

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4年度 第25巻

Annual Report of the Wakasa Wan Energy Research Center

Vol.25 2022



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	5
2.1.1.2 陽子線による頭頸部がん治療時に伴う口腔粘膜炎に対する防護剤の開発	7
2.1.1.3 骨髄幹細胞の粒子線障害に対する NO を介した細胞競合による組織再生能維持機構の解明	9
2.1.1.4 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	11
2.1.1.5 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	13
2.1.2. 粒子線照射技術の高度化研究	15
2.1.2.1 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	15
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	17
2.1.2.3 粒子線の線質測定技術開発	18
2.2. 育種分野	19
2.2.1. 植物・菌類のイオンビーム育種研究	19
2.2.1.1 X線を照射したキク葉片のヒストン H2AX リン酸化に対する KU-55933 の影響	19
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) ー高LETイオンビームによる変異誘発の多様性の実証ー	22
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) ー主要穀物育種におけるイオンビーム照射技術の利用ー	23
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	24
2.2.1.5 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	27
2.2.1.6 異質六倍体作物の草丈にカーボンビーム照射が及ぼす影響の評価	27
2.2.1.7 シイタケ菌糸における DNA 損傷マーカーの検出	28
2.2.1.8 重イオンビーム照射によるピーマンの突然変異体集団の作出	28
2.2.2. 生物資源のDNA情報・特性等の解析評価研究	29
2.2.2.1 福井県産生物資源の DNA マーカーの開発	29
2.2.2.2 福井県産生物資源の代謝産物分析	30
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 ミディマトに関する DNA マーカーの開発	31
2.2.2.5 突然変異育種に供試するためのニンニク無菌苗栽培法検討	32
2.2.3. 植物工場関連品種改良	33

2.2.3.1	赤色レタスにおけるアントシアニン合成系遺伝子の遺伝子発現に及ぼす光質の効果	33
2.2.3.2	きのこと抽出液を用いた植物工場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	実用化に向けたレーザー切断機材の開発	35
2.3.1.2	レーザー除染技術を利用した保全技術の検討	36
2.3.1.3	大型水槽内でのレーザー切断粉じん挙動及び濁水浄化に係るデータ取得等作業	37
2.3.1.4	飛散物抑制・捕獲に関する技術動向検査	38
2.3.2.	レーザー技術の産業利用	39
2.3.2.1	鋼材へのレーザー照射による脱鋭敏化効果の確認作業	39
2.3.2.2	レーザーピーニングによる金属付加製造物の機械的特性改善効果の確認作業	40
2.4.	宇宙開発分野	41
2.4.1.	宇宙で利用される機器・材料の評価技術開発	41
2.4.1.1	イオンビームによる宇宙産業育成	41
2.4.1.2	超小型衛星搭載マイコン素子の陽子線耐性	43
2.4.1.3	宇宙放射線計測装置の放射線耐性試験	45
2.4.1.4	COTS 半導体デバイスの高エネルギー荷電粒子衝突耐性に関する実験的評価	46
2.4.1.5	超小型衛星搭載用電子機器の放射線耐性調査	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	51
2.4.1.7	8 MeV 陽子線照射によるペロブスカイト太陽電池放射線耐性のその場評価	54
2.4.1.8	太陽電池のイオン照射における照射技術の高度化	55
2.4.1.9	プロトン衝突によって宇宙用材料から生じる二次電子の測定	57
2.5.	エネルギー分野	59
2.5.1.	放射線計測技術の開発	59
2.5.1.1	リチウム含有液体シンチレーターの性能評価	59
2.5.2.	様々なエネルギーの技術開発	60
2.5.2.1	触媒・形状・環境を加味したセラミック水素製造能力の向上	60
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	62
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—	63
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—	65
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	67
2.6.	多様な分野の活動を支える技術開発	69
2.6.1.	加速器技術の開発・高度化	69
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	69

2.6.1.2	タンデム加速器の加速電圧用高周波発振器および共振回路の更新	72
2.6.1.3	タンデム加速器加速電圧分割抵抗と放電ポイントの更新	74
2.6.1.4	シンクロトロン高周波加速制御系のデジタル化	76
2.6.2.	加速器利用分析技術の開発・高度化	78
2.6.2.1	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	78
2.6.2.2	TOF-ERDAを用いた膜中酸素量の解析に向けたDLC膜の膜厚制御	79
2.6.3.	放射線場で利用される機器・材料の評価技術開発	80
2.6.3.1	重イオン照射によりジルコニウム合金中に形成された転位ループと水素の相互作用	80
2.6.3.2	動的変形観察手法を用いた照射硬化量測定技術の高度化	82
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	84
2.6.3.4	重イオン照射されたジルコニウム合金の水素放出挙動	86
2.6.4.	材料技術の開発	87
2.6.4.1	プロトン照射による鉄系超伝導薄膜の臨界電流特性の増強に関する研究	87
2.6.4.2	シリコン薄膜の光の干渉による発色方法の実用化	89
2.6.4.3	超強加工による微細結晶粒金属材料の創製と評価	90
2.6.4.4	Ge ₁₂ Sb ₂ Te ₁₅ の熱電特性と微細構造	91
2.6.4.5	マイクロスラージェットエロージョン試験後のTi合金の表面状態	92
2.6.4.6	マグネシウム合金の腐食挙動に及ぼす添加元素の効果	93
2.6.4.7	溶媒溶解性に及ぼすポリイミド共重合構造の影響	93
3.	外部発表、特許、品種登録	94
3.1.	外部発表	94
3.2.	特許	100
3.3.	品種	100

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4年度は、第5期中期事業計画の3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のほか、つるが国際シンポジウム 2022 の開催、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4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4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5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

Basic medical/biological considerations for the realization of multidisciplinary cancer treatment
built around proton beam therapy

前田宗利^{*1}、前田未佳^{*1}、松本英樹^{*2、*3}、水嶋慧^{*1}、山東新子^{*1}、
松田慎平^{*4}、吉村仁志^{*4}、久米恭^{*1}

Munetoshi MAEDA, Mika MAEDA, Hideki MATSUMOTO, Satoshi MIZUSHIMA, Shinko SANDO,
Shinpei MATSUDA, Hitoshi YOSHIMURA and Kyo KUME

Abstract

Recently, a multidisciplinary treatment combining the merits of various therapeutic modalities has been adopted in cancer therapies. Among them, the combination of radiotherapy and molecular-targeted agents is expected to drastically enhance the anti-tumor effect. To realize cancer treatment using a combination of proton beams and molecular-targeted agents, a five-year plan 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 addition, from the perspective of multidisciplinary treatment combining radiation and medication, basic research will be promoted for the development of agents that can alleviate patient suffering. In this brief report, we summarize the established experimental setups during the first year of the project.

要約

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。なかでも、放射線治療と分子標的薬の併用は、がん治療効果を飛躍的に向上させる可能性のある治療法として期待されている。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、1)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、2)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。また、3)放射線と薬剤を併用した集学的治療の観点から、患者の苦痛軽減につながる薬剤の開発に向けた基礎研究を推進する。本稿では、初年度に実施した諸実験系の確立について概説する。

緒言

近年、様々な治療法の良い点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。その一方で、科学技術の発展によってがんの増殖メカニズムなどの解明が飛躍的に進み、多くの新薬が開発されてがんの薬物治療に用いられつつあるものの、放射線治療との併用に関する知見は十分とは言えない。これらの新薬と陽子線治療を組み合わせる集学的なアプローチが成功すればがん治療効果を飛躍的に向上させることができると期待されている。なかでも、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は、がん細胞の増殖を効果的に抑制するため注目が集まっている。優れた治療成績を有する陽子線治療とこの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を向上させることができると考えられる。また、放射線治療は比較的副作用の少ない優れた治療法であるが、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。このような副作用が生じる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症状を緩和する薬剤の開発につながる。

これらの背景を踏まえ、本研究では2022年度(令和4年度)から5カ年計画で、1)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、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、2)動物レベルでの治療効果の検証を行い、臨床治療の実施に向けた知見を蓄積する。また、3)放射線による副作用が生じるメカニズムなどについて詳しく調べ、特に放射線による頭頸部がん治療における副作用を念頭に置いて患者の苦痛軽減につながる薬剤の開発に向けた基礎研究を推進する。

^{*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、^{*2}福井大学・医学系部門・放射線基礎医学分野、^{*3}福井大学・遠赤外線領域開発研究センター、^{*4}福井大学・医学系部門・歯科口腔外科学分野

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県からの受託研究として実施したものである。
また、本研究の一部は、(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。

成果の概要

1. 陽子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) をモデル薬に選定した。本剤は、*ALK* (Anaplastic Lymphoma Kinase) 遺伝子変異を標的としたチロシンキナーゼ阻害剤であり、恒常的なチロシンキナーゼの活性化により増殖が異常増進している *ALK* 融合遺伝子を持つがん細胞の増殖を抑制することができる。本研究では、*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 細胞と、この A549 細胞に *EML4* (Echinoderm microtubule-associated protein-like 4) -*ALK* 融合遺伝子を組み込んだ *EML4-ALK* Fusion A549 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することにした。これに先立ち、2022年度においては、*EML4-ALK* 融合遺伝子の有無が細胞の放射線感受性に与える影響を評価し、A549 細胞 (*EML4-ALK*⁻) と *EML4-ALK* Fusion A549 細胞 (*EML4-ALK*⁺) の陽子線に対する感受性差が無視できるほど小さいことを明らかにした(図 1)。また、これら 2 種類の細胞に対するブリグチニブの 50% 阻害濃度 (IC₅₀) は、それぞれ 9.9×10^{-7} M、 6.5×10^{-7} M であった。

2. 陽子線と分子標的薬の併用による治療効果の検証に向けた予備的検討

EML4-ALK Fusion A549 細胞由来の腫瘍を移植したモデルマウスを作製して腫瘍動態を検証し、移植した腫瘍が良好に生着して増殖することを確認した(図 2)。また、担体マウスにおけるブリグチニブの毒性評価を行い、検証予定の反復投与がマウスの成長に影響を与えないことを確認した。

3. 頭頸部がん治療における副作用モデルの構築

放射線性顎骨骨髄炎のモデル細胞である下顎骨骨髄由来の造血幹細胞/多能性前駆細胞の陽子線に対する感受性を解析し、低線量域において急激な生存率の低下が誘導されることを明らかにした。また、放射線性顎骨壊死のモデル細胞候補として Human osteoblast (HOB) 細胞の X 線に対する感受性を解析し、同細胞が高い放射線抵抗性を有する可能性が示された。一方で、HOB 細胞の増殖速度が非常に遅いことから、より使用しやすいモデル細胞として正常マウス骨芽細胞 (MC3T3-E1 細胞) などをモデル細胞として用いる必要性が認められた。

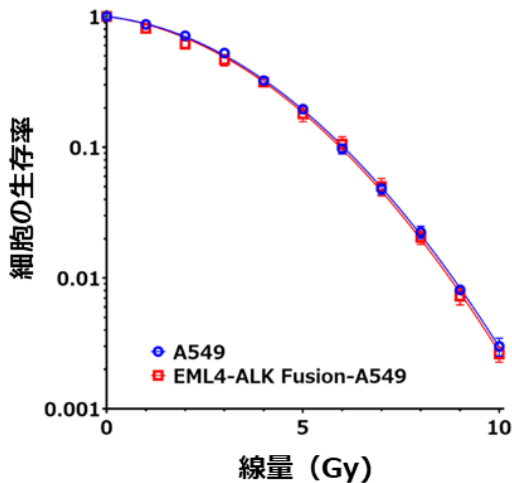


図 1 陽子線 SOBP で照射した A549 細胞および *EML4-ALK* Fusion A549 細胞の線量-生存率曲線。A549 細胞 (*EML4-ALK*⁻) を青色、*EML4-ALK* Fusion A549 細胞 (*EML4-ALK*⁺) を赤色で示した。

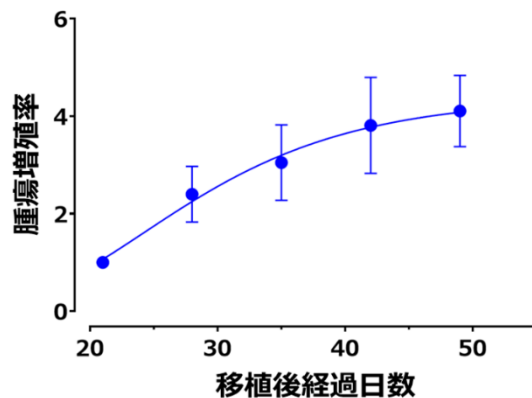


図 2 大腿部に移植した *EML4-ALK* Fusion A549 細胞由来の腫瘍の平均増殖率。移植後 3 週目に腫瘍の生着を確認し、生体内イメージングシステム (IVIS) により平均腫瘍断面積 (n=8) を測定して基準値とした。その後 1 週おきに平均腫瘍断面積を測定し、腫瘍増殖の経時変化を解析した。

結言

次年度より、本年度に構築したモデル系を用いて、①分子標的薬と陽子線の併用が細胞致死効果に与える影響、②モデルマウスに対する分子標的薬単独での治療効果についての検証を進めていく。また、頭頸部がん治療における副作用について引き続き、適切なモデル細胞系の構築を進めていく。

2.1.1.2

陽子線による頭頸部がん治療時に伴う口腔粘膜炎に対する防護剤の開発
Development of a Protective Agent against Oral Mucositis as a Side Effect of Proton Beam Therapy
for Head and Neck Cancers

松本英樹^{*1}、山村睦朗^{*2}、渡邊幸彦^{*2}、千田裕一郎^{*2}、前田宗利^{*3}、久米恭^{*3}
Hideki MATSUMOTO, Yoshiro YAMAMURA, Yukihiko WATANABE,
Yuichiro CHIDA, Munetoshi MAEDA and Kyo KUME

Abstract

To develop a radioprotective agent against oral mucositis as a side effect experienced upon irradiating proton beam on the head and neck cancers, we examined the effect of candidate agent A on the anti-tumor effect of proton beams and the mechanisms for candidate agent A as a radioprotective agent against oral mucositis. Immune-deficient male mice (BALB/cAJcl-*nu/nu*, 5~6 weeks old) and normal male mice (Jcl:ICR, 7~8 weeks old) were used to analyze the effect of the agent A on the anti-tumor effect by proton beams and to analyze the mechanisms for the agent A as a radioprotective agent against oral mucositis, respectively. Tumor (A549)-bearing immune-deficient mice were irradiated transplanted tumors only and normal mice were irradiated head and neck area only with proton beams of 20 Gy in 4 fractions (5 Gy/day, 4 days in a row). The agent A was administered intraperitoneally to tumor-bearing immune-deficient mice and intravenously through the tail vein to normal mice. After proton irradiation, the growth kinetics of the transplanted tumors were precisely measured for the tumor-bearing immune-deficient mice, and comprehensive gene expression analysis was performed at the tip of the tongue for the normal mice.

The agent A did not interfere with the antitumor effect of the proton beam. Treatment with the agent A significantly suppressed gene expression of the proinflammatory chemokine Ccl24 (Eotaxin-2) and significantly promoted gene expression of the anti-inflammatory and anti-apoptotic cytokine Il11.

要約

陽子線による頭頸部がん治療時に伴う放射線性口腔粘膜炎に対する防護剤を開発するために、抗腫瘍効果に対する候補薬剤 A の影響および候補薬剤 A の陽子線誘発放射線性口腔粘膜炎に対する防護剤としての作用機序に関して解析した。免疫不全マウス (BALB/cAJcl-*nu/nu*、雄、5~6 週齢) を陽子線による抗腫瘍効果に対する候補薬剤 A の影響の解析に、正常マウス (Jcl:ICR、雄、7~8 週齢) を陽子線誘発放射線性口腔粘膜炎に対する防護剤としての候補薬剤 A の作用機序の解析に使用した。担がん免疫不全マウスの移植腫瘍 (A549 腫瘍) および正常マウスの頭頸部にのみ陽子線を分割照射 (5 Gy/日、4 日間連続、合計 20 Gy) した。候補薬剤 A は担がん免疫不全マウスに対しては腹腔内投与し、正常マウスに対しては尾静脈から静脈内投与した。陽子線照射後、担がん免疫不全マウスについては移植腫瘍の増殖動態を精密に測定し、正常マウスについては舌尖部での網羅的遺伝子発現解析を実施した。候補薬剤 A は陽子線による抗腫瘍効果を妨げることはなかった。また候補薬剤 A の投与により、炎症増悪性のケモカインである Ccl24 (Eotaxin-2) をコードする遺伝子の発現が有意に減少し、抗炎症性および抗アポトーシス性のサイトカインである Il11 をコードする遺伝子の発現が有意に増加していた。

緒言

頭頸部がんは、一つの臓器から発生するものではなく、顔面頭蓋から頸部にかけての頭頸部領域に発生する上皮性悪性腫瘍を指す。わが国の頭頸部がんの全がんに占める割合は約5%で、発症のピークは40歳以降、男女比は4:1で、高齢化社会を迎えたわが国では増加傾向にある。頭頸部がんに対する放射線治療は、病期が早期であれば単独で、進行している場合でも手術の前後に化学療法と組み合わせた集学的治療の一環として実施されている。放射線治療の利点として患部切除による後遺症・合併症の回避、機能形態温存、低侵襲等があり、患者や家族の身体的、精神的な負担を低減の一助となっている。頭頸部がんの放射線治療時には、X線、陽子線、あるいは炭素線のいずれの線質を用いた場合においても副作用として放射線性口腔粘膜炎がほぼすべての患者に発症する。しかしながら、この放射線性口腔粘膜炎に対する防護剤/治療剤は国内外におい

^{*1}福井大学・医学系部門・放射線基礎医学分野、^{*2}丸石製薬株式会社・研究本部、^{*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・公募型共同研究により福井大学および丸石製薬株式会社と(公財)若狭湾エネルギー研究センターが共同で実施したものである。

て未開発であり、放射線性口腔粘膜炎を発症した患者に対して含嗽、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。また症状がさらに悪化した場合には放射線がん治療の中断を余儀なくされているのが現状である。これまでの放射線性口腔粘膜炎に対する防護剤の開発研究から見出した候補薬剤Aの陽子線による抗腫瘍効果に対する影響および候補薬剤Aの陽子線誘発性口腔粘膜炎に対する防護剤としての作用機序を詳細に解析した。

成果の概要

4. 候補薬剤 A の陽子線による抗腫瘍効果に対する影響

担がん免疫不全マウス(BALB/cAJcl-*nu/nu*, 雄、5~6 週齢)の移植腫瘍(A549 腫瘍)にのみ陽子線を分割照射(5 Gy/日、4 日間連続、合計 20 Gy)し、薬剤 A 投与群には、照射 1 時間前に薬剤 A(3 mg/kg 体重)を腹腔内投与した。照射後、移植腫瘍の増殖動態を精密に測定し、相対腫瘍断面積を指標とした腫瘍増殖曲線を作成し、解析した。その結果、薬剤 A は陽子線による抗腫瘍効果を抑制しない、つまり陽子線による治療効果を妨げないことが明らかになった(図 1)。

5. 候補薬剤 A の放射線性口腔粘膜炎に対する防護剤としての作用機序に関する網羅的遺伝子発現解析

正常マウス(Jcl:ICR, 雄、7~8 週齢)の頭頸部にのみ陽子線を分割照射(5 Gy/日、4 日間連続、合計 20 Gy)し、薬剤 A 投与群には、照射 1 時間前に薬剤 A(0.1 mg/kg 体重)を尾静脈内投与した。照射後 10 日目に舌を摘出して全 RNA を抽出し、網羅的遺伝子発現解析を実施した。その結果、薬剤 A の投与により、炎症増悪性のケモカインである Ccl24(Eotaxin-2)をコードする遺伝子(*Ccl24*)の発現が有意に減少し、抗炎症性および抗アポトーシス性のサイトカインである Il11 をコードする遺伝子(*Il11*)の発現が有意に増加していた。(図 2)。

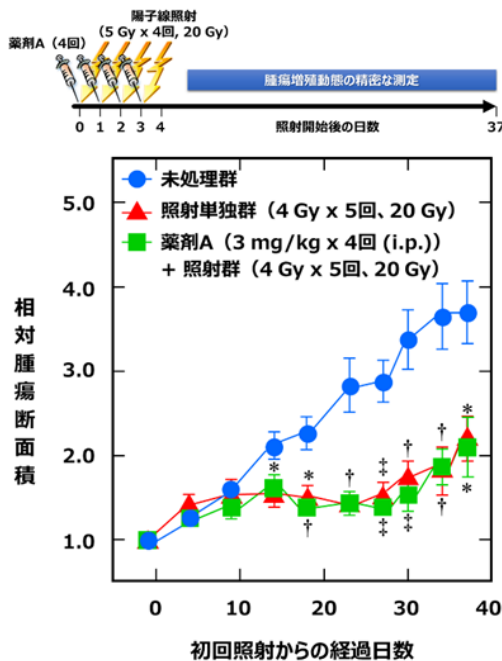


図 1 薬剤 A の陽子線による抗腫瘍効果に対する影響

*, p<0.05; †, p<0.01; ‡, p<0.001 vs. 未処理群

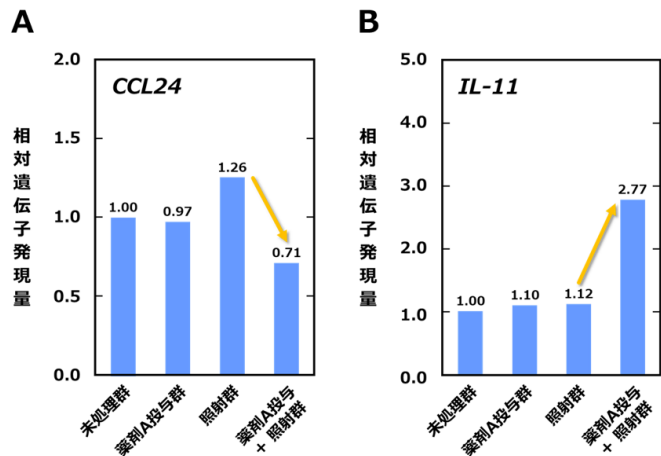


図 2 正常マウス舌での網羅的遺伝子発現解析

(A) *Ccl24* の相対遺伝子発現量、(B) *Il11* の相対遺伝子発現量。

結言

薬剤 A は陽子線による抗腫瘍効果を妨げないこと、および薬剤 A の投与によりケモカイン Ccl24(Eotaxin-2)の発現抑制、サイトカイン Il11 の発現促進が有意に認められた。炎症増悪性ケモカイン/サイトカインの発現抑制および抗炎症性ケモカイン/サイトカインの発現促進が放射線性口腔粘膜炎に対する防護剤としての薬剤 A の効能であることが示唆された。

2.1.1.3

骨髄幹細胞の粒子線障害に対する NO を介した細胞競合による組織再生能維持機構の解明
 Elucidation of Maintenance Mechanisms for Tissue Regenerative Potential by Cell Competition
 via NO in Damaged Murine Bone Marrow Stem Cells Irradiated with Particle Beams

松本英樹*1、前田宗利*2、平山亮一*3

Hideki MATSUMOTO, Munetoshi MAEDA and Ryoichi HIRAYAMA

Abstract

We examined the radiosensitivity of murine bone marrow hematopoietic stem cells (HSCs) and multipotent progenitor cells (MPPCs) after irradiation with X-rays, proton or carbon beams to elucidate maintenance mechanisms for tissue regenerative potential by cell competition in murine bone marrow HSCs and MPPCs irradiated with X-rays, proton or carbon beams. Normal male mice (C57BL/6Jcl, 6~7 weeks old) were used. The mice were irradiated with X-rays, proton or carbon beams at 5 Gy. In irradiation with particle beams, the mice were placed in front of the proximal end of the spread-out Bragg peak (SOBP). The bone marrow cell fractions were prepared 0, 1, 3, 6, 12, 24 h, 7 and 14 days after irradiation. These cells were cultured in the MethoCult medium for 7 days to allow bone marrow HSCs and MPPCs to form colonies. Then the surviving fractions were obtained by counting the number of colonies to analyze recovery kinetics of bone marrow cells.

The bone marrow HSCs and MPPCs showed only about 5% viability recovery 24 h after irradiation with X-rays and proton beams. No recovery of viability was observed in these cells until 7 days after irradiation. While no recovery of viability was observed in the bone marrow HSCs and MPPCs even 24 h after irradiation with carbon beams, and then these irradiated cells showed about only 5% survival recovery 7 days after irradiation. The surviving fraction of the bone marrow HSCs and MPPCs irradiated with X-rays, proton or carbon beams 14 days after irradiation were approximately 70%, 40%, and 20%, respectively.

要約

X線、陽子線、炭素線照射により損傷を受けた骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞の細胞競合による組織再生能維持機構を解明するために、5 Gy の X線、陽子線、炭素線照射後のマウス骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞の放射線感受性を調べた。正常マウス(C57BL/6Jcl, 雄、6~7週齢)に X線、陽子線、あるいは炭素線を 5 Gy 全身照射した。粒子線照射では、ビームエネルギーを調整してマウス内への線量寄与が深度-線量カーブにおけるブラッグピークの手前の平坦部相当になるようにした。照射後 0、1、3、6、12、24 時間、7 日、および 14 日に大腿骨から骨髄細胞を調製した。これらの細胞を MethoCult 培地で 7 日間培養し、骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞のコロニー数をカウントし、骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞の回復動態を分析した。X線および陽子線照射された骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞の生存率は 24 時間後に 5%程度しか回復せず、その後、照射 7 日後まで生存率の回復は観察されなかった。炭素線照射された骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞では、24 時間後でさえも生存率の回復は認められず、照射 7 日後においても約 5%の生存率回復しか認められなかった。X線、陽子線、炭素線を照射した骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞の 14 日後の生存率は、それぞれ約 70%、40%、20%であった。

緒言

近年、放射線発生/照射装置の進歩や照射方法の改善により、強度変調放射線治療(IMRT)や画像誘導放射線治療(IGRT)のみならず、陽子線および炭素線によるがん治療についても急速に普及してきていることにより、放射線がん治療の症例数は増加してきている。しかし、これらの方法による放射線がん治療では、腫瘍の周辺の正常組織に低線量被ばく域が存在している。陽子線や炭素線を用いた粒子線がん治療においても、その物理学的特徴から腫瘍組織に放射線の線量を集中させることができるが、腫瘍の周辺の正常組織における線量をゼロにすることは困難である。そこで本研究では、粒子線がん治療の安全性を担保するために、正常マウス骨髄由来の造血幹細胞/多能性前駆細胞に対する X線、陽子線および炭素線の影響を検証した。

*1福井大学・医学系部門・放射線基礎医学分野、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究室、*3(国研)量子科学技術研究開発機構・量子生命・医学部門・量子医科学研究所
 本研究は、文部科学省・科学研究費助成事業・基盤研究(B) 20H03620 により実施したものである。

成果の概要

6. X線照射後の骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞の回復動態(図1(A)、図2(A))

5.0 Gy のX線(180 kV, 10 mA, Cu-0.1 mm filter)を全身照射された正常マウスでは、照射直後の骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞の生存率は0.200で、照射1時間後に0.054まで低下し、その後約5%の生存率回復が認められ、照射24時間後では0.092であった。照射7日後の生存率は0.124で、照射14日後には0.700まで回復した。

7. 陽子線照射後の骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞の回復動態(図1(B)、図2(B))

線量寄与が拡大ブラッグピーク手前の平坦部相当(10 keV/ μ m以下)になるようなエネルギー(200 MeV)で5.0 Gyの陽子線を全身照射された正常マウス(図3)では、照射直後の骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞の生存率は0.121で、照射3時間後に0.059まで低下し、その後約5%の生存率回復が認められ、照射24時間後では0.118であった。照射7日後の生存率は0.124で、照射14日後には0.431まで回復した。

8. 炭素線照射後の骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞の回復動態(図1(C)、図2(C))

線量寄与が拡大ブラッグピーク手前の平坦部相当(15 keV/ μ m以下)になるようなエネルギー(290 MeV/u)で5.0 Gyの炭素線を全身照射された正常マウス(図3)では、照射直後の骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞の生存率は0.030で、照射24時間まで生存率の回復はほとんど認められなかった。照射7日後の生存率でも0.076で、照射14日後でさえ0.220であった。

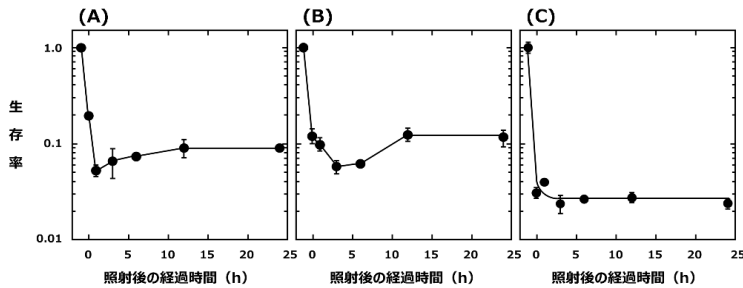


図1 照射直後～24時間後における骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞の回復動態 (A) X線、(B) 陽子線、(C) 炭素線

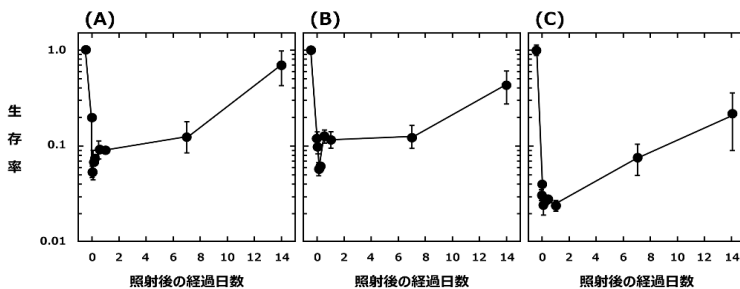


図2 照射直後～14日後における骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞の回復動態 (A) X線、(B) 陽子線、(C) 炭素線

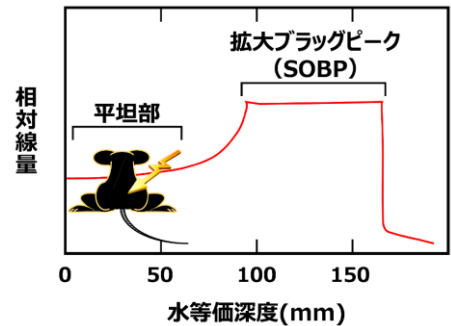


図3 マウスの照射位置の模式図

結言

X線と比較して、粒子線により損傷した骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞の回復が遅延することが示され、粒子線がん治療においては、照射野内に含まれる骨髄組織の被ばくを極力避けるようにすべきであることが示唆された。また、骨髄組織再生能維持機構に関して、損傷した骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞においてDNA損傷応答機構は誘導されず、排除されていると考えられ、また照射7日後以降に僅かに生存した、あるいは新規の骨髄造血幹細胞/多能性前駆細胞によって骨髄組織の回復が誘導されていることが示唆された。

2.1.1.4

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

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

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

Abstract

Pancreatic ductular adenocarcinoma (PDAC) is the most serious malignancy in the digestive system because of the difficulty of diagnosis in early stages as well as lack of conventional chemotherapies for the radical treatment in advanced stages, therefore, generally exhibits very poor prognosis. We conducted proton irradiation treatment on PDAC murine models at WERC. We investigated the immune response of the model to proton irradiation.

要約

膵がんは初期の診断が困難であり、進行期においては従来の化学療法のみでは寛解が難しく、多くの場合予後不良であり、消化器系においてもっとも深刻な悪性腫瘍である。本研究では、陽子線を用いた膵がんに対する新たな治療方法の開発を目的とし、マウス膵がんモデルの陽子線照射に対する免疫応答を調べた。

緒言

膵がんは2019年には36,356人の死因となり、部位別死亡数で第4位を占める¹⁾。同年の膵がんの部位別罹患数は43,865人であり¹⁾、罹患数と死亡数が近い。この理由には、90%以上が膵がん診断時のステージがⅢ以上の進行状態にあることがあげられる²⁾。化学療法として nab-Paclitaxel + Gemcitabine、FOLFIRINOX 治療が開発されてきたが、2年生存率は約10%にとどまる。また、膵がん全体の5年生存率は10%未満であり、部位別悪性腫瘍の予後で最も不良である。こうした背景により、早期診断方法の開発とともに、根治的外科的治療の適応のない進行膵がんに対して、より有効な新しい治療法が開発が予後改善に極めて重要である。

陽子線は粒子、X線は光子による照射治療であるため、癌に対する細胞死誘導機序、治療に伴う生体免疫応答反応も異なると考えられる。これまでに、ヒト膵癌細胞における *in vitro* での陽子線照射とX線照射による遺伝子発現プロファイル変化が異なること、また、*in vitro* での陽子線照射後の生存細胞と、X線照射後の生存細胞の遺伝子発現プロファイルも異なることを見出した³⁾。このことより、陽子線とX線照射についての癌細胞への細胞障害作用に伴う分子発現変化が異なることが明らかとしたが、それに伴う生体の免疫応答については未解明である。本研究は、マウス膵がんモデルを用いて、陽子線治療の効果、生体の免疫反応の詳細を解析し、照射後に免疫反応が増強されることにより非照射部位の腫瘍が縮小する Abscopal 効果を含めた、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

まず我々は *in vitro* における、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た網羅的遺伝子発現解析により行った。陽子線照射は、PAN02 および mT3-2D 細胞のコロニー形成能力を線量依存的に低下させた。遺伝子発現解析の結果、PAN02 および mT3-2D において、陽子線照射はサイトカインの高発現を誘導し、TNFシグナル伝達、P53シグナル伝達およびサイトカイン相互作用を増強し、一方、ダウンレギュレートされた遺伝子はDNA複製、細胞周期およびDNA修復に関連していた。これにより陽子線照射が引き起こす細胞死が、免疫応答を活性化させる可能性が示唆された。続いて我々は *in vivo* において PAN02 または mT3-2D を右脚と背部に移植することにより、2部位皮下膵臓癌マウスモデルを作成した。同モデルマウスに対し、抗 PD-L1 抗体の腹腔内投与と併用し、脚の腫瘍に福井県若狭湾エネルギー研究センター

^{*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・医薬保健研究域・医学系、^{*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。

で 200MeV 陽子線 8 Gy を照射した。照射部位である右脚および非照射部位である腫瘍サイズの経過ならびに炎症細胞の浸潤を評価した。抗 PD-L1 抗体と陽子線照射の併用により、PAN02 または mT3-2D が移植されたそれぞれのモデルマウスにおいて、右脚の陽子線が照射された腫瘍では、抗 PD-L1 抗体または陽子線照射のいずれかのみが行われたマウスおよび両者が行われなかったマウスと比較し、腫瘍の増殖速度が低下した。一方で、背部の非照射部位における腫瘍の増殖速度は、mT3-2D を移植されたマウスでのみ低下した(p<0.05)。抗 PD-L1 抗体と陽子線照射の併用療法を受けたマウスの照射部位である右脚および非照射部位である背部の腫瘍における免疫組織化学染色では、CD8 陽性細胞数、CD11c 陽性細胞数および CD86 陽性細胞数が、併用療法が行われなかったマウスの腫瘍と比較し増加を認めた。一方、CD4 陽性細胞数および F4/80 陽性細胞数は併用療法を受けなかったマウスと比較して増減を認めなかった。また、Gr-1+陽性細胞数と CD206 陽性細胞数は抗 PD-L1 抗体と陽子線照射の併用療法を受けたマウスの照射部位である右脚および非照射部位である背部の両腫瘍において、併用療法を受けなかったマウスと比較し、減少していた。陽子線非照射部位である背部の腫瘍における CD11c⁺細胞数は、併用療法を受けなかったマウスと比較し、陽子線照射により縮小を認めた mT3-2D モデルの背部腫瘍では 3 倍と増加していた一方で、照射により縮小を認めなかった PAN02 モデルの背部腫瘍では 1.4 倍の増加にとどまった⁴⁾。

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陽性を示す炎症性マクロファージである M1 マクロファージ、CD11c 陽性を示す細胞および CD8 陽性を示す細胞障害性 T リンパ球などの細胞数の増加を伴っていた。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、mT3-2D を移植したマウスモデルにおいて観察された。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 を移植したモデルマウスの背部腫瘍と比較し、CD11c 陽性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。

結語

本研究は陽子線照射が、直接的な細胞死のみならず、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 Abscopal effect を含む抗腫瘍効果を増強する可能性を示した。今後、膵がんに対し、陽子線の照射が引き起こす免疫応答を含む生体反応と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要する。

参考文献

- 1) 国立がん研究センターがん情報サービス「がん統計」、
https://ganjoho.jp/reg_stat/statistics/data/dl/index.html#a14、最終閲覧令和5年6月22日
- 2) 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>、最終閲覧令和5年6月22日
- 3) H. Fujinaga *et al.*, *Int. J. Radiat. Biol.*, 95(5) 571-579 (2019).
- 4) 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).

2.1.1.5

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

Determination mechanism of cellular radiosensitivity

depending on the spatiotemporal distribution of radiation energy deposition

前田宗利*¹、前田未佳*¹、富田雅典*²

Munetoshi MAEDA, Mika MAEDA and Masanori TOMITA

Abstract

Our research group has found that the radiosensitivity of cells irradiated with X-ray microbeams differs depending on the irradiated site (cell nucleus, cytoplasm, or whole cell), and that the ATM protein plays an important role in this mechanism. The ongoing study aims to elucidate the intracellular/intercellular signaling mechanism mediated by ATM by analyzing the changes in the induction dynamics of functional proteins in cells with and without irradiation to the cytoplasm. In this brief report, we describe the expression dynamics of p21 protein, which is involved in the induction of cell cycle arrest, as newly revealed by synchrotron X-ray microbeam irradiation experiments.

要約

我々の研究グループは、X線マイクロビームによって細胞の局所を照射した場合、その照射領域(細胞核、細胞質、細胞全体)に依存して細胞の放射線感受性が異なることを見出し、そのメカニズムに ATM タンパク質が重要な役割を果たすことを解明した。本研究では、細胞質への照射の有無により、細胞内の機能性タンパク質群の誘導動態がどのように変化するか解析し、ATM タンパク質をハブとした細胞内・細胞間情報伝達機構を解明することを目指している。本稿では、放射光 X線マイクロビーム照射実験により、新たに明らかになった細胞周期の進行抑制の誘導に関与する p21 タンパク質の発現動態について紹介する。

緒言

我々は、細胞の一部だけを狙い撃ちすることのできる細胞局所マイクロビーム照射技術を用いて細胞内の照射領域と細胞の放射線感受性を評価した結果、低線量域(≤ 2 Gy)では、細胞核だけを X 線で照射したときよりも、細胞全体を X 線で照射したときの方が細胞に与えられる線量が多くなるにもかかわらず細胞が死にくいことを明らかにした^{1, 2)}。細胞核に同じ線質と線量の X 線が照射された場合、細胞核に生じる DNA 損傷の質や量はほとんど等しいため、DNA 損傷が細胞死の主な原因であるとする従来の考え方だけではこの現象を説明することができない。我々は、核と細胞質の緊密な連携によって放射線にさらされた細胞の運命が決定されると考え、ヒト正常細胞(WI-38 細胞)に対する細胞質照射の有無が DNA 損傷応答に関わる 84 遺伝子の発現動態に与える影響について PCR アレイを用いて解析した。細胞質に X 線が照射されていない細胞核照射では細胞死の誘導に関係する 3 遺伝子(*ABL1*, *CDC25C*, *TP73*)が顕著に活性化した。一方、細胞質にも X 線が照射されている細胞全体照射では DNA 損傷修復を行うために細胞周期を停止させる仕組み(cell cycle arrest)に関わる遺伝子(*CDKN1A*)が顕著に活性化した。このうち *CDKN1A* は p21 タンパク質をコードしており、p21 タンパク質が細胞周期の進行を担うタンパク質群の働きを抑制することで細胞周期の停止が誘導される(図 1)。今回

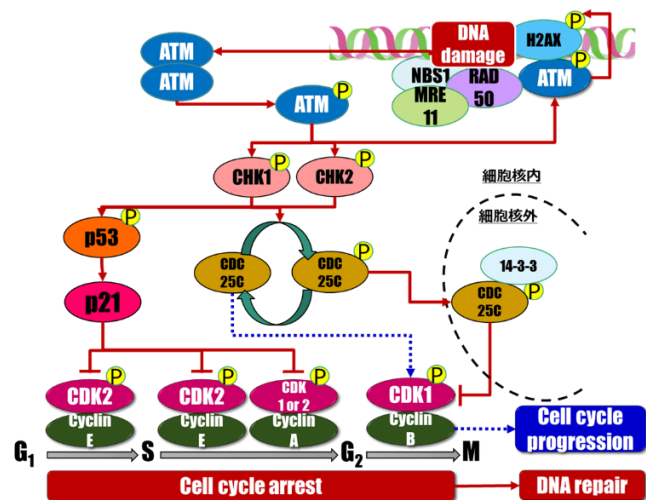


図 1 ATM を介した DNA 損傷を起点とする細胞周期制御に関わる細胞内の情報伝達機構。DNA 損傷が認識されると、ATM がリン酸化し DNA 損傷応答経路が活性化される。p21 は、細胞周期の進行を担っている CDK/Cyclin を抑制して細胞周期の進行を停止し、DNA 損傷を修復するための時間を稼ぐと考えられている。

*¹(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究室、*²(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と(一財)電力中央研究所の共同研究として実施したものである。

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 2021G027 における研究成果を含む。

我々は、p21 タンパク質の発現がマイクロビームに照射された細胞集団においてどの様に変化するのかについて解析した。

成果の概要

顕微鏡の同一視野内に存在するヒト肺由来正常細胞(WI-38 細胞)の集団を 100 μm \times 100 μm の X 線 (5.35 keV) マイクロビームを 1、5、10 Gy で照射し、照射の 30 分後および 4 時間後におけるヒストン H2AX タンパク質のリン酸化 (γ H2AX、DNA 二本鎖切断のマーカー) および p21 タンパク質の誘導状態を免疫蛍光染色法により検証した。照射から 0.5 時間後 (図 2a) には、照射された領域において γ H2AX のフォーカス形成の線量依存的増大が観察された。その一方で、照射された領域では、非照射の細胞に観察された p21 の発現はほとんど観察されなかった。照射から 4 時間が経過すると、 γ H2AX のフォーカスを有する照射された細胞が照射領域から広がって移動した様子が観察され、 γ H2AX のシグナルは減弱しているものの残存が確認された (図 2b)。興味深いことに、照射 0.5 時間後では主として非照射細胞、すなわち照射エリアの外側の細胞に p21 の発現が誘導されているのに対し、4 時間後ではこの周辺細胞における p21 の誘導は抑制され、 γ H2AX シグナルを有する一部の照射細胞において強く発現している様子が観察された。照射試料の細胞周期は同調していないため、視野内には様々な細胞周期の細胞が混在している。このため、図 2a では、非照射細胞における p21 の発現量が一定ではなく、様々な強度の p21 の蛍光シグナルが観察されたと考えられる。一方、照射された領域では、DNA 損傷の修復応答が開始され、図 1 の p21 よりも上流の情報伝達機構が活性化したことにより、一旦 p21 の発現誘導が解除され、シグナルが観察されなくなった可能性がある。その後、DNA 損傷修復応答が進行し、4 時間後において DNA 損傷の修復が完了していない細胞では p21 の発現誘導が持続するために一部の照射細胞に p21 シグナルが観察され、非照射細胞および DNA 損傷修復が完了あるいはアポトーシス等の他の経路が活性化した他の細胞では p21 がリリースされたと推測される。これらの結果は、照射された細胞だけではなくその周辺の非照射細胞も含めた細胞が集団として放射線に対する応答をしている可能性を示唆しており、放射線誘発バイスタンダー応答様の未知の細胞間情報伝達機構が存在するのかもしれない。

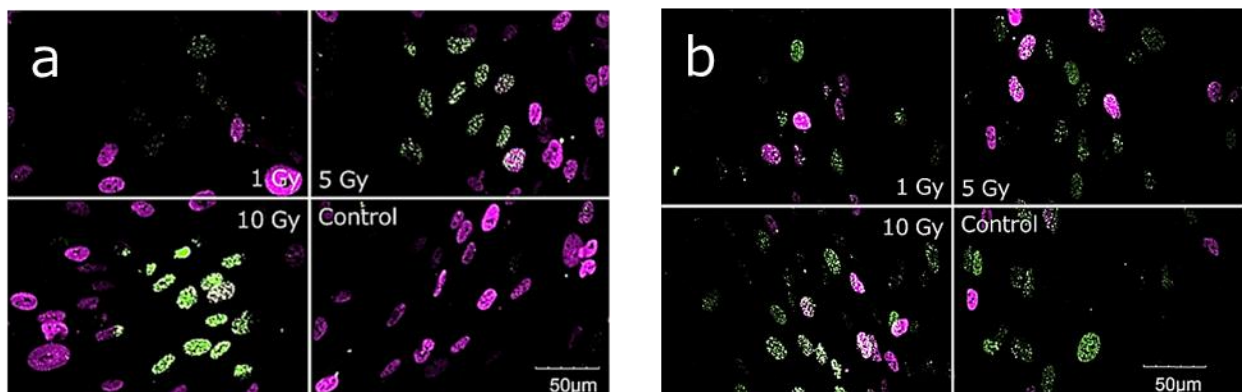


図 2 ヒト肺由来正常細胞(WI-38 細胞)を 100 μm \times 100 μm の X 線 (5.35 keV) マイクロビームを用いて 1、5、10 Gy で照射した 0.5 時間後 (a) と 4 時間後 (b) に免疫蛍光染色法により可視化した p21 (マゼンタ) および γ H2AX (グリーン)。なお、時間の経過とともに DNA 損傷が修復されることで H2AX のリン酸化が解消されて γ H2AX シグナルが減弱するため、図 2b ではグリーンのシグナルを増幅しており、バックグラウンドシグナルも上昇している。一方、p21 の発現を示すマゼンタのシグナルは図 2a、図 2b とともに同一の条件で撮影した。

結言

本研究では、引き続き、p21 や ATM シグナリングの時間変化をより詳しく解析して見出した現象のメカニズムを詳しく検証し、ATM タンパク質をハブとした細胞内・細胞間情報伝達機構を詳細に解明していく予定である。

参考文献

- 1) M. Maeda *et al.*, Exposure of the cytoplasm to low-dose X-rays modifies ataxia telangiectasia mutated-mediated DNA damage responses., *Sci. Rep.*, 11, 13113 (2021)
- 2) M. Maeda, N. Usami, K. Kobayashi., Low-dose hypersensitivity in nucleus-irradiated V79 cells studied with synchrotron X-ray microbeam., *J. Radiat. Res.*, 49, 171-80 (2008)

2.1.2. 粒子線照射技術の高度化研究

2.1.2.1

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
 A Basic Study on the Efficacy and Prediction of Therapeutic Effects of Charged Particle Irradiation
 on a Mouse Model of Cervical Cancer

清野泰*¹、牧野顕*¹、森哲也*¹、岡沢秀彦*¹、久米恭*²

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

Abstract

The results of X-, proton-, or carbon-irradiation to model mice transplanted with HeLa, GH354 or SiHa cells suggested that carbon-irradiation was effective in suppressing tumor volume increase. On the other hand, ¹⁸F-FLT PET imaging performed the day after irradiation failed to predict the change in tumor volume after irradiation, while PET imaging performed 2 days after irradiation showed a decrease in ¹⁸F-FLT accumulation, indicating the possibility of predicting early treatment efficacy.

