

SPring-8 における XFEL/EUV-FEL ビームライン

矢橋牧名¹, 初井宇記¹, 富樫格¹, 玉作賢治¹, 永園充¹, 東谷篤志¹,
工藤統吾^{1,2}, 木村洋昭^{1,2}, 大橋治彦^{1,2}, 後藤俊治^{1,2}, 高橋直^{1,2}, 田中義人¹,
富澤宏光^{1,2}, 田中隆次¹, 原徹¹, 田中均¹, 渡川和晃¹, 石川哲也¹

¹理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

²財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

要旨 SPring-8 における FEL ビームラインについて報告する。XFEL ビームラインは、2011年の供用開始に向けて建設整備が進められている。ビームライン配置、光学系、データ収集システム、2次元検出器、同期レーザーについて、設計・開発の現状を紹介する。SCSS 試験加速器において EUV-FEL ビームラインの整備が行われ、2008年5月より利用運転が開始された。

1. 概要

1.1 はじめに

レントゲンによる X 線管の発明から一世紀余、X 線に関わる研究は大きく発展し、自然科学研究において欠かせないものになっている。この進展の一翼を担ってきたのが、X 線光源の劇的な進化である。特に、放射光の登場を端緒として、アンジュレータの導入、低エミッタンスリングの普及といった大きなジャンプが幾度かあり、その度に新しい利用研究の発展をみた。本稿の主題となる X 線自由電子レーザー (XFEL) の登場は、X 線の発明以来の最大級のジャンプの一つとして位置づけられよう。しかも、その歴史的瞬間は目前に迫っている。

XFEL は、従来のリング型の放射光源と異なり、ライナック (線形加速器) 型の放射光源である。最大の特徴は、そのコヒーレントな放射機構にある¹⁾。すなわち、リング型放射光を含む従来の X 線光源においては、個々の電子からのインコヒーレントな放射の足し合わせに過ぎないため、全放射強度は電子数に対してリニアにしか増加しない。これに対し、XFEL では異なる電子からの放射の間にも位相の相関があり、強度は非線形に増大する。この結果、(1)従来光源を 9 桁も上回る非常に高いピーク輝度が達成されるとともに、(2)空間的にフルコヒーレントな X 線束が得られる。さらに、XFEL 発振のために電子バンチは時間方向に圧縮され、(3)100フェムト秒を切るような超短パルスが生成される。これらを総合すると、XFEL は際立つパルス性を有する超高輝度コヒーレント光源であり、従来の放射光源というよりはむしろパルスレーザーに近い性質をもつといえよう。

本稿の目的は、SPring-8 における XFEL/EUV-FEL ビームラインの開発・整備状況を報告することにあるが、それに先立ち、第 1 章ではサイエンスとテクノロジー、世界の情勢を概観し、SPring-8 の XFEL プロジェクトを簡潔に紹介する。

1.2 サイエンスとテクノロジー

XFEL が切り拓くサイエンスについて、世界各国で検討が進められている^{2,3)}。ここでは、コヒーレンス、極短パルス、超高輝度という光特性に対応した、典型的な応用例を三つ紹介する。第一は、非秩序系試料に対する構造解析 (より正確には電子密度分布の決定) である。すなわち、結晶構造をもたない単粒子に対してコヒーレントな XFEL を照射し、X 線 2 次元検出器により逆空間上のスペックルを取得する。パルス毎に得られる多量のデータセットに対して、高速計算機を用いて統計操作と反復的位相回復を行い、最終的に実空間像を得る。この場合の空間分解能は、プローブ光の波長で制約を受けるが、XFEL の利用によりオングストロームオーダーまで到達することが原理的に可能である。従来の X 線結晶構造解析では計測不可能であった、結晶構造をとらない生体高分子、オルガネラ、新奇ナノ材料など、極めて多彩な試料が解析の対象となるであろう。また、電子顕微鏡では計測困難とされてきたミクロンオーダー以上の比較的大きな試料をターゲットとすることもできる。第二の例は、化学反応や相転移における原子スケールダイナミクスの実時間追跡である。主にフェムト秒レーザーに代表される超高速励起源と同期をとった実験が想定されている。最近の電子バンチ圧縮技術の向上により、XFEL のパルス幅は当初に想定された数

百フェムト秒より大幅に短縮され、数フェムト秒に達する可能性も見えてきている。第三の例は、強光子場による新たな状態や物質相の創成である。コヒーレント光源である XFEL をナノメートルオーダーまで集光することで、 10^{23} W/cm² というペタワットレーザーを超えるような非常に高い電場強度を生成することが可能となる。将来は、真空から電子・ポジトロン対生成が起こる Schwinger limit (10^{29} W/cm²) と呼ばれる領域も視野に入ってくると期待される。量子電磁力学や核物理を含むファンダメンタルな科学に新たな知見がもたらされるであろう。

このようなサイエンスに対応して、ビームライン、実験ステーション、データ解析システム、シミュレーション等に関わる様々なテクノロジーの新規開発が求められている。上述の例に限っても、集光素子を含むコヒーレント X 線光学素子、2 次元検出器、高速計算機、フェムト秒同期レーザーといったキーワードを含む。また、パルスに同期したサンプル制御も必要となる。さらに、XFEL はパルス毎に異なる光特性をもっている。特に、現在主流となっている自己増幅自発放射 (Self-Amplified Spontaneous Emission, SASE) 方式では、カオティックな自発放射を種光として用いているため、エネルギースペクトル、時間スペクトルのショット毎の揺らぎが原理的に不可避である。また、ポンプ・プローブ実験の場合は、トリガー信号に対する XFEL パルスの到来時間のジッターも問題となりうる。したがって、パルス毎に実験データと光特性を並行して取得し、両者を突き合わせる必要があり、このためのシステム構築を行わなければならない (第 3 章参照)。

1.3 世界の情勢

XFEL の建設プロジェクトは、アメリカ (SLAC・LCLS 計画⁴⁾)、ヨーロッパ (DESY・European XFEL 計画³⁾)、日本 (SPring-8・XFEL 計画) の世界三箇所で行われている。ここでは、まず欧米の計画を概観する。アメリカ・LCLS 計画では、既存の 2 マイル線形加速器の一部を利用して建設コストと工期を圧縮することで、世界初の XFEL 施設の完成を目指している。2008 年の加速器のコミッショニング (既に完了) に引き続き、2009 年からアンジュレータ・ビームラインのコミッショニングを開始し、2009 年秋に軟 X 線 FEL、2010 年秋に硬 X 線 FEL の利用実験を開始する予定である。ビームライン・実験ステーションの整備も、LUSI (LCLS Ultrafast Science Instruments) プロジェクトを軸とする国内外のコラボレーションにより急ピッチで進んでいる。これに対し、ドイツ・DESY における European XFEL は、全長 3 km を超えるトンネル工事から着手し、建設コストの総額も 10 億ユーロ超という極めて大がかりなプロジェクトであり、利用開始の予定時期も 2013 年以降と 3 者の中では最も遅い。しかしながら、このタイムラグを補うような形で、EUV・軟 X 線領域の FEL 施設 (FLASH) が 2005 年から稼働し

ており、AMO (Atomic, Molecular & Optical Sciences) やイメージングの分野で続々と成果を出している。また、DESY、マックスプランク研究所 (MPI)、Hamburg 大学は共同で CFEL (Center for Free-Electron Laser Science) を設立し、FEL 利用の研究拠点づくりを目指している。

このように、欧米は予算・マンパワーを集中的に投入して XFEL 装置を建設しているが、規模があまりに大きいため装置の量産は困難であり、ビームタイムの絶対量の不足が危惧されている。特に、既存のリング型の放射光と違い、ライナック型の XFEL は原理的にシングルユーザーマシンであることに注意しなければならない。この問題に対処するために、欧米では、旧来の高エネルギー物理学実験の枠組みにならない、大規模なコラボレーションにより利用実験を進めようとしている。しかしながら、光科学は多様な分野を包含している。ビームタイムの寡占により、発見的な利用の機会が失われるとすると極めて深刻な問題である。

