

公益財団法人 若狭湾エネルギー研究センター

The Wakasa Wan Energy Research Center

研究年報

平成27年度 第18巻

Annual Report of the Wakasa Wan Energy Research Center

Vol.18 2015



— 目 次 —

1. はじめに	5
2. 研究成果	6
2.1. エネルギー・環境分野	6
2.1.1. レーザー技術を応用した除染技術、切断技術の開発	6
2.1.1.1. 電動クローラー安全運用技術とレーザー剥離箱の開発	6
2.1.1.2. 30kW ファイバーレーザーを用いた厚板鋼材切断試験	8
2.1.1.3. レーザー及びプラズマ切断時における気中移行データ取得・調査	9
2.1.1.4. 光学的手法による鉄鋼材料のレーザー照射応答その場観察	10
2.1.1.5. 非鉄金属材料のレーザー照射痕の詳細観察	11
2.1.2. 廃炉段階で役立つ情報の収集・整理・分析と技術の開発	12
2.1.2.1. 原子力発電所コンクリートの有効利用調査	12
2.1.2.2. アスファルト固化体リコンディショニング予備試験	14
2.1.2.3. 焼却炉を用いた塩化セシウム除染分離技術の開発実用化	15
2.1.3. 放射線計測技術の開発	16
2.1.3.1. 逆問題解析による放射性物質分布の詳細化	16
2.1.3.2. 高線量エリアにおける NaI 線量率計の効率的な運用方法の開発	18
2.1.3.3. 放射線計測に関する共同研究	20
2.1.4. 未利用エネルギー利用技術開発	22
2.1.4.1. マイクロ波加熱を用いた農林水産廃棄物からの有用物質生産	22
2.1.4.2. 太陽炉と太陽熱エネルギー利用研究	23
2.1.4.3. 酸化セリウムの基礎物性の把握と燃料電池や水素製造などへの応用	24
2.1.4.4. 気泡駆動型循環式ヒートパイプによる熱輸送	26
2.1.5. 生物作用を利用した環境浄化・修復技術の開発	27
2.1.5.1. 微生物を用いた汽水湖沼浄化研究	27
2.1.5.2. アブラナの三方湖上栽培試験	28
2.2. 医療分野	30
2.2.1. 粒子線がん治療高度化のための生物応答解明研究	30
2.2.1.1. 陽子線による細胞へのダメージ評価による照射線量の適正化研究	30
2.2.1.2. Super-SCID マウスを用いたヒト臨床がん並びに正常臓器・組織に対する陽子線等の増殖抑制効果と副作用解明	32
2.2.1.3. 陽子線・ヘリウム線による脳壊死モデル作成技術の確立 —放射線脳壊死のメカニズム解明と治療法開発を目指して—	34

2.2.1.4.	陽子線がん治療における低線量被ばくした正常組織での組織幹細胞動態の解明	36
2.2.1.5.	低酸素環境下のがん細胞に対する粒子線治療の効果予測に関する基礎的検討	38
2.2.1.6.	陽子線がん治療臨床研究	39
2.2.2.	粒子線照射技術の高度化研究	41
2.2.2.1.	陽子線がん治療における高度な照射法に対応した線量検証技術の開発	41
2.2.2.2.	陽子線治療における陽子線体内飛程計算精度向上のための高エネルギー陽子線 CT 画像取得法の研究	42
2.2.2.3.	粒子線の線質測定技術開発	44
2.3.	農業・生物分野	45
2.3.1.	植物・菌類のイオンビーム育種研究	45
2.3.1.1.	出芽酵母における γ -H2A 検出手法の確立	45
2.3.1.2.	インクラゲ変異株を利用した有用物質の生産	47
2.3.1.3.	炭素線照射実験用サンプルチェンジャーの作製と実装	48
2.3.1.4.	冬虫夏草変異株を用いた新規抗腫瘍物質の生産	50
2.3.1.5.	イオンビーム照射による山田錦のテーラーメード育種ライブラリの開発と福井県に適した「新山田錦」の育成	52
2.3.1.6.	粒子線処理による有用トチュウの育種	54
2.3.1.7.	真菌類を用いた生理活性物質の探索と評価に関する研究	56
2.3.1.8.	クズのデンプン蓄積カルスのホルモン反応	57
2.3.1.9.	植物育種の効率化を目指した DNA マーカーの開発	57
2.3.1.10.	シロイヌナズナ種子胚における γ -H2AX の検出	58
2.3.1.11.	イオンビーム照射による野菜類の品種改良	58
2.3.1.12.	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	59
2.3.1.13.	炭素線照射処理オオムギ後代からの種子貯蔵タンパク質変異のスクリーニング	59
2.3.1.14.	イオンビーム照射による耐熱性発酵糸状菌変異株の構築	60
2.3.1.15.	粒子線照射による花卉類の品種改良	60
2.3.2.	植物工場関連技術開発	61
2.3.2.1.	植物工場用野菜の栽培システムの開発	61
2.3.2.2.	植物工場用エネルギーシステム実証研究	62
2.4.	多様な分野の活動を支える技術開発	63
2.4.1.	加速器技術の開発・高度化	63
2.4.1.1.	若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状	63
2.4.1.2.	シンクロトン加速高周波位相ノイズによる位相振動の発生	65
2.4.1.3.	超伝導加速器を用いた陽電子ビーム発生法に関する研究	67
2.4.2.	加速器利用分析技術の開発・高度化	68
2.4.2.1.	加速器を用いたリチウム定量分析法の開発	68

2.4.2.2.	イオンビーム分析手法の改良と知識の蓄積	70
2.4.2.3.	高深さ分解能 TOF-ERDA 分析装置開発のための基礎研究	71
2.4.2.4.	標的炭化物 SiC による He 後方散乱における核共鳴反応	73
2.4.2.5.	茶葉中元素分布のマイクロビーム PIXE 及び PIGE 測定	74
2.4.2.6.	GAGG:Ce 結晶の特性評価	75
2.4.2.7.	大気マイクロ PIXE/PIGE を用いた歯根面象牙質における脱灰の pH による影響	76
2.4.2.8.	$^{45}\text{Sc}+^{12}\text{C}$ 反応における生成核の核反応断面積測定	78
2.4.2.9.	TOF-ERDA による薄膜定量分析手法の開発	79
2.4.2.10.	TOF-ERDA 法による DLC 膜中の水素分析	79
2.4.2.11.	μ 陽子ビームによる Li イオン電池正極材の Li 分布評価	80
2.4.3.	放射線場で利用される機器・材料の評価技術開発	81
2.4.3.1.	加速器を用いた原子炉構造材評価(原子炉構造材料劣化評価)	81
2.4.3.2.	宇宙機搭載用半導体部品に対するプロトン照射効果の評価(2)	83
2.4.3.3.	大気取り出しビームの線束測定技術の開発	84
2.4.3.4.	放射線遮蔽用可撓性材料の性能評価	86
2.4.3.5.	層状珪酸塩鉱物における太陽風プロトンの影響:反射スペクトル形状変化とプロトン照射量の関係	88
2.4.3.6.	陽子及び重粒子線を用いた衛星搭載用デバイスの放射線耐性の検証	90
2.4.3.7.	MA 回収用 CMPO 吸着材の α 線劣化生成物評価	93
2.4.3.8.	人工衛星搭載用半導体検出器とアナログ集積回路の耐放射線シミュレーション	94
2.4.3.9.	超小型衛星搭載放射線検出器の性能評価	96
2.4.3.10.	宇宙線照射を模擬した鉱物へのイオン照射実験	96
2.4.4.	材料技術の開発	97
2.4.4.1.	シリコンの成膜による金属表面の着色	97
2.4.4.2.	高分子材料上の金属めっきの密着性に関する研究	98
2.4.4.3.	ポリイミド系高分子ファイバーの開発	100
2.4.4.4.	レアメタルフリー・高強靱性チタン材の開発とその応用	101
2.4.4.5.	超高純度金属の精製研究	103
2.4.4.6.	高性能高分子のカプセル化	104
2.4.4.7.	収差補正機能付き分析電子顕微鏡による構造材料の高精度定量分析	105
2.4.4.8.	イオンビーム励起反応場を利用した鉄ロジウム合金の磁気改質技術開発	106
2.4.4.9.	新材料を用いた超小型レーザビーム走査ミラーの作製とそれを用いた眼鏡型ディスプレイの実現	108
2.4.4.10.	磁場中凝固による高アスペクト比・規則化ロータスメタルの製法開発と機能材料への応用	110
2.4.4.11.	局所加熱プロセスを与えた水素イオン注入剥離欠陥の観察	110
2.4.4.12.	ナノ複合めっきに析出した粒子の微視的評価	111
2.4.4.13.	フレキシブル導電材料のための金属皮膜の耐久性向上に関する調査研究	111
2.4.4.14.	太陽電池の Si ウエハー・電極界面の微視的評価	112
2.4.4.15.	ウェットプロセスによるシリコンインタポーザ形成技術開発に関する研究	112
2.4.4.16.	摩擦を利用したナノ結晶微細構造表面膜の創製と評価	113
2.4.4.17.	ミクروسコーピックな視点から見た核燃料中での希ガス析出挙動の解明	113

3. 外部発表、特許、品種登録	114
3.1. 外部発表	114
3.2. 特許	121
3.3. 品種	121

1. はじめに

若狭湾エネルギー研究センターは平成10年11月開所以来、高エネルギービーム利用研究やエネルギー開発研究、技術・研究支援や新事業創出・人材育成支援などの産業支援を行ってきました。

平成27年度は、新たにスタートしたエネルギー研究開発拠点化計画(平成27年度～31年度)の基本理念：①安全・安心の確保、②研究開発機能の強化、③人材育成・交流、④産業の創出・育成、の下で研究活動を推進してきました。特に、新拠点化計画では、レーザー技術を応用した除染技術・切断技術の開発・実用化等、原子力発電所の廃止措置に対応するための研究の加速化、医療・生物・環境等の分野における高エネルギービーム利用やエネルギー開発についての実用化・応用開発の推進、科学機器等の機能充実を図り、最先端の分析評価技術を活かした地元企業や地域の学術振興に対する支援の強化などを強化項目に掲げて進めてきました。

研究開発部は加速器室、生物資源研究室、粒子線医療研究グループ、エネルギー材料グループ、エネルギー開発グループの5つのグループより構成されています。研究開発では、品種改良、医療、材料・エネルギー開発などの分野において大学や企業と連携した実用化・応用研究も行ってきました。また、平成26年度に新たに設置されたレーザー技術開発室では、原子力発電所の廃炉に活用できるレーザー除染装置の実用化に向けた研究開発やレーザー切断技術の高度化研究などを行ってきました。

本書は、平成27年度に当センター研究開発部で行われた研究成果をまとめた研究成果報告集(研究年報)です。研究成果は大きく4つに分けられ、エネルギー・環境分野、医療分野、農業・生物分野、多様な分野の活動を支える技術開発に関するものです。エネルギー・環境分野では、レーザー技術を応用した除染技術・切断技術の開発、廃炉段階で役立つ技術開発、放射線計測技術の開発、未利用エネルギー利用技術開発、生物作用を利用した環境浄化・修復技術の開発などであり、医療分野では、粒子線がん治療高度化のための生物応答解明研究、粒子線照射技術の高度化研究、農業・生物分野では、植物・菌類のイオンビーム育種研究、植物工場関連技術開発、多様な分野の活動を支える技術開発では、加速器技術の開発・高度化、加速器利用分析技術の開発・高度化、放射線場で利用される機器・材料の評価技術開発、材料技術の開発などが挙げられます。これらの研究成果の多くは、学術的な新知見や実用化に貢献できるシーズとして提供できるものと期待されます。

平成27年度においても、当センターにおいて活発な研究活動を推進することができましたことは、偏に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、皆様方の、今後一層のご支援とご鞭撻のほどをよろしくお願い申し上げます。

平成28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 中嶋 英雄

2. 研究成果

2.1. エネルギー・環境分野

2.1.1. レーザー技術を応用した除染技術、切断技術の開発

2.1.1.1

電動クローラー安全運用技術とレーザー剥離箱の開発

Safe Operation of Electric Motorized Crawler and Designing for Laser Peeling Boxes

峰原英介*1

Eisuke MINEHARA

Abstract

The electric motorized crawler have been developed to realize safe operation for the laser beam machining in the field, and the laser peeling boxes has been designed to construct for in-house paint film peeling applications in the factories, decontamination ones inside the nuclear power plants and others in the world.

要約

作業現場でレーザービーム加工を行うための安全な運用を実現するために電気モーター駆動クローラーを、開発した。更に塗装膜の屋内剥離作業や原子力発電所の屋内での除染応用などのためにレーザー剥離用の作業箱を設計製作した。

I. 緒言

平成 27年度福井県委託契約において、平成 26 年度に製作した熱破碎高速剥離装置付ロボットアーム積載電気モーター駆動クローラーを安全に運用する技術開発を実施した。この結果、作業員が多数働く混雑した作業現場などでの運用が可能となった。また、塗装膜の屋内剥離作業、原子力発電所屋内での運用などを目的としたレーザー剥離用作業箱を製作した。

II. 成果の概要

図1は、開発したレーザー剥離機をロボットアームに積載した電気モーター駆動クローラーである。平成 26 年度末の動作確認直後の仕様では、遠隔操作通信が切れた場合の慣性走行による壁面等への衝突を避けるために 6 秒逆走する設計であった。また、試験中はクローラーとアームは、安全確保のために直ちに停止する必要がある。ところが通信途絶の確認があまり高速でなく、通信途絶でない場合でも空走が発生し、危険であった。クローラー制御パラメーターを見直し、走行試験を行って、各状態で危険性のない、十分短い時間での停止を実現した。その他のロボットクローラーに関連する安全運用見直しと改造を行い、確実な安全運用を確立した。



図1 開発されたレーザー剥離機をロボットアームに積載したクローラーの CAD 図(左図)と写真(右図)。

*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県受託人材育成事業(レーザー加工)として実施したものである。

図 2, 3, 4, 5 は平成 27 年度に開発し、製作した屋内用レーザー剥離用の作業箱である。レーザー剥離箱の制御システムは、ロボットレーザー除染機の制御システムをそのまま流用した。図 2 は、屋内で使用することを前提にしたレーザー剥離用の作業箱で、レーザー保護膜を張った窓から中を観察できる。図 3 は、ロボットアームの電源とレーザー発振機、制御システムを入れた19インチラックである。図 4 は、安川電機製ロボットアーム MH5F である。図 5 は、溶接用或いは切断用レーザーポジショナーで作業中に回転調節できる機構を持っている。



図 2 レーザー剥離用の作業箱。



図3 レーザー剥離用作業箱制御ラック他



図 4 ロボットアーム安川電機製 MH5F。



図 5 ポジショナー回転調節機構。

Ⅲ. 結言

今後は、製作した電気モーター駆動のクローラーを用いて、従来アーム先端に装着したレーザー剥離機のみでは困難であった、大面積のケレン作業や表面研磨作業の安全な運用を試みる。また、レーザー剥離箱は種々の加工を安全に清潔に作業できるため、これを用いて屋内における種々の加工剥離作業を進める。

2.1.1.2

30kW ファイバーレーザーを用いた厚板鋼材切断試験
 Development of Laser Cutting of Thick Steel with 30 kW Fiber Laser
 遠山伸一*¹、石神龍哉*²
 Shin'ichi TOYAMA and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

The development of laser cutting for thick steel plates was continued using 30 kW fiber laser. The cutting experiment for the real equipment in nuclear facility was carried out after the optimization of the laser cutting parameters, and the remote control technique was developed out for the laser cutting system.

要約

昨年度に引き続き、30kW ファイバーレーザーを用いた鋼材切断技術開発を行った。昨年度までに試作したレーザー切断システムを用いた切断条件の最適化を行うとともに、原子力施設での実証切断試験や遠隔制御技術の開発を実施した。

I. 緒言

狭い切断幅や狭隘部へのアクセス性等の利点を持つレーザー切断は解体技術に適しており、近年高出力化が進むファイバーレーザーは厚板鋼材切断の可能性を広げ、原子力プラントの廃止措置への適用が望まれている。今年度は気中鋼材のレーザー切断を継続し、照射レーザービームの特性と切断対象を考慮した切断条件の最適化やそれを踏まえた実構造体(バルブ)の切断を行い安全対策を確認した。さらに、レーザー切断システムを「ふげん」に設置し、実機器(海水配管(450 mm φ)等)の原子力機器切断を行った。

II. 成果の概要

厚物鋼材切断条件の最適化では、昨年度の 300 mm 厚のステンレス鋼(SUS304)鋼材及び炭素鋼(SM490A)鋼材を用いた切断パラメータをもとに、スタンドオフやアシストガス量を変更して切断試験を行った。その結果、本 30kW ファイバーレーザー切断システムを用いたステンレス鋼切断の最適条件として、最速の切断速度 8mm/分で、その際の最適アシストガス流量は 7500/分、最適スタンドオフは 50 mm という結果を得た。一方、炭素鋼切断の最適条件としては、最速の切断速度 12 mm/分で、その際の最適アシストガス流量は 4000/分、最適スタンドオフは幅のある 50-15 mm という結果を得た。

原子力機器切断では、発電所で使用された実機の切断を目標としたことから、まず模擬構造体の切断試験、そのうえで実機切断の 2 段階で切断試験を行った。なお、アシストガスの流れに乗ったフェーム飛散の安全対策として、耐火煉瓦を多重化するとともに難燃性レーザー遮光カーテンをブース壁に設置して実施した。今回の切断試験の結果、高出力を活かし、厚みが 18mm 程度の曲面形状では切断ノズルが試料表面を追従せず、一定の切断速度で切断が可能であること、海水配管のような比較的大型で薄肉の場合は、ピアッシングして 3000 mm/分での切断が可能であることが判明した。図 1 に海水配管切断の様子を示す。

遠隔制御技術の開発については、ロボットアームを台車に搭載し走行試験を行ったところ、撓みなどが無いことを確認した。またロボットアームの位置データや、3 台のカメラの画像表示と距離データの収集ができるソフトウェアの設計開発を行い、対象物との距離を測定する際の測定誤差は、1mm 以内であることを確認した。

III. 結言

高出力ファイバーレーザーを用いて原子力機器の切断実証試験を行った。今後は実証試験の継続とともに、解体現場での汎用性のある制御方法や、解体作業への適用性の検討といった実運用に向けた検証を計画している。



図 1 海水配管の切断

*¹(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室、*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福井県からの受託研究として実施したものである。

2.1.1.3

レーザ及びプラズマアーク切断時における金属粒子状物質の気中移行データ取得・調査
Acquisition and Investigation into the Migration Data of the Particulate Matters Produced by
Laser Cutting Method and Plasma Cutting Method

岩井紘基^{*1}、林宏一^{*1}、副島吾郎^{*1}、中村保之^{*1}、遠藤伸之^{*2}、山岸隆一郎^{*3}、安永和史^{*4}、重田達雄^{*3}
Hiroyuki IWAI, Hirokazu HAYASHI, Goro SOEJIMA, Yasuyuki NAKAMURA, Nobuyuki ENDO,
Ryuichiro YAMAGISHI, Kazufumi YASUNAGA, and Tatsuo SHIGETA

Abstract

For comparing the migration behaviors of the particulate matters and dross produced by two kinds of thermal cutting methods which are Laser and Plasma in the open air and the underwater, we performed the investigation by the cutting test by using Laser and Plasma cutting methods. The amount of the migrated particulate matters and these properties were acquired.

要約

レーザ切断工法とプラズマアーク切断工法の切断工法等の違いにより、気中切断や水中切断を行った際に発生するドロスや粒子状物質の挙動を比較するために、それぞれの工法で切断を行った際の粒子状物質の気中等への移行量、移行率及びそれらの性状等に係るデータの取得・調査を行った。

I. 緒言

これまでにプラズマアーク切断試験、高圧水ジェット切断試験、レーザ切断試験において、捕集した粒子状物質である気中浮遊物や沈降、落下固形物等の重量分析及び成分分析を実施してきた。平成 27 年度は、図 1 に示す水槽等を用いて、レーザ切断及びプラズマ切断の 2 種類の熱的な切断工法による気中切断及び水中切断を行った。その際に発生するドロス重量測定や粒子状物質の粒度分布測定、EPMA、SEM、TEM、ICP-MS、ICP-AES を用いた分析を行い、2 種類の切断工法の気中移行データ等を比較した。

II. 成果の概要

日本原子力研究開発機構「ふげん」所有のレーザ切断装置及びプラズマアーク切断装置を使用した切断試験を行った後、若狭湾エネルギー研究センター所有の分析機器を用いて気中、水中浮遊物及び落下、沈降固形物の重量、粒度分布、及び切断面カーフ幅の測定を行った。また、EPMA を用いた 2 次元元素マッピング、SEM、TEM を用いた微小構造観察、ICP-MS、ICP-AES を用いた元素分析を行った。主な結果を以下に示す。

- ・カーフ幅は、プラズマアーク切断で約 8.7 mm、レーザ切断で約 2.5 mm と測定され、レーザ切断はプラズマ切断の 3 分の 1 以下である。
- ・気中浮遊物重量は、同じ切断条件で、SS400 が約 0.8 g/m、SUS304 が 1.7 g/m (2 回平均) と測定され、SS400 は SUS304 の約半分である。
- ・切断した試験材料に付着したドロス量は、プラズマアーク切断で約 350 g/m、レーザ切断で約 26 g/m となり、レーザ切断の方が一桁少ない。
- ・気相フィルタで捕捉された粒子状物質は TEM を用いて観察すると図 2 のように球状であることが確認され、粒子径が数 nm から 100 nm の範囲に分布している。

III. 結言

本調査により、原子炉施設での代表的な材料を対象として、プラズマアーク、レーザ切断工法による気中、水中切断時における気中移行データ等の挙動を比較できるデータを取得することができた。「ふげん」では、今後さらなるデータ拡充に努める予定である。



図 1 水中切断試験用水槽

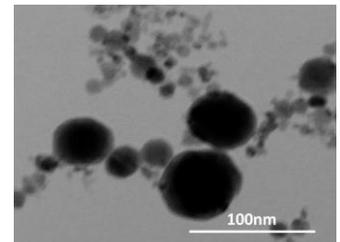


図 2 気相フィルタで捕捉された粒子の TEM 像

^{*1}(国研)日本原子力研究開発機構・原子炉廃止措置研究開発センター(ふげん)・技術開発部・技術開発課、^{*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}(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、^{*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、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが(国研)日本原子力研究開発機構の役務契約として実施したものである。

2.1.1.4

光学的手法による鉄鋼材料のレーザー照射応答その場観察
 In-situ Observation of a Variety of Steels Under Laser Irradiation
 西尾繁*¹
 Shigeru NISHIO

Abstract

Optical responses of a variety of steels under laser irradiation were collected to put them to use in developing the algorithm which nonempirically optimizes laser-processing parameters.

要約

非経験的レーザー加工条件最適化技術開発に資することを念頭に、レーザーを照射した際の鉄鋼材料の熱的応答を光学的な手段によって詳細にその場観察の上、基礎データとして集積した。

I. 緒言

現在ではレーザーポインタに用いられるような 0.2mW 程度の極めて小さい出力のレーザーから、kW を優に超える大出力のレーザーまで、様々な出力のレーザーが産業利用されている。レーザー利用分野は非常に多岐にわたるが、レーザー光を材料に照射した際に発生する大量の熱を利用した鉄鋼材料のレーザー加工は、今やレーザーの主要な利用分野の一つとなっている。

今のところ、レーザー加工における加工条件の最適化はオペレータの経験と勘が頼りである。このため、加工条件の最適化には長い時間と手間を要している。また、経験と勘に頼る性質上、技能継承も極めて難しい。

客観的な情報(材料物性、加工条件、レーザー照射時の材料の応答)のみで、レーザー加工条件を最適化する技術を開発し、レーザー加工に要する時間と手間を大幅に節約することは、レーザー加工の利用拡大を図る上で極めて重要である。このためには、まず材料の熱的応答の基礎データを蓄積する必要がある。

II. 成果の概要

まず、26 種類の異なる鉄鋼材料に対してレーザーを照射しながら、レーザー照射部付近の熱発光スペクトルの経時変化を記録した。このとき、カラービデオカメラによる照射部付近イメージの経時変化もスペクトル取得と同じタイミングで記録した。その結果、全ての試験体で 550nm 付近にピークを持つ黄色いブロードな発光が観察された。発光バンドは成分元素の発光線と思われる幾つかのサブバンドを含んでいたため、この発光バンドを温度と関連付けるには、サブバンドの寄与を差し引く必要があることも分かった。

続いて、鉄鋼材料にレーザーを照射しながら、試験体照射部付近の熱発光イメージの経時変化を 3 つの異なる波長域について同時に記録した。このとき、照射部付近のカラーイメージの経時変化も同じタイミングで記録した。さらに得られた 3 つのイメージを各画素ごとにデータ処理することによって、温度イメージへ変換を試みた。その結果、全ての試験体について温度イメージは得られたが、背景が 300-400°C 程度と算出されたことから、データ処理の精度についてまだ検討の余地のあることが分かった。

最後に、種々の鉄鋼材料に対してレーザーを照射しながら、加工用レーザー照射光学系と光温度信号集光用光学系が共通のレーザーヘッド(同軸光学系レーザーヘッド)を用いて、異なる 2 つの波長域の光温度信号の経時変化を記録した。試験の結果、すべての条件で、内部増幅器由来の 1mVp-p の雑音に対し、30mV 程度の大きさの光温度信号が得られたが、外来の正弦波雑音、ポップコーン雑音それぞれ 30mVp-p、1Vp-p 程度重畳したため、光温度信号の時間変化の詳細を知るのは困難だった。

III. 結言

試験の結果、測定に付随する課題(誤差、ノイズなど)が明らかとなった。今後のこれらの課題を順次解消してより精度の高いデータを蓄積したい。

*¹(公財)若狭湾エネルギー研究センター・レーザー技術開発室

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

2.1.1.5

非鉄金属材料のレーザー照射痕の詳細観察

Detailed Study on the Laser Irradiation Traces Formed on Non-ferrous Metals

西尾繁^{*1}

Shigeru NISHIO

Abstract

This study was performed for deeper understanding of laser-processing of non-ferrous metals through non-contact analysis of their laser irradiation traces and in-situ observation of heat transport properties of two-dimensional pack of metal particles in various packing configurations.

要約

非鉄金属材料のレーザー加工プロセスの理解に資することを念頭に、非鉄金属材料のレーザー照射痕の形状、性質を非接触的な手段を用いて詳細に観察し、さらに照射痕の形成に決定的な役割を果たす熱伝播を種々のモデル系について詳細に調査の上、基礎データとして集積した。

I. 緒言

レーザー光を材料に照射した時に発生する大量の熱を利用したレーザー加工は、レーザーの主要な利用分野の一つである。鉄鋼材料に対してレーザー加工は今日広く利用されているが、非鉄金属材料に対しては限定的である。今後、非鉄金属材料でのレーザー加工の利用拡大を図るためには、非鉄金属材料のレーザー照射応答の詳細を明らかにする必要がある。

材料にレーザーを照射すると照射痕が形成されるが、この照射痕にはレーザー照射に伴って誘起された材料の物理変化(融解、蒸発など)、化学変化(酸化、還元など)に関する多様な情報が含まれている。非鉄金属材料のレーザー加工プロセスの理解のために、照射痕の形状、性質を非接触的な手段を用いて詳細に観察し、さらに照射痕の形成に決定的な役割を果たす熱伝播を詳細に調査の上、これらを基礎データとして集積することが重要である。

II. 成果の概要

まず、種々の非金属材料(アルミニウム合金 7 種(A5052、A2017、A6061、A7075、ANP79、A2024、A5083)、銅および銅合金 8 種(C1020、C1100、C2801、C4621、C5191、砲金、ネーバル真鍮、クロム銅)、チタン(純チタン 2 種):合計 16 種類)に対してレーザーを照射し、その結果生成した照射痕の形状をレーザースキャナを用いて詳細に観察の上記録した。その結果アルミ合金、銅では浅いクレータを形成するケースの多いことが分かった。銅合金では深い穴を形成するケースの多いことが分かった。チタンでは広範囲の酸化が観察された。

続いて試験体にレーザーを照射した上で、照射痕周辺のラマンスペクトルを計測し、さらに残留応力を X 線回折法を応用して計測し記録した。ラマン分光計測では材料の性状を反映して様々なスペクトルが得られた。残留応力計測では、照射痕を中心に半径方向への圧縮応力が観察されるケースの多いことが分かった。

最後に、様々な条件における 2 次元非鉄金属粒子充填層の伝熱挙動をサーモグラフィを用いて調査の上記録した。その結果、2 次元非鉄金属粒子充填層の伝熱速度は比較のために用いた金属板より著しく遅く、また今回の調査の範囲で、空孔の有無は伝熱挙動に有意な影響を及ぼさないことが分かった。

III. 結言

一連の試験を通して、非鉄金属材料のレーザー加工プロセスの理解につながる貴重なデータが得られた。今後も多角的な調査を進めたい。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・レーザー技術開発室

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

2.1.2. 廃炉段階で役立つ情報の収集・整理・分析と技術の開発

2.1.2.1

原子力発電所コンクリートの有効利用調査

Research Study on the Recycle Use of the Concrete Waste Caused by Decommissioning

篠田佳彦*1

Yoshihiko SHINODA

Abstract

Since FY 2015, we have examined the recycle use of the concrete waste caused by decommissioning of the nuclear power plants.

要約

平成 26 年度より、原子力発電所の廃炉で発生するコンクリート廃棄物の再利用方法について検討している。

I. 緒言

大型原子力発電所を1基解体すると、コンクリート廃棄物が約 50 万トン発生する。福井県には複数の原子力発電所が立地し、発生時期が重なると発生余剰となることが危惧される。よって、原子力発電所の廃炉で発生するコンクリートを経済的かつ適正に有効利用できるように予め検討しておくことが重要であると考えている。

II. 成果の概要

福井県における(一般産業)コンクリート廃棄物の現状を把握した上で再利用シナリオ案を策定し、想定した再利用シナリオ事業に要するコスト試算とコスト削減のための検討を研究の中核に据えた。再利用シナリオ策定の留意点を、①原子力発電所の廃棄コンクリートの品質調査、②再利用方法の実施可能性評価と再生製品の試作とし、福井県に適した「原子力発電所コンクリートの有効利用」に資する情報提示を目論む。

(1) 平成 26 年度成果¹⁾

1) 福井県におけるコンクリート廃棄物の現状調査

福井県におけるコンクリート廃棄物の発生量及び利用法の現状と中間処理業者への引き渡し価格、及び道路用再生路盤材や再生骨材等の再生製品の販売価格を調べた。平成 20 年度実績では、福井県においてコンクリート片は 41.7 万トン発生し、主に再生路盤材として 98.4%がリサイクルされていた。

2) 将来期待されるコンクリート廃棄物利用法の調査

コンクリート廃棄物の大半は再生路盤材として利用され、一部は産業廃棄物処分場に埋設されている。再生路盤材として活用するためには、発生量に見合うだけの道路工事が求められ、状況によって発生量が余剰となる。そこで、現状では使用実績が少ないものの、将来有望になり得る再利用法としてコンクリート用の再生骨材利用に着目し、その利用法と課題について調べた。

3) 原子力発電所コンクリートの再利用シナリオ案の策定

原子力発電所コンクリートが様々な工事に利用できるように選択肢を増やすことも視野とし、

- a. 現在最も実績のある再生路盤材を中心としたシナリオ
- b. 近年急速に進歩した再生骨材を中心としたシナリオ

の 2 パターンを選択肢として、原子力発電所コンクリートの再利用シナリオ案を策定した。

(2) 平成 27 年度成果

1) 再利用シナリオ事業に要するコスト試算

想定した再生路盤材および再生骨材による再利用シナリオ事業をもとに人件費、設備費および運賃などの支出単価を設定し、各工程に要する作業人数を掛け合わせて金額を算出した。コンクリート廃棄物を再生路盤材や再生骨材へ処理する施設を原子力発電所内に配置し、電力事業者が自ら処理を行う場合と中間

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー開発グループ、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。

処理業者に委託した場合によるコストの変動についても試算した。表 1 に再生路盤材によるコスト試算結果を、表 2 に再生骨材によるコスト試算結果を発生量に応じて示す。

表 1 再生路盤材によるコスト試算結果

再生骨材コンクリートの種類	混合率	コンクリート廃棄物発生量		
		1万トン	20万トン	50万トン
再生骨材Lコンクリート	100%	2億6866万円	19億6825万円	46億5347万円
	50%	3億775万円	27億6763万円	66億5558万円
再生骨材Mコンクリート	100%	6億499万円	45億5379万円	100億6573万円
	50%	6億3431万円	52億1693万円	117億1282万円
再生骨材Hコンクリート	100%	7億2510万円	60億7784万円	138億9615万円
	50%	7億5193万円	66億632万円	151億9487万円

表 2 再生骨材によるコスト試算結果

再生骨材コンクリートの種類	混合率	コンクリート廃棄物発生量		
		1万トン	20万トン	50万トン
再生骨材Lコンクリート	100%	2億6866万円	19億6825万円	46億5347万円
	50%	3億775万円	27億6763万円	66億5558万円
再生骨材Mコンクリート	100%	6億499万円	45億5379万円	100億6573万円
	50%	6億3431万円	52億1693万円	117億1282万円
再生骨材Hコンクリート	100%	7億2510万円	60億7784万円	138億9615万円
	50%	7億5193万円	66億632万円	151億9487万円

2) 再利用シナリオ事業に要するコスト削減方法

大量に発生するコンクリート廃棄物の処理に掛かるコストの削減方法として処理方法、利用方法、設備・資材などの各方面から検討した。また、原子力施設内における処理または利用等によるコスト削減効果や地元企業との連携によるコストの削減効果についても検討した。

3) リサイクル製品の試製および評価に関わる予備検討

再利用のために対象となる原コンクリートおよび原骨材の調査が必要となるため、事前に評価方法を検討した。試料の採取量別における評価項目を以下に示す。

10～20 kg 圧縮強度、アルカリ骨材反応、再生骨材回収率、溶出危険性評価

100～200 kg 上記+再生路盤材(修正 CBR, PI)、再生骨材(絶対密度、吸水率、微粒分量、粒度)

2～数トン 上記+再生路盤材(粒度、すりへり減量)、再生骨材(実積率、すりへり減量、不純物量)

III. 結言

原子力発電所の廃炉で発生するコンクリート廃棄物の再利用について再生路盤材および再生骨材として活用することを想定して有効利用シナリオとして研究評価し、発生量に応じた再生産規模を具体化した。そして、再利用シナリオ案をもとに再利用シナリオ事業に要するコストの試算およびコスト削減方法について検討した。また、再利用のために対象となる原コンクリートおよび原骨材の調査が必要となるため、評価方法を検討した。

参考文献

- 1) 篠田佳彦、原子力発電所コンクリートの有効利用調査 (2015)

2.1.2.2

アスファルト固化体リコンディショニング予備試験

Preliminary Re-conditioning Test of the Bituminization for Radioactive Wastes

副島吾郎*1、瀧谷啓晃*1、水井宏之*1、藤田義彦*2、明里栄策*3、遠藤伸之*4、久米恭*5、

Goro SOEJIMA, Hiroaki TAKIYA, Hiroyuki MIZUI, Yoshihiko FUJITA, Eisaku AKARI, Nubuyuki ENDO and Kyo KUME

Abstract

We have performed the preliminary re-conditioning test of the bituminization for radioactive wastes as a part of study to apply them to the technical criteria by non-radioactive samples. As a result, we have confirmed the applicability to secure homogeneity that is a part of the technical criteria by evaluating sample properties.

要約

アスファルト固型物を技術基準に適合させるための検討の一環として、リコンディショニング予備試験を実施した。試験体の性状確認により、技術基準の一つである固型物の均質性を確保できる見通しを得た。

I. 緒言

「ふげん」では、設備の維持管理等に伴い発生する濃縮廃液をアスファルト固化装置で固型化し、廃棄体に係る技術上の基準(以下、「廃棄体技術基準」という。)等への適合性を確認した上で、廃棄体(アスファルト固化体)として埋設処分場へ搬出することを計画している。

ただし、アスファルトで固型化したものの一部には、アスファルト固化装置の試運転時等、通常とは異なる条件で固型化したもの(以下、「アスファルト固型物」という。)も存在しており、これらは廃棄体技術基準のうち、固型化の要件として求められる「均質に練り混ぜること」への適合が難しいと推定している。このため、今後「ふげん」の廃止措置を合理的かつ着実に進めていく上では、これらアスファルト固型物についても、何らかの再処理(以下、「リコンディショニング」という。)を実施することで、廃棄体技術基準に適合させ、埋設処分していくことが必要である。

II. 成果の概要

上述のような背景の下、廃棄体技術基準に適合しない可能性のあるアスファルト固型物を基準に適合させるためのリコンディショニング手法の確立に向けた技術開発の一環として、予備試験を行った。

(1)リコンディショニング手法の検討

アスファルト固型物を埋設技術基準に適合させるためのリコンディショニングの手法について、関連文献、類似事例、既往知見等を参考に検討を行い、有効と想定される手法を複数抽出した。

(2)模擬体(試験体)の製作

リコンディショニング予備試験に用いるアスファルト固型物を模擬したコールド試験体(以下、「模擬体」という。)を製作した。

(3)リコンディショニングの実証

(2)項で製作した模擬体を廃棄体技術基準の一つである「均質に練り混ぜること」に適合させるために(1)項で抽出したリコンディショニング手法による予備試験を実施した。

(4)模擬体の性状等の確認

リコンディショニング予備試験に供する前の模擬体及び予備試験後の模擬体に対して、針入度、密度、塩含有率、及び目視観察等による性状等の確認を実施した。

(5)非破壊観察手法の検討

模擬体の非破壊による観察手法を検討し、X線 CT スキャン装置による断層画像の撮影、及び超音波映像装置による観察を試みた。

(6)総合評価

(1)～(5)までの成果を総括するとともに、抽出された課題を整理した。

III. 結言

本予備試験では、アスファルト固化装置の試運転時等に固型化されたアスファルト固型物をモデル化した模擬体を考察・製作し、複数の方法で模擬体のリコンディショニングの予備試験を実証し、リコンディショニング前後の性状確認により、処理後の均質性を確保できる見通しを得た。

*1(独)日本原子力研究開発機構・原子炉廃止措置研究開発センター(ふげん)・技術開発部・技術開発課、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー開発グループ、*3(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー開発グループ、*4(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、*5(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが(独)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。

2.1.2.3

焼却炉を用いた塩化セシウム除染分離技術の開発実用化
 Developmental Works for the Radioactive Cesium Chloride Separation and Decontamination
 峰原英介*1
 Eisuke MINEHARA

Abstract

The rotary kiln incinerators of cement manufacturing factories are designed to separate, and to remove by distilling alkali metal chlorides (clinker dust at low temperature) vapor from other cement raw materials. It was considered to apply the cement rotary kiln incinerators in Japan to separate the radioactive cesium chloride and to reduce volume of radioisotope contaminated raw materials in Fukushima.

