

高エネルギー非弾性散乱ビームライン(BL08W)の立ち上げの現状(II)

100 ~ 150 keVの光の取り出し

理化学研究所 姫路工業大学 (財)高輝度光科学研究センター
 播磨研究所 大学院理学研究科 放射光研究所
 山岡 人志 平岡 望 伊藤 真義、水牧 仁一朗

1. はじめに

BL08Wでは、SPring-8共同利用開始直前の1997年9月にウイグラーからの放射光を分光して300 keV付近の光を実験ハッチに導くことに成功した。分光器の調整・評価実験の後、これまでこのSPring-8で最も高いエネルギーの光を使ったいくつかの利用実験が行われてきた^[1]。

このビームラインでは、もう少し低いエネルギー領域、100 ~ 150keVの光を使った高分解能コンプトン散乱の実験も予定されている。このため、上記の300keV分光器の立ち上げの後、100 ~ 150keVの分光器の立ち上げを1998年5月 ~ 6月に行った。

2. 100keV ~ 150keV分光器^[2,3]

分光器の分光結晶部分の基本的なデザインは、KEK AR NE1で河田 洋氏らが開発した方法をほぼ踏襲、発展させている^[4]。図1に結晶とホルダーの概念図を示す。Si 400反射を利用している。厚さ約3 mmの結晶をIn - Gaを間にはさんで水冷した銅ホルダーに沿わせ、間接冷却する。結晶はホルダーに沿って曲げやすいように表と裏に溝が切られている。また、結晶は地面に対して水平におかれるので、回折したビームは約5度ほど垂直上方向にはねられる。結晶ホルダーはsagittal方向は約820mmの固定した曲率半径をもつ。このシリンダー状の銅ホルダーの表面研磨は、KEKの東 保男氏のところをお願いし、ミラー表面のように鏡面研磨していただいた。これに結晶を張り合わせた後、ホルダーごとビーム軸方向に曲率半径約800 ~ 1000m前後にベンドして2次元集光を行う。有限要素法による熱解析の結果によると、結晶が数度の温度差をもっても分解能に影響す

るような歪みが出てしまう。そこで、SPring-8では、少しでも熱伝達の効率を上げるために、結晶ホルダーの部分に幅約1mmの矩形の冷却チャンネルを設けた。この冷却溝は、通常の丸い冷却チャンネルと違って単純にドリルで穴を開けるような加工法ではできない。そこで、平たい銅ブロックに冷却溝を掘った後、片側から接合（銀銲付け）して塞ぐ方法が取られた。銅ホルダーは結晶とともにベンドされるので、この接合部分がはがれる不安があったが、予備的なテストを経て光を導入し、評価実験を終えた段階では幸い問題は生じてはいない。

結晶のベンダーは、300keV分光器の場合と同様の方式を採用した。ベンダーの部分が熱的に膨張・収縮してもそれがブラッグ角の変化に影響を与えない構造となっている。

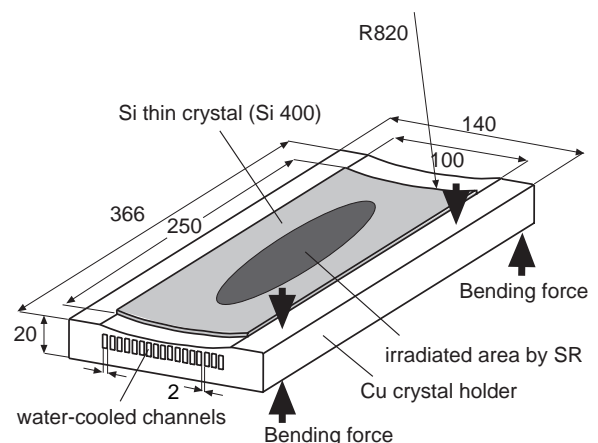


図1 100 ~ 150keV分光結晶とそのホルダー部分の概念図

表1 各検出器の入射光に対する特性 (BL08Wでの評価結果から)

