

## SUPPRESSION OF BEAM HORIZONTAL OSCILLATION BY FAST KICKER MAGNET IN SPRING-8

Chikaori Mitsuda <sup>#A)</sup>, Kenji Fukami <sup>A)</sup>, Kazuo Kobayashi<sup>A)</sup>, Masaya Oishi<sup>A)</sup>, Yuichi Okayasu <sup>A)</sup>, Masazumi Shoji <sup>A)</sup>  
Kouichi Soutome <sup>A)</sup>, Hiroto Yonehara <sup>A)</sup>, Tatsuro Nakanishi <sup>B)</sup>, Takashi Ohshima <sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI) 1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

<sup>B)</sup> Spring-8 Service (SES) Co., Ltd. 2-23-1, Kouto, Kamigori-cho, Akoh-gun, Hyogo, 678-1205

<sup>C)</sup> RIKEN, Spring-8 Joint Project for XFEL 1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

### Abstract

In a top-up operation at the SPring-8, a horizontal beam oscillation had been excited because the injection bump orbit is not closed perfectly. By various improvements, the average amplitude of residual oscillation has now been suppressed to the level of less than 0.1 mm. To suppress the still remaining relatively large residual oscillation, we started a development of a fast kicker magnet system to give a counter kick to this part of the residual beam oscillation. A key technology in this system is how to generate a large pulsed current in a short period to meet the oscillation characteristic. A newly developed fast pulsed power supply can generate a current of about 250 A, which corresponds to a magnetic field of 3.80 mT, with a pulsed width of 0.8  $\mu$ s. Recently, we succeeded in the suppression of the horizontal beam oscillation by 67% at the rising part of the field of the bump magnets by using this kicker system.

## SPring-8 での高速キッカーマグネットによるビーム水平振動の抑制

### 1. 背景

SPring-8 では 2004 年から蓄積リングにおけるビーム寿命改善のためトップアップ運転が開始された<sup>[1]</sup>。SPring-8 においてはビーム入射時に 4 台のパルスバンパマグネットを用いバンパ入射軌道を形成し Off-axis 入射を行っている。バンパマグネットのパルス幅は SPring-8 蓄積リング 2 周分に相当する 8.4  $\mu$ s であるため、バンパ軌道が閉軌道となっていない場合蓄積リングを周回する蓄積ビームの水平振動を誘起することになる。この水平振動は直接的にユーザーに提供する X 線の振動へとつながるため、当初 1mm 以上あった水平振動を、様々な改良のもとユーザーの X 線使用に支障のないレベルである 1/10 のレベルまで低減することに成功している<sup>[2]</sup>。近年、ユーザーの放射光利用の普及が進むにつれ、新たなフィリングパターンの要求、光の高輝度化が時代とともに高まってきている。SPring-8 ではそれに応える目下新たな目標として、10mA シングルバンチ+4/7 均一マルチバンチ(90mA)の大電流バンチフィリングパターンの実現を目指している。この新たなフィリングパターンで問題となるのは、シングル 10mA 蓄積後にマルチバンチを蓄積する際にわずかに誘起される水平振動が、蓄積を済ませたシングル 10mA に不安定性を誘起し電流量を削ってしまうことである。このため、0.1mm 以下まで低減した水平振動であるが、新たなフィリングパターン実現のためには、更なる振動抑制が必要となる。この水平振動抑制のためにフィードフォワードスキームとして、スパイク状に励起された水平振動にカウンターキックを与える方法の検討を開始した。しかしながら 0.8  $\mu$ s のパルス幅にて水平振動を抑制できるカウン

ターキックの生成が可能な 150A 電流量の電源は市販品として存在していなかったため、我々はまず、2007 年より高速パルス大電流ドライブ電源の開発を進め、2010 年に当初目標スペックを大幅に上回る電源の開発に成功した。本論文では開発された高速キッカーマグネットの詳細セットアップと振動抑制のスキームそして、抑制結果について報告する。

