3-2 ビームライン・実験ステーション

3-2-1. ビームライン概要

SACLAのビームライン及び実験ステーションではコミ ッショニングが進められ、2012年3月からユーザー供用 を開始した。ビームラインの鳥瞰図を図1に示す。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 とともに、必要に応じて二結晶分光器により分光を行い、 下流にXFEL光を輸送する。光診断系は、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り、重点的に開発整備 が行われた。

利用実験の場として、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。多様な実験を行う ために、これらの実験ステーションでは、基幹実験システ ム(フェムト秒同期レーザーシステム、1ミクロン集光装 置等)のみ常設とし、個別の利用実験装置は可搬式を原則 とした。

SPring-8の放射光とSACLAのXFEL光を同時に利用で きる、世界でもユニークな「相互利用施設」の整備が進め られ、SACLAのBL3、SPring-8のBL32XU双方のX線を 相互利用施設内の実験ハッチ(EH5)に輸送した。また、 XFELを50 nmまで集光する2段集光システム(前段ミラ ー:EH4、後段ミラー:EH5)の整備も進行中である。



図1 SACLAビームライン概要

3-2-2. 光診断系

XFELは、極めて高い安定性を有する蓄積リングベース の放射光源と異なり、光特性のショット毎の変化は避けら れず、ショット毎に光特性を診断するためのシステムが非 常に重要である。このために、いくつかのビーム診断機器 が光学ハッチ内に設置されている。その詳細を下記に示す。 ・薄膜強度モニター (BM: thin-foil beam monitor)

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 構成されている。全PDの出力の和をとることにより光 強度が求められ、2組のPDの出力の差をとることによ り重心位置が求められる。信号散乱用の薄膜としてナノ ダイヤモンドフォイルが採用されている。ダイナミック レンジとしては、6桁以上有することが確認されている。 ・スクリーンモニター(SCM)

ビームライン基幹部における各光学素子の上下流に設 置されており、光学調整やプロファイルの確認等に利用 される。SCMは、2種類の蛍光スクリーン(Ce:YAG、 B-doped diamond)及びPDを備えており、これらを遠 隔でビームパスに挿入して空間プロファイルや強度の計 測を行うことができる。Ce:YAG及びPDは破壊型計測 であるが、B-doped diamondは硬X線に対して高い透過 率を有し、実験と並行してプロファイルの常時計測を行 うこともできる。

・インライン-スペクトロメーター

XFELの中心波長を簡便にモニターするために、薄膜の回折を利用したスペクトロメーターが開発された。 BMにも利用されたナノダイヤモンドは、均一なデバイ・シェラー環を形成する。このプロファイルを回折計の20アームに取り付けた MPCCD検出器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る。

3-2-3. フェムト秒同期レーザーシステム

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。フェムト秒同 期レーザーシステムとXFELを用いたポンプ・プローブ実 験の立ち上げを行うと共に、これらのタイミングジッター 計測のためのモニターの開発を進めている。

3-2-4. 1ミクロン集光システム

SACLAの優れた空間コヒーレンスの利用、また、その強 度を更に高めてX線非線形光学等の実験を行うために、大 阪大学、東京大学、SPring-8の共同研究にてKirkpatrick-Baez光学系を用いた1ミクロンコヒーレント集光装置の 開発を行った。焦点距離と集光サイズは比例するため、ワ ークディスタンスを長くすれば集光サイズは大きくなる。 SACLAの光源の大きさ(最下流のアンジュレータ出口を 光源と想定)、光源から集光システムまでの距離、ミラー サイズを考慮すると、ワークディスタンスがおよそ1mに おいて、集光サイズは1~2 µm(10 keV)となる。斜入 射角度は1.5 mradであり、ミラー長が400 mmであるため、 開口は600 µm四方である。集光サイズはワイヤースキャ ンにより計測された。図2に得られた集光XFELビームの 強度プロファイルの例を示す。10 keVにおいて垂直、水 平共に1.25 μmの集光を達成している。

