

J-PARC イオン源長時間運転後の RF アンテナ寿命評価

EVALUATION OF RF ANTENNA LIFETIME AFTER LONG-TERM OPERATION OF J-PARC ION SOURCE

柴田崇統^{#, A)}, 石田正紀^{A)}, 南茂今朝雄^{A)}, 池上清^{A)}, 大越清紀^{B)}, 神藤勝啓^{B)}, 小栗英知^{B)}
Takanori Shibata^{#, A)}, Masaki Ishida^{A)}, Kesao Nanmo^{A)}, Kiyoshi Ikegami^{A)}, Kiyonori Ohkoshi^{B)}, Katsuhiro Shinto^{B)},
Hidetomo Oguri^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

Continuous operation duration of the J-PARC Radio Frequency (RF) ion source has been extended step by step these years for the goal to supply stable beam during the entire period of J-PARC user operation each year. A 3651 hours (5 months) continuous ion source operation has been achieved from Nov. 2020 to Apr. 2021. As the lifetime of the ion source is mainly limited by failure on the RF antenna coil, detailed evaluation of the antenna surface condition is required to ensure the feasibility of the further extension of the operation time. In the present study, dimension measurements and SEM/EDS analyses were applied to understand the surface discoloration of the RF antenna. The discoloration after the long-term continuous operation is due to deposition of injected cesium (for H⁻ surface production process) and of stainless used steel (Fe, Cr, Ni) from the ion source components sputtered by plasma. The results show that the enamel coating of the RF antenna has not worn out in the long-term continuous operation for several months and, hence, extension of the ion source continuous operation duration can be extended.

1. J-PARC 高周波放電型イオン源の概要

J-PARC リニアックでは現在、400MeV の大強度負水素イオン(H⁻)ビームを生成し、後段の3GeVシンクロトロンに供給している。イオン源は、メンテナンス日も含めた上記期間の大半で、24 時間休みなくH⁻イオンを内部で生成しビームとして出力する。数か月間にわたるイオン源連続運転は、2014 年に導入された高周波放電型(RF)イオン源によって実現される。RF イオン源は、プラズマチャンバ内部に格納したアンテナコイルに RF 周波数 2MHz の高周波電力を印加することで、誘導結合型プラズマを生成する。アンテナコイルは、米国オークリッジ国立研究所 SNS で製作されたものを使用している [1]。生成したプラズマは、チャンバ周囲に取り付けられたカスプ磁石によって閉じ込められる。さらに、Fig. 1 のチャンバを横切る方向に配置されたロッドフィルター磁石(RFM)は、プラズマ生成部からビーム引出孔周辺に流入する電子の温度・密度を低減させる。ビーム引出孔周辺では、Cs 蒸着したプラズマ電極(PE)にプラズマ中の水素原子および正イオンが流入することで、H⁻イオンが表面生成される。RFM による低電子温度・密度領域[2]は、生成したH⁻イオンの Electron Stripping(H⁻ + e⁻ → H + 2e⁻)による衝突周波数を比較的に低減し、十分な量のH⁻イオンを確保するために重要である。PE と後段の引出し電極(EЕ)および接地電極(GE)の間には、10 kV オーダーの静電圧が印加され、電子およびH⁻がビームとして引き出される。EE 電極には電子抑制磁石を取り付け、加速された電子の大部分が電極に流入するようにすることで、H⁻イオンのみが GE からビームとして出力される。

近年の J-PARC 利用運転では、数か月に一度、イオン

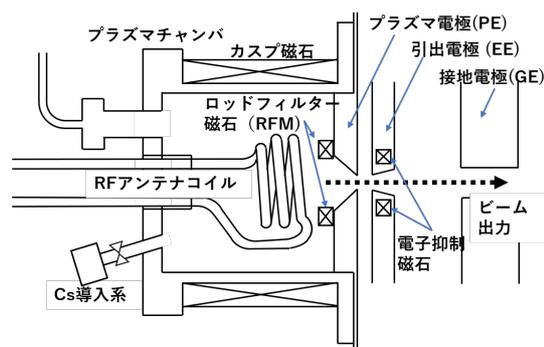


Figure 1: Schematic drawing of the J-PARC ion source.

