

# COMMISSIONING AND OPERATION STATUS OF A SUPERCONDUCTING WIGGLER AT SAGA-LS

Shigeru Koda<sup>#</sup>, Yoshitaka Iwasaki, Yuichi Takabayashi, Tatsuo Kaneyasu

SAGA Light Source

8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga, 841-0005

## Abstract

A three-pole superconducting wiggler, which generates photons in the energy range 20~40 keV, has been developed at SAGA-LS. In order to maintain high operational stability, a hybrid structure which consists of a 4 T superconducting main pole and two normal-conducting side poles was employed. The wiggler was installed to a long straight section LS2 of the SAGA-LS storage ring in the end of March 2010. Following studies toward user operation were carried out: (1) investigation of residual magnetic field effect of the wiggler in low energy beam injection. (2) determination of field excitation pattern of the main and side poles. (3) Decision of regular procedure in routine user operation. Residual magnet field affected relatively the beam injection but was controllable. Field excitation with stored beam was relatively easy with simple linear interpolated pattern of the main and side poles. The effect of multipole fields of the wiggler was roughly in agreement with calculation result and was tolerable for the storage ring. The wiggler has been stably operated and has provided the hard X-ray up to now.

## SAGA-LS における超伝導ウィグラーの立ち上げと運用状況

### 1. はじめに

放射光施設 SAGA-LS において光子エネルギー 20keV~40keV 領域の硬 X 線光源となる超伝導ウィグラー(LS2W)が開発された[1,2]。LS2W はピーク磁場 4T で臨界エネルギー5.2keV である。磁極構成はメインポール 1 台とその 1 次積分を補償するサイドポール 2 台から成る。本ウィグラーは、これまで SAGA-LS では困難であった重要な中重元素の K 吸収端のエネルギー領域を網羅する X 線光源として計画された。開発にあたっては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大きな課題となった。

LS2W は 2010 年 3 月末に SAGA-LS 蓄積リング長直線部 LS2 に設置された。設置状況を図 1 に示す。ウィグラー励磁を伴うビーム試験は 5 月中旬以降週 1 回のマシンスタディにおいて行われ、8 月下旬にはユーザー運転条件での運用が可能となった。2010 年 11 月にウィグラービームライン BL7 に関わる施

設変更検査に合格し、正式に LS2W のユーザー運転が開始された。以下ではユーザー運用に至る LS2W のコミッショニング内容、経過及び運用の現状について報告する。

### 2. ウィグラー概要

LS2W 基本構造を図 2 に示す(ウィグラー構造、磁極詳細は[1,2]参照)。運用安定性の観点から冷凍機熱負荷を抑えることが重要であり、そのため、3 極のうちメインポールのみ超伝導とした。サイドポールは常伝導マグネットとし、メインポールの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とした。冷凍機は液体ヘリウムを使用しない GM 冷凍機による伝導冷却方式を採用した。メインポールのみクライオスタット内に収納したため、クライオスタット筐体厚みや断熱層等により、典型的な一体型 3 極ウィグラーに比べメインポールとサイドポール磁極間の距離が増大し、これに伴い磁場の 2