要約

子宮頸部腺がん細胞である HeLa と GH354 細胞、扁平上皮がん細胞である SiHa 細胞を移植したモデルマウスに X 線、陽子線、炭素線を照射した結果、炭素線照射が腫瘍体積の増大抑制に有効であることが示唆された。一方で、照射翌日に行った ¹⁸F-FLT PET 撮像では、照射後の腫瘍体積の変化を予測することができなかったが、照射 2 日後に行った PET 撮像では ¹⁸F-FLT の集積が低下し、早期治療効果予測の可能性が示された。

緒言

子宮頸部腺がん罹患者は増加傾向にあるが、検診で見つかり難い上に、放射線治療や化学療法が効きにくい性質を持っていることから、有効な治療法の開発が望まれている。粒子線治療は放射線治療抵抗性のがん細胞に対して従来の放射線治療よりも効果があるというこれまでの共同研究成果¹⁾²⁾をもとに、子宮頸がんの腺がん細胞に対する粒子線治療の有効性の検討と、治療戦略の決定や患者の QOL の向上に重要なファクターである治療開始早期における治療効果予測を PET 分子イメージングにより達成可能であるかの検証を、子宮頸がんモデルマウスを用いて行った。

方法

HeLa, GH354, SiHa の 3 種の細胞を皮下移植したモデルマウスを作製した。腫瘍部位に 5 Gy あるいは 10 Gy の X 線、陽子線、炭素線を照射し、放射線を照射しないマウスをコントロールとして、腫瘍体積変化を評価した。照射翌日あるいは翌々日に、細胞増殖能を画像化する PET 薬剤である ¹⁸F-FLT を尾静脈投与し、PET 撮像を行い、腫瘍部分への ¹⁸F-FLT の集積量を測定した。また、PET 撮像後から 7 日間経的に移植した腫瘍の体積を計測した。なお陽子線と炭素線の照射は福井県若狭湾エネルギー研究センターで実施した。

結果・考察

本年度は GH354 細胞移植モデルマウスを用いて粒子線治療の有効性評価を進めた。その結果、腺がんである GH354 では、1) X 線照射に対して感受性が低く、照射後も腫瘍体積が増大した。2) 陽子線照射群では Control 群と比べてがんの増悪抑制傾向がみられた。3) 炭素線照射では有意な増大抑制が観察された。すなわち、既存の治療法による治療奏功性が低い腺がんに対し、炭素線治療が有効であることが示された。また HeLa および SiHa 細胞移植モデルマウスを用い、放射線照射した 2 日後に撮像した ¹⁸F-FLT PET 画像では、照射翌日に撮像した場合とは異なり、¹⁸F-FLT 集積量がその後のがん治療効果と相関して減少した。この結果より、¹⁸F-FLT を用いた放射線治療の治療効果予測には、¹⁸F-FLT PET 検査の実施タイミング最適化が重要であることがわかった。

結言

ヒト子宮頸がん細胞を移植したマウスモデルでは、腺がんと扁平上皮がんいずれの組織型に対しても炭素線照射群の腫瘍体積変化が Control 群に比べて有意に抑制されたことから、炭素線治療の有効性が示された。ま

*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・公募型共同研究事業により、福井大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターが共同で実施したものである。

た、 ^{18}F -FLT PET 検査のタイミングを放射線治療の翌日から2日後に変更することで、 ^{18}F -FLT の集積量変化から放射線治療の治療効果予測が可能であることが示された。

参考文献

- 3) 清野泰 他、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報(令和2年度)、23、10 (2021)
- 4) 清野泰 他、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報(令和3年度)、24、7 (2022)

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

Research for Practical Application of Exposure Dose Evaluation Method by DNA Damage Analysis

Corresponding to Radiation Exposure Accidents

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

We have studied on the new method for the analysis of DNA lesions caused by proton beam irradiation by using a polymerase chain reaction. This year, we focused on the improvement of detection sensitivity of the PCR method by expanding the region where DNA is synthesized. By expanding the region of the DNA synthesis in the URA3 region of *S. cerevisiae* genomic DNA, the detection sensitivity of proton beam-induced damaged template DNA could be improved by approximately 5%.

要約

ポリメラーゼ連鎖反応(PCR)を用いて、放射線による DNA 損傷を指標とした緊急被ばく時の生体影響評価および吸収線量の評価を行った。陽子線を照射した DNA に対して、2 か所の DNA 領域を合成するダブルプライマーを使用した場合、従来法であるシングルプライマーを使用した場合と比較して、吸収線量に対して未損傷の DNA 量の減少割合が 5%上昇し、感度の向上が確認できた。

緒言

本手法は PCR による増幅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)を評価するものである。令和 4 年度は、陽子線を照射した場合の DNA 損傷の評価に関して、感度の向上について検討した。

研究成果

出芽酵母の *URA3* 遺伝子領域(804 bp)DNA 断片をサンプルとした。若狭湾エネルギー研究センターにて陽子線(200 MeV, 0.45 keV/μm)を照射した。吸収線量は 0.01 - 1 Gy である。サンプルを鋳型 DNA として PCR を行った。プライマーとして Primer1F および Primer1R を用いた場合をシングルプライマー、シングルプライマーにあわせて Primer2F および Primer2R を用いた場合をダブルプライマーとして、それぞれ PCR を行った(図 1)。得られた結果から、各吸収線量(Gy)での未損傷の鋳型 DNA 比を評価した。図 2 に吸収線量に対する未損傷の鋳型 DNA を示す。ダブルプライマーを使用した場合、シングルプライマーを使用した場合よりも、吸収線量に対して未損傷の DNA 量の減少の割合が 5%上昇した。これは、図 1 に示すように、プライマーを 2 対用いることで PCR によって増幅可能な領域が拡大されたためであると考えられる。

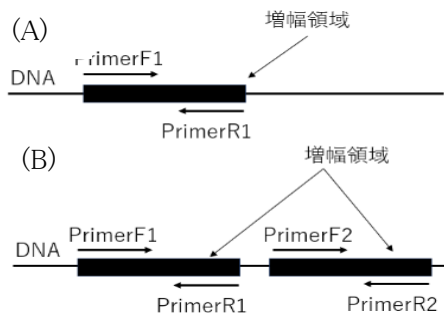


図 1 シングルプライマー(A)およびダブルプライマー(B)による DNA 増幅領域。

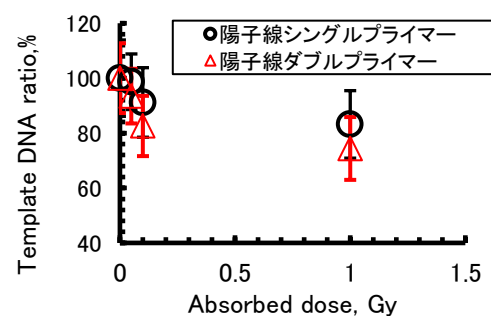


図 2 陽子線を照射した場合の PCR による未損傷鋳型 DNA 量の評価結果。

結言

陽子線を照射した DNA の未損傷の鋳型 DNA 量を PCR により評価した。シングルプライマーと比較して、ダブルプライマーを用いることによって DNA 損傷評価の感度が向上することが示された。今後、陽子線を照射した細胞核内の二本鎖切断生成量を評価し、PCR による評価の結果との比較を行う計画である。

*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。

2.1.2.3

粒子線の線質測定技術開発

Development of Radiation Quality Measurement Technique for Particle Beam

松尾陽一郎*1、安田仲宏*2、泉佳伸*2、久米恭*3

Youichirou MATUO, Nakahiro YASUDA, Yoshinobu IZUMI and Kyo KUME

Abstract

We are promoting the sophistication of treatment planning systems using particle beams. As the development of radiation quality measurement of charged particle beams, we promoted the precise angle measurement of the incident beam, the measurement of the nuclear charge conversion cross-section, and the development of fluorescence-labeled biocompatible materials.

要約

粒子線を用いた治療計画システム高度化に資する研究を推進している。荷電粒子線の線質測定技術の開発として、入射ビームの精密角度測定、核電荷変換断面積等の測定、蛍光標識した生体親和物質の開発を推進した。

緒言

炭素線がん治療で発生しうる標的核破砕反応による余剰線量を推定するために、入射ビームの精密角度測定、核電荷変換断面積等の測定を行った。また、蛍光標識した生体親和物質に関する研究では、「オリゴヌクレオチド」と「蛍光物質」を結合させた物質を用いて、陽子線による生体物質の損傷量及び線量を評価した。検出感度の向上のため、オリゴヌクレオチドの鎖長について検討した。

研究成果

(1) CR-39 検出器による炭素線の線質評価と核破砕反応の解析

エネルギーが 50 MeV/n 以下の炭素線照射により CR-39 プラスチック検出器中で発生した核破砕片の生成確率(核電荷変換断面積)の測定を継続した。またいくつかの破砕モード(C→3 α や C→2Li など)別に、破砕片の電荷を同定し、放出角度を精密に測定した。これにより、既存の原子核反応モデルの評価が可能になり、重粒子線がん治療における治療計画や宇宙飛翔体における遮蔽計算を高度化することが期待できる。統計量を上げることでデータの信頼性を向上させ、結果を公表する予定である。

(2) 蛍光標識した生体親和物質の開発

蛍光修飾したオリゴヌクレオチドの鎖長を変化することによる放射線感受性の向上について検討した。出芽酵母の *URA3* 遺伝子配列の一部の 27 塩基および 15 塩基の 2 種類の鎖長のオリゴヌクレオチドに蛍光修飾したサンプルに対し、WERC にて陽子線(200 MeV)を照射した。吸収線量は 0~0.1 Gy である。蛍光物質 6-FAM の蛍光強度($\lambda_{em}=516$ nm)の変化を評価したところ、27 塩基に対して 15 塩基のオリゴヌクレオチドでは比較的感受性が向上することが示された。分子内励起移動の効率が関係する可能性があり、他の鎖長の場合についても今後検討する計画である。

結言

CR-39 検出器により、治療領域エネルギーの炭素線による核破砕反応の精密分析を行った。また、生体親和物質を用いた DNA 鎖切断の評価では、鎖長による感度への効果について検討し、短い鎖長の場合、比較的感度が向上する結果が示された。

*1 福井大学工学系部門原子力安全工学講座、*2 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、福井大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

2.2. 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

X線を照射したキク葉片のヒストン H2AX リン酸化に対する KU-55933 の影響

Effect of the KU-55933 on Histone H2AX Phosphorylation in X-ray Irradiated Chrysanthemum Leaf Disc

高城啓一*1

Keiichi TAKAGI

Abstract

Phosphorylation of chrysanthemum histone H2AX after X-ray irradiation was markedly reduced by treatment with KU-55933. The result suggests that the mammalian ATM inhibitor KU-55933 may also act as an ATM inhibitor in chrysanthemum cells.

要約

X線照射後に生じるキクのヒストン H2AX のリン酸化は、KU-55933 投与により著しく低下した。この結果は、哺乳類細胞の ATM 阻害剤である KU-55933 が、キク細胞においても阻害剤として作用することを示唆している。

緒言

突然変異が形成される主要因の一つとして、内的/外的要因によって形成された DNA 損傷が修復を受ける際の誤修復が考えられる。したがって、DNA 損傷修復に関わる因子の作用に干渉することによって突然変異の形成率増加や、突然変異パターンの変更が可能ではないかと考えられる。

ATM(血管拡張性運動失調症原因遺伝子)は、DNA 二本鎖損傷(DSB)に対する細胞応答の制御に関わる主要な制御因子である。ATM の作用を抑制することにより、DSB の修復を含む DNA 損傷応答が抑制され、突然変異形成を促進する可能性が考えられる。哺乳類細胞の ATM に特異性が高い阻害剤として、KU-55933 という薬剤が知られている¹⁾。したがってこの薬剤が植物でも作用するのであれば、この薬剤を用いて照射後の DNA 損傷応答に干渉し、より効率的なイオンビーム育種法を開発できる可能性がある。

本報告では、観賞用園芸品種として広く栽培されているキクにおいて、イオンビーム照射と修復系阻害剤の併用処理が突然変異形成に与える影響を検証する前段階として、まず X 線照射を受けたキクの細胞で KU-55933 が作用するかどうかの確認を行った。確認に際して、DNA 損傷マーカーである γ H2AX を用いた。 γ H2AX は C 末端セリン残基がリン酸化されたヒストン H2AX であり、DSB が生じた際に ATM や ATR の作用により DSB 近傍の H2AX がリン酸化されて γ H2AX となることが知られている^{2,3)}。X 線照射をされたキクの細胞では、DNA 損傷により活性化された ATM により H2AX がリン酸化されて γ H2AX となる。もし KU-55933 がキクの ATM に阻害効果を示すのであれば、 γ H2AX の形成は抑制されるため、照射後の γ H2AX の分布を調べることにより、KU-55933 がキクにおいて ATM 阻害効果を示したかどうかを判断できる。

上述した γ H2AX を用いた実験系を用いて X 線照射を行ったキクの葉片細胞に対する KU-55933 の作用を確認したところ、KU-55933 がキクの ATM 阻害作用を持つことを示す結果が得られた。

実験材料と実験方法

実験材料として、無菌栽培した野生型シロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana* ecotype Columbia)、シロイヌナズナ ATM 機能欠損体(SALK_036940)の幼苗、および無菌栽培されたキク栽培品種スージーの葉片を実験材料として用いた。液体培地には 2% スクロースを含む 1/2 MS 培地を、固型培地には 2% スクロース、0.3% グランガムを含む 1/2 MS 培地を使用した。

シロイヌナズナ幼苗、あるいはキク葉片(直径およそ 5 mm)を 20 μ M KU-55933、0.2% DMSO を含む液体培地、あるいは 0.2% DMSO のみを含む液体培地中、室温下でシロイヌナズナでは 30 分間、キク葉片では 3 時間インキュベーションした後、X 線照射装置(MBR-1520R-3, 日立メディコ)を用いて X 線照射を行った。X 線照射後の幼苗や葉片はもとの液体培地に戻し、さらに 30 分(シロイヌナズナ幼苗)、あるいは 1 時間(キク葉片)室温下でインキュベーションを行った後、4% パラホルムアルデヒドを含む固定液で固定した。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室

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。

固定後のシロイヌナズナ幼苗根端、あるいはキク葉片は、一次抗体として抗シロイヌナズナ γ H2AX マウスモノクローナル抗体を、二次抗体として AlexaFluor488 結合抗マウス IgG 抗体を用いて免疫蛍光染色した。核の検出には一次抗体として、抗ヒストン H3 ウサギモノクローナル抗体を用い、二次抗体として AlexaFluor 568 結合抗ウサギ IgG 抗体を用いた。染色後の組織像検出には共焦点レーザー顕微鏡(LSM 780, Carl Zeiss)を用い、画像解析には Image J を使用した。

結果と考察

まず、X 線照射後の、野生型シロイヌナズナ幼苗に対する KU-55933 処理の幼苗根端 γ H2AX 分布に及ぼす効果と、ATM 欠損シロイヌナズナ幼苗における幼苗根端 γ H2AX 分布の比較を行った。その結果を図 1 に示す。KU-55933 処理を行わず、溶媒である 0.2% DMSO のみでインキュベーションを行った野生型シロイヌナズナ幼苗根端では、X 線 100 Gy 照射 30 分後に細胞核上に顕著な抗 γ H2AX 抗体結合が見られた(図 1 左列上段)。ATM 機能欠損体幼苗根端では、野生型と比較して抗 γ H2AX 抗体の結合は著しく低下した(図 1 中列上段)。野生型幼苗を 20 μ M KU-55933+0.2% DMSO で処理した場合、抗 γ H2AX 抗体の核への結合は ATM 機能欠損体の場合と同様に、著しく低下した(図 1 右列上段)。この結果は、KU-55933 処理を行った野生型幼苗根端では、ATM 機能が欠損した場合と類似した H2AX のリン酸化抑制が生じることを示している。この結果や、照射後の γ H2AX 変動の経時変化が ATM の機能欠損体と類似しており、もう一つの制御因子 ATR の機能欠損体の場合とは異なること、個体生存に対する X 線感受性増強の程度が ATM 機能欠損体と似ていることから KU-55933 はシロイヌナズナにおいて特異性高く ATM の阻害を行っていると考えられた。

キク葉片への KU-55933 処理と X 線照射を行った場合、もし KU-55933 がキクの ATM を効果的に阻害するならば、シロイヌナズナ幼苗の場合と同様に X 線照射後に見られる抗 γ H2AX 抗体の結合が、KU-55933 で処理した葉片では、溶媒のみで処理した葉片と比較して著しく低くなることが予想される。そこで次に、キク葉片に対して 20 μ M KU-55933+0.2% DMSO で処理を行った場合と、0.2% DMSO のみの処理を行った場合で X 線 30 Gy 照射 1 時間後の抗 γ H2AX 抗体結合を調べた。その結果を図 2 に示す。溶媒のみで処理を行った葉片では、強い抗 γ H2AX 抗体結合が見られた(図 2 中列上段)。一方、20 μ M KU-55933 処理を行った葉片では、溶媒処理のみと比較して抗 γ H2AX 抗体結合は著しく低かった(図 2 右列上段)。この結果は、キク葉片においてもシロイヌナズナ幼苗の場合と同様に、KU-55933 が ATM 作用を抑制することを強く示唆している。

以上の結果から、KU-55933 は、キク葉片細胞で ATM 抑制効果を持つのではないかと考えられた。

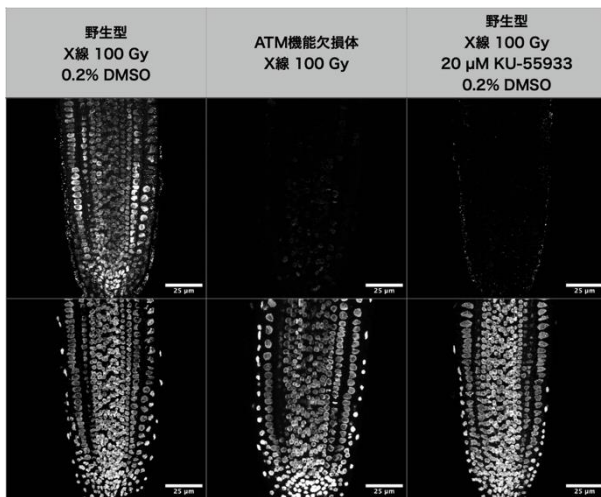


図 1 KU-55933 処理—X 線 100 Gy 照射を行ったシロイヌナズナ幼苗の照射 30 分後の根端像

左列は、野生型を 0.2% DMSO 処理—X 線照射を行った根端、中列は、ATM 機能欠損体に X 線照射を行った根端、右列は、野生型に 20 μ M KU-55933 処理—X 線照射を行った根端の組織像を示す。上段は抗シロイヌナズナ γ H2AX 抗体結合像、下段は抗ヒストン H3 抗体結合像を示す。スケールバーは 25 μ m を示す。

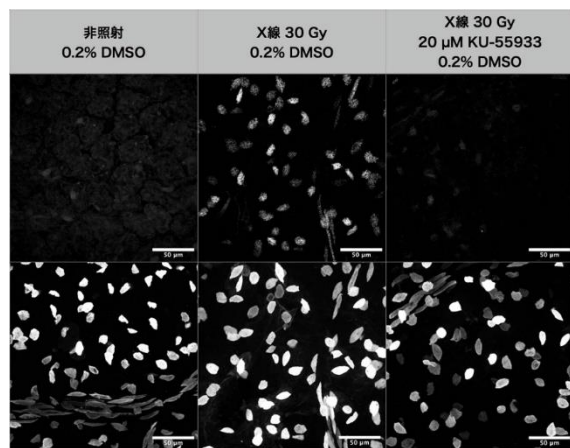


図 2 KU-55933 処理—X 線照射を行ったキク葉片の照射 1 時間後の組織像

右列は非照射葉片、中列は 0.2%DMSO 処理—X 線照射を行った葉片、右列は、20 μ M KU-55933 処理—X 線照射を行った葉片の像を示す。上段は抗シロイヌナズナ γ H2AX 抗体結合像、下段は抗ヒストン H3 抗体結合像を示す。スケールバーは 50 μ m を示す。

結言

KU-55933 がキク葉片において ATM の作用を効果的に抑制することを強く示唆する結果が得られた。今後はこの薬剤処理とイオンビーム照射の併用処理を行ったキク葉片から再分化する植物体の花色等の突然変異に関する調査を行い、薬剤処理とイオンビーム照射の併用効果を検証する。

参考文献

- 1) I. Hickson *et al.* *Cancer Res.* 64(2), 9152 (2004)
- 2) E. Rogakou *et al.* *J Biol. Chem.* 273(10), 5858 (1998)
- 3) J. Friesner *et al.* *Mol. Biol. Cell* 16(5), 2566 (2005)

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 useful 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, high yielding mutants were selected from Japanese rice *Nipponbare* irradiated with high-LET carbon ion.

要約

イオンビーム照射は、主に高等植物の品種改良の手段として用いられてきている。高い線エネルギー付与(LET)をもったイオンビームは、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、イネ日本晴種子に高いLETの炭素イオンビームを照射した後代より多収性に関係する変異体の選抜を行った。

緒言

イオンビーム照射技術は、主に、日本独自の新しい突然変異育種技術として進展してきた。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トロンから得られる炭素イオンビームに対しデグレーターを用い、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てきた。今回は、LET150keV/μmの炭素イオンビームをイネ日本晴種子に照射したときの後代の育成から多収性に関係する変異体の選抜を行った。

結果の概要

炭素イオンビームに対しデグレーターを用いてビームエネルギーを下げることでLET150keV/μmの炭素イオンビームを試料に照射できるようにした。このビームを用いて、イネ日本晴乾燥種子への照射を行い、線量と幼苗時の草丈との関係を明らかにした。非照射に比べ草丈がやや低くなる線量で照射した種子を716個体育成し、照射第2世代種子を得た。照射第2世代は各系統14個体ずつ育成し、同一系統内で同一の変異形態が2個体以上見られるものを変異体として135系統選抜した。照射第3世代以降は変異形態の発現が安定しているものを候補として残し、21系統の多収性変異体を選抜した。



日本晴 選抜された変異体

図1 イネ日本晴種子へのカーボン照射(LET150)によって選抜された多収性変異体(一部)

今後の課題と展望

今後は、この照射法を用いて照射した種々のモデル植物種子および穀類種子の後代を育成することで獲得した変異体のゲノム解析による変異箇所の同定および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}(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, the rice grain quality of mutants of Japanese rice (*Nipponbare*) obtained from seeds irradiated with high LET carbon beams was investigated.

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獲得した変異体の玄米品質を調査した。

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、こうした照射法で獲得されたイネ日本晴の多収性変異体に関して、外観の草型のみならず、玄米における品質の変化の有無を明らかにするために、変異体の玄米品質を調査した。

結果の概要

LET 150 keV/ μm 炭素イオンビーム照射を行った日本晴種子の後代の育成により、今までに 716 系統の中から 135 系統の変異体を選抜した。また、これらのうち、多収性に関係する変異形態を持った系統は 21 系統を選抜することができた。1株当たり 15%以上の明確な籾重量の増加がみられる 6 系統について、玄米品質の調査を行った。整粒歩合の結果を表1に示す。日本晴の整粒率は 64%であった。これと同等の整粒率を示したものは4系統あった。整粒率が 50%以下の変異体1や同2においては、30%を超える未熟粒(乳白)の発生が認められた。この2つの変異体は、日本晴よりも1週間以上早い出穂が見られ、早生でかつ多収性を示す変異体として選抜してきたものである。早生は熟期の期間が短くなるため、十分にデンプンが充填されない籾を大量に作ると思われる。

表1 日本晴多収性変異体の整粒歩合

供試試料	整粒率 (%)	未熟粒 (%) (乳白)
日本晴	64	7
変異体 1	30	44
変異体 2	42	33
変異体 3	57	6
変異体 4	55	9
変異体 5	61	15
変異体 6	52	17

今後の課題と展望

今後は、獲得した変異体のゲノム解析による変異箇所の同定および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. In 2021, we applied for the breed registration of "Yamadanishiki FW1," which is easy to grow in Fukui Prefecture. In 2022, we performed cultivation and brewing test of "Yamadanishiki FW1" and developed "Yamadanishiki FW2".

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。我々は令和3年度に福井県での栽培が容易な「山田錦 FW1 号」の品種登録を申請した。令和4年度は「山田錦 FW1 号」の栽培試験と醸造試験を行い、さらに、「山田錦 FW2 号」を育成したので報告する。

緒言

酒米のトップブランド品種である「山田錦」は、主に兵庫県で栽培され、米粒が大きく通常の米と比較するとタンパク質・アミノ酸が少なく心白(米粒の中心が白く濁る)が大きいという日本酒醸造に重要な形質がある。しかしながら、草丈が高い、茎がもろい、晩生、脱粒性(稔った種子がばらばらと穂から脱落する性質)が高いという栽培が困難になる性質があるため、福井県ではほとんど栽培されていない。これまでに実施した研究開発により、福井県若狭湾エネルギー研究センターの粒子線加速器システムを用いた炭素イオンビーム照射などにより、「草丈が低い」、「茎が丈夫」、「山田錦よりも早生」、「脱粒しない」という形質をそれぞれ有する変異体の選抜に成功した。そして、難脱粒性系統と出穂時期を調整した早生系統との交配により「草丈が低い」、「茎が丈夫」、「山田錦よりも早生」、「脱粒しない」の形質を併せ持つ「山田錦 FW1 号」を育成しその品種登録のための栽培試験を行った結果、山田錦 FW1 号は、「山田錦よりも5日早生、5cm矮性、脱粒しない」という特性を持つことが確認できたため、令和3年度中に品種登録申請を行った(出願番号:36235)。本研究では、①この山田錦 FW1 号の栽培特性を調査する事でその生産性を明確にする。②実需者による試験醸造を行うことで醸造適性を評価する。また、③「山田錦 FW1 号」とは出穂期の異なる早生系統、「FW2 号や FW3 号」を育成する事で様々な栽培環境に適した山田錦 FW 品種群の構築を目指して研究を実施したため報告する。

材料と方法

植物材料

本実験では、令和3年に福井県あわら市二面 88-1 の福井県立大学生物資源開発研究センター、実験圃場で採種した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、生物資源開発研究センターの育苗温室にて1ヶ月間育苗したサンプルを、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水田に定植した。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。

醸造試験

2022年6月4日に久保田酒造の水田(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、試験醸造に移行した。

試験醸造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。

*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。

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。

結果と考察

1. 山田錦 FW1 号の栽培特性の評価

2022年度の山田錦 FW1 号の出穂日は山田錦と同じ8月24日となり、稈長は山田錦が95.44 cmであったのに対し、山田錦 FW1 号の稈長は96.83 cmとなり、有意差は見られなかった。脱粒性の評価では、山田錦の脱粒数の平均脱粒数が57.2粒であったのに対し、山田錦 FW1 号の脱粒数の平均は11.6粒と有意に低下した。また、山田錦の精玄米の100粒重の平均が2.60gであったのに対し、山田錦 FW1 号は2.49gとなり、僅かに減少したが、山田錦の1㎡精玄米収量の平均が289.38gであったのに対し、山田錦 FW1 号の1㎡精玄米収量は296.28gで有意差は無かった。

これらの結果から、山田錦 FW1 号は2022年度の結果では出穂日・稈長について山田錦と明確な差異が見出せなかった。令和4年度は、7月に異常な曇天と高温を示しており、このことにより生育ステージが抑制されて花芽形成期が山田錦と揃ってしまっただけで、山田錦との間に明確な差異が見出せなかった要因となった可能性がある。

2. 実需者による試験醸造とアンケート調査

2023年3月5日に開催された久保田酒造の酒蔵開放で「蒼天跳馬」(図1)の商品名で生原酒の試験販売を行い、購入者を対象にアンケート調査を行った。その結果、40名から回答を得ることができ、男女比は男性:女性=20:19(1名無回答)でほぼ同数であった。年齢は20代~80歳以上まで幅広く回答を得られ、日本酒を飲む頻度も1ヶ月に1~2回以上の方が多く、日本酒好きの方の回答が多く得られた。「この日本酒は好きですか?」の回答は「好き」が82.5%を占め、「嫌い」の回答が0%であった。また、「この日本酒を知合いに勧めますか?」の回答では「はい」が92.5%となった。「好き」と回答した人の理由は、「飲みやすい」が11名、「甘口でおいしい」が8名、「フルーティーな香りが好き」が6名となった。「分からない」と回答した人の理由は「後味が引く」「スツといかない」という回答があった。アンケート調査では、山田錦 FW1 号で醸造した酒は好評であり、「フルーティーな香りが好き」というコメントが得られた事などから山田錦らしい味わいが得られたと判断した。



図1 蒼天跳馬

3. 「山田錦 FW2 号」の育成

2021年度に選抜した早生・矮性・難脱粒を併せ持つ後続候補20系統について栽培試験を実施した結果、山田錦よりも明確に6日早生(図2)、稈長が山田錦よりも10 cm程度短く、難脱粒の性質を示す1系統を選抜した。また、この系統の心白発現率は山田錦よりも高く、デンプンの溶解性は山田錦同等という結果を示し、酒米としての品質も高い事が期待できる。そこで、この有望系統を「山田錦 FW2 号」と命名した。2023年度以降に栽培試験を行い、品種登録を目指す予定である。

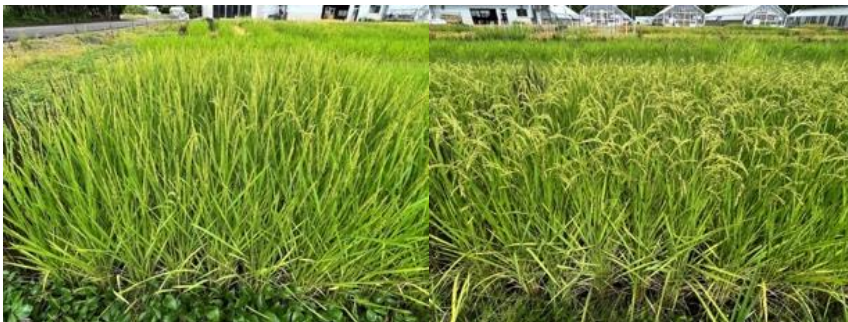


図2 山田錦と山田錦 FW2 号の出穂の様子(8月24日撮影)

山田錦(左)は出穂直後のため穂が実っておらず直立しているが、山田錦 FW2 号は出穂して6日経っているので穂が垂れ始めている。

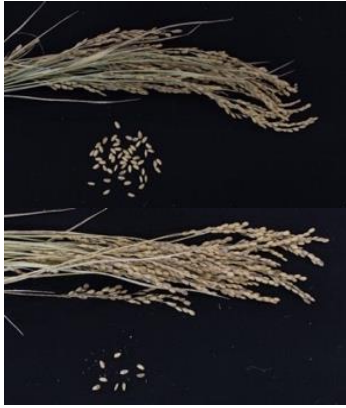


図3 山田錦(上)と山田錦FW2号(下)の脱粒の様子 図4 山田錦(左)と山田錦FW2号(右)稈長の比較

結言

2022年の栽培試験では、山田錦FW1号は出穂日と稈長について山田錦との違いが出ないという結果が出たが、7月の曇天に加えて9-10月の好天により山田錦の生育が良かったことも山田錦FW1号を栽培するメリットが出せなかった要因の一つと考察している。しかしながら、試験醸造を行った結果できた日本酒の評価は概ね上々であったため、再度栽培・醸造試験を行い、山田錦FW1号の評価を行う必要がある。また、新たに育成できた山田錦FW2号については、FW1号と同様の気候条件で栽培したにもかかわらず山田錦よりも明確に早生・矮性の表現型を示した。この結果から、FW2号はより早生化が必要な山間地などでの栽培適応性が期待でき、今後詳細に栽培調査を行う必要がある。

2.2.1.5

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を選抜することを主な目的にする。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。LET の炭素イオンビーム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。致死では無かった系統から種子を獲得し、M2、M1 個体の栽培を R5 年度に行う予定にしている。

^{*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。

2.2.1.6

異質六倍体作物の草丈にカーボンビーム照射が及ぼす影響の評価
 Evaluation of the Effects of Carbon Beam Irradiation on Plant Height of Allohexaploid Crops
 吉田健太郎^{*1}、新田みゆき^{*1}、田淵雅弘^{*1}、畑下昌範^{*2}、高城啓一^{*2}
 Kentaro YOSHIDA, Miyuki NITTA, Masahiro TABUCHI, Masanori HATASHITA and Keiichi TAKAGI

異質六倍体作物の草丈にカーボンビーム照射が及ぼす影響を評価するために、実験系統として使われている普通系コムギ品種「Chinese Spring」に、カーボンビーム照射を行なった。LET 50 keV/μm で 20 Gy、40 Gy、60 Gy、80 Gy の4処理区、LET 150 keV/μm で 2.5 Gy、5.0 Gy、10 Gy、20 Gy の4処理区を設け、処理区あたり 50 粒を供試した。処理区あたり 12 粒の M₁ 種子について発芽試験を実施したところ、92%から 100%の発芽率であった。明期 23°C・16 時間、暗期 16°C・8 時間、培土にスミンコンパル(住友林業緑化)を用い、発芽した種子を栽培した。LET 50 keV/μm の処理区では、吸収線量が増加するにつれて、草丈が低くなった。80 Gy での草丈の平均長は、68.3±10.5 cm であり、20 Gy の 91.6±5.44 cm と比べ、統計的に有意に低かった。一方、LET 150 keV/μm については、処理区間で統計的に有意な差はなかった。同じ吸収線量(20 Gy)下では、統計的に有意差はなかったが、LET 150 keV/μm の方が、50 keV/μm より草丈が低い傾向を示した。残りの M₁ 種子について世代更新するために、京都大学北白川の圃場で栽培した。圃場環境でも処理区間で草丈の差が観察され、LET 50 keV/μm、80 Gy が一番低い草丈を示した。一方、アルビノ個体は、どの処理区においても見られなかった。M₁ 個体からランダムに 4 個体を選び、着粒した M₂ 種子を 5 粒選抜し、一処理区あたり 20 粒について発芽試験を実施した。全ての処理区において、発芽率は 100%であった。R5 年度には、「Chinese Spring」に LET 150 keV/μm、30 Gy のカーボンビーム照射を行ない、草丈に及ぼす影響を評価する予定である。

^{*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。

2.2.1.7

シイタケ菌糸におけるDNA損傷マーカーの検出

Detection of DNA Damage Marker in Mycelia of Shiitake Mushroom

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。このイオン種による感受性の違いとDNA損傷の相関を調査するため、シイタケのDNA損傷マーカーであるリン酸化ヒストンH2A(γ H2A)の免疫組織化学的検出を試みた。

市販されている出芽酵母の γ H2Aに対する抗体を一次抗体としてシイタケ菌糸細胞における抗体結合の検出を試みたところ、X線照射後の菌糸核で強い一次抗体結合が検出された。この一次抗体結合は、シイタケ、出芽酵母のH2Aのリン酸化C末端オリゴペプチドを一次抗体とともにインキュベーションした時には強く抑制されたが、シイタケ、出芽酵母H2A非リン酸化C末端、シロイヌナズナ、ヒトH2AXリン酸化C末端オリゴペプチドとともにインキュベーションした時には抑制されなかった。以上の結果から、この抗体を用いてシイタケの γ H2Aを特異的に検出することが可能であると考えられた。

今後は、この検出系を用いてイオンビーム照射によるDNA損傷と、菌糸伸長抑制の相関に関する調査を実施しようと考えている。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、^{*2}(一財)日本きのこセンター・菌茸研究所

本研究は、(国研)農業・食品技術産業総合研究機構 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ものである。

2.2.1.8

重イオンビーム照射によるピーマンの突然変異体集団の作出

Production of Mutant Population of *Capsicum annum* by Heavy Ion Beam Irradiation古里やす子^{*1}、高城啓一^{*2}、増田順一郎^{*1}

Yasuko FURUSATO, Keiichi TAKAGI and Jun-ichiro MASUDA

重イオンビームを利用した変異体の作出は多くの植物で行われており、得られた変異体から実用品種も育成されている。また、変異体は植物の生理的メカニズムを明らかにするための強力なツールにもなり得る。

本研究の目的は、新品種開発の育種基盤を整備するために、ピーマン‘カリフォルニアワンダー’の乾燥種子に重イオンビーム照射を行い、変異体集団を作出することである。500 MeVの炭素ビーム(LET 50keV/ μ m)を乾燥種子に0, 1, 10, 15, 20, 25, 30, 60 および 100Gy 照射した。照射した種子を播種し、播種20日後の生存率を調査したところ、0~60Gy照射区では93%以上の生存率であったが、100Gyの照射区で生存率が61%であった。次に、重イオンビーム照射と生長との関係を調べるために、播種20日後の胚軸長、第一葉の葉長および葉幅長を調べた。胚軸長は60Gyで短くなり、線量が高くなるにつれて胚軸の生長は抑制された。また、第一葉の葉長および葉幅長の測定結果から、葉の生長は30Gyで抑制され、線量が高くなると葉の生長が強く抑制された。以上の結果から、変異体作出の最適照射線量は60Gyであることがわかった。また、60Gy照射したM₁植物の中から、半矮性、葉緑素欠失、果実形態異常、分枝性異常、成熟果色変異等の変異体を得られた。

^{*1}宮崎大学農学部、^{*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、宮崎大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

2.2.2. 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. As a result, 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3株と非単位結果性の3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100mgから QIAGEN 社の DNeasy Plant mini kit を用いて抽出精製した¹⁾。DNA 断片の増幅は、ABI 社の AFLP Plant Mapping kit のプロトコル²⁾を参考に、PCR 反応は TOYOBO 社の KOD One Master Mix、ABI ProFlex PCR System を用いて行った。DNA の多型は TaKaRa 社の PrimeGel Agarose PCR-Sieve HRS を用いて検出した。AFLP Plant Mapping kit のプロトコルに示された64種類のプライマーの組合せについて調べた結果、プライマーペア EcoRI (AAG) / MseI (CTA) において1個、プライマーペア EcoRI (ACC) / MseI (CAC) において2個の、いずれも単為結果性に特異的な DNA 断片の増幅が認められ、両者の間に多型が検出された(図1)。

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3個の特異的な DNA 断片を検出した。これらの DNA 断片は再現性良く検出でき、単為結果性に関わる DNA マーカーの候補として有力である。今後はこれら 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)

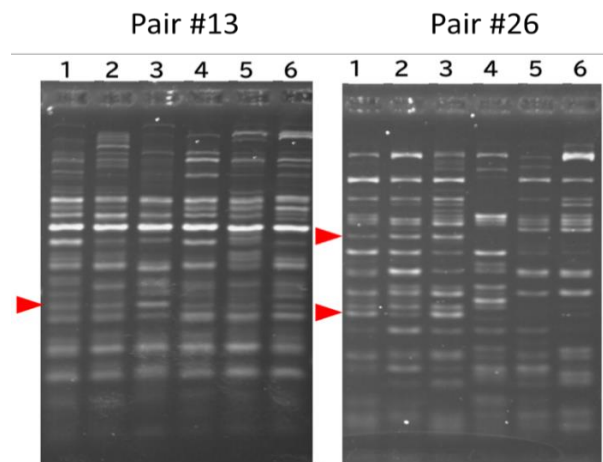


図1 AFLP 解析の一例
レーン 1～3 は為結果性トマト、レーン 4～6 は非単為結果性トマト。赤矢印で示した部分に DNA 多型が検出された。

^{*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

福井県産生物資源の代謝産物分析
Analysis of Metabolites for Agricultural Products of Fukui Prefecture
遠藤伸之*1
Nobuyuki ENDO

Abstract

For agricultural products such as midi tomatoes and leafy vegetables, we investigated whether the constituent ingredients and metabolites of Fukui prefecture products are different from those of other areas. We also investigated whether the difference is characteristic of Fukui prefecture products.

