

平成18年度 学術創成研究費 研究終了報告書（事後評価用）

平成18年3月31日

ふりがな	もり よしはる	②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・客員教授 国立大学法人京都大学原子炉実験所・ 原子力基礎工学部門・教授					
①研究代表者氏名	森 義治							
③研究課題名（英訳名）	汎用 FFAG 加速器の応用と開発 (Study of FFAG as a Versatile Accelerator for Applications)							
④研究経費 (千円未満切捨)	年度	研究経費（千円）		使用内訳（千円）				
		交付額	支出額	設備備品費	消耗品費	旅費	謝金等	その他
	平成13年度	76,000	76,004	34,877	30,199	4,494	74	6,358
	平成14年度	76,000	76,000	31,494	15,705	5,370	2,795	20,634
	平成15年度	76,000	76,000	18,655	27,542	9,426	1,473	18,902
	平成16年度	76,000	76,000	47,710	—	8,583	14,236	5,469
	平成17年度	76,000	76,000	38,437	—	11,611	10,777	15,172
	総計	380,000	380,004					
⑤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）					
森 義治	高エネルギー加速器研究機構・ 加速器研究施設・客員教授 京都大学原子炉実験所・原子力 基礎工学部門・教授	加速器物理	全体総括					
柴田 徳思	日本原子力研究開発機構・量 子ビーム応用研究部門・特別 研究員	放射線物理	放射線設計・出射ビームモニター系設計開発					
仁木 和昭	高エネルギー加速器研究機構・ 加速器研究施設・助手	加速器物理	ビーム入射設計開発					
高木 昭 (平成18年7月28日追加)	高エネルギー加速器研究機構・ 加速器研究施設・助手	加速器物理	FFAG 高周波加速器開発					
榮 武二	筑波大学 臨床医学系陽子線 医学利用センター・助教授	医療物理	照射技術設計開発					
菊池 健	高エネルギー加速器研究機構・ 加速器研究施設・名誉教授	原子核・ 素粒子物理	加速器応用に関する研究助言					
町田 慎二 (平成18年1月24日辞退)	高エネルギー加速器研究機構・ 加速器研究施設・助教授	加速器物理	ビーム軌道解析・シミュレーション					
計7名								

⑥当初の研究目的

加速器の利用は、原子核・素粒子物理学の分野にとどまらず、物質・エネルギー科学、医学・生命科学、さらには環境科学等様々な方面で展開されようとしているが、ここに提案する FFAG 加速器は、そのいずれにおいても有用な汎用加速器である。ここでは、汎用性の要件として、効率、サイズ、コスト、運転の容易さ、フレキシビリティを考慮した。FFAG とは、Fixed Field Alternating Gradient の頭文字で、その名が示すように一定磁場でかつ強集束な光学系を有する。原理は大河千弘により 1953 年に世界で最初に考案されたが、技術的困難により今日まで実用的な加速器として成立していなかった。しかしながら我々のグループは、科学技術研究費補助金(基盤研究(A)(2) 高透磁率新磁性体加速空洞を用いた超高繰り返しシンクロトロン)の研究、平成 11 年度~13 年度)による開発研究により技術的困難を克服し、平成 12 年 6 月に、世界で最初の陽子ビーム FFAG 加速器を原理実証した。これに基づき本学術創成研究により、100MeV 級のエネルギーまで陽子を加速する FFAG 加速器の実用機実証モデルの開発と、それに必要な機器の開発を進め加速器システムとして完成させるとともに、この 150MeV FFAG 加速器からのビームを取り出し、そのビームを用いて、数ある応用分野のうち特に、医療(陽子ビームによる癌治療と診断)、環境保全・浄化(高強度電子・X 線ビームによる殺菌)への応用を目指した開発研究を行う。医療分野においては高繰り返しパルスビームによって可能となる“スポットスキヤニング”照射技術を目指した研究を行う。この技術は、従来の加速器では極めて困難であり、FFAG 加速器により初めて実用化可能と考えられる。これらの開発研究と超小型 FFAG 加速器にむけた FFAG 加速器用超伝導電磁石の開発研究をあわせて主たる研究目的とする。

