

SACLA ビームラインの現状

独立行政法人理化学研究所 放射光科学総合研究センター
XFEL 研究開発部門 ビームライン研究開発グループ

矢橋 牧名

1. はじめに

XFELは、放射光と比べて9桁以上高い瞬時輝度、完全な空間コヒーレンス、10フェムト秒オーダーの超短パルスというかつてない特性を有するX線光源である。SACLAは、国内では初めて、世界でもLCLSに続く2番目のXFEL施設である。単粒子イメージング、ダイナミクス研究、非線形光学等、広範な分野への革新的な応用が期待されている。

SACLAの建設は、2006年度から5年間にわたり国家基幹技術として行われた。実験研究棟は、2009年3月に工事が開始され、2010年5月に完成した。実験ハッチの建設、ビームライン機器の設置に続き、SACLAのビームコミッショニングが2011年2月より開始され、3月にはアンジュレータ自発放射が光学ハッチに導かれた。4月からアンジュレータ部の超精密アライメントを開始し、2011年6月7日には初のレーザー増幅を確認した。さらに、国内の意欲的な研究グループの協力のもと、10月からテスト実験が開始された。同月より、2012A期の利用研究課題の公募が行われ、2012年3月7日から供用

運転が開始された。

2. 全体構成

SACLA ビームライン^[1,2]の鳥瞰図を図1に示す。最初の共用ビームラインとして、主に4 keV以上の硬X線FELを利用するBL3、および広帯域自発放射を利用するBL1が整備された。全ての実験に共通で用いられるビームライン光学系・診断系は、光学ハッチ内に集約して設置されている。ビームライン光学系は、不要なガンマ線・ハロー・高次光等を除去するとともに、必要に応じて分光を行い、下流にXFEL光を輸送する。ビームライン診断系は、極めて強いパルス性を有するXFEL光を安定に供給し、かつ利用実験を高い精度で行うために非常に重要である。

実験ホール内には、BL3を利用するために4つの実験ステーション (EH1~4) が整備された。上流から、先進オプティクス (EH1)、ポンプ・プローブ (EH2)、コヒーレント集光 (EH3)、大型装置 (EH4) という構成になっている。これらの実験ステーショ

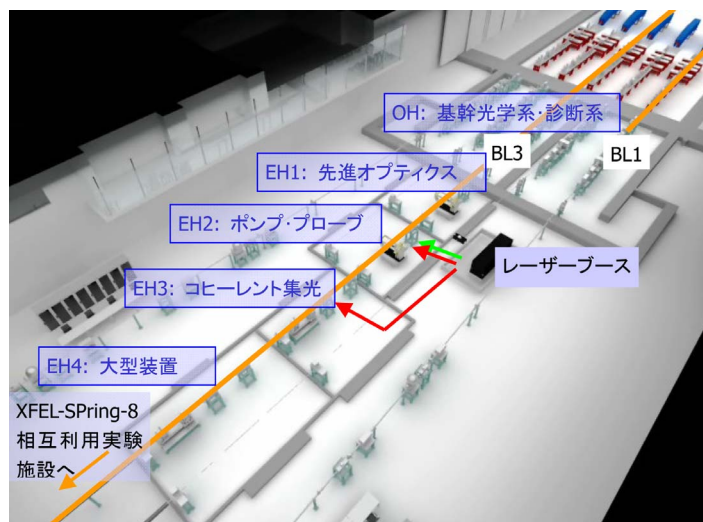


図1 SACLA 実験ホールの鳥瞰図

ンでは、同期レーザーシステム、集光装置といった基幹実験システムのみ常設とし、個別の利用実験装置は可搬式を原則としている。

3. 光性能

BL3においては、約4～20 keVがXFELの基本波で利用可能である。波長の調整は、大きく変更する場合は電子ビームのエネルギーを変える必要があるが、30%程度の範囲であれば、アンジュレータのギャップを実験ステーションから制御することにより変更可能である。光強度（パルスエネルギー）は、10 keVにおいて0.1～0.2 mJ/パルスを達成しており、パルス当たりの光子数に換算すると 10^{11} 台である。パルス幅は数fsから20 fs程度と見積もられている。発散角は垂直・水平ともに約2 μ rad、実験ステーションにおけるビームサイズ径は約200 μ mである。

