

J-PARC RCS 荷電変換フォイルの温度計測にむけた開発

DEVELOPMENT FOR TEMPERATURE MEASUREMENT OF THE STRIPPER FOIL IN J-PARC RCS

吉本政弘^{#,A)}, 山田逸平^{A)}, 仲野谷孝充^{A)}, サハ プラナブ^{A)},
島山衆一郎^{A)}, 佐伯理生二^{A)}, 倉持勝也^{B)}, 大津聡^{C)}

Masahiro Yoshimoto^{#,A)}, Ippei Yamada^{A)}, Takamitsu Nakanoya^{A)}, Pranab Saha^{A)},
Shuichiro Hatakeyama^{A)}, Riuji Saeki^{A)}, Masaya Kuramochi^{B)}, Satoru Ohtsu^{C)}

A) Japan Atomic Energy Agency / J-PARC

B) San-nano technologies

C) Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

Abstract

The J-PARC 3-GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) adopts a charge-exchange multi-turn beam injection method with stripper foils to achieve high-intensity proton beams. Through the user operation at the RCS design output of 1 MW, it is successfully demonstrated that the stripper foils have the lifetime to sustain operational use. Meanwhile, at the J-PARC, efforts are underway to achieve even higher beam intensity, and we investigate the feasibility of a 1.5 MW beam output from the RCS and the potential for a 2.0 MW output. The primary challenge in advancing high-intensity operation for the stripper foils is the temperature rise accompanying increased irradiation beam intensity and the resulting shortened lifetime. Particularly when the maximum temperature reaches the sublimation point, a rapid decrease in foil thickness is anticipated. Therefore, we performed computational analysis using the ANSYS code to investigate the temperature rise of the foil due to higher-power beam irradiation. Additionally, we are setting up the test bench to heat the foil through electron beam irradiation, thereby achieving a foil temperature measurement system.

1. はじめに

J-PARC 3 GeV シンクロトロン(RCS)は、設計出力 1 MW の大強度ビームを実現するために、炭素フォイルを用いた荷電変換ビーム多重入射方式を採用している[1]。2015年に1ショットでの1 MW 相当のビーム粒子の取り出しに成功し[2]、ビームの精密調整や機器の高度化など多くの努力を経て2024年4月に1 MWでの連続利用運転を達成した[3]。同時に、大強度ビーム実現のための基盤技術である荷電変換フォイルも1 MW相当の利用運転でも安定して使用できることを実証した。

一方で、J-PARCにおいては、主リングシンクロトロン(MR)における繰り返し周期の短縮化によるビーム強度増強[4]や、物質生命科学実験施設(MLF)における次期計画[5]としての第二ターゲットステーション増設などの検討が進められている。これらに対応するためにRCSにおいても1 MWを超えるビーム出力が要求されている。

大強度化を進める際の荷電変換フォイルの課題は、照射ビーム量の増加に伴う温度上昇とそれに伴う短寿命化である。そこで、ビーム強度増強によるフォイルの温度上昇についてANSYSコードを用いた解析計算を行った。またフォイル温度計測システムの構築に向けて、電子ビームを用いたフォイル加熱装置の開発を進めている。

2. 荷電変換フォイルにおける熱的影響

2.1 ビーム照射によるフォイル加熱

ビーム照射によってフォイルが破損する要因は主に原

子衝突による直接作用と熱的影響による間接作用に大別される。ここでは主に熱的影響について着目する。

フォイルにビームが照射されると、イオン化や電子励起等によりビームのエネルギーが損失し、その結果フォイルが加熱される。その際にフォイルの内部では加熱温度によって次の3つの事象が引き起こされる。

