

# TOMIC とみつく

九州エネルギー問題懇話会

## 先端技術で未来を照らす 二つの光 ~SPring-8とSACLA~



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  
センター長

石川 哲也 (いしかわ てつや)

1982年、東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修了(工学博士)。東京大学工学部助教授を経て'95年理化学研究所主任研究員。大型放射光施設SPring-8のビームライン建設を統括。2005年X線自由電子レーザー計画合同推進本部プロジェクトリーダー。現理化学研究所播磨研究所放射光科学総合研究センター長。

日本に世界一小さいものが見れる顕微鏡があるのをご存じでしょうか。兵庫県の理化学研究所放射光科学総合研究センターにある、SPring-8(スプリングエイト)とSACLA(サクラ)のことです。細胞のたんぱく質まで見れる電子顕微鏡に対し、何と細胞の分子や原子まで見ることができるのです。今回は同センター長の石川哲也氏にこの装置についてわかり易く解説していただきました。この世界一の装置のしくみや役割について学び、これからの実用性について考えたいと思います。

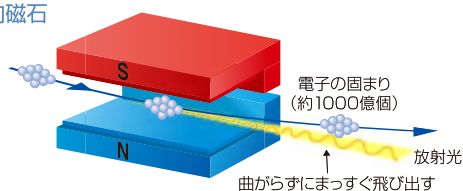
### 原子・分子レベルの世界を見る顕微鏡

放射光科学総合研究センターは、放射光の光源の開発とそれを用いた研究を推進する施設です。平成9年(1997)に世界最大の大放射光施設SPring-8(スプリング8)が完成し、その後、世界最短波長のX線レーザーを発生する施設としてSACLA(サクラ)が、平成24年(2012)3月より供用を開始しました。どちらも世界一を誇る施設ですが、その内容を紹介する前に、「放射光」と「X線」について、簡単に説明しましょう。

電子など、電気を帯びている粒子は光の粒子を伴っています。光の雲、光の衣(ころも)をまとっているとも言えます。もしも衣をまとい高速で走っている電子が急に止まったとしたら、光の衣は前方に飛ばされてしまいます。飛ばされた衣は、そのときの速さ、エネルギーの強さによって光やX線などの電磁波として放出されます。

同様に高速で進んでいる電子を曲げた場合、光の衣は電子のように曲がらず直線方向に飛び出していきます。

#### ●偏向磁石



この場合も同様に電磁波が出てきます。この際に観測される電磁波が「放射光」です。イラストにあるように磁石の力に

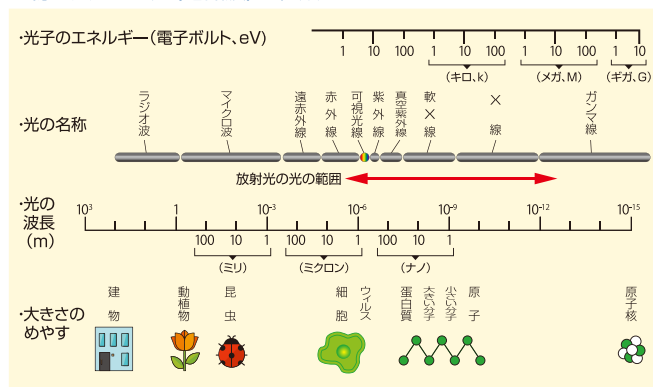
よって、電子は進む方向を曲げられます。これが偏向磁石です。

私たちがものを見る時には光が必要です。光には波長があり、波長が短い光ほどより細かいものを見ることができます。19世紀末にレントゲンによって発見されたX線は可視光に比べて波長がとて短く、病院の診断等でよく知られています。

現在、ナノテクノロジーと呼ばれる最先端の科学技術では、原子や分子のレベルで物質の構造を理解する技術が進んでいます。微細なものを観察するために適しているのは非常に波長の短い光「X線」であり、放射光施設はそれを見るための巨大な顕微鏡といえます。

スプリング8(電子エネルギー8GeV)の場合、赤外線、可視光線からX線、ガンマ線の一部まで発生させることができます。太陽光の100億倍明るい放射光を放つことで、原子、分子レベルで微小な領域の物質を見ることができるのです。