### 2. 水平振動抑制試験概要

水平振動の抑制効果を調べるための試験セットアップは図 1 に示すとおりである。システムは水平高速キッカー(HK)、高速パルス大電流ドライブ電源(Compact Driving Power Supply:CDPS)、シングルパスビームポジションモニター(SPBPM)からなる。HK はキック効率を高めるため水平ベータートロン振動が 22.574m、バンパマグネットから 1042.3m の離れたところでカウンターキックを与えるよう設置された。入射時のバンパ励磁のトリガータイミング信号は 1Hz の繰り返しで HK・CDPS、SPBPM に光ファイバーにて分配されている。このトリガー信号を使い、バンパ電磁石の励磁タイミングと同期して一周 19 箇所の SPBPM によりビーム位置データーを周回ごとに 128 ターンまで取得する。この試験の際に蓄積リングにはシングルバンチ 1mA が蓄積されビーム位置データーを得る。バンパマグネットの励磁タイミングを 100ns ステップでシフトさせながらバンパマグネットの励磁パルス幅の全てのタイミングにて HK 設置場所での水平ビーム振動振幅の計算データーを得る。カウンターキックを与えるためには、まず、高速キッカーなしでの水平振動データーを取得し、次にバンパ電磁石の励磁なしに高速キッカーのみの水平振動を観測し、それらの 2 つのデーターの重ね合わせからカウンターキックのタイミングの

<sup>#</sup> mitsuda@spring8.or.jp

合わせこみを行った。

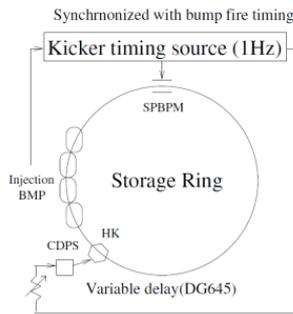


図 1:試験セットアップ。

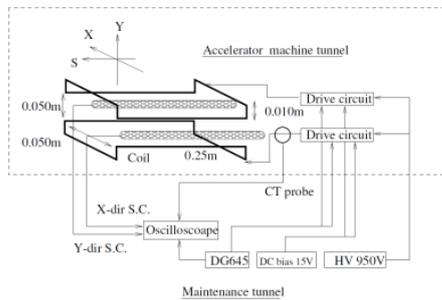


図 2:高速パルスキッカーマグネットシステム。

### 3. 高速パルスキッカーマグネット

図 2 に高速パルスキッカーマグネットシステムを示す。カウンターキックに求められる蹴り角は  $0.8 \mu\text{s}$  パルス幅で  $30 \mu\text{rad}$  以上である。この蹴り角を実現するために空芯コイルの水平キッカー及びパワーMOSFET を用いたドライブ電源を開発した。システムは 1 ターン空芯コイルマグネット(TEIKOKU ELECTRIC MFG. CO., LTD.)、高速パルス大電流ドライブ電源(NIKKE TECHNO SYSTEM CO., LTD.)、外部高電圧電源、タイミングモジュール(DG645)で構成されている。

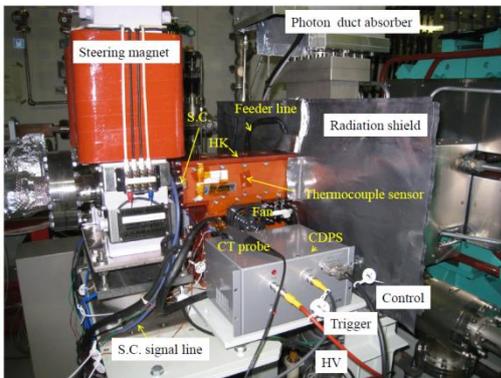


図 3:高速大電流ドライブ電源の設置の様子

マグネットコイルは  $2.0 \times 2.2\text{mm}$  銅角線コイルを用い最適な磁場形状になるよう  $250\text{mm(L)} \times 50\text{mm(W)}$  の図中 2 の大きさに整形しチェンバーを上

