

## PHASE SHIFTER PROTOTYPE OF A POLARIZATION-CONTROLLED UNDULATOR FOR FAST HELICITY SWITCHING

Norio Nakamura<sup>1,A)</sup>, Kenji Shinoe<sup>A)</sup>, Takashi Shibuya<sup>A)</sup>, Isao Ito<sup>A)</sup>, Hirofumi Kudo<sup>A)</sup>, Atsushi Ishii<sup>A)</sup>,  
Hiroyuki Takaki<sup>A)</sup>, Takashi Tanaka<sup>B)</sup>, Hideo Kitamura<sup>B)</sup>, Teruhiko Bizen<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Synchrotron Radiation Laboratory(SRL), Institute for Solid State Physics(ISSP), University of Tokyo  
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8581

<sup>B)</sup> SPring-8 Center, RIKEN <sup>C)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute(JASRI)  
1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo, Hyogo 679-5148

### Abstract

A 27-m polarization-controlled undulator that consists of four horizontal and four vertical figure-8 undulator segments and seven phase shifters will be installed at SPring-8 as the most highly brilliant soft x-ray source for the material science beamline of the University of Tokyo. Each phase shifter controls the radiation phase by giving a bump orbit to the electron beam with its magnetic field to generate various polarization states such as horizontal, vertical, and circular polarization ones. Fast helicity switching of the circular polarization radiation as well as high stability and reproducibility of the phase control are required for the phase shifter. We designed and fabricated a phase shifter prototype to satisfy requirements for the phase shifter. In this paper, we present the phase shifter prototype including the requirements and also show results of the 3-D magnetic field analysis and the first magnetic field measurement.

## 高速円偏光切替のための偏光制御アンジュレータ用 移相器プロトタイプ

### 1. はじめに

東京大学では、最先端の物質科学研究を行うために、アウトステーションとして既存光源施設に高輝度軟X線ビームラインを設置することとした<sup>[1]</sup>。それを受けて、まずはSPring-8にナノビーム光電子分光、軟X線発光、時間分解分光などの利用実験を行うための物質科学ビームラインを2010年度までに完成させる。このビームラインの光源として、長直線部に全長約27mの偏光制御アンジュレータ<sup>[2]</sup>が採用され、建設されることになった。

今回建設される偏光制御アンジュレータは、水平偏光、垂直偏光、左右円偏光など、様々な偏光状態で世界最高輝度の軟X線(250-2000eV)を発生させることができる。このアンジュレータは、4台の水平偏光8の字(figure-8)<sup>[3]</sup>と4台の垂直偏光8の字の2.7mアンジュレータセグメントが交互に配置され、その間には高速で偏光制御できる電磁石タイプの移相器が設置される。偏光制御アンジュレータから光の特性や品質は、この移相器が制御・決定することになり、高い性能が求められる。ここでは、移相器が満足すべき要件と設計・製作された移相器のプロトタイプについて紹介する。

### 2. 移相器とその要件

既に触れたように、偏光制御アンジュレータでは、水平8の字と垂直8の字アンジュレータを交互に4

台ずつ計8台並べ、その間に7台の移相器が置かれる。図1にその配置構成を示す。移相器はバンパ軌道を電子に与え、アンジュレータセグメント間の放射位相を制御することで、様々な偏光状態を実現する。移相器による位相シフト $\phi$ とバンパ軌道の位置 $x$ と傾き $x'$ は、次式で表せる。

$$\frac{\phi(z)}{2\pi} = \frac{1}{2\lambda} \int_{-\infty}^z x'(z_1)^2 dz_1 \quad (1)$$

$$x'(z) = \frac{e}{mc\gamma} \int_{-\infty}^z B_y(z_1) dz_1 \quad (2)$$

$$x(z) = \int_{-\infty}^z x'(z_2) dz_2 = \frac{e}{mc\gamma} \int_{-\infty}^z \int_{-\infty}^{z_2} B_y(z_1) dz_1 dz_2 \quad (3)$$

