

MAGNETIC FIELD DESIGN FOR THE WIGGLER IN SAGA-LS

Mitsushi Abe^{1,A)}, Yukihiro Murata^{A)}, Takayoshi Seki^{A)}, Tomoyuki Semba^{B)},
Yoshitaka Iwasaki^{C)}, Yuichi Takabayashi^{C)}, Tatsuo Kaneyasu^{C)}, Shigeru Koda^{C)}

¹Hitachi Ltd., Energy and Environmental Systems Lab., Hitachi-shi, Ibaraki Japan

²Hitachi Ltd., Hitachi Works, Hitachi-shi, Ibaraki, Japan

³ Saga Light Source, Tosu-shi, Saga, Japan

Abstract

A superconducting magnet for a three pole wiggler, which is installed at the SAGA-LS storage ring, has been designed and been manufactured. The wiggler system consists of a superconducting main pole and two normal conducting side pole magnets. The peak magnetic field of the main pole is 4T, which enables to generate X-ray with over 20keV. To reduce the first and second field integrals of the main pole field, the main pole magnet was designed to have field clamps and have no transverse return yoke. The field clamps make negative magnetic field region at pole ends along the beam axis. Thereby the beam displacement at the main pole was suppressed to a value of 17 mm and volume of the side poles was reduced. Employment of the main pole enabled a compact high field wiggler.

SAGA-LS 放射光源用超伝導磁石の磁場設計

1. はじめに

放射光施設 SAGA-LS において、より高エネルギーの X 線発生を目的に 3 極タイプの 4T 超伝導ウィグラーが計画された^[1]。設計にあたってはコンパクトで全長を 1.5m 程度以下とし、1.4GeV の電子ビームの変位を 20mm 以下とする必要がある^[2]（前者は設置される長直線部の空間的制約で、後者はウィグラー下流のウィグラー放射光取り出しポートに至る蓄積リングビームダクトアパーチャによる制約である）。

一方、超伝導磁石の製作面からは 4T を発生する領域を広めとすれば、導体経験磁界を緩和でき、製作が容易となる。しかし、BL 積とビーム変位が大きくなり、利用系に放射光が届かない光源となる。

この矛盾を解決するために、

1) レーストラック型コイルで磁場発生領域をコンパクト化^[3,4]、

2) 鉄芯を利用してコイル導体負荷の低減、

3) 鉄芯の形状の工夫で BL 積低減、

を検討・最適化し、製作に至った^[4]。この磁場設計の過程を以下に述べる。

2. Wiggler の概要^[2,5]

本 Wiggler の概要を図 1、図 2、表 1 に示す。図 1 は全体概念図である。全長は 1.3m である。3 個の磁石で構成され、中心に超伝導コイル上下 1 対を持つメインポールがあり、両脇に常電導コイル上下 1 対を持つサイドポールがある。メインポールの中心部では 4T の磁場が発生され、この部分を通過する電子ビームから 20keV 超の X 線放射光が発生される。放射光を発生する電子は軌道を曲げられるため、もとの周回軌道に戻す役目を両脇のサイドポールが持つ。この様子は図 2 に模式的に示した。サイドポールは、メインポートとは逆方向の磁場で -0.97T

