

荷電変換薄膜を用いた荷電変換ビーム多重入射に由来する放射化の抑制に向けた取り組みと課題

STRUGGLE TO SUPPRESS RADIO-ACTIVATION DUE TO MULTI-TURN CHARGE EXCHANGE BEAM INJECTION WITH STRIPPER FOIL AND ITS ISSUES

吉本政弘[#], 加藤新一^{*}, 岡部晃太, 原田寛之, 金正倫計

Yoshimoto Masahiro, Kato Shinichi, Kota Okabe, Hiroyuki Harada, Michikazu Kinsho

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) / J-PARC

Abstract

It is key issue to reduce the level of the radio-activation of the devices in high power proton accelerator, to achieve MW class high power beam operation. The 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) of the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) adopted a beam collimation system which aims to localize the beam loss at the collimators and to reduce the level of residual doses at the other devices. However, relatively high residual doses are detected in not only the beam collimator area but also a vicinity of the stripper foil. The results of previous work, measurements of the detailed residual dose distribution and simulations of the radio-activation by the PHITS, indicate that the high level residual dose around the stripper foil is caused by secondary particles due to nuclear reaction at the foil. In order to suppress the secondary particles from foil, we try hard to reduce the number of foil hitting particles during the beam injection period. As a result, the level of the radio-activation around the foil can be decreased. At the same time, new beam loss monitor to detect the secondary particles from the foil is developed. In this presentation, we report the secondary particles detections and estimations of number of the foil hitting particles. In addition, we discuss the reduction of the radio-activation.

1. はじめに

MW 級の大強度陽子ビームの利用運転を実現するためには、機器の放射化の抑制が重要な課題となる。J-PARC 3GeV シンクロトロン加速器(RCS)では、入射直線部にコリメータシステムを導入しビーム損失を局所化することでそれ以外の機器の放射化を抑制する思想で設計されている[1]。しかし、コリメータ部の他に荷電変換薄膜の近傍において極めて高い残留線量が観測されている。これまでの詳細な残留線量分布測定と PHITS を用いたシミュレーション結果から、この放射化の原因はビーム入射期間中に入射ビーム及び周回ビームの荷電変換薄膜への衝突で起こる核反応によって生成された二次粒子(陽子及び中性子)によるものであると強く示唆していた[2-3]。さらに詳細な調査を進めるべく、Ge 半導体検出器を用いてビーム照射後に回収した薄膜自身の放射化分析を実施し、二次粒子による影響評価を行った。また入射部機器の放射化抑制を実現するために、周回ビームの薄膜への衝突回数を減らすことで二次粒子の発生を抑制する努力を続けてきた。同時に衝突回数を計測・評価するための新たなビーム損失モニタの開発も行った。

本論文では、薄膜自身の放射化分析によって見えてきた二次粒子生成過程と、薄膜へのビーム衝突回数の削減努力による放射化抑制の成果について報告する。また現在 100 度ダンプリンに新たに設置を計画している薄膜からの二次粒子の詳細測定を目的とした荷電変換薄膜放射線分析装置についても報告する。

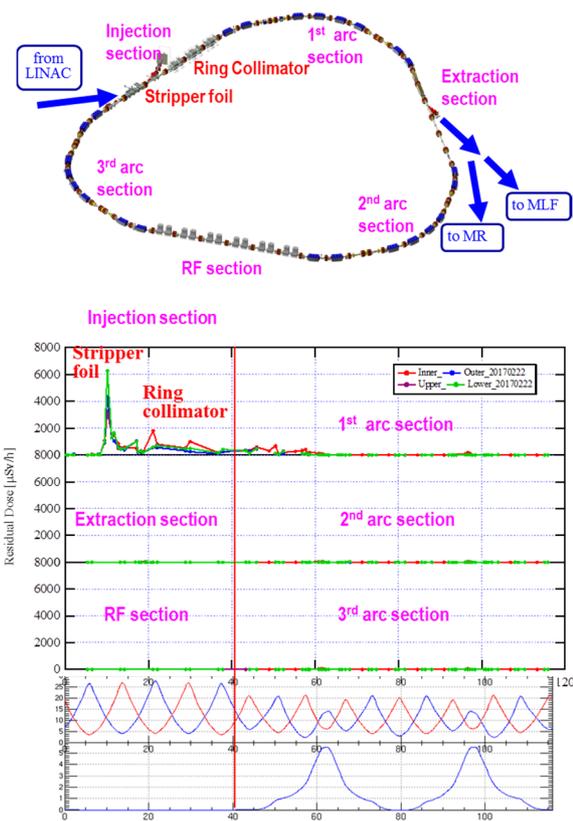


Figure 1: Schematic view of the RCS ring and measured residual dose distributions along the ring.

