

訪問

H O U M O N



(提供 理化学研究所)

SACLA 訪問記

高橋 浩之

Takahashi Hiroyuki

はじめに

SACLA (SPRING-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) は、第三世代放射光の10億倍を超える輝度を持つ国内初のX線自由電子レーザーとして、この3月からユーザーへのX線ビームの供用が開始された。第三世代の放射光は第二世代よりも1,000倍程度の強度であったのに比べるとその進歩は画期的であり、正に世界の注目を一身に集める高輝度光源が完成したのである。今回は、日本アイソトープ協会において企画されたR&I見学会(6月1日(金)開催)に参加したので、その概要を報告する。

SACLA と SPing-8 の概要

SACLA は全長 700 m、加速エネルギー 8 GeV の自由電子レーザーであり、 0.6 \AA を最短波長とし、X線領域の極めて高強度の光を生成する装置である。理化学研究所播磨研究所(兵庫県佐用郡佐用町光都)の敷地内に SPing-8 に隣接して建設された。建設には 2006 年から 5 年間にかけ、388 億円の費用が投じられた。世界では X 線自由電子レーザー (XFEL) は現在 3 機のみが実際に稼働・建設中である。SACLA 以

外には、米国 SLAC (SLAC National Accelerator Laboratory) の LCLS (Linac Coherent Light Source)、ヨーロッパのハンブルグに建設中で 2015 年に完成予定の European XFEL の 2 台であるが、どちらも、SACLA の 3~5 倍程度のサイズであるにも関わらず、SACLA の方が世界最短波長の 0.06 nm で発振する能力を持っている。今回の R&I 見学会は、現地集合であった。新幹線で東京からは 4 時間程度掛かって相生に着き、バスで 30 分程度掛けて SPing-8 の正門までやってくると、今回の見学会の集合場所である放射光普及棟がすぐそこにある(写真 1)。SPing-8 などの全体が分かりやすく紹介されている展示があり、少し早めに来られた参加者の皆さんも楽しんでおられた。ここでは全体概要の説明と SPing-8 と SACLA のそれぞれについてビデオによる紹介が行われた。SPing-8 は第三世代の大型放射光施設として、ヨーロッパの ESRF (European Synchrotron Radiation Facility)、アメリカの APS (Advanced Photon Source) と共に既に広く知られている。特に SPing-8 はこれらの中でも世界最大の 8 GeV のエネルギーを誇る大型放射光施設であり、1997 年の運用開



写真1 放射光普及棟 展示室



写真2 田中部門長による講義の様子

始以来、周長 1,436 m の巨大な蓄積リングから放出される赤外から 100 keV 程度の高エネルギー X 線領域に至る高強度のシンクロトン放射光を用いて、国内外にわたる国際共同利用が進められ、物質科学・地球科学・生命科学・環境科学・産業利用などの分野で貢献している。ビデオでは、タンパク質の分析、Cd や As などの環境有害物質を選択的に吸収する植物の分析と利用、地殻構造の解析、燃料電池開発、はやぶさが小惑星イトカワから持ち帰ったカプセル中の物質分析など、数多くの成果を挙げてきたことが紹介されていた。また、和歌山毒物カレー事件では、最先端技術による科学捜査の一環として微量元素の分析と、それらの成分比から産地の同定にまで活用されたことも多くの方の記憶に留まっていることであろう。SPring-8 においては近年、産業利用に力を入れており、多くの企業が利用を進めているとのことである。また、2009 年には 20 億円を投じて建設された(株)豊田中央研究所のビームライン (BL33XU) が完成し、触媒、二次電池、燃料電池の研究のために時分割の X 線吸収微細構造分析などの運用が行われている。2012 年現在で 54 本のビームラインが稼働中で、3 本が建設中、施設の能力としては 62 本までなので、残りは 5 本ということである。

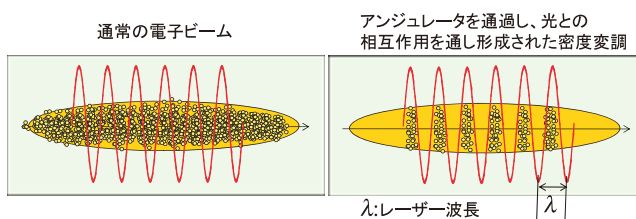


図1 電子ビームにおける密度変調の形成

筆者がまだ建設中に訪れたとき、ここにビームラインが設置される予定であるとの説明を聞いたことを思い出すと、隔世の感がある。

SACLA の開発

SPring-8 の巨大な蓄積リングの外側を車で一周し、リングから外に飛び出した長尺ビームラインや、医学利用実験施設などを含めた全体のスケールの大きさを実感した後に、中央管理棟へ移動して、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 研究開発部門の田中均部門長から、SACLA 建設に纏わる裏話などを交えた施設の詳細な説明を聞いた (写真 2)。通常のレーザーは、現実には存在する物質を用いているために、原子の配列間隔によって発振波長は大きな制約を受けるが、電子そのものを空間中に自由に配列すれば、そのような制約は取り払われる。高速で移動する電子の集合体 (電子ビーム) にレーザー波長の密度変調 (図 1)

