

## SAGA-LS 電子蓄積リングにおける超伝導ウィグラー2 台運用プロジェクトの概要と 現状

### OVERVIEW OF THE PROJECT OF TWO SUPERCONDUCTING WIGGLER OPERATION AND CURRENT STATUS AT THE SAGA-LS ELECTRON 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

A second superconducting wiggler (SCW) with a peak magnetic field of 4 T was installed for generating hard X-rays in autumn of 2015 at the SAGA Light Source (SAGA-LS) 1.4 GeV electron storage. The strong influences to the stored beam caused by the second SCW (LS5W) were corrected independently of that of the first SCW of LS2W. The betatron tune shifts and chromaticity shifts caused by the LS5W were locally corrected. There was no harmful influence to the other beam lines of the synchrotron radiation experiments at the two SCWs operation. The operation of the two 4 T SCWs for user experiments in the SAGA-LS storage ring has been successfully started from July, 2016.

#### 1. はじめに

SAGA Light Source (SAGA-LS)では、2015 年秋に 2 台目となる 4 T ハイブリッド型超伝導ウィグラー (SCW)[1][2]が設置された。SAGA-LS 電子蓄積リングは最大エネルギー1.4 GeV の放射光用リングであり、偏向電磁石光源の臨界エネルギーは 1.9 keV である。4T SCW からの臨界エネルギーは、5.2 keV であり、偏向電磁石光源では難しかった 30 keV 程度までのハード X 線を用いた各種物性研究が可能となった。SAGA-LS 加速器は、255 MeV リニアックと、1.4 GeV 電子蓄積リングから構成される。リニアックにより入射された電子は、蓄積リング内で 1.4 GeV まで加速される。SAGA-LS 電子蓄積リングは、低エネルギー入射方式かつコンパクトサイズの蓄積リングであるため、2 台の SCW を同時に運用するためには、単に SCW をインストールするだけでなく、多くの検討と準備を要した。本稿においては、2 台の SCW 運用プロジェクト概要のうち、主に 2 台目 SCW (LS5W) 運用のためにこれまで準備してきたことを紹介したい。これらの準備内容は、低エネルギー入射方式のコンパクトサイズ電子蓄積リングにおいて 2 台の SCW を運用するために不可欠の事柄であった。コミショニング内容と現在の SCW の運転状況については最後に簡潔に報告する。

#### 2. 2 台目 SCW の運用準備

##### 2.1 2 台目 SCW 運用の条件と問題点

SAGA-LS 電子蓄積リングは、低エネルギー入射方式の加速器である。Figure 1 に SAGA-LS 加速器レイアウトを示す。入射時のビームエネルギーは、255 MeV であるため、SCW は入射毎に消磁しなければならない。SCW の励磁および消磁時間は、各 15 分である。蓄積ビーム

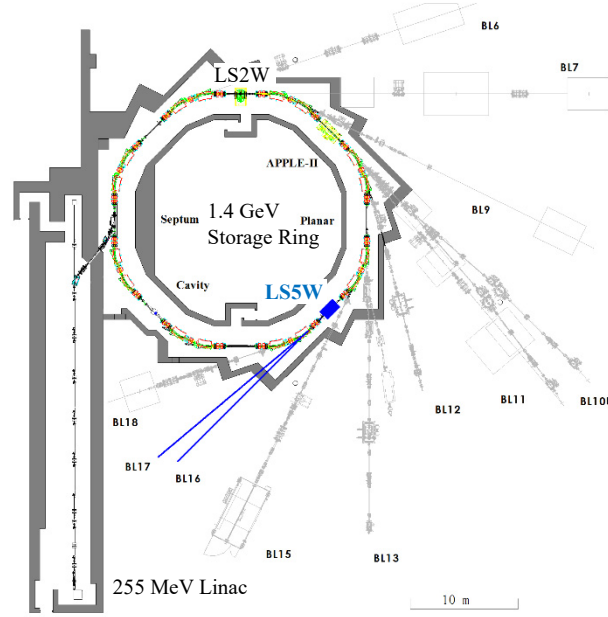


Figure 1: Layout of the SAGA-LS with the second wiggler of the LS5W.

