

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400294

研究課題名(和文) F F A G 加速質量分析法の確立と $^{12}\text{C} +$ 天体核反応研究への応用研究課題名(英文) Development of a new method of mass analysis by the FFAG accelerator and its application to the investigation of the astrophysical nuclear reaction $^{12}\text{C} + \alpha$

研究代表者

池田 伸夫 (IKEDA, Nobuo)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：70193208

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：FFAG加速器を用いた高純度不安定核ビームの生成法を新たに提案した。その有用性を実証するため、九州大学FFAG加速器を用いた実証試験に向けた準備を進めた。FFAG加速器の広いアクセプタンスを保证するため、磁場補正用ポールサーフェスコイルの設計を行い、プロトタイプ製作・試験を行った。12セルの電磁石全ての磁場補正コイル実機が完成し次第、タンデム加速器を入射器とし、 $d(^{15}\text{N}, ^{16}\text{N})p$ 反応により生成した ^{16}N ビームの加速試験を実施する。本研究の成果をもとに高純度 ^{16}N ビーム加速を実証し、 $^{12}\text{C} +$ 天体核反応率の導出に必要な信頼性の高いベータ遅延アルファスペクトルの実験的導出に結びつけたい。

研究成果の概要(英文)：A new method of high-purity radioactive ion beam acceleration by a FFAG accelerator has been proposed. Development of the method using the FFAG accelerator in Kyushu University has been carried out. To ensure large acceptance of the FFAG, magnetic field correction coil of pole surface type has been designed and its prototype has been tested. Acceleration of radioactive ^{16}N produced by the $d(^{15}\text{N}, ^{16}\text{N})p$ reaction using a ^{15}N beam derived from the tandem accelerator is planned to be demonstrated after the completion of the fabrication of pole surface coils for 12 cells of the magnets. The beta-delayed alpha spectrum from ^{16}N reliable enough for the determination of the astrophysical nuclear reaction rate of $^{12}\text{C} +$ is expected to be obtained by the realization of high-purity ^{16}N beam applying the proposed method.

研究分野：応用原子核物理学、加速器科学

キーワード：不安定核ビーム FFAG加速器 大アクセプタンス 零色収差 天体核反応

1. 研究開始当初の背景

(1) 天体核物理学において、 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応は最も重要な反応の一つであり、星の寿命、最期の形態等、星の一生のシナリオを大きく左右する^①。 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 天体核反応率の E1 遷移成分は直接測定データに ^{16}N のベータ遅延アルファ連続スペクトル ($^{16}\text{N} \rightarrow ^{16}\text{O}^* \rightarrow \alpha + ^{12}\text{C}$) のデータを加えた R 行列解析により決定がなされているが、後者データについては異なる反応率を導く複数のデータがあり^{②-④}、 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応率が実験的に確定したとは言い難い状況にある。信頼性の高い ^{16}N ベータ遅延アルファ連続スペクトルデータの取得には高純度の ^{16}N ビームの生成が必須である。

(2) 九州大学加速器・ビーム応用科学センターに設置された固定磁場強集束 (FFAG) 加速器は加速器としては桁外れに大きなアクセプタンスを有した新型加速器である。研究代表者は、この特長を活かした新たな超高純度不安定核ビーム供給法を着想した。

2. 研究の目的

九州大学 FFAG 加速器を用いた新たなインビーム不安定核加速分析技術の確立を目指す。九州大学の FFAG 加速器は scaling 型の FFAG 加速器であり、理想的には零色収差が成り立っているため、広がったビームの加速において最重要となる広いアクセプタンスが保証される。しかし、実際の磁場分布は理想的分布からずれているため、アクセプタンスの低下が危惧される。磁場の補正によりアクセプタンスを保証し、高効率での不安定核加速を実証することが本課題の第一の目的である。最終的には本手法を ^{16}N からのベータ遅延アルファ連続スペクトルの測定に応用し、本手法の有用性を実証するとともに、 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 天体核反応率決定に重要な信頼性の高いスペクトルデータを供給することを目標とする。

3. 研究の方法

(1) FFAG 加速器のチューン制御法の開発を進める。垂直チューンについては磁場補正用磁極により制御し、水平チューンについては磁場補正用コイルを開発し、加速器半径方向 r に対し理想的な磁場分布である $B(r) = B_0(r/r_0)^k$ を再現することを旨とする。この2つの磁場補正によるチューン制御を介し、アクセプタンスの最大化を図る。

(2) 九州大学 FFAG 加速器入射用サイクロロンからの 5 MeV 重陽子ビームを用い、 $^{15}\text{N}(d, p)^{16}\text{N}$ 反応により 1.6 MeV ^{16}N を生成する。FFAG 加速器により $^{16}\text{N}^{1+}$ を選別、20 MeV まで加速し取り出す。それに向け、 ^{16}N 生成用標的箱を製作・設置し、また ^{16}N 加速に向け RF の広帯域化を進める。この加速条件は九州大学 FFAG 加速器の磁場強度を狭い範囲でしか変えられないという制限に基づき決定されたものである。