源の交換を実施する。イオン源交換時には、半日の交換作業だけでなく、PE への Cs 蒸着、コンディショニング運転、また各電極間の放電頻度低減など安定したビーム運転に達するまで数日を要する。特に、交換したイオン源チャンバや電極上に残存する水分・酸素等の排気は、ポンプによる排気能力だけでなく、プラズマ点灯によるチャンバ温度上昇や真空放電による表面付着物のスパッタリングが影響するため、安定化までの時間を制御することは容易ではない。このような交換時のイオン源によるビーム不安定性を回避するため、2014 年の RF イオン源運転開始以降、連続運転期間の延伸が J-PARC イオン源の課題として進められてきた[3]。当初は 1.5 ヶ月の運転期間から開始し、2019 年の RUN#84 では 2445 時間[4]、2020 - 2021 年の RUN#86 では 3651 時間[5]、また 2022 年 1 月から 7 月までの RUN#89 では 4001 時間(約 5.5 ヶ月)の連続運転期間を達成した。イオン源連続運転時間をさらに延伸することで、年間を通し安定なビーム供給が期待できる。本報告では、長期間連続運

[#] takanori.shibata@kek.jp

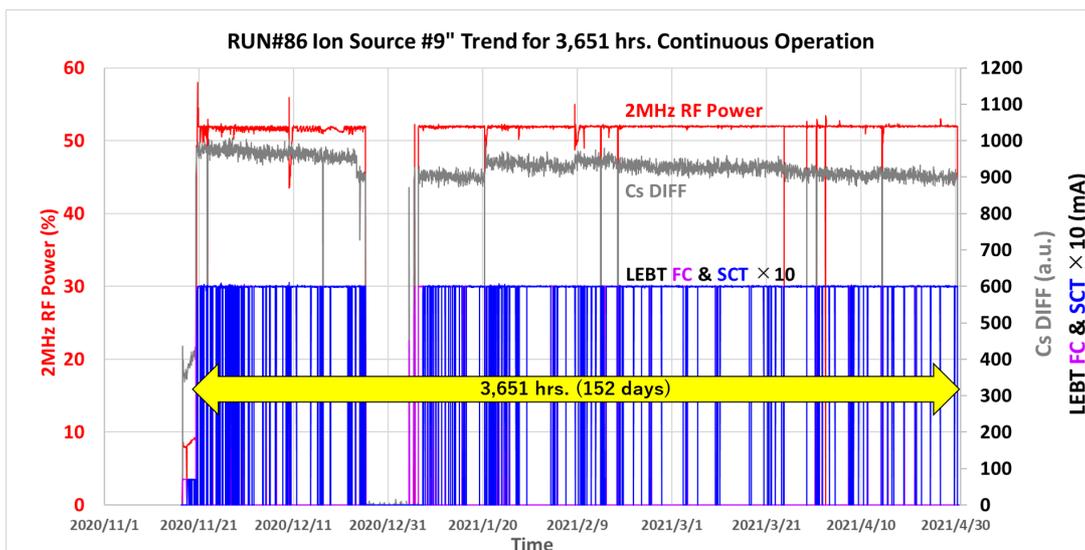


Figure 2: Trend of the ion source operation parameters in the latest long-run (RUN#86) J-PARC user operation. The 2 MHz RF power is given in the availability of the amplifier. The value is around 52 %, which corresponds to the RF power up to 27 W. The Cs (cesium) DIFF is the line intensity of the Cs⁺ emission (852 nm) difference from the base intensity in arbitrary units. The beam current measured by Faraday Cup (FC) or Slow Current Transformer (SCT) are at the same position of the LEBT located after the ion source.

