新博士紹介

氏名　加藤 新一*（原子力機構）
論文提出大学　東北大学
学位種類　博士（理学）
取得年月日　2015 年 3 月 25 日
題目　Localization of the large angle foil scattering beam loss caused by the multi-turn charge-exchange injection

1. はじめに

陽子ビームによって生成される２次粒子を用いた実験で高統計・高精度の結果を得ていくために，陽子加速器の大強度化が求められている．この大強度化にあたって最も重要なことは，ビームロスの低減, 制御である．なぜなら, ロスした陽子ビームは真空ダクトや周辺の機器を放射化し，メンテナンス時の被曝の原因となるからである．具体的には，作業場所での残留線量を 1 mSv/h 程度に抑える必要がある．

大強度出力の場合には, 低強度時には無かった, または無視することが出来たビームロスの起源が数多く顕在化する．その中でも，本研究では荷電変換多重入射に起因した大角度フォイル散乱ロスに着目し，1 MW の大強度出力を目指す J-PARC 3-GeV Rapid Cycling Synchrotron（RCS）を対象として，このロスの効果的な対処法の検討とその実証試験を行った．

2. 大角度フォイル散乱ロスと対処法

大強度陽子シンクロトロンや陽子蓄積リングでは，多くの粒子を蓄積させるために，ビーム入射を複数周回にわたって行い，入射ビームを周回ビームに繰り返し重ねる多重入射が行われる．また，入射ビームの周回ビームに対する位相空間座標を自由にコントロールするために，入射ビームとして周回ビームと反対の電荷をもつ負水素イオンを用いて，入射点に設置した荷電変換膜で陽子に変換して入射する荷電変換入射が必須の入射手法となっている．この荷電変換多重入射の際，先に入射された周回ビームは繰り返し荷電変換膜に衝突することになる．衝突した粒子は散乱されるが，この中で特に大角度に散乱されたものは，入射点下流部の真空ダクト等で直接ロスすることになる．これが大角度フォイル散乱ロスである．このロスは，散乱確率が小さいために，従来の低強度の条件ではロスの起源として重要視されていなかった．しかし大強度出力では，蓄積粒子数の増加によってロスの起源として顕在化する．**図 1** に，RCS の入射点で水平方向に一様に角度を振った粒子の飛跡計算結果を示す．RCS では，**図 1** 中に示される分岐部とビーム位置モニタ（BPM）の内周側のダクト表面で，220 kW での利用運転後にそれぞれ 4.5 mSv/h，6.2 mSv/h もの残留線量があり，出力が制限されていた．この原因は，**図 1** に示される通り，大角度散乱された粒子が入射点下流のアパーチャの狭い所で局所的にロスしたものであることが特定された[1]．また, シミュレーションの結果から，このロスが 10^{-5} 程度の低確率で発生するものであり，大強度出力特有のものであることが判明した．

