

公益財団法人 若狭湾エネルギー研究センター

The Wakasa Wan Energy Research Center

研 究 年 報

平成30年度 第21巻

Annual Report of the Wakasa Wan Energy Research Center

Vol.21 2018



目 次

1. はじめに	4
2. 研究成果	5
2.1. エネルギー・環境分野	5
2.1.1. レーザー技術を応用した除染技術、切断技術の開発	5
2.1.1.1 廃止措置用レーザー除染装置の実証	5
2.1.1.2 ステンレス鋼のレーザー切断における粉じんと貫通光	7
2.1.1.3 原子炉施設の廃止措置等に利用するレーザー除染	9
2.1.1.4 レーザー切断時における粉じん移行データ取得・調査	11
2.1.1.5 レーザー加工パラメータ自動調節システム向け光検出器感度向上調査検討	13
2.1.1.6 高出力レーザー切断用レーザー遮断機構高度化調査検討	14
2.1.1.7 レーザー除染技術の土木建築分野への応用・実用化研究	15
2.1.1.8 耐放射性ロボットレーザー除染基礎技術開発および廃止措置人材育成のための操作実習	16
2.1.1.9 母材を傷めないレーザー加工	18
2.1.2. 未利用エネルギー利用技術開発	19
2.1.2.1 マグネシウムの酸化還元反応を活用した水素エネルギー循環サイクルの構築	19
2.1.2.2 バクテリアを用いた水素製造技術の導入調査	22
2.1.2.3 太陽炉と太陽熱エネルギー利用研究	23
2.2. 医療分野	24
2.2.1. 粒子線がん治療高度化のための生物応答解明研究	24
2.2.1.1 異種放射線の併用によるがん治療の高度化に向けた治療生物学的な検討	24
2.2.1.2 LET カウンターを用いた粒子線場における脳壊死形成に関するマイクロドシメトリ	26
2.2.1.3 子宮頸がんに対する粒子線治療の有効性と治療効果予測に関する基礎的検討	28
2.2.1.4 陽子線頭頸部がん治療における放射線性口腔粘膜障害の発症動態および病態の解析	29
2.2.1.5 細胞の放射線感受性を決定する情報伝達機構の解明	30
2.2.1.6 陽子線誘発バイスタンダー応答誘導メカニズムの解明に向けたヒト培養細胞における新規バイスタンダー因子の探索	32
2.2.1.7 陽子線治療に伴う癌免疫応答の解明と新規免疫放射線療法の開発	33
2.2.2. 粒子線照射技術の高度化研究	34
2.2.2.1 「放射線の見える化」膜の開発	34
2.2.2.2 粒子線の線質測定技術開発	36
2.3 農業・生物分野	37
2.3.1. 植物・菌類のイオンビーム育種研究	37

2.3.1.1	DNA 修復機構を利用した変異誘発促進技術の開発 - ATM、PARP1 欠損変異体の生存率に対する X 線照射、炭素線照射の影響 -	37
2.3.1.2	真菌類を用いた新規免疫賦活剤の開発	40
2.3.1.3	福井県での栽培に最適化した酒米“新山田錦”の育成	42
2.3.1.4	カバノアナタケによる抗糖化物質の生産とその解析	45
2.3.1.5	イオンビーム照射によるストックの育種	47
2.3.1.6	重イオンビーム育種技術の高度化	48
2.3.1.7	イオンビーム照射による高温耐性エタノール発酵糸状菌の構築	48
2.3.1.8	花卉園芸植物へのイオンビーム照射による新品種の育成	49
2.3.1.9	イオンビーム照射による有害元素低蓄積シイタケ菌株の作出	49
2.3.1.10	粒子線による突然変異を利用した野菜の品種開発	50
2.3.2.	生物資源のDNA情報・特性等の解析評価研究	51
2.3.2.1	福井県産生物資源の DNA マーカーの開発	51
2.3.2.2	福井県産生物資源の代謝産物分析	52
2.3.2.3	抗酸化活性評価法の開発	53
2.3.3.	植物工場関連技術開発	54
2.3.3.1	周年栽培可能な高品質ミディトマトの育成	54
2.3.3.2	植物育種の効率化を目指した DNA マーカーの開発	55
2.4.	多様な分野の活動を支える技術開発	56
2.4.1.	加速器技術の開発・高度化	56
2.4.1.1	若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状	56
2.4.1.2	シンクロトロンの出射制御系の開発	58
2.4.1.3	WERC シンクロトロンを用いたマルチバンド RFKO によるビーム取出し法の原理 実証実験	60
2.4.2.	加速器利用分析技術の開発・高度化	62
2.4.2.1	リチウム定量分析のための検出器効率測定とビーム電流計測装置の開発	62
2.4.2.2	大気雰囲気型反跳粒子検出法を用いたラジカル含有リチウム酸化物の常温水 分解による水素生成機構の解明	64
2.4.2.3	DLC 膜の医用応用のための親水性制御に関する研究	65
2.4.2.4	大気 ERDA を用いたセラミック中の水素分析	67
2.4.2.5	TOF-ERDA 測定における新型遮蔽体の導入による検出感度向上の試み	68
2.4.2.6	Micro-PIGE 法によるフッ素測定におけるバックグラウンド減少の試み	70
2.4.2.7	飛行時間型反跳粒子検出法による LiCoO ₂ 正極/LATP 固体電解質界面に おけるリチウムイオン伝導機構解析	72
2.4.2.8	フィルタードアーク蒸着法で作製した DLC 膜内の微量水素含有量	73
2.4.2.9	フッ化物含有材料から接着材を通した歯質内へのフッ素浸透	74
2.4.3.	放射線場で利用される機器・材料の評価技術開発	76
2.4.3.1	熱処理されたジルコニウム合金の微細組織	76
2.4.3.2	人工衛星搭載用半導体検出器とアナログ集積回路の耐放射線シミュレーション	78
2.4.3.3	プロトン照射が GaN HEMT の長期信頼性に与える影響	80
2.4.3.4	民生用シングルボードコンピュータの放射線耐性の検証と軌道上実証	81

2.4.3.5	宇宙放射線計測用 SiPM と CsI(Tl)シンチレーターの放射線耐性	83
2.4.3.6	宇宙機搭載用機器に対する高エネルギー陽子線照射技術の開発	85
2.4.3.7	低放射化建築用部材の性能評価研究	86
2.4.3.8	放射線遮蔽用可とう性材料の性能評価	87
2.4.3.9	超小型衛星搭載用電子機器の放射線耐性調査	88
2.4.3.10	イオン照射した V-xCr-1Ti 合金の照射硬化に及ぼすクロム添加及び不純物の影響	89
2.4.3.11	火星衛星探査機 MMX 搭載用撮像素子の耐放射線性評価基礎研究(2)	91
2.4.4.	材料技術の開発	92
2.4.4.1	水素の安全な輸送と取り扱いに利用可能な水素吸蔵合金の開発	92
2.4.4.2	ポリイミド系高分子ファイバーの開発	95
2.4.4.3	眼鏡型ディスプレイ用超小型レーザービーム走査ミラーのための磁性膜特性向上の研究	97
2.4.4.4	フレキシブル導電材料のための金属皮膜の耐久性向上に関する調査研究	98
2.4.4.5	超強加工による微細結晶粒金属材料の創製と評価	100
2.4.4.6	アルミニウム合金の転位と溶質原子相互作用の研究	101
2.4.4.7	Ag/ガラス界面の接合強度に与える界面微細構造の影響	102
3.	外部発表、特許、品種登録	104
3.1.	外部発表	104
3.2.	特許	109
3.3.	品種	109

1. はじめに

若狭湾エネルギー研究センターは、平成10年の開所以来、設立目的である「エネルギーに関連した科学技術の地域産業への普及等による地域活性化」のため、種々の活動を行ってきました。

平成30年度は、第4期中期事業計画において柱と位置付ける「研究開発」、「産業支援」、「人材育成・交流」に基づいて、以下の事業運営を進めました。「研究開発」においては、イオンビームによる育種技術開発、がん治療の最適条件探索、原子炉廃止措置におけるレーザー技術の応用、水素社会実現に向けた技術開発を行いました。また、「産業支援」では、原子力発電所廃止措置への県内企業参入に向けた情報交換会開催や嶺南地域の企業を中心とした新製品開発への支援、「人材育成・交流」では、IAEA 等と連携した諸外国技術者への研修や研究者受け入れ、国内大学院生の海外留学支援など、原子力人材育成に取り組みました。

当センター研究開発部は加速器室、生物資源研究室、粒子線医療研究室、エネルギー材料グループ、エネルギー開発グループ、レーザー技術開発室の6つのグループより構成されています。本書は、平成30年度に研究開発部で行われた研究の成果をまとめた研究成果報告集(研究年報)です。研究成果は大きく4つに分けられ、エネルギー・環境分野、医療分野、農業・生物分野、多様な分野の活動を支える技術開発に関するものです。エネルギー・環境分野における研究成果は、レーザー技術を応用した除染技術・切断技術の開発、水素エネルギーなど未利用エネルギーの利用技術開発などです。医療分野における成果では、放射線の複合利用による粒子線がん治療高度化のための生物応答解明研究、粒子線照射技術の高度化研究が挙げられます。さらに、農業・生物分野では、植物・菌類のイオンビーム育種研究、生物資源 DNA 情報等の解析評価研究、植物工場関連技術開発、そして、多様な分野の活動を支える技術開発では、加速器技術の開発・高度化、加速器利用分析技術の開発・高度化、放射線場で利用される機器・材料の評価技術開発、材料技術の開発などが挙げられます。特に、水素エネルギー開発のプロジェクトは平成28年度に新たに開始されたもので、3年目を迎えた平成30年度においては、バクテリアを用いた水素製造、水素吸蔵合金、水素エネルギーの循環サイクルの3つの研究開発に関する研究結果が報告されています。また、当センターの加速器が作り出す高エネルギーイオン放射線場は、宇宙における放射線環境を模擬できることから、宇宙機搭載用機器の材料評価や材料開発に有用であり、そのニーズも高まっています。これらの研究成果の多くは、学術的な新知見や実用化に貢献できるシーズとして提供できるものと期待されます。

当研究センターにおいて、平成30年度の活発な研究活動を推進することができましたことは、ひとえに関係者の皆様方のご支援とご指導によるものであり、厚く御礼を申し上げます。職員一同、これまで以上の努力を重ね、より高度な研究開発とその成果の産業・社会への還元を目指していく所存ですので、今後、さらなるご支援、ご鞭撻のほどをよろしくお願い申し上げます。

令和元年10月

公益財団法人 若狭湾エネルギー研究センター

所長 岩瀬 彰宏

2. 研究成果

2.1. エネルギー・環境分野

2.1.1. レーザー技術を応用した除染技術、切断技術の開発

2.1.1.1

廃止措置用レーザー除染装置の実証

Demonstration of Laser Decontamination Equipment for the Decommissioning of Nuclear Power Plant

門脇春彦^{*1}

Haruhiko KADOWAKI

Abstract

The laser decontamination test was conducted for stainless specimens, and we have obtained decontamination data such as the surface removal depth and the size distribution of dust particles. To apply the laser decontamination technique to the decommissioning of nuclear power plants, an equipment for the countermeasure of laser light and the prevention of contamination dispersion has been designed.

要約

ステンレス試料を対象としたレーザー除染コールド試験を実施し、表面除去深さや粉じん粒径分布等の除染データを取得した。原子力発電所においてレーザー除染を運用するためのレーザー光対策、汚染の拡散防止等の作業の安全性を考慮した装置を設計した。

緒言

機器・配管の解体物の除染においてレーザー除染を適用することで、二次廃棄物の発生量を低減すること、および処分費用を大幅に低減することが期待できる。本研究では、レーザー除染のコールド試験を行うとともに、原子力発電所の放射線管理区域でレーザー除染を行う上でのレーザー光や汚染対策を考慮したレーザー除染装置の設計について検討した。

成果の概要

SUS304 試料に対し、出力 1 kW で焦点径 0.15 mm、走査速度 10 m/sec でレーザーを照射した。そのときの様子を図 1 に示す。レーザー照射部から強い赤熱光が放たれ、照射後の部分が変色しているのが分かる。試料の重量と照射面積および母材の比重の計算から、照射部は平均 3.05 μm の深さで表面が除去されたと推測された。

このレーザー照射時に発生した粉じんの粒径分布を測定した(図 2)。その結果、粒径 155 nm を中心とする 65 nm から 275 nm の粉じんが発生することが分かった。除染装置のフィルターユニットには、この粉じんを捕集する性能が要求される。

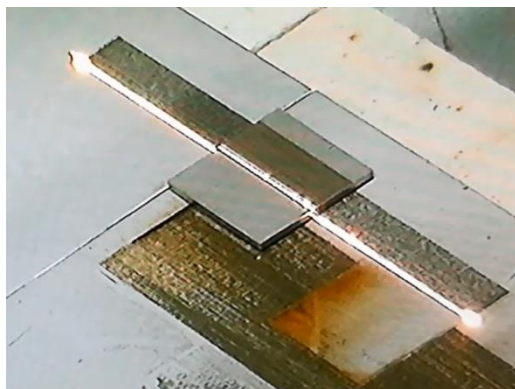


図 1 レーザー照射の様子

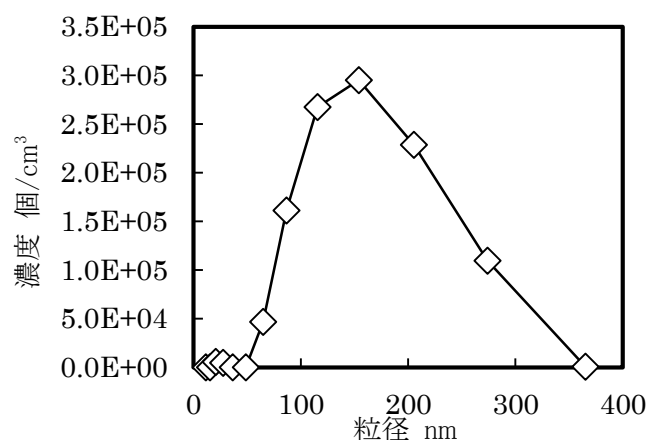


図 2 レーザー照射時の粉じんの粒径分布

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県からの受託研究として実施したものである。

発生する粉じんの捕集について、二次廃棄物発生抑制の観点から焼却減容できるフィルターを適用する。図 3 に焼却減容フィルターの概要を示す。このフィルターの粉じんの捕集効率は 99.97%以上、減容値は焼却により 1/100 となる。これを以下に示すレーザー除染装置のフィルターユニットに組み込む。

レーザー除染時のレーザー対策および粉じんの流れを考慮した除染装置を設計した。装置の概要を図 4 に示す。本装置は規模の小さいホット試験を考慮し、除染処理を行う箇所の寸法は A4 サイズとした。レーザーの焦点距離は 500 mm であり、汚染試料から十分距離をとることでレーザー機器が汚染されることを防ぐ。汚染粉じんは除染ボックス内に閉じ込め、ボックスの開口部を小さくすることでボックス内の負圧を保つ設計である。粉じんは吸引の流れに従い、フィルターユニットに送られる。



図 3 焼却減容フィルターの概要
メーカー:近藤工業

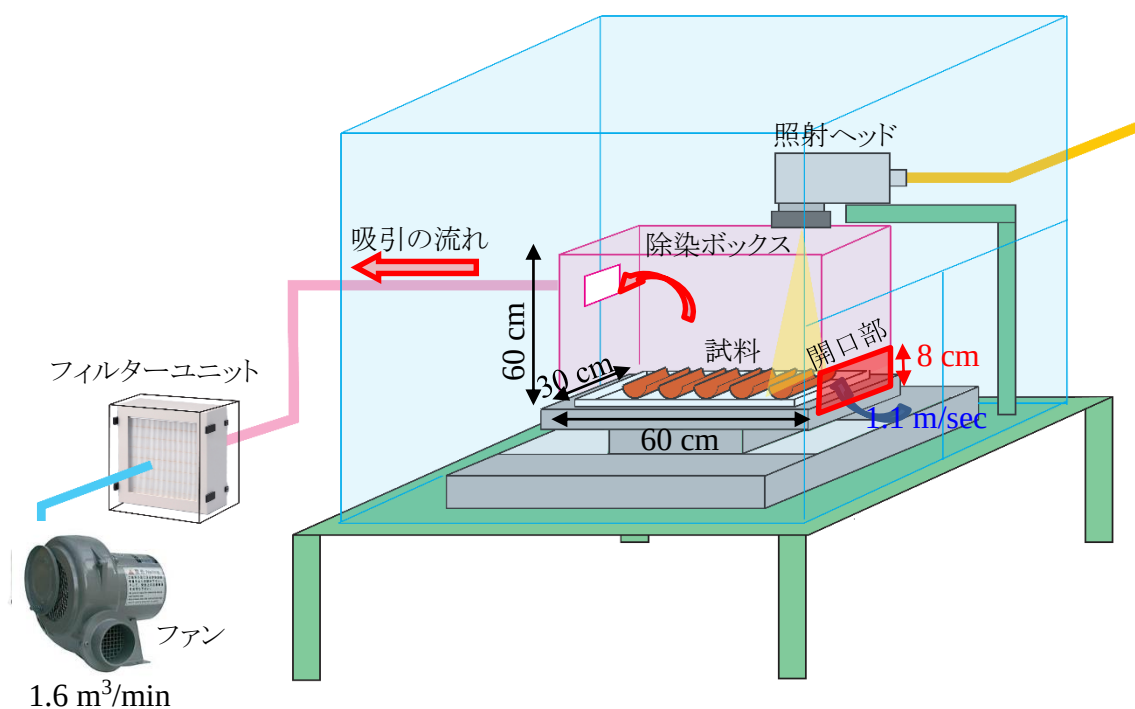


図 4 レーザー除染装置の概要

対象物寸法:W21 cm×D30 cm×H7 cm (φ 80 mm 配管の半割れ試料をトレイに並べて配置した状態を想定)

除染ボックス寸法:W30 cm×D60 cm×H60 cm (レーザー焦点距離および粉じん制動距離を考慮)

除染ボックス開口部:W30 cm×H 8cm 開口部面積 240 cm²

吸引用ファン:シロッコファン 容量 1.6 m³/min

開口部の気流速度:1.1 m/sec

結言

原子力発電所の廃止措置の現場におけるレーザー工法の適用に向けて、放射線管理等の現場を想定したレーザー除染のコールド試験を実施した。除染システムを現場運用する上でのレーザー光対策、汚染の拡散防止対策等の作業の安全性を考慮した装置を設計した。

2.1.1.2

ステンレス鋼のレーザー切断における粉じんと貫通光 Dust and Penetrated Beam during Laser Cutting for Stainless Steel

門脇春彦^{*1}、石神龍哉^{*2}

Haruhiko KADOWAKI and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

For the development of nuclear power plant decommissioning, the cutting test for stainless steel was conducted using the fiber laser with the power of 2.5–10 kW. The size distributions of dust produced during the cutting test were measured as a function of laser operation time. The experimental result shows that the dust size distributions during the cutting were different from those after the laser cutting. This phenomenon can be explained as due to the difference in dust production mechanism between during and after the laser cutting.

We have tried the dust adsorption and the reduction of penetrating laser beam intensity by spreading water mist during the cutting. We have confirmed that the presence of water mist reduces the concentration of relatively large-sized dust particles and the intensity of penetrating laser beam. Additionally, we put a simulation material on the laser beam axis, and performed the cutting test. We have found the conditions of the mist spreading, under which the simulation material was not damaged.

要約

原子力発電所の廃止措置の技術開発のため、出力を 2.5 kW から 10 kW に設定したファイバーレーザーを用いてステンレス鋼の切断試験を実施した。切断試験で発生する粉じんについて粒径分布の経時変化を測定し、切断中と切断後の粉じんの粒径プロファイルが異なることが分かった。この現象は、粉じんの発生メカニズムが異なることに起因していると推察された。

切断環境中に水ミストを散布し、ミストによる粉じんの吸着と貫通光の強度の低減を試みた。粉じんについて、ミストがあることで比較的大きい粒子の濃度が減少したことを確認した。また、貫通光の強度も減少することを確認した。貫通光の光軸上に構造物の模擬材を配置した切断試験を行い、ミストを散布し照射条件を調整することで、模擬材が破損しないレーザー切断条件を設定できることを見出した。

緒言

原子力発電所の廃止措置においてレーザー切断工法を安全に運用するための検討として、機器・配管の材料として使用されるステンレス鋼のレーザー切断を実施し、切断で発生する粉じんの粒径分布を測定した。また、切断環境中に水ミストを散布することで、環境中粉じん濃度の低減とレーザー貫通光の強度低減を試みた。

成果の概要

出力 10 kW で切断した場合の粉じん粒径分布の経時変化を図 1 に示す。切断中は 40 nm 付近と 155 nm 付近中心とする粉じん濃度ピークが見られた。切断後は 200 nm を中心とするブロードピークとなり、時間とともにピークの高さは低下した。この粉じんの粒径プロファイルの経時変化は、本試験で設定した切断条件において同様の結果を示した。切断中と切断後の粉じん粒径プロファイルが異なる現象について、粉じんの発生メカニズムが異なることに起因すると考えられる。切断中の粉じんに見られる粒径 36 nm 前後の粒子は、レーザーの高エネルギー

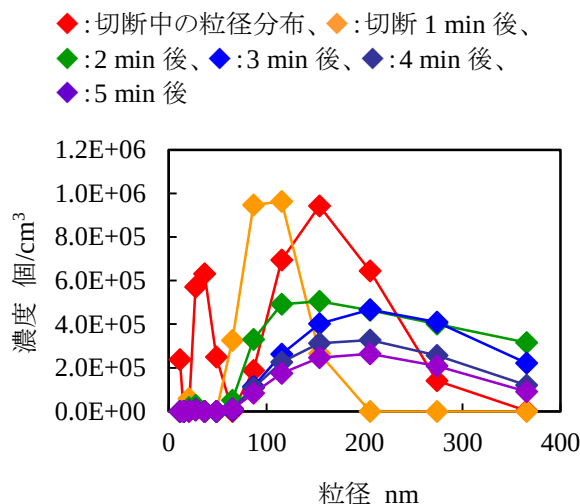


図 1 粉じん粒径分布の経時変化
出力: 10 kW、切断速度: 200 mm/min
アシストガス: Air 600 L/min

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが関西電力株式会社、日本原子力発電株式会社、北陸電力株式会社の 3 社からの受託研究として実施したものである。本研究は、(国研)日本原子力研究開発機構施設供用制度を利用した。

によって照射部の一部が金属蒸気になり、これが凝固したものと推察される。155 nm 前後の粒子は熔融部がアシストガスによって吹き飛ばされて生成したスパッタ等の中の、微小な飛沫成分である可能性が考えられる。また、切断後に継続して観測される粉じんについては、切断試料の残熱および酸化反応熱を熱源として発生する金属煙であると考えられる。

切断環境中に水ミストを散布したレーザー切断において、粒径約 300nm の粉じん濃度が顕著に減少したことを確認した。図 2 に水ミスト散布の有無の違いによる、レーザー貫通光の強度の比較を示す。水ミストが無い場合、貫通光の強度は 1.1 kW と評価されたが、水ミストを散布すると 0.6 kW に低減した。さらにアシストガス流量を 600 L/min から 300 L/min に減少すると貫通光強度は測定下限未満まで低減した。これらの結果から、水ミストは貫通光の低減に効果があることが示された。また図 2C の結果について、アシストガスはレーザー光軸上からミストを除去する効果があるため、これを減少させることによって環境中のミストが維持されて貫通光の分散効果が保持されたことが考えられる。

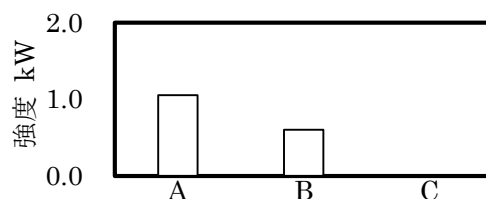


図 2 レーザー貫通光の強度の比較
出力: 5 kW、切断速度: 100 mm/min、
水ミスト・アシストガス条件 A: 無し・600
L/min、B: 有り・600 L/min、C: 有り・
300 L/min

対象物の切断性能を維持しつつ貫通光強度を低減させた条件を設定し、後方構造物への熱影響の低減を確認する試験を行った。切断対象物について厚さ 25 mm のステンレス鋼、切断条件についてレーザー出力 5 kW、アシストガス 300 L/min、切断速度 100 mm/min、スタンドオフ 10 mm、ミスト吹付圧力 0.5 MPa、後方構造物について厚さ 1.9 mm のジルコニウム合金配管を照射直線距離 500 mm の位置に置いた。図 3 に切断後の後方構造物への熱影響の様子を示す。貫通光が 1 min 照射された状況であるが、ミストによる分散によって、熱変形しない程度に貫通光の強度が低下したことを確認した。なお、レーザー出力 10 kW、アシストガス 300 L/min、切断速度 200 mm/min に設定した切断性能を向上させた条件で、水ミストを散布した切断試験では、貫通光によって後方構造物が破損して照射部に穴が開くことを確認している。これは貫通光の強度が大きく、水ミストによる低減効果が不足したためである。



図 3 後方構造物の熱影響の様子

結言

原子力発電所の廃止措置においてレーザー切断工法を安全に運用するための検討として、機器・配管の材料として使用されるステンレス鋼のレーザー切断を実施した。切断中の粉じんと切断後の粉じんの粒径分布が異なることを見出し、この原因は発生メカニズムが異なることに起因すると推察された。

切断環境に水ミストを散布するレーザー切断試験を行った。水ミストにより比較的大きな粉じんが環境中から除かれたこと、および貫通光の強度を大きく低減できたことを確認した。この貫通光強度の低減の効果について、切断対象物の貫通光軸上に構造物の模擬材を設置した試験を行うことで検証した。その結果、水ミスト環境下において切断条件を調節することにより、模擬材が破損しないレーザー切断が実施できることを確認した。

2.1.1.3

原子炉施設の廃止措置等を利用するレーザー除染
Utilization of Laser Decontamination for the Decommissioning of Nuclear Power Plant

都築聡^{*1}、嶋津正^{*2}、桑室直俊^{*2}

Satoshi TSUZUKI, Tadashi SHIMAZU and Naotoshi KUWAMURO

Abstract

During the decommissioning process of nuclear power plants, a large amount of radioactive wastes such as steel and concrete structures will be produced. For their decontamination, the laser peeling is a useful technique which can remove the surface of radioactive waste and reduce their radioactivities.

要約

廃止措置作業では、鋼材・コンクリート構造物等の放射性廃棄物が大量に発生するが、レーザー除染方式は、レーザー照射により放射性物質を含む表面材料を昇華、僅かな深さで剥離(数百 μm オーダー)することにより除染を行うものである。

緒言

過去に新型転換炉原型炉ふげんにて実施した実験では、Ge 半導体検出器にて検出限界未満まで除染できた実績がある。また、使用済みブラスト材等の二次廃棄物や有毒ガスが発生せず、表面材料の除去量も僅かであり、除染に伴う放射性廃棄物発生量が大幅に削減できる。撤去物の放射能レベルがクリアランスレベル以下となれば、有用物として管理区域からの搬出が可能となり、保管に係わる費用の大幅な低減が図れることとなる。

成果の概要

平成 30 年度の試験では、以下の 3 つについて調査研究を行った。

1) 金属除染に適した最適条件の抽出

レーザー照射による金属剥離の試験を行い、金属の剥離量を除染効率の指標として、除染効率が高くなる試験条件出しを行った。この金属の剥離量はレーザー照射の条件によって大きく異なった。走査速度については、5 m/s が最も剥離量が多く見られた。レーザー出力については、試験を行った条件の範囲ではほぼ比例の関係があった。ただし、出力が低いと剥離量が極端に下がり、閾値のようなものも見られた。

2) 金属除染システムの開発

レーザー発振器、レーザーヘッド、ロボットアーム等を組み込んだ除染システムを開発した(図 1)。

レーザー発振器、新規に開発した長焦点用レーザーヘッド、ロボットアームを制御するプログラムを作成し、除染システムとして運用できるよう整備した。

研究期間中、1000 回以上動作プログラムを実行したが、問題なく連続稼働した。

一方で現状は準備にレーザー発振器、レーザーヘッドのガルバノミラー設定、ロボットアームの動作プログラムを個別に立ち上げる必要があり煩雑なため、改善の余地は残る。

3) 金属粉じんの回収方法の検討

レーザー除染時に発生する金属粉じんを効率的に回収するための方法を検討した。

現在主流のフィルター方式に加え、電気集じん方式の検討を行った。フィルター方式は、捕集率が高い一方、圧損が高く、捕集が増えるにつれて、流量が少なくなるデメリットがある。一方で電気集じん機は、捕集の前後で圧損がほぼ無く、粉じん対策のひとつの選択肢になり得ると考えられる。溜まった粉じんの処理については、定期的にワイパーなどのこそぎ落とす機構を付加することで、対応できると考えられる。例えば、目の細かい HEPA フィルターの場合、粉じん捕集量の増加に伴い、著しく圧損が増加するので、HEPA のプレフィルターとして電気集じん機を用いて HEPA フィルターの交換回数を減らし、圧損も低減できると考えられる。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・企画支援広報部
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが関西電力株式会社、日本原子力発電株式会社、北陸電力株式会社の 3 社からの受託研究として実施したものである。

結言

金属表面の表面剥離試験を行い、データの蓄積を行った。その際に発生する飛散物については、放射性粉じんとなり、取り扱いに注意が必要である。また、粉じんは、球形であり、内部が空洞のものもあることが分かった。本研究がレーザー除染の実用化に役立てるよう、継続してレーザー除染の研究を行っていく予定である。

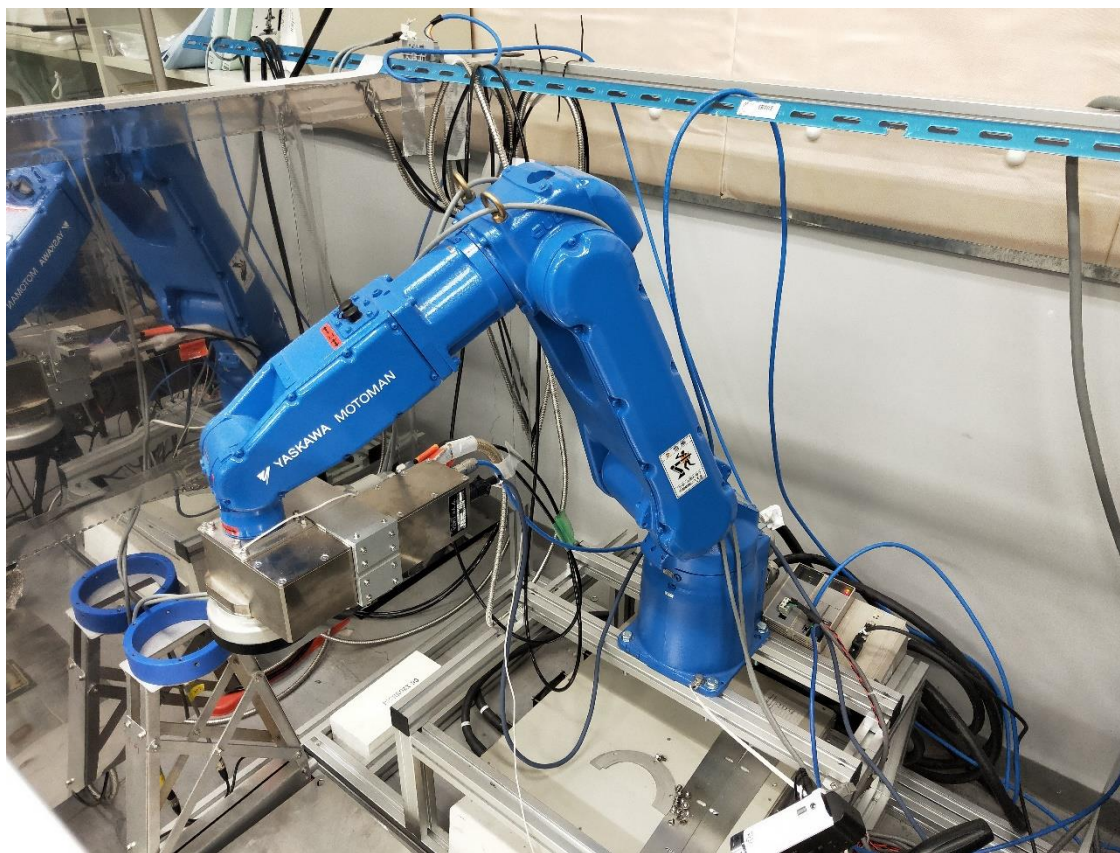


図 1 実験時使用のロボット及びスキャナー

2.1.1.4

レーザー切断時における粉じん移行データ取得・調査
 Study and Data Acquisition of Dust Transition while Laser Cutting
 嶋津正^{*1}、桑室直俊^{*1}、野元賢二^{*1}
 Tadashi SHIMAZU, Naotoshi KUWAMURO and Kenji NOMOTO

Abstract

The laser cutting of test materials which simulated the structure materials of the advanced thermal nuclear reactor “FUGEN” was performed at a water depth of 10 m, and we have obtained some data for the behaviors of dust and dross which were produced during the cutting process, and for the dependence of their transfers to water and atmosphere on the cutting conditions.

For the present cutting test, we previously prepared an equipment for the cutting in water, and confirmed its safety.

要約

「ふげん」の原子炉構造材を模した試験体(コールド材料)を用いて、実機解体を想定した水深約 10 m の試験水槽内でレーザー切断を実施し、切断時に発生する粉じんやドロスの粒子状物質の挙動データを取得した。レーザー切断工法の切断速度等の切断条件の違いによる粒子状物質の気中および水中への移行量等のデータを取得した。また、本試験の実施に当たり、事前に必要な水中試験機材を製作・整備し、水中切断機材の健全性等を確認した。

緒言

(国研)日本原子力研究開発機構(以下「原子力機構」という。)[「ふげん」]では、原子炉本体の解体に工期短縮、二次廃棄物量低減等の観点で優位なレーザー切断工法を適用し、解体用プールを設置した上で水中遠隔解体を行う計画である。「ふげん」の原子炉本体の構造材は約 25 年間の運転による中性子照射により放射化しており、切断時には放射性の粉じんやドロスの粒子状物質が発生することから、事前にそれらの挙動データを取得することが重要である。

本研究では、「ふげん」原子炉の構造材を模した試験体(コールド材料)を用いて実機解体を想定した水深約 10 m の試験水槽内でレーザー切断を行い、切断速度等の様々な切断条件における粒子状物質の気中および水中への移行量等のデータを取得した。

試験の概要

本試験は水中切断に必要な大型試験水槽(水深約 10m)、レーザー発振器等の設備・機材を有する、ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点、廃止措置モックアップ試験フィールドの水中技術実証試験エリアで実施した(写真 1、写真 2)。

- ・試験の実施にあたり、データを取得するために必要な機材(粉じん回収用の試験水槽蓋、攪拌ポンプユニット、真空ポンプユニット等)を製作・整備した。
- ・試験実施前にファイバー等の試験に用いる機材の健全性を確認した。
- ・ステンレス鋼平板(200 mm×100 mm×t25 mm)、二重管(内管:Zr-Nb 合金配管(φ 126.4 mm×200mm×t4.3 mm)、外管:Zry-2 配管(φ 160.2 mm×200 mm×t1.9 mm))の相当部材を対象とし、レーザー切断を行った(写真 3)。
- ・本切断試験において水中移行粉じん、気中移行粉じん及びドロスを回収し、それぞれ重量を計測するとともに気中移行粉じんについては粒径分布も計測した。

結言

本切断試験において水中移行粉じん、気中移行粉じん及びドロスを回収し、それぞれ重量を計測するとともに気中移行粉じんについては粒径分布も計測した。本試験で得られた成果は、原子力機構の協力を得て成されたものであり、「ふげん」の原子炉解体に貢献するものと考えている。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・企画支援広報部

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが(国研)日本原子力研究開発機構の役務契約として実施したものである。本研究は、(国研)日本原子力研究開発機構施設供用制度を利用した。



写真 1 ふくいスマートデコミッショニング
技術実証拠点、廃止措置モックアップ
試験フィールド



写真 2 水中技術実証試験エリア

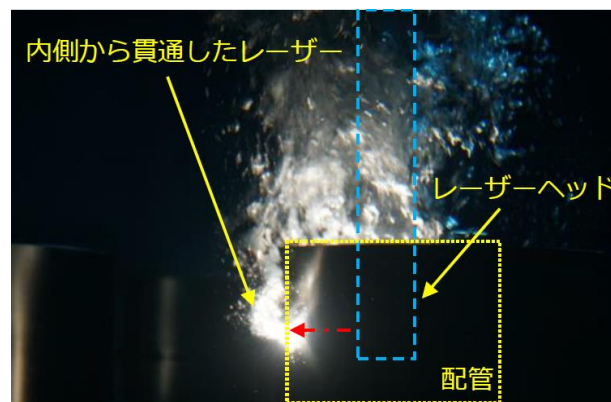


写真 3 二重管のレーザー切断

2.1.1.5

レーザー加工パラメータ自動調節システム向け光検出器感度向上調査検討
Performance Test of the Photodetectors to be used in Intelligent Control System of
Laser-processing Parameters

西尾繁^{*1}

Shigeru NISHIO

Abstract

Optical sensitivities were examined for a variety of Si- or InGaAs-based photodetectors with thermal radiation light source and the optics which simulated the laserhead for co-axial probing optics. All the photodetectors subjected to the test were found much sensitive than a typical two-color thermometer. A net sensitivity to optical emission from a work under laser irradiation can be drastically improved by employing the photodetector used in this work or an equivalent one.

要約

白熱灯と同軸光学系レーザーヘッドを模した光学系を用いて、様々な Si 光検出器、InGaAs 光検出器の感度を調査した。試験した全ての光検出器は、二色温度計(ワークにレーザーを照射した時に発生する光の検出に通常用いられる)より遥かに高い感度を示した。本事業で検討したような光検出器を用いることによって、ワークにレーザーを照射した時に発生する光の検出感度を従来より大幅に高められることが分かった。

緒言

レーザー加工は既に実用化されているが、現在のところ加工品質を左右するレーザー加工パラメータは熟練オペレータの経験と勘によって決定されている。もし、レーザー加工パラメータを自動調節出来れば、レーザー加工の生産性は飛躍的に高まると期待される。レーザー加工パラメータをリアルタイムで自動調節するための一つの方法は、ワークにレーザーを照射した時に発生する光の時間変化を統計的に処理し、レーザー加工パラメータ群に対しフィードバック制御をかけることである。

レーザー加工中のワークの発光強度を検出するために、これまで通常二色温度計が利用されてきた。二色温度計は原理的に全発光エネルギーのごく一部だけを利用するため、光感度が低い。そのため、実用上の利点は多いものの、光検出器に到達する光量が本質的に小さい同軸光学系レーザーヘッドと組み合わせて使用すると、加工対象によっては制御に必要な大きさの光信号情報が得られない恐れがある。この問題を解決するために二色温度計とは異なる感度の高い光検出器の開発が必要だが、開発に必要な基礎データはまだ蓄積されていない。本件はレーザー加工パラメータ自動調節システム実用化を念頭に、発光強度の時間変化を高感度で捉えられる光検出器を開発するための基礎データを収集・蓄積することを目的として実施したものである。

成果の概要

レーザー加工時の発光を模した光源と同軸光学系レーザーヘッドを模した光学系を用いて、様々なモデルの Si 光検出器および InGaAs 光検出器の光検出特性を調査したところ、いずれの光検出器を選択した場合でも、二色温度計を用いた場合よりも格段に強い(1000 倍以上)光信号が得られた。一方雑音レベルはいずれの検出器を選択した場合も二色温度計と同程度であった。つまり、本事業で検討したような光検出器を用いることによって、従来より著しく高い感度でレーザー発光強度情報を取得できることが分かった。

結言

精度の高いレーザー加工パラメータ自動調節のためには、まず、十分な正確性を持ったレーザー発光強度情報の入力が必要である。本事業で得られた知見は、今後レーザー加工パラメータ自動調節システムの精度の実用化に多大な貢献をするものと期待される。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが(国研)日本原子力研究開発機構からの役務契約として実施したものである。

2.1.1.6

高出力レーザー切断用レーザー遮断機構高度化調査検討
Development of Metal-based Optical Dumper for High-power Laser Applications西尾繁^{*1}

Shigeru NISHIO

Abstract

In order to provide a guide for the designing of practical optical dumper, time-dependent temperature changes and change in appearance under high-power laser irradiation were observed for a variety of metal plates. Small temperature changes were found for copper and aluminium plates. In addition, no irradiation damages were found on their surface. Most of laser energy seemed back-reflected on their surface. In contrast, large temperature changes were found for steel plates. The laser energy seemed absorbed effectively by them. However, their low thermal conductivity resulted in irradiation damages.

要約

酸化物耐熱レンガに代わる金属製レーザー遮断体の開発に必要な基礎データを収集することを目的として、様々な種類の金属板に高出力レーザーを照射し、温度変化をその場測定すると同時に外観の変化を観察した。銅、アルミニウムは温度上昇が小さく、なおかつレーザー損傷を受けなかったことから、光エネルギーの大部分を反射していることが分かった。対照的に鉄鋼は温度が劇的に上昇したことから、光エネルギーを良く吸収出来ることが分かった。しかし、熱伝導性が悪いために、照射部が損傷(溶融)を受けることも分かった。

緒言

高出力レーザーを遮断する場合、高融点酸化物を原料とする耐熱レンガを用いるのが一般的だが、レーザーをワークに照射した時に発生する熱輻射光を制御などに利用するケースでは、耐熱レンガに由来する強い熱輻射光がワーク由来の熱輻射光の検出を強く妨害する。この問題を解決するために、熱伝導率の高い金属をレーザー遮断体として用いるのは一案である。しかし開発に必要な基礎データはまだ得られていない。本件は、高出力レーザー切断用実用金属遮断体の開発に必要な基礎データを収集することを目的として実施したものである。

成果の概要

銅(C1020)、アルミニウム(A1100)、鉄鋼(SS400)の3種類の材料を対象に、水冷ありなしのそれぞれの場合について 0.5、1.0、2.0、3.0kW のパワーでレーザーを照射し、温度変化をその場測定するとともに、照射前後の外観の変化を観察した。

銅およびアルミニウムでは、水冷のない場合でも、照射位置直下の温度上昇は最高 100℃程度に留まった。加えて、照射損傷が全く観察されなかったことから、光エネルギーの大部分は表面で反射されたと考えられる。

鉄鋼では、照射位置直下の温度が劇的に上昇した。3.0kW で照射した場合、水冷下でも温度は 500℃以上に達した。光エネルギーを効率的に吸収出来たものと思われる。全条件で照射損傷(溶融)も観察された。熱伝導性が悪いために熱が局部的に蓄積されたようである。

結言

銅およびアルミニウムはレーザー遮断性能そのものは非常に優れているものの、照射されたレーザー光を吸収するのではなく相当の割合を反射するため、実用レーザー光遮断体として活用するためには、テーパ加工など、反射光を抑え込む幾何設計-加工が必要である。また、考え方を変え、レーザー損傷を受ける度に交換することを前提に、冷却器で裏打ちした鉄鋼を遮断体として用いるのは一案である。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが(国研)日本原子力研究開発機構からの役務契約として実施したものである。

2.1.1.7

レーザー除染技術の土木建築分野への応用・実用化研究
Applied and Practical Research of Laser Decontamination Technique
for Civil Engineering and Construction Field

坪井昭彦^{*1}、山岸隆一郎^{*2}、辻正和^{*3}、西川正彦^{*4}、辻勝巧^{*5}

Akihiko TSUBOI, Ryuichiro YAMAGISHI, Masakazu TSUJI, Masahiko NISHIKAWA and Katsunori TSUJI

Abstract

To develop laser peeling machine for coating film intended to maintain architecture/structure, we performed peeling performance evaluation for coating film and development of quantitative evaluation method for peeling state by CW laser and pulse laser respectively.

要約

建築・構造物のメンテナンスを目的としたレーザー塗膜剥離装置開発のため、CWレーザーとパルスレーザーそれぞれの、塗膜に対する剥離性能評価と、剥離状態の定量的評価手法の開発を行った。

緒言

建築・構造物のメンテナンスを目的とした定期的な再防水工事が必要とされ、施工前作業として超高压水による防水塗膜剥離を行っている。この作業は、騒音(噴射ジェット音)発生を伴うため、周辺住民への配慮等が必要だけでなく、作業にも反動(噴射反力)、荷重(配水ホース等)、飛散物等に耐えての長時間労働を強いる典型的な 3K 作業である。若狭湾エネルギー研究センターが開発を進めているレーザー除染システムの他用途展開の出口戦略として、周辺環境に優しく、コスト的にも現行技術に対抗し得る安全な屋外塗膜剥離施工技術・装置を開発する。

実施概要

塗膜剥離において、CWレーザー(熱的プロセス)、パルスレーザー(プラズマ爆発と衝撃波による塗膜の粉碎・噴出プロセス)の違いを実験で確認した。このプロセスの違いにより、同じレーザー出力では、CWレーザーよりも圧倒的にパルスレーザーの方が高効率であり、照射パルスレーザーのエネルギー密度(フルエンス)に比例して除去効率が向上することを確認した。

剥離の際、パルスレーザー照射により粉碎された塗膜は照射面から垂直に勢いよく噴出される。この噴出物をレーザー光路から排除するアシストガスの存在が加工効率を改善することを実験で確認し、現行技術(超高压水除去)にコスト的にも対抗し得る $2.8 \text{ m}^2/\text{h}$ を達成した。(到達目標は $2.5 \text{ m}^2/\text{h}$ 以上)

塗膜剥離状態の評価は従来、熟練者による官能評価に頼っているため、二次元分光輝度計測を実施して Lab 色空間評価を行い、官能評価との対比を実施した。その結果、色相座標(a, b)評価により、剥離状態の定量的な検査・評価に使えるだけでなく、剥離処理の進行の様子や剥離の完了をモニタリングできる可能性を見出した。

選択したレーザー発振器の光学仕様に合致したハンディヘッドの光学設計・機構設計を実施しモックアップでの作業性も検証したが、床面を除き、壁面(横向き)と天井面(上向き)作業では作業者に過負荷を強いる事が分かったため、設計見直しを行うこととする。

結言

高繰返しパルスレーザーとアシストガスの採用により、現行技術(超高压水)にコスト的にも対抗できる防水塗膜剥離条件を見出したが、レーザー照射角等、更なる効率向上の余地があることも分かった。

本実験により、塗膜材料の赤外レーザーに対する透過吸収特性と塗膜剥離効率に相関関係の存在が示唆された。今後は、各種防水塗膜材料の近赤外光透過吸収特性と剥離効率に関するデータの積上げが必要である。

^{*1}光産業創成大学院大学、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室、^{*3}KYLAS International(株)、^{*4}三協防水(株)、^{*5}辻工業

本研究は、公募型共同研究事業として(公財)若狭湾エネルギー研究センターが光産業創成大学院大学、KYLAS International(株)、三協防水(株)、辻工業と共同で実施したものである。

2.1.1.8

耐放射線性ロボットレーザー除染基礎技術開発および廃止措置人材育成のための操作実習
Development of Basic Technology for Radiation Resistance Robot Laser Decontamination and the
Decommissioning Training Using Our Decontamination Setup for Human Resource Development

山岸隆一郎^{*1}、桑室直俊^{*2}

Ryuichiro YAMAGISHI and Naotoshi KUWAMURO

Abstract

We carried out development of basic technology for radiation resistance robot laser decontamination machine constructed by the WERC. The decommissioning training program using our laser decontamination setups was also provided for the human resource development.

要約

若狭湾エネ研開発のロボットレーザー除染装置の耐放射線性向上のための基礎技術開発と、除染装置を用いた廃止措置人材育成のための操作実習を行った。

緒言

営業運転を終了した原子力発電所や福島第一原子力発電所等の廃止措置現場では、除染技術や人材が求められている。そこで、若狭湾エネ研の開発したロボットレーザー除染装置を活用して、廃止措置に供するための基礎技術開発や、将来的に廃炉に関わる可能性のある人材の育成事業を行った。

実施概要

本事業は、文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」に関わる福井大学担当の「福島第一原子力発電所の燃料デブリ分析・廃炉技術に関わる研究・人材育成」に基づき実施されたものである。

1. 耐放射線性ロボットレーザー基礎技術開発

ロボットレーザー除染装置など、廃止措置への適用を想定して開発される機械類は、実際の放射線環境下での作業可能時間(耐放射線性)や作業性等の性能評価試験が必要となるが、放射線環境下での作業実績がないものは、放射線環境への投入が困難であるという二律背反に陥っており、開発における大きな障壁となっている。

そこで、モーションキャプチャ技術を活用し、非放射線環境下においても放射線環境を模擬し、実際の除染作業計画毎に変化する装置や操作者の被曝量の増減を、事前評価可能とする技術開発を行った。

本技術では、光学式モーションキャプチャ技術を、評価対象のある時点での滞在位置取得手段として利用する。取得した位置情報は表計算ソフトウェアで取り扱い可能な行列形式で出力されるため、位置情報に対して空間線量を任意に設定し、表計算ソフトウェアの関数機能等を活用して自動積算することで、一連の作業に伴う被曝量等が出力される。

図 1 に、本技術を用いて 6 m 四方のモーションキャプチャエリア内で床面専用ロボットレーザー除染装置を操作した実際の除染軌跡データと、操作者の移動軌跡を示している。このエリア内の軌跡データに対し、任意に設定した空間線量の異なる領域区分(例:Field 1 ～3)を重ね合わせることで、床面専用ロボットレーザー除染装置実機が除染した面積と、様々な環境想定による被曝量検討が、非放射線環境下でも実施可能となる。

2. ロボット操作実習

廃止措置作業に関わる人材の育成を目的として、若狭湾エネ研開発の床面専用ロボットレーザー除染装置と上記被曝量評価技術や、手先軌道自動計算ロボットアーム等を用い、平成 31 年 2 月に、福島県双葉郡檜葉町に所在する JAEA 檜葉遠隔技術開発センターにて、16 名の参加者に対して実習を行った(図 2)。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・企画支援広報部
本事業は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井大学からの受託事業として実施したものである。

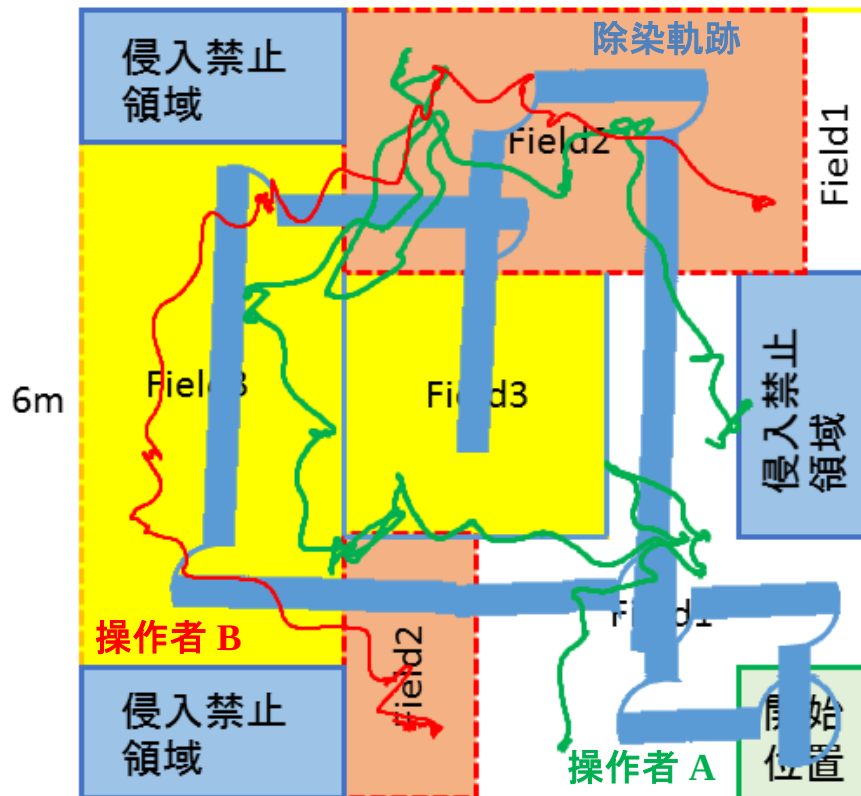


図 1 モーションキャプチャエリア内に設定された各領域と、床面除染軌跡および、操作者(AとB)の軌跡の一例

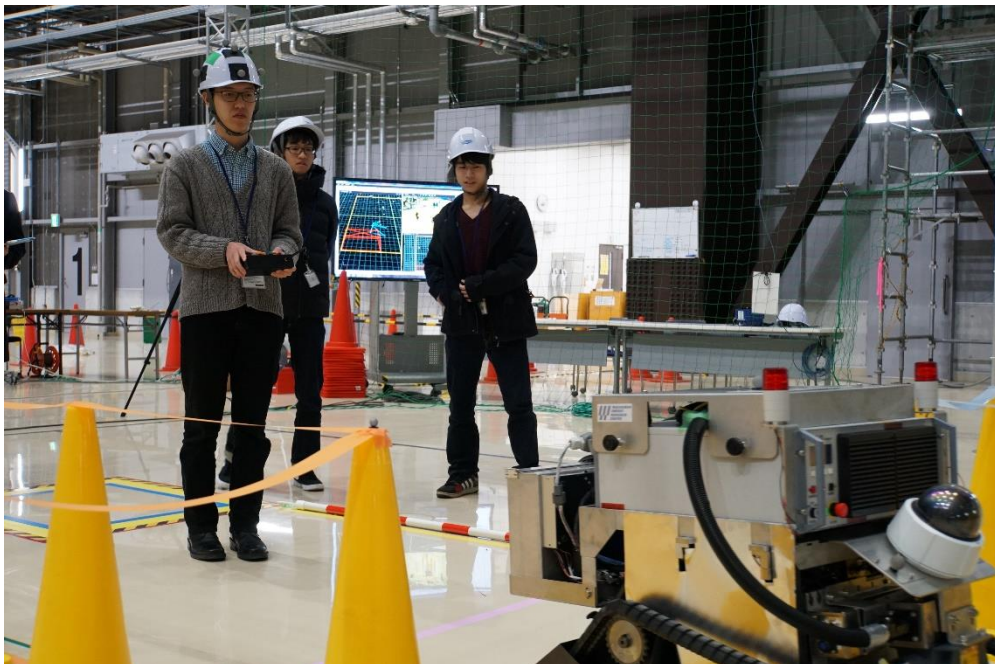


図 2 JAEA 檜葉にて実施した床面専用ロボットレーザー除染装置を用いた実習の風景

結言

モーションキャプチャ技術を活用した廃止措置作業に関わる被曝量の事前評価技術の開発を行い、人材育成実習にも供することで、効果的な事業実施ができた。

2.1.1.9

母材を傷めないレーザー加工

Laser Processing with Less Damage to Matrix

都築聡^{*1}、鈴木寛^{*2}、芦原将彰^{*3}

Satoshi TSUZUKI, Hiroshi SUZUKI and Masaaki ASHIHARA

金属チェーンなどに使われるピンには高い引張強度と耐摩耗性等の機械的特性が求められる。この特性は単一材料だけでは両立が難しいため、引張強度が高い金属を母材とし、この表面に耐摩耗性が高いニッケル-リン合金のめっきを施すことで両立させることを目指している。このニッケル-リンめっきは熱処理することで耐摩耗性が向上する性質があるが、母材が鉄系材料の場合に熱処理による母材の引張強度低下が課題となっている。

レーザー加工は、レーザーを短時間に高いエネルギー密度で照射する条件とすることで、対象物の表面のみを熱処理できるといった特徴がある。この特徴を利用することで、ピン表面のニッケル-リンめっきに対しては熱処理を加えて耐摩耗性を向上させると同時に、母材に対しては熱影響を抑制し高い引張強度を維持することが期待できる。

本研究ではニッケル-リンめっきが施されたピンを対象に、レーザー照射による表面熱処理の要素試験を行った。レーザー光の照射条件をパラメーターとして、照射されたピンの表面および母材部分の硬度を評価した。また、母材表面を構成する積層膜を効率的に除去する照射条件について検討を行った。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室、^{*2}アイテック(株)・新事業開発本部、^{*3}福井県工業技術センター・新産業創出研究部・レーザ・電子線研究グループ
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターがアイテック(株)、福井県工業技術センターと共同で実施したものである。

2.1.2. 未利用エネルギー利用技術開発

2.1.2.1

マグネシウムの酸化還元反応を活用した水素エネルギー循環サイクルの構築

Development of Hydrogen Energy Cycle System Using Redox Reaction of Magnesium

篠田佳彦^{*1}、山岸隆一郎^{*2}、遠藤伸之^{*3}

Yoshihiko SHINODA, Ryuichiro YAMAGISHI and Nobuyuki ENDOU

Abstract

Hydrogen is a promising energy source to replace fossil fuels. However, the social implementation of hydrogen energy has many problems. The purpose of the present research project is to address the problems when using hydrogen energy by the concept of an energy carrier. We began the feasibility study toward the development of the sustainable energy cycle system using a redox reaction of magnesium, then we have studied smelting technology of magnesium by solar heat and practiced hydrogen production by reaction of water and magnesium. The solar furnace which can efficiently collect the sunlight energy has the potential to produce magnesium without emitting carbon dioxide. Furthermore, we proposed a method to increase thermal efficiency by combination using superheated steam and microwave heating in hydrogen production by hydrolysis of magnesium.