転後の J-PARC イオン源性能調査の一環として、イオン源主要機器であるアンテナコイルの表面状態を調査することで、連続運転期間延伸の実現可能性を議論する。

2. 長期間連続運転後のアンテナコイル状態

Figure 2 には、2020 年 11 月から 2021 年 4 月末までの RUN#86 運転における J-PARC イオン源運転パラメータおよびビーム電流値のトレンドを示す。近年の利用運転では、イオン源後段の低エネルギービーム輸送系 (LEBT) に設置した電流変換機 (SCT) またはファラデーカップ (FC) にて、ピーク電流 60 ± 0.3 mA の H⁻イオンビームを出力する[6]ために、RF イオン源には約 27 kW

の 2 MHz RF 電力 (Fig. 2 におけるアンプ出力 52 % に相当) を、繰返し周波数 25 Hz・パルス幅 800 μ s で投入した。

運転期間中、イオン源に依るものでない 0.5 - 2 時間の短時間ビーム停止事象 (地震発生など) はあったものの、1 台のイオン源を使用してトラブルなく 3651 時間 (約 5 ヶ月) の連続運転が達成された。図中の Cs⁺ 発光線 (852 nm) のトレンドは、全体的に減少傾向にあるが、これは分光計測ポートへの Cs や他のスパッタされた成分付着による透過率低下が原因であり、期間中プラズマおよびビームパラメータに大きな変化は無かったことから、イオン源機器異常ではない。

連続運転を延伸する上での主な課題は、RF アンテナコイルの破損によるパワー投入不可である。アンテナコイルは、RF 電力を印加する銅配管をプラズマから電氣的に絶縁するために、珪瑯釉薬によるコーティングを施されている。運転中、プラズマスパッタにより珪瑯の厚みが薄くなったり、クラックやピンホールの発生・拡大が生じたりすると、銅配管が露出して絶縁が取れず RF パワーが投入できなくなるため、イオン源交換を余儀なくされる。ここ数年では、SNS から輸入したアンテナコイルの珪瑯を J-PARC で再調査し、クラック・ピンホールの有無や珪瑯厚みの均一性に対して独自のグレード付けを行い、最もグレードが高いものを利用運転に使用することで、長期連続運転に対応している。

長期連続運転後のアンテナコイルの目視確認・寸法測定を実施した。Figure 3 に (a) 新品および (b) RUN#86 運転後の RF アンテナコイルの写真を示す。新品のアンテナコイルには、珪瑯釉薬の白・灰色のみが確認された。一方、RUN#86 連続運転後のアンテナコイルには黒く変色した箇所が多々見られ、特にコイルのターン部内側を中心に変色が見られた。ピンホールやクラックは確認されず、珪瑯全体の絶縁も保持された状態であることを確認した。RUN#86 運転後に実施したアンテナコイル各部



Figure 3: Photos of the RF antenna coils (a) brand new and (b) used in the long-term operation (RUN#86).

の寸法測定では、コイル直径の平均値が、運転前に 5.92 ± 0.15 mm であったのに対し、運転後は 5.94 ± 0.14 mm であった。アンテナコーティングの損耗はほとんど無いことは確認できたが、アンテナ表面の黒い変色部が将来的な珪瑯釉薬の損耗・絶縁性低下を引き起こし得るかを SEM/EDS 測定から調査した。

3. SEM 撮影および元素マッピング

運転後のアンテナコイル表面状態をより詳細に調べるため、Fig. 3(b)に示した RUN#86(5ヶ月)運転後の黒い変色部と、非変色部(および新品コイル)から珪瑯コーティングの断片を剥がし、それぞれに対して SEM/EDS 測定を実施した。SEM 撮影は卓上型電子顕微鏡(日立ハイテック製 Miniscope TM3000)を使用して行い、この結果に TM3000 用エネルギー分散型 X 線分析装置(Bruker 社製 Quantax70)を使用し、SEM 画像、元素マッピング画像、特性 X 線スペクトルおよび半定量値を取得した。これらの測定は、KEK 環境安全管理室の協力のもとで実施した。

Figure 4 には、SEM で撮影した変色部の断片(左)および非変色部の断片(右)を示す。長期連続運転で使用した RF アンテナ非変色部断片と新品の RF アンテナ断片は、同様のデータが取得されたため、本報告ではこの 2 片は同じ珪瑯の表面状態であるとして、変色部断片との比較・議論を進める。

