

## Status of Accelerator Design for Central Japan Synchrotron Radiation Research Facility Project

Y. Takashima<sup>1,A)</sup>, M. Katoh<sup>C),A)</sup>, M. Hosaka<sup>A)</sup>, N. Yamamoto<sup>A)</sup>, H. Morimoto<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603 Japan

<sup>B)</sup>Graduate School of Science, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602 Japan

<sup>C)</sup>Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences, Myodaiji-cho, Okazaki, 444-8585

### Abstract

Nagoya University had a project to construct a new synchrotron light facility, called Photo-Science Nanofactory, to develop a wide range research on basic science, industrial applications, life science and environmental engineering. The project is now developed to "Central Japan Synchrotron Radiation Research Facility" as the principal facility of the project of Aichi prefecture, "Knowledge Hub", to establish a new research center for technological innovations. The key equipment of the facility is a small electron storage ring, which is able to supply hard x-rays. The energy of the stored electron beam is 1.2 GeV, the circumference is 62.4 m, the current is 300 mA, and natural emittance is about 53 nm-rad. The storage ring consists of four triple bend cells. Eight of the twelve bending magnets are normal conducting ones. Four of them are 5 T superconducting magnets (super-bends). The bending angle of the super-bend is 12 degrees and three hard x-ray beam lines can be extracted from each super-bend. Two insertion devices will be installed in the straight sections. The electron beam is injected from a booster synchrotron with the energy of 1.2 GeV as full energy injection. A 50 MeV linac is used as an injector to the booster synchrotron. The top-up operation is also planned.

## 中部シンクロトロン光利用施設（仮称）計画の加速器設計の現状

### 1. はじめに

名古屋大学は、小型シンクロトロン光利用施設を中心に、周辺装置、支援組織を備えた計測・分析拠点として「光科学ナノファクトリー」計画を推進してきた。この計画は、愛知県の進める「知の拠点」計画と一体となって中部シンクロトロン光利用施設（仮称）計画として実現されようとしており、愛知県、産業界、大学、研究機関が連携して実現に向けて活動を行っている<sup>[1]</sup>。

中部シンクロトロン光利用施設（仮称）計画の電子蓄積リングは、これまで名古屋大学が提案してきた光源加速器の構成を採用し、小型でありながらX線利用の利用を可能にするため、電子ビームエネルギー1.2GeV、周長62.4mに、ピーク磁場5T、偏向角12°の超伝導偏向電磁石を4台導入する予定である。1台の偏向電磁石から2~3本の硬X線ビームラインを引き出すことで、全体で10本程度の硬X線ビームラインが利用可能となる。

入射器としては、50MeV線形加速器と1.2GeVブースターシンクロトロンを用いる。ブースターシンクロトロンから蓄積リングへは、1.2GeVのフルエネルギー入射を行う。これにより、入射による実験の中断がなくなり、電流値が一定であるためビームライン光学系の安定性も高くなる。また、超伝導偏向電磁石の励磁電流が一定となることで、蓄積リングの安定した運転につながる。

### 2. 電子蓄積リング

表1に光源加速器のパラメータ案を示す。蓄積リングはTriple Bendセルを基本とし、2台の常伝導偏向電磁石の間に1台の超伝導偏向電磁石を配置した構造を基本セルとする。常伝導偏向電磁石の偏向角は39°、超伝導偏向電磁石の偏向角は12°とする。リング全体は、これを4回繰り返した構造とする。4本の直線部のうち、入射部とRF空洞部にそれぞれ1本を使用し、残りの2本に挿入光源を配置する。

図2はリング4分の1周の光学関数である。本計画は、低エミッタンスを狙ったリングではないが、アンジュレータの使用も予定しており、合理的な範囲でエミッタンスを小さくしたいと考えている。このため、直線部に1.2mの分散を残している。また、超伝導偏向電磁石中での多極成分の影響を抑えるために、超伝導電磁石中での水平方向のベータ関数が小さくなるように調整を行っている。

