

特集：高輝度 X 線 (I) — SPring-8 —

## SPring-8 の輸送チャンネルと光学系

石川 哲也

原研・理研大型放射光施設計画推進共同チーム\*

## Transport Channels and Optics of SPring-8

Tetsuya ISHIKAWA

JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team

Brief account is given for the design principle of the SPring-8 standard x-ray transport channels for both undulator and bending-magnet beamlines. Rotated-inclined diffraction geometry coupled with pin-post water-cooling for undulator beamlines as one of the solutions for the high-heat-load problem and adjustable-inclined diffraction geometry for bending-magnet beamlines for realizing wide tunable energy range are reviewed for the understanding of somewhat complicated mechanism of the SPring-8 standard double-crystal monochromator, which is designed on the basis of the module-concept.

## 1. はじめに

SPring-8 では平成9年秋に予定されている供用開始時に、10本の共用ビームラインに加えて、各々若干本の原研・理研ビームラインおよび外部機関による専用施設ビームラインが利用可能であり、さらに複数本のビームラインの建設が進行している。従って、運転開始当初から全設置可能ビームライン数61本の1/4以上が利用可能であるという、類似施設に例を見ない計画が進行している。ビームラインの実験ホール部分である輸送チャンネル・光学系の建設担当グループでは、このような同時多数ビームライン建設に対応するために、個々のビームライン建設提案を総合的に検討・解析した。その結果、X線領域での輸送チャンネル・光学系では標準化が可能であるとの結論

に達した。さらに検討を進め、汎用ビームライン構成としての標準アンジュレータ X 線輸送チャンネル、標準偏向電磁石 X 線輸送チャンネルを定め、個々の輸送チャンネル設計は可能なかぎりこれらからのマイナーチェンジで対応することとし、共同チーム主導での建設体制をとることとした。一方で、特殊輸送チャンネルである2本の軟 X 線ビームラインおよび硬 X 線ウィグラービームラインについては、個別に対応することとし、建設提案サブグループと共同チームの密接な連携のもとで建設を進めていくこととした。標準輸送チャンネルの詳細設計を進めるにあたって共同チームでは共通的に使用される輸送チャンネルコンポーネントの抽出作業を行い、最終仕様の確定を行った。これらは、高輝度光科学研究センタ

\* 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 07915-8-1849 FAX 07915-8-0830

一の報告書<sup>1)</sup>に纏められている。本報告書が、共同チームでかねてからお約束していた「ビームラインコンポーネントカタログ」のパイロット版であるとお考えいただきたい。

一方で光学系機器に関しては、以前から様々な検討が進められていたが、平成6年度に標準分光器試作機の最終仕様確定・発注作業が行われ、本年(平成8年)5月に納入された。現在各動作軸の駆動試験、精度試験が進められており、並行して制御ソフトウェア開発が行われている。全反射ミラー調整機構に関しても、様々なビームラインで異なる用途に用いられるミラー調整機構を可能な限り共通要素の組み合わせで構成する設計がなされ、平成7年度に発注作業が行われた。ミラー調整機構は、当初は後年度に設置する方向で検討し、またそのようにお伝えしてきたが、平成7年度補正予算によって第I期共同利用ビームライン機器の契約作業を平成7年度内に完了する必要が生じたため、最初からミラー調整機構を含むビームライン構成とした。

光学素子開発での中心課題は、初段光学素子への高熱負荷対策であり、(i)ピンポスト水冷Si単結晶と回転傾斜配置の組み合わせ、(ii)大型良質ダイヤモンド単結晶の合成、(iii)液体窒素冷却の検討、などが進められている。また、高エネルギー高輝度光源の特徴を活かすための、硬X線領域でのマイクロビーム作成素子としてのブラッグ・フレネルゾーンプレート、曲面スーパーミラー等の開発も進められている。

ここでは、紙数の制限から現在建設が進んでいる全ての輸送チャンネル・光学系について詳述することは避けざるを得ないが、共通要素としての標準輸送チャンネル、標準分光器についての概要と現状を報告したい。これからビームが出るまでの間に、進捗状況等を高輝度光科学研究センターから出版されている「SPring-8 利用者情報」に何度か報告する予定であるので、興味のある読者はそちらも参照されたい。

