

## BL19LXUの技術情報

財団法人高輝度光科学研究センター  
矢橋 牧名  
高橋 直

理化学研究所 播磨研究所  
玉作 賢治、田中 義人、原 徹  
田中 良和、勝又 紘一  
北村 英男、石川 哲也

## Abstract

Present status of BL19LXU is introduced. Basic properties of monochromatic beam are summarized. Status of experimental stations is described.

## 1. はじめに

光源の良し悪しを評価するために、輝度というもののさしがよく用いられる。高い輝度は、高分解能の測定を精度よく行うために重要であり、さらに多光子過程を取り扱う際にも必須である。今日、もっとも輝度の高いX線光源が、SPRING-8の27 mアンジュレータ（周期長32 mm、周期数781）であり、この超高輝度X線を利用するためにつくられたビームラインが、これから紹介するBL19LXU（理化学研究所物理科学ビームライン2）である。研究の対象は、当然この高い輝度を生かしたものが中心となる。例えば、極短パルスレーザと同期させたX線非線形光学及び格子ダイナミクスの研究、X線強度干渉法を含む多様なX線干渉法・干渉計の開発、極限的な高分解能の光学系の開発、次世代放射光用光学素子の評価等が行われている。また、15T超伝導マグネットを利用した磁性の研究も進められている。

2002年5月現在、ファーストビームから約1年半が

経過した。ビームラインのデザイン及びコミッショニングの結果は、文献<sup>[1, 2]</sup>（和文）及び文献<sup>[3-5]</sup>（英文）に詳しく述べられており、幾つかのサイエントフィックな成果も論文の形で既に報告されている<sup>[6-9]</sup>。ここでは、もう少し現場に密着した視点から、コミッショニング後のビームラインのあゆみ、光学系の現状、そして各実験ステーションの近況を紹介しよう。

## 2. History

1998年から2000年にかけて、光学ハッチ及び上流側の実験ハッチ1～3の建設が行われ、2000年10月末にファーストビームを通した。引き続きコミッショニングが行われたが、この裏で、ビームラインの下流側に出島のような建物（蓄積リング附属施設W、WestのW）が建設され、4番目の実験ハッチが設置された（Fig.1）。このハッチには2001年9月にX線が導入された。

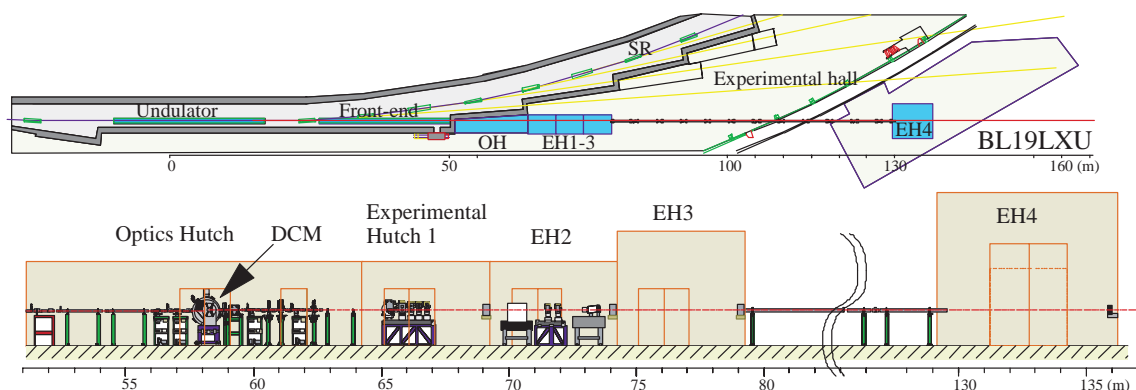


Fig. 1 Beamline layout.

