



理化学研究所 播磨研究所

—放射光科学総合研究センター, SPring-8 & SACLA—

1 はじめに

生命の謎を解き明かしたい、地球のことをもっと知りたい、新しい材料を作り出したい……。このように、さまざまな分野で研究者たちの「夢」をかかなえるためには、「光」を使用し、原子や分子などのミクロの世界を「見る」ことが必要となる。研究者には科学の発展とともに「もっと詳しく見たい!」という願望が湧いてくる。それを実現するためには、もっと強力な光源が必要となる。

さまざまな分野の研究において、対象物を見るための必要な非常に強力な「光」を生み出す「装置」という役割を果たすだけでなく、それらを使いこなす優秀な人材が集まり、設備が整った、分野を問わない最先端「研究室」として科学の発展につながる研究を行っているのが、今回訪問させていただいた理化学研究所播磨研究所である(図1)。

2 播磨研究所概要

理化学研究所には、研究組織としての「放射光科学総合研究センター」と二つの施設—「大型放射光施設 SPring-8」と「X線自由電子レーザー施設 SACLA」—がある。

放射光科学総合研究センターは、高エネルギー光科学の拠点を作るため、2005年に理化学研究所播磨研究所内に設立された。SPring-8という大型放射光施設と、X線自由電子レーザー施設である SACLA という二つの大型施設を用いて、これらの相互利用が可能という利点を活かし、世界を先導する光科学研究組織として新しい科学分野の発展や前人未踏の世界へ挑戦している。

SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV) は、原子レベルの微細な構造

や動きを観察できる大型放射光施設として1997年に設置された。その名のとおり、8GeV (80億電子ボルト)のエネルギーに加速した電子から、高エネルギーの光を生み出す施設である。発生する光の輝度は、従来装置による光の1億倍に達する。また、日本国内にとどまらず、海外の研究者にも広く開かれた共同利用施設である。設置以来、1年間にのべ約1万4000人が利用し、およそ2000件もの実験がさまざまな分野で行われ、科学技術の進歩に貢献してきた。このことが、X線自由電子レーザー(XFEL: X-ray Free Electron Laser)施設である SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free electron Laser)につながる。SACLAは国家基幹技術の一つとして計画され、2006年から建設が進められた。2011年10月にレーザー光の波長としては世界最短である0.063ナノメートルを達成し、2012年3月に供用が開始された最新の施設である。強力な短波長のレーザーにより SPring-8では見えなかったものが見える、できなかったことができるようになるといわれており、今後の基礎科学分野の発展を担っている。

3 放射光と X線自由電子レーザー(XFEL)とは?

「放射光」という言葉はあまり耳にしない言葉ではないだろうか。一言で述べるなら「非常に明るく強力な光」といったところだろう。放射光には、①きわめて明るい②指向性が強く広がりにくい③赤外線からX線までの広い波長領域の光である④偏光している⑤短周期で明滅するパルス光である、という特徴がある。光学顕微鏡を使用した場合、非常に小さな領域を観察しようとするにつれ、光の量が減少する。原子や分子というミクロな世界を見るためには十分明るく照らし出せる光が

必要となる。放射光は、その特徴から、微小なものの観察等にとても有用なのだとか。とくに SPring-8では世界で最も強い放射光を作り出している。

「X線自由電子レーザー(XFEL)」は、物質に束縛されていない自由な電子を用い、高エネルギーの加速器と磁石が規則正しく配列されたアンジュレータという装置によって作り出したレーザーである。レーザーはコヒーレント(光の位相が揃っている)で、非常に強力な光源である。また、SACLAのレーザーのパルス幅は SPring-8の放射光のそれよりもさらに短い。そのため、SPring-8で作られる放射光をもってしても捉えられなかった原子や分子の瞬間の動きを、SACLAのXFELならば捉えることが可能になるのである。

4 SPring-8 見学

4.1 外観

SPring-8は前述のとおり大型放射光施設というくらいだから、さぞ大きいのだろうとは思っていたが、施設を一望できる中央管理棟の屋上に出て、その想像以上の規模に「でかい……」とおのおのが驚きの感想をもらした(図2)。

