

## 最近の研究から

### PF-AR におけるテーパ化機構を持った X 線アンジュレータの開発

山本 樹、土屋公央、塩屋達郎

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光研究施設

#### Development of two new X-ray undulators with tilt mechanism at the PF-AR

Shigeru YAMAMOTO, Kimichika TSUCHIYA and Tatsuro SHIOYA

Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, KEK

#### 1. はじめに

物質構造科学研究所では、2000 年度および 2001 年度に、PF-AR の高度化計画（電子ビームの寿命を改善し単バンチ大電流放射光源の実現を図る）を遂行した。この高度化計画において我々は、本来高エネルギー実験用加速器として建設された、入射・蓄積用電子リング（8 GeV）を放射光専用リング（運転エネルギー 6～6.5 GeV、自然エミッタンス 160 nm@6 GeV（現状では 290 nm@6 GeV：160 nm@6 GeV を目指したマシンスタディが進行中））に改造し、2 台の新しい挿入光源を建設した。PF-AR における利用実験は、主に X 線領域を中心にしたものとなる（蛋白質構造解析、XAFS 実験等）。従って光源となる新しい挿入光源も、5～25 keV 領域の X 線（1～5 次光として）を生成できる、上記利用実験の目的に沿ったものとしなければならない。今回の記事ではこの挿入光源（X 線アンジュレータ）について述べることにする。

上記要求を達成するための光源として、我々はテーパ化機構を持った真空封止アンジュレータ（以下単にテーパ型と呼ぶ）の建設を行った。真空封止方式を採用する理由は、上述のエネルギー領域をカバーするために必要な短周期（4 cm）磁場の発生に要求される狭い磁極間ギャップと、加速器内の電子ビームに必要なアパーチャを両立させるためである。ここで、“テーパ型”とは真空槽内の磁石列をアンジュレータ軸方向に傾斜させることでアンジュレータの入り口よりも出口で少し広い（狭い）ギャップを設定できるアンジュレータを意味する。テーパモードを採用する目的は、アンジュレータの磁場を意図的に“乱す”ことによってアンジュレータ放射のバンド幅を、本来ならば理想的サイン型磁場から得られる高輝度放射光のそれよりも、広くすることにある。しかし、このモードの特徴はアンジュレータ放射の高輝度特性を犠牲にして拡張されたバンド幅を得ることにあるので、XAFS 実験等の特別な利用研究には適合するが他の一般的回折実験には必ずしも最適とは言えない。従って、理想的サイン型磁場を実現する一般実験用通常アンジュレータモードと XAFS 実験等のためのテーパモードとの切り替えを完全に可逆に行いうる磁気回

路的・機構学的方式の実現が重要になる。我々は、この方式の開発を行い今回の新型アンジュレータに応用した。

我々はこれまで、世界に先駆けて硬 X 線領域の円（楕円）偏光放射光を生成するウィグラノアンジュレータの開発 [1] および同じくメスバウア光源用真空封止型 X 線アンジュレータの開発 [2] を PF-AR において行ってきた。これらの成果は、我々光源開発者と利用研究者の間の活発な議論を通して目的志向型の光源デザイン・実験デザインを試みた結果得られたものであると考える。この試みは、本来高エネルギー加速器として建設された PF-AR（当時はトリスタン AR）において、放射光研究者がその寄生的生存権を主張するための最大の根拠であったと記憶する。しかし、目的指向型の問題設定（＝光源デザイン・実験デザイン）は PF-AR が放射光光源に専用化されその高度化計画が進行中の今日さらに重要になっていると確信する。テーパ型アンジュレータが単なる新奇なアイデアにおおらず、大きな成果を上げられるように期待する。

