

氏 名 高木 宏之

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大乙第 209 号

学位授与の日付 平成 23 年 3 月 24 日

学位授与の要件 学位規則第 6 条第 2 項該当

学位論文題目 電子蓄積リングにおけるパルス 6 極電磁石を用いた入射
システムの開発研究

論文審査委員 主 査 教授 安東 愛之輔
教授 小関 忠
教授 佐藤 康太郎
准教授 岸本 俊二
教授 小林 幸則
准教授 中村 典雄 東京大学

近年、蓄積リング型の放射光源においては、頻繁に少量のビーム入射を行うことで蓄積電流を一定に保ちながら、入射中も放射光を利用した実験を行う「トップアップ運転」が主流となって来た。

これ以前の一般的な放射光源におけるビーム入射は、蓄積電流がゼロの状態から始め、ある決められた電流値まで電子ビームを蓄積し終了していた。蓄積した電流はビーム寿命によって徐々に減って行き、ある電流値を下回ったところで次のビーム入射を行うという事を繰り返していた。重要なのは、入射中は放射光実験を中止し、蓄積が完了した時点で実験を再開するというのが一般的であったことである。

これに対してトップアップ運転では、常に少しずつビームを注ぎ足すという方式を取り、ビームを注ぎ足している最中も実験を行う。この新しい運転形態により、放射光ユーザーは、常に一定の高い蓄積電流値で実験を行う事が出来るようになり、高フラックスの実験が可能になるだけでなく、ビームラインにおける放射光による熱負荷を一定に保つ事ができるようになった為、温度変化による系統的な実験誤差が小さくなり長時間に渡って精密な測定をする事が可能になった。

放射光のユーザーにとっては、非常にメリットの多いトップアップ運転であるが、蓄積リングのビーム入射システムに対する要求は厳しいものとなる。一番の問題は、これまでは放射光を供給していなかったビーム入射時においてもその供給を行うようになった結果、それまでは問題視していなかった入射時における蓄積ビームの振動に気を使う必要が出て来たことである。

入射時の蓄積ビームの振動の主な原因は、電子蓄積リングで一般的に用いられている入射のバンパ軌道の不完全さにある。通常このバンパ軌道は、3台ないし4台のパルス偏向電磁石（キッカー）を使って作るが、これらの励磁のタイミングがずれたり、各々のキッカーの個性が違ったりするとバンパ軌道が完全に閉じなくなってしまう。仮にキッカーに問題がなかったとしても、バンパ軌道内に非線形磁場を発生させる電磁石（6極電磁石等）があった場合には、バンパ軌道は完全に閉じなくなる。

複数台のキッカー間のタイミング不整合が蓄積ビーム振動原因であるならば、入射用のパルス電磁石を1台にすれば問題は解決すると考えるのは自然である。1台のパルス電磁石によって入射する方法は、on-axis 入射として知られるが、この方法では入射と同時に蓄積ビームが蹴り出されてしまう。もし、入射ビームに対しては必要な蹴りを与え、蓄積ビームに対しては蹴りを与えないような構造を持つパルス電磁石が用意できれば、原理的には1台のパルス電磁石で入

射が可能となる。PF-AR におけるパルス 4 極電磁石を使った入射実験は、この原理を用いたものである。ところが、実際にパルス 4 極電磁石を使って入射を行ってみると、入射時に蓄積ビームのプロファイルが 4 重極振動を起こすことが PF-AR の実験で明らかになった。原因は、磁極中心に存在する 4 極磁場成分であり、有限のビームサイズを持つ蓄積ビームがこれを感じて振動を起こしていた。この振動を抑える為には、蓄積ビームへ対する多重極電磁石の影響を小さくする必要がある。そこで、多重極の磁極数を増やして、入射ビームに対する磁場をそのままに、磁極中心付近における磁場が弱いパルス電磁石を製作し、それによって入射中も蓄積ビームの重心振動とプロファイルの 4 重極振動の両方抑えることのできるシステムを開発することにした。磁極数を増やせばそれだけ中心部の磁場は小さくなるが、中心から離れた磁極の先端付近では急激に磁場が立ち上がることになる。これは磁極内で磁場の飽和の原因となるので、どこまでも磁極数を増やす訳には行かない。そこで磁極数は 6 極とし、高エネルギー加速器研究機構の Photon Factory の電子蓄積リング (PF リング) に最適化したパルス 6 極電磁石 (PSM) を製作することにした。