本施設の光源加速器の最大の特徴は、1.2GeVという比較的低いビームエネルギーでありながら、硬X線を多数のビームラインで利用するため、偏向電磁石の一部を超伝導とするところにある。この方法は米国の第3世代リングAdvanced Light Source (ALS)において採用されているが<sup>[2]</sup>、本施設のように、小型のリングに対して多数の硬X線ビームラインを設置するため、建設当初から超伝導偏向電磁

<sup>1</sup> E-mail: takasima@numse.nagoya-u.ac.jp

石を採用するのは、世界的にも初めてである。

表1：蓄積リングパラメーター案

ビームエネルギー	1.2 GeV
周長	62.4 m
ビーム電流	> 300 mA
常伝導偏向電磁石	1.4 T, 39°×8
超伝導偏向電磁石	5 T, 12°×4
ラティス構造	Triple Bendセル4回対称
自然エミッタンス	53 nm-rad
RF周波数	500 MHz
RF加速電圧	500 kV
バケットハイト	0.093
エネルギー広がり	$8.4 \times 10^{-4}$
モーメントム	0.022
コンパクションファクター	

入射器パラメーター案

<b>ブースターシンクロトロン</b>	
最大ビームエネルギー	1.2 GeV
偏向電磁石	1.1 T
周長	38.4 m
RF周波数	500 MHz
<b>直線加速器</b>	
ビームエネルギー	50 MeV
ピーク電流	100 mA
繰り返し	1 Hz
RF周波数	2856 MHz

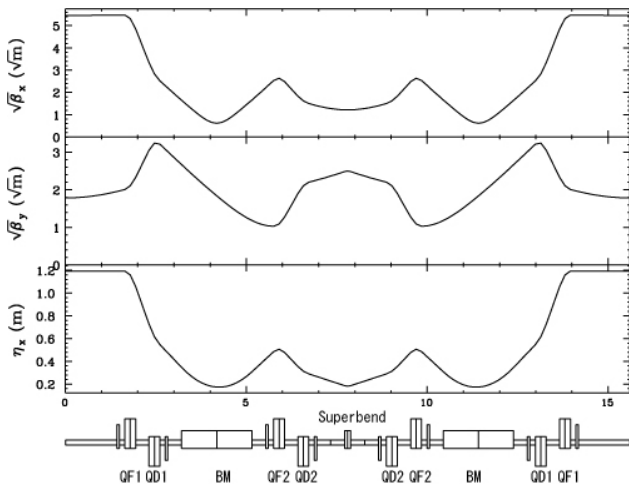


図2：ビームオプティクス

蓄積リングには32台のビーム位置モニタと32台の軌道補正電磁石を設置して、閉軌道歪みを補正する予定である。補正用磁場は、6極電磁石の補助コイルで発生する。シミュレーションによると、超伝導電磁石磁場に1%の誤差がある場合、CODは最大で水平方向に9mm、垂直方向に1.8mm程度である。補正後のCODは水平方向、垂直方向にそれぞれ100 μm、40 μmと予想される<sup>[2]</sup>。

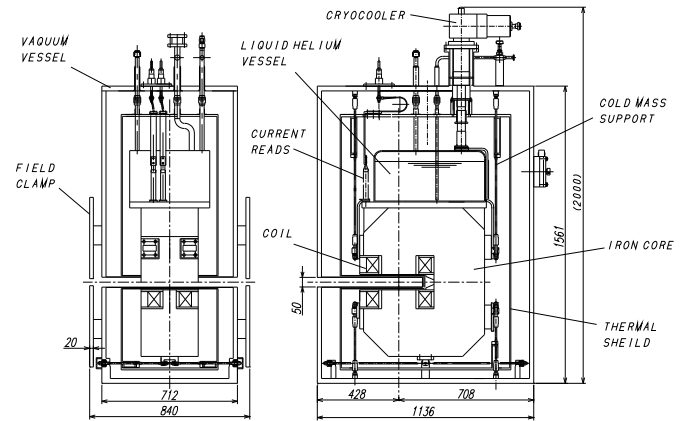


図3：超伝導偏向電磁石外形図案

超伝導偏向電磁石の外形図案を図3に示す。大きさは、フィールドクランプを含めたビーム進行方向が840 mm、幅1140 mm、高さ2000 mmである。鉄心形状は、真空ダクトのベーキング、真空ダクトあるいは電磁石の交換の可能性を考慮してC型を予定している。