(アンジュレータ)ファーストビームの直後は、アンジュレータのギャップを12 mmまで閉めると、蓄積電流のライフタイムが減少した。このため、当初はユーザー運転中は最小ギャップ値を18 mmに制限していた。しかし、2002年の夏に再測定したところ、蓄積リングの真空度が上がったこともあってライフタイムの顕著な減少はみられなかった。現在は、本来の12 mmギャップを最小値としている。また、コミッション以来、アンジュレータのギャップ駆動が途中で止まるというトラブルが頻発していたが、ステップモータの加減速レートを調整することで、問題は解消された (IDグループの原、清家氏のスタディによる)。また、アンジュレータの長さが増したことにより、地磁気が軌道に与える影響が無視できなくなったが、これは、ロングコイルを励磁することで補正されることがわかった<sup>[2, 9]</sup>。この補正は、ギャップを49 mm以下に閉めたときに入り、入射時 (ギャップ50 mm) には切られる。(ビームライン) 2001年3月、振動及びドリフト対策のため分光器内のステージが改良された。2002年1月、分光器の液体窒素冷却用のヘリウム冷凍機が2機から3機に増設された。同時に、実験ホール内の冷却水が慢性的に不足しているため、W棟外に置かれたチラーからの配管を上流側の実験ハッチまで延長した。2月、振動とノイズを減少させるため、ハッチの電気錠をACソレノイドからDCソレノイドに交換した。

### 3. ビームライン光学系

このビームラインでは、二結晶分光器の冷却に、BL29XU等と同様な液体窒素冷却システムが用いられている (詳細は文献<sup>[10, 11]</sup>を参照)。2で述べたよ

うに、2002年の1月、冷却能力を向上させるために循環窒素を冷却するためのヘリウム冷凍機を増設した。この結果、特に低エネルギー側でFEスリットの開口を広げることができ、X線の強度が増した。Fig.2に、各アンジュレータギャップに対して、分光器のエネルギーをアンジュレータ1次光のピークに合わせて測定した結果を示す。増設前は、ギャップを18 mm未満でフロントエンド (FE) スリットを0.5×0.5 mm<sup>2</sup> (垂直×水平) 程度に絞る必要があった (最大熱負荷280 W) が、増設後は12 mmギャップにおいても0.7×1.0 mm<sup>2</sup>のサイズが短時間ならば可能になった (熱負荷540 W)。ただし循環窒素の温度上昇により、1時間以上の連続運転は難しい。連続運転が可能なのは、0.5×1.0 mm<sup>2</sup> (400 W) 未満の場合である。

強調したいのは、このような非常に大きい熱負荷をかけた場合にも、第一結晶の顕著な熱歪みは観測されていない、ということだ。Fig.3にギャップ12 mm、

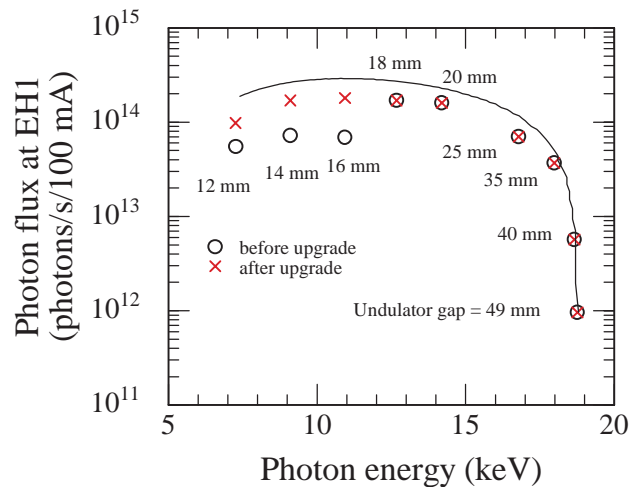


Fig. 2 Photon fluxes of the Si 111 monochromatic beam at the experimental hutch 1 (EH 1).

