

POP EXPERIMENT (I) OF INDUCTION SYNCHROTRON: INDUCTION ACCELERATION OF A SINGLE RF BUNCH AND FORMATION OF A SUPERBUNCH IN THE KEK-PS

Torikai Kota, Arakida Yoshio, Otsuka Kazunori, Kishiro Junichi, Kono Tadaaki, Nakamura Eiji, Shimosaki Yoshito, Toyama Takeshi, Wake Masayoshi

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba City, Ibaraki Prefecture, 305-0801

Kyushu University

Hakozaki, Fukuoka City, Fukuoka Prefecture, 810-0068

Abstract

This paper describes the overview of an induction system in KEK-PS and present status of Proof-of-Principle experiments of a induction synchrotron, which can accelerate long and flat bunch that is called superbunch for obtaining higher beam intensity.

誘導加速シンクロトロンの実証I: KEK-PSでの誘導加速とスーパーバンチ形成

1. はじめに

2004年10月より、KEK12GeV陽子シンクロトロンにおいて、誘導加速装置を用いた陽子加速実験が行われている^[1]。この実験の目的は、原理的には任意形状の加速電圧を発生させる誘導加速装置によって矩形パルス電圧を発生させ、このパルス電圧によって陽子の進行方向閉じ込め・加速を行うことにある。誘導加速装置によってビーム閉じ込めと加速の機能分離が行えるため、長大なビームを加速することにより、ビーム線電流密度を増すことなくビーム大強度化を実現できると期待される。

2004年10月の実験において、 $2.0E11$ pppの陽子バンチを誘導加速装置を用いて500MeVから8GeVまで1.9secで加速した^[1]。このときの誘導加速電圧は4.7kV、加速電圧のパルス幅は250ns、ビーム周回周波数は入射時669kHz、加速終了時871kHzであった。この実験により、シンクロトロンが発明されて以来60年以上ビーム加速装置として用いられてきた高周波加速装置(RF)に代わり、シンクロトロンにおける誘導加速装置を用いた加速開始-加速終了までの陽子ビーム加速を世界で初めて実証した。

さらに2004年11月には $5.0E11$ pppの500MeV陽子バンチを誘導加速装置で発生させたバリアー電圧によってバンチ幅600nsに達する長大なバンチを460ms閉じ込めることに成功した。

2. 誘導加速システム

Figure 1に本実験で使用した誘導加速システムを含むKEK-PSのブロック図を示す。誘導加速システムはその機能上、1:スイッチング電源^[2]、2:誘導加速セル^[3]、および3:トリガー制御系に分類される。Figure 2に誘導加速装置外観を示す。

スイッチング電源は最大出力2.0kV、20Aであり、

最大繰り返し周波数1MHzで動作する。スイッチング電源開発に際して解決した問題は高繰り返しに伴うMOS-FETの冷却、MOS-FETの直列接続によって生じるFET間の充電電圧のばらつき改善、およびゲート電圧供給のためのDC-DCコンバータから侵入するノイズによるFETの誤動作の除去であった。

誘導加速セルは磁性体にFinemetを使用し、磁性体の防錆とセル内の浮遊容量を低減させる目的でシリコン油冷却を採用している。加速セルは水冷抵抗器を並列に接続した構成で、最大許容負荷電力20kW、加速電圧勾配10kV/m、 $Q=0.1$ 、特性インピーダンス125Ω、帯域15MHzの性能を持つ。誘導加速セル開発に際して解決した問題は浮遊容量の低減、空洞内冷却解析、伝送線とのインピーダンス整合が挙げられる。実証実験に用いられている、本加速装置による1MHzCW誘導加速電圧測定結果をFigure 3に示す。

