

# INJECTION AND EXTRACTION SYSTEM FOR S-LSR

Soma Iwata<sup>1,A)</sup>, Tetsuya Fujimoto<sup>A)</sup>, Hideki Fujiwara<sup>A)</sup>, Shinji Shibuya<sup>A)</sup>  
 Akira Noda<sup>B)</sup>, Toshiyuki Shirai<sup>B)</sup>, Koji Noda<sup>C)</sup>

A) Accelerator Engineering Corporation, 2-13-1 Konakadai, Inage, Chiba 263-0043, Japan

B) Institute for Chemical Research, Kyoto-University, Gokanoshō, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

C) National Institute of Radiological Science, 4-9-1 Anagawa, Inage, Chiba 263-8555, Japan

## Abstract

In S-LSR that was constructed at Institute for Chemical Research, Kyoto University, we have succeeded in the multi-turn injection of 7MeV proton beam together with the beam accumulation. The accumulated beam current was  $40 \mu A$  with the injection beam current of  $1 \mu A$ , which agrees well the simulation result. S-LSR has another injection system of the single-turn injection for 35keV  $Mg^+$ . The extraction system has a kicker magnet for the fast extraction. One of the special features of S-LSR is that the injection and extraction are performed in the same straight section, 1.86m in length, which contributed to downsizing of the ring. This paper describes the design of the injection and extraction systems and their beam-test results.

## S-LSR 入出射システム

### 1. はじめに

京都大学化学研究所に建設された小型蓄積リング S-LSR(Small Laser-equipped Storage Ring)は、2005年10月より7MeV陽子によるビームコミッションが開始され、現在まで順調にビーム実験を進めている。S-LSRの特徴の1つとして、入出射位置が1カ所のストレートセクション(ドリフトスペースは1.86m)にまとまっている点が挙げられ、リングの小型化に貢献した。入出射システムは、マルチターン入射用機器一式、シングルターン入射用機器一式、及び速い取出し用機器一式より構成されている。ここでは、入出射システムの設計計算と各機器測定試験、ビーム試験結果からの評価を中心に報告する。

図1にS-LSRの入出射システムを示す。

### 2. 入射ビームの軌道計算

S-LSRでは2種類の入射方式に対応できるように設計されている。一つは7MeV陽子ビーム用のマルチターン入射で、もう一方は35keVの  $Mg^+$  ビーム用のシングルターン入射である<sup>[1]</sup>。

ビーム入射の軌道計算は、コミッションで行なうバンプなし入射などパラメータの異なる様々な入射パターンに対応できるように実施した。軌道計算ソフトはWinAgile<sup>[2]</sup>やMAD(Ver.8)<sup>[3]</sup>を使用した。また、マルチターン入射効率評価の為にシミュレーションプログラムも作成した。

最初に陽子ライナックからリングに至るまでのビーム輸送(BT)ライン及び入射ラインにおける光学計算を行った<sup>[4]</sup>。このときの条件としてリング入射点の静電インフレクター(ESI)の出口で水平方向のDispersion(x)が0mとなるようにした。入射点での

