

### 3. SACLAの現状と高度化

#### 3-1 SACLAの運転と加速器高度化の概要

2014年度のSACLAの運転は、夏期点検調整期間明けのレーザー性能の再現化に手間取ったものの、年間を通して概ね順調に実施された。表1に運転統計データをまとめる。新しいレーザービームラインBL2を設置するため、夏期点検調整期間が通常より約1ヶ月以上伸びた結果、年間総運転時間は6300時間を下回った。一方で、運転の効率化と加速器機器の改善等を進めた結果、施設稼働率と平均レーザー利用率はそれぞれ、過去最高の99.7%と93%を記録し、また、2013年度比10%増の3400時間を計画した利用実験時間も無事達成できた。

2014年度のBL3における光源性能を表2示す。基本的には2013年度と同様に、10フェムト秒を大幅に下回る高ピークパワー/極短パルスレーザーを安定に供給できた。特に、光源の安定化を推し進めた<sup>[1]</sup>結果、高いピーク電流の電子ビームを安定に生成する事が可能となり4～15 keVの広い波長範囲に亘り、図1に示す様に安定で高いレーザー強度（12 keV以下の光子エネルギーで約0.5 mJ/pulse）をユーザー実験に提供できるようになった。大電力機器、特にサイクロトロン長の寿命化や安定化

表1 SACLAの運転統計

	FY2014
Total Operation Time per Fiscal Year (Achieved / Planned)	6258 / 6274 hr
Operation Rate	~ 99.7%
Machine Tuning Time	382 hr
BL Tuning, Preparation & R&D Time	2276 hr
User Experimental Time	3600 hr
Downtime in User Experiments	237 hr
Laser Availability	~ 93.4%

表2 SACLAの光源性能

Pulse Energy	0.6 mJ @10 keV
Available Photon Energy Range	4 ~ 15 keV
Laser Pulse Duration	< 10 fs (FWHM)
Spatial Coherence	Nearly full
Repetition Rate	30 Hz
Stability Intensity $\sigma_{SI} / I$	$\leq 10\%$
Pointing $\sigma_{\theta z} / z$ (FWHM)	3 ~ 7%
Wavelength $\sigma_{\lambda} / \lambda$	~ 0.1%

等の努力によって、加速器の停止回数は大幅に低減し、基本繰り返しが30 Hzに増加したにも係わらずレーザーの平均停止間隔を52分（2013年度34分）まで引き延ばす事ができた。

加速器高度化の成果としては、新しいビームラインBL2の建設・立ち上げが挙げられる。BL2に設置する真空封止アンジュレータの仕様は、互換性を考えBL3と共通(周期長18 mmで周期数277)とした。BL2とBL3のレーザー波長の独立性は、それぞれのビームラインに提供される電子ビームのエネルギーを自在に変更できるTime Interleaved Multi-Energy (TIME) 加速<sup>[2]</sup>により保障する。夏期点検調整期間に図2 (A) に示す様に15台のアンジュレータセグメントをSACLA光源棟内に設置すると共に、ビームダンプまでの電子ビーム輸送系、その後のフロントエンド、光学ハッチと実験ハッチ内のX線光学系と検出器等の整備を行った。BL2の使用に先立つ施設検査を10月8日に合格し、電子ビームを使ったレーザー増幅に向けた調整を開始した。調整は順調に進み10月21日には10 keVの光子エネルギーにてレーザー増幅の初観測に成功(図2 (B))した。冬期点検調整期間には、さらに3台のアンジュレータセグメントをBL2に増設すると共に、最大60 Hzの繰り返しでパルス毎のレーザー振り分けを可能にするため、DC駆動のビーム振り分けシステムをパルス駆動のシステムに置き換える等、線型加速器終端からBL2のアンジュレータまでのビーム