要約

ミディトマトや葉物野菜などの福井県産農産物について、他産地の類似品目と含有する成分・代謝産物が異なるかを比較調査し、福井県産の特徴を有するか調査を行った。

緒言

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

成果の概要

越のルビーを主に福井県産および県外産品のミディトマトについて新たに取得した市販品 5 種 21 検体、昨年度に取得した試料の冷凍保管品の冷凍、供与品 12 種の計 36 種を試料とし、クロマトグラフによる成分分析を実施し、県産品の特異性を植物の含有物から判別する手法の開発を試みた。ガスクロマトグラフ質量分析法(GCMS)、液体クロマトグラフ質量分析法(LCMS,HPLC)を用い、前年度に評価を試みた脂肪酸代謝物およびテルペン類化合物の計4種類、アミノ酸2種類の他にも多成分の分析を実施してデータを蓄積し、品種ごとの特徴探索を昨年度に継続して実施した。また、トマト以外の農産物についても葉物野菜を中心に水菜(福井県産、茨城県産)、春菊(福井県産、栃木県産)、ホウレンソウ(福井県産、静岡県産)、ネギ(福井県産、京都府産)を試料として4種2産地で 21 検体について、GCMS および LCMS 分析結果を実施して成分比のデータを取得した。

トマトおよび葉物野菜を試料とし、含有する種々の香気成分や糖、アミノ酸、ビタミン類といった栄養成分の分析手法は確立できたが、収穫時期、生産場所の違いによる個体差が大きく、福井県産品と他県産地品について同一品種では産地の識別を可能にする差異を見出すことはできなかった。

結言

福井県産および類似品のミディトマトや葉物野菜を試料とし、県産品の特異性を植物の含有物から判別する手法の開発を試みた。成分判定に有望な測定条件や分析手法、試料の前処理法といった分析に関わる技術については確立できたが、含有量の絶対値では、個体差の影響が大きいうえ、収穫時期の違いで成分の含有量は大きくことなり、同一品種の産地を特徴づけることは不可能だった。トマトの品種間比較においては、複数の香気成分・栄養成分について含有比率の相対評価を行うことで品種の特徴は確認することができた。

産地を識別する手法としての活用は困難な結果となったが、本研究で分析を実施している成分には、トマトでは GABA やグルタミン酸、葉物野菜ではオリゴ糖やビタミン類など、よく知られている栄養成分や生体機能性を示す成分も多く含まれており、これらの成分分析手法とそれによって得られる結果は、有用成分の高含有などによる食品の高価値化の根拠を示すことができ、他県産物との差別化、福井県産物のブランド化に寄与することから、これらの成分を多く含む育成法や新品種の開発に活用できる。

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

2.2.2.3

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

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、さまざまな状態（液体、固体、粉末、脂状、水溶液など）である食品に対して、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。具体的には、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・O₂⁻、アルキルラジカル・R、アルコキシルラジカル RO[•]、ヒドロペルオキシドラジカル ROO[•]、一重項酸素 ¹O₂ 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。これら6種の生体内で実際に生成・作用している活性酸素種に関して、簡便な方法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最適化を行い、手法の確立に成功した。

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、様々な食品に適応可能な手法である。今後は、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

2.2.2.4

ミディトマトに関する DNA マーカーの開発

Development of DNA markers for midy tomato

田中良和*¹

Yoshikazu TANAKA

トマト黄化葉巻病は *Tomato yellow leaf curl virus* (TYLCV) によって引き起こされるウイルス病であり、トマトの重要病害の1つである。感染したトマトは葉が黄化して葉巻状態になり、株全体が萎縮して収穫ができなくなる。現在では全国で抵抗性トマトの育成、導入が進んでおり、福井県でもミディトマトに黄化葉巻病抵抗性を導入するために、抵抗性遺伝子 Ty-3 と Ty-3a に対する DNA マーカー (P6-25) の使用条件を検討した。トマト DNA は、QIAGEN 社の DNeasy Plant Mini Kit を用いて抽出したもの、および葉を TE バッファー中で摩砕したものを用いた。PCR 反応には TOYOBO 社の KOD One PCR Master Mix -Blue を使用した。PCR 反応は、94°C 2 分の後、98°C 10 秒、55°C 10 秒、68°C 10 秒を 30 サイクルで行った。DNA の増幅は 3% アガロースゲル (PrimeGel Agarose PCR-Sieve HRS, TaKaRa 社) を用いて確認した。その結果、精製 DNA および葉の摩砕物のいずれにおいても、P6-25 で検出される DNA 断片 (Ty-3 の 450bp、Ty-3a の 630bp、罹病性の 320bp) を増幅することができた。Ty-1 遺伝子をもつトマトでは、罹病性株と同じ 320bp の DNA バンドが検出された。福井県固有系統のトマトにおいても該当 DNA 断片を検出でき、本 DNA マーカーを用いた選抜が可能であることを示した。

参考文献 1) Dellaporta, S. L. *et al.*, *Plant Mol Biol Rep* 1, 19-21 (1983)

*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

2.2.2.5

突然変異育種に供試するためのニンニク無菌苗栽培法検討

Aseptic Propagation of Garlic for Mutation Breeding

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

ニンニクは種子増殖が困難な作物で、種子を出発材料として突然変異育種を行うことが難しい。イオンビーム育種を実施する場合、特に水中飛程の短い炭素ビームでは、ビームを球根全体に貫通させることは不可能であり、球根を出発材料とすることもできない。そこで、ニンニク根端の組織培養により不定芽を誘導し、その不定芽を無菌的に育成して得られた苗を圃場で育成して、短期間で育種目的の選抜実施や、種球として販売が可能で大きさまで育成することが可能かどうかを確かめた。

令和2年度冬にニンニク根端から Haque ら¹⁾の方法を改変した方法で多数の不定芽を誘導可能なことを確認した。誘導した不定芽を無菌育成した苗を令和3年11月に圃場に定植し、令和4年5月に収穫して、通常販売されている種球の大きさまで生長していることを確認した。令和4年秋から令和5年春にかけてこの種球を圃場栽培し、令和5年6月に収穫し、市場で種球として販売されている大きさのニンニクまで生長していることを確認した。以上のことから、ニンニク根端を出発材料とした場合、不定芽誘導-照射時期を調整することにより、照射から1年～2年で圃場栽培での変異選抜が実施可能であると考えられる。

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

*¹(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、*²株式会社アサヒ農園
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと株式会社アサヒ農園が共同研究として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

赤色レタスにおけるアントシアニン合成系遺伝子の遺伝子発現に及ぼす光質の効果

Effect of Light Quality on the Expression of Anthocyanin Biosynthesis Genes in Red Leaf Lettuce

畑下昌範*1、町田龍亮*2、岡義仁*1

Masanori HATASHITA, Ryusuke MACHIDA and Yoshihito OKA

Abstract

The method of anthocyanin 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 red and blue LED.

要約

人工光利用型植物工場においては、白色 LED で栽培されたレッドリーフレタスにはアントシアニンの蓄積が見られないため、アントシアニンの蓄積を促す栽培手法の確立が求められている。本研究では、赤色 LED および青色 LED を用いてレッドリーフレタスのアントシアニン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、赤色 LED および青色 LED を用いてレッドリーフレタスのアントシアニン合成系遺伝子の遺伝子発現を調査した。

結果の概要

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。水耕培養液は一定の電気伝導度を保つように適宜追液し、水耕栽培を行った。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、赤色 LED(PPFD 200)のみの試験区と赤色 LED と青色 LED を 1 対 1 の割合で混合した試験区(PPFD は各々 100)を設定し、均一な幼苗を選んでそれぞれの試験区に分けて定植した。光照射を開始してから 24 時間後に本葉を採取して液体窒素で凍結した。RNA 抽出、cDNA 合成は市販のキットを用いて行った。アントシアニン合成系遺伝子は表 1 にある 5 つの遺伝子(いずれも既知)を発現解析の対象とし、遺伝子特異的プライマーを設計した。cDNA、プライマー、酵素を用いて PCR 反応を行い、遺伝子発現をハウスキーピング遺伝子である Actin 遺伝子との存在比から解析した。表 1 に示した結果から、レッドリーフレタスのアントシアニン合成系遺伝子においては、赤色 LED のみでは遺伝子の発現が見られず、青色 LED を混合することにより、遺伝子が発現することが明らかになった。

表 1 アントシアニン生合成遺伝子の遺伝子発現における光質の効果

遺伝子	赤色 LED	赤色 LED/青色 LED (1:1)
chalcone synthase	—	+
flavanone 3-hydroxylase	—	+
dihydroflavonol 4-reductase	—	+
anthocyanidin synthase	—	+
UDP glucose:flavonoid 3-o-glucosyltransferase	—	+

結言

レッドリーフレタスのアントシアニン合成系遺伝子の遺伝子発現は照射する LED の波長に依存することが明らかになった。今後の詳細検討により、レッドリーフレタスの植物工場内栽培手法の確立を目指す予定である。

*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植物工場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 in murine macrophage cells. In this research, plant-growth promoting effect of polysaccharides extracted from the mycelia of it was examined.

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。以前の研究において、ある種の薬用きのこから抽出した多糖類がマウスのマクロファージ細胞の免疫応答を増強することを示した。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、それらの培養条件の確立、生産物質の抽出と分取、単離した物質の構造解析と生理活性の評価を行ってきた。その中で、ある種のきのこの抽出物に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、免疫応答を増強することを明らかにした。また、露地栽培の野菜に対しても、生育促進作用や害虫忌避作用を示すことを明らかにした。今回は、この薬用きのこの菌糸体から抽出した多糖類が植物工場内で最適化されて栽培されている野菜に対しても生育促進効果を示すのか否かについて検討した。

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、図1に示す濃度で各々母液を調製した。供試野菜としてレタスのグリーンリーフを用い、小型の水耕式白色 LED 栽培装置で栽培した。播種後1週目と2週目において、調製した抽出液の母液をそれぞれ 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。3 週目の苗を収穫し、株あたりの乾燥重量を測定し、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、重量比を比較した(図1)。母液濃度が 0.3%の時には生育促進効果が見られなかったものの、0.6%から 1.2%までの範囲の試験区では明らかな生育促進効果が認められた。

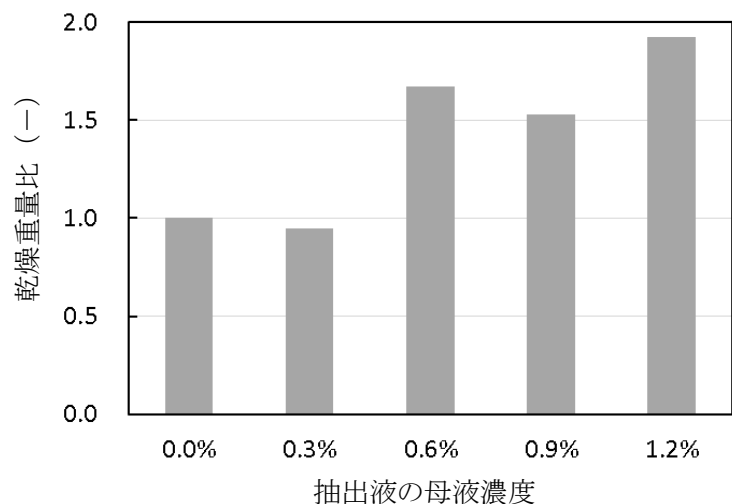


図1 水耕栽培したリーフレタスの乾燥重量におけるきのこ抽出液の濃度依存性

結言

ある種の薬用きのこの抽出物は、マウスのマクロファージ細胞の活性化だけでなく、露地栽培のみならず工場栽培における野菜の生育促進効果も併せてもつことが明らかになった。

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

2.3 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

実用化に向けたレーザー切断機材の開発
Development of Laser Cutting Equipment for Practical Use
山田知典*¹
Tomonori YAMADA

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試作し、その動作確認を行った。

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、開発してきた機材について原子力関連会社と意見交換を行い、取扱性の観点から改良するための検討を進め、それらを反映したレーザー切断機材の試作を行い、300A配管(外径318.5mm)に取り付けて動作確認を行った。

成果の概要

原子力関連会社との意見交換により、レーザー切断機材のサイズは小型であるが、作業効率を向上させるために取扱性について見直しが必要であることが確認できた。レーザー切断機材は照射ヘッドと照射ヘッド駆動機材で構成されるが、照射ヘッドについては、切断作業時の調整の簡易化の観点から長焦点化で開発を進め、照射ヘッド駆動機材については軽量化及び取付方法の見直しを行った。

図1に開発したレーザー切断機材を300A配管に取り付ける様子を示す。図1(a)に示したように受け治具を取付け、そこに2分割した照射ヘッド駆動機材を取付けることで、配管への取付方法を簡易化した。昨年度の照射ヘッドは、WD(照射ヘッド先端から切断対象物までの距離)が1mmであったのに対し、長焦点化によりWDを最大10mmまで離せるようにしたことで、切断作業時の調整の負担を軽減した。また、照射ヘッド駆動機材は、昨年度の重量と比較して32%の軽量化に成功しており、取付方法の見直しと合わせて、取扱性が向上したことを確認した。動作確認試験では、図1(b)に示したようにレーザー切断機材を300A配管に取り付けて切断を行い、動作に問題が無いことを確認した。

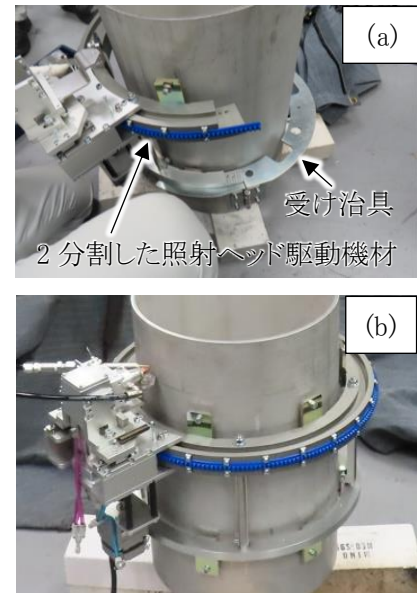


図1 レーザー切断機材を取付ける様子

結言

実用化に向けて取扱性を向上させる観点からレーザー切断機材について見直しを行い、それらを反映した試作機を開発した。300A配管に取り付けて行った動作確認により、動作に問題が無いことを確認した。今後は、引き続き原子力関連会社と意見交換を行い、必要に応じてレーザー切断機材の改良を行うとともに、切断時に発生する微粒子の評価を行うことで、より安全に切断作業が行えるように開発を進める。

*¹(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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

レーザー除染技術を利用した保全技術の検討

Investigation of Maintenance Method using Laser Decontamination Technology

前田敏男^{*1}

Toshio MAEDA

Abstract

As an example of the application of laser decontamination technology to the maintenance of nuclear facilities, we studied the feasibility of the laser irradiation spalling rubber lining.

要約

原子力施設でのレーザー除染技術を保全技術へ応用する例としてゴムライニング剥離の可能性を探った。

緒言

原子力施設の廃止措置では、鋼材及びコンクリート構造物等の放射性廃棄物が大量に発生するが、放射性物質を含む表面材料のみを剥離できるレーザー除染技術を用いれば、2次廃棄物の発生を低減し、効率的に汚染層を除去できる可能性がある。ゴムライニング剥離技術としての可能性を見極めるため、原子力施設で使用されているゴム材に対しレーザー照射を行い、加工性能を評価した。また、母材となる金属表面上にゴム材をライニングした模擬試験体を製作し、ゴム材を剥離する方法について検討を進めた。

成果の概要

原子力発電所で使用されているゴム材としてクロロプレンゴム(CR)、アクリロニトリルブタジエンゴム(NBR)、天然ゴム(NR)の3種類を試験体として準備し、①照射ボックスを用いて加工性能を評価した。②次にステンレス鋼(SUS304)の上にCR、NBR、NRの3種類のゴム材をライニングした模擬試験体を製作し、ゴム材剥離方法について検討を進めた。③さらに、原子力施設の現場で実際にゴムライニング施工を実施している事業者に依頼し、原子力施設に使用されている鋼板(SS400)とゴム材(CR)を組み合わせた模擬試験体を準備してレーザー照射を行い、ゴム材を剥離する方法について検討を進めた。

その結果、①ゴム材3種類についてはゴム材単体への連続波発振によるレーザー(CWレーザー)照射により貫通することを確認し、②SUS304上に配置した模擬試験体でもCWレーザー照射によるゴム材への切込みやゴム材の除去が可能であることを確認した。しかし、③実際に原子力設備で使用されている鋼材(SS400)とゴム材(CR)を組み合わせた模擬試験体の場合、CWレーザー照射によるゴム材への切り込みやゴム材の除去は可能ではあるが、多くの熔融、蒸発を伴う除去後に主に炭素からなる溶融物の付着が見られた。

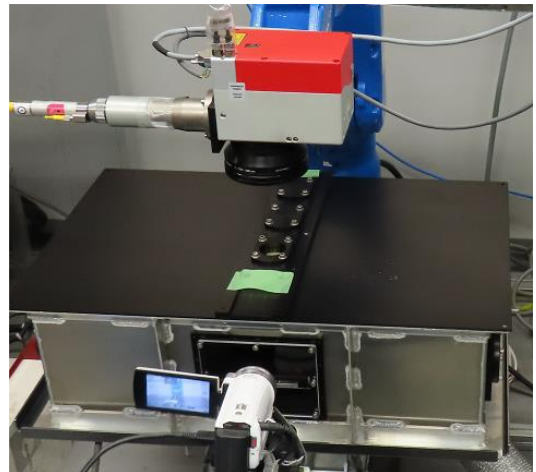


図1 ゴムライニング模擬試験体へのレーザー照射用ボックス

結言

原子力施設で使用されている鋼板とゴム材を組み合わせた模擬試験体に対しては、熔融、蒸発を伴うCWレーザー照射では加工し難い可能性があることから、パルス変調を施し入熱量を抑えたレーザー照射方法によるゴム材の除去や、接着剤にレーザー照射を行い、ゴム材を剥離する方法について検討する予定である。また、建屋内壁(コンクリート)における技術利用の可能性を見極めるため、コンクリートの加工方法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・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

大型水槽内でのレーザー切断粉じん挙動及び濁水浄化に係るデータ取得等作業

Dust Behavior during Laser Cutting Particles and Data Acquisition Regarding the Muddy Water Cleaning
in Huge Water Tank

前田敏男^{*1}、五十嵐昌宏^{*1}、植村勝^{*1}、宮本勇太^{*2}

Toshio MAEDA, Masahiro IGARASHI, Masaru UEMURA and Yuta MIYAMOTO

Abstract

The laser cutting of test piece which simulated the structural materials of the Advanced Thermal Reactor “FUGEN” was performed at a water depth of 10 m in a tank filled with pure water. We obtained data on the behavior of particulate matter such as dust and dross generated by underwater laser cutting. We also obtained data on changes in water quality while a long time was taken to purify suspension water formed during the cutting.

要約

新型転換炉原型炉「ふげん」の実機解体を想定し、水深約 10 m の試験水槽を利用した水中レーザー切断を実施した。本研究では、純水を水槽に注水した後、水中レーザー切断により発生する粉じん等の粒子状物質やドロスの挙動、及び切断によって得られた濁水を用いて浄化試験を行い、水質変化等に関するデータを取得した。

緒言

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下「原子力機構」という)新型転換炉原型炉「ふげん」では、廃止措置が進行中である。原子炉本体の解体では、工期短縮、二次廃棄物量低減等の観点で優位と考えられる水中での遠隔操作による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により放射化しており、切断時には放射性物質を含む粉じん等の粒子状物質やドロスが発生することから、事前にそれらに関わるデータを取得することが重要である。

成果の概要

試験は水中切断に必要な大型試験水槽(水深約 10m)を有する原子力機構「ふくいスマートデコミッションング技術実証拠点」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で実施した。

水中レーザー切断の状況を図1に示す。今年度は純水生成装置を用い水槽内に注水した。レーザー切断により水中移行粉じん、気中移行粉じんの粒子状物質やドロスが発生する。それらの切断速度、水深等の条件の違いによる、発生量、粒形分布等について、フィルタによる粉じん採取及び計測装置等を用い、データを取得した。

また、切断後の濁水に対し、各種フィルタを使用した濁水浄化試験を実施、試験中の水質データ等を取得した。

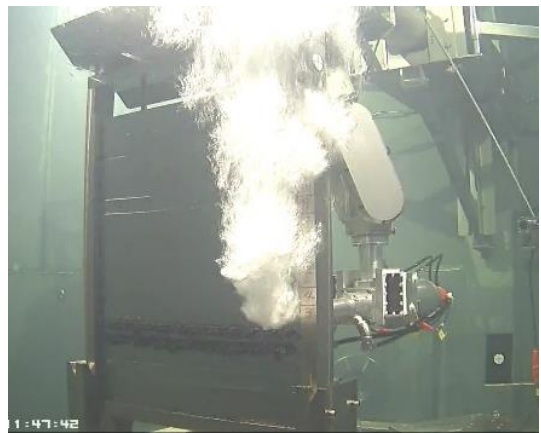


図1 水中レーザー切断状況

結言

本試験において、純水注水後の水中レーザー切断により発生する粉じん等の粒子状物質やドロスの挙動、濁水浄化試験における水質に関する多くのデータを取得した。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・レーザー技術開発室、^{*2}(国研)日本原子力研究開発機構・敦賀廃止措置実証部門・新型転換炉原型炉「ふげん」・廃止措置部・技術実証課

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

2.3.1.4

飛散物抑制・捕獲に関する技術動向検査

Technology Trend Survey on Treating Splashed Substances Used in Laser-cutting

西尾繁^{*1}

Shigeru NISHIO

Abstract

Over 100 recent patent applications focusing on treating splashed substances in laser-cutting were collected and analyzed to review the technology trend in this field. It was found that all the inventions are based on the existing technologies. In addition, no decommissioning-oriented invention was found. A game-changing technology is required before the practical decommissioning with laser.

要約

溶断時に発生する飛散物の抑制・捕獲に関する技術動向を把握することを目的として、近年出願された 100 件を超える特許を検討した。その結果、各案件とも、溶断に伴って発生する飛散物の捕獲のために、溶断や半導体製造の現場で既に用いられている飛散物捕獲技術、単独であるいは組み合わせて用いていることが分かった。加えて、原子炉構造物廃止措置に特化された飛散物捕獲技術が開発されていないことも分かった。

緒言

レーザー溶断技術は、一般工業分野において既に主要な材料加工技術の一つとなっている。このレーザー溶断技術の原子炉構造物廃止措置への応用が期待されている。放射化した原子炉構造物の切断にレーザー溶断を適用すると放射性飛散物が大量に発生すると見込まれるため、極めて高度な飛散物捕獲技術が必要となる。本研究は原子炉構造物のレーザー溶断技術開発を念頭に、溶断時に発生する飛散物の抑制・捕獲に関する技術動向を把握することを目的として実施したものである。

調査結果

商用データベース(国内特許については「Shareresearch」、国外特許については「PatBase」)を利用して、「レーザーを対象物に照射させた際に発生する飛散物の抑制・捕獲」について開示のある出願を最終的に 101 件抽出した。

全ての出願で新しい飛散物回収技術は提示されていなかった。飛散物の除去方法を明示しない案件、乾式除去と思われるが除去方法詳細不明の案件も多数あった。飛散物除去方法を明示している案件のうち、飛散物除去のために水洗を用いていたのは 9 件、乾式フィルタを用いていたのは 8 件、磁気吸着は 3 件、粒状物を用いていたのは 1 件、サイクロンを用いていたのは 1 件、複数の方法を組み合わせていたのは 2 件だった。原子力構造物の切断に言及していたのは 1 件だった。

飛散物を除去するために、現在、多種多様なカートリッジフィルタを入手することができる。この中には原子力産業での使用を想定して、使用後、焼却減容できるよう枠を木製にしたものも多い。特性の異なるフィルタを多段に組み合わせることによって 0.1~0.15 μm クラスの飛散物を 99.9995% 以上捕集することは技術的に可能と思われる。但し、これらのフィルタはレーザー溶断時に大量に発生する飛散物を含む大気処理することを想定していないので、上記のフィルタを通す前に、通常の大気レベルにまで飛散物を除去する必要がある。このような非常に汚染度の高い大気処理する飛散物処理装置として、溶接ヒュームコレクタが知られているが、このような製品は原子力産業で使用することを想定していない。廃止措置に応用するためには、かなり大掛かりな改造が必要と思われる。

結言

近年出願された 100 件を超える特許を検討した結果、各案件とも、溶断に伴って発生する飛散物の捕獲のために、溶断や半導体製造の現場で既に用いられている飛散物捕獲技術、単独であるいは組み合わせて用いていることが分かった。加えて、原子炉構造物廃止措置に特化された飛散物捕獲技術が開発されていないことも分かった。レーザーを用いて放射性を持つ原子炉構造物を安全かつ経済的に溶断するためには、革新的な飛散物捕獲技術の開発が必要と考えられる。

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

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

鋼材へのレーザー照射による脱鋭敏化効果の確認作業 Examination work for desensitization by laser irradiation of metal materials

山岸隆一郎*1、前田敏男*1

Ryuichiro YAMAGISHI and Toshio MAEDA

Abstract

We performed laser irradiation on the surface of sensitization-processed SUS304 samples, and evaluated the irradiation effect by microscopic observation of cross sections and electrochemical potentiokinetic reactivation (EPR) analysis.

要約

鋭敏化処理を行った SUS304 試験片表面にレーザー照射を行い、断面の顕微鏡観察や電気化学的再活性化(EPR)試験により照射効果を評価した。

緒言

ステンレス鋼は 600~800 °C程度の加熱により、不純物由来の炭素が固溶限界を超え、クロム炭化物が結晶粒界に析出する現象、いわゆる鋭敏化が生じる。この鋭敏化は粒界腐食を生じ易くする原因として知られているが、溶接等でも生じうるため、対策が必要となる。

鋭敏化の改善方法としては、合金固有の温度に加熱保持した後に急冷させる固溶化熱処理が一般的であるが、ステンレス鋼の固溶化熱処理温度は 1000~1100 °C程度であるため、この固溶化熱処理を原子力関連施設等で用いられるような大きな構造体に対して行うのは、現実的に困難である。

そこで、レーザーによる局所的加熱に着目した。レーザーは、熱処理炉等を用いた雰囲気加熱とは異なり、加熱範囲を対象のごく一部のみに留めることができる。また、レーザー走査により、点加熱から特定面の範囲の加熱までへと拡張が可能な点も、鋭敏化を改善するための加熱方法として適していると考えた。

本研究では、レーザー照射による脱鋭敏化処理の可能性を検討するための基礎データ取得を目的とし、鋭敏化処理を行ったステンレス鋼表面に対するレーザー照射を行い、断面観察や EPR 試験から得られた結果をもとに、照射効果を評価した。

成果の概要

SUS304 鋼を、650 °Cに恒温した電気炉内に約 500 時間静置することで作製した鋭敏化処理試験片に対し、事前に行ったコンピューターシミュレーションの結果をもとに選定した発振出力と走査速度をパラメータとして、レーザー照射ヘッドを把持したロボットアームの駆動による直線状単走査の照射を行い、レーザー照射試験片とした。

得られた試験片に対しては、照射方向と直交する方向への割断と、断面鏡面研磨・電解エッチング処理を行い、CCD 方式の光学顕微鏡を用いて粒界偏析成分溶出の痕跡を観察した。そして、これらの観察結果をもとに、脱鋭敏化が期待できる試験片を選抜し、EPR 試験を行った。

レーザー照射試験片と鋭敏化処理試験片の EPR 試験結果を比較すると、再活性化率 R_m が 41.78 から 25.11 程度まで回復する(参考:今回の SUS304 材の $R_m=0.09$)ことが分かった。これは初期状態への回復はないものの、ある程度の脱鋭敏化は成されたことを示している。今回の結果は、比較的短時間のレーザー照射だけでも固溶化処理が行えることを実証するものである。

結言

レーザー照射による脱鋭敏化処理の可能性を検討するため、鋭敏化処理を行った SUS304 試験片に対するレーザー照射を行い、結晶粒界のクロム炭化物の偏析状況の観察や EPR 試験を行うことで、照射効果を評価した。

加熱保持による固溶化処理とは違い、比較的短時間のレーザー照射によって速やかな固溶化が起きたことを示す一連の結果は、レーザー照射による脱鋭敏化処理技術の発展を期待させるものである。

*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。

2.3.2.2

レーザーピーニングによる金属付加製造物の機械的特性改善効果

Laser Peening Effect on Improving the Mechanical Properties of Metal Additive Manufacturing Products

前田敏男*1、山岸隆一郎*1、沖原伸一朗*2、菖蒲敬久*3、

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

Abstract

To confirm the effect of peening by laser irradiation, we fabricated specimens by metal additive manufacturing and evaluated the improvement of mechanical properties after laser irradiation. The changes in internal residual stresses in the specimens after the laser irradiation demonstrated the effect of laser peening on the product by metal additive manufacturing.

要約

レーザー照射によるレーザー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、レーザー照射を行った後、機械的特性の改善効果の評価を行った。照射した試験体からレーザー照射による残留応力の変化が得られ、金属付加製造物へのレーザーピーニングの効果を実証した。

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が、内部が均一な金属構造とはならず粒子間の空隙や小孔により強度などの機械的な特性もバルク材に対して低い値を取る。そのため、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)処理を行う必要があるが HIP 処理には高温高圧で長時間処理が必要であるため、大規模な設備導入と運用による初期およびランニングコストが課題となる。結果として 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阻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でパルス照射を行うことで表面付近に発生したプラズマによる衝撃波により金属表面の加工硬化や圧縮応力を付加することで機械的特性の改善を行うことが可能である。

成果の概要

最初にレーザー照射によるレーザー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た。金属粉末には一般的に広く使用されるマルエージング鋼を選択した。造形方式は、ピーニング後の残留応力計測を行うため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。試験体は積層造形を行いつつピーニング照射上面の切削加工を行うこととし、ベースプレートからワイヤ放電加工で取り出した。

レーザー照射装置および条件については、高出力・低繰り返し回のレーザーと比較的低出力・高繰り返し回の波長 532 nm パルス幅(FWHM)8 ns のナノ秒レーザーを用い試験体上面にレーザーピーニング照射を行った。ピーニング処理後に照射前後における残留応力計測および X 線による内部計測を行い、機械特性の評価を行った。

残留応力計測については、汎用の X 線残留応力計測装置によりピーニング処理前後の計測を記録し評価した。また、SPring-8 の X 線残留応力計測装置および CT 内部計測により、試験体のより深部の応力変化および空隙の変化を記録、評価を行った。結果として、高出力レーザーでは試験体深さ最大 1,500 μm まで圧縮応力の増加が確認された、また、低出力レーザーでも最大 300 μm 付近までの圧縮応力の増加を確認した。内部空隙の変化については今回の結果からは空隙率や数の減少などの変化は明確に確認することができなかった。

結言

本試験において、金属付加製造物に対するレーザーピーニングによる残留応力の増加を確認した。今後、残留応力変化が一般的に要求される機械特性に対しどのくらい寄与するかを評価する必要がある。

*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、*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

イオンビームによる宇宙産業育成

Advancement of Space Industry by Ion Beam Application

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、石川ゆい*³、中村博一*³、青柳賢英*⁴

Kyo KUME, Satoshi MIZUSHIMA, Shinko SANDO, Satoshi HATORI, Hiroshi SAWAZAKI, Hajime ARAI,

Yui ISHIKAWA, Hirokazu NAKAMURA and Yoshihide AOYANAGI

Abstract

To simulate a single event effect caused by cosmic rays, a proton beam irradiation was carried out for semiconductor devices onboard a new generation microsatellite, while irradiation techniques have been improved to simulate cosmic ray protons delivered from the accelerator. The experimental result revealed that all irradiated devices can be applicable for the coming mission. The simulation of cosmic ray effects using ion accelerators is expected to contribute to new advancements of space industry in Japan including Fukui area.

要約

新規の超小型衛星に利用を計画している半導体部品に対し、宇宙線を模擬した陽子ビームの照射技術を開発するとともに、シングルイベント試験を実施していずれの部品も超小型衛星への利用が可能であることを明らかにした。これらの取り組みを通し福井県地方における宇宙産業育成への貢献を目指す。

緒言

宇宙産業に民間参入が続く中、福井県地方においても宇宙産業育成の機運が醸成されている。本研究テーマでは、当法人に設置されているイオン加速器の活用により、福井県地方の宇宙産業育成への貢献を目指す。今回は宇宙線を模擬した陽子ビーム照射技術の開発として、模擬計算手法を高度化するとともに、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した。

方法

当法人では、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4年度は、当法人のイオン加速器システムで宇宙放射線耐性評価にかかわる装置のうち、シンクロトロン²⁾のビームライン(照射室4高エネルギー生物照射コース)(HE)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。

まずシミュレーション高度化としては、モンテカルロ計算パッケージ PHITS²⁾で構築した HE シミュレーション体系における計算結果と、ビームを利用した実測とを比較することで、100 MeV 陽子輸送時における高密度ポリエチレン樹脂(PE)の減速体としての実効密度を決定した。これにあたっては、シミュレーションに入力する PE の密度ならびに厚みを可変値とし、実測データと比較した。シングルイベント試験については、体系としては令和2年度・令和3年度の同種の試験内容³⁾を準用した。ただし試料には現在開発中の新規超小型人工衛星に搭載する部品を採用した。

結果

シミュレーション高度化では、PE の入力密度(0.94 g cm⁻³から 0.98 g cm⁻³まで 0.1 g cm⁻³間隔で入力)、入力厚み(0 mm から 80 mm まで 1 mm 間隔で入力)をパラメータとして、PHITS 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 厚みと密度依存性を得た(図1)。一方、実際の 100 MeV 陽子線を用いて PE 厚みを変化させていく際に得られた試料位置でのビーム断面方向陽子線強度分布は、厚み 71 mm から 72 mm の間

*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。

で強度が大幅に減ってしまうことがわかる(図2)。このことから、100 MeV 陽子線については PE 減速体では 71 mm と 72 mm の間に飛程があることがわかるため、PEの実効的密度を 0.94 g cm^{-3} と扱って良いといえる。

シングルイベント試験では、このようなシミュレーション結果も活用し、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においては、ビームの軌跡や試料表面における陽子エネルギー分布等を出力可能でありながら、これらは実測が困難でシミュレーションの妥当性評価には課題が残ると考えてきたが、ビーム強度分布が特定の PE 厚さで特徴的に変化することから、この特定 PE 厚さが陽子残エネルギー 0 MeV を示すと考えることができるため、この特定 PE 厚さから PE の実効密度を決定可能である。シミュレーション計算の妥当性を支持することが可能となり、試験実施の効率化に大きく寄与する。

シングルイベント試験で得た結果を解析したところ、各供試体について、衛星搭載部品として常時通電状態で問題がない、あるいは遠隔でのリセット操作などの対策を講じることで使用可能、と判断できた。

これらの研究により、シングルイベント試験に対する宇宙放射線模擬手法の高度化が進み、超小型人工衛星の新規開発に資する技術が概成されていることを確認した。

結語

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3年度、24、41 (2022)

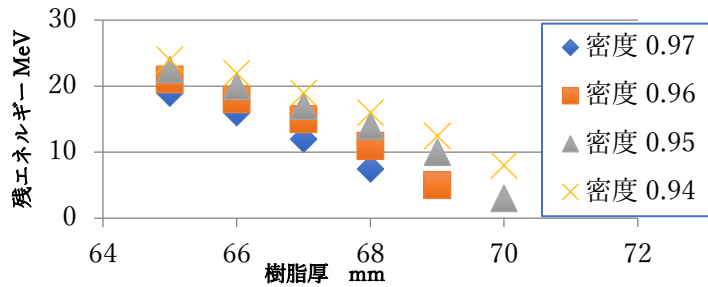


図1 PHITS 計算で得た残エネルギー・PE 厚・PE 密度の相関

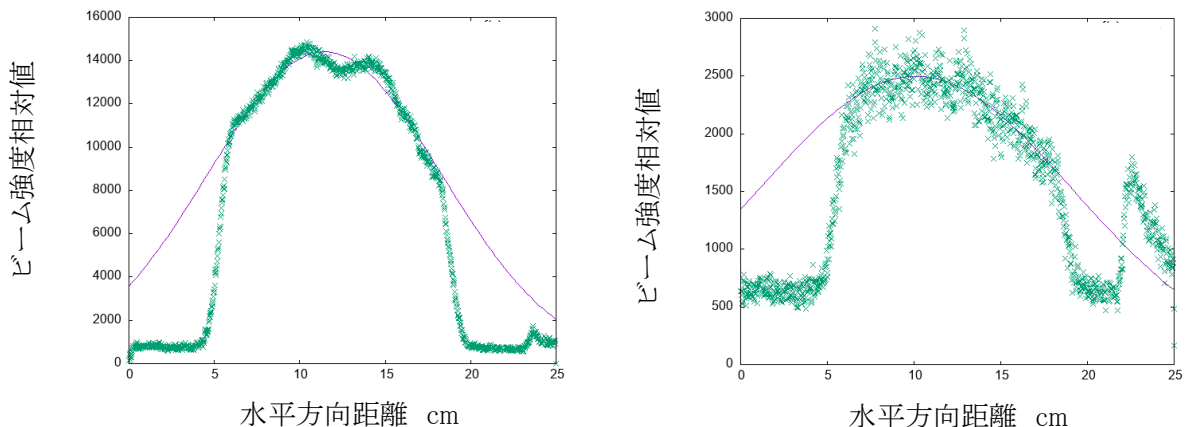


図2 陽子加速エネルギー100 MeV を利用して実験で取得した試料表面位置における X 方向陽子ビームプロファイル(緑線)とガウス分布フィッティング(紫線)。PE 厚は(左)71 mm(右)72 mm。

2.4.1.2

超小型衛星搭載マイコン素子の陽子線耐性

Proton beam tolerance test for micro-controller used in microsatellite

朴志賢*¹、山岡和貴*²、稲守孝哉*¹、鄭仁碩*³、羽鳥聡*⁴、石神龍哉*⁵Ji Hyun PARK, Kazutaka YAMAOKA, Takaya INAMORI, In-Seuck JEUNG, Satoshi HATORI,
and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

We have studied radiation tolerance for micro-controllers which is planned to use in the cubesat developed by Nagoya University, and have been performing verification of the occurrence rate of the Single-Event Latch-up and Single Event Upset (SEU) by the irradiation with Helium beam accelerated by the synchrotron and proton beam by the tandem accelerator.