4. 研究成果

(1) 磁場計算に基づき垂直チューン制御用の磁極 (図1) を設計・製作し、12 セルの DFD 電磁石両端に取り付けた。10 MeV 陽子を用いたビームテストを行い、磁場補正磁極の取り付けにより計算を再現するチューン変化を観測した。



図1：磁場補正磁極

(2) DFD 電磁石の D 電磁石用磁場補正コイルを設計し、プロトタイプのコイル (図2) を製作した。このプロトタイプは5段構成の pole surface 型コイルであり、理想的磁場からのずれが大きい電磁石の内半径領域の磁場を補正する。この磁場補正コイルを実装し、磁場分布の測定を行なった結果、理想的分布に近い測定値を得ることができた。得られた実測値を基に水平チューンを評価した結果、図3に示すように、入射半径である $r = 440$ mm 以上の領域においてコイルなしの場合と比べチューンの変化量をきわめて小さく抑えることが可能という結果が得られた。この結果をもとに、12 セルの DFD 電磁石の D 電磁石全てに実装する磁場補正コイル実機的设计を行なった。今後 24 組のコイル実機を製作・実装した上で、ビームテストによりチューン制御の実証試験を行う予定である。

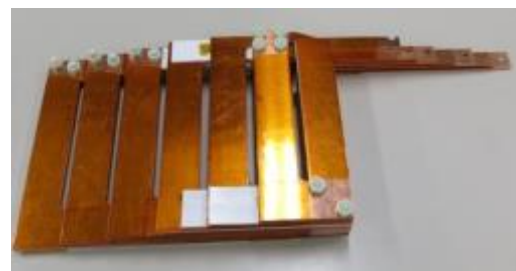


図2：磁場補正コイル

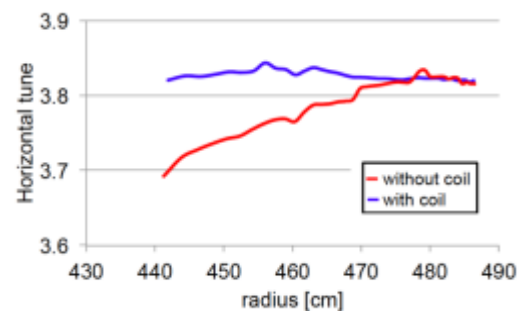


図3：水平チューンの評価値

(3) 本研究開始後、九州大学加速器・ビーム応用科学センターにおいて、FFAG 加速器用の入射器としてタンデム加速器が新たに使用可能となった。これにより、当初計画の FFAG 入射用サイクロトロンでは加速できなかった ^{15}N ビームの利用が可能となった。そこで、当初計画を変更し、逆運動学を用いた ^{16}N インビーム加速を採用することとした。入射タンデム加速器より取り出した 33 MeV ^{15}N ビームを CD_2 標的に照射し、 $^2\text{H}(^{15}\text{N}, ^{16}\text{N})^1\text{H}$ 反応により前方に集中し放出された $^{16}\text{N}^{7+}$ イオンを FFAG 加速器により 416 MeV まで加速する。逆運動学を用いることにより、d ビーム利用を想定した当初計画より約 3 桁の収量増が見込まれ、 ^{16}N のベータ遅延アルファ連続スペクトルの実測に十分な 2 次ビーム強度が達成できる見通しが得られた。さらに、FFAG 加速器へ入射する ^{16}N の速度を大きく取ることが可能となったため、従来の計画では現在の 1/10 の周波数帯域で RF 加速を行う必要があったのに対し、ハーモニクス 1 でも RF 周波数は約 1/2 となり、RF の広帯域化に対する困難が解消した。なお、本研究においては、RF 広帯域化開発としての難易度が下がったことに加え、ハーモニクス 2 で RF 周波数帯域を変える必要なく ^{16}N を加速でき、2 次ビーム強度は $1/\sqrt{2}$ に下がるものの運動量広がりも $1/\sqrt{2}$ に抑えたビームが得られるメリットがあることを考慮し、当初計画では RF 広帯域化に当てることを予定していた開発経費を磁場補正に向けることとした。なお、逆運動学利用への変更は ^{16}N 生成用標的箱に関し全く影響を与えない。当初の計画通り、標的箱を製作、ビームラインに組み込み、不安定核加速試験をすぐに実施できるよう準備を整えた。

