

## 話 題

X線自由電子レーザー，SACLAのコミッショニングと  
実現された光源性能

田中 均<sup>\*1</sup>・Arnaud Amselem<sup>\*2</sup>・青柳 秀樹<sup>\*2</sup>・安積 隆夫<sup>\*1</sup>・浅野 芳裕<sup>\*1</sup>・安積 則義<sup>\*2</sup>  
 石井 健一<sup>\*3</sup>・石井 美保<sup>\*2</sup>・石橋 一憲<sup>\*3</sup>・糸賀 俊朗<sup>\*2</sup>・稲垣 隆宏<sup>\*1</sup>・犬伏 雄一<sup>\*1</sup>  
 井上 忍<sup>\*3</sup>・恵郷 博文<sup>\*2</sup>・大島 隆<sup>\*1</sup>・大竹 雄次<sup>\*1</sup>・大橋 治彦<sup>\*2</sup>・大端 通<sup>\*2</sup>・小竹 拓也<sup>\*3</sup>  
 小野 峻<sup>\*1</sup>・甲斐 智也<sup>\*3</sup>・籠 正裕<sup>\*2</sup>・亀島 敬<sup>\*2</sup>・家納 寛<sup>\*3</sup>・木村 洋昭<sup>\*2</sup>・桐原 陽一<sup>\*1</sup>  
 清道 明男<sup>\*2</sup>・工藤 統吾<sup>\*2</sup>・小林 和生<sup>\*2</sup>・小林 利明<sup>\*2</sup>・近藤 力<sup>\*2</sup>・後藤 俊治<sup>\*2</sup>・呉 樹奎<sup>\*2</sup>  
 櫻井 辰幸<sup>\*2</sup>・佐治 超爾<sup>\*2</sup>・佐藤 堯洋<sup>\*1</sup>・Xavier Marechal<sup>2#</sup>・白澤 克年<sup>1#</sup>・城地 保昌<sup>\*2</sup>  
 杉本 崇<sup>\*2</sup>・鈴木 伸介<sup>\*2</sup>・清家 隆光<sup>\*2</sup>・高橋 直<sup>\*2</sup>・武部 英樹<sup>\*2</sup>・竹下 邦和<sup>\*2</sup>  
 田尻 泰之<sup>\*3</sup>・玉作 賢二<sup>\*1</sup>・田中 信一郎<sup>\*3</sup>・田中 隆次<sup>\*1</sup>・田中 良太郎<sup>\*2</sup>・張 超<sup>\*2</sup>  
 塚本 宜史<sup>\*3</sup>・富樫 格<sup>\*2</sup>・渡川 和晃<sup>\*1</sup>・富澤 宏光<sup>\*2</sup>・登野 健介<sup>\*2</sup>・永園 充<sup>\*1</sup>  
 成山 展照<sup>\*2</sup>・初井 宇記<sup>\*1</sup>・花木 博文<sup>\*2</sup>・原 徹<sup>\*1</sup>・長谷川 太一<sup>\*3</sup>・長谷川 照晃<sup>\*1</sup>  
 広野 等子<sup>\*2</sup>・備前 輝彦<sup>\*2</sup>・深見 健二<sup>\*2</sup>・福井 達<sup>\*1</sup>・古川 行人<sup>\*2</sup>・細田 直康<sup>\*2</sup>  
 前坂 比呂和<sup>\*1</sup>・前田 大輔<sup>\*3</sup>・前田 雄亮<sup>\*3</sup>・益田 邦和<sup>\*3</sup>・町田 武彦<sup>\*3</sup>・松井 佐久夫<sup>\*2</sup>  
 増田 剛正<sup>\*2</sup>・松下 智裕<sup>\*2</sup>・松原 伸一<sup>\*2</sup>・松本 崇博<sup>\*2</sup>・南 潤一朗<sup>\*3</sup>・森永 拓也<sup>\*3</sup>  
 矢橋 牧名<sup>\*1</sup>・柳田 謙一<sup>\*2</sup>・山鹿 光裕<sup>\*2</sup>・山下 明広<sup>\*2</sup>・山下 雅史<sup>\*3</sup>・山本 龍<sup>\*3</sup>  
 新竹 積<sup>1#</sup>・北村 英男<sup>\*1,2</sup>・熊谷 教孝<sup>1#</sup>・石川 哲也<sup>\*1</sup>

## Commissioning of Japanese X-ray Free Electron Laser, SACLA and Achieved Laser Performance

Hitoshi TANAKA<sup>\*1</sup>, Arnaud AMSELEM<sup>\*2</sup>, Hideki AOYAGI<sup>\*2</sup>, Takao ASAKA<sup>\*1</sup>, Yoshihiro ASANO<sup>\*1</sup>, Noriyoshi AZUMI<sup>\*2</sup>  
 Kenichi ISHII<sup>\*3</sup>, Miho ISHII<sup>\*2</sup>, Norikazu ISHIBASHI<sup>\*3</sup>, Toshiro ITOGA<sup>\*2</sup>, Takahiro INAGAKI<sup>\*1</sup>, Yuichi INUBUSHI<sup>\*1</sup>  
 Shinobu INOUE<sup>\*3</sup>, Hiroyasu EGO<sup>\*2</sup>, Takashi OHSHIMA<sup>\*1</sup>, Yuji OTAKE<sup>\*1</sup>, Haruhiko OHASHI<sup>\*2</sup>, Toru OHATA<sup>\*2</sup>  
 Takuya OTAKE<sup>\*3</sup>, Shun ONO<sup>\*1</sup>, Tomoya KAI<sup>\*3</sup>, Masahiro KAGO<sup>\*2</sup>, Takashi KAMESHIMA<sup>\*2</sup>, Yutaka KANO<sup>\*3</sup>, Hiroaki KIMURA<sup>\*1,2</sup>  
 Yoichi KIRIHARA<sup>\*1</sup>, Akio KIYOMICHI<sup>\*2</sup>, Togo KUDO<sup>\*2</sup>, Kazuo KOBAYASHI<sup>\*2</sup>, Toshiaki KOBAYASHI<sup>\*2</sup>, Chikara KONDO<sup>\*2</sup>  
 Shunji GOTO<sup>\*2</sup>, Shukui WU<sup>\*2</sup>, Tatsuyuki SAKURAI<sup>\*2</sup>, Choji SAJI<sup>\*2</sup>, Takahiro SATO<sup>\*1</sup>, Xavier M. MARÉCHAL<sup>2#</sup>  
 Katsutoshi SHIRASAWA<sup>1#</sup>, Yasumasa JOTI<sup>\*2</sup>, Takashi SUGIMOTO<sup>\*2</sup>, Shinsuke SUZUKI<sup>\*2</sup>, Takamitsu SEIKE<sup>\*2</sup>, Sunao TAKAHASHI<sup>\*2</sup>  
 Hideki TAKEBE<sup>\*2</sup>, Kunikazu TAKESHITA<sup>\*2</sup>, Yasuyuki TAJIRI<sup>\*3</sup>, Kenji TAMASAKU<sup>\*1</sup>, Shimichiro TANAKA<sup>\*3</sup>, Takashi TANAKA<sup>\*1</sup>  
 Ryotaro TANAKA<sup>\*2</sup>, Chao ZHANG<sup>\*2</sup>, Yoshifumi TSUKAMOTO<sup>\*3</sup>, Tadashi TOGASHI<sup>\*2</sup>, Kazuaki TOGAWA<sup>\*1</sup>  
 Hiromitsu TOMIZAWA<sup>\*2</sup>, Kensuke TONO<sup>\*2</sup>, Mitsuru NAGASONO<sup>\*1</sup>, Nobuteru NARIYAMA<sup>\*2</sup>, Takaki HATSUI<sup>\*1</sup>  
 Hirofumi HANAOKI<sup>\*2</sup>, Toru HARA<sup>\*1</sup>, Taichi HASEGAWA<sup>\*3</sup>, Teruaki HASEGAWA<sup>\*1</sup>, Toko HIRONO<sup>\*2</sup>, Teruhiko BIZEN<sup>\*2</sup>  
 Kenji FUKAMI<sup>\*2</sup>, Toru Fukui<sup>\*1</sup>, Yukito FURUKAWA<sup>\*2</sup>, Naoyasu HOSODA<sup>\*2</sup>, Hirokazu MAESAKA<sup>\*1</sup>, Daisuke MAEDA<sup>\*3</sup>  
 Yusuke MAEDA<sup>\*3</sup>, Kunikazu MASUDA<sup>\*3</sup>, Takehiko MACHIDA<sup>\*3</sup>, Sakuo MATSUI<sup>\*2</sup>, Takemasa MASUDA<sup>\*2</sup>, Tomohiro MATSUSHITA<sup>\*2</sup>  
 Shinichi MATSUBARA<sup>\*2</sup>, Takahiro MATSUMOTO<sup>\*2</sup>, Junichiro MINAMI<sup>\*3</sup>, Takuya MORINAGA<sup>\*3</sup>, Makina YABASHI<sup>\*1</sup>  
 Kenichi YANAGIDA<sup>\*2</sup>, Mitsuhiro YAMAGA<sup>\*2</sup>, Akihiro YAMASHITA<sup>\*2</sup>, Masafumi YAMASHITA<sup>\*3</sup>, Ryo YAMAMOTO<sup>\*3</sup>  
 Tsumoru SHINTAKE<sup>1#</sup>, Hideo KITAMURA<sup>\*1,2</sup>, Noritaka KUMAGAI<sup>1#</sup>, Tetsuya ISHIKAWA<sup>\*1</sup>