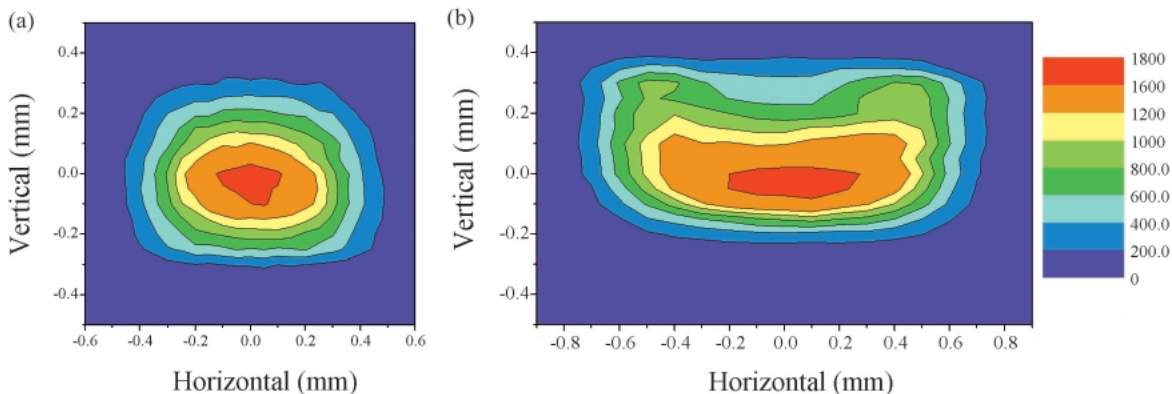


Fig. 3 Spatial profiles of Si 333 diffracted beams, measured by scanning a slit (50x50 μm<sup>2</sup>) at EH 1. Undulator gap was 12 mm and photon energy was 21.8 keV. Aperture sizes of the front-end slit were 0.5x0.5 mm<sup>2</sup> (a) and 0.5x0.9 mm<sup>2</sup> (b).

ブラッグ角  $15.80^\circ$  で測定された Si 333 単色光 ( $E=21.8$  keV) の空間プロファイルを示す。FEスリット開口は  $0.5 \times 0.5$  mm<sup>2</sup> (a) 及び  $0.5 \times 0.9$  mm<sup>2</sup> (b) である。後者は、冷却系の熱処理能力の限界に近いが、空間分布に大きなみだれはみられない。

しかしながら、実はこれらの開口でも、アンジュレータ放射のおいしい部分を全て取り込んでいるわけではない。特に水平方向の強度のロスは大い。Fig.4に熱負荷が無視できる状態で、垂直、水平方向の開口を変えて単色光の強度を測定した結果を示す。垂直方向では  $0.5$  mm 開口で 87 % 取り込んでいるものの、水平開口は  $1$  mm 開口で約 65 % にとどまっている。欲をいうと、例えば  $0.6 \times 1.5$  mm<sup>2</sup> 開口にすると強度は約 5 割増しになるが、熱負荷は  $700$  W を超えてしまう。このような超高熱負荷で運転するためには、二つのやり方がある。一つは、さらに冷凍機を増設して冷却能力を高める、もう一つは、結晶をシリコンからダイヤモンドに変えることで結晶冷却系で処理すべき熱負荷を低減させる、という方法である。特に、ダイヤモンドは、熱負荷の大きな原因となる高エネルギー成分の吸収が小さく、さらに窒素温度での figure of merit (熱伝導率と熱膨張係数の比) が大きいいため、第4世代光源の分光結晶として期待されている。かねてより、SPRING-8と住友電工の共同開発が行われており、結晶性、サイズともに著しい向上がみられている。近い将来にオンラインでのテストを行いたい。また、裏技(王道?)として、蓄積リングのエミッタンスを小さくすることで、FEスリットのサイズが小さいまま

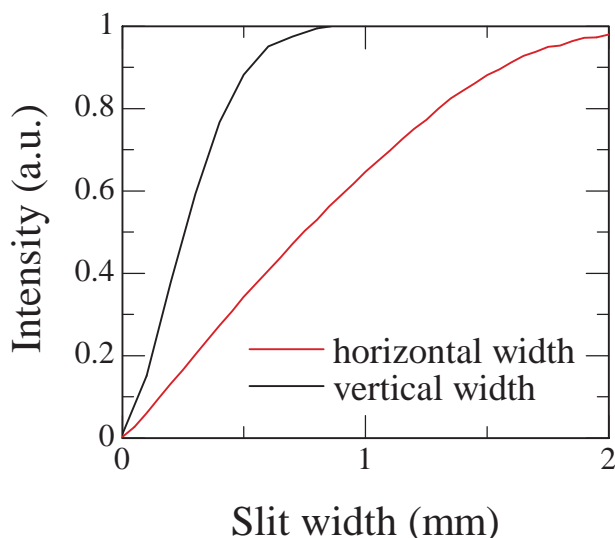


Fig. 4 Intensities of monochromatic x-rays vs. the front-end slit widths, measured at EH 1 with an undulator gap of 49 mm.