- ① 吸着分子の昇温脱離
- ② 真空中での熱分解ガス化
- ③ 真空中での昇華

Figure 1はこれら3つの事象を模式的に表したものである。

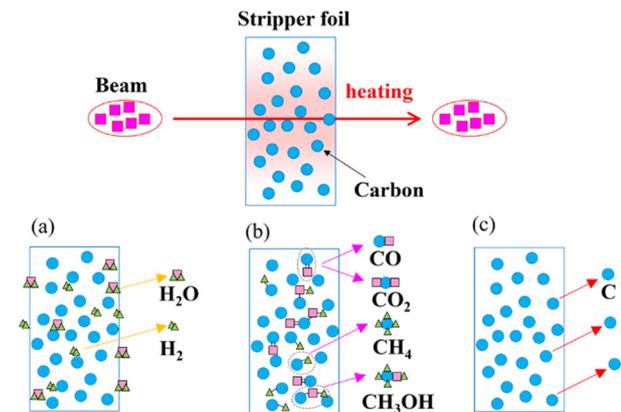


Figure 1: Thermal effects imparted to the foil by beam irradiation. (a) Thermal desorption. (b) Pyrolysis gasification. (c) Sublimation.

J-PARCで使用している荷電変換フォイルはアーク蒸着法によって製膜している[6]。炭素系電極(ホウ素添加

[#] yoshimoto.masahiro@jaea.go.jp

炭素電極もしくは純炭素電極)間で発生させたアーク放電によりアノード及びカソード電極から放出される炭素クラスターをガラス基板に蒸着させる。その後、水を介してガラス基板から剥離させ、独立フォイルとして回収している。このような製膜・調製を経ているため、荷電変換フォイルの表面には水や空気等の吸着分子が多く存在しており、また内部にも炭素原子だけでなく水素原子や酸素原子が水酸基等の形で結合されている。

フォイルが加熱されると、まずは①のように表面に吸着している分子の脱離が始まる。この事象はフォイルの膜厚には変化がなく荷電変換入射に大きく影響しないが、周辺の真空圧力の上昇により、ビーム散乱によるビーム損失として影響を及ぼす。RCS においては、新しいフォイルを使用する際には、焼き出し運転と称して、300 kW 程度の低強度ビームからスタートし、真空圧力とビームロスを見ながら6時間程度時間をかけて徐々にビーム強度を上げ、表面からの脱離ガスがほとんどなくなってから大強度ビームによる利用運転を開始している。

フォイルの加熱温度がさらに高くなると、②のように内部の水素原子や酸素原子が炭素原子を伴って二酸化炭素やメタンなどのガス分子に分解して出ていく。この事象は、フォイルを構成する炭素原子の減損を伴うので、膜厚が徐々に薄くなると同時に荷電変換効率が低下するため、フォイルの寿命を決める要因の一つとなる。これまでラザフォード後方散乱分光法 (RBS) や反跳検出分析法 (ERDA) 等を用いて荷電変換フォイルの組成分析等を実施しており、酸素原子や水素原子の含有量がかなり多いことが分かっている[7]。つまり、昇温脱離はすぐに枯れる事象であったが、熱分解ガス化は長期間に亘り継続する事象になると考えられる。実際に、原子衝突等の直接作用によるフォイルの変形が落ち着いた後でも、熱分解ガス化と考えられる膜厚減少と荷電変換効率の低下が継続し続けることが確認されている[8]。

フォイルの温度が昇華温度を超えて高くなると、③のようにフォイルから炭素原子が直接放出される。ここに至ると、膜厚が急激に減少し、荷電変換フォイルとしての役割を果たすことができない。つまり、昇華温度を超えるようなビーム強度がフォイルを用いた荷電変換多重入射方式の限界点となる。

2.2 赤外線加熱装置による昇温試験

荷電変換フォイルの熱分解ガス化について調べるために、Fig. 2 に示すような赤外線フォイル加熱装置を用いた昇温脱離試験を実施した。試験装置はフォイルサンプルの導入室と昇温脱離測定を行う測定室に分かれている。フォイルの加熱にはサーモ理工製のラピッドアニール赤外線導入加熱システムGV2を組み込んでいる[9]。

Figure 3 に昇温温度と真空圧力のトレンドを示す。昇温温度は 500 °C、800 °C、1100 °C の3段階とし、それぞれ5分間で段階的に昇温し、2時間一定温度に維持した。500 °C 及び 800 °C の場合は時間とともに圧力は低下しており、一般的なベーキング処理と同様の様相を示した。つまり、表面に吸着した分子が吸着エネルギーに対応する昇温温度に応じて脱離していると考えられる。一方で、1100 °C の場合は圧力はほぼ一定値を維持している。炭素の昇華温度にはまだ到達していないため、この恒常的なガス放出は熱分解ガス化が原因と考えられる。