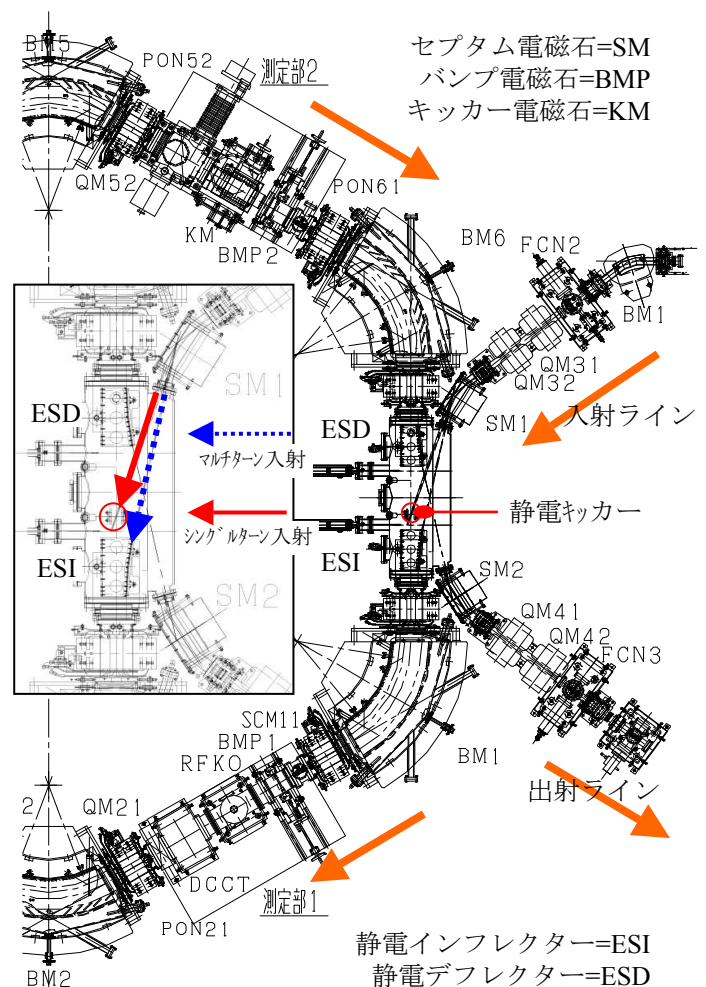


図1: S-LSRの入出射システム

<sup>1</sup> soma.iwata@aec-beam.co.jp

ビーム条件は動作点  $(v_x, v_y)=(1.64, 1.21)$  にマッチするように計算したが、光学系の配置は、想定される他の動作点に対しても成立するように配慮した。

入射ラインの偏向電磁石の下流側に設置されたビームスリットの設定と運動量分散の相関シミュレーションを図2に示す。また、コミッション時に、水平スリット幅  $\pm 3\text{mm}$  としたときのショットキーモニタで見た運動量分散を図3に示す。これらの結果がよく一致していることが分かる。ライナックから出てくるビームの運動量分散  $(\sigma)$  は  $\pm 1\%$  である。また、Electron Coolerの電子ビームサイズを考慮して、スリット幅を  $\pm 1\text{mm}$  ( $\Delta P/P = \pm 0.3\%$ ) に設定した。

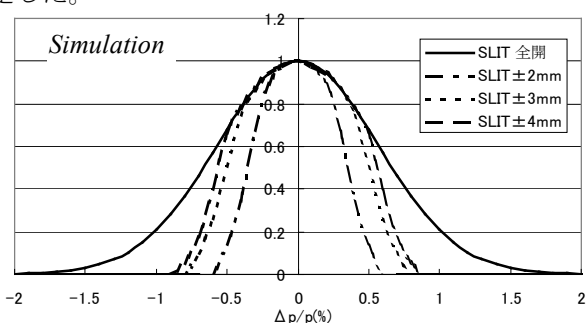


図2: 水平方向スリット幅別に見た運動量分散

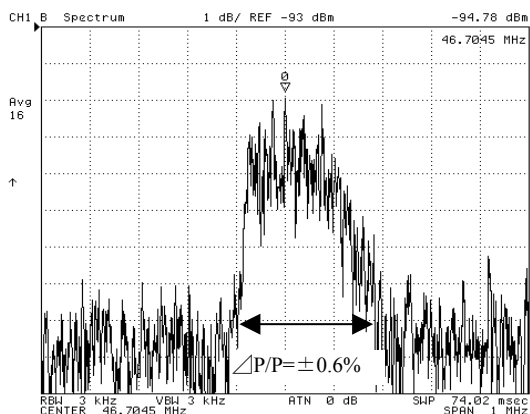


図3: ショットキーモニタで見た運動量分散

リング入射点(ESI出口)におけるマルチターン入射のシミュレーション結果を図4に示す。黒い点の集合は通過ビームを表し、その外周はリングアクセプタンスとなる。セプタム位置はリング軌道中心から  $60\text{mm}$  外側の位置にある。この条件で入射ビームとバンパ軌道の最適化を行った。入射ビームの最適条件はビーム中心位置が  $63\text{mm}$  で、傾きは  $15\text{mrad}$  となった。また、バンパ軌道の変遷について、1ターンあたりのビームロスと、バンパ軌道が消滅するまでの入射ターン数を比較し、最も効率の良い、バンパ軌道が4ターン毎に  $3.6\text{mm}$  ずつ縮小する条件を選んだ。このとき67ターン入射で入射ゲイン約33倍、入射効率は約50%となる。

