

■第1回放射光科学賞受賞研究報告

我が国独自の放射光源技術と世界への貢献

北村英男 (理化学研究所・NEOMAX エンジニアリング株式会社)

1. 真空封止アンジュレータ (IVU) と低温アンジュレータ (CPMU)

現代における放射光光源の最前線は、高平均輝度を志向する究極型蓄積リング-Ultimate-Storage-Ring (USR)¹⁾と、高ピーク輝度を志向するX線自由電子レーザー(XFEL)である。何れの場合も高精度のアンジュレータが主たる光源装置に位置づけられており、特にX線用USRの場合、一部の例外はあるが、多くは施設コスト低減を目指した3 GeV級の中型施設型が採用されており、必然的に短周期磁場を特徴とする真空封止アンジュレータ-In-Vacuum-Undulator (IVU) やその発展型である低温アンジュレータ-Cryogenic Permanent Magnet Undulator (CPMU) の採用が不可欠になっている。

IVUは、筆者が率いるKEK-PFのチームによって開発され、1990年、KEK-ARに世界最初のIVU(周期長:40 mm, 周期数:90)が設置されたのである²⁾。その後、筆者はSPring-8に移り(1993年)、施設の基本コンセプトとしてIVU(周期長:32 mm前後, 周期数:140前後)を主力X線光源に位置づけた³⁾。SPring-8におけるアンジュレータ建設・開発は1997年のコミショニング以来、順調な発展を遂げ、現在では約30台に達するIVUが稼働している。

IVUの特長は、磁石ギャップ内に真空ダクトが存在しないがために、電子ビームを削るまで磁石ギャップを狭くできることである。したがって、広い磁石ギャップでは高い磁場が得られなかった短周期(周期長30 mm以下)のアンジュレータでも高い磁場の発生が可能となり、高輝度の短波長域X線放射光が得られることになったのである。我が国を発信地とするこのIVUのコンセプトは、先ず、フランスESRFが取り入れることになった(1996年)。そして、1997年にはBNLとの共同研究による極短周期(11 mm)IVUの成功へと続く⁴⁾。僅か2.7 GeVのBNL-NSLSにおいて高輝度X線(3次光)の発生に成功というニュースは世界中を駆け巡り、以後、短周期IVUを主光源とする3 GeV級中規模放射光施設が建設されることになった。特にスイスSLSは早くからSPring-8と協力関係を樹立し、主力光源として日本製のIVUを採用しているほか、米国東海岸のBNL、西海岸のLBNLやSLAC、台湾TPS、オーストラリアAS、および最新のUSRコンセプトに基づくスウェーデンMAX-IVにおいても多数の日本製IVUが稼働している。

KEKで開発した最初のIVUには我が国において発明

されたネオジム系永久磁石が採用された。以後、日本製のIVUは全てこのネオジム系が採用されている。ネオジム系はこれ以前に開発されていたサマリウム系磁石を遥かに凌ぐ磁場性能を有する。しかし欠点もある。それは、顕著な温度依存性である。1度温度が上がるごとに0.15%磁場が低くなるのである。しかし、見方を変えればこの欠点は長所に転ずる。つまり、冷やせば磁場性能が向上するのである。筆者が率いるSPring-8のチームはこれに着目し、液体窒素温度付近で動作する低温アンジュレータCPMUのコンセプトを発表し⁵⁾、世界に衝撃を与えた。室温型IVUと比較して実質30%高い磁場性能を有するCPMUはUSRの最重要光源として位置づけられている。

アンジュレータの放射輝度はこれを設置する蓄積リングの電子ビームの質(エミッタンス)に依存する。エミッタンスとは電子ビームの断面サイズと拡がり角の積に相当する。つまり、光源施設のエミッタンス値が低いことは、電子ビームが高品質であることであり、高輝度のアンジュレータ放射を得るための条件のひとつである。アンジュレータを主力光源とする第三世代放射光源では数nm.radのエミッタンスが設定されていたが、USRでは100 pm.radが目標とされるようになった。X線0.1/軟X線波長1 nmに対応する回折限界値がそれぞれ8/80 pm.radであるから、USRは回折限界蓄積リング-Diffraction-Limited-Ringとも呼ばれる。高輝度アンジュレータ放射光を得るためのもう一つの条件はアンジュレータの磁場が高精度であることである。「高精度」とは、アンジュレータ内電子の蛇行軌道が整然としていることである。整然さが乱れると発生する電磁波の位相に乱れが生じ、輝度が低下する。この位相の乱れは「位相エラー」と呼ばれており⁶⁾、アンジュレータの周期長が短いほど顕著になってくる。したがって、短周期アンジュレータであるIVUやCPMUでは、位相エラーを如何に低く抑えるかが重要になってくる。この報告では、最新IVUにおける最重要課題である「低位相エラーアンジュレータ」について言及するものである。