4. ビームライン基幹部

光学ハッチ内には、ビームライン光学系・診断系が収納されている。配置を図2に示す。光学系としては、ダブルミラーシステムおよび二結晶分光器が設置されており、実験ステーションに設置された端末上のGUIにより、簡便に切り替えが可能である。いずれを選択した場合にも、実験ハッチ内のサンプル位置でのビーム高さは一定に保たれるため（床面より1420 mm）、実験中にも容易に切り替えることが可能である。ダブルミラーシステムとしては、垂直偏向の平面ミラーを2枚用いることにより、高エ

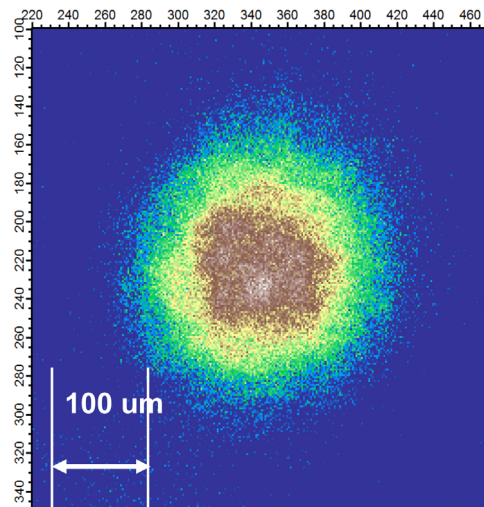


図3 DCM分光後のビームプロファイル

ネルギー成分を除去しながら、反射光を入射光と平行に振り戻す。入射角は4 mradと2 mradが選択可能であり、カーボンコーティングを用いたときのカットオフエネルギーはそれぞれ7.5 keV、15 keVである。二結晶分光器（DCM: Double-Crystal Monochromator）としては、分光素子として無歪み鏡面研磨加工されたシリコン（111）結晶を用いている。DCMを選択した場合、使用波長を固定することが可能であるが、XFELのスペクトル幅（ $\Delta E/E \sim 5 \times 10^{-3}$ ）と比較して分光後の幅は数十分の一に制限されるため（ $\Delta E/E = 1 \times 10^{-4}$ ）、強度が低下し強度変動も増大する。図3にDCMで分光したXFEL光のビームプロファイルを示す。ビームサイ