	100 ~ 150keVの光 ($10^{11} \sim 100^{12}$ photons/s at Is ~ 20mA)	300keV付近の光 ($\sim 10^9$ photons/s at Is ~ 20mA)
リナグラフ	約5分で感光	60分以上露光で変化なし
デマルキスト	No	No
蛍光板	OK	No
ポラロイド57	Pb 3mmの後で約5sec.で感光 Cu 5mmの後で約3sec.で感光	数秒で感光
FUJI工業用X線フィルム (25+50 & 25+50+80)	Pb 3mmの後で 約60sec.で感光	約60sec.で感光
イオンチェンバー (空気) (10 ~ 15cm)	~ 100 nA (High Voltage=150V)	No
イオンチェンバー (kr)	~ 500 nA?	?
Photo diode	$\sim 1 \mu$ A (30V Bias)	dark current (~ 5 nA) と 同じレベルのシグナル
SSD (Ge)	OK	OK

分光器全体は、SPring-8標準分光器のように、装置の中身全体を大フランジの蓋で支え、そのまま水平にレールに沿って引き出せる構造としメンテナンスを容易にしている。

放射線シールドの問題は、散乱X線の発生源である分光器の真空容器の外側全体を厚さ約20mmの鉛の板で覆うことにより、ハッチの鉛の厚さを低減した。散乱X線による真空容器のヒートアップの問題も、300keV分光器と同様に、真空容器の内側全体に水冷された厚さ5mmの銅板を張って対処した。

分光器後の真空パイプは矩形縦長である。結晶の角度を振ってエネルギーを変えることによってビーム軸が振れても、115.5keV付近の光を中心にプラスマイナス20 ~ 30keVの光が通るようにしてある。

3. 100 ~ 150keV分光器の特性評価実験

300keV分光器の立ち上げの時には、最初、光を直接つかまえることができず苦労した。今回はその経験を生かし、様々な検出器を用意して万全を期した。しかし、放射光を結晶にあてた最初の段階で回折光が蛍光板で光ることがわかったので、300keVの場合と比べて実験が比較的楽になった。各検出器の感度特性をそれぞれの分光器からの光に対してまとめたものを表1に示す(但し、数値については目安の値である)。入射光のフラックスにも依存するであろうが、100keV程度までならほぼすべての検

出法が使えることがわかった。これらの実験のとき、フォトダイオードの評価実験も行われ、100keV付近にも感度があることがわかった。イオンチェンバー、SSD測定結果と比較し、それぞれに対して良いリニアリティが得られている。但し、放射線損傷の問題はまだ不明であり今後の課題である。分光器の評価実験の結果は以下の通りであった。

フォトンフラックス：分光器から回折してきたビームをダイレクトにSSD (Ge) で測定した。但し、厚さ480mmのアルミフィルターをSSDの前に置いた。このときフロントエンドのアルミメタルフィルターも一番厚く

(45mm) した。挿入光源 (ID) の gap=30mm, 蓄積電流 Is=20mA のとき、スリット系がオープンならば $\sim 1 \times 10^{12}$ photons/s オーダーのフラックスが実験ハッチBまでできていることがわかった (SSDの効率80%を仮定)。分解能を上げるためにフロントエンド (FE) スリット系を最適化 ($1.5 \times 18\text{mm}^2$) すると、この値は $\sim 2 \times 10^{11}$ photons/s になった。

