

将来のリング型光源と超伝導先端光源の可能性

坂中章悟

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

構造物性研究をますます発展させるためには、より高輝度、高コヒーレンス（空間的および時間的）な光が要求されるであろう。放射光源の一つの目標は、電子ビームのエミッタンスとして、水平・垂直方向ともに硬 X 線領域の回折限界エミッタンス ($\lambda/4\pi$) に到達することである。波長 $\lambda=0.1$ nm に対する回折限界エミッタンスは約 8 pm·rad である。

最近の第 3 世代リングでは、10keV 領域で平均輝度 $10^{20} \sim 10^{21}$ [photons/s/mm²/mrad²/0.1%bw] 程度の放射光を発生できる。一方で、リング型加速器のラティス設計が長足の進歩を遂げた結果、Multi-Bend Achromat (MBA) ラティスを採用する事で、より低エミッタンスのビームを蓄積できるリング型光源の提案が多数なされている。その先駆けとして、スウェーデンの MAX-IV とブラジルの Sirius が建設中であり、ESRF, APS, SPring-8 など MBA ラティスを採用したアップグレードを計画中である。これらの MBA ラティスを採用し、水平ビームエミッタンスとして 100 pm·rad 級を達成できるリングは「第 4 世代リング」と呼ばれるようになってきている。これらの第 4 世代リングでは、平均輝度 $10^{21} \sim 10^{22}$ 超 (@10keV 領域) の放射光を発生できると期待される。

リニアックベースで回折限界を狙う光源計画として ERL 計画があり、KEK/JAEA において過去 10 年間、精力的な R&D がなされた。その結果、低エミッタンス・大電流のビームを発生できる光陰極 DC 電子銃や、ビームを高加速勾配かつ連続的 (CW) に加速できる超伝導加速空洞などの開発に成功し、それらを組み合わせた実証機「コンパクト ERL」が KEK において稼働を開始した。コンパクト ERL では、ビーム電流 100 μ A までの低エミッタンスビームの周回に成功しており、ビーム電流をさらに上げる計画が進行中である。

リニアックからのビームを利用する自由電子レーザー (FEL) では、硬 X 線領域で米国の LCLS や日本の SACLA が稼働し、共同利用に供されている。これらに代わる常伝導リニアックを用いた FEL では、光パルスの繰り返し周波数はリニアックの RF パルスの繰り返し (120~30 Hz) で制限されている。FEL パルスの繰り返し周波数を 1 MHz 程度まで上げることが出来れば、シングルショット毎の回折

像取得やポンププローブ実験を高繰り返しで行うことができ、データ取得を飛躍的に効率化できる。米国 SLAC 研究所では、超伝導リニアックからのビームを用いることで、0.2-5 keV 領域で繰り返し周波数約 0.6 MHz の FEL 光を発生する LCLS-II 計画を推進中である。超伝導リニアックを用いた FEL の高繰り返し化は、今後世界的に主な潮流になってゆくものと考えられる。我が国においては、SACLA で硬 X 線領域の FEL が開発され、KEK/JAEA において超伝導加速空洞と高繰り返し・低エミッタンス電子銃の技術が開発されているので、これらを組み合わせることで硬 X 線・高繰り返し FEL を早期に実現することは、技術的に可能だと考えられる。

X 線 FEL の発展型として、低エミッタンス・高繰り返し（約 1MHz）の電子ビームでドライブされる XFEL オシレータ（XFEL-0）も提案されている。これは、アンジュレータで発生した X 線を高反射率の X 線ミラーで反射させてアンジュレータに戻し、これをシード光にして次の電子バンチにより増幅させるものである。高反射率の X 線ミラーは近年の R&D により開発が進んでいるが、X 線光学系に厳しいトレランス（角度誤差で約 10 nrad）が要求されることなどから、高繰り返し SASE/seeded-FEL よりさらに高難度だと考えられる。

上に述べた超伝導リニアックを用いる高繰り返し FEL が実現すれば、平均輝度において $10^{23} \sim 10^{26}$ (@10keV 領域) が実現する筈であり、X-FEL は「高い繰り返し、高ピーク輝度のパルス光源」としてのみならず、「平均輝度が非常に高い光源」としても極めて有用なものとなる。我が国においては、次世代リング型光源の建設を進めると共に、次世代 FEL 光源に向けた開発研究を進めてゆく必要があると思われる。