(=熱負荷も小さいまま) で取り込むX線を増やすことができる。加速器グループの今後のR&Dに期待したい。

液体窒素冷却の場合、ステージのメカニカルな振動が誘起されやすいが、文献<sup>[11]</sup>に述べられているように、ステージの改良、動作点のR&D等を行った結果、改善がみられた。評価のため、Si 333 (@18.8 keV) 反射で、回折強度がほぼ半値になる位置に固定したときの時間的な強度変動を、オシロスコープで測定した。これとは別に測定したロッキングカーブの形から、強度を二結晶間の角度差に対応づけて度数分布を描いたのが、Fig.5である。これより、角度変動はp-vで  $0.5''$ 、 $\sigma$ で  $0.08''$  に抑えられていることがわかる。また、結晶とステージは熱的に絶縁されているため、ステージの温度変動にともなうドリフトが問題となっていた。これも29XUでのスタディの結果を踏まえて、恒温水の循環する銅ブロックをステージに取り付けることにより、解決された。

このビームラインでは非常に密度の高いX線を取り扱うため、いろいろな問題も起きる。そのひとつが、放射線による損傷である。例えば、輸送部のスクリーンモニタ用の蛍光板は、ものの数分で焼けてしまった。実験ハッチ内の単色光でさえも、数10分でカプトン膜を着色させ、数時間で結晶表面に黒い痕跡を残し、数週間でスリットに堆積物を付着させイオンチェンバーの電極を(ガスフローさせないと)酸化させる。問題は、ビームの垂直方向のコヒーレンスが良いため、光学素子のダメージによって容易

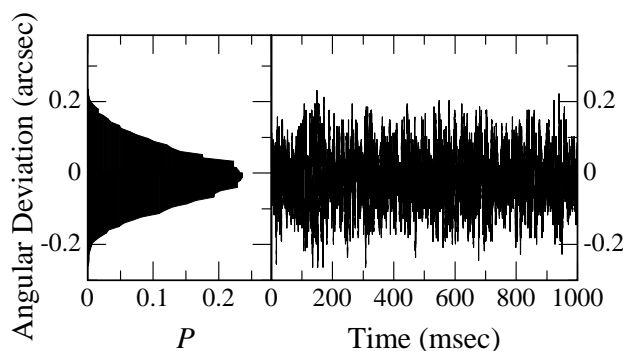


Fig. 5 Distribution of angular fluctuation between two crystals (a), given by measurement of temporal spectrum of Si 333 diffracted beam (energy of 18.8 keV with an undulator gap of 49 mm) (b) with a rocking curve measurement. The mean value of diffracted intensity was ~ 50 % of the peak intensity by detuning the 1st crystal.

にX線の強度分布にむら（いわゆるスペックルパターン）が生じてしまう、ということである。

Fig.6に、実験ハッチに置かれたスリットを垂直方向にスキャンして測定された、Si 111の単色光の強度分布を示す。当初はAのようなきれいなプロファイルがとれていたのだが、約半年後にはBのような強度むらを生じるようになった。この由来を調べたところ、二結晶分光器の第二結晶に原因があり、結晶の位置をずらすことでプロファイルは回復した。第二結晶表面のビームの当たった位置にはカーボンとおぼしき黒い跡がついており、主に表面の堆積物による影響であると考えられる。ただし、両者のロッキングカーブの形に差はみられないため、結晶構造にかかわるような深いダメージではないとみられる。念のために書くと、このビームラインの輸送部の真空度は $10^{-6}$  Paの前半で、うまくすれば $10^{-7}$  Paに入ろうか、というくらいに良い。それにも関わらず、たった半年間の運転でこのようなダメージが生じるということは、将来のXFELのビームラインを設計するときにまじめに考慮する必要があるだろう。ちなみに、第一結晶の位置をずらしても、ほとんど変化はなかった。あまりに強い放射が、堆積を防いでいるとみられる。また、このビームラインでは、フロントエンドのベリリウム窓の熱保護のため、高熱負荷時に挿入できるグラファイトフィルタの厚みが標準の3倍（0.9 mm）となっている。このフィルタもCのようにスペックルパターンを生じさせ、コヒーレンスを低下させることがわかってい

