



## 7. ビームコミッショニング・光源性能

田中 均, 原 徹, 渡川和晃, 田中隆次, 矢橋牧名

独立行政法人理化学研究所 播磨研究所 放射光科学総合研究センター XFEL 研究開発部門

〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

**要 旨** 世界初のコンパクト X 線自由電子レーザー SACLA のビームコミッショニングの概要と得られたレーザー性能を紹介する。特に、ビームコミッショニング時、性能を実現する上で解決を迫られた 3 つの問題に関し詳細に説明する。

### 7.1 はじめに

この記事では、加速器に詳しくない放射光学会会員を対象に、世界初のコンパクト自由電子レーザーという超精密巨大システムに、どのように「命を吹き込んでいったのか」を分かりやすく解説し、その結果として現状得られたレーザー性能をまとめて示すものである。

ビームコミッショニングとは、ある意味、1 つの科学プロジェクトである。決められた時間内で、お金やマンパワー等が制限された境界条件のもと、どのように成果を最大化し目標を達成するかは、ある意味、通常のグループ型研究プロジェクトと共通する点があるだろう。すべての研究型プロジェクトでは、多かれ少なかれ未踏の領域を取り扱う。そこに足を踏み入れ、目標を達成するには、用意周到な計画はもちろんのこと、多くの人がプロジェクトの大方針を理解した上で、協調的な仕事を行い、必ず発生する不測の事態を強力なリーダーシップのもとで解決していくというプロセスを経る。本記事では、SACLA におけるコミッショニング過程を学会会員にこのような視点で感じてもらいたいと考え、どのような戦略を立てたのかを冒頭の 7.2 で述べ、次にそれが実際どう機能したのかをコミッショニングの経過とともに 7.3 で示す。7.3 の後半では、数多くおこった問題の中から 3 つの大きなものを選び、解決に至る詳細なストーリーを示す。最後に 7.4 でこのようなプロセスを通して得られたレーザー性能をまとめ今後の展望を述べる。

### 7.2 ビームコミッショニングの基本戦略

SACLA は真空封止アンジュレータ<sup>1)</sup>の短周期性を活かし、低エネルギーの電子ビームで X 線を生成する世界初のコンパクト X 線自由電子レーザー<sup>2)</sup>施設である。SACLA ではシングルパスで高出力レーザーを生成するので、高いレーザー増幅利得を必要とするが、これには(1)高

輝度 (ピーク電流値  $> 3 \text{ kA}$ , 規格化エミッタンス  $< 1 \text{ } \mu\text{mm} \cdot \text{mrad}$ ) の電子ビームと(2)高精度で多周期 ( $\sim 5000$  周期) のアンジュレータ (レーザーの増幅器に対応) が必須である。規格化エミッタンスとは、電子が静止している状態に外挿した 2 次元横方向位相空間の面積に相当し、横方向空間での電子ビームのシャープさを表す指標である。

SACLA は低エネルギー (8 GeV) であるが故に、他の計画 (例えば LCLS の 14 GeV) に比べ、加速による電子ビームのエミッタンス縮小効果が小さく、目標とするレーザー生成には厳しい (より小さい) 規格化エミッタンスが要求される。これを実現するため、 $\text{CeB}_6$  単結晶カソードを用いた高印加電圧パルス熱電子銃が開発された<sup>3)</sup>。SACLA ではこの電子銃から引き出される 1 A, 500 keV の理想的円柱高品質電子ビームを、ビーム品質を維持した状態で 3 kA 以上まで高める必要がある。最終的には 3000 倍以上の時間方向への圧縮が必要になる訳だが、この値は他施設の数 100 倍に比べて 1 桁大きく、その実現には独自のスキームを開発する必要があった。また、圧縮は電子ビームの時間方向にエネルギー差をつけて行う (詳細は 7.3 を参照) ので、一般的には、圧縮比率に応じて高周波 (RF) 電場の電圧や位相の設定精度は厳しくなる。SACLA のベースとなる線形加速器では、時間の基準は加速される電子ビームである。電子ビームのタイミングは上流の RF 機器のパラメータ設定に依存するので、全てが従属関係となり、パラメータは加速器の上流からしか決定できない。上の説明から予想されるように、パルス的に使用する電子銃や RF 機器の安定性と再現性は、XFEL の高輝度電子ビームの安定性と再現性の要である。一方で、シングルパスで発振するために必要な 5000 周期のアンジュレーションは 1 台のアンジュレータでは実現できない。SACLA では 18 台のセグメントに分割されている。100 m を超えるアンジュレータラインに渡り、各セグメントでの増幅利得を効率的に積み上げるには、レーザーと電子ビームの位相を整合させ、各セグメントの磁場特性を合わせる

とともに、電子ビームをほぼ直線に通すことも必要になる。また、試験加速器の調整・運転を通して、この様に複雑な調整を迅速に遂行するには、実際の加速器を計算機上に再現し、加速器模型に基づく合理的なビーム及び機器の制御が重要であることも分かっていた。

