

平成17年度科学研究費補助金（学術創成研究費）研究進捗状況報告書

ふりがな	たかやま けん	所属研究機関 ・部局・職	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授
研究代表者氏名	高山 健		

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
	英文	Experimental Demonstration of Induction Synchrotron: Super-bunch Acceleration and its Applications

研究経費 (直接経費) 18年度以降は内約額 単位:千円	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	総合計
	75,800	76,000	77,900	77,800	79,800	387,300

研究組織 (研究代表者及び研究分担者)

氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担 (研究実施計画に対する分担事項)
高山 健	KEK 加速器研究施設 教授	ビーム物理	研究統括、実証試験統括
木代純逸	KEK 加速器研究施設 教授	加速器物理	モジュレーター開発
和気正芳	KEK 低温工学センタ 助教授	低温科学	低温動作 SI サイリスタ搭載モジュレーター開発
山根 功	KEK 加速器研究施設 名誉教授	加速器物理	負水素レーザーストリッピング実証試験
作田 誠	岡山大 理学部物理学 教授	素粒子実験	スーパーバンチ利用物理実験と検出器の検討
堀岡一彦	東工大大学院 総理工 教授	パルス工学	誘導電圧波形制御システムの開発
佐藤 皓	KEK 加速器研究施設 教授	加速器科学	実証試験 (加速器電源担当)、インフラ整備
外山 毅	KEK 加速器研究施設 助教授	加速器物理	実証試験 (加速器運転)、ビーム不安定性解析
白形政司	KEK 加速器研究施設 助手	加速器科学	実証試験 (ビーム制御)
五十嵐進	KEK 加速器研究施設 助手	加速器科学	実証試験 (ビーム制御、電源担当)
荒木田是夫	KEK 加速器研究施設 助手	加速器工学	スイッチング電源の制御、実証試験 (全般)
中村英滋	KEK 加速器研究施設 助手	加速器科学	実証試験 (ビーム制御、入射取り出し機器担当)
志甫 亮	原子力研究所 主任研究員	プラズマ科学	誘導加速空洞設計、測定機器支援
前原 直	原子力研究所 副主任研究員	核融合科学	加速ビームモニタリング
江 偉華	長岡技術科学大学 粒子ビーム工学センター 助教授	パルス工学	パワー半導体素子の応用
鈴木敏一	KEK 加速器研究施設 助手	低温工学	レーザー共振器の製作

当初の研究目的 (交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。)
 誘導加速シンクロトロンを KEK 12GeV 陽子シンクロトロンを用いて実証する。
 この誘導加速シンクロトロンの特徴である長大なバンチビーム (スーパーバンチ) を形成し、加速を行なう。
 スーパーバンチビームの応用を併せて考究する。

本研究期間に明かにする項目

(1) 誘導加速装置一式 (高圧モジュレーターと加速空洞) の実機の確立。現在まで進んでいる R&D 2 号機のパラメータの最適化と、フィードバック機能等を付加して実機として仕様を満足する物を作る。パワー半導体スイッチング素子の開発は日進月歩である事を考慮して、より性能の良い物に置き換えながらこれを行う。

(2) 誘導加速装置による 12GeV 陽子加速器での段階的に陽子ビーム加速の実証。
 500MeV ブースターから入射した陽子ビームを既存高周波で捕捉し、誘導電圧で 8-10GeV まで加速する。
 500MeV ブースターから入射した複数の陽子ビームを誘導電圧で作るバリアーバケットで纏めて捕捉し、擬似的スーパーバンチを作り、各種ビームハンドリングの実証を行なう。
 誘導加速システムの増強を待って、上記スーパーバンチを 8-10GeV まで加速する。

(3) 負イオンから電子を剥ぎ取り陽子の形でバリアーバケットに詰め込むのに尤も効率的と考えられている、負イオンのレーザーストリッピング法の実証を米国ブルックヘブン国立研究所の 200MeV 負イオンビームを使って行う。

(4) 誘導加速シンクロトロンと Superbunch Hadron Collider でのスーパーバンチビームの加速・衝突に伴う、ビーム物理上と素粒子反応検出器側の新たな問題点の評価を行う。

(5) KEK-PS での実証実験の結果を踏まえて、それぞれの加速器 (Tevatron, J-PARC, LHC, SNS, RHIC) での具体的なビーム増強を提案する。