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

^{*} 株式会社三菱総合研究所 (MRI)

2. 荷電変換薄膜を用いたビーム多重入射に由来する機器の放射化

2.1 RCS リング全周の残留線量

Figure 1 は RCS の概念図と全周に亘る残留線量分布の測定結果を示したものである。残留線量の測定にはガイガーミュラー比例計数管 (ALOKA 製 TGS-R74) を用いており、真空ダクトの上側/下側/内周側/外周側に直接突き当てて計測した。測定は、2016 年 4 月に発生したリングコリメータ・吸収体5の故障により仮設の固定式コリメータに置き換えられていた時に実施したものである[4]。(吸収体5の完全復旧は2017年度の夏期長期メンテナンス期に実施予定[5]。)そのため、コリメータで回収しきれずにわずかに漏れ出した散乱ビームの損失が第1アーク部の前半で発生し、残留線量をわずかに増加させていることが分かる。しかし全体的にはリングコリメータによるビーム損失の局所化が、入射部荷電変換薄膜周辺を除きうまく機能していることが分かる。

一方で、荷電変換薄膜周辺の高い残留線量の原因に関する詳細な調査を行ってきた。本来、“荷電変換ビーム多重入射方式”は従来のセプタム・バンパを用いた多重入射方式と比較して、(1)セプタム面でのビーム損失を生じさせない、(2)原理的には入射ターン数に制限が無い、といった利点を持っており、J-PARC を含めた世界的な大強度陽子加速器で広く採用されている。事実、荷電変換薄膜近傍の非常に高い残留線量の原因は、狭義の意味でのビーム損失(速度と方向がほぼ揃って安定的に一つの集団として運動する粒子群から、一部の粒子が何らかの原因で安定軌道から外れて物理的境界面に衝突して失われること)ではない。詳細なザンリュ線量分布の解析や PHITS コードによるシミュレーションの結果からは、高エネルギービームの照射により荷電変換薄膜で起こる核反応によって放出された二次粒子によって周辺の機器を強く放射化させていることが明らかになってきた[2-3]。

2.2 回収した荷電変換薄膜の放射化分析

ビーム照射による薄膜での核反応と二次粒子放出の痕跡を調査することを目的とし、利用運転で使用した荷電変換薄膜を回収して放射化分析を行った。Figure 2(a) は回収直後とほぼ1年後に計測した残留線量の計測結果を示したものである。J-PARC では荷電変換薄膜として厚さ 1~2 μm のボロン添加炭素薄膜(Hybrid type thick Boron-doped Carbon: HBC foil)を採用している[6]。これを幅 20mm 及び長さ 110mm+ α に切り出し、アルミニウム製のC型フレームに直径 10 μm の SiC ファイバーを張り付けたもので挟み込んで構成している[7]。ビームの照射点は薄膜先端から 9mm の位置なる様に入射調整を行っている。残留線量測定の結果、照射点に局所的に非常に高い残留線量が観測されている。周辺のアルミフレームには十分なアパーチャがあり、一次粒子による直接的な照射は無いにもかかわらず比較的高い残留線量が計測されている。また、この線量分布は照射点を中心としてほぼ同心円状に分布している。以上の結果は、薄膜の照射点でビーム(一次粒子)照射による核反応が起こり非常に高い残留線量を作るとともに、二次粒子を放