トリガー制御系にはTexas InstrumentsのTMS320-C6416DSKを使用した。演算部(DSP)の動作周波数は720MHzで、3つの独立したタイマーを内蔵している。タイマーの動作周波数は90MHzである。トリガー制御系はビーム電流モニタの波形を元にタイミング信号を生成し、モジュレータのゲート回路へと光信号で伝達する。本制御系開発に際して解決した問題はスイッチング電源からのノイズによる誤動作の改善、加速開始時における誘導加速パルス密度の調整、および陽子の周回周波数が669kHzから871kHzまで変化するために生じる1.5usのトリガー遅延時間変化への追従が挙げられる。

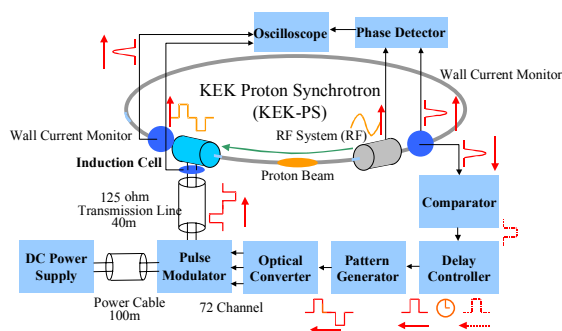


Figure 1: Induction System in KEK-PS

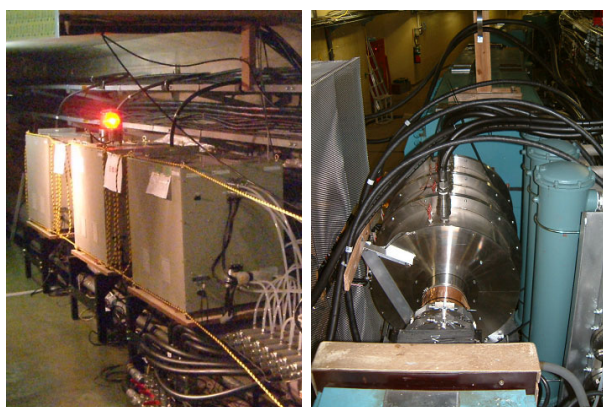


Figure 2: Switching Power Supplies (left) and Induction Cells with Matching Load (right)

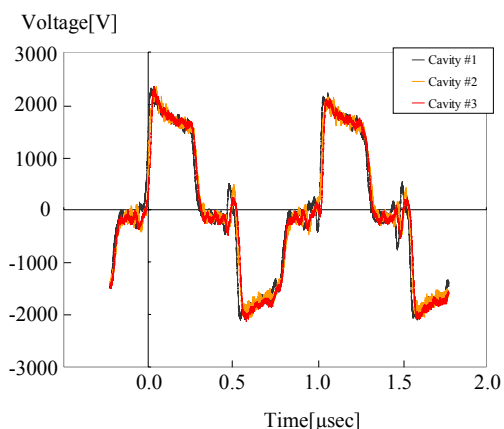


Figure 3: 1MHz CW Operation Result of Induction Voltage

3. デジタル加速制御系

誘導加速装置における加速制御では、1 μ sにもおおよぶ長いパンチ（スーパーパンチ）を加速することを計画している^[4]。KEK-PSでのスーパーパンチはビームを縦方向に閉じ込めるバリアー電圧の発生タイミングを変化させ、パンチ結合を行うことで構築される。この過程においては、RF装置でのビームハンドリングを考察する場合に用いられるRF位相に代わり、ビームと加速電圧のタイミングを時間基準で考察す

る。しかしKEK-PSにおける陽子の周回速度は加速過程において光速の75%から99%まで変化するため、ビームモニタがビーム通過シグナルを出力してから誘導加速セルに加速電圧が印加されるまでの遅延時間を1500ns変化させる必要がある。