これまでの研究経過

本研究は、学術創成研究費の趣旨の3つの観点のうち、どの観点に主眼を置いて研究を行っているかについてお書きください。

発明されて60年の間素粒子・原子核実験研究を支えた高エネルギーの高周波シンクロトロンを越える研究道具として提案されていた誘導加速シンクロトロンの実証を目的に研究を遂行している。実証に必要な装置のそれまでのR&Dを大きく展開させ、ほぼ手作りに近い形で組みあげて来た。この研究で実現するまでは世の中に存在しなかった高繰り返しの誘導加速装置の開発、それを既存高周波シンクロトロンに導入してのハイブリッドシステム特有の加速ビームのハンドリング、加速ビームの挙動解析を含め全てが初めての経験であった。シニアメンバーを含めフルタイムで研究に参加する大学院生、支援研究員は自らが新たな加速器の歴史を切り開いて行くという高い志で従事している。研究の途上産まれた全種イオン加速器のアイデアを特許として出願したが、これが低エネルギーの加速器として実現されれば、医療用に各種の重イオンを供給出来る事から、産業界の注目を集め始めた。今後は、学術創成研究の研究課題と重複する技術要素をこの方面にも積極的に還元していこうと考えている。

研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、研究組織内の連携状況を含め、具体的に記入してください。

研究の主体（研究費配分、マンパワーを含め全体の85%）は誘導加速の実証試験に要する機器開発・製作、実証試験のためのインフラ整備、実証試験そのものに費やした。

(A) 誘導加速実証試験

初年度（H15）はそれまでほそぼそながら開発していたキーパイスのスイッチング電源（高圧モジュレーター）と誘導加速セルの試験結果が出揃うのを待った後、年度後半からベースに実機の製作を開始した。これらは年度最後に完成した。出力2.5kVの誘導加速装置一式4セットが揃った。単体毎の調整試験を次年度（H16）の6月に逐え、DC充電器、高圧電力線、スイッチング電源、伝送線、マッチング抵抗、誘導加速セルと連結しての総合試験を7月に終了、KEK 陽子シンクロトロン加速器（KEK PS）のビームラインにインストールしてのビーム無しの運転試験を9月に終えた。

この間、H15の夏、H16年始、H16年5月連休の加速器シャットダウン中を使って、一次受電ヤード、DC充電器を設置する電源棟、電源棟から地下の加速器トンネル内の配線、加速器トンネル内配電盤、ビームライン、冷却システム等の実証試験をするに当たって必要なインフラ整備を段階的に行なった。

H16年6月に先立ってインストールした誘導加速セルに対する陽子ビームのビームローディングの効果を測定し、誘導加速セルの基本電気パラメーター（インダクタンス、容量、抵抗）を掌握した。

H16年10月からH17年4月にかけて、3週間に一回の割合で24時間のスタデータイムを得て、以下の世界で初めてとなる円形加速器での誘導加速試験を順次実施した。研究の主体はKEK所属のスタッフと大学院生、支援技術者である。

- (1) 高周波で捕捉された陽子集束の入射エネルギー500MeVから8GeVまでの誘導加速試験
- (2) 500MeV入射エネルギーにおける誘導ステップ電圧による陽子集束の捕捉実証試験
- (3) KEK 陽子シンクロトロンでのトランジションエネルギー（6GeV）に於ける Focusing-free Transition Crossing(FFTC)の実証試験

現在、H17年夏にインストールする予定の第2期目の誘導加速装置3セットの試験とインフラ整備が実施されている。

(B) 他パワー半導体スイッチング素子を用いたスイッチング電源の開発

SIサイリスタを用いたスイッチング電源の実現のため、ゲート駆動回路の工夫によりSIサイリスタの1MHzでの高繰り返し動作試験を試みてきた。純抵抗負荷での試験ではオフ動作の問題を解決し、サイリスタ自身の冷却の問題を解決すれば実用に供する処までこぎつけた。この研究開発はKEKの低音工学センターと長岡技術科学大学のスタッフが連携して推進している。SiC-MOSFETを用いたスイッチング電源の開発は素子本体がまだメーカーから供給される段階に至っていないので、実証試験に入れられないでいるが、入手されるや直ぐに着手する準備は東工大堀岡研究室でなされている。

(C) スーパーバンチビーム力学の解明

RFバンチに認められないステップ誘導電圧で閉じ込められるスーパーバンチのビーム力学の特徴を順次明らかにしつつある。特にHead-tail不安定として知られている集団不安定の抑圧機構に集団を形成する粒子全体がmixingに貢献するという新しい知見を見出している。BNLのRIHCとKEK PSを対象にFFTCの有効性が理論/シミュレーションにて確認された。研究総括者、支援研究員、BNL研究者が連携を取って従事している。

(D) レーザーを用いた荷電変換実証試験

BNLとの共同研究として遂行中のこの研究は実証試験を開始しようとしている。BNLの200MeV Linacの下流ビームライン上にレーザー装置、ストリッピング磁石、H⁻イオン、H⁰イオン、H⁺イオンの検出系の設置を逐え、H17年5月より実証試験を開始する。研究分担者（山根）がこの日米双方から参加しているこの共同研究をリードしている。