\*1 独立行政法人理化学研究所 播磨研究所 RIKEN, RIKEN Harima Institute

\*2 財団法人高輝度光科学研究センター JASRI

\*3 スプリングエイトサービス SPring-8 Service, Co. Ltd.

# 現所属: Loyola University Maryland (X.M.M.);

沖縄科学技術大学院大学 OIST (K.S.&amp; T.S.);

財団法人高輝度光科学研究センター JASRI (N.K.)

(E-mail: tanaka@spring8.or.jp)

## Abstract

After 8 months of beam commissioning of **S**Pring-8 **A**ngstrom **C**ompact free electron **L**aser, SACLA reached the primary target performance, i.e., a shortest laser wavelength of  $\sim 0.6$  Angstrom and a laser pulse energy value of sub-mJ at a wavelength of 1.2 Angstrom. This success was due to the following four factors; (1) performance estimation of each component of SACLA required for the target laser performance and its achievement, (2) elaboration of beam diagnostics and control systems enabling precise accelerator and undulator tuning, (3) a rational and strategic commissioning plan, (4) most adequate response to various accidental events during the beam commissioning period. This article, in order to light up the above four factors leading us to the success, starts with the features of SACLA and critical tolerance for the sub-system components, and then, explains our approach to achieve the target laser performance and how the beam commissioning of SACLA proceeded. At last, the article summarizes the present laser and operational status.

## 1. はじめに

**S**Pring-8 **A**ngstrom **C**ompact free electron **L**aser, SACLA のビームコミッショニングでは、8ヶ月という短期間で、レーザー最短波長  $0.6 \text{ \AA}$  の達成並びに波長  $1 \text{ \AA}$  における sub-mJ のレーザーパルスエネルギー生成という目標を実現できた。この成功は、(1) レーザー性能達成を可能とする機器の必要性能評価とその実現、(2) 精密電子ビーム、精密アンジュレータ調整を視野に入れた診断・制御系の整備、(3) 合理的かつ戦略的な調整計画、(4) そして調整時に遭遇する様々な問題への適切な対応、これらが一つ一つ地道に積み上げられてきた結果である。

本記事では、コミッショニングの成功を支えたこの4つの部分を浮き彫りにするため、SACLA のシステムとしての特徴とクリティカルな機器性能に関して初めに言及し、目標レーザー性能を得るためにとったアプローチと SACLA のコミッショニングが実際どのように進展したのかを述べ、最後に現状の光源性能に関してまとめることにする。SACLA の経験が今後の新たなプロジェクト遂行の参考になれば幸いである。

## 2. コンパクトX線自由電子レーザー SACLA –SACLA 特有の機器及びシステム性能の特徴–

SACLA は SPring-8 Compact SASE Source (SCSS)<sup>1)</sup> というコンセプト (以降、SCSS コンセプト) に立脚し、高性能の X 線自由電子レーザー (XFEL) を可能な限り小さな施設規模で実現することを目指した世界初のコンパクト XFEL 施設である。SCSS コンセプトに基づく施設規模縮小のシナリオを図 1 に模式的に示す。コンパクト化の要は、相対的に低いエネルギーの電子ビームを用いて波長の短い X 線を発生させることであるが、これを可能にするのが短周期真空封止アンジュレータ<sup>2)</sup> である。アンジュレータ周期長が半分になれば同じ波長の X 線が7割のビームエネルギーで得られることは教科書を見れば明らかであろう。レーザー生

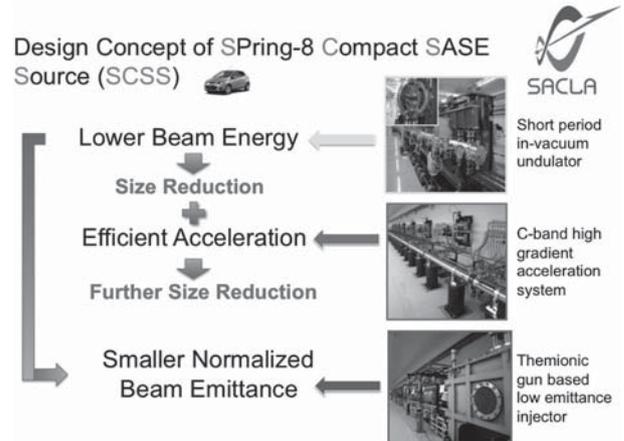


図 1 SACLA の採用した XFEL 施設規模縮小のシナリオ。

成で重要な点は、短い磁石長で十分に電子を曲げ、高いレーザー利得が得られる強磁場を実現することである。真空封止アンジュレータは、磁石列を真空槽中に入れ電子ビームに磁極を近づけることでそれを可能にする。これに加えて、相対的に低い目標エネルギーまで、常伝導 C-band 高勾配加速システム<sup>3)</sup> で効率的に電子ビームを加速し、さらに施設規模の縮小を図る。

ここまではポジティブな側面で、特にシステムを難しくする要素はない。しかし、低エネルギーでは加速による横方向エミッタンスの縮小効果が小さく、さらに短周期アンジュレータであるため K 値 (最大偏向角と相対エネルギー  $\gamma$  の積) も比較的小さいので、レーザー増幅にはピーク電流 3 kA 以上、且つ規格化ビームエミッタンス  $1\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  以下という高輝度電子ビームが必要になる。この高輝度ビームを得るため、単結晶カソードパルス熱電子銃<sup>4)</sup> から出た 1 A の高品質電子ビームパルスに 2 つの RF ポテンシャルでエネルギーチャープを形成し、速度変調バンチングにより電子ビームを圧縮する独自の入射器を開発した<sup>1)</sup>。SCSS コンセプトに基づく SACLA のシステムを図 2 に模式的に示す。

SCSS コンセプトでは、目標のピーク電流生成に必要な圧縮係数は X 線領域でのレーザー生成を目指す場

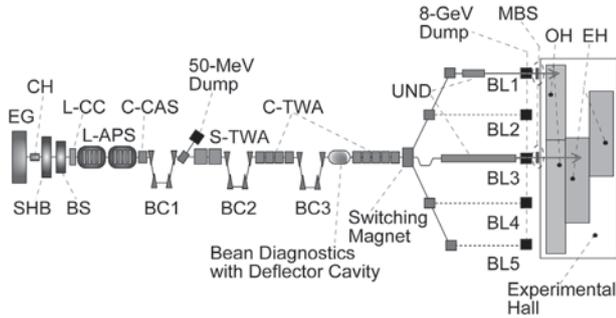


図2 SACLAの模式図。EG, 500-kV単結晶カソードパルス熱電子銃; CH, コリメータ付きビームチョッパー; SHB, 238-MHzサブハーモニックバンチャー; BS, 476-MHzブースター空洞; L-APS, L-band APS空洞; S(C)-TWA, S(C)バンド進行波加速管; BC:バンチ圧縮器; UND, アンジュレータ; BL, ビームライン; MBS, メインビームシャッター; OH, 光学ハッチ; EH, 実験ハッチ。