超伝導偏向電磁石の冷却方式は、小型冷凍機を用いた直接冷凍方式を採用する。これは、それぞれの超伝導偏向電磁石に1台の小型冷凍機を配置し、液体ヘリウムを用いず、冷凍機で直接コイルを冷凍する方式である。直接冷凍方式は、液体ヘリウムを用いないことによってコスト面で有利なだけでなく、クエンチした場合の対策など、メンテナンス性でも有利である。

直接冷凍方式による超伝導電磁石の長期運転試験や多極磁場成分の評価のため、放射線医学総合研究所の所有する超伝導ウィグラー試験機<sup>[3]</sup>を名古屋大学へ移設し、長時間運転時の温度測定や、磁場測定を行っている<sup>[4]</sup>。

表2：超伝導偏向電磁石パラメータ案

鉄心形式	C型
ギャップピーク磁場	5 T 以上
偏向角	12° (1.2 GeV)
コイル電流密度	127 A/mm <sup>2</sup>
電流	150 A
超伝導線	NbTi/Cu
鉄心材料	SUY (電磁軟鉄)
ウォームボアギャップ	50 mm
鉄心ポールギャップ	80 mm
ポール形状 (ビーム方向, 水平方向)	(70 mm, 180 mm)
外形寸法 (軸方向, 高さ, 幅)	(840mm, 2000mm, 1136mm)
全体重量	3500kg
GM方式小型冷凍機	45 W (50 K), 1.5 W (4.2 K)

### 3. 蓄積リングへの入射シミュレーション

図4に、加速器計算コードSADを用いて行った入射シミュレーションの様子を示す。入射ビームエミッタンスは200 nradとし、蓄積リングに配置される4

つのバンパ軌道生成用キッカー電磁石は、 $1.5 \mu \text{ sec}$ のhalf-sineで励磁され蹴り角はそれぞれ $0.945 \text{ mrad}$ ,  $-0.498 \text{ mrad}$ ,  $-0.498 \text{ mrad}$ ,  $0.945 \text{ mrad}$ である。中心軌道から距離 $40 \text{ mm}$ の位置に  $\beta_x = 7$ ,  $\alpha_x = 0$  (rms) のビームを入射した時の、周回ごとの位相空間での様子を示している。図では、ビームの $2\sigma$ にあたる部分までを示している。ビームが入射される過程において、一周目にその一部がセプタムの壁によって失われる。このときに損失する割合は、エネルギー分散がない場合 $0.2\%$ ,  $dE/E = 1 \times 10^{-3}$ の分散を持つ場合  $0.7\%$ となる。さらに、入射点を $40 \text{ mm}$ よりも内側にすると一周目での損失が増加し、 $1 \text{ mm}$ 以上外側にすると三週目で損失が生じる。 $\beta_x$ については $7 \text{ m}$ 以上であれば初期に $dE/E = 1 \times 10^{-3}$ のエネルギー広がりをもつビームであっても $0.1\%$ 以下の入射損失で入射できる。

