

## STATUS OF THE STORAGE OF $Mg^+$ BEAM AT S-LSR

Mikio Tanabe<sup>1,A)</sup>, Shinji Fujimoto<sup>A)</sup>, Hikaru Souda<sup>A)</sup>, Akira Noda<sup>B)</sup>, Toshiyuki Shirai<sup>B)</sup>, Hiromu Tongu<sup>B)</sup>,  
Masahiro Ikegami<sup>B)</sup>, Koji Noda<sup>C)</sup>, Shinji Shibuya<sup>D)</sup>, Tetsuya Fujimoto<sup>D)</sup>, Soma Iwata<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Faculty of Science, Kyoto University

Kitashirakawa, Sakyo, Kyoto, 606-8502

<sup>B)</sup> Institute for Chemical Research, Kyoto University

Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

<sup>C)</sup> National Institute of Radiological Sciences

4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8555

<sup>D)</sup> Accelerator Engineering Corporation

4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8555

### Abstract

We are now preparing for the experiment of the laser cooling at an ion storage ring, 'S-LSR'. The ion beam for this experiment is 35keV,  $Mg^+$  beam. An ion source for this beam was installed to the beam line. In the normal mode of S-LSR (the mode in which a beam is bent only by the magnetic field),  $Mg^+$  beam was stored in this ring. The maximum current of the stored beam was about 4 $\mu$ A. We also installed a set of electrodes at the bending sections to control dispersion, and tried to store beam. But we have so far observed the signal of only two turns. This is because the electrodes at the bending sections make the apertures very narrow.

## S-LSRにおける $Mg^+$ ビーム蓄積の現状

### 1. はじめに

京都大学化学研究所では、イオン蓄積・冷却リングS-LSRを用いて、 $Mg^+$ イオンのレーザー冷却実験を計画している。これは、リング内に蓄積した35keVの $Mg^+$ ビームに対し、色素レーザーおよび倍波発生器により発生させた波長280nm近辺のレーザー光を併走させることにより、ビーム冷却を行って極低温ビームの生成を目的とした実験である。この実験では、ビーム温度を極限まで下げることにより、3次元的に結晶化したビームの生成も目指している。

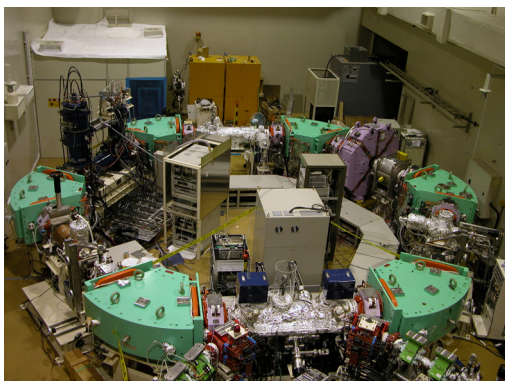


図1：イオン蓄積・冷却リング 'S-LSR'

### 2. S-LSRのビーム偏向部

3次元的に結晶化したビームをリング内に蓄積する場合、偏向部において、結晶の構造を不安定にするような力が働くことが知られている。これは、次のように考えられる。磁場のみで結晶化したビームを偏向するとしたとき、同一速度のビームが偏向部に入射すると、中心軌道よりも内側を通るビームは先行し、外側を通るビームは中心軌道のビームより遅れるので、結果として結晶構造を引き裂くような力（これをShearing forceと呼ぶ）となり、ビームを安定に蓄積することができなくなる。

このような結晶ビーム蓄積の不安定性を避けるため、S-LSRの偏向部では次のような特殊な設計を行った。その設計とは、偏向部に電極を設置して軌道半径方向外向きの電場を発生させ、ビームを構成する粒子のうち中心軌道からはずれたものを偏向部の出入り口で加減速し、偏向部内では角速度を一定にできるようにしたものである。偏向部の磁束密度  $B$ 、ビームの速さ  $v$ 、電場  $E$  が次の関係、

$$vB - 2E = 0$$

をみたととき、ビームの分散の1次の項が消え、Shearing forceをなくす効果が現れる。

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

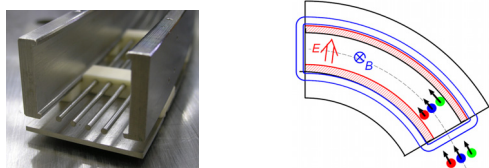


図2：(左) 製作した電極の写真。(右) 偏向部の模式図。偏向部に入射した結晶粒子のうち、設計軌道より内側は減速、外側は加速される。

S-LSRでは、図2のような電極を設計、製作し、すべての偏向部に設置している(これを分散制御用電極と呼ぶ)。またこの電極は駆動軸を用いて移動することができ、ビーム軌道に設置しない時は待避させることが可能となっている。この電極を用いて、電場と磁場の比を変えることで、Dispersionを調整することも可能である。これを確認するために1組の偏向部を用いた実験をすでに実施し、Dispersionを変化させる効果を確認している。