要約

セメント製造工場のロータリーキルン型焼却炉は、セメント原料に含まれるアルカリ金属を塩化物(クリンカーダスト)として分留して分離除去する。日本のセメント工場のロータリーキルン焼却炉を応用して福島放射性の塩化セシウムを減容して分離することを検討した。

I. 緒言

若狭湾エネルギー研究センターが開発している焼却炉を用いた塩化セシウム除染分離・減容技術を検討した。焼却炉を用いた塩化セシウム除染分離・減容技術を確立することが可能になると考えられる。

II. 方法結果考察等

セメント工場などよく見られるロータリーキルン型焼却炉を用いた塩化セシウム除染分離技術を開発している。セメント工場は通常、消費地の近傍に建設され、運送費が最小になるように生産されて消費される。そのため国内の生産は、国内の消費ではほぼ決まるので、高度成長期や建国間もない低開発な後進国では、人口に比較して大きな生産量が見られ、低成長期や先進国では生産は少なくなる。

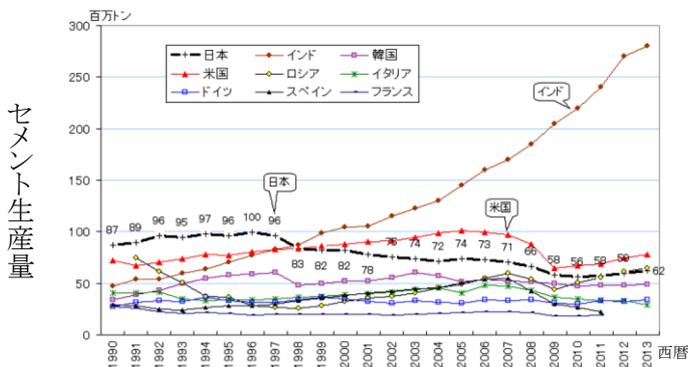
したがって低成長期である日本や先進国では、戦後高度成長が起こったところの大量のセメントの生産と消費は見られない。そのため日本各地、先進国である欧米の各地にあるセメント工場はその生産設備は半分以上が停止して遊休施設となっている。日本では高度成長期に列島改造などの掛け声のもとフル稼働していた施設は解体されるか、休止している。日本全国で遊休施設となっているこの半分以上のセメント生産用のロータリーキルン型セメント焼成炉はそのまま、クリンカーダストの抽気システムが福島事故で福島周辺に分布しているセシウム汚染物の減容システム且つ分離システムとして活用できる。図 1 のように能力的にも日本の最盛期のセメント年間生産量である 1 億トンの 4 割、4 千万トン程度以下がある。¹⁾ このセメント生産能力を放射性セシウムの除去に振り当てれば、福島全域の森林全部や土壌を表層から数センチとって比較的短い期間で除染を完了できる。

III. 結言

セメント工場の焼却炉は、放射性Csの分離減容に利用可能な能力を持っていると考えられる。

参考文献

- 1) 一般社団法人セメント協会編、2013 年度版セメントハンドブック: 一般社団法人セメント協会 (2013)



(資料) US Geological Survey, Mineral Commodity Summaries(2001～、日本のみはセメント協会 会計年度)、セメント協会「セメントハンドブック2005年度版」(1997～2000)、セメント新聞社「セメント年鑑」(～1996)

図1 世界のセメント生産量の推移

*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平成 27 年度に自主事業として実施したものである。

2.1.3. 放射線計測技術の開発

2.1.3.1

逆問題解析による放射性物質分布の詳細化

Unfolding Calculation for Aerial Radiation Monitoring Data

高田卓志^{*1}、久米恭^{*2}、大谷暢夫^{*2}、長谷川崇^{*3}、伊藤英樹^{*4}、杉田武志^{*5}、眞田幸尚^{*6}、鳥居建男^{*6}
Takushi TAKATA, Kyo KUME, Nobuo OTANI, Takashi HASEGAWA, Hideki ITO, Takeshi SUGITA,
Yukihisa SANADA and Tatsuo TORII

Abstract

An analysis method based on an unfolding calculation technique was developed to estimate a radionuclide distribution deposited on the ground by using measurement data of gamma-ray intensity taken by a radiation detector mounted on an automated unmanned helicopter (AUH). Radioactive-cesium distributions were analyzed in a flat field near the power station. Estimated radioactive-cesium distributions were verified by a comparison with measurement data taken on the ground in terms of air dose rate. This verification shows that the present analysis method is effectively working to estimate radionuclide distributions.

要約

無人ヘリで取得した野外モニタリングデータを逆問題解法により解析することで、線源位置分布評価法の高度化を試みた。モンテカルロ法による応答関数の計算、無人ヘリで取得したデータを入力とし地上での線量率分布を解とする計算手法の構築、帰還困難区域での地上モニタリング等により、逆問題解法による地上線量率解析手法の利点ならびに課題を摘出した。

I. 緒言

原子力機構が無人ヘリコプターを用いて上空 50 m 及び 70 m で測定した福島県内の放射線測定データについて、逆問題解法を適用することにより、地表面に沈着した放射性物質の分布を計算評価し、計算結果を実際の地表面における測定値と比較する事によって、逆問題解法の適用性を評価した。

II. 方法

無人ヘリコプターによる測定が実施された福島県双葉郡双葉町の 3 か所のエリアについて、詳細な地表面(主として農地内)の線量率分布を地上で測定した(図1)。上空で測定された放射線分布で観測された 100 m 程度の間でみられる線量率の大きな位置的变化が、地表における測定でも確認された。又、上空における測定で高い線量率が確認された山林とその近傍についても線量率を測定した。

地表面においては、その場所の状態(農地内のアスファルト道路、民家の庭先の砂地、樹木の根もと、土質、枯草の状態、農業用水路、野生動物による掘り返し等)によって線量率が大きく変化し、その評価においてはデータのバラツキの扱いを考慮する必要がある。これらの考慮すべき点に配慮し、上空の測定値に逆問題解法を適用して地表の放射性物質の分布を評価する計算解析を実施した。

III. 結果・考察

地表面の測定で確認された線量率分布のピークが上空のデータから良好に再現される地点が存在し、無人ヘリコプターを用いた測定とその逆問題解法を適用したデータ処理が広い範囲の放射性物質分布を評価する手法として非常に有効であることが判明した。

地表面の測定で確認された線量率分布のピークが上空のデータから良好に再現され、本手法が有効である事が確認できる地点が存在する一方、放射線分布の凹凸が小さくてなだらかに変化している場合には逆問題解法の解が期待された値に収束しないことがある事も確認された(図2)。今後、測定データの選択や数値計算法に改良を加える必要がある。

^{*1} 京都大学原子炉実験所、^{*2} (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、^{*3} (同) ハセテック、^{*4} (株) 環境総合テクノス、^{*5} (有) 科学システム研究所、^{*6} (国研)・日本原子力研究開発機構
本報告は、(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受注した役務契約で得られた内容を含む。

IV. 結言

無人ヘリで取得した野外モニタリングデータの逆問題解法による解析が、線源位置分布評価法の高度化に資することを示した。モンテカルロ法による応答関数の計算、無人ヘリで取得したデータを入力とし地上での線量率分布を解とする計算手法の構築、帰還困難区域での地上モニタリング等により、逆問題解法による地上線量率解析手法の利点ならびに課題を摘出した。

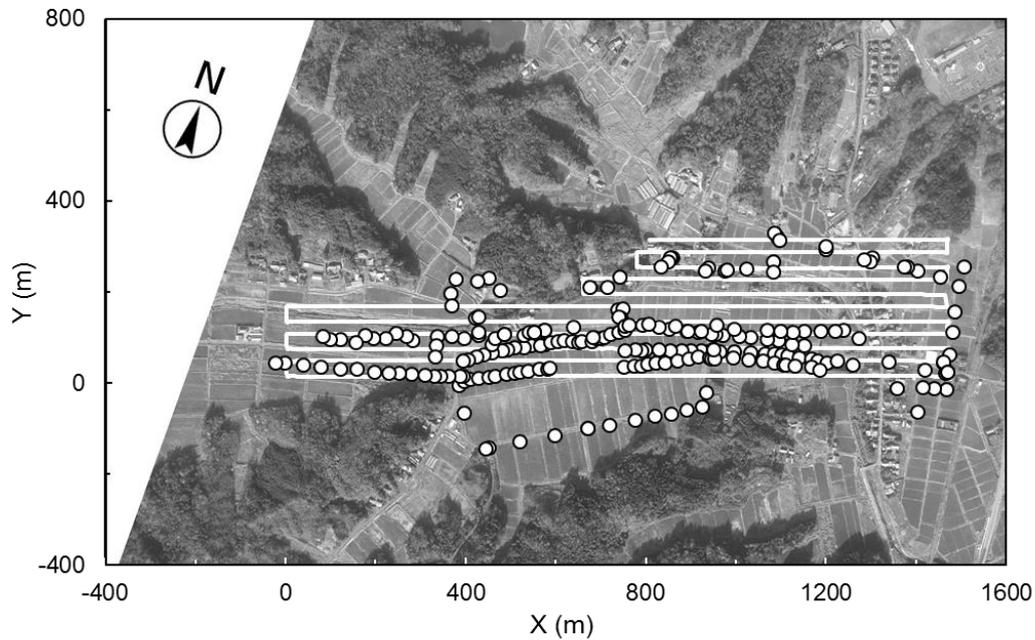


図 1 無人ヘリによる上空測定飛跡(直線)と地表面測定点(○)。

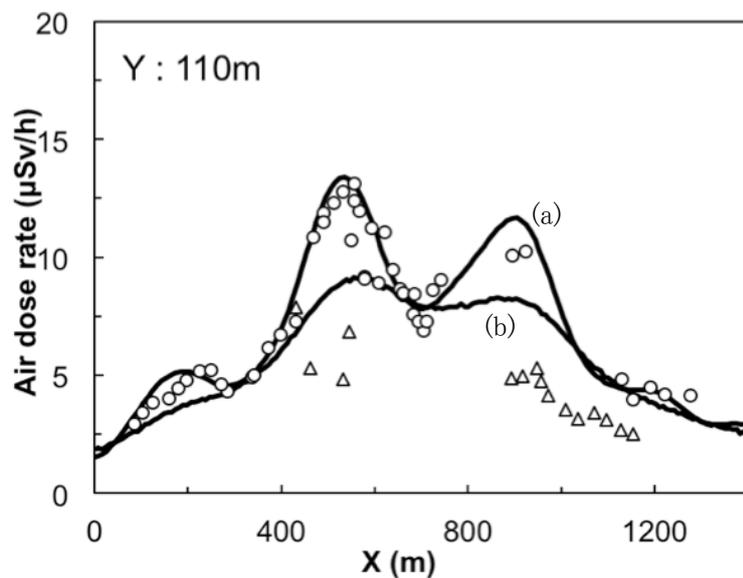


図 2 高度 50m の計数率から求められた地表面の線量率分布。(a)逆問題解析により求めた分布。(b)高度 50 m の計数率を測定点直下の線量率分布に焼き直した地表面の線量率分布。○は地表土壌面の測定値。△は地表アスファルト面での測定値。

2.1.3.2

高線量エリアにおける NaI 線量率計の効率的な運用方法の開発

Development of an Efficient Application of a NaI Survey Meter System in a High Dose Rate Environment

久米恭^{*1}、大谷暢夫^{*2}、眞田幸尚^{*3}、鳥居建男^{*3}、佐藤義治^{*3}、長谷川崇^{*4}、伊藤英樹^{*5}、杉田武志^{*6}

Kyo KUME, Nobuo OHTANI, Yukihisa SANADA, Tatsuo TORII, Yoshiharu SATO, Takashi HASEGAWA, Hideki ITO and Takeshi SUGITA

Abstract

An effective and easy-handling radiation monitoring device is needed especially at severe radiation spread in wide area. In this research, an experiment with a simple modification to an existing survey meter system has been carried out, to contribute to a further recovery from radiation spread in Fukushima Area.

要約

広範囲に放射能汚染された地域では簡易で効率的なモニタリング機器が必要となる。本研究では、既存の NaI 線量率計に簡易な改良を加え、福島地域などの実地での適用を視野に試験を行った。

I. 緒言

大量の放射性物質が福島第一原子力発電所事故により大気中に拡散したことにより、放射能による汚染が広い範囲におよぶ自体が生じている。この問題を解決するためには効率的に除染を行うことが必要である。今回、より迅速な放射能汚染状況の把握に資するため、既存の線量率検出システムを最大限有効活用することにより、簡便で効率的な線源分布取得を可能とする技術の開発を行ったので、報告する。

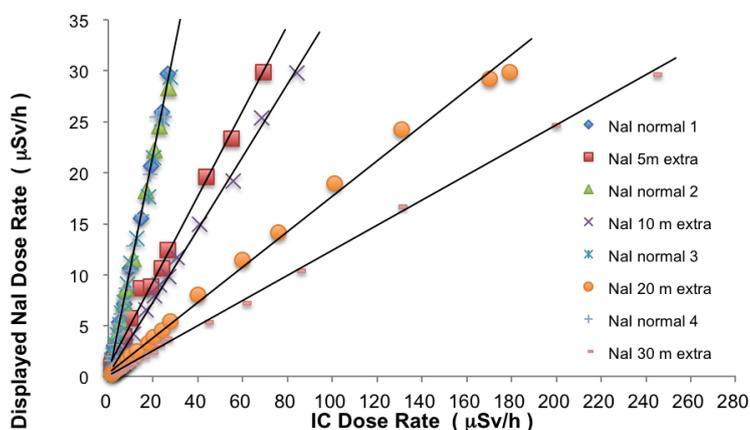


図 1 実験室において取得した線源に対する線量率計(TCS-171 改と TCS-313) 指示値の比較。

II. 方法

使用したのは、日立アロカ製の NaI 線量率計 TCS-171 である。TCS-171 の光電子増倍管に直結されて本体に接続されている BNC ケーブルをいったん取り外し、別の長さ(5 m, 10 m, 20 m, 30 m)の BNC ケーブルを介して再接続した。このように TCS-171 を改造したサーベイメータ(以後 TCS-171 改と表記)を用い、若狭湾エネルギー研究センター(WERC)内の放射線管理区域において、¹³⁷Cs 線源を用い、電離箱線量率計 TCS-311 と同時測定することにより、TCS-171 改の性能評価を行った。

また福島県双葉郡内の帰還困難区域で、付加 BNC ケーブル長 10 m として、TCS-311 と同時測定することにより、TCS-171 改の適用試験を行った。

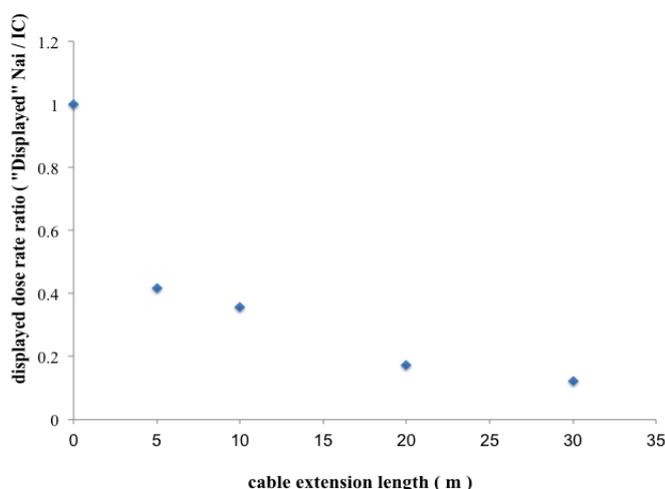


図 2 TCS-171 改の延長ケーブル長に対する TCS-171 改と TCS-311 の指示値の比。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ・協力研究員、^{*3}(国研)日本原子力研究開発機構、^{*4}(同)ハセテック、^{*5}(株)環境総合テクノス、^{*6}(有)科学システム研究所
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で実施した作業で取得したデータの一部を含む。

福島県内の帰還困難区域への入域に際して、双葉町役場・大熊町役場からの公益目的立ち入り許可を取得した。

III. 結果・考察

WERC放射線管理区域で得たTCS-171改とTCS-311の指示値の比較結果を図1に示す。なお線源位置から測定場所までの距離を変化させることにより、空間線量率を変化させている。TCS-171改の延長ケーブル長に応じ、TCS-311に対するTCS-171改の指示値が変化していくことがわかる。延長ケーブル長とTCS-171改指示値/TCS-311指示値変化率を図2に示す。TCS-171のケーブル延長時にTCS-311と校正すれば、TCS-171改がケーブル延長前と比較して広範な線量率範囲に対して適用可能となることがわかる。延長ケーブル長の場合は元のTCS-171の計測範囲の10倍程度まで線量率範囲が拡大されている。

福島県双葉郡内の帰還困難区域で得たTCS-171改(延長ケーブル長10 m)とTCS-311の指示値の比較結果を図3に示す。高線量率域において比例関係が崩れている部分が見受けられる。この部分以外は放射線管理区域内での延長ケーブル長10 mの結果が再現できていることがわかる。また比例関係が崩れているデータは、線源寸法がTCS-311形状よりも小さい場合に取得されていることが、現地での測定で判明している。TCS-311形状よりも線源が小さい場合には、測定で得られる空間線量率はTCS-311有感面積で平均されてしまい、結果として本来の線量率よりも低く表示されてしまうものと考えられる。このような場合にもTCS-171改はTCS-311よりも有感面積が小さいために本来の線量率に追従して測定できているものと想像される。

帰還困難区域内でのTCS-171改の運用例を図4に示す。BNCケーブルは長尺の棒(この場合は竹)に固定され、手元において遠隔(この場合は家屋の雨樋)を簡易に計測することが可能である。

これらの結果により、TCS-171改のように、NaI線量率計のケーブルを延長した場合、広範な範囲の線量率を容易に取得できることを明らかにしたといえる。

IV. 結言

既存のNaI線量率計を有効に活用し、簡便に迅速な線量率分布を取得できる手法を開発した。この手法により、効率的な除染への適用が期待できる。

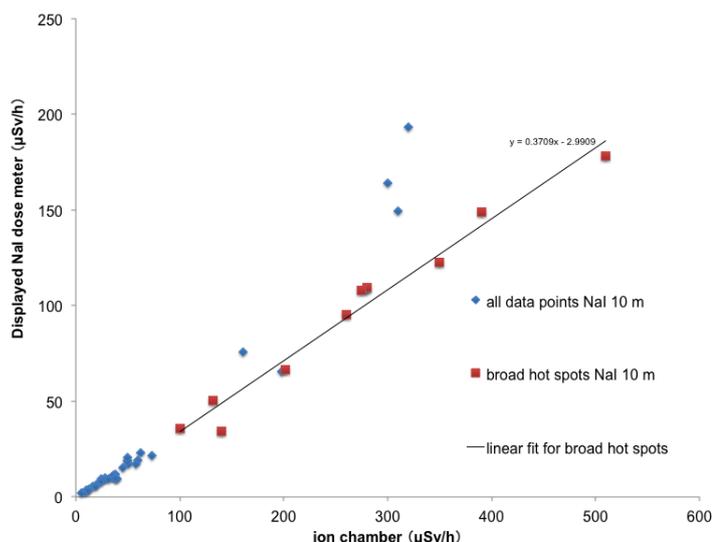


図3 帰還困難区域において取得した線量率計(TCS-171改とTCS-311)指示値の比較。延長ケーブル長は10 m。



図4 帰還困難区域でのTCS-171改運用状況の例。手元において雨樋の迅速な計測が可能である。

2.1.3.3

放射線計測に関する共同研究

Environmental Radiation Dosimetry from Cement Materials using Germanium Gamma Ray Spectrometer

峰原英介^{*1}

Eisuke MINEHARA

Abstract

In order to establish an environmental radiation dosimetry from cement materials at the Tsuruga cement factory using a Germanium gamma ray spectrometer, we continue to measure residual radiation level of the radioactive Cs isotopes in the cement materials over these 5 years after the TEPCO Fukushima first nuclear power plant accident.

要約

ゲルマニウムガンマ線スペクトロメーターを用いた敦賀のセメント工場におけるセメント物質中の放射線計測技術を確認するために東京電力福島第 1 原子力発電所の事故後 5 年に渡り、セメント物質中の放射性セシウムの残留放射線レベルを計測することを続けている。

I. 緒言

敦賀セメント株式会社¹⁾がもっているセメントとその副産物の製造技術と若狭湾エネルギー研究センターが所持している放射線計測装置とその運用技術を組み合わせ、セメントとその副産物などの放射線計測を行った。これにより、セメント工場における放射線計測の基礎的知見を得ることが可能になると考えられる。クリンカー、クリンカーダスト(CD)、セメントなどの計測を約5年間行い、塩化カリウムや塩化セシウム等のアルカリ金属ハロゲン化合物を主体とするクリンカーダストに放射性セシウムが分離減容されて集まることが明らかになった。放射性セシウムの約 78%(焼成時間の最適化を行えば、ほぼ 100%)の分離と千分の一の減容(最適化後も不変)に利用できる。

II. 方法結果考察等

セメント工場における放射線計測の基礎的知見を得ることために以下の 3 点について計測を行った。

① セメントの放射線計測は、含まれる放射性Csが 0.1Bq/g以上では容易に通常の Ge 検出器で検出できた。濃縮されているクリンカーダストの場合、低 BG 型 Ge 検出器は特に必要ないことが明確となった。

② セメントの製造検査技術の開発、クリンカーダストで 0.09-0.05Bq/g程度濃度を得了。クリンカーダストで検出限界以下が見られた。

③ 知的財産(特許出願)の取得と開発結果のまとめと報告(原子力学会 2012 年-2013 年で報告)を行った。

平成 23 年度は、セメント、クリンカーは検出限界以下、クリンカーダストで 0.1Bq/g 程度、平成 24 年度は、セメント、クリンカーは検出限界以下、クリンカーダストで 0.09-0.05Bq/g程度濃度の放射性 Cs を計量した。平成 25、26 と平成 27 年度は平成 24 年度と同様の傾向で、検出限界以下が多く見られた(表1と 2 を参照)。

III. 結言

5 年を経過して、セメント物質の放射線レベルは下がって来ている。更に、セメント製造のためのロータリーキルンの上部に設置されている抽気システムが期待通り働いており、そのためであるがセメントはすべて検出できていない。濃縮する抽気システムの排出物であるアルカリ金属の塩化物、つまりクリンカーダストにも不検出が多くなっている。クリンカーダストは濃縮の性質があるので今後も検出が続くと考えられる。

参考文献

1) 一般社団法人セメント協会編、2016 年度版セメントハンドブック:一般社団法人セメント協会 (2016)

^{*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敦賀セメント(株)と平成27年度共同研究として実施したものである。

表1、平成27年度のクリンカーダスト(クリンカーダスト)採取日と計測値

クリンカーダスト (クリンカーダスト) 採取日	ガンマ線スペクトロメリー [Bq/g]		測定時間 [sec]	試料重量 [g]	Cl 濃度 [%]
	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs			
2015年4月21日	不検出(0.027未満)	不検出(0.023未満)	1000	51.0	21.6
2015年5月14日	不検出(0.017未満)	不検出(0.017未満)	1000	71.3	9.5
2015年6月9日	不検出(0.022未満)	0.037±0.008	1000	53.3	20.9
2015年7月21日	不検出(0.024未満)	0.038±0.009	1000	51.1	15.0
2015年8月11日	不検出(0.023未満)	0.030±0.009	1000	44.8	16.8
2015年9月14日	不検出(0.023未満)	0.027±0.008	1000	59.2	10.4
2015年10月13日	不検出(0.022未満)	0.047±0.008	1000	60.4	18.8
2015年11月16日	不検出(0.019未満)	0.026±0.006	1000	66.9	16.5
2015年12月7日	不検出(0.020未満)	0.022±0.006	1000	62.3	15.6
2016年1月12日	不検出(0.021未満)	不検出(0.018未満)	1000	66.9	9.3
2016年2月15日	不検出(0.027未満)	不検出(0.024未満)	1000	53.2	16.2
2016年3月7日	不検出(0.023未満)	不検出(0.016未満)	1000	61.2	11.4

表2、平成27年度の普通ポルトランドセメント製造日と計測値

普通ポルトランドセメント製造日	ガンマ線スペクトロメリー [Bq/g]		測定時間 [sec]	試料重量 [g]
	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs		
2015年4月上旬(1~15日)	不検出(0.012未満)	不検出(0.010未満)	1000	120.5
2015年4月下旬(16~30日)	不検出(0.011未満)	不検出(0.009未満)	1000	117.3
2015年5月上旬(1~14日)	不検出(0.011未満)	不検出(0.009未満)	1000	123.8
2015年5月下旬(15~31日)	不検出(0.012未満)	不検出(0.011未満)	1000	123.3
2015年6月上旬(1~8日)	不検出(0.012未満)	不検出(0.009未満)	1000	128.9
2015年6月下旬(9~30日)	不検出(0.012未満)	不検出(0.008未満)	1000	121.6
2015年7月上旬(1~15日)	不検出(0.011未満)	不検出(0.009未満)	1000	121.8
2015年7月下旬(16~31日)	不検出(0.011未満)	不検出(0.009未満)	1000	125.1
2015年8月上旬(1~13日)	不検出(0.012未満)	不検出(0.008未満)	1000	122.7
2015年8月下旬(16~31日)	不検出(0.013未満)	不検出(0.010未満)	1000	99.0
2015年9月上旬(1~14日)	不検出(0.011未満)	不検出(0.009未満)	1000	115.0
2015年9月下旬(15~30日)	不検出(0.010未満)	不検出(0.009未満)	1000	128.2
2015年10月上旬(1~13日)	不検出(0.011未満)	不検出(0.009未満)	1000	131.0
2015年10月下旬(14~31日)	不検出(0.014未満)	不検出(0.011未満)	1000	115.1
2015年11月上旬(1~15日)	不検出(0.009未満)	不検出(0.009未満)	1000	117.9
2015年11月下旬(16~30日)	不検出(0.012未満)	不検出(0.010未満)	1000	114.7
2015年12月上旬(1~7日)	不検出(0.011未満)	不検出(0.009未満)	1000	124.7
2015年12月下旬(8~31日)	不検出(0.011未満)	不検出(0.009未満)	1000	124.0
2016年1月上旬(1~15日)	不検出(0.011未満)	不検出(0.008未満)	1000	115.2
2016年1月下旬(16~31日)	不検出(0.010未満)	不検出(0.011未満)	1000	112.5
2016年2月上旬(1~15日)	不検出(0.008未満)	不検出(0.009未満)	1000	126.7
2016年2月下旬(16~29日)	不検出(0.010未満)	不検出(0.008未満)	1000	126.2

2.1.4. 未利用エネルギー利用技術開発

2.1.4.1

マイクロ波加熱を用いた農林水産廃棄物からの有用物質生産
Conversion of Bio-waste into Useful Materials by Microwave Pyrolysis

遠藤伸之*1

Nobuyuki ENDO

Abstract

We investigated the microwave digestion for bio-waste on various conditions, and examined the effect from the product analysis.

要約

農林水産廃棄物試料に対して、種々の条件下でマイクロ波加熱分解を試み、生成物を分析することで分解の効果を評価した。

I. 緒言

バイオマス資源は、再生可能でカーボンニュートラルな資源として有効利用が期待されているものの、回収コストが高く用途が限られることから活用が進んでいない。これまで、木質バイオマスに対してマイクロ波を照射し、急速熱分解によってバイオオイルを生成し、液体燃料を生産するための研究を実施してきた。マイクロ波加熱による急速熱分解技術は、含水率が高い試料を効率よく加熱する手法として優れるものの、単価の低い燃料生産に供する技術としては処理コストが合わず、実用性が低いという問題があった。しかし、局所的にヒートスポットを形成させる技術を使ってマイクロ波の照射量を削減し、省エネルギー化を図るとともに、完全な熱分解ではなく低温度で特異的に起きる弱い分解から生じる低分子化合物を、高分子材料や溶媒等の化学原料として回収できることを明らかにした。本研究では、マイクロ波分解に特異的な低温度での分解、含水率の高い試料を効率よく加熱処理できる特徴を生かし、農水産廃棄物をマイクロ波によって加熱・分解処理し、廃棄物を減容処理するとともに生物由来の有用成分を回収する技術を開発することを目的とした。

II. 成果の概要

農林水産廃棄物(豆殻、枝、搾りかす、木粉、魚粉等)に水を添加し、マイクロ波急速加熱分解で生じる種々雑多な含有成分を、GC-MS, LC-MS, HPLC を用いた分析技術を駆使して、分析比較することができた。菜種搾りかす、トウモロコシの皮、豆の殻や枝などの非可食部位はマイクロ波照射で 220℃ 30 分程度加熱分解することにより、通常加熱では生じない不飽和炭化水素等の化成品材料となりうる有機化合物や、窒素や酸素を含む複素環式化合物といった生理活性を持ち医薬品原料となり得る化学種が特異的に生成することが確認できた。

また、加熱処理時にアルコールを少量添加すること生成物は大きく異なることがわかった。より価値の高い生成物が生じているものの生成量は大きく変化せず、分解処理と目的物回収にかかるコストは増加するため、検討が必要である。また、炭酸塩を添加することで、マイクロ波吸収効率が向上し、少ない電力投入で高い温度が維持でき、分解生成する化学種・量とも増大するが、生成物の化学種は異なっていた。

試料形状の差異による分解物の比較検討を行ったところ、マイクロ波加熱処理前に、試料を粉碎することで、分解生成物の化学種に大きな変化はないが、生成量は向上することが確認できた。

III. 結言

マイクロ波加熱分解は、ヒーター等を用いた従来の外部加熱による分解では生じない特異的な反応が比較的低い温度で高効率で起きていることが明らかとなり、有用物質生産を目的とした分解処理にマイクロ波加熱を用いることは優位であることを明らかにした。今後は、効率よく回収でき価値の高い生成物を選定し、分解処理・有用資源回収・残渣処理の一連の過程を想定し、廃棄物処理-有用物質回収が実現できるシステムの構築を検討する。

*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。

2.1.4.2

太陽炉と太陽熱エネルギー利用研究
 Research Activity on the Applications of the Solar Thermal Energy by the Solar Furnaces
 篠田佳彦*1、重田達雄*1
 Yoshihiko SHINODA, Tatsuo SHIGETA

Abstract

Since FY 2005, we have developed the utilization of the solar thermal energy by the solar furnace.

要約

集光太陽炉による太陽熱エネルギーの活用方策を開発してきた。近年、新たな展開を模索している。

I. 緒言

太陽光をフレネルレンズで集光して超高温場を作り出す「太陽炉」研究を平成 17 年(2005 年)から開始している。この間に大型／小型太陽炉を設計・製作し、かつ熟成(保守を含む)しながら各種の実験研究に供した。

II. 成果の概要

エネ研では、化石燃料を用いずに超高温場を作り出す「太陽炉」の活用先について探索的な調査研究を行っている。この中で利用範囲拡張を目指して、気密性能を有する石英管型のソーラ反応器を開発した。

吸排気系を改良したソーラ反応器と改良型小型太陽炉を用いて、2013 年から大阪大学(小林慶裕教授)で超高温場による酸化グラフェンからの高結晶性グラフェンの形成に関する実験研究を行い、エタノール環境下加熱で有益な乱層構造の多層グラフェンの生成を見出している 1)。本年度は大型太陽炉による加熱実験を見送ったが、小型太陽炉以上の高温環境で発現した現象の状況を検証する実験を 2016 年度以降に計画している。

さらに、太陽炉の新たな展開も模索し、関係機関と共同して公的研究資金の確保を目指した。JST/JAXA による『太陽系フロンティア開拓による人類の生存圏・活動領域拡大に向けたオープンイノベーション』に関する研究提案』において「月土壤の水素還元システムの構築 ―低品位原料の工業的利用を目指して―」が採択された。この研究は、「月土壤などの低品位酸化物原料を還元対象とし、還元が難しい酸化物からの金属製造プロセスの工業的応用を検討する。また、太陽炉を用いた本プロセスの実現性を検討する」(実施計画書抜粋)もので、九州大学とヒロセ・ユニエンス(株)と共に研究に参画する。また、NEDO に応募した以下は不採択となった。

① 海洋微細藻類の培養、油成分の分離抽出および太陽熱による有機廃棄物の炭化と容積低減

「新エネルギーベンチャー技術革新事業」(フェーズ A)において、「再生可能エネルギーによる海洋バイオマス由来革新的水素・燃料生成システムの技術開発」と題して応募(申請者:アンヴァール株式会社、連名申請者として参加)。

② 酸化マグネシウムの熱還元による持続利用可能なエネルギーサイクルの確立

「エネルギー・環境新技術先導プログラム」において、「熱再生可能な安全&廉価発電物質 Mg 循環」と題して応募(研究開発責任者:東北大学、研究実施機関として参加)。

なお、提案型自主研究として実施した「酸化セリウムの基礎物性の把握と燃料電池や水素製造などへの応用」における太陽炉を活用した実験研究については、本年報において別途記述する。

III. 結言

太陽炉の新たな展開を模索し、JAXA らとの共同研究として資金確保に成功し、太陽炉の月面での活用とする興味深い展開に向けた活動を開始するに至った。これには、フレネルレンズを用いた透過・屈折型の太陽炉の頑強性などの利点が活かされたものと捉えられ、蓄積したエネ研の成果が表出されたものである。

参考文献

- 1) Takashi Ishida et al , Anomalous restoration of graphitic layers from graphene oxide in ethanol environment at ultrahigh temperature using solar furnace, Volume 9, Number 2, pp 025103-1~025103-4, 2016

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー開発グループ、本研究の一部(太陽炉を用いた反応性超高温処理によるグラフェン形成法の研究)は、科研費(26600044)の助成を受けた。

2.1.4.3

酸化セリウムの基礎物性の把握と燃料電池や水素製造などへの応用

Research on the Properties of Cerium Oxide and for the Applications to Fuel Cell and to Hydrogen Production

篠田佳彦*1、石神龍哉*2、重田達雄*1、鈴木耕拓*2、遠山伸一*4、安永有史*2、山岸隆一郎*3

Yoshihiko SHINODA, Ryoya ISHIGAMI, Tatsuo SHIGETA, Kohtaku SUZUKI,

Shin'ichi TOYAMA, Kazufumi YASUNAGA and Ryuichiro YAMAGISHI

Abstract

We have examined the properties of cerium oxide exhibiting characteristic behavior at high temperature. Then we have studied to aim at the applications to hydrogen production from water by renewable energy.

