

J-PARC セシウム添加高周波駆動負水素イオン源の開発状況

DEVELOPMENT OF A CS-CEEDED RF-DRIVEN H⁻ ION SOURCE FOR THE J-PARC

小泉勲^{#,A)}, 上野彰^{A)}, 大越清紀^{A)}, 池上清^{A)}, 高木昭^{A)}, 山崎幸春^{A)}, 小栗英知^{A)},
 Isao Koizumi^{#,A)}, Akira Ueno^{A)}, Kiyonori Ohkoshi^{A)}, Kiyoshi Ikegami^{A)}, Akira Takagi^{A)}, Saishun Yamazaki^{A)},
 Hidetomo Oguri^{A)}
^{A)} J-PARC Center

Abstract

In order to satisfy the J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) 2nd stage requirements of an H⁻ ion beam current of 60mA within normalized emittances of $1.5\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ both horizontally and vertically, a flat top beam duty factor of 1.25% ($500\mu\text{s}\times 25\text{Hz}$) and a life-time of more than 50days, the J-PARC rf-driven H⁻ ion source is under development. It was designed based upon the operating J-PARC ion source with several modifications; the adoptions of an rf-antenna developed at the SNS (Spallation Neutron Source) instead of a LaB₆-filament, the cooling plate attached to the plasma electrode (PE), the rod filter magnets instead of the external filter magnets, the cesium (Cs) oven, the axial magnetic field correction (AMFC) coil, the enlargement of the plasma chamber inner diameter from 100mm to 120mm and the shorting of extraction and acceleration gaps, and so on. The source plasma is produced by an about 50W CW 30MHz-rf and an about 40kW pulsed 2MHz-rf. The Cs is installed into the plasma chamber by opening the Cs-valve between the plasma chamber and the Cs oven, which is heated to 200~240 °C. The H⁻ ion beam current is maximized by optimizing the Cs quantity depending upon the Cs-valve opening time, the PE temperature depending upon the flow rate or heater power around air pipe of the air through the stainless pipe brazed to the PE cooling plate, the AMFC by the AMFC coil current, and so on. The experimental results using the nickel (Ni) plated plasma chamber made of oxygen free copper (OFC), which satisfied the above requirements, were reported last year.

The experimental results using the plasma chamber made of stainless steel (SUS) are presented in this paper. The stainless steel was adopted in order to save the weight. It was necessary to install the integrated plasma chamber from the PE to the end-plate, which made it possible to pre-check the vacuum leak and to shorten the time to exchange the ion source as same as the operating J-PARC ion source, by hands. Although the necessary amount of Cs for the SUS chamber was much smaller than that for the Ni-plated OFC chamber, the former H⁻ ion beam current was about 20% lower than the later one.

1. はじめに

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)では、セシウム(Cs)不使用の六ホウ化ランタンフィラメント(LaB₆-fil.)を用いた負水素イオン源が稼働中である^[1]。LaB₆-fil.イオン源では、J-PARC 第1ステージの要求ビーム電流 30mA は可能であるが、Csを添加してもビーム増強がされないことが判明し、ビーム電流 38mA が限界性能であった^[2]。J-PARC 第2ステージの要求を満たすイオン源として、水平&垂直横方向エミッタンス $1.5\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 内ビーム強度: 60mA、パルス幅: ビームフラットトップ 500 μs 、繰り返し: 25Hz、運転寿命 50 日以上を目標とした、セシウム添加高周波駆動(RF)負水素イオン源の開発を行っている。現在テスト中の RF イオン源は、J-PARC 実機イオン源をベースに様々な改良を施している。ソースプラズマは 30MHz-RF を連続的に印加し、2MHz-RF をパルスの重畳して生成している。200~240°Cに加熱されたオープン内の蒸気化されたCsは、圧空バルブ開によりプラズマ生成室内に導入される。ビーム強度は、圧空バルブ開時間によるCs量、プラズマ電極(PE)冷却板への圧空流量、または、圧空ヒーター電力による PE 温度、軸磁場補正

