

SRI '97 特集

SPring-8 における挿入光源の現状

北村 英男

SPring-8 共同チーム・理化学研究所*

Present Status of SPring-8 Insertion Devices

Hideo KITAMURA

JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team

According to the general policy, namely, pursuit for pure radiation without any unreasonable heat load, constructions of various insertion devices have been scheduled at SPring-8. Most of them are of in-vacuum type, which makes it possible to realize short-period devices, so that the fundamental of undulator radiation may be obtained in the hard x-ray region. In addition, undulator radiation in the soft x-ray range down to 100 eV is available by introducing helical or figure-8 devices having low on-axis power density, which is very beneficial for the optics, gratings or mirrors. A brief overview on the insertion devices at SPring-8 is presented with initial commissioning results.

1. はじめに

SPring-8 は高輝度放射光を供給する典型的な第3世代放射光施設であって世界最大規模(ビームエネルギー: 8 GeV)の光源専用電子蓄積リングを中核とするものである。したがって、可能性としては世界第一級の施設となり得るものであろう。しかしながら、このビームエネルギーがもたらす放射パワーは強烈であり、適切に設計された挿入光源を導入しないと理不尽な熱負荷によって光学素子が熔融してしまう恐れがある¹⁾。以上の問題点を十分考慮して以下のようなSPring-8挿入光源開発の大方針を策定した²⁾。(1)50 keV程度までの硬X線はアンジュレータ放射の基本波で得るべきである。コヒーレンス性能はこの基本波が最も優れているからである。(2)高輝度あるいは高エネルギー光の追求が理不尽な放射パワーをもたらしてはならない。(3)ヘリカル型、楕円型³⁾、垂直偏光型、8の字型⁴⁾等の新型挿入光源を積極的に導入すべきである。ただし、以上の挿入光源の磁場特性(一様性)は良好でなければならない。(4)アンジュレータ放射の波長選択(磁極ギャップの変更)は常時可能でなければならない。言い換えれば、アンジュレータの運転は分光器の運転と同期できる必要がある。

以上の方針にしたがって種々のタイプの挿入光源の建設が行われ、平成10年1月1日の時点では周期長32 mmの

真空封止型アンジュレータ(標準型アンジュレータ)5台、タンデム型の真空封止垂直アンジュレータ1台、楕円ウィグラー1台の試験運転が終了している。また、平成10年の夏までにさらに8台の挿入光源(軟X線用ヘリカル型1台、軟X線用8の字型1台、真空封止8の字型1台、真空封止ハイブリッド型1台、標準型4台)を設置する予定である。この報告では以上の挿入光源の性能と試験調整運転の結果について述べる。

2. SPring-8の挿入光源

Table 1にSPring-8における挿入光源対応ビームラインのアウトラインを示す。SPring-8蓄積リングには計38箇所の挿入光源対応直線部が用意されているが、このうち34カ所は4.5 m長の挿入光源を設置できる通常長直線部、残る4カ所は長尺挿入光源が設置可能な30 m長直線部である。また、電子ビームの収束性を考慮すると通常長直線部は高ベーター($\beta_x/\beta_y=24/9$ m)及び低ベーター($\beta_x/\beta_y=1/5$ m)の二つのカテゴリーに分類でき、それぞれ奇数、偶数のビームライン番号に対応させてある。電子ビームの設計エミッタンスは6 nm \cdot radであるからビームサイズと角度発散は高ベーター直線部で $\sigma_x/\sigma_y=380/33$ μ m、 $\sigma_x/\sigma_y=16/3.6$ μ rad、低ベーター直線部で $\sigma_x/\sigma_y=77/24$ μ m、 $\sigma_x/\sigma_y=77/4.9$ μ radとなる。Fig. 1に各挿入光源か

* 理化学研究所 〒678-1201 兵庫県赤穂郡上郡町金出地 SPring-8
TEL 07915-8-2808 FAX 07915-8-2810 e-mail kitamura@spring8.or.jp

Table 1. Insertion device beamlines at SPring-8. Considering the focusing characteristics, the straight sections can be classified into two categories, high β and low β sections. The former/latter is assigned to the odd/even number of beamline. The types of the devices are denoted as EW: elliptical wiggler, IVXU: in-vacuum x-ray undulator, F8: figure-8 undulator, IVF8: in-vacuum figure-8 undulator, THU: twin helical undulator, TIVVU: tandem in-vacuum vertical undulator, IVHyU: in-vacuum hybrid undulator

Location	Beamline	Type	Polarization	λ_u cm	N	G_{\min} mm	B_{\max} tesla	K_{\max}	1st keV	3rd keV	5th keV	Installation
BL08IN	High Energy Inelastic Scatteing	EW	circular	12	37	20	1.1y 0.1x	1.1x				finished
BL09IN	Nuclear Resonant Scattering	IVXU	horizontal	3.2	140	8	0.82	2.45	4.7-18.5	15.5-51	26-75	finished
BL10IN	Extremely Dense State	IVXU	horizontal	3.2	140	8	0.82	2.45	4.7-18.5	15.5-51	26-75	finished
BL11IN	JAERI	IVXU	horizontal	3.2	140	8	0.82	2.45	4.7-18.5	15.5-51	25-75	Aug. '98
BL24IN	Hyogo	IVF8	horizontal vertical	2.6	172	5	1.05y 0.34x	2.6y 1.7x	4.5-20			finished
BL25IN	Soft x-ray Spectroscopy	THU	circular	12	2×12	20	0.58xy	6.5xy	0.12-4.5			finished
BL27IN	Soft x-ray Photochemistry	F8	horizontal vertical	10	44	20	1.0y 0.25x	9.3y 4.6x	0.1-5.8			finished
BL39IN	Physicochemical Analysis	IVXU	horizontal	3.2	140	8	0.82	2.45	4.7-18.5	15.5-51	26-75	finished
BL41IN	Bio-crystallography	IVXU	horizontal	3.2	140	8	0.78	2.32	5.2-18.5	15.5-51	26-75	finished
BL45IN	RIKEN	TIVVU	vertical	3.7	2×40	8	0.5x	1.7x	6.6-16	20-40	33-70	finished
BL46IN	R & D for Insertion Device	IVHyU	horizontal	2.4	187	5	0.9	2.0	6.6-25	20-70	34-90	Aug. '98
BL47IN	R & D for x-ray Optics	IVXU	horizontal	3.2	140	8	0.78	2.45	4.7-18.5	15.5-51	26-75	finished