さらに、加速器運転に伴う様々な偏向磁場ランプパターンに追従させてビームを加速するためには、ビームの周回軌道を加速電圧によってフィードバック制御する必要がある。

これらを包括的に解決するため、DSPを用いた実時間トリガー制御装置を新たに開発した。本制御装置はRF装置等で広く用いられているデジタルフィルタとしての利用法とは根本的に異なる。DSPは信号入力から出力までの時間が決定していることを特徴とする。このためDSPにパルス遅延機能、加速開始および終了時における過渡期の加速電圧調整機能を持たせることで、DSPの駆動クロック自身を利用した、ビームとの同期を保証するパルス出力を実現した。

4. 誘導加速実証実験

誘導加速装置による陽子ビームの加速検証には、RF電圧によるビーム閉じ込めのもとで誘導電圧による加速を行い、RF位相に対するビーム位置の測定を行う方法を用いた。RF装置は常にビームが安定に加速される電圧を与えるようフィードバック制御されている。加速中に誘導電圧によってビームに加速電圧が与えられた場合、ビームはRF電圧における必要な理論的加速位相の位置からずれた場所に位置することになる。ビームとRF電圧との位相差は位相フィードバックに用いられている ϕ モニタによって観測された。

実験に際してはRFフィードバックを利用した誘導電圧の効果を確認するため、RFによる加速、誘導電圧による加速、および誘導電圧による減速についてそれぞれ実験を行った。実験結果をFigure 3に示す。左図および右図はトランジション前および後における、RF電圧のみの加速位相、および誘導電圧によって加速電圧および減速電圧を与えた場合の実験結果にそれぞれ対応している。この結果より、加速周波数が669kHzから871kHzまで変化するビームに対して必要な誘導電圧を付与でき、8GeVまでの加速を実証した。

5. 誘導電圧によるビーム閉じ込め

長パンチをバリアー電圧によって閉じ込める実験はFNALおよびBNLのBarrier RF^{[5][6]}が知られている。本実験の特色はRF空洞+RFアンプによる電圧波形ではなく、高繰り返しスイッチング電源によってビームの閉じ込めを行う点にある。実験はKEK-PSの入射時間帯を利用して行われた。入射エネルギーは500MeV、周回周波数は669kHzであった。本実験ではRF装置は電源を切りdetune状態とした。Figure 4にビーム閉じ込め実験の概念図を、Figure 5に入射直後から460msの壁電流モニタで観測されたビーム波形

をそれぞれ示す。実験結果より、誘導加速システムによってKEK-PSにおけるビーム閉じ込めが行えた事を確認した。

Figure 5に入射直後からのバンチサイズとビーム強度の時間変化について測定したものを示す。このときの入射ビームの運動量広がり $\Delta p/p = 0.2\%$ であった。入射直後のビームロス以降はバンチが安定して閉じ込められていることが確認された。なお本実験で入射直後から5msの間にバンチ分裂が観測された。

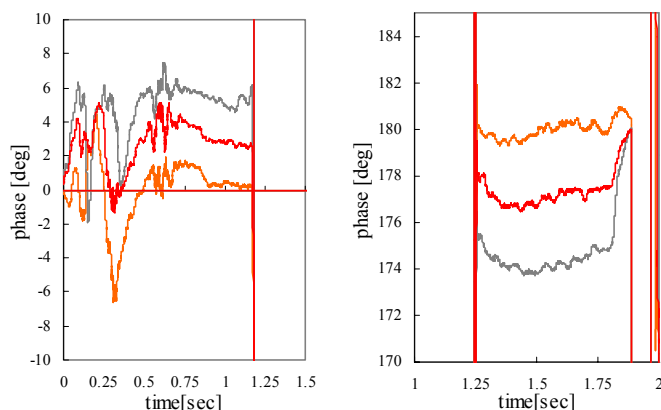


Figure 4: Time Evolution of Acceleration Phase in Experiment of Induction Acceleration