Figure 5 には Fig. 4 の各断片に対応する元素マッピングの結果を示す。非変色部断片から測定された主な元素は、珪瑯釉薬成分である O, Na, Al, Si, K, Ti, Zr および試料固定用カーボンテープによる C であった。変色部断片からは、上記以外に Fe および Cs が検出された。変

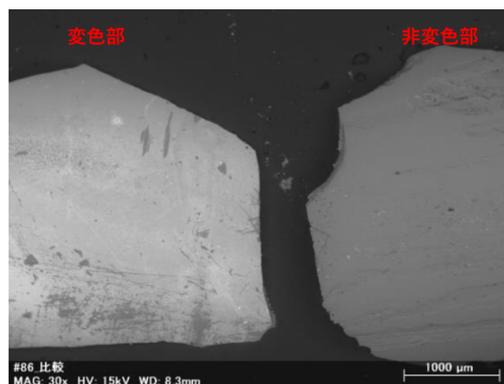


Figure 4: SEM photos of discoloration (left) and non-discoloration (right) fragments on the RF antenna used in RUN#86 operation.

色部のみで珪瑯釉薬の成分以外が見られたことから、長期間のイオン源連続運転によって、釉薬自身が変わったのではなく、外部付着物があったと判断できる。特に、J-PARC イオン源アンテナで使用する珪瑯釉薬には、酸化ケイ素 (SiO_2) の他に銅配管と珪瑯の密着性を高めるため Na_2O の割合が高く混合されており、変色部では Fe や Cs が表面を覆うことで、上記 Si, O, Na に対する EDS 信号が低下している。

Cs のアンテナへの付着については、イオン源内部で H⁻イオン生成効率向上のために Cs 蒸気を導入していることに由来する。一方、Fe の要因を明らかにするため、特性 X 線スペクトルおよび半定量解析結果について次節で説明する。

