

EXPERIMENTAL DEMONSTRATION OF THE INDUCTION SYNCHROTRON

Ken Takayama^{A,B)}, Yoshio Arakida^{A)}, Tanuja Dixit^{B)}, Taiki Iwashita^{A)}, Tadaaki Kono^{A)}, Eiji Nakamura^{A,B)}, Kazunori Otsuka^{C)}, Yoshito Shimosaki^{A)}, Kota Torikai^{D)}, and Masayoshi Wake^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

^{B)} The Graduate University for Advanced Studies

Hayama, Kanagawa, 240-0193 JAPAN

^{C)} Nippon Advanced Technology Co., LTD

Tokai, Ibaraki, 319-1112 JAPAN

^{D)} National Institute of Radiation Sciences

Inage, Chiba, 263-8555 JAPAN

Abstract

Recent progress in the KEK induction synchrotron is presented. In the recent experiment, by using a newly developed induction acceleration system instead of radio-wave acceleration devices, a single proton bunch injected from the 500 MeV Booster ring and captured by the barrier bucket created by the induction step-voltages was accelerated to 6 GeV in the KEK proton synchrotron.

誘導加速シンクロトロンの実証

1. はじめに

次世代の大強度高エネルギー加速器として6年前に高山と木代によって提案された誘導加速シンクロトロンの概念^[1,2]がようやく実証された。従来の高周波シンクロトロンに代わる新しい荷電粒子ビームの閉じ込めと加速方式を提示した。誘導加速シンクロトロンの特徴は以下の2点である。(1) 誘導加速セルに発生させる正負対の誘導電圧パルスで縦方向(進行軸方向)にビームを捕捉し、マイクロ秒オーダーの長大な粒子群(スーパーバンチと呼ばれる)を作る。(2) 別種の誘導加速セルに発生させる長パルスの誘導電圧で捕捉されたスーパーバンチを加速する。従来の高周波シンクロトロンが進行方向について粒子の閉じ込めと加速を共通の高周波で行う機能結合型であるのに比して、誘導加速シンクロトロンは閉じ込めと加速を分離した機能分離型と言える。図1にその概念を示す。

高周波シンクロトロンの進行軸方向の閉じ込めとその加速方式では、粒子を捕捉できる位相空間領域の、特に進行軸方向が原理的に制限されることが知られている。高周波が負の電圧になる時間領域では減速になり、電圧勾配の極性が異なる時間領域では閉じ込められない。一方、加速し得るビーム電流の最大値は横軸方向にビーム自身が作る電磁場に起因する発散力である空間電荷力の大きさによって決まる。空間電荷制限電流値と呼ばれるビーム電流までしか入射は出来ない。厳密には局所電流値すなわち線電流密度の最大値によって制限される。特別な工夫をしない限り高周波シンクロトロンではバンチ中

心が密度最大になる。バンチ中心の電流密度がこの制限値以下でなければならない。誘導加速シンクロトロンにおける閉じ込め・加速方式ではこれら二つの高周波シンクロトロンの弱点が原理的に回避出来ることが理論的に示されている。制限電流値以下で線密度を一定に保ったまま進行軸方向に大幅にビームを詰め込むことが可能になると考えられている。

この概念の応用は次世代ニュートリノ物理に使う陽子駆動用の加速器である。発生させるパイ中間子の強度が標的に入射する陽子数に比例するので、これらの加速器ではとりわけ高いビーム強度が求められる。誘導加速シンクロトロンは閉じ込め・加速方式はこの要求に合致している。誘導加速シンクロトロン提案後直ちに、その応用としてエネルギーフロンティアの衝突器の提案もなされている。これをSuper-bunch Hadron Collider^[3]と言う。スーパーバンチを閉じ込め・加速できる誘導加速シンクロトロンの特徴を最大限活かしたSuper-bunch Hadron Colliderでは従来の高周波技術を基礎にした同サイズの衝突器より一桁大きなルミノシティー(コライダーの性能を表す量: この量に散乱断面積を乗じれば着目する反応の単位時間(秒)当たりの事象数が求まる。)が期待し得る。ハドロンコライダーを稼働中あるいは建設中であるBNLとCERNがこのスーパーバンチの衝突方式に注目し、それぞれRelativistic Heavy Ion Collider (RHIC)とLarge Hadron Collider (LHC)の将来グレードアップのシナリオの中で検討を進めている。

