

SAGA Light Source 光源加速器の現状

PRESENT STATUS OF ACCELERATORS OF SAGA LIGHT SOURCE

竹田晴信 ^{*,A)}, 金安達夫 ^{A)}, 高林雄一 ^{A)}, 岩崎能尊 ^{A)}
Harunobu Takeda ^{*,A)}, Tatsuo Kaneyasu ^{A)}, Yuichi Takabayashi ^{A)}, Yoshitaka Iwasaki ^{A)}
^{A)} SAGA Light Source

Abstract

SAGA Light Source (SAGA-LS) is a synchrotron radiation facility with a 1.4 GeV storage ring of 75.6 m in circumference and the 255 MeV linear accelerator. Public use of the facility was started on February 2006. Eleven synchrotron radiation beamlines have been installed. The annual user hours in the last five years were about 1650 hours, and the beam abort rate was about 1.6% in FY2023. We are planning to replace the ring RF system and magnet power supply in this fiscal year and the next. In addition, the septum magnet, septum-kicker magnet power supply, and storage ring steering power supply are also being prepared for replacement.

1. はじめに

SAGA Light Source (SAGA-LS) は九州地域における放射光の産業利用と地域発展を目的として佐賀県に建設された電子加速器施設であり、地方自治体が運営管理する放射光施設として日本初である。2001年に建屋着工、2004年8月に加速器のコミッショニングを開始し [1]、2006年2月にユーザー運転を開始して以来18年が経過した。この間、蓄積電流値を 100 mA→300 mA に増強させ、挿入光源としてアンジュレータおよび超電導ウィグラーを設置、ビーム軌道補正のために slow orbit feed-back システムを導入するなど光源性能の向上に努めてきた。これに合わせ一般利用に向け実験ホールの拡張やビームライン増設など、放射光の利用環境の整備も行った。一方でコミッショニングから20年が経過した近年では機器の老朽化による放射光供給の信頼性低下が懸念されており、この対処のために電源や加速空洞など各種設備の段階的な更新を計画・推進している。本発表では SAGA-LS 加速器の概要（リニアック、蓄積リング、および挿入光源）について述べ、近年の運用状況などについて報告する。

2. 光源加速器

加速器 3D モデルの鳥瞰図を Fig. 1(a) に示す。SAGA-LS の加速器は低エネルギー入射方式のシンクロトロンであり、255 MeV 入射用リニアックと 1.4 GeV 蓄積リングとで構成される。

リニアックの全長は約 30 m で、加速電圧約 100 kV (DC) の熱電子銃(カソードは EIMAC Y646B)、714 MHz のサブハーモニックバンチャー、2856 MHz の定在波型バンチャー、2856 MHz の進行波型加速管(長さ 2.9 m) 6 本から構成されている。加速の繰り返しは 1 Hz で、定常的な加速エネルギーは 255 MeV、ビームの平均電流はおおよそ 7 nA である。Decay mode 運転であるため蓄積リングへの入射時以外はリニアックを独立して運転させることが出来、電子ビームを用いた実験も行っている [2-4]。

SAGA-LS 蓄積リングの電磁石配置は、Double Bend 型

Table 1: Specification of SAGA-LS Accelerators

| Operation Mode | Decay Mode |
|----------------------------|-----------------------|
| Injection Energy | 255 MeV |
| Storage Energy | 1.4 GeV |
| Storage Current (max) | 300 mA |
| Circumference | 75.6 m |
| Lattice | Double Bend (8 cells) |
| Number of BMs | 16 |
| Bending Radius | 3.2 m |
| RF Frequency | 499.84799 MHz |
| RF Cavity Voltage | 325 kV |
| Harmonic Number | 126 |
| Momentum Compaction Factor | 0.0134 |
| Betatron Tune | 5.796 (H) / 1.825 (V) |
| Emittance (H) | 25 nmrad |

セルで構成される 8 回対称構造をしている (Fig. 1(b))。このセルは以下の電磁石から構成される。

- 1.46T で偏向角 22.5° の偏向電磁石 (BM)2 台
- 4 極電磁石 5 台 (QF1×2, QF2×1, QD1×2)
- 6 極電磁石 4 台 (SF×2, SD×2)
- ステアリング電磁石 (STy, STx)

