



## SPring-8 と SACLA (SPring-8 大型放射光施設)

(国研) 理化学研究所  
放射光科学研究センター センター長  
石川 哲也

大型放射光施設 SPring-8 と X 線自由電子レーザー施設 SACLA は、ともに電子加速器を用いて強力な X 線を発生し、それを利用する施設である。短波長の電磁波である X 線を使うと、波長と同程度のナノメートル以下の空間分解能での撮像が可能であり、物質の原子レベルでの構造決定に用いられてきた。非常に強力な X 線を使うことによって、ナノの世界の形や動きを明らかにすることが可能で、グリーンイノベーションを牽引するツールとして期待されている。

## SPring-8 と SACLA

理化学研究所 放射光科学研究センター

石川 哲也

### 1. はじめに

SPring-8 は、電子加速器を用いて放射光を生成し、SACLA は電子加速器を用いて X 線領域のコヒーレント光を生成して、それらを様々な分野で利用するための共用施設である。放射光とは相対論的電子の軌道が曲がる時、接線方向に放射される指向性の高い電磁波である。歴史的に見ると、初期には素粒子研究用の電子シンクロトロンに寄生して放射光利用研究が行われたが、素粒子研究で蓄積リングによる衝突実験が始まると、スペクトル安定性の高い蓄積リングへの寄生が始まり、1970 年代に放射光利用専用蓄積リング建設の機運が世界的に高まっていった。東京田無にあった東大原子核研究所に設置された SOR リングは、世界的にみても非常に初期の放射光専用リングであり、その後 1982 年に筑波のフォトン・ファクトリーが運転を開始した。初期の専用加速器では通常放射光を円形リングの偏向電磁石から取り出しており、これらを第二世代放射光源と呼ぶ。第二世代光源では、偏向電磁石間の直線部にウィグラーやアンジュレータなどの挿入光源を設置し、そこからの放射光を利用ための開発研究が進められ、1990 年代になると挿入光源、特にアンジュレータ、に最適化された蓄積リング設計が行われるようになった。これを第三世代光源と呼ぶ。

ウィグラーやアンジュレータは交番磁場などによって電子を多数回褶曲させ各々の褶曲で生成された放射光を重ね合わせて強度の増大を図るものである。単なる強度の重ね合わせになる場合をウィグラー、コヒーレントに重ね合わせて準単色光を得る場合をアンジュレータという。多くのアンジュレータはネオジム磁石などの強力永久磁石を用いて周期的磁場を作りその中に相対論的電子を通して振動させる。すると、電子のエネルギーの自乗に反比例し、磁場周期に比例した準単色スペクトルを持つ強力放射光を生成する。

SPring-8 は第三世代 X 線放射光施設として構想されたものであるが、その設計が行われた 1980 年代後半には、アンジュレータの磁石は加速器真空チェンバーの外に置かれることが通常だったため、短周期にすることができず、したがって X 線領域の高エネルギー光子を得るためには、電子ビームのエネルギーを上げることが必要だった。このため、初期の第三世代 X 線放射光施設は、欧州の ESRF が 6GeV、米国 APS が 7GeV、SPring-8 が 8GeV と、高い電子エネルギーを持つことになり、周長の大きな施設を作ることになった。

SPring-8 は 1997 年に運用を開始したが、アンジュレータの磁石を超高真空チャンバー内に入れてしまう「真空封止型アンジュレータ」を標準採用することにより、磁石周期の大幅な短縮の可能性がでてきた。一方で、1000m ビームラインの建設や 27m 長尺アンジュレータの建設など、自己増幅自発放射 (SASE) 方式の X 線自由電子レーザーに関連する技術開発が行われ、それらを統合して 2006 年度からの第三期科学技術基本計画で国家基幹技術としての X 線自由電子レーザー・SACLA の建設が行われた。SACLA は 2011 年 6 月に発振し、2012 年 2 月から共用運転を行っている。



図1. キャンパス航空写真。左側直線状建屋が SACLA で、右側円形建屋が SPring-8

自由電子レーザーの初期の形は、アンジュレータを光共振器の中に入れて光と電子の相互作用によって電子にマイクロバンチを作ることによってコヒーレント光を発生するものである。しかし、短波長領域では共振器を構成するミラーの反射率が低くなり、この方式では使えない。共振器を使うかわりに長いアンジュレータを使うとどうなるかを検討した結果生まれたのが自己増幅自発放射(SASE)方式であり、これは原理的に波長の制限なく自由電子レーザーが実現できる。現時点での X 線自由電子レーザーはすべてこの方式を採用しているが、結晶のブラッグ反射を使って共振器を構成する試みもある。