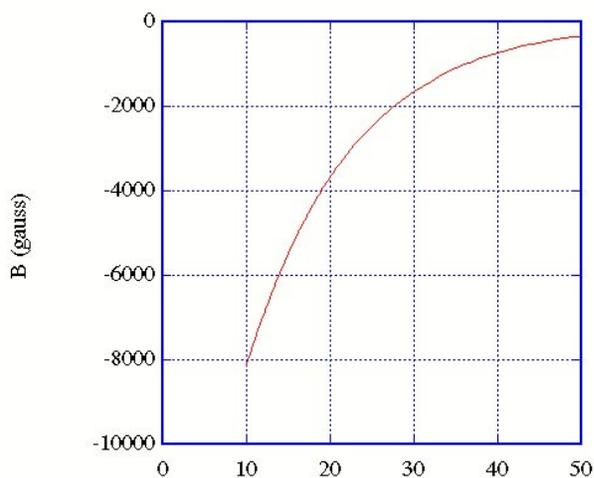
#### 2. 新しい挿入光源 U#NW2 および U#NW12 の基本性能

##### 2-1. 通常アンジュレータモード

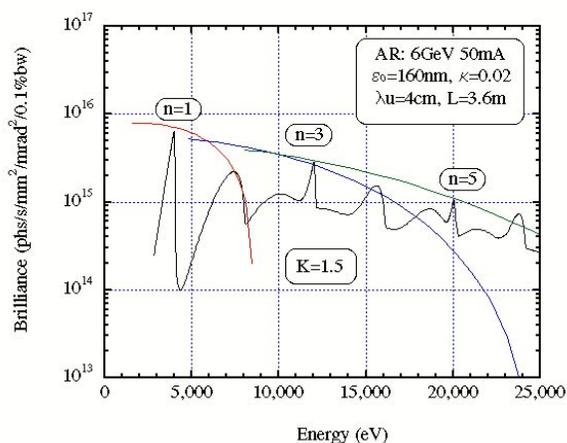
今回新しく建設したアンジュレータ（U#NW2 および U#NW12：PF-AR における設置場所および放射取り出し口を設ける偏向電磁石（B-NW2 および B-NW12）によってこのように命名）は、生成可能な放射のエネルギー領域として 5～25 keV を連続的にカバーすることが求められている。PF-AR 運転エネルギーを 6～6.5 GeV として、アンジュレータ放射の 1 次から 5 次光を用いるとすると、アンジュレータの磁場周期長としては 40 mm 程度が最適なものになる。設置場所において許される占有長さから、U#NW2 の周期長  $\lambda_u$  を 40 mm とし、周期数  $N$  を 90 とすることにした（U#NW12 については同一の周期長で  $N=95$ ）。U#NW2 および U#NW12 の基本仕様を Table 1 に示した。磁場に関する仕様は 1989 年に建設し PF-AR に設置した U#NE3 真空封止型アンジュレータ [2] と同一である。第 1 節で述べたように、これらのアンジュレータはバンド幅の広いスペクトルを持つテーパモードと一般回折実験用の

Table 1. Parameters of U#NW2 and U#NW12.

	U#NW2	U#NW12
Period length	40mm	
Number of periods	90	95
$K$	0.12 ~ 3.0	
$B_0$	0.32 ~ 8.12kG	
Minimum gap	10mm	
Maximum gap	50mm	
Magnet structure	Pure	
Magnet material	NdFeB (TiN coating)	



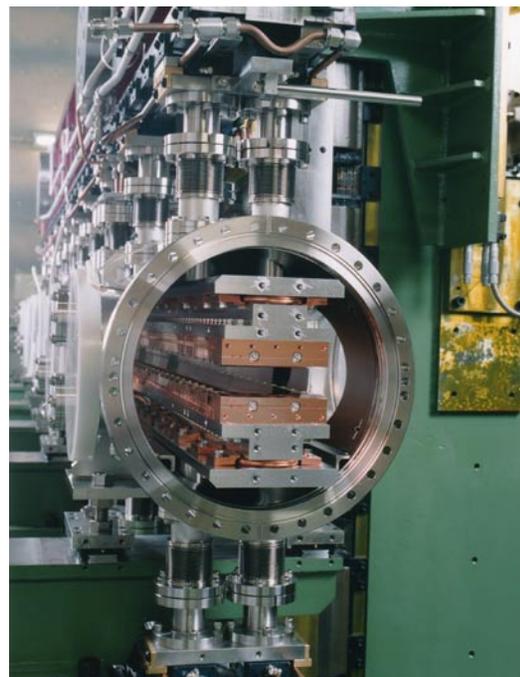
**Figure 1** Relation between the magnetic field strength and the magnet gap in U#NW2.



