

2. 放射線照射装置（線源）の進歩

自由電子レーザー・放射光

理化学研究所 放射光科学総合研究センター 石川 哲也

1 はじめに

加速器中で高エネルギー荷電粒子の軌道が曲げられるときに接線方向に放出される電磁波は、シンクロトロン放射として知られており、我が国では放射光といわれることが多い。1947年に General Electric 社のシンクロトロンで最初に観察された放射光は、加速器を用いて高エネルギー粒子を作り、それを利用する原子核研究や素粒子研究にとって、折角注入したエネルギーを散逸させる邪魔者であった。しかし、光源としては他で得られない多くの特徴を持っていたため、分光研究への応用から始まって、現在では非常に広範な科学技術分野で利用されている。

加速器で自由電子を光源とするスキームは、やがてコヒーレントな発光を生起する自由電子レーザーに発展した。本稿ではまず放射光と自由電子レーザー光源の特徴を概観し、次にそれらの歴史的発展を辿る。最後に将来を展望したい。

2 放射光と自由電子レーザー光源の特徴¹⁾

本稿では放射光や自由電子レーザーが本質的に重要になる X 線領域を中心に記述する。通常のレーザーでカバー可能な、紫外域までは場合によってどちらを選択するかになるだろう。

放射光と自由電子レーザーは共通に以下の性質を持つ：(1) 高強度、(2) 波長可変、(3) 高指向性、(4) 偏光特性と容易な偏光コントロール、(5) 時間的パルス特性；これらの光源パラメータを表す一つの尺度に、光源輝度という量があり、その単位は「光子数/光源サイズ/光源発散角（縦・横）/秒/0.1%バンド幅」である。この量は SPring-8 を含む現状での世界最高性能放射光源で、ほぼ 10^{20} - 10^{21} 程度であり、自由電子レーザーでもそれほど変わらない。そのトリックは「/秒」にあり、SPring-8 では毎秒 5 億の X 線パルスがこの光源輝度を作るが、SACLA では 60 パルスが作っている。つまり SACLA の 1 パルスは SPring-8 の約 1000 万倍強い。このパルスは幅が数フェムト秒以下であり、放

射光の 30 ピコ秒程度のパルス幅と比較すると千倍以上狭い。指向性はどちらもマイクロラジアン領域に達する。

二つの光源の質的な違いはコヒーレンスである。自由電子レーザーは、ほぼ空間的に完全コヒーレントな X 線を出すのに対して、放射光での空間的コヒーレンス度は 0.1% 程度である。現在各国で検討が進められている次世代放射光施設では、通常の放射光技術を使って、空間的コヒーレンス度が数十%まで向上する見込みである。

X 線自由電子レーザーはピーク輝度が第三世代放射光の約 1 億倍、パルス幅が約 1 万分の 1 の X 線光源であり、マルチモードレーザーと言ってよい。放射光 X 線が静止したナノの世界（あるいは時間平均されたナノの世界）を詳細に見るための光であるのに対して、X 線自由電子レーザーは高速で動き回っているナノの世界の一瞬を切り取って観察するための光といえることができる。

3 放射光の発展^{2,3)}

放射光源の発展を説明するのに、「世代」という言葉がよく用いられる。第一世代は、高エネルギー実験用加速器に寄生して光学応用研究を行ったものであり、1950 年代から 1970 年代にはそのような利用形態であった。この間に高エネルギー実験用加速器も、加速粒子のエネルギーが変化するシンクロトロンから、一定エネルギーの粒子をまわし続けるストレージリングへと発展し、スペクトル分布が時間的に不変の光源が実現していた。

放射光利用は、周回型加速器の偏向電磁石からの放射光からはじまったが、その初期は、他に良い光源の存在しなかった真空紫外領域から軟 X 線領域での分光研究への応用が盛んであった。1960 年代の終わり頃から X 線回折への応用や、X 線吸収スペクトル測定 (EXAFS) などへの応用が始まり、世界的に、放射光利用専用加速器の検討が開始された。

