

BL-15 の建設と立ち上げ状況

○上條亜衣, 小山篤, 丹羽尉博, 仁谷浩明, 清水伸隆, 五十嵐教之
高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光科学研究施設

概要

BL-15 は PF リングに新しく設置された挿入光源からの放射光を用い、XAFS、小角散乱などの実験を行うためのビームラインである。「高エネ放射光科学研究施設 BL15 の建設」(小山、上條他。平成 25 年度核融合研技術研究会報告集 75 ページ)でビームラインの設計、設置と立ち上げ開始時のデータを発表したが、その後の立ち上げ状況、評価実験の経過、現在の問題点などを報告する。

1. BL-15 の特徴

放射光科学研究施設は茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構にある研究施設である。放射光とは光速に近い速さで運動する電子が進行方向を変えるとときに放出される電磁波(光)であり、波長が短く大きなエネルギーを持つ。この光を用いると極微の世界を観ることができ、幅広い分野で放射光利用研究が行われている。

光源加速器から発生した放射光を実験装置まで導くのが放射光ビームラインである。当施設のビームラインのうち、BL-15 は PF リングに新しく設置された挿入光源(ショートピリオドスモールギャップアンジュレーター)からの放射光を用い、主に XAFS(エックス線吸収微細構造)、小角散乱(SAXS)の実験を行うためのビームラインである。2 つの実験ステーション A1(XAFS)、A2(SAXS)をタンデムに接続することで、できる限りの光学系を共通化しつつ異なる実験を実施できる設計となっている。それぞれの実験に必要な放射光の性能を表1に示す。

SAXS	ビーム性能項目	XAFS
2~3, 6~7, 10~12	エネルギー(keV)	2.1~15(連続)
100(H) x 10-100(V)	サイズ(μm)	10-20
<0.3mrad	発散	特に規定しない
>10 ¹⁰ phs/s	フラックス	>10 ⁸ phs/s
2 x 10 ⁻³ で十分	エネルギー分解能	<2 x 10 ⁻⁴
大きな実験ハッチ	その他	エネルギーの高速掃引
低発散型光学系 高散乱能の分光 なるべく少ない光学素子	光学系	縮小光学系 高分解能の分光 高次光抑制鏡(ダブルミラー)

表 1 要求ビーム性能と光学系の比較

このような実験側からの要求を満たすため、今回建設を行った BL15 には以下の特徴がある。

- 実験によって異なるビームへの要求を、5 台のミラーにより実現
- 駆動範囲の広い分光器により、実験に使用できる放射光のエネルギー範囲が広い
- 挿入光源と分光器との同期制御により、連続的に放射光のエネルギーを変えることが可能
- 主要光学素子を床フレーム上に配置し、適切な振動対策

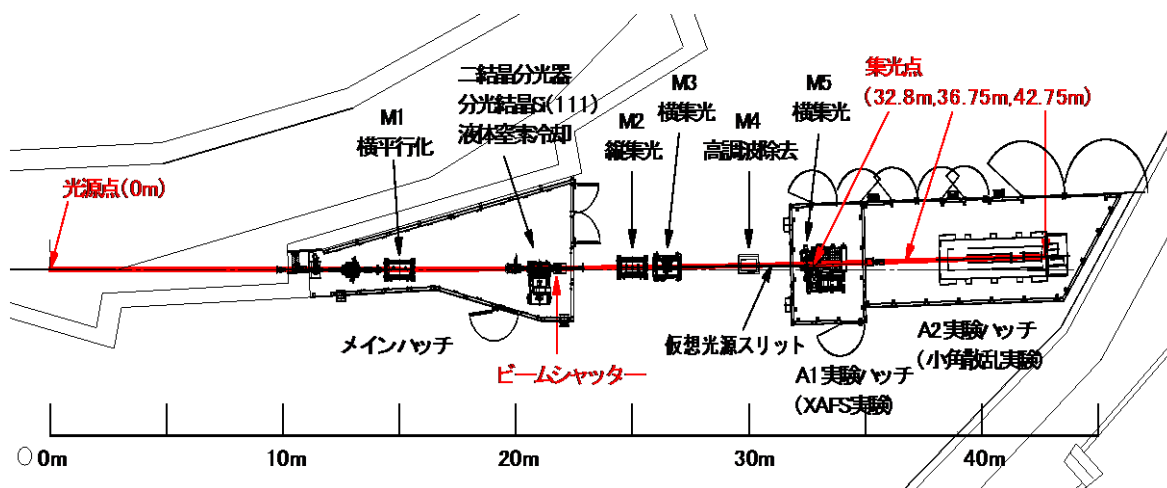


図 1 BL-15 の全体図



写真 1 BL-15(上流より)