蓄積リングの周長は 75.6 m であり、セル間に 2.5 m 以上の挿入光源用長直線部を 8 箇所確保している [5]。このうち入射セプタムと RF 空洞のために 2 箇所の長直線部が占有されており、また DCCT のある長直線部にはビームスクレーパを設置してビーム寿命の評価等に用いている。残りの長直線部には挿入光源としてアンジュレータ 2 台 (APPLE-II、佐賀大 planar) と 4T 超電導ウィグラー 2 台を設置している [6, 7]。BM および挿入光源により、小規模シンクロトロン光施設としては比較的広い 10 eV–35 keV までのエネルギー帯域をカバーしている。取り出された放射光を用いた各種の分析に供するビームラインを 11 本 (県有 7 本、大学 2 本、企業 2 本) 設けており、加えてレーザーコンプトン散乱実験用のビームライン (BL1) [8]、電子ビーム診断用のビームライン (BL20, BL21) も設置している [9]。

SAGA-LS のユーザー運転期間中の基本的な運転サ

* takeda@saga-ls.jp

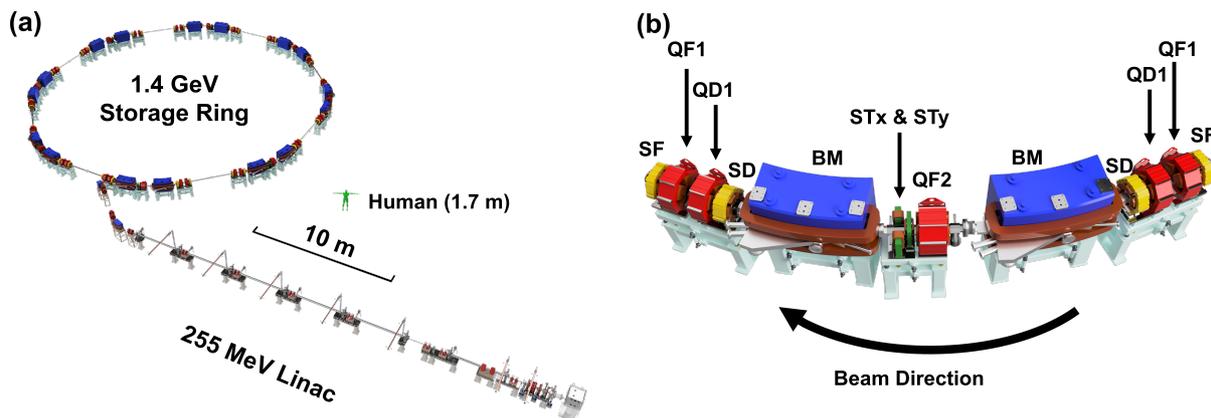


Figure 1: Overview of SAGA-LS accelerator (a) Bird's eye view of Linac and storage ring (without beamline and insertion light source), (b) Double bend type magnet cell.

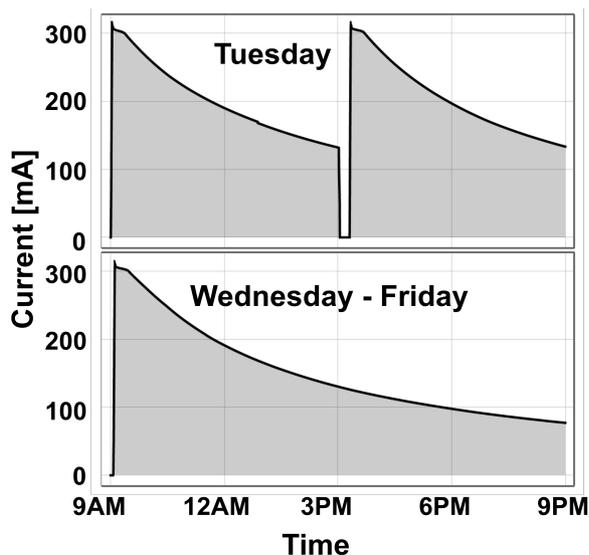


Figure 2: Decay curve of storage current in weekly user operation.

