

トピックス:「SPring-8 30 m 長直線部ビームライン」

SPring-8 での25 m アンジュレータ ビームライン建設と立上げ

原 徹¹, 高橋 直², 矢橋 牧名²,
玉作 賢治¹, 北村 英男^{1,2}, 石川 哲也^{1,2}

¹理化学研究所播磨研究所*

²高輝度光科学研究センター放射光研究所・ビームライン部門

Construction and Commissioning of a 25 m Undulator Beamline at SPring-8

Toru HARA¹, Sunao TAKAHASHI², Makina YABASHI²,
Kenji TAMASAKU¹, Hideo KITAMURA^{1,2} and Tetsuya ISHIKAWA^{1,2}

¹SPring-8/RIKEN and ²SPring-8/JASRI

The first 25 m undulator was installed in SPring-8 storage ring during the summer shutdown of 2000, followed by commissioning works of the undulator itself together with a front-end, a transport channel and end-stations. Described here are design concept, commissioning process and present status of each sector. The integrated beamline has reached mostly to its original design target. The beamline will be extended into a newly constructed building by the end of March 2001.

1. はじめに

SPring-8 のビームライン建設は1994年に開始された。1997年秋の供用開始時には10本のビームラインを完成させ、以後も着実にその数を増やし、2000年10月現在で39本のビームラインが稼働状態にある。従って、全体で62本の建設可能なビームライン数の約2/3が既に運転状態に入っていることになる。

SPring-8 では、その計画段階から他の X 線領域第三世代放射光施設にはない特徴的なビームライン建設の可能性が内包されていた。一つは1000 m の長尺ビームライン¹⁾であり、もう一つは30 m 長直線部へのアンジュレータ設置の可能性である。幸いなことに、どちらも関係当局の御理解を得て供用開始直後の1998年度補正予算で建設がスタートすることとなり、1000 m ビームラインは1999年度末に、また長直線部アンジュレータビームラインは2000年秋に完成した。これらの完成によって、SPring-8 は One of the X-ray third generation sources から一歩抜け出し、独自の世界を開拓していくための足掛りを得ることに

なった。

SPring-8 の蓄積リングには、4ヶ所の長直線部があるが、最初のビームラインは最長300 m まで延伸可能な中尺ビームラインのサイトである BL19IS に建設することとした。建設の主目的は長いアンジュレータからの放射光を用いたサイエンスの展開であるが、このようなアンジュレータの建設および蓄積リングへの設置が世界で初めてであること、またそれから得られる高パワー密度放射光のハンドリング技術が X 線領域で進んでいることを鑑み、エネルギー領域としては X 線を選択した。このため、SPring-8 での命名法に従うとビームラインの呼称は BL19XU となるが、特に長いアンジュレータを用いたビームラインであることを明示するために、BL19LXU と呼ぶことにした。一方で将来予想される他の3つの長直線部アンジュレータと区別するために、SLUS-1 (SPring-8 Long Undulator Source-1) という呼び方もされている。

本稿はもともと挿入光源とビームラインの2つの記事として編集部から依頼されたものであるが、このビームラ

* 理化学研究所播磨研究所 〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1
TEL: 0791-58-2805 FAX: 0791-58-2807 E-mail: ishikawa@spring8.or.jp

イン建設ではアンジュレータ、フロントエンド、輸送チャンネル、エンドステーションが密接に絡み合っていることから、全体をまとめた一本の記事として掲載して頂くことをお願いした。従って、通常の学会誌記事より若干長めとなったことをお詫びしたい。

長直線アンジュレータの設置は、本号の加速器グループからの報告²⁾にもあるように、ビームライン関係者のみならず SPring-8 の多くのスタッフが関与した。加速器、アンジュレータ、フロントエンド、輸送チャンネルのそれぞれについて、誰も経験のない領域に踏み込む必要があり R & D 的要素が非常に高いビームライン建設となったため、予算的には理化学研究所ビームラインとして建設を行ったが、世界にひとつしかないビームラインという性格上

(1000 m ビームライン共々) 世界に対して開かれたビームラインとして運営していくことが計画されている。特に、通常の第三代光源では得られない高パワー放射光が得られるため、第4世代放射光源にむけてのビームライン機器開発の場として世界中から期待されており、この方向での国際協力の推進が期待されている。またかなり高エネルギー領域まで少なくとも垂直方向には回折限界 X 線ビームが得られることから、干渉性放射光の応用研究の展開が一つの使命となっている。

本稿では、2000年10月に開始されたビームラインコミッションの結果を報告することが最大の眼目となるが、アンジュレータ、フロントエンド、輸送チャンネル、エンドステーションのそれぞれについて、その概要を紹介し現況を報告したい。

2. SPring-8 長直線部アンジュレータ

2.1 アンジュレータの構造

長いアンジュレータを作る時、問題となるのはどのように分割して製作し、それを精度よくつなぎ合わせるかである。SPring-8 の長直線部は全長が27 m であるが、27 m 長のアンジュレータを一体で作ることは輸送や磁場測定を考えるとほぼ不可能で、分割して製作する必要がある。この場合、アンジュレータの構造として、磁石列を真空中に入れた真空封止型を採用すれば、磁石列を27 m にわたって連続してつなぎ合わせることができる (Fig. 1a)。これは磁石の外側に真空チャンバーがあるため、仮に磁石を真空の外に置く真空外型を採用した場合、27 m 一体ものの真空チャンバーを製作しない限り、Fig. 1b のようにチャンバー間のフランジ接続の部分で磁石列は切れてしまい、フランジ両側のアンジュレータ放射光の位相整合させる工夫が必要となる。また直線部の全長を有効に使うとい

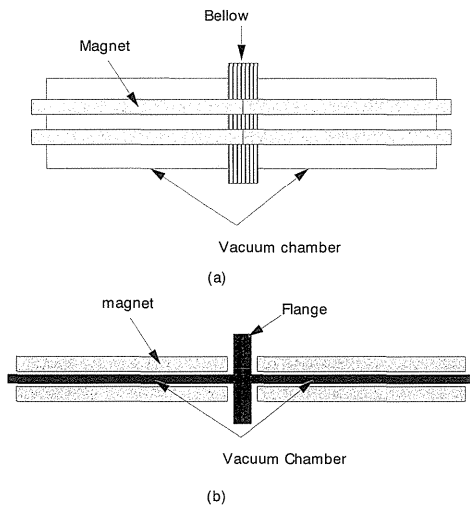


Figure 1. Connection between segments in case of (a) an in-vacuum undulator and (b) an out of vacuum undulator.

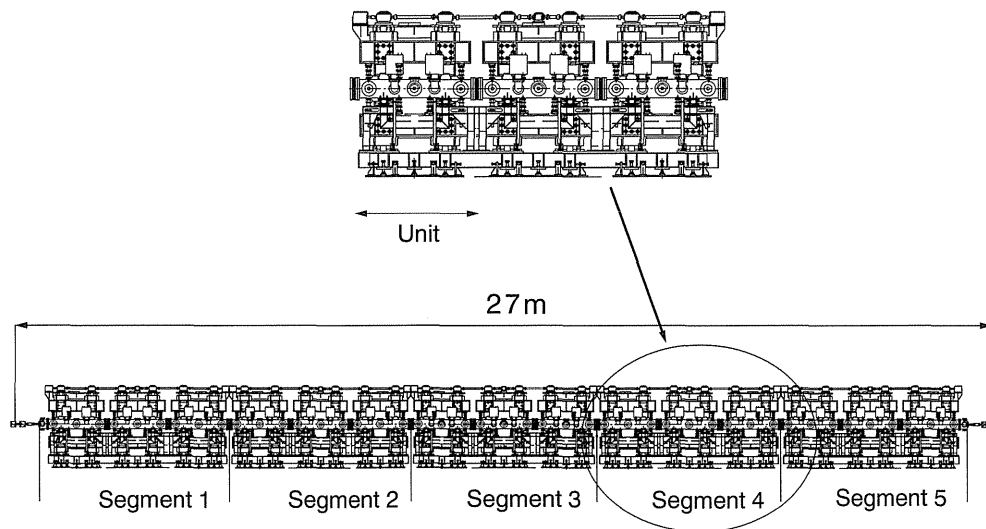


Figure 2. Schematic view of the 25 m long in-vacuum undulator.

