

誘導加速シンクロトロンの実証研究

高山 健、学術創成研究グループ

高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

Abstract

A basic principle of the induction synchrotron, which is under development at KEK, is explained on comparison with that of the conventional RF synchrotron. Key technologies to realize this novel accelerator are an induction accelerating cavity and high-voltage pulse modulator. The present status of R&D works on these devices is introduced. Most attractive applications of this concept, such as a proton driver and super-bunch hadron collider, are briefly introduced.

1 緒言

次世代の大強度高エネルギー加速器として誘導加速シンクロトロンの概念[1]が提案された。この提案の中で、従来のRF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) 誘導加速空洞にパルスとして発生させる正負の誘導電圧のペアで縦方向(進行方向)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) 別種の誘導加速空洞に発生させる長パルスの誘導電圧でこの捕捉された状態のスーパーバンチを加速する。RFシンクロトロンが進行方向について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。上記RFシンクロトロンの動作原理の発明は1945年に遡る。以後、全ての円形高エネルギー加速器は全てこのRFシンクロトロンの方式が採用され、建設された。次章で述べる様にこの閉じ込め・加速方式では、粒子を補足出来る時間領域が原理的に制限され、且つ粒子の線密度が等方的では無いという欠点を有する。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の欠点が原理的に回避出来る。

この概念の最も魅力的な応用は次世代ニュートリノ物理に使うProton DriverとLHCやRHICのアップグレードプランとしてのSuper-bunch Hadron Colliderである。Super-bunch Hadron Collider[2]は次世代陽子コライダーであるVLHCの有力なオプション[3]としても考えられている。

この誘導加速シンクロトロンの概念を適用して、現在稼働中のKEKの12GeV陽子シンクロトロン(12GeV-PS)に必要な誘導加速装置を導入し、この加速・閉じ込め方式の実証試験が平成15年度より開始された学術創成研究プロジェクト「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」として計画され、実行に移すべき準備が進んでいる[4]。

誘導加速装置の心臓部は数kVの2次側出力電圧を持つ、磁性体を装荷した1対1のトランスである加速空洞とこれを駆動する高圧パルスモジュレーターである。加速空洞には加速粒子の周回周波数に同期して電圧を発生させねばならない。既に相対論的な速さを持った粒子を加速するわけだから、繰り返し周波数は概ね加速器周長に沿って走る光の回転周波数に等しい。例えば周長300mクラスの加速器であればCW1MHzの繰り返しが必要される。この小文ではこれまでに無かった加速器の原理、その応用、実証試験のアウトライン、キーデバイスのR&Dの現状を紹介する。

2 誘導加速シンクロトロンの原理

RFシンクロトロンではバンチ頭部と尾部にある粒子の感じる加速電場は重心のそれと異なる。バンチ頭部と尾部は夫々重心に対して減速および加速されるので、周回を繰り返す内に頭部と尾部は重心を中心にして位置の交代をする。この様な重心回りでの振動がシンクロトロン振動である。バンチ重心はいつでも一定の正の電場に晒されているので、バンチ全体として縦方向に閉じ込められながら加速される事が分かる。これがRFシンクロトロンの位相安定性と呼ばれる性質である。一連の縦方向の運動を重心回りの位相空間($\phi = \omega_{rf}t, \Delta p/p$)の運動として理解するならば、その特徴はより鮮明になる(ここで $\Delta p/p$ は理想粒子の運動量からのずれ、 ω_{rf} はRFの角周波数を表わす)。

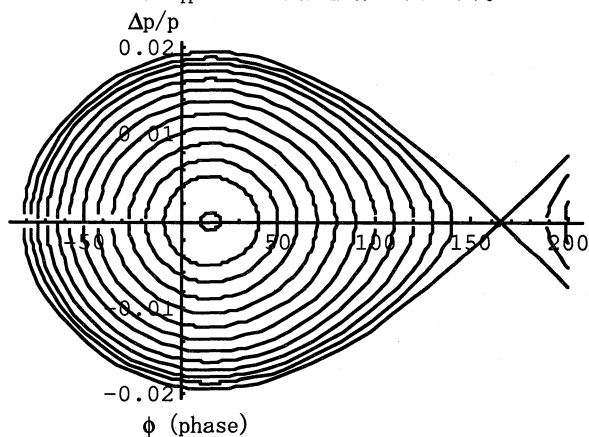


Figure 1 RF Bucket and phase orbit in the Phase-space ($\phi, \Delta p/p$)