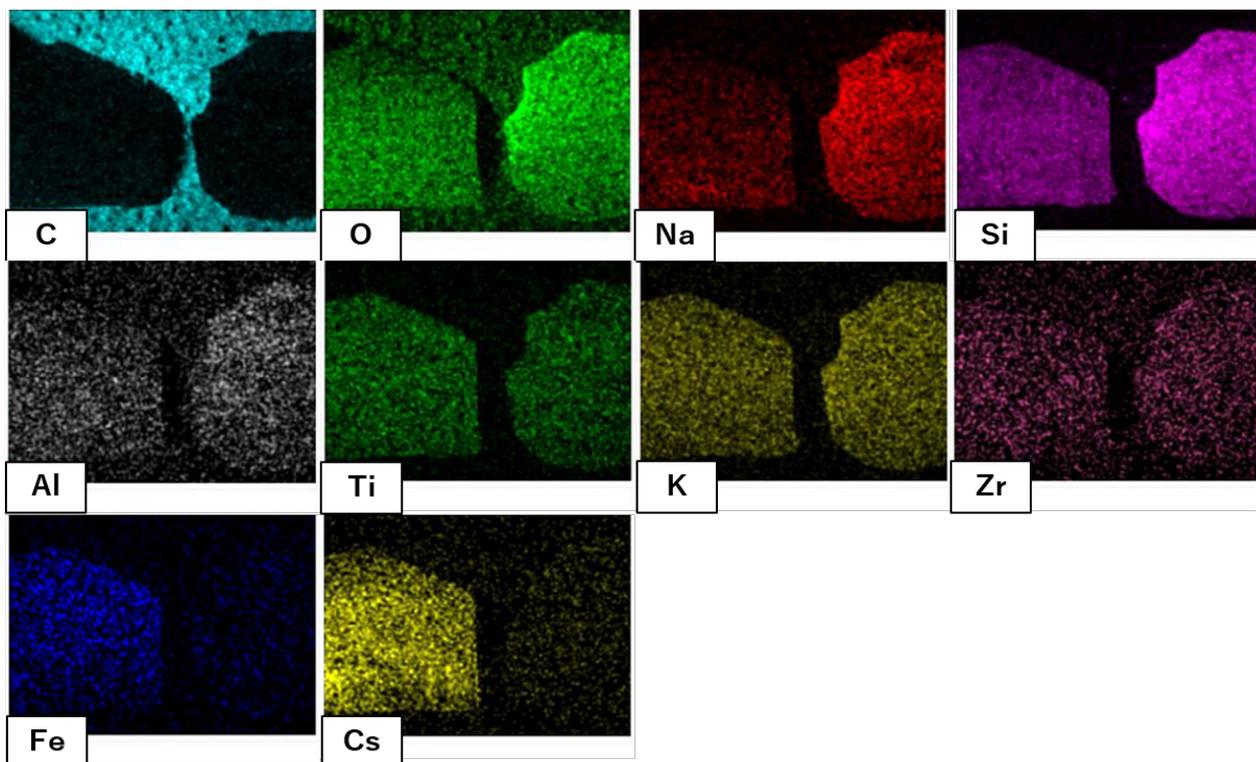


Figure 5: Material mapping of the discoloration (left) and the non-discoloration (right) antenna fragments in Fig. 4.

4. 特性 X 線スペクトルおよび半定量解析

Figure 6 には、アンテナコイルの(a)新品、(b)RUN#86 非変色部、(c)RUN#84 非変色部、(d)RUN#86 変色部、および(e)RUN#84 変色部の断片について、EDS 測定から得られた特性 X 線スペクトルを示す。Fig. 5(a) – (c)では X 線測定を行う分析装置の積算時間を 100 秒としている一方、(d)および(e)の変色部の測定では、微小な輝線を測定するため、積算時間を 200 秒としている。新品のアンテナコイル断片および長期連続運転で使ったアンテナコイルの非変色断片(a) – (c)については、スペクトル波形に見られる輝線の種類に差異は見られ無い。このことから、連続運転後も非変色である部分は、新品のアンテナコイルと同様の表面状態が実現していることが判る。一方、RUN#86 および RUN#84 運転後の変色部 (d), (e)では、Fe と Cs に加え、Cr および Ni の輝線が確認された。RUN#86 と RUN#84 は、イオン源連続運転を 5 ヶ月と 3.5 ヶ月実施した後のアンテナコイルであるが、その両者のスペクトルに大きな違いは見られない。数か月スパンの運転時間の違いでは、アンテナコイルの表面状態に著しい差異は確認されなかった。Cs については、前述の通り、イオン源内部に蒸気として導入したものが根拠と見られる。J-PARC イオン源では、プラズマチャンバ材に Fe, Cr, Ni を主成分とするステンレス(SUS)材を使用している。長期間にわたるイオン源プラズマ点灯により、これらの成分がスパッタリングされてアンテナコイルに再蒸着した可能性がある。

Table 1: Semi-quantitative Analysis Results for the Characteristic X-Ray Spectrums by EDS Measurements for the Discoloration Fragments of the RF Antenna Used in RUN#86 and RUN#84 (Fig.6(d) and (e))

	RUN#86 [norm. wt.%]	RUN#84 [norm. wt.%]
Oxygen	40.65	41.36
Silicon	20.10	14.99
Carbon	9.82	11.94
Titanium	7.65	5.64
Sodium	6.38	4.59
Potassium	5.76	4.06
Cesium	3.56	9.63
Aluminum	1.88	1.31
Iron	1.78	3.82
Zirconium	1.48	0.92
Chromium	0.38	1.11
Nickel	0.34	0.47
Magnesium	0.22	0.17
ALL	100.00	100.00

