

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

令和元年度 第22巻

Annual Report of the Wakasa Wan Energy Research Center

Vol.22 2019



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 配管の遠隔レーザー切断技術開発	7
2.1.1.3 レーザー除染の効率化の検討	8
2.1.1.4 大型水槽を用いたレーザー切断時粉じん挙動データ取得及び調査	10
2.1.1.5 レーザー切断パラメータ自動制御向け信号処理条件最適化調査検討	12
2.1.1.6 空冷式金属製レーザー遮蔽体の特性調査検討	13
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	14
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	15
2.1.2. 未利用エネルギー利用技術開発	17
2.1.2.1 自然エネルギーによる水素製造のためのマグネシウム再生技術の開発	17
2.2. 医療分野	20
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	20
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	20
2.2.1.2 粒子線によるヒト iPS 由来神経細胞の細胞死・炎症メカニズム解明	22
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	25
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	26
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	28
2.2.1.6 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	30
2.2.2. 粒子線照射技術の高度化研究	31
2.2.2.1 「放射線の見える化」膜の開発	31
2.2.2.2 粒子線の線質測定技術開発	33
2.3 農業・生物分野	34
2.3.1. 植物・菌類のイオンビーム育種研究	34
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	34
- 垂直ビームライン炭素線のエネルギー推定 -	
2.3.1.2 重イオンビームにより誘発される染色体再構成を利用した新育種技術の開発	37
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	39

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	43
2.3.1.5	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	45
2.3.1.6	イオンビーム照射によって構築された <i>Schizophyllum commune</i> 変異株を用いた リグノセルロースからの直接有機酸生産	45
2.3.1.7	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	46
2.3.2.	生物資源のDNA情報・特性等の解析評価研究	47
2.3.2.1	福井県産生物資源の DNA マーカーの開発	47
2.3.2.2	福井県産生物資源の代謝産物分析	48
2.3.2.3	食品の抗酸化活性評価法の開発	49
2.3.3.	植物工場関連技術開発	50
2.3.3.1	ミディトマト新品種の時季における着果特性	50
2.3.3.2	DNA マーカーを用いたトマトの病害抵抗性検定	52
2.4.	多様な分野の活動を支える技術開発	53
2.4.1.	加速器技術の開発・高度化	53
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	53
2.4.1.2	シンクロトロンの出射用高周波信号の最適化	55
2.4.1.3	マルチバンド RFKO によるビーム取り出し法の高度化に関する研究	57
2.4.1.4	シンクロトロン出射ビームラインのプロファイルモニタの改良	59
2.4.2.	加速器利用分析技術の開発・高度化	61
2.4.2.1	全固体リチウムイオン電池のリチウム分析	61
2.4.2.2	大気雰囲気におけるリチウム酸化物の水素濃度分布その場イオンビーム計測 の技術開発	62
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	64
2.4.2.4	イオンビームを用いたセラミックにおける軽元素分析	66
2.4.2.5	大立体角 TOF-ERDA 測定装置に用いる分割型シリコン半導体検出器の性能評価	67
2.4.2.6	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	69
2.4.2.7	フィルタードアーク蒸着法を用いて作製した ta-C:H 膜の水素含有量	70
2.4.2.8	歯冠修復用レジンプロックより接着セメントを介した歯質内へのフッ素浸透	71
2.4.2.9	複合核共鳴ピークプロファイル解析用のモデル関数検証のための後方散乱測定	73
2.4.3.	放射線場で利用される機器・材料の評価技術開発	74
2.4.3.1	熱処理されたジルコニウム合金の析出物の分析	74
2.4.3.2	動的変形観察手法を用いた照射硬化量測定技術の高度化	76
2.4.3.3	人工衛星搭載用 CMOS 撮像検出器と民生回路部品の耐放射線シミュレーション	78
2.4.3.4	GaN HEMT 動作中のプロトン照射効果	80
2.4.3.5	陽子線および重粒子線を用いた衛星搭載デバイスの放射線耐性の検証	81
2.4.3.6	超小型衛星搭載中性子検出器の陽子飛跡性能評価と陽子線耐性試験	83
2.4.3.7	宇宙放射線計測装置の放射線耐性試験	84
2.4.3.8	宇宙用電子機器の高エネルギー荷電粒子耐性の確認	86
2.4.3.9	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(3)	88
2.4.3.10	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	90

2.4.3.11	超小型衛星搭載用電子機器の放射線耐性調査	91
2.4.3.12	放射線遮蔽用可とう性材料の性能評価	92
2.4.3.13	低放射化建築用部材の性能評価研究	93
2.4.4.	材料技術の開発	94
2.4.4.1	燃料電池車向け水素吸蔵合金の開発	94
2.4.4.2	フレキシブル性と耐久性を有する導電性皮膜の開発に関する調査研究	96
2.4.4.3	超強加工による微細結晶粒金属材料の創製と評価	98
2.4.4.4	Ag/ガラス界面の接合強度に与える界面微細構造の影響	99
3.	外部発表、特許、品種登録	100
3.1.	外部発表	100
3.2.	特許	106
3.3.	品種	106

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。

令和元年度は、第4期中期事業計画の最終年度にあたり、これまでの取組みを十分に踏まえ、計画の柱と位置付ける「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、粒子線がん治療普及に向けての高度化研究、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、加速器を利用した分析技術や材料評価技術の開発を行いました。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しました。

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、令和元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、太陽エネルギー、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、4年目を迎えた令和元年度においては、水素吸蔵合金、水素エネルギーの循環サイクル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、令和元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2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 Decommissioning

門脇春彦^{*1}

Haruhiko KADOWAKI

Abstract

We have developed a laser decontamination system for the nuclear plants. We evaluated the performances of the system for the efficiency of the decontamination, prevention of the scattering of the contaminated dust and the safety measures against direct and reflected laser beam by application to the samples made with structural materials used in nuclear plants. “Hot runs”, the tests for the radiated materials were also demonstrated for the people belonging to the companies with interest in decommissioning.

要約

原子力プラントの実機材を対象としたレーザー除染システムを開発し、実機材に対してレーザー除染を行った。汚染粉じん対策及びレーザー光対策に問題が無い事が確認でき、実機材に対する除染効率の評価や放射線管理区域内での運用データの取得を行った。また、ホット試験は、廃止措置に興味を持つ企業の立ち合いのもと実施した。

緒言

原子力プラントの解体においては大量の廃棄物が発生するため、作業員の被ばく低減、処分費用の低減、資源再利用の観点から、廃棄物の減容化を目的としたクリアランスレベルへの除染が求められているが、既存の除染技術であるブラスト方式では、大量の研削材を使用するため、研削材と同量の二次廃棄物が発生すること等が課題となっている。

実機材を対象としたレーザー除染では、規模として A4 用紙サイズのトレイに載せた汚染試料を想定し、粉じん対策を考慮したレイアウトを考案した。本レイアウトの設計方針は、レーザー除染で発生する粉じん対策として、粉じんが汚染していることを前提に、処理空間を狭く設定して吸引換気の流れを制御するとともに、レーザーの安全対策として密閉環境を設定することである。

本年度は上記のレーザー除染システムを用いて実機材を用いた実験を実施した。

成果の概要

放射線管理区域内でのレーザー除染の運用(粉じん対策、レーザーの安全対策)について検討し、レーザー除染システムの設計を行った(図 1)。また、日本原子力研究開発機構ふげんの放射線管理区域内において、CW レーザーとレーザー除染システムを組み合わせ実機材を対象としたホット試験を実施した(図 2)。その結果、レーザー除染システムを用いることで、汚染した粉じんの流れを制御でき、レーザーの安全対策にも問題が無いことを確認した。さらに、除染効率や運用データを取得・評価した。ホット試験は、廃止措置に興味を持つ企業の立ち合いのもと実施した(図 3)。



図 1 レーザー除染システムの外観

結言

原子力プラントの実機材を対象としたレーザー除染システムを試作し、ホット試験にて汚染した粉塵の流れを

^{*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。

制御でき、レーザーの安全対策にも問題が無いことを確認した。現在のレーザー除染の運用コストは、既存のブラスト方式と比較して高いが、除染効率や運用データの取得・評価から、二次廃棄物の発生量が少なくできることを確認した。

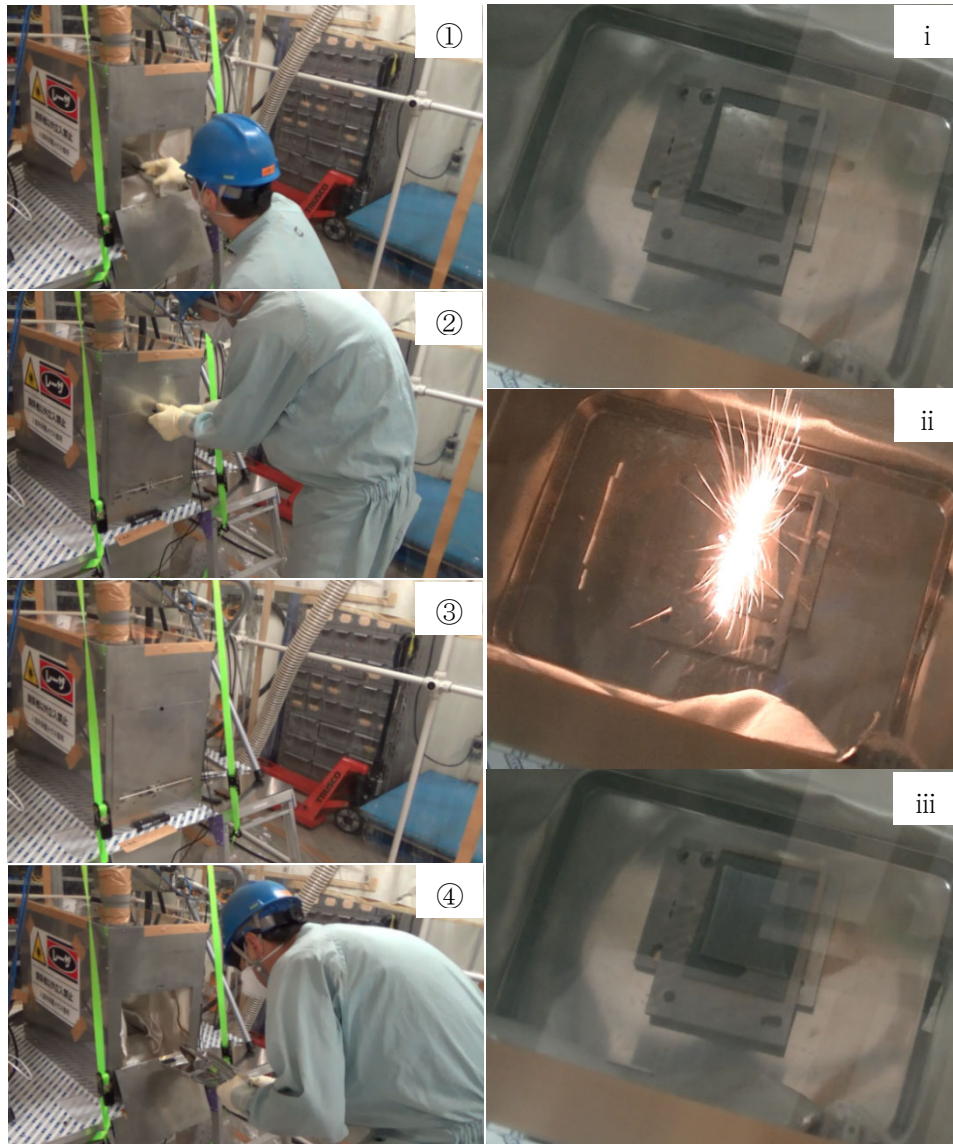


図2 レーザー除染の様子

①試料配置、②試料交換窓の閉止、③レーザー照射中、④試料取出し
i レーザー照射前、ii レーザー照射中、iii レーザー照射終了直後



図3 レーザー除染時の見学同行の様子

レーザー照射中の除染室内をビデオカメラで撮影し、リアルタイムで照射状況を外部モニターで見ている様子。

2.1.1.2

配管の遠隔レーザー切断技術開発
Development of Remote Laser Cutting for Steel Pipe門脇春彦^{*1}

Haruhiko KADOWAKI

Abstract

Dismantling and removal work in the nuclear power plant is often carried out in a narrow space. The device used in such work has to have small size and portability. We developed the laser cutting apparatus which attains the miniaturization of a laser head portion. We demonstrated the performance of the apparatus by remotely cutting a pipe with the nominal outer diameter of 250A.

要約

原子力プラントの廃止措置では、設備・配管の解体撤去工事において、設置レイアウトの関係上、狭隘部での運用があることから、切断機材には小型・可搬式な仕様が要求される。このような現場状況を考慮したレーザー切断機材を試作し、その運用試験として 250A 配管のレーザー切断を行うことで、遠隔操作により対象物の切断が出来ることを確認した。

緒言

原子力プラントの廃止措置では、設備・配管の解体撤去工事において、設置レイアウトの関係上、解体対象物が狭隘な空間に設置されている場合が多い。このような狭隘部での配管の 1 次切断を想定した場合、切断機材には小型・可搬式の仕様が要求されることから、解体撤去工事現場での状況を考慮したレーザー切断工法を検討した。

成果の概要

狭隘部に設置された外径 267.4mm の配管(250A 配管)を対象としたレーザー切断システムとして、奥行寸法 195 mm、重量 1.0 kg の極めて小型なレーザー切断ヘッド(図1)及び、その小型レーザー切断ヘッドを切断対象の 250A 配管の外周に沿って動作させるレーザー切断機材(図 2)を試作した。本システムを用いた 250A 配管の切断中の様子を図 3 に示すが、配管に取り付けたレーザー切断機材により小型レーザー切断ヘッドを外周に沿って走査でき、レーザー照射により貫通孔の形成が可能なことを確認した。また、この試験を通じ、レーザー切断機材のモーター及びレール、ヘッド搭載用マウント等に改善の余地があることが確認できた。

結言

狭隘部に設置された配管を対象としたレーザー切断システムを試作し、運用試験として 250A 配管の切断を実施した。試作したレーザー切断システムには改善の余地があり、今後検討を進める。

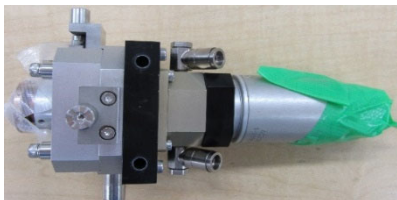


図 1 小型レーザー切断ヘッド

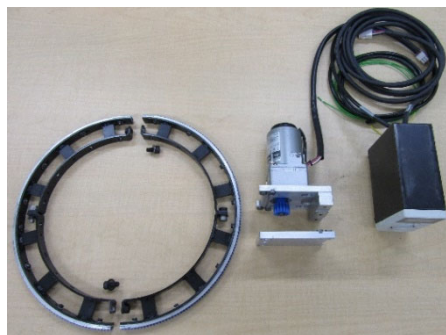


図 2 レーザー切断機材



図 3 レーザー切断システムを使用した 250A 配管の切断

^{*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。

2.1.1.3

レーザー除染の効率化の検討 Examination of Increase Efficiency for Laser Peeling

門脇春彦^{*1}

Haruhiko KADOWAKI

Abstract

We developed method and device for easily decontaminating inner surface of pipe polluted with radioactive isotopes by using laser exfoliation. The pulse laser beam is used as a laser beam for the decontamination. The exfoliation of contaminant simulated layer on the inner surface of the pipe was efficiently carried out by irradiating high-peak pulse laser beams.

要約

原子力プラントの廃止措置において、解体撤去物として想定される配管を対象としたレーザー除染技術の開発を行った。パルスレーザーは、パルス照射時のピークパワーが高く、金属表面の模擬汚染層を効率よく除去できることから、レーザー除染に適していることが確認できた。

緒言

原子力プラントの廃止措置では、配管等が 2 分割～4 分割されて瓦状になった解体撤去物が想定される。解体撤去物毎に放射性物質量の差異はあるものの、配管であれば内表面にコバルトの放射性同位体が付着し、汚染されている前提で処理が進められる。

高出力パルスレーザーは、パルス照射時のピークパワーを高く設定できる特徴があり、除染効率を高く保つことができるため、この特徴を活かすことでレーザー除染技術を実機適用レベルまで向上させ、原子力プラントの廃止措置作業等に貢献することを目指す。

成果の概要

解体撤去物として配管を対象とした場合、形状は 2 分割～4 分割されて瓦状になったものであり、内表面にコバルトの放射性同位体が付着し、汚染されている前提で処理が進められることから、配管を半割りし、コバルトの表面付着を模擬した試験体を作製した。レーザー除染の試験では、高出力パルスレーザー及び CW(連続発振)レーザーを用いて除染効率の比較・検討を行い、高出力パルスレーザーの方が模擬汚染層を効率よく除去できることを確認した。金属表面の剥離ができレーザー除染に適していることが確認できた。

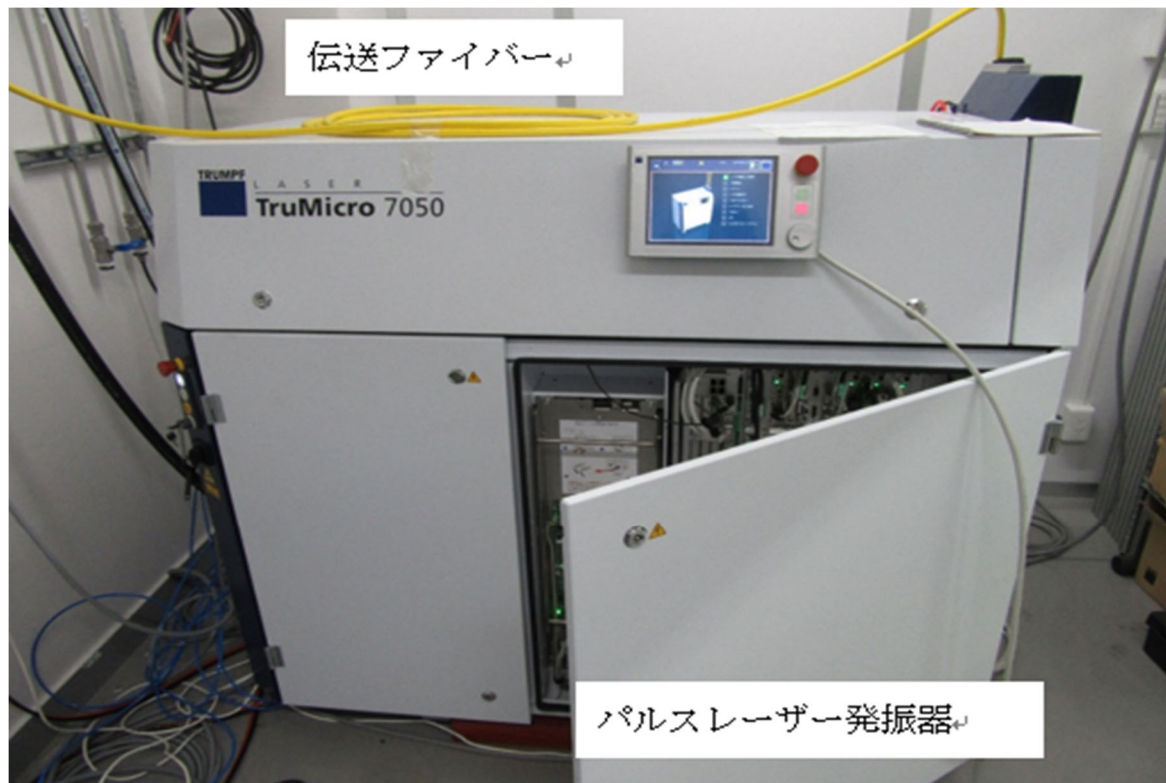
結言

解体撤去物である配管を模擬した試験体を作製し、高出力パルスレーザー及び CW レーザーを用いたレーザー除染試験を行うことで、パルスレーザーの方が模擬汚染層を効率よく除去できることを確認した。

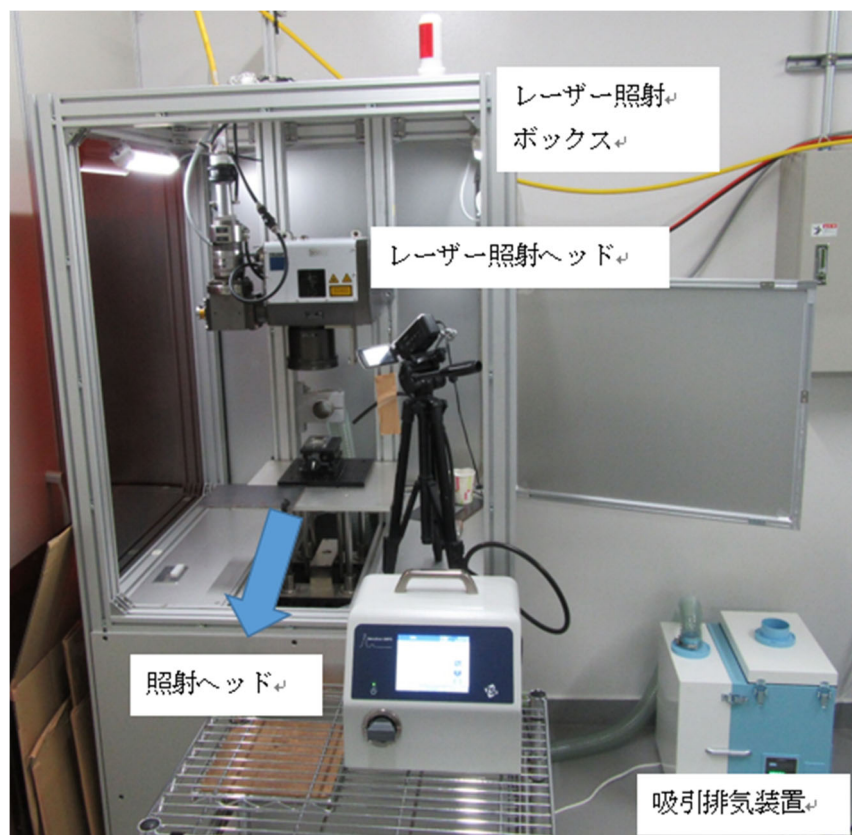
現在のレーザー除染の運用コストは、レーザー機器の機材費が高いために初期費用が高くなり、既存のブラスト方式と比較して割高となるが、レーザー市場においては、5 年経過すると出力単価がおおよそ半額になっていることから、5 年後ないし 10 年後にはレーザー機材費が現実的な価格帯になり、除染工法の一つとして十分に選択候補になることが期待される。

^{*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。



高出力パルスレーザー 本体



試験体へのレーザー照射装置

2.1.1.4

大型水槽を用いたレーザー切断時粉じん挙動データ取得及び調査
Investigation and Data Acquisition of Dust Transition while Laser Cutting
under The Using Huge Water Wank
植村勝^{*1}、吉川勝裕^{*1}、安藤静治^{*2}
Masaru UEMURA, Katsuhiko YOSHIKAWA and Seiji ANDO

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. During the cutting process, we have obtained transfer amount of dust and dross to water and atmosphere and particle size as function of the cutting condition.

We investigated purification method of the turbid water and observation method of condition of the test piece in turbid water.

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及び水中への移行量等のデータを取得した。また、切断によって発生する濁水の浄化方法の検討及び濁水中における切断体の監視方法を検討した。

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及び水中への移行量等のデータを取得した。

切断によって発生する濁水の浄化方法の検討及び濁水中における切断体の監視方法の検討を行った。

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。

- ・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(水中粉じん回収装置、ろ過装置(写真1)、水中レーザースキャナ固定装置等)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。
- ・ろ過装置による濁水のろ過試験を行った。ろ過後の水質分析も行った。
- ・濁水中における切断体を水中レーザースキャナにてスキャンしその性能試験を行った(写真2)。
- ・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、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・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。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 ろ過装置

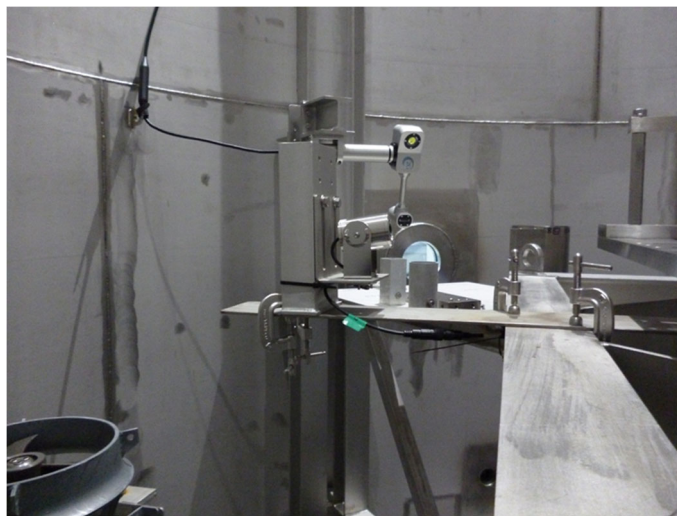


写真2 水中レーザースキャナ

2.1.1.5

レーザー切断パラメータ自動制御向け信号処理条件最適化調査検討
Relationship between Sampling Conditions and Statistical Characteristics in Analyzing Fluctuating Thermal Emission from Works under a Laser Irradiation西尾繁^{*1}

Shigeru NISHIO

Abstract

Relationship between sampling conditions, *i.e.* sampling period and number of samples, and statistical characteristics in analyzing fluctuating thermal emission from works under a laser irradiation was investigated to find the optimum sampling conditions which are used for the automatic laser-cutting parameter control system. It was found that the statistical characteristics of fluctuating thermal emission are maintained within the range of sampling period and number of samples below 0.1 ms and from 10 to 50, respectively.

要約

レーザー照射中にワークが発する熱輻射光の時間的揺らぎを入力として利用するレーザー切断条件自動制御システムの実用化に資するために、揺らぎのサンプリング条件(サンプリング周期と標本数)と算出される統計量(平均値、標準偏差および変動係数)の関係を調べた。その結果、サンプリング周期<0.1ms、標本数 10~50 程度の条件で熱輻射光の時間的揺らぎの統計的性質が保たれることが分かった。

緒言

レーザー光をワークに照射した時にワークが発する熱輻射光の時間的な揺らぎと切断品質の間には良い相関のあることが知られている。このことから揺らぎを特徴付ける統計量の一つである変動係数を制御入力として利用するレーザー切断条件自動制御システムの開発が進んでおり、近い将来、幅広い分野への適用が期待されている。

レーザー切断条件と揺らぎが一对一の関係にあるとしても、算出される変動係数は熱輻射光のサンプリング条件、つまりサンプリング周期と一回の制御周期で処理する光信号データ数(標本数)に依存して変化し得る。元の光信号の統計的性質が保たれる範囲でサンプリング周期を長く取り、なおかつ標本数を小さくすれば、より低廉なハードウェアを使用できるため、この範囲を知ることには実用上大きな意味がある。

本件では、レーザー光をワークに照射した時にワークが発する熱輻射光の時間的な揺らぎの統計的性質が保たれる範囲を把握するため、サンプリング条件(サンプリング周期と標本数)と算出される統計量(平均値、標準偏差および変動係数)の関係を調べた。

成果の概要

SS400 あるいは SUS304 の厚さ 10、20、30mm 程度の試験体を対象に、レーザー出力 1.5kW、アシストガス圧 0.3MPa、ワーク移動速さ 1mm/s の条件でレーザー切断を実施し、光信号をサンプリング周期 $10\mu s$ の条件で 10 秒間取得した。これらのデータ(以後「元データ」と呼ぶ)から、評価基準となる統計量(平均値、標準偏差および変動係数)を算出した。この元データに対して、様々なサンプリング周期での再サンプリング、標本数の調整を施した後、同様に統計量を計算し、これらの値を元データから得られた評価基準と比較した。その結果、元データの統計的性質はサンプリング周期<0.1ms、標本数 10~50 程度の範囲で保たれることが分かった。

結言

レーザー加工パラメータ自動調節システムを実現するためには、まず、十分に正確な光信号入力が必要であることは言うまでもない。本事業で得られた知見は、今後システム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・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

空冷式金属製レーザー遮蔽体の特性調査検討

Development of Air-Cooled Optical Dumper Usable in High-Power Laser Application.

西尾繁^{*1}

Shigeru NISHIO

Abstract

The optical dumper made of 8 mm thick SS400 plate lined with an air cooler was subjected to laser irradiation with 1.5 kW power to test its practicability. The one lined with a water cooler was also tested for comparison. Although the air-cooled dumper was heated up much easier under laser irradiation than the water-cooled one, it was not pierced by laser beam. In addition, the air-cooled dumper more effectively suppressed the light back-reflected on its surface than the water-cooled one. For these reasons, the air-cooled dumper is found to be advantageous over the water-cooled one as a practical metal-based optical dumper.

要約

銅製の空冷冷却器で裏打ちした四三酸化鉄仕上げ SS400 板レーザー遮蔽体の実用性を、水冷冷却器で裏打ちした場合と比較して検討した。1.5kW のレーザー照射を受けた空冷冷却レーザー遮蔽体の温度は水冷冷却の場合と比較して 450～550℃程度高くなったが、それでもレーザー光は貫通しなかった。加えて、空冷冷却レーザー遮蔽体の表面でのレーザー光の反射は水冷冷却の場合と比較して弱いことも分かった。これらの理由で、空冷冷却レーザー遮蔽体は水冷冷却方式と比べてより実用的であることが分かった。

緒言

熱輻射光の時間変化を利用したレーザー加工パラメータ自動調節に適用できるレーザー遮蔽体として、熱輻射光の強度の小さい金属製の天板を水冷式の冷却器で裏打ちした構造物が検討されている。しかし、水冷式の冷却器をロボット、ステージといった大電力デバイスと組み合わせると、万が一漏水が発生した場合、重大な電気事故に発展する恐れがある。これを避けるために冷却方式を空冷に置き換えるの是一案だが、空冷方式が実用的、つまり高出力レーザー光を貫通させず、さらに表面反射を抑制出来るかまだ明らかでない。本件は、銅製の空冷冷却器で裏打ちした四三酸化鉄仕上げ SS400 板が高出力レーザー加工用金属製レーザー遮蔽体として水冷方式より実用的かどうか検討するために実施したものである。

成果の概要

厚さ 8mm の四三酸化鉄仕上げ SS400 板を銅製の空冷冷却器で裏打ちしたレーザー遮蔽体に対し、1.5kW のレーザー光を間欠的に 750 秒照射した時のレーザー遮蔽体の温度上昇を SS400 板に挿入した熱電対とサーモグラフィで計測した。加えて目視でレーザー遮蔽体等の外観変化も観察した。比較のために同じ SS400 板を銅製的水冷冷却器で裏打ちしたレーザー遮蔽体についても同様の試験を実施した。

試験の結果、水冷冷却の場合、レーザー照射領域直下のレーザー遮蔽体の温度は 140～160℃に留まったが、空冷冷却の場合は 600～700℃に達した。しかしそれでもレーザー光は貫通しなかった。

加えて空冷冷却の方が、水冷冷却より遮蔽体表面でのレーザー光の反射が弱いことも分かった。これは、冷却効率が低いことによって、レーザー照射領域を十分にカバーできる広い溶融/損傷領域が形成されたためと考えられる。

結言

レーザー遮蔽体にはレーザー光の貫通と表面での反射を防ぐ能力が求められる。四三酸化鉄仕上げ SS400 板を銅製の空冷冷却器で裏打ちしたレーザー遮蔽体は、この両面で好ましい性質を持っていることが分かった。今後遮蔽体の材質や空冷条件をさらに検討することによって、より実用的な空冷式金属製レーザー遮蔽体が開発され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・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}、楠本利行^{*1}、山岸隆一郎^{*2}、辻正和^{*3}、西川正彦^{*4}、辻勝巧^{*5}
Akihiko TSUBOI, Toshiyuki KUSUMOTO, Ryuichiro YAMAGISHI, Masakazu TSUJI,
Masahiko NISHIKAWA and Katsunori TSUJI

Abstract

For the development of laser peeling machine to maintain the waterproof film coated on the construction and civil engineering structure, we performed evaluation for peeling performance by irradiation of pulse laser on epoxy-based and urethane-based coating films.

要約

建築・構造物の防水塗膜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、パルスレーザーを用い、エポキシ系およびウレタン系それぞれの塗膜に対する剥離性能評価を行った。

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、作業者にも反動(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

kW 級ナノ秒パルスレーザーによる防水塗膜剥離の条件最適化および施工効率評価を行った。エポキシ系塗膜では、実用化レベルの $2.5 \text{ m}^2/\text{h}$ を超える $2.7 \text{ m}^2/\text{h}$ を達成するものと、 $0.88 \text{ m}^2/\text{h}$ に留まるものがあることが分かった。また、ウレタン系塗膜では、エポキシ系における最低効率の照射条件 ($0.88 \text{ m}^2/\text{h}$) ですら、剥離性能が得られないことが分かった。

剥離試験と同時に実施した高速度カメラ画像観察の結果からは、エポキシ系塗膜がレーザー照射に伴ってプラズマ爆発を起こし、その衝撃波によっても剥離が進行するのに対し、ウレタン系塗膜では、レーザー照射により塗膜がゲル化し、それらがエアブローに排出される、塗膜の系統毎で異なる除去プロセスを経ている状況が確認できた。

これらの塗膜毎のレーザー照射に対する挙動の違いを明らかにするため、それぞれの塗膜に対して紫外・可視・近赤外吸収分光を行ったところ、ウレタン系塗膜ではエポキシ系塗膜の $1/10$ 程度のレーザー吸収効率しかないことが分かった。この光吸収効率の差により、ウレタン系塗膜ではレーザー光のもつエネルギーが効率的に作用せず、プラズマ爆発による剥離が起こらなかったと推測される。

また、照射前後のウレタン系塗膜に対して FT-IR 分析を行った結果からは、レーザー照射により生じるゲル状のものが、脱炭酸反応を起こした熱分解生成物であるという示唆を得た。

結言

パルスレーザーによる防水塗膜剥離加工による剥離効率向上を試みた。エポキシ系塗膜ではレーザー照射に伴うプラズマ爆発および衝撃波が剥離を進行させるのに対し、ウレタン系塗膜では熱的作用のみによる塗膜の分解のみが進行し、剥離性能が得られないことが分かった。その原因を探るため、紫外・可視・近赤外吸収分光を行ったところ、ウレタン系塗膜ではレーザーエネルギーの作用効率が低いことが分かった。レーザー塗膜剥離装置開発のためには、さらなる多角的条件検討が必要である。

^{*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 Resistant Robot Laser Decontamination and Practical Training
of Human Resource Development for Decommissioning

山岸隆一郎^{*1}、吉川勝裕^{*2}
Ryuichiro YAMAGISHI and Katsuhiro YOSHIKAWA

Abstract

We carried out development of basic technology for radiation resistant robot laser decontamination machine constructed by the WERC and training of human resource development for decommissioning using our laser decontamination setups.

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、非放射線環境下にて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、令和 2 年 2 月に、福島県双葉郡楢葉町に所在する JAEA 楢葉遠隔技術開発センターにて、22 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。

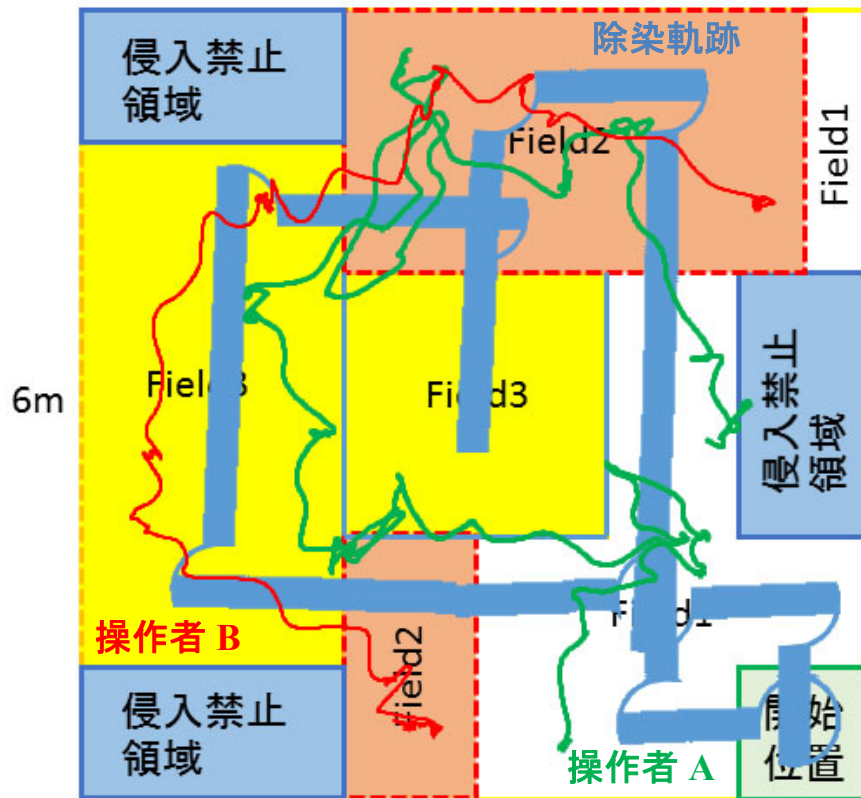


図1 モーションキャプチャエリア内に設定された各領域と、床面除染軌跡および、操作者(AとB)の軌跡の一例

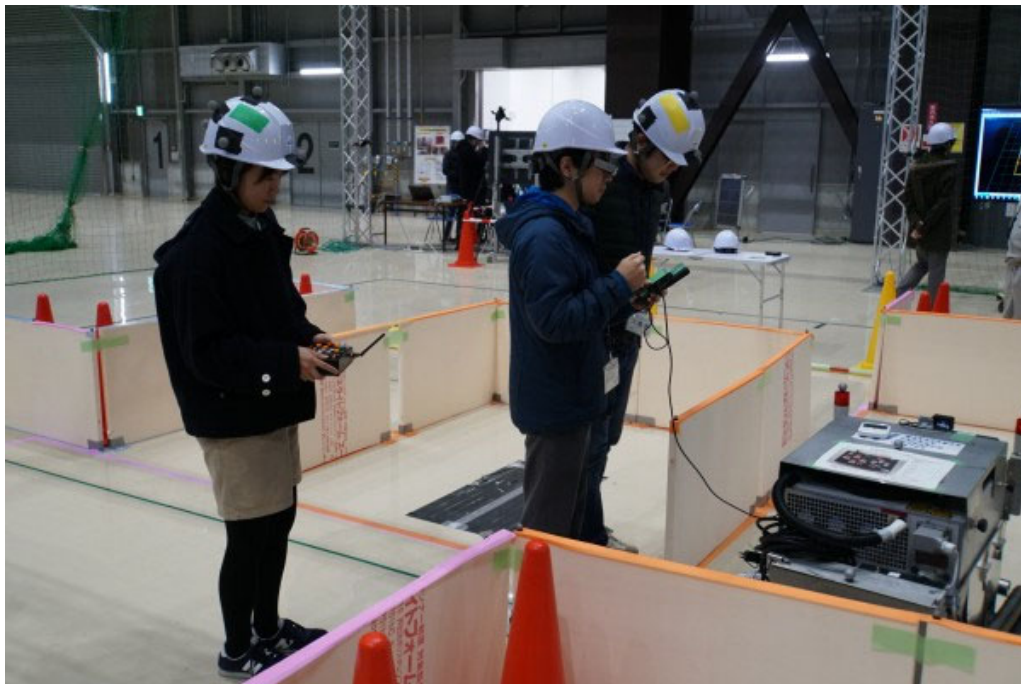


図2 JAEA 檜葉にて実施した床面専用ロボットレーザー除染装置を用いた実習の風景

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。

2.1.2. 未利用エネルギー利用技術開発

2.1.2.1

自然エネルギーによる水素製造のためのマグネシウム再生技術の開発

Development of Magnesium Regeneration Technology for Hydrogen Production by Renewable Energy

篠田佳彦^{*1}、山岸隆一郎^{*2}、遠藤伸之^{*3}、木村忠剛^{*1}、小濱泰昭^{*4}Yoshihiko SHINODA, Ryuichiro YAMAGISHI, Nobuyuki ENDOU, Tadamasa KIMURA
and Yasuaki KOHAMA

Abstract

Hydrogen is one of promising energy sources to replace fossil fuels, however, the social implementation of hydrogen energy has many problems. We began the feasibility study for 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. The solar furnaces have a potential to produce magnesium without emitting carbon dioxide. Research was also conducted on hydrogen production using magnesium. Hydrogen has so wide combustion range and low ignition energy that careful storage is necessary. A risk assessment of hydrogen stations was conducted.