を発生する。2 種のポール共に鉄芯を用いている。

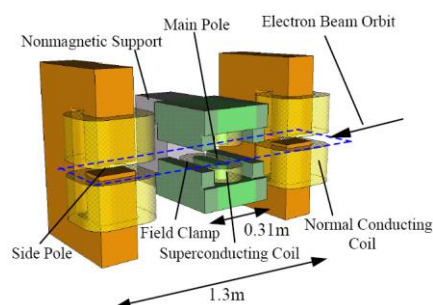


図 1 SAGA-LS 用 Wiggler の概観図

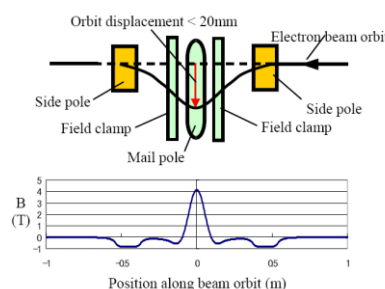


図 2 設計時の磁場分布とビーム軌道概念

表 1 : SAGA-LS Wiggler Specifications

	Main pole	Side poles
Conductor	NbTi/Cu Superconductor	Cu Normal conductor
Field strength	4.0T	-0.97T
Coil shape	Racetrack	Rectangular
Pole material	Pure iron (Cold)	Pure iron (Warm)
Current	450kAT	13.2kAT
Gap	35mm (Warm) 85mm (Cold)	36mm (Warm) -----
BL product	0.32Tm	0.16Tm x 2
Orbit displacement		17mm
Weight	2.1ton	1.0ton

¹ mitsushi.abe.pg@hitachi.com

電子ビームの軌道変位を 20mm 以下とするためには、メインポールの BL 積を 0.35Tm 程度以下とする必要があり、この実現が最大の工夫点である。これは前記 3) の検討項目であるが、1) と 2) の検討項目は主に安定な運転を維持するために検討する項目である。

3. 磁場設計

鉄芯により非線形磁場となり、鉄とコイルの形状の検討は試行錯誤的となった。その検討内容を本章では述べる。磁場解析には J-PARC 3GeV RCS の過渡非線形磁場解析にも用いた^[6]経験のある EMSolution^[7]を利用した。

3.1 コイル形状

鉄形状の検討に先立って、コイル形状を決めた。ビームに対して垂直方向、地面に対して水平な X 方向、言い換えると図 2 のビーム変位方向に対して、磁場一様性を確保するため、コイル形状はレーストラック型とした^[3,4]。その上で、(a)コイル巻き線断面形状、と(b)コイルのビーム方向幅を検討した。

前者では鉄芯を仮定して磁場計算を行った結果、ほぼ正方形断面のコイルが効率的(小起磁力で磁場発生)であると理解した。また後者では、125mm-185mm で検討した。狭幅でも BL 積は 0.45Tm 以上あり、単純な単ポールでは BL 積 0.35Tm の小 BL 積実現は不可能であることが解った。

3.2 鉄芯形状の工夫による BL 積低減

図 3 は前節の検討によるビーム軸上の磁場分布である。鉄芯は図のように C 型である。中心(座標原点)で 4T であるが、Z の±0.2m まで磁場が広がり、BL 積は大きい。しかし、原点から 0.2m 以上離れたら、磁場は逆転し BL 積を低減する効果を持っている。そこで、鉄芯を使ってこの逆転部分を積極的に BL 積低減に利用した。

図 4 には鉄芯の概念設計検討の過程を BL 積数値と共に示した。最左側には C 型鉄芯を対称条件利用で全体の 1/8 計算体系としている。この形状では前節記述のように BL 積は過大である。磁場の逆転(負磁場)を増強するために、コイルの両側(ビーム上下流側)にフィールドクランプ(FC)の鉄材を配置した図中央ではやや BL 積が下がるが、この配置では FC を厚くしても、BL 積は未だ過大であった。これは C 型の鉄形状を残しているために、戻りの磁力線の多くが C 型鉄芯の脚鉄部を通過するためである。

そこで、最右側図のように、C 型の脚鉄部を放棄し、鉄芯を上下で分割する配置とした。この場合、脚鉄は存在しないので、戻りの磁力線は負磁場をビーム軸上に発生することになり、BL 積を小さくできることが確認できた。図 5 には磁力線を模式的に矢印で示した。

3.3 鉄芯形状最適化による BL 積低減

次に、上下分割配置する鉄の形状を最適化する。前節の基礎検討では鉄芯空隙を 90mm としたが、実体系を反映して 80mm(最終的には 82mm)で検討する。また経験磁界も 6T 程度まで引き上げることを許容して、コイル及び鉄の幅を縮め、図 6 左の形状とした。さらに、ビーム軸上へ戻り磁力線を集中させ負磁場を強くして BL 積を低減するために FC の X 方向幅を狭くした(図 6 右)。その結果、BL 積は 0.297Tm まで小さく出来る事が解った。経験磁界は 6T 程度であり実現可能である。

