

PRESENT STATUS OF ION ACCUMULATION AND COOLER RING, S-LSR

Akira Noda ^{#A)}, Hikaru Souda ^{A)}, Hiromu Tongu ^{A)}, Masao Nakao ^{A)}, Yuuji Nasu ^{A)}, Koichi Jimbo ^{B)}, Hiromi Okamoto ^{C)}, Kazuya Osaki ^{C)}, Koji Noda ^{D)}, Shinji Shibuya ^{E)}, Tetsuya Fujimoto ^{E)}, Soma Iwata ^{E)}, Manfred Grieser ^{F)}, He Zhengqi ^{G)}

^{A)} Institute for Chemical Research, ^{B)} Institute of Advanced Energy, Kyoto University., Gokano-sho, Uji-city, Kyoto, 611-0011, Japan

^{C)} Graduate School of Advanced Science and Matter, Hiroshima University., Kagamiyama 1-3-2, Higashi Hiroshima, Hiroshima, 739-0046, Japan

^{D)} National Institute of Radiological Sciences, Anagawa 4-9-1, Inage-ku, Chiba, 263-8555, Japan

^{E)} Accelerator Engineering Cooperation, Konakadai 3-8-5, Inage-ku, Chiba, 263-0043, Japan

^{F)} Max-Planck Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, 69117 Heidelberg, Germany

^{G)} Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing, 100084, China

Abstract

At S-LSR of ICR, Kyoto University, approach to multi-dimensional laser cooling of 40 keV Mg ion beam with the use of synchro-betatron coupling and a short bunch (~3 ns) formation of 7 MeV proton beam by application of electron cooling and its application for bio-medical cell irradiation with a high peak intensity have been performed. In the present paper, these results are described.

1. はじめに

京大・化研では 2001 年度から先進小型加速器のための要素技術の開発の予算を得て、イオン蓄積・冷却リング S-LSR の建設を進めてきた(図 1 参照)が、リングの完成と共にいち早く 7 MeV 陽子ビームの電子ビーム冷却実験をドイツ、ハイデルベルグのマックス・プランク原子核研究所及びロシア、ドゥブナの連合原子核研究所、放射線医学総合研究所との共同研究により推進し、2007 年には世界で始めて陽子ビームでの 1 次元オーダリングの実証に成功している^[1]。

S-LSR では当初のがん治療用のイオン加速器の小型化に向けて、レーザー生成イオンビームの電子ビーム冷却に関しても、イオンビームとレーザービームの相対速度を掃引することにより、冷却時間を 1 桁程度縮減可能であることも示している^[2]が、

