

# 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

江田茂<sup>1</sup>, 岩崎能尊<sup>1</sup>, 高林雄一<sup>1</sup>, 金安達夫<sup>1</sup>,  
仙波智行<sup>2</sup>, 山本勉<sup>2</sup>, 村田幸弘<sup>3</sup>, 阿部充志<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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八丁目 7 番地

<sup>2</sup>日立製作所日立事業所 〒317-8511 茨城県日立市幸町三丁目 1 番 1 号

<sup>3</sup>日立製作所日立研究所 〒319-1292 茨城県日立市大みか町七丁目 1 番 1 号

**要旨** 放射光施設 SAGA-LS では、超伝導及び常伝導マグネットから成るハイブリッドタイプの 3 極ウィグラーを開発した。これまで SAGA-LS ではハード X 光源として偏向電磁石が用いられてきた。その実効的な利用可能光子エネルギーの上限は約 23 keV であり、より高エネルギー領域の X 線が求められていた。本ウィグラーは、偏向電磁石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ことを目的に偏向電磁石光のエネルギー上限領域から 40 keV 程度までをカバーする光源として計画された。開発において目的の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となった。

超伝導マグネットの冷凍機システムの熱負荷軽減、コンパクト化を目的にウィグラーの 3 磁極のうちメインポールのみ超伝導とし、常伝導のサイドポール 2 台をクライオスタット外に配置する構成とした。典型的な一体型 3 極ウィグラーに比べこの構成は磁極間距離が増大し、これに伴い磁場の 2 次積分値が大きくなる。軌道変位は 2 次積分に比例するため、メインポール直下での放射光発光点の変位が大きくなり、光取り出しにおいて蓄積リングビームダクトとの干渉が問題となった。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。

液体ヘリウム設備のない 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運用するために冷凍機システムには液体ヘリウムを用いず、GM 冷凍機 1 台による超伝導コイルと磁極を直接冷却する伝導冷却方式を採用した。製作は 2009 年度に行われ、2010 年 3 月末に SAGA-LS 蓄積リング長直線部 LS2 に設置された。同年 5 月に初ビーム蓄積に成功し、その後実用運転のためのスタディを進めた。2010 年 11 月より通常のユーザー運転に繰り入れられた運用が開始され、2011 年 2 月現在、安定に運用されている。

## 1. 開発の経緯

九州シンクロトロン光研究センター (SAGA-LS) は、2006 年開所以来、九州地域における唯一の放射光施設として VUV からハード X 線領域にわたる放射光を提供してきた。SAGA-LS 蓄積リングのパラメータを **Table 1** に示す。ハード X 線源としてはこれまで臨界エネルギー約 2 keV の偏向電磁石光が利用されてきた。ハード X 線ビームライン BL11,15<sup>1)</sup> の利用実績としての光子エネルギー上限は、臨界エネルギーの約 12 倍 23 keV であった。

このエネルギー上限から 40 keV 程度までの領域にはパラジウム、ロジウム、銀等の物質科学、材料開発等において重要な物質の K 吸収端が集中している。この領域は SAGA-LS では事実上実験が不可能な領域であった。加えて 23 keV 以下の領域においても別の課題が残されてい

**Table 1** Parameters of SAGA-LS storage ring

Circumference	75.6 m
Stored beam energy	1.4 GeV
Bending field	1.46 T
Radiation loss	106 keV/turn
Critical energy	1.9 keV
RF frequency	499.8688 MHz
Cell number	8
Harmonic number	126
Betatron tune	$(\nu_x, \nu_y) = (5.796, 1.825)$
Emittance	25 nmr
Stored beam current	~300 mA
Ir	~1500 mAh
Length of long straight section	2.5 m

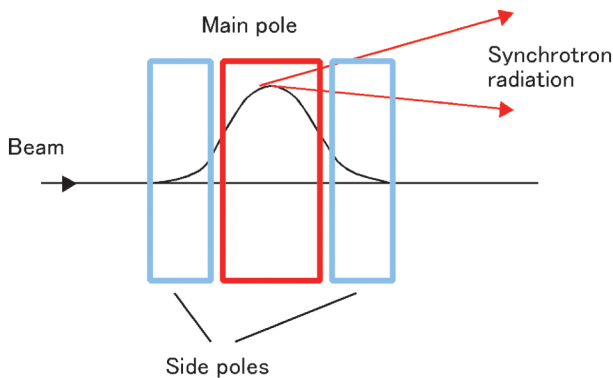


Fig. 1 Principle of three pole wiggler.

た。波長  $1 \text{ \AA}$  ( $12.4 \text{ keV}$ ) の領域はタンパク質 X 線結晶構造解析には大変有効であり<sup>2)</sup>、また  $1 \text{ \AA}$  以上の高エネルギー X 線は物質に対する透過能が高く、非破壊で物質内部を観察するのに適している<sup>3)</sup>が、偏向電磁石の臨界エネルギーを大きく超えたこれら領域では光子数の制限が大きくなり、実効的な応用研究のためには測定時間短縮等課題があった。

以上のような状況から SAGA-LS では地域における放射光源として偏向電磁石の限界を超え、より硬い X 線領域のニーズに応えることが重要な課題となっていた。このような経緯から SAGA-LS 加速器グループでは蓄積リング長直線部 LS2 に超伝導ウィグラー (SAGA-LS-SCW) を設置することが検討された。

Fig. 1 にウィグラーとして最も単純な 3 極タイプの基本構成を示す。目的の放射光を発生するメインポール磁石と、そのメインポール磁場によるビームの偏向を補償するために上下流部に配置されたサイドポールから構成される。高い臨界エネルギーを実現するためには超伝導電磁石が必要となる。

国内では  $20 \text{ keV}$  を超える領域での放射光供用は現在 SPring-8, KEK でしか行われておらず、SAGA-LS-SCW は地域において貴重なハード X 線光源となることが期待された。そのため実用性が高く、長期にわたる安定な運用性能を有することが強く望まれた。

## 2. 設計上の制約

SAGA-LS のような中小規模放射光施設において超伝導ウィグラーを開発運用するに当たっては、光源性能の実現もさることながら、実現した光源性能を長期にわたり安定に維持すること自体が大きな課題であった。中小施設では、超伝導システムを維持するインフラや人の体制といった実用上の制約を十分に検討しなければ、常用を前提とした安定な超伝導ウィグラーの実現は難しい。SAGA-LS-SCW のデザインを行う上では次に示す制約、課題があった。