2. 実証試験のステップ

誘導加速シンクロトロン概念を実証するべく、稼働中の高エネルギー加速器研究機構(KEK)の12GeV陽子シンクロトロン(12GeV-PS)に必要な誘導加速装置の導入が行われ、実証試験が段階的におこなわれている(図2参照)。誘導加速装置の心臓部は磁性体を装荷した1対1のトランスである誘導加速セルとこれを駆動する高圧のスイッチング電源である。加速セルには加速粒子の周回周波数に同期してパルス電圧を発生させねばならない。ほぼ相対論的な速さを持った粒子を加速するわけだから、たとえばKEK-PSのように周長300mクラスの加速器であればCW 1MHzの繰り返しが必要される。この繰り返しで動作するスイッチング電源がニチコン草津株式会社との共同で開発された^[4,5]。2004年の秋から2005年4月にかけて、高周波で閉じ込めた陽子バンチを誘導加速装置によって500MeVの入射エネルギーから8GeVまで加速する事に成功している^[6]。高周波電場での閉じこめ・誘導加速という事実からこの段階の加速器はHybrid Synchrotronと呼ばれる。加速の実証は閉じこめている高周波と陽子バンチの進行軸方向の中心(中心A)の相対位相を測定する事によって行われた。Hybrid Synchrotronでは、一定のパターンで励磁される偏向磁石に追従し、陽子ビームの動径方向の中心(中心B)が加速器真空容器の中央に常に位置するように、高周波の位相が制御される(これを ΔR フィードバックと呼ぶ)。図3に見られる様に、誘導加速電圧が存在しない場合(緑)には、陽子バンチの中心Aが高周波の位相の一定の正の部分に位置し、加速される。磁石の励磁にそれだけで追従出来る誘導加速電圧が存在する場合(赤)は、最早、高周波で加速する必要はないので、中心Aは0度位相の処に位置する。又、大きさは同じだが負の誘導電圧を与えた場合(青)は、陽子バンチは誘導加速装置から減速を受ける事になる。この減速に打ち勝つために、中心Aは0度位相から更に遠い正の位相に位置する事になる。実験結果は予測通りであった。又、同じ誘導加速装置で発生するステップ電圧でビームを閉じ込め、600nsecの長大な陽子バンチが生成された^[7]。500MeV ブースターから入射した100nsec長のバンチが、誘導ステップ電圧がつくるバリアーに挟まれ、広がりながらも最終的には閉じ込められる様子が図4に示されている。

Hybrid Synchrotronだけでもきわめて面白いビームハンドリングの技術が実証された。中規模のハドロン用のシンクロトロンはその加速の途中にトランジションエネルギーと云う一種の特異点を持つ。このエネルギーを通過する時間領域で、粒子は、進行軸方向の運動を安定に支えているシンクロトロン振動が完全に停止する。この時、陽子バンチの長さが極端に短くなり、様々なビーム不安定が発生し、加速器全体としてもビームロスが発生する大きな要因であった。シンクロトロン振動が完全に停止し、陽子バンチの長さが極端に短くなるという性質は、傾き(時間軸上で)を持った加速電圧の存在がその原因である事は明白なのであるが、強収束原理が付与

された高周波シンクロトロンでは不可避の原理的問題であった。シンクロトロン振動が凍結するトランジションエネルギーでは閉じこめ電圧は元来不要である。Hybrid Synchrotronでは誘導加速シンクロトロン同様に閉じこめと加速を分離しているために、不要な時間軸上で傾きを持った高周波電圧(閉じこめのためにのみ用いている)をこのトランジションエネルギー近傍でオフにする事が出来る。トランジションエネルギー手前でオフにすれば、陽子バンチを長いままに維持し、この特異点を通過出来る事が分っていた。問題は高周波電圧どのようにオフにし、特異点を通過後、どのようにオンにするのが最適であるかという事であった。理論的考察から時間的に線形に電圧を下げ、特異点で完全に0にし、その後線形に立ち上げ、元の電圧に戻せば理想的に特異点を通過させ得る事が解明され、直ぐ、実験に移された。予測通り、陽子バンチ長を長いままに維持して特異点の通過が確認された。実験結果の詳細とその解析は最近の論文に議論され^[8]、且つこの学会でも詳しく報告^[9]されている。

3. 試験結果

2006年の冬、更に誘導加速装置を導入し、バリアー電圧による閉じこめと誘導加速により6GeVまで加速する事に成功した。誘導加速シンクロトロンの完全な実証と言える。陽子バンチが誘導加速セルを通過するのに同期して、閉じこめと加速のパルス電圧をjust timingで発生させるための同期システムの整備と共に、中心Bを真空容器の真ん中に確保する ΔR フィードバック法が新たに構築された^[10]。誘導電圧の発生は誘導加速セルを駆動するスイッチング電源の半導体スイッチング素子へゲート信号を「送る」か「送らない」かの選択で制御されている。中心Bのモニター信号(真空容器の中心からのずれに比例した電圧信号)の大きさが一定の閾値を超えると(陽子バンチのエネルギーがその時点の磁場の値が示唆する理想的なエネルギーより大きい事を意味する)、上記ゲート信号をブロックするので加速電圧は発生しない。その結果、理想的なエネルギーに近づく。これがフィードバックとして機能するわけである。他方、バリアー電圧の発生も自在に制御し、実効的にシンクロトロン周波数を制御する手法^[11]も考案され、実験の中で使用された。図5は入射から6GeVまでの中心Bの位置、ビーム強度の時間的推移、誘導加速電圧、バンチモニター信号を示す。加速開始後から中心Bが2mmの位置に一定に保たれている事が見て取れる。ビーム強度は入射域から加速域に推移する領域でロスが見出される。これは複雑なゲートトリガーパルス生成システムにまだ残る問題に由来すると考えている。