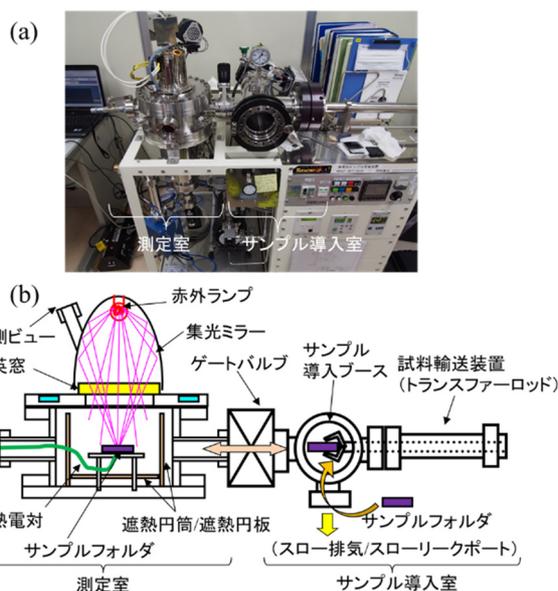


Figure 2: Infrared Foil Heating Device. (a) Device Appearance. (b) Schematic of Measurement Principle.

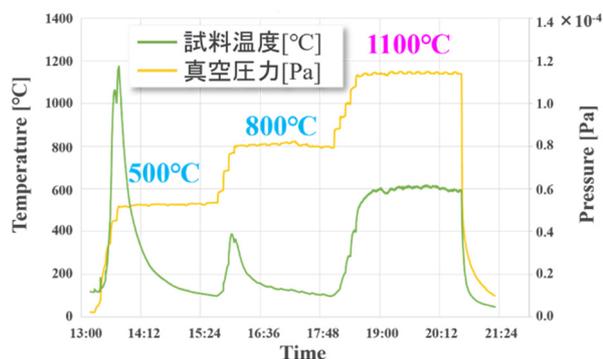


Figure 3: Trend of heating temperature and vacuum pressure in thermal desorption.

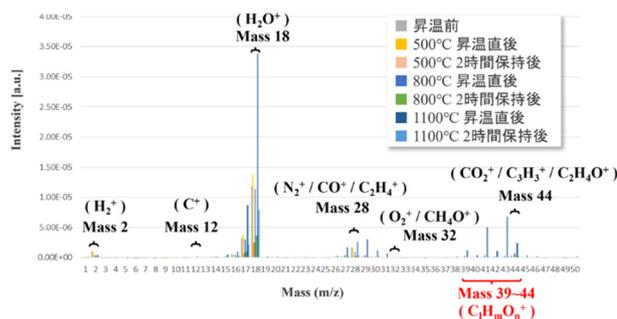


Figure 4: Mass spectra of Q-mass obtained during thermal desorption.

Figure 4 は、昇温前、500 °C・800 °C・1100 °C の各温度設定における昇温直後と2時間保持後のタイミングにおける、Q マスで測定したマスペクトルを新たに示している。最も高い値を示しているのは Mass18 の H₂O⁺ であるが、ここで着目したいのは Mass28 と Mass32 で、一般には N₂⁺、O₂⁺ と考えることが多いが、ここでは熱分解ガス化を考慮

すると CO^+ , C_2H_4^+ や CH_4O^+ などの候補が高い。また、Mass39 から 44 までも多くみられており、これらは $\text{C}_l\text{H}_m\text{O}_n^+$ 系の分子と考えられ、やはり熱分解ガス化によるものと考えられる。一方で、炭素単体である Mass12 はほとんど見られないことから、炭素の昇華反応はほとんど発生していないと思われる。最後に、代表的な Mass 番号と候補となるイオン種を Table 1 にまとめる。