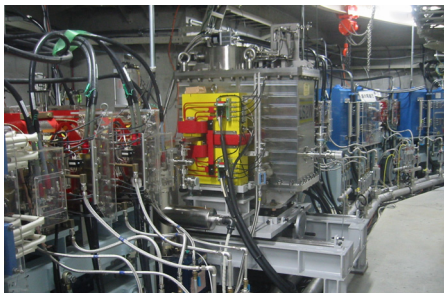


図 1: ハイブリッド 3 極ウィグラー

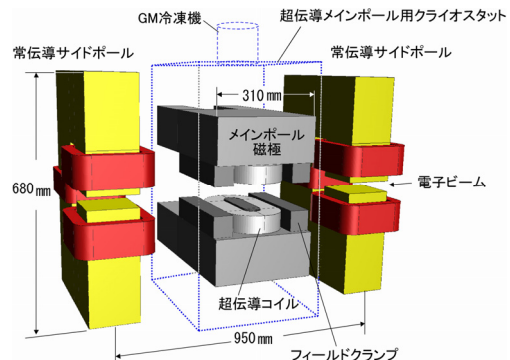


図 2: LS2W 基本構造

<sup>#</sup> koda@saga-ls.jp

次積分値が大きくなる。これによる放射光発光点の変位を抑制するため、メインポール磁極にはビーム軸方向両端部に中央磁極と同じ程度の大きなフィールドクランプを配置し、メインポール両端部には主磁場と逆のアンダーシュート磁場を積極的に発生させ実効磁場積分を抑制している。

### 3. ビームを用いた試験

#### 3.1 ウィグラー残留磁場

ウィグラー設置に当たって、まず検討されたことはウィグラーの励磁試験以前に設置そのものによるビーム入射への影響であった。SAGA-LS 蓄積リングは低エネルギー入射方式を採用しておりリニアックから 255MeV ビームを蓄積リングに入射後 1.4GeV に加速する。入射時の magnet rigidity は蓄積時の 18%程度であり、蓄積時に比べ環境の不整ダイポールキックの影響は大きい。ウィグラー磁極はビーム軸近くに鉄磁極が配置されており（メインポール、サイドポールそれぞれ磁極からビーム軸まで 41mm,18mm）、ウィグラーが非励磁状態でも入射に影響する可能性があった。そのためまずウィグラー設置前に直線部 LS2 に実効的な 2 極成分を生成し、入射速度への影響を測定した。LS2 中央部に点状ダイポールキックがあるのと等価になるよう LS2 両側の 6 極電磁石 SF 内蔵ステアリングコイルを対称に励磁し、入射速度の依存性を調査した。その結果 BL 積 $\sim 500\text{G}\cdot\text{cm}$ 、程度で入射速度がほぼ半減することが観測された。

他方でウィグラー本体の残留磁場は工場出荷前に測定された。工場での励磁試験の際に定格励磁パターンに近い励磁を繰り返し初期化した後、測定が行われた。図 3 にビーム軸方向の垂直磁場分布と磁極配置を示す。積分磁場としてはサイドポールの寄与が大きくウィグラー全体の垂直磁場の BL 積は $\sim 623\text{G}\cdot\text{cm}$ であった。そのため、255MeV 入射時に残留磁場によって有為に蓄積速度が低下すると考えられた。

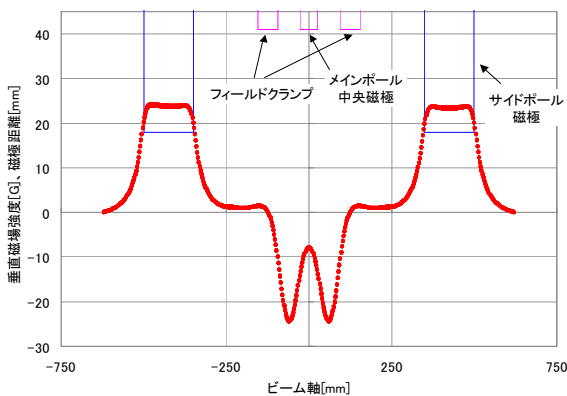


図 3: ウィグラーのビーム軸上の垂直方向残留磁場分布と磁極配置。

LS2W 設置後、最初の入射試験では残留磁場に対する補正を行わず、従来の入射条件で入射を行った結果、予想されたように蓄積速度は目立って低下した。しかしながらビームは蓄積できたことから、蓄積されたビームでグローバル COD 補正を行い、残留磁場のダイポールキックを補償した。その結果、LS2W 設置以前と同様の蓄積速度に回復した。その後のウィグラー励磁を伴うスタディの後で大きく入射速度が低下することが観測されたが、この手法で復旧している。