1.4 日本のプロジェクト

本質的な問題解決のためには、XFEL 装置のダウンサイジングが必須である。建設コスト削減・工期短縮のメリットに加えて、安定運転・保守も格段に容易となろう。最近、新規の XFEL プロジェクトがいくつか計画されているが、その中でもダウンサイジング・コスト評価は重要な検討項目となっている。日本の XFEL プロジェクトは、世界に先駆けて、この「コンパクト XFEL」の実現を第一目標として掲げた⁵⁻⁷⁾。基本戦略は、真空封止・短周期長アンジュレータの活用により、電子ビームの加速エネルギーを抑制しながら (EB=8 GeV)、オングストローム領域の短波長 FEL を実現することである。さらに、通常の加速管の 2 倍近い加速勾配をもつ C バンド加速器の利用により、装置を一段と短縮する (約 700 m)。欧米の施設 ($E_B=14\sim 18$ GeV、全長 2 km 以上) と比べて大幅なダウンサイジングを図ることが可能となる。

しかしながら、低エネルギー XFEL においては、特に電子銃・入射器に対して高い性能が求められる。この要請は、電子ビームの実効的なエミッタンスがエネルギーに反比例して減少するという基本物理に基づいている。このために、CeB₆ 単結晶を用いた熱電子銃⁸⁾と多段階のバンチ圧縮システムが開発され、コンパクトな装置にも関わらず、欧米に比肩する高い光源性能の達成が (超伝導加速器を配する E-XFEL の繰り返しレートを除いて) 可能となった (第 2 章参照)。

この XFEL 建設プロジェクトは、SPring-8 サイトにおいて理研と JASRI の合同チーム (XFEL 計画合同推進本部) が進めており (Fig. 1)、国の第 3 期科学技術基本計画の中で国家基幹技術の一つに指定されている。建屋工事を含む装置の建設は 2006 年度から 5 年間にわたる。特に、アンジュレータを含むビームライン部については、2008



Fig. 1 Aerial view of SPring-8 campus.

年度から2010年度の3年間で整備を行う。建設完了後、ビームコミッショニングを経て、2011年度後半に供用開始を予定している。

また、コンパクト XFEL 加速器システムの実証試験のために、2005年、XFEL 実機の32分の1の加速エネルギー ($E_B=250$ MeV) をもつプロトタイプ SCSS 試験加速器を建設し、試験運転を進めてきた。2006年の EUV 領域 (波長51 nm) のレーザー増幅の観測に続き、2007年秋にはレーザー出力の飽和を達成し⁹⁾、所期の目的はほぼ達成された。引き続き、XFEL に実際に設置される加速器コンポーネントの試験とともに、理研エクストリームフォトンクス研究グループ (緑川克美リーダー) と協力して、シード方式の FEL¹⁰⁾ の R&D を進め、早期に利用実験に提供することを目指している。現行の SASE 方式が自発光のショットノイズを反映した多モード光源であるのに対し、シード方式はシングルモード光の生成を可能とし、エネルギー・時間の2つのドメインにおける極限計測への道を拓くものである。近い将来のポスト SASE-XFEL においても極めて重要な技術と位置づけられている。

さらに、このプロトタイプ機は、加速器開発のみならず、XFEL 利用の R&D の場としても利用価値が極めて高い。このために、2007年より EUV-FEL ビームラインの建設・整備を開始し、2008年から利用実験を開始した。公募に基づき、既に10を超える国内外の研究グループが実験を展開しており、具体的な成果も見え始めてきている¹¹⁾ (第4章参照)。

1.5 本稿の構成

次章以降では、合同推進本部利用グループが中心となって進めている XFEL/EUV-FEL ビームラインの開発整備状況について報告を行う。XFEL 施設には、5本のビームラインが設置可能であるが (Fig. 2)、2010年度までの建設計画では、硬 X 線領域の FEL ビームラインと、より長波長側の広帯域ビームラインの整備が行われる予定である。本稿では、前者に的を絞って報告する。第2章では、光源性能をまとめる。これは、6次元位相空間における電子

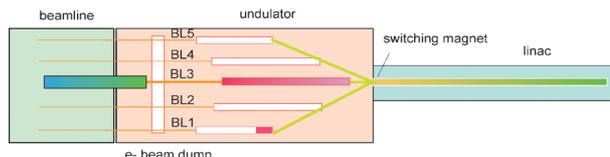


Fig. 2 Schematic configuration of SPring8 XFEL facility.

ビーム分布のシミュレーションと、FEL 放射特性のシミュレーションコード (SIMPLEX¹²⁾) を組み合わせて計算されたものである。第3章では、XFEL ビームライン・基盤技術として、光学系・診断系、データ収集システム、2次元検出器、同期レーザーを紹介する。第4章では、SCSS 試験加速器における EUV-FEL ビームラインの整備状況とともに、利用運転の現状について報告を行う。尚、第2・3章の詳細については、利用グループが取り組んだ「XFELビームラインデザインレポート」¹³⁾にも示されているので、合わせて参照されたい。

また、XFEL 利用実験装置に関しては、文科省のプロジェクトである「X線自由電子レーザー利用推進研究課題」(2006~2010年度)を軸として開発研究が行われている。紙面の都合上、本稿では詳細を紹介することはできないが、施設側システムとこれらの実験システムが相互補完的になることが極めて重要である。そのため、利用グループでは、方針の枠組を議論する定期的な会合 (XFEL 利用ワークショップ)、詳細を詰める小規模ミーティング等を開催している。XFEL の利用にご興味のある方は、我々までぜひご一報いただきたい¹⁴⁾。

2. 光源性能

XFEL は、高輝度、高エネルギーの電子ビームをアンジュレータ内で蛇行させることにより放射パワーの増幅を行うものであり、電子ビームとアンジュレータのパラメータが光特性を決定する。Table 1にこれらのパラメータをまとめる。Table 1には、大きなパルスエネルギーを得るためにバンチ長を長めにとったパラメータセットが示されているが、バンチ圧縮率を大きくしてさらなる短パルス化を図ることもできる。これは、多段バンチ圧縮法に基づく本入射器システムの利点である。また、主加速器としてチヨークモードのCバンド加速管を使用することで、マルチバンチ運転 (4 ns 間隔で最大40パルストレイン) も可能となっている。

Table 2に XFEL の光特性をまとめる。上記の電子ビームパラメータを用い、K 値を2.2としてシミュレーションコード SIMPLEX¹²⁾によって求めた。Fig. 3には、K 値を変えた場合の光子エネルギーと光強度の相関を示す。K 値とは、アンジュレータ内のビーム軌道の偏向角を表すパラメータで、アンジュレータギャップを調整することで変

Table 1 Parameters of electron beam and undulator

Electron beam	
Beam energy (GeV)	8
Peak current (kA)	4.4
Slice emittance (π mm.mrad)	0.77
Slice energy spread	7.1×10^{-5}
Total charge (nC)	0.29
Bunch width (fs, FWHM)	55
Beam size at ID exit (μ m, rms)	35
Repetition rate (Hz)	60 (max) to 1 (min)
Undulator	
Periodic length, λ_U (mm)	18
Segment length (m)	5
Number of segment	18
Maximum deflection parameter, K	2.3
Average betatron function β_x/β_y (m)	25/25

Table 2 FEL radiation parameters at $K=2.2$ (for fundamental radiation)

FEL parameter	4.4×10^{-4}
Radiation wavelength (nm)	0.13
Photon energy (keV)	9.9
Bandwidth	9.2×10^{-4}
Source size (μ m, rms)	33
Angular divergence (μ rad, rms)	0.73
Beam size@sample position (μ m, rms, 100 m from ID exit)	80
Peak power (GW)	29
Pulse energy (mJ/pls)	0.78
Photons per pulse (phs/pls)	5.0×10^{11}
Pulse width (fs, FWHM)	30
Repetition rate (Hz)	60 (max) to 1 (min)
Power ratio of higher-order harmonic (2nd:1st)	1.3×10^{-4}
Power ratio of higher-order harmonic (3rd:1st)	2.8×10^{-3}