要約

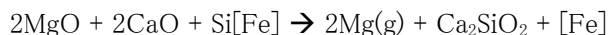
水素は化石燃料に代わる有望なエネルギー源の一つであるが、社会実装には多くの問題点がある。そこで、マグネシウムの酸化還元反応を利用した持続可能なエネルギーサイクルシステムの開発に向けた検討を開始した。太陽熱を利用したマグネシウムの精錬技術について研究し、太陽炉が二酸化炭素を排出せずにマグネシウムを精製できる可能性が示された。また、マグネシウムを用いた水素製造の研究も実施した。水素は燃焼範囲が広く着火エネルギーも低いため、貯蔵には注意が必要であることから水素ステーションに関するリスク調査を行った。

緒言

マグネシウムは固体水素源であるため、エネルギー資源として活用した後に残る酸化マグネシウムを再生・再利用できれば、水素直接利用における高圧ガスや冷却液体の回避による輸送・貯蔵の安定性が向上したエネルギーの循環システムが成立する。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。ここでは、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。

マグネシウム還元再生技術開発(太陽炉による還元実証、電気炉による反応特性評価)

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]は還元剤で生産には外部のエネルギーを要する。マグネシウム蒸気を冷却回収し、反応を維持する。

太陽炉(図1)は1.4 m×1.0 m のフレネルレンズを有した透過・屈折型で市販の太陽追尾装置を用いている。集光焦点部に珪素熱還元反応でマグネシウムを還元するために適した反応容器(図2)を設置した。反応容器は二重の石英管構造で石英管(内)内壁にマグネシウムが付着する。集光焦点部に試料を装入したるつぼを配置する。

図3に回収マグネシウムを示す。ICP-MS分析で純度は95%以上であった。図4に回収したマグネシウムの加水分解による水素発生状況を示す。マグネシウムを媒介とした太陽熱利用による循環システムが成立した。

図5に示す構成による電気炉システムで太陽炉実証条件を模擬した加熱実験を行った。反応特性を評価するとともに、有意な量の回収を目指した。そこで、図6に示す2.8 g程度のマグネシウム塊を得た。

^{*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、^{*4}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・協力研究員
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 自動追尾機構付き太陽炉

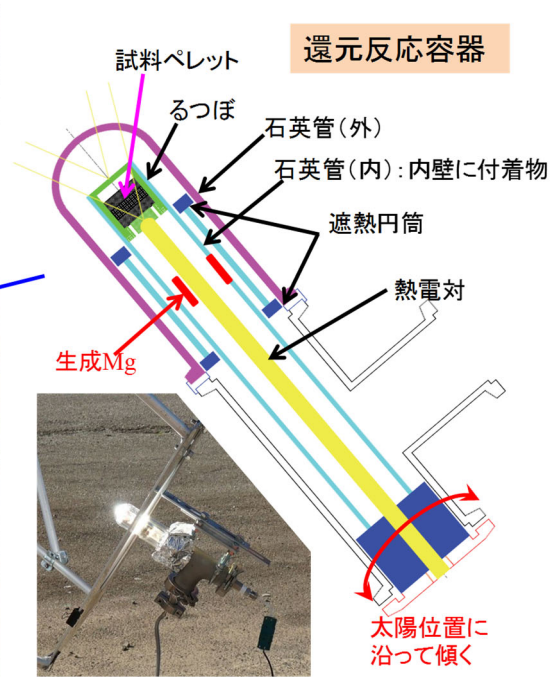


図2 反応容器概念

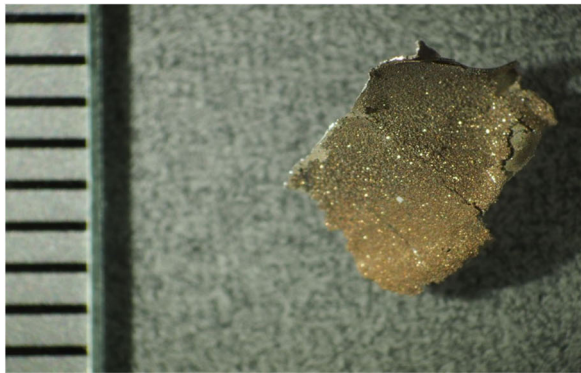


図3 回収したマグネシウム片(一部)



図4 クエン酸水による水素発生状況

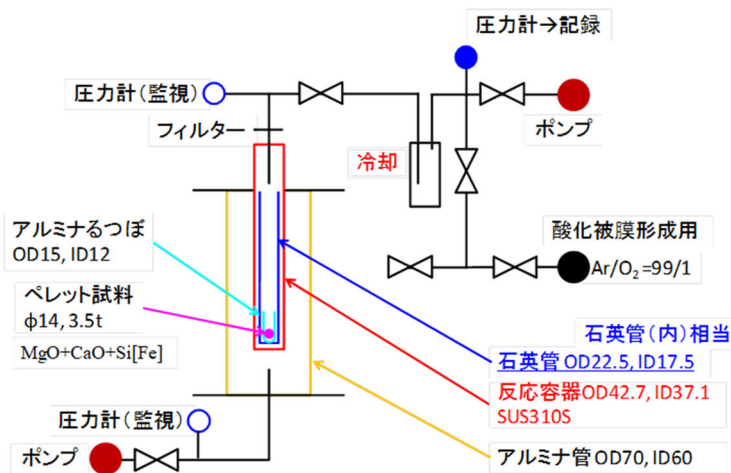


図5 電気炉による加熱実験の構成



図6 回収したマグネシウム塊

マグネシウム保管型水素ステーションを題材とした水素利用のリスク評価

実用化規模を想定したマグネシウム保管型水素ステーションの具現化に必要な要素技術開発を継続し、マグネシウムを過熱水蒸気で酸化し、水素を得る卓上サイズの基礎実験装置を試作、酸素分離が不要な水素とリサイクルが容易な固体水酸化マグネシウムの生成に成功した。それに基づいて、高圧気体や冷却液体を用いる水素ステーションとコストやリスクを比較評価する取り組みを開始し、複数の水素キャリアにおける水素ステーションに対して評価を行った。

実用化に向けた対外活動、成果普及活動

太陽炉によるマグネシウム再生の採算性と可能回収量およびマグネシウム利用のリスクやコストの評価を精緻化し、有効性と魅力を広く周知する。併せて、マグネシウム循環利用構想の利点や研究成果を周知・広報するための展示素材を整備し、実用化に向けた協力に名乗りをいただける国内外の機関や企業を募っていく。

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有意な量のマグネシウム塊を回収した。またマグネシウムから水素を生産する基礎的な装置を試作した。さらに水素ステーションに関するリスク評価を行った。

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、水嶋慧*1、山東新子*1、久米恭*1

Munetoshi MAEDA, Mika MAEDA, Hideki MATSUMOTO,
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 concentrate energy at the local tumor site by the combined irradiation with proton beams and X-rays. 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線治療に加えて線量分布の良好な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線の照射の順序、照射の間隔、線量の組み合わせ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。

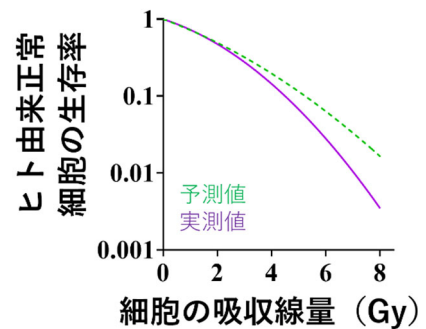


図1:陽子線とX線を模擬的に同時に照射したヒト正常細胞(WI-38)における細胞致死効果の予測値と実測値。予測値は陽子線およびX線の単独照射による細胞致死効果の和(生存率の積)として求めた。

成果の概要

1. 陽子線とX線による併用照射における「線量の組み合わせ」が細胞致死効果に与える影響の検証

陽子線とX線の併用照射における「線量の組み合わせ」が細胞致死効果におよぼす影響を評価するために、ヒト胎児肺由来正常細胞(WI-38細胞)およびヒト肺がん由来細胞(A549細胞)に対して陽子線とX線を照射(併用照射)して細胞致死効果を定量した。X線あるいは陽子線を照射した2時間後に陽子線あるいはX線を様々な「線量の組み合わせ」で照射した細胞の生存率をコロニー形成法によって測定し、細胞の線量応答評価を行う際に一般的に用いられているLinear-quadratic(LQ)モデルを用いて近似曲線を求めた(図2)。いずれの場合にも、近似曲線の寄与率(r^2 値)は0.9以上であり、細胞の総吸収線量と細胞致死効果の関係についてLQモデルによる有意な近似が可能であることから、「線量の組み合わせ」は細胞致死効果に大きく影響を与えないことが明らかとなった。また、「陽子線照射後にX線を照射した場合」よりも「X線照射後に陽子線を照射した場合」に細胞致死効果が高いことが生存率曲線の比較から再度確認された。

平成29年度より実施してきた一連の研究成果を併せると、X線照射後2時間以内に陽子線を照射した場合に、陽子線とX線の併用による顕著な細胞致死効果の増大が誘導されることが明らかとなった。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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

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。

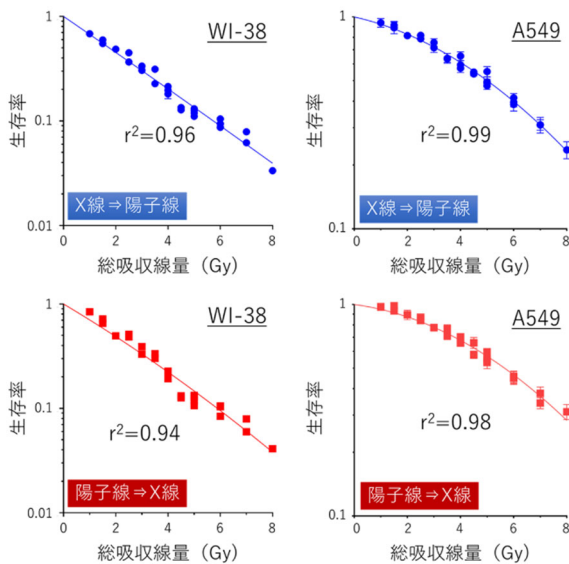


図 2: 照射の間隔を 2 時間に固定し、様々な線量の組み合わせで照射したヒト正常細胞 (WI-38) およびヒトがん細胞 (A549) の生存率。LQ モデルを用いて近似し、それぞれの寄与率 (r^2 値) を求めた。

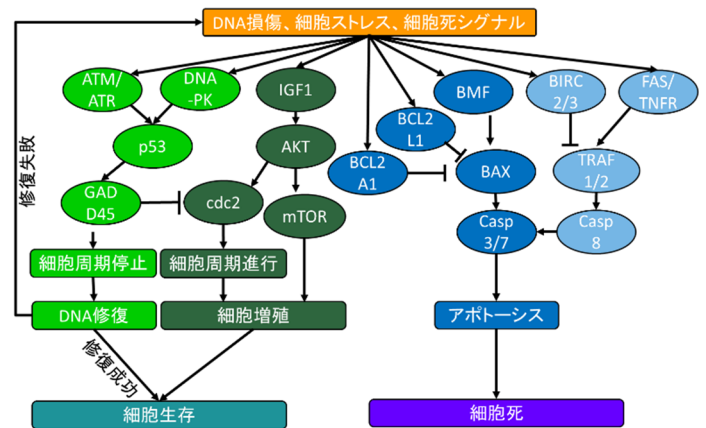


図 3: X 線を照射したヒト正常細胞 (WI-38) の細胞死あるいは細胞の生存に関わる主要な情報伝達経路。遺伝子発現解析において有意な発現の亢進が認められた遺伝子群について、文献等による既知情報を加味して作成した。

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

DNA 二本鎖切断の指標である γ -H2AX のフォーカス形成の時間変化およびフォーカスの積分光学濃度の時間変化を解析し、陽子線と X 線を併用して照射した場合の DNA 損傷の誘発量とその修復効率を解析した。その結果、WI-38 細胞、A549 細胞ともに、「陽子線照射後に X 線を照射した場合」よりも「X 線照射後に陽子線を照射した場合」に修復しにくい重篤度の高い DNA 損傷が生じている可能性が示唆された。また、A549 細胞が DNA 損傷修復経路の一部に機能障害を有する可能性が示唆された。引き続き、詳細な解析を進めていく。

3. 併用照射における可変パラメーターが細胞死に関わる分子機構に与える影響の解析

陽子線と X 線の併用照射における様々な条件と細胞死の増大を誘導する分子機構との関係を明らかにするための基礎的知見として、WI-38 細胞および A549 細胞について遺伝子発現解析を実施し、陽子線あるいは X 線を単独で照射した場合の細胞死誘導経路を明らかにした。解析結果の一例として、図 3 に X 線を照射した WI-38 細胞における細胞死および細胞生存に関与する主要な情報伝達経路を示した。WI-38 細胞では、陽子線照射および X 線照射の双方においてアポトーシスによる細胞死が誘導された。A549 細胞では、陽子線照射および X 線照射の双方においてアポトーシスが主要な細胞死の誘導経路であったものの、オートファジー、ピロトーシス、腫瘍抑制応答、ネクローシス (X 線照射の場合) などの様々な細胞死誘導経路が働くことが明らかとなった。また、いずれの細胞においても、陽子線を照射した場合よりも X 線を照射した場合において DNA 修復関連応答が相対的に強く誘導されることが分かった。

結言

DNA 損傷に起因する細胞内情報伝達は、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。したがって、放射線生物応答の初期過程といえる DNA 損傷を起点とした情報伝達機構を解明することが、放射線の生物影響を理解する上で非常に重要であると言える。陽子線などの粒子放射線と X 線などの光子放射線とでは、細胞に吸収されたエネルギーの総量 (吸収線量) が等しくとも被ばく領域に与えられるエネルギーの密度が異なるため、生じる DNA 損傷の性質が異なると推察される。DNA 損傷の質が異なるために、「照射の順番」や「照射の間隔」によって細胞致死効果の有意差が生まれるのかもしれない。本研究では、引き続き、細胞の放射線感受性変化メカニズムの解明を進めるとともに、細胞レベルの知見を個体レベルへ適用するために、最新のイメージングシステムを活用したモデル動物の生体内における腫瘍動態の精密計測技術を確立し、高精度な治療効果の検証を進めていく予定である。

2.2.1.2

粒子線によるヒト iPS 由来神経細胞の細胞死・炎症メカニズム解明

Elucidation of iPS-Derived Neuronal Cell Death and Inflammation Induced by Particle Radiation

近藤夏子^{*1}、櫻井 良憲^{*1}、高田 卓志^{*1}、久米恭^{*2}、前田宗利^{*2}

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

Abstract

In case of ion beam irradiation, the sensitivity to the ion beam or mechanism of cell death and inflammation have not been investigated in detail. In this study, we irradiated human induced pluripotent stem cell (iPS cell) derived neuron with proton, carbon and helium ion beams and investigated the patterns of cell death (apoptosis or necrosis) and transcriptional change. Proton beam did not cause cell death, while helium beam caused necrosis and carbon beam slightly caused apoptosis. Transcriptional changes were consistent with the results obtained from cell death.

要約

ヒトの神経細胞及び神経幹細胞の陽子線・重粒子線などの粒子線に対する感受性と細胞死・炎症のメカニズムは全く不明である。本研究ではこれらのメカニズムを解明するために、ヒト induced pluripotent stem cell (iPS 細胞) 由来神経細胞に粒子線照射を行い、細胞死と網羅的遺伝子発現解析を行った。その結果、プロトンでは細胞死が起こらず、ヘリウムでネクロシス、カーボンでわずかにアポトーシスが誘導された。5 Gy 照射後の網羅的遺伝子発現解析の結果、プロトンで細胞死などの変化はなく、カーボンで炎症や内因性アポトーシス誘導がわずかに起こった。ヘリウムでアポトーシスや他細胞死関連遺伝子群がカーボンよりも多量上昇がみられ、細胞染色で得られた結果と矛盾しなかった。

緒言

脳神経組織への放射線治療後に生じる認知・行動に関わる神経機能低下は学習機能障害・Quality of Life の低下を招き、解決すべき重要な課題である。認知機能低下には、放射線による脳内の神経幹細胞の不可逆的な細胞障害が関与するとの報告があり、記憶障害を防ぐために、陽子線や強度変調放射線治療などの先進的な放射線治療によって海馬の付与線量を減らす臨床研究が行われ、脳転移症例に対してはアルツハイマー病治療薬 N-methyl-D-aspartate 受容体拮抗薬と併用することで照射後6か月の認知機能は維持された¹⁾。また放射線によって損傷を受けた神経がミクログリアなどの免疫応答細胞を誘引し炎症が遷延し、神経機能低下に寄与すると考えられる。このような状況で、ヒトの神経細胞及び神経幹細胞の陽子線・重粒子線などの粒子線に対する感受性と細胞死のメカニズム、細胞死に対応する炎症のメカニズムは全く不明である。粒子線被ばくによる神経損傷を軽減し、認知機能を保つために、これらのメカニズムを解明することは急務であり、本研究の目的とする。そのために本研究ではヒト induced pluripotent stem cell (iPS 細胞) 由来神経細胞を用いて、粒子線の感受性・細胞死経路・炎症機序を解明する。

方法

iPS 細胞由来神経細胞は国立病院機構大阪医療センター・臨床研究センター(金村米博博士)にて 8 well chamber (細胞染色用)、T12.5 または T25 フラスコ (遺伝子発現解析用) に播種、培養した。照射前日に iPS 細胞由来神経細胞を若狭湾エネルギー研究センターに 22°C の保温箱に入れて搬送し、5 % CO₂ インキュベーターに移し 37°C で保管した。プロトン、カーボン、ヘリウム線をそれぞれ 1, 2, 5, 10 Gy 照射した。

- 1) 照射 24 時間後にアポトーシス/ネクロシス発生頻度を免疫細胞染色によって定性・定量評価し、各種線質でアポトーシスおよびネクロシスの起こりやすさを比較した。アポトーシスは Annexin V によって、ネクロシス(後期アポトーシス)は Propidium Iodide (PI) によって染色した。
- 2) 網羅的遺伝子発現解析(RNA-Seq)用サンプルはプロトン、カーボン、ヘリウム線をそれぞれ 5 Gy ずつフラスコに播種したヒト神経細胞(n=2-4)に照射し、24 間後サンプリングを行った。PBS でリンス後、QIAzol Lysis Reagent によって細胞を溶解し、-80 ° C で保存した。その後、RNA を抽出し、網羅的遺伝子発現解析(RNA-Seq)(外注)を行った。

^{*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}(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。また本研究で用いた iPS 細胞由来神経細胞の提供ならびに解析については、国立病院機構・大阪医療センター・臨床研究センター・先進医療研究開発部 金村米博部長、正札智子幹細胞医療研究室長、福角勇人研究員の研究協力を得た。

結果

1) プロトン、カーボン、ヘリウム線照射 24 時間後のヒト神経細胞の細胞死

プロトン照射によって24時間後初期アポトーシスは起こらず、ネクローシスも線量付与によって起こらなかった。カーボン照射によっては、5-10 Gy でわずかにアポトーシスが誘導された(0.27%, 0.54%)。ヘリウム照射の場合は24時間後5 Gy, 10 Gy 照射群で1.83%, 8.34%ネクローシスが起きた。初期アポトーシスは起こらなかった(表1)。

表1. 各粒子線のアポトーシスまたはネクローシス誘発率(%)

Proton (Gy)	0	1	2	5	10
Early apoptosis(%)	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00
Necrosis(%)	10.56	11.20	9.30	3.40	1.73
Carbon(Gy)	0	1	2	5	10
Early apoptosis(%)	0.00	0.00	1.64	0.28	0.54
Necrosis(%)	3.82	8.80	4.85	2.08	2.22
Helium(Gy)	0	1	2	5	10
Early apoptosis(%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Necrosis(%)	0.00	0.00	0.00	1.83	8.34

2) プロトン、カーボン、ヘリウム照射 24 時間後のヒト神経細胞網羅的遺伝子発現解析の結果

プロトン照射群では非照射群と比べて2倍以上発現量に差があった($p < 0.05$)遺伝子の数は増加群 108、減少群 128 であった。遺伝子オントロジーに基づいて解析(GO 解析)を行った結果、特に差が大きかった遺伝子の機能は、Molecular Function では、adenyl nucleotide binding, ATP binding, adenylyl ribonucleotide binding の増加であった。Cellular component では extracellular matrix の減少であった。カーボン照射群は非照射群と比べて、2倍以上発現量に差があった($p < 0.05$)遺伝子の数は上昇群 88、減少群 97 であった。GO 解析を行った結果、上昇群では、Biological Process では、ミトコンドリア経路の内因性アポトーシス経路、炎症反応におけるロイコトリエン・アラキドン酸産生、intestinal epithelial cell maturation(分化)、Cellular component は DNA packaging complex, nucleosome, protein-DNA complex を認めた(図1)。減少群は Biological Process では cell population proliferation, cell migration, mitotic cell cycle など細胞数増加・細胞の移動や位置付け、細胞周期に関わる因子が大きかった。また、DNA 損傷反応・そのチェックポイント経路も含んでいた。Cellular component では紡錘体、微小管などの細胞分裂に関するものであった。Molecular Function では、integrin binding, extracellular matrix structural constituent などの接着因子・細胞外器質構成要素であった。まとめると、細胞増殖、細胞の移動の停止が起こり、細胞同士の接着が破壊され、細胞間コミュニケーションのための介在因子の分泌が減少した。ヘリウム照射群では非照射群と比べて、2倍以上発現量に差があった($p < 0.05$)遺伝子の数は上昇群 244、減少群 296 であった。GO 解析の結果、上昇群では Biological Process は、顕著なものから述べると、外的刺激に対する応答、細胞間コミュニケーション、アポトーシス経路・プログラム細胞死・形態形成・G1/S 細胞周期制御因子などであった。Molecular Function では細胞接着因子フィブロネクチンが上昇していた。まとめると、強いストレス応答を受けて細胞間伝達物質の量が増加し、また G1/S チェックポイントが働き細胞増殖が抑制され、アポトーシスを中心とした細胞死が起こった。減少群では、Biological Process では生体高分子合成、RNA 代謝・合成、翻訳などであった。Cellular component は核、DNA topoisomerase complex であった。Molecular Function では、芳香族・複素環化合物、イオン、金属イオン、DNA 結合などであった。細胞死がおこったことに伴い、細胞が生存するために不可欠な基本的機能がダメージを受けた。

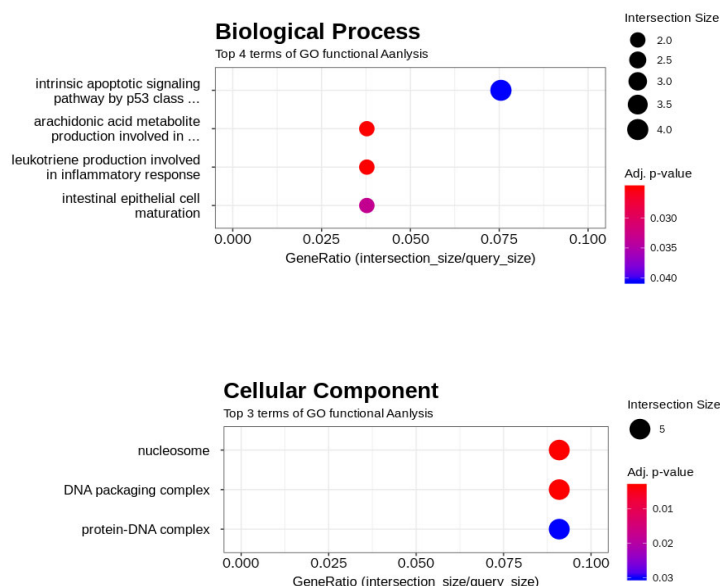


図1. カーボンによって上昇した遺伝子群
(上) Biological Process (下) Cellular Component

考察

網羅的遺伝子発現解析で、5 Gy 照射 24 時間後、プロトンでは細胞死などのダイナミックな遺伝子発現の変化はなく、カーボンにおいては炎症や内因性アポトーシス誘導がわずかに起こり DNA 複合体、DNA-タンパク複合体がわずかに増加した。カーボンによって複雑な DNA 二本鎖切断や複合体が生じること²⁾と矛盾しない結果となった。細胞周期・細胞増殖の停止やインテグリンや細胞外器質の遺伝子発現は大きく減少し、神経細胞がカーボン照射によって複雑な DNA 損傷を生じて、その場で細胞外マトリックスからはがれてアポトーシスに向かっていると考えられる。ヘリウムはアポトーシスやそれ以外の細胞死関連遺伝子群がカーボンよりも多種類上昇がみられ、細胞間コミュニケーション関連遺伝子群の発現も大きく上昇していた。タンパクレベルでネクローシスが上昇することと矛盾はないと考えられる。

結言

治療の副作用の観点から、プロトンが神経細胞死を最も起こしにくく、ヘリウム、カーボンの順で神経細胞死を起こしやすい。ヘリウムは神経細胞の機能全般を低下させる可能性があるため、ヘリウムよりもカーボンの方が神経細胞にとっては副作用が少なく望ましい。ただしカーボン 5 Gy も神経細胞死がわずかに起こるので、慎重に神経機能の低下が起こるかどうかを経過観察する必要があると考える。しかし今回の結果から、10Gy までの粒子線は神経細胞死を引き起こしやすいとは言えず、神経細胞の粒子線の感受性は低かった。今後は脳血管の細胞の粒子線感受性を調べる必要があると考える。脳血管細胞の損傷によって、2 次的に神経細胞の機能低下・細胞死、またはミクログリアの慢性的な活性化に至る可能性があるためである。

参考文献

- 1) PD. Brown *et al.*, J Clin Oncol., 38, 1019-1029 (2020)
- 2) M. Hada and AG. Georgakilas, J Radiat Res., 49, 203-10 (2008)

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

It was suggested that charged particle irradiation is more effective in cervical cancer compared with X-ray irradiation. The reduction of ^{18}F -FLT uptake correlated with 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に対する粒子線照射は X 線照射よりも有効である可能性が示された。また、扁平上皮がんにおいては、 ^{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 GH354 細胞と扁平上皮がん細胞株である SiHa 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

GH354 細胞の照射 4 日後で比較すると、炭素線と陽子線照射では 0.5、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。しかし、X 線照射では 0.5 Gy において有意な減少が観察されなかった。このことは、腺がん細胞に対する炭素線および陽子線照射の優位性を示していると考えられる。一方、4 日後の SiHa 細胞では、陽子線と炭素線照射では、1、5、10 Gy において有意な減少が観察されたが、X 線照射では 5 と 10 Gy でのみ有意な減少が認められ、腺がん細胞と同様に粒子線照射の優位性が示された。細胞内集積実験において、GH354 細胞では、 ^{18}F -FLT および ^{18}F -FDG の集積は、照射 4 日後の細胞数の減少と相関しなかった。この原因は、実験手技に問題があったと考えており、再実験を計画している。一方、SiHa 細胞においては、 ^{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。

結言

子宮頸がんに対しては、X 線治療よりも粒子線治療の方が有効である可能性が示された。さらに、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。

^{*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。

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}、水嶋慧^{*2}、山東新子^{*2}、久米恭^{*2}

Hideki MATSUMOTO, Munetoshi MAEDA, Mika MAEDA,

Satoshi MIZUSHIMA, Shinko SANDO and Kyo KUME

Abstract

Most of the head/neck cancer patients develop oral mucositis as a side-effect after radiotherapy. However, a medicine for oral mucosal diseases remains undeveloped until now. The patients developing oral mucosal disease is treated with symptomatic treatments using a mouthwash and analgesics and the radiotherapy is 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(うがい)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・鎮痛剤による疼痛緩和などの対症療法によって処置されているのみである。そこで放射線性口腔粘膜障害に対する予防薬/治療薬の開発を目指して、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. 陽子線分割照射 (20 Gy、5 Gy×4 回) による放射線性口腔粘膜障害の発症動態および薬剤 A の放射線性口腔粘膜障害に対する防護効果の解析 (図 1)
- (1) マウス頭頸部への陽子線分割照射 (20 Gy、5 Gy×4 回) 後の口腔粘膜障害の病態評価: 平均体重 35.9 g から陽子線照射開始後徐々に体重の減少が認められ、照射後 9 日目で最低となり (31.6 g)、その後徐々に回復した。この体重減少に伴い、照射後 3 日目から口腔粘膜障害の発症が認められ、照射後 9 日目で平均病態スコア (無症状を 0、顎下腺炎症、紅斑、びらん/浮腫、充血、出血の 5 症状の増悪度を 5 段階で評価、合計スコアを 5 匹のマウスで平均化した) が 5.5 まで増悪したが、その後徐々に回復した。また、その症状は顎下腺炎症、口腔粘膜の紅斑および充血が顕著であった。
- (2) 陽子線 (20 Gy、5 Gy×4 回) 分割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: 口腔粘膜障害の防護剤候補である薬剤 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、平均体重 35.7 g から陽子線照射開始後徐々に体重の減少が認められ、陽子線照射後 9 日目で最低となり (33.3 g)、その後徐々に回復した。この体重減少に伴い、照射後 7 日目から口腔粘膜障害の発症が認められ、照射後 9 日目で平均病態スコアが 1.2 まで増悪したが、その後徐々に回復し、照射後 25 日目で完全に無症状となった。また、その症状は軽微で、顎下腺炎症および口腔粘膜の紅斑および充血が顕著であった。薬剤 A の投与により、口腔粘膜障害の著しい病態改善が引き起こされていると考えられる。 * B.W. は body weight (体重) の略。

^{*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

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. 陽子線分割照射(20 Gy、5 Gy×4回)による放射線性口腔粘膜障害の病理学的解析(表1)

陽子線照射後1日目および7日目にそれぞれの実験群から無作為に2匹ずつ選び、頸椎脱臼による安楽死後、舌を摘出し、パラフィン切片を作製し、HE染色を施して病理学的解析を行った。

照射後1日目の標本において、分割照射したマウスの舌に病理学的な異常所見は認められなかった。一方、照射後7日目の標本においては種々の病理学的所見が認められた。陽子線分割照射(20 Gy、5 Gy×4回)したマウスでは、上皮肥厚、上皮過角化が顕著であった。また病理標本においても薬剤Aの投与による口腔粘膜障害の著しい病態改善効果が認められた。

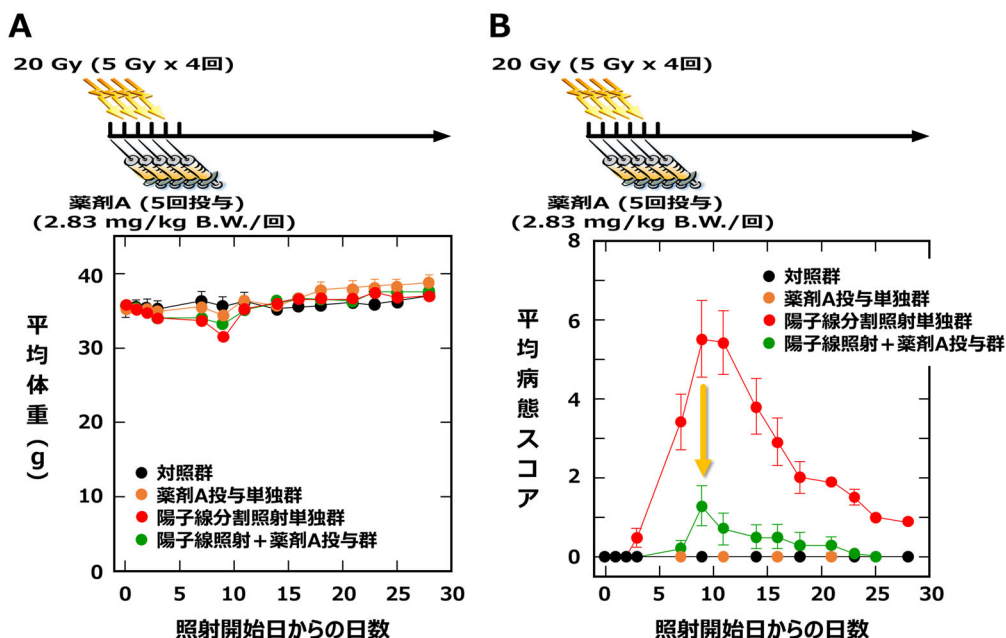


図1. マウス頭頸部への陽子線分割照射による口腔粘膜障害の発症動態

(A) 陽子線照射後の体重変動 (B) 陽子線照射後の肉眼観察による口腔粘膜障害のスコア評価

表1. 陽子線分割照射による舌での放射線性口腔粘膜障害の病理学的評価(照射後7日目)

実験群	異常なし	上皮肥厚	上皮過角化	舌腺萎縮	合計スコア	平均合計スコア
非照射-1	●				0	0
非照射-2	●				0	
薬剤A投与-1	●				0	0
薬剤A投与-2	●				0	
陽子線照射-1		1	2		3	4.5
陽子線照射-2		2	2	2	6	
陽子線照射/薬剤投与-1		1	1		2	2
陽子線照射/薬剤投与-2		1	1		2	

スコア基準 1: 軽微、2: 軽度

結言

- 頭頸部がんに対する陽子線治療を想定して、マウスの頭頸部に陽子線を局所照射し、肉眼観察評価および病理学的評価により口腔粘膜障害の発症動態を解析し、口腔粘膜障害に対する薬剤Aの防護効果を解析した。
- 肉眼観察評価(病態スコア)において、陽子線照射により誘発される口腔粘膜障害に対する薬剤Aの病態改善効果が認められた。
- 病理学的評価(病理学スコア)においても、陽子線分割照射により誘発される口腔粘膜障害に対する薬剤Aの病態改善効果が認められた。

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(血管拡張性失調症変異タンパク質)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の特異的な阻害剤を用いて低線量域におけるDNA損傷修復とATMの関係について検証した。

成果の概要

ヒト胎児肺由来正常細胞(WI-38)集団をX線マイクロビームを用いて照射し、DNA損傷部位の周辺に存在するヒストンH2AXがリン酸化された γ -H2AXフォーカスおよびユビキチン化依存性誘導によってDNA損傷部位に集積した53BP1を免疫蛍光染色を用いて可視化した。昨年度に報告した通り、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した。また、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た(図1)。一方、ATM阻害剤の存在下では、53BP1のフォーカス形成はすべての線量において観察されたが、 γ -H2AXのフォーカス形成は2 Gy以下では観察されず(図2)、細胞質への照射が無い場合(細胞核照射)と同様の線量応答を示した。したがって、2 Gy以下ではDNA損傷部位における γ -H2AXのフォーカス形成にATMが必要不可欠であると考えられる。一方で、高線量域ではATM阻害剤の存在下においても γ -H2AXのフォーカスが形成されていることから、ATMに非依存的な経路によってH2AXのリン酸化が誘導されていることが示唆された。以上の結果から、低線量域におけるDNA損傷修復応答にはATMが必要不可欠であることが明らかとなった。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ことが考えられる。

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、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。

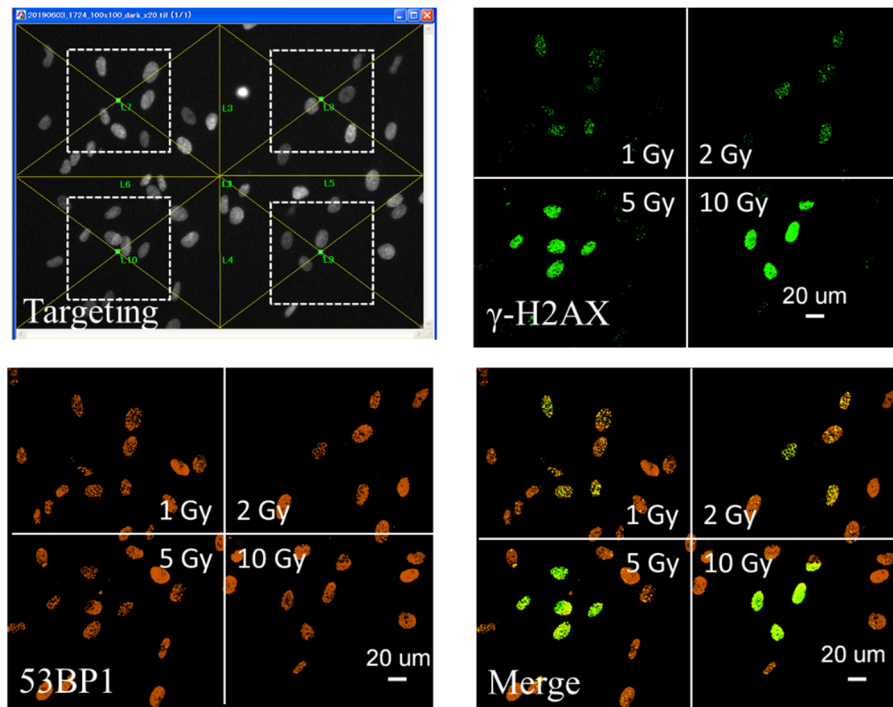


図 1:100 ミクロン角の X-線マイクロビームを用いて WI-38 細胞の細胞全体を 1～10 Gy で照射し、共焦点レーザー顕微鏡(FV300、Olympus)を用い、免疫蛍光染色した γ -H2AX (緑色) および 53BP1 (赤色) を可視化した。“Targeting”中の白色枠が照射領域を示す。照射線量は、各パネル中に示した。

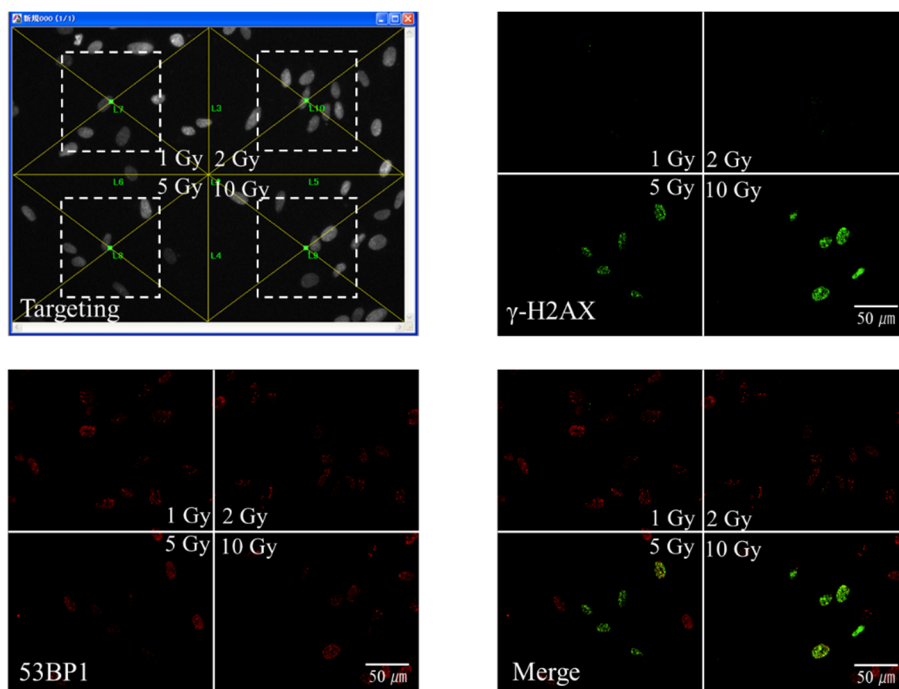


図 2:ATM 阻害剤の存在下で 100 ミクロン角の X-線マイクロビームを用いて WI-38 細胞の細胞全体を 1～10 Gy で照射し、共焦点レーザー顕微鏡(FV300、Olympus)を用い、免疫蛍光染色した γ -H2AX (緑色) および 53BP1 (赤色) を可視化した。“Targeting”中の白色枠が照射領域を示す。照射線量は、各パネル中に示した。

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 3 kinds of murine pancreatic cancer cell lines. We observed that proton irradiation monotherapy to murine pancreatic cancers was partially effective, whereas, when proton was combined with immunotherapy blocking antibodies, the anticancer effect was improved. We will investigate how immune system of the host responded 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、2018年には35,400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(2016年)は40,616人であり、罹患数と死亡数が近い。この理由には、90%以上が膵癌診断時のステージがⅢ以上の進行状態にあることがあげられる。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

3 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た。また、陽子線に抗癌剤、免疫修飾抗体を併用した。1 種類のマウス膵癌大腿皮下腫瘍・背部皮下腫瘍に対して、陽子線および免疫修飾抗体治療による、照射部位および非照射部位の腫瘍双方における、腫瘍増殖抑制効果を確認した。

結言

1 種のマウス膵癌モデルに対して陽子線照射と免疫修飾抗体による、照射部位にかかわらない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、継続し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

Development of an analysis system for PVA-KI gel dosimeter of a combination of a camera and an OLED display was carried out. The effectiveness of this system was investigated with the gel irradiated by He beam.

要約

本研究ではカメラと有機 EL を組み合わせて PVA-KI ゲル線量計用解析システムの構築を行った。本システムを He イオンビーム照射された PVA-KI ゲルに適用し、有用性を明らかにした。

緒言

現在、放射線治療は全身への影響が少なく、患部を切除せずに局所治療が出来る。このアドバンテージを活かし、高齢者や他の病気のために手術療法や化学療法が行えない患者に対しても、放射線治療を行えることで注目を集めている。近年、腫瘍に対して最大限の線量を与え、正常組織への線量を最小限に抑える高精度放射線治療が普及してきおり、精密な治療計画を立てるためには線量検証を行う必要がある。本研究では、PVA 水溶液と KI を使用し PVA-KI ゲル線量計を開発した¹⁾。従来、PVA-KI ゲルの測定に紫外可視分光光度計を用いて、PVA-KI ゲルの吸光度測定を行ってきた。しかしながら、紫外可視分光光度計では光路長 10 mm 角のディスポセルの範囲でしか測定・観察が出来ない。そこで本研究では測定領域を広げ、より実用的な測定システムの開発を目指し、本測定システムを He イオンビーム照射された PVA-KI ゲルに適用し、ブラッグピークの位置を測定し、測定データを吸光度に変換する手法を確立し、その有用性を明らかにすることを目的とした。

実験方法

PVA-KI ゲルにおけるブラッグピーク反応を観察・測定するため、PVA-KI ゲルへの He ビーム照射実験を行った。実験では若狭湾エネルギー研究センター(WERC)の多目的シンクロトロン・タンデム加速器(W-MAST)を用いて 220 MeV He ビームを照射した。実験では次の機器・試料等を使用した: 紫外可視分光光度計(Stellar Net 社製 Black Comet)、ゲル用測定装置、ゲル用解析ソフト、アクリル(PMMA)製矩形セル(50 mm×40 mm×10 mm)、吸光度測定用の光路長 10 mm 角のセル、PVA-KI ゲル (KI 濃度 9wt%)、インキュベーター、粒子・重イオン輸送計算コード PHITS Ver. 3.08。

PVA-KI ゲルを矩形セルに封入した試料を木製の治具に置き、試料短軸中心を He ビーム中心軸に合わせ、長手方向とビーム進行方向を合わせて配置した。試料表面における吸収線量が、積算で 8 Gy、16 Gy、24 Gy となるように照射した。照射毎にゲル用測定装置を用いて試料の撮影を行い、撮影後はゲル用解析ソフトによる RGB 解析を行った。図 1 に試料設置の様子を示す。なお、吸収線量は電離箱により計測し、試料表面で吸収線量が 4 Gy ずつ増分で照射されるよう照射した。

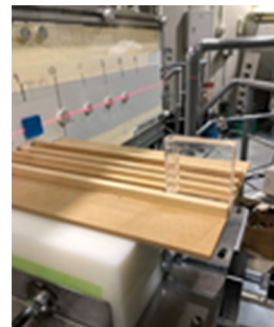


図 1 試料設置の様子。

結果と考察

(1)PVA-KI ゲルへの He イオンビーム照射実験

矩形セル内の PVA-KI ゲルに対して He イオンビームを照射し、RGB 解析を行った。He イオンビームを照射された吸収線量 24Gy のゲル画像と RGB 解析の測定結果を重ね合わせた。照合した結果を図 2 に示す。こ

^{*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。

で、グラフの縦軸は RGB 値、横軸は吸収線量[Gy]である。図 2 のゲル画像において、PVA-KI ゲルへの He 粒子線照射による赤色の呈色及びブラッグピークを確認した。図 2 のゲル画像を RGB 解析した結果、約 1.90cm で G 値と B 値が急激に減少したことは、ブラッグピークにおける線量増大によって、可視領域 490 nm における青緑色の波長が吸収されたため、RGB の中で G 値と B 値が急減したと考える。図 2 からゲル画像のブラッグピーク部分で、G 値と B 値も対応して急減していることから、RGB 測定でブラッグピークを観察・測定できることを確認した。このことを踏まえて、RGB 値を吸光度に変換し、その効果を調べた。

(2)PVA-KI ゲルへの He 粒子線照射及び RGB 値の吸光度変換

RGB 値を吸光度に変換し、その効果を調べるため、吸光度測定用の光路長 10 mm 角のセル内の PVA-KI ゲルに He ビーム照射実験を行った。図 3 に He ビーム照射された吸収線量 20 Gy の PVA-KI ゲルの様子を示す。本研究では線量が均一であるセル No.1 の吸光度のデータを基に、各距離における RGB 値を吸光度に変換した。手順として、No.1 の吸光度測定後、試料を撮影し、撮影データを RGB 解析した。その後 RGB 解析したデータを用いて吸光度に変換した。RGB 値の吸光度変換には以下の式を用いた。

$$RGB_{Abs} = (\text{照射前の RGB 値} - \text{照射後の RGB 値}) \quad (1)$$

$$\text{吸光度} = RGB_{Abs} \times (\text{セル No.1 の吸光度} / \text{セル No.1 の } RGB_{Abs}) \quad (2)$$

(3)He イオンビーム照射及び RGB 値の吸光度変換

図 4 に、図 3 の RGB 値を吸光度に変換し結果を示す。さらに、照射実験体系と PHITS によるシミュレーションを比較するため、RGB 値を式(1)(2)を用いて吸光度に変換した結果と PHITS のシミュレーション結果を比較した。左縦軸は吸光度、右縦軸は PHITS の計算による線量[Gy/source]、横軸は距離[cm]である。図 4 からブラッグピークの位置は、G 値及び B 値の吸光度が 1.80 cm であり、G 値と B 値を吸光度に変換した結果、どちらも同じ結果となった。PHITS による計算はブラッグピークの位置が 1.86 cm であった。ブラッグピークの位置を比較した結果、本研究で構築した測定システムによる RGB 測定が 1.80 cm、PHITS による計算が 1.86 cm であり、測定値と計算値の結果はほぼ一致を示した。He 粒子線を照射された PVA-KI ゲルの RGB 測定では、G 値と B 値を吸光度に変換した結果、吸光度及びブラッグピークの位置が同じ結果となることから、G 値又は B 値で評価するのが妥当だと考える。

結言

放射線照射による PVA-KI ゲルの 490 nm における光吸収に伴う色の変化から、デジタルカメラと有機 EL パネルを用いた RGB 測定システムを構築した。PVA-KI ゲルへの He イオンビーム照射に本測定システムを適用した結果、He 粒子線照射実験ではブラッグピークの位置を測定することが出来た。以上のことから本測定システムを PVA-KI ゲルに適用することで、RGB から吸収線量及びブラッグピークの位置を測定できる手法を見出した。

参考文献

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

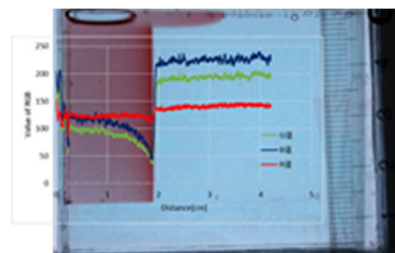


図 2 He ビーム 24 Gy 照射時の矩形セル内の PVA-KI ゲルのゲル画像と RGB 値の変化。

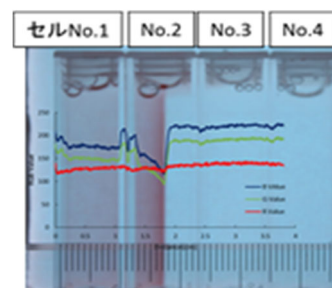


図 3 He ビーム 20 Gy 照射時の 10 mm セル内の試料への照射 PVA-KI ゲル。

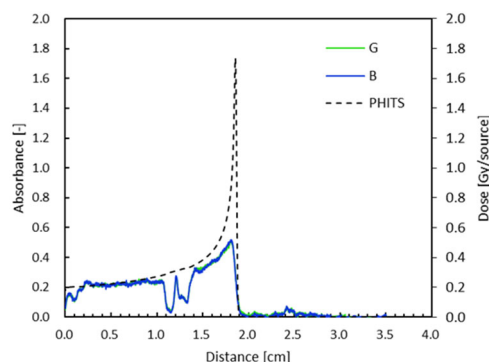


図 4 RGB 値を吸光度に変換した結果と PHITS によるシミュレーション結果の比較。

2.2.2.2

粒子線の線質測定技術開発

The Development of Measurement Technical for the Particle Ion Beam Quality

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

Youichirou MATUO, Nakahiro YASUDA, Yoshinobu IZUMI and Kyo KUME

Abstract

Measurements of target fragmentation reactions by high energetic charged projectiles (carbon 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 a biological tissue equivalent phantom in our experiment. Energy dependences of production rate for target fragment were verified in comparison of proton and helium beam. We also developing 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に資する目的で、粒子線の線質測定技術開発をおこなう。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する。

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

粒子線照射の際に一般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の電荷、放出角度を精密に測定する手法を開発した。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り、照射野内のビームの電荷・角度分布が得られる手法である。CR-39 検出器に炭素線照射を行った後に、エッチングにより検出器の裏表に現出するエッチピットを顕微鏡下で同時に測定することで、電荷分解能は $Z=1$ 、放出角度精度を 10^{-2} 度で測定可能なことを確かめた。本研究は、論文として公開され、博士 1 名を輩出した。

(2) 蛍光標識した生体親和物質の開発

DNA 損傷について、1 本鎖切断よりも 2 本鎖切断のほうが生体影響の観点から重要であることがわかっている。2019 年度は、2 本鎖の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 DNA 2 本鎖切断の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(220MeV)を照射し、6-FAM の蛍光強度($\lambda_{em}=516nm$)の変化を評価した。吸収線量の増加に伴って蛍光強度が増加した。これはオリゴヌクレオチドの鎖切断に起因するものと考えられる。

結言

CR-39 検出器を用いることにより、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の電荷、放出角度を精密に測定する手法を開発した。また、蛍光物質 6-FAM を修飾した 2 本鎖オリゴヌクレオチド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。

^{*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、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 -垂直ビームライン炭素線のエネルギー推定-

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

- Energy Estimation of Carbon Beams from Vertical Beam Line -

高城啓一^{*1}、畑下昌範^{*1}、久米恭^{*2}

Keiichi TAKAGI, Masanori HATASHITA and Kyo KUME

Abstract

The vertical beam line of medical course is now available for carbon beam irradiation to biological materials. Range in water of the carbon beam at the target position along this beam line was measured as 5.34 mm by using cell layer and DNA damage marker. Estimated energy and LET(linear energy transfer) of the beam at target position were 500 MeV and 52 keV/μm, respectively.