実際のビーム入射において、実測水平チューン  $1.64$  の条件で、入射ビーム強度  $1\mu\text{A}$  に対し蓄積量は  $30\sim 40\mu\text{A}$  となった。これはシミュレーション結果

とよく一致している。

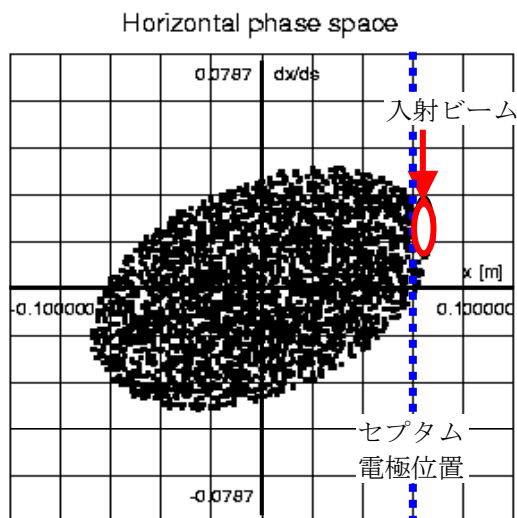


図4: 入射点における位相空間

### 3. 入射システム構成機器の設計・試験

S-LSRにおいて、入射・出射システムはほぼ鏡面対称な機器配置になっている。相違点は、入射システムにマルチターン入射とシングルターン入射の2パターンがあることと、出射システムの構成にキッカー電磁石が存在する点である。入射システムを構成する機器は、前述の軌道計算結果からパラメータを導き、周囲の機器との干渉や  $200^\circ\text{C}$  ベーキング対応などの条件を考慮に入れて設計された。

#### 3.1 マルチターン入射システム

マルチターン入射には、ESIと入射点に隣接するセクションに設置されたバンパ電磁石2台(BMP1,2)が使用される。

##### ① ESI/ESD (ESIとESDは同スペック)

ESI/ESDはVector Fields社のOPERA-3D(TOSCA)を使用した3D電場計算に従って製作された。ESI/ESDの仕様を表1にまとめる。

高い電場 ( $90\text{kV/cm}$  程度) で運用されているにもかかわらず、これまで実験中の放電は一度も観測されることなく安定に動作している<sup>[5]</sup>。

表1: ESI/ESD仕様

|              |             |
|--------------|-------------|
| 偏向角          | 211 [mrad]  |
| 電極ギャップ (可変)  | 10(±5) [mm] |
| 電極長          | 360 [mm]    |
| 有効電場長(計算による) | 376 [mm]    |
| 曲率半径         | 1671 [mm]   |
| 最大電場         | 100 [kV/cm] |
| 7MeV陽子入射用の電場 | 87 [kV/cm]  |

##### ② バンパ電磁石 (BMP1,2は同スペック)

バンパ電磁石電源の特徴の1つに励磁パラメータを2種類持つことができる点が挙げられる。これにより、入射時のバンパ励磁と出射時のそれとは独立して設定を変更することができる。また、励磁パル

ス幅も可変となっており、マルチターン入射の最適化の結果、励磁パルス幅は120  $\mu$  secと決定された。パルス磁場の立下りに合わせてマルチターン入射が行われる。

バンブ電磁石の仕様を表2にまとめる。磁場測定には専用のサーチコイルを数種類用意し、出力される電圧信号を解析した。図5に生成磁場波形を示す。励磁パルス幅120  $\mu$  sec、電流3000Aとした。尚、電流波形から計算した磁場も重ねてある。

表2: バンブ電磁石仕様

|                              |          |
|------------------------------|----------|
| 磁極幅 (コイルスペース含む)              | 232 [mm] |
| 磁極長                          | 100 [mm] |
| 有効磁極長 (実測 パルス幅120 $\mu$ sec) | 135 [mm] |
| ギャップ                         | 62 [mm]  |
| コイル巻き数                       | 4 [turn] |
| 最大電流 (充電電圧3.6kV)             | 4200 [A] |
| 最大ピーク磁場                      | 0.34 [T] |