ここで、 $e$ ,  $m$ ,  $c$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$ ,  $z$ ,  $B_y$ は、電子の電荷と質量、光速度、ローレンツ因子、アンジュレータ光の波長、進行方向の位置、移相器の垂直磁場である。

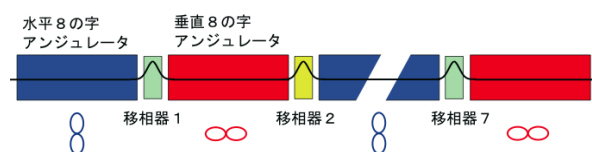


図1 偏光制御アンジュレータの配置構成

<sup>1</sup> E-mail: nakamura@issp.u-tokyo.ac.jp

移相器に必要とされる条件は次のようになる。

- (a) 全ての偏光状態に対応できる位相シフト（最大波長で最大 $3\pi$ ）が実現できる。
- (b) 移相器磁場の変更や変動によって、アンジュレータ光の品質を劣化させたり、リング全体の電子軌道に歪みや変動を与えることがない。
- (c) 偏光状態の切替、特に左右円偏向の切替を高速（10Hz以上）で行える。

要件(a)では、式(1)で与えられる移相器通過後の位相シフト $\phi(\infty)$ は最低限 $2\pi$ が必要であるが、余裕を持って $3\pi$ としている。要件(b)では、移相器磁場に高い再現性と安定性が求められ、さらには位相シフト量の他に移相器通過後の電子軌道の傾きと位置（式(2)(3)の $x'(\infty)$ と $x(\infty)$ に対応）を何らかの方法で調整・制御できる必要がある。要件(c)では高い周波数特性が要求される。その他、移相器として使用可能なスペースや真空チェンバーの内径や厚みなどから、移相器の全長や磁極間ギャップ等に制限が課せられる。このような条件をすべて満たすように、移相器プロトタイプ的设计・製作が行われた。

### 3. 移相器プロトタイプ

移相器のプロトタイプは、ヨーク長が1:2:1の3台のH型の偏向電磁石（順にA, B, Cと呼ぶ）をビーム進行方向に並べた構造で、電磁石は各々上下で半割できるようになっている。図2、図3にその写真と寸法・構造を示す。ヨーク磁極間のギャップは32mmで、磁場の一様性確保のためにシム構造（磁極中央に上底6mm、下底8mm、高さ1mmの台形の凹み）が設けられている。各電磁石で同一断面形状のヨークが上下1つずつあり、0.1mm厚積層パーマロイで製作されている。使用されたパーマロイは、高透磁率かつ低渦流損失のPC系（Ni-Co, Cu-Fe）で、最大比透磁率約400000、飽和磁束密度約0.75Tである。そのため、通常のヨーク材（純鉄やケイ素鋼板）と比べて磁場の再現性に優れているものと期待される。0.1mm厚のヨークシートは、金型からワンパンチ打ち抜きで製作され、磁気特性を最大限に引き出すために1100°Cでアニール（焼鈍）されている。図4にヨークシート（写真）を示す。ヨークは、積層されたヨークシートをワニス含浸処理にて固着したものを、さらに6つの穴を通してボルトで固定している。

3つの電磁石のヨークはノックピンで相対的に位置決めされ、アライメントの基準となる共通の上下2枚のステンレス板に固定されている。3台の電磁石は、1つのコンポーネントとして共通架台の調整機構によって位置・角度が3次元的に調整できる。上のステンレス板上には、クレーン用アイボルトの他にレーザートラッカーのターゲット用の2つの穴と基準水平面が用意されている。

コイルは、1電磁石当り上下2個あり、それぞれ直径2mmのエナメル銅線が300ターン巻かれ、電気絶縁や熱伝導のためにエポキシ樹脂で固められている。測定された電磁石A, B, Cのコイル抵抗は上下2個の合計で、 $R_A=R_C=1.15\Omega$ 、 $R_B=1.62\Omega$ 、インダクタンスは $L_A=145.6\text{mH}$ 、 $L_B=247.2\text{mH}$ 、 $L_C=146.9\text{mH}$ である。1コイルの最大コイル電流は1500アンペアターン[AT]で、コイル断面積はエポキシも含めて24mm×80mmである。自然空冷で運転できるように設計されている。



