

Ⅲ 加速器／ビームライン等の現状

1 加速器

1. 光源概要

SAGA-LS 光源加速器は低エネルギー入射方式の蓄積リングで、周長 75.6m の 1.4GeV 電子蓄積リングと入射用の 255MeV リニアックから構成されている[1]。光源として偏向電磁石 (5 ポート) と挿入光源 (3 台) が運用されている。偏向電磁石は臨界エネルギー約 2keV で広い波長域を有し、SAGA-LS の基本光源として軟 X から硬 X 線まで利用されている。挿入光源は軟 X 線用高輝度光源として APPLE-II 型可変偏光アンジュレータ LS3U[2, 3, 4]、プラナーアンジュレータ LS4U (佐賀大学) が、硬 X 線用ウェーブレングスシフターとしてハイブリッド型 4T 超伝導 3 極ウィグラー LS2W[5, 6] が設置されている。LS2W は 40keV 近くまでのシンクロトロン放射光の利用が可能であり、ビームエネルギーの制限される中小規模のシンクロトロン放射光施設における貴重な硬 X 線源となっており、2010 年 11 月以来 2013 年度現在まで定常的にビーム供給 (ユーザー運転) で運用されている。

2. 運転状況

1日の公式なビーム供給 (ユーザー運転) 時間は10.5時間(10:30~21:00)で、入射は朝1回行う。夜間運転は原則行っていない。リニアックから蓄積リングへビームエネルギー255MeVで毎秒数mA程度の入射速度で入射を行った後、1.4GeVに加速、その後超伝導ウィグラーを4Tに励磁した後、ベータートロンチューン、カップリング等補正し、ビーム供給 (ユーザー運転) を開始する [5]。ビーム供給 (ユーザー運転) 開始時の蓄積電流は300mAで、蓄積電流×ビーム寿命 ($i\tau$ 積) は約1500mAhである。

1週間の運転サイクルは、月曜がマシンスタディ、火～金がビーム供給 (ユーザー運転) で、土日祭日は原則運転を行っていない。2013年度の主なビーム供給 (ユーザー運転) 停止期間は、年末年始 2週、夏期休

暇2週及び点検シャットダウン4~5月3週、10~11月6週であった。2013年度の光源加速器のビーム供給 (ユーザー運転) 時間は1606.5時間であった。

ビーム供給 (ユーザー運転) は、加速器グループ研究者と業務委託の支援員によって維持されている。加速器の研究者は全4名で、2シフト制をとり、早番シフト(8:30~17:15)1名と遅番シフト(13:00~21:45)1名である。残り2名がシフト担当者の病気、出張等へのバックアップとなっている。立上作業では、加速器冷却水系とリニアッククライストロンモジュレータLV系立上げを業務委託支援員1名が7:30に行い、これ以降に残りの機器の立上げを早番研究者1名が行う。ビーム入射は早番研究者1名と業務委託支援員1名で行い、立下げは遅番研究者1名で行っている。

3. 本年度の主な加速器トラブル

2013年度、ビーム供給 (ユーザー運転) の光源要因のビームアポートは15件、時間総計128時間で、ビーム供給 (ユーザー運転) 時間に対するアポート率は約8.0%であった。内訳は、リニアックRF窓真空リーク3件 (115.5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)、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) である。

このうち、2013年度最も大きなトラブルは、リニアックRF窓における冷却水の真空側へのリークでビームアポートの大部分を占めた[7]。RF窓はリニアック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一部上流に配置されており、クライストロンからのハイパワー高周波を伝送する導波管系の真空と加速管、バンチャー側真空との境界となっている。リニアックコミッショニング開始以来これまで約9年間 RF窓には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リークした。また第1加速管・バンチャーセクションでも真空リークが発生し、バンチャー導波管のRF窓

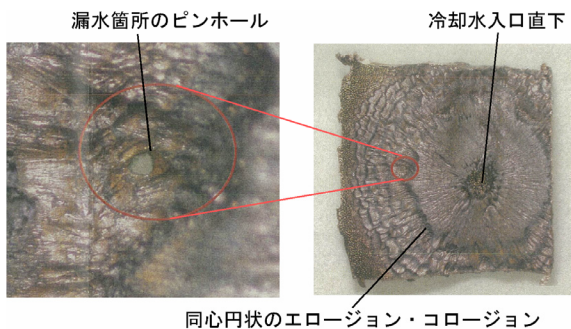


図1 2013年6月に漏水した第5加速管部RF窓の冷却水入口部のエロージョン・コロージョンの状況（右）と確認されたピンホール部の拡大画像（左）。本画像の背面が真空側となる。右図のピンホールが確認された黒色の円周状の構造の直径は1cm程度。冷却水は右図において紙面垂直に上から入り、紙面に平行に等方的に広がる。