**Figure 2** Spectra of the synchrotron radiation from U#NW2. The curves with the number, n, denote loci of the peaks of the individual harmonics. The spectrum in the case of  $K=1.5$  is also shown.

通常アンジュレータモードを持つ。U#NW2の通常モードにおけるアンジュレータ磁石列間ギャップと磁場強度の関係を Fig. 1 に、またこのモードにおけるスペクトルを Fig. 2 に示した (PF-AR の基本パラメータ: 運転エネルギー 6GeV、蓄積電流値 50 mA、自然エミッタンス 160 nm、およびエミッタンスカップリング 2%)。

磁場の周期長を 40 mm としたので、アンジュレータ



**Figure 3** Inside structure of the in-vacuum undulator, U#NW2.

磁場として意味のある磁場強度を得るためにはギャップを 20 mm 程度以下に設定しなければならない。一方で PF-AR の直線部における真空ダクト鉛直方向の外径は 46mm である。このことは、U#NW2 および U#NW12 の真空システムおよびアンジュレータ磁気回路の方式として磁気回路全体を加速器真空中に持ち込む真空封止型が必要であることを意味する。

磁石素材には、優れた磁気特性だけでなく、超高真空達成のための加熱排気にも耐える高温特性を持った NEOMAX35EH (Nd-FeB 系合金; 残留磁束密度  $Br=12.1$  kG、保磁力  $iHc=25$  kOe) を採用した。多孔質体である上記磁石の真空封止は TiN コーティング (5  $\mu$ m 厚) によって行い、無酸素銅製の磁石ホルダーに装着した上で上下 1 対の Al 合金製の磁石支持用ガーダー上に配列した。これらの磁石列はステンレス鋼製の真空槽 (内面を電解研磨処理; 内径 250 mm  $\times$  長さ 4100 mm (U#NW2) および 4300 mm (U#NW12)) に収納されている: Fig. 3 (U#NW2 の内部構造) 参照。排気には非蒸発ゲッターポンプ (排気速度 4000 liter/sec (U#NW2) および 5000 liter/sec (U#NW12)) およびスパッタ・イオンポンプ (240 liter/sec (U#NW2) および 480 liter/sec (U#NW12)) を採用した。上述の薄い TiN コーティングによる真空封止は、電子に対する開口をギャップ値とほぼ等しくとれるという点でも大きな利点を持つ。

## 2-2. テーパアンジュレータモード

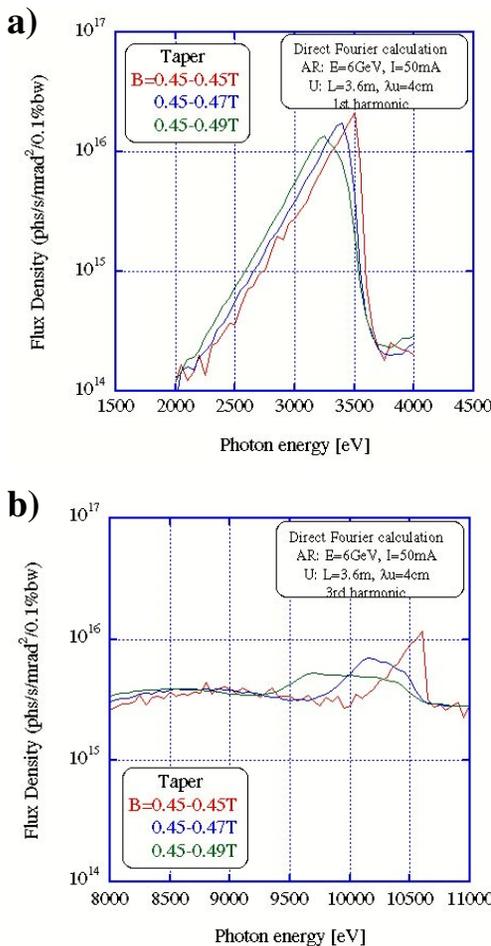
XAFS 実験等に必要とされる幅の広いスペクトルを実現するためにアンジュレータ磁場を“乱す”方法としては (全く磁場調整を行わないことを含めて) 幾つか考えられるが、通常モードにおいて放射の最善の 1 次コヒーレンスが得ら