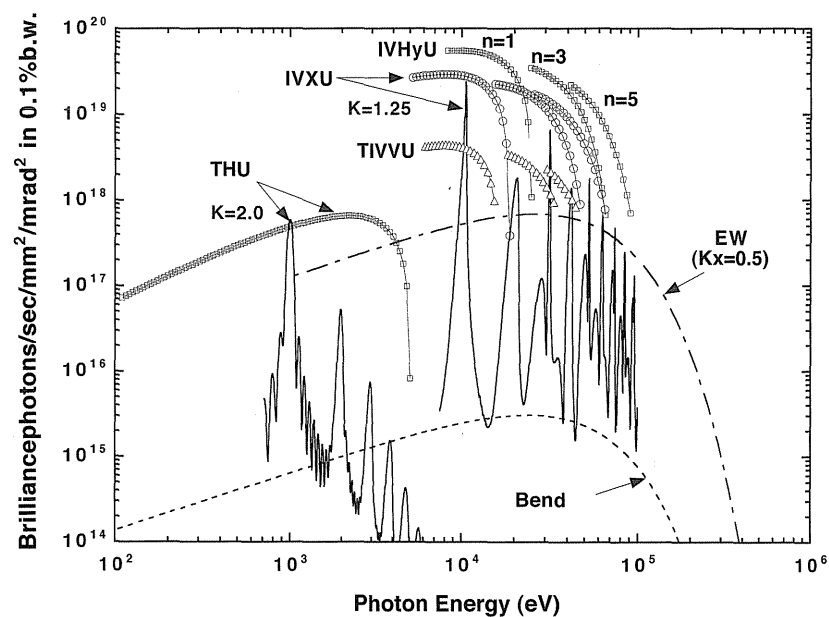


Figure 1. Calculated spectra of the radiations from the various sources at SPring-8. The beam parameters are assumed as emittance=6 nm·rad, emittance coupling=2% and beam current=100 mA. The type of each source appeared in the figure is assigned in Table 1.

ら得られる放射の計算スペクトルを示す。ビーム電流は100 mAと仮定したが現時点(平成10年1月)では放射線安全に関わる手続きスケジュールにしたがって20 mA未満に制限されている。以下に各挿入光源の特徴について簡単に述べる。

2.1 標準型真空封止アンジュレータ

X線領域の光子エネルギーに対するニーズは7~15 keVあたりに集中しているため、この領域において基本波強度の高いアンジュレータが標準型として要求される。また、必要に応じて80 keV領域までのX線を第3あるいは第5高調波で得られ、しかも、7~80 keVの領域にお

いて発生不能の空白領域が存在しないような光源であることも期待される。したがって以上の要求を満たすアンジュレータ設計としては、周期長が32 mm 前後、偏向定数 K が2 (磁場が0.67 T) 以上ということになるがこの磁場性能を得るには磁石ギャップが10 mm 以下である必要がある。当然ながらこのギャップ値を達成するには永久磁石列を超高真空内に設置する真空封止型を採用せざるを得ない。このタイプの長所は磁石ギャップの内側に真空槽をもたないので電子ビームが通過可能な開口 (真空開口) が磁石ギャップに一致することである。したがってギャップ値としては蓄積ビームが削られて寿命を失う直前までの狭い設定が可能となる。さらに、蓄積リングの運転状況に応じてギャップを広げて真空開口を広げることができるのでリングの性能向上のためのマシンスタディが円滑にできるようになるという長所もある。

以上が SPring-8 の標準型アンジュレータとして真空封止型を採用した理由である。真空封止型の重要な技術的ポイントは以下の通りである。①微妙かつ精密なアンジュレータ永久磁石系が高温加熱排気を前提とする超高真空技術に整合していなければならない。これを解くために、130°C 48時間の履歴を与えても減磁がほとんど認められない特別仕様のネオジウム系希土類磁石 (住友特殊金属製 NE-OMAX33UH) を採用したが、錆びやすくかつ粉末焼結合金 (ポーラス) であるこのネオジウム磁石に5 μm 厚さの窒化チタン被膜を施した。②超高真空下では接着剤が使えないので機械的な締め付け方法で磁石を固定した。③蓄積

電子ビームのイメージ電流による発熱⁵⁾を抑制するために銅メッキしたニッケル箔 (厚さ50 μm) で磁石列をカバーした。

世界最初に成功した真空封止型アンジュレータは高エネルギー物理学研究所 (KEK, 現高エネルギー加速器研究機構) において開発された⁶⁾。SPring-8 型は KEK 型を発展させたもので大量生産が可能になるよう小型化、簡素化、標準化が図られているほかいくつかの点で改良が加えられている⁷⁾。Fig. 2 は SPring-8 の直線部に設置した真空封止アンジュレータ、Fig. 3 はその内部構造の写真である。磁気回路は永久磁石だけの構成で、周期長は32 mm、周期数は140、最小ギャップは8 mm、このときの磁場は0.82 T ($K=2.45$) に達する。SPring-8 ではこの磁石パラメータをもつアンジュレータを標準型と呼んでいる。このアンジュレータの機械部分は1.5 m 長のユニット3基で構成されているが磁石列としては4.5 m の単一のアンジュレータである。Fig. 1 に示すように、基本波は4.7 keV から18 keV、3次光は50 keV まで、5次光は80 keV までカバーする。2以上の K 値を持つので基本波と3次光の間に利用不能の空白領域はできない。現在のところ5台の標準型が稼働中である。

2.2 真空封止ハイブリッドアンジュレータ

アンジュレータ磁気回路として磁極材を使用したハイブリッドアンジュレータ (Fig. 4) の真空封止型も開発し、磁石長が異なる計2台を製作した。いずれも同じ磁石性