下に挟み込むようにベークライト治具により保持している。元々のアルミチェンバーは渦電流の効果を低減するため、 $5 \mu\text{m}$  の Ti-Mo コーティングを内表面に施したセラミックチェンバー(KYOCERA CO., LTD.)に置き換えている。セラミックチェンバーはマグネットにより覆われビームロードによる発熱がこもるため、マグネット下部に設けたファンにより強制空冷しチェンバーの熱膨張を抑えている(図 4)。

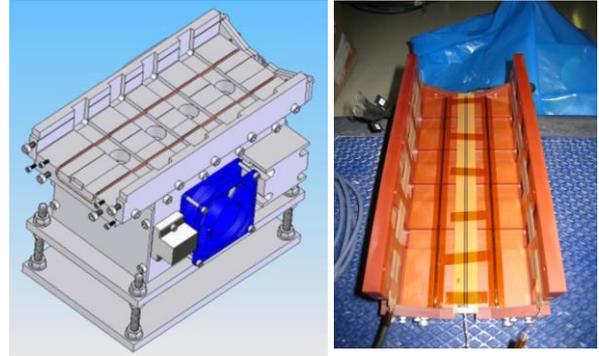


図 4(左):ベークライトコイル治具の構造図(半割下部)。図 5(右):コイル治具にサーチコイルを挿入した様子(半割上部)。

マグネットの設置スペースは限られているため、最大で得られる磁極長は  $0.25\text{m}$  である。そのため、上下 1 ターンの空芯コイルに必要な励磁電流は  $250\text{A}$  と見積もられた。早い立ち上がりで大電流を同時に実現させるためには、出来るだけリード線のインダクタンスを下げる必要がある。ドライブ電源はマグネット近傍( $\sim 0.3\text{m}$ )のマグネット架台上の小スペースに設置することが検討され、コンパクトな高速パルス大電流ドライブ電源の開発が求められた。ドライブ電源を小さくするために、また、耐放射線性の観点から、高電圧電源部は分離し加速器保守通路に設置することにし、ドライブ回路部のみをマグネット近傍に設置し、タイミングモジュール、リモートコントロールシステムなども保守通路に設置を行った。保守通路と加速器収納部は  $40\text{m}$  のケーブル長でドライブ電源と周辺装置が接続されている。電源システムのインダクタンスに大きく影響するリード線及びドライブ電源回路基板などはインダクタンスの低減のための様々な注意がはらわれ、最終的  $0.8\text{m}$  のリード線にて磁石コイルも含めトータル  $1 \mu\text{H}$  まで低減することに成功している。最終的に完成したドライブ電源サイズは  $200(\text{L}) \times 120(\text{W}) \times 150(\text{H})\text{mm}$  である。速い立ち上がりで大電流及びコンパクト化の同時実現のために、IGBT 素子と比べ比較的小さい  $1\text{kV}$  高耐圧 MOSFET 素子をスイッチング素子として採用した。電流量を稼ぐため MOSFET を 6 個並列接続で使用し、上下各コイルそれぞれにドライブ電源を接続している。2 台のドライブ電源には外部から  $950\text{V}$  の高圧がかけられ、外部からの DG645 で生成した  $5\text{V}$  の TTL 信号にて同時にスイッチするようになっている。上下コイル間

のジッターによる双方の電源の破壊を防ぐため、ジッターは 100ns 以下で抑えられている。ドライブ電源は放射線防護のため、5mm 厚の鉛シートにて保護されている。ドライブ電源はリモートコントロールにてパルス幅、極性が可変になっており、水平振動のスパイク幅、位相に合わせて制御が可能となっている。図 3 にマグネット近傍にドライブ電源を設置した様子を示す。