図2. SACLA のアンジュレータホール

## 2. 放射光・X線自由電子レーザーの性質とその役割

前述したように、SPring-8 や SACLA は電子加速器を使って、強力な「波長の短い光」を出す施設である。この波長の短い光というのは、X線なのだが、光でものを見る時の分解能は普通には波長の程度なので、nm以下の波長をもつX線ではnm以下の空間分解能が達成できる。これは、ほぼ物質中の原子の並びの間隔であり、X線はナノの世界を観る光だということが

できる。現在、ナノテクノロジーやナノサイエンスが流行っているが、これらは原子レベルでの製造や操作に関するものであり、旧来の生命科学研究や物質科学研究などの枠にとらわれず、最先端研究に必須の先端科学技術基盤を形成する。ここでは詳しくは説明しないが、非常に荒っぽく分類してしまえば SPring-8 はナノの世界の姿を詳細に見るための光を提供し、SACLA は高速で動き回るナノの世界の一瞬を止めてみるための光を提供するといえる。

私たちの周りには、どのように起こるかにはわかっていても、原子レベルで何故起こるか解らない現象はたくさんある。放射光や X 線自由電子レーザーでの分析は、原子レベルでの何故を明らかにする。何故が明らかになれば、その現象をより起こりやすくするにはどうすればよいか、また起こらないようにすればどうすればよいかを理解できる。つまり、何故を知ることが、ソリューションに直結し、イノベーションの第一歩であるともいえる。

1997 年の供用開始以来、SPring-8 は累計 28 万人以上の研究者に利用されており、最近では年間約 16,000 人の利用者がいる。多分、日本でもっとも多数の利用者を擁する共用施設であろう。いままで、多様な研究に利用されてきたが、ここでは最近の話題を中心に報告する。

### 3. コロナ禍での利用

2020 年初頭から始まった COVID-19 騒ぎにより、人の往来に多くの制限が課され、特に海外からの利用者はほとんど来訪できなくなった。国からはウィズコロナ・アフターコロナでの基盤施設機能の維持・増進を求められ、DX 化の推進、リモート・アクセスの推進等、サイトにやってこなくても SPring-8 や SACLA を利用できる仕掛けの整備に努めた。同様に、データ利用の効率化を検討し、近い将来発生することが予想されるデータ爆発への備えを固めるとともに、施設全体の省エネルギー対応に向けたいくつかの研究開発を進めた。

コロナに直接関連する研究としては、ウィルスの構造解析による増殖抑制薬剤候補の探索や、体外式膜型人工肺 (EXMO) の血液輸送チューブでの血栓生成メカニズムの解明による輸送チューブ材料の最適化などの直接的貢献がなされている。

### 4. グリーン・イノベーションに向けて

ナノの世界を観て、ソリューションを探るための光である放射光や X 線自由電子レーザーの特性は、さまざまな持続可能開発目標 (Sustainable Development Goals: SDGs) 達成に貢献するものである。理研放射光科学研究センターでは 2 年分の SPring-8 利用に基づくプレスリリース 280 件について、17 の SDGs との対応を調査し、それをまとめて解説したブックレットを発刊した。各所で好評だったこともあり、今後隔年ペースで新しいプレスリリースを集めて同様に SDGs に対応させたブックレットの発刊を計画している。2021 年 4 月に開催された施設公開は、コロナのためオンラインでの開催となったが、上記ブックレットに掲載した課題を解説した動画を作成し公開した。

2021 年 4 月に政府の「地球温暖化対策推進本部」で 2030 年度の温室効果ガス削減目標を 2013 年度比で 46% に削減することとなり、また 5 月の「改正地球温暖化対策推進法」では、2050 年の温暖化ガス排出量を実質ゼロとする、いわゆるカーボン・ニュートラルが目標として明記された。日本にとっては、水素の実用化や次世代の蓄電池といった先行する分野での優位性を保ち、出遅れた分野で巻き返せるかが課題とされたが、水素、蓄電池等の先行分野の優位性に SPring-8 は NEDO のプログラムや豊田ビームラインでの豊田中央研究所の活動を通じて大きな貢献をしてきた。しかしながら 2030 年は、目と鼻の先であって新しい開発の時間は少ない。既存技術の高度化や、以前捨てられてしまった技術も見直しなどで、目標達成に

近づく事になる。一方で、何らかの方法でイノベーションサイクルの高速化を図り、2050年目標達成には大きく貢献したい。

政府のグリーン・イノベーション戦略策定を受けて、2021年8月にSPring-8/SACLAはグリーンファシリティ宣言を出した。両施設がカーボン・ニュートラル達成に向けての産官学の活動を強力に支援していくことと、施設自体が可能な限りの省エネルギーに努めることが謳われている。