その他

H15,16年度は研究の立ち上げと本格展開の序章という段階であった故、プロジェクト主催の国内研究会は関連する大学研究グループと技術を支える企業グループを集めてのワークショップとして以下の日程とテーマで開催して来た。

H15,04.24	KEK	研究立ち上げ記念
H15,06.27	東工大（大岡山）	スイッチング電源と誘導加速セル
H15,09.01	KEK	新しいスイッチング素子とその可能性
H16,02.25	東工大（すすかけ台）	スイッチング電源の問題点とスーパーバンチ物理
H16,12.22	KEK	実証試験報告会

研究会での議論の内容は他の学術創成研究に関連する事柄とも含め、以下のweb-siteで公開されている。

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

特記事項

〔 これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入するとともに、推薦者の期待がどの程度達成されつつあるかについて記入してください。 〕

第1期目の誘導加速装置のキーデバイスである繰り返し最大1MHz、出力20kWのスイッチング電源の完成が予定より少し遅れた結果、実証試験（ステップ1）の開始が2年目の秋になった。実証試験そのものは極めて順調に付き、ほぼ最初の2ヶ月で目的は達成した。結果は10、11月にヨーロッパで開催された国際会議で発表された。大型円形加速器での誘導加速の成功は衝撃を持って世界に迎えられた。

その後、継続して行なわれた実証試験（ステップ2を前倒しで行なった）では、加速するのにまだ十分な加速セルが揃っていないので500MeVの入射エネルギーに止まっているが、誘導加速電圧のみでの陽子バンチの閉じ込めに成功した。上記二つの結果で最終目標である誘導加速シンクロトロンの実証に必要なビームハンドリングの基本テクニックが独立ながら実証された。ハードコンポーネントであるDC充電器、スイッチング電源、誘導加速セル、伝送線、マッチング抵抗、制御系の組み合わせによる24時間連続運転はこの誘導加速システムの信頼性を証明した。即ち、エンジニアリングレベルでの稼働が要請される加速器で加速システムとしての市民権を得た事が特記される。誘導加速装置がパルス装置のカテゴリーに入る機器から構成されるという理由で、当初ノイズの問題が懸念された。ほぼ問題になるレベルでは無い事を確認しつつも、スタディーの結果ノイズの発生する条件等について新たな知見を得、対策をほどこした。一方、加速セルで発生させる誘導電圧はスイッチング電源内のバンクコンデンサー電圧がそのまま現れるが、その発生はスイッチング電源のオン/オフを決めるゲートパルスパターンで制御する。このパターンの親信号は周回するビームが作るバンチ信号を基にデジタルシグナル・プロセッサで作る。今回の研究で確立した技術（ゲートパルスの発生を時間的に制御する技術）により、荷電粒子を閉じ込める電磁石の任意励磁パターンを誘導加速で追従できる事が示された。この結果、slow cycle synchrotron でも rapid cycle synchrotron でも誘導加速は対応出来ることが分かった。

国際会議の後、米国のBNLとLBNL（誘導加速器研究の草分けであり、現在でもLLNLと共にこの分野の研究の総本山である。）において講演をおこなった。我々のSuper-bunch Hadron Colliderの最初の提案以来、BNLからはSuper-bunch RHICの可能性について興味を提示されていたが、今回の実証試験の成功を受けて、Super-bunch RHICと共にRHICのFFTC実現への協力を求められている。LBNLからは彼らの将来計画としての重イオンビームを用いたInertial Fusionの為にビーム圧縮実験としてKEK PSで誘導加速電圧を用いたバンチ回転の実証試験を求められている。一方、GSI（独）からは重イオンビームの加速器計画の中でLBNLからのリクエストと同様な事を行なうために誘導加速装置開発への協力要請を受けている。実証研究の途上開発された1MHzで動作するスイッチング電源を加速器やコライダーの他目的（ビーム・ビーム相互作用補償のためのワイヤーレンズ駆動電源、早い立ち上がりのキッカー電源）への応用についてCERN, Fermilabから協力要請を受けている。新たな研究分担者の参加を求めて支援を開始した。

上記実証試験を行なっていく過程で、以下の根本的に新たなイオン加速器の概念を認識するに到った。既存高周波では可変な周波数のバンド幅が有限であるため、そのバンド幅から大きく逸脱する低速の重イオンを既存RFシンクロトロンで加速する術は無かった。しかし、今回開発に成功したスイッチング電源で駆動する誘導加速セルで発生させる電圧はスイッチング電源をトリガーするパルスシグナルの時間制御だけで加速全体を制御できる。この事実から強収束加速器一台で陽子からウランまで加速出来る全種イオン加速器の概念を認識するに到った。これは学術創成研究の派生的な結果であるが、その影響は極めて大きいと判断している。早速、このアイデアとそれを支える要素技術（誘導加速シンクロトロンの実証に当たって開発して来た技術と共通）とを含めて4つの特許として出願した（特願2005-129387全種イオン加速器及びその制御方法）。サイクロトロンに代わって、全てのイオンをサイクロトロンでは全く不可能であったエネルギーまで加速できる事が最大の特徴である。KEK 500MeV ブースターシンクロトロンとKEK12GeV陽子シンクロトロンを全種イオン加速器へ改装して得られるイオンのパラメーター等の提示を行なった。国内外のイオン科学研究グループが重イオンビームの医学生物科学、医療への応用、RI薬品の製造、重イオン科学の新たな展開を検討し始めた。

