

# SAGA-LS 蓄積リング RF 周波数変更に伴うランプアップスタディー A STUDY OF ENERGY RAMP-UP FOR CHANGING RF FREQUENCY AT THE SAGA-LS STORAGE RING

岩崎能尊#, 高林雄一, 金安達夫, 江田茂

Yoshitaka Iwasaki #, Yuichi Takabayashi, Tatsuo Kaneyasu, Shigeru Koda

SAGA Light Source

## Abstract

The strengths of horizontal steering magnets for global closed orbit correction have gradually increased in past years. The excitations of two super conducting wigglers also increase the strengths of steering magnets. Some of power supplies of steering magnets reached the rated amperage. As a result, the accuracy of horizontal orbit correction has not satisfied the specified value. In order to solve the problem, we studied the energy ramp-up at changed RF frequency of 499.84894 MHz, which was decreased by 22.1 kHz from original RF frequency of 499.87060 MHz. However, the energy ramp-up with the stored beam current of 300 mA was hard to achieve. By adjusting the betatron tunes to that of the original RF frequency during the energy ramp-up, the success rate of the energy ramp-up has improved at changed RF frequency.

## 1. はじめに

SAGA Light Source (SAGA-LS)電子蓄積リングにはリニアックにより 255 MeV まで加速された電子が入射される。約 300 mA のビーム蓄積後、蓄積リングにて 1.4 GeV までランプアップを行う。グローバル Closed Orbit Distortion (COD)補正は、1.4 GeV 到達時及び、超伝導ウィグラー[1,2]の励磁が完了した後に実施している。Figure 1 に 1.4 GeV 到達後に行う COD 補正に必要な水平方向ステアリング強度の経年変化を示す。Figure 1 に示されるように、ここ数年で COD 補正に必要な水平方向ステアリング強度が大幅に上昇していることが判明した。SAGA-LS 電子蓄積リングでは 2016 年から 2 台の超伝導ウィグラーを励磁したユーザー運転を開始している。ユーザー運転開始時には、超伝導ウィグラーの励磁に伴う COD 補正のためにステアリング強度が更に増加する。その結果、2 台の超伝導ウィグラーを運用したユーザー運転にて、一部のステアリング電源は定格に達するようになった。定格に達したステアリングはマスクを施し COD 補正を行っているが、水平方向の COD は基準軌道に対し規定値を満たさない状況が生じた。

そこで、RF 周波数の最適化を行い、現在の RF 周波数(499.87060MHz)より約 22.1 kHz 下げたところ、ステアリング強度が大幅に減少されることが判った。しかしながら、蓄積ビーム電流が 200 mA 程度では安定してランプアップができるものの、ユーザー運転時の規定ビーム電流である 300 mA のランプアップは困難であった。グローバル COD 補正に必要なステアリング強度は今後も上昇する可能性があるため、RF 周波数を約 22.1 kHz 変更した蓄積リングの運転において、蓄積ビーム電流 300 mA の安定したランプアップの成功が必要とされている。現在の RF 周波数においては、加速の初期に 20 mA 程度のビームロスはあるものの、安定して 300 mA の加速に成功している。そこで、ランプアップ途中のチューンを計測し、そのチューンの計測値を参考に蓄積リング電磁石電

源のランプアップパターンの調整を行うこととした。

本稿においては、RF 周波数を変更したランプアップにおける蓄積ビーム電流依存性等のビームロスの状況調査、ランプアップを途中で停止させて計測したチューンの計測結果、及び蓄積リング電磁石電源ランプアップパターンの調整結果について報告する。

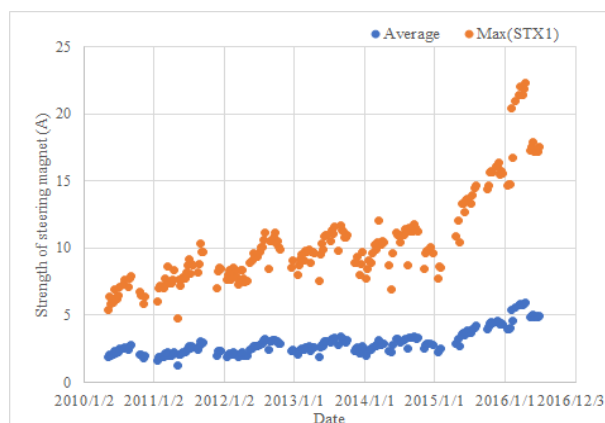


Figure 1: Growth of strength of the steering magnet for horizontal COD correction.

