

## Present Status of Ion Storage and Cooler Ring, S-LSR

Akira Noda<sup>1,A)</sup>, Ikegami Masahiro<sup>A)</sup>, Shinji Fujimoto<sup>A)</sup>, Toshiyuki Shirai<sup>A)</sup>, Hikaru Souda<sup>A)</sup>, Mikio Tanabe<sup>A)</sup>,  
Hiromu Tongu<sup>A)</sup>, Koji Noda<sup>B)</sup>, Satoru Yamada<sup>B)</sup>, Shinji Shibuya<sup>C)</sup>, Tetsuya Fujimoto<sup>C)</sup>, Soma Iwata<sup>C)</sup>,  
Atsushi Takubo<sup>C)</sup>, Hideki Fujiwara<sup>C)</sup>, Youhei Kikuchi<sup>C)</sup>, Igor Meshkov<sup>D)</sup>, Alexander Smirnov<sup>D)</sup>, Igor Seleznev<sup>D)</sup>,  
Evegeny Syresin<sup>D)</sup>, Hicham Fadil<sup>E)</sup> and Manfred Grieser<sup>E)</sup>

<sup>A)</sup> Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokano-sho, Uji-city, Kyoto, 611-0011

<sup>B)</sup> National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba, 263-8555

<sup>C)</sup> Accelerator Engineering Corporation, 2-13-1 Konakadai, Inage-ku, Chiba, 263-0043

<sup>D)</sup> Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot Curie, Dubna, Moscow Region 141980, Russia

<sup>E)</sup> Max-Planck-Institut für Kernphysik, 1 Saupfercheckweg, D-69117 Heidelberg, Postfach 103980, Germany

### Abstract

At ICR, Kyoto University, an ion storage and cooler ring, S-LSR has been completed in October, 2005 and beam experiments, such as an electron beam cooling, feedback damping of coherent instability and accumulation of Mg ion for laser cooling, are now going on. Here present status of the facility is to be presented together with future prospects of the facility.

## イオン蓄積・冷却リングS-LSRの現状

### 1. はじめに

京大・化研では2005年10月はじめにイオン蓄積・冷却リングが完成し、ビームコミッションを開始した。最近の3次元電磁場計算コードによる数値計算の精度の向上により、設計パラメータに設定し、ほぼ無調整の状況で7MeV陽子ビームの周回・蓄積や電子ビーム冷却に成功し、現在までにホットイオンビームの電子ビーム冷却、電子ビーム冷却による冷却リミットの追求、電子ビーム冷却による陽子ビームの蓄積とそれによって生ずるビーム不安定性の抑制、レーザー冷却に向けての<sup>24</sup>Mg<sup>+</sup>イオンビームの蓄

積等の実験を遂行してきた。これらの現状を紹介し、今後の実験計画の展望を述べたい。

### 2. イオン蓄積・冷却リング、S-LSR

S-LSR は入射ビームとして線形加速器からの7MeV Proton Beam, CHODIR イオン源からの35keVの<sup>24</sup>Mg<sup>+</sup>ビーム及び隣接するレーザー棟から導入予定の10TW短パルスレーザーにより固体薄膜から生成されるCビームを想定している(図1参照)。S-LSRは平成13年度から建設を開始し、平成17年夏にその建設が完了し、真空排気とベーキング作業[1]

