

## 話 題

## SAGA Light Source の現状

岩崎 能尊\*・高林 雄一\*・金安 達夫\*・江田 茂\*

## Present Status of the SAGA Light Source

Yoshitaka IWASAKI\*, Yuichi TAKABAYASHI\*, Tatsuo KANEYASU\* and Shigeru KODA\*

## Abstract

The SAGA Light Source (SAGA-LS) is an accelerator facility for the synchrotron radiation experiments. The accelerator complex consists of a 255 MeV linac and a 1.4 GeV storage ring. The commissioning of the accelerator began on August 2004. The SAGA-LS has been stably providing synchrotron radiation to users since it first started user operation in February 2006. Currently three insertion devices (a planar undulator, an APPLE-II undulator and a 4 T superconducting wiggler) are in operation. We present an overview of the accelerator performance with emphasis on the operational status and recent improvements and developments. In addition, recent studies on the superconducting wiggler, beam lifetime, laser Compton scattering, and the interaction between the electron beam and the crystal are also reported.

## 1. はじめに

SAGA Light Source (SAGA-LS) は主に九州地域における放射光供用を目的として佐賀県鳥栖市に建設された電子加速器施設である。2001年に建屋が着工し、2004年8月からは加速器のコミッショニングを開始した<sup>1, 2)</sup>。2004年11月に蓄積リングへの初蓄積に成功し、2006年2月から放射光利用のユーザー運転を開始した。

本稿では、SAGA-LS 加速器の概要（リニアック、蓄積リング、および運用されている挿入光源等）について述べる。次いで現状の運用状況、最近のSAGA-LS 加速器に係わる研究・開発について報告する。

## 2. 加 速 器

## 2.1 概要

加速器は255 MeV 入射用リニアックと1.4 GeV 蓄積リングとから構成される。図1にSAGA-LS 加速器レイアウトを示す。挿入光源としてアンジュレータ2台（APPLE-II<sup>3)</sup>、佐賀大 planar）と超伝導ウィグラー<sup>4, 5)</sup>が設置されてい

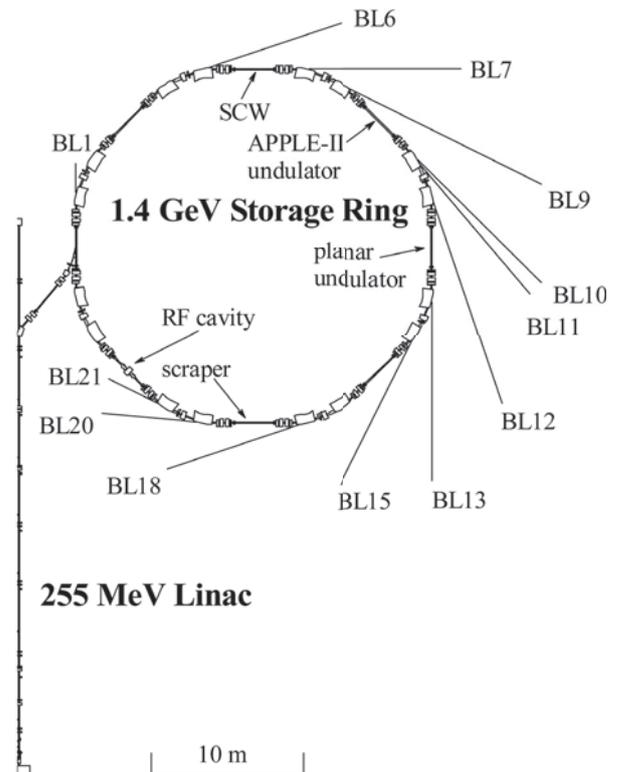


図1 SAGA-LS 加速器とビームラインのレイアウト

\* 九州シンクロトロン光研究センター 〒841-0005 佐賀県鳥栖市弥生が丘 8-7  
(E-mail: iwasaki@saga-ls.jp)

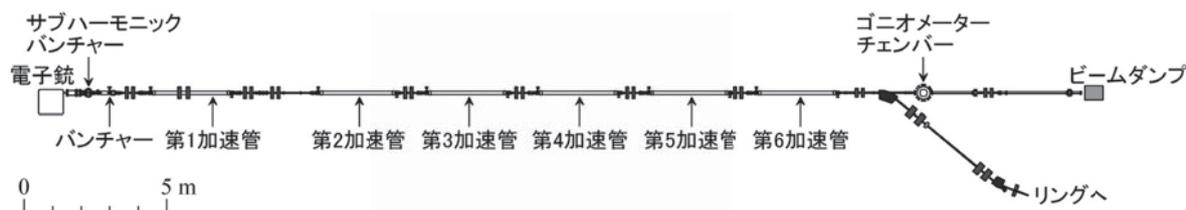


図2 リニアックの全体図

る。図中、放射光ビームラインの他、レーザーコンプトン散乱実験用のビームライン (BL1), 電子ビーム観測用のビームライン (BL20, BL21), また、挿入光源とビームスクレーパの設置位置も示した。

SAGA-LS は低エネルギー入射方式を採用しており、一連の入射蓄積手順は次の通りである。リニアックで 255 MeV まで電子を加速し、蓄積リング内で所定の電流値になるまで蓄積する。その後、蓄積リング内で 1.4 GeV まで加速する。蓄積リングに 300 mA 程度蓄積するのに要する入射時間は約 2 分であり、ランプアップに要する時間は 4 分である。1.4 GeV 到達後、軌道補正、アンジュレータのギャップ変更、4 T 超伝導ウィグラーの励磁を行う。最終的に、ビームサイズの調整を行った後、蓄積電流約 300 mA で放射光をユーザーに提供する。

## 2.2 リニアック

リニアックの全体図を図 2 に、リニアック室内の写真を図 3 に示す。リニアックの全長は約 30 m で、主に、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、2856 MHz の定在波型バンチャ、2856 MHz の進行波型加速管 (長さ約 3 m) 6 本から構成されている。加速の繰り返しは 1 Hz で、典型的な加速エネルギーは 255 MeV, ビームの平均電流は約 7 nA である。リニアックの設計や建設・立ち上げの状況については、すでに報告されているので<sup>6-8)</sup>、本稿では、その後の主な改良点 3 点について述べる。

(i) リニアックの制御系の一部はマニュアル制御となっていたが、運転の効率化のため、2008 年から 2009 年にかけて、電子銃・クライストロンパルス電源・高周波系をコンピュータ制御化した。電子銃とクライストロンパルス電源の制御には当初から PLC が使用されていたが、イーサネット経由でパソコンからも PLC にアクセスで

