

Ⅲ 加速器/ビームラインの現状

1 加速器

1. はじめに

SAGA-LS加速器グループでは2009年度および2010年度を通じて、光源加速器の運転維持を行いつつ、既設加速器系の更なる安定化、性能向上及び新光源等の開発研究を継続的に進めた。以下では本年度の光源加速器の運用状況及びこの間行われた加速器に関わる研究開発について報告する。

2. 光源加速器の現状

2-1 光源性能の向上

2006年の開所時、蓄積リングは蓄積開始電流100mAで運用をスタートした。以来蓄積電流増大を段階的に進めてきた。入射効率改善やビーム電流増大に伴う蓄積リングの影響調査等のスタディを重ね、また蓄積リング及びビームラインの光焼きだしをすすめて、2009年6月にユーザー運転の蓄積開始電流をそれまでの250mAから300mAに増大させた。300mA運転スタート初期、高周波系のインターロックによる運転の中断が発生したが、低レベル系の改修、HOM等空洞動作条件のサーベイにより、安定な運用に至った。

光源スペクトルを図1に示す。光源としては偏向電磁石、プラナーアンジュレータLS4U (佐賀大学) に加えて、2008年度設置したVUV-SX領域の高輝度可変

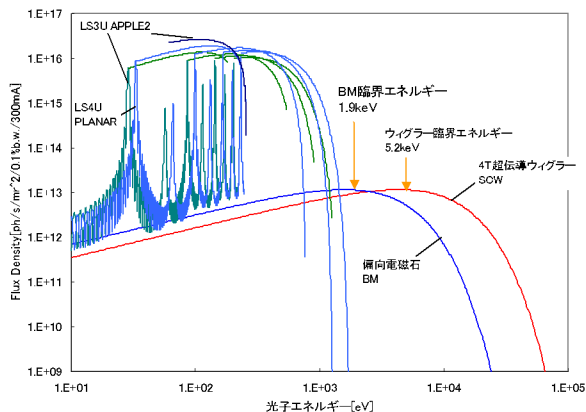


図1 SAGA-LS光源スペクトル。

偏光光源であるAPPLE-II型アンジュレータLS3U[1、2]の利用が開始された。これにより県有ビームラインにおけるVUV-SX領域の最大輝度は3桁増大した。また中小規模の放射光施設では困難であった20keV～35keV領域の硬X線の提供を目的に、2009年度末にハイブリッド型3極超伝導ウィグラーLS2Wが蓄積リングに長直線部LS2に設置され立ち上げ作業が開始された。

2-2 運用状況

図2に典型的な蓄積リングの運転例を示す。一週間の運転は、月曜マシンスタディ、火曜～金曜ユーザー運転、土日停止のサイクルで定期的に行われている。入射は1日2回行われ、ビーム供給(ユーザー運転)時間は10時間/日である(ユーザータイム不足時やBL立ち上げ調整を除き、原則終夜及び土日運転は行っていない)。ただし、2010年10月以降はウィグラー運転を

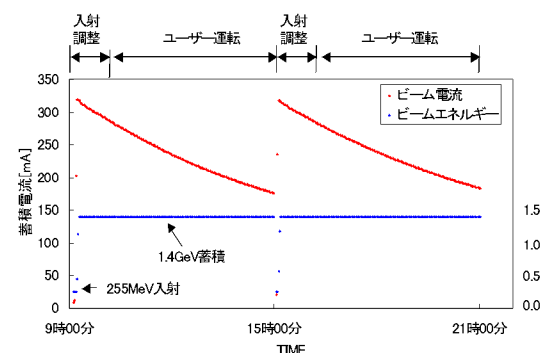
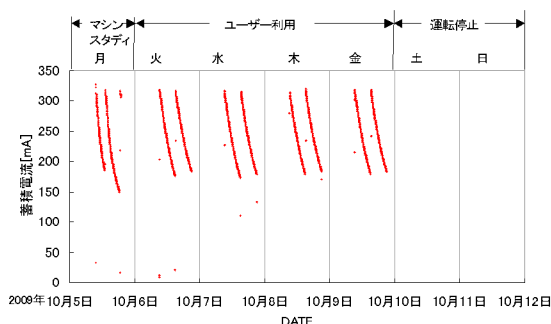