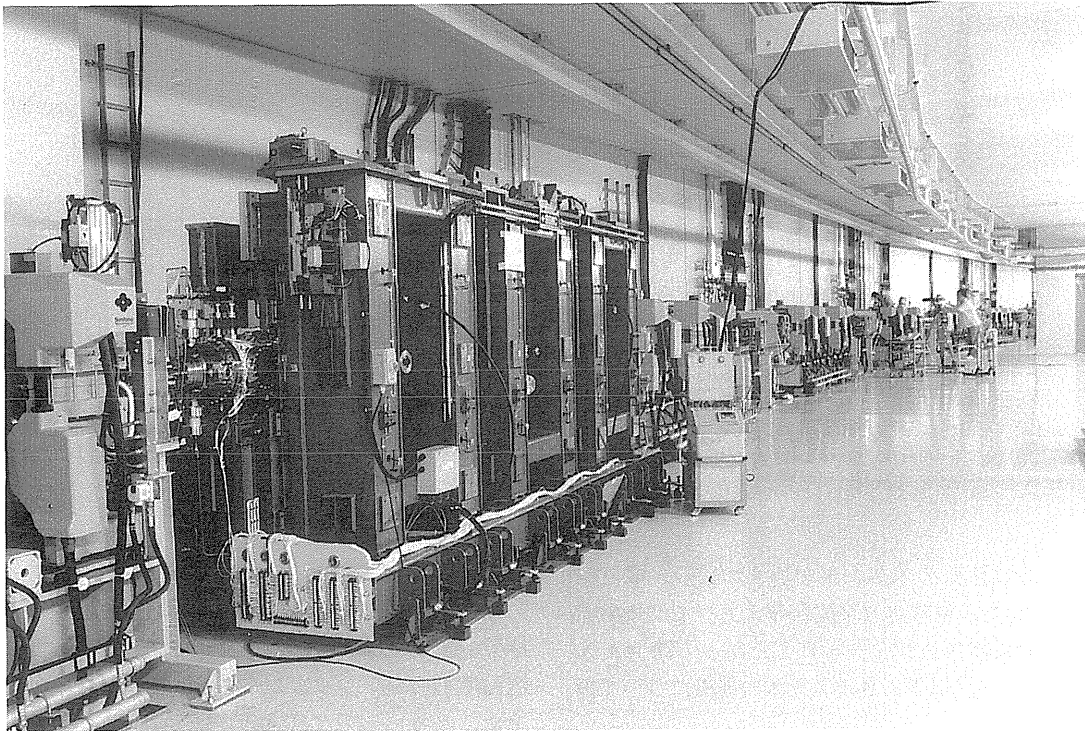


Figure 2. Standard in-vacuum x-ray undulator installed in the straight section of SPring-8 ring.

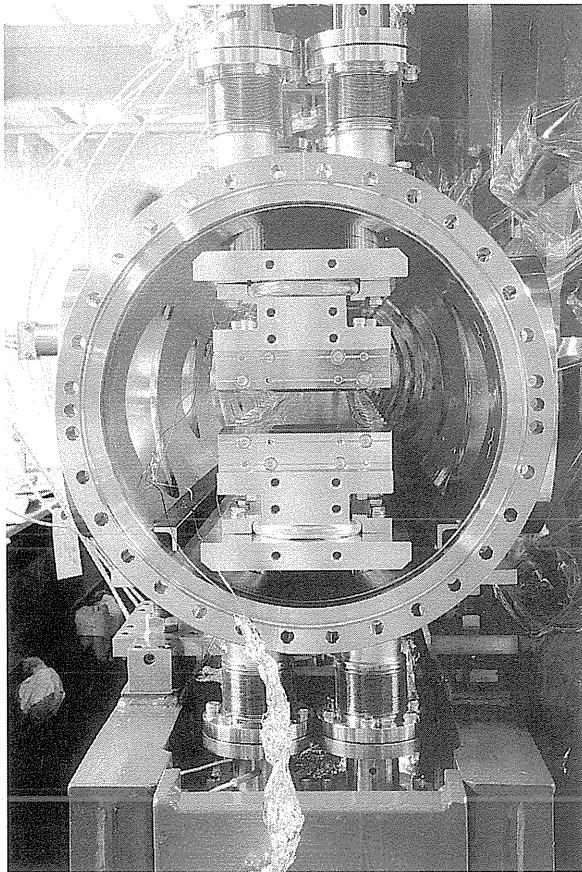


Figure 3. Inner structure of the standard in-vacuum x-ray undulator.

能 (周期長: 24 mm, $B_{\max}=0.9$ T, $K_{\max}=2.0$, $G_{\min}=5$ mm) を有し, 短尺型 ($N=62$) は1996年7月に ESRF に設置して蓄積電子ビームに対する影響やイメージ電流による発熱について調べた⁸⁾。この試験運転の結果は SPring-8 の全ての真空封止アンジュレータの設計に反映させている。通常長型 ($N=187$) は平成10年8月に設置する予定である。SPring-8 のアンジュレータ中最も短い周期長を有し, 基本波は6.6~25 keV をカバーすることができる。

2.3 タンデム型真空封止垂直アンジュレータ

垂直面内に偏光した高輝度放射光を得るためには水平方向に強い磁場を発生できるアンジュレータが必要である。この種のアンジュレータを実現する方法としてまず考えられるのは通常のアンジュレータを90度回転させる方法であるが, これは蓄積リングの運転上たいへん都合が悪い。というのは通常の蓄積リングにおいては水平方向に広い開口が必要であって, 磁場を得るために狭いギャップに設定するとビームを安定に蓄積できなくなるからである。SPring-8 ではこれを解決するために水平方向に広い開口を保ちつつかつ強い水平磁場を発生できる特殊な磁気回路を開発した⁹⁾。当然ながら短周期長を得るには真空封止型

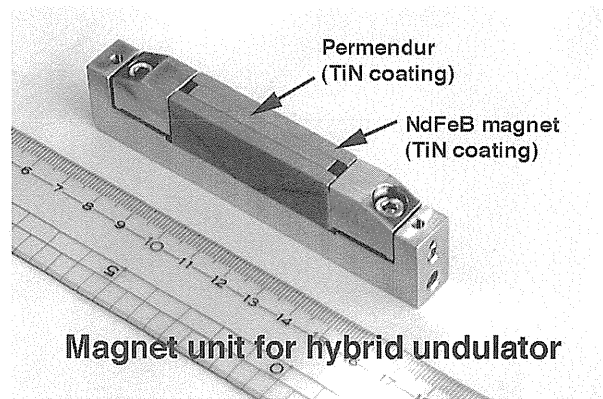


Figure 4. Magnet unit for the in-vacuum hybrid undulators.