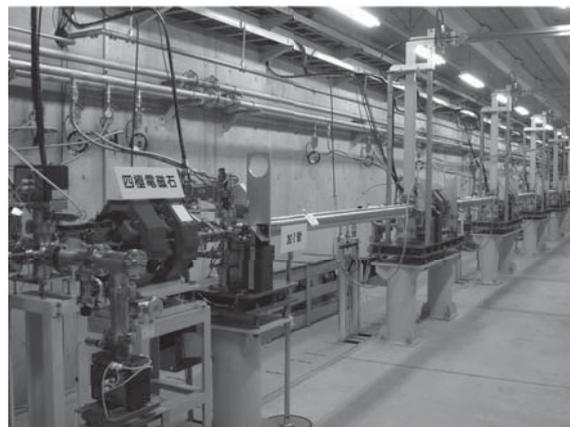


図3 リニアック室内の写真 (下流側から撮影)

きるようにした。高周波系の制御に関しては、RS232C 通信を可能とする中継モジュールを製作・追加した。

(ii) 当初使用していた電子銃用グリッドパルサには、マイクロパルスの繰り返し周波数が 22.3125 MHz (2856 MHz の 128 分の 1) または 89.25 MHz (同 32 分の 1) で、ビームをマルチバンチで取り出すモード (バーストモード) しか備わっていなかった。リングへの多様な入射を可能とするため、2008 年に、100 ps から 700 ps のパルス幅でビームを取り出せるシングルパルスモードと、5 ns から 12  $\mu$ s のパルス幅でビームを取り出せるロングパルスモードを追加した、新しいグリッドパルサを導入した<sup>9)</sup>。複数のグリッドパルサを用いて、多様なビームの取り出しを可能としている例はあるが<sup>10)</sup>、1 台のグリッドパルサで、このように多様なモードを持ったものは珍しいといえる。

(iii) 現在、グリッドパルサへのトリガー信号は、商用電源の交流電圧 (西日本の場合、周波数は 60 Hz) とリニアックの RF 信号 (2856 MHz) に同期しているが、リングの RF 信号 (499.8 MHz) とは同期していないため、ねらったバケツトにビームを入射することができない。この点を

改善するため、SPring-8のタイミングシステム<sup>11)</sup>を参考にし、リングのRF信号とも同期したタイミングシステムの開発を進めている。開発中のシステムを用いて、入射試験を行ったところ、目標のバケットにビームを入射できることが確認された。さらに、多様なフィリングパターンの生成にも成功した。しかし、開発中のシステムは、リニアックのRF信号とは同期していないため、リニアックのショットごとのビーム強度・エネルギーの変動が大きいという問題がある。今後、リニアックのRF信号とも同期するよう改良する予定である。

### 2.3 蓄積リング

SAGA-LS蓄積リングの電磁石配置(ラティス)は8回対称のDouble Bend型であるが、長直線部の分散関数は0.6 mと大きい。ダイナミックアパーチャーの検討<sup>12)</sup>などを経て、差共鳴に近い(5.796, 1.825)を動作点とした。ナチュラルエミッタンスは25 nmradである。図4にラティス関数およびラティスを示す。ラティスは出来る限りコンパクトになるように設計した。

周長75.6 m, 8回対称の中型蓄積リングではあるが、2.5 m以上の挿入光源用長直線部が確保されている。全8箇所(の)長直線部のうち、入射セプトラム<sup>13)</sup>, RF空洞<sup>14)</sup>のために2箇所(の)長直線部が占有されている。また、DCCTのある長直線部にはビームスクレーパが設置されており、ビーム寿命の評価等に用いている。ビーム寿命の評価、挿入光源のスペック等については後に述べる。

可能な限りコンパクトなラティスとした反面、例えば4極電磁石と6極電磁石のヨーク間距離

は85 mmしかなく、その間隔にBPM電極が設置されているなど、新規のビームモニター、あるいは電磁石等を設置するスペースの自由度は少ない。

電磁石は設計当初、1分以下での255 MeVから1.4 GeVへのランプアップを想定していた。そのため、渦電流による不整磁場の影響を避けるため、偏向電磁石、4極電磁石、6極電磁石ともに積層鋼板で形成されている。また、各電磁石は、255 MeVの入射時における磁場精度をできるだけ確保するようにシム形状が最適化されている。

### 2.4 挿入光源

SAGA-LSには挿入光源として2台のアンジュレータと1台の超伝導ウィグラーが設置されている。このうち佐賀大学planar型アンジュレータ(LS3U), APPLE-II型アンジュレータ(LS4U)はそれまで偏向電磁石のみであったSAGA-LSのVUV-SX領域での大幅な輝度向上を目的に、超伝導ウィグラー(LS2W)は中小施設では困難であったハードX線領域でのフラックスの大幅な向上を目的に設置された。各挿入光源のパラメータを表1に示す。

図5, 6にLS2W, LS3Uの設置状況を示す。LS2Wの詳細は後節の章で述べる。アンジュレータLS3U, LS4Uは共に片持ち梁構造のout of vacuumタイプである。両者とも数10 eV ~ 1 keV領域の高輝度光源として利用されている。LS4Uは佐賀大学ビームラインBL13用に設置された典型的なplanar型である。LS3Uは佐賀県ビームラインBL10用で、利用側から可変偏光能力が求められAPPLE-II型を採用した。デザイン

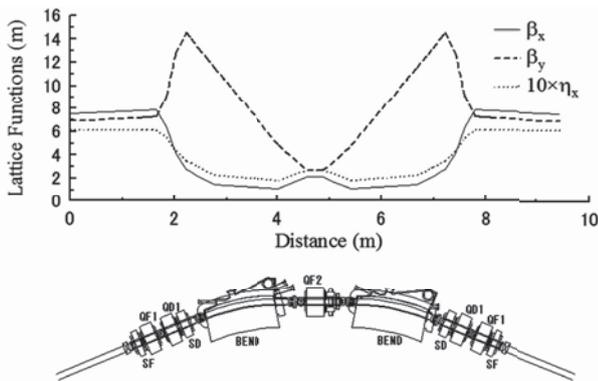


図4 ラティス関数および電磁石配置

表1 挿入光源パラメータ

超伝導ウィグラー						
名称	タイプ	ピーク磁場 [T]	臨界エネルギー [keV]	所属		
LS2W	3極	4	5.2	佐賀県		
アンジュレータ						
名称	タイプ	周期長 [mm]	ギャップ [mm]/K値	周期数	偏光	所属
LS3U	APPLE-II	72	30/3.8-200/0.003*	28	水平, 垂直	橋門 佐賀県
LS4U	プランナー	86	30/4.6-150/0.05	24	水平	佐賀大