電子銃で発生して、長さ140mの線形加速器で1GeVまで加速された電子ビームは、レーストラックの形状をした周長400mのシンクロトロン



図1 理化学研究所 播磨研究所
[写真提供: 理化学研究所]



図2 SPring-8 蓄積リング棟外観



図4 偏向電磁石

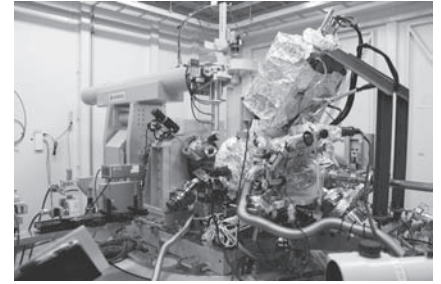


図6 SPring-8 実験ハッチ内部



図3 真空チャンバ



図5 蓄積リング棟内部概観

で8GeVまでさらに加速され、蓄積リングと呼ばれる大型のリング状の加速器に入れられる。蓄積リング内を光速に近い速度で周回している電子が強力な電磁石によって進行方向を変えられると、軌道接線方向に電磁波が発生するという仕組みになっている。この電磁波を「放射光」と呼ぶ。蓄積リングは三原栗山という標高341mの山をクルッと囲むように建設されており、1周が1436m（東京ドームの円周の約2倍！）と非常に巨大である。エネルギーも輝度も極めて高い放射光を作り出すためには、このくらい大規模な施設を構えないといけないようだ。

立地についてもよく考えられており、研究所の敷地全体は花崗岩の頑丈な岩盤が広がる上に設置されており、地震が起きても揺れには非常に強い。

4.2 中央制御室

建物内部に戻り、蓄積リング棟に向かう途中、中央制御室の前を通った。ここではSPring-8全体におけるビームラインの一番上流部のシャッタの開け閉めによるビームのオン・オフや、真空度の管理、周囲に放射線が漏出してないかなどをモニターで監視している。また、将来的にはSACLAの制御もできるように考えているようである。われわれが見学した時期はちょうど夏季の点検期間中で運転が停止していたため、実際に中で作業を行っている方は非常に少なかった。

4.3 蓄積リング棟実験ホール

実験ホールへと入る前に、蓄積リング内で使用されている二つの装置を見せていただいた。

まず、実際に電子ビームが走るチャンバ（図3）である。このアルミ製のチャンバが繋がってリングを形成しており、楕円部分内部を電子ビームが走るという仕組みになっている。チャンバ内ではビームを残留ガスとの衝突を避けながら回し続けなければならない。そのため、ゲッターポンプを使用して1気圧の1000億分の1から100兆分の1という、われわれの日常生活では考えられないような高真空に保ち続けている。真空パイプ全体を真空にするのに大体5日間程度必要で、ベキング（チャンバ全体を加熱し、ガスを事前に放出すること）をしながらいこうとのこと。そのため、計画停電のように毎日数時間ずつでも停電するとまったく使えなくなるのだそうだ。

次は、内部で使用されている非常に強力な電磁石だ。SPring-8で使用されている磁石には偏向電磁石（図4）や挿入光源（アンジュレータ）などがある。前者は、放射光を発生させるだけでなく、電子ビームの進行方向を曲げ、電子ビームを周回させるために使用されており、後者はより強力な放射光を発生させるために使用されている。従来のX線源と比較して、ピーク時で、偏向電磁石では1億倍、アンジュレータでは100億倍もの明る

さになる。これらは実験の用途により使い分けられているようだ。その輝度の高さゆえ、高調波などを除外し、よいところだけを取り出しても500Wのパワーを持つ。非常に熱くなるため液体窒素の温度に冷やしたシリコンで分光している。とくにアンジュレータで作られた放射光は輝度が高く、また細く絞ることが可能なため、非常に薄い試料の分析に向いている。このアンジュレータを使用して放射光を生み出す点で、それまでにつくられた放射光施設とは一線を画しているようである。（SPring-8など1990年代以降につくられた放射光施設を「第3世代放射光施設」と言うのだとか……）