れる磁場の状態を維持しつつ、それと幅広スペクトルに対応する磁場状態とを完全に可逆的に切り替えることが可能な方法として、テーパ型を採用することにした。テーパモードにおいては、対向する磁石列を意図的に先開き（閉じ）に配置（テーパ型磁石列配置）し、サイン型の磁場分布を、アンジュレータを通過するにつれ徐々に弱く（強く）なる分布に変更する。

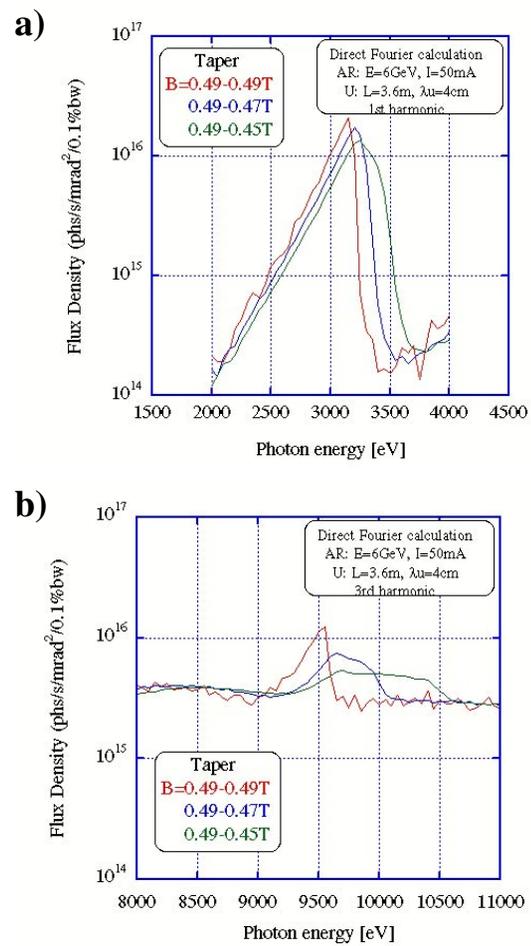
通常のアンジュレータでは磁場を変更するために、2本のボールネジで磁石列間のギャップを制御している。このボールネジの駆動を全く独立に行えば任意のテーパ配置を実現できるが、ここではこの方式を採らない。1本のボールネジのストロークはギャップ可変の全領域であるため、制御系または駆動モータの故障により、最悪の場合2本のボールネジに一方には最小ギャップ他方には最大ギャップが実現し（50 mm/1m 程度のテーパ）、精密機械であるアンジュレータの駆動機構を破壊させる可能性が大きいからである。また、この様に大きなテーパは真空封止型アンジュレータの場合、ボールネジの駆動力を真空槽内の磁石列に伝達するペローズシャフトのペローズ変形として許容されない。

代わりに、今回の建設では2本のボールネジを連結し1台のモータで駆動する。この駆動軸系連結部に位相調整装置を備え、テーパ配置が必要な場合、これを別の小モータで駆動し両ボールネジ間に位相（回転数）の差を与えテーパ配置を実現する。駆動機構としては、磁石列を載せた1本のIビームに装着した2台のサドルをボールネジによりリニアガイドで案内する方式を採るが、Iビームとサドルの連結部に、Iビーム（=磁石列）がテーパモード時にスムーズに傾斜回転できる様に高剛性の軸受けを用いる。さらに一方のサドル連結部には、Iビームの傾斜によって生じる軸受芯間距離の水平方向の変化量を吸収するための水平配置のリニアガイドを設ける。

上記の機構によって実現されるテーパ型磁場分布から予想されるスペクトルの計算例（Flux density）を Fig. 4 および Fig. 5 に示した（U#NW2）。Fig. 4 は通常モードでのアンジュレータ磁場 0.45T の状態から、アンジュレータ入り口の磁場を 0.45T に保ちつつ出口側を徐々に閉じて 0.49T まで強めた場合のスペクトル（Fig. 4a：1次光および Fig. 4b：3次光）であり、Fig. 5 は逆に入り口の磁場を 0.49T に保ちつつ出口側を開いて 0.45T まで弱めた場合に相当す



**Figure 4** Calculated spectra (the fundamental harmonic: Fig.4a and the third harmonic: Fig.4b) of the radiation of U#NW2 in the tapered mode are compared with that in the ordinary mode. In the tapered mode, the undulator field increases from 0.45T to 0.49T at the exit of the undulator, whereas the field at the entrance is kept constant to 0.45T.



