

## SP8 高速偏光切り替えキッカー-BL による COD 変動の調査

### VARIATION OF COD CAUSED BY FAST KICKER BEAMLINES AT SPRING-8

金城良太<sup>#, A, B)</sup>, 鏡畑暁裕<sup>B)</sup>, 清家隆光<sup>B, A)</sup>, 竹内政雄<sup>B)</sup>, 田中隆次<sup>A, B)</sup>

Ryota Kinjo<sup>#, A, B)</sup>, Akihiro Kagamihata<sup>B)</sup>, Takamitsu Seike<sup>B, A)</sup>, Masao Takeuchi<sup>B)</sup>, Takashi Tanaka<sup>A, B)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN SPring-8 Center

<sup>B)</sup> JASRI

#### Abstract

At the beamlines BL23SU and BL25SU of SPring-8, the directions of the circular polarization of soft x-rays are switched for x-ray magnetic circular dichroism experiments by using five electron beam kicker magnets and two helical undulators. The kicker magnets make large orbit bumps of the electron beam with relatively high-speed operation pattern up to 10 Hz. The closed-orbit distortion (COD) caused by these kicker magnets is corrected by fast steering magnets using a feed-forward pattern table. However, some problems have not been solved for the correction system namely the gap dependent variation and the condition-dependent variation of the COD. We found that the magnetic-coupling of the fast and slow steering magnets cause the gap dependent COD variation, and that the temperature-dependent variation of the magnetic property of Kovar used for ceramic chamber causes the COD variation depending on the operation conditions.

#### 1. はじめに

SPring-8 の BL23SU および BL25SU では、それぞれ左右に偏光した二台のヘリカルアンジュレータ内のバンブ軌道をキッカーで切り替えることにより、フロントエンドスリットを通る軟 X 線の高速偏光制御を行っている[1]。光源による高速偏光切り替えは、広い波長範囲をカバーする偏光子の存在しない軟 X 線領域において重宝され、多くの X 線磁気円二色性測定に使用されている。これらのキッカー-BL では、キッカーが原因で生じる速い COD を補正するため、キッカーの駆動パターンに合わせた軌道補正パターンの作成をリングの立ち上げ時に行っている。この補正パターンテーブルは、キッカーの各駆動周波数毎にギャップに依存して用意する必要がある。また調整時に最適と思われるところに設定した補正パターンがユーザー運転時に有効でない現象や、COD の量が変動していくことがみられてきた。近年のユーザー実験の高度化に伴い、加速器および光学系の安定化が行われ、キッカー-BL についてもこれらの問題を解決しより安

定な運転が求められる。これらの問題について、これまで様々な仮説の下に原因調査を行ってきたが、ギャップ駆動による COD 補正を担当する鉄心付きステアリングとの磁気干渉や、セラミックチャンバーの運転温度などいくつかの項目と相関があることが判明してきた。

#### 2. システム概要

##### 2.1 キッカー概要と駆動パターン

Figure 1 にキッカーシステムの概要図を示す。二台のアンジュレータは、それぞれ左右に偏光したヘリカルアンジュレータで、キッカーは上流に 2 台、アンジュレータの間に 1 台、下流に 2 台が備えられている。上流の 3 台 (Kicker 1, 2, 3) と下流の 3 台 (Kicker 3, 4, 5) は、それぞれ直列に接続されており、独立した電源によって駆動される。