⑦研究成果の概要

研究目的に対する研究成果を必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。

本研究の目的は大きく 3 つに分けられる。各目的に対する研究結果の概要を以下に纏める。

1) 150MeV FFAG 加速器の開発

本研究の柱となる 150MeV FFAG 加速器の開発は研究期間内に十分な成果をもって完了した。図 1 に完成した加速器の写真を示す。具体的には、新型 FFAG 電磁石である“リターンヨークフリー電磁石”12 台から成る FFAG 加速器本体を建設し、入射器サイクロトロンからの陽子ビームの入射、FFAG 加速器での加速とビーム取り出しを行った。加速器開発の集大成として、100Hz 高繰り返し運転に成功した。図 2 には 100Hz 運転時のビーム状況を示す。100Hz に相当する 10msec 間隔で入射、加速、取り出しが行われていることが分かる。加速エネルギーは、入射ビームエネルギーが 12MeV において最高 150MeV であるが、用いた入射器であるサイクロトロンのビームエネルギーが 10MeV であり、これに相当する所定のエネルギー(125MeV)までの加速を実現した。加速中のビーム損失については加速器の磁場の調整および加速高周波パターンの最適化によって、図 3 に示すように入射されたビームを 80%以上の効率で加速させることが出来た。また、ビームの取り出し効率も 90%以上を達成した。

これらの成果に基づき文部科学省の放射線発生装置としての施設検査に合格し、加速器システムとして確立するに至った。加速器開発を目的とした 150MeV FFAG 加速器が、放射線発生装置として認められたことの意義は非常に大きく、これにより次に述べるようなビーム利用実験が実現し、FFAG 加速器の実用化が“可能性”から“現実”となった。また、高繰り返し運転の実現にあたり重要な装置となる広帯域・高勾配加速空洞およびビーム取り出しキッカー用高繰り返し電源の開発も技術的に実現可能であることを実証し、今後のより高性能な FFAG 加速器開発に対して大きなブレークスルーとなった。

2) 医療、環境保全・浄化への応用を目指した開発研究

150MeV FFAG 加速器開発によって FFAG 加速器システムが確立したことを受け、医療、環境保全・浄化への応用を目指した開発研究を行った。医療への応用としては、高繰り返しビームを生成することが可能となったため、将来の粒子線がん治療において大きな期待を集めている高繰り返しパルスビームによるスポットスキヤニングの可能性が拓けた。スポットスキヤニングへ向けた基礎実験として、高繰り返しパルスビームの深さ方向線量分布測定を行い治療に適したブラッグピークを得ることができた(図 4)。

また、2次元的なスキヤニングにおいて、十分なビーム線量の安定性が得られることを確認した。これらの測定データをもとに、スポットスキヤニングを行った場合の線量分布を求めた(図 5)。同時に、スポットスキヤニングにおける測定装置の開発研究も行った。各スポットの線量、位置を精密に測定するためには、線量分解能が 1%、位置分解能が 1mm、データ収集速度が 1msec/spot という、高い性能が要求される。この要求を満たすには従来の方法の延長では難しいため、ここではファイバシンチレータと半導体ラインセンサを組み合わせた新しいタイプの測定装置の開発研究を行った。動作原理としては、ファイバシンチレータを短冊状に並べたものを粒子線が通過するときに発生するシンチレーション光を半導体ラインセンサで高速に読み出すというものである。詳細な検討を行うとともに、ファイバシンチレータを短冊状に並べたモデルを試作し、要求性能を十分に満たす装置が製作可能であることを示した。環境保全・浄化への応用としては、大強度電子 FFAG 加速器の設計を行った。150MeV FFAG 加速器と同様の手法で電磁石設計を行うとともに、大強度ビームを実現するために、加速方式としてベータトロン加速を採用することとして、誘導加速用コアの詳細設計を行った。

