

SAGA-LS 電子蓄積リング大規模更新プロジェクトの進捗状況

PROGRESS OF SAGA-LS ELECTRON STORAGE RING UPDATE PROJECT

岩崎能尊[#], 竹田晴信, 高林雄一
Yoshitaka Iwasaki[#], Harunobu Takeda, Yuichi Takabayashi
SAGA Light Source

Abstract

The accelerator of SAGA Light Source (SAGA-LS) has continued to operate stably since its opening in 2006. SAGA-LS is planned to continue operating with the aim of utilizing local industries, such as agriculture, forestry, fisheries, and semiconductors. However, 20 years have passed since user operation began, and the accelerator's components are at risk of long-term shutdown due to an increasing failure rate caused by aging. Therefore, an accelerator upgrade project was initiated for SAGA-LS to ensure continued stable operation of the user operation. The power supplies for the electron storage ring main magnets were updated in April 2025. The RF cavity will be updated in November 2025, and the power supplies for the storage ring klystron, septum magnets, and power supplies for septum and kicker magnets will be updated from October to November 2026.

1. はじめに

九州シンクロトロン光研究センター(SAGA Light Source: SAGA-LS)は地域産業促進を主な目的として佐賀県が建設した放射光施設である[1]。2003年9月より加速器構成機器類の設置を開始し、2006年2月よりユーザー運転を開始した。加速器はコミッショニング期から現在に至るまで大小様々なトラブルや機器故障に見舞われてきたものの、現在まで概ね安定した稼働を継続してきた。SAGA-LSは2026年2月には供用開始から20周年を迎え[2]、農林水産業、半導体分野など地域産業の利活用を目指した安定した運用が期待されている。一方でコミッショニングから20年が経過した加速器構成機器類は老朽化に伴う故障率の増大、型番廃止やサポートの停止に伴う計画外の長期のシャットダウンリスクを抱えている。そこで、加速器の継続した安定運転を目的とし、SAGA-LSでは5カ年に渡る加速器の大規模な更新プロジェクトが開始された。2025年4月には電子蓄積リング主要電磁石(偏向電磁石、4極電磁石、6極電磁石)用電源が更新された。2025年11月には蓄積リングRF空洞及びクライストロン電源用基板類、翌2026年10月から11月にかけて蓄積リングクライストロン及びセプタム電磁石ならびにセプタム電磁石及びキッカー電磁石用電源、2027年11月にはステアリング電磁石及び4極電磁石補正用電源類が更新される。各年次の更新計画をFig. 1に示す。各加速器構成機器類は入射やランプアップ不調、ビーム蓄積時のビーム不安定性等の要因を分離するため、一斉更新ではなく複数年に渡り順次更新される。また、リアックを含む他の機器類についても今後の更新が計画されている。本稿において、電子蓄積リング主要電磁石用電源の更新結果、及び他の機器類の更新計画について概要をまとめる。

2. 電子蓄積リング主要電磁石用電源

電子蓄積リング主要電磁石電源は建設期より故障が

頻発し、更新の優先対象となった。2019年2月には偏向電磁石用電源整流ダイオードがショートし、蓄積リング高周波系等の機器を含む施設全体の受電に影響を与えたことも更新を後押しする要因となった。

新規電子蓄積リング主要電磁石用電源(BM, QF1, QD1, QF2, QFW1, QDW1, QFW2, QDW2, SF, SD:計10台)の製造はコロナ禍の影響が残る情勢下において遂行され、スイッチング電源類等部品の大幅な納期延長、出荷前の電源内部温度異常などがあり、当初2024年11月に現地設置工事の予定だったものが2025年4月に延期された。

SAGA-LSでは建設費に関しても制約が厳しく、建設費用を抑制するために実験ホール天井が低く建設された。天井クレーンの揚程は蓄積リング室上部において約2.4m程度しかなく、大型化した新規製造電源の搬入に際しては電源筐体の分割設計、搬入業者による手動ホイストの追加等の処置が必要であった。

対象機器	2023年度	2024年度	2025年度	2026年度	2027年度
蓄積リング主電源					
蓄積リングRF空洞					
クライストロン電源基板					
セプタム・キッカー電源					
セプタム電磁石					
蓄積リングクライストロン					
蓄積リング小型電源					

Figure 1: Annual update plan of the SAGA-LS electron storage ring.

