

本報告書は、文部科学省の平成20年度科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立大学法人大阪大学が実施した平成20年度「多様なイオンによる高精度自在な照射技術の開発（高精度磁場・ビーム軌道解析技術の開発及び新規な概念に基づく単一粒子ナノ加工法の高度化の研究）」の成果を取りまとめたものです。

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」

(高精度磁場・ビーム軌道解析技術の開発及び新規な概念に基づく単一粒子ナノ加工法の高度化の研究)

2. 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。国立大学法人大阪大学では、ビーム条件の切換え時間の大幅短縮及びM/Q分解能の向上に関わる技術の研究開発

を実施し、本技術の実現に必要な理論及び解析プログラムの構築、データ解析等を担当する。これにより本技術開発で製作・使用する機器の詳細設計、改良、動作アルゴリズムの確立に資する。また、利用研究の面では、機能性有機分子の試作、機能性高分子含有イオン性液体の調査などを実施し、従来の単一粒子ナノ加工法によるナノ構造化試験を担当する。

3. 平成20年度の実施内容

3.1 実施計画

①高精度磁場測定のための3次元磁場分布解析技術の開発

NMRプローブによる高精度磁場測定を実現するため、一万分の一前後の磁場均一性が保証される磁極間隙内の領域を3次元磁場解析コードにより探索するとともに、磁場補正コイルの必要性を検討した上でNMRプローブの最適位置と設置方法等を決定する。また、等時性磁場形成に必要なトリムコイル磁場による半径方向の磁場勾配がNMRプローブによる磁場測定に与える影響を3次元磁場解析コードと磁場測定データを基に詳細に解析し、等時性磁場形成の短時間化を実現する制御法を開発する。

②単一粒子ナノ加工ターゲット材の開発・応用

ターゲット材となる機能性有機分子（架橋凝集性の有機分子及びそれと相溶性のある機能性低分子化合物の混合物）の試作、並びに機能性高分子含有イオン性液体の調査を行うとともに、これらを用いて従来の単一粒子ナノ加工法によるナノ構造化試験に着手する。

3.2 実施内容(成果)

① 高精度磁場測定のための3次元磁場分布解析技術の開発

3次元磁場解析コードOpera-3D/TOSCAを用いて、AVFサイクロトロンの加速領域の3次元磁場分布計算を行った。磁極形状等を図1に示す。

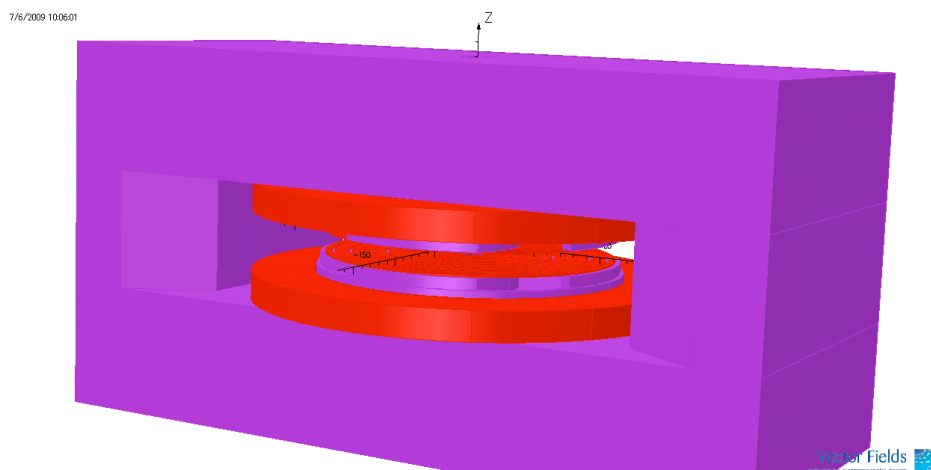


図1 3次元磁場計算コードOpera/TOSCAに用いた原研AVFサイクロトロン本体電磁石のモデル

NMRプローブは、サイクロトロン本体電磁石の中央水平面（Z=0mm）下方にあるアース板上に設置されることから、測定位置の高さ（Z=-62.5mm）における2次元平面内での磁束密度分布の解析を行った。260MeV 20Ne7+イオン加速の場合の2次元磁場分布を図2に示す。