\*k値は水平偏光モードの値

に当っては SAGA-LS 固有の設置上の課題があった。LS3U を設置する長直線部は空間的制約が厳しく、かつ搬入経路は直線部上部のハッチに限られていた。搬入用天井クレーンの吊り上げ重量は 2.8 t であった。planar 型に比べ APPLE-II 型は、その磁石構造の複雑さから重量増が避けられないため、分割可能かつ磁石列支持構造の軽量化を特に考慮して設計が行われた。APPLE-II の偏光を制御する上側下側それぞれ一对の磁石列のうち、一方の磁石列の桁がもう一方の磁石列の桁を保持する構造を採用し、共通のベースとなる桁を廃し、全重量は約 6 t に抑えられた<sup>15)</sup>。2 台のアンジュレータの運用においては、蓄積リングの動作点が差共鳴に近く、アンジュレータギャップ依存のチューンシフト、不整 skew 4 極磁場にビームサイズが敏感であったため、後述の挿入光源稼動に伴うカップリング補償システムを開発した。

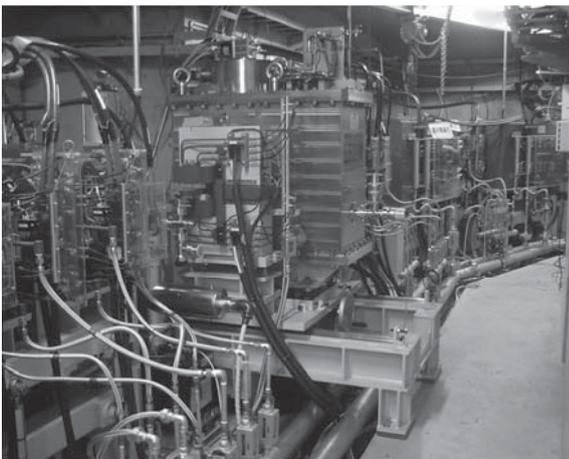


図 5 LS2W 超伝導ウィグラー

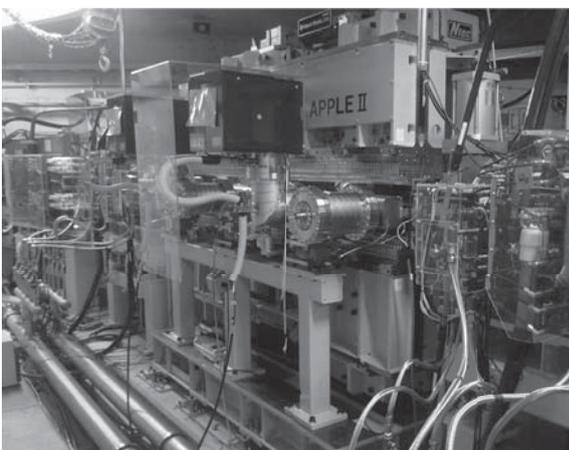


図 6 LS3U APPLE-II アンジュレータ

## 2.5 光源特性

図 7 に SAGA-LS 現状の全光源スペクトル及びビームラインが利用しているエネルギー領域を示す。基本光源は磁場 1.46 T の偏向電磁石（臨界エネルギー 1.9 keV）であり、数 10 eV から臨界エネルギーの 10 倍程度の領域まで利用されている。VUV-SX 領域では、アンジュレータ LS3U、LS4U が運用されており、偏向電磁石光源に対し 3 桁程度輝度が向上した。また超伝導ウィグラー LS2W（臨界エネルギー 5.2 keV）によって、偏向電磁石では利用が非常に困難であった 20 keV ~ 40 keV 領域のハード X 線の実用的な利用が可能となっている。

## 2.6 可視放射光によるビームモニタシステム

蓄積リングのビーム診断を目的とし、蓄積電子からの放射光の可視光成分を取り出せるビームライン (BL20) を 2007 年に建設した<sup>16)</sup>。このビームラインでは、偏向電磁石からの可視放射光が、真空チェンバー内に収納されたベリリウムミラーによって反射され、真空窓を通して大気中へと取り出されるようになっている。その後、可視光は 5 枚のミラーによって、実験ホールに設置された暗室内へと導かれる。暗室内の光学台上には、バンチ長測定のためのストリークカメラ（浜松ホトニクス C5680）とビームサイズ測定のための放射光干渉計<sup>17)</sup>が 2 組（水平・垂直用）設置されている。放射光干渉計とは、ダブルスリットを通過した光によって形成される干渉縞の干渉度 (visibility) からビームサイズを求める装置である。ビームサイズは、水平・垂直共に常時モニターできるようになっている。

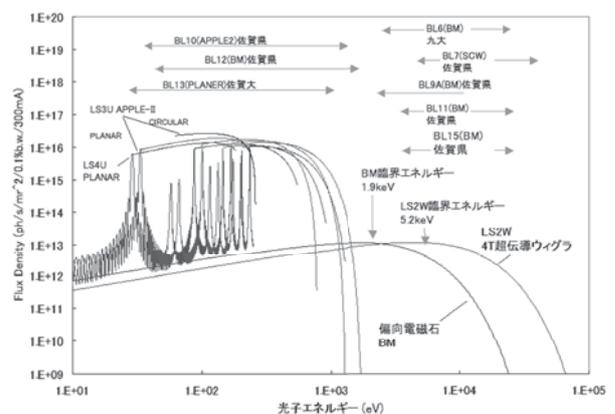


図 7 SAGA-LS 光源スペクトル

## 2.7 制御システム

SAGA-LS 加速器制御システムは、制御システム専任のスタッフがいないでも、内部のスタッフが容易にアプリケーションを構築できることを前提として設計された<sup>18, 19)</sup>。また、制御システムのデザインを検討していた 2000 年代初頭、PC/AT 互換機 (PC) の性能は飛躍的に向上しており、高価なワークステーションによる集中制御ではなく、PC を用いた分散・ネットワークシステムを採用することとした。アプリケーションのほぼ全てが National Instruments LabVIEW にて構築されている。図 8 にシステム概略図を示す。リモート機器 (例えば電磁石電源) のローカル制御には Yokogawa PLC FA-M3, National Instruments FieldPoint, アンジュレータ制御にはツジ電子 PMI6C 等を用いている。通信インターフェースはイーサネットが多いが、各機器の持つ外部インターフェースに応じ GPIB (DCCT 用デジタルボルトメーター), RS232C (リニアック高周波系) を用いている。PLC のラダープログラムなど、一部は外注した。