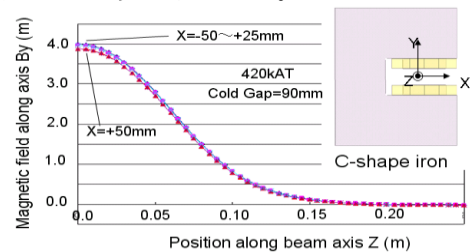


図 3 C 型鉄芯時のビーム軸に沿った磁場分布

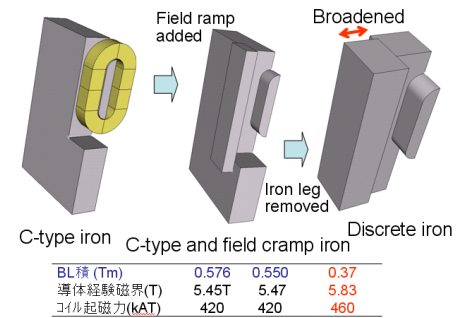


図 4 鉄芯タイプの検討過程

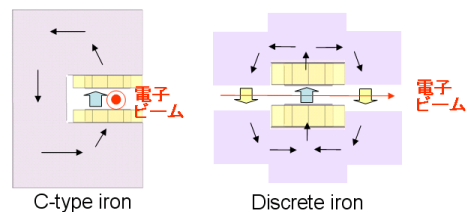


図 5 C 型と離散型の鉄芯体系での磁力線の比較

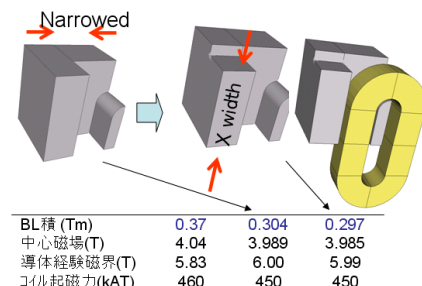


図 6 鉄芯形状の最適化過程

3.4 鉄芯支持構造の反映

鉄芯はコイル励磁で磁化され、上下の鉄芯は強く引き合う(121kN)。この電磁力に対する支持構造を反映した鉄形状を最終的な製作形状とする。

図 7 は支持構造を反映した鉄形状である。鉄棒を

延長し、上下の延長棒の間に非磁性 SS 製の支持部材を配置して片持ち梁として支える。また、磁石全体の配置を反映して 82mm 鉄芯空隙とし、コイルの断面を 50.7mm 高 x61.5mm 水平幅の扁平断面とした。

延長棒は図 7 のように磁力線を戻す効果もあるために、ビーム軸上の負磁場はやや弱くなる。このために表 3 のように BL 積は 0.32Tm に増加した。しかし、ビーム変位は 17mm であり、許容できる。

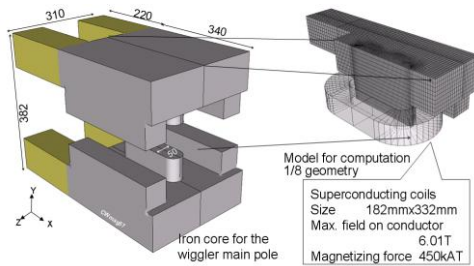


図 7 最終的に決定した Wiggler の鉄芯形状

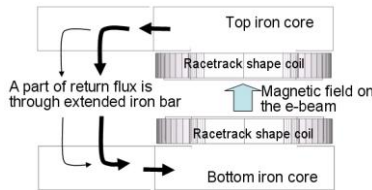


図 8 支持構造用に延長した鉄棒経由の磁力線

3.5 励磁時の発熱

以上の検討で、静磁場としては実現できる見通しがあったが、励磁時間を検討しておく必要がある。SAGA-LS では 20 分以内の励磁を考えている。設計した磁場を発生するには、鉄芯を積層することは出来ない。このような鉄芯には渦電流による発熱が心配される。そこで、発熱量を計算した。

図 9 は、左に 1200 秒(20 分)励磁中の中心磁場強度をコイルと鉄の寄与に分けて示し、右に鉄芯発熱量を示す。励磁初期(<60 秒)に大きな発熱があるが、その後の発熱は少ない。励磁初期には下側図のように表皮効果で渦電流が表面付近に集中し電流密度が大きい。一方、60 秒から後ではポール全体に電流が流れ、電流密度が下がり、発熱も減少する。