合, 3000倍以上というとてもつもない値となってしまう。単純な1段のバンチ圧縮器における圧縮係数  $C_B$  の位相変動  $\Delta\phi$  に対する感度  $S_\phi$  は, 初期ビームエネルギーを  $E_0$ , 全加速エネルギーゲインを  $eV\cos\phi$  として

$$S_{\Delta\phi} = \frac{1}{C_B} \cdot \frac{\partial C_B}{\partial \phi} = (1 - C_B) \cdot \left( \frac{eV \cdot \sin\phi}{E_0 + eV \cdot \cos\phi} + \frac{\cos\phi}{\sin\phi} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\Delta\sigma_z}{\sigma_z} = S_{\Delta\phi} \Delta\phi$$

と表される。  $C_B \gg 1$ , さらに加速位相  $\phi$  が極端なオフクレストではない条件 ( $\phi \ll 1, \phi \neq 0$ ) で (1) 式は

$$\frac{\Delta\sigma_z}{\sigma_z} = S_{\Delta\phi} \Delta\phi \approx -C_B \frac{\Delta\phi}{\phi} \quad (2)$$

の単純な形に近似でき, ピーク電流の変動は圧縮係数に比例するというよく知られた結果を与える<sup>5)</sup>。これは電圧に関しても同様に似たような形として導くことができる<sup>6)</sup>。仮にピーク電流の変動を10%以内に抑えようとする場合, フォトカソードRF電子銃を用いるLCLS<sup>7)</sup>及びEuro-XFEL<sup>8)</sup>に比べ ( $C_B = 100 \sim 200$ ), 一桁以上厳しい位相・電圧安定性が必要になるとの予想がなされた。そこで設計開発段階での重要なテーマはC-band高勾配加速システム開発はもとより, RF機器安定度の設計目標設定, RF機器の設計目標値を達成するシステム開発, 3000倍を超えるバンチ圧縮を可能にする具体的圧縮スキームの開発, バンチ圧縮状態を診断するシステムの開発等であった。

一方でレーザー増幅を担う長尺アンジュレータにも課題が多く残されていた。SCSSコンセプトを支えるのは真空封止アンジュレータの短周期性である。SPRING-8建設当時(1990年代)は, 32mmを標準周期

長としていた<sup>9)</sup>。高いK値を実現しつつ, 磁場精度を保った状態で, この周期長をどこまで短縮できるかが1つの大きな開発要素であった。XFELではアンジュレータ磁場の最大許容誤差がきわめて厳しいので, 真空チャンパーに磁石列を組み込む前に, 測定ベンチにて磁場性能を計測し, 最終磁場調整を行う従来の方法では不十分と考えられていた。このため, チャンパー組み込み後に, 高精度で磁場分布を計測する技術と組み込んだ状況での調整手法も重要な開発項目となった。さらには, ゲイン長が長いので, アンジュレータラインに亘り電子ビームとレーザー場の相互作用の効率を高めるには, SACLAの場合, 総長100mを超える18台のアンジュレータセグメントをあたかも1台の長尺アンジュレータとして機能させる必要があり, 特性の一様性と軌道の直線性を確保することが求められた。アンジュレータラインに高精度ビーム位置モニタ(RF-BPM)の設置は必要と考えられていたが, それを用いてどのように  $\pm 4 \mu\text{m}$  とも言われる直線性を実現するかは具体策は, SACLA建設開始前には固まっていなかった。

### 3. SCSS 試験加速器での実証試験

このようにあまりにも多くの開発項目を持つSACLA建設プロジェクトは, 荒唐無稽とも受け取られ, 日本だけでなく世界中で厳しい批判に晒された。当時の世界標準と比べて大幅に異なるシステム設計は, 「面白いが, そんなものできるか」というのが大方の見解であった。そこでSACLAの32分の1, 250 MeVのプロトタイプ, SCSS試験加速器<sup>10)</sup>を建設し, 実際に極端紫外波長域(EUV)で基本的なレーザー性能の検証を実施することになった。電子銃の端から試験加速器を撮った写真を図3に示す。この試験加速器は全長約60mである。加速器の立場で, この性能検証項目をさらに具体的に表すと以下ようになる。単結晶カソードパルス熱電子銃からの均一円柱ロングビームを切り出し速度変調バンチングで圧縮する入射器では, 相対論的エネルギー領域(エネルギー $\sim 500 \text{ keV}$ )の電子ビームを扱う。この操作が電子ビームの質を悪化(横方向規格化エミッタンスの悪化)させるかという点が第1の検証項目である。第2は, KEKにて開発されたC-band加速器システムの基本要素<sup>11)</sup>が, その後の実用化やコンパクト化に向けたシステム改良により実用に耐えうるシステムに仕上がっているかという点である。第3は, 表面粗度や表面抵抗の影響が支配的になる狭いマグネットギャップを持つ真空封止アンジュレータを用いて, SASEのレーザー増幅が本当に実現

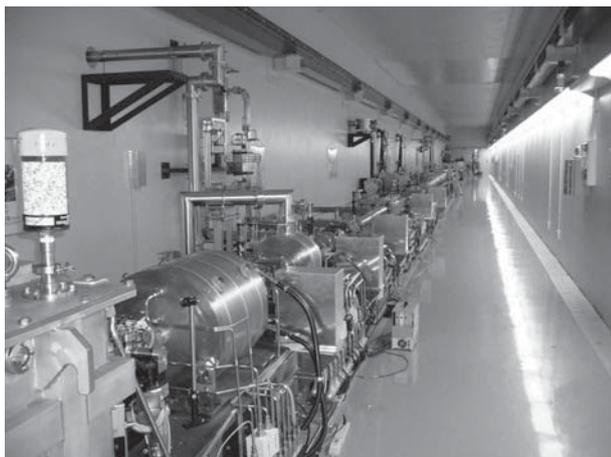


図3 電子銃の高圧タンクから下流に向かって撮影したSCSS試験加速器。

できるかという点である。

2005年にSCSS試験加速器の建設を行い2005年末にはビームを加速して1台のアンジュレータからの自発光を確認した。2006年春からSASEレーザー増幅に向けたビームコミッショニングの準備を進め、その年の7月に49 nmの波長においてSASEによるレーザー増幅の初観測に成功した。その後、加速器の安定化や2台目のアンジュレータ磁場分布を改善するための磁石列の作り直し等を行い2007年の秋にはレーザー出力飽和の達成並びに出力飽和が途切れることなく連続的に持続する超安定レーザー増幅状態を実現<sup>12)</sup>し、「SASEは不安定なもの」というそれまでの間違った常識を覆した。レーザー増幅データを系統的に取得し、実測した電流分布を用いて実験データを再現する電子ビーム特性をシミュレーションで注意深く評価したところ、レーザー部の横方向規格化エミッタンスは $0.7\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ となった。この値は、電子銃カソードから引き出された電子ビームの規格化エミッタンス $0.6\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ とほぼ等しく、速度変調バンチングで100倍(最終バンチ圧縮率300倍以上)という激しい圧縮を行っても電子ビームのレーザー増幅部において、エミッタンスは劣化しないことが明らかになった<sup>10)</sup>。C-band加速システムの加速勾配も目標の35 MV/mをクリアし、37 MV/mの高い加速勾配にて長期間安定に運転できることも実証された<sup>13)</sup>。試験加速器はその後も、EUVのレーザーを実験に提供するユーザー運転を継続し、それにより、新たな加速器システム構成要素の開発、シードFEL開発<sup>14)</sup>、SASEを利用した実験手法や安定なレーザー運転の確立等に重要な役割を果たした。ここで得られた経験や情報は全て、SACLAの設計及び調整に活かされている。

#### 4. SACLA 実現に向けた課題へのアプローチ

試験加速器による実証試験により、当初想定された課題のかなりの部分が検証されたが、(1)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、(2)3000倍の圧縮を可能にするバンチ圧縮スキームと圧縮後の電流分布計測システムの開発、(3)調整を効率的に進めるためのビーム制御系の構築、そして(4)100 mを超えて設置された多数のアンジュレータセグメントが1つの長尺アンジュレータとして機能する精密調整法の確立の4項目が未検証のまま残された。SACLAの実現には、これらの課題を解決する必要がある。

加速器の調整は、電子銃から始まり、最下流に設置されたアンジュレータに進むまでに少なくとも数週間以上を要する。このため、前日までの調整結果が次の日に再現することは調整を積み重ねる上で不可欠である。また、パラメータを最適値に追い込むには、設定の違いを観測量の差として、例えばレーザー強度の変化として観測する必要がある。加速器の不安定性によりレーザー強度が変動していると、パラメータの設定精度はこの強度変動により制限されてしまう。

