3-1 SACLA 加速器

X線自由電子レーザー(XFEL)施設SACLAでは、2011 年の2月にビーム調整運転を開始した後、6月に初めての レーザー増幅を観測した^[1]。更なる調整を経て最短レー ザー波長0.6 Åの達成、sub-mJのパルスエネルギー生成、 レーザー出力の長期安定化という目標を実現し、予定通り 2012年3月からは供用運転を開始するに至った。

3-1-1. SACLA 加速器の概要

SACLA加速器の構成を図1に示す。CeB₆単結晶カソー ド熱電子銃(E-GUN)により、高安定で高輝度の電子ビ ームを生成し、パルス電場型 Deflector によって 500 kV、 1A、1nsの電子ビームを切り出す。これを多段のバンチャ -空洞 (238 MHz、476 MHz、L-band Corr.) およびL-band APS加速管により、加速しながら時間的に圧縮をし、電 子ビームの密度を高める。更に3か所のシケイン(BC1、 BC2、BC3)にて、エネルギー差を利用した磁気バンチ圧 縮法により電子ビームの密度を高め、最終的に3 kA以上 のピーク電流を得る。バンチ圧縮に用いるエネルギー差は、 電子ビームの時間長に応じて、L-band (1428 MHz) APS加 速管、S-band (2856 MHz) 加速管、C-band (5712 MHz) 加 速管によって与えられる。また、バンチ圧縮時の非線形性 を補正し、圧縮効率を高めるために、BC1の手前にC-band 補正(Corr.)加速管を用いている。BC3の下流には高加 速電場(定格35 MV/m)のC-band加速管102本が設置さ れ、X線発生に必要なエネルギー(約5~8 GeV)まで電 子ビームを加速する。こうして得られた高エネルギー、高 輝度の電子ビームを、短周期長(λ₁~18 mm)の真空封 止アンジュレータ18台に通して自発放射光を自己増幅 (SASE) させ、波長0.6~3 Å、ピーク強度10 GW以上の X線レーザーを得る。

このようにユニークで先進的なSACLA加速器システム であるが、SASEレーザー発振を行うためには、非常に高 度な調整を必要とする。例えば、電子ビームを多段に圧縮 し最終的に3kA以上のピーク電流を得るためには、それ ぞれの加速管に供給されるマイクロ波(Radio Frequency: RF)の強度を0.01%、位相を100 fsほどの精度で調整する 必要がある。100 mに渡って続くアンジュレータ内で、電 子と放射光を並走させSASE増幅させるためには、電子ビ ームの軌道を数μmの精度で制御し直進させる必要があ る。これらの要求精度は、従来の加速器に比べても1桁か ら2桁ほど厳しい。

3-1-2. 初期調整と各構成機器の性能

2011年2月にビーム調整運転を開始する際に想定した 調整スケジュールを、図2に示す。実際の調整は、ほぼこ のスケジュールに沿った形で行われた。最初に「初期調整」 として、電子ビームを加速して最終ビームダンプまで導き、 SACLA加速器システムの基本性能の確認を行った。確認 された基本性能を列記する。

- 1) 電子銃より 500 kV で引き出された約1 Aの電子ビ ームのエミッタンスを測定し、設計通りの値 (ε_N ~1 π mm・mrad) が得られていることを確認した。
- 電子ビームを多段のバンチャー空洞に通し、波長計でのバンチアップ信号と空洞でのビーム誘起信号を見な



図2 調整運転を開始する前に作成した加速器調整のスケジュ ール。SASE 出力飽和は10月まで延びたが、それ以外は ほぽこの予定の通りに調整が行われた。



がら、RFの電場強度と位相を決定することができた^[2]。

- 電子ビームを7.8 GeVまで加速した。それぞれの加速
 器で設計通りのエネルギー利得が得られていることを
 確認した。
- 4)電子ビームを最終ビームダンプまで導いた後、アンジ ユレータのギャップを閉めて自発放射光を発生させ、 X線の波長(0.8 Å)分布と空間分布に異常がないこ とを確認した。
- Fの安定性について、電場強度は0.01%台、位相は 100 fs以下と、ほぼ目標の安定性を達成できていることを確認した^[3, 4]。

RFの安定性に関しては、SACLAのRF系、タイミング 伝送系、冷却系など関連する全ての装置が設計通りの性能 を発揮していることを示している。安定性に関して、各機 器の性能上、重要な点を具体的に列記する。