(AMFC)コイル電流による軸磁場補正等の最適化により最大化が図られる。無酸素銅(OFC)製プラズマ生成室を使用したプロトタイプイオン源で、上記の目標が達成可能であるとの実験結果を昨年報告した。本年は、ステンレス鋼製プラズマ生成室の実験結果を報告する。予め真空リークテスト可能なプラズマ電極から天板まで一体化されたプラズマ真空容器をイオン源に組み込み可能な軽重量とする為、薄肉加工を施したステンレス鋼(SUS)製プラズマ生成室を採用した。稼働中の J-PARC 実機イオン源と同様、一体化されたプラズマ真空容器の交換による短時間でのイオン源メンテナンスが可能となる。観測された両生成室間の相違点についても報告する。

2. SUS 鋼製負水素イオン源の構成

J-PARC RF 負水素イオン源は、セシウム添加により 76mA の負水素イオンビーム引き出しに成功した J-PARC タングステンフィラメント(W-fil.)イオン源試験機^[3]を基本に、SNS イオン源で使用されている内部アンテナと RF 負水素イオン源に必須のロッドフィルター磁石を設置したものである。OFC 製プラズマ生成室イオン源については昨年報告した^[4-8]。

SUS 製プラズマ生成室イオン源は、J-PARC 実機イオン源と同様、天板、プラズマ生成室、プラズマ電極を一体化した構造である。予め真空リーク試験を行った一体化した真空容器を交換することで、イオン源のメンテナンス時間の短縮が可能である。SUS 製プラズマ生成室イオン源の断面図を Figure1. に示す。プラズマ生成室は、内径 120mm、内長 127.5mm である。中心間距離 43mm で 2 本のロッドフィルター磁石設置用ステンレス管が溶接されている。PE はモリブデン製である。PE に取り付けられる OFC 製温度制御板にロー付されたステンレス管内に圧空ヒーター(コンダクタンスが適度に調整され電熱ヒーターが埋め込まれたステンレス管)内を通過させ加熱した圧空を通過させることで、PE 温度を一定に制御する。圧空流用を 600L/h に固定し、温度制御板の圧空出口側ステンレス管のロー付部迄挿入した熱電対で測定した温度が一定となる様圧空ヒーター電力を PID(Proportional Integral Derivative)制御する。天板に設置したセシウムオープンは、①セシウムを蓄えるリザーバー、②セシウム添加、停止及びメンテナンス時のリザーバー真空保持のためのバルブ、③セシウム出射口を備えたチューブから構成される。バルブは遠隔操作で Cs 添加を実施する為、圧空バルブを採用した。3 つの部品それぞれに熱電対とマントルヒーターを取り付け、個別に温度制御を行っている。試験時は、バルブとチューブの温度はセシウム固着防止のため、300°C一定とし、リザーバーの温度は 200°Cあるいは 240°Cに設定した。ロッドフィルターの位置に設置した AMFC コイルの電流値を制御し、ビーム引出部でのビーム軸磁場補正を行うことでビーム強度を増加させることが出来た。

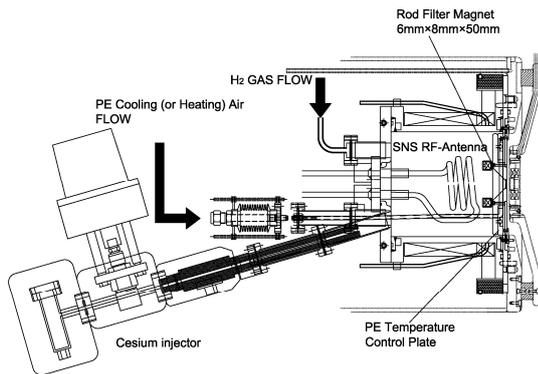


Figure1. Cross-sectional view of the J-PARC RF-driven ion source using the plasma chamber made of SUS.