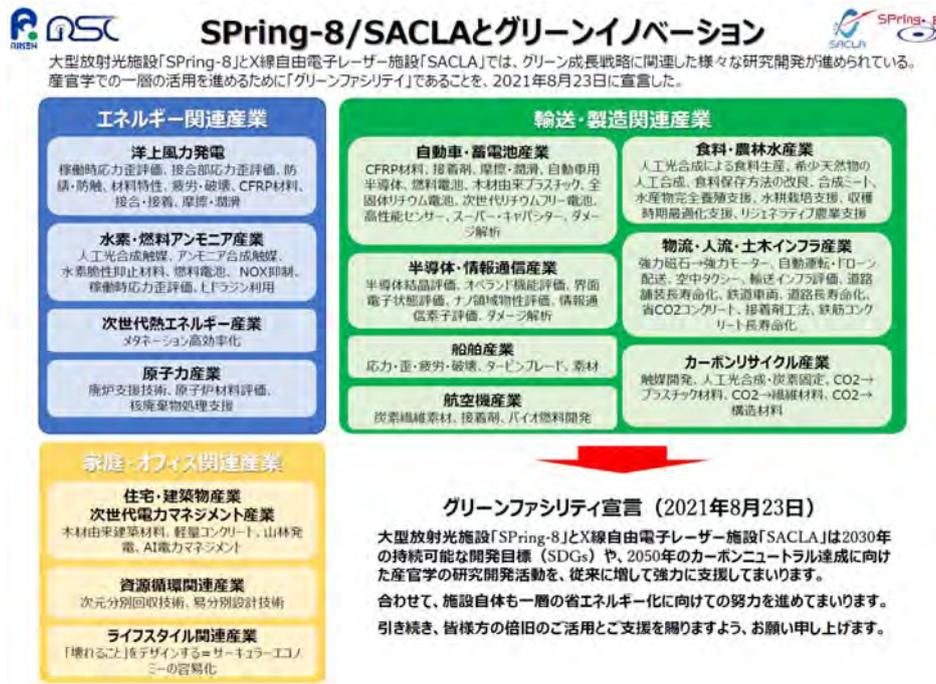


図3. SPring-8/SACLA とグリーン・イノベーション

### 5. 第四世代放射光施設としてのSPring-8-II

イノベーションサイクルの高速化を図りつつ、施設全体の省エネルギー化を実現する方策として、SPring-8のアップグレード計画を検討しており、これをSPring-8-II計画と呼んでいる。加速器テクノロジーとして、マルチバンドアクロマット (MBA) による極エミッタンス化を図り、現状の2.4nmradの電子ビーム水平エミッタンスを100pmrad以下まで低減させる。また、アンジュレータの磁場周期の短縮により、6GeVの電子ビームエネルギーで現在の8GeVと同様の放射光スペクトル分布が得られるようにする。さらに、老朽化が進んだ入射施設を廃し、SACLA線形加速器を入射器として利用することによって、加速器運転電力の節減を図る。

水平エミッタンスを小さくすると、図4の電子ビームサイズに示したように、線状の電子ビーム分布が点状になり、電荷量が同じであれば密度が上がることによって明るい光源となる。電子ビームサイズの縮小は、加速器真空ダクトの小型化に繋がるが、これによって軌道制御用電磁石も小型化され電力消費量が低減する。すると、いままで水冷が必要だった電磁石が空冷で良くなり、冷却負荷が減少する。また、現在非常に大電力を使っている偏向電磁石を永久磁石に置換することによって、冷却が不要になり、空調負荷も減少する。これらと電子ビームエネルギーの減少、SACLA線形加速器による入射を組み合わせると、電力消費量は2015年時点のほぼ半分になる。一方で、低エミッタンス化は、ビームサイズ縮小による輝度

の向上だけでなく、アンジュレータスペクトルも変化させる。これらからより明るい放射光が生成され、研究開発の迅速化が達成されよう。単位時間当たりのデータ生成量が現状の100倍程度になることが期待されている。