要約

高温環境で特徴的な挙動を示す酸化セリウムの高温物性を把握するとともに、その特徴を活かして再生可能エネルギーによる水からの水素製造などへの応用を目指した基礎研究を行った。

I. 緒言

セリウムの特徴的な性質として、セリウムの酸化数が 4 価と 3 価の間で可逆的な変化を示すことが挙げられ¹⁾、この特徴を利用することで固体酸化物形燃料電池の電解質膜や太陽炉などの再生(持続)利用可能なエネルギー源による水や二酸化炭素の分解への適用が期待される。ここでは、酸化数の特定を目指した上で基礎的な物性、特に高温下での特性に着目した基礎研究から着手した。本研究の目的は以下の 3 点である。

1. 核燃料模擬物質として He イオン注入実験に供する酸化セリウム(4 価)のバルク状単結晶の生成
連携重点研究「ミクروسコーピックな視点から見た核燃料中の希ガス析出挙動の解明」の一環として実施
2. 太陽炉による水の分解(水素製造)への適用を目指した物性把握
3. 固体酸化物形燃料電池の電解質膜への適用を目指した薄膜の作製と薄膜特性評価

II. 成果の概要

各種の加熱実験後の試料を XPS、SEM、TEM、EPMA、XRD などの計測機器を用いて観察(分析・評価)し、酸化セリウムの高温特性とその特徴による特異な現象の把握に努めた。また、固体酸化物形燃料電池の電解質膜への適用を考慮し、酸化セリウムの薄膜を作製した。以下に本年度の実施項目と概要を示す。

1. 大気下 1600°C 加熱(電気炉)

酸化セリウム粉末試料(高純度化学研究所製:純度 99.9%、黄色の粉末)を高純度アルミナるつぼに装入し、100°C/10 分で昇温し、1600°C で 8 時間保持した後、室温まで降温した。結晶子サイズが増加したが、結晶構造に変化はなかった。加熱実験前後ともデータベースなどから蛍石型結晶構造の 4 価の酸化セリウムであることを確認した。加熱後試料は、淡いピンク色を呈していた。

2. 大気下 2000°C 程度(融点が既知の物質の熔融状態で加熱温度を評価) 加熱(大型太陽炉)

表面に霜柱状の結晶が生じた。加熱前と比較し、結晶サイズが大幅に増加したことを観察した。図 1 に、緻密質ジルコニア製のるつぼに装入した粉末試料の加熱後状態を示す。

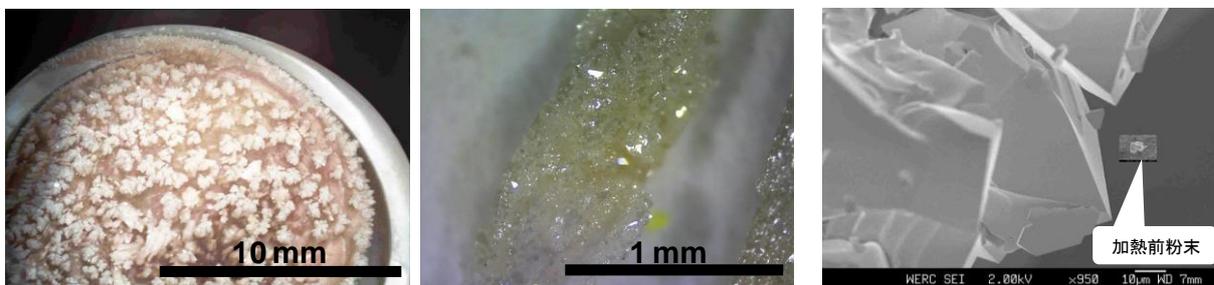


図 1 太陽炉で加熱した酸化セリウム粉末試料の加熱後状況観察結果

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー開発グループ、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*3(公財)若狭湾エネルギー研究センター・企画支援広報部・技術相談室 *4(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の提案型自主研究として実施した。

本研究の一部は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、および国立大学法人東京大学大学院工学系研究科との連携重点研究として実施した。

3. 大気下 2500°C程度 加熱(8 kW ファイバーレーザー)

スポット径 ϕ 25 mm 固定で 100 W から 2000 W まで出力を変化させ、垂直上方からレーザーを照射し、多孔質ジルコニア製るつぼに装入した粉末試料を加熱した。1000 W で溶融し、太陽炉加熱と類似した霜柱状の結晶が生じた。2000 W の加熱では、照射後 20 秒で白熱し、白煙が生じた。中心部は激しく反応し、陥没した。その周辺は黄色に近い黄緑色の霜柱状となった。中心の底部では金属とも見受けられる溶融表面が観察された。さらに、同条件で融点が 2677°C のジルコニウム酸化物粉末を加熱し、セリウム酸化物粉末と同様な溶融形態を示すことを確認した。

4. Ar 下 2000°C、2200°C 加熱(電気炉)

粉末試料を黒鉛製るつぼに装入し、アルゴンガス流入条件で 100°C/10 分で加熱し、所定温度で 3 時間保持した。温度降下時も室温に至るまでアルゴンガス流入を継続した。試料の取り出し時の大気開放は最小限に留め、アルゴンガスで満たした容器内に保管した。2000°C 加熱では粉末形態は消失したが溶融して液体状態となった形跡はなかった。加熱後は淡い黄緑色を呈した。2200°C 加熱では液体化した形跡があり、金属表面と見受けられる表面状態の灰色の溶融物が観察された。

5. He 下及び大気下において室温から 1400°C まで変化させた結晶構造解析

大気中および He 中で加熱しながら結晶構造の変化を調べた。両雰囲気中で温度上昇による結晶構造に顕著な変化は見られなかったが、He 中では 1400°C 付近から Pt ヒーターと酸化セリウム試料の接触を防止するために配置した単結晶サファイア(アルミナ)板と反応した形跡が現れた。これは、4 価から 3 価への変化を示すものと推測でき、非酸化雰囲気下での高温加熱で還元反応性を有する状態への変化を示す情報と思われる。

6. 薄膜作製

粉末試料と同等な原料をペレット化したターゲットを用いて、高周波マグネトロンスパッタ法により 300°C、500°C 条件で薄膜を作製した。500°C 条件では 0.2 μ m のほぼ均質な厚さの薄膜となった。

7. 実験後試料分析(XPS、SEM、TEM、EPMA、XRD など)

X 線光電子分光(XPS)を用いて太陽炉加熱後試料を分析した。XPS では、対象元素の電子状態を知ることができるので、酸化状態(酸化数)を推測できる。図 2 に、ペレット状に成型後、太陽炉で加熱を行った試料の XPS 測定結果を示す。(1)に示す標準試料として用いた CeO_2 粉末の測定結果と比較すると、(3)に示す試料最表面に存在するセリウムはほぼ 4 価の酸化物状態であることが観測されたが、試料最表面を Ar イオンガンによるスパッタリングで除去すると、標準試料や最表面とは異なるピーク形状の(2)に示す測定結果が得られた。これは、高温加熱により一度還元をされたものが、大気中で再酸化されたためであると推測することができるが、3 価の酸化セリウムの生成を確認するためには、標準試料等を用いた同定作業が必要となる。

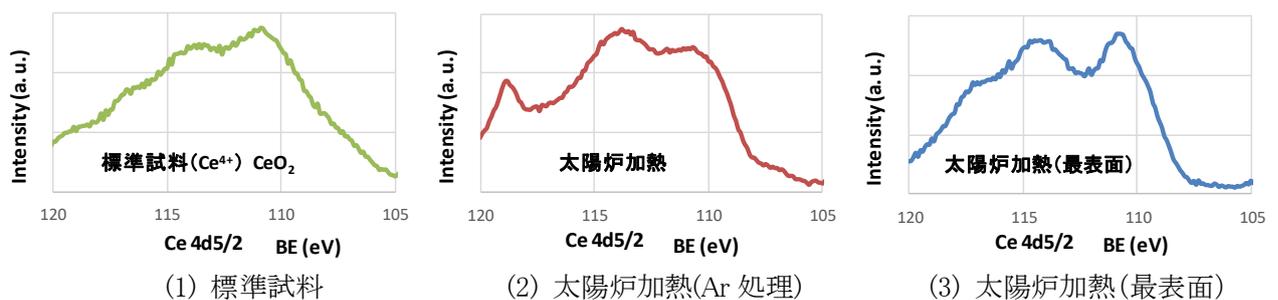


図 2 太陽炉加熱試料の XPS 分析結果

III. 結言

酸化セリウム粉末試料を大気中において光照射加熱で溶融させることで酸化数がほぼ 4 価の緻密で大結晶粒径のバルク試料の作成を目指して実施した、約 2000°C の集光太陽炉と 2500°C 以上と推定されるファイバーレーザーによる加熱で、ともに霜柱状結晶が発現することを観察した。そして、酸化数がほぼ 4 価の緻密で大結晶粒径のバルク試料を作成するためには酸素濃度を制御した環境での加熱が必要となることが示唆された。これらの成果をもとに、本研究ではエネ研が保有する太陽炉技術を用いて、持続利用可能な形態で水を分解し水素を得る(あるいは、二酸化炭素を分解し一酸化炭素を得る)可能性を見出した。

参考文献

1) M. Zinkevich et al., Thermodynamic modelling of the cerium-oxygen system (2006)

2.1.4.4

気泡駆動型循環式ヒートパイプによる熱輸送
Heat Transport of Bubble-Actuated Circulating Heat Pipe (BACH)
明里栄策*¹
Eisaku AKARI

未利用エネルギーや廃熱等を利用するために効率的な熱輸送技術の開発が求められており、無動力で熱を輸送するヒートパイプは重要な機器である。本研究が対象とする気泡駆動型ヒートパイプ (bubble-actuated circulating heat pipe: BACH) は、若狭湾エネルギー研究センターが発明したものである。(特許第 4771964 号)

本研究では、BACH の実用化を目指した取り組みの一環として、地中熱を利用した駐車場の融雪装置を設置し、温度計測等の融雪状況の観察を行った。設置した装置は、地中約 3.5m を吸熱部として地表約 5cm 下に約 70cm の円環状の放熱部としたものを 1 台分の駐車スペースに 8 本を施工した。観察結果、施工後約 1 年経過した後の観察においても正常に作動し、降雪時の地表面温度約 1℃ に比し、放熱部は約 3℃ に保たれていることが観測された。ただし、今回の設置個所は地中 3.5m の温度は約 8℃ と低く、融雪性能としては十分な性能を発揮するまでには至らなかった。

BACH の特性を生かすためには、吸熱部と放熱部の温度差が大きいことが重要であり、そのような実用化に適した使用方法を今後も探索していくことが望まれる。

*¹(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー開発グループ、

2.1.5. 生物作用を利用した環境浄化・修復技術の開発

2.1.5.1

微生物を用いた汽水湖沼浄化研究

Study of Improvement of Water Quality in Brackish Lake by Photosynthesis Bacteria

畑下昌範^{*1}

Masanori HATASHITA

Abstract

A water purification technique with the use of photosynthesis bacteria was examined to improve water quality in wide-closed water area polluted by waste water. The dependence properties of temperature and light intensity on growth rate of photosynthesis bacteria were examined.

要約

水質の悪化した湖沼の光合成微生物による浄化について研究を行った。また、光合成微生物の増殖速度の温度依存性および光強度依存性について検討した。

I. 緒言

福井県の三方五湖や北潟湖では富栄養化による水質悪化が問題となっており、水質改善が求められている。生物を用いた環境浄化は、環境に優しく、大がかりな装置を必要としないという利点があるが、その一方で、用いた生物の利用法が少なく、処理に困るという問題点がある。本研究では、微生物を用いた水質浄化と有用物質生産とを両立する方法の開発を目指している。

これまでの研究で、三方五湖や北潟湖から集積培養により光合成微生物を複数系統単離し、それらにイオンビーム照射を行って、リンをポリリン酸として蓄積する有用な変異体の獲得してきた。また、平成 26 年度は、選抜した光合成微生物の汽水条件下での浄化能を評価した。今回は、実地試験に向けた試みとして、光合成微生物の増殖速度の温度依存性および光強度依存性について検討した。

II. 成果の概要

光合成微生物の 4 系統を用いて、温度 3 条件、光強度 4 条件で湖水を模擬した試験管中での微生物の増殖性を検討した。増殖性は、光合成微生物の光合成色素の吸光度をモニターすることにより行った。光強度 $160 \mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ における増殖速度の温度依存性の一例を図 1 に示す。いずれの温度においても時間の経過とともに、吸光度は増加したが、吸光度の著しい増加を始めるまでの時間は温度に大きく依存し、 30°C 条件が最も早く、約 20 時間の経過で明確な吸光度の増加を認めた。一方、 15°C 条件では約 70 時間経過したあたりから吸光度の増加が見られた。光合成微生物の増殖速度の光強度依存性については、今回試験した $260 \mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ までの光強度の範囲では、その増加に伴い増殖速度は増大する傾向を示し、強光阻害による増殖の遅延は見られなかった。

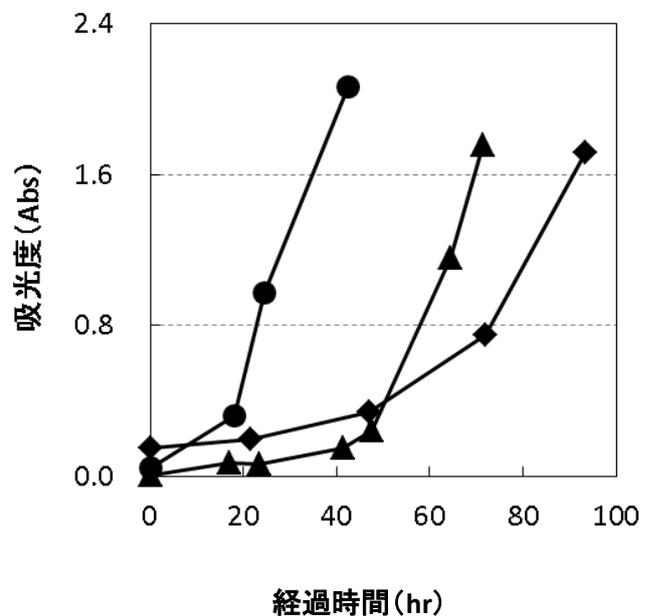


図 1 光合成微生物の増殖速度の温度依存性
(●: 30°C 、▲: 20°C 、◆: 15°C)

III. 今後の課題と展望

今後は、汽水条件下で増殖可能な光合成微生物の特性結果をもとに、実地試験に対応した浄化ユニットの設計、製作を行う予定である。

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

2.1.5.2

アブラナの三方湖上栽培試験

Cultivation Trial of Oilseed Rapes on the Surface of Lake Mikata

高城啓一*¹

Keiichi TAKAGI

Abstract

Cultivation of oilseed rapes(*Brassica napus*) on the surface of Lake Mikata was examined. They grew, bloomed, and seeded on the surface of the lake.

要約

アブラナの三方湖上栽培試験を実施した。アブラナは、湖上で生長、開花、結実し、湖上栽培が可能であることが実証された。

I. 緒言

福井県内の湖沼は、窒素やリンの蓄積による富栄養化が問題となっている。富栄養化を解消するためには、原因物質の水域への流入抑制、水域からの除去が必要である。生態系への影響を避けるため、これらの対策には、穏やかな方法を長期にわたって継続する必要がある。生物を用いて富栄養化物質を吸収させることは、穏やかな水質浄化法の一つであるが、従来の方法は、吸収させた後の生物の利用方法が無いという問題点があった。

そこで、湖沼の富栄養化物質を吸収する手法の一つとして、水面で陸生の有用植物を育て、富栄養化物質を吸収させた後、増殖した植物を利用することを考えた。これまでに、溜池において水面でアブラナが栽培可能であることを確認した。そこで平成 27 年度は、アブラナの三方湖上での栽培を試みた。湖上で栽培したアブラナは、陸上のアブラナと同様に生長、開花し、結実し、湖上栽培が可能であることが実証された。

II. 材料と方法

実験材料としてセイヨウアブラナ(*Brassica napus*)を用いた。アブラナは、若狭湾エネルギー研究センターの植物育成室で草丈 10~15 cm まで育苗した後、日向土 10%、パーライト 90%で構成された栽培基質を含む栽培コンテナに移植し、FRP 性外枠を持つ植物育成床(外寸縦横 1.6 m, サカイオーベックス社)に積載(1 基で 12 個の栽培コンテナを積載可能)して三方湖上で栽培した。栽培地は三方湖南岸、ハス川河口東部に設置した。栽培試験は平成 27 年 2 月下旬から平成 27 年 5 月下旬まで実施した。栽培後の植物育成床、植物体、栽培コンテナは、若狭湾エネルギー研究センターに回収し、種子や植物体の重量を測定後、リン含量を測定した。リン含量の測定は、まず材料をステンレスビーズで粉碎後に材料中に含まれるリンを酸性ペルオキシ二硫酸カリウム-紫外線分解法でオルトリン酸化し、モリブデン青吸光光度法で定量した。

III. 結果と考察



図 1 三方湖面の植物育成床上で開花したアブラナ

湖上で栽培したアブラナは、湖に発生する波の影響で栽培基質の流出が生じた。これは事前に溜池で行った試験では想定されていなかった事態であった。また、栽培地周辺に生息するカモ類による食害を受けた。これらが原因となり、当初行った栽培試験ではほとんどのアブラナが失われてしまった。そこで、基質の流出に対しては、コンテナ表面を植物育成用繊維マット、およびポリプロピレンフィルムで覆う対策を施し、カモ類による食害に対しては、植物育成床周囲にネットを巡らせる対策を施した上で、予備栽培した苗を用いて栽培試験を継続した。その結果、基質の流出や食害を防除すること

*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。

ができた。湖上栽培したアブラナは、4 月中旬から開花を始め、5 月初旬まで開花を続けた(図 1)。開花した花は結果し、湖上で種子成熟が見られた。ただし、予備的に準備した株で、十分な栄養生長が無いまま生殖生長に移行したため、ほとんどの株が草丈 50 cm 以下で十分な生長は得られなかった。

回収した植物育成床 1 基から湿重量 1.18 kg のアブラナ地上部が得られた。湿重量-乾燥重量比から算出される乾燥重量は 280.1 g と推定された。回収された種子は、55.01 g であった。回収した地上部、および種子のリン含量はそれぞれ、358 mg、および 599 mg であった。したがって育成床 1 基で 957 mg のリンが回収されたことになる。これは三方湖全リン濃度を 0.05 ppm と仮定した場合、19.2 t の湖水に含まれるリンに相当する。今回の試験では、予備の苗を使用したためアブラナが十分成長する前に生殖生長に移行したが、仮にアブラナが十分生長し、株あたり 300 g の地上部湿重量を持ったと想定し吸収されるリンの量を推定すると、育成床 1 基あたりのリン回収量は 21.3 g であり、これは 852 t の湖水に含まれるリンに相当する。

IV. 結言

三方湖の水面でアブラナを栽培試験を実施し、富栄養化物質であるリンを吸収させることが可能であることを実証した。三方湖は淡水湖であるが、三方五湖の水月湖、菅湖、久々子湖は汽水湖であり、同様に富栄養化が問題となっている北潟湖も汽水湖である。これらの汽水域に対応するため、イオンビーム照射を用いて汽水域に適用可能なアブラナを既に作出している。今後は、この耐塩性アブラナを汽水域に適用時に、変異遺伝子の環境中への拡散を防除するため、耐塩性、かつ雄性不稔のアブラナの作出を検討する。

2.2. 医療分野

2.2.1. 粒子線がん治療高度化のための生物応答解明研究

2.2.1.1

陽子線による細胞へのダメージ評価による照射線量の適正化研究

Estimation of the Exposure Dose with the Evaluation of Cellular Damage by Proton Beams

前田宗利*¹、松本英樹*²、伊東富由美*¹、田辺久美子*¹、長谷川崇*^{1,3}、水嶋慧*¹、山東新子*¹、久米恭*¹

Munetoshi MAEDA, Hideki MATSUMOTO, Fuyumi ITO, Kumiko TANABE,

Takashi HASEGAWA, Satoshi MIZUSHIMA, Shinko SANDO, and Kyo KUME

Abstract

To accumulate the basic data for the advancement of the proton beam cancer therapy based on detailed biological dosimetry, we estimated the cellular damage induced by proton irradiation with various kinds of biological analysis.

要約

詳細な生物線量分布に基づく陽子線がん治療の高度化に向けた基礎的なデータの蓄積を目指し、陽子線飛跡における電離密度分布の解析や種々の生物学的な解析によるダメージ評価を実施した。

I. 緒言

陽子線がん治療では、腫瘍周辺の正常臓器への影響を最小限にする必要性から、患部への治療(照射)回数、低減や周辺正常組織に対する被ばくの低減化が課題となっている。より治療効果が高く、患者への負担の少ない適正な照射線量を把握することは、福井県立病院陽子線がん治療センターをはじめとする陽子線治療施設における治療技術の最適化、高度化に直結する。本研究では、がん治療に効果的な線量や周辺正常細胞に影響を与えない線量について、細胞生物学および実験動物学的な手法を用いて検証し、より治療効果が高く患者への負担の少ない適正な照射線量を把握するための基礎的なデータを蓄積する。

II. 成果の概要

1. 陽子線の分割照射によるモデル動物の放射線感受性評価

- (1) 正常モデルマウス(ICR マウス、♂、8 週齢)に対して、陽子線拡大ブラッグピーク(SOBP)による分割全身照射(1.5, 2.5, 3.5 Gy/day × 4 day)を実施し、30 日間飼育して生存率を測定した(図1)。コントロール群および 1.5 Gy/day × 4 day 照射群では、顕著な身体症状の変化は見られなかった。2.5 Gy/day × 4 day 照射群における異常所見は、血流障害、動作緩慢化、毛並悪化および脱毛であり、死亡した 1 個体を除いていずれも軽度の障害で発症より 4~10 日の間に回復した。観察期間中の平均体重が、照射後の経過日数とともに順調に増加して行くことから、放射線障害の主因は、血液・骨髄障害であると考えられる。一方、3.5 Gy/day × 4 day 照射群では、照射後 7 日目に全個体において動作緩慢化が観察され、照射後 8~13 日目に更に血流障害、耳介部炎症、眼窩部炎症あるいは耳出血等の身体症状が現れた。観察期間中の平均体重が、照射後 7 日目から急激に減少することと併せて考えると、本群では、血液・骨髄障害に加えて、消化管障害が生じていると推察される。
- (2) (1)と同様の照射を実施し、照射後 10~11 日目に照射個体が死亡した 3.5 Gy/day × 4 day 照射群を除く生存マウスの大腿骨より調整した骨髄幹細胞中の造血前駆細胞の生存率を測定した(図2青色)。コントロール群と 1.5 Gy/day × 4 day 照射群では、増殖能に顕著な差異は認められなかった。一方、2.5 Gy/day × 4 day 照射群では、有意な増殖能の低下が観察された。図2(赤色)に示した様に、単回全身照射では、4.0 Gy を超えると造血前駆細胞の増殖能が顕著に低下する。1.5 Gy/day × 4 day あるいは 2.5 Gy/day × 4 day で分割全身照射した場合の造血前駆細胞の増殖能は、4.0 Gy 以下で単回全身照射した場合よりも有意に高かった。以上の結果から、分割全身照射の場合、1 回線量が 2.5 Gy を超えると急速に造血前駆細胞の増殖能が低下する可能性が高く、個体の生存に不可欠な造血系の回復能が低下して行くことが示唆された。

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

本研究は、福井県からの受託研究として、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと福井大学が共同研究として実施した。

2. 陽子線の分割照射がモデル動物の各種臓器へ与える影響の評価

- (1) ICR マウス(♂, 8 週齢)に対して、陽子線 SOBP による分割全身照射(1.5, 2.5, 3.5 Gy/day × 4 day)を実施し、照射後 1 日あるいは 14 日間飼育した後、精巣を摘出して TUNEL 染色法により精細管断面におけるアポトーシス誘導頻度を測定した(図3)。照射 1 日後のアポトーシス誘導頻度は、総線量の増加とともに増大する傾向が観察されたが、2.5 Gy/day × 4 day および 3.5 Gy/day × 4 day 照射群の間には有意差が観察されなかった。また、3.5 Gy/day × 4 day 照射群において、顕著な組織構造異常が観察された。照射後 10 日目および 11 日目に照射個体が死亡した 3.5 Gy/day × 4 day 照射群を除き、照射 14 日後に観察されたアポトーシス誘導頻度はコントロール群と同レベルであり、損傷細胞の排除および正常細胞の増殖により組織が正常化されたと考えられる。
- (2) (1)と同様の照射を実施して小腸を摘出し、TUNEL 染色法により分化途上の増殖細胞および幹細胞が存在する陰窩(crypt)領域のアポトーシス誘導頻度を測定した(図4)。照射 1 日後では、各照射群の腸管断面あたりに誘導される平均アポトーシス細胞数に有意差は見られなかった。また、精巣の場合と異なり、いずれの照射条件においても陰窩の組織構造等に顕著な異常は認められなかった。一方、照射 14 日後の平均アポトーシス誘導細胞数は、3.5 Gy/day × 4 day 照射群を除き、全ての照射条件においてほぼ一定であり、コントロール群におけるアポトーシスの誘発頻度との間に有意差はなかった。これらの結果は、照射後 14 日までの間に陰窩を構成する細胞群に生じたダメージから回復することを意味すると考えられる。

III. 結言

幹細胞は、各臓器の中で個別の微小環境(ニッチ)において長期に生存するとともに多能性を維持し、それぞれの臓器に存在するあらゆる分化細胞を再現できる状態を保っている。一般的に、幹細胞は、高いテロメラーゼ活性や DNA 修復活性の他、外因性毒物を排除する機構を有しており、アポトーシス耐性であることが知られている。このため、放射線を含む損傷因子によってダメージを受けた幹細胞には時間とともに変異が蓄積し、悪性の形質転換を起こす可能性が指摘されてきた。本研究の結果、放射線に暴露された精巣および小腸では、幹細胞あるいは前駆細胞に特異的にアポトーシスが誘導されることが明らかとなり、放射線によるダメージを排除し、幹細胞の健全性を維持するメカニズムが存在する可能性が明らかとなった。また、この特徴を利用することで、被ばく後の比較的早い段階で正常臓器へのダメージを評価できる可能性が示された。今後は、腫瘍を移植したモデル動物に対する、分割照射による治療を模擬した実験研究を行う事で幹細胞影響および腫瘍動態の解析等を進めて行く。

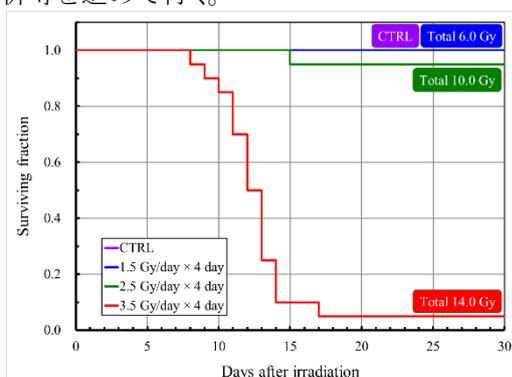


図1 陽子線 SOBP で分割全身照射した ICR マウスの 30 日生存率

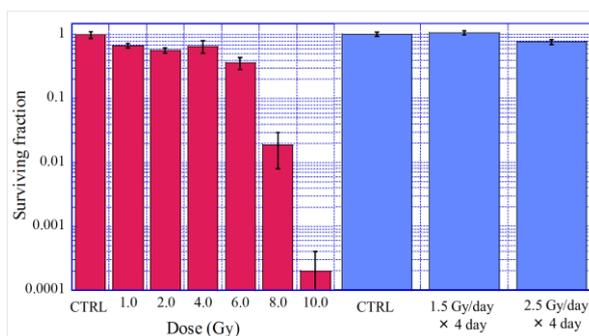


図2 陽子線 SOBP で単回全身照射(赤色)および分割全身照射(青色)した ICR マウスから照射 14 日後に回収した骨髄幹細胞中の造血前駆細胞の増殖能

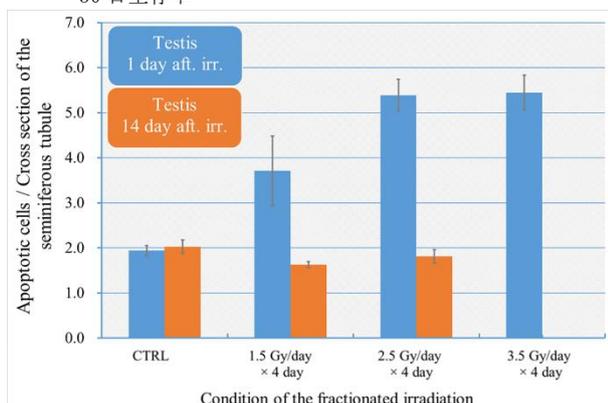


図3 アポトーシス細胞が観察された精細管断面に誘導される平均アポトーシス細胞数の変化(水色:照射 1 日後、橙色:照射 14 日後)

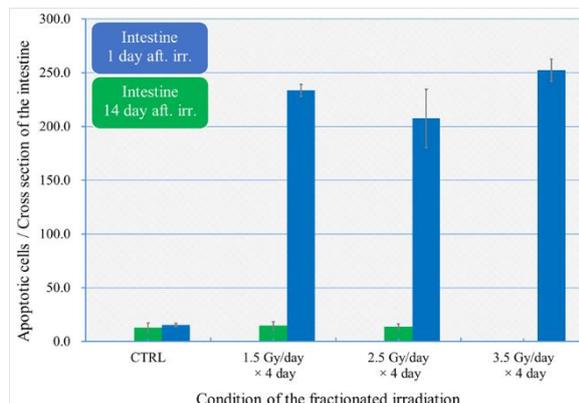


図4 腸管断面の陰窩領域に誘導された平均アポトーシス細胞数の変化(青色:照射 1 日後、緑色:照射 14 日後)

2.2.1.2

Super-SCID マウスを用いたヒト臨床がん並びに正常臓器・組織に対する陽子線等の
増殖抑制効果と副作用解明

Growth Suppressive and Side Effects of Proton Beam on the Human Cancer and Normal Tissues

野村大成*¹、梁治子*¹、足立成基*¹、久米恭*²、前田宗利*²、伊東富由美*²

Taisei NOMURA, Haruko RYO, Shigeki ADACHI, Kyo KUME, Munetoshi MAEDA and Fuyumi ITO

Abstract

Growth suppression of human cancer tissues and side effects on normal human tissues by proton were studied using super-SCID PDX (Patient-derived Xenograft) model. Preliminary study revealed dose dependent suppressive effects of proton beam and X-rays on human lung cancer, prostate cancer and pancreatic cancer. In the financial year of 2015, suppressive effects of proton beam on human breast cancer tissues were examined. Further studies will be continued and results will be compared with those of heavy ion beam. Changes in gene expression will be also examined in normal human tissues.

要約

ヒト臨床がん並びに正常臓器・組織移植 Super-SCID マウス PDX (Patient-derived xenograft)モデルを用いて、陽子線照射によるがん増殖抑制効果と正常組織への副作用の研究を行った。予備実験では、陽子線照射は線量に応じて、ヒト肺がん、前立腺がん、膵臓がんの増殖を抑制した。27 年度は、陽子線のヒト乳がん組織への増殖抑制効果について研究を行った。研究を継続し、その結果は、重粒子線の結果と比較する。また、ヒト正常組織の遺伝子発現の変化も検出する。

I. 緒言

悪性腫瘍(がん)は、我が国では 1981 年以降死亡原因の第 1 位であり、しかも新たにがんと診断される患者の約 60%は 65 歳以上である。高齢者のがんの増加を鑑みると、革新的な非侵襲的がん治療法として陽子線治療の持つ意義は極めて高い。

本研究においては、ヒト臨床がん並びに正常組織移植 Super-SCID マウスモデル¹⁻⁴⁾を用いて、陽子線照射による増殖抑制効果や副作用を解明し、より有効かつ安全な陽子線医療の発展につなげることを目的とし、肺がん、前立腺がん、膵がんおよび正常肺組織を用い若狭湾エネルギー研究センターにおいて 26 年度より開始している。27 年度より、乳がんを加えて本研究を継続し、重粒子線との比較も行い、より有効かつ安全な粒子線医療の発展につなげ、国民の健康・医療・福祉の向上に貢献する。

II. 方法

1. 医薬基盤・健康・栄養研究所(基盤研)において、C3H/HeJ/NOs-scid マウスを繁殖し、ヒト臨床がん、正常肺等をSCIDマウス左右下肢に移植したPDXを作成する。
2. 無菌飼育箱(エコワーク)に入れ、基盤研より若狭湾エネルギー研究センター(WERC)放射線研究棟に搬入する。
3. クリーンベンチ内でマウスをペントバルビタール(6.5 mg/ml、0.2 ml/25g マウス、腹腔内投与)で鎮静し、滅菌・消毒済照射箱に入れて紙テープで軽く固定し、照射室3(がん治療コース水平)に移送し陽子線の局所(左右下肢大腿部)照射(1、3、5、10 Gy; 200 MeV, 3 nA 程度)を行う。
4. 照射終了後、クリーンベンチ内で無菌飼育箱に戻す。放射化の減衰を確認した後、搬出し、医薬基盤研究所動物実験施設に戻す。腫瘍サイズを定期的に計測し、陽子線照射による腫瘍抑制効果をX線による結果と比較する。正常ヒト組織への作用も比較する。

* 医薬基盤・健康・栄養研究所動物実験施設;動物実験委員会の承認の下(動物実験計画書承認番号 DS18-086R15、代表・野村)、ガイドラインに沿い十分に動物愛護上の問題点に配慮し研究を行っている。WERC;本動物実験計画は医薬健栄研及びWERC理事長の承認の下、共同研究契約書(若エネ研第 8 号、代表・野村、28 年度更新申請中)に沿い実施中である。

*¹(国研)医薬基盤・健康・栄養研究所、*²(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと(国研)医薬基盤・健康・栄養研究所の共同研究として実施した。文部科研基盤研究A(代表;野村)および医薬基盤研究所コンソーシアム・創薬等モデル動物研究プロジェクト(代表;野村)の支援を受けた。

III. 結果

平成 26 年度より研究を開始した。まず、ヒト難治性がんである肺がんと膵がん、そして初めて継代移植に成功したヒト前立腺がん移植(PDX)モデルを用い、WERC 陽子線照射およびX線照射による腫瘍抑制効果について検討した。未だ少数例であるが、肺がん症例 575、前立腺がん 415 では、高線量群で腫瘍増殖の抑制効果が認められている(平成 26 年度若狭湾エネルギー研究センター研究年報)。27 年度に開始したヒト乳がん 502 においても、陽子線照射により、強い腫瘍抑制効果が認められている(図 1)。

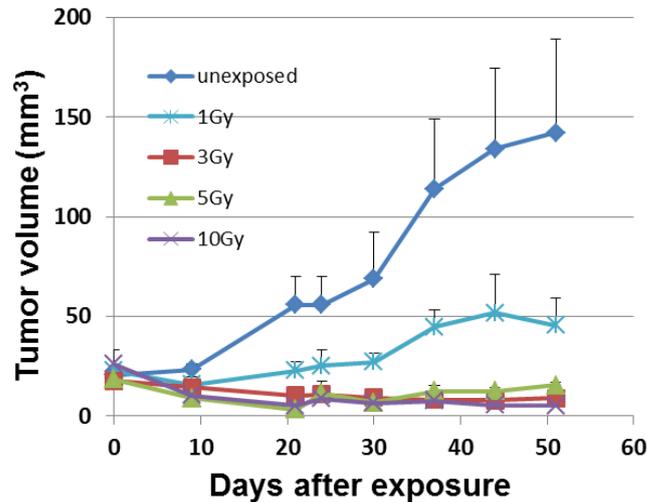


図1. 乳がん症例502

IV. 考察

これら3大臨床がんへの陽子線治療の有効性を確認するために、X線照射実験を併せて基盤研で実施している。これにより生物学的効果比(RBE; Relative Biological Effectiveness)を求める作業を開始したが、これまで、X線照射実験、重粒子線照射実験では見られなかった線量効果の逆転(たとえば 10 Gy 照射でも非照射群を上回るような腫瘍の増殖)が時々見られ、27 年度後半よりその原因追及を含め慎重に実験を進めている。得られた成果については、重粒子線との比較を行う。正常肺、正常乳腺組織への陽子線の影響については、マイクロアレイを用い遺伝子発現変化よりその影響を短時間に捉えることにする。

V. 結言

ヒト臨床がん並びに正常臓器・組織移植 Super-SCID マウス PDX (Patient-derived xenograft)モデルを用い、陽子線照射によるがん増殖抑制効果と正常組織への副作用の研究を行った。結果の一部で高線量群での腫瘍増殖抑制効果が認められた。今後も系統的な結果を求めるために研究を継続していく。

参考文献

- 1) Taisei Nomura, Shigeki Adachi, Haruko Ryo, et al. Differential radiation sensitivity to morphological, functional and molecular changes of human thyroid tissues and bone marrow cells maintained in SCID mice. *Mutat Res.*, 657(1): 68-76, (2008)
- 2) Shigeki Adachi, Haruko Ryo, Taisei Nomura, et al. Effects of Fission Neutrons on Human Thyroid Tissues Maintained in SCID Mice. *Mutat Res.*, 696, 107-113 (2010)
- 3) Nomura T. Opening lecture, Direct effects of radiation and chemicals on human tissue maintained in super-SCID mice. 11th Int. Conference on Environmental Mutagens. Page 45-46. Cataratas do Iguassu São Paulo, Brazil. Nov. 3-8, (2013)
- 4) Taisei Nomura. Keynote Lecture. Establishment of Prostate Cancer and Benign Prostatic Hyperplasia PDX (Patient-Derived Xenograft) in Super-SCID Mice” Prostate Cancer 2015, Orlando, Florida, USA, June 22-24, (2015)

2.2.1.3

陽子線・ヘリウム線による脳壊死モデル作成技術の確立
 -放射線脳壊死のメカニズム解明と治療法開発を目指して-

Experimental Trial of Establishing Brain Necrosis Model Using Proton and Helium Ion Beam
 - Toward Understanding the Mechanism and Developing Treatment Strategies -
 近藤夏子*1、櫻井良憲*1、高田卓志*1、田中浩基*1、渡邊翼*1、鈴木実*1、長谷川崇*2、久米恭*3
 Natsuko KONDO, Yoshinori SAKURAI, Takushi TAKATA, Hiroki TANAKA,
 Tsubasa WATANABE, Minoru SUZUKI, Takashi HASEGAWA and Kyo KUME

Abstract

Experimental trial of establishing brain necrosis animal model by using proton and helium ion beam was performed to understand the mechanism underlying radiation brain necrosis and develop treatment strategies. Techniques and optimal condition of dose delivery was studied. Time-course development of brain necrosis in irradiated animals was observed by small animal MRI and histopathological examination. The obtained results are summarized in this report.

要約

放射線脳壊死のメカニズム解明と治療法開発を目指して、陽子線・ヘリウム線を用いた脳壊死モデル作成技術を確認するための実験的検討を行った。照射技術・条件の検討と、小動物用MRIおよび病理組織による脳壊死形成の経時的観察を行った。平成 27 年度までに得られた成果の概要を報告する。

I. 緒言

脳腫瘍の治療では、放射線治療が非常に重要な役割を果たしている。しかしながら、放射線照射により正常組織に不可逆的な障害が生じる場合がある。その中で、照射後 6ヶ月以降に生じる晩期有害事象である脳壊死については、未だ治療法が確立されておらず、発生した場合、麻痺などの重篤な障害が生じることがあり、患者の生活の質(Quality Of Life; QOL)を著しく低下させる。本研究では、放射線脳壊死のメカニズム解明と治療法開発のために、陽子線・ヘリウム線を用いた脳壊死モデル作成技術の確立を目指して、照射技術・条件の検討と、小動物用MRIおよび病理組織による脳壊死形成の観察を行った。

II. 方法

若狭湾エネルギー研究センターのシンクロトロンにより加速した 70 MeV の陽子線をもとに、拡大ブラッグピークを形成して¹⁾、マウスおよびラットの右脳に対して 50~80 Gy の照射を行った。

図 1 に照射範囲を示す。マウスについては右脳の脳表から 3 あるいは 4 mm の深さまで、ラットについては 7 mm の深さまで照射した。また、マウス、ラットともに、頭尾方向 10 mm×左右方向 5 mm の照射野とした。

照射後のマウスおよびラットは、京大 RI センターに設置されている小動物用 MRI 装置を用いて経過観察を行った。MRI 撮像では、脳壊死に付随する症状である浮腫などの病変が高強度を呈することから、まず T2 強調画像を取得した。T2 強調画像で顕著な変化が現れたものについては、引き続き T1 強調画像も取得した。

MRI 撮像に併せて、病理学的検討のために、計画的なサクリフェイスを行った。サクリフェイスあるいは経過観察中に死亡したマウス・ラットの脳組織切片を作成し、免疫組織染色法(HE 染色)を施した病理組織の観察を行った。

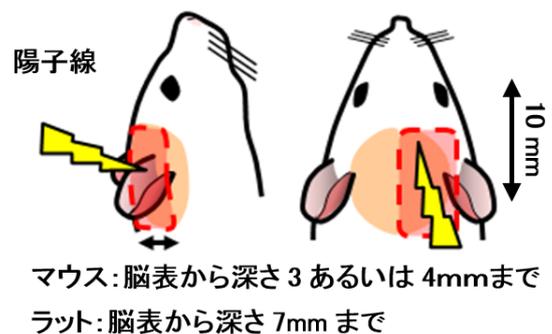


図 1 マウスおよびラットの照射範囲

*1 京都大学原子炉実験所、*2 (同)ハセテック、*3 (公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ
 本研究は、京都大学原子炉実験所と(公財)若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究として実施した。

III. 結果および考察

深さ 3 mm のマウス照射群の MRI による経過観察より、T2 強調画像で顕著な変化が現れるのは、60 Gy で 7～8 ヶ月、70 Gy で 4～5 ヶ月、80 Gy で 2～3 ヶ月であることが分かった。一例として、80 Gy を照射したマウスの T2 強調画像の経時変化を図 2 に示している。また、T2 強調画像で顕著な変化が現れるものについては、遅れて T1 強調画像でも変化が現れることが分かった。

80 Gy のラット照射群では、照射後 3 ヶ月で T2 強調画像に明確な変化が、4 ヶ月で顕著な変化が観察された。マウスと同様に、80 Gy 照射群では短期間で変化が進行することが確認された。

HE 染色による脳の病理組織観察において、深さ 3 mm まで 60 Gy を照射したマウスで、照射から 8 ヶ月後に、人の脳壊死と酷似する病理像が得られた(図 3)。MRI の T2 強調画像で高信号を呈した白質部分に一致して、凝固壊死、血管新生、血管拡張、浮腫、出血等が生じていることが確認された²⁾。

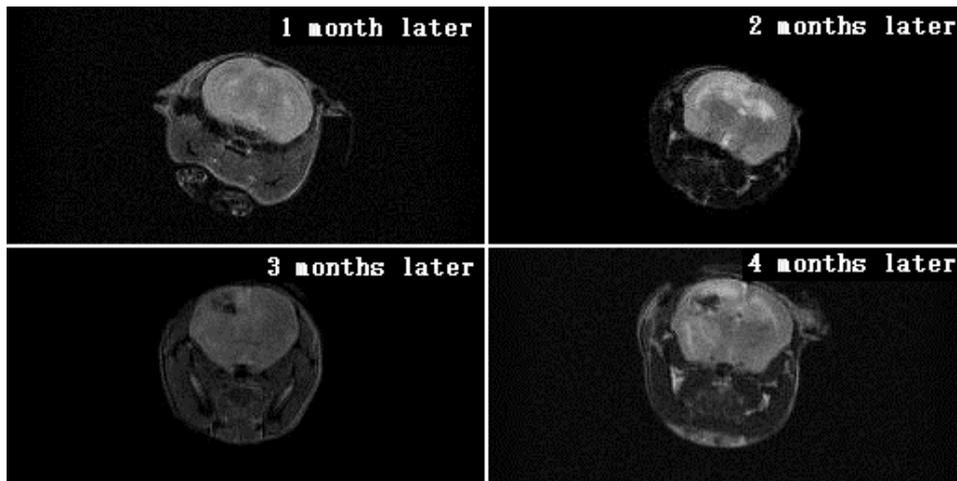


図 2 深さ 3 mm まで 80 Gy を照射したマウスの MRI-T2 強調画像の経時変化

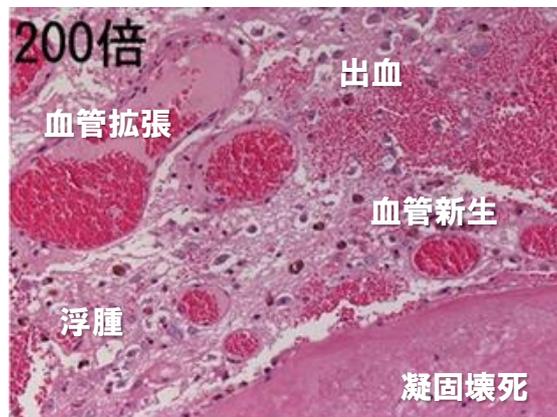


図 3 深さ 3 mm まで 60 Gy を照射したマウスの 8 ヶ月後の脳の病理組織

IV. 結言

深さ 3 mm まで 80 Gy を照射したマウスにおいて、照射後 2～3 ヶ月で MRI の T2 強調画像に顕著な変化が現れることが確認された。病理学的検討では、深さ 3 mm まで 60 Gy を照射したマウスにおいて、人の脳壊死と酷似する病理像が得られた。今後は、深さ 3 mm の照射群に重点を置き、脳壊死モデル作成の最適化を目指す予定である。また、平成 28 年 3 月からヘリウム線を用いた照射実験を開始しており、陽子線との比較を含めた実験的検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) T. Takata et al., Localized dose delivering by ion beam irradiation for experimental trial of establishing brain necrosis model, Appl. Radiat. Isotopes: 106, 104-106 (2015)
- 2) N. Kondo et al., Localized radiation necrosis model in mouse brain using proton ion beams, Appl. Radiat. Isotopes: 106, 242-246 (2015)

2.2.1.4

陽子線がん治療における低線量被ばくした正常組織での組織幹細胞動態の解明
Investigation for Dynamics of Stem Cells in Normal Tissues Exposed to Protons
at Low Dose in the Proton Radiotherapy of Cancer

松本英樹*1、前田宗利*2、長谷川崇*3、田辺久美子*2、久米恭*2

Hideki MATSUMOTO, Munetoshi MAEDA, Takashi HASEGAWA, Kumiko TANABE, and Kyo KUME

Abstract

To guarantee the safety of the normal tissues in the proton radiotherapy of cancer, the numbers of apoptotic cells in the small intestine and surviving stem cells in the bone marrow, which were exposed to protons, were examined using the TUNEL staining method and the in vitro culturing system, respectively.