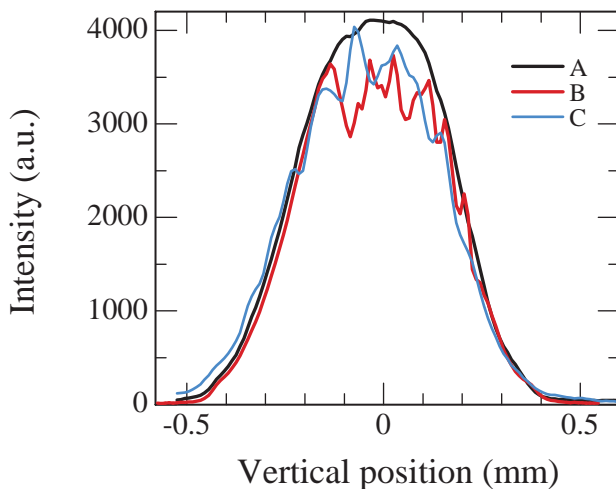


Fig. 6 Vertical profile of Si 111 diffracted beam (energy of 18.83 keV with an undulator gap of 49 mm), measured by a slit scan ( $v10 \times h100 \mu\text{m}^2$ ) at EH1. A : initial condition, B : after irradiation ( $\sim 7$  months), C : with the front-end graphite filter.

る<sup>[6]</sup>。こういったフィルタやベリリウム窓等の透過材のR&Dも今後行っていく必要がある。

#### 4. 実験ステーション

##### 4-1. 実験ハッチ1～3

実験ハッチ1から3のサイズは光軸方向に5 m、光軸直交方向に3.4 m、高さ3.3 m（実験ハッチ1、2）及び4.5 m（実験ハッチ3）である。ハッチ内には、0.1 K制御の精密空調装置が設置されている。実験ハッチ1、2内には、天板のサイズがそれぞれ $2 \times 1 \text{ m}^2$ と $1.2 \times 0.9 \text{ m}^2$ の定盤が設置されている。実験ハッチ2内には、4-2に紹介するレーザーシステムが常設されている。実験ハッチ3内には、常設の装置はなく、大型の装置が持ち込める。ステージ類として、1軸 $\theta$ ・共軸2軸 $\theta$ ・2軸 $\theta$ （通称目玉ゴニオ） $\omega$ -2  $\theta$ - $\chi$ - $\phi$ のゴニオメータ、ゴニオメータ全体の並進及び回転機構、小型回転・並進・スイベルステージ、精密スリット（手動及び電動）等が用意されている。検出器は、イオンチェンバー・PINフォトダイオード・APD・NaIシンチレーションカウンタ・SSD・ビームモニタ等が利用できる。これらを組み合わせた大抵の思いつきに対応できるよう、実験ハッチ1、2、3では24、16、24軸のステッピングモータと10、6、10台の検出器がそれぞれ同時に接続できるように配線されており、これらは1箇所の制御ステーションに集約されている。ここには、各種NIMモジュール、NIM-bin電源、カレントアンプ、オシロスコープ等の計測装置とステッピングモータドライバが用意されている（Fig.7）。これらはVMEを通してLinuxベースのオリジナルソフトウェア上で制御・処理される。また、508.58 MHzのrfタイミング信号が敷設されており、これは次のレーザー同期システムにも利用されている。



Fig. 7 Control racks at the experimental station.

#### 4-2. 放射光同期超短パルスレーザーシステム

実験ハッチ2内には超短パルスレーザーシステムが設置され、高輝度放射光とレーザー光の組み合わせ実験ができるようになっている。レーザーシステムはクラス4のレーザーで構成されているため、安全管理のためのインターロックを整備し、2001年6月21日に検査を完了した。レーザーを用いた実験は実験ハッチ1~3のいずれでも行われることを想定しており、レーザー管理区域を実験場所に伴い、実験ハッチ1、2のみ、または実験ハッチ1~3に切り替えることができる。