う意味でも、磁石列が連続していたほうが好ましい。

SPring-8 長直線部最初の挿入光源には、以上の理由から真空封止型 X 線アンジュレータが採用され、2000年7月～8月にかけての夏期マシン停止期間中に蓄積リングに設置された。直線部の全長は約27 m であるが、アンジュレータ両端のゲートバルブや RF-BPM、ベローズといった部分を除いた磁石部の全長は約25 m となる。これは、蓄積リングに設置されたアンジュレータとしては世界最長である。蓄積リング加速器の収束系電磁石フリーの長直線部実現のため、アンジュレータの設置と同時に、加速器電磁石の再配置も行われ SPring-8 リングのオプティックスも大きく変わった。真空封止型アンジュレータのもう一つの長所は、真空外型アンジュレータ真空チャンバーのように、電子ビームに対する開口が固定されず、必要に応じてギャップを開けることができる点である。今回のような大がかりなリング改造直後のマシンスタディにおいては、電子ビームの物理的な開口を広くとれるということは非常に有用である。

Figure 2 に25 m 真空封止型アンジュレータの全体の概観図を、**Fig. 3** に断面図を示す。アンジュレータは、5つのセグメントで構成されている。各セグメントは、SPring-8 通常直線部 (5 m 長) に導入している4.5 m 長真空封止型アンジュレータとほぼ同じ長さで構成をもち、製作や輸送はセグメントに分割して行い、最終のリング設置時に5つのセグメントを連結させた。1つのセグメントは3つのユニットから成り、各ユニットは独立の真空チャンバーと磁石取り付けアルミビームを持っている。ユニット間の磁石取り付けアルミビームは機械的に連結され、真空チャンバーはベローズを介してつながれてセグメントを構成する。ギャップ駆動はセグメント毎に、1つのステッピングモーターを用いて行われる。セグメント間の磁石取り

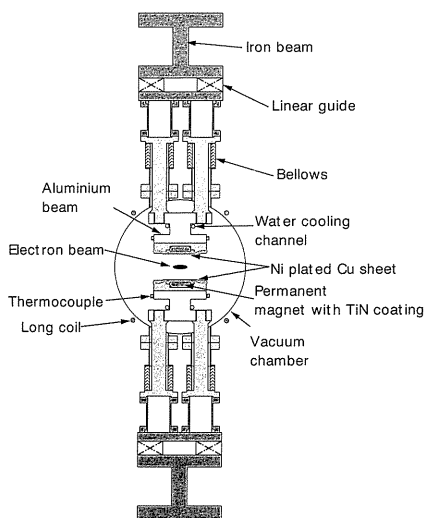


Figure 3. Cut out view of an in-vacuum undulator.

Table 1. Parameters of the 25 m in-vacuum undulator

Type	Pure permanent magnet (halbach)
Periodic length	32 mm
Number of periods	780
Gap range	12~50 mm
Maximum K	1.76 at 12 mm gap
E_{1st}	7.4~18 keV

付けアルミビームの接続は、アルミビーム間を密着させた後、磁石列に間隙ができないよう電子ビーム軸方向に固定し、垂直方向 (ギャップ開閉方向) の動きにはある程度のフレキシビリティを持たせた。これは、5セグメントのギャップを駆動する5台のステッピングモーター間の干渉による脱調を防ぐためである。ギャップ開閉は5台のモーターを同時駆動して行うため、セグメント毎の独立駆動はできない構造になっている。

4.5 m 標準型真空封止アンジュレータと同じく、磁石列の両端とリング真空ダクトは水冷形状変換部によってつながれ、真空ダクトの楕円形状から磁石列の2平面形状へ断面を滑らかに変換している³⁾。磁石列は、60 μm 厚の銅にニッケルを15 μm メッキした金属フォイルによって覆われており、電子ビームのインピーダンスをなるべく小さく抑えている。磁石列は、SPring-8 標準型真空封止アンジュレータと同じ周期長32 mm の Halbach タイプを採用した。25 m 真空封止型 X 線アンジュレータの主なパラメータを **Table 1** に示す。

2.2 磁場測定および調整

25 m アンジュレータの磁場測定は、2000年1月より開始された。磁場測定に用いるホール素子をスキャンする測定ベンチや、磁場積分測定用のフリッピングコイルは、5 m よりも長い挿入光源の磁場測定に対応できないため、磁場測定はセグメント毎に分けて行われた。まず、5 m 長の各セグメントの磁場を測定し、磁場調整を行う。磁場調整は、従来のチップ磁石を磁石ホルダー背面から挿入する調整方法に代えて、磁石ブロックを回転または他のブロックとの入れ替えによる調整方法を主に用いた。各セグメントの磁場調整完了後、2つのセグメントを **Fig. 4** のように配置し、セグメント間の接続部分の磁場を再測定し、調整を行った。

最終的に得られたアンジュレータ磁場の調整結果を、**Table 2** に示す⁴⁾。

2.3 蓄積リングへの設置および真空立ち上げ

磁場測定終了後、2000年7月に5つのセグメントを SPring-8 蓄積リングへ設置し、同時に各セグメント間の連結を行った。真空封止型アンジュレータは、蓄積リングの真空と直結するため 10^{-9} Pa (10^{-11} torr) 台の超高真

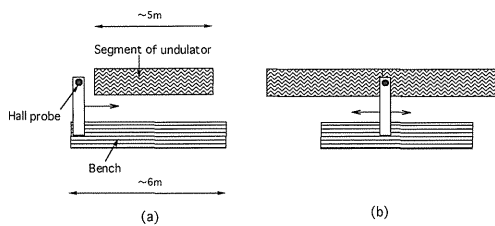


Figure 4. Magnetic field measurement of the 25 m undulator. Field measurement and correction are completed first in each segment (a), and after carried out at connection points (b).

Table 2. Magnetic field performance of the 25 m in-vacuum undulator⁴⁾

Gap	Phase error	Dipole [Gcm]		Quadrupole [G]		Sextupole [G/cm]	
		Normal	Skew	Normal	Skew	Normal	Skew
12 mm	5.8°	72	-36	-12	0	54	-9
20 mm	5.4°	55	-25	-17	-3	41	-15
30 mm	3.4°	37	-15	-7	2	15	4

空の達成が要求される。このためには加熱排気が不可欠だが、加熱による磁石部の非可逆減磁を防ぐため、真空中の磁石および磁石取り付けアルミビームを125°Cに、外側の真空チャンバーを200°Cに温度コントロールしながらベーキングを行う必要がある。ベーキング時の真空チャンバーの熱膨張は、25 mの全長に対し7 cmに達するためベーキングは2段階に分けられた。蓄積リング真空との取り合いである長直線部両端のリングゲートバルブの内側に、もう一つゲートバルブを設置し、まずアンジュレータ本体部のベーキングを行った。本体部の超高真空が立ち上がった後、リングゲートバルブとアンジュレータゲートバルブ間を短管でつなぎ、短管部分のベーキング後に、両ゲートバルブを開けリング真空との接続を行った。また、ベーキング時の熱膨張により形状変換部が切れるのを防ぐため、両端ユニットの真空チャンバーの位置は、磁石取り付けアルミビーム端の熱膨張に合わせて自動調整を行うフィードバック機構により調整した。両端で3.5 cmにおよぶ各種コンポーネントの熱膨張による移動量を吸収するため、コンポーネントの固定部は全てリニアガイド上になっており、熱膨張による機械的なダメージを防ぐようになっている。真空ポンプは、排気速度500 l/minのNEGが60台と125 l/minのイオンポンプが36台取り付けられている。リング設置時の様子を Fig. 5~6 に示す。

計72時間のベーキング後の到達真空度は、全長にわたって多少ばらつきはあるが 9×10^{-9} Paを達成した。100 mA電子ビーム蓄積時の真空度は、設置から3ヶ月経過後で 4×10^{-8} Pa程度である。

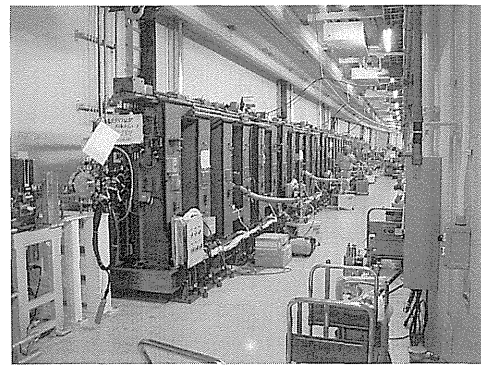


Figure 5. Photograph of the installed 25 m in-vacuum undulator in the SPring-8 storage ring (back side).