このような光源専用加速器を擁する放射光施設は第二世代と呼ばれる。イギリスの Synchrotron Radiation Source (SRS)、日本の Photon Factory (PF)、アメリカの National Synchrotron Light Source (NSLS) などが、初期の第二世代光源を代表するものである。これらに加え、第一世代光源として始まった Stanford Synchrotron Radiation Laboratory (SSRL) などで放射光施設への専

X-ray Free Electron Laser and Synchrotron Radiation
Tetsuya ISHIKAWA (RIKEN SPring-8 Center),
〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
E-mail: ishikawa@spring8.or.jp

用化が進んだ。これらのストレージリングでは、それまでに開発されていたビーム収束用四極磁石とビーム発散用四極磁石を交互に配置した FoDo ラティスが採用されていたが、高エネルギー物理研究からのしごらみから解放されることによって、放射光源加速器の独自の進化が始まることになった。

このような第二世代放射光源では、高エネルギー物理研究とは無関係に放射光利用のみに最適化した加速器性能の向上が迫られ、ウィグラーやアンジュレーターなどの挿入光源の開発が始まった。

挿入光源とは、2つの偏向電磁石間の直線部に多極交番磁場を生成しそこで電子軌道が多数回蛇行させて放射光発生を行う装置である。交番磁場の生成には SmCo や NdFeB などの強力永久磁石が用いられるようになった。磁場が強くと、磁場周期が長い場合には、蛇行軌道の振幅が大きくなり、磁場周期数を N とすると一つの磁極で発生する放射光の約 $2N$ 倍の強度の放射光を得ることができる。この条件での挿入光源はウィグラーと呼ばれる。

一方で磁場が弱くと蛇行振幅が小さい時には干渉効果によって準単色光が発生する。このような挿入光源はアンジュレーターと呼ばれる。これらの挿入光源は開発当初にはビームの通る超高真空ダクトの外側に磁石列を並べるタイプであったが、つくばの KEK で超高真空ダクトの内部に永久磁石列を入れてしまう真空封止アンジュレーターが開発され、後に続く SPring-8 では硬 X 線用の標準アンジュレーターとして採用された。

アンジュレーターでは干渉効果によって特定波長の X 線輝度を増大することができる。この波長は、電子ビームエネルギー、アンジュレーターの磁場周期長、磁場強度の関数であり、磁場周期長に比例し電子ビームエネルギーの 2 乗に反比例する。また、この干渉効果は電子ビームのエミッタンスやエネルギー分散にも影響され、これらの値が小さいほど干渉効果は大きくなり X 線輝度は増大する。

アンジュレーター利用は多くのアプリケーションにとって魅力的であり、このため新しい放射光施設として従来の偏向電磁石光源をメインとしたものから、アンジュレーターをメインとしそれに最適化した施設計画が 1980 年代半ばに始まった。これが第三世代放射光源である。そこでは電子ビームのエミッタンスを小さくするために FoDo ラティスに替わって開発された Chaseman-Green ラティスが採用された。これは周回型加速器を構成する基本ユニット中に偏向電磁石が二つ入った構造をとり、Double Bend Achromat (DBA) ラティスとも呼ばれる。計画開始当時のアンジュレーター技術では、短波長 X 線を出すためには、相当の高エネルギー電子が必要だと考えられていた。そのため、ヨーロッパ連合でフランス・グルノーブルに建設した European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) では電子エネルギーが 6 GeV に設定され、アメリカがシカゴ郊外のアルゴンヌ国立研究所に建設した Advance Photon Source (APS) では、7 GeV に設定された。こ

れらに引き続いて建設が計画された日本の SPring-8 は、8 GeV に設定された。ESRF, APS, SPring-8 は 1994 年、1996 年、1997 年に相次いで稼働を開始した。