でなければならない。Fig. 5 に示すように建設したアンジュレータは2台の同一の真空封止垂直アンジュレータを連結したものである。周期長は37 mm, 周期数は40 (1台あたり) である。このアンジュレータを光源とするビームラインは垂直偏光 X 線利用に最適化されており, 水平分散型ダイヤモンド結晶分光器を導入して高輝度放射光をふたつのビームに分離することに成功している¹⁰⁾。

2.4 楕円ウィグラー

高エネルギー非弾性散乱ビームラインに200~300 keV 領域の円偏光 X 線を供給するために周期長120 mm, 周期数37の楕円ウィグラー¹¹⁾を建設した (Fig. 6 参照)。Fig. 7 はこのウィグラーの磁石列端部の写真である。上下に対向する6個の磁石列で構成されているが写真では下部構造だけが見える。中心部は垂直磁場, 両端の磁石列は水平磁場を発生する^{12,13)}。垂直/水平磁場の最大値はギャップ20 mm のとき1.1/0.1 T であるが, 現在のところ真空槽が垂直開口の広い暫定型であるため最小ギャップは30 mm に制限されている。したがって, 磁場は0.8/0.09 T にとどまっている。両端の各磁石列は独立に並進可能 (軸方向) であるから偏光の位相制御だけではなく水平磁場強度も調整可能である。ちなみに計算上の偏光度は $B_y/B_x=1.1/0.05$ T のとき200 keV にて75%である。

2.5 軟 X 線ヘリカルアンジュレータ

円偏光2色性を変調分光法を用いて調べるには光源の左右円偏光が高速に切り替わることが望ましい。現在に至るまで種々の左右円偏光の高速スイッチング方法が提案されてきたが, SPring-8 においては左右偏光の異なる2台のアンジュレータを直列に配置し5台のキッカーマグネットを使って各アンジュレータからの放射光が交互にビームラインに入射するようして左右偏光を切り替える方法を開発している¹⁴⁾。切り替え速度の目標は10 Hz である。磁気回路は前述した楕円ウィグラーのものと同じタイプであるが位相制御が中央部磁石列を並進させるところが異なっている。周期長は120 mm, 周期数は12 (1台あたり) で

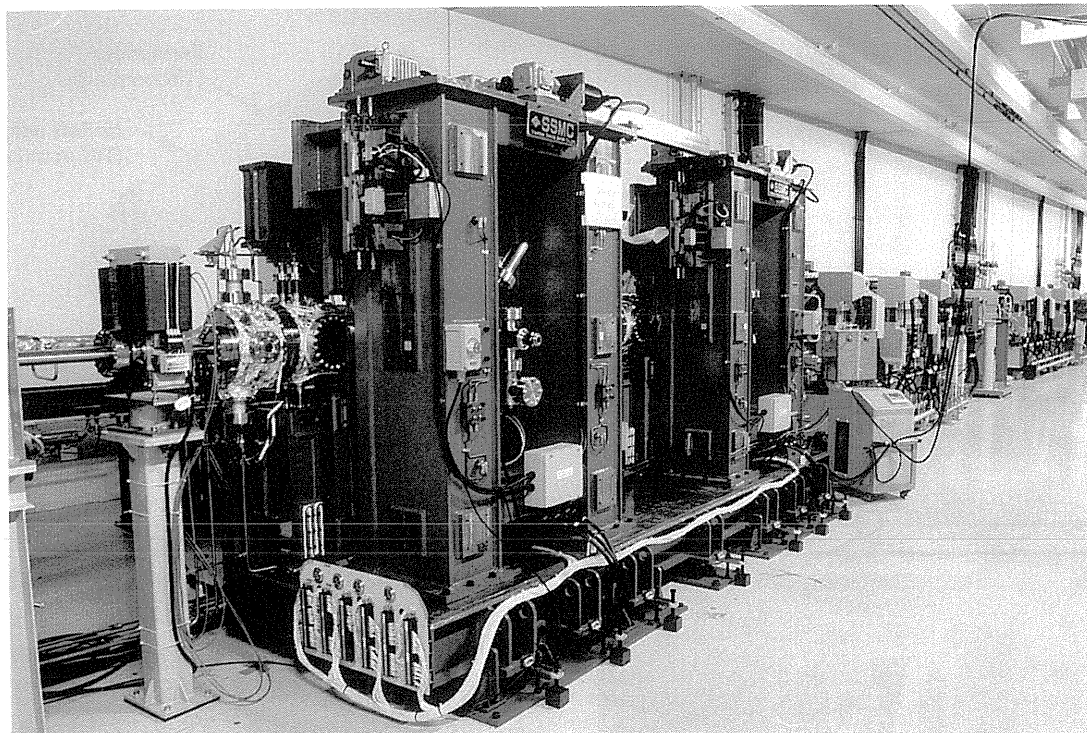


Figure 5. Tandem in-vacuum vertical undulator installed in the straight section of SPring-8 ring.

