

STATUS OF A PULSED QUADRUPOLE MAGNET INJECTION AT THE PF-AR

Hiroiyuki Takaki^{1,A)}, Norio Nakamura^{A)}, Yukinori Kobayashi^{B)}, Kentaro Harada^{B)}, Tsukasa Miyajima^{B)}, Akira Ueda^{B)},
Shinya Nagahashi^{B)}, Takashi Obina^{B)}, Kensei Umemori^{B)}, Miho Shimada^{B)}

^{A)} ISSP, Univ. of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8581, Japan

^{B)} KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

Since a beam injection using a pulsed quadrupole magnet (PQM) was achieved at the Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) in September 2004, we have continued the beam injection study to accumulate the beam up to a current of 60 mA. We observed that the saturation of the stored beam current in the PQM injection was strongly dependent on a total rf voltage. In order to investigate the dependence, various experiments were carried out. Through the experiments using a turn-by-turn beam position monitor, a beam scraper and a fast gate camera, we found that the dependence was generated by the instabilities coupled with the excitation of the PQM, which formed a long tail of the beam profile and resulted in the beam loss of the stored beam.

PF-ARにおけるパルス4極電磁石を用いた入射システムの現状報告

1. はじめに

Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) の入射時におけるビーム不安定性を克服し、大電流単バンチビームを蓄積するため、様々な試みがこれまで行われて来た。その一つとして、通常のバンチ軌道を用いた入射方式に代わる、パルス4極電磁石 (Pulsed Quadrupole Magnet: PQM) を用いた新しい入射方式を提案し、そのシステムの開発も行った。そして2004年にこのシステムをPF-ARにインストールし、実ビームを用いた実験を行い、PQMによる入射・蓄積に成功した[1]。このPQMを用いた新しい入射システムは、バンチ軌道の不整合が原因で入射時に発生する蓄積ビームのコヒーレント双極振動を殆ど発生させることなく入射が可能になることから、当初はPF-ARのビーム入射に有効であろうと考えられた。しかしながら、この入射システムは大電流単バンチビームに対しては、従来のキッカーを用いた入射システムよりも逆に入射が困難になるという結果になってしまった。

何回かの実験を経て、最終的にはPF-ARに6台ある高周波加速空洞の総加速電圧 (V_c) を2MVに調節することで、目標とする蓄積ビーム電流値60mAを実現した (図1参照)。しかし、 V_c を4MVに設定すると飽和蓄積ビーム電流値 (それ以上積み上げることのできない最大蓄積電流値のこと) は約25mAと半分以下にまで減少し、 V_c に非常に強く依存していることも判明した。一方通常入射の場合、飽和蓄積ビーム電流値は V_c が2MVから5.5MVの広い範囲で60mAに達している (通常入射は V_c が3.5MVで行われる)。本報告では、この高周波加速空洞の総加速電圧依存性の原因を解明するために、これまで行ってきた実験結

果について述べる。

2. 測定

2.1 蓄積ビームの損失率

入射時に蓄積ビーム電流が飽和した際に、蓄積ビームに一体何が起きているのかをまず調べた。図2は V_c が4MVの時にPQMを使って5Hzの繰り返しで入射した場合の蓄積ビーム電流値の変化の様子を示している (図1の入射の繰り返しは12.5Hz)。蓄積ビーム電流値が11mA以下の時は入射レートが約0.1mA/秒であったのが、徐々に入射レートが下がりやがてゼロ