近年、制御対象機器の増加に伴うクライアントソフトウェアの増加により、制御室に置かれる PC の設置場所が手狭になっている。また、日常の加速器の運転手順はほぼ決まっており、加速器の運転において制御パラメータの変更を行うことはほとんどない (セプトム電磁石電源設定値, ビームサイズ調整のための skew 4 極電磁石の微調整がある程度)。そのため、一連の加速器運転操作を 1 台の PC で運用する自動化運転の試みも行っている<sup>20)</sup>。試験的に作成された自動化のための集約的な制御アプリケーションは、ネットワーク

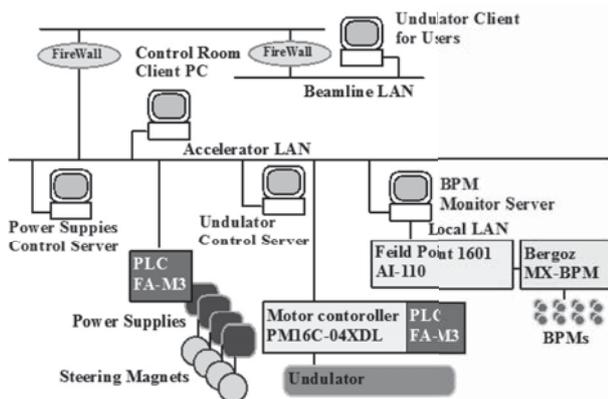


図 8 SAGA-LS 制御システム概略

経路の一部で障害が生じた場合に有益であった。通常は、加速器スタッフの運転当番が 1 名, サポーターとしてスプリングエイトサービスからの 1 名, 計 2 名により, 複数の PC を操作して加速器の運転を行っている。

## 3. 運転状況

加速器の運転は、月曜マシンスタディ, 火曜～金曜ユーザー運転, 土日祭日停止のサイクルで定期的に行われている。夜間運転は行っていない。公式な運転時間は 10:30～21:00 の 10.5 時間である (ただし入射調整終了次第, 公式開始時刻を待たずにユーザーに放射光を提供している)。加速器点検のための定期シャットダウンは、積算でおよそ 2 ヶ月 / 年程度である。開所以来の年間ユーザー運転時間を図 9 (上) に示す。

実験ホールの増築工事が行われた 2008 年を除き、運転時間は、開所以来概ね 1500 時間程度で推移している。加速器が要因となったユーザー運転のアボート率を図 9 (下) に示す。開所以来アボート率は、およそ  $10^{-2}$  台で推移している。単独の最も大きなトラブルは 2011 年度末に発生した蓄積リング高周波空洞系のサーキュレータ漏水であった。サーキュレータ中央部冷却配管のロ

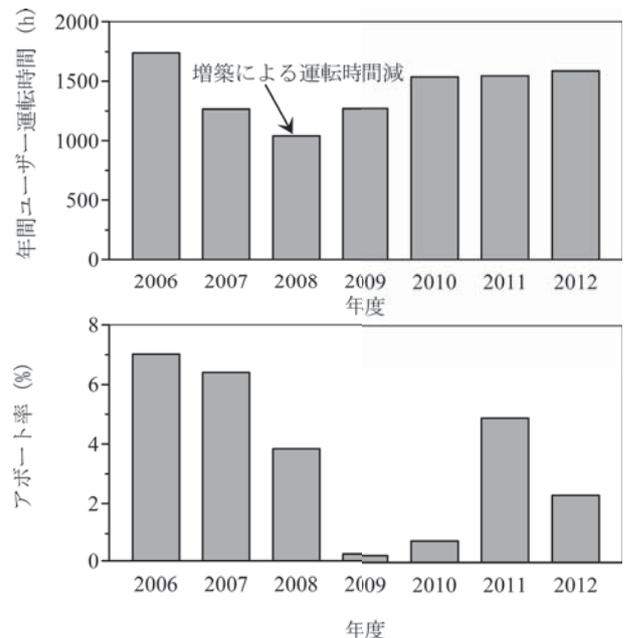


図 9 開所以来の加速器のユーザー運転時間 (上) とユーザー運転アボート率 (下)。ここでいうアボート率とはユーザー運転実施時間に対する加速器が原因となったユーザー運転中止時間の比である。

ウ付けのピンホールから漏水し、導波管で接続されたRF系全域に渡り漏水及び結露が発生した。建設以来始めて、サーキュレータを中心にクライストロン、ダミーロードに関わる導波管を全面的に分解し、サーキュレータ修理、クライストロン窓の乾燥、導波管、ダミーロードの分解乾燥を行った<sup>21)</sup>。ユーザー運転としては7日間運転を中止した。

#### 4. 研究・開発

この章では、近年 SAGA-LS において実施された研究・開発として、ハイブリッド型超伝導ウィグラー、ビーム寿命の評価、挿入光源稼動に伴うカップリング補償、およびビーム軌道安定化の取り組みを報告する。また、電子ビームを用いた研究として、レーザーコンプトンガンマ線の生成、リニアックビームの利用研究について紹介する。

##### 4.1 ハイブリッド型超伝導ウィグラー

SAGA-LS では、既設偏向磁石光源の利用限界の光子エネルギー（～20 keV）を超え 40 keV 程度までをカバーするハイブリッド型超伝導ウィグラー（LS2W）を開発した<sup>4, 5)</sup>。特に目的とされたのは重要な中重元素の K 吸収端エネルギー領域を網羅し、かつタンパク質 X 線結晶構造解析で利用される波長 1 Å (12.4 keV) 領域でのフラックスの増大が実現することであった。

利用側から発光点の光プロファイルが単純であることを求められ、メインポール1極と対称配置のサイドポール2極から成る3極タイプとした。ウィグラー磁場のビームへの影響を抑えるため、得られる放射光フラックスが許容できる範囲で磁場強度を抑えることとしメインポール磁場を 4 T とした。

光源性能の実現に加えて、中小規模放射光施設において長期にわたり安定に超伝導マグネットシステムを維持し続けるということも実用上の大きな課題であり、冷凍機システムの熱負荷軽減は重要であった。この問題を解決するためにメインポールのみ超伝導とし、サイドポール2台は常伝導マグネットとしてクライオスタット外に配置するというハイブリッド構成を採用した。これによりサイドポールをクライオスタット内に設置する場合に発生する電流リードや支持構造からの侵入熱がまったくなくなった。主なパラメータと磁極