出することで周辺を放射化させている、というこれまでの解釈を支持するものである。

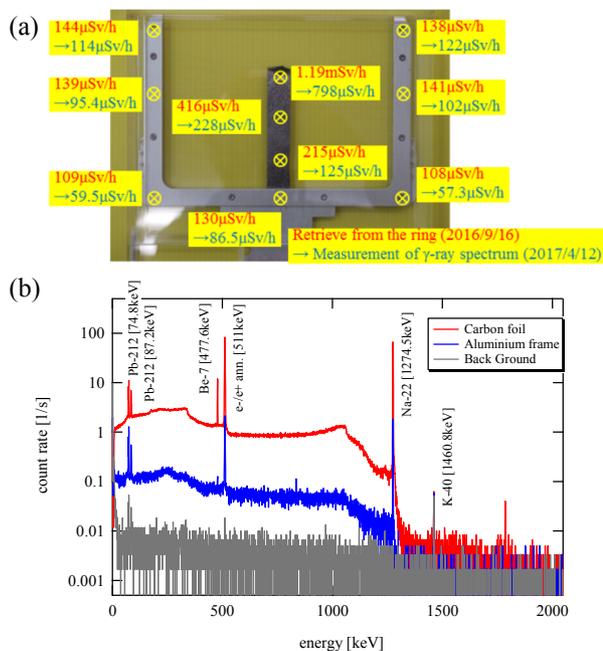


Figure 2: Residual doses and gamma ray spectra of the stripper foil retrieved from the ring.

Table 1: Typical Nuclear Reactions of Produced Nuclei

Produced nuclei	Target	Nuclear reaction	Half lifetime
${}^7\text{Be}$	${}^{12}\text{C}$	${}^{12}\text{C}(p, 3p3n){}^7\text{Be}$	53.28 days
	${}^{11}\text{B}$	${}^{11}\text{B}(p, \alpha n){}^7\text{Be}$	
	${}^{10}\text{B}$	${}^{10}\text{B}(p, a){}^7\text{Be}$	
${}^{22}\text{Na}$	${}^{23}\text{Na}$	${}^{23}\text{Na}(p, pn){}^{22}\text{Na}$	2.602 years
	${}^{27}\text{Al}$	${}^{27}\text{Al}(p, 3p3n){}^{22}\text{Na}$	
	${}^{30}\text{Si}$	${}^{30}\text{Si}(p, 4pxn){}^{22}\text{Na}$	

さらに、詳細な放射化分析を行うために、可搬式のゲルマニウム半導体検出器(CANBERRA 製 GR2018)を用いて測定したガンマ線スペクトルをプロットした結果をFigure 2(b)に示す。今回の測定の大きな特徴は、回収した荷電変換薄膜の前に鉛ブロックを積み上げて遮蔽体を構成し、炭素薄膜のみ、またはアルミフレームのみ、(そしてバックグラウンド)のガンマ線スペクトルに分離して計測できるようにしたことである。結果は、炭素薄膜からは Be-7 と Na-22 の両方が観測され、アルミフレームからは Na-22 のみが観測された。アルミフレームに Be-7 が検出されなかったことから、放射化した薄膜が飛び散ってアルミフレームに付着したのではなく、アルミフレーム自身が放射化していることが明らかになった。しかし、炭素薄膜本体にも Na-22 が検出されたことについては、まだ完全に理解が進んでいない。炭素薄膜には生成過程に由来する不純物(ナトリウムやアルミニウム)がごくわずかに混在していることが分かっている[8]。しかし今回検出された Na-22 の量が考えると説明がつかない。Be-7 及び

Na-22 の生成核種を作る主な核反応を Table 1 にまとめる。ここからも分かるように、Na-22 を生成する原因として今回浮上してきたのが SiC ファイバーの珪素である。もし珪素が原因である場合は、ファイバーの材質を選定し直すことで、二次粒子の発生抑制及び薄膜本体の線量低減も可能となるかもしれない。珪素の放射化については現在 PHITS による解析を進めているところである。

3. 荷電変換薄膜近傍の残留線量低減に向けた取り組み

荷電変換薄膜の近傍で観測される非常に高い残留線量は、設計出力である 1MW ビーム運転の実現に向けた大きな足かせとなるリスクが高い。この残留線量の原因は、ビーム照射による薄膜で起こる核反応によって生成される二次粒子によるものである。しかし、“荷電変換ビーム多重入射方式” にとってビームと薄膜との相互作用は根源的な問題であり、二次粒子の生成を完全に取り除くことは不可能である。しかし、可能な限り二次粒子の生成を抑制し、薄膜近傍の放射化を低減する努力を続けてきた。