## 2. ビームロスの状況調査

RF 周波数を約 22.1 kHz 変更した蓄積リングの運転において、入射時のチューン及び軌道を補正したところ、安定した 300 mA のビーム蓄積が可能となった。しかし、現在の RF 周波数で用いている電磁石電源のランプアップパターンを用いて加速を行うと、1.4 GeV までのランプアップに成功する場合があるものの、再現性がなく、安定しなかった。ビームの全ロス、ランプアップの極初期(開始直後 1~2 秒以内、エネルギーにして 255 MeV から 300MeV 程度)に生じる事が多かった。Figure 2 にランプアップ直後に生じるビーム全ロス時の例を示す。また、ランプアップ開始直後にビームの全ロスをしない場合においても、ビームエネルギー400 MeV と 900 MeV 付近

# iwasaki@saga-ls.jp

にて数 10~100 mA 程度のロスを生じた。原因の把握と対策を検討するため RF 周波数を約 22.1 kHz 下げた運転におけるビームロスの状況を調査することとした。

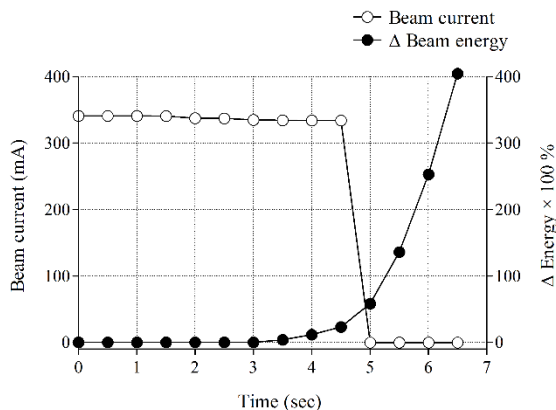


Figure 2: Stored beam current and rate of beam energy increase.

### 2.1 蓄積ビーム電流量依存性

ランプアップ開始時の蓄積ビーム電流に対する生存率(ランプアップ完了後のビーム電流/ランプアップ開始前のビーム電流)を Figure 3 に示す。ランプアップパターンは従来の周波数のものを使用した。

Figure 3 に見られるように、ランプアップの生存率と加速開始時の蓄積ビーム電流には明瞭な閾値が見られた。蓄積ビーム電流が 200 mA 以下では安定したランプアップが可能であるが、240 mA 以上ではほぼ加速開始直後にビームの全ロスが生じた。ビームロスには蓄積ビームの電流量依存性があることが認められた。

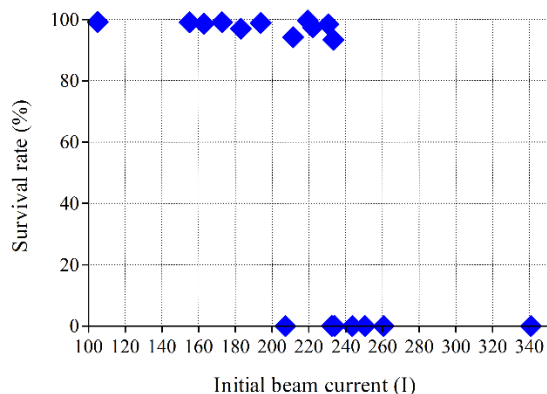


Figure 3: Initial stored beam current and survival rate of energy ramp-up.

### 2.2 ランプアップ速度との関係

ランプアップ開始直後のビーム全ロスの一要因として、蓄積リング電磁石電源の非同期あるいは時間応答性の違いが考えられたため、ランプアップの速度を変更し、ビームロスの状況を調査した。通常は、338 MeV まで約 45 MeV/s でランプアップを行っているが、ランプアップ速

度を通常の 1/40 まで低下させてもビームロスは生じた。Figure 4 に 338 MeV までのランプアップ速度を 8.5 MeV/s まで遅くした際のビームロスの状況を示す。通常のランプアップよりも速度を遅くすると、加速初期のビーム全ロスは回避される。しかし、ビームロス量は依然として多かった。従って、電源の非同期性や時間応答性がビームロスに与える影響は、本質的な原因ではないと推定された。ランプアップ速度を変化させてもビームロスするエネルギーはほぼ変わらないことから、加速初期のビームロスは、ビームエネルギーに強く依存した現象であることが示された。

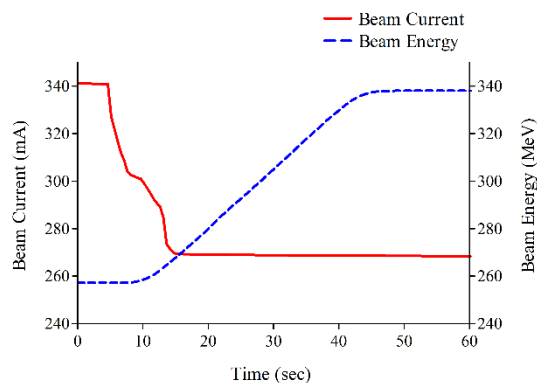


Figure 4: Beam current and beam energy at slow ramp-up (8.5 MeV/s).