同じころより低エネルギーストレージリングを用いた軟 X 線・真空紫外領域の第三世代放射光施設もヨーロッパとアメリカで建設された。アメリカでは、ローレンス・バークレー国立研究所に 1.9 GeV の Advanced Light Source (ALS) が建設され、1993 年に稼働を開始した。ヨーロッパでは、イタリア・トリエステに 2.0 GeV の ELETTRA が建設され 1993 年に稼働開始、またドイツ・ベルリンに 1.7 GeV の BESSY-II が建設され、1998 年に稼働を開始した。日本でもこの領域の第三世代放射光源建設が東京大学物性研究所に於いて、田無の原子核研究所にあった INS-SOR リングの後継機として計画されたが、残念なことに実現には至らなかった。アジアでは台湾でこの領域の第三世代放射光源として 1.5 GeV の Taiwan Light Source (TLS) が建設され、1993 年に稼働を開始した。このように、第三世代放射光源の始まりの時期には、硬 X 線用と軟 X 線用施設を別物として作るのが、いわば常識となっていた。

しかしながら、第三世代放射光施設で展開されたアンジュレーターの高性能化により、基本波以外の高次光も十分に実用に耐えるものとなったことや、SPring-8 が標準アンジュレーターとして採用した真空封止型アンジュレーターによって、短磁場周期長アンジュレーターが実用化され低い電子エネルギーの加速器でも、短波長 X 線をアンジュレーターから取り出せるようになったため、21 世紀に入ると、中エネルギー (3 GeV 程度) の施設で硬 X 線から軟 X 線、真空紫外までの幅広いエネルギー領域をカバーするのがトレンドとなってきた。

これらは新第三世代放射光施設と呼ばれることがあり、その先鞭をつけたのがスイスに建設された Swiss Light Source (SLS) である。そこでは 2.4 GeV の蓄積リングに、SPring-8 と協力して建設した真空封止型アンジュレーターを設置することによって、硬 X 線ビームラインを建設し、蛋白結晶構造解析に利用している。施設の利用は 2001 年に開始された。その後、フランスの SOLEIL、イギリスの DIAMOND、スペインの ALBA、中国の上海光源、オーストラリアの Australian Synchrotron (AS) などが建設され、今や放射光施設の主流となった感がある。

放射光利用の広がりとともに、放射光施設の汎用化が進んでいる。上記の新第三世代放射光源は、エミッタンス値でいえばまだ ESRF, APS, SPring-8 の大型第三世代放射光施設には及ばなかったが、2014 年になって大型施設のエミッタンス値を凌駕する性能を持つ中エネルギー施設が出現した。アメリカ・ブルックヘブン国立研究所で National Synchrotron Light Source (NSLS) の後継機として建設された NSLS-II と、台湾の Taiwan Photon Source (TPS) である。日本でも、このような新第三世代光源を作るべきという声は大きく、現

在東北大学を中心に検討が進められている。

21世紀に入ると、後述する直線型加速器を用いたX線自由電子レーザー(XFEL)施設計画が動き出し、そこでのキーワードとなったX線のコヒーレンスを、より多くのユーザーが同時利用可能な周回型加速器によって得る方法が議論された。今まで見てきたような蓄積リングだと、光源位置と光の指向性の安定性は非常に高いが、放射光を出すことによる電子ビームへの反作用によって決まる平衡エミッタンスはある程度の大きさを持つ。線形加速器を用いた自己増幅自発放射(Self-Amplified Spontaneous Emission; SASE)型XFELでは、直線的に加速することにより放射光の発生を抑え、光発生との反作用で電子ビームエミッタンスの増大がない状態で、非常に低エミッタンス電子ビームを作る。

似て非なる考え方に基づいて、多数のユーザーに同時にコヒーレントX線を供給できると謳ったものが、Energy Recovery Linac(ERL)光源である。Cornell大学のCHESSでの提案以来、多くの検討がなされ、一時はAPSもこの方式でのアップグレードを検討したが、技術的難点が多々あり未だ実用光源への応用の目途はたっていない。蓄積リングを用いた回折限界光源が検討され、ERLでの達成性能と同等なものにほぼ到達可能であることが明らかになった現在、ERLを汎用放射光源として用いる解は、ほぼ消滅したと思われる。