青色ハッチ、赤色ハッチ、オレンジハッチはそれぞれメインハッチ、A1 ハッチ、A2 ハッチ

2. 集光光学系

広がりをもって放射される放射光を実験試料の位置で集光させるためにミラーによる集光が行われている。水平方向は M1 ミラーにより放射光を平行化し、さらに M3 ミラーにより光源点から 31m 地点に設置したスリットの位置に集光させて、そこを仮想光源点とする。M5 ミラーは曲率を変えることができる両面ミラーで、A1 ハッチ使用時には強く曲げて M5 ミラーから 30cm の位置に集光させ、集光点に試料を置いて XAFS 実験を行う。A2 ハッチ使用時にはミラーの裏面を使い、A2 ハッチ内に集光させる(図 2)。垂直方向は M2 ミラーにより、それぞれの集光点に集光させる。M4 は高調波(実験に使うエネルギーの 3 倍、4 倍などのエネルギーを持った X 線)を除去するためのミラーである。

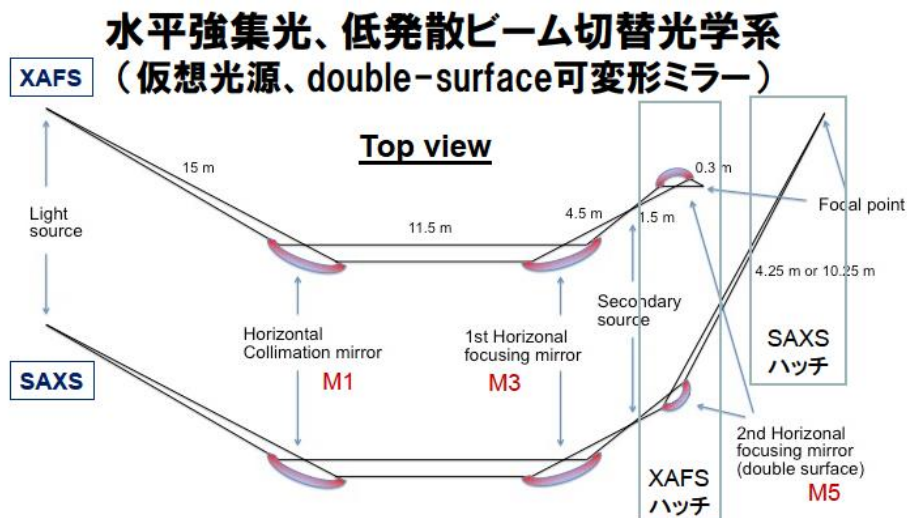


図 2 集光光学系(水平方向)

3. 分光器

BL-15 の分光器には平行に配置された 2 枚のシリコン結晶が使われおり、この 2 つの結晶を回転させて入射角を変えることによって放射光の中から実験に必要なエネルギーの放射光を取り出す。BL-15 は実験に使用するエネルギーが 2.1~15keV と非常に広いため、分光器の入射角は $70.3^\circ \sim 7.6^\circ$ と広範囲となっている。写真 2 は分光器の結晶を回転させた状態であり、右側から入射された放射光が 2 枚の結晶を経て、ある限られたエネルギーの放射光のみが左側へと抜けていく。XAFS 実験では放射光の分光結晶への入射角を連続的に変化させて放射光のエネルギー変えながらデータを取るため、分光結晶と挿入光源を同期させて動かす。