Table 1: List of Candidate Molecular Ions

m/z	Molecule ion	m/z	Molecule ion
2	H_2^+	39	C_3H_3^+
12	C^+	40	C_3H_4^+ , C_2HO^+
18	H_2O^+	41	C_3H_5^+ , $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}^+$
28	N_2^+ , CO^+ , C_2H_4^+	42	C_3H_6^+ , $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}^+$
32	O_2^+ , CH_4O^+	43	C_3H_7^+ , $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}^+$
		44	CO_2^+ , C_3H_8^+ , $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}^+$

2.3 真空中にける炭素フォイルの昇華温度

炭素の昇華温度は大気圧では 3642 °C と非常に高いことが知られている。しかし、一般には低圧領域では物質の昇華点は低くなることが知られている。ポーランド西ポメラニア大学の Jaworski は炭素の気相とグラファイト相との境界は圧力値 10^{-10} bar 付近だと 1400 °C 付近になると示している[10]。また、ウィーン工科大学応用物理学研究所のホームページにはデータベースから蒸気圧の計算ツールがある[11]。このツールを利用すると 1×10^{-5} Pa の超高真空時における昇華温度は 1740 °C であると示された。これは大気圧の時と比べてかなり低く、またこれまでビーム照射による温度上昇を 2000 °C 以下にしたいという漠然とした閾値と比べても低い値であることが分かった。そこで、RCS の大強度化に向けて改めてビーム照射によるフォイルの昇華シミュレーションを実施し、到達最高温度の評価を行う。

3. ビーム照射によるフォイルの昇温シミュレーション

3.1 解析モデル

RCS でのビーム照射による荷電変換フォイルの温度上昇のシミュレーションは計算コード ANSYS を用いて行ってきた[12]。アーク蒸着法で製膜している荷電変換フォイルはアモルファス状の無定形構造となっており、正確な物性値は明らかになっていない。そこで、計算に必要な物性値はグラファイトを想定し、密度は 2.25 g/cm^3 とした。一方で輻射率は $0.7 \sim 0.9$ 程度と想定されるため、 0.5 と 1.0 の 2 種類で計算し、その範囲に納まっているとして評価した。また、フォイルの膜厚は $1.5 \mu\text{m}$ とし、計算上のメッシュサイズは $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ とした。

シミュレーションで用いた運転条件は現行の行先 MLF・1 MW ビームと行先 MR・0.8 MW ビームの同時運転と、将来計画の行先 MLF・1.5 MW ビームの単独運転の 2 つ。荷電変換フォイルにはリニアックから入射されるビームと入射期間中に RCS で周回するビームの両方が照射される。さらに行先に合わせてペイント条件が異な

っており、入射過程をすべてシミュレーションするのは極めて困難である。そこで、別途多粒子ビームトラッキングシミュレーションによって入射期間中のフォイルに照射されるビーム分布を計算しておき、入射期間(リニアックから入射されるマクロビーム幅)中に一様に照射されると仮定して入熱条件を設定する。

3.2 MLF (1 MW) + MR (0.8 MW) の同時運転

まずは現行の運転条件での昇温シミュレーションを実施した。Figure 5 に解析条件をまとめた。フォイル幅は初期設計時の 20 mm とした。加速器運転サイクルは 2.48 秒で、そのうち 58 ショットが MLF に 4 ショットが MR に供給される。行先に応じたビーム条件は Table 2 の通り。またこの時のフォイルに入射されるビーム分布を計算した結果を Fig. 6 にまとめる。

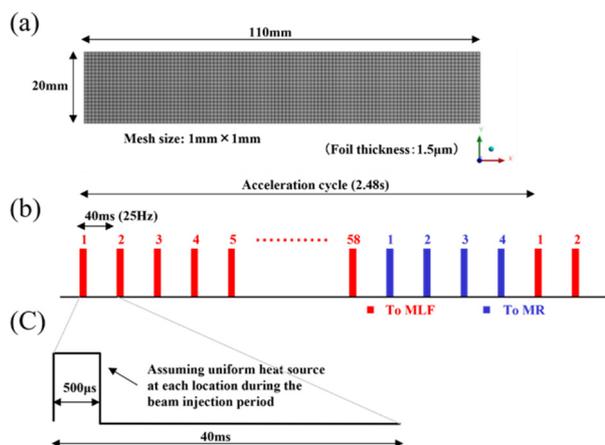


Figure 5: Analytical model for simultaneous operation of MLF (1 MW) and MR (0.8 MW). (a) Foil size, (b) Beam operation cycle, (c) Heat input conditions.

