

放射光施設 SAGA-LS 光源加速器の状況

STATUS OF SAGA-LS ACCELERATOR

江田茂^{#, A)}, 岩崎能尊^{A)}, 高林雄一^{A)}, 金安達夫^{A)}
Shigeru Koda^{#, A)}, Yoshitaka Iwasaki^{A)}, Yuichi Takabayashi^{A)}, Tatsuo Kaneyasu^{A)}
^{A)} SAGA-LS

Abstract

The accelerator of a synchrotron radiation facility SAGA-LS consists of a 1.4 GeV electron storage ring and 255 MeV injector linac. As a synchrotron radiation source, five bending magnets and three insertion devices are operated at present. The user time in the 2013 fiscal year was about 1600 hours. The beam abort rate due to the accelerator troubles in the year is about 0.08, and has increased in recent years. The major trouble in the fiscal year was water leakage of the linac RF window. In addition, the beam losses occurred due to RF reflection interlock of the storage ring. The aspect of the accelerator trouble for these eight years from the facility opening is considered to follow transition near the fault curve, which is well known as a bathtub curve.

1. はじめに

SAGA-LS光源加速器は、2006年2月に正式にユーザー運転を開始して以来、約8年が経過した。この間、加速器は光源能力の向上を進め、また施設では平行して実験ホール拡張、ビームライン増設等放射光利用環境の整備が進められてきた。運転条件のサーベイ、改善を進め、ユーザー運転時の光源要因トラブルは開所時から年々減少し、運転実施時間に対するビームアボート率は、2009年度には 10^3 台となった。しかしその後、重要機器の経年変化や劣化に起因する重故障が発生するようになり、ビームアボートが増大傾向にある。

この8年間のマシントラブルはいわゆるバスタブ曲線といわれる故障曲線に近い推移をたどっており、近年トラブル要因について質的变化が見られる。今回の施設報告では加速器の現状に加え、開所以来現在までの加速器トラブルの推移について報告する。

2. 光源概要

加速器が設置されている実験ホールの現状をFigure 1に示す。画像は実験ホール南東角2階キャットウォークから撮影したもので、視野外と

なっているが、蓄積リングとBL10の向こう側(北側)に佐賀県ビームラインBL7(硬X線)、BL9(白色)及び九州大学ビームラインBL6(硬X)が設置されている。加速器は1.4GeV電子蓄積リングと255MeVの繰り返し1Hzの入射用リニアックから成り、低エネルギー入射方式を採用している。蓄積リングはダブルバンド型セルで直線部に分散を持つ8回対称ラティスで周長75.6mである。

現在、放射光光源としては、偏向電磁石5台と挿入光源3台が運用中である。各光源を利用するビームライン内わけをTable 1に示す。偏向電磁石光源は臨界エネルギー1.9keVで、数十eVから20keV程度をカバーする施設の基本光源である。挿入光源は、数十eVから1keV程度の領域の高輝度光源としてAPPLE-IIアンジュレータ[1,2]1台、プラナーアンジュレータ1台(佐賀大)を運用し、加えてウェーブレングスシフターとして臨界エネルギー5.2keVのハイブリッド型の4T超伝導3極ウィグラー[3,4]1台を運用している。

開所時、蓄積電流100mA、偏向電磁石光源のみで運用をスタートし、その後、蓄積電流を段階的に300mAへ引き上げた。またアンジュレータ設置により軟X線領域では最大輝度は偏向電磁石光源に比べ3桁程度向上し、超伝導ウィグラーの設置より、



Figure 1: Present status of the experimental hall of SAGA-LS.

[#] koda@saga-ls.jp

Table 1: Beam Lines of SAGA-LS

BL	Source	Photon Energy	Method	Organization
BL06	Bending Magnet	3-23 keV	XAFS,SAXS	Kyushu Univ.
BL07	SCW ¹⁾	4.2-37 keV	XRD,XAFS	Saga Pref.
BL09A	Bending Magnet	White(>3 keV)	LIGA	Saga Pref.
BL09B	Bending Magnet	10-50 eV	Photo Excitation	Saga Pref.
BL10	Undulator (APPLE-II)	30-1200 eV	PEEM, ARUPS	Saga Pref.
BL11	Bending Magnet	3-23 keV	XAFS, SAXS	Saga Pref.
BL12	Bending Magnet	40-1500 eV	XPS, XAFS	Saga Pref.
BL13	Undulator (planar)	15-600 eV	ARPES	Saga Univ.
BL15	Bending Magnet	3-23 keV	XAFS, XRD Imaging	Saga Pref.