そこで，このロスの対処法の検討を行った．荷電変換膜で散乱した粒子は原理的に制御できないことから，**図 1** に示すように，分岐部の下流に吸

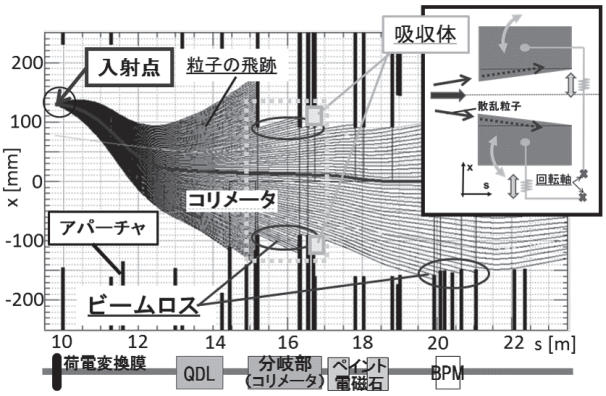

図 1　RCS 入射部下流域における，水平方向に大角度散乱した粒子の飛跡．図中の点線で囲まれた範囲がコリメータ．図の右上は吸収体の形状と駆動機構を示したもの．

* 日本原子力研究開発機構　J-PARC センター　JAEA/J-PARC（E-mail: skato@post.j-parc.jp）

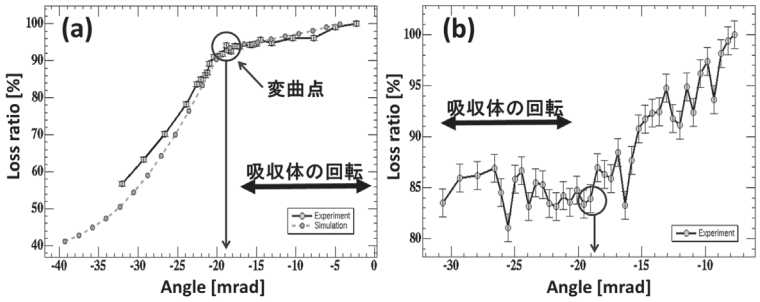

図 2 内周側吸収体の回転角度に対するロスの変化. (a)は BPM 内周側, (b)はペイント電磁石内周側でのロス. 破線でつながれた点はシミュレーション結果. 実線でつながれた誤差付きの点は実験結果.

収体を組み込んだ分岐ダクトをコリメータとして製作し，分岐部と下流部のロスをコリメータ内に局所化することとした[2]. 特に，吸収体には側面に角度をもたせ，角度をもって飛来してくる散乱粒子を吸収体正面で受け止められる構造とした. また，この吸収体は様々な運転パラメータに対応できるよう，位置，角度を動かせる構造にした.

3. 吸収体の調整

ロスの低減のためには，今まであまり考慮されてこなかったコリメータの吸収体角度の調整が重要であることを，シミュレーションで明らかにした. 具体的には，吸収体側面と散乱粒子の角度を数 mrad の精度で一致させることで，下流部全体のロスを最小化できることを明らかにした. そして，吸収体の回転に対する下流部のロスの応答から吸収体の角度を決定するという調整手法を考案した. **図 2** に，内周側吸収体の回転角度に対する，BPM 内周側とペイント電磁石内周側でのロスの変化を示す. シミュレーションより，BPM 内周側では**図 2**(a) のように変曲点を持ったロスの応答が得られ，この変曲点の角度の時に吸収体側面と散乱粒子の角度が一致することを明らかにした. 調整試験の結果，シミュレーション結果と同様のロスの応答が得られ，吸収体の角度を決定できた. また，**図 2**(b) のように，この角度の時に他の場所でのロスが最小化することを確認した. これらの結果から，吸収体の角度調整手法を確立できた[3].

4. 実験結果と考察

吸収体の位置と角度を調整し，300 kW での利用運転後の残留線量を測定した. その結果，問題となっていた BPM 内周側のダクト表面での残留線量を 0.9 mSv/h に抑制できた[4]. また，実験結果とシミュレーション結果の比較から，構築したシミュレーションモデルの妥当性を確認した. このモデルを用いて，RCS が目標とする 1 MW 出力時の残留線量を評価した結果，最も残留線量の大きい BPM 周辺の作業場所で 1 mSv/h 程度に抑制できるという結果を得た. これらの結果から，RCS における大角度フォイル散乱ロスによる出力制限を排除することが出来た. また，今回の一連の研究によって，大角度フォイル散乱ロスの効果的な対処法を確立することが出来た.

5. 今後の抱負

現在，原子力機構の博士研究員として，J-PARC RCS のさらなる大強度化に向けた研究に取り組んでいる. RCS は 2015 年 1 月に 1 MW 相当のビーム加速を達成し，安定した利用運転に向けた更なる調整が進められている. 私も大強度化に寄与すべく，今後は空間電荷力を緩和するための電荷密度分布の制御と均一化に着目して，研究を行っていくつもりである.

参考文献

1) P. K. Saha, In Proceedings of the 46th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams, Morschach, Switzerland, 2010 (HB2010), pp. 324-328.
2) K. Yamamoto, et al., In Proceedings of the 1st International Accelerator Conference, Kyoto, Japan, 2010 (IPAC10), pp. 2842-2844.
3) S. Kato, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 16 (2013) 071003.
4) S. Kato, et al., In Proceedings of the 5th International Accelerator Conference, Dresden, Germany, 2014 (IPAC14), pp. 873-875.