


科学研究費補助金（学術創成研究費）公表用資料
〔事後評価用〕

平成15年度採択分

平成21年 3月31日現在

研究課題名（和文）	誘導加速シンクロトロンの実証研究： スーパーバンチ加速と応用	
研究課題名（英文）	Experimental Demonstration of Induction Synchrotron: Super-bunch Acceleration and its Application	
研究代表者	takayama ken 高山 健	
所属研究機関・部局・職	高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授	

研究の概要：

誘導加速シンクロトロンの完全実証に成功した。スーパーバンチの閉じ込め、加速に成功している。加速と閉じ込め機能を完全分離する特徴を利用した全く新しいトランジションエネルギー通過法を実証した。KEKの500MeVブースターを入射器を用いない誘導加速シンクロトロン（全種イオン加速器）に改装して、スーパーイオンバンチの応用を図るために必要なイオン源などのR&Dを実施した。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：誘導加速、シンクロトロン、スーパーバンチ、全種イオン加速器

1. 研究開始当初の背景

2000年に誘導加速シンクロトロンのアイデアが提案された後、KEKで開発に着手したスイッチング電源の目鼻がようやく立ち始めた状況であった。一方、スーパーバンチをハドロンコライダーに導入するケーススタディーがKEKとCERNで精力的になされていた。

2. 研究の目的

(1) 加速と閉じ込めを分離した新しいシンクロトロン（誘導加速シンクロトロン）を誘導加速装置で発生させるパルス電圧を利用して実現する。

(2) 誘導加速シンクロトロンとそこで加速するスーパーバンチの応用を検討する。

3. 研究の方法

必要な1MHzで繰り返し動作可能な誘導加速システム一式を完成させ、この数を年毎に増やしてKEK12GeV陽子シンクロトロンに導入した。このシステムの数に合せ実証試験を段階的[段階I：既存高周波閉じ込め、誘導加速、段階II：誘導ステップ電圧（バリアー電圧）によるスーパーバンチの形成、段階III：バリアー電圧による閉じ込め、誘導加速電圧による加速]に実施した。

4. 研究の主な成果

(1) 2004年5月に誘導加速システムの実機モデルを完成。

共同研究の成果として、ハイパワー

MOSFETをスイッチング素子として使用したフルブリッジ回路構成の大パワー超高速スイッチング電源を完成させた。加えて、日本発明の微細結晶合金の磁性体を特別に薄膜成形をし、低損失を実現、マイナーループ動作させ、損失総量を下げた誘導加速セルを完成させた。更にこれら二つのハードとスイッチング電源を任意タイミングで動作させるゲート制御システムとを組み合わせ、誘導加速システムのユニットを完成させた。

(2) 2004年秋に世界初の高周波電圧で閉じ込めた陽子バンチを8GeVまで加速に成功する。

誘導加速システム3セットをKEK陽子シンクロトロンに導入し、既存の高周波空洞に発生する高周波電圧で「閉じ込め」た陽子バンチを誘導加速電圧だけで行い8GeV行まで加速した。言い換えると、この段階ではハイブリッドタイプのシンクロトロンを実現したことになる。

(3) 2005年ハイブリッドシンクロトロンの特徴を活かした新しいトランジションエネルギー通過法を確立。

円形ハドロン加速器は加速途上にトランジションエネルギーと呼ばれる特異点がある。既存高周波シンクロトロンでは必然的にこの特異点近傍では局所電流密度が大きな短バンチ状態になり、多種のビーム不安定の結果としてビームロスを引き起こされることが知られていた。この特異点安定にを通過させる方法として既存の高周波シンクロ

〔4. 研究の主な成果（続き）〕

ロンで有効であったのはパルス4極磁石をトランジションエネルギーの近傍のみ励磁する γ ジャンプと呼ばれる手法が唯一であった。ハイブリッドシンクロトロンでは「閉じ込め」と「加速」を分離したことにより、トランジションエネルギー近傍のみ閉じ込め用の高周波電圧を完全にゼロに下げることができる。これによって、長いバンチ長を維持したままトランジションエネルギーを通過できることが証明された。

