

J-PARC RCS 入射部の放射化と残留線量測定

RESIDUAL DOSE MEASUREMENT AND ACTIVATION OF THE INJECTION AREA IN THE J-PARC RCS

吉本政弘^{#,A)}, 山川恵美^{B)}, 竹田修^{A)}, 山本風海^{A)}, 原田寛之^{A)}, Saha Pranab^{A)}, 岡部晃大^{A)}, 金正倫計^{A)}
Masahiro Yoshimoto^{#,A)}, Emi Yamakawa^{B)}, Osamu Takeda^{A)}, Kazami Yamamoto^{A)}, Hiroyuki Harada^{A)}, Saha Pranab^{A)},
Kota Okabe^{A)}, Michikazu Kinsho^{A)}

^{A)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA) / J-PARC

^{B)} Royal Holloway, University of London (RHUL)

Abstract

In the 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) of Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), we adopted multi-turn H⁻ charge exchange injection by using stripper foil in order to achieve high power proton beam. It is therefore impossible to neglect the interaction between stripper foil and the beam. As a result, there are high residual dose measured around the stripper foil. Based on detail numerical simulations by using PHITS code, it is identified that the secondary particles produced in the nuclear reactions due to foil beam interaction caused the high residual activity around foil. In this paper, we report a detail measurement of the residual dose around the stripper foil together with the cause estimated based on simulation studies.

1. はじめに

J-PARC 3GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS)では設計出力 1MW の大強度陽子ビームを実現させるために、ハードウェアのアップグレードやビーム調整を行ってきた。2013 年度にはリニアックのエネルギーを 181 MeV から 400 MeV に増強し^[1]、それに伴い RCS においても入射機器のアップグレードを実施した^[2]。また 2014 年度にはリニアックのピーク電流を 30mA から 50mA へ増強した^[3]。この後、リニアック・RCS 共に大強度ビームを用いたビーム試験を繰り返し実施し、2015 年 1 月 10 日には設計ビーム強度である 1MW 相当のビーム出力を達成した^[4]。RCS において 1MW 大強度陽子ビームを用いた利用運転を実現するための最大の課題はビームロスによる機器放射化の低減である。これまでの大強度ビーム試験を経て、RCS における様々なビームロスの原因を特定しそれぞれに可能な対策を講じることで、荷電変換フォイルに起因するビームロス以外はほぼ全て抑制し最小化することが出来た^[4]。

RCS では大強度陽子ビームを実現するために荷電変換フォイルを用いた H⁻ビーム荷電変換多重入射方式を採用している。そのため、荷電変換フォイルとビームとの相互作用は避けようがなく、様々なビームロス抑制の措置を講じた今でも、入射部のフォイル周辺に非常に高い残留線量が存在している。これまでの詳細な残留線量の分布測定と PHITS によるシミュレーション結果から、荷電変換フォイルからの 2 次粒子（陽子及び中性子）がフォイル周辺の放射化の主な原因であることが分かってきた^[5,6]。本論文では、RCS 入射部における放射化の状況とその原因について、そしてフォイル周辺の残留線量低減に向けた対策について報告する。

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

2. 荷電変換フォイルの照射履歴

Figure 1 は 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災による被災からの復旧後から本年度 2015 年度夏期停止期間まで (Run 41~#63) のリニアックから RCS に入射された H⁻ビームの粒子数の推移をグラフにした結果を示している。下図は 1 時間毎の積算量をグラフにしたもので、おおよそ RCS のビーム出力パワーに比例している。上図は、1 時間毎の積算量を積分し、使用したフォイル毎の総積算量の推移をグラフにしたものである。但し、ビーム入射期間中に荷電変換フォイルに照射されるビームはリニアックから入射される H⁻ビームの他に RCS で周回している H⁺ビームも含まれる。周回する H⁺ビームのフォイル衝突回数は、入射 H⁻ビームのサイズ、フォイルのサイズ、入射位置、ペイント入射条件等により異なるが、確実に入射 H⁻ビームよりも多くなることに注意が必要である。