イクルは緊急時のスタディ運転などを除くと、月曜日にマシンスタディ、火曜日 - 金曜日はユーザー運転（火曜 2 回入射、水曜 - 金曜 1 回入射）となっている (Fig. 2)。1 日のユーザー運転時間は 1 回入射 11 時間 (10:00-21:00)、2 回入射 9.5 時間 (前半 10:00-15:00、後半 16:30-21:00) である (2 回入射日では 15:00 にビームダンプを行いウィグラー 2 台の消磁後、1 回目と同様の手順で再入射)。ユーザー運転開始時の蓄積電流値は 300 mA、 it 積は 1500 mAh 程度である。

入射手順は次のとおりである。まずリニアックで 255 MeV まで電子を加速し、蓄積リング内に所定の電流値 (300 mA) まで入射させる。この入射に要する時間はおよそ 2 分程である。300 mA 以上に到達後、蓄積リング内で 1.4 GeV まで加速 (ランプアップ) させる。要する時間はおよそ 1 分である。1.4 GeV 到達後、軌道補

正とアンジュレータギャップの変更及び 4T 超電導ウィグラーの励磁を行う。超電導ウィグラーは 4T までの励磁中に大きなビームロスを生じない。励磁ののちベータatronチューン、ビーム軌道、カップリング及びクロマチシティの補正を行い、Decay モードでユーザー運転を開始する。通常この入射にかかわる作業は通常 30 分程度で終了する。ユーザー運転中はアンジュレータのギャップと位相 (偏光) をビームラインユーザーが操作可能である [10]。

3. 加速器の運転状況

Table 2 および Fig. 3 に 2019 年度から 2023 年度までの 5 年間の運転統計を示す。近年のユーザー運転時間はおおむね 1650 時間前後で推移しており、2023 年度のユーザー運転時間は 1665.5 時間であった。2023 年度のビームアボートは 11 件 22.8 時間 (アボート率 1.3%) であり、内訳は蓄積リング RF 空洞反射によるものが 13.3 時間 (58.2%)、クライストロン故障によるものが 9.5 時間 (41.8%) と、原因の特定と処置が難しい RF 空洞反射波過大によるビームロスが大きな割合を占めている。以下に近年の加速器トラブルを述べる。

3.1 主な加速器トラブル

3.1.1 RF 空洞反射

近年 SAGA-LS の加速器故障で大きな割合を占めているのが蓄積リングの RF 空洞反射過大によるビーム

Table 2: Operation Statistics in SAGA-LS from 2019 to 2023

| FY | Operation | Study | User | Abort |
|----------|-----------|----------|----------|----------|
| | Time [h] | Time [h] | Time [h] | Time [h] |
| 2019(R1) | 2149 | 506 | 1643 | 71.3 |
| 2020(R2) | 2232 | 528 | 1704 | 86.7 |
| 2021(R3) | 2193 | 539 | 1654 | 47.3 |
| 2022(R4) | 2249 | 569 | 1680 | 44 |
| 2023(R5) | 2127 | 461.5 | 1665.5 | 22.8 |

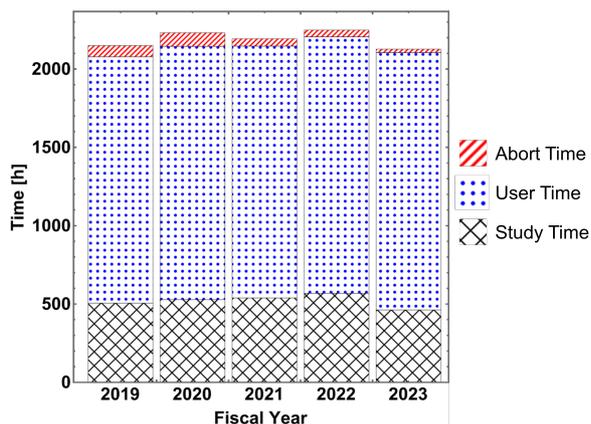


Figure 3: Bar chart of operation statistics in SAGA-LS.