⑦研究成果の概要 つづき

3) 小型化へ向けた超伝導電磁石の開発研究

加速器応用において、加速器の小型化は強く期待されるところであり、電磁石の超伝導化により最大磁場を高くできるのでリングを小型にできる。また、超伝導電磁石を永久電流モードで駆動できるならば、消費電力も著しく低減でき加速器の運転コストを下げる事が可能となる。FFAG加速器は、シンクロトロンと異なり一定磁場（静磁場）であるので、電磁石を超伝導化する事が比較的容易である。一方で、従来の加速器では磁場は線形磁場を主体としたものであるのに対して、FFAG加速器に要求される磁場分布は、零色収差というビーム力学上の特性を満たすために高次の非線形成分を大きく含み、また、強い磁場勾配と大きな非対称性をもつ。

こうした磁場分布を超伝導電磁石で実現するために本研究では、超伝導コイルを非対称に配置した従来にない方式の超伝導電磁石を考案した。この方式を実現するための超伝導コイルの巻き線手法として、巻き枠に直接ボンディングする6軸のCNC（計算機制御による巻き線機）を新たに開発し、プロトタイプ電磁石を製作した（図6）。製作したFFAG加速器用プロトタイプ超伝導電磁石の磁場分布は、常温下およびヘリウム温度下での超伝導状態でそれぞれ測定し、必要とされる磁場分布が十分な精度で実現されていることを確認した。さらに磁場を発生する領域を実際にビームが通る領域に近い形とすることで、無駄の少ない電磁石を実現するために、口径形状を楕円形としたコイルも試作し（図7）、このような形状が技術的に可能であることを示した。これにより、楕円形状・大口径で高次の非線形磁場成分を大きく含む超伝導電磁石の技術的課題が解決され、これを用いた将来の超伝導FFAG加速器実現の可能性が大きく拓けた。

以上述べたように、150MeV FFAG 加速器の開発と応用へ向けた基礎実験ならびに将来の小型化・省エネルギー化へ向けた超伝導電磁石開発を完遂し、本研究の目的を十分に達成した。

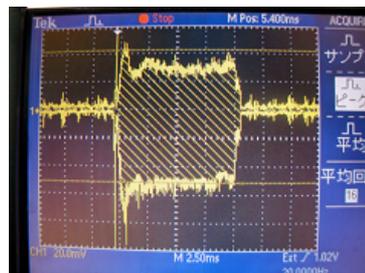
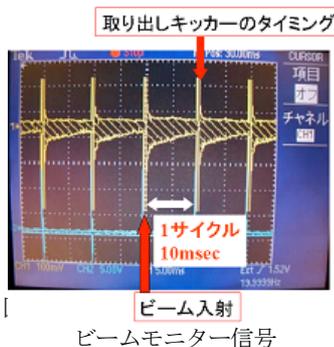