電源設置後、各電源の出力試験等を経て、2025年5月1日より新電源を用いたコミッショニングを開始した。電源外部DCCTにて測定される新規各電源の出力値を旧電源の出力値と一致させることで、翌5月2日には所定のビーム電流である300mAの蓄積に成功した。その後、ランプアップ試験を継続し、5月9日(金)にはビーム

[#] iwasaki@saga-ls.jp

電流 300 mA での 1.4 GeV ランプアップに成功した。新規電源の設置にあたり、これら主要電源の制御システムも一新され、2 台の 4 T 超伝導ウイグラー[3]の同時励磁に必要な 4 極及び 6 極磁場の補償システム、アンジュレーターギャップ変更に伴不整磁場補償システムの再構築とビームを用いた検証が必要であった。Beam Based BPM Alignment 等のビーム調整を経て 5 月 20 日からユーザー運転を再開した。Figure 2 に設置が完了した新規更新した電子蓄積リング主電源を示す。



Figure 2: Newly updated power supplies for electron storage ring at the SAGA-LS.

SAGA-LS 電子蓄積リングは偏向電磁石が 1.46 T まで励磁されるのをはじめ各主要電磁石は磁場の飽和領域まで励磁される。各電源のランプアップパターンは磁場の飽和を考慮した非線形のパターンとして設定する必要がある。255 MeV の入射エネルギーから最大エネルギー 1.4 GeV までの加速に要する時間は約 2 分である。新規製造電源のランプアップパターンは当初従来使用のものをそのまま用いた。しかし従来機とは出力特性の相違があり、大電流のランプアップには試行錯誤による調整が必要であった。現在においてもランプアップ中において大きなビームロスが発生することがあり、原因の特定と対策が継続して進められている。

3. 蓄積リング高周波加速空洞

SAGA-LS では RF 空洞反射波過大インターロックに伴う蓄積ビームの全ロスが発生し、その経験則的な対応として RF 空洞電圧を下げる処置が行われてきた。Figure 3 に RF 反射インターロックにより発生したビームロスの累積回数と RF 空洞電圧設定値の推移を示す。RF 空洞電圧を下げることで RF 反射によるビームロスは低減するものの、空洞電圧は現在定格の 500 kV から 310 kV 付近まで落ち込んでいる。RF 反射波過大インターロックはビームがない状態で高圧を印可した状態においても発生することがある。このことは、ビーム不安定性や他の機器不調に伴うビームロスが RF 反射波過大インターロック発生の主要因ではないことを示唆する。Figure 4 に RF 反射波過大インターロック発生時に空洞 CCD カメラで観測した空洞内部の放電の様子を示す。



Figure 3: Accumulation of beam losses due to RF reflection (above) and RF voltage setting values (below).



Figure 4: Discharge inside an RF cavity observed with a CCD camera at the moment of beam loss.

RF 空洞反射波過大の主要因は RF 空洞内部ないしカップラーでの放電が主要因であると推定され、大規模更新の対象とした。しかし CCD カメラでは放電が写らない場合も多くあり、詳細な発生メカニズムは不明である。原因の解明には受電電圧の変動や SG を含む高周波系全系の詳細な調査が必要である。

また、電子蓄積リング高周波系クライストロン電源内部基板には老朽化による故障が複数発生し、部品のロット違いによる電気特性のバラツキを抑えるため全数交換する予定である。

4. 次年度以降の計画

4.1 キッカー電磁石電源及びセプタム電磁石電源

キッカー電磁石電源に使用しているサイトロン(E2V, CX1685, Fig. 5)は製造停止になっており、SAGA-LS にて保有している予備品の台数も 3 台程度の状況となっている。長期間保管したサイトロンは未使用品であっても動作が不安定な場合があり、またメーカー保証外である。キッカー電磁石電源は内部基板電子部品の故障も頻発した。キッカー電磁石電源は電子蓄積リング室内入射部に設置されており、放射線の影響によるダメージと推定される。2025 年度に新規キッカー電磁石電源(全 4 台)を発注し、2026 年度に設置予定である。新規キッカー電磁石電源ではサイトロンではなく半導体スイッチを用いることとなった。セプタム電磁石電源についても老朽化対策と今後の長期使用を考慮して同時期に更新される。