要約

陽子線がん治療装置の垂直ビームラインの、生物材料への炭素線照射への適用が可能となった。培養細胞層と DNA ダメージマーカーを用いてこのビームラインの炭素線のターゲット位置での水中飛程を測定したところ、5.34 mm であった。この結果から推定されるターゲット位置でのビームのエネルギーと LET(線エネルギー付与)は、それぞれ、500 MeV、および 52 keV/μm であった。

緒言

エネ研ではこれまで、生物材料への炭素線照射は照射室 4 の生物照射コース(高エネルギー)を用いて実施してきた。このビームラインでは、ビームは水平方向に出射されるため、照射されるサンプルは地面とは垂直に配置する必要がある、このことが、特に水中飛程の短い炭素線照射において、試料作製困難や、照射中の試料剥離等の問題を引き起こしていた。

照射室 3 のがん治療装置は、水平、垂直 2 門のビームラインが備えられており、患者へのがん治療研究が終了した後も、がん治療の基礎研究を目的とした陽子線の照射実験が行われてきた。しかし、上述したような水平ビームラインでの生物試料への炭素線照射の問題から、がん治療装置の垂直ビームラインを、生物試料の炭素線照射へ適用することが企図され、真空系の延長や、サンプルチェンジャーの整備等が行われた結果、このビームラインでの炭素線照射が可能となった。

このビームラインで生物試料への炭素線照射を行うためには、ターゲット位置でのビームのエネルギーを知る必要がある。この目的のため、ビームの進行方向に並行に培養細胞層を配置して照射を行い、照射後の DNA 損傷マーカーの分布を調べることで、ターゲット位置での炭素線の水中飛程を測定し、その結果からビームのターゲット位置でのエネルギーと LET(線エネルギー付与)を推定した。

材料と方法

実験材料

実験材料には、マウス繊維蓋細胞株 BALB-3T3 を使い、10%のウシ胎児血清を添加したダルベッコ改変イーグル培地を用いて培養を行った。

炭素線照射

炭素線照射は福若狭湾エネルギー研究センターの陽子線がん治療装置垂直ビームラインで行った。スライドフラスコ(Thermo Fisher)を加工して片面の縁を削り落とし、これを用いて細胞をコンフルエント状態まで培養した。このスライドフラスコを培養液で満たし、2 個のスライドフラスコの細胞付着面を貼り合わせたものを、細胞層がビーム方向と並行になるように照射位置に配置し、0.2 Gy ~ 2.0 Gy の炭素線を照射した。照射後にスライドフラスコを CO₂ インキュベーターに戻し、30 分間培養を継続した後、4% パラホルムアルデヒドを用いて固定した。

^{*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}(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。

γ H2AX の検出と観察

DNA 損傷マーカー γ H2AX の検出には、一次抗体としてマウスモノクローナル抗体 anti- γ H2AX (メルクミリポア)、二次抗体には anti-mouse IgG Alexa Fluor 488 (Thermo-Fisher) を用いた。細胞核染色には SYTOX Orange (Thermo Fisher)を用いた。細胞像の観察には、共焦点レーザー顕微鏡 LSM 780 (Carl Zeiss) を用いた。水中飛程測定のための顕微鏡試料ステージ移動量計測にはリニアエンコーダシステム SAS-200 (マコメ研究所)を用いた。

結果と考察

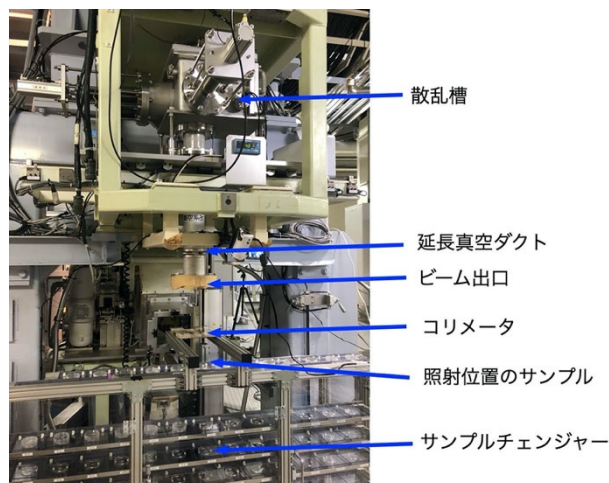


図 1 陽子線がん治療装置垂直ビームライン

図 1 は垂直ビームラインの写真である。このビームラインは元来がん治療のために設計され、後に炭素線照射のための改造を施したため、ターゲットまでに存在する大気によるエネルギー損失を減弱するために、散乱槽、真空延長ダクトの 2 つの独立した真空系を通すという複雑な構成を取っている。

図 2 は、イメージングプレート(IP)を用いて可視化した照射野の像である。図では、IP に 0.6 Gy の炭素線を照射した後、蛍光イメージャー FLA 7000 (GE healthcare) を用いて可視化した像、および照射野中心を通る横軸方向と縦軸方向の相対エネルギー分布を示した。照射野の形状は、やや凹凸が見られるものの、照射中心からおおよそ半径 2 cm の範囲で、ほぼ平坦なエネルギー分布をしていることがわかる。照射野中心から半径 2 cm の範囲に関して、画像解析を用いてビーム強度の平均と標準偏差を求めたところ、平均値に対する標準偏差は 3.7% であった。

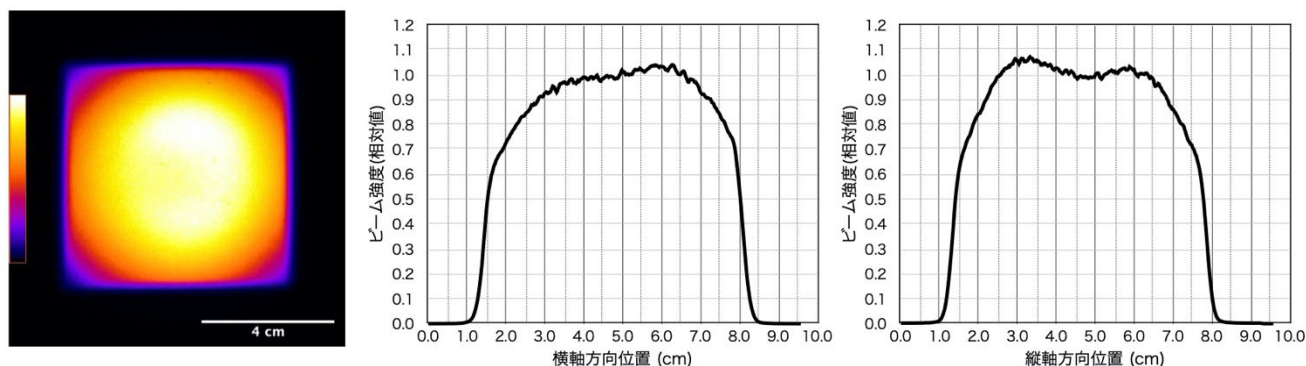


図 2 垂直ビームラインの照射野 (左:IP 像、中・右: 中央部付近のエネルギー分布)

シンクロトロンから出射される炭素線のエネルギーを直接測定することは困難であることから、ビームの水中飛程を測定し、その測定値からエネルギーを逆算することを試みた。また、この炭素線の水中飛程は数 mm と非常に短いことが想定され、通常用いられる水ファントムを使用した飛程計測が困難であるため、ビームの進行方向とは並行に配置した培養細胞層にビームを照射し、照射後の DNA 損傷マーカー γ H2AX の分布を調べることで、ビームの水中飛程を測定した(図 3)。H2AX は、ヌクレオソームを構成するヒストン H2 のバリエーションの一つであり、DNA 二本鎖切断(DSB)が生じると損傷周辺に存在する H2AX がリン酸化を受けて γ H2AX となる¹⁾。これを、蛍光抗体法を用いて検出することで、ビームが深さ方向のどの位置まで DSBを引き起こしたかを可視化することができる。ビームの入射位置(すなわち容器のビーム入射側末端)から γ H2AX が観測されなくなるまでの距離を、顕微鏡のサンプルステージに取り付けたリニアエンコーダを用いてサンプルステージの駆動量として測定することで、ビームの水中飛程を求めた。

図 4 に飛程末端付近の細胞像を示す。赤い蛍光は細胞核を示し、緑ないしは黄色の蛍光は γ H2AX を表している。炭素線の LET が高いため、DSB はイオンの通り道に集中して形成される。照射した線量が低く、細胞核

を通過するイオン数が少ないため、多くの核上で γ H2AX は線状に分布して見えているが、この γ H2AX 蛍光が画像の中ほどで突然検出されなくなっていることがわかる。標本の縁からこの消失点までの距離を3標本、16ヶ所で測定し、平均を求めたところ、 $5.34 \text{ mm} \pm 0.03 \text{ mm}$ (標準誤差) という結果が得られた。この結果から計算コードSRIM2013を用いて得られたビームのエネルギーとLETの推定値は、それぞれ、500 MeV、52 keV/ μm であった。一方、同様の方法を用いて求めた生物照射コースでの炭素線のターゲット位置でのエネルギー推定値とLETは、それぞれ 450 MeV、57 keV/ μm であった。この違いは主として、ビームを散乱させるために両コースで用いている散乱体(生物照射コース: アルミニウム 1.5 mm, 医療垂直: タングステン 0.1 mm) の素材と厚さの違いに起因する。

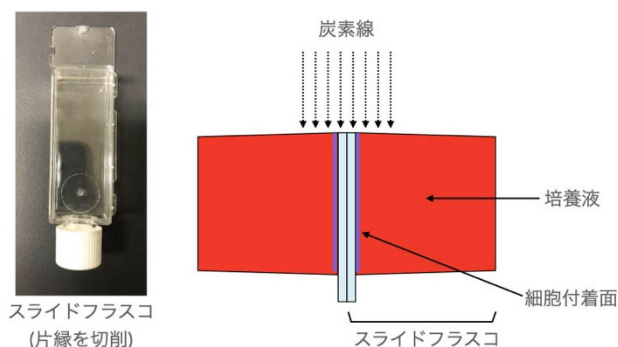


図3 細胞照射時の配置

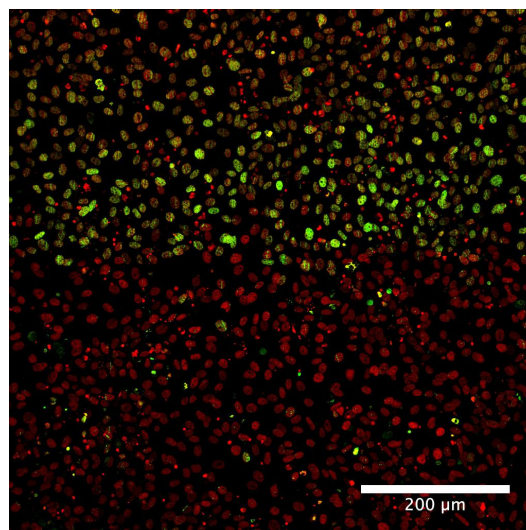


図4 炭素線 2 Gy(表面線量) を照射した細胞層の飛程末端付近の γ H2AX 像

結言

陽子線がん治療装置の垂直ビームラインでの炭素線照射が利用可能となった。DNA 損傷マーカー分布によって求めたこのビームラインでの炭素線のターゲット位置での水中飛程は 5.34 mm で、この値から推定される炭素線のエネルギーとLETはそれぞれ、500 MeV、52 keV/ μm であった。

このビームラインではビームが垂直方向に照射されるため、生物試料の調製はより容易であり、照射中のサンプル落下などの事故も起き難い。また、最大 104 サンプルが搭載可能なサンプルチェンジャーを備えており効率的な照射が可能である。生物試料への炭素線照射を考えている方は、このビームラインの利用もご検討いただきたい。

参考文献

- 1) E.Rogakou et al., J. Biol. Chem., 273(10), 5858 (1998)

2.3.1.2

重イオンビームにより誘発される染色体再構成を利用した新育種技術の開発

Development of New Plant Breeding Technique Using Heavy Ion Beam-Induced Chromosomal Rearrangement

畑下昌範^{*1}、高城啓一^{*1}

Masanori HATASHITA and Keiichi TAKAGI

Abstract

Ion beams have been used to generate new mutants in higher plants. It is thought that ion beams with high linear energy transfer (LET) value caused not so many but large and irreparable DNA damage locally, so novel mutants without detrimental characteristics were efficiently obtained. Recent studies showed that proportion of deletions, insertions and base substitutions in ion beam induced mutations depends on LET and heavy ion beam irradiation with high LET value could induce large deletions and chromosomal rearrangements. In this study, the range shifter at upstream position of the sample is used to reduce the residual range of carbon beams i.e. to raise LET values on targets and biological effects of carbon beams with different LET values were investigated.

要約

イオンビーム照射は主に高等植物の品種改良の手段として用いられてきている。高い線エネルギー付与(LET)をもったイオンビームは修復が困難な大規模な DNA 損傷をごく少数の箇所に局所的に引き起こし、その結果として有害な形質を付随することなく、新規な変異体を効率的に獲得することができると考えられている。最近の研究から、イオンビームにより形成される変異の種類において、大規模な欠失や挿入および点変異の塩基置換などを引き起こす割合が LET に依存して変化し、高 LET の重イオンビーム照射が大きな欠失や染色体レベルでの再構成を誘発していることが明らかになってきた。本研究では、カーボンビーム照射において、照射試料の上流にレンジシフターを挿入することで、ビーム飛程を短くし、すなわち試料位置での LET を高くすることを検討した。さらに、同じカーボンイオンにおいて異なる LET で照射したときの生物効果について調査した。

緒言

イオンビーム照射技術は、主に、日本独自の新しい突然変異育種技術として進展してきた。福井県のイオン加速器は、西日本で唯一の品種改良を目的とした生物照射が可能な加速器であり、これまでに加速器を利用した民間企業との共同研究により、複数の品種登録出願を行ってきた。

最近の理化学研究所によるモデル植物の変異体を用いた全ゲノム変異解析の結果から、アルゴンなどの重イオンビーム照射による局所的な高エネルギー付与が、染色体レベルの再構成を伴う新しいタイプの変異を誘発することが明らかになってきた。そこで、本研究においては、若狭湾エネルギー研究センターに整備されているイオン加速器から得られるカーボンビームに関して、レンジシフターを用いてビームエネルギーを下げることで、より高い LET のカーボンビームを試料に照射することを検討した。さらに、異なる LET のカーボンビームを用いてシロイヌナズナ種子に照射したときの、発根伸長における線量反応の差異を調査した。

結果の概要

イオンビームは、ビームの速度が低速になると、高速の時よりも周囲の物質との相互作用が高まり、その結果より大きなエネルギーを放出し、そのエネルギーを周囲の物質に付与することになる、すなわち高 LET 化する。若狭湾エネルギー研究センターのイオン加速器においては、従来のカーボンビームの照射法では、試料に対しおよそ 450MeV のカーボンビームが照射される。このときの水中飛程はおよそ 4.5mm であって、LET はおよそ 57keV/μm と計算される。理化学研究所が明らかにしつつある大規模な DNA 構造変化を起こすとされる LET は少なくとも 100keV/μm 以上であり、それを当センターのイオン加速器で実現するには、照射室内の作業で出来得る方法としては、照射試料の上流にレンジシフターを挿入し、試料位置でのカーボンビームのエネルギーを下げる可以考虑。この方法をとることで、試料ごとに通常の照射と LET を高めた照射とを使い分けることができる。

^{*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

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に、カーボンビームの LET を試料位置で変化させるためのセットアップを示した。通常の照射の場合は、真空中で厚さ 1.5mm のアルミニウムを用いて、ビームを散乱させ、厚さ 100 μ m のカプトン膜を通して、ビームを大気に取り出している。電離箱(PTW-786)を常時ビーム軸上に設置したままビームを通過させ、試料にビームが照射されることになる。この時の線量計はカーボンビームの水中飛程が約 4.5mm あることもあり、指頭型の線量計を用いている。一方、より高い LET を得るためのセットアップとしては、電離箱(PTW-786)と照射試料との間にレンジシフターとして種々の厚みのアクリル板を挿入することで対応した。この時の線量測定においては、カーボンビームの水中飛程が 1.5mm を切る場合も想定し、指頭型の線量計ではビームが届かないことも考えて、平行平板型の線量計を用いることにした。こうしたセットアップにより、挿入するアクリル板の厚みを可変させることで、LET を変化させることができる。

次に、LET の異なるカーボンビームの照射が植物に与える影響について調査した。実験材料として、シロイヌナズナの種子を使用した。カーボンビームの照射は、従来の照射法(LET:57keV/ μ m)およびアクリル板を 3.5mm 挿入した照射法(LET:160keV/ μ m)でそれぞれ種々の線量で行った。照射後の種子は殺菌処理後、1/2 MS、3%スクロース含有ジュランガム培地のプレートに播種した。プレートは、平置きせず立てた状態で 22 $^{\circ}$ C、16 時間明期 8 時間暗期で設定した照明付培養器の中で保存した。播種後 1 日おきにプレートを写真撮影し、照射法ごと線量ごとに各 10 個体の発根長を計測した。異なる LET のカーボンビームで照射したシロイヌナズナ種子の播種後 14 日目における幼苗の発根長をしめす(図 2)。いずれの播種後日数、いずれの照射法においても、線量の増加に伴い、根長は著しく低下した。しかし、その程度はアクリル板を挿入した照射法においてより顕著であった。アクリル板を挿入した照射法においては、播種後日数が経過するにしたがって、無処理、80Gy の試験区では根の伸長が見られたが、160Gy、240Gy の試験区では根の伸長はほとんど見られなかった。図 2 の播種後 14 日後においては、無処理では 50mm の根長が見られたが、240Gy の試験区では 5mm 以下の根長であった。従来の照射法においては、線量の増加に伴う根の伸長の減少度はアクリル板を挿入した照射法に比べて緩やかで、根の伸長が無処理に比べて半分になる線量はおおよそ 400Gy であった。また、640Gy の試験区においても、アクリル板を挿入した照射法の 160Gy の試験区よりも根の伸長が見られた。無処理に比べて 50%の根の伸長を示す時のそれぞれの照射法に必要な線量から生物学的効果比を算出すると、約 4 倍と見積もられた。以上、同じカーボンイオンにおいて異なる LET でシロイヌナズナ種子に照射したときの根の伸長に関する線量反応は高 LET の場合によりシビアになることが明らかになった。

今後の課題と展望

今年度は、レンジシフターを挿入することでより高い LET のカーボンビームを試料に照射することを検討し、同じカーボンイオンにおいても異なる LET では生物効果が数倍異なることを明らかにした。今後は、この照射法を用いて照射した種々のモデル植物種子および穀類種子の後代を育成し、変異体の作出とそのゲノム解析を行っていく予定である。

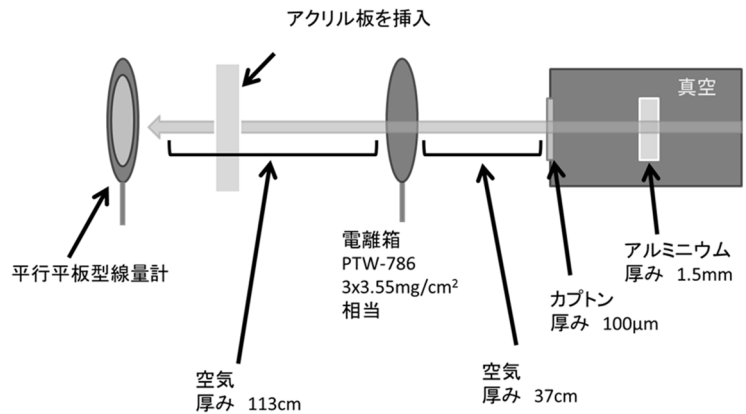


図1 カーボンビームのLETを変化させるためのセットアップ(模式図)

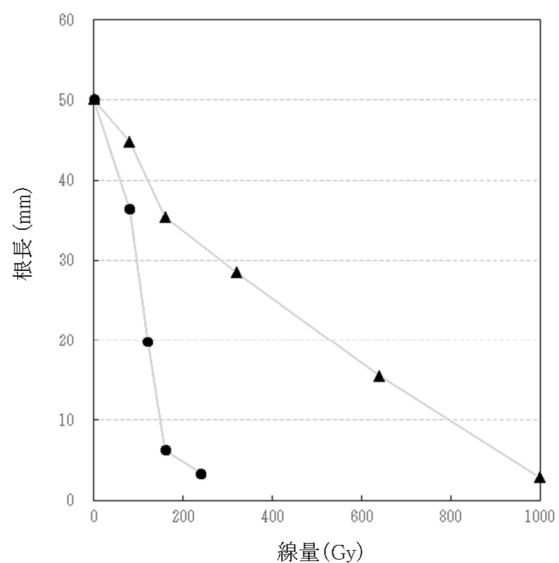


図2 異なるLETのカーボンビームで照射したシロイヌナズナ種子の播種後14日目における幼苗の発根の様子 (●:LET 160 keV/ μ m、▲:LET 57 keV/ μ m)

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 difficult 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。さらに、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、山田錦と比較して糊化ピーク温度が高くなっていた。

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。そこで早生化した山田錦系統群において早生化度とデンプンの溶けやすさの相関を調べたところ、早生になるほど栽培は容易になり多収になるが、早生化による平均気温の上昇のためデンプンが溶けにくくなり商品価値が下がるというトレードオフの関係があり、著しい品質の低下を招かない程度の早生化が重要であることを明らかにした。

さらに、作りやすく多収でかつ品質の高い品種を作り出すため、出穂時期を調整した難脱粒性系統と早生系統との交配により「草丈が低い」、「茎が丈夫」、「山田錦よりも早生」、「脱粒しない」の形質を併せ持つ2系統の分離集団を育成し、これらの集団から両形質が固定された個体の選抜に取り組んだ。また、「脱粒しない」形質を持つ系統への再度の変異誘発を行う事で「脱粒しない」、「山田錦よりも早生」、「山田錦並みの品質」を併せ持つ福井県内での栽培に最適化した「新山田錦」の育成に取り組んだ。

材料と方法

植物材料

本実験では、平成 30 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、実験圃場で採種した交配後代の F2 種子と、難脱粒山田錦変異原処理集団の M₂ 種子、平成 30 年度までに得られた早生変異体 29 系統の種子を用いた。

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ブルを、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。交配後代の苗は、条間25cm、株間20cmで1系統あたり100個体を定植した。変異原処理を行った難脱粒変異体のM₂の苗は、条間25cm、株間20cmで1系統あたり14個体を定植した。

^{*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県立大学と共同で実施したものである。

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)に封入する。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。

結果

早生系統の栽培調査による、最適な出穂日の決定

これまでに得られた早生変異体 29 系統を用いて、最適な出穂日を決定する目的で栽培試験を行った。今回の調査では、令和元年 5 月 11 日と 6 月 1 日に移植を行い、基準品種として五百万石と山田錦を栽培し、山田錦の早生、矮性、難脱粒変異体計 29 系統の調査を行った。その結果、5 月 11 日植えでは五百万石は 7 月 27 日に出穂し、山田錦は 8 月 19 日に出穂した。6 月 1 日植えでは、五百万石は 8 月 28 日に出穂し、山田錦は 9 月 2 日に出穂した。5 月 11 日植えの早生系統では山早 10 が 7 月 30 日と最も早く出穂し、最も遅い系統では EMS720 が 8 月 28 日に出穂した。6 月 1 日植えの早生系統でも山早 10 が 8 月 15 日と最も早く出穂し、最も遅く 9 月 9 日に出穂した系統が 3 系統あった。これら早生系統の出穂日とデンプン溶解性の相関を調べるために、それぞれの系統の糊化ピーク温度を測定した。その結果、最も早くに出穂した五百万石と山早 10 の溶解ピーク温度はやはり高く、出穂日が遅くなるにつれて溶解ピーク温度が低下した(図 1)。出穂後 20 日平均気温と糊化ピーク温度の相関を調べた結果、出穂後 20 日平均気温が最も低い 23.1℃の時に最も低い糊化ピーク温度 66.0℃を示し、出穂後 20 日平均気温が最も高い 28.6℃の時に最も高い糊化ピーク温度 72.6℃を示した(図 2)。

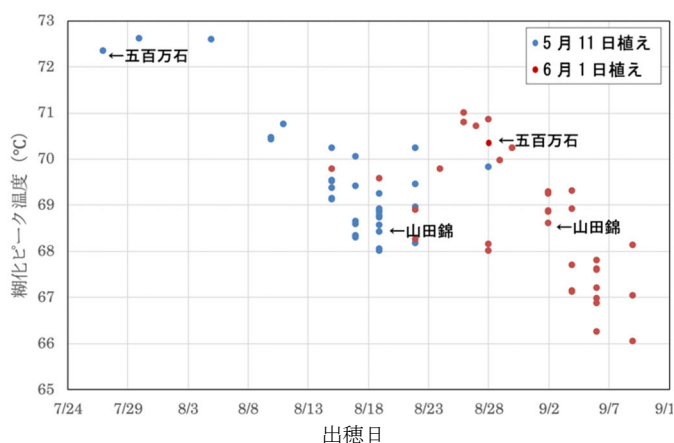


図 1 出穂日と糊化ピーク温度の相関

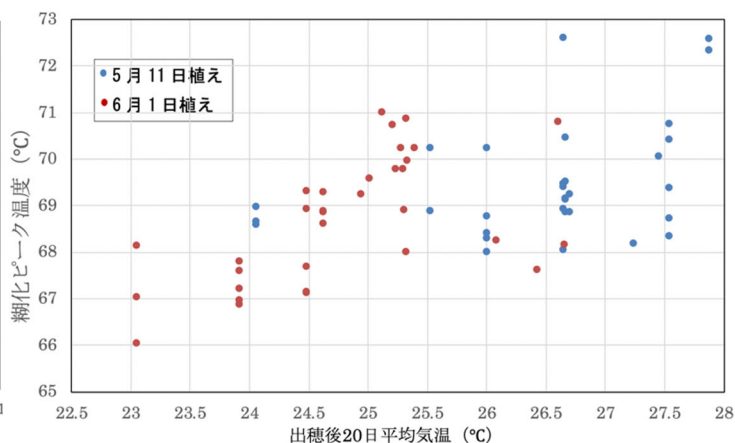


図 2 糊化ピーク温度と出穂後 20 日平均気温の相関

2017 年から 2019 年の 3 カ年分の、変異体系統の糊化ピーク温度と 20 日平均気温をプロットした結果、山田錦および山田錦早生変異体は、20 日平均気温は 23.1℃から 28.6℃まで分布し、糊化ピーク温度は 64.8℃から 72.6℃まで分布した(図 3)。五百万石は 20 日平均 27.1℃で糊化ピーク温度 70.5.0℃、20 日平均 28.61℃で糊化ピーク温度 72.3℃まで分布した。過去 3 年の 20 日平均気温と平年値のグラフから、7 月 30 日から 8 月 6 日に気温が最大となり、8 月 10 日以降に気温が低下する傾向が観察された。五百万石は 7 月 25 日から 8 月 3 日の期間に出穂が観察されたため、最も高温の期間に出穂していることが明らかになった(図 4)。また、8 月 10 日を過ぎるとピークを過ぎ気温が低下する傾向が見られたため、8 月 10 日以降に出穂する早生系統が有望であると結論した。

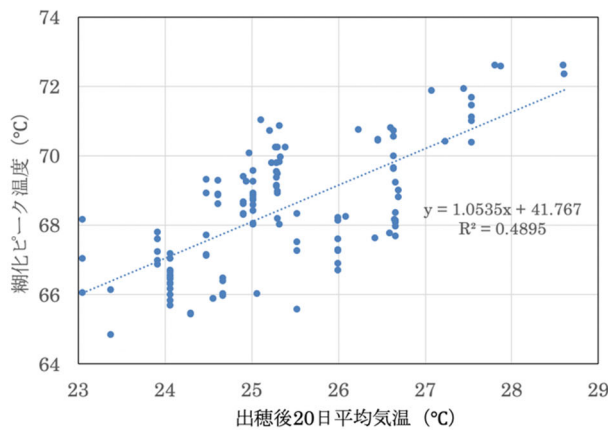


図3 過去3年間の糊化ピーク温度と出穂後20日平均気温の相関

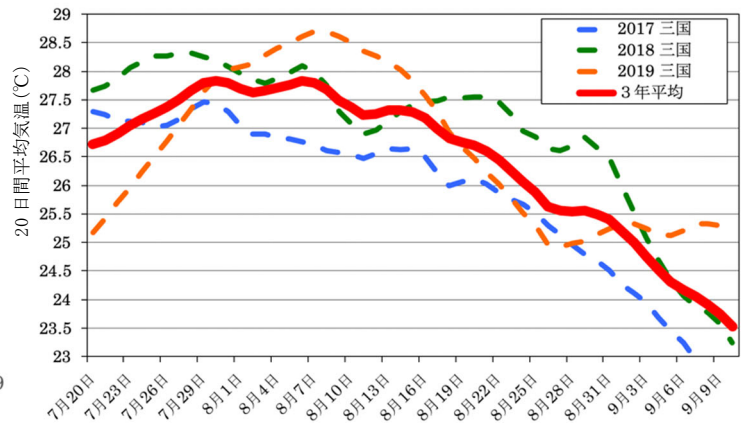


図4 過去3年間の20日間平均気温と3年平均

難脱粒変異体と早生変異体の交配後代F₂からの優良個体の選抜

昨年度までに得られた、難脱粒変異体と、早生変異体を交配した山脱 59×山早 2、山脱 59×山早 11 の後代 F₂ 系統の栽培を行い、難脱粒と早生を併せ持つ個体の選抜を行った。それぞれの集団から早生個体と難脱粒個体の選抜を行った結果、山脱 59×山早 2 から8月3日出穂する個体1個体(脱早 2-8/3)と、8月8日出穂する個体4個体(脱早 2-8/8①～④)を選抜できた。山脱 59×山早 11 からは、8月15日出穂する個体2個体(脱早 11-8/15①～②)を選抜した。それぞれの変異体の草丈は、山田錦が119.5 cmであったのに対し、脱早 2-8/3 が104 cm、脱早 2-8/8①～④はそれぞれ111 cm、112 cm、110 cm、112 cm、脱早 11-8/15①～②はそれぞれ113 cmと114 cmであった(図5)。糊化ピーク温度については山田錦が68.4℃であったのに対し、脱早 2-8/3 が72.7℃、脱早 2-8/8①～④はそれぞれ69.9℃、69.3℃、70.6℃、71.7℃、脱早 11-8/15①～②はそれぞれ69.6℃と70.8℃であった(図6)。

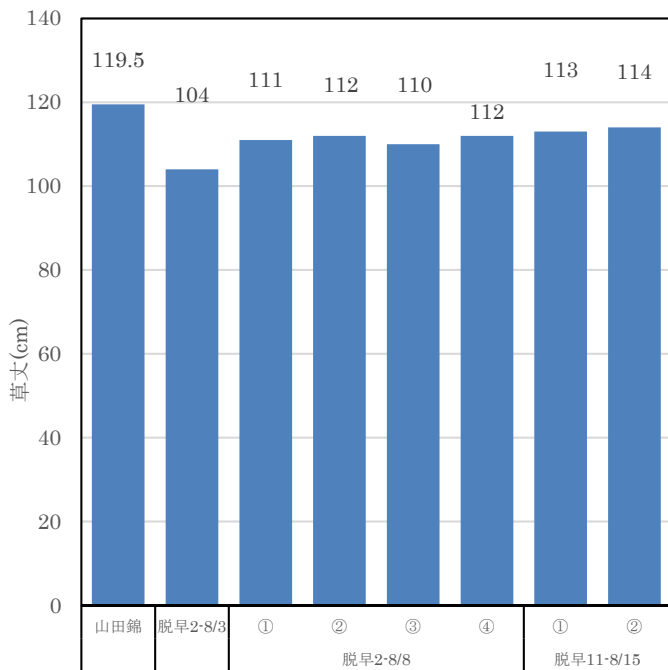


図5 難脱粒・早生交配後代から選抜した有望個体の草丈

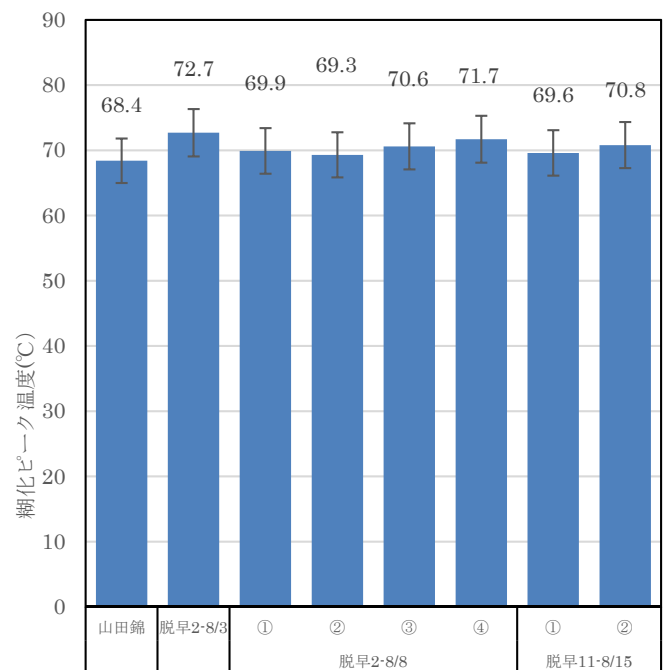


図6 難脱粒・早生交配後代から選抜した有望個体の糊化ピーク温度

難脱粒変異体の変異誘発 M₂ 集団からの早生変異体の選抜

昨年度得た「山田錦」の難脱粒変異体に変異誘発を行ったM₂集団の約2000系統から選抜を行った結果、炭素線75Gy処理区から7月30日出穂する2系統(20C75-1、20C75-2)と、炭素線125Gy処理区から8月10日出穂する1系統(20c125-1)を得た。同時期に栽培した山田錦の出穂日は8月22日であった。これら3系統の早生変異体について草丈およびデンプン溶解性の試験を行った結果、草丈については山田錦が119.5 cmであったのに対し、20C75-1は75.5 cm、20C75-2は68.0 cm、20c125-1は101.5 cmであった(図7)。デンプン溶解性の指標である糊化ピーク温度については山田錦が68.4℃であったのに対し、20C75-1は72.8℃、20C75-2は72.7℃、20c125-1は70.4℃であった(図8)。

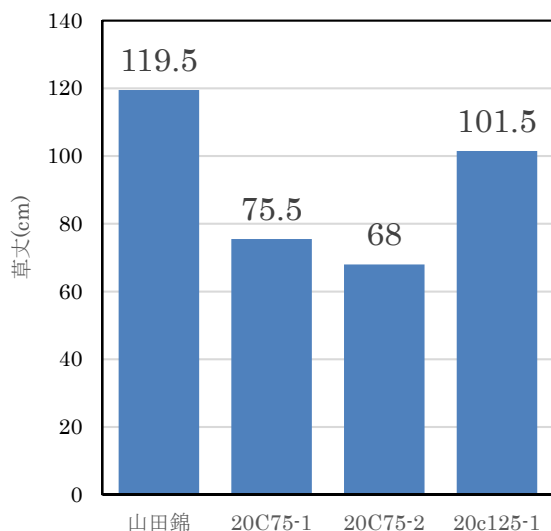


図7 難脱粒・早生二重変異体の草丈

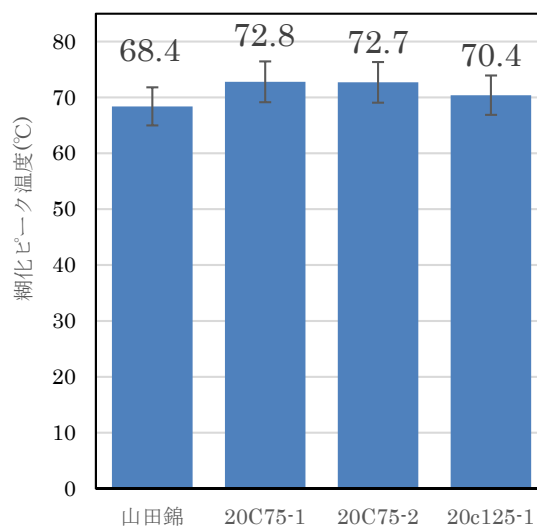


図8 難脱粒・早生二重変異体の糊化ピーク温度

結言

難脱粒と早生を併せ持つ有望系統の選抜

今回の研究で、難脱粒変異体に再度変異誘発を行った M₂ 集団から早生変異体を3個体、難脱粒変異体と早生変異体の交配後代 F₂ から2系統の難脱粒と早生を併せ持つ有望個体を得ることが出来た。これらの有望個体は、7月30日から8月15日まで出穂期が分布し、多様な系統が得られている。デンプン溶解性はこれまでの結果と矛盾せず、出穂期の温度に依存して分布していた。これらの系統の内、20C75-1と20C75-2は比較的強い矮性表現型を示しており、実際の栽培には不適であると考えた。脱早 2-8/3は草丈については良いサイズであるが、出穂が早過ぎるためデンプン溶解性が悪く、不適であると判断した。脱早 2-8/8①～④はと脱早 2-8/15①～②については山田錦よりも10cm程度矮性であり、デンプン溶解性についても五百万石よりも良いため有望系統であると判断した。これらの有望変異体は、今回決定した最適な出穂期にも概ね合致しており、品種化に向けて次年度以降の栽培調査が必要であると結論した。

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 on the liquid surface by a multistage extraction using organic solvents. The fraction, which was obtained by anion exchange chromatographic purification of the extract, showed higher antiglycation activity than that of aminoguanidine. In addition, a mutant that shows 1.3 times larger growth rate than the wild type was obtained by a carbon beam irradiation.

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および化学構造を解析した。抗糖化物質は液体表面培養で得られた菌糸体を数種類の有機溶媒で多段階抽出することにより、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り、抗糖化作用は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。また、イオンビーム照射により親株の1.3倍の増殖速度を示す変異株の作出に成功した。

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。



図1 カバノアナタケ

本研究では、カバノアナタケが生産する抗糖化物質の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。

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および回収

既存のカバノアナタケ NY-1 株を液体表面培養法により培養し抗糖化物質を含む菌糸体を生産した。回収した菌糸体は凍結乾燥後、粉碎し多段階の溶媒抽出により抗糖化成分を抽出した。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。

2. 抗糖化成分の構造解析および生理活性作用の評価

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。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。さらに、抽出物を陰イオン交換クロマトグラフィーにより精製し、抗糖化物質の化学構造を LC/MS と NMR で解析した。

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:500–2000Gy、カーボン:250–750Gy)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. 抗糖化物質の生産および回収

カバノアナタケの菌糸体は、液体表面培養 30 日目に菌糸体濃度が 8-10g/L に到達した。この時点で菌糸体を回収し、凍結乾燥した。凍結乾燥後の菌糸体を乳鉢で粉碎した後、ヘキサン、酢酸エチル、エタノール、熱水の順に固液抽出した。さらに熱水に抽出された生理活性成分を、メチルイソブチルケトン(MIBK)を溶媒として液液抽出した。各抽出画分の構成成分を調べたところ、MIBK 抽出物(図 2)はポリフェノールを最も多く含んでいた(16-20%)。

2. 抗糖化成分の構造解析および生理活性の評価

MIBK 抽出物の抗酸化活性と抗糖化活性を調べたところ、DPPH ラジカル消去法において高い活性を示した。また、牛血清アルブミンの Fructose による糖化をモデル反応として抗糖化活性を測定したところ、抗糖化作用の基準物質であるアミノグアニジンよりも高い活性を示した(図3)。これより、MIBK 抽出物には高い抗糖化活性を示す(糖化最終生成物 AGEs の生成を抑制する)成分が含まれていることが明らかとなった。

次に、MIBK 抽出物中の抗糖化成分を特定するために、陰イオン交換クロマトグラフィーで精製したところ、水-メタノール系のグラジエント溶出により、逆相 HPLC で単一ピークとなる画分が得られた。この画分について、LC/MS、 ^{13}C NMR、 ^1H NMR を用いて詳細に解析した結果、その化学構造を決定することができた。

3. カバノアナタケ変異株の作出

イオンビーム照射により親株よりも高い増殖速度を示す変異株の作出を検討し、カーボンビームで3株、プロトンビームで3株の高増殖速度変異株が得られた。中でも、カーボンビーム 800Gy 照射で得られた変異株 C800-B は親株の約 1.3 倍の増殖速度を示した(図4)。C800-B 株は、親株と同等の DPPH ラジカル消去活性を示したことから、抗糖化活性についても同様の結果が期待できる。現在、この変異株の抗酸化特性及び抗糖化特性の詳細な解析を進めているところである。

結言

カバノアナタケの液体表面培養により抗糖化の基準物質であるアミノグアニジンよりも高い抗糖化活性を示す物質が生産可能であった。この物質は有機溶媒を用いた多段階抽出と陰イオン交換クロマトグラフィーにより精製可能であり、LC/MS および NMR を用いた解析により構造を決定することができた。この内容に関しては、現在、特許出願の準備中である。また、抗酸化物質の生産性を維持しながら増殖速度が大きい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、今回特定した抗糖化物質の詳細な特性について解析する予定である。

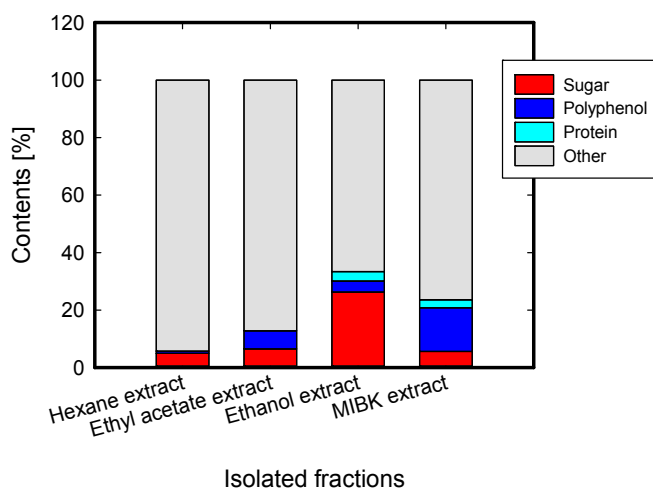


図 2 溶媒抽出成分の構成成分

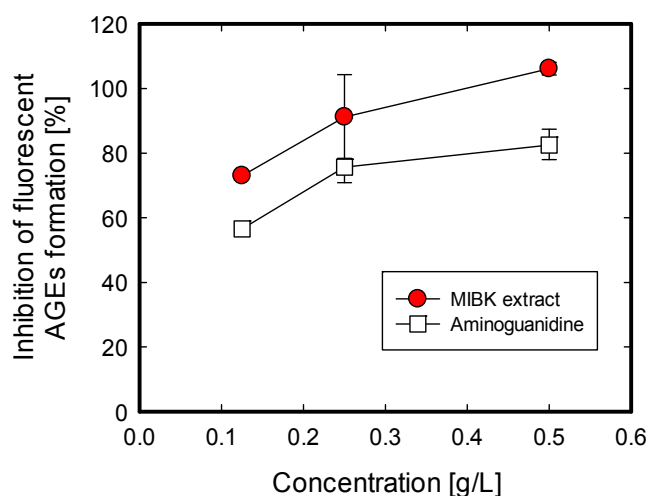


図 3 MIBK抽出物の抗糖化活性

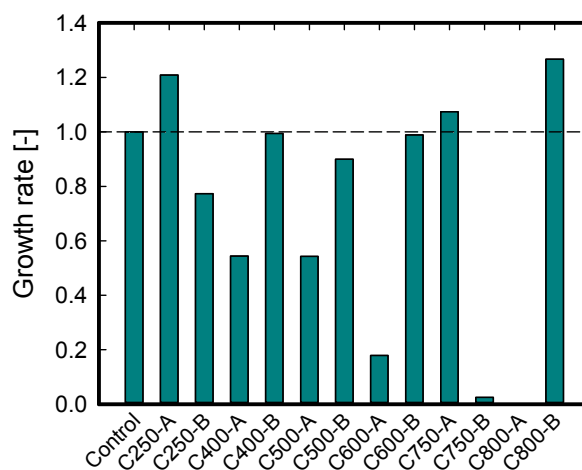


図4 変異株の増殖速度

2.3.1.5

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 Novel Shiitake Strains with Low Toxic-Element Accumulation 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(*Lentinula edodes*)は古くから我が国を含む東アジアで食さ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の菌糸体にイオンビーム(炭素線)を照射して得られた突然変異体の中から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。

昨年度は、予備試験として子実体発生に影響が少ない線量(炭素線 200 Gy)を決定した。そして決定した線量を照射した菌興 115 号の菌糸体の一部をマルト培地で培養し、その培養菌糸体の先端細胞を分離培養し、5350 株の分離株を取得した。これら分離株の子実体を取得するために木粉栽培を行った結果、現時点で 4137 株から子実体を得ることができた。このうち 2961 株の子実体の Cd 濃度を ICP-MS により測定した結果、対照区である菌興 115 号の Cd 濃度平均値は 0.46 mg/kg DW (n=51)であったのに対し、分離株の Cd 濃度範囲は最小値:0.16~最大値:1.14 mg/kg DW であった。今後、菌興 115 号と比較して Cd 濃度が 40~65%減少した 108 株について再現性を調べるとともに、再現性が認められた菌株については原木栽培を実施する予定である。また、新たな分離株の取得、未測定株の Cd 濃度の測定も順次行っていく予定である。

^{*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。

2.3.1.6

イオンビーム照射によって構築された *Schizophyllum commune* 変異株を用いた
リグノセルロースからの直接有機酸生産Direct Production of Organic Acid from Lignocellulose with *Schizophyllum commune* 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

再生可能な資源であるバイオマスから燃料や化学品を作ることは、化石資源への依存から脱却する方法として期待されている。バイオマスはセルロースやリグニンなどで構成されており、そこからの有用物質生産は、糖化プロセスと発酵プロセスとを組み合わせたプロセスによって行われる。こうしたプロセスが従来の化学反応によるプロセスを上回る技術となるためには、プロセスの簡略化や低コスト化、省エネルギー化が求められる。これらを達成するためには、糖化プロセスと発酵プロセスとを同時に行う糖化発酵同時進行プロセスの開発が重要である。

我々は、スエヒロタケ *Schizophyllum commune* が糖化発酵同時進行プロセスにより、リグノセルロースから有機酸やエタノールを選択的に生産できることを見出した。この時、分泌セルラーゼにおいて β -Glucosidase(BGL) および Cellobiohydrolase(CBH)の生産は良好であるものの、endo- β -Glucanase (EG)の分泌が乏しいことが判明した。そこで、イオンビームによる変異誘発を活用し、セルラーゼ生産の向上を図り、各種リグノセルロースから効率良く有機酸を生産できる変異株の作出を検討してきた。獲得してきた変異体の中には、EG の分泌生産量が有意に向上し、野生株では反応が進まなかったもみ殻でさえも有機酸を良好に生産できる株が見られた。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ナ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・学術研究部・バイオ材料研究室
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。

2.3.1.7

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

花卉園芸植物の品種改良においては、花色、花形、草姿などに関する種々の遺伝資源を利用することで品種開発が行われている。その遺伝資源を生み出した元となるものは、膨大な時間をかけて形成されてきた自然界で生じる突然変異であろう。その遺伝資源を積極的に創出していく手段として、人為的な突然変異誘発がある。その突然変異誘発法において、必要な箇所にだけに変化を起こさせ、それ以外には影響を極力与えないといった効率の良い方法の1つとして、イオンビームによる変異誘発がある。

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。特に、組織培養法を用いて、苗を増殖できるシステムを確立している場合には、作出された変異体に不具合が見当たらなければ、そのまま栄養繁殖系品種として非常に短い育種年限で品種化が可能になる。このサイクルを回すことで、19 品種の品種出願を行い、8 品種の品種登録を行うことができた。さらに、今までにない新しい取り組みとして、重イオンビーム照射で得られた変異体への2度目の照射を試みている。これは、重イオンビーム照射で起こる変異箇所がかなり少ないことを利用して、2度目の照射によって、一度の照射では得ることが難しい表現型あるいは複数の表現型を同時にもち変異体を作出しようという試みである。今後は、いままでに獲得した変異体にもう1度照射したこれらの頂分裂組織からの個体再生とその特性評価を行っていく予定である。

^{*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} 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。

2.3.2. 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 an Agricultural Product of Fukui Prefecture

田中良和^{*1}

Yoshikazu TANAKA

Abstract

RAPD analysis was performed on midi-tomato (Hanakomachi), an agricultural 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

福井県はミディトマト発祥の地であり、県内外で高い評価を受けている。近年、品種の流出や産地偽装など生産者の権利が侵害される事例が多くなっている。それに対応するために、品種の同一性判定を迅速・簡便に行える技術の開発が必要とされている。本研究では、福井県が発祥の地であるミディトマトに着目し、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。試料は、福井県農業試験場園芸研究センターから供試されたミニトマト及びミディトマトを使用した。RAPD は 10 塩基からなる PARD プライマー80 種類を使用した。使用した。反応は KOD One Master Mix (TOYOBO)を使用し、94℃ 3 分で変性後、94℃ 10 秒、45℃ 30 秒、68℃ 10 秒を 45 サイクル行った。反応後、3%アガロースゲルを用いて電気泳動を行い、DNA 多型を確認した。その結果 5 個のプライマーにおいて、はなこまち特有のDNA多型が見つかり、合計 8 個の特異的なDNA断片を検出することが出来た(図 1)。これらのプライマーを用いて、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

昨年度に引き続いて今年度はミニトマト及びミディトマトを比較対象とした RAPD 解析を行い、はなこまち特有の DNA 断片を複数検出することが出来た。この RAPD プライマーを組み合わせ使用すれば、はなこまちと他のトマトの判別が可能と考えられる。今後はさらに多くのトマト品種を対象として、はなこまち特有の DNA 多型を検出すると同時に、より安定した結果を得るために、多型 DNA バンドの塩基配列を調べて、STS (Sequence Tagged Site) プライマーを作成する予定である。

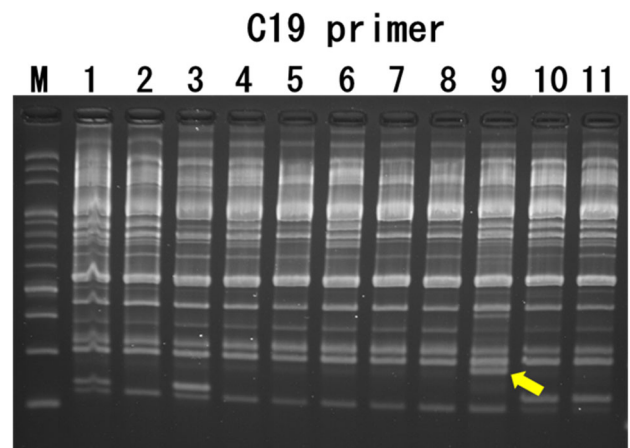


図1 RAPD 解析の結果(C19 プライマー)

M:100bpDNA ラダー、1:べにすずめ、2:Cf ネネ、3:チャコ、4:エコスイート、5:県保有株 A、6:ステラ、7:県保有株 B、8: 県保有株 C、9:はなこまち、10:フルティカ、11:レッドボレロ
黄色矢印で示した所にはなこまち特有の 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 midi-tomatoes produced in Fukui prefecture and other areas.