Figure 1 の上図を見ても分かるように、上記の 4 年間で加速器利用運転に使用した荷電変換フォイルの枚数は全部で 5 枚であった。RCS に設置している第 1 荷電変換装置は、予備も含めた利用運転用のフォイルとビーム試験用のフォイルを合わせて 15 枚の荷電変換フォイルを真空容器内に収納しており、遠隔且つ自動でフォイル交換ができるシステムになっている^[7]。この 15 枚のセットを毎年夏期ビーム停止期間中にまとめて交換して運用している。実際に利用運転中に荷電変換入射に使用するフォイルは、これまでは 1 年毎のサイクルにつき 1 枚で破損させずに十分持ちこたえることができた。しかし、利用運転のビーム強度が増強するに従い、フォイルの劣化が早くみられるようになった。そのため、2015 度前半の利用運転では、初めて夏期ビーム停止期間を待たずに利用運転用のフォイル交換を実施し

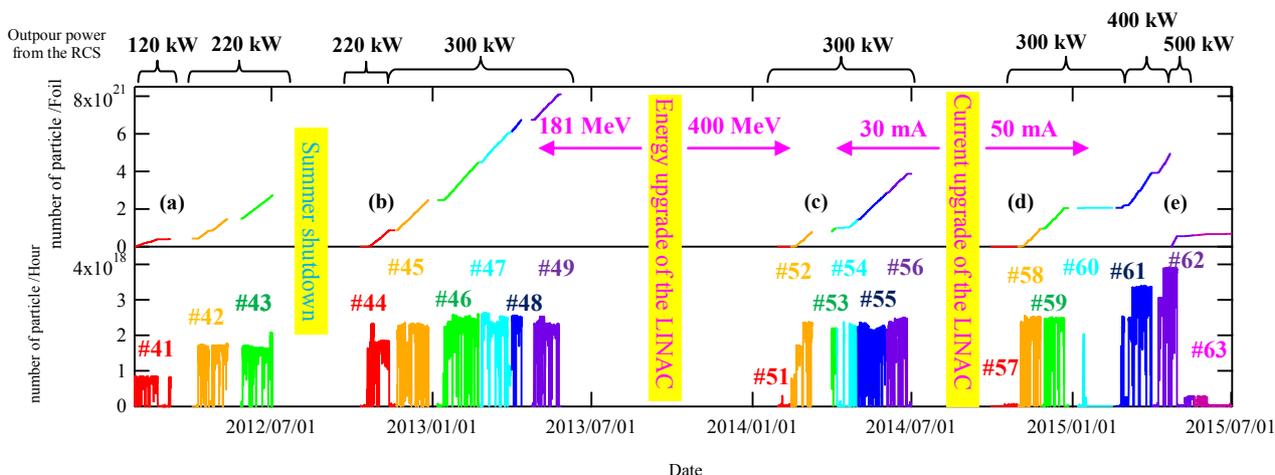


Figure 1: Trend plots of the injection H^- particle numbers into the RCS after the recovery works from the damages caused by the Great East Japan Earthquake on March 11, 2011. Lower plots: each color line classified under the run number of the user operation shows the particle numbers per hour. Upper plots: (a) ~ (e) lines show the integrated particle number per every stripper foil.

