

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18127

研究課題名（和文）ビームリサイクル技術のためのアクティブ内部標的の開発

研究課題名（英文）Development of internal active target for beam recycle technique

研究代表者

小川原 亮 (Ogawara, Ryo)

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号：00807729

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：ビームリサイクルとは生成数の少ない稀少な不安定核に対して精密な核反応研究を実現するために開発された技術である。ビームリサイクルでは不安定核を重イオン蓄積リングに蓄積し、核反応するまで内部標的に衝突させ続ける。しかし標的通過時にエネルギー分散と角度分散は増大していき蓄積が困難となる。それらの分散補正のために、蓄積粒子の情報を取得し適切なフィードバック信号を作成するためのアクティブ内部標的（IAT）の開発を行った。本研究ではMCPを用いたIATのプロトタイプ機と信号処理系の回路を開発し、その性能を評価した。その結果、IATに必要な仕様を明らかにし、また実装可能な信号処理系回路の開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したIAT、及びフィードバック用回路は新しい量子ビーム技術であるビームリサイクルに必要な不可欠であり、その技術開発を大きく進展させるものである。ビームリサイクルの開発が進むことで今まで実現困難であった不安定核実験が可能になるため、その根幹技術の一つであるIAT、及びフィードバック用回路の開発には大きな学術的意義がある。また、ビームリサイクルは生成した不安定核を無駄なく使用するための技術であり、ビームリサイクルと同様の実験を既存の方法で行う場合よりも消費電力が大きく改善される可能性が高いという社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）： The beam recycle technique is developed to realize precise nuclear reaction research with rare-radioactive isotope (RI). In the beam recycle technique, rare-RIs are accumulated in a heavy-ion storage ring and are continuously collisions with an internal target (IAT) until a nuclear reaction occurs. However, as the beam passes through the inner target, the energy and angular dispersion increases. This makes it difficult to accumulation rare-RIs in the storage ring. To compensate for these dispersions, we developed an active internal target (IAT) that acquires information about the accumulated rare-RIs and produces feedback signal. In this study, the prototype IAT using a MCP and feedback signal circuit were developed and their performances were evaluated. As a result, the specifications required for the IAT were clarified, and a circuit for a feedback signal processing was successfully developed.

研究分野：実験核物理

キーワード：アクティブ標的 不安定核 内部標的 ビームリサイクル 重イオン蓄積リング

1. 研究開始当初の背景

自然界に存在する安定核は約 300 種類であり、一方安定に存在できない不安定核は約 7000 種存在すると予想されている。不安定核は安定核と全く異なる特徴が多く発見されており、世界中で研究が進められている。ほとんどの不安定核は自然に存在しないため、一般的には加速器で加速された一次ビームを標的に衝突させたときに得られる核分裂片や核破砕片を利用して実験している。そのため不安定核は生成数が少なく、その生成量が実現可能な実験に制限を与えている。なかでも稀少不安定核と呼ばれる原子核は非常に興味深い性質が理論的に予想されているが、既存の実験方法では精密な核反応測定が困難である。既存の実験方法では一般的に不安定核ビームを固定標的に衝突させる。この時 99.9%以上の不安定核は核反応を起こさず標的を通過し、そのまま廃棄される。このような状況で十分な統計数を確保するため比較的厚い標的を用いており、また不安定核ビームは 1 次ビームに比べて運動量分散などが大きい。これらは両方とも測定精度を低下させる要因である。そこで、希少な不安定核を用いた精密な核反応実験を実現するためにビームリサイクル技術の開発が開始された。ビームリサイクルでは内部標的を実装した重イオン蓄積リングに稀少不安定核を蓄積し、不安定核が核反応を起こすまで内部標的に衝突させ続ける技術である。計算上 1 秒間の蓄積で 10000 倍以上の実験効率を達成することが期待できる。また、この方法であれば薄い標的の使用が可能であり、リングに蓄積するという性質上運動量分散の小さな不安定核ビームを用意することが可能である。しかし、内部標的を通過するたびにエネルギー損失が発生し、またエネルギー分散と角度分散も大きくなっていき蓄積が困難になってしまう。1 秒間蓄積するためにはエネルギー損失を補填し、エネルギー分散と角度分散を補正する必要がある。計算ではこれらの分散補正を行わなければ約 1 ms で蓄積できなくなるため、高速な分散補正が要求される。しかし、既存の技術ではミリ秒以下の時間で分散補正を行うことは困難である。そこで、ビームリサイクルでは蓄積粒子を一つ一つ区別してその状態を測定し、それぞれに適切な補正をリング周回毎に与える方法を考案し開発を行っている。その測定を行うためのデバイスがアクティブ内部標的 (Internal Active Target: IAT) であり、標的と検出器の二役を兼ねている。