要約

ミディトマトについて、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を試料とし、果汁中のアミノ酸、糖、および香気成分を液体クロマトグラフ質量分析装置、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、分析条件の決定を試料毎に検討し、比較検討に適した条件を得た。試料に用いたミディトマトは、越のルビーをはじめ愛知県産、高知県産など同価格帯で似通った大きさの市販品と、種苗会社から供与を受けた種類の異なるもの、入手可能なものでは収穫期の異なる同品種のものを含めた計 31 種を使用した。グルタミン酸とγアミノ酪酸などのアミノ酸、果糖、ブドウ糖、ショ糖、六糖までのオリゴ糖、香気成分としてテルピネン、リモネン、ヘキサナール、ゲラニルアセトン、ファルネシルアセトン等の計 20 種の化合物について含有量の分析を行い比較調査を実施した。結果の一例としてグルタミン酸含有量を図1に示した。いずれの成分も品種間の差は大きくそれぞれに特徴がみられるが個体差も大きく、明瞭かつ有意に産地を特定できる特徴を見出すことはできていない。更に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。

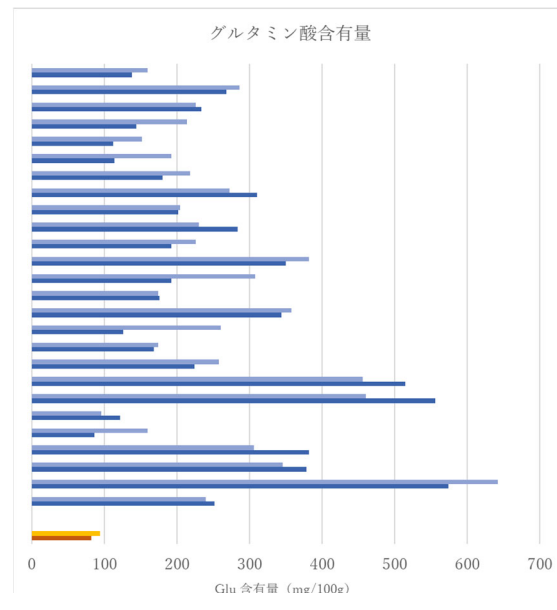


図1 トマト 30 種中のグルタミン酸含有量
品種(産地)毎に2固体ずつ
橙色が越のルビー

結言

福井県産および類似品のミディトマトを試料とし、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。成分判定に有望な条件や前処理法は確立できたものの県産品の特徴を見出すことはできておらず、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。本研究で分析を実施している成分には生体機能性を示すものも多く含まれており、食品の高価値化の根拠を与えるために活用できる。

^{*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

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

食品の抗酸化活性評価法の開発

Development of Antioxidative Activity Evaluation Method for Food

遠藤伸之^{*1}

Nobuyuki ENDO

Abstract

We have developed a simple assay based on electron spin resonance (ESR) spectroscopy for free radical scavenging capacity determination. The reactivities of hydroxyl radical, superoxide anion radical, alkyl radical, alkoxy 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 area 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、ヒドロキシルラジカル、スーパーオキシドアニオンラジカル、アルキルラジカル、アルコキシルラジカル、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の他、梅干し、ラッキョウなどの加工食品を試料として用い、他県産品や類似商品と比較しながら抗酸化活性評価手法の開発を行い、従来法との比較を行いながら測定条件や反応条件、フリーラジカル等の発生条件を様々に変化させ、食品を試料とした抗酸化活性評価手法として精度・再現性のよい条件や手法を得ることができた。評価対象として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、アルキルラジカル、アルコキシルラジカル、一重項酸素の6種のフリーラジカル、活性酸素に対して、簡便で再現性の高い消去活性評価手法を確立できた。

今後は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、食品の機能性評価法として既存法より得られる情報が多く、科学的根拠が高い手法であるが、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適応性の判定を行う必要がある。今後、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を活用した評価を行い、福井県産農産品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

ミディトマト新品種の時季における着果特性

Effect of Season on the Fruit Setting of New Midi-Sized Tomato Variety

畑下昌範^{*1}、井村裕治^{*2}

Masanori HATASHITA 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 highly 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 year-round cultivation. Fruit setting and fruit thickening characteristics of selected midi-sized tomato variety in early summer and late autumn were examined. Fruit setting percentage of this new variety was very high and there were no undergrown fruit irrespective of these seasons. At the same condition, the current midi-sized tomato variety could fertilize rarely and the fruits did not develop normally without treatment of the fruiting promoter. These results suggest that the productivity of this new variety was higher than that of the current variety.

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、今ま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かった。本研究において、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。選抜されたミディトマト新品種に対し、初夏および晩秋季における着果性と果実肥大特性について検討した。検討した時季によらず、新品種の着果率は非常に高く、発育不良果も見られなかった。同じ条件で栽培したミディトマト従来品種では、着果促進処理なしでは、着果も正常な果実肥大もほとんど見られなかった。これらの結果から、ミディトマト新品種は、ミディトマト従来品種に比べて、生産性の高い栽培が可能であると考えられた。

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た。交雑種子へのイオンビーム照射を実施し、受粉作業を行っても種子が形成されずに果実が肥大する変異体を作出した。この変異体を母本として、複数の組合せによる交配を行い、果実重や糖度、草勢などの観点から1系統を選抜し、新品種とした。今回は、この新品種の時季における着果性と果実肥大性について検討した。

結果の概要

本新品種は栄養繁殖系の品種であるため、通常は無菌的な環境下で、苗の状態で維持されている。作期(初夏、晩秋)に合わせて、組織培養法で苗を増殖した。生育した新枝部を台木に接ぎ木し、9cm鉢に鉢上げ、育苗し、試験苗とした。比較する従来品種として、県内種苗会社で育成、販売されている栄養繁殖系の現行品種を用いた。この従来品種も試験苗を同様に調製した。ビニールハウスにて試験栽培を実施した。栽培方法は、施肥量 N 12, P 11, K 10(kg/10a)、畦幅 2m、2 条植とし株間 35 cm で定植した。灌水、病虫害防除は適時実施した。株毎に無受粉条件、着果剤処理条件、振動受粉条件(袋がけした花房への簡易振動発生器による受粉)とに分けた。着果の具合および果実の肥大具合を第 2 花房から第 4 花房において調べた。

^{*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。

ミディトマト新品種の時季による着果性および果実肥大性を検討した結果を図 1 に示す。初夏季の栽培期間における日最高気温の平均値は 35.5℃であった。この時、選抜した新品種においては、無受粉条件、着果剤処理条件、振動受粉条件のいずれにおいてもほぼ 100%の着果性を示し、果実においても発育不良を示すものは全く発生しなかった。一方、従来品種においては、着果剤処理によって着果率は 90%以上となったものの、無受粉条件では 40%、振動受粉条件では 65%の着果率しか示さなかった。しかも、着果剤処理条件においては、正常果を得たものの、無受粉条件および振動受粉条件においては、ほぼすべてが発育不良果となった。この結果から、従来品種は高温期において花粉の稔性が著しく低下することが明らかとなった。

晩秋季の栽培期間における日最低気温の平均値は 10.6℃であった。選抜した新品種では、着果性と果実肥大性において初夏季と同様の結果を示し、無受粉条件、着果剤処理条件、振動受粉条件のいずれにおいてもほぼ 100%で着果し、正常果をつけた。それに対し、従来品種においては、着果性については、無受粉条件、着果剤処理条件、振動受粉条件のいずれ条件においてもほぼ 100%が保たれたが、無受粉条件では、ほぼすべてが発育不良果であり、振動受粉条件では約 50%が発育不良果であった。着果剤処理条件においては、約 1 割に発育不良果が発生した。低温期における従来品種の花粉稔性の低下は高温期のそれほどではないが、確実な収穫を目指す場合においては、着果剤処理が必須であることが明らかになった。

以上の結果から、新品種は花粉の稔性に支障が出る高温期および低温期においても安定に着果、結実する特性を有していることが明らかになった。

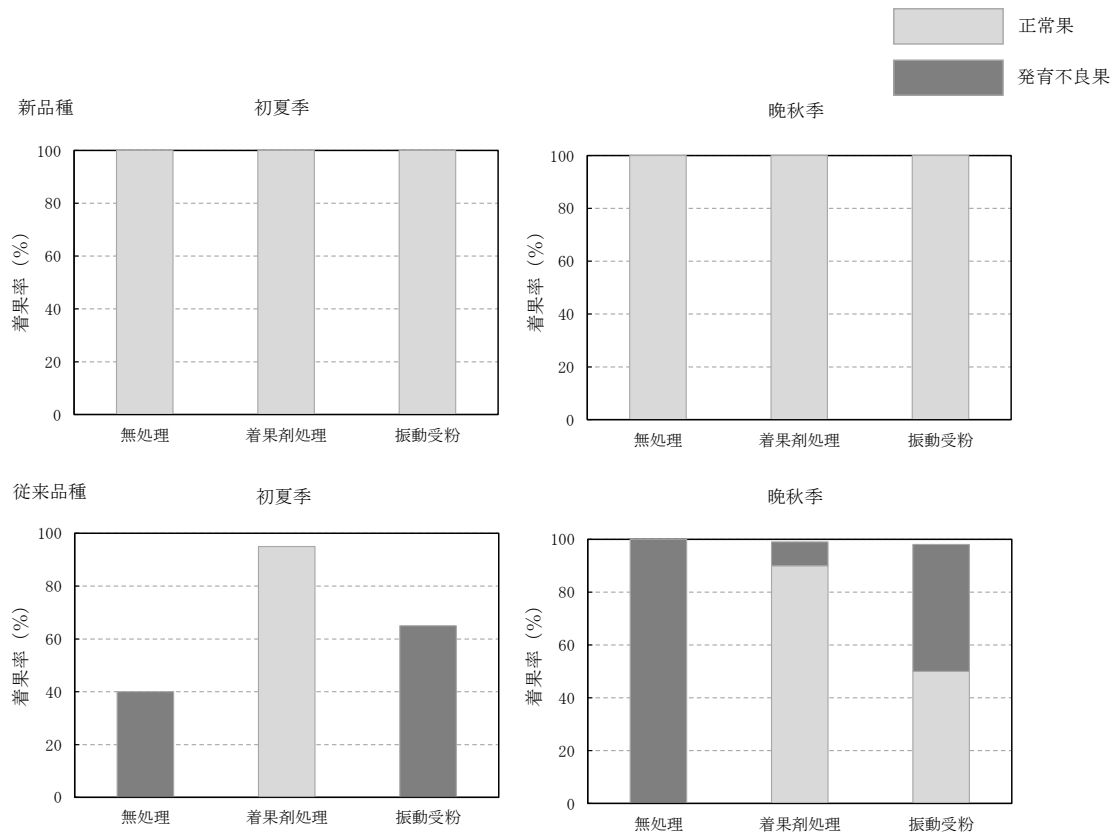


図1 ミディトマト新品種の時季による着果性および果実肥大性

$$\text{着果率} = \text{着果数} / \text{開花数} \times 100$$

発育不良果は、着色が通常の果に比べ遅れ、つやがなく、肥大が明らかに悪い果実

結言

その良食味から需要の増大が期待されるミディサイズのトマトに関しては、周年栽培化および省力栽培化が当面の課題となっている。本研究において、結実性の高いミディトマトの新品種をイオンビーム育種を利用することで育成した。本品種は、初夏季や晩秋季の高温期および低温期においても、従来品種と比べても高い着果率および正常な果実の肥大を示した。本品種を利用することで、着果促進作業の労力やコストを低減した形で周年栽培できる可能性が見出された。

2.3.3.2

DNA マーカーを用いたトマトの病害抵抗性検定

An Assay of Tomato Plants for Screening Disease Resistance Using DNA Marker

田中良和^{*1}、鈴木勝久^{*2}、水野隆^{*3}

Yoshikazu TANAKA, Katsuhisa SUZUKI and Takashi MIZUNO

野菜の育種においては栽培性や高品質性、病害に対する抵抗性など多様な需要があり、種苗会社は迅速かつ効率的に品種改良を行うための方法を求めている。DNA 分析技術を活用した品種の識別や DNA マーカーを用いたマーカー育種を用いて、現在では交配を行った試料植物が、特定の性質を持つか否かを迅速かつ簡便に判別することが可能になった。本年度は、現在開発中のトマトに対してトマトモザイクウイルス (ToMV) への抵抗性 (*Tm-2a*) が付与されたか否かを、DNA マーカーを用いて検定した。送られてきた試料数は年間で約 200 検体であった。DNA マーカーは愛知県農業総合試験場が開発したものを使用した¹⁾。試料は植物 DNA 抽出バッファー (100mM Tris-HCl (pH8)、1M KCl、10mM EDTA) 内で 3 mm 角の葉を摩砕し、これを PCR に用いた。PCR 反応は、KOD FX Neo (TOYOBO) を使用し、反応条件は、94℃2 分間で変性後、98℃10 秒間、63℃30 秒間、68℃90 秒間を 1 サイクルとして 37 回繰り返した。反応後、3µl の PCR 産物を用いて 10µl の容量で制限酵素 *Afl*II (TaKaRa) による消化反応を行った。37℃2 時間の反応後、5µl を用いて、1.5% アガロースゲルにて電気泳動を行い、PCR 産物の切断の有無を確認した。この一連の作業はルーチン化しており、おおよそ 50 検体程度であれば 1 日以内に結果が判る。今後は摩砕方法などを改良して、多数の検体を同時処理出来るシステムの構築をしていく予定である。

参考文献 1) S. Kuroyanagi et al., Res.Bull.Aichi Agric.Res.Ctr.44:7-12(2012)

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ)、^{*2}ハクサンインターナショナル株式会社、^{*3}ブランツファーム 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}、山田裕章^{*1}、山口文良^{*1}、淀瀬雅夫^{*1}、廣戸慎^{*1}、清水雅也^{*1}、渕上隆太^{*1}、小田部圭佑^{*1}、古川靖士^{*1}、
石川遼^{*1}、吉本淳^{*1}、長崎真也^{*1}、大矢龍輝^{*1}、中條直紀^{*1}、柴田凌^{*1}、林豊^{*1}、メヘディ ハサン^{*2}

Satoshi HATORI, Tetsuro KURITA,

Hiroaki YAMADA, Fumiyoshi YAMAGUCHI, Masao YODOSE, Makoto HIROTO, Masaya SHIMIZU,
Ryuta FUCHIKAMI, Keisuke OTABE, Seiji FURUKAWA, Haruka ISHIKAWA, Atsushi YOSHIMOTO,
Shin'ya NAGASAKI, Ryuki OYA, Naoki CHUJO, Ryo SHIBATA, Yutaka HAYASHI and Mehedi HASAN

Abstract

In the periodic inspections in the end of the fiscal 2018, we did not find any visible discharging marks on/in the insulator and protective gap electrodes in a tandem accelerator. After the inspection, we could apply the maximum acceleration voltage of 5 MV to the terminal. In the machine time, which started in April of 2019 after the inspection and ended in the January of 2020, we did not have serious troubles in the operation of the tandem accelerator else besides the instability of the rectifier current in the operation in June of 2019.

The instability was found to be occurred by the discharge in the insulator in the RF transformer tank in the inspection in the fiscal 2019. In the 2019 machine time, we tried to extract nitrogen hydride negative ion NH_x^- from the plasma sputter source for the future use of ^{15}N beam. In the case of the use of the sputter type source, carbon nitride ion CN^- is much feasible than NH_x^- .

A synchrotron with the tandem accelerator as the injector was operated well for supply of proton, helium and carbon beams for the experiments. However, at the distance of 20 years after the construction, we are now facing some problems in the system, for instance, leakage of the cooling water in some magnet power supplies.

要約

タンデム加速器は 2018 年度末の定期点検では絶縁構造物や保護電極に顕著な放電痕も見られず、定検後の 5MV 昇圧も良好であり 2019 年度の運転を再開した。2019 年 6 月整流回路の負荷電流が不安定になる現象が見られたが加速電圧の発生に影響はなく、2020 年 1 月に 2019 年度の運転を終えた。負荷電流が不安定になった原因は高周波トランスタンク内の絶縁物の放電であることが運転終了後の定検でわかった。

将来の窒素 15 ビームの利用のために NH_x^- 発生の試験が行われた。スパッター型イオン源では従来より行われてきた CN^- が利用しやすいことがわかった。

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。しかし一部電源において冷却水漏れが発生するなど建設より 20 年を経て問題が増えてきた。

緒言

2016 年度から取り組んでいるタンデム加速器の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。2018 年度の加速器定期点検では絶縁構造物や保護ギャップ電極に顕著な放電痕は見出せなかった。定検直後に行った昇圧試験では印加電圧は 5.05 MV に達した。

2019 年度のマシンタイムは 2019 年 4 月から 2020 年 1 月まで行われた。タンデム加速器の加速高電圧発生時間は 3879 時間に達し、加速管故障以前、2016 年の水準(3674 時間)に戻った。マシンタイム期間の 2019 年 6 月に昇圧用の高周波多段整流回路(シェンケル回路)の負荷電流や高周波発振器発振管プレート電流(高周波トランス1次コイル電流)が不安定になる現象が発生した。一過性のものであり、加速高電圧発生にその後間

^{*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、^{*2} バングラデシュ原子力委員会(Bangladesh Atomic Energy Commission)
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。

題はなかった。マシンタイム後の 2019 年度定検において高周波トランスタンク内で高周波フィードラインの中継端子や保護ギャップ電極を支える絶縁支柱の放電が確認された。

重イオン源から引き出し可能イオン種の多様化の試みが行われている。将来、原子核反応法(NRA)を用いた水素分析に用いる ^{15}N 引き出しのため、水素化窒素 NH_x^- イオンの引き出しを試みた。

タンデム加速器を入射器としてシンクロtron利用実験は順調に行われている。ビームラインの電磁石シャント抵抗の冷却水漏洩事故が頻発するようになっており対処が必要である。シンクロtron開発に関しては射出高周波の最適化研究開発が行われており、稿を割き詳細に報告する。

タンデム加速器高周波トランス放電

高周波トランス2次コイルから高周波電極へのフィードラインの中継端子や保護用の放電ギャップ電極を支える絶縁支柱にはポリプロピレン(PP)が用いられている。PP はかつて高周波電極を支える支柱にも用いられていた。PP などプラスチックは成型時に内部に気泡ができるのを防げない。気泡はプラスチックの誘電率と異なるため、気泡部分に電位の特異点が生じる。部分放電が起き最終的にプラスチックを熔融させるような雪崩的な放電を引き起こすことが報告されている¹⁾。2007 年度定検で高周波電極支柱は不透明な PP に変え、透明でかつ高周波損失にもすぐれるポリカーボネート(PC)に交換した。透明な材質にすることで、内部放電のチェックを行いやすくなった。しかし、PP 製の絶縁支柱がまだ残っていた。PP 製の支柱は PC 製に交換した。

重イオン源から水素化窒素イオン NH_x^- 引き出し試験

現在エネ研ではイオンビーム分析は荷電粒子誘起 X 線検出(PIXE)やラザフォード後方散乱分析(RBS)、弾性反跳粒子分析(ERDA)を用いているが、これらは多元素・同位体同時分析という特徴があるが、一つの元素や同位体のみを分析する場合にはむしろ S/N を悪化させることもある。特定元素を選択的に分析するため原子核反応法(NRA)が用いられる。水素分析のために ^{15}N ビームが用いられるが、スパッター型イオン源である重イオン源ではイオン化ターゲットに炭素+窒化チタン混合物を用い、炭化窒素イオン CN^- を引き出しタンデム加速器へ入射する方法が取られる。 CN^- はターミナルで荷電変換の際に分解し窒素正イオン N^{+} として加速される。しかし、荷電変換時の分解においてほぼ質量が二分されるためビーム広がり問題となる。そこで、分解時に持ち出し運動量が低くなるように NH_x^- イオンの可能性をテストした。

イオン化ターゲットには窒化チタン TiN と水素化チタン TiH_2 を等当量で混合したものを用意した。重イオン源から引き出されたイオンの質量スペクトルの時間変化を観察した。 NH_2^- と同重体である質量数 16 のイオンが観察され、ターゲットのコンディショニング進行とともに引き出し効率が上昇して行く様子が観察された。しかし、タンデム加速器に入射し加速した結果、質量数 16 の負イオンは酸素イオンであることがわかった。ターゲット表面の仕事関数改善のために導入されるセシウムのリザーバータンクに酸素が混入するためと考えられる。セシウムをターゲット表面改質に用いるタイプのイオン源には適さないことがわかった。

電磁石電源冷却水漏れ

一部の電磁石電源において、電流計測制御用のシャント抵抗から冷却水が漏れるトラブルが頻発してきている。シャント抵抗を空冷方式のものに交換することを検討している。冷却水漏れへの対応時間の短縮のため、電源室に漏水センサーを設置している。

結言

タンデム加速器加速高電圧を分割する素子の抵抗値管理、加速器タンク内の絶縁ガス循環冷却などによる絶縁構造物上での電位分布の一様化の試みは放電を抑制し、高電圧の安定化に一定の効果を見出している。加速器の絶縁構造物は内部の状況がチェックしやすいように透明のものを選ぶようにしているが、不透明な PP 使用箇所において部分放電の進行を察知することができなかった。

重イオン源の開発が行われている。窒素ビームのための負イオン種の可能性チェックが行われたが、従来の CN^- イオン引き出しに優れる方法は見出されていない。

参考文献

- 1) 宇野定則、他、「第20回タンデム加速器およびその周辺技術の研究会」報告集、118 (2007)

シンクロトロン^①の出射用高周波信号の最適化

Optimization of the RF for the Beam Extraction of the Synchrotron at WERC

栗田哲郎*1

Tetsuro KURITA

Abstract

The RF kicker method using band noise is utilized to extract beam from the synchrotron at WERC. The band noise is obtained by superposition of plural waves with discrete frequencies within a finite frequency band. The intervals of each frequency of the noise component are usually set equally. The power of the RF kicker increased with optimizing phases of components of the band noise. The fluctuation of the spill structure of extracted beam decreased with optimizing interval of frequency in the band noise.

要約

WERC シンクロトンでビーム出射に用いられる RF キッカーの帯域ノイズの各周波数の位相を最適化することにより、RF キッカーの出力を向上させた。また、帯域ノイズの周波数間隔を調整することにより出射スピルの一様性を向上させた。

緒言

若狭湾エネルギー研究センターのシンクロトロンでは、帯域ノイズを用いた RF キッカー法によって遅い取り出しを行う。すなわち、周回する粒子のベータトロン振動に相当する周波数の高周波を横方向に印加し周回粒子を拡散させることによって、シンクロトロンからビームを出射させる。数百 ms の時間をかけて一定強度でビームを出射するために、出射用高周波の振幅を時間的に変化させる。

2017 年度に、老朽化して保守が困難になった出射制御系を独自に開発することによって更新した¹⁾。その際に、出射ビーム電流量のフィードバック制御を改良した。2018 年度も開発を継続して、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²⁾。

図1に出射制御系の概要を示す。RF キックに印加する高周波は、周回粒子のベータトロニック振動数の拡がりに対応するため、周波数に拡がりを持たせる必要がある。そのような高周波を生成するため、おおよそベータトロニック振動数に対応した中心周波数 f_0 を 1kHz 間隔、帯域 $\Delta f = 25\text{kHz}$ の分散スペクトラム(帯域ノイズ)で振幅変調することによって、 $f_0 \pm \Delta f$ の拡がりを持った高周波を発生させている。

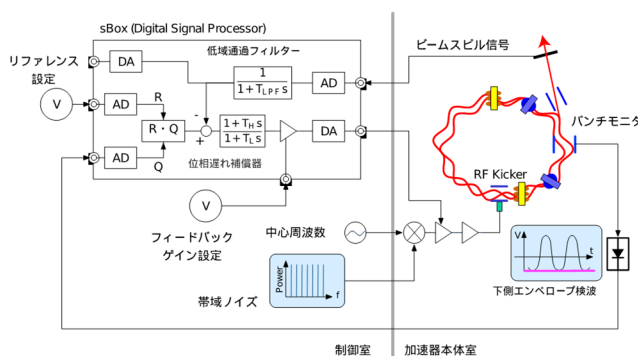


図 1 ビーム出射制御系の概念図

帯域ノイズの最適化

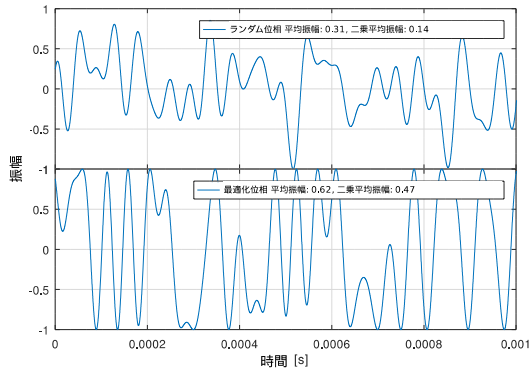
離散スペクトラムの帯域ノイズを生成する際に、各周波数成分の位相は乱数で決定していた。そしてアンプに入力できるように最大振幅が $\pm 1V$ に収まるように規格化する。

位相の選択によって、帯域ノイズのうねりが変わるので、規格化の過程で平均振幅すなわち RF キッカーのパワーが変化すると考えられる。そこで平均振幅が最大になる位相を最小化アルゴリズムの一つである Nelder-Mead 法によって探索した。図2に位相を乱数で決定した帯域ノイズと平均振幅を最大化した帯域ノイズの比較を示す。有意に平均振幅を大きくでき、RF キッカーのパワーの増大が期待できる。

平均振幅によって RF キッカーのパワーが変化していることを確認するために、ゲインパターンを一定にし中心周波数を減衰させ、出射しきれない状況で、様々な帯域ノイズに対する出射効率の変化を測定した。測定結果を図3に示す。RF キッカーが通過する荷電粒子に対して行う仕事は、電圧の2乗に比例するので横軸は二乗平均振幅とした。さらに、周波数間隔を変化させた場合の比較も行った。

*1 (公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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。

図2 帯域ノイズの位相最適化($\Delta f=1\text{kHz}$)

離散スペクトラムだけでなく、連続スペクトラムの帯域ノイズ(colored noise)による測定も行った。Colored noise はデジタルフィルター法³⁾によって生成した。二乗平均振幅を増加させる調整は、振幅のピーク部分を減衰させることによって行った。

図3を見ると、周波数間隔が 1kHz 以下の場合、二乗平均振幅に対して出射効率が比例している。周波数間隔が 2kHz 以上になると出射効率が落ち始める。周波数間隔が広すぎると、ベータトロン振動数が一致しない粒子が増えるためと考えられる。

図4に周波数間隔を変更したときの出射スピルの比較を示す。周波数間隔を広げるにつれ、スパイク状の細かい変動がなくなる傾向にある。2kHz 以上になると、スパイク上の変動はなくなる。出射効率を保ったまま、出射スピルの変動を抑えるには、周波数間隔を 1-2kHz の間に設定すればよいことがわかる。1-2kHz の間を詳細に調べると、およそ 1.6kHz からスパイク上の変動がなくなる(図5)。1.6kHz を最適値として採用することにした。

結言

帯域ノイズの各成分の位相を調整することにより、二乗平均振幅を大幅に向上させることができた。これにより RF キッカーの出力が向上し、出射調整の自由度が上がる。また、スピルのスパイク状の細かい変動を抑制するには、ある程度、周波数間隔を広げた方がよいことが分かった。

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) 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 30 年度、21、58 (2018)
- 3) T. Nakanishi, K. Tsuruha, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A608, 37 (2009)

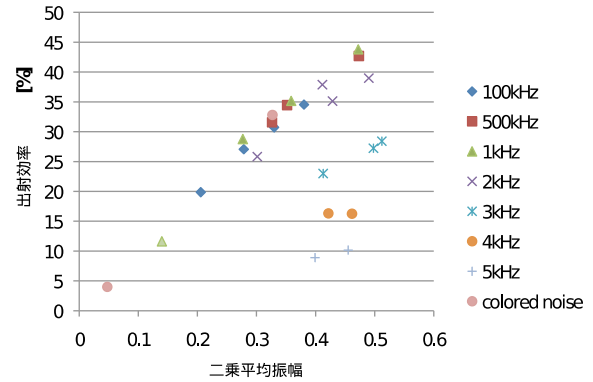


図3 帯域ノイズの位相最適化

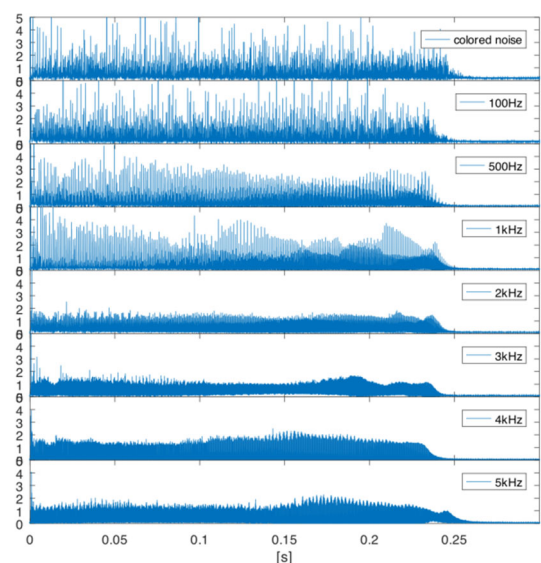


図4 帯域ノイズの周波数間隔を変化させたときの出射スピルの比較(0-5kHz)

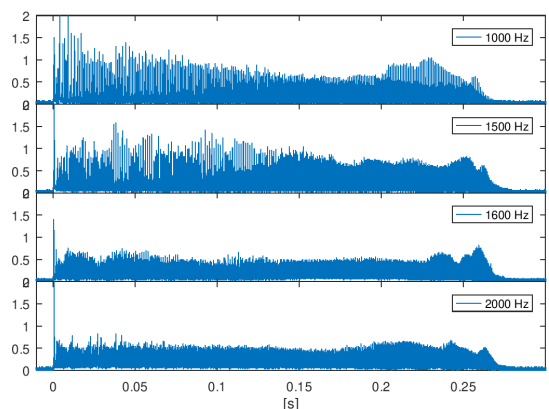


図5 帯域ノイズの周波数間隔を変化させたときの出射スピルの比較(1-2kHz)

2.4.1.3

マルチバンド RFKO によるビーム取出し法の高度化に関する研究
Upgrading of a Beam Extraction Method 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, and beam experiment has been performed using a WERC synchrotron. Experiments of fast beam switching and increasing an extracted beam are done following a proof-of-principle experiment in 2018. As a result, it is shown that the beam-off should be done within 140 μ s, and an extracted beam is increased greatly with proposed methods.

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、マルチバンドスペクトルの高周波電界を使ったビーム取出し法のビーム実証試験を WERC シンクロトロンを用いて行っている。2018 年度の原理実証試験に続き、2019 年度は高速ビーム on/off の実証試験とビーム取出し量を増やす実験を行った。その結果、ビーム off を 140 μ s 以下で行える可能性を示し、また、ビーム取出し量も提案した方法で大幅に増加できた。

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(カラードノイズ信号(CN))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⁾。昨年度、WERC シンクロトロンを使って原理実証試験を行った。2019 年度は、高速にビームを on/off できることを実証する実験を行うとともに、本取出し法の高度化の研究を行った。具体的には、ビーム取出し量を増やすために、乱数を使って作成した CN データの最大値を下げる操作を行い、高周波アンプに入力できる実効値を増やすことや、RFKO システムの電圧変換比を1:4から1:5に増やし、それにより悪化したシステムの周波数特性を補償するために、CN データを局所的に変更するなど操作を行った。

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 CN 信号は、デジタルフィルタ法を使って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)のメモリーに保存し、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 15 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。

WS からの CN 信号は、LPF を通して 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。

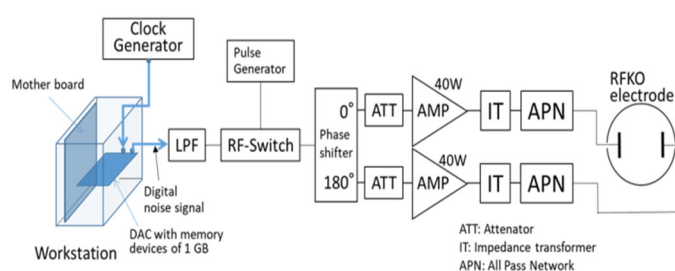


図1 マルチバンド RFKO システムのブロック図

^{*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。

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、IT はインピーダンス変換回路(電圧昇圧回路)である。今回の実験では IT の電圧変換率は 1:4 と 1:5 の 2 つの回路を試作し、APN もそれに合わせて開発した。図2はそれぞれの RFKO システムの電極電圧の周波数特性で、電極付近の電位をオシロスコープのプロープで測定した結果である。電極は日本大学で試作した電極を用いた。1:5 にすることで、高周波側で特性が悪化していることが分かる。

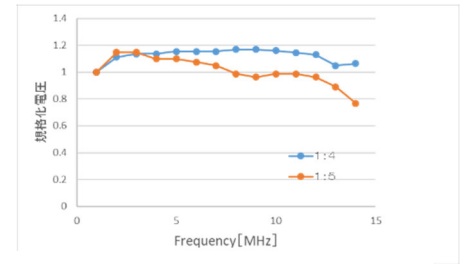


図2 1:4と1:5のRFKO システムの周波数に対する電極電圧。

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。CN 信号のバンド数は全て 10 の結果である。

図3はビーム off 時間の測定結果であり、線量モニタの信号である。ビームは CN 信号が off してから約 $60 \mu s$ 後から減少し始め、その後 $80 \mu s$ でゼロに近づく(RF=10V の場合)。シンクロトロンに周回ビームの一部はバンチングしており、そのビームはシンクロトロン振動の影響でシンクロトロン振動周期の間に取出されてゆくため、 $80 \mu s$ 後に完全にゼロにはなっていないが、加速ギャップに半導体スイッチなどを取り付けて完全にゼロにできれば、 $80 \mu s$ 後にゼロにできると考える。これらの時間遅れの原因としては、線量モニタ回路の時間応答や CN-off 直後にセパトリクス外にいた粒子の影響が考えられるが、今後詳細に検討する必要がある。

図4は CN 信号の最大値(V_m)/実効値(V_e)を前回実験時の 3.3 から 2 に下げた CN 信号で取出したスピル信号である。実効電圧が増えたことにより多くのビームが取り出されていることが分かる。また、スピル強度のバラツキは標準偏差/平均値の値で 0.39 から 0.35 に減少した。

図5は電圧比 1:4 と 1:5 の RFKO システムによるスピル信号である。CN 信号は両者ともに $V_m/V_e=2$ のデータである。電極電圧が高くなったことにより取出し開始からスピル強度が急増していることが分かる。1:5 のシステムは周波数特性が高周波側で悪化するが、スピル強度のバラツキとしては 0.35 から 0.36 程度に増えただけであった。

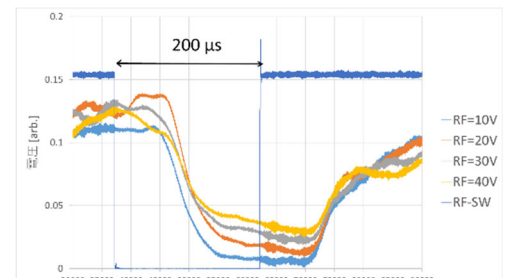


図3 ビーム on/off 時のスピル信号。200 μs の間 RF スイッチにより CN 信号をゼロとした。RF は出射中の加速 RF 電圧である。

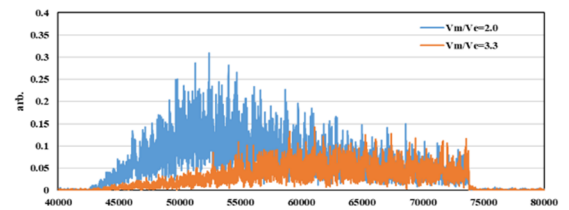


図4 $V_m/V_e=3.3$ (橙)、2.0(青)のときのスピル。

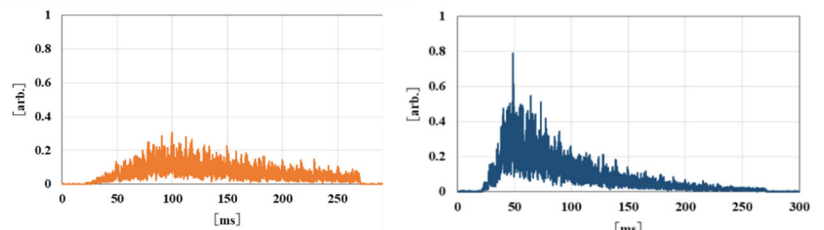


図5 電圧比が 1:4(橙)と 1:5(青)の RFKO システムによるスピル。

結語

マルチバンド RFKO システムを使ったビーム取出し実験を WERC シンクロトロンを使って行った。ビーム on/off 試験では、周回ビームのバンチングにより off 時間が長くなることを示した。この結果から、バンチングをしなければ約 $140 \mu s$ でゼロにできると考える。また、線量モニタの周波数応答を早くすることで、この時間は大幅に短縮できる。一方、CN 信号の V_m/V_e 比を下げたり、RFKO システムの電圧変換比を上げることでスピル強度のバラツキを大きくすることなく出射ビーム量を大幅に増やすことができた。

参考文献

- 1) Th. Haberer, W. Becher, D. Schardt, G. Kraft, Nucl. Instr. and Meth. A 330 (1993) 296
- 2) Tetsuya Nakanishi, Nucl. Instr. and Meth. A 621 (2010) 62
- 3) Akio Shinkai, Soichiro Ishikawa, Tetsuya Nakanishi, Nucl. Instr. and Meth. A 769 (2015) 16-19

2.4.1.4

シンクロトロン出射ビームラインのプロファイルモニタの改良

Improvements of the Profile Monitor in the Extraction Beam Line of the Synchrotron at WERC
 栗田哲郎^{*1}、山田裕章^{*1}、廣戸慎^{*1}、清水雅也^{*1}、山口文良^{*1}、淀瀬雅夫^{*1}、湊上隆太^{*1}、羽鳥 聡^{*1}
 Tetsuro KURITA, Hiroaki YAMADA, Shin HIROTO, Masaya SHIMIZU, Fumiyoshi YAMAGUCHI
 Masao YODOSE and Satoshi HATORI

Abstract

Profile monitors in the extraction beam line from the synchrotron have a problem of vacuum leakage. The vacuum of beam lines affects vacuum of the ring. One of three profile monitors was redesigned and updated to fix vacuum leakage.

