

東北放射光 (SLiT-J) 計画の進捗状況

PROGRESS OF SLiT-J PROJECT

濱 広幸 ^{#A)}, SLiT-J デザインチーム

Hiroyuki Hama ^{#A)}, SLiT-J design team

^{A)} Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University

Abstract

A project Synchrotron Light in Tohoku, Japan (SLiT-J) has been progressed toward innovative science and technology based on light elements. Target light source performances are sub-nm emittance ring and brilliance $> 10^{21}$ around several keV photon energy. We have designed a sub-nm emittance storage ring using mature accelerator technologies in Japan with certain boundary condition, such as a construction cost less than 230M US\$ and a circumference around 350 m. A natural emittance of designed ring is 920 pmrad and the circumference is 354 m with 16 cells, called a double double-bend achromat (DDBA) lattice.

1. はじめに

東北放射光計画 (SLiT-J; Synchrotron Light in Tohoku, Japan) は放射光科学の研究開発成果を先端計測基盤とすることでイノベーションを産み出すオープンプラットフォームを目指した 3GeV 高輝度光源計画である[1,2]。SLiT-J 蓄積リングは建設経費や運転経費を抑えながらも安定に使えるワールドクラスの低エミッタンスリングを目標としている。周長は 354m とフランスの第三世代光源 SOLEIL[3] とほぼ同じであるが、水平エミッタンスは約 1/3 の 0.92nmrad であり、数 keV 付近の輝度は 10^{21} に達すると見込んでいる。ユニットセルは 4 つの偏向磁石からなる DDBA (Double Double-Bend Achromat) であり、セル間の挿入光源用長直線部の長さは 5.4m、セル中央の短直線部は 1.8m であり高エネルギー連続放射光源として多極ウィグラーを挿入する予定である。高周波加速空洞は SPring-8 で開発している TM020 空洞を用いることで RF ステーションを 1ヶ所の直線部のみにしている。全長約 120m のフルエネルギー C バンド入射器を用いることとし、消費電力を抑えるだけでなく将来は軟 X 線 FEL を実現したいと考えている。加速器システムの概要に加え、産業利用のために設立した一般財団法人「光科学イノベーションセンター」について報告する。

2. SLiT-J ラティス

スウェーデンの MAX IV 研究所の 3GeV 蓄積リングでは 7 偏向磁石からなる世界初のマルチベンドアクロマートラティスを用いて、1nmrad を切る低エミッタンスリングを目指している[4]。理論的に偏向磁石数の 3 乗に反比例してエミッタンスは小さくできるため、マルチベンド構造は低エミッタンス化に必須である。ただし、磁石配置のパッキングファクタが非常に高くなるため、ビーム診断装置、真空ポンプなどの実装が容易でない。エミッタンスを小さくするため、偏向部でのエネルギー分散、

[#] hama@lns.tohoku.ac.jp

Table 1: Key Parameters of SLiT-J Storage Ring (tentative)

Lattice parameter		
Beam energy	E(GeV)	2.998
Lattice structure		DDBA
Circumference	C(m)	353.740
Number of cells	N	16
Long straight section	(m)	5.44×16
Short straight section	(m)	1.84×16
Betatron tune	x/y	29.21/10.28
Natural chromaticity	x/y	-70.655/-40.405
Natural horizontal emittance	(nmrad)	0.92
Momentum compaction factor	α	0.00045
Natural energy spread	$\sigma E/E(\%)$	0.082
Lattice functions at LSS	$\beta_x/\beta_y/\eta_x(\text{m})$	13.0/3.0/0.0
Lattice functions at SSS	$\beta_x/\beta_y/\eta_x(\text{m})$	4.28/3.32/0.07
Damping partition number	J_x/J_s	1.431/1.569
Damping time	$\tau_x/\tau_y/\tau_s(\text{ms})$	8.65/12.38/7.89
Energy loss in bends	(MeV/turn)	0.572
RF frequency	(MHz)	508.51
Harmonic number	h	600

水平ベータ関数を小さくする必要がある。その結果、多極磁場は従来に比べ相当に強いいため、ボア径が小さくビームダクトが狭くなる。ビームの物理アパーチャが狭くなることに加え、コンダクタンスが小さくなり真空システム設計が困難になる。しかしながら、既存放射光施設のアップグレード計画では、ほ