SACLA のシステム特性と試験加速器での運転経験から、ビームコミッショニングにおける基本戦略を

- 調整を積み上げられる加速器の再現性と精密調整を可能とする加速器の安定性の確保,
- 3 kA 以上の高いピーク電流を可能にするパンチ（電子ビームの固まり）圧縮スキームの開発と圧縮後の電流分布計測システムの構築,
- 調整を効率的に進めるためのビーム制御系の構築,
- 必要な増幅利得を可能にする100 m に渡る18台のアンジュレータセグメントの精密調整の確立

の4つの柱とした。ビーム調整前に、この4つの課題がプロジェクトチーム内で十二分に検討・議論され、個々の担当者が実際のビーム調整への影響を理解した上で、装置設計並びに制御システムの見直しと改修を進めたこと、上流の加速器からアンジュレータ、下流のX線光学系や検出器までが早期のレーザー増幅を目指し、一体として準備と調整を進めたことが3ヶ月という超短期間でレーザー増幅を実現できた大きな要因の1つであることを始めに強調しておく。

### 7.3 ビームコミッショニングの経過

SACLA のビームコミッショニングは約4ヶ月に渡るRF機器の高出力コンディショニングを経て2011年2月21日から開始された。Fig. 1にビーム調整前に想定した調整スケジュールとマイルストーンを示す。ビーム調整は、電子ビームを最終ビームダンプまで加速し、システムの基本性能の確認を行う「初期調整」とレーザー増幅を目指した「精密調整」の2つの段階に分けられる。

初期調整で重要となる確認項目はa)主要構成機器がその設計性能を満たす、もしくは満たし得るか、b)機器及びビーム制御が基本的調整を効果的に行うレベルに達しているかの2点である。加速器上流から最終ダンプに向けて、それぞれのサブシステムでこれらの確認と必要な修正を行い、3月中のフルエネルギー加速達成とアンジュレータからの自発放射の確認を目標に初期調整は進められた。モジュレータ用インバータ電源のトラブルにより遅れていたRF機器のコンディショニングをカバーするため、加速器上流のビーム調整は、両立可能なRF機器のコンディショニングと同時並行で行った。電子銃の健全性を確認するため、500 kV で引き出された電子ビームの規格化エミッタンスを先ず計測し、ほぼ設計値の $1\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{mrad}$ を実測した。初期電子ビームの健全性を確認した後、SCSS 試験加速器で確立した手順に従い<sup>4)</sup>、ビームの初期条件の評価、

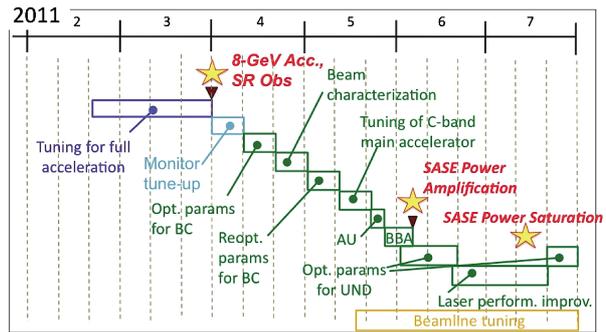
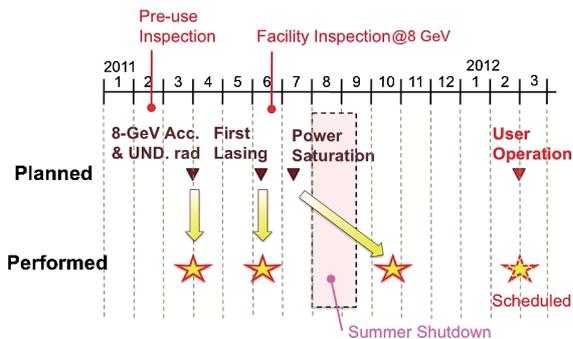


Fig. 1 Beam commissioning plan. The blue, cyan, green and orange squares represent rough beam tuning, monitor tune-up, precise beam tuning, and photon beamline tuning, respectively. The yellow stars represent the key milestones in the commissioning. BC, bunch compressor; AU, alignment using an alignment-undulator; BBA, beam-based alignment; UND, undulator.

238 MHz サブハーモニックパンチャー（SHB）の電圧校正とクレスト位相（正弦波で振動する加速電圧の最大値を与える位相）決定、476 MHz ブースター空洞の電圧校正とクレスト位相決定、波長計<sup>5)</sup>によるパンチアップ信号測定とビーム誘起信号によるクレスト位相決定の信頼性評価、磁気レンズの収束パラメータ設定と各部でのプロファイル確認等を行い第1圧縮器までの加速器パラメータの大まかな設定を実施した。S-band 加速システムは設計値である $-20$ 度（クレスト基準）に、第2パンチ圧縮器以降のC-band 加速システムは全てクレスト位相に設定しビームダンプへ加速電子ビームを射出する準備をほぼ1ヶ月で整えた。そして7.8 GeV まで加速された電子ビームを、3月23日にBL1の最終ビームダンプまで導いた後で、電子ビームの射出をBL1からBL3のビームダンプに切り替え、BL3に設置された18台のアンジュレータの1台、上流から16台目のアンジュレータギャップを5 mm まで閉め、自発光を発生させた。このX線を下流の光学ハッチの分光器システムに通し、スペクトルを計測し、 $0.8\text{ }\text{\AA}$  のX線が生成されていることを確認した。最後に18台のアンジュレータを所定のギャップまで閉じ放射を観測したが、この時点でレーザー増幅は観測できなかった。