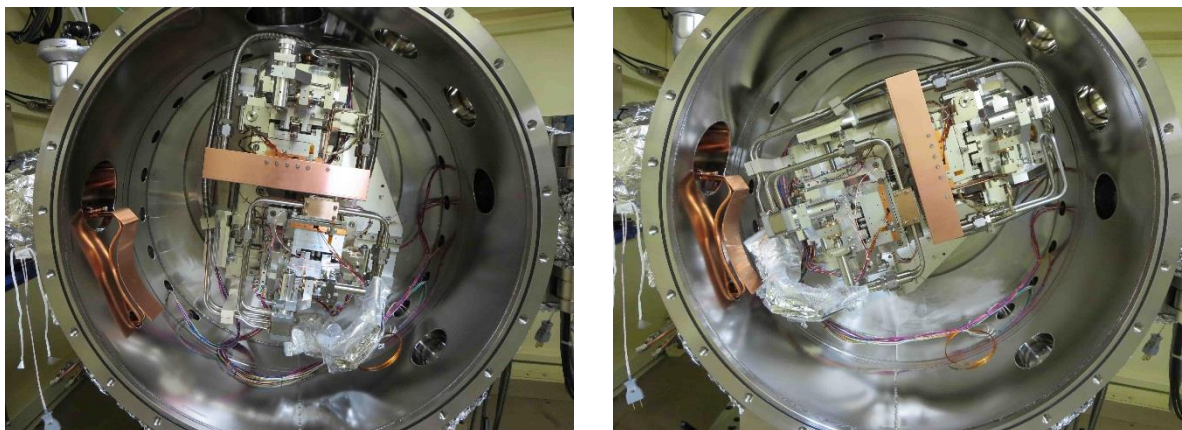


写真 2 左が入射角約 10° 、右が入射角約 75° の様子

4. 振動対策

ミラーで集光されたビームは集光点で $10\mu\text{m}$ 程度と小さくなるため、わずかな振動が実験に影響を与えてしまう。今回の建設では主要な光学素子が載る床の補強工事を実施するなど、振動対策を行った。

放射光実験ホールの床の梁の間隔は $3\sim 7\text{m}$ 程度あり、コンクリートも薄いために、梁から離れた場所では人が近づくと体重により床が沈みビームが動くことが観測されるビームラインもある。BL-15 ではそのような動きを抑えるために、主要な光学素子は梁の上に載るように設計した。しかし、M3 ミラーと M5 ミラー、XAFS 実験装置は梁から離れた位置に設置することになってしまったため、その部分の床を補強する工事を行った。厚さ 20cm の既設コンクリート床を撤去し、新たに厚さ 50cm のコンクリート床を敷設した。工事前後に行った振動測定では、補強工事の効果が確認された。

ミラー、分光器など主要な光学素子の架台は固有振動数を持たず、重量も重たい石定盤で作成して振動を抑えた。他にも真空ステーションのポンプを除振台に乗せる、ポンプとビームラインの間に長めのベローズを入れるなどの振動対策を施した。

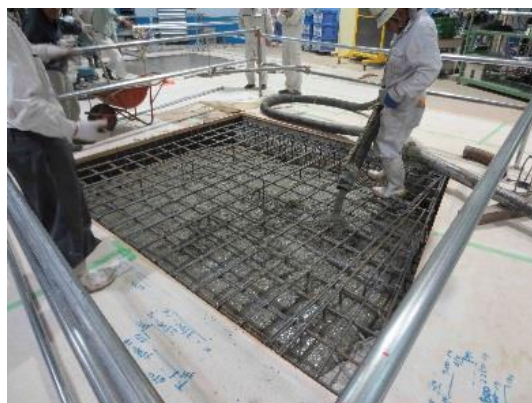


写真 3 床工事の様子



写真 4 M2 ミラーとスリット
駆動機構の架台として石定盤を使用



写真 5 真空ステーション
ポンプは除振台、砂入架台の上に設置

5. ビームライン調整・立ち上げ

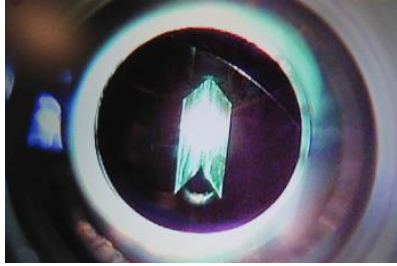
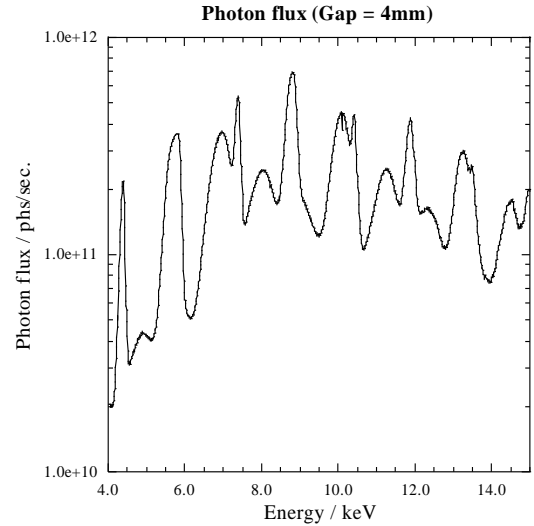
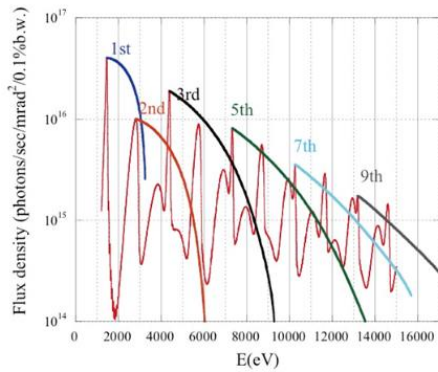