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大きな問題となった。施設に液体ヘリウム設備はなく、また九州内の商用液体ヘリウム事業所は限られており、高コスト ( $\sim 2000 \text{ 円/L}$ ) であり、加えて大量の入手には事前の手配調整が必要であった。立ち上げやアクシデント等で必要に応じて数百リッターの液体ヘリウムが必要となる規模の超伝導マグネットの安定維持は SAGA-LS では現実には困難であった。また SAGA-LS では人的体制上ウィグラー運用維持のために専任者を置くことは難しく、また運転維持費の制約も大きかった。運用には人的物的コストを極力抑えることが重要となっていた。

加えて搬入設置においても制約があった。SAGA-LS の蓄積リング長直線部への大型重量物の搬入経路は、長直線部上部ハッチのみであり、搬入に利用できる実験ホール天井クレーンの最大吊り上げ重量は  $2.8 \text{ t}$  であった。製作費対設置費のバランスから搬入のための施設の改修、改造は難しく、大型の一体型機器の蓄積リング長直線部への搬入は大きな課題であった。過去の挿入光源 (アンジュレータ) 設置においては搬入の制約を機械設計に反映することも行われた<sup>4,5)</sup>。

## 3. デザイン

### 3.1 磁場強度の決定

ウィグラー光利用側からの要請として、実用上の発生光子のエネルギー上限は、前述のように重要な中重元素の内殻励起を網羅するという観点から  $40 \text{ keV}$  程度が求められた。またエネルギー下限については、現偏向電磁石光ビームライン BL11,15 における測定との連続性が求められ、数  $\text{keV}$  当りで偏向電磁石光のスペクトルとオーバーラップすることが望ましいとされた。

他方加速器側としては、ビームへの影響、熱負荷増大等から磁場強度を抑えることが望まれた。臨界エネルギー  $\epsilon_c$  の 10 倍程度が実用的な意味での利用領域上限とし、 $10 \epsilon_c > 40 \text{ keV}$  の範囲で利用側と加速器側の要求のバランスを検討し、磁場は  $4 \text{ T}$  (臨界エネルギー  $5.2 \text{ keV}$ ) とした。

### 3.2 基本構造

SAGA-LS-SCW の基本構造及びデザインパラメータをそれぞれ Fig. 2, Table 2 を示す (デザイン詳細については文献<sup>6-9)</sup>を参照)。磁極構造の決定に当たっては、利用側から発光点のプロファイルが単純であることを強く要請された。そのためマルチポール構成とせず、メインポール 1 台とメインポールによる軌道偏向を補償するためのサイドポール 2 台という 3 極構成を採用した。メインポールの磁場は下向きで、励磁によりビーム軌道はメインポール内で蓄積リング外側に変位する。機械構造的にはメインポール、サイドポールは独立した磁石となっており、サイド

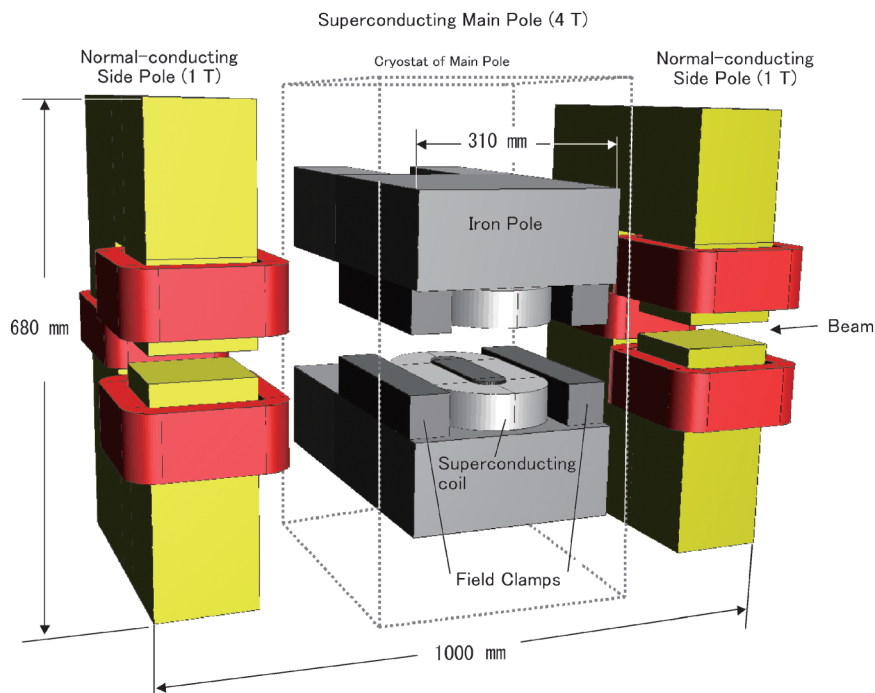


Fig. 2 Basic structure of SAGA-LS-SCW.

Table 2 Design parameters of SAGA-LS-SCW

Superconducting Main Pole	
Field	4 T
Coil material	NbTi/Cu
Pole material	Iron
Pole Gap	82 mm
Magnetomotive force	450 kAT
Current ( $I_p$ )	176.5 A
Maximum field in coil	6.1 T
Critical temperature@ $I_p$	6.7 K
Stored energy of coil	50.5 kJ
Turn number of coil	2549 turn/pole
Average current density	144.6 A/mm <sup>2</sup>
Cryocooler	
Type	SRDK-415D
Performance	
1st stage	45 W (50 K/60 Hz)
2nd stage	1.5 W (4.2 K/60 Hz)
Normal-conducting Side Pole	
Field	0.97 T
Pole material	Iron
Pole gap	36 mm
Magnetomotive force	14.7 kAT/pole
Current density	9.8 A/mm <sup>2</sup>