要約

陽子線がん治療において低線量被ばくした正常組織の安全性を担保するために、陽子線を全身被ばくしたマウスの小腸幹細胞および骨髄幹細胞の動態を、それぞれ免疫組織化学染色(TUNEL)法および骨髄幹細胞培養システムを用いて評価した。

I. 緒言

近年、社会経済的・科学技術的な種々の理由から全国各地に陽子線がん治療施設が普及してきている。陽子線がん治療は、その優れた線量分布および QOL により高い評価を得ているが、更なる高度化へ向けて多くの解決しなければならない課題がある。その中でも照射時に生じる正常組織の低線量被ばくの安全性を担保するために、低線量被ばくした正常組織反応の動態を明らかにすることが重要であると考え、本共同研究を立案した。

II. 成果の概要

1. 陽子線被ばくした小腸でのアポトーシス誘導

0.01~3.0 Gy の陽子線を全身照射したヌードマウスから照射後 1 日目に小腸を摘出し、TUNEL 染色法により各照射線量の小腸腺窩当たりの TUNEL 陽性細胞(アポトーシス細胞)数を解析した(図 1 および表 1)。

陽子線を 0~3.0 Gy 全身照射したマウス小腸での腺窩当たりの TUNEL 陽性細胞(アポトーシス細胞)数は、指数関数的に線量に依存して増加し、解析の結果、 $y = 0.037 + 2.923 \times (1 - \exp(-0.711x))$ の数式で増加することが明らかとなった(図 1a)。

陽子線 0~0.1 Gy の範囲では、腺窩当たりの TUNEL 陽性細胞(アポトーシス細胞)数は、線量に比例して増加し、解析の結果、 $y = 0.025 + 2.845x$ の数式で増加することが明らかとなった(図 1b)。

従って、担がんマウスの腫瘍へ陽子線を照射した際の小腸の被ばく線量を腺窩当たりの TUNEL 陽性細胞(アポトーシス細胞)数から推定できることが明らかとなった。

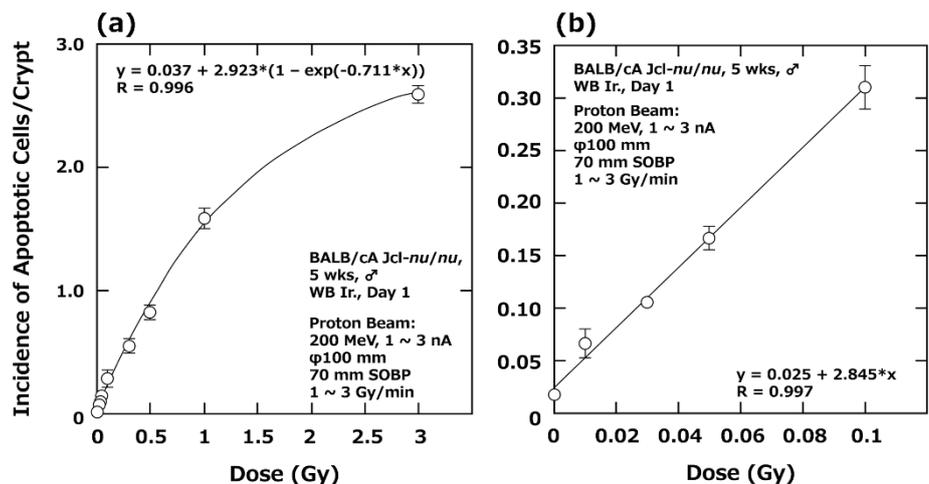


図 1. 各照射線量での小腸腺窩当たりの TUNEL 陽性細胞(アポトーシス細胞)数

*1福井大学・医学系部門・医学領域・国際社会医学講座・放射線基礎医学部門、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、*3(同)ハセテック
本研究は、福井大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究として実施した。

表1. 各照射線量の小腸腺窩当たりの TUNEL 陽性細胞(アポトーシス細胞)数

照射線量 (Gy)	0	0.01	0.03	0.05	0.1	0.3	0.5	1.0	3.0
腺窩当たりの TUNEL 陽性細胞数	0.02	0.07	0.11	0.17	0.31	0.54	0.76	1.66	2.59
誤差(±)	0.005	0.028	0.000	0.009	0.042	0.047	0.005	0.080	0.066

2. 陽子線被ばくした大腿骨骨髓幹細胞の生存率

0.01~3.0 Gy の陽子線を全身照射したヌードマウスから照射後 1 日目に大腿骨を摘出して骨髓細胞を調製し、骨髓幹細胞培養システムにより各線量で照射した骨髓幹細胞の生存率を解析した。

陽子線を 0~3.0 Gy 全身照射したマウス大腿骨より調製した骨髓幹細胞の生存率は、0~0.5 Gy までは急激に減少し、0.5 Gy 以上の線量では緩やかに減少する、すなわち 0.5 Gy 付近を変曲点とする二相性を示すことが明らかとなった(図 2)。また、特に生存率が急激に減少した 0~0.1 Gy の範囲における指数関数的な生存率の減少は、解析の結果、 $y = 0.548 + 0.470 \times \exp(-16.3x)$ の数式で表されることが明らかとなった(図 3)。

従って、担がんマウスの腫瘍へ陽子線を照射した際の骨髓の被ばく線量を骨髓幹細胞の生存率から推定できることが明らかとなった。

III. 結言

本研究の成果より、ヌードマウス移植腫瘍を用いた実験陽子線治療において、小腸腺窩当たりの TUNEL 陽性細胞(アポトーシス細胞)および骨髓幹細胞の生存率から正常組織である小腸あるいは骨髓が被ばくする線量の推定が可能であることが示唆される。また小腸および赤色骨髓を有する骨が標的となる腫瘍の前方に位置する場合と後方に位置する場合との被ばく線量の比較も可能であることが示唆される。

今後は実際にヌードマウス移植腫瘍を用いた実験陽子線治療を実施し、腫瘍線量に対して小腸あるいは骨髓がどの程度の被ばくを受けるのかを明らかにし、陽子線がん治療における正常組織の低線量被ばくの安全性を科学的エビデンスによって担保することを目指したいと考える。

さらに骨髓幹細胞の陽子線感受性を精査した報告は数少なく、今回得られた生存率曲線のプロファイルから幹細胞での放射線誘発 DNA 損傷修復の特徴も考察することができ、陽子線がん治療の基礎研究として非常に興味深い結果が得られたと考える。

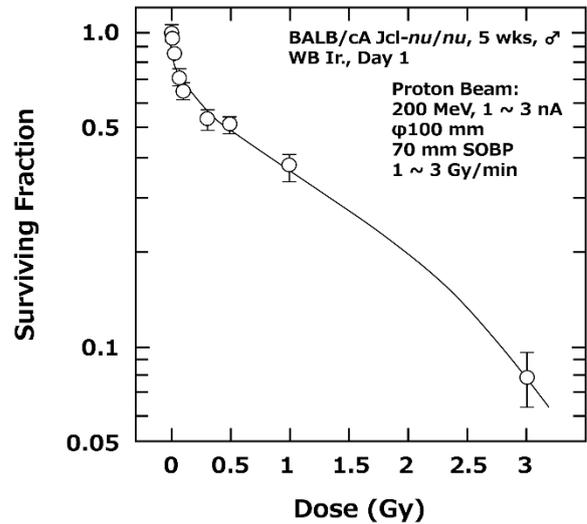


図 2. 各照射線量での骨髓幹細胞の生存率(0~3.0 Gy)

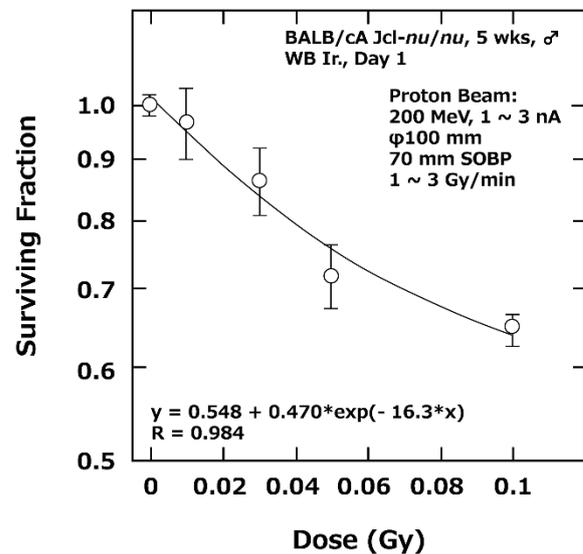


図 3. 各照射線量での骨髓幹細胞の生存率(0~0.1 Gy)

2.2.1.5

低酸素環境下のがん細胞に対する粒子線治療の効果予測に関する基礎的検討
Prediction of Effects of Charged Particle Irradiation on Cancer Cells Under Hypoxia.

清野 泰*¹、森哲也*¹、岡沢秀彦*¹、久米恭*²

Yasushi KIYONO, Tetsuya MORI, Hidehiko OKAZAWA, Kyo KUME

Abstract

The charged particle therapy could be an effective therapy to the cancer cells under hypoxia, and PET could be an useful tool for prediction of that effect.

要約

低酸素環境下のがん細胞に対する粒子線治療は酸素濃度の影響を受けにくく有効な治療法になる可能性が見いだされ、PET を用いたその治療効果予測の可能性も見いだされた。

I. 緒言

放射線治療や化学療法に抵抗性を有する低酸素環境下のがんにおいて、粒子線治療への期待は非常に大きい。そこで、低酸素環境下のがん細胞への粒子線照射の有効性および positron emission computed tomography(PET)による治療効果予測の可能性を基礎的に検討した。

II. 方法

大腸がん細胞株である Colon-26 細胞を酸素濃度 20 % (通常酸素濃度)、5 %、1 % で培養した。それぞれの酸素濃度下で培養した細胞に対して、0、0.1、0.5、1、5、10 Gy の陽子線、炭素線あるいは X 線を照射し、照射翌日から4日間の細胞数の経時変化を観察した。治療効果予測に関する検討では、1 % 酸素濃度で培養した Colon-26 に対し、0、0.1、0.5、1、5、10 Gy の陽子線、炭素線あるいは X 線を照射し、翌日に PET 薬剤である ¹⁸F-FDG および ¹⁸F-FLT の細胞への集積量を測定した。

III. 結果

細胞数の計測の結果、X 線照射群では酸素濃度が低くなるにつれて、細胞数を低下させる作用が有意に低下していることが観察された。一方、陽子線と炭素線照射群では、酸素濃度による細胞数の有意な変化は認められなかった。さらに、酸素濃度 1 % では、X 線照射群に比べ陽子線と炭素線照射群では、細胞数が有意に低下していた。治療効果予測に関する検討では、¹⁸F-FDG の取込実験においては、X 線照射では 5 Gy と 10 Gy の照射で有意に取込量の低下が確認され、炭素線照射では 10 Gy の照射でのみ取込量の有意な低下が認められた。¹⁸F-FLT の取込実験においては、X 線照射では 10 Gy の照射でのみ有意に取込量が低下し、炭素線照射では 5 Gy と 10 Gy の照射で有意な取込量の低下が観察された。

IV. 考察

細胞数の計測の結果は、粒子線治療は低酸素環境下のがん細胞に対する効果が高いという従来の報告と合致していた。一方で、治療効果予測の検討において、高い陽子線照射線量の ¹⁸F-FDG および ¹⁸F-FLT のそれぞれの集積量に有意な変化が認められなかったことは、実験条件の見直しをする必要があることを示唆している。この原因の 1 つとして、陽子線、炭素線、X 線照射後の再酸素化の時間が異なる事が考えられる。

V. 結言

粒子線治療が放射線治療抵抗性腫瘍に対する有効な治療法となる可能性が示された。一方、治療効果予測においては、高い照射線量のがん細胞に関しては、治療効果予測が可能である可能性は見いだされたが、実験条件のさらなる検討が必要であることも確認された。

*¹福井大学・高エネルギー医学研究センター、*²(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ
本研究は、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契約に基づき実施した。

2.2.1.6

陽子線がん治療臨床研究

Clinical Trial of Proton Therapy

山本和高^{*1*2}、前田宗利^{*1}、伊東富由美^{*1}、久米恭^{*1}

Kazutaka YAMAMOTO, Munetoshi MAEDA, Fuyumi ITO and Kyo KUME

Abstract

Proton therapy clinical research has been carried out in the Wakasa Wan Energy Research Center as one of research subjects using the multi purpose ion accelerator complex of a synchrotron and a tandem. Follow-up has been done after the past treatment period between 2001 and 2009, which is reported down below.

要約

若狭湾エネルギー研究センターに設置されている多目的シンクロトロン・タンデム加速器の高エネルギー陽子線を使用した医療分野における応用研究の一環として、平成 14 年度から平成 21 年度まで陽子線臨床研究を実施した。前年度までの経過観察の結果をまとめた。

I. 緒言

がんは、我が国では 1981 年以降死亡原因の第 1 位となっている。高齢化社会が現実化していることも相まって、外科的切除等の侵襲性の高い治療が困難な症例も増加してきており、侵襲の少ないがん治療法である陽子線治療の普及の意義は高いと考えられる。

若狭湾エネルギー研究センター(WERC)では、原子力分野で培われた技術を利・活用する研究の一環として、設置されている多目的シンクロトロン・タンデム加速器を用いた応用研究を実施している。高エネルギーイオンビームを大気に取り出す技術の応用の一つとして、平成14年度より陽子線がん治療臨床研究を開始した。WERCでの陽子線がん治療臨床研究は、我が国における陽子線がん治療装置の普及期の始まりと重なり、また特に、日本海側では最初の陽子線治療臨床施設となる福井県立病院陽子線がん治療センターを円滑に立ち上げるための試金石として、地域からの注目を浴びた。

WERCでは、平成 14 年度に、日立製作所製の陽子線治療装置の安全性や有用性を評価するための臨床治験として前立腺がん 6 例に対し陽子線治療を行い、臨床研究としては平成 15 年度から平成 21 年度まで、前立腺がん 49 例、肝細胞がん 6 例、非小細胞肺癌 1 例に対して陽子線の治療照射を実施した。頭頸部がんも陽子線がん治療臨床研究の対象としてプロトコールが作成されていたが、臨床研究の期間中に、実際に陽子線治療を行った症例はなかった。福井県立病院陽子線がん治療センターでの治療開始にともない、WERCでの患者への陽子線治療照射は平成21年度で終了した。その後も陽子線治療を受けた症例の経過観察等を行ったが、治療終了後 5 年間を区切りとして平成 26 年度で WERC における経過観察の期間も終了となった。したがって、平成 27 年度には、積極的な患者状況のデータ収集等は行われていない。

II. 方法・結果

1. 前立腺がん

前立腺がん症例に対しては、前立腺全体と精嚢の一部に対し左右 2 方向から 1 回 2.5 GyE、週 4 回、総線量 67.5 GyE の陽子線照射を実施した。なお前立腺がん治療の副作用発現の要注意臓器である直腸粘膜を保護するため、照射期間後半には直腸側の照射野縮小を行った。また毎回の陽子線照射直前には、前立腺部の X 線 CT 撮影を行い、CT 画像を用いた患者位置決めを継続して実施した。臨床治験として平成 14 年度に 6 例に対し陽子線治療を実施したが、臨床研究として平成 15 年度～21 年度に実施したのは 51～79 歳の男性、49 例である。照射期間中の急性障害としては、照射部位の軽度の皮膚変化等がみられたのみで重篤な副作用はなく、全例、問題なく陽子線照射を完了することができた。照射期間後の晩期障害としては血便や直腸前壁の発赤、血尿などの発現は見られたものの、外科的治療を必要とするような重篤な副作用は報告されていない。治療効果としては、Phoenix 基準(治療後の最も低下した PSA 値から 2 ng/mL 以上増加すると再発と判定)で 1 例が再発と診断されたが、PSA 値の増加のみで、画像

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、*2 福井県立病院・陽子線がん治療センター

検査上ではこれまでのところ、がん病巣の拡大、転移の出現といった明瞭な異常所見は認められていない。化学的無再発率は 98%である。他病死が1例あったが、前立腺がんによる死亡例は報告されておらず、原病生存率は 100%である。

2. 肝細胞がん

肝細胞がんに対しては、前方、及び、右側方の2方向より、1回 4.5 GyE、16 回、総線量 72.0 GyE の陽子線照射を実施した。照射に際しては呼気終末相のみの呼吸同期照射を行った。期間中には6例(男性 3 例、女性 3 例; 63~74歳)の症例に対する臨床研究を実施した。照射部位に肝細胞がんの再発は確認されず局所制御率は良好であったが、残念ながら、肝不全や肝外転移、肝内異所性再発、他病死などで全員が死亡している。WERC の肝細胞がんに対するプロトコール規定では同一症例には実施できる陽子線照射は 1 度だけであり、肝細胞がんの治療においては肝内異所性再発への対策が重要であることを示唆する結果も得た。

3. 非小細胞肺がん

非小細胞肺がんに対しては、前方、及び、右側方の2方向より、1回 6.6 GyE、10 回、総線量 66.0 GyE の陽子線照射を実施した。照射に際しては呼気終末相のみの呼吸同期照射を行った。期間中には 77 歳、男性の 1 例に対する臨床研究を実施した。他病(脳血管障害)により死亡したが、生存中に問題となるような副作用は報告されておらず、照射部位の再発、転移病巣の出現は確認されなかったために肺がん自体は制御されていたと考えられる。

III. 結言

WERC における陽子線がん治療臨床研究の経過観察期間は平成26年度で終了した。引き続き県立病院での陽子線がん治療の更なる円滑な実施に貢献していく。

WERC で検討された CT 画像を用いた位置決め方法は、県立病院陽子線がん治療センターにも導入され、今日、前立腺がん症例の全員に対し活用されている。位置決めには通常用いられている単純 X 線写真では前立腺自体は描出できないので、前立腺内に金属マーカーを複数個刺入して、それを位置決め用の目印に使用している施設が多い。しかし、金属マーカーを前立腺内に刺入する侵襲が加わるし、金属マーカーの後方では陽子線の線量分布がかなり変化することも知られている。CT 画像では、前立腺自体が画像化されるので、単純 X 線写真と比較すると被ばく線量は増加するが、金属マーカー等を使用しなくても正確な位置決めができるので、患者に対する侵襲はほとんど無く、直腸出血等の副作用のさらなる低減も可能となる。この CT 画像を用いた位置決め法は、肝臓がんなど消化管近傍の悪性腫瘍の症例にも応用が拡大してきており、県立病院で進められている陽子線による乳がん治療の臨床研究においても乳房の位置、形態を確認し、乳がんの病巣部に正確に陽子線を照射するために CT 画像による位置決めは不可欠な方法となっている。また、県立病院では、食道がんに対して、リンパ節転移の可能性が考えられる広い領域に対する X 線照射と、原発部位と転移と診断されたリンパ節領域に限局した陽子線照射の混合照射を県立病院の倫理委員会の承認を得て実施しているが、WERC で実施された食道がん由来の培養細胞に対し X 線と陽子線を混合照射し、細胞の生存率を測定した実験結果は、食道がんに対する X 線と陽子線の混合照射の臨床応用を実施していくうえで重要なデータとなっている。今後も、WERC では、福井県立病院陽子線がん治療センターと連携し、臨床応用に必要と考えられる基礎的実験を実施し、陽子線がん治療の発展に寄与していく予定である。

2.2.2. 粒子線照射技術の高度化研究

2.2.2.1

陽子線がん治療における高度な照射法に対応した線量検証技術の開発

Development of a Verification Technique of Highly Accurate Dose Control in Proton Beam Cancer Therapy

伊東富由美^{*1}、長谷川崇^{*1,*2}、前田宗利^{*1}、久米恭^{*1}

Fuyumi ITO, Takashi HASEGAWA, Munetoshi MAEDA, and Kyo KUME

Abstract

We aimed at developing a measurement method of a dose distribution during irradiation experiment with higher accuracy in shorter time. We took a photograph by using a video camera. And then, an emission intensity were obtained from these photograph by using an new image processing system.

要約

陽子線の線量分布を簡易的な手法で取得するために、陽子線を蛍光板に照射し、その発光の様子をビデオカメラにより取得し、画像処理ソフトウェアを用いて画像処理を行った。画像処理により取得した発光強度と線量を比較した結果、陽子線による蛍光板の発光強度が線量に対応することを確認した。

I. 緒言

陽子線がん治療の高度化に関わる研究開発の一環として、誤照射事故の防止に向けた、リアルタイムに照射野の線量分布をモニタリングできるシステムの開発を進めている。平成 27 年度は、陽子線線量分布測定技術の一部として、蛍光板をビデオカメラで撮影し、画像処理ソフトを用いて発光強度測定レンジの把握を行った。

II. 成果の概要

① 発光強度測定レンジの把握

陽子線はウォブラー電磁石・散乱体・電離箱を通過して、試料台に設置した蛍光板に到達する。蛍光板は F-5 (極光) を使用し、照射線量は 1~5 Gy とした。粒子線照射時の発光板はビデオカメラで撮影し、発光中のフレームのみを抜き出した。その後、画像処理ソフト image-J を用いて画像を解析して、発光強度を取得し、照射線量と比較した。Fig. 1 に示すように、発光強度と照射線量は比例関係にあることを確認した。

② リアルタイムでモニタリングするためのシステムの開発

1/3 インチ CCD カメラとレンズを組み合わせて、照射野における線量分布をリアルタイムにモニタリングできるシステム開発に向けて、LabVIEW ソフトウェア(日本ナショナルインスツルメンツ株式会社)を用いて、CCD カメラで撮影した画像を、照射後に確認できるようにavi形式で保存する新たなプログラムを作成中である。

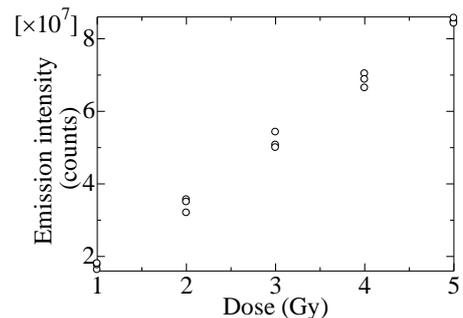


Fig. 1 Comparison of Dose (Gy) and Emission intensity (counts)

III. 結言

ビデオカメラを用いて、陽子線が蛍光板に照射された際の発光を取得するとともに、画像処理ソフトによって画像から発光強度に変換した。陽子線による蛍光板の発光強度と照射線量を比較すると比例関係にあり、発光強度から照射線量に変換することが確認できた。平成28年度はリアルタイムでもモニタリングするためのシステムの構築を開始する。

参考文献

- 1) F ITO et al., "Discussion of highly accurate dose control", Proceedings of the 109th scientific meeting of JSMP, 2015, 35(1), 65.
- 2) F ITO et al., "Development of confirmatory method of proton beam dose distribution", Proceedings of the 110th scientific meeting of JSMP, 2015, 35(3).

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、*2(同)ハセテック

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

本研究は、JSPS 科研費 15K19216 の助成を受けた。

2.2.2.2

陽子線治療における陽子線体内飛程計算精度向上のための高エネルギー陽子線 CT 画像取得法の研究
 Study on High-Energy Proton CT Imaging System for Proton Range Calculation in Proton Therapy
 西尾禎治*1、田中創大*2、松下慶一郎*1、恒田雅人*3、株木重人*4、前田宗利*5、伊東富由美*5、久米恭*5
 Teiji NISHIO, Sodai TANAKA, Keiichiro MATSUSHITA, Masato TSUNEDA, Shigeto KABUKI,
 Munetoshi MAEDA, Fuyumi ITO and Kyo KUME

Abstract

We demonstrated proton CT imaging system using plastic scintillator and CCD camera with 200 MeV proton beam provided by the synchrotron at the Wakasa Wan Energy Research Center. Proton CT was reconstructed from experimental data with FBP method, and the materials of objects were distinguished qualitatively.

要約

陽子線 CT 検出システムの実証実験として、若狭湾エネルギー研究センターのシンクロトロンにより供給される 200 MeV 陽子線を用いて陽子線 CT 画像取得を行った。陽子線 CT 画像は FBP 法により再構成され、被写体の材質は定性的に判断できた。

I. 緒言

陽子線治療の治療計画において、X 線 CT 画像を元に計算される陽子線の飛程の不確かさは数%にも及ぶと報告されており¹⁾、改善すべき問題となっている。陽子線 CT は陽子線を直接用いてイメージングする手法であり、X 線 CT 画像において X 線を用いていることによる計算誤差が生じない。既に私たちはプラスチックシンチレータと CCD カメラを用いた陽子線 CT 検出システムを構築し、70 MeV 陽子線を用いた実証実験で陽子線 CT 画像の取得に成功している²⁾。本研究では、治療に用いられる高エネルギーの 200 MeV 陽子線を用いた陽子線 CT 画像の取得を目指した。

II. 方法

我々が既に構築した陽子線 CT 画像取得システム(図 1)はプラスチックシンチレータと CCD カメラを用いており、シンチレーション光のビーム方向積分値を撮影することで、陽子線の位置分解能とエネルギーを同時に得る特徴がある。シンチレーション光の光量と陽子線エネルギーの関係は、予め様々なプラスチック板を測定することによって変換テーブルとして得た。シンクロトロンにより供給される 200 MeV 陽子線を用いて、円柱型アクリル容器に封入した水、エタノール、40%リン酸水素ニカリウム水溶液、空気を照射被写体として、実証実験を実施した。得られたデータから Filtered Back Projection 法 (FBP 法)により陽子線 CT 画像再構成を行った。

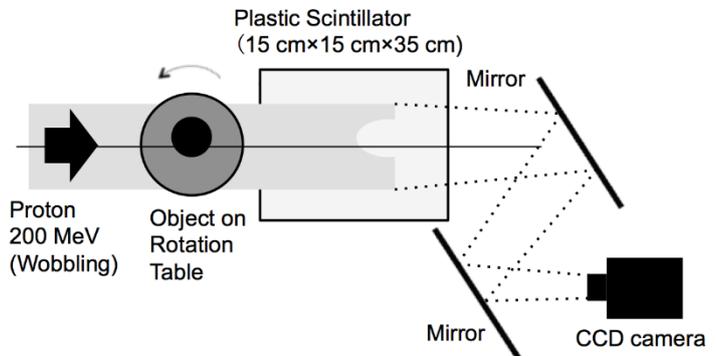


図 1 陽子線 CT 検出システム

III. 結果

円柱型アクリル容器に封入した水サンプルについて、CCD カメラで得られたシンチレーション光の投影画像、その投影画像から抜き出した一次元投影データを様々な角度方向でまとめたサイノグラム、それより FBP 法を用いて得られた陽子線 CT 画像と図 2 に示す。また水、エタノール 40%リン酸水素ニカリウム水溶液、空気サンプルを同時において得た陽子線 CT 画像を図 3 に示す。4 種の濃度差を比較して定性的に判断することは可能であるが、定量的な判断はできない程度の精度の陽子線 CT 画像であった。

*1 広島大学大学院医歯薬保健学研究院、*2 東京大学大学院工学系研究科、*3 広島大学大学院医歯薬保健学研究院、*4 東海大学医学部、*5 (公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ
 本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと広島大学との共同研究として実施した
 本研究は JSPS 科研費 15H04912 と JST 先端 15H04912 の助成を受けた。

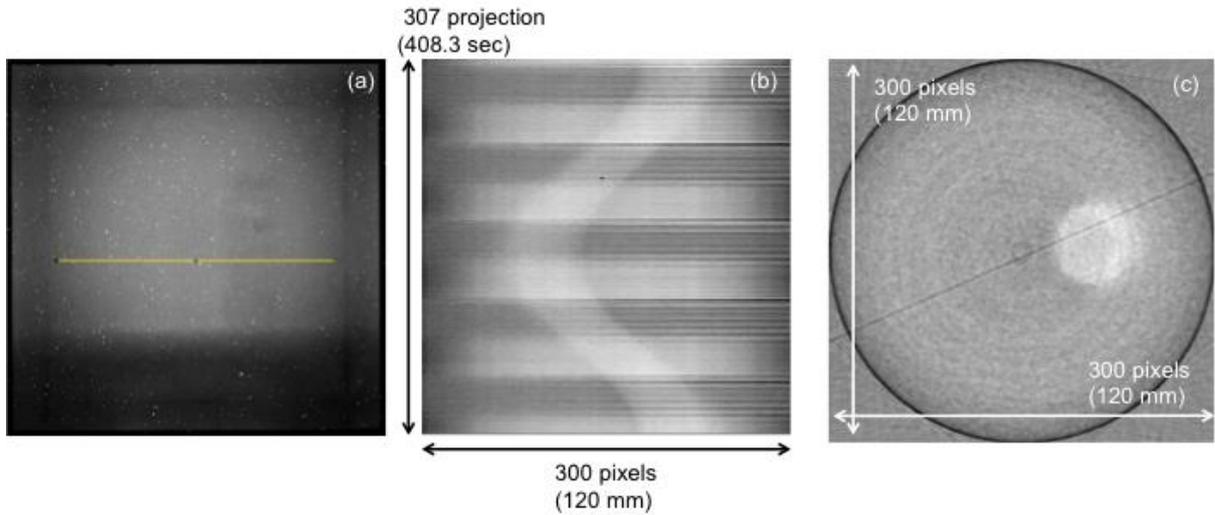


図 2 (a) シンチレーション光の投影画像、(b) 黄線についてのサイノグラム、(c) 陽子線 CT 再構成画像

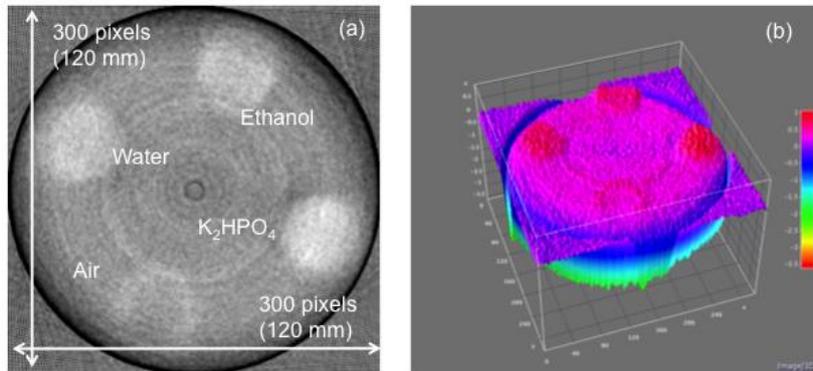


図 3 (a) 4 種類の被写体の陽子線 CT 再構成画像、(b) 陽子線 CT 画像の三次元サーフェースプロット

IV. 考察

陽子線 CT 画像として、被写体の画素値として定量的な値が出るには至らなかった。その理由としては大きく 2 つの問題がある。1 つ目は 200 MeV の陽子線の飛程が 70 MeV の陽子線に比べて長いことであり、円錐状のビームの広がりやカメラの画角が存在することから、シンチレータ中でのシンチレーション光の積算を平行で行っている点で誤差が生じている。また陽子線の多重クーロン散乱も増え、ガウス分布状のぼけが生じ、位置分解能が低下する。これらは今後密度の高いシンチレータを用いることを検討しており、検出システムを改善していく。2 つ目は時間構造の誤差で、サイノグラムに縦軸の時間方向で波状のエラーが見えている。これは CCD カメラの撮影周期と加速器のスピルの周期があっていないためである。今後、加速器からの信号をトリガーとして CCD カメラに取り入れ、時間構造の誤差をなくす。

V. 結言

プラスチックシンチレータと CCD カメラを用いた陽子線 CT 検出システムの実証実験を行い、200 MeV 陽子線による陽子線 CT 画像を得た。

参考文献

- 1) U. Schneider et al: Phys. Med. Biol, 41, 111-124 (1996)
- 2) S. Tanaka et al: Phys. Med. Biol., 61, 4156-4167 (2016)

2.2.2.3

粒子線の線質測定技術開発

The Development of Measurement Technical for the Particle Ion Beam Quality

松尾陽一郎*¹、安田仲宏*¹、泉佳伸*¹、前田宗利*²、久米恭*²、

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

Abstract

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

I. 要約

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

II. 緒言

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

5.

