

ハイブリッド型超伝導3極ウィグラーにおけるエッジ放射の数値計算による検討

NUMERICAL STUDY OF EDGE RADIATION OF A HYBRID SUPERCONDUCTING THREE POLE WIGGLER

江田茂[#], 岩崎能尊, 高林雄一、金安達夫
 Shigeru Koda[#], Yoshitaka Iwasaki, Yuichi Takabayashi, Tatsuo Kaneyasu
 SAGA Light Source

Abstract

Radiation properties of a hybrid superconducting three pole wiggler SAGA-LS-SCW in low photon energy region was numerically studied in viewpoint of edge radiation. The wiggler consisted of a superconducting main pole and two normal conducting side poles. We investigated possibility of peculiar radiation due to edge radiation effects between the isolated wiggler poles and between the wiggler and the bending magnets of the storage ring. Result of numerical calculation suggested presence of characteristic radiation. The photon intensity in angular width $\sim 1/\gamma$ at the downstream of the beam axis was larger than radiation of a simple bending magnet and of the typical edge radiation of two bending magnets in ~ 10 eV region. Compared with the typical edge radiation, transverse distribution of the radiation was complicated and was sensitive to the photon energy.

1. はじめに

硬 X 線発生を目的に開発したピーク磁場 4T のハイブリッド型 3 極超伝導ウィグラー SAGA-LS-SCW[1,2]において、エッジ放射(edge radiation)の観点から長波長領域における放射特性を検討した。後述の議論のため、まず典型的な 2 偏向磁石 (以下 2BM) におけるエッジ放射について紹介する。2BM 型エッジ放射は、電子蓄積リングにおいて可視-赤外域の興味深い放射である。その磁石構成は、単に直線部によって隔てられた 2 つの偏向磁石から成り

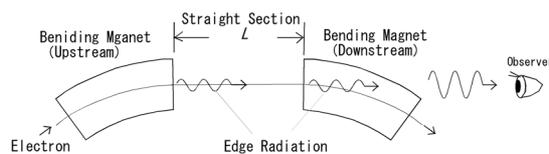


Figure 1: Edge radiation generated by two bending magnets.

(Figure 1 参照)、エッジ放射はこれらの端部からの放射光の干渉によって発生する。単体の偏向磁石からの放射光に比べ、長波長領域で、広がり角が狭く ($\theta \sim 1/\gamma$) ビーム軸近傍でのピーク輝度は高い。磁石構成は単純であり、長波長域の高輝度光を発生する手法としてユニークである。また電子蓄積リングにはこのような磁石配置は随所に見られる。そのため、これまで放射原理[3]から赤外ビームライン建設[4,5]まで基礎から応用にわたり広く研究が行われてきた。

他方、放射光施設 SAGA-LS では 4keV~40keV の硬 X 線発生を目的に強磁場 (4T) の超伝導-常伝導ハイブリッド型 3 極ウィグラー SAGA-LS-SCW を開

[#] koda@saga-ls.jp

発した[1,2]。その磁極構造を Figure 2 に示す。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、サイドポール 2 台を常伝導磁石とした。メインポール、サイドポール間距離は典型的なウィグラーに比べ離れており、離散的な複数の端部を有する。エッジ放射の定性的議論からこの端部配置に注目し、放射光計算コードを用いて数値的に SAGA-LS-SCW の長波長領域における放射を計算し、単純な偏向磁石とは異なる固有の放射特性を有する可能性について検討した。以下では動機となった定性的検討と実際の数値計算の結果を報告する。

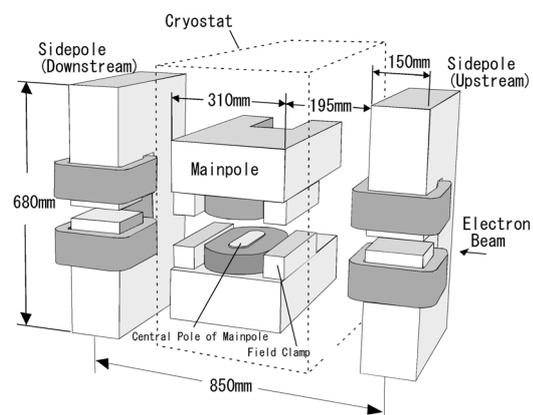


Figure 2: Magnet structure of the hybrid three pole superconducting wiggler SAGA-LS-SCW.