### 2.3 ランプアップ途中のチューン

SAGA-LS では現在リアルタイムでチューンを測定することができないため、ランプアップを途中で停止し[3]、各エネルギーでのチューンを測定した。Figure 5 にビームエネルギー496 MeV までのランプアップ途中におけるチューン変動の様子を示す。

エネルギー400 MeV 付近で動作点が3次の共鳴に近かった。また、エネルギー900 MeV 付近も同様であった。ビームエネルギー400 MeV 及び 900 MeV 付近でのビームロスは、3 次の共鳴に近いことが原因であると推定される。しかし、ランプアップ開始直後のビームロスは、動作点が差共鳴を通過するものの、チューンの変動からは説明できない。

### 2.4 その他の効果

RF 電圧を上げるとランプアップに成功する蓄積ビーム電流量の閾値を上げる効果が見られた。通常の蓄積リングの運転において、入射時の RF 電圧は約 260 kV であるが、320 kV 程度まで上げることでランプアップに成功する蓄積ビーム量は、約 300 mA 程度まで上昇した。

また、その他のビームへの影響としてイオントラッピングによるチューンシフトが考えられた。そのため、イオンクリアリング電極に印加する電圧を変化させて、チューン及びランプアップの成功率を調査した。しかし、イオンクリアリング電極への印加電圧が-200 V 以上(通常-1000 V)で効果に違いは見られなくなり、ランプアップの成功率にも変化はなかった。

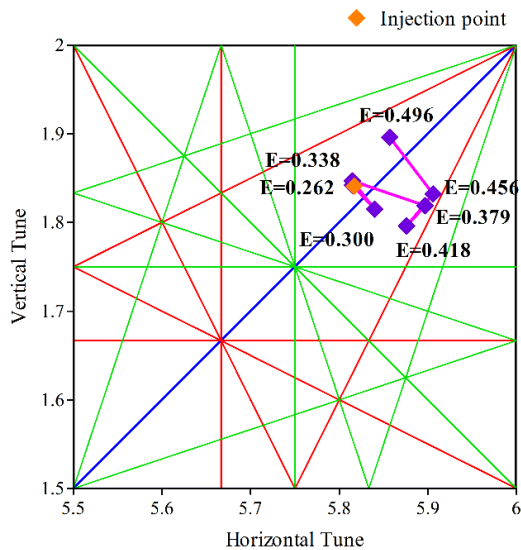


Figure 5: Tune diagram from injection energy to 496 MeV during the energy ramp-up at changed RF frequency. Red and green lines denote third and fourth resonances respectively.

### 3. RF 周波数を変更したランプアップの対処

RF 周波数を変更したランプアップスタディーの当初は、たまたま 300 mA の 1.4 GeV までの加速に成功したため、当初は電磁石電源の試行錯誤によるランプアップパターンの調整を行った。しかし安定しなかったため、ランプアップを途中で停止し、チューンの変動がないように電磁石電源のランプアップパターンを作成した。しかし、この方法によっても、加速開始直後にビームの全ロスを生じた。また、前節に示したようにランプアップ速度の変更も有効でなかった。一方で、現在の RF 周波数においては、加速開始時ビーム電流 340mA にて約 20 mA 程度のビームロスはあるものの、安定したユーザー運転を行っている。そこで、現在の RF 周波数でのランプアップ中のチューンに一致するように、RF 周波数を約 22.1 kHz 変化させた際の電磁石電源ランプアップパターンを設定した。Figure 6 に現在のユーザー運転で用いている RF 周波数におけるチューンの計測結果を示す。ランプアップ途中のチューンを現在の RF 周波数のものと合わせた結果、加速開始直後のビームの全ロスは回避されるようになった。また、ビームエネルギー 400 MeV 及び 900 MeV 付近でのビームロスは、3 次の共鳴から動作点を避ける方向で調整した結果、ほぼ無くなった。現在の RF 周波数における電磁石電源のランプアップパターンは、磁場測定データをベースにしつつも、コミッションング期から調整を繰り返し最適化されたものである。ビームが全ロスしない理由は定かではないが、ランプアップ途中におけるチューンを現在の RF 周波数のチューン近傍に合わせることに一定の成果があったと言える。

超伝導ウイグラーの励磁には 15 分所要する。その間のビーム寿命によるロスは 10 mA 程度である。ユーザーへのビーム提供時に蓄積ビーム電流が 300 mA 以上で