PSM のパラメータは、磁極長 300 mm、中心付近での磁場勾配は $B' = 360 \text{ T/m}^2$ 、最大電流 3000 A、入射ビームに対する積分磁場は 120 Gauss m とした。PSM を励起するパルス形状は、リング 1 周の周回時間が約 0.6 μsec の PF リングにおいては 1.2 μsec 以下のパルス幅が望ましいが、今回は経済的な理由から 2.4 μsec のパルス幅を持つハーフサインとした。磁極は 0.15 mm の厚さの珪素鋼板の積層で作り、ボア径は直径 66 mm とした。円筒形をした真空ダクトには、渦電流の影響を抑えるために厚さ約 3 mm のセラミックを使用し、内側はインピーダンスを下げるために 3 μm の厚さのチタンコーティングを施した。製作した PSM はテストベンチにおいてサーチコイルを使ったパルス磁場測定を行い、PSM 内における入射ビームの位置 (磁場中心から 15 mm 内側) において必要な積分磁場出ていることを確認し、PF リングの 2 番の超直線部のアンジュレータの下流に設置した。

PSM を使った入射システムが有効に機能するかどうかを検証するには以下の 3 点を確認する必要がある。(1) このシステムを使っての入射が可能であるかどうか、(2) 蓄積ビームの振動は通常のパルスバンプを使った入射に比べて小さくなっているか、(3) 蓄積ビームのプロファイルの変動は起きていないか、である。

PSM を使った入射は成功し、通常のカッカーを使った入射に比べて約 2/3 の捕獲効率がある事を確認した。捕獲されなかった電子は、シミュレーションの結果からセプタムと 14 番のチェンバーに当たって失われている。PSM を使ったトップアップ運転も行い、約 30 秒毎に入射を行うことで蓄積電流値が 450 mA

の運転時にピークの幅で 0.02% の電流値の安定度を実現できた。

蓄積時のビーム振動に関しては、ビーム位置検出器を使ってリング周回毎のビーム位置を測定し、入射直後の蓄積ビームの振動を測定した。通常のキッカー入射と比較した結果、PSM 入射直後の蓄積ビームの重心振動は、水平方向で約 1/5、垂直方向で 1/4 にそれぞれ小さくする事ができた。また、問題となっていた蓄積ビームのプロファイルの変動についても、27 番のビームラインに設置した高速ゲートカメラを使ってターン毎のビームプロファイルを測定し、PSM 入射においては 4 重極振動がほとんどなくなっている事を確認した。

蓄積ビームの振動は、放射光の強度の変動としてビームラインに悪影響を与えるため、今回 PF の 5 番、14 番、17 番のビームラインを使って放射光の強度変動も測定した。特に 14 番においては、通常のキッカー入射で 70% 程度あった入射時の放射光の強度変動が、PSM 入射においては 2% 以下にまで小さくなった。

PSM 入射実験におけるいくつかの精密測定により、この入射実験が行われた当時は、PSM に対する電源接続の極性が反転した状態での運転であった事が確認されている。しかしながら、PF リングのアクセプタンスと PSM の入射調整可能領域が大きかったために、偶然にも入射が可能になっていた。

結論として、電子蓄積リングにおけるパルス 6 極電磁石を使ったビーム入射に世界で初めて成功し、その有効性を示す事ができた。蓄積ビームの重心振動はキッカー入射に比べて小さくなり、ビームプロファイルの変動もほとんどなくなった。捕獲効率の向上等の解決すべき課題はあるが、今後この入射方式は蓄積リングを使ったトップアップ入射において有効な手段と成り得る事がこの開発実験によって示された。