を形成することができれば、X線領域でのレーザー発振も可能となる。一方、X線領域の光は可視光のように容易にミラーで反射させて反対方向に戻すことは難しいので、長いアンジュレータ（電子を水平面で蛇行させる垂直交番磁場を生成する装置）により電子ビームを多数回（最大5000回）蛇行させ、図1に示す構造を電子ビーム上に形成しつつ、それによる誘導放射を実現し、生成したX線領域のレーザー光を様々な実験に利用しようというものである。SACLAの開発は日本独自の技術を活用して、欧米のやり方とは一味違うX線自由電子レーザーを実現しようということから始まった。既存の大きな加速器を用いて実現するのではなく、X線自由電子レーザーのためだけに最初から設計された専用の小型の加速器を用いてコンパクトな、信頼性の高いX線ビームを実現しようとするものである。発振可能なX線の波

長は、電子のエネルギーの2乗に反比例し、電子ビームに形成された密度変調の間隔に比例するが、密度変調の間隔を日本の真空封止アンジュレータの技術を用いて極限まで狭くすることで、電子のエネルギーを欧米の装置に比べて半分程度まで抑えることが可能になる。エネルギーを小さくすることは加速器全体のサイズに大きく関係する。電子銃は安定性の高い熱電子によるものとし、ビームの品質を高くすることに集中する。加速管は従来用いられていたSバンド(2,856 MHz)の約2倍の周波数を持つCバンド(5,712 MHz)を採用し、高周波を用いることの利点を生かした小型化を図る(写真3)。ところが、当初は、その小型自由電子レーザーのコンセプトは、国内外においてにわかには受け入れがたいものであったため、まず2005~2006年までにSACLAの1/32の大きさの小さなプロトタイプ装置を建設して性能実証を行った。この性能実証試験は成功を収め、0.25 GeVの小型のプロトタイプ装置(SCSS: SPring-8 Compact SASE Source)において、無事発振が確認され、SACLA本体の建設が2006年から始められた。2009年に世界最初にX線領域で動作したSLACのLCLSに比べて、SACLAは全長700mとほかのX線自由電子レーザー施設と比較して大変コンパクトでありながらも(図2)、2011年6月7日の発振以降、順調に動作し、設計時の最大出力を実現し、2012年3月から実際にユーザーへのビームの供給を開始したのである。このように短期間で立ち上がり、ここまで特に大きなトラブルに見舞われる



写真3 Cバンド加速管カットモデル

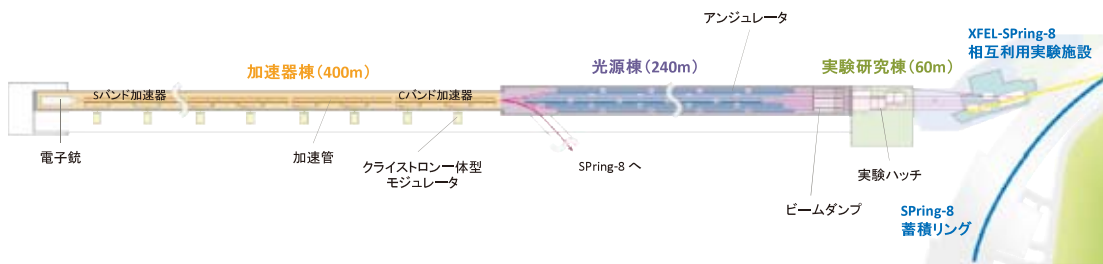


図2 SACLA 模式図 (提供 理化学研究所, 一部改変)



写真4 田中部門長

こともなく来たことに、田中部門長は、逆に驚きを感じていた。また、このように難しい技術を成し遂げたにも関わらず、あまりにも順調に建設から調整を経て、利用実験まで進展したため、その難しさが一般の方々に理解されにくくなったかもしれないとのことであった（写真4）。これは日本の技術の素晴らしさを感じる一幕でもあった。SACLAの利用は、とにかくX線の強度が高いので、これまで分析不可能であった、小さな結晶でも十分なデータが得られ、構造の決定が可能になること、また、電池などエネルギーサイクルに貢献する素材の開発、超伝導体などにも期待しているとの説明があった。現時点で既に、X線ビームの強度は10GW以上の値が実現され、その安定性もおおむね20%程度の値が達成されている。X線エネルギーの低領域での安定性は高く、10%程度に落ち着いているとのことである。