電流 300 mA 時のライフは約 6 時間程度であり、ランプアップ直後は蓄積ビーム電流の減衰が早い。SCW を単純に 1 台ごとに励磁した場合、最短でもランプアップ完了してから 30 分以上経過しないとユーザー運転が開始されないこととなる。従って、SCW は 2 台同時に励磁する必要があった。2 台励磁の同時性は厳密である必要はないが、ランプアップ完了後のどのタイミングにおいてもそれぞれの SCW は励磁可能である必要があった。また、SCW はまれにクエンチを起こす場合があるため、1 台運用時においても 2 台運用時においても加速器の制御が容易であることが望ましかった。上記のことは、SCW がビームに与える影響を、励磁のどのタイミングにおいても十分に抑制すること、また、個々の SCW による影響は、

# iwasaki@saga-ls.jp

独立に抑制する必要があることを意味する。上記の補正に関する考えは、通常のアングレーターの運用と本質的な違いはない。しかし、SCW のビームに与える影響は特に低エネルギー蓄積リングでは大きく、ビームへの影響の抑制方法について多くの検討と準備を行った。

2 台目 SCW の運用に当たっては、電源室に余剰な分電盤がなかったため、3 相 210V 系分電盤の増設が必要であった。また、当然のことながら LS5W 運用のためには真空槽の入れ換えが必要であった[3]。Figure 2 に LS5W 設置時の写真を示す。次章以降に、その他 LS5W 運用のために行ったことを示す。

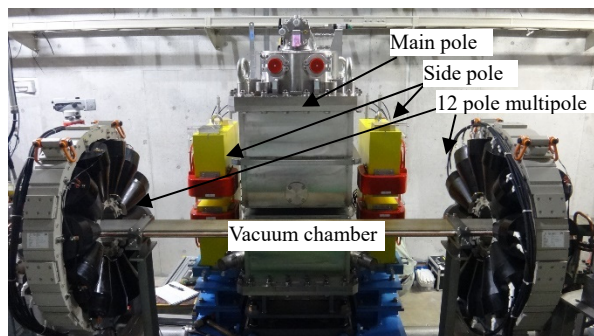


Figure 2: LS5W and the 12 pole multipole magnets at the installation of the LS5W.

## 2.2 4 極電磁石の一部独立電源化

SCW の励磁は蓄積ビームに対し強い影響を与える。その最も大きな影響は、チューンシフトである。1 号機 SCW (LS2W) 励磁に伴うチューンシフトは、水平垂直各 (-0.031, 0.068) であった。SAGA-LS 電蓄積リングの動作点は、(5.795, 1.825) であるが、SCW の励磁に伴い、3 次の共鳴線に近づく。従って 2 台の SCW を同時に励磁するためには、個々の SCW によるチューンシフトを十分に抑制する必要がある。

SCW による強いチューンシフトは、4 極電磁石に設置されている補助コイルによっては必要な磁場勾配が確保されず抑制できない。SAGA-LS では建設期より 1 台の SCW の設置は考慮されていた。そのため、建設当初より 1 部の 4 極電磁石ダブレットは独立電源により励磁されていた。2 台目となる SCW によるチューンシフトを補正するため、それまでシリーズに接続されていた 4 極電磁石の一部を独立電源化することとした。しかし、SAGA-LS 電子蓄積リングではランプアップを行うため、新規の 4 極電磁石電源をいかに同じファミリーに属する 4 極電磁石電源と同期させるかという制御上の問題があった。

SAGA-LS では建設期より、PC と PLC による制御システムが構築されている。上記の問題に対しては、光ファイバーケーブルで PLC 親機と接続した PLC 子機による制御システムを適用することで解決した[4]。制御システム構築の生産性、デバッグの容易さの観点からは、独立電源に対し、新規に CPU モジュールを備える PLC システムを準備するのが望ましかった。しかし、ランプアップのための同期性の必要性から、あえて新規 4 極電磁石電源のための PLC は、既存の PLC システムの子機とする構成とした。PLC 子機によるシステムにより、1 msec 程度の同期性が確保されている。新規 4 極電磁石電源と PLC

システムに移行したのち、多少ランプアップパターン of 修正を行ったもののランプアップには大きな影響を与えなかった。4 極電磁石の一部独立電源化に伴い、4 極電磁石配線の変更も行った。