周回型加速器を構成する基本ユニットの中に多数の偏向電磁石を入れるMulti Bend Achromat(MBA)ラテイスによってエミッタンスを小さくできることは以前から知られていたが、2010年代に入ってからこの方式を採用した放射光施設計画が本格化してきた。2012年2月にESRFで準備的な検討会が開催されたのち、同年12月にSPring-8でDiffraction Limited SR Workshopが開催され、翌2013年にはスタンフォードで第二回、2014年にはアルゴンヌで第三回のワークショップが開催された。この間、スウェーデンのMAX-IVがこの方式での建設を進め、ブラジルのSIRIUSもこの方式での建設を進めている。一方でESRFがこの方式でのアップグレードを開始し、APSとSPring-8もアップグレードに向けての検討を進めている。このことにより、2020年代の放射光施設はMBA蓄積リングによるものが主流となりそうである。

4 X線自由電子レーザーの発展⁴⁻⁷⁾

レーザーは1960年に発明されて以来、従来の光源にはない特徴をもつ光源として広範に利用されてきた。他方でナノの世界を見るため光としてのX線は、物質・材料の原子レベルでの構造解析などに用いられてきた。X線領域までレーザーが拡張できると良いという議論は古くからあったが、原子や分子のエネルギー準位に依存する従来方式のレーザーをX線領域まで拡張することは困難だった。ところが、1971年に、加速器を利用した自由電子レーザーのアイデアが提起さ

れ、原理的には波長に依存しないレーザー建設が可能になった⁸⁾。しかし、そこで用いられる光共振器のミラーには、X線では到達不可能な性能が要求された。

1980年代中盤に、超低エミッタンス電子ビームを長いアンジュレーターに通し、その中で光と電子の相互作用を利用してコヒーレント光を発生させるSASE原理が発見されたことによって⁹⁾、レーザーの短波長化の道が拓け、1990年代にアメリカとヨーロッパで、電子線形加速器を利用したXFEL建設の検討が始まった。アメリカでは、長年高エネルギー物理学研究に利用されてきたスタンフォード線形加速器センターの線形加速器をLinac Coherent Light Source(LCLS)というXFELに転換することが計画され¹⁰⁾、ヨーロッパではドイツの高エネルギー物理学研究機関DESYで、素粒子実験用の電・陽電子リニアコライダーとX線自由電



Photo 1. SPring-8 synchrotron radiation facility (circular accelerator surrounding a small mountain) and SACLA X-ray free electron laser facility (linear accelerator).



Photo 2. Two 90-meter long in-vacuum undulators of SACLA X-ray free electron laser facility.

子レーザーを併設する計画が進められた¹¹⁾。そのころ日本では大型放射光施設 SPring-8 が建設中であり、次の光源を考えている余裕はなかったが、SPring-8 が動き始めた 1997 年以降コヒーレント光学系開発を進めていた SPring-8 の経験を XFEL 建設に活かしたいという要請を受けるようになった。

筆者等は欧米での検討会議に数回招待されて、XFEL の議論を聞いたが、当時 SPring-8 で開発が進んでいた真空封止型アンジュレーターを使えば、欧米の計画よりずっと小型で省エネな XFEL の実現可能性があることがわかってきた。そこで検討されたのが Compact XFEL であり、平成 18 年度(2006 年)からの国の第三期科学技術基本計画の中で、SPring-8 Angstrom Compact Laser (SACLA) に結実した⁷⁾。

SASE 型 XFEL の検討過程で、全世界的に沸き上がった議論は、直線加速器をベースとした光源は、取り出しビームライン数が少なく、コストパフォーマンスが悪いのではないかというものである。このため、低エミッタンス大電流ビームからの放射光の高空間コヒーレンスを利用する ERL 光源との比較検討が、世界中で行われた。基本的には低エミッタンス大電流を連続的に供給するためには、電子ビームは常にフレッシュである必要があり、大きなチャージ量を加速し、発光させてから、捨ててしまう。連続的に加速することから、消費電力量はべらぼうとなり、また高エネルギー大電流を捨てると放射線の問題もばかにならない。放射線の問題を解決するだけであれば、捨てる前に減速すればよいが、さらに超伝導加速管でエネルギーを回収して、そのエネルギーをフレッシュな電子の加速に用いることで、消費電力量を抑える…というのが ERL のロジックであった。