SACLA 施設の現状

その後、見学となった。SPring-8 制御室と実験ホールを見た後（写真5）、夜は鹿が出没することもあるという道を通りぬけて、ずっと先の方まで広がるSACLAの施設を訪ね、加速器部分とビームラインの見学を行った。入口はモダンな感じで、木材を使って少し気持ちがなごむような造りになっている。加速器は一直線な



写真5 SPring-8 見学の様子



写真6 SACLA 実験ホール

のでずっと先まで広がっている。クライストロンが並び、8 GeVまで一気に加速する加速管に懸命に高周波を供給している様子が見て取れる。一方、実際にサンプルを設置して実験を行う側であるビームラインは、将来的には5本まで用意されているが、現在2本が稼働中である。見学に入ったときには、実験ハッチは全開の状態になっていたが、そのサイズは十分大きく、どのような実験にも対応可能であろう。また、海外から来たと思われる研究者が、ビームライン横に設置された多数の机についてそれぞれの実験準備をしているようであった。ただし、5本のビームラインがすべて稼働し、実験ハッチが横にずらっと並んでしまうと、実験者のいるスペースとしては、SPring-8のようにゆ

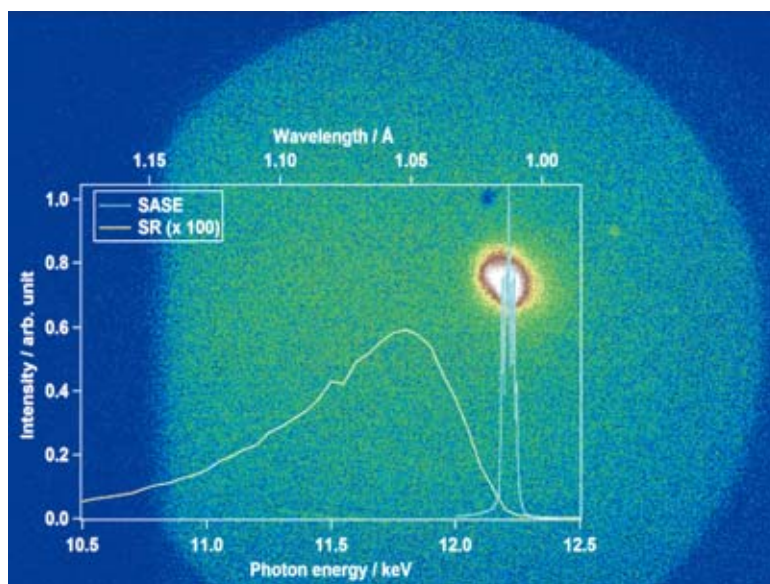


図3 短波長スペクトル (提供 理化学研究所)

ったりとは取れず、ビームライン奥に押し込められてしまうだろうな、という印象であったが、現在のようにビームラインが2本しか稼働していない状況では特に問題はなさそうである (写真6)。

おわりに

中央管理棟での田中部門長の解説とその後の質疑が盛り上がったため、最後は少し駆け足での見学となったが、熱気あふれる状況がそこにあり、世界最先端の成果が矢継ぎ早に生まれてきそうな予感を大いに受けた。実験研究棟の大会議室では多くの人々が集まり、活気に満ちた様子がうかがえた。次回の課題申請は2013年度利用分と思われるが、日本の誇る最先端の技術を用いて建設した装置なので、その利用においても、海外の研究者に日本の研究者がまけないような課題を出してほしいということであっ

た。また、ビームラインの周囲においてあったパネルには、マルチポート CCD の説明があったが、実際に XFEL の能力を引き出すには、より広いダイナミックレンジへの応答、高い分解能、などが計測系に要求されることが容易に想像される。10億倍高い輝度の光源には、10億倍の改善とまではいかないであろうが、それに対応してビーム性能を引き出すだけの光学系と計測器が必要であり、今後はそのような開発も盛んになっていくものと思われる (図3)。9月3~7日に福島県猪苗代町で開催される予定の PIXEL2012 (6th International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging) においても議論がなされるであろうが、次のフェーズとしては、LCLS を超える性能を出して、世界をリードしている SACLA と新規開発の計測系との相乗効果に期待したい。

(東京大学大学院)