初期調整では基本性能を速やかに確認するため、ビームを最短で最終ダンプまで射出することを目標に掲げ、スクリーンモニター等最小限の情報を使いラフな調整を行った。レーザー増幅を目指した精密調整では精度の高いより多くの情報が必要になるので、ビームポジションモニター（BPM）やオプティカル遷移放射（OTR）によるプロファイルモニター、電流モニター（CT）等が必要な精度で使用できるように電子ビームを用いた調整を最初に実施した。その後、Fig. 1に示すステップを踏みながら多段のパンチ圧縮プロセスの最適パラメータ設定を試みた。この調整では、3 kA 以上のピーク電流生成に向け、最上流からRF電場のパラメータを1つ1つ高精度で合わせ込んでい



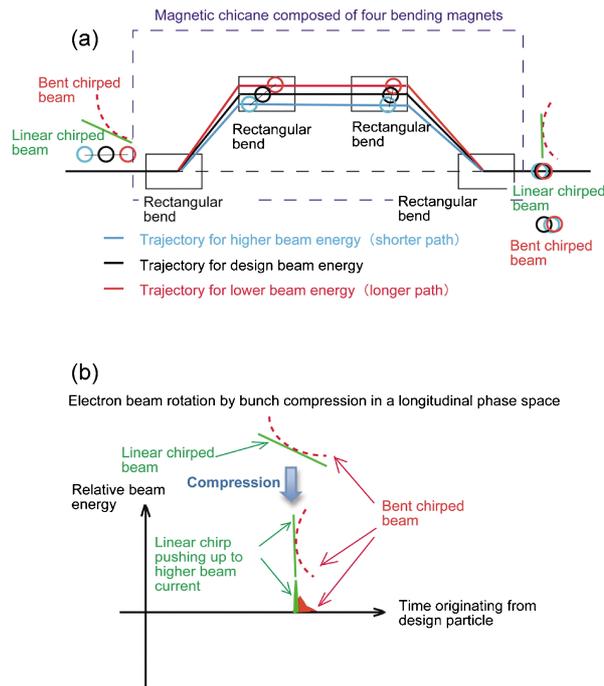
**Fig. 2** Comparison between the planned and performed beam commissioning schedules. The stars represent the key milestones in the commissioning.

くため、多数の RF 機器に正確なタイミングを分配するシステム、各 RF 機器の位相と振幅を分配されたタイミングに対し精密に固定するループの精度と再現性が問われることになる。大竹チームの作り上げたシステム<sup>6)</sup>は見事にこの性能を満たし、多段のバンチ圧縮器のパラメータを順次決定することができた。目標の 3 kA のピーク電流 (3000 倍の圧縮) は、圧縮後の電流分布計測のために開発された電子ビームストリークカメラ<sup>7)</sup>のデータを用い、開発したバンチ圧縮スキームの 2 種類の補正用 RF 機器の位相を微調整することで最終的には達成できた。アンジュレータラインへの電子ビームのエンベロップ整合や加速器に渡る電子ビームのエンベロップ設定には、模型ベースのビーム制御システムが威力を発揮した。5 月中旬には加速器の調整を一通り終え、アンジュレータの精密調整へとコマを進めた。電子ビームを用いたアンジュレータラインのアライメントで手間取ったものの、6 月 7 日には 1.2 Å でのレーザー増幅の初観測を達成、夏前までにレーザー増幅波長を 0.8 Å まで低減した。夏期長期停止以降は、レーザー出力の増大を目指して調整を進め、10 月には 1.2 Å にて 0.15 mJ/pulse, 2.3 Å にて 0.5 mJ/pulse を達成すると共に、レーザー増幅最短波長を 0.6 Å まで低減し、レーザー強度とレーザー波長に関し、ほぼ設計目標をクリアできた。

**Fig. 2** に計画したビーム調整と実際に行われた調整を時間軸上のマイルストーンにより比較して示す。レーザー強度を引き上げるのに若干手間取ったものの、SACLA のビーム調整は、概ね計画通りに進展したことが分かる。うまく進んだコミッショニングではあるが、予想外の事態にも数多く遭遇した。以下にコミッショニングの過程で特に問題となった事項をまとめて示す。

### 7.3.1 レーザー出力の増強

バンチ圧縮とは、**Fig. 3(a)** に示すように時間 (他の言い方では、進行方向位置) に依存したエネルギー変化 (これをエネルギーチャープと呼ぶ) をバンチに付け、電磁石シケインでのエネルギーに依存した行路差を利用し後方の電



**Fig. 3** Bunch compression by a magnetic chicane (a) electron beam rotation in a longitudinal phase space driven by bunch compression (b).