図3 ビーム強度信号：入射から取り出しまで

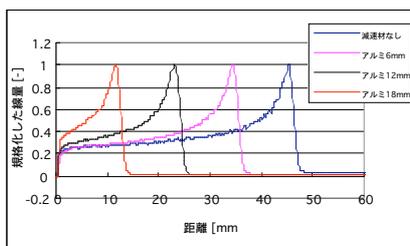


図4 深さ方向線量測定

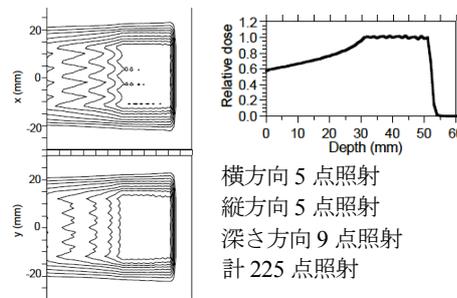


図5 実験で得られたスポット照射を合成した線量分布の例



図6 超伝導 FFAG 電磁石プロトタイプ



図7 楕円形超伝導電磁石コイル試作品

特記事項

こ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してください。

150MeV FFAG 加速器は、先に科学研究費補助金(基盤研究(A)(2) 高透磁率新磁性体加速空洞を用いた超高繰り返しシンクロトロンの研究、平成 11 年度~13 年度)によって我々のグループで開発された世界初の陽子加速原理実証 FFAG 加速器(PoP FFAG)に次ぐ世界で 2 台目の陽子 FFAG 加速器である。さらに特筆すべき点として、FFAG 加速器からのビーム取り出しは世界初である上、リターンヨークフリー電磁石が可能にした電磁石領域からのビーム取り出しは、本研究の独創性をより際立たせている。リターンヨークフリー電磁石は、FFAG 電磁石に必要とされる発散・集束・発散のビーム集束機能を一つにまとめることで通常の電磁石に必要なリターンヨークを省くという、これまでにない方式の電磁石である。この発明により電磁石の重量が大幅に削減された。また、ビーム取り出し部を原理的にリングのいかなる場所(電磁石中でも)にも設けることが可能となり、ビーム取り出し部の場所的制約を解放させるとともに加速器の小型化、取り出し機器の必要性能低減にも貢献した。

さらに、シンクロトロンに比べ桁違いの高繰り返しを実証したことは加速器科学的に大きなインパクトを与えた。従来のシンクロトロンは電磁石の制限からその加速繰り返しは一秒間に数 10 回(数 10Hz)が限界である。これにたいして、本研究の FFAG 加速器では 100Hz という高繰り返しを実証した。さらに、従来ビーム入射の際に用いられてきた断熱的ビーム捕獲に換わって、高効率高速捕獲という新しい手法を確立した。これによりビーム捕獲時間を大幅に低下させることが可能となり、将来の 1kHz 級の超高繰り返し運転の見通しを得た。また実際に FFAG 加速器の取り出しビームを用いた実験(スポットスキャニング等)を初めて行ったことで、将来の FFAG 加速器の可能性を大きく切り拓いた。さらに、FFAG 加速器用の大口径・非線形磁場分布を有する超伝導電磁石の基礎開発を行い、所定の性能を有する超伝導電磁石を製作した。以上の成果により、高エネルギーで大強度でかつ小形化が可能な加速器の実現性が現実のものとなった。

加速器におけるビーム力学上の新たな知見として、非線形共鳴の通過時におけるビームの振る舞いを理解する理論を発展させ、それを実験において具体的に検証することができた。これにより、非線形共鳴をエミッタンスの増加なく通過できるための条件を明らかとなった。これは FFAG 加速器でなければ行うことが困難な実験であり、これにより、新しい方式の FFAG 加速器(零色収差でなく“ノンスケールリング”FFAG と呼ばれる)への新展開が可能となった。

FFAG 加速器は、1953 年に大河千弘博士により発明され、当初より他の加速器にない大強度、高速加速等の長所を有した加速器として注目を集めたが、数多くの技術的困難のためにその後 50 年に亘って実用化出来なかった加速器である。本研究で開発した FFAG 加速器は、汎用性を目指した実用 FFAG 加速器の世界最初のものである。本研究における FFAG 加速器開発の成功を受けて、すでにいくつかの FFAG 加速器の建設及び開発応用研究が国内外で始まっている。将来の核変換や加速器駆動未臨界炉を目的とした京都大学原子炉実験所での FFAG 加速器施設の建設が行われており、FFAG 加速器と京都大学原子炉実験所の臨界集合体(KUCA)とをドッキングさせた世界初の加速器駆動未臨界原子炉の基礎実験が平成 18 年度に行われる予定である。また、大阪大学においてはミュオンの稀崩壊による標準理論を超える超対称性理論の検証実験素粒子実験のための高輝度ミュオンビーム生成用 FFAG 位相回転リングの開発(PRISM プロジェクト)が進められている。FFAG 加速器の特徴である“零色収差”を利用して、位相回転法によりミュオンのエネルギーを揃えることで測定精度を飛躍的に高める事を目的としている。また、がん治療において近年注目を集めている“硼素中性子捕獲療法(BNCT)”のための小型大強度中性子源の開発が NEDO の事業として始められている。これは、FFAG “イオン化クーラーリング”により出力 10MW 級の実験用原子炉に匹敵する中性子強度を得ようというものである。また、将来の高強度ニュートリノビーム計画(ニュートリノファクトリ)及びミュオンコライダーのためのミュオン加速器としての研究も本研究を契機として急速に進展している。

