

小型放射光源における放射線発生の研究

RESEARCH ON RADIATION GENERATION FROM COMPACT SYNCHROTRON RADIATION SOURCES

村山瑠渚^{#,A)}, Christian John^{C)}, 島田美帆^{B,C)}, 宮内洋司^{B,C)}, 加藤政博^{C,D)}

Runa Murayama^{#,A)}, John Christian^{C)}, Miho Shimada^{B,C)}, Hiroshi Miyauchi^{B,C)}, Masahiro Katoh^{C,D)}

^{A)} Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University

^{B)} KEK

^{C)} HiSOR

^{D)} UVSOR

Abstract

HiSOR was constructed in the 1990's and has been operating for nearly 30 years as a low-energy synchrotron light source specializing in the vacuum ultraviolet and soft X-ray regions. A future plan including a complete renewal of the storage ring is being considered. In order to realize a high-brightness, low-energy light source on an appropriate scale for a university facility, not only the accelerator itself but also the rationalization of the building, including radiation protection, is an important issue to consider. We have started a simulation work on radiation generation from a small electron storage ring. A part of the ring was modeled simply as a straight section filled with residual gas followed by a bending section where an ion core magnet was installed. Electrons collide with the residual gas molecules hit the beam pipe wall and electromagnetic showers are generated. Some preliminary results are presented.

1. はじめに

広島大学放射光科学研究センターは2024年度より放射光科学研究センターと改名された。施設の中核装置はエネルギー700 MeV 周長 22 m の小型電子ストレージリング HiSOR である[1]。1996 年に稼働を開始し、その後30年近く安定に稼働を続けてきた。しかし、最近では、加速器の老朽化による装置の信頼性の低下が進んでいる。その一方で、世界各地で建設が進められている最新の放射光源に比べて、光源性能面での競争力低下が著しく、光源の高度化・更新を急ぐ必要に迫られている[1]。大学の施設として適正な規模ながら先端研究が行える一定の先進性と競争力を有する光源加速器を、適正な予算規模で実現する必要がある。そのためには加速器本体の低コスト化に加え、加速器を収納する建屋の低コスト化も重要である。

現在の HiSOR の加速器配置とストレージリングの概要を Fig. 1 に示す。入射器はエネルギー150 MeV のマイクロトロンであり、電子ビームはマイクロトロンで設置されている入射器室からストレージリングの設置されている実験ホールへ輸送され入射・蓄積される。ビーム入射中、実験ホールは立ち入り禁止となる。入射後、電子ビームは数分で 150 MeV から 700 MeV まで加速され蓄積される。この状態で実験ホールは開放され、利用者が入域し放射光利用が開始される。HiSOR 加速器本体はトンネルに収納されており利用者との間の遮蔽壁はない。このレーストラック形状のコンパクトなリングは 2.7 T という強磁場を発生する 2 台の巨大な常伝導磁石を備えており、この偏向磁石の分厚いヨークが遮蔽として機能する設計となっている。通常の放射光用ストレージリングでは放射光の取り出しのためにリング外側が開いた C 型の構造で

あるのが通例であるが、HiSOR では外側が閉じた構造となっている。放射光はこのヨークに開けられた穴から取り出されている。放射線防護の観点からは極めて合理的な設計となっている。

このような遮蔽方法は大型の 180 度偏向磁石の採用という加速器の特異な設計で可能となったが、他方、このような大きな曲げ角の偏向磁石の導入により、電子

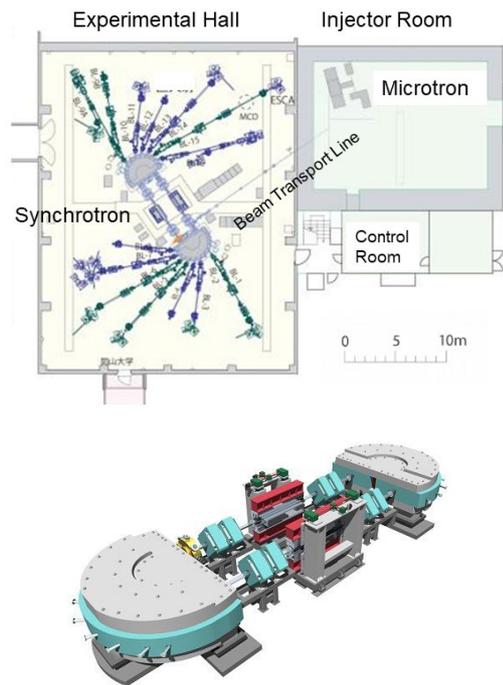


Figure 1: HiSOR accelerator layout (upper) and schematic drawing of the storage ring.