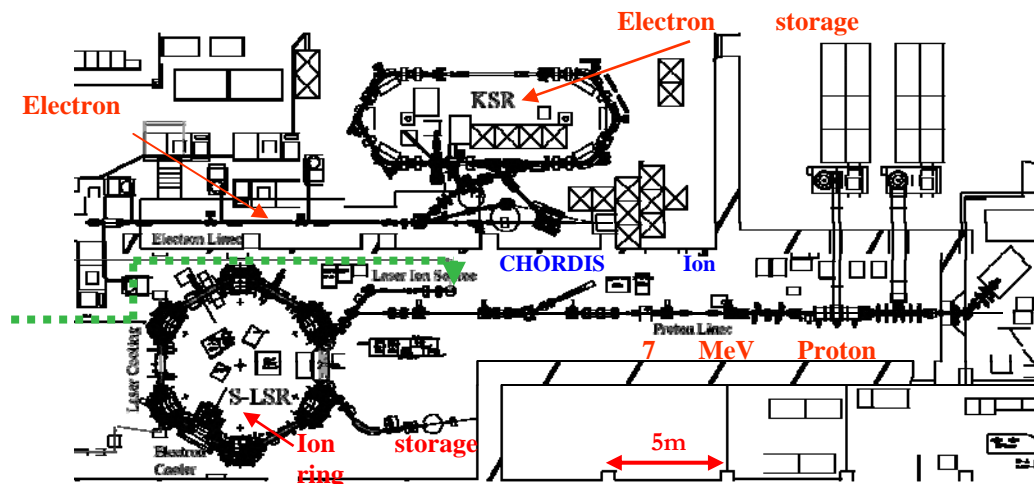


図1. 京大・化研イオン線形加速器実験棟内に設置されたS-LSR及びその入射器の実験室内配置

<sup>1</sup> E-mail: noda@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

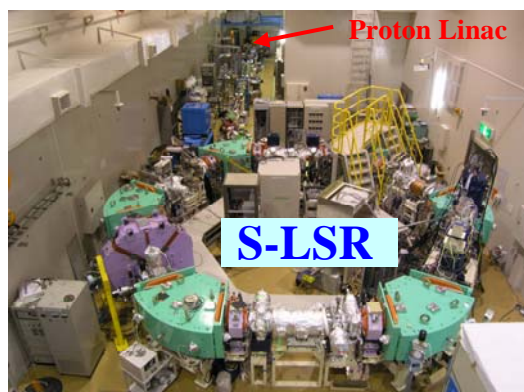


図2. S-LSRの全景

を経て、平成 17 年 10 月から陽子線形加速器からの 7MeV プロトンビームを用いて、ビームコミッションを開始した。図 2 に S-LSR の全景を、表 1 にその主要パラメータを示した。

表 1 : S-LSR の主要パラメータ

Circumference	22.557 m
Average radius	3.59 m
Length of straight section	2.66 m
Number of periods	6
Betatron Tune	
Crystalline Mode	Normal Operation Mode
1.44 (H) , 1.44 (V)	1.872(H), 0.788 (V)
Bending Magnet	(H-type)
Maximum field	0.95 T
Curvature radius	1.05 m
Gap height	70 mm
Pole end cut	Rogowskii cut+Field clamp
Deflection Angle	60°
Weight	4.5 tons
Quadrupole Magnet	
Core Length	0.20 m
Bore radius	70 mm
Maximum field gradient	5 T/m

### 3. ビームコミッションング

S-LSRの設計・製作に当たっては最新の計算機技術を駆使した3次元の電磁場計算をきめ細かく遂行し、装置の設計に反映させた。その効果は如実に現れ、ビームコミッションングに際して基本的なパラメータはすべて設計値どおりの値で、ビームの多重入射・蓄積が実現された。更に驚くべきことには電子ビーム冷却に関しても、当初の設定値でビームの冷却が確認された[2]。図 3 にコミッション初日に観測された縦・横（水平）両方向の電子ビーム冷却の様子を示した。

### 4. ホットイオンビームの電子ビーム冷却

ホットイオンビームの電子ビーム冷却については、7MeV陽子について1%の運動量拡がりの冷却時間が、電子とイオンの相対速度の掃引により、45秒が3秒に短縮されるという結果を得ている(図4参照)[ 3]。