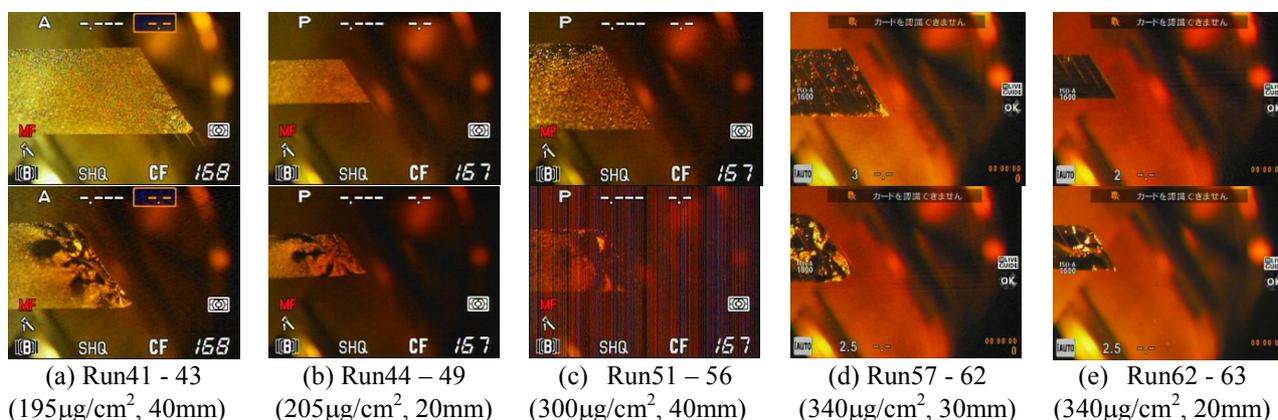


Figure 2: Photographs of the 1st stripper foils to compare between before (uppers) and after beam irradiation (lowers).

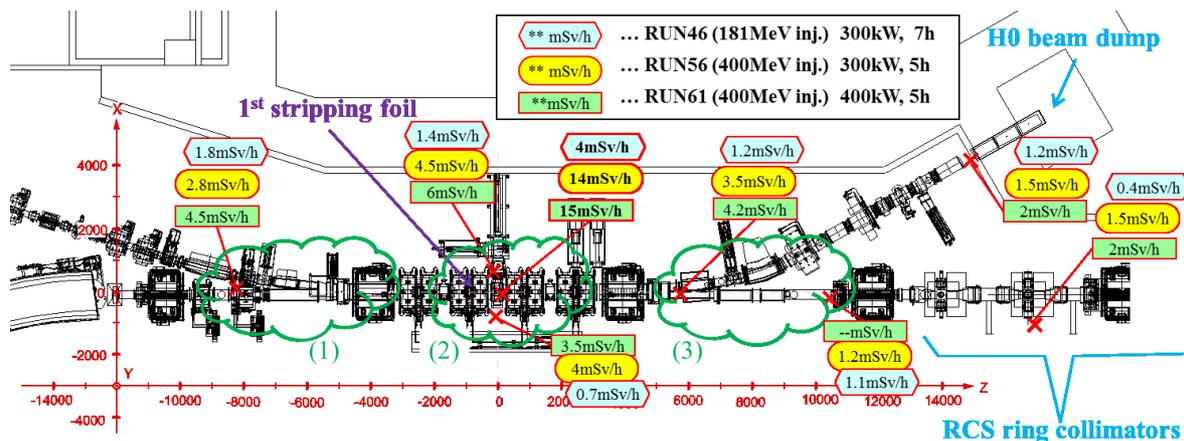


Figure 3: Measurement results of residual radioactivity at the injection area with a GM survey meter after Run 46 with the injection energy of 181 MeV and the output beam power of 300 kW, after Run 56 with 400 MeV and 300 kW, and after Run 61 with 400 MeV and 400 kW.

ている。Figure 2 は、これまで使用した 5 枚の荷電変換フォイルの観測系で観察している画像を示したものである。フォイルの膜厚は入射ビームのエネルギー増強にともない、設計値 $200 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ から $340 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ に変更した。またフォイルの幅はリニアックでのビームサイズ調整の向上に伴い、 40 mm から 30 mm や 20 mm へと小さなものに変更していった。同時に Figure 2 では、ビーム照射によるフォイルの変化を見ることを目的として、照射前後の画像を並べて示した。上列はビーム照射前の状態で、下列はビーム照射が終わった後の状態である。ビーム照射により荷電変換フォイルが照射部を中心として大きくしわが出来るようにひずんでくる様子がはっきりと観測されている。フォイル劣化の観察と同時に荷電変換効率の変化も定期的に観測している^[8]。現在までのところ変換効率からフォイル劣化の兆候はまだ見られていないが、画像からみたフォイル劣化の度合いからフォイル交換の目安として判断した。