**Figure 5** Calculated spectra (the fundamental harmonic: Fig.5a and the third harmonic: Fig.5b) of the radiation of U#NW2 in the tapered mode are compared with that in the ordinary mode. In the tapered mode, the undulator field decreases from 0.49T to 0.45T at the exit of the undulator, whereas the field at the entrance is kept constant to 0.49T.

るスペクトルである (Fig. 5a:1 次光および Fig. 5b:3 次光)。磁場は入り口から出口まで線形に分布しているとし、スペクトル計算には直接フーリエ変換法を用いた (PF-AR のパラメータ: 運転エネルギー 6 GeV、蓄積電流値 50 mA、自然エミッタンス 160 nm、およびエミッタンスカップリング 2%、 $\beta_x=6$  m、 $\beta_y=9$  m)。テーパの度合いが増すにつれてスペクトルの頭がつぶれ幅の広いスペクトルが得られることが判る。また一般にアンジュレタ放射では磁場が低くなるとピークは高エネルギー側に移動する。アンジュレタ入り口部の低磁場を一定に保ちつつ出口部の磁場を強めた Fig. 4 の場合には、スペクトルの高エネルギー側が固定されテーパの度合いが進むにつれ低エネルギー側に裾を引く形でバンド幅の拡大が起り、入り口の高磁場を保ちつつ出口の磁場を弱めた Fig. 5 の場合には逆に高エネルギー側に裾を引く形でバンド幅拡大が起る。

### 3. U#NW2 および U#NW12 の磁場調整

#### 3-1. 磁場調整

U#NW2 および U#NW12 に対する磁場調整は通常アンジュレタモードにおいて (テーパゼロの磁石配列に対して) 行った。我々が採用した磁場調整の方法は (1) 磁石交換 (粗調整) と (2) チップ磁石の使用 (微調整) である。この最適化における判断基準は、これまで PF および PF-AR における挿入光源の開発で採用してきたのと同じように、アンジュレタ中の電子軌道をできる限り理想的なサイン曲線に近づけるということである。ここでは特に良好な横方向コヒーレンスを確保するために、電子軌道 (の包絡線) の折れ曲がり、アンジュレタ放射の波長によって決まる固有の角度広がり  $\sigma_{\theta}$  より十分に小さくなるようにした。

$$\sigma_{\theta} = \sqrt{\lambda / N \lambda_u}$$

ここで、 $\lambda$  は放射の波長であり、 $\lambda=0.06$  nm (20 keV) とすると  $\sigma_{\theta}=4 \times 10^{-6}$  rad. となる。ここでは U#NW2 を例に取って、磁場調整の最終結果をアンジュレタの中を通過する電子の軌道として Fig. 6 に示した (Fig. 6a: 水平方向、Fig. 6b: 鉛直方向、ともに電子エネルギー 6.5 GeV 時)。磁場調整を行ったギャップ (=20 mm) 以外のギャップでもアンジュレタ中の周期磁場が良好に保たれている状況が判る。また、アンジュレタ入り口部に生じる誤差磁場による電子軌道へのキック (電子の入射方向とアンジュレタ軸との平行性を乱す) も非常に小さく抑えることができた (全ギャップ領域にわたり絶対値で 50 Gcm 程度)。Fig. 6 に示した  $\Delta BS_{ENT}$  は、ギャップ 20 mm を基準にしたアンジュレタ入り口部におけるキック誤差の変化分である。

U#NW2 のテーパモードにおける磁場の状況を同様の方法で示したのが Fig. 7 (6.5 GeV 時; ギャップ =20 mm) である。通常モードからテーパモードに移行しても、アンジュレタ中の磁場に劣化は見られない。図ではわかりにくいですがテーパの程度が増すにつれ電子軌道の振幅はアンジュレタ出口部において入り口部より微小に小さくなっていく

