

特集：高輝度X線(I)—SPring-8—

## SPring-8 の挿入光源

北村 英男

原研・理研大型放射光施設計画推進共同チーム\*

## Insertion Devices at SPring-8

Hideo KITAMURA

JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team

SPring-8 is a typical third-generation light source optimized for insertion devices, particularly undulators. The ring has 38 straight sections for insertion devices including four 30-m straight sections where the installation of very long undulators will be possible by some modification. The beam energy, 8 GeV, is the highest among the third-generation x-ray sources in the world. In addition to that, a great many in-vacuum undulators will be installed in the ring, so that it will be possible to generate very hard x-rays in the photon energy region up to several ten keV by fundamental of undulator radiation. On the other hand, there are some difficulties in the utilization of soft x-ray radiation because of very high heat load. To avoid that, the exotic devices, helical undulator or figure-8 undulator, have been constructed for circular or linear polarization. In the paper, we describe the characteristics of the ten devices under construction toward the start of the user running in October, 1997.

## 1. はじめに

よく知られているように、加速器の偏向部から得られるシンクロトロン放射は遠赤外からX線領域にいたる広大な波長領域において連続スペクトルを有する光源である。したがって、適当な分光器さえ用意すれば任意の波長をもつ単色光を得ることができる。この性質が今日の放射光科学の発展に大いに寄与してきたことは疑いのない事実である。しかしながら、この光源のバンド幅は分光器の分解能 ( $10^3 \sim 10^4$ ) と比較してあまりにも広すぎる。その結果、分光後の光には目的とする

光学実験には不要な迷光、高次光が含まれることになる。しかも、光源そのものによる熱負荷によって光学素子が損傷を受けることもある。以上のような熱負荷は理不尽な熱負荷と呼ぶべきものであろう。というのは、この熱負荷の大部分は光学実験には不要なスペクトル領域の光によってもたらされているからである。ゆえに、以下のような結論が引き出される。「シンクロトロン放射光源に必要とされるスペクトル性質は決して連続スペクトルではなくチューナブルな単色光である」。歴史的にはこれが挿入光源 (アンジュレータ) 開

\* 原研・理研大型放射光施設計画推進共同チーム 〒678-12 兵庫県赤穂郡上郡町 SPring-8 リング棟  
TEL 07915-8-0831 FAX 07915-8-0830

発の動機となったのである<sup>1)</sup>。

SPring-8(SP8)は典型的な第3世代放射光源である。しかも、4カ所の30 m長直線部を有しており、これがSP8に強烈な特徴を与えている。第3世代光源の定義を確認すると「アンジュレータ放射に最適化した光源専用蓄積リング」となる。SP8には最大61本のビームラインが設置できる。このうち38本(このうち4本が30 m長直線部対応)が挿入光源対応で23本が偏向部である。当然であるが、SP8は蓄積リングであるから偏向電磁石を欠くと加速器として成立しなくなる。この磁石からは利用するしないに関わらず放射光が発生しているから、これにビームラインを設置してもSP8の基本方針になんらの影響がない。しかし、挿入光源ビームラインの場合は事情がおおいに異なる。たとえば、ある直線部にあるタイプの挿入光源を設置することは、そこに他のタイプを設置することを排除してしまうことになるのである。したがって、38箇所の直線部にどのタイプの挿入光源を設置するかを決定する過程においては、SP8の基本方針と放射光科学の現状と将来を見据えた慎重な判断が必要となるであろう。偏向部やウィグラーが、アンジュレータと比べて異なっているところは発生する放射光が白色(連続)である点である。最終的には単色光が必要である場合にはアンジュレータ利用がベストであるが、強烈な白色光を必要とするならばウィグラーを使うしかない。しかし、安易にこの挿入光源をSP8に導入することは避けるべきである。後述するがウィグラーの性能を発揮するためにはPFリングやトリストランAR等の第2世代リングで十分なのである。しかし、現状では以上のリングには挿入光源対応の自由な直線部がほとんど残っていないことを考慮しなければならないから、ある程度はSP8にウィグラーを設置せざるを得ないであろう。この報告はSP8において展開する光源の基本戦略と導入を予定している挿入光源の建設現状について述べるものである。

## 2. SPring-8の光源戦略

### 2.1 輝度, 光束密度と全光束

ここで第3世代リング(SP8)と第2世代リング(AR)に同一仕様のアンジュレータ(周期長3.2 cm, 周期数140, 偏向定数1)やウィグラー(周期長12 cm, 周期数37, 磁場1.0 T)を設置したと想定した場合のスペクトル比較をしてみる。図1a~cはそれぞれ輝度, 光束密度, 全光束の比較である。図1-aに示すように輝度特性の場合、偏向部、ウィグラーはSP8が約100倍、アンジュレータは約1000倍優っている。ただし、X線光学系の場合、ミラーによる光学的マッチングができないことが多いので輝度よりも図1-bの光束密度の比較のほうが実質的であると思われる。光束密度の場合、ウィグラーは2~3倍程度