2. 定性的検討

2.1 二偏向磁石型エッジ放射

SAGA-LS-SCW におけるエッジ放射を検討するた

め、まず文献[3]に基づいて、基本となる 2BM 型エッジ放射について議論する。Figure 1 に示した二つの偏向磁石面間距離 L をゼロから次第に大きくすると、二つの偏向磁石からの放射光は、電子と光子の到達時間の差から下流の観測者から見て同一の偏向磁石光源と見なされなくなる特徴的距離 formation length[1] が存在する。この距離は

$$L_f = \sqrt[3]{R^2 \lambda / (2\pi)} \quad (1)$$

で与えられる。ここで R , λ はそれぞれ軌道の曲率半径、放射光波長である。この L_f より直線部長さ L が十分大きいとエッジ放射が明瞭となる。

後述の議論のため、SAGA-LS 蓄積リングのウィグラーの設置されていない長直線部での 2BM 型エッジ放射を検討する。2 偏向磁石間距離 $L=5.5\text{m}$ に対して、 $L_f \sim 10\text{mm}$ ($R=3.2\text{m}$, $\lambda=600\text{nm}$) となり、可視域では 2 偏向磁石間距離は L_f の 500 倍程度と十分に長く、SAGA-LS 直線部は、典型的なエッジ放射条件を満たしている。事実、2BM 型エッジ放射は挿入光源のない直線部下流ポートで明瞭に目視で観測されている。

2.2 SAGA-LS-SCW におけるエッジ放射

2 偏向磁石によるエッジ放射は Figure 1 の下流偏向磁石の磁場方向が逆であっても同様に発生する。そこで Figure 2 に示した SAGA-LS-SCW の磁極構造において、対向するメインポール-サイドポール端部間を 2 偏向磁石の端部にとらえ、これら端部に対して大まかな formation length を見積もることを考える。対向するメインポール中央磁極端部-サイドポール面間距離 324.5mm を端部間距離 L として 2BM 型の実効的な formation length を考える。メインポールとサイドポールのピーク磁場(それぞれ 4T、1T)の平均に対する曲率半径 2.7m を R として(1)式を計算すると $L_f \sim 7\text{mm}$ ($R=1.9\text{m}$, $\lambda=600\text{nm}$) となり磁極間距離は、formation length に比べ 47 倍程度大きく、エッジ放射の可能性はある。SAGA-LS-SCW の磁場が蓄積リング偏向磁石より強く (R 小)、またハイブリッド型であるために比較的磁極間距離が大きい (L 大) ことにより、磁極間距離が formation length より有意に大きくなっている。また同様にウィグラー

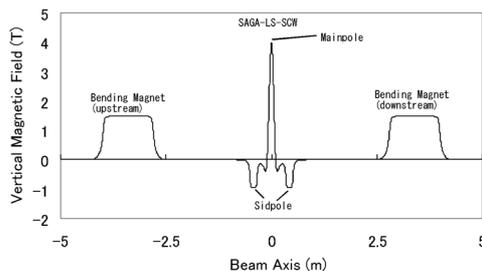


Figure 3: Distribution of vertical magnetic field of the hybrid wiggler and the up and down stream bending magnets on the storage ring.

を設置した直線部両側の偏向電磁石と、これに対向するサイドポール磁極面間で formation length を考えると $L_f \sim 11\text{mm}$ ($R=3.89\text{m}$, $\lambda=600\text{nm}$) で面間距離より約 200 倍大きい。

以上のことからウィグラー本体及び上流下流偏向磁石-ウィグラー間でエッジ放射の条件を満たしている可能性があり、SAGA-LS-SCW 固有の複合的なエッジ放射が発生している可能性があると考えた。