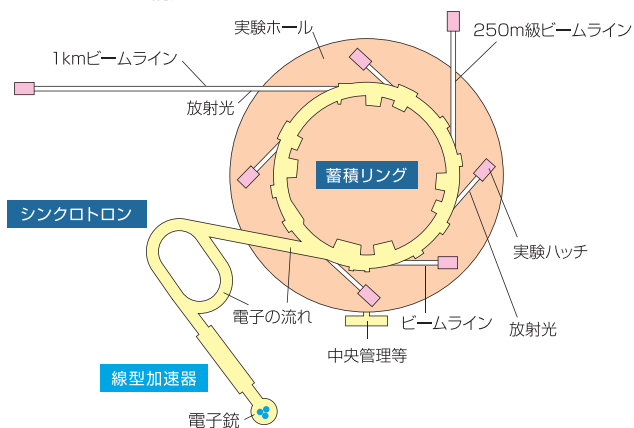
#### ●物の大きさと光(電磁波)の種類



## 世界最大の大型放射光施設スプリング8

スプリング8は1周1,436mの巨大な円型の周りに62個の顕微鏡がついていると思ってください。その名前は「Super Photon ring-8GeV」に由来し、「Photon」は光、「ring」は大きな円形の建物を意味します。また、「8GeV」は80億電子ボルトという世界最高エネルギーを表しています。

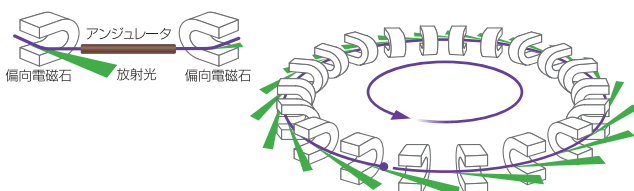
### ●スプリング8の構造



上のイラストでスプリング8のしくみを説明しましょう。電子銃からビーム状に放たれた電子は「線型加速器」、「シンクロトロン(加速器)」を通ることで光速近くまで速度を上げ、エネルギーを8GeVまで高められます。その後、エネルギーを保ったまま円型の「蓄積リング」に送られた電子ビームは偏向電磁石を通る際に角度を変えられたり、アンジュレータの中を蛇行することで放射光を発生させます。その放射光はビームラインの先にある実験施設に送られ、研究対象の物質に当ててさまざまな実験観測に利用されます。

また、放射光を放出したあとの電子ビームは再び偏向電磁石やアンジュレータを通り、蓄積リングを回り続け、実験施設に放射光を送り続けます。

### ●電子ビームが回り続ける蓄積リング



放射光は、電子のエネルギーが高いほど明るい光となり、進む方向の変化が大きいほど、X線などの短い波長の光を含むようになり、より微小な物質を見ることができます。

そのため、放射光施設では、電子のエネルギーを増大させる「加速器」、「アンジュレータ」、「偏向電磁石」などの装置が重要になります。加速器で電子を光速まで加速す

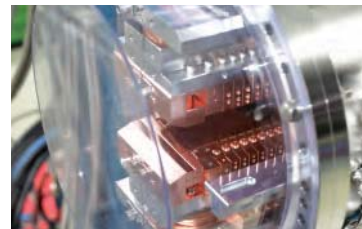
るには50万Vと非常に高い電圧が必要で、制御や安全のためのさまざまな大規模な装置が必要になります。また、偏向電磁石も1つ5トンもあり、全体に巨大な設備になるのです。

## 日本独自の技術「真空封止型アンジュレータ」

国際的な競争が激しい先端科学技術の分野で、「スプリング8」と「サクラ」が世界最高水準を保っているのはなぜでしょうか？これには、独自に開発した「真空封止型アンジュレータ」を採用したことが大きく関わっています。

アンジュレータは、N極とS極の磁石を交互に並べて周期的に極性が反転する磁界を作り出し、入ってきた電子を何度も曲げ蛇行させることによって、極めて明るい光を得ることができる装置です。

