

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5年度 第26巻

Annual Report of the Wakasa Wan Energy Research Center

Vol.26 2023



目次

1. はじめに	4
2. 研究成果	5
2.1. 医療分野	5
2.1.1. 粒子線がん治療高度化のための生物応答解明研究	5
2.1.1.1 陽子線治療を基軸とした集学的がん治療の実現に向けた治療生物学的検討① －陽子線と分子標的薬の併用が細胞の放射線感受性に与える影響－	5
2.1.1.2 陽子線治療を基軸とした集学的がん治療の実現に向けた治療生物学的検討② －頭頸部がん放射線治療における副作用を緩和/防護するための薬剤開発に向けたモデル実験系の構築－	7
2.1.1.3 放射線エネルギー付与の時空間的分布に依存した細胞の放射線感受性決定機構の解明 －ガフクロミックフィルムを用いた超高線量率 X 線照射における線量計測技術の確立－	9
2.1.1.4 細胞の生死を決定する細胞質	11
2.1.1.5 陽子線治療に伴うがん免疫応答の解明と新規免疫放射線療法の開発	12
2.1.2. 粒子線照射技術の高度化研究	14
2.1.2.1 粒子線治療におけるアプスコパル効果イメージングに関する基礎的検討	14
2.1.2.2 放射線被ばく事故に対応した DNA 損傷解析による被ばく線量評価法の実用化	15
2.2. 育種分野	16
2.2.1. 植物・菌類のイオンビーム育種研究	16
2.2.1.1 イオンビーム育種のためのニホンスイセン増殖法	16
2.2.1.2 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(1) －高LETイオンビームによる変異誘発の多様性の実証－	19
2.2.1.3 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(2) －主要穀物育種におけるイオンビーム照射技術の利用－	20
2.2.1.4 酒米新品種「山田錦 FW1 号」の栽培・醸造試験および「山田錦 FW2 号」の育成	21
2.2.1.5 イオンビーム突然変異処理による県産乳酸菌変異株の開発 －ビーム照射に対する感受性の検討－	25
2.2.1.6 重イオンビーム処理による高温・乾燥耐性植物パールミレットの倍加半数体作成技術の開発	26
2.2.1.7 カーボンビーム照射によるパンコムギ品種 ‘Fieldier’ 変異体の作出	26
2.2.1.8 重イオンビームを用いた高温に強い水稻育種素材の育成	27
2.2.1.9 シイタケ菌糸核 DNA 損傷マーカー応答の放射線種による違い	27
2.2.2. 生物資源のDNA情報・特性等の解析評価研究	28
2.2.2.1 福井県産生物資源の DNA カタログ作成	28
2.2.2.2 根端から培養増殖させたニンニク球の 2 年目栽培状況	29
2.2.2.3 食品の価値を高める指標としての抗酸化活性評価手法の開発	31
2.2.2.4 血清試料中のフリーラジカル消去活性測定による神経発達症判定技術の確立	32

2.2.2.5	維持血液透析患者の抗酸化能に関する研究	32
2.2.3.	植物工場関連品種改良	33
2.2.3.1	光応答制御による高付加価値レタスの栽培方法の確立	33
2.2.3.2	きのこと抽出液を用いた野菜の生育促進効果	34
2.3	レーザー分野	35
2.3.1.	レーザー技術を応用した除染技術、切断技術の開発	35
2.3.1.1	レーザー切断機材の開発及び切断性能評価	35
2.3.1.2	ゴムライニング剥離へのレーザーの適用可能性検証	36
2.3.1.3	大型水槽でのレーザー切断時粉じん挙動及び拡散防止対策に係るデータ取得等作業	37
2.3.1.4	粉じんの発生抑制および捕獲に重点をおいたレーザー溶断技術の検討作業	38
2.3.2.	レーザー技術の産業利用	39
2.3.2.1	レーザー加工技術を駆使した金属付加製造物の機械的特性評価に関する作業	39
2.4.	宇宙開発分野	40
2.4.1.	宇宙で利用される機器・材料の評価技術開発	40
2.4.1.1	宇宙産業用イオンビーム照射手法の確立 ～シングルイベント評価手法の標準化に向けた検討～	40
2.4.1.2	宇宙産業用イオンビーム照射手法の確立 ～半導体デバイス特性のイオン照射チャンバ内その場測定システムの構築～	43
2.4.1.3	ペロブスカイト太陽電池放射線耐性のその場評価に向けた試験系の構築	46
2.4.1.4	次世代宇宙観測を目指した Si 半導体ピクセルセンサーの放射線耐性評価	47
2.4.1.5	宇宙環境で利用する放射線検出器の放射線耐性の評価	49
2.4.1.6	シリコン半導体素子のプロトン起因シングルイベント効果研究	50
2.4.1.7	小型衛星搭載用中性子・ガンマ線分光装置(SONGS)の開発状況	52
2.4.1.8	陽子線を用いた衛星搭載デバイスの放射線耐性評価と軌道上実証	52
2.5.	エネルギー分野	53
2.5.1.	放射線計測技術の開発	53
2.5.1.1	リチウム含有液体シンチレーターの性能向上と長期安定性	53
2.5.2.	様々なエネルギーの技術開発	54
2.5.2.1	セラミック水分解を利用した水素製造技術の開発	54
2.5.2.2	熔融ナトリウムを用いたアンモニア合成装置の開発	56
2.5.2.3	ナノ構造化を活用した新規水素貯蔵材の開発 －摩擦強加工による金属材料のナノ構造化－	57
2.5.2.4	ナノ構造化を活用した新規水素貯蔵材の開発 －気相からの急冷とイオン照射－	59
2.5.2.5	加速器照射を利用した規則性 Fe-Al 合金中の空孔制御による多量水素貯蔵に関する研究	61
2.6.	多様な分野の活動を支える技術開発	63

2.6.1. 加速器技術の開発・高度化	63
2.6.1.1 若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状	63
2.6.1.2 シンクロtron高周波加速制御系のデジタル化	65
2.6.2. 加速器利用分析技術の開発・高度化	67
2.6.2.1 イオンビームを用いた充電時におけるリチウム電池内の正・負極間のリチウムイオン移動解析技術開発に関する研究	67
2.6.2.2 液体中のリチウム分析技術の開発	68
2.6.3. 放射線場で利用される機器・材料の評価技術開発	69
2.6.3.1 ジルコニウム合金中の欠陥と水素の相互作用	69
2.6.3.2 プロトン照射した Fe-Cu モデル合金の機械的性質に及ぼす損傷速度の影響	71
2.6.3.3 照射欠陥移行現象の体系化による核融合炉真空容器内トリチウムの蓄積量評価	73
2.6.3.4 ダイバータ用タングステンにおける障害物強度因子の温度依存性に関する研究	75
2.6.3.5 イオントラックオーバーラップ効果を取り込んだイオン照射効果シミュレーションコードの開発	77
2.6.4. 材料技術の開発	78
2.6.4.1 低エネルギープロトン照射した FeSe _{0.5} Te _{0.5} 薄膜の超伝導特性に関する研究	78
2.6.4.2 ポリイミドナノファイバーを用いた新規電解質膜の開発	80
2.6.4.3 イオン照射による低損失磁性材料の機械特性改善	81
2.6.4.4 超強加工による微細結晶粒金属材料の創製と評価	82
2.6.4.5 Ge ₁₂ Sb ₂ Te ₁₅ の熱電特性と微細組織	83
2.6.4.6 β相および Al-rich-α相の形態制御による高耐食性 Mg-Al-X 合金の開発	84
2.6.4.7 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	85
2.6.4.8 マイクロスラリージェットエロージョン試験による Ti 合金積層造形材の摩耗特性	87
3. 外部発表、特許、品種登録	88
3.1. 外部発表	88
3.2. 特許	93
3.3. 品種	93

1. はじめに

公益財団法人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5年度は、第5期中期事業計画の4年目にあたり、これまでの取組みを十分に踏まえ、引き続き、3つの柱と位置付ける「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、「医療」、「育種」、「レーザー技術」、「宇宙開発」の4分野に重点を置いて、粒子線がん治療高度化研究、イオンビーム育種研究、原子炉廃止措置へのレーザー技術を応用研究、宇宙機器の放射線耐性評価研究等を行いました。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との連携による研修や、アジア諸国向けの研修、国内技術者向けの実務研修の実施などにより、原子力人材育成に取り組みました。

当法人の研究開発部は、加速器室、照射支援室、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7つの研究グループより構成されています。本書は、令和5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6つに分けられ、医療分野、育種分野、レーザー分野、宇宙開発分野、エネルギー分野、多様な分野の活動を支える技術開発に関するものです。医療分野における成果では、陽子線治療を基軸とした集学的がん治療に向けた治療生物学的研究、粒子線照射技術の高度化研究が挙げられます。育種分野では、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、植物工場関連品種改良研究、レーザー分野では、レーザー技術を応用した除染技術・切断技術の開発と産業利用、宇宙開発分野では、宇宙で利用される機器・材料の放射線耐性評価技術の開発研究、エネルギー分野では、放射線計測技術開発や様々なエネルギー技術開発、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、イオンビーム分析技術の開発・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、当法人の運用する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きているところです。

また、これらの研究成果の多くは、学術的な新知見や、将来の実用化に貢献できるシーズを提供できるものと期待されます。

当法人において、令和5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6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 野田 耕司

2. 研究成果

2.1. 医療分野

2.1.1. 粒子線がん治療高度化のための生物応答解明研究

2.1.1.1

陽子線治療を基軸とした集学的がん治療の実現に向けた治療生物学的検討①
 –陽子線あるいはX線と分子標的薬の併用が細胞の放射線感受性に与える影響–
 Basic Medical/Biological Considerations for the Realization
 of Multidisciplinary Cancer Treatment Built around Proton Beam Therapy ①
 –Impact of Combined Treatment with a proton or X-ray Beam
 and a Molecular-targeted Drug on Cellular Radiosensitivity–

前田宗利*¹、前田未佳*¹、水嶋慧*¹、山東新子*¹、久米恭*¹

Munetoshi MAEDA, Mika MAEDA, Satoshi MIZUSHIMA, Shinko SANDO and Kyo KUME

Abstract

To realize cancer treatment using a combination of proton beams and molecular-targeted drugs, a five-year research project starting in FY2022 will investigate the combined effects of radiation and multiple molecular-targeted agents at the cellular level, verify therapeutic effects at the animal level, and accumulate knowledge for clinical treatment. In FY2023, we verified the alterations in viability of cells treated with a molecular-targeted drug after proton or X-ray irradiation, and the therapeutic effect of molecular-targeted drug alone on model mice.

要約

本研究では、陽子線と分子標的薬を併用したがん治療の実現に向けて、2022年度(令和4年度)より5年計画で、細胞レベルにおける放射線と分子標的薬との併用効果の検証、動物レベルでの放射線と分子標的薬の併用による治療効果の検証を行い、臨床治療の実施に向けた知見の蓄積を進める。2023年度は、陽子線あるいはX線照射後に分子標的薬を投与した細胞の生存率の変化と、モデルマウスに対する分子標的薬の単独投与による治療効果を検証した。

緒言

近年、様々な治療法の長所を組み合わせた集学的治療の導入によりがん治療効果を向上させる取り組みが進められている。福井県においては、若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)で実施してきた前臨床研究の成果に基づき、福井県立病院陽子線がん治療センター(県立病院)において陽子線とX線および抗がん剤を併用したがん治療(混合化学放射線治療)の臨床試験が実施された。この試験において良好な治療成績が得られたことから、現在、本治療法は食道がんに対する先進医療として社会実装されている。一方、内科的治療においては、がん細胞中の異常なタンパク質の働きを選択的に阻害する分子標的薬が登場し、従来の抗がん剤と比べて副作用の少ない効果的な治療が行える場合も増えてきた。現在のところ、放射線治療との併用が標準治療あるいは禁忌となる分子標的薬は存在しない。そこで、次のステップとして、優れた治療成績を有する陽子線治療と分子標的薬を併用することができれば、よりがん治療の効果が向上すると期待される。また、放射線治療は比較的副作用の少ない治療法であるが、治療患部周辺における炎症など、少なからず患者の負担となる副作用が生じることがある。エネ研と福井大学は、これまでに実施してきた共同研究においてこの副作用を軽減する候補薬剤を見出しつつあり、その仕組みを詳しく解明することができれば、副作用の発生を抑制あるいは緩和する新薬の開発に資すると期待される。

本研究では、陽子線と分子標的薬を併用したがん治療の実現に向けて、2022年度(令和4年度)より5年計画で、細胞レベルにおける放射線と分子標的薬との併用効果の検証、動物レベルでの放射線と分子標的薬の併用による治療効果の検証を行い、臨床治療の実施に向けた知見の蓄積を進める。本稿(2.1.1.1)では、陽子線と分子標的薬の併用によるがん治療効果の向上に向けた2023年度(令和5年度)の研究成果を報告する。また、放射線治療の副作用を軽減する薬剤の開発に向けた福井大学との2023年度の共同研究の成果については2.1.1.2にて報告する。

*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

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。

成果の概要

1. 陽子線あるいはX線と分子標的薬の併用による細胞致死効果の検証

本研究では、2021年に国内における製造販売が承認された Brigatinib (ブリグチニブ) をモデル分子標的薬、ALKの融合遺伝子を持たない非小細胞肺癌由来の細胞株である A549 細胞に *EML4-ALK* 融合遺伝子および発光遺伝子である *Luc2* を組み込んだ EML4-ALK Fusion-A549 Isogenic-Luc2 (A549IG-Luc2) 細胞をモデル細胞とし、陽子線と分子標的薬の併用効果を検証した。本細胞を播種した T25 フラスコを 0~8.0 Gy の陽子線あるいは X 線で照射してから、0~ 1.0×10^4 nM のブリグチニブで 72 時間処理した後、PrestoBlue 試薬を用いて各条件における細胞の相対生存率を求めた。陽子線照射後にブリグチニブ処理を行った場合 (図 1)、X 線照射後にブリグチニブ処理を行った場合 (図 2) の双方において、ブリグチニブ濃度および線量の増加に依存して生存率が低下した。生存率の変動要因について 2-way ANOVA 解析を行ったところ、ブリグチニブ濃度、線量の順で有意に寄与率が高いことが分かった。また、僅かながら両者の有意な交互作用も検出された。したがって、陽子線あるいは X 線とブリグチニブの併用における細胞致死効果は、基本的に相加的に作用し、投与や照射の条件によっては僅かな相乗効果を持つ場合もあることが明らかとなった。

2. 動物モデルを用いた抗腫瘍効果の検証

放射線と分子標的薬の併用による治療効果の検証に先立ち、モデルマウスに対するブリグチニブの単独投与を 20 日間実施し、抗腫瘍効果を検証した。その結果、ブリグチニブは有意に腫瘍増殖を抑制するが、投与の中断により腫瘍増殖が急速に誘導されることを明らかにした (図 3)。

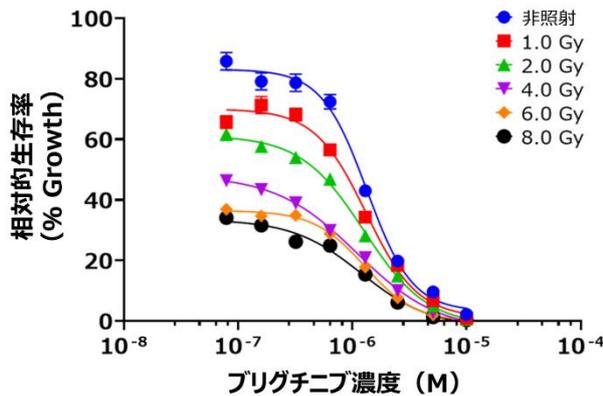


図 1 陽子線で照射(0~8.0 Gy)した後、各濃度のブリグチニブで 72 時間処理した A549IG-Luc2 細胞の生存率

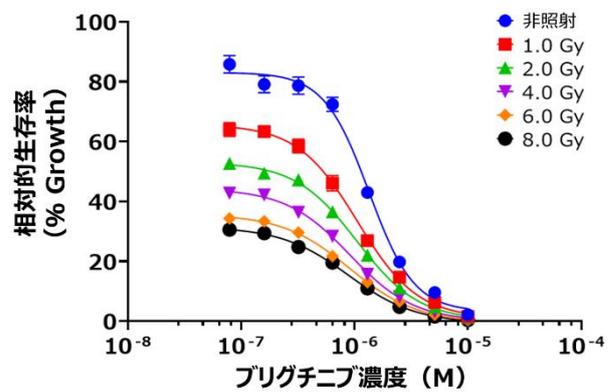


図 2 X線で照射(0~8.0 Gy)した後、各濃度のブリグチニブで 72 時間処理した A549IG-Luc2 細胞の生存率

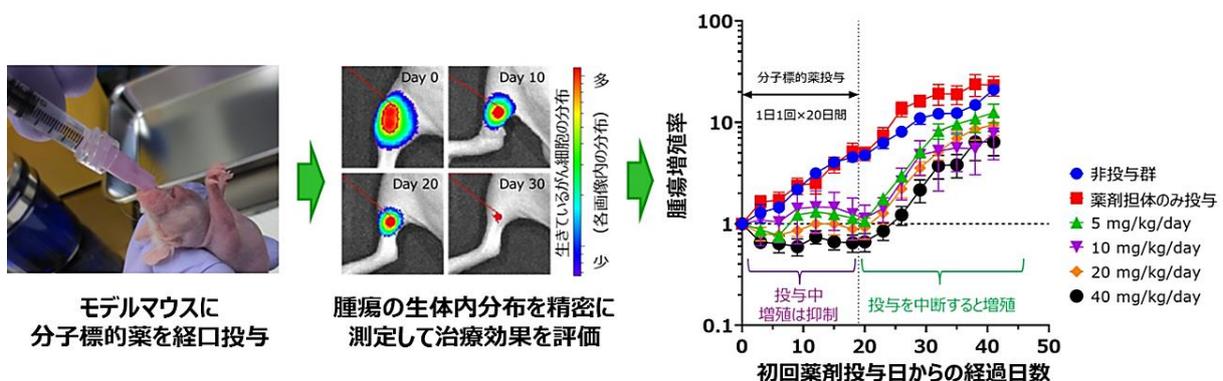


図 3 モデルマウスに対する 20 日間のブリグチニブ単独投与による抗腫瘍効果の検証

結言

治療用陽子線を用いた細胞レベルの基礎研究からモデル動物を用いた前臨床研究をワンストップで実施できる国内唯一の研究機関であるエネ研の特徴を活かし、がん治療効果の向上、副作用の低減化を通じて、より患者に優しい優れたがん治療法の開発に資する知見を蓄積するための研究を今後も推進していく。

2.1.1.2

陽子線治療を基軸とした集学的がん治療の実現に向けた治療生物学的検討②

—頭頸部がん放射線治療における副作用を緩和/防護するための薬剤開発に向けたモデル実験系の構築—

Basic Medical/Biological Considerations for the Realization of Multidisciplinary Cancer Treatment

Built around Proton Beam Therapy ②

—Establishment of an Experimental Model System for the Development of Drugs to Mitigate/Protect Side Effects in Radiotherapy for Head and Neck Cancer—

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

Manabu SUGAI, Hideki MATSUMOTO, Munetoshi MAEDA, Mika MAEDA, Satoshi MIZUSHIMA,

Shinko SANDO and Kyo KUME

Abstract

In radiotherapy for head and neck cancer with proton or carbon beams as well as X-rays, serious side effects on the oral mucosa and mandible have been developed in almost all patients. To establish cultured cell and mouse model experimental systems for the development of drugs that mitigate/protect against these side effects in radiotherapy for head and neck cancer, we examined the radiosensitivity of normal mouse cranial crown-derived osteoblast-like lineage cells (MC3T3-E1 cells), and normal mouse mandibular bone marrow hematopoietic stem cells (HSCs) and multipotent progenitor cells (MPPs). The survival rate of MC3T3-E1 cells to proton beams decreased exponentially with irradiation dose, with D_0 (proton dose indicating 37% survival) at 0.73 Gy and D_{10} (proton dose indicating 10% survival) at 1.69 Gy. The sensitivity of normal mouse mandibular bone marrow HSCs/MPPs to proton beams showed a steep decrease in survival (low-dose hyper-radiosensitivity) between 0 and 0.5 Gy.

要約

X線だけでなく陽子線あるいは炭素線を用いた頭頸部がんの放射線治療では、口腔粘膜や下顎骨への重篤な副作用がほぼすべての患者に発症する。そこでこれらの副作用を緩和/防護する薬剤を開発に向けた培養細胞およびマウスのモデル実験系を確立するために、正常マウス頭蓋冠由来骨芽細胞様株化細胞(MC3T3-E1細胞)および正常マウス下顎骨骨髄由来造血幹細胞(HSCs)/多能性前駆細胞(MPPs)の放射線感受性を解析した。MC3T3-E1細胞の陽子線に対する生存率は、照射線量に依存して指数関数的に減少し、 D_0 (37%生存率を示す陽子線量)は0.73 Gy、 D_{10} (10%生存率を示す陽子線量)は1.69 Gyであった。また、正常マウス下顎骨骨髄由来HSCs/MPPsの陽子線に対する感受性は、0~0.5 Gyの間で急峻な生存率の低下(低線量超高感受性)を示した。

緒言

近年、X線に加えて陽子線・炭素線などの放射線種の拡大、照射装置および照射技術の開発により放射線がん治療は目覚ましく発展し、口腔を含む頭頸部がん患者においてもおよそ3分の1が放射線治療を受けている。しかしながら、口腔を含む頭頸部がんの放射線治療においては、ほぼすべての患者に口腔粘膜炎、顎骨骨髄炎および顎骨壊死などの重篤な副作用が発症し、著しくQOLの低下を招くが、これらの副作用を緩和/防護する薬剤は国内外において未開発であり、含嗽、ステロイド軟膏塗布、消炎鎮痛剤投与などの対症療法がおこなわれているのみである。従って、これらの副作用を緩和/防護するための薬剤の開発は、口腔を含む頭頸部がんに対する放射線治療の支持療法開発における喫緊の課題である。これらの副作用を緩和/防護する薬剤の開発に向けた培養細胞およびマウスのモデル実験系を確立するために、正常マウス由来骨芽細胞様株化細胞(MC3T3-E1細胞)および正常マウス下顎骨骨髄由来造血幹細胞(HSCs)/多能性前駆細胞(MPPs)の陽子線感受性を解析した。

成果の概要

1. 正常マウス由来骨芽細胞様株化細胞(MC3T3-E1細胞)の陽子線に対する感受性の解析

α -MEM培養液を用いてMC3T3-E1細胞を増殖させ、 $2 \times 10^2 \sim 1 \times 10^4$ 個の細胞をT25Cell⁺細胞培養フラスコに播種して16時間、37°C、5%CO₂下で培養し、福井県若狭湾エネルギー研究センターの陽子線がん治療

^{*1} 福井大学・医学系部門・医学領域・生命情報医科学講座・分子遺伝学分野、^{*2} 福井大学・遠赤外領域開発研究センター、^{*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、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと福井大学が福井県からの受託研究として共同で実施したものである。

研究装置において真鍮製コリメータを用いて $\phi 100$ mmの陽子線(200 MeV)照射野を形成し、拡大ブラッグピーク(SOBP)中央に配置して0.1~5.0 Gyの陽子線を単回照射した。コロニーを形成させるために照射後7~10日間、37°C、5%CO₂下で培養し、形成されたコロニー数を計数してMC3T3-E1細胞の生存率を解析した。その結果、MC3T3-E1細胞の生存率は陽子線の照射線量に依存して指数関数的に減少し、グラフの近似直線(指数関数)から計算された D_0 (37%生存率を示す陽子線量)は0.73 Gy、 D_{10} (10%生存率を示す陽子線量)は1.69 Gyであった(図1)。

2. 正常マウス下顎骨骨髄由来造血幹細胞/多能性前駆細胞の放射線感受性の解析

正常マウス(Jcl:ICR、オス、7週齢)をポリエチレン製のディスプレイ拘束衣内に保持し、アクリル板に固定して、福井県若狭湾エネルギー研究センターの陽子線がん治療研究装置において真鍮製コリメータを用いて $\phi 60$ mmの陽子線(200 MeV)照射野を形成し、ブラッグピークの手前の平坦部においてマウスの頭頸部のみで0.01~5.0 Gyの陽子線を単回照射した。照射翌日に各マウスから下顎骨を摘出し、骨髄細胞分画を調製した。MethoCult培養液(M3434)を用いて骨髄細胞分画の造血幹細胞(HSCs)/多能性前駆細胞(MPPs)を培養し、形成されたコロニー数を計数してHSCs/MPPsの生存率を解析した。その結果、HSCs/MPPsの陽子線に対する感受性は、0~0.5 Gyの間で急峻な生存率の低下(低線量超高感受性)を示して生存率は約0.3まで減少し、1.0~5.0 Gyでは緩やかに生存率の低下が認められ、生存率は0.1まで減少した(図2)。また、コロニーを形成した細胞種は、顆粒球・マクロファージコロニー形成細胞(CFU-GM)、赤芽球バースト形成細胞(BFU-E)、赤芽球に分化する赤芽球コロニー形成細胞(CFU-E)、顆粒球・赤芽球・巨核球・マクロファージコロニー形成細胞(CFU-GEMM)などが認められた。

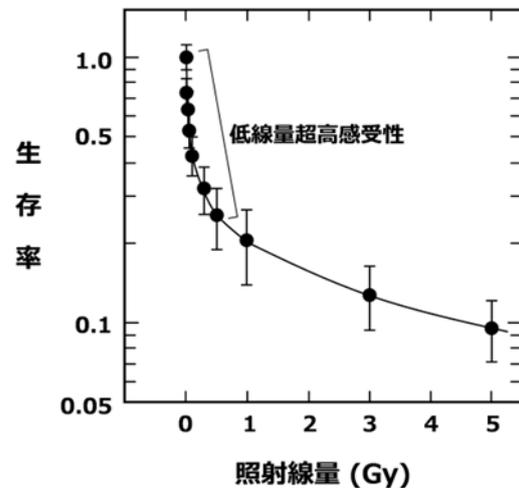
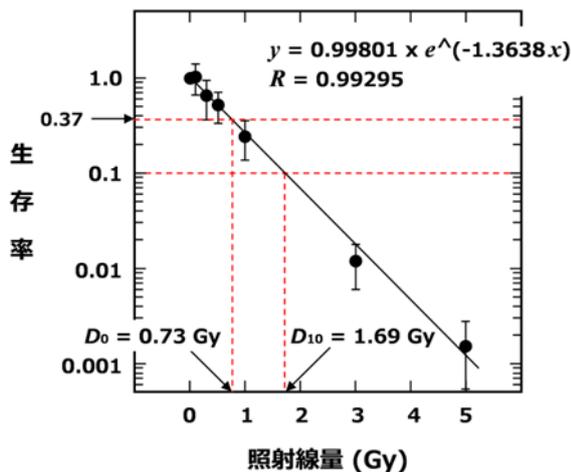


図1 正常マウス骨芽細胞様株化細胞(MC3T3-E1細胞)の陽子線に対する感受性。この細胞の D_0 (37%生存率を示す陽子線量)は0.73 Gy、 D_{10} (10%生存率を示す陽子線量)は1.69 Gyであった。

図2 正常マウスの下顎骨由来骨髄造血幹細胞(HSCs)/多能性前駆細胞(MPPs)の陽子線に対する感受性。0~0.5 Gyの照射により低線量超高感受性が認められた。

結言

正常マウス由来骨芽細胞様株化細胞(MC3T3-E1細胞)の生存率は陽子線の照射線量に依存して指数関数的に減少し、通常低線量域で認められる肩(亜致死損傷修復、sub-lethal damage repair, SLDRによる曲線部分)が認められず、骨芽細胞は陽子線に対して感受性が極めて高い可能性が示唆された。

正常マウス下顎骨骨髄由来造血幹細胞(HSCs)/多能性前駆細胞(MPPs)は陽子線に対して低線量超高感受性を示し、生存していた細胞にはCFU-GM、BFU-E、CFU-E、CFU-GEMMなどが認められた。今後は陽子線照射後に生存している造血幹細胞(HSCs)/多能性前駆細胞(MPPs)を明らかにし、それらの分化体系についても明らかにする計画である。

2.1.1.3

放射線エネルギー付与の時空間的分布に依存した細胞の放射線感受性決定機構の解明
—ガフクロミックフィルムを用いた超高線量率 X 線照射における線量計測技術の確立—

Elucidation of the Mechanism of Cellular Radiosensitivity

Dependent on the Spatiotemporal Distribution of Radiation Energy Deposition

—Establishment of Dosimetry Techniques for Ultra-high Dose-rate X-ray Irradiation Using Gafchromic Films—

前田宗利*1、平山亮一*2、前田未佳*1、富田雅典*3

Munetoshi MAEDA, Ryoichi HIRAYAMA, Mika MAEDA and Masanori TOMITA

Abstract

FLASH radiotherapy, which utilizes an ultra-high dose rate (UHDR) of radiation, is characterized by a high antitumor effect with little adverse effect on normal tissues. Despite this beneficial function being termed the FLASH effect, the induction mechanism remains unclear. To elucidate this mechanism, it is necessary to understand the detail relationship between temporal and spatial radiation energy deposition and biological responses. To achieve this objective, we have devised a straightforward approach to quantify the dose and dose rate of UHDR X-rays using GAFCHROMIC film.

要約

超高線量率の放射線を用いた FLASH 放射線治療は、高い抗腫瘍効果を持ちながら正常組織への悪影響が少ないという特徴を持っている。この特徴は FLASH 効果と呼ばれているが、その誘導メカニズムは十分に解明されていない。このメカニズムを解明するためには、時間および空間的な放射線エネルギーの付与と生物応答の関係を詳しく理解する必要がある。それに向けた最初のステップとして、我々は超高線量率の X 線の線量および線量率をガフクロミックフィルムによって簡便に測定する手法を確立した。

緒言

近年、超高線量率(UHDR; > 40 Gy/s)照射を用いた FLASH 放射線治療と呼ばれる新しい治療法が注目されている。UHDR 照射は、従来の線量率(CONV; < 5 Gy/min)照射に比べて、がん組織に対する抗腫瘍効果を保持したまま、正常組織への放射線影響を低減することが知られている。この FLASH 効果の誘導メカニズムには、フリーラジカルや酸素枯渇、免疫調節が関与していると考えられているが、その詳細はまだ解明されていない。残念ながら、現在、UHDR 照射が可能な研究施設は少なく、FLASH 効果をより深く理解するためには、核酸、細胞、動物を含むすべての生物試料に UHDR 照射が可能な環境を整えることが不可欠といえる。我々は、がん治療の高度化を目指し、加速器から得られる陽子線などの粒子放射線や放射光などの光子放射線を用いた放射線の生物影響研究を推進してきた。そのなかでも、高線量率の X 線を効率よく得ることができる放射光は、FLASH 効果のメカニズムを解明するための強力なツールになると考えられる。そこで、我々は、SPring-8 の放射光を利用して、FLASH 効果のメカニズムを解明するための研究に着手した。

成果の概要

指頭型電離箱のような一般的な線量計を用いて UHDR 照射における線量率を評価することは、その線量率の高さ故に困難である。この課題を克服するために、ミリ秒オーダーで制御可能な高速シャッターを SPring-8 の BL14B1 ビームライン下流に設置し、定位放射線治療で線量測定に用いられているガフクロミックフィルムにより照射野の線量と線量率の評価を試みた。高線量照射用に設計された GAFCHROMIC EBT-XD に放射光(白色 X 線)を 20~100 ms 照射して、フィルム感光面(照射野)の輝度を計測した。各照射時間のスキャン画像を図 1 に示した。あらかじめ取得しておいた標準 X 線から得られた検量線に基づいて積算線量を求め、高速シャッターの開閉時間で除算して線量率を求めた(図 2)。その結果、白色

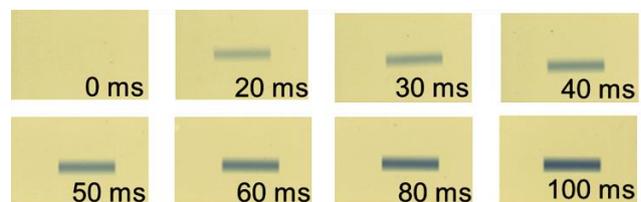


図 1 白色 X 線を照射したガフクロミックフィルムのスキャン画像(照射野:4 mm × 13 mm)

X 線に基づいて積算線量を求め、高速シャッターの開閉時間で除算して線量率を求めた(図 2)。その結果、白色

*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(国研)量子科学技術研究開発機構・QST病院・重粒子線治療研究部・生物物理研究グループ、*3(一財)電力中央研究所・サステナブルシステム研究本部・生物・環境化学研究部門

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが(国研)量子科学技術研究開発機構および(一財)電力中央研究所と共同で実施したものである。本研究の放射光実験は、公益財団法人高輝度光科学研究センターの承認の下で実施した(課題番号 2023A3653、2023B3653)。

X線の平均線量率は、 84.1 ± 1.7 Gy/sと推定された。この線量率の妥当性を評価するため、様々な線量で白色X線あるいは標準X線を照射した大腸菌由来のpBR322プラスミドDNAに生じた鎖切断を定量して比較した(図3)。白色X線を照射したプラスミドDNAの電気泳動像を図4に示した。白色X線を照射したプラスミドにおけるDNA二本鎖切断の吸収線量に対する生成効率は、標準X線を照射した場合とほぼ等しく(図5)、ガフクロミックフィルムによる線量評価の妥当性が確認された。

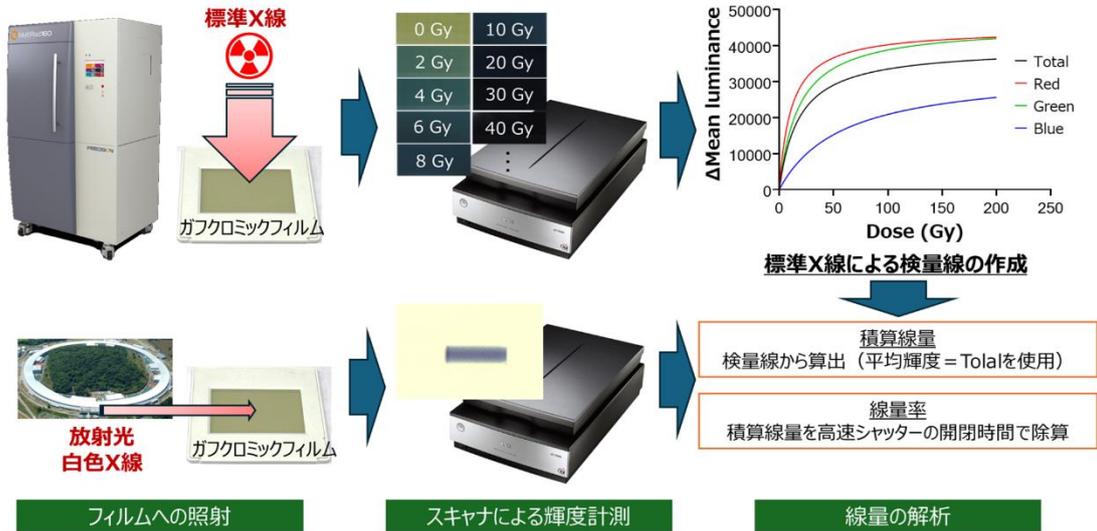


図2 ガフクロミックフィルムによる線量および線量率解析の概要



図3 プラスミドDNAに生じたDNA一本鎖切断(SSBs)および二本鎖切断(DSBs)の定量

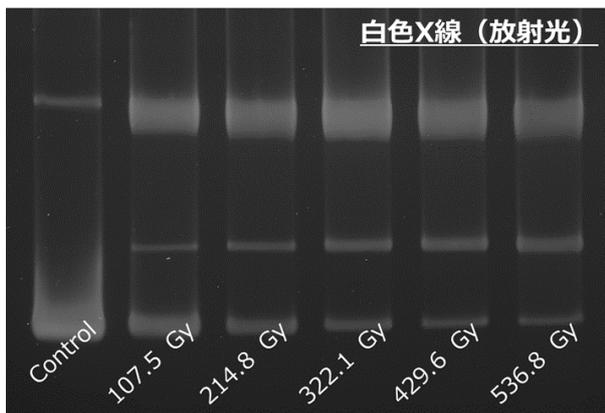


図4 白色X線を各線量で照射したプラスミドDNAの電気泳動写真

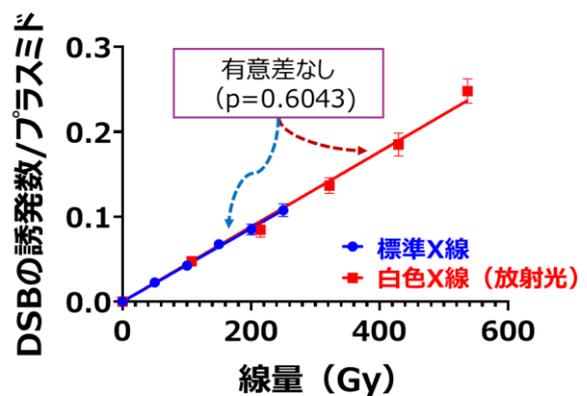


図5 標準X線あるいは白色X線を照射したプラスミドDNAにおける二本鎖切断(DSB)の生成効率

結言

本研究から、ガフクロミックフィルムを用いた線量評価手法がUHDR照射に適用可能であることが示された。我々は、今後FLASH効果の生物学的研究にこの手法を活用していく。

2.1.1.4

細胞の生死を決定する細胞質-細胞核クロストークの解明

Elucidation of the Mechanism of Cell Life/Death Determination via Crosstalk between Cytoplasm and Cell Nucleus

富田雅典*1、前田宗利*2

Masanori TOMITA and Munetoshi MAEDA

Abstract

The present study aims to elucidate cytoplasm-cell nucleus crosstalk mediated by ATM, the causative gene product of telangiectatic ataxia, using an X-ray microbeam. We obtained human immortalized normal cells and proceeded with experiments to confirm the reproducibility of the previous paper¹⁾. In addition, we proceeded with experiments to confirm the temporal changes of p21 protein expression after irradiation.

要約

本研究は、X線マイクロビームを用い、毛細血管拡張性運動失調症の原因遺伝子産物である ATM を介した細胞質-細胞核のクロストークの解明を目的とする。今年度はヒト不死化正常細胞を入手して既報論文¹⁾の再現性を確認するとともに、細胞周期制御に関与する p21 タンパク質の誘導が照射後の時間経過とともにどの様に変化するのかを検証する実験を進めた。

緒言

我々の研究グループは、細胞内の局所を狙い撃ちできる X線マイクロビームを用い、ATM を介した DNA 損傷応答が、細胞核に加えて細胞質への照射の有無によって変化することを解明し¹⁾、細胞質に存在する ATM が細胞の運命を決定するという革新的仮説を提唱した。本研究は、マイクロビームテクノロジーを用い、ATM を「ハブ」とする細胞質-細胞核のクロストークによる新たな細胞運命決定機構を解明することを目的とする。

成果の概要

1. 細胞質-細胞核クロストークの可視化解析

本研究で主に使用する細胞として、不死化ヒト真皮線維芽細胞 CI-huFIB (InSCREENeX 社)を取得し、一連の基礎データを取得した。電中研のマイクロビーム X線照射システム²⁾を用い、「細胞核 1 か所」と「細胞核 1 か所+細胞質 2 か所」の局所照射を行い、DNA 二本鎖切断部位に集積するリン酸化ヒストン H2AX (γ -H2AX)と 53BP1 の蓄積を観察した。その結果、2 Gy 以下の線量において、細胞核のみを照射した場合に比べて細胞核と細胞質を照射した細胞では、 γ -H2AX の蓄積がより明瞭になる既報論文¹⁾の結果の再現性を確認した。また、53BP1 の局在変化と細胞周期分布を観察可能な Focicle プローブ³⁾を CI-huFIB に導入し、安定発現するクローンを単離した。

2. 細胞内照射部位に応じた ATM シグナリングの解明

高エネルギー加速器研究機構・放射光実験施設の放射光X線マイクロビーム細胞照射装置を用い、ヒト正常線維芽細胞 WI-38 への細胞核のみ照射と細胞全体照射を行った。蛍光抗体染色により、細胞周期制御に関わる p21 タンパク質の発現が、照射後に一度消失した後に再度発現する時間変化を示す結果の検証を進めた。

結言

本研究では、引き続き、ATM シグナリングの時間変化のメカニズム解明を進めることに加え、新たに ATM の酸化による細胞質から細胞核内への移行を抑制する天然化合物の探索に取り組む。

参考文献

- 1) M. Maeda *et al.*, *Sci. Rep.*, 11, 13113 (2021)
- 2) M. Tomita *et al.*, *Biology*, 12, 734 (2023)
- 3) K. Otsuka, M. Tomita, *Sci. Rep.*, 8, 17309 (2018)

*1(一財)電力中央研究所・サステナブルシステム研究本部・生物・環境化学研究部門、*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、MEXT KAKENHI 23K11434 の助成を受けた。

本研究は、高エネルギー加速器研究機構・放射光共同利用実験課題 2023G045 における研究成果を含む。

本研究の一部は、(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。

2.1.1.5

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
Alessandro NASTI^{*1}、関晃裕^{*2}、里村康輔^{*2}、Tuyen Thuy Bich HO^{*1}、酒井佳夫^{*2}、小川憲彦^{*3}、稲垣慎吾^{*2}、
宮澤正樹^{*3}、野村浩樹^{*2}、久米恭^{*4}、前田宗利^{*4}、玉村裕保^{*5}、佐々木誠^{*5}、山下太郎^{*2,3}、山本和高^{*6}、
金子周一^{*1, *2, *3}

Alessandro NASTI, Akihiro SEKI, Kosuke SATOMURA, Tuyen Thuy Bich HO, Yoshio SAKAI, Norihiko
OGAWA, Shingo INAGAKI, Masaki MIYAZAWA, Hiroki NOMURA, Kyo KUME, Munetoshi MAEDA,
Hiroyasu TAMAMURA, Makoto SASAKI, Taro YAMASHITA, Kazutaka YAMAMOTO and Shuichi KANEKO

Abstract

Pancreatic ductular adenocarcinoma (PDAC) is the most serious malignancy in the digestive system due to the difficulty in the early detection for radical treatment and also very poor prognosis by chemotherapy. Within this context, we conducted proton irradiation treatment on PDAC murine models at WERC, and investigated the immune response of the hosts to proton irradiation combined with immunotherapy.

要約

膵癌は切除可能となる早期発見が困難な上に、薬物療法による予後は不良であることから、重篤な消化器癌とされる。本研究では、膵癌の予後改善のため、陽子線を用いた膵癌に対する新たな治療法開発を目的とし、マウス膵癌モデルにおける陽子線照射に対する治療効果と免疫応答を検討した。

緒言

膵癌は切除可能となる早期発見が困難な上に、化学療法による全生存期間中央値が10ヶ月程度にとどまる予後不良な疾患である¹⁾。また多くの癌種で有効とされる免疫チェックポイント阻害薬(ICI)も良好な成績が得られていない。こうした背景から、切除不能進行膵癌に対する新規治療の開発が重要である。本邦では2022年に局所進行切除不能膵癌に対する陽子線照射治療が保険適応となったが、膵癌に対する併用療法の治療効果やその機序は解明されていない。本研究は、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に向けた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

我々はまず、*in vitro*において、マウス膵臓癌細胞株: PAN02 (National Cancer Institute) および mT3-2D (Cold Spring Harbor Laboratory) に対する陽子線照射の影響をコロニー形成アッセイおよびマイクロアレイ法を用いて解析した。陽子線照射は、両細胞株のコロニー形成能を線量依存的に低下させた。遺伝子発現解析の結果、両細胞株において、陽子線照射は TNF シグナル伝達、p53 シグナル伝達、サイトカイン相互作用に関わる遺伝子群の亢進と、DNA 複製、細胞周期、DNA 修復に関わる遺伝子群の減弱を認めた。

つづいて、*in vivo*において PAN02 または mT3-2D を右脚と背部に移植した2部位皮下膵癌マウスモデルを作成した。同モデルに対し、抗 PD-L1 抗体の腹腔内投与と併用して脚の腫瘍に 200MeV 陽子線 8 Gy を照射した。陽子線照射と抗 PD-L1 抗体の併用は、無治療群と比し両細胞株モデルにおいて陽子線照射部の腫瘍増大を抑制し($p < 0.01$)、mT3-2D モデルでは非照射部の腫瘍増大を抑制した($p < 0.05$)²⁾。陽子線照射部および非照射部腫瘍の腫瘍内炎症細胞を免疫組織化学染色およびフローサイトメトリー(FCM)にて解析したところ、CD8+T 細胞、CD11c+樹状細胞(DC)、CD86+M1 マクロファージ(MP)の細胞数が増加し、Gr-1+細胞とCD206+M2 MP は減少した。CD4+T 細胞や F4/80+細胞に差は認めなかった。mT3-2D モデルの非照射部腫瘍内における DC 細胞数は、無治療群における腫瘍内 DC 細胞数および PAN02 モデルにおける非照射部腫瘍内 DC 細胞数と比較し、増加していた。

詳細を検討するため、2部位皮下膵癌マウスモデルから得られた脾臓細胞(SPC)を FCM により分析した。CD45+CD3+SPC における CD4+T細胞数の割合は、PAN02 モデルと mT3-2D モデルで違いを認めなかったが、陽子線照射と抗 PD-L1 抗体の併用では、mT3-2D モデルでのみ SPC 内の Tbet+細胞が増加した。mT3-2D モ

^{*1} 金沢大学医薬保健学総合研究科(情報医学開発講座)、^{*2} 金沢大学大学院先進予防医学研究科、^{*3} 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)、^{*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} 福井県立病院・陽子線がん治療センター、^{*6} 福井県立病院陽子線治療研究所
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との共同研究、金沢大学と福井県との共同研究として実施した。

デルにおける CD8+細胞は、PAN02 モデルと比較してインターフェロン γ やグランザイム B の発現亢進を認めた。CD45+CD11c+細胞は両モデルで頻度に変化は認めなかったが、mT3-2D モデルでのみ活性化 DC 細胞が増加しており、アブスコパル効果のメカニズムへの関与が示唆された。

考察

In vitro の検討から陽子線照射が細胞死のみならず、免疫応答を惹起する可能性が示唆された。また、*in vivo* の検討から抗 PD-L1 抗体と組み合わせた陽子線照射は、照射部位における腫瘍増殖を抑制する可能性が示唆され、この腫瘍において CD86+を示す炎症性 MP である M1 MP、CD11c+細胞および CD8+を示す細胞障害性 T リンパ球などの細胞数の増加を伴っていた。mT3-2D モデルにおいて、抗 PD-L1 抗体と組み合わせた陽子線照射後に非照射部位である背部腫瘍に対する腫瘍増大の抑制効果が観察された。このマウスにおける背部の腫瘍では、腫瘍増大の抑制効果を示さなかった PAN02 モデルの背部腫瘍と比較し、CD11c+細胞数が有意に増加しており、CD11c+細胞の浸潤がこの腫瘍増大の抑制効果における一因である可能性が示唆された。宿主の免疫反応を反映する SPC の分析では、Th1 細胞と活性化 DC によって媒介される抗腫瘍免疫も強調され、CD8+T 細胞の活性が増強された。

結語

本研究は陽子線照射が、直接的な細胞傷害に加えて種々の炎症細胞を介した免疫応答を惹起することによりアブスコパル効果を含む抗腫瘍効果を増強する可能性を示した。今後、膵癌に対し、陽子線照射が抗腫瘍効果を増強する機序について、更なる詳細な検討を行う。

参考文献

- 1) がんプラス、「膵臓がんのステージ分類と検査 治療戦略とは」、
<https://cancer.qlife.jp/pancreas/article4180.html>
- 2) A. Nasti *et al.*, Elucidation of immune response in murine models of pancreatic cancer receiving combination therapy of proton beam irradiation and anti-PD-L1 antibody. 第 51 回日本免疫学会学術集会, 熊本 (2022; ポスター).