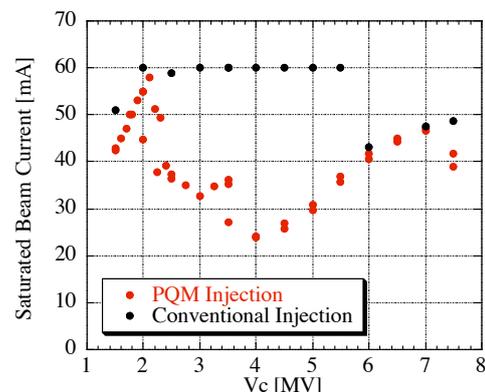


図1: PF-ARに6台ある高周波加速空洞の総加速電圧 (V_c) と入射時に蓄積ビーム電流が飽和する電流値との関係。赤丸はPQMによる入射、黒丸はローカルバンチを用いた通常の入射。PF-ARの蓄積電流値のリミットは60mAに設定してあるため、飽和蓄積電流値は60mAを超える事がなく平坦な部分ができる。それぞれの入射は共に12.5Hzの繰り返しで行った。

¹ E-mail: takaki@issp.u-tokyo.ac.jp

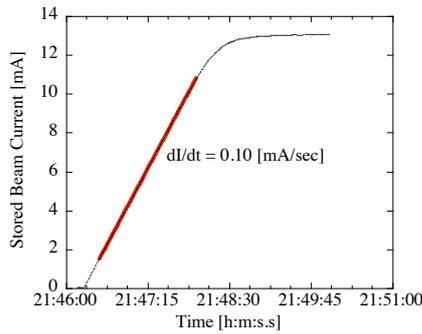


図2: PQM入射における蓄積ビーム電流値の変化。 V_c は4MV。蓄積ビーム電流値がおおよそ13mAで飽和状態に達する。この時入射レートは、0.10mA/秒であり、入射の繰り返しは5Hzである。

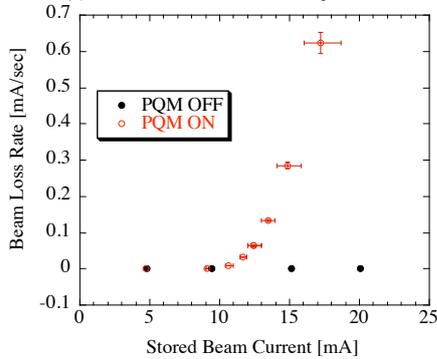


図3: 入射ビーム無し状態で蓄積ビームをPQMで励磁した場合の、蓄積ビーム電流値とビーム損失率との関係。黒丸はPQMを励磁した場合で、赤丸は励磁した場合。ある閾電流値を超えると、PQMは急激に蓄積ビームを落とし始める様子が見える。

になって蓄積ビーム電流値が飽和している。入射の繰り返しは5Hzであるので、12.5Hzで入射した図1に比べて飽和蓄積ビーム電流値が低くなっている。図3は入射ビーム無し状態で蓄積ビームをPQMで励磁した場合のビーム損失率である（繰り返しは同じく5Hz）。PQMを励磁しない場合には、蓄積ビームの損失は全くなく、PQMを励磁した場合には、蓄積ビーム電流値11mA以上になるとビーム損失率が急速に増加した。蓄積ビーム電流値が13mAにおけるビーム損失率は約0.1mA/secであり、この値は入射レートと殆ど等しい。したがって、蓄積ビーム電流値が飽和するのは、入射ビームが捕獲さにくくなるのではなく、PQM自身が蓄積ビームをロスさせているのが原因であると判明した。

2.2 いつビームを落とすのか

では、蓄積ビームはどのタイミングで失われているのだろうか。そこで、PQMの励磁後、何ターン目で蓄積ビームが失われたのかを調べるために、ビーム位置モニターを使って、ターン毎のコヒーレントな双極振動とビーム電流を測定した。蓄積ビーム軌道をPQMの中心から僅かにずらすことによって水平方向のコヒーレントな双極振動が発生するようにしてPQMの励磁のタイミングを得た。図4(a)からPQMの

