

2. SACLAの現状と高度化

2-1 運転・加速器

2016年度はBL2、BL3の2本のXFELビームラインにより、ユーザー運転をスタートさせた。7月中旬からはBL1での軟X線 (SX) FELのユーザー利用も開始された。図1に2本のXFELビームラインと1本のSXFELビームラインが整備されたSACLA施設 (2017年3月現在)の模式図を、表1に2016年度の運転統計データを示す。BL2/BL3の利用運転時間は昨年度同様に全運転時間の約60%程度となった。SACLAの全運転時間は減少したものの、BL1のユーザー利用時間を含めれば、全体で4000時間以上の利用運転時間を確保することができた。2015

表1 SACLAの運転統計

	FY2016
Total Operation Time per Fiscal Year (Achieved / Planned)	5861 / 5934 hr
Operation Rate	~98.8%
Machine Tuning Time	90 hr
BL Tuning, Preparation & R&D Time	2369 hr
User Experimental Time (BL2,3+BL1)	4026 hr BL2,3=3402 hr BL1=624 hr
Downtime in User Experiments	101 hr (BL2,3) 29 hr (BL1)
Laser Availability	~97% (BL2,3) ~95% (BL1)

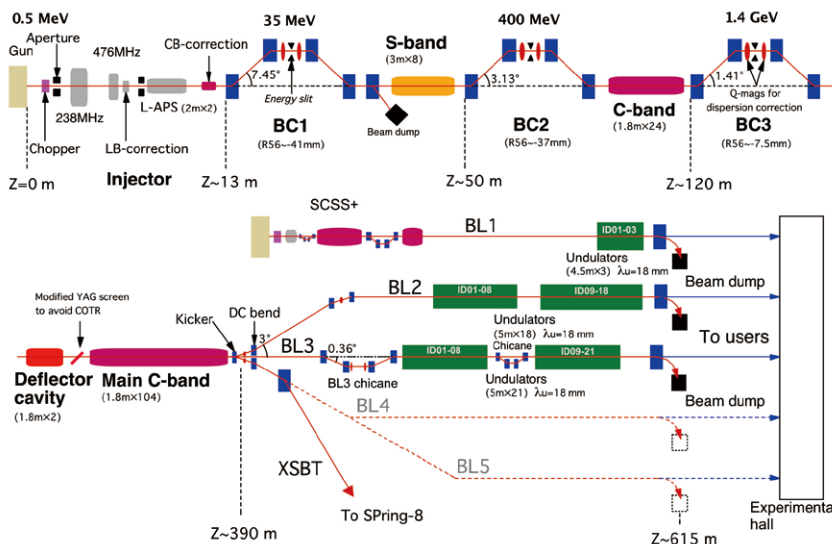


図1 2017年3月時点でのSACLA施設の模式図。

2本のXFELのビームライン、BL2とBL3とSXFELビームラインBL1が同時に利用可能である。BL2へのビーム輸送路は、レーザーパルス振り分けによりフル性能のXFELを提供できるように対称性の高いビーム輸送路の入口と出口にDBAセルを配置した輸送路に置き換えられている。BL1はSACLAの線型加速器から物理的にも、インターロッキング的にも切り離され、専用のBL1専用加速器により単独で運転が可能になった。

年度に引き続き、通年に亘り高いレーザー強度を安定的に提供することができ、2016年度後半からはBL2/BL3において60Hzの繰り返しでユーザー実験にレーザーを提供した。実験時のレーザー利用率はBL1、BL2/BL3共に95%を超える高い値となった。