## 2.3 12 極多極成分電磁石の検討と設置

SCW の励磁に伴うビームへの影響として、クロマチシティーの大きな変化が挙げられる。SCW 励磁に伴うクロマチシティーの変化は水平・垂直各 (-0.5, 0.8) である。LS2W の励磁においては、蓄積リングの全ての 6 極電磁石を用いて LS2W の励磁に伴うクロマチシティーの変化を補正していた。LS5W がビームに与える影響の補正は、LS2W とは独立に行うことを条件としていたため、新規にクロマチシティー補正用の電磁石を設置する必要があった。LS5W を設置するためには、最短でも 1.6 m の長手方向の空間的自由度が必要であった。SAGA-LS の直線部の長さは約 2.5 m であり、あまり大きな補正電磁石は設置できない。そこで、ヨーク幅 0.1 m の薄い 12 極電磁石を LS5W の上下流に設置し、クロマチシティー補正を行うこととした。12 極電磁石としたのは、生成される磁場の自由度の高さによる。SCW の励磁に伴い、カップリングが変化することは LS2W に関するスタディーにより予めわかっていた。クロマチシティー補正と skew 4 極の生成のみであれば、補正コイルを備えた 6 極電磁石があればよいが、2 台の SCW による高次の非線形磁場の影響は不透明であり、最大で 8 極までの磁場を生成可能な電磁石として 12 極電磁石を検討した。クロマチシティー補正に必要な 6 極成分は LS2W に関するスタディーにより把握されており、設計に反映させた。多極成分電磁石による 6 極成分の最大磁場は 40 T/m<sup>2</sup> である。多極成分電磁石は、LS5W の設置以前に蓄積リングに設置し、SCW 励磁に伴うクロマチシティー補正に十分な能力があることを検証した。多極成分電磁石は Skew 4 極として励磁を行い、カップリング調整に使えることも確かめられている。Figure 3 に多極成分電磁石励磁によるクロマチシティーの変化を示す。

12 極多極成分電磁石は、現在は 6 極電磁石として使

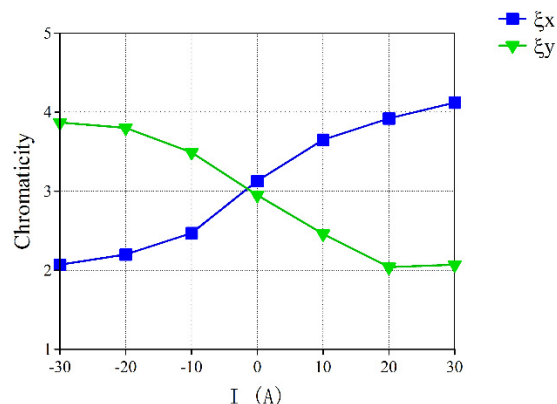


Figure 3: Chromaticity shifts by the excitation of the 12pole multipole magnets.

用しているが、将来的には skew 4 極と 8 極電磁石として使用できるように開発準備している。多極成分電磁石は、

LS5W 設置のための空間を設けるため、LS5W 真空槽の入れ換えの際に、直線部 LS5 の適切な位置に置き直した。Figure 2 に見るように 12 極多極成分電磁石はサイドポール電磁石に比しても大きい。これは、多極成分電磁石のボア径が 168 mm と大きいことによる。ハイブリッド 4T SCW のメインポール部でのビーム軌道シフト量は約 17 mm と大きく、真空槽幅が 126 mm と広いこと、また、真空槽のリング外側にφ12 の冷却水パイプが配置されており、空間的制約からボア径を大きくせざるを得なかった。

#### 2.4 制御システムの更新

新 4 極電磁石電源はそれぞれ、QF1 ファミリー、QD1 ファミリーに属する 4 極電磁石ダブレットの一部を励磁する電源である。LS5W が励磁されないときは、それぞれの電源は、同一のファミリーに属する電源と等しい電流を出力する必要がある。そのため、外部 DCCT による電流フィードバックシステムを新 4 極電磁石電源においても採用した。外部 DCCT による電源のフィードバック制御システムは、以前より SAGA-LS 電子蓄積リングのメイン電磁石電源で採用してきたものである。外部 DCCT によるフィードバック制御により、 $1.0 \times 10^{-4}$  程度の設定値に対する精度が保たれている。Figure 4 に新規 4 極電磁石電源用の外部 DCCT 設置状況および、恒温槽内に設置された DCCT アンプを示す。DCCT アンプからのアナログ出力は、National Instruments Fieldpoint のアナログ入力モジュールに入力している。



Figure 4: External DCCT and the amplifiers.