4. 展望

高周波加速装置をスイッチング電源で駆動する誘導加速セルに置き換えるだけであるから、既存の全てのシンクロトロンにおいて、必要であればこの誘

導加速シンクロトロンに改造することは容易である。粒子バンチの到来をモニターし、そのモニター信号を基にスイッチング電源のゲート信号を作れば、陽子から極端に周回速度の遅いウランまでのどんなイオンであろうとも一台の誘導加速シンクロトロンで加速出来る。イオン源を高圧ターミナルに収容して、直接この全種イオン加速器に入射する方式が可能である。誘導加速シンクロトロンの概念をベースにしたシステムを全種イオン加速器と称し、特許申請がされている^[12]。その概念図を図6に示す。身近な例としてKEKの500MeV Boosterと12GeV PSをこれに改造する場合を考えよう。完全電離ウランを例にとると、500MeV Boosterで80MeV/核子、12GeV PSで4GeV/核子が得られると試算されている。近い将来、次世代のナノ材料創成のイオンドライバーとして魅力的な存在になるかもしれない。又、取り出されたイオンビームを横方向と縦方向に金属標的の一点に収束させれば、局所的にこれまで他の手段で到達が困難だった電子温度、密度パラメーターを持った高密度物質状態を実現出来ると考えられており、そのドライバーとして利用が東京工大や宇都宮大との連携で検討されている。

謝辞

この実証試験の準備期間で大きく貢献した木代純逸(故人)、渡辺真朗(J-PARC)、徳地明(ニチコン草津)、小関国夫(J-PARC)、試験開始後PS加速器整備と運転に貢献したKEKの荒川大、佐藤吉博、久保富夫、白形政司、五十嵐進、末野毅、佐藤皓、高周波加速装置に関する議論に関して二宮重史、誘導加速シンクロトロンの応用に関する議論を作田誠(岡山大)、東京工大の堀岡一彦、小栗慶之、志甫諒の各氏に深く感謝する。

参考文献

[1] K.Takayama and J.Kishiro, "Induction Synchrotron", *N.I.M.* **A451**, p304 (2000).
 [2] 高山健、下崎義人、木代純逸, "誘導加速シンクロトロンの実証とその応用", *日本物理学会誌* **Vol.59**, No.9, 601-610 (2004).
 [3] K.Takayama, J.Kishiro, M.Sakuda, Y.Shimosaki, and M.Wake, "Superbunch Hadron Colliders", *Phys. Rev. Lett.* **88**, 144801(2002).
 [4] A.Tokuchi et al., "Switching Power Supply for the Induction Synchrotron", in *proceedings of RPI A2006*.
 [5] K.Koseki, K.Takayama, and M.Wake, "Significance of isolation impedance in a solid-state power modulator", *N.I.M.* **A554** p64-74 (2005).
 [6] K.Takayama, et al., "Observation of the Acceleration of a Single Bunch by Using the Induction Device in the KEK Proton Synchrotron", *Phys. Re*

v. Lett. **94**, 144801 (2005).
 [7] K.Torikai et al., KEK Preprint 2005-80 (2005), submitted to *Phys. Rev. ST-AB*
 [8] Y.Shimosaki, K.Takayama, and K.Torikai, "Quasiadiabatic, Nonfocusing Transition-Energy Crossing", *Phys. Rev. Lett.* **96**, 134801 (2006).
 [9] Y.Shimosaki et al., in *this proceedings*, T023.
 [10] 特願2005-198557、鳥飼幸太、他「荷電粒子ビームの軌道制御装置及びその制御法」H17.7.7
 [11] 特願2005-196258、下崎義人、他「シンクロトロン振動周波数制御装置及びその制御方法」H17.7.7
 [12] 特願2005-129387、PCT/JP2006/308502、高山健、他、「全種イオン加速器及びその制御方法」H17.4.27