大気中で電子を周回させると、電子はすぐに気体と衝突し、軽い電子ははじき飛ばされてしまいます。そのため、電子の通りの気体を取り除いて真空にする必要があります。

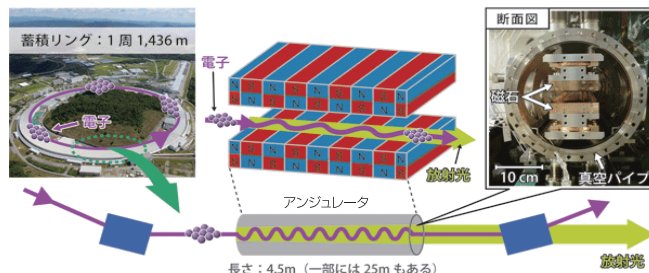


●真空封止型アンジュレータ

超高真空容器の中に、プラスとマイナスの磁極を持った永久磁石が交互に並び、

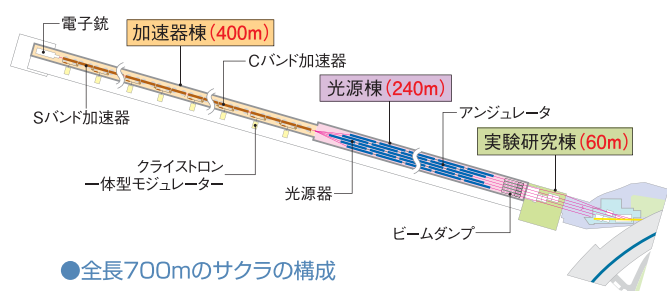
スプリング8の蓄積リングでは、長さ約1.5kmの電子の通りをパイプで覆い、内部を宇宙空間並の真空状態にしています。この際、従来、電子ビームを通すための真空パイプの外側に設置されていた磁石を、スプリング8ではその内部へ導入することを発想しました。磁石から真空中に気体が漏れないようチタンコーティングを施すなどの対策を行い、真空パイプ内に磁石を入れることに成功。その結果、磁石同士の距離を縮めることができ、より強い磁界を発生させることが可能になり、放射光の大幅な性能改善が図られました。

### ●極めて明るい光を作り出すアンジュレータ



## 世界で最も小さなものが見えるサクラ

サクラは、スプリング8同様X線放射光を利用しますが、レーザーのX線を発生させます。レーザーは短い時間だけ



光るため非常に速く動いている物質の瞬間的な動きを観察することができます。

サクラでは、電子銃から発生させた電子を400メートルある加速器でスプリング8を超える8.4GeV(84億電子ボルト)まで加速させ、240メートルに及ぶ「真空封止型アンジュレータ」によって精密に蛇行を繰り返すことでスプリング8の10億倍の明るさを持ち、世界一短い波長のX線レーザー(X線自由電子レーザー)を短いパルスで発生させる性能を持っています。スプリング8の技術はサクラにも継承され、同じ考え方をX線自由電子レーザーに適用することで、大幅な小型化と省コストを実現しています。

実は当初、X線自由電子レーザー分野の研究開発で、我が国は欧米から5年ほど遅れをとっていましたが、スプリング8で培った「真空封止型アンジュレータ」を活用することでその差はあっという間に縮まりました。しかも、アメリカで稼働中の施設が全長2キロメートル、ヨーロッパで建設中の施設は全長3.4キロメートルなのに対して、「サクラ」はわずか700メートルです。短い分、建設コストを低減することができ、建設費は欧米施設の約1,500億円に比べて「サクラ」は約400億円で収まり、工期も大幅に短縮することができました。「サクラ」以降に計画された施設はコンパクト化することが常識になり、世界の新しいトレンドを生み出したのです。

可能な限り小型化を図るための要素技術を支えているの

は、厳選された素材や高度な加工技術、高精度計測制御技術など、参加企業400社以上にも及ぶ我が国の産業技術の裾野の広さです。「サクラ」は、現代日本の最先端技術の結晶ともいえるでしょう。

## 高品質な光源の提供で科学技術の発展に寄与

センターには、国内の大学や研究機関、企業をはじめ、世界中から利用者が訪れています。その数は年間延べ約1万5千人で、そのうち産業界の利用が約25%、外国からの利用が約20%です。スプリング8の利用は一般に広く開かれており、公募で利用申請を受け付け、審査によって選定します。ビーム利用による実験の成果を公開いただく場合、ビーム利用料は国が負担します。

現在、スプリング8で稼働中のビームラインのうち、一般の方に使っていただける共用ビームラインは3本あります。最近では産業利用が約20%を占めており、繊維、ゴム、フィルム等の業界で、関連企業複数社が共同研究を行う事例が増えていきます。その業界における本質的な技術問題を解決することによって、そこで得られた成果を互いに共有し、各社が新しい技術革新や製品開発につなげていこうという動きです。

## 「見えないものが見える」ことで広がる可能性

スプリング8の産業利用では多くの優れた研究成果が出ており、実際の商品開発に結びついた事例も数多くあります。トヨタ自動車では自動車の排ガスを浄化する三元触媒の解析を行い、新しい触媒材料を開発しました。この触媒は全世界のトヨタのガソリン車1億台以上に使われているそうで