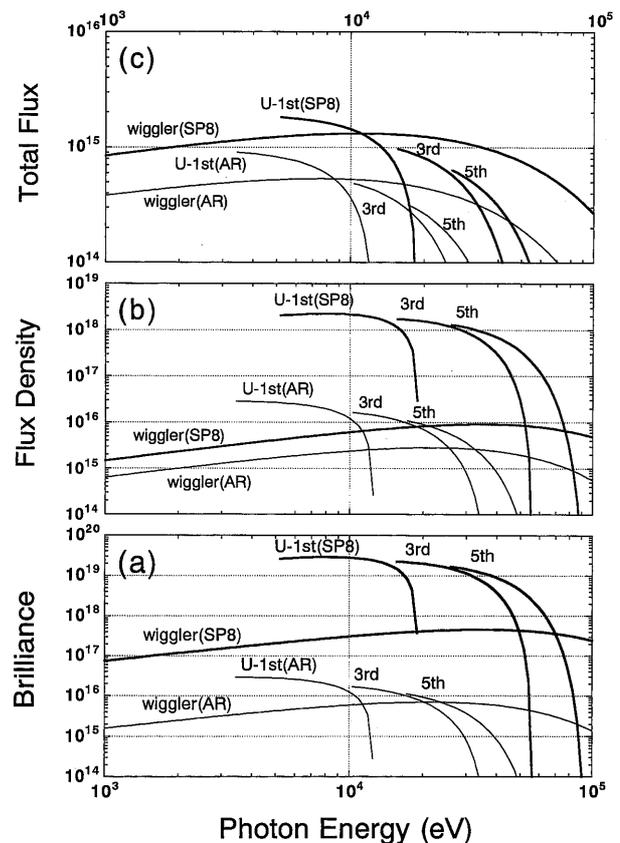


Figure 1. Spectra obtained from the undulator ( $\lambda_u = 3.2$  cm,  $N = 140$ ,  $K = 1$ ) and wiggler ( $\lambda_w = 12$  cm,  $N = 37$ ,  $B = 1$  T) which are assumed to be installed in the Spring-8 or Tristan Accumulation ring. The emittance, coupling and beam current of SPring-8/AR are assumed as  $6 \times 10^{-9} / 1.7 \times 10^{-7}$  m $\cdot$ rad, 2/1%, 100/50 mA, respectively.

SP8 が優っている。しかし、この差はほとんど蓄積電流の差 (SP8 : 100 mA, AR : 50 mA) であるから、偏向部とウィグラーに限れば光束密度性能はマシンの違いに依らないといえる。一方、アンジュレータ光束密度は約100倍 SP8 の方が優れている。輝度や光束密度は光学系のアクセプタンスが狭い場合にのみ重要な物理量となるが、アクセプタンスが放射の拡がりよりも広い場合には全光束特性が重要となる。しかし、図 1-c に示すように、全光束性能に限定する限り、SP8 の優位性はどの光源についても2倍程度 (電流値) しか変わらない。しかも、アンジュレータのウィグラーに対する優位性はない。言い換えれば、アクセプタンスが十分広い光学系を使う実験においては高輝度光源 (第3世代放射光源) は不要である。

## 2.2 光源の選択

光学系のアクセプタンスが狭く、かつ単色光を必要とする場合は、アンジュレータ利用をすすめる。偏向部、ウィグラー利用も可能であるが、そのスペクトル性能はアンジュレータにはとてもかなわない。とくに、ウィグラーの場合は利用できる放射パワーの全放射パワーに対する比が絶望的と思えるほど小さい。言い換えれば、利用できずに捨てられる放射パワーが光学素子を痛めつけるという理不尽さのみが目立つ光源である。

単色光が必要であるが、光学系のアクセプタンスが十分広い場合は、挿入光源であれば、ウィグラーでもアンジュレータでも、実質的違いはない。ただし、前述したように、この場合は第3世代放射光源である SP8 を利用する必然性は希薄となる。しかも白色光を必要とする場合は準単色光源であるアンジュレータは全く不向きである。したがって、連続スペクトル光源である偏向部やウィグラーを利用しなければならない。極数の多いウィグラーの方が当然光強度が高い。しかし、SP8 の大強度白色光の場合は実験ステーシ

ョン内のバックグラウンド X 線強度が問題となる。

周期長 3 cm 程度の真空封止アンジュレータの高エネルギー側の限界は概ね 80 keV (5 次光) である。80 keV 以下で単色光を必要とする放射光実験は実効的光強度と放射パワーの観点からアンジュレータが圧倒的に有利である。80 keV 以上の高エネルギー領域では当面はウィグラーに頼らざるを得ないが、将来、真空封止ミニポールアンジュレータを導入することによって 300 keV まではアンジュレータ特有の単色光利用が可能となるであろう<sup>2)</sup>。

円偏光利用の高エネルギー限界は真空封止型ヘリカルアンジュレータを使って 30 keV までとなる。100~300 keV 領域は、当分の間、楕円ウィグラーに頼らざるを得ない。しかし、この領域の円偏光も将来真空封止ミニポールアンジュレータによって得られる見通しである。