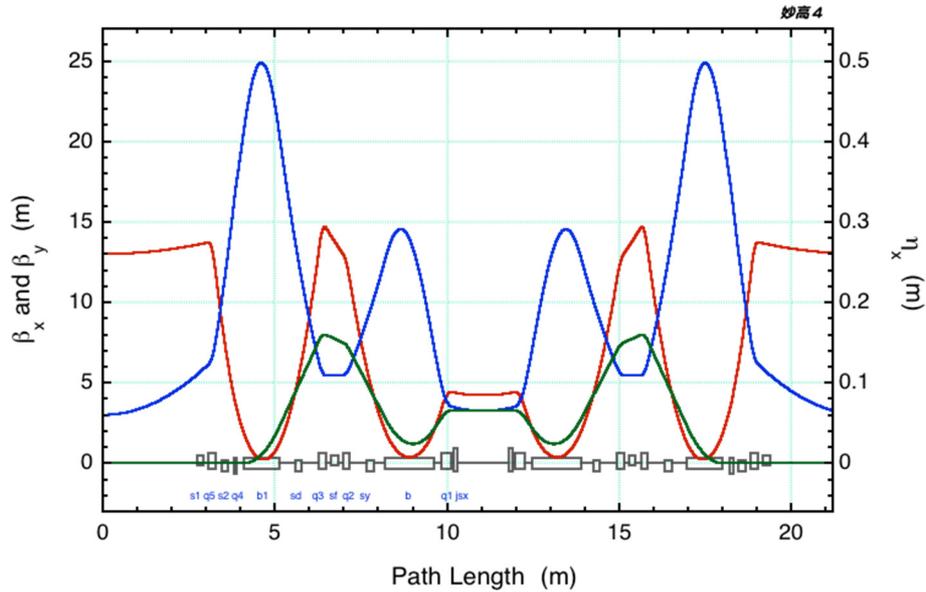


Figure 1: Lattice of the SLiT-J. The red and blue curves represent horizontal and vertical β functions, respectively. The green curve shows the horizontal energy dispersion function.

ば例外なくマルチバンド構造が採用されている。

SLiT-J 蓄積リングも 4 偏向磁石からなるマルチバンド DDBA(Double Double-Bend Achromat)ラティスを採用した。セル数は 16 で、水平方向自然エミッタンスは 0.92nmrad、リング周長は 354m である。周長

528m、セル数 20、偏向磁石数が倍以上の MAX IV ほど、エミッタンスを小さくすることは出来ないが、コンパクトなセル構造により比較的短い周長で低エミッタンス化が可能である。