子と前方の電子との距離を詰め、時間方向にバンチを線形に (=電子バンチの位置によらず一様に) 縮め電子密度を高める操作である。この操作は、**Fig. 3(b)** に模式的に示されるように時間とエネルギーで構成される電子ビームの縦方向位相空間内での回転として捉えることができ、高い圧縮比を実現する状況は、縦方向位相空間内でバンチがほぼ直立することに相当する。この際、電子ビームのチャープが歪んでいると、図から明らかなように時間方向へ射影した電子ビーム密度、すなわちビーム電流が高くなるだけでなく、圧縮途中で電流値の局所ピークを持ち、電子ビーム質の劣化を招くことになる。

電子ビームの質を悪化させることなく 3000 倍を超える圧縮比を実現するため、初期の長い電子ビームパルスに電子ビーム圧縮最終過程を線形化する補正非線形チャープを付与し、多段の圧縮プロセスに渡り適切な過剰補正状態を維持しつつ、最終段階 (バンチが直立する付近) において、必要なバンチ圧縮の線形性を満たす新たな圧縮法<sup>8)</sup>を導入した。興味のある方は参考文献 [8] に詳細が書かれているのでそちらを見て頂きたい。ポイントは、位相空間での電子ビーム分布の傾きが緩い領域では、線形性への要求は甘く、分布が直立する付近で、高い線形性が必要になるということである。この圧縮法では 2 種類の補正器を用いるが、その内の圧縮プロセス後半の線形化を受け持つ補正加速管の位相が大幅に設計値からずれるという状況が発生した。これは初期設定の間違えとか、上流を調整した後で再調整を忘れた等、幾つかの原因が考えられた。問題は、

初期条件を大きく変えてパラメータを再調整しても、レーザー増幅をプローブとして使う限り同じ設定に戻ってきてしまい、レーザー出力が高くないという点である。レーザー出力が低くなる理由は、本来線形化を担う補正用のRF電磁場を部分的に圧縮のチャープとして用いる設定のため、3 kAを超えるピーク電流に寄与する電子ビームの時間幅（線形の範囲）が大きく制限されるためである。最適な圧縮には縦と横方向の両位相空間を圧縮プロセスに渡り制御する必要があるが、RF機器の位相は横方向の収束状態を変えるため、問題は複雑である。結局、夏期停止前は設計パラメータ付近での十分なレーザー増幅状態を実現することができなかった。そこでまず、レーザー増幅による安易なガイディングを排除するため、最終性能確認まで、レーザー増幅をプローブとして使用しないことにした。シミュレーションを信じ、上流から1段ずつRF機器のパラメータを設計値付近にとどめながらビームの軸出しと収束パラメータの最適化によるビームエンベロップ制御を繰り返し、射影エミッタンスを1~1.5  $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ の範囲に追い込む調整を粘り強く行った。それを最集段まで積み上げた結果、ローカルミニマムから抜け出すことができ、ついに目標のsub-mJ/pulseの高い出力が達成できた。

### 7.3.2 コヒーレントオプティカル遷移放射 (COTR) の克服

SACLAでは、電子ビームプロファイルを金属薄膜からの可視光遷移放射を利用して計測することが計画されていた。ところが、2番目のバンチ圧縮器でバンチを圧縮後（ビーム電流は~1 kA, 圧縮率~1000倍）、密度変調起源のCOTRが発生し、ビームプロファイルの計測ができない状況に陥った。ビームプロファイル計測ができなければ、バンチ圧縮や電子ビームの横方向エンベロップ制御等の精密調整は不可能である。SCSS試験加速器の運転では、COTR現象は1度も観測されたことがなかったため、LCLSで問題となっていたこの現象<sup>9)</sup>が、SACLAでは発生しないと私達は信じ込んでいた。全く予想外の展開ではあったが、この問題を解決しなくては前に進めない。そこでまずは電子ビームの圧縮条件等、加速器のパラメータを色々変え、可視域コヒーレント放射の抑制に努めた。しかし、最終的には適当な運転条件を見いだすことができなかった。そこで、分解能は低下するがOTRスクリーンを放射が広い発散角を有する蛍光で観測できるCe:YAGスクリーンに置き換え、発散角が小さいコヒーレント放射をストッパーで取り除き、ビームプロファイル情報を反映した蛍光のみを集めてCCD上に結像する光学系を急遽導入することとした。様々な問題はあったものの、この方式は最終的に機能し、最も重要なピーク電流評価、さらには圧縮後の電子ビームの射影エミッタンスの評価等、精密調整に最低限必要な計測が秋の調整の中盤には十分な精度で実施可能になった。Fig. 4に、OTRによる正常なビームプロ

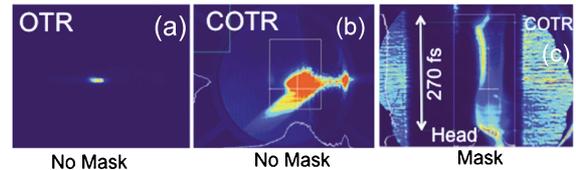


Fig. 4 Beam profiles observed by means of OTR monitors and a fluorescence monitor having a spatial mask. The normal profile by OTR (a), the false profile by superposition of COTR and OTR (b), and the perpendicularly streaked normal profile by fluorescence from a Ce:YAG screen with a spatial mask stopping COTR (c).