ポールは蓄積リング外側に開いた C 型ヨーク構造である。メインポールのみ超伝導マグネットでクライオスタット内に収納される。メインポールには鉄磁極を採用した。

磁極構造は後述するように磁場積分値を抑制するため、上下の磁極は非磁性 (SUS) の部材で支持され、磁気的な意味での C 型ヨーク構造ではない。また鉄磁極両端部には大きなフィールドクランプを設けている。メインポールのクライオスタットは C 型断面をしたウォームボア構造であり、メインポールとサイドポールは共に蓄積リング長直線部ビームダクトとは独立であり、蓄積リング内側作業通路側に手で引き出し可能となっている。メインポールの磁場を 4 T に抑えたことで、メインポール磁場を補償するサイドポールのピーク磁場も抑えられ、サイドポールは鉄の飽和磁場 (~2 T) 以下の磁場強度で十分となった。これによりコンパクトな通常の常伝導電磁石でサイドポールを実現することができた。

前述の液体ヘリウム供給体制の問題から、メインポールの冷却方式については、計画の早い段階で液体ヘリウムを用いないことを決定し、NSRRC の superconducting wave length shifter<sup>10)</sup>、ALS の超伝導偏向電磁石<sup>11)</sup>及び放医研の超伝導ウイグラー<sup>12)</sup>で実績がある、2 ステージタイプの Gifford-MacMahon (GM) 冷凍機で直接超伝導コイルと磁極を機械的接触で伝導冷却する方法を採用した。励磁方式については、蓄積リングが日々低エネルギー (255 MeV) で入射、1.4 GeV へ加速後蓄積という運転サイクルであるため、SAGA-LS-SCW も日々の励磁消磁が必要となり、メインポール励磁には永久電流モードは採用せず、電流リードによるクライオスタット外部からの励磁を行うこととした。

超伝導と常伝導のハイブリッド構成のメリットは、第一

に冷凍機システムの熱負荷の軽減にある。熱負荷軽減は長期にわたる安定運用において冷凍能力の余裕を確保しておくために必要である。これに加え SAGA-LS では日々の運転サイクルにおいてウィグラーの励磁消磁が必要であり、その際の発熱に対する冷凍能力の余力を持つことも必要であった。

定常状態での侵入熱の見積もりを **Table 3** に示す。超伝導コイルの電流リードは熱侵入経路としての寄与が大きい。クライオスタット内にサイドポールも収容された一般的な 3 極一体型超伝導ウィグラーに比べ、SAGA-LS-SCW はサイドポール用電流リードが不要となったことで、電流リード総数は半減し、加えてサイドポールの磁極支持構造による熱侵入もなくなった。**Table 2, 3** から定常状態での GM 冷凍機の第 1, 第 2 ステージの冷凍能力の余力はそれぞれ約 16 W, 1 W である。励磁, 消磁時の

AC ロス等の発熱に対してはこの余裕で耐えうると見積もられた<sup>8,9)</sup>。

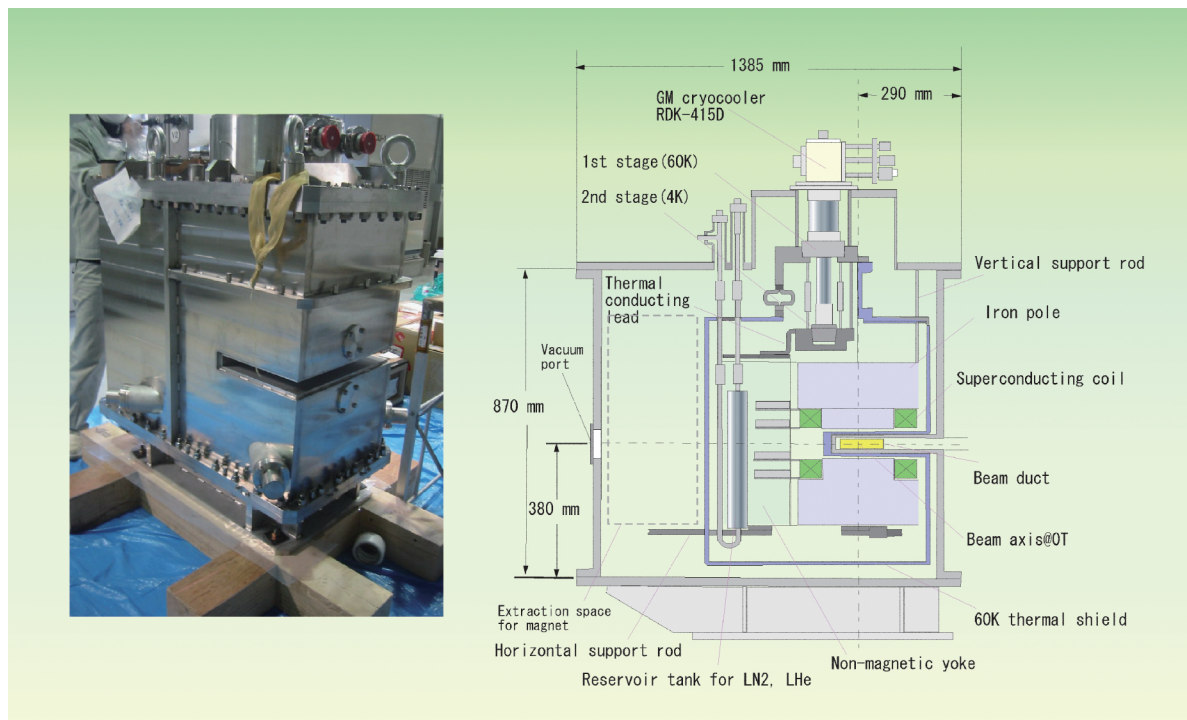
本構成の第二のメリットは搬入設置上の利便性である。メインポール 1 台とサイドポール 2 台が容易に分離可能である。そのため、設置時には十分な余力を持って現状の天井クレーンで分割設置が可能である (メインポール～1.7 t, サイドポール～0.5 t/1 台)。また修理, 改修のための搬出も容易に行える。