構造をそれぞれ表2、図10に示す。

ハイブリッド型の磁極配置は、典型的な一体型3極ウィグラーに比べ磁極間距離が増大し、これに伴いメインポール直下での放射光発光点の変位が大きくなる。この問題を抑制するためメインポール磁極にはビーム軸方向両端部に大きなフィールドクランプを配置した。また人的にもコスト的にも限られた SAGA-LS において長期にわたって超伝導マグネットシステムを安定に維持するために、冷凍機システムには液体ヘリウムを用

表2 超伝導ウィグラーパラメータ  
超伝導メインポール

超伝導メインポール	
磁場	4.0 T
線材	NbTi/Cu
磁極	純鉄
磁極間ギャップ	82 mm
定格電流	172 A
コイル内最大磁場	6.0 T
臨界温度@定格時	6.7 K
コイル蓄積エネルギー	48 kJ
起磁力	438 kAT
平均電流密度	147 A/mm <sup>2</sup>
常伝導サイドポール	
磁場	0.95 T
磁極	純鉄
磁極間ギャップ	36 mm
定格電流	325 A
起磁力	14.5 kAT/pole
電流密度	4.7 A/mm <sup>2</sup>

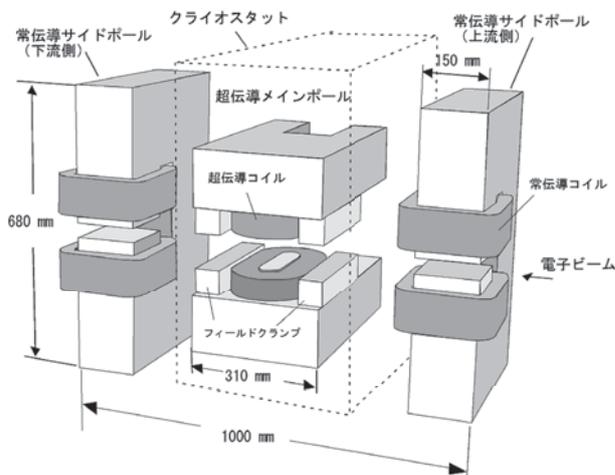


図10 LS2W ハイブリッド3極ウィグラーの磁極構造

いず、GM 冷凍機 1 台によって超伝導コイルと磁極を機械的接触によって直接冷却する伝導冷却方式を採用した。

LS2W は 2009 年度に製作され、2010 年 3 月に蓄積リング長直線部 LS2 に設置された。同年 11 月より通常のユーザー運転における定常運用が開始された。ウィグラー励磁に対するビームへの影響については設置以前に比べ大きな光源性能の悪化は観測されなかった<sup>5)</sup>。運用開始以来この 2 年半、ユーザー運転日には、蓄積リングの加速終了後に 4 T 励磁を行い、ユーザー運転終了時に消磁というサイクルを定常的に繰り返している。本ウィグラーは、当初の計画通り制約の多い中小規模放射光施設における安定なハード X 線源として運用されている。

#### 4.2 ビーム寿命の評価

SAGA-LS 電子蓄積リングのビーム寿命の制限要因を理解するために、ビームスクレーパを用いた実験研究を行った<sup>22)</sup>。蓄積リングを周回する電子は、残留ガス分子との衝突（真空寿命）、Touschek 効果、量子寿命によって失われる。SAGA-LS 電子蓄積リングはエミッタンスが比較的 low、かつビームエネルギーも 1.4 GeV とそれほど高くはないことから、真空ダクトの光焼き出しが十分に進行した状態では、ユーザー運転時のビーム寿命は Touschek 効果によって制限されると推定されていた。本研究ではビーム寿命に対する各種の電子損失要因の寄与を実験的に評価した。

スクレーパは蓄積リングの直線部に設置されており、4 本の円筒ロッドを挿入することで水平・垂直方向のアーチャを自在に制限することができる。電子損失レートのアーチャサイズ依存性が要因毎に異なることを利用し、スクレーパ挿入時のビーム寿命の減少曲線から要因別のビーム寿命を評価した。SAGA-LS 電子蓄積リングの直線部には有限のエネルギー分散が存在するため、水平ロッドの挿入によって運動量アクセプタンスが縮小する。この効果を利用して、各種の真空寿命に加え Touschek 効果の寄与を明確に評価した点が本手法の大きな特徴である。

図 11 に水平ロッド挿入時のビーム寿命の測定結果を示す。測定は通常のユーザー運転と同様の条件（ビーム電流 $\sim$ 300 mA、エミッタンスカッ

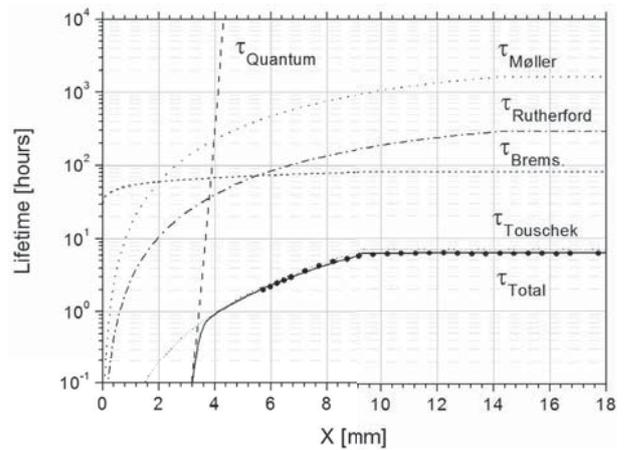


図 11 水平ロッド挿入時のビーム寿命の減少。実線・点線は各種ビーム寿命の曲線フィット。

プリング $\sim$ 1.4%) で行った。図中の実線・点線は寿命評価モデルによる曲線フィットを示しており、要因別のビーム寿命が明確に分離評価されることがわかる。ユーザー運転条件におけるビーム寿命は Touschek 効果が支配している。この結果は蓄積リングの運転状況に対する推定と整合している。

#### 4.3 挿入光源稼動に伴うカップリング補償

SAGA-LS 電子蓄積リングの動作点は差共鳴に近く、エミッタンスカップリングは skew 4 極磁場とベータatronチューンの変動に敏感である。挿入光源のパラメータ（磁極ギャップ・位相）をユーザー運転中に自由に調整するためには、挿入光源由来のカップリング変動の補償が必須であった。そこで APPLE-II 型アンジュレータの設置後、アンジュレータの不整 skew 4 極磁場と集束力によるチューンシフトの双方を、磁極ギャップと位相の設定に応じてフィードフォワード方式で補償するシステムを開発した<sup>23, 24)</sup>。挿入光源近傍のスペースが限られており、かつ補償に必要な磁場強度もそれほど高くはないことから、skew 4 極磁場の補償にはアンジュレータの真空ダクトに取り付けたストリップライン電極を、空芯電磁石コイルとして用いた。一方、チューンシフトの補償はアンジュレータの上下流部の 4 極電磁石を用いている。図 12 にアンジュレータダクトの様子を示す。ストリップラインは幅 3 mm、厚さ 0.1 mm の銅ワイヤーである。補償に必要な励磁電流は垂直ビームサイズの測定値を参照して決定した。