[#] murayama15@hiroshima-u.ac.jp

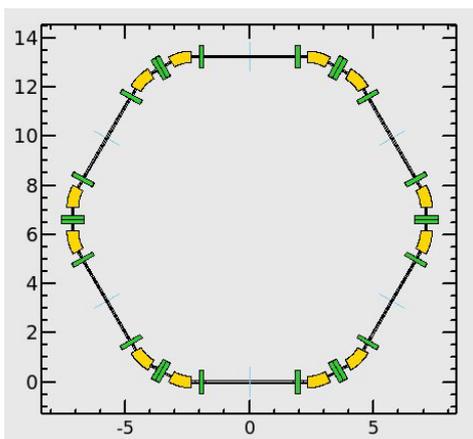


Figure 2: HiSOR-II lattice design. Beam energy 600 MeV, circumference 44 m and bending angle 30 degrees.

ビームのエミッタンスは 400 nm と非常に大きくなっている。次期計画 HiSOR-II を Fig. 2 に示す。次期計画 HiSOR-II では利用者の高輝度放射光への強い要望があり、10 nm 前後の低エミッタンスの実現を目指している。このため、偏向磁石の曲げ角を1台当たり 30 度と小さくし、磁場強度も 1 T 強でと常伝導磁石としては標準的な値となる予定である[2]。いわゆるトップアップ運転を採用する予定であることから、加速器の周囲を遮蔽壁で囲まざるを得ない。しかし建設費を抑制するためには、この遮蔽構造の簡素化も必須である。その検討を進めるためには、まず加速器中で電子ビームの損失が起きた場合に発生する放射線のエネルギーや種別、またそれらの伝搬方向に関する知見は必須である。本研究は、磁石類による遮蔽の効果も含めた放射線シミュレーションを実施し、加速器近傍での局所遮蔽体で放射線を効果的に遮蔽できる可能性を探ることを目的としている。本発表では、研究の第一段階として、ストレージリング直線部で残留ガスと衝突散乱した電子が偏向部で失われるケースをモデル化し、放射線発生シミュレーションを行った結果を報告する。なお、今回のシミュレーションは HiSOR-II のパラメータではなく、HiSOR-II とよく似た性能と規模である UVSOR-III [3] のパラメータに基づくモデルを作成した。これは、本研究の次の段階で放射線の実測との比較なども行うことを考えたためである。

2. 電子ストレージリングにおけるビーム損失

放射光源用電子ストレージリングにおけるビーム損失は入射時と蓄積時それぞれにおいて発生する。前者はビーム入射時の捕獲効率が 100% ではないことによるものであり、後者は一旦安定に捕獲された電子が何らかの理由で失われることによる。ストレージリングには横方向の安定領域と縦方向の安定領域があり、入射された電子のうちこの領域に入らないものは失われ、一旦入った電子も何らかの摂動を受けてここからこぼれだすことがある。横方向の安定領域は物理的に決まる場合と力学的に決まる場合があり、それぞれを物理的開口 (Physical Aperture)、力学的開口 (Dynamic Aperture) と呼ぶ。縦方向の安定領域は基本的には高周波加速空洞が決まるが、エネルギー分散の効果により横方向に軌道が逸れ

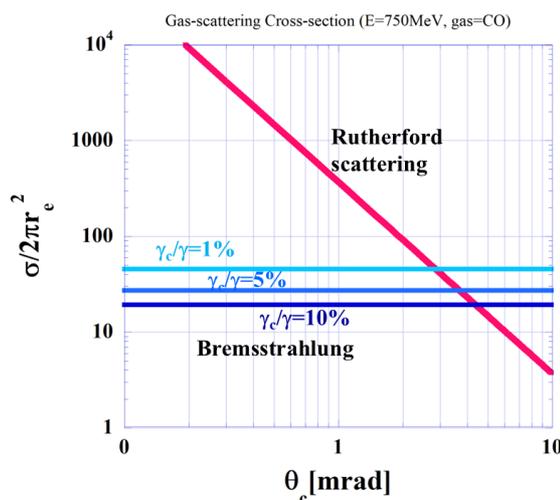


Figure 3: Cross sections for Rutherford scattering and bremsstrahlung for electron energy of 750 MeV and residual gas species, CO. Bremsstrahlung is for energy loss higher than γ_c/γ and Rutherford scattering for scattering angle larger than θ_c .