ここでの一番の問題点は、発光過程が XFEL とは異なりインコヒーレントである点であり、XFEL では N 個の電子が出す光強度は一個の電子の光強度の N^2 倍となるのに対して、ERL 光源では N 倍にしかない。超伝導加速管を用いることによって、繰り返し周波数は高くなるが、それでも既存放射光と同程度の光強度を得ようとすれば、パルスあたりのチャージ量は非常に大きくなる。そのような大チャージパルスを、高繰り返しで発生させる電子銃は、技術的に非常に難しく、Cornell で開発されたマルチアルカリ電子銃等の候補はあるものの、技術的に確立したとは言い難い。

SASE 型 XFEL で取り出しビームライン数が少ないという議論に対しては、二つの全く逆向きの対応策が取られつつある。一つは、超伝導線形加速器を用いて繰り返し周波数を上げ、ビームを多くのビームラインに分割するものである。この方式は、EU がドイツ・ハンブルグに整備している European XFEL の考え方であるが、アメリカも LCLS の二期計画で超伝導線形加速器の利用を打ち出している。

もう一つは、日本の SACLA が主導するコンパクト XFEL の考え方であり、全体を小さく、安くしてしま

えば、取り出しビームライン数は問題にならなくなるというものである。スイス、韓国がこの考え方に追従しているが、日本の中ではさらに小型化した XFEL を開発する動きが ImPACT プロジェクトの中にある。当分の間は米・欧の二つの巨大施設と日本を含むその他多数のコンパクト XFEL の二極化に進んで行こう。

SASE 型 XFEL は多モードレーザーであり、スペクトル的にも時間的にも多数のパルスで構成されている。そこにシード光を入れて、シングルモードに近い X 線レーザー光を取り出す試みが進められている。X 線領域では、長いアンジュレーターの中に分光器を挿入してシード光を作り出すセルフ・シーディング方式が利用され始めている。ダイヤモンド単結晶を用い、ある波長でブラッグ配置の X 線回折を起こさせると、透過 X 線ビームは回折された部分だけがスペクトル的に抜け落ちたプロファイルを持つ。このビームは、時間が遅れた単色 X 線をもととの入射ビームと同軸に出射するので、後半のアンジュレーターに入る電子ビームをシケインなどによって同じだけ時間を遅らせれば、シード光と電子ビームが一緒にアンジュレーターの中を走ることになる¹²⁾。

この電子ビームシケインを用いると、前半のアンジュレーターと後半のアンジュレーターの発光のタイミングをずらすことが可能であり、2 パルス運転をすることができる。SACLA の場合にはアンジュレーターの磁場が可変であるので、前半と後半で異なる波長の XFEL を発生させることが可能であり、最初のパルスからの光を K 吸収端の上に合わせ、二番目のパルスからの光を $K\alpha$ に合わせることによって、古典的な意味での X 線レーザーがすでに銅を使って実現されている¹³⁾。

5 放射光と X 線自由電子レーザー光源の将来

長期的視点に立つて俯瞰すると、放射光は 15 年-20 年で新しい世代に移行してきた。いままさに MBA ラティスによる新世代放射光が幕を開けようとしており、SPring-8 アップグレードもこの方向で検討が始まっている。

その次の世代を予測するのは大変困難であるが、レーザーの歴史を振り返れば、X 線領域でもコヒーレント光源化は必須であり、SASE 型 XFEL はその第一歩である。しかしながら SASE 型は発光原理からある閾値以上の強度の X 線しか作ることができず、レーザーでいうとパルスレーザーに対応するものである。レーザーとの対比でいえば、CW の XFEL を開発することが重要であり、これはリングベースになると思われる。基礎技術としては、すでに米国アルゴンヌ国立研究所で結晶のブラッグ反射ミラーを用いた X 線共振器による XFEL の提案 (XFEL Oscillator と呼ばれている) があり¹⁴⁾、蓄積リングの電子ビーム性能が現在のペースで向上していけば、蓄積リングをベースにしたリング型 XFEL も夢ではない。2040 年代には、このよ