要約

名古屋大学で開発を進めているキューブサットに使用予定のマイクロコントローラに対する放射線耐性の研究を行った。これまでにシンクロトロン加速器によるヘリウムビーム照射とタンデム加速器による陽子ビーム照射を行い、シングルイベントラッチアップ(SEL)やアップセット(SEU)が発生する頻度について検証を行っている。

緒言

名古屋大学では超小型衛星の規格であるキューブサットや搭載用放射線センサを開発している。超小型衛星では COTS と呼ばれる民生部品が数多く使用されるが、特にオンボードコンピュータなどに使用されるマイコンやFPGAといった重要デバイスには過去の搭載実績品や放射線耐性を調査してから搭載される。今回、STマイクロ社の STM32 マイコンについて軌道上陽子・ヘリウムを模擬した実験を行った。2021年11月24日に220 MeVのヘリウムビームをポリエチレン板でエネルギーを調整して照射し、さらなる検証のため2022年5月18日にタンデム加速器からの8 MeV陽子ビームを照射した。どちらもフラックスは 10^6 個/cm²/s以下に抑え、陽子照射の際にはMPUチップ表面のモールド材による減衰の不定性をなくすため、デキャップした状態でも照射を行っている(図1参照)。陽子エネルギーは8 MeV(デキャップ)、3.86 MeV(デキャップなし)、1.55 MeV(Al 0.4mm+デキャップ)であった。これらの陽子はLET(Linear Energy Transfer)で0.04-0.13 MeV/(mg/cm²)に対応している。SELは発生しなかったものの、内蔵SRAMのプログラム領域に書き込んだ1 MbitsのデータにSEUが見られた。図2にLETに対するSEU断面積をヘリウムの結果と一緒に示す。ヘリウムとほぼ同じLETにもかかわらず陽子の方が 10^{-14} ~ 10^{-15} cm²/bitと3桁程度小さい。その理由としてヘリウムの方がシリコン中で減衰してLETが大きくなりうるが、それだけでは違いを説明できない。本実験結果から想定される軌道上のSEUレートは1日あたり約8回となり、大きな問題のない範囲に収まる。

結言

超小型衛星搭載用のSTM32マイコンのヘリウム・陽子線耐性を調査している。さらなる理解のため、今後は炭素ビームや低エネルギーのヘリウムによる0.2 MeV/(mg/cm²)より高いLETでの試験が考えられる。

*¹名古屋大学大学院・工学研究科、*²名古屋大学・宇宙地球環境研究所、*³ソウル大学校・工科大学、*⁴(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・加速器室、*⁵(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ
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が共同研究として実施した。MEXT KAKENHI 18H03700(KY)の助成を受けた。

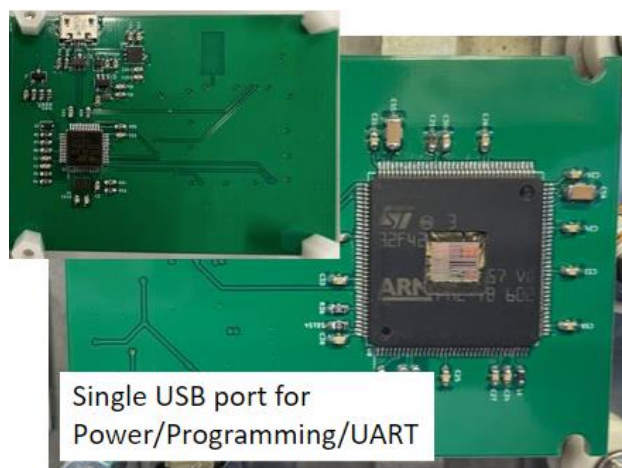


図1 照射したデキャップしたマイコン素子

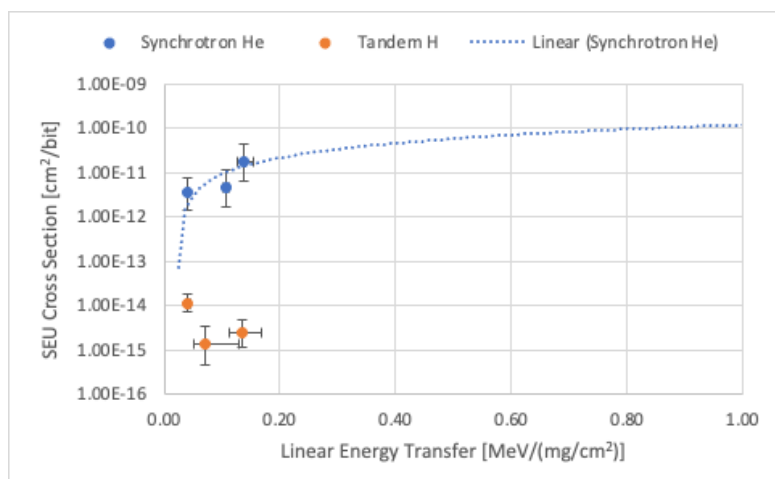


図2 陽子(オレンジ)とヘリウム(青)のシングルイベントアップセットに対する反応断面積のLET依存性

2.4.1.3

宇宙放射線計測装置の放射線耐性試験

Radiation Tolerance of Space Radiation Measurement Devices

高橋弘充^{*1}、榎木大修^{*1}、丹羽怜太^{*1}、森下皓暁^{*1}、長岡央^{*2}、榎戸輝揚^{*2}、辻直希^{*2}、
久米恭^{*3}、水嶋慧^{*3}、羽鳥聡^{*4}

Hiromitsu TAKAHASHI, Taishu KAYANOKI, Ryota NIWA, Teruaki MORISHITA, Hiroshi NAGAOKA,
Teruaki ENOTO, Naoki TSUJI, 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 the scintillator detectors for neutrons and gamma-rays and their circuits with the 200 MeV proton with total dose of 10 Gy simulating the space environment, under which all of the devices was confirmed not fail. 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 陽子ビームを照射し、中性子用およびガンマ線用シンチレータ検出器とその回路が故障しないこと、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の可能性も検討されている。我々は理研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、二種類のシンチレータ(中性子用 EJ-270、ガンマ線用 GAGG)、MPPC 光検出器、電子部品、回路基板である。

結果として、どの素子についても照射による故障は発生しないことが確認された。中性子用シンチレータについては、MPPC 光検出器のノイズ信号が増加したことで、ガンマ線と中性子の波形弁別性能に影響が出ることが分かった。今後、回路パラメータなどの改良を行うとともに、月面で中性子信号がガンマ線信号に埋もれてしまわないかシミュレーションで定量評価する。またガンマ線用シンチレータについては、シンチレータの放射化バックグラウンドの影響が強いため、別のシンチレータ素子とのトレードオフスタディを進める。

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要素素子の放射線耐性を調べることができた。シンチレータ検出器の性能劣化の低減については、回路パラメータなど実機の改良と、月面での運用を定量的に評価して、今後対応する。

^{*1}広島大学・先進理工系科学研究科・物理学プログラム、^{*2} 理化学研究所・榎戸極限自然現象理研白眉研究チーム、^{*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、^{*4}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・加速器室
本研究は、広島大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。
本研究の一部は、理研-広島大科学技術ハブ共同研究プログラムの助成を受けた。

2.4.1.4

COTS 半導体デバイスの高エネルギー荷電粒子衝突耐性に関する実験的評価

Experimental assessment of the resistance of integrated circuits to energetic charged particle impact.

渡邊理子*1、奥山圭一*1、Isai FAJARDO*1、Rafael A. RODRÍGUEZ*1、織田みか*1、神山彩果*1、羽鳥聡*2

Riko WATANABE, Kei-Ichi OKUYAMA, Isai FAJARDO, Rafael A. RODRÍGUEZ, Mika ORITA,

Ayaka KAMIYAMA and Satoshi HATORI

Abstract

In general, commercial off-the-shelf (COTS) semiconductors are not easy to withstand the harsh space environment sufficiently such as cosmic radiations and short wavelength ultraviolet rays. For practical use of COTS components in space, strict design methodologies such as Radiation Hardness Assurance (RHA) are imposed, and systematic approaches such as simulation, screening, and testing must be performed before launch. Application of this methodology is not practical for small spacecraft development with limited schedule and budget. We conducted our study for the purpose of a method construction for adopting COTS components for small spacecraft. Specifically, in addition to PIC series microcomputer, Raspberry Pi series microcomputers which are expected to be future microcomputers, were irradiated with protons from 20 [MeV] to 200 [MeV], and their radiation resistance was evaluated. Through this test, we were able to establish an evaluation method for COTS semiconductors, and its validity will be evaluated by a space experiment using "Ten-Koh 2" scheduled to be launched by an H3 rocket.

要約

一般的に、微細・低電圧・高速化が進んだ高機能民生部品 (commercial off-the-shelf、COTS) は微小重力、超高真空、極端な高温と低温、温度サイクル、太陽や銀河から飛来する宇宙放射線や紫外線といった過酷な宇宙環境に十分に耐荷できない。電子部品を宇宙で実利用するため、放射線耐性保証 (RHA) などの厳格な設計方法論が課せられ、シミュレーション、スクリーニング、および試験など体系的なアプローチを打上げ前に実施しなければならない。スケジュールや予算が限られている小型宇宙機開発の場合、この方法論の適用は実用的ではない。令和4年度若狭湾エネルギー研究センター研究では、COTS 大規模集積回路を小型宇宙機に適用するための簡略化された体系的手法の確立を図った。具体的に、PIC シリーズマイコンに加え、将来マイコンとして期待されている Raspberry Pi シリーズマイコンに 20MeV から 200 MeV までの陽子を照射し、放射線耐性を評価した。この試験を通じて、COTS 半導体の基本的な評価手法を確立でき、その妥当性については「てんこう2」を用いた宇宙実験で評価する。

緒言

奥山研究室(九州工業大学)が開発した「しんえん2」は2014年12月3日にH2Aの26号機で小惑星探査機「はやぶさ2」相乗りとして上げられ、深宇宙探査に成功している。続いて開発された「てんこう」は同40号機で「いぶき2」相乗りとして2018年10月29日に上げられ、太陽活動極小期における電離圏観測などを行った。これら2つの宇宙機の主制御システム用マイコンはPIC16F877AとPIC16F877であり、これは宇宙放射線耐性に優れており、様々な小型宇宙機に多用されてきた。しかし、CPU速度20MHz、メモリ8KBと低い処理能力であることから、大きな処理速度を有し、かつ宇宙環境耐性に優れたCOTS集積回路の登場が望まれてきた。宇宙放射線は、銀河宇宙線(GCR)、太陽粒子線(SEP)などから構成されている。これらの放射線は主に陽子で構成されており、このような高エネルギー荷電粒子が半導体に衝突すると、SEE現象(Single-Event Effects)と呼ばれる一時的な誤作動や恒久的な故障が発生することが明らかになっている。また、一般的に、COTS集積回路の放射線耐性は低い。現在、奥山研究室(日本大学)は「しんえん2」、「てんこう」の後継となる「てんこう2」を開発しており、これは366mm×226mm×100mmのサイズのW6U型衛星でHTV-X初号機に搭載され、H3ロケットで上げ予定である。「てんこう2」のミッションの一つは、COTS半導体デバイスの宇宙環境耐性を評価し、地球低軌道上での運用実証を通じて宇宙機への利用を拡大することにある。令和4年度若狭湾エネルギー

*1 日本大学・理工学部・航空宇宙工学科, *2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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、日本大学理工学部航空宇宙工学科と(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。

研究センター研究「LEO における GCR、SEP 観測、ならびに集積回路の高エネルギー荷電粒子耐性の評価」は深宇宙に投入される宇宙機から電離圏観測を行う地球周回衛星などにおける幅広いエネルギー範囲の荷電粒子に対する電子機器の耐性評価を目的としたもので、今回は宇宙使用実績のない PIC16F18877 と Raspberry Pi Pico (同 125 MHz、同 256 KB) の2つのマ

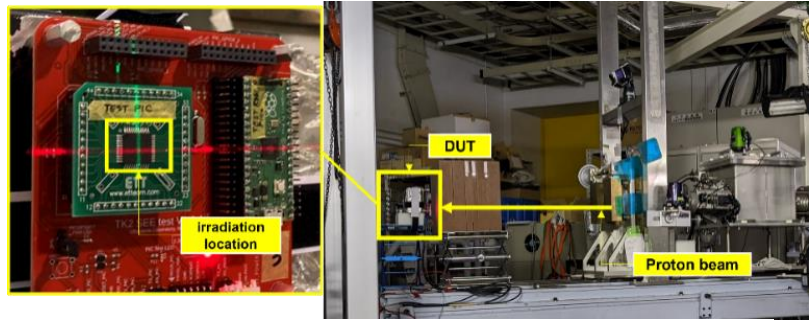


図 1 宇宙用電子機器の高エネルギー荷電粒子耐性確認試験

1. 試験目的および試験方法

本試験は、若狭湾エネルギー研究センター(WERC)のシンクロトロンからの 200MeV 陽子線を用いて行った。照射ビームのエネルギーからの 200MeV 陽子線をエネルギーデグレーダーで減速することで、被検体照射時におよそ 20、50、100、150 MeV に調整した。照射時間は、原則各エネルギーに対して 30、60s の2通りとした。表 1 の条件にしたがって PIC16F18877 と Raspberry Pi Pico 陽子線照射を行い、エラー発生率の解析を行った。実験装置の概観図を図1に示す。

表1 PIC16F18877 および Raspberry Pi Pico に対する照射条件

PIC16F18877				Raspberry Pi Pico			
No.	Beam Energy [MeV]	Fluence [p/cm ²]	Beam Time [s]	No.	Beam Energy [MeV]	Fluence [p/cm ²]	Beam Time [s]
1	20	3.29E+09	30	1	20	3.23E+08	30
2	20	6.55E+09	60	2	50	2.70E+09	30
3	50	2.98E+09	30	3	50	5.67E+08	60
4	50	5.97E+09	60	4	100	3.11E+08	30
5	100	3.15E+09	30	5	100	6.22E+08	60
6	100	6.30E+09	60	6	150	3.24E+08	30
7	150	3.27E+09	30	7	150	3.08E+09	30
8	150	6.53E+09	60	8	200	6.08E+08	30
9	200	3.62E+09	20	9	200	1.22E+09	60
10	200	6.34E+09	35*1				

*1 : To make fluence conditions equal to other conditions.

2. 供試体および試験結果

本試験では PIC16F18877 に加え、Raspberry pi Pico の照射試験を行った。上記の通り、これら2つのマイコンは宇宙使用実績がなく、これらは開発中の衛星「てんこう2」に搭載される。照射試験の結果、PIC16F18877 と Raspberry Pi Pico はともに陽子線照射によって、一定の SEE が発生することを見出した。また、SEE 効果の発生確率は SEE 発生断面積 $\sigma(E)$ で評価し、これは式(1)で求めた。SEE 発生断面積 $\sigma(E)$ の解析結果から、PIC16F18877 は Raspberry pi Pico 比べ SEE 耐性に優れると判断できる。なお、フルエンスの単位は[p/cm²]、SEE 断面積の単位は[cm²]である。

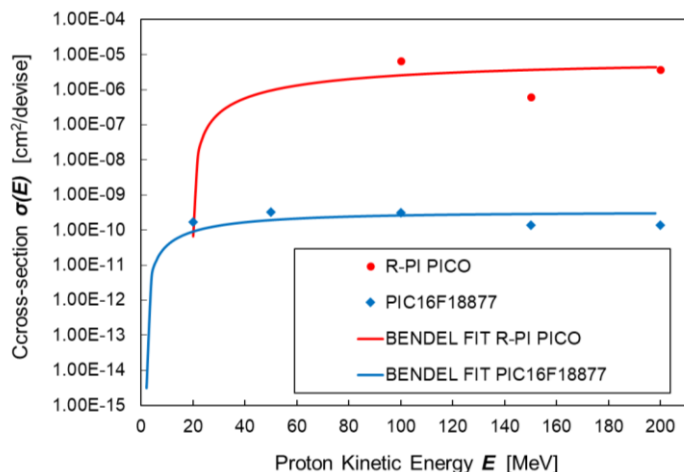


図 2 宇宙用電子機器の高エネルギー荷電粒子耐性確認

$$\sigma(E) = \frac{\text{Number of events}}{\text{Proton fluence}} \quad (1)$$

また、Raspberry pi Pico においてはビット反転のエラーだけでなく、デバイス自体が動作停止してしまうというエラーも含まれた。動作停止した場合は再起動することで、正常にデータの読み出しができることもあったが、多くの場合、複数回動作停止が起こった。横軸を SEE 発生断面積(照射量、縦軸を陽子ビーム照射量範囲に対してのエラー率)とし、それぞれの供試体の比較を図 2 に示した。

「しんえん2」には PIC16F877A が、「てんこう」には PIC16F877 がそれぞれ搭載されており、これら 2 つの宇宙機は所期の目的を達成できたことから、2 つのマイコンが宇宙環境耐性を有していることが理解できる。「てんこう2」には宇宙使用実績のない PIC16F18877 と Raspberry Pi Pico が搭載されており、今回の COTS 半導体の評価手法が妥当であることは「てんこう2」を用いた宇宙実証実験で確認する。

結言

今回の研究は COTS 半導体を小型宇宙機に適用するための放射線耐性の評価方法の確立を目指して行ったもので、PIC16F18877 と Raspberry Pi Pico の SEE 発生確率を明らかにでき、PIC16F18877 の優れた放射線耐性を確認できた。また Raspberry Pi Pico については動作停止・再起動のエラーが多発しており、SEE 発生断面積値も大きいことから、高エネルギー荷電粒子衝突耐性は低いと見出せた。本研究で用いた PIC16F18877、Raspberry Pi Pico は、奥山研究室で開発中の超小型人工衛星「てんこう2」のペイロード機器として搭載しており、宇宙空間での動作確認やエラー発生の確率を実際に確認する。その解析結果と本研究で導き出した実験値とを比較・評価し、COTS 半導体の宇宙環境耐性、特に放射線耐性の評価手法の確立に繋げていきたい。

参考文献

- 1) Isai FAJARDO, Keiichi OKUYAMA, Rafel RODRÍGUEZS *et al.* Validation methodology for the adoption of microelectronic devices for Nanosatellites, The 34th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), (2023).
- 2) European Space Agency, Single Event Effects Test Method and Guidelines : ESCC Basic Specification No.25100, (2014)

2.4.1.5

超小型衛星搭載用電子機器の放射線耐性調査

Investigation of Radiation Resistance of Semiconductor Devices for Nano-Satellite

松本健*1、中澤賢人*2、中須賀真一*1、久米恭*3

Takeshi MATSUMOTO, Kent NAKAZAWA, Shinichi NAKASUKA and Kyo KUME

Abstract

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

要約

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

緒言

超小型衛星には多くの民生部品が採用されているが、新規の民生電子部品の宇宙機器への適用に際しては、その信頼性評価が重要であり、特に耐放射線特性の把握を行うことが重要である。本実験では、衛星搭載を予定している高周波用集積回路(RFIC)及び SD カード2種へプロトン照射を行い、シングルイベント効果を引き起こし、発生回数を測定した。そのデータをもとに、想定される衛星軌道上でのシングルイベント効果がどの程度起こるかを解析的に明らかにした。

成果の概要

プロトンの照射エネルギーは 20, 40, 60, 80 MeV、フラックスは 1×10^7 protons/cm²/s、照射時間は 20 MeV で 840 秒、40, 60, 80MeV で 660 秒とした。本照射条件下で図 1 に示す RFIC と SD カード 2 個(SD1 (Panasonic 社製 RP-SMHA32GJK) と SD2 (ELECOM 社製 MF-CAMR032GU11A)) を供試体としてプロトン照射を行った。図 2 に試験構成を示す。各条件における供試体のシングルイベント効果によるリセット現象の回数を記録した結果を表 1 に示す。照射結果から、想定される衛星軌道(月周回軌道)における相当年数を欧州宇宙機関 ESA が開発したツール SPENVIS を用いて確認した。

解析の結果、シングルイベントの発生頻度は、RFIC では 0.74 回/年程度であり、SD1, SD2 では 18.56 回/年となるのがそれぞれ見積もられた。SD1 は、途中からファイルシステムの一覧が取得できなくなり、80 MeV の照射中、パワーリセットしてもアクセスエラーから復帰しなくなった。試験後、他の計算機(PC)に接続しようとしてもカード自体が認識デバイスとして認識されなかったため、永久故障が発生したと考えられる。SD2 は途中からファイルシステムの一覧が取得できなくなったが、80 MeV の実験終了後も書き込み動作は行うことができた。試験後の検査でもカードは認識されたが、PC に接続してアクセスしてみると多数の不良ファイルが発生しており、読み書きしたファイルも先頭部に破損が見られた。図3に SD2 の PC での読み出し結果を示す。

結言

衛星搭載予定の RFIC と SD カードへプロトン照射を行い、放射線耐性評価を実施した。その結果、シングルイベント効果によるリセット現象が軌道上で発生する頻度が解析され、RFIC では 0.74 回/年程度であり、SD1, SD2 では 18.56 回/年となる結果を得た。

RFIC に関しては、リセット回路等の付属やリセットロジックの実装を行うことで十分宇宙機器への適用が可能であると結論付けられる。一方で SD カードについてはシングルイベント終了後に中のデータを確認したところ、永久故障やデータの破損が見られたことから、本 SD の衛星搭載は難しいと考えられる。

近年、人工衛星の高機能化が進んでおり、大容量保存デバイスへの要求も高まりつつある。本研究にて評価した民生 SD カードは、残念ながら軌道上には適さない結果となったが、引き続き衛星で使用可能な大容量デバイスの調査を行う予定である。

*1 東京大学大学院工学系研究科・航空宇宙工学専攻、*3 株式会社アークエッジ・スペース、*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

本研究は、東京大学と(公財) 若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施した成果を含む。本研究は、東京大学が実施している文科省宇宙航空科学技術推進委託費(代表: 福井大学)で実施した成果を含む。

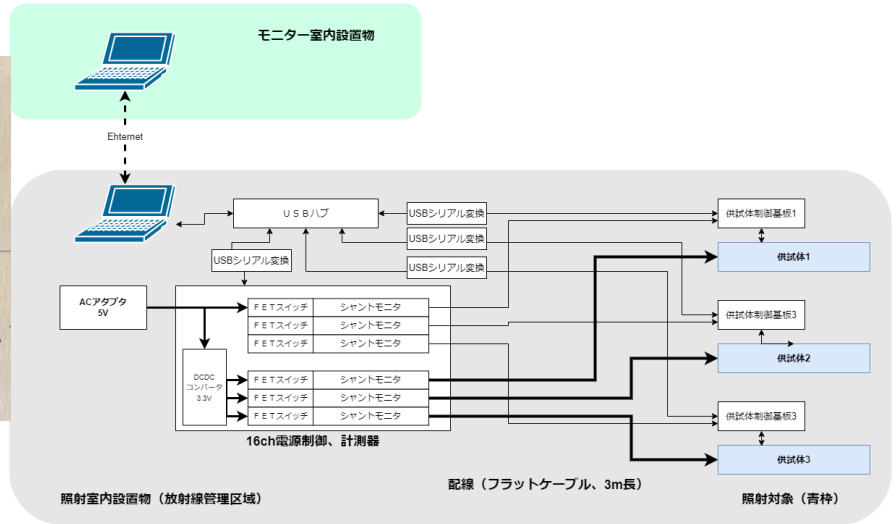


図1 照射物(RFIC および SD カード)

図2 試験構成

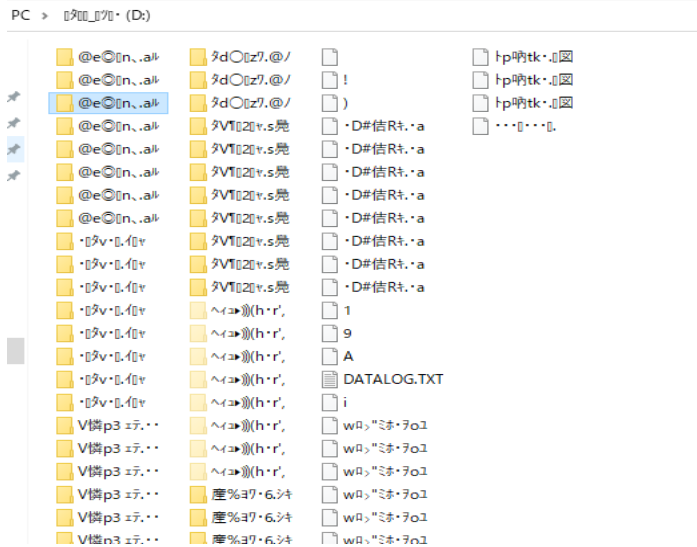


図3 SD2 の PC での読み出し結果

表1 試験結果

対象	Energy(MeV)	Flux	Fluence	月軌道 Fluence/年	相当年数	イベント数	イベント数/年
RFIC	20	9.99E+06	8.39E+09	1.42E+10	0.59	1	1.69
SD1		9.99E+06	8.39E+09	1.42E+10	0.59	11	18.56
SD2		9.99E+06	8.39E+09	1.42E+10	0.59	11	18.56
RFIC	40	1.01E+07	6.67E+09	4.92E+09	1.36	1	0.74
SD1		1.01E+07	6.67E+09	4.92E+09	1.36	10	7.38
SD2		1.01E+07	6.67E+09	4.92E+09	1.36	4	2.95
RFIC	60	1.01E+07	6.67E+09	2.12E+09	3.15	5	1.59
SD1		1.01E+07	6.67E+09	2.12E+09	3.15	11	3.49
SD2		1.01E+07	6.67E+09	2.12E+09	3.15	4	1.27
RFIC	80	1.01E+07	6.67E+09	1.29E+09	5.15	6	1.16
SD1		1.01E+07	6.67E+09	1.29E+09	5.15	2	0.39
SD2		1.01E+07	6.67E+09	1.29E+09	5.15	1	0.19

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、新藤浩之*1、羽鳥聡*3、久米恭*2

Keita SAKAMOTO, Kozo TAKEUCHI, Shinko SANDO, Satoshi MIZUSHIMA, Hiroyuki SHINDO,

Satoshi HATORI and Kyo KUME

Abstract

Large scale integrated circuits (LSIs) manufactured by cutting-edge process technology nodes such as the 16/14 nm FinFET process are expected to be applied to spacecrafts. However, there is concern that the soft error rate will increase in space due to single event upset (SEU) induced by proton direct ionization (PDI). The influence of PDI on planar devices have been reported¹⁻³⁾, while there is lack of knowledge of PDI on FinFET devices. Although we demonstrated the influence of PDI on 16/14 nm FinFET SRAM might be smaller than that of 20 nm Planar SRAM in our previous work⁴⁾, challenges have been identified for proton flux measurement. In this report, both improvement of proton flux measurement and the effects are discussed.

要約

16/14 nm FinFET 素子は宇宙機への適用が期待されているが、65nm 未満のプロセスノードのプレーナ素子では低エネルギープロトンによる直接電離(Proton Direct Ionization, PDI)起因の誤動作が急増することから宇宙空間でのエラー発生頻度に影響することが報告されている¹⁻³⁾。一方で 16/14 nm 世代の FinFET 素子に対する PDI 起因のソフトエラーについては文献も少なく未解明な領域である。2021 年に実施した実験で 16/14 nm 世代の FinFET 素子の PDI の影響が 20 nm Planar 素子と比較して小さいことを示唆する結果を得たものの、照射線量率計測の測定系の改善が必要であることを示した⁴⁾。本稿ではセットアップの改善活動結果および、改善後のセットアップにて実施した照射試験結果を示す。

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、集積回路(LSI)の SEU 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 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 素子と同一照射条件で低エネルギープロトン照射を実施した結果、16/14 nm FinFET 素子では 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⁾。しかしながら供試体として用いた 16/14 nm FinFET SRAM の反応断面積が小さく、エラーを起こすために必要な粒子数を輸送出来ていないことによる結果でもある可能性も残った。そこで今回は、低エネルギープロトン照射を実現するための減速用ポリエチレンブロック(PE)通過後の照射線量を正しく計測できるように照射セットアップを変更し、16/14 nm FinFET 素子における PDI の影響を調べた。

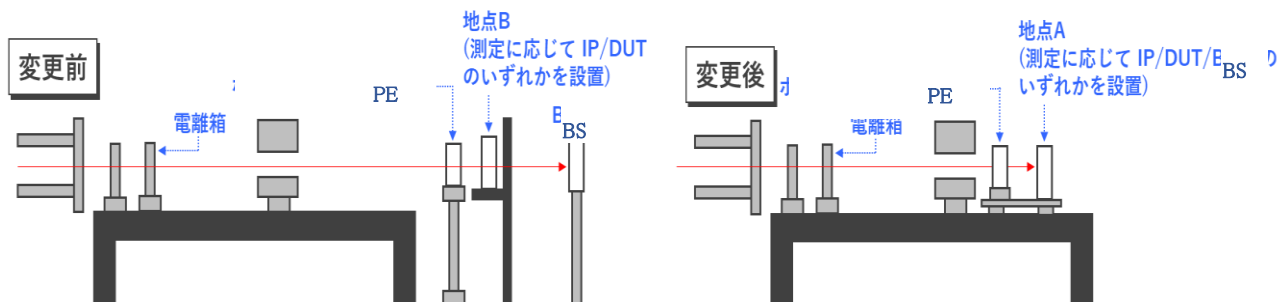


図 1 実験体系のイメージ図。(左)変更前、(右)変更後。PE: 減速用ポリエチレンブロック、BS: 真鍮製ビームストッパー、DUT:供試体。

*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。

表 1 プロトン照射試験のセットアップ条件及び供試体の照射条件

供試体	16/14 nm FinFET SRAM
減速体通過後のエネルギー	60 MeV 以下
照射角度	垂直照射
電圧	0.8 V (Typical 条件)
書き込みデータ	All0
セットアップ	旧試験系 (図 1 左) 及び 新試験系 (図 1 右)

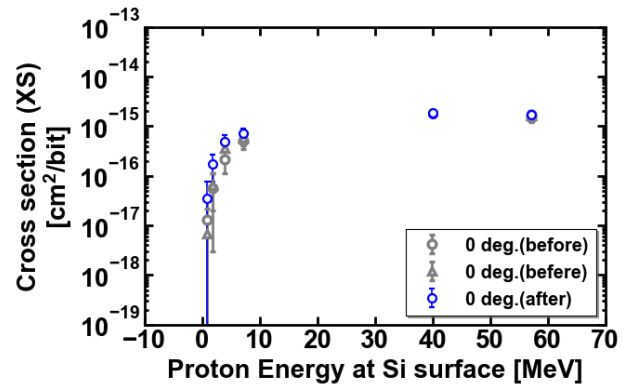


図 2 16/14 nm FinFET SRAM のプロトン照射エネルギーに対する SEU 反応断面積曲線

実験

プロトン照射試験のセットアップを図 1(右)に示す。シンクロトロンでは実験全体を通してプロトンを 100 MeV に加速し、可変厚さの PE により供試体(DUT)への照射エネルギーを調節した。比較のために変更前の低エネルギープロトン照射試験のセットアップを図 1(左)に示す。変更前のセットアップでは PE の厚さ毎にイメージングプレート(IP)像を取得し、その後 PE を取り外して電離箱および真鍮製ビームストッパー(BS)で全電荷量測定を行い両者の紐づけ結果から照射線量率を算出していた。この計測手法の場合、照射したプロトンが PE を全数通過する場合には問題ないが、PE が厚く、一部のプロトンが貫通しない場合では照射線量が狙いよりも小さくなる。PDI 起因の SEU を観測する実験の場合、供試体(DUT)の感応領域でプロトンが Bragg peak を形成する必要があるため PE は厚くせざるを得ない。したがって、変更前の輸送系では一部のプロトンが止まっている可能性を否定できなかった。今回のセットアップでは、IP 像取得は変更前と同様に実施した後に、全電荷量測定も任意の PE を置いた状態で実施して電離箱と BS とで計数した粒子数の紐づけを行うよう変更した。これにより PE で一部のプロトンが止まった場合でも照射線量率を正しく紐づけができる構成とした。また、厚い PE を通過した下流で全電荷量測定を行う場合、BS を PE の近くに置いて散乱による取りこぼしを防ぐ必要がある。このため、IP 及び BS の設置位置を変更前と比較して上流側に移動させることで解決した。

結果・考察

変更前後のプロトン輸送系における 16/14 nm FinFET SRAM のプロトン入射エネルギーに対する SEU 反応断面積曲線の実験条件を表 1 に、実験結果を図 2 にそれぞれ示す。図 2 を見ると、今回の照射条件においては全ての照射エネルギーの範囲で有意な反転断面積の違いは観測されなかった。事前に実施した TRIM の計算結果に基づくと 60 MeV 照射条件では PE を完全に貫通することから、変更前後で反転断面積の差異は見られないという予想であり、実際の結果でも予想と一致した。この結果から、輸送系の変更は適切に実施できたと考える。一方で 10 MeV 以下の低エネルギー照射条件では PE 中で一部のプロトンが停止する可能性が示唆されていたが、実験結果では有意差は確認されなかった。この結果から、今回の試験系の場合、低エネルギー照射条件であっても十分に PE を貫通することを明らかにした。

結言

16/14 nm FinFET SRAM における PDI 起因の SEU の評価における粒子計測の課題解決のため、厚膜の PE を用いて低エネルギープロトンを輸送する系においても PE の厚さに依存せず一定の線量を照射できる構成を実現した。セットアップ変更の影響を受けない 60 MeV 照射結果は以前の結果と同一となり、問題無くセットアップの改善が実現できたと考える。加えて低エネルギー照射条件の結果も以前の結果と有意差が無かったため、照射したプロトンは PE を十分に貫通していると結論した。

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松山英也氏、加藤貴志氏、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)

2.4.1.7

8 MeV 陽子線照射によるペロブスカイト太陽電池放射線耐性のその場評価

Radiation Tolerance Evaluation of the Perovskite Solar Cell Using 8 MeV Proton Irradiation

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 evaluated the variation of the I-V characteristics of PSC with elapsed time after 8 MeV proton irradiation in order to clarify whether the lattice imperfections are introduced to the perovskite crystals by radiation.

要約

照射直後にペロブスカイト太陽電池(PSC)に発電特性に劣化を引き起こす欠陥が導入されるのか否かを明らかにするため、8 MeV 陽子線を PSC に照射し、照射直後の I-V 特性を評価した。

緒言

ペロブスカイト太陽電池(PSC)は、軽量フレキシブルで高効率な太陽電池を低コストで実現できる特徴から宇宙応用が期待されている。世界に先駆けた筆者らの放射線耐性評価試験¹⁾などから、ペロブスカイト太陽電池が極めて高い放射線耐性を有することが明らかになっている。しかし、放射線照射直後に発電特性の劣化を引き起こす欠陥が導入された後に回復したのか、そもそも欠陥が導入されなかったのかは不明であった。そこで、照射直後に PSC に発電特性に劣化を引き起こす欠陥が導入されるのか否かを明らかにするための実験を実施した²⁾。

成果の概要

桐蔭横浜大学宮坂研究室にて作製したトリプルカチオンペロブスカイト結晶を発電層に用いた PSC (quartz/ITO/SnO₂/CsMAFAPb(IBr)₃/MCP/Au) に、室温下において、8 MeV 陽子線を照射した。一定の放射線量を照射後に、真空チャンバに設置した石英ガラス窓から、照射後 0 分後、1分後、3 分後に強度 0.3SUN で AM0 スペクトルの光をサンプルに照射して IV 特性を取得し、陽子線照射直後の IV 特性の時間変化を評価した。IV 特性測定終了後に陽子線照射を再度行い、一定量照射後に電気特性を計測することを繰り返し行った。図1に、短絡電流(Isc)、開放電圧(Voc)、曲率因子(FF)の放射線照射量依存性を示す。

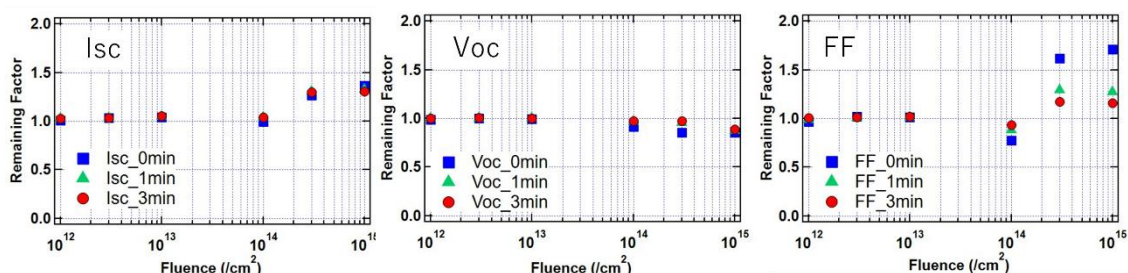


図1 Isc(短絡電流)、Voc(開放電圧)、FF(曲率因子)の照射後保存率の放射線量依存性

結言

照射後 0 分後においても短絡電流は $1 \times 10^{14} / \text{cm}^2$ まで安定であり、 $1 \times 10^{16} / \text{cm}^2$ までも低下は見られなかったことより、室温環境においては、ペロブスカイト結晶に欠陥は導入されていないということが明らかになった。開放電圧と曲率因子においては、 $1 \times 10^{14} / \text{cm}^2$ 照射直後に一時的な低下とその後の回復が見られており、電荷輸送層や界面の劣化と回復が起こっていると考えられる。

参考文献

- 1) Y. Miyazawa *et al.*, Evaluation of Radiation Tolerance of Perovskite Solar cell For Use in Space. 42th IEEE PVSC, 14-19 June 2015, New Orleans.
- 2) Y. Miyazawa *et al.*, In-situ radiation resistance evaluation of perovskite solar cells using 8 MeV proton irradiation. 33th PVSEC, 13-17 NoV. 2022, Nagoya.

^{*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、(国研)宇宙航空研究開発機構と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施した。本研究は、JSPS KAKENHI 22K04252 の助成を受けたものである。

2.4.1.8

太陽電池のイオン照射における照射技術の高度化

Improvement of Ion Irradiation Technologies for Degradation Study on Solar Cells

今泉充^{*1*2}、中村徹哉^{*1}、鈴木耕拓^{*3}、石神龍哉^{*3}

Mitsuru IMAIZUMI, Tetsuya NAKAMURA, Kohtaku SUZUKI and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

Improvement of irradiation method for solar cell devices at high temperatures was studied. In this study, apparatus and method for irradiation while keeping samples at high temperature and in-situ measurement of output characteristics of solar cells were established. Irradiation tests with high energy protons and He ions on an InGaP solar cell were carried out by using the tandem accelerator at WERC. The samples were kept at 300 °C, and irradiated with 3 MeV protons or 1.5 MeV helium ions. Simultaneously, output characteristics of the solar cells were successfully corrected by the in-situ measurements. From the comparison of the results from the in-situ measurement and post irradiation measurements at the room temperature(RT), difference of degradation tendency among the three output parameters was confirmed.

要約

太陽電池に対する高温照射試験技術の向上に向けた検討を行った。今回は高温での照射と、その高温を保持したままの太陽電池特性のその場測定技術を確認した。このその場測定技術を用いて、InGaP 太陽電池における高温での放射線劣化について検討した。タンデム加速器を用い、陽子および He 1価イオンをそれぞれ 3 MeV、1.5 MeV に加速し、試料温度 300°C で照射し、太陽電池の出力特性を測定した。その結果、昨年度に実施した高温照射→室温 (RT) 測定での結果と比較して、出力パラメータごとに劣化傾向に差があることを見出した。

緒言

宇宙用半導体デバイスは、そのミッションの宇宙環境によって動作環境が変化する。特に動作温度については、太陽電池のように外部に晒されているデバイスの場合、大きく変化する。例えば、内惑星探査では 150～250°C に、外惑星探査では -170～-100°C になり得る。このような環境での半導体デバイスの動作における放射線の影響、例えば劣化特性を知るには、その環境温度での放射線照射試験と、その温度環境を保持したままのデバイス特性の測定が必要となる。そこで今回、タンデム加速器のイオン注入チャンバに疑似太陽光光源とチャンバ内での出力特性測定用のサンプル治具および配線を整備した。また、それを用いて InGaP 太陽電池を試料とし、試料温度を 300°C に保ち 3 MeV 陽子線および 1.5 MeV He イオン (1 価) の照射を行い、チャンバ内にて太陽電池の出力の変化を測定した。その結果を、昨年度実施した (令和 3 年度研究年報 2.4.1.9 参照)、He イオン照射のみを 300°C で行い、室温 (RT) まで冷却後にチャンバから試料を取り出して 25°C で出力を測定した結果と比較を行った。

実験

試料には、シャープ製 InGaP 太陽電池 (サイズ: 1 cm×1 cm) を用いた。この試料は、変換材料を用いての中性子検出応用を検討しているものであり、応用先は運転中の原子炉中でのリアクタの暴走検知である。そのため、動作環境として原子炉内という 300°C 程度の高温を想定している。これは太陽観測ミッションなど、宇宙環境でもあり得る温度である。一方、変換材として ⁶Li による変換では約 3 MeV の ³H が、¹⁰B による変換では約 1.5 MeV の He が発生し、これらによる放射線劣化が想定されている。今回はこれらを照射粒子に選定したが、³H のイオン照射は困難であるため本実験においては水素の照射効果という観点から ¹H で代替した。H、He の加速エネルギーは前述の変換反応に従いそれぞれ 3 MeV、1.5 MeV とした。これらのビームをタンデム加速器で加速し、イオン注入チャンバに搬送し照射した。試料温度としては、昨年度に照射時試料温度 RT、200、250、300°C の 4 水準で実験をした (出力特性測定は 25°C) 結果、劣化傾向に有意な温度依存性が見られなかったことから、300°C を選択した。また、300°C という高温での InGaP 太陽電池の正常動作をこれまで確認していないため、チャンバ内で昇温中 (イオン照射前、初期状態) および降温中 (イオン照射後、劣化状態) において出力パ

^{*1}(国研)宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・第1研究ユニット、^{*2} 現三条市立大学、^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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宇宙航空研究開発機構が共同研究として実施したものである。

ラメータ値(短絡電流 I_{sc} 、開放電圧 V_{oc} 、最大電力 P_{max})の温度依存性を測定し、その温度に対する直線性(温度との1次比例関係)を確認することで、300°Cでの正常動作を確認した。

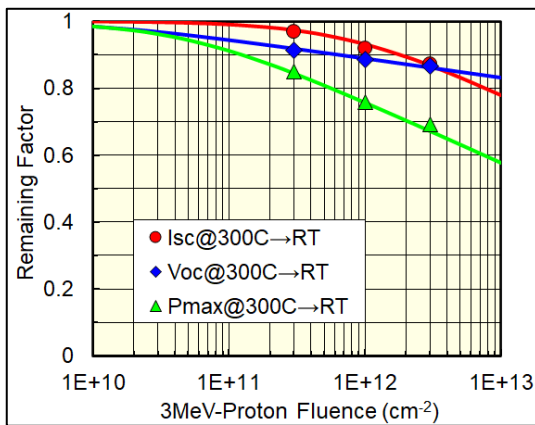
結果と考察

図1は3 MeV 陽子、図2は1.5 MeV He イオンによるInGaP 太陽電池の、照射時試料温度300°Cにおける3種の出力パラメータすなわち短絡電流密度(I_{sc})、開放電圧(V_{oc})、最大電力(P_{max})の劣化特性である。横軸は単位面積当たりの照射量(フルエンス)、縦軸は初期値を1として規格化した保存率を示している。各図(a)は照射のみ300°C(測定は25°C)、(b)は300°Cその場測定での結果である。

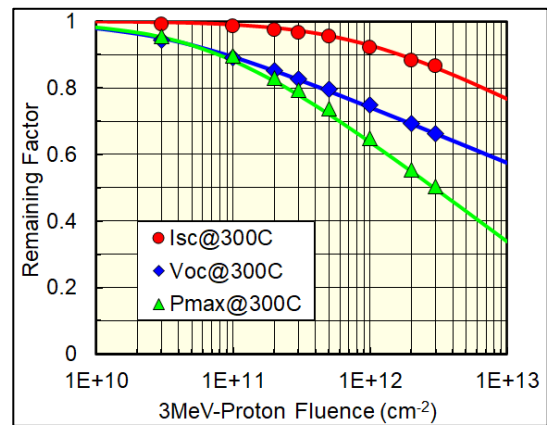
これらの結果より両照射手法において、 I_{sc} では劣化傾向に大きな差はみられないが、 V_{oc} ではその場測定において劣化率が大きいことがわかる。 P_{max} ではこの V_{oc} の劣化の影響によりその場測定での劣化が大きくなっている。この I_{sc} と V_{oc} において劣化傾向に差が表れた理由、原因は不明である。測定の正確性を含めた検討が必要であるが、仮にこの差が本質的であるならば、従来の照射のみを高温とした実験による結果では、本当の動作状態での劣化の振舞いを見誤るといった可能性が示唆された。

結言

実動作温度が高温状態の放射線環境下でのデバイス応用における放射線劣化を実験的に確かめられる方照射技術を確認した。今回、InGaP 太陽電池を用いて高温照射およびその場出力特性測定を行い、実験は問題なく実施できた。しかし、その結果については今後検証する必要がある。

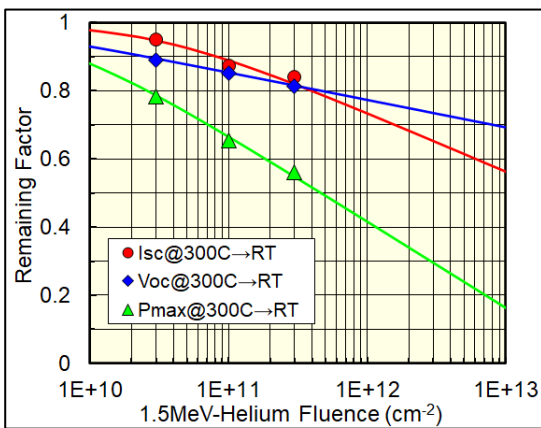


(b) 照射 300°C, 測定 25°C

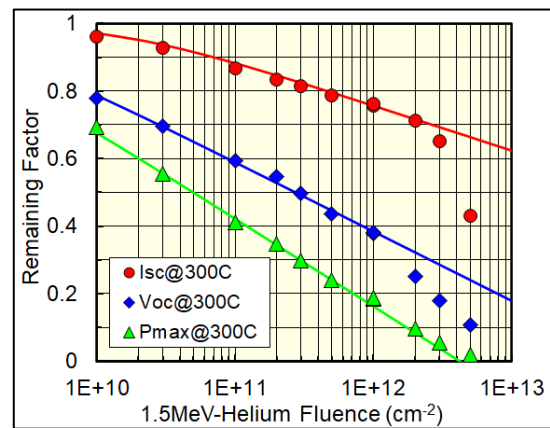


(b) 300°Cその場測定

図1 InGaP 太陽電池の短絡電流密度(I_{sc})、開放電圧(V_{oc})、最大電力(P_{max})の300°Cでの3 MeV 陽子線照射による劣化特性。(a)は照射のみ300°C(測定は25°C)、(b)は300°Cその場測定。



(a) 照射 300°C, 測定 25°C



(b) 300°Cその場測定

図2 InGaP 太陽電池の短絡電流密度(I_{sc})、開放電圧(V_{oc})、最大電力(P_{max})の300°Cでの1.5 MeV He イオン照射による劣化特性。(a)は照射のみ300°C(測定は25°C)、(b)は300°Cその場測定。

2.4.1.9

プロトン衝突によって宇宙用材料から生じる二次電子の測定
Measurement of Secondary Electron from Spacecraft Material due to Proton Collision

奥村哲平*1、鈴木耕拓*2

Teppei OKUMURA and Kohtaku SUZUKI

Abstract

We measured the secondary electrons emitted by proton irradiation on aluminum or copper plate. It was found that the secondary electrons produced from the test sample could be measured correctly if the proton beam did not strike the edge of the suppressor and collimator.