図2 移相器プロトタイプ

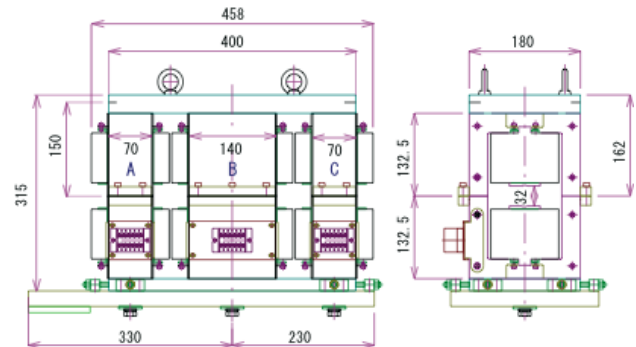


図3 移相器プロトタイプの寸法・構造（単位mm）

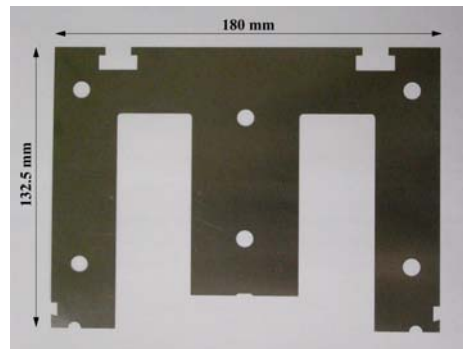


図4 ヨークシート（0.1mm厚パーマロイ）

電源はリップルの小さいリニアアンプ方式をプロトタイプとして採用した。これは、以前に高速軌道フィードバックの補正電磁石用電源として開発した5A20V電源<sup>[4]</sup>を、5A30Vまで容量を増やしたものである。電流リップルは、最大電流5Aに対して100ppm以下に抑えられるように設計されている。また、立ち上げ8時間内でのドリフトも100ppm以下に抑えられ

ている。さらに、電源自身の周波数応答は、1kHzまでの振幅減衰は-3dB、位相遅れは90度以下になるように設計・調整されている。電源1台で1台の電磁石(上下2コイル)に電力を供給するので、移相器1台で3台の電源が使われる。これによって、位相シフトと移相器通過後のバンブ軌道の傾きと位置が独立して調整できる。

#### 4. 磁場解析

磁場解析は、3次元磁場解析コードELF/MAGIC<sup>[5]</sup>を用いて行われた。図5に、計算されたz軸方向の磁場分布と式(1)による位相シフトを示す。位相シフトは最小光子エネルギー250eV(波長 $\lambda=4.959\text{nm}$ )時のものである。また、図6にこの磁場分布と式(2)(3)から求めた電子ビームのバンブ軌道とその傾きを示す。1コイル当りの電流は、電磁石A,B,Cでそれぞれ $I_A=-1270\text{AT}$ 、 $I_B=1400\text{AT}$ 、 $I_C=-1270\text{AT}$ で、移相器通過後の $x$ と $x'$ がほぼゼロになるように調整されている。図5より、位相シフトはこの時ほぼ $4\pi$ になり、移相器の要件(a)を満足している。

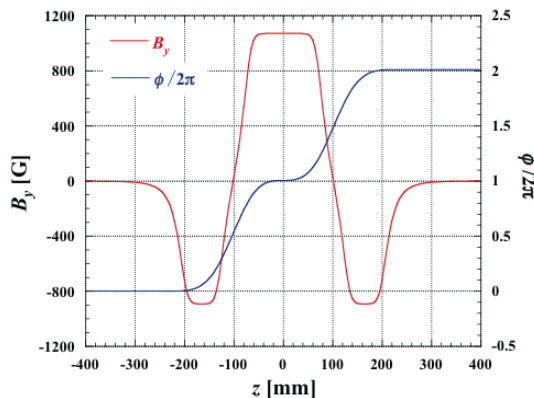


図5 計算された磁場分布と位相シフト  
( $I_B=1400\text{AT}$ ,  $I_A=I_C=-1270\text{AT}$ )