要約

水素は化石燃料に替わる次世代エネルギー源として期待されているが、社会実装には課題も山積する。そこで、マグネシウムをエネルギーキャリアとして介在させることで課題を解消し、同時に持続可能なエネルギーサイクルの実現に向けた検討を継続した。太陽熱によるマグネシウムの製錬(還元)とマグネシウムの加水分解による水素生成に関わる実用的な技術が、エネルギーサイクルの実現に向けた要となる。太陽光を集光する太陽炉は、二酸化炭素無放出でマグネシウムを還元する可能性を示した。さらに、マグネシウムの加水分解による水素製造において、過熱蒸気とマイクロ波加熱を併用することで熱効率を高める方法を提案した。

緒言

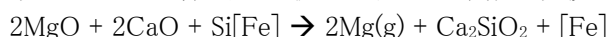
マグネシウムは持続利用可能なエネルギーシステムを構築する能力を備えた物質である¹⁾。マグネシウムを加水分解による水素源として活用した際には酸化マグネシウムが残存する。この酸化マグネシウムを還元し、再び利用すれば、エネルギー輸送・貯蔵の安定性が向上したうえで水素エネルギーの循環システムが構築できる。しかし、持続利用可能なエネルギー源によるマグネシウムの還元技術は確立されていない¹⁾。ここでは、持続利用可能なエネルギー源として、太陽エネルギーを取り上げる。マグネシウムの活用で、太陽エネルギーを貯蔵・輸送が可能で利用も容易な形態に変換すれば、地球規模の持続的エネルギー循環利用が可能になる。

成果の概要

エネルギーサイクル構想の具現化に要求される技術の開発や実証を目指す。なお、マグネシウムのエネルギー利用の観点においては、水素インフラの普及・整備を想定して水との反応による水素製造のみを扱う。マグネシウムを酸素と反応させて熱や電気を発生する直接利用(マグネシウム空気電池など)については協力者を含む外部の研究に委ねる。そこで、以下、2 テーマに関連する研究機関と共同しながら研究していく。

マグネシウム還元再生技術開発と太陽炉の適用

マグネシウム還元において工業的に主流な方法は珪素熱還元反応(ピジョン法)で、固相反応である。



Si[Fe](フェロシリコン)は還元剤で反応後に回収できず、生産にはエネルギーを要する。1200℃程度の減圧下で反応が進展し、発生したマグネシウム蒸気を冷却回収することで反応を進めることができる。反応に必要な温度域などの観点から、太陽炉および太陽炉で培った高温環境活用技術の応用に適した反応系である。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー開発グループ、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・企画支援広報部・技術相談室、^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県からの受託研究として実施したものである。

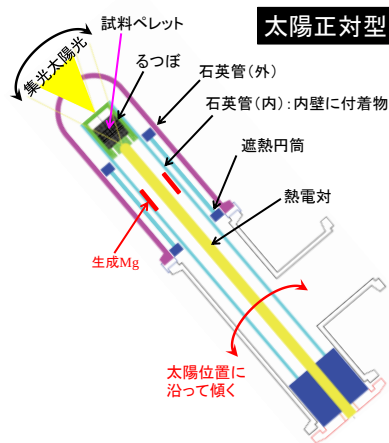


図 1 反応容器概念

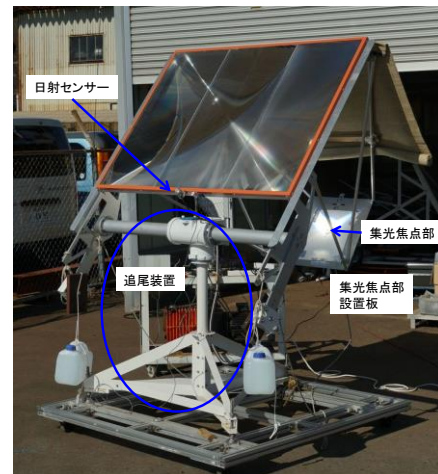


図 2 自動追尾機構付き太陽炉

図 1 に示す反応容器を図 2 に示す自動追尾機構を有した太陽炉の集光焦点部に設置した。共に今回新たに設計・製作した。反応容器は 2 重の石英管構造で、図 1 中の紫で示した石英管(外)は集光太陽光を透過させたうえで、気密を保持する。反応容器内は真空ポンプで 1 Pa 台以下に減圧する。試料を装荷した黒鉛るつぼは、底面を上側に石英管(内)の上部先端に配置し、るつぼ底面部(外側)が集光部となる。試料は、反応式に基づき各物質粉末を混合し、ペレット化する。試料ペレットは間接加熱となる。試料ペレットを保持する黒鉛るつぼの蓋構造部に複数の孔を配置し、反応で生じたマグネシウム蒸気はその孔を通過して石英管(内) (図 1 中では水色で示した円筒部位で、内面に赤で示した生成 Mg 部位)に付着する。太陽炉は市販の太陽追尾装置を活用した自動追尾式で、1.4 m × 1.0 m のフレネルレンズを有した透過・屈折型である。

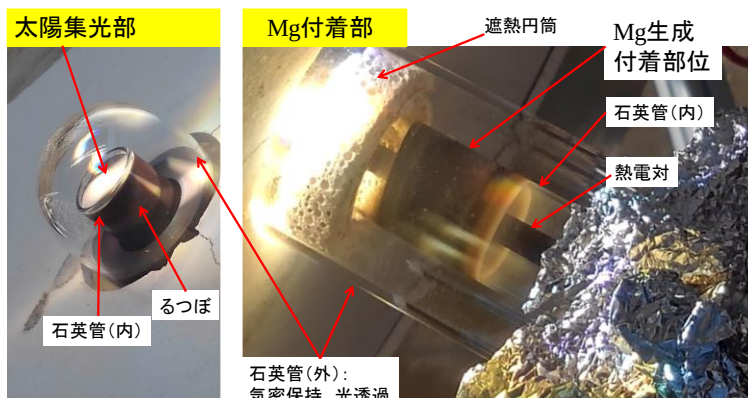


図 3 加熱中の反応容器

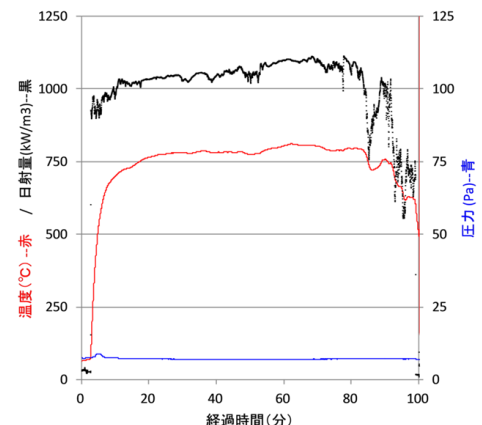


図 4 加熱実験測定結果

図 3 に加熱実験中の様相を示す。るつぼ底面に集光し、間接的に加熱された試料から生じた脱離成分が石英管(内)に付着している。図 4 に測定結果例を示す。赤線は熱電対で計測した試料近傍温度、黒線は日射量、青線は反応容器内圧力を示している。この実験では、加熱開始 80 分後に雲の出現で日射量に変動し、それによって温度も影響を受けている。加熱実験中の集光部と石英管(内)の試料付近の温度は 750°C に達し、安定している。日射量と温度が同様な変動を見せていることなども勘案すれば、太陽の追尾性能も十分である。

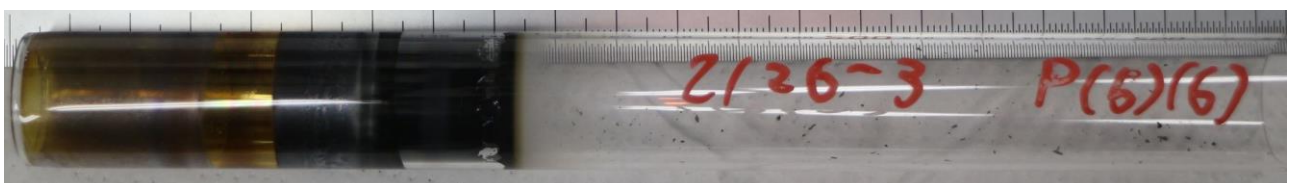


図 5 加熱実験後の反応容器石英管の様相

図 5 に加熱実験終了後の石英管(内)を示す。左側先端がるつぼを配した部位で茶色く変色している。黒色部がマグネシウムの付着で、厚みがある部位は剥離し、一部はそげ落ちている。これは、付着物がある程度の厚みを有する緻密な固体で、石英管との熱膨張差によって剥離したものであることを示している。焼結体が噴出し、連続体として固体化することは考えにくい。この反応系において、この加熱温度で気化するものは単体のマグネシウム(融点 650℃、沸点 1091℃)のみである。酸化マグネシウムの融点は 2800℃であり、気化にはさらに高温が必要である。付着物は点接触で粉体が連結した焼結体ではなく、気化したマグネシウムが固化したものとみることが妥当である。なお、反応中に生成すると思われるマグネシウムやカルシウムの珪化物(シリサイド)の融点は 1050℃前後である。カルシウムシリサイドは還元作用が強く、液相として反応に寄与している可能性がある。

付着物の元素同定を電子プローブマイクロアナライザー(EPMA)で行った。今回、石英管(内)の中にモリブデンあるいはタングステンの板材を装入し、その表面に付着物を受けることで測定精度をあげた。付着物は、マグネシウムと酸素の比率がほぼ 1:1 で酸化マグネシウムの状態となっている部位がほとんどである。還元反応で生成したマグネシウムが付着し、再酸化されたとみなすことが妥当である。一部の間中部にマグネシウム比率が高い部位が存在する。付着物の厚さは評価していないが、当該部位は付着量が他部位より多く、内表面に形成された酸化被膜内部にマグネシウム層が存在していることを裏付けるものである。

さらに、電気炉(赤外炉と管状炉)を活用して、還元反応過程の解明を目指した。赤外炉加熱実験では、1100℃程度から反応が活発化し、石英管内壁に太陽炉実証と同様な付着物が生じた。さらに、1200℃以上で反応量が増えることで付着物が厚くなり、マグネシウム部位が多くなるので金属光沢部を確認することができる。赤外炉実験で付着した箔状マグネシウムを図 6 に示す。さらに、管状炉で図 1 に示した反応容器を用いた加熱状況を可能なかぎり模擬した加熱実験を行い、金属状の固化物が石英管に付着し、一部はそげ落ちた。

太陽炉による実証実験において、試料全域を安定的に 1200℃に加熱することが重要になる。反応容器に装荷する量の最適化を図るとともに受光部、伝熱・断熱構造部を改良し、「反応に費やすエネルギー／太陽集光エネルギー」率(熱利用効率)を 0.25 から 0.5 の範囲で確保することで生成物量を重視した実証を実現し、採算性評価の精度確保が緊縛の課題である。熱利用効率が 0.5 程度になれば太陽光発電・水電解によって製造した水素エネルギー利用を上回るエネルギー利用率を確保することが見通せる。同時に、利用に適した形態でマグネシウムを回収する機構構築を目指す。

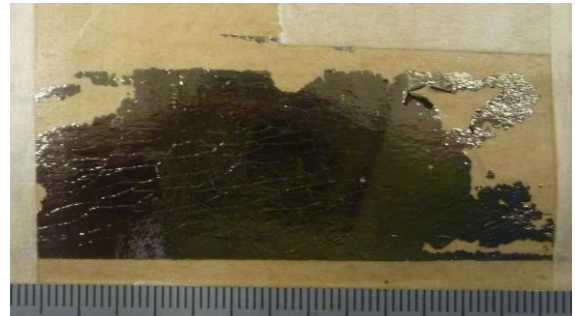


図 6 付着したマグネシウム箔

マグネシウムと水の反応による水素製造技術開発

マグネシウムの加水分解による水素生成効率の向上と装置化をイメージした概念設計と実証評価を行っている。今年度は、図 7 に示す卓上試験装置を用いた常圧過熱水蒸気下での水素生成実験を行い、マグネシウム装填部位で 350℃に達した条件で安定的に水素が発生した。また、マイクロ波でマグネシウムを直接加熱することで反応に必要な熱入力量の低減を試み、150℃で水素の発生を確認した。

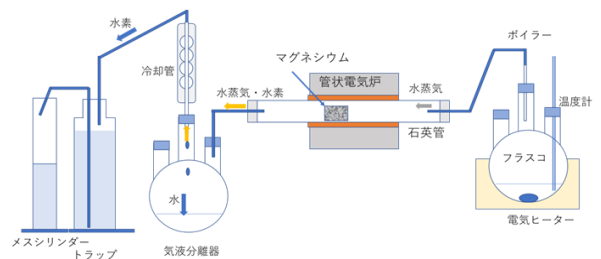


図 7 常圧過熱蒸気による水素製造装置

結言

太陽炉を用いて酸化マグネシウムの熱還元実証実験を継続し、マグネシウムの生成を確認した。同時に、電気炉で太陽炉による実証実験を検証すると共に反応過程を評価し、必要な条件を示した。さらに、マグネシウムの加水分解による水素製造において、過熱蒸気とマイクロ波の併用による加熱で反応に必要な温度を 200℃程度低温化した。この構想の実現により、高圧水素気体や液化水素などで輸送・貯蔵する方法に比べてエネルギー資源を安定に保持できる。そして、持続利用可能なエネルギー源による水素製造が可能となり、水素利用の課題解消において製造／輸送・貯蔵／利用の全局面で有効的に機能する。

参考文献

- 1) 小濱泰昭、NGO「キュレム」、大丈夫だよ！心配ないから—マグネシウム社会の未来 (2014)

2.1.2.2

バクテリアを用いた水素製造技術の導入調査
 Research of Carbon-Free Hydrogen Production Using Bacteria
 田中良和^{*1}
 Yoshikazu TANAKA

Abstract

Photoproduction of hydrogen by photosynthetic bacteria is one of the key technologies that produce carbon-free hydrogen. In this study, we utilized the RAPD method for the genetic fingerprinting of mutant candidates created by ion-beam breeding technology and examined mutations of genes related to hydrogen production.

要約

光合成細菌を用いた水素生産は、カーボンフリー水素生産を実現するための重要技術として有望である。今回、イオンビーム育種技術によって作成した変異候補を RAPD 法を用いて調べ、水素生産に関連する遺伝子の変異を調べた。

緒言

二酸化炭素を排出しないカーボンフリーの水素社会を実現するためには、再生エネルギーの利用、化石燃料からの脱却など根本的な技術革新が必要となる。本事業では、水素生産方法の多様化の一つとして、シアノバクテリアの水素生産機能に着目し、イオンビーム育種技術を用いて水素生産能力を向上させたシアノバクテリア変異株の作成を目的とする。これまでに、イオンビーム照射によって得た変異体候補株から水素生産に関連する遺伝子に変異が入ったものを選抜するために、RAPD (Random Amplified Polymorphic DNA) 法の適用を試みた。

成果の概要

イオンビーム照射後の継代培養株6種類について、定法によって DNA を抽出した後、PCR によってヒドロゲナーゼおよびニトロゲナーゼ遺伝子を増幅した。得られた各 DNA 断片を精製し、これを鋳型として 80 種類の 10 塩基からなるプライマーを用いて RAPD を行った。反応は rTaq DNA Polymerase (TaKaRa)を用い、反応条件は、94℃ 3 分の後、94℃ 30 秒、44℃ 60 秒、72℃ 90 秒を 40 サイクル行った。反応後の試料は、Agilent2100 バイオアナライザーを用いて大きさを調べた。その結果、ヒドロゲナーゼ (*hup L*)遺伝子においては、6 種類の RAPD プライマーで異なる大きさの DNA 断片を複数得ることが出来た(図1)。これらの多型は遺伝子内の変異を反映したものと考えられる。この方法を用いることで、イオンビーム照射後の生存菌株が少量増えた段階で、該当遺伝子に変異が入った菌株を選抜することが可能となった。

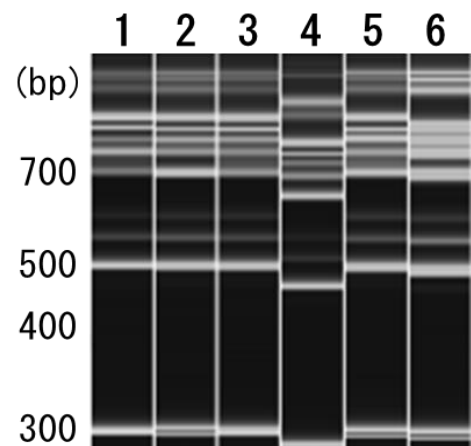


図 1 RAPD 解析

Hup DNA を鋳型とした一例を示した。
 Lane 1-3: Anabena, Lane 4-6: Nostoc
 Agilent2100 バイオアナライザーを使用

結言

今後は、多型が観察された菌株に対して塩基配列の解析を進めるとともに、小スケールでの培養を行って、発生水素量を直接モニタリングする選抜方法を検討する。また、増殖した菌体の有効利用や、細胞外多糖類の生産菌などを利用して、トータルで水素生産コストを下げる方法を検討していく。

^{*1}(公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室
 本研究は、(公財) 若狭湾エネルギー研究センターが福井県からの受託研究として実施したものである。

2.1.2.3

太陽炉と太陽熱エネルギー利用研究
Research on Applications of Solar Thermal Energy by Solar Furnaces篠田佳彦^{*1}、山岸隆一郎^{*2}
Yoshihiko SHINODA and Ryuichiro YAMAGISHI

フレネルレンズで太陽光を集光して超高温場を作り出す「太陽炉」研究を平成 17 年(2005 年)から実施している。この間に大型／小型太陽炉を設計・製作し、かつ高度化しながら各種の実験研究に供した。

以来、太陽炉の新たな展開を模索し、無尽蔵の高温活用方策の充実を目指してきた。「新エネルギー技術調査研究事業」(水素研究)のうちの「マグネシウムの酸化還元反応を活用した水素エネルギー循環サイクルの構築」において、太陽炉を活用したマグネシウム還元法の開発を 2017 年度から取り組み、マグネシウム製錬で主流となっている珪素熱還元法を適用した実証実験を実施している。詳細は、別稿「マグネシウムの酸化還元反応を活用した水素エネルギー循環サイクルの構築」に記す。このなかで、手動追尾式小型太陽炉(レンズサイズ 1.4 m X 1.0 m)の改良と市販の追尾システムを活用した自動追尾式小型太陽炉の開発を行った。

今後も太陽炉の新たな展開を模索し、フレネルレンズを用いた透過・屈折型の太陽炉の頑強性など利点を活かすことで、これまでに蓄積したエネ研の独自かつ特徴的な成果を示し続けていく。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー開発グループ、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・企画支援広報部・技術相談室

2.2. 医療分野

2.2.1. 粒子線がん治療高度化のための生物応答解明研究

2.2.1.1

異種放射線の併用によるがん治療の高度化に向けた治療生物学的な検討

Therapeutic Biological Verifications for Advanced Treatment of Cancer by Combining Heterologous Radiations

前田宗利^{*1}、前田未佳^{*1}、松本英樹^{*2}、長谷川崇^{*3}、水嶋慧^{*1}、山東新子^{*1}、久米恭^{*1}

Munetoshi MAEDA, Mika MAEDA, Hideki MATSUMOTO,

Takashi HASEGAWA, Satoshi MIZUSHIMA, Shinko SANDO and Kyo KUME

Abstract

At Fukui Prefectural Hospital, a new clinical trial of "Combined Concurrent Chemoradiotherapy" has been started, which can accumulate energy at the local tumor site by combining proton beam and conventional X-ray irradiation. We are pursuing various therapeutic biological verifications in anticipation of further advancement of this therapeutic modality under cooperation rooted in Fukui area.

要約

福井県立病院において、従来の X 線治療と線量分布の良い陽子線治療を併用する新しい「混合化学放射線治療」の臨床研究が開始されている。我々は、地域に根差した連携の下、本治療法の更なる高度化を見据えた様々な治療生物学的検証を進めている。

緒言

がん治療の高度化を図る方法の一つに、既存治療法の長所を組み合わせた集学的治療法の積極的な活用が挙げられる。これまでの研究から、陽子線照射と X 線照射の併用により、両者の単独照射の結果から予測されるよりも効率よく細胞死が誘導されることが見出された(図1)。本研究は、陽子線と X 線の照射順序、吸収線量比、照射間隔が細胞死の誘導に与える影響を解析し、併用照射による細胞死増大の最適化条件およびその分子機構の解明を目指すものである。また、モデル動物を用いた実験的放射線治療において異種放射線の併用による治療効果を解析し、混合放射線治療の更なる高度化に向けた基礎的なデータを蓄積して行く。本研究の推進を通じて、放射線治療によるがんの治療効果の向上に資するのみならず、薬剤併用などによる集学的治療法の確立においても将来的に必要な不可欠な知見の蓄積につながると考えられる。

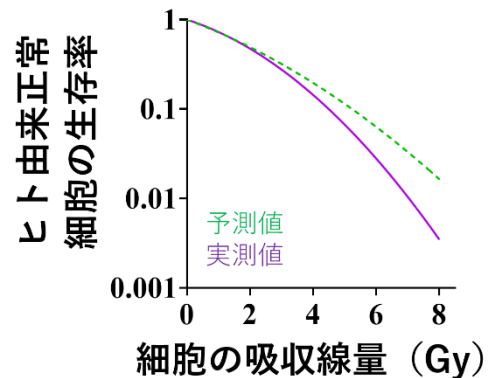


図 1: 陽子線と X 線を模擬的に同時に照射したヒト正常細胞(WI-38)における細胞致死効果の予測値と実測値。予測値は陽子線および X 線の単独照射による細胞致死効果の和(生存率の積)として求めた。

成果の概要

1. 陽子線と X 線による併用照射の間隔が細胞致死効果に与える影響の検証

ヒト胎児肺由来正常細胞(WI-38)およびヒト肺がん由来細胞(A549)を用いて、「陽子線を照射した後に X 線を照射した場合」と「X 線を照射した後に陽子線を照射した場合」の双方について、照射の間隔が細胞致死効果に与える影響を解析した。各照射条件で得られた細胞生存率から図1に示した照射の間隔が0時間の場合の予測生存率(陽子線および X 線の単独照射による細胞致死効果の和)を基準として算出した細胞致死効果比を図2に示した。

いずれの照射条件においても、照射間隔の延伸により細胞致死効果は減弱し、4 時間以上で同程度の細胞致死効果に収束することが示された。また、照射間隔が 2 時間の場合、いずれの細胞においても、「陽子線を照射してから X 線を照射する場合」よりも「X 線を照射してから陽子線を照射する場合」に高い細胞致死効果が得られた。観察された細胞の放射線感受性変化は、時間差をもって質の異なる DNA 損傷が形成された場合の細胞内の情報伝達機構の変化に依存して誘導されることが考えられる。これまで、放射線の種類による生物学的影響の大きさは、放射線加重係数を用いて正規化され、相加的に評価されてきた。本研究から、異種放射線被ばく

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究室、^{*2}福井大学・医学系部門・医学領域・国際社会医学講座・放射線基礎医学分野、^{*3}(同)ハセテック

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県からの受託研究として、福井大学と共同で実施したものである。

のパラメーターによって生物影響が変化することが明らかとなり、単純な相加的評価法では複合放射線に曝露される環境における生物影響を過小評価している可能性が示唆された。

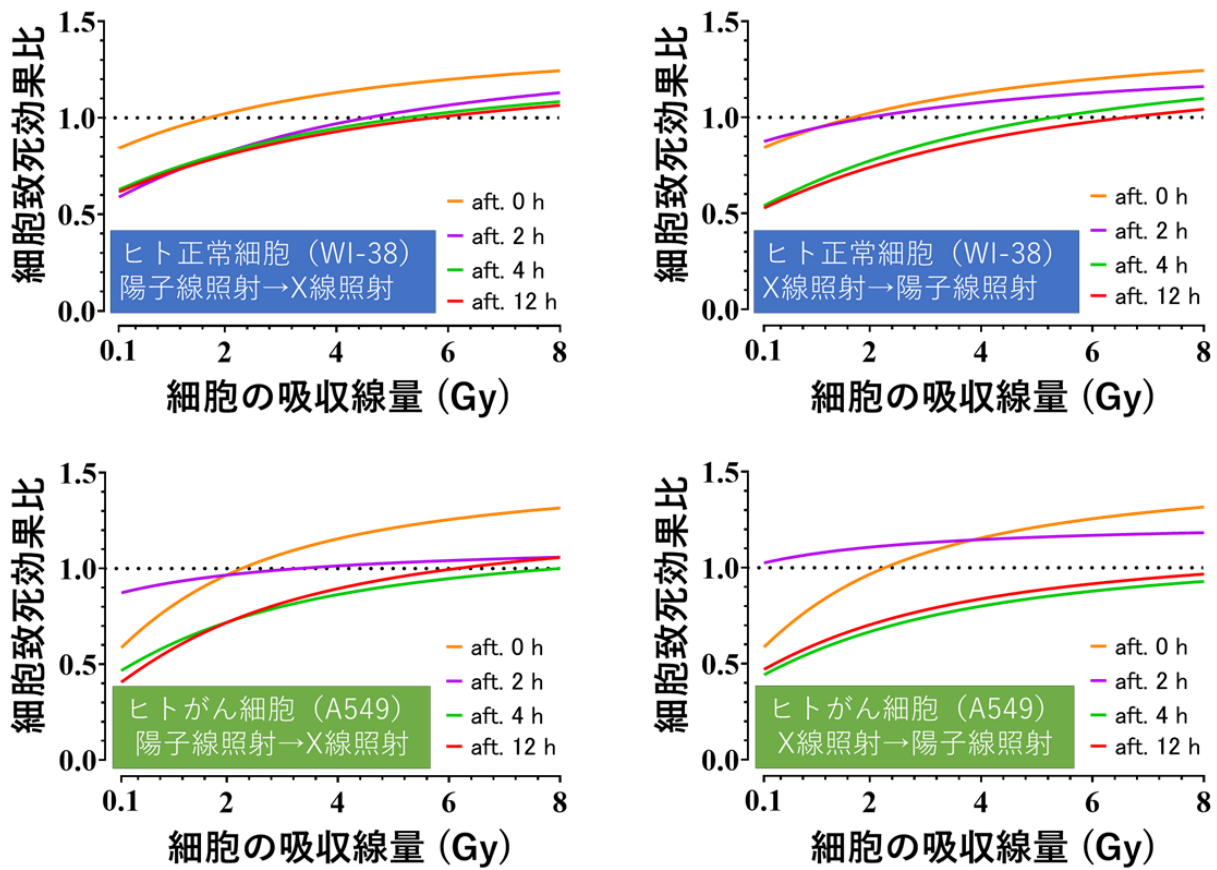


図 2: 陽子線と X 線の照射の順番および間隔がヒト正常細胞およびヒトがん細胞の細胞致死効果に与える影響の比較。陽子線と X 線は同線量を照射し、細胞の合計吸収線量を図の横軸に示した。各照射条件で得られた細胞生存率から、模擬的同時照射における細胞致死効果の予測値(陽子線および X 線の単独照射による細胞致死効果の和)を基準(=1.0)として細胞致死効果比を算出した。

2. 併用照射における可変パラメーターが DNA 損傷およびその修復に与える影響の評価

WI-38 細胞および A549 細胞に陽子線を照射した場合の DNA 損傷の誘発量および修復効率を評価するために、DNA 二本鎖切断(DSB)の指標であるリン酸化ヒストン H2AX (γ -H2AX)のフォーカス形成およびその集積度の時間変化を詳細に解析した。その結果、1.0~8.0 Gy の陽子線に曝露された細胞における γ -H2AX フォーカスの脱リン酸化(修復過程)は、多くの場合、フォーカス形成のピークから短時間(0.5~2 時間)のうちに開始されることが明らかとなった。一方で、1.0 Gy 未満の比較的低線量域では、ヒストン H2AX のリン酸化がピークとなるまでに 8~10 時間と長時間を要することから、細胞の DSB 修復機構の状態と密接に関係している可能性が示唆された。引き続き、さらに詳細な解析を進めていく。

結言

細胞は、細胞外からの刺激を感知し、細胞内でその情報を伝達する機構を持っている。DNA 損傷に起因する情報伝達は、DNA 損傷の感知によって開始され、最終的に増殖阻害、DNA 損傷修復、細胞死などの細胞応答を誘導する。粒子放射線と光子放射線とは、被ばく領域における電離密度が異なるため、生じる DNA 損傷の質が異なると考えられる。この様な異種放射線の併用照射では、細胞応答の起点となる DNA 損傷の質が異なるために、「照射の順序」や「照射の間隔」によって細胞致死効果に変化することが考えられる。本研究では、引き続き、併用照射の可変パラメーターである「吸収線量比」が細胞致死効果に与える影響を検証する。また、免疫蛍光染色による DNA 修復関連タンパク質の可視化解析を継続し、併用照射の各条件における DNA 損傷の量および質、その修復効率と細胞致死効果の関係についても検証を進める。さらに、動物レベルにおける治療効果の検証を念頭に置きつつ、遺伝子発現解析などを通じて、これらの興味深い現象の分子機構についても検証を進めていく予定である。

2.2.1.2

LET カウンターを用いた粒子線場における脳壊死形成に関するマイクロドシメトリ

Microdosimetry for Formation of Brain Radiation Necrosis in Particle Irradiation Field using LET Counter

櫻井良憲^{*1}、近藤夏子^{*1}、高田卓志^{*1}、呼尚徳^{*2}、久米恭^{*3}、前田宗利^{*3}

Yoshinori SAKURAI, Natsuko KONDO, Takushi TAKATA, Naonori KO, Kyo KUME and Munetoshi MAEDA

Abstract

The objective of this research is to approach the biological effects on the cells such as vascular endothelial cell and nerve glial cell, accompanying brain necrosis formed by the particle radiation such as proton, helium-particle and neutron, from the viewpoints of physics by the microdosimetry using silicon-on-insulator microdosimeter (SIM). As SIM did not work for malfunction, the microdosimetric experiments using LET counter were performed in 2018. The irradiation experiments for the preparation of the brain-necrosis-model mice were performed using neutron, proton and helium particle. The prepared brain-necrosis-model mice were analyzed by MRI images, staining pathology images, HR-MALDI-IMS, LC-MS, etc..

要約

本研究は、陽子線、ヘリウム線、中性子線等の異なった粒子線照射により形成される脳壊死に伴い生じる血管内皮、神経・グリア細胞などに対する生物学的効果について、Silicon-on-insulator microdosimeter (SIM)を用いたマイクロドシメトリにより物理的な視点からのアプローチを試みることを目的としている。平成 30 年度は、不調により SIM を利用できなかったことから、LET カウンターを用いたマイクロドシメトリ実験を行った。また、マウス脳壊死モデル作成のために、中性子線、陽子線、ヘリウム線による照射実験を実施した。作成したマウス脳壊死モデルの解析を、MRI 画像、染色病理像、HR-MALDI-IMS、LC-MS 等により行った。

緒言

平成 24 年度より陽子線およびヘリウム線による脳壊死モデル作成のための研究を行っており、その技術はほぼ確立されている。確立された技術により作成されたマウス等の脳壊死モデルを用いて、集積される生理活性脂質の同定、陽子線、ヘリウム線等の粒子線の違いによる生物学的効果の評価等、様々な脳壊死研究を行っている¹⁾。特に、脳壊死に伴い生じる血管内皮、神経・グリア細胞等の脳構築細胞に対する生物学的効果の評価に重点を置いている。本研究では、これらの細胞に対する生物学的効果について、物理的な視点から粒子線の違いによる生物学的効果の違いの説明を試みる。

細胞レベルでの生物学的効果については、付与された物理的な吸収線量(Gy)の評価だけでなく、ミクロなレベルでのエネルギー付与の評価、すなわち、マイクロドシメトリが重要である。実験的な評価としては LET カウンター等の利用が考えられるが、 μm オーダーですべき評価を mm あるいは cm オーダーに空間的に変換した評価であり、真のマイクロドシメトリにはなっていない。粒子線治療における細胞レベルでの生物学的効果評価の高精度化のために、真のマイクロドシメトリ手法の確立が望まれている。そこで、特殊な検出器である Silicon-on-insulator microdosimeter (SIM)に着目している²⁾。この検出器を用いることで、真の実験的マイクロドシメトリが可能になると考えている。

マイクロドシメトリを組み入れた脳壊死形成に関する評価は、脳組織を構築する細胞に対する生物効果・免疫応答を理解し、悪性脳腫瘍に対する粒子線治療手法の改善に繋がる可能性があると考えている。

方法

当初は、粒子線照射による脳壊死形成に伴い生じる脳構築細胞に対する生物学的効果に関するマイクロドシメトリについて、SIM 検出器を用いて、陽子線、ヘリウム線、炭素線、中性子線に関するマイクロドシメトリ実験を行う予定であった。SIM 検出器については、本研究と別予算を確保して、University of Wollongong・Centre for Medical Radiation Physics (UOW-CMRP)から入手する予定であった。しかしながら、予算確保ができず入手は見送り、UOW から SIM を貸与することとした。

^{*1}京都大学・複合原子力科学研究所・粒子線腫瘍学研究センター、^{*2}京都大学大学院・工学研究科・原子核工学専攻、^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究室

本研究は、公募型共同研究事業として(公財)若狭湾エネルギー研究センターが京都大学と共同で実施したものである。

平成 30 年 11 月、UOW のスタッフの来日に合わせて、京都大学複合原子力科学研究所(KUR)および若狭湾エネルギー研究センターにおいて SIM の特性評価実験を行うことを計画した。まず KUR 重水中性子照射設備において、中性子に対する特性評価実験を行った。しかしながら、SIM の不調により、有効なデータが得られなかった。そのため、若狭湾エネルギー研究センターでの特性評価実験は断念した。代わりに、KUR 重水中性子照射設備等で LET カウンターを用いたマイクロシメトリ実験を行った。

マウスへの脳壊死モデル作成については、中性子線、陽子線、ヘリウム線による照射実験を実施した。また、細胞への照射実験も行い、放射線線質の違いによる影響を評価・比較した。

結果・考察

KUR 重水中性子照射設備における LET カウンターを用いたマイクロシメトリ実験により、中性子照射モード、すなわち、中性子エネルギースペクトルによるマイクロシメトリックスpektrum(リニアルエナジースpektrum)の相違が確認できた。図 1 に、KUR 重水中性子照射設備熱外中性子照射モードにおける LET カウンターによるリニアルエナジー分布の一例を示す。

若狭湾エネルギー研究センターおよび KUR 重水中性子照射設備において作成したマウス脳壊死モデルの解析を、MRI 画像、染色病理像解析、HR-MALDI-IMS、LC-MS 等により行った。これらの解析結果から、放射線脳壊死モデルでは慢性期に神経細胞やアストロサイトから LPC の放出、ミクログリアの活性化が続いていることが推測された。図 2 に、マウス脳壊死モデルの HR-MALDI-IMS による解析結果の一例を示す。

LPC の前駆体であるホスファチジルコリンの K+イオン phosphatidylcholine: PC(16:0/20:4)+K+の挙動からも、時間経過とともに脳全体に炎症が広がっていることが推測された。

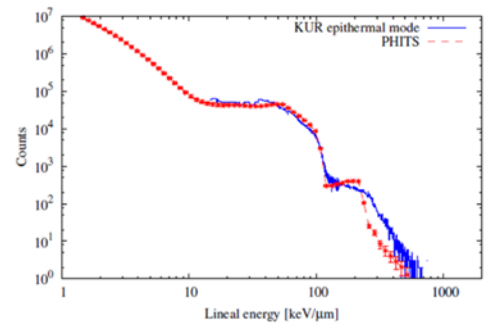


図 1 熱外中性子照射による LET カウンターによるリニアルエナジー分布

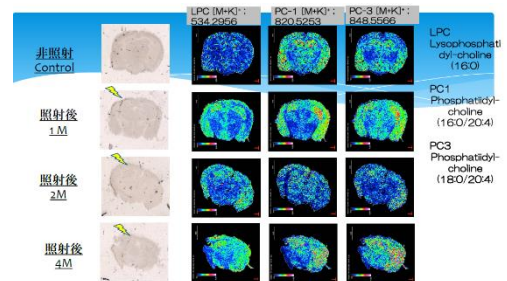


図 2 HR-MALDI-IMS による解析結果

結言

UOW グループの協力のもと SIM への照射実験を計画し、若狭湾エネルギー研究センターでの実験に先立って、KUR 重水中性子照射設備において中性子照射実験を行った。しかしながら、SIM の不調により有効なデータが得られず、若狭湾エネルギー研究センターでの特性評価実験も断念した。不調の原因としては、検出器あるいは回路の中性子線による故障が考えられるが、極めて出力が低い状態で起こっていることから、他の要因も考えられる。現在、原因については調査中である。

SIMの代わりに、KUR重水中性子照射設備においてLETカウンターを用いたマイクロシメトリ実験を行った。中性子照射モード、すなわち、中性子エネルギースペクトルによるマイクロシメトリックスpektrum(リニアルエナジースpektrum)の相違が確認できた。

マウス脳壊死モデル作成のための照射実験は予定どおりに実施できた。脳壊死形成に関する解析を、MRI 画像、染色病理像解析、HR-MALDI-IMS、LC-MS 等により行った。これらの解析結果から、放射線脳壊死モデルでは慢性期に神経細胞やアストロサイトから LPC の放出、ミクログリアの活性化が続いていることが推測された。LPC の前駆体であるホスファチジルコリンの K+イオン phosphatidylcholine: PC(16:0/20:4)+K+の挙動からも、時間経過とともに脳全体に炎症が広がっていることが推測された。

参考文献

- 1) N. Kondo et al., Appl. Radiat. Isot., 106, 242 (2015)
- 2) L. T. Tran et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 62, 504 (2015)

2.2.1.3

子宮頸がんに対する粒子線治療の有効性と治療効果予測に関する基礎的検討

Predictive Value of ^{18}F -FDG and ^{18}F -FLT Uptake in Cervical Cancer Treated with Charged Particle Irradiation清野 泰^{*1}、牧野 顕^{*1}、森哲也^{*1}、岡沢秀彦^{*1}、久米恭^{*2}

Yasushi KIYONO, Akira MAKINO, Tetsuya MORI, Hidehiko OKAZAWA and Kyo KUME

Abstract

The reduction of ^{18}F -FLT uptake preceded the change in cell proliferation ability at 96 hr after charged particle irradiation. Therefore, ^{18}F -FLT is a promising tracer for monitoring the early response of tumor to charged particle irradiation in cervical cancer.

要約

子宮頸部腺がんおよび扁平上皮がん細胞に対する粒子線照射において、 ^{18}F -FLT の集積低下が 4 日後の細胞数の低下と相関していた。このことより子宮頸がんの粒子線治療においては、 ^{18}F -FLT の集積量低下を指標に治療効果を予測できる可能性が示された。

緒言

子宮頸部腺がんは増加傾向にあるが、検診で見つかり難い上に、放射線治療や化学療法が効きにくい性質を持っている。このため腺がんに対する有効な治療法の開発が望まれている。そこで、粒子線治療は放射線治療抵抗性のがん細胞に対して従来の放射線治療よりも効果があるというこれまでの共同研究成果をもとに、子宮頸がんの腺がん細胞に対する粒子線治療の有効性を検討することを目的とした。加えて、治療戦略の決定や患者の QOL の向上に重要なファクターである治療開始早期における治療効果予測を PET 分子イメージングにより達成可能であるかを基礎実験にて検証することを目的とした。

方法

子宮頸部腺がん細胞株である HeLa 細胞と扁平上皮がん細胞株である ME-180 細胞に、0、0.1、0.5、1、5、10 Gy の X 線、陽子線、炭素線をそれぞれ照射した。照射1日から4日後までの生細胞数を計測した。また、照射 26 時間後に、PET 薬剤である ^{18}F -FDG および ^{18}F -FLT を添加し、それぞれの薬剤の細胞への集積量を測定した。

結果・考察

HeLa 細胞の照射 4 日後で比較すると、炭素線照射は 1、5、10 Gy においてコントロール群に対して有意な細胞数の減少が認められた。一方、陽子線と X 線照射では 5、10 Gy において有意な減少が認められた。このことより、腺がん細胞に対する炭素線照射の優位性が確認できた。一方、ME-180 細胞の 4 日後では、X 線照射では 0.5～10 Gy で有意な減少が認められたが、陽子線と炭素線照射では、1～10 Gy で有意な減少が観察された。このことより扁平上皮がん細胞に対する粒子線照射の優位性は確認出来なかった。細胞内集積実験において、HeLa 細胞では、 ^{18}F -FLT の集積は、照射 4 日後の細胞数の減少に相関して低下していたが、 ^{18}F -FDG の集積には変化が認められなかった。一方、ME-180 細胞においては、X 線照射においては ^{18}F -FLT と ^{18}F -FDG とともに有意な変化が認められなかった。陽子線と炭素線照射では、 ^{18}F -FLT と、 ^{18}F -FDG の集積は、照射 4 日後の細胞数の減少に相関して低下していた。

結言

子宮頸部腺がんおよび扁平上皮がんの粒子線治療においては、 ^{18}F -FLT の集積量低下を指標に治療効果を予測できる可能性が示された。

^{*1}福井大学・高エネルギー医学研究センター、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ
本研究は、公募型共同研究事業として(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井大学と共同で実施したものである。

2.2.1.4

陽子線頭頸部がん治療における放射線性口腔粘膜障害の発症動態および病態の解析

Analysis of Pathophysiological Kinetics and Symptoms of Oral Mucositis

Developed during Radiotherapy for Head/neck Cancer

松本英樹^{*1}、前田宗利^{*2}、前田未佳^{*2}、長谷川崇^{*3}、水嶋慧^{*2}、山東新子^{*2}、久米恭^{*2}

Hideki MATSUMOTO, Munetoshi MAEDA, Mika MAEDA,

Takashi HASEGAWA, Satoshi MIZUSHIMA, Shinko SANDO and Kyo KUME

Abstract

The oral mucositis is developed in most of the head/neck cancer patients treated with radiotherapy as a side-effect. However, a medicine for oral mucosal diseases remains undeveloped until now. The patients developing oral mucosal disease have been treated with symptomatic treatment using a mouthwash and analgesics and the radiotherapy has been interrupted in the patients with worsening symptoms. This project was performed to elucidate pathophysiological kinetics and symptoms of oral mucositis developed during radiotherapy for head/neck cancer.

要約

頭頸部がんに対する放射線治療において、ほぼ全ての患者に副作用として発症するのが放射線性口腔粘膜障害である。しかしながら、放射線性口腔粘膜障害に対する予防薬/治療薬は存在せず、発症後に含嗽による口腔ケア、ステロイド軟膏塗布による粘膜保護、消炎・鎮痛剤による痛みの緩和といった対症療法によって対処されているのみである。そこで放射線性口腔粘膜障害の発症動態および病態を明らかにするために、正常マウスへの X 線照射により口腔周辺の正常組織反応の動態メカニズムを放射線生物学的、組織化学的、細胞生物学的および分子生物学的手法を用いて詳細に解析した。

緒言

これまでの研究において、陽子線に対する正常組織反応について放射線生物学的、組織化学的、細胞生物学的および分子生物学的に解析し、陽子線がん治療における正常組織の低線量被ばくの安全性担保に資する科学的エビデンスを蓄積してきた。本研究では、陽子線頭頸部がん治療の際に発症する放射線性口腔粘膜障害の発症動態および病態を明らかにするために、陽子線照射された正常マウスの放射線性口腔粘膜障害の発症動態および病態を明らかにした。

成果の概要

- (1) マウス頭頸部への陽子線(16 Gy)単回照射後の口腔粘膜障害の病態評価:陽子線照射後 7 日目から顕著な体重減少が認められ、11 日目以降回復した。この体重減少に伴い、口腔粘膜障害の発症が認められ、照射後 9~14 日目で病態平均スコアが最大 13.0 まで増悪したが、その後回復した。その症状は頸部前方の体毛の汚れ、口腔粘膜の充血、舌先の浮腫、上下口唇の浮腫/びらんが顕著であった。
- (2) 陽子線(16 Gy)単回照射により誘発される口腔粘膜障害に対する薬剤 A の防護効果:薬剤 A(2.83 mg/kg B.W.)を陽子線照射前日、照射直後、照射 1 日後、照射 2 日後、照射 3 日後に投与したマウスでは、陽子線照射後 7 日目から顕著な体重減少が認められ、11 日目以降回復した。この体重減少に伴い、口腔粘膜障害の発症が認められたが、照射後 9 日目で病態スコアが 5.5 まで増悪した後に速やかに回復した。その症状は軽微で、頸部前方の体毛の汚れおよび口腔粘膜の充血/浮腫が顕著であった。

結語

頭頸部がんに対する放射線治療を想定して、マウスの頭頸部(耳介より前方部)に陽子線を局所照射し、口腔粘膜障害の発症動態を解析した。また口腔粘膜障害に対する薬剤 A の防護効果を解析した。陽子線照射により誘発される口腔粘膜障害に対して薬剤 A の投与が有効であることが示された。

^{*1} 福井大学・医学系部門・医学領域・国際社会医学講座・放射線基礎医学分野、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究室、^{*3}(同)ハセテック

本研究は、公募型共同研究事業として(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井大学と共同で実施したものである。

2.2.1.5

細胞の放射線感受性を決定する情報伝達機構の解明
Analysis of Signal Transduction Mechanism Deciding Cellular Radiosensitivity

前田宗利^{*1}、前田未佳^{*1}、富田雅典^{*2}

Munetoshi MAEDA, Mika MAEDA and Masanori TOMITA

Abstract

The progress of recent microbeam irradiation technology has enabled the analysis of the cellular response by the energy deposition to the local site of a cell. Therefore, the response of molecules and cells corresponding to the irradiated regions within the cells can be evaluated clearly. We have been studying the relationship between the irradiation domain and the molecular and cellular response by using soft X-ray microbeams.