マグネットのベークライト治具の内面にはサーチコイルが水平・垂直方向に挿入(図 5)されており、CT プローブによりキャリブレーションした結果で電流値及び磁場をリアルタイムに測定することが出来る。水平方向のサーチコイルでは上下ドライブ電源のパルス波形のずれを磁場として見る事が出来、電源故障を感知することが出来る。CT プローブのインダクタンスによる電流値の低減(-8.3%)を考慮し、試験で得られた、セラミックチェンバーなしの状態での最大電流は 270.6A/coil(パルス幅 0.8  $\mu$ s)である。中心磁場は 3.16 mT に達する。実際のセットアップのセラミックチェンバーがある状況下ではおよそ9~10%の低下が見られ、247.4A/coil の最大電流値が得られた。これは 0.25m の磁極長にて 8GeV の電子エネルギーで 33.23  $\mu$ rad のカウンターキックを与えることが可能である。高速パルス大電流ドライブ電源に求められた、当初目標スペックを十分に達成するものとなった。

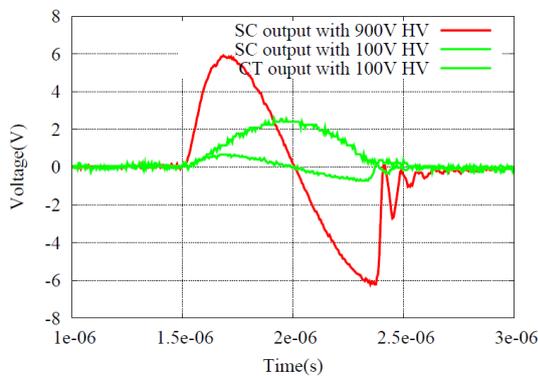


図 6:出力磁場と出力電流の様子。

#### 4. 水平振動抑制結果

バンブマグネットとカウンターキッカーとの距離は固定され、これらのマグネット間のベータatron振動の位相差を調整することが出来ない。しかしながら、カウンターキックを与えるタイミングを周回単位でシフトさせればベータatronチューンの端数ずつ調整することが可能である。そこで、我々はカウンターキックを逆位相で最も効果的に与えることが可能なビーム水平振動が zero-cross する周回数のサーベを行った。まず、1 ターン目におけるカウンターキックのタイミングの合わせこみを行い、そのタイミングから周回時間ずつカウンターキックのタイミングをずらしながら水平振動の振幅の減衰率を観測した。その際にキックパワーは 200.2A の一定とした。図 4 に結果を示す。横軸を周回数で示

し、縦軸の減衰率はカウンターを与える前と与えた後の振動振幅の比率で計算している。誤差は 7.8%と見積もられており、バンブマグネット電源のタイミングジッターから来ている。図中曲線は  $Asin(0.15B+C)$  のチューンの端数(40.15)でフィッティングした結果である。この図より早い段階で水平振動を効果的抑制するためには 3 ターン目にカウンターを与えればよいことが分かる。

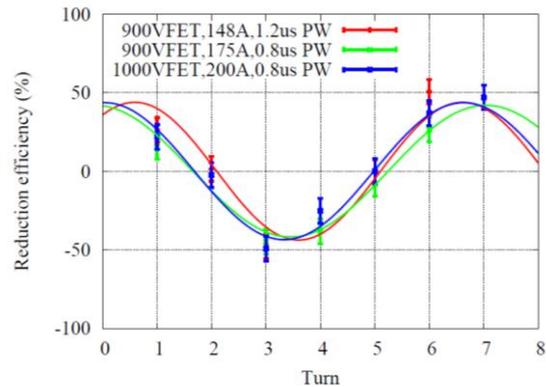


図 7:水平振動抑制効果の周回数依存

次に 3 ターン目におけるカウンターキックの精密タイミング調整を行った。キックパワーを 247.4A/coil、キックパルス幅を 0.8  $\mu$ s に固定し、SPBPM の時間分解能である 0.1  $\mu$ s ずつキックタイミングをずらしながらスパイク状の水平振動のピーク値での減衰を確認した。図 8 に結果を示す。スパイク状の振動ピークのみが減衰させられた結果を青線で示している。このキックタイミングの最適値より  $\pm 100$ ns ずれるとスパイク状の水平振動の裾野の逆位相の部分で蹴ってしまい、例えピークの振動振幅が強く抑制出来たととしても、V-like 状に水平振動を助長してしまっている。バランスのとれた最適なキックタイミングの精密調整が必要である。