SP8 における真空紫外光利用は低放射パワー密度型のアンジュレータを導入すれば可能となる。通常型の直線アンジュレータを使えば 1 keV 以上の領域で利用可能であるが、1 keV 以下を発生するアンジュレータでは高い放射パワー密度によって回折格子等の光学素子が損傷を受けることになる。これを避けるにはヘリカルアンジュレータ (円偏光) や 8 の字アンジュレータ (直線偏光) を採用しなければならない。ヘリカルアンジュレータは本来円偏光を得るためのデバイスであるが、原理的に軸上では基本波しか放射せず、理不尽な放射パワーとなる高調波は軸外に放射する。このことは、例え偏向定数 K を大きく設定しても軸上での放射パワー密度が逆に低くなることを示唆している。しかし、直線偏光を必要とするユーザーにはこの光源は役に立たない。これを解決するために考案されたのが 8 の字アンジュレータである。以上 2 種の光源は真空紫外光科学の分野に SP8 利用の道を大きく拓くものと期待される。

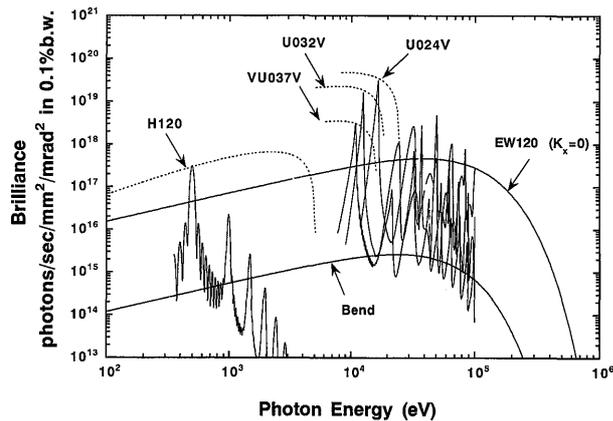


Figure 2. Spectral brilliance obtained from the SPring-8 insertion devices under construction. The in-vacuum undulators ( $\lambda_u=2.4/3.2$  cm,  $N=187/140$ ) are denoted by UO24V/U032V, in-vacuum vertical undulator ( $\lambda_u=3.7$  cm,  $N=40$ ) by VU037V, helical undulator ( $\lambda_u=12$  cm,  $N=12$ ) by H120 and elliptic wiggler ( $\lambda_u=12$  cm,  $N=37$ ).

以下に現在建設中の挿入光源<sup>3)</sup>についてその特徴を述べるものである。なお、図2に各挿入光源から得られる輝度スペクトルを示した。

### 3. 建設中の挿入光源

#### 3.1 標準型真空封止 X 線アンジュレータ

##### 3.1.1 装置の全体図

標準型真空封止 X 線アンジュレータ<sup>4)</sup>の周期長は3.2 cm, 周期数は140である。最大磁場は0.78 T (ギャップ10 mm) で対応する K 値は2.3である。現在, 同一のデザインのもの5台建設している。図3にこのアンジュレータの全体図を示す。機械部としては共通架台に設置した3台の1.5 m ユニットから構成されているが, 磁石列としてはユニットとして独立ではなく約4.5 m の磁石長を持つアンジュレータとみなされる。図4は磁石部の詳細である。永久磁石ユニットはアルミ合金製の I ビームに取り付けられている。2本の I ビームは直径250 mm の真空槽に設置されており, ベローズを介して真空槽外部の機械部 (リニアベアリング) と連結されている。リニアベアリングは加熱排気時の熱膨張差 (I ビームと真空槽) を吸収するためのものである。磁石ギャッ

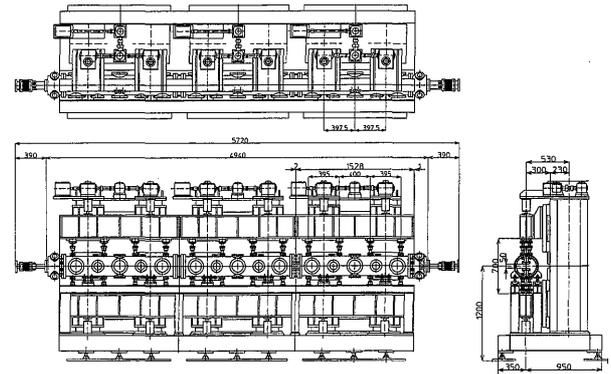


Figure 3. Plan view of the standard in-vacuum x-ray undulator.