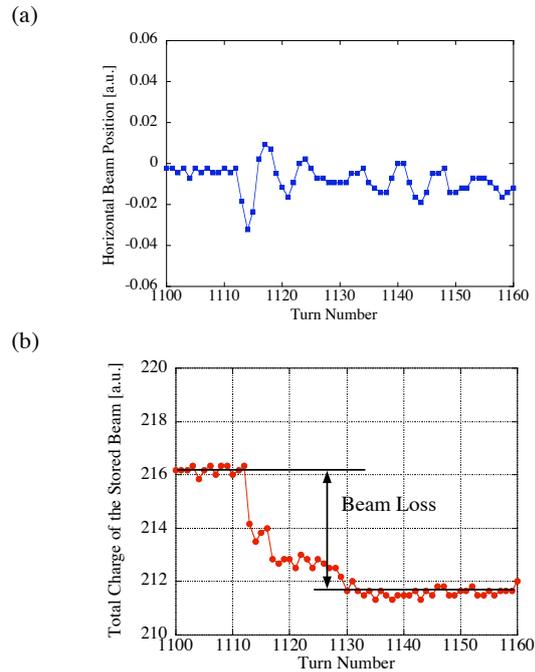


図4: 4電極のビーム位置モニターで観測された水平位置(a)と4電極の合計から算出した蓄積ビーム電流値(b)。水平振動よりPQMの励磁タイミングは、1112ターン目であることが分かる。

励磁タイミングは1112ターン目であることが分かる。図4(b)はBPM 4電極からの信号の合計であり、ビーム電流に相当している。ビームロスに相当する急激な減少はPQMの励磁後20ターンの内に殆ど終わっており、最初の数ターンが特に大きい事が分かる。さらに、PQMの励磁後1万ターンまで調べたが、双極振動（別の測定で四極振動も確認した）が成長していく様子は観測されなかった。

2.3 どこでビームを落とすのか

上述した測定から、ビームロスはPQMの励磁とほぼ同時に起きており、また双極・四極振動が成長していくのではないことが判明した。そこで我々は、蓄積ビームはビーム不安定性等何らかの理由でPQMを励磁する前にすでにビームが広がっていて、その広がりをPQMがさらに増大させているのが原因でビームロスが生じているのではないかと推測した。そして、そのビーム不安定性等が高周波加速空洞の総加速電圧に強く依存している、横方向のビームの広がりに影響を及ぼしているのではないかと推測した。

これらの推測を立証するために、高周波加速空洞の総加速電圧を変えてPQMを励磁しながら水平方向のビームの広がりを測定した。測定にはビームスクレーパーを使用し、最初に20mAのビームを蓄積し、PQMは1Hzの繰り返し率で励磁した。ビームスクレーパーのビーム中心からの距離を変えてビーム損失率を測定し、その立ち上がりの部分をビームの広がりとした（図5及び図6参照）。図1に示されるように飽和蓄積ビーム電流値に明らかな違いが見られた2MVと4MVを総加速電圧として選んだ。図5から2MVの時のビームの広がりはそれぞれ水平方向に

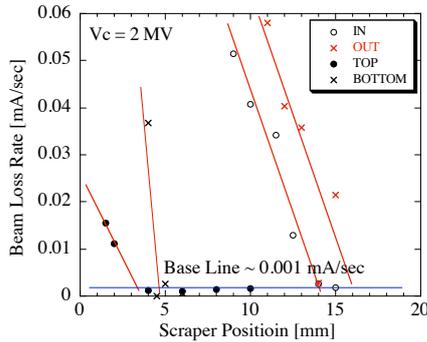


図5: ビームスクレーパーを用いて測定した総加速電圧が2MVの時のビーム損失率。INとOUTはそれぞれリングの水平方向での測定であり、TOPとBOTTOMは上下方向での測定である。赤い実線は、損失率の立ち上がりを示しており、青い実線はビーム損失率のベースラインを示している。