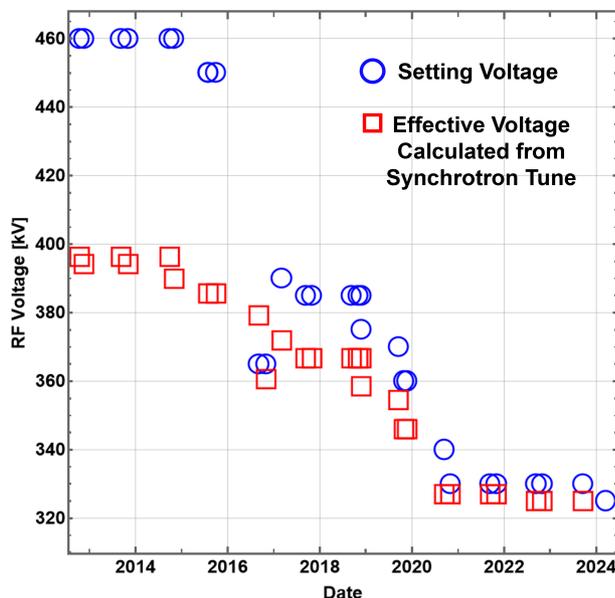


Figure 4: Trends of RF cavity voltage from September 2012 to March 2024.

アポートである。SAGA-LS は Decay mode のみでの運転を行っているため、通常のビームダンプと入射手順により、機器の重故障などに比べれば比較的短時間での復旧が可能である。しかし主因は明らかになっておらずパラメータ調整や部品交換などによる改善が難しい。頻発すれば実験を中断せざるを得なくなるなどユーザー利用に支障をきたすため無視できない。応急的な処置として RF 空洞電圧（定格 500 kV）を下げた運転することで発生頻度を抑制している（Fig. 4）。これまで RF 空洞電圧を段階的に下げている、2023 年度末からは 325 kV での運転を行っている。一般的に RF 空洞電圧の低減はバンチ長を伸ばす一方で運動量アクセプタンスを減少させ、タウシェック寿命を短くする。SAGA-LS 蓄積リングのビーム寿命はタウシェック効果が支配的である [11]。このため RF 空洞電圧低減はビーム寿命とビームラインに供給される光子数の減少に大きく影響し、実用的な光源性能の低下につながる。このため、RF 空洞共振器の更新といった抜本的な解決方法が強く

望まれる。

ほかにアポートに至らないものの数 mA ほどの小幅なビームロスも多発している。SAGA-LS は低エネルギー入射方式で top-up 運転ではないため、逐次入射による電流値復旧はできない。放射光強度を急峻に低下させるためビームラインでの各種の実験に影響が出ている。

3.1.2 水平方向ビームサイズ変動

2019 年以降、運転中のビームについて、水平方向のビームサイズに不規則なステップライクな変動が数十秒単位で生じていることが確認されている。この変動はビーム径を 10-20% 程大きくするような変動を見せる一方で垂直方向ビームサイズは連動していない。この症状はビームラインにおける特定の試験を困難にしているのが現状である。この原因究明と対策のため分散関数や水平チューン、クロマチシティを調整するなどして水平方向ビームサイズの不連続変動の観察を行っている。しかしこの変動が不規則に日を置いて発生するため、調整による挙動変化を判別しにくく原因を突き止めるに至っていない。今後も原因調査に取り組んでいく。

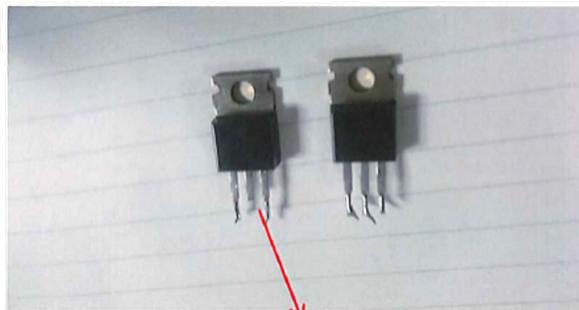
3.1.3 電源故障

加速器各部の電源は建設始期の機器導入から更新されていないものが大半であるため、経年劣化による機器故障が加速器の運転に影響を及ぼしている。以下に近年発生した電源関連の主な故障事例について列挙する。