ることで横方向の開口で制限される場合もある。電子に対する摂動としては、放射光を光子の形で放出することによる揺らぎを原因とするもの、周回している電子同士の衝突散乱、ビームパイプ中の残留ガス分子との衝突散乱などがある。今回はこの中で残留ガスによる散乱を取り扱うこととした。これは結果を可視化しそれを物理的に解釈することが比較的容易と思われたためである。

加速器真空の教科書などによれば、十分にベーキングされた真空容器では H_2 および CO が主要なガス種となるとされていることから[4]、蓄積電子との相互作用への寄与の大きい CO を残留ガスの主成分と仮定することとした。蓄積電子と残留ガス分子との相互作用で起きる現象としては、ラザフォード散乱、制動放射、メラー散乱の3つがある[4]。このうち主要な最初の2つについて、UVSOR-III の電子エネルギー 750 MeV の場合の散乱断面積の様子を Fig. 3 に示す。高エネルギーのストレージリングでは制動放射が重要となるといわれることが多いが、UVSOR-III や HiSOR-II のような低エネルギーリングではラザフォード散乱の重要性が相対的に増すことが見て取れる。

3. 放射線発生モデル計算

放射線発生に関するシミュレーションには PHITS を用いることとした[5]。PHITS の利用法に習熟することも重要と考え、まずは比較的単純な系で計算を行うこととした。ストレージリングの一部を直線部とそれに続く偏向部でモデル化し、直線部で残留ガスと衝突散乱した電子が偏向部で失われた場合の放射線の発生や伝搬の様子をシミュレーションすることを試みた。

今回の計算では、先に述べたようにビームエネルギー 750 MeV の UVSOR の一部をモデル化した。7 m の直線部に内径 110 mm × 39 mm で肉厚 3 mm の SUS 製ビームパイプを設置し、それに続く偏向部には C 型ヨークを持つ磁場約 1 T の偏向磁石を設置した、磁石内部に

は軌道半径 2.2 m に沿って湾曲する直線部と同じ断面のビームパイプを設置した。実際の放射光加速器では、特に偏向磁石内のビームパイプには放射光取り出しや真空排気のための側室構造などを有するが、今回の計算では省略してある。また、加速器本体からの放射線の発生方向に興味があったためビームパイプの外側も真空としてある。計算モデルの概要を Fig. 4 に示す。

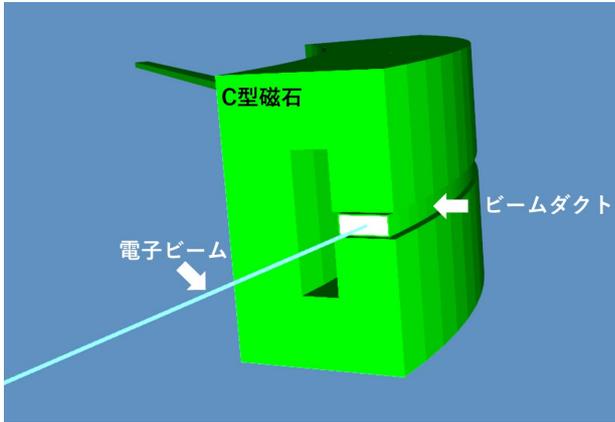


Figure 4: Calculation model and electron trajectories. The incident electron energy is 750 MeV, and the number of electrons is 500. Both the inside and outside of the pipe are vacuum.