- 6)高精度高電圧充電器にて、モジュレータ(加速器駆動 用パルス電源)の充電電圧の変動を0.001%(rms)まで抑えていること^[5]。
- 7)高電圧スイッチ素子であるサイラトロンの時間ジッタ を、1 ns以下に抑えていること^[6]。
- 8) RFの基準源であるマスターオシレータについて、 SSBノイズをGHz領域で-140 dB以下に低減し、時間 ジッタを30 fs程度まで抑えていること^[4]。
- 9)400mに渡るRF伝送系には、位相安定化シングルモ ード光ファイバーを用いて位相ノイズを低減、さらに 光ファイバーには冷却水を沿わせて温度変化を0.1 K 以下に抑えたこと。
- 10)各ユニットに設置されるRF位相制御機器、パルス RF増幅器について、駆動用DC電源のノイズレベル を-150 dBV以下に抑えて安定化したこと。水冷ラッ クに納めて温度の変動を0.1 K以下に抑え、環境温度 の変化によるドリフトを無くしたこと^[4]。
- 11)加速管や高周波空洞について、冷却水の精密温度調整 システムを用いて、加速管や空洞の温度を0.08 K以 下で安定化させたこと^[7]。それ以外の水冷機器を流 れる装置冷却水についても0.1℃程度の温度安定化が なされていること。

3-1-3. 精密調整とビームモニタ機器

次に、レーザー増幅の実現を目指して、RFの位相や電 子ビームの軌道、集束電磁石をより精密に調整する「精密 調整」を行った。電子ビームを測定するビームモニタ機器 としては、以下のモニタを使用した^[8]。

- ・位置: RF空洞型 BPM、ストリップライン型 BPM
- ・電荷量:高速差動型CT、RF空洞型BPM

- ・空間分布:スクリーン型プロファイルモニタ
- ・到達時間:到達時間モニタ、RF空洞型BPM
- ・バンチ長: RF-deflector 空洞、波長計

ビームモニタに関して、特筆すべき点を列記する。

- 12) RF空洞型 BPM は、高精度 RF 計測系と組み合わせる ことで、期待通りサブμmの位置精度で電子ビームの 位置を計測できることを確認した^[9]。
- 13) スクリーン型プロファイルモニタにて、大きな問題となったのが、図3に示すようなCoherent-OTR(Optical Transition Radiation: 遷移放射)の発生であった。Coherent-OTRは、金属薄膜でのOTR過程にて、発生する光の波長(数100 nm~1 µm)程度の間隔に電子ビームが集中した時に起こる。様々な対策を試した結果、図3下に示す方法により、Coherent-OTRの問題を解決することができた。まず、ビーム軸上にYAG スクリーンを設置する。YAGによる蛍光は等方的に放射するのに対して、YAGスクリーンや後続のミラーで発生するCoherent-OTRは光軸に集中して1/yの角度で放射される。この角度分布の違いを利用し、Coherent-OTR光を遮るようなマスクを集束レンズの直前に設ける。光軸中心部付近の遮光ではまだ散乱光



図3 (左上) BC3の入口部にあるプロファイルモニタでの測 定画像。 Coherent-OTR は発生していないため、画像は 電子ビームの空間分布を反映している。(右上) BC3の 出口にあるプロファイルモニタでの測定画像。Coherent-OTR が発生して画像信号が飽和し、本来の電子ビームの 分布が見えなくなっている。(左下) Coherent-OTR を隠 すための、プロファイルモニタのレンズ直前に取り付け たマスク。(右下) SACLA プロファイルモニタの模式図 と写真。 の影響が残るので、最終的には $\phi 2 \text{ mm}$ のピンホールを開けたマスクを用いた。

14) RF-deflector空洞は図4に示すように、RFの電磁場に よって電子ビームを横方向にキックするもので、進行 方向の分布を上下方向に掃引し、プロファイルモニタ で観測することにより、進行方向の電子ビーム形状を 測定する^[8]。RF-deflector空洞は、運転開始当初より 設計通りの性能を発揮し、約20 fsの分解能で図4に 示すような時間分布の測定を行う事が可能となり、電 子ビームの調整におおいに役立った。

こうして5月には、規格化エミッタンス $\varepsilon_N \sim 2\pi \text{mm}$ ・ mrad程度でピーク電流3 kAまでのバンチ圧縮を行い、調 整の進んだ秋以降は、設計値である規格化エミッタンス ε_N ~1 π mm・mrad、ピーク電流3 kA以上の電子ビームを 定常的に供給することができた^[10]。

電子ビームのエネルギー安定性は、アンジュレータ直前 にあるシケイン部での偏向位置をRF空洞型BPMにて測 定することにより評価した。パルス毎の変動はRMSで約 0.014%、数時間程度のドリフトも全幅で0.01%程度と、目 標とする安定性が得られていることがわかった^[11]。

レーザー増幅を実現するうえで最後に生じた問題は、ア ンジュレータ区間における電子ビームの軌道調整の困難さ であった。まず、粗アライメントとして予定していたアラ イメントアンジュレータからのX線を基準光とする方法 は、光位置基準のアイリスとアライメント対象物である