¹⁾ Hybrid superconducting three pole Wiggler

偏向電磁石光源のエネルギー上限の倍近い硬 X 線まで利用可能となった。現在、中小規模放射光施設としては数十 eV から 40keV 近くに及ぶ広いエネルギー範囲で、放射光の提供を行っている。またレーザーコンプトンガンマー線実験 [5,6]の実験環境の大幅な改善のため、蓄積リング入射直線部下流にレーザーコンプトン実験用ビームライン BL1 を整備しており、2014 年 7 月下旬に変更申請が許可された。

3. 運用の現状

3.1 運転

2013 年度のユーザー運転は、一日 1 回入射、初期蓄積電流 300mA ($i_{\tau} \sim 1500\text{mAh}$)、運転時間は 1 日 10.5 時間(10:30-21:00)で、運転日は火-金の 4 日/週の定常的なパターンで運転された。年末年始、盆休みを除く 2013 年度の主な計画的運転停止期間は、2013 年 4 月のビームライン関係のメンテ、点検を主とする短期シャットダウン約 3 週間、同年 10 月の加速器定期点検を主とするシャットダウン約 6 週間が設けられた。2013 年度のユーザー運転時間は 1606.5 時間であった。

ユーザー運転における入射蓄積手順は次の通りである。255MeV のリニアックビーム(5~10nA)を蓄積リングに入射し蓄積した後 1.4GeV に加速し、さらに超伝導ウィグラーを 4T に励磁後、ウィグラー磁場に対する補正(チューン、クロマティシティ、COD、カップリング)を行った後、ユーザー利用を開始する[4]。

加速器運転は加速器グループ研究員と業務委託の支援員によって行われている(SAGA-LS は常勤技術職員がいないスタッフ構成となっている)。グループ員全 4 名で 2 シフト制をとり、早番シフト(8:30~17:15)、遅番シフト(13:00~21:45)をそれぞれ 1 名が担当する。日々の加速器立ち上げ作業では、加速器冷却水系とリニアッククライストロン LV 系立ち上げを事前に支援員 1 名が行い、その他機器の立ち上げを早番グループ員 1 名が行う。ビーム入射は早番グループ員 1 名と支援員 1 名で行い、立ち下げは遅番グループ員 1 名で行っている。

なお、午後の放射光強度の増強を要望するユーザーのために、超伝導ウィグラーの再励磁を伴う 1 日 2 回入射運転を 2014 年 4 月に試験的に行った後、同年 6 月より定常的に毎週火曜に 2 回入射を行っている。

3.2 加速器トラブル

2013 年度、ユーザー運転のビームアポート要因となった光源加速器トラブルは 15 件であった。光源要因のビームアポート時間総計は 128 時間で、全ユーザー運転時間に対するアポート率は 8.0%であった。後述するようにユーザー運転中のマシントラブルは近年増加傾向にある。アポート内わけは、リニアック RF 窓真空リーク 3 件(115.5 時間)、施設外要因による瞬低 2 件(2.4 時間)、BPM モジュール異常 1 件(1.2 時間)、蓄積リング高周波空洞系 RF 反射インターロック発生によるビーム全ロス 9 件(8.9 時間)である。

RF 反射によるビームロスは、2010 年に RF 空洞系を現在の運転条件にして以来 3 年程発生しなかったが 2014 年 2 月に発生した後、頻度が数日から半日に 1 回程度にまで増加した。その後、頻度は低下したが 2014 年 7 月現在でも 2 週間に 1 度程度発生している。これまでに、ビームロス、空洞電圧低下は、空洞反射後に発生し、また空洞進行波パワーの減少が空洞反射パワーの増大より早く($\sim 0.1\mu\text{s}$ 程度)始まっていることがわかった。要因の特定について現在も調査を進めている。

2013 年度の最も大きなマシントラブルは、リニアック RF 窓のリークで 2013 年度ビームアポート時間の大部分を占めた。RF 窓は加速管及びバンチャーから垂直に約 1.5m 立ち上がった導波管のエルボー部上流に配置されており、クライストロン導波管系との境界となっている。リニアック設置以来これまで約 9 年間 RF 窓のトラブルはなかったが、2013 年 6~12 月の半年間に集中的にリークが発生した。7 台(加速管×6、バンチャー×1)ある RF 窓のうち第 3,第 5,第 6 加速管の 3 台で RF 窓冷却水が真空側へ漏水した。また第 1 加速管-バンチャーセクションで真空リークが発生し、同セクションのバンチャー部 RF 窓が原因と推定された。