2. 低位相エラーの真空封止アンジュレータ

位相エラー σ を持つアンジュレータにおいて、 n 次光の理想輝度 B_0 に対する劣化した実効輝度 B_{err} は近似的に次式で与えられる。

$$B_{err} = B_0 \exp(-n^2 \sigma^2)$$

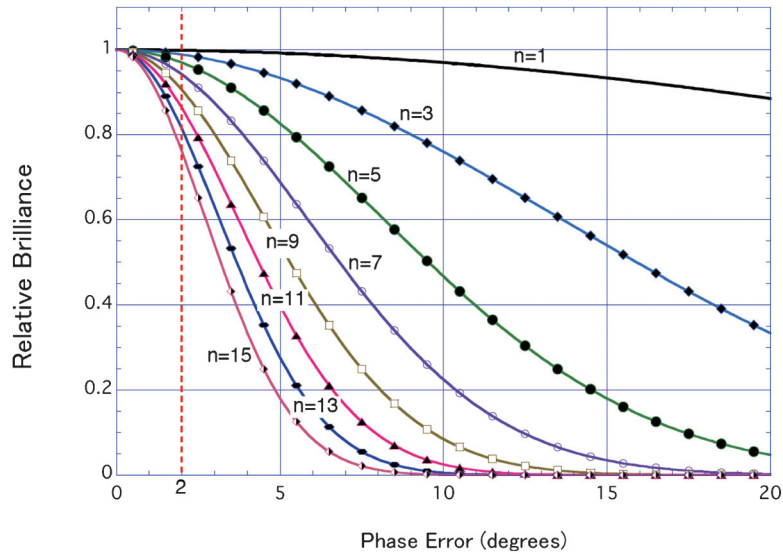


Fig. 1 Degradation of undulator brilliance due to phase error. 'n' denotes harmonic order of undulator radiation.

上式において n は高調波次数であり、 σ の単位は radian である。Fig. 1 は、位相エラーによる各高調波輝度の劣化曲線である。図に示すように、高調波次数が高いほど劣化が顕著になることがわかる。例えば、 $\sigma=5$ 度の場合、基本波の実効輝度は99%、3/5次光のそれは93/83%となる。しかしながら、11/15次光では40/17%まで劣化する。SPring-8 (8GeV) のような高エネルギー施設では基本波～5次光で硬 X 線領域をカバーできるから、実効輝度80%以上を得るためのアンジュレータは位相エラー5度でも許容されるが、11～15次光が必要な3GeV級施設では2.0度以下のアンジュレータが必須となる。これが3GeV級USR施設において低位相エラーアンジュレータが要求される理由である。位相エラーをもたらす原因として以下が考えられる。

① 永久磁石ユニットの個体差、装着エラー（磁石位相エラー）

永久磁石の残留磁束密度、保磁力、着磁方向、寸法等のパラッキあるいは磁石列ビームへの装着エラーによって位相エラーが生じる。一般にアンジュレータ磁場の調整とは、各磁石ユニットの並び方を工夫し、個体差を相殺することによって低位相エラーを得ることである。

② 磁場測定エラー（偽位相エラー）

磁場測定システムに測定エラーがあると低位相エラーへの追い込みが困難となる。つまり、磁石ユニットや機械部に問題がなくても見せかけの位相エラーが発生し、磁場調整作業は収束しなくなる。これを偽位相エラーと定義する。測定エラーをもたらす要因は、ホール素子走行システムのエラー、素子校正の失敗、素子マウントエラーがある。通常、ホール素子はセラミック基板等でモールドされているが、磁場感受方向が基

板面法線と一致しないことが多い。市販の高品位ホール素子でも0.5度程度、普及品では2～3度の傾きがある。この傾きを考慮しないで較正や磁場測定を実施すると大きな偽位相エラーが発生する恐れがある。

