

## 東北大学放射光計画における 1.5 GeV 蓄積リングのデザイン

日出富士雄<sup>A)</sup>、笠木治郎太<sup>A)</sup>、栗原 亮<sup>A)</sup>、佐藤 繁<sup>B)</sup>、柴崎 義信<sup>A)</sup>、神藤 勝啓<sup>A)</sup>、鈴木 章二<sup>B)</sup>、高橋 重伸<sup>A)</sup>、田中 拓海<sup>A)</sup>、七尾 晶士<sup>A)</sup>、濱 広幸<sup>A)</sup>、宮本 篤<sup>A)</sup>、武藤 正勝<sup>A)</sup>、渡辺 誠<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> 東北大学大学院理学研究科附属原子核理学研究施設 〒982-0826 宮城県仙台市太白区三神峯 1-2-1

<sup>B)</sup> 東北大学大学院理学研究科 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉

<sup>C)</sup> 東北大学多元物質科学研究所 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1

### 概要

東北大学放射光計画[1]は、原子核理学研究施設に現存する加速器施設を基に、新たに 1.5GeV 蓄積リングを建設し、遠赤外から X 線、及び数百 MeV の  $\gamma$  線と広いエネルギー領域に渡った光の利用を可能とするものである。本稿では、この光源蓄積リングの設計について報告する。

### 1 はじめに

東北大学は、これまで多年にわたって全国共同利用の真空紫外・軟 X 線領域の高輝度放射光光源施設の建設計画を推進してきた。その必要性は現在もなお減ずるものではないが、しかし法人化の問題とあいまって一大学の規模で大型施設の建設・運営を企図するのは、より困難な情勢になっているのも事実である。このような状況を踏まえて、東北大学では早期実現性の観点から計画の見直しを図り、より現実的な新光源の提案をすることとなった。この新たな光源は、いわゆる第 3 世代光源のように低エミッタンスではないが、しかし赤外から X 線まで、また更に数百 MeV の  $\gamma$  線と広いエネルギー領域に渡った光の利用を可能とするものであり、地域センター型の施設として、従来提案がなされてきた大規模な VUV-SX 光源施設とは相補的な役割を果たすべきものである。

### 2 1.5 GeV 蓄積リング

#### 2.1 設計方針と概要

光源リングの設計に際して、以下の性能が設定された；1)ビームエネルギー：1.5 GeV (入射時 1.2 GeV、最大 1.8 GeV)、2)周長：100m以下、3)直線部の数：8、4)エミッタンス：30 nmrad 以下 (@1.5 GeV)、5)超伝導 Wiggler (7 T-2 箇所) が利用可能であること、6)長直線部 (8m 以上) を有すること。また、できるだけコストを抑えた設計であることも重要である。

これらの方針を基に、リングは Chasman-Green 型 (8 セル) とし、2 箇所 の長直線部 (8 m 長) を有するレーストラック型の構成とした。またリング全体を可能な限りコンパクトなものとするため、4 極と 6 極磁場を併せ持った多重極電磁石を採用することとした。リングの全体図と 1 セルのラティス関数を図 1 に、主要パラメータを表 1 に示した。6 箇所ある短直線部の内 2 箇所は入射と RF 空洞に使用される。また、8m の長直線部では自由電子レーザー

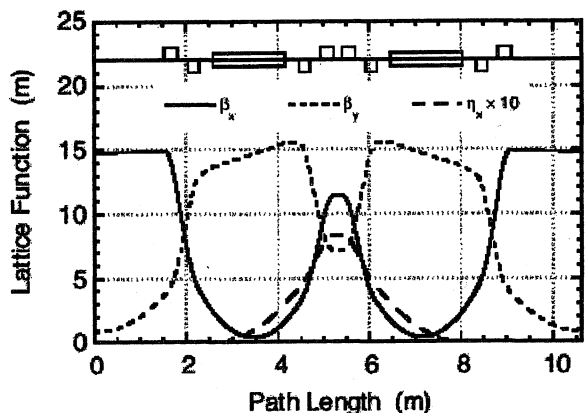
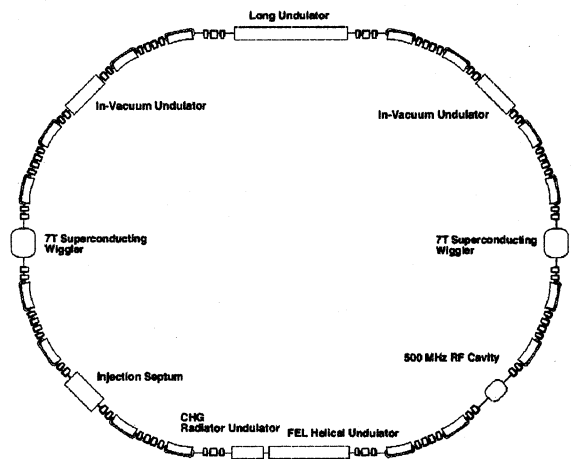