図2 典型的な一週間(上)と一日(下)の運転サイクル。

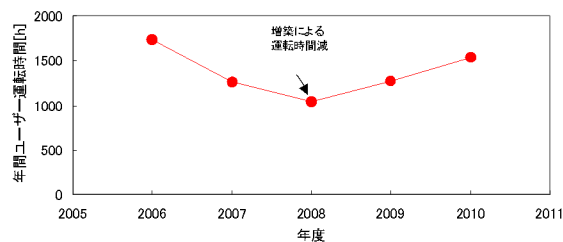


図3 開所以降のユーザー運転時間。

定常的に開始したことにより、入射は1日1回とし、ビーム供給時間は10時間30分/日であった。点検改修のためのシャットダウン期間は、積算でおよそ2ヶ月/年程度である。

2006～2010年度の年間のユーザー運転時間を図3に示す。増築工事による2008年度の減少を除くとおおよそ1500時間前後で推移している。この運転時間は上述の運転サイクル及びシャットダウン期間からほぼ決まっている。

ユーザー運転におけるビームアポート率（ユーザー運転中の加速器故障時間÷実績ユーザータイム）は開所時から大きく改善した。2006～2010年度の年間及び月間のアポート率の推移を図4に示す。開所から3年間は主にリニアッククライストロン系及び蓄積リング電磁石電源の重故障が年間のビームアポートを決め、 10^{-2} 台であった。2009年度以降、重故障はなく、 10^{-3} 台に達している。

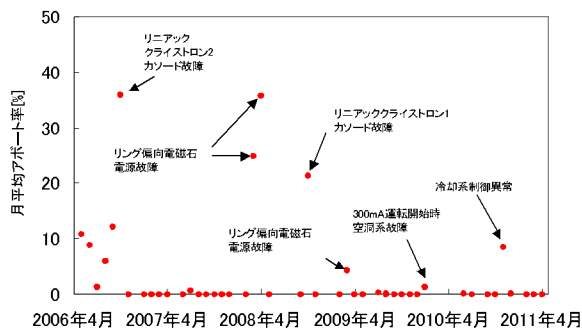
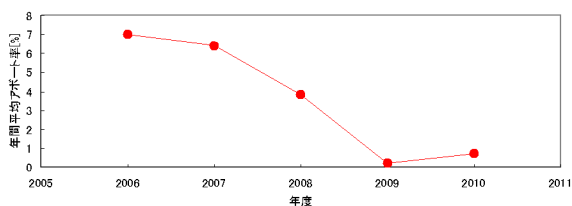


図4 開所以降の年平均（上）及び月平均アポート率の推移。

3. 研究開発

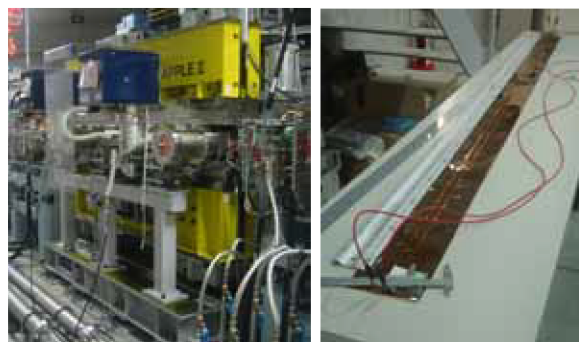


図5 APPLE-II型アンジュレータ LS3U (左) と LS3U スキュー成分補償用ストリップラインコイル(右)。

3-1 可変偏光アンジュレータ

2008年度に開発したAPPLE-II型アンジュレータ [1、2]であるLS3U(図5左参照)は、2009年1月末にBL11においてファーストライトが観測され、これ以降LS3U用ビームラインであるBL11の立ち上げ調整が進められた。これと並行し加速器グループではAPPLE-IIの実用運用に向けて、電子ビームへの影響及び磁場補償システムのスタディを進めた[3]。スタディの過程で、蓄積リングのペータートロンチューンの動作点が、差共に近い ($|v_x - v_y| = 0.029$) こと

によってペータートロンカップリングが、スキュー四極に非常に敏感となり[4]、加えてチューンシフトのカップリングへの寄与も無視できないことが判明し、アンジュレータギャップ依存のスキュー変化、チューンシフトによって発生するビームサイズ変動の抑制が課題となった。これに対応するため、ギャップ依存のダイポールキックの補償に加え、4極とスキュー4極の連動した補償を行うシステムを開発した[5]。アンジュレータスキュー補償用磁石として、BESSYのマルチポール補償用ストリップラインコイルをベースに大幅に単純化した非常に簡便なスキュー制御用ストリップラインコイルを用いた (図5右)。このスキューコイルは、アンジュレータ真空ダクトの上下大気側に固定され励磁される。このスキューコイル及び既設スキュー磁石SFX13[6]によってアンジュレータ及び蓄積リング本体のスキューをそれぞれ独立に制御することが可能となった。スキュー補償コイルの強度決定は、SR干渉計[7]によるビームサイズモニター[8、9]から得られた垂直ビームサイズのギャップ依存変動が抑制されるよう実効的に決定した。アンジュレータ