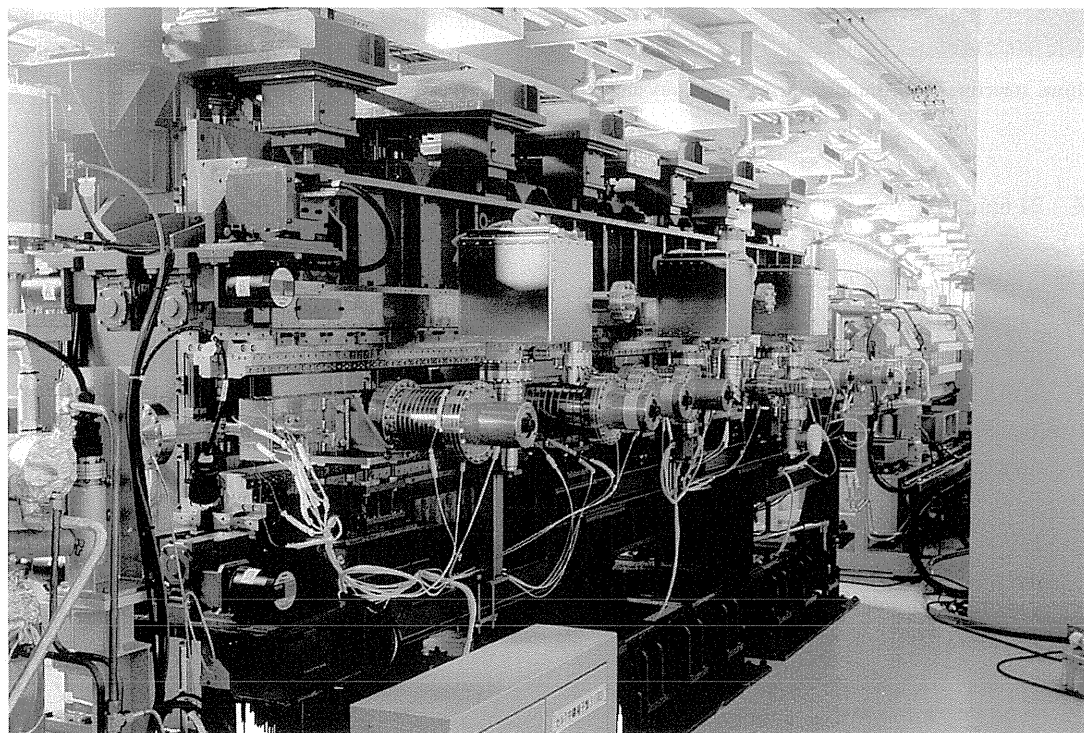


Figure 6. Elliptical wiggler installed in the straight section of SPring-8 ring.

ある。利用可能な光子エネルギー領域は0.5~5 keVで、平成10年1月に設置を終了した。ただし、スイッチングが可能になるのは平成10年度末の予定である。

2.6 8の字アンジュレータ

SPring-8のビームエネルギーは8 GeVである。したがって、軟X線領域においてアンジュレータ放射を得るためには周期長を長く設定するのが一つの方法である。しか

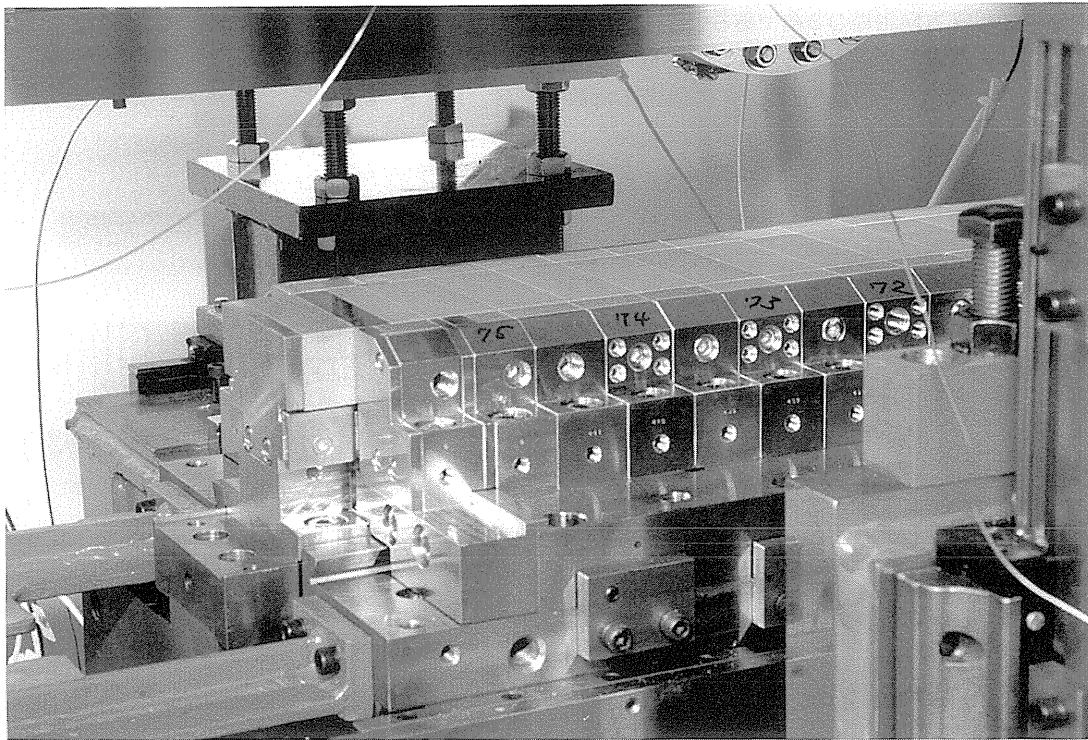


Figure 7. Magnet array of the elliptical wiggler.