3. 実験結果

3.1 プラズマ生成室材質によるビーム強度の違い

OFC 製プラズマ生成室イオン源及び SUS 製プラズマ生成室イオン源の運転条件を Table1. に示し、測定されたビーム強度波形を 2MHz-RF の進行波と反

射波電圧波形、引出電流波形と一緒に Figure2.及び Figure3.に示す。OFC 製プラズマ生成室イオン源のパラメーターは、必要性能が安定的に達成可能な値に設定されている。一方、SUS 製プラズマ生成室イオン源のパラメーターは、長時間連続運転が可能と考えられる条件で、ビーム強度最大となる値である。RF 電力と AMFC コイル電圧の値が大きく異なっている。PE に取り付けられる OFC 製温度制御板温度 (Tc) は圧空を流すことで、OFC 製プラズマ生成室イオン源で 220°C~240°C、SUS 製プラズマ生成室イオン源では 200°C付近に調整している。水冷用配管を兼ねるロッドフィルター磁石設置用管を OFC 製フランジ削り出しから SUS 管をプラズマ生成室に溶接する構造に変更した際、SUS 管の造り易さを優先させた為、ロッドフィルター磁石の断面形状が長方形から正方形に近いものになっている。PANDIRA^[9]を使用した近似磁場計算の結果を Figure4 に示す。Figure4(a)と(b)に示される様にフィルター磁場の違いは小さく問題ないと考え製作を行った。しかし、ビーム強度が再現出来ないこと、及び、10G 程度の AMFC 磁場の違いがビーム強度に 10%程度の違いを生み出すこと^[8]からこの僅かだと考えたフィルター磁場の違いが大きなビーム強度の違いの原因となっている可能性が高くなった。ビーム強度を減少させる可能性のあるもう一つの原因は、OFC と SUS の熱伝導率の違いによるプラズマ生成室内面温度の違いが引き起こす不純元素量の増加による負水素イオン生成率の低下である。しかし、Figure5 に示す 2MHz-RF 電力とビーム強度の関係から分かる様に、SUS 製プラズマ生成室イオン源では、OFC 製プラズマ生成室イオン源より低い電力で、ビーム強度の飽和が発生している。フィルター磁場の違いによってビーム強度が飽和している可能性が高いと考えて、同形状のロッドフィルター磁石が使用出来る SUS 製プラズマ生成室の製作を開始した。不純物の影響も減少させる為、内表面処理を現状の電解研磨に加え、真空炉での脱ガス処理も行うことにした。今回のビーム電流波形を比較すると、OFC 製プラズマ生成室イオン源のビーム電流は約 68.3mA に対し、SUS 製プラズマ生成室イオン源のビーム電流は約 59.3mA となった。J-PARC 第 2 ステージの目標には到達していないが、ビーム電流の変動幅が小さくなっていることが分かった。今後は、SUS 製プラズマ生成室イオン源のビーム電流の変動幅が、OFC 製プラズマ生成室イオン源に比べて小さいことに着目し、ビームの変動幅を維持したまま第 2 ステージ要求を満たすことを目標とする。

Table1. Typical operation parameters.

	IS using the plasma chamber made of OFC	IS using the plasma chamber made of stainless steel
the accelerator voltage	50kV	50kV
the extraction voltage	10.0kV	10.1kV
the gas pressure	20SCCm	20SCCm
the solenoid current	400A	400A
AMFC coil current	4.0V	2.0V
2MHz-RF outpot Power	38.2kW	43.8kW
the Cs reservoir temperature	240°C	200°C

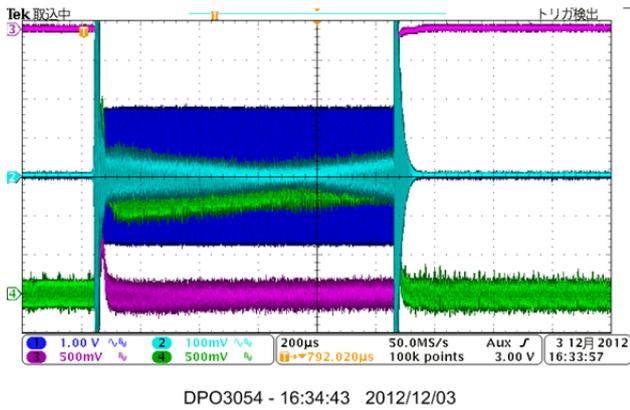


Figure2. The measured waveforms (sample mode, 200 μs / Div.) of V_{2MHzFOR} (trace1), V_{2MHzRFR} (trace2), I_{H-} (trace3, 10 mA / Div.) and I_{ext} (trace4, 50 mA / Div.). IS using the plasma chamber made of OFC.