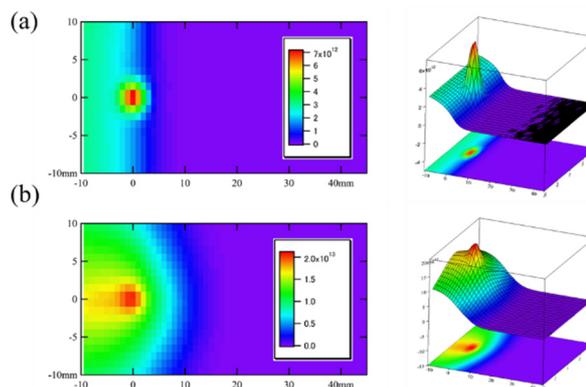


Figure 6: Beam distribution incident on the foil. (a) MLF (1 MW), (b) MR (0.8 MW).

Table 2: Current Beam Operation Condition

Beam destination	Peak current	Macro width	Chop width	Paint condition
MLF	50 mA	500 μs	456 ns	200 π - Anti.
MR	50 mA	500 μs	440 ns	50 π - Corr.

7.44 秒間(加速器運転サイクル 3 周期分)の解析計算を実施した。フォイル上の最高温度の時間発展を Fig. 7 に示す。行先に応じた最高温度は運転サイクル毎にほぼ再現しており、MLF 行の場合で輻射率 0.5 と仮定した場合で 630 °C、1.0 と仮定した場合で 532 °Cとなる。

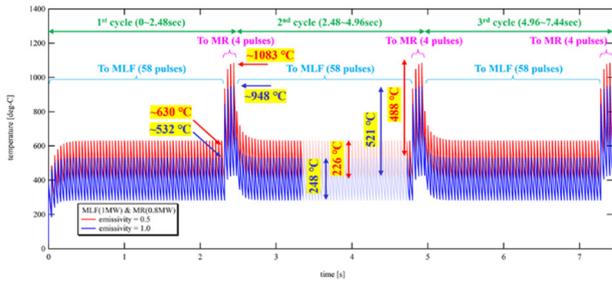


Figure 7: Trend of the maximum thermal point on the foil for simultaneous operation of MLF (1 MW) and MR (0.8 MW).

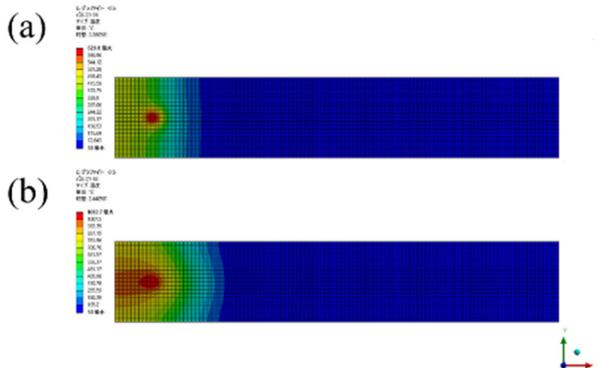


Figure 8: Temperature distribution on the foil for simultaneous operation of MLF (1 MW) and MR (0.8 MW).

また MR 行の場合は輻射率を 0.5 と 1.0 の場合でそれぞれ 1083 °C 及び 948 °C となった。また Fig. 8 に MLF 行の 58 パルス目と MR 行の 4 パルス目のビーム照射完了後のフォイル温度分布を示す。MLF 行の場合、ペイントエリアが広いいため周回ビームの影響は相対的に低く、ビーム入射領域に高温部分が集中している。一方、MR 行の場合、ペイントエリアが狭いため、周回ビームの影響は高くなり、ビーム入射領域だけでなく内周側にも高温部分が広がっていることが分かる。解析計算上で最も厳しい場合でも、フォイル上の最高到達温度は 1083 °C であり、真空中の炭素の昇華温度にまではかなり余裕があることが分かる。