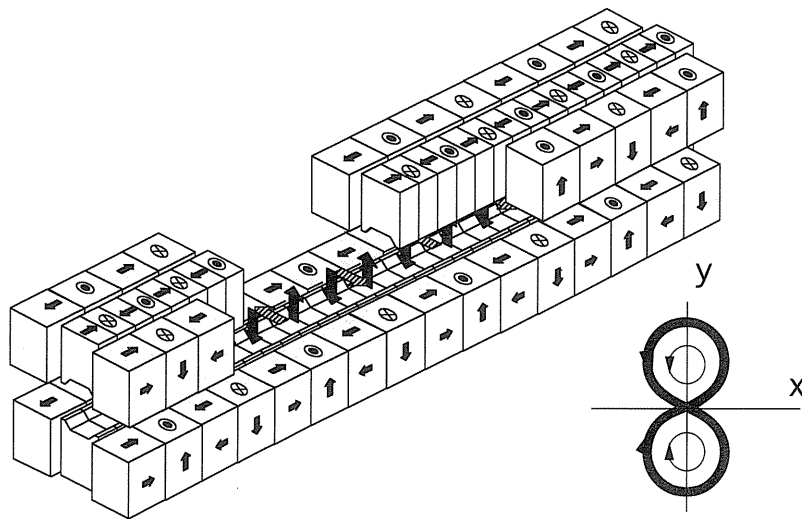


Figure 8. Schematic illustration of figure-8 undulators.

し、許される磁石長には制限（4.5 m 程度）があるから周期数が少なくなり結果として高輝度光が得られなくなる。あるいは、K 値を高く設定して低エネルギー域の基本波を得ることも可能であるが、一般的な直線偏光アンジュレータの場合、使用しない高調波による放射パワー強度が著しく高くなり結果として光学素子に損傷を与えることになる。ただし、ヘリカルアンジュレータの場合は軸上には基本波だけが得られ、高調波は軸外に放射されることによって軸上放射パワーが著しく低くなり、光学素子の損傷を避

けることができる。したがって、SPring-8 においてはヘリカルアンジュレータによる軟 X 線利用には問題はないが、円偏光しか得られない。直線偏光軟 X 線を必要とする研究分野も少なくはないのである。

8 の字アンジュレータは以上の問題点を解決するために考案されたもので、軸上放射パワーの低い直線偏光放射光が得られるものである¹⁵⁾。Fig. 8 にこのアンジュレータの原理を示す。SPring-8 型のヘリカルアンジュレータによく似ているが、水平方向磁場に対応する磁石列（外側の

4つ)の周期長が垂直方向磁場の2倍であるところが異なっている。したがって軸に垂直な平面に投影した電子の軌道は8の字となり、水平あるいは垂直方向に偏光した放射は得られても決して円偏光は得られないことがわかる。また、大部分の放射パワーはヘリカルアンジュレータの場合と同様、軸外に放出される利点がある。ただし、ヘリカルアンジュレータとは異なり、低次の高調波が軸上に存在することに留意しなければならない。建設した軟X線8の字アンジュレータ¹⁶⁾は周期長が100 mm、周期数が44で、軟X線光化学ビームライン用として平成10年1月に設置された。

2.7 真空封止8の字アンジュレータ

8の字アンジュレータにはもうひとつの重要な特徴がある。それは水平面に偏光した整数次高調波の他に垂直面に偏光した半奇数次の高調波を発生することができることである。この性質はほぼ同時に両偏光特性を必要とするビームラインにとって好都合である。この性質をもつ放射光をX線領域において得るには当然ながら真空封止型の8の字アンジュレータが必要となる。このタイプのアンジュレータは兵庫県ビームライン(BL24)用にすでに設置済みである¹⁷⁾。周期長は26 mm、周期数は172である。

2.8 ミニポールアンジュレータ

100 keV以上の領域で周期長30~60 mmの一般型アンジュレータを使って高輝度光を得るにはSPring-8の8 GeVを使っても困難のように思われる。常識的にはウィグラーを利用すべきであろう。しかしながら、これはX線光学系に理不尽な熱負荷を与えるだけである。これを解決するには極端に周期長の短い特別仕様のアンジュレータを導入するしかない。このようなアンジュレータをミニポールアンジュレータと呼んでいるが磁場を得るためには磁石ギャップを十分狭くする必要がある。永久磁石型アンジュレータの場合、有効な磁場を得るためのギャップ値としては周期長の1/3以下に設定しなければならない。例えば周期長10 mmのミニポールアンジュレータの場合は3 mm程度の磁石ギャップを必要とするから当然のことながら真空封止型が前提となる。しかしながら、このギャップ値では現状のSPring-8直線部の垂直ベータートロン閏数値($\beta_y=9$ m)を考慮すると確実に蓄積ビームの寿命が激減する。これを解決するためには現状の直線部に新たなビーム収束系を導入することによってベータートロン値 β_y を0.5 m以下としなければならない。

以上の改造を行うには十分な検討期間が必要であるから当面ミニポールアンジュレータのSPring-8への導入はないであろう。しかし、R&Dを積み重ねて問題点を洗い出し将来に備える必要がある。幸いにも米国Brookhaven研究所NSLSが短周期アンジュレータ導入を指向していた¹⁸⁾こともあって同研究所との共同研究により真空封止

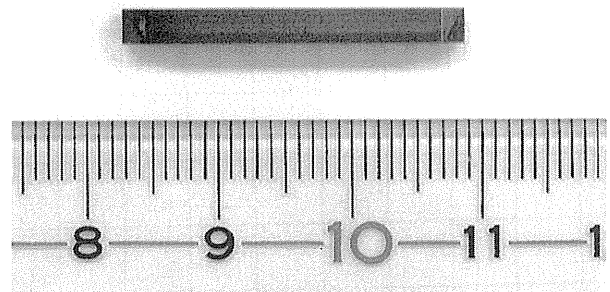


Figure 9. Magnet unit for the in-vacuum minipole undulator. The magnet ($2.75 \times 3.0 \times 28$ mm³) is made of NdFeB coated by TiN.

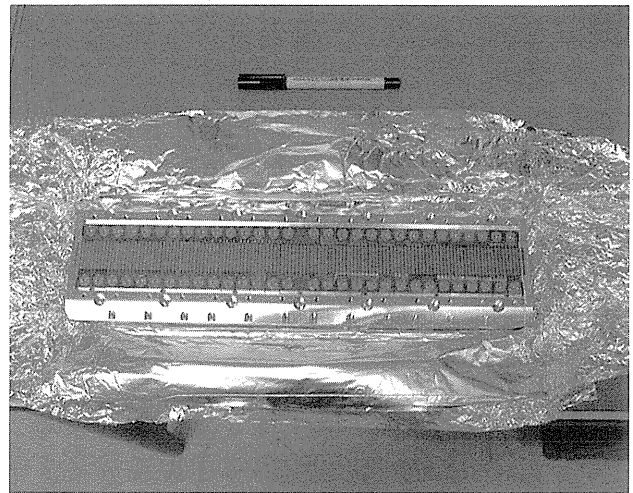


Figure 10. Magnet array for the in-vacuum minipole undulator. The magnets are fixed on the common base by a mechanical clamp made of BeCu every 4 units.