一番重要なことは、3000倍の圧縮を安定に実現するためのRF機器の必要性能をどのように定義するかであった。目標性能を明確にするため、空間電荷効果を無視したモンテカルロシミュレーションを実施し、ピーク電流変動(標準偏差)に対する各RF機器の感度を調べた。ピーク電流変動が設計値の10%以内になるように、各RF機器からの寄与を等分配して、それぞれの機器の設計目標安定性を決定した<sup>15)</sup>。このシミュレーションにより、3000倍の圧縮のうち、速度変調バンチングが担う約25倍は、レーザーの時間ジッターに吸収され、ピーク電流への影響が小さいことが明らかとなった。目標安定性は、LCLSやEuro-XFELとほぼ同じ、位相安定性で言えば約100 fsとなり、実現可能であることが分かった。それでも、この設計目標値は、試験加速器で達成されている性能をさらに3~4倍改善する必要がある。そこで、RF加速システムへタイミングを配信する高精度タイミング系(メタルケーブルからファイバー長ドリフト補正機構付きファイバーへ)<sup>16)</sup>、IQ Modulator / De-Modulatorによる高精度位相/電圧制御及びフィードバックループ<sup>17)</sup>、電子ビーム基準の高精度位相計測システム<sup>18)</sup>、クライストロンモジュレータをドライブするインバータ充電器の精度向上<sup>19)</sup>、単一絶縁オイルタンクを用いた一体型クライストロンモジュレータ<sup>20)</sup>等に代表される技術開発を引き続き実施

した。

設計目標の高い増幅利得を得るには、250 MeV の SCSS 試験加速器で達成した約 300 倍のバンチ圧縮率を一桁以上上回る 3000 倍を超えるバンチ圧縮が求められた。バンチ圧縮とは、図 4 に示すようにバンチに時間(他の言い方では、進行方向位置)に線形なエネルギー勾配(これをエネルギーチャープと呼ぶ)を与え、電磁石シケインでの行路差を利用し後方の電子が前方の電子との距離を詰め、時間方向にバンチを締め密度を高める操作である。この操作は、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、図から明らかの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、圧縮途中で電流値が局所ピークを持ち、電子ビーム質の劣化を招くことになる。そこで 3000 倍を超える未踏の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過程を線形化する補正非線形チャープを導入し、多段の圧縮プロセスに亘り適切な状態を維持しつつ、最終段階(バンチが直立する付近)において、必要なチャープの線形性を満たすような新たな圧縮法<sup>21)</sup>を考案した。さらにこのバンチの圧縮状態を、レーザー強度で間接的に評価するのではなく直接観測可能なよう

に、圧縮終了後の電子ビームの電流分布を垂直方向に掃引して 10 fsec 程度の時間分解能で観測できる診断システム<sup>22)</sup>の開発も行った。

試験加速器での調整・運転経験によって、効率的な加速器の調整には現実の加速器を表す精密模型が不可欠であることが分かった。しかし、通常のリング型放射光光源とは異なり、電子ビームは時間方向に一様ではなく、電子ビームの実エミッタンスが刻々と変化する線形加速器システムをモデル化することはきわめて難しい。そこで電子ビームのエネルギーが低い領域は円柱ビームを仮定し、レーザー増幅部の空間電荷効果を線形力として取り扱った。規格化エミッタンスを保存させることで、リング型放射光光源の取り扱いと同じく横方向位相空間分布を位置(x, y)とその傾き( $x'=dx/ds$ ,  $y'=dy/ds$ )で、縦方向の位相空間を電子ビームエネルギー E と時間 t で記述する加速器模型<sup>23)</sup>を構築した。この模型を実際の加速器と 1 対 1 に対応させることで、模型に基づく効率的なビーム制御の実現を目指した。

SASE 型の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、位相器、水平・垂直ダイポール補正器ペア、ビーム位置モニター及び 4 極電磁石からできている。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必要がある<sup>24)</sup>。この目標に向かい、全作業は 2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 Self-Aligned Field Analyzer with Laser Instrumentation (SAFALI) システム<sup>25)</sup>により磁場分布が計測され、周期磁場の位相誤差補正が実施された。同様に位相器も、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必要である。

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、3次元位置測量に基づくアライメントから開始し<sup>26)</sup>、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>27)</sup>、電子

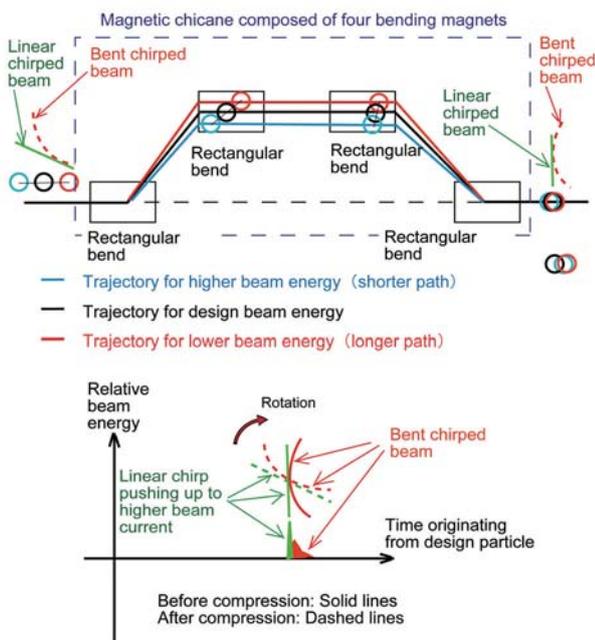


図 4 4 台の矩形偏向電磁石で構成される電磁石シケインにおける圧縮プロセスの概念図(上)と縦方向位相空間における圧縮プロセスの模式図(下)。

ビームを用いたビームベースドアライメント (BBA)<sup>28, 29)</sup> を組み合わせることで、100 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  $\pm 4 \mu\text{m}$  に抑える方針をとった。

第2段階終了後、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想定である。その後は、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 K 値を徐々に低減する) 及び位相器のパラメータの精密調整を実施し<sup>30)</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。

## 5. ビームコミッショニングの経過と直面した問題

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。図 5 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て、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」の大きく 2 つの段階に分けられる。

初期調整は 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進められた。モジュレータ用の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、これと両立可能な加速器上流のビーム調整を同時並行で行った。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、健全な値である  $1 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$  を実測した。試験加速器で確立した手順に従い<sup>31)</sup>、ビームの初期条件の評価、238 MHz サブハーモニックバンチャー

(SHB) の電圧校正とクレスト位相決定、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>32)</sup> によるバ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、第一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  $-28$  度 (クレスト基準) に、第 2 バンチ圧縮器以降の 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出射する準備をほぼ 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。電子ビームの出射を 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、16 番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。この自発光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、 $0.8 \text{ \AA}$  の X 線が生成されていることを確認した。この段階で取り敢えず 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、レーザー増幅はこの時点では確認できなかった。

初期調整ではビームを最終ダンプまで出射することを目標に、スクリーンモニター等限られた情報をもとにビームの調整を行った。精密調整に向け、RF-BPM やオプティカル遷移放射 (Optical Transition Radiation) によるプロファイルモニター (OTR)、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、図 5 に示すステップを踏みながらレーザー増幅可能な高輝度電子ビームの生成に向けた調整を進めた。ここで問題となったのは Coherent OTR (COTR) の発生である。試験加速器の運転において、今まで一度も COTR を経験してこなかったため、SACLA でも当然発生しないと私たちは想定していた。ところが実際には、第 3 バンチ圧縮器 (図 2 の BC3) 以降、極めて強い COTR が発生し、

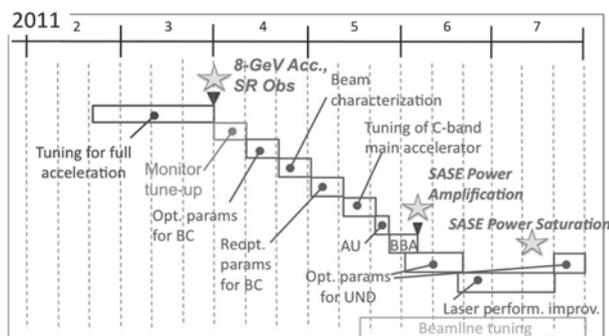


図 5 ビームコミッショニング前に想定したコミッショニング手順とマイルストーン。SASE 出力飽和は 10 月まで延びたが、SASE によるレーザー増幅の初観測まで、コミッショニングはほぼ予定通りに進んだ。