正弦波の力を与えるポテンシャル内に置かれた粒子の軌道を示す。セパトトリックスの外側の粒子は安定に加速される事はない。又、加速器真空容器内で許容出来る運動量幅は有限(例えば $(\Delta p/p)_{max} = 1\%$ とか)であるので、実際に加速し得る粒子群の拡がりには位相空間上の面積 $2\pi (\Delta p/p)_{max}$ よりかなり小さい。これがRFシンクロトロンの限界である。

しかしながら縦方向の閉じ込めには必ずしも傾きを持った電場の存在は本質的ではない。図2に見られる様な重心に対して極性の異なる加速電場が存在しさえすれば十分である。誘導加速シンクロトロンでは誘導電圧の形でこれを実現する。この場合もバンチ頭部に至った粒子はバンチ重心に対して減速される。一方尾部に達した粒子は加速されるので、位相安定性は保持される。

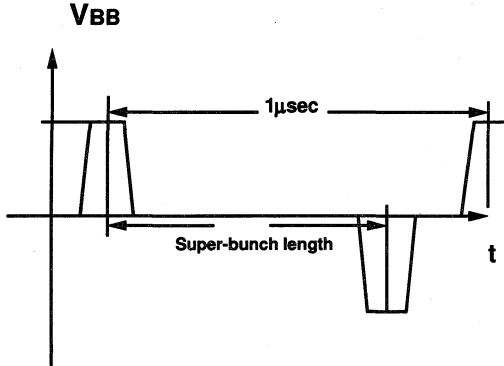


Figure 2 Barrier Voltage

しかし、この電場だけでは加速は出来ないので、別途加速電場を用意してやらねばならない。図3に見られる様な長いフラットトップを持った矩形に近い誘導電圧パルスの形で与えてやる。

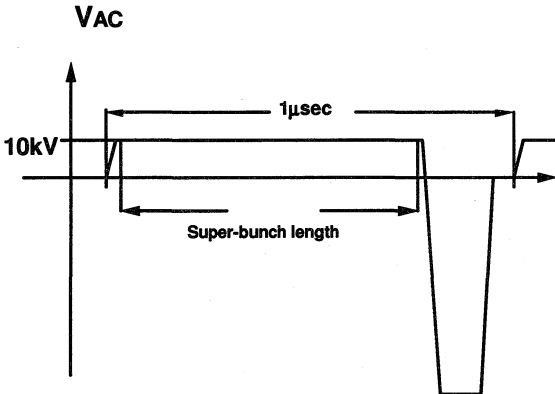


Figure 3 Induction Accelerating Voltage

この場合の位相空間における粒子軌道とセパトリックス (Barrier Bucket と呼ばれる) を図4に示す。軌道がほぼ矩形である事が特徴である。即ち、加速に有効に使える領域がRFシンクロトロンのそれに比較して大幅に増す。

$\Delta p/p$

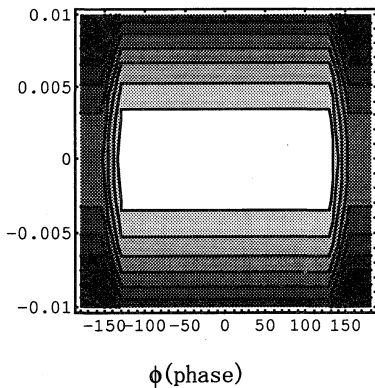


Figure 4 Phase space structure for the barrier bucket and contours

この事を加速器全体として視覚的に表現したものを図5に示す。そこには安定に加速出来る領域が示される。右の誘導加速シンクロトロンの長い安定領域に補足された粒子集団をスーパーバンチと呼ぶ。