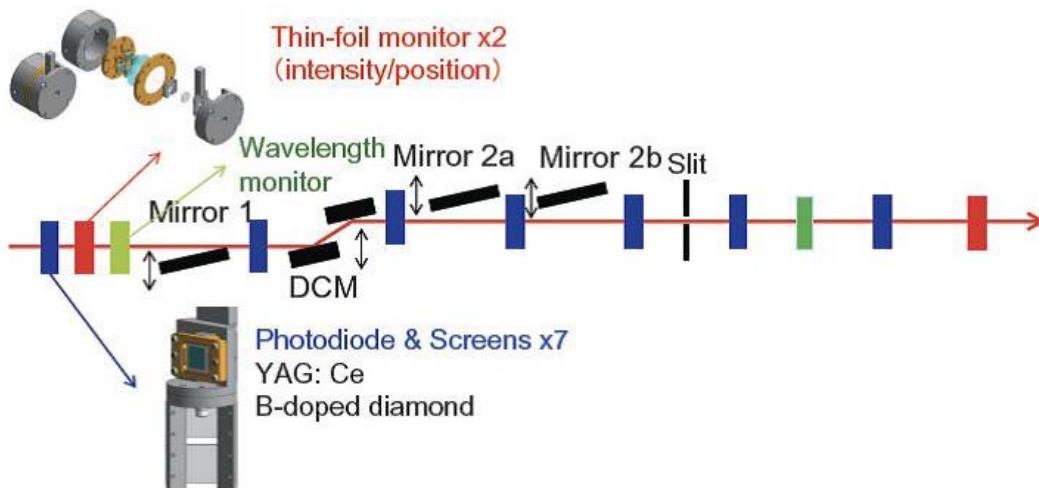


図2 ビームライン光学系・診断系の配置図

ズと光源からの距離から、典型的な角度発散は1~2 μ rad程度と見積もられている。これらの光学系は、初期の硬X線レーザー増幅のための超精密調整に有効に利用され、定期的な軌道補正にも用いられている。また、ビーム強度を減衰させるために、シリコン単結晶の固体アッテネータ(0.1 mmから3 mmまで可変)とガスアッテネータが用意されており、これらのパラメータも実験ステーション端末から制御することができる。さらに、任意のXFELパルスを選択して利用するためのパルスセクター^[3]が用意されている。

SACLAの光診断系は、ショット毎に変化するXFELの光特性を取得して、実験データと比較参照するために非常に重要である。最も重要な対象は、光強度(パルスエネルギー)の計測である。XFEL光は極めて高いピーク強度を有しており、リニアリティを広いダイナミックレンジにわたって確保するために、薄膜強度モニタ(BM: thin-foil beam monitor)が開発された^[4]。これは、入射X線のごく一部を後方に散乱する薄膜と、上下左右に配置された4つのフォトダイオード(PD)により構成されており、PDの出力の和と差分をとることにより、光強度と重心位置がそれぞれ求められる。PDの出力は、プリアンプ・メインアンプで波形整形された後、16ビットADC^[5]によりデジタル処理が行われ、最終的には電荷量に比例する信号がデータベースにショット毎に記録される。アンプのゲインを切り替えることにより、6桁以上のダイナミックレンジを有することが確認されている。また、BMとは独立に、ガスからのX線散乱をPDによって検出するガス散乱型モニタ(GM)も利用可能である。さらに、より簡便なデバイスとして、空気によるX線散乱を

検出する強度モニタが開発され、実験ステーションにおいて用いられている。これらの強度モニタを用いて、放射光ビームラインと同様に強度の規格化を行うことが可能である。

また、XFELは加速器のエネルギーの変化により、波長が変動しうるが、中心波長を簡便にモニタするために、薄膜の回折を利用したスペクトロメータが開発された。BMにも利用されたナノダイヤモンドは、均一なデバイ・シェラー回折環を形成する。このプロフィールを回折計の 2θ アームに取り付けたMPCCDで読み取ることにより、スペクトルの重心を求める。ショット毎に画像処理を行い、中心波長がデータベースに記録されユーザーから参照可能となっている。

5. 実験ステーション

EH2においては、フェムト秒光学レーザーをXFELと組み合わせたポンプ・プローブ実験が可能になっている。光学レーザー本体は、実験ステーション近傍のレーザーブース内に設置され、ここから実験ハッチ内にレーザーが輸送されて実験が行われる。また、EH3への輸送も準備されている。

レーザーシステムは、チタンサファイヤ(Ti:Sapphire)ベースのモード同期オシレータ、チャープパルス増幅器(CPA: chirped pulse amplifier)と光パラメトリック増幅器(OPA: optical parametric amplifier)から構成されている。CPAは、波長800 nm、パルスエネルギー2.5 mJ、パルス幅30 fs(FWHM)のビームを供給する。OPAは、赤外~紫外領域において、パルス幅約100 fsのビームを生成する。これらの出力を表1にまとめる。レーザーシステムの繰り返しレートは1 kHzである

表1 光学レーザーの性能

	波長	パルスエネルギー (μ J)	パルス幅 (fs)
CPA	800 nm	2500	30
OPA	Idler: 2.5 ~ 1.5 μ m	90 ~ 390	100
	Signal: 1.6 ~ 1.2 μ m	160 ~ 510	
	SHI: 1.16 ~ 0.79 μ m	1 ~ 128	
	SFI: 600 ~ 530 nm	21 ~ 270	
	SFS: 530 ~ 480 nm	240 ~ 260	
	FHI: 480 ~ 395 nm	1.6 ~ 56	
	SH-SFI: 295 ~ 265 nm	3.0 ~ 55	
	SH-SFS: 265 ~ 240 nm	34 ~ 53	