## 2. 標準輸送チャンネル

標準輸送チャンネル構成は、アンジュレータを光源とするか偏向電磁石を光源とするかで変わってくるが、いずれについても最初にミラー調整機構や分光器等の主要光学機器の位置を確定することから始めた。アンジュレータビームラインでは、ミラーを第一光学素子とした場合の耐熱性、安定性に対する対処方法の不安のため、結晶分光器を第一光学素子とすることとした。このことにより、フロントエンド部と分光器の間隔が短くなり、フロントエンド部に設置される耐熱スリットを分光器前置スリットと兼用できるので、フロントエンド終端のベリリウム窓と分光器の間にはスリットは設置しないこととした。試料位置での集光を必要とするビームラインでは、分光器の下流側に集光ミラーを設置することによりミラーに対する熱負荷の影響を避けた。集光等の目的のためにミラーを使用する場合には、分光器下流の単色ビームに対処することとした。一方で、偏向電磁石光源では、熱負荷が少ないため初段光学素子としての全反射ミラーの利用が可能であり、コリメーションミラー、サジタル集光二結晶分光器、リフォーカシングミラーの組み合わせで標準輸送チャンネルを構成することとした。分光器直後にガスブレイムスによるガンマ線を止めるための遮蔽体を配置し、その後ろに単色X線用下流シャッターとビーム整形用4象限スリットをこの順序で配置した。標準偏向電磁石輸送チャンネルでは、この後ろにリフォーカシングミラー、ミラー出射4象限スリットを配置した。ビームライン終端部は、ベリリウム窓で真空を仕切り、白色光が大気中に出る場合にはヘリウムチェンバーによりベリリウム窓を保護することとした。

輸送チャンネルを真空系としてみると、ゲートバルブによって仕切られた3~6ユニットから構成され、各ユニット毎に排気ポートとゲージポートが設置されている。主排気ポンプは磁気浮上型ターボ分子ポンプであり、その前段をオイルフリ

ースクロールポンプとすることでビームダクト内外のオイルフリー環境を保持している。

個々の輸送チャンネルの詳しい構成は、本誌の各ビームライン建設グループからの報告や、SPring-8 アニュアルレポート<sup>2)</sup>を参照されたい。

### 3. 標準結晶分光器

#### 3.1 設計指針

標準 X 線分光器の設定に当たっては(a)可能な限り少数の駆動軸制御による定位置出射型の二結晶分光器であること、(b) Si 111反射を用いて40 keV 程度の高エネルギーまで走査可能であること、(c)アンジュレータ用分光器では、高パワー密度に対応できること、(d)偏向電磁石用分光器では、真空を破らずに結晶あるいは使用反射面を交換して100 keV 程度まで連続的に走査でき、しかもサジタルフォーカス機構を持つこと、を当面の目標とした概念設計作業が平成5年度に開始された。

まず、フォトン・ファクトリィの実質的な標準 X 線分光器であるメカニカルカムによる結晶位置制御によって一軸制御のみで定位置出射エネルギー走査を行う、いわゆる松下分光器<sup>3)</sup>を検討したが、高エネルギー側のブラッグ角の小さい箇所での問題があった。これを解消するために、反射面法線方向の位置制御をメカニカルカム方式とし、面内方向の位置制御を平行移動ステージによることで、低ブラッグ角でより安定な動作を目指した。この結果、ブラッグ角 $3^\circ$ での利用が可能となり、Si 111反射で高エネルギー側は40 keV まで取り出し得る。定位置出射型の二結晶分光器は、ビームオフセット(入射ビームと出射ビームの高さの差)にほぼ比例してサイズが大きくなるが、ガスプレートス・ガンマ線の広がりを検討してオフセットを30 mm とした。低ブラッグ角までの使用を可能としたこととオフセットを大きくしたことにより、フォトン・ファクトリィの二結晶分光器よりかなり大型のものとなった。

概念設計の過程で、アンジュレータ用と偏向電磁石用の二結晶分光器が結晶マウント部分の交換と、入射・出射フランジの変換によって容易に入れ替わるモジュラー分光器の概念が考案され、多数の分光器の共通化が非常に容易になった。その結果第 I 期に建設される全ての共同利用 X 線アンジュレータビームライン(4本)と単色 X 線偏向電磁石ビームライン(2本)に、この分光器を設置することになった。また、イメージング R & D 用ビームライン、原研偏向電磁石 X 線ビームラインにも設置され、さらにいくつかの専用施設ビームラインでの設置が検討されている。

高熱負荷に対しては、取り扱いの楽な水冷によって、SPring-8 標準真空封止型アンジュレータのパワー密度に耐え得る冷却方法の検討を行い、後述する回転傾斜型二結晶配置とピンポスト構造による冷却を組み合わせることによって原理的には可能であるとの結論を得た。しかしながら、将来の光源増強に対処するため液体窒素冷却シリコン単結晶および間接水冷ダイヤモンド結晶にも対応可能な構造とすることとした。