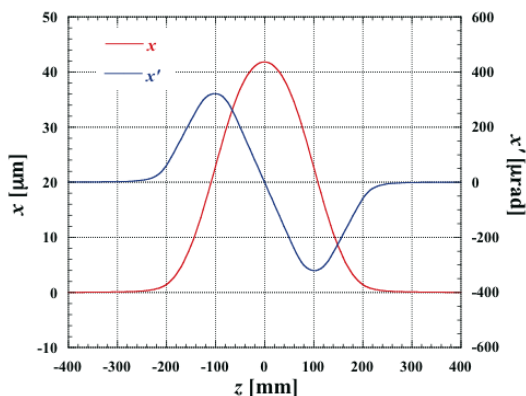


図6 計算されたバンブ軌道とその傾き  
( $I_A=1400\text{AT}$ ,  $I_B=I_C=-1270\text{AT}$ )

#### 5. 磁場測定

最初の磁場測定をホールプローブと3次元ムーバーで構成される3次元磁場測定システムを用いて

行った。図7に、コイル電流が $I_B=1400\text{AT}$ 、 $I_A=I_C=-1400\text{AT}$ の時のz方向磁場分布の測定結果を示す。測定された磁場分布は磁場解析結果と良く一致し、電磁石中心での磁場の絶対値は3台全て1070-1074 Gauss[G]であった。また、図8に電磁石Bの中心での水平方向の磁場分布の測定結果を示す。磁場の様性は $\pm 7\text{mm}$ の範囲で $\pm 0.05\%$ が確保されており、磁場解析結果ともほぼ一致する。

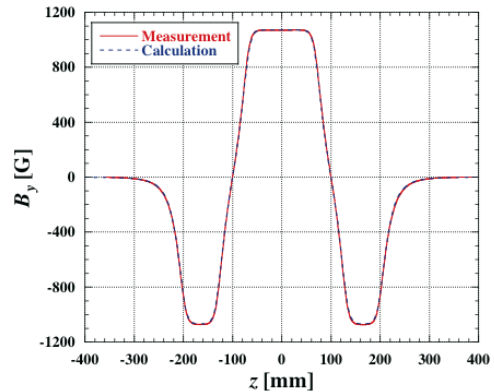


図7 測定されたz方向の磁場分布  
( $I_B=1400\text{AT}$ ,  $I_A=I_C=-1400\text{AT}$ )

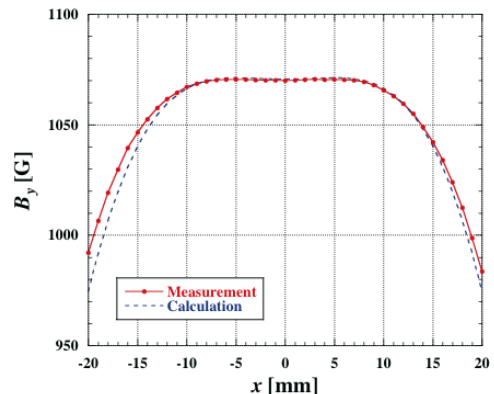


図8 測定されたx方向の磁場分布 ( $I_B=1400\text{AT}$ )

#### 6. まとめ

偏光制御アンジュレータ用移相器のプロトタイプをその要件に基づいて設計・製作し、磁場測定も開始した。磁場測定結果は、磁場解析結果と良く一致している。今後、本格的に磁場測定を行うとともに、安定性、再現性、周波数特性などの点から性能を評価していく。また、他の積層ヨークとの比較を行い、実機設計の参考としたい。

#### 参考文献

- [1] 尾嶋正治、柿崎明人、“東京大学アウトステーション計画”、放射光20巻6号、p.383 (2007).
- [2] T. Tanaka and H. Kitamura, AIP Conference Proceedings **705** (2004) 231.
- [3] T. Tanaka et al., Rev. Sci. Instrum. **70** (1999) 4153.
- [4] Activity Report of Synchrotron Radiation Laboratory 2002.
- [5] <http://www.elf.co.jp/product/elfmagic.html>