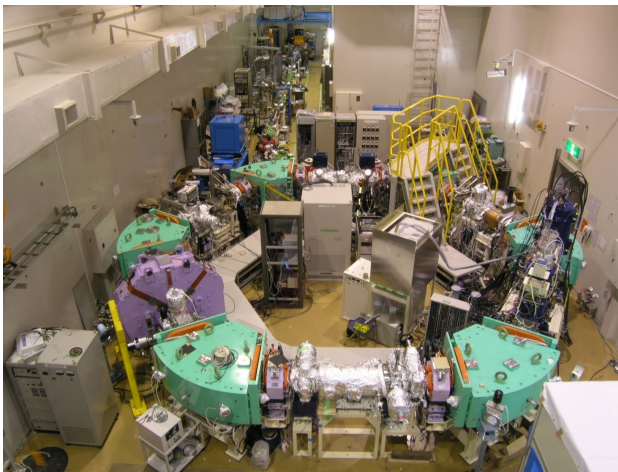


図 1 : S-LSR の全景

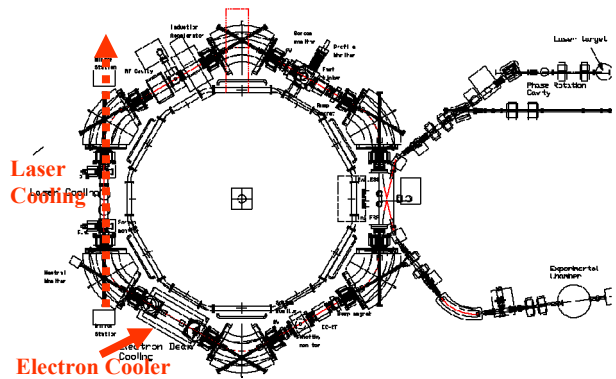


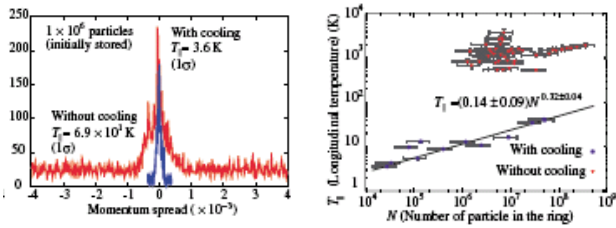
図 2 : S-LSR のレーザー及び電子ビーム冷却系

主として加速器中のビームの温度を可能な限り低減することを追及してきた。

ビームの冷却力としては、レーザー冷却が確率冷却、電子ビーム冷却等に比して格段に強い冷却力が報告されている^[3]が、この手法の場合、レーザーの進行方向の自由度のみが冷却可能であり、これと直交する方向の自由度に対しては、Intra-Beam Scattering によるビーム進行方向自由度と直角方向自由度の結合による間接的横方向冷却^[4]及びレーザービームとイオンビームの中心を平行にずらして横方向の冷却力を発生させる Dispersive Coupling による Transverse Laser Cooling^[5]が報告されているが、いずれもビームの進行方向(縦方向)の冷却時間に比して冷却時間が長く、極低温ビームの実現のためにはこの横方向冷却の効率化が重要な役割を果たすと考えられる。

一方、電子ビーム冷却により短バンチ(3ns 程度)を形成し、S-LSR から早い取り出しでリング外に取り出すことに成功している^[6]が、最近のレーザー生成陽子ビームを用いた DNA 二重鎖切断の報

#nodai@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

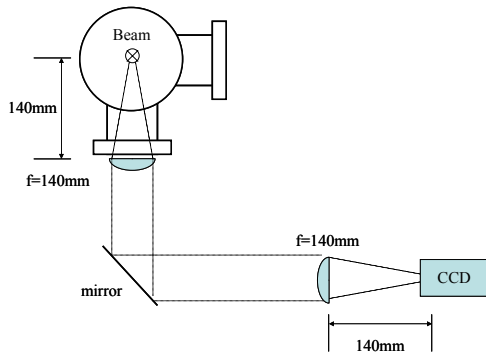


(a)冷却前後の運動量分布(b)平衡温度の粒子数依存性
図3: コースティングビームの縦方向レーザー冷却

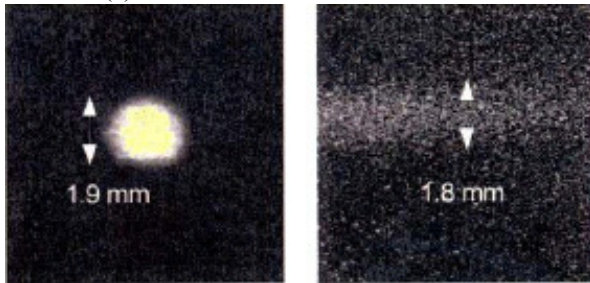
告^[7]を受けて、加速器生成の同程度以上のピーク強度を有する陽子ビームを用いて二重鎖切断に関するより定量的なデータの取得を目指している。図2にS-LSRにおけるレーザー冷却及び電子ビーム冷却系のレイアウトを示した。

2. ²⁴Mg⁺イオンのレーザー冷却

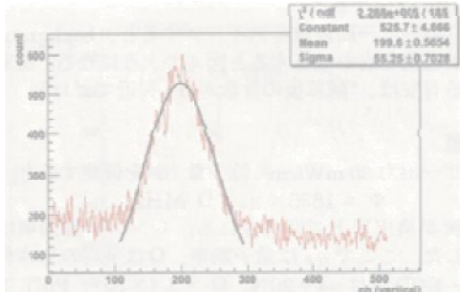
²⁴Mg⁺のレーザー冷却に関してはS-LSRにおいても既にコースティングビームの縦方向冷却に成功している^[8](図3参照)が、この縦方向冷却力を能動的にこれと直角方向の横方向に伝えて多次元的な