### 3.3 クライオスタット内部構造

**Fig. 3** にメインポールを収容するクライオスタットの外観と内部構造を示す。上部に GM 冷凍機のコールドヘッドを配置している。GM 冷凍機には NSRRC superconducting wave length shifter<sup>10)</sup>, ALS の超伝導偏向電磁石<sup>11)</sup> で実績がある住重製 SRDK-415 (**Table 2** 参照) を採用した。このクラスの冷凍機は商用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, 保守体制の点でも運用上のメリットがあった。冷凍機の推奨運転時間は 1 万時間であるため、年 1 回冷凍機を計画的に停止し交換・保守を行う。GM 冷凍機第 1 ステージは 60 K サーマルシールドに、第 2 ステージは、超伝導コイル, 鉄磁極及びリザーバータンクに接続されている。リザーバータンクは予冷時に、液体窒素や液体ヘリウムを充填し作業時間を短縮する可能性を考慮して、60 K サーマルシールド内磁極脇に配置した。

クライオスタット内部の大部分の領域は断熱真空となっ

First Stage (60 K)		Second Stage (4 K)	
Mechanical supports	1.85 W	Mechanical supports	0.03 W
Current leads (normal conducting)	20 W	Current leads (HTS)	0.2 W
Tubes and bellows	2.48 W	Tubes and bellows	0.13 W
Cables	0.23 W	Cables	0.02 W
Radiation	4.8 W	Radiation	0.074 W
<b>Total</b>	<b>29.4 W</b>	<b>Total</b>	<b>0.454 W</b>



**Fig. 3** External appearance (left) and cross section (right) of the main pole cryostat.

ている。コールドヘッドを納めた管構造内部及びリザーバータンク内のみ、外部ヘリウムガスボンベよりわずかに大気圧より正圧（10 kPa 程度）にしたヘリウムガスで満たされる。これは断熱真空のパーズを伴わず迅速なコールドヘッドの交換及びリザーバータンクが負圧になることによる空気の侵入を避けるためである。

### 3.4 メインポールのデザイン

磁極設計上重要な課題はメインポールのピーク磁場 4 T を保持しつつ、磁場の 1 次積分（BL 積）を抑制することであった。メインポールの BL 積の低減は、ビーム軌道変位（磁場 2 次積分）の抑制、ビームダクト内の不要な放射光照射の低減及びサイドポール BL 積の低減、ビームエミッタンス増加の抑制等、挿入光源としての様々な重要な要素に広く寄与する。

特にビーム軌道変位の抑制が重要となった。クライオスタット壁厚や、内部断熱層厚み、サイドポールのコイルスペース等によってビーム長軸方向においてメインポールとサイドポールの間隙は、一体型の 3 極ウィグラーに比べ増大せざるを得ない。メインポールとサイドポールの間隙が広がれば磁場の 2 次積分が増大する。ビーム軌道変位は 2 次積分に比例するため、一体型ウィグラーに比べ発光点でのビーム変位は増大する。当初検討した単純な C 型ヨークの鉄磁極とレーストラック型超伝導コイルの構成では、ウィグラー光の発光点となるメインポール直下の最大軌道変位が、ウィグラーを設置する長直線部 LS2 の下流 4 極電磁石のダクトアパーチャ（片幅 50 mm）に近い大きな変位となり、そのダクトの下流の偏向電磁石にあるウィグラー光取り出しポート（BM5 ゼロ度ポート）からの光取出しが困難であることがわかった。

検討をすすめた結果、Fig. 2 に示したようにメインポール鉄磁極にはビーム軸方向両端部に中心磁極相当の大きなフィールドクランプを設け、また磁気的な意味での C 型ヨーク構造をやめ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。Fig. 4 にフィールドクランプによる BL 積抑制の原理を示す。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、メインポールの中心磁場とは逆向きのアンダーシュート磁場が発生し、これによりメインポール全体の実効的な磁場積分を抑えることが出来る（Fig. 2 におけるメインポールの上下鉄磁極のトランスバース方向への張り出しは機械的支持のためのものでトランスバース方向への漏洩磁場の効果は無視できる）。Fig. 5 に磁極配置と磁場計算結果を示す（図の垂直磁場は下向きを正としている）。ビーム軌道上のメインポール各領域の BL 積内わけを Table 4 に示す。表からわかるように Fig. 5 のメインポール中心部の磁場正の領域に対し、メインポール全体の BL 積は 1/5 程度低下したことがわかる。これによってピーク磁場 4 T を保持しつつ、実効 BL 積を押さえ、軌道変位は約 17 mm に抑えら

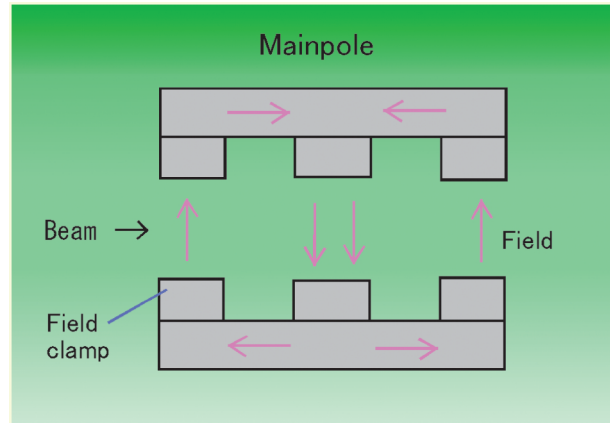


Fig. 4 Principle of field-integral reduction by the field clamps.

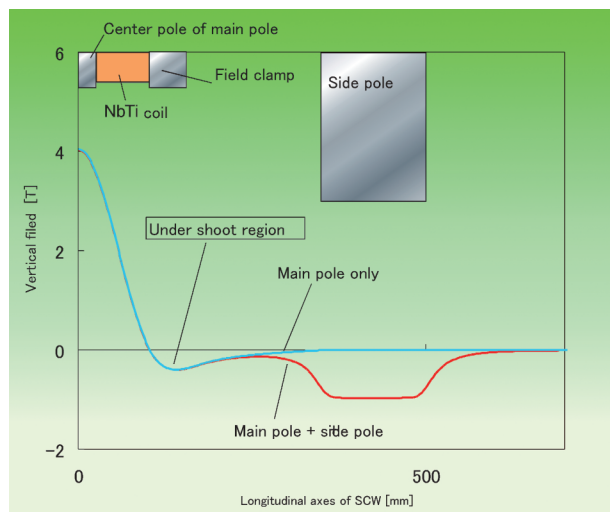


Fig. 5 Vertical-field distribution along longitudinal axis of the SCW.