位相空間で見るRFシンクロトロンと誘導加速シンクロトロンの違い

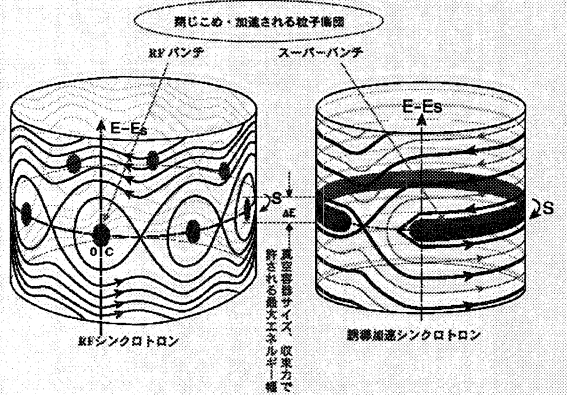


Figure 5 Difference between RF Synchrotron and Induction Synchrotron

ここで重要な事は、一般に加速器で加速出来る粒子数は進行方向とは垂直な方向の運動に与える空間電荷効果に支配される。即ち、粒子の線密度に一定の上限がある。従って、線密度をその上限以下に抑えて、全体の粒子数を増大させる為には縦軸方向、言い換えると時間軸方向に粒子を詰め込めれば、それだけ有効である事は自明である。誘導加速シンクロトロンで実現し得るスーパーバンチはこの目的に極めて良く合致する。

3 その応用

誘導加速シンクロトロンは既存のシンクロトロンのRF加速装置を誘導加速装置に置き換えるだけで済む故、その変更は難しくない。この様な既存RFシンクロトロンの誘導加速シンクロトロンへの変更案は既にKEK 12GeV-PS[5]やフェルミ国立加速器研究所のMain Injector[6]に対して提示されている。夫々、ビーム強度が2-4倍程度の増強になるであろうと試算。これは同規模の加速器2台分、4台分に相当するわけだから、実現すればインパクトは大きい。次世代ニュートリノ実験用の陽子駆動加速器への導入が期待される。

一方スーパーバンチ方式を採用したハドロンコライダーを2001年に提案した[2]。これは誘導加速シンクロトロンの自然な延長である。これをスーパーバンチハドロンコライダー(SHC)と呼ぶ。SHCが建設中のLHCやRHICのアップグレードプランとして注目を集め始めた[7]。このSHCでは上流の誘導加速シンクロトロンでスーパーバンチを作り、これを加速器複合体の最終段であるコライダーに蓄積し、このまま衝突させる方式を取る。コライダー全体に蓄積させる粒子数がRF技術を基礎にしたコライダーに比して20倍程度増やせるので、必然的にコライダー自身のルミノシティーも一桁以上大きくなる。既存RF技術を基礎にしたコライダーとSHCの質的違いを簡潔に図6に示す。

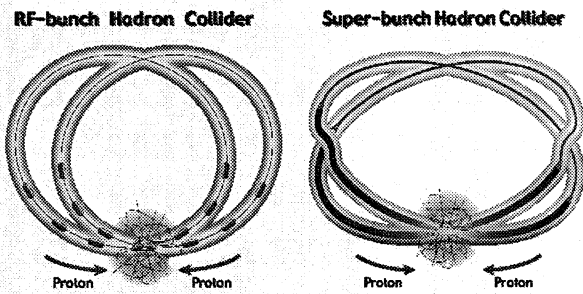


Figure 6 Difference between RF-bunch Hadron Collider and Super-bunch Hadron Collider