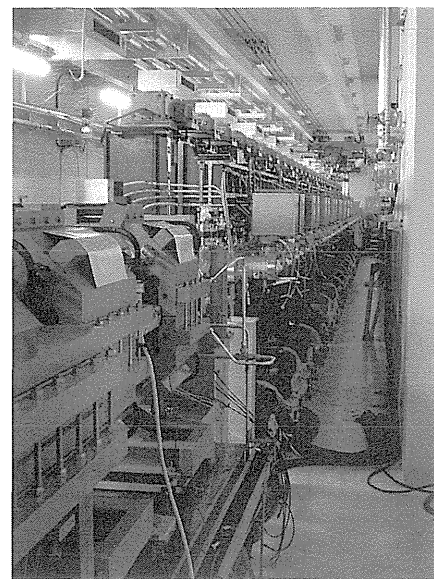


Figure 6. Photograph of the installed 25 m in-vacuum undulator in the SPring-8 storage ring (front side).

2.4 25 m アンジュレータの輝度

25 m アンジュレータで得られる放射光輝度を、Fig. 7 に示す。ビームのエミッタンスやエネルギーブレッドを無視すれば、輝度はアンジュレータの長さの2乗に比例して大きくなる。しかし25 m アンジュレータの場合、電子ビームのエネルギー広がり0.1%によって、アンジュレータ放射光のスペクトル幅が広がるため、25 m アンジュレータの輝度は4.5 m 長アンジュレータ輝度の5倍程度となる。垂直方向の電子ビームの角度発散は約 $1 \mu\text{rad}$ と小さく、50 keV以下の放射光では垂直方向については光の回折限界に達している。

2.5 コミッショニング

4箇所長直線部実現後のSPring-8蓄積リング加速器のコミッショニングは、2000年9月より開始された。真空封止型アンジュレータのギャップをどこまで閉じるこ

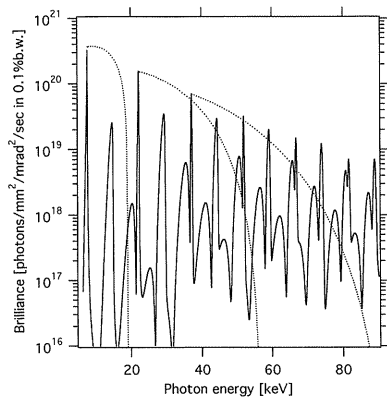


Figure 7. Expected brilliance of the 25 m undulator. Solid line shows the spectra at 12 mm gap and dotted lines show brilliance available using 1st~3rd harmonics.

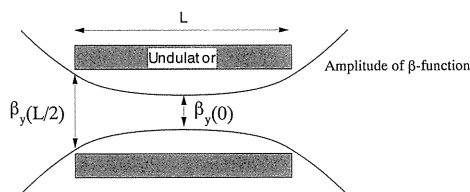


Figure 8. β -function at a straight section.

ができるかは、直線部の垂直方向ベータ関数の振幅によって決まるため、長直線部ベータ関数の最適化は非常に重要である⁵⁾。直線部中心からの距離を z とすると、直線部のベータ関数振幅 $\beta_y(z)$ は、直線部中心のベータ関数振幅 $\beta_y(0)$ によって一意に決まり、**Fig. 8** のように

$$\beta_y(z) = \beta_y(0) + \frac{z^2}{\beta_y(0)}$$

で与えられる。クーロン散乱による電子ビームの振幅は、ベータ関数振幅の平方根に比例し、散乱された電子は物理的に狭い開口部分で失われる。このため、直線部内でベータ関数振幅の振幅が最大となるアンジュレータ両端 ($z=L/2$, L はアンジュレータ全長) の $\beta_y(L/2)$ をできるだけ小さくして、散乱された電子がアンジュレータ磁石に当たるのを防ぎ、ビーム寿命の低下を避ける必要がある。アンジュレータ両端において最も $\beta_y(L/2)$ が小さくなるのは $\beta_y(0)=L/2$ の時で、この時 $\beta_y(L/2)=L$ となる。25 m アンジュレータの場合、最適な $\beta_y(0)$ は 12.5 m であるが、実際は $\beta_y(0)=14$ m とほぼ最適値近くに設定されている。しかしながら、5 m 直線部のアンジュレータと比較すると、直線部の長さが長い分だけアンジュレータ両端の $\beta_y(L/2)$ が大きくなることは避けられず、最小ギャップも

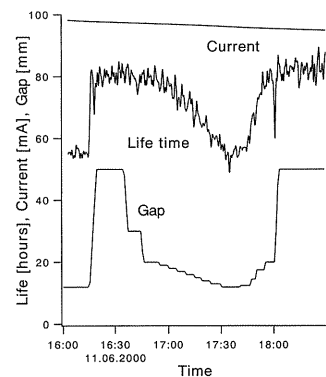


Figure 9. Beam life time dependence on the 25 m undulator gap.

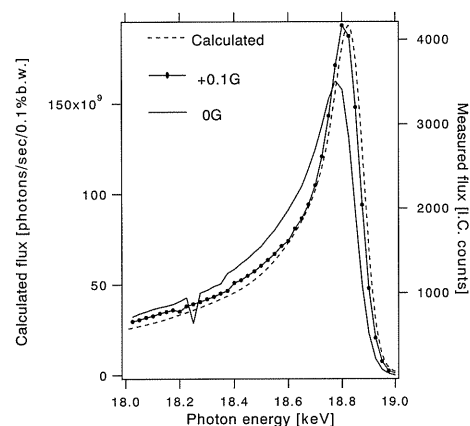


Figure 10. Effect of uniform field correction on undulator spectrum, The spectrum are measured at 50 mm gap ($K \sim 0.04$) with 0 and +0.1 G horizontal field correction. Dashed line shows a calculated spectra.

5 m 長アンジュレータに比べると大きくなる。

25 m アンジュレータ自体のコミッショニングは、2000年10月末から開始され、ギャップを当初予定していた 12 mm まで閉めることができた。しかし **Fig. 9** に示すように、20 mm 以下のギャップではビーム寿命の低下が見られた。これは長直線部導入後の蓄積リングの運転がまだ始まったばかりで、今後加速器のチューニングが充分行われればビーム寿命は改善されるものと思われる。ギャップ閉閉に伴うビーム軌道の変位は、アンジュレータの両端のステアラーによって補正され、水平垂直両方向とも数 μm 以下に抑えられている。

コミッショニングと同時に行われたスペクトル測定では、地磁気と思われる一様磁場の影響がギャップ 50 mm のスペクトルにあらわれた (**Fig. 10** 中 0 G)。アンジュレータ真空チャンパーには、各セグメントに一様磁場を補正できるロングコイルが付いており、これを用いて補正した後のアンジュレータ放射光スペクトルを **Fig. 10** (図中 0.1 G) に示す。補正は水平方向にアンジュレータ全体で 0.1 G の一様磁場をかけて行い、ほぼ計算で予測されるス

ベクトルが得られた。地磁気のような弱い磁場は電子ビームを徐々に曲げるため、通常の5 m長のアンジュレータではほとんど問題にならないが、25 m長になるとビーム軌道の変化が無視できなくなる。