が原因と推定された。当初RF窓の予備品への交換で対応したが、予備がなくなった段階で、RF窓の冷却水配管取り合い口をエポキシ系接着剤で封じ、排気する応急措置を行い、ビーム供給（ユーザー運転）を維持した。RF窓リークは長期の安定運用の後に集中したことから偶発的ではなく系統的要因があると考えられた。漏水したRF窓を調査した結果、図1に示すように冷却水導入部に同心円状の明瞭なエロージョン・コロージョンが見られ、特に強く視認された同心円の周上に漏水の原因となったピンホールが確認された。一方でEPMA分析では腐食要因となる物質の検出はごく微量であるか、検出限界以下であった。これらのことに加えリニアックの運転条件（RFパワー、真空、冷却水条件等）はこの9年間大きな変化はなく、また加速管用RF窓の製作仕様は全て同一で運用条件も同じことから、再現性の高いエロージョン・コロージョンが各RF窓で同時にほぼ同じ速度で進行し、その結果、漏水発生時期が集中したと推定された。またこの観点に立ち、漏水の発生していないRF窓も漏水する可能性が高いと考えられた。対策を検討の結果、現状のRF窓を通過する高周波パワーが設計負荷より十分小さいことから、全てのRF窓で通水を停止し、

RF窓の冷却配管内を乾燥処理し、周辺の冷却水配管は取り外した。またRF窓を加速器の運転停止期間を利用し新規作製のものと順次交換を行っている。

RF窓以外のトラブルとしては蓄積リング高周波系のRF反射が目立った。現象としては突然、蓄積リング高周波空洞系のRF反射インターロックが発生し、全ビームロスが発生する。2010年に高周波空洞系を現在の運転条件にして以来、ビーム供給（ユーザー運転）中のRF反射インターロックは3年間程発生しなかったが、2014年2月に発生して以来、頻度が数日に1回から1日2回程度にまで増加し、その後、2週間に1回程度となった。どのRF反射の事例においてもビームロス後、高周波系は問題なく復旧し再入射によってビーム供給（ユーザー運転）を再開している。これまでにRF反射前後の蓄積ビーム、高周波系機器をモニターする高速の観測系を整備し、要因の特定について調査を進めている。

4. 開所以降現在までのビームアポートの推移

図2に2006年度以降2013年度までの光源要因ビームアポート率の推移とその主な要因を示す。トラブル要因はこの8年間で質的に変化しており、開所後3年程はいわゆる初期故障のカテゴリーに属するものが主であり、リニアッククライストロン、蓄積リング電磁石電源等で重要機器の製作時の不具合が運用後1～2年以内に表面化するタイプのものがアポート率を決めた。これらは交換、改修等により順次改善された。その後の2年間（2009～2010年度）は、初期不良はほぼなくなり、制御系トラブル等の偶発的かつ小規模なものが多く、復旧も短時間であったため低いアポート率となっている。2011年度以降は、加速器主要設備での冷却水に関わる経年変化や劣化要因によるものが目立っており、前節で報告したRF窓リークのような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るようになった。RF窓については、冷却水の通水停止という対策で水による劣化腐食の問題はなくなったと考えているが、他の冷却系等での腐食や劣化は今後の加速器運用で大きな課題となる可能性がある。加速器に関わる冷却水について劣化、老朽化等対応のための検討を始め、予備的な水質調査を開