LS2W のみを運用していた期間は、LS2W の励磁後に、チューンおよびクロマティシティー補正に必要な電源設定値を、LS2W 制御アプリケーションより変更していた。しかし、2 台同時励磁のためには、SCW によるビームへの影響を、励磁中のどのタイミングにおいても十分に抑制する必要があった。そのため、LS2W と LS5W のメインポールの出力値に応じて 4 極電磁石電源、6 極電磁石電源、多極成分電磁石電源を連動制御するフィードフォワードシステムに変更した。また、LS5W は垂直方向の COD を生じたため、LS5W に関しては 2 台の垂直方向ステアリングも連動させることとした。PC 間通信には従来 SAGA-LS で採用してきた Windows 版の EPICS である ActiveXCA[5]を用いた。

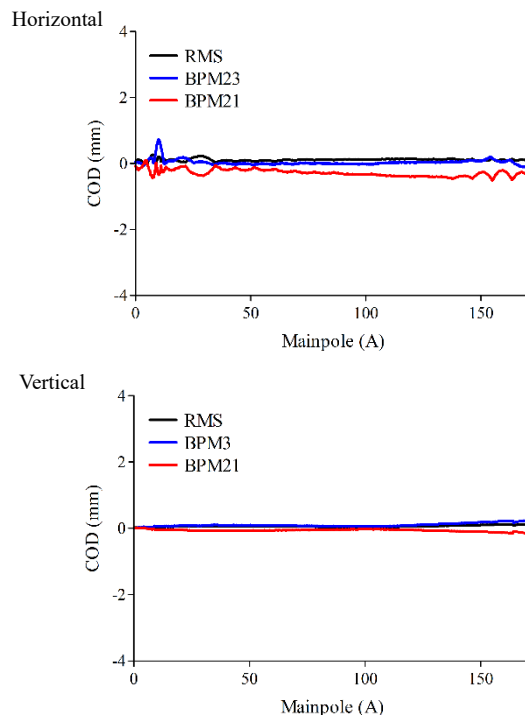


Figure 5: COD during the excitation of the LS5W after the dipole corrections.

### 3. コミッショニング

SCW の励磁によるビームへの影響を、2 極、4 極、6 極の順で補正した。SCW を構成するメインポール、サイドポールの励磁パターンは初めに磁場計算に基づき決定した。実際の励磁パターンは、観測されるビーム軌道の歪み (COD) を最小にするように、最小二乗法により決定した。具体的には、i) 上下流のサイドポールを適当な電流で励磁し、単位電流あたりの COD を測定、ii) 計算によって求めた励磁パターンに従って励磁、iii) 観測される COD が最小になるようにサイドポールの励磁電流を調整、iv) 励磁のどの状態においても、水平方向 COD が 1 mm 以下になるまでパターンを分割し、繰り返した。1 号機 SCW には見られなかったことであるが、2 号機 SCW の励磁により、垂直方向に 3 mm 程度のやや大きな COD が観測された。そのため、垂直方向 COD を補正するため、LS5W 上下流の 6 極内蔵のステアリングを用いて励磁中における垂直方向 COD も 1 mm 以下とした。Figure 5 に LS5W 励磁中における COD を示す。サイドポール電磁石励磁パターンの最適化と垂直方向ステアリングによる補正の結果、水平・垂直ともに励磁中における COD は 1 mm 以下に抑制された。4 T 励磁後には、グローバル COD 補正を行い、基準軌道に対し  $20 \mu\text{m}$  以下の COD とした。

LS5W の励磁に伴う垂直方向 COD の原因としては、水平方向の不整磁場もしくは、ビーム軸回りのミスアライメントが考えられる。LS2W と LS5W は磁極

の構造が同一であり、LS5W のみ不整な水平方向磁場が生じているとは考えにくい。LS5W の励磁に伴う垂直方向 COD の要因は、ビーム軸回りのミスアライメントと考えられる。しかし、LS5W のビーム軸回りのミスアライメント許容値は、 $\pm 0.1$  mrad であり、実際のアライメントにも問題はなかった。垂直方向の COD を生じた原因は不明である。