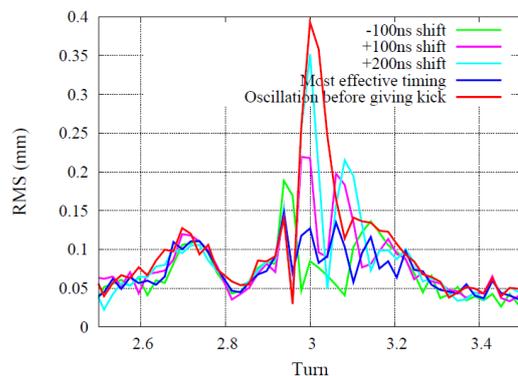


図 8:精密カウンターキックタイミング調整

次に、3 ターン目におけるカウンターキックのタイミングにてドライブ電源の出力パルス幅に対する水平振動抑制効果の様子を観測した。電源出力のパルス幅は 0.8  $\mu$ s~1.6  $\mu$ s まで 0.1  $\mu$ s ステップで変更することが可能である。SPBPM で観測されるパル

ス幅は  $0.8\mu\text{s}$  と見積もられるため、 $0.8\mu\text{s}\sim 1.0\mu\text{s}$  まで電源出力パルス幅を振った。図 5 に結果を示す。横軸はカウンターキックを与えた周回数でカウンターを与えたタイミングの 3 ターン目に注目している。縦軸は水平振動振幅(RMS)である。キッカー出力パワーは  $950\text{V}$  固定である。 $0.8\mu\text{s}$  から  $1.0\mu\text{s}$  にパルス幅を  $0.1\mu\text{s}$  きざみで変更するに従い、振動振幅の中心は大きく抑制することが出来ている。しかしながら、パルス幅が広がっていくため、水平振動の裾野の部分において逆位相のキックを与え、W 状に裾野の水平振動を助長してしまっているのがわかる。パルス幅を広くすることで見かけのインダクタンスが下がるため出力電流は増加し中心の水平振動の抑制効果を増加させることが出来るが、スパイク状のパルス幅と同程度の電源出力パルス幅を小さくする必要があるのである。本試験での水平振動の抑制に必要な最適パルス幅は  $0.8\mu\text{s}$  である。