SLiT-J 蓄積リングの主要パラメータを Table 1 に示

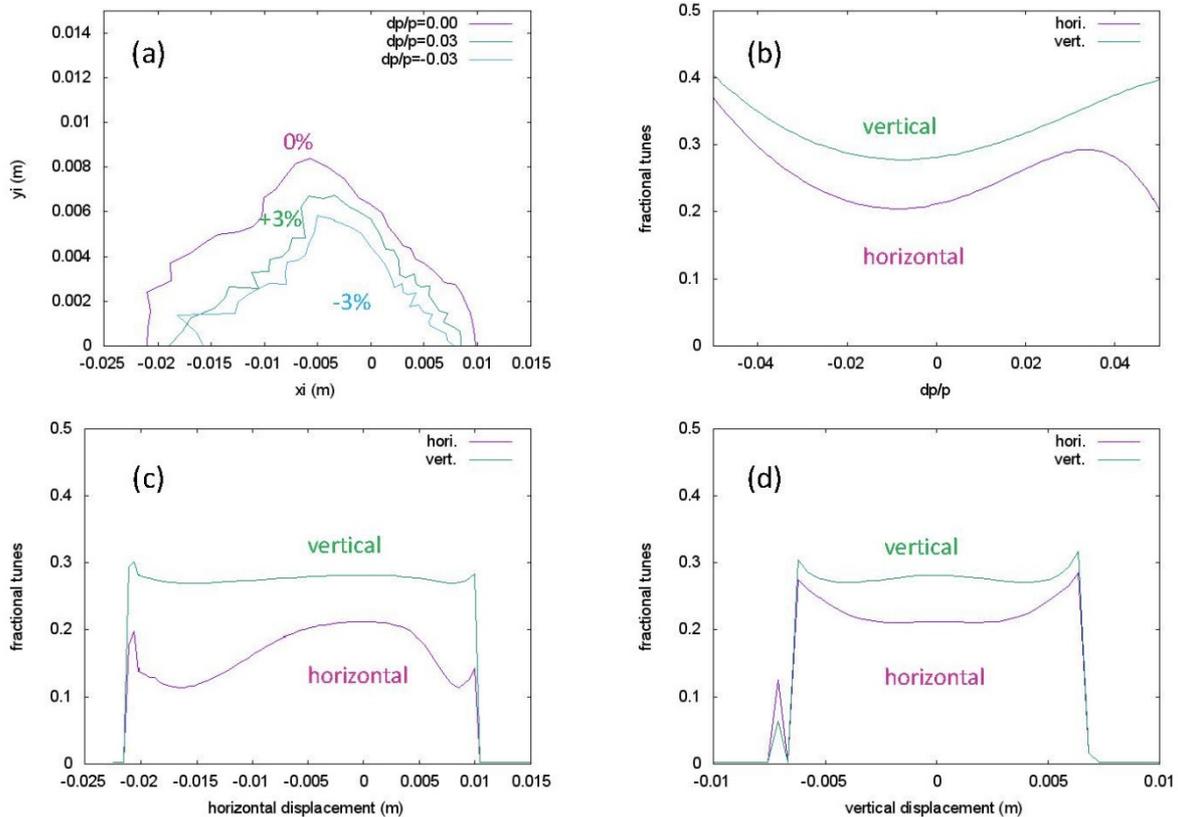


Figure 2: Dynamic apertures (a) for on-momentum (red-curve) and $\pm 3\%$ off-momentum (green and blue curves) particles at the long straight section center. Momentum dependent tune shift (b), horizontal amplitude dependent tune shift (c), vertical amplitude dependent tune shift (d). Operating point: $(\nu_x, \nu_y) = (29.21, 10.28)$.

す。DDBA ユニットセルは、偏向磁石 4 台、収束用四極磁石 10 台、電子ビーム収束時に発生する色収差補正、非線形効果抑制用の六極磁石 10 台で構成され、ユニットセル長 22.1m である。16 ヶ所の 5.4m 長直線部のうち 14 ヶ所にアンジュレータ、残り 2 ヶ所にビーム入射システムと高周波加速空洞を設置する。1.7m 短直線部には白色光源としての多極ウィグラーなどを設置する予定である。

ユニットセル内のビーム光学におけるラティス関数を Fig. 1 に示す。

偏向磁石には、リングのコンパクト化と水平エミッタンス低減のために、偏向磁場と四極磁場を重ね合わせた機能複合型偏向電磁石を採用した。長直線部のエネルギー分散関数を無理なくゼロにするため、両端の偏向磁石の長さは中央の 2 つより短くしてある。双極磁場の強さは電子ビームのエネルギー損失が余り大きくならないよう 0.8 T とした。四極成分は 7T/m 程度とした。

四極と六極電磁石の最大強度は 40T/m、1000T/m² 程度とした。ボア径を 30mm 程度確保しても達成可能な値である。

SLiit-J 蓄積リングの構成要素である、電磁石システム、真空システム、高周波加速システム、ビーム診断系入射システム、入射器、挿入光源、ビームラインについての基本設計は CDR[1] に述べられている。電磁石[5]と入射器[6]の更なる詳細設計については、本学会で別途紹介されている。高周波加速空洞は SPring-8 恵郷博文博士（現 KEK）により開発された TM020 high-Q 空洞を用いる[7]。ビームの進行方向にコンパクトな構造であるため、4 空洞を 1 本の長直線部に収めることができる。空洞あたりの定格加速電圧は 750kV で、4 空洞で 3MV 加速を見込んでいる。

3. SLiit-J 電子ビームダイナミクス

四極磁石で発生する色収差補正は六極磁石で行う。最適化後の蓄積リングの力学的口径（DA:Dynamic Aperture）を Fig. 2 (a) に示す。計算は KEK で開発された SAD[8] を用いた。エネルギー偏差が ±3% であっても、水平方向に -15mm のアパーチャが確保されており、ビーム入射において十分に広い安定領域がある。チューンの運動量依存性を Fig. 2 (b) に、水平振幅依存性を Fig. 2(c) に、垂直振幅依存性を Fig. 2(d) に示す。磁石のミスアラインメントで DA がやや狭くなるものの、チューンシフトは 0.1 程度以下であり、運転に支障が生じるようなチューンシフトはないと判断できる。

