

軟 X 線ビームライン BL13 の建設

○豊島章雄、田中宏和、菊地貴司、間瀬一彦

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

1. 概要

高エネルギー加速器研究機構 放射光科学実験施設では、2.5GeV の電子蓄積リングから放射される放射光を用いて様々な実験が行われている。今回報告する BL13 は、電子蓄積リングの直線部分に設置された挿入光源（アンジュレーター/マルチポールウィグラー）からの放射光を利用して実験を行うビームラインであり、X 線を利用する実験ステーションと真空紫外・軟 X 線（VUV/SX）を利用する実験ステーションを有し、タイムシェアで使用されるビームラインとして運用されてきた。しかしながら、X 線実験ステーションとのタイムシェアのためビームタイムが制限される(50%)ほか、分光器が旧式であり、最新式の分光器に比べて「分光領域、分解能、光強度、スポットサイズ」などの性能が低いことが問題となっていた。

放射光科学実験施設では、有機薄膜・生体分子研究を推進する目的で、この老朽化した既設ラインを撤去し、新たに高輝度 VUV/SX 領域専用のビームライン（30～1000 eV）として入射スリットレス可変偏角 Monk-Gillieson 型分光器[1]を設置する再構築を行った。今回は、この新ビームラインを建設・立ち上げ調整を行った経過について報告する。

2. ビームラインの概要

新ビームラインに設置される分光器は、BL28 で実績があり、低コスト高性能を実現できる入射スリットレス可変偏角 Monk-Gillieson 型分光器とし、トロイダル鏡(M1)、前置平面鏡 (M2)、不等間隔回平面折格子 (VLSG)、出射スリット (S)、後置鏡(M3)からなり、3 枚のミラーと回折格子で構成されるシンプルな構造である。M2 および VLSG を回転制御することにより、30-1000eV の領域で高輝度の単色光を得ることが出来る構成となっている(図 1) [3,4]。

この光学系により得られる、光エネルギー分解能としては、2つの回折格子によって、30-700 eV において最高分解能 30000~10000 と予想される (図 2)。光強度 (フォトンフラックス) は、30-700 eV、分解能 10000 において、 $2 \times 10^{12} \sim 6 \times 10^{10}$ photons/s を得ることが出来る (図 3)。

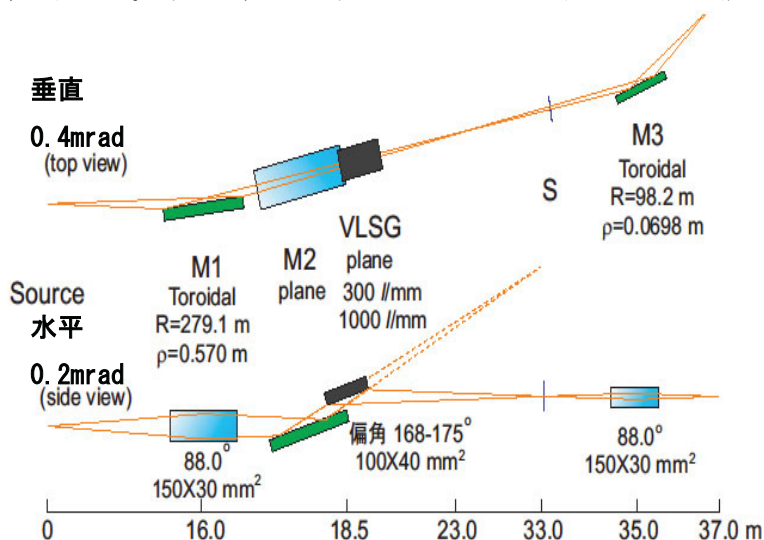


図 1 分光器の光学素子構成

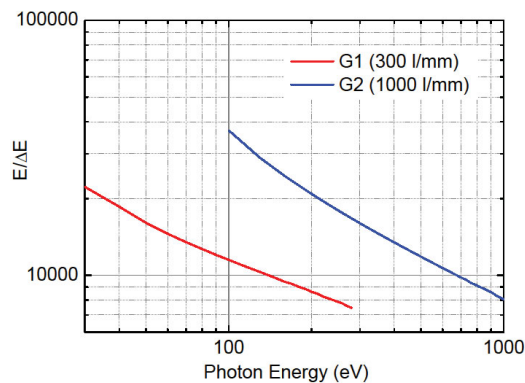


図 2 予想される光エネルギー分解能

この値は旧 BL13 分光器と比較して、分解能として数倍、フォトンフラックスで1桁大きいものである。また、試料位置でのスポットサイズは、 $130\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$ と旧分光器より2桁小さくなり、試料上の強度密度は、3桁大きくなることが予想される（図4）。