分解能：300keV分光器はSSDのスペクトル幅から分解能が見積もられたが、この分光器では、UO₂のK吸収端測定からエネルギー幅が計算された。この酸化ウラン (密封線源) は、組成比は、U²³⁸ : 99.3%、U²³⁵ : 0.7%、U²³⁴ : $\sim 0\%$ で、ほとんどU²³⁸と考えると良い。図2に吸収端測定の結果とその微分曲線を示す。この微分曲線の幅からエネルギー幅dEが見積もられる。ウランのK吸収端 (エネルギー、E=115.54keV) の自然幅は96.1eVと計算されている^[5]。ウランのK吸収端の場合、L吸収端の場合のように吸収曲線の微細な構造は表れない。最適化された上記のスリット系のとき、dE=173eVと測定され、これから、モノクロメーターのエネルギー幅は、約144eVだと見積もられた。このとき、E=115.54 keVに対してdE/E= 1.25×10^{-3} となり、ほぼ設計値のdE/E 1×10^{-3} に近い値が得られた。

結晶のバンド：評価実験は間に1週間弱の期間を置いて、2回に分けて行われた。第2回目の実験のとき第1回目の実験結果が再現できなかった。経時変

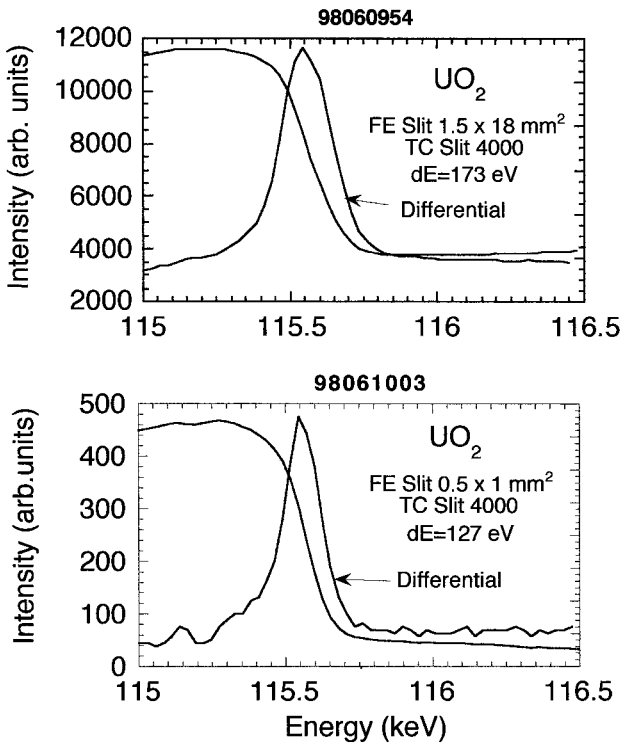


図2 各種の条件下での酸化ウランのK吸収端測定の実例

化が起きたのだと思われる。図3に集光した像のイメージを示す。X方向がsagittal方向、Yがビーム軸方向に対応する。sagittal方向に関して集光した像のイメージを結晶からの距離の関数として見た結果、集光ポイントが設計値の場所よりも下流側にずれているのがわかった。フォーカスされたビームのサイズは、結晶からの距離 $q=16.3\text{m}$ の実験ハッチ内の位置で、 $1\sim 2\text{mm} \times 5\sim 6\text{mm}$ となった。これらの結果から、まだ結晶がホルダーに完全に沿うような理想的な形では張られてないのがわかった。今後改良していくべき点のひとつである。

高調波成分：図4にSSDによる測定の結果（アルミフィルター521mmの後）を示す。Si 400面反射の高調波、Si 800、Si 1200の反射が出ていることがわかった。分解能を要求しないのなら2倍高調波（231keV）に対して現在でも $\sim 10^{10}$ photons/s程度のフラックスはある（SSDの効率10%を仮定）。Si 1200反射（347keV）では $\sim 10^7$ photons/s程度のフラックスがある（SSDの効率5%を仮定）。

実験ハッチ内の散乱X線：バックグラウンドとしては、分光器の結晶から真空パイプを通ってくる前方散乱が大きく、実験ハッチ内の真空パイプを出たすぐのところを鉛ブロックで覆わないといけな

