

## DESIGN STUDY OF SUPERCONDUCTING WIGGLER FOR SAGA-LS STORAGE RING

Shigeru Koda<sup>1,A)</sup>, Yoshitaka Iwasaki<sup>A)</sup>, Yuichi Takabayashi<sup>A)</sup>, Tatsuo Kaneyasu<sup>A)</sup>,  
Tomoyuki Semba<sup>B)</sup>, Yukihiro Murata<sup>B)</sup>, Mitsushi Abe<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Saga Light Source

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

<sup>B)</sup> Hitachi, Ltd.

1-6-6, Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-8280

### Abstract

Design of a superconducting wiggler is proceeded at synchrotron radiation facility SAGA Light Source. Purpose of the wiggler development is to respond to request of X-ray users in higher photon energy region 20~40keV. The wiggler consists of a main-pole magnet of superconducting magnet (4 T), and two side-poles of normal conducting magnets (1 T) to compensate the beam orbit. Operation stability and maintenance cost were important to decide the wiggler specification. The main pole is directly cooled by a small GM cryocooler and liquid helium is not used for maintenance of superconducting. The main pole was designed to have return yokes along the beam axis to reduce effective field integral.

## SAGA-LSにおける超伝導ウィグラーの設計検討

### 1. はじめに

放射光施設SAGA-LSでは現在ハードX線源として偏向電磁石が用いられている。臨界エネルギーは1.9keV、光子エネルギー上限は利用実績で23keVである。このエネルギー上限からさらに高い40keV程度までの領域はパラジウム、銀等物質科学、材料開発等において重要な物質のK吸収端の領域にあたり、SAGA-LSにおいてこの領域の光源が求められていた。このニーズに応えるべく現在、蓄積リング長直線部LS2へ超伝導ウィグラーを設置する計画を進めている。間もなく設計が終了し製作が本格化する。本報告では開発の課題、設計検討の現状、今後の計画を報告する。

### 2. 設計条件及び課題

#### 2.1 光子エネルギーと磁場

ウィグラーの光子エネルギー下限は、現偏向電磁石光ビームラインの測定との連続性が求められ、20keV程度とした。上限については、前述のように重要元素の内殻励起を網羅するという観点から少なくとも40keV以上とした。

加速器側の条件として、熱負荷、ビームへの影響等から磁場強度は下げることが望まれた。図1にウィグラー磁場に対する臨界エネルギー ( $\epsilon_c$ ) 及びその10倍の光子エネルギーを示す。臨界エネルギー  $\epsilon_c$  に対し既設X線ラインの利用実績から  $10\epsilon_c$  程度まで利用可能とし、 $10\epsilon_c > 40\text{keV}$  の範囲でビ-

ムラインと加速器の条件の妥協点を検討し、ウィグラーの磁場は4T、臨界エネルギーを約5keVとした。

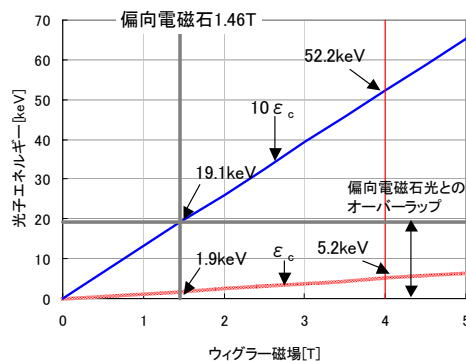


図1 ウィグラー磁場対光子エネルギー

#### 2.2 液体ヘリウムの課題

SAGA-LSに超伝導マグネットシステムを設置するにあたって液体ヘリウム供給体制が実務上の大きな課題となった。現在、国内には20-40keV領域の高エネルギー光子を供用している施設はSPring-8、KEKのみで、SAGA-LSで本ウィグラーが運用開始されると地域的に貴重なハードX線光源となる。そのため長期にわたる性能安定性、保守性及び低い維持コストが重要な条件となる。

SAGA-LSに極低温設備はなく、また九州内の液体ヘリウム事業所は限られており、高コスト (~

<sup>1</sup> E-mail: koda@saga-ls.jp

2000円/L)である。随時100Lオーダーの液体ヘリウムを安価に入手することは現実には困難である。

このような背景から液体ヘリウムを使用しない冷凍機系を検討し、放医研磁場実証試験用ウィグラー<sup>[1]</sup>、NSRRCのwave length shifter<sup>[2]</sup>及びALSのsuper bend<sup>[3]</sup>で実績のある、液体ヘリウム不要な小型GM冷凍機による直接冷却方式を採用することとした。

### 3 設計の現状

#### 3.1 概要

現在、磁石設計は終了しつつある。現時点での磁石構造及び仕様をそれぞれ図2、表1に示す。磁石設計にあたっては、ウィグラー光発光点が1つであることが利用側から要請され、メインポール1極、軌道補償用サイドポール2極の3極ウィグラーとした。磁石システムとしての特徴は図2に示したようにメインポール超伝導、サイドポール常伝導とするハイブリッド型としたことである。