#### 3.2 アンジュレータ光源での高パワー密度への対応

SPring-8 での標準的 X 線アンジュレータは、フロントエンドマスク、ベリリウム窓を透過した後で第一光学素子に到達する光のパワー密度(数百 W/mm<sup>2</sup>)を生ずる。第一光学素子では、光学的性能を劣化させずにこの高熱負荷を処理しなければならない。このような高熱負荷への対処に SPring-8 共同チームが真剣に取り組み始めた平成4年当時、先行する ESRF, APS では、(i)冷却方式の改良、(ii)光学素子材料の選択、(iii)回折幾何学の3方向からの研究が進んでいた<sup>4)</sup>。

冷却方式の高効率化は、冷媒と冷却流路の両面からの開発が行われ、冷媒としては水、液体金属、液体窒素などが検討されていた。また、冷却流路は結晶内に作り込まれた直接冷却が必須であ

ることは明白であったが、普通のスロット、ホール等の他により熱伝達係数の高いマイクロチャンネルやピンポスト冷却が試作されていた。一方で、放射光の結晶分光器光学素子にはいままでも殆どの場合完全性の高いシリコン単結晶が用いられてきたが、より高い熱伝達率を持ち、低い熱膨張率を持つ素材としてダイヤモンド単結晶が注目されていたが、シリコンと比較して完全性が格段に悪く、また十分なサイズのもので得られないという欠点があった。回折幾何的に結晶表面上での照射面積を広げてパワー密度を落とす方式としてAPSで傾斜配置(図1)が検討されていた。これは、ビームが照射する結晶表面を回折格子面と傾けた配置での回折を利用するものであり、結晶表面の法線と入射ビーム・回折ビームの各々とのなす角度が等しいために動力的回折理論上は対称反射と同様な取り扱いができるものである。同様に幾何学的にパワー密度を減らす方法として非対称反射(図2)の利用がある。これは、入射ビームと回折ビームが形成する散乱面内で結晶表面法線ベクトルを非対称的に傾けることに相当している。この場合には傾きの角度に対応したエネルギー

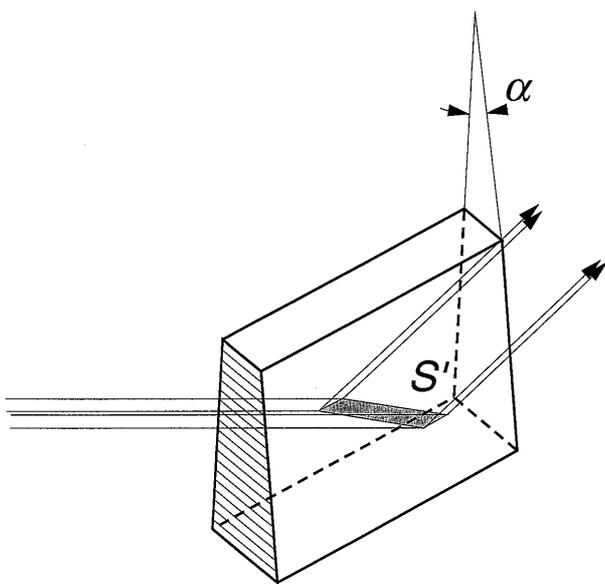


Figure 1. Enlargement of irradiated area on the crystal surface by inclined diffraction geometry.

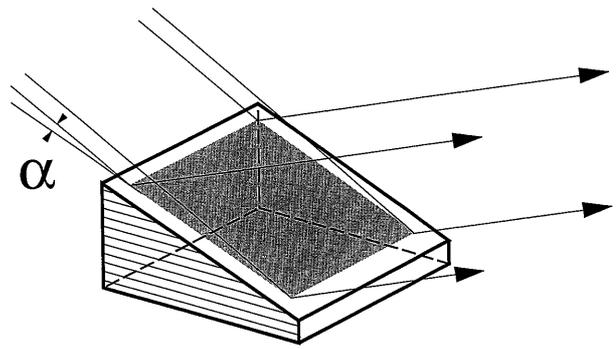


Figure 2. Enlargement of irradiated area on the crystal surface by asymmetric diffraction geometry.