3. 数値計算

3.1 計算条件

現状の蓄積リングの 2 偏向磁石 BM04, BM05 間中央に SAGA-LS-SCW が配置された条件で放射光計算を行った。計算には SRW[6]を用いた。Twiss パラメータ、水平エミッタンスはデザイン値、カップリングは現状の値(1.4%)を採用した。偏向電磁石の磁場分布は、磁石製作時の磁場測定値($I=530.0\text{A}$)から比例補正して現状の 1.4GeV 相当電流 ($I=539.3\text{A}$) における磁場分布に換算し、現実のフリンジ効果を反映した。また SAGA-LS-SCW については、製作時の磁場分布測定で電流値を補正した実効的 3 次元磁場モデルを用いて 4T 励磁条件における磁場分布を計算した。ビーム軌道上の磁場分布を Figure 3 に示す。計算に用いた SRW では、磁場分布としてダイポール磁場のみ考慮している。今回の計算では BM04, 05 間に二組設置されている 4 極ダブレット (QF1-QD1) の効果は考慮していない。

3.2 計算結果

スペクトル計算結果を Figure 4 に示す。図は 2 偏向磁石 BM04, 05 間中央に SAGA-LS-SCW を設置した磁場条件 (以下 BM04-SCW-BM05)、BM04, 05 のみの条件(以下 BM04-BM05)及び SAGA-LS-SCW の 4T ピーク磁場の位置に単純な 4T 偏向磁石を置いた条件(以下 4T-Simple-BM)それぞれの計算結果を示している。Figure 4 において BM04-SCW-BM05, BM04-BM05 における flux density は、直線部中央を発光点として直線部下流 10m の観測点において光軸中心から $\pm 1/\gamma$ 内の平均光子数から計算した。図からわかるように BM04-SCW-BM05 の放射は、光

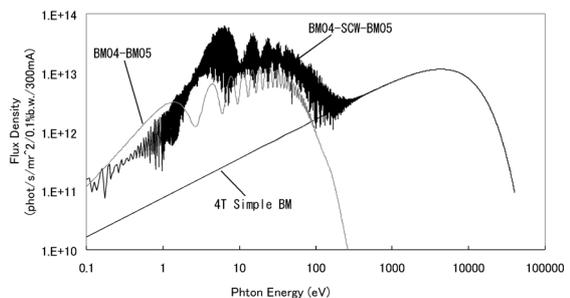


Figure 4: Calculated spectrum in case of the wiggler and the two bending magnets (BM04-SCW-BM05), the two bending magnets (BM04-BM05) and a simple 4T bending magnet (4T Simple BM).

光子エネルギー10eV 前後の領域で、単純な 4T 偏向磁石に比べ二桁程度強く、2BM 型エッジ放射に比べても一桁大きい。またそのスペクトルは赤外から EUV に及び、2BM 型に比べ若干高エネルギー側にシフトしているように見える。また flux density が光子エネルギーに依存して 2BM 型に比べ大きく変動している。観測点における放射強度の空間分布を Figure 5 に示す。数 eV 領域では光子エネルギーに依存した複雑な空間分布を有していることがわかる。

4. 考察及び課題

計算結果から BM04-SCW-BM05 の磁石配置は長波長領域で固有の放射を発生していると考えられる。特に可視から紫外域においては、光軸近傍の光強度は単体偏向磁石のみならず 2 偏向磁石型エッジ放射に比べても高く、また複雑な空間分布を持っている。硬 X 領域も含めて総合的に考えると SAGA-LS-SCW は 1eV~数十 keV までの非常に広いエネルギー範囲で放射光を発生していると考えられる。

計算結果の検証は可視域-紫外域の光学観測が可能であれば直接かつ容易に行える。現在、SAGA-LS-SCW 下流に可視域観測ポートはなく、検証の上で観測ポート設置は重要と考えている。

現時点では、定性的な考察と SRW による計算との間に理解の大きな隔りがある。スペクトル構造や空間分布における、各磁極の寄与やそれらの干渉の効果について理解するために理論的モデルが必要である。直線部に少数磁極の強磁場挿入光源を配置した条件のエッジ放射モデル構築が課題である。また光強度、帯域やスペクトル構造について新しいタイプの光源として磁石配置最適化の余地があるか興味あるところである。

今回の計算では 2 偏向磁石間の 4 極の効果は入っていない。放射に関わる各磁極間距離が長く、その間のベータatron関数も大きく変化するため、放射計算における 4 極の寄与についての検討も今後の課題である。