エネルギー分散補正には IAT を通過したタイミング信号から生成したバイポーラ信号とシングルギャップの加速管を利用する。エネルギーによって IAT から加速管までの飛行時間が異なるため、平均的なエネルギーを持つ粒子が丁度バイポーラ信号のゼロクロス点で通過する様に信号を印可することで高いエネルギーを持つ粒子は減速され低いエネルギーを持つ粒子は加速される。この補正を周回毎に各粒子事に行うことでエネルギー分散を補正する (図 1)。

蓄積リングでは蓄積粒子は位置と運動量 (角度) の位相空間上を回転するため、IAT における位置情報は蓄積リングの特定の場所では角度情報に変換される。そこで、角度分散の補正では蓄積粒子が IAT を通過した位置を測定し、そこから得られたユニポーラ信号を平行平板電極に印可して偏向させることによって角度分散を補正する (図 1)。

これらの補正を正確に行うためには、蓄積粒子の情報を取得するための IAT の開発が必要不可欠である。

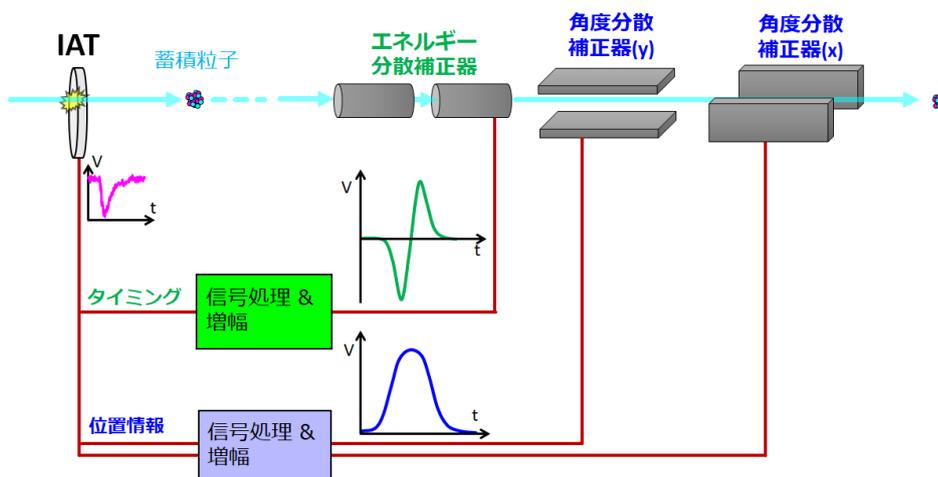


図 1 ビームリサイクル概念図

2. 研究の目的

本研究ではビームリサイクルに必要な性能を持つ IAT の開発とフィードバック信号を生成するための回路開発を目的とする。

3. 研究の方法

IAT に必要な性能は本研究申請時にシミュレーションによって見積り済みである。エネルギー分散補正用のタイミング信号の時間分解能は約 1 ns 以下であり、角度分散用の信号には約 1 mm 以下の位置分解能が必要とされる。また、IAT の基本的なデザインは図 2 の様になっており、標的から発生した二次電子を直行電磁場によって加速しつつ 180 度輸送し MCP によって検出する。本研究ではこの IAT を実際に開発し、その性能評価を行う。

ビームリサイクルではリング周回毎に補正を行うため、蓄積粒子がリングを 1 周する前にフィードバック信号の処理を行い補正器に印可する必要がある。現在の想定では 300 ns 以下で信号処理と信号増幅を行う必要があるため、その性能を満たすフィードバック信号の回路を開発する。