6. III. 研究成果

(1) CR-39 読み取り技術の高度化

粒子線治療の際に体内で発生する原子核反応のうち、標的核が破砕することにより生成される標的核破砕片に関する研究を推進した。入射粒子破砕片は、入射粒子とほぼ同じ運動量を持つため、比較的測定が容易で、治療においては Bragg peak より深部に線量を付与する。標的核破砕片は、エネルギーが非常に低いために測定が困難であり、断面積はさらに 1000 分の 1 程度と考えられるが Bragg peak 中のどの深さでも起こり得るうえ、局所的に大きな線量を付与する。また、これは電離箱などによる通常の線量測定プロトコルでは原理的に測定ができない成分である。陽子とヘリウムを入射粒子として、CR-39 検出器を用いて標的核破砕片の測定が可能であること、またヘリウムによる標的核破砕が陽子線のそれよりもエネルギーに依存することを確かめた。

(2) 蛍光標識した生体親和物質の開発

数十塩基程度のオリゴヌクレオチドを蛍光物質である 6-FAM (6-Carboxyfluorescein)を修飾したサンプルを用い、放射線による生体親和物質の損傷量を蛍光分光光度計で読みとり評価する手法を開発している。蛍光修飾オリゴヌクレオチドに対し、ヘリウム線(220MeV)及びガンマ線を照射し、蛍光修飾ヌクレオチドの切断に伴って生じる蛍光強度を測定した。ヘリウム線およびガンマ線の吸収線量の増加に伴い、6-FAM の蛍光強度($\lambda_{em}=516nm$)が上昇することが示された。一方で、蛍光物質 6-FAM の放射線分解の可能性が考えられ、平成 28 年度は再現性の確認および蛍光物質の放射線分解の可能性について検討する。

IV. まとめ

CR-39 検出器を用いて標的核破砕片の測定が可能であること、またヘリウムによる標的核破砕が陽子線のそれよりもエネルギーに依存することを確かめた。さらに蛍光物質 6-FAM を修飾した生体親和物質を用いて、放射線による損傷量を評価できる見通しを得た。

*¹福井大学附属国際原子力工学研究所、*²(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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福井大学との共同研究として実施した。
本研究の一部は、JSPS 科研費 25820447 の助成を受けた。

2.3. 農業・生物分野

2.3.1. 植物・菌類のイオンビーム育種研究

2.3.1.1

出芽酵母における γ -H2A 検出手法の確立Establishment of the Procedure for Detecting γ -H2A in Budding Yeasts高城啓一^{*1}

Keiichi TAKAGI

Abstract

The procedure to detect γ -H2A in budding yeasts, applicable for flow cytometric analysis, was established.
要約

出芽酵母においてフローサイトメトリーにも適用可能な γ -H2A 検出手法を確立した。

I. 緒言

酵母菌の突然変異育種を効率化するためには、DNA 損傷形成、および損傷の変動が重要な情報となる。

動物や植物の細胞では、ゲノム DNA が損傷(特に二本鎖損傷)を受けると、損傷部位周辺に存在するヒストン H2A のサブタイプ、H2AX がリン酸化を受けて γ -H2AX となるため、これを DNA 損傷の指標とすることができる。酵母では、H2 に H2A、H2Z の 2 サブタイプが存在し、H2A が H2AX に相当する。H2A は、DNA 損傷をうける 129 位のセリン残基がリン酸化を受けて γ -H2A となることが知られている¹⁾。

本報告では、酵母が X 線照射を受けた後の DNA 損傷マーカー γ -H2A を、共焦点レーザー顕微鏡、およびフローサイトメトリーで検出するための標本作製法を検討し、両解析法に適用できる標本作製手法を確立した。

II. 材料と方法

実験材料には、出芽酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)半数体株 YPH499(福井県食品加工研究所より分譲)を用いた。この菌株を YPDA 培地で 1 日以上液体培養(30°C)し、吸光度が 0.3~0.5 に達したもの($4.2 \times 10^6 \sim 0.7 \times 10^6$ cells/ml に相当)を実験に用いた。

培養した菌懸濁液を 1.5 ml のスクリーキャップ付きマイクロチューブに取り、4 °C に冷却後、X 線照射装置(MBR-1520R-3, 日立メディコ)内に置いた保冷剤上で X 線照射(実効エネルギー 0.38 keV, 線量率 ca. 6 Gy/min)を行った。

照射後の懸濁液は、30 °C のインキュベータで 30 分間培養し、4% パラホルムアルデヒド溶液で、室温、減圧下 30 分間固定し、洗浄後、液を 70% エタノールに置換して -20 °C で保存した。

γ -H2A の検出には、一次抗体としてウサギ抗 γ -H2A 抗体(ミリポア社)を、二次抗体として AlexaFluor488 結合ロバ抗ウサギ IgG 抗体(Life Technologies 社)を使用した間接蛍光抗体法を用いた。細胞核の検出には一次抗体としてマウス抗ヒストン H3K4me2 抗体(Life Technologies 社)、二次抗体として AlexaFluor568 結合ロバ抗マウス IgG 抗体(Life Technologies 社)を使用した間接蛍光抗体法、あるいは核染色剤 SYTOX Orange (Life Technologies 社)を用いた。

染色後の細胞像の観察には、レーザー共焦点顕微鏡 LSM780(Zeiss 社)を、フローサイトメトリーには、FACS Calibur (BD Bioscience 社)を使用した。

III. 結果と考察

酵母はマンナンタンパク質、 β -1,6-グルカン、キチンからなる細胞壁を持つため、そのままでは抗体が細胞内に進入することができない。そこで通常は、抗体溶液の適用前に細胞壁中の β -1,6-グルカンを分解する酵素 Zymolyase で細胞壁分解処理を行い、細胞壁の無いスフェロプラスとする。しかし、この方法を適用して細胞壁を完全に除いた場合、細胞同士が寄り集まって集塊を作るため、フローサイトメトリーへの適用は困難であると考えられた。そこで、Zymolyase 処理を行う前に短時間 KOH 処理し、細胞壁成分を部分的に加水分解した後、Zymolyase 処理を行い、細胞壁を残した状態で抗体適用を試みた。

^{*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。

まず、抗体の浸透性を検証するために、核を検出する対比染色として、ヒストン H3 に対する抗体、抗 H3K4me2 を用いて、 γ -H2A の検出を試みた。その結果、抗 H3K4me2 蛍光は、非照射区、照射区両方の細胞で検出された(図 1 上、中段中)。このことから、抗体は細胞内に浸透し、核内の抗原(ヒストン H3)と結合できることが確認された。抗 γ -H2A 蛍光は、非照射区では少数の細胞に弱く見られ(図 1 上段左)、X 線 200 Gy 照射 30 分後の細胞ではほぼすべての細胞で蛍光が見られた(図 1 中段左)。抗 γ -H2A 蛍光の位置は、抗 H3K4me2 蛍光の位置と一致しており、この結果から、 γ -H2A は、X 線照射後の細胞核に局在することが確認された。しかし、抗 H3K4me2 の蛍光は弱く(図 1 上、中段中)、フローサイトメリーに用いる FACS Calibur の光学系では、 γ -H2A が多量に存在した場合、蛍光クロストークにより抗 H3K4me2 蛍光が隠されることがわかった。そこで、核染色に SYTOX Orange を用いて蛍光観察を行ったところ、抗 γ -H2A 蛍光、核蛍光ともに明瞭な蛍光像が得られた(図 1 下段)。

さらに、この染色を施した細胞をフローサイトメリーにかけたところ、細胞周期を反映した DNA 含量ヒストグラムと、抗 γ -H2A 蛍光のヒストグラムを得ることができた(図 2)。

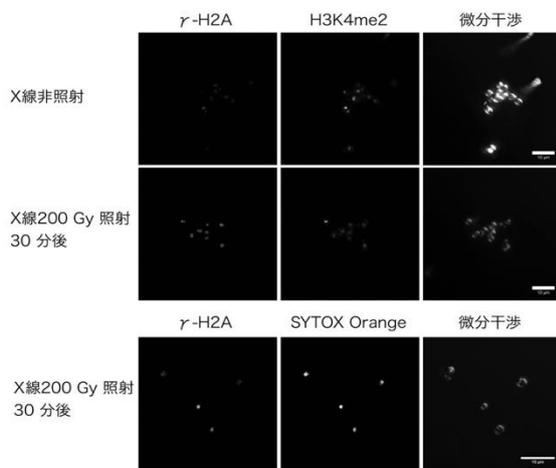


図 1 γ -H2A の蛍光像
(スケールバーは、10 μ m を示す)

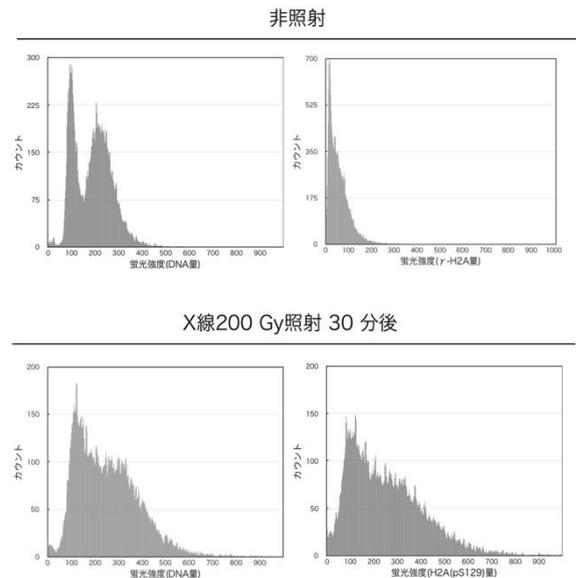


図 2 フローサイトメリーの結果

上段は非照射を、下段は X 線 200 Gy 照射 30 分後のヒストグラムを示す。左右図の横軸はそれぞれ DNA 量、 γ -H2A 量を、縦軸は出現頻度を示す。

IV. 結言

酵母の γ -H2A 間接蛍光抗体法をフローサイトメリーに適用する手法を確立した。今後はこの手法を用いて、酵母の選抜開始時期と変異体取得効率との関係に関する研究を進める。

参考文献

- 1) Downs, J. A., Lowndes, N. F. & Jackson, S. P.: Nature 408, 1001

2.3.1.2

イシクラゲ変異株を利用した有用物質の生産
 Material Production Using *Nostoc commune* Mutants
 田中良和*¹
 Yoshikazu TANAKA

Abstract

To contribute to the development of new medical & cosmetic products, terrestrial blue algae (*Nostoc commune*) were isolated from Fukui pref., and some useful strains were isolated by ion-beam mutation.

要約

医薬・化粧品などの産業に寄与する目的で、福井県内において陸棲藍藻類であるイシクラゲ (*Nostoc commune*) を複数採集し、イオンビーム照射によって複数の変異株を得た。

I. 緒言

食品、医薬・化粧品、繊維産業界などでは、商品価値を高める有用物質を生物資源に求め、その探索に強い関心を示している。陸生藍藻類のイシクラゲ (*Nostoc commune*) は、古くは漢方や食材として利用されてきたが、生育速度が遅く産業利用のためには有用物質の生産効率を高める必要がある。本研究は、イオンビーム照射によって多糖類など有用物質を高効率で生産するイシクラゲの変異株を作出し、有用物質の生産に利用することを目的としたものである。

II. 成果の概要

平成 26 年度において培養系を確立したイシクラゲ野生株に対してプロトン及びカーボンのイオンビームを照射し、新たに複数の変異体を得ること出来た。このうち、2000Gy のプロトン照射を行った菌株では、照射後の菌体を BG11 プレート上に展開し、24°C、 $50 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光条件下で 7 日間培養した後、紫外線 UV-B (305nm) を継続照射することによって、野生株と比べて紫外線耐性が強いと考えられる複数の変異体を得られた。本菌株では、紫外線吸収物質であるマイコスポリン様アミノ酸(MAA)の量・質的变化が期待出来る。また、1500Gy のカーボン照射を行った菌株からは、多糖類を大量に分泌する変異体を得ることが出来た。本菌株は液体培養下において、明瞭な大型コロニーを形成せず、大量の多糖類を培養液中に分泌するのが特徴である。この菌株を約 1 か月間培養後、遠心分離により菌体を除去した培養上清約 80ml に対して 2 倍量のエタノールを加えたところ、白色の糸状析出物(乾燥重量約 0.2g)を得ることが出来た。これを水に再溶解すると無色透明な粘性溶液となった。この溶液は 40mM MgCl_2 を加えることでゲル化し、自重の約 160 倍の水分を保持出来ることが判明した。

III. 結言

今回得られた紫外線耐性株は生育が遅いことから、培養条件の検討を重ねる必要がある。多糖類の高分泌株は、菌体を潰すことなく培養液中から容易に多糖類を抽出出来るため有望である。今後、この多糖類の性質を明らかにするとともに、利用用途などを検討する。

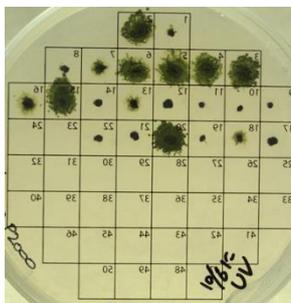


図1 紫外線耐性株



図2 培養上清から抽出した多糖類
約 160 倍の水分を保持する。

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

2.3.1.3

炭素線照射実験用サンプルチェンジャーの作製と実装

Fabrication and Installation of a Sample Changer for the Irradiation of Carbon-Beams

高城啓一*1、畑下昌範*1、久米恭*2、長谷川崇*3

Keiichi TAKAGI, Masanori HATASHITA, Kyo KUME and Takashi HASEGAWA

Abstract

For efficient carbon-beam irradiation experiments, a sample changer that can mount 15 samples at once was fabricated and installed in the irradiation room 4.

要約

効率的な炭素線照射実験実施のために、15 サンプルを搭載可能なサンプルチェンジャーを作製し、照射室 4 に実装した。

I. 緒言

福井県若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)の高エネルギー生物照射コースでは炭素イオン、陽子の 2 種のイオンビームを利用可能であり、戦略的イノベーション創造プログラム(次世代農林水産業想像技術)「戦略的オミクス育種技術体系の構築」においては、変異指向性付与研究、および次世代育種技術に適用可能な遺伝子探索のため、エネ研で照射することが可能な LET 60 keV/μm の炭素線がイネにもたらす突然変異の様式の解析を担っている。エネ研で照射可能な炭素線の水中飛行はおよそ 4.5 mm と短く、ターゲットまでのエネルギー損失を低くするため大気取り出し後のターゲットまでの距離を短くすることが必要である。そのため、同コースで炭素線を照射する場合、測定機器等を取り付けることができる汎用レールの上にサンプルチェンジャーを設置し、大気取り出し後のターゲットまでの距離を短縮して照射実験を実施してきた。ただし既設のサンプルチェンジャーは最大積載サンプル数が 5 で、このため、頻繁に照射サンプルを載せ替える必要があり、サンプル交換のための時間がマシンタイムを逼迫させる事態が生じていた。

「戦略的オミクス育種技術体系の構築」では、多量のイネサンプルへの照射を効率的に実施できることを前提としている。そこで照射実験の効率化を図るため、最大積載量 15 のサンプルチェンジャーを作製し、同コースに実装することとした。

II. 結果

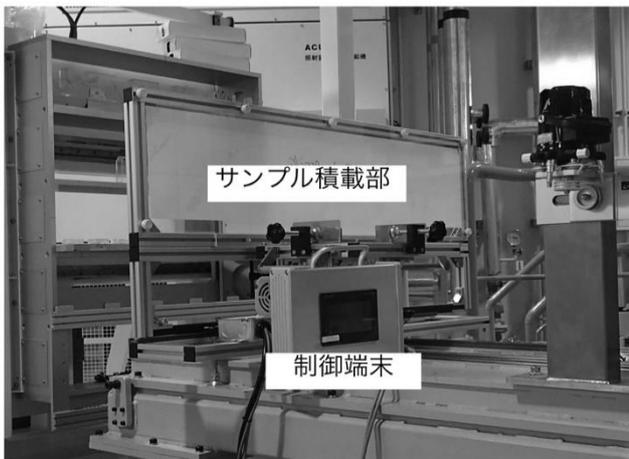


図 1 サンプル積載部と制御端末

作製したサンプルチェンジャーは、サンプル積載部、制御部、制御端末で構成される。サンプル積載部の横幅は 1100 mm であり、炭素線照射実験に標準的に使用している外径 60 mm のポリスチレンシャーレを最大 15 個搭載できる(図 1)。サンプル積載部は通常、照射時にビームの状況が確認できるように蛍光板が貼り付けた透明の亚克力ボードを取り付けて使用している(図 3)。また穂木や微生物など多様なサンプルに対応するため、別形状の積載部を取り付けることも可能である。駆動用のモーターはビームによる影響を避けるため、直接ビームが当たらない下部に取り付けられており、これらが同コースの汎用レールの上に取り付けられる。

サンプルチェンジャーの動作はプログラマブルロジックコントローラにより制御され、操作場所を現場(同コース脇)と遠隔(加速器制御室)の 2 箇所から選択可能とし、操作場所選択は制御端末(図 1)により行うものとした。作業中の事故を避けるため、常に一つの端末のみが

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、*3(同)ハセテック

本研究は、戦略的イノベーション創造プログラム(次世代農林水産業想像技術)「戦略的オミクス育種技術体系の構築」の一部として実施した。

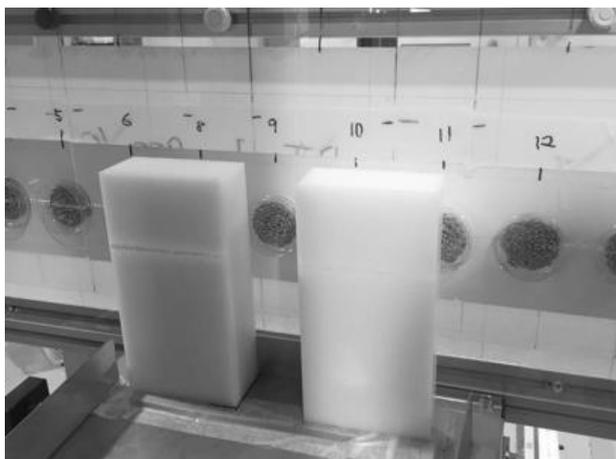


図 2 サンプルチェンジャーにセットしたイネサンプル
中央の 2 個の白いブロックはコリメーター、コリメータ
上に見える赤のラインは照射位置確認用のレーザー
マーカーである。

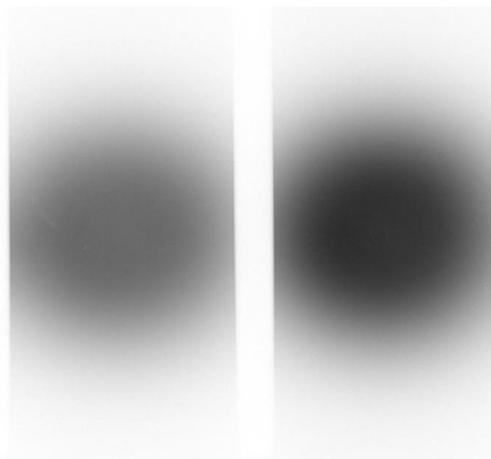


図 3 隣接サンプル位置での照射野像
サンプル積載部にイメージングプレートを取り付け、
隣接した照射位置に 0.3 Gy(左) および 0.6 Gy(右)
の炭素線を照射した。

アクティブとなり、アクティブ末端の切り替えは、現場でのみ可能としている。端末と制御部との通信は、既設装置系への親和性の高い cc-link 形式で行われている。制御端末にはデフォルトでは 15 の照射位置が設定されているが、多様なサンプルに対応するため、横方向で任意の照射位置を設定することが可能となっている。

隣接するサンプルへのビームの漏洩を避けるため、照射時にはコリメータを設置して照射を行う(図 2)。図 3 に、サンプルチェンジャーの動作確認を行うため、積載部にイメージングプレートを貼り付け、試験照射を行った結果を示す。この試験では特定サンプル位置で照射を行った後、隣接サンプル位置へ積載部を移動させ、照射を行ったが、隣り合った照射位置間でのビーム漏洩は見られないことが確認された。

III. 結言

作製したサンプルチェンジャーを用いて、イネ(ニホンバレ)に照射試験を実施した。現在、照射したイネの照射第二世代が福井県立大学生物資源開発研究センターの圃場で栽培中であり、H28 年度には多収性を中心に有用変異体の選抜を実施する予定である。

2.3.1.4

冬虫夏草変異株を用いた新規抗腫瘍物質の生産

Production of Novel Antitumorogens with the Use of *Cordyceps militaris* Mutant

櫻井明彦*1、畑下昌範*2

Akihiko SAKURAI and Masanori HATASHITA

Abstract

From the viewpoint of practical application of nucleoside antimetabolites, cordycepin production by submerged culture was investigated using *Cordyceps militaris* mutant. One of the mutants obtained by ion beam irradiation showed fivefold increase in cordycepin productivity in the submerged culture. In addition, the derivatization of cordycepin was examined for the improvement of cordycepin efficacy *in vivo*. Several derivatives were successfully synthesized with carboxylic acid chloride.

要約

本研究ではヌクレオシド系核酸代謝拮抗剤の実用化の観点から、コルジセピンを効率よく生産する技術と、生体内での有効性を高めるためのコルジセピン誘導体の開発を試みた。タンク培養でのコルジセピン生産を目的として、イオンビーム照射を用いて機械的ストレス耐性を持ったコルジセピン高生産株の作出を検討し、親株の5倍の生産性を示す変異株を取得した。また、カルボン酸塩化物を用いてコルジセピンの誘導体化が可能であった。

I. 緒言

冬虫夏草が生産する抗腫瘍物質であるコルジセピン(図 1)は、抗腫瘍ばかりでなく抗菌、抗ウイルスなどの様々な生理活性を示すことから、医薬品や機能性食品、化粧品原料として期待されている。しかしながら、天然の冬虫夏草が生産するコルジセピンは極微量であり、またコルジセピンの生産技術(冬虫夏草の培養技術)が確立されていないことから、コルジセピンの利用に関する研究は進んでいない。このため筆者らは、コルジセピン高生産株の作出を検討し、液体表面培養で高い生産性を示す冬虫夏草変異株の作出に成功している。しかしながら、この菌株のタンク培養でのコルジセピンの生産性は著しく低い。一方、コルジセピンは細胞レベルでは高い生理活性を示すが、生体内ではアデノシンデアミナーゼにより酸化されて急速に生理活性が低下する場合がある。

コルジセピンを実用化するためには、これらの問題を解決し、より効率が高く汎用性の高いコルジセピンの生産技術を開発すること、コルジセピンの生体内での分解耐性を高めることが必要である。そこで、本研究では、タンク培養によるコルジセピン生産のための冬虫夏草変異株の作出と、コルジセピンの誘導体化による分解耐性の付与について検討した。

II. 方法

1. 使用菌株

コルジセピン生産菌株(親株)としては、以前の研究でイオンビーム照射によって作出した液体表面培養用冬虫夏草 *Cordyceps militaris* G81-3¹⁾を用いた。

2. 育種

プレート上に増殖させた G81-3 株(親株)の菌糸にイオンビーム(プロトン:600-2000Gy; カーボン:500-1000Gy)を照射した。照射後の菌糸体を試験管内の液体培地に接種し、振盪培養法における菌糸体の増殖性およびコルジセピン生産性を基にタンク培養用有望株を選択した。

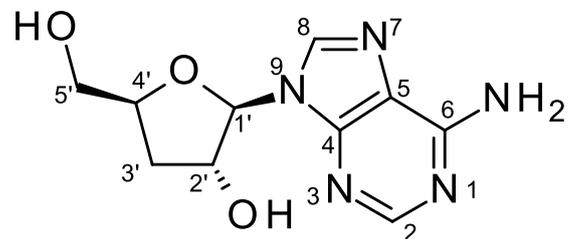


図 1 コルジセピンの化学構造

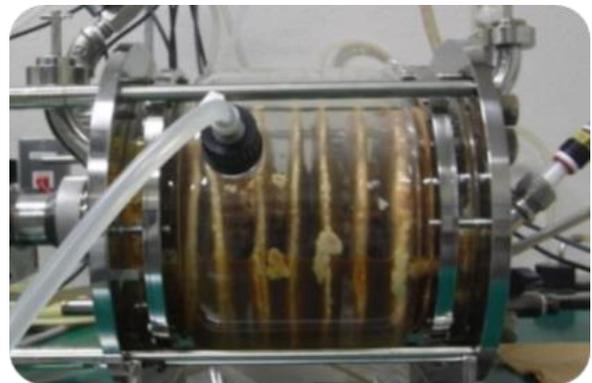


図 2 回転円板型培養器

*1福井大学大学院工学研究科生物応用化学専攻、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、本研究は、公募型共同研究事業として(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井大学と共同で実施した研究の一部である。

3. コルジセピンの誘導体化

はじめに誘導体の原料となるコルジセピンを液体表面培養法²⁾および回転円板培養法(図 2)で生産した。培養温度は 25℃とし、培養液には酵母エキスとグルコースを主成分とするものを用いた。生産したコルジセピンは晶析法で精製し、誘導体化原料とした。

誘導体化はコルジセピンの 6 位窒素のアシル化を目的として、カルボン酸塩化物/ピリジン系の反応を用いて行った。カルボン酸塩化物としては、主に塩化オクタノイルを用いた。生成物はシリカゲルカラムで精製した後、NMR で構造を確認した。

III. 結果と考察

1. タンク培養用冬虫夏草変異株の作出

プロトンビームを照射した場合の振盪培養によるスクリーニングでは、1000~1200Gy では親株と同程度のコルジセピンを生産するものはいくつかあったが、特筆すべきものはなかった。1500Gy では全般にコルジセピン生産性が高く、親株の約 1.5 倍の生産性を示すものもあった。2000Gy 照射すると、ほとんど死滅し変異株は得られなかった。

一方、カーボンビームを照射した場合には、500Gy では親株と同程度のコルジセピン生産性を示すものは得られたが、特筆すべき変異株は得られなかった。750Gy では図 3 に示すように全般にコルジセピン生産性は低かったが、変異株 C750bO では親株の 5 倍以上の生産性を示した。1000Gy では特に有望な変異株は得られなかった。これらの結果より、C750bO をタンク培養用変異株の第一候補とした。

2. コルジセピンの誘導体化

コルジセピンの 6 位のアミノ基をアシル化するために種々のカルボン酸塩化物を用いて反応条件を検討した。その結果、溶媒として塩基性溶媒であるピリジンを用いて加熱することにより、アミノ基とカルボン酸塩化物の反応が進行することが分かった。カルボン酸塩化物としては、塩化オクタノイルを用いて 80℃で反応させると反応液中からコルジセピンが完全に消失した。反応物をカラムで精製し¹H-NMR で分析したところ、6 位の NH₂ に由来する 7.3ppm 付近のピークが消失し、1ppm 近傍の高磁場側にメチレンに由来するピークが現れていることから、アミノ基にオクタノイル基が付加した図 4 の構造の誘導体が合成できていることが確認できた。

IV. 結言

液体表面培養用の冬虫夏草変異株にイオンビームを照射することによって、タンク培養に適したコルジセピン生産変異株を作出することに成功した。また、カルボン酸塩化物とコルジセピンを反応させることにより、アシル化コルジセピンの合成に成功した。

今後は、作出したタンク培養用変異株の培養特性を明らかにしてコルジセピン生産条件を検討する予定である。また、コルジセピン誘導体の合成条件の最適化の後に、大量合成を行い、誘導体の生理活性を評価する予定である。

参考文献

- 1) 増田美奈他、冬虫夏草の突然変異体及びその変異体の培養法、特許第 5343264 号(2013)
- 2) M. Masuda et al., Efficient production of cordycepin by the *Cordyceps militaris* mutant G81-3 for practical use. *Process Biochem.*, 49, 181 (2014)

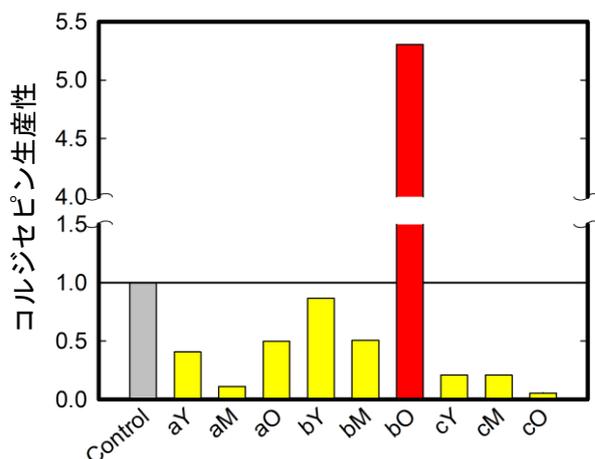


図 3 タンク培養用変異株のスクリーニング

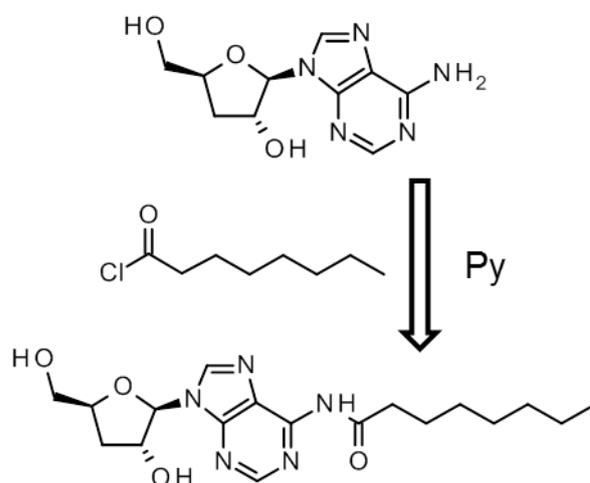


図 4 コルジセピン誘導体の合成

2.3.1.5

イオンビーム照射による山田錦のテーラーメイド育種ライブラリの開発と福井県に適した「新山田錦」の育成
Development of Tailor-Made Breeding Library of ‘Yamadanishiki’ by Ion-Beam Irradiation and Breeding of
‘New Yamadanishiki’ for Fukui Prefecture

三浦孝太郎*1、高城啓一*2

Kotaro MIURA and Keiichi TAKAGI

Abstract

It is hard to grow ‘Yamadanishi’, the brand leading cultivar for sake brewing in Japan, in Fukui prefecture, because of its low lodging resistance and of a problem in the period of ear emergence. Therefore, we are trying to develop ‘Novel Yamadanishiki’ for Fukui prefecture by means of the ion-beam breeding.

要約

酒米のトップブランド「山田錦」は、耐倒伏性や出穂期の問題から福井県での栽培が難しい。そこで、イオンビーム育種を用いて、福井県での栽培に適した「新山田錦」の開発を試みている。

I. 緒言

酒米イネ品種「山田錦」は、日本の酒造好適米のトップブランドである。しかしながらその生産地は兵庫県の一部地域に限られており、福井県内酒造会社は高価な兵庫県産山田錦を仕入れるか、県内で自社生産せざるを得ない。山田錦は草丈が高くなりやすいため倒伏しやすく、栽培管理が困難な品種である。また、出穂期が遅い晩生の品種であるため、福井県内での生産では登熟期間に低温にさらされ易く、未熟米が多発する問題点がある。そこで、我々はイオンビームを及び変異原性化学物質を組み合わせる事で、山田錦に高効率かつ多様な有用変異を誘発したテーラーメイド育種ライブラリを構築し、矮性や早生の形質を組み合わせることで福井県内の栽培に適した「新山田錦」の育成を目指して研究を実施した。

II. 材料と方法

含水率をおよそ 13%に調整した山田錦種籾を、福井県若狭湾エネルギー研究センターの汎用高エネルギー照射コースを用い、450 MeV の炭素ビームを約 30 Gy/min の線量率で、100 Gy, 125 Gy, 140 Gy, 160 Gy を照射した。また、変異原としてイオンビームだけではなく、EMS(エチルメタンサルホン酸, 40 mM)、MNU(メチルニトロ尿素, 3 mM)、および DEB(ジエポキシブタン, 3 mM)を用いた化学変異剤による変異誘導も試みた。

照射したイネの栽培は、福井県立大学生物資源開発研究センターの育苗温室で行った(栽培期間 H27 年 11 月初旬～H28 年 2 月末)。

山田錦の遺伝子解析は、山田錦から抽出したゲノム DNA の次世代シーケンサーによる解析を行い(タカラバイオ NGS 解析サービス)、イネ遺伝子データベース(Q-TARO, <http://qtaro.abr.affrc.go.jp/>)で検索した品種日本晴の出穂期や稈長に関わる遺伝子との照合を行った。

III. 結果と考察

炭素線照射、EMS 処理、MNU 処理、および DEB 処理を行った種子を育成し、2920 系統からなる M2 変異集団を育成した。炭素線 100 Gy, 125 Gy とも生存率には大きな影響はなかった(94.1% および 98.0%)が、炭素線 125 Gy を照射した種子では稔実率が 57.5%に低下した。この稔実率の差は 100 Gy と 125 Gy の変異導入率の差を反映したものであると推測される。EMS、DEB 処理では、生存率は 85%前後で稔実率は 90%前後となった。MNU 処理では、生存率はおおよそ 75%まで低下し、稔実率はおおよそ 45%まで低下した。なお、稔実率については冬期温室栽培による負のバイアスがかかっており、生殖障害を引き起こすような変異形成を直接反映したものは無いと考えられる。

¹公立大学法人福井県立大学・生物資源学部・生物資源開発研究センター、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室

本研究は、公募型共同研究事業として(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県立大学と共同で実施した研究の一部である。

山田錦のゲノム解析において、公開されている日本晴ゲノム配列と異なる部位を 72,040 箇所検出する事に成功した。出穂期に関与する遺伝子の内、変異形性により早生が生じる可能性がある 9 遺伝子を調査したところ、いずれの遺伝子でも変異が見られなかったことから、変異原処理による変異導入によってこれらの遺伝子に変異することで、早生化した変異体が得られる可能性が大きいと考えられた。

桿長に関与することが推定されている 3 遺伝子についても、山田錦ゲノムではいずれの遺伝子も変異しておらず、これらに変異が生じることで桿長が変化した形質が得られる可能性があることがわかった。

表 1 出穂期、桿長に関与する遺伝子の山田錦ゲノム上の変異の有無

遺伝子名	染色体	遺伝子ID	関与形質	山田錦上の変異
Hd6	3	Os03g0762000	出穂	無し
Hd16	3	Os03g0793500	出穂	無し
Hd17	6	Os06g0142600	出穂	無し
Hd3a	6	Os06g0157700	出穂	無し
Hd1	6	Os06g0275000	出穂	無し
Ghd7	7	9184534-9187187	出穂	無し
ehd3	8	Os08g0105000	出穂	無し
DTH8	8	Os08g0174500	出穂	無し
Ehd1	10	17533310-17535191	出穂	無し
d18	1	Os01g0177400	桿長	無し
sd1	1	Os01g0883800	桿長	無し
SCM2	6	28357085-28358456	桿長	無し

IV. 結言

今後、M₂ 変異集団を圃場にて栽培し、表現型を調査する事で有用変異体を選抜し、新山田錦の育成を目指す。

2.3.1.6

粒子線処理による有用トチュウの育種

Mutated Breeding of *Eucommia ulmoides* by Ion Beam Irradiation徳本雄史¹、鈴木伸昭¹、中澤慶久¹、高城啓一²

Yuji TOKUMOTO, Nobuaki SUZUKI, Yoshihisa NAKAZAWA and Keiichi TAKAGI

Abstract

Mutation breeding of *Eucommia ulmoides* by X ray, proton and carbon irradiation was carried out. Survival rates of irradiated individuals were decreased as increase of dose in the case of all radiation source. The germination rate were not drastically changed through all dose examined in X-ray and proton-beam experiments, on the other hand, abrupt decrease of the germination rate was observed in carbon-beam irradiation. LD50 of X-ray, proton-beam, and carbon-beam was around 75 Gy, 60 Gy, and 20Gy, respectively.

要約

バイオトランスポリイソプレン生産木であるトチュウに対し放射線処理を行い突然変異体の作出を試みた。X線、陽子線、炭素線による照射を行った結果、X線、陽子線では照射量の増加に応じ生存率は低下した。X線照射、および、陽子線照射では、発芽率に大きな変化は見られなかった。一方で炭素線は照射量に応じて発芽率、生存率とも顕著に低下した。半数致死は、X線で75Gy、陽子線で60 Gy、炭素線では20Gy前後であった。

I. 緒言

トチュウは温帯性の落葉高木で葉、樹皮、果実等に白色糸状の高分子化合物を生成・蓄積する特徴を持つ。この白色糸状成分はトチュウエラストマーと呼ばれ、トランス型のポリイソプレンを主成分とする天然化合物である。現在、トランス型ポリイソプレンはナフサ等を原料に化学合成により製造されるが、植物由来トランス型ポリイソプレン(バイオトランスポリイソプレン)の生産と供給に対する期待は大きい。しかし、バイオトランスポリイソプレンの市場競争力のある生産を行うには、よりバイオトランスポリイソプレン生産性に優れた有用品種の開発と利用が必要とされる。

通常、トチュウの果皮には約 10 %のバイオトランスポリイソプレンが含まれる。トチュウ果皮は毎年、結実により収穫可能なことから樹勢を弱らせることなく採取でき、バイオトランスポリイソプレンの採取用組織として適している。このため、トチュウによるバイオトランスポリイソプレンの生産性向上には、含有量の増加のほか結実量の多い株や果実サイズの大きい株の育種が望ましい。本研究では、トチュウを材料にバイオトランスポリイソプレンの高生産株の育種を目的に、粒子線処理によるトチュウ突然変異株の作製に取り組んだ。

II. 方法

乾燥種子に対するX線照射は、X線照射装置(MBR-1520R-3, 日立メディコ)を用いた。陽子線、および炭素線照射には、福井県若狭湾エネルギー研究センターの汎用高エネルギー照射コースを使用した。それぞれの線種のエネルギーと線量率は、X線が実効 38 keV, 5.7 Gy/min、陽子線が 200 MeV, 2.5 Gy/min、炭素線が 500 MeV, 30 Gy/min であった。

本実験の材料として、2014年11月に大阪市内でトチュウ雌株より採取したトチュウ種子を使用した。トチュウ種子は照射実験ごとに20粒ずつ用い、照射後、トチュウ種子を1%の次亜塩素酸ナトリウムに10分間浸し滅菌処理を行い、さらにクリーンベンチ内で滅菌水により2回洗浄後、無菌的に作成したMurashige-Skoog固体培地(Murashige-Skoog 培地用混合塩 2.2g/L, AgarGel5.0g/L)に播種したうえ、16時間・24,000ルクスの明期と8時間の暗期の光サイクル下で23度にて発芽・生育させた。播種後の種子は、子葉展開と根の伸長を指標に発芽状況を観察し、発芽率を算出した。

III. 結果

トチュウの各種放射線に対する感受性は、これまで調査された例が皆無であり、このため突然変異体の育種に適した照射線量を求めるため、最初にX線照射による影響を調べた。各処理につき20粒ずつ、0、100、200、

*¹大阪大学 Hitz(バイオ)協働研究所、*²(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが大阪大学と共同で実施した研究の一部である。

400、800Gy の 5 吸収線量で処理を行った結果、照射後 20 日間の発芽率は未照射種子と 800Gy 照射の種子ではほぼ同じ値を示した。しかし、その後照射をした全ての個体で成長が止まり枯死したことから、生存率は大きく変化することが分かった。また、より低い線量での処理を再度実施した結果、X 線照射では照射線量を増やしても発芽率に顕著な低下が見られないのに対し、本葉出芽に至るまでの生存率はほぼ直線的に低下した(図 1a)。

同様の処理を陽子線及び炭素線に対しても行った結果、陽子線では X 線の場合と同様の傾向が見られ、照射線量を増加させても発芽率はほとんど変化しない一方、生存率は顕著に低下した(図 1b)。しかし、炭素線では発芽率と生存率はともに照射線量に応じて低下し、その度合は X 線、陽子線に比べて著しかった(図 1c)。一方、未照射の試料に対して生存率が 50%程度となる半数致死が、X 線で 75Gy 程度となったのに対し、陽子線では 60 Gy 前後、炭素線では 20Gy 前後となった。

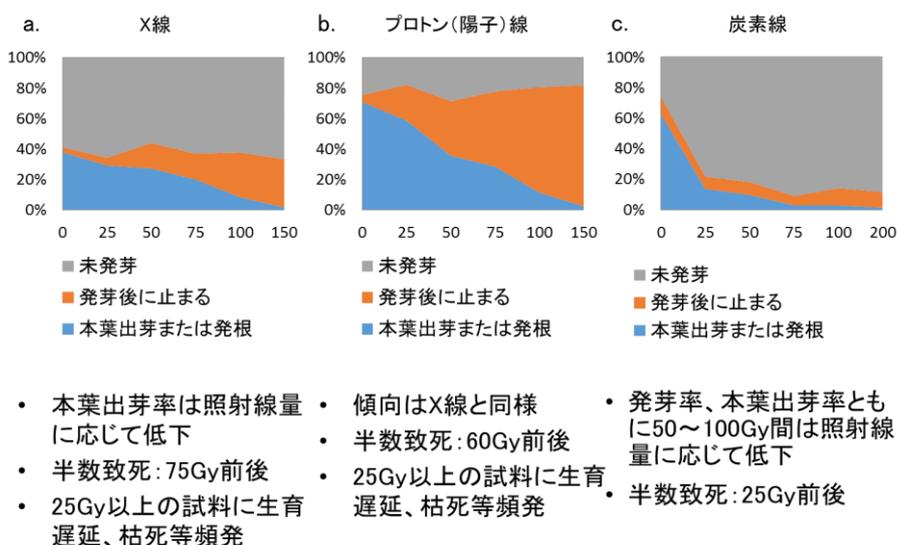


図1 照射による発芽、生存結果

IV. 考察

有用な変異株の取得を目的に、トチュウ種子に対し、X 線、陽子線、炭素線の照射を行い放射線育種を試みた。どの処理でも照射により生存率は低下したが、X 線、陽子線では今回実施の線量範囲内では発芽率の著しい低下は見られなかった。一般に発芽は種子を適切な温度、水分、栄養条件下に置くことで、種子内に蓄積された養分等を用いて細胞増殖非依存的に進行する部分が大いため、発芽率への影響が低かったのではないかと考えられる。炭素線照射では発芽率もともに大きく低下していることから、炭素線はトチュウ種子内でDNAだけでなくその他の細胞内分子やメカニズムにも大きな影響を与える可能性が示唆された。また、生存率への影響に関しても、炭素線は X 線や陽子線よりも大きな影響を与えた。半数生存率(LD50)で比較すると、X 線で 75Gy 前後、陽子線では 60 Gy 前後であったのに対し、炭素線では 20Gy 前後であり、同一の生物効果を与え得るための線量が 1/3 以下であった。LD50 を指標とした場合の X 線、および陽子線の適正線量は、75 Gy、および 60 Gy 付近であると考えられた。生存曲線の肩前後を指標とすることが多い炭素線の場合、今回の結果では明確な生存曲線の肩が検出されていないが、10 Gy 以下ではないかと推測された。

V. 結言

突然変異等による有用株の作成は、遺伝子組み換え植物の利用が現在、社会的に制限され事実上難しい中で有用株育種を行う貴重な手法である。今回、トチュウの放射線処理と発芽率、生存率との関係を調べることで、トチュウの有用株育種を行うための重要な基礎データが得られた。作製した変異株は現在、圃場に植栽し育成中であり、今後の成長を待って表現型解析へと進めていきたい。

2.3.1.7

真菌類を用いた生理活性物質の探索と評価に関する研究

Studies about Searching and Evaluation of Physiological Active Substances with the Use of Fungi

畑下昌範*1

Masanori HATASHITA

Abstract

It is well known that β -D-glucans from fungi are effective initiators of cell-mediated immunity in humans. β -D-glucans isolated from various fungi differ in their chemical structures and consequently in their immunomodulatory activities. For example, schizophyllan classified as a medicine, β -D-glucan extracted from the fungus *Schizophyllum commune*, stimulate the immune system. However, it remains unclear what the molecular mechanisms has occurred in and what downstream events are triggered by. In this study, several extremely rare fungi are focused. Their culture conditions and irradiation conditions were examined.