キッカーの駆動は、VME のパターンボードを用いてパターン信号を生成し、キッカー電源に入力している。同時に同じパターンボードから、空芯ステアリング用のパ

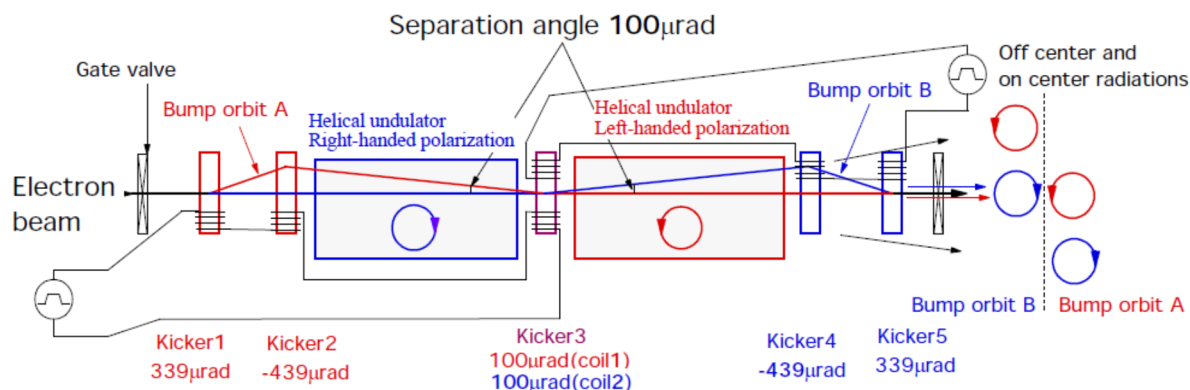


Figure 1: Schematic view of kicker beamline at ID25 (Kick angles are three times large at ID23).

# r-kinjo@spring8.or.jp

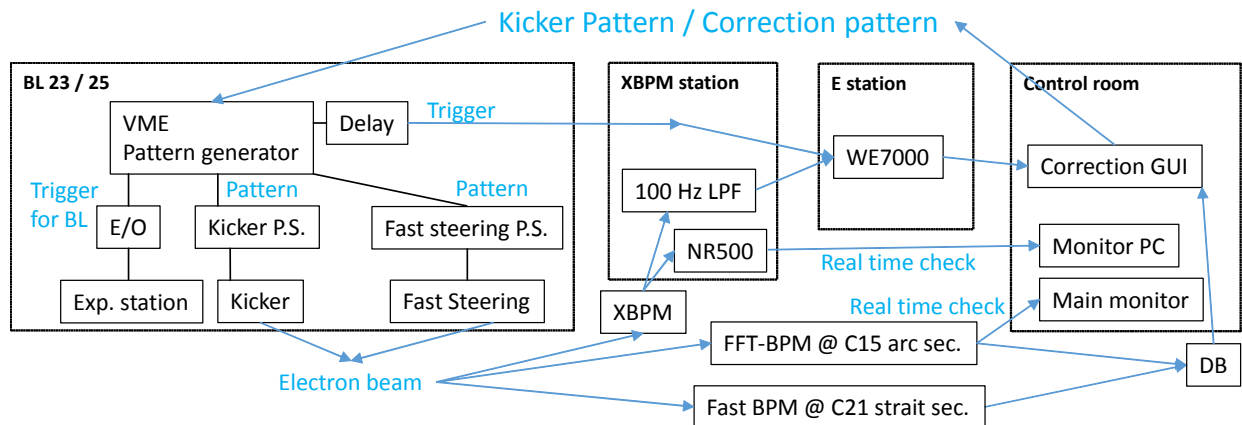


Figure 2: Simple schematics of COD correction system.

ターン信号を生成し、キッカー駆動時の COD をフィードフォワードで補正するようになっている。キッカーのパターンボードからは BL 向けのパターン信号も発生しており、BL 側で測定のタイミングを調整する。

電源の駆動パターンは、ID23 においては 1 Hz、ID25 においては 0.1、1、10 Hz で、10 Hz は正弦波、0.1 と 1 Hz は台形波となっている。BL25SU における利用状況として、例えば 2014B 期、2015A 期では磁性で重要な元素 Cr - Cu の吸収端である 550 - 950 eV (ギャップ 45 - 55 mm に相当) での利用率が高く、また Nd の吸収端である約 1000 eV (ギャップ 55 - 66 mm に相当) レンジでも 1 Hz の利用が多い。