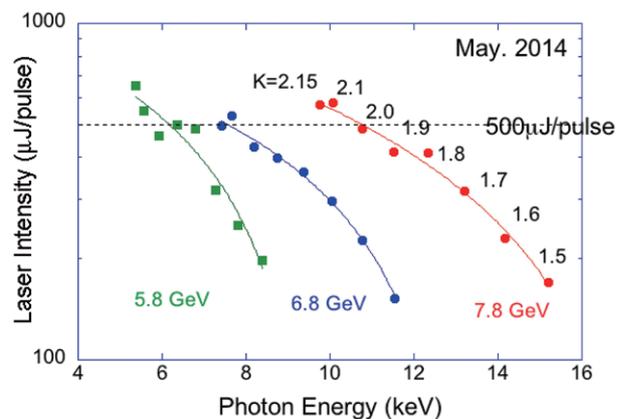


図1 2014年5月のレーザー波長毎のレーザー強度  
基本的に12 keV以下の光子エネルギーにおいては、K = 2.1の点（エネルギーの異なる3本の曲線の最上部付近）で利用レーザー波長を提供するよう電子ビームのエネルギーを調整する。

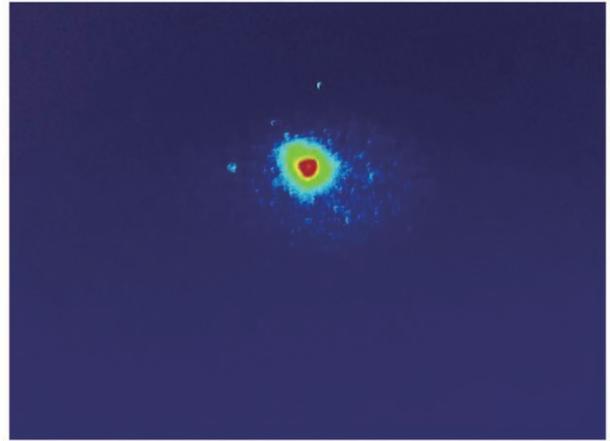


図2 新たに設置されたBL2のアンジュレータライン (A:左図)  
10 keVの光子エネルギーにおいてレーザー増幅が観測された直後のレーザーのプロファイル (B:右図)

輸送系の改造を実施した。今後は、2015年度の早い時期にユーザー実験への導入を目指し、BL2でのレーザー性能の向上を図っていく。

#### 参考文献

- [1] H. Maesaka et al.: Design and performance of the optical fiber length stabilization system for SACLA, *Proc. of IPAC2014*, Dresden, Germany, (2014) pp.1906-1908.
- [2] T. Hara et al.: Time-interleaved multienergy acceleration for an x-ray free-electron laser facility, *PRSTAB* **16** (2013) 080701.

### 3-2 ビームライン・実験ステーション

#### 3-2-1 ビームライン・実験ステーション・関連システムの開発と高度化

2014年度に実施された、主なビームライン・実験ステーション・関連システムの開発と高度化項目を下記に示す。

- a) BL2の整備と立ち上げ。詳細は (1) に示す。
- b) ビームスプリッターを用いたアライバルタイミング計測・スペクトル計測基盤の開発、導入、及び試験。ポンプ・プローブ実験において100フェムト秒を切る時間分解能を目指す。2015年3月には、共用運転においてはじめて試験利用を行った。
- c) BL3 EH2に「アクセスモード」を新設。下流ハッチを利用している際にハッチ内のアクセスを可能とし、実験準備の効率を高めた。
- d) 500 TWレーザーシステムの立ち上げ
- e) DAPHNISシステム等の共通実験基盤システムの高度化
- f) MPCCDの高度化

g) DAQの高度化

h) FX10の利用開始。詳細は (2) に示す

#### (1) BL2の立ち上げ

SACLAは、2012年3月より、XFELビームライン (BL3) と広帯域自発放射ビームライン (BL1) の2本のビームラインについて供用運転を行ってきた。BL3では世界最短波長のXFEL光が安定に供給され、数々の優れた成果が報告されるようになった。一方で、現在世界で稼働しているXFELビームラインは、SACLA BL3と米国LCLSの2本のみであり、ビームタイムの不足が世界共通の課題と認識されていた。国内の学術・産業界の利用者や研究者の方々からも、利用機会の拡大について強く要望されており、この問題に応えながらSACLAの国際競争力を高めるために、2013年度に、BL3に続く2本目のXFELビームラインBL2の整備を行い、2014年10月から精密調整を開始した。