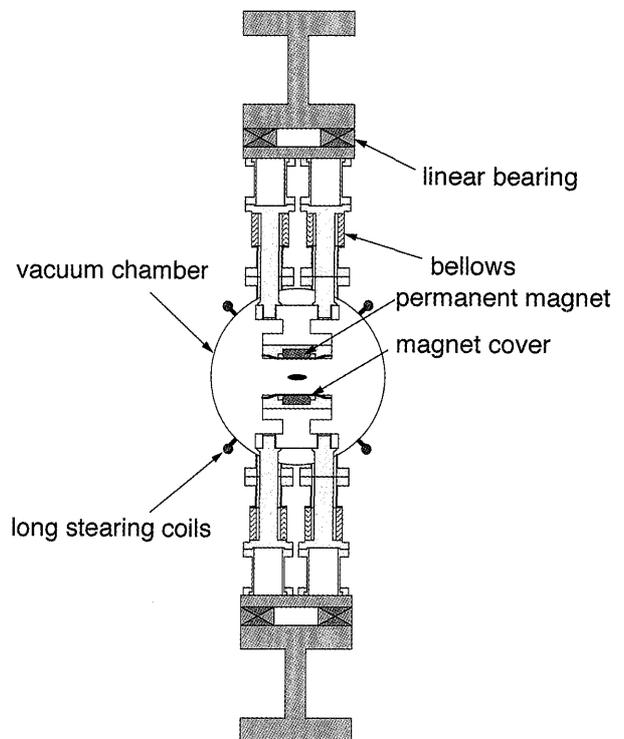


Figure 4. Inner structure of the in-vacuum undulator.

プの可変範囲は8 mm から50 mm である。利用できる光子エネルギーの範囲は基本波が5~18 keV, 3次光が51 keV 以下, 5次光が75 keV 以下である。

##### 3.1.2 永久磁石ユニット

図5は永久磁石ユニットの写真である。SUS316製のホルダー (25H×100W×8L) に窒化チタンでコートした永久磁石 (12H×46W×

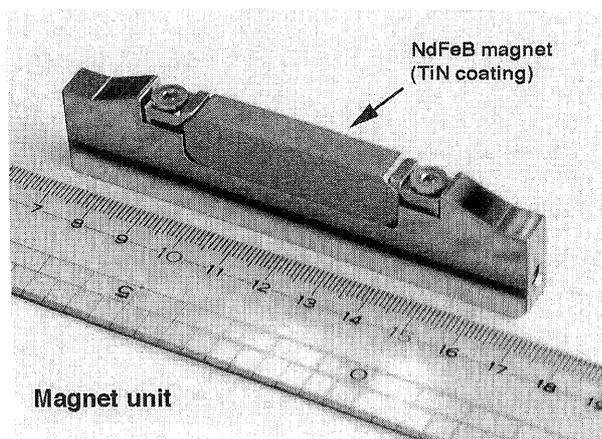


Figure 5. Magnet unit of the standard in-vacuum x-ray undulator.

8L) が固定されている。超高真空を実現するには低くとも $130^{\circ}\text{C}$ の加熱排気を実施しなければならない。したがってこの温度以上で非可逆減磁特性の優れた希土類系磁石 (SmCo 系あるいはNdFe 系) が必要となる。この特性に限っては一般に SmCo 系の方が優れているが機械強度の点で難がある。真空封止型における磁石固定では接着剤が使用できないので図5に示すように機械的クランプが採用される。SmCo 系ではクランプの締め付けによってたやすく破壊され粉末状となることが懸念される。その点 NdFe 系ははるかに優れている。SP8 では耐高温型の NdFe 系磁石, NEOMAX-33UH (住友特殊金属製) を採用している。

### 3.1.3 磁場測定

磁場測定としては、アンジュレータ磁場のビーム軸方向の分布を測定するためにホールプローブ、ネットの偏向角 (磁場積分値) とビーム変位を測定するためにフリップコイルを使用している。ホールプローブとしては電気エリア ( $1\text{ mm}^2$ ) のシーメンス製を採用している。素子の温度係数は  $1 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$  である。このままでは使用に耐えないので  $28^{\circ}\text{C} \pm 0.01$  に保たれたマイクロオープンホルダーに固定してある。標準型アンジュレー

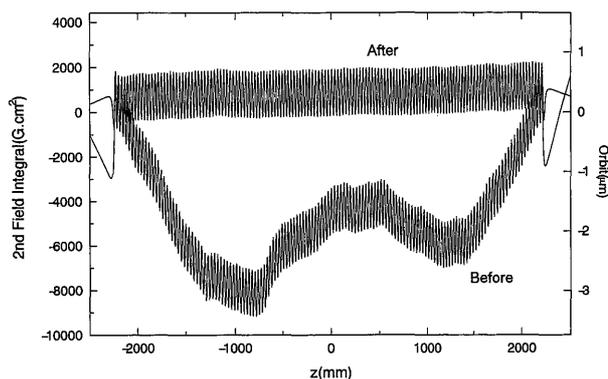


Figure 6. Example of the second field integral or electron orbit in the horizontal direction calculated for the standard in-vacuum x-ray undulator (gap=15 mm,  $B=0.4\text{ T}$ ).

