

|           |                                                                                                                                                   |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氏 名       | ふじもと しんじ<br>藤 本 慎 司                                                                                                                               |
| 学位(専攻分野)  | 博 士 (理 学)                                                                                                                                         |
| 学 位 記 番 号 | 理 博 第 3127 号                                                                                                                                      |
| 学位授与の日付   | 平 成 19 年 3 月 23 日                                                                                                                                 |
| 学位授与の要件   | 学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当                                                                                                                           |
| 研究科・専攻    | 理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻                                                                                                                   |
| 学位論文題目    | Beam Commissioning and Suppression of Transverse Coherent<br>Instability at S-LSR<br>(小型イオン蓄積リング S-LSR におけるビームコミッショニングおよび横方<br>向コヒーレントビーム不安定性の抑制) |
| 論文調査委員    | (主 査)<br>教 授 野 田 章 教 授 笹 尾 登 助 教 授 瀬 戸 誠                                                                                                          |

### 論 文 内 容 の 要 旨

京都大学・化学研究所で建設を進め、2005年10月に完成したイオン蓄積・冷却リング S-LSR のビームコミッショニングに向けた、ビームモニターの開発に関して、本研究の前半部分は記述している。既存の DC-CT 及び Schottky Monitor に加えて、周回イオンビームが、リング中の残留ガスを電離することにより生成するイオンを、高圧によりビーム進行方向と直角方向に加速した後、マイクロチャネルプレート (MCP) で検出して、ビームのプロファイルを観測する装置 (ビームプロファイルモニター) および周回ビームが電極に静電誘導する電荷を検出しビームセンターの位置を検出する装置 (Electro-Static Beam Position Monitor: ESBPM と略記) の開発を行い、これらのモニターを既存の DC-CT 及び Schottky Monitor と併せ用いることにより、S-LSR のビームコミッショニングに成功している。更に、ESBPM を用いた観測に基づく Closed Orbit Distortion (COD と略記) の補正により、COD を最終的には 0.2mm 以下に抑制している。また、ビームプロファイルモニターは S-LSR での 7MeV 陽子での測定に先立ち、KSR での電子ビームに対するビームプロファイルの測定も行い、0.3~0.4mm の精度で測定が可能であることを明らかにしている。

本研究では、これらのモニターを用いて、7MeV 陽子の電子ビーム冷却にも成功し、40 $\mu$ A 程度のビーム強度に対して、ビームサイズ (1 $\sigma$ ) 及び運動量拡がりそれぞれ、0.5mm 及び  $4.5 \times 10^{-4}$  に縮減することに成功している。更に、電子ビーム冷却を用いて、既に入射されたビームの位相空間内での面積を縮減した後、位相空間内に出来た空きスペースに次のビームを入射する、Electron-Cool Stacking により、蓄積陽子ビームの強度を増大させることにも取り組み、600 $\mu$ A 近辺でビーム強度が飽和して増大できなくなる現象を観測している。更に、ESBPM からのビーム信号及びビームのショットキー信号の観測により、この現象はビームが真空槽等に誘起する電場の影響で発生する垂直方向のコヒーレントビーム不安定性に起因していることを解明している。

本研究では更に、上記のビーム不安定性の抑制のため、ESBPM の1つからのビーム信号を前置増幅器及び増幅器と減衰器を用いて信号強度を調節した後、可変遅延回路でタイミングを合わせ、リング内に既設のベータトロン振動数測定用の RF ノックアウト用キッカー電極に給電して、上述の垂直方向のコヒーレント運動を打ち消すキックをビームに与えるフィードバック ダンピングを適用することにより、蓄積可能な 7MeV 陽子のビーム電流を 800 $\mu$ A 以上に増大させることを可能としている。この過程で、フィードバックのゲインを過大にした場合、垂直方向の不安定性は抑制されるが、水平方向の不安定性が生ずるため、適切なゲインの範囲が存在すること、またフィードバックのタイミングも 2ns 以内の精度で調整する必要があることも明らかにしている。

### 論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

申請者の藤本慎司は、京都大学・化学研究所で建設を進めてきたイオン蓄積・冷却リング S-LSR のビームコミッショニングに向けて、ビーム観測装置全般を担当し、既存の DC-CT 及び Schottky Monitor を用いた観測に加えて、MCP を用

いたビームプロファイルモニター及び静電型位置モニター（ESBPM）の開発を中心となって推進し、これらのモニターの設計・製作に携わり、その S-LSR への設置・調整を行い、S-LSR のビームコミッショニングが、開始から数日で、ビーム周回から入射・蓄積及びビーム軌道の観測を行うことに成功するうえで中心的な大きな貢献を果たした。

具体的には、ビームプロファイルモニターに関しては、S-LSR への設置に先駆け、電子蓄積リング KSR 中に設置を行い、世界的にも初めて電子ビームに対してもこの方式でビームプロファイルの測定を実施すると共に、詳細な特性評価を行っている。また、ESBPM に関しては、S-LSR ががん治療用加速器の小型化という役割を有していることから、サイズを可能な限り低減することを目指し、すべて四重極電磁石中の真空槽内に設置することとし、この真空槽が偏向電磁石部分と一体として製作される関係上、偏向電磁石と反対側の片側からのみの固定・位置調節で 0.1mm の精度で電極位置を固定する手法を確立している。更に、上記の位置的な制約から個々の電極の特性の較正がリングの現場では不可能であることを考慮し、特性評価のための特別の装置を製作し、設置に先立ち12台全台数にわたって特性のキャリブレーションを行い、高精度のビーム位置測定を可能とした。申請者はこうした努力により、ビームの平衡軌道のずれを最終的に 0.2mm 以下に追い込んでいる。また、電子ビーム冷却はコミッショニングの開始当日に、ビーム冷却効果の確認に成功したが、これには上記平衡軌道の補正と申請者の開発した MCP を用いたビームプロファイルモニターによる観測が大きく貢献している。

Electron-Cool Stacking による、蓄積陽子ビームの強度増大に関しても、 $600\mu\text{A}$  近辺でのビーム強度の飽和が、垂直方向のコヒーレントビーム不安定性に起因していることを、ESBPM からのビーム信号及びビームのショットキー信号の観測によりいち早く示し、こうしたビーム不安定性を能動的に抑制するため、自身の開発した ESBPM の信号を用いたフィードバックダンピングを適用することに取り組み、ビームの蓄積可能な強度を  $800\mu\text{A}$  以上に増大させることに成功している。この過程でフィードバックゲインには適切な範囲が存在し、過度のゲインは水平方向の不安定性を生ずることを明らかにしている。また、フィードバックのタイミングは 2ns 以内の精度で合わせる必要があることを明らかにし、S-LSR における垂直方向のコヒーレントビーム不安定性は 100MHz 近辺の周波数成分が主として寄与していることを初めて明らかにした。これは、昨年つくばで開催された国際ワークショップ HB2006 でも注目を集めている。

以上の理由により、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た。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。