#### 3.2. 励磁パターンの決定

LS2W の励磁パターン決定にあたり、ウィグラー設置前に、要求される実効的な BL 積制御精度をビームを使って調査した。前節同様の方法で 1.4GeV で LS2 に等価ダイポールキックを作り、このキックに対して蓄積ビームの  $I\tau$  積の変化を測定した。その結果水平キック力が BL 積にして  $10\text{kG}\cdot\text{cm}$  以上で急激に  $I\tau$  積が低下した。これよりメインポール 4T 時 BL 積 ( $390\text{kG}\cdot\text{cm}$ ) に対し BL 積の補償精度は少なくとも  $\Delta\text{BL}/\text{BL}\sim 2.5\%$  以下であることが求められた。一方で磁場計算と磁場測定では、4T 励磁時のウィグラー全体の BL 積で  $6\text{kG}\cdot\text{cm}$  程度の不一致が見られた。計算モデルに基づいた励磁パターン制御を行うには上記  $I\tau$  積の観点からは、ビームロスの可能性があった。そのため、4T 励磁条件でメインポール中央磁極直下ビーム軸上の垂直磁場測定値に計算値が一致するように計算モデルの電流値に 1 次の補正係数をかけた。これにより 4T 以下の測定点においても BL 積のずれが最大で  $3\text{kG}\cdot\text{cm}$  程度に抑制された。

励磁パターンとしてはメインポールの励磁電流変化率を一定とし、サイドポールの励磁電流はメインポールに追従して BL 積を補償するように計算された。磁場計算には [radia](#)[3,4]を用いた。

また励磁パターン決定にあたってはアンジュレータのギャップ制御と異なり、定格励磁以外での放射光利用を計画していないため、ビームが持ちこたえる範囲で、出来るだけ単純で少ないパラメータで制御を行うこととした。

実効計算モデルに基づき励磁電流 6 点(以下基準電流点)でサイドポール電流を計算し、基準点間の領域を直線補間による定速励磁とした。2010 年 5 月に行なわれた励磁試験において、励磁開始後基準電流点に達する度、蓄積リング全体の BPM から長直線部 LS2 の不整ダイポールキックを求め、これを 2 台のサイドポールの励磁電流で補償する手順を基準電流点毎に行い、4T 定格励磁に成功した。サイドポールのみによるキック補正では数 mm 程度の大きな COD が発生するが、ビームロスはおこらず安定に励磁できている。その後、励磁時間を短縮する試験をすすめ、最終的に励磁によるヒステリシス損等過渡的な発熱に対して冷凍機の冷凍能力が余力をもつ限界と見積もられた 15 分間での 0T $\rightarrow$ 4T 励磁が可能になった。このようにして得られたメインポール、サイドポールの励磁パターンを図 4 に示す。

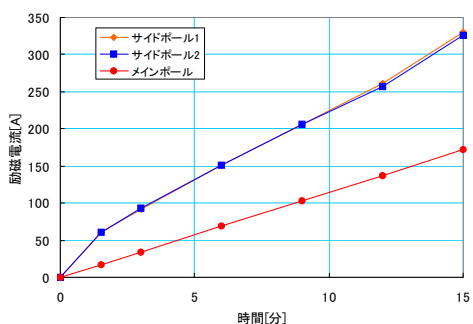


図 4: メインポール、サイドポールの励磁パターン

### 3.3 マルチポール

前述の励磁パターンに則って 4T 励磁後、ビームロス等の問題はなかったものの、磁場補正のない状態では、LS2W による 4,6 極効果はそれぞれベータートロンチューンとクロマチシティの変化として明瞭に観測された。0T→4T 時のクロマチシティ及びチューンのシフトの計算及び測定値を表 1 に示す。垂直チューン  $\Delta \nu_y$ 、クロマチシティ  $\Delta \xi_{x,y}$  については計算と概ね一致している。水平チューンはファクター2 程度の不一致がある。この原因については現在検討中である。

表 1: 4T 励磁時の 4,6 極磁場変化

チューン		クロマチシティ	
$\Delta \nu_x$	$\Delta \nu_y$	$\Delta \xi_x$	$\Delta \xi_y$
(計算値/測定値)	(計算値/測定値)	(計算値/測定値)	(計算値/測定値)
-0.069/0.032	0.062/0.078	-0.90/-0.6	0.81/0.6