ファイル(a), COTRで大きく歪んだビームプロファイル(b), 空間マスク等を設置し蛍光だけを結像する光学系で計測した電子ビームのストリーク画像(c)を示す。Fig. 4(c)の両サイドの画像はチェンバー等で散乱したCOTRのバックグラウンドを示し、中央の縦長（上方）と水平方向に伸びた細長の三角形（下方）の2つのプロファイルがマスクの外側を通過した蛍光による実際の電子ビームのストリーク画像である。COTRはマスクに当たるので、基本的にこの領域に結像されることはない。この圧縮状態では電子ビームは時間方向に2つに分かれた構造をしており、最適化された状態でないことが分かる。

### 7.3.3 長尺アンジュレータラインの精密調整

SASE型自由電子レーザーの増幅部となるアンジュレータは、シングルパスでの増幅利得飽和を実現するため高い性能が要求される。これは簡単に言うと以下のように表現できる。SACLAの場合100 mを超えるアンジュレータラインは18台のアンジュレータセグメントから構成されている。1つのセグメントはアンジュレータ、移相器、水平・垂直ダイポール補正器ペア、ビーム位置モニター(BPM)及び4極電磁石(QM)からできている。この18台のセグメントが、あたかも1つの長いアンジュレータとして機能するように、各アンジュレータ磁場を高い精度で合わせ、アンジュレータ間の位相をレーザー場に対し整合し、全てのコンポーネントを精密にアライメントする（途中でキックを受け軌道が曲がらないため）必要がある。この目標に向かい、全作業は3つの段階に分けられた。第1段階は、ビーム調整前の準備である。18台のアンジュレータはホールに設置後、その場でSAFALIシステム<sup>10)</sup>により磁場分布が最終計測され、周期磁場の位相誤差補正等が実施された。同様に移相器も、磁場測定データからレーザーと電子ビームの位相同期条件が予め算出された。これらの情報はビーム調整時の初期条件設定に用いられた。第2段階は、100 mを超えるアンジュレータラインの精密アライメントである。これは、レーザートラッカー<sup>11)</sup>を用いた3次元位置測量に基づくアライメントから開始し、振り分け電磁石上流部に設置したアライメントアンジュレータのX線を用いた光学アライメント（予想精

度数 $10\ \mu\text{m}$ )<sup>12)</sup>, 電子ビームを用いたビームベースドアライメント (BBA)<sup>13)</sup>を組み合わせることで,  $100\ \text{m}$ を超えるアンジュレータラインの電子ビーム軌道の直線からのずれを $\pm 4\ \mu\text{m}$ 以下とする基準ビーム軌道を設定するという方針である。第2段階までの手順に, アンジュレータの高さを微調整することでレーザー増幅が得られると予想されたので, レーザー並びに自発放射の特性をプローブに, K値とそのテーパー (上流からアンジュレータ毎にK値を徐々に低減する) 及び移相器のパラメータの精密調整を実施し<sup>14)</sup>, レーザー性能を目標値まで引き上げることを計画した。

しかし, 実際は想定通りには進まなかった。アライメントアンジュレータを用いたアライメントは, ターゲットのピンホールを参照X線に対し,  $20\ \mu\text{m}$ の精度で並べることができたものの, ピンホールとアライメント対象機器との相対位置情報 (事前に計測して準備しておくべきデータ) の精度不足で活用できなかった。この原因は事前の相対位置計測を大気中で行ったことに起因していると考えられている。このため, BBAは3次元位置測量に基づくアライメントを初期条件とした。上流からの逐次BPMと4極電磁石の磁場中心をアライメントする操作は収束し, BPMベースで4 GeVと7 GeVの電子ビーム軌道を $\pm 4\ \mu\text{m}$ で一致させることができた。この基準軌道をベースに上流からアンジュレータギャップを閉め, 下流光学ハッチに設置された2次元CCD検出器で光軸の確認を実施したところ角度にして $10\ \mu\text{rad}$ 程度の光軸ズレが観測された。理由は現在調査中であるが, BPMで決めた参照軌道と自発放射の光軸を整合させることは, この時点では困難となった<sup>15)</sup>。

そこで, アンジュレータからの自発放射の光軸を $100\ \text{m}$ 以上下流に位置するMPCCD<sup>16)</sup>のターゲット (1ピクセルが $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ ) に合わせることで電子ビーム軌道を直線にガイドするという方針変更を行った。自発放射を用いる方が, BPMを用いるよりはより直接的で, 精度が高いと判断した訳である。この方式では自発放射のピーク波長を二結晶分光器で切り出しガイド光として用いるので, BBAに先立ち, 各アンジュレータのギャップとK値の精密相関計測, 並びに補正テーブルの作成を実施した。Fig. 5に単色化された自発放射をMPCCDで観測したプロファイルを示す。実施したBBAでは, 光学ハッチ内のMPCCD上にターゲット点 (ピクセルで定義) を設定し, アンジュレータラインへの電子ビーム入射条件の設定を行った後, 最上流のアンジュレータセグメントからビームライン出口に向かって以下の手順を繰り返し実施した。