(a) システムレイアウト



(b)レーザービーム (c)イオンビームからの発光



(d) Fitted result of emitted photon
図4: 水平方向ビームサイズの測定。

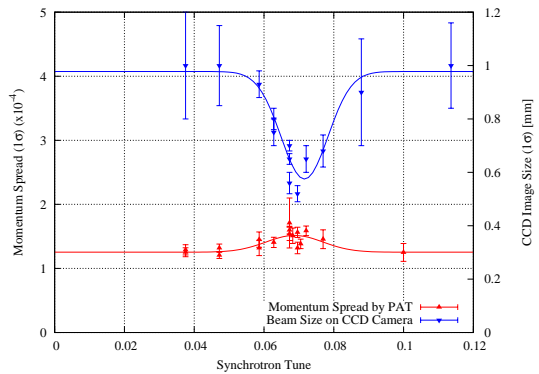


図5: 冷却後の水平方向ビームサイズと縦方向運動量拡がりのシンクロトロン・チューンに対する依存性

レーザー冷却を行う可能性について追求してきた。岡本等の提唱になるシンクロ・ベータトロン結合を用いる手法^[9]についてS-LSRにおける実験的検証を目指してきた。

横方向のビームサイズの測定はレーザーにより励起レベルに汲み上げられた²⁴Mg⁺イオンのspontaneous emissionを図4に示したように真空槽下方に設置した光学系で90度偏向し、冷却CCD(Hamamatsu Photonics C7190-11W: -20)で検出を行っている。

図5にはこうした測定をシンクロ・ベータトロン共鳴を可能とするため、有限の分散関数(D ~ 1.1 m)の位置で印加するRF電圧を変えてシンクロトロン・チューンを変化させながら行った際の水平方向のビームサイズの変動の様子を冷却後の平衡状態での縦方向運動量拡がりの変化の様子とあわせて記した。この際の動作点は(v_H, v_V) = (2.068, 1.105)であったので、図からシンクロ・ベータトロン共鳴条件を満たす0.069近辺のシンクロトロンチューンの場合に水平方向のエネルギーが縦方向に転化し、水平方向ビームサイズが極小値を取り、一方冷却後の縦方向運動量拡がりの平衡値は極大値を取っていることが見て取れる。図6にはこうしたデータの本となる水平方向のビームサイズの時間変化を種々のシンクロトロンチューンに対して測定した結果を示す(動作点は(v_H, v_V) = (2.068, 1.105))。シンクロ-

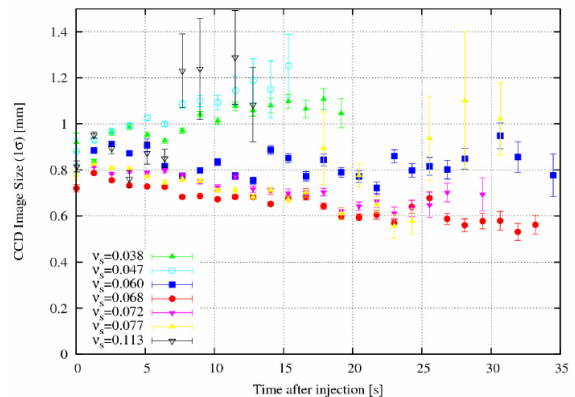


図6: 水平方向ビームサイズの時間変化

ベータトロン共鳴条件では縦方向冷却力が水平方向に転化され、水平方向ビームサイズが徐々に縮減していくが、共鳴条件から外れた場合にはイントラ・ビーム散乱の影響で水平方向ビームサイズが逆に増大してしまっていることが見て取れる。測定の際のビーム強度は 10^7 のオーダーであった。このデータからシンクロ・ベータトロン共鳴条件を満たした条件で有限の分散関数の場所で高周波加・減速を行うことにより、縦方向と水平方向の自由度の結合が起こり、水平方向の冷却が生じる事が確認できた。ただ、ここで注意すべきはその冷却時間である。図 6 から判るようにシンクロトロンチェーンが 0.068 と共鳴条件の中心においても 10 秒を超える冷却時間となっている。これは先に述べた Intra-beam Scattering による横方向レーザー冷却（参考文献 [4]）乃至は Dispersive Coupling による横方向レーザー冷却（参考文献[5]）をより高効率とするという目的は果たしていない。よく知られているように Intra-beam scattering の確率は粒子数に比例するので、極低温ビームを目指す我々の試みにおいては粒子数を低減し、intra-beam scattering を抑制して能動的なシンクロ・ベータトロン共鳴を如何に高効率で実現するかが問われている。前述の光学的検出でビームサイズを測定する我々のシステムは現状の 10^7 個から 1 桁程度ビーム強度を下げると十分な S/N 比が得られない状況となっており、この状況の克服が焦眉の急となっている。

