

SPring-8-II に向けた挿入光源開発

INSERTION DEVICE DEVELOPMENT FOR SPRING-8-II

金城良太^{#, A)}, 備前輝彦^{B)}, 貴田祐一郎^{A)}, 清家隆光^{B)}, 長谷川照晃^{A)}, 鏡畑暁裕^{B)},
久間正之^{B)}, 岸本輝^{B)}, 大橋治彦^{B)}, 山本樹^{C)}, 田中隆次^{A)}

Ryota Kinjo^{#, A)}, Teruhiko Bizen^{B)}, Yuichiro Kida^{A)}, Takamitsu Seike^{B)}, Teruaki Hasegawa^{A)}, Akihiro Kagamihata^{B)},
Masayuki Kuma^{B)}, Hikaru Kishimoto^{B)}, Haruhiko Ohashi^{B)}, Shigeru Yamamoto^{C)}, Takashi Tanaka^{A)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center

^{B)} Japan Synchrotron Research Institute

^{C)} KEK-PF

Abstract

Toward the upcoming bright low-emittance storage ring, SPring-8-II, we have studied novel undulator concepts. First, new in-vacuum undulator (IVU-II) having lightweight compact frame based on the force-cancellation system using multipole-monolithic magnets have been proposed and demonstrated with two prototypes. Second, Helical-8 undulator, whose on-axis power density is kept low in any polarization states, have been studied to prevent thermal issue especially in soft X-ray beamlines. Third, fast-switching of polarization by the spectrum splitting method, which is expected to have less impacts on the electron beam stability, has been proposed and numerically studied.

1. はじめに

SPring-8 の次期高度化計画である SPring-8-II 計画では、エミッタンスを小さくし高い輝度を得るため、電子ビームエネルギーが 6 GeV になるとともに、偏向電磁石の数が増えアンジュレータを設置する直線部の長さが短くなる。表 1 に標準的な X 線ビームラインを想定したパラメータを、図 1 に SPring-8-II における輝度を示す。

これに対応し、これまで 20 年にわたり設置してきた約 40 台ものアンジュレータを 1 年間の停止期間の間に入れ替える必要がある。このため次期標準アンジュレータとして、多極着磁ブロックを用いた吸引力相殺機構に基づく軽量コンパクトな真空封止アンジュレータを開発している[1]。この吸引力相殺機構の実証実験、およびそれを搭載したプロトタイプの実証実験について報告する。

また特殊なビームライン向けアンジュレータとして、軟 X 線ビームラインにおいて問題となる光学系への熱負荷をあらゆる偏光状態で低減する Helical-8 アンジュレータ[2]や、高速で偏光を切り替え可能かつ電子ビームへ与える揺動が小さいスペクトル分割法による高速偏光切り替え手法[3]について報告する。

Table 1: Standard ID Parameters

Parameters	SPring-8	SPring-8-II
Electron Energy	8 GeV	6 GeV
β_y	5.6 m	3 m
ID Length	4.5 m	3.6 m
Minimum Gap	8 mm	5 mm
ID Period	32 mm	22 mm

[#] r-kinjo@spring-8.or.jp

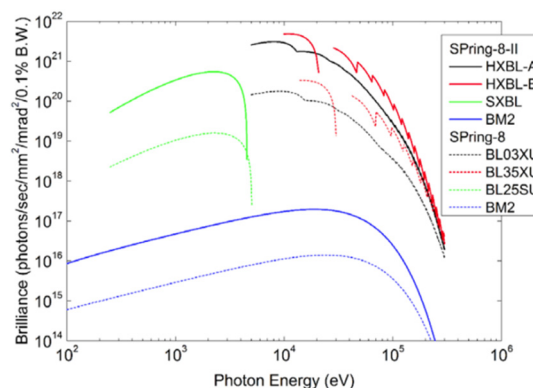


Figure 1: Brilliance curve for SPring-8-II (solid line) and SPring-8 (dashed line). Periods of HXBL-A, -B, and SXBL are 22, 16, and 80 mm, respectively.