- アンジュレータの高さ調整 (X線使用)
- 上流のステアリングによるアンジュレータの光軸調整 (X線使用)
- アンジュレータ下流の4極電磁石の軸出し (電子ビーム使用)

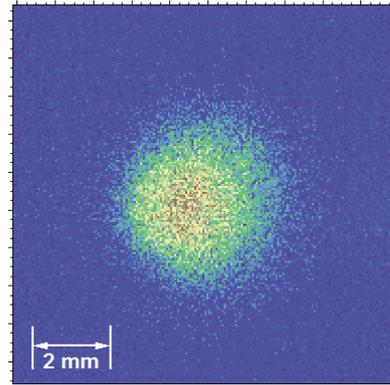


Fig. 5 Profile of undulator radiation measured by the developed MPCCD installed in the optical hutch. The radiation is monochromatized to  $10\ \text{keV}$  X-rays by a double crystal monochromator.

- アンジュレータ下流のBPMのオフセット決定 (電子ビーム使用)

アンジュレータラインのアライメント終了後, 真空封止アンジュレータの磁石列をカバーする銅フォイルの電気抵抗による電子ビームの平均エネルギー損失を, 最後尾のアンジュレータ放射の波長シフトにより計測した。この結果に基づき, FEL相互作用を考慮しないK値のテーパーの最適化を施した。これらの調整完了後, 設計電流値まで圧縮された電子ビームをアンジュレータラインに導き, アンジュレータのギャップを上流から1台ずつ閉めることでレーザー増幅の初観測を $1.2\ \text{\AA}$ の波長において成功させた。その後は, 主にレーザー増幅強度をプローブに, K値テーパー, 移相器のパラメータ, ビーム軌道の最適化を進めた。

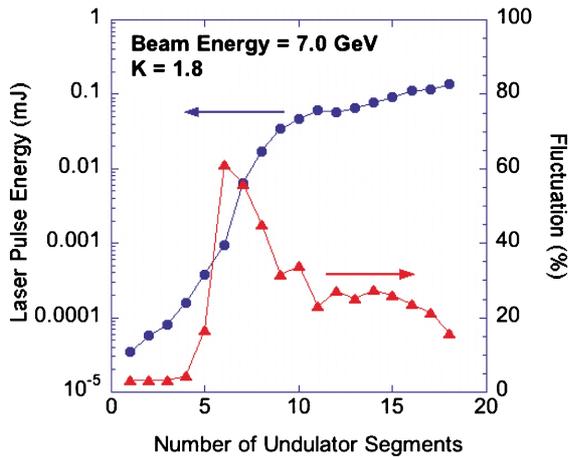
## 7.4 光源性能

主要な光源性能をTable 1に示す。現状, 利用可能なレーザー波長範囲は, 約 $0.6\sim 3\ \text{\AA}$ であり, レーザーのパルスエネルギーは波長に強く依存し, 長波長程高い強度が得られる傾向にある。レーザー波長が $1\ \text{\AA}$ 以上であれば $0.1\ \text{mJ}$ を超えるパルスエネルギーが得られ, 出力飽和領域での使用が可能である。同一のレーザー波長の場合, 高いエネルギーで, かつ, 大きなK値を用いる方がパルスエネルギーは高くなる。Fig. 6と7にはほぼ同じ時期に取得した波長 $1.2\ \text{\AA}$ のレーザーのゲインカーブとスペクトルを示す。ゲインカーブからレーザー増幅利得は $5 \times 10^3$ 程度であり, ゲインが10台目のアンジュレータ付近から横ばいとなる, 並びに強度変動が20%以下まで低減することから, レーザー出力が飽和領域に達したと考えられる。飽和時の強度変動は加速器の不安定性も繰り込んで16% ( $\sigma$ ) である。Fig. 7のレーザースペクトルには, この増幅利得に対応した自発光からのピーク強度増大が見て取れる。

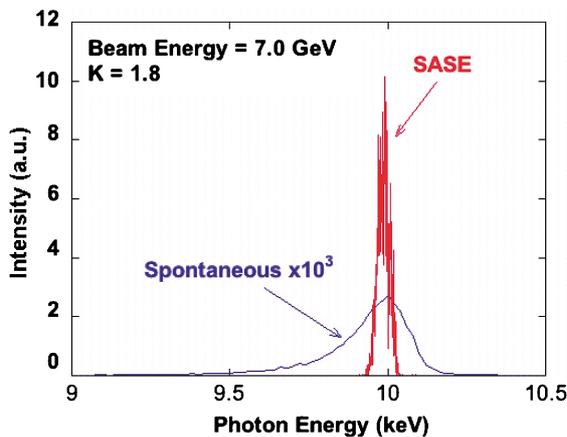
**Table 1** Achieved SASE FEL performance

Pulse Energy* Ep	Sub-mJ@ $\lambda \geq 1 \text{ \AA}$
Electron Beam Pulse Duration* $\tau_e$	30~70 fs (FWHM)
Intensity Fluctuation*	10~20%
Spatial Coherence	Nearly full
Repetition Rate	10 Hz (Max. 60 Hz)

\*Achieved values depend on the lasing wavelength



**Fig. 6** Gain curve for a photon energy of 10 keV together with an intensity fluctuation. The laser intensity was measured by the developed backscattering-based monitor<sup>13)</sup>. The beam energy and K-value were set to 7.0 GeV and 1.8, respectively.