3. フォイル周辺の残留線量

3.1 入射部残留線量の傾向

Figure 3 はビーム停止後に J-PARC の放射線安全が計測している入射部の残留線量サーベイの結果を比較しまとめたものである。リニアックのエネルギー増強そしてピーク電流増強に伴い、残留線量も高くなることがわかる。設計当初から残留線量が高くなることが想定されていた、リングコリメータや H^0 ビームダンプ周辺を除くと、入射部には大きく分けて次の 3 か所に残留線量の高い箇所が見られた (Figure 3 の緑色で囲まれた箇所を参照)。つまり、(1)入射分岐ダクト周辺、(2)第 1 荷電変換フォイル周辺、(3) H^0 ダンプライン分岐ダクト周辺、の 3 か所である。このうち(1)箇所及び(3)箇所については、比較的早くから残留線量を作るビームロスの原因について理解が進んでいた。(1)箇所については、リニアックから入射される H^+ 粒子が荷電変換フォイルに到達する前に残留ガス等により H^0 粒子に変換されることで、入射セプタム電磁石で入射軌道に曲げられずに真空容器に直接照射されることが高い残留線量を生み出す原因であると考えられる^[9]。そこで残留ガスを抑制するために、入射ライン上にターボ分子ポンプを増強し、真空容器内の圧力をさげるための対策を行った。但し、現状の真空圧力の向上では多少の改善はみられるものの残留線量を劇的に減少させるまでには至っていない。(3)箇所については、荷電変換フォイルに照射された荷電粒子の大角度散乱によるビームロスが原因であった^[10]。本来フォイルで散乱されたビームはリングコリメータで回収できるように設計されていた。しかし RCS のような大強度陽子ビームの場合、統計的に見ても極僅かな大角度散乱の粒子ですら現実的には無視できない数にのぼり、コリメータまでの間にいくつある僅かにアパーチャーの狭くなった箇所でもロスすることで大きな残留線量を発生させていることが分かった。そこで、 H^0 ダンプへビームを輸送するダンプセプタム電磁石内に組み込んである分岐ダクトに対し

て、鉄遮蔽体を積み、且つ大角度散乱されたビームを集中的に回収できるように改造して、局所的なコリメータにアップグレードさせた。この局所的なコリメータの位置及び角度を微調整することで、分岐ダクトから下流の残留線量は大幅に抑制することが出来た^[10]。一方で、(2)箇所の強い残留線量については、大角度散乱によるビームロスでは説明がつかず、フォイル周辺の放射化の原因はわからなかった。

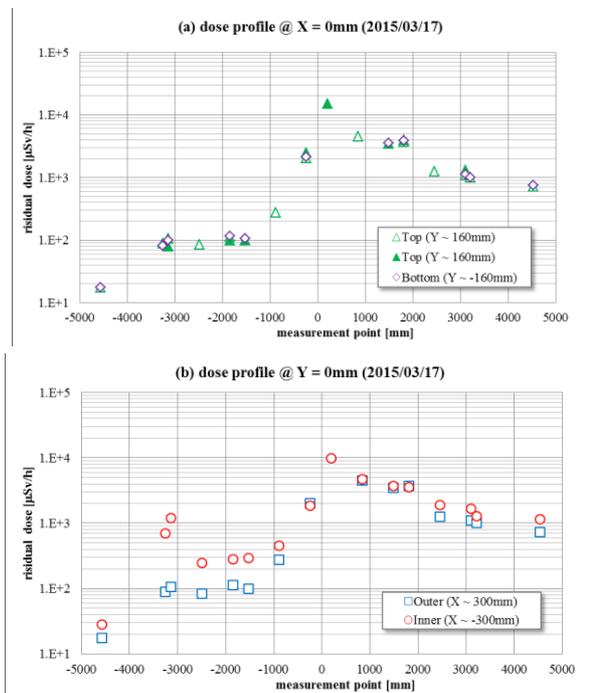


Figure 4: Residual dose mapping in detail on Run 61 with 400 MeV and 400 kW. Origin of coordinate is a beam injection point at the 1st stripper foil. (a): Comparison of the inside and the outside of the vacuum chambers at the X-Z plane with $Y = 0 \text{ mm}$. (b): Comparison of the top- and the bottom-side of the vacuum chamber at the Y-Z plane with $X = 0 \text{ mm}$.