2. 標準型真空封止アンジュレータ (IVU-II)

2.1 背景

アンジュレータでは数トンに及ぶその巨大な磁気吸引力に耐えつつ上下の磁石列のギャップを 1 μm という精度で動かす必要がある。このためアンジュレータの架台は、心臓部である磁石列に比べて大きく、重く、複雑な駆動機構や架台を必要とする。特に真空封止アンジュレータ (In-vacuum Undulator: IVU) においては、磁石列を保持する磁石列ガーダのたわみを防止するため、磁石列ガーダと大気中で駆動部につながった大気ガーダの間を多数のベローズシャフトで接続し負荷分散をはかる必要がある。

一方で、この磁気吸引力を作用点の近傍で相殺すれば、アンジュレータの構造を劇的に単純化でき、アンジュレータの建造及び収納部内への設置の費用と時間を減らすことができる。それに加えて、磁場調整手法の高度

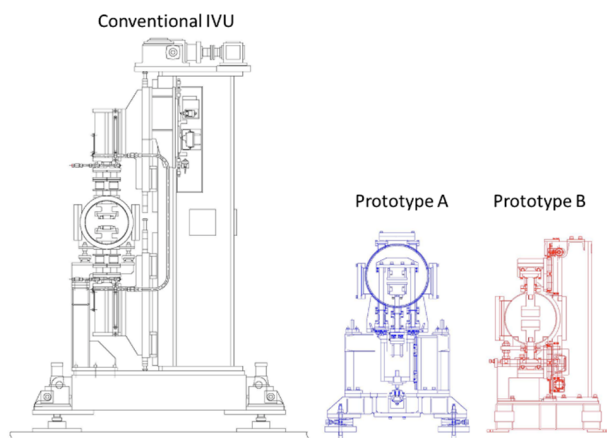


Figure 2: Cross-sectional view of conventional IVU (left, black), and prototype A (middle, blue) and B (right, red) of lightweight compact IVU.

化やこれまでの SPring-8 の運転における経験の蓄積により、アンジュレータの磁場、機械構造、熱対策、放射線対策、電子ビームへの影響などを最適化する為の知見が集まっている。そこで我々は SPring-8-II に向けて、吸引力相殺機構を前提とした軽量コンパクト架台に加え、各機能を改善した新型の真空封止アンジュレータ (IVU-II) を標準型アンジュレータとして採用することとし、各種の研究開発を行っている。

図 2 に軽量コンパクトな真空封止アンジュレータのコンセプトを示す。詳細については 2.2 節で述べる。

2.2 吸引力相殺機構の開発

1980 年代に ALS で皿バネを用いたのを始めとして多く施設で磁気吸引力対策手法が開発されている ([1] のレビュー参照)。中でも磁石列の直近で磁気吸引力を相殺し、架台を大幅に軽量化、真空大気連結部を少なくできる手法としては以下の方法がある。第一に磁石列ビームの両側面にバネ係数と長さの異なる複数のバネを分布させて設置する手法で、フランス SOLEIL の真空封止ウイグラーに使用されている [4]。第二に磁石列の左右に磁石列を同じ周期を持つ反発磁石列を並べる手法で、SPring-8 の真空封止リボルバーアンジュレータで採用さ

れている [5]。第三にそもそも磁気吸引力を持たない磁気回路を用いる方法で、筆者らが提案した Phase-Combined Undulator がそれにあたる [6]。

これらの方式は磁気吸引力の相殺という目的には合致しているものの SPring-8-II の標準型として採用する上で問題点を持っている。第一の方法は、磁石列の両側にバネを用いるため精密な磁場計測が難しく、磁石列の作る指数関数的なギャップ依存性を持つ磁気吸引力を完全に打ち消すことができず、またバネのへたりや熱・放射による影響も明らかではない。第二の方法は主磁石列と同じ周期構造を持ち磁気力のギャップ依存性も同等であるが、磁石列を 3 列設けるためにコストと組立の手間が大きく、標準型として採用は難しい。第三の手法は非常にシンプルで磁場の周期構造を崩さず吸引力を劇的に小さくできることが実証されている [7] が、磁場強度が通常の Halbach 型の $1/\sqrt{2}$ になるため、短周期かつ強磁場が求められる X 線ビームラインには向かない。