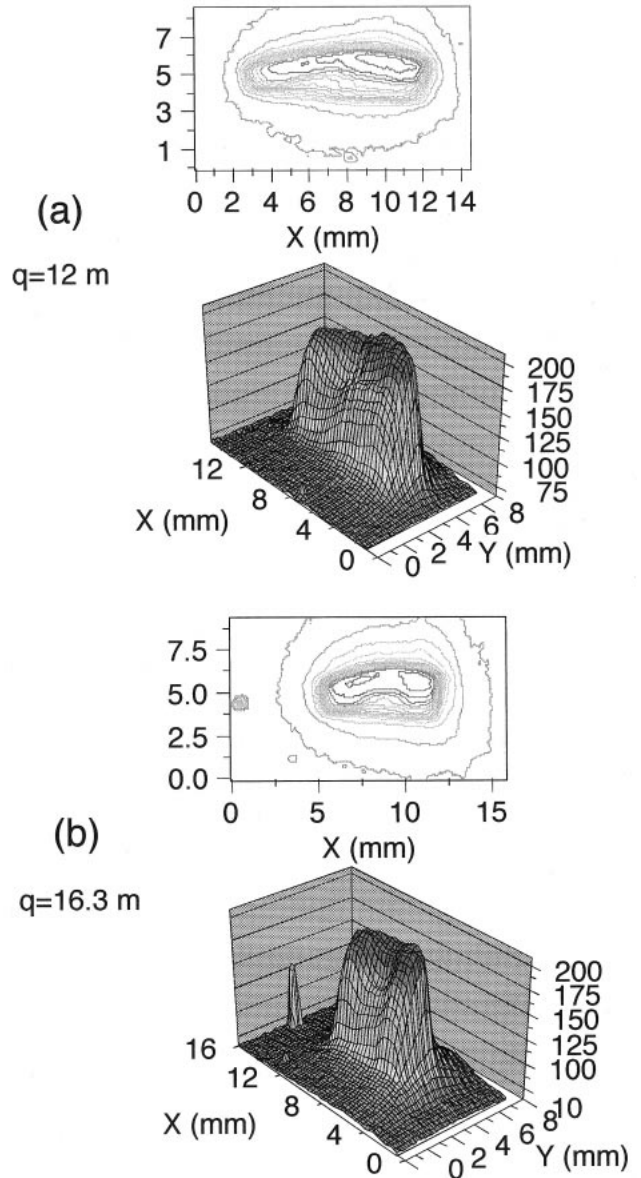


図3 実験ハッチ内で集光されたビームのプロファイル測定

った。また、空気によるコンプトン散乱も注意しないと無視できないバックグラウンドとなって検出器に入ってくることがわかった。空気以外にもスリットやサンプルホルダーなど、光がものにあたることによるコンプトン散乱が検出器の窓に入り込む。測定系の設計や設置の段階で、これらを注意して除くような工夫がこのビームラインでは必要であろう。