2.1.2. 粒子線照射技術の高度化研究

2.1.2.1

粒子線治療におけるアブスコパル効果イメージングに関する基礎的検討
Fundamental Study on Abscopal Effect Imaging in Particle Radiotherapy

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

4T1 cells, the breast cancer of mouse, were transplanted into the left shoulder and right thigh of the model mice. Irradiation on the left shoulder region with X-rays, protons, and carbon beams suppressed the increase in cancer volume in the very right thigh, which was not irradiated with protons. This suggests that proton beam therapy may be able to induce an abscopal effect.

要約

マウス乳がん由来細胞である 4T1 細胞を正常マウスの左肩と右大腿部に移植したモデルマウスに、左肩部位にのみ X 線、陽子線、炭素線を照射した結果、陽子線照射で照射していない右大腿部のがん体積の増大も抑制された。このことにより、陽子線治療によりアブスコパル効果が誘導できる可能性が示された。

緒言

ここ数年放射線治療領域ではアブスコパル効果が注目を集めている。アブスコパル効果とは、放射線治療において放射線照射領域外の病変が縮小するという希な現象のことである。がん免疫の研究の進展に伴い、このアブスコパル効果に対する免疫細胞の関与が注目を集めている。具体的には、放射線照射によって障害を受けた細胞から放出されたがん細胞由来の物質を樹状細胞が認識し、細胞障害性 T 細胞を誘導することで引き起こされていると考えられている。しかし、どのような条件で免疫系を効率よく動員できるかがまだ特定できていない。粒子線治療においてアブスコパル効果を制御することができるようになれば、将来的には原発巣への粒子線照射により転移部位のがん細胞を治療できる可能性が高くなり、新しい粒子線治療の開発へとつながる。そのためには、アブスコパル効果をイメージングするための技術が必要になってくる。本研究では、粒子線照射後にアブスコパル効果がおきる条件を免疫細胞の活性化を測定することにより検討する。加えてその免疫細胞の活性化状態をイメージング可能であるのか、さらにはアブスコパル効果を含めた治療効果の早期予後予測をイメージング可能であるのかを検討することを目的とする。

方法

正常マウスの左肩と右大腿部にマウス乳がん由来細胞である 4T1 細胞を皮下移植した。マウスの左肩部位にのみ陽子線、炭素線を 5 又は 10 Gy 単回照射し、照射日を 0 日目として 9 日目までの左肩と右大腿部のがん体積を経日的に測定した。

結果・考察

照射 9 日目のがんの体積を放射線未照射のコントロール群と比較したところ、照射側(左肩)は全てにおいて、有意にがんの増大抑制が起きていることがわかった。また、非照射側(右大腿部)においても陽子線 10 Gy 照射群において、統計学的有意にがんの増大抑制が起きていることが示された。陽子線照射群の放射線非照射側のがんが有意に増大抑制された原因として免疫系の関与すなわちアブスコパル効果が考えられ、陽子線治療はアブスコパル効果を効率的に誘導できる可能性が示された。

結言

陽子線、炭素線を照射し、照射後のがん体積変化を経日的に追跡することで放射線によるがんの治療効果、ならびにアブスコパル効果を引き出すことができるかを検討し、陽子線で免疫チェックポイントの使用をせずにアブスコパル効果を誘導することができる可能性を示した。

*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、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと福井大学が(公財)若狭湾エネルギー研究センターの公募型共同研究として採択されて実施したものである。

2.1.2.2

放射線被ばく事故に対応した DNA 損傷解析による被ばく線量評価法の実用化
Study on the Development of Novel Dosimetry Based on DNA Damage Analysis

Preparing for the Case of Radiation Exposure Situation

松尾陽一郎*1、泉佳伸*2、清水喜久雄*2、久米恭*3

Youichirou MATUO, Yoshinobu IZUMI, Kikuo SHIMIZU and Kyo KUME

Abstract

In order to establish a novel dosimetry based on DNA damage analysis using PCR, it is necessary to clarify the relationship between DNA strand breaks that occur in living cells and the yield of DNA breaks in the aqueous solution containing DNA observed by PCR. The yield of DNA double-strand breaks (DSB) in Chinese hamster CHO-K1 cells irradiated with proton beams was evaluated using γ H2AX fluorescent immunostaining. This result shows that the dose-dependent behavior of DSB in living cells is similar to that of DNA damage in the aqueous solution containing DNA observed by PCR.

要約

PCRを用いたDNA損傷解析による被ばく線量評価法の実用化のためには、細胞中に生じたDNA鎖切断と、PCRによって評価されたDNA切断量の関係を明らかにする必要がある。陽子線を照射したチャイニーズハムスターCHO-K1細胞でのDNA二本鎖切断(DSB)の発生頻度について、 γ H2AX蛍光免疫染色法を用いて評価した。この結果は、昨年度にPCRによって得られたDNA損傷量と吸収線量の関係と類似した傾向であった。

緒言

PCRによるDNA合成の効率がサンプルの鋳型DNAの量に比例することに着目し、増幅したDNA量から未損傷の鋳型DNA量(PCRの活性を持つ未損傷DNA量)を評価する手法を開発している。DNAを含む水溶液系においてPCRで得られるDNA損傷挙動が細胞中でのDNA鎖切断を反映しているかどうかを確認しておく必要がある。令和5年度は、陽子線を照射したチャイニーズハムスターCHO-K1細胞でのDNA二本鎖切断(DSB)の発生頻度について、 γ H2AX蛍光免疫染色法を用いて評価した。

研究成果

CHO-K1(チャイニーズハムスター卵巣単上皮細胞) 2×10^4 cellをフラスコに封入し、若狭湾エネルギー研究センターにて200 MeVの陽子線(LET:0.45 keV/ μ m)を照射した。吸収線量は非照射コントロール群をあわせ0~3 Gyとした。蛍光免疫染色にはDNA Damage Detection Kit- γ H2AX-Green(同仁化学研究所)を用いた。DSB部位に集積した γ H2AXに一次抗体を添加し、その後に染色溶液を及び二次抗体を添加し、その後、蛍光顕微鏡(カールツァイス)により細胞核あたりの γ H2AXのfoci数を評価した。

CHO細胞での陽子線照射による γ H2AX foci数の結果を図1に示す。吸収線量の増加とともに細胞核あたりのfoci数、すなわちDSBが増加した。一方、3 Gy以上の照射では、DSBは飽和していく傾向がみられた。令和4年度に実施したPCRによる結果でも、一定の吸収線量以上ではDNA損傷量の飽和傾向が確認された。

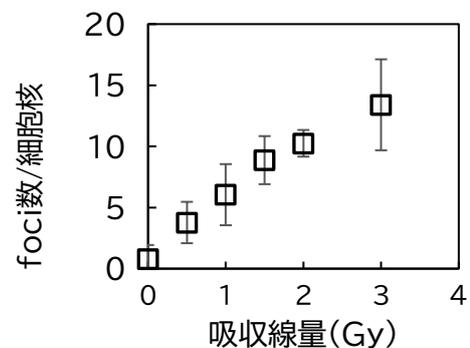


図1 陽子線をCHO-K1細胞に照射した場合の細胞核あたりの γ H2AX foci数

結言

陽子線を照射したCHO-K1細胞でのDNA二本鎖切断の発生頻度は、吸収線量の増加とともに上昇した。この傾向は、PCRによって得られたDNA損傷量と吸収線量の関係と類似しており、妥当であると考えられる。

*1 福井大学工学系部門原子力安全工学講座、*2 福井大学附属国際原子力工学研究所、*3 (公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究室。本研究は、MEXT KAKENHI 21H01861の助成を受けた。

2.2. 育種分野

2.2.1. 植物・菌類のイオンビーム育種研究

2.2.1.1

イオンビーム育種のためのニホンスイセン増殖法

Propagation Method of *Narcissus tazetta* var. *chinensis* for Ion Beam Breeding高城啓一*¹

Keiichi TAKAGI

Abstract

Propagation method of *Narcissus tazetta* var. *chinensis* for ion beam breeding was established.

要約

イオンビーム育種適用のためのニホンスイセン増殖方法を確立した。

緒言

ニホンスイセン(*Narcissus tazetta* L. var. *chinensis* M.Roem)は、福井県の県花であり、越前海岸で広く栽培されている県の特産品である。ニホンスイセンは、3 倍体であるため種子が形成されず、分球による栄養体繁殖によって増殖してきたと考えられている。したがって、品種が非常に乏しく、花型や草姿、開花時期等が変化した品種が強く求められている。

交配による品種開発が困難な場合、植物体にイオンビームなどの変異原を作用させ、栄養体繁殖時に突然変異を誘発することで品種を開発する方法が考えられる。我々は、イオンビーム照射時に DNA 修復系阻害剤を作用させることで、イオンビームによる変異誘発効果を促進する手法を開発しており、その方法の実証例の一つとして、ニホンスイセンを材料としたいと考えている。

ニホンスイセンをイオンビーム育種の対象とするためには、3 つの問題点がある。問題の 1 点目は、増殖方法である。ニホンスイセンは、球根の分球により増殖するが、1 個の球根からは 1 年に数個の小球しか分球しない。イオンビーム育種により有用変異体の選抜を行うためには数百規模の変異体を展開する必要があるため、通常に分球を用いた方法では、出発材料として多くの球根が必要となる。問題の 2 点目は照射材料調製である。重イオンビームは水中飛程が短く、若狭湾エネルギー研究センターで炭素ビームを照射するためには、材料の厚さを 2 mm 以内に抑える必要がある。しかし、球根はこの制限よりもはるかに大きく、炭素ビームの照射材料とすることができない。問題の 3 点目は、生育期間である。スイセンは種子繁殖が可能であったとしても、播種から開花に至るまで 3-5 年程度の育成期間を必要とする。分球したニホンスイセンからの開花の場合でも小球が形成され始めてから開花に至るまで 3 年以上が必要である。

これらの問題点の内、増殖方法、および照射材料調製の問題を解決するため、球根の組織培養を用いた増殖を試行し、1 球の球根から 40 球程度の小球根を得る方法を確立した。

実験材料と方法

実験材料

実験材料には、JA 福井県から入手したニホンスイセン(*Narcissus tazetta* L. var. *chinensis* M.Roem)球根を用いた。

球根の滅菌

球根は、外皮を取り除き、市販の殺菌石鹼を用いて、表面を良く洗浄した後、70% エタノールに 5 分間浸漬し、続いて 2% PPM 溶液 (Plant Preservative Mixture, ナカライテスク)に 4 時間、振盪浸漬した。浸漬を終了した球根は 2% スクロース、0.3% ゲルライト(Gelrite、富士フィルム和光純薬)、0.1%PPM を添加した 1/2 Murashige-Skoog 培地に置床した。置床した球根は、1 日後に取り出して再び 1% PPM 溶液で 2 時間振盪浸漬したのち、再置床した。この操作を 3~4 回繰り返した球根を滅菌球根とした。

*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
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。

球根・根盤の培養

球根、あるいは根盤は、2% スクロース、0.3% ゲルライト(Gelrite、富士フィルム和光純薬)、0.1% PPM を含む 1/2 Murashige-Skoog 培地を用いて、グロースチャンパー(MLR350-HT、サンヨー)中で 25°C、あるいは 15°C の温度、16 時間照明、8 時間暗黒の培養条件で 7 日程度培養してコンタミネーションが無いことを確認した後、PPM を含まない培地に移植し培養を継続した。

結果と考察

ニホンスイセンは通常一つの球根から数個の小球根しか分球しない。このような低増殖効率を解決する園芸手法として、ツインスケールという方法が知られている。この方法は、球根を縦方向に放射状分割し、個別の球根片を栽培することで、個々の球根片からの分球を誘導する方法である。スイセンの鱗片は葉に相当し、球根基部(根盤)の 2 枚の鱗片が接続する部分は葉腋にあたる。植物の葉腋は、シュートを形成するポテンシャルがあるが、なんらかの方法で、シュートの形成が抑制されている。スイセンにおいても、鱗片間の根盤組織は小球を分化させるポテンシャルがあるが抑制されており、ツインスケール法では球根を分割することによってこの抑制が解消され、各球根片で分球が誘導されたと考えられる。

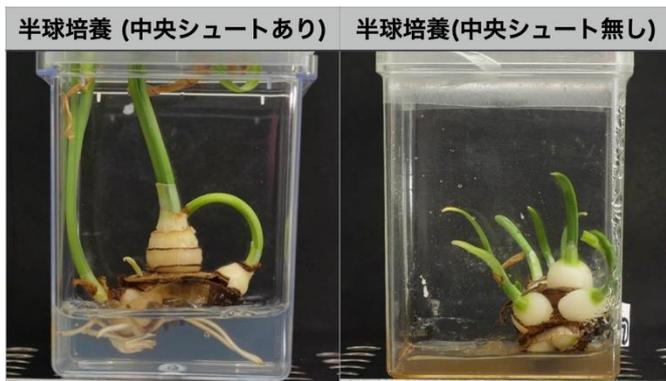


図1 半球培養での小球形成(培養 10 ヶ月目)

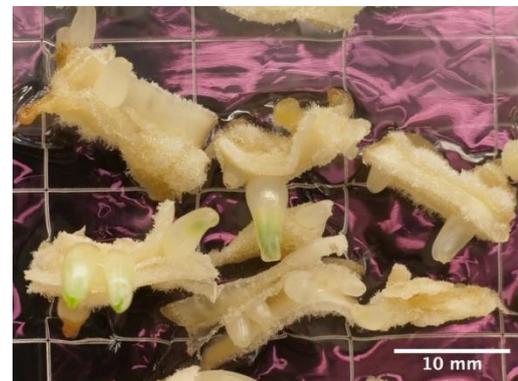


図2 根盤鱗片接続境界から分化した小球 (培養 30 日目)

そこで、まず通常の植物の頂芽にあたる球根中央のシュートが分球抑制の主要因となっているのではないかと考え、滅菌した球根を水平方向に切断して半球にしたもの、および、半球にした後、中央部のシュートを除いたものを作製し、それぞれを培養してみた。その結果中央部のシュートを除かない半球では 2 個の分球が見られたのに対し、中央のシュートを除いた半球では 10 個の分球が見られた。この結果から、中央のシュートが分球抑制の主要因となっていることが推察された。また、中央のシュートから切り離した上で、鱗片を細分すればより多くの小球が得られることが予想された。

次に、半球根を縦に 4 分割した後、外側から 2 枚ずつ鱗片を切り離し、根盤の鱗片接続部から 1~2 mm の高さでトリミングして、ほぼ根盤接続部のみの状態にした培養片を培養した。鱗片接続部の状態を継続観察すると、25°C の培養条件では培養 10-14 日で接続部にドーム状の隆起が見られ始め、30 日程度で小球根へ生長することがわかった。15°C 培養と、25°C 培養において各培養片で形成される小球の数をカウントすると、球根の外側に由来する培養片ほど小球の形成数が多く、1/4 球根当たり 10 個前後、1 個の球根に換算すると 40 球前後の小球が得られることがわかった。

以上の結果から、分割した根盤境界部を培養することにより 1 個の球根から 40 個体前後の小球を誘導することが可能なことがわかった。また、この培養片は、小球が分化すると見られる根盤境界部組織が培養片の上部から 2 mm 以内の位置にあり、炭素ビーム照射の対象とすることが可能であると考えられた。

表1 根盤鱗片接続部培養片から形成された小球数

鱗片位置	培養温度(°C)	
	15	25
1-2	0.8 ± 0.4	0.7 ± 0.5
3-4	0.8 ± 0.6	1.3 ± 0.8
5-6	1.3 ± 1.0	1.1 ± 0.7
7-8	1.8 ± 1.6	1.6 ± 0.9
9-10	3.9 ± 2.9	4.2 ± 2.0
11-12	2.4 ± 2.6	3.6 ± 1.3
合計	9.8 ± 3.9	10.9 ± 4.8

鱗片位置は、最内側を 1 として表した。

結言

ニホンスイセンをイオンビーム育種の対象とする場合の問題点である、増殖方法と照射材料調製に関し、一個のニホンスイセン球根からイオンビーム育種の対象となりうる培養片を作製し、40 球前後の小球を得る方法を確立した。

今後は、残された課題である生育期間短縮方法を検討するとともに、確立した手法を用いて、DNA 修復系阻害剤とイオンビーム照射による突然変異誘発促進効果の検証に向けて研究を進める。

2.2.1.2

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(1)

—高LETイオンビームによる変異誘発の多様性の実証—

Development of New Plant Breeding Technique Using Heavy Ion Induced Chromosomal Rearrangement (1)

– Demonstration of Diverse Mutation Inductions by High-LET Ion Beam Irradiation –

畑下昌範^{*1}、高城啓一^{*1}、阿部知子^{*2}

Masanori HATASHITA, Keiichi TAKAGI and Tomoko ABE

Abstract

Ion beam irradiation has been one of useful techniques for breeding of higher plants. As ion beams with high linear energy transfer (LET) value cause large DNA damage in only a few small area, novel mutants without detrimental characteristics have been efficiently obtained. In this study, the degrader at upstream position of the sample has been used to increase LET of carbon beam in targets.

要約

イオンビーム照射が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、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。本研究では、若狭湾エネルギー研究センターの炭素イオンビームに対しデグレーダーを用いることで、より高いLETの炭素イオンビームを試料に照射することを検討した。

緒言

イオンビーム照射による品種改良技術は、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。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解析の結果から、アルゴンなどの高LETの重イオンビーム照射が今までにな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のシンクロtronから得られる炭素イオンビームに対しデグレーダーを用い、ビームエネルギーを下げることでより高いLETの炭素イオンビームを試料に照射することを検討した。

結果の概要

イオンビームは、同じイオン種においても試料に打ち込む時のビームのエネルギーを変えることで、LETを変化させることができる。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、従来の炭素イオンビームの照射法では、試料に対しおよそ450MeVの炭素イオンビームが照射される。このときのLETはおよそ57keV/μmと計算される。我々は、炭素イオンビームのLETをより高くするために、照射室内の作業だけで可能な方法として、照射試料の上流にデグレーダーを挿入し、試料位置での炭素イオンビームのエネルギーを下げることを検討してきた。この方法をとることで、試料ごとに通常の照射とLETを高めた照射との使い分けをデグレーダーの出し入れのみで容易に行うことができる。LET150 keV/μmの炭素イオンビームの線量測定においては、炭素イオンビームの水中飛程が1.5mm以下の領域での照射になるため、指頭型線量計ではビームが届かないことも考慮して、平行平板型線量計を用いて測定を行ってきた。この場合、試料の照射前に複数の線量計を用いて線量測定をすることになり、試料への照射の開始時間が遅くなるという課題があった。しかしながら、指頭型線量計と平行平板型線量計での線量計測値の相関をみたところ、アクリル板デグレーダーが3.5mmまでは相関関係があり、指頭型線量計でも計測可能であることが明らかになった。3.5mmのアクリル板を挿入する時は、シロイヌナズナ種子のような直径0.5mm程度の厚みをもった試料を照射する時の条件であり、それ以上の厚みをもった試料に対してはより薄いアクリル板を挿入することになるため、今後の線量測定は、指頭型線量計による測定のみで対応可能である。

結言

今後は、この照射法を共同研究などにも適用していくことで、若狭湾エネルギー研究センターの加速器の生物照射利用を普及していく予定である。

^{*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}(国研)理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・イオン育種研究開発室

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

2.2.1.3

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(2)

—主要穀物育種におけるイオンビーム照射技術の利用—

Development of New Plant Breeding Technique Using Heavy Ion Induced Chromosomal Rearrangement (2)

— Application of Ion Beam Irradiation Technique to Staple Grain Breeding —

畑下昌範^{*1}、高城啓一^{*1}、三浦孝太郎^{*2}

Masanori HATASHITA, Keiichi TAKAGI and Kotaro MIURA

Abstract

Recent studies have shown that probabilities of deletions, insertions and base substitutions in ion induced mutations depend on linear energy transfer (LET) and heavy ion beam irradiation with high LET value induces large deletions and chromosomal rearrangements. In this study, many mutants of rice (Nihonbare) were obtained from seeds irradiated with high LET carbon beams. DNA preparations for whole genome sequencing and identification of mutation sites were tried out to clarify mutation patterns in this case.

要約

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線エネルギー付与(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。本研究においては、イネ日本晴種子への高 LET 炭素イオンビーム照射により、多数の変異体を作成してきた。今回、変異様式の解明を行うために、全ゲノム解析に供試する DNA サンプルの調製と変異体の変異箇所の同定を行った。

緒言

イオンビームは、同じイオン種においても試料に打ち込む時のエネルギーを変えることで、LET を変化させることができる。照射試料の上流にデグレーダーを挿入し、試料位置での炭素イオンビームのエネルギーを下げることによって得られた高い LET の炭素イオンビームにおいては、今までにない高い変異率を示し、新しい照射法として利用することができる。本研究では、このような照射法で獲得されたイネ日本晴変異体の変異様式を明らかにするために必要となる全ゲノム解析用の DNA サンプルの調製と変異箇所の同定を行った。

結果の概要

LET 150 keV/μm の炭素イオンビームをイネ日本晴種子に照射してその後代の育成より 21 系統の多収性の変異体を獲得した。これらの変異体を系統ごとに播種後成長した植物体を用い、1系統当たり10個体をランダムに選び、各個体から葉を 10 mg ずつ採取し、合計 100 mg となるようにした。ゲノム DNA の抽出には市販のキットを用い、そのプロトコールに従って実施した。抽出した DNA は超微量分光光度計を用いて、濃度測定を行った。調製した全ゲノム DNA は次世代シーケンサを用いて、リシーケンスした。得られた配列データをイネ日本晴野生株のリファレンスゲノムにマップした。カバレッジ深度は平均 20~30 であった。変異リードが 25~75% の場合はヘテロ接合型変異、75~100% の場合はホモ接合型変異とした。コントロールを含む全ての株でリファレンスゲノムと配列が異なる領域はバックグラウンド変異として解析から除いた。偽陽性を減らすため、変異候補は Integrative Genomics Viewer プログラムで視覚的にも確認した。変異箇所の同定作業は塩基置換や小規模の挿入/欠失などを中心に進めており、大規模な逆位や染色体レベルでの転座の同定は現在進行中であるが、今まで同定作業を行った 3 系統については、変異は系統あたり数十箇所程度で生じているとみられる。また、各染色体における変異検出頻度に明確な規則性は認められず、変異が起こりやすいホットスポットの存在は特に確認されていない。変異の約 8 割程度は遺伝子の上下流領域、約 1 割程度がエクソン領域に生じ、それ以外の領域での変異が約 1 割であると見積もられた。

結言

次世代シーケンサを用いた解析により、イオンビーム育種でしばしば用いられる炭素イオンビームがモデル植物イネ日本晴の全ゲノムに誘発する突然変異の特徴について、部分的ではあるが明らかにされた。今後は、獲得した変異体の変異箇所の同定の継続と変異様式の解明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}福井県立大学・生物資源学部・創造農学科
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県からの受託研究として、福井県立大学と共同で実施したものである。

2.2.1.4

酒米新品種「山田錦 FW1 号」の栽培・醸造試験および「山田錦 FW2 号」の育成
Cultivation and Brewing Test of the New Sake Rice Variety "Yamadanishiki FW1" and Development of
"Yamadanishiki FW2"

三浦孝太郎*1、久保田直邦*2、高城啓一*3

Kotaro MIURA Naokuni KUBOTA, and Keiichi TAKAGI

Abstract

"Yamadanishiki", an elite variety of sake brewing rice, is difficult to cultivate in Fukui Prefecture due to its low resistance to lodging and late heading. "Yamadanishiki FW1" and "Yamadanishiki FW2", which are easy to grow in Fukui Prefecture, have been bred so far. "Yamadanishiki FW1" has already been applied for variety registration, and cultivation and brewing trials were conducted by growers in 2023. The data on the traits required for variety registration have been extracted for "Yamadanishiki FW2", and are reported here.

要約

酒米のトップブランド品種「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。これまでに、福井県での栽培が容易な「山田錦 FW1 号」と「山田錦 FW2 号」を育成した。「山田錦 FW1 号」はすでに品種登録申請を行っており、令和5年度は生産者による栽培試験及び醸造試験を行った。また、「山田錦 FW2号」については、品種登録に必要な形質データを抽出したので報告する。

緒言

現在日本酒製造においては、最高級ブランド品種である「山田錦」が重宝されているが、生産量の約8割を兵庫県産が占めており価格が高騰している。そのため、福井県内の酒造メーカーでは、高価な県外産「山田錦」を仕入れざるを得ない状況にある。福井県内生産者に委託して契約栽培を行うケースもあるが、「山田錦」は草丈が高くなりやすく、茎がもろい性質から倒伏しやすく、脱粒性という実った粒が穂からバラバラと脱落する性質があり生産が難しい品種である。その上、晩生（収穫日が遅い）という特徴から秋に寒くなりやすい福井以北の地域では生産がより困難となる。そのため、酒造メーカー及び生産者から福井県内での栽培に適した“新山田錦”の開発が求められている。

これまでに、上記の山田錦の生産困難さを改善した変異体を利用し、「5日早生、わずかに矮性、脱粒しない」の特性を併せ持つ“新山田錦”候補系統「山田錦 FW1 号」の品種登録申請を行った（出願番号：36235）。また、山田錦 FW1 号よりもさらに6日早生のFW2号も育成した。本研究では、①この山田錦 FW1 号の栽培特性を評価し、その栽培方法を決定する。②実需者による醸造試験を行うことで醸造適性を評価し、栽培方法を確立する。また、③山田錦 FW2 号の品種登録出願を目指し、栽培特性、生産性の評価を行った。

材料と方法

植物材料

本実験では、令和3年に福井県立大学あわらキャンパス実験圃場で採種した種子を用いて研究を行った。

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、福井県立大学あわらキャンパス育苗温室にて1ヶ月間育苗したサンプルを、令和2年5月15日に福井県立大学あわらキャンパス内の実験圃場に定植した。各品種をA区、B区の2区制で栽培し、各区で200個体を栽培した。

形質調査

農林水産省品種登録ホームページに公開されている稲種審査基準に基づいて評価を行った。公開されている87項目の形質うち、66項目について形質調査を実施した。

*1福井県立大学・生物資源学部・創造農学科、*2久保田酒造(資)、*3(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室
本研究は、福井県立大学、久保田酒造(資)、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが、(公財)若狭湾エネルギー研究センター公募型共同研究事業として実施したものである。

実需者による栽培試験と醸造試験

4月下旬に育苗培土に播種し、3週間育苗温室内で生育させ、6月4日に久保田酒造の40aの水田（福井県坂井市丸岡町山久保）に移植した。10月中旬にコンバインによる刈り取りを行い、乾燥機にて玄米の水分量が15%になるように乾燥させた。玄米を55%まで精米し、醸造試験に供試した。

醸造試験は以下の工程で実施した。

12月17日添麴引込、12月18日添麴盛、12月19日添麴出麴、12月20日仲麴・留麴引込、12月21日仲麴・留麴盛、添仕込み、12月22日仲麴・留麴出麴、12月23日仲仕込み、12月24日留仕込み、1月14日上槽

醸造した酒は3月3日の酒蔵開放イベントにてコップ販売を行い、購入者を対象にアンケート調査を行った。

結果と考察

山田錦FW1号の栽培特性および生産性の評価

山田錦FW1号（山脱58×山早11）の栽培調査を行った結果、山田錦FW1号の出穂日は8月22日で山田錦よりも6日早生であった（表1、図1）。また、草丈の高さ、稈長も山田錦よりも短くなり（表1）、期待した特性を発現した。脱粒性の調査でも、山田錦よりも著しく脱粒数が少なく、難脱粒の性質を示した（表1）。1000粒重では若干小さく、玄米の幅や厚さも同様に若干小さくなっていた（表1）。玄米のサイズが小さくなるのは酒米の特性としては不良であるため、これが再現されるのか次年度以降も慎重に調査を行う必要がある。整粒率、心白発現率、10a当り収量では、平均値では有意差が見られないが、若干減少傾向が見られるためこれも慎重に継続して調査を行う必要がある（表1）。



図1 山田錦FW1号の出穂日の様子(令和6年8月22日撮影)

実需者による山田錦FW1号の醸造試験

令和6年度の栽培試験の結果、山田錦が4.5町の水田で16,710kgの収量であったのに対し、山田錦FW1号は4.4反の水田で1,800kgの収量であった。10a当りの収量に換算すると、山田錦が375.08kg/10a、山田錦FW1号は413.22kg/10aとなり、山田錦FW1号の収量が10%程度多く良好な結果であった。アンケート結果では、85.4%が好きと回答しており、良い日本酒ができていると判断出来た（図2）。また、感想として、飲みやすい、甘口でおいしいなどの回答が得られ、山田錦らしい味わいが得られていると判断出来た。

山田錦FW2号の栽培特性および生産性の評価

山田錦FW2号の品種登録に必要な2作期以上の形質データのうち1作期目を基準品種と共に調査し、表2にまとめた。山田錦FW2号の出穂日は期待通り山田錦FW1号よりも5日早く、草丈・稈長も山田錦FW1号よりも低く、脱粒性や精玄米1000粒重も他の酒米品種と同程度になっており、山田錦特有の問題である脱粒性が改善し、酒米としての粒大は維持している。心白発現率や精玄米収量も他の酒米と比較して遜色ない結果となった（表2）。

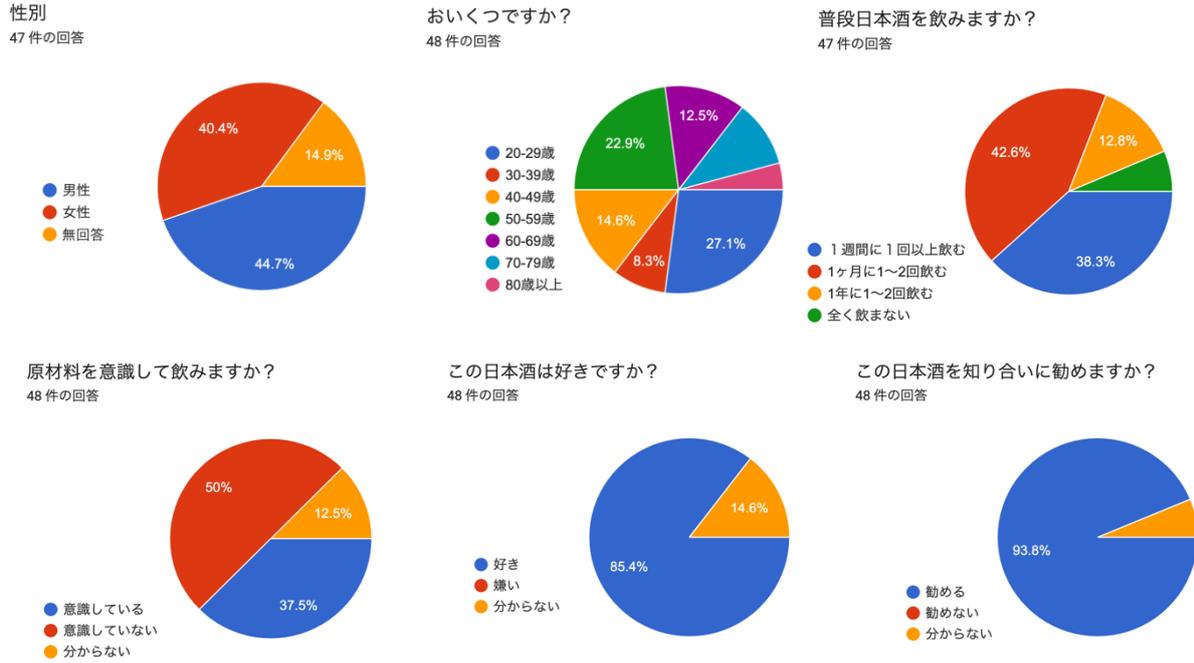


図2 試験販売を行った日本酒のアンケート結果

結言

2023年の栽培試験では、山田錦FW1号は出穂日、稈長、脱粒性について山田錦との明確な違い見られた。また、山田錦FW2号の調査では山田錦FW1号よりもさらに出穂が5日早く、草丈・稈長も山田錦FW1号よりも低く、脱粒性や精玄米1000粒重も他の酒米品種と同程度と良好な結果が得られており、品種登録のためのデータ抽出も実施できた。山田錦FW1号については、今後の生産拡大のために情報発信をする必要があり、山田錦FW2号については次年度の作付けで品種登録に必要なデータを抽出し、登録申請ができるよう研究を継続する必要がある。

表1 山田錦と山田錦FW1号の形質の比較

	山田錦	山田錦FW1号
出穂日	8月28日	8月22日
草丈 (cm)	111.03±1.29	107.82±1.44
稈長 (cm)	89.87±2.5	87.37±1.18
穂数 (cm)	14.63±1.27	16.31±0.8
脱粒性 (粒)	26.5±4.9	2±1.4
精玄米1000粒重 (g)	24.99±0.35	24.24±0.11
玄米の長さ (mm)	5.26±0.11	5.32±0.05
玄米の幅 (mm)	3.05±0.05	2.94±0.05
玄米の厚さ (mm)	2.09±0.03	2.05±0.04
整粒率 (%)	45.89±4.83	40.78±6.16
心白発現率 (%)	86.73±3.71	93.03±12.16
10a 当り収量 (kg)	483.48±40.75	469.85±28.19
10a 当り精玄収量 (kg)	381.78±30.18	362.33±26.55

表2 山田錦FW2号と基準品種の形質

	山田錦	山田錦FW1号	山田錦FW2号	さかほまれ	五百万五	アケボノ	美山錦	越淡麗	富の香	北陸193号	日本晴
出穂日(月日)	8月28日	8月22日	8月17日	8月23日	7月24日	8月30日	7月28日	8月7日	8月15日	8月13日	8月16日
草丈(cm)	111.03	107.82	103.84	98.36	98.62	97.11	102.46	104.24	99.39	106.25	88.27
稈長(cm)	89.87	87.37	85.07	79.64	76.11	76.32	80.13	81.64	78.79	79.13	69.54
穂長(cm)	19.69	19.12	18.76	18.72	22.51	20.79	22.33	22.60	20.60	27.12	18.73
穂数(本)	14.63	16.31	16.29	16.60	11.54	12.98	11.19	10.74	13.63	10.73	13.87
脱粒性(粒)	26.50	2.00	2.10	0.50	5.20	23.10	2.00	1.00	0.10	16.50	1.40
精玄米1000粒重(g)	24.99	24.24	24.23	24.46	24.89	23.97	23.54	24.64	25.06	21.18	20.98
玄米の長さ(mm)	5.26	5.32	5.28	5.24	5.17	5.12	5.07	5.13	5.33	5.64	5.00
玄米の幅(mm)	3.05	2.94	3.01	2.96	3.09	2.91	2.92	3.06	3.02	2.51	2.99
玄米の厚さ(mm)	2.09	2.05	2.11	2.11	2.13	2.12	2.08	2.10	2.13	1.89	2.11
整粒率(%)	45.89	40.78	20.44	46.44	27.11	30.56	27.00	39.67	35.67	29.89	20.33
心白発現率(%)	86.73	93.03	78.08	95.11	92.69	75.49	99.14	96.19	91.92	34.50	61.73
10a当り籾収量(kg)	483.48	469.85	465.14	486.67	500.52	533.32	569.56	570.23	460.11	830.90	539.24
10a当り精玄収量(kg)	381.78	362.33	357.37	376.97	382.96	422.91	434.94	430.00	350.44	471.21	409.07

2.2.1.5

イオンビーム突然変異処理による県産乳酸菌変異株の開発
ービーム照射に対する感受性の検討ー

Exploring the Effect of High-Energy Ion Beam on Lactic Acid Bacteria

日 弁隆雄*¹、岩端菜々美*¹、平田咲恵*¹、村田良洋*¹、畑下昌範*²、高城啓一*²

Takao HIBI, Nanami IWABATA, Sakie HIRATA, Yoshihiro MURATA, Masanori HATASHITA and Keiichi TAKAGI

Abstract

We have selected three mesophilic lactic acid bacteria strains used as cheese starters and have tried to enhance their organic acid production of these strains by ion beam breeding. Proton and carbon-ion beams were irradiated on the three selected strains, 1, 2, and 3, and the relationship between irradiation dose and survival rate was investigated. We will measure the organic acid production of the surviving strains, select beneficial strains, and examine the efficiency of the production of the useful mutant strains.

要約

チーズスターターとして選抜した中温性乳酸菌 3 株について、イオンビーム育種で有機酸産生能の向上を目指した。菌株 1、2、3 に対して陽子線および炭素線を照射し、照射線量と生存率の関係を調べた。今後、残存した菌株の有機酸生産量の測定を進め、有用株の選抜とその作出効率を検討する。

緒言

我々は、福井県産ソバから単離された乳酸菌 FHC3 株(*Lactiplantibacillus plantarum* FHC3 株)をはじめとする、中温性乳酸菌 3 株をチーズスターターとして選抜した。通性ヘテロ乳酸発酵¹⁾を行うこれらの菌株は、風味付与の点で優れていたが、乳酸産生の量が比較的少なく、生産できるチーズの種類や製法が限られ、繊細な品質管理も求められた。そこで、これらの中温性乳酸菌株について、中温条件下における有機酸産生能の向上を目指し、イオンビーム育種を行うことにした。

結果

乳酸菌株 1、2、3 の 3 種類について、陽子線および炭素線の照射線量と生存率の相関を図 1、図 2 に示した。菌株 1 は両者で同様の生存曲線を示すのに対し、菌株 2 では炭素線、菌株 3 では陽子線により高い感受性を示した。残存した菌株のコロニーから、試験的に 30 ずつ培養し、予備的に指示薬で pH をモニターしたところ、野生株に比べて pH 低下が認められた 1-2 株が得られた。

結言

乳酸菌株 1、2、3 の 3 種類について、陽子線および炭素線の照射線量と生存率との関係を明らかにした。今後、ハイスループット測定系を構築し、有機酸生産量を指標にした有用変異株の選抜を進めるとともに、変異率との相関についても検討する。

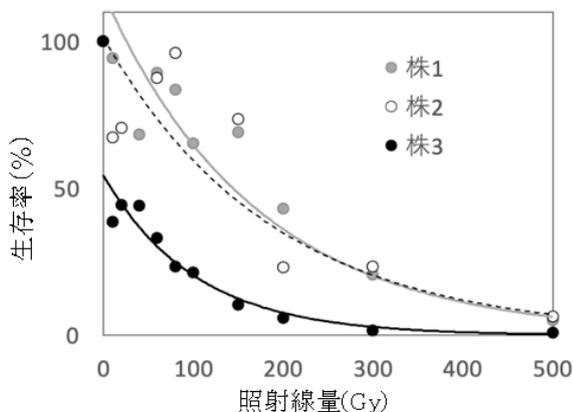


図 1 陽子線の照射線量と生存率

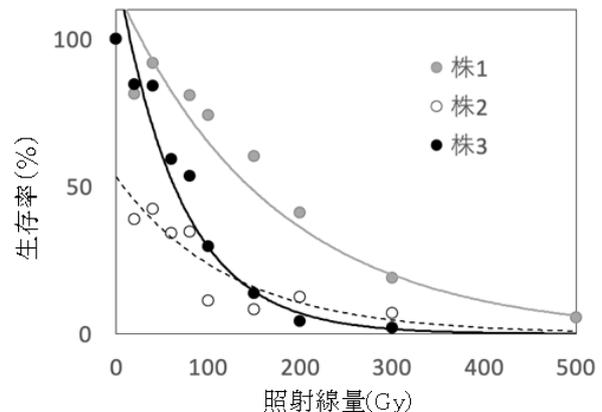


図 2 炭素線の照射線量と生存率

参考文献

1) T. Zaunmüller, et al: *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **72**, 421–429 (2006).