そこで我々は、極短周期アンジュレータへの応用に向けて開発が進められている多極着磁ブロック (Multipole-Monolithic Magnet: MMM) [7, 8] を反発磁石として用いることを提案し、研究開発を行っている。多極着磁ブロックはパルス磁場により N 極と S 極が交互に書き込まれた長尺の単一ブロックで、これを利用することにより製作と組立のコストを激減できるとともに、通常の磁石列より表面積が小さいため真空中でのガス放出量も小さいことが期待できる。

図 3 にこの多極着磁ブロックを用いた吸引力相殺機構を設置した周期 15 mm、全長 1.5 m の磁石列の吸引力及び磁場の計測結果を示す。左図は反発磁石のあり・なしでの吸引力のギャップ依存性を示しており、思惑通り吸引力が相殺できていることがわかる。若干反発力の方が勝っているが、大きさは磁石列の自重程度であり問題はなく、また反発磁石のギャップを微増する、位相を調整するなどの手法でほぼゼロにすることが可能である。右図は計測した半周期 (極) ごとの磁場積分の分布である。ギャップを 10 mm では黒線で表すほぼフラットな分布を持っているが、反発磁石なしに 3 mm まで閉めると赤線のように大きな偏差が出ている。中心と両端で磁場積分が大きく、ベローズシャフトの支持点で磁場が小さいということは、中心と両端のギャップが支持点でのそれより小さくなっていることを示し、明確に磁石列ガードが吸引力

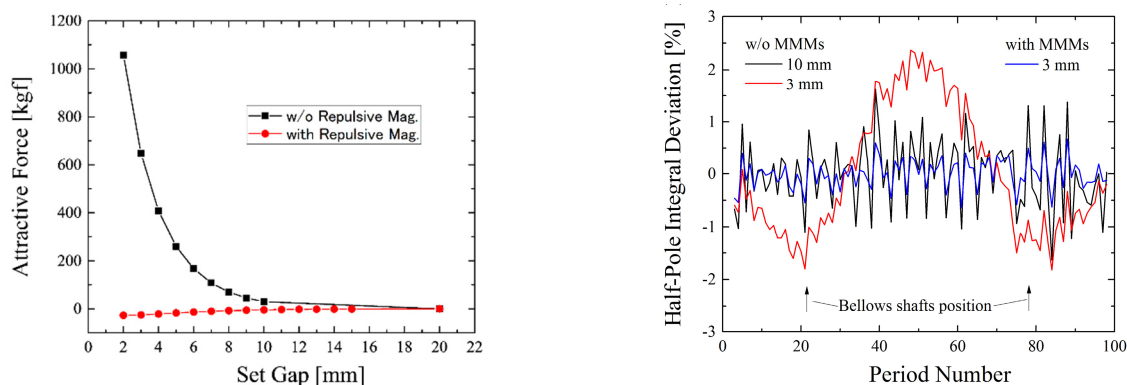


Figure 3: Attractive force (left) and deviation of half-pole magnetic field integral (right) with and w/o MMMs [1].

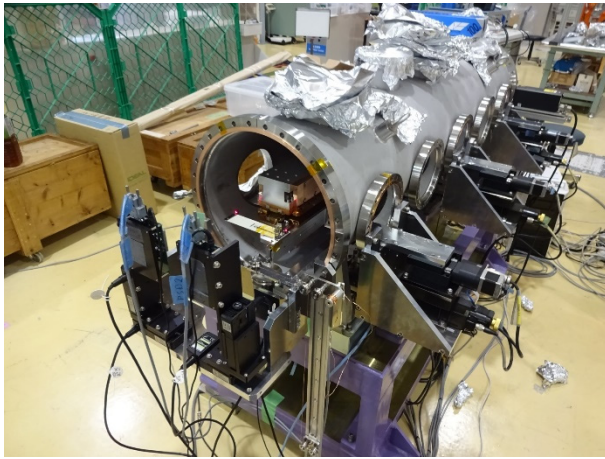


Figure 4: Prototype A (left) and B (right) of lightweight compact IVU based on force cancellation system using MMMs [1].