左が従来のコライダーであり、粒子バンチはその長さがほぼ 10cm 程度、約 5-7m の間隔で並ぶ、このようなバンチ形状と配置は RF バンチである事と、向かい合うバンチの衝突に伴う寄生的空間電荷効果による不安定性を回避する目的や、これまでの粒子検出モニターの技術的限界等によって決まっていた。この結果ビーム自身が加速器周長に実効的に閉める割合は 2-3% に過ぎない。一方、SHC ではバンチ自身は連続ビームに近い。その為、衝突するスーパーバンチは長い時間に渡って、相手側バンチが作る電磁場に晒される。寄生的空間電荷効果を避けるためには従来の衝突方式(単純に同じ平面で一定の角度を付けて交差させる)は採用出来ない。そこで、hybrid crossing (衝突点 2 か所とし、一か所は $s-x$ 平面での交差、もう一か所では $s-y$ 平面での交差)と inclined crossing (衝突点に於ける相手ビームの入射軸の $x-y$ 平面への射影が $\pi/4$ をなす。図 7 参照)が提案された [2, 8]。最近の多粒子シミュレーションと理論研究の結果はこれらの衝突の幾何と beam-beam tune-shift の関係を明らかにし、beam-beam tune spread の人為的操作の可能性を示唆している [9]。

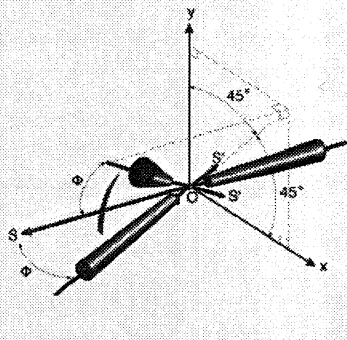


Figure 7 Inclined Crossing

又、最近のコライダーの性能の限界を決める大きな要素が、荷電粒子ビームを閉じ込める真空容器壁から放出される 2 次電子と周回する陽子ビームの結合運動による不安定性と陽子ビームの作る電場で加速された 2 次電子が壁に達して失うエネルギーの絶対量の大きさと看做されている。スーパーバンチは連続ビームに近いので、真空壁から離脱した 2 次電子が陽子ビームの空間電荷ポテンシャルに捕捉されても、運動の後、壁に帰還する時にはエネルギー保存則によって初期状態に戻る。即ち、新たなエネルギー

ギー負荷にはならないという原理的有利性を有している [10]。

4 実証試験スケジュール

学術創成研究プロジェクトでは 3 段階に分けて、誘導加速シンクロトロンの実証試験を計画している。第 1 ステップでは、500MeV ブースターからの 1 バンチを 12GeV 陽子シンクロトロンに既存 RF 空洞に励起した RF で捕獲する。この RF はバンチの閉じ込めのみ使用する。加速には別途用意する 4 連の誘導加速空洞(出力: 2.5kV/空洞)が用いられる。出力電圧は重畳され、粒子は周回当たり 10kV の加速電圧を受ける。誘導電圧のみで 8GeV のフラットトップまで加速する予定である。成功すれば、勿論世界で初めての試みとなる。次年度では第 2 ステップとして、初年度製作の誘導加速空洞に、新たに製作する物を加えて、誘導電圧をバリアー電圧として使い、バリアーバケットを作る。先ずブースターから 5 バンチ程度を入射し、既存 RF で捕獲する。最後のバンチの入射後、バリアー誘導電圧のトリガーをオンにし、RF 電圧を断熱的にオフにすると、5 バンチに極在していた粒子は互いにマージし、バリアー電圧のパルス間隔で決まる長大なスーパーバンチが出来る。パルス間隔を変更してスーパーバンチの長さを自在にコントロールするハンドリングの技術を試すと共に、これらの操作とバンチ拡散の関係等のスーパーバンチビーム物理の実験的検証が予定されている。最後のステップは、さらに製作する誘導加速空洞を加えて、ステップ 2 で素性の知れたスーパーバンチを 8GeV まで加速する。更に、この段階では、海外の研究所の陽子シンクロトロンやハドロンコライダーに誘導加速装置を持ち込み、そこでの実証試験を計画している [4]。