3. フロントエンド

3.1 概要

SPring-8における典型的なフロントエンドの定義は、蓄積リング光取り出しポート終端から、シールド壁直下流に設置されるベリリウム窓までの領域で、①高出力放射パワーの制御、②リング真空保護のための超高真空の維持、③放射光ビーム位置のモニタリング、④放射線シールド等の役割を担っている。特に、高出力放射パワーの制御に寄与する機器として、典型的なSPring-8標準真空封止型アンジュレータ用フロントエンドの場合、上流側から順に、固定マスク、アブソーバ⁶⁾、前置スリット⁷⁾、XYスリット⁸⁾と呼ばれる高熱負荷機器が設置されている。固定マスクおよび前置スリットは光軸から大きく外れた放射光の除去を、XYスリットは光軸近傍の良質な放射光のみを通すための開口制限を、アブソーバはユーザの要求に応じて放射光ビームの光学ハッチへの導入/遮断を行うものであり、各機器とも適切なパワーを分け合って処理する設計となっている。従って、固定マスクを抜けてくる放射パワーは、アブソーバ開時には前置スリットとXYスリットで、閉時にはアブソーバ単独で受け止める。この熱負荷の分散化という設計思想に基づいたフロントエンドは既に9本建設されており、順調に稼動中である。

一方において、この夏にSPring-8で最初の長直線部対応挿入光源用ビームラインがBL19LXUに建設された。BL19LXUの光源は、周期長32 mmの標準真空封止型アンジュレータが5連並んだ構造になっており、K値が最大の1.7の場合に、全放射パワーは33 kW、フロントエン

ド入口における放射パワー密度は1.92 kW/mm²にも達する。これらは標準真空封止型アンジュレータの各々約3倍と約1.5倍に相当する。この強烈な放射パワーを処理するために、**Fig. 11**に示す新しい高熱負荷機器設計を導入した。

3.2 設計コンセプト

基本的な設計コンセプトとして、「アブソーバより上流側で放射パワーを集中的に処理する」ことを掲げた。これは、マスクを抜けてアブソーバに入ってくる放射パワーの処理は、アブソーバだけでなくアブソーバよりも下流側の機器にも影響するため、できるだけ多くの標準型のコンポーネントの採用を目指したことによる。その結果、アブソーバを標準型の機器配置よりも下流側にずらし、マスクだけBL19LXU専用のものを設計することとした。

最終的なマスク出口サイズは次の2つの観点から1.5 mm角に決定した。1つはユーザにとって十分な放射光ビームサイズを供給することである。**Figure 12**は、基本波の光子束密度とパワー密度の水平および垂直分布の関係を示したものである。参考に標準真空封止型アンジュレータの空間パワー密度分布も併記している。この図から明らかなように、ユーザの望む放射光ビーム、すなわち基本波の空間分布はパワー分布に比べて狭いため、マスクの最終的な開口サイズを約40 μ rad程度とすると、基本波を損なうことなく軸外の不要なパワーを処理できることになる。ただし、40 μ rad程度まで絞るとすると、マスクの出口開口を放射光ビーム軸に合わせるために、精密駆動ステージを装備した可動マスクが必要になる。

もう一つはフロントエンドに与えられた設置スペースを考慮する必要がある。フロントエンドの長さは蓄積リングの各場所によって異なるが、BL19LXUは幸いなことに一番長いケースで、フロントエンド入口からシールド壁内壁

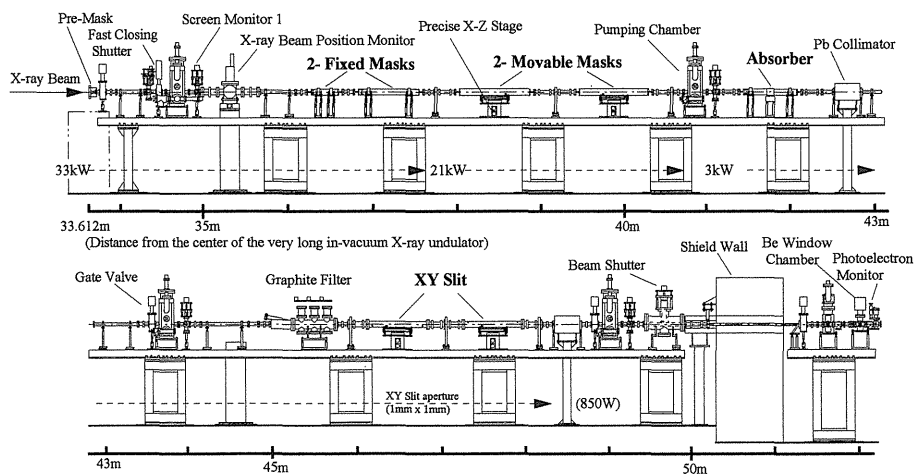


Figure 11. Layout of the front end for the SPring-8 very long in-vacuum undulator beamline (BL19LXU). The components shown by the bigger and bold letters are the high heat load components.

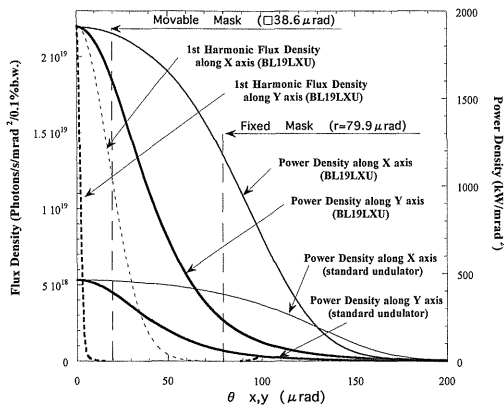


Figure 12. Comparison of the spatial distributions along axes between the 1st harmonic flux density and power density. The spatial power density distributions for the standard undulator are also plotted for reference.

まで16.688 m 与えられている。この内、超高真空維持、放射光ビーム位置のモニタリング、および放射線シールドのために必要な機器用のスペースや、フロントエンド専用架台と各種ケーブル・配管との干渉を避けるために必要なニップル用スペースなどを差し引くと、アブソーバを最も下流側に移動させた場合、その位置は光源から約42 m となった。次にフロントエンド入口からアブソーバまでの領域についても同様のことを考えると、マスクに与えることができるスペースは約5 m 程度になった。光源から約40 m 離れた位置で放射光ビームサイズを約40 μrad 程度に制限すると、マスクを抜ける放射パワーは約3 kW 程度となり、全放射パワー33 kW のうち、残りの30 kW を5 m の領域で処理することになる。現在、SPring-8 フロントエンドでは、標準的な高熱負荷対応技術として、高温強度に優れた Glid-Cop を受光部に使用し、かつ斜入射で受けることと、冷却流路に熱伝達向上用のワイヤコイルを挿入するという手法⁹⁾を組み合わせ採用しており、本手法ではおおよそ1メートルあたり最大で約10 kW のパワーの処理を可能にしている。従って可動マスクの駆動に必要なベローズの長さを考慮しても問題ないため、最終的なマスク出口サイズは1.5 mm 角 (38.6 μrad 相当) とした。

3.3 個別機器

(1) マスク

今回新たに設計された BL19LXU 専用のマスクは、**Fig. 11** に示すように、固定マスク 2 連、可動マスク 2 連の合計 4 連から構成されている。マスク全体で約30kW のパワーを処理するために、まず固定マスクで約10 kW を取り除く。2 連としているのは、固定マスクの上流にある前置マスクの出口開口サイズが18 mm 角と大きいため、1 段目のマスクの入口開口はどうしても大きくとらざるをえず、その場合受光面の斜入射角を考えると全長が非常に

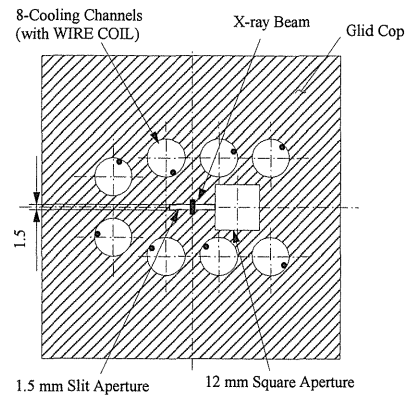


Figure 13. Sectional view of the exit of the 2nd movable mask, having an 1.5 mm slit and 12 mm square apertures.