によってたわんでいることを示す。反発磁石がある場合には、青線で示すようにギャップ 3 mm に閉めてもギャップ 10 mm の時と同じフラットな分布となり、1.5 m の長さを 2 本という少ないベローズシャフトで支持していても磁石列ガーダのたわみによる磁場劣化が起きないこと

を示している。

2.3 軽量コンパクトアンジュレータプロトタイプ製作

多極着磁ブロックを用いた吸引力相殺機構が実証できたので、それを前提とした軽量コンパクトなアンジュ

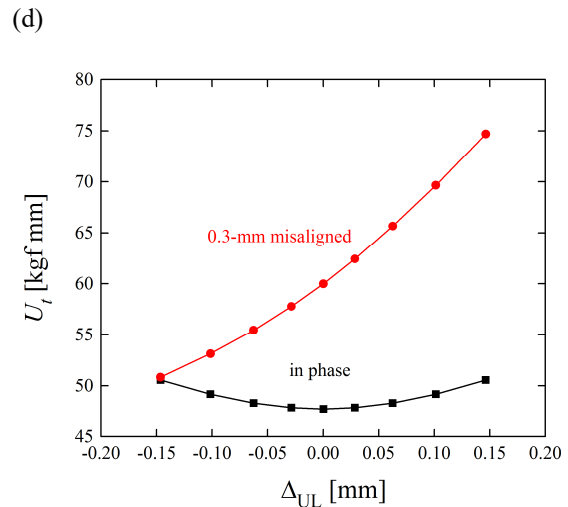
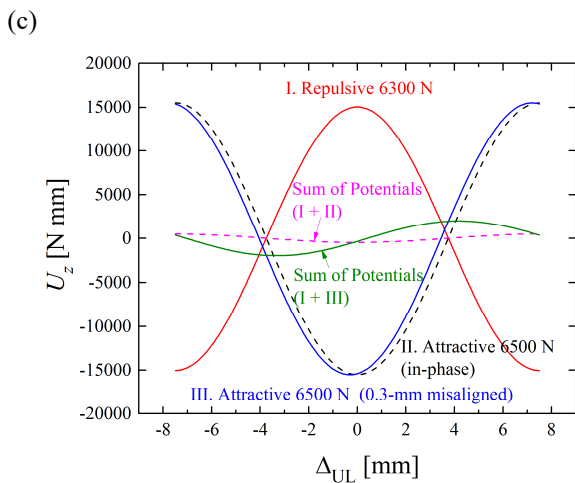
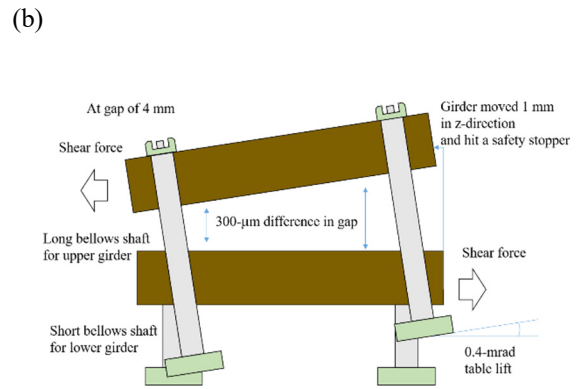
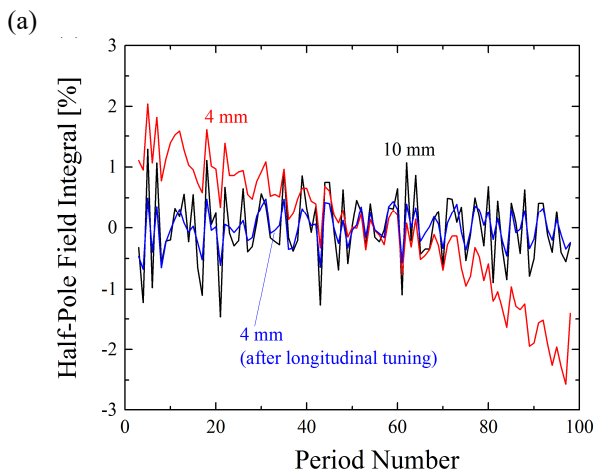


Figure 5: (a) Half-pole field integral profile, (b) problem happened in narrow gap, (c) calculated potential of magnetic force, and (d) total potential including elastic force in prototype A [1].