要約

シンクロトロン出射ビームラインのプロファイルモニタに真空リークが発生しており、間欠的に真空度が変化していた。シンクロトロンの真空度にも影響し、C ビームの加速効率に影響を与えていると考えられる。構造に問題があり、修繕できなかった。真空リークしにくい構造に再設計することにより、1台のプロファイルモニタについて真空リークが改善できた。

緒言

炭素イオンのような重イオンをシンクロトロンで加速する際に、真空度が加速効率に大きく影響する。シンクロトロンの真空度を向上させるために、2009 年度に、O リング材質の変更、ベーキング、クライオポンプの導入をおこなった。これらにより真空度は、 $\sim 8.6 \times 10^{-6}$ Pa から $\sim 8.2 \times 10^{-7}$ Pa まで向上し、20 MeV 入射、660 MeV 出射時の炭素イオンの加速効率は、8%から39%まで向上した¹⁾。2010 年度に老朽化した9台のイオンポンプの更新を行い真空度は $\sim 7.5 \times 10^{-7}$ Pa まで向上した²⁾。

接続される入出射のビームラインの真空度が悪くリングに影響を与えていたので、ビームラインもリークの修繕およびメタルシール化によって真空度を改善させた³⁾。入射ビームラインの真空度は、 2.7×10^{-4} Pa から 2.1×10^{-5} Pa と一桁以上向上し、リング内の真空度に影響を与えることはなくなった。

出射ビームラインのすべてのプロファイルモニタ(3 台)に真空リークが発見され、真空度は $\sim 3.5 \times 10^{-4}$ Pa 程度にとどまりリングの真空度の悪化の原因になっている。

プロファイルモニタの真空リーク

出射ビームラインには3台のイオンチェンバー型ワイヤープロファイルモニタ(HPR1,HPR2,HPR31)が設置されている。2011 年度に、3 台すべてのプロファイルモニタの真空リークが発見され、2013 年度まで分解点検およびO-ring 交換などによって修繕を試みたが、修繕することができなかった。

プロファイルモニタからの真空リークは間欠的で真空度にスパイク状の変動を及ぼしていた。それを確認したリーク試験を図1に示す。

筐体をビニールのフードで囲い、その中にHeガスを導入した(図1)。その状態で真空度とHeリークディテクターによるリークレートのトレンドを観測した。HPR2 の測定例を図2, 3に示す。真空度とリークレートが同期して変動するイベントが多数確認された。特に、真空窓を持つセンサー部分にHeを導入した時に顕著に同期した変動が多く現れた。すなわち、間欠的にリークが発生して外部から大気真空中に流入していることが示唆される。他の2台のプロファイルモニタにも同様のリークを確認している。

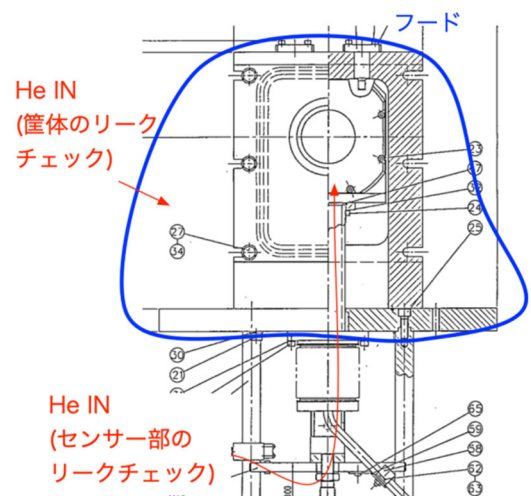


図1 プロファイルモニタの真空リーク試験

^{*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。

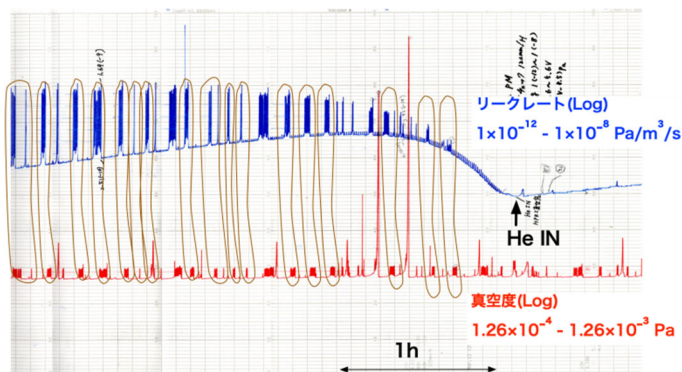


図2 センサー部に He ガスを導入した時の真空度とリークレートのトレンド

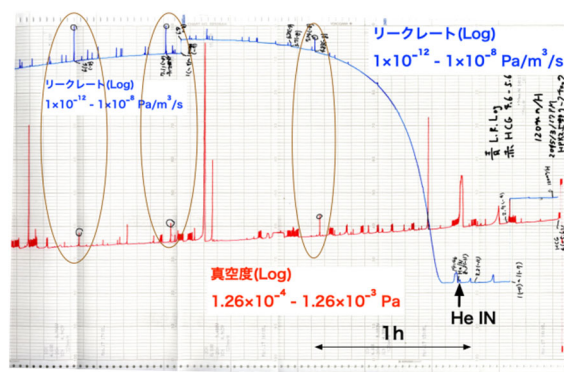


図3 筐体を覆うセンサーに He ガスを導入した時の真空度とリークレートのトレンド

設計の改良と更新

従来のプロファイルモニタは図 4 のように、締結ボルトが少なくアンバランスな配置で、細い O-ring が使用されていたためリークしやすい構造であり、抜本的な修繕のためには、構造を大きく変更する必要があると考えた。2015 年度から 2016 年度にかけて図 5 に示す新プロファイルモニタを設計した。不均一なボルトの配置を解消し、できる限り太い O リングを使用するようにした。図 4 に旧プロファイルモニタの問題点、それに対応した改良点を図 5 に示す。

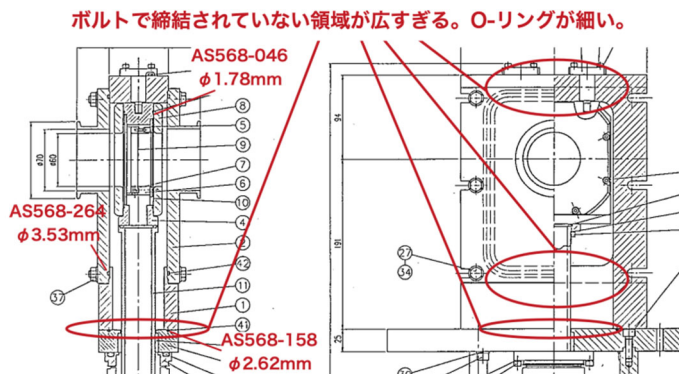


図4 旧プロファイルモニタの問題点

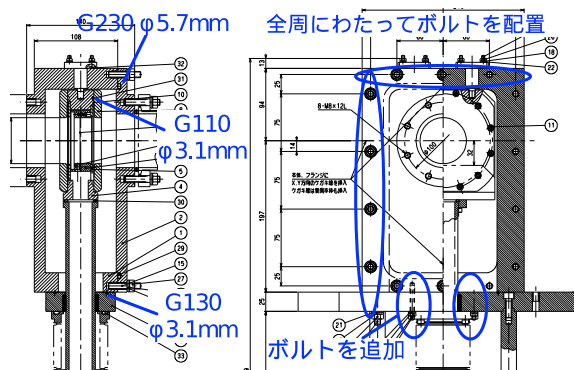


図5 新プロファイルモニタの問題点

2017 年度に製作する予定であったが、タンデム加速管の加速管に真空リークが発生し、製作することができなかった。2018 年度に一台製作し 2019 年度にかけて HPR2 としてインストールおよび試験を行った。

図 6 にインストール前後の出射ビームライン真空度のトレンドを示す。HPR2 の更新に伴い、真空度の変動が大きく減少した。まだ、真空度の変動が残っているのは、他の 2 台のプロファイルモニタの影響と考えられる。それらを更新することができれば、真空度の改善が期待できる。

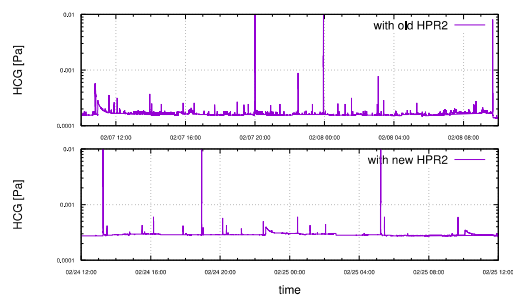


図6 プロファイルモニタの真空リーク試験

結言

プロファイルモニタの真空容器の構造を改良することによって、真空リークを減らし、真空度の変動を抑制できた。同じ構造のプロファイルモニタをすべて更新することによって、出射ビームラインの真空度の改善、ひいてはシンクロトロン全体の真空度の向上及び C ビームの加速効率の向上に寄与するはずである。

参考文献

- 1) 栗田哲郎 他、(財)若狭湾エネルギー研究センター年報 平成 21 年度、12、14 (2009)
- 2) 栗田哲郎 他、(財)若狭湾エネルギー研究センター年報 平成 22 年度、13、59 (2010)
- 3) 栗田哲郎 他、(財)若狭湾エネルギー研究センター年報 平成 23 年度、14、43 (2011)

2.4.2. 加速器利用分析技術の開発・高度化

2.4.2.1

全固体リチウムイオン電池のリチウム分析

Lithium Distribution Analysis for All-Solid-State Lithium-Ion Batteries

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 using a tandem accelerator in the Wakasa Wan Energy Research Center. Lithium distributions of mock samples of all-solid-state lithium-ion battery was measured using the TOF-ERDA detector. Lithium migration was measured while applying voltage to the mock samples by lithium analysis of TOF-ERDA.

要約

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、飛行時間測定反跳粒子検出法(TOF-ERDA¹⁾)によるリチウム定量分析法の開発を進めている。この装置により全固体リチウムイオン電池を模擬した試料のリチウム分布を測定した。模擬試料に電圧をかけながら、リチウムを検出したところ、優位にリチウムの移動が観測された。

緒言

現在普及しているリチウムイオン二次電池は、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。世界的に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。リチウム分析には、定量も可能なイオンビーム分析が最も適している。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ことで、電池性能を評価する手法を開発するものである。

リチウムイオン電池模擬試料におけるリチウム分析

リチウム固体電解質である LICGC ($\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5-\text{TiO}_2$ 系材料、株式会社オハラ製)を用いて、両面に金を蒸着し電極とした。この試料を真空チャンバーに導入し、蒸着した金をフィードスルーを経由して電源と接続した。ビーム照射する面に対して、電圧を 0 V、+3 V、-3 V 印加する場合の 3 通りで TOF-ERDA 測定を行った。TOF-ERDA 測定では、飛行時間とエネルギーを同時に測定することによって、粒子の質量を計算することができる。よって、リチウムの質量(質量数 7)に対応する事象のみ選別し、リチウムのエネルギー分布を導出した。リチウムのエネルギー分布は表面からの深さ方向に対応する。これらのエネルギー分布から、+3 V 印加時は表面付近に対応するリチウム量が減少し、-3 V 印加時は逆に増加していた。よって電圧印加におけるリチウムの移動を TOF-ERDA により測定することが可能であることが分かった。

結言

これまで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きた²⁾。令和元年度では全固体リチウムイオン電池模擬試料に電圧を印加しながらリチウムの TOF-ERDA 測定を行い、表面付近のリチウム濃度が異なることを示した。今後は薄膜の全固体リチウムイオン電池に対して、リチウムの TOF-ERDA から電池性能の評価を行っていく。

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 27～30 年度 (2015-2018)

^{*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実施したものである。

2.4.2.2

大気雰囲気におけるリチウム酸化物の
水素濃度分布その場イオンビーム計測の技術開発

Development on In-Situ Measurement Technique of Hydrogen Distribution in Lithium Oxides

Using Ion Beam Analysis in Air Atmosphere

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 $\text{Li}_{2-x}\text{ZrO}_{2+x}$ ($x=1.00$) with some radical such as lithium (Li) and oxygen (O) vacancies, heated to 623 K in vacuum and subsequently exposed in air at room temperature and relative humidity of 80%, were investigated by employing weight gain (WG) measurements and elastic recoil detection (ERD) in air atmosphere. The WG and ERD results indicated that the amounts of H and H_2O absorbed into Li_2ZrO_3 increased with the exposed time and reached to approximately 30 wt%. The H_2O dissociation and H migration processes are enhanced due to the presences of the Li and O vacancies. In addition, by surface analyses using Rutherford backscattering spectrometry (RBS), field emission-scanning electron microscopy (FE-SEM), and X-ray diffraction (XRD), it was found that Li_2CO_3 and ZrO_2 were formed on the topmost surface of the air-exposed Li_2ZrO_3 by reaction of Li_2ZrO_3 including Li and O vacancies with CO_2 as well as H_2O . The Li_2CO_3 and ZrO_2 formation may suppress H_2O dissociation, and H diffusion and accumulation at the vacancies.

要約

本研究では、貯蔵重量(WG: weight gain)変化法および大気雰囲気において材料中の水素(H)濃度測定を可能にした反跳粒子検出(air-ERD: elastic recoil detection)法を用いて、室温(20℃)および相対湿度 80%の大気雰囲気に曝されたラジカル含有 Li_2ZrO_3 試料の重量および H 濃度変化を測定し、常温水分解および水素蓄積過程について調べた。 Li_2ZrO_3 試料の重量は空気曝露時間の増加とともに増加し、約 30 wt%まで達することがわかった。また、H 濃度も空気曝露時間の増加とともに増加したことから、この H 吸収が、重量増加の曝露時間依存性に関わることがわかった。また、RBS 法、FE-SEM および XRD を用いて、 Li_2CO_3 および ZrO_2 が空気曝露時間の増加とともに Li_2ZrO_3 試料表面に形成されることも判明された。これらは、大気からの CO_2 吸収によって形成され、重量増加の空気曝露時間依存性にも関わっており、さらに、水分解および H 吸収を抑制することが考えられた。

緒言

現在、 CO_2 を排出しない地球環境に調和した水素エネルギー社会の実現に向けて多くの研究が進められている。その目標達成のための理想的な方法の一つには、常温で水分解により水素を製造して、その水素を直接貯蔵する技術を確立することにある。本研究では、リチウム-ジルコニウム酸化物(Li_2ZrO_3)は室温で空気中の水蒸気を解離して水素を貯蔵する材料であることを発見した¹⁾。しかしながら、自動車用水素燃料電池の水素供給源に求められる 5 wt%以上の水素の重量貯蔵容量に達していない。本研究では、 Li_2ZrO_3 試料を真空において約 350℃の加熱を行い、 Li_2ZrO_3 表面およびバルク内にリチウム(Li)および酸素(O)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℃および 1300℃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 $\text{Li}_{2-x}\text{ZrO}_{2+x}$ ($x=1.00$)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℃で 10 分間の加熱処理により残留ガスを取り除き、さらに Li および O 放出により電荷を帯びた Li および O 空孔を形成させたラジカル含有 Li_2ZrO_3 試料を温度 20℃、相対湿度 80%の条件下に置き、各空気曝露時間後に精密電子天秤を用いて WG 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、大気雰囲気において材料中の水素(H)濃度測定を可能にしたイオン

^{*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。

ビーム分析法である air-ERD によって、室温において空気中に曝された Li_2ZrO_3 試料表面の H 濃度を測定した。その後、RBS 法、FE-SEM および XRD を用いて、 Li_2ZrO_3 試料表面の元素分析および表面形態観測を行った。

結言

WG 法および air-ERD 法を用いて、 Li_2ZrO_3 試料中の水素濃度は空気曝露時間の増加とともに増加し、約 4000 時間でほぼ一定の値(約 30 wt%)に達することがわかった。また、RBS 法、FE-SEM および XRD を用いて、 Li_2CO_3 および ZrO_2 が空気曝露時間の増加とともに Li_2ZrO_3 試料表面に形成されることもわかった。これより、 CO_2 吸収が重量増加の空気曝露時間依存性に関わっていることも判明された。 Li_2ZrO_3 試料中の Li および O 空孔が大気中の H_2O および CO_2 との反応を促進させるが、形成された Li_2CO_3 および ZrO_2 が、水分解、H の拡散および蓄積過程に大きな影響を与えることが考えられる。

参考文献

- 1) B. Tsuchiya *et al.*, Int. J. Hydrogen Energ., 42, 23746 (2017)

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

Hydrogen contents and nanovoids of various types of DLC (diamond-like carbon) films have been evaluated by elastic recoil detection analysis (ERDA) and positron annihilation spectroscopy, respectively, to investigate influential factors on wettability of DLC films. In particular, samples were annealed to induce structural changes in films. In addition, the validity of standard samples for ERDA measurements was confirmed. A range of measurements suggested that Si-doping gives some influence on properties of DLC and related films and there is a correlation between contact angles and positron annihilation lifetimes.

要約

DLC (diamond-like carbon)系薄膜の親水性に影響を与える因子を調べるため、多様な DLC 系薄膜に対して、ERDA(elastic recoil detection analysis)法による水素量測定、陽電子消滅分光法によるナノ空隙測定により評価を行った。特に、熱処理により積極的に膜の構造変化を促した試料を用いた。また、ERDA 法の標準試料に関する検討を行い、標準試料及び測定法の有効性を確認した。今年度の一連のデータを比較検討した結果、Si 添加が DLC 系薄膜の性質に影響を与えること、接触角(親水性)と陽電子寿命の間に相関関係がある可能性が示唆された。

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 ERDA 測定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

本研究で用いる各種の DLC 薄膜は、産業技術総合研究所中部センターで成膜した。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 DLC 系薄膜を作成した¹⁾。昨年度は、幅広い材料を対象に測定したが、今年度は DLC 及び PLC (polymer-like carbon) とそれらに Si 添加したものに対象を絞り、熱処理を行いながら試料の変化を調べた。それぞれの膜の親水性は、産総研の接触角計を用いて測定した。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加速器を用い、ERDA(Elastic Recoil Detection Analysis)法により実施した。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 密度の計算に反映した。そして、試料のナノ構造(ナノ空隙)に関しては、陽電子消滅分光測定(ドップラー広がり測定と陽電子消滅寿命測定)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実施した。

^{*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。

結果と考察

本研究では、ERDA 法の標準試料として高分子材料 PPS (Polyphenylenesulfide)を主たる標準試料として用いているが、比較検討するために水素イオン注入 Si を測定した。図 1 は H_2^+ を $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ まで照射した単結晶 Si の ERDA スペクトルを示す。ピークが二つあるのは、使用したイオン注入機の真空ポンプとしてロータリーポンプを用いたため、ポンプ油に起因したハイドロカーボンが照射中に表面に堆積したためと考えられる。注入した水素原子は、フィッティング関数 (fit1) から計算したカウント数を使用した。

次に水素イオン注入 Si を標準試料として用いて、PPS 中の水素量を定量した。PPS の公称厚さと組成比から計算される水素 $3.61 \times 10^{18} \text{ H/cm}^2$ との比較を行った結果、水素イオン注入 Si との誤差は 17%~25%であった。これらの測定結果から、PPS を標準試料に使ってもある程度の誤差を許容すれば標準試料として有効だと判断した。

DLC 系薄膜の性質を決める大きな要因は水素の存在である。昨年度は様々な成膜条件の DLC 系薄膜を比較する実験を行ってきたが、今年度は代表的な DLC 薄膜を選び、それらを熱処理して水素含有量を制御し、膜の性質を変化させた後に接触角測定、ERDA 測定、陽電子消滅分光測定を行い比較した。熱処理温度としては、室温(未処理)、400℃、800℃の 3 種類を選んだ。図 2 は代表的な陽電子消滅寿命分光スペクトルである。陽電子の入射エネルギーは 2keV とし、Si 上に形成した DLC 系薄膜の中心付近に陽電子が分布を持つようなエネルギーを選んだ。

代表的な DLC 系薄膜に対して行った一連の測定結果をまとめ、接触角、水素量、陽電子寿命、温度をパラメータとして、それらの間の相関関係を調べた。得られたデータから単純な傾向を見出すことは難しいため、以下のような手順でデータを整理した。まずは、800℃の熱処理を行った試料から水素が大きく抜け炭化が起きていると考えられたため、DLC 系薄膜の範疇を超えた性質の変化を起こしているとみなし、比較対照する試料は室温と 400℃熱処理の試料に集中した。次に水素量が異なる試料は異なる性質を持つと考え、比較は同等の水素量を持つ試料間で比較を行った。このような方法で、対象とする試料を絞り込んでいくと、試料間及び測定値の間に傾向を見出すことができた。

特に、Si-DLC(試料 B)と原料ガスとして C_7H_8 を使用した DLC(試料 C)がほぼ同量の水素含有量であるため比較に適している。この両者を比べてみると、Si 添加することで接触角が低下し、同時に陽電子寿命も低下する傾向が見られた。明確な結論を引き出すためにはデータ数が不足しており、今後の追試が必要であるが、昨年度ドップラー広がり測定と接触角測定の相関解析の際にも見られた様に、Si 添加の有無により、接触角と陽電子測定結果が影響を受ける可能性が示唆された。

結言

DLC 系薄膜の親水性と、ERDA 法による水素量、陽電子消滅分光法による空隙情報の間の関係を調べるために、昨年度に引き続き複薄の DLC 系薄膜の測定を行った。今年度は、熱処理により積極的に膜の構造変化を促した試料を用い、さらに、陽電子消滅寿命法を導入した。また、ERDA 法の標準試料に関する検討を行い、その有効性を確認した。今年度の一連のデータを比較検討した結果、Si 添加が DLC 系薄膜の性質に影響を与えること、接触角(親水性)と陽電子寿命の間に相関関係があることが示唆された。

参考文献

- 1) S. Nakao et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 307 (2013) 333

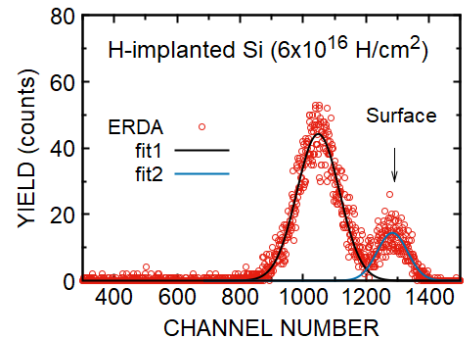


図 1 Si 中にイオン注入された水素の ERDA スペクトル。

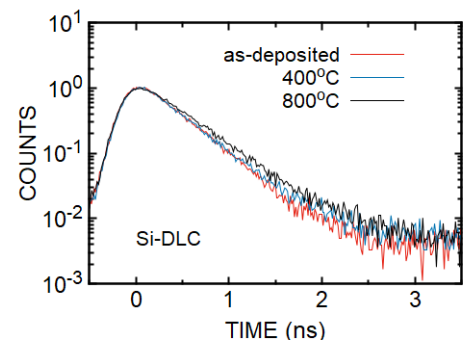


図 2 異なる熱処理条件の DLC 膜の陽電子寿命スペクトル。

2.4.2.4

イオンビームを用いたセラミックにおける軽元素分析
Light Element Analysis for Ceramics Using Ion Beam鈴木耕拓^{*1}、土屋文^{*2}、中田吉則^{*3}

Kohtaku SUZUKI, Bun TSUCHIYA and Yoshinori NAKATA

Abstract

Some of ceramics such as lithium zirconate 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. And also, lithium zirconate has absorption ability of carbon dioxide. Light element analysis of lithium zirconate was performed using an in-air and time-of-flight method. Distributions of light elements were measured and compared.

要約

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。さらに二酸化炭素も吸収する能力がある。そこでリチウムジルコネート中の軽元素の振る舞いを測定するため、大気および飛行時間差測定による分析を行った。各軽元素の分布を測定し、比較した。

緒言

クリーンエネルギーによる環境にやさしい社会基盤が求められ、水素を燃料として使用する試みがなされている。このためには、二酸化炭素を放出せず水素製造する必要がある。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、水や二酸化炭素吸収過程や水素ガス発生機構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)や、飛行時間差測定反跳粒子検出法(TOF-ERDA)を用いて、水素、リチウム等の軽元素を測定した。

イオンビームによる軽元素分析

若狭湾エネルギー研究センターでは大気中で水素分析が可能な装置(大気 ERDA)を開発した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水素分析した結果、大気中に保管したものについては水素が多量に含まれていることが分かった。

TOF-ERDA は飛行時間とエネルギーを測定することにより、粒子の質量を特定できる測定手法である。したがって多元素を同時に測定可能である。真空中および大気中に保管したリチウムジルコネートに対して TOF-ERDA 測定を行った結果、大気中に保管した試料からは炭素が検出された。さらに表面付近でリチウムや酸素の凝集が見られた²⁾。これらの結果から、表面には炭酸リチウム層が形成されていることが示唆された。

結言

真空中および大気中で保管したリチウムジルコネートに対して、大気 ERDA および TOF-ERDA 測定を行った。大気中で保管した試料は、水素が内部に保存され、炭素を含むことが分かった。また表面でのリチウムや酸素の凝集が見られ、炭酸リチウム層が形成された。水および二酸化炭素吸収過程が判明しており、今後は、水素放出過程を観測していく。

参考文献

- 1) K. Suzuki and Y. Nakata; Nucl. Inst. Meth. B, 450, 135–138 (2019)
- 2) K. Suzuki *et.al.*; Nucl. Inst. Meth. B, 478, 169–173 (2020)

^{*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

大立体角 TOF-ERDA 測定装置に用いる分割型シリコン半導体検出器の性能評価
Performance Test of Segmented Silicon Semiconductor Detector for Large Solid Angle TOF-ERDA安田啓介^{*1}、操谷佳奈^{*2}、吉川志歩^{*2}、操谷佳奈^{*2}、鈴木耕拓^{*3}

Keisuke YASUDA, Kana KURITANI, Shiho YOSHIKAWA and Kohtaku SUZUKI

Abstract

We evaluated the performance of the segmented silicon semiconductor detector used in the large solid angle TOF-ERDA measuring system. Among the segments of the detector, energy resolutions vary from 27 to 63 keV, which were measured using 5.486-MeV α particles from ^{241}Am . Hydrogen was measured by the stopper foil ERDA method using this detector, and the change in recoil energy due to the difference in recoil angle could be measured.

要約

大立体角 TOF-ERDA 測定装置に用いる分割型シリコン半導体検出器の性能評価を行った。アルファ線源を用いてエネルギー分解能を測定したところ、公称値の 20 keV に対して 27 ~ 63 keV という値が得られた。この検出器を用いてストップフォイル ERDA 法による水素測定を行い、反跳角の違いによる反跳エネルギーの変化を測定することができた。

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種で、イオンビームが試料に照射された際に放出される反跳イオンのエネルギーと飛行時間を同時に測定する。元素分離をして優れた深さ分解能で深さ分析を行うことが可能で、薄膜中の軽元素分析に威力を発揮する¹⁾。一般的な TOF-ERDA 測定ではエネルギーの運動学的広がりを抑えて深さ分解能を向上させるために、横方向の角度広がりを数 mrad 程度に制限する。そのため立体角は一般的なストップフォイル ERDA 測定の 1/10 程度であり、測定効率、あるいは測定感度に難がある。そこで、我々はエネルギーと飛行時間に加えて反跳角を測定することによってエネルギーの運動学的広がりの影響を小さくし、大立体角でかつ優れた深さ分解能で測定可能な TOF-ERDA 測定装置 (角度分解 TOF-ERDA 装置) を開発している。図 1 に角度分解 TOF-ERDA 装置の概略を示す。本装置は位置感応型透過型検出器、(位置を測定しない) 透過型検出器、および分割型シリコン半導体検出器で構成される。位置感応型透過型検出器と分割型シリコン半導体検出器で粒子の位置を測定し、これから反跳角を決定する。今年度は角度分解 TOF-ERDA 装置に用いる分割型シリコン半導体検出器の性能評価を行ったのでこれについて報告する。

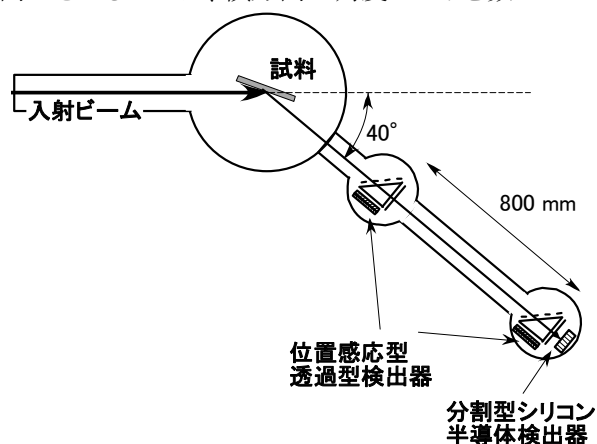


図 1 角度分解 TOF-ERDA 装置の概略図

実験と結果

分割型シリコン半導体検出器には CANBERRA 社の PF-16CT-58*58-300EB を用いた。有感面積は 58 mm × 58 mm でこれが縦方向に 16 分割されている。エネルギー分解能は 5.48 MeV の α 線に対して 20 keV である。

この検出器で ^{241}Am 線源からの α 線を測定し、エネルギー分解能の評価を行った。実験は京都府立大学で行った。検出器からの信号をプリアンプ (CLEAR PULSE 5576) で増幅し、これをテクノエーピー社のデジタル信号処理装置 (DSP) に入力してデータを取得した。測定では 16 分割された領域のうちの 3 領域について測定

^{*1}京都府立大学大学院・生命環境科学研究科・環境科学専攻、^{*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。

を行った。具体的には(i) 領域 1、(ii) 領域 2、(iii) 領域 2, 3 のみ配線の 3 パターンで測定した。信号取り出し電極を上にしたときに検出面に向かって右から領域 1, 2, 3 とした。測定(ii)および(iii)で得られたエネルギースペクトルを図 2 に示す。これからエネルギー分解能を求めると、(i) が 27 keV、(ii) が 34 keV、(iii)の 領域 2 は 49 keV、領域 3 は 63 keV となった。検出器のエネルギー分解能の公称値は 20 keV であり、特に(iii)の測定でエネルギー分解能が悪化した。

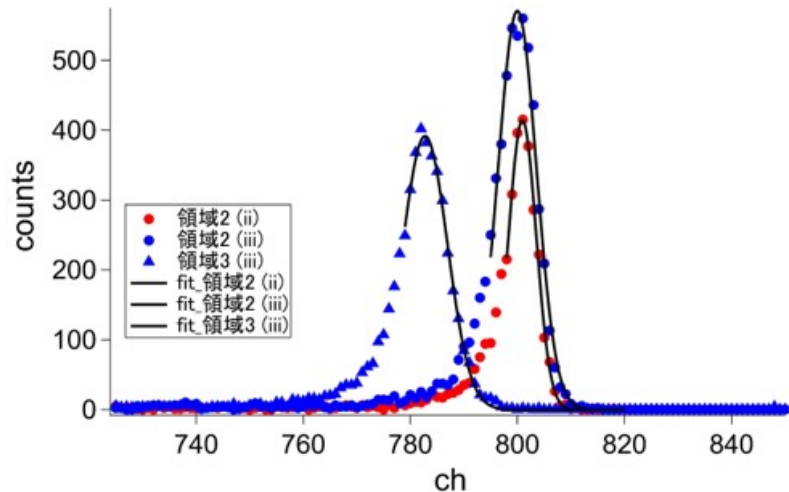


図 2 分割型シリコン半導体検出器で測定された ^{241}Am 線源からの α 線のエネルギースペクトル。赤が測定(ii)、青が測定(iii)のもの。実線はガウス関数によるフィッティングの結果を表す。

次に、分割型シリコン半導体検出器を実際の TOF-ERDA 測定装置に取り付けて加速器からのビームを用いた測定試験を行った。本測定では透過型検出器は使用せずに分割型シリコン半導体検出器のみを用いてストップフォイル ERDA 法による水素測定を行った。試料には厚さ 25 μm の PET フィルムを、入射ビームにはエネルギーが 3 MeV の He^{2+} イオンを用いた。また、ストップフォイルには厚さが 8 μm の Ti を用いた。測定角の中心値は 40° である。試料と検出器の距離は 1484 mm で検出器の 1 領域の幅は約 3.6 mm なので、検出器全体では反跳角が 38.9° から 41.1° の範囲を 0.14° 刻みでカバーしていることになる。試料表面で反跳された水素がストップフォイルを通過した後のエネルギー E_1 は以下の式で求められる。

$$E_1 = \frac{4M_1M_2(\cos\varphi)^2}{(M_1 + M_2)^2} E_0 - \langle s \rangle l \quad (1)$$

ここで M_1 は入射粒子の質量、 M_2 は反跳粒子の質量、 φ は反跳角、 E_0 は入射エネルギー、 $\langle s \rangle$ はフォイル中での阻止能の平均値、 l はフォイル

の厚さである。この式から分かるように反跳エネルギーは反跳角の増加とともに減少する。そこで、各領域で測定されたエネルギースペクトルから試料表面で反跳された水素イオンのエネルギーを求め、これを(1)式による計算値と比較した。結果を図 3 に示す。これからわかるようにエネルギーは反跳角の増加とともに減少し、その値は(1)式による計算値とよく一致した。このことは本測定で ERDA 測定における反跳角によるエネルギーの違いが測定できたことを示している。なお、16 領域のうち 6 領域はノイズが大きくエネルギー測定ができなかったため、これらについては表示していない。 α 線源を用いた測定において複数領域を同時に測定したときにエネルギー分解能の悪化が見られたが、これもノイズの影響と推測される。実際の角度分解 TOF-ERDA 測定においてはノイズを減少させることが課題となる。

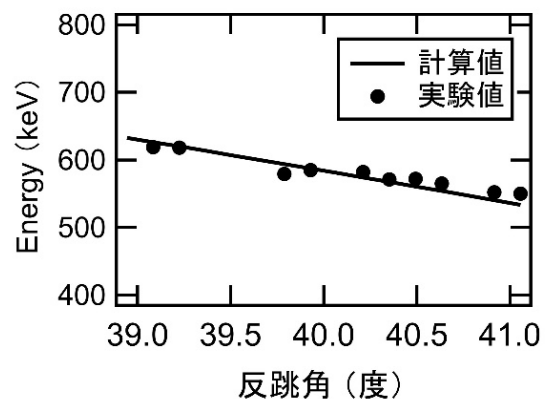


図 3 反跳角と試料表面で反跳水素のエネルギーの関係。実線は(1)式による計算結果を表す。阻止能は SRIM2013 コード²⁾の値を使用した。

参考文献

- 1) K. Yasuda *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. B442, 53-58 (2019)
- 2) <http://www.srim.org>

2.4.2.6

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 9 MeV Cu^{10+} ion probe beam, after voltages of 1.8 and 2.2 V were applied to the multi-layers thin films at room temperature. The ToF-ERD spectra revealed that the Li concentration at each depth in the LiCoO_2 positive electrode uniformly reduced with increasing the voltages and reached to 65 and 30% for each voltage due to the Li ion 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 9 MeV の Cu^{10+} 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 1.80 V および 2.20 V の電圧を印加しながら全固体リチウムイオン二次電池($\text{Au/LiCoO}_2\text{/LATP/Pt}$)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 濃度は印加電圧の増加とともにどの深さに対してもほぼ一様に減少し、各電圧に対してそれぞれ約 65%および約 30%程度に達することが判明した。

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)を電極とした全固体 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、1.80 V および 2.20 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

パルスレーザー堆積法およびマグネトロンスパッタリング法による蒸着装置を用いて、全固体 Li^+ イオン二次電池(24 nm $\text{Au}/65\text{ nm LiCoO}_2/150\text{ }\mu\text{m Li}_{1.4}\text{Ti}_2\text{Si}_{0.4}\text{P}_{2.6}\text{O}_{12}\text{-AlPO}_4$ (LATP)/16 nm Pt)試料を作製した。次に、作製した試料に 1.80 V および 2.20 V の電圧を 15 分間印加して平衡状態に達することを確認した後、9 MeV の Cu^{10+} イオンビームを用いた ToF-ERD 法を利用して、試料内の Li 濃度分布を測定した。

結言

ToF-ERD 法を用いて、1.80 V および 2.20 V のそれぞれの電圧が印加された $\text{Au/LiCoO}_2\text{/LATP/Pt}$ 二次電池試料の Au 電極側の Li 濃度分布をその場で測定した。 LiCoO_2 中の Li 濃度は印加電圧の増加とともにどの深さに対してもほぼ一様に減少し、各電圧に対してそれぞれ約 65% (Li_xCoO_2 : $x=0.65$)および約 30% (Li_xCoO_2 : $x=0.30$)程度に達することがわかった。この結果は、 Li^+ イオンが電位勾配により LiCoO_2 から LATP 固体電解質内を駆動されて負極へ移動したことを示す。

参考文献

- 1) B. Tsuchiya *et al.*, Adv. Mater. Interfaces, 6, 1900100 (2019)

^{*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。

2.4.2.7

フィルタードアーク蒸着法を用いて作製した ta-C:H 膜の水素含有量 Hydrogen Content in ta-C:H Films Fabricated Using Filtered Arc Deposition Method

針谷達*¹、戸谷陽文*¹、滝川浩史*¹、鈴木耕拓*²

Toru HARIGAI, Takafumi TOYA, Hirofumi TAKIKAWA, and Kohtaku SUZUKI

Abstract

Hydrogenated tetrahedral amorphous carbon (ta-C:H) films were prepared using the filtered arc vapor deposition method introduced H₂ or C₂H₂ gas. Compared to H₂ gas, the ta-C:H films prepared with C₂H₂ gas under the same process pressure showed a higher hydrogen content in the films.

要約

H₂ または C₂H₂ ガスを導入したフィルタードアーク蒸着法により、水素化テトラヘドラルアモルファスカーボン (Hydrogenated tetrahedral amorphous carbon: ta-C:H) 膜を作製した。同程度の成膜プロセス圧力条件では、H₂ ガスに比べ、C₂H₂ ガスを用いて作製した ta-C:H 膜の方が、膜中の水素含有量が多い傾向であった。

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 膜の中でも、特に硬質で水素を含まない DLC 膜は、テトラヘドラルアモルファスカーボン (Tetrahedral amorphous carbon: ta-C) 膜と呼ばれ、硬質で水素を含む DLC 膜は、水素化テトラヘドラルアモルファスカーボン (Hydrogenated tetrahedral amorphous carbon: ta-C:H) 膜と呼ばれる。本研究では、異なるガス雰囲気中において、フィルタードアーク蒸着法を用いて ta-C:H 膜を作製し、作製した ta-C:H 膜中の水素含有量を ERDA 法により分析することで、ta-C:H 膜形成における雰囲気ガス種の影響を明らかにする。

方法

成膜チャンバーへ H₂ ガスまたは C₂H₂ ガスを導入し、H₂ または C₂H₂ ガス雰囲気中において T 字状フィルタードアーク蒸着法²⁾を用いて、Si 基板上に ta-C:H を成膜した。Si 基板上に成膜した ta-C:H 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 分析によって得られた ta-C:H 膜中の水素含有量を図 1 に示す。同程度のプロセス圧力下における ta-C:H 膜形成では、H₂ ガスに比べ C₂H₂ ガス雰囲気下で作製した ta-C:H 膜の方が、多量の水素を含む傾向にあることが明らかになった。C₂H₂ 分子が C-H 結合を持つことで、堆積膜中に水素が取り込まれやすくなったと考えられる。

結言

H₂ ガスまたは C₂H₂ ガスを導入したフィルタードアーク蒸着法を用いて、Si 基板上に ta-C:H 膜を作製した。同程度の圧力雰囲気下では、C₂H₂ ガス雰囲気の方が膜中の水素含有量が多い傾向にあった。一方で、膜中水素含有量の微量制御には、H₂ ガスが適していることがわかった。

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)

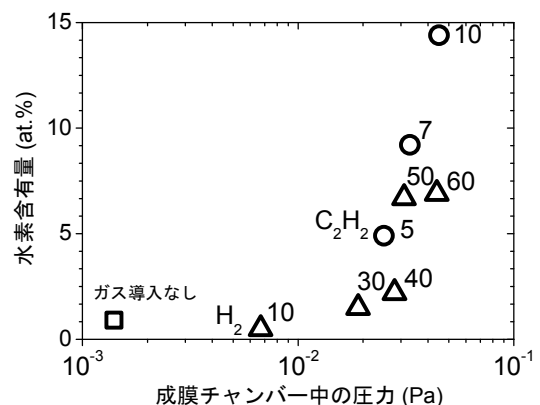


図 1 T-FAD 法を用いて作製した ta-C と ta-C:H 膜の水素含有量 (図中の数字は、導入ガス流量(sccm))

*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。

2.4.2.8

歯冠修復用レジンブロックより接着セメントを介した歯質内へのフッ素浸透

Infiltration of Fluorine into Tooth Structure from the Composite Resin Block for Restoration through the Adhesive Cement

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}、菅谷頼仁^{*5}

Katsushi OKUYAMA, Hiroko YAMAMOTO, Katsuaki NAITO, Yasuhiro MATSUDA, Kohtaku SUZUKI,
Yukimichi TAMAKI, Mikako HAYASHI, Takashi SAITO, Masaharu NOMACHI and Yorihiro SUGAYA

Abstract

Fluorine infiltration into tooth structure from a composite resin block through an adhesive cement was measured using in-air micro PIXE/PIGE. The results of this study suggest that amount of fluorine infiltration is affected by whether an adhesive cement has fluoride or not, rather than a resin block.

要約

大気マイクロ PIXE/PIGE を使用し、コンポジットレジンブロックから接着性セメントを介しての歯質へのフッ素浸透を確認したところ、ブロックよりも使用するセメントのフッ化物の有無が大きく影響を与えることが示唆された。

緒言

以前の報告では歯科用修復材料を歯質接着システムにより象牙質に接着させた試料について、材料から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。その結果、材料からのフッ素浸透は介在する歯質接着システムによる影響も認められたが、充填する修復物からのフッ素徐放量が大きく影響することを示した¹⁾。最近では、クラウンなどの歯冠修復にブロック状のコンポジットレジンを用いて削り出すことで製作されるものが増え、レジンブロックにフッ化物徐放性を付与したものも製品化されている。これらの修復物は歯に装着する際、接着性セメントを用いて歯と接着されるため、ブロックから削り出し作製した修復物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、必ずこのセメントを介することになる。そこで本研究では修復用コンポジットレジンブロックを接着性セメントで接着させた試料における歯質へのフッ素浸透を評価、検討した。

材料と方法

本研究では、コンポジットレジンブロックとして、フッ化物含有の KZR-CAD (KZ)、フッ化物を含まない Dentcraft HR Block (DC) をそれぞれ使用した。接着性セメントは、フッ化物含有の Block HC Cem (HC)、とフッ化物を含まない EsteCem (ES) を使用した。ヒト抜去臼歯の歯冠切除後象牙質面を露出させ、象牙質面に厚さ 2 mm に切断したレジンブロックを、上で示した接着性セメントでそれぞれ接着させた。ヒト抜去歯使用については朝日大学倫理審査委員会で承認済みである(承認番号 30008)。実験で用いた試料は KZ-HC、DC-HC、KZ-ES、DC-ES の 4 群で、それぞれ 8 試料ずつである。接着材硬化 1 時間後に歯軸に平行に頬舌的に切断し約 500 μm の厚さに調製した。試料全面をワックスで被覆した後、37℃脱イオン水中に 8 週間保存した。その後ワックスを除去し PIXE/PIGE 装置を用い、試料中央部接着性セメントと象牙質との界面付近におけるフッ素濃度分布を、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、健全歯質のカルシウム量の 90%を示した部位を測定する象牙質の最表層(歯とセメントとの界面)と規定した。フッ素濃度の測定箇所は象牙質平面中央部と 200 μm 離れた2箇所の計3箇所とした。各群のフッ素取込み量の比較には、セメント界面から深さ 100 μm までの累積値を用いた。得られたデータは Kruskal-Wallis test および Steel-Dwass test (危険率 5%) にて統計解析を行った。

結果および考察

図 1 に各試料の象牙質・セメント界面から象牙質内部にかけてのフッ素浸透の変化を示す。材料からのフッ素浸透は、フッ化物を含むセメントである HC を用いた DC-HC と KZ-HC が界面付近で高いフッ素濃度を示したが、20 μm の深さ以降は少量のフッ素を認めるくらいである。フッ化物含有レジンブロックである KZ を使用した

^{*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(17H04382、17K11705、17K11712、19K10136)の助勢を受けた。

群では、フッ素を含まないセメント ES を接着させた試料でも、全くフッ素を含まない DC-ES よりも界面付近で高いフッ素濃度を認めた。図 2 にセメントと象牙質との界面から 100 μm の深さまでの各材料からの累積フッ素量を示した。ブロック、セメントともにフッ化物を含む KZ-HC がフッ化物を含まない DC-ES より有意に高いフッ素量を示したが、その他については有意差を認めなかった。得られた結果の傾向として、フッ化物を含むセメントを使用した KZ-HC および DC-HC がフッ化物を含まないセメント ES を使用した群よりも高いフッ素量を示している。

この結果は、歯質に浸透するフッ素量が接着に使用したセメントにおけるフッ化物の有無が大きく影響していることが考えられ、フッ化物を含む充填物を歯質接着システムで接着させたときは、充填物のフッ化物の有無や量が大きく影響した前回の報告¹⁾とは異なるものとなった。これは前回使用の接着システムより形成されるボンディング層(歯質とコンポジットレジンとを結合させる層)が数 μm の薄い層であるのに対し、今回用いたセメントは 30~50 μm ほどの厚みがあり、その分ブロックからのフッ素浸透はセメントに妨げられたことが考えられる。ただ、セメント ES を使用した場合、ブロックのフッ化物の有無によりフッ素量に差のある傾向があったため、セメント内のフッ素浸透のメカニズムを詳細に検討する必要がある。

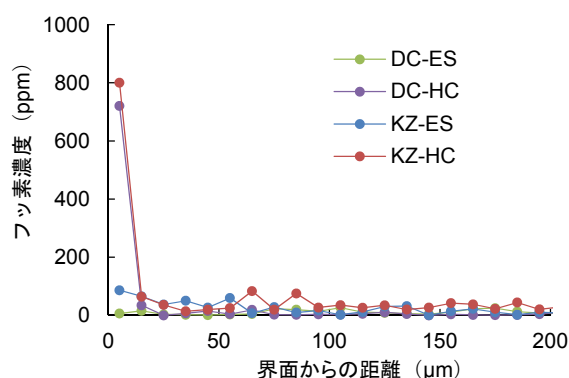


図 1: 象牙質・セメント界面からのフッ素量

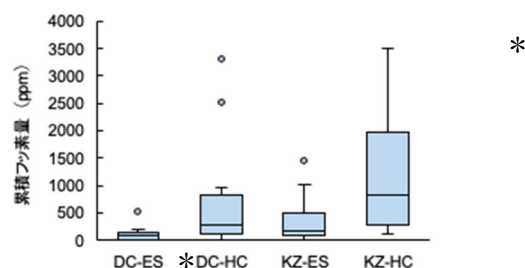


図 2: 象牙質・セメント界面から深さ 100 μm までの累積フッ素量

*: 材料間に有意差を認める(危険率 5%)

結言

以上よりコンポジットレジンブロックから接着性セメントを介しての歯質へのフッ素浸透は、使用するセメントにおけるフッ化物の有無が大きく影響していることが確認でき、フッ化物含有材料の使用は有用であることが示唆された。

参考文献

- 1) 奥山克史他、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報(平成 30 年度)、21、74-75 (2018)

2.4.2.9

複合核共鳴ピークプロファイル解析用のモデル関数検証のための後方散乱測定
Evaluation on Model Function for Peak Profile Observed Nuclear Resonance at Ion Backscattering

戸崎充男*1、鈴木耕拓*2、石神龍哉*2

Mitsuo TOSAKI, Kohtaku SUZUKI and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

To evaluate our model function for analyzing resonances in ion backscattering, we have measured backscattering spectra of He ions by C-13 at a resonance energy of 2.75 MeV using incident He charge of +1 and +2.