BL2を利用するために、既存の実験ハッチに変更を加え、BL2向けとしてEH3及びEH4bを整備した。実験装置本体はEH3に設置され、必要に応じて、EH4cに小角領域のX線信号を計測するための検出器を配置することが想定されている (図1)。EH3には、1ミクロン集光装置が常設されている。この装置は、BL3でこれまで用いられていた1ミクロン集光装置 (大阪大学山内和人教授の研究グループとの共同開発、H. Yumoto et al., "Focusing of X-ray free-electron laser pulses with reflective optics", *Nature Photonics*, 7, 43-47 (2013)) をさらに安定化し、かつ有効開口を拡げて高強度のXFELを利用可能とするものである。また、BL3と同様に、ポンプ・プローブ計測のためのフェムト秒光学レーザーも導入された。

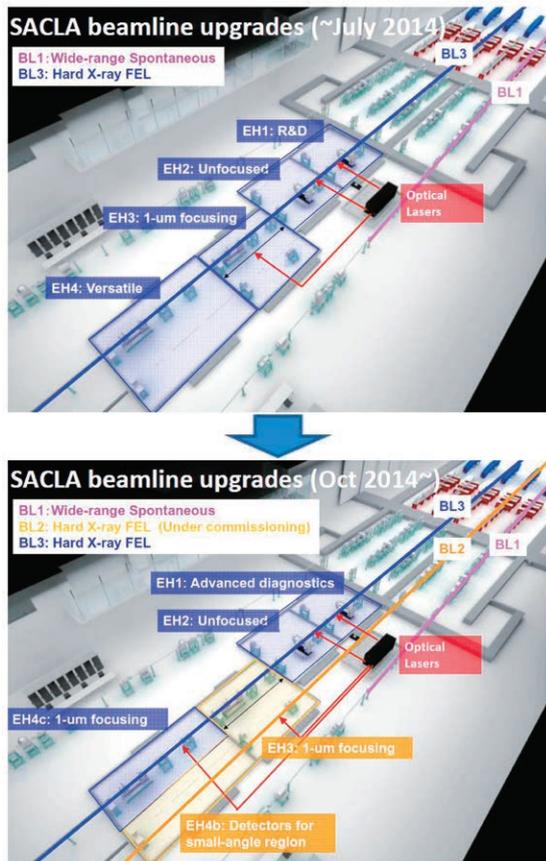


図1 SACLA実験ホールのレイアウト  
(上: 2014年7月以前 下: 2014年10月以降)

(2) FX10の運用

SACLAとスーパーコンピュータ「京」の連携による実験データ解析技術開発を加速するためにFX10スーパーコンピュータシステム(通称:ミニ京)を2013年度末に導入した。SACLAの利用実験では1日あたり最大で500万個の2次元データが取得され、このような大量データの解析では「京」などのスーパーコンピュータを利用することが効率的である。「京」との互換性の高いミニ京は、「京」での高精度解析を行う前の事前(粗い)解析、および、大量データの解析ソフトウェアの開発を目的としている。

ミニ京は、計算ノード群、管理サーバ群、ストレージ群から構成されるシステムであり、その仕様概要を以下のテーブルに示す。

[PRIMEHPC FX10]

計算ノード	384ノード(4ラック) SPARC64 IXfx
総理論演算性能	90.8 TFLOPS(1ノードあたり236.5 GFLOPS)
総主記憶容量	12 TB(1ノードあたり32 GB)
共有ファイル容量	グローバルファイルシステム500 TB ローカルファイルシステム100 TB
インターコネクト	6次元メッシュトラス(5 GB/sec双方向)

[SACLA実験データをFX10に転送するための中継ストレージシステム]

共有ファイル容量	1 PB
----------	------

SACLAでは、大量実験データの読み出し、および、1次データ解析用として約13 TFLOPSの計算能力をもつデータ解析システムをユーザーに提供してきた。ミニ京と同時期に導入した中継ストレージシステムは、データ解析システムとミニ京の両方の計算ノードから直接アクセス可能であり、これを介してデータ解析システムでの前段処理とミニ京での後段解析を効率的に組み合わせることで、迅速な成果創出が期待できる。2014年度は、ミニ京の運用が開始され、SACLAユーザーがコヒーレントイメージング等の実験データの解析を行った。

3-3 利用成果

2013年度に引き続き、2014年度も、生物学、化学から基礎物理学やX線量子光学に至る幅広い分野で、SACLAならではの利用実験が実施された。2014年度に報告された利用成果の一部を下記に示す。