3.3 MLF (1.5 MW) の単独運転

将来計画に対応する RCS からの 1.5 MW ビーム出力の運転条件での昇温シミュレーションを実施した。Figure 9 に解析条件をまとめる。フォイル幅は現在フォイル散乱ビームロスを抑制するために細くしている 14 mm に設定した。また、MLF 行単独運転のため加速器運転サイクルは存在しないが、長期間の安定性を見るために、4 秒(合計 100 ショット)分の解析計算を行った。ビーム条件は Table 3 の通り。またこの時のフォイルに入射される

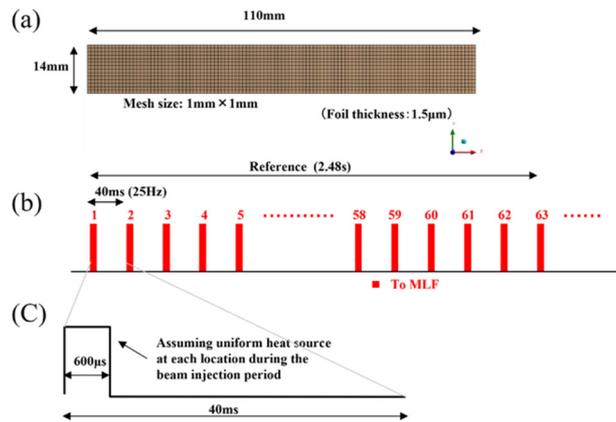


Figure 9: Analytical model for solo operation of MLF (1.5 MW). (a) Foil size, (b) Beam operation cycle, (c) Heat input conditions.

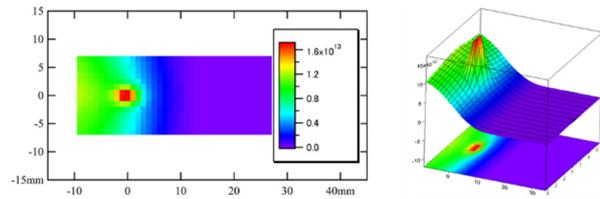


Figure 10: Beam distribution incident on the foil in MLF (1.5 MW).

Table 3: RCS 1.5 MW High-Power Operation Condition

Beam destination	Peak current	Macro width	Chop width	Paint condition
MLF	60 mA	600 µs	460 ns	150π - Anti.

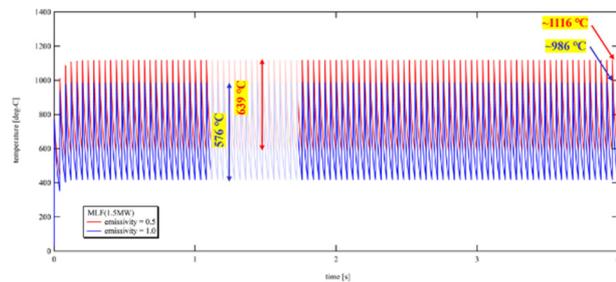


Figure 11: Trend of the maximum thermal point on the foil for solo operation of MLF (1.5 MW).



Figure 12: Temperature distribution on the foil for solo operation of MLF (1.5 MW).

ビーム分布を計算した結果を Fig. 10 にまとめる。

解析計算の結果を Fig. 11 に示す。最高温度は 5 ショット程度でほぼ飽和しており、輻射率 0.5 と仮定した場合で 1116 °C、1.0 と仮定した場合で 986 °C となる。また、100 ショット目のビーム照射完了後のフォイル温度分布を Fig. 12 に示す。MLF 行 1 MW と比較してビーム強度が上がっただけでなくペイントエリアも狭まったので、全体的に高温部分が増えており、特にフォイル端部に新たに高温領域ができていくことが分かる。また、フォイル上の最高到達温度は 1116 °C となり、MR (0.8 MW) よりも高くなるが、真空中の炭素の昇華温度にまでは余裕があることが分かる。つまり、1.5 MW の大強度化においても、昇華温度によるフォイル寿命の急激な低下は起こらないと期待できる。