更できる。K 値を2.2から1.1まで変えることで、光子エネルギーを10から20 keV 超まで走査できる。この光子エネルギー（波長）の走査は、電子ビームのエネルギーの変更によっても原理的には可能であるが、加速器パラメータの大きな変更を伴うため短時間での切替は難しい。アンジュレータによる波長走査は、固定ギャップアンジュレータを採用した LCLS にはみられない大きな特徴であり、分光

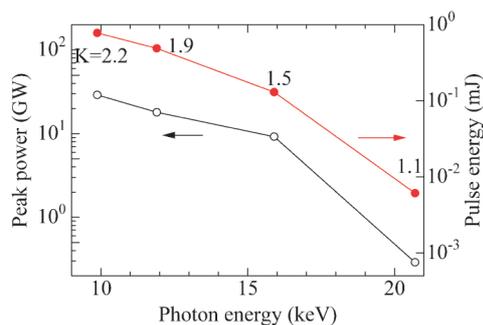


Fig. 3 Peak power and pulse energy as a function of photon energy. The corresponding K -parameters are shown in the graph.

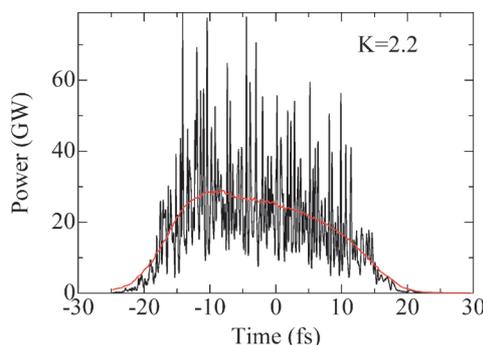


Fig. 4 Time spectrum at $K=2.2$. The red line shows a guide line after smoothing.

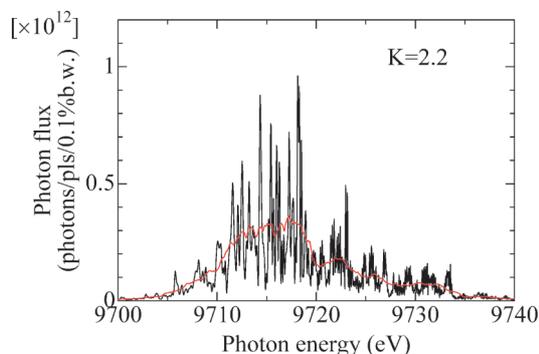


Fig. 5 Energy spectrum at $K=2.2$. The red line shows a guide line after smoothing.

研究を中心に多大な貢献が期待される。

続いて、**Figs. 4** と **5** に、エネルギースペクトル、時間スペクトルを示す。スペクトル中の微細構造は、自発光のショットノイズを反映したものであり、パルス毎に異なることに注意する必要がある。**Fig. 4** に示すように、XFEL のパルス幅は30 fs (FWHM) 程度と見積もられている。この値は、**Table 1** に示す電子ビームのパンチ長 (50 fs) よりも短くなっている。この理由は、通常の放射光と異なり、XFEL の強度は電子数と非線形の関係にあるため、パンチの尖頭がより強調されるということに基づいている。

これらは全て $E_B = 8$ GeV として算出しているが、ビー

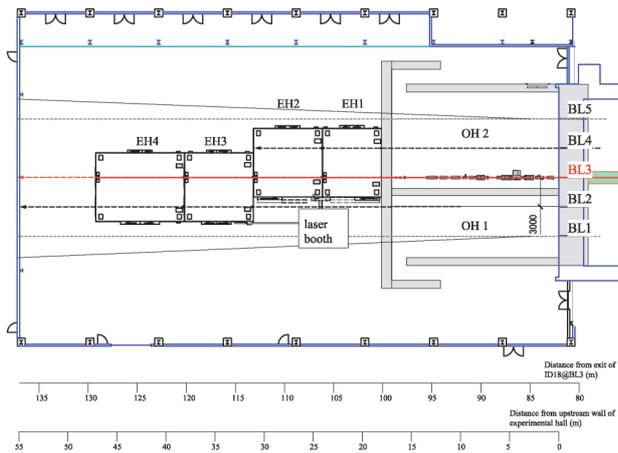


Fig. 6 Configuration of beamline in the Experimental Hall. OH: Optics Hatch, EH: Experimental Hatch.

ムエネルギーを下げることで、長波長側へのアプローチも可能である。

3. XFEL ビームラインと基盤技術

3.1 構成

XFEL ビームラインは、フロントエンド、光学系・輸送系、光学ハッチ・実験ハッチといった要素から構成される (Fig. 6)。このうち、フロントエンドは光源収納部内に設置され、コリメータにより不要なハローを取り除く。それ以外の部分は、実験ホール内に配置される。光学系・輸送系は、光学ハッチ内に設置され、実験にとって障害となるオン軸のガンマ線を除去するとともに、XFEL の加工・診断を行い、実験装置に導く。光学ハッチ (OH1, OH2) は、ガンマ線・中性子線の遮蔽のためにコンクリート壁を遮蔽壁として用いている。さらに、実験装置を収納するために4つの実験ハッチ (EH1~4) が建設される。隣接ビームラインとの間隔が3mと狭いため、光学ハッチ・実験ハッチとも、複数のビームラインを収納するように設計された。特に、実験ハッチについては、BL2~4にまたがった形となっており、当初は4つのハッチ全てがBL3用として供されるが、BL2・4の建設後は、それぞれのビームラインに振分けられる予定である。また、BL1・5は軟X線・EUVといった長波長領域が想定されており (理由: 設置可能なアンジュレータ長が短いため)、実験ハッチを設けていない。

3.2 光学系

光学系の最大の目的は、光軸上のガンマ線とXFEL (X線) を分離して、後者のみを下流の実験装置に導くことにある。本ビームラインでは、広く用いられている二結晶分光器 (Si111バンド幅: 0.01%) に加えて、高調波成分のカットのみを行う全反射平面ミラー (2枚1組) を使用す

Table 3 Parameters of main optics

	Mirror 1&2a	Mirror 1&2b	Double-crystal monochromator
Incident angle	4 mrad	2 mrad	3.7° ~30°
Photon energy range	~< 9 keV with SiC	~< 18 keV with SiC	4~30 keV with Si 111
Bandwidth	—	—	0.01% with Si 111
Length of optics along optical axis	400 mm	400 mm	100 mm
Spatial acceptance	1.6 mm	0.8 mm	> 6.4 mm

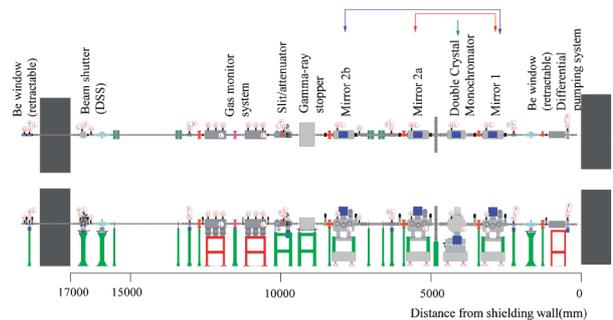


Fig. 7 Layout of beamline components. Main optical components are indicated as the blue line for high-energy double mirror, the red line for low-energy double mirror, and the green line for DCM, respectively.