このようなモデルで直線部の真空ダクト内に密度 $8.9 \times 10^{-6} [\text{g}/\text{cm}^3]$ の CO を挿入した場合のシミュレーション結果を Fig. 5-1, 2 に示す。結果は電子や光子の飛跡そのものではなく、計算領域を多数の微小領域に区切り領域ごとの流束を表示してある (Fig. 6 以降も同様)。中性子や陽電子についても結果は得られているが量が少なく本報告では掲載を省略した。CO は 2/3 程度の電子は CO と衝突することなく通り抜ける程度の量に設定した。これは多重散乱の影響を避けるためである。Figure 5-1 に示す電子成分の飛跡から、多くの電子は直線部から偏向

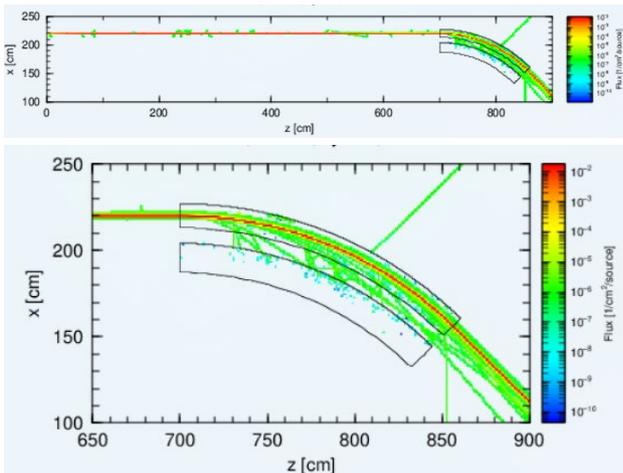


Figure 5-1: Electron trajectory. Top: entire calculation area. Bottom: enlarged bending section. Electrons interact with CO molecules in the straight section.

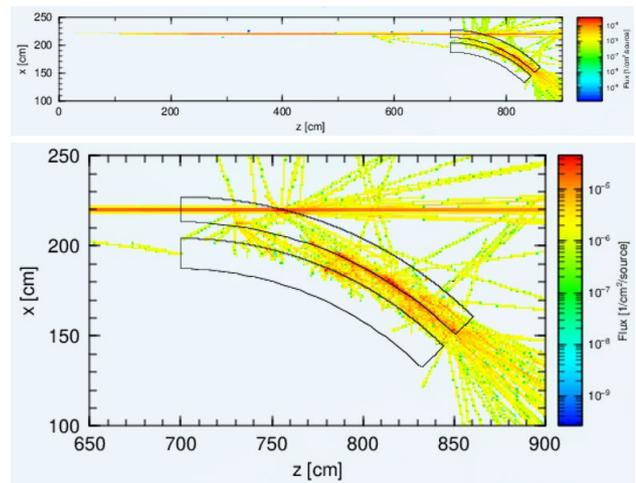


Figure 5-2: Gamma ray trajectory. Top: entire calculation area, bottom: enlarged bending section. Gamma rays from the straight section are generated by bremsstrahlung with CO. Gamma rays from the magnet section are generated by beam loss.

部を失われることなく通り抜けており、少数の電子は CO と相互作用し軌道を逸れ真空ダクトに衝突し電磁シャワーを生成していることが分かる。一方 Fig. 5-2 の光子成分の飛跡を見ると、偏向部の電磁シャワーに加え直線部から制動放射によるガンマ線が強く前方に放射されている様子も見て取れる。

制動放射で一定のエネルギーを損失した電子が偏向

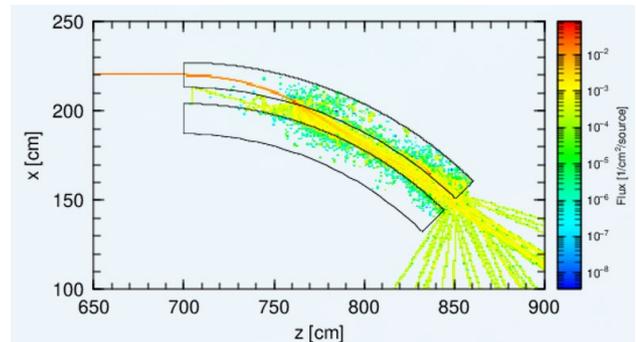


Figure 6-1a: Electron trajectory. Incident electron energy 450 MeV, number of electrons 50.