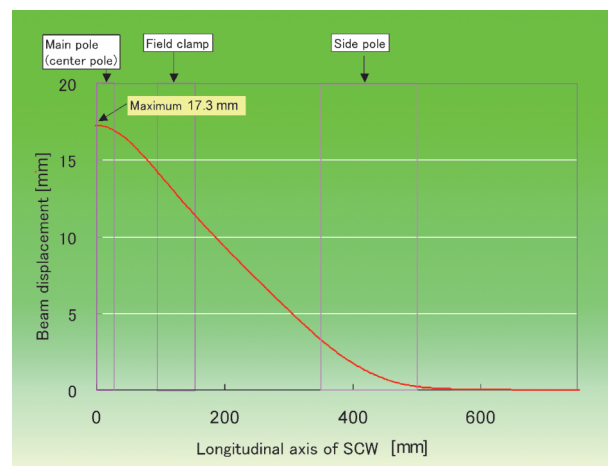
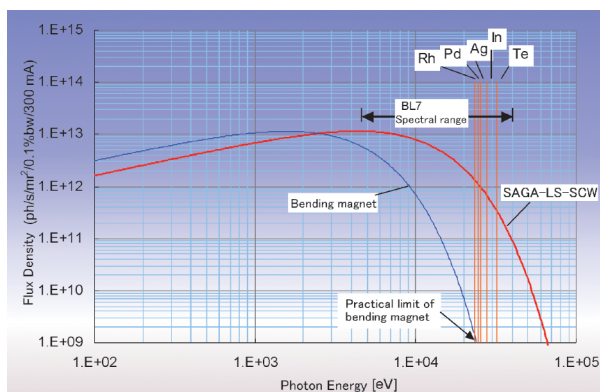


Fig. 6 Horizontal beam displacement at the SCW section.

れると見積もられた。この磁極構造の採用によってビーム軌道上の磁場多極成分は、単純な 3 極構成ウィグラーに

**Table 4** First field integral of the SCW

Total	0.39 Tm
Positive field area (B > 0 T)	0.47 Tm
Undershoot area (B < 0 T)	-0.08 Tm
Undershoot/positive field	18 %



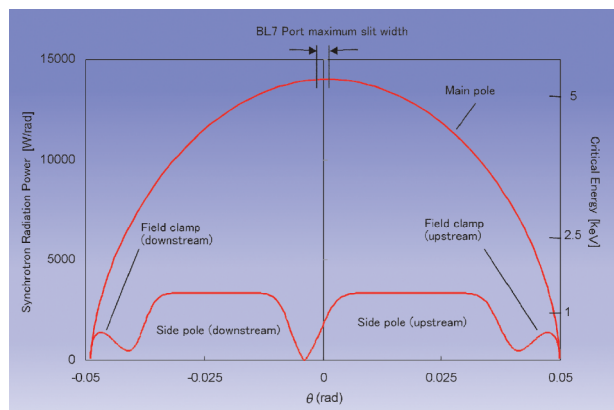
**Fig. 7** Spectrum of the SCW and the bending magnet.

比べて増大するが、ダイナミックアパーチャの縮小効果は大きくなく安定な蓄積が可能と判断した<sup>7)</sup>。ビーム軌道の計算結果を **Fig. 6** に示す。**Fig. 5, 6** 及び **Table 4** の磁場計算には Radia<sup>13,14)</sup> を用いた。この軌道変位にあわせてウィグラービームライン BL7 は、長直線部 LS2 の軸線から平行移動して設置された。

### 3.5 光源性能

**Fig. 7** にウィグラー、偏向電磁石のスペクトル計算及び重要な中重元素の K 吸収端エネルギーを示す。計算には SPECTRA<sup>15)</sup> を用いた。現状の偏向電磁石ビームライン BL11,15 の実効的な利用限界は前述のように 20 keV 付近である。図示されているようにこのエネルギー上限よりやや高エネルギーの領域に重要元素の K 端が集中している。この領域の SAGA-LS-SCW の光強度はフラックス密度にして偏向電磁石光の数倍から千倍程度に達する。タンパク質 X 線結晶構造解析等で有効な 12 keV 領域では、偏向電磁石光の約 10 倍となる。また利用の実効上限は 40 keV 程度と考えられた。

ウィグラー光のパワー分布計算を **Fig. 8** に示す。図はウィグラービームライン BL7 基幹部と加速器側の取り合い位置になっている BM5 偏向磁石ゼロ度ポートにおける放射パワーと臨界エネルギーの角度分布を示している。**Fig. 8** の水平軸は発光点の変位に合わせ、長直線部 LS2 のビーム軸に対して約 17 mm 蓄積リング外側にシフトした点を原点としている。**Table 5** にウィグラーの全放射パワーの内わけを示す。表からわかるようにサイドポールからの放射は 20% 程度である。一体型の典型的な超伝導 3



**Fig. 8** Angular distribution of radiation-power density of the SCW at BM5 (0deg) port.

**Table 5** Radiation power from the SCW

Magnet section	Radiation power* (W)
Main pole (without field clamps)	1045
Two field clamps	17
Two side poles	227
<b>Total</b>	<b>1289</b>

\* Stored beam current 300 mA

極ウィグラーに比べ不要な放射は抑えられている。

**Fig. 8** で示されているように BL7 の最上流部スリットで見込む範囲の光には 1/7 程度上流側サイドポールからの放射光が入っている。しかし、BL7 のベリリウム窓とグラフィートフィルターによって 5 keV 以下の光は減じられるため、BL7 に供給される光は実効的にいってほぼメインポールからの光と考えてよい。発光点が蓄積リング長直線部から平行にシフトしていることも考慮すると SAGA-LS-SCW の光はビームライン側では空間的にもスペクトル的にも単純なプロファイルを有すると考えられた。

## 4. 設置及びコミッショニング

2010年2月にウィグラー本体設置に先立って、LS2 及び下流 4 極ダブレット、偏向部 BM5 の真空ダクトの交換を行った。またこれと平行してウィグラービームライン BL7 の設置作業も開始された<sup>16-18)</sup>。

SAGA-LS-SCW 本体の製作は 2009 年度に日立製作所において行われた。2010 年 3 月に工場での励磁試験を終了し、同月末に蓄積リング長直線部 LS2 に設置された。設置作業においては当初の構想の通り分割設置することで、天井クレーンにより支障なく長直線部 LS2 に分割搬入された。搬入途中及び設置後の状況を **Fig. 9, 10** にそれぞれ示す。