る (Table 3)。二結晶分光器は、波長を精密に定める目的に用いるが、入射XFELのスペクトル幅は0.1%程度であるため (第2章参照) 分光後は1桁程度の光量損失を伴う。一方、平面ミラーは、大強度を必要とする実験に適している。異なるカットオフエネルギーに対応して2セット用意する。二結晶分光器と平面ミラーを排他的に用いることで、光学系・波長範囲に関わらず出射ビームの位置を一定に保つ「定位置出射」を実現する。光学系を含む全体構成を Fig. 7 に示す。4 keV 以下の低エネルギー利用時に真空隔壁 (ベリリウム窓) を光軸から退避できるように、ビームライン上下流に差動排気システムを配置している。また、後のアップグレード対応も考慮に入れ、全体に余裕をもった配置とした。

XFEL の光学素子は、二つの条件を満足する必要がある。第一に課される条件は、コヒーレント照明下でスペックルを生じないための高い品質である。基本光学素子については、2001年以降 SPring-8 の 1 km ビームラインで R&D が進められ、既に目標はクリアされている。すなわち、全反射ミラーは、阪大山内教授のグループが中心となり開発した EEM 加工・超平坦ミラー (形状誤差 p-v 2 nm 以下) を利用する^{15,16)}。また、ベリリウム窓は、JASRI・理研が開発したポイドフリーの PVD ベリリウム箔を使用する¹⁷⁾。

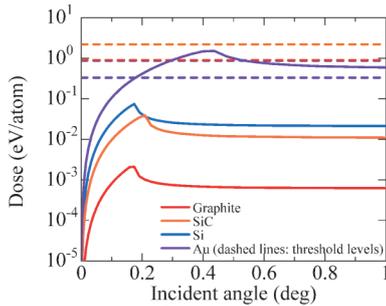


Fig. 8 Dose vs. incident angle. Dashed lines are melting threshold levels of each materials. Photon energy: $h\nu = 10$ keV, distance from undulator exit: 100 m. Threshold levels for graphite and silicon are overlapped in this graph.

第二の条件として、大強度 XFEL の照射により光学素子が劣化・損傷してはならない。XFEL の場合、平均的な熱負荷は小さいが（シングルパンチ運転時 1 W 以下）、単パルス照射による素子のダメージが懸念されている。簡便な見積もりとして、Fig. 8 にカーボン、シリコン、金といった材質について、XFEL 照射下で光電吸収に伴って賦与されるドーズ（1 原子あたりの吸収エネルギー）を結合エネルギーと比較した。横軸は入射角を示す。吸収が少ない軽元素の場合、ドーズは結合エネルギーに比べて十分小さく保たれているが、重元素に対しては前者が上回り、メルティング・アブレーションといった素子の劣化につながる恐れがある。また、角度依存性をみると、全反射の臨界角付近が最もドーズが高くなっているが、これは表面近傍の原子層に光吸収が集中することによる。この考察を踏まえ、ミラーのコーティング材質としては SiC、 α -C 等の軽元素系の材料を当初の候補と考えているが、実際の耐性について現時点では実験的な確証が得られていない。したがって、XFEL 完成後に速やかに照射テストを行い、基準を決定する必要がある。

これらの光学素子の駆動機構について、特に以下の二点に留意して設計を進めている。第一に、XFEL はサブマイクロラジアンという極めて小さい発散角を有しているため、角度安定性の確保が重要である。第二に、素子表面のコンタミネーションが照射損傷を促進させることがないように、真空容器を超高真空環境に保つ。上記の二条件は、特に二結晶分光器については大きな問題であり、2007 年度より議論を重ねてきた。基本方針として、駆動機構の軸数を可能な限り減らし、ストロークも小さくすることで、クリーンかつ精密・安定なメカニズムの実現を目指す。詳しい報告は別途行いたい。

3.3 診断系

XFEL の放射特性（強度、プロファイル、スペクトル等）をパルス毎に診断するための各種装置の開発整備を進めている。強度（パルスエネルギー）については、PVD

ベリリウム箔やガスからの X 線散乱をフォトダイオードで検出する。複数のフォトダイオードを用いることにより重心検出への拡張も可能である。ビームプロファイルの計測のためには、照射耐性の高い CVD ダイヤモンド¹⁸⁾の利用を考えている。また、スペクトル計測は、理研・JASRI が中心となって開発したスペクトロメータを利用する¹⁹⁾。これは、光学素子により平行光を発散光に変換した後、平板の完全結晶で分散を与えるもので、格子面を切り替えることで分解能・測定レンジを広い範囲で調整することが可能である。これらの特性診断を利用実験と並行して行うためには、非破壊検出が望ましい。このために、ビームの一部を分割して診断系に導くことが有効であり、シリコン薄板等を用いたビームスプリッタの開発を進めている。

光学系・診断系は、利用実験のみならず、ビームコミッションにおいても非常に重要である。特に、アンジュレータ内の電子ビームと光の軌道のオーバーラップをマイクロラジアンオーダーで調整することと、セグメント間の K 値の偏差を 0.01% オーダーに抑制することが求められる⁵⁾。推進本部では、加速器・光源・ビームラインが一体となり、これらの超精密調整のシナリオの検討を行っている。

3.4 実験データ収集 (DAQ)

SASE-XFEL ではパルス毎に特性が変動する。SASE-XFEL の光源特性を有効に利用するには、X 線パルス個々について、強度・位置・時間ジッター・波長分布・パルス時間幅などの情報（以下パルス情報）を非破壊的に測定したうえで試料に照射し、得られるデータと X 線パルスの特性の相関を考慮した解析を行うことが望まれる。従ってエンドステーションの実験についても、施設側のデータ収集 (DAQ) システムの利用を基本的な実験形態として整備していきたいと考えている。このため、データを収集するシステムの構築に当たっては、ユーザーコミュニティの理解を得ながら進めていく。

パルス毎にデータを取得する実験手法は高エネルギー物理実験では一般的であり、大規模実験用の種々の技術が開発されている。しかし実験の性格が異なるため、同じものを借用するだけでは不十分である。主な違いは、(1)データの圧縮可能性、(2)オンライン解析、(3)実験の多様性、の 3 つである。(1)については、高エネルギー物理実験では、稀な物理過程を探索するのが目的なので、不必要な既知の過程に由来する実験データを予め排除して有用なデータのみを選択的に非可逆圧縮して保存することが行われている。また、それぞれの情報は、どれだけの遅延時間でどの位置の検出器がヒットしたか、といった 1 次元データが主である。一方 XFEL 利用実験の多くでは 2 次元の画像全体が有用なデータとなるため、XFEL の検出器は小規模であるにもかかわらず、少なくとも毎秒 GByte オーダーの

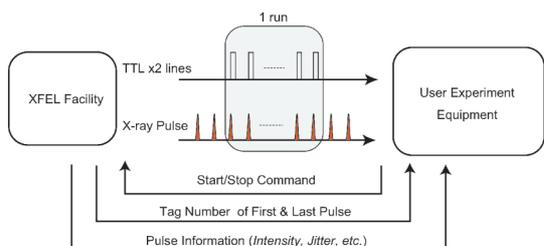
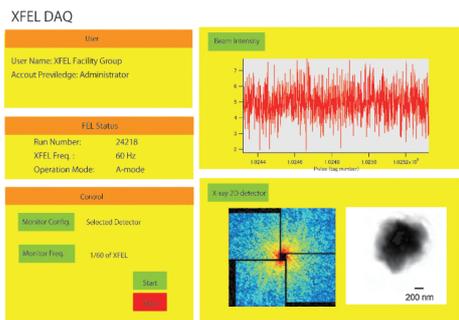


Fig. 9 Conceptual sketch of DAQ GUI window (top), and tag delivery scheme by a tag generator.