3.2 入射部の詳細な残留線量分布測定

入射部の(2)箇所での放射化の原因を探ることを目的として、改めて入射部の残留線量の詳細な分布測定を実施した。第 1 荷電変換フォイルの位置を中心に、4 台のシフトポンプ電磁石及び 2 台の四極電磁石に設置しているセラミックダクトの表面線量を、ガイガー・ミュラー計数管(GM 管)を用いて測定した。測定結果をプロットして詳細な残留分布に示したものが Figure 4 である。上図がセラミックダクトの上下側の平面中心上の分布を示しており、下図がセラミックダクトの内周・外周側の平面中心上の分布を示している。このうち、内周側の分布 (下図赤丸プロット) にのみ上流側で線量が高くなる箇所がみられる。これは(1)箇所の残留ガス等による H^0 に変換された入射ビームによる放射化の影響によるものである。それ以外については、上下側分布及び内外周側上分布はほとんど同じ傾向を示している。

フォイル直下だけに高い線量があるわけではなく、ビーム進行方向に高くなる傾向はあるものの、フォイル位置を中心になだらかで広い範囲に亘る山型分布をしていることがわかる。もう一つこの残留線量分布からわかることは、中心付近については上下側分布の残留線量が高くなっているが、中心から遠ざかると内外周側分布の残留線量が高くなる、ことである。これはシフトバンプ電磁石に設置しているセラミックダクトの形状が水平方向に広い角型ダクトを考慮して、フォイルからみた立体角で評価することで理解ができる。口径の小さい上下平面は口径の大きな内外周平面に比べて、中心付近での立体角は大きい、離れると逆転する。以上のことから、(2)箇所の残留線量の原因は、第1荷電変換フォイルから180度ほぼ等方向に放出している「何か」によって放射化されたことが原因と考えられる。

4. PHITSによるシミュレーション

残留線量の詳細分布から推察される、第1荷電変換フォイルから前方から後方まで180度に亘りほぼ等方向に放出される「何か」の正体を探るために、PHITS^[11]モンテカルロ・コード(ver2.64 核データファイル JENDL4 利用)を用いたシミュレーションを実施した^[6]。RCSで採用している荷電変換フォイルはボロンをドーパしたカーボン薄膜(HBCフォイル)を採用しており^[7]、PHITSによるシミュレーションにも反映させている。ただし、照射ビームはH⁺粒子ではなくH⁺粒子を用いている。Figure 5はフォイルで散乱された1次粒子のエネルギー分布及び角度分布のシミュレーション結果を示したものである。エネルギーもほとんど入射される400 MeVから減少することもなく、またほとんど前方方向にのみ放出されていることがわかる。このことから改めて、荷電変換フォイルでの大角度散乱された粒子が(2)箇所の放射化の原因ではないことがわかる。

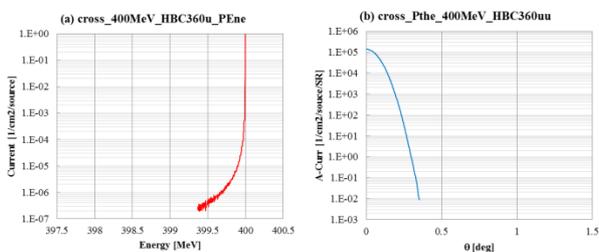


Figure 5: Scattered angle and energy spectrum of primary protons

次に、荷電変換フォイルにH⁺ビームが照射されたときに発生する2次粒子についてのシミュレーション結果を見る。入射エネルギーを181 MeVから400 MeVに増強すると、発生する2次粒子は陽子・中性子に加えて正負パイ中間子も発生する。また発生した2次粒子のエネルギーも400 MeVからほとんど0 MeVまでの幅広い範囲に亘っている。ここで、4種類の2次粒子について、エネルギーを0~1 MeV, 1~50 MeV, 50~100 MeV, 100~181 MeV, 181~300