図 1：1.5GeV 蓄積リングの全体図 (上) と 1 セルのラティス関数 (下)。

のためのアンジュレータの使用が予定されている。

一般に、比較的に低エネルギーのリングでは、挿入光源による付加的な収束力の影響も無視できない。とりわけ 7 T という非常に強い超伝導 Wiggler の使用は、ラティスの対称性を壊してしまうことになりかねない。しかし、この光源リングでは、直線部での鉛直方向ベータ関数を 0.8m と非常に小さく抑えてあるので、多重極電磁石の励磁電流をわずかに変えることで、Wiggler の影響を取り除くことが可能である。

ビーム寿命に関しても、ビームエネルギーが低いと Touschek 寿命が厳しくなってくる。1.5GeV で 400mA のビ

ームが166のRFバケットに均一に分布しているとした時、1%のカップリングを仮定すると、Touschek 寿命はおおよそ7時間となり、1nTorrの真空度(CO換算)で得られる寿命(7時間弱)と同程度になってくる。カップリングが10%になるとそれぞれ約20時間と15時間程度となるが、輝度が下がるので、あまり大きくできない。現在のところ、高調波加速空洞の導入による Touschek 寿命の改善と必要な到達真空度を実現するための真空系の検討を行っている。

表1: リングの主要パラメータ

Beam energy	1.5 GeV (1.2 - 1.8 GeV)
Circumference	99.503 m
Lattice structure	Chasman-Green, 8-cell racetrack
Straight section	3.06m, 3.83m
Horizontal emittance	26.9 nmrad
Betatron tune	(7.80, 3.72)
Momentum compaction factor	0.00644
Chromaticity	(-20.9, -13.2) → (2, 2)
Relative energy spread	0.000645
Radiation loss / turn	112 keV
Damping time (dipoles only)	(8.77, 8.88, 4.47) ms
RF frequency	500.14 MHz
RF power & voltage	120 kW & 700 kV
Harmonic number	166
Synchrotron frequency	26.7 kHz
Natural bunch length	24.7 ps (7.43 mm)
Beam current	400 mA @ 1.5 GeV 200 mA @ 1.8 GeV

## 2.2 ダイナミックアパーチャー

ノーマルセルには4種類の多重極電磁石が存在するが、コストを抑えるため2種類の形状のみを製作し、残りの2種類は励磁電流を変えて運転することを検討している。従って、ハーモニック6極磁石の強さは独立には最適化されていない。しかしながら、強い収束を行っていないことや強い非線形性をもたないことから、大きなダイナミックアパーチャーが得られている(図2参照)。

## 2.3 電磁石

リングには、偏向電磁石(16台)とノーマルセル用の2種類の多重極電磁石(各32台)、直線部用4極電磁石(12台)、軌道補正用電磁石(32台)が設置される。

偏向電磁石は、ビームエネルギー1.2~1.8 GeVに対応して、1.0~1.5 Tの範囲で使用される。磁極間距離は、大きなダイナミックアパーチャーの利点を損ねることが無いように、真空ダクトの厚み分も考えて50mmと設定した。磁石形状は、放射光の取り出しと真空排気の点から、C型とした。また鉄芯は、電磁石ごとの磁気特性の均一化と磁気余効を考慮して、0.5mm厚のケイ素鋼板を積層して製作する予定である。磁石全体の寸法をコンパクトに抑えながら、なおかつ磁極間距離50mmで最大1.5 Tの磁場を生成するのは、鉄芯内部での飽和の影響が大きく、さほど容易ではない。しかし、鉄芯断面をできるだけ大きくすると同時にポールフェースの両端部を落とすことで、最終的に有効領