カップリングの補償効果は垂直ビームサイズの

測定で確認した. 例としてAPPLE-II 水平偏光モードにおける垂直ビームサイズのギャップ依存を図13に示す. skew 4 極磁場とチューンシフトの補償により, カップリングの変動が抑制されることがわかる. 補償システムの運用によって, 任意のギャップ・位相調整に対して垂直ビームサイズの相対変化は2% (rms) 以下に抑制されており, 他のビームラインへ影響を及ぼすことなくアンジュレータのパラメータ調整が可能となった. また同様のカップリング補償機構は planar 型アンジュレータ (佐賀大学) にも組み込まれている.

#### 4.4 ビーム軌道安定化に向けた取組

SAGA-LS 蓄積リングでは 1.4 GeV での電子貯蔵中, ビーム軌道がドリフトすることが観測されていた. 前述したように SAGA-LS 蓄積リングでは 255 MeV で入射を行い, 所定の電流まで蓄積した後, 1.4 GeV まで加速する. 1.4 GeV における放射光による熱負荷は 255 MeV における熱負荷の 900 倍以上にも増加する. また, SAGA-LS

ではトップアップ運転が行えないため, 蓄積電流量は時間の経過と共に減少し, 熱負荷の変化が生じる. そのため, ビーム軌道のドリフト要因のひとつとして Beam Position Monitor (BPM) が設置されている BPM 真空槽の温度変化に伴う位置変動が想定された.

そこで, ビーム軌道のドリフトと BPM 真空槽の変動との関係を調べるため, 蓄積リングの代表的な 8 箇所に分解能  $0.5 \mu\text{m}$  の接触式変位計を設置した<sup>25)</sup>. 接触式変位計は 4 極電磁石架台に対して固定した.

図14に 1.4 GeV 到達後, Closed Orbit Distortion (COD) 補正後のビーム軌道のドリフトと, 変位計により観測した BPM 真空槽の変動の様子を示す. 変位計の原点は見やすいように適当にオフセットさせている. 両者のドリフトには関連があるが, 完全には一致せず, 最大で  $50 \mu\text{m}$  程度の違いがあった. ビーム軌道のドリフトは, BPM 真空槽の変動だけでなく, ステアリング電磁石電源のドリフトといった他の要因も考えられている.

1 日のサイクルにおける BPM 真空槽の最大変動量は水平方向 1.2 mm, 垂直方向 0.1 mm 程度であった. また, BPM 真空槽は, 冷却水の通水開始時, ランプアップ時に大きく変位していた.

今後, 全 24 箇所ある BPM のうち, 残り 18 箇所の BPM 真空槽に対し接触式変位計を取り付け, BPM 真空槽の変動を考慮した 1 Hz 程度の遅いフィードバック方式の COD 補正の導入を考えている. しかし, 残りの BPM 電極は 4 極電磁石と 6 極電磁石のヨーク間距離 85 mm の狭い位置に

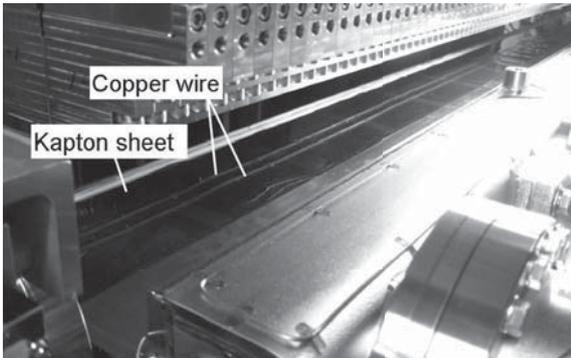


図12 補正用 skew 4 極電磁石

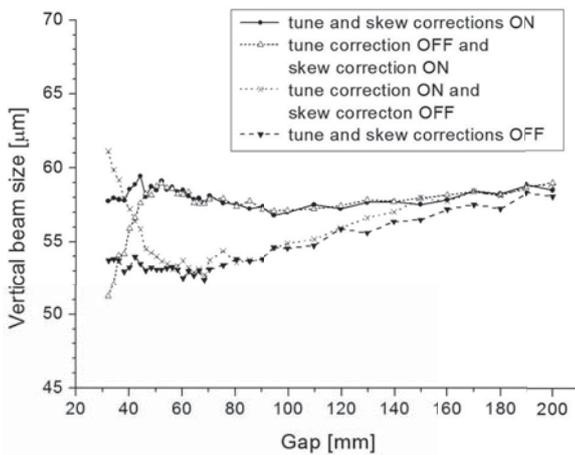


図13 垂直ビームサイズの磁極ギャップ依存

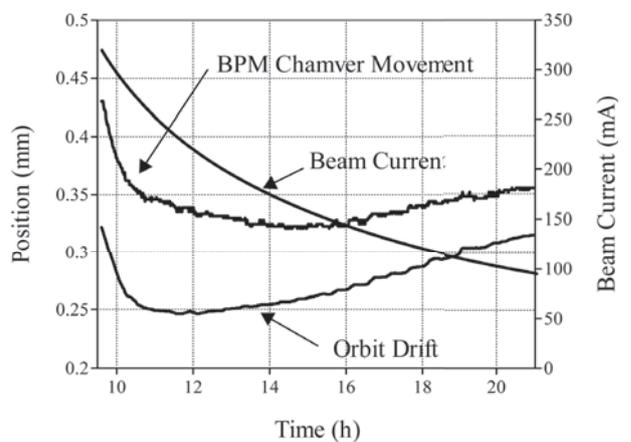


図14 ビーム軌道のドリフトと BPM 真空槽の変動

あり、変位計のサポート方法について検討を行っている。

#### 4.5 レーザーコンプトンガンマ線の生成

1.4 GeV 電子蓄積リングと CO<sub>2</sub> レーザーを用いてレーザーコンプトン散乱 (LCS) ガンマ線の生成実験に取り組んでいる。SAGA-LS LCS ガンマ線源の基本コンセプトは、GeV クラスの電子蓄積リングにおける大出力赤外レーザーを用いた数 MeV 領域の高フラックスガンマ線の生成かつ放射光ユーザー運転との共存である。図 15 に LCS 実験系の概略を示す。LCS 用レーザーは波長 10.6 μm の CW CO<sub>2</sub> レーザー (最大出力 10 W) を採用した。電子ビームとの相互作用領域には入射用直線部を利用しており、レーザー光と 1.4 GeV 電子ビームとの正面衝突によって最大エネルギー 3.5 MeV のガンマ線が生成される。BGO 検出器を用いて測定したガンマ線スペクトルを図 16 に示す。蓄積リングのエネルギーアクセプタンスはガンマ線のエネルギーより充分に高く LCS によって反跳を受けた電子の損失は無い。LCS によるビーム寿命の減少は生じないため、ガンマ線利用実験は通常の放射光ユーザー運転との