要約

近年のマイクロビーム照射制御技術の飛躍的な発展によって、細胞内の任意の局所部位へ放射線を容易に照射することができるようになった。我々は、軟 X 線マイクロビームを用いて細胞局所を照射することにより、照射部位と細胞応答および細胞内の分子応答との関係について解析を進めている。

緒言

これまでの研究から、「細胞核に与える線量をそろえて」X 線マイクロビームで照射した場合、細胞核のみを照射した場合に比べて細胞全体を照射した場合には放射線感受性が減弱されることが明らかとなった。細胞質への照射の有無による遺伝子発現変化を解析したところ、細胞質への照射が無い場合、細胞質から細胞核への ATM (ataxia-telangiectasia mutated) の移行 (nucleo-shuttling) が起こらず、低線量域 (≤ 2 Gy) において DNA 損傷修復機構が誘導されていない可能性が示唆された。本研究では、ATM 依存的/非依存的な DNA 修復関連タンパク質を免疫蛍光染色によって可視化し、この仮説を検証した。

成果の概要

ヒト胎児肺由来正常細胞 (WI-38) の細胞核あるいは細胞全体を 1~10 Gy で照射し、ATM 依存的に誘導されるリン酸化ヒストン H2AX (γ -H2AX) のフォーカス形成および ATM 非依存的にユビキチン化依存性誘導によって DNA 損傷部位に集積する 53BP1 を免疫蛍光染色を用いて可視化した。その結果、5 ミクロン角の X 線マイクロビームを用いて細胞核のみを照射した場合、 γ -H2AX のフォーカス形成は 5、10 Gy でのみ観察されたが、53BP1 のフォーカスは 1 Gy から観察され、5、10 Gy では γ -H2AX のフォーカスと共局在することが明らかになった (図 1)。一方、100 ミクロン角の X 線マイクロビームを用いて細胞の全体を照射した場合、 γ -H2AX、53BP1 の双方とも 1 Gy からフォーカスを形成し、両者は共局在していることが確認された (図 2)。

観察したすべての条件において 53BP1 のフォーカスが形成されており、X 線マイクロビームによる照射によって確実に細胞核内に DNA 損傷が誘導されていることが示された。細胞質への照射が無い場合に、低線量域 (≤ 2 Gy) における H2AX のリン酸化が生じないことから、この線量域では ATM 依存的な DNA 損傷応答が十分に誘導されていないことが確認された。細胞核に加えて細胞質を照射することによって生じる ATM の核内移行が、細胞核内における ATM を介したシグナル伝達機構の活性化に重要な役割を果たし、その結果として放射線抵抗性が誘導されると考えられる。

結言

細胞質へ放射線のエネルギーが与えられることによって開始される細胞内の情報伝達によって、細胞の放射線感受性や細胞間情報伝達因子の生成や放出を司るメカニズムが制御あるいは修飾されており、低線量域における放射線生物応答のターゲットとしての細胞質の重要性は明らかである。今後の更なる研究の推進により細胞質を起点とした ATM を介する情報伝達機構の詳細を明らかにしていく。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究室、^{*2}(一財)電力中央研究所・原子力技術研究所・放射線安全研究センター

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが(一財)電力中央研究所と共同で実施したものである。

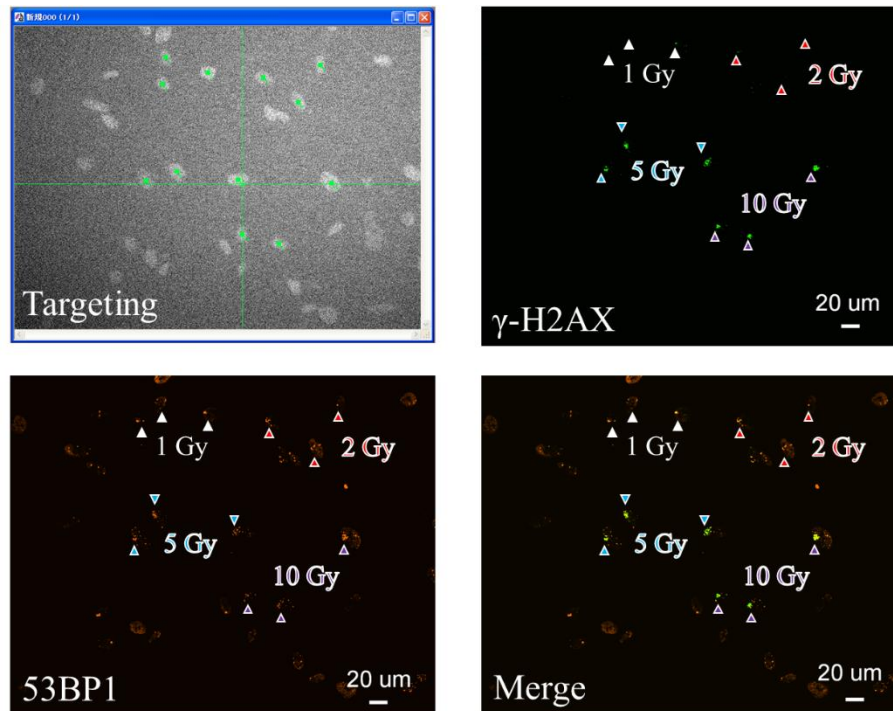


図 1:5 ミクロン角の X-線マイクロビームを用いて WI-38 細胞の細胞核を 3 個ずつ 1～10 Gy で照射し、共焦点レーザー顕微鏡 (FV300、Olympus) を用い、免疫蛍光染色した γ -H2AX (緑色) および 53BP1 (赤色) を可視化した。“Targeting”中の緑色マークおよび各パネルの矢印が照射した細胞核を示す。各細胞の照射線量はパネル中に示した。

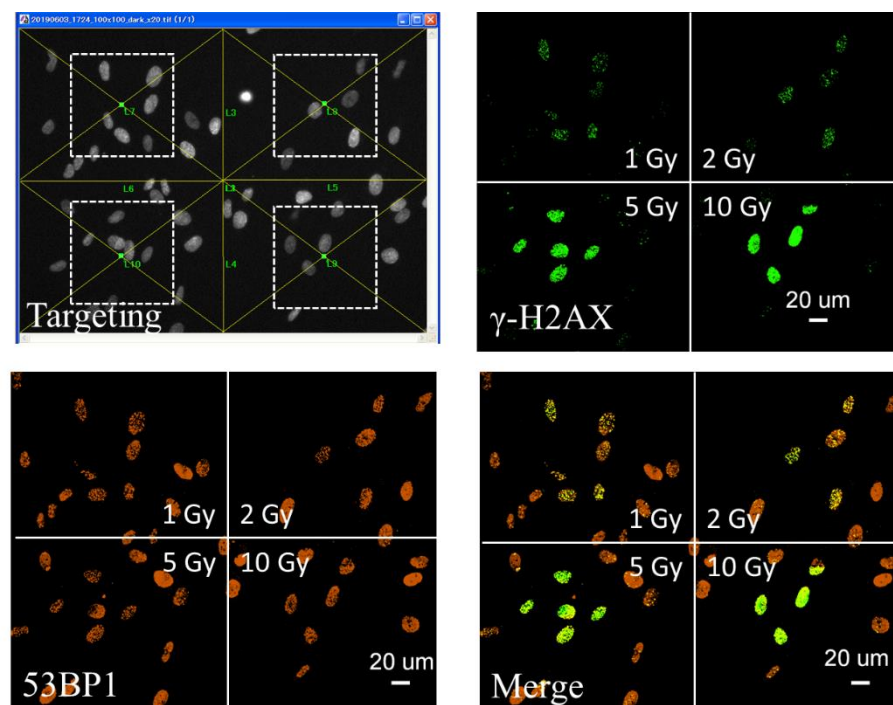


図 2:100 ミクロン角の X-線マイクロビームを用いて WI-38 細胞の細胞全体を 1～10 Gy で照射し、共焦点レーザー顕微鏡 (FV300、Olympus) を用い、免疫蛍光染色した γ -H2AX (緑色) および 53BP1 (赤色) を可視化した。“Targeting”中の白色枠が照射領域を示す。照射線量は、各パネル中に示した。

2.2.1.6

陽子線誘発バystanダー応答誘導メカニズムの解明に向けた
ヒト培養細胞における新規バystanダー因子の探索

Analysis of Novel Bystander Factors in Human Cultured Cells

toward Elucidation of Induction Mechanisms for Proton-induced Bystander Responses

松本英樹^{*1}、Carmel Mothersill^{*2}、Colin Seymour^{*2}、前田宗利^{*3}、前田未佳^{*3}、長谷川崇^{*4}、水嶋慧^{*3}、山東新子^{*3}、久米恭^{*3}

Hideki MATSUMOTO, Carmel MOTHERSILL, Colin SEYMOUR, Munetoshi MAEDA, Mika MAEDA,

Takashi HASEGAWA, Satoshi MIZUSHIMA, Shinko SANDO and Kyo KUME

Abstract

Induction mechanisms for proton-induced bystander responses are not fully known. This project was performed to elucidate the contribution of *p53* to induction of proton-induced bystander responses using radiation biological, cell biological and molecular biological techniques.

要約

陽子線によって誘発されるバystanダー応答の誘導メカニズムには、まだ不明な点が多く残されている。そこで陽子線誘発バystanダー応答の誘導メカニズムを明らかにするために陽子線誘発バystanダー応答誘導におけるがん抑制遺伝子 *p53* の寄与について放射線生物学的、細胞生物学的および分子生物学的に明らかにすることを目的として本研究を実施した。

緒言

1992 年、Little と Nagasawa によって放射線誘発バystanダー応答が発見されて以来、その誘導メカニズムについて精力的に研究が行われ、 α 線、 γ 線、あるいは X 線によって誘発されるバystanダー応答の誘導メカニズムについては多くの論文が発表されてきている。しかしながら、放射線がん治療に用いられている炭素線および陽子線によって誘発されるバystanダー応答の誘導メカニズムについてはまだ不明な点が多く残されている。そこで我々は、陽子線誘発バystanダー応答の誘導メカニズムを明らかにするために陽子線誘発バystanダー応答の誘導におけるがん抑制遺伝子 *p53* の寄与について詳細な解析を進めている。

成果の概要

- (1) 陽子線照射により誘導された新規バystanダー因子を含む培養液の調製: 温度感受性変異型 *p53* 保有ヒト非小細胞肺癌 (H1299/*mp53*-143) 細胞は 37°C では変異型 *p53* 細胞であるが、32~33°C では正常型 *p53* 細胞となる。この温度感受性の性質を利用して、33°C あるいは 37°C それぞれで培養した H1299/*mp53*-143 細胞に陽子線を 0.01~5 Gy 照射し、それぞれ 33°C あるいは 37°C で 3 時間培養した後に培養液を回収した。
- (2) 回収した培養液中での正常型あるいは変異型 *p53* 細胞の生存率の測定: 回収したそれぞれの培養液を用いて正常型あるいは変異型 *p53* (H1299/*wt p53* あるいは H1299/*mp53*-248) 細胞にコロニーを形成させ、生存率を測定した。
- (3) 回収した培養液中に含まれる物質の解析: 培養液中に含まれる培養液組成成分以外の物質をウェスタンブロット法および質量分析法により解析した。

結語

現在、主にカナダの McMaster University において、得られた実験結果の詳細な解析を実施中である。引き続き、国際的な連携の下で本共同研究を継続し、陽子線誘発バystanダー応答誘導におけるがん抑制遺伝子 *p53* の寄与の検証を通じ、陽子線によって誘発されるバystanダー応答の誘導メカニズムの解明を目指す。

^{*1} 福井大学・医学系部門・医学領域・国際社会医学講座・放射線基礎医学分野、^{*2} McMaster University、^{*3} (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究室、^{*4} (同) ハセテック
本研究は、福井大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

2.2.1.7

陽子線治療に伴う癌免疫応答の解明と新規免疫放射線療法の開発

Elucidation of Cancer Immune Response with Proton Therapy and Development of New Radioimmunotherapy

酒井佳夫^{*1}、ナスティ・アレッサンドロ^{*2}、宮澤正樹^{*2}、久米恭^{*3}、前田宗利^{*3}、金子周一^{*1*2}Yoshio SAKAI, Alessandro NASTI, Masaki MIYAZAWA, Kyo KUME, Munetoshi MAEDA
and Shuichi KANEKO

Abstract

Pancreatic ductular adenocarcinoma (PDAC) is the most serious malignancy in the digestive system with regard to difficulty of diagnosis in early stages as well as lack of radical treatment for the most patients in advanced stages, leading to very poor prognosis. We conducted proton irradiation treatment on PDAC murine models using 4 kinds of pancreas murine cancer cell lines. We observed that proton irradiation to murine pancreas cancers were effective in part. We will investigate how immune system of the host responds in details.

要約

膵癌の予後は極めて不良であり、従来の化学療法のみでは完全寛解になる例はない。若狭湾エネルギー研究センターでの研究では、陽子線治療による膵癌に対する新たな治療方法の開発を目指し、マウス膵癌モデルを用い陽子線照射を実施した際の免疫応答の基礎的データを獲得するための非臨床研究を実施した。

緒言

膵癌は、2017 年には 34,224 人の死因となり、部位別死亡数で第4位を占めている(国立がん研究センターがん登録・統計より)。膵癌の部位別罹患数は 36,156 人であり、罹患数と死亡数が近い。このことの一因として、膵癌は、90 %以上が診断時には、ステージⅢ以上の進行した状態である。化学療法として nab-Paclitaxel + Gemcitabine、FOLFIRINOX 治療が開発されてきたが、24 か月生存率は約 10%にとどまる。これらのため、膵癌全体の 5 年生存率は、10%未満であり、部位別悪性腫瘍の予後で最も不良である。こうした背景により、早期診断方法の開発とともに、根治的外科的治療の適応のない進行膵癌に対して、より有効な新たな治療法の開発が膵癌の予後改善に極めて重要である。

本研究では、マウス膵癌モデルを用いて、陽子線治療の効果、生体の免疫反応の詳細を解析し、新たな免疫放射線治療開発への基礎的データを獲得することを目的としている。

成果の概要

4 種類のマウス膵癌細胞株を用いて、マウス膵癌大腿皮下・背部皮下腫瘍モデル、マウス大腿皮下・肝転移腫瘍モデルを作成した。これらのマウス膵癌モデルの大腿部皮下腫瘍へ陽子線を照射し腫瘍増殖を経時的に計測した。2種類のマウス膵癌大腿皮下腫瘍に対して、腫瘍増殖抑制効果を認め、陽子線照射に対する感受性が確認された。

結言

2種のマウス膵癌モデルに対する陽子線照射の抗腫瘍効果を確認した。膵癌腫瘍に対して陽子線を照射した際の生体に生じる反応についての詳細について現在解析を進めている。

^{*1}金沢大学・医薬保健研究域・医学系、^{*2}金沢大学大学院・先進予防医学研究科(システム生物学分野)、^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究室
本研究は、金沢大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

2.2.2. 粒子線照射技術の高度化研究

2.2.2.1

「放射線の見える化」膜の開発

Development of "Visualization of Radiation" Film

砂川武義^{*1}、Glenn HARVEL^{*2}、青木祐太郎^{*1}、畑下昌範^{*3}、久米恭^{*4}、佐倉俊治^{*5}Takeyoshi SUNAGAWA, Glenn HARVEL, Yutaro AOKI, Masanori HATASHITA,
Kyo KUME and Toshiharu SAKURA

Abstract

We developed a measurement equipment and an analysis program specialized for PVA-KI gel dosimeter combining camera and organic EL. The device was applied to a proton-irradiated PVA-KI gel dosimeter to clarify the usefulness.

要約

PVA-KI ゲル線量計は PVA(ポリビニルアルコール)水溶液と KI(ヨウ化カリウム)を使用し、低コストで作製可能である。本研究では、カメラと有機 EL を組み合わせた PVA-KI ゲル線量計に特化した測定装置、及び解析プログラムの開発を行い、これらの成果を陽子線照射された PVA-KI ゲル線量計に適用し、有用性を明らかにした。

緒言

現在、がんの治療法には主に、外科手術、薬物療法、放射線治療がある。その中でも身体的負担が少ない放射線治療の進歩が目覚ましく、高齢化社会にとって重要な役割を持つ。そのためにも照射野を視覚的に評価できるゲル線量計の開発は必須である。本研究室では、PVA 水溶液と KI を使用し、低コストで作製可能な PVA-KI ゲル線量計(以後、PVA-KI ゲル)を開発した¹⁾。本研究では、カメラと有機 EL を組み合わせた PVA-KI ゲルに特化した測定装置、及び解析プログラムの開発を行い、これらの結果を陽子線照射された PVA-KI ゲルに適用し、開発成果の有用性を明らかにすることを目的とした。

実験方法

(1) 測定装置の作製

使用器具: 白色有機 EL カメラ本体(Canon kiss X5)レンズ(Canon EPS 18-55mm)リモートスイッチ(Canon RS-60ES)アイピースカバー(Canon EW-100DBIII)三脚(LPL WALKIE POD mini mini)カメラ用水準器 外部電源(AC アダプターキット ACKE-8)

使用材料: アクリル板(10 mm 角)アクリル板(厚さ 1 mm)ダンボール 定規 厚紙

図 1 に測定装置の写真を示す。本研究で使用した矩形セルは、PMMA(アクリル)を材料とし PVA-KI ゲルの充填部を(50 mm×50 mm×10 mm)、(60 mm×40 mm×10 mm)、(40 mm×40 mm×10 mm)とし、それぞれ 3 個、4 個、1 個製作した。



図 1 測定装置の写真

(2) X 線照射した PVA-KI ゲルの測定

9wt%PVA-KI ゲルに対する X 線照射における吸収線量と RGB 値との関係を知るために、9wt%PVA-KI ゲルを矩形セル(50 mm×50 mm×10 mm)に封入し、PVA-KI ゲルに X 線照射装置(日立社製 MBR-1520R-3)を使用し吸収線量 2 Gy~14 Gy の領域で 2 Gy ずつ照射した。ここで、照射の条件は、管電圧:150 kV、管電流:20 mA、フィルタ:Al 0.5 mm + Cu 0.1 mm、線量率:2 Gy/min とした。

^{*1}福井工業大学・工学部・原子力技術応用工学科 ^{*2}オンタリオ工科大学、^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、^{*4}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究室、^{*5}(株) NUCLEAR TECHNOLOGY
本研究は、福井工業大学、(公財)若狭湾エネルギー研究センター、(株) NUCLEAR TECHNOLOGY の共同研究として実施したものである。

照射後の試料を本研究で作製した測定装置を用いて撮影を行った。撮影した画像データを本研究室で開発したゲル解析用ソフトで解析し、RGB 値に変換した。

(3) 陽子線照射ならびに PHITS による計算評価

PVA-KI ゲルへの陽子線効果を調べるために、若狭湾エネルギー研究センターの多目的シンクロトン・タンデム加速器(W-MAST)を使用して陽子線照射を実施した。ここで、陽子線のエネルギーは 200 MeV を使用した。また粒子・重イオン輸送計算コード PHITS Ver. 3.08 を用いて計算評価した。計算に用いた体系では矩形セル(40 mm×40 mm×10 mm)1

つ、(60 mm×40 mm×10 mm)矩形セル 4 つを直列に並べ、セルの素材 PMMA(密度 1.19 g/cm³)、セル内のゲル PVA-KI(密度 1.118 g/cm³)、陽子線のエネルギー200 MeV を入れた。図 2 に計算体系および計算結果を示す。計算結果から、ブラッグピークの位置は約 24 cm であることが想定され、ブラッグピークが矩形セル内に位置することが予想された。

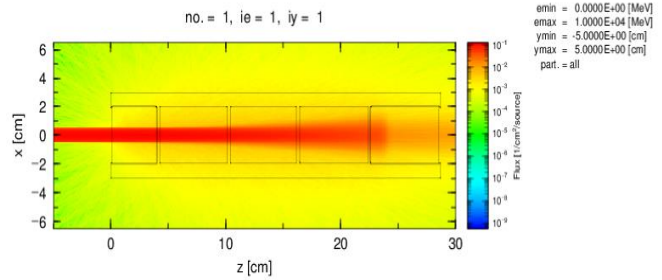


図 2 PHITS による陽子線照射計算結果

結果と考察

(1) X 線照射した PVA-KI ゲルの測定結果

図 3 に実験 2.2 で X 線照射した PVA-KI ゲルの測定結果を示す。縦軸は RGB 値、横軸は吸収線量である。R 値は傾きが小さく G 値は 6 Gy まで、B 値は 8 Gy までの線形性があつた。このことから B 値は、吸収線量との比例関係が R 値と G 値とに比べて優位であることが分かった。

(2) W-MAST で陽子線照射した PVA-KI ゲルの測定結果

図 4 の上部に 200 MeV 陽子線照射における写真を示す。PVA-KI ゲル試料は、5 つのセルに封入し、並べた状態で写真右側より照射した。吸収線量は PVA-KI ゲル試料の手前に設置された電離箱により計測された。本研究における吸収線量は 16 Gy である。図 4 下部に RGB 解析を行って得た距離に対する B 値の結果を示す。ここで、4 cm、10 cm、16 cm、22 cm 付近に存在する B 値の急増減は、セルの繋ぎ目によるものである。24 cm 付近に B 値の極小値が見られる。この極小値はブラッグピークに相当するものであると考える。この結果は、PHITS による計算結果(図 2)と一致している。

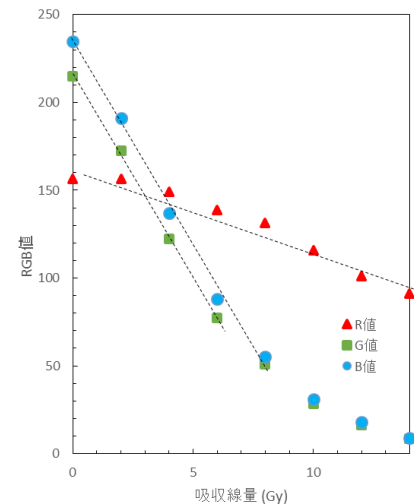


図 3 吸収線量と RGB 値の結果

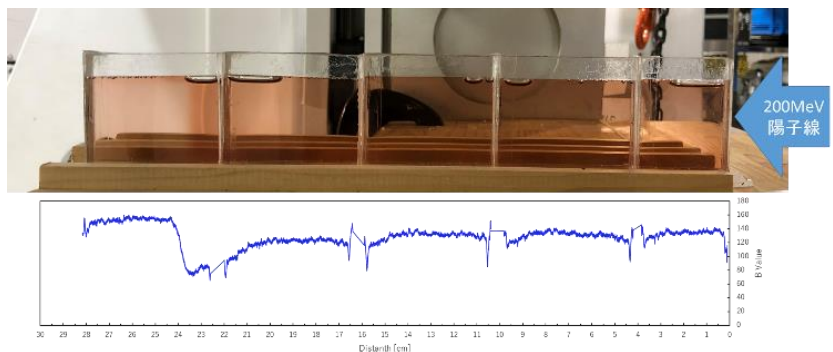


図 4 200 MeV 陽子線照射における写真と B 値の結果

結言

本研究は、PVA-KI ゲルに特化した測定システムを構築した装置を作製し、PVA-KI ゲルへの陽子線照射効果の測定が可能である事を確認した。

参考文献

- 1) T. Sunagawa *et al.*: Memoirs of Fukui University of Technology, vol.47 pp.105-110 (2017)

2.2.2.2

粒子線の線質測定技術開発

The Development of Measurement Technique for the Particle Beam Quality

松尾陽一郎^{*1}、安田仲宏^{*1}、泉佳伸^{*1}、前田宗利^{*2}、久米恭^{*2}

Youichirou MATUO, Nakahiro YASUDA, Yoshinobu IZUMI, Munetoshi MAEDA and Kyo KUME

Abstract

Measurements of target fragmentation reactions by high energy charged projectiles (proton and helium) were performed by using nuclear track technique. In this energy range, the target fragment has relatively lower energy compared to projectile fragment, and will not be detected by routinely using an ionization chamber in therapy. The CR-39 detector is acting not only as a detector but also as tissue equivalent target to simulate human body in our experiment. Energy dependences of production rate for target fragment were verified in comparison of proton and helium beam. We also developed a tissue-equivalent dosimeter comprised of oligonucleotides, which are short deoxyribonucleic acid (DNA) strands, in liquid solution.

要約

粒子線を用いた治療計画システム高度化を目的とした粒子線の線質測定技術を開発するため、CR-39 読み取り技術の高度化、蛍光標識した生体親和物質の開発を推進した。

緒言

CR-39 読み取り技術の高度化として、陽子線とヘリウム線の標的核破砕反応によるがん治療時の余剰線量測定比較を行った。また蛍光標識した生体親和物質の開発として、DNA や RNA を構成する単位でもある「オリゴヌクレオチド」と「蛍光物質」を結合させた物質を用い、放射線による生体物質の損傷量及び線量を評価する技術を開発した。

研究成果

(1) CR-39 検出器によるビームの質の評価と核破砕反応の解析

粒子線照射の際に入射核および標的核が破砕することにより生成される破砕片に関する研究を継続している。これは粒子線照射実験における入射粒子の質に寄与する技術開発である。各種標的材料を CR-39 検出器でサンドウィッチにし炭素線照射を行った。材料に対し上流側では入射ビームの質を計測し、材料中で炭素がそれよりも軽い原子核に破砕する様子を下流側で計測した。入射粒子のエネルギーが 55 MeV/n よりも低い領域の核破砕反応データはほとんど存在しないため、貴重な情報を得たと評価している。現在解析を継続している。

(2) 蛍光標識した生体親和物質の開発

数十塩基程度の一本鎖オリゴヌクレオチドを蛍光物質である 6-FAM (6-Carboxyfluorescein) で修飾したサンプルを用い、放射線による損傷量を蛍光分光光度計で読みとり評価する手法を開発している。オリゴヌクレオチドの配列は酵母細胞の核酸代謝に関与する *URA3* 遺伝子の一部の配列を選択した。若狭湾エネルギー研究センターにてヘリウム粒子線(220 MeV)を照射し、比較として大阪府立大学にてガンマ線を照射した場合の 6-FAM の蛍光強度($\lambda_{em}=516$ nm)の変化を評価した。0.03 Gy の照射により、ヘリウム線照射の場合は約 7%、ガンマ線照射の場合で約 15%の蛍光強度が増加した。ヘリウム粒子線と比較してガンマ線のほうが一本鎖オリゴヌクレオチドの切断収率が高い結果が得られたが、この傾向はモンテカルロシミュレーションの結果¹⁾と矛盾しない。

結言

CR-39 検出器を用いて炭素線の標的核破砕片の線量測定が可能性を示した。また、蛍光物質 6-FAM を修飾した生体親和物質を用いて、放射線による損傷量を評価できる見通しを得た。今後、二本鎖オリゴヌクレオチドをサンプルとしたときの鎖切断を評価する計画である。

参考文献

- 1) 渡邊立子、重粒子線トラックと DNA 損傷、放射線化学、89、13-19 (2010)

^{*1} 福井大学附属国際原子力工学研究所、^{*2} (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究室

本研究は、福井大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

本研究の一部は、JSPS 科研費 16K18347 の助成を受けた。また、本研究の一部は、JST 卓越研究員 16811771 の助成を受けた。

2.3. 農業・生物分野

2.3.1. 植物・菌類のイオンビーム育種研究

2.3.1.1

DNA 修復機構を利用した変異誘発促進技術の開発

– ATM、PARP1 欠損変異体の生存率に対する X 線照射、炭素線照射の影響 –

Development of a Method for Enhancing Mutation Rate by Utilizing DNA Damage Response

– The Effects of X-ray and Carbon-beam Irradiation on the Survival of Arabidopsis Seedlings Lacking ATM or PARP1 –

高城啓一^{*1}、畑下昌範^{*1}、石井公太郎^{*2}、市田裕之^{*2}、阿部知子^{*2}

Keiichi TAKAGI, Masanori HATASHITA, Kotaro ISHII, Hiroyuki ICHIDA and Tomoko ABE

Abstract

The effects of X-ray and carbon-beam irradiation on Arabidopsis seedlings which lack a function of ATM or PARP1 were examined.

要約

DNA 修復因子 ATM、および PARP1 の機能を欠損したシロイヌナズナ変異体幼苗の生存率に対する X 線照射、および炭素線照射の影響を調べた。

緒言

イオンビームは、これまでに無い突然変異原として着目されているが、さらに高い突然変異体取得率を得ることや、変異の種類やサイズをより正確に制御することが求められている。我々は、DNA 修復因子に干渉する薬剤を用いることで、これらの技術課題を解決することを試みている。この目的を達するためには、まず複数ある DNA 修復経路のどれに干渉することが有効かを知らねばならない。また、薬剤が正確に作用を及ぼしているかを評価するために、目的とする修復因子の機能が損なわれた場合に起こる現象を把握する必要がある。これらの目的から平成 29 年度には、DNA 二本鎖切断(DSB)の 2 つの主要な修復経路、正則的非相同末端結合(canonical non-homologous end-joining, C-NHEJ)、および相同組換え(homologous recombination, HR)に関し、それぞれの構成因子 KU70、および RAD54 の機能欠損変異体に対する X 線照射の効果を調べた。平成 30 年度は、DNA 損傷応答(DNA damage response, DDR)の制御因子 ATM、および代替的 NHEJ(A-NHEJ)に関わる PARP1 に関する機能欠損変異体の生存に対する、X 線、および炭素線照射の影響を調べた。

材料と方法

シロイヌナズナの ATM の機能欠損変異体として、SALK_036940 株を(以下 ATM (-/-)と表記)、PARP1 の機能欠損変異体として SALK_111410 株を(以下 PARP1 (-/-)と表記)、それぞれ The European Arabidopsis Stock Center より入手し、目的の遺伝子のホモ変異体であることを確認した上で自殖により種子を得て実験に用いた。野生型として、*Arabidopsis thaliana* のエコタイプ Columbia を用いた。

これらの種子は、2% スクロース、0.3% ゲルゼンを含む 1/2 MS 培地上に無菌的に播種し、播種 4 日目(D4)の幼苗に、X 線照射装置(MBR-1520R-3、日立メディコ)を用いて X 線(実効エネルギー 33 keV、線量率 4.3 Gy/min)を 25 Gy、50 Gy、100 Gy および 200 Gy 照射した。炭素線照射では、同様に D4 の幼苗に対し、福井県若狭湾エネルギー研究センターの生物照射コース(高エネルギー)を用いて炭素線(450 MeV、線量率 30 Gy/min)を 25 Gy、50 Gy、75 Gy および 100 Gy 照射した。

照射後の幼苗はそれぞれの変異体、線量区ごとに 25 個体ずつ同じ組成の培地で栽培を継続し、D46(X 線)、あるいは D45(炭素線)まで栽培を継続して生存状況を判断した。

結果と考察

図 1 に、X 線を照射した幼苗の D25 での状況を示す。野生型、および PARP1 (-/-)では、50 Gy から 100 Gy の間に顕著な生育状況の悪化が見られた。これに対し、ATM (-/-)では、25 Gy から 50 Gy の間で顕著な生育

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、^{*2}(国研)理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・イオン育種研究開発室

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県からの受託研究として、(国研)理化学研究所と共同で実施したものである。

状況の悪化が見られ、100 Gy では多くの個体が白化した。200 Gyでは、いずれの系統においてもほとんどの個体が白化していた。野生型と PARP1 (-/-)では 200 Gy 照射でも少数の生存個体があったが、ATM (-/-)ではすべての個体が枯死した。

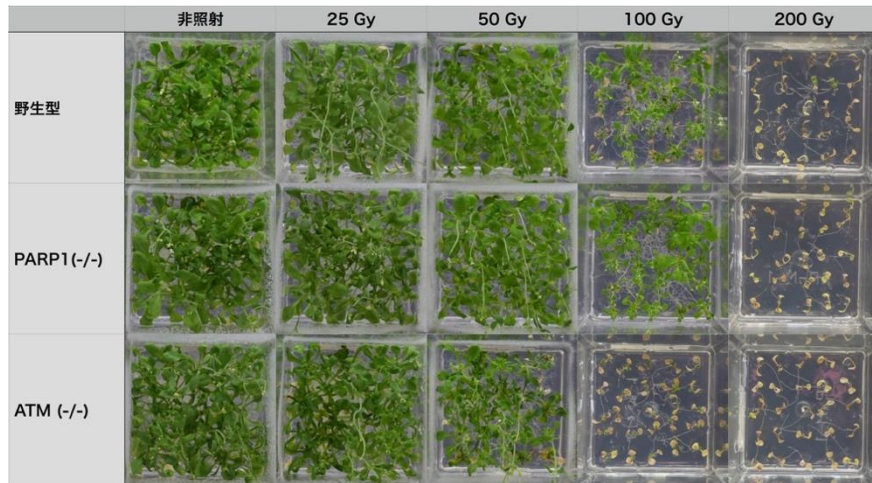


図 1 X 線照射 21 日(D25)の幼苗

図 2 に炭素線を照射した幼苗の D24 での状況を示す。炭素線の場合、X 線よりも低い線量から苗の生育状況が悪化したが、X 線の場合と同様、野生型と PARP1 (-/-)は類似した線量応答を示し、一方で ATM (-/-)の場合は、両者よりも低い線量から苗の生育状況が悪化していた。

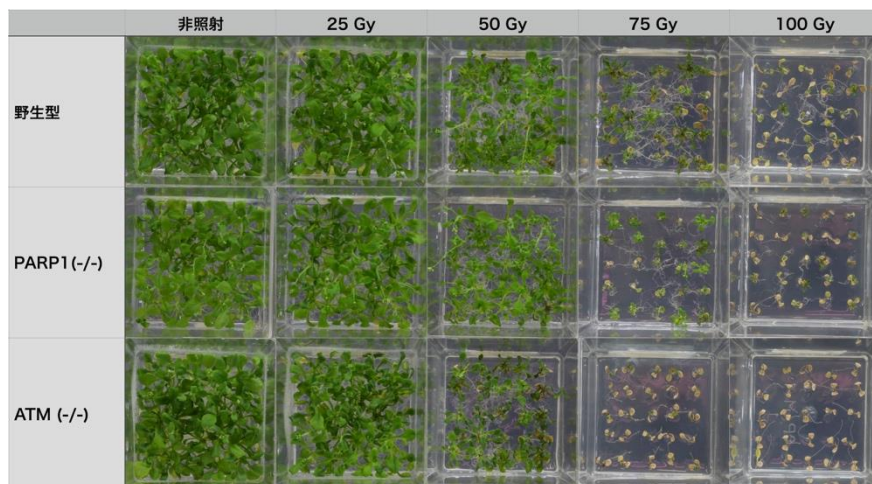


図 2 炭素線照射 20 日(D24)の幼苗

図 3 に、X 線、および炭素線照射後の生存率を示す。個体の生存に関し、X線では野生型と PARP1 (-/-)では、100 Gy まではすべての個体が生存したのに対し、ATM (-/-)では、100 Gy で生存率が 24%まで低下した。炭素線照射の場合は、野生型と PARP1 (-/-)で 75 Gy で生存率がやや低下し、100 Gy では野生型が 24%、PARP1 (-/-)が 40%まで低下した。一方、ATM (-/-)では、75 Gy で生存率が 8%まで低下し、100 Gy ではすべての個体が枯死した。炭素線では、X 線よりもより低い線量で生存率への影響が表れるが、特定の機能欠損株で炭素線に対する感受性が増加、あるいは減少するといった現象は見られなかった。

以上の結果から、PARP1 機能の欠損は、放射線照射に対する、生存率を指標とした感受性に大きな影響を与えないのに対して、ATM の機能欠損は放射線照射に対する感受性を増大させることがわかった。DDR の制御因子である ATM の機能欠損は、放射線照射後の生存率に対して大きな影響を与えるのに対し、A-NHEJ はあまり大きな影響を与えないものと考えられる。平成 29 年度の KU70、および RAD54 変異体を用いた実験の結果と合わせると、照射によって与えられた DNA 損傷は、ATM の制御下で A-NHEJ を主要修復経路として修復されている可能性が大きい。ただし、A-NHEJ に関しては、PARP2 が PARP1 と同等以上の役割を果たしているという報告があり¹⁾、更なる検討を要する。

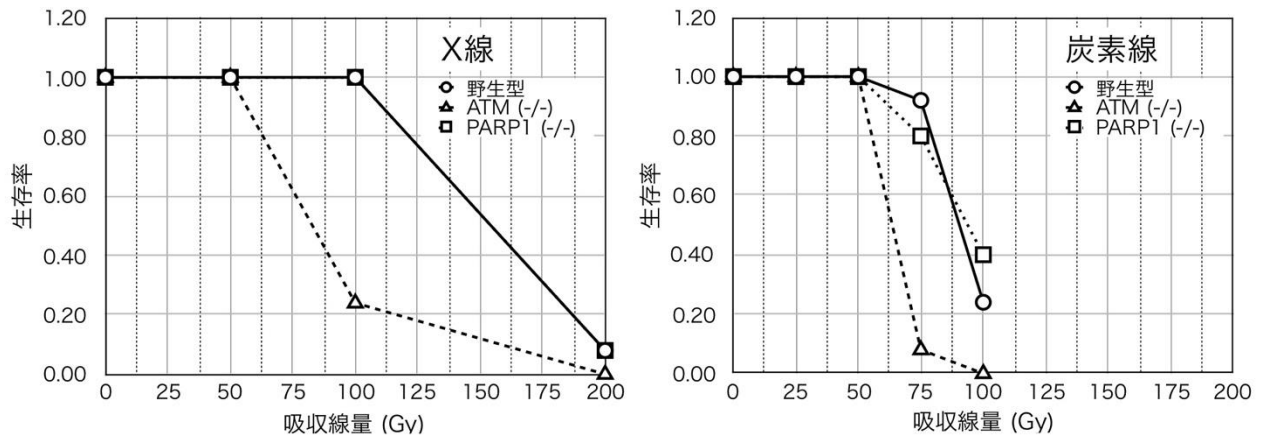


図3 X線、および炭素線照射後の各系統の生存率

結言

今後は、今回のデータや、DNA 損傷マーカー変動、DNA 合成マーカー変動、さらには実際に DNA 損傷修復因子機能欠損体で照射後に生じた突然変異の変異率や変異パターンを調べた結果をもとに、変異率向上や変異パターン制御に有効な DNA 修復経路を特定する。そして、その修復経路に対する阻害剤の効果を、同様の指標を用いて調査し、突然変異率や突然変異パターンの制御に有効な薬剤の特定と、適用時期や濃度の最適化を図る。

参考文献

- 1) J. Song *et al.*, PLoS Genetics, 11, 5, e1005200 (2015)

2.3.1.2

真菌類を用いた新規免疫賦活剤の開発

Development of Novel Immunostimulator with Use of Fungi

畑下昌範^{*1}、高城啓一^{*1}、市田裕之^{*2}、阿部知子^{*2}

Masanori HATASHITA, Keiichi TAKAGI, Hiroyuki ICHIDA and Tomoko ABE

Abstract

It is well known that β -D-glucans from fungi are effective initiators of cell-mediated immunity in humans. β -D-glucans isolated from various fungi differ in their chemical structures and consequently in their immunomodulatory activities. For example, schizophyllan, which is β -D-glucan extracted from the fungus *Schizophyllum commune*, and is classified as a medicine, stimulates the immune system. In this study, several extremely rare fungi with immunostimulatory activities are focused. In the latest study, monosaccharides composition of polysaccharides obtained from Fungi were determined by Liquid Chromatography-Mass spectrometry (LC-MS) and polysaccharides were analyzed by NMR spectrometry.

要約

真菌類由来の多糖類である β -グルカン免疫反応の効果的なイニシエーターとして知られている。種々の真菌類から単離した β -グルカンはそれぞれの化学構造が異なり、その結果として免疫調整作用が異なるとされている。例えば、スエヒロタケから抽出された β -グルカンであるシゾフィランは医薬品として分類、使用されているが、これはヒトの免疫系に作用することが明らかにされている。本研究では、免疫賦活能が予め明らかにされているいくつかの希少な真菌類について検討することにした。今年度は、多糖類を構成する単糖類のLC-MSによる同定と多糖類のNMRによる構造解析を行った。

緒言

本研究では、真菌類の希少種を取り上げて、それらが生産する生理活性物質の単離とその機能評価およびイオンビーム育種による高生産株の育種を実施することを計画した。これらの希少種を取り扱うにあたり、まず培養条件を検討した。炭素源と窒素源の組成比を変化させた複数の培地で菌糸体の増殖性を調査することにより、最適な培地組成を決定した。生育温度に関しては、5℃から35℃までの温度領域における菌糸体の増殖性を調査し、増殖に最適な培養温度を明らかにした。イオンビーム照射による変異体選抜を行うために、真菌類のイオンビーム照射に対する菌糸体増殖性の線量依存性を調査した。いずれの線量においても照射後の増殖の遅延が見られたが、その後増殖を再開するまでの日数に線量依存性が確認された。菌糸体の主要な構成成分である多糖類 β -グルカンを分離する方法として、 β -グルカンが熱水に可溶でエタノールには不溶であるという性質に着目して、乾燥した菌糸体を用い、エタノール抽出後の残渣に対し熱水抽出を行い、その後抽出物のエタノール沈殿を行う方法を試行した。得られた沈殿物は、コンゴレッドとの混合による色調変化試験より、 β -グルカンであることを確認した。さらに、イオンビーム照射した菌株からの高増殖性変異体の選抜を行い、形質の安定した変異株の取得を試みてきた。今年度は、多糖類を構成する単糖類のLC-MSによる同定と多糖類のNMRによる構造解析を行った。

結果の概要

真菌類として、*Fuscoporia obliqua*(以下、菌株 A)、*Cordyceps militaris*(以下、菌株 B)、*Polyporus umbellatus*(以下、菌株 C)を用いた。培地として、Potato Dextrose Agar 培地(以下、PDA 培地)、YM Ager 培地(以下、YM 培地)を用いた。それぞれ調製した培地は、オートクレーブ後にプレートに分注し、固形培地を得た。上記の真菌類を固形培地の表面にそれぞれ植菌し、25℃暗黒条件で表面培養した。3 週間の培養後に、培養液表面から回収した菌糸体は、凍結乾燥によりその乾燥菌体を得た。次に、エタノールを加え、室温下で1晩抽出を行った。ろ過後、ろ液は凍結乾燥した。残渣に対しては、熱水を加え 4 時間抽出した。ろ過後、そのろ液に 4 倍量のエタノールを加え、1晩静置して沈殿物をろ過回収した。これらのエタノール添加後に得られた沈殿物は、1晩

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、^{*2}(国研)理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・イオン育種研究開発室

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県からの受託研究として、(国研)理化学研究所と共同で実施したものである。

真空乾燥した。熱水抽出の他に、アルカリ抽出およびジメチルスルホキシド抽出も検討し、回収した多糖類を構成する単糖類の組成を調べることにした。これらの抽出された沈殿物に純水を加えて再溶解させた。その一部を採取し、トリフルオロ酢酸を1%添加し、100℃で1時間反応させたのち純水で10倍希釈した。この溶液を用いて、LC-MS (Waters) の分析に用いた。まず、各種糖類が分離できる条件を検討した。標準物質として六炭糖、五炭糖、二糖類を計7種類 (glucose (以下、Glu)、galactose (以下、Gal)、mannose (以下、Man)、fructose (以下、Fru)、xylose (以下、Xyl)、sucrose (以下、Suc)、Lactose (以下、Lac)) 準備し、条件検討を行った。今までの検討では、カラムに Suger-D を用いていたが、Glu と Gal とを分離することができなかった。そこで、カラムを Shodex に変更し、カラム温度を 60℃、溶媒の流量を 0.5mL/min とし、MS は、質量電荷比、341、179、149 の固定値で分析したところ、7 種の糖類を分離することができた (図 1)。この条件をもとに多糖類を構成する単糖の組成を分析したところ、菌株 A では、Glu、Gal、Man、Xyl より、菌株 B では、Man、Gal、Glu より、菌株 C では、ほぼ Glu のみで多糖類が構成されていることが明らかになった。

菌株 B については、菌糸体からの多糖類の抽出条件を変えることで、得られた多糖類を構成する単糖の組成が変化することがわかった (図 2)。熱水抽出により得られた多糖類は Man の割合が多かったが、アルカリ抽出したものは Glu の割合が増加し、DMSO 抽出したものはほぼ Glu で構成されていた。これは、菌株が複数の種類の多糖類を生産していることを示唆し、それらが異なるタンパク質と複合体を形成し種々の極性を有しているために、抽出条件が異なれば、異なる多糖類が抽出されてくるものと推測された。

菌株 C の多糖類の構造解析を $^1\text{H-NMR}$ 測定により行った (図 3)。4.5ppm 付近および 4.7ppm 付近 (水のピークと重なるため、図では省略) にピークが見られ、 β -1,6 結合および β -1,3 結合を有していることがわかった。これが、主鎖が β -1,6 結合の構造に対して、側鎖に β -1,3 結合の構造を有しているものなのか、あるいは、主鎖が β -1,3 結合の構造に対して、側鎖に β -1,6 結合の構造を有しているものなのかを調べるために、Endo-1,6- β -glucanase を用いて、多糖類の酵素処理を行った後に $^1\text{H-NMR}$ 測定を行った。その結果、4.5ppm のピークが消失したことから、菌株 C が生産する多糖類は、主鎖に β -1,3 結合の構造を有し、その側鎖に β -1,6 結合の構造を有しているものと考えられた。

今後の課題と展望

今までの研究から、真菌類へのイオンビーム照射による変異株の作出に関して、複数の高増殖性変異体を獲得することができた。また、LC-MS を用いた分析からは、多糖類を構成する単糖類の組成を、NMR による多糖類の構造解析からは、主鎖と側鎖の構造を明らかにすることができた。この他にも、多糖類がマクロファージ細胞の活性化にどの程度影響するのかに関し、その評価法を確立した。今後は、高増殖性変異体が生産する多糖類がマクロファージ細胞の活性化にどの程度効果があるのかについて検討し、最終的には真菌類を用いた免疫賦活物質の高効率生産システムの開発につなげていくことが望まれる。

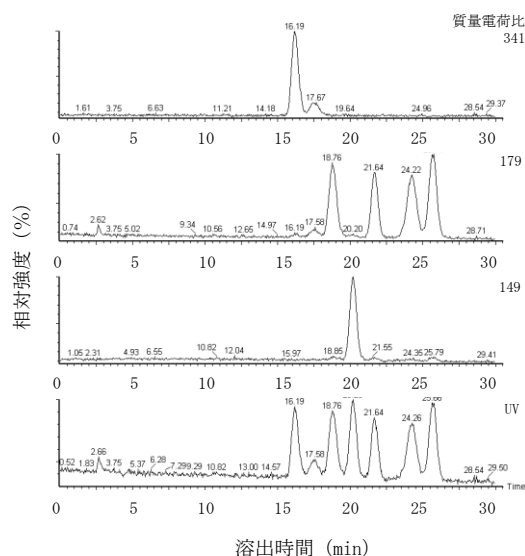


図 1 単糖類、二糖類合計 7 種を混合した溶液の液体クロマトグラムおよびマスキロマトグラム

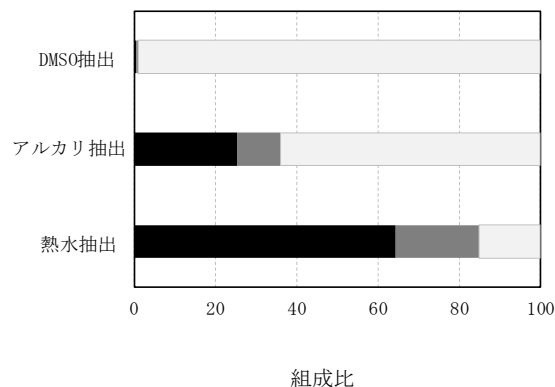


図 2 菌株 B の各種抽出条件によって得られた多糖類中の単糖の組成
■ : Man、■ : Gal、□ : Glu

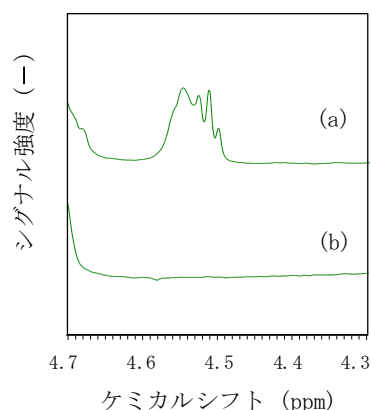


図 3 菌株 C より抽出した多糖類の $^1\text{H-NMR}$ スペクトル
(a: 酵素処理前、b: 酵素処理後)

2.3.1.3

福井県での栽培に最適化した酒米“新山田錦”の育成
 Development of “New Yamadanishiki” Optimized for Cultivation in Fukui Prefecture
 三浦孝太郎^{*1}、高城啓一^{*2}
 Kotaro MIURA and Keiichi TAKAGI

Abstract

It is hard to cultivate ‘Yamadanishi’, the brand leading rice cultivar for sake brewing, in Fukui prefecture, because of its low lodging resistance and late heading. Therefore, we are trying to develop ‘New Yamadanishiki’ for easy cultivation in Fukui prefecture.

要約

酒米のトップブランド「山田錦」は、倒伏性や出穂期の問題から福井県での栽培が難しい。そこで、我々は福井県での栽培が容易な「新山田錦」の開発を試みている。

緒言

「山田錦」は米粒が大きく、通常の米と比較するとタンパク質・アミノ酸が少なく心白(米粒の中心が白く濁る)が大きいという日本酒醸造に重要な形質がある反面、草丈が高い、茎がもろい、晩生、脱粒性(稔った種子がばらばらと穂から脱落する性質)という欠点がある。これまでに実施した研究開発により、「草丈が低い」、「茎が丈夫」、「山田錦よりも早生」、「脱粒しない」という形質をそれぞれ有する系統の育成に成功し、それぞれが単年度の収量試験であるものの山田錦よりも多収となった。特に早生、および脱粒しない系統で収量が著しく向上しており、福井県内での「多収」という面から見た「新山田錦」の育成には成功した。そこで、これらの多収山田錦の酒米特性について評価したところ、「粒が大きい」、「心白が大きい」という重要形質は維持していたが、もう一つの重要な形質である「デンプンの溶けやすさ」が変化していた。一般的にイネのデンプンの溶けやすさは、開花 20 日までの平均気温と相関があり、気温が上昇すると溶けにくくなるが、早生化した山田錦系統群においても同様に平均気温とデンプンの溶けやすさには非常に高い相関があり、早生になればなるほど溶けにくくなることを明らかにした。つまり、早生になるほど栽培は容易になり多収になるが、酒米としての品質は低下し商品価値が下がるというトレードオフの関係になることを明らかにした。これらの系統群を用いた交配により「草丈が低い」、「茎が丈夫」、「山田錦よりも早生」、「脱粒しない」の形質を複数併せ持つ系統の育成に挑戦したが、出穂期が著しくずれているので交配が困難であった。そこで 30 年度は、脱粒しない変異体に再度炭素イオンビームを処理することで、早生化を目指す材料作りを行うと同時に、山田錦早生系統群を用いた収量性と品質の両方が安定となる出穂タイミングの調査と、脱粒しない変異体の形態観察により難脱粒性の原因を明らかにすることを目指して研究を実施した。

材料と方法

植物材料

本実験では、平成 29 年に福井県あわら市二面 88-1 の福井県立大学生物資源開発研究センター、実験圃場で選抜した山田錦変異原処理集団の種子を用いた。

定植

種子は、200倍に希釈したベンレートTに24時間浸漬し、その後、水道水に移して4日間吸水し、みのる式育苗マットに1穴あたり1粒を播種した。その後、生物資源開発研究センターの育苗温室にて1ヶ月間育苗したサンプルを、平成30年5月15日にと6月15日に福井県立大学生物資源開発研究センター内の水田に定植した。栽培条件は、条間25cm、株間20cmで1系統あたり30個体とした。

^{*1} 福井県立大学・生物資源学部・生物資源開発研究センター、^{*2} (公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室
 本研究は、公募型共同研究事業として(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井大学と共同で実施したものである。

山田錦難脱粒変異体の変異誘発

山田錦難脱粒変異体の種子を相対湿度70%、温度23℃の環境下において含水率を調整し、水分含量12.3%に調整し、この種子を、若狭湾エネルギーセンター内シンクロトンから出射される炭素イオンビーム(450 MeV, LET ca. 60 keV/ μ m)を吸収線量75Gy、100Gy、125Gyの3処理区で照射した。各処理区とも700粒程度の種子を照射した。平成31年1月10日に、M₁種子をベンレートT水和物に24時間浸漬し、その後水に浸漬して24時間吸水した。これらの種子は床土(キセキ)40kgに対して元肥1号を130g、オルトランを10g加えてよく混合した培土に播種し、福井県立大学生物資源開発研究センターの温室内にて栽培した。

デンプン溶解温度の測定

デンプン溶解温度については、示差走査熱量計(DSC-60A Plus 島津製作所)を用いた溶解ピーク温度で比較した。収穫後・水分含量 14%程度に乾燥調整した玄米 10g を小型精米機パーレスト(ケツト科学研究所)を用いて 90%に精米した。精米した米をマイクロパウダー(有限会社ウエスト)を用いて製粉した。15mg の米粉を 30mg の蒸留水で懸濁し、アルミ容器(Al シールセル AUS 島津製作所)に封入した。温度制御 20℃-120℃、温度上昇レート 5℃/min、32mg の蒸留水をスタンダードとした。上記設定で解析を実施し、溶解ピーク温度を測定した。

離層の組織切片観察

開花直前の籾をサンプリングし、FAA(ホルマリン-酢酸-アルコール)固定液に浸漬し 30 分間脱気後、固定液を交換して一晩浸漬した。翌朝 30 分間脱気、サフラニン染色後、パラフィン包埋を行い、9 μ m の薄切片を作製し、生物顕微鏡で観察を行った。

結果

山田錦難脱粒変異体への炭素イオンビーム照射

山田錦難脱粒変異体を早生化する為に、炭素イオンビームの照射を行った。難脱粒変異体は、既に一度変異原処理を行って選抜した系統であるため、生存に関わる遺伝子に何らかの変異が生じている可能性を考慮し、75Gy、100Gy、125Gy の比較的低線量の3処理区とした。炭素イオンビームを照射した種子を吸水させ、発芽させたところ、75Gy、100Gy、125Gy の処理区でそれぞれ 76%、56%、54%の発芽率となった。これらの苗は冬季に温室で栽培し、種子を得ることで平成31年度に早生系統のスクリーニングを行う予定である。

早生系統群を用いた出穂日とデンプン溶解度の比較

今回の調査で、五百万石と山田錦では出穂日で 25～28 日の違いがあり、デンプンの溶けやすさでは 4.5℃程度の違いがあることが明らかになった(図1)。また、調査を行った山田錦変異体において、五百万石と同等の出穂日の系統では五百万石と同等のデンプン溶けやすさとなり、五百万石と山田錦の間の出穂日の系統では中間的なデンプン溶けやすさを示していた(図1)。このことから、出穂日とデンプンの溶けやすさは非常に高い相関がある事が明らかになり、五百万石と山田錦のデンプンの溶けやすさの差を決定しているのは出穂日であり、栽培気温であることが明確になった。この結果は、五百万石よりも明確にデンプンが溶けやすく、山田錦並みの品質を併せ持つ新品種を育成するためには、その最適なタイミングに出穂する変異体を選抜する必要があることを示唆している。今後はこれらの系統を用いてデンプンの溶けやすさと収量性が安定な出穂タイミングを決定していく必要がある。

山田錦難脱粒変異体の離層の観察

脱粒性品種は籾と枝梗の接合部に離層と呼ばれる切れ目が形成されることが知られている。そこで、難脱粒変異体の離層が変化しているかを確認するために、パラフィン切片を作成して籾と枝梗の接合部の観察を行った。その結果、難脱粒品種である日本晴には、明確な離層は形成されていないのに対し、山田錦では明確に離層が形成されていることが確認できた。難脱粒変異体の接合部を観察したところ、日本晴と比べると曖昧な離層が形成されている様に見えるが、山田錦の様な明確な離層は形成されていなかった(図2)。

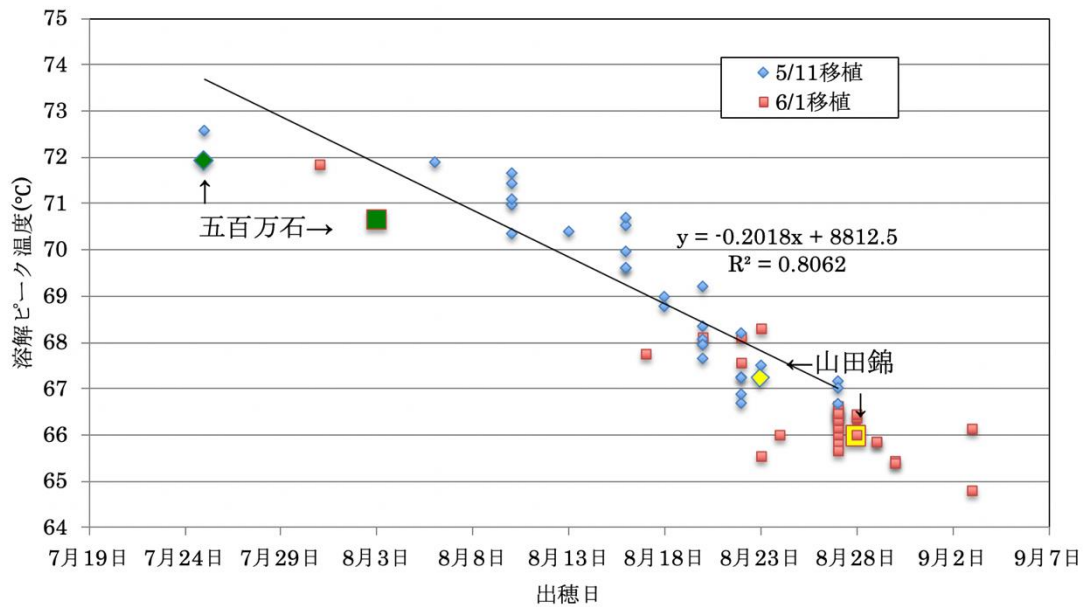
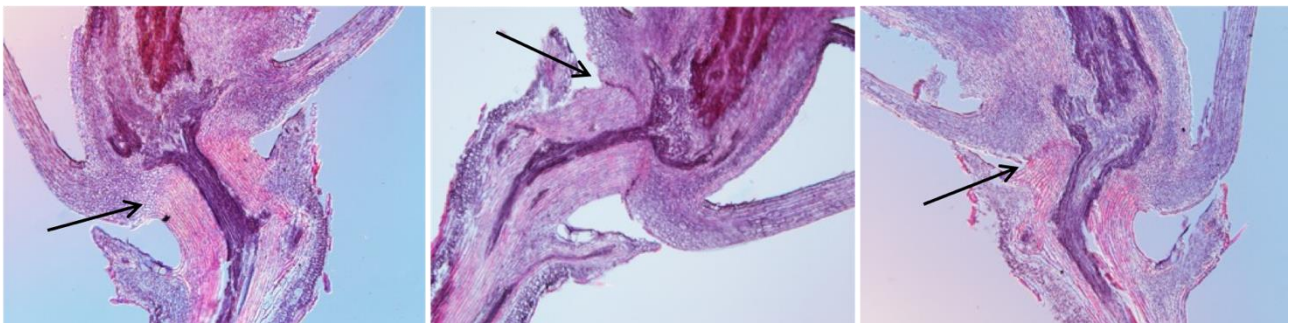


図1 出穂日と溶解ピーク温度の関係

各系統の出穂日を横軸に、縦軸にデンプンの溶解ピーク温度をプロットした。青のプロットは5/11植えのサンプル、赤のプロットは6/1植えのサンプルを示す。緑のプロットは五百万石、黄色のプロットは山田錦を示し、菱形は5/11植え、正方形は6/1植えのサンプルを示す。



日本晴(難脱粒)

山田錦(易脱粒)

山田錦難脱粒変異体

図2 山田錦難脱粒変異体の離層の組織切片観察

出穂直後の山田錦難脱粒変異体の離層の観察結果を示す。日本晴は籾と枝梗の接合部(矢印)に切れ目が見られないが、山田錦には明確な切れ目(離層)が観察される。山田錦難脱粒変異体には離層が見られるが、山田錦よりも明確ではなく不完全であることが分かる。

結言

本研究により、山田錦のデンプン溶解度は出穂日と非常に強い相関がある事が明らかになった。この知見は、早生系統を選抜するための重要な指標となり、かつ、日本全国で山田錦の安定栽培を目指す場合の指標となる有意義な結果である。また、本研究で得た山田錦難脱粒変異体は離層形成が不完全な変異体であることが明らかになったため、品種開発上有用であるだけでなく、植物の形態形成に関する遺伝子情報を提供する事が出来る学術的に非常に重要な変異体であると言える。この原因遺伝子を突き止めることが出来れば、山田錦の脱粒性を失わせる酒米品種育成の重要マーカーを作成することが可能となる上に、植物の離層形成関連遺伝子のメカニズム解明にも貢献できる。今後はこの難脱粒性・離層非形成の原因遺伝子の単離を行っていく必要がある。

2.3.1.4

カバノアナタケによる抗糖化物質の生産とその解析

Production and Characterization of Antiglycation Substances from *Inonotus obliquus*櫻井明彦^{*1}、畑下昌範^{*2}

Akihiko SAKURAI and Masanori HATASHITA

Abstract

Production and purification of antiglycation substances from *Inonotus obliquus* were investigated. Characterizations of the antiglycation substances were also carried out. The antiglycation substances were efficiently collected from the mycelia cultured in a liquid surface culture by a multistage extraction using organic solvents. The fraction, which was obtained by anion exchange chromatographic purification of the extract, showed high antioxidant activity. In addition, antiglycation activity was higher than aminoguanidine that is usually used as the standard antiglycation substance.