設置作業終了後直ちに GM 冷凍機の運転を開始し、ほ

ぼ常温（ $\sim 300$  K）の状態から約8日で目標の4 K台に達した。5月上旬に始めての励磁試験を行い、4 T付近で一度クエンチした後再度の励磁で4 T励磁に成功した。そ

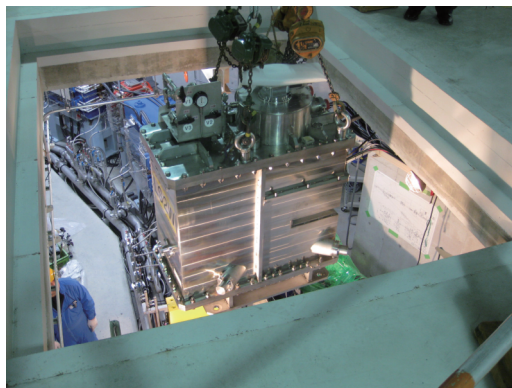


Fig. 9 Installation of the main pole via a ceiling hatch of the long straight section LS2 by an overhead crane.

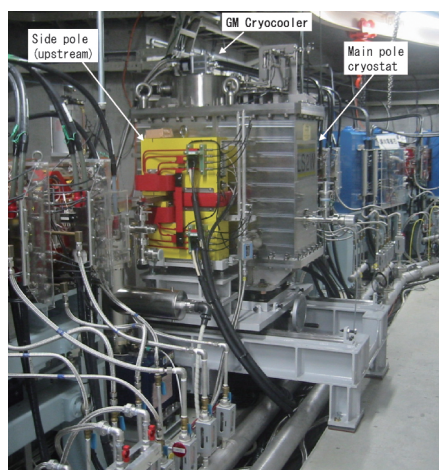
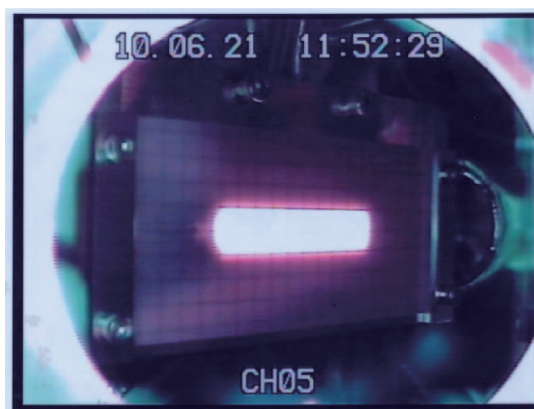
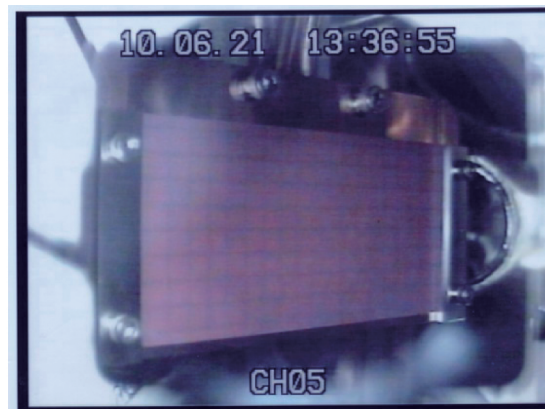


Fig. 10 SAGA-LS-SCW after installation.



4 T excitation



0 T

Fig. 11 First observation of the SCW light by a fluorescent plate at BL7 upstream section. Pictures of left and right correspond to field excitation and non-excitation of the SCW, respectively.

の後、週1回月曜のマシNSTAディでビームを用いた励磁試験を進めた。5月下旬に1.4 GeV 低電流蓄積状態で4 T励磁に成功した。

低電流蓄積が可能となった段階でLS2及びその下流の4極ダブレット及び偏向部のビームダクトのウィグラー光による焼きだしを開始した。6月下旬に低電流（ $\sim 3$  mA）蓄積状態において、BL7に初めてウィグラー光を導入し、BL7上流部ハッチ内に設置した蛍光板上で、ウィグラー光による蛍光が始めて観測された。その時の蛍光板モニター画像をFig. 11に示す。Fig. 11からわかるようにウィグラー非励磁状態では偏向電磁石由来の迷光は観測されず、4 T励磁状態では明瞭にウィグラー光が観測された。7月上旬には分光器試験において分光範囲の上限である37 keVの光が観測された。

その後さらに蓄積リング真空ダクトの光焼き出し、ウィグラー励磁スタディを進めた。8月下旬に1.4 GeV、300 mA蓄積状態において、4 T励磁と消磁をそれぞれ約15分間で行うことに成功し、ユーザー運転の準備が整った。11月1日付けでBL7に関連した文科省の施設変更検査に合格し、翌日より正式にユーザー運転におけるウィグラー光提供が開始された。同月中旬にはBL7におけるパイロットユースによるユーザー利用が開始された。

## 5. 運用の現状

メインポールのGM冷凍機は安定に極低温を保持しており、2010年3月末の起動以来、2011年2月現在までに運転時間は約8千時間に達した。その間、計画停電及びこの停電に先立って冷凍機停止試験を行った数時間のみしか冷凍機は停止していない。また2010年11月2日のユーザー運転開始以来、全てのユーザー運転日に運用されており、BL7に放射光を安定に提供し続けている。またこれまでSAGA-LS-SCWに起因するユーザー運転中のビー