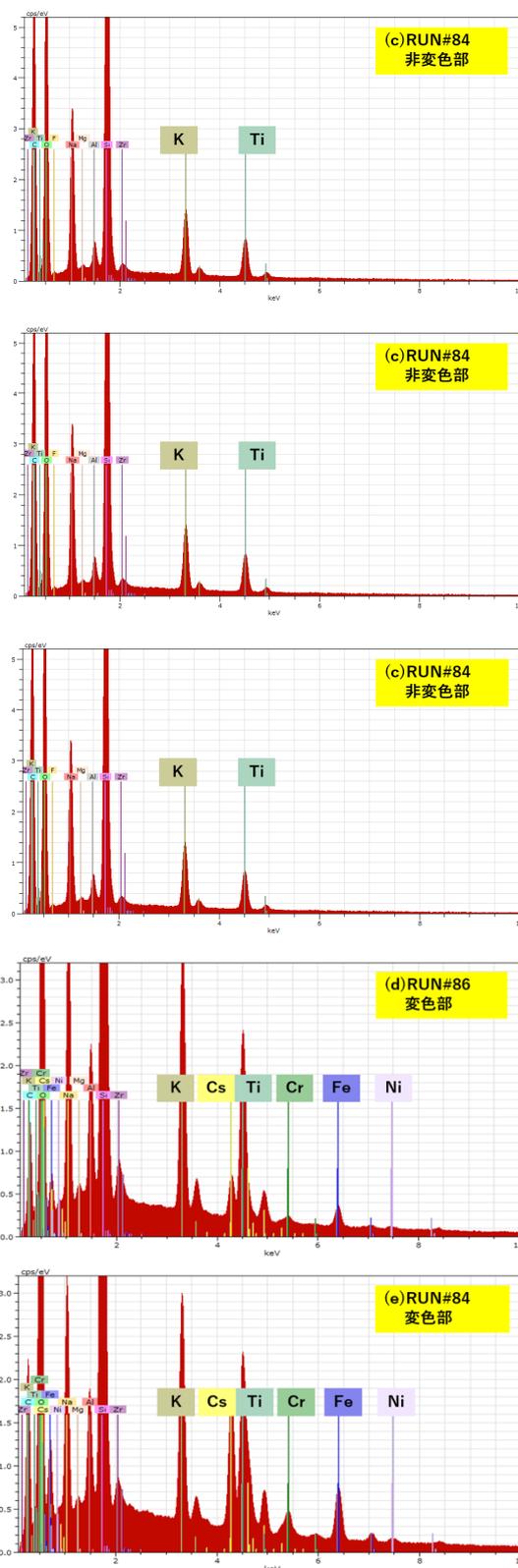


Figure 6: Characteristic X-ray spectrum obtained by SEM/EDS measurements for (a) brand new antenna fragment and (b) RUN#86 non-discoloration, (c) RUN#84 non-discoloration, (d) RUN#86 discoloration and (e) RUN#84 discoloration antenna fragments.

Table 1 には、RUN#86 および RUN#84 で使用したアンテナの変色部断片に対する各元素の半定量解析結果を示した。Fe, Cr, Ni のみに注目すると、Fe が 7 割近くを占め、SUS に含まれる同元素の割合と近い。実際にはスパッタされた金属元素が全く同じ割合でアンテナ表面に付着するわけではないが、上記の一致から、イオン源機器で使用しているステンレス鋼のスパッタおよび再蒸着がアンテナコイル変色の原因であると考えられる。半定量値についても、RUN#86 と RUN#84 の数か月程度の運転期間の違いで大きな差異が見られないことから、同程度の運転期間の延伸によるアンテナコイル表面への影響が小さいことが期待できる。

5. スパッタリングされた SUS 成分の発生源

J-PARC イオン源では、プラズマチャンバおよび RFM を格納するケースに SUS 材を使用しているため、アンテナコイル表面付着物の SUS 成分発生源はこのいずれかである。Figure 7 は、運転後のイオン源を分解し、プラズマチャンバと RFM ケースのみ残したものを、PE 側から撮影した写真である。RF アンテナコイルは、写真の RFM ケースより奥に取り付けられ、その周囲でプラズマが生成される。イオンビームは図中の矢印方向に出力される。RFM ケースの側面(図中点線で囲われた部分)、特にプラズマ生成部に近い領域では SUS 材が変色した痕跡が見られた。イオン源の運転では、写真の上下方向に磁場が形成されるように RFM が配置される。この磁場強度は中心軸上で 400 Gauss、RFM ケース付近では 2 kGauss を超えるため、誘導結合型プラズマ中の各種イオンや電子は磁力線に捕捉されて RFM ケースの側面に衝突する。これにより、プラズマ生成部付近で高熱負荷とそれに起因するスパッタリングが生じたと考えられる。さらに、スパッタされた Fe などのイオンは、磁力線に沿ってプラズマ中心部へと戻ること、アンテナコイル表面付近に輸送される。Figure 3(b)に示した連続運転後のイオン源アンテナコイルにおいて、RFM に比較的近いターン部で黒く変色した領域が多く見られたのは、上記アンテナコイル表面付着物が RFM ケースのスパッタリングに由来することと一貫する。