5 誘導加速空洞

緒言で言及した様に誘導加速空洞は図 8 に見る様に 1 対 1 のトランスである。

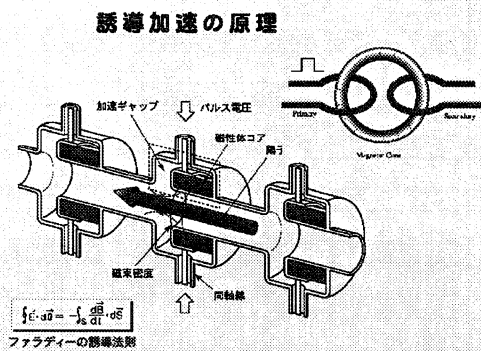
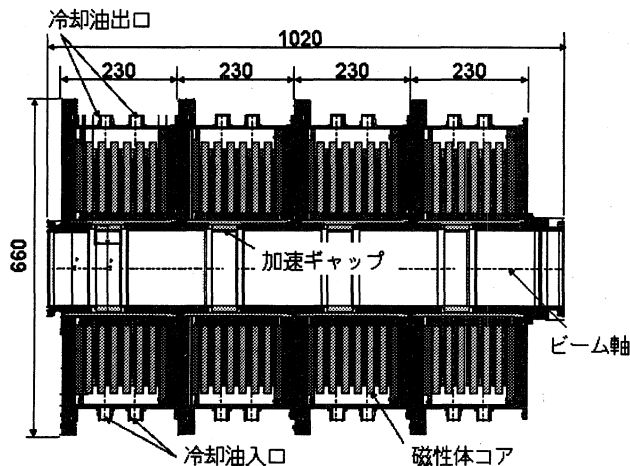


Figure 8 Principle of Induction Acceleration

2 重構造の円筒形の金属容器の内側に微細結晶合金 [11] で出来た磁性体を挿入する。この磁性体はこれまでのフェライトやアモルファス合金等の磁性体に比して、高い飽和特性と共に、マイナーループで動作させる限り、高周波による励磁に対してコアロスが小さいという特徴を持つ。最大 1 次側励磁電流 20A、2 次側電圧 2.5kV、パルス幅

250nsec、繰り返し最大 880kHz、デューティー50%運転でコアロスと渦電流によるロスが 15kW 程度と見積もられている。冷却は不可欠であり、絶縁油を強制対流させる。ビームが通過する真空容器側の加速ギャップにはセラミックを用い、油漏れによる高真空悪化を防止している。図 9 に POP 実験に用いる空洞を示す。

Figure 9 Accelerating Cavity Set (2.5kVx4=10kV)



加速空洞の電気設計は二つの側面から考慮される。空洞を駆動するのは高圧伝送ケーブル・高圧端子を介して接続する高圧パルスモジュレーターからの 1 次電流と 2 次側のビーム電流自身である。図 10 に示された等価回路から推察出来る様に、一次側にはパルス電圧が印加された時、負荷の回路定数に従って電流は流れ、ビームが見る電圧が決まる。

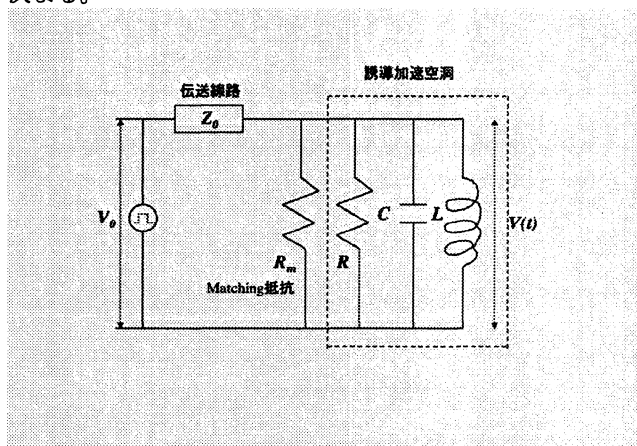


Figure 10 Equivalent Circuit for Driving System including Induction Cavity

負荷定数は磁性体のインダクタンスやロスに対応する抵抗、構造体を持つ容量成分であるが、矩形波の印加電圧に対して、2 次側電圧の立ち上がり、ドループ、立ち下りの特性を決める。主回路以外にも浮遊容量、浮遊インダクタンスが存在し、誘導加速電圧のリングングとして顕在化するが、この種の浮遊成分の低減化が計られる。一方、ビームと空洞との相互作用を考慮すると、空洞のカップリングインピーダンスが重要になる。特に、空洞の共鳴構造は非常に危険であり、 Q/R の低減化が計られる。