4. 研究成果

(1) IAT

十分な時間分解能と位置分解能と得るため、IAT の検出器には MCP とディレイラインアノードを採用した (図 2)。テスト実験には ^{241}Am から放出される α 線を使用し、また標的に穴の開いたマスクを被せることでイベントの発生位置を限定した測定を行った。まずは MCP に直接 α 線を入射する実験を行い、ディレイラインアノードで正しく検出できるかどうかを評価した。その結果、得られた分布はマスクの通りではなくやや歪みがあることが判明した。その原因を追究した結果、ディレイラインアノードのワイヤーの巻き方やクオリティに原因がある可能性が高いことが明らかになった。今回使用したディレイラインアノードは大きさなどの関係から適切な製品がなかったため研究室で作成した自作品である。したがって自由に改良が可能だが、実際にディレイラインアノードとしてのクオリティを向上させるにはそれなりに時間を取った R&D が必要であることが予想された。そこで、検出位置から補正量を求める方法よりもっとシンプルな方法で補正が可能かどうかの検討を進めた。その方法とは、粒子が IAT 上で直交デカルト座標におけるどの象限を通過したかのみ検出し、同じ象限で検出した粒子には同じ角度補正を与えるというものである。この方法では補正の精度がディレイラインアノードよりも低下してしまうが、アノードが 4 枚の板で簡単に作成可能である。また、シミュレーションによる検討でも後者の 4 枚アノードで十分な性能が得られることが明らかになり、今後はこの方法での信号読み出しを進めていく。

薄膜 (アルミニウムドマイラー) に α 線を入射し、磁場によって二次電子を 180 度輸送して検出する実験を行った。この時はまだ 4 枚アノードを検討する前だったので、ディレイラインアノードを使用した。本実験では、MCP で信号を確認することには成功したが、標的に被せたマスクの穴の分布を明確に検出することはできなかった。その原因としてバックグラウンドを検出している可能性が挙げられ、正しく標的を通過した α 線からのイベントを同定する必要があると考えた。そこで、薄膜通過後の α 線をプラスチックシンチレータで検出し、それに同期した信号を取得する測定系を構築した。しかし、薄膜でのエネルギー損失が大きくプラスチックシンチレータでの信号強度が想定より小さくなり S/N 比が低下してしまった。現在はより薄い炭素薄膜を用いた測定に向けた実験準備を行っている。