チューンシフトの許容値は、水平・垂直共に 0.01 以下とした。0.01 というチューンシフト量は、通常の利用者運転時におけるチューン変動の許容値として我々が許容している限度値である。LS5W のチューンシフトは、まず 4T 励磁時におけるチューンシフトを LS5W 上下流の 4 極電磁石ダブレットにより補正した。次に、励磁途中においては、メインポールの出力値に比例した値をフィードフォワード制御により補正した。SCW の励磁に伴うチューンシフトは、SCW のメインポール電源出力値に対し非線形であるが、線形に補正するだけで LS5W の励磁中におけるチューンシフトは 0.01 以下に補正された。

クロマチシティーの補正に必要な多極成分電磁石に通電電流量は事前のスタディーにより予め把握していた。実際多極成分電磁石電源の設定値は、LS5W の励磁に伴うクロマチシティーの変化を測定し、所定のクロマチシティーとなるように合わせ込みを行った。2 台の多極成分電磁石により、LS5W 励磁に伴うクロマチシティーが十分に補正された。LS5W 励磁によるチューンシフト、クロマチシティーシフトおよび補正結果を Table 1 に示す。

Table 1: Tune and Chromaticity Shift Caused by the LS5W

	Before excitation	After excitation	Correction results
Horizontal tune	5.788	5.759	5.787
Vertical tune	1.819	1.894	1.819
Horizontal chromaticity	3.13	2.40	3.03
Vertical chromaticity	2.95	3.75	2.91

#### 4. 運転状況

LS5W に関するコミッショニングは、2015 年 10 月より開始した。コミッショニングは順調に遂行され、2015 年 11 月 28 日には 2 台の SCW の励磁に成功した。2 台の SCW を励磁した際にビーム寿命が極端に短くなることもなかった。その後、制御システムの整備・改修等を行ったのち、2016 年 2 月 29 日に一部のビームラインに対し LS5W 励磁による影響調査を行った。その後、全てのビームラインで SCW 励

磁による影響調査が行われ、他の放射光実験に影響ないことが確かめられた。2016 年 7 月 5 日からは、利用者運転においては常時 2 台の SCW を励磁することとし、2 台の SCW 励磁した SAGA-LS 電子蓄積リングの定常運転を開始した。Figure 6 に蓄積リングビーム電流の減衰の様子を示す。ビーム寿命は、垂直方向ビームサイズ調整精度等により、日々の運転で若干のばらつきがある。SCW を 2 台運転した際の寿命の詳細については調査中であるが、利用者運転に影響を与えない範囲内である。現在まで、SCW を 2 台励磁した SAGA-LS 電子蓄積リングの安定した利用者運転が行われている。2 台の SCW の運用により、低エネルギー入射方式のコンパクトな蓄積リングでは難しかったハード X 線ビームラインの複数運用が可能となった。

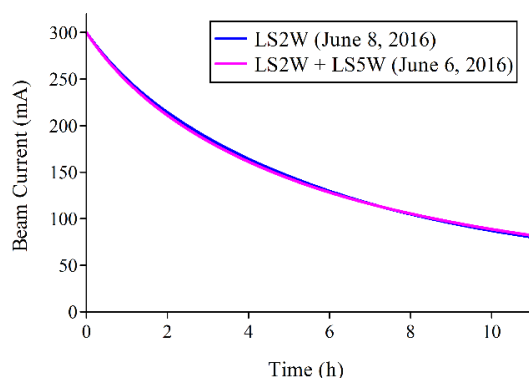


Figure 6: Decays of the stored beam at the operations of single SCW and the two SCWs.

#### 謝辞

LS5W は住友電気工業株式会社によるハード X 線ビームライン BL16 整備の一環として設置された。製造は株式会社日立製作所が行った。住友電気工業株式会社の山口氏、飯原氏、および株式会社日立製作所の山本氏らの協力に謝意を表したい。

#### 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] T. Kaneyasu *et al.*, “Installation of a second superconducting wiggler at SAGA-LS”, in: AIP Conf. Proceedings, SRI 2015 (2015).
- [4] Y. Iwasaki *et al.*, “Update of control system of SAGA-LS storage ring power supplies”, Processing of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (2014), pp. 1285-1287.
- [5] ActiveXCA; <http://ics-web.sns.ornl.gov/kasemir/axca/>