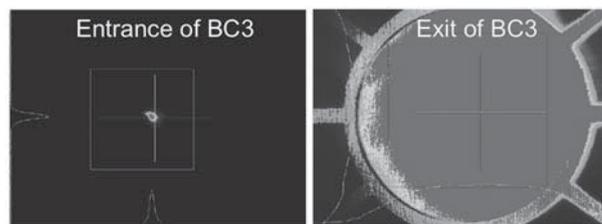


図 6 第 3 バンチ圧縮器入口 (圧縮前) での OTR による正常なビームプロファイル (左) と同じようなプロファイルで見えるはずの第 3 バンチ圧縮器出口 (圧縮後) のプロファイル (右)。COTR の強烈な発光でビームプロファイルが認識できない。

OTR モニターによる電子ビームプロファイルが計測できない状況となった。COTR によりビームプロファイルがどのように見えるかの例を図 6 に示す。色々対策を考えた結果、現状で直ぐに対応可能な対策として、OTR スクリーンを Ce:YAG スクリーンに取り替え、蛍光と OTR の角度発散の違いを利用し、空間マスクで COTR を取り除くことを考えた。第 3 圧縮器直下流に設置されたビーム特性診断エリア内の OTR モニターにこの対策を施し、圧縮後のビームサイズ、電子ビームの電流分布、射影エミッタンスの計測を取り敢えず実施できるようにした。この対策により、3 段のバンチ圧縮システムのビーム調整を曲がりなりに 5 月初旬までに終えることができたが、後述するようにプロファイル計測に大きなシステムティック誤差が含まれており、電子ビームの射影規格化エミッタンスの値は、この時点では  $2\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$  を下回ることは殆どなかった。さらに後から分かったのであるが、多段のバンチ圧縮システムの最終段を線形化する C バンド補正加速管の位相が設計値  $-180^\circ$  から大きくずれていたため、初段のバンチ圧縮器にあるエネルギーリットをかなり狭めて運転せざるを得ない状況になっていた。

アンジュレータラインの調整では、アンジュレータ放射を分光し、その強度<sup>33)</sup>と 2 次元プロファイルが計測できた事が決定的に重要であった。XFEL のコミッションにおいては、加速器と X 線ビームライン(所謂放射光業界では利用系と呼ばれるグループ)間の連携がリング加速器以上に効果的であった。一方、アンジュレータラインのプレアライメント法として期待していたアライメントアンジュレータの X 線を用いる方法は、残念なことに失敗に終わった。原因はアライメント用のピンホールとアラインメントすべき RF-BPM と 4 極の関係が精度良く決まっていなかったためである。皮肉なことに、ピンホールだけは 100 m に亘り数  $10 \mu\text{m}$  の精度で並べることができた<sup>27)</sup>。当初は、アンジュレータラインのビームベースドアライメント BBA(軌道設定と RF-BPM, 4 極電磁石の軸出し)は電子ビームを用いて実施する計画であった。実際に試してみると、考えていた BBA 方式は電子ビーム位置を RF-BPM で測定するデータを使用する限り、矛盾なく収束させることができた。ところが RF-BPM で直線にアラインした筈の軌道は、アンジュレータの自発光の角度(100 m 以上下流での位置)でチェックすると直線から外れているという結果が得られた。色々試しても、両者を整合させることがどうしてもできず、プロジェクトとしての決断を迫られることとなった。結局、より直接的な観測で誤差混入の可能性の少ない X 線での計測結果

をもとにアンジュレータラインの BBA を実施する方針転換を行った。各アンジュレータのギャップ駆動による軌道変動を補正するためのステアリング電流テーブル(以降、ギャップ駆動用補正テーブル)作成、K 値精密調整並びにアンジュレータの高さ調整を順次行った後、各アンジュレータの自発光を上流から 1 台ずつ、100 m 以上下流に置かれた 2 次元検出器(Multiport CCD)上の目標点に入口のステアリングで導く操作を行い、アンジュレータラインの軌道設定とアライメントを実施した。アンジュレータ間に置かれた位相器の設定は、計測ベンチでの磁場測定結果から決められた。最後に、狭ギャップアンジュレータのインピーダンスによる電子ビームのエネルギーロスと自発光の波長シフトにより計測し、ピーク電流依存の K 値テーブル(リニアテーブル)を決定して、SASE によるレーザー増幅初観測迄の加速器の調整は全て終了した。RF-BPM を用いた測定は、結果的にはギャップ駆動用補正テーブルの作成等非常に限定的で補助的なものとなった。

ここまで調整を行った後、6 月 7 日に、電子ビームのエネルギーを 7 GeV、ピーク電流を約 3 kA に設定し、上流から 1 台ずつアンジュレータギャップを約 4 mm(K 値で 1.8)まで閉めていった。7, 8 台のアンジュレータギャップを閉めた辺りから自発光の中にボヤッと構造らしきものが見え始め、さらに閉めていくとスクリーンの蛍光の比較的長い発光時間により、図 7 に示すレーザーの輝点が常時見えるようになった。この SASE によるレーザー増幅の初観測以降は、レーザーの強度をたよりに、それをとにかく高めるようにありとあらゆるパラメータの調整を行った。レーザーの強度は夏前には  $30 \sim 40 \mu\text{J}/\text{pulse}$  まで上がり、そこで頭打ちとなった。

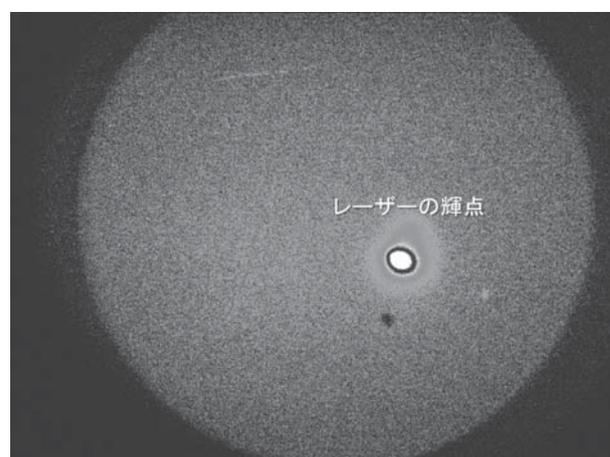


図 7 SASE によるレーザー増幅の初観測時に自発光のバックグラウンドの中に現れたレーザー光の輝点。

夏のシャットダウン期間に、レーザー強度を広い波長範囲でどのように上げていくかが議論され、まずは、加速器を設計パラメータで運転してどうなるかを見ることになった。Cバンド補正加速管の設定位相を $-180^\circ$ の設計値に戻し、BC1のエネルギースリットを広げた状態で、レーズングパラメータを追い込むためには、多段のバンチ圧縮システムに亘りエンベロープをある程度最適化する必要がある。この目的には、レーザーの強度は使えない。そこで調整をガイドするプローブとして電子ビームの射影規格化エミッタンスを用いることにした。これを頼りに、バンチ圧縮条件を設計値に合わせて圧縮後の各段のエミッタンスを上流から $1\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 程度に追い込めれば、必ずや強いレーザー増幅が得られ、そこからはレーザーの強度を使って、パラメータを精密に追い込めるだろうという筋書きである。このためにQ-Scan法<sup>34)</sup>で求めるエミッタンス計測における誤差を減らし、正しいビームエミッタンスが評価できる測定手法の確立を目指した。先ず取り組んだのは、正しいビームプロファイルを測定するためのCOTR対策である。次にCCDカメラの焦点をスクリーン上に正確に合わせた。前者についてはプロファイルが安定して見える様に、ビューポート下流に挿入する空間マスクの形状を縦長の長方形型から色々としてみた。最終的には図8(a)の水平軸方向に对称に配置されたアイリスをもつマスク形状を採用した。これは、電子ビームが垂直方向にディフレクター空洞で延ばされることを考慮したものである。後者については、調整を二段階に分けることで、CCDカメラの焦点を高精度でスクリーンに合わせ込んだ。図8(b)はプロファイルモニターシステムの模式図と上部から撮影した光学系・CCDカメラ部の写真である。先ず、外部光源によりマスクを取り除いた状態でビューポートからスク