レータのプロトタイプを製作した。

図 4 に製作した二つの 1.5 m プロトタイプを示す。レーザによるアライメント機構を備えたその場磁場計測システム (SAFALI) [9] を用いて磁場計測を行っている。プロトタイプ A は、上側磁石列ガード用の駆動機構もチャンバーの下側に配置し、上側磁石列を磁石列ガードの側面に配置した 2 本の長いベローズシャフト (一か所の支持点)、下側磁石列を 1 本の短いベローズシャフトによって支持している。磁場計測用のホールプローブを光軸方向に移動させるレールは長いベローズシャフトと磁石列の間に設置した。プロトタイプ B は、これまでの IVU と似た上下に駆動機構を持つタイプであるが、ベローズシャフトによる支持点を 2 点に減らすとともに大気側ガードを廃止しすべての部品が軽量コンパクトになっている。

プロトタイプ A において磁場計測を行った結果を図 5 に示す。図 5 (a) に半周期 (極) の磁場積分の分布を示す。最初ギャップを 10 mm から 4 mm に閉めたところ、黒線が赤線のように傾いた偏差の大きな分布となった。原因を調べるため、架台の各所の動きを計測したところ、図 5 (b) に示すような、ベローズシャフトの倒れ、テーブルの浮き上がり、上下の磁石列ビームの光軸方向 (z 方向) へのずれが確認された。これは上下の磁石列の z 方向のせん断力に起因するという仮定を立て詳細な調査を行ったところ、最終的に上下の主磁石列間の z 方向の力の位相安定点が、磁石列を並べる基準である上流側の端面を合わせた状態から 0.3 mm ずれた位置にあることが判明した。図 5 (c) に磁石列の作る z 方向の力の磁気力ポテンシャルの上下の磁石列の z 方向ずれに対する依存性を示す。主磁石列のポテンシャルは下に凸な形であり、反発磁石のポテンシャルは上に凸な形をしている。二つのポテンシャルを合わせたポテンシャルは、主磁石列と破発磁石列で位相がそれぞれ合っている場合には原点に安定点を持ち、ほぼフラットである。しかしながら今回のように初めから主磁石列が 0.3 mm ずれていると、磁気力ポテンシャルの和の位相安定点が大きくずれ、原点で大きな傾きを持つ。つまり磁石列がずれようとする。図 5 (d) に架台の弾性ポテンシャルも加えた全ポテンシャルを示す。架台の弾性ポテンシャルは磁石列を z 方向に押した力とその時の変位を計測して実測したものである。グラフから明らかなように位相があった状態であれば、実験に用いた磁石列は反発力の方がやや大きいものの、架台の弾性ポテンシャルが下に凸なので全ポテンシャルは下に凸になり安定する。剛性の高い従来の架台であればミスアライメントの影響はそれほどないが、軽量コンパクトなアンジュレータでは、主磁石列、反発磁石列の位相をそれぞれ一致させることが重要となる。

これらの問題を解決した結果、図 5 (a) の青線のようにギャップ 4 mm においても 10 mm とほぼ同じ分布を得た。最終的なフェーズエラーの一例を図 6 に示す。プロトタイプ A と B どちらにもいってもすべてのギャップにおいてフェーズエラーが 2 度以下におさまっており従来の重厚長大な IVU と同等の性能が得られた。

最後に地震などによる突発的な振動に対する影響について簡単に議論する。図 5 (c) に示すように、それぞれの磁石列の位相が一致している場合には原点付近での磁気力ポテンシャルはほぼフラットになる。つまり主磁石

列と反発磁石が一緒になってずれる限り、ずれを増大させるような磁気力は働かない。つまり架台は、地震による重力加速度を 1 G と見積もって、ほぼ磁石列の自重に等しい z 方向の力に耐えうるだけの剛性があればよいことがわかる。

今年度の 3 月より SPring-8 のセル 34 においてビーム試験を行う予定である。

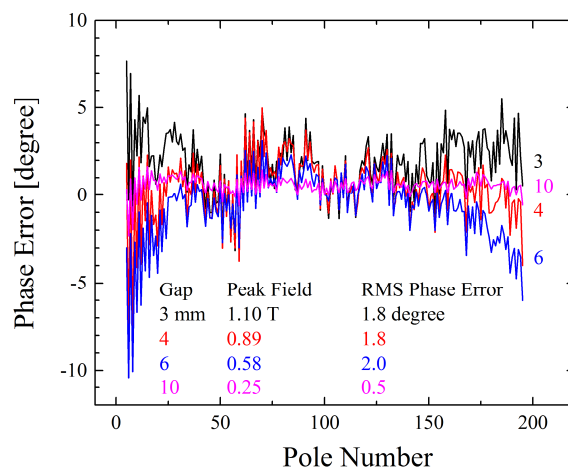


Figure 6: Phase-shake profile in Prototype B [1].

