

成果報告書

多様なイオンによる高精度自在な照射技術の開発

平成23年5月

独立行政法人日本原子力研究開発機構

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、独立行政法人日本原子力研究開発機構が実施した平成22年度「多様なイオンによる高精度自在な照射技術の開発」の成果を取りまとめたものです。

成 果 報 告 書

1. 委託業務の内容

1. 1 委託業務の題目

「多様なイオンによる高精度自在な照射技術の開発」

1. 2 実施機関

住 所 茨城県那珂郡東海村白方字白根 2 番地の 4

機関名 独立行政法人日本原子力研究開発機構

1. 3 委託業務の目的

独立行政法人日本原子力研究開発機構が保有するイオン照射研究施設 (TIARA) の AVF サイクロトロン的高度化により、ビーム条件の切換え時間の大幅短縮を実現する。具体的には、高精度磁場測定技術の開発、磁場高度安定化技術の開発、位相プローブの高度化、等時性磁場自動形成技術の開発、M/Q 分解能向上技術の開発を順次進める。これにより、ビーム切換え時間を従来の 1/3 に当たる約 40 分で行えるようにする。さらに、これらのビームを用いるシングルイオンヒット等先進的イオンビーム技術の更なる高度化を行い、数百 MeV 以上の高エネルギーイオンの照射タイミング、水平方向照射位置及び深さを自在に変更可能な高精度イオンビーム制御技術を開発する。具体的には、2 次元的高精度高速ビーム照準技術の開発、シングルイオンヒット実時間計測・制御技術の開発、カクテルイオンマイクロビーム照射技術の開発を順次進める。これにより、イオンビームマイクロ・ナノ加工を始めとする利用研究を加速し、斬新なもの作り技術革新に繋げる。

このため、独立行政法人日本原子力研究開発機構、国立大学法人大阪大学、独立行政法人宇宙航空研究開発機構、独立行政法人放射線医学総合研究所と共同で業務を行う。さらに、新イオンビーム育種技術に関する研究開発については、連携相手を検討する。

独立行政法人日本原子力研究開発機構は、幹事機関として他の技術開発及び利用研究の参画機関との連携を図りながら、サイクロトロンの高度化と、シングルイオンヒット技術の高度化を実現する。

2. 平成22年度の実施内容

2. 1 実施計画

① サイクロトロンビーム条件切換えの短時間化

1)磁場高度安定化技術の開発：サイクロトロンの鉄芯温度の定温化により磁場を短時間で安定化する技術を開発するために、平成21年度に構築した鉄芯温度計測システムを用いて、鉄芯温度を制御するシステムを構築する。

2)短時間・高再現性励磁プロセスの開発：主磁場を迅速に高い再現性で短時間に設定するため、磁場補正システムを開発し、平成21年度に探索した励磁電流パターンを用いて実用的立上げプロセスを確立する。

3)等時性磁場形成技術の開発：計測したビーム位相から等時性磁場を高い精度で形成するために、ロックインアンプを用いたビーム位相計測技術の開発に着手する。

②シングルイオンヒット技術の高度化

シングルイオンヒットの実時間計測・制御技術の開発：平成21年度に構築した1個のイオンによるシンチレータの発光位置を検知する高感度 CCD システムを用いて、発光効率の高いシンチレータの探索を継続して行い、タンデム加速器などからのシングルイオンのヒット位置を実時間で測定可能なシステムを開発する。

③プロジェクトの総合的推進

事業の総合的推進としては、複数の研究機関・研究者で構成される技術開発及び利用研究ネットワークの有機的な連携を図り、各参画機関の研究責任者及びその幹事機関側のカウンターパートによって構成する研究推進協議会を主宰して、技術開発及び利用研究の方針の検討、進捗状況の確認等を行うことで、本研究開発計画全体の円滑な推進を図る。

2. 2 実施内容

①サイクロトロンビーム条件切替の短時間化

1) 磁場高度安定化技術の開発：

鉄芯温度の制御のため、24枚の銅製冷温水ジャケットと20枚の電熱式シートヒーターをサイクロトロンヨークの表面に密着させて設置した。温度制御機器を稼働させ、平成21年度に構築した鉄芯温度計測システムで得た実測温度を元に加熱や冷却を行い、鉄芯温度のフィードバック制御ができることを確認した。