実験ホール内部に入ると、外観の巨大さにも驚いたが、内部の広さにも圧倒された。天井の高さは10mあり、普通の建物の3階分に当たる。周長総距離は約1.5kmもあるため、移動手段はもっぱら自転車だそうだ（図5）。内部はABCDの4ゾーンに分かれており、それぞれに色が割り振られている。これは同じような景色が広がっているホール内部で現在地をわかりやすくするための工夫のようだ。

内部には、蓄積リングを取り囲むように大小さまざまなビームラインが存在している。最大で62本のビームラインが設置可能であるが、現在は54本が稼働中で、3本が建設中である。ビームラインは軌道から放射光を取り出す基幹チャンネル、放射光を実験に使える形に整える光学ハッチ、そして放射光を使用して実験を行う実験ハッチ（図6）という三つの部屋で構成されており、この施設の「研究室」という側面を垣間見ることができる。実験ハッチのサイズは取り出す光の種類と実験内容によりけりで、大小さまざまなものが設置されている。ハッチの壁には厚さ5~10cmの鉛が含まれており、X線を外部に漏出させないよう



図7 SACLA 外観 (奥の細長い建物)



図9 加速器棟 上流部内部 (手前が電子銃, そこから加速管が奥までつながっている)

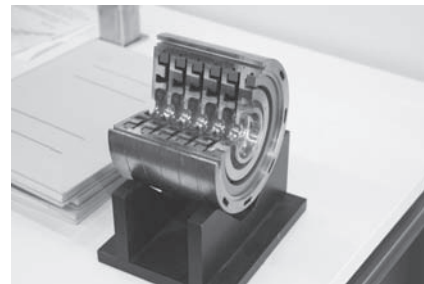


図10 加速管のカットモデル

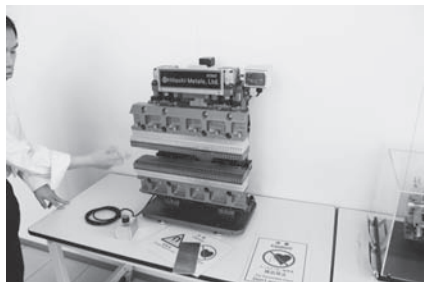


図8 SACLA で使用されているアンジュレータの模型

にしている。また、ハッチ内にはインターロックがあり、すべてのインターロックが完了するまで、そのビームラインには放射光が出せないシステムになっている。かつてはドアに鉛ガラス製ののぞき窓が付いていたが、現在はカメラを使用してハッチ内部の様子を見ることができるといふさげられている。

この実験ハッチ内ではユーザが装置を組み上げることも可能である。施設自体がもともと大きいため、大きな装置も簡単に入れることができる。今回の訪問では、放射光を使用して半導体などが結晶成長している様子を回折や屈折作用によって確認することができるビームライン (BL13XU) と、放射光がパルス光であることを利用して、DVD を回転させながら、記録層表面にレーザーを当て、どのようにアモルファス (非晶質) から結晶へ時間変化するかを調査することができるビームライン (BL40XU) の2カ所を見せていただいた。どのような実験を行うにしても放射光の輝度が高いことが重要で、狭い範囲に大量の光を集めて使用することが微量、微小なものを見るのに非常に適している。目に見えない世界を見るために、これほどまで大がかりな設備が必要だとは思ってもよらなかった。

5 SACLA 見学

SPring-8 から車で移動し、われわれは次に SACLA の見学をさせていただいた。まず外見からして長い、400m もの加速器棟、240m の光源棟、そして 60m の実験研究棟がまっすぐ並び、計 700m の直線状の施設を成している (図7)。