ギー(波長)のカットオフが存在し、一般的な分光器には使いにくい。図1に示される傾きの角度を $\alpha$ とすると、同一入射ビームサイズ、同一ブラッグ角の場合で傾斜配置と普通の対称反射を比較すると、結晶表面上での照射面積は $1/\sin \alpha$ 倍となり、 $\alpha$ が小さい程パワー密度は低下することになる。この方式ではエネルギーを変化させると(ブラッグ角を変えると)照射面積は変化する。すなわち、ブラッグ角の大きい低エネルギー側では、結晶表面上での照射面積が小さくなり、高エネルギー側で照射面積が大きくなる。照射パワーはアンジュレータのギャップによって変化するので一概にはいえないが、低エネルギー側でより高いパワー密度を処理することとなる。これは数十 $\text{W}/\text{mm}^2$ となり、水冷での冷却限界を越えているため、APSでは液体Ga冷却との組み合わせでの試作が行われた。

SPring-8では、水を冷媒とした時にSPring-8アンジュレータの熱負荷にどこまで対処可能かの検討が行われた。これは、水が液体金属や液体窒素に較べてはるかに扱いが簡単で、しかもランニングコストが低いためである。また一方で、液体窒素冷却の開発がESRF, APSで進展して、新しい開発要素が少なくなりむしろコストの問題になっているとの認識もあった。まず、回折幾何学的に結晶表面上での照射パワー密度を水冷で対処可能な数 $\text{W}/\text{mm}^2$ に抑える方式の検討を行い、そ

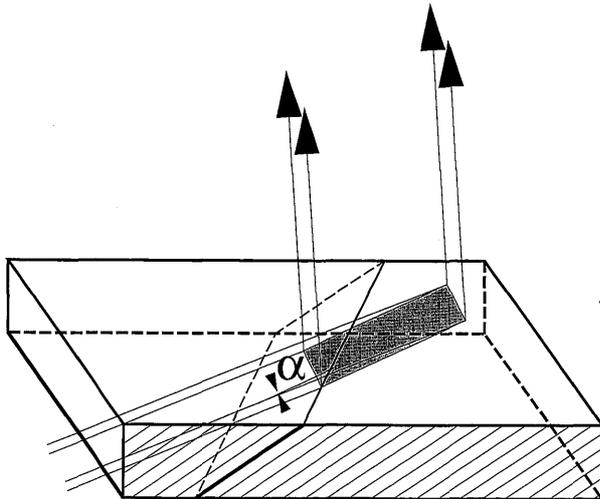


Figure 3. Monochromator crystal using skew and grazing incidence diffraction.

の上で冷却効率の高い流路設計と組み合わせることを考えた。

図3に示されるような、結晶表面に対して斜めに入った回折格子面を使い、照射角を非常に浅い角度に固定して表面法線ベクトル,  $n$ , を軸として結晶を回転すると回折ビームのエネルギーを変えることができる。結晶表面上の照射面積は照射角が一定であれば不変であり、カットオフエネルギーも存在しないので、傾斜配置, 非対称反射での問題点を解消している。問題は, このままだと入射ビームと出射ビームをエネルギーに依らずに同一平面上に乗せることが出来ず, このような回折配置を用いて如何に定位置出射の結晶分光器を実現するかにあった。これには, 図4に示すように, 入射ビームの波数ベクトル,  $k_o$ , を軸とする新たな回転によって出射ビームの波数ベクトルをエネルギーに依らずに同一平面上に乗せる方法と,  $k_o$  と逆格子ベクトル,  $G$ , に直交する新たな回転軸,  $g$ , を導入し,  $G$  と  $g$  の周りの回転による方法とがある。後者は, 前述の傾斜配置に逆格子ベクトルの周りの回転を組み合わせたものであり,  $g$  の周りの回転が直接ブラッグ角の変化に対応するため, 従来の分光器と同じ考え方で動作が可能になる。このため, SPring-8 ではこの方

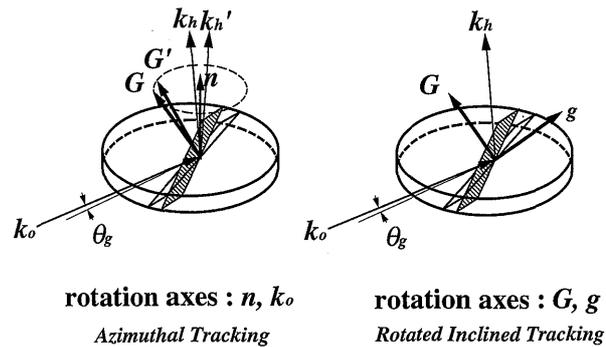


Figure 4. Beam tracking of grazing incidence monochromator crystal.