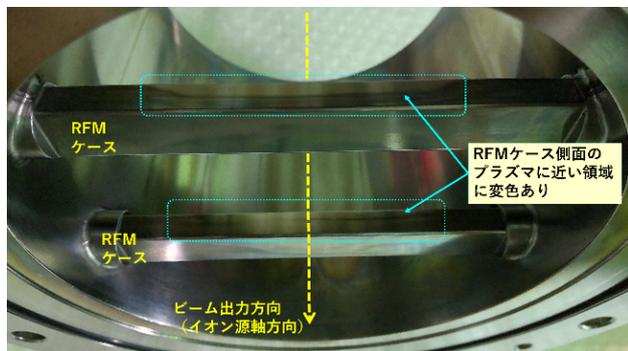


Figure 7: Photo of RFM cases taken from the PE side after the RF ion source operation.

6. まとめ

イオン源交換作業に伴う J-PARC 利用運転期間中数日間のビーム不安定化を解消するため、J-PARC イオン源では 1 台のイオン源における連続運転期間を徐々に延伸しており、2019 - 2022 の間に 3.5 - 5.5 ヶ月の長期連続運転を達成した。本報告では、運転後の J-PARC RF イオン源に対するアンテナコイルの表面状態調査を実施した。

長期間連続運転後のアンテナコイルに対する目視確認および寸法測定から、アンテナ表面には黒い変色部が随所に見られたものの、コイル径の減少は確認されなかった。また、変色部および非変色部に対する SEM/EDS 測定から、アンテナコイル変色の原因は、イオン源で H⁻イオンの生成効率を向上させるために導入する Cs、およびプラズマスパッタされたイオン源機器を構成する SUS 材(Fe, Cr, Ni 等)の表面付着物であることが判った。イオン源長期連続運転により、アンテナコイルの珪瑯釉薬自体が損耗しているのではなく、Cs やスパッタされた金属が付着する。上記結果から、5 か月連続運転後のアンテナコイルで絶縁性能は維持されており、イオン源連続運転期間のさらなる延伸が期待できる。

運転後のイオン源内部観察から、アンテナ付着物は H⁻イオン生成のための RFM を格納する SUS ケースへのプラズマスパッタによって生じている可能性が高い結果が得られた。そのため、現在より長いスパンのイオン源の連続運転を実施すると、アンテナコイルへの SUS 付着が進行し、いずれは珪瑯釉薬全体が金属付着物に覆われる状況が考えられる。このような場合にアンテナコイルを介して RF 電力を供給しようとする渦電流が発生し、それに伴う過度な熱負荷によって、結果として珪瑯が損耗して failure モードが引き起こされる可能性がある。このような観点から、数年スパンで稼働できるような、より安定性の高いイオン源開発のためには、RFM ケースのプラズマスパッタ対策(例えば、耐プラズマスパッタ金属材料による RFM ケースのコーティングなど)が課題の一つであると言える。

参考文献

- [1] M. P. Stockli *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **81**, 02A729 (2010).
- [2] A. J. T. Holmes, Rev. Sci. Instrum. **53**, 1523 (1982).
- [3] K. Ohkoshi *et al.*, "J-PARC イオン源の現状", Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016.
- [4] H. Oguri *et al.*, JPS Conf. Proc. **33**, 011008 (2021).
- [5] T. Shibata *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **2244**, 012041 (2022).
- [6] T. Shibata *et al.*, JPS Conf. Proc. **33**, 011010 (2021).