

## ■マスタープラン2014 & 放射光光源将来計画討論会報告

### コヒーレンス光源をめぐる世界の技術動向と SPring-8 アップグレード計画

田中 均 (独立行政法人 理化学研究所放射光科学総合研究センター 回折限界光源設計検討グループ)

X線の回折限界光源という場合、10 pmrad を下回る必要があるが、現在 ESRF や SPring-8 で議論されているアップグレードは、100 pmrad を下回る事をまずは目標に掲げている。そこで誤解を生じないようにコヒーレンス光源という言葉を発表では用いたことを冒頭で述べておく。

発表の Outline は以下の通りであるが、1. の前に ERL と蓄積リングの特性の比較を行った。

1. 光源の低エミッタンス化の歩み
2. 高コヒーレンスを可能にした最近の進展
3. ESRF の高コヒーレンスリングへのアプローチ
4. SPring-8 のアップグレードにおける基本戦略
5. 加速器設計の現状
6. 課題と今後の検討スケジュール

始めに、1980年代から最近までのリングの低エミッタンス化に関わる加速器物理研究の歴史とそれらに基づく放射光源のエミッタンス低減の歩みを紹介した。

次に、昨年 ESRF が発表した画期的なリングのオプティクス設計に関し解説を試みた。あくまでも発表者の個人的見解ではあるが、ブレークスルーのキーポイントは、(1)共鳴励起項を抑制できる Interleaved (位相整合) 6 極ペア、(2)6 極電磁石の強さを緩和するエネルギー分散のピーク生成、(3)クロマチシティを低減するベータatron 関数サプレッサーの採用、(4)8 極電磁石による振幅依存チューンシフト補正の4つの新たな試みであること、これにより、現実的な加速器コンポーネントを用いて低エミッタンスと電子ビームの動的安定性を両立、即ち、エネルギー 6 GeV、周長 844 m で 130 pmrad の安定な超低エミッタンスリングの設計が実現したことを述べた。

その後で、SPring-8 のアップグレードとして、ゴールを何処に設定し、それに向かってどのような戦略と戦術をたて、実際にリング設計を行うのかを説明し、加速器設計の現状を紹介した。

基本方針としては、(1)低エミッタンス化については、偏向電磁石の分割数 Nb を大きくして低エミッタンス化 (エミッタンス  $\propto 1/Nb^3$ ) を単純に図るのではなく、その方法に加えて、これまで第3世代放射光光源の設計に導入されていない、複数の低エミッタンス化法を組み合わせ、「低エミッタンスと電子ビームの安定性」を両立することを目指す。今のところ、非一様偏向電磁石による放射励起抑制、ダンピング分割数制御によるエミッタンス制御 (自然エミッタンスの低減)、放射光利用を目的としたアン

ジュレータによる積極的なダンピング促進を組み合わせる予定である。

従来の非線形性の抑制には、線形クロマチシティ (収束力の色収差) を補正する 6 極電磁石の誘起するシステムティックな非線形共鳴を、エネルギー分散のない直線部の 6 極電磁石 (色収差補正に寄与しないもので、特定の共鳴を抑制することからハーモニック 6 極電磁石と呼ぶ) で補正するスキームが用いられてきた。しかし、これでは格段に強くなった 6 極電磁石の誘起する膨大な数の共鳴を制御するのは困難である。そこで、強くなった 6 極電磁石からの非線形性のメインタームを制御する目的で、次の様な方針転換を行った。

水平、垂直ベータatron 振動の位相進み  $= (2n+1)\pi$  の位相整合条件を満たす 1 組の 6 極電磁石を 1 単位として配置する<sup>注1)</sup>。これにより、設計ビームエネルギーでの非線形性を完全に抑制可能になる。エネルギー偏差や各種誤差による位相整合条件のやぶれによる不安定性は、6 極電磁石の配置とペアの種類自由度、さらには電磁石の強さの 1 次で振幅依存チューンを制御できる弱い 8 極電磁石を組み合わせることで抑制する。

この手法はリング周長の大きな高エネルギー実験用のコライダーリングでよく使われるが、周期数の大きいリング型光源では、セルの長さが短い上に制約が多く、この方法の導入は現実的に困難と考えられてきた経緯がある。SPring-8 の次期計画では、実現可能な加速器コンポーネントによる極限の低エミッタンス化を追求するため、敢えて、この困難な手法をリングのオプティクス設計に取り入れることにした。

この方針の下で設計を進め、現時点では実現可能な加速器コンポーネントにより、ベアラティスのエミッタンスは 274 pmrad まで低減できたこと、これに放射減衰制御と放射減衰促進を組み合わせる事で 100 pmrad を下回るエミッタンスが達成できる見込であること等が示された。

最後に、年度内に基本設計を完了し、R&D の方針を決定すると共に、2014年夏に加速器設計の国際レビューを開催する予定を示した。

注1: 6 極電磁石の設計ビームエネルギーでの非線形キックの相殺条件  
6 極電磁石の規格化された強さを

$$\lambda \equiv \frac{1}{2B\rho} \left[ \frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} \right]_{x=0},$$

水平，垂直変位をそれぞれ  $x$ ， $y$  と表わす。ここで  $B\rho$  は magnetic rigidity と呼ばれ量で，超相対論領域ではビームエネルギー  $E$  (GeV) =  $0.3 B\rho$  (Tm) で与えられ， $B_y$  は電磁石の垂直磁場である。水平，及び垂直の6極電磁石による非線形キック  $\Delta xx$  と  $\Delta yy$  はそれぞれ以下の様に与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta xx &= -\lambda(x^2 - y^2), \\ \Delta yy &= 2\lambda xy. \end{aligned}$$

このキックに， $(2n+1)\pi$  位相が正確にシフトし，ベータ関数等，電子ビームの光学関数が同一な場所に置かれた6極電磁石の非線形キックと足し合わせるとどうなるかを見てみよう。この条件から  $x$ ， $y$  は最初の場所と同じ絶対値で符号が逆の  $-x$ ， $-y$  となることが分かる。また，上流のキックは位相が  $(2n+1)\pi$  進むので次の6極電磁石の位置で  $-\Delta xx$ ， $-\Delta yy$  となる。2つの非線形キックの和を  $\text{Sum\_xx}$ ， $\text{Sum\_yy}$  とおけば，

$$\begin{aligned} \text{Sum\_xx} &= -\Delta xx - \lambda((-x)^2 - (-y)^2) = \lambda(x^2 - y^2) - \lambda(x^2 - y^2) = 0, \\ \text{Sum\_yy} &= -\Delta yy + 2\lambda(-x)(-y) = -2\lambda xy + 2\lambda xy = 0 \end{aligned}$$

となり綺麗に相殺する事が分かる。