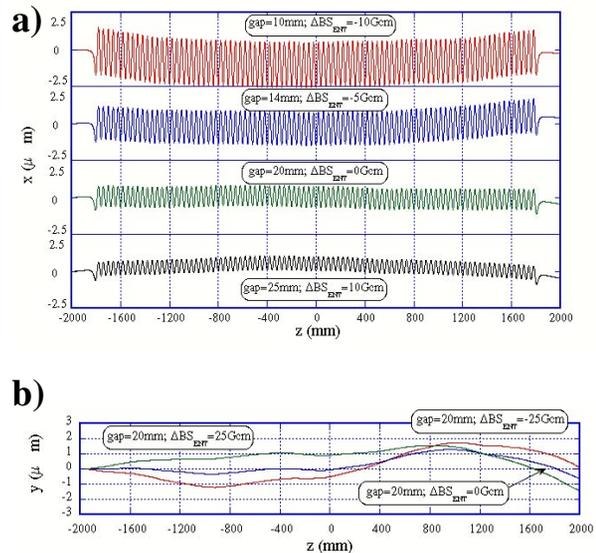


Figure 6 Electron orbits in the horizontal (Fig.6a) and the vertical (Fig.6b) directions in U#NW2 at several gaps at PF-AR's operation energy of 6.5 GeV, which are calculated based on the precise measurements of the undulator field.

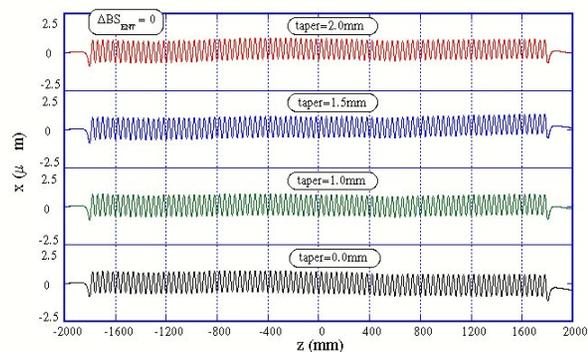
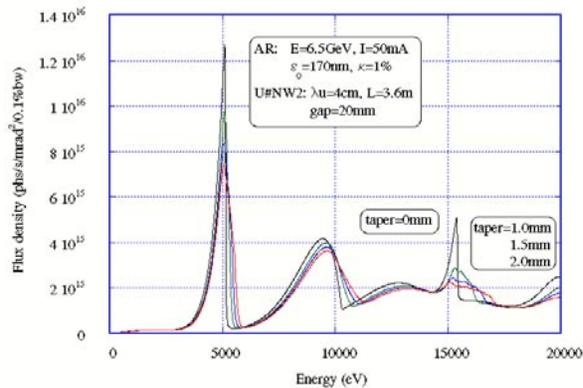


Figure 7 Electron orbit in U#NW2 at a gap of 20mm when we take the tapered configuration of the magnet arrays. The amounts of the taper are given as a difference of the gaps between at the entrance and at the exit of the undulator.

る (アンジュレタ入り口から出口へかけて磁場が徐々に弱まる磁場テーパを採用しているため)。また今回の磁場測定精度の範囲内では、テーパの程度を増やしても入り口部のキックエラー、 $\Delta BS_{ENT}$  に、何ら変化が見られなかったことは特筆に値する。なお、Fig. 7 における taper とは、入り口部と出口部のギャップの差である。

#### 3-2. 実測磁場に基づくスペクトル

Fig. 8 はテーパモードにおける実測磁場 (Fig. 7 に示した: ギャップ =20 mm ( $B_0=3670$  G)) から求めた放射のスペクトル (Flux density) である。スペクトル計算には前節と同様に直接フーリエ変換法を用いた (PF-AR のパラメータ: 運転エネルギー 6.5 GeV、蓄積電流値 50 mA、自然エミッタンス 170 nm、およびエミッタンスカップリング 1%、 $\beta_x=5.4$  m、 $\beta_y=10.1$  m)。Fig. 7 と同じ定義でテーパ量



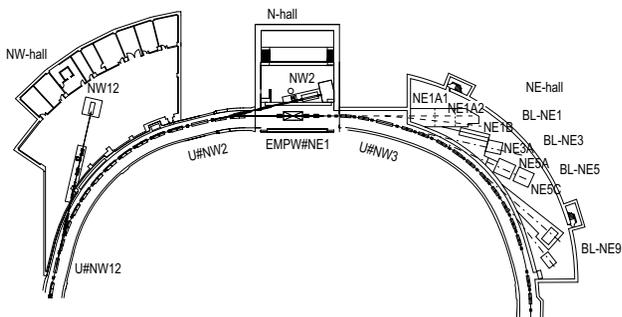
**Figure 8** Calculated spectra in the tapered mode are compared to that in the ordinary mode. The calculation is made on the basis of the measured magnetic field shown in Fig. 7.