5 まとめ

SAGA-LS 蓄積リング長直線部に設置した硬 X 線発生用ハイブリッド型 3 極超伝導ウイグラーにおいて、エッジ放射の観点から長波長領域の放射光特性について検討した。2 偏向型エッジ放射モデルの定性的な考察からウイグラー本体及びウイグラー-上下流偏向磁石間のエッジ放射の可能性を議論した。2 偏向磁石間に設置されたウイグラーにおける放射光の数値計算を行い、長波長域で、ビーム軸近傍での高い光強度と複雑な強度分布を有するという結果が得られた。今後、光学観測による検証、理論モデルの構築が課題である。

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, 32-38, 2011
 [2] 江田他," SAGA-LS における超伝導及び常伝導マグ

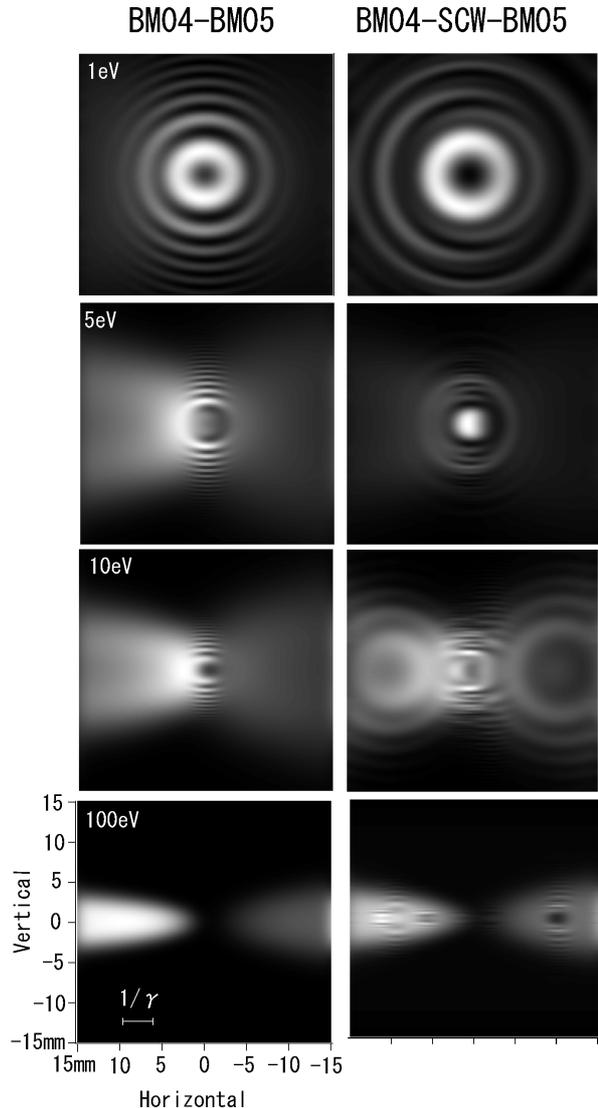


Figure 5: Calculation results of radiation intensity distribution in case of the two bending magnets and the wiggler BM04-SCW-BM05 (right) and of the two bending magnets BM04-BM05 (left). The distribution images are individually normalized by the maximum and minimum values of the intensities (phot/s/mm²/0.1%b.w.).

ネットから成るハイブリッド型 3 極ウイグラーの開発と運用状況”, 放射光, 24, 141-151, 2011
 [3] G. Geloni, et al., "Theory of edge radiation. Part I: Foundations and basic applications", NIM A, 605, 409-429, 2009
 [4] J. Ablett, et al., "NSLS-II Conceptual Design Report", Brookhaven National Laboratory, 8-16, 8-20, 2006
 [5] V.N. Korchuganov, et al., "Edge Radiation at SIBERIA-2 Storage Ring", Proceedings of RuPAC 2008, Zvenigorod, Russia, 146-150, 2008
 [6] O. Chubar, P. Elleaume, "Accurate And Efficient Computation Of Synchrotron Radiation In The Near Field Region", Proceedings of EPAC98, June, 1177-1179, 1998