## 2.2 調整システム概要

Figure 2 に調整システムを単純化した概要を示す。ビームモニターとして、主に各 BL のフロントエンドの X-ray beam position monitor (XBPM) と呼ばれる X 線の位置モニター [2, 3] を使用し、補助的にセル 15 偏向部、セル 21 直線部に設置されている高速読み出し可能な電子 BPM を用いている。XBPM では、四枚のブレードでアンジュレータからの X 線の周縁部を検出し、各 BL のラックに置かれた信号合成器によって位置情報に変換する。アンジュレータ中心から約 20 m 下流にあり、1 urad の角度変動は 20  $\mu$ m の位置変動となって観測される。また XBPM の信号のほかに、セル 15 偏向部の高速 BPM、及びセル 21 直線部で試験中の高速・高精度 BPM の信号も補助的に使用している。それぞれの BPM での軌道変動は ID25 の位置で発生した 1 urad のキックあたり約 30  $\mu$ m と 25  $\mu$ m である。

次節以降の調査に際し、XBPM の信号を各 BL から光ビーム診断ステーションの制御ラックに集積しさらに E-Station の制御ラックに送るための光ファイバーシステムの導通試験を実施した。不都合が発生すると、正常な信号にノイズ、高調波、オフセット信号が乗る、信号が飽和するなどの現象が現れるが、これまで不都合が判明した全 11 ケースのうち、コネクタのゆるみ 1 件以外は、すべて O/E モジュールの方が原因であり、E/O の故障はなかった。

調整の流れは、まずバックグラウンドの COD を測定し、次に空芯コイルのレスポンスを測定、さらにキッカーの COD を測定し、補正パターンテーブルの値を決定する。

1 回の調整で補正が十分でない場合には、2 - 3 回の調整を行うこともある。

調整の目標としては、セル 15 の BPM における COD で 7  $\mu$ m としている。これは 2015 年に BL47 においてピンホールを抜けた後の強度測定を行い、水平方向の COD が 10  $\mu$ m 以下であれば、ほぼバックグラウンドレベルまで強度変動が抑えられることが確認できたため、この値としている。また、各運転モードにおいて COD の発報閾値を定め、COD がそれ以上になった場合には、運転シフトサマリーに報告を行うようになっている。

## 3. 各種変動の調査

### 3.1 経時変動

リング立ち上げあるいは加速器調整時に COD を補正するフィードフォワードテーブルを更新するが、COD は時間の経過とともに悪化する。これはどの ID でも普遍的に見られキッカー BL に限ったことではないが、通常の ID の場合はギャップ駆動に伴う COD の変動はそれほど速くないため、少量であれば自動 COD 補正 (フィードバック) システムによって補正されるのに対し、キッカー ID の場合には顕著に観測される。また、キッカー ID においては補正パターンテーブルの更新には通常の ID より多くの時間を要する。よってキッカー ID においては経時変動をなるべく抑えたい。

経時変動の要因としては、ID10 でアライメントミスによる磁石列の大きな放射線減磁が明確な原因としてみられたほかは、小さな放射線減磁や収納部床の長期変動などが考えられるが明確にはわかっていない。

キッカー ID においては、補正前の COD の絶対値を小さくすること、補正パターン調整の時間短縮・効率化で対処している。具体的には、以下のとおりである。まず、BL25SU の 0.1 Hz および 1 Hz 駆動において、キッカーの駆動パターンを改良しバンプ軌道の切り替え時に上下流のキッカーが同時に ON にならないようにした。これにより、光学系が 2 台分の ID からの光を受ける時間ができ熱負荷による影響が懸念されるため、導入にあたっては BL25SU の担当者として試験を行い特に問題ないことを確認し 2016 年から使用している。また、これまで水平と垂直の COD 測定は別々にしか行えず、どちらも補正すると倍の時間がかかるため主にキック方向である水平

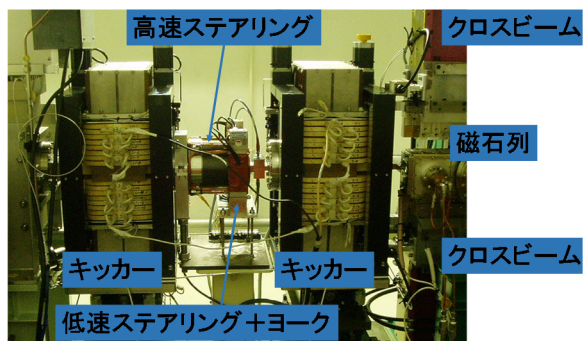


Figure 3: Kicker and steering magnets at ID25.