最初に発生した 2013 年 6 月の第 5 加速管 RF 窓の漏水が最も大きなトラブルで、純水冷却水(電気伝導度 $\sim 1\mu\text{S/cm}$ 弱、流量 $\sim 4\text{l/min}$)がクライストロン側真空導波管内に漏水した。原因特定に時間がかかり、その間に第 6 加速管にもつながる同じ導波管系統内の広い範囲に水が拡散した。Figure 2 は調査のため RF 窓から 7m 程上流にあるダミーロードを取り外した際に確認された導波管内の結露の状況



Figure 2: Status of a water leak in a wave guide of 5th accelerator tube.

である。壁面の細かい斑点状のものが水滴である。またダミーロードより 2m 程下流に設置された 45L のスパッターイオンポンプ本体にも、その内部容量ほぼいっぱい水がたまっていることが確認された。第 5、第 6 加速管の真空導波管系は加速管の RF 窓から、クライストロンの RF 窓に至る広い範囲で液相もしくは気相の水に晒されたと考えられた。

復旧についてはユーザー運転の長期停止を避けるため、導波管システムの全面的な分解洗浄は行わず、まず真空排気による乾燥を試み、結果的にはこれで復旧した。イオンポンプ交換後、疎排気セットによる真空排気を行い、これと平行して水温約 40 度の導波管系冷却水を循環させ、イオンポンプはテープヒータで数十度に保った。その結果、イオンポンプは問題なく立ち上がった。このトラブルの間に第 5、第 6 加速管システムの導波管内面が何らかの形で液相、気相の水にさらされていた時間は、おおよそ 150 時間で、その後の真空立ち上げが 24 時間程度であった。その後 RF エージングを行い、約 30 時間 (~10⁵ ショット) で終了した。エージングの進捗はおおまかに 2 段階に分けられ、前半は(通常の加速管エージング時と同様の)インパルス的な加速管内の真空悪化、後半は時定数の長い導波管の真空悪化が支配的であった。

RF 窓リークは長期安定運用の後に集中したことから偶発的とは言いがたく系統性があると考えられた。RF 窓は円形のセラミック製で冷却水は下部よりセラミック外周部に対し垂直に導入され、円周両側に沿って上部の出口から出る構造であった。これまでにバンチャー、第 1、第 5、第 6 加速管の RF 窓の分解調査を行った。このうち漏水した第 5、第 6 加速管の RF 窓は、ともに冷却水導入部の流れが大きく変わる部分で明瞭な同心円状のエロージョン・コロージョンが確認され(Figure 3 参照)、この

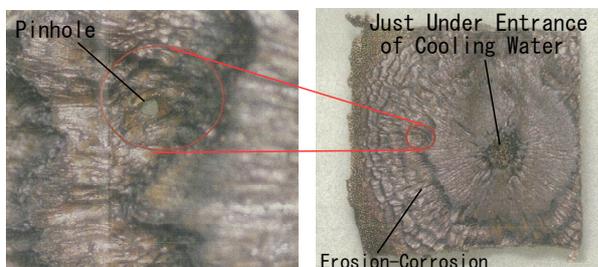


Figure 3: Status of erosion-corrosion and pinhole at a RF window of 5th accelerator.

同心円構造の中に腐食によるピンホールが確認された(冷却配管の真空側は無酸素銅 0.5mm)。Figure 3 の右側画像では、エロージョン・コロージョンの同心円中心の紙面上から冷却水が入り、90 度向きを変え窓の外周に沿って流れる。腐食部では EPMA 分析で塩素、硫黄が微量検出された。また漏水は確認されなかったが、第 1 加速管の RF 窓冷却水導入部においても明瞭なエロージョン・コロージョンが確認された。ピンホールは、第 5 加速管 RF 窓では、セラミックに対してクライストロン側、第 6 加速管

