

## 成果報告書

平成21年度量子ビーム基盤技術開発プログラム  
「多様なイオンによる高精度自在な照射技術の開発」

平成22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21  
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. 委託業務の目的

### 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21年度（報告年度）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を、コイル等の熱源からの遮熱の強化及び鉄芯温度の冷却水温度へのフィードバック制御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、鉄芯温度を精密に計測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の、励磁電流パターンの探索を中心とした励磁プロセスを開発する。

3)平成20年度に開発した広帯域のNMR（核磁気共鳴）プローブによるビーム加速中の磁場測定を実施する。

## 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：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。具体的には、発光効率の高いシンチレータを探索するとともに、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 システムを構築する。なお、CCD には独立行政法人日本原子力研究開発機構が所有する冷却 CCD を用いる。

## 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（成果）

### 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： 赤外線

サーモグラフィーでサイクロトロン鉄芯表面の広い面積の温度を測定するシステム(図1)と、鉄芯の80箇所を測定するシステムを構築した。後者では鉄芯の表面に貼付ける測温体と数cm内部に埋込む測温体を設置した。これにより、サイクロトロンのコイル電流や気温の変化に対する鉄芯の温度変化を長時間に亘って広範囲かつ精密に測定し、共同開発者である大阪大学が実施している熱解析と合わせることで、メインコイル等で発生する熱の伝達機構を明らかにして磁場を短時間で安定化させるための鉄心温度フィードバック制御法を具体化する目処が立った。

2)短時間・高再現性励磁プロセスの開発：メインコイル電流の設定値と磁場の時間変化との関係を調べ、メインコイル電流が低いほど一定磁場強度

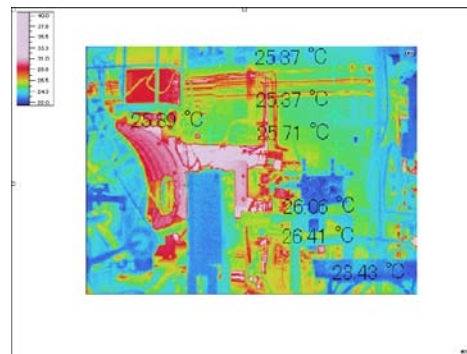


図1 赤外線サーモグラフィーによるサイクロトロン鉄芯温度測定例（上図）。下図は測定部分の写真。

への集束に時間を要することを見出した。これに基づいて、低磁場強度の場合はメインコイル電流を数分かけて最終値に近づけるパターンを、高磁場強度では直接最終値を設定するパターンを開発し、どの磁場強度でも励磁後10分程度で安定した磁場を設定することを可能にした。低磁場強度においては再現性が $\Delta B/B \sim 10^{-4}$ 程度と充分ではないが、PID制御を併用することで $10^{-5}$ に高められる見通しを得た。

- 3) ビーム加速中の磁場測定：平成21年度に開発した広帯域NMR（核磁気共鳴）プローブを用いて、 $320\text{MeV-}^{12}\text{C}^{6+}$ （最高磁場）や $10\text{MeV-H}^{+}$ （最低磁場）などの14種類のビームの加速中に測定を実施し、全磁場強度領域で加速中の磁場測定ができることを確認した。

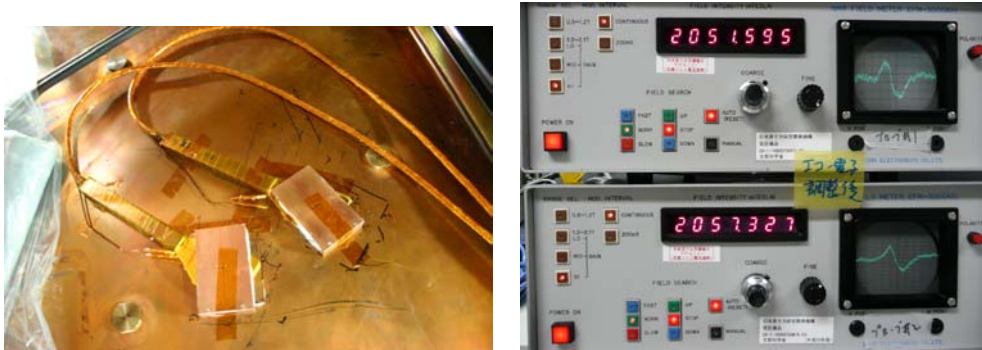


図2 加速中の磁場測定を行うための2台のNMRプローブ(左図)と、ビーム条件  $320\text{MeV-}^{12}\text{C}^{6+}$ での各プローブの磁場測定の際のコントローラにおける共鳴波形と磁場計測値表示の例(右図)。

## 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：シンチレータ、画像強度増幅器及び冷却 CCD カメラでシングルイオンヒット位置のリアルタイム検出システムを構築した。 $^{241}\text{Am}$ 線源からの $\alpha$ 線(5.5MeV)を用いて $\alpha$ 線のスポット形状等をリアルタイムで測定し、毎秒数ヒットでの位置検出が可能であることを確認した。

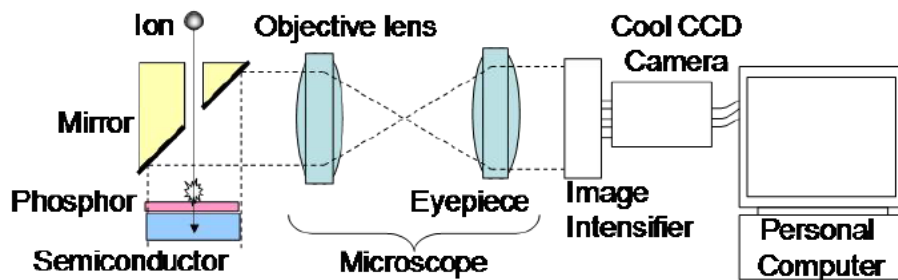


図3 シンチレーション光によるシングルイオンヒット位置リアルタイム検出(オフライン実験)

### 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平成 22 年 1 月 20 日に開催した。中核機関による①、②の進捗状況、共同研究機関である大阪大学による磁場解析・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、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

### ○「サイクロトロン磁場迅速切替のための磁場計測システム開発」

奥村進、宮脇信正、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 6 回日本加速器学会年会、平成 21 年 8 月 6 日、茨城県、ポスター発表

### ○「多様なイオンによる高精度自在な照射技術の開発」

神谷富裕、「量子ビーム基盤技術開発プログラム」シンポジウム、平成 22 年 1 月 25 日、東京、口頭発表

## 2. 4 研究推進活動

### 1) 「第2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 1 月 20 日（水） 13：30～16：00

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

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21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tron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 石堀郁夫 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	◎○神谷富裕 佐藤隆博
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・高分子材料耐放射線性評価研究グループ 量子ビーム応用研究部門半導体・高分子材料耐放射線性評価研究グループ	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物質選択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物質選択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細胞照射研究グループ 量子ビーム応用研究部門マイクロビーム細胞照射研究グループ	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 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 量子ビーム応用研究部門研究推進室	河田靖 福田豊 保東麻央 野上大地 武田智裕 山形順 須藤竜一郎

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。