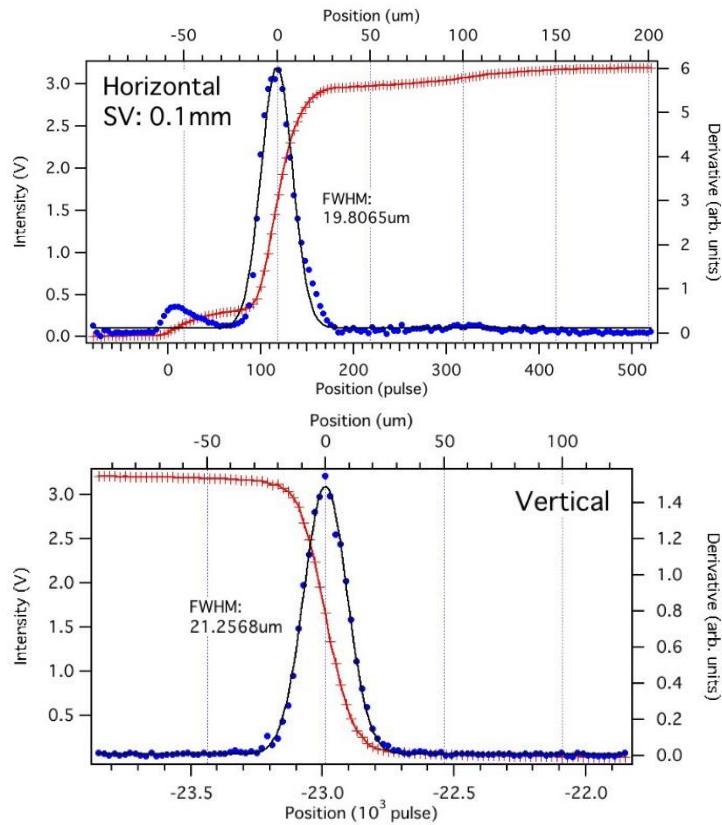
写真 6 観測されたファーストビーム

2013年10月17日にビームラインに初めて光を導入した(写真6)。その後挿入光源の永久磁石の最小間隔 4mm で測定したビーム強度はほぼ計算通りであった(グラフ1)。



グラフ 1 ビーム強度測定結果 左が計算値、右が実測値

A1 ハッチにて測定されたビームサイズは横方向が $19.8 \mu\text{m}$ (計算値 $20 \mu\text{m}$)、上下方向が $21.3 \mu\text{m}$ (計算値 $10 \mu\text{m}$) であり、横方向はほぼ計算通りであった。



グラフ 2 ビームサイズ測定結果

上:横方向、下:上下方向

6. 各実験ステーションの現状

●A1 ハッチ:XAFS 実験

XAFS とは X 線吸収微細構造のことであり、X 線を照射した際にスペクトル上で観測される振動構造である。XAFS 実験ではこの XAFS の解析によって X 線吸収原子の電子状態やその周辺構造などの情報が得られる。

写真 8 は XAFS と X 線回折の同時測定テストの様子であり、左上から右下へと放射光に沿って M5 ミラー、試料、検出器の順に並んでいる。試料と検出器の間には空気で X 線が散乱してしまうのを防ぐためにパイプを設置した。