式を採用し, 回転傾斜配置 (Rotated Inclined Geometry) と呼んでいる。回転傾斜配置で照射角を  $1^\circ$  に保ってエネルギー走査する場合, パワー密度は直入射の場合の約  $1/60$  となり, SPring-8 の標準アンジュレータビームの場合結晶表面上でのパワー密度は約  $4 \text{ W/mm}^2$  となる。これは水冷によって対処可能な範囲に入っていると考えられる。

流路構造としては, 熱伝達係数の大きい冷却水路の一つに, ピンポスト構造を採用した。これは図5のように, 流路中に円柱の配列を設けて水の流れを乱すことにより, 従来の冷却構造より熱伝達係数を大きくするものである。冷却部分を数個のセルに分割すると, 圧力損失を小さく保ったまま広い領域を均等に冷却できる。まずピンポスト冷却の性能 (圧力損失, 熱伝達係数) について, 管群モデル<sup>4)</sup>を用いて検討を行い, 従来よく使われているスロット状の冷却水路を持つタイプ (図6) と冷却性能を比較した。結果は図7示すように, 同じ流速に対してピンポストモデルがスロットモデルの2~4倍の熱伝達係数となった。次にSPring-8 アンジュレータビームライン用ピンポスト結晶について検討を行った。回転傾斜配置で, 結晶の傾き,  $\alpha$ , を  $80^\circ$ , 照射角を  $1^\circ$  とすると, 矩形スリット (水平方向  $2 \text{ mm}$ , 垂直方向  $1 \text{ mm}$ ) を通過した光をすべて受けるのに必要な結晶サイズは, 約  $140 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$  になる。この領

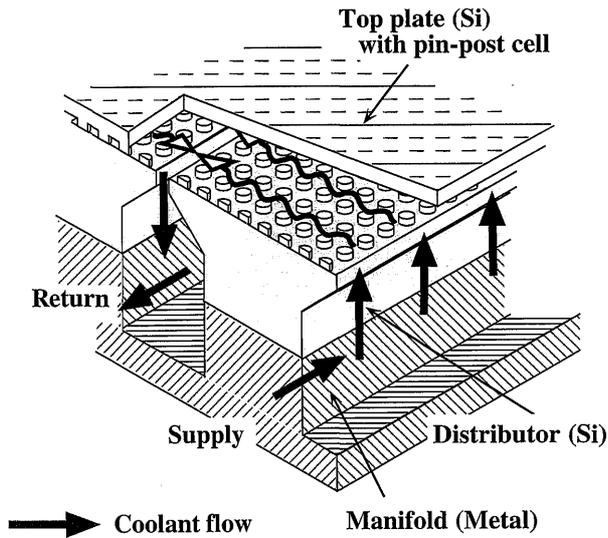


Figure 5. Direct water-cooling of the monochromator crystal with pin-post structure.

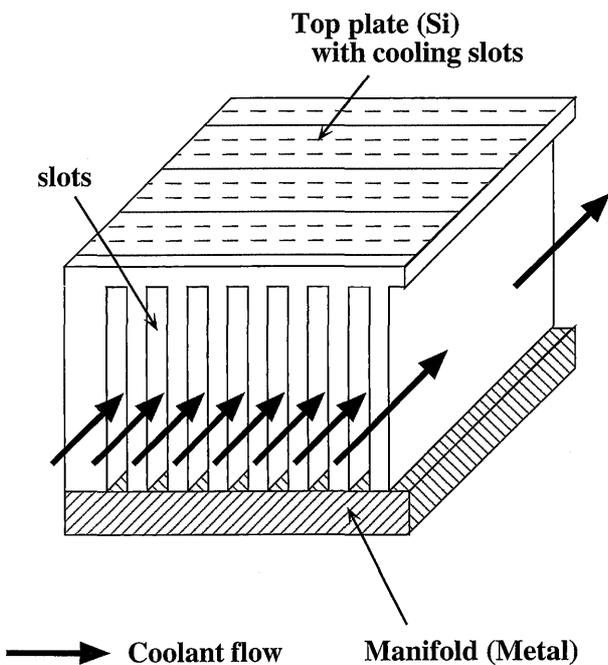


Figure 6. Direct water-cooling of the monochromator crystal with multi-slot structure.