6 高圧パルスモジュレーター

高圧パルスモジュレーターが誘導加速シンクロトロンの実現に向けて鍵となるデバイスである。その回路構成とそのスイッチング動作の概略を図 11 示す。図のインダクタンスが誘導加速空洞を表している。

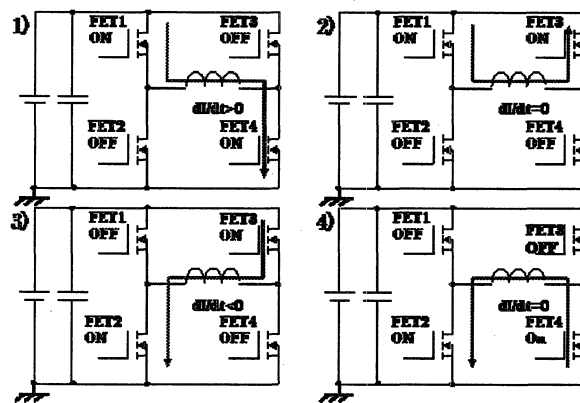


Figure 11 Circuit of Pulse Modulator and Its Trigger Sequence

緒言に言及した様に、現在スイッチングアームには MOSFET が直列に並ぶ。4 個のアームの夫々 2 個をペアにして要求されるタイミングで、同時に切り替える事で DC 充電器で常にチャージアップしている大容量コンデンサの電圧を負荷に印加する (左側上下)。一方、閉じたループに電流を流すシーケンス (右側上下) では負荷端に電圧は発生しない。このスイッチング動作を約 1MHz で加速中繰り返すわけであるから、MOSFET 自身での発熱も無視出来ない。水冷のヒートシンクに絶縁した MOSFET を貼付ける方法で熱の除去を行っている。開発の当初では通電していない MOSFET 自身のソースドレイン間のインダクタンスと容量を含めて、モジュレーター回路の浮遊のインダクタンスと容量成分の存在が負荷端の電圧にリングングとして顕著であった。これらの浮遊成分の低減化と高調波成分の除去が計られた。図 12 は 100Ω 抵抗負荷の場合の負荷端電圧と 1MHz 運転の様子を示す。

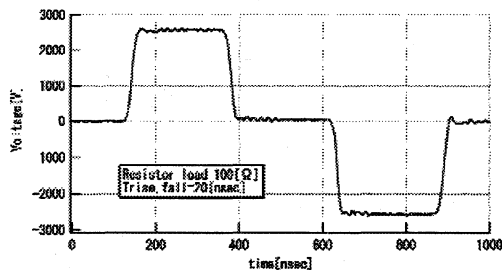


Figure 12 Output voltage for one period with 100 ohms of resistor load in quasi-CW operation. Vertical; 1kV/div, Horizontal; 200nsec/div

又、誘導加速空洞 R&D2 号機 ($R=150\Omega$, $L=53\mu\text{H}$, $C=300\text{pF}$ at 667kHz) に伝送ケーブル無しで接続した時の出力電圧を図 13 に示す。

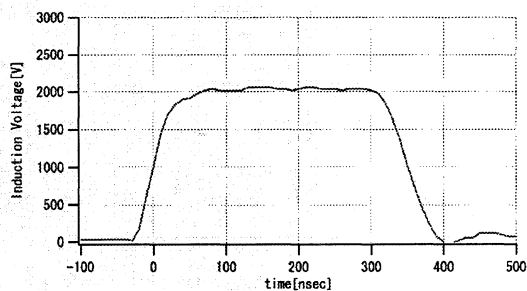


Figure 13 Output voltage with the induction cavity load
Vertical; 0.5kV/div, Horizontal; 100nsec/div