データが生み出される。そこで、それらを効率よく可逆圧縮して保存することが求められる。(2)については、コヒーレント X 線散乱顕微鏡などでは、実験中に相当程度の計算能力を必要とするオンライン解析を行ってデータの質を確認することが望ましい。随時解析を行って効率よく実験を遂行できるシステム構築を行う必要がある。また、高度な計算能力が必要な場合は外部のスーパーコンピューターをビームタイム中に利用できる環境整備が必要になる可能性が高い。(3)については、XFEL は未踏の光科学領域であるため、様々な新しい実験方法に挑戦し、その可能性を追求することが求められる。従って堅牢な実験システムであると同時に、試験的な研究であっても、実験システムの構築を容易に行える柔軟な方法を選択する必要がある。

Fig. 9 にデータ収集システムのユーザーインターフェースの概念図を示した。多くの実験で使用されると考えられている X 線 2 次元検出器などの施設側で整備・開発する検出器は、この DAQ システムによって実験を行っていたことを考えている。また、ユーザー持ち込み機器もこの DAQ システムに接続できるよう整備を行う。

ユーザーが機器を持ち込む場合に重要となるのは、それぞれのパルスに番号 (タグ) 付けをする方法である。施設側で提供するパルス情報データと、ユーザー実験で利用する測定機器が同一のタグ番号で整理する必要がある。なるべく多くの機器が施設側の DAQ システムに接続できるように、タグ付けを容易に行えるシステムの構築が求められる。

そこで我々は、Fig. 9 に示すタグ配布方法を採用することにした。ここでは、それぞれの測定ランの間、X 線パルスに同期した TTL 信号をユーザー側に送信する。ユーザーは、この測定ランのタグ番号のうち、最初の番号と最後の番号を、ソケット通信を介して施設側から受け取る。

ユーザー実験の測定機器は、TTL パルスを数え上げ、タグ番号を計算しながらデータを保存する。測定ランが終了後、ユーザー実験測定器が計算した最後のタグ番号と、施設側で保持している最後のタグ番号を比べて、タグ番号に間違いがなかったかどうかを検証する。TTL 信号は 2 系統準備し、それぞれ X 線パルスに対しての遅延時間または先行時間を予め設定しておくことができる。TTL の 1 系統をカメラの露光開始シグナルに、もう 1 系統を露光終了シグナルとして用いるなどの使用方法が想定されている。施設側でソケット通信のプログラムサポートを行う。これにより市販の装置を含む多くの測定機器が接続可能となる。ユーザー測定機器としては、数え落としのない装置とすることが前提となる。

3.5 X 線 2 次元検出器

XFEL はピーク輝度・空間コヒーレンス・超短パルスが飛躍的に向上するものの、平均光子数は第 3 世代光源の高輝度ビームラインと比べると同程度にとどまる。従ってその性能を十分に引き出すにはパルスごとのデータを漏らすことなく取得できる高性能な検出器が求められる。XFEL 利用実験の特徴を検出器の観点から概観すると、下記の 2 点が重要である。

- (条件 1) パルスごとにデータを取得しなければならない。
- (条件 2) パルスあたりの光子数が約 6 桁強くなった。これに伴い、検出器に到達するピクセルあたりの光子数の飛躍的増大に対応しなければならない (従来はパルスあたり 1 光子程度であった)。

条件 1 は、実機の繰り返し周波数最大 60 Hz に同期して 60 fps (frame per second) の撮像速度で動作することを要求する。さらに前のフレームの信号が次のフレームに残像として観測されてしまうことを避けるため、残像を実効的に無視できるセンサーが要求される。

条件 2 によって、計数型でなく蓄積型の検出器が必要となる。これまで放射光施設では蛍光体と CCD 検出器を組み合わせた 2 次元検出器が広く用いられてきた。しかし、コヒーレント X 線回折顕微鏡実験などでは、1 光子レベルの検出感度が必要になるので、半導体検出器の開発が求められる。半導体検出器では、フォトダイオード中で X 線が吸収され、電子・ホールペアを多数生成する。電子・ホールはフォトダイオード中で分離し、一般に検出素子内でいずれかを電圧に変換する。電圧信号は Analogue-to-digital converter (ADC) によってデジタル情報に変換し読み出される。条件 1 を満たすためには、読み出し過程を速くする必要があるが、そのまま高速化してもノイズの増大を招くだけであり得策ではない。そこで、並列で読

み出すことにより、全体の速度を向上させるのが一般的である。

尚、条件2に関しては、シリコンの半導体検出器の場合の検出可能な最大信号強度がまだよく分かっていない。10⁵のX線光子が1画素50×50×50 μm³に平均的に吸収されたと仮定すると、キャリア濃度は2.2×10¹² e/cm³となるが、これは通常の10 kΩ cmの高抵抗シリコン基板のドーピング濃度と同程度である。このことから、空乏層中の電場がX線によって生成したキャリアによって遮蔽され、電極側に集まらず熱拡散して像がぼやけてしまう(Point Spread Functionが入射X線強度に依存する)。この効果はcharge explosionなどと呼ばれている。これを避けるためには、ドーピング濃度よりもX線によって発生したキャリアの濃度が十分低い、すなわち単位面積当たりのX線光子数が少ないことが求められるが、どの程度までが現実的な条件なのかについては現在活発な研究が行われている。charge explosion効果は、厚いフォトダイオードで生成キャリアのドリフト距離が長い場合に顕著である。従ってX線自由電子レーザー用の検出器の場合、量子効率と最大信号強度を同時に向上させるのは技術的に難しいことが予想される。最も簡単な解決方法はピクセルサイズを大きくすることであるが、コストの増大を招くことが懸念される。

また一般に、直接検出型の半導体検出器では放射線耐性が悪い。1年間の使用に耐えられることを必須の条件と考えると、50%程度のユーザーが利用すると仮定して4×10¹¹ ph./pixel以上の耐性が必要と見積られる。さらに、コヒーレントX線回折顕微鏡実験で1パルスだけで画像を取得するためには不感領域を3ピクセル以下にす

ることが必要と考えられている。

既存の検出器でこれらの要求を満たすものはない。また市販の検出素子も存在しない。そこで、新たに検出素子、駆動・読出回路を開発する必要がある。開発に当たっては、60 fpsの撮像速度と1光子検出能力、X線照射耐性4×10¹¹ ph/pixel以上を必須仕様、検出可能な最大信号強度(Full Well Capacity)を優先度の高い仕様項目とし、システムを選択を行う。また、検出素子を複数並べた検出器とし、様々な検出器サイズに対応できるようにすることが望ましい。

これらの要求にこたえるため、XFEL完成時に確実に動作することを目標とするシステム(安定システム)と、新しい技術開発を導入し、より高性能の検出器を実現するシステム(先進システム)とに区別し開発を行っている。

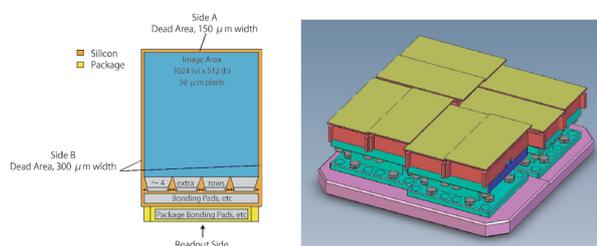


Fig. 10 Schematic sensor format of multi-port charge-coupled devices (MP-CCDs) with 8 readout nodes (left), and a tiled detector with stepped array of 8 devices with total pixel number of 4k×4k (right). Each readout node operating 5 M pixel/sec readout rate enables synchronization to the XFEL repetition rate of 60 pps. The tiled detector has a through hole at the center, of which the size can be controlled remotely.