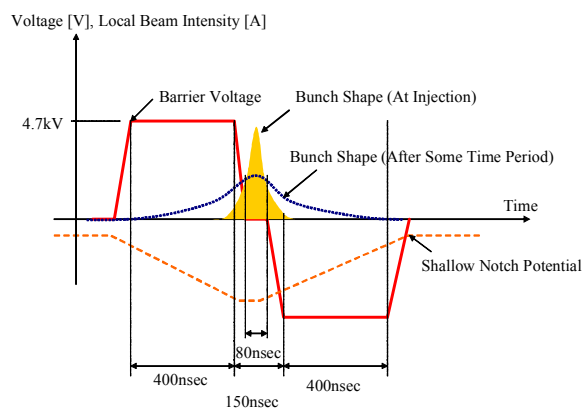


Figure 5: Schematic View of Beam Confinement

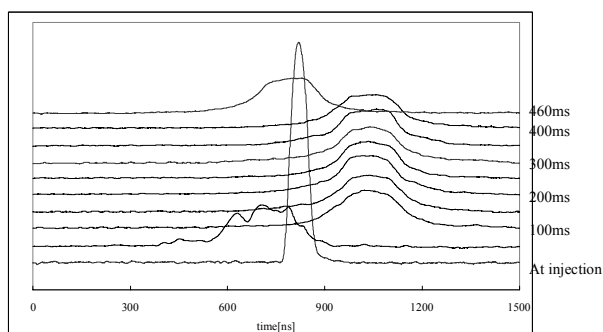


Figure 6: Bunch Shape during Experiment of Beam confinement

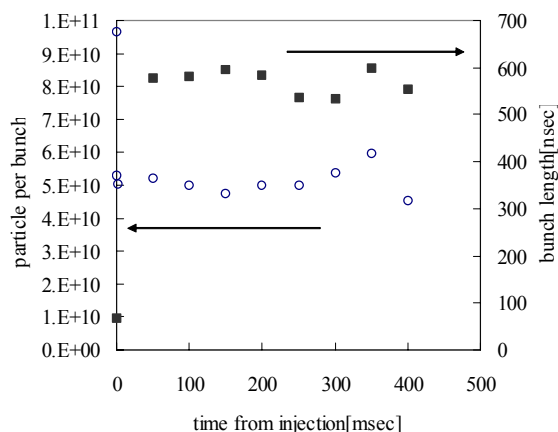


Figure 7: Bunch Length and Particle Number during Beam Confinement

6. 今後の計画

2005年秋に誘導加速装置をKEK-PSに追加し、最大出力電圧を現状の6kVから12kVに増強する。この誘導加速装置は現在設置されたシステムと独立に動作させることを計画しており、12kV,パルス幅400nsのバリアー電圧ではアクセプタンス $p/p \sim 0.29\%$ を確保できる。これにより複数バンチ閉じ込めによるスーパーバンチ構築が可能になる。また、各システムをビーム閉じ込めと加速に用いることで、RFを用いない世界初の「完全パルス電圧制御シンクロトロン」となる誘導加速シンクロトロンの実験を今年度中に実証する予定である。

さらに、R軌道制御法、シンクロトロン振動やベータトロン振動などのパラメータを加速中にDSPに与えることで、ビーム不安定性を実時間で抑制しながら加速を行うことが可能になると期待される。

なお、上述した電圧調整装置、および軌道制御装置および誘導加速装置運転法は特許出願されている。

参考文献

- [1] Ken Takayama *et. al.*, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 144801 (2005).
- [2] Kunio Koseki, submitted to *Nucl. Inst. Meth.*
- [3] Kota Torikai *et. al.*, in proceedings of PAC2003, edited by Joe Chew (IEEE, Piscataway, NJ, 2003), pp.1784-1786 (2004).
- [4] K.Takayama *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 144801 (2002).
- [5] M. Fujieda *et. Al.*, *PRST-AB* **2**, 122001 (1999).
- [6] W. Chou, Proceedings of PAC2003, edited by Joe Chew (IEEE, Piscataway, NJ, 2003), p. 2922.