要約

アルミニウムと銅にプロトンを照射した際に生じる二次電子を計測した。サブレッサやコリメータのエッジにプロトンのビームが当たらなければ、供試体から生じる二次電子を正しく測定できることがわかった。

緒言

人工衛星は接地できないので、宇宙空間に対して電氣的に浮いた状態になっている。また、人工衛星表面には熱制御材や太陽電池のカバーガラスなど絶縁材料が使用されている。宇宙環境で人工衛星は宇宙プラズマに晒されるため帯電する。低軌道では電離層プラズマが帯電要因で、静止軌道ではサブストーム時に発生する高エネルギーの電子(数 keV から数十 keV)が主な帯電要因となる。静止軌道での帯電要因としてはプロトンも考慮する必要がある。従来、日本国内では帯電解析ソフトウェア開発当初の環境スクリーニング解析からプロトンの帯電解析への影響はないと考えられてきた。一方で、軌道上で遭遇するプロトンと電子のエネルギーの条件次第では、プロトンの衝突によって生じる二次電子が帯電電位の大きさに寄与することがわかった。本研究では若狭湾エネルギー研究センターが有する 200 keV イオン注入装置を用いて衛星材料から生じる二次電子を測定できるようにするための最適な測定方法と照射方法を明らかにすることを目的とする。

実験

図 1 に示すようにイオン注入装置照射チャンバー内の試料台、コリメータ、サブレッサを用いた測定を試みた。供試体であるアルミニウム箔と銅箔は試料台に導電性テープで固定した。コリメータは接地した。サブレッサをプローブとして用いるために 90 V の電圧を印加し、供試体から発生した二次電子を集荷できるようにした。試料台、及びサブレッサの電流は図 2 に示すように照射チャンバーの外側に置いた電流計を使用して測定した。プロトンビームはサブレッサやコリメータのエッジにかからないよう、十分にしばって照射した。

結果

表 1 に 50 keV 照射したときのサブレッサ電流、ベース電流、両電流から計算した二次電放出係数を示す。

表 1 50 keV 照射した時に測定した電流

	サブレッサ電流 (μA)	ベース電流 (μA)	二次電子放出係数
銅	0.35	0.55	1.75
アルミニウム	0.6	0.8	3

結言

金属材料についてはプロトン衝突による二次電子放出特性の測定が可能なが確認できた。

*1(国研)宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・第1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・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宇宙航空研究開発機構が共同研究として実施したものである。



図1 設備内の試料台等の状況



図2 照射チャンバーの外に置いた電流計

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評価

Performance Evaluation of Lithium-loaded Liquid Scintillators
 鈴木耕拓*1、小栗廉太郎*2、川端考弥*2、玉川洋一*2、中島恭平*2

Kohtaku SUZUKI, Rentarou OGURI, Atsuya KAWABATA, Yoichi TAMAGAWA and Kyohei NAKAJIMA

Abstract

A neutrino detector has been developed to monitor the inside of nuclear reactors and spent nuclear fuel. Since lithium-dissolved liquid scintillators are used for neutrino detection, we have developed a method of dissolution of lithium into liquid scintillators. The detector was manufactured by using the dissolving method and the performance was evaluated.

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。ニュートリノ検出には、リチウムを溶解させた液体シンチレーターを用いるため、液体シンチレーターの作製手法の開発、および装置の製作を進め、検出器の性能を評価した。

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た。これまで、リチウムの溶解手法を開発し、大型の液体シンチレーター検出器を作製してきた。令和4年度は、この作製した検出器の性能を評価した。

液体シンチレーターの性能評価

リチウム含有液体シンチレーターの開発では、天然のリチウムを溶解させ検出器を作製した。これまで 100 mL 単位で作製していたが、令年度は 2 L 単位で製造し、合計 8 L の大型検出器を作製した。大型検出器の容器はアクリルで一辺 20 cm の立方体とした。検出器を図に示す。両端には光電子増倍管(PMT)を取り付け、シンチレーション光を測定する。

作製した液体シンチレーターを評価するため、まず ^{137}Cs および ^{60}Co のガンマ線源を照射し、ガンマ線源に対するエネルギー較正を行った。次に ^{252}Cf からの中性子線を照射し、リチウム 6 の中性子捕獲反応($^6\text{Li}+n\rightarrow\alpha+t$)により発生したアルファ・トリチウム事象を観測した。このアルファ・トリチウム事象とガンマ線を取得波形により弁別する手法を開発した。弁別性能としては、7割程度となった。



図 液体シンチレーター検出器

結言

大型のリチウム含有液体シンチレーターを作製し、ガンマ線とイオンを弁別する手法を開発した。現状で弁別性能はあるが、今後はさらなる向上を目指す。最終的に濃縮したリチウム 6 を溶解させた液体シンチレーターを作製し、性能を評価していく。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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

触媒・形状・環境を加味したセラミック水素製造能力の向上

Consideration of Catalyst/Shape/Environment to Improve Capability in Hydrogen Production by Ceramics

鈴木耕拓*1、土屋文*2、百合あい*1、中田吉則*1

Kohtaku SUZUKI, Bun TSUCHIYA, Ai YURI and Yoshinori NAKATA

Abstract

Hydrogen production by ceramics have been studied at the Wakasa Wan Energy Research Center. Lithium zirconate absorbs water vapor in the atmospheric air, and desorbs hydrogen gas during heating. To improve the hydrogen gas producing capacity, the hydrogen gas generation capacity was evaluated under the various conditions of the catalysts, shapes of and ambience around the ceramics.

要約

若狭湾エネルギー研究センターでは、セラミックを利用した水素製造手法の開発を進めている。リチウムジルコネートは、大気中水蒸気を吸収し、加熱することにより水素ガスを発生させることできる。水素ガス発生量能力を向上させるため、触媒、形状、雰囲気環境を変更し水素ガス発生量を評価した。

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に、リチウムジルコネートの水蒸気吸収・水素放出について研究してきた。本研究の水素製造手法は、リチウムジルコネートに大気中水蒸気を吸収させ、その後加熱することによって水素ガスを発生させる手順を踏む。この手法では、加熱エネルギーのみで水素を製造できるため、工場排熱や自然エネルギーを活用することで、クリーンな水素製造が可能である。これまで、リチウムジルコネート製造手法、加熱による水素ガス定量分析法を開発し、放出される水素ガス量を測定したが、現状では水素の発生量は多くない。そこで、水素ガス発生量や反応速度を向上させるため、温湿度環境の変更、リチウムジルコネート表面への触媒の蒸着、およびセラミックの微粉化を試した。

セラミック水素製造能力の改良

1. 温湿度環境の変更

リチウムジルコネートは大気中の水蒸気を吸収するが、その吸収速度および吸収量は、温度や湿度に依存すると考えられる。そこで、吸収速度および吸収量の最適な条件を検討した。湿度を80%で固定し温度を変更した場合、および温度を25°Cで固定し湿度を変更した場合の最大重量増加割合を図1に示す。図1の結果から、湿度80%環境下では、温度60°C程度までは重量増加量に変化はないが、それよりも温度が高いと増加量が減少することが判明した。また、温度25°Cの環境下では、湿度が高いほど増加量が上昇した。湿度100%の環境は再現が難しいことから、温度60°C湿度80%が適した環境だと考えられる。

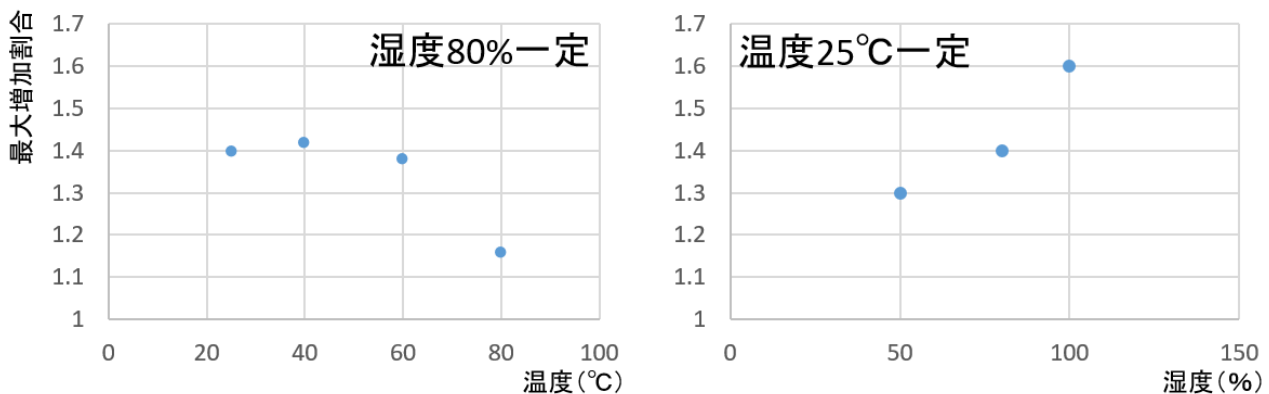


図1 温湿度環境を変更した場合のセラミック重量増加最大量の比較

*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

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

2. 触媒

セラミックペレット表面に触媒として、Pt/Pd/Au/Ag を蒸着し、加熱時の水素ガス放出量が増加するか検討した。セラミックペレット表面および裏面に Pt を蒸着したときの様子を図 2 に示す。蒸着後には若干黄色くなっていることが分かる。まず、吸収時の重量増加量は、触媒の種類および触媒の有無でほとんど変化はなく、同様の増加量であった。次に加熱ガス分析した結果、Pt および Pd で水素ガス量の増加が見られた。

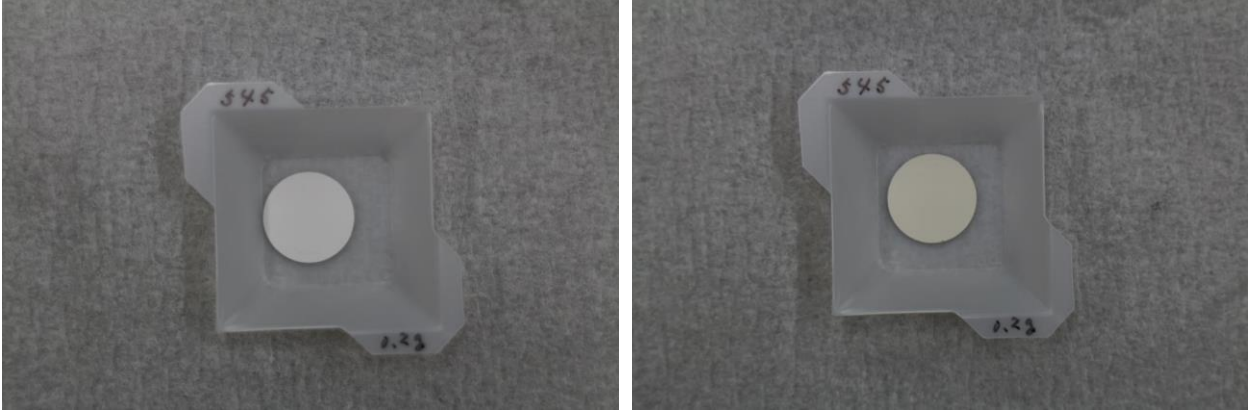


図 2 Pt 蒸着前(左)と蒸着後(右)のペレット写真

3. 形状

これまでペレット状の試料で実験していたが、表面積を大きくすれば、吸収速度が向上すると考えられる。そこで、図 3 のように乳鉢でペレットをすりつぶした。すりつぶした後の試料を SEM で観測した結果、粒径サイズは約 1 μm 程度であった。

この微粉化した試料を用い、水蒸気を吸収させた結果、温度 60°C湿度 80%環境において 4~5 日で重量増加が飽和した。これに対してペレットで同環境下では、20 日程度で飽和した。したがって、4~5 倍程度の吸収速度の増加が見られた。ただし、重量増加飽和量にはほぼ変化がなかった。さらに水素ガス放出量は、ペレットより多い結果となった。

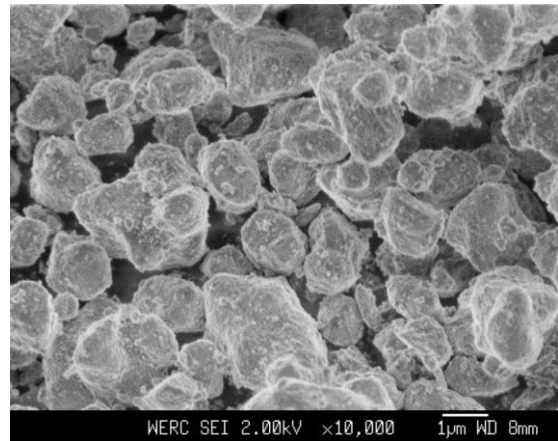


図 3 ペレット粉碎後の SEM 像

結言

セラミックの水素ガス放出能力および反応速度向上のための改良を行った。温湿度環境として、温度 60°C湿度 80%の環境下では、セラミックの吸収速度の上昇および吸収量の増加が見られた。触媒として Pt/Pd をセラミック表面に蒸着した結果、水素ガス放出量の増加が見られた。しかしながら、蒸着表面積としては多くないため、微粉化した試料への触媒蒸着を試すことが重要である。セラミックを微粉化したときは、吸収速度の増加が見られたが、重量増加量には変化がなかった。しかし水素ガス放出量としてはペレットより優れていた。今後は、イオン注入による改質や微粉化した試料への触媒蒸着、そして繰り返し使用の可能性を探索していく。

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. Establishment of analysis method and reaction analysis necessary for development of ammonia production method were carried out. Furthermore, based on the knowledge obtained, 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・試作した。

緒言

水素キャリアとして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。液化水素に比べ取り扱いが容易で既存の輸送手段が利用できるなどのメリットがあるものの、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発生するというものである。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製造法となり得る。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アンモニアの生成・回収量を増やすために、化学的反応機構の解明と、反応を促進する条件の最適化の探索を行った。

結果の概要

本研究では、ナトリウムが存在する混合ガスにおいて、アンモニアを確実に計測できることが必須であることから、昨年度から継続してアンモニアや他のガスを定性・定量できる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、反応ガスを希硝酸に吸収させてイオンクロマトグラフで定量する手法が有効であることを見出し、昨年度よりも広範囲の濃度域に対応したアンモニア計測手法を確立できた。この計測手法を用い、ナトリウムの取扱い技術を有する県内企業に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上記手法で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内容量 100mLの卓上の超小型反応装置を製作した。その装置を用いてアンモニア合成実験を行い、実験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した。また得られた知見を用い、実用化に向けたナトリウム装荷量が最大1Lの小型装置を設計・製作し、この装置を用いた実験に着手した。

結言

今年度は、ナトリウムを含む反応生成ガス中のアンモニアを精密に定量分析する手法を確立した。更に卓上の超小型反応装置を用いて効率のよい生成条件を探索し、得られた知見を用いて実用化に向けた小型装置を設計製作した。今後は、超小型実験装置を用いた反応生成物の分析と反応解析を継続し、詳細なデータを蓄積する。また、アンモニア生成反応を促進するため、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。さらに、新たに試作した小型試作装置を用いてアンモニア製造の高効率化を図る。

参考文献

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

*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

The surface of hydrogen storage metal was plastically deformed by burnishing to introduce nano-sized defects to improve hydrogen absorption and desorption property. Mg specimens burnished at applied loads of 20 N and 50 N showed that different microstructure and 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、バニシング加工に伴う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。負荷荷重 20 N 及び 50 N で摩擦強加工された純 Mg 試料には異なるナノ構造の形成及び水素放出挙動を示した。

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。滑らかで硬度の高い材料を用いて、金属材料の表面を摩擦強加工すると強度の塑性変形を誘起することが可能で、それに伴い表面下の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 の円盤試料を回転速度及び加工時間を一定として、負荷荷重を変化させて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) の鋳造棒を直径 60 mm、厚み 1 mm の円盤形に機械加工したものである。平均結晶粒径は、約 4 μm である。

図 1 は、純 Mg 円盤試料の摩擦強加工に用いた Ni 製のローラーを設置した摩擦強加工治具である。摩擦強加工領域は、円盤試料の外周 10 mm 幅である。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。摩擦強加工は、回転速度 3000 rpm 及び加工時間 30 min と一定とし、負荷荷重を 20 N 及び 50 N の条件で行った。

摩擦強加工後の純 Mg 試料は、集束イオンビーム加工 (Focused Ion Beam: FIB) 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。断面試料は、透過型電子顕微鏡

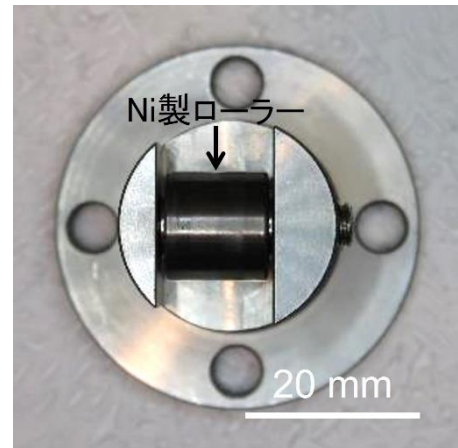


図 1 純 Mg 円盤試料の摩擦強加工に用いた Ni 製のローラーを設置した治具。

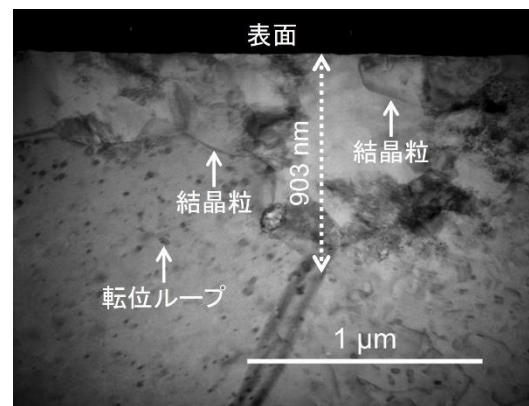


図 2 負荷荷重 20 N、回転速度 3000 rpm、加工時間 30 min の条件で摩擦強加工後の純 Mg の断面の微細組織。

^{*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。

(Transmission Electron Microscope: TEM)を用いて走査透過電子顕微鏡法(Scanning Transmission Electron Microscopy: STEM)によりナノ構造の導入状態を観察した。

摩擦強加工後の純 Mg 試料の水素放出実験は、加工直後に酸化防止及び水素放出温度を低下させる触媒付与を目的として厚み約 10 nm の Ni を蒸着した。その後、金属打ち抜き装置を用いて、直径 10 mm の円盤に加工し、昇温脱離法(Thermal Desorption Spectroscopy: TDS)用の試料形状にした。水素の吸収は、赤外線加熱炉を用いて水素雰囲気中で 200°C、60 min 熱処理することにより行った。水素を吸収させた純 Mg 試料からの水素放出挙動は、TDS により調査した。

図 2 は、負荷荷重 20 N、回転速度 3000 rpm、加工時間 30 min の条件で摩擦強加工後の純 Mg 試料の表面近傍領域の断面の STEM 明視野像である。微細な結晶粒が表面から最大約 900 nm の深さの領域に形成され、平均結晶粒径は 49 nm と評価された。微細結晶粒形成領域よりも深部では、転位ループが形成されており、深さにより導入されるナノ構造に違いが生じることが判明した。

図 3a 及び b は、負荷荷重 50 N、回転速度 3000 rpm、加工時間 30 min の条件で摩擦強加工後の純 Mg 試料の表面近傍及び表面から深さ約 9 μm の深部領域の微細組織の STEM 明視野像である。粒状の黒いコントラストを示しているものは、結晶粒である。異なる深さ領域において共に微細な結晶粒の形成が主であった。平均結晶粒径は、表面近傍において 9.5 nm、深さ約 9 μm の領域においても約 8.0 nm と評価され、深さによる依存性が小さい。

図 4 は、負荷荷重 20 N 及び 50 N で、回転速度及び加工時間を同一の条件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ある。水素は、0.8 気圧の水素雰囲気中において 200°C、60 min の条件で吸収させた。水素の最大放出温度は、負荷荷重 20 N 及び 50 N の試料でそれぞれ、243°C 及び 259°C であり同程度の値を示した。一方、水素の最大放出速度(g/s)は、負荷荷重が 20 N から 50 N に増大すると、約 2 倍に増加した。負荷荷重の増加により結晶粒の微細化及びその形成領域の深部への増大が観察されている。水素放出量に微細結晶粒の形成が寄与している可能性が高いと考えられる。

結言

回転速度及び加工時間を同一条件とし、負荷荷重を 20 N 及び 50 N と変化させて純 Mg 試料をバニング加工により摩擦強加工した。負荷荷重の増大により、結晶粒の微細化及びその形成領域の深部への増大が観察され、水素放出量も増加した。負荷荷重の増加は、強度の塑性変形領域を深部へ増大させることによりナノサイズの結晶粒を形成させたと考えられる。微細結晶粒の形成は、水素放出量の増大に寄与したと考えられる。

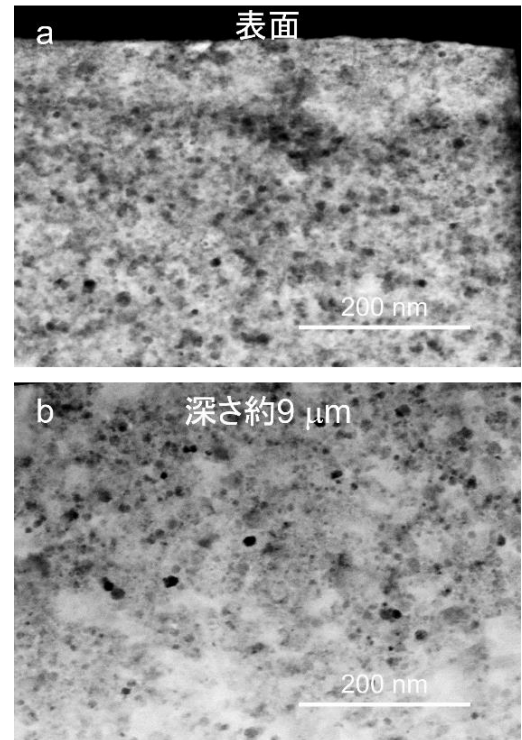


図 3 負荷荷重 50 N、回転速度 3000 rpm、加工時間 30 min の条件で摩擦強加工後の純 Mg の断面の微細組織。(a) 表面近傍の領域及び(b) 表面から深さ約 9 μm の領域。

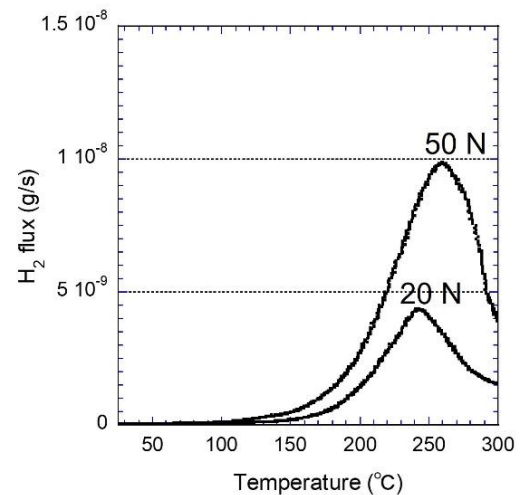


図 4 回転速度及び加工時間を同一の条件とし、負荷荷重 20 N 及び 50 N で摩擦強加工後に水素を吸収させた純 Mg 試料からの水素放出挙動。

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

To prepare hydrogen storage materials containing nanoscale gaps and cavities, we deposited magnesium (Mg) on the substrates cooled with liquid nitrogen. Numerous fine holes were observed in the cross section of the deposited Mg fragments. After hydrogen was absorbed into the deposited Mg at 200°C, hydrogen with an atomic ratio H/Mg of 0.012 was released in the range from room temperature to around 40°C. A thermal desorption spectrum of H₂ from a magnesium plate which was irradiated with hydrogen ions was measured. It was found that the amount of hydrogen released was about 6% of the implanted amount, and the release temperature was about 310°C, which was almost the same as the decomposition temperature of MgH₂ powder.

要約

ナノスケールの隙間や空洞を含有する水素貯蔵材料を作製するため、液体窒素で冷却された基板にマグネシウム(Mg)を堆積させた。堆積した Mg の破片の断面には微細な穴が多数観察された。堆積した Mg に 200°C で水素を吸蔵すると、室温から 40°C 付近の範囲で原子数比 H/Mg=0.012 の水素が放出された。一方、水素イオン注入されたマグネシウムの昇温脱離スペクトルの測定から、放出された水素の量は注入量の約 6%で、放出温度は約 310°Cと水素化マグネシウム粉末の分解温度とほぼ同じであることが分かった。

緒言

水素は燃焼しても二酸化炭素を発生せず水しか生成しないクリーンなエネルギーキャリアであるため、燃料電池式の自動車や電車、船舶が開発され実用化されつつある。発電所や製鉄所のような固定式施設であれば化石燃料の燃焼で発生した二酸化炭素の回収、貯留が可能であるが、自動車のような移動体の場合には大気中に放出されるため二酸化炭素濃度の増加を招く原因になる。そのため将来のエネルギーキャリアとして水素の利用が推進されており、外国で生成された水素を日本に大量輸送する方法が開発されている。一般家庭における暖房や給湯用エネルギー、災害時の病院や避難所などの重要拠点におけるエネルギーも化石燃料から水素へ転換し、安全性の高い地域分散・自立型エネルギーシステムを普及する必要がある。

本研究では、材料中にナノスケールの隙間や空洞を形成し、そこに水素を吸着・吸蔵することで、より低い圧力で水素を輸送・貯蔵できる、より安全、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

液体窒素によって冷却された基板に不活性ガス中で Mg を堆積させると、金属原子と不活性ガス分子の混合物質が堆積し、温度を上げると不活性ガス分子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た。実験には福井県内の企業である株式会社エツミ光学の電子ビーム蒸着装置を使用した。基板を液体窒素で冷却する部品を取り付けたが、ガスの導入は行わなかった。1 回目の実験では Si ウェハの鏡面に Mg を堆積させたが、実験後に観察すると Si ウェハ上には Mg は全く付着せず、金具や Cu 製ホルダーに破片がわずかに付着しているのみであった。走査型電子顕微鏡(SEM)で破片を観察すると膜厚が約 1 μm であることから Mg は堆積しなかったのではなく、堆積した後で、何らかの理由で剥がれたと推測される。剥がれた理由としては、基板と Mg との熱膨張率の違いや基板表面に付着していた水などの不純物の影響が考えられるが、正確な理由は分かっていない。

2 回目の成膜実験では基板への付着力を増すために、鏡面研磨した Cu 板と Al 板に加え、研磨後に紙やすりで表面を粗くした Cu 板と Al 板、Si ウェハの裏面を使用した。1 回目の成膜実験と同様に、Cu 製ホルダーにそれらの基板を固定し、液体窒素で冷却して Mg を堆積させた。ガスの導入も同様に行わなかった。その結果、Cu 板と Al 板の粗くした部分には剥がれることなく一面に Mg が付着していた。一方、鏡面研磨した部分と Si ウ

^{*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。

エハラの裏面には、部分的に Mg の破片が付着していた。破片の断面を SEM で観察した結果、図 1 のように、多数の穴が形成されていることが分かった。ただし、基板が液体窒素温度になっているときに大気にさらされたため、Mg に霜が付着した。そのため 1 回目の実験と比較して構造が変化、または酸化した可能性がある。

Mg が堆積した Cu 板、Al 板、Si ウェハ、およびそれらを固定していた金具に付着していた Mg の破片を赤外線ランプアニール炉に入れ、120℃まで 5℃/分で昇温してガス出した。室温に戻った後、水素ガスを 0.8 気圧導入し、5℃/分で 200℃まで昇温した。1 時間保持した後に室温まで自然冷却し、その後に真空引きして 4.2×10^{-4} Pa に到達後に 5℃/分で昇温しながら真空度を測定した。そのときの温度と真空度の時間変化を図 2 に示す。使用した装置では温度制御が不正確なため、50℃以下では時間に対して温度が階段状になっている。黒の破線はガス放出が無いときの真空度の変化を仮定した直線である。図 2 から、室温から 40℃付近の範囲でガスが放出されたことが分かる。Cu 板など基板のみで同様の操作を行ってもガスの放出はほとんど見られなかったため、このガスは水素と推測される。使用した赤外線ランプアニール炉において過去に、Pd を触媒として水素化マグネシウムから脱離する水素の放出挙動を観察したときの、圧力の時間変化と放出水素量との関係¹⁾から感度校正を行った。その結果、この昇温脱離試験で放出された水素量は、堆積した Mg に対して、原子数比で H/Mg=0.012、重量比で 0.05 wt%であることが分かった。

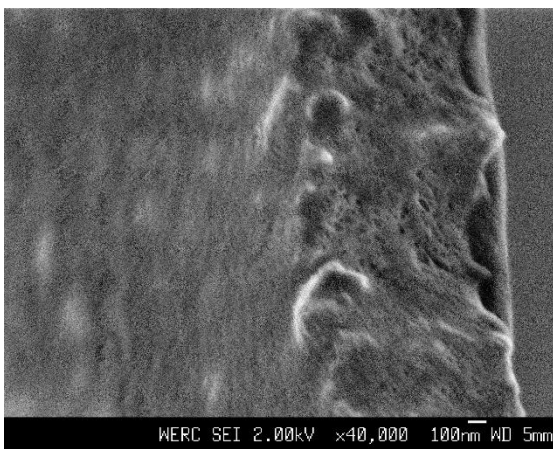


図 1 液体窒素で冷却された金具に付着していた Mg の破片の SEM 写真

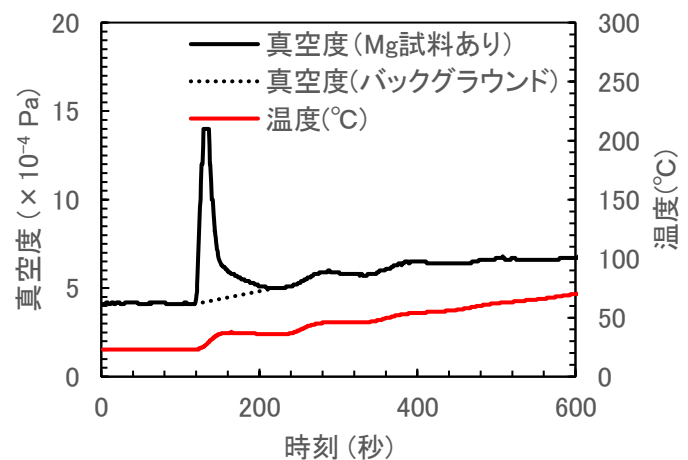


図 2 水素にさらした Mg を昇温したときの温度と真空度の時間変化

2. 水素イオン照射された 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形成し水素を吸蔵させる実験を行った。鏡面研磨後に真空中で 320℃に加熱しガス出し後、マイクロ波イオン源イオン注入装置により 4.7×10^{17} atoms/cm² の水素を注入後に 420℃まで 5℃/分で昇温した。未注入試料との比較の結果、放出された水素量は注入量の約 6%で、放出ピーク温度は約 310℃と、水素化マグネシウムからの水素放出温度とほぼ同じとなった。この結果から、注入された水素はバブルの形成や Mg との化学結合により安定化したと推測される。今後は、より重いイオンでの損傷導入、水素ガス中での水素吸蔵実験を行う予定である。

結言

液体窒素で冷却された Cu などの基板に Mg を堆積することで、ナノ構造を持った Mg を作製することができた。鏡面研磨された面は Mg の付着力が悪く剥がれが発生したため、紙やすりで表面を粗くすることにより付着力を向上させた。堆積した Mg を水素中で加熱して水素を吸蔵・吸着させてから昇温脱離すると、室温から約 40℃の範囲において水素と推測されるガスが放出された。このガスがすべて水素であるとし、圧力の変化と変化した時間から計算することにより、Mg に対する放出された水素量は原子数比で H/Mg=0.012、重量比で 0.05 wt%であることが分かった。一方、イオン照射法で Mg 板に注入された水素は、放出ピークが約 310℃で、放出された水素量は注入量の約 6%しかなかった。これは、注入された水素が安定化し、抜けにくい状態になったためと推測される。

参考文献

- 1) 石神龍哉、安永和史、鈴木耕拓、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報平成 30 年度、21、92 (2018)

2.5.2.5

加速器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 Irradiation
Using Particles Accelerator

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

We have researched hydrogen atom captured in nano-scale atomic vacancy in the B2 structured FeAl alloys as new hydrogen storage materials. Feasibility of the utilization of the accelerator as a hydrogen implantation method was investigated. We performed electron irradiation for B2 ordered Fe-Al alloys using a linear accelerator in order to introduce vacancy-type defects followed by hydrogen introduction by electrochemical methods. Furthermore, hydrogen ion implantation, which can simultaneously introduce hydrogen and vacancies, was performed into the B2-ordered Fe-Al alloy. As a result, it was found that hydrogen atoms are trapped in vacancies even in hydrogen ion implantation, but the desorption temperature of hydrogen atom is slightly higher than the desorption temperature from single vacancies. In addition, it was found that even after 160 hours of electrolytic hydrogen injection, the amount of hydrogen captured was not saturated.

要約

水素貯蔵の方法の候補として Fe-Al の結晶合金中の原子空孔と呼ばれるナノ空間への水素原子捕獲挙動について調べ、水素注入方法としての加速器利用の有用性などの検証を行った。B2 型構造と呼ばれる Fe-Al 合金に対し電子照射で空孔制御した後、電気化学的に水素を注入しその捕獲量の同定と放出温度測定などを行い、さらに水素イオンによる欠陥と水素の同時注入との比較を行った。その結果、電子線を導入した単空孔への注入時間と捕獲水素量の相関から 160 時間の注入でもまだ飽和に至らないことに加え、水素イオン注入では放出温度が単空孔からの放出よりやや高くなった。このように水素イオン注入で形成される空孔サイズは単空孔ではなく集合体であり、空間的に大きな空孔ではより水素原子が捕獲され易いことなどが示唆された。

緒言

水素は、その資源の豊富さや二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギー源として世界中で期待されている。しかし、水素は可燃性を有するなど非常に不安定であるため、その貯蔵や運搬方法とそれらの容器など保存に関するコストや安全性が課題となっている。そのため、安定で大量の水素を保管する技術は不可欠である。特に安定性に着目した保管方法が金属への水素吸蔵である。一般的に知られる水素吸蔵合金は水素を原子の状態を導入し、自らの金属原子と結合させて水素化合物を生成して貯蔵するため、多くの水素を安定に保持することが可能である。しかしながら、このような化合物を形成する合金は高価な元素を要することや水素貯蔵プロセスにおいて高温高压反応を伴うなど多くの課題を抱えており実用化が進んでいない。

Fe-Al 合金は空孔を内包し易い合金として知られており、第一原理計算によると B2 型構造をとる Fe-Al 合金の場合単一空孔あたりに 12 個程度の水素が安定に捕獲されるという結果を得ている。このような空孔あたりの複数水素原子捕獲は同じ第一原理計算でも他の合金系ではほとんど見つかっていない。本研究は、水素化合物を形成せずに、空孔への水素捕獲を利用した水素貯蔵への応用を模索するための基礎研究である。そのため、Fe-Al 合金のような小さな空孔型欠陥への水素の捕獲状態についての知見を得ることが非常に重要である。前年度までに、この合金中の空孔への水素捕獲が確認された。そのため、本年度では空孔に捕獲される水素量の限界値の評価や空孔への水素の多重捕獲現象を検証するための実験を行った。さらに空孔と水素を同時に注入できる方法として水素イオン注入を行いその挙動を単空孔での捕獲水素の挙動と比較することで、イオン注入による水素の空孔捕獲について評価検討を行った。

成果の概要

合金作製と照射及び水素注入

^{*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。

試料は高純度母材の Fe とアルミニウムから Fe-50at.%Al の組成合金でアーク溶解によりボタン材を作製し、3 mm×4 mm×1 mm の板状に切り出した。これを均質化と残留欠陥の除去のため 1273 K で 20 時間の熱処理後に 1023 K まで 50 K 毎に 5 時間温度を下げ 973 K で 72 時間保持後に水中に急冷した。これらの試料を京都大学複合原子力研究所電子線加速器にて 8 MeV の電子線照射を水中で 40 °C に維持し 1×10^{18} /cm² の照射により空孔を導入した。また、190 keV の水素イオン注入を若狭湾エネルギー研究センターのイオン注入器により最大 1×10^{18} /cm² まで注入を行った。照射前後 0.01 g の NH₄SCN を加えた 1×10^{-3} mol/L の硫酸性酸性溶液 50 mL に試料を陰極とし電流密度 0.1 A/cm²、室温条件下で 8~160 時間定電流で電流を流すことで、水溶液中で電気化学的な水分解電解による水素注入を行った。注入後の試料は陽電子消滅測定、X 線回折測定 (XRD)、1 K/1 min の加熱速度で昇温脱離測定 (TDS) を行った。

加速器照射導入空孔への捕獲水素の放出挙動

図 1 は電子線照射前後に電解水素注入法で注入時間を変えて水素を導入した Fe-Al 合金の TDS スペクトルを示す。この結果から注入時間の増加とともに放出水素量が増えている。また 160 時間の注入でも放出水素は増加していた。これ以上の時間での注入は実施しておらず、吸収水素量の上限の特定には至らなかった。一方、水素イオン注入試料の TDS スペクトルを図 2 に示す。この図から、電解水素注入に比べ 100 度以上高い温度で水素放出のピークが現れ、さらにピークがブロードニングしている。このことから、イオン注入で捕獲されている水素は単一空孔だけではなく、複数の空孔サイズへの捕獲が存在している可能性が考えられる。一般的なイオン照射による照射効果では、局所的に高密度な原子弾き出しが起こるため、導入される空孔は集合した空孔集合体を形成している可能性が考えられる。そのため、水素イオン注入ではサイズに分布を有する空孔集合体が生成して水素を捕獲したのではないかと考えられる。図 2 は一見照射量の増加とともに吸収される水素量が低下しているように見えるが、これら正味の捕獲水素量は試料サイズ等で規格化した定量化を試みているが、現時点ではイオン注入の単位体積あたりの捕獲水素量に大きな差はなく、電子線照射に比べ単位体積あたりの捕獲水素量が多い結果が求められている。また高温でも水素放出が確認され、全体的な捕獲水素量について

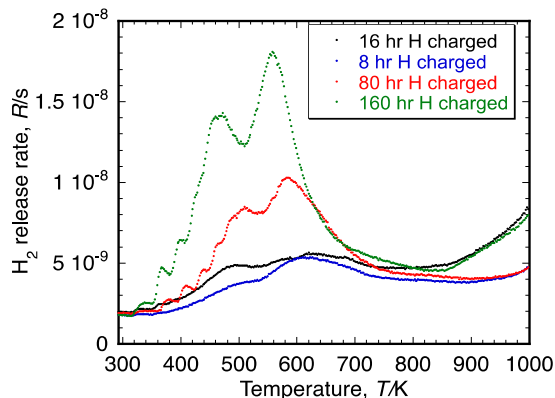


図 1 電子照射後、電解水素注入した Fe-Al 合金の TDS による水素放出挙動

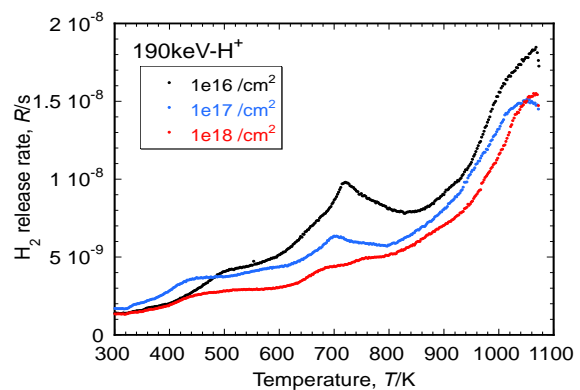


図 2 190 keV 水素イオン注入した Fe-Al 合金の TDS による水素放出挙動

てはさらに検証が必要である。以上のことを踏まえて、本研究では空孔サイズを大きくすることで捕獲水素量も増やすことができる可能性などが示唆された。また、第一原理計算により2つの空孔からなる複空孔に水素を入れた場合、単空孔に比べより安定なエネルギー状態になる事が示され (図 3)、実験結果とも整合性が取れた結果が得られた。さらに、Fe または Al が抜けたサイトに隣の異種原子が移動して形成されるアンチサイト欠陥 (anti-site defect: ASD) に水素が捕獲されると、Fe 空孔よりも安定であった。

結言

原子空孔への水素原子捕獲は 160 時間の電解注入でも飽和しておらず、さらに合金内に保持できる事が確認された。また、この捕獲状態は空孔サイズの変化により放出温度が高温側にシフトするが、トータルでは捕獲水素原子数を増やす事ができる可能性が示された。

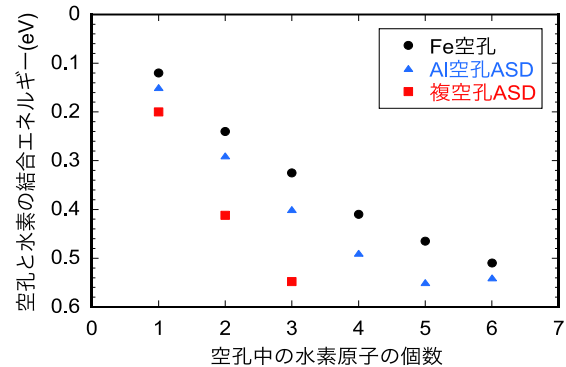


図 3 第一原理計算による空孔及び複空孔での水素原子捕獲のエネルギー安定性

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、
 淵上隆太¹、小田部圭佑¹、古川靖士¹、羽田祐基¹、菊池亮平¹、北上悟¹

Satoshi HATORI, Tetsuro KURITA, Hiroaki YAMADA, Makoto HIROTO, Masaya SHIMIZU,
 Ryuta FUCHIKAMI, Keisuke OTABE, Seiji FURUKAWA, Yuki HANEDA,
 Ryohei KIKUCHI and Satoru KITAJO

Abstract

The replacement of components of the tandem accelerator, i.e., voltage dividing resistors for the accelerator tubes, discharge points of the protective gap for the resistors and tubes and RF driver for the generation of acceleration high tension, was planned in fiscal year of 2021 and realized in FY 2022. Although the installation of the new components shortened the usual 8.5 months term of use of the accelerator system by 1.5 months, the acceleration voltage generation hours of the tandem accelerator reached 3156 hours, of which figure is comparable to 3849 hours in FY 2019. Hunting phenomenon had been generated at a specified acceleration voltage soon after start of the machine time. The issue, of which cause was identified by finding the change of the parasitic resonances in the oscillation system, was fixed. The simulation of the cosmic ray by the proton beam and ERDA for the analysis of the light elements such as hydrogen and lithium are given as examples of the recent characteristic usages of the accelerator system at the WERC.