### 3. Mg<sup>+</sup>イオン源

Mg<sup>+</sup>を蓄積して冷却実験を行うために、イオン源の立ち上げと、ビーム引き出し実験を行った。

#### 3.1 イオン源からビーム輸送部合流まで

イオン源からビーム入射部までの概略図は次のようになる(図3)。イオン源から引き出されたビームはビームチョップでパルス化され、合流用の電磁石で25°曲げられ、陽子ビームのビーム輸送ラインと合流する。その後ビームはもう1度、偏向電磁石で軌道を曲げられ、セプタム電磁石を経て最後は静電キッカーにより、リングへとシングルターン入射される。

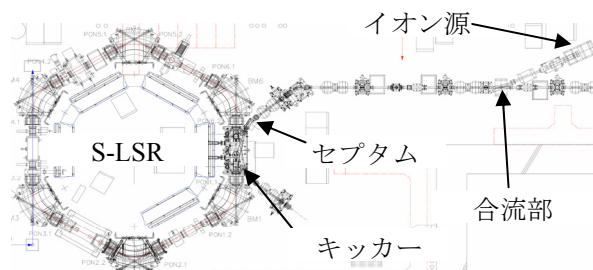


図3：イオン源からリング入射部までの様子。

#### 3.2 イオン源の運転とビーム生成

このようにビームライン上に接続したイオン源を用いて、ビーム生成実験を行った。イオン源はDanfysik社の'CHORDIS'を用いた。このイオン源をスパッタモードで使用し、導入ガスにアルゴン、スパッタ電極にマグネシウムを用いて、Mg<sup>+</sup>ビーム生成を試みた。このときの典型的な運転パラメータは次のようである(表1)。

項目	値
引き出し電圧	35kV
フィラメント	117A,6.95V
アーク	100V
ガス流量	0.038SCCM
ビーム電流	~10μA

表1：Mg<sup>+</sup>イオン源の運転パラメータ

当初、スパッタ電極に電圧をかけて用いていたが、その後の調整でビーム電流を最適化した結果、現在はスパッタ電極にスパッタ電圧を印加しないで用いている。表のビーム電流はイオン源下流、約1.5mに設置した縦約2mm×横約1mmのビームスリットで、ビームを切ったときの電流値である。

また、ビームの核種を判別するために、合流電磁石でアナライズしたビームの電流をスクリーンモニターで測定することで、ビームスペクトルの測定を行った(図4)。その結果、Mg<sup>+</sup>とAr<sup>+</sup>のビームをおよそ1:1の電流比で引き出すことができていることがわかった。

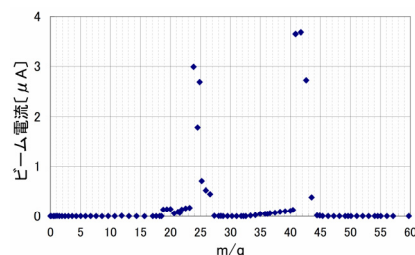


図4：イオン源内にマグネシウム製のスパッタ電極を設置してビーム引き出しをしたときのビーム核種。m/q=24付近のピークがMg<sup>+</sup>、40付近のピークがAr<sup>+</sup>。

#### 3.3 スパッタ電極の状況

イオン源内部に設置した、マグネシウム製のスパッタ電極の劣化について、観測した様子を報告する。イオン源使用開始後から、およそ10時間、20時間後にイオン源を大気解放し、内部の観察をしたときの写真が次のようである(図5)。10時間後には、スパッタ電極を構成しているマグネシウムの表面に、直径数mmの多数の穴が空いたような状況であり、20時間後、スパッタ電極の表面の一部が、スパッタされ尽くしてなくなってしまう様子も見えた。また、イオン源内部には最大2mm程度の厚さのマグネシウムでコーティングされた層やスパッタ電極の一部が変性したような金属小片も見られた。イオン源内部に層状に重なったマグネシウムがはがれて、イオン源内部の絶縁されているフランジ間をショートし、アーク電圧がかからなくなる事例も生じた。

これらの状況を踏まえ、現在のところ、イオン源のフィラメント交換とスパッタ電極の交換は2週間に1度程度の頻度で実施している。



図5：使用したスパッタ電極の変化の様子。

(左) 未使用の状態、(中央) 10時間使用後のスパッタ電極、(右) 20時間使用後のスパッタ電極。

## 4. ビーム蓄積の状況

### 4.1 通常モードでのビーム蓄積

このようにして準備した $Mg^+$ ビームを用いて、リングへの入射実験を行った。はじめに、S-LSRを通常の磁場のみでビームを偏向するモードでビームの入射、蓄積を試みた。ビームをシングルターン入射でS-LSRに入射し、高周波加速空洞にHarmonic number=50に相当する高周波をかけてビームをバンチ化して、リング中に設置したBPMからの信号をスペクトラムアナライザで観測したところ、図7のような波形が得られビーム蓄積が確認できた。