③ 機械部の脆弱さ（固有位相エラー）

アンジュレータ内には様々な力が発生する。その主たるものが吸引力であるが、ギャップ開閉動作によって生じる力も無視できない。機械部の精密さが欠けると不要な力が発生し、磁石列ビームに予期せぬ変位が生じるのである。また、アンジュレータの運搬や設置方法、設置場所（床面）に由来するエラーも警戒すべき対象となる。いずれにせよ、脆弱かつ低精度の機械構造は、磁石ギャップエラーを生じさせ、重大な位相エラーをもたらすことになる。なお、機械部エラーに由来する位相エラーを固有位相エラーと定義する。

上記①/②については、注意深く対処すれば、磁石/偽位相エラーを1度以下に抑えることができるが、③の固有位相エラーを2度以下に抑えるのは容易ではない。磁石ギャップエラー Δg がもたらす固有位相エラー σ_{int} は定性的に以下の式で表すことができる⁷⁾。

$$\sigma_{int} = \pi k_b \frac{K^2}{1 + K^2/2} \frac{L_u}{\lambda_u^2} f |\Delta g|$$

上式において、 λ_u はアンジュレータ周期長、 L_u はアンジュレータ長さ、 $K = 0.934B$ (tesla) λ_u (cm) はアンジュレータの偏向定数であり、通常、1 から 2 の範囲に設定される。 k_b は磁石列ビームの撓み形状に依存する量で通常0.03～0.07の範囲にある。 f は磁気回路設計とギャップに依存する量で、狭ギャップで4.5、広ギャップで3.0付近の値とな

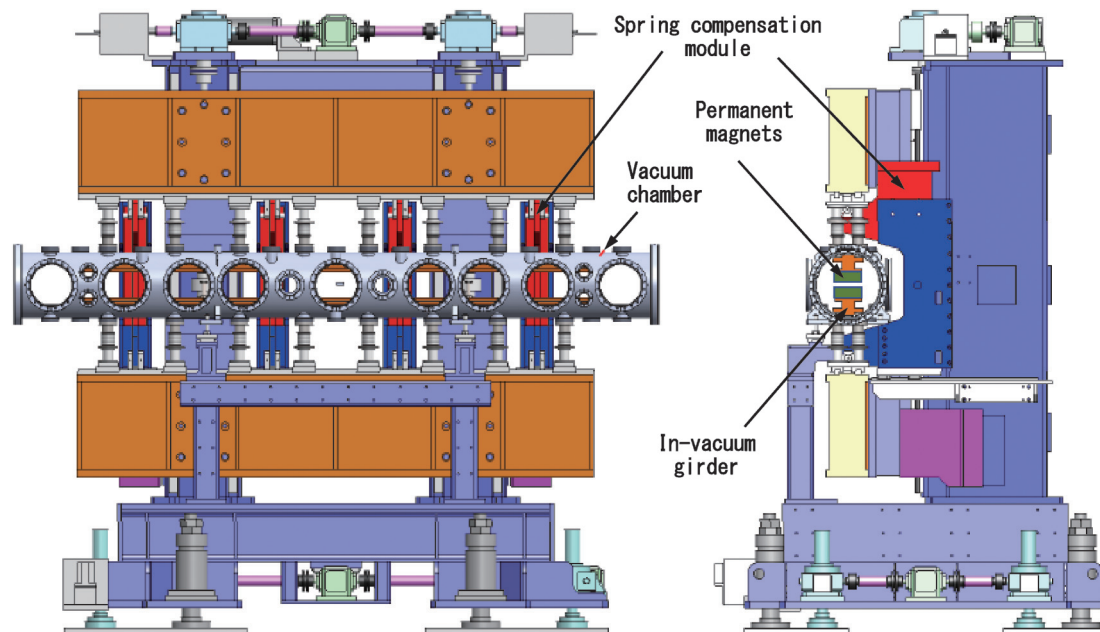


Fig. 2 Cryogenic permanent magnet undulator of spring compensation type with a periodic length of 15 mm, 2 m length and the minimum gap of 4 mm generating maximum magnetic field/force of 1.12 T/23 kN at room temperature, 1.32 T/32 kN at liquid nitrogen temperature. This undulator was produced by NEOMAX ENGINEERING Co. Ltd. for NSRRC, Taiwan.