*¹福井県立大学・生物資源学部、*²(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室
本研究は、福井県立大学が(公財)若狭湾エネルギー研究センターと共同で実施したものである。

2.2.1.6

重イオンビーム処理による高温・乾燥耐性植物パールミレットの倍加半数体作成技術の開発
 Development of Doubled Haploids Production System through Heavy-ion Beam Irradiation of Pearl Millet
 石井孝佳*1、畑下昌範*2、高城啓一*2、吉田健太郎*3
 Takayoshi ISHII, Masanori HATASHITA, Keiichi TAKAGI and Kentaro YOSHIDA

パールミレットは、アフリカ西部の乾燥地帯を起源としており、世界で最も優れた高温耐性と乾燥耐性を持つ作物の一種である。アフリカ、インドを中心に栽培され、乾燥地帯で重要な人の食糧および、家畜の飼料として使われている。近年、トウモロコシで開発されている倍加半数体作成技術の基盤となる遺伝子 MATRILINEAL (MTL) が単離された。この遺伝子を破壊した変異体を交雑親に用いることで、花粉側の遺伝子情報によらず、雌の半数体を創り出し、染色体を倍加する事によって、すべての遺伝子座がホモの系統を1年で創り出すことが可能である。本研究では、重イオンビーム処理によりパールミレットの変異体集団を整備し、MTL 遺伝子が破壊されたパールミレット変異体系統の選抜を主な目的とする。R3 年度で、若狭湾エネルギー研究センターにおいて、減速体の厚さを調整することにより2種類の異なる LET(50,150keV/μm)の炭素イオンビームを調整し、パールミレットの種子に対しそれぞれのビームを複数の線量区で照射した。炭素イオンビームの LET で変異体を獲得するのに適切と思われる線量を決定した(50keV/μm で 80Gy、150keV/μm で 20Gy)。R4年度は乾燥地研究センターの圃場 30a を用いて大規模に 1000 個体を超える M1、M0 個体を栽培した。R5 年度はパールミレットを室内で簡便に育てる方法を確認した。また、パールミレットのMTL遺伝子を葉と花粉からの RNA-seq データを用いて同定することに成功した。

*1 鳥取大学乾燥地研究センター、*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、*3 京都大学大学院農学研究科
 本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが鳥取大学および京都大学と共同で実施したものである。

2.2.1.7

カーボンビーム照射によるパンコムギ品種 ‘Fielder’ 変異体の作出
 Development of Bread Wheat Cultivar ‘Fielder’ Mutants by Carbon-Ion Beam Irradiation
 吉田健太郎*1、畑下昌範*2、高城啓一*2
 Kentaro YOSHIDA, Masanori HATASHITA and Keiichi TAKAGI

パンコムギ品種 ‘Fielder’ は、アグロバクテリウム法による形質転換が容易な品種である。ゲノム編集により有用形質を発現したパンコムギも開発されている。2022 年度、普通系コムギ品種 ‘Chinese Spring’ に、カーボンビーム照射を行い、LET 50 keV/μm で 80 Gy の処理区で実験室および圃場環境で、対照区と比較し、有意に草丈が減少することが示された。また、M₂ 種子での発芽率は、100%であった。このデータに基づき、パンコムギ品種 ‘Fielder’ 650 粒について 50 粒ずつ LET 50 keV/μm で 80 Gy で処理した。M₁ 種子 503 粒について京都大学北白川のガラス温室で、1個体1鉢で栽培した。スマリンコンパル(住友林業緑化)と赤玉土を 1:1 に混合し、苦土石灰を少量加えた培土を用いた。M₁ 種子の発芽率は、100%であった。草丈は、野生型個体と比較し、低く成長が遅かった。アルビノ個体は見られなかったが、双子が1個体観察された。フローサイトメリーで双子個体の DNA 量を調べたところ、双子ともに野生型個体と同じく、六倍体であることが判明した。次に、M₁ 世代 503 個体の稔性について調査したところ、半不稔を示した個体が 44 個体、不稔個体が 6 個体見られた。穂によって稔性の違いが見られた個体が 15 個体あり、キメラであることが示唆されたが、環境による影響等に起因することなども考えられ、M₂ 世代で確認する必要がある。また、半不稔個体については、M₂ 世代で展開し、不稔個体と稔性個体の分離比を調べる予定である。

*1 京都大学大学院農学研究科、*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。

2.2.1.8

重イオンビームを用いた高温に強い水稻育種素材の育成

Breeding of Rice Cultivars Tolerant to High Temperature at Flowering

畑下昌範^{*1}、高城啓一^{*1}、茶谷弦輝^{*2}、小林麻子^{*2}、佐藤信二^{*2}

Masanori HATASHITA, Keiichi TAKAGI, Genki CHAYA, Asako KOBAYASHI and Shinji SATO

本研究では、イオンビーム育種により、29℃を超えるような高温登熟に対して、玄米外観品質および胚乳澱粉の頑健性を示す育種素材を育成することを目的としている。そのために、炭素線を照射した水稻種子から得られた突然変異体集団を高温条件で栽培し、澱粉生合成関連遺伝子の発現が増加している個体、および原品種より乳白等の白未熟粒が少ない個体など、従来の交配育種では得られなかった高温耐性を有する個体を選抜することを計画している。本年度は、照射第1世代の育成および照射第2世代の採種を実施した。県内において栽培されている水稻品種2種(品種 A、品種 B)の種子に対して、LET 150 keV/μm の炭素イオンビームを 30 Gy または 40 Gy 照射した(処理区あたり各品種約 1,000 粒)。このうち、品種 A については、30Gy の線量区で約 500 個体、40Gy の線量区で約 500 個体、および品種 B については、30Gy の線量区で約 500 個体、40Gy の線量区で約 500 個体、計約 2000 個体を圃場で栽培した。出穂期はいずれの照射条件においても原品種とほぼ同等であった。不稔や弱勢が散見されたが、30Gy の線量区よりも 40Gy の線量区の方が不稔の程度や弱勢の頻度はやや高かった。成熟期に各個体から 1 穂をサンプリングし、次年度用の種子として調製した。同時に、澱粉生合成関連遺伝子の遺伝子発現解析手法の構築を図った。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、^{*2}福井県農業試験場・品種開発研究部
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県農業試験場と共同で実施したものである。

2.2.1.9

シイタケ菌糸核 DNA 損傷マーカー応答の放射線種による違い

Differences in Shiitake Nuclear DNA Damage Marker Response between Radiation Species

高城啓一^{*1}、畑下昌範^{*1}、牛島秀爾^{*2}、寺島和寿^{*2}

Keiichi TAKAGI, Masanori HATASHITA, Syuji USHIJIMA and Kazuhisa TERASHIMA

我々は現在イオンビーム照射による突然変異誘導を用いて、カドミウムや放射性セシウムの子実体への蓄積が低減されたシイタケ品種の育種を試みている。適正線量の決定に際し、菌糸伸長に対するイオンビーム照射感受性を調べたところ、炭素ビームでは X 線や陽子ビームと比較してより低い線量で菌糸伸長が抑制されることがわかった。そこで、X 線、陽子ビーム、炭素ビーム照射後の DNA 損傷マーカー γ H2A 応答の違いを調べた。

照射 30 分後に核内に形成される γ H2A フォーカスの数に関して、X 線、陽子ビーム、炭素ビームの間に違いは見られなかった。この結果は、照射時に形成される DNA 二本鎖損傷に、放射線種間で違いが無いことを示唆している。照射 1 日後に核内の γ H2A シグナルが残存しているかどうかを調べたところ、同一線量の照射において X 線と陽子ビームでは、 γ H2A 陽性を示す核の割合は類似していたが、炭素ビームでは、X 線や陽子ビームよりも γ H2A 陽性を示す核の割合が高くなっていることがわかった。この結果は、炭素ビームが修復困難な損傷を引き起こしていることを示唆し、菌糸伸長抑制の放射線種による違いがこのような難修復性損傷形成頻度の違いによって引き起こされているのではないかと考えられた。

^{*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、^{*2}(一財)日本きのこセンター・菌蕈研究所
本研究は、生物系特定産業技術研究支援センター イノベーション創出強化研究推進事業の助成を受けた。

2.2.2. 生物資源のDNA情報・特性等の解析評価研究

2.2.2.1

福井県産生物資源の DNA マーカーの開発

Development of DNA Marker for a Signature Agricultural Product of Fukui Prefecture

田中良和*¹

Yoshikazu TANAKA

Abstract

AFLP analysis was carried out with the aim of creating a DNA marker for parthenocarpy to be used in breeding midi tomatoes. Several characteristic DNA fragments were obtained.

要約

福井県が開発中であるミディトマトの選抜時に用いる、単為結果性判別用 DNA マーカーの作成を目的として AFLP 解析を行い、特徴的な DNA 断片を複数得た。

緒言

ミディトマトは福井県が発祥の地であり、近年では県外への出荷量も増え、供給能力の強化が課題になっている。そのため、現在開発中のミディトマトでは栽培の安定化、省力化に結びつく形質の付加が望まれている。本研究では、受粉しなくても果実が正常に成熟する単為結果性という性質の有無を判別できる DNA マーカーの作成を目的として、AFLP (Amplified Fragment Length Polymorphism) 法による DNA 多型の検出を行った。

成果の概要

試料のトマトは、単為結果性を有する 2 株と非単為結果性の 2 株であり、いずれも福井県農業試験場から供与されたものを用いた。DNA は各試料の葉 100 mg から QIAGEN 社の DNeasy Plant mini kit を用いて抽出精製した¹⁾。AFLP 解析は、ABI 社の AFLP Plant Mapping kit のプロトコル²⁾を参考にした。PCR 反応は TOYOBO 社の KOD One Master Mix を使用し、ABI ProFlex PCR System を用いて行った。DNA 多型の検出には ThermoFisher 社の SeqStudio Genetic Analyzer を用いた。AFLP Plant Mapping kit のプロトコルに示されたトマト用の 64 種類のプライマーの組合せについて調べた結果、単為結果性を有するものに 4 個、単為結果性を有しないものに 8 個、合計 12 個の特異的な DNA 断片の増幅が認められ、両者の間に DNA 多型を検出する事ができた。(図1)。

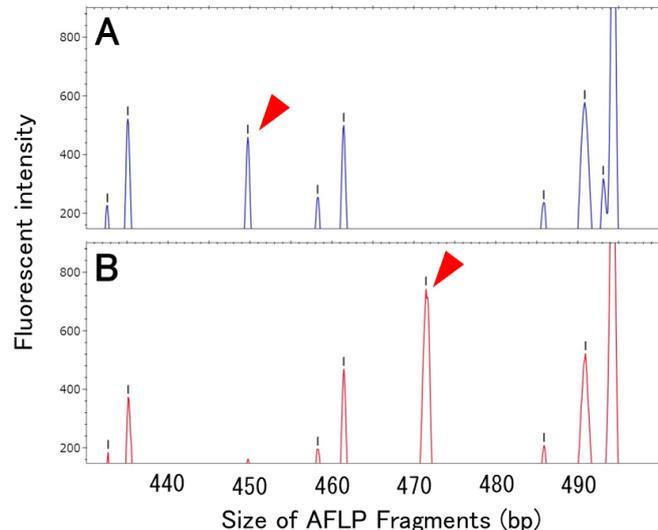


図1 AFLP 解析の一例

A は為結果性トマト、B は非単為結果性トマト。赤矢印で示した部分に DNA 多型が検出された。

結言

今年度に福井県農業試験場から供与されたトマト試料において、計 12 個の特異的な DNA 断片を検出した。SeqStudio Genetic Analyzer を用いた解析では、1 塩基の違いを検出する事が可能であり、これまで以上に詳細な DNA 多型の検出とそれに基づく DNA マーカーの作成が期待できる。今後はこれら特異的な DNA 断片の塩基配列を決定し、簡便に取り扱いが出来る STS (Sequence Tagged Site) 化マーカーの作成を行う予定である。

参考文献

- 1) Dellaporta, S. L. *et al.*, Plant Mol Biol Rep 1, 19-21 (1983)
- 2) Vos, P. *et al.*, Nucleic Acids Res. 23: 4407-4414 (1995)

*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。

2.2.2.2

根端から培養増殖させたニンニク球の2年目栽培状況

Growth Status of Garlic Bulbs Propagated from Root Tips by Tissue Culture in the Second Year of Cultivation

高城啓一*1 田中良和*1、小関大輔*2、伊藤夢子*2

Keiichi TAKAGI, Yoshikazu TANAKA, Daisuke OZEKI and Yumeko ITO

Abstract

Garlic bulbs propagated from root tips by tissue culture were grown in the field for two years and size of resulted bulbs were examined. Only 17% of them reached a size vendible as a seed bulb. Another year was required before they could be sold as seed bulbs or edible bulbs.

要約

組織培養により根端から増殖させたニンニクを圃場にて2年間栽培し、球根の生育状況を確認した。種球として販売可能な大きさに到達したものは全体の17%であり、種球、食用球として販売するためにはさらに1年の生育期間が必要である。

緒言

ニンニクは、長期栽培を繰り返すとウイルス罹患により生育量が減少するため、生産者は数年ごとにウイルスフリーの種球を購入して栽培を更新している。ウイルスフリー種球の供給源は限られており、安価なウイルスフリー種球の供給源が求められている。

種子による増殖が困難なニンニクは、品種開発が難しく、イオンビーム育種による品種開発対象となる可能性があるが、そのためには飛程の短い重イオンビームに適した育種材料作製手法を確立する必要がある。

これらの目的から、我々は無菌化したニンニクの根端から組織培養を用いて小球根を分化、増殖する方法を試み、すでに報告されている方法に改変を加えることで、効率的に小球を得る手順を確立した。

そこで、根端から増殖させた球根を順化させて圃場栽培し、2年間の栽培期間でどのくらいのサイズまで生長するかの確認を行った。その結果、2年間の栽培では、種球根として販売できるサイズまで生長した球根は17%であり、種球や食用球として販売するにはさらに1年以上の栽培が必要であると考えられた。しかし、栽培環境や気象状況が適していなかった可能性があり、適地栽培では2年間の栽培で十分な生長が得られることを示唆する結果が得られた。

実験材料と方法

実験材料

実験材料には、ニンニク(*Allium sativum* L.)のウイルスフリー種球をアサヒ農園研究圃場で増殖させたものを用いた。

根端からの子球増殖

無菌化したニンニク球根の根端を摘出し、Haqueらの方法に改変を加えた方法を用いて不定芽を誘導し、不定芽を分離して発根させ3~6ヶ月培養を継続して子球として育成した。

圃場栽培

愛知県一宮市の圃場にて、2021年11月17日に定植し、2022年7月21日に収穫した球根を、2022年11月14日に定植し、2023年6月26日に収穫した。収穫した球根は、乾燥させた後、重量を測定した。

2年目に関しては、対照として市販の青森六片種球を入手し、同一圃場で同一期間栽培した。また、1年目栽培の寒冷地でのパイロット栽培として、北海道栗山町の圃場で2022年11月11日に定植し、2023年6月29日に収穫した。

結果と考察

図1に1年目に収穫された球根、2年目に収穫された球根、および対照として市販種球を同一圃場で1年栽培し、収穫した球根の写真を示す。1年目と2年目を比較すると、明らかに球根は肥大しているが、市販種球から栽培し、収穫した球根と際立った違いが無いように見える。

*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株式会社アサヒ農園
本研究は、株式会社アサヒ農園との共同研究として実施した。



図1 収穫したニンニク

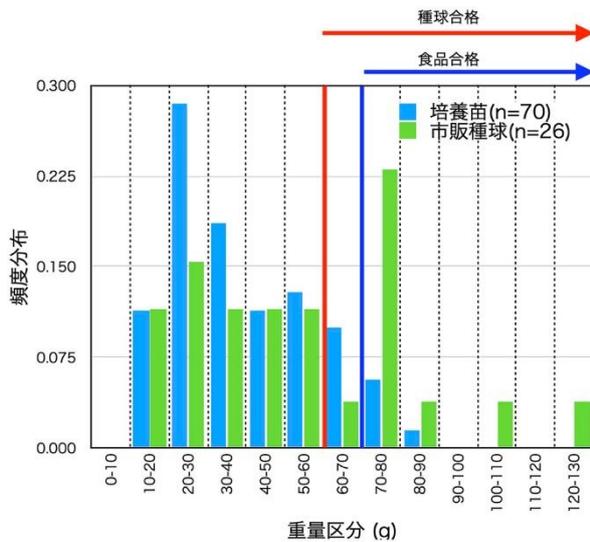


図2 収穫した球根(2年目)の重量分布

培養苗を寒冷地で栽培し、暖地栽培での1年目の結果と比較すると、暖地栽培(愛知県一宮市)で1年目の球根(図1左端)の平均直径が2.3 cm (n=46)であるのに対して、寒冷地(北海道栗山町)の1年目球根(図1右端)では、5.1 cm (n=10)と、直径比で2倍以上の生育が見られた。この結果から適地で栽培を行えば、2年間の栽培で出荷レベルに達した球根が多数得られる可能性が示唆された。

結言

根端から組織培養下で誘導した培養苗は、適地での栽培を行えば2年で出荷可能なレベルまで生育できる可能性が示唆された。

今回の結果は、ニンニクの苗生産や育種に活用できる可能性がある。また、この研究で得られた球根培養に関する知見は、他の球根作物のイオンビーム育種に活用する。

参考文献

1) Haque, M.S. et al., Plant Cell, Tissue, Organ Culture, 50, 83 (1997)

図2に、2年目に収穫された球根の重量による頻度分布を示す。横軸は10gごとの重量区分、縦軸は書く重量区分の頻度を示す。種球として市販するためには60g以上が、食用球として販売するためには70g以上が必要である。培養苗を栽培して得られた球根の内、種球合格レベルに達しているのは17%、食用球合格レベルは、7%であった。市販種球から得られた球根では、種球合格レベルは39%、食用球合格レベルは35%であった。これらの結果は、培養増殖により得られた培養苗は、2年の栽培期間では市販品として出荷可能な収量が十分でないことを示しており、さらに1年以上栽培を継続する必要があると考えられた。しかし、市販の種球を用いてもおよそ60%は販売レベルに達しておらず、栽培環境に問題がある可能性が考えられた。培養苗の元となった球根、対照として用いた市販種球ともに寒地性品種であり、暖地(愛知県)では、2022年から2023年の暖冬環境下では十分な生育が得られなかった可能性が高い。

2.2.2.3

食品の価値を高める指標としての抗酸化活性評価手法の開発

Development of Antioxidative Activity Evaluation Method as an Index to Added Value of Food

遠藤伸之*1

Nobuyuki ENDO

Abstract

In order to establish a simple and accurate method for evaluating the elimination of foods against reactive oxygen species (ROS) and free radicals, we have performed the research using an electron spin resonance (ESR) spectroscopy. 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 improved for food analysis.

要約

電子スピン共鳴(ESR)装置を用い、食品が有する活性酸素種やフリーラジカルに対する消去活性を、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。液体、固体、粉末、脂状、水溶液などのさまざまな状態である食品に対して、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について食品を試料とするために改良したスピントラッピング-ESR法で評価し、抗酸化活性を正しく評価する新しい手法を開発した。

緒言

食品の機能性の中でも抗酸化活性は、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おり、抗酸化活性の高い食品は付加価値が高まる例が多い。このため、抗酸化活性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、簡便かつ確実に評価する方法は少ない。

そこで、さまざまな食品に対して、抗酸化活性を正しく評価する新しい手法を開発してきた。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、抗酸化活性の評価を試行した。本研究は、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目的とする。

成果の概要

これまでの研究で、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、試料を流通して導入できるよう改良した電子スピン共鳴装置(ESR:図1)を用い、食品が有する活性酸素種やフリーラジカルに対する消去活性を、簡便で精度よく評価する手法の確立を目指し、6種の生体内で実際に生成・作用している活性酸素種(ヒドロキシルラジカル・OH、スーパーオキシドアニオンラジカル $\cdot\text{O}_2^-$ 、アルキルラジカル $\cdot\text{R}$ 、アルコキシルラジカル $\text{RO}\cdot$ 、ヒドロペルオキシドラジカル $\text{ROO}\cdot$ 、一重項酸素 $^1\text{O}_2$)との反応性について、簡便な手技で再現性が高い評価結果が得られるよう、試薬の組み合わせ、濃度、装置条件などの測定法や試料処理について改良したスピントラッピング-ESR法で評価し、抗酸化活性を正しく評価する手法の確立に成功した。本研究の成果を活用するため、国立研究開発法人国際農林水産業研究センター、福井県農業試験場、愛知県農業総合試験場が共同で取り組んでいる有色米の付加価値化の研究に参画した。エネ研においては、国内外の有色米の抗酸化活性について本手法を用いて評価している。将来的には付加価値のある県内産の赤米・黒米のブランド化を目指す。



図1 電子スピン共鳴装置

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うえ、様々な食品に適用可能な手法である。引き続き確立できた手法について利用・応用可能な食品や農産物の生産者との取り組みを行い成果の活用を目指すとともに本手法の公知を図る。

*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国立研究開発法人国際農林水産業研究センター、福井県農業試験場、愛知県農業総合試験場と共同研究として実施した内容を含む。

2.2.2.4

血清試料中のフリーラジカル消去活性測定による神経発達症判定技術の確立
Establishment of a Technique for Diagnosing Neurodevelopmental Disorders
by Measuring Free Radical Scavenging Activity

遠藤伸之^{*1}、松崎秀夫^{*2}

Nobuyuki ENDO and Hideo MATSUZAKI

自閉スペクトラム症(ASD)をはじめとする神経発達症においては早期介入の重要性が叫ばれている。一方、行動学的指標による評価のみで神経発達症の乳幼児期診断を正確に行うことは専門家でも難しく、早期介入に導くためにも症状の顕在化に先立つ生物学的診断指標の開発が切望されている。しかしながら、神経発達症の早期診断に資する、世界でコンセンサスのある生物学的指標はいまだにない。松崎らは ASD 児童の末梢血を用いて、電子スピン共鳴法によりフリーラジカル消去活性を定量することで、ASD 児童と健常児間で末梢血中フリーラジカルの変化を捉えることに成功し、有力な ASD 児の生物学的指標候補として同定した¹⁾。しかしながらこの測定手法は、末梢血でのフリーラジカル消去活性測定の評価を目的とした方法としては最適化されていない。

本研究では電子スピン共鳴装置を用いた短寿命化学種に対する消去能測定手法(MULTIS法)を改良し、末梢血中フリーラジカル消去活性の全容を解明することで、神経発達症の早期診断法を確立するために必要な測定条件を確立する。フリーラジカルの発生量や検体試料の量などを変化させた種々の条件下での測定を行い、消去活性の効果が最も大きくなる測定手法の確立と評価精度の向上を目指した。

参考文献 1) A. Hirayama et al., SCIENTIFIC REPORTS 10(1) ,(2020)

^{*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}福井大学・子どものこころの発達研究センター
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井大学と共同で実施したものである。

2.2.2.5

維持血液透析患者の抗酸化能に関する研究

Study on Antioxidant Activity in Serum Samples from Hemodialysis Patients

遠藤伸之^{*1}、大和田滋^{*2}

Nobuyuki ENDO and Shigeru OOWADA

腎不全患者の主要死因として血管合併症があり、腎不全では動脈硬化が促進されている。酸化ストレスはこれらの病態形成に関与し、その臨床指標の確立は合併症予防や死亡率を減少させる意味で重要であることが知られている。これまでに様々な方法によって酸化ストレスを臨床指標として用いる検討がなされている。著者らはこれまでに、血清の抗酸化能について電子スピン共鳴装置を用いて評価し、健常人と透析患者では有為に差が有ることを見いだしている。本研究では、更に種々の活性種について消去活性を評価し、健常人と血液透析患者の透析前後から得られる血清試料の抗酸化能を精度よく評価する手法を確立することを目的とする。

健常人および透析患者の血清を試料とし、各種フリーラジカルの他、一重項酸素や過酸化水素などの活性酸素種についての消去活性に関して、著者が開発した電子スピン共鳴装置を用いた測定手法である MULTIS法¹⁾によってデータを蓄積する。また、他の手法による分析も実施してその差を検討することで、従来の手法に対する本法の優位性を明確にする。

本研究の結果により臨床指標が可能になれば、腎疾病の予防や治療効果の改善に大きく寄与する。また抗酸化能を有する未知の物質が同定できれば、新しい治療薬の開発が期待される。

参考文献 1) S. Oowada et al., J. Clin. Biochem. Nutr., 51(2), 117-121 (2012)

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、^{*2}医療法人あさお会・あさおクリニック
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが医療法人あさお会と共同で実施したものである。

2.2.3. 植物工場関連品種改良

2.2.3.1

光応答制御による高付加価値レタスの栽培方法の確立

Establishment of High Value-Added Lettuce Cultivation Method by Controlling Light Response

畑下昌範^{*1}、町田龍亮^{*2}、岡義仁^{*2}

Masanori HATASHITA, Ryusuke MACHIDA and Yoshihito OKA

Abstract

The method of red pigment accumulation in red leaf lettuce is required at plant factory with artificial light, because growing red leaf lettuce under the white LED is insufficient in anthocyanin accumulation. In this study, the expression of anthocyanin biosynthesis genes in red leaf lettuce were investigated using LEDs with specific wavelengths.

要約

人工光利用型植物工場において栽培されたレッドリーフレタスには赤色色素の蓄積が見られない。赤色色素の蓄積を促す栽培手法を確立するため、本研究では、特定波長の LED 照射によるレッドリーフレタスの赤色色素合成系遺伝子の遺伝子発現を調査した。

緒言

現在、人工光利用型植物工場で栽培される主な品目としては、リーフレタス、サラダ菜など緑色の葉物野菜が挙げられる。市場調査から赤色になるサニーレタス等、彩りのある品種のニーズが高いことが明らかになっているが、未だに十分に赤くなるレタスの栽培手法は確立されていない。本研究では、特定波長の LED 照射によるレッドリーフレタスの赤色色素合成系遺伝子の遺伝子発現を調査した。

結果の概要

本研究では、大手種苗会社により市販されているレッドリーフレタスの種子を用いた。育苗は、22-25℃の条件下で、小型の水耕式白色 LED 栽培装置を用いて行った。光合成有効光量子束密度(PPFD)は $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ に設定した。明期 16 時間、暗期 8 時間で 2 週間栽培した後、特定波長の LED を照射開始した。照射開始から 0, 12, 24, 48 時間後に本葉を個体ごとに採取して、液体窒素で凍結させた。RNA 抽出、cDNA 合成は市販のキットを用いて行った。赤色レタスの赤色色素は複数の酵素による生化学反応により生合成される。このうち、色素合成のキーとなる 5 つの酵素を発現解析の対象とした。リアルタイム PCR 用に遺伝子特異的プライマーを設計、作製した。合成した cDNA、遺伝子特異的プライマー、市販のリアルタイム PCR 専用試薬を使用し、リアルタイム PCR 装置で、PCR 反応、蛍光検出、定量解析を行った。定量解析の結果は、ハウスキーピング遺伝子である Actin 遺伝子(ACT)の発現量でノーマライズした。

5 つの酵素のうちの 1 つの酵素に関して、その遺伝子発現レベルの経時変化を示した(図1)。特定波長の LED 照射により、遺伝子発現レベルは 24 時間後に照射前の約 4 倍に達した。しかし、48 時間後には最高レベルの半分になることが明らかになった。

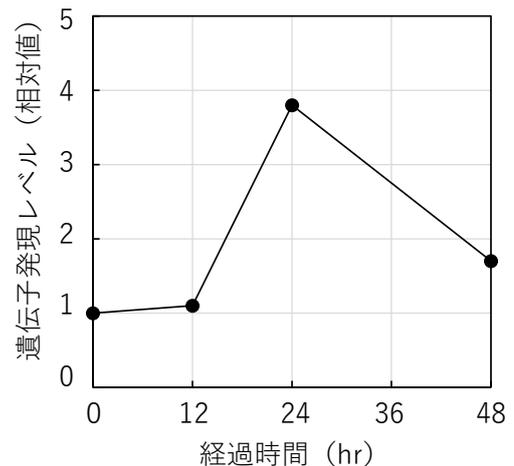


図1 特定波長の LED を照射した後の赤色色素合成関連遺伝子の遺伝子発現量の経時変化

結言

レッドリーフレタスの赤色色素合成系遺伝子の遺伝子発現レベルは特定波長の LED の照射により、顕著に上昇するが、そのレベルは長時間維持しないことが明らかになった。今後は、特定波長の LED の照射時間を詳細に検討することにより、植物工場内におけるレッドリーフレタスの栽培手法の確立を目指す。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、^{*2}株式会社フレデリッシュ
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと株式会社フレデリッシュが共同研究として実施したものである。

2.2.3.2

きのこ抽出液を用いた野菜の生育促進効果

Plant-Growth Promoting Effect of Polysaccharides Extracted from the Mycelia of Medicinal Mushroom

畑下昌範*1

Masanori HATASHITA

Abstract

Polysaccharides are believed to be the major bioactive components in medicinal mushrooms. In the previous study, it was demonstrated that crude polysaccharide extracted from one of the medicinal mushrooms enhances immune response of murine macrophage cells. In this research, we extracted polysaccharides from the mycelia of the mushroom. It was examined whether the polysaccharides have growth-promoting effect on the vegetable.

要約

薬用きのこが生産する多糖類はそのきのこが示す主要な生理活性物質の一つであると考えられている。今回は、その薬用きのこの菌糸体から抽出した多糖類の野菜に対する生育促進効果について検討した。

緒言

今までの研究において、きのこ類由来の生理活性物質の探索とその利用を目的として、複数の希少な薬用きのこ類を取り上げ、それらの生産物質の中で、著明な生理活性を示す多糖類分画を見出した。この多糖類はマウスのマクロファージ細胞を活性化させることを明らかにした。昨年度は、この薬用きのこの菌糸体から抽出した多糖類の葉面散布により植物工場内で栽培されている野菜が濃度依存的に生育促進することを明らかにした。今回は、露地栽培の複数の野菜に対して、生育促進作用を示すのか否かについて検討した。同時に害虫忌避作用を示すのか否かについても併せて検討を行った。

結果の概要

薬用きのこの菌糸体からの多糖類の抽出は定法により行い、0.7%の濃度で母液を調製した。表1に示す9種の野菜を用いて、露地に定植後週に1回の頻度で、調製した抽出液の母液を1,000倍に希釈した溶液を作製し、葉の表面にスプレー状に噴霧した。収穫期において、株あたりの湿重量および乾燥重量を測定し、抽出液の希釈液を噴霧しなかった試験区をコントロールとして、重量を比較した(表1)。また、葉面の食害痕の状況から害虫忌避効果を確認した。9種の野菜に対する生育促進効果については、重量比20%以上の増加を示したものが3種類、重量比5%~20%の増加を示したものが3種類、重量に変化のなかったものが3種類といった結果になった。また、害虫忌避効果

も著しい効果を示すものが1種類、効果を示すものが4種類、効果が認められないものが4種類となった。

結言

ある種の薬用きのこの抽出物は、工場栽培のみならず露地栽培における野菜の生育促進効果も併せもっていた。しかし、その促進効果および害虫忌避効果の程度は野菜の種類によって異なっていることも明らかになった。

表1 各種野菜に対するきのこ抽出物の散布効果

供試野菜	生育促進効果	害虫忌避効果
サニーレタス	+	-
ルッコラ	+	-
スティックセニョール	-	+
ホウレンソウ	-	+
ブロッコリー	++	+
カリフラワー	+	-
小松菜	++	+
水菜	++	-
ハクサイ	-	++

生育促進効果 ++ : 重量20%以上増加 害虫忌避効果 ++ : 著しい効果あり

+ : 重量5%~20%増加 害虫忌避効果 + : 効果あり

- : 重量増加を認めず 害虫忌避効果 - : 効果を認めず

-- : 重量の減少を認める

*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

2.3 レーザー分野

2.3.1. レーザー技術を応用した除染技術、切断技術の開発

2.3.1.1

レーザー切断機材の開発及び切断性能評価

Development of Laser Cutting Equipment and Evaluation of Particles during Laser Cutting

山田知典*¹、山岸隆一郎*¹、古澤彰憲*¹

Tomonori YAMADA, Ryuichiro YAMAGISHI and Akinori FURUSAWA

Abstract

In the decommissioning of nuclear power plants, it is necessary to cut pipes in narrow place. For practical use, we have developed a laser cutting system which will be applied to the cutting of pipes just plumbed in the actual plants and evaluated its performance.

要約

原子力プラントの廃止措置における解体撤去工事では、狭隘な場所で配管等の切断を行う必要がある。実用化に向けて配管の1次切断を想定したレーザー切断機材を開発し、切断性能を評価した。

緒言

原子力プラントの廃止措置における解体撤去工事について、対象設備・配管は、機器レイアウトの関係上、狭いスペースに設置されていることが多い。この状況で配管の1次切断を想定した場合、切断機材には狭いところでも運用可能な小型・可搬式のものが必要とされる。本研究では、実用化を推進するために、フクイ建設技術フェア2023や北陸技術交流テクノフェア2023へ切断機材を出展することで、原子力関連会社をはじめ幅広い分野の方と意見交換を行い、その結果及び使用状況を踏まえてレーザー切断機材の改良を進めた。さらに、レーザー切断機材を300A配管(外径318.5mm、厚み10.3mm、材質SUS304)に取り付けて切断性能を評価した。

成果の概要

レーザー切断機材の改良では、レーザー切断機材を構成する照射ヘッド駆動機材について、モーター組付部の小型化、2分割したメインリングの固定方法の見直し、ギアの固定方法の見直し、制御盤の小型化、俵い機構のバネの強度向上、照射ヘッド固定部の微調整機能追加及びそれに伴う干渉対策、切断時に発生するスパッタ対策を実施し、各機能として問題が無いことを確認した。

図1に改良したレーザー切断機材を用いて300A配管を切断する様子を示す。300A配管を立てて設置し、その300A配管の周囲にレーザー切断機材を取付けてレーザー出力と切断速度の影響を評価した。切断試験ではWD(ヘッド先端から切断対象物までの距離)を10mmとし、同軸ノズルのみで切断を行った。レーザー出力4kWの場合には1.4m/minで切断可能であることが確認できた。



図1 改良したレーザー切断機材を用いて300A配管を切断する様子

結言

実用化を推進するために、意見交換の結果及び使用状況を踏まえてレーザー切断機材の改良を進め、取扱性を向上させた。また、300A配管にレーザー切断機材を取付けて切断したところ、レーザー出力4kWの場合に1.4m/minで切断可能であることが確認できた。

レーザー切断技術の実用化のためには、対象物を切断した際にどのような微粒子が発生するか把握し、その結果を基にフィルターシステム等を検討する必要があることから、今後はレーザー切断条件と発生する微粒子のサイズや形状への影響を評価する。

*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。

2.3.1.2

ゴムライニング剥離へのレーザーの適用可能性検証

Trial Work to Investigate the Applicability of Lasers to the Removal of Rubber Linings

古澤彰憲*1、山田知典*1

Akinori FURUSAWA and Tomonori YAMADA

Abstract

As part of applying laser decontamination technology to nuclear facilities, we investigated the feasibility of applying it to the existing maintenance and preservation process of removing rubber lining materials. We made test specimens with a base material of rolled steel for general structure SS400 lined with chloroprene rubber and natural hard rubber. We investigated the performance of removing the rubber lining using continuous wave lasers, pulsed lasers, and quasi-continuous wave lasers.

要約

レーザー除染技術の原子力施設への適用の一環として、既存の保守保全プロセスである、ゴムライニング剥離作業への適用可能性を検討した。一般構造用圧延鋼材 SS400 を母材としてクロロプレンゴム(CR)および天然硬質ゴム(NR)をライニングした試験体を作製し、連続発振(CW)レーザー、パルス(P)レーザーおよび疑似パルス(QCW)レーザーを用いてゴムライニングの剥離性能を調査した。

緒言

レーザー除染技術は対象物の表面材料のみをレーザーによって蒸発・剥離するため、2次廃棄物の発生量が少なく、原子力施設の廃止措置に有望な技術として、その実用化に向けた研究開発が広く行われている。一方で、照射対象物の表面に固着した剥離対象物を蒸発によって取り除くその原理に着目すれば、原子力発電所における既存の作業の合理化にも適用可能性がある。すなわち、定期的な交換が必要なゴムライニングの除去作業へのレーザー技術の適用である。令和4年度の成果から、CWレーザーを用いてゴムライニングの剥離を行う場合には、ゴムライニングの熔融・蒸発および固着物が多く発生することが分かっている。本研究では、CWレーザーに加えてPレーザーおよびQCWレーザーを用いることで、その適用可能性の検証を行った。

成果の概要

原子力施設で使用されているゴムライニングを模擬するために、鋼板(SS400)に、CRおよびNRの2種類のゴム材をライニングした試験体を作製し、Pレーザー、CWレーザーおよびQCWレーザーを照射し、その剥離性能を調査した。図1にレーザー照射中の様子を示す。Pレーザーを照射した場合は、母材であるSS400の損傷を抑制しながらゴム材の剥離が可能であった。また、剥離時にSS400表面にゴム材が固着した場合は、固着物に対し再度Pレーザーを照射することで除去が可能であった。QCWレーザーを照射した場合は、同出力のCWレーザーを照射した場合と比較してゴム材を深くまで剥離することができた。QCWレーザーは断続的にゴム材を熔融させることから、CWレーザーと比較して熔融物を効率的に排出できていると考えられる。ゴム材の種類を比較した場合には、Pレーザー、CWレーザーおよびQCWレーザーの種別に関わらず、CR材が剥離し易く、剥離後の固着物が少ないこと、また、臭気も軽度な傾向にあることが確認できた。

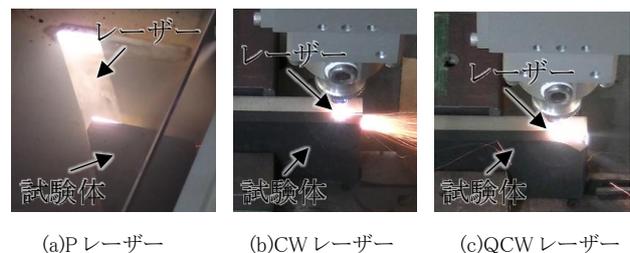


図1 レーザー照射中の様子

結言

Pレーザー、CWレーザーおよびQCWレーザーはゴムライニング材の剥離作業へ適用可能であることが確認できた。今後は、ゴムライニング剥離時に発生する微粒子を評価し、ゴムライニング剥離作業におけるレーザー除染技術の適用可能な範囲について検討を進める。

*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。

2.3.1.3

大型水槽でのレーザー切断時粉じん挙動及び拡散防止対策に係るデータ取得等作業
Data Acquisition Work on the Behavior of Dust Generated by Laser Cutting in a Large Water Tank
and Measures to Prevent its Diffusion

小井 衛^{*1}、前田 敏男^{*1}、山岸 隆一郎^{*1}、嶋津 正^{*1}、岩井 紘基^{*2}、手塚 将志^{*2}
Mamoru KOI, Toshio MAEDA, Ryuichiro YAMAGISHI, Tadashi SHIMAZU,
Hiroki IWAI and Masashi TEZUKA

Abstract

To investigate methods for collecting airborne dust generated during the dismantling of the reactor area of 'FUGEN' using laser cutting, we conducted laser cutting on test specimens simulating reactor structural materials in a large water tank. We acquired data on the behavior of the dust during this process and confirmed the effectiveness of HEPA filters in preventing dust diffusion.

要約

「ふげん」原子炉領域のレーザー切断工法による解体時に発生する気中移行粉じんの回収方法の検討のため、原子炉構造材を模した試験体を対象に大型水槽内でレーザー切断を実施し、この時の粉じん挙動に係るデータを取得するとともに、HEPA フィルタによる拡散防止対策効果の確認を行った。

緒言

「ふげん」では、原子炉本体の解体に工期短縮及び二次廃棄物量低減等の観点で優位なレーザー切断工法を適用する計画である。「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で放射化しており、解体時には放射性の粒子状物質(粉じん)やドロス等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安全評価上重要である。

成果の概要

日本原子力研究開発機構のふくいスマートデコミッション技術実証拠点(スマデコ)の廃止措置モックアップ試験フィールド水中技術実証試験エリアに設置された大型水槽(円筒型プール)内に原子炉構造材を模したステンレス鋼(SUS304)試験体を設置し、アシストガス流量及び切断速度をパラメータとして 30kW レーザ切断装置(出力 10kW)による水中切断試験を実施した(図1)。

水中レーザー切断後に回収したドロス、気中移行粉じん(図2)及び水中移行粉じんの重量を測定し、各々の移行量を評価した。また、切断中に発生した気中移行粉じんの粒径分布を ELPI+(電子式低圧インパクタ)で計測して評価するとともに、HEPA フィルタにより気中移行粉じんをバックグラウンド以下に除去できることを確認した。

結言

スマデコの大型水槽内で水中レーザー切断試験を実施し、回収した気中移行粉じん等の重量を測定するとともに、気中移行粉じんの粒径分布を測定し HEPA フィルタによる除去性能を確認した。今後、得られた成果は「ふげん」において原子炉領域解体の検討に活用される予定である。

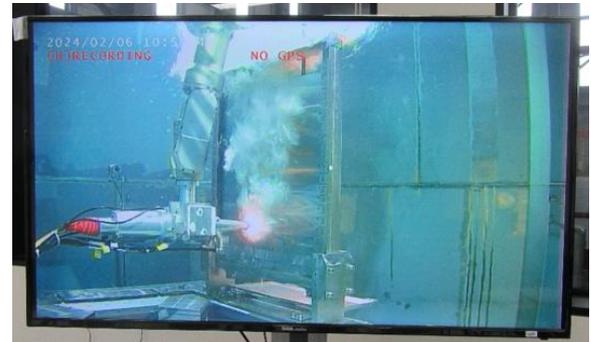


図1 大型水槽内での水中レーザー切断

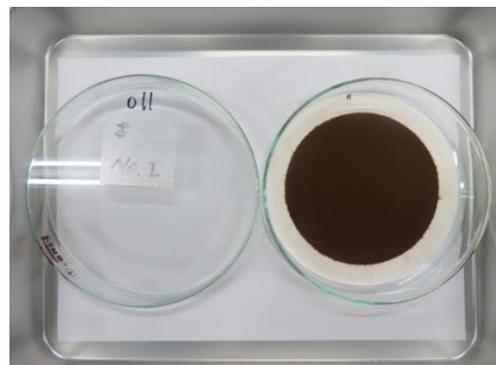


図2 回収した気中粉じん

^{*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}(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(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。
本研究におけるスマデコの利用は、(国研)日本原子力研究開発機構の施設供用制度を利用した。

2.3.1.4

粉じんの発生抑制および捕獲に重点をおいたレーザー溶断技術の検討作業
Study on Laser Cutting Technology Focusing on Suppressing Fine Particle Generation前田敏男^{*1}

Toshio MAEDA

Abstract

This study was conducted with the aim of suppressing fine particles diffused into air in underwater laser cutting. The results of the experiments revealed that fine particles generated during underwater laser cutting are seemed to be diffused into the atmosphere through the injection of large amounts of assist gas bubbles in water. Additionally, particle size distribution measurement data shows that the amount of fine particles, regardless of whether in water or air, is almost the same. In the case of underwater irradiation, fine waterdrops generated by the adiabatic expansion in the absorption are observed as fine particles, therefore, the net amount of the particles dispersed by underwater cutting is presumed to be less than that in air. Therefore, underwater cutting is likely to suppress fine particle diffusion into the circumstance.

要約

水中レーザー切断における気中移行粉じんの抑制を念頭に、気中あるいは水中でのレーザー切断時に発生する微細粒子の大気中への移行経路、発生量を調査した。その結果、レーザー切断時に発生する微細粒子は、大量に噴射されるアシストガス気泡に乗って大気中へ移行すると見られることが分かった。また、粒径分布測定データなどから、照射環境が水中か気中かに拘らず、発生する粉じん量は同程度ということが分かった。水中照射の場合は試験体起源でない粉じん(吸引時の断熱膨張によって発生する微小な水滴)を含むので、水中切断によって飛散する粉じんの正味量は、気中切断の場合より少ないと推測される。

緒言

切断(溶断)等により粒径が $\sim 1\mu\text{m}$ 程度の粉じんが大量に発生する。この粉じんを人が鼻腔や口から吸入した場合、肺の奥深くにある肺胞まで到達し、健康障害(神経機能障害、呼吸器系障害、がん)を引き起こす可能性がある。

開放タンク内での水中レーザー切断作業においても、これまでの切断試験の知見より、粉じんが水中に留まらず、大気中に飛散・拡散することが確認されている。微細粒子が放射性物質を含む場合は言うまでもなく、単なる微細粒子だったとしても、大気中に飛散すれば健康障害を引き起こす恐れがある。しかし、これらの微細粒子の飛散抑制や捕集に関する知見は、切断に関する知見と比べて少ない。そこで今回、気中あるいは水中でのレーザー切断時に発生する微細粒子の大気中への移行経路、発生量を調査した。

成果の概要

試験の結果、レーザー切断時に発生する粉じんは、大量に噴射されるアシストガス気泡に乗って大気中へ移行すると見られることが分かった。また、粒径分布測定データなどから、照射環境が水中か気中かに拘らず、発生する粉じん量は同程度ということが分かった。水中照射の場合は試験体起源でない粉じん(吸引時の断熱膨張によって発生する微小な水滴)を含むので、水中切断によって飛散する粉じんの正味量は、気中切断の場合より少ないと推測される。

結言

水中切断には一定の粉じん抑制効果があるものと思われるが、飛散を完全に抑えることは今のところ難しい。粉じんを完全に封じ込めるには、何か別の方策が必要である。

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

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

2.3.2. レーザー技術の産業利用

2.3.2.1

レーザー加工技術を駆使した金属付加製造物の機械的特性評価に関する作業

Work on Mechanical Property Evaluation of Metal Additive Manufacturing using Laser Processing Technology

山岸隆一郎^{*1}、前田敏男^{*1}、沖原伸一郎^{*2}、菖蒲敬久^{*3}

Ryuichiro YAMAGISHI, Toshio MAEDA, Shin-ichiro OKIHARA and Takahisa SHOBU

Abstract

To confirm the effect of peening by laser irradiation, we fabricated test pieces by metal additive manufacturing and evaluated the improvement of mechanical properties by tensile test.