ギャップ依存のビームサイズ変動は、1/20程度に抑えられた。さらにAPPLE-IIの偏光を決める磁石位相に対しても、ギャップと独立に磁場補正し、ビームサイズ変動を抑制する完全2次元の磁場補償システムを実現し、任意偏光、ギャップに対してフリーチューニングを実現した。また既設プラナーアンジュレータLS4Uに対してもギャップ制御に関して同様の補償システムを製作した。

3-2 ハイブリッド型3極超伝導ウイグラー

より高エネルギーのX線提供を目的に、超伝導ウイグラー(LS2W)の開発を進めた[10-13]。2009年度に製作を行い、同年度末に長直線部LS2に設置された。3極型ウイグラーでメインポール超伝導4T(臨界エネルギー5.2keV)、サイドポール常伝導1Tのハイブリッド構成である。本ウイグラーは、長期にわたる運用安定性を特に考慮して設計された。メインポールのみ超伝導としたのは、クライオスタットのコンパクト化、冷凍機系の負荷抑制が目的である。また冷凍機系は、液体ヘリウムを使用せず、超伝導コイルを小型GM冷凍機によって直接冷却する伝導冷却方式を採用し、冷媒を使用するシステムに比べ、構成を単純化した。またウイグラー磁場による軌道(発光点)変位を抑えるためメインポール磁極では横方向リターンヨークを

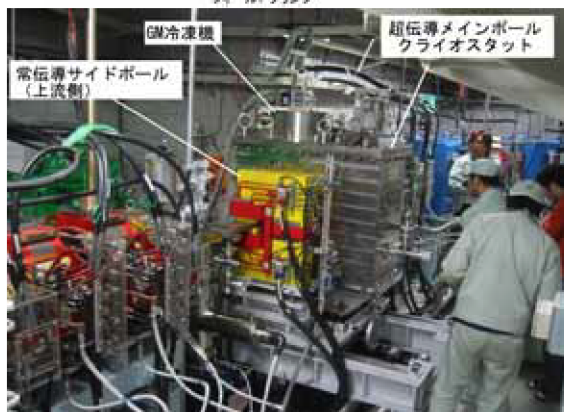
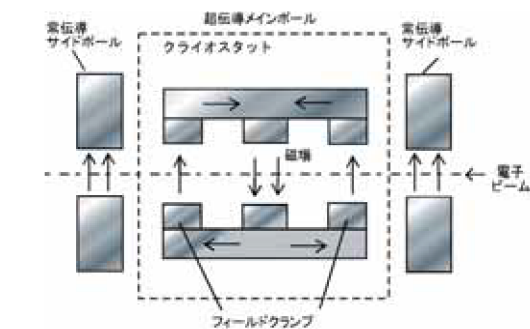


図6 ハイブリッド型超伝導ウイグラーLS2Wの磁極構成(上)と、長直線部LS2へ設置時の状況(下)。

廃し、ビーム軸方向磁極両端に大型のフィールドクランプを設けた(図6上参照)。2010年3月に製作及び工場での励磁試験が完了し、月末に蓄積リング長直線部LS2に設置され、冷凍機の立ち上げを開始した。設置作業終了時のLS2の状況を図6下に示す。

3-3 レーザーコンプトン散乱実験

ビーム計測及びガンマー線応用を目的に蓄積ビームを用いたCO2レーザーを用いたレーザーコンプトンガンマー線生成実験を進めている。CO2レーザーを選択した理由はLCS反跳電子がRFバケットを越えないため、レーザーコンプトン散乱によるビーム寿命低下がなく、放射光を利用するユーザー運転と共存できるメリットがあり、加えてレーザーのパワーあたりのコストが他レーザーに比べ低いためである。

リング入射部LS8下流にレーザーコンプトン実験用ラインBL1の整備を進め、BL1基幹部、レーザー導入用ポート及び基幹部インターロックシステムの設置及び光焼きだしを行い[14]、実験を開始した。2009年12月、入射レーザー波長 $10.6\mu\text{m}$ 、ビームエネルギー1.4GeVで3.5MeVのガンマー線が生成実験を行い、3.5MeVのガンマー線の初観測に成功した[15]。図7に実験系セットアップ及び観測されたスペクトルを示す。