MeV, 300~400 MeVの6つ範囲に分けてグループ化し、それぞれのエネルギーグループについて角度分布をプロットしたものがFigure 6である。1次粒子と異なり、2次粒子は角度分布も前方だけでなく後方180度までの広い範囲にわたっており、特にエネルギーが低くなるほど等方向に分布していることが分かる。このことから(2)箇所のフォイル直下での非常に強い残留線量の原因は、高エネルギー陽子がフォイルに照射された時に生じる核反応によって生成された2次粒子によって放射化されたもの、である可能性が高いことがわかる。

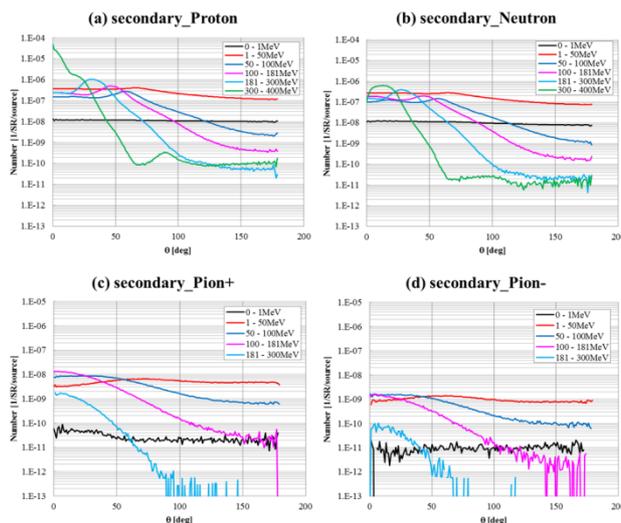


Figure 6: Angle distributions of secondary particles on several energy ranges.

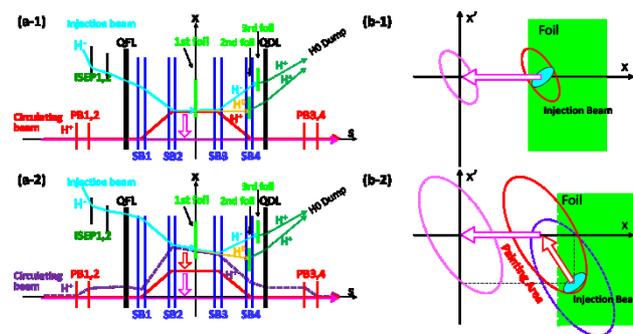


Figure 7: Schematic diagrams of the horizontal injection painting scheme. (a-#) shows the beam orbits of the injection and circulating beams in the RCS, and (b-#) shows the beam emittance in the horizontal phase space at the 1st foil. (*-1) and (*-2) shows the injection process without and with the injection painting respectively.

5. 横ペイントのエリアを広げた効果

入射部(2)箇所のフォイル周辺での非常に高い残留線量は、第1荷電変換フォイルに高エネルギーのビームが照射されることで核反応が起こり、そこから放出される2次粒子によってセラミックダクト