要約

レーザー照射によるピーニングの効果を確認するために金属付加製造による試験体を作製し、引張試験により機械的特性改善効果の評価を行った。

緒言

金属付加製造は、一定面積内に敷き詰めた金属粉末層あるいはノズルから金属粉末を射出した空間のいずれかにレーザー照射し、急激に熔融と凝固もしくは焼結を行い、金属を積層しながら造形する加工法である。しかしながら、内部が均一な金属構造とはならず、粒子間の空隙や小孔が原因となり、機械的特性はバルク材には及ばない。また、熔融と凝固による膨張と凝縮という過程を伴うため、引張力の発生が避けられない。構造物の表面近傍の残留応力は破壊の起点となりうるため、航空機や自動車産業などでは、後処理として HIP 処理(熱間等方圧加圧)処理を行っているが、HIP 処理には高温高压で長時間処理を行う必要があるため、大規模な設備導入とその運用によるコストが課題となっている。そのため、HIP 処理を行う金属付加製造物は大型の機械部品のみが対象となり、比較的小サイズの機械部品における金属付加製造技術の実利用促進の大きな障害要因となっている。そこで、レーザー光によるピーニング処理に着目した。レーザーピーニングは、金属表面に極短時間のパルス照射が行われた際に、表面近傍に発生するプラズマが生み出す衝撃波により、金属表面の加工硬化や圧縮応力の付加を行う技術で、構造物表面近傍の機械的特性を改善することが期待できる。

成果の概要

レーザー照射によるピーニングの効果を確認するため、金属粉末に航空・宇宙分野で構造材として使用されるマルエージング鋼を選択し、金属付加製造による試験体を作製した。造形方式は、造形方向が幾何学的に均一な方向で行うレーザー焼結(SLS)方式を採用した。試験体は、積層条件をパラメータとし、それぞれの条件において、積層造形のままの照射対象面および、切削加工を行い整えた照射対象面をもつ2種類を用意した。

レーザー照射装置および条件については、波長 532 nm パルス幅 10 ns のナノ秒レーザーを用い、パルスエネルギー 280 mJ で、それぞれの試験体にレーザーピーニング処理を行った。処理後には、X 線残留応力計測装置を用い、積層後の切削整形加工の有無や、ピーニング処理の有無による表面残留応力の違いを測定した。

また、引張試験用試験片を作製し、ピーニング処理の有無による引張強度の評価も行った。処理前後の表面観察や X 線残留応力測定からは、ピーニング処理により表面から一定の深さ内で残留応力の変化が起こったことが示唆されるものの、積層条件や表面の切削加工による影響の方が照射効果よりも大きく表れているため、ピーニング効果の断定には至らないという結果が得られた。引張試験の場合も同様に、積層条件による影響の方が強く作用し、ピーニングの有無による引張強度の差は誤差の範囲に留まる結果となった。これは、ピーニングに用いたレーザーが比較的低出力であったため、圧縮応力の付加が極表面に限定され、高耐力・高硬度のマルエージング鋼の内部までは衝撃波が伝搬しなかったためであると考えられる。

結言

本研究では、金属付加製造物に対してレーザーピーニング処理を行った際の機械特性変化を評価した。一連の作業からは、比較的低出力のレーザーでも、ピーニング効果が得られるという示唆を得た。レーザーによる機械的特性改善の実用化に向け、大出力のレーザー照射に伴う形状変化が許容できないような比較的小サイズの機械部品等への本技術の適用拡大が期待される。

^{*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、^{*2}光産業創成大学院大学光産業創成研究科、^{*3}(国研)日本原子力研究開発機構原子力科学研究部門物質科学研究センター中性子解析研究ディビジョン

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。

2.4. 宇宙分野

2.4.1. 宇宙で利用される機器・材料の評価技術開発

2.4.1.1

宇宙産業用イオンビーム照射手法の確立 ～シングルイベント評価手法の標準化に向けた検討～

Development of Standard Methods for Single Event Evaluation

久米恭*1、水嶋慧*1、山東新子*1、羽鳥聡*2、沢崎浩史*3、荒井肇*3、中村博一*3、青柳賢英*4

Kyo KUME, Satoshi MIZUSHIMA, Shinko SANDO, Satoshi HATORI, Hiroshi SAWAZAKI, Hajime ARAI,
Hirokazu NAKAMURA and Yoshihide AOYANAGI

Abstract

Efforts are paid to an irradiation technique development in single event effect evaluations, mainly for three aspects; an improvement, a standard method, and a validation verification. As a result, a beam transport simulation in the single event effect evaluation was improved with an extension of the initial beam energy from 100 MeV to 200 MeV. Also a fundamental design was considered to adopt a vacuum chamber with an energy degradation system for the single event evaluation.

要約

宇宙放射線模擬環境提供技術の研究段階から実用段階への進化を目的に、イオンビーム照射手法の高度化、イオンビーム照射手法の標準化、照射手法の有効性確認に取り組んだ。シングルイベント評価試験におけるビーム輸送計算の改良として、計算の入力に用いるビーム加速エネルギーを 100 MeV から 200 MeV へ拡大した。またシングルイベント評価試験用にエネルギー減速機構を採用した真空容器導入を基礎検討した。

緒言

若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)ではこれまでに宇宙放射線耐性評価のためのイオンビーム照射試験研究の成果・ノウハウを蓄積している。今後の宇宙機開発における更なる高度な照射手法のニーズに対応するとともに、県内の宇宙産業関連企業へ提供しうる標準的な照射手法も構築していくため、イオンビーム照射手法の高度化、イオンビーム照射手法の標準化および照射手法の有効性確認に取り組んでいる。このうち本稿では、シングルイベント評価試験におけるイオンビーム照射手法の高度化について述べる。

方法

エネ研は、県内企業・大学と当法人の間で構築した共同研究体制¹⁾を継続し、この共同研究体制に基づき宇宙放射線耐性評価手法の高度化を実施している。

令和5年度は、シングルイベント試験で主に利用しているイオン加速器システムのビームライン(シンクロトロン利用の照射室4高エネルギー生物照射コース)における高エネルギー陽子ビームによるシングルイベント試験の高度化にかかる研究に取り組んだ。

まず計算シミュレーションの高度化として、これまでのニーズとして多い陽子 100 MeV とは別に、シンクロトロン最大加速可能エネルギーである 200 MeV 陽子に対する装置全体の応答を計算評価し、高エネルギー生物照射用装置での陽子線エネルギー拡大検討を行った。陽子の加速エネルギーを 200 MeV に拡大し、試料表面入射時のエネルギーを高密度ポリエチレン樹脂板減速体(PE)で調整する手法である。

同時に、照射手法の高度化の一つとして、減速体による陽子のエネルギー分散を低減する目的で、PE 駆動機構への真空排気装置導入方法を予備検討した。

並行して、現在開発中の新規超小型人工衛星に搭載する部品についてのシングルイベント試験も実施した。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・照射支援室、*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 セーレン(株)・研究開発センター・人工衛星グループ、*4 福井大学・学術研究基盤部門・産学官連携本部
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、セーレン(株)、福井大学と共同で実施したものである。

結果

シミュレーション高度化では、PE 厚み(0 mm から 256 mm までを入力)をパラメータとして、加速粒子とエネルギーを陽子、200 MeV とした PHITS による輸送計算をおこない、試料表面における陽子の残エネルギーの PE 厚み依存性を得た(図1)。厚さ 255 mm の PE を設置することにより残エネルギーを 0 MeV とできることがわかる。

照射手法の高度化として、PE 減速体を真空容器に入れる予備検討をおこない、試験体系の軽量化・試験効率化の観点も加味し、加速エネルギー最大 200 MeV の陽子に対応する機構として、PE 減速体移動機構を3分割し、大気による散乱の影響が深刻ではない高エネルギー領域は大気中に、残エネルギーが 0 MeV に近づく低エネルギー領域のみを真空中に設置する案を検討した。この予備検討案を図2に示す。

シングルイベント試験では、前年度までのシミュレーション結果を活用し、エネルギー(20~80 MeV)とビーム強度を確定した陽子線を用いてシングルイベント試験を実施し、各供試体でのラッチアップ回数やビットアップセット、オフセット回数のエラー頻度を計測した。

考察

シミュレーション高度化では、陽子の加速エネルギーを 200 MeV まで拡張し PHITS による輸送計算をおこなった。陽子の残エネルギー検証は容易ではなく、それ自身が多大な研究開発要素を含むため、ここでは検証しない。前年度までの陽子 100 MeV を加速粒子としたシミュレーションの議論では、残エネルギー 0 MeV に近い PE 厚でのプロファイル計測を実測することにより、シミュレーションについて一定の検証結果が得られた。今回の結果についても検証の機会を持つことが必要と思われる。

照射手法の高度化としての PE 減速体機構への真空容器導入については、シミュレーション高度化の結果により、陽子の加速エネルギーが 200 MeV の場合には 100 MeV の場合と比べて、PE 厚が 180 mm ほど大きいことがわかっているので、PE 減速体機構としては 180 mm 分を高エネルギー専用として大気中に設置することで体系のスリム化を図ることも可能である。このような要素を加味することで、真空容器の容量を低減化して、装置全体を軽量化することが可能であろうと思われる。

シングルイベント試験では、現在開発中の新規超小型人工衛星に搭載する半導体部品についての評価を実施することができた。

結言

宇宙線を模擬した陽子ビームの照射技術を開発し、事前のシミュレーション手法、ビームの制御手法等を高度化することで、新規の超小型衛星に搭載を計画している半導体部品に対するシングルイベント試験を実施することができた。これらの取り組みは、今後の福井県をはじめとする宇宙産業育成に貢献することが期待される。

参考文献

- 1) 若狭湾エネルギー研究センター、プレスリリース、<http://www.werc.or.jp/newsdetail/img/R021026press.pdf> (2020)
- 2) T. Sato et al. Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55(5-6), 684-690 (2018)
- 3) 久米 恭、他、若狭湾エネルギー研究センター研究年報 令和4年度、25、41 (2023)

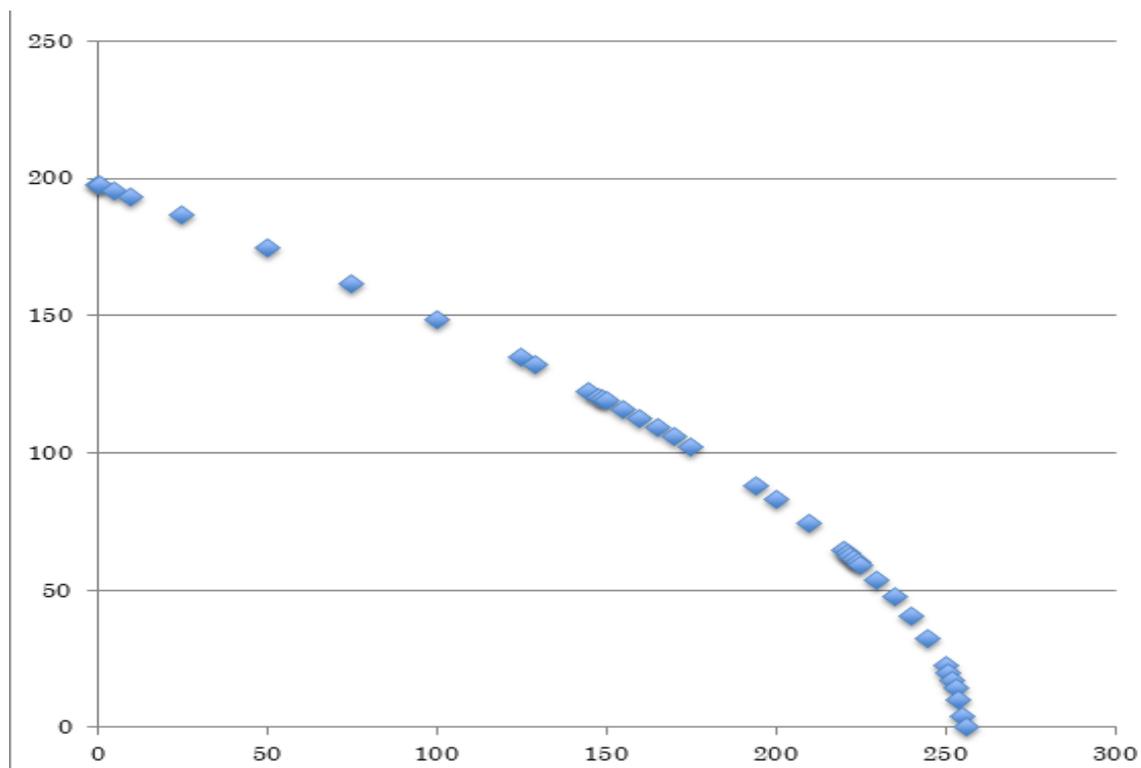


図1 PHITS 計算で得た残エネルギー・PE 厚の相関。横軸:PE 厚(mm)、縦軸:残エネルギー(MeV)。加速粒子は p200 MeV、ビームライン中に散乱体設定なしとした。

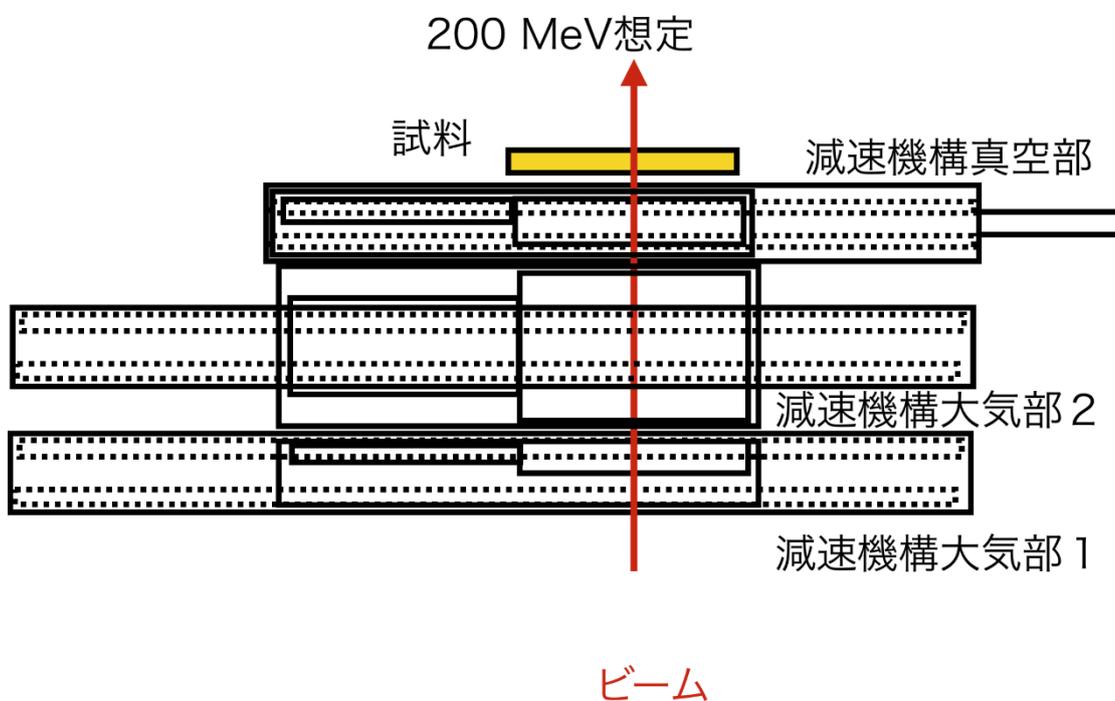


図2 高エネルギー生物照射用装置(200 MeV 輸送時)に真空利用減速機構を配置する予備検討案。平面図。

2.4.1.2

宇宙産業用イオンビーム照射手法の確立
～半導体デバイス特性のイオン照射チャンバ内その場測定システムの構築～

Development of In-situ Measurement System for Semiconductor Devices in Irradiation Chambers During
Irradiation Experiment

今泉充*1、鈴木耕拓*2、石神龍哉*2、久米恭*3

Mitsuru IMAIZUMI, Kohtaku SUZUKI, Ryoya ISHIGAMI, and Kyo KUME

Abstract

An *in-situ* measurement system in an irradiation chamber has been developed at ion beam irradiation experiments on semiconductor devices such as solar cells. As a result for a measurement trial of a beam current at a target device in an irradiation condition, beam current measurements were performed on the target plates in both irradiation chambers of the 200 kV ion implanter and the 5 MV tandem irradiation course with ion beam irradiation.

要約

太陽電池などの半導体デバイスに対するイオン照射実験における、照射チャンバ内でのその場デバイス特性測定システムの構築について検討している。今年度はその初年として、実際の照射量を正確に把握するための試料電流の測定方法について検討した。対象とした照射チャンバはマイクロ波イオン源イオン注入装置およびタンデム加速器イオン注入チャンバの2つである。その結果、両チャンバにて照射中の試料取付けステージ上に設置した試料プレートに流入するビーム電流の測定を可能とした。

緒言

半導体デバイスの放射線耐性や放射線損傷による出力などのデバイス特性の変化/劣化を評価することは、その半導体デバイスの原子力施設や宇宙空間での応用において、開発と実装の両面にて必須である。この評価実験では、一般的にはイオン照射を所望の照射量まで真空チャンバ内で行い、その後試料デバイスをチャンバから取り出して特性測定を行うという方法が採られるが、イオン照射チャンバ内における「その場測定システム」構築により、異なる計測条件でのデータの差し引きに起因する耐放射線特性への影響を避けることが可能となる。加えて、「その場測定」を採用することにより、試料デバイス数の節減(すなわち実験費用の節減)および総所要実験時間の短縮が実現し、効率的に成果を得ることが可能になる。イオン照射施設として、このような機能・能力を準備しておくことは、利用者の増加や一利用者当たりの必要ビーム時間の低減などの利点を得ることができる。今年度の検討では、将来におけるデバイス特性の照射チャンバ内その場測定システムの構築を目指し、試料電流の測定系の確立を試みた。

試料電流測定系構築

対象とした照射チャンバは、試料を真空中で高温ないし低温にすることが可能であり、従ってその場測定の必要性が見込まれる①マイクロ波イオン源イオン注入装置および②タンデム加速器イオン注入チャンバの2つとした。

試料上におけるビーム電流を測定するための試料装着ステージに対する絶縁方法としては、試料貼付板の裏面にポリイミドフィルムテープを貼り、あるいは400℃以上の高温にする場合はセラミック板を挟めばよい。その試料貼付板に試料電流収集用の配線を施す。実際の試料装着例として、図1にマイクロ波イオン源イオン注入装置の照射チャンバの場合、図2にタンデム加速器のイオン注入用照射チャンバの場合を示す。ここで、貼り付ける試料として、シャープ製 InGaP 太陽電池(サイズ:1cm×1cm)を用いている。試料電流信号の照射チャンバ外への取り出しのため、①には ICF-34 の、②には ICF-70 の BNC 端子フィードスルーフランジを調達し、それぞれチャンバに取り付けた。チャンバから電流積算計までの電流信号の搬送には、BNC コネクタによるコアシールド同軸ケーブルを用いた。図3にマイクロ波イオン源イオン注入装置の照射チャンバ、図4にタンデム加速器のイオン注入用照射チャンバからの試料電流信号取出し配線を示す。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・照射支援室協力研究員((公大)三条市立大学・工学部・技術経営工学科)、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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・研究開発部・照射支援室。
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。

試料電流測定

構築した上記の電流測定系を用い、実際に試料板上にてビーム電流の測定を行った。

① マイクロ波イオン源イオン注入装置チャンバ

図1に示したものと同様の試料板を試料ステージに装着し、照射チャンバに装入した。ビームとして試験時に利用可能であった190 keV Ar⁺を利用し、開口部20 mm×20 mm(矩形)のビームマスクを用い、2次電子の発生を抑制するためにサブレッサ電極板に-50Vを印可した。電流値の測定は、電流積算器の電流メータを用いて行った。

まず、通常ビーム電流の測定に用いている銅板位置において、従来の試料ステージを通した電流経路にてビーム電流を約370nAに調整した。次にビーム照射位置を試料電流測定板の位置に移動し、試料電流測定用に新たに配線した電流経路にて入射ビーム電流を測定したところ、電流値は360nAを示した。よって、ビーム電流の測定は正常に行えていることがわかった。差の10nAはビーム電流揺らぎの範囲と判断した。ここで、サブレッサへの電圧印可を切ったところ、電流値は約2.0μAと約5.5倍に増大した。サブレッサが有効に機能していることが確認される。続けて、試料ヒータの配線を外してビーム電流を測定したところ、電流値は約320nAであった。直後にヒータの配線を再接続して再度ビーム電流を測定した結果、電流値は310nAとなり、ヒータ配線の影響は除去されていることが確認された(前記同様に差の10nAはビーム電流揺らぎの範囲と判断)。

以上の電流測定において、電流積算器の電流メータでの指示値はよく安定していた。従って、ノイズレベルは十分低い水準に抑えられていることが理解された。

② タンデム加速器イオン注入チャンバ

このチャンバを用いた照射実験では、試料板に入射したビーム電流の測定は現状不可能であるが、ビーム電流に関してはFCを用いて正確に測定することが可能である。しかし、サブレッサ電極が装備されていないため、試料板電流の測定値にはイオン入射によって放出される2次電子の単位時間当たりの電荷分が加算される。そこで、実際の試料板電流はFCで計測されるビーム電流値とし、試料板から放出される2次電子分を加えた試料板電流を測定することで、試料板電流としてビーム電流の何倍が計測されるかを、ビーム電流を変化させながら求めた。なお、この倍率を「2次電子係数」と定義する。このとき、図2に示した試料取付け銅板にその場測定用に試作した太陽電池デバイス用の取付け治具を試料ステージに装着し(図5参照)、照射チャンバに設置した。試験では2 MeV H⁺を利用した。

結果として、2次電子放出係数はビーム電流に依らず約1.37とほぼ一定の値が得られた。すなわち、ビームとして入射するH⁺イオンの数に対して、約37%の電子が2次電子として放出されている。なお、今回この2次電子係数はビーム電流に依らないことがわかったが、照射するイオンの質量数、価数、加速エネルギー、および試料装着銅板や治具の表面状態によって変化することが予想されるため、少なくとも当面はマシンタイムの都度、イオン照射実験の前に測定し求めることが必要であると考えられる。

結言

以上の結果より、マイクロ波イオン源イオン注入装置の照射チャンバおよびタンデム加速器のイオン注入チャンバの二つのチャンバにおいて、試料板に入射するイオンビーム電流の測定が可能になった。また、サブレッサ機能が設置されていないタンデム加速器チャンバにおける2次電子放出係数を取得した。これまで照射直前に測定したビーム電流を元に計算した照射時間によって照射量(フルエンス)としていたが、本成果により実際の試料へのイオン入射数を正確に求めることができ、より信頼性の高い実験データが得られると期待される。さらに、本成果は将来の半導体デバイスに対するイオン照射実験における、照射チャンバ内でのその場デバイス特性測定システムの構築に寄与するものである。

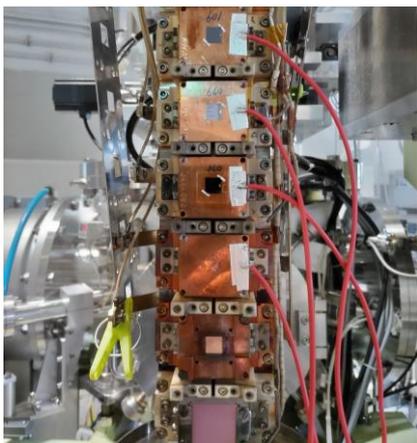


図1 マイクロ波イオン源イオン注入装置の照射チャンバにおける電流測定のための試料取付け例。

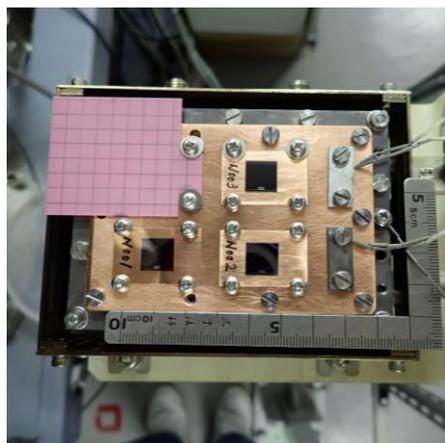


図2 タンデム加速器のイオン注入用照射チャンバにおける電流測定のための試料取付け例。



図3 マイクロ波イオン源イオン注入装置の照射チャンバにおける試料電流信号の取出し配線。

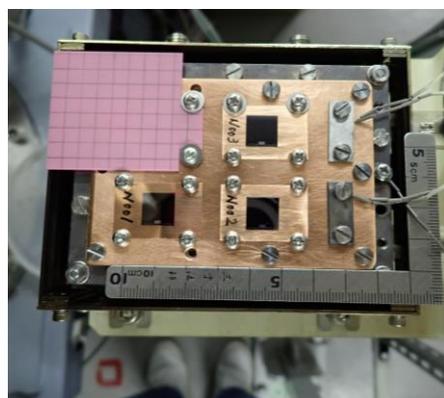
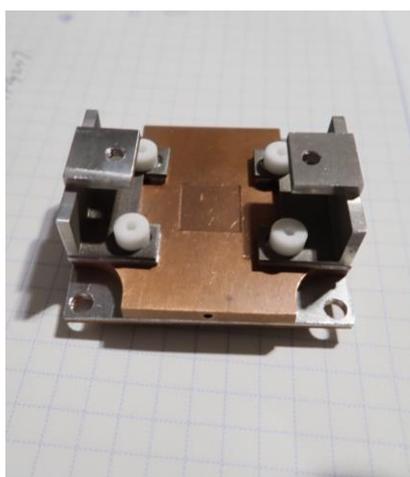
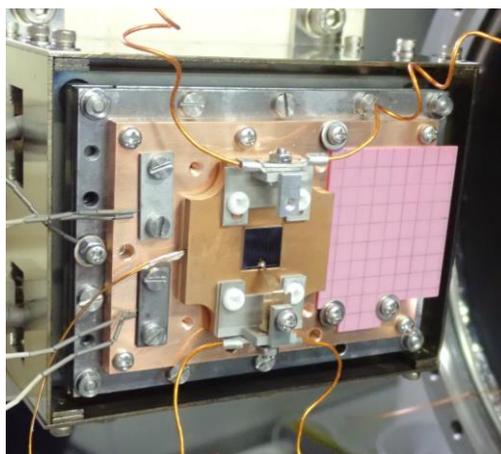


図4 タンデム加速器のイオン注入用照射チャンバにおける試料電流信号の取出し配線。



(a) 太陽電池デバイス取付治具



(b) 照射用試料板への装着例

図5 タンデム加速器イオン注入チャンバでの試料板電流測定に用いた治具。

2.4.1.3

ペロブスカイト太陽電池放射線耐性のその場評価に向けた試験系の構築

Construction of a Test System for in-situ Evaluation of the Perovskite Solar Cell Radiation Resistance

宮澤優^{*1}、石神龍哉^{*2}、金谷周朔^{*1}、豊田裕之^{*1}、廣瀬和之^{*1}

Yu MIYAZAWA, Ryoya ISHIGAMI, Shusaku KANAYA, Hiroyuki TOYOTA, and Kazuyuki HIROSE

Abstract

We constructed a system to evaluate I-V characteristics of perovskite solar cells (PSC) in a vacuum chamber while controlling the temperature of PSCs at low temperatures to clarify whether proton irradiation causes defects that reduce power generation performance.

要約

陽子線照射により、ペロブスカイト太陽電池(PSC)に発電性能の低下を及ぼす欠陥が発生しないのか、あるいは欠陥が生成されるもののその後に欠陥が修復されるのかを明らかにするために、サンプルの温度を低温に制御しながら、照射チャンバ内で太陽電池のI-V曲線特性計測により光発電特性を評価するシステムを構築し、低温下照射試験を実施した。

緒言

PSCは、低コストで十分高効率かつ高放射線耐性を有する宇宙用の軽量薄膜太陽電池を実現できることが期待されている。しかしながら、これまでPSCの放射線耐性が高い理由は明らかになっていない。本研究では、陽子線照射により、発電性能の低下を及ぼす欠陥が発生しないのか、あるいは欠陥が生成されるもののその後に欠陥が修復されるのかを明らかにするために、サンプルの温度を低温に制御しながら、照射直後に放射線照射用真空チャンバ内のサンプルに光を照射して、その後の性能の時間変化を評価するシステムを構築し、実際に照射試験を実施した。

成果の概要

図1にサンプル温度を低温に制御するために、チャンバ外に設置した液体窒素による冷却システムの様子を示す。本システムを用いてサンプル温度を -65°C に制御できることを確認したため、サンプルを低温に制御した状態で陽子線照射試験を実施した。室温下と低温下でPSCの放射線下での挙動が異なる可能性が示唆されたが、振る舞いを明らかにするには同一のサンプル構成での追加試験が必要である。



図1 液体窒素による冷却システムの様子

結言

2023年度までにサンプルの温度を低温に制御しながら陽子線を照射し、照射チャンバ内で光発電特性を評価するシステムを構築し、そのシステムの妥当性を評価した。2024年度以降、サンプルの温度を振って照射実験を実施することで、陽子線照射により発電性能の低下を及ぼす欠陥が発生しないのか、あるいは欠陥が生成されるもののその後に欠陥が修復されるのかを明らかにしていく。

^{*1}(国研)宇宙航空研究開発機構、^{*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、JSPS KAKENHI 22K04252 の助成を受けたものである。

2.4.1.4

人工衛星搭載用軟 X 線 pnCCD センサーの低エネルギー陽子線を利用した放射線耐性試験
 Radiation Tolerance Test of Soft X-ray pnCCD Sensors for Satellite Use Utilizing Low-Energy Proton Beams
 有元誠*1、高橋周汰*1、後藤初音*1、今度隆二*1、米徳大輔*1、澤野達哉*1、羽鳥聡*2、石神龍哉*3
 Makoto ARIMOTO, Shuta TAKAHASHI, Hatsune GOTO, Daisuke YONETOKU, Tatsuya SAWANO,
 Satoshi HATORI, and Ryoya Ishigami

Abstract

The Wide-Field X-ray monitor scheduled to be installed in the future satellite project HiZ-GUNDAM is expected to have a wide field of view and an order of magnitude higher sensitivity compared to previous astronomical instruments. To achieve this, a silicon pixel sensor that can be used in space is required. In this research, a radiation tolerance test was conducted by irradiating the pnCCD, a candidate silicon pixel sensor for the satellite, with a 10 MeV proton beam. As a result, it was found that even with radiation dose equivalent to three years in satellite orbit, HiZ-GUNDAM can achieve its goal of observing soft X-rays above 0.4 keV if the operating environment is maintained at temperatures below -35°C . These results provide essential information for designing the Wide-Field X-ray Monitor, and future development will proceed based on this data.

要約

次世代人工衛星計画 HiZ-GUNDAM に搭載予定の広視野 X 線モニターは、広い視野かつ従来の一桁以上の高感度軟 X 線観測を目指している。その実現のために、宇宙で使用可能な Si ピクセルセンサーが要求される。本共同研究では、HiZ-GUNDAM 衛星搭載用 Si ピクセルセンサーの候補である pnCCD に対し 10 MeV 陽子線を照射する試験を行った。その結果、衛星軌道上 3 年の被ばくであっても、 -35°C より低い温度での動作環境であれば、HiZ-GUNDAM が目標とする 0.4 keV 以上の軟 X 線観測を実現できることがわかった。これらの結果は、広視野 X 線モニターの設計を行う上で必須となる情報であり、これをもとに今後の開発を進める予定である。

緒言

金沢大学や国内の複数の研究機関によって、初期宇宙・極限時空探査衛星計画 HiZ-GUNDAM (2030 年代に打ち上げ予定)の開発が行われている。本研究では、HiZ-GUNDAM に搭載される広視野 X 線モニターの焦点面検出器の候補である Si ピクセルセンサー-pnCCD に対して、放射線耐性試験を行った。宇宙環境では陽子をはじめとする宇宙線による影響を受けて、センサー性能が劣化し、暗電流の増加に伴う軟 X 線(0.4-4 keV)の検出感度の低下が懸念される。本実験では、若狭湾エネルギー研究センターで利用可能な 10 MeV 陽子線を用いて、衛星軌道上 3 年分相当の線量を pnCCD に付与する試験を行い、放射線損傷が軟 X 線観測に与える影響を定量評価した。

方法

宇宙放射線の大部分は陽子であり、また最悪ケースの被ばくを想定し単位粒子あたりのエネルギー付与が大きく、かつ pnCCD の $450\ \mu\text{m}$ の空乏層全体にわたって均等にエネルギー付与できるという点を考慮し、本試験では 10 MeV 陽子線を選択した。また必要な陽子線のフルーエンスを見積もるため、宇宙放射線の量を推定できる計算ツールである SPENVIS¹⁾ を用いて HiZ-GUNDAM の軌道上(高度 700km、軌道傾斜角 98.1° の太陽同期軌道を仮定)における pnCCD の被ばく量を計算した。ここで広視野 X 線モニターには、ロブスターアイ光学系が搭載されるため、陽子線のエネルギー分布に応じて、焦点面検出器に届く陽子フラックスが異なる。これらの影響も考慮してフルーエンスを見積もり、3.5 年分に相当する 5.1×10^9 proton/cm² の照射を行った。またビームのフラックスは極めて高いため($>10^8$ proton/cm²/s)、予期しない放射線損傷が生じる恐れがある。そこで、ビームライン内に設置されている電磁石を用いて、ビームを拡散およびスウィープさせることにより、およそ 10^6 proton/cm²/s 程度までビーム強度を抑えて照射を行った。また照射中は、pnCCD のチャージアップを避けるために、 $-200\ \text{V}$ の電圧をセンサーに印加した。pnCCD のセットアップを図 1 および図 2 に示す。pnCCD の放射線被ばくの影響を段階的に調べるために、pnCCD の前面に Al スリットを設置し、図 3 に示すように 4 段階の

*1金沢大学・理工研究域・数物科学系/先端宇宙理工学研究センター、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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。

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(17H06362、22J12717、23H04898)及び金沢大学超然プロジェクトの助成を受けた。

異なるフルーエンスで陽子線を照射した。実験終了後に校正用線源 ^{55}Fe から生じる Mn-K_α および Mn-K_β の X線スペクトルを取得し、低エネルギー側に生じる暗電流起因のノイズレベルを評価した。

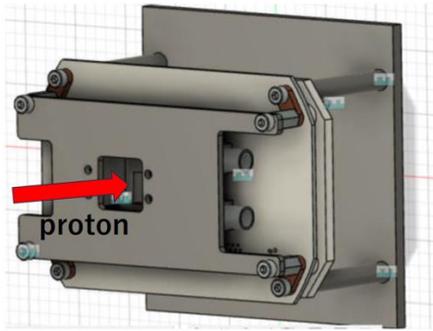


図1 pnCCDの照射セットアップ。

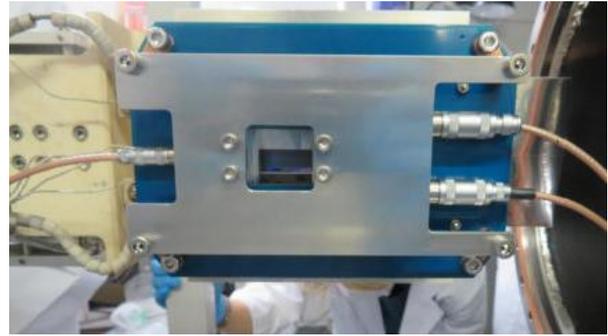


図2 治具組み立て後に真空チャンバーステージに取り付けた図。pnCCDは中に組み付けられている。

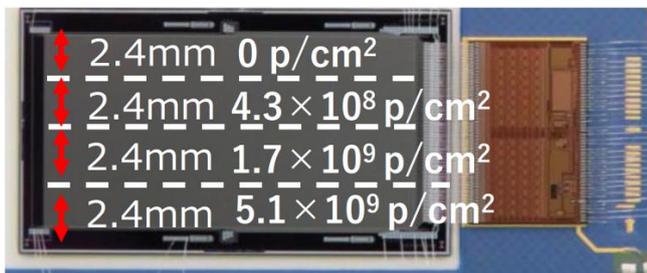


図3 4分割したpnCCDの被ばく領域。低い順から、0ヶ月、3ヶ月半、1年2ヶ月、3年6ヶ月分に相当。

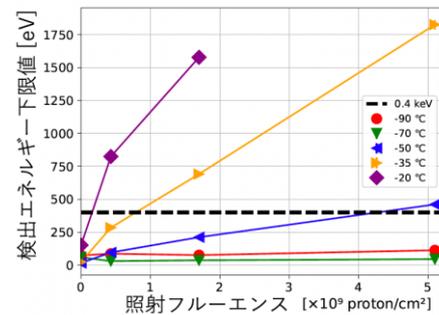


図4 陽子線の照射量及び動作温度(-90から-20°C)に応じた検出エネルギー下限値。

結果

図4に、陽子照射フルーエンスおよびセンサーの動作温度に応じた検出エネルギー下限値をまとめた結果を示す。-35°Cよりも低い動作温度(例えば、-50°Cや-70°C)であれば、HiZ-GUNDAMで要求される検出エネルギー下限値の400 eVを達成できることがわかった。一方、-20°Cや-35°Cの動作温度の場合、軌道上で半年程度を超えると暗電流増加によって400 eV付近の軟X線検出は困難になる結果が示唆された。注意すべきは、本試験では全ての放射線被ばくを10 MeVの低エネルギー陽子線で付与している点である。いくつかの先行研究では、同様の線量を高エネルギー陽子線と低エネルギー陽子線の2種でSiセンサーに与えた場合、低エネルギー陽子線のほうが暗電流の増加が多いといった例²⁾が報告されている。よって本試験は、最悪ケースを想定したケースと考えられ、今後より精度の高い放射線劣化を模擬するために、100 MeVなどの高エネルギー陽子線を用いた試験を行う予定である。本研究の成果は、国際学会や投稿論文³⁾にて報告を行った。

結言

本研究では、将来人工衛星計画HiZ-GUNDAMに搭載を予定しているpnCCDに対して、10 MeV陽子線を照射した。その放射線損傷を定量評価したところ、-30°Cよりも低い温度で動作させることによりミッション機器が要求する400 eVの軟X線観測を実現できることが実証された。

参考文献

- 1) Space Environment Information System, <https://www.spennis.oma.be/>.
- 2) X. Yuanyuan *et al.*, Sensors, 17 (12), 2017.
- 3) S. Takahashi *et al.*, "Radiation tolerance tests and performance verification of pnCCD at high temperature for future satellite mission HiZ-GUNDAM" 13th HSTD, 2023 & NIM-A, Vol. 1064, 169413, 2024.

2.4.1.5

宇宙環境で利用する放射線検出器の放射線耐性の評価

Radiation Tolerance of Radiation Detectors Used in the Space Environment

高橋弘充^{*1}、榎戸輝揚^{*2}、辻直希^{*2}、長岡央^{*3}、晴山慎^{*4}
久米恭^{*5}、水嶋慧^{*5}、羽鳥聡^{*6}Hiromitsu TAKAHASHI, Teruaki ENOTO, Naoki TSUJI, Hiroshi NAGAOKA, Makoto HAREYAMA,
Kyo KUME, Satoshi MIZUSHIMA and Satoshi HATORI**Abstract**

For scientific observations on the Moon and in lunar orbit, we are developing the MoMoTarO radiation detector for lunar water resources exploration. We irradiated several scintillators for neutrons and gamma-rays, MPPC photodetector (SiPM), and their circuits with the 200 MeV proton with total dose of 10 Gy simulating the space environment. The degradation of the scintillators and MPPC was measured and guidelines for the future circuit designs were also obtained.

要約

月面や月周回軌道からの科学観測のため、我々は月水資源探査用放射線測定器 MoMoTarO を開発している。宇宙環境を模擬して 10 Gy の 200 MeV 陽子ビームを、中性子用およびガンマ線用シンチレータ、MPPC 光検出器(SiPM)、その回路に照射した。その結果、シンチレータと MPPC の劣化具合、および今後の回路設計の指針を得た。

緒言

月面探査プログラム「アルテミス計画」により、月面や月周回からの科学観測も検討されている。我々は京都大学が中心となって開発を進める月水資源探査用放射線測定器 MoMoTarO を月に送り込み、中性子やガンマ線を計測することで、月の水資源探査、ガンマ線バースト観測、中性子の寿命測定などを計画している。そのため、MoMoTarO 検出器で利用する要素部品について、陽子照射を行い、放射線耐性を評価した。

方法・結果

MoMoTarO 検出器に必要な放射線耐性について評価すると、NASA が定める宇宙放射線の見積りや過去の月探査機 LRO の観測実績から、その線量は 10 Gy 程度と見積られる。そのため本年度は 200 MeV 陽子を用いて、シリコンに照射した際に 10 Gy に相当する 1.7×10^{10} protons/cm² 以上の照射を実施した。照射物は、3 種類のシンチレータ(中性子用 EJ-270 と Cs₂LiYCl₆ (CLYC)、ガンマ線用 Gd₃(Ga,Al)₅O₁₂ (GAGG))、MPPC 光検出器、電子部品、回路基板である。

結果として、シンチレータについては放射化によるバックグラウンド信号の増加とその減衰の情報が得られた。MPPC 光検出器については、クエンチング抵抗を長くした対策を施したが、放射線損傷による暗電流の増加(悪化)率は通常の製品版から劇的な改善は得られなかった。回路素子については、照射による故障は発生しないことが確認された。これらの測定と検証を経て、これから実際の衛星搭載品の製作を開始する見込みである。

結言

月面や月周回軌道からの科学観測のため、MoMoTarO 検出器で利用が検討されているシンチレータ、MPPC 光検出器、回路の要素素子の放射線耐性の測定および検証を実施することができた。

^{*1}広島大学・先進理工系科学研究科・物理学プログラム、^{*2} 京都大学・理学研究科・宇宙物理学専攻、^{*3} 立命館大学・総合科学技術研究機構、^{*4} 聖マリアンナ医科大学・生理学教室、^{*5} (公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・照射支援室、^{*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、京都大学、立命館大学、聖マリアンナ医科大学と(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。

2.4.1.6

シリコン半導体素子のプロトン起因シングルイベント効果研究

Proton-induced Single Event Effect on Si Semiconductor Devices

坂本敬太*1、竹内浩造*1、山東新子*2、水嶋慧*2、羽鳥聡*3、新藤浩之*1 久米恭*2

Keita SAKAMOTO, Kozo TAKEUCHI, Shinko SANDO, Satoshi MIZUSHIMA, Hiroyuki SHINDO,
Satoshi HATORI and Kyo KUME

Abstract

The influence of proton direct ionization (PDI) on large-scale integrated circuits (LSIs) manufactured by cutting-edge processes has been receiving strong attention due to the increase in soft error rate (SER) in harsh radiation environment, such as space¹⁻³). In our previous experiment, we demonstrated that the 16/14-nm Fin field effect transistor (FinFET) static random-access memory (SRAM) circuit exhibited better PDI tolerance compared to the 20-nm planar SRAM circuit when biased at the typical voltage in the data-holding state⁴). To further understand the SER increase due to the PDI effect, we studied its dependence on the data retention voltage for the 16/14-nm FinFET SRAM circuit.