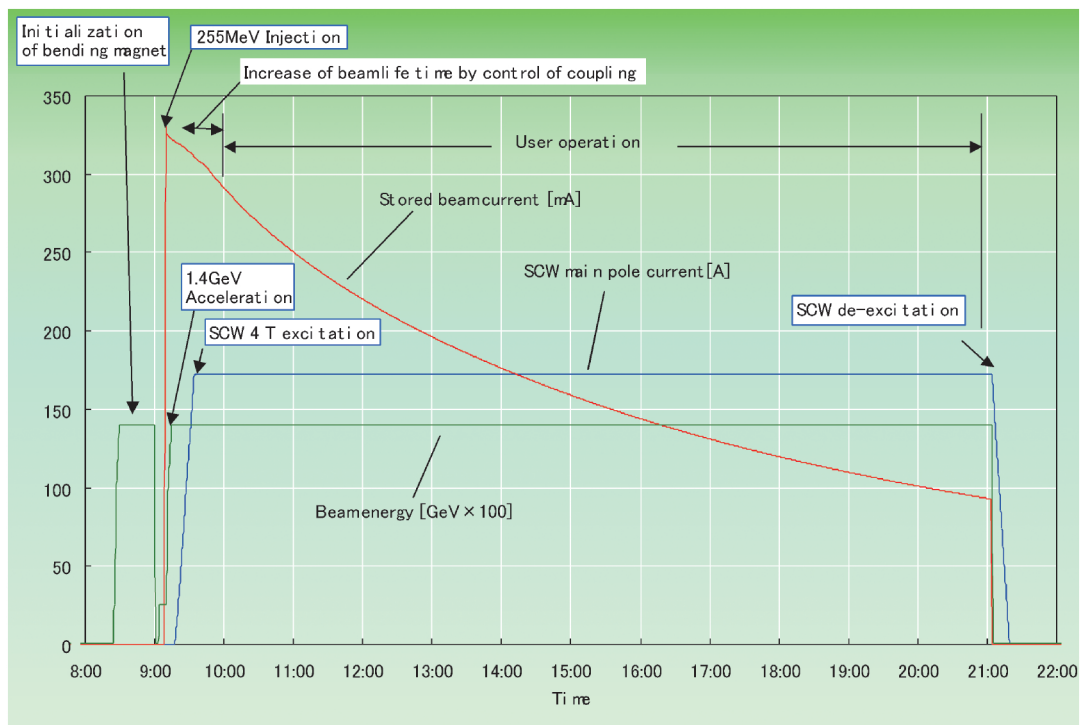


Fig. 12 Typical operation of SAGA-LS with the SCW.

ムトラブルは発生していない。ユーザー運転における典型的なウィグラー運用状況を Fig. 12 に示す。SAGA-LS では火曜から金曜の10:30~21:00がユーザー運転となっている(夜間、週末及び休日のユーザー運転は行わない)。SAGA-LS-SCWはこの加速器運転サイクルにあわせ、励磁消磁を1日に1回行う。朝、255 MeV リニアックから蓄積リングへ電子ビームを300mA強入射し1.4 GeV 加速後、SAGA-LS-SCWを0 Tから4 Tに励磁する。1.4 GeVへのビーム加速時及びSAGA-LS-SCW励磁途中のビーム電流の減少を抑制するため、ビーム加速からウィグラー励磁を経てユーザー利用開始までの間、ベータートロンカップリングを増大させ Touschek 寿命を増大させている。SAGA-LS-SCWの励磁は電流値を0 Aから定格(メインポール172 A)まで6点の直線補間パターンで行っている。励磁中の補正はウィグラーによる不整ダイポール磁場の補正のみで、4 T励磁終了後にウィグラー前後の4極ダブレット(QFW, QDW)によるベータートロンチューン補正、6極ファミリー(SF, SD)によるクロマチシティの補正、ステアリング磁石によるCOD補正及びスキュー4極(SFX13)によるカップリング補正を行っている。

## 6. まとめ

中小放射光施設で運用することを前提として、オペレーションコストを抑制し高い運用安定性を目標とした3極

ウィグラーを開発した。メインポール超伝導、サイドポール常伝導というハイブリッド構成により、冷凍機系の熱負荷の軽減を実現した。またメインポールとサイドポールの配置が離れたことによる軌道変位の増大を大型のフィールドクランプを使ったメインポール端部のアンダーシュート磁場によって抑制した。本ウィグラーによりSAGA-LSでは中小放射光施設では困難だった20~40 keV領域の放射光の提供を実現した。日々の励磁消磁を伴う運用において現在安定にユーザーにウィグラー光を提供している。

## 謝辞

SAGA-LS-SCW開発にあたっては超伝導マグネットに関わる様々の方々のご協力を頂きました。NSRRCのHwang氏には、NSRRC superconducting wavelength shifterについてご教示と実機の見学をさせていただき大変お世話になりました。放医研取越氏には放医研超伝導ウィグラーの見学と開発の詳細についてご教示いただきました。また現在名古屋大に移設されている放医研ウィグラーの試験及び中部シンクロトロン光利用施設プロジェクトにおいて計画されている超伝導偏向磁石に関してご教示いただいた分子研UVSOR加藤氏並びに名古屋大学シンクロトロン光研究センターの方々に感謝します。KEK-PF超伝導ウィグラーについてご教示いただいた大見氏、野上氏並びに超伝導マグネットシステムに関してアドバイスいただいたKEK土屋氏に感謝します。SAGA-LS-SCWからの放射光観測はSAGA-LSビームライングループの協力