- a) 「世界最高強度で探る真空」(東大 浅井祥仁教授ら)  
非常に強いSACLAのX線を利用して、光・光散乱の計測を行うことにより、真空中に潜んだ未知の場の探索が行われた。(Inada et al., Phys Lett B, doi: 10.1016/j.physletb.2014.03.054)
- b) 「無損傷結晶構造解析」(理研 吾郷日出夫専任研究員ら)  
SACLAのフェムト秒X線パルスを用いて、結晶が物理的・化学的な損傷を受ける前のオリジナルの分子構造を決定する手法を開発した。(Hirata et al., Nature Methods, doi:10.1038/NMETH.2962)
- c) 「X線可飽和吸収の観測」(電通大 米田仁紀教授ら)  
世界最高強度のX線を生成するSACLA 50 nm集光システムを用いて、X線領域の「可飽和吸収」現象を世界で初めて観測した。(Yoneda et al., Nature Commun. doi: 10.1038/ncomms6080)
- d) 「光化学系II複合体の正確な分子構造の決定」(岡山大、沈建仁教授ら)  
SACLAのフェムト秒X線パルスを用いて、光合成を司る重要なタンパク質複合体である光化学II (PS-II)の正確な構造を、1.95 Åという高い分解能で決定した。(Suga et al., Nature, doi:10.1038/nature13991)
- e) 「分子の生成過程をピコ秒で計測」(KEK 足立伸一教授ら)

SACLAのX線パルスと紫外レーザーパルスを組み合わせることにより、金イオンから新しい分子を生成する過程をピコ秒分解能で計測した。(Kim et al., Nature, doi: 10.1038/nature14163)

### 3-4 SACLA産学連携プログラム

SACLAは極めて高い輝度、短いパルス幅、高い空間コヒーレンス特性を持つ、新しいX線光源であり、幅広い先端科学に革新をもたらすとともに、高度な産業の発展に貢献すると期待されている。一方で、既存光源の能力を遥かに超えたSACLAを駆使した研究活動を行うためには、利用装置・手法の検討と開発からはじめる必要がある、企業が主体となった利用を行うためのハードルは依然高い。

この状況を変革し、SACLAを使った産業イノベーションを進めて行くために、RSCは、JASRI・大学・研究機関・企業の協力のもと、SACLAの産業利用振興に必要な調査研究を目的とした「SACLA産学連携プログラム」を2014年度に実施した。公募、審査を経て、以下の2件が採択され、SACLAの現地研修を含むプログラムを実施した。企業の研究者に、SACLA利用を体験・評価頂くことにより、実験中のみならず事前の試料準備、事後のデータ解析も含めたシステムを構築していく上で極めて有益な情報を得ることができた。2015年度以降も継続して実施する予定である。

#### 1. 「創薬ターゲット蛋白質のシリアルフェムト秒X線結晶構造解析」

課題代表者：理化学研究所  
放射光科学総合研究センター  
SACLA利用技術開拓グループ  
グループディレクター 岩田想  
参画機関：第一三共RDノバーレ株式会社、  
武田薬品工業株式会社、  
創薬産業構造解析コンソーシアム

#### 2. 「XFELを用いた自動車用ナノマテリアルの形態や状態の把握」

課題代表者：国立大学法人北海道大学  
電子科学研究所 教授 西野吉則  
参画機関：トヨタ自動車株式会社

ポートを受けながら、学生自らの研究計画に基づく実習研究を進めるとともに、SACLAを支える加速器・光源の研究スタッフや、SACLAを利用する国内外の一流の研究者との交流や議論、ワークショップへの参加を通して専門以外の幅広い分野も俯瞰する。本プログラムを通して、大学とSACLA間の連携の一層の強化を図り、我が国の科学技術力の持続的な発展に資する。公募、審査を経て、2014年度は、3名の大学院生が本プログラムに採択され、質の高い研究実習活動をSACLAにおいて実施した。

XFEL研究開発部門

田中 均

矢橋 牧名

### 3-5 SACLA大学院生研究支援プログラム

新しい光源であるSACLAの利用を今後飛躍的に発展させるためには、創意と熱意にあふれた若手研究者の貢献が不可欠である。このために、2014年度、RSCは「SACLA大学院生研究支援プログラム」を立ち上げた。本プログラムは、意欲ある大学院生を実習生としてSACLAに一定期間受入れ、SACLAの先端利用を切り拓く研究実習活動を行いながら、研究者としての基礎力を養成するものである。SACLA利用系研究スタッフのサ