要約

先端プロセスで製造された集積回路(Large Scale Integrated-circuit, LSI)では、プロトンの直接電離 (Proton Direct Ionization, PDI) 起因で LSI に付与されるエネルギーにおいてもソフトエラーを起こすことが報告されており、宇宙空間におけるソフトエラー率 (Soft Error Rate, SER) 増加への寄与が懸念されている¹⁻³)。我々はこれまでに、データ保持電圧がノミナル条件の場合においては、16/14-nm 世代の FinFET SRAM 回路は 20-nm planar SRAM に比べて PDI による影響が小さいことを実験で明らかにした⁴)。本研究では PDI が放射線耐性に及ぼす影響をより定量的に理解するため、16/14-nm のデータ保持電圧を水準とした実験を通じて PDI のデータ保持電圧依存性を調べた。

緒言

ビッグデータや人工知能(AI)の幅広い分野での活用など、最近では IoT 社会の実現に向けた技術革新が進んでいる。宇宙機においてもミッション要望が年々高度化している状況のため、高速演算・高速通信を担う 16/14 nm FinFET 素子の宇宙機への適用が期待されている。しかしながら、LSI の SEU (Single Event Upset) 耐性はプロセス世代が進むほど弱体化する傾向にあり、さらに 65 nm 未満のプレーナ素子では PDI 起因でも誤動作に至ることが報告されている¹⁻³)。加えて宇宙空間におけるプロトンの存在比率は、他の核種と比較して高いため、PDI 起因の誤動作は無視できない問題となっている。

16/14-nm FinFET SRAM における PDI 起因の SEU 耐性への影響を調べるために 20 nm planar SRAM と同一の照射条件で低エネルギープロトン照射を実施した結果、データ保持電圧がノミナル条件の場合において、16/14 nm FinFET 素子における PDI 起因の SEU の影響が小さい可能性を示唆する結果を得た⁴)。しかし SEU 耐性はデータ保持電圧に依存することが広く知られているため、16/14-nm FinFET SRAM の PDI 起因の SEU 耐性を網羅的かつ定量的に把握するためには電源電圧依存性も含めた SEU 耐性を評価する必要がある。そこで今回は、データ保持電圧を水準とし、低電圧印加状態の SRAM に対してプロトン照射試験を実施し、反転断面積を取得することで PDI 起因の SEU 耐性低下への影響を調査した。

実験

プロトン照射試験のセットアップ図及び照射条件を、図 1 及び表 1 にそれぞれ示す。シンクロトロンから出射されるプロトンのエネルギーを 100 MeV とした。PDI の影響は低エネルギーであるほど顕著になるため、サンプルの上流側に任意の厚さのポリエチレン(PE)ブロックを設置することでエネルギーを減衰させてからサンプルに入射するような実験系とした。実験に用いた PE 厚と減衰後のエネルギーの関係は Geant4 によるモンテカルロシミュレーションの結果を利用した(表 2)。実験には、民生用のプロセスで製造された 16/14-nm FinFET SRAM を用い、プロトンが感応領域に到達するまでの輸送経路を単純化するため、デキャップによりチップ表面を露出させた。データ保持電圧は表 1 の通りの水準振りを行い、各電圧条件において PE 厚を変えながらプロトン照射を行い、反転断面積を取得した。本実験におけるプロトンの照射角度は、チップ表面に対して垂直とした。

*1(国研)宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・第一研究ユニット、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・照射支援室、*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

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

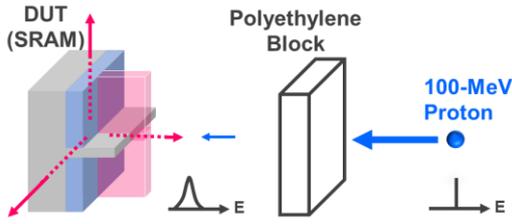


図 1 照射試験におけるプロトン輸送ラインのセットアップイメージ

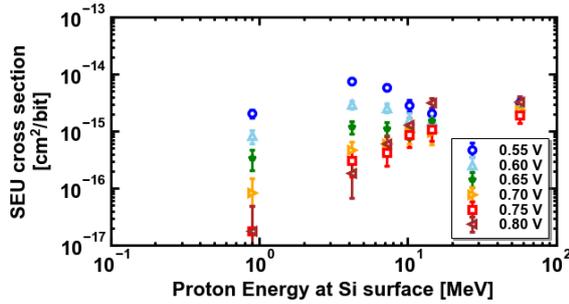


図 2 16/14-nm FinFET SRAM のプロトン照射エネルギーに対する SEU 反応断面積⁵⁾

表 1 照射試験における加速粒子及び供試体のセットアップ条件

供試体	16/14-nm FinFET SRAM (デキャップ済み)
照射角度	垂直照射
データ保持電圧 [V]	0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80 (Typical 条件)
保持データ	All0
照射核種	プロトン

表 2 PE 厚及び、PE 厚に対応する減速後のプロトンエネルギー(Geant4 にて算出)

PE 厚 [mm]	減速後のエネルギー [MeV]
43	57.1
57	40.1
70	14.4
71	10.2
72	7.2
73	4.2
74	0.9

結果と考察

本実験で取得した 16/14-nm FinFET SRAM のプロトン入射エネルギーに対する SEU 反応断面積を図 2 に示す。データ保持電圧が Typical 条件の場合は、これまでの実験結果と同様に PDI による SEU 反応断面積の増加は見られなかった。一方で、データ保持電圧が 0.55 V 条件の照射では、低エネルギープロトンを照射した際の SEU 反応断面積 (1×10^{-14} cm²/bit) が高エネルギープロトン (57.1 MeV) 照射時の飽和断面積 (2×10^{-15} cm²/bit) を上回り、4.2 MeV 照射時に SEU 反応断面積がピーク値を持つような特性を示した。この結果から、① 16/14-nm FinFET SRAM においてもデータ保持電圧が低い場合には PDI の影響が顕在化することが明らかとなった。また PDI に起因して現れる SEU 反応断面積のピーク値はデータ保持電圧に依存しており、②データ保持電圧が低くなるにつれて SEU 反応断面積のピーク値が高くなることが分かった。しかしながら以前に取得した 20-nm planar SRAM の結果⁴⁾と比較すると、飽和断面積に対するピーク値の断面積の上昇幅は小さいため、16/14-nm FinFET SRAM では PDI の寄与が大きくないことが分かった。

結言

16/14-nm FinFET SRAM における PDI 起因の SER への影響をより定量的に理解するため、SEU 反応断面積のデータ保持電圧依存性を調査した。PDI の影響はデータ保持電圧に依存しており、SRAM に低電圧を印加した条件で PDI による SEU 断面積の増加が最大となった。しかしながら、20-nm planar SRAM の結果と比較すると断面積の上昇幅は小さく、PDI 起因 SEU の SER への影響は大きくないことを明らかにした。

謝辞

本実験を実施するに当たってご支援頂きました株式会社ソシオネクストの加藤貴志氏、中村隆之介氏、および菱栄テクニカ株式会社の照射試験支援メンバの方々に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) K. P. Rodbell *et al.*, IEEE Trans. on Nucl. Sci., 54, 6, 2474-2479 (2007)
- 2) A. Coronetti *et al.*, IEEE Trans. on Nucl. Sci., 68, 5, 937-948 (2021)
- 3) P. Caron *et al.*, IEEE Trans. On Nucl. Sci., 66, 7, 1404-1409 (2019)
- 4) K. Sakamoto *et al.*, 若狭湾エネルギー研究センター年報 (令和 3 年度), 24,49(2022).
- 5) K. Sakamoto *et al.*, in Proc. IEEE-NSREC, Ottawa, Canada (2024)

2.4.1.7

小型衛星搭載用太陽中性子・ガンマ線分光装置(SONGS)の開発状況

Status report on development of the solar neutron and gamma-ray spectrometer (SONGS) for a microsatellite
山岡和貴^{*1}、羽鳥聡^{*2}

Kazutaka YAMAOKA and Satoshi HATORI

名古屋大学宇宙地球環境研究所では太陽フレア爆発に伴い発生する中性子やガンマ線を用いてイオンの加速機構を解明することを目指し、100 kg 以下の小型衛星に搭載する小型・軽量・低消費電力のセンサ、太陽中性子ガンマ線分光装置(Solar Neutron and Gamma-ray Spectrometer: SONGS)を開発している。SONGSは棒状のプラスチックシンチレータを積層したものに下部に GAGG シンチレータアレイを組み合わせたもので、3次元で宇宙線の飛跡を追跡する。上部のプラスチックシンチレータ部で入射した高速中性子(30-120 MeV)の弾性散乱による反跳陽子を検出するとともに、軟ガンマ線(100-3 MeV)がコンプトン散乱した後、下部の GAGG で光電吸収して検出する。SONGS は要素試作モデル(BBM)、エンジニアリングモデル(EM)、フライトモデル(FM)と段階的に開発を進めており、現在 EM の開発を行っている。すでにプラスチックシンチレータ部の組み立てや全ての信号処理基板やインターフェース基板のコンポーネント開発を終え、今は個々の信号処理基板の電氣的調整を行っている。今後回路基板の統合試験を行い、センサとして完成させる。センサ完成後に宇宙線ミュオンを用いた飛跡のトラッキングテスト、さらに若狭湾エネルギー研究センターでの 10-100 MeV エネルギーでの陽子照射試験を行い、エネルギー分解能を評価することを予定している。

^{*1}名古屋大学宇宙地球環境研究所、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・加速器室

本研究は、MEXT KAKENHI 18H03700 の助成を受けた。

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。

2.4.1.8

陽子線を用いた衛星搭載デバイスの放射線耐性評価と軌道上実証

Evaluation of Radiation Tolerance of satellite components with Proton Beams and In-Orbit Demonstration

谷津陽一^{*1}、福田美実^{*1}、渡邊奎^{*2}、小林寛之^{*2}、天木祐希^{*2}、羽鳥聡^{*3}、久米恭^{*4}、水嶋慧^{*4}

Yoichi YATSU, Minoru FUKUDA, Kei Watanabe, Hiroyuki KOBAYASHI, Yuki AMAKI,

Satoshi HATORI, Kyo KUME and Satoshi MIZUSHIMA

本研究では、安価で高性能な民生品を地球低軌道用の宇宙機器として搭載するために、ガンマ線や重粒子ビームを用いて放射線耐性を評価し、デバイスの選定・改良等を行うものである。令和5年度は2021年11月に打ち上げた東工大の超小型衛星 HIBARI を引き続き運用し、各搭載デバイスの動作状況を調査した。

これまでに、不具合が確認されているのは、可動太陽電池パドルの角度検知に用いているアブソリュートエンコーダであり、搭載している4個中1つで不具合が発見され、現時点でも復旧していない。2023年6月には、過去に多数のフライト実績がある MEMS ジャイロの特定の1軸において不具合が発生した。電源リセットも含めさまざまな復旧策を講じたが改善しなかったが、およそ半年後の2024年2月に正常状態に復帰した。症状からはシングルイベント効果であると考えられる。HIBARI 衛星に搭載している天測航法装置は、既に2.5年にわたって不具合なく動作している一方、センサ自体は確実に劣化しており、高エネルギープロトンが作る格子欠陥によりバッドピクセル数が徐々に増大している。バッドピクセル数増加率と太陽活動との関連性を調査中であるが、現時点では明確な相関関係は確認できていない。今後は引き続き軌道上評価を続けるとともに、評価結果を次期衛星の設計に反映させる。

参考文献 1) Fukuda *et al.*, Small Satellite Conference, (2024)

^{*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・照射支援室

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、科研費 1704829、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、経済産業省令和2年度補正宇宙開発利用推進研究開発で行った。

2.5. エネルギー分野

2.5.1. 放射線計測技術の開発

2.5.1.1

リチウム含有液体シンチレーターの性能向上と長期安定性

Performance Improvement and Long-term Stability of Lithium-loaded Liquid Scintillators

鈴木耕拓*¹、小栗廉太郎*²、伊藤善亮*²、玉川洋一*²、中島恭平*²

Kohtaku SUZUKI, Rentarou OGURI, Yoshiaki ITO, Yoichi TAMAGAWA and Kyohei NAKAJIMA

Abstract

A neutrino detector has been developed to monitor the inside of nuclear reactors and spent nuclear fuel. For this detector, a liquid scintillator with dissolved lithium has been developed. Furthermore, considerations for improving the detector's performance and an evaluation of the long-term stability of the liquid scintillator have been carried out.

要約

原子力発電における原子炉内部や使用済燃料を外部から監視するためのニュートリノ検出器を開発している。本検出器のために、リチウムを溶解させた液体シンチレーターを開発してきた。さらに検出器の性能を向上させる考察、および液体シンチレーターの長期安定性について評価した。

緒言

ニュートリノは反応性が乏しい反面、透過性が高く、原子炉等を外部から監視可能である。本研究におけるニュートリノの検出では、逆ベータ崩壊($\bar{\nu}+p\rightarrow n+e^+$)反応を利用し、陽電子と中性子を同時に測定する。このため、液体シンチレーターに中性子捕獲断面積の高い物質(リチウム 6)を溶解させた検出器を考案し、開発してきた。逆ベータ崩壊を高精度で特定するためには、電子線およびガンマ線事象とイオンの粒子識別性能が必要である。このため粒子弁別性能の向上および液体シンチレーターの長期安定性を調査した。

検出器性能評価

1. 性能向上の考察

令和4年度では、大型の8Lサイズの検出器を開発した。この検出器では光電子増倍管を2本用いて、両端から発光を測定していた。この条件では、ガンマ線とアルファ線の弁別割合は60%程度であった。この弁別性能は測定する光量に関連しており、令和5年度ではデータから考察し光電子増倍管を4本用いることにより、90%以上に向上することが判明した。

2. 長期安定性試験

開発した液体シンチレーターは、長期にわたって使用することを目指している。そこで、継続的にガンマ線源を照射し、発光量の推移を測定した。図1に4か月程度の期間における発光量の推移を示す。この結果、初期の不安定期以降の発光量の減衰はほぼ無く、数十年にわたり使用可能であることが判明した。

結言

8Lサイズの大型検出器で4本の光電子増倍管を用いることで性能が向上し十分な分解能となることが予測できた。また検出器の長期安定性を試験した結果、4か月間の発光量に大きな変化は無く、この推移が続けば数十年の使用にも耐えられることが判明した。

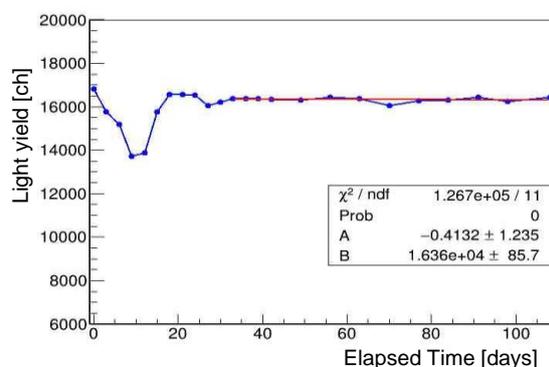


図1 液体シンチレーター発光量の長期安定性

*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福井大学

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。

2.5.2. 様々なエネルギーの技術開発

2.5.2.1

セラミック水分解を利用した水素製造技術の開発

Development of Hydrogen Production Method using Water Splitting by Ceramics

鈴木耕拓*1、土屋文*2

Kohtaku SUZUKI and Bun TSUCHIYA

Abstract

A hydrogen production method has been developed using the ceramic water decomposition at The Wakasa Wan Energy Research Center. As a result of improvement of the hydrogen production capacity, it has been found to be effective to use catalysts and material reforming by ion implantations. It has also been found that the material can be reused repeatedly.

要約

若狭湾エネルギー研究センターでは、セラミックによる水分解を利用した水素ガス製造手法について研究開発してきた。製造能力向上のため、触媒やイオン注入による改質により発生量が増加することが判明した。また繰り返し利用が可能であることも判明した。

緒言

これまで若狭湾エネルギー研究センターでは名城大学と共同で、セラミックによる水分解を利用した水素製造技術の開発を行ってきた。セラミックであるリチウムジルコネートは、大気中で水蒸気と二酸化炭素を吸収し、加熱することにより水素ガスが発生することが分かっている¹⁾²⁾。この加熱に太陽光や廃熱等のエネルギーを利用することで、二酸化炭素フリーで水素製造が可能となる。これまで、水素ガス製造の実用化を目指し、水素ガス製造量を増加させるための改良を実施してきた。まず水蒸気吸収能力を向上させるため、温度・湿度環境を変化させた結果、温度 60℃湿度 80%で吸収量および速度が高いことが判明した。次に表面への触媒を蒸着した結果、Pt や Pd で水素ガスの製造量の増加が見られた。さらにセラミックを 1 μm程度に微粉化させた結果、吸収速度が大幅に向上することが判明した。令和5年度は、さらに水素ガス製造量を向上させる条件を検討した。

実験

1. 触媒

触媒として水素と相性の良い Pt、Pd、Ni の各金属をセラミック粉体の表面に真空蒸着した。Ni蒸着した試料の写真を図1に示す。この蒸着の膜厚は 30 nm 程度と推定され、黒く変色していた。各試料は、温度 60℃湿度 80%の環境下に一週間保持した。これは十分水蒸気を吸収し、重量増加が飽和する期間である。

それぞれの触媒を蒸着し、一週間保存した試料に対し、加熱ガス分析を実施した。加熱は 600℃まで行い、その範囲での水素ガスの放出量を測定した。何も蒸着していない試料から放出される水素ガス量を基準として、上記の条件で水素ガス放出量の総和を比較した。その結果、Pt で約 6 倍、Pd で約 4 倍、Ni で約 2 倍となった。Pt が最も良い数値となったが、高価であるため以降は Ni を用いてさらなる検討を行う。

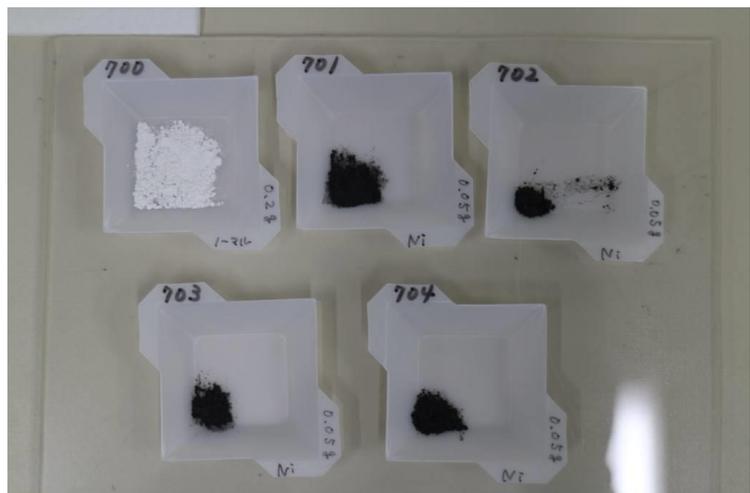


図1 Niを蒸着した粉体の写真(左上のみ蒸着なし)

*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・理工学部
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. Ni メッキ

前回は真空蒸着で Ni を蒸着したが、湿式メッキによる Ni メッキの効果を検証した。メッキ加工は清川メッキ化学工業株式会社により施され、図 1 と同様に黒く変色した粉末であった。Ni メッキ試料も同様に温度 60°C 湿度 80% の環境下に一週間保持した後、600°C まで加熱しながらガス分析を実施した。この結果、メッキ無しの試料と比較して約 6.5 倍の水素ガスが発生することが分かった。

3. イオン注入

イオン注入は、試料表面付近の改質が可能で、欠陥等により水素を吸収しやすくなる可能性がある。また Ni 蒸着とセラミック界面付近に注入することにより、ミキシングによる触媒効果の向上を見込む。イオン種はセラミック組成の一部である酸素とし、エネルギーは界面付近で止まるように設定した。注入量は 800 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ とした。注入した試料に対し、同じ条件で加熱ガス分析を実施した結果、触媒を付けない注入試料は約 1.1 倍、Ni 蒸着した注入試料は約 1.2 倍の水素ガス発生量となった。高くはないものの、イオン注入による界面付近の改質効果が見られた。

4. サイクル性能

Ni 蒸着した試料に対し、サイクル性能を検証した。同様に温度 60°C 湿度 80% の環境下に一週間保持した後、600°C まで加熱しながらガス分析を実施する工程を、合計 4 回繰り返した。この結果、1 回目の水素ガス発生量と比較し、2 回目は 10% 程度の増加が見られたがほぼ同量であった。3 回目は約 30% 程度の減少が見られ、4 回目以降はさらに徐々に下がっていく傾向が見られた。しかし、水素が製造できなくなるまで大幅に減少するわけではなく、サイクル可能であることが判明した。

5. イオンビームによる水素分析とメカニズム考察

イオンビームは水素等の軽元素を分析できる特徴を持つ。飛行時間差測定反跳粒子検出法³⁾を用いて加熱した試料の水素分布を測定することで水素の振舞いを検証した。セラミック試料は、ヒーターを取り付けた試料台に取り付け、ビームラインの真空チャンバーに設置した。試料を 100、200、300°C に加熱し、その間にイオンビーム分析を実施した。この結果表面から 2 μm 程度の深さまでの水素分布が得られた。何も加熱しない場合は水素が保持されているのに対し、100°C では水素が減少し 200°C 以上ではほぼ測定されなかった。この結果と前年度までの加熱ガス分析結果や参考文献¹⁾から、表面に付着した水分子の一部が分解され、水素原子がセラミック内部に保管される。200°C 以下の加熱では、分解されなかった水分子が放出され、それ以上の温度では水素原子が表面で水素ガスとなり放出されたと考えられる。

結言

セラミックの一種であるリチウムジルコネートを用いて、水蒸気を吸収・分解させ、加熱により水素ガスを製造する手法の開発を行ってきた。水素ガスの発生量を増加させるため、1 μm 程度の微粉化、触媒の成膜、イオン注入による改質を実施した。この結果、メッキによる触媒の効果が最も高いことが分かった。またセラミックはサイクル利用が可能であることも判明した。

参考文献

- 1) K. Suzuki *et al.*, Nucl. Inst. Meth. B 478, 169-173 (2020)
- 2) K. Kataoka *et al.*, International Journal of Hydrogen Energy, 50 B, 599-604 (2024)
- 3) K. Yasuda *et al.*, Nucl. Inst. Meth. B 442, 53-58 (2019)

2.5.2.2

溶融ナトリウムを用いたアンモニア合成装置の開発
 Development of Ammonia Synthesis Equipment Using Molten Sodium
 遠藤伸之
 Nobuyuki ENDO

Abstract

It has been reported that ammonia can be synthesized by passing a mixture of hydrogen and nitrogen gases through molten sodium. We have started the development of ammonia production using this reaction. In order to develop ammonia production method, establishment of reaction analysis method is necessary, by which the reaction was analyzed. Furthermore, based on the knowledge obtained by the analysis, we designed and prototyped a new experimental device.

要約

水素と窒素の混合ガスを溶融ナトリウム中に通すことでアンモニアが生成することが報告されている。我々はこの反応を利用したアンモニア製造手法の開発を進めている。新しいアンモニア製造手法を開発するために必要な分析手法の確立と反応解析を実施し、得られた知見を用いて新しい実験装置を設計・試作し、アンモニア合成量の増大を目指した。

緒言

水素キャリアとしてのアンモニアは、国が掲げるエネルギー基本戦略においてグリーン成長戦略の重要分野として早い導入が期待されている。現在の主なアンモニア製造法は高温高压下での反応となり、大型のプラントが必要である。物質・材料研究機構において見いだされた新しい手法¹⁾は、加熱したナトリウムに窒素と水素の混合物を通すことでアンモニアが生じ、加圧が不要であることから維持管理が容易で装置の小型化も期待され、需要に応じた柔軟な運用が可能となり、ローカル水素サプライチェーンの構築に適切なシステムとなり得る。しがしながら、現状ではアンモニアの生成量が著しく低い状況である。本研究では実用化に向けた課題として、反応を促進する条件の最適化の探索を行い、アンモニアの生成・回収量を増やすことを目的とした。

結果の概要

本研究では、ナトリウム存在下でアンモニアや他の生成物の分析手法の確立を目指し、ガスクロマトグラフ質量分析装置による定性分析と、イオンクロマトグラフを用いた手法により、広範囲の濃度でアンモニアを計測する手法を確立できた。ナトリウムの取扱い技術を有する県内企業において、加熱溶融ナトリウム中に窒素・水素混合ガスを通気して反応模擬ガスを作製し、アンモニアおよび他のガスを分析できることを実証した。また、アンモニア合成反応の詳細を把握するため、温度・圧力制御およびガス回収が可能な各部品を接続した内容量100mLの卓上超小型反応装置を製作し、アンモニア合成によってできる反応生成物の分析と反応解析を実施し、効率のよい生成条件を探索することができた。また得られた知見を用い、規模をより大きくした内容量1Lの小型装置(図1)を設計・製作し、この装置を用いてガス流量、温度等の種々の条件を変化させてアンモニア生成実験を実施した。条件の最適化により安定したアンモニア生成が可能となり、合成効率を向上させることができた。

結言

卓上の超小型反応装置および新たに設計製作した小型装置を用い、種々の条件下でのアンモニア生成を探索することにより、安定したアンモニアの合成を実現できた。今後は更にアンモニア生成量を促進するため、反応条件の最適化や金属粒子などの反応促進剤の効果を検証する。加えて得られた知見をフィードバックした小型装置の改良を行い、アンモニア製造の更なる高効率化を図る。

参考文献

- 1) F. Kawamura, T. Taniguchi., Scientific Reports, 7, 11578 (2017)

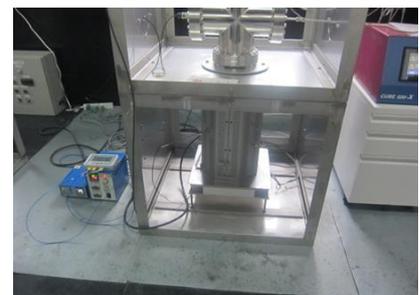


図1 試作した小型実験装置

*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。

2.5.2.3

ナノ構造化を活用した新規水素貯蔵材の開発
 -摩擦強加工による金属材料のナノ構造化-

Development of New Hydrogen Storage Materials by Making Use of Nanometer-scale Structuring
 -Nanostructure Formation in Metals by Severe Surface Friction-

安永和史*1

Kazufumi YASUNAGA

Abstract

Severe plastic deformation was imparted to hydrogen storage metals from the surface by roller burnishing and nano-sized defects were formed in the metal in order to improve hydrogen absorption and desorption property. Pure Mg specimens burnished by newly developed Ni roller showed nanostructured crystal formation and higher hydrogen desorption property.

要約

水素吸蔵放出特性を改善することを目的として、ローラーバニシング加工による強度の塑性変形により水素吸蔵材料中にナノサイズの欠陥を導入した。新規に作製した Ni 製のローラーを用いて摩擦強加工された純 Mg 試料は、ナノ構造化の進展及び水素放出特性の向上が観察された。

緒言

水素の吸蔵能力のある金属または合金中に、転位や結晶粒界等のナノサイズの欠陥を高密度に導入することにより、水素の吸放出量の増大及び吸放出温度の低下等の特性を改善する可能性があると考えられる。ナノサイズの欠陥を金属中に導入する手法として、滑らかで硬度の高い材料を用いて、金属表面を摩擦強加工するローラーバニシング法を採用した。この加工法は強度の塑性変形を金属表面に誘起することが可能で、それに伴い表面領域に高密度のナノサイズの欠陥が形成されると期待される。本研究では、純 Mg の円盤試料を摩擦強加工することにより、ナノ構造の導入状態及び水素の放出挙動について調査した。

成果の概要

実験に用いた純 Mg 試料は、純度 99.95% (大阪富士工業株式会社) の鑄造棒を直径 60 mm、厚み 1 mm の円盤形に機械加工したものである。

摩擦強加工は、ローラーバニシング法で行った。これまでの円筒型のローラーを用いていたが、本年度は円盤試料外周部を加工中のローラーの回転状態及び接触状態の改善を目的として、ローラーの直径を軸方向に変化させた傾斜ローラーを作製し、使用した。図 1(a) は、Ni 製の傾斜ローラーを設置した摩擦強加工治具で、ローラーの直径は右から左に向けて減少している。摩擦強加工領域は、円盤試料の外周 10 mm 幅で、図 1a において黄色く示したローラーの領域が試料外周領域と接触する。図 1(b) は、純 Mg 円盤試料を摩擦強加工中の様子で、試料回転台の上に円盤試料が固定され、その外周領域を傾斜

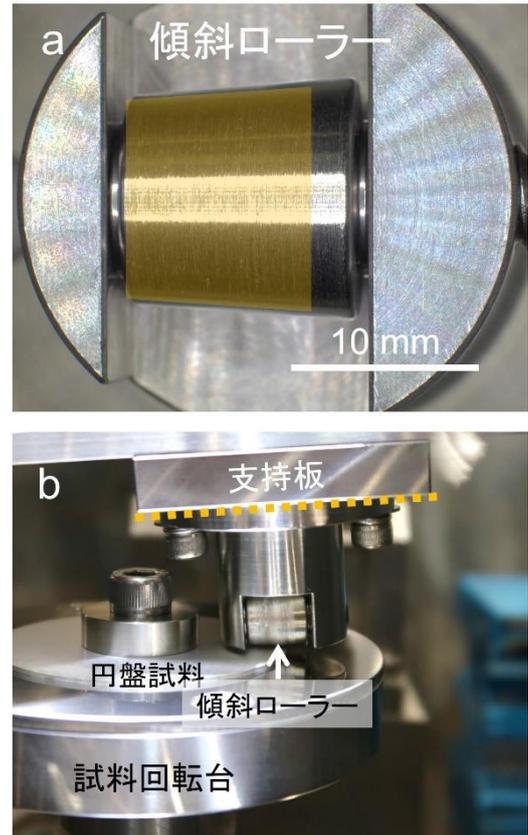


図1 (a) 純 Mg 円盤試料の摩擦強加工に用いた傾斜ローラーを設置した摩擦強加工治具、(b) 傾斜ローラーで純 Mg 円盤試料を摩擦強加工中の様子

*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。

ローラーが摩擦している。試料の加工中における酸化防止を目的として、摩擦強加工は、試料を設置したチャンバー内部を真空排気後に Ar ガスを導入して行った。加工後の純 Mg 試料は、酸化防止及び水素放出温度を低下させる触媒の付与を目的として、スパッタ装置を用いて厚み約 10 nm の Ni を蒸着した。水素の吸収は、赤外線加熱炉を用いて水素雰囲気中で 150°C、60 min の熱処理により行った。水素放出挙動は、昇温脱離法 (Thermal Desorption Spectroscopy: TDS) により調査した。

摩擦強加工後の純 Mg 試料は、集束イオンビーム法により断面方向から微細組織を観察できるように薄膜化した。ナノ構造の導入状態は、透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope: TEM) を用いて走査透過電子顕微鏡法 (Scanning Transmission Electron Microscopy: STEM) により観察した。図 2 は、負荷荷重 20 N、回転速度 3000 rpm、加工時間 10 min の条件で摩擦強加工した純 Mg 試料の断面を示す STEM 明視野像である。図 2(a) は、表面から約 1.3 μm の深さ領域にわたる微細組織で、微細化が進展した領域と遅れた領域 (粗大結晶粒) が混在している。図 2(b) は、(a) 中の微細化領域の拡大像で、矢印で示すような黒い粒状のコントラストが観察された。これらは個々の結晶粒であり、表面から最大深さ約 800 nm の領域に存在した。図 3 は、結晶粒の粒径を測定した個数分布で、結晶粒径は 11~73 nm の範囲に分布し、平均粒径は 26 nm であった。旧ローラーを用いて摩擦強加工した試料では、100 nm 未満の粒径をもつ結晶粒は形成されていなかった。

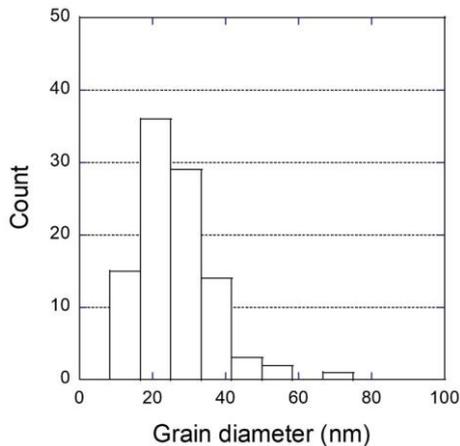


図 3 負荷荷重 20 N、回転速度 3000 rpm、加工時間 10 min の条件で摩擦強加工した純 Mg の微細化領域に形成された結晶粒の粒径分布

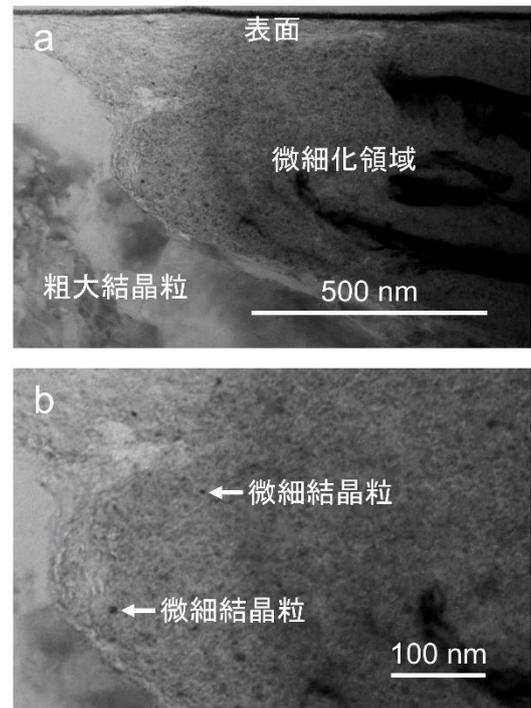


図 2 負荷荷重 20 N、回転速度 3000 rpm、加工時間 10 min の条件で摩擦強加工後の純 Mg の断面微細組織の (a) 低倍率像、(b) 高倍率像

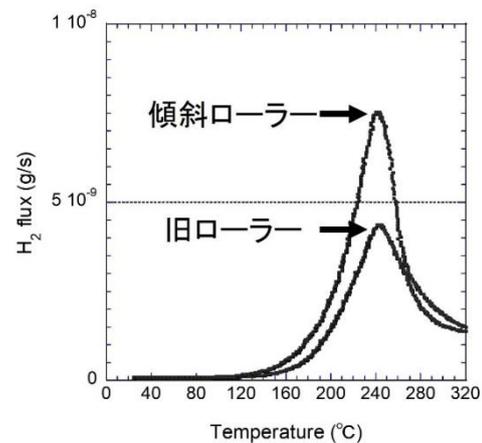


図 4 傾斜ローラー及び旧ローラーで摩擦強加工した純 Mg の水素放出挙動の比較

図 4 は、傾斜ローラーで摩擦強加工後に水素を吸収させた純 Mg 試料からの水素放出挙動で、旧ローラーで加工した試料のデータも示した。傾斜ローラーで加工した試料からの水素の総放出量は、旧ローラーで加工した試料のそれと比較して、約 1.5 倍に増加した。

結言

ローラーバニシングに用いる金属製ローラーの形状の改良により、これまでナノ構造化の程度の低かった負荷荷重 20 N の摩擦強加工条件においても、結晶粒の微細化が進行し、水素の総放出量は増加した。これらの結果は、ローラーと試料表面の接触状態が改善されたため加工中に効率よく塑性変形が導入され、水素放出挙動にも影響を及ぼしたことを示唆していると考えられる。

2.5.2.4

ナノ構造化を活用した新規水素貯蔵材の開発
—気相からの急冷とイオン照射—

Development of New Hydrogen Storage Materials by Making Use of Nanometer-scale Structuring
- Deposition of Mg on Substrate Cooled with Liquid Nitrogen and Ion Irradiation-

石神龍哉^{*1}

Ryoya ISHIGAMI

Abstract

A magnesium (Mg) was deposited on substrates cooled with liquid nitrogen and Mg plates were irradiated with neon (Ne) ions to form nanometer-scale structure in Mg films. By depositing Mg while introducing argon (Ar) and hydrogen, a Mg film with a highly dense and various nano-scale cracks was formed. After depositing nickel (Ni) of 12 nm thickness on the Mg film and hydrogenating at 150°C for 1 hour, 0.05 wt% hydrogen was released below 320°C. By depositing Ni of 18 nm thickness on a polished Mg plate, of the Ni-deposited Mg plate being irradiated with 190 keV Ne ions of 3.4×10^{16} ions/cm² and hydrogenated at 150°C for 3 hours, 1.6×10^{-5} g of hydrogen was released below 240°C. Assuming that the hydrogen was emitted from a region below 700 nm that was damaged by Ne ion irradiation, hydrogen content in the region was calculated to be 11.5 wt%.

要約

マグネシウム(Mg)膜にナノスケールの構造を形成するため、液体窒素で冷却された基板へのMgの堆積、およびMgへのネオン(Ne)イオン照射を行った。アルゴン(Ar)と水素を導入しながらMgを堆積した結果、様々なナノサイズの亀裂が高密度で形成されたMg膜を作製できた。12 nmのニッケル(Ni)を堆積後150°Cで1時間水素化すると320°C以下で0.05 wt%の水素が放出された。一方、研磨されたMg板にNiを18 nm堆積後に190 keVのNeイオンを 3.4×10^{16} ions/cm²照射し150°Cで3時間水素化すると、240°C以下で 1.6×10^{-5} gの水素が放出され、これがNeイオン照射により損傷を受けた700 nm以下の領域から放出されたとすると、その領域の水素含有量は11.5 wt%と計算された。

緒言

現代では排出される温室効果ガスを全体としてゼロにするカーボンニュートラル社会を実現するため、水素の利用が推進されている。僻地や離島、災害時の病院や避難所、店舗や家庭用などでは大規模な水素供給網ではなく地域分散・自立型エネルギー供給システムが普及すると考えられるが、そこでは一般人の利用が想定されることから温度や圧力は専門業者ではなく一般人が扱える範囲でなければならない。

本研究では、材料中にナノレベルの乱れを高密度に導入し、そこに水素を吸着・吸蔵することで、重量当たりの水素貯蔵量が従来より大きく、より低い温度で水素を放出可能な、安全、安価で軽量な水素貯蔵材料を開発することを目標とした。

成果の概要

1. 液体窒素で冷却された基板への堆積によるナノ構造形成と水素吸蔵放出実験

希ガスや水素ガスの導入により数 Pa の圧力となった空間で Mg を蒸発させ、液体窒素によって冷却された基板に堆積させると、Mg 水素化物と希ガスの混合物が凝結し、その状態から温度を上げると不活性ガスや水素が放出されナノスケールの空洞を持った Mg が形成されると考え、装置を製作して実験を行った。

ヒーターを内蔵したルツボ、液体窒素で冷却できる堆積基板ホルダー、Ar ガスと水素ガスを導入できるマスフローコントローラが付属した実験装置を製作した。数 Pa の圧力で Mg を蒸発すると、気体となった Mg は気体分子と衝突して直進できず基板に到達できなくなると考え、ルツボの周辺から水素ガスを基板方向に噴き出し、蒸発した Mg をその気流に乗せて基板に到達できるようにした。ルツボと基板との距離は約 8 cm とした。

実験では、Ar と水素の導入量は両方とも 0.25 sccm (standard cubic centimeter per minute) とし、真空容器と真空ポンプとの間にあるバルブの開度を調整することにより圧力を 0.8~0.9 Pa とした。堆積基板は厚さ 0.05 mm の銅箔で、Mg の付着力を増すため表面を #400 の紙やすりで粗くした。ルツボには Mg の切削片と粉末を入れた。基板ホルダーにはんだ付けされたパイプに液体窒素を流し、温度が -190°C 付近で一定になってから Mg を蒸発させた。ルツボに取り付けたヒーターに流した電流は 7.0 A であった。堆積時間は 27 分間であった。

^{*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。

銅箔を基板ホルダーに固定したネジに堆積した Mg を走査型電子顕微鏡 (SEM) で垂直方向から観察して得られた像を図 1 に示す。図 1 から、様々なナノスケールの亀裂が高密度で形成されていることが分かる。また、斜め方向から観察すると、膜は細い柱が束になったような形状で、柱と柱の間には隙間が形成されていたことが分かった。膜の厚さは約 1 μm であった。

銅箔に堆積した Mg に、水素の吸蔵放出用触媒として Ni を 12 nm 堆積後、約 1 気圧の水素中において 150 $^{\circ}\text{C}$ で 1 時間保持して水素を吸蔵させ、その後に昇温脱離ガス分析 (TDS) 装置に入れて 5 $^{\circ}\text{C}/\text{分}$ で 320 $^{\circ}\text{C}$ まで昇温して水素の放出速度を測定した。得られた TDS スペクトルを図 2 に示す。図 2 から、130 $^{\circ}\text{C}$ 付近から水素の放出が始まり、温度とともに水素放出速度が大きくなることが分かる。320 $^{\circ}\text{C}$ までに放出された水素量は 6.2×10^{-7} g と計算された。銅箔に堆積した Mg は厚さ 1 μm で均一であると仮定し、放出された水素はすべてこの膜から放出されたとすると、堆積した Mg の質量に対する放出水素量の割合は 0.05 wt% となった。

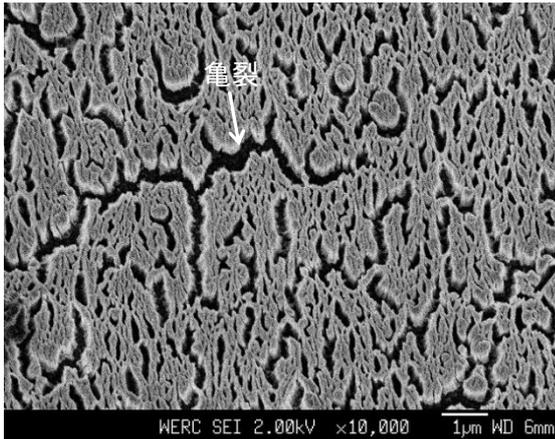


図 1 基板の固定に使われたネジに堆積した Mg を表面垂直方向から観察した SEM 像

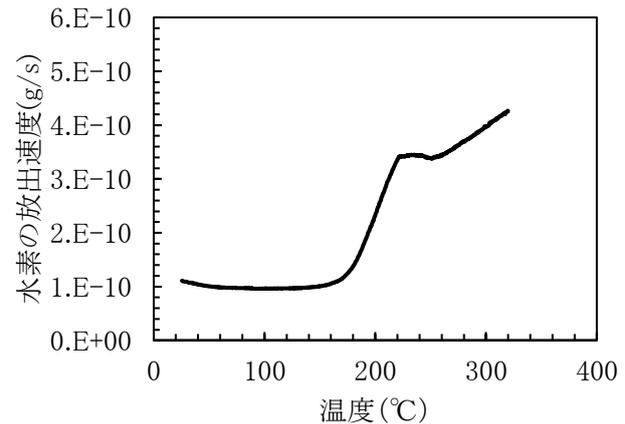


図 2 水素化された Mg からの水素の昇温脱離スペクトル

2. Ne イオン照射された Mg 板の昇温脱離

高エネルギーイオン照射によって原子を弾き出し、空孔およびその集合体を形成することでナノ構造を導入する実験を行った。鏡面研磨後に Ni を堆積し、190 keV の Ne イオンをマイクロ波イオン源イオン注入装置により照射した。約 1 気圧の水素中において 150 $^{\circ}\text{C}$ で加熱して水素化した後、TDS 装置に入れて 5 $^{\circ}\text{C}/\text{分}$ で 320 $^{\circ}\text{C}$ まで昇温して水素の放出速度を測定した。照射量は 1.2×10^{16} または 3.4×10^{16} atoms/cm 2 とし、水素化時間は 1 時間または 3 時間とした。その結果、照射量 1.2×10^{16} atoms/cm 2 、水素化時間 3 時間ではほとんど水素は放出されなかったが、照射量 3.4×10^{16} atoms/cm 2 、水素化時間 3 時間のとき、240 $^{\circ}\text{C}$ 以下で 1.6×10^{-5} g の水素が放出された。190 keV の Ne イオン照射により Mg は深さ 700 nm までの領域に損傷が導入されることから、放出された水素はすべてこの領域に存在したと仮定すると、その領域における水素含有量は 11.5 wt% と計算された。

結言

Mg の水素含有量を飛躍的に向上させ水素貯蔵材料として使用するため、Ar および水素を導入しながら液体窒素で冷却された銅箔に Mg を堆積する実験、および Mg 板への Ne イオン照射実験を行った。堆積した Mg に Ni を堆積後、水素中 150 $^{\circ}\text{C}$ 1 時間加熱して水素を吸蔵させると、320 $^{\circ}\text{C}$ 以下で 6.2×10^{-7} g の水素が放出された。Mg 膜中の水素含有量は 0.05 wt% と計算された。Ni 堆積後に 190 keV の Ne イオンを 3.4×10^{16} ions/cm 2 照射し、水素中 150 $^{\circ}\text{C}$ で 3 時間加熱して水素を吸蔵させると、240 $^{\circ}\text{C}$ 以下で 1.6×10^{-5} g の水素が放出された。この水素がすべて、Ne イオン照射によって損傷された領域から放出されたとすると、その領域の水素含有量は 11.5 wt% と計算された。

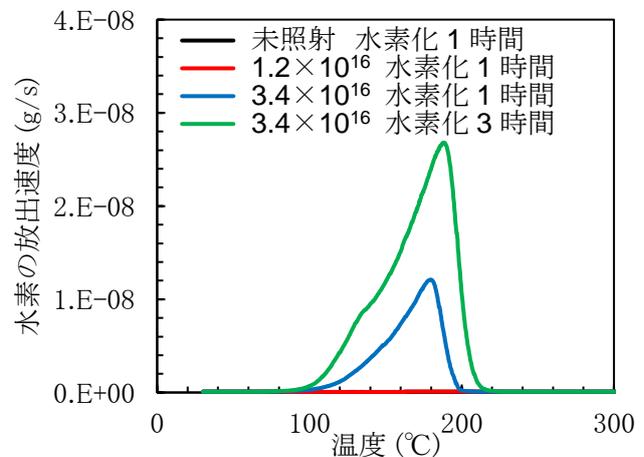


図 3 Ne イオン照射後に水素化された Mg からの水素の昇温脱離スペクトル

2.5.2.5

イオン照射を利用した規則型 Fe-Al 合金中の空孔制御による多量水素貯蔵に関する研究

Study of Hydrogen Absorption Behavior of Vacancies in Fe-Al Compound Alloy Introduced by Ion Irradiation

堀史説^{*1}、徐虬^{*2}、大澤一人^{*3}、安永和史^{*4}

Fuminobu HORI, Qiu XU, Kazuhito OHSAWA and Kazufumi YASUNAGA

Abstract

Although the interaction between vacancies and hydrogen atoms in this type of Fe-Al alloy is not cleared yet. In this study, we have performed slow positron beam and elastic recoil detection (ERD) measurements for irradiated and hydrogen introduced Fe₅₀Al₅₀ alloy with B2 structure to estimate the hydrogen trapping state in a vacancy site.