3-2-5. X線2次元検出器

XFELパルスに同期した実験スキームを可能にするX線 2次元検出器、Multiport Charge-Coupled Device (MPCCD) 検出器を開発した。MPCCD検出器では、センサー内の8個 の読み出しポートから並列に読み出すことで60 fpsを実現 している。ビームラインのビーム診断用分光器やゴニオメ ーターに搭載するブラッグ回折計などでは、MPCCDセン サーを1個搭載した小型の検出器(シングルセンサー検出 器)を使用し、コヒーレント回折顕微鏡や微小結晶構造解 析などの用途には、同一センサーを8個モザイク状に並べ た検出器(オクタルセンサー検出器)を使用する。

シングルセンサー検出器は、XFELコミッショニングに おいて、二結晶分光器と組み合わせることによりアンジュ レータの電子ビーム軌道のアライメントに用いられた。図3 に、自発放射の分光後の空間プロファイルを示す。分光波

	Wavelength	Pulse energy (µJ)	Pulse duration (fs)
CPA	800 nm	2500	30
OPA	Idler: 2.5-1.5 µm	90-390	100
	Signal: 1.6-1.2 µm	160-510	
	SHI: 1.16-0.79 μm	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	

表1 同期レーザーシステム





図3 自発光プロファイル



図4 金微粒子からの回折像

長は、アンジュレータの共鳴波長よりわずかに長波長側に 設定してある。電子ビームのエミッタンスは垂直・水平方 向ともに非常に小さく、エネルギー広がりも小さいので、 ドーナッツ状の理想的な軸外放射が観測されている。この プロファイルから、重心位置を1 µradの精度で決定する ことができた。また、利用実験への導入も進められ、X線 回折実験、波長分散型スペクトロメーター等に使用されて 良好なデータが得られている。

オクタルセンサー検出器は、壽壱号、MAXICといった コヒーレント回折イメージング用の実験チャンバーとの組 み合わせで使用された。図4は、オクタルセンサー検出器 で初めて得られたデータであり、金微粒子からの回折像で ある。

3-2-6. 実験データ収集システム

ユーザー供用開始に向け、実験データ収集システムの制 御系構築を行った。最大60 Hzの繰り返しでビームに同期し 10枚の MPCCD検出器の画像データを記録するには5 Gbps の転送速度が必要であり、同時にビームライン機器の制御 を行いつつ機器状態やビーム条件を高速データベースに記 録するため、加速器制御系の基本フレームワーク MADOCA をベースに、大容量高速データ転送技術を追加拡張した分 散システムとして構成した。画像データは10 GbEネットワ ークを用いて画像収集計算機から高速ストレージに転送し