等周辺機器が放射化されたことによって生じている可能性が高いことが分かった。RCS のように荷電変換フォイルを用いた荷電変換多重入射方式を採用している限り、フォイルとビームの相互作用による放射化を完全に消去することは不可能である。一方で、荷電変換フォイルに照射されるビームは、リニアックから入射される H⁻ビームの他に RCS で周回する H⁺ビームも存在する。この周回する H⁺ビームのフォイルへの照射量を減らすことは、原理的には可能である。RCS は多重入射によりビーム密度が増えることで生じる空間電荷効果の影響を緩和させるために、ペイントパンプ電磁石を用いた横方向ペイント入射方式も合わせて採用している^[4,12]。Figure 7 は横ペイント入射の原理と効果を示した概念図であり、横ペイントが無い場合と有る場合を比較したものである。横ペイント入射方式では、ビーム入射期間中に位相空間上の入射ビーム位置は固定しているのに対して周回ビームの中心位置は時間的に変化させることで、多重入射された後の周回ビームが位相空間上に占める領域を様に分布させながら広げる手法のことである (Figure 7 (b-2)参照)。この手法は、実空間上では周回ビームの中心軌道をフォイルから遠ざけることと等価である (Figure 7 (a-2)参照)。ここで横ペイントのエリアを広げることは、ビーム入射期間中において周回ビームの中心軌道を早くフォイルから遠ざけることと等価であることを考慮すると、横ペイントのエリアを広げることで結果的に周回ビームのフォイル衝突回数を減らすことが可能となる。また、フォイルのサイズを小さくしたりビームの入射位置をフォイル端部に近づけたりすることも周回ビームのフォイル衝突回数を減らすことに貢献する。このような様々な努力を積み重ねることで周回ビームの照射回数を減らし、その結果としてフォイル周辺部の放射化を減らすことが期待できる^[12]。

この効果を実証するために、本年 4 月に利用運転のビーム強度を 400 kW から 500 kW に増強するとき、横ペイントのエリアを 100 π mm-mrad から 150 π mm-mrad に広げ、またフォイル端部から入射点までの位置を 13 mm から 9 mm に近づけた。これにより周回ビームにおいて 1 粒子当たりの平均的なフォイル照射回数は計算上 37.5 回から 18.4 回とほぼ半減する。ビーム強度の増強(1.25 倍)を考慮しても放射化の効果はおおよそ 6 割まで減少することが期待できる。Figure 8 は Figure 1 の入射された H⁻ビームの粒子数の推移のプロットを本年度 3 月から 4 月にかけての範囲を拡大したものに、フォイル直下の残留線量の測定値を合わせたものである。横ペイントのエリアを広げたことで残留線量は 15 mSv/h から 8.5 mSv/h まで減少し、目論み通りの効果を示している。また Figure 9 は 400 kW と 500 kW の利用運転後の残留線量の詳細分布を比較したもので、典型的な結果として上側平面の分布を示している。ピークだけでなく分布全体でほぼ一様に減少しており、上下側分布及び外周側分布とともに積分量で比較すると 6~7 割程度減少していることを確認することが出来

た。(但し、内周側分布は残留ガス等による H⁰ビームのロスを含むため、評価の対象外とした。)以上の検証結果の成果をもとに考察すると、ビーム調整をさらに進め横ペイントのエリアを設計値の 216 π mm-mrad まで広げ、フォイルサイズ及び入射位置の微調整を行うことでフォイル衝突回数は 400 kW 利用運転時に比べて計算上 1/4 程度まで抑えることが可能となる^[12]。そのため、1 MW 利用運転時にフォイル周辺で最大 40 mSv/h 程度の残留線量が発生すると思われていたが、さらなるビーム調整を実施することで 10 mSv/h 程度と大幅に減らせることが期待できる。

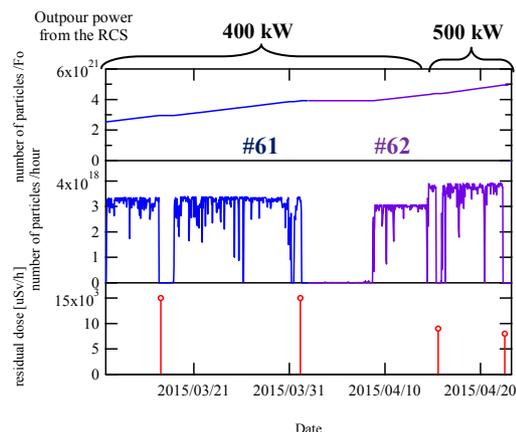


Figure 8: Trend plots of the injected H⁻ particle and residual dose measured in about five hours after the beam stop.