BL2とBL3の2本のXFELビームラインにパルス毎にレーザーを振り分ける運転^[1]は実現したものの、ユーザー運転への導入には至っていない。その理由は、BL2へのビーム輸送路においてCoherent Synchrotron Radiation (CSR)によるビーム品質の劣化が無視できず、BL3単独運転時に得られるレーザー性能を、BL2/BL3を用いたレーザー振り分け運転で提供できないからである。この課題を克服するため、CSR抑制の詳細な検討が実施され、ビームスイッチヤードを含むBL2へのビーム輸送路の大幅な改造が必要である事が分かった。CSRによるビームへの摂動はシステマティックであり、主要な発生源であるビーム偏向部で加わる摂動を相殺する配置を取ること、さらに輸送路全長に亘り、CSR放射の状況が変化しないよう、パンチ長を一定に維持すること ($R_{56} = 0$) が本質的に重要である。これにより10 kA程度の高いピーク電流を輸送しても電子ビームの品質を維持できることがシミュレーションで明らかになった。一方でこの条件を満たすには、現状の上流から下流に向かってアンバランスに配置されたビーム偏向部を大幅に組み変える必要がある。輸送路改造の概要は、先ず、振り分けパルス磁石も含め、上流の3度曲げの部分に位相差 π のDouble Bend Achromat (DBA)で構成する。各偏向磁石の偏向角は同一の1.5度とし、2つの偏向磁石からの摂動の大部分をDBAセル内で相殺する。中央の収束4極磁石にオフセットを与える事で逆偏向磁場を加え R_{56} の値もゼロにすることが可能になる。下流の-3度曲げ戻す部分も同様に位相差 π のDBA (各偏向磁石の偏向角は-1.5度)で構成し、2つのDBAの位相差を π の奇数倍に合わせる。これにより、1つのDBAセルの2台の偏向磁石を通過する際の電子

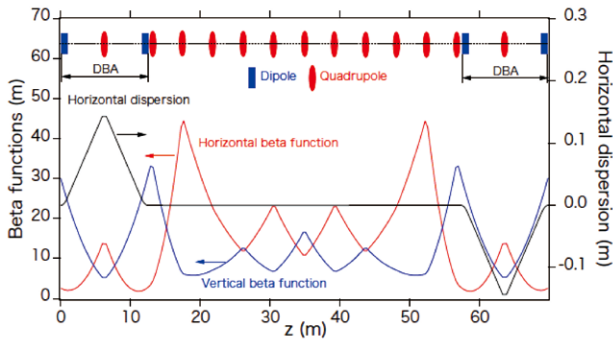


図2 CSRによるビーム質の劣化を抑制するため、新しく設計されたDDBAビーム輸送路。

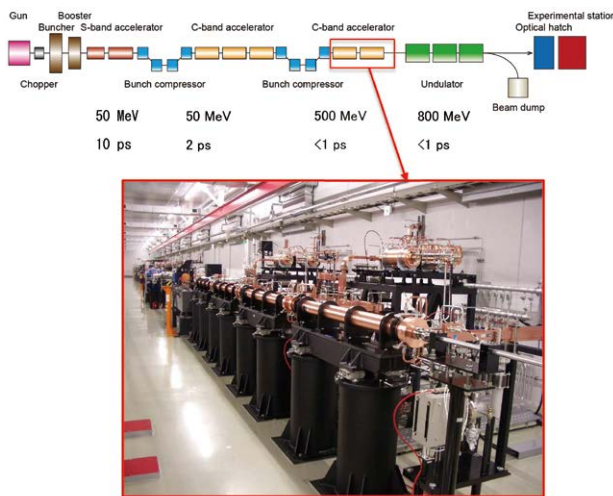


図3 BL1専用加速器システムに新に追加されたC-band加速器2ユニット。これにより最大加速ビームエネルギーが800 MeVまで引き上げられた。

ビームのエネルギー偏差による「摂動相殺のおつり」まで取り除くことが原理的に可能になる。設計したBL2ビーム輸送路のオプティクスを図2に示す^[2]。このCSR抑制型Double DBA (DDBA) ビーム輸送路の実現で最も高いハードルは、8 GeVの電子ビームを、+1.5°、0°、-1.5°の3方向に任意のパターンで正確に、最大60Hzで蹴り出すキッカーを駆動する高出力バイポーラパターン電源の開発である。このため、2016年度初めからこの電源の開発に着手した。一方で2016年夏に、新しいビームスイッチヤードを構築するスペースを確保するため、加速器最後尾のC-band加速システム2ユニットを上流の旧暗電流除去シケインのスペースに移設した。2016年冬期停止期間には、図2に示すDDBAビーム輸送路を加速器トンネルからアンジュレータホールにかけて建設した。改造後の年明けの運転では、先ずは改造したシステムを用いて、BL2、BL3それぞれの単独XFEL運転を再現し、これまで通りのユーザー運転を保障することを優先した。これにより、短パルス高出力XFELのパルス振り分け運転の実用化を2017年度以降に目指せる体制を整えた。

