメント本数：2本、デューティーファクター：6.0%)

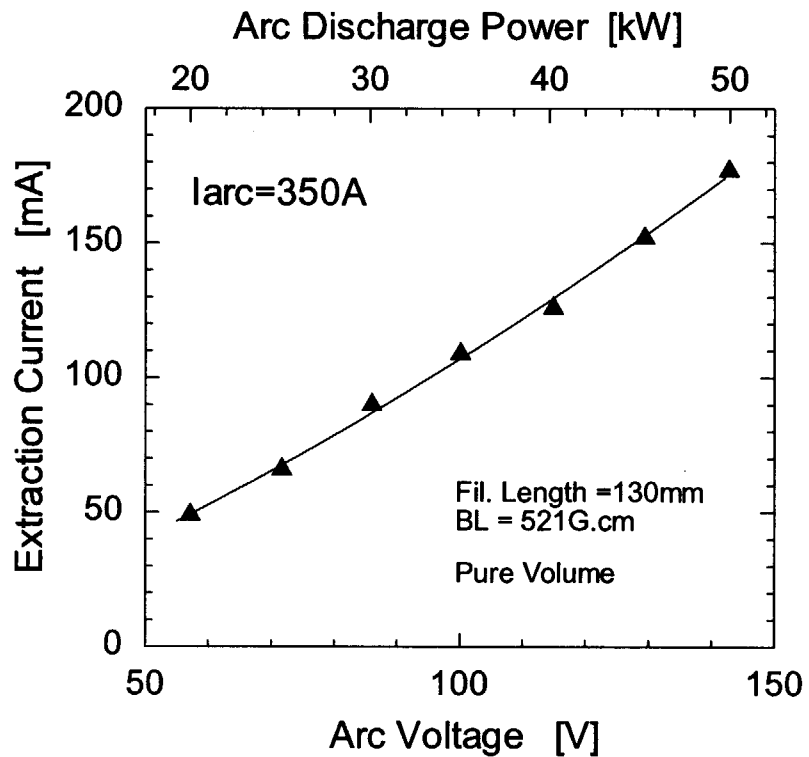
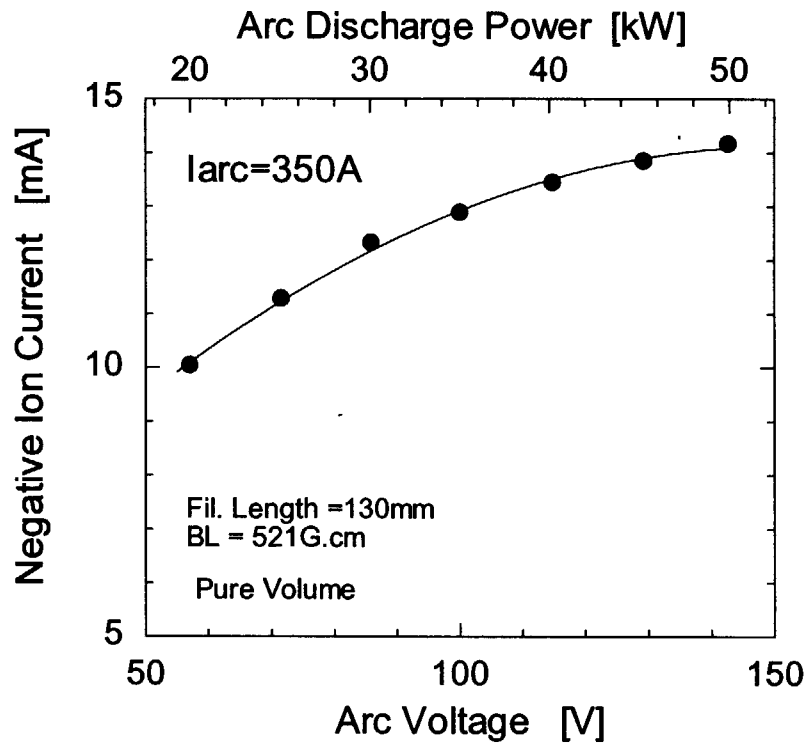


図 29 アーク電流一定のときの、負イオンビーム電流および引出電流の
アーク電圧およびアークパワー依存性 (セシウム未添加状態)

4. まとめ

J-PARC用負水素イオン源のフィラメント陰極の寿命評価試験および長寿命化に向けて、フィラメント使用本数、フィラメント電源とアーク電源の接続方法、フィラメント形状、およびアーク条件依存性について調べた。

フィラメント使用本数の検討では、フィラメント使用本数と蒸発速度の関係を定量的に評価し、最適なフィラメント本数を検討した。その結果、フィラメントの発熱がすべての場所で一様と仮定した場合に、フィラメント本数は2本または3本が適当で、それ以上増やしても寿命は大きく向上しないことが分かった。実際にアークパワー30 kW、デューティーファクター3%の条件でアーク放電の連続運転を実施した結果、フィラメント本数を2本から3本に増すと、フィラメント寿命が4倍向上し、3本使用時では258時間の寿命を達成した。また、使用後のフィラメントの消耗状態を調べることで、フィラメントの消耗場所は一様ではなく、負極端子側の消耗が著しいことが分かった。