**Fig. 7** Spectrum of 10 keV SASE FEL together with the spontaneous radiation of which is magnified by a factor of 1000. Each datum shows an average of 10 shots. The beam energy and K-value were set to 7.0 GeV and 1.8, respectively.

レーザー増幅時における電子ビームの電流ピーク時間幅は、バンチ圧縮条件により異なるが30~70 fs程度である。レーザーのパルス幅は、一般的にはこの幅に比べて狭く、しかもその中に多数のモードが混在し、スパイク上のスペクトルを構成する。最大ピーク出力は、このスパイク

部に対応し、パルスエネルギーをパルス幅で割り算した平均値に比べ数倍は高く、現状でも10 GWは超えていると推定される。

レーザーの運転状況は現状次の様になっている。運転中の平均トリップ頻度は、10 Hzの繰り返しであれば30~40分に1回程度である。レーザー波長が長くなる（エネルギーが低くなる）ほどRF高出力機器の使用数が減り、トリップ頻度は減少する。一方で、レーザーの繰り返しを増やすにつれて、単位時間あたりのトリップ数は増加する。トリップ頻度を低く抑える立場から、レーザーの繰り返しを10 Hzからスタートするが、できるだけ速やかにコンディショニングを進め、設計目標値の60 Hzへ引き上げる予定である。現状では、RF高出力機器のトリップからレーザー運転の再開には、おおよそ5分を要する。復帰後のレーザーの再現性は高く、トリップのレーザー特性への影響はないが、レーザー復帰までの時間を最小化しよう今後復帰手順の効率化を進める。レーザー運転に実績のある最大電子ビームエネルギーは8.3 GeVであるが、3月からのユーザー運転では、トラブル時の待機号機の確保も考慮し、当面は最大ビームエネルギーを8 GeVとして運転の信頼性を確保する。

アンジュレータのK値制御は、ギャップ変更に対するフィードフォワード補正テーブルの精度が不十分で、設定を変更する度に軌道調整を必要としてきた。この理由は、補正テーブル作成時に不可欠なビーム軌道変位測定に加速器不安定性に起因するノイズが混入しているからである。このノイズ除去の手順が最近確立したことで安定なレーザー増幅を維持できる補正精度を達成する見通しが得られ、ユーザー運転までには実験ホールから自由にK値を変更できるシステムを導入する予定である。

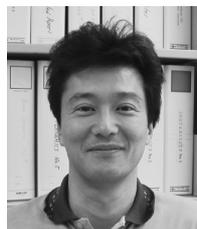
上流の加速器の安定性が設計目標に現状達していないこともあり、長時間のレーザー運転の維持には30分程度の加速器の再調整が必要である。例えば、朝9時にレーザーを良好な状態に設定したとして、その後の24時間で状況に応じた数回の調整を、例えば8時間毎に行うというのが典型的な運転パターンと予想される。この原因はRFの位相が複雑にドリフトすることに起因しており、現在、この暫定対策を進めると共に、恒久対策のための原因調査を平行して実施している。

### 参考文献

- 1) H. Kitamura: Rev. Sci. Instrum. **66**, 2007 (1995)
- 2) T. Shintake, H. Matsumoto, T. Ishikawa and H. Kitamura: Proceedings of SPIE, Optics for Fourth-Generation X-Ray Sources, edited by R. O. Tatchyn, A. K. Freund, and T. Matsushita (SPIE, Bellingham, WA, 2001), **Vol. 4500**, pp. 12-23.
- 3) K. Togawa, T. Shintake, T. Inagaki, K. Onoe, T. Tanaka, H. Baba and H. Matsumoto: Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, 020703 (2007).