要約

新しい水素貯蔵材料として B2 規則 Fe-Al 合金について、原子サイズのナノ空間である「空孔」と水素原子との相互作用について調査した。このタイプの Fe-Al 合金における空孔と水素原子の相互作用はまだ詳しくはわかっていない。本研究では、B2 構造を有する化学量論組成 Fe₅₀Al₅₀ 合金に対して照射および水素導入し、低速陽電子ビーム測定や反跳粒子検出などの手法を用いて空孔サイトにおける水素捕捉状態を推定した。

緒言

次世代のエネルギー源として期待される水素はその反応性の強さから安全に取扱い保管する方法が必須である。水素の貯蔵や輸送においては、液体や気体での取扱いが効率的には良いが、安全性の観点からは他の手法が望まれる。その方法として金属に水素を吸収させる水素吸蔵合金があるが、ほとんど実用化されていない。我々は一般的には水素化合物を形成する水素吸蔵合金とは異なり、金属固体内の結晶欠陥である空孔に捕獲される水素に着目し、これまで B2 構造を有する Fe-Al 金属間化合物に関する欠陥制御と水素の吸収に関する研究に取り組んできた。実際にこの合金が空孔内に水素を捕獲することは明らかになっているが、実際の空孔内での水素状態、特に複数の水素が捕獲された状態についてはその検出例もほとんどなく解明されていない。そこで粒子線照射によって Fe-Al 合金内に空孔を導入し電気化学的に水素を大量に注入することで注入された水素がどのように空孔に捕獲されるか、低速陽電子ビームなどの手法を用いて詳細な評価を行った。

成果の概要

合金作製と照射及び水素注入

試料は高純度の鉄とアルミニウム母材から Fe-50at.%Al の組成を秤量し、アーク溶解により合金化したボタン材を作製し 3 mm×4 mm×1 mm の板状に切り出したものを用いた。これを均質化と残留欠陥除去の熱処理後急冷した。作成した試料は、水中で 40 °C に維持しながら、京都大学複合原子力研究所電子線加速器により 8 MeV 電子線を 1×10¹⁸ /cm² 照射することにより空孔を導入した。照射後の試料に NH₄SCN を加えた 1×10⁻³ mol/L の酸性溶液 50 mL に試料を陰極とし電流密度 0.1 A/cm²、室温の条件下で 8~160 時間電流を流すことで、水溶液中で電気化学的な水分解による水素注入を行った。注入後の試料は全て X 線回折測定(XRD)を行った後、京都大学複合原子力研究所の低速陽電子ビーム装置により 1~30 keV のエネルギーで陽電子消滅ドップラー拡がり及び陽電子寿命測定を行った。また同じ試料について昇温脱離分析法(Thermal Desorption Spectroscopy; TDS)および弾性反跳粒子検出(Elastic Recoil Detection Analysis; ERDA)測定による水素捕獲量と堆積深さ分布測定を行った。

空孔導入試料中の捕獲水素状態

TDS の結果はこれまでと同様に 500-600 K 付近に水素放出ピークが観測され、注入時間に依存して放出量増加も確認されている。これらの試料の XRD 測定結果を図 1 に示す。照射による高角度側にピークシフトした歪みが水素注入とともに 80 時間までに本来の回折ピーク位置に戻り、さらに 160 時間の注入では低角度側に

^{*1}大阪公立大学大学院・工学研究科、^{*2} 京都大学・複合原子力科学研究所、^{*3} 九州大学・応用力学研究所、^{*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

本研究は、大阪公立大学、京都大学、九州大学および(公財)若狭湾エネルギー研究センターが公募型共同研究として実施したものである。

シフトする格子膨張が観察された。これは空孔に水素が捕獲されることで格子歪を緩和するが、複数の水素原子が空孔内に捕獲されることによる格子膨張の可能性を示唆している。

図2に水素注入後の低速陽電子ドップラーSパラメータ値の深さ分布を示す。陽電子エネルギーは観測試料表面からの深さに対応し8 keVでおよそ0.5 μmに相当する。この図から注入前には深さに対してほぼ直線的であるため空孔が均一に導入されていることを示している。水素注入後に表面付近でS値が減少しており、空孔に水素が捕獲されたことを示している。さらに注入時間80時間ではS値は0.51で変化せず、より深い方向にまでS値の減少が進行し水素が奥まで侵入して捕獲されたことがわかる。160時間注入ではS値が0.5にまで低下した。S値の低下は電子密度の上昇に対応するため、80時間注入前後で空孔内の電子密度すなわち水素原子の捕獲数が増加したことが推測される。そこでS値の変化の顕著な4 keVでの陽電子寿命を測定した結果、未注入での寿命値195 psが80時間で176 ps、160時間で160 psまで減少し、複数の水素捕獲した空孔の理論計算値で陽電子寿命が減少する傾向とも良く一致していた。

また、注入した水素量の試料深さ方向の分布を測定したERDAの結果を図3に示す。この図から堆積した水素の分布が注入時間とともに増加し表面から深さ方向におよそ0.2 μm付近まで進入している様子が観測されているが、この分布の変化は低速陽電子によるS値の深さ分布変化の傾向とほぼ一致していることから陽電子寿命とS値の変化が空孔に捕獲された水素の堆積分布を反映している裏付けとなっていることも確認できた。

結言

160時間までの水素注入による水素の空孔への捕獲状態を詳細に評価し、注入した水素が表面近傍の空孔に徐々に捕獲され、単空孔内に複数の水素原子が捕獲されていく多重捕獲過程を確認することに成功した。

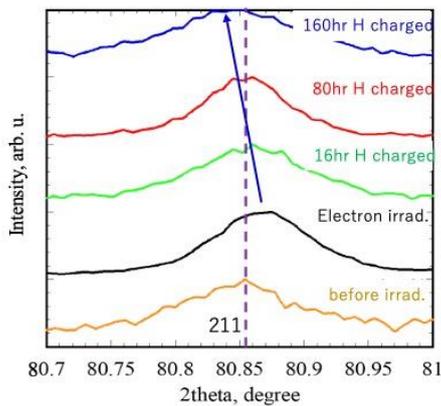


図1 電子照射後、電解水素注入したFe-Al合金のX線回折(211)ピーク変化

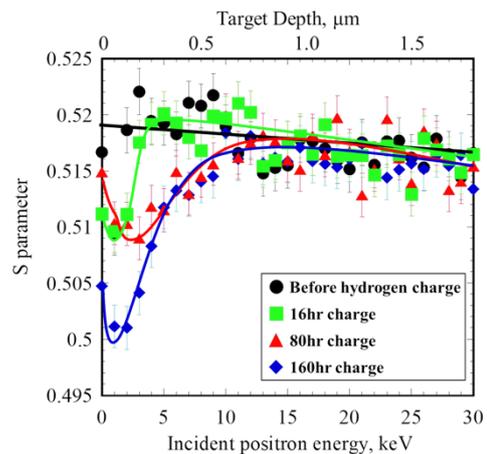


図2 水素注入したFe-Al合金での低速陽電子によるSパラメータの深さ分布変化

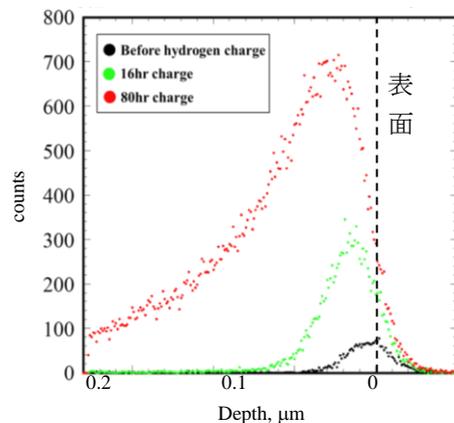


図3 水素注入したFe-Al合金中の水素深さ分布変化のERDA測定結果

2.6. 多様な分野の活動を支える技術開発

2.6.1. 加速器技術の開発・高度化

2.6.1.1

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 Wakasa Wan Energy Research Center

羽鳥聡^{*1}、栗田哲郎^{*1}、山田裕章^{*1}、廣戸慎^{*1}、清水雅也^{*1}、淀瀬雅夫^{*1}、
 湧上隆太^{*1}、小田部圭佑^{*1}、古川靖士^{*1}、羽田祐基^{*1}、北上悟^{*1}、石井勇揮^{*1}

Satoshi HATORI, Tetsuro KURITA,

Hiroaki YAMADA, Makoto HIROTO, Masaya SHIMIZU, Masao YODOSE, Ryuta FUCHIKAMI, Keisuke OTABE, Seiji FURUKAWA, Yūki HANEDA, Satoru KITAJO and Yūki ISHII

Abstract

In FY2023, the integration time of the high tension generation of the tandem accelerator reached 3426 hours. The operation time except the conditioning to maintain and improve the insulation was 2683 hours, 34 % of which figure was for the evaluation of the radiation-resistant performance of the electric devices durable in space. In FY2022, we introduced new type voltage dividing resistors and discharge points. We found no discharging marks nor degradation of resistors. New oscillator also introduced in FY2022 works well for an initial defect to be excluded. Although a sharp parasitic resonance in the RF system was found, the oscillator is operated avoiding the resonance.

要約

2023年度のタンデム加速器の運転時間は3426時間であった。実験のための運転時間の34%は宇宙機用半導体の耐放射線性能評価に用いられている。2022年度に更新した加速管デバイダー抵抗や放電ポイントは放電痕も抵抗値の劣化もなく良好である。高周波発振器は初期不良を克服し動作良好である。共振系にシャープな寄生共振の存在が確認されたが回避運転を行なっている。

緒言

若狭湾エネルギー研究センターの加速器施設は5 MV タンデム加速器、タンデム加速器のビームを利用するビームライン群、タンデム加速器を入射器とする200 MeV 陽子シンクロトロン(重イオンも加速可能、質量電荷比=2の重イオンの場合55 MeV/u)、シンクロトロンのビームを利用するビームライン群を備える。この装置の構成から、タンデム加速器は全ての加速器利用実験に用いられる。このためタンデム加速器をいかに安定に運転するかが重要である。

荷電粒子を加速しエネルギーを付与するには、荷電粒子の電界(電場)中での運動を利用する。タンデム加速器の場合、加速電場を二度利用する。したがって高エネルギーを得ようとする加速電場を与える加速高電圧をいかに高く発生・維持できるかが重要になる。加速高電圧の電位分布を一様にし、放電を起こしにくくする取り組みをおこなっている。絶縁構造物・加速管の電位分布を与える分割抵抗や高電圧発生用整流器、限流抵抗などの抵抗値の管理もその一環である。2022年度に加速管の電位分割システムを変更している。また加速高電圧を発生させる高周波発振器および共振系の更新・

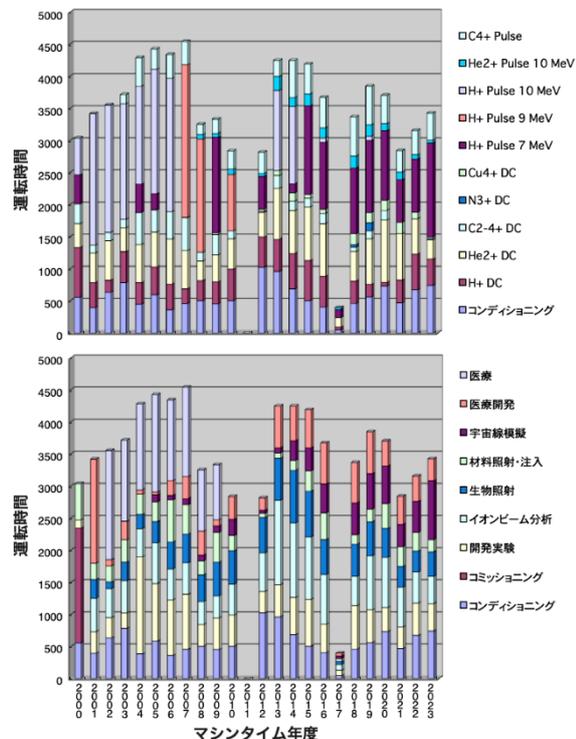


図1 タンデム加速高電圧運転時間の推移
 上)加速粒子 下)実験テーマごとの運転時間

^{*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
 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の受託を受けて実施したものである。

改造もおこなっている。これらに関して検証を行ったので、2023年度の運転状況とともに報告する。また、イオン源に関するトラブルおよびその解決も報告する。

シンクロトロンはタンデム加速器よりさらに高エネルギーの荷電粒子を得ることができる。加速高周波電場を何度も通過させることにより実現する。加速高周波電力増幅器への高周波入力信号の発生機構・制御機構のデジタル化とインターフェース開発に取り組んでいる。これに関しては、稿を割いて詳細に報告する。

加速器運転状況

図1はタンデム加速器の加速高電圧を発生させた時間の年度ごとの推移を表したものである。上は加速粒子・エネルギーにより、下は加速器利用実験のテーマによりまとめたものである。2023年度の運転時間は3426時間であった。加速高電圧維持のためのコンディショニングは743時間であった。COVID-19蔓延の影響からはほぼ脱したが2019年の3847時間には及ばない。シンクロトロンによる陽子加速に1465時間タンデムを運転したが(図1上のH⁺ pulse 7 MeV)、このうち63%、921時間が宇宙機用半導体への照射に充てられた。前年度の480時間から倍近くの伸びであり、宇宙機用半導体の耐放射線評価利用は今後も増えると考えられる。

重イオン源のフッ素コンタミネーション

重イオン源はタンデム加速器へ入射する負イオンを発生させるイオン源の一つで固体表面と被イオン化原子間の相互作用を利用するプラズマスパッター型イオン源である。固体表面をプラズマで衝撃することで負イオンの高速放出を促し、固体表面の仕事関数を下げ負イオン生成確率を上げるためにセシウム蒸気が導入される。プラズマ発生はプラズマ化ガス中でのアーク放電で行う。アーク放電が途絶えるアクシデント時に供給され続けるセシウム蒸気を遮断するため、アーク放電用電源と連動した緊急遮断弁(CsGV)が備えられている。重イオン源のCsGVにスルーリークが認められたので交換した。

交換後の炭素ビーム引き出し運転でセシウム供給ライン加熱のタイミングで炭素のイオン化分岐比を著しく低下させるほどのフッ素がイオン化されていた。CsGVのメーカー仕様に変更され、接流体部の潤滑剤にパーフルオロポリエーテル(PFPE)が用いられていることがわかった。PFPE除去剤を用い除去した。除去剤もフッ素化合物(デカフルオロペンタン)であるので、潤滑剤除去作業後、真空排気しつつベーキングを行った。フッ素コンタミネーションは抑制され、また、潤滑剤除去後のバルブの動作も良好であった。

2022年度更新機器の状況

1. 加速管デバイダー抵抗および放電ポイント

加速管デバイダー抵抗や放電ポイントに放電痕はなかった。デバイダー抵抗導入時(2022年5月)、もともと量の多い76 M Ω 抵抗(公差1%)の抵抗値平均と標準偏差はそれぞれ75.91 M Ω 、0.29 M Ω であったが、2023年度定期点検時で75.95 M Ω 、0.32 M Ω であり、著しい劣化は認められなかった。しかし、抵抗体とマウント用のキャップの接合面の剥離とリード線の断線が生じたものが発見された。加速管へのマウント方法の詳細な調査と見直しを行った。

2. 高周波発振器と共振系

高周波発振器は入出力インターフェース部の不具合により最悪DCバス電圧出力、RF出力が停止する初期不良があったが、ファームウェアの更新により問題なく運転を行なっている。さらに共振周波数探索、Q値計測の分解能が向上し、共振電流制御の精度も向上した。

高周波給電方法を共振トランス方式から直接高周波コイルに給電する方式にあらためた。寄生共振を1/10以下に抑えられたことがわかった一方で、高周波コイルー高周波電極共振系の共振周波数近傍に同じ程度のQ値をもつ共振が確認された。原因は調査中だが共振周波数探索の範囲を制限する運用を行なっている。

結言

2023年度のタンデム加速器の運転時間は3426時間であった。シンクロトロンによる陽子ビーム利用は1465時間であり、その63%が宇宙機用半導体の放射線耐性評価の実験に充てられた。

重イオン源のセシウムゲート弁を交換したことでフッ素の混入が問題となった。仕様変更によりバルブの接流体部の潤滑剤にPFPEが用いられるようになったためである。除去剤を用い、フッ素混入の影響は除去された。

2022年度に更新された加速管デバイダー抵抗および放電ポイントは放電痕もなく抵抗値の劣化も見られず良好である。高周波発振器は初期不良があったがファームウェア更新で現在は動作良好である。共振系に今までに見られなかったシャープな寄生共振の存在が認められた。新たな共振を回避する運転を行なっている。

2.6.1.2

シンクロトロン高周波加速制御系のデジタル化

Development of Digital RF Control System of a Synchrotron at WERC

栗田哲郎*1

Tetsuro KURITA

Abstract

A new RF control system is in under development. By using FPGA, digital signal processing is utilized all over the system. The new system utilizes MicroTCA.4 platform and AMC's developed by Mitsubishi Electric Defense & Space Technologies Corporation. The system consists of parts of an RF acceleration control and of a BPM signals processing. The part of RF acceleration control has been utilized in normal operations since October 2023. As a result, acceleration efficiency and extracted current have increased. Some modifications are required to reduce noise on the feedback signal to dump quadrupole mode oscillation.

要約

FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いてデジタル化されたシンクロトロンの高周波加速制御系を開発している。新システムでは MicroTCA.4 をプラットフォームとし三菱電機ディフェンス&スペーステクノロジーズ株式会社によって開発された AMC (Advanced Mezzanine Card) を用いる。高周波加速制御部とビーム位置モニター(BPM)信号処理部によって構成されている。高周波加速制御部は、2023年10月から運用を開始した。その結果、加速効率と出射電流量が増加した。四極モード位相振動を抑制するフィードバック信号にノイズが重畳しており、改良が必要である。

緒言

シンクロトロンの高周波加速制御系(LLRF: Low Level RF)の更新に取り組んでいる^{1,2)}。保守が困難になってきた現有システムを更新し、さまざまな問題点を克服するために、発振器およびフィードバック制御系、BPM 信号処理系のすべてをFPGA (Field Programmable Gate Array) を用いたデジタル高周波信号回路で構築したシステムの開発を行っている。

MicroTCA.4 をプラットフォームとして三菱電機ディフェンス&スペーステクノロジーズによって開発された AMC (Advanced Mezzanine Card)³⁾を用いている。AMC には、Xilinx 社の Zynq XC7Z045 (FPGA + Arm Cortex-A9)が用いられており、内部の Linux 上で EPICS⁴⁾ IOC が動作しており、EPICS Channel Access を通じて設定とモニターを行う。

三つの AMC で構成されており、一つは、空洞電圧と周波数の制御、BPM 信号を用いたフィードバック制御(高周波加速制御部)である。2019年度に製作した。もう二つの AMC ボードは、6台の BPM の信号を処理する(ビーム位置モニター信号処理部)。2020年度末に製作した。2021年度後半から、ビーム試験を開始した。試験と並行して、オペレーションインターフェースの開発もおこなっている⁵⁾。2023年10月から高周波加速制御部の運用を開始した。

高周波加速制御部の導入の効果

2023年10月23日から、高周波加速制御部の運用を開始した。運用しながら不具合の解消とオペレーションインターフェースの改良をおこなった。新システム導入前後のシンクロトロン加速効率および出射電流量のトレンドを図1、図2に示す。

図1より、加速効率が70%程度から80%程度に上昇していることがわかる。このため、出射電流量も2.5 nA程度から最大で3.5 nA程度に増えた。これは、次の2点が寄与していると考えている。

- ・ 2倍高調波の調整が精度良く行えるようになった。
 - 新システムでは基本波だけでなく高調波の振幅と位相も検波し、フィードバック制御しているので調整結果が再現される。旧システムでは、2倍高調波のフィードバック制御がなく不安定だった。
- ・ 横方向のビーム位置フィードバックの反映周期が上がった。
 - BPM フィードバック信号の加速周波数への反映周期が50kHz から300MHz に上がっており、加速周波数の変化幅が少なくなっている。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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。

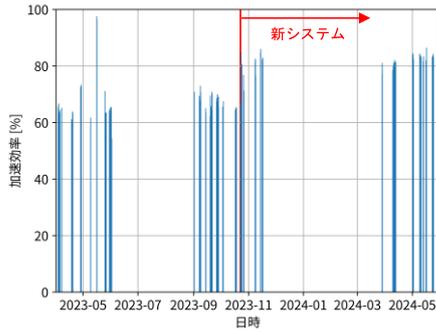


図1 プロトン 7MeV 入射 200MeV 出射時の加速効率のトレンド

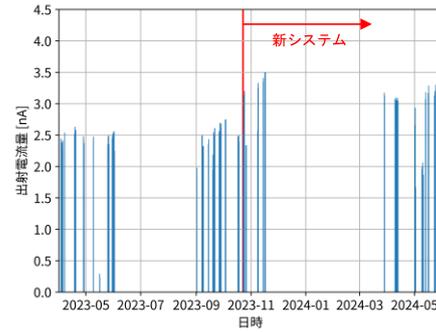


図2 プロトン 7MeV 入射 200MeV 出射時の出射電流量のトレンド

四極モード位相振動フィードバック系の問題

RF バケツ内でバンチが回転すると、バンチ信号の波高がシンクロロン周波数の2倍の周波数で振動する。このモードの位相振動を抑制するためにバンチ信号の包絡線の微分信号を空洞電圧の振幅にフィードバックする。四極モード位相振動フィードバックの回路を図3に示す。新システムでは、微分演算がデジタル信号処理によって行われており、フィードバック信号に大きなノイズが重畳している(図4 中段)。カットオフ周波数 50kHz のローパスフィルターが設置されているが、ノイズを除去できていない。ノイズを除去するために微分演算に Savitzky-Golay フィルターの適用を検討している。これは、数学的には多項式フィッティングと等価である。Savitzky-Golay フィルターを適用した場合のシミュレーションの結果を図4 下段に示す。ノイズの除去が行えていることがわかる。

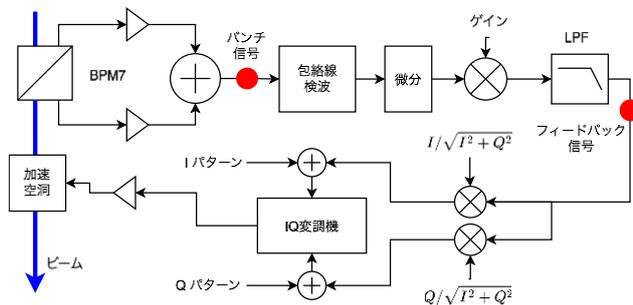


図3 四極モード位相振動フィードバック回路

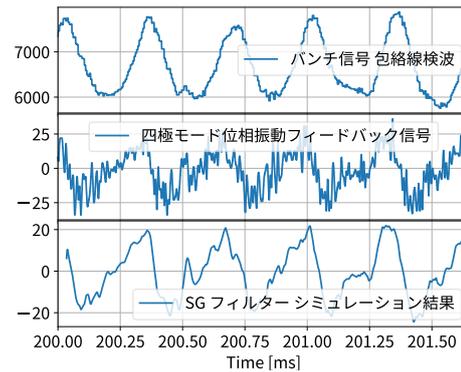


図4 上段:バンチ信号エンベロープ。中段:現状のフィードバック信号。下段:微分回路を改良した場合のシミュレーション

結言

FPGA を用いてデジタル化されたシンクロロンの新高周波加速制御系の運用を 2023 年 10 月から開始した。制御系の更新に成功したのみならず、ビーム電流量の増加に寄与している。しかし、ADC の遅延が変化することがあるなど FPGA プログラムの不具合が残っており、引き続き不具合対応をおこなっている。また、T-Clock での周波数制御、四極モード位相振動のフィードバック制御など、より高度な調整を試みる。ビーム位置信号処理系の運用を 2024 年度に開始する。

参考文献

- 1) 栗田哲郎 他、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報、24、71 (2021)
- 2) 栗田哲郎 他、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報、23、55 (2020)
- 3) M. Ryoshi et al., Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 340 (2016)
- 4) <https://epics-controls.org>
- 5) 栗田哲郎、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報、25、76 (2022)

2.6.2. 加速器利用分析技術の開発・高度化

2.6.2.1

イオンビームを用いた充電時におけるリチウム電池内の正・負極間の
リチウムイオン移動解析技術開発に関する研究

Study on Development of Analytical Technique of Lithium Ion Migration between Positive and Negative
Electrodes in Lithium Batteries by Charging Condition Using Ion Beams

土屋文*¹、高廣克己*²、鈴木耕拓*³

Bun TSUCHIYA, Katsumi TAKAHIRO and Kohtaku SUZUKI

Abstract

The lithium (Li) depth distributions in multi-layers thin films of Au/LiCoO₂/LATP and Pt/Li_{1.4}Ti₂Si_{0.4}P_{2.6}O₁₂-AlPO₄ (LATP) sides in all-solid-state Li batteries (Au/LiCoO₂/LATP/Pt) were *in-situ* measured using time-of-flight elastic recoil detection (ToF-ERD) before and after charging at various open circuit voltages of 1.8 and 2.2 V. The ToF-ERD spectra revealed that the Li concentrations, x , in Li _{x} CoO₂ anode was reduced to 0.65 and 0.30 times from the initial value, respectively, at the charged voltages of 1.8 and 2.2 V. On the other hand, the Li concentration in LATP for the Pt/LATP side increased approximately 3 times higher than that before charging. These results show that it is able to estimate the amounts of the Li migration between the anode and cathode using the ToF-ERD technique.

要約

ToF-ERD 法を用いて、1.8 および 2.2 V まで充電された全固体 Au/LiCoO₂/LATP/Pt 試料中の Au および Pt 側における Li 濃度分布をそれぞれ測定した結果、Li _{x} CoO₂ 正極中の Li 濃度(x)は、電圧の増加とともに初期値から約 0.65 および 0.30 倍まで減少した。また、LATP/Pt 界面近傍における LATP 中の Li 濃度は約 3 倍の値まで増加した。これらの結果は、LiCoO₂ 正極中の Li⁺イオンが LATP 負極へ駆動されることを示しており、充電による Li 電池の正・負極間の Li⁺イオン移動量を定量的に評価することを可能とした。

緒言

現在、電解質を有機電解液から固体電解質へと変更した全固体 Li 電池の研究が進められている。この電池の開発において、充放電時における正極、負極、固体電解質内およびそれぞれの界面における Li 濃度をその場で直接計測し、Li 電池内の Li⁺イオンの移動量および蓄積量を把握する必要がある。本研究では、飛行時間型反跳粒子検出法(ToF-ERD; Time-of-Flight Elastic Recoil Detection)法を用いて、充電時における Li 電池内の正・負極/固体電解質界面近傍の Li 濃度分布を測定し、正・負極間の Li⁺イオン移動量を評価した。

実験

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、約 65 nm の LiCoO₂ を正極、150 μm の Li⁺イオン伝導性ガラスセラミックス(LATP)を固体電解質、約 24 nm の Au および約 16 nm の Pt を集電体とした全固体 Li 電池 (Au/LiCoO₂/LATP/Pt)試料を作製した。次に、9 MeV の銅(Cu⁺)イオンビームを用いた ToF-ERD 法によって、1.8 および 2.2 V の電圧まで充電された試料の Au および Pt 側の Li 濃度分布を測定した。充電後の試料中の Au および Pt 側における Li 濃度分布をそれぞれ測定した結果、Li _{x} CoO₂ 正極中の Li 濃度(x)は、電圧の増加とともに初期値から約 0.65 および 0.30 倍まで減少するが、Li 濃度勾配が LiCoO₂/LATP 界面から約 30 nm の領域に生じることがわかった。さらに、約 10%程度の Li 濃度欠損が LiCoO₂/LATP 界面から約 170 nm の LATP 固体電解質領域に生じることが判明した。また、LATP/Pt 界面近傍における LATP 中の Li 濃度は急激な増加を示し、充電前の Li 濃度に比べて約 3 倍の値まで達することがわかった。さらに、LATP/Pt 界面から約 200 nm から 50 nm の領域における LATP 中の Li 濃度は深さに対して徐々に増加し、充電前の Li 濃度に比べて約 1.3 倍の値まで達することもわかった。

結言

実験結果より、2 種類の Li _{x} Ti _{y} (PO₄)₃ その場負極が LATP/Pt 界面から約 0~50 nm および 50~200 nm の範囲において形成されることが判明した。さらに、LiCoO₂ 正極中の Li⁺イオンが LATP/Pt 界面近傍にその場形成された Li _{x} Ti _{y} (PO₄)₃ の負極へ駆動されることを示しており、充電時における Li 電池中の Li⁺イオン移動量を定量的に評価することを可能とした。

*¹名城大学・理工学部、*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および京都工芸繊維大学が公募型共同研究として実施したものである。

2.6.2.2

液体中のリチウム分析技術の開発
Development of Liquid Analysis Method for Lithium
鈴木耕拓*¹
Kohtaku SUZUKI

Abstract

In-air analysis methods have been developed in The Wakasa Wan Energy Research Center. By using a nuclear reaction between a proton beam and a lithium target, it is now possible to measure the lithium distribution in a deep region of more than 10 μm depth from the surface without any background.

要約

若狭湾エネルギー研究センターでは、大気中でイオンビーム分析できる手法を開発してきた。陽子ビームとリチウムとの核反応を用いることで、表面から 10 μm 以上の深い領域のリチウム分布をバックグラウンドフリーで測定できるようになった。

緒言

リチウム等の軽元素の分析は一般的に非常に困難であるが、イオンビームを用いた手法は軽元素の定量分析が可能である。これまで若狭湾エネルギー研究センターでは、飛行時間差測定反跳粒子検出法 (TOF-ERDA) によるリチウム分析が行われてきたが¹⁾、測定は真空中で行われるため、固体物質内のリチウム分析に限られていた。しかし現実に実用化されているリチウムイオン電池は液体であり、今後も改良され性能が向上していくと考えられる。そのためには、液体中のリチウムを直接定量分析できる手法は非常に有用である。当センターでは、大気中におけるイオンビーム分析の手法を開発しており、水素の分析を実施してきた²⁾。この手法を応用することで、液体中のリチウムを定量分析する手法を開発した³⁾。

大気中分析手法

リチウム分析には、 ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$ の核反応を用いる。この反応では 8 MeV 前後の高エネルギー α が発生するため、試料表面から深い位置で反応が起こっても検出が可能である。陽子ビームのエネルギーは、反応断面積のピーク付近であり、前後で断面積がフラットな 3 MeV とした。

若狭湾エネルギー研究センターの照射室 1 に設置されている元素分析コースのビームラインを用いる。このビームラインでは 200 nm 厚の窒化シリコン薄膜をビーム取り出しウインドウとして用いる。測定したい試料はウインドウから 1 mm 下流に設置し、ウインドウを通過したビームは大気 1 mm を通り試料に照射する。試料中で上記の核反応が起これば、高エネルギー α が発生し一部は試料外へ放出される。半導体検出器はビームから 140° の真空中に設置されており、140° 方向に飛び出した α は大気とウインドウを通過し検出器で検出される。核反応で発生した α のエネルギーは一定であるとみなせる。従って、検出された α のエネルギーにより深さ方向の情報が得られる。また高エネルギー α を捉えるため、バックグラウンドフリーの測定である。本手法により深さ方向で 10 μm 以上の深さまで分布測定および定量が可能となった。

結言

核反応を用い、大気中で液体中のリチウム分析ができる手法を開発した。本手法では、バックグラウンドフリーでかつ、深さ 10 μm 以上の分布の測定が可能である。今後は本測定手法をリチウムイオン電池の分析に適応していく。

参考文献

- 1) K. Suzuki *et al.*, Nucl. Inst. Meth. B 478, 169–173 (2020)
- 2) K. Suzuki *et al.*, Nucl. Inst. Meth. B 450, 135–138 (2019); K. Suzuki *et al.*, Trans. Mat. Res. Soc. Japan 45[4], 97–101 (2020)
- 3) K. Suzuki *et al.*, Nucl. Inst. Meth. B 554, 165413 (2024)

*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

2.6.3. 放射線場で利用される機器・材料の評価技術開発

2.6.3.1

ジルコニウム合金中の欠陥と水素の相互作用
Interaction between Hydrogen and Defects in Zr Alloys
安永和史*¹、渡辺英雄*²
Kazufumi YASUNAGA and Hideo WATANABE

Abstract

Interaction between hydrogen and defects formed by plastic deformation in Zircaloy-4 was investigated. Deuterium gas release behaviors showed different manner in non-deformed and deformed specimens probably due to the formation of dislocations.

要約

Zry-4 中に塑性変形により導入した欠陥と水素の相互作用について調査した。熱処理試料及び塑性変形を導入した試料からの重水素の放出挙動は異なり、転位の存在に起因した現象と考えられた。

緒言

ジルコニウム(Zr)合金は、軽水炉の燃料被覆管材料として使用されている。燃料被覆管は、原子炉運転中に中性子照射による弾き出し損傷による照射欠陥の形成、及び水の放射線分解により発生する水素や高温水と被覆管表面との反応により生じる水素を吸収し蓄積する。水素の吸収は、Zr合金中で固溶さらには水素化物の形成を引き起こし、高燃焼度において材料が脆化に繋がる問題がある。このような表面酸化膜を通して侵入する水素の蓄積が単に炉内滞在時間に依存するか、燃焼度・照射量にも依存するかは不明で、材料中の水素蓄積機構の解明は燃料寿命の延伸に繋がると考えられる。ジルカロイ4(Zry-4)において、熱処理材と冷間加工材に対して同一条件で重水素を照射・蓄積させた後に、その放出挙動を調査することにより、欠陥の放出挙動に与える影響を調査した。

成果の概要

実験に用いた Zry-4 試料は、初期厚さ約 115 μm の板材を縦横 10 mm×5 mm の長方形に切断加工し、 3.0×10^{-4} Pa の真空中において 630°C で 2h 熱処理したものである。Zry-4 の化学組成を表 1 に示す。熱処理後の Zry-4 試料は、圧延装置を用いて冷間加工(cold working CW)し、照射欠陥の模擬として転位を導入した。圧延率は 0~20%で、転位の導入量の異なる試料を作製した。その後、重水素イオンを九州大学応用力学研究所に設置された軽イオン加速器を用い、30 keV の D_2^+ イオンを室温で照射量 3.0×10^{21} ions/ m^2 照射した。重水素の放出挙動は、昇温脱離ガス分析(Thermal Desorption Spectrometry; TDS)法を用いて調査した。

表 1 ジルカロイ4(Zry-4)の化学組成

Zry-4	Sn	Fe	Cr	Zr
wt.%	1.29	0.20	0.11	Bal.

試料の微細組織の観察には、福井県若狭湾エネルギー研究センターに設置された透過型電子顕微鏡(TEM、JEM-3000F、JEOL)を用い、走査透過型電子顕微鏡法(Scanning Transmission Electron Microscopy; STEM法)により明視野像を取得した。STEM観察に用いた電子の加速電圧は 300 kV である。

図 1 は、Zry-4 の熱処理材(冷間加工率 0%の Zry-4 試料)及び 20%冷間加工材からの重水素の放出挙動を比較したグラフである。縦軸は重水素の流束で、検出器が捉えたガス分子の単位時間当たりの量(molecule/s、1秒間当たりの分子数)、横軸は試料温度(°C)である。昇温速度は、1 K/s として測定した。黒色で表示した Zry-4 の熱処理材からの重水素放出挙動は、欠陥由来ではない、あるいはその影響を極力抑制した状態の Zr合金本来の挙動を示すと考えられる。約 400~700°Cの温度領域に1つの放出ピーク(ピーク温度約 560°C)が

*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実施したものである。

存在している。一方、赤色で表示した Zry-4 の 20% 冷間加工材からの重水素の放出挙動は、約 60°C から放出が開始され、約 410°C に放出ピークを示した。5% 冷間加工材からの重水素の放出挙動も同様で、冷間加工材は、Zry-4 熱処理材と比較して約 150°C 低温側に放出温度領域が遷移した。これらの結果から、冷間加工を施した試料では欠陥が導入され、重水素の放出挙動に影響を与えている可能性がある。

様々な冷間加工率の Zry-4 試料からの重水素の総放出量を比較することにより、欠陥の存在の及ぼす重水素の捕獲への影響を評価することが可能と考えられる。表 2 は、冷間加工率が 0%、5%、20% の Zry-4 試料から放出された重水素の総放出量及び捕獲率をまとめた結果である。捕獲率は、重水素の総放出量に対する注入量の比率である。冷間加工した Zry-4 試料は、欠陥の導入のない熱処理材(0% CW)と比較して重水素の捕獲率が約 20% も高いことから、欠陥は重水素の捕獲サイトとして働いていることが示唆された。

冷間加工を Zry-4 に施すことにより、どのような欠陥が導入されるのかについて明確にするために微細組織を観察した。図 2 は、冷間加工により Zry-4 に形成された欠陥の状態を比較した STEM 明視野像である。熱処理材では、Zry-4 中に元来存在する金属析出物の近くに転位線が存在・残存していた。一方、5% の冷間加工材では、直線状の転位が形成されていた。20% の冷間加工材は、転位の分布が局在化し、絡まり合った状態で高密度に存在する転位網が形成された。Zry-4 の熱処理材を冷間加工することにより、照射欠陥の模擬として転位の導入を目的としていたが、微細組織観察からその存在及び、加工率に上昇による導入量の増大が確認された。

結言

冷間加工により塑性変形を加えた Zry-4 試料の重水素の放出挙動を熱処理試料の挙動と比較した。冷間加工された Zry-4 試料では、重水素の放出温度領域の低下及び蓄積率の増大を示す結果が得られた。冷間加工により転位線さらには転位網が形成されており、重水素の放出挙動に影響を与えたと考えられた。

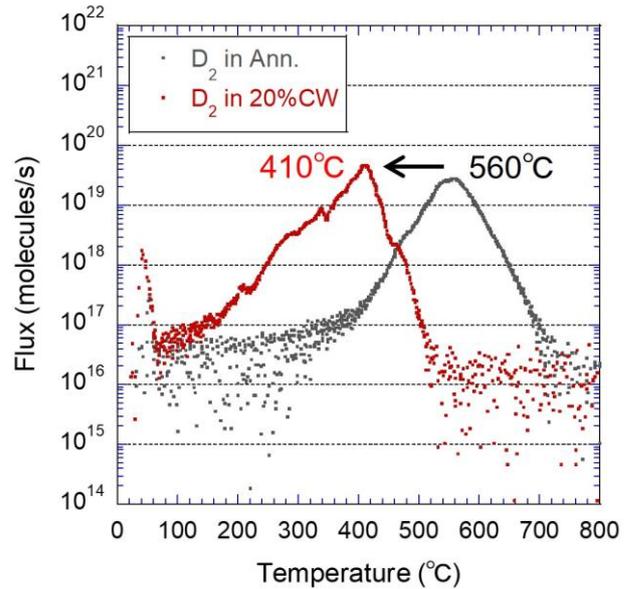


図 1 Zry-4 の熱処理材(黒)及び 20% 冷間加工材(赤)の重水素放出挙動

表 2 冷間加工率の異なる Zry-4 試料の重水素の総放出量及び蓄積率

	D ₂ 総放出量	蓄積率(%)
0%CW	2.2E+21	73
5%CW	2.8E+21	93
20%CW	2.7E+21	90

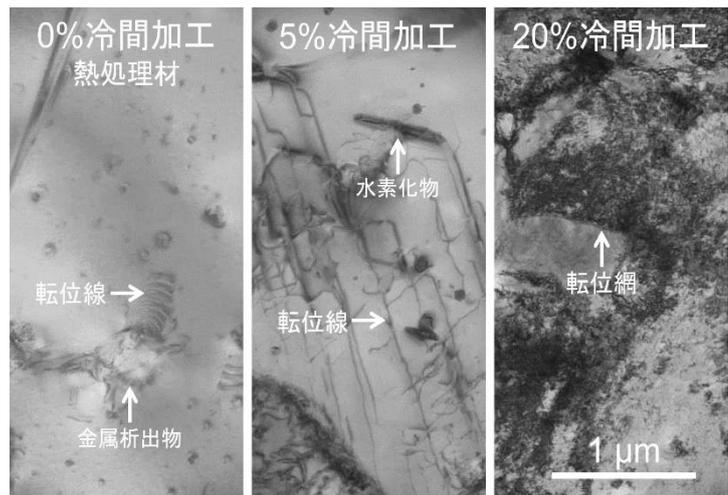


図 2 冷間加工により Zry-4 に形成された欠陥の加工率依存

2.6.3.2

プロトン照射した Fe-Cu モデル合金の機械的性質に及ぼす損傷速度の影響

Effect of Damage Rate on Mechanical Property Changes in Proton-Irradiated Fe-Cu Model Alloys

福元謙一^{*1}、野志勇介^{*1}、石神龍哉^{*2}、宇田欽治^{*2}

Ken-ichi FUKUMOTO, Yusuke NOSHI, Ryoya ISHIGAMI and Kinji UDA

Abstract

In order to understand the effect of damage rate on the irradiation hardening behavior of reactor pressure vessel model alloys, proton irradiation tests were performed over three orders of magnitude of damage rate at the same irradiation field and nano-indentation hardness tests were conducted. The results showed that irradiation hardening was larger at lower damage rates, and this effect was accelerated with increasing Cu content. This suggests that the effect of damage rate is dominant in the formation process of Cu-enriched precipitates. At high damage rates, the effect does not appear, suggesting that the effect appears below a certain threshold damage rate. The effect of damage rate might be caused by the effect of damage rate on the vacancy behavior, which are responsible for the diffusion of Cu atoms.

要約

原子炉圧力容器モデル合金の照射硬化挙動に与える損傷速度の影響を明らかにするため、同一の照射場で3桁に亘る損傷速度でのプロトン照射試験を行い、超微小押し込み硬さ試験を実施した。その結果、低損傷速度での照射ほど照射硬化量が大きくなり、その影響はCu含有量の増加に伴い促進されることが分かった。このことから、Cu濃縮析出物の形成過程に損傷速度の影響が発現することが示唆された。一方、高い損傷速度の場合、その影響は現れず、一定のしきい損傷速度以下で影響が発現することが示唆された。このような損傷速度の影響は、Cu原子の拡散を担う空孔の挙動に影響を与えることで発現すると考えられた。

緒言

原子炉圧力容器(RPV)鋼の照射脆化は重要な高経年化事象の一つであり、軽水炉の60年超運転下でのRPV鋼の健全性を担保するため照射脆化メカニズムの解明と高精度な脆化量の予測が不可欠である。照射脆化研究では現実的な時間スケールで60年超運転相当の中性子照射量を確保するため、試験炉にて2-4桁程度高い中性子束(損傷速度)での加速試験が行われる。近年、照射脆化には損傷速度が影響し、特に実機照射条件である低損傷速度で照射されたRPV鋼ほど脆化量が大きくなることが報告された¹⁾。しかし、照射損傷過程は中性子のエネルギースペクトルや照射温度など、様々な因子に影響を受けるため、厳密に損傷速度の影響を抽出した知見は少ないのが現状である。

本研究ではRPV鋼の照射損傷による機械的性質の変化に及ぼす損傷速度の影響を明らかにすることを目的とし、同一の照射場を用いて3桁の範囲での損傷速度を選択して照射試験を行い、照射硬化量に与える損傷速度の影響を抽出した。

実験方法

本研究ではRPVモデル合金として真空アーク溶解・冷間圧延で製作されたFe-xCu (x=0.05, 0.25 and 0.50 wt.%)モデル合金を用いた。試験片形状は11.5×2.2×0.3 mmの短冊状である。Cu原子を母材Fe中に固溶させるため、825℃で4時間溶体化熱処理を行い、水冷焼入れを行った。熱処理後、酢酸-過塩素酸-ブトキシエタノール混合液中で電解研磨(26 V, 0℃)を行い表面を鏡面に仕上げた。

プロトン照射は若狭湾エネルギー研究センターのマイクロ波イオン源イオン注入装置で実施した。照射には190 keVのH⁺イオンを用いた。照射温度は300℃であり、損傷ピーク深さ800 nmにおける照射量は0.05 dpaと0.10 dpaの2条件である。損傷速度は7.3×10⁻⁷から7.2×10⁻⁴ dpa/sの範囲で4条件とした。なお、損傷量はイオン注入解析用ソフトウェアSRIM2013を用い、純Feと仮定してはじき出し閾エネルギーをE_d=40 eVとして計算した。

硬さは超微小押し込み硬さ試験機(ELIONIX ENT-1100)を用い、ナノインデンテーションにより押し込み深さ200 nmで測定した。190 keV H⁺イオン照射では深さ約1000 nmまで照射欠陥が導入される。照射材では超微小硬さ測定の押し込み深さの4-5倍程度の深さ領域が塑性変形し、この領域の硬さの平均値が測定される。本研

^{*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。

究では押し込み深さを 200 nm とすることで損傷領域のみの硬さを得た。また、20 個以上の結晶粒に対して測定を行い、結晶方位と圧子との幾何学関係による硬さの測定値への影響を平均化した。

実験結果及び考察

Fe-Cu モデル合金の照射硬化挙動を図 1 に示す。すべての Fe-Cu モデル合金の各損傷量、損傷速度条件において照射硬化が認められた。照射硬化量は損傷量、Cu 含有量の増加に伴い上昇する傾向が認められ、Fe-0.25Cu モデル合金と、Fe-0.50Cu モデル合金では 0.10 dpa で硬化量が飽和した。これは母材 Fe 中に過飽和に存在する Cu 原子の照射促進拡散で生じた Cu 濃縮析出物と照射によって生じる格子間型転位ループによる硬化であると考えられる²⁾。

硬化量の未飽和領域にて照射硬化量に損傷速度の影響が現れ、低損傷速度での照射ほど硬化量が大きくなる傾向が認められた。特に、この影響は Cu 含有量の増加に伴い、促進されることが分かった。このことから、Cu 濃縮析出物の形成過程に損傷速度の影響が発現することが示唆された。

一方、すべての Fe-Cu モデル合金の 0.05 dpa 照射材においては、 7200×10^{-7} dpa/s と 660×10^{-7} dpa/s の照射硬化量はほぼ同等であった。このことから、損傷速度が高い場合には、その影響が発現せず、一定のしきい損傷速度以下にてその影響が発現するということが示唆された。

α -Fe 中の Cu 原子は空孔と複合体を形成し、拡散・集積することが知られている³⁾。損傷速度が低い場合、単位時間当たりの欠陥導入密度が低くなり、照射によって生じる格子間原子と空孔の再結合に時間的・空間的余裕が生じる。このことから Cu 原子の拡散を担う空孔の寿命が延び、Cu 原子の拡散・集積が促進され、結果的に硬化量が大きくなったと考えられる。今後、3次元アトムプローブトモグラフィや STEM/EDS などの分析手法を用いて Cu 濃縮析出物を直接観察し、損傷速度の影響を調査する必要がある。

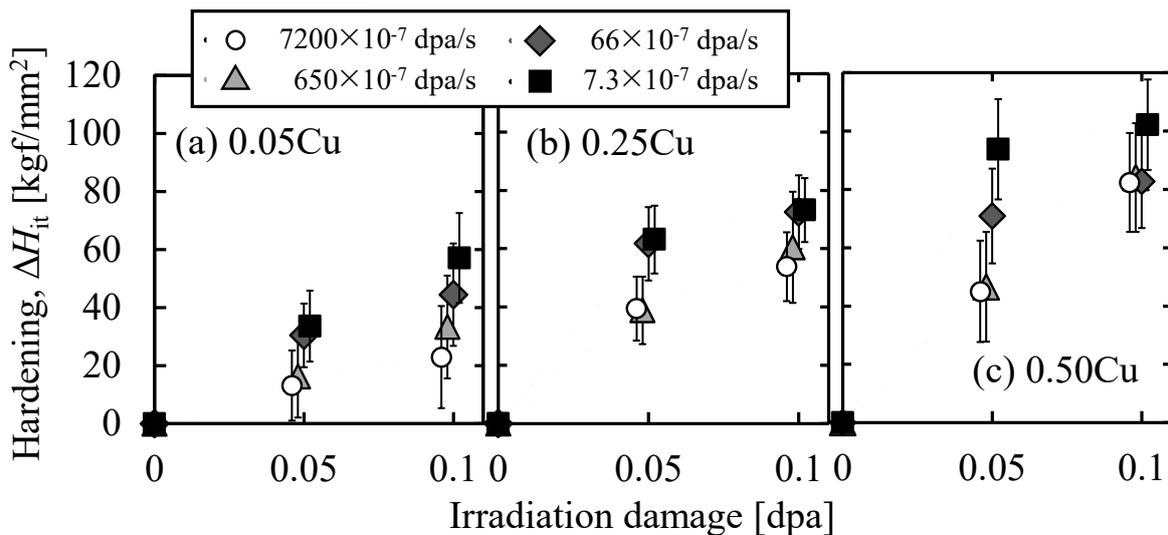


図1 Fe-Cu モデル合金の照射硬化挙動((a) 0.05Cu、(b) 0.25Cu、(c) 0.50Cu)

結言

原子炉圧力容器モデル合金の照射硬化挙動に与える損傷速度の影響を明らかにするため、同一の照射場で 3 桁に亘る損傷速度でのプロトン照射試験を行い、超微小押し込み硬さ試験を実施した。その結果、低損傷速度での照射ほど照射硬化量が大きくなり、その影響は Cu 含有量の増加に伴い促進されることが分かった。このことから、Cu 濃縮析出物の形成過程に損傷速度の影響が発現することが示唆された。一方、高い損傷速度の場合、その影響は現れず、一定のしきい損傷速度以下で影響が発現することが示唆された。このような損傷速度の影響は、Cu 原子の拡散を担う空孔の挙動に影響を与えることで発現すると考えられた。

参考文献

- 1) K. Asano, *et al.*, Proceedings of the International Symposium Fontevraud 7, p. A123 (2010).
- 2) Q. Xu, *et al.*, Phys. Rev. B, 73(13) 134115 (2006).
- 3) Y. Nagai, *et al.*, Phys. Rev. B, 63, 134110 (2001).