要約

真菌類由来の多糖類である β -グルカンが細胞を媒介した免疫反応の効果的な開始物質として知られている。種々の真菌類から単離した β -グルカンはそれぞれの化学構造が異なっており、その結果として免疫調整作用が異なるとされている。例えば、スエヒロタケから抽出された β -グルカンであるシズフィランは医薬品として使用されているが、ヒトの免疫系に作用することが明らかにされている。しかし、その反応にどのような分子メカニズムが働いているのか、またそれに誘導されて起こるシグナル伝達下流の反応には何があるのか、については未だ不明である。本研究では、いくつかの希少な真菌類を取り上げて、それらの培養条件およびイオンビーム照射条件について検討した。

I. 緒言

疾病の予防対策や食生活における健康志向の高まりから、健康増進を目的とした健康食品(サプリメントを含む)の需要が高まってきている。その中の一つに多糖類等を有効成分とするキノコ系(真菌類)健康食品がある。真菌類には様々な生理活性物質が含まれていると言われていたが、メジャーな菌株に関しては分析されているものの、希少な菌株についてはそれほど進んでおらず、新たな生理活性を示す物質が見つかる可能性が高い。真菌類由来の新規の生理活性物質(免疫賦活剤)の開発を最終的な目標として、本研究では、複数の希少な真菌類を取り上げ、それらの培養条件の確立、生産物質の分取、イオンビーム照射条件について検討を行った。

II. 成果の概要

冬虫夏草、カワラタケ、チャガ、チョレイマイタケ、その他同定していない真菌類も含め計 17 種の真菌類を入手し、それらの培養条件(培地組成、温度)を検討した。菌糸体をプレート上で接種した後のコロニーの形成速度を指標として、真菌類それぞれに対して培地組成を決定した。温度に関しては、いずれの真菌類に対しても 25°C が最もよい生育を示した。

真菌類が生産する菌体内多糖類、菌体内多糖類、ポリフェノール、テルペン類を分取する方法を確立するために、培養後の培養液上澄み液、乾燥菌糸体からの熱水抽出物およびエタノール抽出物、最終沈殿物をそれぞれ回収することを試み、それらの分画を回収する手法を確立した。

イオンビーム照射による変異体選抜を行うために、真菌類の放射線感受性を調査した。プレート上で接種した菌糸体に対し、種々の線量で X 線、プロトン、カーボンビームを照射し、その後のコロニーの形成速度を指標に、真菌類の線量応答反応を解析し、真菌類の菌種毎の放射線感受性を明らかにした。

III. 結言

今回の試験では、コロニーの形成速度を指標として、培養条件とイオンビーム照射条件とを明らかにした。今後は、生成した菌糸体の乾燥重量を指標に、それらのより詳細な条件を検討していく必要がある。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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の提案型自主研究として実施したものである。

2.3.1.8

クズのデンプン蓄積カルスのホルモン反応

Response of Starch Accumulating Callus derived from Kuzu to Plant Hormones

高城啓一*¹Keiichi TAKAGI*¹

葛粉は若狭地方の特産物であるが、原料となるクズ塊根の多くは九州や海外から調達されており、若狭原産のクズからはわずかの葛粉しか作られていない。葛粉の生産には、草齢が 10 年以上の大きな塊根が必要であり、このことが若狭原産の純葛粉の生産を困難にしている。

そこで、葛粉生産の効率化を図る目的で、若狭地方原産のクズ(*Pueraria lobata*)種子からデンプンを蓄積するカルスの確立を試み、これまでに乾燥重量の 1%近くのデンプンを蓄積するカルスの作出に成功している。平成 27 年は、このカルスにより多くのデンプンを蓄積させるため、培地中の植物ホルモンの濃度を変え、細胞中に形成されるアミロプラストの量を評価した。このカルスは、通常ナフトレン酢酸(NAA) 1.0 mg/L、ベンジルアミノプリン(BAP) 1.0 mg/L を含む培地で維持しているが、NAA の濃度を 5.0 mg/L に増加させると、通常薄緑色をしているカルスの色が白色に近くなり、アミロプラストの蓄積量が増えることがわかった。BAP の濃度はアミロプラストの蓄積量に対する影響は少なく、低濃度ではカルスの増殖速度が低下した。

今後は、ホルモンの種類や濃度、培養方法を検討し、よりデンプン含量の高いカルス培養法の確立を目指す。

*¹(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室

2.3.1.9

植物育種の効率化を目指した DNA マーカーの開発

Development of a DNA Marker Improve the Efficiency in Plant Breeding

田中良和*¹、鈴木勝久*²、水野隆*³

Yoshikazu TANAKA, Katsuhisa SUZUKI and Takashi MIZUNO

植物の育種においては栽培性や高品質性、病害に対する抵抗性など多様な需要があり、種苗会社は迅速かつ効率的に品種改良を行うための方法を求めている。遺伝子解析技術の進展により、現在では交配を行った試料植物が、特定の性質を持つか否かを DNA レベルで判定可能になった。この方法を用いれば、従来の選抜試験と比べて飛躍的に短期間かつ季節要因などに左右されない選抜が可能となる。本研究は DNA 判定に用いる特定塩基配列(DNA マーカー)を見つけ出し、植物育種の効率化に寄与することを目的とするものである。F1 (雑種第一代)品種は、両親の優れた形質を持たせた一代限りの品種である。そのため母親の自殖種子の混入が問題となり、これを迅速に判別出来る方法が必要となる。そこで現在育成を行っているメロン F1 品種に対して、その純度検定に使用可能な DNA マーカーの作成を試みた。両親系統および F1 の葉から抽出した DNA100ng に対し、10 塩基からなるプライマー 40 種類を用いて Random Amplified Polymorphic DNA (RAPD) 法を行ったところ、父親系統と F1 においてのみ出現する DNA 断片を複数確認することが出来た。これをクローニングして DNA 配列を調べたところ、父親系統と F1 から得られた DNA は同一配列であり、母親系統の該当領域とは数塩基の違いがあることが判った。この部位を用いて新たに 22 塩基からなるプライマーを設計し PCR を行った結果、父親系統及び F1 で約 700bp の単一 DNA 断片を検出することが出来た。母親系統からは DNA 断片の増幅は認められなかった。また、葉の摩砕物を直接 PCR に用いた場合においても良好な結果を得ており、今回作成した DNA マーカーによって、迅速かつ簡便な F1 純度検定が可能になった。

*¹(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、*²ハクサンインターナショナル株式会社、*³プランツファーム SETO
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターがハクサンインターナショナル株式会社、プランツファーム SETO と共同で実施した研究の一部である。

2.3.1.10

シロイヌナズナ種子胚における γ -H2AX の検出
 Detection of γ -H2AX in a Seed Embryo of Arabidopsis
 高城啓一*1
 Keiichi TAKAGI

突然変異は、DNA 損傷や DNA 複製エラーとその修復過程で発生する。したがって、イオンビーム照射による突然変異形成を研究する上で、DNA 損傷の検出は非常に大きな課題である。多くの植物材料では、育種のためのイオンビーム照射を乾燥種子に対して行う。しかし、種子胚の細胞は、タンパク質粒、脂肪粒、デンプン粒等に満たされているため、種子胚に生じた DNA 損傷やその修復過程を、DNA 損傷マーカーの抗体を用いて追跡することは非常に困難であり、これまで報告例が無い。

そこで本研究では、種子胚中の DNA 損傷状況を追跡するため、のシロイヌナズナ(*Arabidopsis thaliana*)の乾燥種子に、イオンビームや X 線を照射し、照射後吸水させた種子から胚を摘出して、DNA 損傷マーカー γ -H2AX の蛍光抗体法による検出を試みた。

摘出した胚に対して抗 γ -H2AX 抗体を浸透させる手順を工夫したところ、X 線 100 Gy を照射した種子胚で、吸水後 2~4 時間では γ -H2AX が細胞核内に検出されるが、吸水 1 日後では、ほぼ見られなくなることがわかった。しかし、結果が不安定で、吸水早期の胚での再現性に問題があった。今後は、検出手法や実験手順の検討を行い、乾燥種子に対するイオンビーム照射による、種子胚中の DNA 損傷やその修復過程を明らかにしていく。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室

2.3.1.11

イオンビーム照射による野菜類の品種改良
 Ion Beam Breeding of Vegetables
 後藤勇太郎*1、棚橋知弘*1、高城啓一*2、畑下昌範*2、田中良和*2
 Yutaro GOTO, Tomohiro TANAHASHI, Keiichi TAKAGI, Masanori HATASHITA and Yoshikazu TANAKA

乾燥種子への炭素線照射を用いて、アブラナ科野菜(ミズナ、ダイコン)やナス科野菜(ナス)など野菜類の品種改良を試みている。

H27 年度は、ダイコン(*Raphanus sativus* var. *longipinnatus*)、ミズナ(*Brassica rapa* var. *laciniifolia*)の乾燥種子に種々の線量で炭素線照射を行い、線量応答を調査した。発芽率は、ダイコン、ミズナとも試行した線量ではほとんど影響が見られなかった。

ダイコンに関しては 350 Gy までで生存率には影響は見られなかったが、300 Gy、350 Gy の線量区で、第二本葉の形態異常が見られ、第三本葉以降の主茎伸長に抑制が見られた。この結果は、300 Gy から 350 Gy で、葉原基の細胞分裂や茎頂分裂組織の生長に対して顕著な影響が出現したことを示しており、このことから適正線量は、300 Gy 付近であると判断した。

ミズナに関しては、250 Gy で生存率の顕著な減少が見られた。第二本葉の形態異常は 100 Gy から 150 Gy で出現し始め、第三本葉以降の主茎伸長は、150 Gy から 200 Gy で顕著となった。この結果から、ミズナに対する適正線量は、150Gy から 200 Gy であると判断した。

*1株式会社アサヒ農園、*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株式会社アサヒ農園と共同で実施した研究の一部である。

2.3.1.12

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

栄養繁殖系の植物材料を用いることにより、照射当代において枝変わり変異を選抜することができれば、それらの変異体を挿し木や組織培養等の方法によって形質を安定に保ったまま増殖することで、短期間での新品種育成が期待できる。我々は、ビンカ (*Catharanthus roseus*) の吸水種子に、カーボンビームを照射、その後の変異体の選抜を行うことにより、新品種の作出を試みてきた。その結果、花に刷毛目状の斑が入った花色変異体を2系統選抜し、それらの特性調査を行い、形質の安定性も確認した上で、せと福 CAMR およびせと福 UMR とし、品種登録を行ってきた。

ビンカのシリーズ化を目的として、種々の品種の茎頂分裂組織に対して、イオンビーム照射を行ってきた。その後の枝変わり型の変異体の選抜から、特徴的な性質を示した枝については挿し木により植物体を残した。その中で、3 品種について、せと福 GPN、せと福 NBPN、せと福 RMR と命名し、品種登録の出願を行った。このうち、せと福 GPN、せと福 RMR については、品種登録に必要な要件である区別性、均一性が確認されたため、品種登録された。一方、せと福 NBPN については、均一性が保てなかったため、出願を取り下げた。その他の品種登録候補個体については、無菌化苗を作成し、培養系での系統の保存を行った。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、^{*2}ハクサンインターナショナル株式会社
 本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターがハクサンインターナショナル株式会社と共同で実施した研究の一部である。

2.3.1.13

炭素線照射処理オオムギ後代からの種子貯蔵タンパク質変異のスクリーニング
 Screening of Seed Storage Protein Mutation from the Progenies of Carbon Beam Radiated Barley
 長嶺敬^{*1}、池田達哉^{*2}、高城啓一^{*3}
 Takashi NAGAMINE, Tatsuya M. IKEDA and Keiichi TAKAGI

I. 緒言

イオンビーム処理による有用突然変異の誘発事例は多くの作物で報告されている。新たなオオムギ品種の開発にむけて、炭素線処理後代から品質・農業特性に関わる有用突然変異の選抜を行う。今年度は大麦粉の利用特性を飛躍的に向上させることが推察されている種子貯蔵タンパク質の変異スクリーニングを行った。

II. 内容

大麦粉の生地物性を用途の広い小麦粉生地に近づける効果が推察される種子貯蔵タンパク質 D-ホルデインの突然変異の獲得を目的としたスクリーニングを行った。六条オオムギ品種ファイバースノウなど 3 品種に対して、50 あるいは 100Gy の炭素線照射処理を行った後代 (M₂) 約 2000 個体 (温室ポット栽培) について、種子貯蔵タンパク質の一種である D-ホルデインの変異を SDS-ポリアクリルアミド電気泳動法 (SDS-PAGE) によって調査した。

今回実施したスクリーニングでは目標とした D-ホルデインの分子量が低減した系統を見出すことができなかった。今後、圃場で栽培した別の M₁ 個体由来の M₂ 2000 個体について D-ホルデイン変異のスクリーニングを行う。また、品質育種において特に重要な低ポリフェノール性、高β-グルカン性、リポキシングナーゼ欠失性などについてもスクリーニングを行う。

^{*1}農研機構・中央農業研究センター・北陸研究拠点・作物開発研究領域、^{*2}農研機構・西日本農業研究センター・水田作研究領域、^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室
 本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構と共同で実施した研究の一部である。

2.3.1.14

イオンビーム照射による耐熱性発酵糸状菌変異株の構築

Construction of Heat-Resistant Fermentation Filamentous Fungi Mutants by Ion Beam Irradiation

畑下昌範^{*1}、星野一宏^{*2}

Masanori HATASHITA and Kazuhiro HOSHINO

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

イオンビーム育種法を活用することにより、耐熱性エタノール発酵糸状菌の温度耐性の安定化および耐熱性乳酸発酵糸状菌の育種を試みた。プロトンビーム、カーボンビームをそれぞれ照射した系で、増殖阻害を受ける線量区を主として、変異株のスクリーニングを行った。今までの研究から、45℃で安定にエタノール発酵できる糸状菌に対して変異誘導を行った結果、40℃の繰り返し回分培養でエタノールを安定に生産できる菌株を獲得してきた。さらに、乳酸発酵糸状菌に対してイオンビーム照射による変異導入を実施し、50℃で 30 g/L 以上の乳酸を生産できる生産株および 40℃でキシロースから乳酸発酵可能な生産株のスクリーニングに成功してきた。こうした変異株は代謝に関わる酵素群が野生株よりも高発現していることが示唆された。イオンビーム照射により目的とする形質を容易に選抜することができたので、今後もこの手法を用いてより高性能な変異株の獲得を試みる予定である。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、^{*2} 富山大学工学部生命工学科
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが富山大学と共同で実施した研究の一部である。

2.3.1.15

粒子線照射による花卉類の品種改良

Improvement of Ornamental Flowers by Ion-Beam Breeding

藤井崇治^{*1}、高城啓一^{*2}

Takaharu FUJII and Keiichi TAKAGI

イオンビーム照射を用いて、スターチス類、ユーストマ、ストックなど花卉類の品種改良を試みている。

H26 年度に照射した培養植物体から得られたスターチス類(シヌアータ、シネンシス)の花色や花序の当代変異は、初代培養による継代を試みたが、一部は微生物のコンタミネーションにより失われ、継代が成功したものについては、変異形質が消失した。今後、培養植物体への照射から当代変異が得られた場合、初代培養の方法や、初代培養に用いる組織に関して検討を要する。

H26 年度に X 線照射を行ったユーストマ種子から得られた花色や花型の変異体については、採種し、形質確認を行うため次代苗を育成中である。

H27 年度は、陽子線を照射したストック種子から濃色花卉を持つものや、花卉にフリルがあるものなどの当代変異体を得られた。今後、これらの種子を採種し、次代で形質の確認を行う予定である。また、アスター種子の陽子線感受性調査を行い、50 Gy から 100 Gy が適正線量であることがわかった。線量応答調査を行ったアスターからは、花型や花期に関する当代変異体を得られており、これらは次代での形質確認のため採種を行った。

^{*1}福花園種苗株式会社生産技術部生産技術グループ、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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花園種苗株式会社と共同で実施した研究の一部である。

2.3.2. 植物工場関連技術開発

2.3.2.1

植物工場用野菜の栽培システムの開発

Development of Cultivation System of Vegetables for Plant Factory

畑下昌範^{*1}

Masanori HATASHITA

Abstract

The plant factory can produce vegetables all year round by artificially controlling the cultivation environment. The new halophilic vegetable for plant factory was examined. The cultivation condition of it in indoor hydroponics system was revealed.

要約

植物工場は、栽培環境を人工的に制御することによって、野菜を周年栽培することができる。植物工場に用いるための新しい好塩性野菜に関して検討を行い、完全閉鎖型植物工場における栽培条件を明らかにした。

I. 緒言

天候や場所を選ばない安定生産や無農薬栽培といった特徴をもつ植物工場で栽培される野菜には高付加価値化、差別化が求められている。植物工場(水耕栽培)によってのみ継続的に栽培可能な野菜として、好塩性野菜が挙げられる。好塩性野菜は海藻と同様に高ミネラル低カロリーであり、陸生植物にはないタウリンなどの栄養素も含んでおり、昨今の健康志向に合致した機能性野菜である。本研究では、この好塩性野菜の完全閉鎖型植物工場における栽培条件を明らかにするため、種々の栽培試験を行った。

II. 成果の概要

好塩性野菜として、シーアスパラガス(*Salicornia europaea*)を用いた。この野菜は、特定の汽水域干潟に自生する希少種であり、海外では古くから食用に供されている。今後低カロリーでミネラルやアミノ酸が豊富な新規の野菜として消費拡大が見込まれるものの、現状では栽培技術が確立されていない。これまでの栽培試験の結果から、光強度の増大や赤色LEDの照射が高生長を促すことを確認した。また、赤色LEDへの青色LEDの追加は、生長を抑制する方向に働くことが明らかになった。

次に、機能性成分のグリシンベタイン(GB)の蓄積性を検討した。図1に、各種照明条件におけるGBの蓄積量の相対比を示す。蛍光灯条件に比べて、赤色LED条件下ではGBの蓄積量が低下した。また、赤色LEDの強度を上げると、GBの蓄積量は増加した。さらに、青色LEDの追加は、GBの著しい蓄積量の増加を示した。

III. 今後の課題と展望

GBは既存添加物名簿収載品目リストにおいては、調味料として分類されており、化粧品やシャンプーに含まれる天然アミノ酸系保湿剤とは、このGBのことを指している。サカタのタネは、塩類集積、高温、低温、乾燥などの生育不良環境下において植物の成長を改善する肥料として、このGBが6%含まれる肥料の販売を開始している。このようにGBは多岐の用途に使われており、現在は北海道で主に栽培されているテンサイのみから抽出されている。テンサイは2年草であり、根の部分にGBが蓄積されているので、取り扱いが難しい。今後、シーアスパラガスが植物工場内で安定生産できるようになれば、容易にGBを抽出できると期待される。

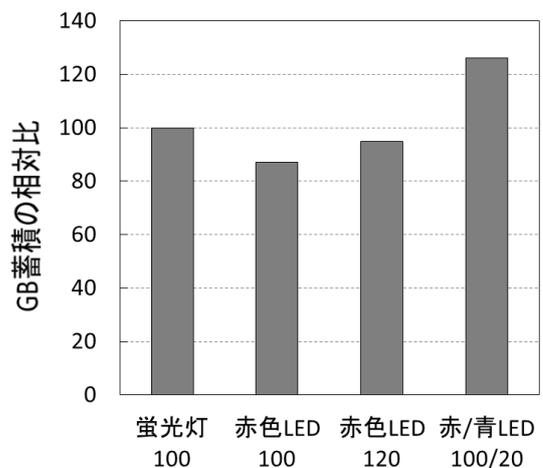


図1 各種照明条件におけるGBの蓄積
(単位: $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

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

2.3.2.2

植物工場用エネルギーシステム実証研究
 —イオンビームによる植物工場用作物の新系統育成と工場生産法の確立—
 Experimental Study of Energy System for Plant Factory
 —Production of New Variety of Vegetable for Plant Factory and Establishment of Cultivation Method—
 畑下昌範^{*1}
 Masanori HATASHITA

Abstract

For labor-saving cultivation, the use of tomato which are able to form fruit without fertilization/pollination is essential. Producing new varieties of parthenocarpic tomato plants (*Solanum lycopersicum*) by ion beam irradiation was examined.

要約

トマト栽培の省力化には、受粉作業や着果剤処理無しで結実できるトマトの利用が不可欠である。本研究では、イオンビーム照射による単為結果性トマト品種の開発について検討を行った。

I. 緒言

現在、トマト栽培の多くは、環境制御可能な施設園芸により行われており、収穫期間の延長や周年栽培が図られている。しかし、施設栽培では、着果促進剤処理、セイヨウマルハナバチ放飼などの着果促進処理が必要で、これらの作業には、多大な労力がかかるだけでなく、栽培経費の大きな負担となっている。こうした課題を克服するためには、着果促進処理を行わなくても果実ができる‘単為結果性’を導入した品種の育成が必要であり、生産現場の省力化、農薬使用量の低減および特定外来生物の不使用を実現し、環境保全型農業の推進にも有効と考えられる。今までに、数種の単為結果性品種が登録されているが、いずれも大玉トマトやミニトマトであり、生産現場からは、収量性および果実特性に問題がある品種が多いとの指摘もある。着果促進処理が不要で、高品質なミディトマトは、着果作業の省力化の観点から産地の期待は大きく、普及の可能性が高い。

本研究では、イオンビーム照射を利用することで、受粉作業や着果剤処理が不要で、周年栽培可能な高品質ミディトマトの育成を行うことを目的とする。前回の報告では、4系統のミディトマトの雑種種子に X 線を 60Gy、または陽子線を 10Gy 照射し、播種、育苗後、ハウスにて試験栽培したものの中から、受粉作業をしても種子をもたない果実をつける個体が、X 線の照射区で 9 個体、陽子線の照射区で 7 個体得られたことを報告した。今回は、その後の経過とそれらの無受粉条件による着果性について報告する。

II. 成果の概要

前回報告した受粉作業をしても、種子をもたない果実をつける 16 個体については、挿し木をして個体の維持を図った。個体毎に複数本の側枝を取り出して苗を調製、定植し、作期毎に形質調査を行った。その過程で、単為結果様の性質を示さなくなった個体が見られたため、それらは選抜から外した。さらに、相対的に糖度の低い実をつける個体、相対的に果実重量が十分ではない個体も選抜から除外し、3 個体を残した。それらは、いずれの個体も現行品種に比べて、糖度はやや低いものの、果実重量が劣らない実を付ける個体であった。この 3 個体から複数の苗を調製し、それらの結実性を調査した。その結果、1 つの系統では、無受粉条件において、着果率が 60%程度であり、単為結果性を示さなかった。残りの 2 系統については、振動受粉、無受粉条件のいずれにおいても 90%以上の着果率を示し、これらは既存の単為結果性大玉品種と同様な結果であった。一方、現行のミディトマト品種では、振動受粉により 90%以上の着果率を示すものの、無受粉条件では約 20%の着果率しか示さなかった。

III. 結言

イオンビーム照射したトマト雑種種子より、無受粉条件において既存の単為結果性大玉品種と同様な結実性を示すミディトマトを 2 系統獲得することができた。今後は、品種登録に向けた特性調査を行う。

^{*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文部科学省地域イノベーション戦略支援プログラムして実施したものである。

2.4. 多様な分野の活動を支える技術開発

2.4.1. 加速器技術の開発・高度化

2.4.1.1

若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状
Current Status of the Accelerator Facility at the WERC羽鳥聡^{*1}、栗田哲郎^{*1}、
林豊^{*1}、山田裕章^{*1}、小田桐哲也^{*1}、廣戸慎^{*1}、清水雅也^{*1}、山口文良^{*1}、淀瀬雅夫^{*1}、長崎真也^{*1}、
山田和彦^{*1}、丸田恭央^{*1}、和田一人^{*1}

Satoshi HATORI, Tetsuro KURITA,

Yutaka HAYASHI, Hiroaki YAMADA, Tetsuya ODAGIRI, Makoto HIROTO, Masaya SHIMIZU,
Fumiyoshi YAMAGUCHI, Masao YODOSE, Shin'ya NAGASAKI, Kazuhiko YAMADA, Yukihi MARUTA
and Kazuto WADA

Abstract

After creeping discharge on the insulation column of the tandem accelerator in November 2014, it had been difficult to generate the acceleration high tension more than 4.5 MV and the maximum voltage had been limited at 4 MV. After the finish of the machine time in fiscal year 2014, we removed the damaged surface by the creeping discharge and changed the potential fixing method, however, it was impossible to generate the voltage more than 4.5 MV. We had another opportunity to maintain the inside of the accelerator tank in July 2015. Although we found other discharging marks to be removed, the discharge occurred at 4.5 MV again and the limit of the acceleration voltage was set at 4 MV in FY 2015. Total time of the generation of the high tension amounted at 4190 hours.

要約

2014年11月、タンデム加速器は絶縁コラム上で発生した沿面放電により、以降のマシントイムでは最高電圧を4 MVに制限しての運転を行った。2015年3月から4月にかけて、沿面放電痕の除去と電位固定の変更を行ったが、4.5 MV以上の高電圧維持が不可能であった。2015年7月にタンク内の点検を行い、沿面放電痕の除去を行ったが、やはり4.5 MVで再び放電を起こした。2015年度も最高電圧を4 MVに制限して運転を行った。高電圧発生時間は4191時間であった。

I. 緒言

エネ研の加速器施設のタンデム加速器は、絶縁ガス SF₆ の水分含有量を下げることや、絶縁ガスを循環させることでタンク内の温度分布を抑え、絶縁構造物の抵抗をなるべく均一にすることで、放電を抑える取り組みをしている。さらに、絶縁ガスの冷却も行っている。しかし、2014年11月19日、12月10日、12月17日に放電を起こし、以後、最高電圧を4 MVに制限して実験をせざるを得なかった。

2015年度のマシントイムを迎えるため、2015年3月から4月にかけて定期点検を行った。いくつか絶縁コラム上に沿面放電痕が見つかり、さらに、電位固定用配線と素子や電極との間での放電痕もみつけた。沿面放電痕の除去と電位固定法の変更を行ったが、定検後の昇圧で再び放電を起こした。7月にタンク内の点検を行い、放電痕の除去を行ったが、4.5 MVで再び放電を起こし、2015年度も最高電圧を4 MVに制限する運転を行った。

タンデム加速器の高電圧発生時間は4191時間であった。

シンクロトロンに関しては、バンチ振動の発生機構の調査とそれにもとづく抑制法の検討を行っている。これは項目2.4.1.2で詳細に報告する。

II. タンデム加速器放電

SF₆に含まれる水分が絶縁構造物表面での沿面放電を引き起こしやすくする原因の一つと考えられている。また、絶縁構造物に温度勾配が発生することにより電界の不均一性を生じ、それが放電の起こしやすさの原因の一つとなっている。加速器タンク内の温度の均一化を実現するため、SF₆の循環冷却を行っている。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・加速器室

本事業は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県から施設の指定管理を受託実施したものである。

しかし、高エネルギー側の絶縁コラム(倍電圧整流回路カスケード(シェンケル回路)が組み、シェンケルコラムと呼ぶ)上で沿面放電が起き、倍電圧整流回路を何段かバイパスし高周波発生回路の共振特性を悪化させ、ダイオードスタックを焼損するような放電を、ふたたび、引き起こした。

シェンケルコラム上の放電痕の除去を行った。シェンケルコラム上の電位固定個所での放電も見られるため、シェンケル回路での電位分布、加速管の電位分布の推定を行い、電位分布が加速管とコラム上でなるべく均一になるように、分割抵抗の測定と配置換えを行った。電位固定の配線経路の見直しも行った。

シェンケルコラム内で放電を引き起こす損傷が起こっていないか、コラムの UT 検査を実施したが問題箇所はみつからなかった。

加速管電極間での放電がかなり見つかっている。次回定検は 2016 年度初頭に予定されているが、そこで、加速管放電ギャップの全交換を計画する。

III. 2015 年度メンテナンス

2015 年度は 170 日の実験(2014 年度は 166 日計画、トラブルにより 155 日に留まった)が計画された。メンテナンスはトラブルにより実施日の変更はあったが、全て行うことができた。コンディショニングも含め、加速器の昇圧運転は 2014 年度と同じ 203 日、4191 時間であった(図 1 参照)。昇圧時間は減ったが、実験に供する時間数はむしろ増えることとなった。

2012 年から試みている電力需要の大きな 7 月中旬から 8 月末までの期間にシンクロトロンを運転しないことは、2015 年度も行われた。11 ヶ月運転により、イオン源切替時が 7 月にあたった。シンクロトロン運転の効率が向上する結果となった。

IV. まとめと今後

タンデム加速器の最高加速電圧を回復するべく、点検、修理を行ったが、2015 年度は 4 MV 運転を行った。メンテナンスの効率は前年度より上がり、タンデム加速器の高電圧発生時間を抑えたにもかかわらず、前年度よりも実験時間は増加した。2016 年度初頭の定期点検において、放電の原因を引き続き探求し、5 MV 加速を復活させる。

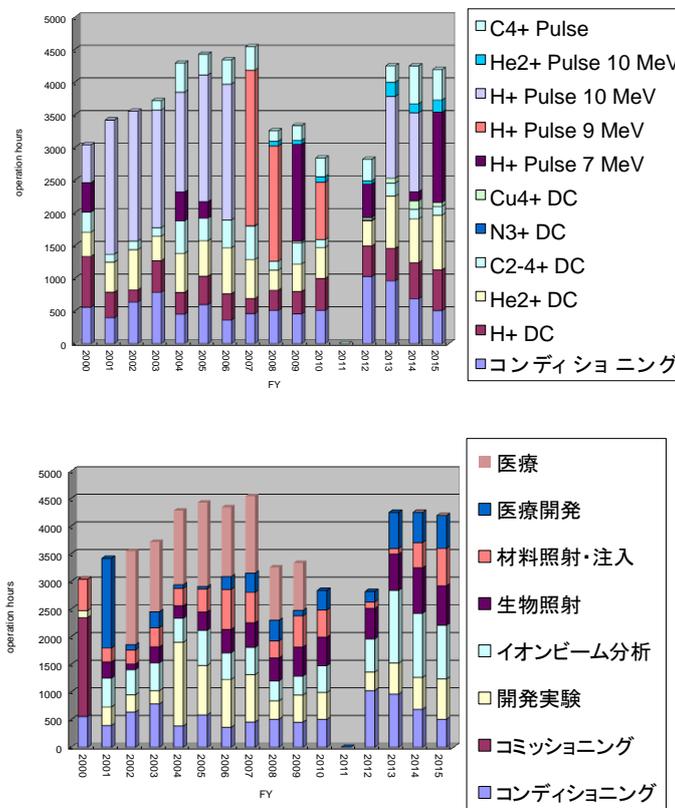


図 1 タンデム加速器運転時間推移

上半分は加速イオン種・エネルギーでまとめたもの。下半分は実験テーマごとの推移を現している。

2.4.1.2

シンクロtron加速高周波位相ノイズによる位相振動の発生
Phase Oscillation Induced by Phase Noise of RF of the Synchrotron

栗田 哲郎*1
Tetsuro KURITA

Abstract

I found that the phase oscillation of beam bunch in the synchrotron at WERC is induced by phase noise in LLRF system. The problem of the system is that a frequency multiplier amplifies the phase noise. An improvement plan is discussed.

要約

シンクロtronのビームバンチの位相振動の原因が、加速高周波に重畳する位相ノイズであることを明らかにした。位相振動の振幅は最大周波数偏移到依存し、0.2Hz 以下であれば有意な位相振動は発生しないことを確認した。位相ノイズの原因は、高周波基準信号発生部の 10 通倍回路で周波数が 10 倍されるとともに、ノイズ成分も拡大されていることにあることを確認した。

I. 緒言

シンクロtronに入射された荷電粒子は加速高周波によって、捕獲されビームバンチを形成する。加速高周波によって形成される安定してビームバンチを捕獲できる領域 (RF バケツ) とビームバンチに何らかのミスマッチがあると、ビームバンチは RF バケツの中で振動することがある (位相振動)。位相振動が成長すると、ビームは RF バケツの中からこぼれ落ちてビームロスになる。

このため、加速高周波とビームバンチの位相差を検出して加速高周波の周波数にフィードバックする事により、位相振動を抑制している。しかし、位相フィードバックはバンチを形成していない捕獲領域と出射領域では機能しない。したがって、位相フィードバックがない状況でも位相振動を抑制できれば、捕獲電荷及び出射電流量の安定性に寄与すると考えられる。現状、位相フィードバックをオフにすると、図 1 の上段のように位相振動が発生する。

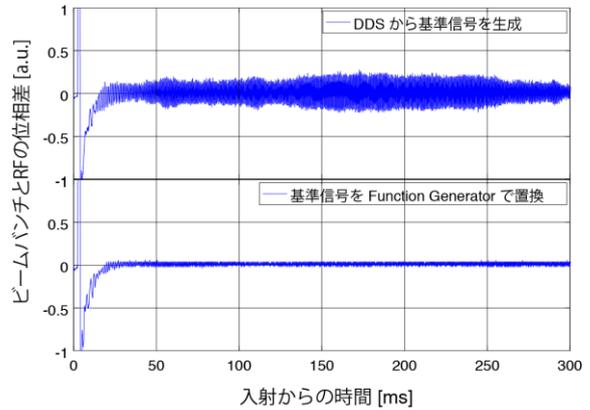


図 1 位相フィードバックがない場合の位相振動 (上段) と基準振動を Function Generator に置き換えた時の位相振動 (下段)。

II. 位相振動と位相ノイズの状況

図2に高周波信号制御系の概要を示す。源発振器である DDS の周波数を 10 通倍し、PLL によって 10MHz にロックされた VCO の周波数を足し合わせている。さらに 71MHz を引くことにより加速高周波の周波数 (高周波基準信号) としている。71MHz を引く前の信号は、空洞電圧およびビーム位置モニタの検波用信号として用いる。

高周波基準信号発生部から出力される高周波基準信号を外部のファンクションジェネレータに置き換えると、位相振動は図1の下段のように発生しなくなる。すなわち、DDS もしくは高周波基準信号発生部に何らかの原因があると考えられる。

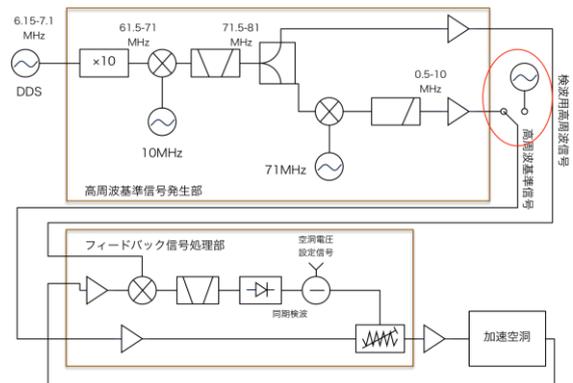


図2 高周波信号制御系の概要

*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

位相振動の原因としては、加速高周波に位相ノイズが重畳していることが考えられる。そこで、高周波基準信号を同期検波の原理で周波数変調を評価し、その周波数解析を行った(図3の上段)。

図3の上段のスペクトラムには、773Hz, 1570Hz, 3140Hz に特徴的なピークがある。加速高周波の電圧を捕獲後に一定にし、その電圧を変化させることによりシンクロトン振動数を変化させ、シンクロトン振動数に対する位相振動の振幅をプロットした(図 4)。高周波基準信号の周波数変調スペクトラムに現れるピークの位置で、位相振動が大きくなっており、加速高周波に含まれる周波数変調が問題になっていることがわかる。

DDS 信号の周波数変調スペクトラムを図3の下段に示す。DDS 信号と高周波基準信号に含まれる周波数変調成分の構造はほぼ同じであるが、最大周波数偏移の大きさが 10 倍になっている。高周波基準信号発生部で周波数を 10 通倍しているためと考えられる。

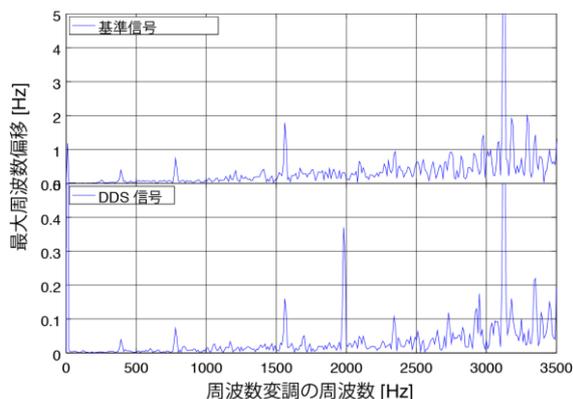


図3 高周波基準信号及び DDS 信号の周波数変調スペクトラム

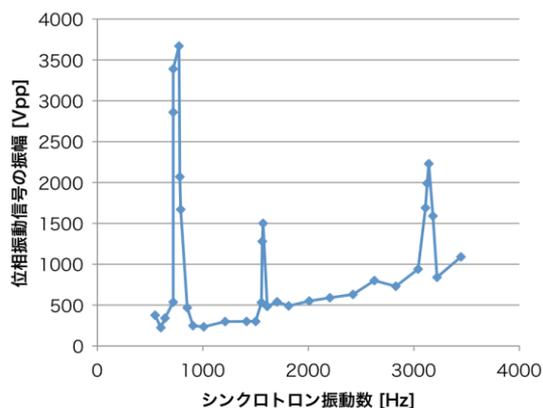


図4 シンクロトン振動数に対する位相振動の振幅

III. 周波数変調の最大周波数偏移に対する位相振動の振幅

周波数変調の最大周波数偏移に対する位相振動の振幅を測定する為に、高周波基準信号をファンクションジェネレータの信号に置き換え、加速高周波の電圧で決定されるシンクロトン振動数と同じ周波数変調を加えた。

二つのシンクロトン振動数の場合で、測定した結果を図5に示す。シンクロトン振動数によらず、位相振動の振幅は最大周波数偏移で決定されることがわかる。

IV. 改造案

図5を参照すると、最大周波数偏移を 0.2Hz 程度までに抑えることができれば、目立った位相振動は起きないと考えられる。

図 3 によれば高周波基準信号発生部で周波数を10通倍して位相ノイズを10倍にしなければ、十分に低い位相のノイズを保てそうである。そこで、DDS で直接加速高周波の周波数を発生させる方式に改めることを検討している。この際に、空洞電圧の検波に必要な加速高周波の周波数に 71MHz を足した信号をアップコンバージョンによって生成する必要がある。現在、アップコンバージョンにイメージリジェクトミキサの使用を検討している。

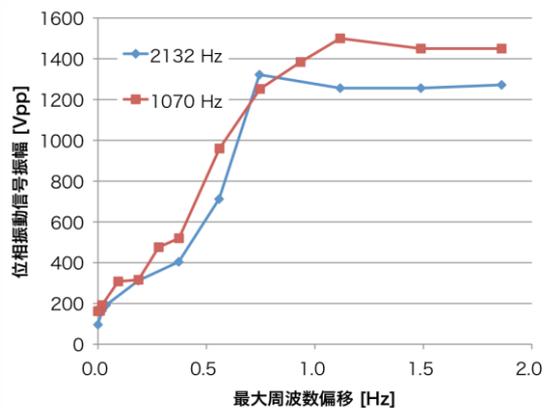


図5 最大周波数偏移に対する位相振動の振幅

V. 結言

若狭湾エネルギー研究センターのシンクロトンで発生している位相振動の原因が高周波基準信号に重畳する位相ノイズであることを明らかにした。高周波基準信号発生部で周波数の10通倍しており、同時にノイズ成分も10倍にしていることが問題である。そこで、DDS で直接加速高周波の周波数を発生させることを検討している。

2.4.1.3

超伝導加速器を用いた陽電子ビーム発生法に関する研究
 A Positron Generator using A Superconducting Linear Accelerator
 峰原英介*¹
 Eisuke MINEHARA

Abstract

A positron generator using a superconducting linear accelerator has been reconstructed at AIST Tsukuba. The JAERI FEL group had originally designed the superconducting linear accelerator system about 26 years ago. The reconstructed superconducting accelerator system has been operated successfully to accelerate electron beam.