要約

カバノアナタケによる抗糖化物質の生産及びその精製条件を検討し、得られた抗糖化物質の基本特性を解析した。液体表面培養により抗糖化物質が菌糸体内に蓄積すること、さらに、菌糸体を数種類の有機溶媒を用いて多段階抽出することにより、抗糖化物質が効率的に回収できることが明らかとなった。回収した抗糖化物質は、イオン交換クロマトグラフィーにより高純度に精製可能であった。精製物は高い抗酸化活性を示した。また抗糖化活性は、抗糖化作用の基準物質として使われるアミノグアニジンよりも高かった。

緒言

カバノアナタケ(図 1、別名チャーガ)は、耐寒性の白色腐朽菌で抗腫瘍ばかりでなく抗菌、抗ウイルスなどの様々な生理活性を示すことから、医薬品や機能性食品、化粧品の原料として期待されている。しかしながら、天然のカバノアナタケの存在数は極めて少なく、また人工培養技術が確立されていないことから、ロシアなどの一部の寒冷地でのみ民間薬として使われてきた。そこで筆者らは、カバノアナタケを用いた生理活性物質の生産を目的として、人工培養技術の開発に取り組んできた。その過程で、カバノアナタケの菌糸体には、これまでに報告されていない抗糖化作用を示す物質が存在することが明らかとなった。

本研究では、カバノアナタケが生産する抗糖化物質の回収・精製条件を検討するとともに、抗糖化成分の化学構造や基本特性の解析を行った。また、抗糖化物質の生産性が高い変異株の作出についても検討した。



図 1 カバノアナタケ

方法

1. カバノアナタケの液体表面培養法による抗糖化物質の生産及び回収・精製

構造解析等に用いる抗糖化物質を大量生産するため、既存のカバノアナタケ NY-1 株を用いて液体表面培養法により抗糖化物質を含む菌糸体を培養した。培養後、菌糸体を回収し凍結乾燥した。

培養で得られた菌糸体からの抗糖化物質の回収方法として、溶媒を用いる抽出法を検討した。抽出に用いる溶媒としては、水、メタノール、エタノール、酢酸エチル、メチルイソブチルケトン、ヘキサンを使用した。また、抽出した成分の精製法としては、逆相 HPLC とイオン交換クロマトグラフィーを検討した。

2. 抽出物の構成成分および生理活性の測定

抽出物の多糖、ポリフェノール、タンパク質含有率をそれぞれフェノール硫酸法、Folin-Ciocalteu 法、Bradford 法で測定した。また、抗酸化活性は DPPH 法、抗糖化活性は BSA-glucose 法および BSA-fructose 法で測定した。

3. カバノアナタケ変異株の作出

プレート上に増殖させたカバノアナタケの菌糸体に 200MeV のプロトンおよび 660MeV のカーボンビームを照射(プロトン: ~2,500Gy、カーボン: ~1,000Gy)し、増殖速度が大きい、あるいは生産される生理活性成分の性質が異なる変異株の作出を検討した。

^{*1}福井大学・学術研究院工学系部門・生物応用化学講座、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室
本研究は、公募型共同研究事業として(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井大学と共同で実施したものである。

結果と考察

1. 抗糖化物質の生産・回収及び精製

カバノアナタケの菌糸体は、菌糸体濃度が 8-10g/L に到達する液体表面培養 30 日目に回収した(図 2)。これを凍結乾燥し乳鉢で粉碎した後、各種溶媒での抽出を検討したところ、ヘキサン、酢酸エチル、エタノール、熱水、メチルイソブチルケトン(MIBK)の順に抽出することによって、高い抗糖化活性を示す画分が得られた。抗酸化活性と抗糖化活性の間には相関関係がみられることから、以降の検討では評価が容易な抗酸化活性を指標として、精製条件の検討を進めた。

菌糸体からの MIBK 抽出物(図 3)はポリフェノールを 16-20% 含んでおり抗酸化作用と抗糖化活性を示したが、多くの成分を含む混合物であり、抗糖化作用に関係する主成分が明らかではない。そこで、抽出物の分画による抗糖化成分の回収・精製を検討した。はじめに ODS を中心とする複数のカラムを用いて逆相 HPLC による分画を検討したが、十分な精製度が得られなかった。次に陰イオン交換クロマトグラフィーを検討したところ、DEAE セルロースをイオン交換体として水-メタノール系の溶出条件を最適化することによって、HPLC で単一ピークが得られるまでに精製することができた(図 3)。

2. 精製物の構成成分および生理活性

精製物を分画分子量 3000 で限外濾過しても HPLC のピークに大きな変化がなかったことから、抗糖化成分の分子量は 3000 以下であると考えられる。次に LC/MS 測定では、ネガティブモードで $m/z=177$ 、355 にピークが確認されたことから、抗糖化物質は分子量 177 のフラグメントを有する分子量 356 の物質と予想される。また、吸収スペクトルでは、270 nm、340 nm 付近に吸収ピークがみられたことからフラボノイド類に近い分子構造を有していると予想される。今後、NMR による構造決定を行う予定である。

精製物は、抗糖化の標準物質であるアミノグアニジンよりも低濃度で糖化最終生成物(AGEs)の生成を抑制できる(抗糖化活性が高い)ことが明らかとなった(図 4)。

3. カバノアナタケ変異株の作出

イオンビームを照射した菌糸体から、親株よりも増殖速度が高い変異株がいくつか得られた。これらの変異株の MIBK 抽出物の抗酸化活性を調べたところ、プロトンビームを 500Gy 照射した変異株とカーボンビームを 500Gy 照射した変異株が、親株である NY-1 とは異なる抗酸化特性を示した。親株よりも DPPH や ABTS のラジカル消去活性は低かったが、SOD 様活性、ORAC 値が高いことから生体内での有効性が高いと考えられる。

結言

カバノアナタケの液体表面培養により高い抗糖化活性を示す物質が生産可能であった。この物質はイオン交換クロマトグラフィーにより精製可能であり、分子量は 360 程度であることが分かった。また、特性の異なる抗糖化物質を生産可能なカバノアナタケ変異株の作出に成功した。

今後は、抗糖化物質の大量生産を行い、抗糖化物質の化学構造を決定するとともに詳細な抗糖化特性を解析する予定である。

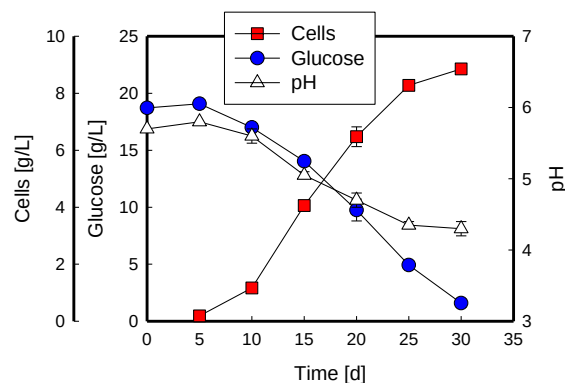


図 2 カバノアナタケの液体表面培養の経時変化

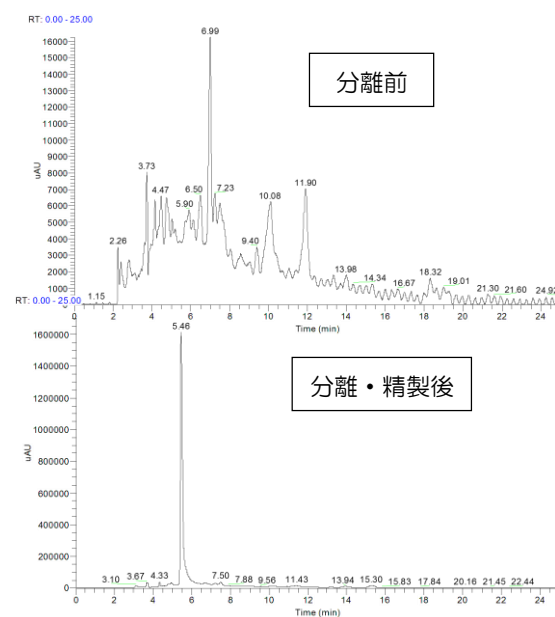


図 3 菌糸体抽出物の HPLC 測定結果

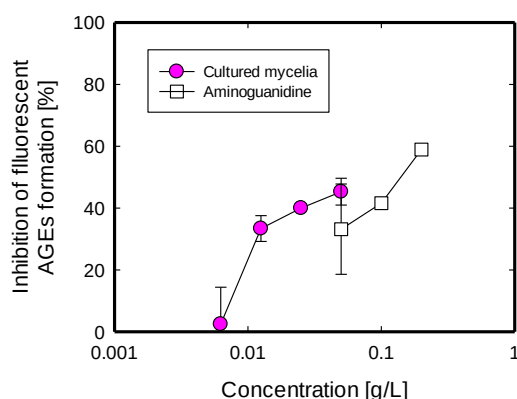


図 4 カバノアナタケ菌糸体の抽出・粗精製物の抗糖化活性

2.3.1.5

イオンビーム照射によるストックの育種

Breeding of Stock (*Matthiola incana*) Cultivars by Ion Beam Irradiation藤井崇治*¹、高城啓一*²、畑下昌範*²

Takaharu FUJII, Keiichi TAKAGI and Masanori HATASHITA

Abstract

We have obtained flower color variants of a certain stock (*Matthiola incana*) cultivar by irradiation of carbon beams to dry seeds.

要約

ストック乾燥種子に対する炭素線照射により、あるストック品種の花色変異を得ることができたので報告する。

緒言

ストック (*Matthiola incana*)は、アブラナ科の多年草(日本では一年草として扱われる)であり、観賞用作物として花壇栽培や切り花に利用されている。我々は、イオンビーム照射を用いてストックの花色バリエーションを増やすことを試みている。その試みの中から平成 29 年度に作出した系統よりもさらに安定性の高い系統が得られたので報告する。

材料と方法

福花園種苗オリジナル品種 ムーンフェアリーの乾燥種子を出発材料に、若狭湾エネルギー研究センターの生物照射コース(高エネルギー)を用いて、450 MeV の炭素線 (LET 57 keV/μm、線量率 30 Gy/min)を照射した。

照射した種子は福花園種苗の研究圃場で栽培し、照射 2 代目種子(M₂)を得た。M₂ 世代、あるいは M₃ 世代で花色等に変異があるものについて、さらに後代で花色に関する変異の選抜を行った。

結果と考察

乾燥種子に 10 Gy の炭素線を照射し、得られた M₄ 世代から平成 29 年度には赤色系統 13-19 を得ることができた。しかし、この系統は株ごとに花色に濃淡が生じ安定性に欠けていた。そこでこの系統に関して世代を進め選抜を行うことにより、赤色系統 13-18、および濃桃色系統 13-21 を得ることができた(図 1)。これらの花色は安定しており、商品としてより利用しやすいと考えられた。

結言

今回得られた系統は、新規花色品種として利用することを考えている。今後はさらに有用な新品種の作出を試みる予定である。

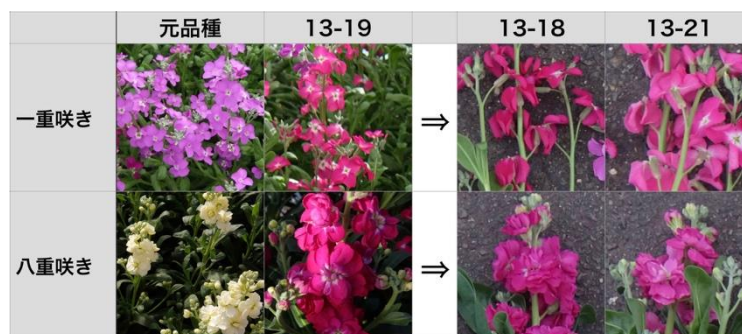


図 1 元品種、13-19、および新しい系統 13-18、13-21

*¹福花園種苗株式会社生産技術部、*²(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室
本研究は、福花園種苗株式会社と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

2.3.1.6

重イオンビーム育種技術の高度化

Improvement of Heavy Ion Beam Breeding

高城啓一^{*1}、畑下昌範^{*1}、仲下英雄^{*2}、三浦孝太郎^{*2}、市田裕之^{*3}、阿部知子^{*3}Keiichi TAKAGI, Masanori HATASHITA, Hideo NAKASHITA, Kotaro MIURA, Hiroyuki ICHIDA
and Tomoko ABE

日本国内には生物試料にイオンビーム照射を行うことができる加速器施設が 4 箇所あり、この内、若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)を含む 3 箇所が、戦略的イノベーション創出プログラム「戦略的オミクス育種技術体系の構築」において、重イオンビーム育種技術の高度化研究に参画している。

重イオンビーム育種技術の高度化では、イネの品種「ニホンバレ」を対象に、それぞれの照射施設が、それぞれの施設に特徴的なイオンビームを照射し、現れる突然変異の特徴を明らかにすることで、望む様式(変異のタイプやサイズ)の突然変異を得るためにはどの施設のどのようなビームを照射すればよいかということに関して体系化を図っている。

エネ研の炭素ビーム(450 MeV、LET ca. 60 keV/μm、100-150 Gy)で照射したニホンバレ種子より得られた照射第3世代(M₃)に関する結果をより確かなものにするために、平成 29 年度に実施した 8 系統の変異体に関するバルク DNA の全ゲノム解析に加え、平成 30 年度は新たに 12 系統の変異体の 1 個体由来 DNA について全ゲノム解析を行い、個体内に生じた変異の数と変異様式を調べた。その結果、変異体あたり 100 前後の変異が確認され、発生していた変異の種類は、1 塩基置換と欠失変異が 9 割以上を占め、欠失変異の中でも 100 塩基以下の欠失がおおよそ 9 割を占めるという、平成 29 年度と類似した結果が得られた。このことは、エネ研の炭素ビームが小規模欠失を高頻度で起こすのに適していることを示している。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、^{*2}福井県立大学・生物資源学部・生物資源開発研究センター、^{*3}(国研)理化学研究所・仁科加速器研究センター・イオン育種研究開発室
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが SIP 次世代農林水産業創造技術に基づき農研機構からの受託研究として、福井県立大学、(国研)理化学研究所と共同で実施したものである。

2.3.1.7

イオンビーム照射による高温耐性エタノール発酵糸状菌の構築

Ethanol Production from Rice Straw with Thermotolerant Fungi Mutant Constructed by Ion-beam Irradiation

畑下昌範^{*1}、高野真希^{*2}、星野一宏^{*2}

Masanori HATASHITA, Maki TAKANO and Kazuhiro HOSHINO

現在、バイオマスからの有用物質生産の実用化において、バイオマスの加水分解反応の促進、基質の殺菌エネルギーの削減、発酵速度の向上などを達成できる高温環境下で発酵生産が可能となる発酵微生物が求められてきている。しかし、このような高温耐性を持つ発酵微生物はほとんど存在しない。そこで、本研究では、イオンビーム照射により発酵温度を向上させた高温耐性エタノール発酵糸状菌を育種することを目的とした。

イオンビーム育種法を活用することにより、高温耐性エタノール発酵糸状菌のより高温での耐性付与を試みた。イオンビームを照射した糸状菌株から、増殖阻害を受ける線量区を主として、変異株のスクリーニングを行った。その中で、50℃条件でセルロース培地上で生育可能な変異体を複数獲得し、そのうち 14 系統の変異株で高いエタノール発酵能を示した。こうした変異株は代謝に関わる酵素群が野生株よりも高発現していることが予想されたので、cellobiohydrolase (CBH)とβ-glucosidase (BGL)の分泌量を調べた。その結果、ある変異株においては両方の酵素とも高い分泌量であることが明らかになった。イオンビーム照射により目的とする形質を容易に選抜することができたので、今後もこの手法を用いてより高性能な変異株の獲得を試み、最終的には稲わらや廃木材などのセルロース系バイオマスからのバイオリファインリー技術の確立を試みる予定である。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、^{*2}富山大学大学院・理工学研究部
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが富山大学と共同で実施したものである。

2.3.1.8

花卉園芸植物へのイオンビーム照射による新品種の育成
Development of Commercial Varieties of Flowering Plants by Ion Beam Irradiation
畑下昌範^{*1}、高城啓一^{*1}、鈴木勝久^{*2}

Masanori HATASHITA, Keiichi TAKAGI and Katsuhisa SUZUKI

栄養繁殖系の植物材料を用いた新品種の育成においては、まず植物の茎頂分裂組織へのイオンビーム照射により、照射当代において枝変わりを選抜する。次に、それらの枝変わりを挿し木や組織培養等の方法によって増殖し、増殖後においても形質が安定に保たれているかについて調査を行う。こうした過程を経て栄養繁殖系の植物として、短期間で新品種を確立することができる。

我々は、ビンカ(*Catharanthus roseus*)の組織に対してイオンビームを照射し、その後の枝変わり変異体を複数選抜することにより、新品種の作出を試みてきた。さらに、今までに品種登録を行った変異体の茎頂分裂組織に対してもイオンビーム照射を行い、二重に変異した枝変わりの選抜も試みている。そうした検討の中で、せと福 RMR(品種登録番号 25111 号)において、花に刷毛目状に入った斑の花色がピンクである親株に対して、その斑の花色が白になった変異体を見出した。この変異体は花色が赤／ピンクから赤／白に変化したことにより、見た目のコントラストが向上し、親株に対しても十分に差別化できるものであった。今後は、品種登録に必要な要件である安定性、均一性を確認する予定である。その他の品種登録候補個体については、無菌化苗を作成し、培養系での系統の保存を行った。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、^{*2}ハクサンインターナショナル株式会社
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターがハクサンインターナショナル株式会社と共同で実施したものである。

2.3.1.9

イオンビーム照射による有害元素低蓄積シイタケ菌株の作出
Development of the Low Toxic-element *Lentinula edodes* by Ion-beam Irradiation
佐々木明正^{*1}、寺島和寿^{*1}、畑下昌範^{*2}、高城啓一^{*2}
Akimasa SASAKI, Kazuhisa TERASHIMA, Masanori HATASHITA and Keiichi TAKAGI

シイタケは古くから我が国を含む東アジアで好まれてきた伝統的自然食品であり、食物繊維や健康機能性成分を多く含んでいることから、近年、栄養学的にも注目を集めている。一方で、シイタケ等きのこ類は有害元素を多く蓄積する傾向があり、特にカドミウム(Cd)を多く含んだ培養基材で栽培した場合、きのこ類が Cd を高濃度に蓄積する可能性が危惧されている。そこで、本研究では、シイタケの優良品種にイオンビーム(炭素ビーム)を照射して突然変異体ライブラリーを作出し、その中から Cd の蓄積量が低下した菌株を選抜することを目的とする。

平成 30 年度は、炭素ビーム照射の子実体発生に与える影響を調べるために、様々な線量(10、25、50、100、200、300、500、1000、1500、2000 Gy)を菌興 115 号に照射し、子実体発生率を調べた。照射株をコルクボーラーでくり抜きマルチ培地で培養を行い、菌糸伸長が見られた 10-500 Gy 照射株から菌糸先端分離により分離株を取得した。各線量区 30 株ずつ木粉培養を行い、子実体の発生率(発生操作開始3週間)を調査した。その結果、10-200Gy 照射株までは、対照区(発生率:76.6%)と同等の子実体発生率であった。しかし、300、500Gy 照射株の子実体発生率はそれぞれ 27.8%、18.9%と大幅に低下し、さらに菌糸蔓延が不十分な株も多く見られた。以上の結果から、子実体発生に影響が出ない 200Gy を Cd 低蓄積株の選抜を実施するための線量区とした。現在、200Gy 照射株より菌糸先端分離を実施しており、今後、分離株を用いて木粉栽培を行い、得られた子実体の Cd 濃度を順次測定する予定である。

^{*1}(一財)日本きのこセンター・菌茸研究所、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室
本研究は、(一財)日本きのこセンターと(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

2.3.1.10

粒子線による突然変異を利用した野菜の品種開発

Breeding of Vegetables by Particle Beam-induced Mutation

高城啓一^{*1}、田中良和^{*1}、畑下昌範^{*1}、山本絢也^{*2}、棚橋知弘^{*2}、後藤勇太郎^{*2}

Keiichi TAKAGI, Yoshikazu TANAKA, Masanori HATASHITA,

Junya YAMAMOTO, Tomohiro TANAHASHI and Yutaro GOTO

我々は、イオンビーム照射を行った乾燥種子を用いてアブラナ科、マメ科、およびナス科野菜の品種改良を試みている。また、効率的な育種を実施するための DNA マーカーの確立も実施しており、これまでに大根の抽苔性を識別するマーカーを確立した。

平成 30 年度は、これまでに照射した作物の栽培を継続するとともに、品種改良を効率的に行うための DNA マーカー探索として、単為結果性大玉トマト品種で形質発現の原因となった変異部位を検出するマーカーを作製し、ミニトマトの単為結果性品種の検出にこのマーカーが適用可能かどうかを調べた。その結果、大玉トマトの単為結果性検出マーカーは、ミニトマトの単為結果性を検出することができないことが明らかとなった。この結果は、ミニトマトの単為結果性が、大玉トマトと異なる変異、あるいは遺伝子が原因となっていることを示している。

今後は、これまでに照射を行った落花生等の有用形質の選抜を実施するとともに、効率化的に育種を実施するための DNA マーカーの探索も継続して実施し、有用な野菜品種の確立を目指す。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、^{*2}株式会社アサヒ農園
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが株式会社アサヒ農園と共同で実施したものである。

2.3.2. 生物資源のDNA情報・特性等の解析評価研究

2.3.2.1

福井県産生物資源の DNA マーカーの開発

Development of DNA Marker for a Special Product of Fukui Prefecture

田中良和^{*1}

Yoshikazu TANAKA

Abstract

RAPD analysis was performed on midi-tomato (Hanakomachi), a special product of Fukui Prefecture, to obtain some specific DNA fragments.

要約

福井県の特産品としてブランド力があるミディトマト(はなこまち)を試料として RAPD 解析を行い、特徴的な DNA 断片を複数得た。

緒言

福井県特産物のブランド化を進める際に、産地偽装や品種流出などを防ぐための科学的な裏付けとなる技術の開発が必要とされている。本研究では、福井県の特産品としてミディトマト(はなこまち)に着目し、これを他のトマトと判別するためのDNAマーカー作成を試みた。

成果の概要

ミディトマト(はなこまち)に特異的な DNA バンドを検出する方法として RAPD(Random Amplified Polymorphic DNA)法を用いた。トマト試料は、敦賀市内のスーパーで購入したミディトマトや、種苗会社から入手した大玉トマトを用いた。RAPD には 80 種類の PARD プライマーを使用した。反応は rTaq DNA Polymerase (TaKaRa)を用い、94℃ 3 分で変性後、94℃ 30 秒、44℃ 60 秒、72℃ 90 秒を 40 サイクル行った。反応後、2%アガロースゲル(TAE バッファー)を用いて電気泳動を行い、多型を確認した。その結果、80 種類の RAPD プライマーのうち、13 個のプライマーにおいて、はなこまちのみに出現する DNA バンドを複数得ることが出来た(図1)。これらのプライマーを用いることによって、はなこまちを他の品種と区別することが出来る様になった。

結言

今回得られた特異的な DNA バンドは、10 塩基からなる RAPD プライマーを用いたもので、再現性が低い欠点があるため、今後はこれら特異的な DNA バンドの塩基配列を調べて、より安定な DNA プライマーを作成する予定である。また、はなこまちは葉かび病に対する抵抗性が無く、生産現場において病気の蔓延が問題になっているため、現在葉かび病に対する抵抗性を付与することが課題となっている。ミディトマト市場における福井県のブランド力を維持するために、育種に用いることが出来る DNA プライマーの作成も並行して行っていく予定である。

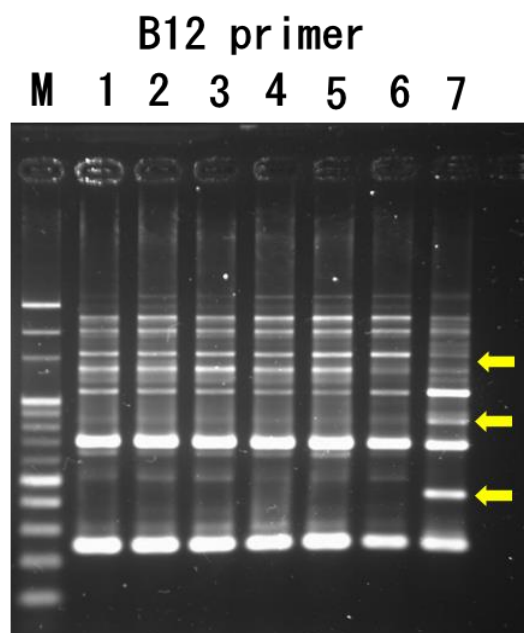


図1 RAPD 解析の結果(B12 プライマー)
M:100bpDNA ラダー、1:桃太郎 EX、
2:桃太郎コルト、3:桃太郎エイト、4:桃太郎ヨーク、5:桃太郎ファイト、6:桃太郎、
7:はなこまち
黄色矢印で示した所に特異的な DNA バンドが見られた。

^{*1}(公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室

本研究は、(公財) 若狭湾エネルギー研究センターが福井県からの受託研究として実施したものである。

2.3.2.2

福井県産生物資源の代謝産物分析

Analysis of Metabolites for Agricultural Products of Fukui Prefecture

遠藤伸之^{*1}

Nobuyuki ENDO

Abstract

Major products of Fukui prefecture, we investigated the difference in components and metabolites between agricultural products of Fukui prefecture and those of other areas.

要約

ミディトマト、にんにく、ネギについて、福井県産品と他産地間において含有する成分・代謝産物が異なるかを比較調査し、特徴を有するか調査を行った。

緒言

地場産の野菜や果物などの農産物を地域のブランド製品とするには、消費者の信頼を損なわない品質管理や、他産物との差別化が必要である。また、近年では産地偽装や特産品の海外への不正流出が、経済的被害をもたらす事が問題となっており、これは県特産物のブランド化にあたっても想定しておくべき問題である。そのためには、これら地場産物の品種や生産地を的確かつ迅速に判別する技術の開発が必要とされている。そこで本研究は、福井県の特産物や伝統野菜に対して、品種や産地識別に利用できる代謝産物の網羅的解析を用いた県産物カタログを構築し、他県産物との差別化、福井県産物のブランド化に寄与することを目的とした。

成果の概要

敦賀市内の農産物直売所やスーパーで購入したミディトマト、にんにく、ネギを試料とし、果汁成分および香気成分を液体クロマトグラフ質量分析装置、およびガスクロマトグラフ質量分析装置を用いて含有成分の同定・定量分析を行った。成分の分離や定性分析に適した試料前処理、分析条件の決定を各試料ごとに検討し、比較検討に適した条件を得た。図1に青ネギを試料とした際に得られたガスクロマトグラフのTICクロマトグラムを示した。福井県産2種の差は小さく、高知県産と福井県産の差異が大きいことがわかる。香気成分では有意な差が認められたが、ビタミン類や糖分等の栄養成分では、個体差が大きく、産地間での有意な差を示すことができなかった。ミディトマト、にんにくでも産地による成分の差が確認できたが、農産物は品種や収穫時期によって大きく変化することから、多くの検体について分析を行い、平均化を行ったうえで統計的処理を行い、解析評価を行う必要がある。

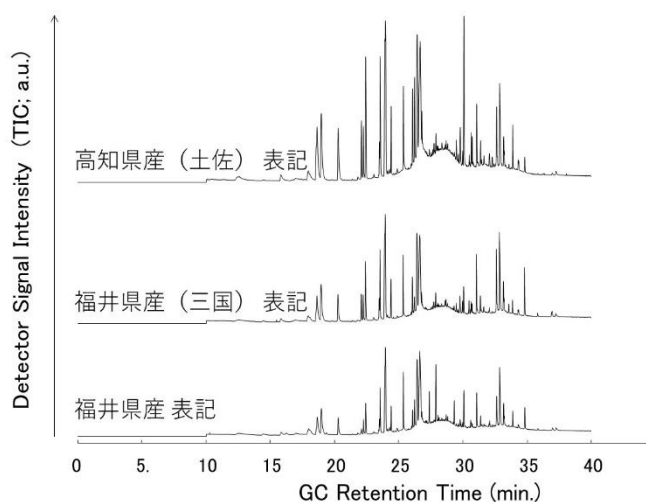


図1 青ネギを試料とした GC-MS 成分分析結果の例

結言

福井県産および県外産品のミディトマト、ネギ、にんにくを試料とし、クロマトグラフによる成分分析を実施し、県産品の特異性を植物の含有物から判別する手法の開発を試みた。液体クロマトグラフ質量分析、ガスクロマトグラフ質量分析法を用い、特徴的な成分判定に有望な条件を見出した。今後検体数を重ねて統計的処理を行い、精度の向上を目指す。

^{*1}(公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室

本研究は、(公財) 若狭湾エネルギー研究センターが福井県からの受託研究として実施したものである。

2.3.2.3

抗酸化活性評価法の開発

Development of Reactive Oxygen Species Detection Method for Evaluation of Antioxidative Activity

遠藤伸之^{*1}

Nobuyuki ENDO

Abstract

We have developed a simple method based on electron spin resonance (ESR) spectroscopy for free radical scavenging capacity determination. The reactivity of hydroxyl radical, superoxide anion radical and singlet oxygen with components in several foods were evaluated by spin trapping-ESR method using a new reagent. The anti-oxidation revitalization of several foods produced in Fukui and the other areas was evaluated by using this method.

要約

電子スピン共鳴(ESR)装置を用い、フリーラジカルの消去活性を簡便で精度よく評価する手法の確立を目指した研究を実施している。食品中に含まれる成分について、ヒドロキシラジカル、スーパーオキシドアニオンラジカル、一重項酸素との反応性を新しいスピン捕捉剤を用いたスピントラッピング-ESR法で評価した。また、この手法を用い、福井県産と他の地域産の食品について抗酸化活性の評価を試みた。

緒言

食品の機能性の中でも抗酸化力は、生活習慣病や老化、発がんとの関連性が示唆される酸化ストレスを抑制する能力として特に注目されている。近年、抗酸化力を有する成分は五大栄養素、食物繊維に次いで「第七の栄養素」と呼ばれ注目されており、抗酸化力の高い食品は付加価値が高まる例が多い。このため、抗酸化力を有する成分を多く含む食品の検索が進められているが、抗酸化力を簡便かつ確実に評価する方法は少ない。

そこで、さまざまな状態(液体、固体、粉末、脂状、水溶液など)である食品に対して、抗酸化力を正しく評価する新しい手法を開発する。研究には主に福井県内・周辺地域で産出する農水産物や地元特徴的な食材を用い、抗酸化力の評価を試行する。本研究の成果によって、県産農水産物・食品の価値向上に寄与する基礎技術の確立を図る。

成果の概要

福井県の特産品であるトマト、ニンニク、かぶ、ラッキョウを試料として用い、他県産品と比較しながら測定手法の開発を行い、従来法よりも精度・再現性のよい手法を得ることができた。食品を試料とした抗酸化活性評価手法の開発においては、種々の酸化ストレス要因物質のうち、ヒドロキシルラジカル、スーパーオキシドアニオンラジカル、一重項酸素に対して、簡便で再現性の高い測定手法を確立できた。

試料調製については、食品には多種多様なものがあるので、さらに対象範囲を広げて評価を行い、広範囲の試料に対応できる調整法を開発する必要がある。農産物は個体差が大きいため検体数を多く測定し、統計的な処理を行うことが必要である。

今後は、多数の測定による標準化や、より広範囲の試料への適応、評価数値の規格化、手法の標準化を目指して、測定を重ねていく予定である。

結言

本研究での成果は、農産物などの機能性評価法として既存法より詳細な情報が得られる手法であるが、一般的な手法として確立するためにはより多様な試料に対して実験を重ね、精度の高い結果が得られる条件の検討や簡素化が必要である。今後、より簡素なプロトコルを開発し、他の研究機関等の協力を得て標準測定法としてのプロトコル策定を目指すとともに、地域特産品に対して本手法による測定を行い、高機能食品としての可能性を調査し、福井県産農産物の高価値化に寄与することを目指していく。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県からの受託研究として実施したものである。

2.3.3. 植物工場関連技術開発

2.3.3.1

周年栽培可能な高品質ミディトマトの育成

Breeding of High-quality Midi-sized Tomatoes for Year-round Culture

畑下昌範^{*1}、高城啓一^{*1}、井村裕治^{*2}

Masanori HATASHITA, Keiichi TAKAGI and Yuji IMURA

Abstract

The year-round cultivation in greenhouses is one of the most important issues for midi-sized tomatoes, which have a good eating quality and the demand of which have been growing.

However, there have never existed high fructiferous varieties of them for a labor saving cultivation. In this study, we have conducted the breeding of high-quality midi-sized tomatoes with high fructification for the round-year cultivation.

要約

近年その良食味により需要が増大しているミディサイズのトマトに関しては、周年栽培化が一つの課題である。しかし、現状では省力栽培が可能な結実性の高いミディトマト品種は見当たらない。そこで、周年栽培可能で結実性の高い高品質トマトの育成を試みた。

緒言

ミディトマトのブランドの一つである「越のルビー」は、福井県立短期大学(現福井県立大学)農学科で育成された品種である。また、当研究センターと共同研究している県内種苗会社からも「華クイン」「華小町」などのミディトマトが品種登録され、販売されている。福井県では、エコ園芸推進の一環で、嶺南地方に大規模施設によるトマト栽培を推進しており、ミディトマトの周年栽培化が行われてきている。園芸の現場においてはトマトも例外ではなく生産農家の高齢化が課題であり、周年栽培においてより一層の省力化が不可欠であり、そのために省力栽培が可能な結実性の高いミディトマト品種の開発が求められている。こうした中で、結実性の高い高品質トマトの育成を試みることにした。

結果の概要

ミディトマトの雑種種子に 200MeV のプロトンビームを照射(～100Gy)し、播種、育苗後、ハウスにて試験栽培を行った。その中で、受粉作業をしても、種子をもたない果実をつける個体が 16 個体認められた。これらの受粉作業をしても、種子をもたない果実をつける個体については、個体毎に複数本の側枝を取り出して苗を調製、定植し、作期毎に形質調査を行った。その過程で、単為結果様の性質を示さなくなった個体が見られたため、それらは選抜から外した。さらに、相対的に糖度の低い実をつける個体、相対的に果実重量が十分ではない個体も選抜から除外し、3 個体を残した。これらは、いずれの個体も現行品種に比べて、糖度はやや低いものの、果実重量が劣らない実を付ける個体であった。最後に、複数の苗を調製し、それらの結実性を調査した。その結果、1つの系統では、無受粉条件において、着果率が 60%程度であり、単為結果性を示さなかった。残りの 2 系統については、振動受粉、着果剤処理、無受粉条件のいずれにおいても 90%以上の着果率を示し、これは既存の単為結果性大玉品種と同様な結果であった。一方、現行のミディトマト品種では、振動受粉により 90%以上の着果率を示すものの、無受粉条件では約 20%の着果率を示した。

結言

目的とする品種の育成のためには、異なる特徴をもつ多様な結実性の高い系統を育成する必要がある。それらを利用した交配などにより、様々な特徴をもつ多くの結実性の高い品種の育成が可能となる。そのための母本となりうる個体を今回の試験から得ることができた。これらの有用な突然変異体を用いた複数の組合せによる交配の中から、品種登録に値する系統を 1 系統選抜し、品種登録するに至った。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、^{*2}福井シード株式会社
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井シード株式会社と共同で実施したものである。

2.3.3.2

植物育種の効率化を目指した DNA マーカーの開発

Development of a DNA Marker Improve the Efficiency in Plant Breeding

田中良和^{*1}、鈴木勝久^{*2}、水野隆^{*3}

Yoshikazu TANAKA, Katsuhisa SUZUKI and Takashi MIZUNO

本研究は、迅速かつ効率的に植物の品種改良を行うために必要な DNA マーカーを作成し、新品種育成の効率化に寄与することを目的とするものである。この方法を用いれば、旧来の選抜試験と比べて短期間かつ季節要因に左右されない選抜が可能となるだけでなく、選抜に用いる圃場や栽培に関わる人件費の削減も出来る。

本年度は、メロンの F1 品種を識別するための DNA マーカーを新しく作成し、これを用いた検定を行った。両親系統および F1 の葉から抽出した DNA 10ng に対し、40 種類の RAPD プライマーを用いて PCR を行ったところ、父親系統と F1 にだけ出現する DNA 断片を複数確認することが出来た。これらの DNA 断片の配列を調べたところ、父親系統と F1 から得られた DNA は同一配列であった。この DNA 配列を用いて新たに DNA プライマーを設計して PCR を行ったところ、父親系統及び F1 でのみ増幅する約 300bp の単一 DNA 断片を得ることが出来た。本プライマーは、葉の摩砕物を粗抽出 DNA として用いた PCR でも単一 DNA 断片を増幅し、これを用いた簡便な F1 品種の検定が可能になった。F1 品種の作成に用いる両親株の組み合わせ毎に新しく DNA マーカーを作成する必要があるが、今回使用した方法をプロトコル化することで、速やかに DNA マーカーを作成することが可能になった。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、^{*2}ハクサンインターナショナル株式会社、^{*3}プランツファーム SETO
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターがハクサンインターナショナル株式会社と共同で実施したものである。

2.4. 多様な分野の活動を支える技術開発

2.4.1. 加速器技術の開発・高度化

2.4.1.1

若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状

Current Status of the Accelerator Facility at the WERC

羽鳥聡^{*1}、栗田哲郎^{*1}、林豊^{*1}、吉本淳^{*1}、山田裕章^{*1}、山口文良^{*1}、淀瀬雅夫^{*1}、
長崎真也^{*1}、廣戸慎^{*1}、清水雅也^{*1}、大矢龍輝^{*1}、淵上隆太^{*1}

Satoshi HATORI, Tetsuro KURITA,

Yutaka HAYASHI, Atsushi YOSHIMOTO, Hiroaki YAMADA, Fumiyoshi YAMAGUCHI, Masao YODOSE,
Shin'ya NAGASAKI, Makoto HIROTO, Masaya SHIMIZU, Ryuki OYA and Ryuta FUCHIKAMI

Abstract

After the periodic inspections in 2017 and during filling SF6 insulation gas into the tandem accelerator tank, we found the adhesions of the accelerator tubes peeled off and all the tubes could not keep the vacuum inside of themselves. After the completion of replacement of all of the tubes at the end of May in 2018, we restarted to use the accelerator system for the experiments in June of 2018. The insulation performance against the acceleration high tension was so good that the application of the maximum tension of 5 MV to the terminal was successful in very early time of the machine time in 2018. After the successful use of the accelerator system of the fiscal year of 2018 in January of 2019, we conducted inspections of the tandem accelerator. In the inspections, no traces or impressions of discharge were observed on the surface of the insulator and electrodes. The synchrotron with the tandem accelerator as the injector has well supplied proton, helium and carbon beams for the experiments.

要約

2017 年度加速器定期点検でタンデム加速器の加速管に電極／絶縁体接着面剥離による気密破壊が見出され、4 本の加速管を全て交換することになった。交換完了後、2018 年 6 月より加速器利用を再開した。加速管の耐高電圧性能は良好であり、マシンタイム再開後の極めて初期には 5 MV の最高加速高電圧の印加に成功している。2018 年度の利用を 2019 年 1 月に終えたのち、2018 年度の定期点検を行なったが、絶縁構造物や保護電極に顕著な放電の痕跡は認められなかった。タンデム加速器を入射器としたシンクロトロンも順調に行われ、必要な陽子、ヘリウムおよび炭素ビームを実験に供した。

緒言

2017 年度は前年度からの加速器システムの運転・ビーム供給を 4 月まで行い、5～7 月に定期点検(定検)を行った。タンデム加速器の点検では、加速高電圧を発生させるシェンケル回路の組み込まれた絶縁コラム(シェンケルコラム)表面に、回路を短絡する沿面放電痕、コラム表面やダイオードスタック、コラム分割抵抗を保護する放電ギャップ電極、加速管や加速管分割抵抗を保護する放電ギャップ電極にアーク放電痕が、ほとんど見出されなかった。2016 年度より、これらの放電を抑制するために放電ギャップの電位差を設計値になるべく近づけ、電位不均衡による放電開始を抑える取り組みを行っている。すなわち、分割抵抗、ダイオードスタックの限流抵抗、ダイオードの順方向／逆方向抵抗の抵抗値分布を管理する取り組みであるが、その成果であるといえる。一部の放電ギャップにアーク放電痕が見つかったが、2016 年 9 月 15 日の倍電圧整流回路短絡放電(これ以後最高電圧を 4 MV に制限)に至った原因と考えている。2017 年度定検では是正がなされたがその成果は未確認である。

2017 年度定検を終え、タンデム加速器圧力タンクに絶縁ガス 6 フッ化イオウ SF₆を充填する際に、加速管への SF₆漏洩が見出された。加速管電極と絶縁ガラス(加速管 1 本あたり 80 段)の接着面の剥離が原因であり、4 本の加速管すべての交換を余儀なくされ、2017 年度は加速器の運転を断念した。

2018 年 5 月末までにタンデム加速器は加速管の交換・加速器復旧を終え、直ちに昇圧試験を行ない、6 月には実験利用の再開も行なった。シンクロトロン利用も順調に行われた。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・加速器室

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県から施設管理を受託、実施する中で行ったものである。

加速管コンディショニング

2017 年度の定検でタンデム加速器の加速管 4 本全てに気密破壊が見出された。加速管をハイボルテージ・エンジニアリング・ヨーロッパ社に発注、2018 年 3 月までに入荷した。加速管のインストールを行い、加速器の復旧を 5 月 28 日までに終えた。ただちに昇圧試験を行った。加速館内壁の耐圧降下速度(デコンディショニングレート)は昇圧開始時から週 120 時間の実験利用に耐えるものであったが、コンディショニングを進めていく過程でデコンディショニングレートは低下し、かつ、内壁の真空雰囲気での耐圧はこれまでの 3.5 MV から 3.8 MV まで向上した。荷電変換ガス(アルゴン)を導入することで、加速電圧は 5 MV の最高電圧印加が再び可能となっている。

マシンタイム

2018 年 6 月に入り昇圧試験、エネルギー校正、ビームコースへの搬送試験を行なったのち、2018 年度の実験利用は 2018 年 6 月 12 日から開始し、2 度のイオン源切り替え・整備を行いつつ、2019 年 1 月まで行なった。タンデム加速器の総発電時間は 3369 時間であった。

定期点検

2019 年 1 月に 2018 年度の加速器の実験利用を終えたのち 2 ヶ月の予定で 2018 年度定検を行なった。

絶縁コラム表面や放電ギャップでの放電は電位分布のバランスが崩れることが原因の一つとなり引き起こされ、と考えている。加速器タンク内には複数の熱源が存在し温度勾配が生まれる。絶縁コラム表面の絶縁抵抗やターミナル電圧を分割する分割抵抗などが温度勾配に比例し電界の不均一性を生み、それが放電の起こしやすさの原因と考え、絶縁ガスを循環冷却することで、温度勾配を抑える取り組みを行っている。定検中に熱交換器を追加し、加速器タンクと RF タンクを別々に冷却できるようにした。昇圧による温度上昇は抑制され、温度上昇によると考えられる加速電圧ドリフトも抑制された。

温度勾配によらずとも、分割抵抗の抵抗値の分布による電界の不均一性も発生しうる。全ての素子の抵抗値を計測し、平均値、分布の幅を導出・管理している。素子に乱数を与え、その昇順で取り付け位置を決定する取り組みは引き続き行なっている。コラムの放電ギャップや絶縁コラム上の放電痕が調査されたが、放電痕は見出されなかった。素子の均一化を図る取り組みの結果があらわれたと考えている。

加速管の電極剥離による気密破壊は、加速管電極にシールドプレートを取り付けるときに電極を変形させる力がかかることが原因であると考えている。新しい加速管をインストールする際に、全てのシールドプレートの変形を計測・是正し、取り付け溝の歪みも取り除いた。シールドプレートは電極に無理なく取り付けられたが、定検中に取り付け状況をチェックし、問題のないことを確認した。電極・絶縁ガラスの接着面の状況も観察し、剥離は認められなかった。

結言

2016 年度から取り組んでいる昇圧回路素子の抵抗値均一化の試みは、加速器の多くの場所での放電を抑制する結果を生んでいる。素子や絶縁構造物の温度分布も電位分布の均一化を阻害する効果をもつが、絶縁ガスの循環冷却の取り組みによる解決を試みている。温度上昇も抑制され、加速高電圧のドリフトを抑える効果も認められている。2017 年度、加速管の気密破壊による加速管交換の必要性が生じたため、2017 年度は加速器の運転を行っていなかったが、2018 年 5 月までに加速管の交換、加速器復旧を終え、2018 年 6 月より加速器の運転を再開している。加速管のコンディショニングは良好であり、最高加速高電圧 5 MV も再び印加可能になっている。放電抑制の取り組みの成果は定検でも確かめられた。

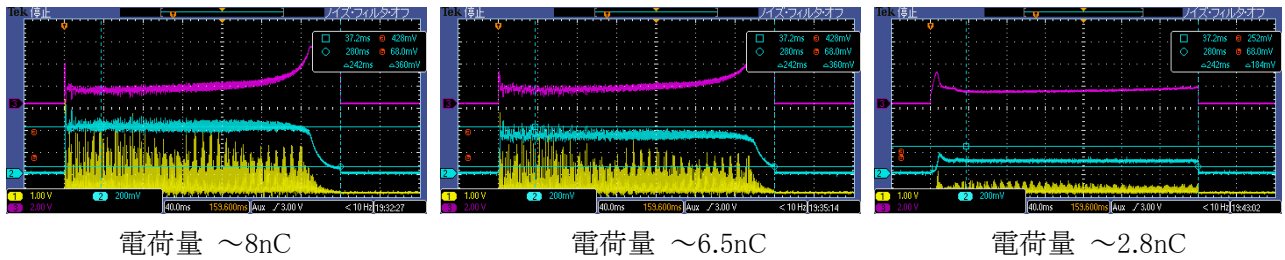


図 2 リファレンス自動調整制御時のスピル信号

黄:スピル信号 青:スピル信号の LPF 出力 赤:フィードバック信号

出射ビーム電流量と蓄積電荷の自動測定

リファレンスの自動調整の追加に伴い、リング内の電荷をモニタする機能が出射制御系に備わったので、これを利用してリング内の捕獲電荷/加速電荷および出射電流量/漏れ電流量(RF キッカーを OFF したときに射出される電流量)の自動測定機能を追加した。

これまで、これらの測定には二人がかりでオシロスコープを使ってバンチ信号の下側と出射電流量の同時測定を行い、10 周期分の平均を記録していた。オシロスコープのトリガーを加速開始タイミングもしくは加速終了タイミングに切り替えて測定し、さらに RF キッカーを OFF にして漏れ電流の測定を行っていた。

これらを制御ソフトウェアのボタン一つを押すだけで自動的に行えるようにした。これにより、運転業務の大きな効率化を図ることができた。以上の仕組みを図 3 に示す。

バンチ信号の下側エンベロップ信号を加速開始/加速終了タイミングで sBox (DSP)³⁾で記録する。sBox は PC と通信が行えないので、記録した値を一度 AD 出力し、PC で読み込むために CONTEC AIO-120802LN-USB⁴⁾に入力する。同時に、出射電流量を I/F Converter でカウント数に変更して、CONTEC-AIO モジュールに付属の Counter で計測する。

出射制御系には、RF スイッチによって中心周波数を遮断する機能もあるので、漏れ電流の測定も含めてすべて自動的に行える。

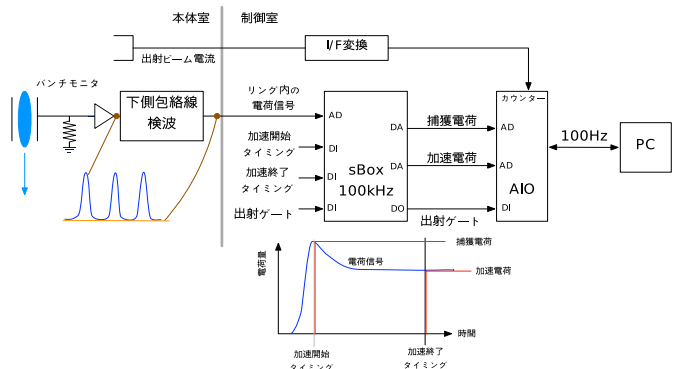


図 3 出射ビーム電流量と蓄積電荷の自動測定の仕組み

結言

2017 年に開発したビーム出射制御系は、2018 年度を通して安定に運用された。運用の中で発見された不便を解消すべく、さらに開発を継続してフィードバック制御系のリファレンス自動調整機能および出射電流量と蓄積電荷自動測定機能を開発した。

参考文献

- 1) 栗田哲郎、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報平成 29 年度、20、128 (2017)
- 2) H. Nishiuchi *et al.* 医療用シンクロトロン向けビーム出射制御システムの開発、第 6 回日本加速器学会年会プロシーディング (2009)
- 3) http://www.mtt.co.jp/dsp/sbox_index.html
- 4) <https://www.contec.com/jp/products-services/daq-control/pc-helper/usb-module/aio-120802ln-usb/feature/>

2.4.1.3

WERC シンクロトロンを用いたマルチバンド RFKO によるビーム取出し法の原理実証実験

Proof-of-principal Experiment of Beam Extraction Using a Multiband RFKO

from WERC Synchrotron

中西哲也^{*1}、奥川雄太郎^{*1}、塩川智也^{*1}、山口輝人^{*1}、栗田哲郎^{*2}

Tetsuya NAKANISHI, Yutaro OKUGAWA, Tomoya SHIOKAWA, Teruto YAMAGUCHI and Tetsuro KURITA

Abstract

A spot scanning irradiation for a cancer therapy using a synchrotron requires a fast beam-on/off control as well as a uniform spill structure. An RF-knockout extraction method for this purpose has been proposed using a multiband spectrum including many frequency bands around the betatron resonances. A prototype of the RF-knockout system has been developed for a proof-of-principle experiment at the WERC synchrotron. The beam experiment shows that a uniformity of spill intensity can be improved by increasing the number of frequency band as predicted in a beam simulation.