Table 4 Target Performance of multi-port charge coupled device (MP-CCD) detector

Parameter	Target Value	Units	Comments
Pixel size	50×50 100×100	μm ²	in 2×2 binning mode
Operating Temperature	0~-50°C	°C	
Detection Efficiency	80 20	%	6 keV x-rays 12 keV x-rays
System Noise	<0.2 <330	photons e ⁻	for 6 keV x-rays
Full Well Capacity	5 3100 20 12400	Me ⁻ /pixel photons/pixel Me ⁻ /pixel photons/pixel	for 6 keV x-rays in unbinned mode for 6 keV x-rays in 2×2 binning mode
Frame Rate	> 60	Hz	
Dead area width	<300	μm	3 effective pixels in 2×2 binning mode
Tiling Capability	3-side buttable	N/A	
Radiation Hardness	4×10 ¹¹	photons/pixel	for 12 keV x-ray

Table 4 及び Fig. 10 に安定システムとして開発する Multi-Port Charge-Coupled Devices (MP-CCDs) 検出器の仕様と目標性能を示す。高エネルギー X 線に対する検出効率は悪いが、これは charge explosion 効果为了避免のために比較的薄い $50 \mu\text{m}$ の高抵抗エピタキシャル層を採用したため、分子科学研究所の協力を受けて開発をおこなっている。先進システムとしては、検出効率、最大検出信号量を改善できる可能性を持つ Silicon-on-insulator (SOI) センサーの開発を高エネルギー加速器研究機構と共同で進めている。

3.6 XFEL 同期フェムト秒レーザーシステム

XFEL の短パルス性を生かした利用実験として、フェムト秒レーザーパルスと組み合わせたポンプ・プローブ法による時間分解計測が計画されている。ポンプ・プローブ法は、強力なポンプ光により変化（励起）した状態を、プローブ光の遅延時間を変化させて観測することで、光励起過程におけるダイナミクスを計測する方法であり、その原理的な時間分解能は互いのパルス幅のみで決まる。レーザーパルスをポンプ光、XFEL からの X 線パルスをプローブ光とし、X 線回折、吸収分光法などで、光励起状態の電子、原子、構造の情報を得ることができる。また、XFEL の高強度 X 線パルスをポンプ光とし、X 線照射下での可視～赤外域における光学応答計測も可能である。

フェムト秒レーザーとしては、いくつかの方式が考えられるが、ここでは、広く用いられているチタンサファイヤレーザーベースのシステムについて紹介する。XFEL に同期したモード同期オシレータからのレーザーパルス列を元に、チャープパルス増幅器 (Chirped pulse amplifier: CPA) で数 mJ 程度まで高出力化を行う。更に、CPA 出力の一部を光パラメトリック増幅器 (Optical parametric amplifier: OPA) の励起光として用いる。OPA は、光パラメトリック効果により、励起光より長い波長の光を発生し、連続的に波長を走査することができる。発生した OPA パルスの 2 倍波及び励起光との和周波・差周波などにより、赤外～紫外光の波長可変パルス光を発生させることが可能である。これら CPA 出力及び OPA 出力をそれぞれ実験装置に導き、実験目的に応じた特性をもつレーザーパルスを提供する。モード同期オシレータから出力されるパルス列の繰り返し周波数は、共振器長に比例するため、加速器を駆動する RF 信号に対して、モード同期オシレータの共振器長をフィードバック制御することで同期をとることができる。XFEL 同期レーザーシステムのダイアグラムを Fig. 11 に示す。

レーザーパルス及び XFEL のパルス幅は共に $10 \sim 100$ fs 程度であるため、 100 fs 程度の時間分解能が原理的には得られる。しかしながら、2 つのパルス間隔のタイミングジッターを 100 fs 以下に抑えることは技術的に困難であり、実効的な時間分解能が悪化する恐れがある。このため

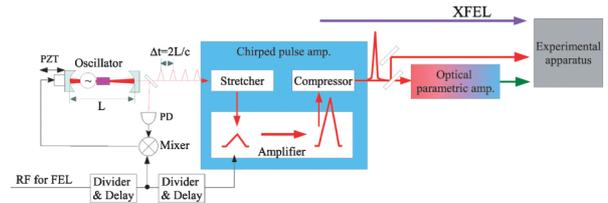


Fig. 11 Schematic diagram of the synchronized laser system for pump-probe experiments.

に、実験と並行してショット毎にタイミングジッターを計測し、実験終了後にジッター情報も用いて解析を行う「ポストプロセス」という方式が提案されている。タイミングジッター計測として、電気光学効果^{20,21)}、半導体を用いた過渡反射²²⁾、希ガスによる 2 光子相互作用²³⁾などを利用した方法が報告されている。第一の方法は、電子バンチから発生する電場とレーザーパルスとの、電気光学素子中における相互作用を利用する。FEL に対しては非破壊の計測であるが、計測場所が実験ハッチから遠方に位置する加速器収納部内となるため、レーザーを安定に輸送するために注意が必要である。一方で、後者の 2 つの方式は、実験装置近傍で計測を行うことが可能であるが、ジッター計測に用いた FEL パルスを実験に用いることは困難である (破壊型計測)。ポストプロセスを実現するためには、予め FEL パルスを分岐して、一方をジッター計測、他方を実験に用いるという仕掛けが必要である。

4. EUV-FEL ビームライン

SCSS 試験加速器においては、2005 年の建設以来、加速器システム・コンポーネントの R&D が行われてきた。2007 年秋には所期の目的であるレーザー出力の飽和を達成した。現在得られている EUV-FEL の光特性を Table 5 にまとめる。波長 $50 \sim 61$ nm の領域において、強度変動が rms 10% 以下の安定した出力を得ている。最大繰り返しは現在 20 Hz となっているが、実機と同様に最大 60 Hz まで可能な設計となっており、このためのスタディが継続されている。また、エネルギースペクトルを Fig. 12 に示す。SASE 方式に起因したショットごとのスペクトルの変動が観測されている。実験にあたっては注意が必要である。

加速器 R&D と並行して、推進本部利用グループでは、EUV-FEL を利用するための環境構築を進めてきた。2006 年度には加速器収納部の下流に「EUV レーザー実験棟」($9 \text{ m} \times 14 \text{ m}$) を建設した。2007 年度には加速器収納部から EUV レーザー実験棟への輸送系ビームラインを整備し、さらに実験棟内ビームラインの建設整備も開始した。実験棟内ビームライン配置の計画図を Fig. 13 に示す。ビームライン上流側には収納部から続くブランチ B、下流側には 4 つのブランチ D, E, F, G を整備する。実験

Table 5 Radiation properties of EUV-FEL at a beam energy of $E_B = 250$ MeV (for fundamental radiation)

Radiation wavelength at saturation condition (nm)	50~61
Photon energy at saturation condition (eV)	20~25
Bandwidth	~1e-2
Source size (μm , rms)	~90
Angular divergence (μrad , rms)	~90
Unfocused beam size@sample position (mm, rms, 27 m from ID exit)	~3
Pulse energy at sample ($\mu\text{J}/\text{pls}$)	~10
Photons per pulse (phs/pls)	~3e12
Intensity fluctuation (%)	<10
Pulse width (fs, FWHM)	~100
Polarization	Horizontally linear
Repetition rate (Hz)	20 (max) to 1 (min) (Design max.: 60)
Power ratio of higher-order harmonic (2nd:1st)	~1e-3
Power ratio of higher-order harmonic (3rd:1st)	~1e-2

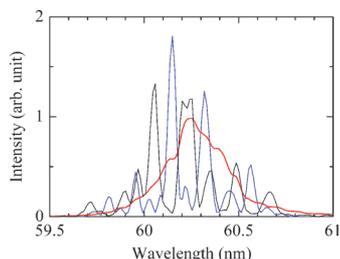


Fig. 12 Spectra of EUV-FEL. The blue and black lines show independent single-shot spectra, while the red line corresponds to an average profile over 100-shots.

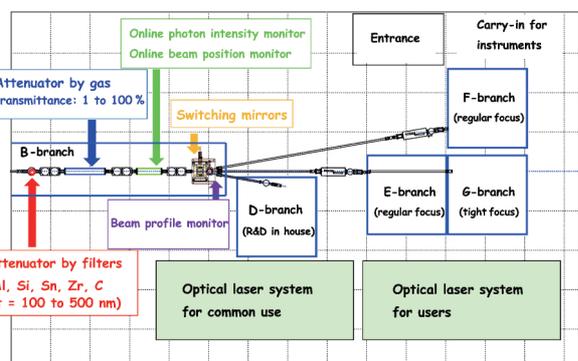


Fig. 13 Layout of EUV-FEL beamline.