3.1 薄膜サイズビーム照射点の最適化及び横方向ペイントエリアの拡張による効果

ビーム入射期間中は、リニアックからの入射される H 粒子だけでなく RCS で周回する H⁺ 粒子も荷電変換薄膜に衝突する。入射ビームと薄膜との衝突は原理的に不可避であるが、周回ビームと薄膜との衝突は必須ではない。しかも、最長 500 μ s のビーム入射期間中におおよそ 615 バンチものビームを多重入射するため、周回ビームの薄膜衝突回数は入射ビームの薄膜衝回数に比べて圧倒的に多い。つまり、周回ビームの衝突回数を減らすことが、二次粒子の生成量の低減つまり薄膜近傍の放射化の抑制に非常に有効であることが容易に理解できる。ここで薄膜に衝突する粒子ののべ数と入射ビームの粒子数との比率を薄膜衝突率(foil hitting rate)と定義する。この薄膜衝突率を導入することで、異なるビーム条件下での二次粒子の生成量の比較・評価が容易になる。

薄膜衝突率を下げるには、RCS へ入射した後に周回するビームを素早く荷電変換薄膜から遠ざければ良い。これを実現するための手段として、(1)薄膜の幅を入射ビームサイズに合わせて小さくする、(2)ビーム照射点を薄膜先端に近づける、(3)横方向のペイントエリアを拡張する、を実施した。Table 2 はこれまでの運転条件及び薄膜衝突率の見積もりをまとめたものである。また、Figure 3 はその時の入射部荷電変換薄膜周辺の残留線量分布の測定結果を示したものである。RCS は MLF だけでなく MR にも同時にビームを供給しているが、その割合は圧倒的に MLF の方が高い。そのためまずは MLF 行きの薄膜衝突率をビーム条件に合わせてシミュレーションから見積もった。その結果、41 から 18, 13, 7 へと約 1/6 に抑制することが出来た。それに伴い、薄膜近傍の残留線量も 15mSv/h から 9, 6.5, 6mSv/h へと約 4 割まで低減することが出来た。

リニアックから RCS に入射するビーム強度に薄膜衝突率を掛けたものを実効的薄膜衝突強度(effective foil

hitting power)と定義する。薄膜での二次粒子生成量はこの実効的薄膜衝突強度に比例する。Figure 4 は MLF 及び MR の運転条件を考慮した実効的薄膜衝突強度と残留線量との相関をプロットしたものである。実効的薄膜衝突強度を下げるとほぼ比例して残留線量も減少している。しかし、これらの努力を続けても設計の 1MW 出力で運転すると 20mSv/h を超えるリスクがある。そこで荷電変換薄膜のある真空容器そのものを遮蔽体で覆うための入射部アップグレードを計画している[9]。

Table 2: Injection Painting Parameters and Foil Parameters

●	2015/03/17	(foil hitting rate ~ 41)
	MLF	400kW (100 π /100 π -Cor.)
	MR/NU	316kW (50 π /50 π -Cor.)
	foil width	30mm
	foil edge position	+13mm
▲	2015/04/22	(foil hitting rate ~ 18)
	MLF	500kW (150 π /100 π -Cor.)
	MR/HD	24kW (100 π /100 π -Cor.)
	foil width	30mm
	foil edge position	+9mm
◆	2015/11/14	(foil hitting rate ~ 13)
	MLF	500kW (150 π /150 π -Anti.)
	MR/HD	39kW (50 π /50 π -Cor.)
	foil width	20mm
	foil edge position	+9mm
■	2017/03/17	(foil hitting rate ~ 7)
	MLF	151kW (200 π /200 π -Anti.)
	MR/NU	470kW (50 π /50 π -Cor.)
	foil width	20mm
	foil edge position	+9mm