を増加させるにつれてスペクトルの頭がつぶれ幅の広いスペクトルが得られることが判る。

#### 4. 真空立ち上げと PF-AR への設置

U#NW2 および U#NW12 の磁石列を収納する真空槽は、加速器に連結され電子ビームのパスにもなるため超高真空状態に保たねばならない。そのために、120℃、48時間の加熱処理を行い真空立ち上げを行った。前節に述べた排気系を採用し、 $1.2 \sim 1.5 \times 10^{-10}$ Torr の到達真空度が得られている。真空作成時における磁場性能の高温劣化を防ぐために磁石列の高温処理を真空中 145℃において、あらかじめ行っている。さらに、調整後の磁場性能に対する温度の影響を調べるために、上記真空作成の前に磁石列を同一の温度（真空中 120℃）に曝した後再度磁場測定を行い変化のないことを確認した。上記の磁場安定化・真空作成法については、U#NE3 の開発時に得た知識を参考にして発展させた [2]。

上記の立ち上げ調整作業を終えたこれらの真空封止アンジュレータは、2001年10月（U#NW2）および2002年8月（U#NW12）に PF-AR に導入設置された [3]。PF-AR におけるこれらのアンジュレータの配置を Fig. 9 に示す。2002年1月よりは加速器・放射光ビームラインを合わせた PF-AR の加速器高度化完了後の立ち上げ実験が開始された。その後、ビームライン BL-NW2 への光導入試験、ビームラインの立ち上げ作業を経て XAFS 等の利用実験



**Figure 9** Plan view of the north half of the PF-AR.

が進行中である。また、U#NW12 からの放射を利用する BL-NW12 においても同様の立ち上げ実験を経て、2003年4月から共同利用実験を開始した。すでにいくつかの構造生物学的に重要なタンパク質構造決定がなされている。この間テーパモードを含めたアンジュレータスペクトルの測定も一部開始されており、それによれば確かにテーパモードに対応する幅の広いスペクトルは実現されている。実測スペクトルとそれに基づくアンジュレータ磁場性能・加速器性能の評価については別途報告することにした。

#### 引用文献

- [1] S.Yamamoto, T.Shioya, S.Sasaki and H.Kitamura, Construction of insertion devices for elliptically polarized synchrotron radiation, Rev. Sci. Instr. **60**, 1834 (1989).
- [2] S.Yamamoto, T.Shioya, M.Hara, H.Kitamura, X.Zhang, T.Mochizuki, H.Sugiyama and M.Ando, Construction of an in-vacuum type undulator for production of undulator x rays in the 5-25 keV region, Rev. Sci. Instrum. **63**, 400 (1992).
- [3] S.Yamamoto, K.Tsuchiya, and T.Shioya, Construction of two new in-vacuum type tapered undulators for the PF-AR, in press, the proc. of the eighth international conference on synchrotron radiation instrumentation (2003).

(2003年12月22日原稿受付)

#### 著者紹介

山本 樹 Shigeru YAMAMOTO  
物質構造科学研究所 助教授  
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1  
TEL: 029-864-5663  
FAX: 029-864-2801  
email: shigeru.yamamoto@kek.jp

土屋公央 Kimichika TSUCHIYA  
物質構造科学研究所 助手  
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1  
TEL: 029-864-5675  
FAX: 029-864-2801  
email: kimichika.tsuchiya@kek.jp

塩屋達郎 Tatsuro SHIOYA  
物質構造科学研究所 文部科学技官  
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1  
TEL: 029-864-5675  
FAX: 029-864-2801  
email: tatsuro.shioya@kek.jp