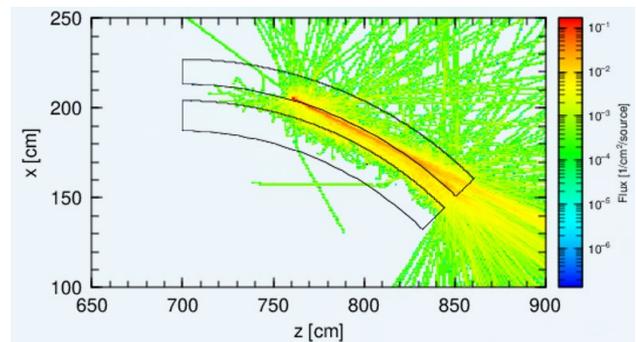


Figure 6-1b: Gamma-ray trajectory. Incident electron energy 450 MeV, number of electrons 50.

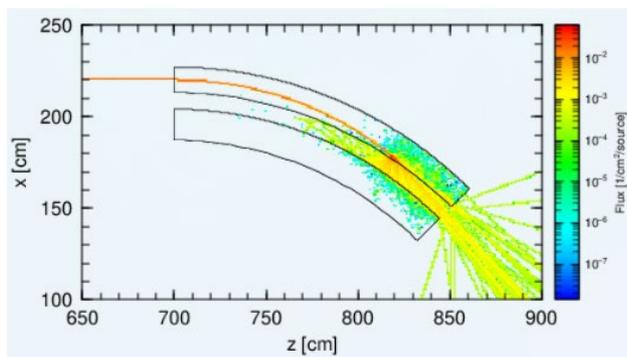


Figure 6-2a: Electron trajectory. Incident electron energy 638 MeV, number of electrons 50.

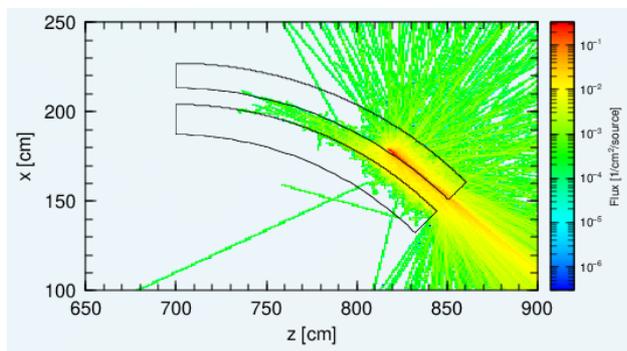


Figure 6-2b: Gamma ray trajectory. Incident electron energy 638 MeV, number of electrons 50.

電磁石中で軌道を逸れビームダクトに衝突する様子をシミュレーションしてみた。結果を Fig. 6 に示す。電子はビームダクトの内壁に衝突し前方方向に電磁シャワーを生成している。C 型の磁石のヨーク部は遮蔽となりリング内側方向へ向かう放射線は微量である。光子は軌道接線方向へ強く出るが、軌道と垂直にリング外側へ出るものも多いことが分かる。

4. まとめと展望

小型放射光施設における効果的な放射線遮蔽法の探索を目的に、放射光リングにおける放射線発生 of 計算機シミュレーションに着手した。放射光リングの一部をモデル化し、蓄積電子の損失による放射線発生について計算機シミュレーションを行った結果、直線部で残留ガス分子に衝突した電子による放射線発生や放射線の加速器中での伝搬を可視化することに成功した。このような計算機シミュレーションの結果からは視覚的に多くの有益な情報を引き出せる可能性があると思われる。今後はモデルの精密化を進めるとともに、稼働中の加速器における実測との比較なども行っていきたいと考えている。

謝辞

本研究では PHITS Version 3.350 を使用しました。この使用にあたり、6 月に開催されました講習会、PHITS 掲示板における迅速な返答など、様々な形でご支援いただいたこと感謝申し上げます。

参考文献

- [1] C. John *et al.*, “Present Status of HISOR”, in these proceedings.
- [2] T. Narai *et al.*, “Research and Development of combined-function magnets for a compact synchrotron light source”, in these proceedings.
- [3] T. Kaneyasu *et al.*, “UVSOR 光源加速器の現状 2025”, in these proceedings.
- [4] e.g., 「高エネルギー加速器セミナーOHO」, <http://accwww2.kek.jp/ofo/OHOtxt1.html>
- [5] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, Y. Matsuya, N. Matsuda, Y. Hirata, T. Sekikawa, L. Yao, P.E. Tsai, H.N. Ratliff, H. Iwase, Y. Sakaki, K. Sugihara, N. Shigyo, L. Sihver and K. Niita, Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33, *J. Nucl. Sci. Technol.* 61, 127-135 (2024).