域を同じサイズのセルに分割し、結晶全体に供給される冷却水の流量が20 l/min となるときに、ピンポスト構造1セルあたりの圧力損失が約1 kgf/cm<sup>2</sup> となるように、セルのサイズ、ピンの配置等について最適化を行った。ピンポスト結晶の製作方法についても検討が行われ、図8に示す工

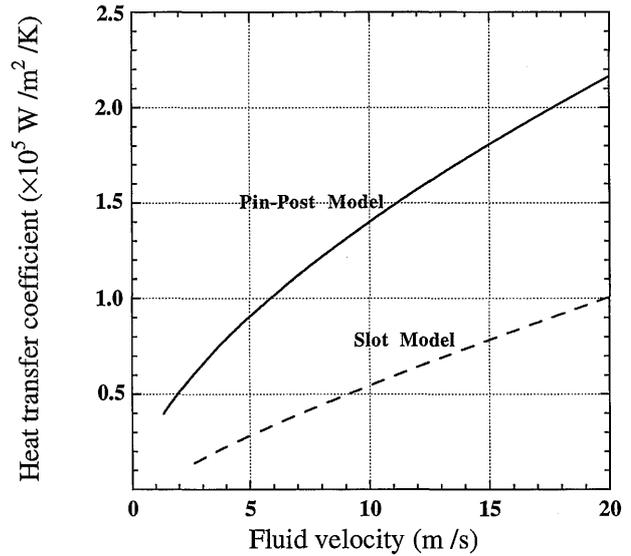


Figure 7. Calculated heat transfer coefficients for pin-post and multi-slot water-cooling of silicon crystal.

程で製作することとした。ピンポスト結晶の製作上特に問題となるのは、(a)シリコンへのピンポスト構造の加工、(b)シリコンとシリコンの接合、であり、(a)についてはサンドブラスト法を、(b)については金拡散接合法を用いる。これらの検討に基づいて試作を行い、二結晶ロッキングカーブ測定、二結晶平行配置トポグラフィによって接合歪みの評価を行った<sup>5)</sup>。接合歪みによるロッキングカーブの広がり、1秒程度であり、これをさらに減少させる接合方法の開発が現在の課題である。トポグラフィはビーム形状内で一様なコントラストが得られるようになっている。一方で、標準アンジュレータからの放射パワーと冷却水圧力を考慮した ANSYS による熱歪み解析が行われ、この歪みを考慮した高木-Taupin 方程式の数値積分によるロッキングカーブの計算が行われた<sup>6)</sup>。この結果、接合歪みが無ければ完全結晶でのロッキングカーブと殆ど変わらないことが判り、熱的には SPring-8 アンジュレータに十分対処できるとの結論を得た。現在、水路設計も終了し実機の製作に取りかかっている。

Si 111反射を用いた回転傾斜配置に用いる結晶は、方位の関係から非常に一般的な<111>あるい

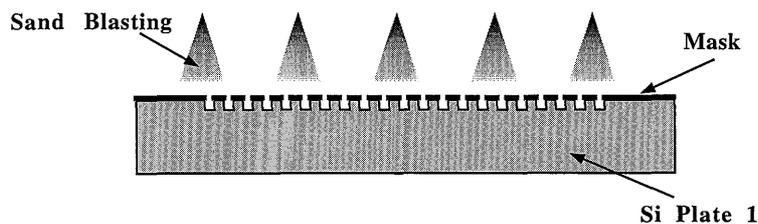
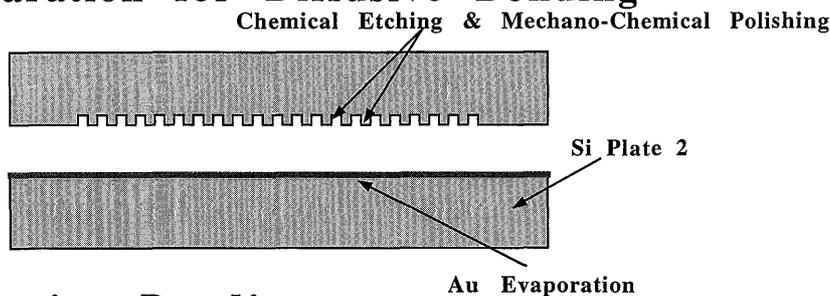
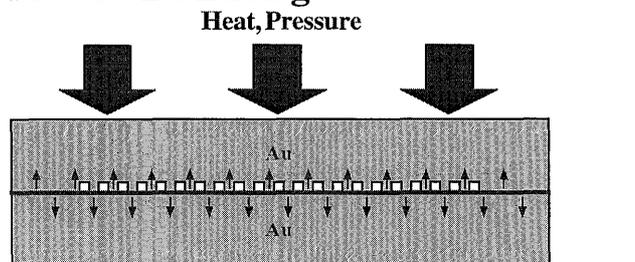
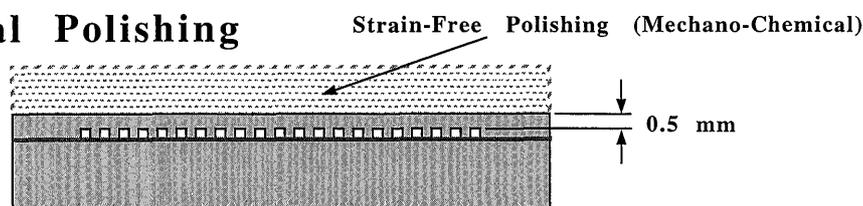
**(1) Pin Fabrication****(2) Preparation for Diffusive Bonding****(3) Diffusive Bonding****(4) Final Polishing**

Figure 8. Fabrication process of monochromator crystals with pin-post cooling structure.