3. Helical-8 アンジュレータ

SPring-8 のような高エネルギー施設においても高輝度な軟 X 線の利用は非常に盛んである。高いエネルギーの電子ビームで長波長の軟 X 線を得るには高い K 値が必要となるが、アンジュレータ光は K 値が大きいくほど高調波成分を多く含み、実験に必要なこれらの高調波は光学系への熱負荷となる。ヘリカルアンジュレータからの光は軸上には基本波のみを含み、この問題はない。Figure-8 アンジュレータは、電子ビームの軌道を 8 の字に曲げ放射パワーの分布を馬蹄型にすることで直線偏光かつ軸上から高調波によるパワーを抑制している。これら二つの利点を併せ持つのが Helical-8 アンジュレータである[2]。

SPring-8 では APPLE 型ではなく、y 方向磁場を生み出す中心磁石列と x 方向磁場を生み出すサイド磁石列からなる 3 列タイプのヘリカルアンジュレータを用いている。Helical-8 アンジュレータではサイド磁石が複合周期型磁石列を構成しており上下の位相をずらすことで、x 方向の磁場の周期を基本周期と倍周期で切り替えることができる。これにより円偏光を得るヘリカルアンジュレータモードと直線偏光を得る Figure-8 アンジュレータモードを自由に切り替えることができ、どちらのモードにおいても軸上における熱負荷を低く保つことができる。

図 7 に各モードでの放射パワーの分布を示す。どちらのモードでも軸上パワー密度は抑制されていることがわかる。Figure-8 モードの時、軸上のフラックスはプラナーアンジュレータの 8 割程度が得られ、軸上のパワー密度は 5%程度に抑えられるという結果を得ている。

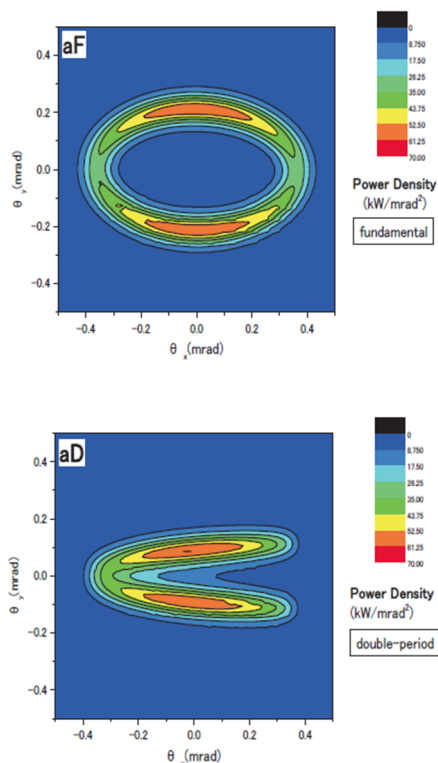


Figure 7: Power profile of helical (upper) and figure-8 (lower) mode in Helical-8 Undulator [2].

4. スペクトル分割による高速偏光切り替え

X線磁気円二色性測定(XMCD)は、多数の磁性元素からなる系の元素選択的分析に高い効果を発揮し、特に左右の円偏光を高速で切り替えることで高いS/Nを実現することが可能である。5 keV以上のX線領域においてはダイヤモンドの位相子を用いることで10 – 100 Hzの高速な偏光切り替えが実現されている[10]が、軟X線領域においては広い領域で有効な素子はなく、光源側

で偏光を切り替えることで対応する必要がある。

SPring-8のBL23SU、BL25SUにおいては上下流二台のアンジュレータの光軸を高速キッカーでバンパ軌道を作り出してずらすことによりBLに届く偏光の切り替えを行うシステムが採用されており成果を生んでいる[11]。しかしながら近年、加速器の安定化とモノクロメータをはじめとする光学系の安定化によりキッカーが電子ビームに与える揺動が問題視されるようになってきている。