(4) 円形加速器はそれ自体が優れた質量/電荷比分析装置として働く。FFAG 加速器は前述の通りアクセプタンスが大きく、本加速器を以って初めて不安定核インビーム加速への応用が可能となる。その一方、分析器としての性能としては他の加速器に比べ劣っており、FFAG 加速器による $^{16}\text{N}^{7+}$ 加速においては、 $^{16}\text{O}^{7+}$ 、 $^{32}\text{S}^{14+}$ など質量/電荷比及び速度が % オーダーで一致するものが同時に加速・引き出される。特に一次反応で同じく生成される ^{16}O は必然的に混入が避け得ない。当初計画の一次 d ビーム利用では取り出し ^{16}N ビームのエネルギーが低く、 ^{16}O の除去が不可能であったが、逆運動学の採用により取り出しエネルギーが約 20 倍に大きく取れたため、アブゾーバーの利用により極めて高純度の 2 次 ^{16}N ビームが得られる見込みが立った。ビーム取り出し後に 1 mm 厚程度の Al アブゾーバーを通してやることにより、 ^{16}N 以外はすべて停止し、160 MeV 即ち 10 MeV/A の ^{16}N のみが見込まれる。不純物は 1 mm 厚 Al での核反応生成物 0.1% 程度のみと評価される。縦方向 (運動量広がり) と横方向 (水平、垂直両方向への角度広がり) を同時に考慮したトラッキング・シミュレーション

により、取り出される 416 MeV ^{16}N ビームの強度は約 10^3 ions/10pA、運動量広がり最大 $\pm 1\%$ と評価される。今後、チューン制御に向けた磁場補正コイルの実機 24 組の製作・実装が済み次第、 ^{16}N 加速実証試験を行い、 ^{16}N のベータ遅延アルファ連続スペクトルを取得し、天体核反応 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ の反応率の最終決定に向け研究を進めていく。

<引用文献>

- ① W. A. Fowler, Experimental and theoretical nuclear astrophysics: the quest for the origin of the elements, Rev. Mod. Phys. No. 2, Vol. 58, 1984, pp.149-179 等
- ② R. E. Azuma et al., Constraints on the low-energy E1 cross section of $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ from the β -delayed α spectrum of ^{16}N , Phys. Rev. C 50, No. 2, 1994, pp.1194-1215
- ③ R. H. France III et al., Further measurement of the β -delayed α -particle emission of ^{16}N , Phys. Rev. C 75, No. 6, 2007, 065802 (7 pages)
- ④ X. D. Tang et al., Determination of the E1 component of the low-energy $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ cross section, Phys. Rev. C 81, No. 4, 2010, 045809 (14 pages)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 6 件)

- ① 米村祐次郎、有馬秀彦、池田伸夫、石橋健二、魚住裕介、執行信寛、野呂哲夫、森田浩介、寺西高、若狭智嗣、藤田訓裕、坂口聡志、岩村龍典、中山久義、高木昭、森義治、九州大学加速器・ビーム応用科学センターの現状報告 2016、第 13 回日本加速器学会年会、2016 年 8 月 8 日、幕張メッセ
- ② 本橋直也、有馬秀彦、池田伸夫、米村祐次郎、高木昭、中山久義、森義治、沖田英史、上田光貴、黒岩健宏、FFAG 加速器のチューン制御手法に関する研究、日本原子力学会 2016 年春の年会、2016 年 3 月 27 日、東北大学
- ③ Nobuo Ikeda, Present status of Center for Accelerator and Beam Applied Science of Kyushu University, International Workshop on FFAG Accelerator 2015, 14 September 2015, Nishijin Plaza
- ④ 米村祐次郎、有馬秀彦、池田伸夫、石橋健二、魚住裕介、執行信寛、是永忠志、野呂哲夫、森田浩介、寺西高、若狭智嗣、藤田訓裕、坂口聡志、岩村龍典、相良建至、中山久義、高木昭、森義治、九州大学加速器・

ビーム応用科学センターの現状報告、第12回日本加速器学会年会、2015年8月5日、プラザ萬象

- ⑤ Nobuo Ikeda, Status of Center for Accelerator and Beam Applied Science of Kyushu University, International Workshop on FFAG Accelerator 2014, 22 September 2014, Upton
- ⑥ 米村祐次郎、有馬秀彦、池田伸夫、石橋健二、魚住裕介、執行信寛、是永忠志、野呂哲夫、寺西高、若狭智嗣、藤田訓裕、坂口聡志、森田浩介、相良建至、中山久義、高木昭、森義治、九州大学加速器・ビーム応用科学センターの現状、第11回日本加速器学会年会、2014年8月9日、リンクステーションホール青森

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.cabas.kyushu-u.ac.jp/home/ja>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 伸夫 (IKEDA, Nobuo)
九州大学・工学研究院・教授
研究者番号：70193208

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

有馬 秀彦 (ARIMA, Hidehiko)
九州大学・工学研究院・助教
研究者番号：20253495

米村 祐次郎 (YONRMURA, Yujiro)
九州大学・工学研究院・助教
研究者番号：20452815

(4) 研究協力者

なし