により行うことが出来ました。岡島氏、河本氏をはじめとする BL7 関係者の協力に感謝します。

#### 参考文献

- 1) T. Okajima: "Present Status and Future Development of the SAGA Light Source", Proceedings of the 157th Meeting on X-Ray Studies on Mechanical Behavior of Materials, Kyoto, Japan, 16 (2009).
- 2) 河本正秀他: "SAGA-LS におけるタンパク質結晶の長は長回折実験の試み", 放射光 21, 194 (2008).
- 3) 隅谷和嗣他: "SAGA-LS における DEI 測定システム", 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, 134 (2009).
- 4) 江田茂他: "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).
- 5) 江田茂他: "放射光施設 SAGA-LS の現状と今後", 第 5 回日本加速器学会年会・第 33 回リニアック技術研究会報告集, 東広島, 616 (2008).
- 6) 江田茂他: "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 (2009).
- 7) S. Koda, *et al.*: "Design of a Superconducting Wiggler for the Saga Light Source Storage Ring", IEEE Transactions on Applied Superconductivity **21**, 32 (2011).
- 8) T. Semba, *et al.*: "Design and Manufacture of Superconducting Magnet for the Wiggler in SAGA-LS", Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, 358 (2010).
- 9) 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 (2010) to be published.
- 10) 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).
- 11) D. Robin, *et al.*: "Superbend Upgrade on the Advanced Light Source", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **538**, 65 (2005).
- 12) M. Sasaki, *et al.*: "Development of Superconducting Wiggler at NIRS", Proceedings of the European Particle Accelerator Conference 2002, Paris, France, 2442 (2002).
- 13) P. Elleaume, *et al.*: "Computing 3D Magnetic Field from Insertion Devices", Proceedings of the Particle Accelerator Conference **97**, 3509 (1995).
- 14) 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).
- 15) T. Tanaka, *et al.*: "SPECTRA: A Synchrotron Radiation Calculation Code", J. Synchrotron Radiation **8**, 1221 (2001).
- 16) M. Kawamoto, *et al.*: "The Design of Superconducting Wiggler Beamline BL7 at SAGA-LS", SRI 2009, 10th International Conference on Radiation Instrumentation. AIP Conference Proceedings **1234**, 355 (2010).
- 17) 河本正秀他: "SAGA-LS 超伝導ウィグラーを用いた高エネルギー X 線ビームラインの建設", 第 23 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, 姫路, 63 (2010).
- 18) 河本正秀他: "SAGA-LS バイオ・イメージングビームライン (BL07) の立ち上げと現状", 第 24 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, つくば, 126 (2011).

● 著者紹介 ●



**江田 茂**

九州シンクロtron光研究センター 加速器グループ グループ長(主任研究員)

E-mail: koda@saga-ls.jp

専門: 加速器科学

**【略歴】**

1996年九州大学大学院博士課程理学研究科修了。博士(理学)。放射線医学総合研究所客員研究員, 新技術事業団科学技術特別研究員, 分子研助手, 佐賀大助手, 同助教授を経て2007年より現職。



**岩崎能尊**

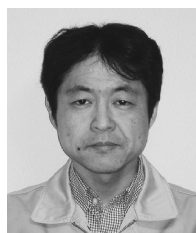
九州シンクロtron光研究センター 加速器グループ 副主任研究員

E-mail: iwasaki@saga-ls.jp

専門: 加速器

**【略歴】**

2001年3月佐賀大学大学院工学系研究科エネルギー物質科学終了, 理学博士。SAGA-LSのデザイン期よりプロジェクトに加わる。2001年4月より現職。



**高林雄一**

九州シンクロtron光研究センター 加速器グループ 副主任研究員

E-mail: takabayashi@saga-ls.jp

専門: 加速器物理, 放射線物理

**【略歴】**

2002年3月東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。博士(理学)。2002年8月広島大学VBL中核的研究機関研究員。2004年4月より現職。



**金安達夫**

九州シンクロtron光研究センター 加速器グループ 副主任研究員

E-mail: kaneyasu@saga-ls.jp

専門: 加速器科学

**【略歴】**

2004年東京都立大学大学院理学研究科博士課程修了。博士(理学)。東京大学大学院工学系研究科, 分子科学研究所極端紫外光研究施設での博士研究員を経て, 2008年より九州シンクロtron光研究センター研究員, 2009年より現職。



**仙波智行**

㈱日立製作所 日立事業所 医療・核装置生産本部 主任技師

E-mail: tomoyuki.semiba.au@hitachi.com

専門: 低温工学

**【略歴】**

1989年3月東京工業大学理工学研究科修士課程修了, 1989年4月㈱日立製作所入社。主に超伝導応用機器の設計に従事。博士(工学)。



**山本 勉**

㈱日立製作所 日立事業所 医療・核装置生産本部 主任技師

E-mail: tsutomu.yamamoto.pn@hitachi.com

専門: 超伝導工学

**【略歴】**

1992年3月京都大学理学部(物理系)卒業, 1992年4月㈱日立製作所入社。主に核融合プラズマ実験装置・超伝導応用機器の設計に従事。



**村田幸弘**

㈱日立製作所 日立研究所 主任研究員

E-mail: yukihiro.murata.sf@hitachi.com

専門: 電磁応用工学

**【略歴】**

2005年3月東京大学工学系研究科博士課程修了, 2005年4月㈱日立製作所入社。主に超伝導磁石設計に関する研究に従事。博士(工学)。



**阿部充志**

㈱日立製作所 日立研究所 技術主幹

E-mail: mitsushi.abe.pg@hitachi.com

専門: 電磁応用工学

**【略歴】**

1977年3月京都大学工学研究科修士課程修了, 1977年4月㈱日立製作所入社。主に電磁応用機器の電磁構造最適化, トカマクプラズマの実験的研究に従事。博士(工学)。

## Development and operation status of a hybrid type three pole wiggler that consists of a super- and normal-conducting magnets at SAGA-LS

Sigeru KODA<sup>1</sup>, Yoshitaka IWASAKI<sup>1</sup>, Yuichi TAKABAYASHI<sup>1</sup>,  
Tatsuo KANEYASU<sup>1</sup>, Tomoyuki SEMBA<sup>2</sup>, Tsutomu YAMAMOTO<sup>2</sup>,  
Yukihiko MURATA<sup>3</sup>, Mitsushi ABE<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Saga Light Source, Tosu, 841-005, Japan

<sup>2</sup>Hitachi Ltd., Hitachi Works, Hitachi, 317-8511, Japan

<sup>3</sup>Hitachi Ltd., Hitachi Research Lab., Hitachi, 319-1292, Japan

**Abstract** A hybrid type three-pole wiggler was newly developed and installed on the long straight section LS2 of SAGA-LS storage ring. The wiggler consists of a 4 T superconducting mainpole and two 1 T normal-conducting sidepoles. The wiggler generates hard X-rays in the energy range up to about 40 keV. Employment of normal-conducting side poles reduced the heat load on the cryogenic system of the wiggler. A cryogenic system of liquid helium-free was employed to ensure long-term operational stability of the wiggler system. The superconducting coil and iron poles of the main pole was cooled by a Gifford-McMahon cryocooler via mechanical contact. To suppress the magnetic first and second field integrals of the main pole, we designed the main pole with relatively large field clamps. This pole structure was effective in suppressing beam displacement. The wiggler was manufactured in FY2009 and was installed in late March 2010. The first light from the wiggler was observed in late June 2010. User operation of the wiggler started in November 2010. The wiggler has been stably operated until present (February 2011).

---