2) 短時間・高再現性励磁プロセスの開発：

平成21年度に開発した迅速な主磁場形成のためのメインコイル励磁電流パターンの内、磁場強度の再現性が悪い低磁場に対して、平成20年度に開発した高精度磁場測定装置を用いて測定した磁場によりPID制御するシステムを開発した。両極性電源（最大電流±20A）で励磁できる5ターンの磁場補正コイルにより磁場のPID制御を行い、制御開始から3分以内に $\Delta B/B \sim \pm 1 \times 10^{-5}$ の再現性が得られるPID制御パラメータを構築した。当制御で迅速形成した磁場を用いて10MeV-Hビームが安定に加速できることを確認した（図1）。これにより、低磁場及び高磁場の両磁場領域において10分以内に高い再現性で励磁できるようになった。

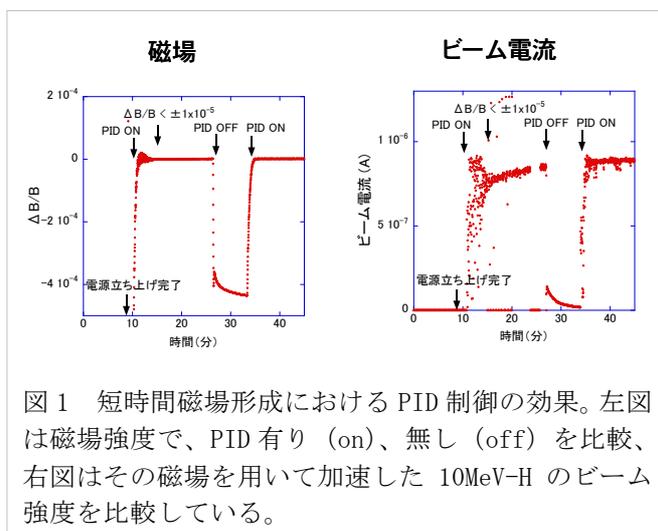


図1 短時間磁場形成におけるPID制御の効果。左図は磁場強度で、PID有り(on)、無し(off)を比較、右図はその磁場を用いて加速した10MeV-Hのビーム強度を比較している。

- 3) 等時性磁場形成技術の開発： 10個の位相プローブで検出したビームのタイミング信号からロックインアンプを用いてビーム位相を測定するシステムの構築を進めた。タイミング信号をオシロスコープで計測する従来方法の1/5程度の約1分で計測できること、及び両方法による測定結果が一致することを確認した。平成23年度に高速化・自動化を図って完成させる予定である。

②シングルイオンヒット技術の高度化

シングルイオンヒットの実時間計測・制御技術の開発： 発光強度の高いシンチレータの探索を引続き行った。まず、ZnS:Ag について、タンデム加速器で加速した 3MeV-Ni イオンを約 10 個/秒程度の強度でヒットした場合に、リアルタイム位置検出に十分な発光強度を有することが分かった (図 3)。また、ZnS:Ag と別の高感度なシンチレータとされる CaF:Eu とを比較した結果、発光強度の点でサイクロトロンにより加速した 260MeV-Ne を用いて前者の

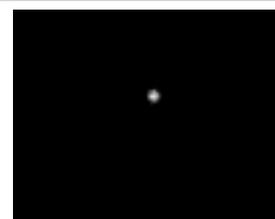


図 3 3MeV-Ni (約 10 個/秒の強度) による ZnS:Ag の発光。

発光強度が後者の約 3 倍であることを確認した (図 4)。ただ前者は、照射損傷による発光特性の劣化がより顕著であった。そこで、CaF:Eu について、膜中で入射イオンが止まる厚みのものを用いてイオンヒットによる発光の位置を観測した。320MeV-C を用いた測定では、検出個数が 60 秒で 315 個であった。同じビーム条件で、半導体検出器を用いた場合、検出される個数が 6 個/秒程度であったことから、検出効率は 88%であった。また検出位置の形状が、固体飛跡検出器 CR-39 の照射痕とほぼ同じであった (図 5)。これにより、ZnS:Ag や CaF:Eu を用いることにより照射位置を発光で検出できることが確認できた。今後、高感度カメラのレンズ、フレームレート、動画像解析法の最適化を行い、90%以上の検出効率を目指すとともに、検出位置精度の向上を行う。