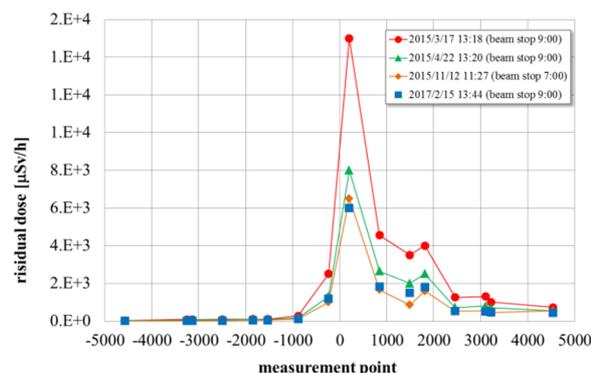


Figure 3: Transition of the specific residual dose distribution around the stripper foil.

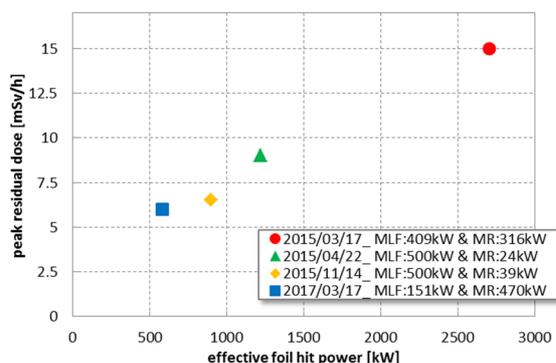


Figure 4: Transition of the specific residual dose distribution around the stripper foil.

3.2 新型ビーム損失モニタの開発と薄膜衝突率の実測

これまでの結果から、薄膜衝突率は二次粒子の生成量の比較・評価を行うための重要なパラメータであることが分かった。そこで、薄膜衝突率を実験的に測定するための新しいビーム損失モニタ(Beam Loss Monitor: BLM)の開発を行った。

RCSにおけるBLMの開発・運用と詳細な残留線量分布との関連付けから、ビーム損失の位置及び量を評価する方法として、シンチレータ部を小型化して真空チャンバー表面に直接取り付ける方法が有効であることを示した[4]。ここで、薄膜からの二次粒子測定にも同手法の適用を試みた。しかし、荷電変換薄膜はシフトバンク電磁石の間に設置しており、時間的に変動する漏れ磁場がシンチレータに取り付けた光電子増倍管(Photo Multiplier Tube: PMT)の増幅率に大きく影響していることが分かった。そこで、小型シンチレータを直接真空ダクトに取り付け、且つ PMT は電磁石から離して設置するために、2つの間を光ファイバーでつなぐ新たな BLM (Optical Fiber-BLM: OF-BLM)を開発した[10]。Figure 5に今回開発した OF-BLM の写真を示す。この OF-BLM を用いることで、薄膜由来の二次粒子の定量測定が可能となった。

次に、薄膜衝突回数率を算出するために、RCS の運転モードを変えて測定を行った。RCS ではビーム入射・加速後に取出しキッカー電磁石を使ってビームを取り出す“加速モード”の他に、ビームを入射した直後に DC キッカー電磁石で直ぐに取り出す“1/3 周モード”が存在する。この“1/3 周モード”を用いることで、入射ビームの薄膜衝突のみの二次粒子を測定することが可能となる。一方、“加速モード”の時は周回ビームの薄膜衝突を含んだ二次粒子測定になる。Figure 6(a)は2つのモードでの OF-BLM の生信号とエレクトロンキャッチャー(Electron Catcher: EC)の生信号を比較した典型的な測定結果である。EC 信号は入射した H-ビームから荷電変換薄膜ではぎ取った電子を捕捉・計測したもので、周回ビームの影響は受けなため、2つのモードでも同じ結果を示している。一方 OF-BLM による二次粒子計測は“1/3 周モード”に比べて“加速モード”はかかなり二次粒子が多く発生していることが分かる。つまり周回ビームの薄膜衝突回数は入射ビームの薄膜衝突回数に比べて非常に多いことが実験的にも確かめられた。ここで 2 つの