超伝導マグネットをメインポールのみとした理由は冷凍機系の熱負荷軽減にある。超伝導コイルの電

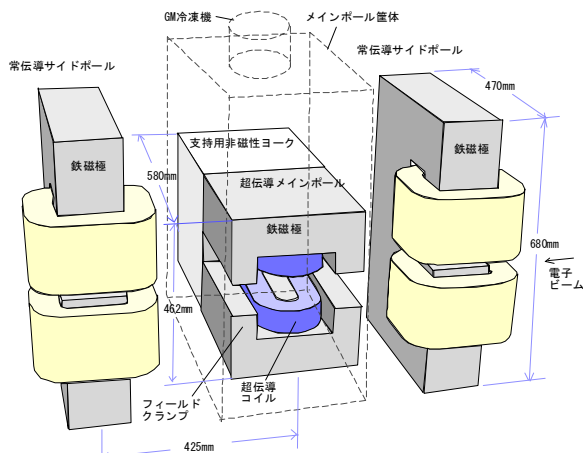


図2 ウィグラー磁石基本構成

流リードは熱侵入源としての寄与は大きい<sup>[2]</sup>。3極一体式超伝導ウィグラーに比べ、サイドポール用が不要となったことで、電流リードは半減し、加えて磁極支持構造による熱侵入も減少する。熱負荷の軽減は冷凍能力の余力を持つためにも重要である。SAGA-LSは低エネルギー入射(255MeV)であり、ウィグラーは1.4GeV蓄積後の励磁と再入射前の消磁が必要となる。運用上これに有する時間は出来るだけ短縮する必要がある。励磁消磁の際の発熱に対して十分な冷凍能力が必要となる。

メインポール用冷凍機にはNSRRC wave length shifter<sup>[2]</sup>、ALS super bend<sup>[3]</sup>で実績がある住重製SRDK-415(1.5W@4.2K, 45W@50K)を採用する予定である。冷凍機は機械的に磁極に接触する。このクラス

表1 ウィグラー基本仕様

メインポール		サイドポール	
磁石	超伝導	磁石	常伝導
台数	1	台数	1
磁場	4T	磁場	0.97T
コイル形状	レーストラック	磁極	純鉄
線材	NbTi	磁極間ギャップ	36mm
磁極	純鉄	起磁力	13.2 kAT
磁極間ギャップ	82 mm		
機械的ギャップ	35mm		
起磁力	450 kAT		
冷凍機	SRDK-415D		

の冷凍機はMRI等で多数使用されている規格品であり、冷凍能力に加え、運転安定性、メーカーサイドの安定な保守体制ということも大きなメリットとなる。

後節で示すようにメインポールの実効BL積を十分抑制することによって、サイドポール磁場は、鉄の飽和磁場以下とすることが出来、サイドポール磁石は通常の常伝導偏向電磁石に近いピーク磁場約1Tのコンパクトな仕様となった。

機械構造的にはメイン、サイドポールは独立した磁石となっており、どちらも蓄積リング外側に開いたC型ヨーク構造である。メインポールはウォームボアで、直線部真空ダクトはメインポール、サイドポールとは独立している。ビームダクト固定のまま、ウィグラー本体は蓄積リング内側通路方向に引き出し可能な架台構造とする。SAGA-LSでは天井クレーン吊上げ能力制限、蓄積リング長直線部の空間的制約が大きく、大型で重量のある挿入光源設置は制約が大きい<sup>[4]</sup>。分離構造によって搬入・搬出も容易となっている。

#### 3.2 メインポールの設計

設計上最も重要な課題はメインポールのピーク磁場4Tを保持しつつ、BL積を抑制することであった。BL積の低減は、超伝導コイル体積の縮小、ビーム軌道変位の抑制、不要なダクト内放射光照射低減及びサイドポールBL積の低減に寄与する。

BL積には設計上の上限と下限が存在した。上限については、ダクトアパーチャの制限からウィグラー磁場によるビーム軌道(発光点)の変位が制限されることで決まる。また下限については、ウィグラー光取り出しポートアパーチャで見込むウィグラー光が規定の臨界エネルギーであるためには、アパーチャが見込むメインポール下ビーム軌道上の磁場がピーク磁場近傍でなければならない。SAGA-LSの条件では許されるBL積の範囲はおよそ0.1Tm~0.7Tmであった。メインポールBL積はこの範囲で可能な限り低減させる方針で設計を進めた。

当初、単純なレーストラック型コイルと鉄心の構成でビーム軸方向のコイルと鉄心の厚みを減少させることを検討したが、厚みが減少するにしたがい漏れ磁場が増大し0.6Tm程度が限界であり、ビーム軌