要約

粒子線がん治療のためのスポットスキャンニング照射は、シンクロトロンからのビーム取出しにおいて一様なスピルだけでなく高速のビーム on/off 制御が必要とされる。この目的のために、ベータトロン共鳴周波数帯を多く含んだマルチバンドスペクトルの高周波を使ったビーム取出し法が提案された。この取出し法の原理実証実験を WERC シンクロトロンで行うために RFKO システムのプロト機を開発した。実験結果はビームシミュレーションで予測した通りにスピル強度の一様性がバンドの数を増やすことで向上することを示した。

緒言

シンクロトロンは粒子線がん治療装置として用いられているが、最も効果的な照射方法であるスポットスキャンニング照射を行う場合、一様なスピル強度で高速にビーム on/off する必要がある¹⁾。それを目的にベータトロン共鳴周波数の高次の成分を含んだマルチバンドスペクトル(MB スペクトル)の高周波を使った高周波ノックアウト(RFKO)によるビーム取出し法を開発してきた²⁾。ビームシミュレーションによると、バンド数1に対して10まで増やすとスピル強度のばらつきの標準偏差は $1/2.7$ に低減する。この方式の原理実証を WERC シンクロトロンで行うために、RFKO システムのプロト機を開発しビーム実験を行った。

本論文では、プロト機の概要を述べた後に実験結果について報告する。

マルチバンド RFKO システムの概要

RFKO システムのプロト機のブロック図を図1に示す。MB スペクトルの高周波信号は、次のように発生させる。まず、デジタルフィルタ法を使って信号のデジタルデータを作成し、ワークステーション(WS)内のデジタル-アナログ変換器(DAC)のメモリーに保存する。そのデータを外部クロックにより電圧として出力する³⁾。DAC のメモリー容量は有限であるため、今回は1から2万ターン分のデータを使い、それを繰り返し出力させる。1ターン当たりのデータ数は84であり、クロック周波数は250MHzとなる。10 個の共鳴周波数帯を含めるために必要な全周波数帯は、炭素 55MeV/u の場合は1MHzから14MHzである。従って、高周波波形のデジタル化にあたっての最大周波数成分に対するサンプリング数は $250/14 \approx 18$ であり十分に大きい。

図2はWS出力をLPFを通してスペクトラムアナライザで測定した結果である。1-14MHzの間の必要な共鳴周波数帯が10個含まれていることを確認した。また、図3はその中の最初のバンドを拡大したものであり、周波数幅は0.925-1.068MHzであり、設計値に一致した。

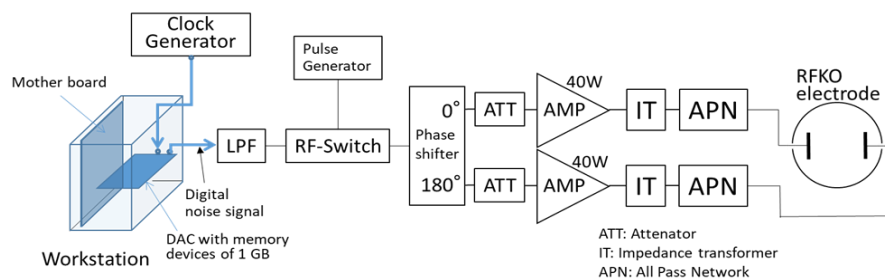


図1 マルチバンド RFKO システムのブロック図

^{*1} 日本大学・生産工学部・電気電子工学科、^{*2} (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・加速器室
本研究は、日本大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

LPF を通した高周波信号は RF スイッチに入力され、ビーム取り出し時間の間だけ出力される。そして分配器により、位相が 180 度異なる信号として、それぞれ 40W の広帯域アンプ、IT、APN を通して各電極に入力される。APN は広い周波数帯にわたって一定の電圧を RFKO 電極に印加するための回路で、入力インピーダンスは 800Ω 、IT のインピーダンス変換率は 1:16 (電圧変換率は 1:4) である。⁴⁾

ビーム実験結果

開発した RFKO システムを WERC シンクロトロン of 電極に繋がる同軸コネクタに接続してビーム実験を行った。取出し粒子は炭素 55MeV/u で、出射時間は 250ms、繰り返し 2Hz であった。図3はビームシミュレーション結果で、図4は実験結果である。図4の横軸はオシロスコープに取り込んだデータ数となっているが、スピルが出ている部分は時間にして 250ms であり、回転数は約 750,000 ターンである。図3からバンド数10でスピル強度のばらつきが小さくなるのが分かるが、実験でも同様の結果が得られた。実験における取出しビーム率はバンド数1のときに 34%、バンド数10のときに 47% であった。これはバンド数の違いにより RFKO 電極に印加される高周波電圧の実効値が異なるためと考える。WS で作成するデータはバンド数に関わらず実効値が一定になるように調整しているが、高周波アンプや IT、APN の周波数特性により、このような違いが生じる。

図5はバンド数に対するスピル強度のばらつきの標準偏差である。それぞれの標準偏差はそれぞれの平均値で割っている。この結果からもシミュレーションから予測されたようにバンド数とともに偏差が小さくなっていることが分かる。

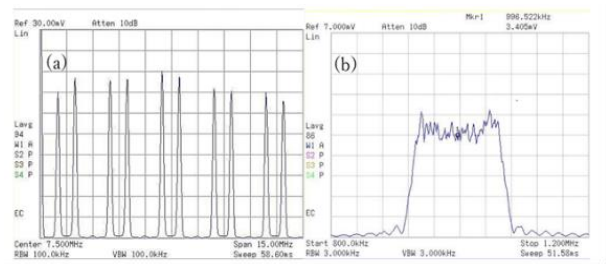


図2 スペクトルアナライザーで観測したマルチバンドスペクトル(左)と1バンドの拡大図(右)。横軸周波数は左図が 1-14 MHz、右図は周波数幅 143 kHz。

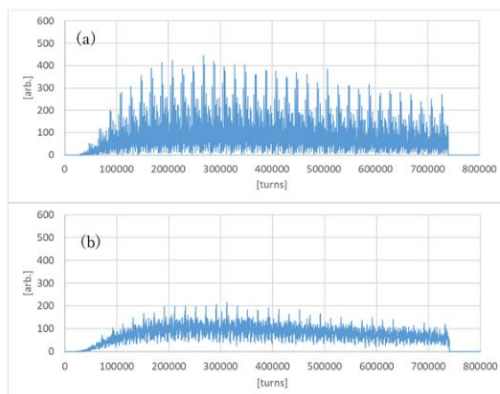


図3 スピルのシミュレーション結果。(a)バンド数1、(b)バンド数 10。

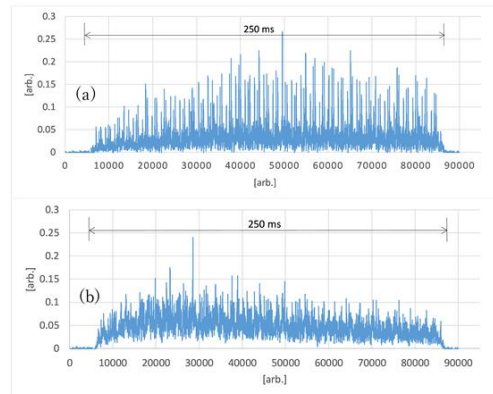


図4 スピルのビーム実験結果。(a)バンド数1、(b)バンド数 10。

結語

マルチバンドスペクトルのカラーノイズを使った RFKO ビーム取出し実験を WERC シンクロトロンを使って行った。実験結果は、スピル強度の変化がビームシミュレーションで予測した通り周波数バンドの増加とともに低減することを示した。これにより、一様なスピルを高速でビーム on/off 制御できることが期待できる。

参考文献

- 1) Th. Haberer, W. Becher, D. Schardt, G. Kraft, Nucl. Instr. and Meth. A 330 (1993) 296
- 2) Tetsuya Nakanishi, Nuclear Instruments and Methods A 621 (2010) 62
- 3) Akio Shinkai, Soichiro Ishikawa, Tetsuya Nakanishi, Nuclear Instruments and Methods A 769 (2015) 16-19
- 4) T. Yamaguchi, et al., Proc. of the PASJ2018, Nagaoka, Japan, pp.562-565 (2018)

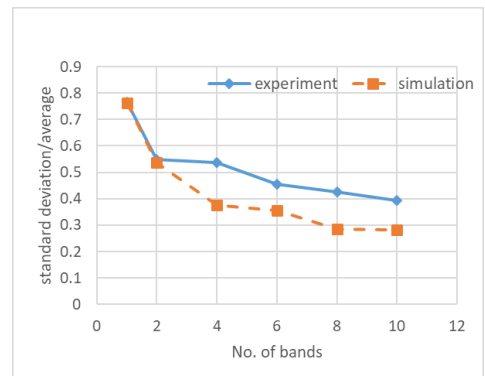


図5 バンド数に対するスピル強度のばらつきの標準偏差。

2.4.2. 加速器利用分析技術の開発・高度化

2.4.2.1

リチウム定量分析のための検出器効率測定とビーム電流計測装置の開発

Measurement of Detector Efficiency and Development of Beam Current Measurement System for Ion Beam Analysis

鈴木耕拓^{*1}、安田啓介^{*2}、中田吉則^{*3}

Kohtaku SUZUKI, Keisuke YASUDA and Yoshinori NAKATA

Abstract

Time-of-Flight Elastic Recoil Detection Analysis (TOF-ERDA) has been developed for lithium analysis. The TOF-ERDA detector efficiency was measured, and beam current measurement system was developed. The detector efficiency is less than 80%, and we have found that the TOF-ERDA detector efficiency becomes higher with increasing a particle mass.

要約

飛行時間測定反跳粒子検出法(TOF-ERDA)によるリチウム定量分析法の開発を進めている。このため、TOF-ERDA 検出器の検出効率などの測定およびビーム電流計測装置の開発を行った。検出効率は 80%以下となり、粒子が重いほど上がることが確認された。ビーム電流計測装置は回転式とし、常時ビーム計測ができるようにしている。

緒言

リチウムイオン二次電池は、モバイル製品から自動車・飛行機にまで搭載されている。しかし、液体媒質を使用しているため、発火・爆発の危険を伴う。これに対し、全固体リチウムイオン電池は、不燃・難燃の媒質が用いられ、構造が簡単になることから安全・安価になると考えられている。現在は全固体リチウムイオン電池の研究開発が盛んに行われている。本研究は、リチウムイオン電池中のリチウムの振舞いを直接観測するため、イオンビームを用いた TOF-ERDA によるリチウム定量分析法を開発することが目的である。水素やリチウムなどの軽元素は定量分析が困難で、イオンビームによる分析がほぼ唯一の手法である。TOF-ERDA は透過型検出器とエネルギー検出器で粒子の速度とエネルギーを同時計測する手法で、質量を計算できるため元素を特定できる¹⁾。また表面からの元素分布をナノメートルの精度で決定できるため、電極と媒質の界面におけるリチウムの振舞いが良く分かる。リチウム定量分析のためには、ビーム粒子とリチウムの散乱断面積、ビーム電流の計測、検出器の検出効率および立体角などの情報が必要である。これまで散乱断面積の導出とビーム電流計測装置の試作を行ってきた²⁾。平成 30 年度にはビーム電流計測装置のビームライン導入、および検出器の検出効率と立体角を求めた。

ビーム電流計測装置

若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)加速器棟照射室 2 のイオンビーム分析コースに TOF-ERDA 装置が設置されている。このビームコースに作製したビーム電流計測装置を導入した。図 1 に導入した様子を示す。ビームは左から導入され、右側のターゲット台に照射する。その間に回転軸に固定された金属の羽があり、常時回転することによって、ビーム電流計測とターゲットへの照射を交互に行う装置である。回転数は 2 rpm 程度だと電流計測の応答性が良かった。



図 1 ビーム電流計測装置。

検出器性能測定

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、^{*2}京都府立大学、^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが関西電力株式会社、日本原子力発電株式会社、北陸電力株式会社の 3 社からの受託研究として、京都府立大学と共同で実施したものである。

TOF-ERDA は透過型検出器 2 台と半導体検出器 1 台により、粒子の飛行時間差とエネルギーを同時に測定する装置である。透過型検出器は、厚さ数ナノメートルの炭素薄膜を粒子が透過した際に放出される二次電子を静電ミラーでマイクロチャンネルプレートに導く機構になっている。このため、検出効率は 100% にならず、粒子の速度・質量に依存(放出二次電子量に依存)することとなる。今回は、ヘリウムおよび銅ビームを金板に照射し、弾性散乱したビームに対して検出効率を測定し、エネルギー依存性を確認した。TOF-ERDA 検出器はビーム軸からの散乱角 40° に設置されており、金板はビーム軸から 20° に傾けた。図 2 にはヘリウム(左図)および銅(右図)に対する検出効率を示す。青が前方検出器単体、緑が後方検出器単体、赤が前方後方 2 台を合わせた検出効率を示す。基本的に、2 台合わせた検出効率のみでよいが、確認のため単体での効率も求めた。単体の検出効率を求めるときと 2 台合わせた効率を求める際に用いたときで、マイクロチャンネルプレート信号の閾値が異なるため、単体の場合は 1-2 MeV 付近のエネルギーで検出効率が下がっている。ただし 2 MeV 以上の領域で、単体と 2 台合わせた効率を比較すると、単体の効率の積が 2 台合わせた効率とほぼ一致していることが分かる。

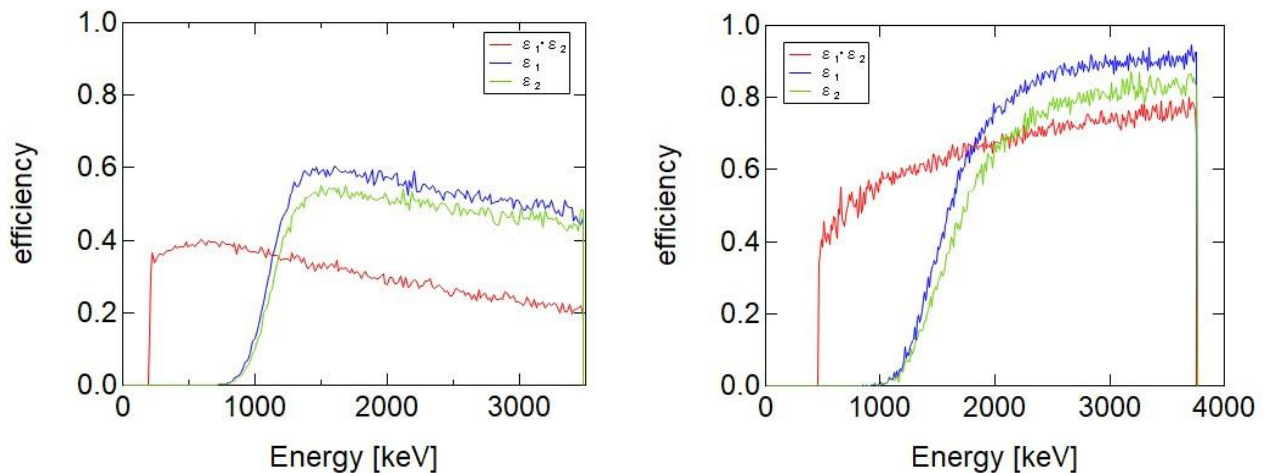


図 2 透過型検出器の検出効率。左図がヘリウム、右図が銅に対する効率である。青が前方、緑が後方の透過型検出器単体での効率であり、赤が 2 台合わせた効率である。

結言

エネ研ではリチウムイオン電池のためのリチウム定量分析法の開発を行っている。定量分析のためには、ビーム粒子(ヘリウム)とリチウムの散乱断面積、ビーム電流計測、検出器の効率などの情報が必要である。平成 30 年度にはビーム電流計測装置の導入と、検出器効率を求めた。平成 29 年度にはヘリウムとリチウムの散乱断面積を求めているため、定量のための条件がそろった。

今後は実際の全固体リチウムイオン電池模擬試料に対してリチウム分析を行っていく予定である。TOF-ERDA の高位置分解能の特性を生かして、電極—電解質界面付近におけるリチウム分布を詳細に測定していく。

参考文献

- 1) Y. Yasuda *et al.*; Nucl. Inst. Meth. B, 442, 53-58 (2019)
- 2) 鈴木耕拓他、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報平成 29 年度、20、132 (2017)

2.4.2.2

大気雰囲気型反跳粒子検出法を用いた

ラジカル含有リチウム酸化物の常温水分解による水素生成機構の解明

Clarification on Hydrogen Production Processes of Radical Doped Lithium Oxides
by Water Splitting at Room Temperature using In-situ Elastic Recoil Detection in Air土屋文^{*1}、高廣克己^{*2}、鈴木耕拓^{*3}、石神龍哉^{*3}

Bun TSUCHIYA, Katsumi TAKAHIRO, Kohtaku SUZUKI and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

The hydrogen and water absorption characteristics of $\text{Li}_{2-x}\text{ZrO}_{2+x}$ ($x=1.00\sim 1.25$) with various densities and Li concentrations were investigated by employing weight gain measurements (WGM), elastic recoil detection (ERD), field emission-scanning electron microscopy (FE-SEM), and X-ray diffraction (XRD). The WGM and ERD results indicated that the amounts of H and H_2O absorbed into $\text{Li}_{2-x}\text{ZrO}_{2+x}$ ($x=1.11$) with the lowest density in air at room temperature were the highest values, as compared with those for $\text{Li}_{2-x}\text{ZrO}_{2+x}$ ($x=1.00$ and 1.25).

要約

密度および Li 濃度の異なるラジカル含有 $\text{Li}_{2-x}\text{ZrO}_{2+x}$ ($x=1.00\sim 1.25$) 試料を大気雰囲気に曝し、電子天秤、ERD、FE-SEM、XRD それぞれの測定方法を用いて、空気暴露時間に対する重量増加、水素濃度、表面形態、構成元素および組成を測定して、水および水素吸収特性における表面積および Li 濃度依存性について調べた。 $x=1.11$ の $\text{Li}_{2-x}\text{ZrO}_{2+x}$ 試料における重量増加および水素吸収速度が最も高いことがわかった。これは、水素吸収および貯蔵特性が体積密度(粒径)の減少および Li 含有量の増加により促進されていることを示している。

緒言

水素吸収、貯蔵および放出特性を有するラジカル含有リチウム酸化物水素吸蔵貯蔵材料を用いた常温水分解-水素生成システム開発の基礎を築くことを目指した。具体的には、 1200°C および 1300°C の焼結温度で密度および Li 濃度の異なるラジカル含有 $\text{Li}_{2-x}\text{ZrO}_{2+x}$ ($x=1.00\sim 1.25$) 試料を作製し、リチウム酸化物表面およびバルク内に Li の格子間原子および酸素空孔等の電荷を帯びたラジカルを形成させ、室温における水分解、水素吸収および貯蔵、水素生成等の水素輸送機構に関与する素過程を向上させることを目的とした。

実験

これまでの研究成果に基づき、炭酸リチウム(Li_2CO_3)粉末を 1200°C および 1300°C の高温および空気雰囲気において焼結することによって、直径 8 mm、厚さ 1 mm のディスク状の密度および Li 濃度の異なるラジカル含有 $\text{Li}_{2-x}\text{ZrO}_{2+x}$ ($x=1\sim 1.25$) 試料を作製した。これらの試料を約 1×10^{-4} Pa 以下の高真空装置内に導入し、 350°C で 10 分間の加熱処理により残留ガスを取り除いた各試料を温度 20°C 、相対湿度 80% R.H. の条件下に置き、各空気暴露時間後に精密電子天秤を用いて貯蔵重量変化を測定し、試料全体に対する水素吸収量を求めた。また、イオンビーム分析法である反跳粒子検出(ERD:elastic recoil detection)法によって、室温において空气中に曝された $\text{Li}_{2-x}\text{ZrO}_{2+x}$ 試料表面の水素濃度および元素分析を同時に測定した。

結言

$\text{Li}_{2-x}\text{ZrO}_{2+x}$ 試料の重量増加の割合および $\text{Li}_{2-x}\text{ZrO}_{2+x}$ 試料中の水素濃度は空気暴露時間の増加とともに増加し、約 4000 時間ではほぼ一定の値に達することがわかった。また、 $x=1.11$ の $\text{Li}_{2-x}\text{ZrO}_{2+x}$ 試料における重量増加および水素吸収速度が最も高いことがわかった。これは、 $x=1.11$ の $\text{Li}_{2-x}\text{ZrO}_{2+x}$ 試料における体積密度(粒径)は $x=1.00$ および $x=1.25$ の $\text{Li}_{2-x}\text{ZrO}_{2+x}$ 試料における体積密度(粒径)よりも低く(小さく)、空気に曝される面積がより大きい、多くの水が吸収され易い状態であると考えられる。また、Li 含有量の増加は、大気中の H_2O および CO_2 との反応による、 Li_2CO_3 、 ZrO_2 および LiOH 等の生成物形成を促進することから、自由に動けるわずかな Li が水分解、水素の拡散および蓄積過程に大きな影響を与えられとされる。

^{*1}名城大学・理工学部・教養教育、^{*2} 京都工芸繊維大学・材料化学系、^{*3} (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ

本研究は、公募型共同研究事業として(公財)若狭湾エネルギー研究センターが名城大学および京都工芸繊維大学と共同で実施したものである。

2.4.2.3

DLC 膜の医用応用のための親水性制御に関する研究
Wettability Control of DLC Films for Medical Applications
木野村淳^{*1}、鈴木耕拓^{*2}、中尾節男^{*3}
Atsushi KINOMURA, Kohtaku SUZUKI and Setsuo NAKAO

Abstract

Diamond-like carbon films (DLC) formed by plasma-based ion implantation techniques on Si have been characterized by contact angle measurements, elastic recoil detection analysis and positron annihilation spectroscopy to obtain materials information on wettability, hydrogen contents and nanostructures. The measured results were compared alongside each other to find correlation among these measured values to understand the origin of DLC wettability.

要約

プラズマイオン注入法を用いて Si 基板上に幅広い条件で成膜した DLC (Diamond-Like Carbon) 膜に対して、接触角測定、ERDA 測定、陽電子消滅分光測定を行い、各試料に対して親水性、水素量、ナノ空隙に関する情報を収集した。それらの 3 つの測定結果の相関を取ることで、親水性に影響を与える材料の要因に関する調査を行った。

緒言

炭素系新材料である DLC 膜は耐摩耗性や摺動性向上などの各種機械特性向上を目的とした機械材料のコーティング膜として幅広く研究開発が行われている。近年、それに加えてカテーテルやステントなど医用材料としての応用も研究が進められてきた。このような医用材料に要求される重要な性質に抗血栓性が挙げられる。その性質は材料組成や材料表面の親水性・疎水性、ナノ表面構造に関わることが知られている。DLC 表面の親水性に関しては、成膜パラメータや化学的組成などとの相関を調べる研究が行われてきたが、その起源については十分に理解されていない。本研究では材料中の陽電子消滅分光で得られる微細な空孔空隙に関する情報とイオンビーム分析で得られる水素量に着目して、ナノ構造と親水性との相関関係を調べ、DLC 膜の親水性発現に関わる材料物性に関する基礎研究を実施する。

方法

産業技術総合研究所中部センターで、高電力パルススパッタ (High Power Impulse Magnetron Sputtering : HiPIMS) とプラズマイオン注入装置 (Plasma-Base Ion Implantation: PBII) を組み合わせた PVD-CVD (物理蒸着-化学蒸着) ハイブリッドシステムを用いて、Si 基板上に H、Si を含む様々な組成・構造の炭素系薄膜を準備した¹⁾。本研究では、DLC (Diamond-like carbon)、PLC (Polymer-like carbon)、GLC (Graphite-like carbon)、Si-DLC、Si-PLC に分類される炭素系薄膜を用いた。また PBII 法ではなく単純にスパッタ法で炭素膜を成膜した sp²-C、水素をほとんど含まない DLC 膜として ta-C (Tetrahedral amorphous carbon) も用いた。これらの膜はすべて Si 基板上に成膜されたものである。膜厚は試料によりばらつきがあるが、いずれも表面粗さ計で膜厚を測定し、ERDA 測定から得られる H (水素) 密度の計算に反映した。それぞれの膜の親水性は、同研究所の接触角計を用いて測定した。炭素系薄膜試料中の H の絶対量を若狭湾エネルギー研究センターのイオンビーム分析装置により分析した。測定手法として ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis) 及び TOF-ERDA (Time-of-Flight ERDA) の 2 種類の方法を使用した²⁾。これらの炭素系薄膜試料の陽電子消滅分光測定 (ドップラー広がり測定) を京都大学複合原子力科学研究所の原子炉ベース低速陽電子ビームラインで測定した³⁾。

結果と考察

ERDA 測定では原理的には測定パラメータのみから試料内に含まれる H 量を計算することは理論上可能であるが、測定パラメータの精度は必ずしも高くないため、2 種類の標準試料 (水素イオン注入した Si と高分子の

^{*1} 京都大学複合原子力科学研究所、^{*2} (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、^{*3} 産業技術総合研究所・構造材料研究部門

本研究は、公募型共同研究事業として (公財) 若狭湾エネルギー研究センターが京都大学および産業技術総合研究所と共同で実施したものである。

PPS (Polyphenylenesulfide) 膜を使用し、その有効性を確認した。ERDA 測定では、測定中の H 脱離が問題となるため、1 試料に対し、複数回 ERDA 測定を実施し、H 脱離がないことを確認するか、H 脱離が観測される場合には、その積算電荷依存性を調べて、測定初期の H 脱離がない状態の H 量を計算で推定する方法を取った。図 1 に DLC 膜の ERDA スペクトルを示す。十分な H 信号が得られており測定に問題はなかった。さらに、1 回目の測定と 4 回目の測定との間で大きな差異は見られず、測定中のスペクトル形状の変化は無視できる程度であった。一方、PLC 膜では照射中に検出される H 信号の低下が見られた。いずれにしても、すべての測定試料に対して、測定点に対して直線をフィッティングし、積算電荷量 0 の場合の H 量を外挿して、その値を試料の H 量とした。

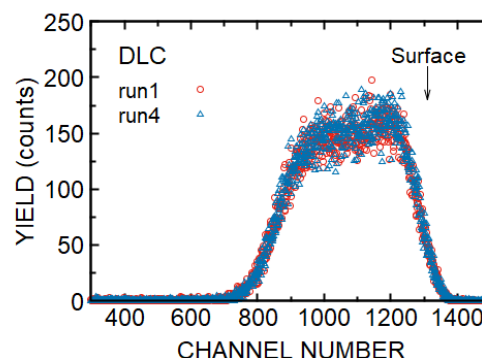


図 1 DLC 膜の ERDA スペクトル。

TOF-ERDA 法の評価のために、一部の炭素系薄膜試料の測定を行った。膜中の H 信号が観測されているが、通常型 ERDA よりも長い測定時間(高いビーム照射量)が必要であり、TOF-ERDA 測定はもっぱら標準試料の確認や精度向上のために使用するのが良いと考えられる。

接触角測定では、測定精度向上のため、水滴の頂点と端の部分との間に線を引き、その線の角度を使って、接触角を導出する間接的な方法を用いた。膜によって差が見られ、おおよそ 70 度から 90 度程度の範囲の値を示した。

ERDA 測定及び接触角測定に対応する試料に対して、京都大学複合原子力科学研究所の低速陽電子ビームラインを用いて、エネルギー 0-30 keV の範囲で加速エネルギーを変えながらドップラー広がり測定から得られる S パラメータのエネルギー依存性(S-E カーブ)の測定を行った。S パラメータの計算には 511 keV ピークの中心から ± 0.8 keV の範囲に入るカウント数をピーク全体の積分値(バックグラウンド差引後)で割った値とした。ほぼすべての試料で、陽電子のエネルギーが高くなると、陽電子が薄膜部分を通過して、基板 Si を反映した S パラメータを示したが、エネルギー 0.5-2 keV の範囲の正規化 S パラメータの平均値を求め、薄膜部分の S パラメータの値として定義した。

測定した複数の炭素系薄膜試料に対して、H 量(体積密度)、接触角(親水性)、陽電子の S パラメータ(ナノ空隙情報)を測定したが、その中から 2 つの量を選んでグラフにプロットして、全体の傾向を調べた。まず、すべての得られたデータ点を一つのグラフにプロットした後、Si 含有試料と非含有試料で分けてプロットし、さらに傾向を示す直線をフィッティングした。H 量と接触角の間に強い相関関係は見られなかった。しかし、S パラメータと接触角、S パラメータと H 量の関係を調べると、Si 含有試料と Si 非含有試料がグラフの中で異なる位置を占める可能性を示唆した。

結言

幅広い成膜条件で作成した炭素系薄膜試料を準備し、その試料に対して、ERDA 法による H 量測定、接触角測定による親水性評価、陽電子ドップラー広がり測定による S パラメータ測定の 3 つの測定を行った。これらの測定結果から得られた 3 種類の測定値から成るデータに対し、そこから 2 つの測定値を選んで相関図を書いて解析を行った。その結果、H 量-接触角に関しては明確な関連は見られないが、S パラメータ-接触角、S パラメータ-H 量に関しては、Si 含有の有無によりグループ分けでできることが示唆され、今後の展開が期待される結果となった。

参考文献

- 1) S. Nakao et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 307 (2013) 333
- 2) K. Yasuda et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 442 (2019) 53
- 3) K. Sato et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 342 (2015) 102

2.4.2.4

大気 ERDA を用いたセラミックス中の水素分析

Hydrogen Analysis for Ceramics by using In-air ERDA

鈴木耕拓^{*1}、土屋文^{*2}、中田吉則^{*3}

Kohtaku SUZUKI, Bun TSUCHIYA and Yoshinori NAKATA

Abstract

Ceramics such as Li_2ZrO_3 absorb water vapor in the air, and desorb water and hydrogen gas when ceramics are heated up to 100–200 degrees C. These materials can be used for manufacturing hydrogen gas. Hydrogen analysis in ceramics was performed by using an in-air ion beam method. The increase in hydrogen quantity in the samples was detected as the increase in the sample weight.

要約

リチウムジルコネートなどのセラミックスは、大気中の水蒸気を吸収し 100–200℃に加熱すると、水蒸気と共に水素ガスが発生するという特徴を持っている。これから水素ガスの製造にも使用可能である。そこで吸収した水分量を測定するため、大気中におけるイオンビーム分析手法を用いて水素分析を行った。その結果、セラミックスの重量変化に伴い、水素量が増加していることが分かった。

緒言

地球温暖化対策のため、低炭素社会の実現が叫ばれている。これまでに水素を燃料として使用する試みがなされているが、二酸化炭素を放出せず水素製造する課題を解決する必要がある。リチウムジルコネートなどのセラミックは大気中の水蒸気を取り込み、加熱することで水蒸気と共に水素ガスを発生する特徴を持つ。加熱に自然エネルギーを用いれば、クリーンな水素製造方法となりえる。しかしながら、水素ガス発生メカニズムは分かっていないため、大気中イオンビームによる水素分析(反跳粒子検出法:ERDA)を用いて、水素の振舞いを観測している。

大気 ERDA による水素分析

大気中で水素分析が可能な装置(大気 ERDA)は若狭湾エネルギー研究センター加速器棟照射室 1 の元素分析コースに設置されている¹⁾。本装置を用いて、大気中または真空中に保管したリチウムジルコネートに対して、大気中で水素分析を行った。図 1 に取得した水素のエネルギースペクトルを示す。黒が PET フィルム、赤が大気中に保管したリチウムジルコネート、緑が真空中に保管したもののスペクトルである。大気中に保管したリチウムジルコネートには内部まで水素が確認された。このとき、大気中で保管したものは 10%程度の重量増加が見られたが、真空中で保管したものはほとんど変化が無かった。

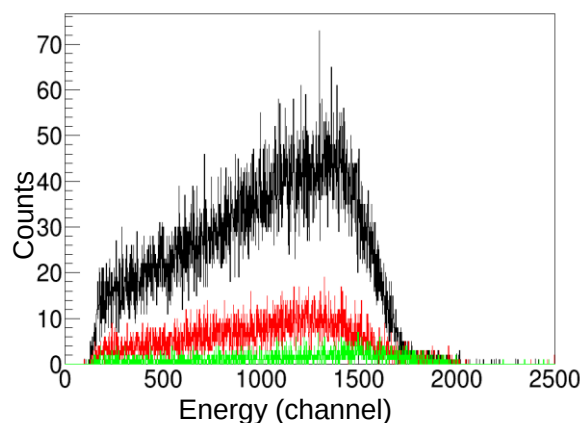


図 1 水素のエネルギースペクトル

結言

リチウムジルコネートを大気中で保管すると、水蒸気を吸収し重量が増加する。さらに大気 ERDA の分析結果から、内部にまで水素が分布していることが分かった。今後は重量増加に伴う水素量の増加割合を導出したり、水素放出過程の観測を行う。

参考文献

- 1) K. Suzuki and Y. Nakata; Nucl. Inst. Meth. B, 450, 135–138 (2019)

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、^{*2}名城大学、^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが名城大学と共同で実施したものである。

本研究は、JPSJ 科研費 JP18K04948 の助成を受けた。

2.4.2.5

TOF-ERDA 測定における新型遮蔽体の導入による検出感度向上の試み

Attempt for Improvement of Sensitivity by Introducing a New Shield in the TOF-ERDA Measurement

安田啓介^{*1}、竹内幹^{*2}、鈴木耕拓^{*3}

Keisuke YASUDA, Motoki TAKEUCHI and Kohtaku SUZUKI

Abstract

A new shield covering a transmission detector was made for the improvement of detection sensitivity in the TOF-ERDA measurement. By performing TOF-ERDA measurement using a carbon beam and using the new shield, the sensitivity to oxygen has been improved by 31%.

要約

TOF-ERDA 測定における検出感度向上を目的として、透過型検出器を覆う遮蔽体を新たに製作した。炭素ビームを用いた TOF-ERDA 測定を行い、新しい遮蔽体を用いることによって酸素に対する測定感度を 31%向上させることができた。

緒言

飛行時間測定弾性反跳粒子検出(TOF-ERDA)法はイオンビーム分析法の一つで、軽元素を元素分離して優れた深さ分解能で分析することが可能である¹⁾。TOF-ERDA 測定では 2 台の透過型検出器と 1 台のシリコン半導体検出器を用いるが、透過型検出器に用いるマイクロチャネルプレート(MCP)検出器は電子に感度を有するため、測定の際に試料やチェンバー内で発生する二次電子をカウントする。これはバックグラウンドとなり、測定感度を低下させる要因となる。現在の測定系では二次電子が MCP 検出器に入射することを防ぐために前方透過型検出器の前に金属製の板状のコリメータを設置しているが、バックグラウンドのカウント数は反跳イオンのカウント数の 80 倍以上と非常に高く、高感度測定のためにはバックグラウンドをより減少させる必要がある。そこで、本研究では前方透過型検出器を覆うような遮蔽体を新たに製作し、TOF-ERDA 測定におけるバックグラウンドの削減と検出感度向上を実験的に検証した。

実験

昨年度の研究では、加工しやすいアクリル板を用いて新しい遮蔽体を作製したが、アクリルからのアウトガスの放出によって測定チェンバーの真空度が悪化する現象が見られた²⁾。そこで本実験では、アルミニウムを用いて遮蔽体を作製した。形状は昨年度のものと同様で、従来の測定で使用していた遮蔽体が前面のみを覆うのに対し、新しい遮蔽体は側面および上面も囲える形状とした。製作した遮蔽体の効果を検証するために、新旧 2 つの遮蔽体を用いて酸素の TOF-ERDA 測定を行い、測定感度とバックグラウンドを比較した。

試料にはシリコンウェハーに酸素イオンを注入したものを用いた。イオン注入装置を用いて大きさが $15 \times 25 \text{ mm}^2$ のシリコンウェハーにエネルギー 50 keV の酸素イオンを注入した。酸素の面密度はラザフォード後方散乱法によって $1.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ と決定された。

TOF-ERDA 測定では、8 MeV の C^{3+} イオンビームを用いた。ビーム電流は 13~17 nA だった。酸素イオン注入試料に加えて酸素イオンを注入していない未注入試料の測定も行い、これからバックグラウンドを評価した。測定時間はそれぞれ 2.5 時間で、30 分毎にデータを 5 回測定した。

結果と考察

未注入試料の TOF-ERDA 測定で得られたバックグラウンド数の結果を図 1 に示す。同一入射粒子数での結果を比較するために、従来型遮蔽体の結果をフィッティングし、バックグラウンドと入射粒子数の関係を求めた。結果を図 1 の直線で示す。入射粒子数 2.2×10^{14} 個で新型シールドのバックグラウンド数が 408、従来型シールドのバックグラウンド数が 523 となり、新型シールド導入によりバックグラウンド数を 23%削減することができた。

次に TOF-ERDA 測定の検出感度の結果を図 2 に示す。検出下限の面密度 σ_l は

^{*1}京都府立大学大学院・生命環境科学研究科・応用生命科学専攻、^{*2}京都府立大学・生命環境学部・環境・情報科学科、^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ
本研究は、京都府立大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

$$\sigma_l = \frac{\sigma}{Y_\sigma} 3\sqrt{Y_b}$$

で求められる。ここで、 Y_b はバックグラウンド数、 σ_l は測定試料の面密度、 Y_σ は試料測定の出量である。同一入射粒子数での結果を比較するために、従来型シールドの結果をフィッティングし、検出感度と入射粒子数の関係を求めた。結果を図 2 の直線で示す。入射粒子数 2.2×10^{14} 個で新型シールドの検出感度が $1.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 、従来型シールドでの検出感度が $2.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ となり、新型シールド導入により検出感度を 31% 改善することができた。

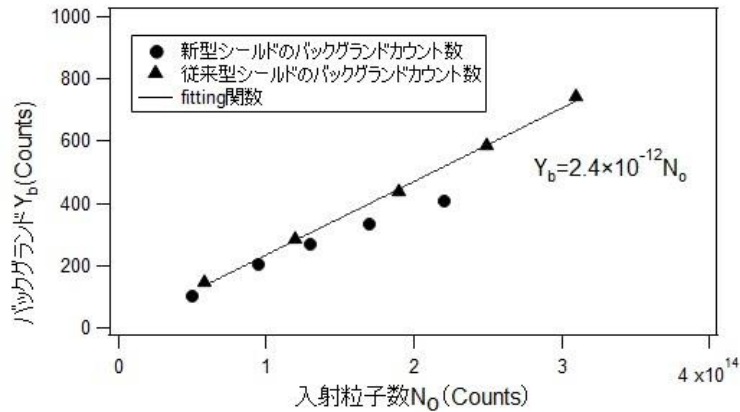


図 1 バックグラウンド測定結果。●が新型遮蔽体、▲が従来型遮蔽体を用いたときのもの。

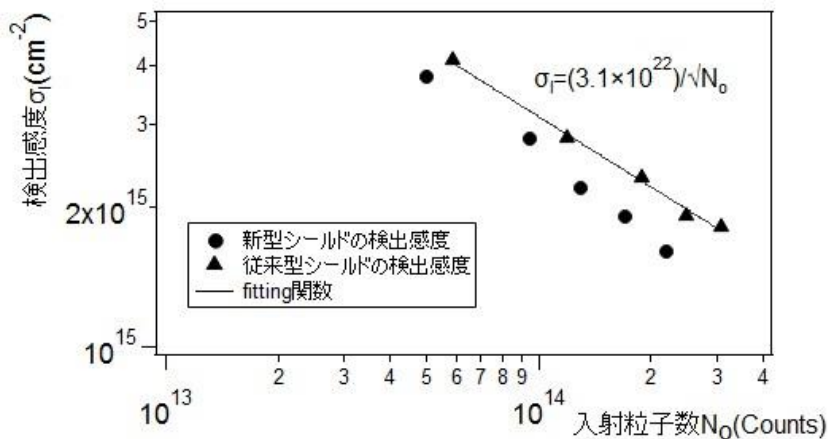


図2 酸素検出感度測定結果。●が新型遮蔽体、▲が従来型遮蔽体を用いたときのもの。

結言

TOF-ERDA 測定に用いる前方透過型検出器の新たな遮蔽体を導入した。炭素ビームを用いて酸素の検出感度とその際のバックグラウンドを評価したところ、従来型の遮蔽体を使用したときと比べてバックグラウンド数が 23%削減した。また、検出感度が 31% 向上した。

参考文献

- 1) K. Yasuda *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. B, 442, (2019), 53-58
- 2) 安田啓介、黒田虹輝、中田吉則、鈴木耕拓、若狭湾エネルギー研究センター研究年報平成 29 年度、20 (2017)136-137

2.4.2.6

Micro-PIGE 法によるフッ素測定におけるバックグラウンド減少の試み
 Attempt for Background Reduction in the Fluorine Measurement using Micro-PIGE Method

安田啓介^{*1}、安田香澄^{*2}、鈴木耕拓^{*3}

Keisuke YASUDA, Kasumi YASUDA and Kohtaku SUZUKI

Abstract

In order to reduce the gamma-ray background from the upstream of the beam line and then improve the detection sensitivity in fluorine measurement by the Micro-PIGE method, a lead shield was introduced in the beam line. This shield reduced the background by 55%.

要約

Micro-PIGE 法によるフッ素測定における検出感度向上を目的として、ビームライン上流からのガンマ線バックグラウンドを遮蔽する鉛遮蔽体を製作し、ビームラインに設置した。これによってバックグラウンドは 55% 減少した。

緒言

若狭湾エネルギー研究センター放射線研究棟照射室 1 にある元素分析コースでは Micro-PIGE 法による植物試料、歯科試料のフッ素分布測定が行われているが、検出感度は 1000 ppm 程度である。検出感度を制限している要因として、ビームライン上流で発生するガンマ線のバックグラウンドが挙げられる。本研究では、ガンマ線の遮蔽効果が高い鉛を用いて遮蔽体を作製し、実験装置に設置することで、バックグラウンドの削減を試みた。

実験

円型鉛遮蔽体(外径 80 mm、内径 30 mm、厚さ 10 mm)と正方形型鉛遮蔽体(70 mm×70 mm、厚さ 10 mm、中央に直径 3.9 mm の穴)の 2 つの遮蔽体を作製した。図 1 に示すように、円型鉛遮蔽体はチェンバー外に、正方形型鉛遮蔽体はチェンバー内に設置した。

遮蔽体によるバックグラウンド削減の効果を検証するために Micro-PIGE 法によるフッ素測定実験を行った。試料には京都府立茶業研究所から提供された「アサヒ」という品種の茶葉を用いた。茶葉はマイクローム(Plant Microtome MTH-1)を用いて、茶葉の断面を葉脈の垂直方向に切り出した。ターゲットの厚さを 60 μm として切断し、切断後、凍結乾燥を行った。測定では 2.5 MeV のプロトンを用い、ビーム径は 5 μm ×5 μm 、ビーム量は 30~40 pA 程度だった。測定領域は 400 μm ×400 μm とした。円型鉛遮蔽体と正方形型鉛遮蔽体をどちらも設置した場合(実験 1)、正方形型鉛遮蔽体のみ設置した場合(実験 2)、鉛遮蔽体を設置しなかった場合(実験 3)の 3 条件で測定を行った。測定時間は各測定とも 1 時間とした。

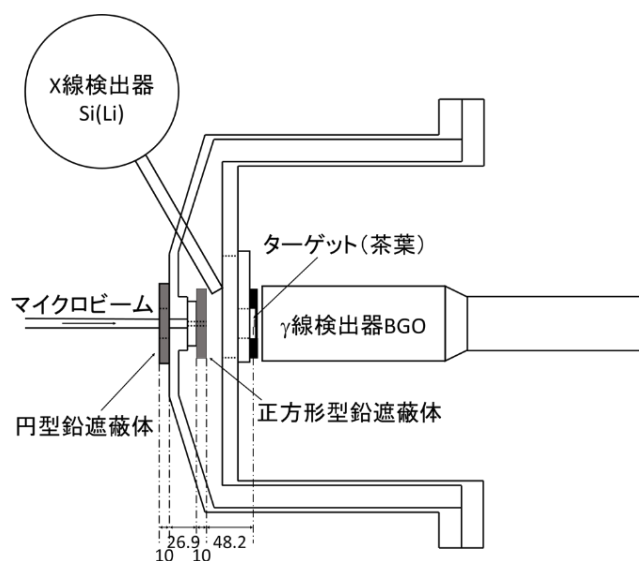


図 1 実験装置の概略図

結果と考察

図 2 に実験 1、2、3 で得られたフッ素の二次元分布を水平方向に射影することによって得られた線分布図を示す。

^{*1}京都府立大学大学院・生命環境科学研究科・応用生命科学専攻、^{*2}京都府立大学・生命環境学部・環境・情報科学科、^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ
 本研究は、京都府立大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

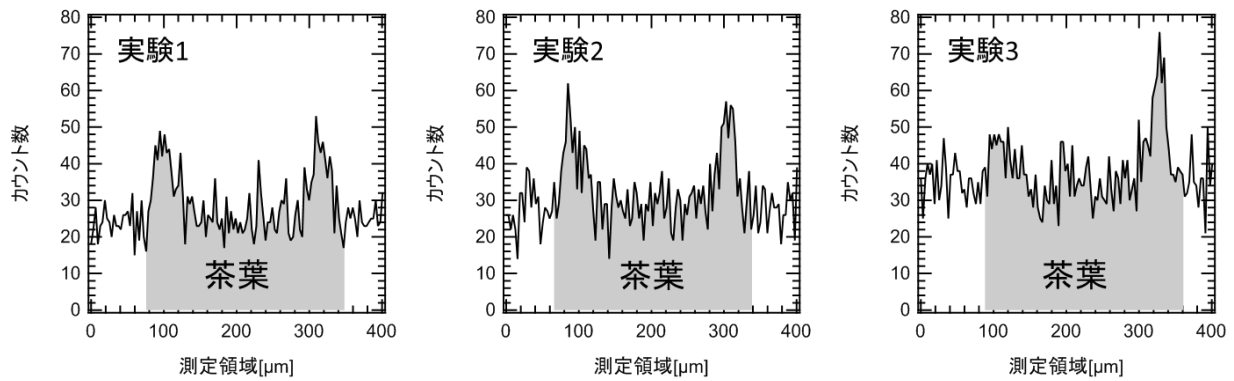


図 2 実験 1、2、3 で得られたフッ素の二次元分布に対する射影図。茶葉部分を色付きで示す。

左:実験 1、中央:実験 2、右:実験 3。

茶葉の位置は茶葉全体に分布しているカリウムの分布を用いて特定した。実験 1、2、3 におけるバックグラウンドのカウント数の平均値を茶葉領域以外のカウント数より求め、その平均値を用いて茶葉領域におけるバックグラウンドのカウント数を求めた。そして、茶葉領域の全カウント数からバックグラウンドを差し引くことによってフッ素のカウント数を計算し、フッ素に対するバックグラウンドのカウント数の比から、実験 3 を基準とするバックグラウンドの遮蔽率を求めた。その結果を表 1 に示す。

表 1 実験 1、2、3 におけるカウント数の測定結果及びバックグラウンドの遮蔽率

	実験 1	実験 2	実験 3
茶葉中のバックグラウンドの全カウント数	2184	2471	3132
茶葉中のフッ素の全カウント数	390	418	251
バックグラウンド/フッ素	5.60	5.91	12.5
バックグラウンドの遮蔽率[%]	55.1	52.6	0.00

表 1 より、円型鉛遮蔽体と正方形型鉛遮蔽体をどちらも設置した実験 1 では 55.1 %の遮蔽が得られ、正方形型鉛遮蔽体のみ設置した実験 2 では 52.6 %の遮蔽が得られたことが分かる。実験 1 と 2 では遮蔽率が数%しか変わっていないことから、円型鉛遮蔽体はあまり遮蔽の効果を示していないことが分かった。これは、円型鉛遮蔽体の中央の穴が大きかったため、その穴を通ったバックグラウンドが検出されたからだと考える。また、計算で求めたバックグラウンドの遮蔽率は、実験 1 の場合 63.2 %、実験 2 の場合 39.3 % であるが、実験 2 で実測値から得られた遮蔽率は計算値よりも大きかった。今後さらなる検討が必要である。

結言

Micro-PIGE 法によるフッ素測定の際のバックグラウンド軽減のために鉛遮蔽体を製作し、ビームラインに設置した。その結果、55% のバックグラウンドを削減することができた。

2.4.2.7

飛行時間型反跳粒子検出法による LiCoO_2 正極/LATP 固体電解質界面におけるリチウムイオン伝導機構解析

Analysis of Lithium Ion Conduction Processes at Interface between LiCoO_2 Positive Electrode and LATP

Solid-state Electrolyte using Time-of-flight Elastic Recoil Detection Technique

土屋文^{*1}、高廣克己^{*2}、鈴木耕拓^{*3}、石神龍哉^{*3}

Bun TSUCHIYA, Katsumi TAKAHIRO, Kohtaku SUZUKI and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

The migrations of lithium (Li) in multi-layers thin films of Au/LiCoO_2 , which were deposited onto one face of $\text{Li}_{1.4}\text{Ti}_2\text{Si}_{0.4}\text{P}_{2.6}\text{O}_{12}\text{-AlPO}_4$ (LATP) substrates, were observed using time-of-flight elastic recoil detection (TOF-ERD) with 20 MeV Cu ion beam. A voltage of 1.8 V was applied to the multi-layers thin films at room temperature between TOF-ERD measurements. The TOF-ERD spectra revealed that the Li concentration at each depth in the LiCoO_2 positive electrode uniformly reduced to 50% due to the migration from the LiCoO_2 to the negative electrode in the LATP during the charge.