発熱量のまとめを 20 分での励磁・消磁について表 2 に示した。伝導冷却用の銅板の渦電流発熱は小さくなるようにスリットを入れている。平均発熱量は励磁で 0.23W、消磁で 0.11W であり、冷凍機容量 1.5W に比べて小さく、20 分での励消磁は可能であると言える。励磁初期の 0.94W および消磁末期の 1.28W の発熱はやや大きいため、鉄芯とコイルは緩やかな断熱構造を採るようにした。

表 2(a) 励磁時の極低温部発熱

部位	最大(W)	平均(W)	発熱量(J)
鉄芯	0.94	0.23	275
ステンレス柱	1.64E-4	6.85E-5	0.082
Cu 冷却板	5.23E-3	3.89E-3	4.7

表 2(b) 消磁時の極低温部発熱

部位	最大(W)	平均(W)	発熱量(J)
鉄芯	1.28	0.113	135
ステンレス柱	1.68E-4	6.37E-5	0.076
Cu 冷却板	5.41E-3	4.13E-3	4.96

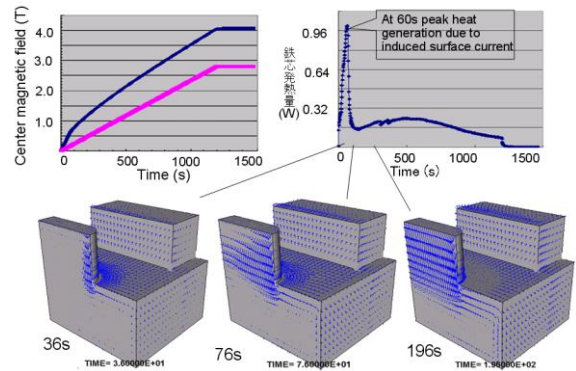


図 9 励磁時の過渡磁場解析と渦電流発熱量
上左：中心の磁場強度、下側の線はコイルのみで発生する磁場強度、上右；鉄芯発熱(W)の時間変化、下側図は 1/8 体系で渦電流分布を密度ベクトルで示す。

4. まとめ

本 Wiggler は 2010 年 3 月末に完成、冷却・励磁され、設計通りの磁場分布を持つことが確認された(図 10)。2010 年度より SAGA-LS 蓄積リングに挿入されて、20keV 超の X 線発生を確認し、運用に向けた調整を行っている。

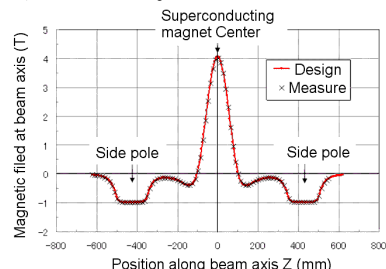


図 10 ビーム軸に沿った磁場分布の比較

参考文献

- [1] S. Koda, et al., "Feasibility Study on Introducing a Superconducting Wiggler to Saga Light Source", Proceedings of PAC05, Knoxville, TN, USA, pp.1021, 2005
- [2] S.Koda, et al., "Progress and Status of Synchrotron Radiation Facility SAGA Light Source", IPAC10, Kyoto, Japan 2010 in press.
- [3] C.S. Hwang, et al., "Design and Construction Performance of a Compact Cryogen-Free Superconducting Wavelength Shifter", IEEE Trans. on Applied Supercond., **12**, 686, 2002
- [4] D. Robin, et al., "Superbend upgrade on the Advanced Light Source", NIM A, 538, 65, 2005
- [5] T. Semba, et al., "Design and Manufacture of Superconducting Magnet for the wiggler in SAGA-LS", IPAC10, Kyoto, Japan 2010 in press.
- [6] M. Abe, et al., Transient Electromagnetic Analysis and Thermal Design on the Magnet of 3-GeV Synchrotron, EPAC08 WEPC138, Genoa, Jun, 2008.
- [7] EMSolution, <http://www.ssil.com/em/EMSolution/>