

戦略的国際科学技術協力推進事業（日本－クロアチア研究交流）

1. 研究課題名：「ダイヤモンドの新しい応用に向けた高エネルギーイオンマイクロビーム技術の開発」
2. 研究期間：平成22年9月～平成26年3月
3. 支援額： 総額 14,938,000 円
4. 主な参加研究者名：

日本側（研究代表者を含め6名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	神谷富裕	独立行政法人日本原子力研究開発機構、原子力科学研究部門、高崎量子応用研究所、放射線高度利用施設部	研究主席
研究者	大島 武	独立行政法人日本原子力研究開発機構、原子力科学研究部門、量子ビーム応用研究センター 半導体耐放射線性評価研究グループ	グループリーダー
研究者	小野田 忍	同上	研究副主幹
研究者	牧野高紘	同上	研究職
研究者	加田 渉	国立大学法人理工学研究科 電子情報部門	助教
研究者	岩本直也	オスロ大学	ポスドク
参加研究者 のべ			13名

相手側（研究代表者を含め6名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	(Leader) Milko Jakšić	Ruder Bošković Institute, Department of experimental physics, Laboratory for ion beam interactions (LIIS)	部長
研究者	Stjepko Fazinić	LIIS	上級研究員
研究者	Marko Karlušić	LIIS	上級研究助手
研究者	Ivana Zamboni	LIIS	初級研究員
研究者	Natko Skukan	LIIS	加速器施設主任
研究者	Veljko Grilj	LIIS	助手
参加研究者 のべ			6 名

5. 研究・交流の目的

加速器から引き出された高エネルギーイオンビーム、すなわち高速で運動するイオン粒子束は、医療や宇宙開発において問題となる生体や半導体素子への照射影響に関する機構解明に不可欠なツールとなっている。そのような照射を効果的に行うには大気中に置かれた試料へのイオン一つの照射のタイミングおよび位置に関する情報をリアルタイムに取得することが求められており、本研究ではそのための新規検出器材料として薄膜型のダイ

ダイヤモンドを提案し、これを透過型の半導体検出器としたときの様々なイオン照射に対する電荷生成・収集応答特性やの放射線耐性の評価を行う。またイオンビーム照射がもたらすダイヤモンドのグラファイト化によるダイヤモンド中の導電性微細構造の創製による位置敏感型検出器への応用の可能性を検討する。

6. 研究・交流の成果

6-1 研究の成果

ダイヤモンドを半導体検出器とした場合の高い電荷収集効率と放射線耐性、さらにはケイ素やゲルマニウムに比べて極めて大きいバンドギャップを有する半導体であることに着目し、常温環境下でも低雑音で動作可能であるという特徴を有する特性から、これを用いた透過型検出器を高エネルギーイオン照射の個別計測・制御可能なシングルイオンヒットシステムを構成する要素技術として開発した。加えて極めて高い機械的強度を利してイオンビームを $1\mu\text{m}$ レベルの位置精度で大気中の生物細胞や半導体デバイス等に照射する際に高エネルギーイオンを真空から大気に引き出す窓としての機能を有するダイヤモンド薄膜を用いたシングルイオン検知器を新たに開発した。

原子力機構のTIARAおよびクロアチアRBIでの実験では、本交流事業により構築した研究者ネットワークにより実際に製作できた $5\mu\text{m}$ 厚さの単結晶CVDダイヤモンド薄膜を用いた透過型検出器について、双方で開発したマイクロビーム装置を相補的に利用して1-3MeV H⁺及び15 MeV O⁴⁺の局所照射を行うことにより、これまでに実験報告例がないイオンマイクロビーム照射下でのダイヤモンドの照射損傷耐性を評価した。具体的には $1.5\mu\text{m}$ 径の15 MeV O⁴⁺イオンビームを $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ の領域毎に順次照射を行いイオン誘起電荷のパルス信号を連続的に計測したところ、照射領域内でイオン照射量が多くなるに伴い、パルス信号の波高値が減少することが確認され、この現象は、試料内部の印可電圧のリセットにより復元すること（イオンマイクロビーム照射によりダイヤモンド結晶の表面や内部に形成された欠陥において、ポーラリゼーション効果の発現）を見出した。

結果として製作した透過型薄膜ダイヤモンド検出器は、 $5\mu\text{m}$ の薄さでイオンビームの大気取り出しのための真空窓として十分な強度を有し、検出効率として、低い線エネルギー付与（低LET）陽子でも高効率（100%）であることを確認し、膜を透過できるエネルギーをもつ粒子であればその種類によらず確実に検出可能であり、常温でかつ明光下で動作可能な半導体検出器であることを確認した。