要約

筑波の産業技術総合研究所(以下、産総研)において超伝導線型加速器を用いた陽電子発生装置の再建設を行った。旧原研自由電子レーザーグループが平成元年にこの超伝導線型加速器を設計した。この再建設された超伝導線型加速器は成功裏に電子を加速し、運転されている。

I. 緒言

産総研筑波のグループに協力して超伝導加速器を用いた陽電子ビーム発生法の研究を行った。特に陽電子顕微鏡などの最先端陽電子ビーム計測性能限界を極限までの拡大するため、その隘路であった同時計数誤差が極めて大きな間欠運転の超高ピークパルス電流ビームをやめて最適なCWビーム発生可能な超伝導加速器システムの開発研究を行った。併せてこれを産業利用可能で、安価で、使い易い、可搬型とする開発研究も東京工業大学の原子炉工学研究所と行った。

II. 方法結果考察等

平成 21 年度は伝導加速器を用いた陽電子ビーム発生法の検討を行った。特に陽電子顕微鏡などの最先端陽電子ビーム計測性能限界を極限までの拡大するため、その隘路であったビーム発生を最適にできる超伝導加速器システムの検討を行った。平成 22 年度は特に冷凍機、加速器本体などの要素技術の開発改良を行い、冷却能力試験を行った。平成 23 年度は電子源やRF源等の要素技術の開発改良を行い、電子加速の準備試験を行った。しかしながら平成 23 年 3 月 11 日東日本大震災による RF 窓の破損が確認され、これを部品交換して回復を図ることとなった。平成 24 年度は、ドイツの RI 社から技術者を呼んで RF 窓の修理と交換を行った。交換後真空試験を行い、冷却試験を行った。平成 25 年度は、長期間液化ヘリウムの保持に成功して、電子ビーム加速にも成功した。平成 26 年度は、運転体制を組んで定期的な運転を行うことができた。平成 27 年度は、安定して運転を行い、電子ビーム加速が行われた。産総研ではこの装置をベースに次期計画として予算を要求する希望を持っている。

III. 結言

この研究によって半導体や微細構造物の欠陥が容易に見え、これらの製品の歩留まりや性能改善が劇的に向上すると考えられる。地震による RF 窓部品修理交換を行ったが、加速器低温性能の確認は終了した。地磁気による電子ビーム偏向損失があるのでヘルムホルツコイルなどで軌道を修正して電子線通過効率を上げる必要がある。平成 26 年度に産総研と共同で 4K 予冷の関連論文¹⁾、報告を投稿し、受理された。平成 27 年度は、より実用的な電子ビームの取り回しと安定的な運転を行った。

参考文献

- 1) B.E. O'Rourke, E.J.Minehara, N.Hayashizaki, N.Oshima, R.Suzuki : Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A776 83-86 (2015)

*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産総研との共同研究として実施したものである。

2.4.2. 加速器利用分析技術の開発・高度化

2.4.2.1

加速器を用いたリチウム定量分析法の開発

Development of Lithium Quantitative Analysis using Accelerators

鈴木耕拓*1、中田吉則*1、安田啓介*2

Kohtaku SUZUKI, Yoshinori NAKATA and Keisuke YASUDA

Abstract

Quantitative analysis of Lithium with Accelerators and a time-of-flight elastic recoil detection analysis (TOF-ERDA) system has been developed at the Wakasa-wan Energy Research Center in Fukui prefecture. On 2015th, we produced lithium fluoride targets on thin silicon nitrides using the vacuum deposition method for the quantitative ion beam analysis. To observe surface structures of the lithium fluoride targets, we used the atomic force microscope. As the results, we found that targets can be used for the ion beam analysis. Ion beam analysis, elastic recoil detection analysis (ERDA) and Rutherford backscattering spectroscopy (RBS), were performed using the lithium fluorine targets, and we evaluated the targets compared with the other analysis.

要約

福井県若狭湾エネルギー研究センターでは加速器と飛行時間測定反跳原子検出法(TOF-ERDA)測定装置を用いたリチウム定量分析手法の開発を行っている。まず定量分析の標準的な試料とするため、窒化シリコン薄膜にフッ化リチウムの薄膜を蒸着した。原子間力顕微鏡(AFM)などを用いて蒸着面の観察を行った結果、イオンビーム分析の標準試料として使用可能なものと判断できた。実際に反跳原子検出法(ERDA)やラザフォード後方散乱法(RBS)によるイオンビーム分析を行い、作製した試料の評価を行った。

I. 緒言

近年ではリチウムイオン二次電池の活用が盛んにおこなわれている。当初は携帯電話やノートパソコンなどの携帯用電源に使用されていたが、最近では自動車や飛行機に搭載されるなど大型化もされてきている。リチウムイオン二次電池は体積当たりのエネルギー密度が高く、寿命も長いなどのメリットをもつ。特にエネルギー密度については鉛蓄電池に比べ 3~5 倍である。これに対してコストが高いなどのデメリットが存在するが、最も盛んに研究開発されている二次電池であるので、将来的なコストは大幅に下がると期待される。

原子力発電所では、安全対策としてバックアップ電源が用いられている。バックアップ電源の一つに鉛蓄電池が使用されているが、体積当たりのエネルギー密度は低く、非常時に機能するためには相当量の電池が必要である。鉛蓄電池は歴史も長く安定的に動作できる電源として使用されているが、自己放電が大きく、頻繁な充電が必要などのデメリットが存在する。将来的にこのバックアップ電源をリチウムイオン電池に置き換えることが出来れば、安全対策の飛躍的な向上が見込めると考えられる。

製品の研究開発では作製した試験体の分析が必要不可欠であるが、非破壊でリチウムの定量分析を行う手法は存在しない。本開発ではリチウム定量分析手法を開発することで、発展途上のリチウムイオン二次電池の研究開発がさらに加速すると期待される。

II. フッ化リチウム標的の作製と観察

リチウムは化学的反応性が高く、基本的には純粋な単体で存在していることはない。数あるリチウム化合物のうち例外的に安定なフッ化リチウム(LiF)を試料標的に選択した。LiF は 99.9%以上の純度のものを使用した。リチウム標的の作製は、粉末状の LiF を窒化シリコン薄膜やシリコン基板上に真空中で蒸着する手法により行われた。

図 1 には窒化シリコン薄膜(上側)とシリコン基板(下側)に LiF を蒸着した様子を示す。特にシリコン基板に蒸着したときには青い色がついていることが分かる。シリコン基板の左端は付着しないように蒸着時に覆いをしていたので基板そのものが見えている。図 2 にはシリコン基板に蒸着された LiF 膜の厚さを測定した様子を示す。触針式段差計を用いて測定したところ、図 1 の試料では 126 nm 程度の厚さであった。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*2 京都府立大学・生命環境科学研究科・応用生命科学専攻・環境計測学

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実施したものである。

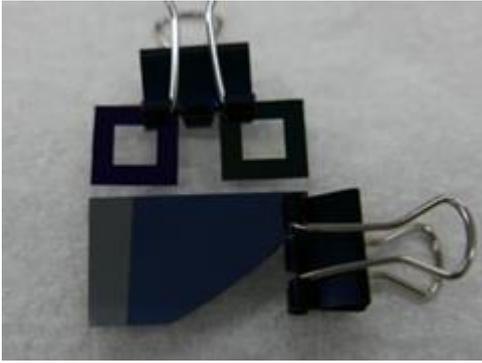


図1 フッ化リチウム試料。

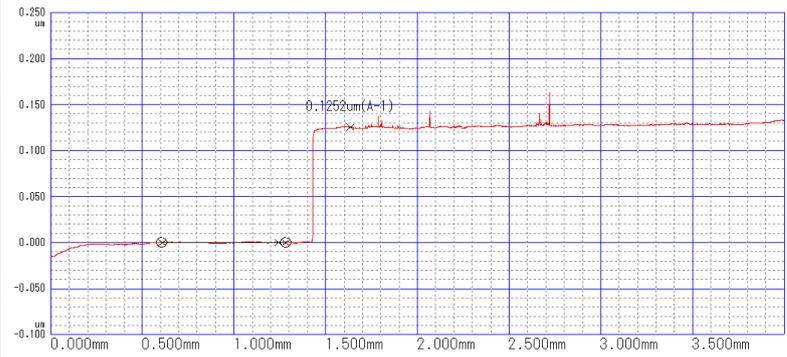


図2 フッ化リチウムの蒸着厚を測定した様子。

LiF 使用量を変更しながら様々な厚さの標的を作製した。この結果、20 nm 程度の非常に薄いものから 600 nm 以上の比較的厚い蒸着膜まで作製することができた。図 3 には蒸着膜表面を AFM で観察した様子を示す。表面は幅数 nm 程度の凹凸は見られるが、凹凸の段差については平均的に 2~3 nm 程度であった。この凹凸は蒸着膜の厚さには関係しなかった。これは真空蒸着されるときに LiF が数 nm の塊で飛散し、蒸着したと考えられる。これらより蒸着膜の厚さを数十 nm 程度よりも厚くすれば、厚さにくらべ平坦に蒸着されていると言える。

III. イオンビーム分析による評価

作製した試料は ERDA や RBS によるイオンビーム分析を行った。ERDA はイオンビームにより試料中の元素を跳ね飛ばし、検出器で跳ね飛ばされた元素を測定することにより分析する手法である。RBS はイオンビームが試料中の元素によって跳ね返され、跳ね返された元素を検出器で測定することにより分析する手法である。

イオンビーム分析では入射したイオンビーム数や検出した粒子数などから LiF の表面密度 (g/cm^2) を導出することが出来る。イオンビームによる分析では表面密度しか分からないので、固体の密度で蒸着されていると仮定すると蒸着厚を導出することが出来る。その結果、触針式段差計で測定した結果よりも 2~3 割程度薄いという結果になった。これは固体の密度で蒸着されていると仮定して計算した場合であるから、固体密度よりも 2~3 割程度低い密度で蒸着されていると考えられる。AFM の観察結果からも数 nm の塊で飛散し蒸着したと思われるため、蒸着内部がぎっしりと詰まっているわけではないとも考えられ、密度が薄いという結果と合致する。これらよりイオンビーム分析と他の観察結果と合わせても矛盾しない結果となった。

IV. 結言

真空蒸着により LiF の蒸着膜を厚さ 20~600 nm 程度の範囲で作製することに成功した。触針式段差計や AFM を用いて、蒸着膜の厚さ測定や蒸着表面の観察を行った。どの試料でも比較的平坦に蒸着されており、イオンビーム分析に使用できるものだと分かった。実際に ERDA や RBS によるイオンビーム分析を行い、表面密度を導出した結果、触針式段差計の結果と大きな矛盾はないことが分かった。今後は炭素ビームとヘリウムビームに対する散乱断面積の比較を行い、イオンビーム分析に必要な反応断面積のデータを集めることや、ビームカレントをビーム照射中に測定する手法の開発などを行い、定量分析手法の課題をこなしていく。

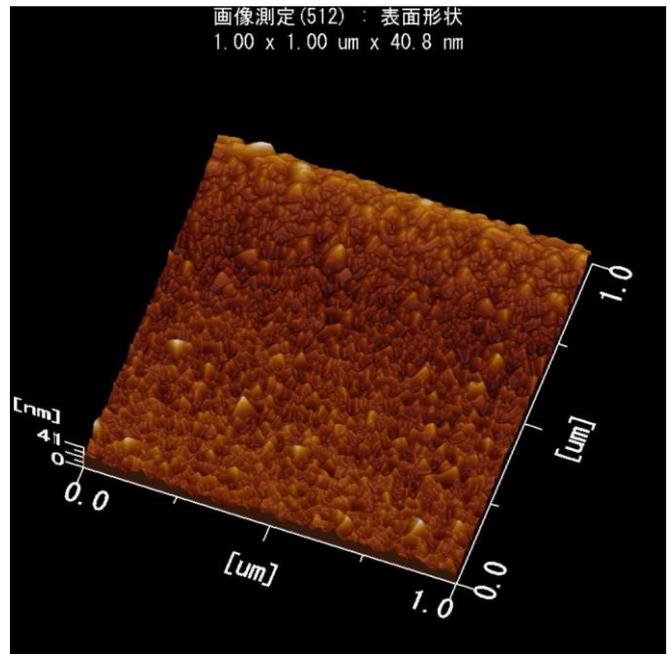


図3 AFM により観察した LiF 蒸着試料の表面の様

2.4.2.2

イオンビーム分析手法の改良と知識の蓄積

Improvement and Accumulation of Knowledge for Ion Beam Analysis

鈴木耕拓*¹、中田吉則*¹

Kohtaku SUZUKI and Yoshinori NAKATA

Abstract

Ion beam analysis has been developed at the Wakasa-wan Energy Research Center in Fukui prefecture. We measure reaction rates and depth resolutions for each type of beam ions. From these results, we can estimate the measurement time and depth resolutions even for unknown targets. Therefore, it will be possible to improve the experimental efficiency.

要約

福井県若狭湾エネルギー研究センターでは加速器を用いたイオンビーム分析の手法を開発している。使用するイオンビームの種類ごとに反応率や深さ方向の分解能などを求めた。この結果を蓄積することで、未知の試料であっても類似する試料の結果から測定時間や深さ分解能などを前もって推測することができるため、実験の効率化を図ることができる。

I. 緒言

福井県若狭湾エネルギー研究センターには多目的シンクロトロン・タンデム加速器があり、様々な実験に使用されている。イオンビーム分析はそのうちのひとつの実験であるが、加速器のビームタイムは限られており、他の課題とシェアしながら実験を行っている。したがって実験の効率化を図ることは非常に重要なことである。飛行時間差測定反跳原子検出法(TOF-ERDA)におけるイオンビーム種による反応率や深さ方向の分解能などの違いを蓄積することで、今後の実験効率化のための基礎データとする。

II. イオンビーム種の違い

試料としてシリコン基板に酸化チタンが 10 nm 蒸着されたものや、PET フィルムを用いて、炭素とヘリウムビームの場合の比較を行った。図 1 に炭素とヘリウムビームを用いた場合の酸化チタン薄膜に対するヒストグラムを示す。縞状に見えるものが各元素に対応している。炭素ビームではチタンを測定できるのに対し、ヘリウムビームでは測定できないことが分かる。酸素の測定についてはヘリウムビームに比べ、炭素ビームの場合が 45 倍程度の収量となった。PET フィルムにおいては水素の収量を求めることができた。収量増加という点では炭素ビームのほうが有利だが、数 MeV のエネルギー範囲では、ヘリウムビームは炭素ビームに比べ 4 倍程度深く侵入することができる。したがって表面付近を分析したいときには炭素ビームを用い、深い場所ではヘリウムビームを用いるというように適応させればよいことが分かった。

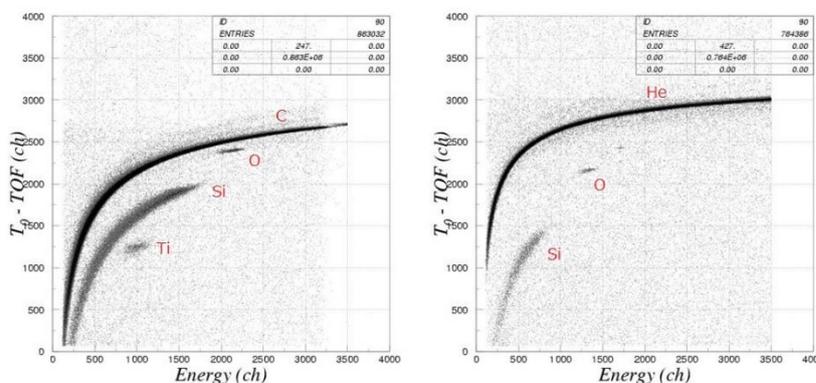


図 1 TOF-ERDA 測定におけるエネルギー(横軸)と飛行時間差(縦軸)の関係。左が炭素、右がヘリウムビームの場合である。

III. 結言

炭素とヘリウムビームによる酸化チタン薄膜や PET フィルムの分析結果から、酸素、チタンや水素の含まれる他の試料分析で今回のデータを参考にすることができる。今後は、他の元素構成の結果や試料表面の粗さと深さ分解能の関係を調べていく。

*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

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。

2.4.2.3

高深さ分解能 TOF-ERDA 分析装置開発のための基礎研究

Basic Study for the Development of the High Depth-resolution TOF-ERDA System

安田啓介*1、辻野博貴*2、藤木健裕*2、春山洋一*1、鈴木耕拓*3

Keisuke YASUDA, Hiroki TSUJINO, Takehiro FUJIKI, Yoichi HARUYAMA and Kohtaku SUZUKI

Abstract

Energy broadening of the recoil energy in the detector acceptance was investigated experimentally as the basic study for the improvement of the depth resolution in TOF-ERDA. Energy difference of the recoil O ion was 17.0 ± 2.8 keV when the recoil angle is changed 0.5° . This measured value was consistent with the result of the kinematical calculation.

要約

TOF-ERDA 分析における深さ分解能向上のための基礎研究として、検出器系の角度アクセプタンス内での反跳エネルギーの広がりを実験的に検証した。反跳酸素イオンに対して角度が 0.5° 変わることによる反跳エネルギーの変化は 17.0 ± 2.8 keV で、運動学的な計算で求めた値とよく一致した。

I. 緒言

近年ナノテクノロジーの進化により厚さが数 nm の極薄膜が半導体デバイスなどに使用されるようになってきており、この極薄膜の品質評価が重要となっている。しかし極薄膜中の水素、リチウム、炭素、酸素などの軽元素については従来の手法では測定が困難であり、新たな測定法の開発が望まれている。そこで、我々は若狭湾エネルギー研究センターにおいて薄膜中軽元素分析のための TOF-ERDA 測定装置の開発を行ってきた。その結果、水素から酸素までの軽元素を同位体レベルで分離して測定することに成功した。また、2 MeV の He ビームを用いて炭素表面において 1.3 nm というこれまでの最高値と同等あるいはそれを上回る深さ分解能の値を得ることに成功した。理論計算との比較から、反跳イオンのエネルギーが、現在の測定系の角度幅において運動学的に広がりを持っていて、これが深さ分解能を制限していることが示唆された。そこで本研究では検出器の角度アクセプタンス内での反跳エネルギーの運動学的な広がりを実験的に測定することを目的とした。

II. 実験

実験は若狭湾エネルギー研究センター放射線研究棟照射室 2 のイオン分析コースに構築された TOF-ERDA 測定系を用いて行われた。入射ビームにはタンデム加速器で加速された 3.5 MeV の He²⁺ イオンを用いた。測定試料にはシリコン基板上に成膜された厚さが 20 nm の酸化チタン薄膜 (TiO₂/Si) を用いた。試料へのビーム入射角、および反跳イオン出射角はそれぞれ 20° とした。図 1 に実験装置の概略図を示す。測定系は 2 台の透過型検出器と 1 台のシリコン半導体検出器 (SSD) で構成される。透過型検出器 1 台は散乱槽内のターンテーブルに設置し (前方透過型検出器)、もう 1 台の透過型検出器 (後方透過型検出器) と SSD は TOF ダクト末端の小型チェンバー内に設置される。2 台の透過型検出器で測定粒子の飛行時間を、SSD でエネルギーをそれぞれ測定する。通常の TOF-ERDA 測定では測定系の角度アクセプタンスは後方透過型検出器の有感面積で決定され、散乱平面内の角度広がり 0.65° 、立体角

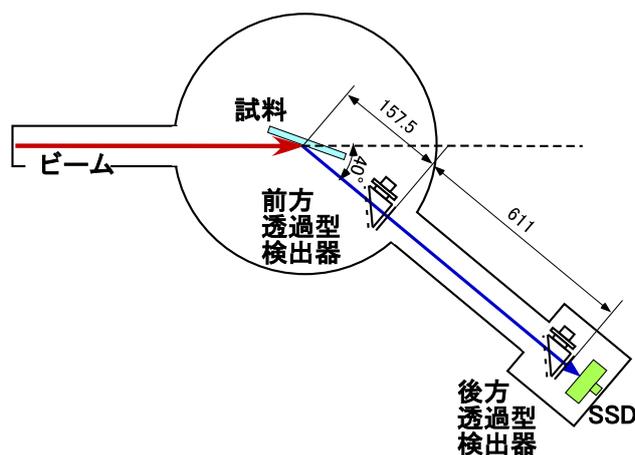


図 1 実験装置の概略図

*1 京都府立大学・生命環境科学研究科・応用生命科学専攻、*2 京都府立大学・生命環境学部・環境・情報科学科、*3 (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ

本研究は、若狭湾エネルギー研究センターにおける公募型共同研究として実施された。

は 0.13 msr である。本実験ではこの角度アクセプタンス内での反跳エネルギーの角度依存性を調べるために、前方透過型検出器の有感面積を $0.5 \times 10 \text{ mm}^2$ に制限した。これによって前方透過型検出器の角度アクセプタンスは 0.2° となる。前方透過型検出器はターンテーブルに設置されているので角度を 0.1° ステップで動かすことが可能である。そこで前方透過型検出器の角度 ϕ を 39.8° と 40.3° に設定して測定を行い、 TiO_2/Si 試料からの反跳酸素イオンのエネルギーの変化を測定して、エネルギーの運動学的広がりを検証した。

III. 結果と考察

測定で得られた酸素の TOF スペクトルを図 2 に示す。本実験に TOF 測定では後方透過型検出器を start、前方透過型検出器を stop としているため、エネルギーが高く飛行時間が短いイオンほど測定値は大きくなる。試料表面で反跳された酸素は 2180 ch. 付近の立下りに該当する。また、 $\phi=39.8^\circ$ の方が $\phi=40.3^\circ$ よりも高エネルギー側にシフトしていることがわかる。定量的な議論を行うために、それぞれの立下りを誤差関数でフィットすることによって立下りの中心値を求め、比較を行った。その結果、2つの角度での測定の間隔として $0.99 \pm 0.16 \text{ ns}$ という値が得られた。これは $17.0 \pm 2.8 \text{ keV}$ のエネルギー差に相当する。

測定データから得られたエネルギー差を運動学的計算で得られた値と比較する。反跳粒子のエネルギー E は

$$E = \frac{4M_p M_r}{(M_p + M_r)^2} \cos^2 \phi \cdot E_0 \quad (1)$$

と表される。ここで E_0 はヘリウム入射エネルギー、

M_p, M_r はヘリウム(入射粒子)、酸素(反跳粒子)の質量である。(1)式を用いて $E_0 = 3.5 \text{ MeV}$ のときの $\phi=39.8^\circ$ および $\phi=40.3^\circ$ での反跳エネルギーを計算し、これからエネルギー差を求めると 19.3 keV となる。測定で得られたエネルギー差は $17.0 \pm 2.8 \text{ keV}$ であるので、測定値は計算値と誤差の範囲で一致していることがわかった。

ここで求めたエネルギー差は、TOF-ERDA 測定系の角度アクセプタンス中でのエネルギーの運動学的広がりに相当する。これまでの研究では試料表面でのエネルギー広がりを測定してきた。これには運動学的広がりに加えて、TOF 測定での時間分解能の寄与、透過型検出器のカーボンフォイルでのストラグリング、およびカーボンフォイルの非一様性に起因するエネルギー広がりの寄与が含まれる。計算では運動学的広がりが全エネルギー広がりの 83% と大きな割合を占めるという結果が得られたが、実験的には示されていない。今回の測定で運動学的広がりの値が実験的に得られ、計算値と一致することが初めて示された。これによって、深さ分解能に直接対応するエネルギー広がりに運動学的広がりが大きく寄与するという、これまでの推測が正しかったことが示された。

IV. 今後の展望

本研究によって、TOF-ERDA 測定におけるエネルギー広がりには検出器系の角度アクセプタンスが有限であることに起因するエネルギーの広がり、即ちエネルギーの運動学的な広がりが大きく影響することが明らかになった。これを解決するには TOF-ERDA 測定系において、これまでのエネルギー、時間差に加えて反跳角度を測定することが有効である。各反跳イオンについて反跳角度を精密に測定し、これをもとに反跳エネルギーを補正することによって、エネルギーの運動学的広がりの効果を消すことが可能になる。TOF-ERDA 測定で反跳角度の測定を行うには、透過型検出器、あるいは SSD で反跳イオンの位置を測定すればよい。前方透過型検出器と後方透過型検出器、あるいは前方透過型検出器と SSD で位置測定を行い、各イオンの検出器系内での軌跡から反跳角度を決定できる。今後、TOF-ERDA 検出器系に位置感応型の透過型検出器あるいは SSD を導入し反跳角度を測定することによって、サブナノメートルの深さ分解能を有する TOF-ERDA 測定装置を開発することを検討している。

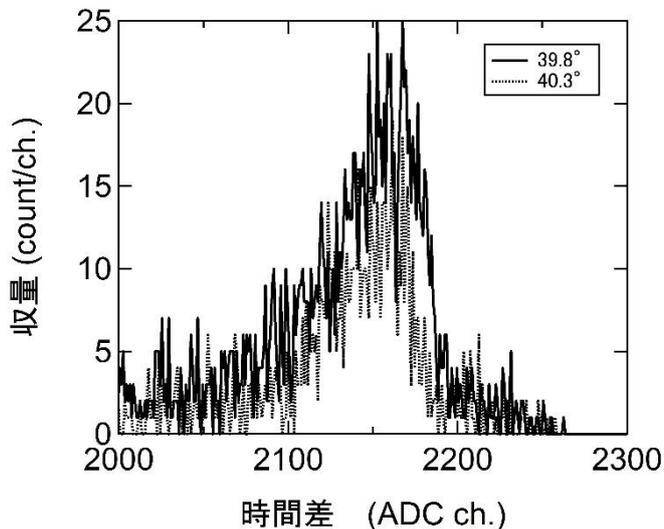


図 2 酸素の TOF スペクトル。実線は $\phi=39.8^\circ$ 、点線は $\phi=40.3^\circ$ のデータをそれぞれ示す。

2.4.2.4

標的炭化物 SiC による He 後方散乱における核共鳴反応

Elastic Nuclear Reaction on Backscattering of He Ions by Carbide SiC

戸崎充男*1、鈴木耕拓*2、石神龍哉*2、安田啓介*3

Mitsuo TOSAKI, Kohtaku SUZUKI, Ryoya ISHIGAMI and Keisuke YASUDA

Abstract

To study the energy loss process on compound material, we have measured resonances observed in the backscattering spectra of He ions by carbide SiC and graphite carbon. We surveyed those resonance profiles between the same reaction, which were by carbon in SiC material and also by carbon in graphite at 4.265 MeV. 要約

我々は、炭化物 SiC を標的とし、He の後方散乱において標的の中でエネルギー損失させて、SiC 中の炭素との共鳴ピークを測定した。炭素と炭化物の共鳴ピークを比較測定・解析することで、化合物によるエネルギー損失過程の情報を得ることが出来る。

I. 緒言

イオンと物質のエネルギー損失過程で、単一原子標的に比べて、固体の化合物による研究は少なく、精度の良い測定データがない。この主な要因は、標的の厚さの制御、つまり関わる標的原子の数の評価が難しいことによる。精度高く厚さの異なる標的をそろえるのに限界がある。特に、固体化合物ではなおさらである。我々は、これまでの研究で開発してきた手法の核共鳴後方散乱¹⁾を利用し、SiC を標的にして化合物のエネルギー損失に関わる測定が可能であるか検討した。

II. 方法と結果

図1に散乱角 160 度、He エネルギー 5.3 MeV を標的 C, Si, SiC に同量照射をしたそれぞれの後方散乱スペクトルを重ねて示す。C, Si 標的中で He がエネルギー損失した後の C 共鳴(4.265 MeV)ピークが観測される。プロファイルの立ち上がり(340 ch)は C, SiC 共に表面散乱を示し、そのエネルギーは運動学的に決まり差はない。しかし、ピークのプロファイル(ピーク位置とピーク幅)に差が生じている。これは He イオンの標的 SiC と C で He の通過中でのエネルギー損失過程の差を精度よく示すものである。つまり、同じ炭素の共鳴ピークに対して、炭素化合物としてのエネルギー損失とその揺らぎの違いによるものである。

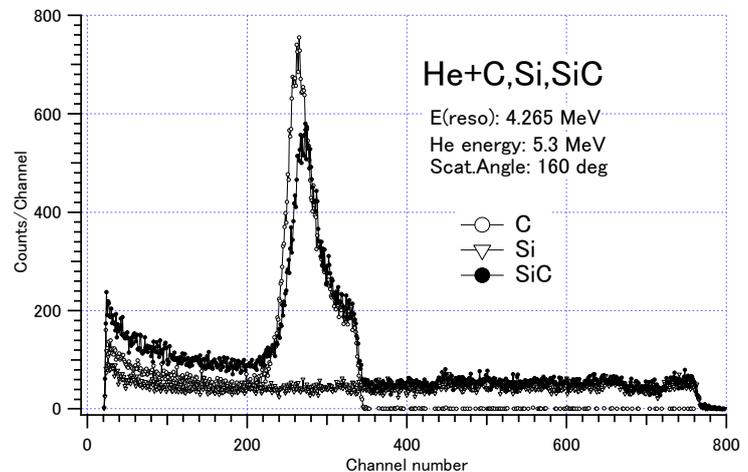


図1 標的 C, Si, SiC による He 後方散乱スペクトル

III. 結言

炭素の共鳴ピークプロファイルはエネルギー損失過程の情報を含んでおり、炭化物と炭素の違いの解析から新しいデータを取り出せる可能性がある。引き続き、入射 He のエネルギーを変えて、我々の研究手法である核共鳴後方散乱による精密測定を、固体の化合物に関するエネルギー損失過程の測定に応用していく。

参考文献

1) 戸崎充男、安田啓介、石神龍哉、若狭湾エネルギー研究センター研究年報 Vol.15 p.35-36 (2010)

*1 京都大学・放射性同位元素総合センター、*2 (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*3 京都府立大学・生命環境科学研究科・応用生命科学専攻
本研究は、京都大学と若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究である。

2.4.2.5

茶葉中元素分布のマイクロビーム PIXE 及び PIGE 測定

Elemental distribution measurement in tea leaves by micro-beam PIXE and PIGE

春山洋一*1、藤原嗣久*1、安田啓介*1、鈴木耕拓*2

Yoichi HARUYAMA, Tsuguhisa FUJIWARA, Keisuke YASUDA and Kohtaku SUZUKI

Abstract

Elemental distributions, including light elements such as fluorine and aluminum, in tea leave were determined by micro-beam PIXE and PIGE. It was found that both aluminum and fluorine were localized in epidermis. Aluminum was found to be located in cell wall of epidermis. Spatial distribution of silicon was quite similar to that of aluminum.

要約

茶葉に含まれるフッ素やアルミニウムなどの軽元素を含めた多元素の位置分布を測定するため、マイクロビームイオンビーム照射によって発生する X 線とガンマ線を同時に測定できるように工夫した。その結果、アルミニウムとフッ素は共に表皮細胞に局在することが確認された。アルミニウムは表皮細胞の細胞壁に存在していることが確認された。従来と同様にケイ素は極めてアルミニウムと似た位置分布を示すことが確認された。

I. 緒言

多くの植物にとってアルミニウムは毒であるが、茶は成長にアルミニウムが欠かせず、強いアルミニウム耐性をもち、最終的には茶葉表皮に高濃度のアルミニウムを蓄積することが知られている。しかし、そのメカニズムは研究が始まって 70 年以上経っているのに未だ分かっていない。提案されているメカニズムの一つとして、何らかの生理活性を發揮した後他の元素と結合して安定化されるというものがある。候補となる元素としてケイ素やフッ素などが指摘されている。我々は、マクロな元素分布を観察することで、この問題の一端を明らかにすることを目指してきた。そのためには出来るだけ多くの元素の位置情報を細胞以下の空間分解能で測定する必要がある。マイクロビーム PIXE は空間分解能と多元素同時分析が可能であることから有力な測定方法である。X 線検出器の進歩と共に軽元素からの X 線を測定することが出来るようになってきたが、フッ素のような軽元素からの X 線を測定することはまだ難しい。そこで、フッ素分布は核反応で生じるガンマ線を測定する PIGE(Proton Induced Gamma-ray Emission)法で、ナトリウム以降は従来通り X 線を測定する PIXE(Particle Induced X-ray Emission)法で、同時に測定できるように測定系を工夫した。

II. 実験

茶葉試料の作成方法を変更した。従来は、凍結乾燥をした茶葉を薄く切り出して試料としてきたが、この方法では表皮細胞構造を壊している場合があることが顕微鏡観察で分かった。先に茶葉の薄い切片を液体窒素容器の上で切り出して直ちに凍結し、それを真空乾燥するように順番を変えた。この手順で作成した試料をサフニン染色し、顕微鏡観察をしたところ、表皮構造が良く保たれていることが確認できた。

PIGE 測定を行う設定は既にあつたが、その際にはビーム出口にシリコンナイトライドの薄膜を用いており、そこで発生する莫大なシリコン X 線がアルミニウム X 線を妨害することが分かっていた。この膜をアクリル板に変更しその上に電流測定用の銅板を貼り、更に茶葉試料を導電テープで銅板の上に貼り付けるようにした。X 線とガンマ線の測定は従来と同様である。測定は 2.5 MeV プロトン、ビーム径 4 μm とした。

III. 結果

アルミニウムは表皮細胞の細胞壁に分布していることが確認された。細胞壁であることの確認は、空間分布が四角い中空の分布を示すことと、細胞質に多く含まれるリンやカリの空間分布との比較対照による。ケイ素は従来からアルミニウムと酷似した位置分布を示すことが観測されてきたが、今回の結果もそれと同じであり、ケイ素もまた細胞壁に分布していることが確認された。フッ素については表皮に局在していることは確認出来たが、ガンマ線の統計が悪く、それが細胞壁であるかについては判断出来ないという結果であった。

*1 京都府立大学・生命環境科学研究科・応用生命科学専攻、*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、京都府立大学と若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究である。

2.4.2.6

GAGG:Ce 結晶の特性評価

The Study of Characteristics on the GAGG:Ce Crystal

高橋成企*1、平岡大和*1、檜山太旗*1、増田旭*1、中島恭平*1、小川泉*1、玉川洋一*1、鈴木耕拓*2、小林正明*3
 Naruki TAKAHASHI, Hirokazu HIRAOKA, Daiki HIYAMA, Akira MASUDA, Kyohei NAKAJIMA,
 Izumi OGAWA, Yoichi TAMAGAWA, Kohtaku SUZUKI and Masaaki KOBAYASHI

Abstract

The energy dependence of the quenching factor for alpha rays of GAGG:Ce scintillator was studied using He ion beam. From this experiment, It was found that the quenching factor for alpha rays with energies of 4-12 MeV has the linear dependence with the beam energy.