### 7MeV proton (rev=1.610MHz) 20μA, 3.815keV electron 60mA

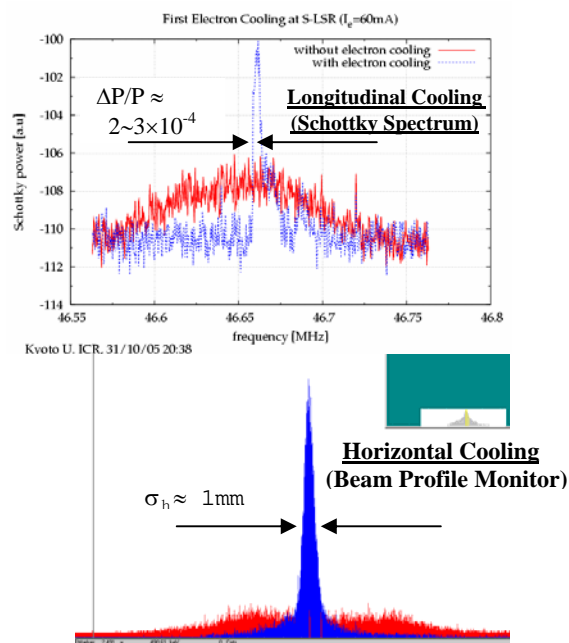


図 3. S-LSRにおけるコミッション時の電子ビーム冷却実験結果

これはTSRでの73.3MeVの $^{12}\text{C}^{6+}$ の場合と冷却力の差を考慮すればコンシステントであると評価している。

### 5. 電子冷却ビームの早い取り出し

S-LSR中を周回する7MeV陽子ビームに電子ビーム冷却を適用し、運動量拡がりを0.03%程度にまで冷却して、RF電圧を印加し、短パルスビームを形成し位相空間内で回転させた後、キッカーマグネットを用いた早い取り出しを行い、取り出したビームの時間幅をFaraday Cupを用いた測定で評価した[4, 5]。取り出されたビームはガウス分布に近くビームの時間幅は $2\sigma$ で8.4nsまで短縮可能で、今後パルスラジオリシス等への利用の展開を図りたい。

### 6. ビーム不安定性の抑制

7MeV陽子の電子ビーム冷却・蓄積により周回ビーム強度が600μA程度に増大するとビームのコヒーレント不安定性(垂直方向)が生じビームが失われる。静電型ビーム位置モニターで検出したシグナルを増幅し、RFKO電極に高周波電力を供給するフィードバックループを形成し負帰還をかけるとビーム不安定性が

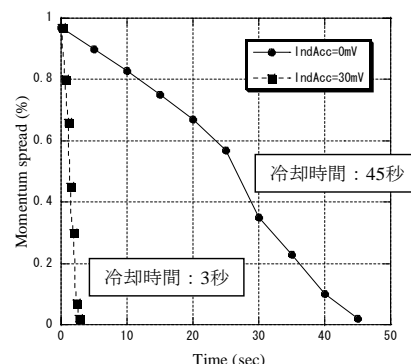


図4. ホット陽子ビームの電子ビーム冷却(縦方向)

抑制され、不安定性の生ずるビームの閾電流が現状の入射システムで達成可能なビーム強度(1.2mA)以上まで向上できることが確認された。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も判明した[6]。

## 7. ビームのオーダリング

### 7.1 電子ビーム冷却による1Dストリングの追求

重イオンについては、ドイツGSIのSIS及びESRとスウェーデンのCRYRINGで1次元のオーダリングの生成が報告されているが、電子ビーム冷却の冷却力は、陽子の場合には重イオンの場合に比して小さいため、ドイツのユーリッヒのCOSYでの実験では1Dのオーダリングはいまだ観測されるにいたっていない。我々も7MeV陽子について、粒子数を減少させIntra-beam scatteringの影響を軽減して、電子ビーム冷却による運動量の拡がりを測定した。陽子数を $10^3$ 個まで減少させた測定を行い、1Dストリングへの相転移を示唆するデータを得ており[7]、観測系のノイズレベルの一層の低減に向けた取り組みを強めている。

### 7.2 レーザー冷却によるビームの多次元結晶化

レーザー冷却は、イオンビームの進行方向の自由度に関しては、電子ビーム冷却に比して圧倒的に強い冷却力を有するが、進行方向と直交する横方向の冷却はIntra-beam Scatteringを通じてのみ可能で十分な強さでは無い。S-LSRでは35keVの $^{24}\text{Mg}^+$ に岡本等の提案する有限の軌道分散点でRF加速を行い、共鳴結合を図る3Dレーザー冷却法[8, 9]を適用し、動作点(2.07, 1.07)の有限の軌道分散の磁場のみの通常のラティスを用いて2次元のジグザグ構造の実現をまず目指す[10]。S-LSRで行った35keVの $^{24}\text{Mg}^+$ の周回テストでは14秒のビーム寿命が確認され、レーザー冷却可能と判断している[11]。この場合、直線部でのレーザー冷却で全イオンが同一エネルギーに揃うが、偏向部での有限の軌道分散のため、結晶の線密度が大きく水平方向に拡がりを有する状況では、水平方向の位置により角速度に差が生じ、結晶を引き裂く力、Shear Heatingが発生するため、3次元の結晶の安定化は不可能である[12, 13]。