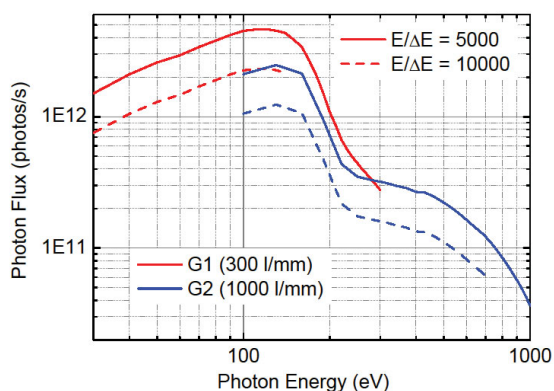


図3 フォトンフラックス

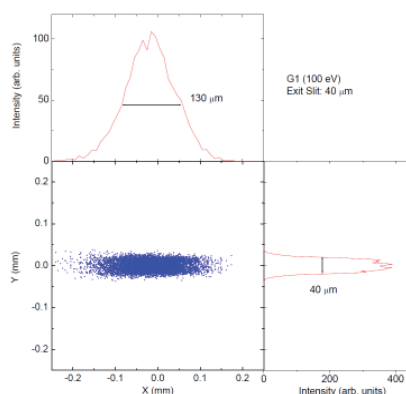


図4 スポットサイズ

3. 建設スケジュール

放射光実験施設では、約5000時間/年のビームタイムを設けて共同利用実験を行っている。ビームタイム中は実験中のビームラインに影響を与えるために、騒音や振動の発生する建設作業をすることが制限されている。このため建設作業は限られた休止期間を利用して、建設作業を進める必要がある。今回の建設作業は以下の日程で行った。

- 2008年度 光学設計、概要設計・測量、技術開発（冷却・洗浄・調整機構）、インターロック仕様決定、放射線遮蔽設計、図面作成・発注、光学素子発注、ユーティリティ（水・圧空・電気）設計および発注。各種真空コンポーネント発注、動作確認。
- 2009年 春 既設建築物の撤去（X線実験ステーションA,B、実験ハッチ、VUV実験ステーション）床補修、リング内測量（ライン引き準備）、振動測定、電力配線、各種真空コンポーネントプリベーク。
- 2009年 夏～秋 設置測量、放射線遮蔽（基幹部ハッチ）工事、水・圧空配管工事、ビームライン設置工事、光学素子取付・アライメント、真空排気系設置、ベーキング、インターロック設置、放射線遮蔽設置、完成検査
- 2009年 秋～冬 ビームライン検査、光導入開始、光学素子光焼きだし、分光器制御ソフト作成、分光器駆動テスト開始、性能評価用超高真空槽立ち上げ開始、光強度、分解能、スポットサイズ測定、実験装置（SES200）立ち上げ調整
- 2010年 1月～ ユーザー共同利用開始

4. 建設報告

4.1 建設準備作業

BL13の再構築にあたり、予算の制約の問題から再利用可能な物はできるだけ活用して節約する設計を行う必要があった。このため放射光ビームを実験室まで導く基幹チャンネルと、ビームライン最上流部分に設置されている4象限スリット、基幹部ハッチなどはそのまま使用することにした。また、ビームシャッター(BBS)、分光器のスリット、各種直線導入機など、使える物はオーバーホールして活用することにした。このため、

設計の制約が大きく、作業も含め非常に手間が掛かることになった。再利用した 4 象限スリットは新ビームラインの仕様より開口部が大きいので、このままでは前置鏡 (M1) から光をこぼす可能性がある。このため基幹部に開口部を制限する水冷マスクを設置する必要が生じた。新たな試みとして、0.2%ベリリウム銅合金の一体加工による水冷マスクを製作し、コスト削減を行った [2]。分光器の心臓部とも言える回折格子チャンバーは、BL28、BL16 で実績がある型式の物を改良して導入することにし、製作費用を抑えた。新ビームラインは光学素子の炭素汚染を最小限に抑えたいことから、超高真空が得られるよう、チャンバー内壁を電解研磨、純水煮沸洗浄処理を行うことにした。各コンポーネント【前置鏡チャンバー (M1)、回折格子チャンバー (M2,G)、スリット (S)、後置鏡 (M3)】については、光学素子や冷却機構などを取付後、十分な時間をかけてベーキングを行うことのほかに、光学素子部分に集中して真空排気ポンプを配置することで、超高真空を達成できるように設計した(図 5)。