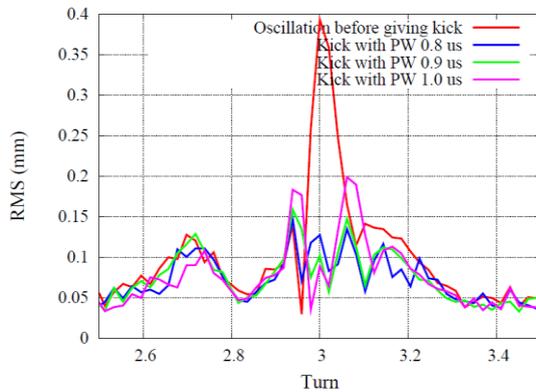


図 9:電源出力パルス幅と水平振動抑制効果

次にこれまでの電源開発で製作された電源ごとの振動振幅の達成された減衰量のキックパワー（出力電流量）依存性を図 10 に示す。

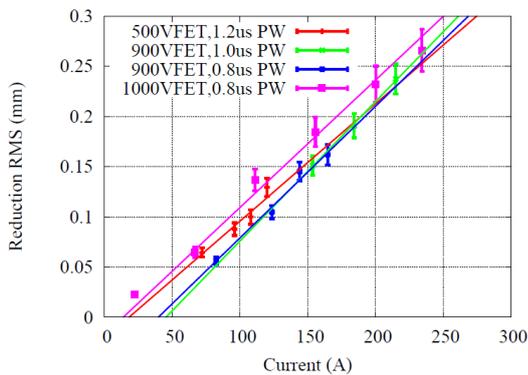


図 10:水平振動振幅減衰量のキックパワー依存性

図中プロットの各々の色違いの点は電源に搭載している MOSFET 素子の耐圧、達成されたパルス幅が異なる電源の結果を示している。開発が済んだ実機電源の結果は紫色の点で示している。MOSFET の耐圧が低い場合、達成できる出力電流値が低いため、開発方向として最新の高耐圧の MOSFET の搭載を

進めてきた。達成されるパルス幅が広い  $1.0\mu\text{s}$  以上では比較的容易に大電流出力を可能にしていたが、 $1.0\mu\text{s}$  以下では出力の増加が難しかった。インダクタンスの低減に努めるなど様々な工夫のもと  $0.8\mu\text{s}$  パルス幅、 $247.4\text{A}$  の電源出力に成功した。 $-67\%$  の水平振動の抑制に成功した際の、3 ターン目以降の低減の様子を含めた振動抑制の効果の結果を図 6 に示す。

## 5. 今後の課題

水平振動抑制効果の試験により  $0.8\mu\text{s}$  のパルス幅の高速パルスキッカーを用いて最大出力電流  $247.4\text{A}/\text{coil}$  にて  $\sim 70\%$  の水平振動の抑制に成功した。この試験結果を受けユーザー運転への適用を 2010 年 5 月より開始したが、2 週間の運転で各電源に 6 個ずつ搭載されているうちの 1 個の MOSFET が損傷し出力不能となった。電源には過電流保護のためヒューズが仕込まれ MOSFET 破損による大電流の流れこみを遮断が出来るようになっているため、電源内部の焼損は避けられている。これまでの試験から現在 MOSFET の破損からくる電源の出力不能の原因についていくつか挙げる。1. MOSFET の散乱 X 線による放射線損傷 2. 上下コイル別駆動のドライブ電源間のタイミングジッターによる逆起電力 MOSFET 破壊 3. 高圧ケーブルに生じるノイズのグラウンドラインを通じたトリガー系、制御系への回り込みである。これらの原因候補について現在、放射線遮蔽壁の増強や、トリガー系タイミングジッターの改善及びタイミング信号の絶縁、高圧ケーブルに乗じるノイズの低減、耐ノイズ性をあげるための MOSFET 周辺回路基板パターンの改良などあらゆる電源の改良策を進めている。現在 1 カ月以上の長期安定性を控えた段階にあり、今後長期安定性も確保された電源によるユーザー運転への適用が期待できる。また、今年度内に新しい大電流バンチフィリングモードの試験を開始する予定である。

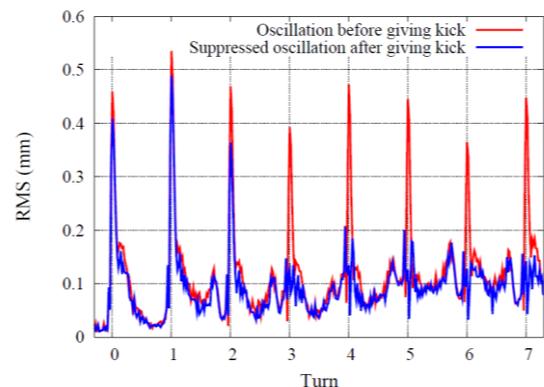


図 11:最適化されたキックで抑制された水平振動

## 参考文献

- [1] H.Tanaka, et. al. Proceedings of EPAC'04, Lucerne, Switzerland, 2004, p222
- [2] T. Ohshima, et. al. Proceedings of EPAC'04, Lucerne, Switzerland, 2004, p414