は $\langle 100 \rangle$ 引き上げの結晶からの切りだしが困難である。このため、 $\langle 110 \rangle$ 引き上げのFZ-Si単結晶を特注し、これから切り出している。現在入手可能なサイズは3インチ径であるが、4インチ径での引き上げの可能性をメーカーと交渉している。

### 3.3 偏向電磁石光源での広エネルギー走査範囲への対応

SPring-8の偏向電磁石光源では、電子ビームの周回エネルギーが高いことにより100 keV以上のX線も十分に利用できる。広いエネルギー範

囲を単一の分光結晶で走査することは困難であり、また真空を破らずに結晶交換を行いたいという要求から、幾つかの偏向電磁石ビームラインにおいて二結晶分光器をタンデムに3台程度並べ、各々で異なる反射面を用いる方式が検討されていた。しかしながら、図9に示されるように、二結晶分光器の二つの結晶を幾つかの異なる反射面を使用する傾斜配置で用いることによって、一組の結晶対で広いエネルギー範囲をカバーすることが出来る<sup>7)</sup>。この方式は、可変傾斜配置 (Adjustable Inclined Geometry) と呼ばれている。

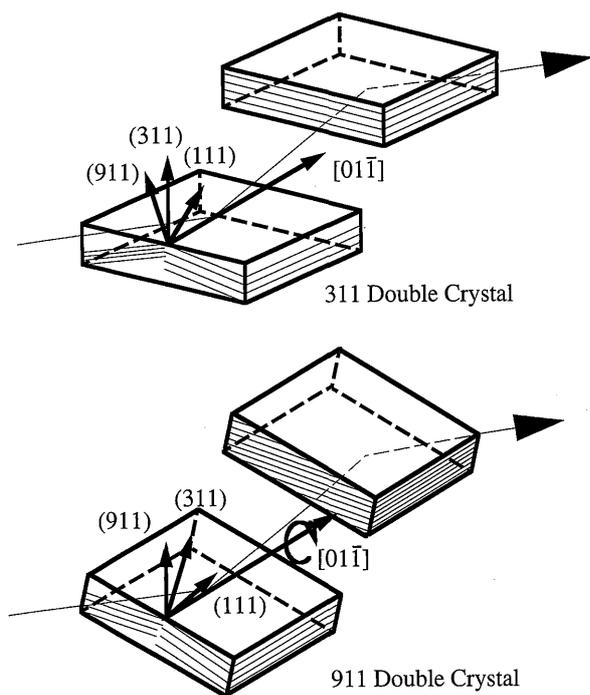


Figure 9. Adjustable inclined diffraction geometry.

### 3.4 機構仕様

ビームラインコンポーネントの規格化・標準化を進めるために、上述のアンジュレータ光源用の回転傾斜配置と、偏向電磁石用の可変傾斜配置を行う二結晶分光器をできるだけ標準化された機構部品の組み合わせによって構成することが検討された。二つの結晶のブラッグ角を変えるための軸 ( $\omega$  軸)、定位置出射を実現するためのメカニカル・カム付き並進機構、二結晶配置の微調整のための角度微調整機構 ( $\Delta\omega$  軸)、結晶表面とビームの相対位置を調整するための並進機構 ( $z$  軸) は、共通に必要な軸である。

回転傾斜配置では、結晶表面上のビームの照射位置が照射角を制御する回転軸 ( $\phi$  軸) 上になければならない。また、上下方向の結晶中心にビームが照射することが必要となるが、これは前述の  $z$  軸で調整する。このために、結晶の方位調整機構 (ゴニオメータ・ヘッドに相当する) 部分は、 $z$  軸に載っている必要がある。 $\phi$  軸をビーム上に載せるためには、 $\phi$  軸回転機構の下に並進機構 ( $X1$  軸) を要する。また、 $\phi$  軸上で軸上に結晶中