要約

2021年度に計画したタンデム加速器の構成品の一部(加速管分割抵抗、放電ポイント、加速高周波発振器)の更新を2022年度に行うことができた。通常より1.5ヶ月短い7ヶ月のマシントime期間であったが、タンデム加速器の加速高電圧発生時間3156時間は8.5ヶ月運転できたとすれば2019年度の3849時間にと同程度だった。マシントime開始直後、タンデム加速器の特定電圧でのハンチングに悩まされたが高周波発生機構の共振特性の変化から原因を特定し解決した。近年のエネ研加速器の利用法を特徴づけるものとしては加速器ビームによる宇宙放射線模擬実験があげられる。

緒言

若狭湾エネルギー研究センター(WERC)の加速器施設ですべての実験に必ず用いられる加速器がタンデム加速器である。タンデム加速器は高電圧を発生させ、負イオンを加速、正イオンに荷電変換後さらに加速する。したがって加速高電圧を安定に発生させることが極めて重要になる。高電圧ターミナルや加速管を支える絶縁構造物の絶縁性能の維持、ターミナル電圧を分割固定するための抵抗素子の管理、高電圧を発生させるための高周波発振機構の共振特性の維持や多段倍電圧整流回路(シェンケル回路)の素子の管理を行っている。加速管電極の分割電位固定用のシールドプレートや分割抵抗、保護ギャップ電極(放電ポイント)は着脱に手間がかかり、その数も多いので、メンテナンス効率を上げるために分割抵抗や放電ポイント、それらの取り付け方法を変更した。これに関しては、稿を割き報告をする。

高周波発振機構に関しては、高周波トランスの分解・点検・修理、高周波トランス-RF電極-シェンケル回路の周波数特性測定・管理を行なっている。2022年度も共振特性の悪化による特定電圧におけるハンチング現象の発生が見られた。原因と対応に関して報告する。高周波発振器自体の経年劣化(真空管カソードのエミッション漸減)により必要な高周波電力が得られなくなっていて5MV発生が困難な状況になっていた。高周波発振器更新により再び5MV発生が安定に行われるようになった。これに関しても、別稿で報告する。

加速管分割抵抗および放電ポイント、高周波発振器の更新作業に1.5ヶ月を要したが、例年のマシントime期間の18%に相当する。加速高電圧発生時間は3156時間であるが、2017年度加速管更新以降、運転時間が最大であった2019年度の3849時間に相当する運転時間である。近年、宇宙放射線や地球磁場に捕捉された荷電粒子を模擬する実験がWERC加速器施設の利用法を特徴づけている。

^{*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、実施する中で行なったものである。

タンデム加速器高周波発振系の共振特性変化によるハンチング現象

図1はタンデム加速器高周波トランスの1次コイルに高周波電力を投入したときのアドミッタンスを示している。横軸は高周波の周波数である。トランス2次コイルインダクタンスとRF電極とタンク内壁間の静電容量とでほぼ決定される共振周波数(〜41kHz)で高周波発振器の発振管はスイッチングされるが、高周波帯にわたって複数の寄生共振が存在する。2021年3月、2022年3月と定検後の周波数特性はほぼ変化ないが、マシンタイムを開始するとハンチング現象が発生するようになった。

2022年5月23日の測定で周波数特性が変化し寄生共振が増えていることがわかる。高周波トランスのインダクタンスに変化がないことも確認されたが、トランス2次コイルの両端電圧のバランスを取るための補正コイルへの接続端子部分で素線のいくつかに断線が発生していることが確認された。

断線による不安定なオーミックな抵抗は不安定なQ値を生み共振電流の変動のもとになる。また、完全に間隙ができてしまえば静電容量が寄生することになり、寄生共振のもとになり共振電流を発振させる原因となる。

切断部を是正することで共振特性は以前同様に復し、ハンチング現象は見られなくなった。

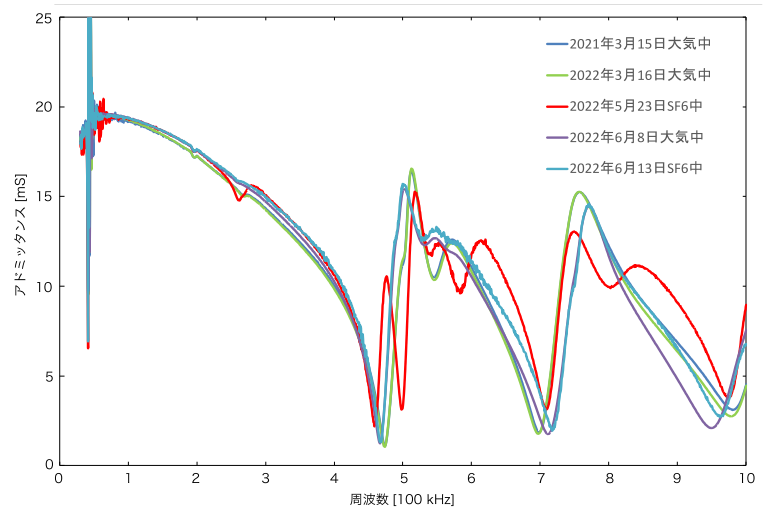


図1 高周波トランスの1次側から見たアドミッタンス周波数特性

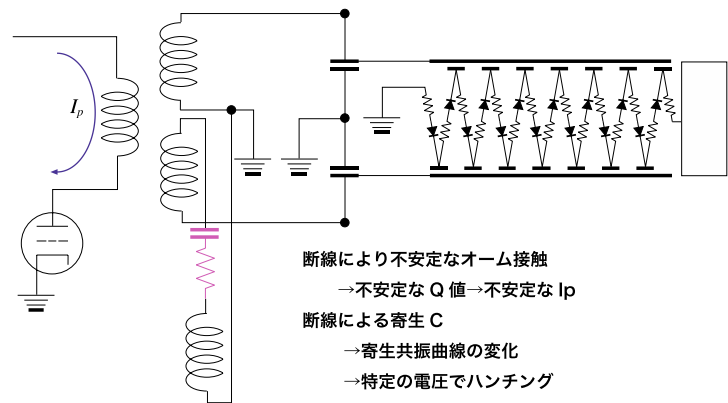


図2 2次コイルと補正コイル間の切断部が共振電流に与える影響

タンデム加速高電圧発生時間推移

図3はタンデム加速器の加速高電圧発生時間の年度ごとの推移を加速器の利用方法によりまとめたものである。2017年の加速管更新以降、2019年度のように年間3850時間程度の運転は可能である。しかし、2021年度は絶縁構造物上の電位を固定するための分割抵抗に発生した不具合による電圧不安定さやその修理のためにマシンタイムが大きく割かれた。さらに、2020年度や2021年度はCOVID-19の流行によりマシンタイムのキャンセルが相次いだ。

2022年度は、2021年度に計画されたがやはりCOVID-19の影響により2022年度に延期されたタンデム加速器構成品の一部更新作

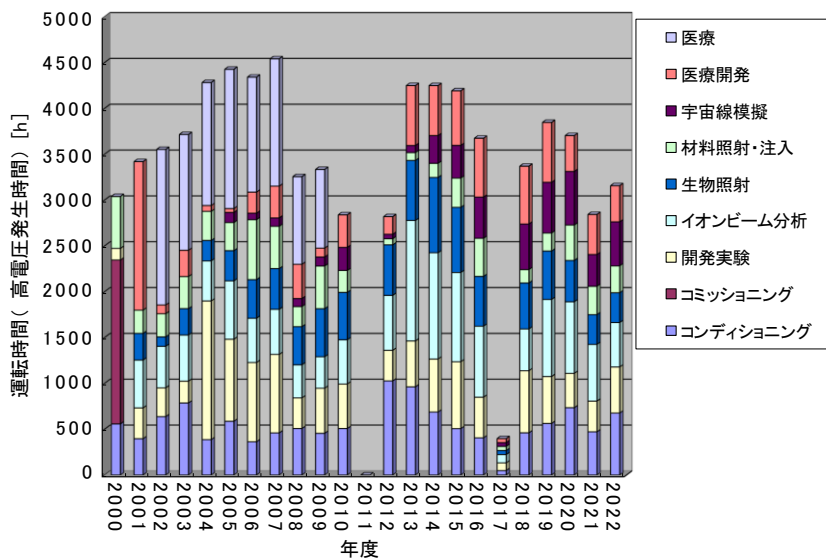


図3 加速高電圧発生時間推移の利用方法によるまとめ

業にマシンタイムを割かれ、2019年度の8.5ヶ月のマシンタイム期間に対し7ヶ月となり、3156時間の高電圧発生時間となった。マシンタイム期間の減少を考慮すれば、2019年度の高電圧発生時間に匹敵する。

イオンビーム分析や宇宙線を模擬した実験の割合が増えてきている。イオンビーム分析は特に反跳核質量分析法 ERDA を用いた軽元素の分析が行われており、燃料電池や2次電池開発を意識したものである。

宇宙機で用いられる半導体選別のために宇宙線模擬実験が行われている。太陽活動の状況にもよるが地球近傍における1次宇宙線(銀河宇宙線 GCR) エネルギースペクトルは長期間の平均で 1GeV/u 、極小期では 200MeV/u にピークがある。WERC 加速器群のエネルギーレンジにマッチしていると言える。

シンクロトロンエネルギーレンジ $50\sim 200\text{MeV}$ では電子的エネルギー損失はほぼ一定の $2\sim 1\text{MeV/mm}$ であり半導体素子におけるシングルイベント効果の実験が行われている。また、タンデム加速器の陽子ビームエネルギー 10MeV はシリコン中ではほぼ 1mm 程度の飛程をもち、ブラッグピーク位置を素子内で自由に選ぶことができる。トランジスタの MOS 構造部、チャンネル部で大きなエネルギー損失を与えることも可能であり、電離損傷効果(トータルドーズ効果)、弾き出し損傷効果の実験も行われ始めている。

また、イオン注入装置のエネルギーレンジ $50\sim 200\text{keV}$ は半導体素子の表面近傍の照射を行う。また、このエネルギー領域では電子的エネルギー損失に対し、原子核的エネルギー損失の割合が無視できない程度に大きくなる。したがって、むき出し、もしくはむき出しに近い状態で用いられる太陽電池やセンサー(CCD、CMOS など)の弾き出し損傷効果の実験が行われている。

結言

2022年度の加速器運転時間は3156時間であった。タンデム加速器の加速管分割抵抗や放電ポイント、加速電圧発生用の高周波発振器の更新作業により、例年8.5ヶ月程度は確保できるマシンタイム期間が7ヶ月程度に短縮されたためであり、2019年度の3849時間に匹敵する。COVID-19によるマシンタイムキャンセルなどの影響はほぼ解消されたと言える。

2022年度マシンタイム開始直後は共振電流やシェンケル回路の負荷電流が不安定になり特定の電圧でハンチング現象をおこした。高周波発振系の共振特性を調べ、高周波トランス2次コイルと2次コイル相間電圧のバランスを取るための補正コイルとの接続部に素線の一部に断線箇所を発見し、この是正により共振電流の不安定さやハンチング現象は解消した。断線箇所に存在する不安定なオーミック抵抗による不安定な共振Q値、断線箇所に寄生する静電容量による新たな寄生共振の発生が原因である。

WERC 加速器を用いた利用で軽元素分析のための ERDA 実験や宇宙機搭載半導体素子へ宇宙線を模擬した照射実験の割合が増えている。今後もこの傾向は続くと考えられる。

2.6.1.2

タンデム加速器の加速電圧用高周波発振器および共振回路の更新

Replacement of oscillation system

using electric tube forward convertor with MOSFET half bridge convertor

羽鳥聡^{*1}, 清水雅也^{*1}, 瀧上隆太^{*1}, 菊地亮平^{*1}, 小田部圭佑^{*1}, 古川靖士^{*1}, 羽田祐基^{*1},栗田哲郎^{*1}, 廣戸慎^{*1}, 淀瀬雅夫^{*1}, 北上悟^{*1}, 山田裕章^{*1}

Satoshi HATORI, Masaya SHIMIZU, Ryuta FUCHIKAMI, Ryohei KIKUCHI, Keisuke OTABE,

Seishi FURUKAWA, Yuuki HANEDA, Tetsuro KURITA, Makoto HIROTO, Masao YODOSE,

Satoru KITAJO and Hiroaki YAMADA

Abstract

The maximum acceleration voltage of the tandem accelerator at the WERC amounts to 5MV, however, it had been difficult for the insufficient power to generate high tension of 5MV. A type of DC-DC forward convertor using triode tube had been adopted to the existing RF oscillator. DC bias and cathode heater consumed useless power. For the generation of only RF component, half-bridge convertor with MOS-FET was adopted to the new oscillator. The change of the switching method reduced the output power in one third. Output power of existing RF driver is controlled by PWM, however, the duty ratio of new RF driver is fixed at almost 50% and output power is controlled by changing the DC bus voltage. The fixed duty reduces the harmonic components.

要約

若狭湾エネルギー研究センター(WERC)のタンデム加速器は高周波発振器(RF ドライバー)の経年劣化による出力電力不足のため最高電圧 5MV の発生が困難になってきていた。RF ドライバーは三極管をスイッチング素子とするフォワード方式であるが DC バイアス成分やカソードヒーターが無駄な電力にもなっていた。必要な高周波(RF)成分のみを発生できる MOS-FET をスイッチング素子とするハーフブリッジ方式に変更し、出力電力を 1/3 にすることができた。また、従来の PWM 方式による出力制御をやめ、デューティー比をほぼ 50%に固定し DC バス電圧を変化させる方式を採用することで、高調波の重畳を抑えることができた。

緒言

若狭湾エネルギー研究センター(WERC)のタンデム加速器は最高電圧 5MV 発生時に必要な RF ドライバーの出力が漸増し、定格の 60kVA をもってしても 5 MV 発生が困難になっていた。RF ドライバーおよび空芯トランス、RF 電極・加速器タンク間静電容量、さらにシケンル回路は一種のフォワード方式の DC-DC コンバーターを形成していて、スイッチングは三極管によっていた。RF ドライバー出力漸増に加え、カソードのエミッション低下により、グリッドドライブのデューティーが上限に達し、しばしば、トリップするようになっていた。そのため、最高電圧を 4MV に制限する運転を余儀なくされていた。

真空管の経年劣化やまたフォワード方式採用による DC 電力の発生を伴う発振器を廃し、RF 成分のみを発生可能なブリッジ方式を採用し、さらに、スイッチングは MOSFET を用いた RF ドライバーに置き換えることにした。DC 成分フリーなので、もはや共振トランスは必要なく、1 次コイルは廃し、2 次コイルに直接 RF を供給する。

従来の RF ドライバーはデューティー比で加速高電圧を制御していたが、新しい RF ドライバーはブリッジの DC バス電圧を変化させ、デューティー比はほぼ 50%に固定してある。そのため、加速高電圧に依存した高調波発生が抑えられ、クリーンな正弦波が得られる。

従来の高周波発振器

図 1 に従来の三極管を用いた RF ドライバー、RF トランスおよび多段倍電圧整

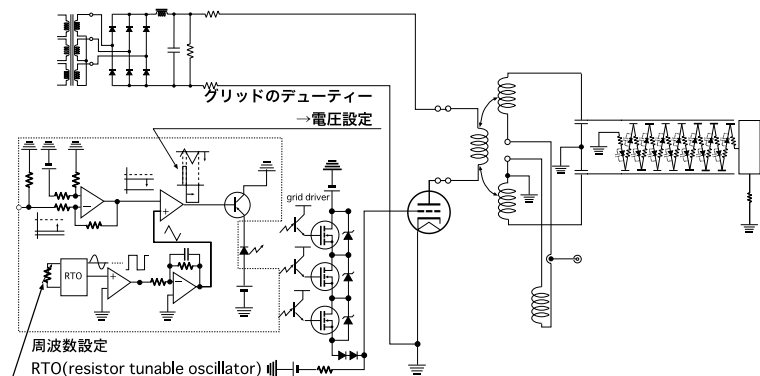


図 1 従来の RF ドライバー

三極管のグリッドを共振周波数および電圧設定デューティー比でスイッチングする。DC バイアスのため整流回路へはトランスを介して電力を供給する。

^{*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、実施する中で行なったものである。

流回路(シェンケル回路)を示す。シェンケル回路に RF を供給する RF 電極と加速器タンク内壁(大地電位)との間で形成される静電容量は RF トランスと共振回路を形成し、共振周波数で三極管のスイッチングが行われる。共振電流はデューティー比の変化により制御され、ターミナル電圧を決定する。

図2は2023年1月4日最後の運転で5MV発生を行うことができたときの、三極管プレート電圧、RF トランス1次コイル両端電圧および1次コイル電流を示している。プレート電流はデューティー比に応じたパルス状であり、1次コイル両端にはトランス2次側の並列共振回路に流れる共振電流にカップルしたRF電圧が発生する。プレート電流のパルス幅に起因する高周波成分が重畳している。コイル電圧・電流から皮相電力は定格の60kVAに達していることがわかる。

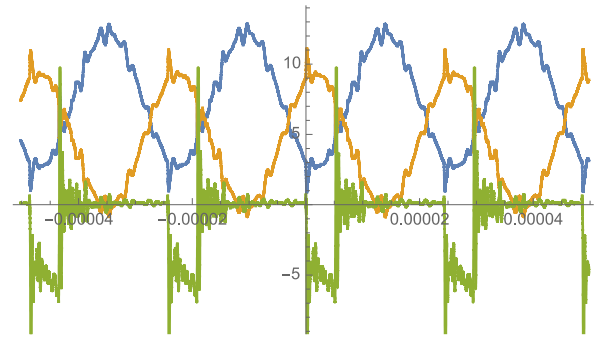


図2 従来のRFトランス1次側電圧および電流
青:プレート電圧、橙:コイル電圧、緑:1次電流 縦軸は電圧の単位は[kV]、電流の単位は[0.25A]。

新しい高周波発振器

図3にトランジスタを用いたRFドライバー、3台のRFドライバー出力を1出力にまとめるためのRFトランス、従来のRFトランスの2次コイル(RFコイル)およびシェンケル回路を示す。RFコイルに流れる共振電流を計測しトランジスタのスイッチング周波数を共振周波数にロックする。

図3にはターミナル電圧の計測値(回転発電電圧計 Generating Voltage Meter: GVM もしくはコラムサポート上の分割抵抗を流れる電流計測値:コラム電流)による制御(TVモード)、ビーム搬送系で分散の生じる位置に設けたビームプロファイルモニターによるビーム位置計測による制御の方法も記してある。ビーム位置計測による制御は従来ターミナル電圧設定値に帰還していたが、新しいRFドライバーでは主制御はTVモードで行い、ビーム位置計測で±1%以内の電圧補正を行うようにした(TV+BPモード)。さらに新しいRFドライバーではRFコイルを流れる共振電流で制御を行うIrfモードがある。出力側インピーダンスが低くなるような時、例えば高圧ターミナルが地絡するような場合にRFドライバーや加速器を保護することができる。定検後の加速管コンディショニング時などに用いる。

図4は従来のRFトランス2次コイルと新しいシステムのRFコイルを流れる共振電流を比較したものである。ターミナル電圧はともに5MVである。従来のものには発振管のスイッチングによるノイズが重畳している。新しいRFドライバーではスイッチング素子にトランジスタを用いているが、トランジスタ保護のためにTVS(transient voltage suppressor)がトランジスタに並列に接続されている。このTVSにより共振電流に重畳するノイズも抑えられている。またデューティー比が50%に固定されているので、寄生共振を励起する高調波も観測されていない。RFドライバーの出力がそのまま高電圧発生用に使われていて図4、RFコイルインダクタンスおよび共振Q値からRF有効電力は18kWである。

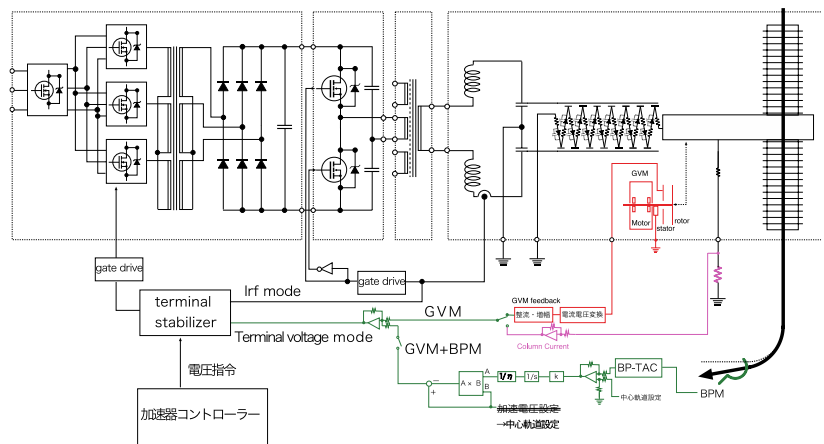


図3 新RFドライバー
共振周波数でトランジスタのゲートを交互にドライブ。デューティーはほぼ50%に固定。RF出力電力はDCバス電圧で制御する。

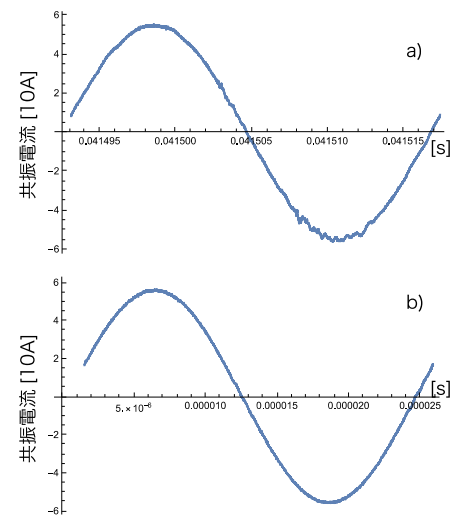


図4 5MV発生時の共振電流新旧比較
a)旧2次コイル電流、b)新RFコイル電流

結言

RFドライバーを更新した。ハーフブリッジ方式を採用し加速電圧発生に必要な高周波成分のみを生成する。加速電圧制御はDCバス電圧変化で行う。これらにより高効率・低雑音高周波発振を実現した。

2.6.1.3

タンデム加速器加速電圧分割抵抗と放電ポイントの更新

Introduction of new type voltage dividing resistors and discharge points
for acceleration tube of 5MV tandem accelerator

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、
 湊上隆太¹、小田部圭佑¹、古川靖士¹、羽田祐基¹、菊池亮平¹、北上悟¹

Satoshi HATORI, Tetsuro KURITA, Hiroaki YAMADA, Makoto HIROTO, Masaya SHIMIZU,
 Ryuta FUCHIKAMI, Keisuke OTABE, Seiji FURUKAWA, Yuki HANEDA,
 Ryohei KIKUCHI and Satoru KITAJO

Abstract

In order to keep the withstand voltage performance of the insulating column support and acceleration tubes of the tandem accelerator at WERC, we keep the potential distribution on the insulator and electric field on the electrodes uniform. For example, the resistance values of all dividing resistors for the acceleration tubes are measured and the mean values and the distribution are controlled. The surfaces of the all electrodes for the spark gap (discharge points) are inspected and polished. For the inspection of the dividing resistors and discharge points, which are mounted on the shield plates, all the shield plates must be demounted from the tube electrodes. Mounting/demounting of the shield plates makes the efficiency of the maintenance low and causes the peeling of the adhesive faces of glass insulator and electrode. We removed all the shield plates and introduced new type dividing resistors and discharge points.

要約

若狭湾エネルギー研究センター(WERC)のタンデム加速器は加速高電圧の維持のため絶縁構造物の電位分布を一樣にすることや電極の不平等電界の緩和に取り組んでいる。加速管の分割抵抗管理や保護ギャップ電極(放電ポイント)表面の点検もその一環である。分割抵抗や放電ポイントの点検のためそれらが取り付けられているシールドプレートを加速管電極から取り外す必要がある。メンテナンス効率を著しく低下させかつ加速管剥離の原因にもなるシールドプレートを廃し分割抵抗と放電ポイントを更新した。

緒言

WERC のタンデム加速器の加速管は1本あたり 80 のチタン電極をもち、高電圧ターミナルを挟み低エネルギー側、高エネルギー側に 2 本ずつ配し、加速器を構成している。1インチピッチの電極には分割抵抗が接続され、ターミナル電圧が抵抗分割され電極に印加される。1組の分割抵抗は抵抗 2 個を並列接続したもの 4 つを直列接続して構成されていた。分割抵抗体が長くなり電圧印加時に隣り合う抵抗体が引力で接近してしまう。それを避けるためのセパレーターや抵抗、放電ギャップ電極(放電ポイント)を取り付けるためのシールドプレートを電極にとりつけていた。

WERC では放電を抑えるため、電位分布の均一性を保つように、抵抗値の分布管理を行なっている。また、放電の引き金となる不平等電界を抑えるため、放電ポイントの表面状態の管理も行なっている。加速管のシールドプレートの着脱が必要となるが、それが、加速管電極に変形を生じさせ、加速管電極の剥離を引き起こすこととなった。

分割抵抗体を高抵抗値で剛性の強いものとし、抵抗体や放電ポイントはシールドプレートを用いず、クリップ方式で加速管電極に直接取り付ける方式に変更する。

従来のシールドプレート方式

加速管電極間に配される1組の分割抵抗は抵抗 2 個を並列接続したもの 4 つを直列接続して構成されていた。分割抵抗の抵抗値のばらつきは加速管電極の電位分布のばらつきにつながり、放電の原因にもなるが、このような構成により抵抗値許容差(単体ではJすなわち±5%)を実質的に $1/\sqrt{2}$ に抑えることができる。しかし、分割抵抗体が長くなり電圧印加時に隣り合う抵抗体が引力で接近してしまう。それを避けるためのセパレーターや抵抗、放電ギャップ電極(放電ポイント)を取り付けるためのシールドプレートを電極にとりつけていた。

WERC では放電を抑えるため、電位分布の均一性を保つように、抵抗値の分布管理を行なっている。また、放電の引き金となる不平等電界を抑えるため、放電ポイントの表面状態の管理も行なっている。加速管のシ-

^{*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、実施する中で行なったものである。

ルドプレートの着脱が必要となるが、それが、加速管電極に変形を生じさせ、加速管電極の剥離を引き起こすこととなった。

新しい分割抵抗と放電ポイント

分割抵抗を高抵抗値かつ低許容差(±1%)の単体抵抗体とし、抵抗体や放電ポイントはシールドプレートを用いず、クリップ方式で加速管電極に直接取り付ける方式に変更した。抵抗体の抵抗値は公称値と実測平均値の差は0.4%であり、また実測標準偏差は実測平均値に対し0.4%であった。従来の抵抗値のばらつき管理よりも高品位な管理が行うことができる。シールドプレートは電界強度の緩和の目的もあったが、使用しなくても加速電圧5MV発生に問題は生じていない。放電ポイント表面にも放電痕は見いだせなかった。

結言

加速管分割抵抗や放電ポイントを取り付けるシールドプレートを廃止した。分割抵抗は剛性の強い高抵抗値かつ低許容差の単体抵抗体とした。分割抵抗は放電ポイントを介し加速管電極間に取り付けた。放電ポイントはクリップ式で取り付けられ、着脱が容易である。分割抵抗の抵抗値のばらつきは従来のものより2倍抑えられ、放電ポイントに放電痕もなかった。またクリップ方式は着脱が容易で、従来サンプリングによる放電ポイント調査しできなかつたが、全数調査することができる。

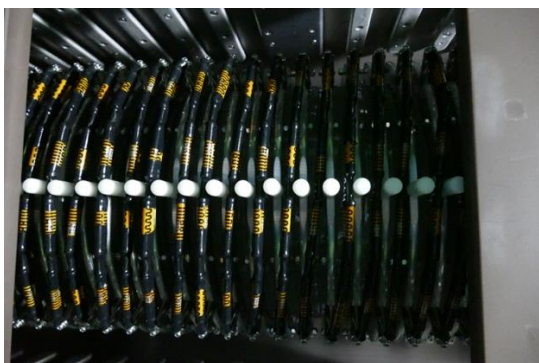


図1 加速管デバイダー抵抗と放電ポイントの更新

左はシールドプレートを用いた旧システム。左上は加速管を上から見たところで、電極にシールドプレートがとりつけてある。左下は、加速管を下から見た図。長尺の抵抗体がシールドプレート間に取り付けてあるが、昇圧時に流れる電流による隣り合う抵抗体の接触を防ぐためのセパレーター(中央に見える白い丸、デルリン製)がシールドプレートにとりつけてある。これを右のように改める。シールドプレートはもはやなく、放電ポイントや抵抗体はクリップ方式で電極に取り付けてある。抵抗セパレーターもない。

2.6.1.4

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 under development. Using FPGA makes it possible to digitize and process the signal all over the system. The new system utilizes MicroTCA.4 platform and AMC boards developed by Mitsubishi Electric TOKKI Systems Corporation. In the report, overview of new system, progress of beam commissioning and development status of operation interface software are presented.

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特機システムによって開発された AMC (Advanced Mezzanine Card) を用いる。現在、試験中であり、システムの概要および開発状況、ビーム試験およびオペレーションインターフェースソフトウェアの開発について報告する。

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)}。現有の LLRF 系は、建設当初から原発振器として DDS (Direct Digital Synthesizer) を用い、これを DSP (Digital Signal Processor) で制御するシステムであるが、継続的な保守が困難な状況にあり、様々な問題点も明らかになってきた。これらの問題点を克服し、近年の技術的動向に追随したシステムとして、発振器およびフィードバック制御系、ビーム位置モニター(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。

システムの概要と試験状況

新システムでは、MicroTCA.4 をプラットフォームとして三菱特機システムによって開発された AMC (Advanced Mezzanine Card)³⁾を用いる。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 (Input Output Controller) 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 信号の処理およびそれを用いたフィードバック制御である。2019 年度に製作した。もう二つの AMC ボードは、フィードバックに用いられるもの以外の6台の BPM の信号を処理する。2020 年度末に製作した。2021 年度には、フィードバック制御部のシステムクロックを生成している電圧制御発振器 (VCO) に不具合があり交換を行うとともに、システムクロックを 150MHz から 300MHz にアップグレードする改造を行った。2021 年度後半から、ビーム試験を開始、2022 年度中に以下の機能の不具合の発見/修正を行いビーム調整に寄与することを確認した。

- B-Clock(磁場変化を検出して発生させるクロック)による周波数制御
- 空洞電圧フィードバック制御系
- バンチ位相の検出と位相振動フィードバック
- 横方向ビーム位置の検出とフィードバック制御
- 2倍高調波制御系

以下の機能の、試験および不具合の修正が未達成であるが、当面の通常運転は行える見込みである。

- T-Clock (時間周期クロック)による周波数制御
- 四極モード位相振動フィードバック

オペレーションインターフェースの開発状況

オペレーションインターフェース(OPI)は Control System Studio⁵⁾ (CSS)を用いて制作している。CSS は LLRF システム内の EPICS IOC に Channel Access を経由した設定やモニターのグラフィックユーザーインターフェース (GUI)を容易に構築できる。しかし、CSS ではそのままでは実装が困難な、複数の設定を連動して操作するな

*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。

どの複雑なロジックの実装、各種パターンデータの生成や設定を行うために、同じ PC 内で Python による Software IOC を Python の EPICS Channel Access ライブラリである caproto⁶⁾を用いて開発した。この Software IOC は、Channel Access などの入出力を非同期で実行している。そのイベントループをブロックしないように、設定の一括設定/保存、パターンデータの送信などのためのファイル選択ダイアログなどは、CSS の Action Button から Python スクリプトを実行するようにしている。

RF アンプの ON/OFF や BPM アンプのゲインの切り替えなどの DIO 処理は、コンテキストの PIO ボードを用いている。PIO ボードの IOC を C#.Net の EPICS Channel Access ライブラリである EpicsSharp⁷⁾を用いて構築した。

オペレーションインターフェースソフトウェアの構成を図 1 に示す。

CSS によるオペレーション画面は、調整の場面ごとに、必要なコントロール、パラメータ、波形の表示を一画面にまとめるように作成している。その例として、捕獲周波数とビームフィードバック調整用を図 2,3 に示す。

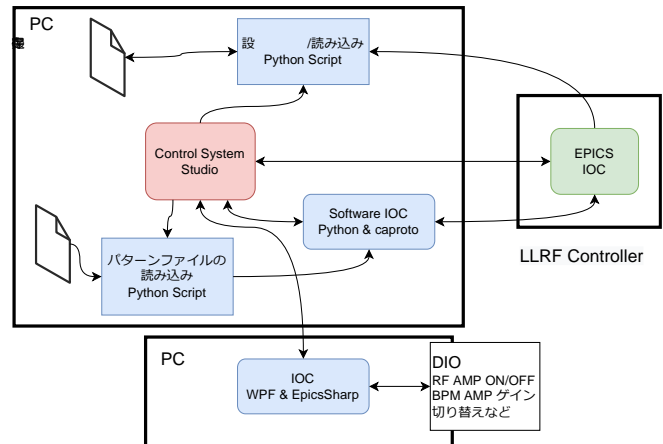


図 1 オペレーションインターフェースソフトウェアの構成

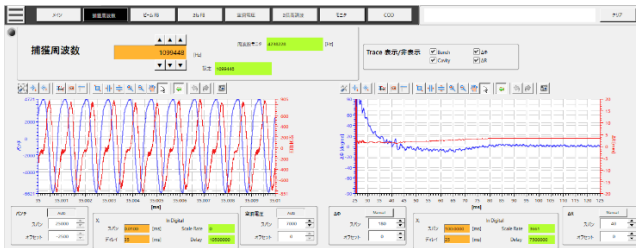


図 2 捕獲周波数調整画面

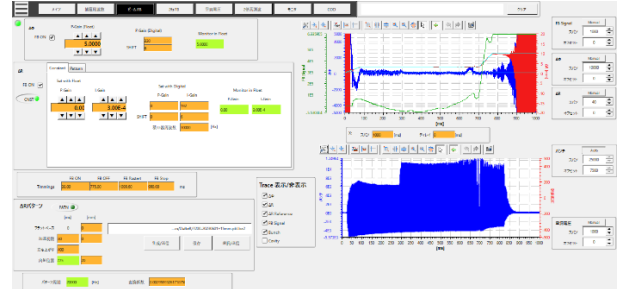


図 3 ビームフィードバック調整画面

結言

FPGA を用いてデジタル化されたシンクロトロンの新高周波加速制御系のビームテストを重ねて、2022 年度中に通常運転の障害となる不具合の修正は完了した。オペレーションインターフェースソフトウェアも通常運転に必要な機能は開発できた。2023 年度は、運転員による試運転を通じて更なる改良を行うとともに、新システムでのシンクロトロンの通常運転を目指す。

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) <https://controlsystemstudio.org>
- 6) <https://github.com/caproto/caproto>
- 7) <https://github.com/paulscherrerinstitute/NetChannelAccess>

2.6.2. 加速器利用分析技術の開発・高度化

2.6.2.1

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

Study on Development of Operando Observation Technique of Lithium Ion Migration at Interface Between
Electrode and Solid Electrolyte in Lithium Ion Batteries Using Time-of-Flight Elastic Recoil Detection

土屋文*1、高廣克己*2、鈴木耕拓*3

Bun TSUCHIYA, Katsumi TAKAHIRO and Kohtaku SUZUKI

Abstract

The migrations of lithium (Li) in multi-layers thin films of Au/LiCoO₂, which were deposited onto one face of Li_{1.4}Ti₂Si_{0.4}P_{2.6}O₁₂-AlPO₄ (LATP) solid-state electrolyte substrates as cathode current collector/positive electrode, were *in-situ* observed using time-of-flight elastic recoil detection (ToF-ERD) after charging at various voltages of 1.80 and 2.20 V. The ToF-ERD spectra revealed that the Li concentration inside LiCoO₂ around the LiCoO₂/LATP interface reduced with increasing the charged voltages and became higher than that near the Au/LiCoO₂ interface above 1.86 V. The Li gradient region was approximately 30±10 nm depth from the LiCoO₂/LATP interface. In addition the Li deficient region with the reduction of approximately 10% was produced inside LATP around the LiCoO₂/LATP interface with approximately 150±10 nm depth.

要約

LiCoO₂を正極、LATPを固体電解質とした全固体Li⁺イオン電池(Au/LiCoO₂/LATP/Pt)試料を作製し、試料に1.80 Vおよび2.20 Vの電圧を15分間印加した後、9 MeVのCu¹⁰⁺イオンをプローブビームとしたToF-ERD法によって電圧印加前後における試料中のLi濃度を計測した。充電されたLiCoO₂正極中のLi濃度は、Au側の約半分の領域において電圧の増加とともに減少するが、1.86 V以上ではAu/LiCoO₂界面近傍より高くなることが分かった。LiCoO₂/LATP界面から約30±10 nmの領域において残留することがわかった。また、界面から約150±10 nmの領域におけるLATP中のLi濃度は、約10%程度減少した。この結果から、ToF-ERD法を用いることでLiCoO₂正極中のLi⁺イオンがLATP中の負極へ充電により駆動される様子をその場で観測することを可能とし、LiCoO₂/LATP界面近傍に生じるLi濃度勾配は、正極および負極間のLi⁺イオン挙動に影響を与えることが示唆された。

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⁺イオン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、二次電池内の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、ToF-ERD法を利用して、正極、固体電解質内および正極/固体電解質界面の印加電圧に対するLi濃度分布の変化を計測するとともに、正極/固体電解質界面におけるLi⁺イオン移動機構を解明することを目的とした。

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、約150 nmのリチウム(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 Auおよび約16 nm Ptを正極およびLATP側のそれぞれの電極とした全固体のLi⁺イオン電池(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飛行時間型反跳粒子検出法(ToF-ERD; Time-of-Flight Elastic Recoil Detection)法によって、室温および真空において1.8および2.2 Vの電圧まで充電された試料のAu側の構成元素およびLi濃度分布が測定された。

結言

LiCoO₂正極中のLi濃度はAu側から約30 nmの領域において電圧の増加とともにほぼ一様に約35および70%まで減少するが、LiCoO₂/LATP界面から約30 nmの領域では残留することがわかった。さらに、LATPにおいて約10%程度のLi濃度欠損がLiCoO₂/LATP界面から約150 nm程度の領域に生じることも判明した。これらのLi濃度勾配は、正極から負極、負極から正極へのLi⁺イオンの移動に影響を与えることが考えられる。

*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

TOF-ERDA を用いた膜中酸素量の解析に向けた DLC 膜の膜厚制御
Initial Study for Analysis on Oxygen Content in DLC Films Using TOF-ERDA針谷 達^{*1}、鈴木耕拓^{*2}

Toru HARIGAI and Kohtaku SUZUKI

Abstract

The deposition rate of DLC films fabricated using the CO RF plasma CVD method with different He gas flow rate was investigated. The DLC deposition rate decreased with an increase in He gas flow rate.

要約

He ガス混合量の異なる CO RF プラズマ CVD 法における DLC 成膜速度を明らかにした。He 混合量が増加するほど、成膜速度は低下した。

緒言

酸素を含むダイヤモンドライクカーボン(Diamond-like carbon: DLC)膜は、含有酸素量が膜の機械的・光学的特性に影響を与える可能性が示唆されている^{1,2)}。我々のこれまでの研究において、DLC 膜作製時の He ガス混合量を変えることで、DLC 膜の含有酸素量が増加する可能性を見出した。TOF-ERDA による DLC 膜中微量酸素の定量分析に向け、本研究では、同一膜厚試料の作製に必要な、異なるガス条件における DLC 成膜速度を明らかにする。

方法

Si 基板上に RF プラズマ CVD (Chemical Vapor Deposition) 法を用いて DLC 膜を作製した。炭素源ガスとして CO ガスを用いることで、酸素含有 DLC 膜を作製した。CO ガス流量を固定し、He ガス混合流量を変えた条件にて DLC 膜を作製した。作製した膜の厚さは、段差計を用いて測定した。

結果および考察

図 1 に、測定した膜厚と成膜時間から算出した DLC 膜の成膜速度を示す。CO ガスのみで作製した際の成膜速度は、13 nm/min であり、He ガス流量が増加するほど、成膜速度は低下した。He ガスを混合することで、プラズマ中には He イオンが生成される。セルフバイアス電圧によって加速された He イオンが堆積した膜に衝突することで、スパッタリングによって堆積膜をエッチングし、成膜速度が低下したと考えられる。

今後について

各ガス条件における DLC 成膜速度の基本情報が得られたことで、同一膜厚試料の作製が可能になった。今後は、同一膜厚試料を用いることで、TOF-ERDA による DLC 膜中の微量酸素の定量分析を検討していく。

参考文献

- 1) P. Safaie, *et al.*, *Diamond Relat. Mater.*, 70, 91 (2016)
- 2) P. Safaie, *et al.*, *J. Alloys Compd.*, 672, 426 (2016)

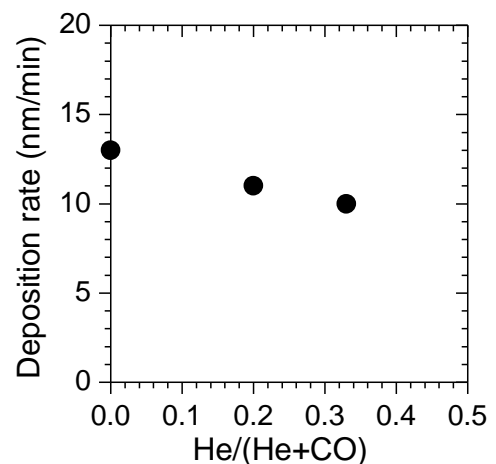


図 1 DLC 成膜速度

^{*1}豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・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豊橋技術科学大学と共同で実施したものである。本研究は、JSPS KAKENHI Grant Number JP 21K13908 の助成を受けた。

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

重イオン照射によりジルコニウム合金中に形成された転位ループと水素の相互作用
Interaction of Hydrogen and Defect Clusters Formed by Heavy Ion Irradiation in Zr Alloys安永和史*¹、渡辺英雄*²

Kazufumi YASUNAGA and Hideo WATANABE

Abstract

Interaction between hydrogen and defect clusters formed by heavy ion irradiation in Zircaloy-2 and Zircaloy-4 were investigated. Vacancy type dislocation loops were formed only in Zircaloy-2. Additional hydrogen ion irradiation increased the contrast of vacancy type dislocation loops. This phenomenon suggests that the hydrogen atoms are trapped vicinity at vacancy type dislocation loops and leads to the difference in the amount of hydrogen atoms accumulated in Zircaloy-2 and Zircaloy-4 at higher burnup.