要約

後方散乱実験で観測される複合核共鳴反応のピークプロファイル解析のためのモデル関数(自作)を検証する目的で、評価に用いる精密な測定実験(He の C-13 標的による共鳴ピーク測定)をおこなった。

緒言

入射 Heイオンによる炭素の後方散乱実験で観測される複合核共鳴反応のピークプロファイルの解析のためのモデル関数(独自開発)を検証するために測定実験をした。C-13 と He の核共鳴(共鳴エネルギー:2.75 MeV)反応を取扱うために、C-13 の粉末から加圧成形で固体標的を作成した。解析(モデル関数の評価)データとして、入射 Heイオンの価数の違い(+1、+2)による後方散乱に観測される共鳴ピークの詳細な測定を行った。

モデル関数

共鳴ピークの断面積 σ_{el} は、ポテンシャル散乱 A_{pot} と共鳴散乱 A_{res} が干渉し、次式で表される。

$$\sigma_{el} \equiv \frac{\pi}{k^2} \cdot |A_{res} + A_{pot}|^2$$

$$= \left(\frac{2\pi}{k}\right)^2 \cdot \left\{ \cos(2ka) \cdot \frac{\Gamma_L}{2} \cdot L(E, E_R, \Gamma_L) + \sin(2ka) \cdot (E - E_R) \cdot L(E, E_R, \Gamma_L) + \frac{\sin^2(ka)}{\pi} \right\}$$
(1)

$$L(E; E_R, \Gamma_L) \equiv \frac{(\Gamma_L/2)}{\pi} \cdot \frac{1}{(E - E_R)^2 + (\Gamma_L/2)^2}$$
(2)

ここで、 Γ_L は共鳴幅で、 E_R は共鳴エネルギーである。式(1)の断面積をガウス関数(仮定:ストラグリングの分布)で畳み込んでモデル関数とした。このモデル関数(断面積)は、対称項と非対称項の和になる。

実験

粉末 C-13 を加圧成形して固体標的を作成した(密度約 0.8 g/cm³)。散乱角度 160° で後方散乱スペクトルを測定した。He(+2)で入射エネルギー2840、2870、2900 keV の測定データとモデル関数でフィットした結果(赤)を図1に示す。畳み込みのガウス関数の幅より損失ストラグリングは、95、145、170 keV(誤差2%)と評価でき、後方散乱の影響をモデル関数を用いて調べることが可能である。He+1 価のビームを用いて同じ測定実験が出来るように整備した。

結言

系統的に+1、+2 価の He ビームを用いて同じ共鳴を入射エネルギーを変えて測定し、モデル関数の検証を進めている。

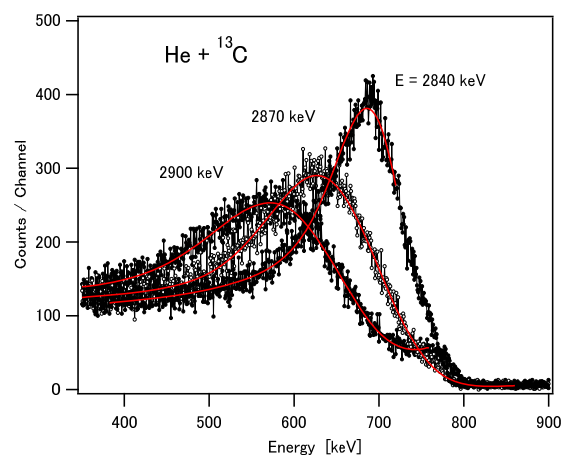


図1 後方散乱 He+¹³C の核共鳴ピーク。

*1京都大学・放射性同位元素総合センター、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ
本研究は、京都大学と(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. 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中の析出物の分析
Precipitates Behavior in Zr Alloy by Thermal Treatment安永和史^{*1}、渡辺英雄^{*2}

Kazufumi YASUNAGA and Hideo WATANABE

Abstract

Two kinds of precipitates, $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ and ZrFe_x were observed in the thermally-treated Zircaloy 4 alloy specimen. The main precipitate was $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ and most of the diameters of Fe in precipitates were larger than those of Cr suggesting that the surface layer of the precipitate only contains Fe element.

要約

熱処理を施したジルカロイ 4 (Zry-4) には、 $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ 系及び ZrFe_x 系の2種類の析出物が存在し、主要な析出物形態は $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ 系であった。 $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ 系の個々の析出物の Fe と Cr の大きさは異なり、多くの析出物において Fe のサイズの方が Cr よりも大きい傾向を示し、外殻は Fe のみで構成されている可能性が示唆された。

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。昨年度は、熱処理された Zry-4 試料中に存在する析出物について、その構成元素・平均直径・体積密度を調査した。その結果、Fe 及び Cr を含む析出物の存在を確認した。Fe の元素分布像の長軸を析出物の直径とした測定値は 47~330 nm の範囲に分布し、平均直径は 130 nm であった。また、体積密度は $8.3 \times 10^{18}/\text{m}^3$ と評価された。本年度は引き続き多数の異なる視野において Zry-4 に存在する析出物について、構成元素ごとに測定した長軸及び短軸の長さの詳細な比較、さらには巨視的な析出物の空間分布等を調査した結果について報告する。

成果の概要

試料は 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、真空中にて 630°C で 2h の熱処理を施した。熱処理試料は電解研磨法 (ツインジェット法) により TEM 観察用に中心部を薄膜化した。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 を用いた。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°C である。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-EDS 法 (Scanning Transmission Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy) により元素分布像を取得した。電子の加速電圧は 300 kV である。

図 1 は Fe、Cr、Zr の分布を示す STEM-EDS マッピング像 (Fe、Cr、Zr の空間分布の重ね合わせ像) である。

図 1a には黄色及び緑色と色調の異なる 2 種類の析出物が観察され、各析出物の構成元素の分析から番号 1~3 は $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ 系、番号 4~5 は ZrFe_x 系と同定された。 ZrFe_x 系は図 1a で観察されるように単独で存在するのみならず、図 1b 中に白矢印で示すように $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ 系に隣接するものも存在した。今年度新たに確認された ZrFe_x 系の $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ 系に対する存在割合は

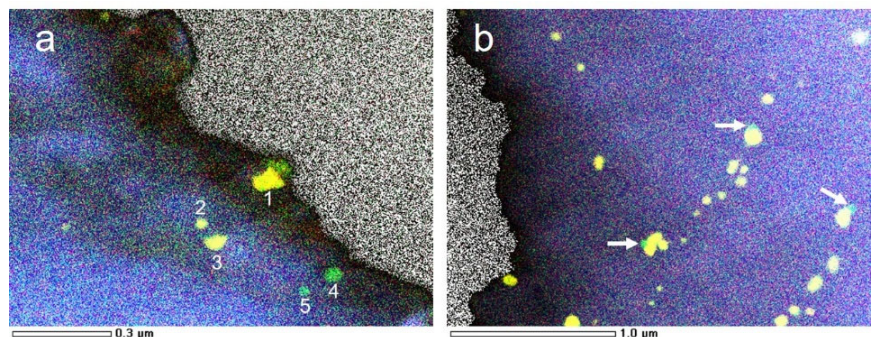


図 1 Zry-4 の微細組織の Fe、Cr、Zr 元素分布の重ね合わせ像。

^{*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}九州大学・応用力学研究所・核融合力学部門・先進炉材料分野

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。

約 4.7%(化学組成を同定した総析出物数 127 個に対して 6 個)と低く、熱処理された Zry-4 に存在する主要な析出物は $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ 系である。

図 2a は図 1b 中のある $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ 系析出物中の Fe 及び Cr の分布を緑及び赤で表示し、元素ごとに長軸(Long Axis; LA)及び短軸(Short Axis; SA)の長さを測定した値を記入した図である。図 2b は図 1b 中に存在する 24 個の $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ 系の析出物について、個々の析出物に割り振った番号(横軸)に対して長軸及び短軸の長さ(縦軸)を表示した図である。多くの $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ 系の析出物は、長軸・短軸共に Fe の元素分布像で計測した値の方が Cr のそれと比較して大きな値を示す傾向があり、平均長軸長は Fe(80 nm)及び Cr(73 nm)、平均短軸長は Fe(61 nm)及び Cr(56 nm)とそれぞれ評価された。これらの結果から $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ 系の析出物は中心から外殻に向かい Fe 濃度が Cr 濃度比べて相対的に高くなり、特に最外殻の数 nm の領域においては Fe のみで構成されている可能性も指摘される。

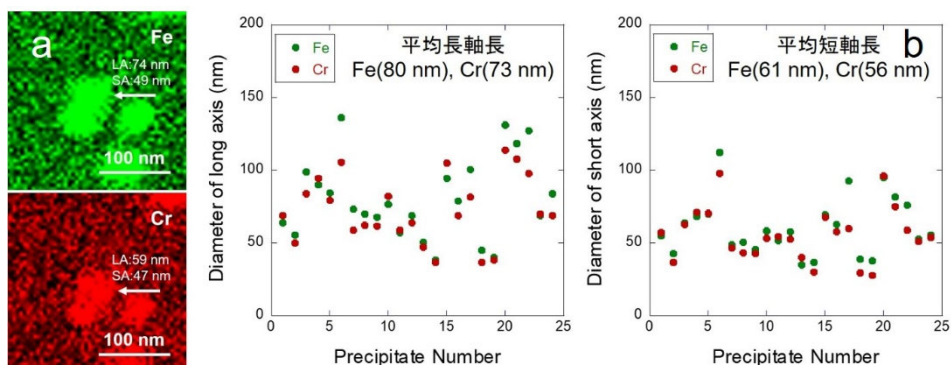


図 2 図 1b 中のある $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ 系の析出物の Fe 及び Cr の元素分布像(a)、図 1b 中の個々の $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ 系の析出物の長軸及び短軸の長さの Fe 及び Cr の各元素分布像から得られた測定値(b)。

図 3 は Zry-4 の母相中において多数の析出物がどのように空間的に分布しているのかを巨視的に把握するために、低倍率で広い領域を複数の視野について観察した STEM-EDS マッピング像である。4 つの視野全てにおいて析出物の空間分布は不均一で遍在していた。さらに図中の白矢印で示すように、ある方向に数マイクロメートルの長さにわたり、直線または緩やかな曲線に沿うように点列状に分布する傾向がみられる。点列の方向は熱処理前の冷間加工時の各結晶粒の主要な塑性変形方向と対応関係があるのではないかと考えられる。

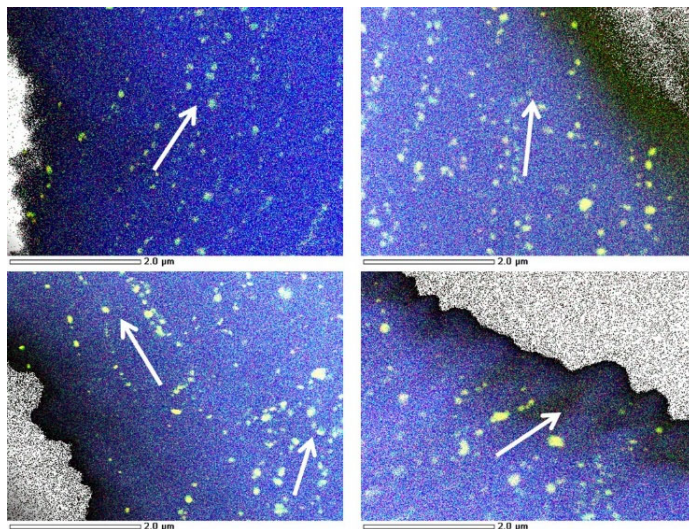


図 3 Zry-4 の析出物の不均一な空間分布。

結言

熱処理された Zry-4 試料中には、 $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ 系に加えて ZrFe_x 系の析出物が共存することが新たに確認された。ただし、化学組成を同定した析出物に占める ZrFe_x 系の存在割合は数%と低く、主要な析出物は $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ 系であった。多くの $\text{Zr}(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})_2$ 系の析出物において、長軸・短軸共に Fe の元素分布像で計測した方が Cr のそれと比較して大きな値を示したことから、最外殻の数 nm の領域においては Fe のみで構成されている可能性がある。また、析出物の巨視的な空間分布は不均一で点列状に並ぶ傾向が観察された。

2.4.3.2

動的変形観察手法を用いた照射硬化量測定技術の高度化

Modification of Quantitative Measurement Technique for Evaluating Irradiation Hardening Using an In-Situ TEM Observation during Tensile Test

福元謙一^{*1}、梅原弘平^{*1}、中川奎^{*1}、石神龍哉^{*2}

Ken-ichi FUKUMOTO, Kohei UMEHARA, Kei NAKAGAWA and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

A method of Ni ion irradiation technique was established in order to evaluate irradiation-hardening coefficient of defect species in ion-irradiated stainless steels. The in-situ observation experiment of ion-irradiated stainless steels during tensile test at low/high temperature region was prepared and performed to get an insight of the interaction of dislocation with defect clusters.

要約

照射欠陥-転位相互作用における障害物強度因子を測定してステンレス鋼の照射硬化量を予測するため、ニッケルセルフイオン照射方法の確立を行い、イオン照射材に対する低温/高温領域における TEM 内引張試験『その場』観察手法の検討を行った。

緒言

SUS316L 鋼を含めたオーステナイト系ステンレス鋼は軽水炉に広く使われており、原子炉の長期運転においてその照射脆化は高経年化事象の一つとして問題となる。中性子照射によって照射損傷による欠陥の蓄積によって転位運動が阻害され硬化が促進される。この照射硬化量予測においてはそれぞれの照射欠陥が持つ硬化係数があり、この硬化係数を高精度に測定することによって照射硬化予測の信頼性が向上して照射劣化予測の精度が向上する。そこで本研究では様々なイオン照射材を用いた TEM 内引張試験『その場』観察実験により各種欠陥の硬化係数を測定するため、今年度はステンレス鋼中に欠陥を導入するためのニッケルセルフイオン照射法について確立することと、低温/高温領域での TEM 内引張試験『その場』観察手法を用いた照射硬化係数測定手法の検討を行った。

実験方法

表 1 Ni イオン照射試験の条件

入射イオン種	Ni ³⁺
加速エネルギー	10MeV
照射温度	約200℃
照射時間	222分
最大損傷量	約4.5dpa
損傷速度	3.4×10^{-4} dpa/s

① ニッケルイオン照射の確立

ニッケルイオンは入射させることで中性子照射をよく模擬できる重イオンであり、SUS316L 鋼においてはセルフイオンであるため、他の材料照射で使用するヘリウムイオンと比べて本研究の取り組みに適している。実施した照射試験の条件を表 1 に示す。最大損傷量はソフトウェア“SRIM-2008”を用いて求めた値であり、計算過程では弾き出ししきい値エネルギーを 40 eV と設定した。

② 低温/高温領域での TEM 内引張試験『その場』観察実験

SUS316L 鋼と純 Mo に対し、タンデム加速器でイオン照射することで照射欠陥を導入した試料を作製し、高温 TEM 内引張試験『その場』観察を実施した。200℃Ni 照射した SUS316L 鋼は 150℃で観察し、700℃He 照射した純 Mo 試料は 300℃で観察した。低温 TEM 内引張試験『その場』観察については初めての試みであったため、SUS316L 鋼の未照射材を試料として用いた。観察温度は-170℃で行った。

結果

① ニッケルイオン照射の確立

今回の Ni イオン照射試験を通じて、十分な照射が可能な試料枚数、およその損傷速度、Ni イオン注入率が問題とならない値であること、試料が放射化しないこと等を確認することができた。ニッケルイオン照射を実施した SUS316L 鋼の断面 TEM 観察画像を図 1 に示す。図 1(a)は TEM 観察用試料の全体図に、計算で導出した

^{*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、(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、福井大学と共同で実施したものである。

損傷量のグラフを重ねたものである。損傷ピークの位置が計算結果と TEM 画像でわずかに異なっており、要因として照射試料の表面が正確な平面でなかったこと等が考えられる。Ni イオン照射による深さ方向の損傷量分布は、損傷ピークから表面に近づくにつれての減少が He イオン照射と比べてなだらかであるため、TEM 内引張試験『その場』観察実験において照射欠陥の観察が容易であると推測される。図 1(b)では高倍率で観察したことにより照射欠陥が明瞭に見られ、ブラックドットと呼ばれる数ナノメートルの欠陥集合体を多く観察できる。格子間原子型積層欠陥転位ループであるフランクループは見ることはできなかった。以上の研究成果からタンデム加速器によるニッケルイオン照射を用いて、TEM 内引張試験『その場』観察用試料を作製して、試料が適用可能な状態であることを確認した。試料枚数や損傷量、照射時間など、照射条件の最適化を今後続ける。

② 低温/高温領域での TEM 内引張試験『その場』観察実験

高温観察を行うにあたり試料形状の不揃いによる高温 TEM 内引張用試料の金型を作製し、試料作製工程の精度を向上させた。しかし試料の調整不足により、SUS316L 鋼で試験観察することができなかった。この要因として試料作製工程において背面研磨による観察可能な薄膜化ができなかったことが要因であり、今後試料作製工程を検討する。イオン照射した純 Mo 試料では運動転位と照射欠陥の相互作用を観察した。700°CHe イオン照射では転位ループが形成され、ボイドは形成されなかった。転位ループと運動転位の相互作用について図2に示す。引張変形に伴い転位が移動し転位ループを吸収してピンポイントからの張り出し、そして離脱する行程が観察された。転位すべり方位解析かららせん転位と転位ループの相互作用であり、転位ループ障害抵抗は 0.3 程度であると推定され、室温変形での値に近いと推測される。SUS316L 鋼を -170°C まで冷却した際に、観察前にき裂が発生したため実験が実施できなかった。これは熱膨張により試料の長手方向に荷重がかかってき裂が進展したためであると推察され、今後試料取り付けから冷却時の作業工程を精査し、TEM 内での変形観察が可能になるよう調整し、手法の向上を図っていく。

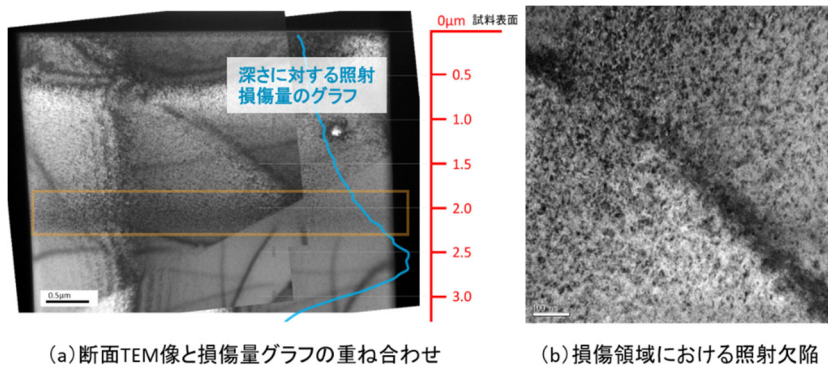


図 1 Ni イオン照射をした SUS316L 鋼の断面 TEM 観察画像。

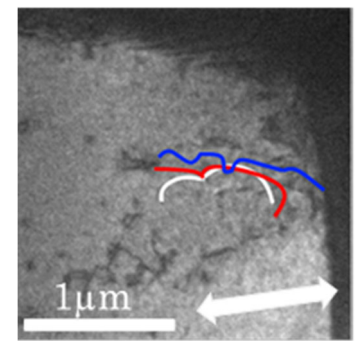


図2 700°CHe イオン照射した純 Mo 中の引張試験による運動転位と転位ループの相互作用。図中白線 0 s、赤線 11.8 s、青線 18.3 s の転位像を示す。⇔は引張方向。

結言

タンデム加速器によるニッケルイオン照射を実施し、TEM 内引張試験『その場』観察用試料として適用が可能な状態であることを確認した。試料枚数や損傷量、照射時間など、照射条件の最適化を今後続けていく。

高温/低温 TEM 内引張試験『その場』観察実験によるイオン照射材に対する照射欠陥-転位相互作用について知見を得るための試験準備を実施し、多くの問題点を抽出して検討を行い、手法の向上を図った。

2.4.3.3

人工衛星搭載用 CMOS 撮像検出器と民生回路部品の耐放射線シミュレーション

Radiation Tolerance Test for Semiconductor Imaging Sensor and Electronic System Based on Commercial Products Onboard Satellites

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

Daisuke YONETOKU, Makoto ARIMOTO, Tatsuya SAWANO, Shota WATANABE, Naoki OGINO,
Satoshi HATORI, Kyo KUME and Satoshi MIZUSHIMA

Abstract

We performed a radiation tolerance test on an X-ray CMOS imaging sensor for the future observation in space. We confirmed that we can operate it for more than 6 years in satellite orbit. We also investigated a radiation tolerance of an electronic readout system based on commercial products used for a gamma-ray detector onboard a micro-satellite, Kanazawa-SAT³. We confirmed that the electronics can be operated in orbit for 4 years.

要約

次世代の人工衛星計画に向け、X 線撮像素子 CMOS センサーの放射線耐性試験を実施した。本試験により、CMOS センサーが宇宙空間で6年以上にわたって要求性能を維持可能であることを実証することが出来た。また、金沢大学で開発する超小型衛星搭載ガンマ線検出器の読み出し回路基板にトータルドーズ試験を実施し、軌道上4年の運用に耐えることを確認した。

緒言

金沢大学では、低エネルギーの X 線帯(0.4-4keV)を利用した突発天体観測による初期宇宙・極限時空探査衛星計画 HiZ-GUNDAM への搭載を検討している 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。また、ガンマ線検出器を超小型人工衛星に搭載し、重力波に同期した X 線突発天体観測による重力波天文学への貢献を目指した金沢大学衛星計画 Kanazawa-SAT³ に搭載するガンマ線検出器の読み出し回路に対する放射線損傷試験も併せて実施した。

方法

HiZ-GUNDAM 計画における人工衛星の軌道を高度 700 km の太陽同期極軌道と仮定した場合、CMOS センサーに入射する粒子線フラックスは、陽子およびヘリウムが主な原子核で 3×10^9 proton/cm²/yr 程度と SPENVIS¹⁾により算出された。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 100 MeV の陽子を照射した。CMOS センサーには、想定する約 8 Gy/yr を念頭にミッション期間 6 年分に相当する約 48 Gy (Si)を照射した。

CMOS センサーは Hot 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。実験のセットアップを図 1 に示す。LD は、CMOS センサーの暗電流と読み出し回路ノイズによって発生する電荷によるピクセル値が、CMOS センサー内で光電吸収された X 線が与える電荷損失によるピクセル値と区別できる X 線エネルギーの下限値として表される。本実験では、CMOS センサーに対してノイズの影響が十分無視可能な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。なお、X 線イベントのエネルギー較正には、⁵⁵Fe から放出される Mn-K α 線で行った。

金沢大学衛星の軌道を高度 660 km の太陽同期極軌道と仮定し、衛星構体や観測装置筐体により実効的にアルミニウム 3mm 厚の遮蔽を経て IC 回路に到達する放射線の被ばく量は、年間 20 Gy (Si)程度と見積もられた。そこで、民生部品で構成される衛星搭載品と同等のガンマ線検出器読み出し回路基板に軌道 10 年分に相当する 200 Gy (Si)以上を 100 MeV の陽子により照射し、トータルドーズ効果の影響を調べた。具体的には、リニ

*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。

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

ア電圧レギュレータの出力 3.3V の変化、ADC と計装アンプによる機器の健康状態を監視する電流モニターの出力変化を調べた。実験のセットアップを図 3 に示す。

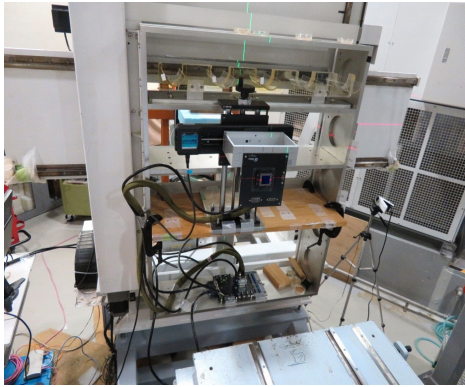


図 1 CMOS センサーの照射セットアップ。照射時は暗幕をかぶせ、遮光した。

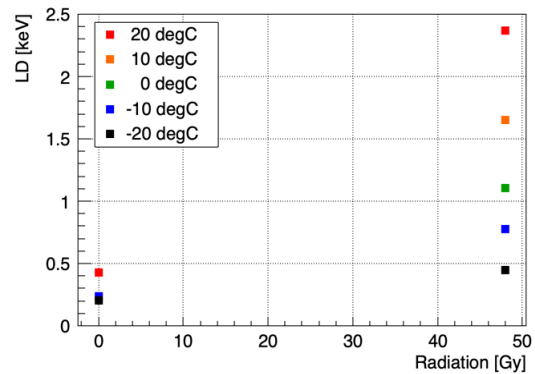


図 2 トータルドーズに対する CMOS センサーの読み出し下限値 LD の変化。

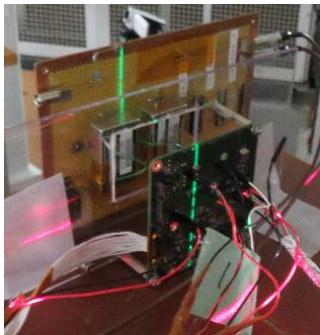


図 3 ガンマ線検出器読み出し回路の照射セットアップ。基板サイズは 10cm 角。

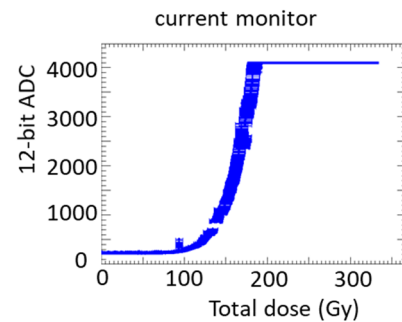


図 4 ガンマ線検出器読み出し回路のトータルドーズによる電流モニターの出力変化。

結果

図 2 に陽子線照射前後での 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℃の場合、ヘリウム照射前に 0.4 keV であった読み出し下限値は 2.4 keV まで悪化した。しかし、-20℃まで冷却することで陽子線照射によって生じた暗電流増加が抑えられ、照射後も LD はおよそ 0.4 keV であった。これは、我々の観測帯域である 0.4 keV と同程度であるため、宇宙利用可能であることが明らかになった。

また、ガンマ線検出器読み出し回路のトータルドーズ効果について、リニア電圧レギュレータの出力 3.3V は 200 Gy 照射後も出力し続けたが、10 Gy あたり 6 mV の割合で電圧が降下していくことが確認された。この電圧は ADC のアナログ参照電圧に使用されるが、電圧降下の影響が無視できないことから年 1 回の頻度で衛星軌道上での較正が必要である。その他の ADC と計装アンプによる電流モニターの出力は、80 Gy を過ぎてから被ばくにつれて 10 Gy あたり 60 mV の割合でドリフトし、その後変化量が加速度的に変化していく様子が確認された(図 4)。実際の使用に際して無視できない量であるため、80 Gy、すなわち軌道上 4 年までが実用上の寿命であり、それ以上の運用を実施するには軌道上で注意深く較正を行う必要があることが示唆された。

結言

将来衛星計画 HiZ-GUNDAM への搭載を検討している CMOS センサーは、-20℃まで冷却することで 6 年間運用可能であることが実証された。また、金沢大学衛星に搭載するガンマ線検出器の読み出し回路は年 1 回のアナログ電源電圧 3.3V の電圧較正を行うことで 4 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/>

2.4.3.4

GaN HEMT 動作中のプロトン照射効果

Proton Irradiation Effect under Device Operation of GaN HEMT

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

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

Abstract

The influence of proton irradiation of GaN HEMT under device operation was investigated. We found gradual drain current increase during the proton irradiation caused by a priming effect, and the gradual drain current decrease after the proton irradiation caused by a persistent photoconductivity effect.

要約

動作中の GaN HEMT にプロトンを照射し、デバイス特性に与える影響を調査した。照射開始後、プライミング効果によりドレイン電流が徐々に増加し、照射停止後、持続的光伝導によりドレイン電流が流れ徐々に減少していく現象を明らかにした。

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、宇宙用途に適したデバイスである。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。今回、太陽フレアで発生するプロトンを想定し、デバイス動作中の特性変動や信頼性に与える影響を調査した¹⁾。

方法

SiC 基板上 AlGaIn/GaN 構造 HEMT に、若狭湾エネルギー研究センターでシンクロトロン²⁾の 70MeV プロトンビームを用い、エネルギーデグレーダーで所望のエネルギーまで減速し $1.7 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の照射を行った。照射中のバイアス条件は $V_{gs} = -5.0\text{V}$ 、 $V_{ds} = 100\text{V}$ である。

結果・考察

照射開始直後にドレイン電流が急増し、その後徐々に増加している。これは照射直後、電子・正孔対の発生により急激にドレイン電流が増加し、その後深い準位に関連したプライミング効果で徐々にドレイン電流が増加していると考えられる。また照射を停止後、瞬時に初期電流に戻らず徐々に減少することが分かった。これは深い準位による持続的光伝導(Persistent photoconductivity)によるものと考えられる。照射エネルギーが増加するにつれ、ドレイン電流の変化は減少している。これは高エネルギーのプロトンのデバイスに対する線エネルギー付与が低下するためである。ドレイン電流の変動は小さく破壊にも至らなかった。

結言

高エネルギーのプロトン照射により動作中の GaN HEMT のドレイン電流が徐々に増加後減少することを示した。変動量は小さくプロトンに対し高い信頼性を有していることが明らかになった。

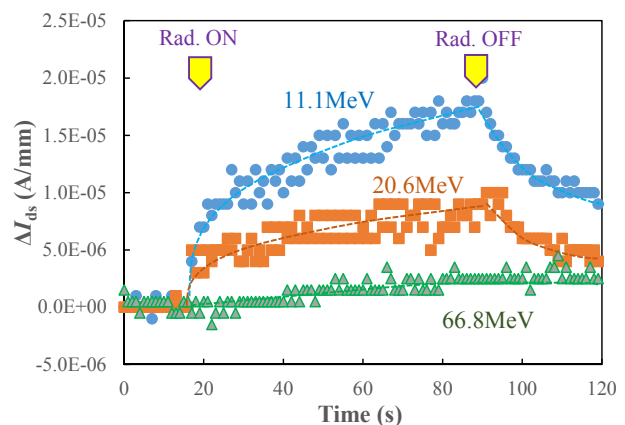


図1 プロトン照射時のドレイン電流変動

参考文献

- 1) H. Sasaki *et al.*, Reliability of Compound Semiconductor Workshop, 34, p.83 (2019)

^{*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。

2.4.3.5

陽子線および重粒子線を用いた衛星搭載デバイスの放射線耐性の検証

Evaluation of Radiation Hardness of Electric Devices for Space with Proton / Heavy Particle Beam

谷津陽一^{*1}、間宮英生^{*1}、中島豪志^{*2}、林輝明^{*2}、菊谷侑平^{*2}、羽鳥聡^{*3}、久米恭^{*4}、水嶋慧^{*4}Yoichi YATSU, Hideo MAMIYA, Tsuyoshi NAKASHIMA, Teruaki HAYASHI, Yuhei KIKUYA,
Satoshi Hatori, Kyo KUME and Satoshi MIZUSHIMA

Abstract

The radiation hardness of commercial off-the-shelf (COTS) semiconductor devices, such as SRAMs, communication transceiver IC, and operational amplifiers, necessary for on-board computer (OBC) are reported. For microsatellites, automotive-grade devices tends to be recommended as a highly reliable component with a wide operating temperature range, however, the sensitivity to the particle events is almost the same with that of normal grade devices. Among the four types SRAMs, the one with the higher radiation tolerance did not show latch-up like current variations, but upsets of 20 bit/day per 64 Mbit is expected. If the rewriting of the data is acceptable, it is considered possible to use those devices in the satellite.

要約

本研究では、オンボードコンピュータ(OBC)に欠かせないSRAM、通信トランシーバICなどを商用オフザシェルフ(COTS)から選択し、その放射線耐性を評価した。超小型衛星では、動作温度範囲の広い高信頼性部品として車載グレードが推奨される傾向にあるが、放射線耐性という宇宙特有の条件においてビット反転の頻度は特に優れていないことが判明した。試験した4種のうち耐性の高かったものは、ラッチアップは見られなかったものの、64 Mbit あたり 20 bit/day のビット反転が予想される。もし、データの書き換わりが許容できる用途であれば、衛星での仕様も可能だと考えられる。

緒言

衛星搭載観測装置の高機能化が進む中であって、大容量のランダムアクセスメモリや、高速なデータ転送が可能なトランシーバICなどの選定が、ミッション要求を実現する上で重要になっている。従来の大型衛星では、フルカスタムの航空宇宙グレードを採用することで、放射線に起因するビット反転(データの書き換わり:SEU)やラッチアップ(SEL)による永久故障を避けてきたが、これらの宇宙専用部品は生産個数が極めて少なく、価格はチップあたり数百万円以上、納期は早くても半年、そもそも大学や小さな企業では購入契約自体が困難であることも多く、民間宇宙開発を促進する上で大きな参入障壁になっていた。一方で、宇宙開発経験の少ない大学・企業は半導体素子の放射線障害自体の理解が乏しく、そもそも試験さえ行わずに打ち上げて、失敗することも少なくない。本レポートでは比較的試験の簡単なトータルドーズ試験(ガンマ線照射)と大気圧下で照射が可能なプロトンビーム照射による部品選別試験のうち、特に興味深い情報が得られたSRAMの選定結果について報告する。

実験方法

照射する核種は軌道上で圧倒的多数を占める陽子とし、入射頻度の高い100 MeVを選択した。散乱体(タングステン 1.3mm 厚)を通過するため、被検体照射時にはおよそ90 MeVとなる。照射レートは2016年の実験結果を参考とし¹⁾、シングレイベント効果(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に 6×10^5 と 3×10^6 proton/s/cm²の2種類の強度を設定した。最初は低レートで照射を行い、問題が無い様であれば高レートで照射を行い、最終的にトータルで $\sim 10^9$ proton/cm²(地球低軌道換算で1年分)以上になるよう実験を行った。

SRAMの照射試験は通電状態で行い、20 ms 周期でデータ書き込み、読み出しを行い、ビット反転等の異常の有無をリアルタイムでモニタした。この書き込み・読み出しには時間がかかるため、書き込み済みのメモリセルが陽子線に暴露されている時間は全照射時間の3/8のみである。また、データが書き込まれているメモリ領域

^{**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

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。

は、通信速度の制約により 512 Byte/chip とした。メモリ制御は Flash プロセスの CPLD を用い、ビームが直撃しない様パラフィンブロックで防護して行った(結果として試験中1度フリーズした)。

実験結果

実験結果を表 1 にまとめる。被検体は容量 64 Mbit/32 bit それぞれ 2 種類ずつである。SRAM1 と SRAM2 は同じシリーズのサイズ違いであり、SEU/SEL 特性もほとんど同じであった。これら 2 種は、照射試験を通してビット反転が 1 回のみ確認されたが、有意な電流変化は見られず、SEL は無かったものと考えられる。次に放射線耐性が高かったのは SRAM4 であり、照射実験中 4 回のビット

表 1 各メモリの SEE 特性まとめ

デバイス	容量 (Mbit)	SEU	SEL	SEE 断面積 ($\text{cm}^2 \text{ bit}^{-1}$)
SRAM1	64+パリティ	1 bit	無	$\sim 4.3 \times 10^{-14}$
SRAM2	36+パリティ	0 bit	無	$\sim 4.3 \times 10^{-14}$
SRAM3	64	> 40 bit	SEU に同期 5-20 mA	$> 1.7 \times 10^{-12}$
SRAM4	32	4 bit	無	$\sim 1.7 \times 10^{-13}$

反転が確認されたが、同様に SEL は見られなかった。一方、SRAM3 は照射開始直後から数秒おきにビット反転が連発した。ビット反転自体はデータ上書きにより元に戻すことが出来るものの、5~20 mA ほど増大した電流値は電源を切るまで戻らなかった。40 回以上の不具合を検知しつつモニタを継続し、最後は電流が増大したまま放置したが、結果として永久破壊には至らなかった。

今回試験した同一メーカーの 4 種類 SRAM は、それぞれ使用温度範囲の広い車載グレードから選択したが、特に Parity 情報の無い 2 種類については放射線に対する感度が高いことが確認された。このうち SRAM3 は、SEL と思われる電流増大も併発しており、軌道上での連続動作は極めて危険だと結論する。

一方、今回の試験の中で比較的放射線耐性の高かった SRAM1、SRAM2 の SEU 断面積を計算するとおおよそ $4.3 \times 10^{-14} \text{ cm}^2 \text{ bit}^{-1}$ となった。これは、メモリ領域全体 (64 Mbit) 全てにデータを書き込んだ状態で高度 500 km の極軌道を 1 日間飛行した場合に、おおよそ 20 回のビット反転が発生することに相当する(実測したのが 1 回だけであり、統計的に精度は低い)。地球低軌道においては、荷電粒子の大部分が南大西洋異常帯か南北のオーロラ帯に集中しているため、これらの上空を通過する際に何らかの不具合が生じる可能性があると考えられる。

今回の試験では、新宇宙業界ではよく使われている「車載グレード」から部品を選定したが、結果として放射線耐性にはばらつきがあり、特にビット反転を想定していない(パリティなし)製品は SEE の断面積が 1-2 桁ほど大きかった。これに対し、民生品であっても、サーバー用の中性子アップセット対策品は、スペックシート上も実測値も $10^{-16} \text{ cm}^2 \text{ bit}^{-1}$ という値であり、SRAM1/SRAM2 よりも 400 倍ほど耐性が高く、衛星での利用を考えた場合やはり放射線対策品の方が良いという結論が得られた。一方で、上記製品はアクセス速度や容量・チップサイズに制約があるため、大容量の画像データなどに使用するのは困難である。今回試験した SRAM は、マイクロプロセッサの実行メモリ領域として使う場合、1 日になんどもビット反転が起こり得るため、そのたびにシステムがフリーズすることを意味しかなり危険であるが、例えば、ミッション装置での利用や、数秒間しか保存しない画像バッファとしての利用であれば、実用上は問題が顕在化する確率は低いと考えられる。当然ながら、再現試験で実際にビット反転が起こってもシステムに問題が無いことを確認することが絶対条件となるだろう。

結言

本研究では、放射線耐性に着目した衛星搭載のための電子部品の選定を行った。国内外で超小型衛星開発が活発に行われている中にあって、比較的試験の容易なガンマ線照射は一般に行われる様になりつつあるものの、より致命的な不具合に繋がりがかねないシングルイベントに対しては無防備な場合が多く、トータルドーズ耐性のみで「耐放射線」を謳っている製品が散見される。本試験では、信頼性が高いと信じられている車載グレードを持ち込み試験をしたが、結果は製品ごとに全く異なっており、車載グレードであることが宇宙においては何の保証にもならないことが明らかになった。したがって、衛星搭載品を選定する場合、車載品であることは温度条件とスクリーニング条件という観点での必要条件にしかならず、全く十分ではないと結論できる。放射線環境下の動作を想定しない民生品は、放射線耐性が重視されないため、現時点においては、打ち上げ前の粒子線照射試験の重要性が改めて浮き彫りになったと言えよう。また、本レポートでは紙面の都合上割愛したが、SRAM 以外にも、通信変換 IC12 機種、シングルボードコンピュータ 1 機種(追試)、モーター制御装置 4 種、オペアンプ 2 機種、電源 IC2 機種、カメラ 2 機種を試験しおおよそ半数が搭載品として選定された。これらは、2021 年打ち上げ予定の東工大ひばり衛星に搭載予定である。

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)

2.4.3.6

超小型衛星搭載中性子検出器の陽子飛跡性能評価と陽子線耐性試験

Performance Evaluation of Proton Tracks and Radiation Tolerance for Neutron Detector Onboard Cubesat
 山岡和貴^{*1}、稲守孝哉^{*2}、朴志賢^{*1}、宮田喜久子^{*3}、大月洋貴^{*2}、野橋大輝^{*1}、羽鳥聡^{*4}、久米恭^{*5}、水嶋慧^{*5}
 Kazutaka YAMAOKA, Takaya INAMORI, Ji Hyun PARK, Kikuko MIYATA, Hiroki OTSUKI, Daiki NOBASHI,
 Satoshi HATORI, Kyo KUME and Satoshi MIZUSHIMA

Abstract

The purpose of this study is to investigate 1) radiation tolerance of electric components onboard cubesat under development of Nagoya University and 2) proton response of fast neutron detector which consists of multi-layered plastic scintillators to be installed for the cubesat. In the two experiment of 2019, we have verified radiation tolerance of key electric parts such as micro-controllers and FPGAs, and measured response of a plastic scintillator bar with 4x4x64 mm to protons readout by MPPCs.

要約

名古屋大学で開発中の超小型衛星に搭載する電子部品の放射線耐性と搭載予定の積層プラスチックシンチレータで構成される中性子検出器の陽子応答を調べる研究である。2019年度の2度の照射実験でオンボードコンピュータに使用されるマイコンやミッション部のFPGAなど主要部品の耐性を検証し、MPPCで読み出したプラスチックシンチレータバーの陽子に対する応答を測定した。

緒言

名古屋大学では大きさ10 cm×10 cm×30 cmの超小型衛星(3Uキューブサット)の開発を理工連携で進めている。1号機の工学実証機は2022年度の打ち上げが決まり、理学では2号機にミッション装置として太陽フレアからの中性子を宇宙空間から観測する検出器を搭載する予定(中性子ガンマ線分光ミッション: Solar Neutron and Gamma-ray Spectrometer (SONGS) と命名)であり、2023年以降太陽極大期での打ち上げを目指している。この検出器は棒状のプラスチックシンチレータを256本積層したもので、中性子の弾性散乱で生じた反跳陽子の飛跡を測定することで入射中性子のエネルギーを決定する。さらに下部にGAGG(Ce)無機シンチレータをおき、プラスチックシンチレータでコンプトン散乱したガンマ線をとらえることでガンマ線にも感度をもつ。高速中性子(20-100 MeV)とガンマ線(200-1000 keV)に同時に感度をもつ超小型な画期的なセンサである。超小型衛星・検出器開発のため、2019年度から継続的に衛星搭載用電子部品への照射を行い、シングレイイベントラッチアップ(SEL)やアップセット(SEU)の頻度を確認して軌道上で使用可能かどうかを調べている。

2019年度実験内容・結果

2019年度は6月27-28日にヘリウム220 MeV(電流値1.6 pA)を、10月29-30日に陽子200 MeV(電流値8.5 pA)をマイコン、ADC、FPGAなどに軌道上で予想される陽子1年分程度(X線天文衛星570km、軌道系射角31度の軌道で 3×10^9 個 cm^{-2})を照射した。特にミッション機器で用いる、集積回路を制御するためのXilinx社製FPGAに照射して問題なく動作することが分かった。この結果、搭載する電子部品についてはデータ保存用メモリを除いてほぼ選定を終了している。また、ミッション装置としては中性子を検出するプラスチックシンチレータバー(4x4x64 mm)の陽子に対する応答を陽子エネルギー200 MeVから減速材を使って段階的にエネルギーを落とし、さらに回路応答に影響を与えない極低レート(100 Hz程度)まで絞り照射した。白色ペイントを反射材として施したプラスチックシンチレータバーをその両端にとりつけた3 mm角のMPPCで読み出し、陽子に対する応答を約10 MeVから200 MeVまで測定することができた。

結言

2019年度に引き続き、2020年度はデータ保存用メモリの陽子線耐性を調べるとともに、プラスチックシンチレータのさらなる改良を行い、積層型プラスチックシンチレータ4層分を組み立て、その応答を調べる予定である。

^{*1}名古屋大学・宇宙地球環境研究所、^{*2}名古屋大学大学院・工学研究科、^{*3}名古屋大学大学院・工学研究科(現名城大学・理工学部)、^{*4}(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、^{*5}(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、名古屋大学と(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。MEXT KAKENHI 18H03700 (KY)の助成を受けた。

2.4.3.7

宇宙放射線計測装置の放射線耐性試験

Radiation Tolerance of Space Radiation Measurement Devices

平出尚義^{*1}、廣瀬憲吾^{*1}、内田和海^{*1}、高橋弘充^{*1}、大野雅功^{*1}、山岡和貴^{*2}、久富章平^{*3}、中澤知洋^{*4}、
久米恭^{*5}、水嶋慧^{*5}、羽鳥聡^{*6}

Naoyoshi HIRADE, Kengo HIROSE, Nagomi UCHIDA, Hiromitsu TAKAHASHI, Masanori OHNO,
Kazutaka YAMAOKA, Syohei HISADOMI, Kazuhiro NAKAZAWA, Kyo KUME,
Satoshi MIZUSHIMA and Satoshi HATORI

Abstract

SiPM or Multi Pixel Photon Counter (MPPC) will be used as optical devices to readout scintillation lights in space. In this report, we describe results of the proton radiation tolerance of a new MPPC (S14160). Compared with the previous type (S13360), this MPPC has the higher detection efficiency and lower operational voltage, although the leak current is worse. After the irradiation of 300–5000 rad of 200 MeV protons, we observed the increase of the leak current by a factor of 300–1000 times, which is comparable to the previous MPPC. As the results, the similar energy threshold of scintillation detectors was achieved between the new and previous MPPCs.