棟内のブランチ B は、施設側の共通基盤機器（プロファイルモニター、光量調整用アッテネーター、パルス制御シ

ャッター、透過型光強度モニター、透過型光位置モニター、分岐チャンバー）を配置する。ブランチ D, E, F, G は、ユーザー利用実験を行うために、ブランチ D は非集光、ブランチ E と F は汎用集光システム（集光径 $\sim 10 \mu\text{m}$ ）、ブランチ G は究極集光システム（集光径 $\sim 1 \mu\text{m}$ ）を整備する予定である。さらに、実験棟内には、FEL と同期した光学レーザーシステムを整備し、またユーザーのレーザーを持ち込めるスペースも設ける。2009年1月現在、ブランチ B, D の大部分について整備を完了し、ブランチ E 及びレーザーシステムの整備を急ピッチで進めているところである。

利用研究は、2007年10月から2008年3月にかけて、文科省 XFEL 利用推進研究課題の2グループ（研究代表者：東大・山内薫教授、東北大・上田潔教授）により、試行実験の形で開始された。この期間中、大きなトラブルなく安定して EUV-FEL が供給されたことを確認した。さらに、これらの実験から SCSS 試験加速器の利用研究における初の成果も得られた¹¹⁾。これを受けて、推進本部では2008年1月~2月にかけて課題公募を行い、5月より本格的な利用実験を開始した。2008年度は3期に分けて公募が行われ、総計25研究課題（XFEL 利用推進課題17課題、一般利用8課題）が採択された。一般課題の中には、フランス、ドイツ等海外からの課題も採択されている。2009年度も同様な課題公募を行っていく予定である。ご興味のある方は利用グループまで是非ご連絡いただきたい¹⁴⁾。

5. おわりに

本稿では、XFEL ビームラインのデザインを中心に述べたが、実験ステーションを中心としてまだ手が回っていない部分は山積している。我々には全く見えていない部分もあるに違いない。さらに、XFEL は、単に強力な X 線の発生装置にとどまらず、既存のサイエンスを融合・発展させ、新しい研究を創造する場としての役割が期待されている。実際に、レーザー科学や大規模シミュレーションをはじめとした様々な先端分野とのコラボレーションが最近急速に進んでいる。また、諸外国との競争・協調も一層大規模になってきた。このような従来の観念が通用しない混沌とした状況を切り抜けていくためには、プロジェクトの内部に若い力がどうしても必要である。万人に推奨される道ではないが、未踏の荒野を開拓するチャンスもそうあるものではない。本稿が、その一歩への一助となることを期待する。

XFEL ビームラインの設計・開発にあたっては、推進本部の安全設計グループ（浅野芳裕グループディレクター）及び制御系建設グループ（田中良太郎グループディレクター）から全面的なサポートを頂いている。また、熊谷教孝副本部長、北村英男グループディレクター、新竹積

ループディレクターを始めとするプロジェクトのメンバーにも日夜励ましを頂いている。さらに、JASRI 光源・光学系部門からも多大なるご指導・ご協力を頂いている。改めて感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) E. L. Saldin, E. A. Schneidmiller and M. V. Yurkov: The Physics of Free Electron Lasers (Springer, Berlin, 1999).
- 2) LCLS The First Experiments, SLAC-R611 (Stanford, 2000).
- 3) M. Altarelli, et al. (Eds): XFEL: The European X-Ray Free-Electron Laser, Technical Design Report. Preprint DESY 2006-097, (DESY Hamburg, 2006).
- 4) J. Arthur, J. et al.: Linac Coherent Light Source (LCLS) Conceptual Design Report, SLAC-R593 (Stanford, 2002).
- 5) T. Shintake, H. Matsumoto, T. Ishikawa and H. Kitamura: SPring-8 Compact SASE Source (SCSS). Proc. SPIE 4500, 12-23 (2001).
- 6) 北村英男, 新竹 積, 石川哲也: 放射光 **16**, 65 (2003).
- 7) T. Tanaka and T. Shintake (Eds): SCSS X-FEL Conceptual Design Report, (RIKEN Harima Institute, Hyogo, Japan, 2005).
- 8) K. Togawa et al.: Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, 020703 (2007).
- 9) T. Shintake et al.: Nat. Photon. **2**, 555 (2008).
- 10) G. Lambert et al: Nat. Phys. **4**, 296 (2008).
- 11) T. Sato et al: Appl. Phys. Lett. **92**, 154103 (2008).
- 12) T. Tanaka: Proc. FEL 2004, 435-438 (2004); <http://radiant.harima.riken.go.jp/simplex/index.html>.
- 13) 矢橋牧名, 石川哲也編: XFEL/SPring-8 Beamline Technical Design Report Ver. 1.0, 理研・JASRI 合同推進本部利用グループ (2008).
- 14) 利用グループ事務局 xfeluser@spring8.or.jp; 利用グループホームページ <http://xfeluser.riken.jp/>; 合同推進本部ホームページ <http://www.riken.jp/XFEL/jpn/index.html>
- 15) Y. Mori et al.: Proc. SPIE 4501, 30 (2001).
- 16) H. Mimura et al.: Rev. Sci. Instrum. **79**, 083104 (2008).
- 17) S. Goto et al.: AIP Conf. Proc. CP879, 1057 (2007).
- 18) T. Kudo et al.: Rev. Sci. Instrum. **77**, 123105 (2006).
- 19) M. Yabashi et al: Phys. Rev. Lett. **97**, 084802 (2006).
- 20) G. Berden et al: Phys. Rev. Lett. **93**, 114802 (2004).
- 21) A. L. Cavalieri et al: Phys. Rev. Lett. **94**, 114801 (2005).
- 22) C. Gahl et al: Nature Photon. **2**, 165 (2008).
- 23) S. Cunovic et al: App. Phys. Lett. **90**, 121112 (2007).

● 著者紹介 ●

矢橋牧名

理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部 利用グループ ビームライン建設チーム チームリーダー
E-mail: yabashi@spring8.or.jp

専門: X 線光学

【略歴】

1996年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻, 2003年博士(工学), 1996年財団法人高輝度光科学研究センター, 2007年理化学研究所研究員を経て, 2008年4月より現職。

初井宇記

理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部 利用グループ データ処理系開発チーム チームリーダー
E-mail: hatsui@spring8.or.jp

専門: X 線分光学

【略歴】

1996年京都大学工学研究科・分子工学専攻修士課程修了, 1999年総合研究大学院大学数物科学研究科博士課程修了(博士(理学)), 東京大学理学部化学科・ウブサラ大学物理学科博士研究員, 2000年分子科学研究所助手(助教), 2007年高輝度光科学研究センター研究員を経て, 2008年4月より現職。

富樫 格

理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部 利用グループ ビームライン建設チーム 研究員
E-mail: tadashit@spring8.or.jp

専門: 量子エレクトロニクス, 非線形光学, 光物性

【略歴】

1996年東京理科大学大学院理学研究科物理学専攻, 1998年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻, 2001年博士(工学), 2001年理化学研究所基礎科学特別研究員, 2004年鈾理化学研究所研究員, 2008年4月より現職。

玉作賢治

理化学研究所 播磨研究所 放射光科学総合研究センター 専任研究員

理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部 利用グループ ビームライン建設チーム 研究員

E-mail: tamasaku@riken.jp

専門: X 線光学

【略歴】

1996年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了。博士(工学)。1996年4月より現職。

永園 充

理研 X 線自由電子レーザー計画推進本部 利用グループ SCSS 試験加速器利用チーム チームリーダー

E-mail: nagasono@spring8.or.jp

専門: 軟 X 線分光, 分子科学, 表面科学

【略歴】

1993年横浜国立大学大学院工学系研究科物質工学専攻博士課程前期修了, 1997年総合研究大学院大学論文博士(理学), 1993年分子科学研究所研究技官, 1999年スウェーデン放射光施設 MAX-lab 博士研究員, 2001年日本学術振興会特別研究員(PD), 2002年京都大学大学院工学研究科助手, 2004年ハンブルク大学実験物理学研究所上級研究員, 2007年理化学研究所研究員を経て, 2008年4月より現職。