また、単結晶CVDダイヤモンド薄膜に電気伝導性を有する黒鉛領域を形成するためのイオンマイクロビームによる任意パターン描画(PBW)を行うと同時に *in situ*での単色イオンビーム励起発光 (IBIL) 分析する手法を新たに適応して、特定の波長で観察することにより、単結晶CVDダイヤモンドの結晶構造が照射量に応じて黒鉛化していく様子を継続的に監視することに成功した。またPBW後のIBILの2次元画像からダイヤモンド上に描画された黒鉛化された領域のパターンとして視覚化した。これにより同検出器を位置敏感型にするための微細電極パターン形成に向けて一定の見通しが得られた。

これらの成果は、従来から行われていた大気中の生体や半導体デバイスへの照射効果評価実験の精度や効率を向上させるだけではなく、今後より高い照射精度が要求される粒子線治療におけるビームモニタリングや、宇宙の起源を探求するうえで欠かせない宇宙放射線計測あるいは高エネルギー物理実験に活用できる。

6-2 人的交流の成果

人材育成の観点では、日本側研究チーム内において中心的に研究を推進したポスドクの若手研究員2名が、それぞれ能力を発揮して、上記の研究成果創出に大きく貢献したとともに、現在国内外の大学に新たにポジションを得た。

人的交流のさらなる発展という観点では、研究代表者は、本研究成果を踏まえ、これを発展させるため、クロアチア側の研究者を協力研究に加えて、単結晶ダイヤモンド薄膜による位置敏感型イオン検出器の開発を目指した研究を提案しこれを科研費基盤（A）に申請して採択された。これにより、相手側の研究者や、ワークショップを契機に交流が深まった研究者を研究分担者や協力研究員として加えて、引き続き国際交流をしつつ研究を進展していくことが可能となった。

その他として最終年度のワークショップは、クロアチア側の研究チームが同じ RBI に所属しており、マイクロビームという共通のキーワードを有することもあり、同時期に採択された JST 受託戦略的国際科学技術協力推進事業日本-クロアチア研究交流事業のうちの 2 課題である「ダイヤモンドの新しい応用に向けた高エネルギーイオンマイクロビーム技術の開発」（代表者：神谷）、及び「高速重イオンマイクロビームによる先進的分子イメージング法の研究」（代表者：松尾京大准教授）の合同開催として、単独開催よりも規模を大きくでき、クロアチア駐日大使を特別ゲストとして会場である奈良東大寺文化会館にお迎えしてより盛大に開催することができた。

7. 主な論文発表・特許等（5 件以内）

相手側との共著論文については、その旨を備考欄にご記載ください。

論文 or 特許	・論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年 ・特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、出願番号、出願人、発明者等	備考
論文	V. Grilj, N. Skukan, M. Pomorski, W. Kada, N. Iwamoto, T. Kamiya, T. Ohshima, and M. Jakšic, An ultra-thin diamond membrane as a transmission particle detector and vacuum window for external microbeams, <i>Applied Physics Letters</i> 103, 243106 (2013)	共著
論文	V. Grilj, N. Skukan, M. Jakšic, W. Kada, T. Kamiya, Irradiation of thin diamond detectors and radiation hardness tests using MeV protons, <i>Nucl. Instr. Meth. B</i> 161, 446 (2013).	共著
論文	Wataru Kada, Akihito Yokoyama, Masashi Koka, Katsuyoshi Takanol, Takahiro Satoh and Tomihiro Kamiya, Ion-Beam-Induced Luminescence Analysis as Diagnostic Tool for Microstructure Patterning on Diamond by Proton Beam Writing, <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i> 51 06FB07 (2012).	
論文	W. Kada, T. Kamiya, N. Iwamoto, S. Onoda, V. Grilj, N. Skukan, T. Makino, M. Koka, T. Satoh, M. Jakšic, and T. Ohshima, Focused Microbeam Irradiation Effects in Transmission CVD Diamond Film Detectors, <i>Transaction of Material Research Society of Japan</i> , 38 , 279 (2013).	共著
論文	Wataru Kada, Naoya Iwamoto, Takahiro Satoh, Shinobu Onoda, Veljko Grilj, Natko Skukan, Masashi Koka, Takeshi Ohshima, Milko Jakšić, Tomihiro Kamiya, Continuous observation of polarization effects in thin SC-CVD diamond detector designed for heavy ion microbeam measurement, <i>Nucl. Instr. Meth. B</i> , In Press, Corrected Proof, Available online 3 February 2014	共著