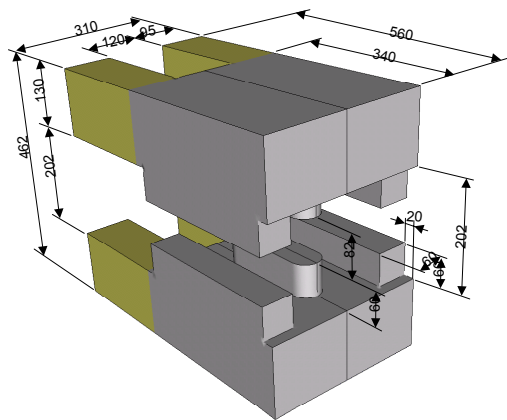


図3 メインポール磁極モデル

道変位がダクトアーチャで決まる限界に近かった。検討の結果、超伝導コイルは単純なレーストラックのままとし磁極設計を変更した。図3にメインポールの磁極構造を示す。ビーム軸方向両側に、メインポール中心部の主磁極に匹敵する大きさのフィールドクランプを設け、かつビームトランスバース方向にはリターンヨークを設けないデザインとした。これによりフィールドクランプはビーム軸方向のリターンヨークとして機能し、ビーム軸方向にメインポールの主磁場とは逆向きのアンダーシュート磁場が発生する(図4下参照)。このアンダーシュートによりメインポールの実効BL積を抑えることが出来る。各領域のBL積を表2に示す。これからメインポール中心部の磁場正の領域(図4参照)に対し、メインポール全体のBL積は23%低下したことがわかる。これによってピーク磁場4Tを保持し、実効BL積を押さえ、軌道変位は18mm程度に収まった(図4上参照)。

表2 メインポールBL積

BL積	
メインポール全体	0.37 Tm
主磁場 ( $B_y > 0$ ) の領域	0.48 Tm
アンダーシュート ( $B_y < 0$ ) 領域	-0.11 Tm
BL積比 全体/主磁場	77 %

#### 4. 今後の計画及び課題

現在、ウィグラー磁場のビームへの影響、サイドポール磁石系及びメインポール冷凍系の詳細設計を進めている。間もなくウィグラー本体の設計は終了し、本年後半には製作が本格化する予定である。またウィグラー光により蓄積リングの熱負荷が増大するため、ウィグラーから下流偏向電磁石までのビームダクトの交換を行う予定で、現在設計が進んでいる。

2010年2月までに真空ダクトの交換、3月にウィグラーの設置、4月に超伝導磁石立ち上げ試験を行

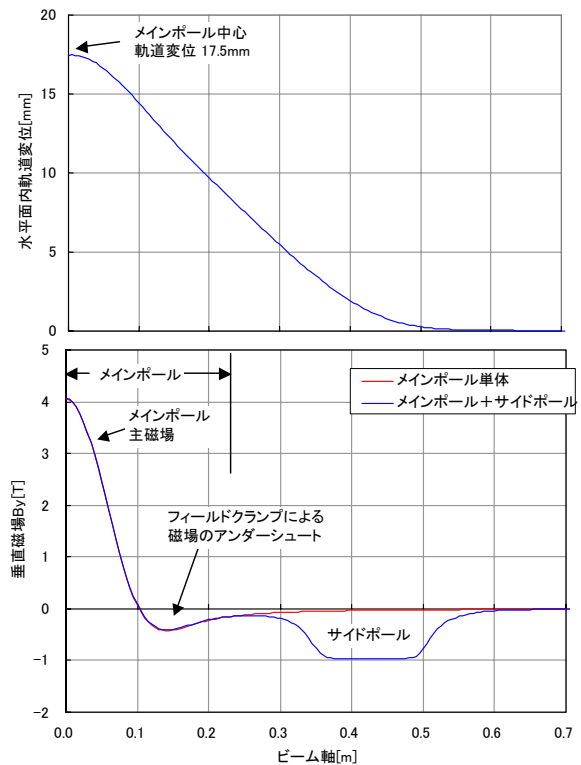


図4 ビーム軸上水平面内軌道変位(上)と垂直磁場分布(下)。原点はメインポール中心。

い、運用スタディを開始する予定である。

#### 5. まとめ

SAGA-LSにおいて4T超伝導ウィグラーの設計を進めている。メインポールのみ超伝導としサイドポールを常伝導とした。液体ヘリウムを使用しない小型GM冷凍機による直接冷却方式を採用した。メインポールの磁極設計ではフィールドクランプを用いてBL積を抑えつつ、4Tピーク磁場を実現する設計を行った。間もなく全系の設計が確定し製作が本格化する。2010年3月に蓄積リングに設置する計画である。

#### 参考文献

- [1] Sasaki, et al., "Development of Superconducting Wiggler at NIRS", Proceedings of EPAC2002, Paris, France, 2442, 2002
- [2] C.S. Hwang, et al., "Design and Construction Performance of a Compact Cryogen-Free Superconducting Wavelength Shifter", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 12, 686, 2002
- [3] D. Robin, et al., "Superbend upgrade on the Advanced Light Source", NIM A, 538, 65, 2005
- [4] 江田他, "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, 東大, 108, 2009