方向の COD の補正をメインに行ってきたが、自動調整プログラムの開発とともに、水平・垂直の同時測定が可能となり 2017 年から使用している。また、次節で述べるギャップに依存した変動が解決されれば、調整時間は劇的に短縮されると期待される。

### 3.2 ギャップに依存した変動

現状では ID のギャップが変わると COD のパターンが変化するためギャップ毎に補正パターンテーブルが必要で、調整にかなりの時間がかかっている。Table 1 に補正パターンテーブルの作成ギャップと、その補正パターンテーブルで可能な XMCD スキャンのギャップ範囲を示している。ギャップがこの範囲を超える場合には一度キッカーを停止する必要がある。テーブルの刻みは COD や磁性測定に重要な Cr - Cu, Nd 等の吸収端付近での利用実績をもとに BL 側と協議して決定している。ギャップ範囲に重複があるのは、吸収端周辺でキッカーを止めずに連続スキャンを行うためである。

COD のパターンが ID のギャップに依存する理由について、これまで、ID 架台の磁性体、特に磁石列を保持して開閉されるクロスビームと呼ばれる鉄製の駆動部が、キッカーの磁場に影響を与えていると思われる。通常、ギャップ開閉に伴う架台の影響は、磁石列のダイポール成分と共に、ギャップ連動テーブルを持つ低速ステアリングで精度よく補正される。ただし、キッカー ID においては、キッカーの作る磁場成分が架台の磁性体の影響を受け COD が変動するのではないかと考えられてきた。

今回、我々は高速ステアリングが低速ステアリングの影響を受け COD が変動するという仮説を立て①ギャップ固定かつ低速ステアリング変化、②低速ステアリング固定かつギャップ変化の 2 パターンで、C21 BPM で COD を観測し検証を行った。まず①として ID23 のギャップ 12.5 mm、COD パターンの水平振幅が 3  $\mu\text{m}$  の状態で、ギャップを固定したまま低速ステアリングの電流をギャップ 8 mm の補正電流値に 0.4 A ほど変化させたところ、10  $\mu\text{m}$  程度まで悪化した。また、ID25 においても上流水平低速ステアリングを 0.3 A 変化させたところ、COD パターンの水平振幅が同程度悪化した。比較のために②として、今度は ID23 のギャップを 12.5 mm から 8 mm や 30 mm に変化させた後に低速ステアリングの値を 12.5 mm 用の補正電流値に戻したところ、COD パターンの水平振幅が 5  $\mu\text{m}$  程度まで悪化した。

Table 1: Gap Dependent Pattern Tables (mm)

ID23 (1 Hz)		ID25 (0.1, 1, 10 Hz)	
Gap	Scan range	Gap	Scan range
20	16.9	60	52 - 80
15	13.7 - 16.9	50	42 - 62
12.5	11.3 - 13.7	35	25 - 48
10.5	9.5 - 11.3		
9	8 - 9.5		

上の結果から言えることは、ギャップ依存の COD パターンの変動は、①の結果からわかるように高速ステアリングが低速ステアリングから影響を受けることが支配的である。これは Fig. 3 に示すように、スペースが狭いため高速ステアリングが低速ステアリングと空間的に重なっており、高速ステアリングの磁場が低速ステアリングのヨークに吸われる磁気カップリングが起こるが、この量が低速ステアリングの電流値に依存することで説明できる。②の結果については、変動はあるが、①と比べて小さく、制御の都合上ギャップ変更時に一度低速ステアリングの磁場状態が変わっているためと考えている。

この問題の対策として、高速ステアリングをよりターン数が大きく進行方向の長さが短いものに交換し低速ステアリングとの間に磁気シールドを入れる、低速ステアリングを ID のロングコイルに置き換える等を検討している。これが解決すれば、スキャン端部での COD が小さくなるとともに、補正パターンテーブルが現在のギャップ毎に細かく分割されたものから周波数毎のみになり調整時間が劇的に短縮されると期待できる。