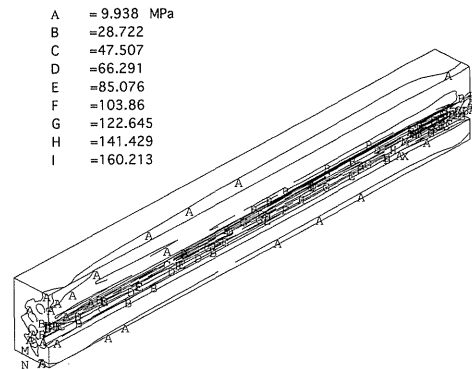


Figure 14. Equivalent stress contour in the 1st movable mask calculated by ANSYS analysis.

長くなり加工できないことから2段とした。

一方の可動マスクは **Fig. 11** に示すように精密 X-Z ステージに搭載されており、放射光ビーム軸に対して容易に位置調整できるようになっている。**Figure 13** に後段可動マスクの出口開口部の断面図を示すが、縦方向に1.5 mm のアパーチャーをもったスリット形状をしている。前段可動マスクの形状は、この図を90°回転させたものであり、横方向に1.5 mm のアパーチャーをもったスリット形状になっている。また、このスリットの横には約12 mm 角のコミッショニング用のアパーチャーが設けてある。これにより、コミッショニングの際に、まず後段可動マスクの12 mm 角アパーチャーを光軸中心付近に持ってきて開口を十分に大きくした状態で、前段可動マスクの縦スリットを水平方向にスキャンして軸を出す。次に同じ作業を前段と後段を入れ替えて行う。さらにこれを繰り返して行うことで、精度良く可動マスク開口を放射光ビーム軸上に合わせる。

前段可動マスクについては有限要素法プログラムである ANSYS による熱および熱応力解析を実施した。**Figure 14** に熱応力解析結果を示す。受光部の傾斜角度は標準型

の10 mrad に対し、6.7 mrad とした。この解析を行う上では、放射光ビームが許容範囲で最大に振れた時を想定しているため、前段可動マスクへの入熱量は約20 kW となっており、これはほぼ固定マスクを抜けてくる全放射パワーに相当する。この厳しい条件にもかかわらず、最高温度および最大等価応力とも、許容値以下であることを確認した。

(2) ベリリウム窓

SPring-8 のベリリウム窓は250 μm 厚さの箔を2枚用いており、中間部分はイオンポンプで排気している。また、Fig. 11に示すように、ベリリウム窓を保護するために、グラファイトフィルターが上流側に設置されている。グラファイトフィルターは3軸から構成されており、標準型では各軸とも厚さ100 μm のフィルターが取り付けられていて、ステッピングモータによりフィルター挿入と未挿入を選べる。従って、フィルター無しから300 μm まで、100 μm きざみで選択できるようになっている。

SPring-8 では、ベリリウム窓の設計条件としては、最高温度が400°C以下で、最大等価応力が280 MPa (ベリリウム圧延材の0.2%耐力以下) であることとしている。これまでの各種光源に対する検討結果によると、ベリリウム箔 (250 μm) での総吸収熱量が約12 W 程度で、最大熱応力が設計値である280 MPa に達することがわかっている。BL19LXU において、XY スリットの開口制限を1 mm 角とした場合の、各種グラファイトフィルター挿入時のベリリウム窓での吸収熱量を計算したところ、グラファイトの厚みを標準型の最大値である300 μm としても、吸収熱量が約14 W にもなり、現在の設計条件には合わないことがわかった。

実際に熱応力解析を行った結果を Fig. 15 に示す。横軸

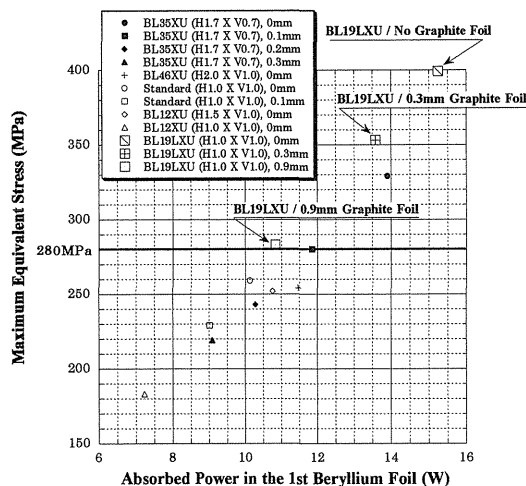


Figure 15. Maximum equivalent stresses of beryllium window for various light sources calculated by ANSYS analysis. The horizontal axis shows the absorbed power in the beryllium foil, and the vertical axis shows the maximum equivalent stress.

がベリリウムでの吸収熱量、縦軸は最大等価応力を示しており、参考に他の光源の結果についてもプロットしている。この図からわかるように、BL19LXU では、XY スリットの開口サイズを1 mm 角とすると、グラファイトフィルターを900 μm 入れないと最大等価応力が280 MPa 以下にならないことが確認できた。280 MPa は0.2%耐力であるため、これを少し超えてもすぐに破損事故につながるとは考えにくい、破損による真空事故が発生した場合の影響の大きさを考慮して、当面は900 μm での運転を行う予定である。しかし、現在実施中の、実機と同じ仕様・工程で製作したベリリウム箔の試験片を用いた静的な強度試験と熱疲労試験の結果を見て、実用的なグラファイトフィルターの厚みを決定していくことにしている。

参考に900 μm のグラファイトフィルターを挿入した場合のフラックスの落ち方は、K 値が1.7の場合 (基本波=7.7 keV) で約37%、基本波に10 keV を選択した場合には約20%の減少となる。

(3) その他

アブソーバとXY スリットについては標準型と同じものを設置した。放射パワーで考えるとオーバースペックになるが、軸上のパワー密度で約4倍になること、保守業務を考えた場合同じ仕様であることが望ましいことから判断した。ビームシャッターの遮蔽用タングステン厚みに対しては残留ガスと電子ビームによる制動放射が最も影響するが、制動放射による影響は真空度が同じだとすると直線部の長さ に 比例する。標準真空封止型アンジュレータの場合直線部は約16.5 m であるのに対し、BL19LXU では約40 m と2.5倍程度長くなるが、遮蔽計算の結果に基づいて標準では40 cm であるところを46 cm に変更した。

その他の前置マスク、排気真空槽、光位置モニター、フィルター類等についても検討を行った結果、標準型で問題ないことを確認している。

3.4 コミッショニング

2000年10月25日からBL19LXU のコミッショニングを開始した。フロントエンドのコミッショニングは、①スクリーンモニターによる光軸の確認作業、②可動マスクおよびXY スリットの開口軸の放射光ビーム軸へのアライメント作業、および③光位置モニターの調整作業から構成される。①については、リングカレントが1 mA の状態で行った。光源から約35 m 離れた位置にあるスクリーンモニター1での映像を Fig. 16 に示す。真ん中の丸い光がアンジュレータ光で、左側に見える帯がアンジュレータの下流側にある19セルの偏向電磁石1からの漏洩光である。スクリーンモニターはフロントエンドの中に4個設置されているが、いずれもモニター中心にアンジュレータ光が観測され、アンジュレータおよびフロントエンド機器の設置精度の高さが確認された。②については、ベリリウム窓の下流側の高真空領域に設置された光電子モニターを用いて

行った。光電子モニターの検出部には厚さ $50\ \mu\text{m}$ の金箔を採用しており、可動マスクおよびXYスリットの水平・垂直スキャンを行い、その時に放出された光電子電流を測定することにより放射パワーの空間分布を求め、各機器を光軸中心に合わせた。光学系グループによるコミッショニングが進み、単色光が実験ハッチまで通るようになった後で、単色光を使ったXYスリットのより精密なアライメントが同グループの手で行われる予定である。③についても標準型と同様に、4枚のブレードの信号量が同じになるようにステッピングモータ駆動による位置調整を行うとともに、水平・垂直方向の補正係数を設定した。