タの磁場は垂直磁場であるから水平磁場を測るにはプレナーホール効果 (ホール素子制御電流と磁場との交差角度に依存する偽りの信号出力) を十分考慮する必要がある。SP8 ではこの出力をキャンセルするためにホール素子を $180^{\circ}$ 回転した時の出力との平均値を採用している。図6にギャップ15 mm ( $0.4\text{ T}$ ) 時の磁場測定データ (垂直磁場) から計算される電子軌道 (水平面) を示す。図には磁場調整前と調整後の軌道が示してある。一般の磁場調整では磁極表面にスチール箔等を張り付ける方法<sup>5)</sup>が採られるが磁極面の平滑さが重要である真空封止型では各磁石ユニットの裏側に磁石チップを挿入する方法を採用しなければならない。図6に示すようにチップ調整によって十分最適な軌道が得られている。この軌道からスペクトルを直接計算することが可能である。図7には第9次高調波の強度が理想値, 調整前後値について示してある。調整前は理想値の半分以下であったスペクトル強度が調整によって70%近くまで増加したことがわかる。図8は測定した水平磁場 (ギャップ15 mm) に対応する垂直面内の軌道を示す。スペクトル強度を劣化させるような鋭い垂直偏向はないが、全体的に緩やかな偏向が見られる。これは真空槽の回りに配置した空芯コイル (図4参照) によって補正できる。

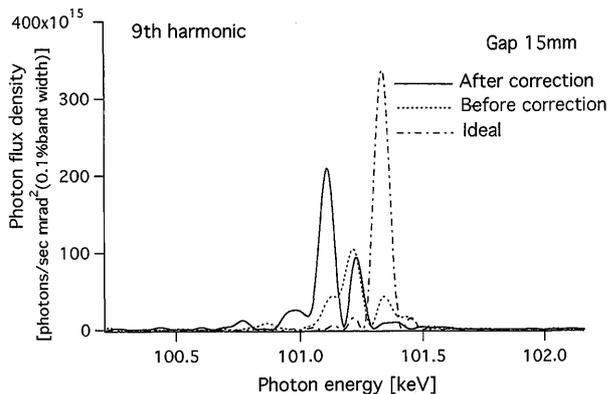


Figure 7. Spectra of the 9th harmonic calculated from the orbit shown in Fig. 6.

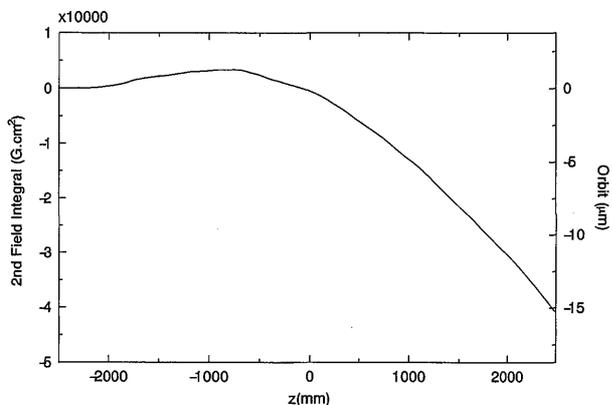


Figure 8. Example of the second field integral or electron orbit in the vertical direction calculated for the standard in-vacuum x-ray undulator (gap=15 mm, B=0.4 T).

以上の磁場測定結果は標準型アンジュレータ第1号器のものであって垂直偏向の調整が不十分であるように見受けられる。したがって2号器以降はさらに精度の高い磁場調整を行うことによって無補正の独立チューニングを目指している。

### 3.1.4 磁極面カバー

真空封止型アンジュレータでは強くバンチされた電子ビームが磁極面近傍を通過する。したがってバンチのイメージ電流を流すための金属製のカバーを施す必要がある(図4参照)。バンチ長( $1\sigma$ )が15~40 psecと短いためピーク電流値は数Aに達することと表皮深さが $\mu\text{m}$ 以下となる

ことから発生するパワーは10 W/mに達すると考えられる<sup>6)</sup>。本年7月にSP8製の真空封止型アンジュレータ(磁石カバーは50 $\mu\text{m}$ のステンレススチール)をESRFに持ち込んで試験運転したが、ギャップ10 mm以下では磁石カバーの発熱によるものと思われる真空度悪化によってビームが失われるという結果となった。この教訓により、磁石カバーとして50 $\mu\text{m}$ ニッケル(磁極に吸引されることにより良好な熱伝達を期待する)に10 $\mu\text{m}$ の銅メッキ(抵抗値を低くしてパワー発生を抑える)を施したものをSP8に採用することとなった。ただし、これが最良であるとは限らないのでひきつづき最善策を検討している。

### 3.1.5 真空系

標準型の真空封止アンジュレータでは永久磁石だけで1120個(総表面積23000 $\text{cm}^2$ )に達するばかりでなく、取り付けビスも1万個近く使用される。したがって十分な排気速度を与えないと超高真空( $2 \times 10^{-10}$  torr以下)は得られない。付属する真空ポンプとしては125 l/sのイオンポンプが6台、500 l/sの非蒸発ゲッターポンプが12台であるから計6700 l/sの排気速度を持つことになる。真空テストの結果を以下に紹介する。加熱排気は48時間行った。温度は磁石部が130 $^{\circ}\text{C}$ 、真空槽が180 $^{\circ}\text{C}$ である。図9に排気曲線を示す。

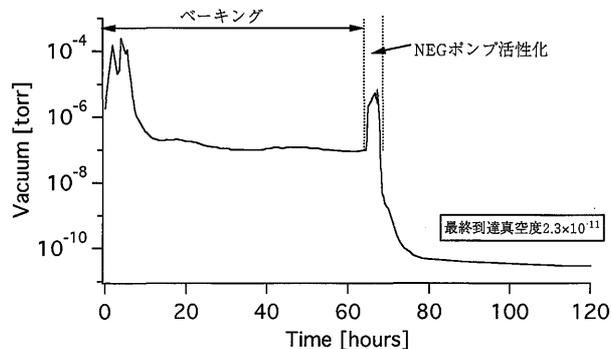


Figure 9. Pumping down curve of the standard in-vacuum x-ray undulator.