5.1 SACLA 上流部

SACLA 上流部では電子銃を使用して、セラミックスを 1500℃くらいまで加熱して発生させた電子を 10kV の高電圧で引き出し、パルス状の電子ビームを作り出している。電子ビームは加速管の中を、クライストロンという装置から発生する高周波電力を受けながら 8GeV まで加速する。加速した電子は、アンジュレータ (図8) を通ることで蛇行し放射光を放出する。放射光は、電子と一緒に 18 台のアンジュレータを通り、電子と光が相互作用するうちに位相がそろってレーザーとなる。その後、電子は磁石によってビームダンプに導かれ、その役目を終える。そしてレーザーだけが下流部の実験ハッチの中へ入れられるという仕組みになっている。普通のレーザーは固体の中に閉じ込められた電子が励起して発振するが、固体中では X 線領域の光を発振するほど高いエネルギー状態に電子を励起することができないため、電子を固体から引き出し、ある意味フリーな状態にしてレーザー発振を行うため、フリーエレクトロンレーザー (FEL) というのだそうだ。SACLA の売りは、磁石を真空管の中に設置した「真空封止型アンジュレータ」を使っているため、アンジュレータの磁石の開き (ギャップ) を自由に変えることができることである。磁場

を調整し、そして電子のエネルギーも変化させることで、自由に光の波長を変えることができる。

実際に加速器棟に足を踏み入ると、なんと部屋の端が見えない! 400m の細長い部屋を作り、そこに加速管を置いているのだ (図9)。最高級の無酸素銅を 100 分の 1mm のずれも許されない加工精度で、非接触測定をしながら NC 旋盤によって厚さ約 2cm のディスクを作りだし、それを 91 枚重ねて 1 本約 2m の加速管にしている (図10)。そしてこれを 128 本、全体で 0.1mm の誤差もないように置かれている。非常に大量の無酸素銅が使用されているが、これは建設当時としては世界で流通しているものの数割にも及ぶ量だったというのだから恐ろしい。また、温度が変化しても伸縮しにくい素材を使用した架台に加速器を固定し、さらにコンクリートの床面を 0.1mm の凹凸も無いように削って架台の設置面積を増やすといった工夫をすることで、非常に強固な固定を行っている。極めつけは、これだけ長いと地球の丸みが電子の軌道に影響するため、地球の丸みも考慮して設計しており、実際、この加速管の連なりは直線ではなく弧を描いているという。そうは見えないのだが……。

この加速管には電磁波の山と谷をビームに合わせたり、クランクを作ることで速い電子と遅い電子の軌道差を利用したりして、ビームサイズを小さくするという工夫がなされている。また、5.7GHz の高周波を入れる C バンド、2.8GHz の高周波を入れる S バンドを組み合わせることで加速をしている。周波数が高いと短距離で効率の良い加速が可能である。アメリカやヨーロッパの施設では S バンドを使用しているが、日本は加速部分に C バンドを使用しているため、たとえば同じ

エネルギーを加速させるのに半分の長さで済ませることができる。さらに、真空封止型アンジュレータにより、8GeV という低エネルギーで X 線のレーザー発振が可能であるという。世界の XFEL 施設と比べても非常にコンパクトな施設ということがうかがえる。

5.2 SACLA 下流部

次に SACLA 下流部の光学ハッチと実験ハッチを見せていただいた。

光学ハッチでは非破壊で光の出力や波長をモニタしたり、ミラーや分光器などを使用して光軸や使用する波長を調整したりすることができる。これらの光学部品は共用である。XFEL 光はショットごとに波長や出力などの個性が異なるため、ショットごとにモニタされデータベースに貯蓄される。また、途中途中で CCD カメラを置き、X 線が当たると光るスクリーンを見て、どこに光が出ているか位置と傾きを確認している。訪れたときはちょうど X 線専用ミラーの設置作業中だった。SACLA の X 線レーザーのビームサイズは大体直径 300 ミクロン程度で、シリコン基板に対して全反射、約 2 ミリラジアン程度の角度で入射するので、ミラーの大きさは 40cm もある。ミラーを磨く技術は日本が一番すばらしく、世界一精度よく作ることが可能だそうだ。