さらに、海外においては本研究を契機として急速に FFAG 加速器への関心が高まり、研究期間中には、毎年 2 回の FFAG 国際ワークショップ(全 11 回)開催され、その中で、新しいノンスケールリング FFAG の提唱等学問的に意義の深い議論が多くなされた。こういった機会を通して、FFAG 加速器の有用性が海外でも認知されるようになり、フランスにおける FFAG 加速器の粒子線がん治療応用への基礎研究や、イギリスでのミュオン加速へ向けたノンスケールリング FFAG 実証機開発では実際に研究予算を獲得するに至った。

⑨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（投稿中の論文を記入する場合は、掲載が決定しているものに限りません。）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、3頁以内に収めて記入してください。

1. Y. Mori, “Development of FFAG accelerators and their applications for intense secondary particle production”, Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. Sect. A, In Press.
2. S. Machida, T. Uesugi, M. Aiba, “Experimental simulation of resonance crossing in FFAG”, Nucl. Phys. B Proc. Suppl. Vol.155, pp.320-322, 2006
3. M. Aiba, S. Machida, Y. Mori, T. Uesugi, “Study of Resonance Crossing in FFAG”, Nucl. Phys. B Proc. Suppl., Vol.155, pp.328-329, 2006
4. T. Obana, T. Ogitsu, T. Nakamoto, K. Sasaki, A. Yamamoto, T. Orikasa, M. Yoshimoto, Y. Mori, “Magnet field design of a superconducting magnet for a FFAG accelerator”, IEEE Trans. Appl. Superconductivity, Vol.15, pp.1185-1188, 2005.
5. M. Yoshimoto, T. Ogitsu, M. Aiba, T. Obana, S. Machida, Y. Mori, “The magnet design study for the FFAG accelerator”, IEEE Trans. Appl. Superconductivity, Vol.14, pp.397-401, 2003.
6. S. Machida, “Design and particle tracking of FFAG”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A, Vol. 503, pp.322-327, 2003.
7. S. Machida, “Neutrino Factory design based on FFAG”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A, Vol. 503, pp.41-46, 2003
8. M. Aiba, M. Yoshimoto, Y. Mori, S. Machida, T. Yokoi, “Acceptance survey of FFAG accelerators for the neutrino factory”, Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. Sect. A, Vol. 503, pp.328-331, 2003.
9. Y. Mori, “Development of FFAG accelerators and their applications”, invited talk, AccApp05 Conference ,2005, Venice.
10. Y. Yonemura, N. Ikeda, M. Matoba, M. Aiba, S. Machida, Y. Mori, A. Muto, J. Nakano, C. Ohmori, K. Okabe, I. Sakai, Y. Sato, A. Takagi, T. Yokoi, M. Yoshii, Y. Yuasa, R. Taki, T. Uesugi, A. Yamazaki, M. Yoshimoto, “Development of FFAG Accelerator at KEK”, Proc. of PAC2005, pp.1943-1945, 2005
11. Y. Mori, “Development of FFAG accelerators”, invited talk, Cyclotron Conference, 2004, Tokyo.
12. Y. Yonemura, M. Matoba, M. Aiba, M. Sugaya, S. Machida, Y. Mori, A. Muto, J. Nakano, C. Ohmori, I. Sakai, Y. Sato, A. Takagi, T. Yokoi, M. Yoshii, M. Yoshimoto, Y. Yuasa, T. Uesugi, A. Yamazaki, “Commissioning of 150MeV FFAG Synchrotron”, Proc. of EPAC2004, pp.2640-2642.
13. M. Aiba, S. Machida, Y. Mori, “A study of Transverse Resonance Crossing in FFAG”, Proc. of EPAC2004, pp.2116-2118, 2004.
14. T. Yokoi, S. Machida, Y. Mori, A. Muto, J. Nakano, C. Ohmori, I. Sakai, Y. Sato, A. Takagi, T. Uesugi, A. Yamazaki, M. Yoshii, M. Yoshimoto, Y. Yuasa, M. Matoba, Y. Yonemura, M. Aiba, M. Sugaya, “Status of 150MeV FFAG Synchrotron”, Proc. of PAC2003, pp.3452-3454, 2003
15. Y. Yonemura, T. Adachi, M. Aiba, S. Machida, Y. Mori, A. Muto, J. Nakano, C. Ohmori, I. Sakai, Y. Sato, M. Sugaya, A. Takagi, R. Ueno, T. Uesugi, A. Yamazaki, T. Yokoi, M. Yoshimoto, Y. Yuasa, K. Koba, M. Matoba, Beam Extraction of the PoP FFAG with a Massless Septum, Proc. of PAC2003, pp.1679-1681, 2003.
16. A. Takagi, Y. Mori, J. Nakano, M. Sugaya, T. Uesugi, Radio Frequency Acceleration System for 150MeV FFAG, Proc. of PAC2003, pp.1231-1233, 2003.
17. Y. Mori, “Neutrino Factory in Japan: based on FFAG Accelerator”, Proc. of EPAC2002, pp.278-280, 2002.
18. J. Nakano, M. Aiba, K.Koba, S. Machida, Y. Mori, A. Mutoh, C. Ohmori, I. Sakai, Y. Sato, M. Sugaya, A. Takagi, R. Ueno, T. Uesugi, T. Yokoi, Y. Yonemura, M. Yoshimoto, Y. Yuasa, “150MeV Fixed Field Alternating Gradient and Return-yoke Free Magnet”, Proc. of EPAC2002, pp.1028-1030, 2002.