（4）2006年春誘導加速シンクロトロンの完全実証に成功。

順次誘導加速システムのセットを加速器にインストールした。合計10個の誘導加速セルを導入し、4セルを加速用に6セルを閉じ込め用に使い、500 MeV ブースター加速器から入射された陽子バンチ (5×10^{11} ppb) を、200 nsec の時間間隔で対で発生させるバリアー電圧の間に陽子バンチを拡散させて500 nsec 長のスーパーバンチとして閉じ込めた。その後、2 sec で6 GeV まで誘導加速電圧のみで加速することに成功した。これは誘導加速シンクロトロンの完全実証になった。様々な摂動で生じる動径方向の陽子バンチ軌道のずれを自動的に補正する ΔR フィードバックシステムと呼ばれる、ビーム位置信号を使ってスイッチング電源のゲート信号のオン・オフを制御する手法を導入した。

（5）2006年夏-2008年7月は誘導加速シンクロトロン方式を導入した入射器を必要としない全種イオン加速器（デジタル加速器）のアイデアを具体化し、発明を完成させた。誘導加速シナリオを構築し、長パルス誘導加速セルと ECR イオン源を製作した。

スイッチング電源はゲート信号の制御だけで駆動させ得ることに着目し、加速器リングに導入したイオンバンチモニターでイオンバンチの通過信号を元にゲート信号を制御すれば、如何に低速で入射された任意のイオンでもバリアー電圧で捕捉し、誘導加速電圧で加速器リングの偏向電磁石が持つ磁気剛性が許すエネルギーまで加速できる全種イオン加速器の概念を特許として完成させた。既存 KEK ブースターをこの全種イオン加速器に改装する作業に着手した。まだその途上であるが低エネルギー全種イオン加速器の、加速器物理上の問題点を明らかにした。また、これ用の永久磁石 ECR イオン源の開発を行った。

次世代スイッチング電源用の大電流、高耐圧、高速スイッチング素子（SI サイリスタ、SiC-JFET）としての特性テストを実施し、コンパクトなスイッチング電源を実現するのに必要な素子パッケージの見通し（特に排熱構造に関して）を得た。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

加速・閉じ込めの機能を分離して行う世界初の誘導加速シンクロトロンを実証した。この結果に文部科学大臣賞が与えられた。この方式によりこれまでの円形加速器の限界は克服されることが実験的に示され、CERN Courier に「加速原理を変革した」として宣伝された。又、この誘導加速を使い任意のイオンを加速出来る全種イオン加速器の発明を完成させ、この発明に21世紀発明賞が与えられた。実際の応用を念頭に実機を展開する段階に入った。

6. 主な発表論文

1. T. Dixit, T. Iwashita, and **K. Takayama**, “Induction acceleration scenario from an extremely low energy in the KEK all-ion accelerator”, *Nucl. Inst. Meth. A602*, 326-336 (2009).
2. **K. Takayama**, Y. Arakida, T. Iwashita, Y. Shimosaki, T. Dixit, K. Torikai, “All-ion accelerators: An injector-free synchrotron”, *J. of Appl. Phys.* **101**, 063304-7 (2007).
3. T. Dixit, Y. Shimosaki, and **K. Takayama**, “Adiabatic damping of the bunch length in the induction synchrotron”, *Nucl. Inst. Meth. A582*, 294-302 (2007).
4. **K. Takayama et al.**, “Experimental Demonstration of the Induction Synchrotron”, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 054801-4 (2007).
5. Y. Shimosaki, **K. Takayama**, and K. Torikai, “Quasiadiabatic, Nonfocusing Transition-Energy Crossing”, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 134801-4 (2006).
6. **K. Takayama et al.**, “Observation of the Acceleration of a Single Bunch by Using the Induction Device in the KEK Proton Synchrotron”, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 144801-4 (2005).
7. Y. Shimosaki, E. Nakamura, **K. Takayama**, K. Horioka et al., “Beam-dynamic effects of a droop in an Induction Accelerating Voltage”, *Phys. Rev. ST-AB* **7**, 014201-7 (2004).
8. **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**, 601-610 (2004).

ホームページ等

<http://www-accps.kek.jp/Superbunch/>