要約

重イオン照射により照射欠陥を導入したジルカロイ2及びジルカロイ4の試料に対して、水素イオンを重畳照射し、照射欠陥と水素の相互作用について調査した。その結果、ジルカロイ2でのみ形成された空孔型の転位ループの近傍に水素が捕獲されたと示唆される現象が観察され、両合金での水素吸収の程度の違いに影響していると考えられた。

緒言

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。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起因する照射欠陥を形成したり、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する。水素の吸収は、Zr合金中での水素化物の形成につながり、高燃焼度燃料においては燃料被覆管が脆化する問題がある。水素の蓄積挙動は照射欠陥の形成により影響され燃焼度に依存すると考えられる。沸騰水型及び加圧水型の軽水炉で使用されているZr合金であるジルカロイ2(Zry-2)及びジルカロイ4(Zry-4)において、中性子照射による弾き出し損傷が引き起こす照射欠陥の形成を模擬するために、タンデム型加速器を用いた重イオン照射を行った。水素の吸収を模擬するためには、マイクロ波イオン注入装置を用いた水素イオン照射を行った。高燃焼度に対応する弾き出し損傷を重イオン照射により導入したZr合金に対して、水素を重畳照射することにより、照射欠陥と水素の相互作用に関する知見を得ることを目的とし、本報告ではZry-2で得られた結果を中心に記す。

成果の概要

実験に用いたZry-2及びZry-4試料は、圧延により厚みを100 μm にした板材を直径3mmの円盤形に打ち抜き、 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-2及びZry-4の化学組成を表1及び2に示す。まず、Zry-2に対して重イオン(Niイオン)を高燃焼度に対応する弾き出し量まで照射し、弾き出し損傷を与えた。重イオン照射は、九州大学応用力学研究所に設置されたタンデム型加速器を用い試料温度400°Cで3.2 MeVのNi³⁺イオンを最大弾き出し損傷量が30 dpaとなるように照射した。その後、水素イオンを重畳照射した。水素イオンは、(公財)若狭湾エネルギー研究センターに設置されたマイクロ波イオン注入装置を用い、30 keVのH₂⁺イオンを室温で照射量 2.5×10^{21} ions/m²照射した。水素イオンの入射方向は、厚み約100 nmの膜面に垂直方向である。

表1 ジルカロイ2(Zry-2)の化学組成

Zry-2	Sn	Fe	Cr	Ni	Zr
wt.%	1.38	0.15	0.09	0.05	Bal.

表2 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.

*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。

試料の微細組織の観察には、(公財)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、重イオン照射により Zry-2 試料の表面からある深さまで弾き出し損傷が生じた領域を集束イオンビーム(FIB)加工により断面薄膜化した微小薄片に対して、さらに水素イオンを重畳照射した微細組織の STEM 明視野像である。重イオンの入射方向は、図 1 の上部の試料表面に向かう方向で、弾き出し損傷が生じる最大深さは試料表面から約 2.5 μm である。一方、水素イオンの入射方向は、紙面に垂直方向である。その理由は、30 keV の H_2^+ イオンを Zr に照射した場合の水素注入が生じる最大深さは約 250 nm であり、FIB 加工による薄膜の厚み約 100 nm 全体に水素を注入可能にするためである。

図 2 は、重イオン照射直後(a)及び重イオン照射後に水素イオンを重畳照射後(b)の同一領域を観察し比較した STEM 明視野像である。点線で囲まれた領域に存在する複数の結晶粒内には、重イオン照射により平行に並んだ直線状の黒いコントラストを示す照射欠陥が形成されている(a)。これらの照射欠陥は、さらに水素イオンを照射すると、そのコントラストが増大し明瞭に観察された(b)。

図 3 は、図 2 で観察された照射欠陥の存在する結晶面を調査した結果である。図 3a は TEM 暗視野像で、白いコントラストを示す転位ループが水平方向に並んで観察されている。制限視野電子線回折像の解析により、図 3a の水平方向に対応する面は六方晶構造の Zr 合金の底面であると同定された。六方晶の底面は、図 3b において黄色の面に対応しており、この面上に形成される転位ループは空孔型であると考えられる。図 2b において、水素イオンの照射により転位ループのコントラストが増加した原因は、空孔型の転位ループの近傍に水素原子が捕獲されたことを示していると考えられる。

一方、Zry-4 試料では、空孔型の転位ループは同一照射条件で形成されず、その結果として母相中に水素原子が捕獲される量が低減される可能性が示唆される。

一方、Zry-4 試料では、空孔型の転位ループは同一照射条件で形成されず、その結果として母相中に水素原子が捕獲される量が低減される可能性が示唆される。

一方、Zry-4 試料では、空孔型の転位ループは同一照射条件で形成されず、その結果として母相中に水素原子が捕獲される量が低減される可能性が示唆される。

結言

高燃焼度燃料に対応する弾き出し損傷を与えた Zry-2 には空孔型の転位ループが形成され、その近傍に水素が捕獲されたと示唆される現象が観察された。Zry-4 では同様の現象は観察されておらず、両合金での燃焼度の増加に伴う水素吸収の程度の違いに影響していると考えられる。

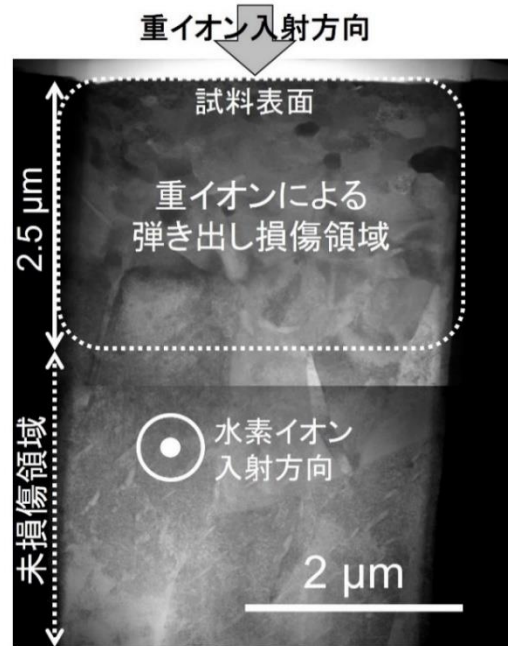


図 1 重イオン照射後に水素イオンを重畳照射した Zry-2 の断面微細組織。

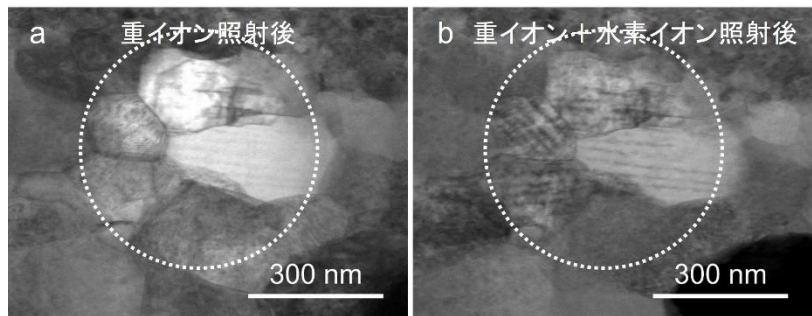


図 2 重イオン照射により Zry-2 に形成された照射欠陥のコントラストの水素イオン重畳照射による増大を示す STEM 明視野像。

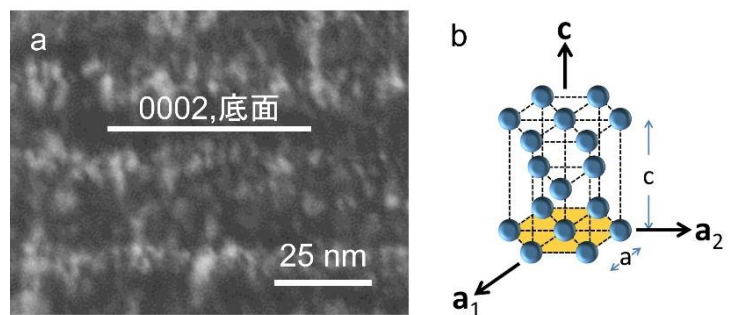


図 3 重イオン照射及び水素イオン照射後の Zry-2 中の照射欠陥(空孔型転位ループ)の存在する結晶面。

2.6.3.2

動的変形観察手法を用いた照射硬化量測定技術の高度化

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

福元謙一*1、石神龍哉*2

Ken-ichi FUKUMOTO and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

A method for estimating irradiation-induced hardness by computer simulation using a reaction kinetics model of the point defect formation process was investigated for the development process of irradiated microstructures. Based on the experimental conditions used to observe the microstructure of and measure the hardness of ion-irradiated stainless steel model alloys, the reaction kinetics calculation simulated the process of the development of the radiation damage microstructure. Under the assumption that the main process of irradiation hardness increase starts from an interstitial spot defect, the defect microstructure development process was also simulated. The hardening increase derived from the simulation was used for the verification of the hardening model.

要約

照射組織の発達過程を点欠陥形成過程の反応速度論モデルを用いて計算機実験による照射硬化量推定手法の検討を行った。イオン照射された材料の組織観察や硬化量の測定などで用いた実験条件から、反応速度論を用いて照射欠陥損傷組織の発達過程を模擬し、硬化の主体を格子間型欠陥として欠陥組織の発達過程について計算した。得られた結果を用いて照射硬化量を算出して硬化モデルの検証を行った。

緒言

点欠陥が動くことのできる温度で照射が行われたり、低温照射後点欠陥が動ける温度で焼鈍が行われたりすると、照射によって導入された格子間原子、原子空孔は拡散し、消滅、集合体の形成など種々の反応を起こす。それにより生じた照射硬化は、軽水炉における主要な高経年化課題の一つである照射誘起応力腐食割れの一因と考えられているため、照射硬化量を精度良く評価することが重要である。本研究では点欠陥の挙動について予測を試みるためにステンレス鋼モデル合金に対する反応速度論による計算を行った。また得られた損傷組織情報から照射硬化量を求め、損傷組織発達と照射硬化の相関性について知見を得た。

実験方法

本実験で用いた反応速度論プログラムは、京都大学複合原子力科学研究所から提供を受け本研究の仕様条件に合わせて調整を行った¹⁾。具体的には点欠陥反応速度論プログラムを用い、点欠陥、点欠陥集合体の挙動について解析を行った。令和3年度の研究においてステンレス鋼における点欠陥集合体挙動解析を行った結果、照射欠陥のサイズ分布と数密度変化から適正なパラメータを選定することができ、格子間型欠陥の移動活性化エネルギー E_m を0.3-0.4 eV、空孔型欠陥の移動活性化エネルギー E_v を1.2 eVとした。令和4年度では長時間側の計算を実施し、実際のイオン照射試料で得られる損傷組織パラメータとの比較を通してモデルの妥当性を検証し、照射硬化評価ができるか検討した。点欠陥反応速度論プログラムを用いて、点欠陥集合体のサイズ分布を計算した。計算時間は100万秒までの計算を実施した。100万秒はおよそ11.5日相当であり、照射速度が 3.7×10^{-8} dpa/sであり全はじき出し損傷量は0.04 dpaに相当する。

実験結果及び考察

本研究では290°Cでの計算を試みたが、計算が発散したため100万秒まで計算できる範囲での最高温度の504 K (231°C)で計算した。計算では欠陥集合体のサイズとして二次元の円板状の欠陥集合体を仮定してその直径を求めた。これはステンレス鋼の格子間型欠陥集合体は主にフランクループであり、稠密面である{111}面上の一層の原子面で構成されるため次の式で欠陥サイズとした。

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{6}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{N \cdot \pi r_{Fe}^2}{\pi}} \quad (\text{式 1})$$

*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。

ここで r_{Fe} はステンレス鋼の格子定数から求められる原子半径であり、 N は欠陥集合体の構成欠陥数を表す。稠密構造をとるため欠陥数と原子体積の積に空間充填率である $\sqrt{2}\pi/6$ を乗じている。

空孔型欠陥集合体では高密度の点欠陥が内部に蓄積され、100 秒程度ではすべて 10 個以下の欠陥数によるクラスタ形成によって構成された。これは 1 nm 以下であり転位芯サイズよりも小さい ($< 5b$: b はバーガースベクトルでありステンレス鋼で 0.25 nm) ので硬化には強く寄与しないと考えられる。100 万秒においても数密度およびサイズ分布にほとんど変化が見られず、空孔型集合体は点欠陥形成場においてはほとんど成長しないことを示し、空孔型欠陥による硬化への寄与も小さいと推定される。

格子間型欠陥集合体での照射下での発達過程は空孔型集合体に比べて大きく変化していた(図 1)。100 秒の照射初期では 130 個の欠陥数のクラスタ(サイズ 3.3 nm)の密度は、照射により形成されて残存する単独格子欠陥濃度よりも 100 倍の欠陥数密度を示し、格子間原子の移動に伴う格子間型クラスタの形成と成長が優先的に進んでいることがわかる。1 万秒まで時間が進むと格子間型欠陥の成長は進み、160 個の欠陥数のクラスタ(サイズ 3.7 nm)が各クラスタの数密度で最大を示した。100 万秒においては臨界サイズを超えた格子間型クラスタは大きく成長し、25000 個の原子数(サイズ 45 nm)によって構成されるクラスタまで安定的に成長することを示した。照射下においては欠陥集合体同士の近接による弱肉強食的な合体・消滅(大きな欠陥集合体のみが成長し小さな欠陥集合体は消滅していく過程)が生じ、Ostwald ripening(オストワルド成長)による、より大きな欠陥集合体形成と数密度の低下を引き起こしていくことになる。

転位論における分散粒子強化機構による障害物モデルを用いて格子間型欠陥集合体の硬さの寄与を求めると²⁾。式 2 で示された。オロワン機構による障害物モデルにおいて異なる欠陥の硬さの寄与を次式で求めた。

$$\Delta\sigma = M\mu\alpha b \sum_i \sqrt{N_i\rho_i} \quad (\text{式 2})$$

ここで M はテイラー因子、 μ は剛性率、 N_i は障害物の数密度、 ρ_i は障害物の直径、 i は障害物の種類を表す。障害物強度因子 α の値は本研究で得られた欠陥サイズから推定される 0.66 の値を採用する³⁾。得られた降伏応力増加分に相当する硬さの図を図 2 に示す。100 秒から 1 万秒にかけて降伏応力は増加しているが、100 万秒ではほぼ 1 万秒の硬さと同じ値をとる。ステンレス鋼ではイオン照射や中性子照射において 0.01 から 0.1 dpa の間で時間に対して比例する形で降伏応力や硬さが増加し、0.1 dpa から 1 dpa に至る過程で降伏応力は数 100 MPa 増加して飽和する傾向がある事が知られている⁴⁾。計算機実験における損傷量は 0.04 dpa が最大線量であるため、定量的には一致しないが、硬さの傾向と損傷組織の対応は合理的な一致を見ており、計算機実験による損傷組織と硬さの相関はとれていると考えられる。

結言

照射組織の発達過程を点欠陥形成過程の反応速度論モデルを用いて計算機実験による照射硬化量推定手法の検討を行った。イオン照射された材料の組織観察や硬化量の測定などで用いた実験条件から、反応速度論を用いて照射欠陥損傷組織の発達過程を模擬し、硬化の主体を格子間型欠陥としてその欠陥組織発達過程について計算した。得られた結果を用いて照射硬化量を算出して硬化モデルの検証を行った。

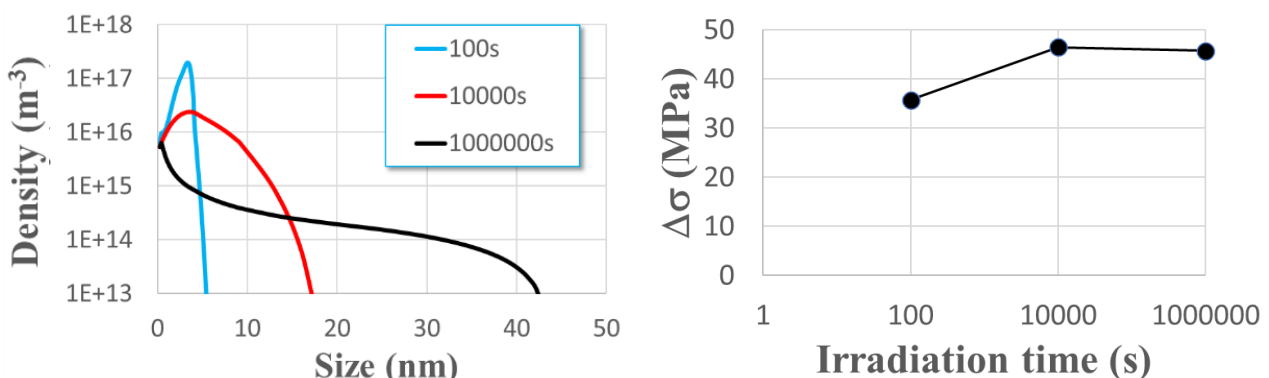


図 1(左) 各照射時間における格子間原子型欠陥集合体の直径に対するサイズ分布

図 2(右) 計算機実験で得られた格子間原子型欠陥集合体分布から求めた硬さへの寄与の照射時間依存性

参考文献

- 1) 義家敏正、金属、77、17 (2007)
- 2) G. S. Was, "Fundamentals of Radiation Materials Science", Springer, 631 (2007)
- 3) L. Tan, J. T. Busby, J. Nucl. Mater., 465, 724 (2015)
- 4) 仲田清智 他、日本金属学会誌 52、1023 (1988)

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 I. KOBAYASHI and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

Tungsten will be used as the plasma facing components in the fusion reactors. In this study, energetic proton beam irradiation was carried out into tungsten samples to induce irradiation defects. In order to evaluate the influence of irradiation defects on deuterium permeation behavior, deuterium gas-driven permeation experiments were conducted. Due to trapping of diffusing deuterium, it took longer to achieve a steady-state deuterium permeation rate. Moreover, the decrease in the deuterium permeation rate following the removal of deuterium gas on the upstream side was delayed due to the process of deuterium detrapping from the irradiation defects.

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イオンビーム照射により照射欠陥を導入し、重水素透過試験により重水素透過速度に及ぼす照射欠陥の影響を評価した。照射欠陥による拡散重水素の捕獲のため重水素透過速度が定常状態に到達するまでの時間が長くなる、重水素が照射欠陥から脱捕獲することで重水素ガス供給停止後に透過速度の減衰速度が低下するなどの影響が観察された。

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。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、タングステン中の照射欠陥蓄積量評価を目的として、プロトンビーム照射により欠陥導入したタングステンについて重水素透過試験を行った。

実験

本実験の試料には、ニラコ社製のタングステン箔(厚み: 25 μm)を用いた。この試料を $\phi 12$ mm に切り出し、核融合科学研究所設置の水素同位体吸蔵透過試験装置の真空下加熱部に導入した。真空下加熱部は、片側封止石英管がセラミック管状炉に挿入されている構造で、片側封止石英管は ICF70 規格で真空系に接続されており、 $\sim 5 \times 10^{-6}$ Pa 程度の真空下での加熱が可能である。試料は 900°C で 6 時間加熱処理され、冷却後取り出され、若狭湾エネルギー研究センターでのプロトンビーム照射に使用された。

プロトンビーム照射は、エネルギーが 4.5 MeV、 200°C で行われた。平均電流値は 0.73 μA で、照射時間は約 $30,000$ 秒であり、この条件から、はじき出し損傷数は 1.3×10^{-5} dpa であると評価された。

試料は冷却後、核融合科学研究所に持ち込み、水素同位体吸蔵透過試験装置の水素同位体透過試験部に導入された。本試験部を図1(a)に示す。水素同位体透過試験部は二重管構造になっている。内側配管はステンレス製で、VCR 継手により試料を緊縛している。外側配管は石英ガラス製で、その周囲をセラミックファイバーヒーターで囲っている。内側・外側配

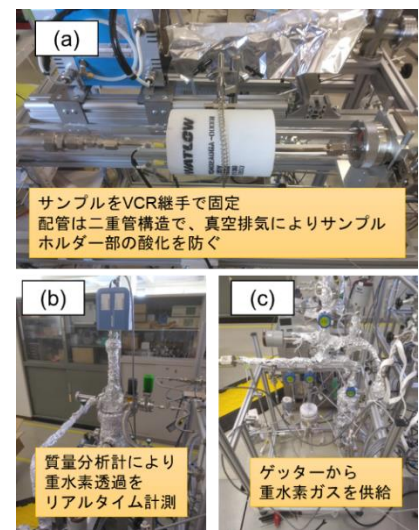


図1 水素同位体吸蔵透過試験装置の外観

^{*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・ヘリカル研究部、^{*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。

管はそれぞれ別系統のターボ分子ポンプで排気されている。試験では、ヒーターによる加熱処理の後、試料の片側(上流側)に重水素ガスを導入し、曝露面の裏側(下流側)から脱離した重水素ガスを質量分析計(図1(b))にて計測する。内側配管内の上流側試料近傍に熱電対を挿入しており、試験中の試料温度をほぼ正確に計測する。また、供給する重水素ガスは V-Zr-Fe 系合金(ゲッター)に吸蔵させた重水素を、合金を加熱することで脱離させ、圧力を制御した。この際、試験の開始直前まで試料は真空排気した状態で静置し、温度及び重水素ガス圧が所定の値になった後、試料直前のバルブを開とすることで重水素ガスを試料上流側に瞬時に供給し、これを試験開始とした。実験温度は 700-1000 K の範囲で実施した。

結果・考察

図 2 は加熱処理済み試料及び未処理試料の重水素透過係数の温度依存性である。本試験では、試験温度は低いものの、重水素透過係数は多くの文献値データの外挿値とほぼ一致しており、これにより、本試験装置及び質量分析計の校正に問題は無いことが確認された。

加熱処理のみを行ったタングステン試料の重水素ガス透過試験開始に伴う重水素透過速度の時間変化を図 3 に示す。試験温度は 773 K、重水素ガス圧は 67 kPa である。透過試験開始から速やかに重水素透過が観察され、定常状態に到達している。500 秒程度で透過速度が大きく減少しているのは、上流側の重水素ガスを排気したことが理由である。続いて、プロトンビーム照射したタングステン試料の 773 K、重水素ガス圧 53 kPa における重水素ガス透過試験結果を図 4 に示す。図 4(a)は試験開始直後からの重水素透過速度変化を、図 4(b)は定常に到達後、上流側重水素ガスを排気した際の重水素透過速度の変化に注目した図である。図 4(a)と図 3 を比較すると、未照射試料と比べてプロトンビーム試料では透過の開始と定常に到達するまでの時間が大幅に伸びていることが分かる(横軸のスケールが異なることに注意されたい)。また、上流側重水素ガス排気後の重水素透過速度の減衰も遅くなっている。このことは、タングステン中を拡散する重水素と照射欠陥の相互作用に起因すると考えると理解できる。すなわち、透過試験開始後、タングステン中の拡散可能な重水素が照射欠陥により捕獲され濃度が減少することで、見かけ上、重水素の拡散速度が低下した結果、定常状態に到達するまでの時間が伸びたと考えられた。また、定常状態における重水素透過速度は、各タングステン試料で差異が見られないことは、重水素により照射欠陥が完全に占有されたことを表している。

さらに、上流側重水素ガス排気により、タングステン中の拡散可能な重水素濃度が減少するため、照射欠陥からの重水素脱捕獲が促進されることで、重水素透過速度が緩やかに減衰する様子が確認されたと考察された。

結言

本研究では、重水素透過試験を通じて、照射欠陥による水素同位体の捕獲・脱捕獲現象の影響を可視化することに成功した。これらの重水素透過速度変化のデータを解析すると共に、重水素ガス吸蔵後の試料を加熱し重水素の脱離挙動を調べることで、照射欠陥密度の評価を行うことを計画している。

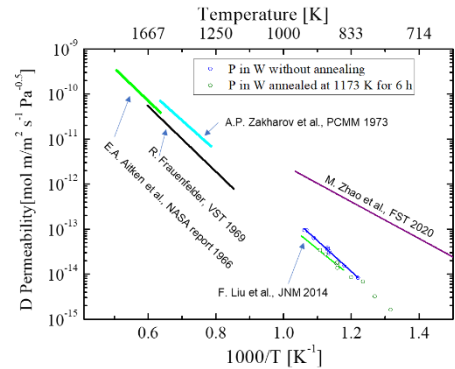


図 2 未照射タングステン試料における重水素透過速度の温度依存性

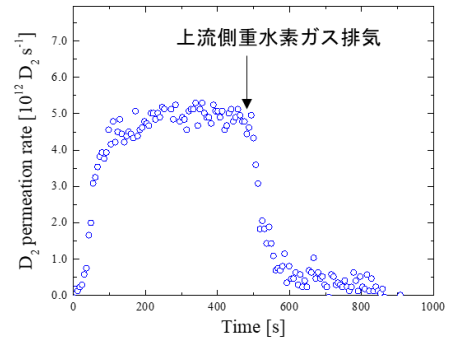


図 3 未照射タングステン試料における重水素透過速度の変化

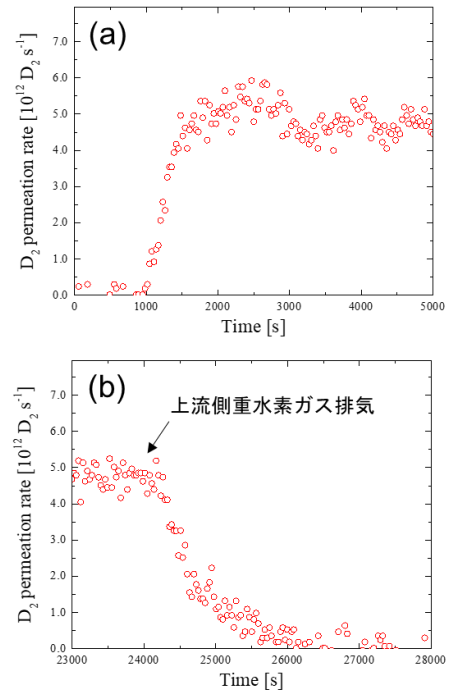


図 4 プロトンビーム照射試料における重水素透過速度の変化

2.6.3.4

重イオン照射されたジルコニウム合金の水素放出挙動
 Hydrogen Desorption Behavior of Heavy Ion Irradiated Zirconium Alloy
 安永和史*1、渡辺英雄*2
 Kazufumi YASUNAGA and Hideo WATANABE

Abstract

The effect of radiation defects on hydrogen desorption behavior of heavy ion irradiated Zry-4 was investigated. Deuterium gas release observed below 200°C was probably due to the formation of interstitial dislocation loops.

要約

Zry-4 中の照射欠陥の存在が与える水素蓄積への影響について昇温脱離ガス分析(Thermal Desorption Spectrometry; TDS)法を用いて調査した結果、200°C未満の温度領域において水素放出量が顕著に増大し、転位ループの形成に起因した現象と考えられた。

緒言

ジルコニウム合金は、軽水炉の燃料被覆管の材料として利用されている。運転中には、中性子照射による弾き出し損傷が引き起こす照射欠陥や水との反応により吸収される水素が合金中に蓄積される。今回、未照射試料と重イオン照射試料に対して同一条件で重水素を蓄積させた後に TDS 分析により照射欠陥の水素蓄積に与える影響を調査した。

成果の概要

図1は、タンデム型加速器を用いて3.2 MeVのNi³⁺イオンを室温において3 dpa照射したZry-4試料及び未照射試料に対して、30 keVのD₂⁺イオンを室温において3×10²¹ ions/m²の同一条件で照射後のTDS法により得られたD₂ガスの放出挙動である。どちらの試料においても、300°C未満及び500°C以上の2つのピークが存在している。重イオン照射後の試料では、未照射試料と比較して2つのピーク温度が共に低温側に約160°C遷移している。さらに、重イオン照射後のZry-4試料では、赤い破線で囲んだ低温側の100°C付近のピークが鋭く明瞭に観察されている。重イオンを3 dpa照射したZry-4試料の微細組織は、弾き出し損傷により形成された格子間原子が二次元的に集合したa成分転位ループ及びそれが成長し高密度の転位網を形成していることがTEM観察から判明している。すなわち、100°C付近のD₂ガスの放出は、格子間原子集合体である照射欠陥に捕獲された重水素の離脱に起因したピークである可能性が高いと考えられる。

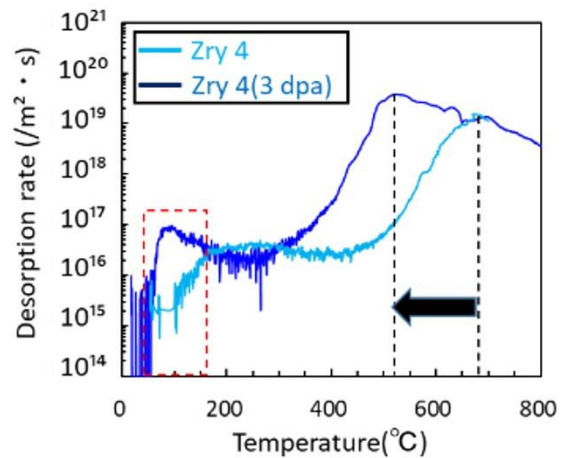


図1 未照射のZry-4試料及び重イオンを室温にて3 dpa照射したZry-4試料にD₂⁺イオンを室温にて3×10²¹ ions/m²照射後のD₂ガスの脱離挙動。

結言

重イオン照射されたZry-4試料のD₂ガス放出挙動を未照射試料の挙動と比較した結果、重イオン照射されたZry-4試料では、D₂ガスの放出量が100°C付近において増大する現象が観察された。重イオン照射により照射欠陥として転位ループさらには転位網が形成されており、これらの格子間原子集合体の存在がD₂ガスの放出量の増大に影響を与えたと考えられる。

*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国立大学法人九州大学
 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九州大学と共同で実施したものである。

2.6.4. 材料技術の開発

2.6.4.1

プロトン照射による鉄系超伝導薄膜の臨界電流特性の増強に関する研究

Improvement of Critical Current Properties of Iron-Based Superconducting Films Using Proton Irradiation

尾崎壽紀*1、山下朔*1、掛谷一弘*2、石神龍哉*3

Toshinori OZAKI, Saku YAMASHITA, Itsuhiro KAKEYA and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

We present the effect of 10 keV protons (fluence: 7.0×10^{14} , 2.0×10^{16} ions/cm²) irradiation on superconducting properties of iron-chalcogenide FeSe_{0.5}Te_{0.5} thin films. The 10 keV proton irradiation with the fluences of 7.0×10^{14} and 2.0×10^{16} ions/cm² suppresses superconducting transition temperature T_c by 0.9 and 1.9 K, respectively. The 10 keV proton irradiation with 7.0×10^{14} ions/cm² fluence yields the critical current density J_c (4.2 K) improvement of about 40 % at 6–12 T with respect to the pristine film. The transmission electron microscopy (TEM) images of the proton-irradiated film reveal the possible nature of the small irradiation defects, resulting in the J_c enhancement. These results indicate that 10 keV proton irradiation could be effective to enhance the in-field performances of iron-based superconducting films.

要約

10 keV のプロトン(H⁺)照射(照射量: 7.0×10^{14} , 2.0×10^{16} ions/cm²)が鉄系超伝導 FeSe_{0.5}Te_{0.5}(FST)薄膜(膜厚 ~100 nm)の超伝導特性に与える影響について調べた。照射量 7.0×10^{14} 、 2.0×10^{16} ions/cm² において、臨界温度 T_c は共に低下し、照射量増加に伴い T_c が減少した。また、 7.0×10^{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、照射前より自己磁場で約 10%低下したが、3 T 以上において約 40%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、これらが照射後の J_c の向上に起因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 薄膜の磁場中での 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、磁場環境下における臨界電流密度 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)を向上させる手法の一つとしてイオン照射がよく知られている。従来は、数百 MeV 以上の高エネルギー重イオン照射によって形成される 1 次元非晶質トラックを利用した J_c 向上の研究が数多く行われてきたが、最近では、数 MeV 以下の低エネルギーイオン照射が注目されている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 のプロトン照射が FST 薄膜の超伝導特性に及ぼす影響について検討を行った。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。

実験結果

図 1 に照射前 FST 薄膜とエネルギー 10 keV、照射量(a) 7.0×10^{14} 、(b) 2.0×10^{16} ions/cm² でプロトン照射した FST 薄膜における照射前後の電気抵抗率の温度依存性を示す。また、図 1(a)及び 1(b)の挿入図は、それぞれ T_c 付近の拡大図を示す。照射量 7.0×10^{14} 、 2.0×10^{16} ions/cm² において、 T_c がそれぞれ 0.9、1.9 K 低下し、照射量増加に伴い T_c が減少することがわかった。照射前後の両方の薄膜で、常伝導領域において上に凸な曲線が観察された。また、照射後は照射前より常伝導領域における電気抵抗率がわずかに上昇している。これは、照射欠陥及びその周りの歪が影響していると考えられる。

図 2 に照射前 FST 薄膜と照射エネルギー 10 keV、照射量 7.0×10^{14} ions/cm² でプロトン照射した FST 薄膜の (a) 4.2 及び 10 K における $J_c(H//c)$ の磁場依存性、(b) (a)から算出した J_c enhancement の磁場依存性を示す。ここで、 J_c enhancement = $(J_c^{\text{after}} - J_c^{\text{before}}) / J_c^{\text{before}}$ で定義した。 7.0×10^{14} ions/cm² 照射した FST 薄膜は、照射前の薄膜と比較して 4.2 及び 10 K での $J_c(H//c)$ は 0.5 T 以下の磁場では低下しているが、0.5 T 以上の磁場では高い値を示した。4.2 K においては、 $J_c(H//c)$ enhancement は約 3 T 以上の磁場で約 40%向上した。0.5 T 以下の磁場において $J_c(H//c)$ が低下しているのは、照射後の T_c が低下していることが原因と考えられる。一方、0.5 T 以上の磁場においては、イオン照射によって形成された欠陥が、ピン止め点として働いているため $J_c(H//c)$

*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、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関西学院大学および京都大学と共同で実施したものである。

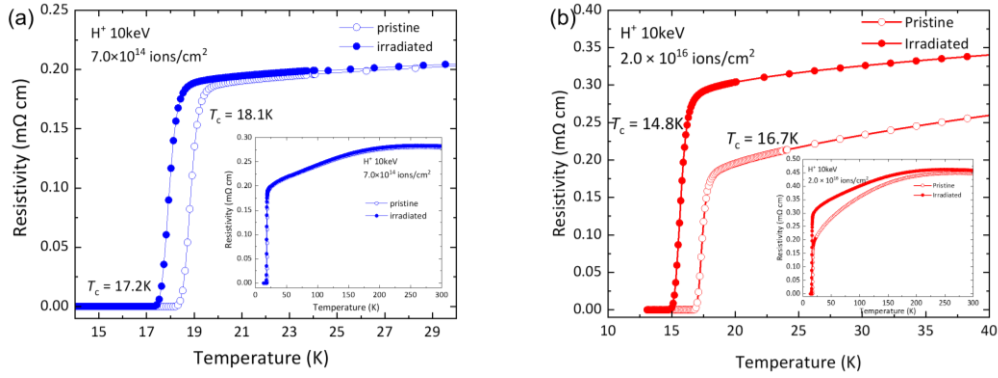


図1 照射前FST 薄膜とプロトンに10 keVで(a) 7.0×10^{14} 、(b) 2.0×10^{16} ions/cm²照射したFST 薄膜の電気抵抗率の温度依存性.

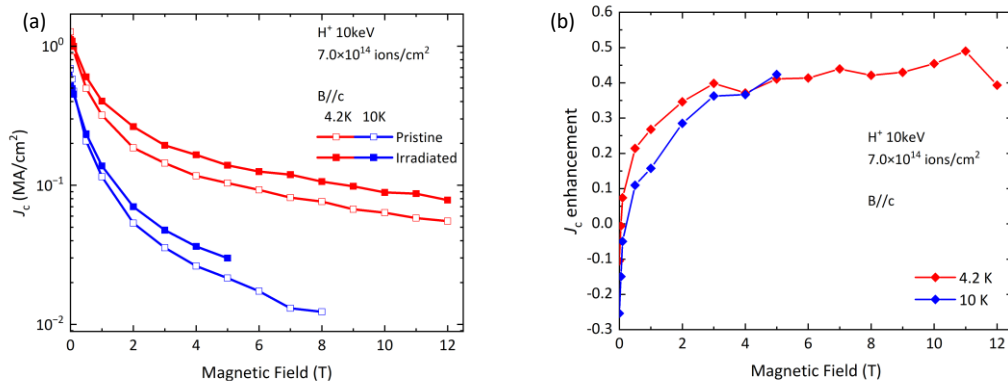


図2 照射前FST 薄膜と照射エネルギー10 keV、照射量 7.0×10^{14} ions/cm²でプロトン照射したFST 薄膜の4.2及び10 Kにおける(a) $J_c(H//c)$ の磁場依存性と(b) J_c enhancementの磁場依存性.

が向上したと考えられる。もう少し低い照射量で照射し、 T_c の低下を抑えることができれば、更なる $J_c(H//c)$ の向上が期待できる。

10 keVのプロトン照射によって形成された欠陥を調べるために透過電子顕微鏡(TEM: Transmission Electron Microscope)による微細構造観察を行った。図3に10 keVプロトンに 2.0×10^{16} ions/cm²照射したFST 薄膜の高倍率断面TEM像を示す。照射前FST 薄膜の断面TEM像は観察できていないが、緑の丸い点線で囲まれた部分の格子の歪んだ部分が照射によってできた欠陥だと考えられる。このような5 nm程度のサイズの格子が歪んだ部分が照射欠陥として磁束ピン止め点として働いていると考えられる。

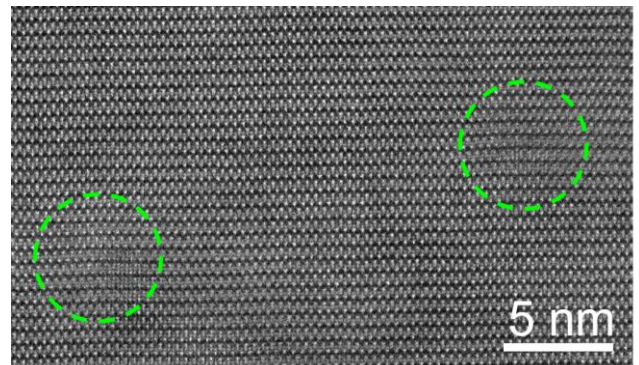


図3 10 keV H イオンを 2×10^{16} ions/cm²照射したFST 薄膜の断面TEM像.

結言

鉄系超伝導 FeSe_{0.5}Te_{0.5}(FST)薄膜にプロトン(H⁺)を10 keVのエネルギーで照射(照射量: 7.0×10^{14} 、 2.0×10^{16} ions/cm²)し、通電測定による超伝導特性の変化を調べた。プロトンにエネルギー10 keV、照射量 7×10^{14} ions/cm²照射したFST 薄膜は、照射前FST 薄膜と比較して4.2 Kでの J_c はH//cにおいては、自己磁場で約10%低下したが、磁場中で約40%向上した。断面TEM観察結果から、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と考えられる。これらの結果から、低エネルギー軽イオン照射は、FST 薄膜の臨界電流特性を向上させる有効な方法であると考えられる。また、 T_c の低下を抑えることで更なる向上が期待できる。

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)

2.6.4.2

シリコン薄膜の光の干渉による発色方法の実用化

Industrial Application of Coloring Method Using Light Interference by Silicon Thin Films

木村栄男*1、下内孝博*1、石神龍哉*2

Hideo KIMURA, Takahiro SHIMOUCHI and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

To implement a coloring method using interference of lights reflecting on and passing through silicon thin films, we have performed film formation experiments using industrial ion plating equipment. A newly introduced deposition equipment was also used. The films were formed on the surface of three-dimensional objects such as forks and spanners, and the color uniformity was tested.

要約

シリコン薄膜による光の干渉を利用した発色方法を実用化するため、実際の製品の製造に使用されているイオンプレーティング装置を用いた成膜実験を行った。新規に導入した成膜装置を用いて、フォークやスパナレンチといった立体物へのSiの成膜を行い、色の均一性を試験した。

緒言

透明な薄膜を固体表面に形成することで光の干渉により固体表面が発色する。しかしこの着色方法は見る方向によって色が変わるという欠点がある。シリコンは屈折率が4付近と大きく見る方向による色の変化が少ないため、その欠点を克服できる可能性がある。ただ、均一に着色するには膜厚を均一にする必要があり、立体物への均一な着色は困難である。本研究では、新たに導入された装置も用いて均一に着色する方法の開発を行った。

成果の概要

使用したイオンプレーティング装置φ1600(HSM1600)は縦型円筒タイプで、着色対象物を自転および公転させることで均一成膜を行っている。1号機は自転と公転のみであるが、新規に導入した2号機では自転、小公転、大公転と3段の回転機構を組み合わせたもので、さらに成膜の均一性を高めている。

図1は着色したケーキ用フォークの写真である。首部分の曲率の大きな面がやや膜厚不足になり濃い発色となった一方、ハンドル部の平面状の部分が厚く成膜され色調はやや淡くなった。図2は着色したスパナレンチの写真である。概ね視覚的均質性が確保されたので展示会に出品し、好評を博した。図3は着色した水道蛇口の写真である。形状的にはかなり困難な着色対象物であるが視覚ゾーンの広いブルー系着色ならば商品化の可能性は高いと判断された。



図1 ケーキ用フォーク



図2 スパナレンチ



図3 水道蛇口

結言

光の干渉で発色させるために従来用いられてきたチタン酸化膜に対するシリコン膜の優位性は実験的には確認されたが、多様で安定した発色技術を事業化へつなぐための最大の課題は弊社の装置の真空度が 10^{-3} Pa台と低いことで、その結果膜に酸素が入ってしまい十分に高い屈折率が得られず、酸化膜に対する優位性を確実に確保できていない点である。この装置に干渉膜加工を集中させて稼働率を高め酸素などの不純物混入対策を進めることができれば事業性が見えてくることになり、耐摩耗性、耐薬品性など反応有色膜との物性差の検討も進められると考えられる。本公募共研はこれで期間終了したが引き続き協力して課題解決を行ってゆく。

*1株式会社NCC、*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、公募型共同研究として（公財）若狭湾エネルギー研究センターが株式会社NCCと共同で実施したものである。

2.6.4.3

超強加工による微細結晶粒金属材料の創製と評価

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

安永和史*¹、加藤寛敬*²

Kazufumi YASUNAGA and Hiroataka KATO

Abstract

A burnished pure Ti disk specimen was observed by cross-sectional transmission electron microscopy. Severe plastic deformation induced nanocrystal formation whose mean grain diameter was about 110 nm at 3.3 μm in depth from the surface.