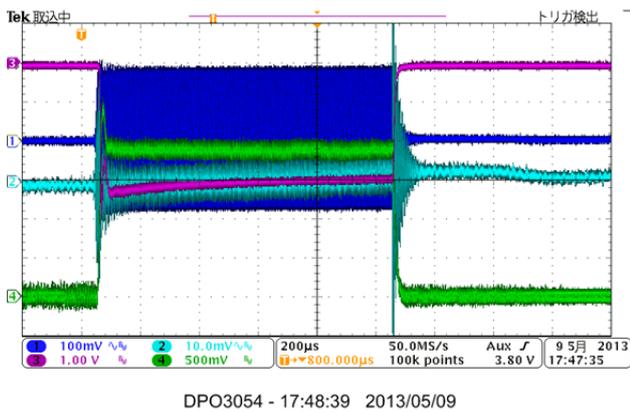
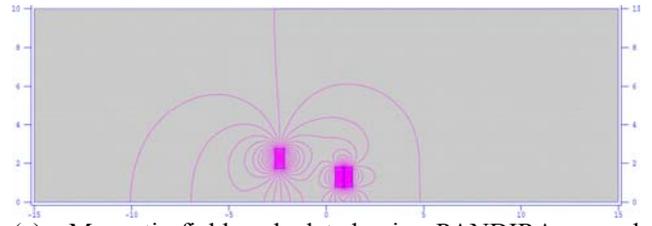
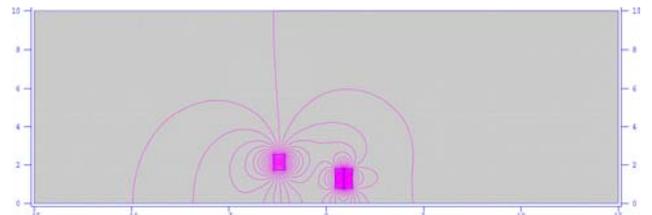


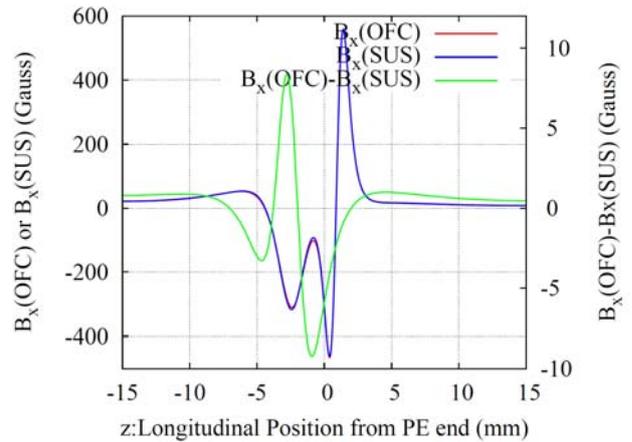
Figure3. The measured waveforms (sample mode, 200 μs / Div.) of V_{2MHzFOR} (trace1), V_{2MHzRFR} (trace2), I_{H-} (trace3, 20 mA / Div.) and I_{ext} (trace4, 50 mA / Div.). IS using the plasma chamber made of SUS.



(a) Magnetic fields calculated using PANDIRA around the filter magnets and the electron suppression magnets for the plasma chamber made of OFC.



(b) Magnetic fields calculated using PANDIRA around the filter magnets and the electron suppression magnets for the plasma chamber made of SUS.



(c) Calculated magnetic fields of B_x on the beam axis for the plasma chambers made of OFC and SUS and a difference between these two B_x .

Figure4. Magnetic fields calculated using PANDIRA around the filter magnets and the electron suppression magnets.