上記のコミッショニング作業は順調に進んだが、標準型に比べて真空焼きだし作業に手間取ってしまった。今回の設計では、アブソーバの上流側でほとんどのパワーを取る構造になっているため、上流側の圧力が問題になることは当初から予想しており、可動マスクに設けた $12\ \text{mm}$ のア

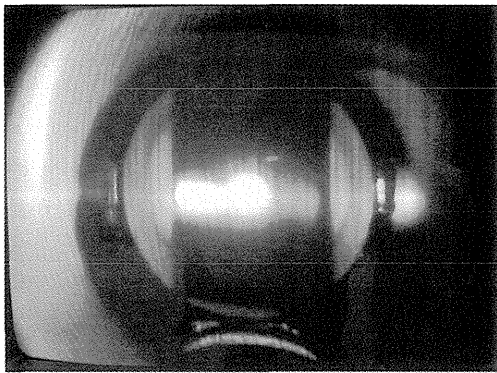


Figure 16. Photograph of the first beam observation by the Screen Monitor 1, which is located at about 35 m away from the light source point. The round shape brightness, located at center, is the undulator radiation, and the band shape brightness, located at the left side, is the bending magnet radiation downstream of the insertion device.

パーチャーがコンダクタンスを大きくする効果があると期待していた。しかし、この強烈な放射パワーによる光脱離および熱的なガス放出による影響は予想以上に大きく、蓄積リングの圧力を確認しながら徐々に真空焼きだしを進めた。蓄積電流値が $0\ \text{mA}$ になった時の圧力の回復が他のビームラインに比べて遅いことから、冷却していない機器への照射（特に斜入射による散乱光のベローズでの影響等）を懸念したが、放射パワーと圧力上昇の関係がリニアであり徐々にその傾きが小さくなってきたこと、運転停止直後にマシン収納部に入りあらゆるベローズの温度を確認したが特に異常が認められなかったことから、辛抱強く焼きだしを継続し、11月2日に $100\ \text{mA}$ /ミニマムギャップを達成した。また、高熱負荷機器には全て熱電対を装着しているが、全ての機器での温度上昇も予想範囲であることも確認した。

4. 輸送チャンネルとエンドステーション

4.1 概要¹⁰⁾

ロングアンジュレータの最大放射パワーは $35\ \text{kW}$ であるが、このうち大部分の軸外れの熱負荷は、フロントエンドセクションにて除去される。このため、ビームライン輸送系¹¹⁾や放射線遮蔽ハッチ等のビームライン要素類は、SPRING-8の標準アンジュレータビームラインに準じて設計された (Fig. 17)。蓄積リング棟内には光学ハッチと3つの実験ハッチ（実験ハッチ1-3）がタンデムに設置される。さらに蓄積リング棟付属施設W内に1つの実験ハッチ（実験ハッチ4）が設置される。光学ハッチ内には、SPRING-8標準型の二結晶分光器（SSM-6型）及び輸送系コンポーネントがインストールされる。実験ハッチ1から3のサイズは光軸方向に $5\ \text{m}$ 、光軸直交方向に $3.4\ \text{m}$ で、高さは $3.3\ \text{m}$ （実験ハッチ1, 2）及び $4.5\ \text{m}$ （実験ハッチ3）である。実験ハッチ4は、光軸方向 $7\ \text{m}$ 、光軸直交方向 $6\ \text{m}$ 、高さ $6\ \text{m}$ と大型になっている。実験ハッチ3

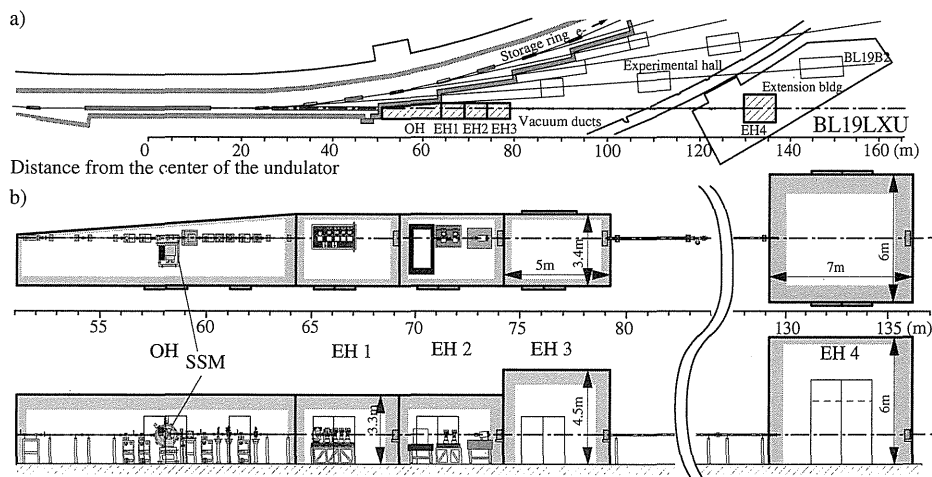


Figure 17. Layout of BL19LXU.

と4の間の約51 mの延伸区間は、ICF152フランジ付きの鉛シールドされた真空ダクトによってビームが輸送される。光学ハッチ内及び延伸区間輸送系の真空排気は、ターボ分子ポンプとスクロールポンプを組み合わせた SPring-8 標準型の排気ユニットによって行われる。ビームライン制御及びインターロックも、SPring-8 標準システムによって構築される。その他のビームラインユーティリティとして、タイミング系実験のため、508.58 MHzの蓄積リング加速 rf 信号が供給される。また、実験ハッチ1, 2内には、精密空調装置が設置され、室温の局所的な揺らぎは ± 0.1 K以下に抑えられる。

分光結晶の冷却は、本ビームラインにおける重要な課題の一つである。これまで、SPring-8 標準アンジュレータビームラインにて、様々な冷却方式による熱負荷のテストが行われてきた。液体窒素冷却シリコン結晶と水冷ピンポストシリコン結晶は、ともに、500 W 入射時にも熱による歪みを伴わないことが確認された¹²⁻¹⁴⁾。しかしながら、本ビームラインにおける最大パワーは、2 kW 以上、また、分光器位置（アンジュレータ中心から58 m）での最大パワー密度は、580 W/mm²と見積もられている。この甚大な熱負荷に耐えうる冷却方式として、ダイヤモンド結晶の液体窒素冷却がテストされる予定である。ダイヤモンドは高エネルギー X 線の吸収が少なく、高い熱伝導率をもち、シリコンと同様低温で熱膨張係数が0になる点が存在することが知られている。これらのことから、ダイヤモンド結晶の液体窒素冷却は、将来の X 線自由電子レーザー (FEL) における結晶冷却技術としても有力視されており、そのための R & D として重要な意義をもつ。ちなみに、SPring-8 標準型二結晶分光器の機構は、これらの異なる冷却方式を大がかりな改造なしに切り替えることができるように設計されているため、多岐にわたる R & D が可能となっている。

各実験ステーションの、立ち上げ時に設置される機器は、以下の通りである。実験ハッチ1には、精密多軸回折計が設置される。これは、精密ゴニオメータ、精密移動ステージ、スリット、その他アクセサリ類が定盤上に置かれることによって構成される。実験ハッチ2には、フェムト秒パルスレーザーが設置される。極短パルスのチャージングを避けるため、レーザーは実験ハッチ内に設置される。ストリークカメラまたは小型の精密多軸回折計を併用することもできる。実験ハッチ3は、オープンハッチになっており、大型の機器が持ち込み可能で、将来は共同利用実験にも使用される。実験ハッチ4は、15 T 超伝導電磁石と多軸回折計が設置され、強磁場下の X 線磁気散乱が主に研究される。この実験ハッチは蓄積リングから遠く離れているため、15 T 電磁石が電子軌道に与える影響は極めて小さい。実験ハッチ1と2の制御は、1 km ビームライン29XULと互換なシステムによって行われる。SPring-8 ビームライン制御にも用いられている VME シ

ステムが使用され、挿入光源を含むビームライン機器と実験装置の統一的な制御が可能である。実験ハッチ3と4の制御には spec (Certified Scientific Software) が使用される予定である。