4. おわりに

このビームラインの分光器は、結晶がひとつで2結晶分光器のような定位置出射型ではない。ウランのK吸収端測定では、分光器の角度をふるとビーム

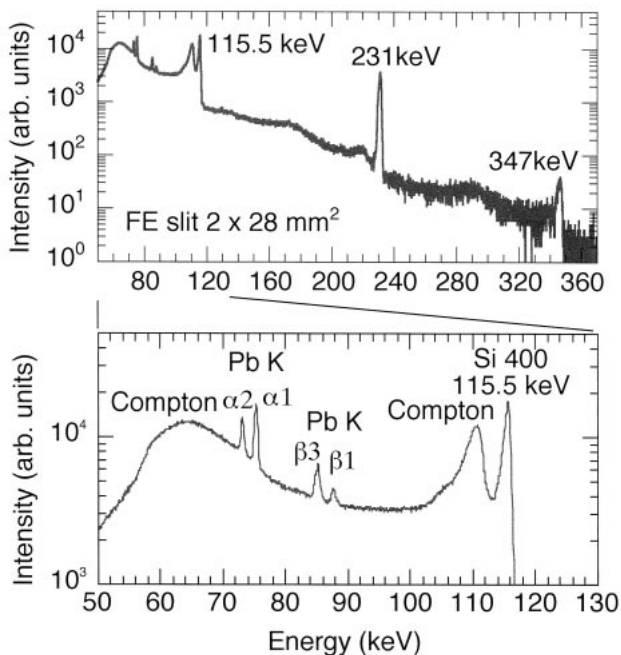


図4 SSDIによるSi 400面からの回折光の測定結果
厚さ521mmのアルミフィルターをSSDの前に置きダイ
レクトに回折光を測定している。2倍高調波、3倍高調
波が出ているのがわかる。

が上下に動く。このためにスリット系、イオンチェ
ンバー及びターゲット系を結晶の角度変動に連動さ
せて動かさねばならなかった。平岡による「ユーザ
ー便り (SG立ち上げ実験記)」の報告にもあるよう
に、その調整に最後まで苦労させられた^[6]。このシ
ステムは今後恒常的に実験ハッチ内に置かれ、分光
器の性能チェックに使われる予定である。

1999年1月以降、IDgapを20mmにすることができる。
これにより、放射光のパワーが計算値で約80Wから
約600Wへ、結晶への実質的な熱入力が現在の約
50Wから約350Wになり約7倍に増大する。この影響
により結晶の状態は現在よりも大きく変化すること
が予想される。300keV分光器も含め、現在より大
きなヒートロードがかかったときには再調整が必要
であろう。

100~150keV分光器は分解能を優先すると現在で
もビームを一部カットせざるを得ない。フラックス
はその分下がることになる。IDgap=20mm, Is=100
mA になれば現在よりも数10倍のフラックスが期待
できる。分解能との兼ね合いでもあるが、さらにフ
ラックスを上げるには、(a) 結晶表面をpolishする、
または結晶全体をアニールする^[7]、(b) 結晶のホル
ダーへのはり方を良くしてビーム全体を受けかつ分

解能を保つようにする、などの方法が有効であろう。
今後、実験ハッチBにはアナライザーや検出器が置
かれ、高分解能コンプトン散乱等の実験がこのビー
ムを使って行われる予定である。

BL08Wは2台の分光器の基本的な立ち上げが終了
し、今後、分光器を改良してその性能を上げていく
段階となる。たゆまぬ努力を続けることにより、世
界で最も高いエネルギーをもち、かつ最も高いフラ
ックスの光を安定供給するビームラインとなるであ
ろう。そうして、このビームラインが、放射光でこ
れまで利用の少なかった比較的高い100~300keVオ
ーダーの光を利用する核となる場所になることを祈
っている。

謝辞

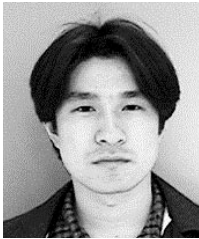
この分光器の立ち上げ・評価実験には、立ち上げ
協力グループとして姫工大理学部 坂井信彦、小泉
昭久、角谷幸信、生子雅章の各氏に参加していただ
いた。また、KEKの東 保男氏らには結晶ホルダ
ーを研磨していただいた。結晶をビームラインに設
置する前に、オフラインで結晶をホルダーに張り付
け評価する作業では、KEKの河田 洋、佐藤昌史
の各氏に協力していただいた。酸化ウランの準備及
び分光器以外のビームライン建設全体に関しては
JASRIの櫻井吉晴氏の寄与が大きい。これらの方々
にここに感謝したい。

参考文献

- [1] 山岡人志、水牧仁一朗：SPring-8利用者情報
Vol. 3, No. 2, March (1998) 16-20.
- [2] H. Yamaoka, K. Ohtomo and T. Ishikawa : J.
Synchro. Radiation 5 (1998) 687-689.
- [3] H. Yamaoka, T. Mochizuki, Y. Sakurai and H.
Kawata : J. Synchro. Radiation 5 (1998) 699-701.
- [4] H. Kawata, M. Sato, Y. Higashi and H.
Yamaoka : J. Synchro. Radiation 5 (1998) 673-
675.
- [5] M. O. Krause and J. H. Oliver : J. Phys. Chem. Ref.
Data 8 (1979) , 329-338.
- [6] 平岡 望：SPring-8利用者情報 Vol. 3, No. 4,
September (1998) 35-36.
- [7] H. Yamaoka, S. Goto, Y. Kohmura, T. Uruga
and M. Ito : Jpn. J. Appl. Phys. 36 (1997) 2792-
2799.