⑨研究成果の発表状況 つづき

19. T. Yokoi, M. Aiba, S. Machida, Y. Mori, A. Mutoh, J. Nakano, C. Ohmori, I. Sakai, Y. Sato, M. Sugaya, A. Takagi, R. Ueno, Y. Yonemura, M. Yoshimoto, Y. Yuasa, “Beam Injection and Extraction in 150MeV FFAG”, Proc. of EPAC2002, pp.1076-1078, 2002
20. M. Aiba, S. Machida, Y. Mori, A. Mutoh, J. Nakano, C. Ohmori, I. Sakai, Y. Sato, M. Sugaya, A. Takagi, R. Ueno, T. Uesugi, A. Yamazaki, T. Yokoi, Y. Yonemura, M. Yoshii, M. Yoshimoto, Y. Yuasa, K. Koba, “Study of Acceptance of FFAG Accelerator”, Proc. of EPAC2002, pp.1226-1228, 2002.
21. M. Yoshimoto, T. Adachi, M. Aiba, S. Machida, Y. Mori, R. Muramatsu, A. Mutoh, C. Ohmori, I. Sakai, Y. Sato, M. Sugaya, A. Takagi, R. Ueno, A. Yamazaki, T. Yokoi, Y. Yonemura, M. Yoshii, Y. Yuasa, “Dynamic Aperture of PoP-FFAG Proton Synchrotron”, Proc. of EPAC2003, pp.1320-1322, 2002.
22. M. Yoshimoto, T. Adachi, M. Aiba, K. Koba, S. Machida, Y. Mori, R. Muramatsu, C. Ohmori, I. Sakai, Y. Sato, M. Sugaya, A. Takagi, R. Ueno, M. Wada, T. Yokoi, M. Yoshii, Y. Yuasa, “Recent Beam Studies of the PoP FFAG Proton Synchrotron”, Proc. of PAC2001, pp.51-53, 2001.
23. Y. Mori, A. Takagi, K. Koba, “Multi-Beam Acceleration in FFAG Synchrotron”, Proc. of PAC2001, pp.588-590, 2001.
24. T. Adachi, M. Aiba, K. Koba, S. Machida, Y. Mori, A. Mutoh, J. Nakano, C. Ohmori, I. Sakai, Y. Sato, M. Sugaya, A. Takagi, R. Ueno, T. Uesugi, T. Yokoi, M. Yoshii, M. Yoshimoto, Y. Yuasa, “A 150MeV FFAG Synchrotron with “Return-Yoke Free” Magnet”, Proc. of PAC2001, pp.3254-3256, 2001.
25. 相場政光 他、150MeV 陽子 FFAG 加速器の開発とビームスタディー、日本物理学会、第 61 回年次大会、2006 年 3 月。
26. 岡部晃大 他、中性子捕捉療法用小型 FFAG の開発、日本物理学会、第 61 回年次大会、2006 年 3 月。