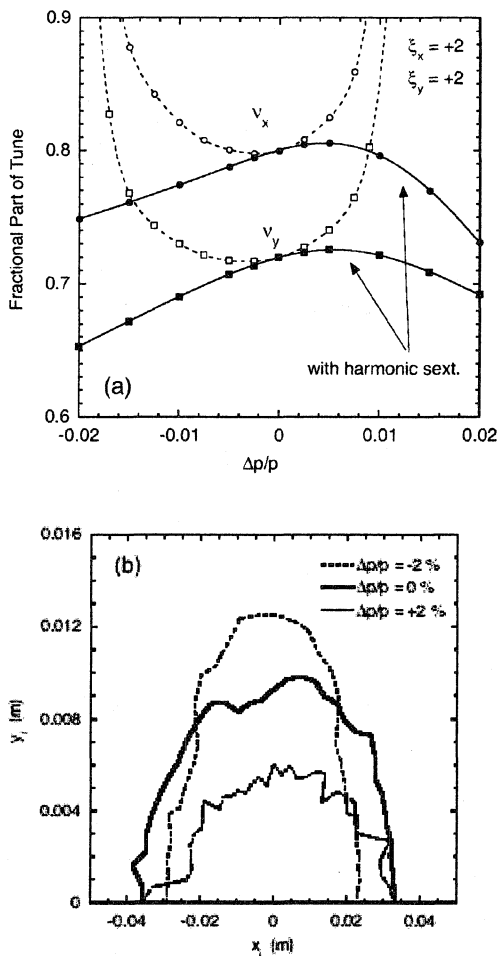


図2: (a) 非線形チューンシフト、(b) 入射点でのダイナミックアパーチャー。

表2: 多重極電磁石の基本仕様

	Focus	Defocus
4極成分磁場強度 (T/m)	16.053	-13.655
6極成分磁場強度 (T/m <sup>2</sup> )	55.242	-91.288
磁極長 (cm)	28	24
ボア径 (mm)	> 30	> 30
有効領域 (mm)	±25	±25
一様性	<1×10 <sup>-4</sup>	<1×10 <sup>-4</sup>

域±10mmで一様性  $\Delta B/B < 1 \times 10^{-4}$  を得ることは可能と考えている。

この光源リングの特徴の一つは、多重極電磁石を採用していることである。表2にその基本仕様を示す。多重極電磁石自体については、既にMAX-IIリング[2]において実用されている。ポールフェースの形状は、与えられたボア径の下で、等ポテンシャル:  $\phi = \text{一定}$  の条件により以下のように与えられる。

$$\phi = -kxy - m(3x^2 - y^3)/6 = \text{const.} \quad (1)$$

ここで  $k, m$  はそれぞれ4極と6極磁場強度を表す。実際に磁極形状を決定する際には、こうして得られた等ポテンシャル面を元にして、ポールフェースが有限の位置で打ち切られたために生じる不要な高調成分を打ち消すように、

シムの調整がなされる。図3に、POISSONを用いて得られた、励磁電流を変えた際の4極成分に対する6極成分の磁場強度の比を示す。9 kA turnを超えると飽和の影響が顕著になってくるが、1.2~1.8 GeV の実際の使用範囲においては、focus/defocus magnetともに線形性が保たれている。なお実際の製作に際しては、磁極端面の漏れ磁場やコイルの影響のため、2次元の磁場計算を行っただけでは不十分なことが予想される。このため現在、RADIA[3]を用いた3次元磁場計算による評価を進めており、最終的にはプロトタイプを製作して磁場測定を行う予定である。