超短パルスレーザーシステムは、モードロックチタンサファイアレーザー、再生増幅器、波長変換器で構成されている。モードロックチタンサファイアレーザーは、パルス幅80 fs、繰り返し84.76 MHzで外部トリガー信号に同期できるモデルである。再生増幅器は、モードロックチタンサファイアレーザー光を種光としてパルス増幅するもので、得られる出力は、1.1 mJ/pulse、パルス幅130 fs、繰り返し1 kHzである。波長変換器としては、第二高調波 (SHG) 発生器と、光パラメトリック増幅器 (OPA) が設置されている。前者で波長400 nm、後者で波長可変範囲400 nm~3000 nmのレーザー光が得られる。この二つの波長変換器はフリップ形式のミラーにより、簡単に切り替えることができる。

この超短パルスレーザーシステムには、放射光パルスに高精度で同期照射できるよう、タイミング制御システムが導入されている。実験ハッチ2の横に、タイミング制御回路を整備し、チタンサファイアレーザーがRF基準信号の1/6の繰り返し周波数で発振するようにした。再生増幅器で得られるレーザーパルスは、特定の電子パンチから発生する放射光パルスだけに同期するように分周されている。レーザーパルスと放射光パルスのサンプル上での照射タイミングを制御できるよう、2段階の精度でタイミング掃引できるシステムを構築した。一つはステップ30~40 psで約30 nsの範囲を粗掃引できるパルス遅延回路に基づいたもの、もう一つは精度約1 psで2 nsの範囲を掃引できる回路を使ったものである。これらのタイミング制御回路系により、SPring-8で得られる放射光のパルス幅30~100 ps (FWHM) より十分高い精度で放射光パルス、レーザーパルスの照射時間間隔を制御することができる。

また、実験ハッチ2内のレーザーシステムの隣に精密回折計が設置されており、時間分解X線回折実

験ができるようになっている (Fig.8参照)。今後は精密時間計測用のピコ秒X線ストリークカメラも設置する予定である。

#### 4-3. 実験ハッチ4

このハッチでは、高エネルギー領域における非共鳴X線磁気散乱測定を主な目的としている。蓄積リングからの距離は遠いため、強磁場をかけた場合も、電子軌道に与える漏れ磁場の影響は無視できることが実験的に確認された (JASRIの青柳氏及び大阪大学の田畑氏の協力による)。入射エネルギーは約7.3 keV以上で、高調波を使うことにより100 keV程度までの測定が可能である。回折計の概念図をFig.9に示す。

回折計全体が上下、左右に移動可能であり、試料台の回転及び試料台と検出器を載せた台の回転が可能である。検出器にはアバランシュ・フォトダイオード (APD) を用いている。低温・強磁場中での測定が可能であり、最高磁場は15Tで、温度可変インサートを用いると1.8 Kから室温までの測定が行

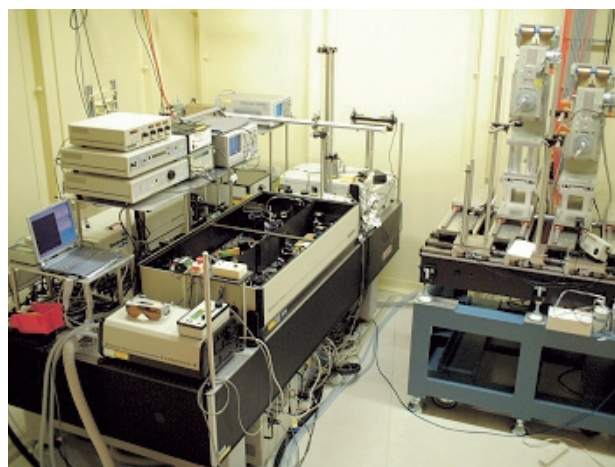


Fig. 8 Laser system and diffractometer at EH 2.

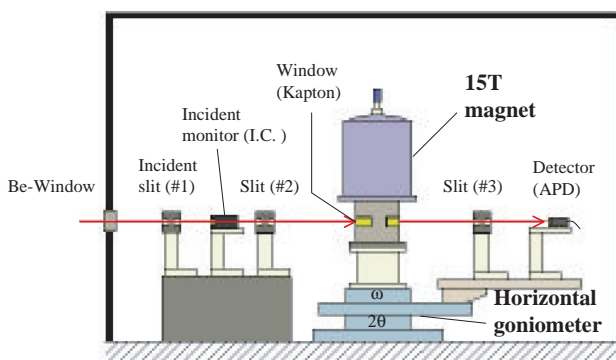


Fig. 9 Schematics view of diffractometer at EH 4.