27. 森義治、Principle of FFAG ERIT、日本原子力学会、2006 年春の年会、2006 年 3 月。
28. 吉本政弘 他、150MeV-FFAG 加速器の研究開発、日本物理学会、第 60 回年次大会、2005 年 3 月。
29. 瀧玲子 他、イオン化冷却を用いた FFAG 中性子源、日本物理学会、第 60 回年次大会、2005 年 3 月。
30. 町田慎二 他、FFAG を用いたミュオン加速、日本物理学会、第 60 回年次大会、2005 年 3 月。
31. 米村祐次郎 他、FFAG 加速器の開発、日本原子力学会、2005 年春の年会、2005 年 3 月。
32. 横井武一郎 他、茨城県粒子医療センター用 FFAG 加速器、2005 年春の年会、2005 年 3 月。
33. 相場政光 他、共鳴を横切るときのビームダイナミクス、日本物理学会、第 59 回年次大会、2004 年 3 月
34. 米村祐次郎 他、FFAG 加速器の開発、日本原子力学会、2004 年春の年会、2004 年 3 月
35. 森義治 他、Neutrino Factory based on FFAG Accelerator、日本物理学会、第 58 回年次大会、2003 年 3 月。
36. 吉本政弘 他、PoP-FFAG シンクロトロン加速器におけるビームダイナミクスの実験 2、日本物理学会、第 58 回年次大会、2003 年 3 月。
37. 山崎明義 他、150MeV FFAG 加速器の建設の現状、日本物理学会、第 58 回年次大会、2003 年 3 月。
38. 上杉智教 他、二つの高周波バケツを用いた二段加速の研究、第 58 回年次大会、2003 年 3 月。
39. 米村祐次郎 他、Massless Septum を用いた PoP FFAG からのビーム取り出し、日本原子力学会、2003 年春の年会、2000 年 3 月。
40. 中野譲 他、150MeV FFAG 加速器の現状、日本原子力学会、2003 年春の年会、2003 年 3 月。
41. 菅谷昌広 他、ASTOR から FFAG への入射、日本原子力学会、日本物理学会、第 57 回年次大会、2002 年 3 月。
42. 吉本政弘 他、PoP-FFAG シンクロトロン加速器におけるビームダイナミクスの実験、日本物理学会、第 57 回年次大会、2002 年 3 月。
43. 湯浅由将 他、150MeV FFAG 陽子シンクロトロン用電磁石の磁場測定実験、日本原子力学会、2002 年春の年会、2002 年 3 月。

⑨研究成果の発表状況 つづき

44. 佐藤庸夫 他、150MeV FFAG への入射器サイクロトロンからの H⁺入射、日本原子力学会、2002 年春の年会、2002 年3月。
45. 米村祐次郎 他、150MeV FFAG への入射器サイクロトロンからの H⁻入射、日本原子力学会、2002 年春の年会、2002 年3月。
46. 相場政光 他、RF ノックアウトによる PoP FFAG synchrotron のベータトロンチューン測定、日本原子力学会、2002 年春の年会、2002 年3月。
47. T. Obana, “Study of Combined Function Superconducting Magnets Containing Higher Harmonics”, Ph. D. Thesis, Graduate University for Advanced Studies, 2006.
48. M. Aiba, “Study of Resonance Crossing in Strong Focusing Accelerators”, Ph. D. Thesis, Tokyo University, 2005.
49. 吉本 政弘、“固定磁場強集束シンクロトロン加速器中におけるビームダイナミクスの研究”、博士論文、同志社大学、2003。