る。上式に示すように、位相エラーは周期長の自乗に反比例して増大する。例えば、 $L_u=3\text{ m}$ 、 $K=2$ 、 $f=4.0$ 、 $k_b=0.05$ 、 $\Delta g=10\ \mu\text{m}$ のアンジュレータを想定すると、周期長30 mm の場合、 $\sigma_{int}=1.6$ 度である。しかし、周期長15 mm の短周期アンジュレータでは $\sigma_{int}=6.4$ 度という3GeV級USR施設では許容できない値になってしまう。したがって、短周期アンジュレータにおいて $\sigma_{int}<2$ 度であるためにはギャップエラーは $3\ \mu\text{m}$ 以下でなければならない。

固有位相エラーは、機械部動作に由来するギャップエラーと吸引力によるエラーに依存するが、吸引力エラーについては回避する方法がある。その一つは、反撥磁石列をアンジュレータ磁石列の両側に並べて実質的吸引力を無くす方法、もう一つは、バネを使用する方法であるが、後者のバネ補償法の方が、適用範囲が広く、かつ、調整が容易である。

現在建設中の台湾NSRRC向けCPMUは積極的にバネ補償法を採用している（Fig. 2）。周期長15 mmの典型的な短周期型であるが、調整可能なバネ補償モジュールを4基備えている。アンジュレータ長は2 m、最小ギャップは4 mm、室温時における最大磁場/吸引力は1.12 T/23 kN、液体窒素温度（77 K）における設計値は1.32 T/32 kNである。強靱な構造を採用しているため、機械部動作によるギャップエラーが $1\ \mu\text{m}$ 以下であることが確認されている。また、吸引力によるエラーもバネモジュールの微調整により、 $2\ \mu\text{m}$ 以下に抑えられているので室温時の位相エラーは1.7度以下を達成している。ただし、液体窒素温度における磁場測定は未完了であるため、この温度での

位相エラーの評価は行っていないが、バネモジュールの再調整により2度以下が達成できるものと思われる。

3. おわりに

なぜ、我が国が世界に先駆けてIVUばかりでなくCPMUを考案・実用化できたのかというのが社会科学上の大きな疑問となっている。いずれのアンジュレータも実現するには高い技術水準が必要であるが、同等以上のレベルにある西欧諸国も開発するチャンスは十分にあったはず。この疑問に対する回答は以下である。技術の分業化が進みすぎると新しいコンセプトを産み出すことが難しくなる。欧米の加速器科学分野ではこの状況にあり、IVUやCPMU開発に必要な磁石、真空、低温、機械の全ての技術を統合的に把握している個人あるいはチームが存在しなかった。一方、我が国では、特殊な経歴のためにオールラウンダーになってしまった筆者と、彼に協力するチームメンバーに加えて、優秀な磁石、機械および真空メーカーが存在していたのである。前節で述べたようにUSRコンセプトに基づく新しい放射光施設に対応するには低位相エラーのIVU・CPMUが必要である。これに対応するには、構成する全ての技術（磁石、真空、低温、機械）において一層のブラシアップが必要となる。

参考文献

- 1) S. C. Leemann, Å. Andersson *et al.*: Phys. Rev. ST Accel. Beams **12**, 120701 (2009).
- 2) S. Yamamoto *et al.*: Rev. Sci. Instrum. **63**, 400 (1992).

- 3) H. Kitamura: J. Synchrotron Radiation **5**, 184 (1998).
- 4) P. Stefan, T. Tanabe *et al.*: J. Synchrotron Radiation **5**, 417 (1998).
- 5) T. Hara *et al.*: Phys. Rev. ST Accel. Beams **7**, 050702 (2004).
- 6) R. P. Walker: Phys. Rev. ST Accel. Beams **16**, 010704 (2013).
- 7) J-C. Huang, H. Kitamura *et al.*: Phys. Rev. ST Accel. Beams **20**, 064801 (2017).

● 著者紹介 ●

**北村英男**

理化学研究所 名誉研究員, NEOMAX
エンジニアリング㈱ 技術顧問

E-mail: kitamura@spring8.or.jp

専門: 加速器科学, 放射光源

【略歴】

1976年8月, 京都大学大学院理学研究
科物理学第一専攻博士学位取得退学, 博
士(理学)

1976年9月～1980年4月, 東京大学物性研究所助手

1980年5月～1985年2月, 高エネルギー物理学研究所放射光
実験施設助手

1985年3月～1990年3月, 同施設助教授

1990年4月～1997年3月, 同施設教授

1997年4月～2008年3月, 理化学研究所主任研究員

2008年4月～2001年3月, 理化学研究所 X線自由電子レー
ザー計画推進本部・光源研究開発グループリーダー

2011年4月～2013年3月, 理化学研究所放射光科学総合研究
センター・XFEL研究開発部門上級研究員

2013年4月より現職。