2.6.3.3

照射欠陥移行現象の体系化による核融合炉真空容器内トリチウムの蓄積量評価

Evaluation of Tritium Retention in the Fusion Reactor Vacuum Vessel

According to Comprehensive Modeling of Irradiation Defects Migration

小林 真^{*1}、石神龍哉^{*2}

Makoto KOBAYASHI and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

Tungsten will be used as the plasma facing components in fusion reactors. In this study, an energetic proton beam irradiation was carried out into tungsten samples to induce irradiation defects. Then, a positron annihilation measurement was conducted to know the size and density of irradiation defects formed by proton irradiation. Additionally, a tritium ion irradiation experiment was carried out to the proton-irradiated sample to decorate vacancies with tritium. For a tritium depth profile measurement, the conversion factor of the time duration of electro-polishing to the thickness of the tungsten sample to be solute into the liquid phase was quantitatively evaluated.

要約

核融合炉第一壁候補材料であるタングステンに対し、高エネルギープロトンビーム照射により照射欠陥を導入した。照射試料に対し陽電子寿命測定を行うことで残留照射欠陥のサイズや密度に関する情報を収集した。さらにトリチウムイオン照射により原子空孔にトリチウムを捕獲させ、続けて行うトリチウム深さ分布測定により原子空孔深さ分布を計測する予定である。その準備として、電解研磨時間と液相に溶出するタングステンの厚みに関する換算係数を定量評価した。

緒言

核融合炉において、真空容器における燃料トリチウム滞留量の高精度評価は、炉システム設計や炉運転シナリオの決定、安全性評価のため重要である。これまでに行った中性子照射やイオン照射したタングステン中の重水素滞留量評価実験から、タングステン中の照射欠陥に水素同位体が強く捕獲されることが示された^{1,2)}。従って、炉運転に伴う照射欠陥蓄積量を定量的に見積もることができれば、真空容器内トリチウム滞留量が予測可能となる。そこで本研究では、プロトンビーム照射により欠陥導入したタングステン中の照射欠陥に関する情報を得るため、陽電子寿命測定を実施した。また、同試料にトリチウムイオンビーム入射を行い、照射欠陥にトリチウムを捕獲させた。トリチウムの深さ分布を計測することで、照射欠陥深さ分布を定量評価する予定である。

実験

アライドマテリアル社製 0.5 mm 厚タングステン円板に対し、福井県若狭湾エネルギー研究センターのタンデム加速器を利用してプロトンビーム照射を実施した。照射条件は、プロトンエネルギーが 4 MeV、照射時間 30,000 s で、ビーム電流は約 2 μ A であった。照射温度が 200、600°Cと異なる 2 つの試料を調製した。比較試料として、京都大学複合原子力科学研究所の LINAC により電子線照射を行った。電子のエネルギーは 8 MeV で、約 4 日間照射を継続した。照射中は試料を水冷することで、温度を 100°C以下に保持した。

鹿児島大学の陽電子寿命測定装置を利用し、未照射タングステン円板(真空下 900°Cで 1 時間焼鈍処理)、及び上記照射試料の計測を実施した。



図 1 トリチウムイオン照射装置

^{*1}大学共同利用機関法人・自然科学研究機構・核融合科学研究所・研究部、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ

本研究は、大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所と(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。また、本研究は、MEXT KAKENHI 21K13903 の助成を受けた。

さらに、プロトン照射試料に対し富山大学においてトリチウムイオン照射を実施した。トリチウムイオン照射は図1の照射装置を用い、100°Cで10,000 s行った。これにより原子空孔密度と比例した密度のトリチウムが試料中に捕獲された。照射試料に対し電解研磨を一定時間行うことで液相にタングステンが溶出し、同時に、捕獲されているトリチウムも液相に移動するため、電解研磨と液相中トリチウム濃度計測を繰り返すことにより、原子空孔の深さ分布評価が可能となる。その実験準備として、核融合科学研究所において、電解研磨時間とタングステン表面溶出量に係るコールド実験を進めた。コールド実験では、水酸化ナトリウム水溶液にタングステン円板(陽極)と白金板(陰極)を平行に浸漬し、一定時間5 mAの直流電流印加した後、タングステン円板の重量減少を調べた。

結果・考察

図2は、各試料の陽電子寿命スペクトルである。事前に計測した1500°Cで焼鈍した試料の寿命スペクトルをベースラインとして解析することで、各試料における短い陽電子寿命を持つ欠陥の陽電子寿命値(τ_1)、長い陽電子寿命を持つ欠陥の陽電子寿命値(τ_2)を評価した。各試料のそれぞれの欠陥の割合を図3に示す。900°C焼鈍試料及び電子線照射試料では、寿命の短い成分しか検出されなかった。また、電子線照射試料では τ_1 はやや長くなっていることから、900°C焼鈍試料では残留した転位、電子線照射試料では、単原子空孔や転位ループの存在が示唆された。プロトン照射試料では τ_2 が評価可能で、このことからプロトンビームにより引き起こされたカスケード損傷の冷却過程にボイドが直接形成し残留していることが示唆された。600°C照射試料で τ_2 の割合が低いのは、照射中の欠陥回復の影響と考えられた。

図4は電解研磨時間とタングステンの重量減少の関係を示している。両者には線形関係があることがわかり、本実験で使用する試料は直径10 mmの円板であることから、1分間の研磨で約40 nmが研磨されることが示された。一方で水酸化ナトリウム水溶液の濃度が濃くなると、タングステンの結晶粒界が優先的に液相に溶出してしまい、均一な研磨が難しくなることが示されたことから、可能な限り低濃度の水酸化ナトリウム水溶液を用いて電解研磨を行うことが望ましいことがわかった。

結言

本研究では、プロトン照射したタングステン中に生成した照射欠陥のサイズや密度に関する情報を得るため陽電子寿命測定を実施し、その結果から、照射する荷電粒子の種類、照射温度により欠陥サイズ・密度に差異があることを明らかにした。さらに続けてトリチウムイオン照射を行い、材料中の原子空孔にトリチウムを捕獲させる実験を行った。この試料中のトリチウム深さ分布を評価するためのコールド試験として、電解研磨とタングステンの重量減少について定量した。今後、トリチウム深さ分布計測を行い、その結果から原子空孔深さ分布を明らかにする予定である。

参考文献

- 1) Y. Hatano et al., Nucl. Fusion 53, 073006 (2013)
- 2) S. Wang et al., Act. Materialia 244, 118578 (2023)

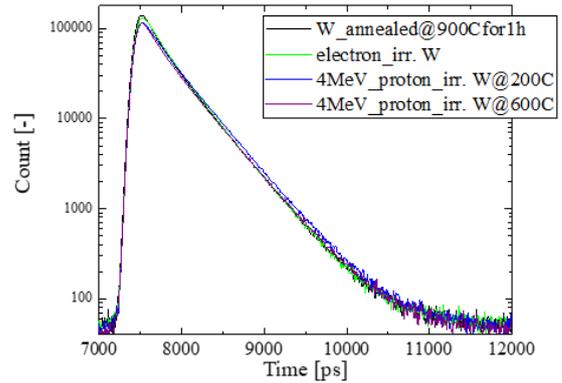


図2 陽電子寿命スペクトル

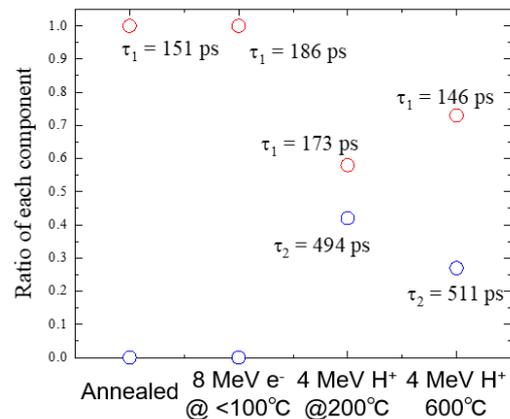


図3 各試料の陽電子寿命の解析結果

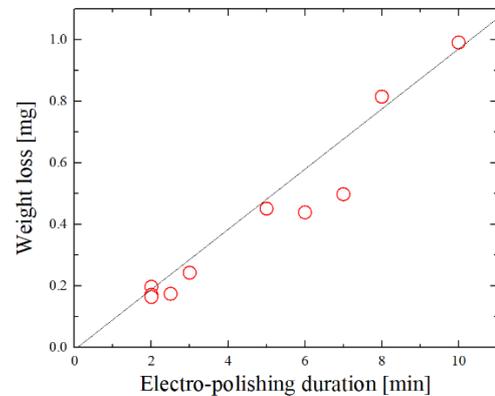


図4 電解研磨時間とタングステンの重量減少の関係

2.6.3.4

ダイバータ用タングステンにおける障害物強度因子の温度依存性に関する研究
 Study of Temperature Dependence of Obstacle Barrier Strength in Tungsten for Divertors
 東郷広一*1、水野魁人*1、福元謙一*2、石神龍哉*3
 Kouichi TOUGOU, Kaito MIZUNO, Ken-ichi FUKUMOTO and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

The temperature dependence of the correlation between irradiation hardening and microstructural changes was investigated to clarify the material hardening mechanism of tungsten divertor materials for fusion reactors. *In-situ* TEM observations during tensile test was performed in a TEM at 700°C to study the effect of test temperature on the change in the obstacle strength factor and fraction of cross-slip behavior measured by the interaction between dislocations and cavities in the temperature range from room temperature to 700°C. It shows that the hardening mechanism of tungsten depends on the irradiation hardening temperature and the temperature dependence of the microstructural changes.

要約

核融合炉用ダイバータ材であるタングステンの材料硬化メカニズムを明らかにするため、照射硬化と微細組織変化の相関則における温度依存性を調べた。試験温度 700°Cにおいて TEM 内引張「その場」観察を行い、室温から 700°Cの温度範囲において転位とキャビティの相互作用から測定される障害物強度因子と交差すべり挙動の割合の変化への試験温度の影響について研究を行った。タングステンの硬化メカニズムは照射硬化時の温度に依存し、微細組織変化の温度依存性とも関係があることが示された。

緒言

タングステン(W)は高融点、中性子照射に伴うスパッタリング率、スエリング性が低いことから、核融合炉用ダイバータ候補材に挙げられている。しかし W には中性子照射に伴い発生する照射欠陥(キャビティや転位ループ)が材料硬化を起こし、延性—脆性遷移温度の上昇に繋がることが懸念されている¹⁾。一方で W にヘリウム(He)イオン照射を行い、キャビティ(2 nm サイズ)を発生させた W 試料を用いて、室温環境下(脆性破壊領域)での透過型電子顕微鏡(TEM)内引張「その場」観察を行ったところ、転位とキャビティの相互作用(材料硬化メカニズム)から求められる硬化の度合い(障害物強度因子)の転位のすべり面(結晶方位)依存性が確認された²⁾。また W の延性—脆性遷移温度の境界領域である 450°Cにて TEM 内引張「その場」観察を行ったところ、2 nm サイズにおけるキャビティの障害物強度因子は室温のものと同様、また転位がキャビティを避けて通過する交差すべり挙動の割合は室温に比べて高い値を示した³⁾。そこで本研究では、W の延性破壊領域である 700°Cにて TEM 内引張「その場」観察を行い、温度の違いに伴う障害物強度因子と交差すべり挙動の割合の変化を調べることを目的とした。

方法

TEM 内引張「その場」観察を行うため、W 圧延材(t0.15 mm)から圧延方向に試料の切り出しを行い、試料のひずみ除去のため 1100°C×10 h の真空熱処理を行った(熱処理材)。その後、若狭湾エネルギー研究センターのタンデム加速器を用いて入射エネルギー 2 MeV、照射温度 700°C、照射量 0.2 dpa の条件で He イオン照射を行い、キャビティサイズの調整のために 1100°C×2.5 h の追加熱処理を行った(イオン照射材)。入射エネルギー 2 MeV の条件では、試料表面から約 2.8 μm の深さに照射欠陥が最も多く発生する。そこで照射欠陥が発生している領域にて TEM 観察ができるよう、試料表面を電解研磨にて研磨した後、試料の薄片化を行った。その後、九州大学の超高压電子顕微鏡と加熱引張ホルダー(Gatan 672)を用いて、加速電圧 1000 kV、700°Cの条件で TEM 内引張「その場」観察を実施した。

結果

本研究では温度の違いに伴う W でのキャビティの障害物強度因子と交差すべり挙動の割合の変化を調べた。本研究にて得られたキャビティは、他の先行研究^{2,3)}同様、約 2 nm の大きさであった。また本研究において、転

*1 福井大学・工学部、*2 福井大学付属国際原子力工学研究所、*3 (公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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と福井大学の共同研究として実施したものである。
 本研究は、JSPS KAKENHI JP23K03357 の助成を受けた。

位がキャビティにおいて張り出し、通過する様子を確認することができた(図1参照)。障害物強度因子(α)は、転位がキャビティに張り出した際の臨界張り出し角 Φ を用いて、「 $\alpha=\cos(\Phi/2)$ 」で求めることができ、本研究(700°C)にて得られた障害物強度因子の値は 0.37 ± 0.07 であった。これは先行研究^{2,3)}における室温、450°Cのもの(0.53 ± 0.02 , 0.49 ± 0.02)より小さな値を示しており、障害物強度因子の温度依存性(減少傾向)が確認された。室温環境下にて認められた障害物強度因子の転位のすべり面依存性($\{123\}$ 面 $\times\{110\}$ 面 $\times\{112\}$ 面)²⁾は、450°Cと同様³⁾、本研究(700°C)でも認められなかった。また700°Cにおける交差すべり挙動の割合は、約57%と求められた。室温、450°Cでの交差すべり挙動の割合は、それぞれ約11%、約39%^{2,3)}であり、交差すべり挙動の割合にも温度依存性(上昇傾向)が確認された。これより温度の上昇に伴って、障害物強度因子は減少傾向を示し、交差すべり挙動の割合は増加傾向を示すことが明らかとなった。

先行研究⁴⁾により、温度の上昇に伴いWのパイエルス応力(転位を動かすために必要な力)が減少することが報告されている。パイエルス応力の低下に伴い、転位が動きやすくなるため、450°C、700°Cにて転位がキャビティと相互作用を起こした際、室温環境下より転位がキャビティをせん断(通過)せずに避けて通過し、交差すべり挙動の割合が増加したものと考えられる。また温度の上昇に伴う障害物強度因子の減少も、交差すべり挙動と同様、転位がキャビティに十分に張り出す前に避けて通過したため、見かけ上、値が減少したものと推測される。今後はW中のキャビティサイズを大きくし、障害物強度因子や交差すべり挙動の割合に与える影響を調べていく。

結言

本研究により、温度の違いによるWでのキャビティの障害物強度因子と交差すべり挙動の割合の変化を調べた。温度の上昇に伴って、障害物強度因子は減少傾向を示し、交差すべり挙動の割合は増加傾向を示した。

参考文献

- 1) A. Hasegawa, Journal of Plasma and Fusion Research, Vol.92, 891–896 No.12 (2016)
- 2) K. Tougou *et al.*, Nuclear Materials and Energy, 30, 101130 (2022)
- 3) 福井真音 他, 日本金属学会 2022年春期(第170回)講演大会 予稿集, 53 (2022)
- 4) S. Yao *et al.*, Mechanics of Materials 140, 103211 (2020)

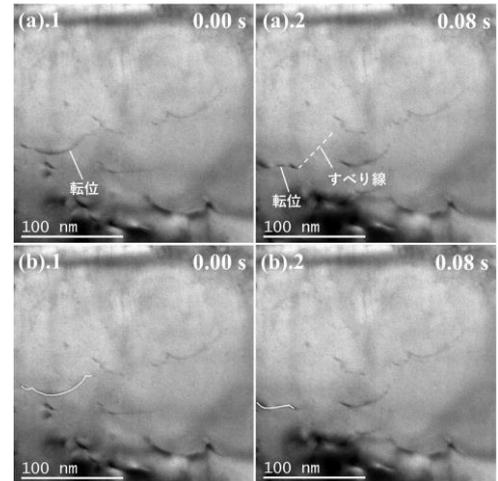


図1 転位がキャビティに張り出した様子

2.6.3.5

イオントラックオーバーラップ効果を取り込んだイオン照射効果シミュレーションコードの開発
Development of Simulation Code for Ion Irradiation Effects Including Ion-track Overlapping岩瀬彰宏*¹、堀史説*¹、西尾繁*²

Akihiro IWASE, Fuminobu HORI and Shigeru NISHIO

Abstract

Under the assumption that the lattice structures are modified only inside the narrow one-dimensional region along the ion beam path (the ion track), and that such modifications are affected by ion track overlapping, the exposure of oxide targets to spatially random ion impacts was simulated by the Monte Carlo method. By the Monte Carlo method, the evolutions of the two-dimensional images corresponding to the lattice structure transformation of ZrO₂ were simulated as a function of ion fluence. The total fractions of the modified areas were calculated from the two-dimensional images. They agree well with the experimental results.

要約

イオンビームの経路に沿った狭い一次元領域(イオントラック)の内部でのみ格子構造が変化し、このような変化はイオントラックの重なりの影響を受けるという仮定のもと、酸化物ターゲットが空間的にランダムなイオン衝撃を受けるシミュレーションをモンテカルロ法により行った。モンテカルロ法により、ZrO₂の格子構造変化に対する二次元イメージの変化をイオン照射量の関数としてシミュレートした。

緒言

高分子材料や酸化物などを高エネルギーの重イオンで照射すると、その飛跡に沿って原子配列が大きく乱れた直径数 nm の領域が生成される。個々のイオントラックの生成機構や内部構造に関する研究は多くある。一方、照射量が多くなることによるトラックオーバーラップは、ターゲット材料の構造や物性に大きな影響を与えると思われるが、その研究例はわずかである。本研究では、イオントラックのオーバーラップ頻度と、その2次元分布をモンテカルロ法で求めるシミュレーションコードを開発し、重イオン照射による材料の構造、物性変化の理解のための知見を得ることを目的とする。

成果の概要

ZrO₂のイオントラック内部の結晶構造は、トラックがオーバーラップすることにより単斜相から正方晶に変化することが実験¹⁾からわかっている。そこで、ZrO₂においてモンテカルロ法でトラックオーバーラップが起こる領域、すなわち、単斜晶から正方晶に構造変態する領域の2次元分布を求めた。その結果を図1に示す。青色領域が単斜晶、黄色領域がトラックオーバーラップによって生じた正方晶領域を示す。結晶構造変化の2次元イメージは、実験からは得ることのできないものであり、本シミュレーションコードが、重イオン照射効果のさらなる理解に役立つものと考えられる。

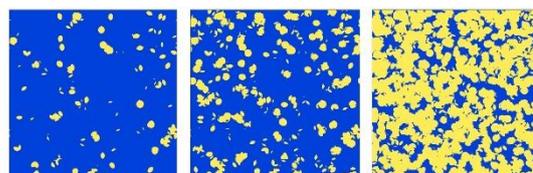


図1 135 MeV Ni イオン照射した ZrO₂の結晶構造 2次元分布 (左)2.5 × 10¹²/cm², (中) 5 × 10¹²/cm², (右)1.5 × 10¹³/cm²

結言

上で述べた結果は、イオントラックの寿命が無限大で、トラック内部の構造が一様な場合におけるものである。実際には、トラックの内部構造は一様でなく変調構造を有し、また高温で照射されると、トラック内部の格子欠陥が熱的に回復し、トラックが有限の寿命を有する場合もある。これらの効果も本モンテカルロ法に取り入れることは可能であり、その結果、照射効果のドーズレート(ビーム電流)依存性に関する知見も得られる。現在、様々な場合に対応できるモンテカルロシミュレーションコードの構築に取り組んでいる。

参考文献

- 1) A. Benyagoub *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 175-177, 417 (2001).

*¹大阪公立大学大学院・工学研究科、*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
本研究は、大阪公立大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターが共同研究として実施したものである。

2.6.4. 材料技術の開発

2.6.4.1

低エネルギープロトン照射した $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 薄膜の超伝導特性に関する研究
 Superconducting Properties in $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ Thin Films Irradiated with Low-energy Protons
 尾崎壽紀*1、吉田智之*1、宇田欽治*2、石神龍哉*2
 Toshinori OZAKI, Tomoyuki YOSHIDA, Kinji UDA and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

We investigate the irradiation effect with the fluence with 10 keV proton irradiation on superconducting properties of iron-chalcogenide $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ thin films. After the irradiation with a dose of $5.0 \times 10^{13} - 7.0 \times 10^{14}$ ions/cm², superconducting transition temperature T_c slightly increases. The 10 keV proton irradiation with 1.0×10^{14} ions/cm² fluence yields the critical current density J_c ($H//c$, 4.2 K) improvement of over 50 % at 6 - 12 T with respect to the pristine film. The transmission electron microscopy (TEM) analysis of the proton-irradiated film reveals the possible nature of strain defects with size of 5 nm induced by the irradiation, which could result in both T_c and J_c enhancements. These results indicate that 10 keV proton irradiation could be effective to enhance both T_c and J_c in FST thin films.

要約

鉄系超伝導 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ (FST)薄膜(膜厚 ~100 nm)に 10 keV のプロトン(H^+)を照射し、照射量を変化させたときの照射前後での超伝導転移温度 T_c 及び臨界電流密度 J_c を調べた。プロトン照射前後の T_c を測定すると、 $5.0 \times 10^{13} - 7.0 \times 10^{14}$ ions/cm² の比較的広い照射範囲において、照射前よりも照射後の T_c が上昇した。また、 1.0×10^{14} ions/cm² 照射した FST 薄膜の 4.2 K での臨界電流密度 J_c は、自己磁場から 12 T のすべての磁場において照射前よりも上昇し、特に 6 - 12 T において 50%以上上昇した。断面 TEM 像から照射後の薄膜には 5 nm 程度の歪みが観察されており、これらが照射後の T_c 及び J_c の向上に寄与している可能性がある。これらの結果から、10 keV のプロトン照射は FST 薄膜の T_c や J_c を向上させるのに有効であると考えられる。

緒言

超伝導薄膜において、磁場環境下の臨界電流密度 J_c (電気抵抗ゼロで流すことのできる最大の電流密度値) を向上させることは、超伝導応用の上で非常に重要である。磁場中の J_c を向上させるためには、超伝導体内部に侵入する磁束の運動を抑制するピン止め点が必要である。我々は磁束ピン止め点導入の手法の一つとして、低エネルギーイオン照射に着目して研究を行ってきた¹⁻³⁾。低エネルギーイオン照射に用いる加速器は、比較的安価で取り扱いが容易であり、照射後の残留放射能の影響もほとんどないため、産業応用にも期待されている。本研究では、10 keV のプロトン照射において、照射量が FST 薄膜の超伝導転移温度 T_c と J_c に及ぼす影響を調べた。照射実験は、若狭湾エネルギー研究センターのマイクロ波イオン源イオン注入装置を用いて行った。また、超伝導特性は、照射前後で同一試料を用いて評価した。

実験結果

図 1 に 8 つの FST 薄膜のそれぞれに 10 keV のプロトンを照射量 $5.0 \times 10^{12} - 2.0 \times 10^{16}$ ions/cm² で照射した時の、照射前後の T_c の照射量依存性を示す。 3.0×10^{13} ions/cm² 照射した場合、 T_c は照射前後でほとんど変化しなかった。一方、 $5.0 \times 10^{13} - 7.0 \times 10^{14}$ ions/cm² 照射した場合、 T_c は照射前よりも上昇し、照射量 1.0×10^{14} ions/cm² において、0.3 K と最も大きく上昇した。照射量を増加させ、 3.0×10^{15} ions/cm² 照射した場合、 T_c は照射前よりも低下し、さらに照射量を増加させると、 T_c の低下が大きくなることが確認された。透過電子顕微鏡 (TEM: Transmission Electron Microscope) による高倍率断面 TEM 像から、 2.0×10^{16} ions/cm² 照射した FST 薄膜に、照射によってできた欠陥だと考えられる大きさ 5 nm 程度の格子の歪んだ部分が観察された。190 keV プロトン照射した FST 薄膜でも照射後の T_c 上昇が報告されており、また TEM 像から格子歪みが観察されている⁴⁾ ため、本研究における T_c の上昇も格子歪みが寄与している可能性がある。

次に、図 2 に 10 keV のプロトンを FST 薄膜に 1.0×10^{14} ions/cm² 照射した時の、プロトン照射前後の 4.2 K および 10 K における FST 薄膜の J_c の磁場依存性を示す。4.2 K では、0 - 12 T ($//c$) のいずれの磁場において

*1 関西学院大学・工学部、*2 京都大学・工学研究科、*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、MEXT KAKENHI 23K23288 の助成を受けた。

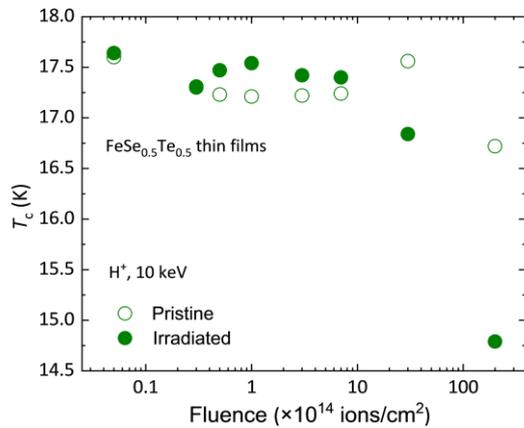


図1 FST 薄膜に 10 keV のプロトン照射した時の、照射前後の T_c の照射量依存性

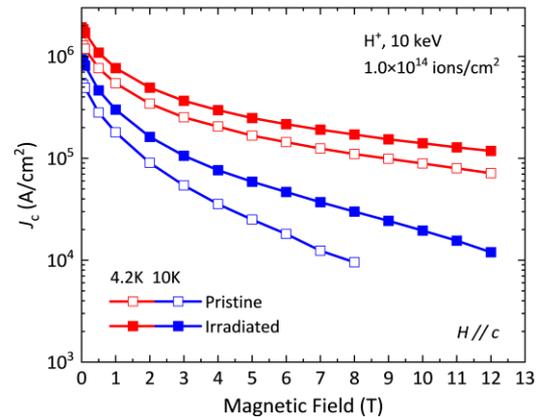


図2 10 keV のプロトン照射した FST 薄膜に 1.0×10^{14} ions/cm² 照射した時の、プロトン照射前後の J_c の磁場依存性

も照射後に J_c が向上した。同様に 10 K においても各磁場で照射後に J_c の向上が確認され、8 T で J_c が約 3 倍向上した。これは、高倍率断面 TEM 像で観察されている 5 nm 程度のサイズの格子が歪んだ部分(照射欠陥)が磁束ピン止め点として働いたためと考えられる。これらの結果より、10 keV のプロトン照射は、照射量を調整することで T_c と J_c を同時に向上させる有効な手法であることがわかった。

結言

鉄系超伝導 FeSe_{0.5}Te_{0.5}(FST)薄膜にプロトン照射エネルギー 10 keV、照射量 $5.0 \times 10^{12} - 2.0 \times 10^{16}$ ions/cm² で照射し、照射量が FST 薄膜の超伝導転移温度 T_c と J_c に及ぼす影響を調べた。 3.0×10^{15} より高照射量では、照射後 T_c は低下したが、 $5.0 \times 10^{13} - 7.0 \times 10^{14}$ ions/cm² の比較的広い照射量範囲において、照射前よりも照射後の T_c が上昇した。これは、10 keV プロトン照射によって形成された欠陥が寄与している可能性がある。また、照射量 1×10^{14} ions/cm² 照射した FST 薄膜は、4.2 K 及び 10 K での臨界電流密度 J_c は、自己磁場から 12 T のすべての磁場において照射前よりも上昇し、特に 4.2 K では 6 - 12 T において 50%以上、10 K では 8 T において約 3 倍上昇した。断面 TEM 像から、5 nm 程度のサイズの格子が歪んだ欠陥が確認されており、このような格子が歪んだ部分が、磁束ピン止め点として働いているために J_c が上昇したと考えられる。これらの結果から、10 keV プロトン照射は、FST 薄膜の T_c や J_c を向上させるのに有効であると考えられる。

参考文献

- 1) H. Matsui *et al.*, Appl. Phys. Lett. 101, 232601 (2012)
- 2) T. Ozaki *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 33, 094008 (2020)
- 3) T. Ozaki *et al.*, Quantum Beam Sci. 5, 18 (2021)
- 4) T. Ozaki *et al.* Nat. Commun. 7, 13036 (2016)

2.6.4.2

ポリイミドナノファイバーを用いた新規電解質膜の開発
Development of Novel Polyelectrolyte Membranes Using Polyimide Nanofibers
畑下昌範*1、山下義裕*2、河内敬*3
Masanori HATASHITA, Yoshihiro YAMASHITA and Kei KAWAUCHI

Abstract

Perfluorosulfonic acid polyelectrolyte membranes are commonly used in polymer electrolyte fuel cells. Polyelectrolyte membranes with excellent thermal stability and proton conductivity have been developed.

要約

固体高分子形燃料電池においては、パーフルオロスルホン酸高分子電解質膜が一般的に用いられている。我々は、熱安定性やプロトン伝導性に優れた高分子電解質膜の開発を実施した。

緒言

エネルギー資源枯渇や地球温暖化、環境汚染などの問題解決に貢献する次世代の電源機器として、燃料電池は、その早期実用化が強く望まれている。なかでも固体高分子形燃料電池(Polymer electrolyte fuel cell : 以下、PEFC)は、その低温作動、小型化が可能なることから、自動車、モバイル機器への応用が期待されており、世界的に活発な研究開発競争が展開されている。PEFC の実用化にはいっそうの高性能化と低コスト化が不可欠であり、そのためには低コストで高温作動(120℃以上)が可能なる高分子電解質膜のような新材料の開発が重要課題となっている。

DuPont 社の Nafion に代表されるパーフルオロスルホン酸高分子膜は、PEFC 用電解質膜としてもっとも広く研究され、有力視されてきた。しかし、Nafion は高いプロトン伝導性、優れた膜安定性といった利点を持つ一方で、100℃以上でのプロトン伝導性の低下、高ガス透過性、高環境負荷、高コストなどの欠点を有しており、実用化への妨げとなっている。そこで、我々は、高プロトン伝導性を有する非フッ素系の炭化水素系電解質膜の開発を進めることにした。その中で、合成が比較的容易であるポリイミド系の電解質膜に着目して研究を行うことにした。ポリイミドは良好な熱的・機械的・化学的安定性を有しており、スルホン酸基を導入したスルホン化ポリイミドは高いプロトン伝導性を示すことが期待される。本年度は、スルホン化ポリイミドの合成を行った。

結果の概要

従来のスルホン化ポリイミドの合成においては、我々は、スルホン酸基を有するジアミンモノマーおよびスルホン酸基のような極性基をもたない非極性ジアミンモノマーと芳香族テトラカルボン酸二無水物モノマーを用いて、合成を行ってきた。しかし、この場合においては、スルホン酸基を有するジアミンモノマーが市販されていないため、最初にこのモノマーを合成してから、次にスルホン化ポリイミドを合成するという 2 段階の合成が必要であった。PEFC 用の電解質膜として一定量のポリイミド電解質を合成するには、このモノマーの合成が律速になるため、今回は、既存のポリイミドからスルホン化を行うことを計画した。我々の従来法によれば、合成されたポリイミドにはスルホン酸基を有するジアミンモノマーが最初から含まれているため、合成されたポリイミドはそのスルホン酸基の存在により、容易に溶媒可溶性となる。一方、既存のポリイミドからスルホン化を行う場合には、溶媒中でスルホン化を行う必要があるため、用いるポリイミドは少なくとも溶媒溶解性でなくてはならない。一般には、溶媒溶解性のポリイミドは耐熱性が低下することが知られているが、今回の開発は PEFC 用の電解質膜で、作動温度は 100℃以上の条件であるので、ポリイミドの本来の耐熱性(500℃)を下げても PEFC 用の電解質膜としては支障がないと考えた。市販されている溶媒溶解性のポリイミドをスルホン化試薬と反応させたのち、イオン交換水中に滴下し、スルホン化ポリイミドの沈殿と精製を行った。沈殿物を減圧乾燥機で乾燥することにより、スルホン化ポリイミドを得た。

結言

スルホン酸基を有するジアミンモノマーを用いることなく、溶媒溶解性ポリイミドのスルホン化による一段階の反応法からスルホン化ポリイミドを合成した。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター、*2 福井大学 繊維・マテリアル研究センター、*3 カトーテック株式会社
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井大学 繊維・マテリアル研究センターとカトーテック株式会社と共同で実施したものである。

2.6.4.3

イオン照射による低損失磁性材料の機械特性改善

Improvement of Mechanical Properties of Low-Loss Magnetic Materials by Ion Irradiation

石山和志*1、石神龍哉*2、鈴木耕拓*2、安永和史*2

Kazushi ISHIYAMA, Ryoya ISHIGAMI, Kohtaku SUZUKI and Kazufumi YASUNAGA

Abstract

By ion irradiation to 6.5% SiFe alloy, which is promising material for improving the efficiency of next-generation power electronics circuits, mechanical properties of 6.5% SiFe alloy were improved. This result provides important basic knowledge that will lead to future industrial production.

要約

パワーエレクトロニクス回路の高効率化のために必要不可欠な低損失磁性材料として注目されている6.5%SiFe合金に対しイオン照射を行ったところ機械特性の改善が見られ、将来の工業生産につながる重要な基礎的知見が得られた。

緒言

現在のパワーエレクトロニクス回路の損失の多くは磁気部品によるものである。その改善のために6.5%SiFe合金が注目されている。この合金は高い透磁率と低損失が見込まれるものの硬くて脆いことから圧延など工業生産に適した手法で箔を作ることが不可能とされている。本研究はイオン照射により結晶構造を変化させ、それに伴う機械特性の変化を観察し、6.5%SiFe合金の工業生産につながる知見を得ることを目的とした。

実験結果

表面研磨した10 mm×10 mm×1 mm^tの6.5%SiFe合金に若狭湾エネルギー研究センターのイオン注入器を使用して、加速電圧190 keVでArイオンを照射した。照射時間は10秒から1000秒まで変化した。その間の平均電流密度は1.7~1.8 μA/cm²であった。また対照実験として純鉄試料に対しても同様のイオン照射を行った。照射後の機械特性変化をエネ研に設置のナノインデントによる表面硬度評価により行った。その結果を図1に示す。照射時間を延長して照射量を増やすとともに、純鉄では照射硬化が生じた結果硬度変化が見られたものの、6.5%SiFe合金では硬度の変化は純鉄に比べてわずかであった。また押し込み力を1 mNと5 mNに変化させても同様であった。この結果は6.5%SiFe合金は照射硬化と相殺する軟化が生じていることを示唆している。このことは、6.5%SiFeにおいてイオン照射によって与えたエネルギーにより表面近傍を急速加熱した結果、規則相が不規則相に変態したあと、不規則相がそのまま残存した結果、機械的に柔らかい不規則相の存在割合が増加し、その結果硬度変化が起こるとする当初の仮説を裏付ける結果となっている。今後は規則-不規則変態の様子についてX線回折や電子顕微鏡による解析でさらに詳細に検討を行う。

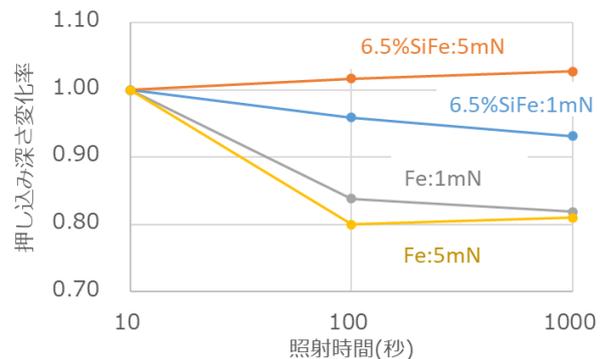


図1 押し込み試験による硬度評価結果

結言

次世代パワーエレクトロニクス回路用磁性材料として注目されている6.5%SiFe合金の機械特性がイオン照射により変化することを見出した。この結果は、難加工材料である6.5%SiFe合金を工業的に適用可能な手法で箔に加工できる可能性を示すもので極めて重要な知見である。今後は、この機械特性の変化の原因を明確にするために、イオン照射により結晶構造を変化させた際の機械特性の変化を詳細に検討し、機械特性と結晶構造の関連を明確化してゆく。

*1 国立大学法人東北大学電気通信研究所、*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
 ・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東北大学と共同で実施したものである。

2.6.4.4

超強加工による微細結晶粒金属材料の創製と評価

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

安永和史^{*1}、加藤寛敬^{*2}

Kazufumi YASUNAGA and Hirotaka KATO

Abstract

The cross section of burnished metal specimens with three different crystal structures were observed by transmission electron microscopy. Severe plastic deformation was imparted to the metal from very surface and induced nanocrystal formation with mean diameter of below 200 nm in the vicinity of the surface in all metals examined.

要約

金属材料表面をバニシング加工し強度の塑性変形を導入すると、結晶構造に依存せず表層領域に 200 nm サイズのナノ結晶粒が発現することが示された。

緒言

バニシング加工は、回転中の金属材料に高硬度で滑らかな表面をもつ球面工具を押しつけ、表面を鏡面状態にする表面処理法である。加工中に金属表層は、工具との摩擦により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も向上する。本研究では、結晶構造の異なる複数の金属材料に対してバニシング加工を施し、導入される微細組織について比較した。

成果の概要

試料は、焼鈍した金属円盤(直径 60 mm、厚さ 5 mm)である。バニシング加工は、セラミックスまたは超硬合金製のボールを用い、大気中、室温、無潤滑の条件で行った。図 1 a~c は、それぞれバニシング加工後の純銅(Cu, fcc 構造)、炭素鋼(S45C, bcc 構造)、Ti 合金(Ti-6Al-4V, hcp 構造)の表面から深さ 2000 nm 未満の領域の微細組織を断面方向から観察した TEM(Transmission Electron Microscopy)暗視野像である。白いコントラストを示すものは、摩擦強加工により生じた個々の結晶粒で、その平均粒径は 200 nm 未満であった。全ての金属中に観察されたナノメートルサイズの結晶粒の形成は、摩擦強加工による強度の塑性変形に起因した現象で、機械的性質の向上に高い効果を示すと考えられる。

結言

バニシング加工による金属表層の微細組織の特徴は、微細な結晶粒が結晶構造の違いによらずに形成されることである。バニシング加工は、摩擦強加工により十分な塑性変形が導入可能な材料であれば、その機械的性質の改善に有効な手法と考えられる。

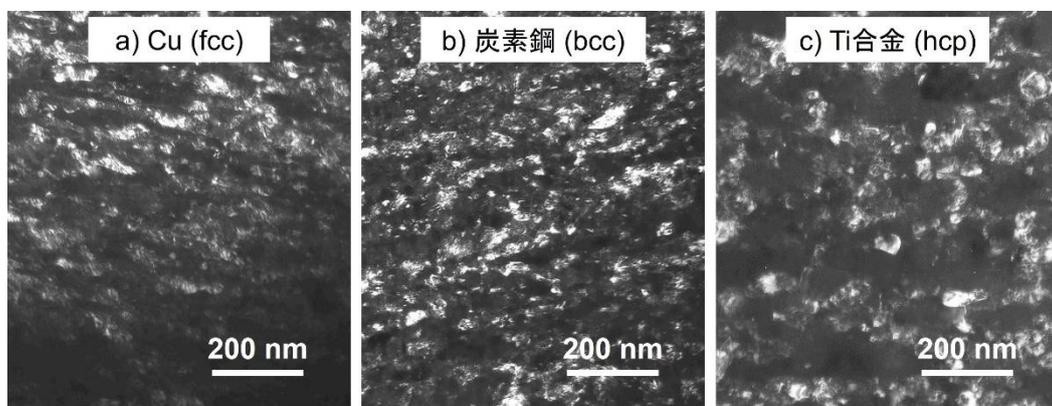


図 1 バニシング加工後の様々な金属材料の表層に形成された微細結晶粒

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

2.6.4.5

Ge₁₂Sb₂Te₁₅ の熱電特性と微細組織Thermoelectric Properties and Microstructure of Ge₁₂Sb₂Te₁₅ Specimens

小菅厚子*1、安永有史*2

Atsuko KOSUGA and Kazufumi YASUNAGA

Abstract

Thermoelectric properties of Ge₁₂Sb₂Te₁₅ significantly depend on thermal treatment and microstructure. Planar defects were formed uniformly in a furnace cooled specimen.

要約

Ge₁₂Sb₂Te₁₅ 試料の熱電特性は、熱処理条件やその条件により変化する微細組織に顕著に依存する。熱処理後炉冷により作製された Ge₁₂Sb₂Te₁₅ 中には、面状欠陥が一様に形成された。

緒言

熱電発電技術は、温度差を電気に直接変換する技術であり、原理的に低温排熱の回収に対して他の技術より優位性をもつ。室温付近で高い熱電特性を示す室温熱電材料が実現できれば、省エネルギー社会の実現に道筋をつける廃熱回収技術への貢献が期待される。最近、大阪公大のグループは、GeTe 系熱電バルク材料が室温付近で高い熱電特性を示すことを発見した。この材料の特徴は、特殊なバンド構造を有する事、熱電特性が試料作製条件に強く依存する事である。本研究では、熱処理後炉冷した Ge₁₂Sb₂Te₁₅ 試料について、熱電特性に影響を与えると指摘されている欠陥¹⁾の存在を調査した。

成果の概要

実験に用いた Ge₁₂Sb₂Te₁₅ 試料は、900℃で 12 時間熔融、500℃で 10 日間アニール後に炉冷することにより作製した。得られたバルク試料は、切断及び研磨後、イオン研磨(6 kV、Ar⁺)により薄膜化し、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて内部組織を観察した。

図 1(a)は、Ge₁₂Sb₂Te₁₅ 炉冷試料の TEM 暗視野像である。矢印で示すような白いコントラストを示す線状の欠陥が一様に存在しており、体積密度は、 $4.8 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ と評価された。これらの欠陥は、積層不整を伴う面欠陥であると考えられる。図 1(b)は、欠陥の長軸長さの分布で、44~1171 nm の範囲に分布し、平均長さは 211 nm であった。これらの欠陥の存在は、熱電特性に影響を与えている可能性がある。

結言

Ge₁₂Sb₂Te₁₅ の炉冷試料は、積層欠陥を含むことが判明した。積層欠陥の存在は、熱電特性に影響を与えていると考えられる。

参考文献

- 1) “Room-Temperature Pressure Induced Nanostructural CuInTe₂ Thermoelectric Material with Low Thermal Conductivity”, A. Kosuga et al., Inorg. Chem. 53(13) (2014) 6844.