要約

純 Ti の円盤表面を回転速度 800 rpm、荷重 100 N でバニシング加工し断面組織を観察した。強度の塑性変形により、表面から約 3.3 μm の深さの領域において平均粒径約 110 nm の結晶粒が形成された。

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、金属表面を鏡面状態にする表面処理法である。この方法では外見の改善のみならず、工具との摩擦により金属表面が強度に塑性変形され、硬度・耐摩耗性・疲労強度等の機械的性質も向上する。本研究では hcp 構造の純 Ti に対してバニシング加工を施し、導入される微細組織及び硬度について調査した。

成果の概要

試料は、焼鈍した純 Ti の円盤(直径 60 mm、厚さ 5 mm、結晶粒径約 5 μm)である。バニシング加工は、超硬合金製のボール(直径 6 mm)を用い、荷重 100 N、回転速度 800 rpm、送り速度 0.01 mm/rev、加工摺動直径 40~50 mm、加工パス 1 回、大気中、室温、無潤滑の条件で行った。

図 1 は、表面から深さ約 3.3 μm の領域の微細組織を断面方向から観察した TEM 暗視野像である。摩擦方向は、矢印で示す方向である。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結晶粒で、摩擦方向に対して約 10° 右上の方向に長軸をもつ楕円形状である。

図 2 は、結晶粒の長軸長さを粒径とした場合の個数分布である。粒径は 34~250 nm の範囲に分布し、平均粒径は 111 nm であり、結晶粒のナノメートルサイズへの微細化が確認された。

バニシング加工により純 Ti の硬さは、195 HV から 209 HV に変化した。硬度上昇は約 7%と大きな変化ではなかった。昨年度の結果によると、バニシング加工により同様の微細組織が形成された Ti 合金(Ti-6Al-4V)では、約 50%硬度が上昇した。純 Ti の硬度については今後ナノインデンテーション法などの再検討が必要であると考えられる。

結言

バニシング加工した純 Ti の微細組織は表面から少なくとも 3.3 μm においてナノメートルサイズまで結晶粒が微細化した。結晶粒微細化が生じたにも関わらず、硬度変化が小さい理由は不明である。

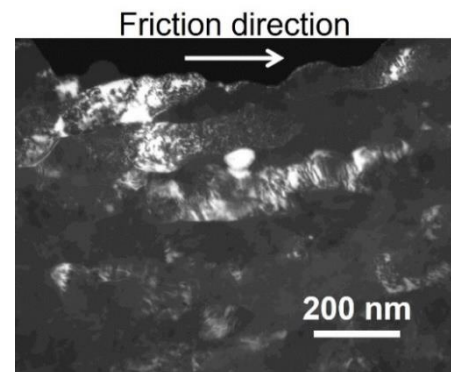


図 1 荷重 100 N、回転速度 800 rpm でバニシング加工後の純 Ti の表面から深さ約 3.3 μm の領域の断面 TEM 暗視野像

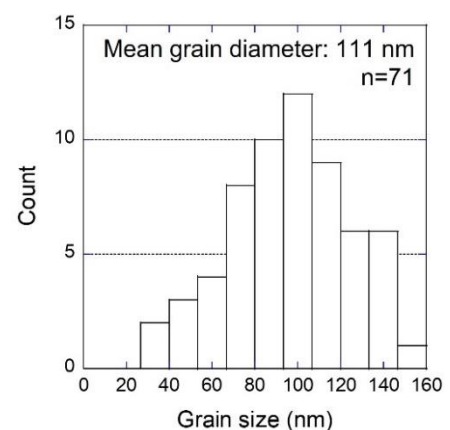


図 2 バニシング加工後の純 Ti の表面から深さ約 3.3 μm の領域に形成された結晶粒の個数分布

*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。

2.6.4.4

Ge₁₂Sb₂Te₁₅ の熱電特性と微細構造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 with stacking fault were formed uniformly in a water quenched 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。水冷により作製された Ge₁₂Sb₂Te₁₅ 中には、積層不整を伴う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されれば、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¹⁾。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、Ge₁₂Sb₂Te₁₅ 試料の熱電特性の中で特に熱伝導度に影響を与えると指摘されている欠陥の存在²⁾について調査した。

成果の概要

実験に用いた Ge₁₂Sb₂Te₁₅ 試料は、900°Cで12時間溶融、500°Cで10日間アニール後に水冷することにより作製した。得られたバルク試料は、イオン研磨法(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 水冷試料のTEM暗視野像である。白いコントラストを示す欠陥が一様に高密度に存在しており、体積密度は、 $1.4 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ と評価された。矢印で示すように、一部の欠陥には複数の平行な縞が観察されており、積層不整を伴う面欠陥であると考えられる。図1(b)は、積層欠陥の直径の分布で、5.1~86.4 nmの範囲に分布し、平均直径は16.5 nmであった。これらの欠陥の存在は、熱伝導度を低下させている可能性がある。

結言

Ge₁₂Sb₂Te₁₅ の水冷試料の微細組織は、直径数十 nm の積層不整を伴う欠陥が高密度に存在することが判明した。積層欠陥の存在は、熱伝導度に影響を与えていると考えられる。

参考文献

- 1) “Superior room-temperature power factor in GeTe systems via multiple valence band convergence to a narrow energy range”, T. Oku and A. Kosuga et al., Mater. Today Phys. 20 (2021)100404.
- 2) “Room-Temperature Pressure Induced Nanostructural CuInTe₂ Thermoelectric Material with Low Thermal Conductivity”, A. Kosuga et al., Inorg. Chem. 53(13) (2014) 6844.

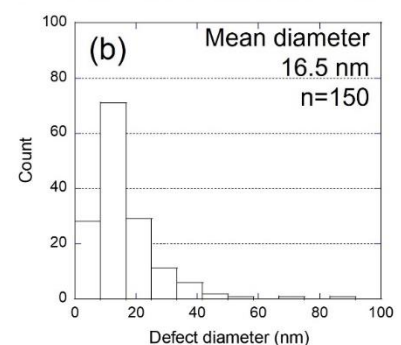
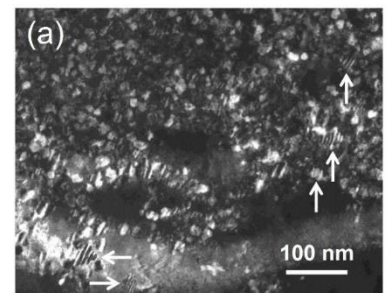


図1 Ge₁₂Sb₂Te₁₅ の水冷試料のTEM暗視野像(a)及び欠陥直径の分布(b)

*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。

2.6.4.5

マイクロスラリージェットエロージョン試験後の Ti 合金の表面状態
Surface Condition of a 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

Abstract

A micro slurry-jet erosion test was applied to a Ti alloy produced by additive manufacturing, and the eroded surface was observed by scanning electron microscopy. It is suggested that the relation between dimple diameter and crystal grain size.

要約

マイクロスラリージェットエロージョン試験後の Ti 合金積層造形材の表面を走査型電子線顕微鏡で観察し、エロージョン摩耗による表面状態を評価した。Ti 合金表面に形成された不定形の表面窪みの直径と結晶粒径の関連性を示唆する結果が得られた。

緒言

積層造形法により作製した Ti-6Al-4V 合金は、航空機エンジン部品等への適用が検討されているが、信頼性や安全性にとって微小な固体粒子によるエロージョン摩耗(以下、エロージョン)が問題になると考えられる。本研究では、福井大学で開発された固体微粒子を含む水噴流の高速投射による表面破壊に対する強度特性を高い信頼性で簡便に評価できる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)を、積層造形された Ti-6Al-4V 合金に適用して、エロージョンによる表面の状態を調査した。

成果の概要

試料は電子ビーム積層造形(Electron Beam Melting; EBM)法により作製された Ti-6Al-4V 合金製の円盤(12 mm φ、3 mm t)である。MSE 試験は、投射粒子として多角形状のアルミナ粒子(WA#320、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。図 1 は、MSE 試験後の Ti 合金表面の SEM 像である。白矢印で例示するように、破碎された金属粉の脱落により不定形の窪みが形成されている。図 2 は、窪みの長軸の長さを粒径とした度数分布であり、粒径は 0.66 μm~5.60 μm の範囲に分布し、平均粒径は約 2.24 μm と評価された。内部組織観察により測定した結晶粒の粒径は、0.73 μm~2.28 μm の範囲に分布し、平均粒径は約 1.29 μm と評価されたことから、エロージョンにより生じた窪みは、主として単一の結晶粒さらには隣接した結晶粒の剥離した結果を反映していると考えられる。

結言

積層造形により作製された Ti-6Al-4V 合金を MSE 試験後、エロージョンによる表面剥離に関して調査した結果、窪みは主として単一または隣接した結晶粒の脱落により形成されていることが示唆された。

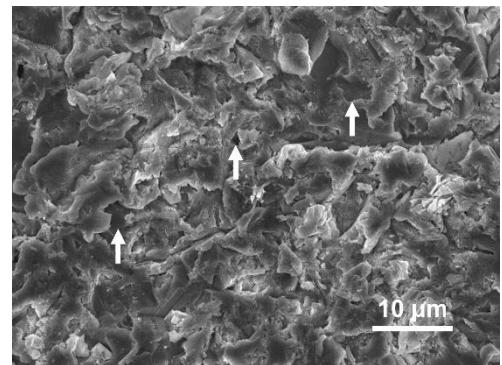


図 1 MSE 試験後の Ti-6Al-4V 合金積層造形材料の表面状態。

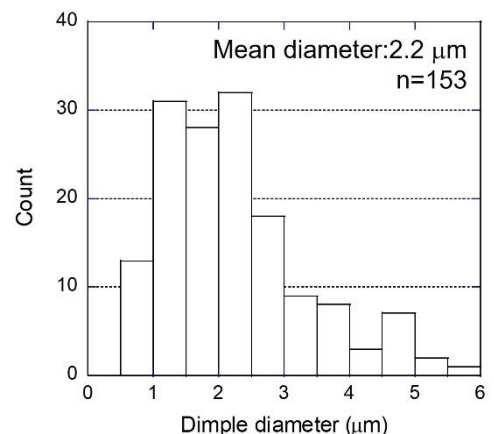


図 2 MSE 試験後の Ti-6Al-4V 合金積層造形材料の表面摩耗により生じた窪みのサイズ分布。

*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。

2.6.4.6

マグネシウム合金の腐食挙動に及ぼす添加元素の効果
 Effects of Alloying Elements for Corrosion Properties in Magnesium Alloys
 畠山賢彦*1、安永有史*2
 Masahiko HATAKEYAMA and Kazufumi YASUNAGA

本研究では、汎用の Mg-9mass%Al 合金を基準とし、そこに 1mass%の Zn、Ag、Sn をそれぞれ添加した三元系 Mg-Al-X 合金を作製して腐食挙動を調査した。各試料に対し、強アルカリ環境下でのアノード分極曲線測定、低真空 SEM による組織観察、EPMA による元素マッピングを行った。それにより、添加元素や金属組織が腐食メカニズムに及ぼす影響を検討した。

全ての試料で α 相、Al-rich- α 相および β 相の三相組織が確認された。 β 相(Mg₁₇Al₁₂)の形態に着目すると、三元系 Mg-Al 合金の β 相は AM90 のものよりも粗大であり、その傾向は Ag 添加材で特に顕著であった。Mg-9mass%Al-1mass%Zn 合金(AZ91)の Zn に着目すると、 β 相中に濃化していた。Ag、Sn も同様に β 相中に濃化していた。各試料の表面上に占める β 相の面積率、分極試験結果から β 相の晶出量が多いほど、 β 相と Al-rich- α 相の界面が大きくなり、孔食が発生する頻度が高くなると考えられる。

*1国立大学法人富山大学大学院・理工学研究部、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ
 本研究は、(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

溶媒溶解性に及ぼすポリイミド共重合構造の影響
 Effect of Copolymer Structure on Solvent Solubility of Sulfonated Aromatic Polyimide
 畑下昌範*1
 Masanori HATASHITA

従来、ポリイミド系高分子のファイバー化は困難であるとされてきた。それは、いずれの紡糸法においても、高分子は溶液の状態もしくは熔融状態で調製することが必須条件であるのに対して、ポリイミドが不溶融、溶媒不溶性であることに起因している。本研究では、イオン性官能基を有するモノマーを用いて、ポリイミド系高分子電解質の共重合構造の共重合比を変化させて合成を検討した。酸無水物モノマーA、二官能性イオン性モノマーS、二官能性非イオン性モノマーR により共重合反応を行い、図1のような共重合構造を得た。検討した共重合比においては、図の $n=1, m=1$ の時、 $n=1, m=2$ の時、 $n=1, m=4$ の時においては、溶媒である DMSO や m-クレゾールに可溶であったものの、 $n=1, m=10$ の時は、DMSO や m-クレゾールに対して膨潤するのみで溶解しなかった。溶媒溶解性や紡糸性に及ぼす共重合比の知見を得た。



A : 酸無水物モノマー
 S : 二官能性イオン性モノマー
 R : 二官能性非イオン性モノマー

図1 共重合構造を有するポリイミド系高分子電解質

*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4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. Akihiro Iwase, Yuichi Saitoh, Atsuya Chiba, Fuminobu Hori and Norito Ishikawa, Effects of Energetic Carbon-Cluster Ion Irradiation on Lattice Structures of $\text{EuBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Oxide Superconductor, *Quantum Beam Sci.*, Vol. 6, No. 2, 21, 2022. 5. <https://doi.org/10.3390/qubs6020021>.
2. Natsuko Kondo, Yoshinori Sakurai, Takushi Takata, Kuniyuki Kano, Kyo Kume, Munetoshi Maeda, Nobuhiko Takai, Shugo Suzuki, Fumihito Eto, Kenji Kikushima, Hideki Wanibuchi, Shin-Ichi Miyatake, Takayuki Kajihara, Shoji Oda, Mitsutoshi Setou, Junken Aoki and Minoru Suzuki, Persistent elevation of lysophosphatidylcholine promotes radiation brain necrosis with microglial recruitment by P2RX4 activation, *Scientific Reports*, Vol. 12, 8718, 2022. 5. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12293-3>.
3. A. Iwase, K. Fukuda, Y. Saitoh, Y. Okamoto, S. Semboshi, H. Amekura and T. Matsui, Structure and magnetic properties of Fe nanoparticles in amorphous silica implanted with Fe ions and effect of subsequent energetic heavy ion irradiation, *Journal of Applied Physics*, Vol.132, No. 16, 163902, 2022. 10. <https://doi.org/10.1063/5.0102438>.
4. Thi Nhan Tran, Lukas Wisnu Wicaksono, Maradi Abdillah, Youichirou Matuo, Kikuo Shimizu, Kyo Kume and Yoshinobu Izumi, Radiation Protection of Yeast Cells and DNA by Epigallocatechin Gallate and Epicatechin, *RADIOISOTOPES*, Vol.71, No. 3, 245-253, 2022. 10. <https://doi.org/10.3769/radioisotopes.71.245>.
5. Ryoya Ishigami, Kohtaku Suzuki and Kazufumi Yasunaga, Hydrogen desorption characteristics of Mg hydride films with Ni and Ni-based alloy catalyst layers deposited by magnetron sputtering, *Thin Solid Films*, Vol.764, 139628, 2022.12. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139628>.
6. F. Hori, Y. Morikuni, H. Obayashi, A. Iwase, T. Matsui, Y. Kaneno, T. Wada, H. Kato and N. Ishikawa, Change in local structure and hardness in the amorphization process of $\text{Zr}_{45}\text{Cu}_{45}\text{Al}_{10}$ alloy by heavy ion irradiation, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol.535, 11-14, 2022.12. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.11.007>.
7. Hiroyuki Daido, Tomonori Yamada, Koichi Saruta, Masabumi Miyabe, Chikara Ito, Takuya Shibata, Kaoru Inoue, Ryohei Terabayashi and Shuichi Hasegawa, Observation and characterization of quasi-continuous wave kW-class laser interaction with metal and metal oxide targets using a high-speed camera and microscopes, *Physica Scripta*, Vol.98, No.3, 035112-1 ~ 22, 2023.2. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/acbba9>.
8. Katsushi Okuyama, Yasuhiro Matsuda, Hiroko Yamamoto, Kohtaku Suzuki, Kohei Shintani, Takashi Saito, Mikako Hayashi and Yukimichi Tamaki, Fluoride Retention in Root Dentin following Surface Coating Material Application, *Journal of Functional Biomaterials.*, Vol.14, No.3, 171, 2023.3. <https://doi.org/10.3390/jfb14030171>.

(2) 解説、総説、報告書等

1. 山田知典、レーザー溶接プロセスのモデリングと適応性技術の開発ーレーザー溶接プロセスの可視化手法の検討ー、大阪大学接合科学共同利用・共同研究拠点共同研究報告書、15 頁、2022.5
2. Akihiro IWASE, Fuminobu HORI, EXAFS Study of Thermal Aging and Energetic Ion Irradiation Effects on CuTi alloy, *Photon Factory Activity Report 2021*, Vol.39, 57, 2022.6
3. Fuminobu HORI, Kemeng ZHU, Tomoko YAMADA, Toshiyuki MATSUI, Akihiro IWASE, Qiu Xu, Characterization of alloy nanoparticles synthesized by gamma and electron irradiation reduction, *Photon Factory Activity Report 2021*, Vol.39, 58, 2022.6
4. 大道博行、山田知典、柴田卓弥、レーザー誘起超音波による高温にさらされたコンクリートの診断、*ILT2022 年報*、1-4 頁、2022.7
5. 前田宗利、前田未佳、宇佐美徳子、富田雅典、細胞質の放射線応答が細胞の放射線感受性に与える影響とそのメカニズム、*PHOTON FACTORY NEWS*, Vol.40, No.2, 10-14 頁、2022.8

6. 堀史説、日吉遼樹、大林浩也、金野泰幸、松井利之、和田武、加藤秀実、石川法人、岩瀬彰宏、重イオン照射による Ni-Al 金属間化合物の局所構造と特性変化、大阪公立大学研究推進機構 放射線研究センター 令和3年度 放射線施設共同利用報告書、47-49 頁、2022.8
 7. 堀史説、大友彦卓、金野泰幸、徐虬、大澤一人、安永和史、体心立方型構造 Fe-Al 合金における空孔への水素捕獲放出挙動、大阪公立大学研究推進機構 放射線研究センター 令和3年度 放射線施設共同利用報告書、50-51 頁、2022.8
 8. 堀史説、山田智子、松井利之、千星聡、岩瀬彰宏、田口昇、田中慎吾、SiO₂ への複合イオン照射による複合ナノ粒子生成に及ぼす照射順効果、大阪公立大学研究推進機構 放射線研究センター 令和3年度 放射線施設共同利用報告書、52-54 頁、2022.8
 9. 阿部知子、林依子、大野豊、畑下昌範、高城啓一、イオンビーム育種技術の開発に取り組む加速器施設、アグリバイオ(北隆館)、Vol.6、No.12、8-13 頁、2022.10
 10. 畑下昌範、高城啓一、イオンビームを用いた植物工場生産に適したレタスとトマトの新品種育成、アグリバイオ(北隆館)、Vol.6、No.12、19-23 頁、2022.10
 11. 風間裕介、畑下昌範、木元久、櫻井明彦、イオンビームを用いた微生物の品種改良、アグリバイオ(北隆館)、Vol.6、No.12、29-33 頁、2022.10
 12. 前田宗利、イオンビームと X 線の併用によるがん治療高度化に向けた治療生物学的な研究、2021 年度 ONSA 賞受賞公開論文(一般社団法人大阪ニュークリアサイエンス協会 WEB サイト)、2022.11
 13. F. Hori, T. Yamada, H. Obayashi, T. Matsui, A. Iwase, S. Semboshi, N. Taguchi, S. Tanaka, Synthetic control of functional metal nanomaterials in SiO₂ by multiple particles irradiation, QST Takasaki Annual Report 2021, 63, 2023.3
 14. 羽鳥聡、栗田哲郎、山田裕章、山口良文、淀瀬雅夫、廣戸慎、清水雅也、淵上隆太、小田部圭佑、古川靖士、羽田祐基、菊地亮平、若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状、第 34 回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」報告集、16-21 頁、2023.3. <https://doi.org/10.11484/jaea-conf-2022-002>.
 15. 堀史説、岩瀬彰宏、金属間化合物への重イオン照射によるアモルファス化、材料、Vol.72、No.3、222-225 頁、2023.3. <https://doi.org/10.2472/jsms.72.222>
- (3) 国際会議発表(口頭発表)
1. B. Tsuchiya, T. Kodera and K. Suzuki, Absorption and desorption processes of H in LiCoO₂ by H₂O splitting at room temperature, 14th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '22 (ALC'22), Okinawa, Japan, 2022.10.16-21
 2. A. Iwase, R. Ishigami and T. Matsui, Tuning of antiferromagnetic-ferromagnetic transition temperature of FeRh intermetallic compound by combination of energetic ion irradiation and high temperature heat treatments, The 32nd Annual Meeting of MRS-J; International Symposium "Innovations in Materials Triggered by Recent Advances in Ion Beam Applications", Yokohama, Japan, 2022.12.5
 3. Munetoshi MAEDA, Effects of combined photon and ion beam irradiation on biomaterials—Irradiation sequence in combined radiation exposure modifies the cellular radiosensitivity—(Invited), The 32nd Annual Meeting of MRS-J; International Symposium "Innovations in Materials Triggered by Recent Advances in Ion Beam Applications", Yokohama, Japan, 2022.12.6
 4. K. Suzuki, B. Tsuchiya, and K. Yasuda, Isotope Analysis of Lithium using Time-of-flight ERDA, The 32nd Annual Meeting of MRS-J; International Symposium "Innovations in Materials Triggered by Recent Advances in Ion Beam Applications", Yokohama, Japan, 2022.12.6
- (4) 国際会議発表(ポスター発表)
1. Iwase Akihiro, Nishio Shigeru, Ishikawa Norito, Hori Fuminobu, Analysis of ion-track overlapping effects using Poisson distribution function and Monte Carlo simulation, 29th international conference on atomic collisions in solids & 11th international symposium on swift heavy ions in matter (ICACS & SHIM 2022), Helsinki, Finland, online, 2022.6.22
 2. Hori Fuminobu, Morikuni Yuto, Obayashi Hiroya, Iwase Akihiro, Matsui Toshiyuki, Kaneno Yasuyuki, Local structure and hardness change in the amorphization process of ZrCuAl alloys by heavy ion irradiation, 29th international conference on atomic collisions in solids & 11th international symposium on swift heavy ions in matter (ICACS & SHIM 2022), Helsinki, Finland, online, 2022.6.22

3. Yu Miyazawa, Momoko Kohsaka, Ryoya Ishigami, Naoyuki Shibayama, Kazushi Ikegami, Tsutomu Miyasaka, Shusaku Kanaya, Hiroyuki Toyota, Kazuyuki Hirose, In-situ radiation resistance evaluation of perovskite solar cells using 8MeV proton irradiation, 33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-33), Nagoya, Japan, 2022.11.15
4. H. Obyashi, A. Iwase, Y. Kaneno, T. Matsui, T. Wada, H. Kato, N. Ishikawa, Changes in microstructure and hardness of Ni-Zr alloy by heavy ion irradiation, The 32nd Annual Meeting of MRS-J; International Symposium "Innovations in Materials Triggered by Recent Advances in Ion Beam Applications", Yokohama, Japan, 2022.12.5
5. T. Mayuzumi, A. Matsuta, M. Hatashita, K. Takagi, T. Abe, K. Murai and Y. Kazama, Heavy-Ion Beams with High Linear Energy Transfer frequently produces morphological mutants in the M1 generation of an ornamental plant *Torenia fournieri*, The 32nd Annual Meeting of MRS-J; International Symposium "Innovations in Materials Triggered by Recent Advances in Ion Beam Applications", Yokohama, Japan, 2022.12.5

(5) 国内会議発表(口頭発表)

1. 岩瀬彰宏、シンクロトン放射光、イオンビームって研究開発の何に使えるのか、2022 年度中部イノベッ 第 1 回オープンイノベーションサロン、愛知県 名古屋市(オンライン併用)、2022.6.6
2. 近藤夏子、櫻井良憲、高田卓志、河野邦行、久米恭、前田宗利、高井伸彦、鈴木周五、江藤史博、菊島 健児、鯉淵英機、宮武伸一、尾田正二、瀬藤光利、青木淳賢、鈴木実、放射線脳壊死の発症に関連する 慢性的なリゾホスファチジルコリンの上昇とミクログリアの P2X4 受容体の活性化、第 59 回日本放射線腫瘍 学会生物部会学術大会、北海道 札幌市、2022.6.24
3. 羽鳥聡、栗田哲郎、山田裕章、山口文良、淀瀬雅夫、廣戸慎、清水雅也、瀧上隆太、小田部圭佑、古川 靖士、羽田祐基、菊池亮平、若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状(2019-2021)、第 34 回タ ンデム加速器及びその周辺技術の研究会、オンライン、2022.7.21
4. 前田宗利、ONSA 賞受賞講演:イオンビームと X 線の併用によるがん治療高度化に向けた治療生物学的 な研究(招待講演)、一般社団法人大阪ニュークリアサイエンス協会 第 76 回放射線科学研究会、オンラ イン、2022.8.2
5. 前田宗利、前田未佳、松本英樹、久米恭、Relationship between the order of proton and X-ray irradiation in combined radiotherapy and antitumor effects on tumor model mice in their modalities(複合放射線治療 における陽子線と X 線の照射順序と腫瘍モデルマウスにおける抗腫瘍効果の関係)、日本放射線影響学 会 第 65 回大会、大阪府 大阪市、2022.9.16
6. 土屋文、小寺拓、鈴木耕拓、佐々木知子、常温水分解によるコバルト酸リチウムの水素吸収特性、日本金 属学会 2022 年秋期第 171 回講演大会、福岡県福岡市、2022 年 9 月 20- 23 日
7. 安永和史、岩井善朗、HIP 処理した Ti 合金のエロージョン摩耗試験後の微細組織、日本金属学会 2022 年秋期第 171 回講演大会、福岡県 福岡市、2022.9.21
8. 尾崎壽紀、山下朔、柏原卓弥、掛谷一弘、石神龍哉、岡田達典、淡路智、1.5MeV プロトン照射した FeSe_{0.5}Te_{0.5} 薄膜の Jc の磁場角度依存性、第 83 回応用物理学会秋季学術講演会、宮城県 仙台市、 2022.9.21
9. 岩瀬彰宏、千星聡、斎藤勇一、堀史説、電子線照射による CuTi 合金の硬度と電気伝導度の改質、日本 金属学会 2022 年秋期第 171 回講演大会、福岡県 福岡市、2022.9.22
10. 大林浩也、岩瀬彰宏、金野泰幸、和田武、加藤秀実、石川法人、堀史説、Ni-Zr 系金属間化合物への重 イオン照射による結晶相からのアモルファス化制御、日本金属学会 2022 年秋期第 171 回講演大会、福岡 県 福岡市、2022.9.22
11. 堀史説、大友彦卓、徐虬、大澤一人、安永和史、粒子線照射により導入した Fe-Al 合金中の空孔への水 素原子捕獲、日本金属学会 2022 年秋期第 171 回講演大会、福岡県 福岡市、2022.9.22
12. 山岸隆一郎、前田敏男、金属材料へのレーザー照射による脱鋭敏化の検討、日本金属学会 2022 年秋期 第 171 回講演大会、福岡県 福岡市、2022.9.22
13. 中尾節男、木野村淳、藪内敦、鈴木耕拓、熱処理した a-C:H 膜の陽電子消滅測定、第 83 回応用物理学 会秋季学術講演会、宮城県 仙台市、2022.9.22
14. 山口雅、松尾陽一郎、久米恭、清水喜久雄、泉佳伸、ポリメラーゼ連鎖反応を用いた放射線による DNA 損傷評価手法の検討、第 4 回日本保険物理学会・安全管理学会合同大会、福岡県 福岡市、2022.11.2

15. 黛隆宏、松田彩花、畑下昌範、高城啓一、阿部知子、村井耕二、風間裕介、重イオンビームを用いた園芸植物トレンシアの花形変異体の作出、北陸植物学会、富山県 富山市、2022.11.13
16. 岩瀬彰宏、イオン加速器を用いた材料改質・材料分析研究、関西学院大学 理工学部講演会、兵庫県 三田市、2022.11.16
17. 廣江真俊、木野村淳、藪内敦、宇田欽治、鈴木耕拓、堀利彦、満汐孝治、Nanovoid evolution in hydrogen-implanted and annealed Si probed by slow positron beams、第 23 回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会、福井県 敦賀市、2022.12.2
18. H. Watanabe, Y. Saita and K. Yasunaga, Hydrogen pickup of ion irradiated Zry-2、第 23 回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会、福井県 敦賀市、2022.12.2
19. T. Kodera, B. Tsuchiya, T. Sasak and K. Suzuki, Hydrogen and Lithium Measurements in Near Surface of Water-soaked LAMP Solid Electrolytes Using Elastic Recoil Detection Techniques、第 23 回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会、福井県 敦賀市、2022.12.2.
20. B. Tsuchiya, T. Kodera, K. Suzuki and T. Sasaki, In-situ Hydrogen Distribution Analysis in LiCoO₂ by Water Uptake at Room Temperature Using Elastic Recoil Detection in Air Atmosphere、第 23 回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会、福井県 敦賀市、2022.12.2
21. A. Iwase, Surface modifications of lattice structures and physical properties of inorganic materials induced by energetic ion beam irradiation (Invited)、第 23 回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会、福井県 敦賀市、2022.12.2.
22. 廣江真俊、木野村淳、宇田欽治、鈴木耕拓、堀利彦、満汐孝治、低速陽電子ビームで評価した水素照射 Si 中のナノボイドの高温アニール特性(High temperature annealing properties of nanovoids in hydrogen-irradiated Si evaluated by slow positron beams)、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、2022.12.10
23. 前田宗利、X 線マイクロビームを用いた放射線による DNA 損傷の修復を調節する新規メカニズムの解明、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
24. 畑下昌範、新たな炭素イオンビーム照射技術の開発およびそれを用いた植物の突然変異誘発、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
25. 鈴木耕拓、土屋文、ToF-ERDA 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、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
26. 前田敏男、レーザー技術を活用した原子力施設の廃止措置技術開発及び産業利用、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
27. 生駒賢二、(公財)若狭湾エネルギー研究センターの紹介、燃料電池・FCH 部会 第 281 回定例研究会、大阪府 大阪市、2022.12.22
28. 畑下昌範、高城啓一、井村裕治、櫻井明彦、福井県のイオンビーム育種・野菜や微生物の新品種(招待講演)、理研シンポジウム「重イオンビーム育種による持続可能な社会や特産品創出の実現」、埼玉県 和光市、2023.1.20
29. 前田宗利、特別講演:放射光 X 線マイクロビームを用いた細胞の放射線感受性を決定する情報伝達機構の解明(招待講演)、令和 5 年東京 RBC (Radiation Biology Conference) 新春放談会、千葉県 千葉市、2023.2.11
30. 遠藤伸之、水素キャリアとして有望なアンモニアの革新的な合成法の研究、一般社団法人ふくい水素エネルギー協議会 講演会、福井県 敦賀市、2023.3.6
31. 青柳賢英、島田芳永、石川ゆい、荒井肇、久米恭、松本健、CubeSat 搭載に向けた 32bit CPU の Single Event Upset 評価、2023 年電子情報通信学会総合大会、埼玉県 さいたま市、2023.3.7
32. 岩瀬彰宏、千星聡、斎藤勇一、堀史説、高エネルギー電子線照射した Cu-Ti 合金の硬度変化と導電率変化の相関、日本金属学会 2023 年春期講演大会、オンライン、2023.3.9
33. 岩瀬彰宏、量子ビーム複合利用による材料照射効果研究、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所 第 658 回オープンセミナー、群馬県 高崎市、2023.3.13
34. 土屋 文、小寺拓、鈴木耕拓、佐々木知子、イオンビーム分析法を用いた電極/固体電解質界面のリチウム濃度分布その場測定、第 70 回応用物理学会春季学術講演会、東京都 千代田区、2023.3.16
35. 笛木麗奈、畑下昌範、村井耕二、重イオンビーム照射によるパンコムギ品種「福井県大3号(ふくこむぎ)」早生変異体の作出、日本育種学会第 143 回講演会(令和 5 年度春季大会)、静岡県 静岡市、2023.3.18

36. 岩瀬彰宏、石神龍哉、松井利之、イオンビーム照射と熱処理による FeRh の反強磁性-強磁性転移温度の制御、日本物理学会 2023 年春季大会、オンライン、2023.3.22
37. 大林浩也、岩瀬彰宏、平山翔太、金野泰幸、松井利之、加藤秀実、和田武、石川法人、堀史説、NiZr 金属間化合物の重イオン照射による局所的構造変化とアモルファス化、日本物理学会 2023 年春季大会、オンライン、2023.3.22
38. 牧野顕、久米恭、森哲也、岡沢秀彦、清野泰、X 線・陽子線・炭素線による子宮頸がん治療と 3'-Deoxy-3'-[18F]fluorothymidine (18F-FLT)をトレーサーとした PET による早期治療効果予測に関する in vivo 評価、日本薬学会第 143 年会、北海道札幌市、2023 年 3 月 25-28 日
39. 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(招待講演)、公益財団法人放射線影響協会 放射線影響研究奨励賞 贈呈式・お祝いの会、東京都千代田区、2023.3.27

(6) 国内会議発表(ポスター発表)

1. 山田智子、田口昇、田中真悟、岩瀬彰宏、松井利之、千星聡、堀史説、多重イオン照射によるアモルファスガラス中での金属ナノ粒子複合化制御、ナノ学会第 20 回大会、オンライン、2022.5.21
2. 牧野顕、久米恭、谷佳樹、浅井竜哉、森哲也、岡沢秀彦、清野泰、子宮頸がん放射線治療における粒子線治療の優位性とポジロン断層撮像法による早期治療効果予測法の in vivo 評価、第 16 回日本分子イメージング学会総会・学術集会、京都府京都市、2022 年 5 月 26-27 日
3. 村岡壮志、松尾陽一郎、清水喜久雄、久米恭、泉佳伸、The gene expression analysis of DNA double-strand break repair genes using irradiated yeast cells wild-type strain and RAD52 gene-deficient strain(放射線照射した酵母細胞の野生株および RAD52 遺伝子欠損株を用いた DNA 鎖切断修復遺伝子の発現量解析)、日本放射線影響学会 第 65 回大会、大阪府 大阪市、2022.9.15-16
4. 近藤夏子、櫻井良憲、高田卓志、河野邦行、久米恭、前田宗利、高井伸彦、鈴木周五、江藤史博、菊島健児、鯉淵英機、宮武伸一、尾田正二、瀬藤光利、青木淳賢、鈴木実、慢性的なリゾホスファチジルコリンの上昇がミクログリアの P2X4 受容体の活性化を伴う放射線脳壊死を促進する、日本脳神経外科学会 第 81 回学術総会、神奈川県 横浜市(Web 配信)、2022.9.28-11.30
5. 杉森康一、藤あかね、櫻井明彦、畑下昌範、カバノアナタケ培養菌糸体の生理活性物質が線虫の寿命・脂肪蓄積・糖化に及ぼす影響、第 74 回日本生物工学会大会、オンライン、2022.10.18
6. 中西哲也、奥川雄太、塩川智也、栗田哲郎、一様なスピルでかつ高速ビーム ON/OFF ができるマルチバンド RFKO による遅いビーム取出し、第 19 回日本加速器学会年会、オンライン、2022.10.18
7. 栗田哲郎、若狭湾エネルギー研究センターシンクロトロン of の現状、第 19 回日本加速器学会年会、オンライン、2022.10.21-22
8. R. Aoki, M. Hatashita, T. Ishii and K. Yoshida, Development of biotechnology for advanced utilization of dry- and heattolerant crop, pearl millet、共同利用・共同研究拠点 鳥取大学乾燥地研究センター 令和 4 年度共同研究発表会、鳥取県 鳥取市、2022.12.4
9. Alessandro Nasti, Yoshio Sakai, Tuyen ThuyBich Ho, Akihiro Seki, Shingo Inagaki, Norihiko Ogawa, Kyo Kume, Munetoshi Maeda, Hiroyasu Tamamura, Kazutaka Yamamoto, Makoto Sasaki and Shuichi Kaneko, 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、熊本県 熊本市、2022.12.8
10. 岩瀬彰宏、西尾 繁、重イオントラックオーバーラップ効果のモンテカルロシミュレーション、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
11. 羽鳥聡、栗田哲郎、山田裕章、廣戸慎、清水雅也、山口文良、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、若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
12. 栗田哲郎、シンクロトロンの高周波加速制御系の開発、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
13. 久米恭、羽鳥聡、青柳賢英、中村博一、沢崎浩史、荒井肇、石川ゆい、イオンビームを活かした宇宙産業育成、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
14. 高城啓一、石井公太郎、阿部知子、シロイヌナズナ照射幼苗に対する阻害剤 DDRI-18 の影響、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-

15. 田中良和、ミディトマトに関する DNA マーカーの研究、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
16. 畑下昌範、高城啓一、鈴木勝久、花卉園芸植物へのイオンビーム照射による新品種の育成、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
17. 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、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
18. 清野泰、牧野颯、久米恭、森哲也、岡沢秀彦、モデルマウスによる子宮頸がん粒子線治療の有効性と治療効果予測法の検討、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
19. 前田宗利、前田未佳、松本英樹、久米恭、異種放射線の併用によるがん治療の高度化に向けた治療生物学的な検討、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
20. 石神龍哉、安永和史、鈴木耕拓、Ni および Ni 基合金を添加した水素化マグネシウムからの水素放出、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
21. 安永和史、堀史説、徐虬、大澤一人、加速器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、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
22. 鈴木耕拓、中島恭平、ニュートリノ検出のための液体シンチレーターの開発、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
23. 生駒賢二、山岸隆一郎、自然エネルギーによる水素製造のためのマグネシウム再生技術の開発、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
24. 前田敏男、原子力産業への適応に向けたレーザー除染技術に関する動向調査、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
25. 山田知典、原子力施設の廃止措置の推進に向けたレーザー切断技術の開発、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
26. 山岸隆一郎、前田敏男、木曾原直之、坪井昭彦、SUS 材へのレーザー照射による脱鋭敏化、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター「第 24 回研究報告会」、オンライン、2022.12.14-
27. 笛木麗奈、畑下昌範、村井耕二、イオンビーム突然変異育種法によるパンコムギ品種「福井県大 3 号（ふくこむぎ）」の改良、第 17 回ムギ類研究会、茨城県 つくば市、2022.12.17

3.2. 特許

令和4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

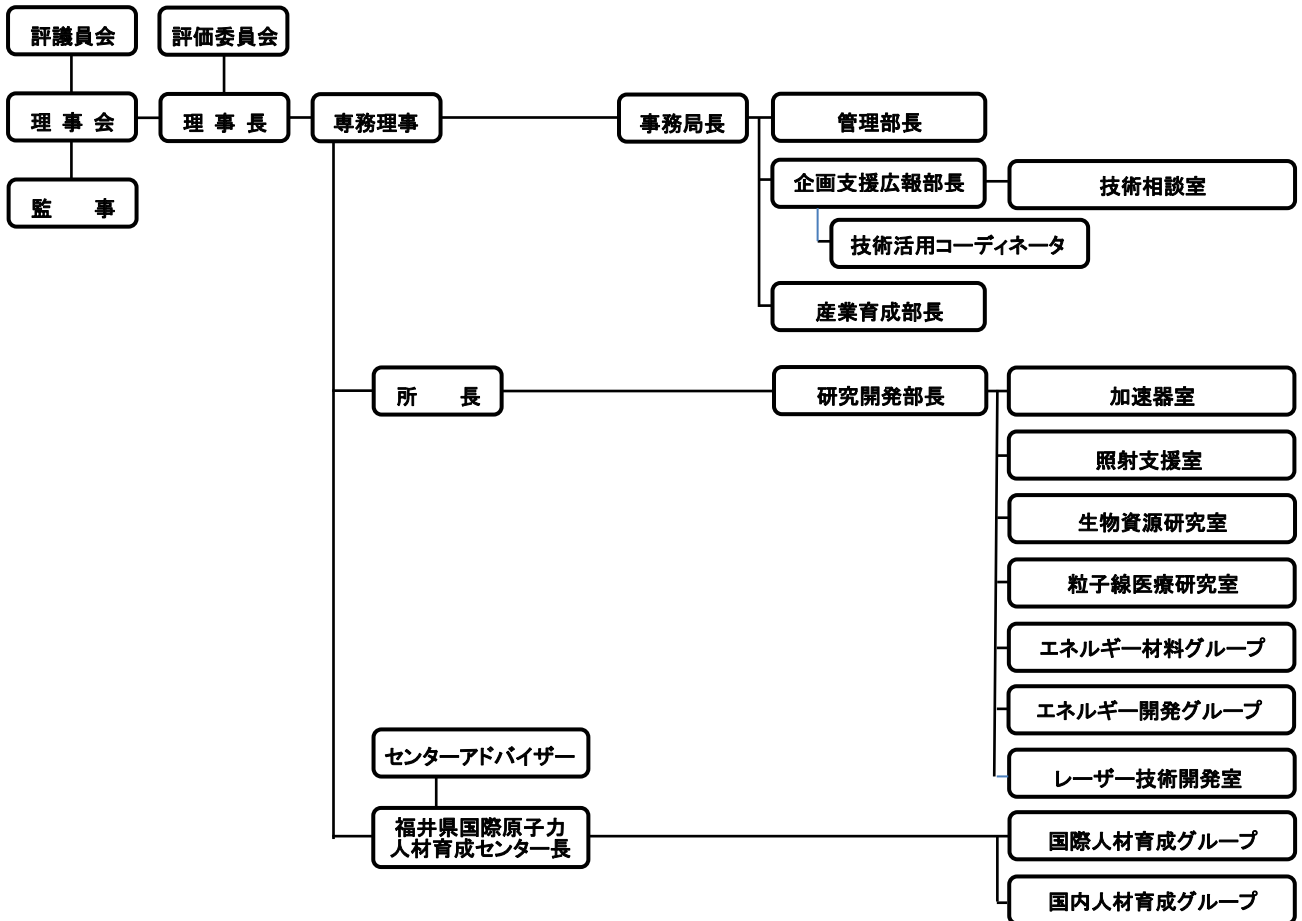
3.3. 品種

令和4年度における品種出願、品種登録は次のとおりである。

- (1) 品種出願
 - 1. 「山田錦 FW1 号」(品種登録出願番号 第 36235 号)
登録品種の育成をした者:三浦孝太郎、高城啓一
- (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4年4月1日 現在)



令和4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25巻

発行:令和5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