うな議論をしていただきたいと期待している。

一方で X 線自由電子レーザーは、2009 年に LCLS¹¹⁾、2012 年に SACLA¹⁵⁾ がユーザー運転をはじめ、現状では世界に二つしかない。今後 EU のユーロ XFEL¹⁵⁾、スイス¹⁶⁾、韓国¹⁷⁾ など現在建設中の施設が続々と運転を始め、また上海など新たに建設計画を策定する機運がある。軟 X 線から EUV 領域でも、ドイツの FLASH、イタリアの FERMI¹⁸⁾ がユーザー運転を始めており、米国が超伝導加速器ベースの軟 X 線 FEL を LCLS に併設して、LCLSII にする計画を遂行中である。日本でも SACLA のプロトタイプとして建設した SCSS を SACLA の建物に移設・増強した上で、SCSS+ としてユーザー運転を開始することにしている。

SASE 型 XFEL には、超伝導加速器を用いることによって多くのビームラインに同時に光を供給するユーロ XFEL-LCLSII の考え方と、よりコンパクトな光源にして、さまざまな場所に独立に建設するという SACLA の考え方があり、それぞれに独自の進展をしている。

そのような「経緯」はともかく、いままで独立して進んできたレーザー光源開発と加速器ベース光源開発は、どこかで協調性を高め、両者が協力して初めて可能になるような光源開発に進むべき時が迫っているように感じている。SACLA がそのためのプラットフォームの役割を果たすことを期待している。

最後に、「放射線化学」100 号記念特集に寄せていただいたことに感謝する。読者の皆様に今まで X 線では到達不可能だった時間領域が SACLA によって到達可能になったことをお知らせし、是非その利用を考えて頂けるようお願いしたい。

〈参考文献〉

- 1) 大柳 宏之, シンクロトロン放射光の基礎, 丸善, 1996.
- 2) 石川 哲也, 応用物理, 77 (2008) 1449.
- 3) H. Wiedemann, Synchrotron Radiation, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2003.
- 4) W. Ackermann *et al.*, Nat. Photonics, 1 (2007) 336.
- 5) T. Shintake *et al.*, Nat. Photonics, 2 (2008) 555.
- 6) P. Emma *et al.*, Nat. Photonics, 4 (2010) 641.
- 7) T. Ishikawa *et al.*, Nat. Photonics, 6 (2012) 540.
- 8) J. M. J. Madey, J. Appl. Phys., 42 (1971) 1906.
- 9) R. Bonifacio, F. Casagrande, C. Pellegrini, Opt. Commun., 61 (1987) 55.
- 10) SLAC National Accelerator Laboratory, Linac Coherent Light Source.
https://portal.slac.stanford.edu/sites/lcls_public/Pages/Default.aspx
- 11) European XFEL, <http://www.xfel.eu>
- 12) J. Amann *et al.*, Nat. Photonics, 6 (2012) 693.
- 13) H. Yoneda, Y. Inubushi, K. Nagamine, Y. Michine, H. Ohashi, H. Yumoto, K. Yamauchi, H. Mimura, H. Kitamura, T. Katayama, T. Ishikawa, M. Yabashi, Nature, 524 (2015) 446.
- 14) K.-J. Kim, Yu. Shvyd'ko, S. Reiche, Phys. Rev. Lett., 100 (2008) 244802.
- 15) SACLA, <http://xfel.riken.jp>
- 16) Swiss XFEL, <http://www.psi.ch/swissfel/>
- 17) PAL XFEL, <http://pal.postech.ac.kr/paleng/>
- 18) FERMI FEL, <https://www.elettra.trieste.it/FERMI/>