リーン上に光を導入し、それを用いてCCDカメラの焦点を粗く調整する。次に、マスクを挿入した状態で、電子ビームを用いてプリセットしたカメラの焦点をプロファイルの幅が最小になるように精密に調整する。このような対策の結果、精度の高い射影エミッタンス計測が2011年の秋に初めて可能になった。Cバンド補正加速管の設定位相を $-180^\circ$ の設計値に戻し、BC1のエネルギースリットを広げた状態で、BC1から順次BC3に向かって、バンチ圧縮器のRF加速位相をビーム誘起法で設計値に合わせ込み、収束パラメータと軌道補正を各段圧縮後の電子ビームの射影規格化エミッタンスが $1\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 前後となるように調整を重ねた。その結果、3段の圧縮器を経て電子ビームのピーク電流が3kAを超えた状態で初めてビームの射影規格化エミッタンスをほぼ $1\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ まで下げることができた。

これによりアンジュレタラインのBBAを実施する基準エネルギー、この当時は7GeV、においてはレーザー強度が向上し、 $100\mu\text{J}/\text{pulse}$ を超え念願の $\text{sub-mJ}/\text{pulse}$ の領域に入り始めた。ところがこのビームエネルギーからエネルギーを下げてレーザー波長を長波長側に変更してもレーザーの出力が思ったように上がらない。定性的には増幅利得が上がりレーザー強度は高くなることが予想されるにも関わらず。結局、短波長、長波長どちらの側に電子ビームエネルギーを変えても、レーザー出力は低下し、基準エネルギーでレーザー強度がピークを示す結果となった。明らかに何かがおかしいのであるが、色々調べても分らなかった。エネルギー変更時には、多段バンチ圧縮システム等上流部は全てパラメータを固定し、加速器の下流部のみパラメータの変更を行う。もちろん加速管のウエーク場のビームに対する影響を緩和すべく、加速・減速を組み合わせ加速器に渡る平均エネルギーが可能な限り高くなるように配慮している。一方でエネルギー変更に伴って、アンジュレタ入口部の条件を固定してもアンジュレタラインの軌道が変化していたので、最初はそれをステアリングで補正し、RF-BPM上で基準軌道へ常に戻っていた。議論している中で、アンジュレタラインでこれ程ディスパージョンが大きくなる原因はあり得ないことに気がついた。確かに線形ディスパージョンの漏れのソースは限られており、個別にその下流で顕著な漏れのないことは逐次確認していた。そこで、取り敢えず基準エネルギーでレーザー増幅している状況から僅かずつエネルギーをずらしてレーザー増幅状態とRF-BPMの測定値を見比べる実験を行ってみた。レーザー増幅状態が高いまま維持されている範囲で、

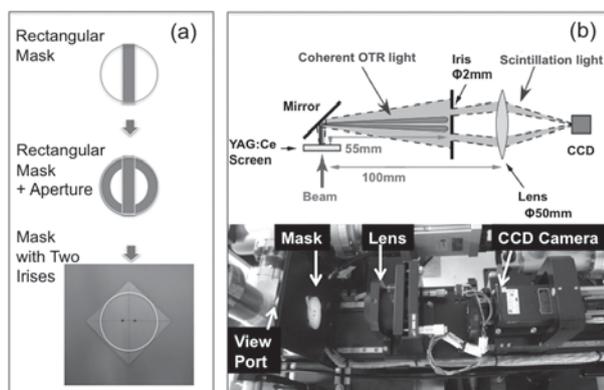


図8 COTRを抑制するためにプロファイルモニターに挿入されたマスク(a)とプロファイルモニターの模式図(b上)と上から撮影した写真(b下)。

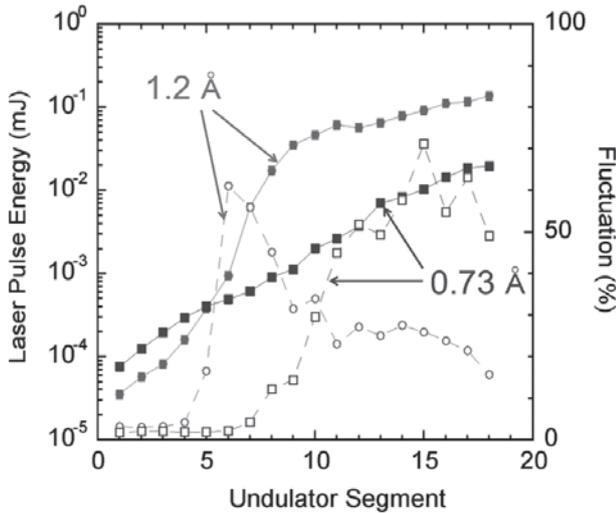


図9 レーザー出力飽和に達している波長 1.2 Å のケースと出力飽和に到っていない波長 0.73 Å のケースの2種類のゲインカーブ (黒塗りのシンボル). 白ヌキのシンボルは強度変動を示す.

RF-BPM 上では明らかなビーム軌道の偏差が発生していた. それを補正して RF-BPM 上で基準軌道に戻したところ, レーザー強度が低下したではないか. これで私達は状況を理解できた. 結局, RF-BPM の測定値をそのまま正しいとして補正することが, 逆にアライメントされた状況を崩していたのである. この実験以降, 基準エネルギーでアンジュレータラインをアライメントした後は, アンジュレータラインのダイポールステアリングを変更しない取り扱いにした. 唯一の例外は, 各アンジュレータのギャップ変更に伴う誤差磁場の变化を相殺するギャップ駆動用補正テーブルの修正 (高精度化) であるが, これは基本的に基準のエネルギーで行えば済む話である. この実験以降, ようやく広い波長範囲でレーザー強度を上げることができるようになった. 2011 年の 10 月半ばのことである. レーザー出力飽和に達していない短波長のゲインカーブが得られたことで, 波長 1.2 Å でのレーザー増幅が飽和に達していることも裏付けられた. 図9に出力飽和に到達している 1.2 Å のゲインカーブと到達していない 0.73 Å のゲインカーブを合わせて示す. これ以降は, 2012 年 3 月からのユーザー運転に向け, 長期間のレーザー運転を可能とする安定化やアンジュレータラインの BBA など定期的に行う各種調整の合理化と自動化等を進めていった.

## 6. SACLA のレーザー性能

表1に2012年3月時点での SASE XFEL の特性をまとめる. 先ずレーザーの強度であるが, 図10に示

表1 SACLA のレーザー性能

Parameter	Achieved Value
Pulse energy (mJ)	0.1 ~ 0.5
Peak power (GW)	> 10
Intensity fluctuation (%)	10 ~ 20
Lasing wavelength (Angstrom)	0.6 ~ 3
Spatial coherence	nearly full

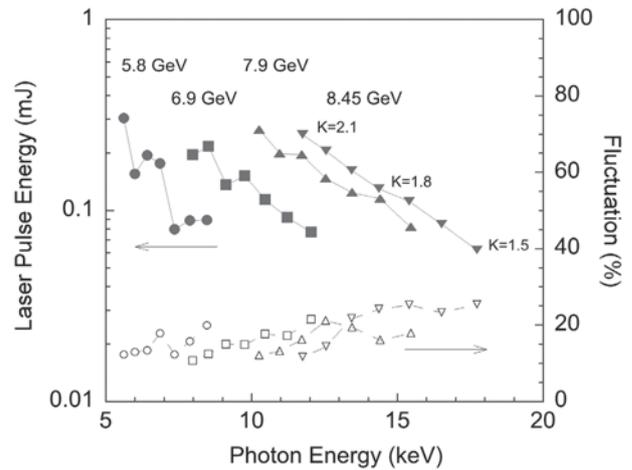


図10 レーザー強度及びその変動とレーザー波長の相関. 各エネルギーで K 値は 1.5 から 2.1 まで 0.1 ステップで変えて強度とその変動を計測.

すように, おおよそ 0.8 から 3 Å の範囲で sub-mJ/pulse のレーザーを提供可能である. 同じ波長であれば K 値が大きい (ビームエネルギーが高い) 方がレーザーの強度は大きくなる. レーザー強度は 1.2 Å の波長で約 0.25 mJ/pulse まで達している.