## 4. 運転手順の決定

4T 励磁パターン試験、マルチポール測定結果に基づきユーザー運転の励磁手順を次のように決定した。(1) 蓄積リング 1.4GeV ビーム加速終了後、グローバル COD 補正を行い、励磁パターンに則ってメインポール、サイドポールの励磁を行う。(2) ウィグラー励磁終了後、LS2 両側のダブレット QFW、QDW によるチューン補償、6 極ファミリー SF, SD によるクロマチシティ補償を行なった後、グローバル COD 補償を行なう。また 255MeV から 1.4GeV への加速開始から、ウィグラー励磁後のグローバル COD 補正を終了するまでの間、Touschek 寿命によるビーム減少を抑制するためスキュー4 極(SFX13) を用いてカップリングを増大させている。最終的に SFX13 によって垂直ビームサイズをユーザー運転規定値(偏向電磁石 4 度ポートで  $\sigma_y \sim 60 \mu\text{m}$ ) に設定した後、ユーザー運転が開始される。

## 5. ウィグラー運用の現状

2010 年 11 月に正式にユーザーにウィグラー光提供を開始して以来、全てのユーザー運転においてウィグラーは運用されてきた。SAGA-LS は 1 日 10.5 時間の運転で LS2W は朝励磁し晩に消磁するサイクルで運転している。ユーザー運転における

LS2W に起因するビームトラブルは、制御系アクシデントによって 13 分間ユーザー運転開始時間が遅れた事例が 1 件あるのみで、ユーザー運転中断トラブルはこれまで発生していない。また GM 冷凍機も安定に運転している。4T 定常励磁状態で超伝導コイル温度は 4.4K 前後に保持されている。2011 年 7 月 1 日現在で冷凍機運転時間は約 11000 時間に達した。ウィグラー光の利用も進みこれまで中小放射光施設では困難もしくは不可能だった 20keV を超える領域で XAFS 等の研究に定常的に利用されている。ウィグラービームライン BL7 において BL7 グループによって観測されたスペクトルを図 5 に示す。

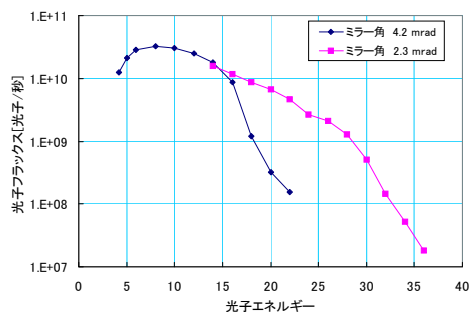


図 5: ウィグラービームライン BL7 斜入射ミラー下流で測定されたスペクトル (角度は斜入射ミラー角)。

## 6. まとめ

SAGA-LS においてハイブリッド型 3 極超伝導ウィグラーの立ち上げを行った。励磁はダイポール補償のみ行った。励磁中のマルチポールの効果は深刻ではなく、励磁後の補償で十分であった。立ち上げは 2010 年度 10 月までに終了し、同年 11 月以降これまで半年間、安定に運転されている。

## 謝辞

ウィグラー本体の製作、磁場測定に関して日立製作所の仙波氏をはじめとする製作関係者の方々に感謝します。ウィグラー光の観測データの提供について岡島氏をはじめとする SAGA-LS ビームライングループの方々に感謝します。

## 参考文献

- [1] S. Koda, et al, "Design of a Superconducting Wiggler for the Saga Light Source Storage Ring", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 21, 32 (2011).
- [2] 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).
- [3] P. Elleaume et al., "Computing 3D Magnetic Field from Insertion Devices", Proceedings of the Particle Accelerator Conference 97, 3509 (1995).
- [4] O. Chubar et al., "A 3D Magnetostatics Computer Code for Insertion Devices", Proceedings of the International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation 97, J. Synchrotron Rad, 5, 481, (1998).