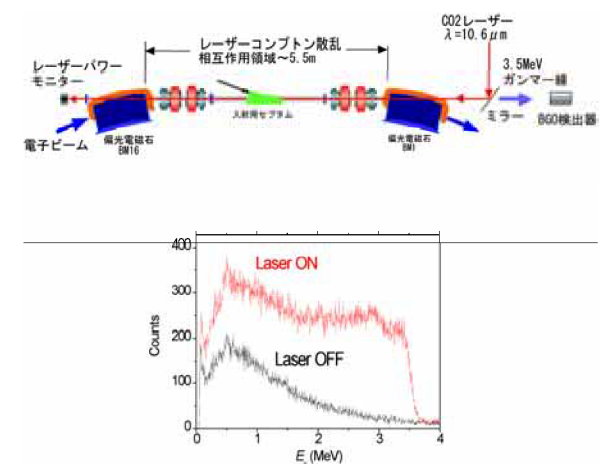


図7 蓄積リング入射部LS8におけるレーザーコンプトン実験セットアップ(上)及びBGO検出器で観測されたガンマー線スペクトル(下)。

3-4 リニアック

継続的に行っていた入射用リニアックの計算機制御が進み、電子銃、クライストロンモジュレータ、

位相器の個別計算機制御化及びその連動制御を進めた。電子銃関連機器一括立ち上げ、蓄積リングへの入射開始終了手順の自動化が実現した。入射開始及び終了時の電子銃、ゲートバルブ、クライストロンモジュレータ及び蓄積リングセプタム、キッカーの連動が自動化されている。これによりリニアックの定型操作は手順が大幅に減少し、ユーザー運転のみならず、入射を伴うマシンスタディにおいても作業効率が大きく向上した。

4. まとめ

2009年度及び2010年度を通じ、SAGA-LS加速器グループでは光源加速器の運転維持を行いつつ、運用安定性及び光源性能の向上を継続的に行った。開所以来蓄積電流は着実に増大、300mAに達し、ビームアポートは 10^{-3} 台に低下した。また運転維持と平行しアンジュレータのカップリング補償システム、ハイブリッド型超伝導ウィグラー、レーザーコンプトン散乱によるガンマ線の発生実験等の新光源、ビーム制御高度化に関わる研究開発を進めた。

参考文献

[1] S. Sasaki, "Analyses for a planar variably-polarizing undulator", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 347, 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] 金安他, "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回加速器学会報告集, 原研東海, 230-232 (2009).

[4] 江田他, "SAGA-LS蓄積リングにおけるカップリングの測定", 第5回加速器学会第33回リニアック研究会報告集, 東広島, 701-703 (2008).

[5] T. Kaneyasu, *et al.*, "Scheme for correcting coupling variation induced by insertion devices near linear difference resonance", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 641, 5-11 (2011).

[6] 岩崎他, "SAGA Light SourceにおけるSkew 4極電磁石", 第5回加速器学会第33回リニアック研究会報告集, 東広島, 704-706 (2008).

[7] T. Mitsuhashi, "Spatial coherency of the Synchrotron Radiation at the Visible light Region and its Application for the Electron Beam Profile Measurement", Proceedings of the PAC97, 12-16 (1997).

[8] 高林他, "放射光モニタ用ビームラインBL20・BL21", 九州シンクロトロン光研究センター・早稲田大学ナノ理工学研究機構合同シンポジウム平成19年度研究成果報告会実施報告書, 152-155 (2008).

[9] Y. Takabayashi, *et al.*, "Beam-Size Measurement System at the SAGA-LS Storage Ring", Proceedings of ICALEPCS2009, Kobe, Japan, 140-142 (2009).

[10] 江田他, "SAGA-LSにおける超伝導ウィグラーの設計検討", 第6回日本加速器学会年会報告集, 原研東海, 112-114 (2009).

[11] S. Koda, *et al.*, "Design of a Superconducting Wiggler for the Saga Light Source Storage Ring", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 21, 32-38 (2011).

[12] T. Semba, *et al.*, "Design and Manufacture of Superconducting Magnet for the Wiggler in SAGA-LS", Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, 358-360 (2010).

[13] 阿部充志他, "SAGA-LS放射光源用超伝導磁石の磁場設計", 第7回日本加速器学会年会報告集, 姫路, 262-264 (2010).

[14] 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", 第7回加速器学会年会報告集, 姫路, 409-411 (2010).

[15] 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).

加速器グループ
江田 茂