実験ハッチでは、用途と分野に応じた各種の実験ができるスペースになっている。たとえば、XFEL による細胞やタンパク質、ウイルスなどのイメージング、紫外から赤外のレーザー光を用いて誘起した高速現象を XFEL によって観測する、などの実験が計画、実施されている。数十フェムト (10^{-14}) 秒という、考えられないような時間間隔の現象を追うことができるというのだ。また、X 線を集光するミラーも置いてあり、300 ミクロンのビーム径を絞って、集光強度にして 10^{18}W/cm^2 という X 線としては世界最高クラスの強度を出すことができる。このような XFEL を使えるビームラインは、現在 1 本しかないが、将来的には上流のほうで電子を振り分けることができるようになり、最大 5 グループが同時に実験を行うことができるようになる。



図 11 理化学研究所の方々と編修委員

5.3 SACLA でできること & 今後の展望

この SACLA では、XFEL がコヒーレントであること、発光時間が短い (10 フェムト秒) という特徴を活かして、たとえば、今までは結晶にしなないと見えなかったタンパク質が、結晶にならない膜タンパクのようなものできれいに構造解析ができるとか、SPring-8 で放射光を数秒当てるとタンパク質は壊れてしまい、写真としては壊れていくところを見ていたものが、一瞬で大量の光が当たるため壊れる寸前を見ることができるといった、基礎科学の実験ができるという。また、原子炉やタービンブレードの強化に施されるレーザーピーニングについて、今までは経験的に強くなるというのがわかっていただけが、実際はどのようなメカニズムで金属の構造を変化させるのかを解明するため、反応過程などを時間分解で計測を行うという、産業応用に近い研究も実際に行われている。今後は、たとえば記録媒体の構造がどのような構造だとより早くレスポンスできるようになるのかなど、機能性物質の研究も産業に近いところで行われる可能性もあるそうだ。

SACLA は 2012 年の 3 月から利用が開始されたばかりの最新施設であり、課題の採択倍率は 2 倍から 3 倍という。ある程度成果が出て、何がどこまで見えるのかがわかってくるまで様子を見ている潜在的ユーザがたくさんいる段階のようだ。また、8GeV という SPring-8 の放射光と同じエネルギーを持つため、SPring-8 の中でも SACLA の電子ビームを入れることができるという。SACLA の電子ビームをうまく使用することも目的の一つとして、現在 SPring-8 のアップグレードを計画しており、現在の 100 倍から 1000 倍という光の強

度を実現できるそうだ。今まで 1 時間かかっていたことが 1 秒でできるようになり、そうすることでユーザ数を増やすことを目指している。ここにしかないものでどのようなことができるか。新しいニーズが新しい手法や装置を生み出し、新しいモノを開発することにつながっていく。どのように使用していくかということは今後ユーザと一緒に考えていくことが大切なのだろう。

6 おわりに

今回の取材では SPring-8 と SACLA という二つの大型施設を見学させていただいた。ミクロな世界を見るための「光」を生み出すために、これほどまでの規模の施設が必要なのかと、見学中終始圧倒されっぱなしだった。しかし、ここで生み出される非常に明るい放射光や XFEL といった「光」を通じて、われわれの知らない世界、そしてもっと先の明るい未来が見えているような気がした。今後の光科学研究の動向に注目していきたい。

最後に、今回の見学では理化学研究所の広報担当、生越企画課長には施設全般についてご説明をいただいた。SPring-8 の運転と利用者選定・利用支援を担う公益財団法人高輝度光科学研究センターの木村グループリーダーには SPring-8 ビームラインについて、理化学研究所の佐藤特別研究員には SACLA について、詳しくご説明をいただいた。また、東京工業大学の木村先生にはわれわれの引率をしていただいた。ご協力くださった皆様にご場をお借りして感謝いたします。(文責 メカライフ学生編修委員 市川賀康、中村恭子、松下 真)