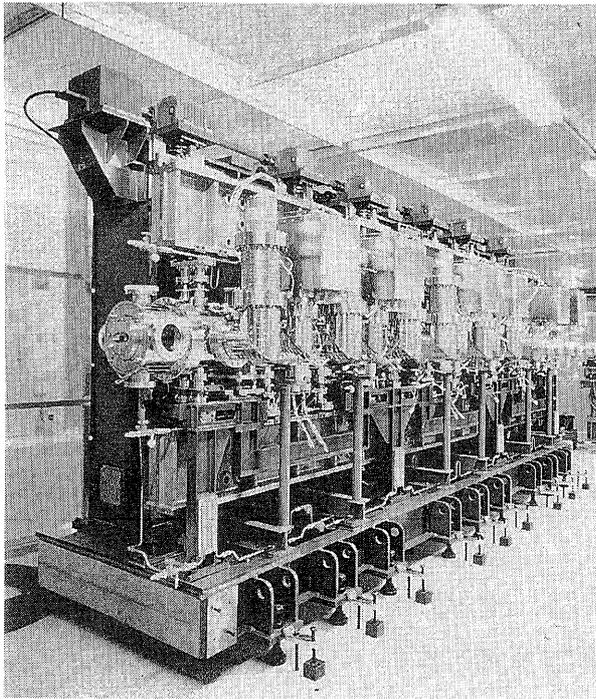


Figure 10. Completed standard in-vacuum x-ray undulator.

$2.3 \times 10^{-11}$  torr の超高真空が得られていることがわかる。図10は完成した標準型真空封止アンジュレータである。

### 3.1.6 放射パワー

ビーム電流100 mA 時、最大磁場0.78 T を与えたとき、放射パワーは約11 kW、パワー密度は  $470 \text{ kW/mrad}^2$  となる。この値は光源から20 m 離れたフロントエンド入り口における直入射パワー密度が  $1.2 \text{ kW/mm}^2$  に達することを意味する。したがって、この常軌を逸するパワーを処理しなければならないマスク、アブゾーバー、XY スリット等の各フロントエンド要素はその幾何学的形状とともに材質の検討を十分行う必要がある<sup>7)</sup>。SP8 では以上の要素の主要材料としてグリッドコップ(アルミナ含有の強化銅)を採用している。また、照射面の斜入射角は1度以下となるよう設計してある。

フロントエンド要素以上に深刻であるのは、40 m 離れた分光器における直入射パワー密度が

$300 \text{ W/mm}^2$  という通常型の2結晶分光器ではとても処理できない値に達することである。SP8 では回転傾斜型の結晶配置(本編光学系参照)を有する分光器<sup>8)</sup>が開発されたのでこの困難が解決される見通しであるが、これには以下の前提がある。必要以外の放射パワーを分光器に送り込まないことである。この役目を負うのが前述したフロントエンド要素のXYスリットである<sup>9)</sup>。

### 3.2 真空封止垂直アンジュレータ

ダイヤモンド結晶を分光結晶として使用する横振りの分光器では垂直偏光のアンジュレータ放射が必要となる<sup>10)</sup>。すなわち、水平磁場を発生する垂直アンジュレータを開発しなければならない。磁気回路として図11に示すようなものを開発した。図に示すように磁石列の中央部には溝が設けてある。これは水平方向に一樣な磁場を得るための工夫である。周期長は3.7 cm であるから必要な磁場(0.5 T 程度)を得るにはギャップを10 mm 以下に設定しなければならない。したがって、これも真空封止型となる。

### 3.3 真空封止ハイブリッドアンジュレータ

周期長2.4 cm、周期数187のパーメンジュールを磁極とする真空封止ハイブリッドアンジュレー

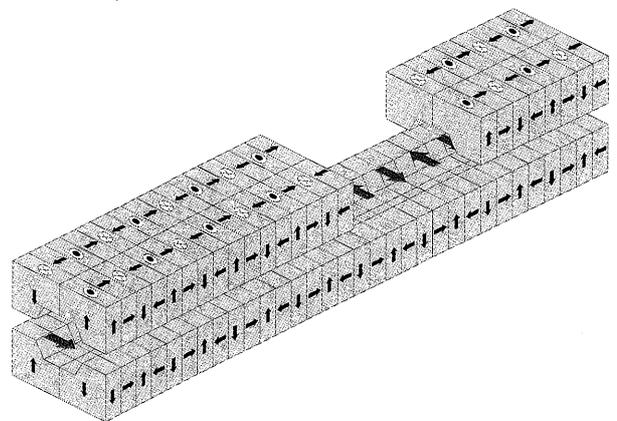


Figure 11. Magnetic design of the in-vacuum vertical undulator. The gutter in the central part of the magnet array is made for obtaining wide homogeneous field in the horizontal direction.