●電子の加速能力を従来の約2倍にするCバンド加速器(サクラ)  
加速した高品質な電子ビームはアンジュレータに送られる。

※SACLAの名前の由来である、「SPRing-8 Angstrom Compact Free Electron LAser」には、コンパクトな自由電子レーザー施設という意味が込められています。



●X線レーザーを生み出す真空封止型アンジュレータ(サクラ)  
低いエネルギーでもX線レーザーの発生が可能となり、コンパクト化を実現した。

す。また、住友ゴム工業では、タイヤゴム材料の内部構造を解析することで、グリップ性能と燃費向上を両立した低燃費タイヤ「エナセーブ PREMIUM」の製品化を実現しました。このタイヤは摩耗が遅いうえに燃費が6%程度良くなったといえます。

この事例で興味深いのは、技術者は当初スノータイヤの研究を行っていたところ、「スプリング8」を使うことで「こんなものまで見えるんだ」と驚き、そこから低燃費タイヤの開発に行き着いたということです。つまり、技術者にとって「今まで見えなかったものが見える」ということはとても重要なことで、それまで勘と経験に頼っていた手探りの状態がなくなるということなのです。様々な産業分野で放射光を利用した研究を行うことで、技術開発の可能性が大きく広がっているのです。



●住友ゴム工業(株)  
「エナセーブPREMIUM」



●大型放射光施設スプリング8とX線自由電子レーザー施設サクラ

知ることが、持続可能社会を実現する課題解決のヒントになるかもしれません。

中でも大きな注目と期待を集めているのが、植物の光合成に関する研究です。光合成には触媒となるたんぱく質が関わっていますが、その構造は正確にわかっていませんでした。これを岡山大学の沈健仁教授の研究グループが、当センターの光源を利用した解析によって高い精度で解明したのです。この成果を受けて、人工光合成の技術開発を導くことが期待される様々な応用研究が始まっています。

スプリング8の供用開始から今年で20年を迎え、これまでに多くの研究者の方々と連携し、日本の科学技術の発展に尽力してきました。その歩みを振り返ると、決して最初から研究成果が期待された案件ばかりではありませんでした。しかし研究者の好奇心から思わぬ成果も数多く生まれました。まずは課題を抽出し、それをとことん突き詰めることによって、新しい技術開発のヒントやイノベーションが生まれるのではないかと考えています。スプリング8とサクラの2つの光が、日本の科学技術の未来を明るく照らすことを願っています。

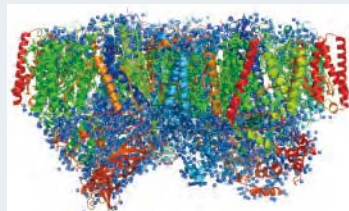
## 超循環社会の実現へ向けた可能性

放射光科学総合研究センターの最大の利点は、スプリング8とサクラという2つの世界一の施設を同時に活用できることです。スプリング8で止まった世界を見て、サクラでどう動くかを見る。それぞれの光源の優れた長所を組み合わせることで、これまで仮説に過ぎなかった自然界の現象を観察することができ、科学技術の新たな分野を切り開くことが期待されています。

今後の科学技術の大きなテーマの一つに、いかにして持続可能社会をつかっていくかという課題があります。エネルギー資源、環境問題、食料問題等の分野で、多くの研究者がスプリング8とサクラを使って原子・分子レベルで何が起きているのかを

## サクラが解明した光合成の水分解反応

岡山大学の沈健仁教授の研究グループは、植物が光合成する過程で水が分解され酸素ができる仕組みを解明しました。沈教授は、サクラを用いて光化学II複合体が光合成の水分解反応において酸素分子を発生させる直前の状態の立体構造を捉えることに成功。たんぱく質に水分子が取り込まれる様子や、反応が起きる場所を特定しました。これは光合成における水分解反応の核心に迫る成果で、太陽エネルギーから酸素を発生させる人工光合成の仕組みの解明に大きく寄与するものです。人工光合成の



●PSII(たんぱく質複合体)の全体構造

実現は、エネルギー問題、環境問題、食糧問題の解決に重要な貢献ができると期待されています。(※本研究成果は2017年2月21日、英国の科学雑誌「Nature」に掲載されました)