4. 光科学イノベーションセンター

東北大学では、東北地方の国立 7 大学と協力して、学術・産業界におけるイノベーション創出に貢献する、3 GeV クラスの中型放射光施設を実現するため東北放射光施設計画 SLiit-J を東日本大震災直後より提案し、その実現に向けて活動してきた。昨年度来

の活動について報告する。

国内外の放射光施設長および著名な放射光利用研究に携わる研究者から 8 名の有識者を SLiit-J 国際評価委員として迎え、2016 年 6 月 21 日から 23 日まで仙台で「SLiit-J 国際評価委員会」を開催した。委員会では東北放射光施設計画光源加速器システム提案書[1]の科学技術的妥当性、予算計画、建設計画について評価が行われた。最終日に、スタンフォード大学教授の Jerome Hastings 委員長から、里見進東北大学総長に向けて、計画は妥当であるとのまとめが報告された。最終報告は 7 月に東北大学に答申され、SLiit-J のホームページ[9]に掲載されている。

放射光を使いこなすための新しい産学連携スキームであるコウリションコンセプトを実現するため、施設と同時に建設を予定している 10 本の初期ビームラインについてエンドステーションのデザインを広く公募した。壽榮松宏仁氏（東京大学名誉教授）を委員長とする外部ワーキンググループに審査を委託し、2016 年 11 月 11 日、12 日には東京大学本郷キャンパスにて公開シンポジウムを行った。

2017 年 1 月 7 日、日本放射光学会の会場にて SLiit-J ユーザーコミュニティが発足した。

2017 年 2 月 15 日には東北放射光施設の建設を推進する産学連携組織として、一般財団法人「光科学イノベーションセンター」が設立された。理事長には、東北大学総長特別補佐 高田昌樹教授が就任した。センターが設置した外部有識者による「東北放射光施設建設地選定諮問委員会」は、2017 年 4 月 11 日に東北大学青葉山キャンパスが建設地として最適であるとの審査結果を答申した。2017 年 4 月 19 日、センターは建設地利用に関し、東北大学に申入れを行った。2017 年 7 月 26 日、東京日本橋にてセンターが主催する東北放射光施設 SLiit-J 第 1 回コウリションコンファレンスが開催予定である。

5. まとめ

東北放射光計画（SLiit-J）実現のため、加速器システムの詳細設計を進めている。周長 354m というコンパクトな蓄積リングでサブナノメートルエミッタンスを実現するため、DDBA セルを採用した。機能複合型偏向電磁石、TM020 加速空洞、アパーチャの狭い真空容器システムなど、鍵となるテクノロジーについては注意深く設計、製作、設置する必要がある。東北放射光施設の建設を推進する産学連携組織として設立された光科学イノベーションセンターが主体となり SLiit-J の建設地や利用に関する議論を進めている。

参考文献

- [1] SLiit-J デザインチーム、「東北放射光施設計画“SLiit-J” 3GeV 高輝度光源加速器システム提案書 V2.0」, 2016 年 3 月。

PASJ2017 WEP012

- [2] Hiroyuki Hama, “Status of SLiT-J Project”, presented in Low Emittance Rings Workshop 2016, SOLEIL, France, Oct. 26-28, 2016.
- [3] L. S. Nadolski *et al.*, “Progress Status for the 10-year-old SOLEIL Synchrotron Radiation Facility”, Proc. of IPAC 2017, WEPAB004, 2564 (2017).
- [4] S. C. Leemann *et al.*, “First Optics and Beam Dynamics Studies on Progress Status for the 10-year-old SOLEIL Synchrotron Radiation Facility”, Proc. of IPAC 2017, WEPAB004, 2564 (2017).
- [5] 西森信行, SLiT-J デザインチーム, 「東北放射光蓄積リングのための電磁石設計」, 第 14 回日本加速器学会年会, TUP071, 北海道大学, 2017 年 8 月.
- [6] 三浦禎雄, SLiT-J デザインチーム, 「東北放射光(SLiT-J)入射器の設計検討」, 第 14 回日本加速器学会年会, TUP007, 北海道大学, 2017 年 8 月.
- [7] 惠郷博文 他, 「Spring-8-II 高次モード減衰型高周波加速空洞の開発」, 第 11 回日本加速器学会年会, MOOL14, 237 (2014).
- [8] SAD Home Page; <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [9] SLiT-J ホームページ; <http://www.slitj.tagen.tohoku.ac.jp>