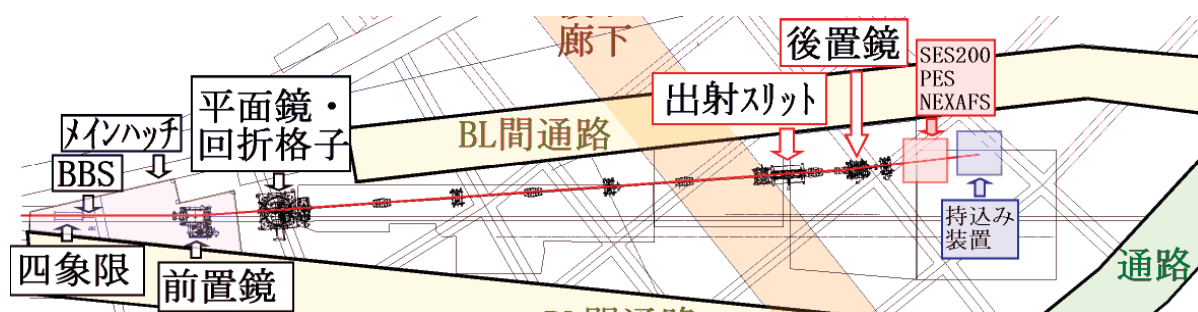


図 5 ビームライン全体配置図

4.2 既設ビームラインの撤去および新ライン設置準備

2009 年春、短い実験停止期間の合間を利用して、既設ビームラインの撤去を行った。旧 BL13 は、ビームライン遮蔽ハッチ、X 線実験ステーション A/B、実験ハッチ、VUV 実験ステーションが設置される重装備であり、建築場所の制限からクレーンが使用できない場所であった。このため作業の殆どが人の手によるものとなった。既設建築物の撤去後、床補修、およびユーティリティ（電気・冷却水・圧空配管）の整備が、実験の合間を縫って進められた。

4.3 測量

今回の再構築作業において、ビームラインの基準線は、リングの改造によりマグネットの位置が変わっており、建屋の経年変化も無視できないことから、新しく引き直す事が必要とされた。しかしながら基幹チャンネルや、4 象限スリット等のビームライン上流部分は撤去せずにそのまま再利用するため、リング内からの見通し測量を行うことが出来なかった。

このためビームラインの基準線を直接引かず、光軸から 450mm オフセットしたラインをリング内に引き、建設時に使用する基準線とした。また、ビームラインの光学素子を、設計通りの位置に設置するため、挿入光源からの距離を正確に求めた。光軸高さはマグネット中心の位置を基準として、測量により実験室へ移設し求めた。測量誤差を減らすため、複数の基準点から同作業を行い、精度を高め



図 6 測量、墨出し

た (図 6)。

4.4 設置作業

2009年夏の運転停止期間を利用して、新ビームラインの設置作業が進められた。各コンポーネントを測量位置に設置した。設置誤差は、真空槽およびダクトで $\pm 0.5\text{mm}$ 以下、光学素子で $\pm 0.1\text{mm}$ 以下になるよう設置を行った。各光学素子を取り付け後、下流光路上にレーザーを設置して、ミラー中心をレーザー光が通り、上流までレーザーが届くように調整用のモーターで微調した。回折格子は、ホルダーに面内回転の微調機構がないため、レーザー光の反射(回折)を利用して、ホルダーと刻線が直交するように大気中で調整した。M2ホルダーおよびGホルダーのマウントは、精密水準器を使って水平を出した。さらにM2については、オートコリメータを使用して、水平を取ったマウント面とミラー面が平行になるよう調整した。

約1ヶ月間の設置作業が無事終わり、各真空排気系の立ち上げ、十分な時間を取ったベーキングが行われた結果、到達真空 $< 1 \times 10^{-8}\text{Pa}$ 以下を得ることが出来た。その後、放射線遮蔽設置、インターロック設置、完成検査と順調に進み、予定通りの工程で完成させることが出来た(図7~10)。