4. 荷電変換フォイルの温度計測システムの構築に向けた取り組み

ANSIS コードを用いた、ビーム照射によるフォイルの昇温シミュレーションの結果、RCS からのビーム出力を 1.5 MW まで増強しても、最高到達温度は 1116 °C 程度であり、真空中の炭素の昇華温度まではかなり余裕があることが分かった。しかし、今回のシミュレーションにはアモルファスカーボンフォイルの物性値を正確にインプットできていない、ビーム入射時のペイント過程を正確にインプットできていない、等の課題があるため、必ずしも正しいとは限らない。そのため、加速器運転中の荷電変換フォイルの温度計測が重要になる。

4.1 フォイル観測システムの高度化による温度計測

RCS における荷電変換装置には運転中の荷電変換フォイルの状態を観測するためのフォイル観測システムが備わっている[13]。Figure 13 にフォイル観測系システムの外観図を示す。ビーム照射されたフォイルからは強い放射線が放出されるため、フォイルの直近に光学カメラを設置するとすぐに壊れて使用できなくなる。そこで、放射線量の低いサブトンネルに光学カメラを設置し、フォ

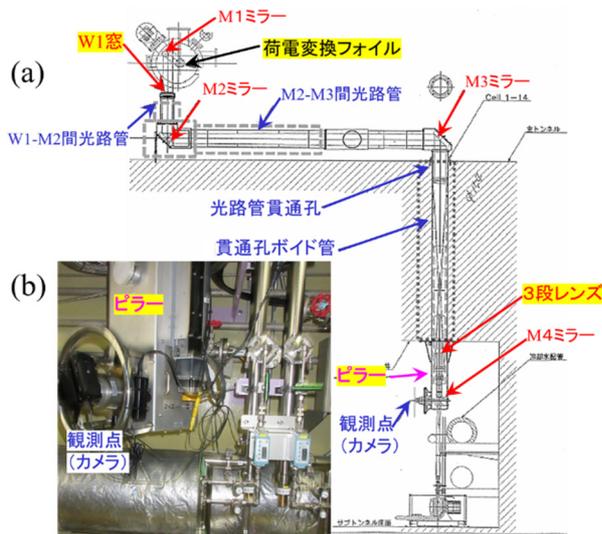


Figure 13: Foil observation system. (a) System overview, (b) Photo of the Pillar.

イルの光学画像をミラーとレンズ群を用いてサブトンネルまで導いて観測できるようにしている。本システムの特徴は、長焦点距離の三段レンズをカメラの近くに設置して荷電変換フォイルを結像していることである。また、ピラー一部にはミラーを切り替えて光路を 3 つに分岐できるようにしており、将来の光学観測の高度化が実現できるように準備している。そこで、この分岐光路の一つを利用して、赤外線カメラを設置して温度計測を実現できるよう計画している。

フォイル観測システムの光路上にあるビューポート (W1 窓) は石英ガラスを採用している。また三段レンズは蛍石とサファイアでできている。そのため、赤外線の波長では減衰して温度計測が困難になる可能性が高い。そこで、可視光の波長に近い近赤外線での温度計測を進めるよう検討しており、ビジョンセンシング社製 InGaAs 近赤外線カメラ (NIRCam-640) [14] を準備している。

4.2 オフラインでの性能評価試験機の立ち上げ

赤外線カメラもちいて温度を計測する際、輻射率の設定が重要になってくる。そこで、オフラインでテストベンチを立ち上げフォイルの輻射率の評価と赤外線カメラの温度校正を実施する。Figure 14 はモニタ校正用電子ビーム照射装置で、この装置を改造して、電子ビーム照射によるフォイル加熱を実現するためのテストベンチを立ち上げを進めており、今年度中の性能評価試験を実施する。

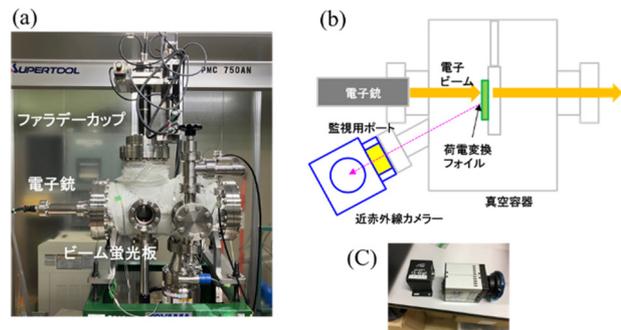


Figure 14: Infrared camera calibration test. (a) Electron beam irradiation device, (b) Conceptual diagram of infrared camera calibration, (c) Photo of a near-infrared camera (NIRCam-640).