- 4) T. Shintake *et al.*: Phys. Rev. ST Accel. Beams **12**, 070701 (2009).
- 5) H. Maesaka, T. Shintake, Y. Otake, T. Hara, K. Togawa, T. Tanikawa, M. Yabashi, H. Tanaka and SCSS Group: Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sendai, Japan, 2006 (Tohoku University, Sendai, Japan, 2006), pp. 328–330, only title and abstract in English.
- 6) 本特集号の加速器ハードウェアの記事参照.
- 7) H. Ego, H. Maesaka, Y. Otake, T. Sakurai and S. Miura: Proceedings of the 2nd Particle Accelerator Conference 2011 (EPS-AG, San Sebastian, Spain, 2011), pp. 1221–1223.
- 8) K. Togawa, T. Hara and H. Tanaka: Phys. Rev. ST Accel. Beams **12**, 080706 (2009).
- 9) H. Loos *et al.*: Proceedings of the 30th International Free Electron Laser Conference 2008 (PAL, Gyeongju, Korea, 2009), pp. 485–489.
- 10) T. Tanaka, R. Tsusu, T. Nakajima, T. Seike and H. Kitamura: Proceedings of the 29th International Free Electron Laser Conference 2007 (Budker INP, Novosibirsk, Russia, 2008), pp. 468–471.
- 11) <http://www.apisensor.com/tracker3-usa>
- 12) T. Morinaga *et al.*: “Alignment of BPM and Q-Mag that uses X-ray from alignment undulator” presented in the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, 2010.
- 13) H. Tanaka, K. Togawa, T. Hara and R. Yamamoto: Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan, 2010 (JASRI/RIKEN, Himeji, Japan, 2011), pp. 207–209, only title and abstract in English.
- 14) T. Tanaka: Proceedings of the 31st International Free Electron Laser Conference 2009 (STFC, Liverpool, UK, 2009), pp. 524–527.
- 15) R. Yamamoto *et al.*: “Beam Based Alignment (BBA) of SACLA Undulator Beamline” presented in the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Japan, 2010.
- 16) 本特集号の検出器・データ取得システム・実験機器制御・解析の記事参照.
- 17) K. Tono, T. Kudo, M. Yabashi, T. Tachibana, Y. Feng, D. Fritz, J. Hastings and T. Ishikawa: Rev. Sci. Instrum. **82**, 023108 (2011).

● 著者紹介 ●



**田中 均**

独立行政法人理化学研究所 播磨研究所  
放射光科学総合研究センター XFEL 研究  
開発部門 部門長

E-mail: tanaka@spring8.or.jp

専門：加速器におけるビーム物理

**【略歴】**

1982年3月東京工業大学総合理工学研究  
科化学環境工学専攻終了，1982年4  
月日揮株式会社原子力事業本部，1989  
年9月理化学研究所サイクロトロン研  
究室，1999年5月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4月同部門主席研究員，2006年  
4月理化学研究所X線自由電子レー  
ザー計画推進本部，2010年4月財団法  
人高輝度光科学研究センターXFEL 研  
究推進室室長を経て，2011年4月から  
理化学研究所播磨研究所放射光科学総合  
研究センターXFEL 研究開発部門部門  
長。博士（工学）。



**原 徹**

独立行政法人理化学研究所 播磨研究所  
放射光科学総合研究センター XFEL 研  
究開発部門 加速器研究開発グループ  
先端ビームチーム チームリーダー

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

専門：FEL，挿入光源

**【略歴】**

1995年パリ第11大学博士課程修了，理  
学博士，1995年理化学研究所入所後  
SPring-8 挿入光源の開発に従事，2003  
年同前任研究員，2007年同専任研究員，  
2007年理化学研究所X線自由電子レー  
ザー計画推進本部チームリーダー，  
2011年4月より現職。



**渡川和晃**

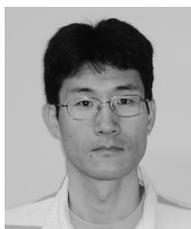
独立行政法人理化学研究所 播磨研究所  
放射光科学総合研究センター 前任研究  
員

E-mail: togawa@spring8.or.jp

専門：加速器における電子ビーム源，  
ビーム物理

**【略歴】**

1994年3月名古屋大学大学院理学研究  
科博士課程(前期課程)物理学専攻修了，  
1998年4月日本学術振興会特別研究員，  
1998年9月名古屋大学大学院理学研究  
科博士課程(後期課程)物理学専攻修了，  
博士（理学），2001年4月より理化学研  
究所 播磨研究所。



**田中隆次**

独立行政法人理化学研究所 播磨研究所  
放射光科学総合研究センター XFEL 研  
究開発部門

E-mail: ztanaka@spring8.or.jp

専門：放射光源，自由電子レーザー

**【略歴】**

1996年9月京都大学大学院工学研究科  
博士課程原子核工学専攻修了，1996年  
10月財団法人高輝度光科学研究セン  
ター入所，1999年4月理化学研究所入  
所，2007年4月同専任研究員



**矢橋牧名**

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 グルー  
プディレクター

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X線自由電子レー  
ザー計画推進本部を経て，2011年4月  
より現職。博士（工学）。

## 7. Beam commissioning and achieved laser performance

**Hitoshi TANAKA, Toru HARA, Kazuaki TOGAWA,  
Takashi TANAKA, Makina YABASHI**

RIKEN Harima Institute, RIKEN SPring-8 Center, XFEL Research and Development Division,  
1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148, Japan

**Abstract** This article describes the beam commissioning overview of a world's first compact X-ray Free Electron Laser named SACLA and the achieved laser performance. Especially, three detailed stories are also shown on clearing the hurdles to SASE lasing during the beam commissioning.

---