図7 設置

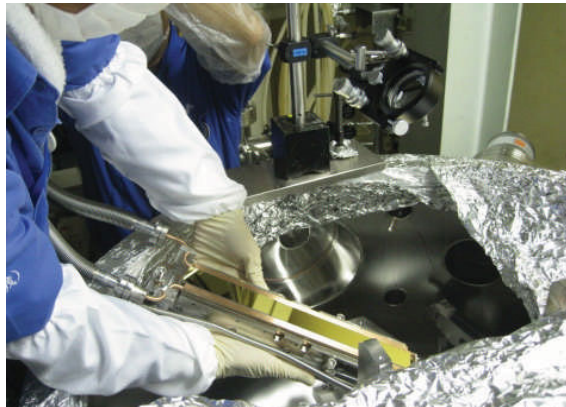


図8 光学素子取付

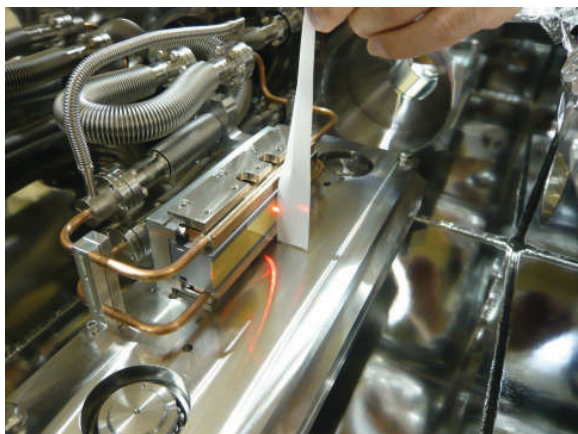


図9 レーザー光によるアライメント



図10 完成したビームライン

4.5 調整および分解能評価

分解能測定については、希ガスのイオン収量スペクトルを測定することにより、求められたスペクトルと既知の自然幅を比較することで求めることが出来る。試料ガスの既知スペクトルの変化を利用して分光器の調整を行う。この報告書を執筆している時点では、まだ調整途中の状況であるが、図 11 は、N₂ の N K 吸収端 401eV 付近におけるイオン収量スペクトル測定結果である。これによって分解能 ($E/\Delta E$) 10000 以上を達成していると見積もることが出来る。

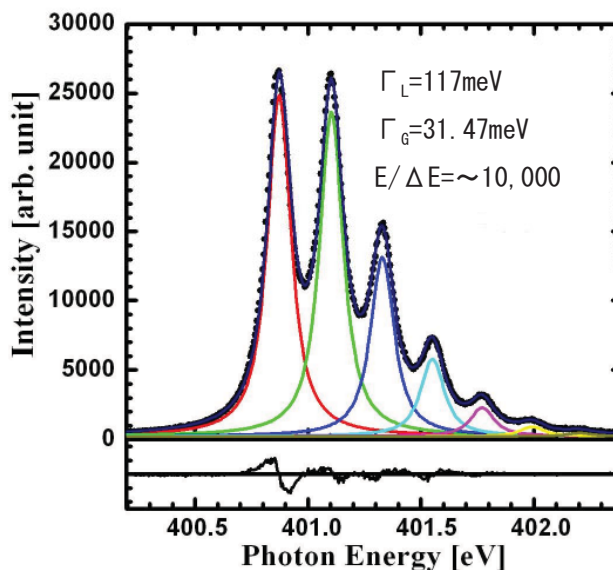


図 11 実測された N₂ イオン収量スペクトル

5. まとめ

軟 X 線ビームライン BL13 の建設、立ち上げと関連する技術開発など一連の作業を行った。ビームタイムの休止期間を利用しての日程的に厳しい工事であったが、予定通り建設することが出来た。まだ調整途中の状況ではあるが、評価実験を行った結果、予想していた性能を得ることが出来た。

6. 謝辞

ビームラインの設計および建設に関して、様々な指導、助言を頂きました雨宮健太准教授、収量スペクトルのデータ解析を担当して頂きました足立純一研究機関講師に、この場をお借りして深くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] K. Amemiya and T. Ohta, J. Synchrotron Rad. 11 , 171 (2004).
- [2] 極低ガス放出材料 0.2%ベリリウム銅合金製水冷マスクの開発と VUV/SX ビームライン BL-13A への応用 (渡辺文夫・豊島章雄・菊地貴司・田中宏和・間瀬一彦：日本放射光学会年会 姫路 2010/01/08)
- [3] 有機薄膜研究用高輝度真空紫外軟 X 線ビームライン BL-13A の開発 (豊島章雄・菊地貴司・田中宏和・間瀬一彦・雨宮健太・伊藤健二：日本放射光学会年会 姫路 2010/01/08)
- [4] Construction of a New VUV/Soft X-ray Undulator Beamline BL-13A in the Photon Factory for Study of Organic Thin Films and Biomolecules Adsorbed on Surfaces (Kazuhiko Mase, Akio Toyoshima, Takashi Kikuchi, Hirokazu Tanaka, Kenta Amemiya, and Kenji Ito The 10th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2009) Melbourne)