

## 新博士紹介

氏名 中尾 政夫\* (放医研)  
 論文提出大学 京都大学  
 学位種類 博士(理学)  
 取得年月日 2013年3月25日  
 題目 シンクロ・ベータトロン共鳴結合  
 による間接的横方向レーザー冷却  
 の実証

### 1. はじめに

ビームの品質向上のために、確率冷却、電子ビーム冷却、レーザー冷却といったビーム冷却技術が開発されてきたが、理論的に最も低温のビームを実現できるのはレーザー冷却である。近年イオントラップ中のイオン集団をレーザー冷却することでクーロン結晶を生成することが確認<sup>1,2)</sup>されている一方で、理論的には蓄積リングを周回するイオンビームを冷却することでクーロン結晶がリング中を周回しているのと同様なクリスタルビームが生成可能であることが理論的に予言されている<sup>3,4)</sup>。重心系運動エネルギーが1 eVと非常に低いMg<sup>+</sup>イオンビームではレーザー冷却により3次元クリスタルビームが生成されたと報告されている<sup>5)</sup>が、高速イオンビームの結晶化はまだ実現していない。

リング中で運動しているビームをレーザー冷却するためには、両者をオーバーラップさせる必要があるため、レーザーはビームの前方または後方から照射することになり、直接レーザー冷却が可能であるのはビームの進行方向のみである。クーロン散乱によって横方向から進行方向へ熱が移行するため、進行方向が冷却されれば横方向も間接的に冷却されるが、冷却力は弱い。この問題を解決するため、シンクロ・ベータトロン共鳴結合<sup>6,7)</sup> (SBRC, Synchro-Betatron Resonance Coupling)が理論的に提唱された。この方法では、ベータトロンチューンとシンクロトロンチューンを差共鳴の条件にし、進行方向と横方向を結合さ

せる場があれば、縦方向の冷却力を横方向に移すことで能動的な横方向の冷却が実現できる。

修士課程時には前段階としてバンチしたビームの進行方向の冷却を確認した。博士課程ではSBRC条件で横方向の運動量広がり小さくなると同時に進行方向の運動量広がり大きくなることを光学的方法で確認した。

## 2. 実験装置

### 2.1 S-LSR

京都大学化学研究所で2005年より稼働しているS-LSR(図1)は、6回対称性を持つ周長22.557 mの小型イオン蓄積・冷却リングである。本実験では、イオン源から取り出された40 keVの<sup>24</sup>Mg<sup>+</sup>ビームを入射して周回させた。また、ビームはRF drift tubeにかけられるRF電場によりバンチ化される。

### 2.2 レーザー

冷却に用いるレーザーとして、波長532 nmの固体レーザーにより560 nmのリング色素レーザーを励起し、その出力レーザーを倍波発生器に導き280 nm、15 mWの紫外線レーザーを得ている。このレーザーをS-LSRの直線部でビームの進行方向に合流させることでビームを冷却し

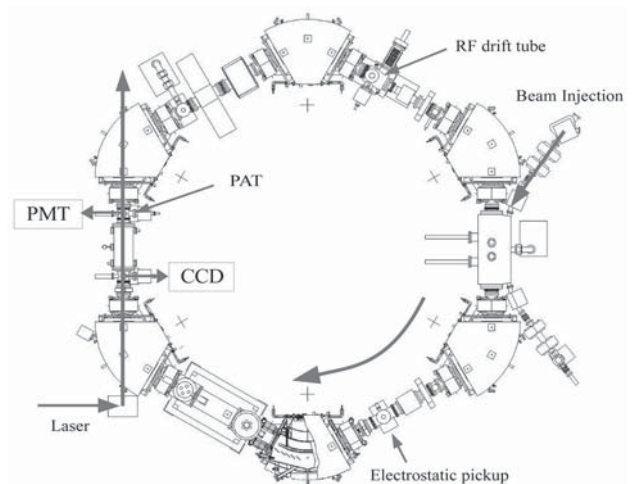


図1 S-LSRの概略図

\* 放射線医学総合研究所 National Institute of Radiological Sciences (E-mail: nakao\_m@nirs.go.jp)

た. 色素レーザーの安定化, 光学系の最適化は念入りに行った.

