論 文 内 容 要 旨

氏　　名	加藤　新一	提出年	平成 26 年
学位論文の 題　　　目	Localization of the large angle foil scattering beam loss caused by the multi-turn charge-exchange injection (陽子加速器における荷電変換入射起因のビーム損失の研究)		

論 文 目 次

1 Introduction

2 A high-intensity proton synchrotron and the injection scheme

2.1 Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)

2.2 Rapid Cycling Synchrotron (RCS)

2.3 Multi-turn charge-exchange injection scheme

2.4 Transverse painting injection scheme

2.5 Longitudinal painting injection scheme

2.6 Charge-exchange foil in the injection scheme

3 The large-angle foil-scattering beam loss and the countermeasure

3.1 Beam loss issue around the injection downstream area

3.2 Tracking simulation of the foil scattered particle

3.3 Estimation of the event rate of the large-angle foil-scattering

3.4 Countermeasure of the large-angle foil-scattering beam loss

3.5 LSB-Collimator

3.6 Design of the collimator absorber

4 Optimization method of absorbers for sufficient localization

4.1 Simulation model of the Large Scattered Beam Collimation System

4.1.1 SIMPSONS simulation

4.2 Optimization method of absorber position

4.3 Optimization method of absorber angle

5 Experimental results

5.1 Setup of the experiment

5.1.1 Detection system of the beam loss

5.1.2 Beam conditions for the experiment

5.1.3 Particular injection scheme at 2014 first operation

5.2 Optimization results of absorber position

5.3 Optimization results of absorber angle

5.4 Loss suppression result in 300 kW user operation

6 Simulations and Discussion
6.1 Modeling of the beam condition for the realistic simulation
6.1.1 Injection beam
6.1.2 Time variation of ring orbit during painting injection
6.1.3 Other error sources
6.2 Comparison between experiment and simulation results
6.2.1 Foil hitting probability
6.2.2 Absorber position
6.2.3 Absorber angle
6.2.4 User operation results
6.3 Localization effect in the 1 MW operation
6.4 Discussion for further beam loss suppression
6.4.1 The present remaining loss
6.4.2 The reduction method of the foil hitting probability
6.4.3 New painting pattern for the foil hitting probability reduction
6.4.4 The loss dependence on the foil thickness around downstream area
7 Conclusion
Acknowledgements
A The Linear betatron motion and the tracking method of SIMPSONS
B Calculation method of the Poisson equation in SIMPSONS
C Comparison between the experimental results and the SIMPSONS simulation
References

論　文　要　旨

陽子加速器は、物質構造解析実験や原子核素粒子実験といった領域で、中性子やニュートリノ、パイ粒子といった2次粒子の生成源として用いられている。これらの最先端の実験は、大強度陽子加速器施設(J-PARC)をはじめ世界中で行われている。これらの実験で高統計・高精度の結果を得るためには、大出力の陽子加速器が必須である。例えば、J-PARC 3-GeV シンクロトロン(RCS) は、KEK の陽子ブースターリングと比較して、2 桁高い1 MWの大強度出力を目指している。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、真空ダクトなどに衝突してビームロスとなった陽子ビームは、核反応によって大量の2 次粒子を発生させ、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。つまり、ビームロスは陽子加速器の出力を制限する最大の要因である。

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。例えば、大口径の電磁石による非線形磁場成分や、粒子同士の反発力である空間電荷力などである。そこで、本論文では、大強度陽子シンクロトロンや陽子蓄積リングで新たに生じるビームロスの理解とその解決を研究課題とした。具体的には、荷電変換多重入射に起因した大角度散乱ロスに着目した。

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という手法が用いられ

る。これは多重入射と呼ばれる。この際、入射ビームに陽子を用いると、先に入射した周回ビームと同じ位相空間座標に重ねて入射させることができない。つまり、入射回数に従ってビームサイズを増加させしてしまう。このため、入射回数は許容できるビームサイズによって制限されてしまう。この問題を解消するため、大強度陽子シンクロトロンや陽子蓄積リングでは、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いる。この負水素イオンは、入射点に導かれたのち、入射点に設置した荷電変換膜で陽子に変換されて入射される。これは荷電変換入射と呼ばれる。この入射を行うことで、入射ビームを周回ビームに完全に重ねることができ、入射回数の制限を取り除くことが出来る。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こともできる。このような理由から、大強度陽子シンクロトロンや陽子蓄積リングでは、荷電変換多重入射は必須の手法である。

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。これが大角度散乱ロスである。この大角度散乱ロスは、従来の低強度の陽子シンクロトロンや陽子蓄積リングではビームロスの起源として認識されていなかった。なぜなら、荷電変換膜は薄く、ロスを引き起こすような大角度散乱の確率は非常に小さいからである。しかし大強度出力では、蓄積粒子数の増加によって、このロスが顕在化する。本論文では、荷電変換多重入射に起因した大角度散乱ロスが大強度陽子シンクロトロンや陽子蓄積リングで問題となることを提起し、効果的な対処法の検討とその実証試験といった包括的な議論を世界に先駆けて行った。

本研究では、J-PARC RCS を実際の例として用いた。RCS は、400 MeV の負水素イオンを用いた荷電変換多重入射を行っている。まず、RCS での事例から、大角度散乱ロスが大強度陽子シンクロトロンや陽子蓄積リングで問題となることを示した。RCS では、入射点下流部で非常に大きな残留線量が観測されており、出力が制限されていた。具体的には、181 MeV の負水素イオンを用いた入射で 220 kW 運転を行った時に、最も大きなところで 6.2 mSv/h もの残留線量がダクト表面で測定されていた。シミュレーションと実験の結果から、このロスが 10^{-5} 程度の低確率で発生する水平方向への大角度散乱によるものであることを示した。