4.2 輸送チャンネルの建設及びコミッショニング

輸送チャンネル建設に当たって、1998年から99年にかけて主な仕様がまとめられ、2000年初頭から蓄積リング棟内の現地工事が開始された。まずハッチが6月に完成し、光学ハッチ内の輸送チャンネル、分光器の据付は8月に完了した。続いてインターロック工事が行われた。10月24日には、安全管理室スタッフ立ち会いのもと、ビームライン使用前検査に合格した。これまで SPring-8 で進められてきたビームライン要素類の規格化・標準化の通り、迅速なスケジュールでビームライン建設は完了した。ビームラインの現在の様子を Fig. 18に示す。

10月25日18時16分、蓄積電流 1 mA で蓄積リングのフォトンダクトアブソーバが開かれ、ビームラインコミッショニングが開始された。まずフロントエンド部のスクリーンモニターにてファーストビームを観測し、アンジュレータギャップは50 mm から最小の12 mm まで閉められた。引き続き、アンジュレータを含む電子軌道の調整が行われた。ところが、調整終了間際の10月26日午前0時頃、アンジュレータのギャップ駆動にトラブルが生じた。担当各氏に「惨劇」好きの木村洋昭氏 (JASRI) が加わったチームが苦闘した結果、なんとか明け方には復旧にこぎつけた。並行して、フロントエンドの可動マスク、スリット類の調整が進められた。10時55分から蓄積電流100 mA、ギャップ50 mm で二結晶分光器の調整が行われ、5分後に単色光を輸送部スクリーンモニターにて観測した (Fig. 19)。翌27日の16時に、単色光が実験ハッチ1に導かれ、30日には実験ハッチ2と3にも導入された。アンジュレータギャップはフロントエンド部の真空度をみながら徐々に閉められ、11月2日、100 mA 運転時に12 mm ギャップに到達した。

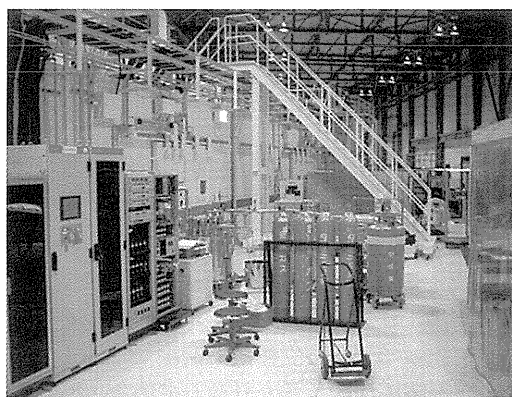


Figure 18. View of the beamline from the upstream side.

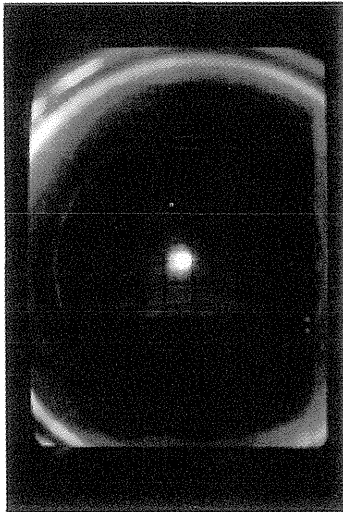


Figure 19. First monochromatic beam observed at a screen monitor in a transport-channel of BL19LXU.

4.3 測定結果

二結晶分光器の分光結晶としては、現在、(111)シリコンが液体窒素によって間接冷却されている。結晶のサイズは、第一結晶が $90 \times 50 \times 35 \text{ mm}^3$ 、第二結晶が $80 \times 50 \times 35 \text{ mm}^3$ である。第一結晶が結晶ホルダーにマウントされた様子を **Fig. 20** に示す。結晶は、両側面をホルダーによって挟み込まれることで固定されている。熱接触をとるため、両者の間にはインジウムシートが挿入された。この厚さのシリコン結晶は入射 X 線の殆どを熱として吸収し、また冷却器の冷却能力は現在300 W 程度であるため、フロントエンド XY スリット（アンジュレータ中心から47 m）によって入射パワーを制限しながら使用する必要がある。アンジュレータギャップを変えながらフロントエンドスリットの開口を変化させたところ、ギャップ18 mm 以上で $0.7 \times 1.0 \text{ mm}^2$ （垂直方向 x 水平方向）、18 mm 以下で $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ という開口下で結晶は正常に冷却された。後者の条件で、垂直方向は80%以上のフラックスを取り込んでいるものの、水平方向は1/3程度しか取り込んでおらず、この分だけトータルフラックスをロスすることになる。

この開口条件の下、いくつかのアンジュレータギャップ値について、実験ハッチ 1 にて 1 次光のピーク強度を測定した。各ギャップにおいて、二結晶分光器（Si111反射）をエネルギーキャンして最大強度に合わせた。検出器としては、p-i-n フォトダイオード（浜松フォトニクス S3590-09）、シンチレーションカウンター（応用光研 SP-10）等の異なるタイプの検出器を併用することで、信頼性を高めた。このうちシンチレーションカウンターは、コリメータによって見込む立体角を制限した上で、 90° (2θ) 方向に空気散乱される X 線を計数している。**Figure 21** に測定されたピーク強度をフォトンエネルギーに対してプロ

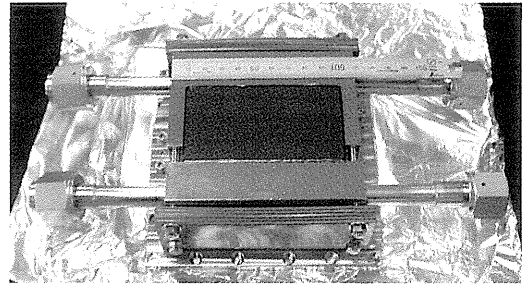


Figure 20. Monochromator Si crystal with a crystal holder.

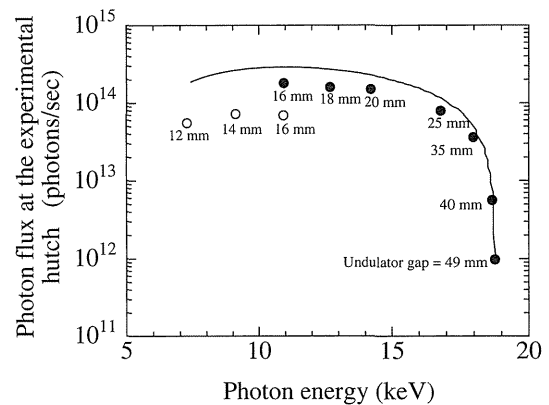


Figure 21. Peak photon flux vs. photon energy, measured at different conditions of undulator gaps. The aperture sizes of a front-end XY-slits were set at $0.7 \times 1.0 \text{ mm}^2$ (closed circles) and $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ (open circles). The solid line represents the calculated result with an aperture of the XY-slit of $0.7 \times 1.0 \text{ mm}^2$.