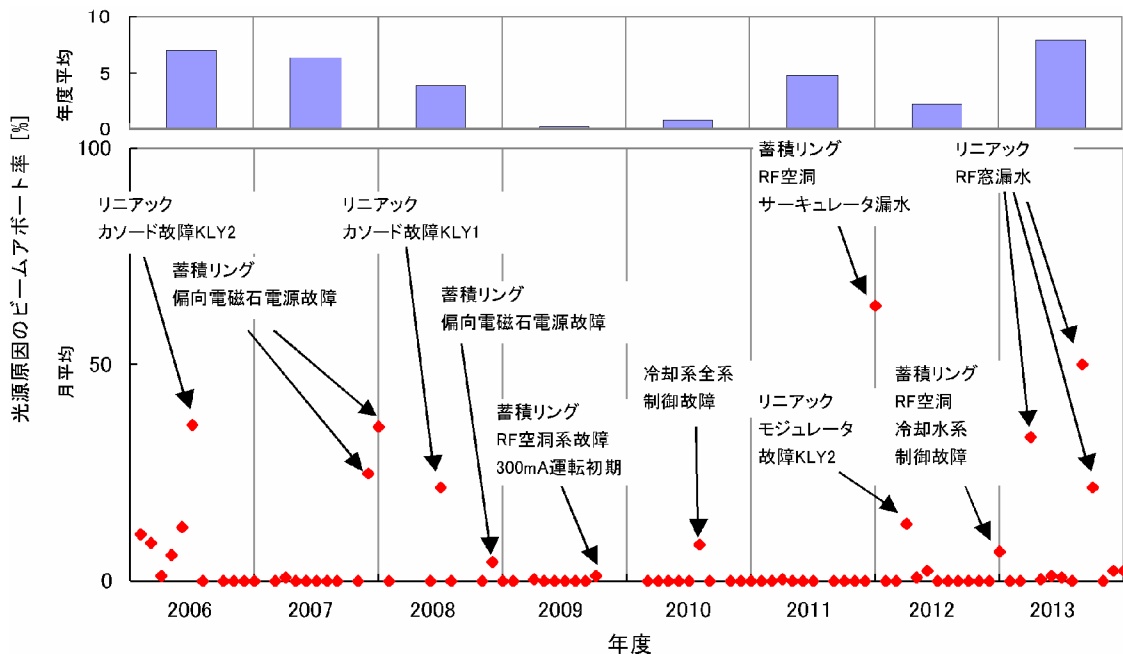


図2 2006年度～2013年度の光源加速器要因のビームアポート率の年度平均（上）及び月平均（下）の推移。

始した。開所して8年を経た現在、加速器設備の経年変化、劣化等に対する理解とそれに基づく対応の体制が今後ビームアポートを抑える上でより重要な課題になると考えている。

5. まとめ

光源加速器は2013年度1,606.5時間のビーム供給（ユーザー運転）を実施した。ビームアポートは約8%で、主な要因はリニアックRF窓の漏水であった。開所以来8年が経過し、ビームアポート内容の推移から、加速器が初期故障期から偶発的軽故障が主となる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りつつあると考えられる。一旦発生すると復旧に時間がかかる加速器主要機器における経年変化、劣化要因の理解とこれに対する対策の準備が今後より重要となる。

参考文献

[1] S. Koda, Y. Iwasaki, Y. Takabayashi, T. Kaneyasu, "Progress and Status of Synchrotron Radiation Facility SAGA Light Source", Proceedings of International Particle Accelerator Conference 2010, Kyoto, Japan, 2579 (2010).
 [2] S. Sasaki, "Analyses for a planar variably polarizing undulator", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 347, 83 (1994).

[3] 江田茂, 岩崎能尊, 高林雄一, 金安達夫, 幸田勉, 沖平賢一, 三木康司, "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).
 [4] 金安達夫, 岩崎能尊, 高林雄一, 江田茂, "電子ビームを用いた可変偏光アンジュレータの不整磁場評価", 第6回日本加速器学会年会報告集, 東海, 230 (2009).
 [5] S. Koda, Y. Iwasaki, Y. Takabayashi, T. Kaneyasu, T. Semba, T. Yamamoto, Y. Murata, M. Abe "Design of a Superconducting Wiggler for the Saga Light Source Storage Ring", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 21, 32 (2011).
 [6] 江田茂, 岩崎能尊, 高林雄一, 金安達夫, 仙波智行, 山本勉, 村田幸弘, 阿部充志, "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極ウイグラーの開発と運用状況", 放射光, 24, 141 (2011).
 [7] 江田茂, 岩崎能尊, 高林雄一, 金安達夫, "放射光施設SAGA-LS光源加速器の状況", 第11回日本加速器学会年会報告集, 青森, 360 (2014).

加速器グループ
江田 茂