### 3.3 運転状況に依存した変動

COD パターンの水平振幅が、ユーザー運転開始前の加速器調整においては C21 BPM の目標値である 7  $\mu\text{m}$  以下に抑え込めているのに対し、ユーザー運転時には 20  $\mu\text{m}$  近くまで悪化することがある。この原因としてこれまでいくつかの要因について検討してきた。

- 他の ID の運転状態がキッカーによる COD に影響を与えるかについては、原則として個々の ID で軌道が閉じるように調整しており、COD の振幅は変動しないと考えている。ただし電子ビームの伸縮は後で議論する。
- 自動 COD 補正(フィードバック)との干渉については、キッカーの各駆動周波数でランダムなタイミングでフィードバックを ON/OFF し、影響がないことを確認した。
- 加速器調整時にラティス誤差がありユーザー運転時とチューンが異なっていた場合について、多少の差があっても最適なステアリング電流値が変わらないことを計算で確認した。
- キッカー電源、ステアリング電源の故障については、原理的に軌道を閉じさせる 3 台のキッカーは直列に接続され、残差を補正する高速ステアリングの補正量が約 4  $\mu\text{rad} \times 2$  台分以下であることを考えるとパーセントオーダーの電流変動が必要である。定期メンテナンスを行っているため簡易的な測定では当然そのような故障レベルの変動は見られていない。

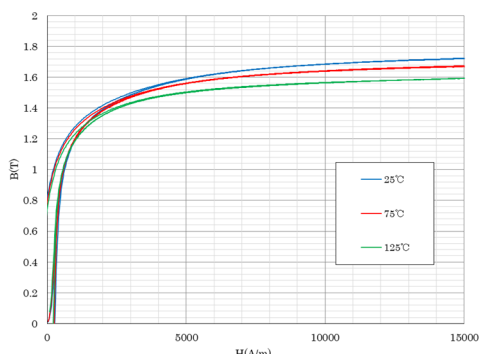


Figure 4: Magnetic hysteresis of Kovar at various temperatures.

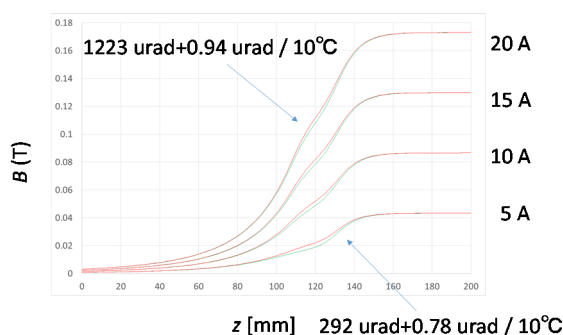


Figure 5: Field profile in kicker magnet at various currents with Kovar having 10% difference in saturated magnetic flux. The annotations indicate the temperature dependencies of field integral.

調査を進めるうち、電子ビームのフィリングに依存した現象が見られた。比較的電流がフラットにバケツに入るマルチモード(160 bunch train \* 12)で調整後、すぐにシングルバンチのみ電流の高い新 H モード(406 \* 11/29-bunches + 1 bunch)に切り替えたところ、COD パターンの振幅が最大 3 倍程度まで悪化するとともにオフセットが発生した。さらに調査を進めていくうちに、同じフィリングでも COD が異なる場合があることがわかった。この原因として、セラミックチャンバーのセラミックと金属フランジの接合部に使用されている Kovar という金属の磁性が温度変化することによりキッカー磁場の遮蔽割合が変化し、COD パターンが変動するのではないかという仮説を立て検証を行った。

Figure 4 に Kovar の B-H カーブの温度依存性の測定結果を示す。材質は日立金属 KV-2 で熱焼鈍は行っていない。 $H = 15 \text{ kA/m}$  を印加した場合、温度 25、75、125 °C で  $B_m$  が 103.1、100、95.4 % (75 °C 基準) となり、さらに強磁場下では差が大きくなる。Figure 5 に、Kovar の飽和磁束密度が 50 °C で 10 % 変動したと仮定した場合の、キッカーの各運転電流値での磁場分布を示す。また、Fig. 5 中にキッカー磁場積分の 10 °C 温度変動に対する変動値を示す。計算は ID23 の 2 台目 (236 ターン) について行ったので、他のキッカーを考える場合例えば 3 台目 (54 ターン) のキッカーで約 20 A 流すと Fig. 5 の 5 A に対応する。