博士論文の審査結果の要旨

放射光源などの電子蓄積リングにおけるビーム入射では、数台（2～4台）のパルス偏向電磁石（キッカー電磁石）で入射点付近に局所バンプ軌道をつくり、すでに蓄積されている電子ビームを失わせることなく、入射されてくる電子ビームをリングのアクセプタンスにうまく捕獲させるという操作が行われる。しかし、誤差磁場やタイミング誤差、また磁石毎の時間応答性の不一致などで、複数のキッカー電磁石を用いてバンプを完全に閉じさせることは困難で、入射時にはある程度蓄積ビームが振動してしまうことは避けられない。従来までの放射光源で行われていた運転では、入射時はビームシャッターを閉じ実験を中断していたため、多少蓄積ビームが振動していたとしても大きな問題ではなかった。ところが、近年放射光源で主流となってきている「トップアップ運転」では、入射中もビームシャッターを開いたままで実験を継続するため、入射時の蓄積ビームの振動がビーム強度の変動につながり、実験によっては実験精度を損ねるため、その振動をできるだけ抑制することが重要な課題となっていた。

高木氏は、入射システムに複数のキッカー電磁石を用いるという従来の入射方式ではなく、最低1台のパルス6極電磁石を用いることで、入射蓄積ビームの振動を抑制できるという新しい入射方式を考案した。この入射方式が、高エネルギー加速器研究機構放射光蓄積リング（PFリング）において、現実に可能かどうかをシミュレーションにより確認し、またパルス6極電磁石も技術的に製作可能であることを見いだした。ビーム入射にパルス4極電磁石を用いる方式は既に実現されているが、高木氏は、4極よりさらに高次の6極電磁石を用いることで、4極振動によるプロファイル変動を引き起こすという4極電磁石のもつ弱点をも克服できると判断した。そして、氏は具体的にパルス6極電磁石を用いた入射システムを構築してPFリングに設置し、世界で初めて入射・蓄積を成功させた。それによって、パルス6極電磁石による入射方式が、入射時における蓄積ビームの振動を、既設の入射システムに比べ水平方向1/5、垂直方向で1/4程度に抑制できることを実験的に示した。また、ビームプロファイルの変動においても、6極電磁石の場合は変動がほとんど起きていないことを示した。ユーザ実験における入射時の影響を確認するため、水平方向の振動に最も敏感と予想されていた放射光ビームライン（BL14）においてビーム強度を調べたところ、従来の入射方式の場合放射光ビーム強度が70%減少するのに対して、パルス6極入射では、それが2%以下に抑制されることを確認した。しかしながら、一連の実験においては、電磁石の極性が間違っていたことが判明した（そ

れでも入射が可能であることはシミュレーションにより示されている)。また、ビーム捕獲率(入射効率)においては従来の入射方式に比べて約2/3しか達成されていないこと、シミュレーションで予測された捕獲率が達成されていない等の課題があることが分かっている。本論文には、パルス6極電磁石による入射方式の今後の課題として、これらの点に対する対策等についても言及されている。

上記の内容を含む論文が既に国際的学術誌(Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams)に掲載されているとともに、国際会議においても複数報告されている。さらに、米国ブルックヘブン国立研究所で開催されたパルス電磁石に関するワークショップで招待講演を行ったり、PFシンポジウムにおいても光源開発の重要な成果と認められ招待講演を行っている。また国内学会等で口頭発表を行っている。

予備審査において指摘された電磁石の極性が間違っ て実験が行われたことを序論に記述し論旨を構成すること、加速器理論のところでは、座標系、文字、符号等にも気を配り間違いが無いように記述すること、参考文献を努力範囲内で追加すること等については、本審査の時点では解決されていると判断した。

高木氏が行った蓄積リングにおけるパルス6極電磁石を用いた入射システムの開発研究は、独創的なアイデアで入射時の蓄積ビームの振動を抑制させるという提案であり、また1桁程度高精度のパルス電源開発や長い直線部を必要としない。従って、既設放射光源でも採用可能である。しかも、1台のパルス6極電磁石で、高精度のパルス電源もタイミングも必要としない入射システムであるため、低コストで実現できるという長所も有している。この独創的なビーム入射方式を実験的に実証したことは、加速器科学における大きな成果であると言える。

以上により、審査員全員一致で高木氏の研究は博士論文に値すると判定した。