2 つ目に、このロスの対処手法を議論した。荷電変換膜での散乱は原理的に減らせず、またコントロールもできないことから、新たにコリメータを導入しこれらのロスをコリメータ内に局所化することとした。特に、コリメータの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つ目に、コリメータの局所化効果や吸収体の調整手法の検討、残留線量の見積もりのために用いる、シミュレーションモデルを構築した。また、このモデルを用いた吸収体の調整手法の検討を通して、今までのコリメータではあまり考慮されてこなかった吸収体の角度調整というものが、効率的なビームロスの局所化のためには重要であることを示した。具体的には、吸収体の側面と散乱粒子の角度を、数mradの精度で平行にすべきであるという結果を得た。そこで、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角度調整手法を新たに考案した。

4つ目に、今回新たに導入したコリメータによる、入射点下流部のロスの局所化効果を試験した。吸収体の挿入前後でのロスの変化を詳細に測定するために、下流部に複数台のプラスチック

シンチレータータイプのロスモニタを設置し、ロスを測定した。まず、吸収体の挿入によって下流部のロスが減少することを確認し、挿入距離を決定した。次に、考案した手法を用いて吸収体の角度調整を行った。その結果、予想されたものと同様のロスの応答が得られ、考案した手法での調整に成功した。最後に、実際の供用運転でのロスの測定、残留線量の測定を行った。その結果、300 kW出力運転において、最も大きな残留線量が測定されたダクト表面で、残留線量を0.9 mSv/hまで抑制できていることを確認した。

5 つ目に、実験結果と、シミュレーションとの比較を行った。シミュレーションには、入射ビームサイズや入射軌道の時間変動といった、実験で実測した条件を導入した。その結果、挿入量、吸収体角度に対するロスの変化、ロスの時間構造の実験結果を再現することが出来た。これらから、シミュレーションの妥当性が確認出来た。そこで、このシミュレーションを用いて、RCS が目標とする 1 MW 出力時での残留線量の評価を行った。その結果、今回導入したコリメータによって、作業場所での残留線量を 1 mSv/h 程度に抑えられるという結果を得た。

6 つ目に、さらなる大角度散乱ロスの削減手法を議論した。大角度散乱ロスの削減のためには、周回ビームの荷電変換膜への衝突回数を減らすことが有効である。検討の結果、荷電変換多重入射中の、入射ビームの位相空間座標コントロールの最適化を行うことで、荷電変換膜への衝突回数を現在の 80 %まで減らすことができるという結果を得た。

今回の研究によって、RCS の 1 MW 出力達成への制限を排除することが出来た。これは、J-PARC で行われている実験の高精度化に直接的に貢献するものである。また、今回考案した大角度散乱ロスへの対処手法は、入射下流にコリメータを設置するスペースさえ確保すれば、リングのラティス設計にほとんど制約を与えないため、スタンダートな手法となりえる。つまり、今回の研究によって、今後の大強度陽子シンクロトロンや陽子蓄積リングで適用されうる有力な手法として、荷電変換入射に起因する大角度散乱によるビームロスの局所化手法を確立することが出来た。

論文審査の結果の要旨

大強度陽子加速器施設（J-PARC）に代表される大強度陽子加速器では，機器保守時の被ばくの観点から，ビームロスが出力ビームパワーを制限する。したがって，大強度出力を達成するためには，ビームロスの低減，及び制御が最重要課題である。真空チャンバー等に衝突しビームロスとなった陽子は，核反応により大量の二次粒子を発生させ，真空チャンバーや周囲の機器を放射化し，機器保守時の作業員の被ばく原因となる。これまでの経験から作業場所での残留線量は 1 mSv/h 程度に抑制する必要がある。本研究論文は，J-PARC 3GeV シンクロトロン（RCS）を用いて，陽子加速器においてこれまでビーム強度が小さい場合には観測されなかったビームロス，すなわち大強度陽子加速器で初めて顕在化したビームロスの理解とその解決を目的とした。

RCS でビーム出力 220ｋW でのビーム利用運転を行った際に，ビーム入射点下流で 6 mSv/h を超える大きな残留線量が発生した。このビームロスはそれ以前には観測されていなかった。本研究論文では，シミュレーションと実験から，本ビームロスが 10^{-5} 程度の低確率で発生する入射に利用する炭素薄膜との大角度散乱が原因で発生することを突き止めた。次に，このロスの対処として，コリメータを導入することを提案しロスを局所化させることとした。局所化効率やコリメータに使用する吸収体の調整手法，及び残留線量を見積もるための計算コードを構築するとともに，ビームロスモニタを用いた全く新しい吸収体調整手法を考案した。ビーム試験で本調整方法の有効性，及びコリメータの有効性を証明した。最後に，大強度陽子ビームに対して，運動力学の線形効果，及び非線形効果を考慮した計算コードを構築し，RCS での１MW 出力時の大角度散乱起因のビームロスを最小限に抑制するビーム入射方法を提示した。本研究の成果より，RCS の設計値である１MW 出力達成への制限を排除することができた。実際，J-PARC RCS では平成 27 年 1 月 10 日に，短時間ではあるが，設計出力の１MW を達成した。

これらの成果は，自立して研究活動を行うに必要な高度な研究能力と学識を有することを示している。したがって，加藤新一提出の博士論文は，博士（理学）の学位論文として合格と認める。