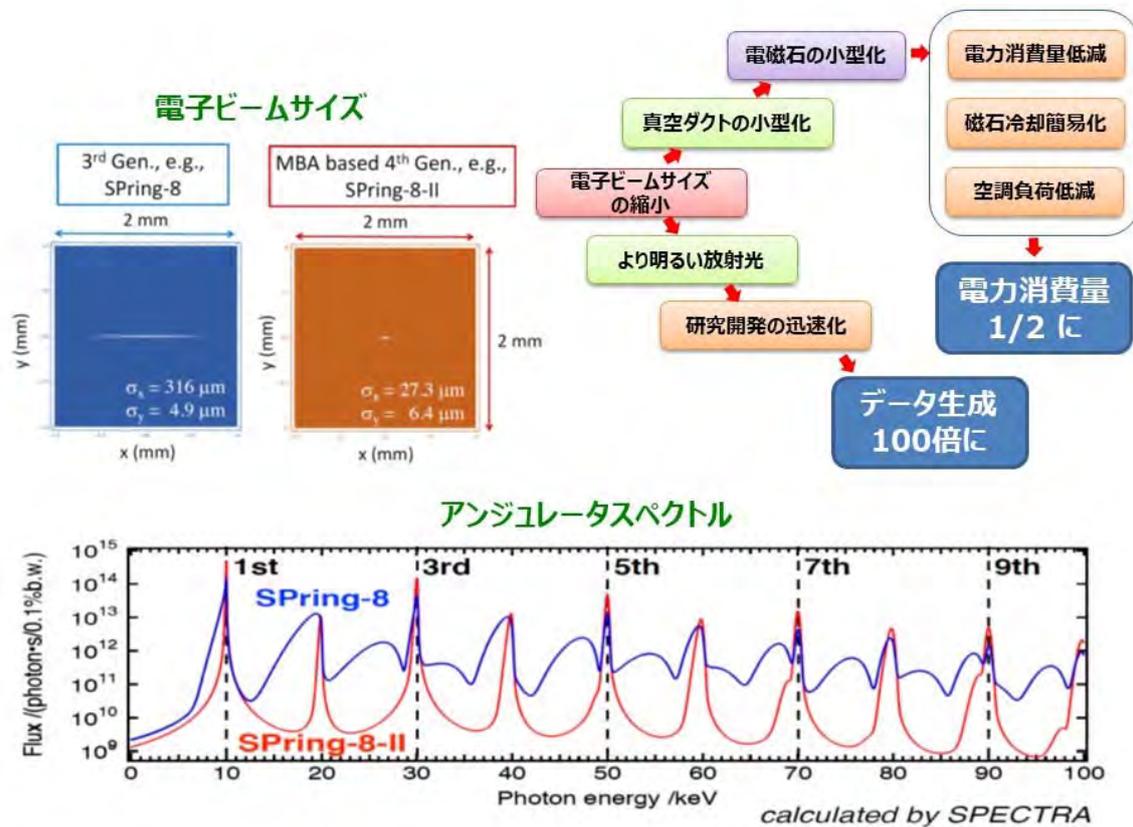


図4. SPring-8-II アップグレード計画

## 6. おわりに

地球環境の悪化を放置して温暖化が進むと、50年後には経済などと言ってられない劣悪な世界になることが予想される。これには、グローバル社会が協力して立ち向かわなければならないが、キーとなるのは科学技術であろう。わが国は、科学技術先進国として、世界を惨状から救うために一定の責任を果たさなければならないし、果たすことによって世界経済の守護神の一員とならなければならない。このなかで、先端基盤施設である SPring-8/SACLA は分析・解析機能を学術や産業界に使って頂くことで、国が進めるグリーン・イノベーションの推進に貢献することができるが、老朽化した施設を改修・強化することによって、さらに一層の貢献が期待できる。しかるに、わが国は財政難の中にあると言われており、来るべき大災害への備えであっても、民間資金の活用が要請されている。

このような状況のなかで、東北次世代放射光は整備資金の半分を民間等から集め、それと国費と合わせて整備を行うことになった。この方式は、国の財政審に於いて今後のモデルになるべきものとされているが、数々の問題点があり、改良モデルを作る必要がある。今後 SPring-8-II の実現に向けて、どのような改良モデルが可能であるかを考えていきたい。

本稿では、個々の項目に対応させて参考文献を挙げることはしなかったが、全体として関係する資料を最後にまとめておくので、必要に応じてご参照されたい。

参考文献・資料

- [1] T. Ishikawa: AIP Conference Proceedings, 2054(1)020001 (2019).
- [2] T. Ishikawa: Phil. Trans. A, 377, 2147 (2019).
- [3] SPring-8 全体の情報 <http://www.spring8.or.jp/ja/>
- [4] SACLA 全体の情報 <http://xfel.riken.jp>
- [5] SPring-8-II CDR <http://rsc.riken.jp/pdf/SPring-8-II.pdf>
- [6] 2021 年施設公開 <https://new.spring8.or.jp/openhouse2021-arcv/sitemap.php#tour>

## 講演者略歴



### 石川 哲也 (いしかわ てつや)

所属 理化学研究所 放射光科学研究センター センター長

住所 〒679-5148 兵庫県佐用町光都1-1-1

連絡先 TEL/FAX : 0791-58-2800/0791-58-2898、E-mail:ishikawa@spring8.or.jp

学職歴 1977年 東京大学 工学部 物理工学科卒業

1982年 工学博士 (東京大学) 「角度分解型 X 線トポグラフィー」

1983年 高エネルギー物理学研究所放射光実験施設 助手

1989年 東京大学 工学部 物理工学科 助教授

1995年 理化学研究所 主任研究員

2006年 理化学研究所 放射光科学研究センター センター長 現在に至る

研究・活動分野など SPring-8/SACLA での共用施設運営を統括している。SPring-8 アップグレードに向けての活動を進めている。