では加速管側に発生しており、どちらもエロージョン・コロージョンの同心円模様の上にあった。またピンホールは真空側に比べ、冷却水側で穴径が大きかった。以上のことから、漏水は導波管内側の要因ではなく、冷却水によるエロージョン・コロージョンが主たる要因で、これに腐食が加わったと考えられた。加速管の RF 窓は、機械的仕様が同一で、流量、運転頻度等運用条件も同様で、またバンチャーの RF 窓もこれらに製作仕様、運用条件は近かった。そのためエロージョン・コロージョン発生条件がそろい、同程度の速度で劣化が進行し、短期に集中したと考えている(またこのことからトラブルを発生していない RF 窓でもエロージョン・コロージョンがかなり進行していると考えられた)。

2013 年 11 月に 3 度目の RF 窓漏水(第 3 加速管)が発生した時点で交換予備品がなく、ユーザー運転維持のため応急的対応として冷却水出入口を暫定的に封じ、真空側の一部とし、RF 窓を冷却しない運転を検討した。RF 窓は 50MW、4 μ sec、50pps で設計されており、これに対し SAGA-LS の現状の運転条件は、20MW、2 μ sec、1pps であったことから、熱負荷の余裕はあると考えられた。第 3 加速管の復旧では、RF 窓の冷却水出入口をボルト締めしてエポキシ樹脂で封じ、RF 窓周辺温度を熱電対、赤外線カメラで監視してエージングを行った。繰り返し 1pps 連続 4 時間程度のエージング中、有意な温度上昇は見られなかった。これ以降リークが発生した RF 窓には冷却水出入口にボルトと排気用引口を付けエポキシ樹脂で封じ、同様の復旧を行った。発熱について問題が生じなかったため、2014 年 4 月までに漏水を起こしていない RF 窓、既に交換済みの RF 窓を含め、全ての RF 窓の通水を停止、外部冷却水配管を撤去し、また熱電対による監視系設置した。その後 2014 年 7 月現在までに RF 窓のトラブルは発生していない。2014 年秋のシャットダウン時に未交換の RF 窓を交換し、リーク対策を終了する予定である。

4. 開所以降の加速器トラブルの推移

Figure 4 に 2006~2013 年度の 8 年間のユーザー運転時間と光源要因ビームアポルト率の推移を示す。SAGA-LSではこの 8 年間に大規模な加速器改造は行っておらず、また前述のように夜間土日祭日の運転を行わず、年間に通算 2、3 ヶ月程度の停止期間を設ける運転を開所以来継続しており、Figure 4 で

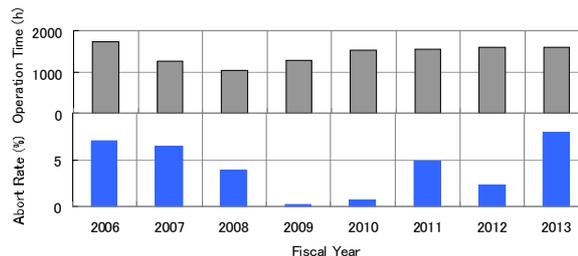


Figure 4: Accelerator operation time (upper) and beam abort rate due to the accelerator (lower) over 8 years from official opening of SAGA-LS.