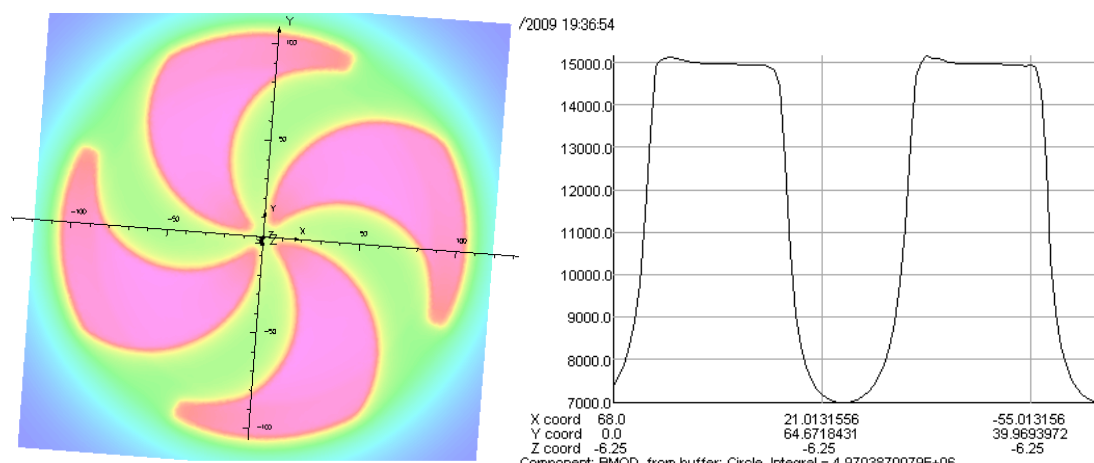


図 2 50MeV 4He2+加速の場合の Z=-62.5mm における 2 次元磁場分布(左図)と R=68cm における方位角方向の磁場分布 (右図)

NMRプローブの設置に最適な $\Delta B/B \sim 1/10,000$ 程度の磁場均一性が得られる領域は、方位角方向にはスパイラル・セクター磁極の中心線付近に位置し、半径が大きくなるに従ってその均一な平坦な領域は拡大することが確認できた。一方、半径方向の磁場分布は、加速に必要な等時性磁場の形成に依存し磁場勾配を持つものの、比較的磁場勾配の小さな領域はR=650~800mmに見出すことができ、原子力機構が実施したNMRプローブの計測可能位置の探索結果と矛盾しないことが確認された。この結果、高精度磁場測定を実現するために必要とされる磁場補正コイルの磁場補正量は、50G以上必要であることを明らかにした。

② 単一粒子ナノ加工ターゲット材の開発・応用

平成20年度の業務計画である、「ターゲットとなる機能性有機分子の試作」について、平成20年8月より着手し、poly(*n*-isopropylacrylamide) (NIPAM) 誘導体、poly(*N*-methylpyrrolidone) (PMPD) 誘導体、完全アセチル化cyclodextrin(CD)を目標化合物として選定した。特に、CDおよびNIPAMに関しては、それぞれの共重合化に取り組み、CD分子を効率的に取り込んだ高分子化合物を得ることができた。これらは、固体薄膜状態において放射線照射により効率的な架橋反応を引き起こし、すべての材料において高分子ゲルを得ることに成功した。

一方で、「機能性高分子含有イオン性液体の調査」に関して、上記高分子を非常によく溶解するイオン性液体として、Bismethylimidazolium-tetrafluorosulfonic acid (bmin-TFSI)を選定した。Bmin-TFSIは上記高分子材料を最大10 wt%程度まで溶解可能であり、液状化合物の単一粒子ナノ加工法による直接ナノ構造化の可能性を強く示唆する結果を得た。

3. 3 成果の外部への発表

S. Seki, S. Watanabe, M. Sugimoto, S. Tagawa, and S. Tsukuda; Multi-Functional Polymer Nanowires with Ultra-high Aspect Ratio Produced by Single Particle Nano-fabrication Technique; *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **21** (2008) 541-543.

S. Tsukuda, **S. Seki**, M. Sugimoto, S. Tagawa, and S.-I. Tanaka; SiC Nanowires Formed by High Energy Ion Beam Irradiation to Polymer Films and Heating; *J. Cer. Process. Res.*, **9** (2008) 466-469.

Y. Honsho, A. Asano, **S. Seki**, T. Sunagawa, and A. Saeki; Intramolecular Mobility of Holes along Rod-like Helical Si-backbones in Optically Active Polysilanes; *Synthetic Metal*, **159** (2009) 843-846.

M. Sugimoto, M. Yoshikawa, S. Tsukuda, and **S. Seki**; Synthesis of Ceramic Nano fiber from Precursor Polymers by Ion Beam Irradiation; *Trans. Mater. Res. Soc.*, **33** (2008) 1027-1030.

T. Kamiya, K. Takano, Y. Ishii, T. Satoh, M. Oikawa, T. Ohkubo, J. Haga, H. Nishikawa, Y. Furuta, N. Uchiya, **S. Seki**, and M. Sugimoto; Fabrication of Nanowires by Varying Energy Microbeam Lithography using Heavy Ions at the TIARA; *Nucl. Instr. Meth. B*, doi:10.1016/j.nimb.2009.03.043.

関 修平; 一つの粒子が引き起こす化学反応によるナノ造形; *放射線*, **34** (2008) 31-38.

3. 4 活動(運営委員会等の活動)

関 修平 25-26th International Conference on Photopolymer Science and Technology, 組織委員 プログラム委員

3. 5 実施体制

別表 1 に記載

別表 1 平成 20 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. 高精度磁場測定のための3次元磁場分布解析技術の開発	大阪大学 核物理研究センター	○福田 光宏
2. 単一粒子ナノ加工ターゲット材の開発・応用	大阪大学 工学研究科応用化学専攻	○関 修平

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。