山岡 人志 YAMAOKA Hitoshi

(Vol. 3, No. 2, P20)



平岡 望 HIRAOKA Nozomu

昭和47年9月26日生
 姫路工業大学大学院理学研究科、理研ジュニア-リサーチ-アソシエイト
 〒678-1297
 兵庫県赤穂郡上郡町金出地1475-2
 TEL : 07915-8-0101 ex.431
 FAX : 07915-8-0146

略歴：平成6年姫路工業大学理学部卒業、平成8年神戸大学自然科学研究科修士課程修了、同年姫路工業大学理学研究科博士課程進学、同時に理研ジュニア-リサーチ-アソシエイト。日本物理学会、日本放射光学会 会員。

最近の研究：コンプトン散乱を用いた物性研究。

趣味：スキーを少々。



伊藤 真義 ITOU Masayoshi

昭和45年12月28日生
 (財)高輝度光科学研究センター 実験部門
 〒679-5198
 兵庫県佐用郡三日月町三原323-3
 TEL : 07915-8-0831 FAX : 07915-8-0830

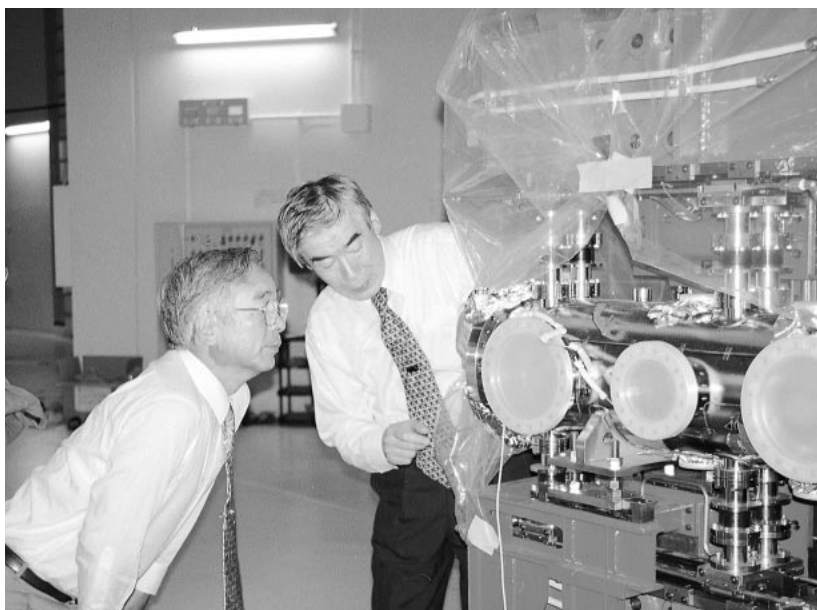
略歴：平成5年東京学芸大学教育学部卒業。平成7年東京学芸大学大学院教育学研究科修了。平成10年総合研究大学院大学数物科学研究科修了。博士（理学）。同年4月より高輝度光科学研究センター研究協力員。日本物理学会、日本放射光学会 会員。

最近の研究：コンプトン散乱における反跳電子同時測定法の開発と応用。

趣味：散歩、パズル。

水牧 仁一朗 MIZUMAKI Masaichiro

(Vol. 3, No. 2, P20)



設置予定のアンジュレータの説明をうける藤家原子力委員会委員長代理 (H.10.8.3)