要約

タンデム加速器からの 20-MeV Cu^{12+} イオンビームを用いた飛行時間型反跳粒子検出(TOF-ERD)法により、室温において真空中で 1.8 V の電圧印加された 24 nm $\text{Au}/65 \text{ nm } \text{LiCoO}_2/150 \text{ } \mu\text{m } \text{Li}_{1.4}\text{Ti}_2\text{Si}_{0.4}\text{P}_{2.6}\text{O}_{12}\text{-AlPO}_4$ (LATP)/16 nm Pt の全固体リチウムイオン二次電池試料中の Li 濃度をその場で測定した。TOF-ERD スペクトルから、 LiCoO_2 中の Li 濃度は 1.8 V の電圧印加によりどの深さに対してもほぼ同程度(約 50 %)まで減少することが判明された。

緒言

リチウムイオン(Li^+)伝導体である固体電解質(LATP; $\text{Li}_{1.4}\text{Ti}_2\text{Si}_{0.4}\text{P}_{2.6}\text{O}_{12}\text{-AlPO}_4$)を用いた、軽量化と安全性を目指した全固体 Li^+ イオン二次電池の開発が進められている。正および負極間の Li^+ イオンの輸率や移動速度、正および負の両極、固体電解質内の過渡的な Li^+ イオン捕捉濃度は、二次電池の開発において極めて重要なデータとなる¹⁾。本研究では、パルスレーザー堆積(PLD)法により、LATP を固体電解質(負極を含む)、 LiCoO_2 薄膜を正極、金(Au)およびプラチナ(Pt)を電極とした固体 Li^+ イオン二次電池($\text{Au/LiCoO}_2\text{/LATP/Pt}$)試料を作製し、若狭湾エネルギー研究センターに設置されている TOF-ERD 検出器を用いて、1.8 V の電圧を印加しながらその場で Li 濃度を測定して、充電時における Li^+ イオン伝導挙動について調べた。

実験

PLD 装置より、LATP の片面のみに厚さ約 65 nm の LiCoO_2 薄膜、さらにその面に電極として厚さ約 24 nm の Au、LATP の他面に厚さ約 16 nm の Pt を蒸着し、 $\text{Au/LiCoO}_2\text{/LATP/Pt}$ の全固体 Li^+ イオン二次電池試料を作製した。次に、タンデム加速器からの 20 MeV の銅イオン(Cu^{12+})ビームを用いた TOF-ERD 法によって、室温において真空内でこの Li^+ イオン二次電池試料に 1.8 V の電圧を印加しながら、 LiCoO_2 および LATP 中の Li 濃度分布の変化をその場で測定した。

結言

TOF-ERD 法を用いて、1.8 V の電圧を印加しながら $\text{Au/LiCoO}_2\text{/LATP/Pt}$ 二次電池試料中の Li 濃度をその場で測定した。 LiCoO_2 中の Li 濃度は電圧を印加することによりどの深さに対してもほぼ同程度(約 50 %)まで減少した。この結果は、 Li^+ イオンが電位勾配により LiCoO_2 から LATP 中の負極側へ駆動されて移動したことを示す。

参考文献

- 1) B. Tsuchiya *et al.*, Physics Procedia, 66, 292 (2015)

^{*1}名城大学・理工学部・教養教育、^{*2}京都工芸繊維大学・材料化学系、^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ

本研究は、名城大学、(公財)若狭湾エネルギー研究センター、京都工芸繊維大学の共同研究として実施したものである。

2.4.2.8

フィルタードアーク蒸着法で作製した DLC 膜内の微量水素含有量

Small Amounts of Hydrogen Content in DLC Films Fabricated by Filtered Arc Deposition

針谷達^{*1}, 戸谷陽文^{*1}, 爲国公貴^{*1}, 滝川浩史^{*1}, 鈴木耕拓^{*2}

Toru HARIGAI, Takafumi TOYA, Koki TAMEKUNI, Hirofumi TAKIKAWA and Kotaku SUZUKI

Abstract

Hydrogenated diamond-like carbon (DLC) films were fabricated by filtered arc deposition introduced hydrogen gas. The hydrogen content of the fabricated DLC films was analyzed by ERDA method. The hydrogen content of the fabricated DLC films was 8 at.% or less.

要約

水素ガスを導入したフィルタードアーク蒸着法により、水素含有ダイヤモンドライクカーボン (Diamond-like carbon: DLC) 膜を作製した。ERDA 法を用いて、作製した DLC 膜の水素含有量を分析した。作製した DLC 膜の水素含有量は 8 at.% 以下であった。

緒言

ダイヤモンドライクカーボン (Diamond-like carbon: DLC) と呼ばれる硬質アモルファスカーボン膜¹⁾は、切削工具や金型等の表面保護膜として、広く用いられている。DLC 膜は、水素を含む膜と含まない膜の 2 種類に大別され、微量の水素を含有した DLC 膜は、特定の環境下における摺動性の向上などが期待される。アーク蒸着法は、他の成膜法に比べ、より硬質な DLC 膜を形成可能であり、さらに膜中の水素含有量を変えることができる。本研究では、フィルタードアーク蒸着法を用いて作製した水素含有 DLC 膜中の水素含有量を ERDA 法により分析することで、フィルタードアーク蒸着法による微量水素含有 DLC 膜の形成条件を明らかにする。

方法

T 字状フィルタードアーク蒸着装置²⁾を用いて、Si 基板上に DLC を成膜した。成膜チャンバーへ水素ガスを導入し、チャンバー内を水素ガス雰囲気とした。Si 基板上に成膜した DLC 膜中の水素含有量を ERDA 法により分析した。

結果および考察

ERDA 法によって得られた DLC 膜中の水素含有量を図 1 に示す。作製した DLC 膜中の水素含有量は 8 at.% 以下であった。チャンバー内へ導入する水素ガス流量の増加にともなって、DLC 膜中の水素含有量も増加した。チャンバー雰囲気中の水素ガスが、カーボンプラズマビームによって電離・分解され、DLC 膜中に水素が含まれたと考えられる。

結言

水素ガスを導入したフィルタードアーク蒸着法により、水素含有量 8 at.% 以下の微量水素含有 DLC 膜が得られた。導入水素ガス流量制御により、DLC 膜中の水素含有量の制御が可能であることを明らかにした。

参考文献

- 1) J. Robertson, Mater. Sci. Eng. R, 37, 129 (2002)
- 2) H. Takikawa, *et al.*, Surf. Coatings Technol., 163, 368 (2003)

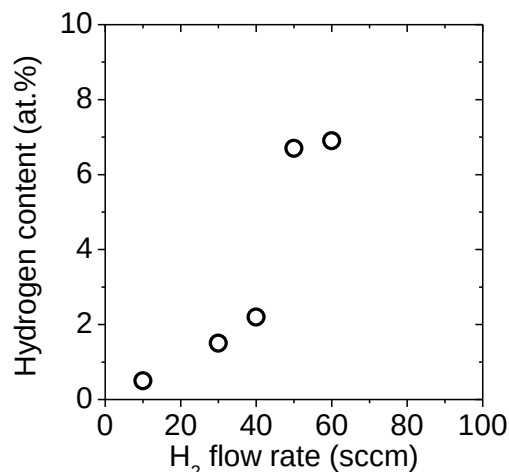


図 1 異なる H₂ ガス流量で形成した DLC 膜中の水素含有量

^{*1}豊橋技術科学大学・電気・電子情報工学系, ^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ
本研究は、豊橋技術科学大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

2.4.2.9

フッ化物含有材料から接着材を通した歯質内へのフッ素浸透

Penetration of Fluorine into Tooth Structure from Fluoride-containing Materials through the Bonding Agents

奥山克史^{*1}、山本洋子^{*2}、内藤克昭^{*2}、松田康裕^{*3}、鈴木耕拓^{*4}、玉置幸道^{*1}、
林美加子^{*2}、斎藤隆史^{*3}、能町正治^{*5}Katsushi OKUYAMA, Hiroko YAMAMOTO, Katsuaki NAITO, Yasuhiro MATSUDA, Kohtaku SUZUKI,
Yukimichi TAMAKI, Mikako HAYASHI, Takashi SAITO and Masaharu NOMACHI

Abstract

Fluorine penetration into tooth structure from fluoride-containing dental materials (resin composite and glass ionomer cement) through the dentin bonding system was measured using in-air micro PIXE/PIGE. The results of this study show that by using resin composite for filling, amount of fluorine penetration is affected by whether a bonding system (bonding agent) has fluoride or not.

要約

大気マイクロ PIXE/PIGE を用い、歯質接着材により歯と接着させたフッ化物含有歯科材料から歯質へのフッ素分布を測定した。その結果コンポジットレジンを使用した場合、接着材でのフッ化物の有無がフッ素浸透量に影響を与えることが示唆された。

緒言

フッ化物含有歯科材料によるう蝕抑制効果は数多く報告されている。これらの材料より徐放されるフッ素は直接歯質に作用するか、または一度口腔内に徐放された後、再び歯質に取り込まれ浸透していく。フッ化物含有材料の中にはコンポジットレジンも多く製品化されている。コンポジットレジンには歯質との接着性を有しないため、う蝕などのために欠損した歯質に対し、接着システム(接着材)を用いて歯に接着させる必要がある。そのため、フッ化物含有コンポジットレジンから徐放されたフッ素を歯質へ直接浸透させるためには、必ず接着材を介することになる。しかし、歯質接着材を通したフッ素浸透に関する報告は少ない。そこで本研究では各種材料の歯質接着材を通しての歯質へのフッ素浸透を、大気マイクロ PIXE/PIGE 法により測定、評価した。

材料と方法

本研究では、歯質接着システムとして、フッ化物含有接着システム(フルオロボンド II:F)とフッ化物を含有しない接着システム(スコッチボンドユニバーサルアドヒーズン:S)を使用し、充填材料として、フッ化物含有のグラスアイオノマーセメント(フジ IX エクストラカプセル:G)、コンポジットレジン(ビューティフィル II: B)、フッ化物含有しないコンポジットレジン(デントクラフトファインフィル:D)をそれぞれ使用した。ヒト抜去小臼歯頬側面に 2×2×1.5 mm の窩洞を形成し、窩洞にそれぞれの接着システムで処理後、上記3種の充填材料を窩洞に填塞し、重合、硬化させた(それぞれ FG, FB, FD, SG, SB, SD 群とする)。グラスアイオノマーセメントについては、接着システムを使用せずに填塞した試料も作製した(G 群)。各試料を 37℃中に 4 週間水中保存後、材料を含むように試料を歯軸に平行に頬舌的に切断し約 500 μm の厚さに調整した。PIXE/PIGE 装置を用い、窩底部象牙質のフッ素濃度分布をフッ素とカルシウム濃度測定により算出した。フッ素濃度分布算出部位としては、窩底部健全歯質のカルシウム量の 90%を示した部位を健全部の最表層と規定した。フッ素濃度の測定箇所は窩底中央部と 200 μm 離れた2箇所の計3箇所とした。試料数は各6個とし、各群のフッ素取込み量の比較には、表層から深さ 150 μm までの累積値を用いた。得られたデータは、Mann-Whitney U test にて統計解析を行った(α=0.05)。

結果および考察

材料からのフッ素浸透は、グラスアイオノマーセメントの群は 150～200 μm の深さまで、フッ素量が徐々に低下していくのに対し、コンポジットレジン群は 30 μm までの深さ以降は少量のフッ素を認めるくらいである。図 1 に

^{*1}朝日大学・歯学部、^{*2}大阪大学大学院・歯学研究科、^{*3}北海道医療大学・歯学部、^{*4}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、^{*5}大阪大学大学院・理学研究科

本研究は、朝日大学、大阪大学、北海道医療大学、(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(15K11101、17H04382、17K11705、17K11712)の助成を受けた。

窩底から 150 μm の深さまでの各材料からの累積フッ素量を示した。ガラスアイオノマーセメントを用いた G、FG、SG で多くのフッ素浸透を認め、次いでフッ化物含有コンポジットレジンを用いた FB、SB 群、フッ化物を含まないコンポジットレジンを使用した FD、SD 群はわずかな量またはほとんどフッ素を認めなかった。この結果は、充填物に含有し徐放されるフッ素量¹⁾に依存していることが示された。またガラスアイオノマーセメントの群でしか比較できないが、接着システムを使用することでフッ素浸透量が低下していることから、ボンディングにより充填物からのフッ素浸透をある程度遮断していることが示唆される。ボンディング材のフッ化物の有無による差は、ガラスアイオノマーセメントでは認めなかったのに対し、コンポジットレジンではフッ素浸透に差を認めた。これは充填材料から徐放されるフッ素量が、ガラスアイオノマーセメントでは著しく多く¹⁾、ボンディングに含まれるフッ素量に左右されないだけのフッ素が浸透していたことから、差を認めなかったのに対し、コンポジットレジンでは材料からのフッ素徐放量が少なく、接着システムが介在するために歯質に到達するフッ素量がさらに少なくなるため、ボンディングの含有フッ素量が結果に影響したものと考えられる。

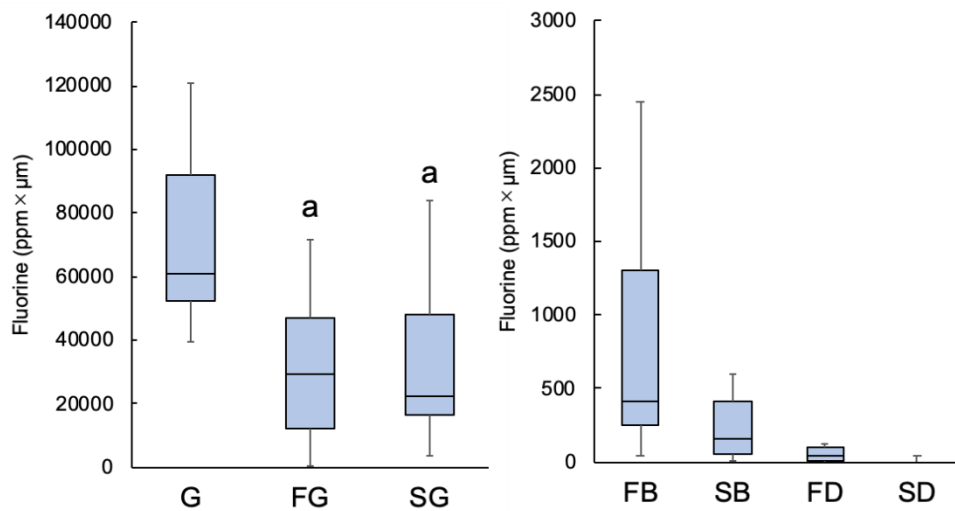


図 1 窩底から 150 μm までのフッ素浸透量(左:ガラスアイオノマー群、右:コンポジットレジン群)。同じ文字は有意差がないことを示す($p>0.05$)。

結言

PIXE/PIGE 装置を用いることで、歯質接着材を通したフッ化物含有歯科材料から歯質へのフッ素の分布を確認することができた。また、歯質へのフッ素浸透は接着システムによる影響が示されたことから、フッ化物含有接着システムが歯質へのフッ素浸透に対して有用であることが示唆された。

参考文献

- 1) 奥山克史 他、日歯理工誌、37、Special 72、90 (2018)

2.4.3. 放射線場で利用される機器・材料の評価技術開発

2.4.3.1

熱処理されたジルコニウム合金の微細組織
 Microstructure of Zr Alloy by Thermal Treatment
 安永和史^{*1}、渡辺英雄^{*2}
 Kazufumi YASUNAGA and Hideo WATANABE

Abstract

Microstructure of a Zircaloy 4 alloy specimen which include defects and precipitates by the thermal treatment was investigated. TEM observation revealed the existence of some kinds of precipitates with significantly different in mean diameters and volume densities.

要約

欠陥や析出物が存在する熱処理を施したジルカロイ 4(Zry-4)の微細組織を調査した。TEM 観察により Zry-4 には元来、平均直径及び体積密度の顕著に異なる析出物が存在することが確認された。

緒言

Zry-4 は、加圧水型の軽水炉(PWR)の燃料被覆管材料として用いられている。析出物の存在は、原子炉の運転中に照射欠陥及び水素化物の形成等の微細組織発達に影響を与える。Zry-4 の Zry-2 と異なる特徴は、成分元素に Ni を含まないこと、及び製管時の加工に伴う転位が残存していることである。本年度は、Zry-4 に元来存在する析出物について、その構成元素・直径・体積密度を調査した結果について報告する。

成果の概要

試料は、630℃で 2h 熱処理された Zry-4 の厚板をダイヤモンドワイヤーソーで六方晶の a 面に平行に切断後、ダイヤモンドシートで手研磨した 100 μm 厚の板状試料である。板状試料は 3 mm ϕ の円盤形に打ち抜き、電解研磨法(ツインジェット法)やイオン研磨法を併用して TEM 観察用に薄膜化した。ツインジェット電解研磨には九州大学応用力学研究所の TenuPol-5 を、イオン研磨には若狭湾エネルギー研究センターの PIPS (PRECISION ION POLISHING SYSTEM、Model 691、Gatan)をそれぞれ用いた。ツインジェット法による薄膜化条件は、電解液としてメタノール 950 ml、過塩素酸 50 ml の溶液を用い、25 V、-40℃である。イオン研磨による薄膜化条件は、円盤試料の中心領域が開孔するまで試料表裏を複数回反転しながら 6 kV の Ar イオンを照射、入射角は 6° である。さらに、仕上げ加工として 2 kV の Ar イオンを入射角 6° で 10 min 照射した。ION BEAM MODULATOR は DOUBLE、2 つのイオン源配置は共に TOP である。このイオン研磨により、ツインジェット研磨では得にくかった極薄領域を開孔部周辺にもつ TEM 観察に適した試料が作製された。試料の微細組織観察には透過型電子顕微鏡(TEM、JEM-3000F、JEOL)を用い、STEM-BF(Scanning Transmission Electron Microscopy-Bright Field)像及び STEM-EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)マッピングにより元素分析した。電子の加速電圧は 300 kV である。

図 1 は、Zry-4 薄膜の STEM-BF 像(a)、Fe 及び Cr の分布を示す STEM-EDS マッピング(b、c)、これら全てに Zr の分布を重ね合わせた像(d)である。厚膜(電子線の透過強度が低く黒く観察される領域)から試料端の極薄膜(透けて観察される領域)を含む領域について特性

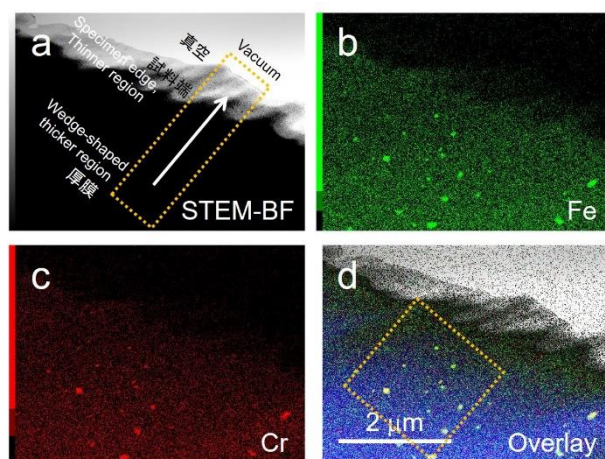


図 1 Zry-4 の微細組織を示す STEM 明視野像及び元素マップ。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、^{*2}九州大学・応用力学研究所

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが関西電力株式会社、日本原子力発電株式会社、北陸電力株式会社の 3 社からの受託研究として、九州大学と共同で実施したものである。

X 線分析を試みた。STEM-BF 中の黄色破線の矩形領域がその領域で、白矢印方向に X 線の発生しない真空領域を末端に含めた。厚膜領域には、緑および赤の強度が高い点が観察され、それらの位置関係も一致していることから、Fe 及び Cr を含む析出物が存在していることが分かる。厚膜領域の析出物は STEM-BF 像では電子線透過量が低いため確認できなかったが、長時間の電子線の走査により発生した特性 X 線の積算による元素分布像により確認可能となった。体積密度が低い対象物の場合、その存在を多数捉えるためには、当然ながら観察すべき体積が増大する。そこで、TEM の拡大率としては比較的低倍率の 25,000 倍で広範囲かつ十分な厚みも有する領域で観察した。今回用いた特性 X 線の積算による低密度の微視的对象物の撮像手法は、厚膜試料中の微視的组织に元素分布の局所的なゆらぎがある際には、その可視化及び定量化に有効な手段となり得ると考える。図 2 は Fe、Cr、Zr の特性 X 線強度の位置依存性を示すグラフである。試料端には Zr の特性 X 線強度が低くかつその増加が緩やかな領域が存在している。一方、試料端から厚膜領域の方向には急激に特性 X 線強度が増加している。膜厚評価には 0002 ブラッグ反射時に生じる等厚干渉縞を用いた。300 kV 電子の Zr 中での消衰距離は 45 nm である。また、Zr の特性 X 線強度変化も厚み評価に利用した。まず、粗大析出物については図 1d の点線で囲まれた領域 (2 μm 四方) に存在する析出物の個数から面密度を算出、その後、楔形を考慮にいたした厚みで除して体積密度を導出した。厚膜領域には体積密度 $8.3 \times 10^{18}/\text{m}^3$ の Fe および Cr を含む析出物が存在していると評価された。粗大析出物のサイズ(長軸の測定値)は 47~330 nm の範囲に分布し、平均サイズは 130 nm と評価された。

図 3 は、試料端の極薄領域において観察された微小析出物を示す STEM-BF 像である。微小析出物は近傍のもの同士が合体して成長する傾向があり、例として白破線で示した。微小析出物の体積密度は、 $2.4 \times 10^{23}/\text{m}^3$ と評価された。また、微小析出物のサイズは 4~33 nm の範囲に分布し、平均サイズは 14 nm と評価された。サイズは粗大析出物と同様に長軸の測定値である。微小析出物の元素の組成については、現時点では不明である。微小析出物は粗大析出物の体積密度及びサイズを比較すると、体積密度は 4 桁高く、サイズは 1 桁小さい値をもつことが明らかとなった。

結言

試料端近傍の極薄膜及び数百 nm 厚の厚膜を共に一視野に含む Zry-4 を TEM 観察することにより、サイズ及び数密度が顕著に異なる析出物の存在を明確にした。粗大析出物は Fe-Cr 系、微小析出物の成分は現時点で不明である。

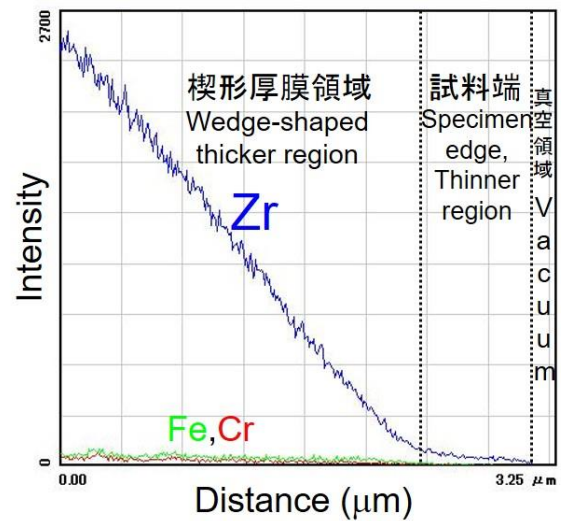


図 2 試料厚さ変化を示す特性 X 線強度。

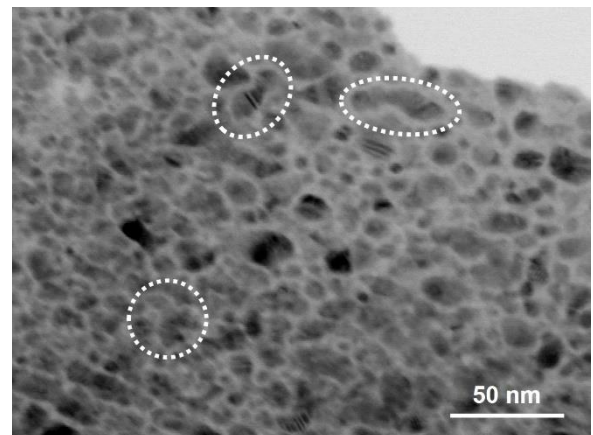


図 3 試料端の極薄領域において観察された微小析出物。

表 1 Zry-4 に含まれる析出物のサイズ及び体積密度。

	サイズ (nm)	体積密度 (m^{-3})
粗大析出物	130	8.3×10^{18}
微小析出物	14	2.4×10^{23}

2.4.3.2

人工衛星搭載用半導体検出器とアナログ集積回路の耐放射線シミュレーション

Radiation Tolerance Test for Semiconductor Sensor and Integrated Circuit Onboard Satellites

米徳大輔^{*1}、有元誠^{*1}、澤野達哉^{*1}、渡辺彰汰^{*1}、佐藤大地^{*1}、荻野直樹^{*1}、羽鳥聡^{*2}、久米恭^{*3}、長谷川崇^{*4}、水嶋慧^{*3}

Daisuke YONETOKU, Makoto ARIMOTO, Tatsuya SAWANO, Shota WATANABE, Daichi SATO,

Naoki OGINO, Satoshi HATORI, Kyo KUME, Takashi HASEGAWA and Satoshi MIZUSHIMA

Abstract

We performed radiation tolerance test on an analog-to-digital converter (ADC) in microcontroller used for a gamma-ray detector, onboard a micro-satellite, Kanazawa-SAT³, and an X-ray CMOS sensor for the future observation in space. We confirmed the ADC has a radiation tolerance of 400 Gy, and we can operate it for more than 3 years in satellite orbit. We also confirmed the lower discrimination energy threshold of the X-ray CMOS sensor keeps less than 0.4 keV in the environmental temperature of -20°C after the irradiation of 23 Gy.

要約

金沢大学が開発している超小型衛星 Kanazawa-SAT³ に搭載するガンマ線検出器の読み出し集積回路に搭載されたアナログデジタルコンバーター(ADC)に対する放射線耐性試験を実施した。また、将来の衛星計画に向け X 線撮像素子 CMOS センサーの放射線耐性試験を実施した。本実験により、それぞれの素子が宇宙空間で 3 年以上にわたって機能維持できることを検証することが出来た。

緒言

金沢大学では、50 kg 級の超小型衛星 Kanazawa-SAT³ の開発を進めている。理学ミッション機器として、重力波発生源のひとつとして考えられている「短時間ガンマ線バースト」と呼ばれる突発天体の方向を決定するための広視野 X 線撮像検出器や、詳細な発生時刻を測定するためのガンマ線検出器を搭載し、イリジウム衛星を利用したパケット通信で検出した天体の位置情報を速報する。ガンマ線検出器は、入射ガンマ線を無機結晶で光に、光センサーでさらに電荷信号に変換し、ADC でガンマ線のエネルギーを電圧として読み出す。本実験では、マイコン搭載 ADC のトータルドーズ(TID)に対する機能の劣化を調べた。さらに、金沢大学では、軟 X 線帯(0.4-4 keV)での突発天体観測を用いた初期宇宙・極限時空探査衛星計画 HiZ-GUNDAM への搭載を検討している X 線撮像素子である CMOS イメージセンサーの性能評価を行っている。本実験では、Gpixel 社製 CMOS イメージセンサーに対する放射線耐性試験を実施し、宇宙利用可能であるか検証した。

方法

衛星の軌道を高度 700 km の太陽同期軌道とした場合、IC 素子が受ける粒子線フラックスは、陽子・ヘリウムが主な原子核で 3×10^9 proton/cm²/yr 程度と見積もられる。粒子の平均的なエネルギーは数 100 MeV 程度であることから、本実験では 220 MeV の He²⁺を照射粒子とした。2018 年 7 月 5 日、6 日(照射は 6 日)、および、2019 年 1 月 14 日、15 日(照射は 15 日)に 220 MeV のヘリウム照射試験を ADC、CMOS センサーそれぞれに実施した。ビームサイズはそれぞれ $\phi 63$ mm、 $\phi 56$ mm(@FWHM)、ビーム強度はビーム全体でいずれも約 3×10^8 particle/s と設定した。照射量はそれぞれ、ADC には Kanazawa-SAT³ が想定する約 50 Gy/yr を念頭に目標ミッション期間 3 年を超える 400 Gy を、CMOS センサーには、想定する約 7 Gy/yr を念頭に目標ミッション期間 3 年分に相当する約 23 Gy を、それぞれ照射した。図 1 に、COMS センサーの照射セットアップを示す。

次に素子の性能測定方法について説明する。ADC は hot 照射試験を行い、TID に対する AD 変換の線型性の変化を測定した。照射中、遠隔操作でデジタルアナログコンバーター(DAC)による電圧出力を ADC に入力し、一次関数でフィッティングを行い、その切片と傾きの変化を記録した。CMOS センサーは cold 照射試験を行い、照射前後の X 線エネルギーの読み出し下限値(LD)の変化を測定した。LD は、CMOS センサーの暗電流と読み出し回路ノイズ由来の電荷によるピクセル照度が、X 線が CMOS センサー素子内部で光電吸収して与える電荷損失によって生じるピクセル照度と区別できる X 線エネルギーの下限値として表される。本実験では、センサ

^{*1}金沢大学・理工研究域・数物科学系、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・加速器室、^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、^{*4}(同)ハセテック

本研究は、金沢大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

本研究は、科学研究費補助金(16H06342, 17H06362)の助成を受けた。

ー1 素子に対してノイズの寄与が十分無視できる全ピクセルで共通の ADC 閾値に対応する X 線エネルギーを LD とした。X 線イベントのエネルギー較正には、 ^{55}Fe による Mn-K_α と Mn-K_β の特性 X 線であらかじめ行った。

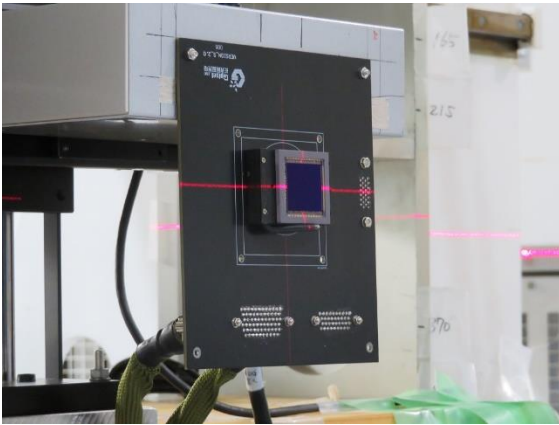


図 1. CMOS センサーの照射セットアップ。
照射時はさらに暗幕を被せた。

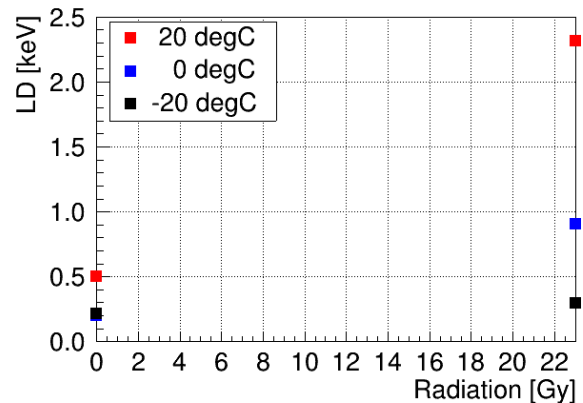


図 2. TID に対する CMOS センサーの
読み出し下限値 LD の変化。

結果

ADC に 400 Gy 照射するまでの間、線型性の測定、フィッティングを約 50 回、ほぼ等間隔の時間インターバルで行った。DAC による電圧入力に対する線型性の変化はオフセット電圧で 1.6 mV (at 1σ) 以下、傾きの変化は 0.1% 以下で、照射による線型性の有意な変化は見られなかった。次に、図 2 にヘリウム照射前後での CMOS センサーの読み出し下限値 LD の算出結果を示す。環境温度が 20°C の場合、ヘリウム照射前に 0.5 keV であった読み出し下限値は 2.3 keV まで悪化した。しかし、-20°C まで冷却することで照射による暗電流増加が抑えられ、照射後も LD は 0.3 keV であった。これは、我々の観測帯域である 0.4 keV を下回っており、宇宙利用可能であることが実証された。

結言

超小型衛星 Kanazawa-SAT³ に搭載するガンマ線検出器のエネルギー測定に使用する ADC は、衛星軌道環境においても目標ミッション期間の 3 年間は運用可能であることが実証された。また、将来計画 HiZ-GUNDAM への搭載を検討している CMOS センサーは、-20°C まで冷却することで 3 年間運用可能であることが実証された。

参考文献

- 1) Space Environment Information System, <https://www.spennis.oma.be/>

2.4.3.3

プロトン照射が GaN HEMT の長期信頼性に与える影響

Proton Irradiation Effect on Long-term Reliability of GaN HEMTs

日坂隆行^{*1}、佐々木肇^{*1}、石村栄太郎^{*1}、羽鳥聡^{*2}、石神龍哉^{*3}、久米恭^{*4}

Takayuki HISAKA, Hajime SASAKI, Eitaro ISHIMURA, Satoshi HATORI, Ryoya ISHIGAMI and Kyo KUME

Abstract

In this study, we investigated proton irradiation effect on long-term reliability of GaN HEMTs. We found a novel phenomenon that the change in device characteristics owing to the irradiation can be recovered by an appropriate electrical stress even at relatively low temperatures.

要約

本研究では、プロトン照射損傷が GaN HEMT の長期信頼性に与える影響を調査した。照射損傷による特性変化は、比較的低温においても適切な電気ストレスを印加することにより回復することを明らかにした。

緒言

GaN HEMT (High Electron Mobility Transistor)は、増幅器の小型軽量化、高信頼性化が実現できることから、宇宙用デバイスとして期待されている。GaN HEMT を宇宙環境で使用するためには、高エネルギーのプロトン、重イオン、 γ 線等からなる宇宙放射線に対して十分な耐性、信頼性を確保することが要求される。

前年度は、GaN HEMT に 70MeV、 $2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ のプロトン照射を行い、その後の RF 通電信頼性に影響はないことを確認した。今回、さらに高 NIEL(Non-Ionizing Energy Loss)条件のプロトン照射による損傷が長期信頼性に与える影響を調べた。

成果の概要

SiC 基板上 AlGaIn/GaN 構造 HEMT に、若狭湾エネルギー研究センターの加速器システムを用いて 2MeV、 $3 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ のプロトン照射を行った。照射により、GaN HEMT の出力電力(P_o)は、約 3dB 低下した。プロトン照射損傷によりキャリア濃度、及び移動度が低下したためと考えられる。プロトンを照射後、異なるタイプのストレス試験を行った。 P_o 変化を図1に示す。RF 動作試験は、 $T_{ch}=125^\circ\text{C}$ 、 $V_{ds}=30\text{V}$ 、入力電力(P_{in})は 3dB 利得圧縮となるように調整後一定とした。高温逆バイアス(HTRB)試験は、 $V_{gs}=-5\text{V}$ 、 $V_{ds}=30\text{V}$ 、 $T_{ch}=125^\circ\text{C}$ で行った。

照射しないサンプル(Non-Rad)は RF 動作試験時の P_o 変化が小さく、ストレスに対して安定である。プロトン照射サンプルは、RF 動作試験により P_o が約 1dB 回復した。125°C の保存では約 0.3dB の回復に対し、HTRB 試験は約 1dB 回復した。RF 動作と比べホットキャリアが少ない HTRB 条件においても RF 動作試験と同等の回復が見られることから、バイアスアニール効果が大きいと考えられる。

結言

プロトン照射損傷による GaN HEMT の特性変化は、その後の RF 動作あるいは HTRB 試験により劣化することではなく、逆に回復することを明らかにした。この結果から、宇宙環境の放射線に対して高い信頼性を有していると考えられる。

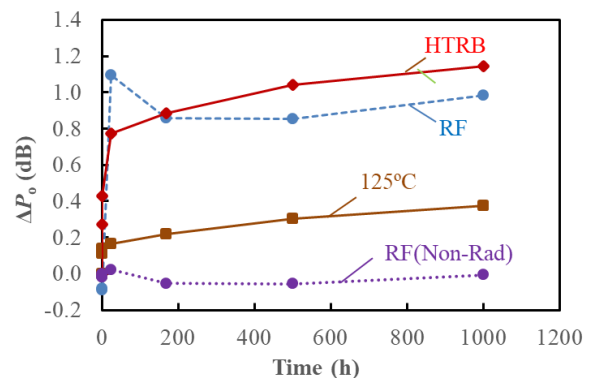


図1 プロトン照射後の異なるストレス試験による P_o 変化

^{*1}三菱電機株式会社・高周波光デバイス製作所・品質保証部・信頼性技術課、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・加速器室、^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、^{*4}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究室

本研究は、三菱電機株式会社と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

2.4.3.4

民生用シングルボードコンピュータの放射線耐性の検証と軌道上実証

Evaluation of Radiation Hardness of COTS Single Board Computers and their In-orbit Demonstration

谷津陽一^{*1}、安戸博紀^{*2}、中島豪志^{*2}、渡邊奎^{*2}、菊谷侑平^{*2}、羽鳥聡^{*3}、久米恭^{*4}、水嶋慧^{*4}、長谷川崇^{*5}

Yoichi YATSU, Hiroki ANDO, Tsuyoshi NAKASHIMA, Kei WATANABE, Yuhei KIKUYA

Satoshi Hatori, Kyo KUME, Satoshi MIZUSHIMA and Takashi HASEGAWA

Abstract

Evaluation of the proton induced single event effect on COTS single board computers for space-use is reported. The performances of recent single board computers are almost the same as those of desktop computers a few years ago. To utilize those technologies in space, we conducted proton irradiation test at the synchrotron accelerator facility. We chose several samples from commonly used "Raspberry Pi" series and irradiated 100 MeV protons without any modification. As a result, part of new products fell into permanent destructions after exposure to protons equivalent to several month in low earth orbit. The observed radiation hardnesses are totally different from that of the previous-generation products, which is already demonstrated in-orbit.

要約

本研究では、市販のシングルボードコンピュータを衛星上で利用できるかどうか検証するためにシンクロトロン陽子線を照射し、その放射線耐性を検証した。サンプルには最も広く使用されている Raspberry Pi シリーズから選択し、無改造のまま 100MeV の陽子ビームを照射した。結果として、一部の最新モデルは地球低軌道にて数ヶ月分の照射後に永久故障に陥った。過去の同一シリーズ品はすでに軌道上で動作を実証しているが、そのときの結果とは全く異なるものであり、これらの宇宙利用には注意が必要である。

緒言

IoT 機器の活用が本格化するなか、近年のシングルボードコンピュータ(Single Board Computers, SBCs)の性能向上は著しく、名刺大の大きさで、ディスプレイ出力、USB、LAN、無線 LAN、Bluetooth 等、通常のデスクトップパソコンとなんら変わらない完成度の機能を数千円で入手できる。従来の宇宙機は国家プロジェクトで数百億円をかけて「絶対に壊れない」様に設計を行うため、未だに 40 年前のプロセッサを後生大事に使用しているケースもある。一方で、超小型衛星の様に打ち上げサイクルが短い新しい宇宙機では、ペイロードの制約を計算能力で補い、まったく新たな価値を創出することに主眼がおかれている。このような宇宙機では SBC の利用価値は極めて高く、新しい宇宙利用・産業を切り開く鍵となる。

我々は 2005 年に打ち上げた Cute-1.7 +APD 1 号機にて、ミッションペイロードを USB の様な一般的な電気 I/F で接続し、共通バスによるシリーズ衛星のアイデアを具現化し、これが現在主流の超小型衛星モデルの世界初のプロトタイプになっている。我々はその当初から、搭載品の放射線耐性が衛星の信頼性を維持する上で極めて重要であることを、加速器実験と実際のフライト実験で継続的に実証してきた。この 15 年で、搭載デバイスのプロセス・ルールは数十分の一に微細化し、それに伴い荷電粒子による放射線障害、すなわちシングルイベント効果(Single Event Effect, SEE)の発生率もおよそ 2 桁増大してきている。ただし、必ずしも永久破壊に陥るとは限らず、電源を再投入することで復帰できるケースもあり、この見極めが、これらの民生デバイスの宇宙利用の可否を決定づける。

本研究では、これまで蓄積してきた放射線耐性実験・実際のフライト実証の結果に基づき、陽子ビームの照射実験を行い、最新の SBC の放射線耐性を評価した。また、平成 31 年 1 月には実際に衛星を打ち上げ、宇宙環境での動作実証を継続して行っている。本論文では、ビーム試験の結果とともに実際の軌道上実証の結果をあわせて、評価結果を検証する。

実験方法

1. ビームセットアップ

照射する核種は軌道上で圧倒的多数を占める陽子とした。陽子誘発 SEE は、低エネルギー陽子のブラッグ

^{**1}東京工業大学・理学院・物理学系、^{*2}東京工業大学・工学院・機械工学系、^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・加速器室、

^{*4}(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究開発部・粒子線医療研究室、^{*5}(同)ハセテック

本研究は、東京工業大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。本研究は、文部科学省宇宙航空科学技術推進委託費「宇宙連携拠点形成プログラム 新宇宙産業を創出するスマート宇宙機器・システムの研究開発拠点」、MEXT KAKENHI の助成を受けた。

ピーク付近での反応と、高エネルギー陽子が核子間相互作用を経由して引き起こす反応の 2 つの経路が考えられるが、本実験では高エネルギー陽子の影響を見ることとした。我々は、地球低軌道で期待される陽子のエネルギースペクトルをシミュレートし、最も入射頻度数の高い 100 MeV を選択した(拡散照射のため被検体の位置では 90MeV となるが、過去の計測結果と整合性を取るため同一の値を設定した)。

照射レートは 2017 年の実験結果を参考とし、SEE 発生率を一定レベルに抑え、不具合発生時の動作を正確に追跡できるよう 10^5 – 10^6 proton/s/cm² の範囲で設定した。照射線量は、 $\sim 10^9$ proton/cm² 地球低軌道換算で 1 年分とし、被検体が頓死した場合はそこで照射終了とした。

2. 被検体

被検体には、IoT など世界的に広く使われている RaspberryPi シリーズから、より小型で消費電力の小さい Zero W (ZeroW)、産業用でフォームファクターの小さな Model 3B ComputeModule (CM3)、高性能の最新モデル Model 3B+ (3B+) を選択した。これらは、いずれも無改造とし、SD カードの不具合を避けるため、ブートディスクは延長ハーネスで外付けとした。SEL 発生時の、CPU 温度をモニタする目的で CPU 表面には熱電対を取り付け、電力とともに記録した。照射中は、電流増加 (Single Event Latch-up: SEL) もしくは UART 経由でのシリアル通信の切断をもって「不具合」とみなし、直ちに電源を遮断し電源投入により再起動させた。また、搭載されている CPU では、4 つのコアを持つためこれらすべてを使う高負荷の試験用プログラムを走らせ、DRAM に展開した配列のビット反転 (Single Event Upset: SEU) をモニタした。

結果と考察

表 1: SBC の陽子線誘発 SEE の発生頻度

デバイス	照射強度 (cm ⁻² s ⁻¹)	SEE 間隔(s)	軌道上頻度 (day ⁻¹)	備考
CM3 (1)	2.8×10^5	>3500 s	$< 8.3 \times 10^{-3}$	不具合なし
CM3 (2)	1.9×10^6	132	0.03	1.6 年で頓死
3 B+	1.8×10^6	180	0.03	2.5 月で頓死
ZeroW	1.4×10^5	693	0.03	翌日起動せず

表 1 に測定結果を示す。今回照射したすべての素子は旧機種 of 主要な故障原因であったウェハレベル CSP タイプの素子が省かれており、安定動作が期待され、実際に 10^6 p/s/cm² 程度で照射した際の不具合発生率は 0.03event/day と、前回実験の結果から予想した通りの反応確率を得た¹⁾。一方で、

旧機種では 1 度も起こらなかった頓死が全てのデバイスで確認された。CM3 については初回の照射レートが低く、全く不具合が起こらなかったものの、2 度目の照射では、軌道上でおよそ 1.6 年分相当のプロトンに曝された時点で再起動不能に陥った。ZeroW については、照射中は復帰を確認したが、翌日の時点では起動しない状態であった。最も弱かったのは最新モデルの 3B+ であり、およそ 2.5 ヶ月分の照射で起動不能となった。CM3 については、過去の照射実験に対し 3 倍のレートで照射しており、過剰試験の可能性を再現実験で追検証する。

一方、本年 1 月 18 日に打ち上げられた DLAS には改造版 Model3B が搭載されており、現在までに ON 状態でおおよそ正味 80 時間分運用を行い、現時点までに一度も不具合は発生していない。これは、プロトン照射試験の結果と相違ない性能である。今後、さらに運用頻度を高め、軌道上での動作状態を監視することで、地上でのプロトン照射試験と実際の宇宙での放射線障害との相関を定量的に評価する。

結言

最新版を含む 3 種 4 機の SBC に対し高エネルギープロトンの照射実験を行った。結果として、得られた不具合発生確率は事前に想定した通りであったが、内 3 つのサンプルで永久故障が見られ、これらについての宇宙での使用は困難であろうという結論に至った。また、同一シリーズとはいえ、回路構成が複雑であるため、個別の放射線耐性検証が重要であることを垣間見た結果であった。我々は、これらの試験と並行して軌道上での実際の検証データを取得中であり、今後実証データと突き合わせた比較検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 谷津陽一他、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報平成 28 年度、19、95 (2016)

2.4.3.5

宇宙放射線計測用 SiPM と CsI(Tl)シンチレーターの放射線耐性

Radiation Tolerance of SiPM and CsI(Tl) Scintillator for the Space Application

鳥越健斗^{*1}, 内田和海^{*1}, 高橋弘充^{*1}, 大野雅功^{*1}, 山岡和貴^{*2}, 久米恭^{*3}, 水嶋慧^{*3}, 羽鳥聡^{*3}

Kento TORIGOE, Nagomi UCHIDA, Hiromitsu TAKAHASHI, Masanori OHNO, Kazutaka YAMAOKA,

Kyo KUME, Satoshi MIZUSHIMA and Satoshi HATORI

Abstract

SiPM semiconductor devices and CsI(Tl) scintillator will be used as gamma-ray detectors in space. In this report, we describe the results of their radiation tolerance tests using energetic proton beam. We found that the dark current of Multi Pixel Photon Counter (MPPC) increased by a factor of more than 300 after 1 krad of the radiation dose, which corresponds to one-year operation in our planned space orbit, and it makes the detector sensitivity degraded. We did not detect any unusual signal response from CsI(Tl) scintillator during irradiation of the 200 MeV proton beam with an expected in-orbit particle background rate. We need careful design of the detector in order to reduce the proton dose to keep the detector sensitivity for the space application.

要約

平成 30 年度の実験において、宇宙放射線検出器として使用予定である半導体デバイス SiPM (Multi Pixel Photon Counter; MPPC 浜松フォトニクス S13360-6050CS) 及び CsI(Tl)シンチレーターに対する放射線耐性試験を 200 MeV プロトン照射により実施した結果について報告する。宇宙空間での運用1年分に相当する 1 krad 相当のプロトン照射に対して、MPPC の暗電流は 300 倍以上に増加することを確認した。一方、CsI(Tl)シンチレーターにプロトン照射した際に読み出した信号には大きな異常は見られなかった。暗電流の増加は検出器感度の低下をもたらすため、宇宙放射線の吸収線量を抑えるための検出器デザインや放射線耐性に優れた MPPC デバイスの選定が今後の課題である。

緒言

我々は、放射線検出器を搭載した小型衛星を複数打ち上げ、それぞれの検出器の放射線検出時刻の時間差を利用して、宇宙における放射線の発生源を特定する計画を進めている¹⁾。小型衛星の制約を考慮し、放射線検出器として、コンパクト、省電力で感度の良い半導体デバイス SiPM で光量の高い CsI(Tl)シンチレーターのシンチレーション光を読み出す構成を検討している。今回利用予定の SiPM(MPPC S13360-6050CS)デバイスは宇宙利用の例が少なく、宇宙空間における放射線耐性について理解を深める必要がある。また、CsI(Tl)シンチレーターは宇宙放射線による大信号により異常な振る舞いを示さないかどうか確認する必要がある。そこで、本実験では、宇宙放射線を想定した 200 MeV プロトンビームを MPPC 及び CsI(Tl)シンチレーターに照射し、それぞれの放射線耐性を調べた。

方法

衛星軌道上の宇宙放射線は主に陽子で構成されており、我々の想定する高度 500km, 軌道傾斜角 30-50 度では、一年間に 1 krad 程度の被曝量が想定される。そこで、本実験では、複数の同型 MPPC(S13360-6050CS 浜松フォトニクス)に対して、1 krad 前後の様々な照射量で 200 MeV のプロトンビームをできるだけ MPPC に対して均一になるように照射した。3つの MPPC に対して、100 rad, 300 rad, 5 krad に相当するプロトンビームを照射する。さらに残りのひとつは、10 rad, 50 rad, 100 rad, 1 krad と段階的に照射し、詳細に調べる。放射線耐性の指標として、暗電流の照射前後における変化、及びその後の推移について評価する。さらに照射直後から 1cm³ CsI(Tl)シンチレーターを用いて ²⁴¹Am 放射性同位体からの 60 keV ガンマ線スペクトルを継続して取得し、評価する。別実験として、我々が宇宙放射線検出器用として利用予定の大面積 CsI(Tl)シンチレーター(75x150x5mm³)に対して MPPC(S13360-6050CS)で ²⁴¹Am の 60 keV ガンマ線を読み出しながら、シンチレーターに通常軌道(200c/s)及び放射線異常帯(10⁵c/s)で想定されるレートで 200MeV プロトンビームを照射し、前置増幅器の信号波形及びガンマ線スペクトルに異常が生じないかどうか確認する。

^{*1} 広島大学・理学研究科・高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室 ^{*2} 名古屋大学宇宙地球環境研究所 ^{*3} (公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ

本研究は、広島大学、名古屋大学、(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

結果

図 1、図 2 にそれぞれ 10 rad、50 rad、100 rad、1 krad 相当のプロトンビーム照射直後に計測した暗電流値と ^{241}Am 60 keV ガンマ線スペクトルを示す。図 1 から、1 krad 照射後の暗電流は照射前に対して 300 倍以上に増加していることがわかる。図 2 では、暗電流の増加に伴い、低エネルギー側のノイズイベントが吸収線量とともに増加していることがわかる。また、100 rad 照射までに、60 keV ガンマ線由来のピークが低エネルギー側にシフトしており、MPPC のゲイン特性も吸収線量に伴って変化することがわかる。プロトン照射後、暗電流の変化をモニタし続けたが、少なくとも 2 ヶ月に渡っては時間経過によって暗電流値が回復することはなかった。図 3 にはプロトン照射からおおよそ 2 ヶ月後に計測したエネルギー閾値の温度依存性を示す。エネルギー閾値は我々が使用予定の大面積シンチレータ(75x150x5mm³)を使用した場合のノイズイベントの立ち上がり場所として定義している。1 krad 照射後の MPPC では、検出器を -30℃ まで冷却できたとしてもエネルギー閾値は 100keV 近くまで悪化し、これは照射前の 10 倍以上の悪化に相当する検出器感度の低下をもたらすことがわかった。

図 4 は大面積(75x150x5mm³)CsI(Tl)シンチレータに通常軌道上で想定されるレートでプロトン照射を行いながら取得した ^{241}Am 60 keV ガンマ線スペクトルである。図 4 に見られるように、プロトン照射している場合としていない場合で、60 keV ガンマ線スペクトルに大きな違いが見られないことがわかる²⁾。

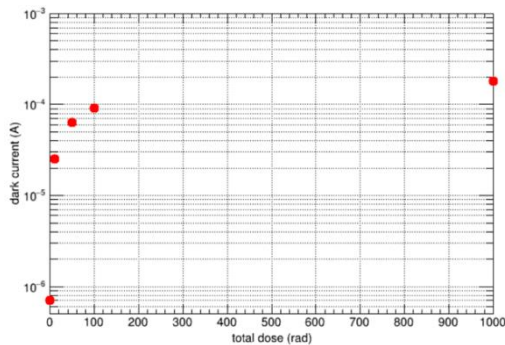


図 1: 吸収線量と暗電流の関係

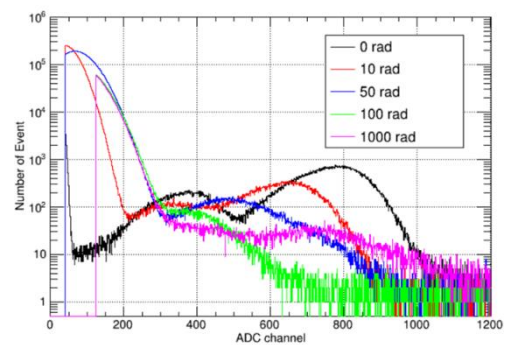


図 2: 吸収線量と ^{241}Am 60 keV スペクトルの関係

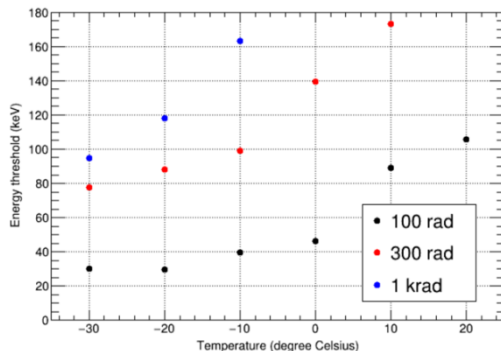


図 3: 吸収線量の異なる MPPC における温度とエネルギー閾値の関係

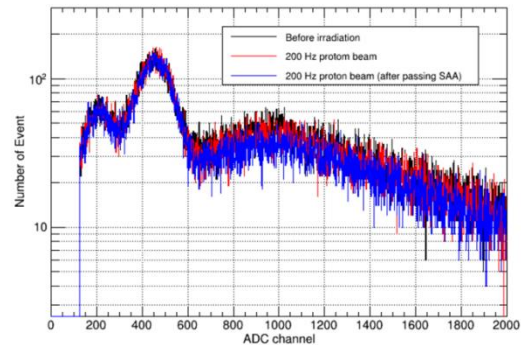


図 4: プロトン照射中(赤)照射なし(黒)における 60 keV スペクトルの比較

結論

今回行った二つの実験により、MPPC は我々が想定する衛星軌道上において、1 年分に相当する宇宙放射線による影響で、暗電流が増加し、結果として放射線検出器としての感度が 10 倍以上悪化することを確認した。MPPC を用いた宇宙放射線検出器の開発としては、より放射線耐性の高い MPPC を選定することや、衛星軌道上でできるだけ冷却しながら運用できるシステムを確立すること、さらにはシールドにより吸収線量そのものを抑えるような検出器デザインが必須であることが確認できた。一方、大型 CsI(Tl)シンチレータにおける宇宙放射線がもたらす大信号の影響はプロトン由来であればほぼ問題ないことが確認できた。今後重粒子線などといったさらに大きな信号がもたらす影響を検討する必要がある。

参考文献

- 1) Werner, N., et al., Proceeding of the SPIE, 10699E, 2 (2018)
- 2) 鳥越健斗、修士論文 広島大学 (2018)

2.4.3.6

宇宙機搭載用機器に対する高エネルギー陽子線照射技術の開発

Development of a Proton Irradiation Technique for Electronic Devices to be mounted on Spaceships

久米恭^{*1}、水嶋慧^{*1}、山東新子^{*1}、長谷川崇^{*2}、羽鳥聡^{*3}、瀧田正人^{*4}、鳥居建男^{*5}Kyo KUME, Satoshi MIZUSHIMA, Shinko SANDO, Takashi HASEGAWA, Satoshi HATORI, Masato TAKITA
and Tatsuo TORII

Abstract

A NaI spectrometer system was applied to estimate proton beam intensity at WERC synchrotron facility during cosmic-ray irradiation simulation for electronic devices which will be mounted on spaceships. The same NaI spectrometer was also applied to measure high energy photons in Norikura Observatory of Tokyo University as a background run, to estimate high energy photon energy spectrum in the natural environment.