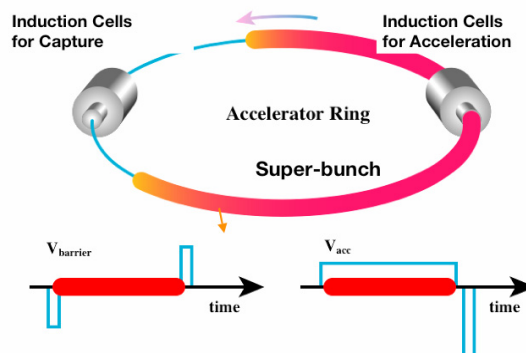


図1 誘導加速シンクロトロン概念図

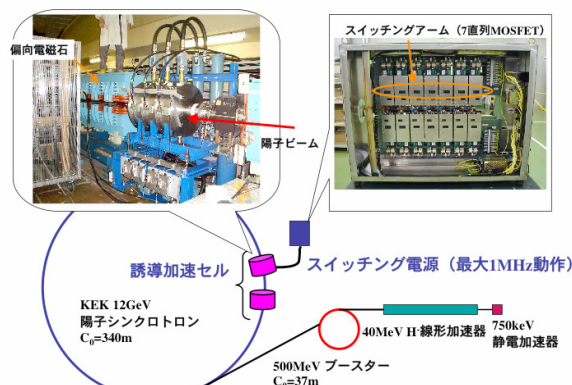


図2 KEK-PSにおける全体配置

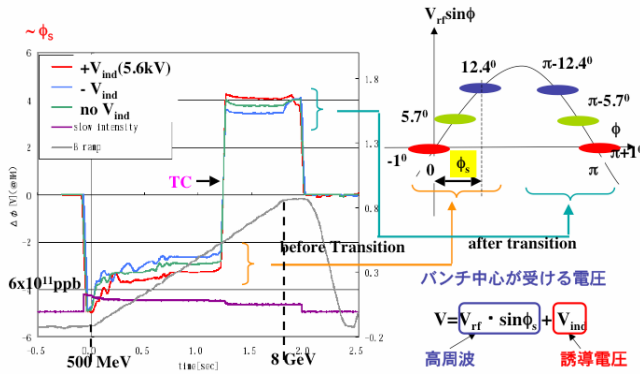


図3 Hybrid Synchrotronでの誘導加速試験結果：
バンチ中心の高周波に対する位相の時間変化

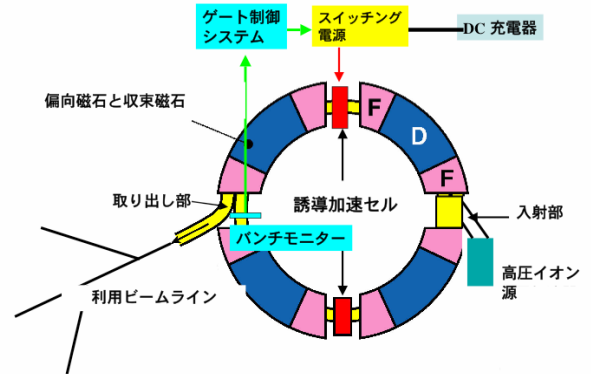


図6 全種イオン加速器概念図

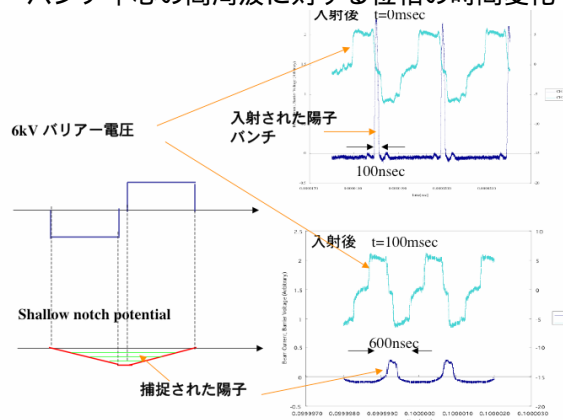


図4 バリアー電圧閉じ込め

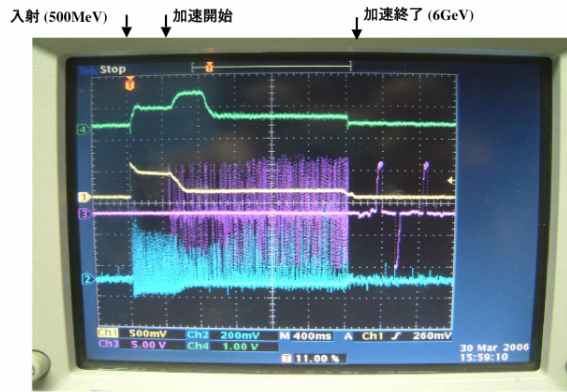


図5 誘導加速シンクロトロン試験結果
緑: ビーム位置 (10 mm/div), 黄: ビーム電流 (10¹²/div),
紫: 誘導加速電圧パルス (1 kV/div), 青: バンチ信号