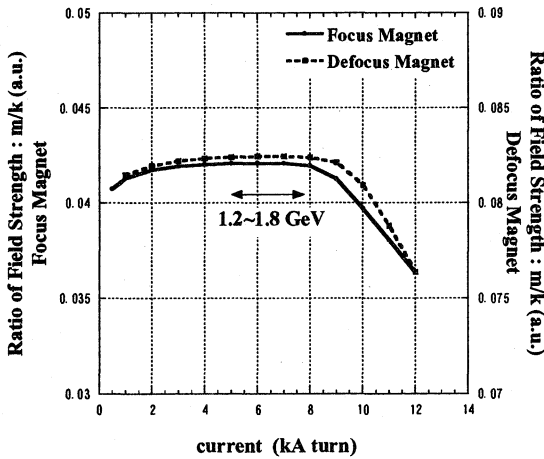


図3：励磁電流に対する磁場強度比の変化。

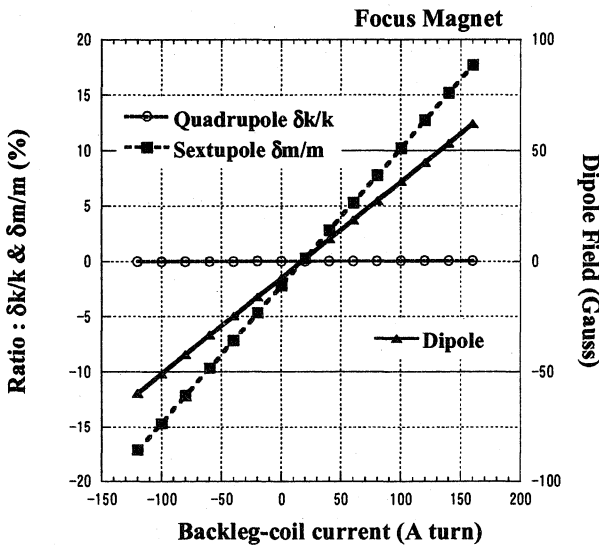


図4：バックレグコイルによる各磁場強度の変化。

多重極電磁石にあるバックレグコイルは、通常では2極成分を打ち消すと同時に6極成分を適当な強さに調整するために使用される。しかし、2極成分がCOD補正の可能なレベルであれば、これを用いて6極成分を調整することが可能となる。図4に、バックレグコイルを用いた際の各磁場強度の変化を示す。4極成分をほとんど変えることなく、6極成分をほぼ線形に調整可能であることがわかる。図4に示された約±15%の6極成分の磁場強度変化は、通常2.0のクロマチシティーを±2.0変化させることを

可能にする。また、さらにクロマチシティーを変える必要がある場合を考えて、現在、永久磁石を用いた小型のハイブリッド6極磁石の導入も検討している[4]。

## 2.4 COD補正

バックレグコイルを用いてクロマチシティーを±2.0変化させた際に生じた2極成分は、最大で100 G近い値となる。この結果は、最大で6mm程度のCODを引き起こすことに対応する。しかし、これは多重極電磁石に $\sigma=100\mu\text{m}$ のミスアラインメントがあった場合に生じるCODよりも小さな値であり、特別に補正電磁石を必要とせず補正が可能な範囲である。図5にその様子を示した。COD補正により、最大でも70 $\mu\text{m}$ 以下にすることが可能であり、直線部ではほぼ0 $\mu\text{m}$ という結果が得られている。

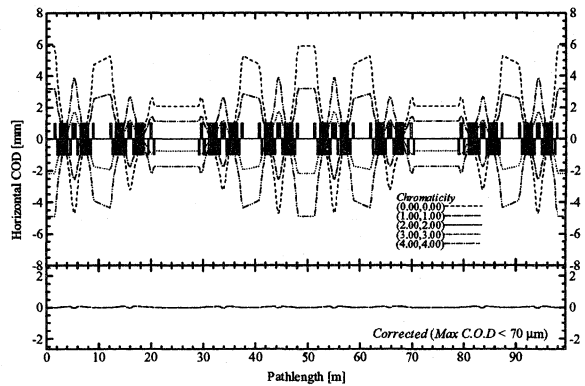


図5：クロマチシティー調整で生じたCODとその補正。

## 3 まとめ

東北大学放射光計画は、既存の加速器施設を基に、熱RF電子銃の導入を含めたLINACの改修を行うとともに、新たに1.5GeV蓄積リングの建設することで、広いエネルギー領域に渡った光の利用を可能とするものであり、またこれは従来提案がなされてきた大規模なVUV-SX光源施設とは相補的な役割を果たす地域センター型施設建設を推進するものである。現在、その基本的な設計作業を終え、より詳細な検討を進めている。特に多重極電磁石等の主要項目については、早期にプロトタイプを試作し性能評価を行うべく、準備をすすめている。

## 参考文献

- [1] H. Hama, *et al.*, Proceedings of the Eighth International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2003), San Francisco, August 2003.
- [2] M. Eriksson, *et al.*, "Design Report for the MAX II Ring", MAX-lab University of LUND, February 1992.
- [3] P. Elleaume, *et al.*, "Computing 3D Magnetic Fields from Insertion Devices", Proceedings of the 17th Particle Accelerator Conference (PAC97), Vancouver, May 1997.
- [4] 田中拓海, 他, "核理研STBリングのための小型ハイブリッド6極磁石の設計", 本予稿集