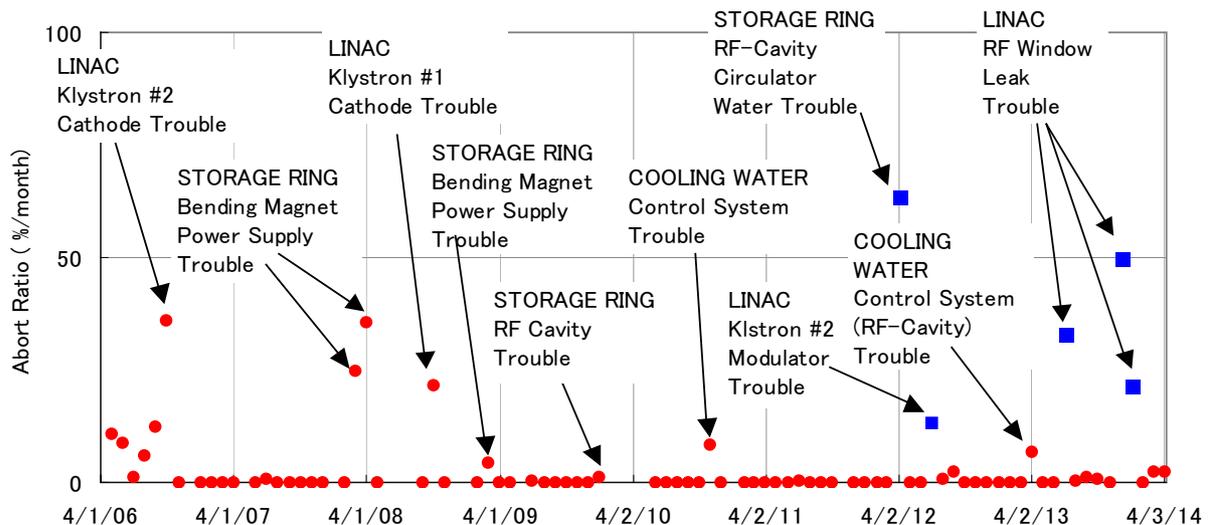


Figure 5: Abort ratio of monthly average between fiscal years of 2006 and 2013. Blue square dots are troubles, which are considered due to aging or degradation.

わかるように、この運用状況では運転時間は概ね1500時間/年程度となる(2008年度若干低下しているのは実験ホール拡張工事のため)。この8年間、加速器のマシンとしての運用状況、構成に大きな変化はない。これに対し、光源要因のビームアポート率は、大まかには開所時 10^{-2} 台から低下してゆき2009,2010年に 10^{-3} 台で底となりその後 10^{-2} 台に増加した。

Figure 5にこの8年間の月毎の光源要因ビームアポート率とその主要な原因を示す。トラブルの要因は質的に変化しており、おおよそ2006~2008年度、2009~2010年度、2011~2013年度の3期に分けられる。Figure 5で2006~2008年度に発生した主なトラブルであるリニアッククライストロンカソード、蓄積リング電磁石電源のトラブルは、製作時の不具合、問題が、運用後1~2年で表面化するタイプのトラブルであった。これらは加速器の主要設備であり、復旧に時間がかかり、当時大きな課題であったが、交換、改修により改善された。続く2009~2010年度は、製作時の問題に起因する不具合は無くなり、アポートは制御系トラブル等偶発的かつ小規模なもののみで、その復旧時間も短時間であった。2011年度以降は、加速器主要設備での漏水等経年変化、劣化要因によるものが主となり、前節で報告したRF窓リークのように、一旦発生すると復旧に時間がかかるトラブルがアポート率を決めている。Figure 4, 5からこの8年間のマシントラブル要因の推移は、大まかには、3年程度の時定数で、初期故障期、偶発故障期、磨耗故障期に分けられる、いわゆるバスタブ曲線といわれる故障曲線に近い推移をたどっている。トラブル要因はこの2, 3年間に質的に変化し、経年変化や劣化に対する予防と対応体制が今後のより重要な課題となっている。

5. まとめ

SAGA-LSは開所以来8年が経過した。その間に蓄積電流の増大、アンジュレータ、超伝導ウィグラー

整備等光源能力の向上を進めた。一方で、マシントラブルについては、小規模で偶発的な故障が主となるビームアポート極小期を経て、経年変化、劣化が支配的となる段階に入ったと考えられる。2013年度は特にリニアックのRF窓漏水が大きな課題となった。一旦発生すると復旧に時間がかかる加速器主要機器の経年変化、劣化によるトラブルへの準備と対応が今後より重要な課題である。

謝辞

リニアックRF窓の漏水トラブルで調査、対応いただいた花川氏を初めとする三菱電機関係者並びに日本高周波関係者の方々に感謝します。また導波管漏水トラブルに関して情報をいただいた産総研清氏、豊川氏、日本アドバンステクノロジー高見氏、JASRI近藤氏、日大田中氏、早川氏にこの場を借りて感謝します。

参考文献

- [1] S. Sasaki, "Analyses for a planar variably-polarizing undulator", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A347, 83-86 (1994)
- [2] 江田他, "SAGA-LSにおけるAPPLE-IIアンジュレータの製作", 第22回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム予稿集, 東大, 108, 2009
- [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] 江田他, "SAGA-LSにおける超伝導及び常伝導マグネットから成るハイブリッド型3極ウィグラーの開発と運用状況", 放射光, 24, 141 (2011).
- [5] T. Kaneyasu, et al., "Generation of laser Compton gamma-rays in the SAGA light source storage ring", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 659, 30 (2011).
- [6] 金安他, "SAGA-LSにおけるレーザーコンプトンガンマ線の生成試験とモーメントコンパクションファクター評価への応用", 第24回放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム予稿集, つくば, 77 (2011).