フィラメント負極端子側のアーク電流流入量を減らすために、フィラメント電源とアーク電源の接続方法を従来の負極端子同士の接続からフィラメント電源を正極端子に変更した。その結果、フィラメントの負極端子側へのアーク電流流入量が15%程度減少し、フィラメント寿命が1.8倍向上することを確認した。

フィラメント形状の検討では、フィラメント正極端子側の断面積を負極端子側より小さくすることで、フィラメント温度分布の不均一性の改善を図った。寿命試験の結果、正負異断面形状フィラメントは同断面形状よりも寿命が2倍程度長いことを確認した。フィラメント長の検討では、長いフィラメントほど長寿命かつ負イオン生成効率は高いが、一方でほとんどが電子である引出電流も高く、引出電極への熱負荷が増加することが分かった。よって、適度な長さのフィラメントの選定が必要で、本イオン源ではフィラメント長130 mm程度が、総合的に最適な長さであることが分かった。フィラメント径の検討では、1.5 mm ϕ と1.8 mm ϕ のフィラメントについて比較を行い、1.5 mm ϕ から1.8 mm ϕ に太くすることで、約2倍の寿命向上が期待できることが分かった。

アーク条件依存性の測定では、アーク電圧を高くしてアーク電流を低めに設定することが、フィラメントの寿命の観点からは有利であることが分かった。またビーム試験の結果、負イオンビーム電流、引出電流ともに、アーク電流一定の条件でもアーク電圧とともに増加することが分かった。今回測定を実施したアーク電圧150 Vまででは見られなかったが、一般的に高いアーク電圧ではカソードシース電圧が高くなることでスパッタリング等によりフィラメントの消耗が増すこと、また負イオンビーム電流の増加は150 V付近で飽和傾向を示すこと、さらに引出電流の増加はイオン源引出電極の熱負荷が増大することから、本イオン源では150 V程度のアーク電圧が、寿命とビーム特性の両面から好条件であると言える。

今回実施したフィラメントの長時間運転試験について、フィラメント形状、使用本数、アーク条件および電源接続方法と、そのときに得られた寿命時間の結果を、表6にまとめる。アーク電源に対するフィラメント電源の接続を、負極端子から正極端子に変更すると、1.5 mm ϕ 使用時

でも1.8 mmφ使用時でも寿命は約1.8倍向上している。この結果を、アークパワー30 kW、デューティーファクター3%、負極端子同士の接続（NN接続）で達成した258時間に適用すると、正極端子接続方法（PN接続）の使用により464時間の寿命を期待することができる。さらにフィラメントの正極端子側を細くすることで寿命が63時間から119時間、つまり約1.9倍向上しているので、464時間の寿命はさらに882時間程度まで延びると予想される。J-PARCで要求されているイオン源のメンテナンス頻度は500時間なので、フィラメント寿命については本研究により要求性能達成の目処が得られたことになる。

表6 測定したフィラメント寿命時間のまとめ

Filament Size [mm]		Number of Filament	Arc Discharge Power [kW]	Duty Factor [%]	FIL-ARC P.S. Connection	Filament Lifetime [hour]
P-Leg	N-Leg					
1.5	1.5	3	30	3	NN	258
1.5	1.5	3	45	6	NN	46
1.5	1.5	3	45	6	PN	83
1.8	1.8	2	45	6	NN	21
1.8	1.8	2	45	6	PN	38
1.5	1.5	2	30	3	NN	63
1.4	1.5	2	30	3	NN	119

謝辞

本研究を行う機会を与えて頂くとともに、実験の方法および結果について有意義なご助言を頂きました加速器グループの皆様に、深く感謝いたします。本論文をまとめるにあたり有益なコメントを頂きました那珂研究所 核融合工学部 加熱工学研究室の渡邊和弘氏に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] High-intensity Proton Accelerator Project Team, JAERI-Tech 2003-044 : KEK Report 2002-13 (2003)
- [2] H. Oguri, Y. Okumura, K. Hasegawa, Y. Namekawa and T. Shimooka, Rev. Sci. Instrum., Vol. 73, No. 2, p1021 (2002)
- [3] 下岡隆、小栗英知、滑川裕矢、富澤哲男、奥村義和、長谷川和男 : JAERI-Tech 2002-038, "大強度陽子加速器用負イオン源のビーム試験" (2002)
- [4] K. N. Leung, P. A. Pincosy and K. W. Ehlers, Rev. Sci. Instrum. 55 (1984) 1064
- [5] S. Tanaka and Y. Ohara, Rev. Sci. Instrum. 55 (1984) 1625

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光量	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局 1985年刊行による。ただし、1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC関係理事会指令では bar、barn および「血圧の単位」mmHg を表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘 度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

大強度陽子加速器用負イオン源のフィラメント寿命試験

R100

不純物含有率100%
白色度70%未満紙を使用しております