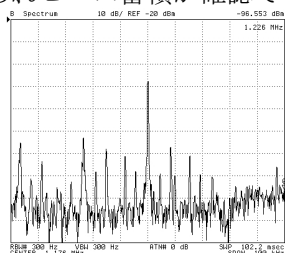


図7：周回ビームのBPM信号。中心に見える波形のピークは1.176MHzであり、これは35keVの $Mg^+$ ビームの周回周波数23.35kHzのHarmonic number=50に相当する。

ピーク強度の変化を観測すると、ビーム寿命はおよそ14秒であった。また、DCCTによりビーム電流を測定すると、最大蓄積電流はおよそ4 $\mu A$ であった。

さらに、リング内の四重極磁石の励磁電流を変えて、チューンが変化の様子を測定した(図8)。その結果、レーザー冷却を行う際のチューンの1つである(1.44,1.44)を実現できることを確認できた。

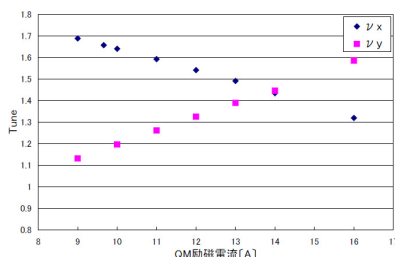


図8：リング偏向部の四重極磁石の励磁電流を変えて、チューンを変化させた結果。

### 4.2 電極を入れた状態でのビーム蓄積

つぎに、ビーム軌道上に分散制御用電極を設置し、この電極に電圧をかけない状態でのビーム蓄積を試みた。BPMからの信号をオシロスコープで観測した

ところ、これまでにビームの周回2周目の信号までを確認した。しかしそれ以上、ビームが周回して蓄積された信号は確認できていない。オシロスコープで測定した1周目に対する2周目の信号強度は、約数十分の一であり、1周するあいだにビームの多くがロスしていることになる。これは、ビームの軌道上に、アパーチャを制限する分散制御用電極が設置されていることによって、ビームがこの電極に衝突し、ビームが失われているのではないかと考えている。現在、セプタム電磁石手前にあるビームスリットによりビームサイズを制限して、分散制御用電極にビームが衝突するのを抑えて、ビーム蓄積に向けた調整を行っているところである。

## 5. まとめと今後の展望

イオン蓄積リング'S-LSR'に $Mg^+$ ビームを入射、蓄積して、レーザー冷却を行い、極低温ビームの実現、さらにはビームの結晶化を目指した実験のための準備が進行中である。S-LSRの偏向部には、通常の磁場に加えて電場を発生させ、ビーム分散の調整や、結晶化したビームを蓄積する際のShearing forceを抑制ができるように設計されている。レーザー冷却実験に用いる $Mg^+$ ビームを生成するイオン源のビームライン上への組み込み、ビーム引き出し実験を行い、 $Mg^+$ ビームの生成を確認できた。このビームを用いて、リングへの入射・蓄積実験も行った。その結果、リング中に磁場のみを用いて蓄積するモードではビーム蓄積に成功し、最大ビーム寿命約14秒、最大蓄積電流約4 $\mu A$ を観測した。しかし、分散制御用電極をビーム軌道上に設置した状態でのビーム周回は、2周目の信号を確認するまでで、これ以上の周回信号の確認は未だできていない。現在、ビーム蓄積に向け、ビームサイズなどを調整しているところである。

またこれと同時に、冷却実験に用いるレーザーの調整も行っているところである。レーザーは、色素レーザーと倍波発生器により、波長280nm付近のレーザー出力を行える状態である。現在、リングへ入射するためのレーザー経路を設計・組み上げ中である。レーザーをリングに入射できるようになった時点で、まずは、S-LSR中を通常の磁場だけのモードで蓄積した $Mg^+$ ビームに対し、レーザー冷却を行う予定である。

## 6. 謝辞

本研究は、先進小型加速器事業の一環として行われました。

## 参考文献

- [1] A. Noda, Nucl. Instrum. Methods A. 532, 150 (2004)
- [2] M. Ikegami, M. Tanabe, T. Shirai, H. Tongu, K. Noda, M. Grieser and A. Noda, Nucl. Instrum. Methods A. 532, 492 (2004)
- [3] M. Ikegami, A. Noda, M. Tanabe, M. Grieser, and H. Okamoto, Phys. Rev. ST-AB, 120101, (2004)