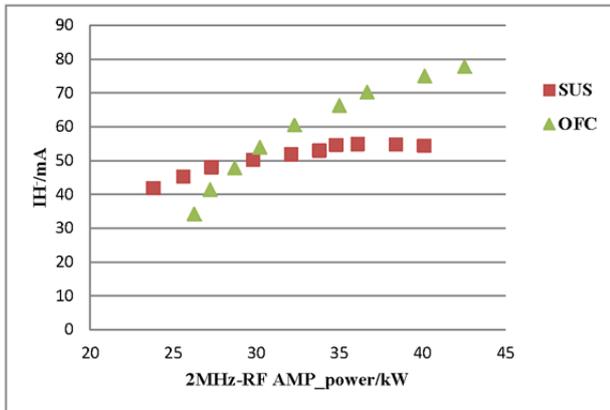


Figure 5. Measured dependences of the H⁻ ion beam current (IH) on the 2MHz-RF output power of the IS using the plasma chambers made of OFC and SUS.

3.2 Cs 添加時間の比較

メンテナンス（真空面の洗浄による Cs 除去を含み）後からビーム強度最大となるまでの Cs 添加時間及びリザーバー温度比較を Table 2 に示す。OFC 製プラズマ生成室イオン源の Cs 添加条件は、手動バルブ（現場操作）、RF"ON"、高圧"ON"、リザーバー温度 240°C。SUS 製プラズマ生成室イオン源は、圧空バルブ（リモート操作）、RF"ON"、高圧"ON"、リザーバー温度 200°C となっている。SUS 製プラズマ生成室イオン源では圧空を用いた自動バルブにより、加速した状態で Cs 添加を行った。これは、J-PARC 実機イオン源で運転することを考慮して遠隔化させた。それにより、ビーム強度及びセシウム量を観察しながら Cs 添加が可能となった。最大ビーム電流となるまで Cs 添加した時間の合計は OFC 製イオン源 238 分に対し、SUS 製プラズマ生成室イオン源は 158 分となった。添加中の Tc は 200°C ~ 250°C とした。リザーバー温度 200°C の Cs 添加量は、240°C の時に比べ、約 10 分の 1 となるため、大幅に Cs 添加量が減少していることがわかる。また、銅に比べステンレス鋼は熱伝導が悪いため、プラズマ容器や天板に付着する Cs が少なくなるため、Cs 添加時間及び添加量が減少したと考えられる。

Table 2. The Cesiation sequences examined in the J-PARC RF-drive H⁻ ion source operation.

	total cesiation time	the Cs reservoir temperature
IS using the plasma chamber made of OFC	238minute	240°C
IS using the plasma chamber made of stainless steel	158minute	200°C

4. まとめ

本論文では、SUS 製プラズマ生成室イオン源の構成を示し、OFC 製プラズマ生成室イオン源とのビーム強度、Cs 添加時間及び添加量についての比較を報告した。

両イオン源がほぼ同じ運転条件の時、OFC 製プラズマ生成室イオン源のビーム電流約 68mA に対し、SUS 製プラズマ生成室イオン源は約 59.3mA となり J-PARC 第 2 ステージ目標であるビーム電流 66mA には達成していないが、ビーム電流の変動幅が小さくなった。

SUS 製プラズマ生成室イオン源での Cs 添加時間及び添加量は OFC 製プラズマ生成室イオン源に比べ減少傾向となった。

今後は実機として J-PARC にインストールできるように、SUS 製プラズマ生成室イオン源での第 2 ステージ目標達成に向け、開発を進めていく。

参考文献

- [1] H.Oguri, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 010401 (2009).
- [2] H.Oguri, et al., Rev. Sci. Instrum., 81, 02A715 (2010).
- [3] A.Ueno, et al., Rev. Sci. Instrum., 81, 02A720 (2010)
- [4] S. Yamazaki et. al., Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (in Japanese) p29 (2012).
- [5] A. Ueno et. al., AIP Conference Proceedings 1515, 331-340 (2013)
- [6] A. Ueno et. al., AIP Conference Proceedings 1515, 409-416 (2013)
- [7] A. Ueno et. al., AIP Conference Proceedings 1515, 417-424 (2013)
- [8] S. Yamazaki et. al., AIP Conference Proceedings 1515, 433-439 (2013)
- [9] K. Halbach et al., Part. Accel. 7, 213, (1976).