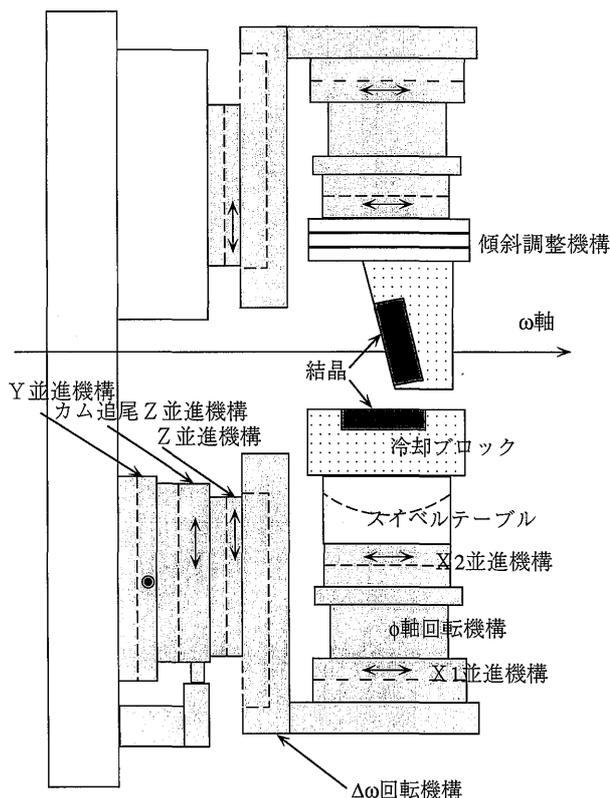


Figure 10. Schematics of crystal aligning mechanism for the SPring-8 standard double-crystal monochromator.

心を合わせるために、同じ方向の並進機構 ( $X2$  軸) を要する。この上に、結晶の逆格子ベクトルを  $\phi$  軸に合せ込むための二方向の傾斜調整機構を付けた。冷却ブロックに取りつけられた結晶は、この傾斜調整機構上にマウントされる。

可変傾斜配置では、回折格子面の切替のためにスイベルテーブルを用いた。スイベルテーブルの回転中心軸と結晶表面・結晶方位を合わせるのは、オフラインで行う。このスイベルテーブルは、回転傾斜配置での傾斜調整機構が取り付けられる並進機構 ( $X2$  軸) 上に載る。 $X2$  軸は、スイベル中心軸と  $\phi$  軸とを交差させるために用いられ、 $\phi$  軸は幾つかの傾斜配置の晶帯軸を散乱面内に載せるために用いられる。 $X1$  軸は、スイベル中心軸とビームセンターを一致させるための並進機構となり、これによって回折格子面を切り替えた時のビーム高さが変わらないことが保証され

る。

このように、回転傾斜配置と可変傾斜配置での結晶方位調整機構は傾斜調整機構とスイベルテーブルを交換すると入れ替わる。図10は分光器結晶調整部分の概念図であり、下側の第一結晶では可変傾斜配置の場合を、また上側の第二結晶では回転傾斜配置の場合を示す。

#### 4. おわりに

平成8年9月現在、輸送チャンネルの建設はほぼ順調に進行しており、幾つかの放射線シールドハッチの建設が始まっている。SPring-8 共同チームでは、来年2月の蓄積リング運転開始時までに、6本の共用ビームラインと1本の理研ビームラインを完成させるべく努力している。本稿では、SPring-8 標準 X 輸送チャンネルと標準二結晶分光器の概要について記したが、読者あるいは利用者にとって十分な情報を記述できたとは思えない。共用開始以前のなるべく早い機会に何らかの形でより完全な情報を公開したいと考えてい

る。

#### 謝辞

本稿の内容の殆ど全ては SPring-8 共同チーム・ビームライン建設グループの共同作業の結果であり、著者はそれらを取り纏めたにすぎない。その際の、後藤俊治、望月哲郎、木村洋昭、山本雅貴の各氏の御助力に感謝する。

#### 参考文献

- 1) 「ビームラインの規格化・標準化に関する調査報告書」高輝度光科学研究センター、播磨、1996.
- 2) T. Ishikawa: SPring-8 Annual Report 1995, pp. 38-44 (1996).
- 3) T. Matsushita, T. Ishikawa and H. Oyanagi: Nucl. Instr. Meth. **A246**, 377 (1986).
- 4) Proc. Workshop on the Thermal Management of X-ray Optical Components for Synchrotron Radiation, Argonne National Laboratory, Argonne 1994.
- 5) 奥井一規：東京大学大学院工学系研究科修士論文、1996.
- 6) K. Ohtomo and T. Ishikawa: SPring-8 Annual Report 1995, pp. 198-199 (1996).