型ミニポールアンジュレータの開発を進めてきた¹⁹⁾。開発したアンジュレータは周期長11 mm、周期数32、磁場はギャップ3 mm時に0.8 Tである。Fig. 9及びFig. 10に永久磁石ユニットと磁石列を示す。このアンジュレータは平成9年5月にNSLSリングの直線部($\beta_y=0.3$ m)に設置した。試験調整運転は成功裏に終了し、磁石ギャップ3.3 mm、真空ギャップ3.1 mmを達成した²⁰⁾。NSLSリングのビームエネルギーは我が国のフォトンファクトリーと同じ2.5 GeVであるがこのアンジュレータにより基本波で4~5.5 keV領域をカバーできるようになった。

3. SPring-8 挿入光源の試験調整運転

3.1 蓄積リングの試運転

通常の光源専用蓄積リングの試運転においては、ビーム蓄積の妨げになりそうな、加速器運転そのものに不要な装

置は設置しないのが普通である。一般型の挿入光源は磁石ギャップ内に真空ダクトが存在するため電子ビームが通過できる開口は極めて狭い。最初の蓄積運転では閉軌道が定まらないのでこのような障害物があっては困るのである。加速器の安定な運転を実現した後に初めて挿入光源の設置が可能となるのである。したがって、加速器の試運転が成功して半年あるいは1年後にやっと最初のアンジュレータ光が得られるのが普通なのである。ところが SPring-8 ではリングの試験調整運転に先駆けて4台の真空封止アンジュレータが設置された(平成9年冬、標準型3台と垂直アンジュレータ)。真空封止アンジュレータでは電子ビームに対する開口大きさが原理的に可変であるという長所を利用したのである。つまり、蓄積リングの試運転時には全てのアンジュレータの磁石ギャップを最大値50 mm に設定して電子の通り道を十分広くすることができるのである。目論見通り最初の蓄積ビームは滞りなく得ることができた(平成9年3月26日)。

3.2 最初のアンジュレータ放射光

標準型である BL47XU アンジュレータの試運転がビーム蓄積の成功後約1ヶ月を経て開始され(4月23日)、その日のうちに最初の放射を得ることができた(Fig. 11)。残る3台のアンジュレータの試運転も夏のシャットダウンまでに全て成功裏に終了した。全てのアンジュレータについて最小ギャップ8 mm を達成することができたがビーム寿命が全開時の70%に減少してしまった。このビームロスには現在の垂直ベータatron関数(現在9 m)が狭ギャップアンジュレータに最適化されていないことによる。平成9年末の時点では蓄積リングの試運転前に設置した4台の真空封止アンジュレータのほかに3台の挿入光源が稼働中である。そのうち2台は標準型真空封止アンジュレータ、残る1台は楕円ウィグラーである。

3.3 独立チューニングの実現

次にアンジュレータのエラー磁場をキャンセルするための補正電磁石パラメータの最適化を行った。その結果、ギャップ変更時の電子ビーム位置の変動をビームサイズの10%以下にすることができた。したがって任意のタイミングでギャップを変更できるようになり、一部のビームラインでは放射光ユーザーによるアンジュレータ波長の独立チューニングが可能となっている。

3.4 アンジュレータ放射光の評価

光学素子開発のための R & D ビームライン BL47IN においてアンジュレータ放射のスペクトル測定やエミッタンス測定(角度分布と光源サイズ測定)が精力的に行われている。Fig. 12 はビーム電流が1 mA、偏向定数(K 値)を2.05に設定したときのアンジュレータ放射光第3次高調波の観測スペクトル(実線)と計算値(点線)である。た

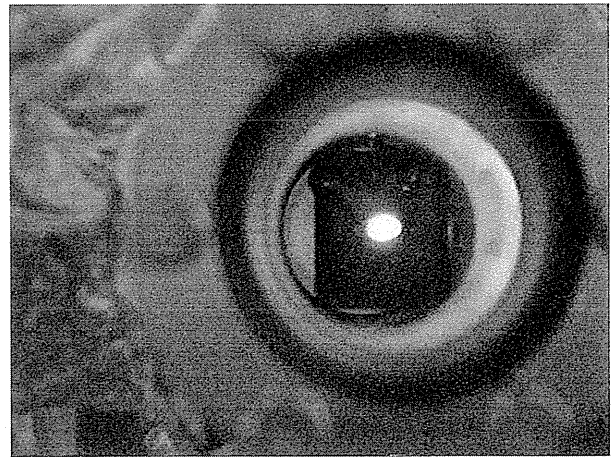


Figure 11. First undulator radiation at SPring-8.

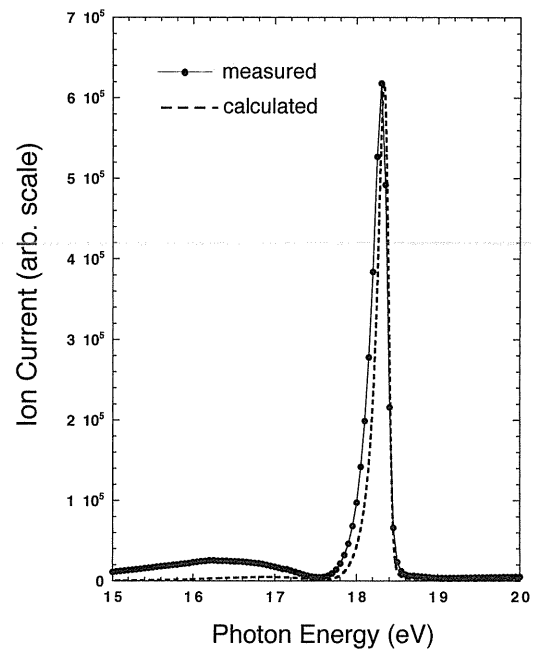


Figure 12. Spectrum of the 3rd harmonic observed in the R & D beamline, BL47IN.