3. 短パルス陽子ビームによる細胞照射システムの開発

レーザー生成陽子ビームを用いた余語等の実験（参考文献[7]）は陽子ビームによる DNA 二重鎖切断を報告し、大きな関心を集めた。こうした状況が生ずる原因として通常のビームに比してレーザー生成パルスはその幅が短く（生成時は 35fs、照射点到達時はエネルギー拡がりの影響で ~15ns）ピーク強度が格段に高いことに起因すると考えられている。照射に用いられた 1Hz 繰り返しのレーザーによる生

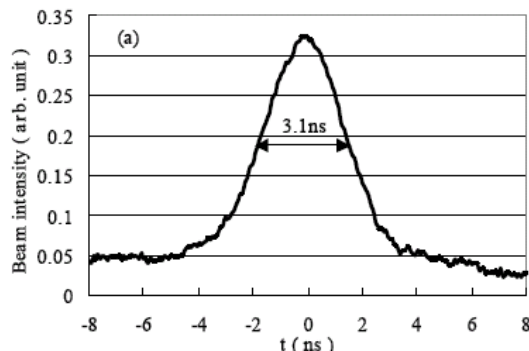


図 7：電子ビーム冷却後 Bunch rotation により生成された 7 MeV 陽子の短バンチビーム

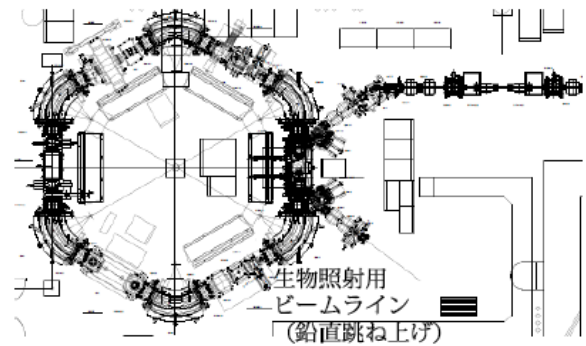


図 8：検討中の S-LSR からの電子冷却短パルス陽子ビームの鉛直照射系

成陽子ビームのバンチあたりの強度は 0.8 ~ 2.4 MeV のエネルギー拡がり度で $2.5 \pm 0.5 \times 10^4$ である [7]。我々は S-LSR に於いて 1.4×10^8 個の 7 MeV ($\pm 0.015\%$) の陽子に対して電子ビーム冷却後 bunch rotation を適用することにより 3.1 ns (2σ) のパルス幅を実現している（図 7 参照）。この手法の場合 S-LSR リングからの早いビーム取り出しの効率は 20%程度と予想されているのでバンチ当たり $\sim 3 \times 10^7$ 個の陽子ビームが約 3 分の 1 のビーム幅で供給可能となる。S-LSR への入射・蓄積とビーム冷却の繰り返しは 1 Hz は困難だが、0.1Hz 程度は可能であるので、文献[7]に比して 2 桁程度ピーク強度の高い条件での定量的な照射が可能と考えている。現在放射線医学総合研究所との共同研究により、こうした生物細胞照射のためのビームコースの検討を進めており（図 8 参照）、生物細胞を培養液中に保持しながらの照射を可能とするため、S-LSR からの早い取り出しビームを 90 度鉛直に偏向して、薄膜を透過して照射を行うシステムの設計を進めつつある。

4. 謝辞

本研究は先進小型加速器のための要素技術開発事業、京都大学グローバル COE プログラム「普遍性と創発性から紡ぐ次世代物理学」の支援を得て行われた。

参考文献

- [1] T. Shirai et al., "One-Dimensional Beam Ordering of Protons in a Storage Ring", Phys. Rev. Lett. **98**, 204801 (2007)
- [2] H. Fadil et al., Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. **A517** (2004) pp1-8
- [3] C.B. Schröder et al., Phys. Rev. Lett. **64** (1990) 2901.
- [4] H.J. Miesner et al., Phys. Rev. Lett. **77** (1996) 623 (coasting beam), H.J. Miesner et al., Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. **A383**(1996) 634-636 (bunched beam).
- [5] I. Lauer et al., Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 2052.
- [6] T. Fujimoto et al., Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. **A588**(2008)330-335.
- [7] A. Yogo et al., Appl. Phys. Lett. **94** (2009) 181502.
- [8] M. Tanabe et al., Appl. Phys. Express, **1**, (2008) 028001.
- [9] H. Okamoto, A.M. Sessler and D. Möhl., Phys. Rev. Lett. **72**, (1994) 3977.