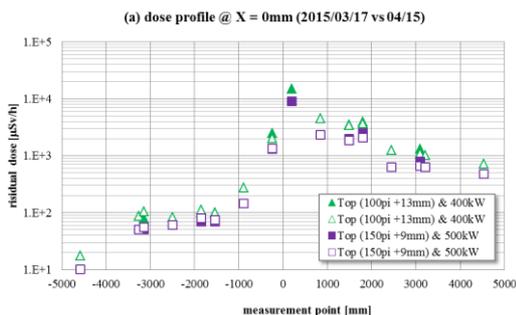


Figure 9: Comparison mapping of residual dose in detail on the top-side of the vacuum chamber between the 400 kW operation and 500 kW operation.

6 まとめ

現状、RCS で残っている残留線量の高い箇所は入射部に集中しており、その中でもフォイル周辺部に非常に強い残留線量が存在する。詳細な残留線量の分布測定と、PHITS を用いたシミュレーションの結果から、フォイル周辺部の残留線量の原因は、高エネルギービームがフォイルに照射することで生じる核反応によって放出された二次粒子 (陽子及び中性

子) であると考えられる。この残留線量を抑制するために、周回する H^+ ビームとフォイルとの衝突回数を減らす方法を採用し、その効果を利用運転で確かめた。今後、さらに微細なビーム調整を行い、ペイントエリアを広げる、ビームの入射位置をフォイル端部に近づける、フォイルサイズを小さくする、等の努力を重ねることで、1 MW ビームでの利用運転でも残留線量が低く抑えることが期待できる。一方で入射分岐ダクト周辺の残留線量はビーム強度増強に比例して増大することが予想される。真空圧力向上でも劇的に改善しなかったことを考えると、残留ガス以外にも原因が存在することも考慮する必要がある。ビーム軌道とビームロスの応答やさらに詳細な残留分布の調査を行い、引き続き入射部の残留線量低減に向けた努力を行っていく。

荷電変換フォイルを用いた荷電変換多重入射方式は、大強度陽子加速器を実現するための非常に優れた手法であり、世界の多くの加速器で採用されている。しかし、これまで荷電変換フォイルで生じる核反応について定量的な議論はあまりされてなかった。また生成される広いエネルギー範囲を持つ 2 次粒子 (陽子及び中性子) の放射化の評価もほとんどされていない。J-PARC RCS において、ビーム強度の低いコミッシング初期からあらゆるビームロスについて原因調査とその抑制を徹底したことで初めてこの問題を認識し、かつ定量的な評価について議論するに至った。この成果は荷電変換フォイルを用いる全ての加速器において有意義であると考えられる。特に 2 次粒子の放射化に関する評価は、今後の大強度加速器にとって大きな課題となる。そのため我々は J-PARC を超えた広い枠組みで、さらなる研究を進めていく予定である。

参考文献

- [1] K. Hasegawa, Proc. LINAC2014, Geneva, Switzerland: TUIOB03.
- [2] N. Hayashi, et al., Proc. IPAC2013, Shanghai, China: THPWO032.
- [3] K. Hasegawa, JPS Conf. Proc. "Proceedings of the J-PARC Symposium 2014", to be published.
- [4] H. Hotchi., Proc. IPAC2015, Richimond, USA: TUBB3.
- [5] M. Yoshimoto, et al., J. Radioanal. Nucl. Chem., DOI: 10.1007/s10967-015-4138-x.
- [6] E. Yamakawa, et al., JPS Conf. Proc. "Proceedings of the J-PARC Symposium 2014", to be published.
- [7] M. Yoshimoto, et al., J. Phys.: Conf. Ser. 417 (2013), 012073.
- [8] P. K. Saha, et al., J. Radioanal. Nucl. Chem., DOI: 10.1007/s10967-015-4023-7.
- [9] J. Kamiya, et al., Proc. IPAC14, Dresden, Germany: WEPME035.
- [10] S. Kato, et al., Phys. Rev. ST, 16, (2013): 071003.
- [11] T. Sato, et al., J. Nucl. Sci. Technol. 50, 913-923 (2013).
- [12] H. Hotchi., In these proceedings: THOL06.