レーザーのピーク出力はまだ直接観測されていない. バンチ圧縮後の電子ビームの電流分布の実測データから電子ビームのバンチ構造のエンベロップの時間幅は FWHM で 20 から 30 fs である. (1) レーザー場のパルス幅は電子ビームのパルス幅より狭く, 条件によっては半分程度となる, (2) SASE はスパイク構造の時間スペクトルを持ち, スパイクのパルス幅はエンベロップの幅に比べて短い. これらの事実から, レーザーのピーク出力は 10 GW を超えていると推定される.

レーザーのスペクトルの例を同じ波長の自発光と共に図11に示す. この例では 1.2 Å の SASE スペクトルを示した. スペクトル幅は, 自発光に比べ大幅に狭く, 約 0.4% (FWHM) であり, この値はシミュレーションの予測と整合している. このスペクトル幅は高調波 (2 次光, 3 次光) となっても変わらない.

レーザー強度の変動は図10右軸に示すように 10 から 20% の範囲である. 図から分かるように強度変動は

波長が長いほど小さくなる傾向があり、波長 2.5 Å 付近ではほぼ 10% へ収束する。

空間干渉性は、今のところスリット間隔 50 μm のダブルスリットで干渉パターンを観測して評価しただけである。計測された干渉パターンからビジビリティが約 98% と評価された。このことからレーザーのコアは空間的にフルコヒーレントであることが分かった。スリット間隔が 50 μm に制限された理由は、実験配置の制約から、干渉パターンが検出できる条件で決められた結果である。レーザーの空間プロファイルは図 12 に示すように分光前(ピンクビーム)、分光後(単色ビーム)共に、対称性の高い円形の形状をしており、ピンクビームでも Kirkpatrick-Baez (KB) ミラーシステムを用いて、約 1 × 1 μm<sup>2</sup> のマイクロビームが得られている。これらの事実からコアの部分のみならず、レーザービーム全域で空間干渉性は十分高く保たれていると推定され

る。今後、別の観測方法を用いて、空間干渉特性評価の追実験を計画<sup>35)</sup>している。

表 2 に現状での運転性能を示す。レーザーの繰り返しは、10 Hz に下げてユーザー運転が行われている。この理由は、繰り返しを上げるとトリップ頻度が増し、平均トリップ間隔が 30 分を下回るからである。トリップの主原因は、サイクロトンのミスファイヤであることが分かっており、機器インターロックの見直しを現在検討中である。現状では、ミスファイヤの単一事象でも加速器の運転を停止するロジックとなっている。調査の結果、ミスファイヤ後の次のパルスは正常に戻ることが確認されており、単一事象では機器インターロックをかけない緩和措置を実施する予定である。これにより平均トリップ間隔は大幅に改善される見通しで、この改善の後、順次レーザーの繰り返しを目標の 60 Hz まで上げていく。一方で、ミスファイヤにより 1 ~ 2% エネルギーの異なる電子ビームがアンジュレータラインへ入射されることになり、これにより実験中に波長が 2 ~ 4% 異なるレーザーが混じることになる。これらの混入が加速器のビーム制御、並びにユーザー実験に悪影響を及ぼさないように制御ロジックの修正、波長のずれたショットを簡単にモニターして処理できるシステムの準備等を進めている。

サイクロトンのミスファイヤからの復帰は、非常に早く 1 分程度でレーザー運転を再開できる。加速管の放電の場合は、もう少し復帰には時間を要することが多い。復帰後のレーザー性能の再現性は、極めて良く、例えば、強度や波長、レーザー位置はトリップの前後で滑らかに(変動幅の範囲内で)接続できる。実験ユーザーは、トリップの前後でレーザー特性の違いを気にしないで実験可能な状態にある。

ユーザー実験時の運転は、24 時間連続で行われており、レーザー性能の維持を目的とした調整は基本的に実施しない。加速器調整はユーザー実験前に実施し、あらかじめ必要な全ての加速器パラメータを準備している。図 13 に 3 日間に亘るユーザー実験時のレーザー

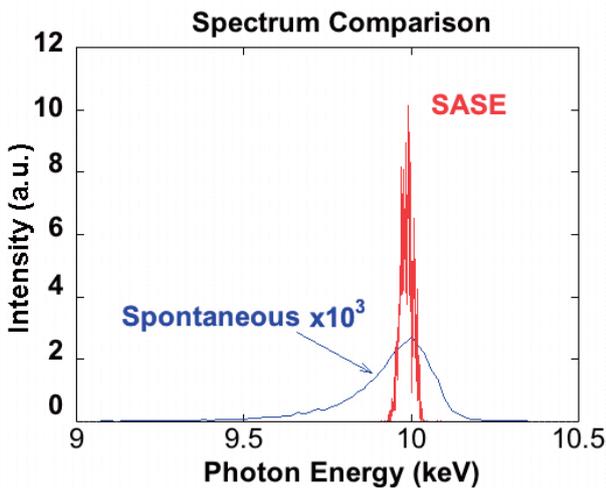


図 11 10 keV (1.2 Å) でのレーザーのスペクトルと自発光のスペクトルの比較。自発光のスペクトル強度は 1000 倍にしたもの。

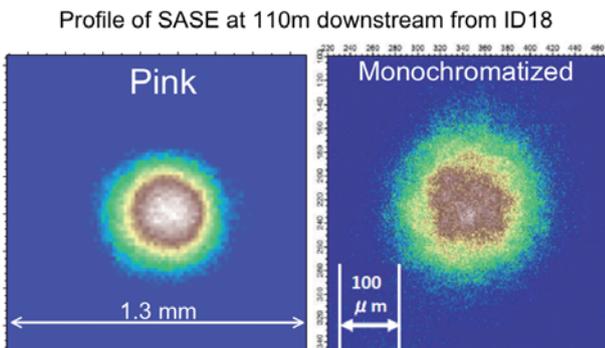


図 12 レーザーの空間プロファイル(左)と分光器で分光後のレーザーの空間プロファイル(右)。波長は 1.2 Å。

表 2 SACLA の運転性能

Parameter	Achieved Value
Mean fault interval @10 Hz(min.)	30 ~ 40
Recovery time from the fault (min.)	1
Repetition rate (Hz)	10
Operation mode	24 hrs continuous
K-value change between 1.5 and 2.1	done freely by users
Availability (%)	~90
Reproducibility (peak:100%)	60~70

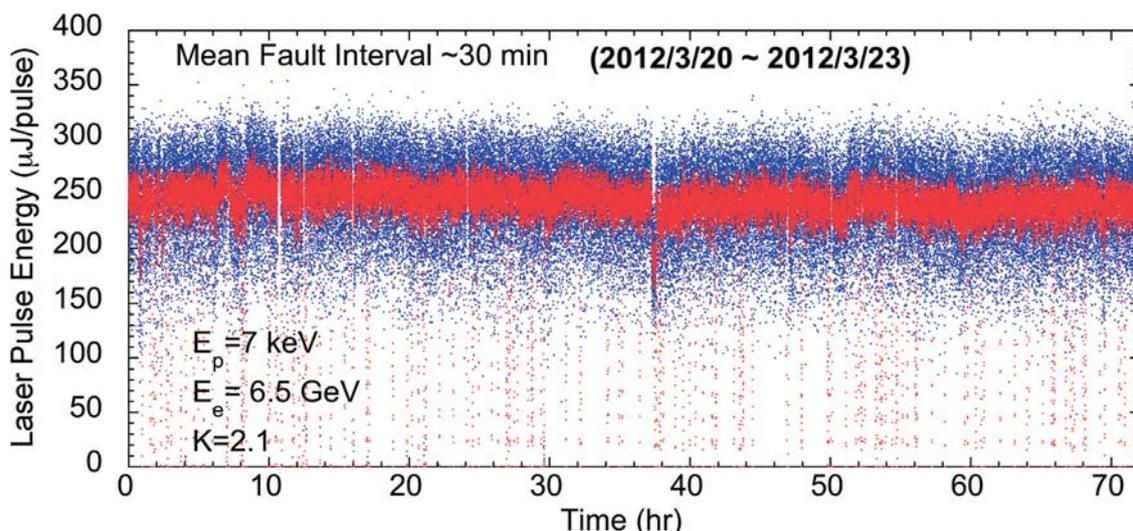


図13 ユーザー運転3日間にわたるレーザーの強度変動.

強度変動とドリフトを示す. この期間の平均トリップ間隔は約30分であり, レーザーの利用率(有効実験時間を計画利用時間で割ったもの)は90%以上となっている. 現状ではまだバンチ長制御のフィードバックが働いておらず, 図13に示す程度の強度ドリフトは発生する状況にある. 現在安定化対策を進めている最中で, この夏以降, 加速器の安定性が改善されるよう精力的に取り組んでいる.