### 2.3 光学的ビーム観測装置

ビームの観測は, レーザー冷却の際にレーザーによって励起されたビーム中の粒子の脱励起に伴って放出される自発光を利用した. 水平方向のビームプロファイルの測定には CCD カメラを, 進行方向運動量広がり の測定には PAT (Post Acceleration Tube)<sup>8)</sup> を用いた. 光量が少ない領域でも観測できるように測定方法を改善した.

## 3. 実験結果と考察

ベータトロンチューンを固定したまま, シンクロトロンチューンを変化させた際に, CCD カメラのイメージサイズは, SBRC 条件で極小値 0.55 mm ( $1\sigma$ ) をとった. この極小値におけるビームの水平方向温度は 200 K に相当する. 一方, PAT で測定した進行方向の運動量広がり は増大した. これは温度に換算すると 14 K から 21 K に上昇したことに相当する (図 2). これらの現象は SBRC によって水平方向の熱が進行方向に移行したこと

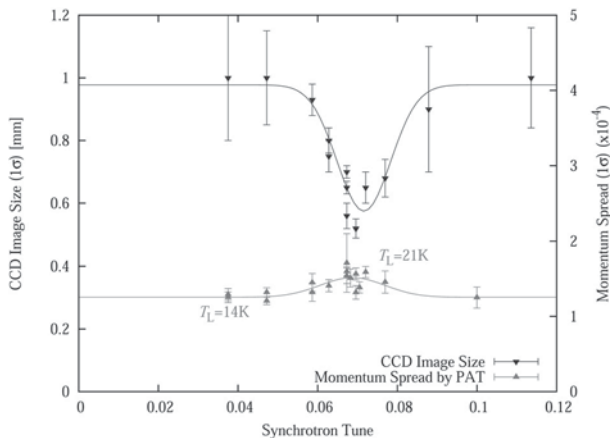


図 2 CCD カメラで測定した入射から 30 秒後の水平方向 CCD イメージサイズと PAT で測定した入射から 1 秒後の進行方向運動量広がり

を示唆している<sup>9)</sup>.

その後の S-LSR におけるビームのレーザー冷却実験では, ビーム量が少なくても冷却力が維持できる SBRC 法の利点を生かし, ビーム量を減らした条件で実験を行った. そして, スクレイパーを用いたビームサイズの測定<sup>10)</sup>, ソレノイドコイルを用いた鉛直方向と水平方向の結合, レーザー径と CCD カメラの測定条件の最適化等の改善により, 水平方向と鉛直方向において高速イオンビームの間接的レーザー冷却の最低温度を実現した<sup>11)</sup>.

## 4. 今後の抱負など

現在, 放射線医学総合研究所の博士研究員として働いている. 博士課程で得た知識と経験を生かし物理工学部サイクロトロン運転室においてサイクロトロンの大強度化に向けたシミュレーション計算を行っている. 大学, 大学院でお世話になった方には感謝しております. ありがとうございました.

## 参考文献

- 1) F. Diedrich, et al., Phys. Rev. Lett., vol. 59, p2935, 1987.
- 2) D. J. Wineland, et al., Phys. Rev. Lett., vol. 59, p2935, 1987.
- 3) E. L. Pollock and J. P. Hansen, Phys. Rev. A, vol. 8, p. 3110, 1973.
- 4) A. Rahman and J. P. Schiffer, Phys. Rev. Lett., vol. 57, p. 1133, 1986.
- 5) T. Schätz, et al., Nature, vol. 412, p. 717, 2001.
- 6) H. Okamoto, et al., Phys. Rev. Lett., vol. 72, p. 3977, 1994.
- 7) H. Okamoto, Phys. Rev. E, vol. 50, p. 4982, 1994.
- 8) W. Petrich, et al., Phys. Rev. A, vol. 48, p. 2127, 1993.
- 9) M. Nakao, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, vol. 15, p. 110102, 2012.
- 10) H. Souda, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 52 (2013) 030202
- 11) A. Noda, et al., Proc. of COOL'13