5. まとめ

現在、J-PARC の将来計画の一環としてビーム強度の増強が計画されており、RCS でも 1.5 MW の大強度化の検討を進めている。荷電変換フォイルにおいては、フォイルの温度上昇とそれに伴う短寿命化が最大の課題であり、特に、最高温度が昇華温度に到達する場合、膜厚減少が急激に進行すると考えられる。ANSYS コードを用いた昇温シミュレーションの結果、1.5 MW 出力時でも 1116 °C 程度までしか上昇しないことが確かめられた。これは超高真空 1×10^{-5} Pa 時の昇華温度 1740 °C を大きく下回っていることから、現状のフォイルでも 1.5 MW のビーム運転に十分対応できると期待できる。また、現在のフォイル観測システムをアップデートして、近赤外線カメラを用いたフォイル温度の計測を計画しており、そのためオフライン試験体系を構築中である。

参考文献

- [1] JAEA/KEK Joint Project Team, KEK Report 200213, JAERI-Tech 2003-044, March, 2003.
- [2] Hotch *et al.*, “Achievement of a low-loss 1-MW beam operation in the 3-GeV rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex”, *Phys. Rev. Acc. And Beams* 20, 060402 (2017).
- [3] P.K. Saha *et al.*, “1-MW BEAM OPERATION AT J-PARC RCS WITH MINIMUM BEAM LOSS”, JACoW HB2023 (2024) TUA4I2.
- [4] S. Igarashi *et al.*, “Accelerator design for 1.3-MW beam power operation of the J-PARC Main Ring”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2021, 033G01 (28 pages).
- [5] J-PARC 物質・生命科学実験施設 第2ターゲットステーション 概念設計書,
https://mfinfo.jp/_src/resource/PEPngy9XwF/TS2CDR.pdf
- [6] I. Sugai *et al.*, “A NEW METHOD FOR MAKING LONG-LIVED CARBON FOILS FOR HEAVY ION BEAM STRIPPERS”, *Nucl. Instr. and Meth. A* 236 (1985) 576-589.
- [7] M. Yoshimoto *et al.*, “Progress status in fabrication of HBC stripper foil for 3-GeV RCS at J-PARC in Tokai site”, *EPJ Web of Conferences* 229, 01001 (2020).
- [8] P.K. Saha *et al.*, “First measurement and online monitoring of the stripper foil thinning and pinhole formation to achieve a longer foil lifetime in high-intensity accelerators”, *Phys. Rev. Accel. Beams* 23, 082801 (2020).
- [9] 株式会社サーモ理工,
<https://www.thermo-r.co.jp/product-01.html#sys01>
- [10] Z. Jaworski *et al.*, “On thermodynamic equilibrium of carbon deposition from gaseous C-H-O mixtures: updating for nanotubes”, *Rev. Chem. Eng.* 2017, 33(3), 217-235.
- [11] TUWien, Legacy pages of the Institute of Applied Physics,
https://www2.iap.tuwien.ac.at/www/surface/vapor_pressur_e
- [12] 倉持勝也他, 「J-PARC 3 GeV シンクロトロン用荷電変換フォイル温度分布計算」, The 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan, November 2003, 637-639.
- [13] Y. Takeda *et al.*, “Exchange and observation systems for charge stripper foils at the J-PARC 3 GeV-RCS”, *Nucl. Instr. and Meth. A* 590 (2008) 213-220.
- [14] 株式会社ビジョンセンシング,
https://www.vision-sensing.jp/products_NIRCam-640LN.html