

## QUASI-ADIABATIC, NON-FOCUSING TRANSITION-ENERGY CROSSING

Yoshito Shimosaki<sup>1,A)</sup>, Ken Takayama<sup>A)</sup>, Kota Torikai<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0801

<sup>B)</sup> National Institute of Radiological Sciences

4-9-1 Anagawa, Chiba, Japan, 263-8555

### Abstract

A quasi-adiabatic focusing-free transition crossing is proposed for suppressing any non-adiabatic and undesired features in a longitudinally separated function-type accelerator, in which particles are confined by an radio-frequency voltage with an adiabatic reduction of the amplitude and accelerated by a step voltage. This new method has been examined, both theoretically and experimentally.

### 縦方向機能離性を利用した新しい加速方式

#### 1. はじめに

RF電圧またはバリア電圧でビームを閉じ込め、ステップ電圧でビームを加速する、縦方向機能（加速と閉じ込め）分離型加速器が提案され<sup>1)</sup>、2004年秋にハイブリッド・シンクロトロン（RF閉じ込め&ステップ電圧加速）が、2006年3月に誘導シンクロトロン（バリア閉じ込め&ステップ電圧加速）が実証された<sup>2, 3)</sup>。縦方向機能分離型加速器では、ビームの加速をステップ電圧で行うぶん、閉じ込め電圧は任意に操作できる。よって加速中、自由なバンチ制御が可能となる。

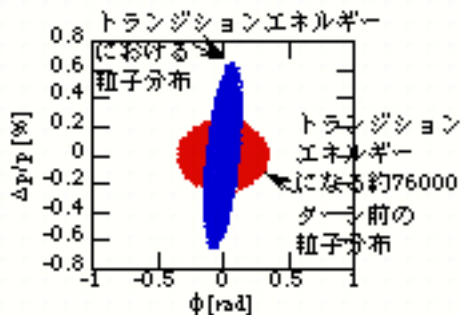


図1  $\gamma_c$  近傍でのバンチ変形。

円形加速器において、粒子のエネルギーがトランジションエネルギー近傍になると、シンクロトロン振動は遅くなり、バンチの形状が著しく変型される。すなわち、(1) 時間軸方向にバンチは圧縮され、また (2) 理想粒子に対する粒子集団の運動量偏差は増大する（図1参照）。これを非断熱現象と呼ぶ。非断熱現象に伴うバンチ圧縮は粒子分布の線密度を増大させる（図2参照 線密度増大の為、トランジションエネルギー近傍で壁電流が増大する）。これは、縦方向空間電荷効果に起因する不安定性の原因となる<sup>4, 5)</sup>。一方、非断熱現象に伴う運動量偏差の

増大は、横方向ビームサイズの増大や、非線形効果（Johnsen effect）による縦方向エミッタンス増大を引き起こす<sup>6)</sup>。これら「非断熱現象に伴う諸現象」は、トランジションエネルギー近傍でビームロスを引き起こす原因となりうる（図2参照）。

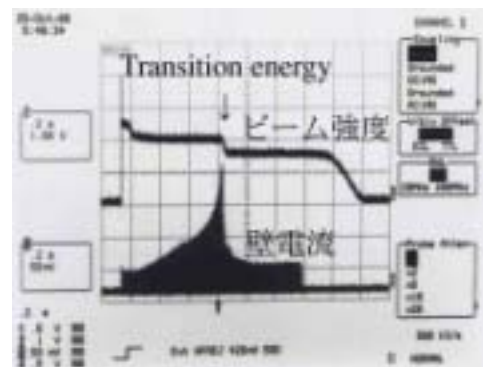


図2 KEK-PS MRでの、入射から取り出しまでのビーム強度と壁電流。QNTC非適用。

一方、非断熱現象と反対向きの運動として、断熱デバンチングと非断熱デバンチングが挙げられる。前者は閉じ込め用RF電圧をゆっくりと減衰させることにより、後者は急激に減衰させることにより生じる。時間軸方向のビームサイズは両者共に伸びる。運動量方向については、前者は時間とともに減少するが、後者は一定となる。すなわち断熱デバンチングはトランジションエネルギー近傍における非断熱現象と真逆の向きの運動である。

よって縦方向機能分離性の特徴（ビームの加速をステップ電圧で行うぶん、閉じ込め電圧は任意に操作でき、加速中、自由なバンチ制御が可能となること）を活かし、ステップ電圧で加速しながら、閉じ込め用RF電圧を断熱的に変化させてバンチ長を制御する新しい加速方式（Quasiadiabatic, nonfocusing