あるためには、定常的に 310 mA 以上のビーム電流を 1.4 GeV まで加速させる必要がある。現在、電磁石電源のパターン微調整により、約 340 mA からの加速で 320 mA 以上生存するケースが多くなった。しかし、同じランプアップパターンにおいても 30 mA 以上ロスする場合もある。パターンの微調整を繰り返しつつ 1.4 GeV にて 310 mA 以上生存する成功率の統計データを取得し、最適な蓄積リング電磁石ランプアップパターンを模索中である。

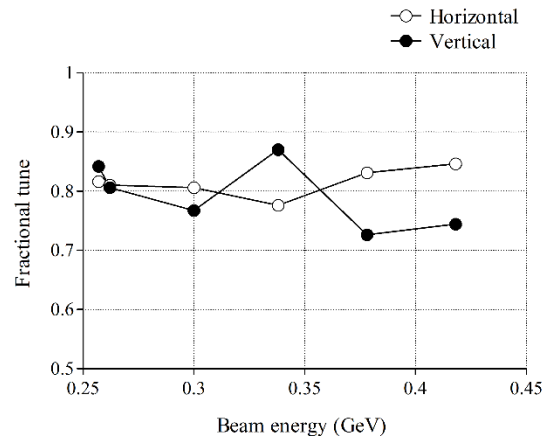


Figure 6: Fractional tunes of horizontal and vertical at original RF frequency of 499.87060 MHz.

### 4. まとめと今後の展望

蓄積リングのグローバル COD 補正に必要なステアリング強度がここ数年で大幅に増大したため、蓄積リング RF 周波数の最適化を行った。しかしながら、RF 周波数を変更したところ、ユーザー運転時の蓄積ビーム電流 300 mA でのランプアップが困難となった。ビームの全ロスはランプアップの極初期(開始直後 1~2 秒以内、エネルギーにして 255 MeV から 300MeV 程度)の間に生じた。また、エネルギー 400 MeV と 900 MeV 付近にてロスするケースもあった。そこで、ランプアップを途中で停止し、従来の RF 周波数におけるチューンに合うようにランプアップパターンを設定した。またエネルギー 400 MeV と 900 MeV 付近においては 3 次の共鳴から遠ざけるようにランプアップパターンを調整した。その結果、300 mA のランプアップに成功するようになった。しかし、ビームロス量が多い場合もあり、現在も微調整を続けつつ成功率の統計データを取得している。

RF 電圧を変化させると、ランプアップの成功率に効果がある。今後はランプアップパターンの微調整の他、RF 電圧を変えたスタディーも検討したい。また、代替的な対応としては、リニアックの加速ビーム電流を減らし、入射エネルギーを高めることも考えられる。ランプアップ開始時のエネルギーを高めることで加速極初期のビームロス低減が期待される。あるいは、1.4 GeV までのランプアップ完了後に RF 周波数を変化させるのもひとつの方法である。

ランプアップ開始直後のビームロスは、蓄積ビーム電流量とビームエネルギーに強く依存する。また、RF 電圧にも依存する。そのビームロスのメカニズムは不明

である。また、そもそも何故 COD 補正に必要なステアリング強度が年々増大したのか、その原因解明も望まれる。COD 補正に必要なステアリング強度には季節変動もあり、夏場に上昇する傾向がある。RF 周波数を約 22.1 kHz 下げるとは、Beam Position Monitor (BPM) が平均して約 0.5 mm リング外側に移動したことを意味する。これは、BPM 真空槽の移動によるものなのか、あるいは蓄積リング電磁石もしくは建屋が膨張した結果なのか未検証である。これらの問題の原因解明については、今後の研究課題としたい。

計測システムとしては、現在は約 2Hz の電磁石電源モニターシステムと、GPIB にて接続された蓄積ビーム電流モニターシステムが別々の PC にて稼働している。データログはネットワークで接続された更に別の PC にて取得している。そのため、どのタイミングでビームロスしているのか正確な判断ができない。ビームロスの原因

特定のために、速い(1 kHz 程度)のリアルタイムモニターシステムの開発を検討している。COD 補正に必要なステアリング電磁石電源の強度増加の原因特定には、BPM 真空槽の変位観測や、電磁石の測量が求められる。

## 参考文献

- [1] S. Koda *et al.*, “Design of a superconducting wiggler for the SAGA light source storage ring”, IEEE Trans. Appl. Supercond. 21 (2011) 32.
- [2] S. Koda *et al.*, “Effects of a hybrid superconducting three-pole wiggler on the stored beam at the SAGA-LS storage ring”, Nucl. Instr. and Meth. A 682 (1) (2012), 1.
- [3] Y. Iwasaki *et al.*, “Update of power supply control system at the SAGA Light Source storage ring”, Proceedings of ICALEPCS’15, Melbourne, (2015), 137.