			1
	課題名	課題代表者	所 属
1	生体分子単粒子解析用クライオ試料固定照射装置の整備と調整実験	中迫雅由	慶應義塾大学
2	蛋白質単粒子解析用分子ビーム生成装置の共用化のための整備実験	中嶋 敦	慶應義塾大学
3	液体ビームをターゲットとするXFEL単粒子回折装置の導入	真船文隆	東京大学
4	ナノ構造体の光励起反応追跡	上田 潔	東北大学
5	ワンショット磁気散乱実験に向けた回折スペックル装置の整備(1)、(2)	鈴木基寛	高輝度光科学
5			研究センター
6	不可逆過程観測用時間分解X線回折データ測定技術装置の整備	北川 進	京都大学
7	物質のフェムト秒物理現象解析装置(1)、(2)	田中義人	理化学研究所
8	コヒーレントフォノンによるパルス同期と構造ダイナミクス研究	中村一隆	東京工業大学
9	マイクロ・ナノX線自由電子レーザー集光システムの構築	三村秀和	東京大学
10	シングルショット光電子分光によるXFEL計測	菱川明栄	名古屋大学
11	初吉市业添却提出亦化の解明に向けもV対応流動升けの明惑	日去曲	高エネルギー
11	但同述几該些傳迫多化の件所に回りたA廠俗做取癿広の用先	足立伸-	加速器研究機構
12	非平衡圧縮状態生成と超高時間分解X線回折装置の整備	兒玉了祐	大阪大学
13	X線自由電子レーザー絶対強度計測技術の開発	齋藤則生	産業技術総合
			研究所
14	フェムト秒・サブミクロン分解能を持つポンププローブ計測システム	米田仁紀	電気通信大学
15	XFEL用高精度化汎用回折計の開発	玉作賢治	理化学研究所
16	硬X線自由電子レーザー用オートコリレータの開発	佐野泰久	大阪大学
17	スペックル強度相関法によるナノドメインダイナミックス測定装置	並河一道	東京理科大学
18	気相広角X線回折像計測装置の開発	山内 薫	東京大学
19	MAXIC : Multiple Application X-ray Imaging Chamber	宋 昌容	理化学研究所
20	パルス状コヒーレントX線溶液散乱測定装置の開発	西野吉則	北海道大学
21	ナノスケールマテリアルサイエンス創出への試料導入装置の整備	和田真一	広島大学
22	X線自由電子レーザーを用いたワイドギャップ系固体分光計測システム	猿倉信彦	大阪大学
23	FEL光制御に向けた時分割広帯域発光分光器の開発	繁政英治	分子科学研究所
24	単分子光電子回折計の整備	柳下 明	高エネルギー
			加速器研究機構
95	XFELによるX線共鳴ラマンXAFS法の可能性とこれを用いた吸着種構	胡合注言	北海道十冯
25	造の時間分解直接観察	朝居佰尚	北御旭人子

表2 SACLA装置提案課題一覧

保存する。ユーザーが実験をコントロールするために必要 な、実験機器制御用、オンラインデータモニター用、デー タ保存の開始停止用等、各種GUIソフトウェアを作成し た。実験データ収集システムのソフトウェア・ハードウェ アの健全性監視を行い、異常時に音声警告を発するアラー ムシステムを作成し、障害箇所の特定と復旧を迅速に行う 体制を整えた。2011年10月から本システムを利用して供 用開始前の試験的な実験が開始された。10 Hzのビーム繰 り返しで最大9枚のMPCCDを利用した実験において、画 像データ保存機能を始め本システムが設計どおり機能して いることを確認した。実験ユーザーが必要とする機能の不 足や追加の要望に関しては、実験ユーザーと対話をしつつ 利便性向上と機能改善を進める予定である。

3-2-7. SACLA利用装置提案課題

SACLAの利用実験に用いられる装置は、文部科学省 「X線自由電子レーザー利用推進研究課題」(2006年度~ 2010年度)のもと整備が進められてきた。XFELは全く新 しい光源であるため、各利用装置について、供用運転に先 だって調整運転を行い適切なフィードバックを与えること は極めて重要である。このために、理研は、2010年度に 「SACLA利用装置提案課題」の公募を行った。国内の大 学・研究機関から多数の提案を頂き、外部審査委員会にて 書類選考、ヒアリングを行った結果、本公募・追加公募と 合わせて計25課題が採択、実施された(表2)。既存装置 の共用化・調整運転とあわせて、SACLA独自のサイエン スを開拓する新規装置の開発が行われた。

3-2-8. ユーザー供用

2012年3月からユーザー供用運転を開始した。2012A 期(2012年3月~7月)では25課題が採択されており、 その内訳はX線回折イメージング:13件、ポンプ・プロ ーブ実験:7件、X線非線形・AMO:5件である。各実 験において、壽壱号、MAXIC、汎用回折計等の共用実験 装置に加え、ユーザー持ち込みの装置も組み合わせて、柔 軟に実験セットアップを構築できるよう支援を行ってい る。更に、ユーザーの要望に応え、新しい利用手法を開拓 するために、実験ステーション整備、実験技術の開発を進 める予定である。

> ビームライン研究開発グループ ビームライン開発チーム 大伏 雄一