える。また、到達最低温度40 mKの希釈冷凍機が使用可能である。代表的な反強磁性体MnF<sub>2</sub> (磁気転移温度約67 K) について、入射エネルギー30 keV、温度5 Kで非共鳴磁気散乱測定を行ったところ、毎秒約800万カウントの(3, 0, 0) 磁気ブラッグ散乱を観測した。

## 5. おわりに

近々、ビームタイムの一部が共同利用実験に提供される予定である。斬新で画期的な提案は、国内外を問わず大歓迎である。

ビームラインの建設に当たっては、JASRIビームライン・技術部門の後藤俊治氏、竹下邦和氏、望月哲朗氏、山崎裕史氏、大端 通氏、松下智裕氏らをはじめとするの大勢の方々にご協力いただいた。安全に関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。また、東京学芸大学の並河先生にはエンドステーション整備に関して有益な御教唆を頂いた。ここにあらためて感謝する。

## 参考文献

- [ 1 ] 石川 哲也、他 : SPring-8利用者情報、Vol. 4, No. 6 ( 1999 ) 4.
- [ 2 ] 原 徹、高橋 直、矢橋 牧名、玉作 賢治、北村 英男、石川 哲也: 放射光、**14** ( 2001 ) 12.
- [ 3 ] H. Kitamura et al. : Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **A 467-468** ( 2001 ) 110.
- [ 4 ] S. Takahashi et al. : Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **A 467-468** ( 2001 ) 758.
- [ 5 ] M. Yabashi et al. : Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **A 467-468** ( 2001 ) 678.
- [ 6 ] M. Yabashi, K. Tamasaku, and T. Ishikawa : Phys. Rev. Lett. **87** ( 2001 ) 140801.
- [ 7 ] M. Yabashi, K. Tamasaku, S. Kikuta, and T. Ishikawa : Rev. Sci. Instrum. **72** ( 2001 ) 4080.
- [ 8 ] M. Yabashi, K. Tamasaku, H. Yamazaki, and T. Ishikawa : Proc. SPIE **4500** ( 2001 ) 177.
- [ 9 ] T. Hara et al. : Rev. Sci. Instrum. **72** ( 2002 ) 1125.
- [ 10 ] T. Mochizuki et al. : Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **A 467-468** ( 2001 ) 647-649.
- [ 11 ] 玉作 賢治、矢橋 牧名、望月 哲朗、石川 哲也 : SPring-8利用者情報、Vol. 6, No. 5 ( 2001 ) 390.

### 矢橋 牧名 YABASHI Makina

(財)高輝度光科学研究センター  
〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1  
TEL : 0791-58-0831 FAX : 0791-58-0830  
e-mail : yabashi@sp8sun.spring8.or.jp

### 高橋 直 TAKAHASHI Sunao

(財)高輝度光科学研究センター  
〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1  
TEL : 0791-58-0831 FAX : 0791-58-0830  
e-mail : takahasi@sp8sun.spring8.or.jp

### 玉作 賢治 TAMASAKU Kenji

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 : tamasaku@spring8.or.jp

### 田中 義人 TANAKA Yoshihito

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 : yotanaka@postman.riken.go.jp

### 原 徹 HARA Toru

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 : 0791-58-2809 FAX : 0791-58-2810  
e-mail : toru@spring8.or.jp

### 田中 良和 TANAKA Yoshikazu

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 : 0791-58-2931 FAX : 0791-58-2923  
e-mail : ytanaka@postman.riken.go.jp

### 勝又 紘一 KATSUMATA Koichi

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 : 0791-58-2931 FAX : 0791-58-2923  
e-mail : katumata@postman.riken.go.jp

### 北村 英男 KITAMURA Hideo

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 : 0791-58-2809 FAX : 0791-58-2810  
e-mail : kitamura@spring8.or.jp

### 石川 哲也 ISHIKAWA Tetsuya

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