- 2017 年 4 月 キッカー電源のトライアックの爪折れによるビーム入射不良 (Fig. 5)。
- 2017 年 8 月 偏向電磁石電源のチョークコイルの劣化による異音が発生。
- 2022 年 11 月 リニアック電子銃高圧電源の電源回路基板内における過電圧・過電流保護回路のツェナーダイオード損耗による故障。
- 2022 年 12 月 蓄積リングリングクライストロン電源の IGBT 基板の動作不良が原因と推定されるインターロックが発生。
- 2023 年 6 月 リニアックのクライストロン電源からの高圧出力が OFF になる現象が発生した。電源制御基板内におけるリレー回路の一部が溶けていたことによる信号エラーが原因。
- 2024 年 5 月 蓄積リング偏向電磁石電源において電源筐体上部の冷却ファンが故障したことによる温度異常が生じ、予備品との交換作業などに 2 日間の運転停止を要した。

3.2 加速器更新計画

このように SAGA-LS 加速器は 2004 年のコミッションから 20 年が経過しているため機器類の老朽化とそれに伴う運転停止や光源性能低下が問題となっている。現行部品で置き換えが可能な物に対しては随時現行品に置き換える等の処置を実施しているが、製造停止となっている部品も多く、今後の継続した加速器の維持のために大幅な更新が必要となる。このため 2023 年度から 2027 年度までの 5 ヶ年に渡る大規模な機器更新を推進している。2024 年度は蓄積リングの電磁石



Broken Triac lead

Figure 5: Faulty triac in the kicker power supply.

電源、2025年度はRF空洞本体とクライストロン電源IGBT基板、2026年度はセプタム・キッカー電源とセプタム電磁石本体、2027年度は蓄積リングの小型電源の交換を予定している。

4. まとめ

SAGA-LSは地方自治体が運営管理する日本初の放射光施設として、2006年の開所から18年間その光源性能向上を図りつつユーザーに放射光利用環境を提供してきた。一方でコミショニングから20年が経過した現在では加速器施設の宿命としてRF空洞や電源設備、冷却系など各所に老朽化に伴うトラブルを抱えている。今後の長期的な運用を見据えて、昨年度から機器類の段階的な更新を進めている。近年は国内外の次世代加速器の新設・加速器アップデートの話題が多く、SAGA-LSもこれにキャッチアップしつつ九州地域における唯一のシンクロトロン光施設としての役割を考慮したうえで、加速器高度化とユーザー開拓を進めていく。

参考文献

- [1] T. Tomimasu *et al.*, AIP proceedings vol. 879, 184, 2007.
- [2] Y. Takabayashi, Y. L. Pivovarov & T. A. Tukhfatullin, "Observation of sub-GeV electrons mirrored by ultrathin crystalline Si." *Physics Letters B*, vol. 751, pp. 453-457, 2015.
- [3] Y. Takabayashi, Y. L. Pivovarov & T. A. Tukhfatullin, "Angular distributions of parametric X-ray radiation from a diamond crystal." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 402, pp.79-82, 2017.
- [4] Y. Takabayashi, Y. L. Pivovarov & T. A. Tukhfatullin, "First observation of scattering of sub-GeV electrons in ultrathin Si crystal at planar alignment and its relevance to crystal-assisted 1D rainbow scattering." *Physics Letters B*, vol. 785, pp.347-353, 2018.
- [5] Y. Iwasaki, *Proceedings of Particle Accelerator Conference 2003 in Portland, Oregon*, pp.140-142, 2003.
- [6] S. Koda *et al.*, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* vol. 21, 32, 2011.
- [7] S. Koda *et al.*, "Effects of a hybrid superconducting three-pole wiggler on the stored beam at the SAGA-LS storage ring." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 682, Issue 1, 2012.
- [8] T. Kaneyasu *et al.*, "Generation of laser Compton gamma-rays in the SAGA light source storage ring." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* vol. 659, Issue 1, 2011.
- [9] Y. Takabayashi *et al.*, *Proceedings of The 12th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems in Kobe, Japan*, pp.140-142, 2009.
- [10] T. Kaneyasu *et al.*, "Scheme for correcting coupling variation induced by insertion devices near linear difference resonance." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 641, Issue 1, 2011.
- [11] T. Kaneyasu *et al.*, *Nucl.Instrum.Meth A*, vol. 694, 107, 2012.