モードでの信号レベルが大きく異なるため、薄膜衝突率を算出する際には PMT 信号の線形応答性が課題となる。そこで、OF-BLM の信号を直接比較するのではなく、PMT に印加する高電圧(High Voltage: HV)特性から線形応答性を確認した上で比率を計算した。Figure 6(b)は MLF(150kW)と MR/HD(40kW)の利用運転時の結果をまとめたものである。OF-BLM の信号を入射時間で積分した値を HV 設定値毎にプロットした。一般に PMT は印加した HV の累乗に応答することが知られている[11]。測定範囲内で信号の飽和や感度以下もなく HV の 8.6 乗に比例していることが明らかになった。この比例係数の比から薄膜衝突率を算出することができ、その結果は MLF(150kW)で 8.95、MR/HD(40kW)で 65.3、であった。シミュレーションから算出した見積りはそれぞれ 6.3 と 70 であり、まだ多少の開きがある。測定精度や、実験とシミュレーションとの条件の違いを精査が必要である。



Figure 5: Photograph of an optical fiber beam loss monitor.

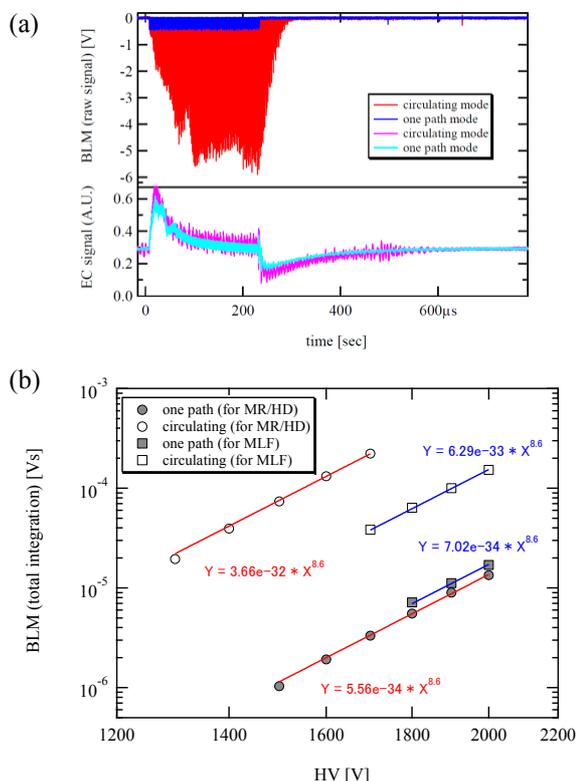


Figure 6: Estimation of the total foil hitting rate by comparing beam loss signals between the single pass extraction mode and the circulating mode in the RCS.

4. 荷電変換薄膜由来の二次粒子同定と角度及びエネルギー分布測定へ挑戦

ビーム照射により荷電変換薄膜から発生している二次粒子について、PHITS シミュレーションの結果は陽子及び中性子に対し放出角度がビーム進行方向から後方まで幅広く分布且つエネルギーも入射ビームのエネルギーである400MeV から以下低エネルギーまで幅広く分布していることを示した。これを実験により検証するために、Fig.7(a)に示すように RCS の上流にあるビーム調整用の100度ダンブラインのビームラインでビーム損失による一次粒子の散乱を作らない簡潔な実験系の構築を進めている。新たに Fig.7(b)に示す荷電変換薄膜放射線分析装置を製作し、2017年夏期メンテナンス期間中に設置する。この分析装置の真空チャンバーには30度毎に導入ポートが付いており、(1)放射化用金属ターゲットを取り付ける、(2)二次粒子検出モニタを設置する、等により薄膜由来の二次粒子の同定及び各粒子の角度分布及びエネルギー分布を実験的に測定・評価する。そのために必要な PHITS を用いた放射化法の検討や粒子弁別を可能とする新たな二次粒子検出器の開発も行っている。この新しい実験系の構築はビーム照射による放射化に関する新たな研究基盤として期待できる。