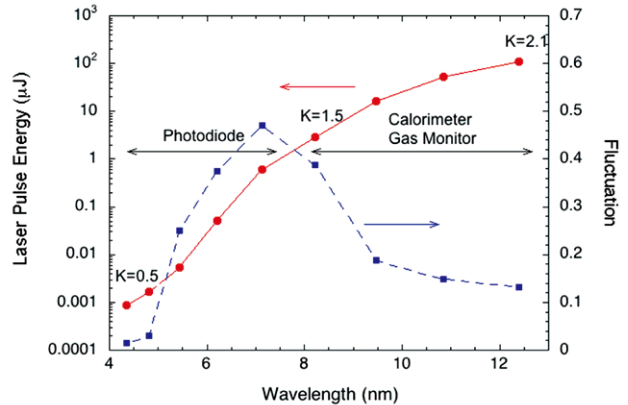


図4 BL1において実測されたレーザーのゲインカーブ。図中の赤丸はレーザーのパルスエネルギーの平均値を、青四角はパルスエネルギーの変動幅 (r.m.s. 値) を示す。この測定に於いて、電子ビームのエネルギーは780 MeV、電荷量は0.23 nCであった。

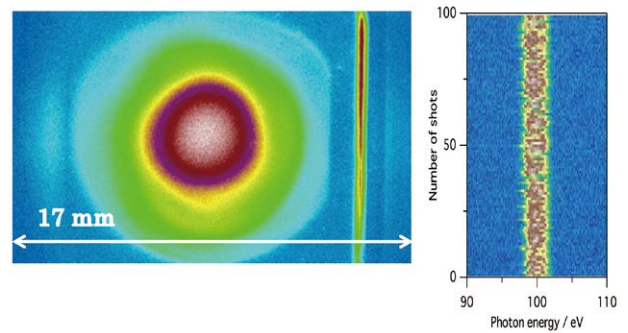


図5 FEL発振波長12 nm (100 eV) においてBL1光学ハッチ内のCe:YAG screenで計測されたビームプロファイル (左) とスペクトルの安定性 (右)。

BL1では、最短波長30 nmのSXFELをユーザー実験に提供するため、昨年度からビーム調整が続けられてきた。5月には、レーザーのパルスエネルギーで20～30 μJが安定に再現良く提供できる目処が付き^[3,4]、何回かのテスト利用を経て、7月15日から本格的なBL1のユーザー利用を開始した。BL1はRF高出力系が既に改善されており、レーザーの繰り返しは60Hzで運用されている。夏期停止期間に、BL1専用加速器の最大ビームエネルギーを500 MeVから800 MeVに引き上げるエネルギー増強改修 (図3参照) を実施し、SXFELの最短波長を10 nm前後まで低減可能とした。夏期停止期間明けのレーザー再現化、レーザー短波長化の調整も順調に進展し、2016年末までには、13 nmの波長においてパルスエネルギーで100 μJを安定に出力できる状態となった。2016年の冬には、BL1とSACLAを繋いでいたビーム輸送路を撤去すると共に、インターロックにおいてもSACLAから切り離して独立なシステムとした。図4にK値を用いたゲインカーブを、図5に典型的なレーザープロファイルとレーザー波長の安定性を示す。2016年度秋以降、10～

60 nmの波長範囲で安定なSXFELをユーザー実験に提供できるようになった。

References

- [1] T. Hara et al.: *PRAB* **19**, (2016) 020703.
- [2] T. Hara et al.: *Proc. of 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan*, (2016) pp. 282-285.
- [3] T. Inagaki et al.: *Proc. of 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan*, (2016) pp. 286-290.
- [4] T. Sakurai et al.: *Proc. of IPAC2016, Busan, Korea*, (2016) pp. 757-759.

国立研究開発法人理化学研究所
放射光科学総合研究センター
XFEL研究開発部門

田中 均