ここからわかるように、3 台のキッカーのセラミックチャンバーのうち、1 つのチャンバーの温度が 10 °C 変化す

ると 1 urad 近い軌道の残差が残ることになる。また、今回の計算には含めていないが、ゼロ電流時の Kovar の残留磁化の温度依存性も磁場積分を変動させる。

実際のセラミックチャンバーとキッカーは収納部に設置されており、磁場計測を行うことはできないため、蓄積ビーム電流によって温度を変え、COD との関連を調べた。

チャンバーの温度が変わる原因として、一番大きいのはフィリングの違い、次に電荷の積み込み状況、ID のギャップ状態により電子ビームが伸縮しピーク電流が変化するなどが考えられる。フィリングの違いについては電流の二乗和を一定にするようにフィリングが決定されているが、高電流バンチの伸びに伴うピーク電流低下は考慮されておらず設計温度より低くなる。ただし実測ではピーク電流の高いフィリングの方が温度が高い傾向にあり、他の要因もある。電荷の積み込みは最初の蓄積時にある程度ばらつき、トップアップ運転と共に数時間で解消されていく変動をする。

この問題の対策として、Kovar 部の恒温化、Ti 接合セラミックチャンバーへの交換、金属チャンバーへの交換及び渦電流対策などが考えられる。1 番目の方式はまだ容易な方だがスペース的にテープヒーター等で温めるしかない。2 番目の方式は確実ではあるが費用がかなり高い。3 番目の方式は渦電流の補正は可能だが渦電流の変動がないとは言えない。この問題が解決すれば、COD パターンが運転状況に依存して変動することがなくなると期待している。

#### 4. まとめ

キッカーシステムの現状についてまとめた。計測システムの問題点の洗い出しと調整の自動化についてまとめた。原因のわからない経時変動について、調整時間を短縮し定期的な調整を行えるような対策をまとめた。ギャップに依存する変動について、キッカー COD 補正用の高速ステアリングとアンジュレータ COD 補正用の低速ステアリングが磁気カップリングすることが原因であることがわかった。運転状況に依存する変動について、チャンバーに使用されている Kovar の磁性の温度特性が原因であることがわかり対策を検討した。

今後の展望として、発覚した各種変動に対する対策を含めたキッカー ID の改造を行い、十分に COD を小さくできることがわかれば、調整を運転員による加速器立ち上げ時の定期的な調整に移行できる。また、次期アップグレード時には COD がほとんど発生しないスペクトル分割による高速偏光切り替え手法[4]の採用も検討している。

#### 謝辞

理研原徹氏、JASRI 木村洋昭氏にはキッカー BL 全体について、JASRI 青柳秀樹氏、古川行人氏には XBPM システムについて、JASRI 中村哲也氏、小谷佳範氏には BL への影響について、JASRI 高雄勝氏、早乙女光一氏、SES 住友博史氏には COD の計算、変動の原因等について相談にのっていただきました。JASRI (現 KEK) 下崎義人氏にはラティス誤差と最適ステアリング量の関係について計算していただきました。株式会社 KRI の山本日登志様、松本信子様には Kovar の磁性

**PASJ2018 WEP030**

測定においてご協力いただきました。また SES 運転員の方々には調整作業において様々な点で助けて頂きました。

**参考文献**

- [1] K. Shirasawa *et al.*, “Fast helicity switching of circularly polarized light using twin helical undulators”, AIP Conf. Proc. 705, 191 (2004).
- [2] H. Aoyagi *et al.*, “Blade-type X-ray beam position monitors for SPring-8 undulator beamlines”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 467 – 468, 252-255 (2001).
- [3] H. Aoyagi, Y. Furukawa, and S. Takahashi, “Performance of the x-ray beam position monitors and observation of beam drifts in the SPring-8 storage ring”, This Proceedings.
- [4] R. Kinjo and T. Tanaka, “Spectrum Splitting for Fast Polarization Switching of Undulator Radiation”, J. Synchrotron Rad. 23 (2016) 751-757.