要約

SiPM または Multi Pixel Photon Counter(MPPC)は、宇宙環境においてもシンチレータからのシンチレーション光を読み出す光検出器として利用が検討されている。この報告では、新型の MPPC (S14160)に陽子を照射した際の放射線耐性について述べる。従来の MPPC (S13360) に対して、今回調べた S14160 は検出効率が高く、動作電圧が低いという利点があるが、一方で暗電流は高いという欠点がある。200 MeV 陽子を 300–5000 rad 照射した結果、暗電流は 300–1000 倍高くなることが明らかになった。この悪化率は、従来タイプと同程度である。結果として、シンチレータ検出器としては新旧 MPPC で同程度のエネルギー閾値が達成されることが分かった。

緒言

我々は、天体からのガンマ線信号を検出するため、放射線検出器を搭載した衛星計画を進めている。人工衛星では、電力、スペースの制限があるため、数 10V の低電圧で動作し、数 mm 角のコンパクトな光検出器である MPPC は有力な候補である。宇宙において高度 500 km の軌道では、1 年間に 1 krad 程度の被曝が想定される(シールドをすれば数 100 rad に低減される)。そこで、これまでに従来 MPPC の S13360–6050CS の放射線耐性を調べ、新型 MPPC では暗電流が数 100 倍悪化してしまうことを明らかにした。今回は新型 MPPC の S14160–6050HS について、放射線耐性に差が見られるかどうかを調べた。

方法・結果

衛星軌道を模擬して 200 MeV の陽子を MPPC S14160–6050HS に照射した。MPPC のサイズは 6mm 角で、陽子はこの面内で均一になるように調整した。陽子の照射量に対して、増加した暗電流をプロットしたのが図 1 である。照射前の時点で、S14160 の暗電流は S13360 よりも約 4 倍高い。どちらの素子も照射量が増加するにつれ暗電流が増加しているが、絶対値の比はほぼ 4 倍に保たれており、照射量と暗電流の増加率(悪化率)は両素子で同程度であることが分かった。

300 rad 照射した S14160–6050HS を 1cm 角の CsI(Tl) シンチレータを接着して、+20℃においてガンマ線のエネルギースペクトルを取得したところ、30 keV 程度のエネルギー閾値が達成された。

結言

今回の 200 MeV 陽子照射実験により、新型 MPPC の S14160 についても、従来の S13360 と同程度の放射線耐性を示すことが分かった。これにより、40V と低電圧での動作が必要であれば S14160 を利用し、少しでも暗電流の低い環境が有益な場合には S13360 を使う方が良いと考えられる。

^{*1} 広島大学・理学研究科・物理科学専攻、^{*2} 名古屋大学・宇宙地球環境研究所、^{*3} 名古屋大学・理学研究科・素粒子宇宙物理学専攻、^{*4} 名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所、^{*5} (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、^{*6} (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、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。

なお 1 krad の放射線ダメージで、MPPC の暗電流が数 100 倍も悪化し、エネルギー閾値(感度)が 10 倍以上も悪化してしまう点については、硬 X 線に感度を持たせたい宇宙放射線計測装置としては欠点である。今後引き続き少しでも放射線耐性の高い MPPC の開発が望まれる。

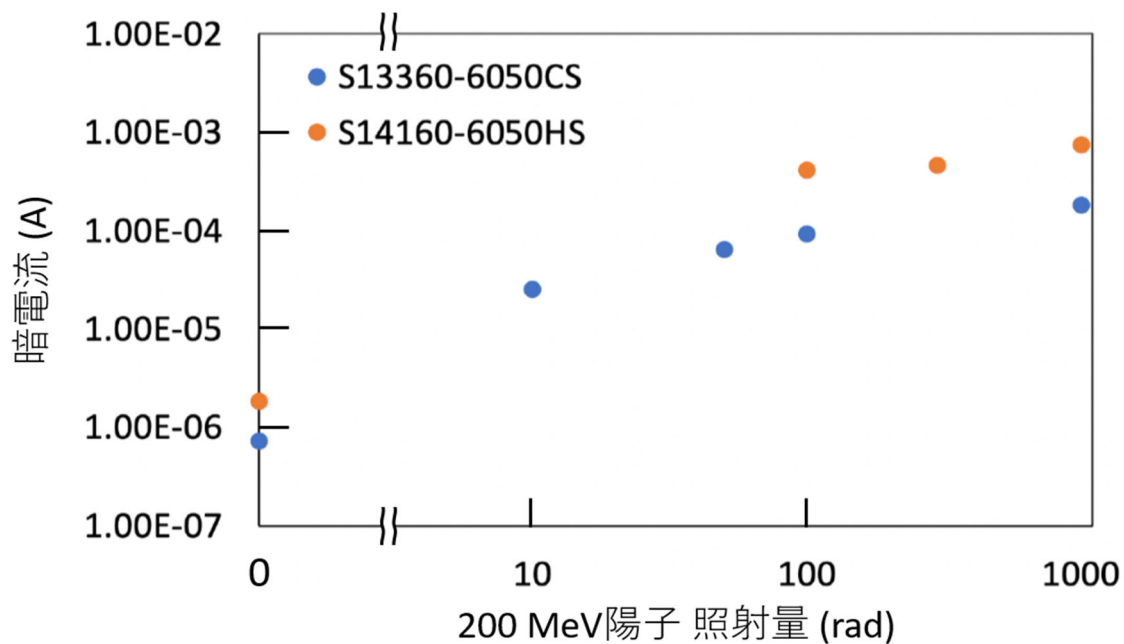


図 1 MPPC に 200 MeV 陽子を照射した際の暗電流の増加。
S14160-6050HS が今回の新型、S13360-6050CS が従来型。

2.4.3.8

宇宙用電子機器の高エネルギー荷電粒子耐性の確認

Confirmation of High-Energy Charged Particle Resistance of Space Electronics

前田知宏^{*1}、Isai FAJARDO^{*1}、Rafael A. RODRÍGUEZ^{*1}、武谷悠^{*1}、奥山圭一^{*1, *2}、
久米恭^{*3}、羽鳥聡^{*4}

Chihiro MAEDA, Isai FAJARDO, Rafael A. RODRÍGUEZ, Chikashi TAKEYA,
Kei-Ichi OKUYAMA, Kyo KUME and Satoshi HATORI

Abstract

This report shows the results of the survivability and operability of some commonly used electronic devices for small spacecraft under the irradiation of charged particles. The Single Event Effects (SEE), and in particular single event upsets (SEU) were tested for the memory of the selected devices.

要約

本研究は宇宙機に一般的に使用されている幾つかの集積回路に高エネルギー荷電粒子を照射させ、それらのシングスイベントエフェクト(SEE)発生挙動を調査することで、生存性を評価した。特に本研究では試験に用いた集積回路のシングスイベントアップセット(SEU)が発生するエネルギーをある程度特定できた。

諸言

宇宙放射線は太陽放射線 SCR(Solar Cosmic Ray)と銀河放射線 GCR(Galactic Cosmic Ray)から構成され、SCRは主に太陽フレアやコロナガス噴出によって発生した高エネルギーの粒子 SEP(Solar Energetic Particles)である。SEPは、太陽から放出される 10 keV から数 10 GeV の陽子、電子、重イオンであり、主としては陽子である。GCRは太陽系外を起源とする高エネルギー荷電粒子で、そのほとんどが陽子であり、そのエネルギーレベルはSCRより一桁以上大きい。人工衛星に搭載した LSI などの半導体に、一時的な誤作動(ソフトウェア)や恒久的な故障(ハードウェア)は、これら宇宙放射線が集積回路への衝突 SEE 現象(Single-Event Effects)であることが知られている。最近の研究開発では、最先端の機能を持ち低価格の民生部品を用いて人工衛星のコストダウンを図る動きが活発である。しかし、微細・低電圧・高速化が進んだ高機能民生部品は放射線耐性が低い。このため、宇宙機開発においてそういった民生部品に含まれる集積回路の放射線耐性は必要不可欠な評価項目である。ここでは、長年超小型衛星に採用され続けた集積回路に加え、宇宙における放射線耐性が未だ詳しく解明されていない新しい集積回路の高エネルギー荷電粒子耐性の確認試験結果を報告する。

SEE 効果または TDE 効果

放射線の搭載機器、特に電子機器に対する影響には、SEE 効果、トータルドーズ効果ならびに内部帯電による絶縁破壊などの現象がある。SEE 効果とは、高いエネルギーを持つ一個のイオンが半導体デバイスに入射して引き起こす故障のことを指す。SEE 効果には、回路素子が誤作動(たとえばメモリ反転)などを起こすシングスイベントアップセット SEU (Single-Event Upset)、過電流が流れて恒久的損傷に至るシングスイベントラッチアップ SEL (Single-Event Latch-up)がある。また、トータルドーズ効果とは、素子または材料が、放射線の通過によりエネルギーを吸収し(このエネルギー量の総和をトータルドーズという)、原子を電離させたり、結晶格子に欠陥を生じさせたりして、素子に恒久的損傷を与える効果のことである。

今回の試験では長年超小型衛星に採用され続けてきた集積回路と新しい集積回路を供試体とし、若狭湾エネルギー研究センターの加速器施設にて放射線試験を行った。

試験目的および試験方法

今回の試験では若狭湾エネルギー研究センターのシンクロトロンを用いて、20MeV、50MeV、100MeV、150MeV、200MeV の 5 条件の陽子ビームを集積回路に照射して、SEE 現象の発生率を取得した。加速器からの陽子のエネルギーは 200MeV に固定し、デグレーダーを供試体よりビームライン上流に設置し、デグレーダーの厚さに応じて供試体上でのビームエネルギーを調整した。図1に試験概観を示す。

^{*1}九州工業大学、^{*2}日本大学・理工学部・航空宇宙工学科、^{*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}(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、九州工業大学と(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。

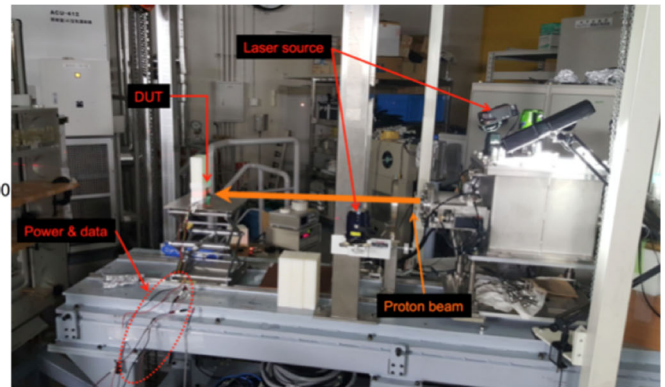
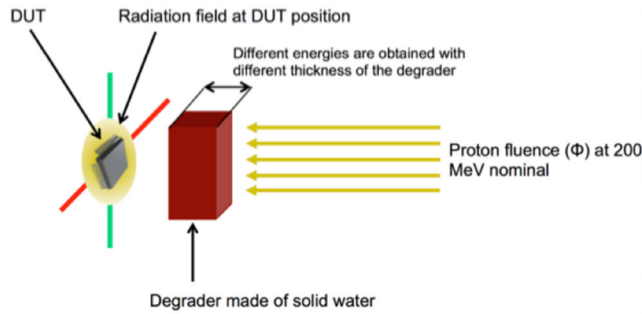


図1 若狭湾エネルギー研究センターにおける宇宙用電子機器の高エネルギー荷電粒子耐性確認試験装置外観

供試体および試験結果

Raspberry pi Zero および Raspberry Pi 3B に加え、地球低軌道環境観測衛星「てんこう」など多くの衛星に搭載され続けた PIC16F877 の 3 つの集積回路について照射試験を行った。

まず PIC16F877 の動作結果について示す。結果としては、今回検証したデバイスの中では最も SEE 耐性に優れると判断した。しかし、150MeV を照射したあたりから再起動を必要とするエラーを確認できた。

次に Raspberry Pi ZERO および 3B +モデルの動作結果について示す。結果としては両デバイスともに宇宙環境下における使用としては適さないと判断できた。50MeV を照射した際、どちらも共にエラーが確認できたため非常に SEE 耐性が低いと判断したためである。横軸を照射量、縦軸を陽子ビーム照射量範囲に対してのエラー率とし、それぞれの供試体の比較を図2に示した。

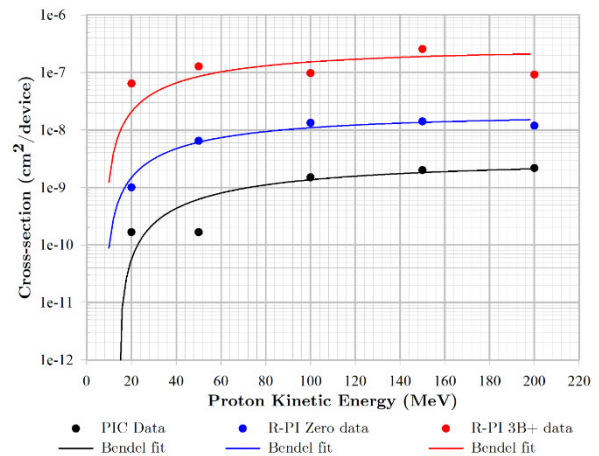


図2 宇宙用電子機器の高エネルギー荷電粒子耐性確認試験結果

結言

超小型衛星を対象とした集積回路の放射線耐性を確認する目的で実施した今回の試験では、電子ビーム照射が SEU 発生の一因であることをあらためて見出せた。PIC16F877 は今回の試験で用いた供試体の中で最も優れた放射線耐性のあることが分かったが、約 150MeVあたりから動作が不安定になる。Raspberry Pi と Raspberry Pi 3B +に関しては PIC16F877 と比較してさらに SEE 耐性が低い。今後、Raspberry4 など他の集積回路の放射線耐性を調べ、さらに適正な素子を見つけるべきと判断した。またここでは陽子ビームについてのみ報告を行ったが、その他の重イオンに関しても試験を行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) “The Behavior of Systems in the Space Environment | Robert N. Dewitt, Dwight Duston Anthony K. Hyder. Springer 1993.”
- 2) “ECSS-E-HB-10-12A - Calculation of Radiation and Its Effects and Margin Policy Handbook (17December 2010) | European Cooperation for Space Standardization.”
- 3) “ESCC Basic Specification 25100: Single Event Effects Test Method and Guidelines”. ESCC Radiation: Standards | ESCIES (European Space Components Information Exchange System).

2.4.3.9

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(3)

Basic Study for Radiation Tolerance Test of Martian Moons eXplorer's Scientific Imagers

尾崎正伸^{*1}、石神龍哉^{*2}

Masanobu OZAKI and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

We irradiated CCD imagers with 8 MeV protons that are planned to be used for the optical imagers of the Martian Moons eXplorer (MMX) scheduled as Y2024 launch, and evaluated the dark current caused by the radiation damage. The comparison of the results among present samples and others irradiated by different energy and particles suggests that the dark currents cannot be simply predicted either by total ionization dose (TID) or non-ionization energy loss (NIEL) of the device.

要約

2024 年打上予定の火星衛星探査機(Martian Moons eXplorer) 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 8 MeV 陽子の照射実験を行った。本実験および他施設での線質の異なる照射実験の結果から、CCD 素子の暗電流量はトータルイオンドーズ TID や非イオン化エネルギー損失 NIEL を揃えることでは再現できないことが示唆される。

緒言

火星衛星探査計画(Martian Moons eXplorer) MMX は 2024 年打上予定の火星衛星サンプルリターン計画である。探査機にはサンプラのみならず科学観測用カメラも搭載する。本研究では、前々年度・前年度に引き続きカメラ撮像素子の耐放射線性評価を目的とした実験を行った。前年度までで 8 MeV 陽子ビームラインにおける照射装置系の整備は完了したが、素子を壊さない線量での照射には成功していなかった。この時当てた最大線量はおおよそ 50 Gy である。本年度は定量的評価に耐えるサンプルの作成を目的として、2 回のマシンタイムで 3 素子の照射を実施した。

供試体と照射条件

供試体は民生品のインターライン型 CCD である。ピクセルピッチは $5.5\ \mu\text{m}$ でありフォトダイオードの面積比は 5% 程度と推測される。空乏層厚は未公表だが分光感度特性から $4\sim 5\ \mu\text{m}$ と推測される。転送路の空乏層厚は不明である。

照射系の概念図を図 1 に示す。中エネルギーラインのビームの空間強度分布は保証されていない為、ビームを一旦散乱体(金箔)で反射させることで一様性と強度分布を担保する仕組みとした。また、散乱体上のビームスポットと供試体(CCD)との間に可動遮蔽体(電動ステージに設置したアルミ板)を挟むことで、照射室に立ち入る事なく CCD の場所毎の被曝量を制御可能としている。

照射条件は、最終的に最大で 2.5 Gy とすることで、CCD としての動作を阻害しないサンプルを作成することに成功した。これにより、素子の低エネルギー陽子による劣化を定量的に評価することが可能となった。

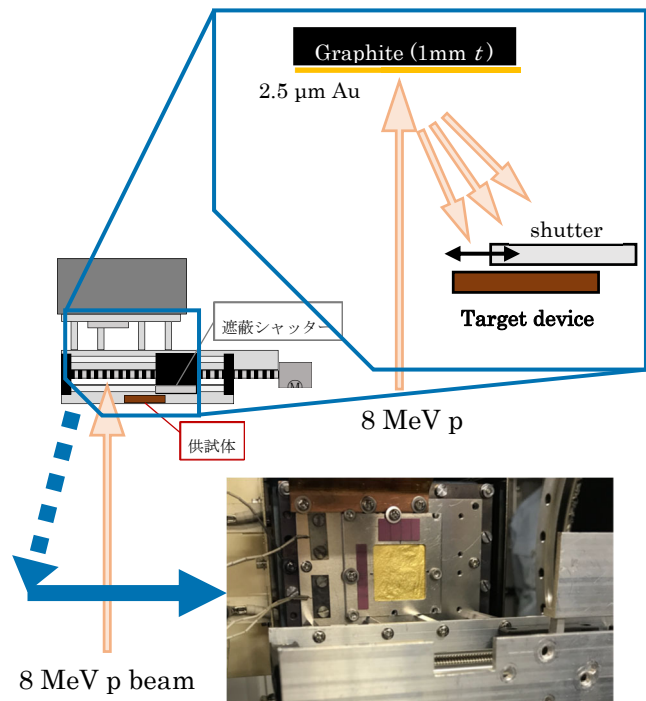


図 1 陽子ビーム照射系概念図。入射したビームを金箔で散乱させることで既知の空間分布にしてターゲットに照射する。

^{*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。

結果と他サンプルとの比較

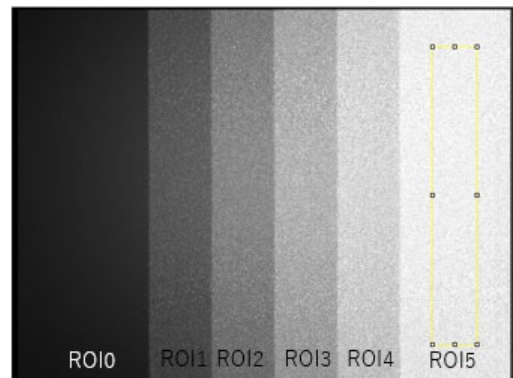
本実験で作成したサンプルの暗電流像を図 2 (a)に示す。このように、場所毎に被曝量をコントロールしたサンプルを作ることができた。暗電流の最も多い ROI5 の被曝量が 2.5 Gy であり、ROI0 は常にシャッターにより遮蔽されて被曝量が実質ゼロな領域である。一方で、他施設で作成した 70 MeV 陽子照射サンプルと ^{60}Co ガンマ線照射サンプルを図 2 (b)(c)に示す。照射量はそれぞれ 9 Gy と 120 Gy である。

これらのサンプルを比較すると、以下のことが容易に見て取れる。

- ・ 8 MeV 陽子サンプルは、他サンプルと比べて TID (Total Ionization Dose) が格段に小さいにも関わらず暗電流量(即ち放射線損傷)はむしろ大きい。
- ・ 同じ陽子をエネルギーだけ変えて照射した(但し dose rate は異なる) 8 MeV と 70 MeV 実験では、TID に代えて全 NIEL (Non-Ionization Energy Loss) で比較することが容易である。それぞれのエネルギーでの粒子当たりの LET と NIEL により、70 MeV サンプルは 8 MeV サンプルのおよそ 10 倍の全 NIEL を受けている計算になる。それにも関わらず、放射線損傷は 8 MeV の方が大きい。

結言

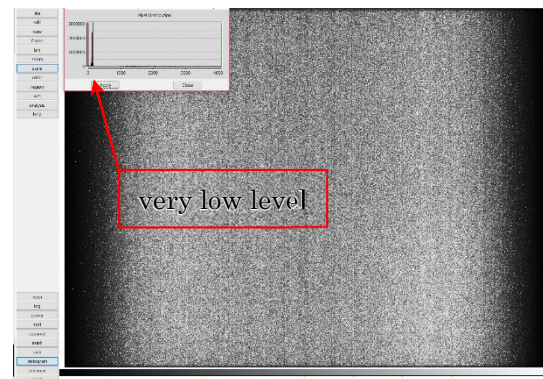
本実験および他施設で作成した種々の放射線照射サンプルの比較により、シリコン半導体(あるいはその中でも CCD 素子)での放射線損傷の定量的予想には TID と NIEL のみを考慮したのでは不十分であることが示された。これは従来考えられていたことに加え、損傷の微視的過程を考慮した理解が必要であることを示唆するものである。



(a) 8MeV-p, TID 2.5 Gy (ROI5)



(b) 70MeV-p, TID 9 Gy



(c) ^{60}Co , TID 120 Gy

図 2 線質の異なる放射線を照射したサンプルの暗電流の違い。陽子線の場合、TID の違いに比して暗電流量が大きく異なり、また損傷の様子も異なることが見て取れる。 ^{60}Co 照射時ははるかに大きな TID にも関わらず暗電流量は相対的にとても低い。

2.4.3.10

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}、瀧田正人^{*2}、古田禄大^{*3}、森下祐樹^{*3}、鳥居建男^{*3}Kyo KUME, Satoshi MIZUSHIMA, Shinko SANDO, Masato TAKITA,
Yoshihiro FURUTA, Yuki MORISHITA and Tatsuo TORII

Abstract

NaI spectrometer systems, which had been applied to estimate proton beam intensity during cosmic ray simulation experiments for onboard electronic devices for spacecrafts at WERC ion beam facility, were applied to measure background high energetic photons at Norikura Observatory of Tokyo University during a summer period of 2019 as a long term operability test. Detection of radon and measurement of atmospheric electric field were carried out for the investigation of sources of background high energetic photons in the natural environment.

要約

NaI スペクトロメータを使用したイオン加速器による宇宙機搭載用機器への模擬宇宙線照射試験中のイオンビーム強度評価法開発の一環で、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連続測定により耐久試験を実施した。また同時にラドン検出や大気電場測定を行い、バックグラウンド起源探索に努めた。

緒言

当法人では、近年の宇宙開発のニーズの高まりを受け、当センターに設置されている 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。この種の試験中に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測定・利用を検討しており、大型 NaI スペクトロメータでテスト実験をおこなっている。この取組の一貫として、今年度も有意な高エネルギー光子線を期待できる東京大学乗鞍観測所でバックグラウンドを連続測定し装置の耐久性を評価した。またラドン発生率や大気電場の計測も行い、高エネルギー光子線発生現象の起源の解明にも努めた。

方法

乗鞍観測所で使用した装置は NaI スペクトロメータ 3 個、AlphaGuard ラドン検出器 1 個、可搬式ダストサンプラ 1 個、フィールドミル電場計 1 個である。NaI スペクトロメータは単一の円筒形 NaI からイベント毎にエネルギーを弁別取得するシステムを使用した。これらを第3観測室(NaI スペクトロメータ2個)、車庫(ラドン検出器とダストサンプラおよび NaI スペクトロメータ1個)、野外(電場計)に配置し、2019年7月から9月までの期間に連続測定した。

結果と考察

乗鞍での測定期間内に、NaI スペクトロメータのうち1個の動作不具合が発生した以外、他の装置では期間全般にわたり連続してデータを取得できた。加速器で連続測定するための耐久性については、一部で改善の必要性を認めるものの、概ね長期運用を期待できる結果を得た。一方、雷由来の高エネルギー光子線の観測を期待して電場計の変動と光子線エネルギー分布・ラドン発生率の相関関係を解析したところ、今回は相関関係を有する事象は見られなかった。

結言

東京大学乗鞍観測所において、NaI スペクトロメータシステムの健全性を確認するとともに、ラドン検出器や電場計等との組み合わせにより雷由来の高エネルギー光子線発生現象の測定にも努めた。今後も自然現象を利用して放射線検出技術を開発し、イオンビーム利用技術を高度化していく。

^{*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} 東京大学・宇宙線研究所、^{*3} (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 2019 年度共同利用研究 D05 で得た成果の一部を含む。

2.4.3.11

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-Satellite

青柳賢英^{*1}、中須賀真一^{*2}、久米恭^{*3}

Yoshihide AOYANAGI, Shinichi NAKASUKA and Kyo KUME

Abstract

In this research, we investigated radiation resistance of commercial semiconductor devices for Nano-satellite by proton irradiation. These semiconductor devices have sufficiently radiation resistance, and were found to be applicable for spacecrafts including Nano-satellite.

要約

本研究では、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。特に CPU は、衛星の状態を監視し、複雑な制御を実行するため、高機能な CPU が必要となるが、その反面、誤動作・停止等を行うと衛星に甚大な被害をもたらす場合がある。本実験では、既に軌道上実績のある CPU と未実証の CPU の 2 種の放射線耐性を評価した。既に軌道上実績のある CPU であっても衛星の軌道や太陽の活動条件等により、放射線影響が生じる可能性がある。本実験では、PIC32MX795F512L、dsPIC30F4012 の 2 種を供試体として、プロトン照射により SEU を引き起こし、その発生回数により衛星軌道上でのビット反転(SEU)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 40, 60, 80MeV とした。フラックスは 2×10^7 [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、PIC32MX795F512L の処理停止確率を周回日数で表すと、約 98 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。dsPIC30F4012 は 339 日/回であった。

結言

2 種の CPU 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頻発することは無く、定期リセットや状態監視を適切に行うことにより、宇宙機器への適用が十分可能であると考えられる。

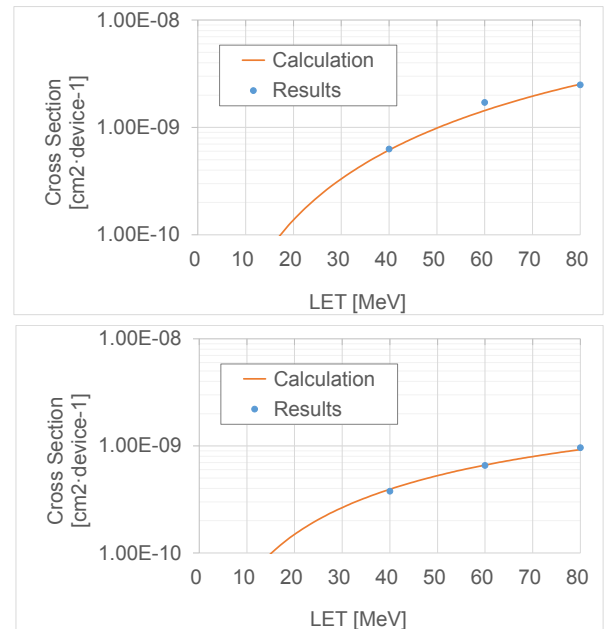


図 1 反転断面積

(上: PIC32MX795F512L, 下: dsPIC30F4012)

^{*1} 東京大学大学院・工学系研究科・航空宇宙工学専攻(現 福井大学・産学官連携本部)、^{*2} 東京大学大学院・工学系研究科・航空宇宙工学専攻、^{*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、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。

2.4.3.12

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}、久米恭^{*3}

Nobuhiro SHIGYO, Kosuke IMATOMI, Takahiro MINE, Ken-ichi KIMURA and Kyo KUME

Abstract

We investigated the application of a neutron dosimeter to the estimation of neutron dose attenuation with a flexible material for radiation shielding. It is found that neutron response of the dose meter for high energy neutron was needed to be corrected by simulation.

要約

放射線遮蔽用可とう性材料の中性子線量低減性能を中性子線量計により評価可能か検討した。高エネルギー中性子に対して線量計の応答をシミュレーションで補正する必要があることがわかった。

緒言

加速器施設などの遮蔽用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。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後の中性子量の変化を中性子線量計により調査し、PHITS によるシミュレーションと比較した。

方法

実験は若狭湾エネルギー研究センター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。平均電流 3.1 nA の 200 MeV 陽子を厚さ 6 cm の鉄に照射し生成された中性子が遮蔽用可とう性を透過する量を富士電機システムズ NSN-1000 中性子線量計で測定した。遮蔽材料は厚さ 0 cm から 20 cm まで 5 cm 毎のウレタンをベースとしたラディシールを使用した。

結果と考察

図 1 に 0.01 eV から 200 MeV までの連続エネルギー中性子が厚さ 0 cm から 20 cm の可とう性材料を透過した時の中性子線量を厚さ 0 cm で規格化した値の測定と PHITS による計算を示す。この結果から得られる中性子の線減弱係数は実験が 0.016 cm^{-1} 、PHITS による計算値が 0.035 cm^{-1} となった。両者の値が大きく異なるのは、中性子線量計の対応上限中性子エネルギーが 8 MeV であるためである。8 MeV 以上のエネルギーで中性子線量計を使用する際は線量計の応答を PHITS などシミュレーションして補正する必要があることがわかった。

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中性子線量計で評価する場合は、線量計の応答を PHITS など補正する必要があることがわかった。

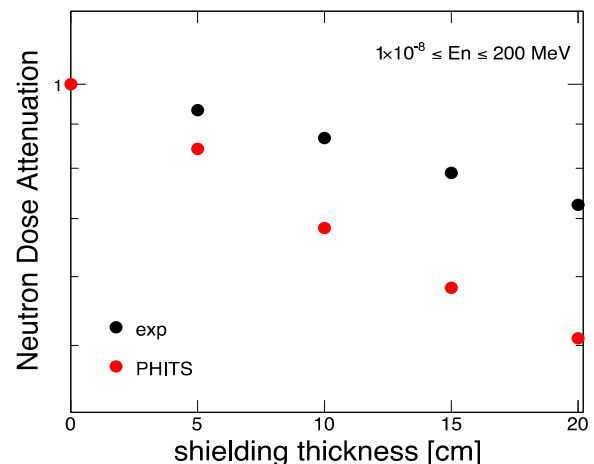


図 1 線量計による測定と PHITS による計算によるラディシールによる 200 MeV までの連続エネルギー中性子線量の減弱の相対値

^{*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}(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。

2.4.3.13

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}、執行信寛^{*2}、久米恭^{*3}

Ken-ichi KIMURA, Nobuhiro SHIGYO and Kyo KUME

陽子線や BNCT などの医療用加速器施設で使用する遮蔽材料の放射化問題を解決するために、低放射化建材の開発や適用に関しての基礎的な検討を進めてきた。放射化が問題となるのは数MeV以下の中性子であることから、タンデム加速器で発生させた陽子をターゲットに入射させて中性子場を構築し、10 cmから30 cm程度の遮蔽材料を配置して評価するための検討を行った。測定は、観測位置に金箔(11mmφ、60mg)を設置し、そのγ線をGe検出器で計測して実施評価することとした。事前に行ったPHITSによる計算により、鉄ターゲットではビーム方向深さで10 cm程度までしか評価できないことが判明したため、ターゲットにはベリリウムを使用することとした。さらに実験を想定した照射室2は、ターゲット以降の空間があまり広くないことから、周りからの反射中性子を減らし、材料の透過中性子量を評価できるように、ホウ素入りのコンクリート遮蔽材を試験材料の周りに配置することとした。その結果、発生した最大エネルギー8MeVの中性子ビームを照射したところ、高純度石灰石と白色セメントで構成された汎用型低放射化コンクリート(密度2.3g/cm³)では、7.5 cm程度の深さでピークとなり、30 cmまで(入口の中性量の1/5程度)評価することができた。

謝辞

本検討を行うに当たり、京都大学複合原子力科学研究所の高田卓志氏には、過去の検討資料などを通じて多大なる助言をいただき、感謝の意を示します。

^{*1}(株)フジタ・技術センター、^{*2}九州大学大学院・工学研究院・エネルギー量子工学部門、^{*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、(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。

2.4.4. 材料技術の開発

2.4.4.1

燃料電池車向け水素吸蔵合金の開発

Development of Hydrogen Storage Alloys for Fuel Cell Vehicles

石神龍哉^{*1}、安永和史^{*1}、鈴木耕拓^{*1}

Ryoya ISHIGAMI, Kazufumi YASUNAGA and Kohtaku SUZUKI

Abstract

Nickel and nickel-copper (Ni-Cu) alloy layers were deposited on magnesium hydride (MgH_x) films in order to decrease desorption temperature of hydrogen from magnesium hydride. Initiation and termination temperatures of hydrogen desorption were 106°C and 178°C , respectively in the case of a Ni layer deposited on MgH_x film with a thickness of $1.9\ \mu\text{m}$. These temperatures of MgH_x films with a Ni-Cu alloy layer were almost as high as those of MgH_x film with a Ni layer. The evaporation of Ni and Mg was observed from Ni-deposited MgH_x film annealed at 200°C , of which figure is almost same as a termination temperature of hydrogen desorption. This suggests that the necessity of adequate temperature control during hydrogen desorption.

要約

水素化マグネシウム MgH_x からの水素の放出温度を下げるため、Ni および Ni-Cu 合金を MgH_x 膜上に成膜した。厚さ $20\ \text{nm}$ の Ni を厚さ $1.9\ \mu\text{m}$ の MgH_x 膜上に成膜すると、水素放出開始温度は 106°C 、水素放出終了温度は 178°C となった。Ni-Cu 合金層を成膜した場合には、水素放出開始温度、水素放出終了温度ともに Ni 層の場合とほぼ同じとなった。Ni を付与した MgH_x 膜は水素放出終了温度付近の 200°C において、水素のみならず一部 Ni および Mg の蒸発が確認され、水素放出時において適切な温度管理が必要であることが示唆された。

緒言

マグネシウム(Mg)は密度が小さく、二水素化物(MgH_2)の水素含有率は $7.6\ \text{wt}\%$ と大きいと、水素を燃料とする自動車の燃料供給物質の候補と期待されているが、水素化マグネシウム MgH_x からの水素の放出温度は約 300°C と高いと、水素を燃料とする燃料電池車での水素供給用材料としては適していない。これまでに、水素放出温度を下げるため、Mg 粉末または MgH_x 粉末に様々な金属、合金、酸化物、フッ化物、塩化物などを添加したり、Mg と他の金属との多層膜を形成したり、または他の金属との合金を作製したりしたという文献が多数報告されている。その中でも水素放出温度が最も低くなったのは、Pd を除けば Ni ナノ粒子または Nb_2O_5 を添加した場合であり、水素放出ピーク温度は約 200°C である^{1,2)}。しかし燃料電池車において水素を燃料として使う場合、 200°C 以下で水素が放出されることが望ましい。

そこで本研究では、Ni および Ni 基合金層を成膜することで、 MgH_x 膜からの水素の放出温度を下げる方法について実験を行った。

成果の概要

MgH_x 薄膜試料は、鏡面研磨した SUS304 板にマグネトロンスパッタ法を用いてアルゴンと水素の混合ガスを放電ガスとして Mg をスパッタすることによって作製された。膜の厚さは $1.9\ \mu\text{m}$ とした。X 線回折パターンから、この膜はほとんどが正方晶の MgH_2 で構成されており、六方最密構造の Mg からの回折ピークは無いことを確認した。この膜の上に、触媒層として Ni および Ni-Cu 合金を成膜した。その厚さは $20\ \text{nm}$ とした。図 1 に、触媒層が無い MgH_x 膜と、Ni を触媒層とした MgH_x (以下、Ni/ MgH_x) 膜からの水素の昇温脱離スペクトルを示す。この図から、Ni 層を成膜することで水素の放出開始温度が約 200°C 低下することが分かる。Ni 層を成膜したことにより、水素放出開始温度、水素放出終了温度はそれぞれ 106°C および 178°C となった。これらの温度はボールミル処理において Ni ナノ粒子または Nb_2O_5 を添加した場合より低く^{1,2)}、水素の放出特性が向上したことが分かる。図 2 には Ni-Cu 合金層が成膜された MgH_x 膜からの水素の昇温脱離スペクトルを示す。同時に示されている Ni/ MgH_x 膜からの水素の脱離スペクトルとの比較から、Ni-Cu 合金層の場合には水素の放出開始温度、終了温度がそれぞれほぼ同じであった。Cu は Ni と比較して安価であるため、Ni 触媒をある程度の組成まで Cu で置き

^{*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。

換えることができるのであれば、経済的に有利である。図 3 は水素放出終了温度である 178°C より若干高温の 200°C で 10 分保持後の 100 nm 厚の Ni/MgH_x 膜の微細組織である。試料は、 $2.5 \times 10^{-5}\text{ Pa}$ の真空度の TEM 内で加熱保持した。図 3a は走査透過電子顕微鏡法による明視野像 (STEM-BF; Scanning Transmission Electron Microscopy-Bright Field)、図 3b 及び c は同一領域の Mg 及び Ni の特性 X 線により得られた元素分布像である。図 3a において白い不定形領域が観察され、それらの長軸長さは $62\sim 317\text{ nm}$ に分布し平均 157 nm であった。 MgH_x 膜は微細結晶から構成される多結晶性で、その長軸長さは $14\sim 80\text{ nm}$ に分布し平均 38 nm であることから、白い不定形領域は単一または近傍の複数の結晶粒が蒸発したことを示唆している。実際、図 3b 及び c の対応する領域において Mg 及び Ni とともに欠損していることが確認される。これらの結果から、Ni 触媒の MgH_x 表面への付与により水素放出温度は MgH_x と比較して顕著に減少するが、一部領域において Mg および Ni が水素放出終了温度付近で蒸発することが明らかとなった。水素のみを母相の金属から放出させる適切な温度管理が必要であると考えられる。

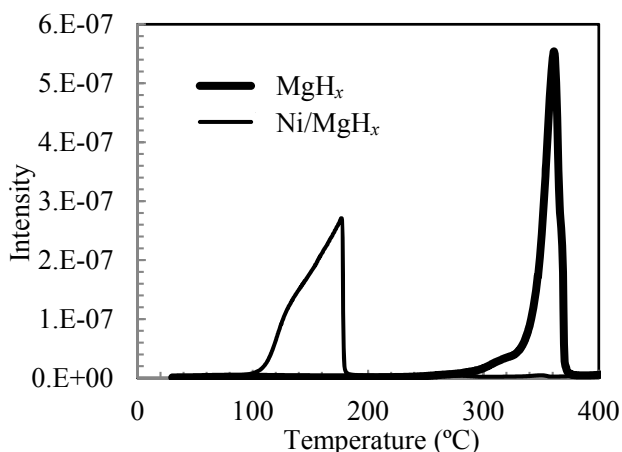


図 1 MgH_x 膜および Ni/MgH_x 膜からの水素の昇温脱離スペクトル。

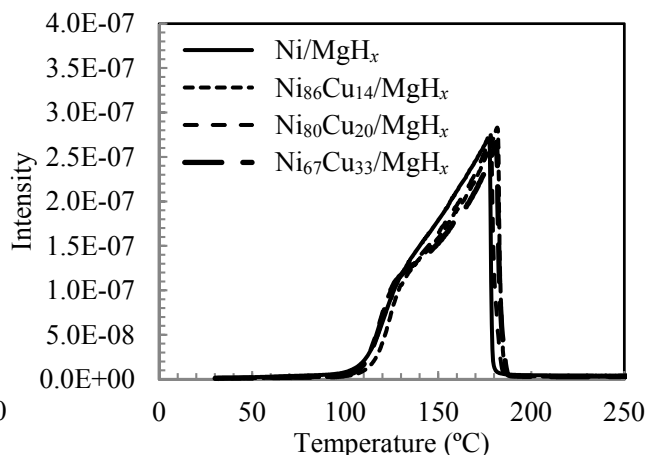


図 2 Ni/MgH_x および $\text{Ni-Cu}/\text{MgH}_x$ 膜からの水素の昇温脱離スペクトル。

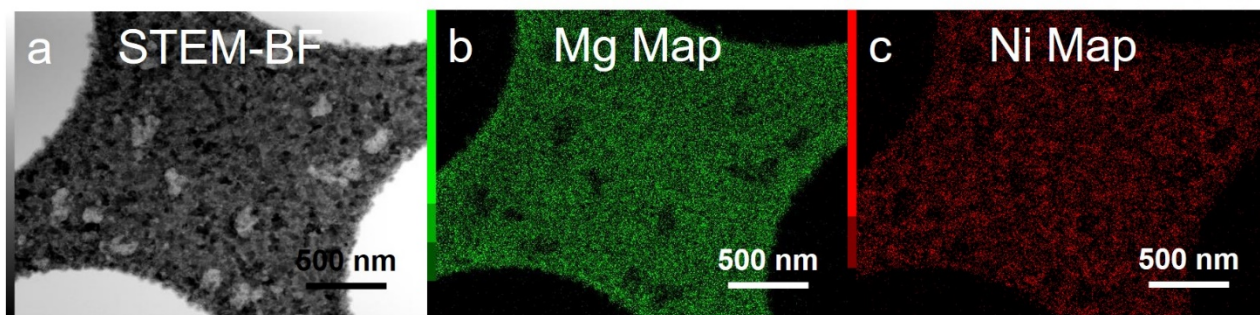


図 3 200°C で 10 分保持後の Ni/MgH_x の微細組織。

結言

水素化マグネシウムからの水素の放出温度を低下させるため、マグネトロンスパッタ法を用いて、水素化マグネシウム膜に Ni 層または Ni-Cu 層を成膜し、昇温脱離法により水素の放出開始温度、放出終了温度を測定した。Ni 層を成膜したとき、水素の放出開始温度を 106°C まで低下させることができた。また、水素の放出は 178°C で終了した。 Ni/MgH_x 膜は水素放出終了温度近傍の 200°C に昇温することで、水素のみならず一部 Mg および Ni の蒸発が生じることが微細組織観察から明らかとなった。Ni-Cu 層を成膜した場合には、Ni 層の場合と水素の放出特性はほぼ同じであった。これは、高価な Ni をある程度の組成までであれば Cu に置き換えることが可能で、経済的に有利になる可能性があることを示している。

参考文献

- 1) N. Hanada, T. Ichikawa, H. Fujii, J. Phys. Chem., B, 109, 7188 (2005)
- 2) N. Hanada *et al.*, J. Alloys Compd., 420, 46 (2006)

2.4.4.2

フレキシブル性と耐久性を有する導電性皮膜の開発に関する調査研究

Research on Development of Flexible and Conductive Films

辻本和久^{*1}、笠嶋 趙充^{*1}、安永和史^{*2}、山岸隆一郎^{*3}Kazuhisa TSUJIMOTO, Takemichi KASASHIMA, Masatoshi GOTO, Kazufumi YASUNAGA
and Ryuichiro YAMAGISHI

Abstract

It has become a task to develop conductive materials with flexibility and durability. In this study, we created conductive textile covered by conductive resin layer and silver-plating. This conductive material had a durability problem of yellowing under high temperature conditions. In order to clarify the cause of this yellowing, the elemental distribution in the depth direction of the conductive coating was analyzed by Auger electron spectroscopy. From this measurement, it was considered that the cause of yellowing seemed to be a sulfur component on silver plating layer derived from the plating solution.