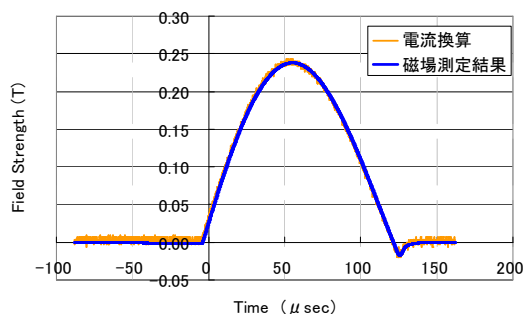


図5: BMP1磁場パルス波形

### 3.2 シングルターン入射システム

静電キッカーを使用した、35keV  $Mg^+$ 入射専用の入射システムであり、マルチターン入射とはセプタム電磁石以降のビーム軌道が異なる<sup>[6]</sup>。静電キッカーの仕様を表3にまとめる。2006年5月にコミッショニングを開始した。

表3: 静電キッカー仕様

|        |            |
|--------|------------|
| 偏向角    | 338 [mrad] |
| 電極ギャップ | 60 [mm]    |
| 電極長    | 100 [mm]   |
| 曲率半径   | 565 [mm]   |
| 最大印加電圧 | 10 [kV]    |

### 3.3 速い取出しと出射システム

S-LSRはイオンビームの冷却の為の蓄積リングであるが、同時に冷却された高品質ビーム利用を想定した出射システムを持つ。ビームはキッカー電磁石を使用して、速い取出しを行なうことが可能である。出射システム構成機器は、図1に示すようにマルチターン入射システムと同様の構成となっている。ESD,セプタム電磁石については入射システムと同仕様であり、出射用バンブ電磁石は入射システムと共用している。

表4にキッカー電磁石の仕様をまとめる。図6に磁場測定によるキッカー電磁石磁場波形(1200A通電)

を示す。モニター用CTから読み出した電流値を磁場換算した波形を重ねている。両波形は、実測磁場波形のリングング部を除きよく一致している。また、負荷ケーブルの仕様・長さ等も考慮に入れた回路計算から磁場波形をシミュレートしており、実測磁場波形はシミュレーションとよく一致していることを確認した。

表4: キッカー電磁石仕様

|             |                  |
|-------------|------------------|
| 磁極幅         | 139 [mm]         |
| 磁極長         | 250 [mm]         |
| 有効磁極長 (実測)  | 293 [mm]         |
| ギャップ        | 60 [mm]          |
| コイル巻き数      | 1 [turn]         |
| 最大電流/充電電圧   | 1200[A] / 60[kV] |
| 最大ピーク磁場     | 0.025 [T]        |
| 磁場立上り時間     | 80以下 [nsec]      |
| 磁場フラットトップ時間 | 800以上 [nsec]     |

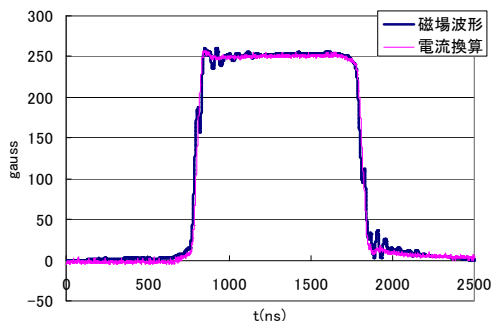


図6: KM磁場パルス波形

## 4. まとめ

2005年10月から7MeV陽子ビームの入射試験が開始された。試験開始から2日後にはマルチターン入射とビーム蓄積が確認でき、その時の機器パラメータはほぼ設計通りの値であった。

2006年1月にビーム出射試験が行われ、試験開始同日にビーム出射を実現できた。同様に2006年5月には35keV  $Mg^+$ ビーム入射試験が開始され、開始同日にシングルターン入射・蓄積に成功した。

今後、 $Mg^+$ を用いたビーム結晶化実験や、出射ビーム精密測定などが予定されている。

## 参考文献

- [1] T.Fujimoto, et al., "Injection System for S-LSR", Beam Science and Technology Vol.9, Activity Report 2004, Kyoto University.
- [2] <http://bryant.home.cern.ch/bryant/>
- [3] <http://hansg.home.cern.ch/hansg/mad/mad8/mad8.html>
- [4] T.Fujimoto, et al., "Design of the Injection Line at S-LSR", Beam Science and Technology Vol.10, Activity Report 2005, Kyoto University.
- [5] 岩田他, "S-LSRにおける静電セプタムの設計", ARTA2006, June 2006.
- [6] 岩田他, "S-LSRにおけるセプタム電磁石の設計", ARTA2006, June 2006.