が、回転シャッターを用いてXFELの繰り返しレート（最大60 Hz）に分周することが可能となっている。XFELに対する同期レーザーの遅延時間は、光学遅延ステージを用いて1 fs単位での調整が可能である。

本レーザーは、加速器をドライブするRF信号によって同期駆動が行われている。RF信号は温度安定化された光ファイバーを用いて高精度で実験ホールまで輸送されている。フェムト秒領域の計測を行うためには、XFEL光とレーザーの到達時間ジッタの評価が非常に重要であり、EH2においてレーザーポンプ・XFELプローブの調整実験が進められている。

EH3には、コヒーレント集光装置が常設されている。これは、文部科学省X線自由電子レーザー利用推進課題において阪大・山内和人教授のグループによって開発が行われ^[6]、2011年度に立ち上げが完了している。EEM加工された超高精度かつ長尺（40 cm）の集光ミラーを光学素子として用いており、XFEL光をほぼ取りこぼすことなく1ミクロン程度の領域に集光する。微小サンプルのコヒーレント回折・散乱実験や、非線形光学実験に適用されている。

6. 展望

SACLAの利用実験装置は、2006～2010年度、文部科学省「X線自由電子レーザー利用推進研究課題」によって整備が行われ、2011年度は、理研の「XFEL利用装置提案課題」により、当該装置のテストと共用化、ならびに新規装置の開発が行われた。2011年度末には、文部科学省の「X線自由電子レーザー重点戦略研究課題」の公募が行われ、先導的・革新的な成果の早期創出を目指して2012年度から実施される。

最後に、施設の高度化の展望についてまとめる。SACLAとSPring-8を同時に使用可能な「相互利用実験施設」は、2012年度からのテスト実験を予定している。XFELと放射光源に加えて、光学レーザーや軟X線FELなど、様々なビームの複合利用の検討が行われている。また、XFELのシード化は、シングルモード化と輝度の数桁の向上を可能にするものであるが、近い将来の利用運転を目指して検討が進められている。さらに、広帯域自発放射ビームラインBL1は、現在は光学ハッチ内のみの利用となっているが、ビームライン・実験ステーションの

高度化を進めており、光源側においても軟X線領域のレーザー生成に向けた検討を行っている。但し、この波長領域のレーザーとしては、FLASHやLCLS軟X線ステーションという他のFEL施設、さらには高次高調波に代表される実験室光源との競合もあるため、戦略的な観点が求められている。

XFELはまだ利用が始まったばかりの若い光源であり、これまで期待されてきた利用分野に加えて、これまで予想もつかなかった方向に発展する可能性も十分高い。利用者の皆様からの斬新なご提案をお願いしたい。

参考文献

- [1] M. Yabashi and T. Ishikawa (eds.): *XFEL/SPring-8 Beamline Technical Design Report ver. 2.0* (RIKEN/JASRI, Hyogo, Japan, 2010).
- [2] 矢橋牧名ら：「放射光」**25** (2012) 70.
- [3] T. Kudo, T. Hirono, M. Nagasono and M. Yabashi: *Rev. Sci. Instrum.* **80** (2009) 093301.
- [4] K. Tono, T. Kudo, M. Yabashi, T. Tachibana, Y. Feng, D. Fritz, J. B. Hastings and T. Ishikawa: *Rev. Sci. Instrum.* **82** (2011) 023108.
- [5] T. Kudo et al.: *Rev. Sci. Instrum.* **83** (2012) 043108.
- [6] H. Mimura et al.: *Rev. Sci. Instrum.* **79** (2008) 083104.

矢橋 牧名 YABASHI Makina

(独)理化学研究所 XFEL 研究開発部門

ビームライン研究開発グループ

〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1

TEL : 0791-58-0803 (ex. 3811)

e-mail : yabashi@spring8.or.jp