要約

フレキシブルで耐久性に優れた導電性素材の開発が課題となっている。我々はこれまでに、フレキシブルな繊維素材上に、導電性樹脂層と銀めっき層からなる導電性被膜を形成した、新たな導電性素材を作成したが、この導電性被膜は、高温条件下で黄変するという耐久性の問題があった。そこで本研究では、この導電性被膜の黄変の原因を明らかにするため、導電性被膜の深さ方向の元素分布をオージェ電子分光法(AES)により分析した。その結果、黄変の原因はめっき液由来の硫黄成分と考えられ、耐久性向上の可能性を見出した。

緒言

近年、身の回りのさまざまな生活製品がスマートフォンなどの情報端末と連携するようになり、ヘルスケア・家電・ロボット・クルマ等の幅広い分野において、新規用途の製品が提案されている。特に、用途に応じて変形したり折りたたまれたりするような、柔らかなエレクトロニクス製品が注目されており、その製品実現のために、フレキシブル性と耐久性を有する新たな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導電性フィルムや、柔軟な繊維素材に金属皮膜複合化した、導電性ファブリック等のフレキシブル導電素材を開発してきた。

本研究では、繊維素材上に、導電性樹脂層と銀めっき層からなる2層の導電性被膜を形成した新たな導電性ファブリックの開発を行った。導電性と屈曲耐久性に優れた素材であるが、高温条件下で変色(黄変)するという問題があった。そこで、オージェ電子分光分析(AES)を用いて、導電性被膜の元素分布を分析し、黄変の原因を解析するとともに、高温条件下における耐久性向上方法を検討した。

成果の概要

導電性ファブリックの作成

繊維素材上に導電性樹脂層を形成し、さらにその上に銀めっき層を形成することにより、2層の導電性被膜の積層構造を有する導電性ファブリックを形成することに成功した(図1)。ここで用いた導電性樹脂層は柔軟性が高く、さらに銀めっき層は接触抵抗値が低いことから、本素材は、導電性と屈曲耐久性に優れた導電性素材と期待されている。一方で本素材は、高温条件下(160℃、1時間)で、変色(黄変)することが判明し、熱耐久性の問題があることが分かった。

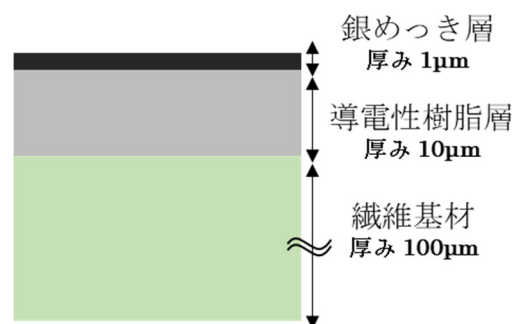


図1 導電性ファブリックの構造。

導電性被膜の成分分析による黄変原因解析

黄変の原因を明らかにするため、正常サンプルと黄変サンプルの外観および元素分布を比較した(図2)。正常サンプル、黄変サンプルについてそれぞれ分析試料(幅5mm×長さ10mmのサイズ)を作成し、外観観察は

^{*1}セーレン株式会社・研究開発センター・開発研究グループ、^{*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。

SEM(走査電子顕微鏡装置, JSM-6340F)を用いておこなった。また、元素分布の分析は、AES(オージェ電子分光装置, JAMP-7810, 日本電子株式会社)を用いて、アルゴンイオンエッチングを併用し、導電性被膜の表面から深さ方向の元素分析をおこなった(図3)。その結果、SEM 観察では違いを確認することができなかったが、AES 分析では、黄変サンプルの表面に微量ながら硫黄の存在を確認できた。硫黄は正常サンプルでは検出されておらず、黄変の原因の一つであると考えられた。

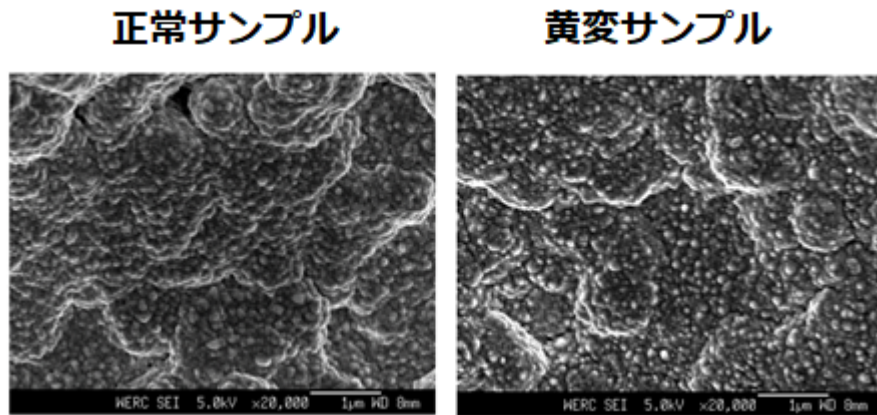


図2 SEM 観察画像(20,000 倍)。
表面観察において両サンプル間に違いはみられなかった。

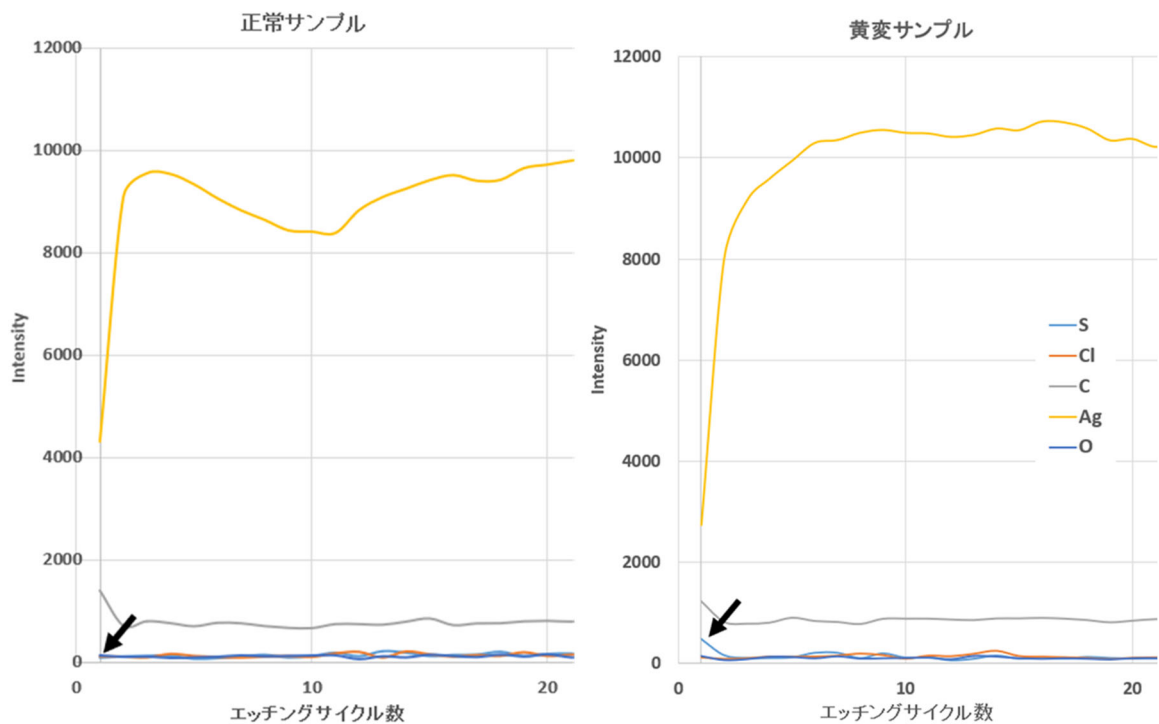


図3 黄変した導電性被膜表面の元素分析(AES 分析結果)。
黄変サンプルの表層に硫黄(S)が検出された。

結言

繊維素材上に導電性樹脂層と銀めっき層を形成した新たなフレキシブル導電性ファブリックを作成した。本素材は、高温条件下で黄変するという問題があったが、本研究の結果、黄変の原因が銀めっき層表面の硫黄成分の存在であると考えられ、今後の耐久性向上につながる知見が得られた。

2.4.4.3

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

A carbon steel (S45C) disk specimen, of which surface was burnished at a rotation speed of 200 rpm, was observed by cross-sectional transmission electron microscopy. The grain size depends almost linearly on depth from the disk surface, which suggests the strain introduced by burnishing surface decreases with a function of depth.

要約

炭素鋼(S45C)の円盤表面を回転速度 200 rpm の条件でバニシング加工し、表面から深さ方向について微細組織を比較した。結晶粒の長軸長さは、表面からの深さに対しほぼ比例して増加した。この結果は試料の表面摩擦により導入された歪み量が、深さの増加に対して減少していることを示唆している。

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、金属表面を鏡面状態に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強度に塑性変形され、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係の理解が深まれば、構造用の中炭素鋼に分類され、使用量が多く安価な S45C に対して、さらなる機能性の付与が可能と考えられる。

成果の概要

試料は、焼鈍した S45C 円盤(Φ60 mm、t5 mm)に超硬合金(WC-Co、Φ6 mm)製のボールを荷重 500 N で押し当て、回転速度 200 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により作製した。図 1 は、最表面からの深さ 1560 nm (a) 及び 4300 nm (b) における断面微細組織の TEM 暗視野像及び制限視野電子線回折像である。白いコントラストを示す結晶粒は、表面にほぼ平行に引き延ばされた長軸をもつ。深さ 1560 nm の領域では長軸長さが 19~252 nm(平均粒径 97 nm)、深さ 4300 nm の領域では 87~549 nm(平均粒径 261 nm)の結晶粒が形成された。図 2 は、結晶粒径を表面からの深さに対して表示した図である。結晶粒径は各深さでばらつきが存在するが、表面から深さ 32 μm に及ぶまで深さに比例して増加する傾向がみられる。この結果は、金属表面の摩擦により導入される歪み量が高いほど結晶粒が微細化すると仮定すると、歪み量が深さに比例して減少していることを示していると考えられる。

結言

回転速度 200 rpm でバニシング加工した S45C の結晶粒の長軸長さについて表面からの深さ依存性を調査した。結晶粒の長軸長さは表面からの深さに比例して増加する傾向を示し、塑性変形による歪み量が深さの増大に比例して減少していることを示唆していると考えられる。

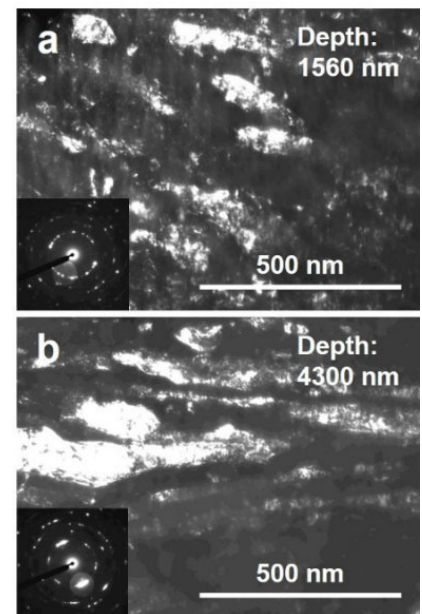


図 1 200 rpm でバニシング加工した S45C 断面の TEM 暗視野像。

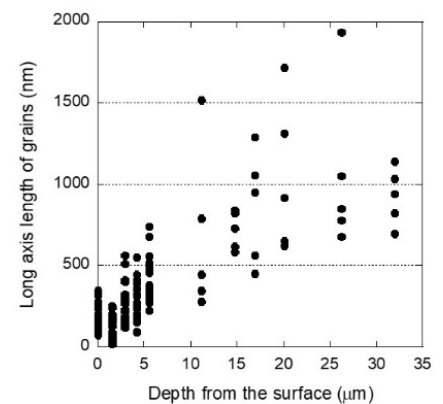


図 2 結晶粒径の深さ依存性。

^{*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の共同研究として実施したものである。

2.4.4.4

Ag/ガラス界面の接合強度に与える界面微細構造の影響

Effect 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

Ag film and glass were sinter bonded in air or a reduction atmosphere. Only specimens sintered in air firmly adhered, whose glasses contained Ag due to the chemical reaction between Ag and the glass element.

要約

大気中または還元雰囲気中での焼成により Ag 箔とガラスを接合した。空気中で焼成した試料にのみ、Ag とガラス成分の化学反応により Ag のガラスへの溶解が確認され、接合強度も高いことが示された。

緒言

近年の電子部品は回路の高密度化・高機能化を目的に小型化が加速しており、外部電極の接着面積も減少し十分な接着強度を維持しにくく、軽い衝撃でも電子部品が離脱することがある。電子部品の電極材料として Ag ペーストが用いられており、これに含まれるガラスはその成分より基板と電子部品の接着強度や電極強度への影響が知られているが知見は乏しい。信頼性の高い電極材料の開発には、Ag ペーストを焼成後に形成される Ag/ガラス界面の知見が求められる。そこで、Ag/ガラス接合界面の状態について調べることを目的とした。

成果の概要

Agとガラスの接合界面の作製は、ガラス組成 $20\text{Na}_2\text{O}-75\text{B}_2\text{O}_3-5\text{SiO}_2(\text{mol}\%)$ (軟化点: 555°C) のガラスフリットをアルミナ基板上に塗布後 800°C で焼成し、厚さ $50\text{ }\mu\text{m}$ のガラスコーティング層を形成後、上部に厚さ $50\text{ }\mu\text{m}$ の Ag 箔を載せ各種条件で接合した。接合後の試料から Ag 箔を剥離し、Ag 箔に接していたガラス表面の Ag3d 電子を X 線光電子分光法 (XPS) により分析した (図1)。接合条件は空気中 800°C で 1 及び 6 時間 (Air) と $\text{Ar}/\text{H}_2 3\%$ の還元雰囲気中 800°C で 1 及び 6 時間 (red) である。空気中での接合試料には Ag3d 電子のピークが検出され、Ag がガラスへ溶解したと考えられると同時に接合強度も得られた。ピーク強度は 1 及び 6 時間で差はなく、Ag の溶解は 1 時間程度の熱処理で飽和していると考えられる。一方、還元雰囲気での接合では、ガラスへの Ag の溶解は認められず、且つ接合強度は全く得られなかった。すなわち、Ag とガラスの接合には Ag の溶解反応が大きく関与していると考えられる。

図 2 は空気中 800°C で 1 時間接合させた Ag とガラス接合界面の断面像である。a) は明視野像、b) は Ag、c) 及び d) はガラス成分の Na と O の分布像である。界面のガラス中には Ag が溶解し再析出している。さらに、Ag が析出している界面近傍のガラス層では、Na は濃化し O は減少した。このように、Ag とガラスの接合には両者の反応が大きく関与し、ガラス組成の変動など複雑な挙動が観察された。

結言

Ag とガラスの接合には界面での Ag の溶解再析出が大きく関与しており、また、拡散層ではガラス組成の変動など、複雑な反応現象が生じていることが分かった。接合強度と反応層の構造との関係や、反応に関与するガラスの物性については継続した研究が必要である。

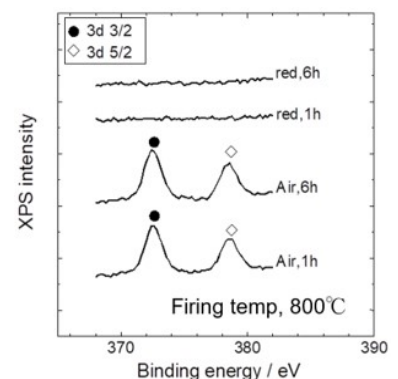


図 1 接合ガラス界面の Ag3d XPS チャート

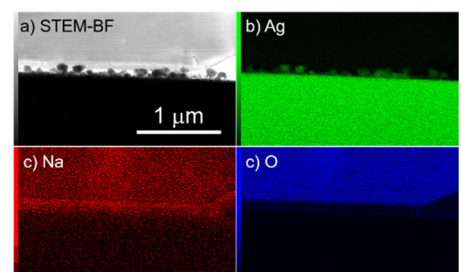


図 2 Ag とガラス接合界面の STEM 元素分析

^{*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。

3. 外部発表、特許、品種登録

3.1. 外部発表

令和元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、材料の一方方向性多孔質化と機能、日本金属学会会報「まてりあ」、第 58 巻、第 5 号、252-260 頁、2019
2. Hideo Nakajima, Fabrication, Mechanical and Physical Properties, and Its Application of Lotus-Type Porous Metals, Materials Transactions, Vol.60, No.12, 2481-2489, 2019
3. Rosnani Abdul Rashid, Masanori Hatashita, Hassan Hamdani Hassan Mutaat and Mohd Meswan Maskom, Determination of mushroom monosaccharides by liquid chromatography mass-spectrometry (LCMS) and macrophage activation by *Polyporus umbellatus*, *Fuscoporia obliqua*, *Cordyceps militaris* and *Pleurotus ostreatus*, Jurnal Sains Nuklear Malaysia, 31(1), 42-47, 2019
4. 畑下昌範、高城啓一、市田裕之、阿部知子、希少キノコ類の菌糸成長に及ぼす重イオンビームの照射効果、品種改良ユーザー会報告書 2019、61 頁、2019
5. Munetoshi MAEDA, Hideki MATSUMOTO and Masanori TOMITA, Importance of ATM-mediated cytoplasmic radiation response in determining the fate of cells exposed to low-dose radiation, 生物物理, 59, Suppl.1-1, p.S145 & Suppl.1-2, p.S364, 2019
6. 岩切宏友、安永和史、森下和功、渡邊英雄、吉田直亮、ジルコニウム合金中の水素同位体の挙動に関する第一原理計算、平成 30 年度 九州大学応用力学研究所 共同利用研究成果報告書、第 22 号、165-166 頁、2019
7. 安永和史、収差補正機能付き分析電子顕微鏡による構造材料の高精度定量分析、平成 30 年度 九州大学応用力学研究所 共同利用研究成果報告書、第 22 号、171-172 頁、2019
8. Yoichi Haruyama, Tsuguhisa Fujiwara, Keisuke Yasuda, Manabu Saito and Kohtaku Suzuki, Localization of Aluminum in Epidermal Cells of Mature Tea Leaves, Quantum Beam Science, 3(2), 9, 2019
9. T. Yamaguchi, Y. Okugawa, T. Shiokawa, T. Kurita and T. Nakanishi, Slow beam extraction from a synchrotron using a radio frequency knockout system with a broadband colored noise signal, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 462, 177-181, 2020
10. A. E. M. Tamidi, Y. Sasajima and A. Iwase, Crystal Structure Analysis of Irradiated Ni₃Al Using Molecular Dynamics Simulation, Materials Transactions, Vol.61, No.1, 72-77, 2020
11. Akihiro Iwase and Fuminobu Hori, Modification of Lattice Structures and Mechanical Properties of Metallic Materials by Energetic Ion Irradiation and Subsequent Thermal Treatments, Quantum Beam Science, 4, 17, 2020

(2) 国際会議論文(国際会議論文集への掲載。)

1. K. Suzuki and Y. Nakata, Development of an in-air ERDA system for hydrogen analysis, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 450, 135-138, 2019

(3) 国際会議発表

1. Hajime Sasaki, Takayuki Hisaka, Kaoru Kadoiwa, Yoshitaka Kamo, Eitaro Ishimura, Satoshi Hatori, Ryoya Ishigami and Kyo Kume, Reliability Study of Proton Irradiation Effects on AlGaIn/GaN HEMTs, Reliability of Compound Semiconductors Workshop, Minneapolis, US, 2019.4
2. T. Yamaguchi, Y. Okugawa, T. Shiokawa, T. Kurita and T. Nakanishi, Slow beam extraction from a synchrotron using a radio frequency knockout system with a broadband colored noise signal, The 13th European Conference on Accelerators in Applied Research and Technology, Split, Croatia, 2019.5
3. Yasushi Kiyono, Akira Makino, Kyo Kume, Tetsuya Mori, Tatsuya Asai and Hidehiko Okazawa, Changes in the uptake of ¹⁸F-FDG and ¹⁸F-FLT in HeLa cells treated with charged particle irradiation, Soc. Nucl. Medicine & Molecular Imaging 2019 Annual Meeting, Anaheim, California, 2019.6
4. R. Uemura, H. Yamamoto, K. Yagi, K. Naito, M. Amo, K. Suzuki and M. Hayashi, Evaluation of fluoride uptake into dentin over long-term using micro-PIXE/PIGE, International Association for Dental Research, Vancouver, Canada, 2019.6

5. Kazuhiro Hoshino, Maki Moriwaki and Masanori Hatashita, Continuous production of ethanol by yeast-like cell of dimorphic fungus *Mucor circinelloides* controlled by carbon dioxide, 14th Asian Congress on Biotechnology (ACB2019), Taipei, Taiwan, 2019.7
 6. A. Iwase, K. Fukuda, Y. Saitoh, S. Semboshi, T. Matsui, F. Hori, Y. Okamoto and N. Ishikawa, Study on iron-atom clustering and magnetic property of iron-ion implanted silica Glass by using EXAFS and SQUID measurements, 29th International conference on Insulators, Astana, Kazakhstan, 2019.8
 7. Ayaka Sato, Mana Kato, Ryohei Ogawa, Masanori Hatashita, Fuminori Hyodo, Makoto Kubo and Go Kagiya, Development of a non-invasive real time imaging system for hypoxic cell apoptosis, 16th International Congress of Radiation Research (ICRR2019), Manchester, UK, 2019.8
 8. Setsuo Nakao, Kohtaku Suzuki, Atsushi Kinomura, Tsutomu Sonoda, Atsushi Yabuuchi, Y. Kuzuya, M. Nakajima and Koumei Baba, Effect of hydrogen content on water wettability of diamond-like carbon films prepared by plasma-based ion implantation and deposition, 21st International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams, Tomsk, Russia, 2019.8
 9. Akihiko Sakurai, Mina Masuda and Masanori Hatashita, Cordycepin production by a rotating disk contactor using *Cordyceps militaris* mutant, The 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress(APCCChE2019), Sapporo, 2019.9
 10. Mana Kaneda, Motoki Tanaka, Masanori Hatashita and Masaya Oki, Analysis of X-ray resistance mechanism by using SIR2, SIR3, and SIR4 deletion strains, Future of Biomedicine Conference 2019 (FOB2019), Vladivostok, Russia, 2019.9
 11. Motoki Tanaka, Mana Kaneda, Masanori Hatashita and Masaya Oki, Analysis of X-ray resistance mechanism shown by sir deficient strains, Future of Biomedicine Conference 2019 (FOB2019), Vladivostok, Russia, 2019.9
 12. H. Takahashi, K. Torigoe, N. Uchida, K. Hirose, N. Hirade, M. Ohno, T. Mizuno, Y. Fukazawa, S. Hisadomi, K. Yamaoka, K. Nakazawa, S. Hatori, K. Kume and S. Mizushima, Radiation damage of Si-PM (MPPC) and coincidence method to reduce dark counts, The 2019 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS) and Medical Imaging Conference (MIC), Manchester, UK, 2019.10
 13. N. Uchida, T. Hiromitsu, N. Hirade, K. Hirose, K. Torigoe, M. Ohno, K. Yamaoka, K. Nakazawa, S. Hisadomi, S. Hatori, K. Kume, S. Mizushima, T. Mizuno and Y. Fukazawa, Radiation Hardness Tests of Si-PMs with a Proton Beam for Future Satellite Missions, SiPM workshop: from fundamental research to industrial applications, Bari, Italy, 2019.10
 14. K. Suzuki, Tsuchiya and Y. Nakata, Hydrogen Analysis of Ceramics by using In-air ERDA, 23rd International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions, Matsue, 2019.11
 15. A. Kinomura, S. Nakao, K. Suzuki, T. Sonoda, Y. Kuzuya, M. Nakajima, K. Ikeda, A. Yabuuchi and K. Yasuda, CHARACTERIZATION OF DIAMOND-LIKE CARBON FILMS BY SLOW-POSITRON AND MEV ION BEAMS TO INVESTIGATE THE ORIGIN OF WATER WETTABILITY, 23rd International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions, Matsue, 2019.11
 16. A. Iwase, Current Status and Prospects of the Research Using Energetic Ion Beams at Wakasa-Wan Energy Research Center, Material Research Society of Japan International Symposium, Yokohama, 2019.11
 17. K. Suzuki, K. Yasuda, B. Tsuchiya and Y. Nakata, Quantitative Ion Beam Analysis for Light Elements by using In-air and High Depth Resolution Systems, Material Research Society of Japan International Symposium, Yokohama, 2019.11
 18. R. Ishigami, Improvement in coercivities of Fe-Pt thin film permanent magnets by implantation of nitrogen ions, Material Research Society of Japan International Symposium, Yokohama, 2019.11
 19. Yoshikazu Maeda, Yoshitaka Sato, Kazutaka Yamamoto, Hiroyasu Tamamura, Makoto Sasaki, Nobukazu Fuwa, Shigeyuki Takamatsu and Kyo Kume, Effectiveness of re-planning protocols for sparing rectal doses based on the daily CT-images during the proton treatment for prostate cancer, 1st PTCOG-Asia Oceania 2019, Osaka, 2019.12
- (4) 国内会議発表
1. 前田嘉一、佐藤義高、柴田哲志、坊早百合、山本和高、玉村裕保、佐々木誠、久米恭、不破信和、高松繁行、陽子線前立腺治療における日々の臓器移動による影響評価解析(更新)、第 117 回日本医学物理学学会学術大会、横浜市、2019.4

2. 畑下昌範、庄司英一、ポリイミドナノファイバーの作製とその応用、第 68 回高分子学会年次大会、大阪市、2019.5
3. 疋田雄祐、庄司英一、畑下昌範、セルロースナノファイバー複合体の創製とナノ構造、第 68 回高分子学会年次大会、大阪市、2019.5
4. 太田圭祐、庄司英一、畑下昌範、機能性導電性セルロースナノファイバー複合体の創製、第 68 回高分子学会年次大会、大阪市、2019.5
5. 庄司英一、波多野光顕、畑下昌範、ポリアニリン誘導体との複合化による機能性セルロースナノファイバーの創製、第 68 回高分子学会年次大会、大阪市、2019.5
6. 金田真奈、田中元基、畑下昌範、沖昌也、SIR 欠損株における X 線耐性機構の解明、日本生化学会北陸支部第 37 回大会、福井市、2019.6
7. 佐藤彩花、加藤真奈、小川良平、兵頭文紀、畑下昌範、久保誠、鍵谷豪、低酸素細胞アポトーシス可視化システムの開発、第 25 回癌治療増感研究会、高山市、2019.6
8. 鍵谷豪、佐藤彩花、加藤真奈、兵頭文紀、畑下昌範、久保誠、小川良平、ネクローシス可視化システムの開発、第 25 回癌治療増感研究会、高山市、2019.6
9. 畑下昌範、高城啓一、明石行生、田中紘一、笠原康一、井村裕治、岡田正一郎、エネ研における植物育成用フィードバック型 LED 補光装置の開発、次世代型スマート農業セミナー、若狭湾エネルギー研究センター、2019.6
10. 羽鳥聡、栗田哲郎、林豊、吉本淳、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、小田部圭佑、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 32 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、神戸大学、2019.7
11. 清水雅也、羽鳥聡、栗田哲郎、林豊、吉本淳、山田裕章、山口文良、淀瀬雅夫、長崎真也、廣戸慎、大矢龍輝、湊上隆太、小田部圭佑、高山宏一、タンデム加速器絶縁ガス循環冷却システム(2)、第 32 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、神戸大学、2019.7
12. 三浦孝太郎、山口航平、茶谷弦輝、高城啓一、山田錦の北陸地域での安定栽培を目指した突然変異育種、北陸作物・育種学会第 56 回講演会、福井市、2019.7
13. 佐藤彩花、加藤真奈、小川良平、畑下昌範、兵頭文紀、久保誠、鍵谷豪、低酸素細胞アポトーシス可視化システムの開発、第 32 回バイオサイエンスフォーラム、北里大学、2019.8
14. 栗田哲郎、羽鳥聡、林豊、山田裕章、廣戸慎、清水雅也、山口文良、淀瀬雅夫、長崎真也、大矢龍輝、湊上隆太、吉本淳、若狭湾エネルギー研究センターシンクロトロン施設の現状、第 16 回日本加速器学会年会、京都大学、2019.8
15. 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(2)、第 16 回日本加速器学会年会、京都大学、2019.8
16. 山口輝人、奥川雄太郎、塩川智也、栗田哲郎、中西哲也、マルチバンド RFKO 電界による遅いビーム取り出しの原理実証実験、第 16 回日本加速器学会年会、京都大学、2019.8
17. 岩瀬彰宏、石川法人、高速重イオン照射によって発現した固体内ナノ構造の LET、イオン速度依存性、日本金属学会 2019 秋期講演大会、岡山大学、2019.9
18. 安永和史、石神龍哉、鈴木耕拓、マグネトロンスパッタ法で作製した MgH_{2-x} の微細組織及び水素放出挙動、日本金属学会 2019 秋期講演大会、岡山大学、2019.9
19. 高城啓一、畑下昌範、イオンビーム照射による生物の品種改良、日本遺伝学会第 91 回大会、福井大学、2019.9
20. 木元久、高城啓一、畑下昌範、N- アセチルグルコサミン発酵生産技術の開発:変異育種は色褪せない!、日本遺伝学会第 91 回大会、福井大学、2019.9
21. 久保義人、橋本直哉、畑下昌範、高城啓一、イオンビームを活用した清酒酵母の育成、日本遺伝学会第 91 回大会、福井大学、2019.9
22. 沖昌也、金田真奈、田中元基、畑下昌範、一度壊れたヘテロクロマチン領域の機能はすぐには回復しない、日本遺伝学会第 91 回大会、福井大学、2019.9
23. 田中元基、金田真奈、畑下昌範、沖昌也、Sir 複合体の構成因子によって異なる X 線耐性とそのメカニズム解析、日本遺伝学会第 91 回大会、福井大学、2019.9
24. 金田真奈、田中元基、畑下昌範、沖昌也、SIR 遺伝子破壊及び再導入に伴う X 線耐性への影響、日本遺伝学会第 91 回大会、福井大学、2019.9
25. 安藤静治、門脇春彦、石神龍哉、ステンレス鋼のレーザー切断における粉じんと貫通光 (1) 粉じん粒径分布、日本原子力学会 2019 年秋の大会、富山大学、2019.9

26. 門脇春彦、石神龍哉、安藤静治、ステンレス鋼のレーザー切断における粉じんと貫通光 (2) 水ミスト散布による粉じんと貫通光の抑制、日本原子力学会 2019 年秋の大会、富山大学、2019.9
27. 山岸隆一郎、積算線量と作業効率をモーションキャプチャデータから同時評価する手法の開発、日本原子力学会 2019 年秋の大会、富山大学、2019.9
28. 畑下昌範、庄司英一、イオンビーム照射によるパターン化複合電極材の創製、第 68 回高分子討論会、福井大学、2019.9
29. 庄司英一、畑下昌範、セルロースナノファイバーの特徴を活かしたバイオマス高分子アクチュエータや分子認識センシングエレメントの創製、第 68 回高分子討論会、福井大学、2019.9
30. 疋田雄祐、庄司英一、畑下昌範、セルロースナノファイバーの性質を活かしたナノ構造複合体の創製、第 68 回高分子討論会、福井大学、2019.9
31. 太田圭祐、庄司英一、畑下昌範、導電性高分子によるセルロースナノファイバー複合体の創製と機能、第 68 回高分子討論会、福井大学、2019.9
32. 岩瀬彰宏、若狭湾エネルギー研究センターにおけるイオンビームを用いた研究・開発、第 62 回放射線化学討論会、福井大学附属国際原子力工学研究所、2019.9
33. 青木祐太郎、Glenn HARVEL、柴岡龍、速水醇一、田口光正、長澤尚胤、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開発、第 62 回放射線化学討論会、福井大学附属国際原子力工学研究所、2019.9
34. 小林亮太、高柴則子、米田任伸、畑下昌範、櫻井明彦、カバノアナタケの液体表面培養による生理活性物質の生産とその性質、第 14 回北陸地区化学工学研究交流会、富山市、2019.9
35. 前田嘉一、佐藤義高、山本和高、玉村裕保、不破信和、高松繁行、佐々木誠、久米恭、陽子線前立腺がん治療における直腸線量低減のための同室 CT 画像を利用した再治療計画の有効性、第 16 回日本粒子線治療臨床研究会、奈良市、2019.9
36. 浪花智英、山岸隆一郎、廃止措置技術実習、敦賀廃止措置セミナー、福井大学附属国際原子力工学研究所、2019.9
37. 山岸隆一郎、耐放射線性ロボットレーザー基礎技術開発、敦賀廃止措置セミナー、福井大学附属国際原子力工学研究所、2019.9
38. Munetoshi MAEDA, Hideki MATSUMOTO and Masanori TOMITA, Importance of ATM-mediated cytoplasmic radiation response in determining the fate of cells exposed to low-dose radiation, 第 57 回日本生物物理学会年会、宮崎市、2019.9
39. 金田真奈、田中元基、畑下昌範、沖昌也、SIR 遺伝子破壊と再導入による X 線耐性獲得機構の解析、第 6 回北陸エビジェネティクス研究会、福井大学、2019.10
40. 近藤夏子、櫻井良憲、高田卓志、可野邦行、梶原堯之、久米恭、前田宗利、尾田正二、青木淳賢、宮武伸一、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する、第 78 回日本脳神経外科学会総会、大阪市、2019.10
41. 長谷川正、曾田一雄、丹羽健、大塚春雄、杉浦慎哉、山口貫太、加藤政彦、鈴木耕拓、石神龍哉、LH-DAC を用いた高温高压超臨界水中での金属のレーザー加熱と水素化物の形成、第 60 回高压討論会、札幌市、2019.10
42. 石動美稀、森脇真希、畑下昌範、星野一宏、イオンビーム変異誘導法による高機能酵母の構築およびグリセロールからの効率的エタノール生産、第 12 回北陸合同バイオシンポジウム、あわら市、2019.10
43. 梁取由佳子、宗石徹也、小楠夏海、増田美奈、畑下昌範、櫻井明彦、冬虫夏草変異株を用いた回転円板型培養器によるコルジセピンの生産、第 12 回北陸合同バイオシンポジウム、あわら市、2019.10
44. 中村冬輝、大西崇太、三木紀彦、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、第 12 回北陸合同バイオシンポジウム、あわら市、2019.10
45. 金田真奈、田中元基、畑下昌範、沖昌也、SIR 遺伝子を破壊及び戻すことによる X 線耐性への影響、第 37 回 YEAST WORKSHOP、熊本大学、2019.10
46. 畑下昌範、庄司英一、ポリイミド系高分子ファイバーの開発、若狭湾エネルギー研究センター第 21 回研究報告会、福井大学、2019.10
47. 高城啓一、「DNA 損傷修復機構を利用した変異誘発促進技術の開発」種子の透明化、若狭湾エネルギー研究センター第 21 回研究報告会、福井大学、2019.10
48. 土屋文、高廣克己、鈴木耕拓、石神龍哉、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、若狭湾エネルギー研究センター第 21 回研究報告会、福井大学、2019.10

49. 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 21 回研究報告会、福井大学、2019.10
50. 松本英樹、前田宗利、前田未佳、長谷川崇、水嶋慧、山東新子、久米恭、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 21 回研究報告会、福井大学、2019.10
51. 羽鳥聡、栗田哲郎、林豊、吉本淳、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、瀧上隆太、小田部圭佑、中條直紀、古川靖士、柴田凌、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 21 回研究報告会、福井大学、2019.10
52. 櫻井明彦、畑下昌範、カバノアナタケによる抗糖化物質の生産とその解析、若狭湾エネルギー研究センター第 21 回研究報告会、福井大学、2019.10
53. 久米恭、伊東富由美、前田宗利、長谷川崇、水嶋慧、山東新子、陽子線オンラインモニタリングシステムの開発、若狭湾エネルギー研究センター第 21 回研究報告会、福井大学、2019.10
54. 清野泰、久米恭、岡沢秀彦、牧野顕、森哲也、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 21 回研究報告会、福井大学、2019.10
55. 櫻井良憲、近藤夏子、高田卓志、呼尚徳、久米恭、前田宗利、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シメトリ、若狭湾エネルギー研究センター第 21 回研究報告会、福井大学、2019.10
56. 石神龍哉、シリコンの成膜による着色方法の開発、若狭湾エネルギー研究センター第 21 回研究報告会、福井大学、2019.10
57. 木野村淳、鈴木耕拓、中尾節男、DLC 膜の医用応用のための親水性制御に関する研究、若狭湾エネルギー研究センター第 21 回研究報告会、福井大学、2019.10
58. 篠田佳彦、山岸隆一郎、遠藤伸之、柴田浩幸、小濱泰昭、自然エネルギーによる水素製造のためのマグネシウム再生技術の開発、若狭湾エネルギー研究センター第 21 回研究報告会、福井大学、2019.10
59. 門脇春彦、ステンレス鋼のレーザー切断における粉じんの粒径分布調査、若狭湾エネルギー研究センター第 21 回研究報告会、福井大学、2019.10
60. 坪井昭彦、山岸隆一郎、レーザー除染技術の土木建築分野への応用・実用化研究 ―レーザーによる遠隔防水塗膜剥離施工技術の確立―、若狭湾エネルギー研究センター第 21 回研究報告会、福井大学、2019.10
61. 岩瀬彰宏、若狭湾エネルギー研究センターにおけるイオンビームを用いた研究・開発 ―宇宙環境機器の放射線照射効果研究を含めて―、2019 年度宇宙用電源および関連技術連絡会、関西大学、2019.11
62. 安永和美、高分子材料上の金属めっきの引きはがし試験による密着性評価、日本ポリマースクラッチコンソーシアム第 24 回会議、福井大学、2019.11
63. 奥山克史、松田康裕、山本洋子、内藤克昭、鈴木耕拓、斎藤隆史、林美加子、玉置幸道、フッ化物含有歯面塗布材料からのフッ素の歯質取り込みと結合状態の評価、第 35 回 PIXE シンポジウム、東京都市大学、2019.11
64. 高城啓一、畑下昌範、石井公太郎、阿部知子、ATM/ATR 機能欠損シロイヌナズナ根端におけるX線照射後の γ H2AX の時間・空間分布、日本放射線影響学会第 62 回大会、京都大学、2019.11
65. Munetoshi MAEDA, Mika MAEDA, Masanori TOMITA, Kyo KUME, Satoshi MIZUSHIMA, Shinko SANDO and Hideki MATSUMOTO, Effects of combined radiation exposure on cellular radiosensitivity, 日本放射線影響学会第 62 回大会、京都大学、2019.11
66. 松尾陽一郎、榊祐介、久米恭、清水喜久雄、泉佳伸、蛍光修飾オリゴヌクレオチドを用いた放射線による生体分子の損傷量評価手法に関する研究、第 2 回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会、東北大学、2019.12
67. 鳥居建男、久米恭、山東新子、水嶋慧、瀧田正人、宇宙機搭載用機器に対する陽子線照射技術の開発(乗鞍観測所利用)、令和元年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会、東京大学柏キャンパス、2019.12
68. 岩瀬彰宏、照射効果を記述するイオンビームのパラメータはなにか? ―放射線物性研究からの考察―、福井イオンビーム育種研究会、若狭湾エネルギー研究センター、2019.12
69. 畑下昌範、高城啓一、大城閑、井村裕治、笠原康一、イオンビームによる植物工場用野菜の開発、福井イオンビーム育種研究会、若狭湾エネルギー研究センター、2019.12
70. 櫻井明彦、畑下昌範、イオンビームによるきのこ類の育種、福井イオンビーム育種研究会、若狭湾エネルギー研究センター、2019.12

71. 沖昌也、金田真奈、田中元基、畑下昌範、エピジェネティックな発現制御の破綻による X 線耐性機構の解明、福井イオンビーム育種研究会、若狭湾エネルギー研究センター、2019.12
72. 高城啓一、 γ H2AX 検出によるイオンビーム照射効果研究へのアプローチ、福井イオンビーム育種研究会、若狭湾エネルギー研究センター、2019.12
73. 鈴木耕拓、安田啓介、石神龍哉、安永和史、イオンビームを用いた軽元素分析手法と最近の分析事例、日本学術振興会 荷電粒子ビームの工業への応用第 132 委員会 第 238 研究会、東京都、2019.12
74. 安藤静治、スマデコ施設を用いた水中レーザー切断と気中粉じん移行動向の調査、レーザー応用技術 産学官連携成果報告会(令和元年度)、福井大学附属国際原子力工学研究所、2019.12
75. 岩瀬彰宏、照射誘起析出現象の RBS「その場」測定、イオンビーム分析研究会、若狭湾エネルギー研究センター、2020.2
76. 鈴木耕拓、イオンビームによる大気中での定量分析手法の開発、イオンビーム分析研究会、若狭湾エネルギー研究センター、2020.2
77. 畑下昌範、イオンビーム育種による野菜類の開発、機能性表示食品に係る勉強会、高浜町、2020.2

3.2. 特許

令和元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. 「2次元光走査ミラー装置、2次元光走査装置及び画像投影装置」(特願 2020-052534) 石神龍哉

(2) 特許登録

1. 「高分子アクチュエーターの制御方法、高分子アクチュエーター及びこの高分子アクチュエーターを利用した微少流体送出装置」(特許第 6586686) 畑下昌範
2. 「トリチウムを含む汚染水を処理する処理装置」(特許第 6656909) 中嶋英雄

3.3. 品種

令和元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

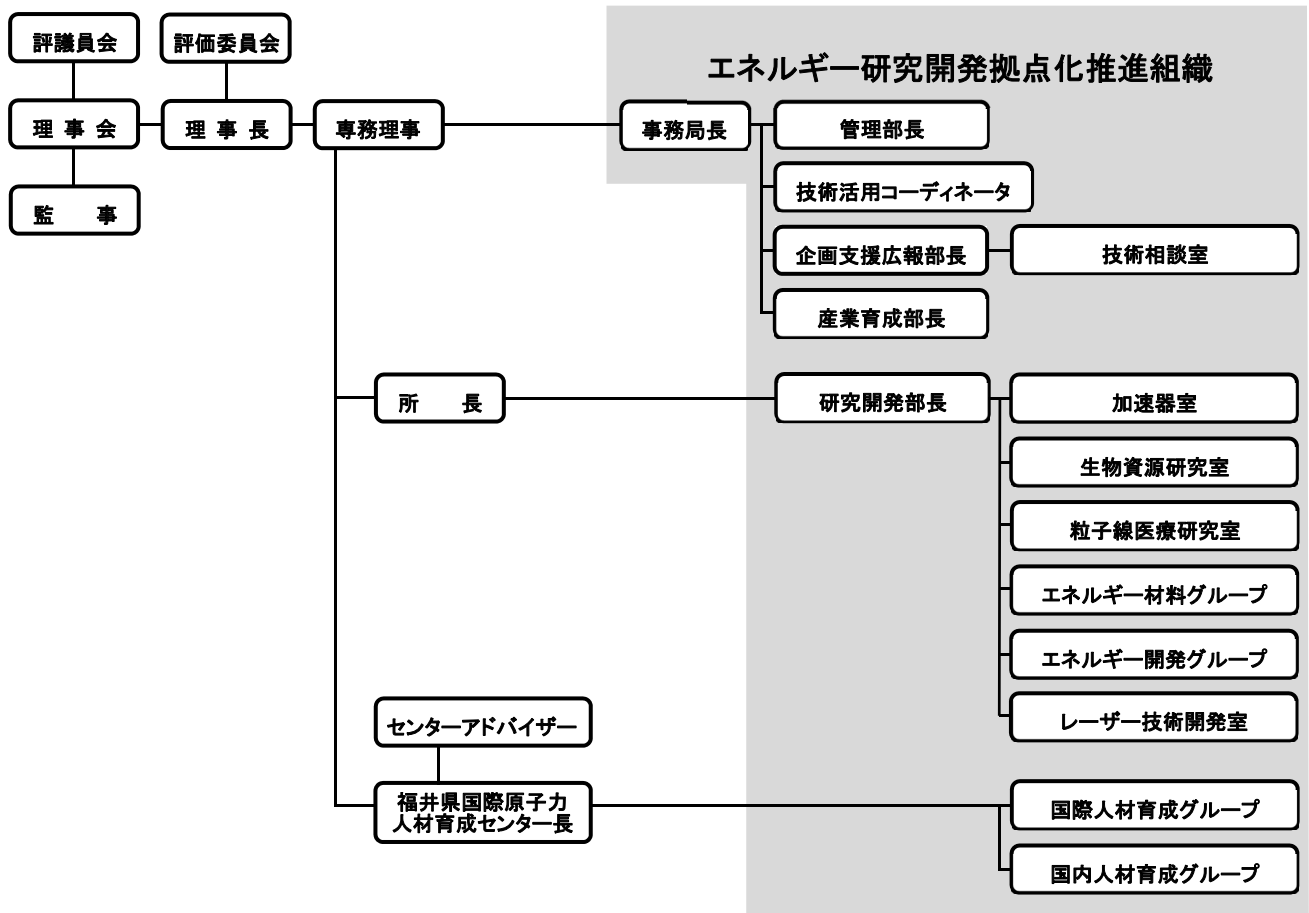
なし

(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 31 年 4 月 1 日 現在)



令和元年度

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 22 卷

発行: 令和2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