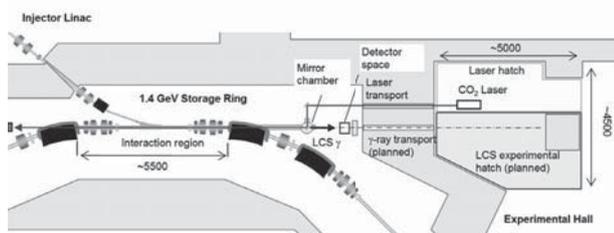


図 15 LCS 実験系の概略

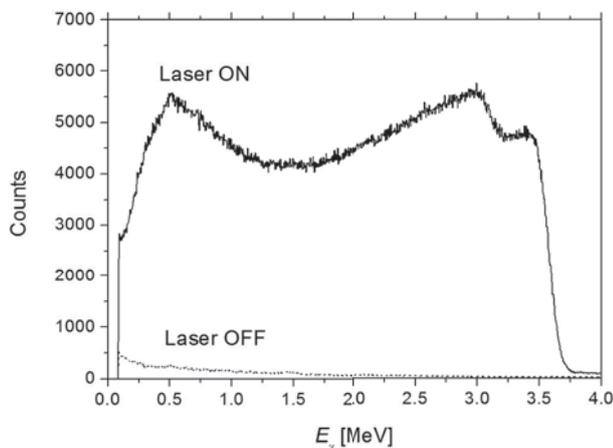


図 16 BGO シンチレーション検出器で測定したガンマ線スペクトル

共存が可能である。また CO<sub>2</sub> レーザーは大出力化が比較的容易であり、将来的なガンマ線フラックスの増強も検討している。

LCS 実験系の構築後、低ビーム電流にて LCS ガンマ線の特性評価を目的とする基礎実験を行い、ガンマ線のエネルギー分布や空間分布はシミュレーションの結果と良く一致することを確認した<sup>26, 27)</sup>。

その後、現状の実験系における最大強度条件でガンマ線の生成に成功し<sup>27)</sup>、ガンマ線フラックスの長時間安定性とビームへの影響を調査するため、ユーザー運転時間 (10.5 時間/日) を想定した連続運転試験を行った<sup>28)</sup>。連続運転試験の結果、蓄積ビームやリング真空へ影響を与えずに LCS ガンマ線を放射光ユーザー運転と共存して安定供給可能なことが確認された。現状で検出器位置における LCS ガンマ線のフラックスは最大強度条件 (ビーム電流 300 mA, レーザー出力 10 W, コリメータ無し) にて  $1 \times 10^7$  photons/s 程度である。2012 年度からは放射光ユーザー運転中に、一部応用実験への LCS ガンマ線供給も試験的に行っている。現在ガンマ線の利用は蓄積リング室内の限られたスペースで行っているが、利用実験の利便性向上を目的として、ガンマ線の実験ホールへの取り出し準備と実験ハッチの整備を進めている。

#### 4.6 リニアックビームの利用研究

SAGA-LS では、リニアックからの電子ビームを利用した実験も行われている。現在進行中の、結晶との相互作用に関する研究について紹介する。

結晶は原子が周期的に配列したものであり、荷電粒子が結晶に入射すると、その周期性を反映し、パラメトリック X 線放射 (parametric X-ray radiation : PXR) やチャネリングなどのユニークな現象が生じることが知られている。PXR とは、相対論的荷電粒子が結晶に入射した際に、ブラッグ条件を満たす方向に X 線が放射される現象である。入射荷電粒子のまわっている擬似的光子が、結晶によって回折される現象と解釈することができる。また、チャネリングとは、荷電粒子が結晶の軸や面に沿ってほぼ平行に入射した際に、結晶の原子列や原子面のつくる強力な電場によってガイドされながら結晶中を進む現象である。

近年, ビームと結晶の相互作用を利用した応用研究が精力的に行われている. 例を4つ挙げる.

(i) 日本大学のグループは, PXRを空間コヒーレンスの高い波長可変のX線源として利用するための専用ビームラインを構築し, イメージング等の研究に供している<sup>29)</sup>.

(ii) KEKのグループは, 陽電子生成用標的としてタングステン単結晶を採用し, チャネリング放射によって陽電子の取量を増加させることに成功している<sup>30)</sup>.

(iii) CERNでは, 湾曲結晶によるチャネリングを利用して, 高エネルギーのビームを偏向させる研究が行われている<sup>31)</sup>.

(iv) ドイツのマイントのグループは, 超格子構造を利用して周期長 $9.9 \mu\text{m}$  (mm単位ではないことに注意)の超短周期アンジュレータ結晶を作製し, 電子ビームをチャネリングさせることによってX線を生成することに成功している<sup>32)</sup>.

このような背景のもと, SAGA-LSでは, 新たな加速器技術への応用を念頭に, 下記の3テーマに関して研究を進めている.

- (a) PXRの基礎研究とビームプロファイルモニタへの応用
- (b) 回折チャネリング放射 (パラメトリックチャネリング放射)の実験的検証とビームエネルギーモニタへの応用
- (c) 単結晶・多結晶におけるチャネリングの基礎研究とビーム制御技術への応用

実験は, リニアックからビームダンプへと続くビームラインを利用して行われている<sup>33)</sup> (図2参照). 標的結晶は, 2軸回転ゴニオメーターに取り付けられるようになっている. 紙面の都合上, (a)のテーマに関してのみ詳述する.

従来, リニアックの電子ビームの高精度プロファイルモニタとして, 可視遷移放射 (optical transition radiation: OTR) が利用されてきた. しかし最近, X線自由電子レーザー (XFEL) 施設であるアメリカのLCLSや日本のSACLAにおいて, ビームのバンチ長が短い場合, OTRがコヒーレントになり, ビームのプロファイル測定に利用できないことが判明した<sup>34, 35)</sup>. また, 国際リニアコライダー (ILC) のように, ビームサイズが極端に小さい場合にもOTRはコヒーレントになると考えられる.