● 著者紹介 ●

東谷篤志

理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部 利用グループ ビームライン建設チーム 研究員

E-mail: codbello@spring8.or.jp

専門：固体物理

【略歴】

2004年大阪大学大学院基礎工学研究科物性物理専攻修了，博士（工学），2004年理化学研究所 研究員，2007年自由電子レーザー計画推進本部 加速器建設グループ 研究員を経て，2008年4月より現職。

工藤統吾

高輝度光科学研究センター 制御情報部門 副主幹研究員
理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部 利用グループ データ処理系開発チーム 研究員

E-mail: kudo@spring8.or.jp

専門：放射光科学における基盤技術開発，エレクトロニクス，放射光ビームモニター

【略歴】

1989年筑波大学大学院修士課程医科学研究科医科学専攻，2008年博士（工学），1989年住友製薬株式会社，1992年ソジ電子株式会社，1996年財団法人高輝度光科学研究センター，2007年5月より理研 X 線自由電子レーザー計画推進本部兼務。

木村洋昭

高輝度光科学研究センター 光源・光学系部門 主幹研究員
理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部 加速器建設グループ 建設チーム 研究員

E-mail: kimura@spring8.or.jp

専門：軟 X 線光学，加速器土木，加速器・ビームラインアライメント

【略歴】

1993年総合研究大学院大学数物科学研究科放射光科学専攻修士課程修了，博士（理学）。同年理化学研究所 SR 研究協力員，1995年から勸高輝度光科学研究センター。2008年4月より理研 X 線自由電子レーザー計画推進本部加速器建設グループ建設チームを兼務。

大橋治彦

高輝度光科学研究センター 光源・光学系部門 光学系グループ グループリーダー

理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部 利用グループ ビームライン建設チーム 研究員

E-mail: hohashi@spring8.or.jp

専門：放射光ビームライン工学

【略歴】

1992年豊橋技術科学大学システム情報工学専攻単位修得済退学，1992年分子科学研究所，1996年総合研究大学院大学・構造分子科学専攻 博士（理学），1996年 財団法人高輝度光科学研究センター，2007年8月より現職。

後藤俊治

高輝度光科学研究センター 光源・光学系部門長
理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部 利用グループ ビームライン建設チーム 研究員

E-mail: sgoto@spring8.or.jp

専門：X 線光学

【略歴】

1986年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士課程修了，2000年博士（工学），1986年株式会社富士通研究所，1995年財団法人高輝度光科学研究センター研究員，2007年より現職，2007年より理化学研究所兼務。

高橋 直

高輝度光科学研究センター 光源・光学系部門 フロントエンドチーム チームリーダー

理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部 加速器建設グループ 建設チーム 研究員

E-mail: takahasi@spring8.or.jp

専門：放射光ビームライン工学

【略歴】

1985年名古屋大学大学院工学系研究科化学工学専攻修士課程修了，1985年株式会社神戸製鋼所，1998年財団法人高輝度光科学研究センター，2001年より現職，2008年より理化学研究所兼務。

田中義人

理化学研究所 播磨研究所 放射光科学総合研究センター 基盤研究部 物質系放射光利用システム開発ユニット ユニットリーダー

理研 X 線自由電子レーザー計画推進本部 利用グループ ビームライン建設チーム 研究員

E-mail: yatanaka@riken.jp

専門：レーザー・放射光を用いた高速時間分解測定

【略歴】

1991年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻修士課程中退，1992年博士（理学），1991年理化学研究所，1997年理化学研究所・播磨研究所研究員を経て，2009年1月より現職。

富澤宏光

高輝度光科学研究センター 加速器部門 高品質ビームチーム 副主幹研究員

理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部 利用グループ ビームライン建設チーム 研究員

E-mail: hiro@spring8.or.jp

専門：レーザー工学，プラズマ化学反応，加速器科学（重イオン加速器，光陰極電子源）

【略歴】

1996年東京工業大学理工学部原子核工学科修士課程修了，同年6月よりミュンヘン工科大学物理学部博士候補生（ドイツ学術振興会 DAAD 奨学生），2000年3月モスクワ光学研究所（IOFAN）短期外来研究員，博士号取得，同年4月より現職，2003年より勸放射線医学総合研究所 客員協力研究員，2007年より理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部 利用グループ 兼任。

● 著者紹介 ●

田中隆次

理化学研究所 播磨研究所 放射光科学総合研究センター 専任研究員

理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部 加速器建設グループ 光源チーム チームリーダー

E-mail: ztanaka@spring8.or.jp

専門：挿入光源

【略歴】

1996年京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻修了，同年博士（工学），1996年財団法人高輝度光科学研究センター，1999年理化学研究所研究員を経て，2007年2月より現職。

原 徹

理化学研究所 播磨研究所 放射光科学総合研究センター 専任研究員

理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部 加速器建設グループ 電磁石チーム チームリーダー

E-mail: toru@spring-8.or.jp

専門：電子加速器，挿入光源

【略歴】

1995年パリ第11大学博士課程修了，理学博士。理化学研究所入所後 SPring-8 挿入光源の開発に従事し，最近は X線自由電子レーザーの建設に参加，現在に至る。

田中 均

理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部 SCSS 試験加速器運転グループ グループディレクター

理化学研究所 加速器建設グループ オプティクスチーム チームリーダー

E-mail: tanaka@spring8.or.jp

専門：加速器物理

【略歴】

1982年東京工業大学総合理工学研究科化学環境工学専攻修了，1999年博士（原子核工学），1989年特殊法人理化学研究所サイクロトロン研究室，1999年財団法人高輝度光科学研究センター加速器部門 副主席研究員，2005年同部門 主席研究員を経て，2006年4月より現職。

渡川和晃

理化学研究所 播磨研究所 放射光科学総合研究センター 先任研究員

理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部 加速器建設グループ オプティクスチーム 研究員

E-mail: togawa@spring8.or.jp

専門：加速器科学

【略歴】

1998年名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 博士（理学）取得，1998年日本学術振興会特別研究員，2001年より理化学研究所研究員

石川哲也

理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部 推進統括役

理化学研究所 播磨研究所 放射光科学総合研究センター センター長

E-mail: ishikawa@spring8.or.jp

専門：X線干渉光学

【略歴】

1977年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻，1982年博士（工学），1983年高エネルギー物理学研究所助手，1989年東京大学工学部物理工学科助教授，1996年理化学研究所主任研究員を経て，2006年10月より現職。

XFEL/EUV-FEL beamlines at SPring-8

Makina YABASHI¹, Takaki HATSUI¹, Tadashi TOGASHI¹, Kenji TAMASAKU¹, Mitsuru NAGASONO¹, Atsushi HIGASHIYA¹, Togo KUDO^{1,2}, Hiroaki KIMURA^{1,2}, Haruhiko OHASHI^{1,2}, Shunji GOTO^{1,2}, Sunao TAKAHASHI^{1,2}, Yoshihito TANAKA¹, Hiromitsu TOMIZAWA^{1,2}, Takashi TANAKA¹, Toru HARA¹, Hitoshi TANAKA¹, Kazuaki TOGAWA¹ and Tetsuya ISHIKAWA¹

¹RIKEN, XFEL Project Head Office, Kouto 1-1-1, Sayo, Hyogo 679-5148

²JASRI, Kouto 1-1-1, Sayo, Hyogo 679-5198

Abstract We report on the present status of FEL beamlines at SPring-8. An XFEL beamline is under construction towards the launch of user operation scheduled in 2011. Plans for a beamline configuration, an optical scheme, a data acquisition system, 2-D detectors, and a synchronized laser system are described. For EUV-FEL utilization, a beamline was constructed at the SCSS test accelerator. User operation started in May, 2008.