ユーザーに提供しているレーザーの強度レベルは, 調整で得られたピーク性能に比べて, 60~70%程度水準を維持している. レーザー波長変更は2通りの方法で行っている. 大きく波長を変える場合は, 一旦レーザー運転を中止して, 運転員が加速器のパラメータを再ロードしてレーザー特性を確認し実験ユーザーへレーザービームの供給を再開している. このため10分程度の時間を要する. 一方で, レーザーの波長を微調する場合は, その微調範囲が設定波長の $\pm 20\%$ 程度であれば, ギャップ可変アンジュレータの特徴を生かし, 実験ユーザーが実験の要請に応じて実験ホールから実施可能になっている.

## 7. 今後の性能改善

ここ1~2年の短期的なテーマは多岐に渡るが, その中でも代表的なものとして, (1)波長可変範囲の拡大, (2)レーザーパルス幅の制御, (3)レーザー強度の増大, (4)加速器の安定化が挙げられる. (1)は現状, 波長が $2.5 \text{ \AA}$ 以上になると強度が大幅に下がるという問題があり, 長波長側のレーザー強度低下の原因の究明とその対策が急務である. 長波長側にも利用実験からのニーズはあり, 強度を維持しながら波長領域を何処まで長

波長側にのばせるのかは重要である. 一方で短波長域を拡大するには, 電子ビームのエネルギーの最大値を引き上げる必要がある. この可能性として, 現在利用していない暗電流除去用シケイン部<sup>36)</sup>に, C-band加速ユニットを増設することを検討している. これにより $0.5 \text{ GeV}$ 程度のエネルギー増加が見込めるので $\text{sub-mJ/pulse}$ の下限を $0.7 \text{ \AA}$ まで下げることが期待される.

(2)は圧縮状態もしくはK値を制御し, ショートパルスを実現するスキームの検討である. この場合, レーザーのパルスエネルギーは低下するものの, よりショートパルスが利用出来るため, 一部の実験にはメリットがある.

(3)は2つのアプローチを現状検討している. 1つは, 圧縮過程で2次の非線形性まで制御しているスキームを3次までに拡張することで, 電子ビームの線形圧縮領域を今より拡大し, レーザー増幅に寄与する電子ビームの数を増大させるものである. もう1つは, アンジュレータのK値の上限を引き上げることで, よりレーザー増幅利得を稼ぐというものである. SACLAのアンジュレータの現状の最大K値は2.2でギャップとしては $3.5 \text{ mm}$ である. 機械的にはギャップは $2 \text{ mm}$ まで閉めることが可能なので,  $3.5 \text{ mm}$ の最小ギャップを小さくすることでK値を最大で3.2まで大きくする余地が残されている.

(4)は現状, 入射部のRFパラメータのドリフトが止まらず, 多段バンチ圧縮システムの各圧縮器にて, バンチ長のフィードバックをかけられない状況にあり, この改善が緊急の課題である. まずは, 入射器を安定化する必要がある, 加速管の精密温調系, 低電力RF

系とタイミング系のラックの温度制御の精密化, タイミング系のドリフト補正の導入等幾つかの改善策を並行して進めている。

長期的な高度化項目としては, (5) X線領域におけるセルフシードの導入, (6) SCSS 試験加速器の SACLA アンジュレータホールへの移設とアップグレード, (7) アンジュレータラインの高速切り替え, (8) アンジュレータラインの増設, (9) 軟 X線領域におけるシード技術の開発と導入が挙げられる。(5)と(9)はシングルモードで時間コヒーレンスのあるレーザーが得られるため, 実験に対するインパクトは大きい。特に(5)は薄いダイヤモンド結晶1枚とシケインというシンプルな構成の透過型という方式<sup>37)</sup>を用いて, LCLSがこの1月にシード化実験に成功<sup>38)</sup>しており, SACLAでも可能な限り早期に導入を図りたい。セルフシードでは, SASEをシードレーザーとして用いるので, 強度変動が大きいと予想され, その変動を抑制する適当な手法を現在検討している。この夏には, 中央のアンジュレータラインのアンジュレータセグメント18台の内, 上流から9番目を最後のセグメントの後に設置し直し, そこにシケインを導入して, 自己相関計測系を構築し, 電子ビーム電流分布の精密計測から開始する予定である。(7)に関しては, 3年後を目処に, 今年度から電源のR&Dを既に開始している。

## 8. おわりに

SACLAの建設と運転は, ここまでは順調に達成されてきた。しかし, 加速器は道具である以上, 使われて成果が出ることによりその道具の性能にも光が当てられる。SACLAは, この記事でも書いてきたように施設規模縮小だけを単に追求してきた訳ではない。レーザー性能, 安定性, 機能性, 拡張性と実験の利便性にも徹底的に拘ったシステム構築を行ってきた。LCLSとSACLA, そして今後登場してくる新たなXFEL施設で, 利用実験がどのように展開されていくのか, どのような成果が出てくるのか楽しみである。SACLAで展開される新たなサイエンスの成果が私達のアプローチの正当性を証明してくれると信じている。

## 参考文献

- 1) T. Shintake et al., Proc. SPIE 4500 (2001) 12.
- 2) H. Kitamura, J. Synchrotron Rad. **7** (2000) 121.
- 3) T. Shintake et al., Proc. the 1995 Particle Accelerator Conference (1995) 1099.
- 4) K. Togawa et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **10** (2007) 020703.
- 5) M. Dohlus et al., ICFA Beam Dynamics Newsletter **38** (2005) 15.
- 6) H. Tanaka et al., Private Communication.
- 7) J. Arthur et al., SLAC Report 593, 2002.
- 8) M. Altarelli et al., Report No. DESY 2006-097, 2006.
- 9) T. Hara et al., J. Synchrotron Rad. **5** (1998) 403.
- 10) T. Shintake et al., Nat. Photon. **2** (2008) 555.
- 11) 例えば, T. Shintake, Jpn. J. Appl. Phys. **31** (1992) L1567.
- 12) T. Shintake et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **12** (2009) 070701.
- 13) T. Inagaki, Proc. the 24th Linear Accelerator Conference (2008) 1090.
- 14) T. Togashi et al., Optics Express **19** (2011) 317.
- 15) H. Tanaka et al., Proc. the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2007) 613.
- 16) Y. Otake et al., Proc. ICALEPCS'07 (2007) 706.
- 17) H. Maesaka et al., Proc. EPAC'08 (2008) 1404.
- 18) T. Ohshima et al., Proc. the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2011) WEMH05.
- 19) K. Kawasaki et al., Proc. the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator (2008) 565.
- 20) T. Shintake et al., Proc. IPAC10 (2010) 3287.
- 21) K. Togawa et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **12** (2009) 080706.
- 22) H. Ego et al., Proc. IPAC2011 (2011) 1221.
- 23) T. Hara et al., Nucl. Instrum. Meth. **A 624** (2010) 65; Y. Tajiri et al., Proc. the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2011) TUPS051.
- 24) T. Tanaka et al., Nucl. Instrum. Meth. **A 528** (2004) 172.
- 25) T. Tanaka et al., Proc. 30th Int. Free Electron Laser Conf. (2008) 371.
- 26) <http://www.apisensor.com/tracker3-usa>
- 27) T. Morinaga et al., Proc. the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2011) TUPS059.
- 28) H. Tanaka et al., Proc. the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2010) 207.
- 29) R. Yamamoto et al., Proc. the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2011) TUPS062.
- 30) T. Tanaka, Proc. 31th Int. Free Electron Laser Conf. (2009) 524.
- 31) H. Tanaka et al., J. Particle Accelerator Society of Japan **5** (2008) 237.
- 32) H. Maesaka et al., Proc. the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2006) 328.
- 33) T. Kudo et al., Rev. Sci. Instrum. **83** (2012) 043108.
- 34) X. J. Wang et al., Proc. of the 1993 Particle Accelerator Conference (1993) 2486.
- 35) M. Yabashi et al., Private Communication.
- 36) H. Tanaka et al., Proc. of the 23rd Particle Accelerator Conference (2009) WE5RFP051.
- 37) G. Geloni et al., DESY 10-53 (2010).
- 38) P. Emma, presented in IPAC'12, New Orleans, May 20-25, 2012.