<sup>1)</sup> E-mail: shimo@www-accps.kek.jp

transition-energy crossing : QNTC)を提案し、理論と実験の両面から検証した。

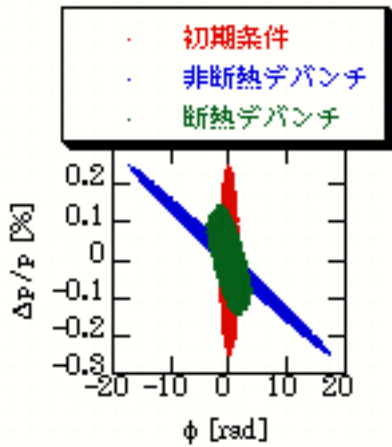


図3 デバンチング例。

## 2. 理論的検証

QNTCでは、閉じ込め用RF電圧の振幅  $V_f(t)$ を  $|t - t_c|^{-n}$ で任意に変化させながら、ステップ電圧で加速する ( $t = t_c$ はトランジション・クロッシングのタイミング。||は絶対値。 $n$ は任意の実数) [7]。

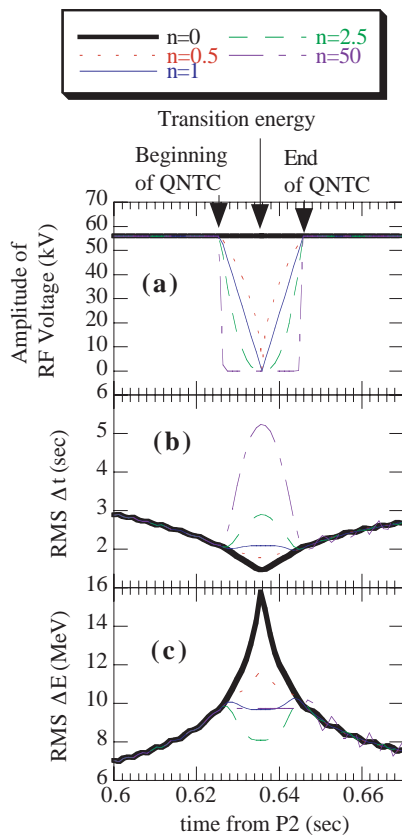


図4 (a) RF電圧振幅, RMS bunch length (b) in time and (c) in energy space.

QNTCを適用した場合のシミュレーション結果例

を図4に示す。 $n$ が小さい時、ビームは断熱デバンチングを行ないながら加速されるので、非断熱現象が緩和される。すなわち時間軸方向のビームサイズは増大し、エネルギー軸方向へ収縮する。一方、 $n$ が十分大きいとき、図4(a)のようにRF電圧が急激に減衰する為、非断熱デバンチングが誘起され、時間軸方向のビームサイズは増大するが、エネルギー軸にほとんど変化しない。全ての実数 $n$ のうち、 $n$ が整数1を取る時のみ、トランジションエネルギー近傍において、ビームサイズが位相空間で一定となる [7]。

## 3. 実験結果

高エネルギー加速器研究機構の主リングには、既存のRF空洞以外に、誘導加速シンクロトロン実証用の誘導加速セルが導入されている[2]。よって閉じ込め用RF電圧及び加速用誘導ステップ電圧を駆動することで、縦方向機能分離が可能となる。そこでQNTC実験の為に、閉じ込め用RF電圧(振幅57kV)について、加速時間1秒のうち計0.25秒の間、 $n = 1$ で振幅を減衰させた(図5(a), (b)参照)。また図5(c)のように、9.76kVのステップ電圧とビームを同期させ、ビームの加速を行なった。