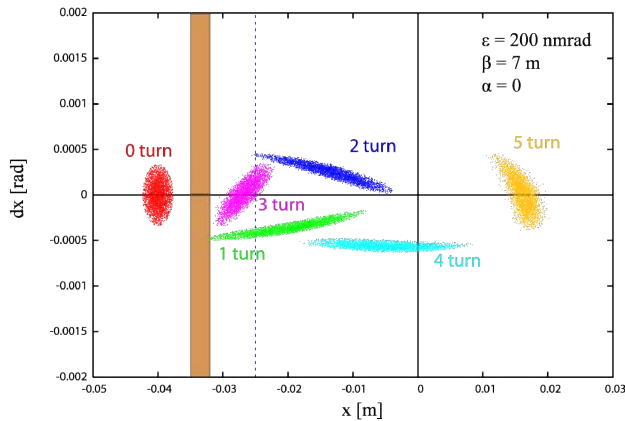


図3：入射シミュレーション

#### 4. 放射線遮蔽

本施設の光源加速器の構成は、 $50 \text{ MeV}$  線形加速器、 $1.2 \text{ GeV}$  ブースターシンクロトロン及び $1.2 \text{ GeV}$  蓄積リングである。放射線管理区域は、線形加速器及びブースターシンクロトロンを収容する入射器室、ビーム輸送路、蓄積リングを納める遮蔽トンネル内、および、実験ホールとする予定である。将来的にトップアップ運転を行う予定であり、蓄積リングへの電子ビームの入射中でも、ユーザーが実験ホールから退出することなく、実験を続けることができるだけの遮蔽が必要である。

建設当初の寿命の短い期間において、焼きだし運転を十分に行えるように考慮して損失電子数を評価し、直接線およびスカイシャインを評価したところ、入射器室のコンクリート厚は、壁、天井ともに $100 \text{ cm}$ 程度必要であり、線形加速器からブースターシンクロトロンへの入射点や、ブースターから蓄積リングへ向けた出射点においては、 $5 \text{ cm}$ 程度の厚さの鉛で局所遮蔽を行うことが必要である。

蓄積リングを納める遮蔽トンネルでは、内側のコンクリートの壁厚は $50 \text{ cm}$ 、外側は、ビームラインが貫通する部分は $1 \text{ m}$ 、その他の部分では $50 \text{ cm}$ が必要

であり、入射セプタムの周辺等の電子損失の多い場所では、 $5 \text{ cm}$ 程度の鉛による局所遮蔽が必要である。

#### 5. まとめ

名古屋大学が進めてきたシンクロトロン光施設計画は、愛知県の推進する科学技術政策である「知の拠点」計画の一部として、中部地区の大学、産業界、行政の協力の下、「中部シンクロトロン光研究施設（仮称）」として実現されようとしている。地域共同利用施設として、大学や研究機関からの利用だけでなく、産業界からの利用を重視した施設となるよう平成23年度中の共用を目指して検討を進めている。

その中核となる光源加速器は、エネルギー $1.2 \text{ GeV}$ 周長約 $60 \text{ m}$ の比較的小型の電子蓄積リングであるが、 $5 \text{ T}$ 超伝導偏向電磁石を4台導入することにより、 $10$ 本を超えるX線ビームラインが建設可能である。

建設予定地は、2005年に開催された愛知万博の長久手会場に隣接しており、名古屋市の都心部から約 $20 \text{ km}$ に位置する場所である。建設予定地のすぐ近くにはリニアモーターカーの駅があり、交通の便もよい。

#### 参考文献

- [1] 高嶋圭史, 加藤政博, 渡邊信久, 保坂将人, 竹田美和, 山根隆, 曾田一雄, “中部シンクロトロン光利用施設（仮称）計画”, 日本放射光学会誌, Vol. 21, No. 1, 10 (2008).
- [2] 鈴木康宏, 加藤政博, 高嶋圭史, 保坂将人, 山本尚人, 森本浩行, “中部シンクロトロン光利用施設（仮称）電子蓄積リングの閉軌道歪みとその補正”, 第5回日本加速器学会年会（東広島, 2008）.
- [3] M.Sasaki, et al., “DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING WIGGLER AT NIRS”, Proceedings of EPAC (2002), 2442-2444
- [4] 吉田光宏, 加藤政博, 保坂将人, 山本尚人, 森本浩行, 取越正巳, “中部シンクロトロン光利用施設（仮称）計画のための超伝導電磁石の検討”, 第5回日本加速器学会年会（東広島, 2008）.
- [5] D. Robin et al., “Superbend upgrade on the Advanced Light Source”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 538 (2005), 65-92.