

「X線自由電子レーザー」とは

理化学研究所 線型放射光研究開発グループ

北村 英男

1960年代に実用化された放射光はその基本原理「真空中の高エネルギー電子が静磁場で曲げられる時に放出する光」のおかげで波長域の原理的な制限がないという特長を有し、電子エネルギーの選択によりいかなる波長域の光も発生可能である。また、レーザーには敵わないが従来のランプ型光源と比較すれば遙かに優れた指向性を持っている。さらに、高品質電子ビームを正負が交番する周期的な磁場（アンジュレータ）に通すと単色性に優れ、かつレーザー以上の指向性を有する高輝度放射光が得られる。このアンジュレータこそ SPring-8 等の第三世代放射光源における主力放射光源なのである。しかしながら、レーザーにあって第三世代放射光源には無い重要な光源の特質がある。これがアインシュタインの発見した誘導放出原理がもたらすレーザーのコヒーレンス性である。しかし、この光源にも致命的な欠点がある。100nm 以下の波長領域での直接発振はとても難しいということである。この波長域においてほとんどの物質が不透明になってしまうという法則がレーザー媒質にも例外なく適用されてしまうのである。したがって、波長制限がないという放射光の利点とレーザーのもつコヒーレンス性を併せ持つ次世代の放射光源が待望されるのは当然である。

1970年代になって光源史上極めて重要といえる自由電子レーザー（FEL）の原理が発見され、遠赤外域において最初の FEL が成功した。アンジュレータ内を共に進む電子ビームと光との相互作用が誘導放出効果をもたらすという原理である。レーザー媒質による光の再吸収がないので短波長域レーザーの本命として期待され、世界中で FEL 開発が行われるようになった。我が国においても 80 年代から 90 年代にかけてこの光源の開発に予算が集中投資された経緯がある。しかしながら、その成果は原理検証の範囲を超えるに至らず、短波長性能も従来のテーブルトップレーザーを凌ぐことはできなかった。この背景にも冷酷な物理学上の限界がある。当時の FEL（原始的 FEL）の主要構成機器である共振器に必要なミラーの反射率の波長依存性である。短波長域において最も高い反射率をもつアルミニウムでも 100nm で 50%、10nm では絶望的に低い値を示す。共振器ミラーとしてはほぼ 100%の反射率が必要であるにも拘わらずである。放射線管理対象である加速器が FEL の主要構成機器である以上、原始 FEL がテーブルトップレーザーにとって代わる可能性は皆無に近いといえる。ただし、従来レーザーが対応できない遠赤外やテラヘルツ域においては十分期待できる光源である。

原始 FEL の問題点であった共振器ミラーの主たる役割は光を往復させることによって長い相互作用距離を得ることである。したがって、共振器ミラーを取り除き、光源体であるアンジュレータの長さを発振に至る（飽和出力に達する）のに必要な相互作用距離に設定することによってもレーザー出力が得られるはずである。これが自己増幅型自由電子レーザー：Self-Amplified Spontaneous-Emission FEL（略して SASE-FEL）の原理である。電子エネルギーの選択によりいかなる波長域のレーザー光も得ることができるが、必要なアンジュレータの長さを 100m 以下という現実的な値とするためには、高品質の電子ビームを使って相互作用距離の単位長さあたりの光増幅率を高くする必要がある。また、0.1nm 域の X 線域のレーザーを得るためには 10GeV 前後の電子エネルギーが必要となる。本計画 SCSS の X 線自由電子レーザーは、以上の SASE-FEL 原理に基づいており、電子エネルギーを 8GeV、アンジュレータ周期長を 15mm、アンジュレータ長を 80m に設定することによって 0.1nm 域のコヒーレント X 線を得ようとするものである。