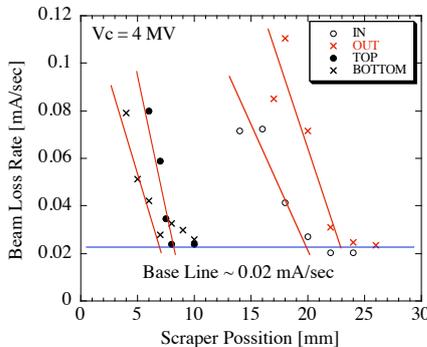


図6: 図5と同じであるが、総加速電圧が4MVの時のビーム損失率。

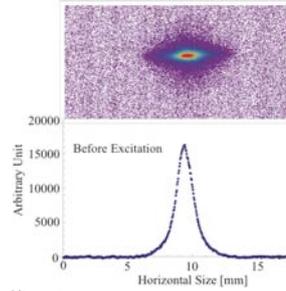
30mm (ベースラインとIN及びOUTの交点それぞれ14mmと16mm)、垂直方向に7mm (ベースラインとTOP及びBOTTOMの交点それぞれ3mmと4mm)であった。一方、総加速電圧が4MVの場合は、水平に43mmと垂直に15mmで、飽和蓄積ビーム電流値の低い4MVの方が水平方向の幅がおよそ1.5倍広いという結果になった。また、ベースラインが高くなっているのは、ビームスクレーパーで削る前に別の場所でビームをロスしている事を示している。

ビームの損失場所を特定するため、ローカルバンブを使って探したが、残念ながら現時点までその場所を特定するには至っていない。

2.3 高速ゲートカメラを用いてのビームプロファイル測定

総加速電圧の違いによって横方向ビームの広がりが変化することが、スクレーパーを使った実験より解ったが、高速ゲートカメラ[2]でビームプロファイルを観測することでクロスチェックを行った。ビームスクレーパーを使った実験と同じ条件で測定を行った。図8(a)はPQMで蓄積ビームを蹴る前の横方向のビームプロファイルである。図8(b)(c)の2枚はそれぞれ高周波加速空洞の総加速電圧が2MVと4MVの時のビームプロファイルである。ビームプロファイルがGaussianであると仮定してビームサイズ

(a) キック前



(b) キック後 (2MV)

(c) キック後 (4MV)

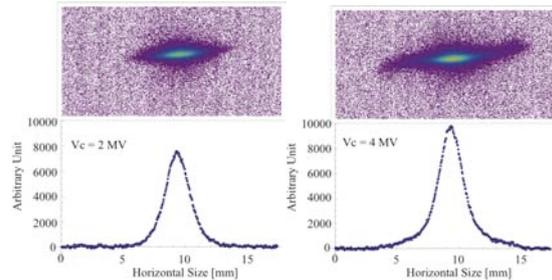


図7: 高速ゲートカメラで観測した横方向のビームプロファイル。(a)はPQMの励磁の前、(b)は総加速電圧が2MVでキックして8ターン後、(c)総加速電圧が4MVでキックして8ターン後。ビーム・プロファイルの枠の大きさは水平方向に17.0mm、垂直方向に8.5mmで、この点でのベータトロン関数と分散関数はそれぞれ4.11mと0.79mである。

を計算すると、中心部は殆ど違いがない事が解る。しかしながら、2MVと4MVのビームテールの部分は明らかな違いが観測されていて、4MVのビームは2MVのそれより明らかに長いテールを引いている事が解った。これはビームスクレーパーを使った実験と定性的に一致している。

3. まとめ

2004年9月以来、我々はPQM入射システムを用いて60mAの蓄積ビーム電流を達成する為にPF-ARでビーム入射試験を行って来た。PQM入射において飽和蓄積ビーム電流値は高周波加速空洞の総加速電圧に強く依存することが解り、その原因を解明するために、様々な実験を行った。結果、蓄積ビームのテールの広がりがその総加速電圧に依存し、これが原因で蓄積ビームの損失がおこることが解って来た。しかしながら、テールの広がりや総加速電圧がどのように関係しているのか、またビームがリングのどの場所でロスしているのか、現時点では判明していない。したがって、これらの解明には、さらに詳細な実験が必要であると考えている。

参考文献

- [1] K. Harada, Y. Kobayashi, T. Miyajima and S. Nagahashi, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10 123501 (2007).
- [2] T. Mitsuhashi and M. Tadano, Proc. of the PAC 2003, p2506.