この高圧パルスモジュレーターの開発の現状は参考文献12に詳しい。

7 まとめ

以上、発明以来58年に亘って、高エネルギー加速器の屋台骨を支えたRFシンクロトロンに代わる、誘導加速シンクロトロンの特徴を整理し、その将来的応用について述べた。鍵となる技術、誘導加速空洞、それを駆動する高圧パルスモジュレーターの開発の現状を紹介し、KEK-12GeV PSでの実証試験について述べた。この論文で概説した事柄は来年Springerから出版する単行本「Induction Synchrotrons」中で詳説される。又、プロジェクト自体は機構のつくばキャンパス将来構想の一つとして候補に挙げられ、議論を深めつつある[13]。

謝辞

電源を含む誘導加速装置の開発と誘導加速シンクロトロンやSuper-bunch Hadron Colliderのビーム物理の展開はスーパーバンチグループのメンバー及び国内製造メーカーとの協力の下に行われて来た。平成12年にこの研究を開始して以来、木原元央前加速器研究施設長、菅原寛孝前機構長、木村嘉孝前物構研所長、山根功前加速器4系主幹、神谷幸秀現加速器研究施設長、佐藤康太郎現加速器4系主幹には研究の意義をいち早く認識して頂き、助成を賜った。平成14年度からは科学研究費「萌芽研究: 14654048, 特定領域研究: 140646221」と平成15年度からは学術創成研究費(15GS0217)によって支援されている。

参考文献

- [1] K. Takayama and J. Kishiro, "Induction Synchrotron", *Nucl. Inst. Meth.* **A451/1**, 304 (2000).
 [2] K. Takayama, J. Kishiro, M. Sakuda, Y. Shimosaki, and M. Wake, "Super-bunch Hadron Colliders", *Phys. Rev. Lett.* **88**, 144801 (2002). K. Takayama, "Super-bunch Hadron Colliders", Proceedings of RPIA2002, 39 (2003).
 [3] S. Peggs and M. J. Syphers, "Hadron Collider Working Group Report", Proceedings of Snowmass 2001, M4001. <http://www.slac.stanford.edu/econf/C010630/proceedings.shtm1#05>
 [4] K. Takayama et al. "A POP Experiment Scenario of Induction Synchrotron at the KEK 12GeV-PS", in

Proceedings of PAC2003, TPPB093.

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

[5] K. Takayama, "Intensity Doubler: A Proposal for a Major Upgrade of the KEK 12GeV-PS", Frontier Science Series No. 35, Neutrino Oscillation and their Origin (University Academic Press, Tokyo, 2000).

[6] K. Takayama et al. "Super-bunch Acceleration and its Applications", Proceedings of EPAC2002, 998-1000 (2002).

[7] F. Ruggiero (ed.) et al. "LHC Luminosity and Energy Upgrade: A Feasibility Study", CERN LHC Project Report, in preparation (2002). W. Fisher and M. Blaskiewicz, "Luminosity Increase at the Incoherent Beam-Beam Limit in RHIC", BNL Report C-A/AP/94 February 2003

[8] Y. Shimosaki, "Beam-beam Effects in the Inclined Super-bunch Crossing", Proceedings of RPIA2002, 126 (2003).

[9] Y. Shimosaki and K. Takayama, "Crossing Geometry and the Tune-spread in Super-bunch Hadron Colliders", to be submitted to *Phys. Rev. E*.

[10] F. Zimmermann et al., "Beam Dynamics Studies for Uniform (Hollow) Bunches or Super-bunches in the LHC: Beam-beam Effects, Electron Cloud, Longitudinal Dynamics, and Intrabeam Scattering", Proceedings of RPIA2002, 131 (2003).

[11] K. Torikai et al., "High Repetition Rate Induction Cavity", Proceedings of PAC2003, TPPB079.

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", 2003 加速器科学発表会

[12] K. Koseki et al., "R&D Works on 1 MHz Power Modulator for Induction Synchrotron", Proceedings of PAC2003, ROAC011.

[13] つくばキャンパス将来構想委員会答申、平成15年3月。