写真 7 A1 ハッチと XAFS 実験装置

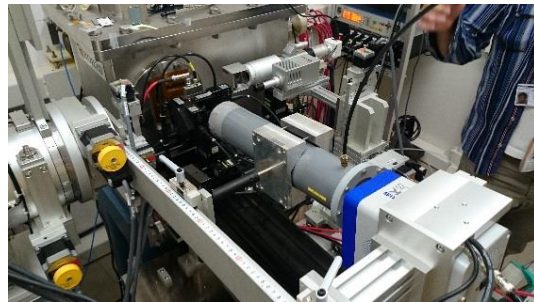
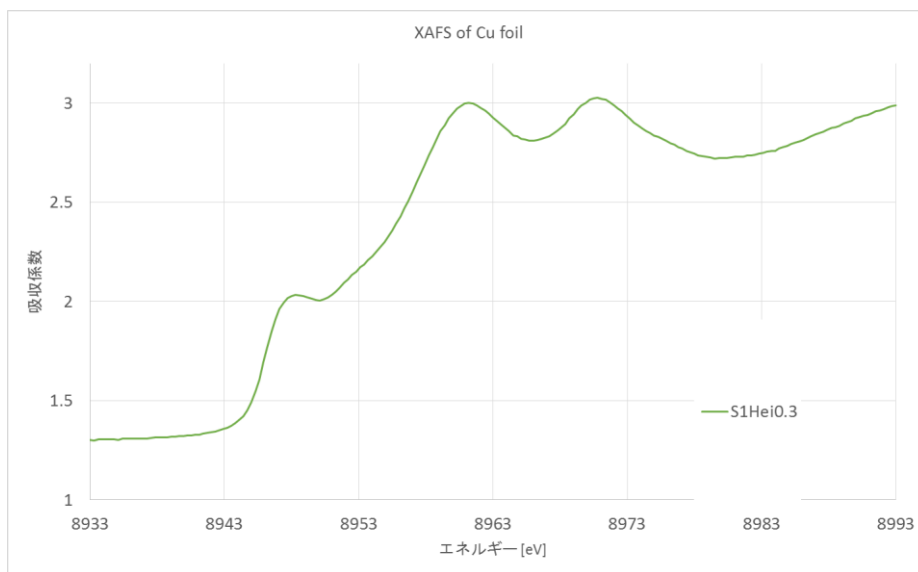


写真 8 調整運転データ測定時の様子



グラフ 3 Cu foil (6 μ m) の透過法 XAFS スペクトル

●A2 ハッチ:小角散乱実験

X 線小角散乱とは、X 線を試料に照射して散乱する X 線のうち、散乱角が小さいものを測定することにより物質の構造情報を得る手法である。溶液中のタンパク質の構造決定に多く用いられており、慣性半径や折り畳み構造を明らかにすることができる。

BL-15A2 ハッチでは今年 2 月に光導入に成功した。写真 9 は A2 ハッチ内の回折計と実験装置であり、手前から奥に向かって放射光が入射される。テスト測定時は M2 ミラーが未調整だったため、水平方向は集光していない。3 重らせん構造のコラーゲンに X 線を当てると、周期構造に応じた回折ピークが観測された(図 3)。



写真 9 A2 ハッチ内

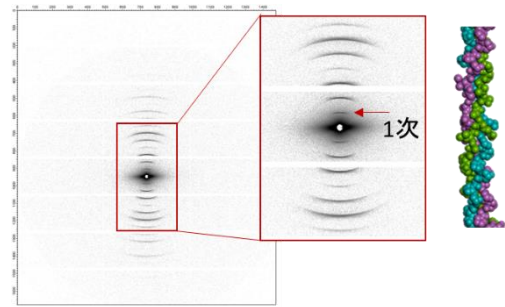


図 3 ニワトリの腱コラーゲンの回折パターン

7. 現在の問題点

- ・分光器に不具合
 - ▶ 2 つの結晶位置を微調整するピエゾ素子が故障している。夏の施設シャットダウン時に修理を行う予定である。
- ・測定データが変動する
 - ▶ 分光器の 2 結晶を回転させて入射角を変えたとき、ビームが縦方向に動く。結晶の角度を微調整する軸の動作が影響していると考えられるので、夏の施設シャットダウン時に調整を行う予定である。
- ・上下方向のビームサイズが予想値よりも大きい
 - ▶ M2 ミラーのスロープエラーが原因ではないかと考えられている。
- ・M4 ミラーを光軌道上に挿入すると約 $20 \mu\text{m}$ だった上下方向のビームサイズが約 $300 \mu\text{m}$ になってしまう
 - ▶ M4 ミラーの歪みが疑われている。ミラーを強く抑えて固定すると歪みが生じることがあるので、固定の仕方を再検討する。ミラー自身の重みも歪みの一因と考えられる。また、ミラーの表面粗さも原因の可能性が有る。

8. 今後のスケジュール

現在 A1 ハッチでユーザーにも協力していただき、評価実験を行っている。6 月 10 日夜にハッチモードを切り替え、6 月 11 日から 6 月 30 日まで A2 ハッチで引き続き評価実験を行う。夏期の施設シャットダウン期間に問題点を改善し、10 月中旬から運転を再開する予定である。今年中に本格的なユーザー実験が開始できることを目指している。発表では、現在行っている評価実験の結果や夏の調整作業も含めて発表する。