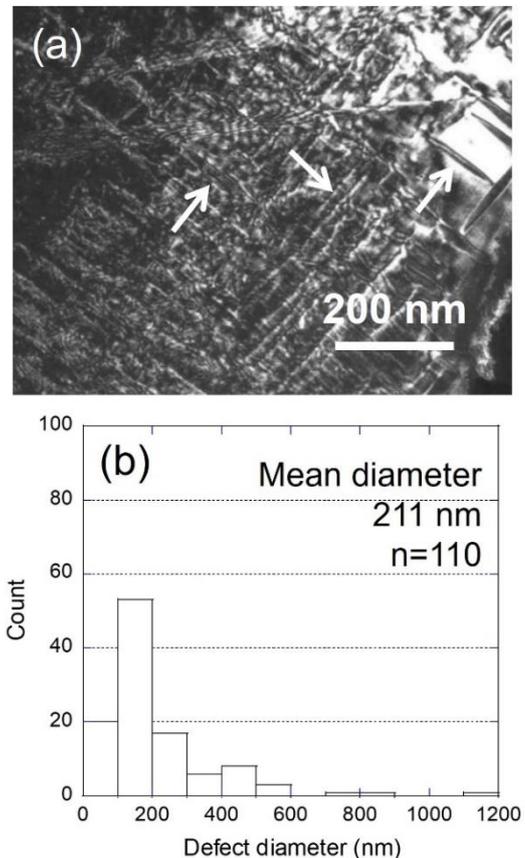


図1 Ge₁₂Sb₂Te₁₅ 炉冷試料の TEM 暗視野像(a)、及び欠陥の長軸長さの分布(b)

*1大阪公立大学・理学研究科・物理学専攻、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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大阪公立大学と共同で実施したものである。

2.6.4.6

 β 相および Al-rich- α 相の形態制御による高耐食性 Mg-Al-X 合金の開発Development of Highly Corrosion-resistant Mg-Al-X Alloys
by Controlling the Morphology of the β and Al-rich- α Phases

島山賢彦*1、安永和史*2、岡田祥成*3

Masahiko HATAKEYAMA, Kazufumi YASUNAGA and Syosei OKADA

Abstract

It has been reported that the addition of tertiary elements to Mg-Al alloys improves their corrosion resistance. However, few systematic investigations have been carried out in the same environment. In this study, the corrosion resistance of Mg-Al alloys was evaluated by adding a third element and changing the morphology of the β phases and Al-rich- α phases. The results show that the corrosion resistance of alloys with the addition of silver is the most improved.

要約

Mg-Al 合金に第三元素を添加すると耐食性が向上することが報告されている。しかし、同一環境下で体系的に調査した例は少ない。そこで、Mg-Al 合金に第三元素を添加し、同一環境下での β 相や Al-rich- α 相の形態を変化させた際の耐食性評価を行った。その結果、銀を添加した合金の耐食性が最も向上した。

緒言

マグネシウム合金は、軽量で比強度が高いという優れた特性から、携帯機器や輸送機器の構造材料などで用いられている。マグネシウムは活性であるため単体では耐食性は低いが、アルミニウムを添加することにより耐食性を向上させることができる。また、種々の添加元素により Mg-Al 系合金の特性を向上させることで、実環境での適用が広がっている。三元系 Mg-Al 合金の腐食特性について、同一環境下で体系的に調査した例は少ない。そのため、合金内の添加元素が耐食性にどのように寄与し、影響を与えるのか横並びで比較することは困難である。そこで、Zn、Ag、Sn、Pb をそれぞれ添加した三元系 Mg-Al 合金を作成し、金属組織観察と、強アルカリ環境下での分極試験を行った。

成果の概要

金属組織観察により、第三元素を添加した全ての合金で図 1 に示すように三相が確認され、Zn、Ag、Sn 添加の合金で第三元素が α 相に固溶し、Pb 添加の合金で β 相に固溶していることが確認された。また、第三元素の添加により、 β 相と Al-rich- α 相の晶出量が共に増加した。

分極曲線を解析した結果では、腐食電位、腐食速度はともに Zn < Sn < Pb < Ag 添加の順に高くなり、腐食電位と腐食速度の大小関係が一致した。これは β 相、Al-rich- α 相に固溶した第三元素が、 β 相、Al-rich- α 相の電位を変化させ、ガルバニック腐食のカソード極としての働きに影響を及ぼしたことが原因であると考えられる。

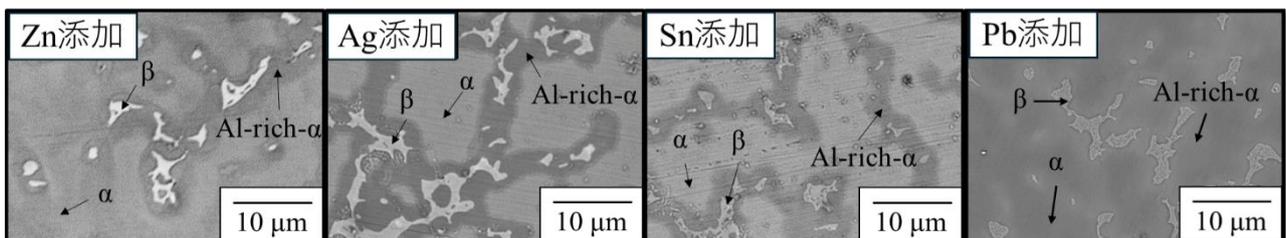


図 1 三元系 Mg-Al 合金の SEM 像

結言

Mg-Al 合金に Ag を添加した Mg-Al-Ag 合金の腐食速度が最も小さくなった。Mg-Al 合金に第三元素を添加すると、腐食中のカソード反応量が変化することが明らかになった。

*1 国立大学法人富山大学・学術研究部都市デザイン学系、*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、

*3 国立大学法人富山大学大学院・理工学研究科・理工学専攻・博士前期課程

本研究は、(公財) 若狭湾エネルギー研究センターと国立大学法人富山大学と共同で実施したものである。

本研究は、JSPS 科研費 JP22K04774 の助成を受けたものである。

2.6.4.7

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

野坂敬之*1、辻本和久*1、後藤昌利*1、山岸隆一郎*2、安永和史*3

Takayuki NOSAKA, Kazuhisa TSUJIMOTO, Masatoshi GOTO, Ryuichiro YAMAGISHI
and Kazufumi YASUNAGA

Abstract

Development of conductive materials with flexibility and durability has been expected. The purpose of this study is to develop a conductive film with excellent heat resistance and bending durability by plating Cu and Sn on the polyimide film substrate. The conductive film under development has a problem that the Sn surface turns yellow under high temperature and high humidity environments. To clarify the mechanism related to yellowing of Sn surface, the oxidation of the Sn surface during exposure to high temperature and humidity was observed. As a result, it was confirmed that the thicker the oxide film formed on the surface and the higher the degree of yellowing under the longer the time of exposure to high temperature and humidity environments. It was also found that the area affected by yellowing was approximately 2 nm from the surface layer of the Sn oxide film.

要約

電子部品関連の分野において、フレキシブルで耐久性に優れた導電性素材が求められている。我々は、ポリイミドフィルム基材に銅やスズの金属膜を積層することで、耐熱性や屈曲耐久性に優れた導電性フィルムの開発を目指している。その中で、開発中の導電性フィルムには、高温高湿環境下に曝されることでスズ表面が黄変するという課題があった。そこで、本研究では、開発中の導電性フィルムのスズ表面の酸化挙動の分析を行い、黄変に関するメカニズムの分析を実施した。その結果、高温高湿環境下に曝されるほど、表層に形成される酸化被膜は厚くなり、それに相関して、黄変度も高くなる傾向を確認した。また、黄変する深さ領域は、スズの酸化被膜が形成された、表層から約 2 nm であることが判明した。

緒言

柔軟な導電性材料として、ポリイミドフィルム上に銅やスズが積層されたフィルムを開発している。主に小型軽量性が要求されるスマートフォン等の電子機器内部において、ノイズ等のグランディング材として使用される。電子材料は、導電性はもちろん、フレキシブル性(屈曲耐久性)、皮膜密着性、半田付け性及び耐熱性等が必要である。スズ皮膜は、その中でも半田付け性が特に優れているが、半田付け工程でリフロー処理と呼ばれる高温での処理時(260℃で数分)に変色や凸状欠点が発生する等の問題もある。その他にも、金等の安定な金属に比べ、酸化被膜が形成されやすく、高温高湿環境下に曝されることによる黄変も課題とされている(図1)。本研究では、オージェ電子分光法(AES)を用いて金属皮膜の深さ方向元素分布を測定し、高温高湿環境下に曝されることで発生する黄変のメカニズム解明を目的とし、分析を行った。



図1 スズ表面の黄変
(高温高湿暴露)

成果の概要

導電性フィルムサンプルの作製

ポリイミドフィルム(厚さ 25 μm)の片面に蒸着によって銅層を形成し、その銅層表面にめっき加工によってスズ層を形成することにより、導電性フィルムを作製した(図2)。

さらに最表面には、リフロー処理で発生しうる変色を抑止できる変色防止層を形成した。

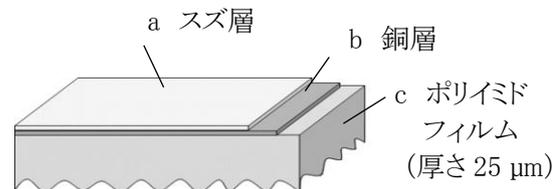


図2 導電性フィルムの構造の模式図

*1セーレン株式会社・研究開発センター・開発研究グループ、*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・エネルギー材料グループ

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。

高温高湿環境下で発生する黄変の解析

高温高湿暴露後に発生する黄変の解析のため、導電性フィルムサンプルを高温高湿条件(85°C、85%Rh)に設定した恒温恒湿機(PH-3KT、ESPEC 製)を用いて、0、5、15、24、48、96 時間暴露させ、表面を黄変させた。これらの表面に関して、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、アルゴンエッチングを併用し、金属皮膜の表面から深さ方向の酸素元素分析をおこなった(図 3)。また、高温高湿暴露時間における黄変度と酸化被膜との関係、若しくは黄変度と最表層の酸素の検出強度との関係を確認した(図 4)。黄変度は、分光測色機(CM-2600D、コニカミノルタ製)を用いて、測定された b^* (SCI)の値を指標とした。 b^* は正反射光込みの色測定方式(SCI)で測定された色味の強さを表しており、プラスの方向に大きくなると黄色が強くなる。

その結果、高温高湿暴露時間が長くなるにつれて、酸化被膜の厚みは、厚くなっていくことが確認された。黄変度との比較でも、これらの傾向が確認され、酸化被膜の厚みと相関関係がある可能性が示唆された。対して、最表層の酸素の検出強度を確認すると、高温高湿環境下に 5h 曝された時点で飽和状態となり、その後は、大きな変動は確認できず、黄変度との相関は低い結果であった。従って、黄変の程度に関しては、スズの酸化被膜の厚みに依存する可能性が示唆された。

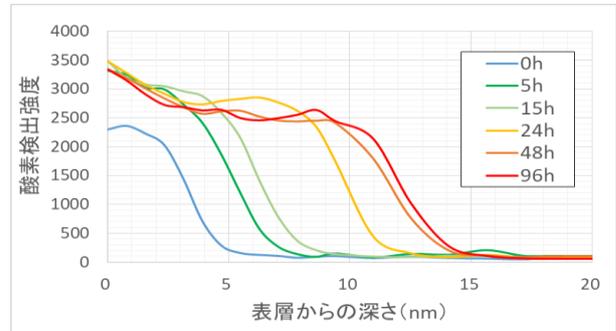


図 3 高温高湿(85°C、85%Rh)暴露時間における表層酸素分布

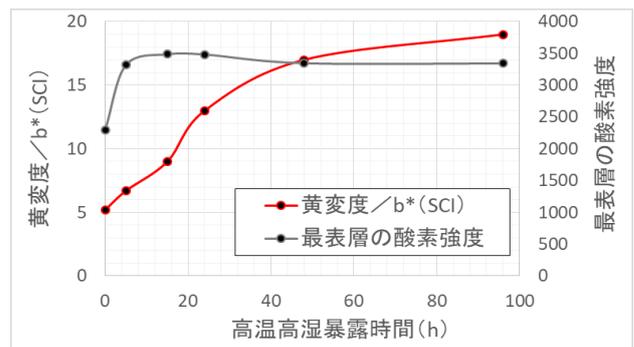
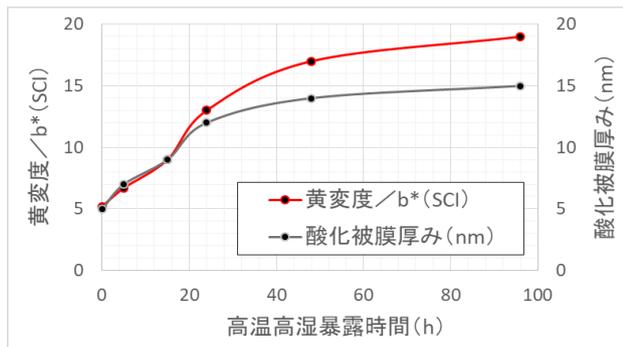


図 4 高温高湿(85°C×85%Rh)暴露により発生する黄変と酸化被膜厚み、及び最表層の酸素強度との関係(左:黄変度 vs 酸化被膜厚み、右:黄変度 vs 最表層の酸素の検出強度)

一方で、上記の高温高湿条件(85°C×85%Rh)下に 24 時間暴露させたサンプルを酸洗浄目的で 98%硫酸を 10%含む Sn めっき液に 2 分間浸漬し、その前後での表層元素分析を同様に実施した(図 5)。本処理により b^* (SCI) 値は、13 から 5 まで低減し、黄変は改善した。

その結果、酸洗浄後に最表層の酸素の検出強度が低減し、酸化被膜自体も約 2 nm 薄くなることを確認した。酸化被膜自体が薄くなった影響もあるが、最表層の酸化被膜が除去されたことで黄変も改善したことから、黄変に影響を与える領域としては、表層から約 2 nm であることが示唆された。高温高湿環境下では、酸化被膜は厚くなっていくが、熱が直接加わっている最表層での反応が黄変に最も影響を与えることが判明した。本研究により、黄色のメカニズムを考察でき、これらの知見から、耐熱性に優れたスズ製品の開発の進展に繋がった。

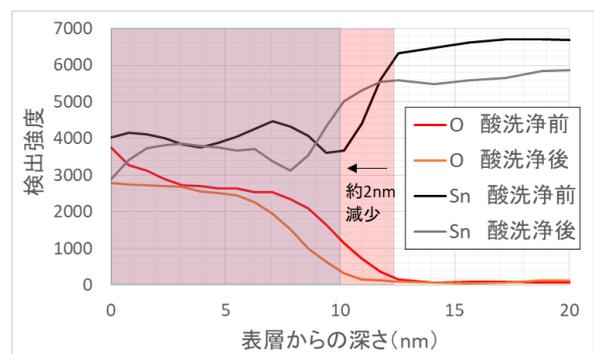


図 5 硫酸を 10%含む Sn めっき液に 2 分間浸漬した前後での表層元素分布の挙動

結言

高温高湿(85°C、85%Rh)暴露におけるスズ表面の黄変に関して、オージェ電子分光法により、表層元素解析を行った。その結果、スズの酸化被膜が厚くなるにつれて、黄変度も高くなる傾向が見られ、黄変に最も影響する領域としては、熱が直接加わっている表層約 2 nm の酸化被膜であることが判明した。

2.6.4.8

マイクロスラリージェットエロージョン試験による Ti 合金積層造形材の摩耗特性
Erosion Property of an Additive Manufacturing Ti Alloy by a Micro Slurry-Jet Erosion (MSE) Test
安永和史*¹、岩井善郎*²
Kazufumi YASUNAGA and Yoshiro IWAI

近年、製造技術の進歩や市場の拡大等により積層造形法で作製された金属材料が注目されている。本研究では、直接金属レーザー焼結法 (Direct Metal Laser Sintering; DSML) により積層造形されたチタン合金 (Ti-6Al-4V) の摩耗特性をマイクロスラリージェットエロージョン試験法 (MSE 試験法) により調査した。

試料は、積層造形されたチタン材料及び積層造形後さらに熱間等方圧プレス (Hot Isostatic Pressing; HIP) 処理を行ったチタン材料である。エロージョン試験は、室温において、投射粒子として多角形状のアルミナ粒子 (平均粒径 40 μm) を水に混ぜたスラリーを試料表面に対して垂直に投射することにより行った。エロージョン深さは、表面形状測定により得られた最大窪み深さとし、一定量のスラリーを投射する毎に測定した。エロージョン率 ($\mu\text{m}/\text{g}$) は、エロージョン深さ (μm) のスラリー投射量 (g) に対する傾きから算出した。エロージョン率は、積層造形されたチタン材料では 6.84 $\mu\text{m}/\text{g}$ 、積層造形後 HIP 処理された材料では 6.13 $\mu\text{m}/\text{g}$ であった。HIP 処理によりエロージョン率が低下した原因は、積層造形後に存在する結晶中の欠陥の消滅等の微細組織の変化によるものと考えられる。

*¹(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*²国立大学法人 福井大学 産学官連携本部
本研究は、(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。

3. 外部発表、特許、品種登録

3.1. 外部発表

令和5年度における外部発表は次のとおりである。

(1) 論文(学協会誌等への掲載)

1. Setsuo Nakao, Atsushi Kinomura, Keisuke Ikeda, Makoto Nakajima, Atsushi Yabuuchi and Kohtaku Suzuki, Positron annihilation spectroscopy of thermally annealed hydrogenated amorphous carbon films, *Vacuum*, September 2023, Vol. 215, 112255, 2023. 6. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112255>.
2. Akihiro Iwase, Yuki Fujimura, Satoshi Semboshi, Yuichi Saitoh and Fuminobu Hori, Modification of Hardness and Electrical Conductivity of Copper-Titanium Alloy by Energetic Electron Irradiation, *Materials Transactions*, Vol. 64, No.9, 2232-2236, 2023. 8. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-M2023061>.
3. K. Kataoka, B. Tsuchiya, R. Kato, R. Terasawa and K. Suzuki, Hydrogen absorption and desorption characteristics of H₂O-uptake LiCoO₂ materials at room temperature, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.50, Part B, 599-604, 2024. 1. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.039>.
4. Akira Makino, Kyo Kume, Tetsuya Mori, Tetsuya Tsujikawa, Tatsuya Asai, Hidehiko Okazawa and Yasushi Kiyono, High efficacy of particle beam therapies against tumors under hypoxia and prediction of the early-stage treatment effect using 3'-deoxy-3'- [18F]fluorothymidine positron emission tomography, *Annals of Nuclear Medicine*, Vol. 38, No. 2, 112-119, 2024. 2. <https://doi.org/10.1007/s12149-023-01877-2>.
5. 岩瀬彰宏、藤村勇貴、千星聡、斎藤勇一、堀史説、高エネルギー電子線照射による銅-チタン合金の硬度と導電率の改質、*日本金属学会誌*、Vol.88, No.3, 48-52, 2024.3. <https://doi.org/10.2320/jinstmet.J2023024>.
6. Yichen Zou, Ken-ichi Fukumoto, Ryoya Ishigami and Takuya Nagasaka, Microstructural Changes in He-Irradiated V-Cr-Ti Alloys with Low Ti Addition at 700°C, *Nuclear Materials and Energy*, Vol. 38, 101605, 2024.3. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2024.101605>.

(2) 解説、総説、報告書等

1. 前田宗利、X線マイクロビームによる細胞局所照射技術を用いた細胞の放射線感受性変化の機構解明、*放影協ニュース*、第114号、6-9頁、2023.4
2. 高城啓一、畑下昌範、若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状におけるイオンビーム育種およびイオンビームによる変異形成研究の展望、*放射線生物研究*、Vol 58、No.4、150-163頁、2023.6
3. 安永和史、渡邊英雄、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、*令和4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26巻、62-63頁、2023.7
4. 櫻井明彦、畑下昌範、カバノアナタケの液体表面培養による抗糖化物質の生産、*月刊 BIO INDUSTRY*、第40巻、第7号、35-39頁、2023.7
5. 大道博行、山田知典、ミリ秒 kW 級レーザーパルスと金属、金属酸化物との相互作用-加工の基礎-、*ILT2023年報*、1-5頁、2023.7
6. F. Hori, H. Obayashi, T. Matsui, Y. Kaneko, T.Wada, H. Kato, N. Ishikawa and A. Iwase, Effect of Energetic Ion irradiation on Lattice Structure and Hardness of Double-Phased Zr-Ni Alloy, *Photon Factory Activity Report 2022*, Vol.40, 58, 2023.8
7. 阿部知子、林依子、森田竜平、池田時浩、高城啓一、畑下昌範、ゲノム解析を用いたイオンビーム育種技術の高度化、*JATAFF ジャーナル*、第11巻、第9号、25-31頁、2023.9
8. 羽鳥聡、清水雅也、淵上隆太、菊地亮平、小田部圭佑、古川靖士、羽田祐基、栗田哲郎、廣戸慎、淀瀬雅夫、北上悟、山田裕章、5MV タンデム加速器加速高電圧の回復、*第20回日本加速器学会年会プロシーディングス*、894頁、2023.11
9. 中尾政夫、依田哲彦、福田光宏、宮脇信正、想田光、野田耕司、GHMC のイオン源テストスタンドにおけるペッパーポットエミッタンスモニタの導入、*第20回日本加速器学会年会プロシーディングス*、942頁、2023.11
10. 中尾政夫、川嶋基敬、松村彰彦、野田耕司、酒井真理、島田博文、田代睦、Varnava Maria、遊佐顕、想田光、群馬大学重粒子線医学センターの現状、*第20回日本加速器学会年会プロシーディングス*、1046頁、2023.11

11. 栗田哲郎、羽鳥聡、山田裕章、廣戸慎、清水雅也、淀瀬雅夫、瀧上隆太、小田部圭佑、古川靖、羽田祐基、若狭湾エネルギー研究センターシンクロトロン の現状、第 20 回日本加速器学会年会プロシーディングス、1073 頁、2023.11
12. 羽鳥聡、栗田哲郎、山田裕章、廣戸慎、清水雅也、淀瀬雅夫、瀧上隆太、小田部圭佑、古川靖士、羽田祐基、菊池亮平、北上悟、若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状、第 35 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集、28-32 頁、2024.3
13. 清水雅也、羽鳥聡、栗田哲郎、山田裕章、淀瀬雅夫、廣戸慎、古川靖士、瀧上隆太、小田部圭佑、羽田祐基、北上悟、タンデム加速器加速電圧発生用発振器および共振回路の更新、第 35 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集、33-36 頁、2024.3
14. 鈴木耕拓、大気環境下におけるイオンビーム分析手法の開発、第 35 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集、55-58 頁、2024.3
15. 今泉充、奥野泰希、小林智洋、石神龍哉、鈴木耕拓、InGaP 太陽電池への陽子線、He イオンの高温照射効果、第 35 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集、84-87 頁、2024.3
16. 羽鳥聡、栗田哲郎、山田裕章、廣戸慎、清水雅也、淀瀬雅夫、瀧上隆太、小田部圭佑、古川靖士、羽田祐基、菊池亮平、北上悟、5MV タンデム加速器加速管分割抵抗および放電ポイントの更新、第 35 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集、116-119 頁、2024.3

(3) 国際会議発表(口頭発表)

1. Naoto Usami, Takeshi Matsumoto, Satoshi Ikari, Takayuki Hosonuma, Kota Kakihara, Kanta Yanagida, Kyo Kume, Akihiro Ishikawa, Ryu Funase and Shinichi Nakasuka, Exploratory approach of efficient SEE evaluation of multiple and/or complex COTS devices with graphical current monitoring and control system, The 34th International Symposium on Space Technology and Science, Kurume, Japan, 2023.6.8
2. B. Tsuchiya, K. Suzuki and T. Sasaki, In-situ measurement of lithium transfer around electrode/solid electrolyte interfaces in all-solid-state batteries under charging and discharging using elastic recoil detection techniques, The International Conference on PROCESSING & MANUFACTURING OF ADVANCED MATERIALS: Processing, Fabrication, Properties, Applications, Vienna, Austria, 2023.7.4
3. Yo Kato, Toru Tamagawa, Teruaki Enoto, Takao Kitaguchi, Tatehiro Mihara, Wataru Iwakiri, Masaki Numazawa, Yuanhui Zhou, Keisuke Uchiyama, Tomishi Takeda, Yuto Yoshida, Naoyuki Ota, Syoki Hayashi, Sota Watanabe, Arata Jujo, Hiroki Sato, Chin-Ping Hu, Hiromitsu Takahashi, Hirokazu Odaka, Tsubasa Tamba, Kentaro Taniguchi and Satoshi Hatori, Development of radiation belt monitors for a 6U-CubeSat sized X-ray telescope, 37th Annual Small Satellite Conference, Utah, US, 2023.8.5
4. Satoshi Hatori, Tetsuro Kurita, Hiroaki Yamada, Makoto Hiroto, Masaya Shimizu, Masao Yodose, Ryuta Fuchikami, Keisuke Otobe, Seiji Furukawa, Yuuki Haneda and Satoru Kitajo, Operation of accelerator system at the Wakasa Wan Energy Research Center, 13th international Workshop on Accelerator Operations (WAO2023), Tsukuba, Japan, 2023.9.13
5. K. Kataoka, B. Tsuchiya, R. Terasawa, K. Suzuki and T. Sakaki, Effect of platinum-coating on hydrogen- and water-absorption characteristics of lithium-cobalt oxides, 26th International Conference on Ion Beam Analysis and 18th International Conference on Particle Induced X-ray Emission, Toyama, Japan, 2023.10.10
6. K. Suzuki and B. Tsuchiya, Application of ion beam analysis techniques to liquid samples, 26th International Conference on Ion Beam Analysis and 18th International Conference on Particle Induced X-ray Emission, Toyama, Japan, 2023.10.11
7. Hikaru Souda, Takayuki Kanai, Sung Hyun Lee, Yuya Miyasaka, Hongbou Chai, Miyu Ishizawa, Takeo Iwai, Shun Sawamura, Kyohei Nagai, Fumihisa Ouchi, Takayuki Taguchi, Michitaro Sei, Yohei Kanto, Azusa Sato, Masashi Katsumata, Izumi Kobayashi and Koji Noda, Medical facilities in Japan, (Invited), 5th Slow Extraction Workshop at MedAustron in Wiener Neustadt, Vienna, Austria, 2024.2.11

(4) 国際会議発表(ポスター発表)

1. A. Iwase, F. Hori and S. Nishio, Two-Dimensional Images for Ion-Irradiation Induced Change in Lattice Structures and Magnetic States in Oxides by Monte Carlo Simulation, 21st International Conference on Radiation Effects in Insulators, Fukuoka, Japan, 2023.9.5

2. M. Imaizumi, Y. Okuno, T. Nakamura, K. Suzuki, R. Ishigami, T. Kobayashi and A. Iwase, Behavior of an InGaP Solar Cell Type Dosimeter Device under High Temperature Condition, 21st International Conference on Radiation Effects in Insulators, Fukuoka, Japan, 2023.9.5
 3. K. Suzuki, Ion Beam Irradiation Tolerance of Silicon Nitride Thin Film for Beam Extraction Window, 21st International Conference on Radiation Effects in Insulators, Fukuoka, Japan, 2023.9.7
 4. A. Kinomura, S. Nakao, K. Suzuki, Y. Kuzuya, M. Nakajima and K. Yasuda, Stable hydrogen signals from hydrogenated amorphous carbon films during ERDA measurements, 26th International Conference on Ion Beam Analysis and 18th International Conference on Particle Induced X-ray Emission, Toyama, Japan, 2023.10.12
- (5) 国内会議発表(口頭発表)
1. 羽鳥聡、栗田哲郎、山田裕章、廣戸慎、清水雅也、淀瀬雅夫、淵上隆太、小田部圭佑、古川靖士、羽田祐基、菊池亮平、北上悟、若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状、第 35 回タンデム加速器及び周辺技術の研究会、福井県 敦賀市、2023.6.22
 2. 清水雅也、羽鳥聡、栗田哲郎、山田裕章、淀瀬雅夫、廣戸慎、古川靖士、淵上隆太、小田部圭佑、羽田祐基、北上悟、タンデム加速器加速電圧発生用発振器および共振回路の更新、第 35 回タンデム加速器及び周辺技術の研究会、福井県 敦賀市、2023.6.22
 3. 鈴木耕拓、大気環境下におけるイオンビーム分析手法の開発、第 35 回タンデム加速器及び周辺技術の研究会、福井県 敦賀市、2023.6.22
 4. 今泉充、奥野泰希、小林知洋、鈴木耕拓、石神龍哉、InGaP 太陽電池型放射線検出デバイスの高温下陽子線劣化、第 35 回タンデム加速器及び周辺技術の研究会、福井県 敦賀市、2023.6.23
 5. 久米恭、WERC 加速器利用現状報告～若狭湾エネルギー研究センター加速器システムを用いた宇宙機搭載用電子機器放射線耐性評価試験～、ふくいオープンイノベーション推進機構 FOIP「IR 交流会(先端研究機関見学会)」～福井県での衛星製造を支える放射線試験関連技術紹介～、福井県 敦賀市、2023.8.28
 6. 畑下昌範、庄司英一、エレクトロスピンニング法によるポリイミド系高分子ナノファイバーの作製、2023 年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会、オンライン、2023.9.2
 7. 今泉充、奥野泰希、小林知洋、鈴木耕拓、石神龍哉、InGaP 太陽電池型放射線検出デバイスの高温下陽子線劣化、第 84 回応用物理学学会秋季学術講演会、熊本県 熊本市、2023.9.19
 8. 山岸隆一郎、前田敏男、木曾原直之、坪井昭彦、SUS304 表面へのレーザー照射による脱鋭敏化処理、日本金属学会 2023 年秋期(第 173 回)講演大会、富山県 富山市、2023.9.20
 9. 岩瀬彰宏、堀史説、西尾繁、寿命を有した重イオントラックのオーバーラップ効果、日本金属学会 2023 年秋期(第 173 回)講演大会、富山県 富山市、2023.9.21
 10. 平山翔太、徐虬、大澤一人、安永和史、堀史説、電子線照射により Fe-Al 合金中に導入された空孔内での水素状態、日本金属学会 2023 年秋期(第 173 回)講演大会、富山県 富山市、2023.9.21
 11. 前田宗利、前田未佳、久米恭、Importance of the intracellular DNA damage response in the dependence of antitumor effects on irradiation sequence in combined proton and X-ray cancer therapy(陽子線と X 線を併用したがん治療の抗腫瘍効果の照射順序依存性における細胞内 DNA 損傷応答の重要性)、日本放射線影響学会第 66 回大会、東京都 港区、2023.11.6
 12. 平山翔太、徐虬、大澤一人、安永和史、堀史説、水素イオン照射による B2 型 Fe-Al 合金中の照射導入空孔への捕獲水素状態の研究、第 33 回日本 MRS 年次大会、神奈川県 横浜市、2023.11.14
 13. 岩瀬彰宏、堀史説、西尾繁、有限の寿命や変調構造を有したイオントラックのオーバーラップ効果(Overlapping Effects of Heavy Ion Tracks with Finite Lifetime and /or Modulated Structures)、第 33 回日本 MRS 年次大会、神奈川県 横浜市、2023.11.14
 14. 清野泰、牧野顕、久米恭、森哲也、岡沢秀彦、子宮頸がんモデルマウス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、(公財)若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会、福井県 福井市、2023.11.27
 15. 高城啓一、畑下昌範、牛島秀爾、寺島和寿、シイタケにおける DNA 損傷マーカー γ -H2A の検出、(公財)若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会、福井県 福井市、2023.11.27
 16. 久米恭、イオンビームによる宇宙産業育成、(公財)若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会、福井県 福井市、2023.11.27

17. 尾崎壽紀、柏原卓弥、山下朔、掛谷一弘、石神龍哉、低エネルギーイオン照射した超伝導薄膜の磁場中臨界電流特性、(公財)若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会、福井県 福井市、2023.11.27
 18. 按田左助、中島恭平、鈴木耕拓、Li 含有液体シンチレーターにおける低エネルギー領域を含めた α 線の消光係数測定、2023 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会、福井県 敦賀市、2023.12.2
 19. 伊藤善亮、鈴木涼斗、中島恭平、玉川洋一、鈴木耕拓、 Li_2CO_3 を用いた Li 含有液体シンチレーターの作製と性能評価、2023 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会、福井県 福井市、2023.12.2
 20. 鈴木涼斗、伊藤善亮、中島恭平、鈴木耕拓、玉川洋一、 ^6Li を濃縮した Li 含有液体シンチレーターの開発、2023 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会、福井県 福井市、2023.12.2
 21. 樹下稜太、中島恭平、鈴木耕拓、中性子飛来方向に感度のある検出器開発、2023 年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会、福井県 福井市、2023.12.2
 22. 水野魁人、東郷広一、福元謙一、石神龍哉、核融合炉ダイバータ用純 W における運動転位と照射欠陥の相互作用に関する研究、令和 5 年度日本鉄鋼協会北陸信越支部・日本金属学会北陸信越支部連合講演会、福井県 福井市、2023.12.2
 23. 岡田祥成、黒川莉瑚、畠山賢彦、砂田聡、中藤大地、安永和史、Mg-9Al 合金の腐食特性に及ぼす第三元素添加の影響、令和 5 年度日本鉄鋼協会北陸信越支部・日本金属学会北陸信越支部連合講演会、福井県 福井市、2023.12.2
 24. 中尾節男、木野村淳、池田佳祐、中島諒、藪内敦、鈴木耕拓、水素化非晶質炭素薄膜の熱処理による変化:ラマン散乱分光と陽電子消滅分光の比較、京都大学複合原子力科学研究所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」、大阪府 熊取町、2023.12.8
 25. 久米恭、イオンビームの実用化(招待講演)、令和 5 年度「放射線科学とその応用」第 4 回研究会、福井県 敦賀市、2023.12.22
 26. 石神龍哉、ナノ構造化を活用した新規水素貯蔵材の開発(招待講演)、(一社)ふくい水素エネルギー協議会主催講演会「水素社会構築に向けた製品開発と福井県内での取り組み」、福井県 敦賀市、2024.2.29
 27. 岩瀬彰宏、堀史説、西尾繁、重イオントラックオーバーラップ効果のイオンビーム電流依存性、日本金属学会 2024 年春期(第 174 回)講演大会、東京都 葛飾区、2024.3.14
 28. 平山翔太、田嘉信、宮住賢太、徐虬、大澤一人、安永和史、堀史説、山本春也、B2 型 Fe-Al 合金中の空孔への水素原子多重捕獲、日本金属学会 2024 年春期(第 174 回)講演大会、東京都 葛飾区、2024.3.14
 29. 野志勇介、福元謙一、石神龍哉、宇田欽治、プロトン照射した Fe-Cu 合金の機械的特性変化と微細組織発達に及ぼす損傷速度の影響、日本金属学会 2024 年春期(第 174 回)講演大会、東京都 葛飾区、2024.3.14
 30. 水野魁人、東郷広一、福元謙一、石神龍哉、純タングステンにおける運動転位-キャビティの相互作用の温度依存性に関する研究、日本原子力学会 2024 年春の年会、大阪府 東大阪市、2024.3.27
- (6) 国内会議発表(ポスター発表)
1. 羽鳥聡、栗田哲郎、山田裕章、廣戸慎、清水雅也、淀瀬雅夫、湊上隆太、小田部圭佑、古川靖士、羽田祐基、菊池亮平、北上悟、5MV タンデム加速器加速管分割抵抗および放電ポイントの更新、第 35 回タンデム加速器及び周辺技術の研究会、福井県 敦賀市、2023.6.22
 2. 寺島和寿、高城啓一、畑下昌範、牛島秀爾、シイタケ菌糸核 $\gamma\text{H}_2\text{A}$ に対するイオンビーム照射の影響、日本きのこ学会第 26 回大会、奈良県 奈良市、2023.8.7-8
 3. 中尾政夫、川嶋基敬、松村彰彦、野田耕司、酒井真理、島田博文、田代睦、Varnava Maria、遊佐頭、想田光、群馬大学重粒子線医学センターの現状、第 20 回日本加速器学会年会、千葉県 船橋市、2023.8.29-30
 4. 栗田哲郎、羽鳥聡、山田裕章、廣戸慎、清水雅也、淀瀬雅夫、湊上隆太、小田部圭佑、古川靖士、羽田祐基、若狭湾エネルギー研究センターシンクロトロン機の現状、第 20 回日本加速器学会年会、千葉県 船橋市、2023.8.31
 5. 中尾政夫、野田耕司、依田哲彦、福田光宏、宮脇信正、想田光、GHMC のイオン源テストスタンドにおけるペッパーポットエミッタンスモニタの導入、第 20 回日本加速器学会年会、千葉県 船橋市、2023.9.1
 6. 羽鳥聡、清水雅也、湊上隆太、菊池亮平、小田部圭佑、古川靖士、羽田祐基、山田裕章、栗田哲郎、廣戸慎、淀瀬雅夫、北上悟、5MV タンデム加速器加速高電圧の回復、第 20 回日本加速器学会年会、千葉県 船橋市、2023.9.1

7. 黛隆宏、畑下昌範、高城啓一、阿部知子、風間裕介、重イオンビーム照射で得られたトレニア新規フリル変異体の花卉の形態変化、日本植物学会第 87 回大会、オンライン、2023.9.4
8. 笛木麗奈、畑下昌範、村井耕二、重イオンビーム照射によって作出した、パンコムギ品種「福井県大 3 号 (ふくこむぎ)」の硬質粒変異体におけるピュロインドリン遺伝子の遺伝子構造解析、(一社)日本育種学会第 144 回講演会(令和 5 年度秋季大会)、兵庫県 神戸市、2023.9.17
9. 黛隆宏、畑下昌範、高城啓一、阿部知子、風間裕介、トレニア新規フリル変異体に対するサイトカイニン分解阻害剤(CPPU)処理の影響、(一社)日本育種学会第 144 回講演会(令和 5 年度秋季大会)、兵庫県 神戸市、2023.9.17
10. 安藤寛之、松尾陽一郎、清水喜久雄、下川卓志、久米恭、泉佳伸、出芽酵母に対する γ 線および粒子線照射による突然変異誘発効果に関する研究、日本放射線影響学会第 66 回大会、東京都 港区、2023.11.7
11. 松本英樹、山村睦朗、渡邊幸彦、千田裕一郎、前田宗利、陽子線頭頸部がん治療時に発症する放射線性口腔粘膜炎を克服できるか?、(公財)若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会、福井県 福井市、2023.11.27
12. 前田宗利、陽子線と分子標的薬の併用によるがん治療効果向上に向けた基礎研究を開始、(公財)若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会、福井県 福井市、2023.11.27
13. 三浦孝太郎、高城啓一、酒米新品種「山田錦 FW1 号」を用いた吟醸酒の醸造と新たな山田錦早生品種の作出、(公財)若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会、福井県 福井市、2023.11.27
14. 畑下昌範、三浦孝太郎、新たな炭素イオンビーム照射法による植物の突然変異誘発、(公財)若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会、福井県 福井市、2023.11.27
15. 遠藤伸之、食品の価値を高める指標としての抗酸化活性評価法の開発、(公財)若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会、福井県 福井市、2023.11.27
16. 山田知典、前田敏男、配管を対象としたレーザー切断機材の開発、(公財)若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会、福井県 福井市、2023.11.27
17. 山岸隆一郎、前田敏男、SUS304 表面へのレーザー照射による脱鋭敏化処理、(公財)若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会、福井県 福井市、2023.11.27
18. 堀史説、徐虬、大澤一人、安永和史、加速器を利用した Fe-Al 合金中のナノ空間への水素捕獲挙動、(公財)若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会、福井県 福井市、2023.11.27
19. 石神龍哉、安永和史、鈴木耕拓、Mg 系材料と La 系材料のハイブリッドによる 1 気圧以上の水素発生、(公財)若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会、福井県 福井市、2023.11.27
20. 羽鳥聡、栗田哲郎、山田裕章、廣戸慎、清水雅也、淀瀬雅夫、瀧上隆太、小田部圭佑、古川靖士、羽田祐基、菊池亮平、北上悟、若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状、(公財)若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会、福井県 福井市、2023.11.27
21. 栗田哲郎、田村文彦、シンクロトロンの高周波加速制御系の開発、(公財)若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会、福井県 福井市、2023.11.27
22. 木村栄男、下内孝博、石神龍哉、シリコン薄膜の光の干渉による発色方法の実用化、(公財)若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会、福井県 福井市、2023.11.27
23. 土屋文、高廣克己、鈴木耕拓、ToF-ERD 法を用いたリチウムイオン電池の電極 電解質界面におけるリチウムイオン移動のオペランド計測技術開発に関する研究、(公財)若狭湾エネルギー研究センター第 25 回研究報告会、福井県 福井市、2023.11.27
24. 平山翔太、田嘉信、宮住賢太、徐虬、大澤一人、安永和史、山本春也、堀史説、B2 型 Fe-Al 金属間化合物中の空孔内水素状態評価に関する研究、日本鉄鋼協会関西支部・日本金属学会関西支部材料物性工学談話会 2023 年度第 3 回講演会・ポスター発表会、大阪府 吹田市、2024.1.12
25. 黛隆宏、畑下昌範、高城啓一、石井公太郎、阿部知子、風間裕介、トレニア新規変異体 frilly petal undulation1 (fpu1)の原因遺伝子の探索、(一社)日本育種学会第 145 回講演会(令和 6 年度春季大会)、東京都 文京区、2024.3.17

3.2. 特許

令和5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
なし
- (2) 特許登録
なし

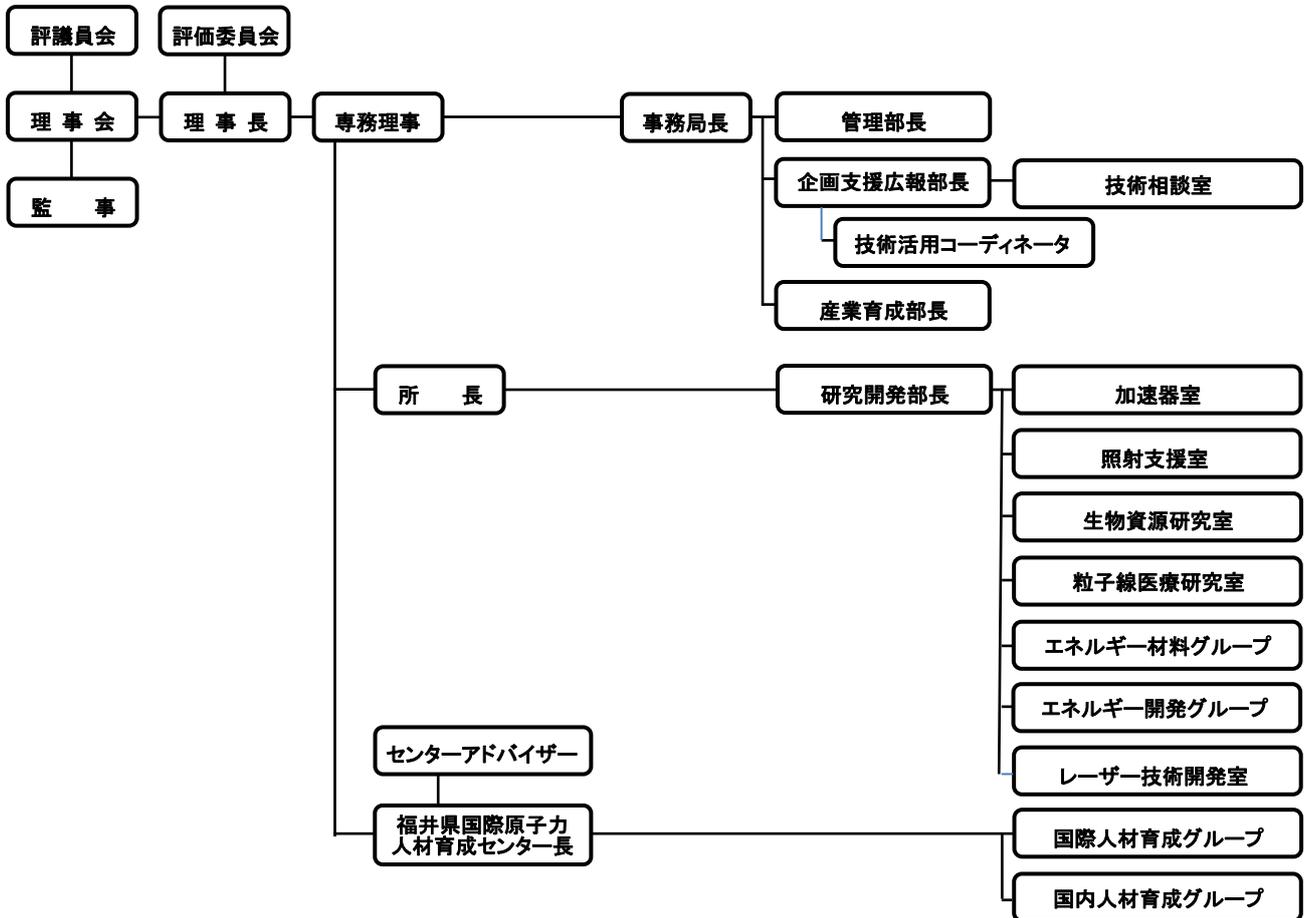
3.3. 品種

令和5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

(令和5年4月1日 現在)



令和5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26巻

発行:令和6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