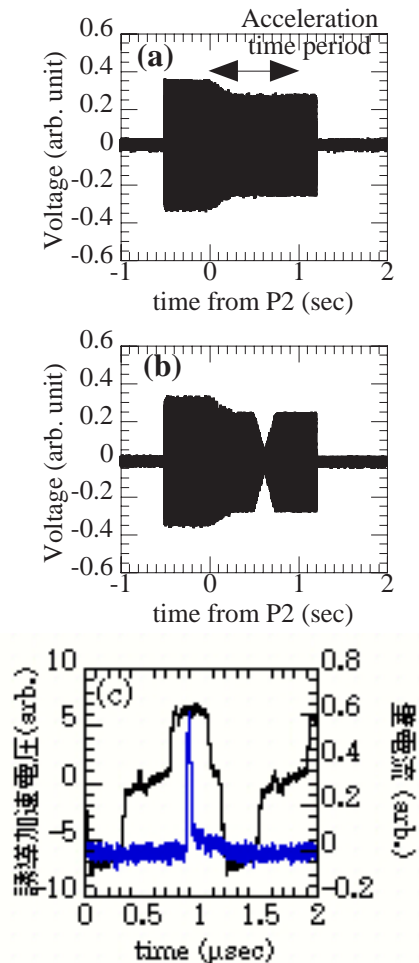


図5 (a) QNTC非適用時及び(b)QNTC適用時の閉じ込め用RF電圧。(c)ビーム信号(青)に同期した加速用ステップ電圧(黒)。

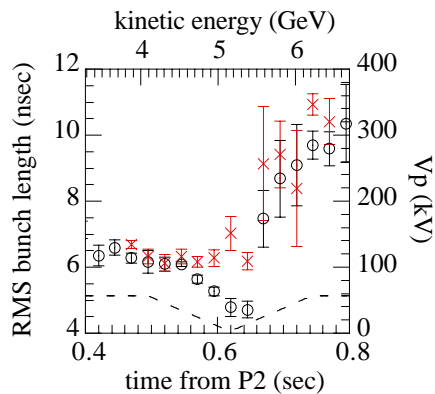


図6 (黒) QNTC非適用時及び(赤) QNTC( $n = 1$ )適用時のバンチサイズ時間変化。破線はRF電圧振幅。

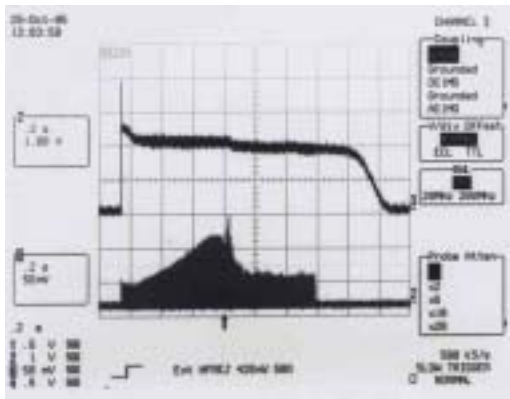


図7 KEK-PS MRでの、入射から取り出しまでのビーム強度と壁電流。QNTC ( $n = 1$ ) 適用時。

壁電流モニターで計測したバンチ波形の root-mean squares (RMS) サイズについて、その時間変化を図6に示す。QNTC( $n = 1$ )適用区間において(1)ビームサイズがQNTC非適用時のものよりも大きくなる、及び(2)QNTC( $n = 1$ )の時はビームサイズがほとんど変化しないという、理論から予測された通りの結果が得られた。

次に入射から取り出しまでのビーム強度と壁電流を図7に示す (QNTC非適用時の結果は図2参照)。図2と図7を比較すると、QNTC ( $n = 1$ ) 適用時にはQNTC非適用時に比べ、壁電流モニターの出力がほぼ平坦になっていることがわかる。図6のように、QNTC( $n = 1$ )適用によりバンチサイズが一定となった為だと思われる。またビーム強度については、QNTC( $n = 1$ )適用時、トランジションエネルギー近傍におけるビームロスが抑制される結果が得られた。バンチサイズが広がることにより、ビーム不安定性が抑制された為だと思われる。

#### 4. まとめ

ステップ電圧で加速しながら、閉じ込め用RF電圧を断熱的に変化させてバンチ長を制御する新しい加

速方式 (Quasiadiabatic, nonfocusing transition-energy crossing : QNTC)を提案し、理論と実験の両面から検証した。バンチサイズを広げ、ビームロスを低減することができた。

「断熱デバンチしながら加速する方式」は、(1) 加速中、低線密度を維持しうる (=空間電荷に起因する現象を抑制しうる)、及び(2) 加速中にも運動量偏差を制御しうるという点で、トランジション・クロッシングの無い加速器においても有効と思われる。

このように縦方向機能分離性はビームハンドリングの自由度をあげる。RF電圧を重ね合わせるRFハーモニクスで平坦な電圧を作りビームを加速することも可能であるので[8]、RFシンクロトロンにおいても縦方向機能分離性は適用可能であるものと思われる。

#### 参考文献

- [1] K. Takayama and J. Kishiro, Nucl. Inst. Meth. A 451, 304(2000).
- [2] K. Takayama et al, Phys. Rev. Lett. 94, 144801 (2005).
- [3] K. Takayama et al, presented in this proceedings (WO023).
- [4] K. Takayama, D. Arakawa, J. Kishiro, K. Koba and M. Yoshii, Phys. Rev. Lett. 78, 871(1997).
- [5] J. Wei et al., Proceedings of PAC2005, TPAT081.
- [6] K. Johnsen, Proceedings of the CERN Symposium on HE Accelerators and Pion Physics, Geneva, 1956 (CERN Report No. 56-25, 1956).
- [7] Y. Shimosaki, K. Takayama and K. Torikai, Phys. Rev. Lett. 96, 134801 (2006).
- [8] C. M. Bhat et al, Phys. Rev. E55, 1028(1997).