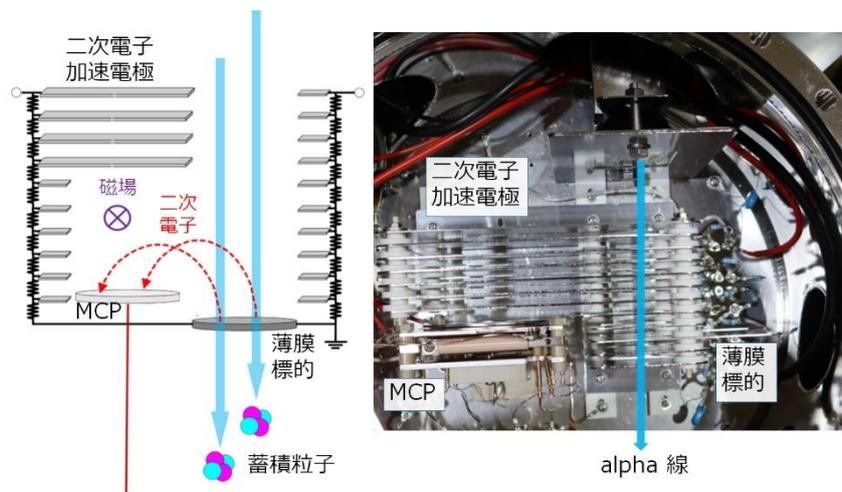


図 2 作成した IAT と概念図

(2) フィードバック信号回路

現在のビームリサイクル用リングでは周回時間約 690 ns を想定しており、IAT からエネルギー分散補正器や角度分散補正器まではほぼリング半周だとすると約 300 ns の間に信号処理を完了させる必要がある。図 1 に示した様にエネルギー分散補正器では両極のバイポーラ信号が必要であり、角度分散補正器には極性を高速かつ自由に選択可能なユニポーラ信号が必要である。本研究では高速で動作する FET (EPC 社製品 EPC8009) に注目し、それを使用したプッシュプル回路とゲート回路によってそれぞれの信号処理回路を作成した (図 3)。TTL のテストパルスを使用してこの回路の動作時間を測定した結果、入力 TTL に対して出力信号は僅か 1 ns 程度の遅延であり、十分に性能を満たす回路の開発に成功した。また、IAT から TTL 信号を作成する市販回路の遅延時間は実測で約 31 ns であった。またこれらのフィードバック信号は高周波電力増幅器によって信号強度を増幅させる必要があり、それには数百 MHz の帯域で約 50 dB のゲインが必要である。この性能を持つ市販品の性能を調査した結果、メーカーにもよるがおよそ 100 ns 以内の遅延時間という情報が得られた。また、フィードバック信号を補正器まで輸送する必要があり、現在の想定ではその距離は約 6 m である。輸送中可能な限り信号強度の減衰を少なくかつ高速で輸送するため、信号輸送には中空同軸管を採用した。実測での 6 m の信号輸送時間は 22 ns であり、上記の全ての信号処理時間を合わせると今回開発したフィードバック信号の処理システムの遅延時間は約 155 ns であり、当初目標としていた 300 ns という処理時間を大きく上回るシステムの開発に成功した。一方現状ではまだリングノイズ等が除去できていないため、このままでは誤作動を起こす可能性がある。したがって今後はフィルターなどを使用したノイズ低減の研究開発や、また補正器にフィードバック信号を印可する際遅延時間の微調整が必要となるため FPGA 回路の導入を進めたシステム開発を行っていく予定である。

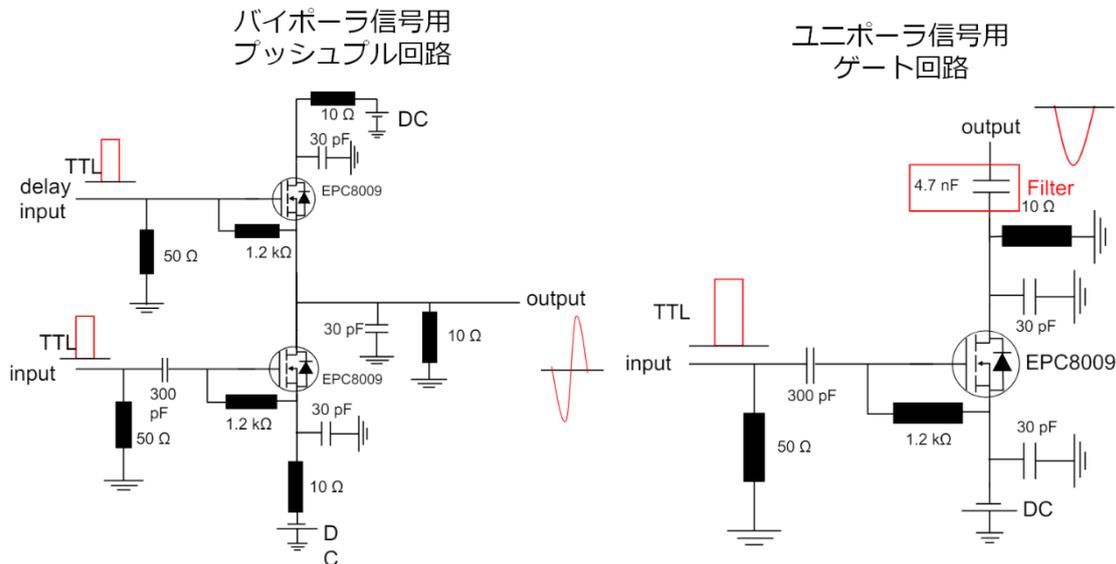


図 3 作成したフィードバック信号処理回路

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小川原亮
2. 発表標題 ビームリサイクル技術開発を目的とした重イオン蓄積リングRUNBAの動作原理
3. 学会等名 第19回日本加速器学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川原亮
2. 発表標題 ビームリサイクル技術における蓄積粒子のダイナミクス解析
3. 学会等名 第20回日本加速器学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小川原亮
2. 発表標題 稀少不安定核実験のためのビームリサイクル技術の開発進捗
3. 学会等名 第12回停止・低速RIビームを用いた核分光研究会(12th SSR1)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------