タを建設している。最小ギャップとしては4.5 mm が可能でこのとき発生する磁場は1 T を越える。基本波は7 keV から25 keV の範囲をカバーする。

### 3.4 楕円ウィグラー

硬 X 線領域の円偏光源として楕円ウィグラーを建設している。現在のところ SP8 唯一のウィグラーである。磁気回路としては SP8 において円偏光光源として考案された3連型 (図12参照) のものである<sup>11,12)</sup>。中央の磁石列は垂直磁場を発生し両側の磁石列は水平磁場を発生する。中央の磁石列は固定されているが両側の4つの磁石列は独立の位相制御が可能である。したがってこのウィグラーはギャップを含めて5軸の可動部を持つことになる。周期長は12 cm, 周期数は37である。もちろん, 磁石列は真空の外にある従来型の挿入光源である。最大垂直磁場としてギャップ20 mm 時1.1 T, 水平磁場としては0.1 T が得られる予定である。

### 3.5 ツインヘリカルアンジュレータ

アンジュレータ放射の利用においてはユーザーが必要とする波長をもつ光は光ビーム軸上の僅かな立体角にしか存在しない。したがって, ユーザーはスリット等で軸上近傍の光だけを光学系に取り込むことになる。つまり, 軸上の光の諸性質が

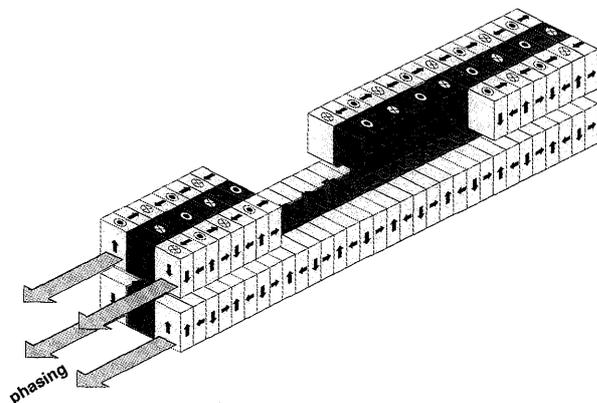


Figure 12. Magnetic design of the elliptic wiggler.

ユーザーの重大な関心事となる。通常のアンジュレータでは, 軸上に基本波以外に高い強度を持つ高調波が紛れ込む。基本波だけを使うユーザーにとってはこの高調波が厄介な代物となる。なぜならば, 必要としない光が光学系に紛れ込むばかりでなく光学素子にダメージを与えることになるからである。まことに理不尽な高調波である。これゆえ, 真空紫外領域におけるアンジュレータの利用は SP8 において極めて難しいものであった。ところが, 解決する道が拓けたのである。発生する高調波の全出力を小さくすることはできないが, 高調波の方向分布を変えることができるのである。具体的には, 高調波を軸上から追い出して軸外に分布させる。こうすれば, 高調波はスリットで除去できることになり, 光学素子のダメージは飛躍的に軽減される。円偏光を発生するヘリカルアンジュレータ (同一周期長の垂直磁場と水平磁場をもつ) とは, 螺旋運動をする電子からの放射であって (この運動はビーム軸からみれば円運動), 原理的に高調波を軸外に放出する。したがってヘリカルアンジュレータは光学系に優しい光源であるといえる。以下に述べるツインヘリカルアンジュレータは真空紫外領域 (0.12~4.5 keV) において左右の円偏光の高速スイッチングが可能なアンジュレータである。

採用した磁気回路は楕円ウィグラーのものと原理的には同じものである。ただし, このアンジュレータでは両側の磁石が固定で中央の上下の磁石が独立の位相制御ができる。図13に示すように, 左右円偏光の切り替えは, ヘリシテーターの異なる2台の等価なヘリカルアンジュレータ (周期長

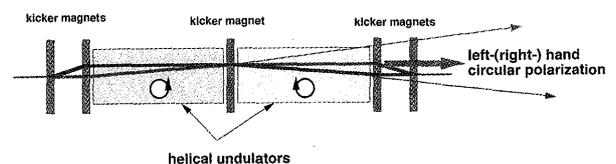


Figure 13. Principle of the switching of polarization in the twin-helical undulator.

12 cm, 周期数12) の前後に設置した5台のキッカーマグネットを動作させることにより行う。2台のアンジュレータからの放射(円偏光の状態が異なる)がキッカーの働きで交互に光学系に入射するようにしたものである。切り替え周波数は10 Hz 以上を目標としている。

### 3.6 8の字アンジュレータ

前述したようにヘリカルアンジュレータを使用すれば軸上放射パワーが極めて低くなることがわかっている。したがって、円偏光ユーザーはこの恩恵を十分受けることができる。しかし、直線偏光ユーザーには福音がないのであろうか。これを解決するために考案されたのが8の字アンジュレータである<sup>13)</sup>。このアンジュレータの磁気回路では水平磁場の周期長が垂直磁場のその2倍に設定してある。電子の運動を軸上からみると数字の8に極似たものとなる。これが8の字アンジュレータと命名したゆえんである。一筆書きで8の字をなぞるとこの字の上部の円では右回り、下部の円では逆方向の左回りになることがわかる。このような運動をする電子はもはや円偏光を発生することができない。左右の円偏光が互いに打ち消し合って直線偏光となるからである。したがって直線偏光を発生し、ヘリカルアンジュレータと同様、大部分の高調波を軸外に放出するアンジュレータが実現される。図14において通常の直線アンジュレータ、ヘリカルアンジュレータ、および8の字アンジュレータの放射パワー空間分布を比較してある。図に示すように8の