そこで我々は図8に示すようなスペクトル分割法を用いた高速偏光切り替え手法を提案し研究開発を行っている[3]。左図において、二台の右回りヘリカルアンジュレータの間の電磁石位相器の位相を二つの光が重ねあわされるように0にとり、二台の左回りヘリカルアンジュレータの間の位相を π にとる。すると分光器を通過後の光は右円偏光のみを含むことになる。位相を逆にすると左円偏光が得られる。右図にSPring-8-IIの電子ビーム条件で計算した右円偏光、左円偏光のスペクトルを示す。この図からモノクロ通過後に 2σ の開口で90%近い左円偏光が得られていることがわかる。

参考文献

- [1] R. Kinjo *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 88, 073302 (2017).
- [2] T. Tanaka and H. Kitamura, Nucl. Instr. Meth. A659 (2011) pp. 537.
- [3] R. Kinjo and T. Tanaka, J. Synchrotron Radiat., Vol. 23, (2017), pp. 751–757-542.
- [4] O. Marcouill'e *et al.*, Proc. Intl. Part. Accel. Conf. (Kyoto, 2010), WEPD009.
- [5] T. Bizen *et al.*, Proc. 8th Intl. Conf. Synchrotron Radiat. Instrum. (San Francisco, 2003), pp. 175–178.
- [6] R. Kinjo, A. Kagamihata, and T. Tanaka, Proc. 8th Intl. Part. Accel. Conf. (Copenhagen, 2017), TUPAB053.
- [7] S. Yamamoto, J. Phys.: Conf. Ser. 425, 032014 (2013).
- [8] S. Yamamoto, Proc. 5th Intl. Part. Accel. Conf. (Dresden, 2014), WEOAA02.
- [9] T. Tanaka *et al.*, Proc. 29th Intl. FEL Conf. (Novosibirsk, 2007), pp. 468–471.
- [10] M. Suzuki *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 74, 19, (2003).
- [11] K. Shirasawa *et al.*, Proc. 8th Intl. Conf. Radiat. Instrum. (San Francisco, 2003), p. 191.

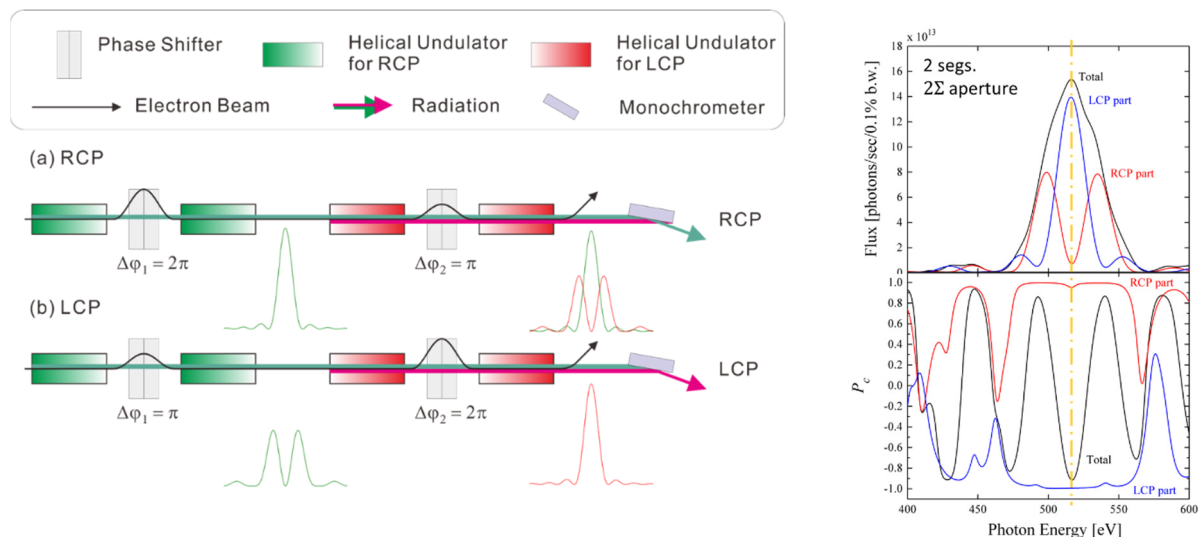


Figure 8: Principle of fast polarization switching by spectrum splitting (left) and calculated spectrum (right) [3].