Shear Heatingを抑制し、3次元のビーム結晶を安定化するため、偏向部の磁場にこれと直交する条件

$$(1+1/\gamma^2)\vec{E} = -\vec{v}_0 \times \vec{B} \quad (1)$$

を満たす静電場を重畳し全周にわたって一次の軌道分散の無いlatticeの使用を提案した[14]。S-LSRの6台の全偏向電磁石にこのモードのための可動式電極を挿入し、(2.07, 2.07)の動作点で $^{24}\text{Mg}^+$ をレーザー冷却し、水平方向に拡がりを有する3次元結晶化ビームの実現を目指す。この場合にはビーム進行方向のRF加速電場の大きさが進行方向と直角方向の位置依存性を有する「結合空腔」が不可欠である。ま

た、この動作点は、

$$N_{SP} > 2\sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (2)$$

なる条件は満たすが、更に厳しい

$$N_{SP} > 4 \cdot v_{x(y)} \quad (3)$$

なる条件は満たさない( $N_{sp}$ 及び $v_x, v_y$ は夫々リング超周期性及び水平、垂直方向のベータトロン振動数)ため、イオンの線密度が高く生成される結晶が多層構造を有する条件では、初期の高温状態からの冷却の過程でイオンビームが線形共鳴の通過により失われるため結晶化実現は困難である。

多層の結晶化ビームの実現のためには、式(3)を満たす(1.44, 1.44)の動作点の有限の軌道分散を有するNormal Latticeに於いて、Wien Filter内でのみレーザー冷却を行う[15, 16]ことにより実現されるtapered coolingの適用を考えている[7]。

## 謝辞

ここで述べた研究は文部科学省の先進小型加速器のための要素技術の普及事業の財政的支援を得て遂行された。また、京都大学の21世紀COE—物理学の多様性と普遍性の探求拠点—からも支援を頂いた。ここに記して深甚な謝意を表したい。

## 参考文献

- [1] H. Tonngu, et al., Proc. of the 3<sup>rd</sup> Japanese Accelerator Society Meeting and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Aug. 2-4, 2006.
- [2] H. Fadil, Talk for Young Scientist Award at the 3<sup>rd</sup> Japanese Accelerator Society Meeting and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Aug. 2-4, 2006.
- [3] T. Shirai et al., Proc. of the 3<sup>rd</sup> Japanese Accelerator Society Meeting and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Aug. 2-4, 2006
- [4] T. Fujimoto et al., *ibid.*
- [5] S. Iwata et al., *ibid.*
- [6] S. Fujimoto et al., *ibid.*
- [7] A. Noda, M. Ikegami and T. Shirai, "Approach to ordered structure of the beam at S-LSR", submitted to New Journal of Physics.
- [8] Okamoto H, Sessler A M and Möhl D 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 3977
- [9] Okamoto H 1994 *Phys. Rev. E* **50**, 4982.
- [10] A. Noda et al., "Experimental strategy for realization of 3-D beam ordering with use of tapered cooling at S-LSR", Proc. ICFA Workshop HB2006, Tsukuba, Japan (2006) in print.
- [11] M. Tanabe et al., Proc. of the 3<sup>rd</sup> Japanese Accelerator Society Meeting and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Aug. 2-4, 2006.
- [12] Yuri Y and Okamoto H 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 204801.
- [13] Yuri Y and Okamoto H 2005 *Phys. Rev. ST-AB*, **8**, 114201.
- [14] Ikegami M, Noda A, Tanabe M, Grieser M and Okamoto H 2004 *Phys. Rev. ST-AB*, **7**, 120101.
- [15] Noda A and Grieser M 2005 *Beam Science and Technology* vol **9** (2005) p12.
- [16] Noda A, Ikegami M, Sakabe S and Aruga T 2006 *Beam Science and Technology* vol **10** (2006) p39.