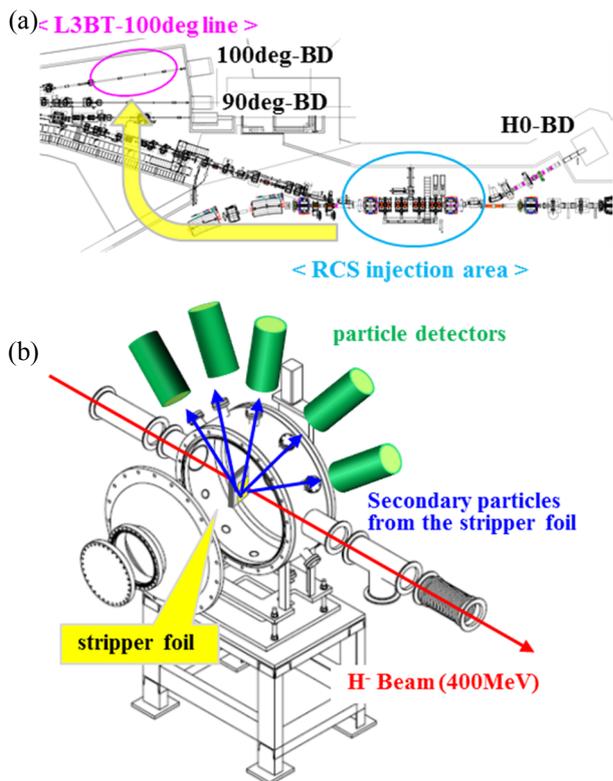


Figure 7: Layout of the next plan to measure the secondary particles from the stripper foil.

5. まとめ

J-PARC RCS では、コリメータ部の他に荷電変換薄膜の近傍において極めて高い残留線量が観測されており、

設計出力の 1MW 利用運転を実現するための大きな課題となっている。この放射化の原因は入射ビーム及び周囲ビームの荷電変換薄膜への衝突で起こる核反応によって生成された二次粒子によるものである。利用運転後に回収した荷電変換薄膜の放射化分析の結果、SiCファイバーの珪素による放射化の課題が新たに浮上した。このことはファイバーの材質を見直すことで、二次粒子の発生抑制と薄膜本体の線量低減の可能性を期待できる。また、今回導入した薄膜衝突率を用いることで、二次粒子の生成量や残留線量の評価が可能になることを示した。また新たに開発した OF-BLM によって薄膜からの二次粒子計測が可能となり、薄膜衝突率が実測できるようになった。これは RCS におけるより詳細なビーム調整の有効なツールとして期待できる。

ビーム照射による放射化に関して、研究基盤となる薄膜試験チャンバーを100度ダンブラインへの設置を計画している。この新しい実験系の構築により二次粒子の生成や放射化の過程についての理解を深め、より一層の放射化抑制に向けた取り組みを続ける予定である。

謝辞

Ge 半導体検出器によるガンマ線スペクトル分析には東北大学笹尾真実子氏にさまざまなご教示を賜りました。また薄膜衝突率のシミュレーションや解析について原子力機構サハ・プラナブ氏、發知英明氏にご協力いただきました。この場をお借りして御礼申し上げます。

なお、研究基盤として開発中の薄膜試験チャンバーと新しい実験系の構築については、JSPS 科研費 JP16K05027 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] K. Yamamoto, PRST-AB 11, 123501 (2008).
- [2] M. Yoshimoto *et al.*, JRNC, 3, 305 (2015), PP 865-873.
- [3] E. Yamakawa *et al.*, JPS Conf. Proc. 8, 012017 (2015).
- [4] M. Yoshimoto *et al.*, in Proc. of PASJ2016, pp.3927-3929, (THPEB020).
- [5] K. Okabe *et al.*, In these proceedings (WEP021).
- [6] I. Sugai *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A561(2006)16.
- [7] M. Yoshimoto *et al.*, in Proc. of IPAC10, Japan, pp.673-677, (WEPG22).
- [8] Y. Yamazaki *et al.*, in Proc. of IPAC10, Japan, pp.3924-3926, (THPEB019).
- [9] K. Yamamoto *et al.*, In these proceedings (TUP027).
- [10] M. Yoshimoto *et al.*, in Proc. of IBIC2016, Spain, pp.673-677, (WEPG22).
- [11] 浜松ホトニクス, 光電子増倍管 その基礎と応用; https://hamamatsu.hpk.co.jp/pmt_handbook_g (accessed 2017-07-28).