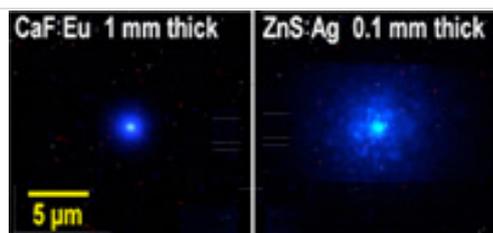


図 4 260MeV-Ne によるシンチレータの発光強度の比較。ZnS:Ag は CaF:Eu の約 3 倍の強度を有する。

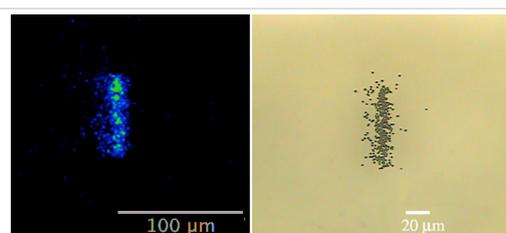


図 5 320MeV-C による、CaF:Eu の発光によって検出した位置 (左図) と、CR-39 の照射痕 (右図)。

③プロジェクトの総合的推進

研究推進協議会を平成 22 年 11 月 22 日に開催した。中核機関による①、②の進捗状況、計画当初からの参画機関である大阪大学によるサイクロトロン的高度化技術開発と、利用研究として進めてきた磁場解析・熱解析と微細加工技術の開発の進捗状況の報告を行うとともに、平成 23 年度より参画機関となる宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と放射線医学総合研究所を加えて進められる今後の開発の進め方や課題を議論し、本研究開発計画全体の円滑な推進を図った。

2. 3 成果の外部への発表

○「ビーム迅速切換のためのサイクロトロン磁場立ち上げ時間短縮」

宮脇 信正, 奥村 進, 湯山 貴裕, 石坂 知久, 倉島 俊, 柏木 啓次, 吉田 健一,
石堀 郁夫, 百合 庸介, 奈良 孝幸, 横田 渉, 福田 光宏、第7回日本加速器学会年
会、平成22年8月5日、兵庫県、ポスター発表

○ 'Microbeam complex at TIARA: Technologies to meet a wide range of applications' T.Kamiya, K.Takano, T.Satoh, Y.Ishii, H.Nishikawa, S.Seki, M.Sugimoto, S.Okumura and M.Fukuda, Nucl. Instr. Meth. B, in press.

2. 4 研究推進活動

1) 「第3回多様なイオンによる高精度自在な照射技術の開発研究推進協議会」

日時：平成22年11月22日（月） 15:00～18:30

場所：日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所
イオン照射研究施設討論室

議題：事業の進捗状況について
関連する研究開発プロジェクトについて
今後の事業展開と方向性について

2. 5 実施体制

1) 研究担当者

別表1の通り

別表1 平成22年度に於ける実施体制

研究項目	担当機関等	研究担当者
1. サイクロトロンビーム条件切替の短時間化	放射線高度利用施設部イオン加速器管理課 放射線高度利用施設部ビーム技術開発課 放射線高度利用施設部イオン加速器管理課 放射線高度利用施設部ビーム技術開発課 放射線高度利用施設部ビーム技術開発課 放射線高度利用施設部ビーム技術開発課 放射線高度利用施設部イオン加速器管理課 放射線高度利用施設部イオン加速器管理課 放射線高度利用施設部イオン加速器管理課 放射線高度利用施設部イオン加速器管理課 放射線高度利用施設部イオン加速器管理課	○横田渉 奥村進 倉島聡 宮脇信正 柏木啓次 百合庸介 奈良孝幸 石掘郁夫 吉田健一 湯山貴裕 石坂知久
2. シングルイオンヒット技術の高度化	放射線高度利用施設部ビーム技術開発課 放射線高度利用施設部ビーム技術開発課 放射線高度利用施設部イオン加速器管理課 放射線高度利用施設部ビーム技術開発課	◎○神谷富裕 佐藤隆博 横山彰人 江夏昌志
3. プロジェクトの総合的推進	放射線高度利用施設部ビーム技術開発課	◎○神谷富裕
(1) 利用研究		
①「半導体耐放射線性評価技術に関する研究開発」の連携推進	量子ビーム応用研究部門半導体耐放射線性研究グループ 量子ビーム応用研究部門半導体耐放射線性研究グループ	大島武 平尾敏雄
②「イオンビームナノ加工に関する技術開発」の連携推進	量子ビーム応用研究部門機能性セラミック材料研究グループ 量子ビーム応用研究部門機能性セラミック材料研究グループ	吉川正人 杉本雅樹
③「マイクロビーム生物効果解析に関する研究開発」の連携推進	量子ビーム応用研究部門マイクロビーム生体影響研究グループ 量子ビーム応用研究部門マイクロビーム生体影響研究グループ	小林泰彦 舟山和夫
(2) 研究推進協議会		
① 事務局	放射線高度利用施設部業務課 放射線高度利用施設部業務課 放射線高度利用施設部業務課 量子ビーム応用研究部門研究推進室 量子ビーム応用研究部門研究推進室	福田豊 野上大地 渡邊浩一 山形順 岡崎武人

注1. ◎:課題代表者、○:サブテーマ代表者

注2. 本業務に携わっている方は、全て記入。