図4 (上) RF-deflector空洞を用いたバンチ長測定システムの構成図。(下)バンチの時間分布の測定例。

BPM電気中心、並びに四極電磁石磁場中心との相対位置 計測の精度が悪く、うまくいかなかった。次に行ったビー ム基準アライメント(Beam Based Alignment: BBA)で は、エネルギーの異なった電子ビームの軌道をアンジュレ ータ間に置かれたBPM位置で一致させることによりアン ジュレータ内の平均軌道、BPM、四極電磁石を一直線に 並べたはずであった。しかし、それぞれのアンジュレータ からの自発放射光を、100 m以上離れた実験ハッチにある X線検出器で観測すると、直線から外れていることがわか った。そこで最終的には、X線検出器で測定した自発放射 光の位置を一致させるように電子ビームの軌道を修正し た。アンジュレータ部の調整としてはこのほかに、K 値の 調整、磁石列の高さ調整、位相器の調整、および壁電流の エネルギーロスによるK 値テーパー補正等を行った^[12]。

3-1-4. レーザー増幅の実現

こうして電子ビームの調整が全て完了した後、6月7日 に、最初のSASE増幅試験を行った。電子ビームのエネル ギー7 GeVにてアンジュレータラインBL3にビームを通 し、上流のアンジュレータから1台ずつ順にギャップを約 4 mm (K=1.8) まで閉めていった。大勢の関係者が見守る 中で、7、8台目のアンジュレータを閉めたあたりから自 発光のなかにSASEのぼんやりと明るい部分が現れはじ め、更に下流のアンジュレータのギャップを閉めると、図5 に示すように明らかな輝点となった。輝点の強度はパルス 毎に大きく変動し、SASE増幅過程による統計的ゆらぎを 示唆していた。また、輝点の部分の波長スペクトルを取る と、自発放射光のスペクトルより明らかに幅が狭く単色化 されており、SASE増幅によるX線レーザーである証拠と なった。こうしてビーム調整の開始からわずか3か月半で、 目標となる SASE 増幅を観測することに成功した。発生し たレーザーの波長は1.24 Å (10 keV) で、LCLSの下限で ある1.2 Åに並ぶ、世界最短波長タイのレーザーが実現し た。この成果は即日中にプレスリリースされ、また夏に開 かれた多くの国際会議でも詳細に報告された。



図5 (左) 6月に初めて観測されたSASE光のプロファイル。 (右) 波長1.24 Å (10 keV) にて測定したSASE光と自 発放射光とのエネルギースペクトルの比較。

3-1-5. 供用運転へ向けての改善

夏以降の調整においては、次の目標である供用運転に向 けて、実用光源として問題となる下記の3点について重点 的に改善を行った。

1) レーザー強度の増大

2) 安定性の向上

3) 加速エネルギーの増加とレーザー波長領域の拡大

レーザー強度の増大については、バンチ圧縮条件を設計 値に戻し、射影エミッタンスに着目しながら、ビーム軌道、 エンベロープの最適化を行った。また、精度の高いビーム プロファイルを計測するためには、スクリーンモニタの改 良と精密調整を行った。電子ビームの精密なプロファイル が、上流より段階を追って測定できるようになり、電子ビ ームのピーク電流が3 kA程度で射影規格化エミッタンス が $\varepsilon_N \sim 1 \pi$ mm・mrad前後の電子ビームをアンジュレー タ部まで運ぶことができた。更に、入射部空洞のRF位相 やアンジュレータ部のビーム軌道、K値のテーパーなど、 様々なパラメータを最適化し、最終的にはレーザーの強度 を 250 µJ 程度まで高めることができた。

波長範囲の拡大については、後述する電子ビームのエネ ルギーの増加と、パラメータの最適化による低K値での増 幅利得の向上により実現された。短波長FELとしては、 世界最短の波長となる約0.6 ÅのX線レーザーを生成する ことができた。図6に、波長1.2 Åの場合と0.73 Åの場合で の、ゲイン曲線を示す。1.2 Åの場合は、10台目のアンジ ュレータあたりから飽和に達し、パルス毎の変動も20%程 度に納まっている。

レーザーの安定性に関して、夏の時点では周期的な変動



図6 SASE増幅のゲイン曲線(色塗り)とパルス毎の強度変動(白抜き)。レーザー出力飽和に達している波長1.2 Å のケースと、飽和に至っていない波長0.73 Åのケースを示す。