要約

NaI スペクトロメータを使用して、宇宙機搭載用機器に対する宇宙線模擬照射試験中にガンマ線計測をおこない、陽子線の強度評価を試みた。また同じ NaI スペクトロメータを東京大学乗鞍観測所でのバックグラウンド測定に使用し、自然界での高エネルギー光子線スペクトルの評価も行った。

緒言

当センターでは、近年の宇宙開発のニーズの高まりを受け、200 MeV 陽子シンクロトロンによる宇宙線模擬照射試験環境の提供に取り組んでいる。試験実施中の陽子線強度を非破壊的な手段で評価する手法の一つとして、二次粒子である高エネルギーガンマ線の計数が考えられる。この目的のため、NaI スペクトロメータを使用してエネルギー測定を試みた。またバックグラウンド測定として有意な高エネルギー光子線現象を期待できる東京大学乗鞍観測所で夏期の測定を実施し、自然界における高エネルギー光子線スペクトルの評価も行った。

方法

実験に使用した NaI スペクトロメータは直径 12.5 cm x 長さ 10 cm の円筒形で、光電子増倍管出力をプリアンプで増幅し、ラボラトリ・イクイップメント NT100-GPS によりエネルギー弁別による信号計測をおこなった。ビーム実験は、若狭湾エネルギー研究センター多目的イオン加速器で実施した。100 MeV 陽子を照射室4高エネルギー生物照射装置へ搬送しておこなった宇宙機搭載用機器の照射損傷実験時を含む期間中に、発生したガンマ線を測定した。バックグラウンド測定は、乗鞍観測所の第3観測室において7月から9月までの期間に実施した。

結果と考察

ビーム実験におけるデータ取得については、期間に取得したデータの解析により、ビーム搬送中のビーム強度変化に応じたガンマ線強度変化を得ることができた。とくに加速器からのビーム出射パターン1周期中のビーム強度時間分布も得ることができた。これについては現在検証を進めている。

乗鞍におけるバックグラウンド測定については、この測定システムが1週間単位での連続測定が可能であること、ならびに高地特有の光子線エネルギー分布が得られることを確認した。なお雷由来の高エネルギー光子線を期待していたが、観測期間には有意な発雷現象はなく、雷由来の高エネルギー光子線は観測されなかった。

結言

NaI スペクトロメータによるガンマ線計測により、加速器の運転パターンに応じたガンマ線発生時間分布を取得することができた。また高地において測定システムの健全性を確認した。

^{*1} (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究室、^{*2} (同) ハセテック、^{*3} (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・加速器室、^{*4} 東京大学宇宙線研究所、^{*5} (国研) 日本原子力研究開発機構
本研究は、(公財) 若狭湾エネルギー研究センターが東京大学宇宙線研究所の共同利用研究 D05 で得た成果の一部を含む。

2.4.3.7

低放射化建築用部材の性能評価研究

Fundamental Investigation on Performance Evaluation of Low Activation Building Materials

木村健一^{*1}、森大樹^{*1}、長谷川崇^{*2}、執行信寛^{*3}、久米恭^{*4}

Ken-ichi KIMURA, Taiki MORI, Takashi HASEGAWA, Nobuhiro SHIGYO and Kyo KUME

Abstract

The depth distribution of neutrons produced by 8 MeV proton to Be target was measured for low-activation concrete materials.

要約

8 MeV 陽子を Be ターゲットに照射して生成される中性子量の低放射化コンクリートに対する深さ方向分布を金箔の放射化により測定した。

緒言

医療用加速器施設での使用を想定した放射線遮蔽用建材の低放射化性能の評価を行うための基礎的な検討を行っている。平成 30 年度は、汎用型低放射化コンクリートに対して 8 MeV 陽子を Be ターゲットに照射して得られる中性子量の深さ方向分布を測定した。

方法

実験は、多目的シンクロトロン・タンデム加速器のシステム照射室 2 イオン注入コースで行った。タンデム加速器からの 8 MeV 陽子を真空ターゲット中に設置した Be ターゲットに照射し、核反応により生成される連続エネルギー中性子を照射した。使用した材料は、汎用型低放射化コンクリート(type-1:高純度石灰石と白色セメントで構成)で密度 2.3g/cm^3 であった。平均ビーム電流は $8\text{ }\mu\text{A}$ 、照射時間は 1 時間とした。ベリリウムターゲットの厚さは 8 MeV 陽子の飛程よりも厚いものを使用した。コンクリート試料の厚さは 2.5、5.0、7.5、10、15、20、30 cm とした。中性子量はコンクリート試料に貼り付けた直径 6 mm、厚さ 0.1 mm の金箔を使用した。中性子が金箔を通過する際に放射化により $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ 反応が起こり、照射後 ^{198}Au の 412 keV の崩壊ガンマ線を CZT 半導体検出器で測定した。測定時間は 1200 秒から 3800 秒とした。

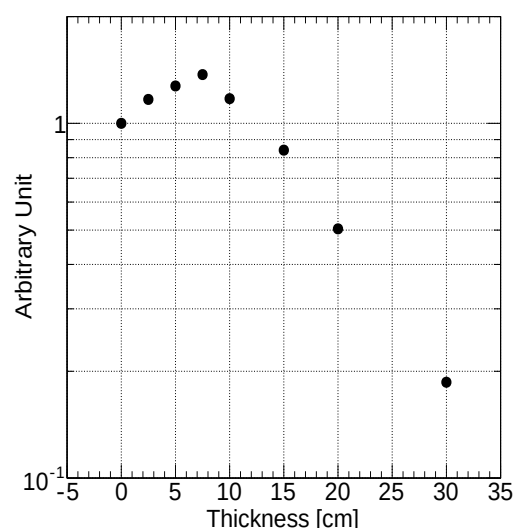
結果と考察

図 1 に、 ^{197}Au の放射化量のコンクリートの深さ方向分布を示す。この図では深さ 0 cm の値で規格化を行っている。コンクリートには最大 8 MeV の連続エネルギー中性子が照射され、これらの中性子はコンクリート中で減速・拡散を行う。

深さ 7.5 cm で中性子量がピークになっているのは、7.5 cm よりも浅い部分で中性子が減速される効果が中性子の吸収される効果よりも高いために、 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$ 反応の断面積が大きくなる熱中性子の量が増えたためであると考えられる。また、深さ 20 cm で、放射化量が半分程度になることがわかった。

結言

低放射化コンクリート中の最大エネルギーが 8 MeV の連続エネルギー中性子量の深さ方向分布を得ることができた。

図 1 ^{198}Au 生成量の深さ方向分布

^{*1} (株)フジタ・技術センター、^{*2} (同)ハセテック、^{*3} 九州大学・大学院工学研究院・エネルギー量子工学部門、^{*4} (公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究室
本研究は、(株)フジタ、九州大学、(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

2.4.3.8

放射線遮蔽用可とう性材料の性能評価

Performance Evaluation of Flexible Material for Radiation Shielding

執行信寛^{*1}、今富宏祐^{*1}、三根貴大^{*1}、木村健一^{*2}、長谷川崇^{*3}、久米恭^{*4}

Nobuhiro SHIGYO, Kosuke IMATOMI, Takahiro MINE, Ken-ichi KIMURA,

Takashi HASEGAWA and Kyo KUME

Abstract

Neutron dose attenuation of flexible material for radiation shielding was evaluated by PHITS code. We have found that attenuation coefficient of continuous energy neutron between 0.01 eV and 200 MeV is 0.035 cm^{-1} .

要約

放射線遮蔽用可とう性材料の中性子線量低減の評価を PHITS で行った。この材料の 0.01 eV から 200 MeV の連続エネルギー中性子に対する線量の線減弱係数は 0.035 cm^{-1} となることがわかった。

緒言

加速器施設でコンクリート等を配置することが困難な箇所に適用できるように開発された可とう性を有する材料の放射線遮蔽性能を調べることを目的とする。PHITS コードで 200 MeV 陽子ビームと鉄の核反応で生成される連続エネルギー中性子を使用して、この可とう性材料通過前後の中性子の線量の変化を調べた。

方法

放射線遮蔽用可とう性材料は、厚さ 10 cm のウレタンをベースとしたラディシールとさらにホウ素を添加したホウ素入りラディシールを使用した。PHITS によるシミュレーションでは、多目的加速器システム照射室4高エネルギー生物照射装置で実施した実験と同等の 200 MeV 陽子を厚さ 6 cm の鉄板に入射し、核反応により生成された連続エネルギー中性子を想定し、可とう性材料の前後での中性子線量を計算した。核反応モデルには INCL、20 MeV 以下の中性子反応に対しては核データライブラリ JENDL-4.0 を使用した。

結果と考察

図 1 に 0.01 eV から 200 MeV までの中性子が厚さ 0 cm と 10 cm の可とう性材料を透過した時の線量を示す。PHITS による計算では中性子線量の減弱係数がラディシールで 0.035 cm^{-1} 、ホウ素入りラディシールで 0.033 cm^{-1} とホウ素の有無が線量の源弱に与える影響が小さいことがわかった。

結言

可とう性材料の連続エネルギー中性子の線量減衰を PHITS で計算して、線量の線源弱係数を得ることができた。

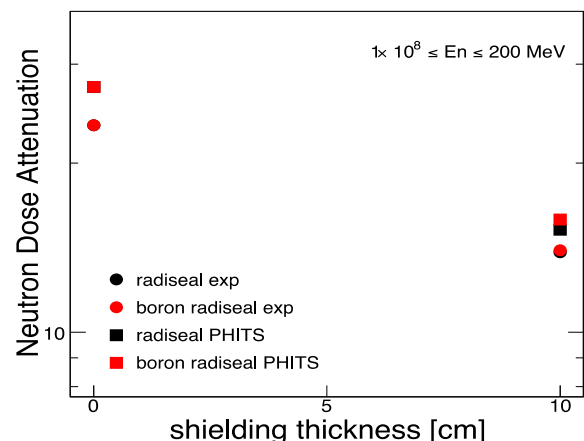


図 1 ラディシールとホウ素入りラディシールの 0.01 eV から 200 MeV までの連続エネルギー中性子の線量減弱の実験と PHITS による計算結果の比較

^{*1}九州大学・大学院工学研究院・エネルギー量子工学部門、^{*2}(株)フジタ・技術センター、^{*3}(同)ハセテック、^{*4}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究室
本研究は、九州大学、(株)フジタ、(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

2.4.3.9

超小型衛星搭載用電子機器の放射線耐性調査

Investigation of Radiation Resistance of Semiconductor Devices for Nano-satellites

青柳賢英^{*1}、中須賀真一^{*1}、久米恭^{*2}

Yoshihide AOYANAGI, Shinichi NAKASUKA and Kyo KUME

Abstract

In this research, we investigated radiation resistance of commercial semiconductor devices for Nano-satellites by proton irradiation. As a result, these devices have a sufficient radiation resistance, and these devices were found to be applicable for spacecraft including Nano-satellites.

要約

超小型衛星へ搭載する民生電子部品へプロトン照射を行い、放射線耐性評価を実施した。その結果、対象の民生電子部品は十分な放射線耐性を有しており、宇宙機器への適用が可能であることを確認した。

緒言

超小型衛星の多くには民生部品が採用されているが、新規の民生電子部品の宇宙機器への適用に際しては、その信頼性評価が重要であり、特に耐放射線特性の把握を行うことが重要である。CPU 及びメモリ等は高ビット数、大容量になるにつれ半導体密度が上がり放射線耐性が弱くなる傾向があるため、最新の民生電子部品を使用する際には注意が必要である。近年、Raspberry PI 等に代表されるような、PC のように使い勝手が良い OS が搭載されているシングルボードコンピュータが注目を集めており、これを組み込むことにより柔軟な開発環境、汎用性の高いシステム構成が可能となる。本研究では、これに着目し、Raspberry PI zero の耐放射線性を評価し、人工衛星への搭載が可能かどうかを検証した。Raspberry PI zero に対するプロトン照射によりビット反転 SEU、過電流 SEL を引き起こし、その発生回数により衛星軌道上での SEU、SEL の発生確率を解析的に評価した。

成果の概要

プロトンの照射エネルギーは 20、40、60、75 MeV とした。フラックスは 7×10^6 [protons/cm²/s] とした。図 1 に、各照射エネルギーにおける SEU の反転断面積の例を示す。各プロット点に対する Weibull 分布のパラメータを用いて衛星軌道上でのシングルイベント発生確率を評価した。評価には CREME (Cosmic Ray Effects on Micro Electronics) 96 を用い、軌道は国際宇宙ステーションと同等とした。SEU の評価結果として、CPU の処理停止確率を周回日数で表すと、約 166 日/回(太陽活動、磁気乱共に低条件)であることが確認できた。

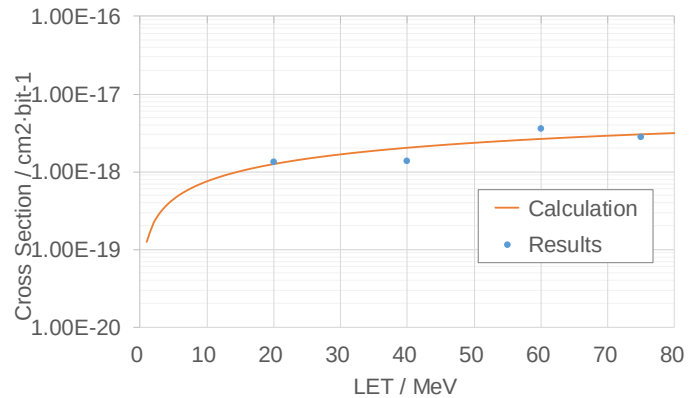


図 1 各照射エネルギーにおける SEU の反転断面積

結言

Raspberry PI zero へプロトン照射を行い、放射線耐性評価を実施した。その結果、SEU は軌道上で発生すると思われるが、半年に 1 回程度の確率であり、間欠動作機器への利用や、リセット回路等を付属させることにより、宇宙機器への適用が十分可能であると言える。本研究にて評価した民生電子部品は、今後の超小型衛星へ搭載し軌道上へ打ち上げる予定であり、軌道上においても放射線耐性の評価を行う予定である。

^{*1} 東京大学大学院・工学系研究科・航空宇宙工学専攻、^{*2} (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究室
本研究は、東京大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

2.4.3.10

イオン照射した V-xCr-1Ti 合金の照射硬化に及ぼすクロム添加及び不純物の影響

Effects of Cr Additive and Interstitial Impurities on Radiation Hardening for Ion-irradiated V-xCr-1Ti Alloys

福元謙一^{*1}、藤田江示^{*1}、三浦柊一郎^{*1}、石神龍哉^{*2}

Ken-ichi FUKUMOTO, Koji FUJITA, Shuichiro MIURA and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

In order to investigate the mechanical properties of ion-irradiated V-Cr-Ti alloys, the TEM observation and nanoindentation test were performed for 2 MeV He ion irradiated V-(4, 6, 8)Cr-1Ti alloys. With increasing the content of Cr additive, the irradiation hardening increased. The TEM observation confirmed the void formation in all alloys. In addition, the formation of Ti(CON) was observed in V-4Cr-1Ti alloy with different impurity concentrations. Hence, it is necessary to adjust not only the Ti and Cr addition level but also the impurity level for suppressing void swelling.

要約

低チタンバナジウム合金の照射組織形成に及ぼす Ti 添加依存性を調べるため、He イオン照射実験を行い、照射組織形成に係る低チタン添加バナジウム合金の Cr 添加による照射硬化への影響が分かった。

緒言

低放射化バナジウム合金である V-4Cr-4Ti は、核融合炉構造材ブランケット構造材として期待されている。ボイドスエリングによる寸法不安定化を抑制するために Ti を添加しているが、Ti を添加することにより、Ti 析出物である Ti(CON)が形成され、照射脆化を引き起こす原因となる。本研究では Ti(CON)析出物形成を抑えるために、Ti 添加量を 1 とした V-xCr-1Ti(x=4, 6, 8)合金の He イオン照射材を用いて、照射微細組織の透過型電子顕微鏡(TEM)観察およびナノインデント硬度試験による照射硬化の計測を行った。

実験方法

Ti 濃度を 1 wt%に固定し Cr 濃度を 4~8 wt%に変化させて添加させた V-xCr-Ti 合金を核融合科学研究所から提供を受けた。表 1 に各合金の化学組成を示す。試料を 11.5 mm×2.5 mm×0.1 mm の板材に加工した。試料表面を硫酸・メタノール電解液で電解研磨した後に V 合金をタンタル箔とジルコニウム箔で包み 1000℃、 2×10^{-4} Pa の真空雰囲気中で 3 時間の焼鈍を行った。焼鈍後、若狭湾エネルギー研究センターのタンデム加速器を用いて温度 500℃、エネルギー 2 MeV、ピーク位置での損傷量(はじき出し量) 1 dpa、損傷速度 8×10^{-5} dpa/s の条件で He²⁺イオンを各試料に照射した。深さ 3.5 μm の位置に損傷が導入され、Focused Ion Beam (FIB)を用いて試料を加工し、TEM を用いて損傷領域の観察を行った。また He イオン照射を行ったバナジウム合金を用いてナノインデント硬度試験を行った。バナジウムは bcc 構造であるため、すべり方向<1 1 1>に最大せん断応力がかかるように圧子を打ち込む結晶を選定し測定した。

表 1 バナジウム合金の化学組成と不純物濃度(wt%)。

	Cr	Ti	C	N	O
V-8Cr-1Ti	7.89	0.99	0.006	0.006	0.038
V-6Cr-1Ti	5.97	0.96	0.006	0.006	0.036
V-4Cr-1Ti	3.86	0.96	0.005	0.006	0.035

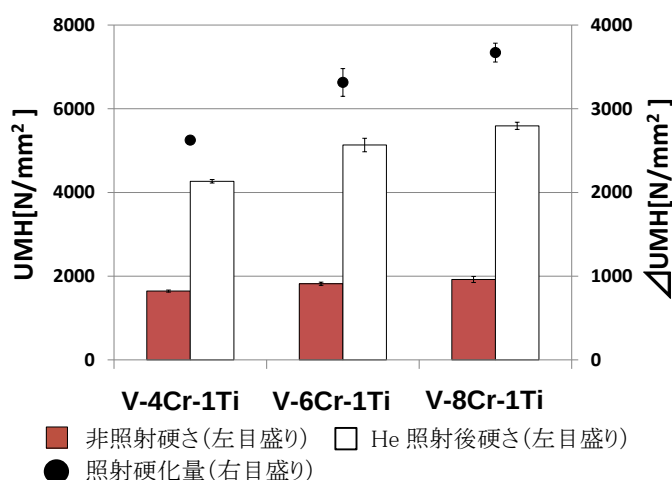


図 1 超微小硬度測定による V-xCr-1Ti の照射硬化量

結果

超微小硬度試験の結果から得られた He イオン照射前後の硬度 Ultra Micro Hardness(UMH)及び照射硬化量 Δ UMH について図 1 に示す。Cr 添加

*1 福井大学、*2 (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ

本研究は、福井大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

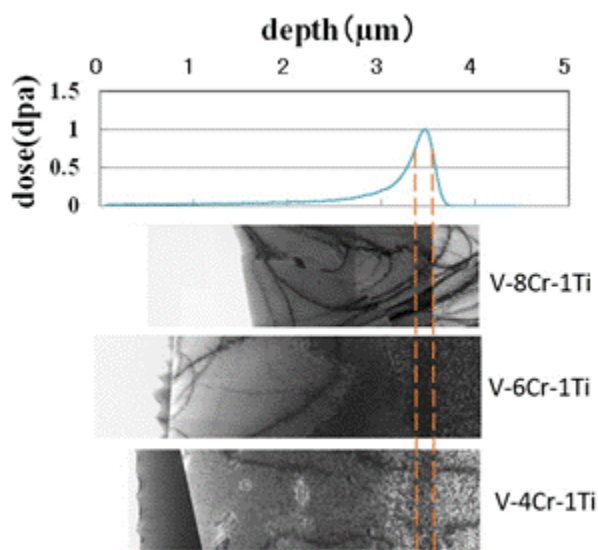


図 2 He 照射した V-xCr-1Ti の断面組織観察写真。オレンジ線は損傷形成領域を示す。

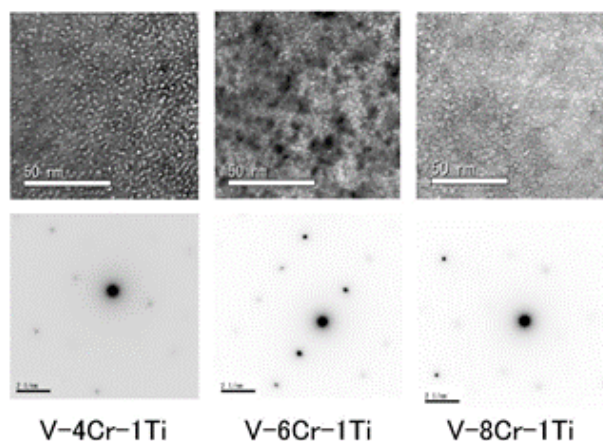


図 3 図 2 で示された He 照射した V-xCr-1Ti の損傷集中領域の拡大写真(ボイド組織)とその電子回折図形。

濃度の増加に伴い照射硬化量が増加していることから、Cr 添加量と照射硬化量には相関がみられた。Cr 添加量が増加しても非照射硬さは微増だが、He イオン照射材は硬さが大幅に増加していた。黒丸は硬化量を表しており、Cr 添加濃度の増加に伴い硬化量の増加が確認された。

He イオン照射した V-(4, 6, 8)Cr-1Ti の断面微細組織観察の結果を図 2 に示す。図 2 より表面から 3.5 μm の深さに帯状の損傷があることが確認され、イオン照射欠陥分布計算コード SRIM の予測とよい一致があった。損傷領域よりも浅いところでも損傷はあったが詳細は明らかでない。図 2 のオレンジ色の破線は帯状の損傷領域の深さ方向の端を示した線である。断面微細組織観察と損傷量の分布から帯状の損傷領域が発生する損傷量の閾値が 0.75 dpa と推定された。

ボイドの観察に適した位相コントラストによる明視野画像を用いて帯状の損傷領域を拡大して観察したものを図 3 に示す。V-(4, 6, 8)Cr-1Ti は損傷領域内に円状の微細な白い組織が導入されており、これはバブルである。断面微細組織観察画像および電子回折像より析出物がないことがわかった。しかし C、O、N の濃度の合計が 2450 ppm である V-4Cr-1Ti に対し同条件の実験前処理および実験を行ったところ、Ti 析出物である Ti(CON)が生じた¹⁾。このことから同じ Cr、Ti 添加濃度であっても C、N、O の不純物元素の濃度によって析出物とボイド形成に差が出ることが判明した。

本研究の結果から、超微小硬度試験の結果より Cr 添加濃度と照射硬化量に相関関係があることが考えられる。また、硬化量を減らすには Ti 添加濃度について検討しなければならない。損傷が発生する閾値は V-(4, 6, 8)Cr-1Ti でほぼ同一であることが判明した。より詳細な閾値を計測するために、詳細な断面微細組織を広い範囲で観察する必要があると考えられる。

微細組織観察の結果より同じ Cr 濃度でも不純物濃度が低いとボイドが形成され不純物濃度が高いと Ti(CON)が形成されることが判明した。このことからボイドスエリングの抑制には Ti、Cr 添加濃度のみを調整するだけでなく、不純物濃度も考慮する必要があると考えられる。今後は C、O、N の濃度を調整し Ti(CON)がほとんど形成されない化学組成を目指す。

結言

照射した高 Cr 添加バナジウム合金の機械的性質を調べるために V-(4, 6, 8)Cr-1Ti について実験を行った。He 照射 V-(4, 6, 8)Cr-1Ti 合金について TEM 観察とナノインデント試験を行った。V 合金への Cr の添加が増加すると、照射硬化は増加した。TEM 観察結果から、全ての材料にボイドが形成されていることが確認された。さらに、Ti(CON)の形成は、異なる不純物濃度を有する V-4Cr-1Ti 合金において観察された。そのため、Ti、Cr の添加量だけでなく、ボイドスエリングを抑制するための不純物量も調整する必要がある。

参考文献

- 1) K. Fukumoto *et al.*, J. Nucl. Mater., 335, 103 (2004)

2.4.3.11

火星衛星探査機 MMX 搭載用撮像素子の耐放射線性評価基礎研究(2)

Basic Study for Radiation Tolerance Test of Martian Moons eXploration's Scientific Imagers (2)

尾崎正伸^{*1}、石神龍哉^{*2}

Masanobu OZAKI and Ryoya ISHIGAMI

前年度に引き続き、2024 年打上予定の火星衛星探査機(Martian Moons eXploration) MMX に搭載する科学観測用カメラ素子の耐放射線性評価を目的とした実験を行った。本年度は 2 度の照射実験を実施した。

素子は差渡し 20 mm 以上と、制御されたビームの直径に比べ大きい為、素子各部の被爆量を制御するには工夫が必要になる。我々は収束した 8 MeV プロトンビームを金薄膜に入射し、その薄膜上の一点で散乱したプロトンを素子に照射するというアプローチを取っている。前年度実験では予想外に広がった入射ビームが治具のガラスエポキシをかすめることで大量のアウトガスを誘発したが、本年度はビーム経路に面するプラスチックをアルミで遮蔽することによりこれを避けることに成功した。

一方で、ビームターゲットの金薄膜を機械的に支えるために裏打ちのポリイミドテープを導入したが、放熱パスが不十分だったかこちらからアウトガスが生じ、また金薄膜が損傷する結果となった。そこで 2 度目の照射では箔の扱いを工夫することでポリイミドを使わなくすることに成功し、アウトガスを生じず 1 μ A 以上のビームを数時間に渡って照射できる系の構築を完了した。

一方、供試体の素子は予定線量の照射により正常動作をしなくなった。この為、来年度は照射線量を減らして素子の耐性を評価する予定である。

^{*1}(国研)宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・太陽系科学研究系、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ

本研究は、(国研)宇宙航空研究開発機構と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

2.4.4. 材料技術の開発

2.4.4.1

水素の安全な輸送と取り扱いに利用可能な水素吸蔵合金の開発

Development of Hydrogen Storage Alloys for Safe Transporting and Handling of Hydrogen

石神龍哉^{*1}、安永和史^{*1}、鈴木耕拓^{*1}

Ryoya ISHIGAMI, Kazufumi YASUNAGA and Kohtaku SUZUKI

Abstract

Hydrogen is released from magnesium hydrides at elevated temperatures above 300°C. It is well known that the temperature for the hydrogen release can be lowered by coating some catalysts such as metals, metal oxides and metal fluorides on magnesium hydrides. In this study, we show that for the magnesium hydride coated with Ni₆₆Co₃₄ alloy, the temperatures at which the hydrogen release starts and that at which the amount of hydrogen released per unit time becomes maximum are 110°C and 177°C, respectively. These temperatures are 15°C lower than those for the magnesium hydride coated with pure Ni.

STEM-EDS mapping for Ni 5 nm thick deposited on MgH_x 100 nm thick thin films clearly revealed a fully coated Ni throughout the MgH_x surface, and the surface roughness of MgH_x films. *In-situ* TEM observation at 200°C at which most of hydrogen is released, shows the local evaporation of Mg and Ni atoms. This result indicates the importance of the proper temperature control.

Hydrogen quantities in magnesium hydrides before and after heating up of the magnesium hydrides have been measured by using in-air ion beam analysis. From the measurement, we could calculate the amount of released hydrogen during the heat treatment.

要約

水素化マグネシウム(MgH_x)からの水素の放出には 300°C 程度の高温が必要であるが、様々な金属や金属酸化物、フッ化物を触媒とすることで水素の放出温度が下がることが知られている。本研究では、Ni-Co 合金を触媒とすると Ni、Co 単体よりも水素放出開始温度、単位時間当たりの水素放出量が最大になる温度が下がることが示された。Ni₆₆Co₃₄ 合金の場合、それぞれ 110°C 及び 177°C となり、Ni 単体と比較してどちらの温度とも 15°C 低くなった。

マグネトロンスパッタ法により成膜された約 5 nm 厚の Ni を担持させた約 100 nm 厚の MgH_x 薄膜の元素分布像を得た。その結果、触媒である Ni は MgH_x 薄膜一面を被覆していること、及び MgH_x 薄膜の最表面の状態を明瞭に可視化するのに有効であることが明らかとなった。水素の最大放出温度(192°C)よりも高い温度(200°C)において TEM 中で 30 min 保持すると、結晶粒単位と考えられる一部領域ではあるが母相の Mg 及び触媒の Ni の蒸発が確認され、水素放出時の温度管理の重要性が指摘された。

MgH_x 中の水素量を測定するため、大気中におけるイオンビーム分析手法を用いた。本手法により、作製後及び加熱による水素放出後の水素量を測定し、実質的に使用できる水素量を算出した。

緒言

石油、石炭、天然ガスなど従来型の燃料の埋蔵量は有限であるため、将来的には価格が高騰し利用が困難になると予想される。またそれらの燃料を使い続けることは、世界的な気候変動を引き起こす大気中二酸化炭素濃度の増加につながる。水素エネルギーの利用はこれらの問題に対する解決策の一つであり、水素の生成、貯蔵、輸送などに関して様々な研究開発が行われている。特に輸送部門は日本の二酸化炭素排出量の約 18% を占めているため代替エネルギー源が望まれているが、水素は常温で気体で密度が低い、高圧タンクに詰める方法、液体にして輸送する方法、有機物に付加する方法など様々な輸送方法が考案されている。

それらの中で水素吸蔵合金を利用する方法も提案されている。爆発性や毒性が低く水素圧力が低いという点では優れているが、質量当たりの水素含有量が小さいという問題点がある。その中でもマグネシウム系合金は水素含有量が比較的大きいが水素の放出には 300°C 程度の高温を必要とするといった短所があるため普及には

^{*1}(公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ

本研究は、(公財) 若狭湾エネルギー研究センターが福井県からの受託研究として実施したものである。

至っていない。本研究ではマグネシウム系水素吸蔵合金を輸送機器の燃料供給用材料として利用するために必要な技術の開発を行った。

成果の概要

1. 触媒物質の成膜による MgH_x 薄膜からの水素放出特性の改良

2017 年度には、Ni と Co には MgH_x からの水素の放出に対する触媒効果があることが示された。Ni と Co は原子番号が 1 違うだけであるため、Ni と Co の中間に元素があれば触媒能力がより高いと推測された。そこで、Ni と Co の合金を触媒として MgH_x 膜からの水素の昇温脱離実験を行った。

成膜には二台のマグネトロンスパッタ装置が付属した成膜装置を用い、試料を大気にさらすことなく MgH_x と Ni-Co 合金を連続して成膜した。Ni-Co 合金の成膜では、厚さ 0.1 mm、直径 50 mm の Ni 板の上に厚さ 0.1 mm、幅 13 mm、長さ 50 mm の Co 板を重ねた物をスパッタリングターゲットとした。放電ガスとして Ar と H_2 をそれぞれ 40 sccm 及び 30 sccm 導入し、高周波電力 200 W で厚さ 1.9 μm の MgH_x 膜を、100 W で厚さ 50 nm の Ni-Co 膜を厚さ 0.1 mm のステンレス鋼板上に続けて成膜した。 MgH_x 膜の組成比は測定していないため MgH_x と表記している。Ni-Co 合金の組成は、走査型電子顕微鏡 (SEM) に付属のエネルギー分散 X 線分光 (EDS) 装置を用いた分析から、原子数比で Ni:Co=66:34 であることが分かった。成膜中にステンレス鋼板の加熱は行わなかった。成膜装置から大気中に取り出された試料は、5 分以内に 20 mm×20 mm の面積に切断され赤外線ランプアニール炉に入れられ真空引きされた。真空引きから 2 時間後に、5℃/分の速度で昇温し、温度に対する真空度の値が測定された。温度と真空度の関係を図 1 に示す。図に示したように、Ni または Co を成膜したときにはそれぞれ 125℃ 付近、160℃ 付近で放出が始まり、192℃、207℃ で単位時間当たりの水素放出量が最大に達した後、急速に放出が終了した。一方で $\text{Ni}_{66}\text{Co}_{34}$ を成膜したときには、110℃ 付近で水素の放出が始まり、177℃ で放出量が最大になった後、急速に放出が終了した。このように、 $\text{Ni}_{66}\text{Co}_{34}$ 合金には Ni 単体及び Co 単体よりも水素の放出を促進させる触媒効果があることが分かった。

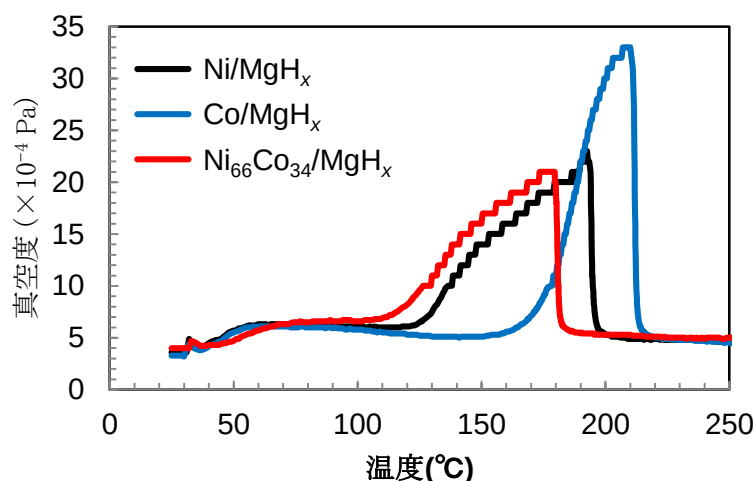


図 1 触媒物質を成膜した MgH_x 膜の昇温に対する真空度の変化

2. 触媒物質を担持した MgH_x 薄膜の微細構造

TEM グリッド用のカーボン支持膜上に約 100 nm 厚の MgH_x を高周波マグネトロンスパッタ装置を用いて真空蒸着後、さらにその表面に約 5 nm 厚の Ni を蒸着した試料を作製した。Ni は MgH_x 薄膜の水素放出温度の低下を目的とした触媒であり、 MgH_x 上の Ni の担持状態や水素放出前後の微細組織を調査することを目的とした。試料の微細組織観察には透過型電子顕微鏡 (TEM、JEM-3000F、JEOL) を用いた。電子の加速電圧は 300 kV である。

図 2 の左列は Ni 触媒を担持した MgH_x 試料の STEM (Scanning Transmission Electron Microscopy、走査透過電子顕微鏡) 像である。上段から STEM-BF (Bright Field、明視野) 像、STEM-EDS (Energy Dispersive Spectroscopy、エネルギー分散型分光法) により同一視野から得ら

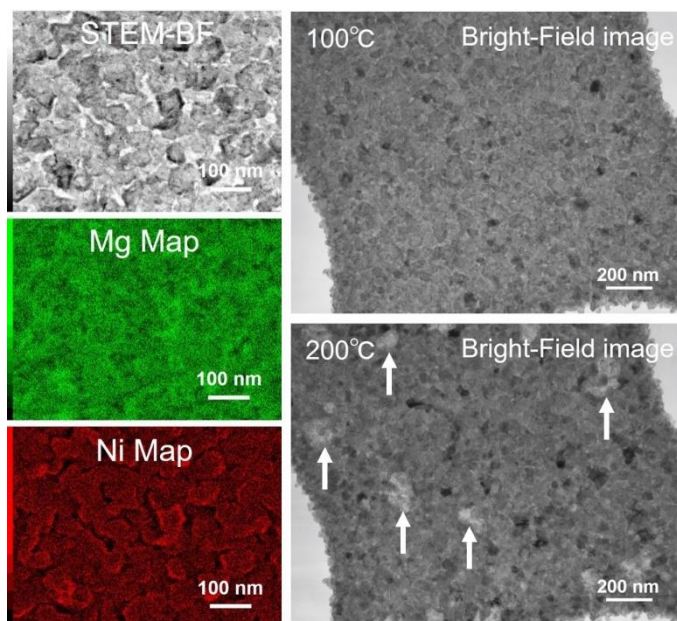


図 2 Ni 触媒を担持した MgH_x 薄膜の微細構造 (左列)、および TEM 内加熱による微細組織変化 (右列)

れた Mg 及び Ni の分布像である。STEM-BF 像の白黒の濃淡と Ni 分布像の赤の濃淡の対応関係が良いことが特徴的で、STEM-BF 像の黒のコントラストと Ni 分布像の赤の強度が高い領域がほぼ一致している。STEM-BF 像の黒い領域は、Ni の原子番号が Mg に対して 16 大きいこと吸収コントラストが高いことに起因すると考えられ、実際に Ni 分布像の対応する領域において Ni 濃度が高いことが確認される。触媒粒子である Ni は、試料表面全体を被覆しているが、最表面に存在する MgH_x の結晶粒の端部に濃化する傾向があり、Ni 分布像は MgH_x の結晶粒の表面構造・起伏を反映した表面敏感な像である。また、起伏の存在は MgH_x の膜厚方向の積層構造が鱗状であることを示唆していると考えられる。図 2 右列は、図 1 の Ni/ MgH_x 試料の水素放出前後の温度である 100℃及び 200℃に各 30 min 保持後の微細組織を示す TEM-BF 像である。真空度は 2.5×10^{-5} Pa である。水素放出後の 200℃において、白矢印先端で示すように不定形の白いコントラストを示す領域が形成された。白く観察される理由は、他の領域よりも試料厚が薄く電子の透過強度が増加したことにより起因していると考えられ、これらの領域は母相である Mg さらには触媒である Ni の蒸発が生じたことを示している。

3. イオンビームによる大気中水素分析

触媒付の MgH_x は真空中で水素を放出してしまう恐れがあるため、水素分析は大気中で行う必要がある。若狭湾エネルギー研究センターでは、これまでにイオンビームを使用して大気中で分析可能な手法(反跳粒子検出法:ERDA)を開発してきた。本手法を用いて、作製後及び加熱による水素放出後の水素定量分析をすることで、実質的に使用可能な水素量を求めることができる。 MgH_x (500 nm) に触媒として Ni 50 nm をつけた試料について水素分析を行った。図 3 に大気 ERDA で計測した水素のエネルギースペクトルを示す。横軸が検出した水素のエネルギー、縦軸が検出個数に対応する。黒がポリフェニレンサルファイド(PPS)フィルム 1.2 μm 、赤が作製後の MgH_x (500 nm)、青が加熱により水素放出後のものである。PPS フィルムの水素量は 3.6×10^{18} 個/ cm^2 であるため、検出個数比が水素量とみなせる。この結果から作製後の水素量は PPS フィルムの約 60%、水素放出後は約 9% であった。したがって、実質的に使用可能な水素量は全体の 85% 程度であることが分かった。

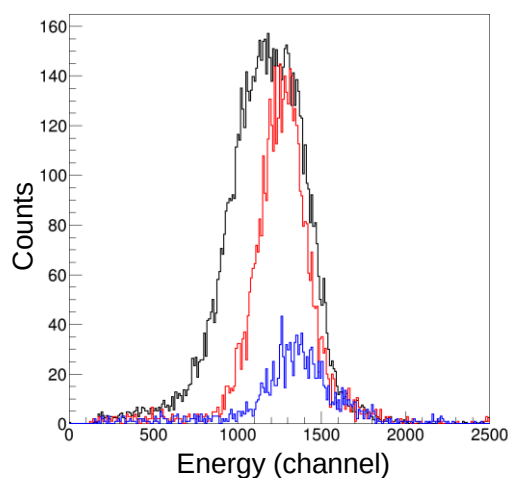


図 3 水素のエネルギースペクトル

結言

$\text{Ni}_{66}\text{Co}_{34}$ 合金を触媒として MgH_x 膜上に成膜して水素の昇温脱離測定を行った。その結果、Ni 単体及び Co 単体よりも水素の放出開始温度、単位時間当たりの水素放出量が最大になる温度が低下した。水素は 110℃付近で放出を開始し、177℃で放出量が最大となった。

STEM-EDS マッピングにより、Ni 触媒を担持させた MgH_x 試料は Ni が MgH_x 表面上一面を十分に被覆していることが示された。Ni 触媒の担持により MgH_x 試料単体に比べて水素放出温度を大きく低下させることが可能だが、一部領域ではあるが母相の Mg 及び Ni の蒸発が確認された。昇温脱離実験と TEM 内加熱実験では、昇温速度が異なるため一概には比較できないが、水素放出最大温度よりも高温領域への昇温には母相の保持・回収・再利用の観点から十分な注意が必要であると考えられる。

作製後及び水素放出後における MgH_x 中の水素量を大気 ERDA を用いて測定した。この結果、 MgH_x 中の約 85% 程度の水素が放出されたことが分かった。

2.4.4.2

ポリイミド系高分子ファイバーの開発

Development of a Novel Fiber Produced by Polymers Containing Polyimide Structure

畑下昌範^{*1}

Masanori HATASHITA

Abstract

It is well-known that aromatic polyimides have found wide applications in many industrial fields due to their excellent thermal stability, high mechanical strength and superior chemical resistance. In this study, to develop a new polymer fibers, polymers containing polyimide structure have been synthesized. Aromatic polyimides composed of carboxylic dianhydrides, diamines having sulfonic acid and diamines without any ionic residues were heat-treated for desulfonation. The properties of obtained polyimide polymer were investigated. These polyimide polymers showed higher heat resistance and higher mechanical strength properties than the pre-existing polymer materials as plastic optical fiber (POF). The optical transparency of these polyimide polymers to near-infrared light and that of the pre-existing polymer materials as plastic optical fiber (POF) were about the same. The effect of gamma-ray irradiation on the optical transparency of the present polyimide polymer was compared with that for the pre-existing plastic optical fibers.

要約

芳香族ポリイミドは、その高い熱安定性、優れた機械的強度および高い耐薬品性といった性質により、工業分野の様々な用途に用いられている高分子である。新しい高分子ファイバーを開発するにあたり、本研究ではこのポリイミド構造を有する高分子に着目し、合成を行った。カルボン酸二無水物、スルホン酸基を有するジアミン、イオン性基をもたないジアミンからなる芳香族ポリイミドの加熱による脱スルホン化処理を行った。得られたポリイミド系高分子の物性を調査した。本高分子は既存のプラスチック光ファイバーの高分子素材よりも高い耐熱性と高い機械強度を示した。本高分子膜の近赤外域での光透過性は既存のプラスチック光ファイバー用高分子素材とほぼ同等の光透過性を示した。今回は、脱スルホン化して得られたポリイミド系高分子膜のガンマ線照射による近赤外域での光透過性の変化を、既存のプラスチック光ファイバー用高分子素材のそれと比較した。

緒言

従来、ポリイミドは、不溶融、溶媒不溶性であるために、ファイバー化は困難であるとされてきた。今までに行ってきた研究から、ポリイミドのモノマーの1つであるジアミンにイオン性基を導入することにより、溶媒への溶解性が変化することが見いだされた。新規なモノマーの組合せによる高分子合成を行い、溶媒溶解性の高いポリイミドスルホン酸高分子を合成した。この高分子を加熱処理後に得られた高分子は有機溶媒に不溶になり、脱スルホン化したポリイミド系高分子であることが示唆された。本高分子は高い耐熱性を示した。また、引張試験における引張強度および破断伸びから、従来プラスチック光ファイバーとして用いられているポリメタクリル酸メチルに比べて有意に高い機械的強度を示すことが明らかになった。得られた均一な高分子膜を用いて近赤外域の光透過性を評価したところ、既存のプラスチック光ファイバー用高分子素材とほぼ同等の光透過性を示した。今回は、脱スルホン化して得られた均一な高分子膜を用い、ガンマ線照射による近赤外域での光透過性の変化を既存のプラスチック光ファイバー用高分子素材と比較することにより評価した。

成果の概要

芳香族ポリイミドのファイバーを得る方法として、モノマーにイオン性基を導入して、生成した高分子の紡糸溶媒に対する溶媒溶解性を向上させることにした。こうして合成した高分子は、溶液状態でファイバーを作製することができた。しかし、このままでは導入したイオン性基の存在がポリイミドとしての特徴を損なう恐れがあるため、イミド環の骨格が維持されつつ、かつ、不要なイオン性基のみが脱離する高温条件で処理して、芳香族ポリイミド系高分子のファイバーを得ることができた。具体的には、モノマーの酸無水物として、1,4,5,8-ナフタレンテトラカルボン酸無水物(以下、NCA)、スルホン酸を含むジアミンとして、4,4'-ジアミノジフェニルエーテル-2,2'-ジス

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが関西電力株式会社、日本原子力発電株式会社、北陸電力株式会社の3社からの受託研究として実施したものである。

ルホン酸(以下、AES)、非イオン性のジアミンとして、ビス[4-(3-アミノフェノキシ)フェニル]スルホン(以下、3APS)を用いた。NCA/AES/3APS(モル比、5:1:4)のポリイミドスルホン酸高分子を合成した。この高分子を紡糸溶媒に溶解させて湿式紡糸法によりファイバーを得た。光透過性の評価には、測定が簡便である高分子膜を用いた。高分子膜は、高分子溶液が流動性を失うまで常圧下で静置し、その後真空乾燥によって残留溶媒を除去することで均一な膜を得た。最後に、イオン性基を脱離させるために、300℃で3時間の加熱処理を行った。

次に、本高分子膜のガンマ線照射による近赤外域での光透過性の変化を既存のプラスチック光ファイバー用高分子素材であるポリメタクリル酸メチル(PMMA)、透明性のある汎用プラスチック素材であるポリ塩化ビニル(PVC)と比較することにより評価した。ガンマ線照射は株式会社コーガイソトープのガンマ線照射施設を利用し、100kGyの線量を照射した。照射後の様子を観察したところ、ポリイミド系高分子膜は無処理においてもやや薄い黄色をしているが、ガンマ線照射による着色の進行は見られなかった。その一方で、PMMAはガンマ線照射によって黄色く着色し、PVCにおいてはほぼ黒色になった。PMMAの着色は、可視スペクトル測定の結果から400～500nmの透過率の低下によるものと考えられた。近赤外域である波長800nmにおけるガンマ線照射による高分子膜の光透過性の変化を表1に示す。試験した3種類の高分子膜は波長800nmにおける透過率が90%を越えていた。100kGyのガンマ線照射により、ポリイミド系高分子でわずかな透過率の低下がみられた。PMMAにおいては、ガンマ線照射による光透過性の低下の程度がポリイミド系高分子よりも大きかった。PVCにおいては、ガンマ線照射によりほとんど光透過を示さなくなった。

表1 ガンマ線照射による近赤外領域での光透過性の変化

高分子膜	透過率(%) 800nm		
	無処理	100 k Gy	Δ
desufonated polyimide	93.4	90.8	2.6
PMMA	95.2	88.8	6.4
PVC	92.1	0.01	92.09

結言

今までの研究から、通常溶媒に不溶なポリイミドにイオン性基を導入したポリイミドスルホン酸高分子を合成することにより、溶媒に可溶な高分子を作製することができた。この溶媒に可溶な高分子を用いることで、ファイバーを作製することができた。このポリイミドスルホン酸高分子は300℃の加熱処理によって、イミド環の骨格構造を損なうことなく、最も放射線耐性のない官能基であるスルホン酸基を脱離することができた。スルホン酸基を脱離したポリイミド系高分子は、市販品のポリイミドであるカプトンと同様に、溶媒には不溶であり、高い耐熱性を示した。引張試験における引張強度および破断伸びの測定から、従来プラスチック光ファイバーとして用いられているポリメタクリル酸メチルに比べて有意に高い機械的強度であることが明らかになった。また、光通信波長(近赤外域)での光透過性に関しては、従来の光学用高分子素材と比較しても同等の光透過性を示した。さらに、ガンマ線照射による近赤外域での光透過性の低下は、従来の光学用高分子素材と比較してポリイミド系高分子において抑えられていた。

プラスチック光ファイバーは、従来の金属ファイバーに対して、高速かつ大容量の伝送が、細い1本のファイバーで可能であり、低消費電力であって、電磁ノイズの発生がないために信頼性が高い。また、その重量は金属ケーブルの3分の1以下に軽量化が可能である利点を有している。さらに、石英光ファイバーに対しては、プラスチックならではの折れないだけでなく、折り曲げても通信可能であることや、そのことによる取り扱いや配線の自由度があること、さらにコア径や外径を任意に変更でき、安価なコネクタで接続が可能であることが利点である。こうした利点を有するプラスチック光ファイバーは今後も利用分野がより広がっていくことが予想される。本研究の成果を新規のプラスチック光ファイバーの開発としてさらに推し進めていく時に今後検討すべきことは、今までの様々な要素技術や知見を総合して、ポリイミドの光ファイバーの試作を行い、その性能評価からの課題の抽出とその対策などを繰り返しながら、高耐久性通信素材としての技術を確立していくことである。

2.4.4.3

眼鏡型ディスプレイ用超小型レーザービーム走査ミラーのための磁性膜特性向上の研究

Quality Improvement of Magnetic Films for Compact Laser Beam Scanning Mirrors used in Eye Wear Displays

勝山俊夫^{*1}、石神龍哉^{*2}

Toshio KATSUYAMA and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

We have studied an increase in the thickness of magnetic films, which can be applied to compact laser beam scanning mirrors used in eye wear displays.

要約

眼鏡型ディスプレイ用超小型レーザービーム走査ミラーを実現する上で鍵となる磁性膜の厚膜化を検討した。

緒言

近年、レーザー走査ディスプレイ実現のため、レーザービームを走査する MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)ミラーの超小型化が求められている。この MEMS ミラーの有力な方式である電磁駆動方式では、その小型化のためにミラーの回転力向上が必須である。ここでは、その回転力向上に資する Fe-Pt 磁性膜の厚膜化を検討した。

実験方法と実験結果

Fe:Pt=50:50 のターゲット(厚さ 0.5 mm)を 2 枚重ねてスパッタリングし、710 nm の膜を 400℃で形成した。成膜後、650℃で 15 分間の熱処理を行った。その結果、図 1(a)の X 線回折パターンに示されるように、膜は FePt 単相で、Fe:Pt=50:50 の可能性が高いことが分かった。図 1(b)は、赤外線ランプアニール炉で、650℃で 1 時間の熱処理を行った膜の X 線回折パターンである。アニール前に比べて、バックグラウンドが減少し、それぞれのピークが高くなる傾向があり、結晶構造が改善されている。この結果を基に、厚さ 2 μm の成膜を行い、均質な膜を得ることができた。また、その磁気特性を測定した結果、保磁力が 7 kOe 程度であることが分かり、膜の磁気特性も良好であることが示された。

結言

Fe-Pt 磁性膜の厚膜化検討を行い、従来の 0.5 μm より 4 倍厚い 2 μm の厚さで、かつ保磁力が 7 kOe 程度の良質な膜が得られた。今後、この膜の MEMS ミラーへの適用を行う予定である。

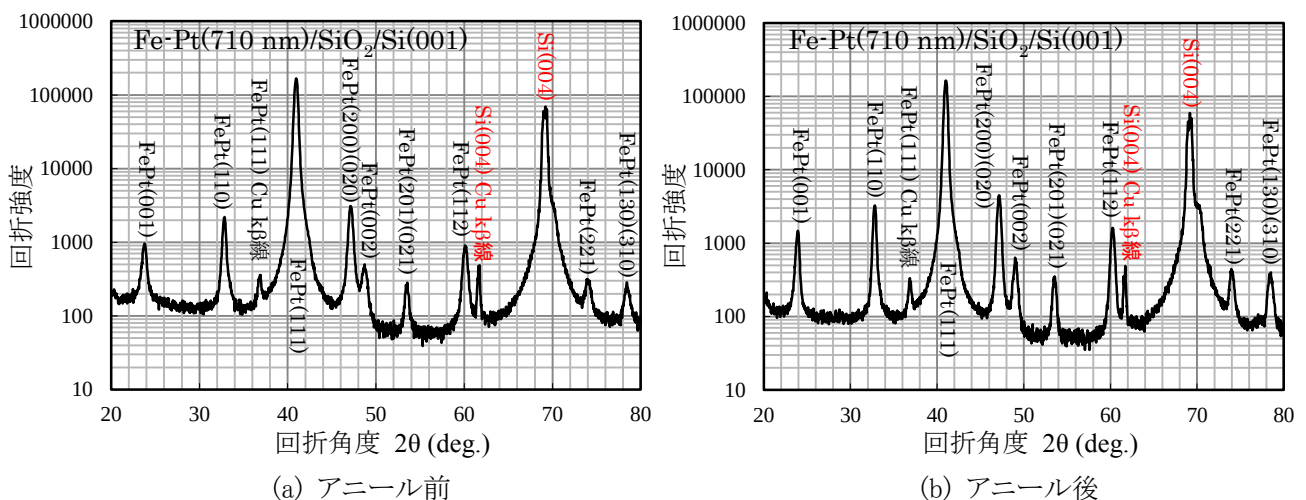


図1 Fe-Pt 磁性膜のX線回折パターン

^{*1}福井大学産学官連携本部、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ
本研究は、福井大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

2.4.4.4

フレキシブル導電材料のための金属皮膜の耐久性向上に関する調査研究

Research on Development of Flexible and Conductive Films

辻本和久^{*1}、野坂敬之^{*1}、後藤昌利^{*1}、安永和史^{*2}、山岸隆一郎^{*3}Kazuhisa TSUJIMOTO, Takayuki NOSAKA, Masatoshi GOTO, Kazufumi YASUNAGA
and Ryuichiro YAMAGISHI

Abstract

It has become a task to develop conductive materials, which show not only flexibility and durability but also show creativity such as black appearance. In this research, we tried to create NiZnP/NiP plated multilayers, which was expected to show durability and black appearance on flexible film. To clarify the structure of this conductive plated multilayer, we measured depth profile of elements by AES further more. From this measurement, we found highly oxidized interface layer between NiP plating layer and NiZnP plating layer.