字アンジュレータの放射パワー分布はV字型の形状を示し、軸上ではヘリカルアンジュレータと同様極めて低い値を示すことがわかる。建設している8の字アンジュレータの周期長は10 cm, 周期数は44, 最大磁場は1 Tである。光子エネルギーの供給範囲は0.1~5.8 keV である。

### 3.7 真空封止ミニポールアンジュレータ

真空封止ミニポールアンジュレータとはその周期長が1 cm 以下のものをいう。アンジュレータとして意味のある磁場(~0.5 T)を得るにはギャップを5 mm 以下としなければならない。このような狭いギャップに電子ビームを通すためには垂直ベータトロン値を1 m 以下に設定する必要がある。また、低ベータ特有の大きなビーム角度発散に帰因するビームロスを避けるためにアンジュレータ長を50 cm 以下としなければならない。このアンジュレータの目的は、ウィグラーを利用するのが常識とされる100 keV~300 keV 領域をアンジュレータの基本波で供給することである。これが実現できれば輝度の高い準単色光が低い熱負荷で利用可能となる。このアンジュレータの導入はSP8の次期計画(平成10年以降)において予定されているが、BNL-NSLS用のミニポールアンジュレータ(周期長1.1 cm, 周期数27)を同研究所との共同研究によりSP8にて製作中(磁石部のみ)である<sup>14)</sup>。NSLSのX線リングへの導入は1997年1月の予定である。ビームエネルギーはPFとおなじ2.5 GeVであるが6 keV 領域を基本波で得ることができる。

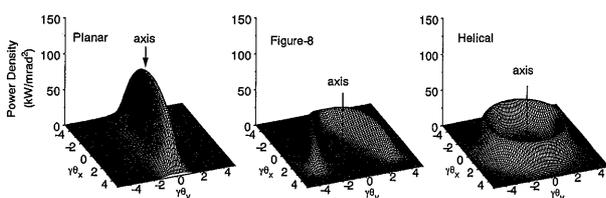


Figure 14. Radiated power distributions of planar, figure-8 and helical undulators.

## 4. SPring-8 次期計画におけるアンジュレータ

前述したように、SPring-8の最大の特長は4カ所の30 m長直線部を有していることである。ただし、第I期においては以上の直線部に多数の4極磁石群(偏向部のないセル)が設置されている。しかし、第II期(1998年以降)ではそれら

は撤去され、実効長（磁石長）27 m 程度の長尺アンジュレータが導入できるであろう。この直線部に十分最適化されたアンジュレータを開発すれば、空間的可干渉性に優れた超高輝度領域の放射光を得ることができる。さらに、蓄積リングの低エネルギー運転とラテイスの最適化やフィードバック技術の進展によってサブナノ領域の低エミッタンスビームが得られる可能性があり、長尺アンジュレータによるシングルパス型の自由電子レーザー（SASE）が制限的ではあるが実現できるであろう<sup>15)</sup>。

謝辞この報告の作成にあたり SPring-8 挿入光源グループの諸氏（田辺敏也，原 徹，X. Marechal，田中隆次）より多大な協力を得ましたことを感謝いたします。

## 文献

- 1) H. Kitamura: Rev. Sci. Instrum. **66**, 2007(1995).
- 2) R. Tatchyn, P. Csonka and A. Toor: Rev. Sci. Instrum. **60**, 1796 (1989).
- 3) 原 徹他: SPring-8 利用者情報 Vol. 1, No. 3, 19 (1996).
- 4) S. Yamamoto, et al.: Rev. Sci. Instrum. **63**, 400 (1992).
- 5) J. Chavanne, E. Chinchio and P. Elleaume: ESRF-SR/ID-89-27 (1989).
- 6) K. Bane and S. Krinsky: BNL-48792 (1993).
- 7) Y. Sakurai: Rev. Sci. Instrum. **66**, 1771 (1995).
- 8) T. Uruga, et al.: Rev. Sci. Instrum. **66**, 2254 (1995).
- 9) 大浦正樹他: 第8回放射光学会予稿集 160 (1995).
- 10) M. Yamamoto, et al.: Rev. Sci. Instrum. **66**, 1833 (1995).
- 11) X. Marechal, et al.: Rev. Sci. Instrum. **66**, 1937 (1995).
- 12) S. Kimura, et al.: J. Electron Spect. and Related Phenomena **80**, 437 (1996).
- 13) T. Tanaka and H. Kitamura: Nucl. Instrum. and Method **A364**, 368(1995).
- 14) 田辺敏也, P. Stefan, 北村英男: 第9回放射光学会予稿集 22 (1996).
- 15) Report of the International Workshop on 30-m Long Straight Sections (1996).