ットした結果を示す。数字はギャップ値を表す。実線はスリットサイズ $0.7 \times 1.0 \text{ mm}^2$ のときの計算値¹⁵⁾である。測定値は空気や検出器の窓材による吸収等を考慮して、また計算値はビームパス中のグラファイトフィルター及びベリリウム窓による吸収を考慮して、ともに輸送系終端である実験ハッチベリリウム窓直下流のフラックスに換算された。測定値の誤差は、 $\pm 10\%$ 程度と見込まれている。フラックスの最大値は、 1.8×10^{14} photons/sec に達している。また、おしなべて測定値は計算値の6-7割程度である。標準の4.5 m長アンジュレータビームライン29XULにおけるフロントエンドスリットサイズ $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$ の下での同様な測定結果¹²⁾と比較すると、約3倍のフラックスが得られた。フロントエンドスリットの光源からの距離は19LXUの方が1.6倍遠いため、同じスリットサイズでも水平方向のビームのロスは大きくなる。このことを考慮すると、アンジュレータ長にはほぼ比例するフラックスが得られた。また、実験ハッチ 1 におけるビームサイズは、スリットサイズ $0.7 \times 1.0 \text{ mm}^2$ 、 $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ のとき、それぞれ $0.5 \times 1.2 \text{ mm}^2$ 、 $0.5 \times 0.7 \text{ mm}^2$ (半値全幅)であった。

アンジュレータギャップ12 mmにおいて、二結晶分光器（Si111反射）のエネルギーキャンにより、アンジュ

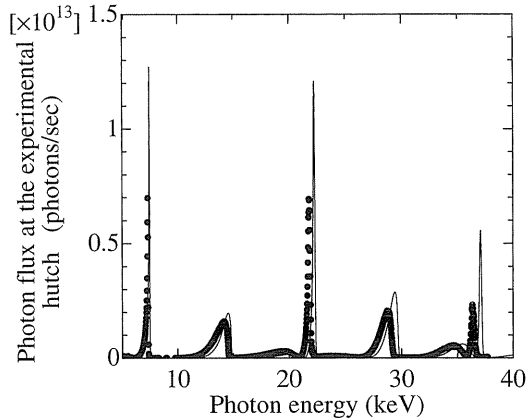


Figure 22. Undulator spectra at a 12 mm undulator gap. The dots represent the measured results and the solid curve is the calculated ones. For the calculation, a coupling constant between a vertical and a horizontal emittances of the orbital electron beam is set at 0.3%.

レータのスペクトルが測定された。この種の測定において、ビームの軸芯、特に垂直方向の位置決めを精度よく行うことが重要である。開口を絞ったフロントエンドスリットを垂直方向にスキャンしながら、3倍高調波のスペクトルが最も高エネルギー側にシフトする位置を求めることで、 $2 \mu\text{rad}$ 以上の精度で軸芯が定められた。スペクトルの測定エネルギー範囲は、5–37.7 keVである。フロントエンドスリットの開口は $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$ に固定された。分光結晶間の平行度は、エネルギーを変えた都度、強度が最大になるように第1結晶の微回転 ($5 \mu\text{rad}/\text{step}$)により調整された。検出には、先の測定と同様、複数の検出器が併用された。Figure 22に測定結果を示す。実線は計算結果¹⁵⁾である。測定値、計算値ともに実験ハッチベリリウム窓直下流のフォトンフラックスに換算されている。5次高調波に至るまでスペクトルの大きな劣化はみられない。ただし、実測は計算より低エネルギー側にピークがシフトしている。また、奇数次高調波のピーク強度の偶数次ピーク強度に対する比は、実測値の方が小さくなっている。標準の4.5 m長アンジュレータビームラインでも同様な傾向がみられ、これらの原因は調査中である。ちなみに、本測定は、アンジュレータの地磁気補正用ロングコイル非励磁時に行われた。励磁時にも同様な測定を行ったが、50 mmギャップのスペクトルと異なり、スペクトルに変化はみられなかった。

4.4 今後の予定

現在、実験ステーション1を主な根城として、試験調整運転が進められている。また、レーザーシステムは、田中義人氏(理研)が中心となって立ち上げが進められている。蓄積リング棟付属施設Wは、2000年10月に完成した。実験ハッチ4及び延伸区間は、2001年3月に建設を

終え、年度明けには光が導かれる予定である。

5. おわりに

本稿では SPring-8 の最初の長直線部アンジュレータビームラインである BL19LXU について、アンジュレータ、フロントエンド、輸送チャンネル、エンドステーションの概略を述べ、初期の運転状況を報告した。実際に使ってみた経験では、輝度としては標準アンジュレータの数倍であるにも拘わらず、光学素子への影響や検出器の使い方など、今後改善を加えるべき多くの点が見いだされた。

現状では、蓄積リングの運転パラメータとの兼ね合いでアンジュレータギャップにある程度の制限をかけるために、特に低エネルギーでの利用に困難があるが、加速器スタディの積み重ねにより解決されるものと考えている。ビームライン側でも熱負荷対策を中心として多くの R & D が残っているが、なるべく早い機会に部分的な供用運転を始めたいと考えている。但し供用の方式としてはビームラインの性格から既存の供用ビームラインと同じであることはあり得ず、本当にこのビームラインを必要とする課題を厳選したうえで実施することになるが、詳細および開始時期に関しては現在のところ検討中である。

最初にも述べたように、本ビームラインの建設にあたっては SPring-8 内外の多くの方々のお協力を頂いた。本稿はコミッシングの直接の担当者と責任者が分担してまとめたものであるが、ここに至る設計、製作、試験等の各段階で、JASRI ビームライン部門の、光源グループ、光学グループ、計画調整グループ、制御グループの殆どすべてのメンバーがなんらかの形で関与している。また、安全にかんする遮蔽計算は日本原子力研究所関西研究所の浅野芳裕氏によって行われた。東京学芸大学の並河先生をはじめとする SPring-8 利用者懇談会サブグループのメンバーにもエンドステーション整備に関して数々の有益な御教唆を頂いたことを感謝する。

参考文献

- 1) T. Ishikawa, K. Tamasaku, M. Yabashi, S. Goto, Y. Tanaka, H. Yamazaki, K. Takeshita, H. Kimura, H. Ohashi, T. Matsushita and T. Ohata: SPIE Proceedings, Vol. 4145A (2000) to be published.
- 2) 大熊春夫:放射光.
- 3) T. Hara, T. Tanaka, T. Tanabe, X. M. Maréchal, H. Kitamura, P. Elleaume, B. Morisson, J. Chavanne, P. Vaerenbergh and D. Schmidt: *J. Synchrotron Rad.* 5 406 (1998).
- 4) T. Tanaka, T. Seike, X. M. Maréchal, T. Bizen, T. Hara and H. Kitamura: *Nucl. Instrum. Methods A (Proceedings for SRI 2000)*, to be published.
- 5) H. Kitamura: *J. Synchrotron Rad.* 7 121 (2000).
- 6) T. Mochizuki, Y. Sakurai, D. Shu, T. M. Kuzay and H. Kitamura: *J. Synchrotron Rad.* 5 1199 (1998).
- 7) S. Takahashi, Y. Sakurai and H. Kitamura: *J. Synchrotron Rad.* 5 581 (1998).
- 8) M. Oura, Y. Sakurai and H. Kitamura: *J. Synchrotron Rad.* 5

- 606 (1998).
- 9) T. Takiya, T. Mochizuki and H. Kitamura: *SPring-8 Annual Report* 164 (1998).
 - 10) M. Yabashi, T. Mochizuki, H. Yamazaki, S. Goto, H. Ohashi, K. Takeshita, T. Ohata, T. Matsushita, K. Tamasaku, Yoshihito Tanaka and T. Ishikawa: *Nucl. Instrum. Methods A (Proceedings for SRI 2000)*, to be published.
 - 11) S. Goto, M. Yabashi, H. Ohashi, H. Kimura, K. Takeshita, T. Uruga, T. Mochizuki, Y. Kohmura, M. Kuroda, M. Yamamoto, Y. Furukawa, N. Kamiya and T. Ishikawa: *J. Synchrotron Rad.* 5 1187 (1998).
 - 12) H. Yamazaki, M. Yabashi, K. Tamasaku, Y. Yoneda, S. Goto, T. Mochizuki and T. Ishikawa: *Nucl. Instrum. Methods A (Proceedings for SRI 2000)*, to be published.
 - 13) T. Mochizuki, Y. Kohmura, A. Awaji, Y. Suzuki, A. Baron, K. Tamasaku, H. Yamazaki and T. Ishikawa: *Nucl. Instrum. Methods A (Proceedings for SRI 2000)*, to be published.
 - 14) K. Tamasaku, Y. Tanaka, M. Yabashi, H. Yamazaki and T. Ishikawa: *Nucl. Instrum. Methods A (Proceedings for SRI 2000)*, to be published.
 - 15) T. Tanaka and H. Kitamura: *SPECTRA Synchrotron Radiation Calculation Program*, Insertion Device Group, SPring-8, Hyogo 679-5148, Japan (2000).