要約

フレキシブルで耐久性に優れ、さらに黒色外観などの意匠性を有する導電性素材の開発が課題となっている。本研究ではフレキシブルなフィルム上に、耐久性と黒色外観が期待される NiZnP/NiP 積層めっき被膜の形成を試みた。さらに、この積層めっきから成る導電性被膜の構造を明らかにする目的で、めっき被膜の深さ方向の元素分布を AES により分析した。その結果、積層された NiP めっき層と NiZnP めっき層の界面付近に、強く酸化された層が存在していることが分かった。

緒言

ヘルスケアデバイスや家電・ロボット・クルマ等の幅広い分野で、柔らかなエレクトロニクス製品(ソフトエレクトロニクス)が注目されており、フレキシブル性と耐久性を有する導電性素材が求められている。

我々はこれまでに、フィルム上に導電性のめっき被膜を形成したフレキシブルな導電性素材の開発を進めており、電子線マイクロアナライザー(EPMA)、オージェ電子分光分析(AES)等を用いて、樹脂とめっき被膜とのフレキシブルな複合界面の構造や機能を解析してきた。また近年は、フレキシブル性と耐久性に加えて、意匠性にも優れた黒色の外観を有する導電性被膜の開発にも取り組んでいる。

本研究では、フレキシブルなフィルム上に黒色の導電性めっき被膜の形成を試みた。さらに、このめっき被膜の最表面から深さ方向の元素分布を、AES 分析により測定した。

成果の概要

めっき被膜の耐久性を改善する方法の一つに、異種金属層を積層させる多層めっきが知られている。本研究では、フレキシブルなフィルムの表面に、黒色の外観を有するニッケル-亜鉛(NiZnP)とニッケル(NiP)との積層めっき被膜を形成することにより、フレキシブルで耐久性を有し、且つ黒色の導電性被膜の形成を試みた。

図 1 は、フィルムの表面に、黒色の外観を有するニッケル-亜鉛(NiZnP)とニッケル(NiP)との積層めっき被膜を形成した導電性素材の模式図である。本研究で用いたフィルムはフレキシブルかつ透明であり、めっき層を形成していない面から、フィルム越しに見える導電性被膜が黒色外観を有することが必要であった。

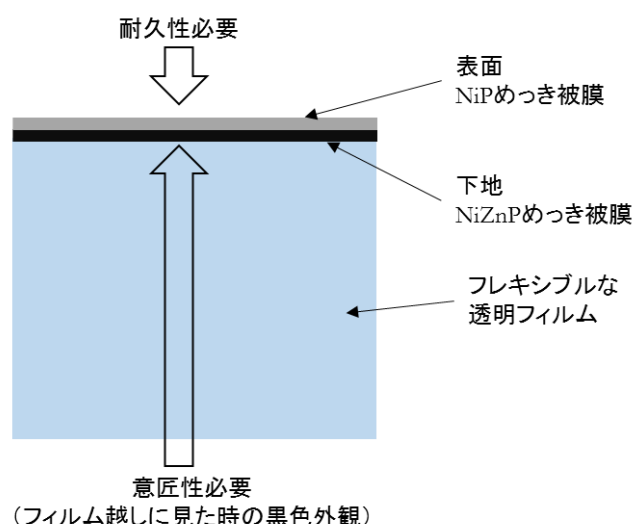


図 1 フィルム上への NiZnP/NiP 積層めっき被膜の模式図。

^{*1}セーレン株式会社・研究開発センター・開発研究第一グループ、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・企画支援広報部・技術相談室
本研究は、セーレン株式会社と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

図 2 は、NiZnP と NiP との積層めっき被膜を形成したフィルムの断面の SEM 観察結果である。めっき被膜の表面には、本研究に用いた特殊フィルムの表面形状に由来すると考えられる凹凸が見られたものの、最表面に、厚みが約 300 nm の均一なめっき皮膜が形成されていることが確認できた。また、この積層めっき被膜の表面粗さ Ra は 10 nm と平滑であり、ここでは示していないが、表面を磨耗処理した場合でも金属粉の脱落は観察されず、高い耐久性を有していることが確認できた。

次に、黒色の導電性被膜の構造を解析するため、黒色の外観を有する NiZnP/NiP の積層めっき被膜について、深さ方向の元素分布を AES 分析により測定した。

図 3 は、NiZnP/NiP 積層めっき被膜の最表面から 400 nm までの深さ方向の元素分布である。最表面には Ni めっき被膜の存在が確認された。また、深さ 100 nm 付近から下の部分では、Ni と同時に Zn が検出されており、NiP めっき層の下には NiZn めっき層が存在していると考えられた。一方、Ni めっき層と NiZn めっき層の界面(約 100 nm 付近)および NiZn めっき層(300 nm あたりまで)からは酸素が検出された。このことから、この領域には、強く酸化された層が存在していると考えられた。

本研究の範囲内では、酸化された層の特性や、意匠性(黒色外観)に及ぼす影響を解析するまでには至らなかったが、酸化されためっき層に含まれる金属酸化物が、めっき被膜の黒色化に関与している可能性が示唆された。フレキシブル性、耐久性、導電性、そして意匠性を同時に備えた導電性被膜の実現が、引き続きの課題である。

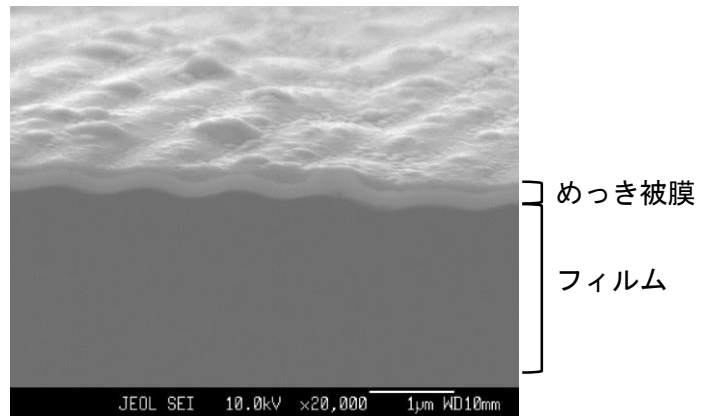


図 2 積層めっき被膜が形成されたフィルムの断面の SEM 観察像。

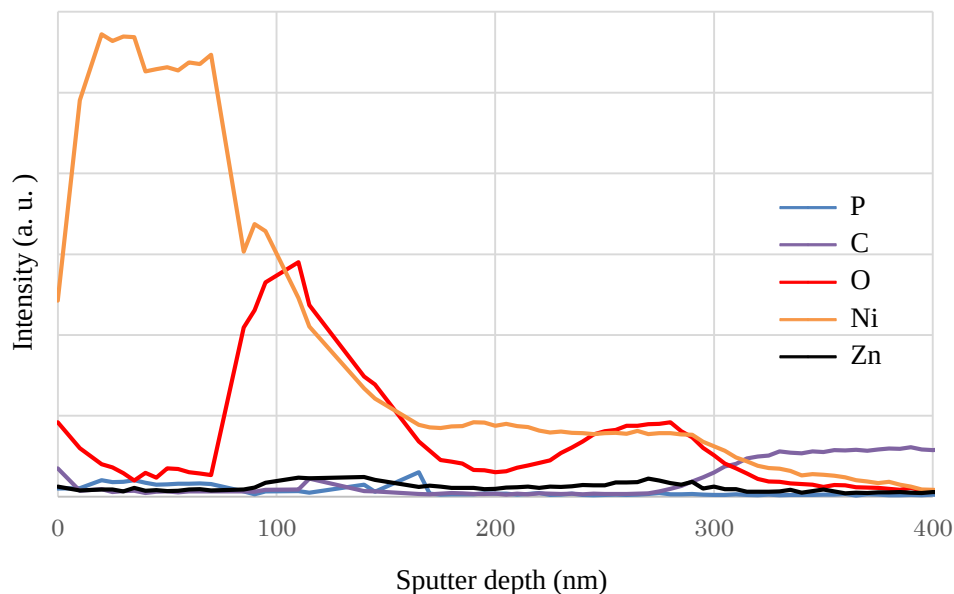


図 3 NiZnP/NiP 積層めっき被膜の深さ方向(0～400 nm:SiO₂換算値)の元素分布。

結言

フレキシブルで耐久性に優れ、且つ優れた意匠性(黒色外観)を有する導電性被膜の開発を目指して、フィルム上に NiZnP/NiP の積層めっき被膜を形成した。さらに、AES 分析により、積層めっき被膜の深さ方向の元素分布を測定した。その結果、黒色外観を有するフレキシブルな導電性被膜中に、強く酸化されている層が存在していることを確認できた。

2.4.4.5

超強加工による微細結晶粒金属材料の創製と評価

Ultra-Fine and Nanocrystalline Structure Induced by Severe Plastic Deformation of Metal Surfaces

安永和史^{*1}、加藤寛敬^{*2}

Kazufumi YASUNAGA and Hirotaka KATO

Abstract

The burnished carbon steel (S45C) disk specimens worked at 200 rpm and 1200 rpm were observed by cross-sectional transmission electron microscopy (TEM). Other burnishing conditions were the same for the two samples. The dark-field images revealed that the rotating speed of disk specimens affects the formation depth of nano-sized grains, below 50 nm in diameter, from the surface.

要約

円盤形の炭素鋼(S45C)表面を回転速度 200 rpm 及び 1200 rpm の条件でバニシング加工した試料を作製した。押しつけ荷重等の他の条件は同一である。断面方向から得られた TEM 暗視野像から、円盤試料の回転速度が、粒径 50 nm 未満の超微小結晶粒が形成する試料表面からの深さに影響を及ぼすことが明らかとなった。

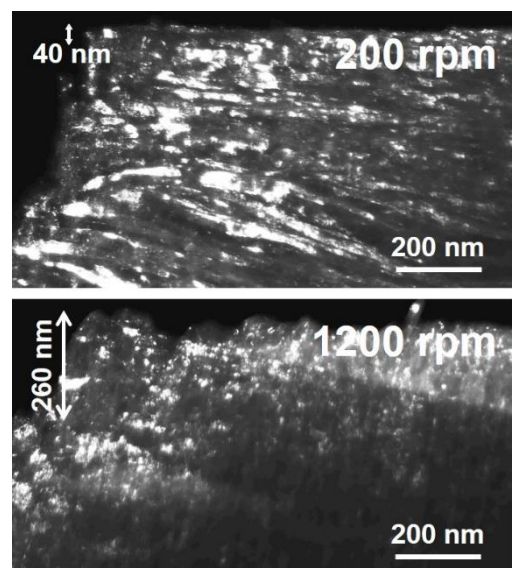
緒言

バニシング加工は、回転中の金属材料に高硬度で滑らかな表面をもつ球面工具を押しつけ、切りくずを出さずに金属表面を鏡面状態に仕上げることを第一義とする表面処理法である。この手法は金属の表面粗さを低下させるのみならず、工具との摩擦により金属表層が塑性変形され、硬度・耐摩耗性・疲労強度等の機械的性質を改善する。バニシング加工後の機械的性質と微細組織の関連の理解が深まれば、流通量が多く安価で構造用機械材料として多用される S45C に対して、さらなる機能性を付与することが可能と考えられる。

成果の概要

試料は焼きならした S45C 円盤(Φ60 mm、t5 mm)である。旋盤に固定した S45C に超硬合金(WC-Co)製のボール(Φ6 mm)を荷重 500 N で押し当て、回転速度 200 rpm 及び 1200 rpm、送り速度 0.00937 mm/rev、加工摺動直径 Φ40~50 mm、加工パス1回、大気中、室温、無潤滑の条件でバニシング加工した。

図 1 は、回転速度 200 rpm(上)及び 1200 rpm(下)の条件で加工した S45C の最表面を含む断面微細組織の TEM 暗視野像である。200 rpm では表面から約 40 nm の領域に長軸長さが 5~42 nm(平均粒径 17 nm)の結晶粒が、それより深部では試料表面にほぼ平行な高アスペクト比の結晶粒が形成された。一方、1200 rpm では表面から約 260 nm の領域に 7~41 nm(平均粒径 16 nm)の結晶粒が形成された。結晶粒微細化は、高回転速度では低回転速度と比較して 6.5 倍もの深部にまで達した。これらの結果から、結晶粒微細化の深さ方向の進展の程度に、金属表面の塑性変形の歪み速度が影響している可能性が指摘される。



結言

バニシング加工した S45C の結晶粒径が 50 nm 未満にまで微細化される試料最表面からの深さは、回転速度に顕著に依存し、歪み速度と結晶粒微細化との関連が指摘される。

図 1 200 及び 1200 rpm でバニシング加工した S45C 表面近傍断面の TEM 暗視野像。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、^{*2}福井工業高等専門学校・機械工学科
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井工業高等専門学校と共同で実施したものである。

2.4.4.6

アルミニウム合金の転位と溶質原子相互作用の研究

Solute-Dislocation Interaction in an Aluminum Alloy

畠山賢彦^{*1}、安永和史^{*2}

Masahiko HATAKEYAMA and Kazufumi YASUNAGA

Abstract

To investigate the solute-dislocation interaction in an aluminum alloy, we used the Al-Mg-Si alloy which contained Si as an undersize solute atom and Mg as an oversize solute atom. Enrichment of Si on stacking faults and Shockley partial dislocations were observed.

要約

熱時効下の鈴木偏析を調べるための試料として Al を母材にオーバーサイズの溶質原子として Mg、アンダーサイズの溶質原子として Si を添加した Al-Mg-Si 合金の線材を用いた。積層欠陥部分およびショックレー部分転位への Si の濃化が認められた。

緒言

熱時効下の鈴木偏析を調べるための試料として Al を母材にオーバーサイズの溶質原子として Mg、アンダーサイズの溶質原子として Si を添加した Al-Mg-Si 合金の線材を用いた。Al-Mg-Si 合金を溶体化熱処理後、24 時間程度 200℃で熱時効することで溶質原子を転位に偏析させた。溶体化処理によって低くなった転位密度では、3 次元アトムプローブ (3DAP) 測定の視野に転位が含まれる確率が低いため、200℃時効の途中で 10% 程度の加工を行うことで、転位密度を高くした後、再度昇温して偏析を促進する手法を用いた。線材は硝酸 90% の水溶液中で 12V で電解研磨後、顕微鏡下での電解研磨で先端直径 5 μ m 程度まで細くした後、FIB 加工により 3DAP 測定に十分な直径に加工した。加工後は、紫外光レーザー補助による 3DAP 測定を行い、転位近傍の 3 次元原子マップを取得した。

成果の概要

これまで鈴木偏析を観察するためには転位密度の低い溶体化処理後の試料を、融点の 1/2 程度の温度から徐々に温度を下げながら炉冷する方法が用いられてきたが、過飽和固溶体を熱時効途中で加工し、転位密度を高くした後、一定の温度による時効で導入された転位に偏析を促進させて観察する新しい手法を開発した。熱時効下においては、積層欠陥部分およびショックレー部分転位への Si の濃化が認められた。Mg についても Si よりも低濃度の偏析が同じ領域で認められており、定性的にはオーステナイト系ステンレスを重照射した場合と同様の傾向を示すことが明らかとなった。これらの結果、転位の構造に対して、照射下と熱時効下での定性的な偏析の傾向に大きな違いは無いものと考えられるが、照射下では転位の運動や増殖が照射により継続的に起こっている事や、照射促進の偏析が起こることにより熱時効下よりも容易に偏析が起こることが示唆された。

結言

Al-Mg-Si 合金の線材に予め転位を導入した試料を熱時効後に 3DAP 観察を行い、転位への Si 偏析などを認めた。定性的にはステンレスの照射下における偏析挙動に類似しており、熱時効下と照射下における溶質原子と転位の相互作用は定性的に類似していることが示唆された。

^{*1} 富山大学大学院・理工学研究部、^{*2} (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、本研究は、富山大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

2.4.4.7

Ag/ガラス界面の接合強度に与える界面微細構造の影響

Influence of Interface Microstructure on Bonding Strength of Ag/Glass Interface

志々目雄太^{*1}、渡辺静晴^{*1}、湯村尚史^{*1}、角野公平^{*1}、安永和史^{*2}、若杉 隆^{*1}

Yuta SHISHIME, Shizuharu WATANABE, Tadashi YUMURA, Kouhei KADONO, Kazufumi YASUNAGA and Takashi WAKASUGI

Abstract

A peel test machine which can pull metal foil at 180 degrees from the glass surface was developed to measure adhesion strength between metal foil and glass. The peel strengths between Ag foil and glass increased with firing temperature, suggesting that anchor effect of glass into silver foil surface roughness and/or chemical reaction between the glass element and silver.

要約

Ag とガラスの接着強度を測定するために 180° 剥離試験装置を考案した。剥離試験から Ag とガラスの接合温度の上昇により接合強度が増加する温度依存性が得られた。試料表面の凹凸にガラスが侵入しやすくなる物理的要因及び Ag とガラスの反応が促進される化学的要因があると考えられる。

緒言

近年の電子製品はマイクロサイズに小型化された電子部品を多用することによって高機能化を実現している。実装されている IC チップやコンデンサーなど電子部品は回路基板へ固着させるために電極が形成されている。しかし電子部品が小型化されると、外部電極の接着面積が小さくなるため、十分な接着強度を維持しにくくなる。軽い衝撃でも電子部品が離脱してしまうことがあり、製品の故障につながる。電子部品の電極材料として Ag ペーストが用いられている。Ag ペーストに含まれるガラスはその成分によって基板と電子部品の接着強度、あるいは電極強度に影響することが知られているが、これに関する知見は乏しい。信頼性の高い電極材料を開発するためには、Ag ペーストを焼成させた後に形成される Ag/ガラス界面の知見が求められる。

本研究は、Ag/ガラス界面の接合強度と界面微細構造に影響を与えるガラス物性を明確にし、信頼性の高い Ag 電極ペーストに用いるガラスの設計指針を得る事を目的とする。

成果の概要

Ag とガラスの接着強度を評価するために考案した 180° 剥離試験装置を図1に示す。厚さ 1 mm、縦横 50×50 mm のアルミナ基板上に、ガラスフリット入りの Ag ペースト①をスクリーン印刷後、約 200℃のホットプレートで焼成し、続いてガラスフリットを含まない Ag ペースト②を同条件で焼成した。次に、焼成した Ag ペーストアルミナ基板の上にパルペライザーを用いて粉碎したガラスを載せて熱処理し、ガラスコーティング層を形成させた。本実験で使用したガラス組成は 20Na₂O-75B₂O₃-5SiO₂(mol%) (軟化点: 555℃) である。ガラスコーティングした Ag ペーストアルミナ基板の表面に、厚さ 50 μm、幅 10 mm のリボン状 Ag 箔を載せ、Ag 箔全面がガラスと接着するように軽いおもりを置いて熱処理した(昇温速度 10℃/min、最高温度範囲は 600-900℃、保持 60 min)。この試料を固定し、Ag 箔を 180° に折り曲げ、10 mm/min の速度で剥離中の荷重を測定した。測定開始後、安定した数値に推移した点から 60 秒間の平均荷重を測定した(0.1 秒測定間隔)。180° 接合温度 600℃

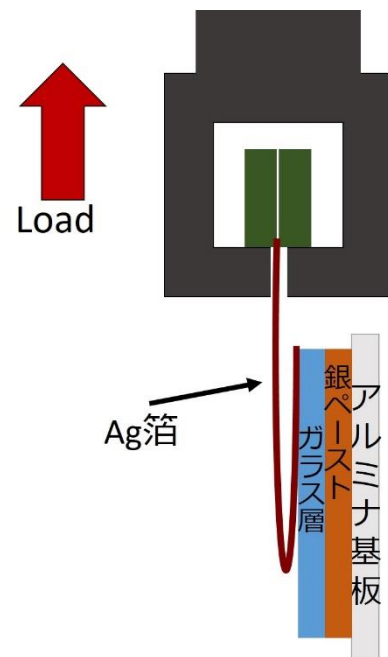


図1 180° 剥離試験装置の模式図。

^{*1} 京都工芸繊維大学、^{*2} (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、
本研究は、京都工芸繊維大学と(公財) 若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

～900℃の試料の剥離試験で得られた荷重曲線を図 2 及び 3 に示す。接合温度 700℃では Ag とガラスの界面から剥離しており、荷重曲線もある一定の数値で推移しており、再現性も高かった。一方、900℃付近での高温接合では、剥離中に Ag 箔が破れるために剥離強度が一定とならず、接合強度の評価は困難であった。Ag 箔が破れる直前の最大荷重は最大 25 N であり、700℃接合の約 5 倍であった。接合温度が増加するにつれて、最大接合強度が増加する傾向が得られた(図 4)。

ガラスと金属間の界面における密着機構は、機械的接合説と化学的接合説、またその 2 つを合わせた複合組織説のいずれかに当てはまると考えられる。物理的要因で接合強度が増加する場合、ガラスの濡れ性が増すことで、試料表面の凹凸にガラスが侵入し、アンカー効果をもたらしている可能性が考えられる。一方、化学的要因の場合、Ag とガラスの反応が促進されている可能性が考えられる。図 5 は接合温度 800℃の試料の Ag とガラスの境界領域断面の STEM 明視野像である。Ag とガラスの境界面全面ではないが、Ag とガラスの焼成中の化学反応に起因したと考えられる Ag の微細粒子の形成が観察された。

結言

180 度剥離試験により Ag とガラスの接合温度が高くなるにつれて、接合強度が上昇する温度依存性が認められた。試料表面の凹凸にガラスが侵入しやすくなるような物理的要因と、Ag とガラスの反応が促進されるような化学的要因が考えられる。

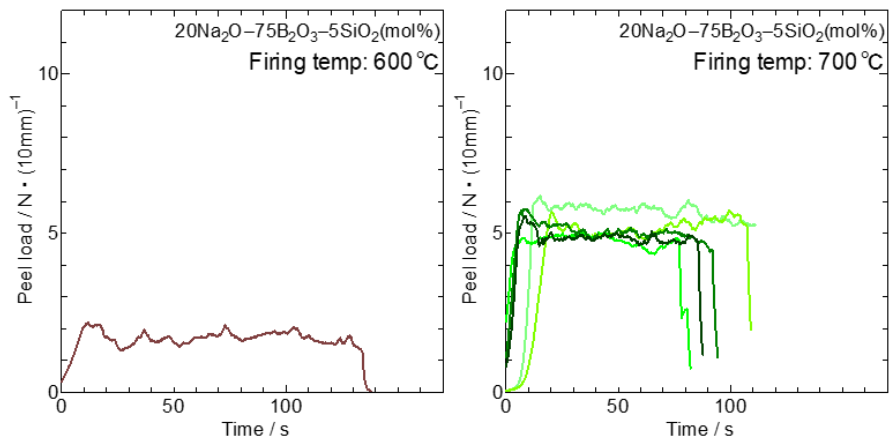


図 2 剥離試験により得られた 600℃及び 700℃での荷重曲線。

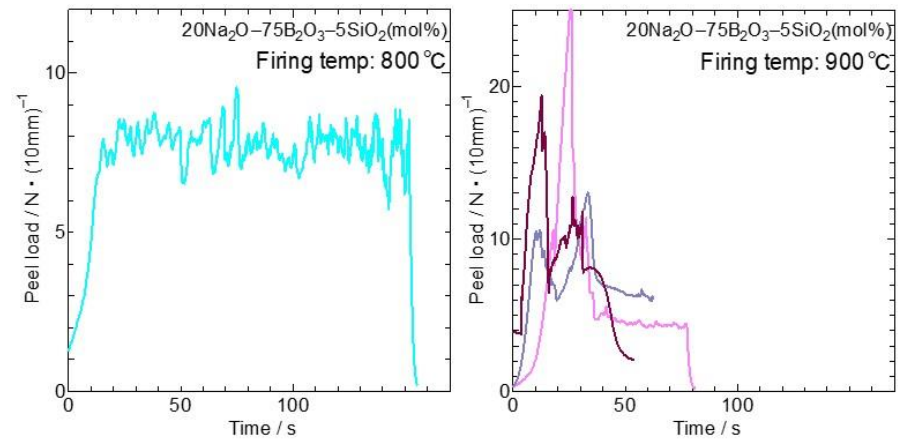


図 3 剥離試験により得られた 800℃及び 900℃での荷重曲線。

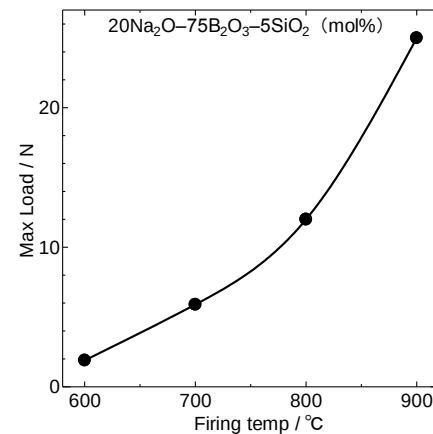


図 4 剥離試験による最大荷重の接合温度依存性。

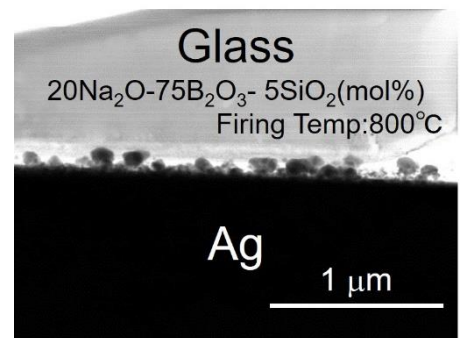


図 5 接合温度 800℃の Ag とガラスの境界領域断面の STEM 明視野像。

3. 外部発表、特許、品種登録

3.1. 外部発表

平成 30 年度における外部発表(論文等及び国際会議、国内会議における発表)は次のとおりである。

- (1) 論文等(学協会誌等への掲載。解説、総説などを含む。)
1. 中嶋英雄、連載 多孔質が創る材料と機能(3)「一方向気孔をもつポーラス金属の作り方」、金属、第 88 巻、第 5 号、73-80 頁、2018
2. Yoshikazu Maeda, Yoshitaka Sato, Hiroki Minami, Yutaka Yasukawa, Kazutaka Yamamoto, Hiroyasu Tamamura, Satoshi Shibata, Sayuri Bou, Makoto Sasaki, Yuji Tameshige, Kyo Kume, Hiroshi Ooto, Shigeru Kasahara, Yasuhiro Shimizu, Yusuke Saga, Akira Omoya and Makoto Saitou, Positioning accuracy and daily dose assessment for prostate cancer treatment using In-room CT image guidance in proton therapy facility, Medical Physics 2018 May;45(5): 1832-1843. doi: 10.1002/mp.12858, 2018
3. Yoshikazu Maeda, Yoshitaka Sato, Satoshi Shibata, Sayuri Bou, Kazutaka Yamamoto, Hiroyasu Tamamura, Nobukazu Fuwa, Shigeyuki Takamatsu, Makoto Sasaki, Yuji Tameshige, Kyo Kume, Hiroki Minami, Yusuke Saga and Makoto Saito, Effects of organ motion on proton prostate treatments, as determined from analysis of daily CT imaging for patient positioning, Medical Physics 2018 May;45(5):1844-1856. doi: 10.1002/mp.12869, 2018
4. 中嶋英雄、連載 多孔質が創る材料と機能(4)「ポーラス金属の気泡や気孔の作り方」、金属、第 88 巻、第 6 号、64-70 頁、2018
5. 中嶋英雄、連載 多孔質が創る材料と機能(5)「ポーラス金属の機械的性質」、金属、第 88 巻、第 7 号、55-61 頁、2018
6. 中嶋英雄、連載 多孔質が創る材料と機能(6)「ポーラス金属の物理的性質」、金属、第 88 巻、第 8 号、57-64 頁、2018
7. 中嶋英雄、研究所紹介 若狭湾エネルギー研究センター、日本金属学会会報「まてりあ」、第 57 巻、第 8 号、393-394 頁、2018
8. 中嶋英雄、連載 多孔質が創る材料と機能(7)「ポーラス金属の軽量化・制振・衝撃吸収材料への応用」、金属、第 88 巻、第 9 号、49-56 頁、2018
9. 中嶋英雄、連載 多孔質が創る材料と機能(8)「ポーラス金属の吸音材料・電子デバイス冷却器・医療材料への応用」、金属、第 88 巻、第 10 号、65-72 頁、2018
10. 中嶋英雄、連載 多孔質が創る材料と機能(9)「カーケンドール効果を利用したナノポーラス金属の作り方」、金属、第 88 巻、第 11 号、75-82 頁、2018
11. 中嶋英雄、連載 多孔質が創る材料と機能(10)「脱合金化によるナノポーラス金属の作り方」、金属、第 88 巻、第 12 号、73-80 頁、2018
12. 安永和史、辻本和久、高分子材料と金属材料の接合界面、日本金属学会会報「まてりあ」、第 57 巻、第 12 号、606 頁、2018
13. Hideo Nakajima and Takuya Ide, Fabrication, Properties and Applications of Porous Metals with Directional Pores, Materials Science Forum, Vol.933, 49-54, 2018
14. Hideo Nakajima, Yuichi Higuchi, Kazuya Takahashi and Hiroshi Komasa, Biocompatibility of Titanium Implants with Porous Surface Fabricated by Micromachining, Materials Science Forum, Vol.933, 304-308, 2018
15. Hideo Nakajima, Kazufumi Yasunaga, Ryuichiro Yamagishi and Susumu Matsuda, Antimicrobial Effect of Lotus-Type Porous Copper, Materials Science Forum, Vol.933, 314-319, 2018
16. Hideo Watanabe, Katsuhito Takahashi, Kazufumi Yasunaga, Yun Wang, Yasuhisa Aono, Yusaku Maruno and Kenichi Hashizume, Effects of an alloying element on a c-component loop formation and precipitate resolution in Zr alloys during ion irradiation, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.55, 1212-1224, 2018
17. K. Fukumoto, K. Tone, T. Onitsuka and T. Ishigami, Effect of Ti addition on microstructural evolution of V-Cr-Ti alloys to balance irradiation hardening with swelling suppression, Nuclear Materials and Energy, 15, 122-127, 2018.
18. 中嶋英雄、連載 多孔質が創る材料と機能(11)「ナノポーラス金属の強度」、金属、第 89 巻、第 1 号、71-76 頁、2019

19. 阿部知子、市田裕之、森田竜平、大野豊、長谷純宏、高城啓一、畑下昌範、村井耕二、ミュータゲノミクスと変異統合データベースの構築、JATAFF ジャーナル、Vol.7、No.2、19-23 頁、2019
 20. Haruo Fujinaga, Yoshio Sakai, Tatsuya Yamashita, Kuniaki Arai, Takeshi Terashima, Takuya Komura, Akihiro Seki, Kazunori Kawaguchi, Alessandro Nasti, Keiko Yoshida, Takashi Wada, Kazutaka Yamamoto, Kyo Kume, Takashi Hasegawa, Takushi Takata, Masao Honda and Shuichi Kaneko, Biological characteristics of gene expression features in pancreatic cancer cells induced by proton and X-ray irradiation, Int. J. Radiat. Biol. DOI: 10.1080/09553002.2019.1558297, 2019
 21. K. Yasuda, Y. Kajitori, M. Oishi, H. Nakamura, Y. Haruyama, M. Saito, K. Suzuki, R. Ishigami and S. Hibi, Upgrades of a time-of-flight elastic recoil detection analysis measurement system for thin film analysis, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 442, 53-58, 2019
- (2) 国際会議論文(国際会議論文集への掲載。)
1. K. Okuyama, Y. Tamaki, H. Yamamoto, K. Yagi, M. Hayashi, Y. Matsuda, T. Saito, K. Yasuda, K. Suzuki and H. Sano, Fluorine binding with dentin adjacent to fluoride-containing luting materials, International Journal of PIXE, 27, 1-9, 2017
 2. Kyo Kume, Fuyumi Ito, Takashi Hasegawa, Makoto Sasaki and Yoshikazu Maeda, Development of an online dose distribution visualization system (RDD visualization system), Japanese Journal of Medical Physics, Vol.38, Sup.1, pp.76, 2018
 3. K. Morita, B.Tsuchiya, J. Ohnishi, Y. Iriyama, H. Tsuchida, T. Majima and K. Suzuki, High Resolution Li Depth Profiling of Solid State Li Ion Battery by TERD Technique with High Energy Light Ions, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 426, 30-33, 2018
- (3) 国際会議発表
1. Yasushi Kiyono, Kyo Kume, Akira Makino, Tetsuya Mori, Tatsuya Asai, and Hidehiko Okazawa, Changes in the accumulation of ^{18}F -FDG and ^{18}F -FLT in colorectal cancer cells treated with charged particle irradiation under hypoxic condition, World Federation of Nuclear Medicine and Biology (WFNMB) 2018, Melbourne, Australia, 2018.4
 2. Yasushi Kiyono, Akira Makino, Kyo Kume, Tetsuya Mori, Tatsuya Asai and Hidehiko Okazawa, Predictive value of ^{18}F -FDG and ^{18}F -FLT uptake in colorectal cancer treated with charged particle irradiation under hypoxic condition, Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging (SNMMI)2018, Philadelphia, 2018.6
 3. Shusaku Kanaya, Dayna Erdmann, Gyu Min Kim, Masashi Ikegami, Youhei Numata, Tsutomu Miyasaka, Yuji Hazama, Hidefumi Akiyama, Kohtaku Suzuki, Kanta Osonoe, Tomoyuki Yamamoto, Yu Miyazawa, Hiroyuki Toyota and Kazuyuki Hirose, Radiation Evaluation from the Carrier Life Time and Structure Studied of Perovskite Solar Cells for Space Application, World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waicoloa, Hawaii, 2018.6
 4. K. Suzuki, K. Yasuda, R. Ishigami, K. Yasunaga and Y. Nakata, Measurement of α - ^7Li scattering cross-section for time-of-flight and transmission ERDA, CAARI2018, Grapevine, Texas, 2018.8
 5. Kento Torigoe, Yasushi Fukazawa, Tsunefumi Mizuno, Masanori Ohno, Hiromitsu Takahashi, Nagomi Uchida, Koji Tanaka, Kazuhiro Nakazawa, Norbert Werner, Andras Pal, Laszlo Kiss, Jakub Řipa, Gabor Galgoczi, Zsolt Frei, Norbert Tarcai, Zsolt Varhegyi, Teruaki Enoto, Hirokazu Odaka, Yuto Ichinohe, Kyo Kume, Satoshi Mizushima, Satoshi Hatori and Takashi Hasegawa, Performance Study of Large CsI(Tl) Scintillator with MPPC Readout, 5th International Workshop on New Photon-Detectors PD18, The University of Tokyo, Tokyo, 2018.11
 6. Motoki Tanaka, Wataru Kobayashi, Masanori Hatashita and Masaya Oki, Analysis of X-ray resistance mechanism by epigenetic gene expression, 2018 American Society for Cell Biology Annual Meeting, San Diego, 2018.12
 7. Mana Kaneda, Ayane Yagishita, Wataru Kobayashi, Motoki Tanaka, Masanori Hatashita, Hiroyuki Uchida and Masaya Oki, Analysis of resistance mechanism in different radiations by using sir 2, 3, 4 deletion strain, 2018 American Society for Cell Biology Annual Meeting, San Diego, 2018.12

(4) 国内会議発表

1. Kyo Kume, Fuyumi Ito, Takashi Hasegawa, Munetoshi Maeda, Yoshikazu Maeda and Makoto Sasaki, Development of an online dose distribution visualization system (RDD visualization system), 第 115 回日本医学物理学会学術大会, 横浜市, 2018.4
2. Yoshikazu Maeda, Yoshitaka Sato, Tetsuhi Shibata, Sayuri Bo, Kazutaka Yamamoto, Hiroyasu Tamamura, Nobukazu Fuwa, Shigeyuki Sasaki, Makoto Sasaki and Kyo Kume, Interfractional movements of the prostate and seminal vesicles during CT image-guided proton therapy and their impact on the proton range, 第 115 回日本医学物理学会学術大会, 横浜市, 2018.4
3. 庄司英一、大野良記、池内拓海、畑下昌範、セルロース系高分子電解質の特徴を活かした導電性ナノファイバーの創製、第 67 回高分子学会年次大会、名古屋市、2018.5
4. 畑下昌範、庄司英一、イオン照射による表面改質を利用した電極形成のパターン化、第 67 回高分子学会年次大会、名古屋市、2018.5
5. Tomoki Kimura, Yusuke Nakauchi, Jun Kimura, Kohtaku Suzuki, Yoshinori Nakata, Toru Tamagawa, Asami Hayato, Toshio Nakano, Go Murakami and Kazuo Yoshioka, Evolution of Icy Moon's Interior Uncovered by Laboratory Experiment: Modeling of Space Weather by Ion Irradiation, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 幕張メッセ, 2018.5
6. 田中元基、畑下昌範、内田博之、沖昌也、Aft1、Aft2 を介した鉄制御システムによる放射線耐性機構の解析、日本生化学会北陸支部第 36 回大会、福井市、2018.6
7. 羽鳥聡、栗田哲郎、林豊、山田裕章、山口文良、淀瀬雅夫、長崎真也、廣戸慎、清水雅也、和田一人、大矢龍輝、原裕也、瀧上隆太、高山宏一、若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状、第 31 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、東京都市大学、2018.7
8. 佐藤彩花、加藤真奈、小川良平、畑下昌範、田中良和、鍵谷豪、エビ由来ルシフェラーゼを用いたネクローシス可視化システムの改良、第 56 回日本放射線腫瘍学会生物部会学術大会、東京都中央区、2018.7
9. 中田克、関昌子、青木秀之、池田達也、高城啓一、長嶺敬、炭素線照射によりデンプン特性が変化した大麦変異体のスクリーニング、北陸作物・育種学会、長岡市、2018.7
10. 佐藤彩花、加藤真奈、小川良平、畑下昌範、田中良和、鍵谷豪、エビ由来ルシフェラーゼを用いたネクローシス可視化システムの改良、第 31 回北里大学バイオサイエンスフォーラム、相模原市、2018.8
11. 栗田哲郎、若狭湾エネルギー研究センターシンクロトロンにおけるビーム出射制御系の開発、第 15 回日本加速器学会年会、長岡市、2018.8
12. 近藤夏子、櫻井良憲、梶原堯之、高田卓志、保田隆子、久米恭、尾田正二、鈴木 実、放射線脳壊死では脂質メディエーター・リゾホスファチジルコリンが上昇し、その受容体 P2x4 を介してミクログリアを活性化、平成 30 年度若手支援技術講習会、茅野市、2018.9
13. 鈴木章弘、増田美奈、畑下昌範、櫻井明彦、冬虫夏草が生産するコルジセピンの誘導体化と、その性質、第 13 回北陸地区化学工学研究交流会、福井市、2018.9
14. 門脇春彦、石神龍哉、副島吾郎、岩井紘基、中村保之、30 kW ファイバーレーザを用いた原子炉圧力容器模擬材の切断と粉じん発生の評価、日本原子力学会 2018 年秋の大会、岡山大学、2018.9
15. 山岸隆一郎、モーションキャプチャ技術を活用した非 RI 環境での模擬除染、日本原子力学会 2018 年秋の大会、岡山大学、2018.9
16. 大西崇太、杉浦康友、畑下昌範、櫻井明彦、イオンビーム照射によるセルラーゼ欠失白色腐朽菌の作出、化学工学会第 50 回秋季大会、鹿児島市、2018.9
17. 中嶋英雄、若狭湾エネルギー研究センターにおける研究活動の現状と将来、若狭湾エネルギー研究センター第 20 回研究報告会、福井大学、2018.10
18. 嶋津正、小型自走式レーザー除染システム、若狭湾エネルギー研究センター第 20 回研究報告会、福井大学、2018.10
19. 久米恭、陽子線オンラインモニタリングシステム、若狭湾エネルギー研究センター第 20 回研究報告会、福井大学、2018.10
20. 櫻井明彦、畑下昌範、冬虫夏草変異株を用いた新規抗腫瘍物質の生産、若狭湾エネルギー研究センター第 20 回研究報告会、福井大学、2018.10
21. 安永和史、高分子材料上の金属めっきの密着性に関する研究、若狭湾エネルギー研究センター第 20 回研究報告会、福井大学、2018.10
22. 鈴木耕拓、水素吸蔵材料のための大気中イオンビーム分析手法の開発、若狭湾エネルギー研究センター第 20 回研究報告会、福井大学、2018.10

23. 羽鳥聡、栗田哲郎、林豊、山田裕章、山口文良、淀瀬雅夫、長崎真也、廣戸慎、清水雅也、大矢龍輝、湊上隆太、若狭湾エネルギー研究センター WERC 加速器施設の現状、若狭湾エネルギー研究センター第 20 回研究報告会、福井大学、2018.10
24. 三浦孝太郎、高城啓一、イオンビーム照射による山田錦のテーラーメイド育種ライブラリの開発と福井県に適した「新山田錦」の育成、若狭湾エネルギー研究センター第 20 回研究報告会、福井大学、2018.10
25. 高城啓一、生物資源研究室の活動概要、若狭湾エネルギー研究センター第 20 回研究報告会、福井大学、2018.10
26. 松本英樹、前田宗利、陽子線頭頸部がん治療における放射線性口腔粘膜障害の発症動態および病態の解析、若狭湾エネルギー研究センター第 20 回研究報告会、福井大学、2018.10
27. 櫻井良憲、近藤夏子、高田卓志、呼尚徳、久米恭、前田宗利、伊東富由美、Silicon-on-insulator microdosimeter を用いた粒子線場における脳壊死形成に関するマイクロドシメトリ、若狭湾エネルギー研究センター第 20 回研究報告会、福井大学、2018.10
28. 清野泰、久米恭、子宮頸がんに対する粒子線治療の有効性と治療効果予測に関する基礎的検討、若狭湾エネルギー研究センター第 20 回研究報告会、福井大学、2018.10
29. 勝山俊夫、石神龍哉、寺田恵一、慶光院利映、岩堀一夫、鈴木雅也、福村康和、新材料を用いた超小型レーザービーム走査ミラーの作製とそれを用いた眼鏡型ディスプレイの実現、若狭湾エネルギー研究センター第 20 回研究報告会、福井大学、2018.10
30. 土屋文、高廣克己、鈴木耕拓、ラジカル含有リチウム酸化物を用いた常温水分解法による水素発生システムの開発、若狭湾エネルギー研究センター第 20 回研究報告会、福井大学、2018.10
31. 篠田佳彦、遠藤伸之、山岸隆一郎、マグネシウムの酸化還元反応を活用した水素エネルギー循環サイクルの構築、若狭湾エネルギー研究センター第 20 回研究報告会、福井大学、2018.10
32. 鍵谷豪、佐藤彩花、加藤真奈、小川良平、田中良和、畑下昌範、高発光型ネクロシス可視化システムへの改良、日本放射線影響学会第 61 回大会、長崎市、2018.11
33. 田中元基、畑下昌範、内田博之、沖昌也、エピジェネティックな発現制御による X 線耐性機構の解析、日本放射線影響学会第 61 回大会、長崎市、2018.11
34. 前田宗利、松本英樹、冨田雅典、低線量域において ATM が細胞核-細胞質間情報伝達に果たす役割、日本放射線影響学会第 61 回大会、長崎市、2018.11
35. 松本英樹、前田宗利、久米恭、平山亮一、鶴沢玲子、古澤佳也、粒子線がん治療時の正常組織被ばく線量の生物学的推定、日本放射線影響学会第 61 回大会、長崎市、2018.11.
36. 柴岡 龍、青木祐太郎、Glenn Harvel、田口 光正、長澤 尚鼠、畑下昌範、久米恭、佐倉俊治、砂川武義。PVA-KI ゲル線量計を用いた線量評価技術研究、第 7 回 3D ゲル線量計研究会、金沢大学鶴間キャンパス、2018.11
37. 門脇春彦、レーザー工法を用いた原子炉圧力容器模擬材の切断とダンパー材および粉じん評価、レーザー応用技術 産学官連携成果報告会(平成 30 年度)、福井大学附属国際原子力工学研究所、2018.12
38. 金田真奈、田中元基、畑下昌範、内田博之、沖昌也、sir 遺伝子破壊に伴う X 線耐性機構の解明、第 5 回北陸エピジェネティクス研究会、富山市、2018.12
39. 畑下昌範、受粉作業や着果剤処理が不要で、周年栽培可能な高品質ミディトマトの育成、平成 30 年度園芸学会北陸支部大会、金沢市、2018.12
40. 高岡弘典、西畑善丸、高城啓一、イオンビーム照射種子を利用したイオンビーム育種、園芸学会北陸支部 金沢市、2018.12
41. K. Suzuki, Performance of the in-air ERDA system at WERC, 第 19 回「イオンビームによる表面・界面解析」特別研究会、京都大学宇治キャンパス、2018.12
42. 久米恭、長谷川崇、水嶋慧、山東新子、鳥居建男、瀧田正人、宇宙機搭載用機器に対する高エネルギー陽子線照射技術の開発、平成 30 年度東京大学宇宙線研共同利用研究成果発表会、東京大学、2018.12
43. 中嶋英雄、放射性同位元素を用いたトレーサ拡散の物理、大阪ニュークリアサイエンス協会第 27 回放射線利用総合シンポジウム、大阪大学中之島センター、2019.1
44. 近藤夏子、櫻井良憲、梶原堯之、高田卓志、保田隆子、久米恭、尾田正二、鈴木 実、放射線脳壊死では脂質メディエーター・リゾホスファチジルコリンが上昇し、その受容体 P2x4 を介してミクログリアを活性化、第 9 回国際神経放射線生物学会、桑名市、2019.2 月
45. 山岸隆一郎、廃止措置セミナー ロボットレーザー除染実習、JAEA 櫛葉遠隔技術開発センター、2019.2
46. 林真人、高野真希、畑下昌範、星野一宏、子囊菌 *Talaromyces trachyspermus* による *Spiculisporic acid* の効率的生産、日本農芸化学会 2019 年度大会、東京農業大学、2019.3

47. 中嶋英雄、第 64 回日本金属学会賞受賞記念講演「材料の一方方向性多孔質化と機能」、日本金属学会 2019 年春期(第 164 回)講演大会、東京電機大学、2019.3

3.2. 特許

平成 30 年度における特許出願、特許登録は次のとおりである。

(1) 特許出願

1. 「車輻型レーザー照射装置、及びアーム型レーザー照射装置」(特願 2018-182309)嶋津正、桑室直俊

(2) 特許登録

1. 「放射線モニタリングシステム」(特許第 6493859)伊東富由美、久米恭

3.3. 品種

平成 30 年度における品種出願、品種登録は次のとおりである。

(1) 品種出願

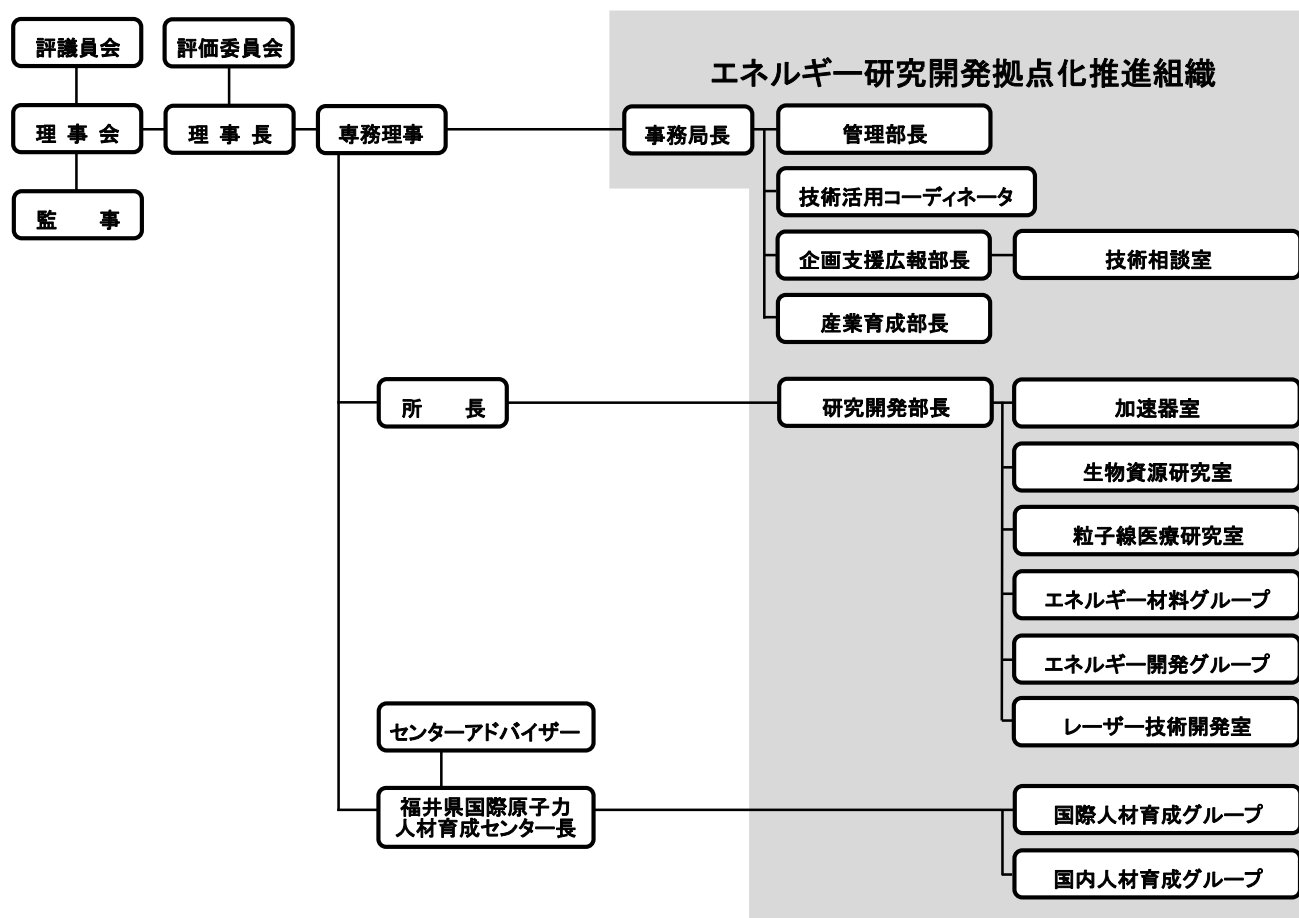
1. 「フォルトナ」畑下昌範、高城啓一、井村裕治、大城閑 品種登録出願番号 第 33134 号
2. 「ルキナ」畑下昌範、高城啓一、前田博和、大野泰希 品種登録出願番号 第 33672 号

(2) 品種登録

なし

公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター 組織図

(平成 30 年 4 月 1 日 現在)



平成 30 年度

公益財団法人 若狭湾エネルギー研究センター

研 究 年 報 第 21 卷

発行: 令和元年 10 月

公益財団法人 若狭湾エネルギー研究センター

〒914-0192 福井県敦賀市長谷 64 号 52 番地 1

TEL.0770-24-2300(代表) FAX.0770-24-2303