コヒーレントになることを避けるには, より波長の短い光を使用する必要がある. そこで, 本研究では, PXRの利用を提案している<sup>36)</sup>. 測定手法として, ①光源点近傍にX線検出器を設置してPXRのプロファイルを測定し, そのプロファイルから計算によりビームプロファイルを導出する“近接法”, ②光源点とX線検出器の間にピンホールを設置し, X線検出器上にビームプロファイルを構成する“ピンホール法”, ③フレネルゾーンプレートをX線用レンズとして用い, X線検出器上にビームプロファイルを結像する“フレネルゾーンプレート法”という3者について研究を進めている. 後者の2つは放射光X線を利用した蓄積リングのビームプロファイル測定においても, よく用いられている手法である. すでに, 近接法とピンホール法の原理の検証実験に成功しており, 残るフレネルゾーンプレート法に関する研究が進行中である.

## 5. ま と め

SAGA-LSの加速器概要を示した. 運用状況としては, アバート率は $10^{-2}$ 台で2006年2月にユーザー運転を開始して以降, 定常的に稼動している.

また, 近年のハイブリッドウイグラー等による光源性能の向上や, 挿入光源運用のためのカップリング補償, ビーム寿命の評価, ビーム軌道の安定化といった基礎研究について報告した. 4 T超伝導ウイグラーにより, これまで中小規模の放射光施設では困難だった20 keV~40 keVのハードX線の利用が可能となった. また, アンジュレータにより, VUV-SX領域での輝度は, 偏向電磁石光源の輝度に対し3桁程度向上した. 蓄積リングの動作点が差共鳴に近い場合, カップリング補償システムを構築した. これにより, 他のビームラインへ影響を及ぼすことなくアンジュレータのパラメータ調整が可能となった. また, 電子ビームを用いた研究として, レーザーコンプトンガンマ線の生成, リニアックビームの利用研究の概略を紹介した. 放射光供用を目的としたSAGA-LSではあるが, 電子ビームを用いた応用研究についても発展させている.

## 謝 辞

新タイミングシステムの開発にあたり、SPring-8 のシステムを紹介して下さった、高輝度光科学研究センターの安積隆夫氏に感謝いたします。

放射光干渉計の構築に関してご指導いただきました、KEK の三橋利行氏に感謝いたします。

レーザーコンプトン実験においては、研究面に限らず実験系の立ち上げから変更申請に至る様々の点で産総研豊川弘之氏、京都大学大垣英明氏、兵庫県立大学宮本修治氏にご協力いただきました。この場を借りて感謝します。

超伝導ウィグラー開発に当たり、超伝導マグネットに関わる様々なアドバイスや情報をいただいた NSRRC の Hwang 氏、放医研の取越正己氏、KEK 土屋清澄氏、分子研加藤政博氏、名古屋大学シンクロトロン光研究センター関係者の方々に感謝します。またウィグラー本体の製作にあたりご尽力いただきました仙波智行氏、阿部充志氏をはじめとする日立製作所の方々に感謝します。

軽量構造の APPLE-II アンジュレータ製作にご尽力いただいたネオマックスエンジニアリングの幸田勉氏をはじめとする関係者の方々に感謝します。

## 参考文献

- 1) T. Tomimasu, et al., Proc. of the Pac'05, 2021 (2005).
- 2) 富増多喜夫, 加速器 3, 151 (2006).
- 3) S. Sasaki, Nucl. Instrum. Methods A347, 83 (1994).
- 4) S. Koda, et al., IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, 21, 32 (2011).
- 5) S. Koda, et al., Nucl. Instrum. Methods A 682, 1, 1 (2012).
- 6) T. Tomimasu, et al., Proc. of PAC'03, 902 (2003).
- 7) Y. Takabayashi, et al., Proc. of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 254 (2005).
- 8) T. Tomimasu, et al., AIP Conf. Proc. 879, 184 (2007).
- 9) Y. Takabayashi, et al., Proc. of 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 966 (2008).
- 10) T. Kobayashi, et al., Proc. of LINAC'98, 58 (1998).
- 11) H. Suzuki, et al., Nucl. Instrum. Methods A 431, 294 (1999).
- 12) Y. Iwasaki, et al., Proc. of PAC'03, 3270 (2003).
- 13) Y. Iwasaki, et al., IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, 20, 246 (2010).
- 14) S. Koda, et al., Proc. of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 284 (2004).
- 15) 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 APPLE2 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, 東京大学 108 (2009).
- 16) Y. Takabayashi, et al., Proc. of ICALEPCS'09, 140 (2009).
- 17) T. Mitsunashi, Proc. of PAC'97, 766 (1997).
- 18) H. Ohgaki, et al., Proc. of PAC'03, 2387 (2003).
- 19) H. Ohgaki, et al., Proc. of PAC'05, 3976 (2005).
- 20) Y. Iwasaki, et al., Proc. of PCaPAC'10, 76 (2010).
- 21) S. Koda, et al., Proc. of 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 885 (2012).
- 22) T. Kaneyasu, et al., Nucl. Instrum. Methods A 694, 107 (2012).
- 23) T. Kaneyasu, et al., Proc. of IPAC2010, 3162 (2010).
- 24) T. Kaneyasu, et al., Nucl. Instrum. Methods A 641, 5 (2011).
- 25) Y. Iwasaki, et al., Proc. of 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 933 (2012).
- 26) T. Kaneyasu, et al., Nucl. Instrum. Methods A 659, 30 (2011).
- 27) T. Kaneyasu, et al., Proc. IPAC2011, 1476 (2011).
- 28) T. Kaneyasu, et al., Journal of Physics: Conference Series 425, 042018 (2013).
- 29) 早川恭史, 加速器 6, 166 (2009).
- 30) 諏訪田剛, 加速器 4, 7 (2007).
- 31) W. Scandale, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 11, 063501 (2008).
- 32) H. Backe, et al., Radiation emission at channeling of electrons in a strained layer  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  undulator crystal, Nucl. Instrum. Methods B, in press.
- 33) Y. Takabayashi, et al., Nuovo Cimento C 34 (4), 221 (2011).
- 34) H. Loos, et al., Proc. of FEL'08, 485 (2008).
- 35) T. Hara, et al., Proc. of 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 55 (2011).
- 36) Y. Takabayashi, Phys. Lett. A 376, 2408 (2012).