

(論文内容の要旨)

本論文は大強度陽子加速器 J-PARC における入射器 LINAC と 3GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron) の間のビーム輸送系 (L3BT) のビーム動力学設計を遂行したものであり、LINAC と RCS 間での空間電荷効果を考慮したビームマッチングを探求し、RCS に 3GeV, 1MW の大電力ビーム入射を実現するための横方向位相空間への多重入射 (Transverse Painting Injection) と縦方向位相空間における運動量シフトによる入射 (Momentum Offset Injection) を実現するためのスキームの提案を行い、計算機シミュレーションによりその実現性の検証を実施している。

具体的には Transverse Painting Injection による横方向位相空間におけるマッチングの実現のため、入射 H ビームのテールのコリメーションを行い、100% エミッタンスで $6\pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 以下のビームエミッタンスを実現している。その際、コリメータとしては炭素薄膜を用い、H のテールを荷電変換して電磁石でビームダンプに除去している。この過程における空間電荷効果及びストリッパフォイルでの多重散乱効果を 3 次元 Particle in Cell Code, IMPACT 及び、モンテカルロシミュレーションコード GEANT を駆使した最適化を行い、コリメータの厚みの最適値として $\sim 10\text{mg}/\text{cm}^2$ を求め、制御不能なビームロス $1\text{W}/\text{m}$ 以下に抑制して、Manual Maintenance が可能な残留放射線レベルの実現に成功し、発表論文 1 (Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A589** (2008) pp1-12) に発表している。

LINAC からの大強度ビームの RCS リングへの入射に際しては、ビーム軌道分散のマッチングが重要であり、通常リング中のバンチは多数の LINAC バンチが重畳されているので、入射に際してはビーム運動量中心の変動と運動量揺れが問題となる。運動量中心の変動は空間電荷効果なしの軌道分散により横方向のビーム動力学に影響を与え、運動量揺れは空間電荷効果を考慮した軌道分散に依存するため、理想的なマッチングのためには、両方の軌道分散の最適化が必要である。本論文ではバンチビームに対して σ -matrix calculation を用いて迅速に空間電荷込みの軌道分散を算出する手法を提案し、空間電荷なし及び空間電荷込みの両者の軌道分散の最適化を行って、入射マッチングを遂行し、その結果を粒子シミュレーションと比較検討し、妥当性の検証も実施している。こうした成果は発表論文 2 (Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, **A576** (2007) pp274-286) に公表している。

上記の運動量中心の変動と運動量揺れを独立に制御可能なシステムとして、2 台の高周波空洞を用いた機能分散型デバンチャーシステムを提案し、簡易化した解析的モデルによる議論を展開し、粒子シミュレーションによる設計方針の妥当性の確認を遂行し、0.2% 以下の運動量揺れを RCS への入射点において実現し、発表論文 3 (Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A581** (2007) pp606-618) に発表している。

上記の成果に基づき、RCS において 1MW のビームパワーを実現するスキームの構築を実現しているが、こうしたスキームの妥当性は上記研究における計算機シミュレーションに加えて、最近進行しつつある J-PARC のコミッショニング過程において達成されたビーム強度範囲内ではあるが、実験的にも確認されている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は J-PARC という世界でも最先端のビーム強度を目指す陽子加速器に於いて、メンテナンスが可能なレベルに残留放射線を抑制することが可能な範囲内にビーム損失を抑えつつ、大強度ビームパワーの実現を可能とする LINAC から高繰り返しシンクロトロンリング (RCS) へのビーム輸送及びマッチングを実現するためのスキームを提案している。この論文において採用されているスキームは横方向の位相空間における多重入射、ビーム軌道分散のマッチング及びデバンチャーによるビーム運動量中心の変動及び運動量拡がりの抑制であり、こうしたスキームの採用が、RCS 入射点での運動量拡がり及び横方向エミッタンスを夫々 $\pm 0.1\%$ 及び $6\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 以下に抑えて、Painting 入射により、Phase I で実現している 181 MeV, ピーク電流値 30mA の LINAC からのビームを、許容ビーム損失の範囲内で RCS へ入射することに成功する上で大きな役割を果たしたといえる。

本論文では、横方向のコリメーションのために炭素薄膜を用いて周辺のテール部の H ビームのストリッピングを行い、電磁石を用いて不要ビームをビームダンプに導き、ビーム損失の局所化を実現して加速器周辺エリアにおける残留放射線レベルの低減を図っているが、3次元 Particle in Cell Code, IMPACT 及びモンテカルロシミュレーションコード GEANT を駆使した独自に開発した手法により、炭素膜厚を $10\text{mg}/\text{cm}^2$ に設定することによりこの放射線レベルを $1\text{W}/\text{m}$ の許容範囲内に抑える事が可能であることを示しており、これが J-PARC、RCS の予定通りの早期コミッショニングの実現に大きな役割を果たしたといえる。

また、軌道分散のマッチングに関しても、空間電荷を考慮したバンチビームの軌道分散を σ -matrix calculation を用いて迅速に行う手法を開発し、マッチングの最適化を実現して、横方向ビームエミッタンスの増大につながるミスマッチの抑制を実現しており、ユニークな成果といえる。更に、縦方向位相空間内でのビームの中心運動量の変動と運動量拡がりを独立に制御するため、ビーム輸送系 (L3BT) 内に 2 台の高周波空洞を設置し、これら 2 つの自由度を個々に制御する機能分散型デバンチャーシステムを初めて採用し、RCS 入射点における $\pm 0.1\%$ 以下の運動量拡がりを実現しているが、これは大強度ビームの入射・蓄積のユニークな手法として注目に値するものであり、今後 J-PARC のコミッショニングが進行し、ビーム輸送系が取り扱うビームパワーが増大するにつれてその真価が遺憾なく発揮されるものと考ええる。

以上述べた理由により、本論文は博士 (理学) の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。