だし、計算値を得るために仮定したビームパラメータはエミッタンス $6 \text{ nm} \cdot \text{rad}$ 、エミッタンス結合 2%、 $\beta_x = 24 \text{ m}$ 、 $\beta_y = 9 \text{ m}$ である。図に示すように、観測スペクトルのバンド幅(1.1%)が若干計算値(0.88%)より広がっているのがわかる。また、高調波の主ピークの低エネルギー側のバンプ(主ピークに対する相対値:4%)が計算値(0.78%)に比べて著しく大きい。このバンプをもたらす原因は水平方向の軸外成分がスペクトルに取り込まれていることによる。ここで、バンド幅とバンプの大きさのビームエミッタンス依存性を計算してみた。Table 2 にその結果を示す。測定値にはほぼ一致する結果を与えるエミッタンスは $15 \text{ nm} \cdot \text{rad}$ であるがこれをもってビームエミッタンスを測定したことはない。アンジュレータ放射に影

Table 2. Calculated spectral width of the 3rd harmonic and ratio of the bump to the peak for various beam emittances. The emittance coupling is assumed to be 2%

emittance nm·rad	σ_x μrad	σ_y μrad	width %	bump/peak %
6	15.7	3.6	0.88	0.78
10	20.2	4.7	0.99	2.2
12.5	22.6	5.2	1.05	3.2
15	24.8	5.7	1.1	4.2
17.5	26.7	6.2	1.2	5.2
20	28.6	6.6	1.2	6.2

響を与えるのはエミッタンスだけではない。スペクトルはアンジュレータ磁場のエラーや放射の観測条件にも依存する。

4. まとめ

SPring-8では7台の挿入光源が試験運転を終えて放射光実験に利用されている。このうち5台は標準型真空封止アンジュレータ, 1台は真空封止垂直アンジュレータでいずれも最小ギャップ8mmを実現しているがこのときビーム寿命は70%に減少している。この問題点は挿入光源直線部の垂直ベータトロロン関数を現状の9mから挿入光源磁石長の半分である2.3mまで減少させれば解決するであろう。挿入光源のエラー磁場(挿入光源全体としてビームに与える偏向)は補正電磁石によりキャンセルすることができた。その結果, ほとんどの挿入光源ビームラインで独立チューニングが可能となっている。蓄積ビームのイメージ電流による発熱は現在のところ観測されていない。現在のところビーム電流が20mA未満に制限されているからである。ただし, この制限は放射線安全に関する申請手続きのスケジュールに従っている。

謝辞

この報告をまとめるにあたり, SPring-8共同チームのスタッフの方々に多大なる御協力をいただいたことを感謝いたします。

文献

- 1) H. Kitamura: *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 2007 (1994).
- 2) 北村英男: 日本放射光学会誌 **9**, 27 (1996).
- 3) X. M. Maréchal, T. Tanaka and H. Kitamura (1994): *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 1937 (1994).
- 4) T. Tanaka and H. Kitamura: *Nucl. Instrum. Meth.* **A364**, 368 (1995).
- 5) K. Bane and S. Krinsky: *Proceedings of the 1993 Particle Accelerator Conference*, Washington, DC, 3375.
- 6) S. Yamamoto, T. Shioya, M. Hara, H. Kitamura, X. W. Zhang, T. Mochizuki, H. Sugiyama and M. Ando: *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 400 (1992).
- 7) T. Hara, T. Tanaka, T. Tanabe, X. M. Maréchal, S. Okada and H. Kitamura: to be published in *J. Synchrotron Rad.*
- 8) T. Hara, T. Tanaka, T. Tanabe, X. M. Maréchal, H. Kitamura, P. Elleaume, B. Morrison, J. Chavanne, P. Van Vaerenbergh and D. Schmidt: to be published in *J. Synchrotron Rad.*
- 9) T. Tanaka, X. M. Maréchal, T. Hara, T. Tanabe and H. Kitamura: to be published in *J. Synchrotron Rad.*
- 10) M. Yamamoto, T. Kumasaka, T. Fujisawa and T. Ueki: to be published in *J. Synchrotron Rad.*
- 11) X. M. Maréchal, T. Hara, T. Tanabe, T. Tanaka and H. Kitamura: to be published in *J. Synchrotron Rad.*
- 12) S. Kimura, M. Kamada, H. Hama, X. M. Maréchal, T. Tanaka and H. Kitamura: *J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena* **80**, 437 (1996).
- 13) A. Hiraya, K. Yoshida, S. Yagi, M. Taniguchi, S. Kimura, H. Hama, T. Takayama and D. Amano: to be published in *J. Synchrotron Rad.*
- 14) T. Hara, T. Tanaka, T. Tanabe, X. M. Maréchal, K. Kumagai and H. Kitamura: to be published in *J. Synchrotron Rad.*
- 15) T. Tanaka and H. Kitamura: *J. Synchrotron Rad.* **3**, 47 (1996).
- 16) T. Tanaka, X. M. Maréchal, T. Hara, T. Tanabe and H. Kitamura: to be published in *J. Synchrotron Rad.*
- 17) T. Tanaka, X. M. Maréchal, T. Hara, T. Tanabe and H. Kitamura: to be published in *J. Synchrotron Rad.*
- 18) P. M. Stefan, S. Krinsky, G. Rakowsky and L. Solomon: *The Art and Science of Magnet Design*, LBL PUB-754, 161 (1995).
- 19) T. Tanabe, T. Tanaka, X. M. Maréchal, H. Kitamura and P. M. Stefan: to be published in *J. Synchrotron Rad.*
- 20) P. M. Stefan, T. Tanabe, S. Krinsky, G. Rakowsky, L. Solomon and H. Kitamura: to be published in *J. Synchrotron Rad.*