があり、ビームエネルギーや軌道などのフィードバック制 御を外すと XFEL 強度が1時間で半減してしまうような状 況であった。そこで、変動についての系統的な調査を行い、 ドリフトの原因を特定して改善を行った。具体的には、 RF位相のフィードバック制御の最適化や入射部バンチャ ー空洞の温度安定化、クライストロンのカソードヒータに 使用する AC1 φ 200 V系への安定化電源の導入などを行 った^[13, 14]。それでも残る変動要因は、電子ビームの軌道と エネルギーのフィードバック制御を行うことで補償するよ う、GUIベースのシステムを整備した。これらの改善の結 果、レーザー強度の安定性は改善し、レーザー強度が大き く減るような事は無くなった。3月のユーザー運転開始後、 3日間に渡るレーザーの強度変動の例を図7に示す。オペ レータによる簡単な調整だけで、レーザー強度は250 µJ近 くを維持することができている。まだいくらか強度の変動 が残っていることは、今後の改善すべき点である。

加速エネルギーに関しては、大電力RFによるコンディ ショニングを行い、放電の頻度を減らしてより多くのRF 電力を加速空洞に投入できるよう改善した。9月から11月 にかけて、ビーム調整を行わない夜間を利用して約700時 間のコンディショニング運転を行い、放電の頻度を約 1/10に減少させることができた。また、放電後の復旧プロ セスを1分以下に短縮し、運転効率を上げた。これらの改 善により、8 GeVを超えるエネルギーでも、許容できる停 止頻度で運転ができるようになった。図8に、供用開始後 の典型的な運転条件での、C-band加速管の加速電場と、イ ンターロックによる停止頻度を示す。加速電場は設計値で ある35 MV/mを超え、37 MV/m程度で常時運転が可能と なっている^[15]。停止頻度に関しては、それぞれのC-band 加速ユニットで1日に平均1回であっても、64ユニットあ れば加速器全体では20~30分に1回停止することになる。 この時の停止頻度は10 pps、7.8 GeV 運転時で23分に1回、 8.2 GeV 運転時は14分に1回であった。とくに7.8 GeV 運 転では、加速管などでの放電による停止は10~20%ほどで あり、大多数はサイラトロンの自爆によるものであった。

こうして、XFEL施設としての準備が整い、sub Åから



図7 供用開始後、ユーサー連転中の3日間のレーサー強度の 推移。赤点は100回の平均値。



図8 供用開始後の典型的な運転条件(8.2 GeV、7.8 GeV)での、C-band加速器64ユニットの加速電場(上図)と、7.8 GeV運転時の停止頻度(下図)。停止頻度に関しては、停止理由別に色分けしている。RF(緑):加速管などでの放電、Klystron(赤):クライストロンカソード部での高電圧放電、Thyratron(青):サイラトロンの自爆。

数Åの波長領域で、強度数100 μJのX線レーザーを安定し て供給することが可能となった。そして予定通り3月より 供用運転を開始することができた。

参考文献

- [1] H. Tanaka and M. Yabashi, et. al.: "A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region", nature photonics **6**, 540-544 (2012).
- [2] 渡川和晃,他:"X線自由電子レーザー施設SACLAに おける電子ビームの圧縮特性",第8回日本加速器学 会,(2011).
- [3] T. Asaka, et. al.: "Performance of RF system for XFEL/Spring-8 Injector", IPAC'11, (2011).
- [4] 大島隆,他: "XFEL/SPring-8 "SACLA"におけるタイ
 ミング・LLRFシステムの性能",第8回日本加速器学
 会,(2011).
- [5] C. Kondo, et. al.: "High precision inverter power supply for klystron modulator of SACLA", EAPPC'12, (2012).
- [6] T. Inagaki, et. al.: "Compact 110 MW Modulator for C-band High Gradient Accelerator", IEEE IPMHVC'12, (2012).
- [7] T. Hasegawa, et. al.: "Upgrade of a precise temperature regulation system for the injector at SACLA", FEL'12, (2012).
- [8] Y. Otake, et. al.: "Commissioning and performance of the beam monitor system for XFEL/SPring-8 SACLA", IPAC'11, (2011).
- [9] H. Maesaka, et. al.: "Sub-micron resolution rf cavity beam position monitor system at the SACLA XFEL facility", NIM-A 696 66-74, (2012).
- [10] 原徹,他:"SACLA加速器のビームコミッショニン

グ", 第8回日本加速器学会, (2011).

- [11] 大竹雄次,他:"XFEL/SPring-8"SACLA"の加速器構成 機器の試運転と性能",第8回日本加速器学会,(2011).
- [12] T. Tanaka, et al.: "Undulator commissioning by characterization of radiation in x-ray free electron lasers", Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 110701 (2012).
- [13] H. Maesaka, et. al.: "Stability improvements of SACLA", FEL'12, (2012).
- [14] T. Asaka, et. al.: "Stability performance of the injector for SACLA/XFEL at SPring-8", LINAC'12, (2012).
- [15] T. Inagaki, et. al.: "High gradient operation of 8-GeV Cband accelerator in SACLA", LINAC'12, (2012).

加速器研究開発グループ 基盤光源チーム 稲垣 隆宏