4.2 セプトム電磁石

現在の SAGA-LS セプトム電磁石は、電子蓄積リング側真空度への影響を考慮し、真空外タイプのもが用いられている。従来機と比較し、漏れ磁場、コイルの堅牢性が向上され、入射効率が大幅に改善された[4]。Figure 6 に SAGA-LS 真空外タイプセプトム電磁石を示す。セプトム電磁石は 2009 年の設置以降トラブルは発生していない。しかし、パルス励磁されるセプトムコイルには有限の寿命があると考えられる。コイル破断の際には真空外タイプのセプトム電磁石の構造上、一旦蓄積リングから取り外す必要があるため、交換に要する期間と今後の長期使用を考慮し更新対象とした。セプトム電磁石についても 2025 年度に発注し 2026 年度に交換の予定である。取り外したセプトム電磁石は予備品として保管する。



Figure 5: Thyratron (E2V: CX1685) used for the power supply of kicker magnet.



Figure 6: SAGA-LS injection septum magnet.

4.3 電子蓄積リング用クライストロン

クライストロンの寿命は個体間のバラツキが大きいいため現在使用しているクライストロン(キャノン電子管デバイス:E3774)の今後の寿命を予想することは困難である。しかし、現在稼働中のクライストロンは 2008 年に設置され、2025 年には使用開始から 17 年が経過する。Figure 7 に E3774 と同型タイプの CW クライストロン(E3786 及び E3732)の経年故障率 [5]を示す。Figure 7 において出荷された各クライストロンの故障率を 3 次曲線にてフィッティングした。またクライストロンの使用時間は年間 2000 時間とした。Figure 7 に示すように現在使用しているクライストロンの故障リスクは徐々に上昇し、今後 10 年以上

に渡る SAGA-LS の稼働において 50%以上の危険率にて故障することが推定される。SAGA-LS の長期安定稼働を目的として蓄積リングクライストロンも更新対象とした。

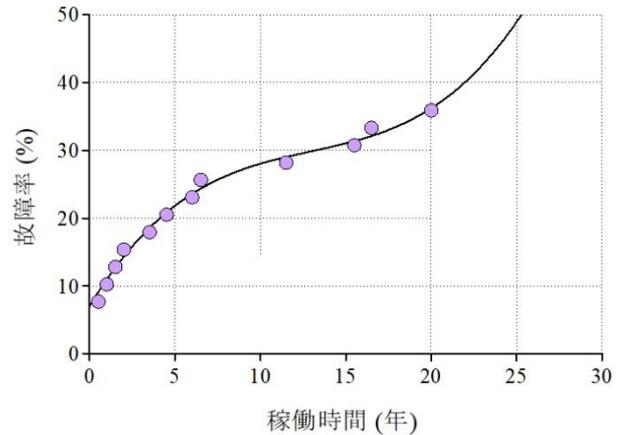


Figure 7: Failure rate of shipped klystrons obtained from Ref. [5] and a fitting curve using a cubic curve.

5. まとめ

SAGA-LS では今後の長期安定稼働を目的として 5 年に渡る大規模な電子蓄積リング更新プロジェクトを 2023 年度より開始した。2025 年 4 月には電子蓄積リング主要電磁石用電源の更新が完了した。新電源の設置後、コミッションは順調に進められ、5 月 20 日からは所定のスペックにてユーザー運転を開始した。2025 年 10 月からは蓄積リング高周波加速空洞が更新される。高周波加速空洞の更新により、これまで問題となっていた RF 反射波過大インターロックに伴うビームロスの発生頻度低減が期待される。また、その他の機器類についても順次更新される予定である。

参考文献

- [1] T. Tomimasu *et al.*, “The SAGA Synchrotron Light Source in 2003”, Proceedings of PAC’03, Portland, 2003, pp. 902-904.
- [2] H. Takeda *et al.*, “Twenty years of operation of the SAGA Light Source”, J. Phys.: Conf. Ser. 3010 012013, 2025.
- [3] S. Koda *et al.*, “Design of a Superconducting Wiggler for the SAGA Light Source Storage Ring”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, 21, 32 (2011).
- [4] Y. Iwasaki *et al.*, “New Septum Magnet at the SAGA Light Source”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, 20, 246 (2010).
- [5] S. Isagawa *et al.*, “M-Type Cathodes and Insulation in High Power Klystrons”, 3rd ICFA Workshop on Pulsed RF Sources for Linear Colliders (RF96), Hayama, Kanagawa, Japan, April 8-12, 1996, pp. 252-261.