研究成果の発表状況

〔 この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文（掲載が確定しているものを含む。）の全著者名、論文名、学協会誌名、巻（号）最初と最後のページ、発表年（西暦）及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。 〕

学術誌等

K.Takayama, K.Koseki, K.Torikai, A.Tokuchi, E.Nakamura, Y.Arakida, Y.Shimosaki, M.Wake, T.Kouno, K.Horioka, S.Igarashi, T.Iwashita, A.Kawasaki, J.Kishiro, M.Sakuda, H.Sato, M.Shiho, M.Shirakata, T.Sueno, T.Toyama, M.Watanabe, and I.Yamane, “Observation of the Acceleration of a Single Bunch by Using the Induction Device in the KEK Proton Synchrotron”, *Phys. Rev. Let.* **94**, 144801-4 (2005)

Ken Takayama, “Rewriting the rules on proton acceleration”, *CERN Courier* **45**, No.3, 22-23 (2005).

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).

W.Jiang, K.Yatsui, K.Takayama, M.Akemoto, E.Nakamura, N.Shimizu, A.Tokuchi, S.Rukin, V.Tarasenko, A.Panchenco, “Compact Solid-State Switched Pulse Power and Its Applications”, *Proc. of the IEEE* **Vol.92**, No.7, 1180-1196 (2004).

Y.Shimosaki, E.Nakamura, K.Takayama, K.Torikai, M.Watanabe, M.Nakajima, and K.Horioka, “Beam-dynamic Effects of a droop in an Induction Accelerating Voltage”, *Phys. Rev. ST- Accel. and Beam* **7**, 014201-8 (2004).

Y.Shimosaki and K.Takayama, “Halo formation at early stage of injection in high-intensity hadron rings”, *Phys. Rev. E* **68**, 036503-11 (2003)

Ken Takayama, “Induction acceleration looks to the future”, *CERN Courier* **43**, No.3, 19-20 (2003).

国際会議、学会

First CARE-HHH-APD Workshop on Beam Dynamics in Future Hadron Colliders and Rapidly Cycling High-Intensity Synchrotrons, CERN, November 8-11 (2004)

K. Takayama, “First Result of Induction Acceleration in the KEK Proton Synchrotron”, (invited talk)

33rd ICFA ADVANCED BEAM DYNAMICS WORKSHOP on HIGH INTENSITY & HIGH BRIGHTNESS HADRON BEAMS, Bensheim, Germany, October 18-22 (2004)

K. Takayama, “Progress in Induction Synchrotron R&D”, (invited talk)

Y. Shimosaki, “Halo-formation at an early stage of injection into high-intensity hadron rings”, (invited talk)

Y. Shimosaki, “Head-tail instability of a super-bunch”, (contributed talk)

Yamane, “POP experiment of laser stripping via a broad Stark state using BNL 200MeV H⁺beam”, (contributed talk)

European Particle Accelerator Conference (EPAC2004), Lucerne, Switzerland, July 5-9 (2004)

Y. Shimosaki et al., “Specific Beam Dynamics in Super-bunch Acceleration”, (poster presentation)

K. Torikai et al., “Induction Accelerating Cavity for a Circular Ring Accelerator”, (poster presentation)

14回加速器科学発表会、つくば国際会議場、11月11-13日 (2003)

高山健、「誘導加速シンクロトロンの実証研究」、(特別講演)

下崎義人、“BEAM-DYNAMICAL EFFECTS OF A DROOP IN AN INDUCTION ACCELERATING VOLTAGE”、(ポスター発表)

鳥飼幸太、「誘導加速シンクロトロン用1MHz誘導加速空洞の開発」、(ポスター発表)

16回SIデバイスシンポジウム、中野サンプラザ、6月13日 (2003)

高山健、「誘導加速シンクロトロンの概要とSIサイリスタの役割」(招待講演)

Particle Accelerator Conference (PAC2003), Portland, Oregon, May 12-16 (2003)

K.Koseki et al., “R&D Works on 1MHz Power Modulator for Induction Synchrotron”, (oral presentation)

K.Torikai et al., “Design Study of 1MHz Induction Cavity for Induction Synchrotron”, (poster presentation)

K.Takayama et al., “A POP Experiment Scenario of Induction Synchrotron at the KEK 12 GeV-PS”, (poster presentation)