要約

GAGG:Ce シンチレーター結晶の、 α 線に対する消光係数のエネルギー依存性を He イオンビームを用いて調べた。これにより、4-12 MeV での α 線に対する消光係数は入射エネルギーとともに線形に変化することが明らかになった。

I. 緒言

福井大学では、Gd-160 のニュートリノレス二重ベータ崩壊観測実験のための基礎実験および次世代シンチレータの応用方法を探る特性評価を行っている。GAGG:Ce($Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$)は、高光量で高速応答性を持つ無機シンチレーター結晶であり¹⁾、医療分野、産業分野での応用が期待されている。本実験では、GAGG:Ce 結晶の α 線に対する消光係数を測定する実験を行った。消光係数のエネルギー依存性を明らかにすることで、今後の応用範囲の拡大を目的とする。

II. 方法

今回は、Am-241 線源では照射できない 4-12 MeV の α 線に対する GAGG の応答を調査するために、タンデム加速器と生物照射コース(照射室 2)を使用した。照射台は大気中にあり、加速粒子は真空のビームラインから取り出し口、大気を通過し GAGG 結晶に入射した。その際のエネルギー損失を補正するために荷電粒子伝播コード SRIM を用いた。GAGG:Ce 結晶(10 mm×30 mm×10 mm、図1)は反射材(PTFE テープ)と、遮光材を施し、光電子増倍管(R9800-100-10)に接続した。パイルアップ抑制のために、加速器からのビームレートは 100 Hz 程度まで抑えて照射を行い、1 MeV 毎に1万イベント収集した。



図1 GAGG:Ce 結晶

III. 結果と考察

本実験により、これまで明らかでなかった GAGG:Ce 結晶の、消光係数のエネルギー依存性を確認することができた。GAGG:Ce 結晶の、消光係数のエネルギー依存性を図 2 に示す。他の無機シンチレーター同様、 α 線のエネルギーが高くなるにつれて、消光係数もほぼ線形に増大する傾向がみられた。また、ビームを照射する際、ビームノズルの位置や角度がビームプロファイルに影響を与えることが判明した。

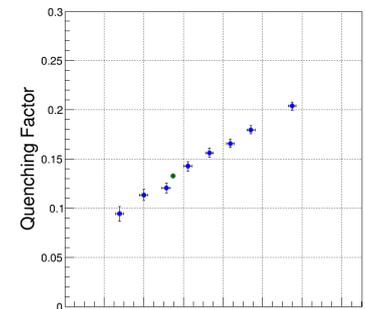


図2 消光係数のエネルギー依存性

IV. 結言

本実験により、GAGG:Ce 結晶の α 線に対する消光係数のエネルギー依存性を測定することができた。今後は陽子線での消光係数を調査する予定である。

参考文献

1) K. Kamada, et al., Journal of Physics D: Applied Physics 44 (2011) 505104

*1福井大学大学院・工学研究科、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*3 高エネルギー加速器研究機構

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

2.4.2.7

大気マイクロ PIXE/PIGE を用いた歯根面象牙質における脱灰の pH による影響

The Effects of pH of Demineralizing Solution on Demineralization on Root
Dentin Used by in-air Micro PIXE/PIGE

奥山克史^{*1}、山本洋子^{*2}、松田康裕^{*3}、八木香子^{*2}、安田啓介^{*4}、鈴木耕拓^{*5}、

林美加子^{*2}、玉置幸道^{*1}、斎藤隆史^{*3}、能町正治^{*6}、菅谷頼仁^{*6}

Katsushi OKUYAMA, Hiroko YAMAMOTO, Yasuhiro MATSUDA, Kyoko YAGI,

Keisuke YASUDA, Kohtaku SUZUKI, Mikako HAYASHI, Yukimichi TAMAKI,

Takashi SAITO, Masaharu NOMACHI and Yorihiro SUGAYA

Abstract

Concentration of fluorine and calcium in root dentin, which was applied with fluoride-containing dental materials, were evaluated by In-air micro PIXE/PIGE with various demineralized condition. The results of this study were that there was the negative correlation between fluorine uptake and calcium loss. Also, more than amount of concentration of fluorine uptake was caused inhibition of demineralization no-related with pH of demineralized condition.

要約

マイクロ PIXE/PIGE を用い、フッ化物含有材料を作用させた歯根面象牙質に pH の異なる脱灰条件を設定し、歯根面象牙質におけるカルシウムおよびフッ素濃度の変化を検討した。その結果、取り込まれたフッ素量とカルシウム喪失量の間には負の相関を確認し、pH の値に関係なく一定量以上のフッ素取り込みにより脱灰抑制効果を認めることが示唆された。

I. 緒言

これまで、歯質内のカルシウム(Ca)とフッ素(F)とを同時に定量測定できる、若狭湾エネルギー研究センター設置の大気マイクロ PIXE/PIGE 装置を用いて、歯根面象牙質の脱灰の評価法、およびフッ素と脱灰との関連について検討を行ってきた。本研究ではこの大気マイクロ PIXE/PIGE による評価法を用い、フッ化物含有歯科材料を作用させた歯根面象牙質における Ca および F 濃度の脱灰条件の違いによる影響について比較検討を行った。

II. 方法

ヒト健全第三大臼歯頬側面に根面象牙質を露出させ、露出面を含むように歯軸に平行に切断し1歯につき 3 ブロックの試料を得た。2 ブロックの露出面にフッ化物含有歯科材料(Fuji VII および MI Varnish)を、残り1ブロックは何も塗布せず(Control)、露出面以外をワックスで被覆した後生理食塩水中に浸漬した。1 ヶ月後材料およびワックスを除去後歯軸に平行に、頬舌的に 0.5 mm 幅に切断し測定試料とした。切断面の象牙質表層より約 800 μm の部位に厚さ 4 μm の銅箔を貼付し、象牙質表面から銅箔までの歯質内の Ca および F 濃度を測定した。その後再び象牙質表層を除いてワックスで被覆した後、異なるう蝕リスクを想定し、pH:5.0 (低いう蝕リスク)または pH:4.5 (高いう蝕リスク)の脱灰溶液に 3 日間浸漬し、再度同部位の Ca および F 濃度を測定した。

試料の象牙質最表層は、脱灰処理前試料の、健全象牙質の 5%Ca 濃度の位置と規定した。また、銅箔を基準とすることで脱灰処理後試料の脱灰前表層の位置を規定した。Ca および F の取り込みは表層から 10 μm ごと積算濃度量で比較検討した。

^{*1}朝日大学歯学部、^{*2}大阪大学大学院歯学研究科、^{*3}北海道医療大学歯学部、^{*4}京都府立大学 ^{*5}(公財)若狭湾エネルギー研究センター ^{*6}大阪大学大学院理学研究科

本研究は、朝日大学歯学部、大阪大学大学院歯学研究科、北海道医療大学歯学部、大阪大学大学院理学研究科、(公財)若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究である。

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金(25293387、26462879)の補助の下に行われた。

III. 結果

図 1, 2 に各材料におけるF取り込み量およびCa喪失量をそれぞれに示す。pH: 5.0 では、F 取り込み量、Ca 喪失量ともに、材料塗布群とコントロール群の間に有意差を認めた。一方、pH:4.5 では F 取り込み量は MI Varnish、FujiVII、コントロールの順に多く、Ca 喪失量は、MI Varnish 群とコントロール群間にのみ有意差を認めた。図 3 に各材料からの F 取り込み量と Ca 喪失量との相関を示す。pH:5.0、4.5 の両条件において有意な負の相関が認められた。しかし、コントロール群を除いた材料群のデータのみでは、pH: 4.5 では負の相関が認められるものの、pH: 5.0 では相関は認めなかった。

IV. 考察

F 取り込み量と Ca 喪失量との関係より、F 取り込みにより歯質の耐酸性が向上し、脱灰の進みにくい環境になること考えられる。また、pH:4.5 では FujiVII から取り込まれる F 濃度では明らかな脱灰抑制は発揮されなかったこと、さらに、異なる 2 つの pH の結果より、pH の値にかかわらず、う蝕を抑制するためには、歯質内に約 6,000-7,000 ppmF × μm の F が取り込まれていることが望ましいと考えられる。材料間では pH: 4.5 でのみ負の相関を認められることから、低い pH の環境になると材料からの F 取り込み量が脱灰抑制効果に大きく寄与することが考えられる。

V. 結言

フッ化物含有材料を使用することで、根面象牙質の耐酸性の向上を認めた。また、一定のフッ素取り込み量があると耐酸性は向上するが、その効果は必ずしも量依存的ではない可能性が示唆された。

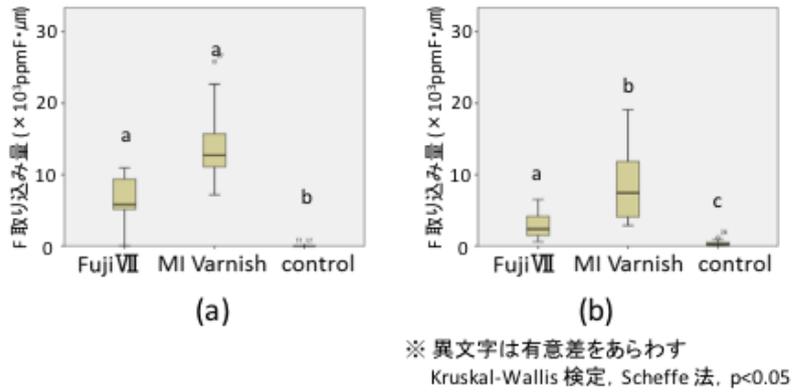


図1：各材料のF取り込み量。(a): pH 5.0, (b): pH 4.5

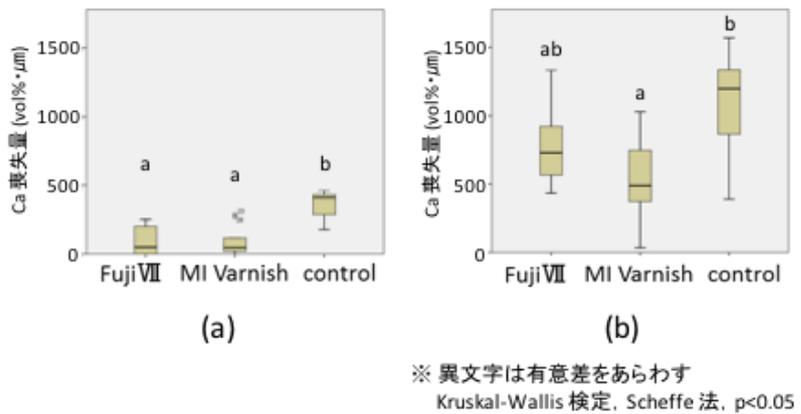


図2：各材料のCa喪失量。(a): pH 5.0, (b): pH 4.5

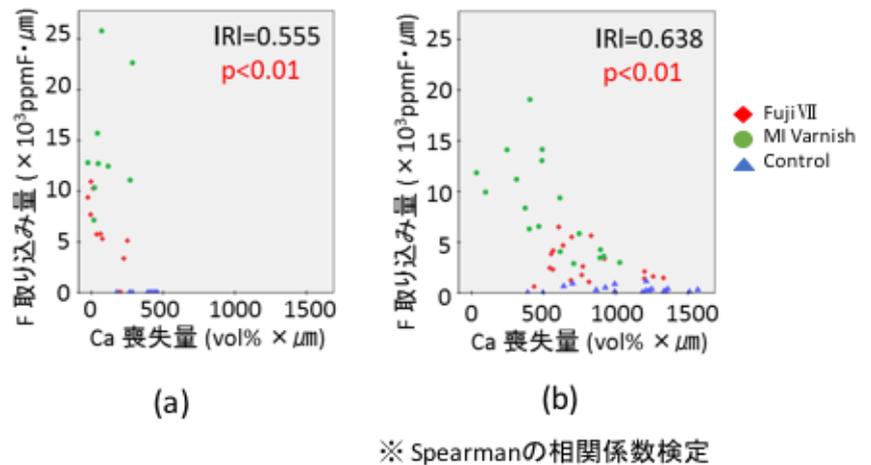


図3：F取り込み量とCa喪失量との相関。(a): pH 5.0, (b): pH 4.5

2.4.2.8

 $^{45}\text{Sc}+^{12}\text{C}$ 反応における生成核の核反応断面積測定Cross Section Measurement of Reaction Products in the $^{45}\text{Sc}+^{12}\text{C}$ Reaction木下哲一^{*1}、横山明彦^{*2}、谷津由香里^{*3}、林和憲^{*3}、福田芳樹^{*3}、石神龍哉^{*4}

Norikazu KINOSHITA, Akihiko YOKOYAMA, Yukari YATSU, Kazunori HAYASHI, Yoshiki HAYASHI and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

Reaction products by the $^{45}\text{Sc}+^{12}\text{C}$ reaction were investigated for precisely simulating a nucleosynthesis of iron-group nucleus in a stellar environment. Nuclides of ^{44}Sc , $^{52,54}\text{Mn}$, and ^{55}Co were detected at ^{12}C beam energies of 21–24 MeV.

要約

天体内における鉄付近の質量数を持つ元素合成の高精度なシミュレーションに向けて、 $^{45}\text{Sc}+^{12}\text{C}$ 反応における生成核の断面積測定を行った。 $E_{\text{lab}} = 21\text{--}24$ MeV のエネルギーにおいて ^{44}Sc 、 $^{52,54}\text{Mn}$ 、 ^{55}Co が検出された。

I. 緒言

現在の太陽系内の鉄付近の質量数を持つ元素は、天体の進化における最終ステージで AGB 星(赤色巨星)の中心付近にてケイ素同士の核反応により作られる。そのため天体内での元素組成の進化の研究は、モデルを用いたシミュレーションが唯一の手段になる。核反応実験をよく再現できるモデルを用いることで、精度が格段に向上する。ケイ素同士の核融合反応による生成核は安定核である場合が多く測定困難であり、先行研究がない。そのため、鉄の生成における高精度な計算をする上で課題が多い。本研究では、天体内にて鉄を元素合成する核反応に着目し、生成核の測定が可能で質量数が比較的近い $^{45}\text{Sc}+^{12}\text{C}$ 反応にて、生成核の断面積測定を行った。

II. 実験

Sc ターゲットは厚さ 10 μm の純度 99.999% のアルミホイルに Sc を分子電着することにより調製した。21 MeV、23 MeV、24 MeV に加速した 300–400 nA の $^{12}\text{C}^{5+}$ ビームをそれぞれのターゲットに 3 時間ずつ照射を行った。照射後、ターゲットをそれぞれポリ袋に封入し、Ge 検出器を用いて 3 時間の γ 線測定を行った。

III. 結果

本研究において、 ^{44}Sc 、 ^{52}Mn 、 ^{54}Mn 、 ^{55}Co の 4 核種が検出された。これらはそれぞれ、($^{12}\text{C},^{13}\text{C}$)反応、($^{12}\text{C},\alpha$)反応、($^{12}\text{C},h$)反応、($^{12}\text{C},2n$)反応により生成した核種である。入射粒子のエネルギーに対して、得られた断面積をクーロン障壁の透過確率 $\exp\{-2\pi(\eta-\eta_0)\}$ で割り算した値を図 1 に示す。 η は Sommerfeld パラメータ、 η_0 はクーロン障壁と同じ入射エネルギーにおける η 値である。 ^{44}Sc はピックアップ反応による生成で、 $^{52,54}\text{Mn}$ と ^{55}Co は融合後に生成した核種である。 ^{44}Sc とそれ以外では生成メカニズムが異なるため、傾向も異なる。本研究における $^{45}\text{Sc}+^{12}\text{C}$ 反応と $^{56}\text{Fe}+p$ 反応は同じ複合核を経由する。 $^{56}\text{Fe}+p$ 反応は他の研究者より、いくつかの生成核の断面積も知られている。これらと本研究の結果を比べることで、より詳細な情報が得られると思われる。

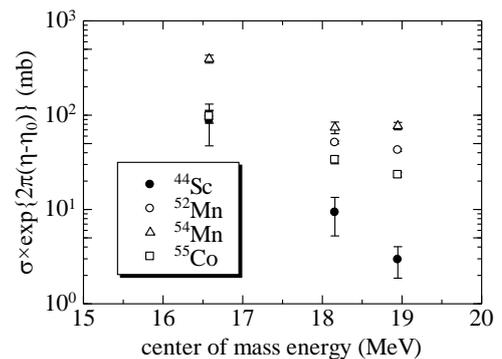


図 1 トンネル効果の透過確率で規格化した生成断面積

IV. 結言

^{45}Sc ターゲットに $E_{\text{lab}} = 21\text{--}24$ MeV の ^{12}C ビームを照射し、 ^{44}Sc 、 $^{52,54}\text{Mn}$ 、 ^{55}Co の生成断面積を得ることに成功した。トンネル効果の透過確率で規格化した生成断面積では、ピックアップ反応により生成した ^{44}Sc と核融合により生成した $^{52,54}\text{Mn}$ と ^{55}Co では異なる傾向が見られた。

*1清水建設(株)・技術研究所、*2 金沢大学・理工研究域、*3 金沢大学・自然科学研究科、*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、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと清水建設(株)、金沢大学との共同研究として実施した。

本研究は、MEXT KAKENHI 26800161 の助成を受けた。

2.4.2.9

TOF-ERDA による薄膜定量分析手法の開発
Development of TOF-ERDA Analysis for Thin Film Quantification
齋藤正裕*1、安田啓介*2、石神龍哉*3、中田吉則*3
Masahiro SAITO, Keisuke YASUDA, Ryoya ISHIGAMI and Yoshinori NAKATA

I. 緒言

Li イオン電池、半導体分野において、軽元素の高深さ分解能分析に対するニーズは高い。このような需要に対して、TOF-ERDA の適用可能性を検討した。

II. 内容

これまで我々は、Cu¹²⁺ 20MeV のビームを用いて、Li イオン電池負極の表面皮膜(SEI)の TOF-ERDA 測定を実施し、検出効率の評価、および初期水分量と SEI 形成過程の関係を研究してきた¹⁾。今回入射イオン種によるデータの差異を評価するため、He²⁺ 3 MeV のビームを用いて実験を行った。Li を含む試料は大気中水分との反応性が高いことから、試料変質を抑えるため、Ar グローブボックス内で試料調整を行い、大気非曝露の状態で試料をチャンバーへ導入した。グローブバック内の到達露点は-40℃であった。得られたスペクトルから、軽元素に対する感度、および検出可能な元素種の観点では、Cu¹²⁺ の方が優位であると考えられた。両者におけるビーム電流の差を考慮しても、測定時間に対する検出感度は Cu¹²⁺ の方が高く、特に F に質量の近い元素については、He²⁺ では評価が困難であると考えられた。

参考文献 1) M. Saito et al.: Nucl. Instr. and Meth. B 371 273 (2016).

*1(株)東レリサーチセンター・表面科学研究部・表面科学第 2 研究室、*2 京都府立大学・生命環境科学研究科・応用生命科学専攻、*3(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ
本研究は、東レリサーチセンターと若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究である。

2.4.2.10

TOF-ERDA法によるDLC膜中の水素分析
The Measurement of the Hydrogen in Diamond-Like Carbon(DLC) Films with TOF-ERDA Method
日比章五*1、鈴木耕拓*2、安田啓介*3
Shogo HIBI, Kohtaku SUZUKI and Keisuke YASUDA

I. 緒言

弾性反跳粒子検出法(ERDA)は水素分析の有力な手法である。更に飛行時間法(TOF)を組み合わせることにより比較的解析が困難な軽元素分析が可能になり、分析深さ分解能の向上が期待される。我々はこの飛行時間型弾性反跳粒子検出法(TOF-ERDA)をダイヤモンド様炭素(DLC)膜中の水素分析に適用すべく技術開発を進めている。

II. 内容

現在、測定システムの構築により定性的な評価は可能になった。次の段階として定量化のための解析手法の確立に取り組むこととした。まず我々が従来から実施してきた吸収体を用いたERDA法と本手法であるTOF-ERDA法での水素分析結果について比較した。水素濃度が異なるDLC膜をRFグロー放電プラズマCVD及びDCグロー放電プラズマCVD法にて作成し、まず吸収体ERDA法で水素濃度を見積もった。その結果水素量は12-27 atm%と見積もられた。引き続きTOF-ERDAによる水素分析を実施した。TOF-ERDA法では現在構成元素の検出効率は明確ではないので絶対量を見積もれないため、炭素を基準にして検出された水素量を規格化して比較を行なった。その結果、2法の間で正の線形相関が確認された。さらに構成元素の検出効率を明確にしてTOF-ERDA法により水素量が決定できるようにしていく予定である。

*1株式会社豊田中央研究所、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*3京都府立大学・生命環境科学研究科・応用生命科学専攻
本研究は、豊田中央研究所と若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究である。

2.4.2.11

μ 陽子ビームによる Li イオン電池正極材の Li 分布評価
 PIGE Imaging for Li Ion Batteries with Micro Proton Beam
 小北哲也*¹、常石英雅*¹、池田孝*¹、坪田隆之*¹、鈴木耕拓*²

Tetsuya KOGITA, Hidemasa TSUNEISHI, Takashi IKEDA, Takayuki TSUBOTA and Kohtaku SUZUKI

I. 緒言

Li イオン二次電池は車載に向けた開発が進められているが、ハイレート充放電における電極内の Li イオン分布は重要な情報である。電極面内の Li 分布を評価できる手法として X 線光電子分光等があるが、その空間分解能は数十 μm と、電極粒子($\sim 10 \mu\text{m}$)の大きさに比べて十分ではなく、より空間分解能の高い手法が求められている。我々は μ 陽子ビームを用いた PIGE 分析により、Li の分布取得の検討を進めており、平成 27 年度は電極深さ方向の Li 分布測定を実施した。

II. 内容

入射粒子には四重極電磁石により $3 \mu\text{m}$ ϕ 程度に集束させた 2.5 MeV 陽子ビームを用いた。ビームカレントは $3 \mu\text{m}$ ϕ 時で 50 pA 程度である。試料には、ハイレート放電を行うことで電極厚さ方向に Li 濃度勾配をつけた、 $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3})\text{O}_2$ 電極を用いた。電極の厚みは $50 \mu\text{m}$ 程度であり、電極断面にビームを照射した。

走査領域(視野)は最大で $6000 \times 1000 [\mu\text{m}^2]$ 、最小で $800 \times 150 [\mu\text{m}^2]$ とし、各照射点における PIXE/PIGE/RBS の各スペクトルと 2 次電子強度から、2 次元イメージを作成した。その結果、Mn、Co、Ni は深さ方向に勾配は無く一様に分布しているが、Li についてはハイレート放電の影響による濃度勾配を捉えることに成功し、 μ 陽子ビームにより Li の分布評価が可能であることを確認した。

*¹(株)コベルコ科研・材料ソリューション事業部、*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、(株)コベルコ科研と(公財)若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究である。

2.4.3. 放射線場で利用される機器・材料の評価技術開発

2.4.3.1

加速器を用いた原子炉構造材評価(原子炉構造材料劣化評価)

Estimation of Nuclear Reactor Structure Materials by Using Accelerators (Degradation Estimation of Nuclear Reactor Structure Materials)

福元謙一^{*1}、石神龍哉^{*2}

Ken-ichi FUKUMOTO and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

Motion of dislocations in the helium ion-irradiated SUS304 steels was observed in a tensile test with the "in situ" TEM observation, and was compared with that in the unirradiated SUS304 steels. Stacking faults were observed more than perfect dislocations in the irradiated steels. During the tensile test for the irradiated sample, dislocation line shows jig-zag motion intermittently and the extension and shrink of stacking fault band surrounded by the partial dislocations in a dislocation occurred repeatedly. From the propagation motion of pile-up dislocation across the grain boundary, the dynamic stress level at the leading dislocation of pile-up ones was estimated.

要約

ヘリウムイオン照射した SUS304 試料を TEM(透過型電子顕微鏡)内で引っ張りながら、転位の動きを観察し、非照射材と比較した。照射材では完全転位よりも積層欠陥が多く観察され、非照射材では積層欠陥よりも完全転位が多く観察された。照射材において転位は転位線部がジグザク形状にて、断続的に積層欠陥の拡張と収縮を繰り返しながらすべり運動をしていた。また、粒界付近に堆積した転位が粒界を超えて伝播する様子から、先頭転位に加わる応力を計算した。

I. 緒言

中性子照射による材料劣化の進行は、原子炉の運転寿命を決定する重要因子である。照射による材料劣化事象でよく知られているのは照射脆化や照射硬化であるが、特に問題となっているのが照射誘起応力腐食割れ(IASCC)と呼ばれる高温水環境中で生じる粒界割れである。これは炉内構造物のステンレス鋼で生じる現象で、脆化と並び高経年化対策の重要課題である。国内の原子力発電所には運転期間を最大 60 年まで延長しようとする方針もあることから、詳細な発生メカニズムが解明されていない IASCC に関してはデータ拡充が急務である。

IASCC のメカニズムには、照射誘起偏析による局所的な化学組成の変化に加え、照射材の局所変形が重要な役割を果たしている可能性が指摘されている。中性子照射によってキャビティ、転位ループなどの照射欠陥が形成され、さらに転位と照射欠陥の相互作用により局所的な転位運動を生じる転位チャンネルが形成され、応力腐食割れ発生クラックの初生位置となると考えられている。これまでの研究では転位チャンネル形成後の材料組織に対する影響が主であり、運動転位と照射欠陥の相互作用の観察は実験的に難しい側面があり、転位チャンネル形成過程について詳細に明らかになっていない。

本研究では、ヘリウム(He)イオンを照射した SUS304 試料の TEM 内での引張応力印加時における転位の「その場」観察を行い、非照射試料と比較した。また、粒界に蓄積した転位が粒界を超えて伝播するときの様子から、堆積した先頭転位に加わる応力を計算した。

II. 内容

1. 照射材

TEM 内引張「その場」観察を行う試料として SUS304 を使用した。アニール処理し結晶粒を粗大化させ、電解研磨で表面の凹凸を除去した。最大損傷量が 0.05 dpa(displacement per atom)になるように 300℃で 190 keV の He イオンを照射後、表面と裏面から電解研磨を行いイオン照射による損傷領域のみを残した。TEM 内引張「その場」観察には、福井大学総合研究センターに設置されている JEOL 製の JEM-2100TM を使用した。加速

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

本研究は、(公財)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。

電圧は 200 kV、試験温度は室温とした。TEM 内引張試料ホルダーの傾斜機構は一軸傾斜であり、試料に荷重を掛け引っ張りながら、200 フレーム/s のサンプリングレートで CCD カメラにより録画を行った。

照射損傷領域での観察結果を図 1 に示す。図 1 は欠陥中を移動する先頭転位であり、積層欠陥を伴っている。転位線はジグザクな不均一形状であり、積層欠陥部は拡大と収縮を断続的に繰り返している様子が観察された。通常、積層欠陥は積層欠陥の前部と後部が拡張と収縮を繰り返しながらすべり運動を行うことが確認されているが、図 1 では前部と後部の形状が不均一かつ断続的にその運動を行っていることから照射欠陥によって部分的に運動を阻害されていると考えられる。図 2 は、照射損傷領域における、積層欠陥が運動する様子である。先行する積層欠陥のすべり痕に沿って後続の積層欠陥が進行する様子が観察された。これは新たにすべり帯を形成するよりも既存のすべり帯の方が運動に対する抵抗が小さいため後方の積層欠陥が同じ進路を進行すると考えられ、転位チャンネルに類似したすべり帯であると言える。

2. 転位に加わる応力の計算

先頭転位が運動した痕を後続の転位が追従してゆく現象が、非照射材でも観察された。これは転位運動の障壁となるため結晶粒界近傍で運動を停止、さらに応力を印加し堆積する転位数の増加により、隣接する結晶粒に伝播するという既知の現象である。今回は TEM 観察の録画データから転位運動に加わる応力を算出することを目的とした。外部せん断応力を τ 、先頭の転位の後方に堆積した転位の数を n としたとき、せん断応力は文献 1 から $n\tau$ と表される。室温における SUS304 の臨界分解せん断応力は文献 2 および 3 から 50 MPa と見積もられる。TEM 観察から、堆積した転位の数が 8 本であることから、粒界を超えるときに先頭の転位に加わる応力は約 400 MPa となった。照射材における運動転位と照射欠陥の相互作用の観察で、非照射材と同様の手法を用いて、転位チャンネル形成のしきい応力の算出にも用いることができると考えられる。

III. 結言

TEM 内引張「その場」観察法を用いて、イオン照射された SUS304 試料内で運動する転位の観察を行い、照射損傷領域と非照射損傷領域で比較を行った。照射損傷領域では完全転位よりも積層欠陥が多く観察され、すべり痕に沿って後続の転位が追従する転位チャンネルに類似したすべり帯も観察された。

参考文献

- 1) 加藤雅治：“新教科書シリーズ 入門 転位論”、裳華房 (1999)
- 2) 内田仁 他、材料:35(388) 7-12 (1986)
- 3) Hi Vo et al. :J. Mineral, Metals & Mater. Soc. (2015). DOI: 10.1007/s11837-015-1596-0

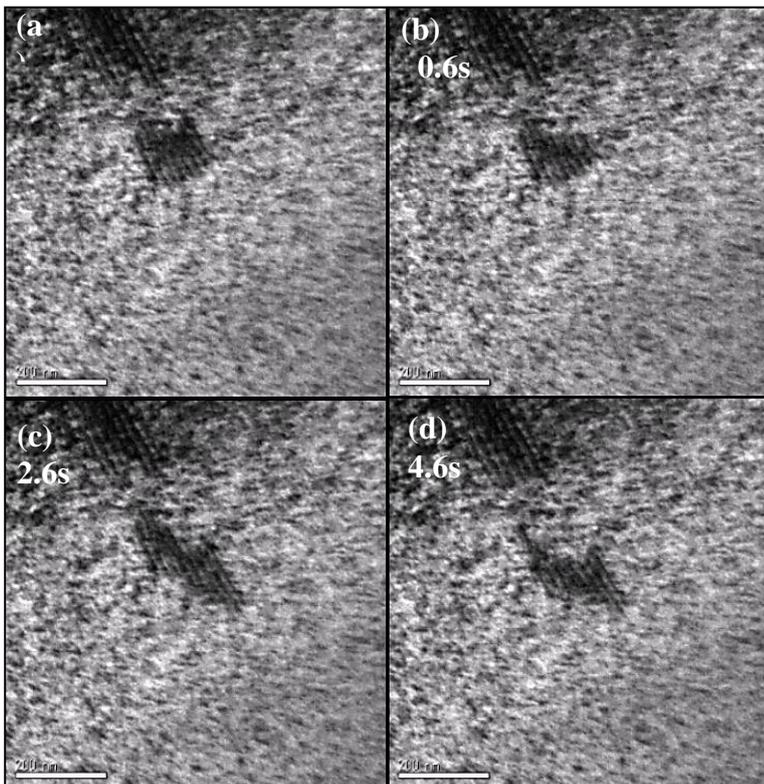


図 1 照射欠陥を確認できた試料のコマ送り画像。

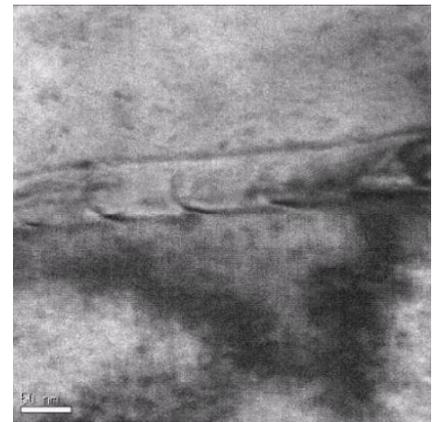


図 2 照射欠陥を確認できた領域において、先行した積層欠陥のすべり痕に沿って後続の積層欠陥が進行する様子。

2.4.3.2

宇宙機搭載用半導体部品に対するプロトン照射効果の評価(2)

Investigation of Proton Irradiation Effects on Semiconductor Devices for Spacecraft (2)

小林大輔^{*1}、三田信^{*1}、伊藤大智^{*1}、梯友哉^{*1}、廣瀬和之^{*1}、
 富木淳史^{*1}、川勝康弘^{*1}、船瀬龍^{*2}、
 久米恭^{*3}、長谷川崇^{*4}

Daisuke KOBAYASHI, Makoto MITA, Taichi ITO, Yuya KAKEHASHI, Kazuyuki HIROSE,
 Atsushi TOMIKI, Yasuhiro KAWAKATSU, Ryu FUNASE,
 Kyo KUME and Takashi HASEGAWA

Abstract

Investigated are proton irradiation effects on semiconductor devices such as photo-couplers for use in a deep space explorer, PROCYON. After receiving 1.1×10^{11} p/cm² 50-MeV proton bombardments, each tested photo-couplers exhibits a decrease in its characteristic parameter of the current transfer ratio, which decrease is dependent on its input resistance for controlling supply current fed to the device as well as its output circuit structure. Possible effects of electrical stress during irradiation are also examined.

要約

フォトカプラと呼ばれる半導体部品についてプロトンを照射し、その効果の評価した。その結果を報告する。

I. 緒言

人工衛星などの宇宙機に搭載される半導体部品は、とりわけ放射線耐性の観点で健全性を確認することが必要である。平成 26 年度に¹⁾、プロキオン衛星に搭載が見込まれる半導体部品についてプロトンを照射した。平成 27 年度は、その評価結果を整理してまとめたので²⁾、ここにその概要を報告する。

II. 実験

若狭湾エネルギー研究センター高エネルギー生物照射装置を用いて 50 MeV に加速したプロトンを、フォトカプラと呼ばれる半導体光部品に照射した。出力段の回路構造が異なる二種(単一またはダーリントン接続)について、それぞれ入力電流制限抵抗 R を変化させた評価回路を用意した。それぞれに対し、 1.1×10^{11} p/cm² まで照射し、電流伝達率が保存されるか調べた。その際、静的ストレス(常時 ON)または動的ストレス(3-s ON, 27-s OFF を繰り返す)を与えた。照射ビームの委細については前報告を参照されたい¹⁾。

III. 結果

単一構造に対しダーリントン接続の方が総じて保存率が高かった。また、それぞれ R を小さくすると保存率が高くなる傾向が認められた。これらは格子欠陥による劣化モードを想定すると説明できた。また、今回のストレス実験の範囲では、動作ストレスに応じて保存率が劣化するような兆候は認められなかった。

IV. 結言

プロキオン衛星に搭載するフォトカプラについてプロトン照射効果を調査した。動作ストレスに大きく依存しないことが示唆された一方、ダーリントン接続型を使うこと、入力制限抵抗を小さくすることが保存率の維持に効果的であることが示された。それらは保存率の維持に役立つ一方で、消費電力の増大や放射線以外の効果による寿命劣化をもたらす負の効果もあるため必要最小限に留めることが望ましい。照射結果を得たことは、その境界を見極めて設計を最適化するためにも有用であった。

参考文献

- 1) 小林他, 若狭湾エネルギー研究センター年報: 17, 51 (2014)
- 2) 伊藤他 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 1G15 (2015)

^{*1}(国研)宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所、^{*2}東京大学大学院工学系研究科・航空宇宙工学専攻、

^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、^{*4}(同)ハセテック

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが(国研)宇宙航空研究開発機構と共同で実施した研究の一部である。

2.4.3.3

大気取り出しビームの線束測定技術の開発

Development of a Beam Fluence Measurement Technique at Atmosphere

久米恭^{*1}、鳥居建男^{*2}、瀧田正人^{*3}、長谷川崇^{*4}

Kyo KUME, Tatsuo TORII, Masato TAKITA and Takashi HASEGAWA

Abstract

Ion beam irradiation examinations for devices mounted on spaceships to simulate cosmic rays have been carried out at the Wakasa Wan Energy Research Center by using proton up to 200 MeV delivered by the synchrotron accelerator. A measurement technique of a beam fluence by means of secondary gamma-ray detection has been developed, of which the situation is reported.

要約

若狭湾エネルギー研究センターでは、シンクロトロンから出射する陽子線(最大エネルギー200 MeV)を利用し、宇宙機搭載用機器に対する宇宙線模擬照射試験を実施している。ビーム強度の新たな同定方法として、照射時に発生する二次放射線(ガンマ線)の計測技術を開発中である。今回はこの開発状況について報告する。

I. 緒言

若狭湾エネルギー研究センター(WERC)では、原子力分野で培われた技術を利・活用する研究の一環として、設置されている多目的シンクロトロン・タンデム加速器を用いた応用研究を推進している。高エネルギーイオンビームを大気に取り出す技術の応用の一環として粒子線治療関連研究を実施しており、その中では陽子線治療臨床研究を平成 14 年度から平成 21 年度まで行った。並行して生物資源関係の照射を行うとともに、宇宙機搭載用機器に対する宇宙線環境模擬試験も開始している。対象物が多岐にわたるなか、照射量を粒子フルエンス計測により求めるニーズが発生している。課題解決の一環として、照射時に発生する二次放射線(ガンマ線)計測技術を開発中である。今回は、WERC 加速器運転中に取得した高エネルギーガンマ線データにより、ビームの時間構造を取得することができたので、この成果について報告する。

II. 方法

WERC においては、ビームライン(照射室4高エネルギー生物照射装置)から 5 m ほど離れた場所に、NaI 検出器、クロック付きマルチチャンネルアナライザ NT24-Dual(ラボラトリイクイップメント)、制御用計算機からなる高エネルギー光子線計測システムを設置した。このビームラインへ陽子線(エネルギー50-200 MeV)を輸送して実施した大気取り出し実験中に、二次放射線(高エネルギーガンマ線)エネルギースペクトルを得た。ビーム強度は最大 3 nA、ビーム出射幅は 400 ms 程度以上の遅い取り出し(ビームエネルギーに応じて出射幅が変化)、ビーム出射間隔は 2 s であった。一方で、自然界で高エネルギー光子線の有意な測定を期待できる東京大学宇宙線研究所乗鞍観測所においては、同じ高エネルギー光子線計測システムを使用した高エネルギー光子線の連続測定を行い、検出システムの長期安定性確認試験を行った。

III. 結果・考察

図 1 に、WERC で得られた陽子線 80 MeV 出射停止直後ならびに同じ陽子線出射中の光子線エネルギースペクトルを示した。ビーム出射中と出射停止後の光子線エネルギースペクトルには、3 MeV 以上の領域に大きな違いがあることがわかる。天然放射性同位元素の場合にはエネルギースペクトルは 3 MeV 以下に限定されるので、3 MeV 以上の領域が陽子線起源のイベントであることがわかる。図 2 には光子線エネルギー 3 MeV 以上のイベントについて、時刻に対する頻度分布を示した。陽子線利用中のみ有限の頻度が確認でき、さらに頻度とビーム強度に相関が認められる。ビーム出射中のスパル構造も同じ計測システムで取得したが、取得した 3 MeV 以上のデータにおいてはビーム間隔 2.5 s が計測されており、加速器側で供給しているビーム間隔 2 s とは矛盾している。この矛盾を検討するため、現在、デッドタイムの算定法を見なおしている。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、^{*2}(国研)日本原子力研究開発機構、^{*3}国立大学法人東京大学宇宙線研究所、^{*4}(ト)ハセテック

本報告は、国立大学法人東京大学宇宙線研究所の共同利用研究で得られた内容を含む。

乗鞍観測所で取得した自然界高エネルギー光子線のエネルギースペクトルを図 3 に示した。天然放射性同位元素よりも高エネルギー側での光子線が観測されていることがわかる。本計測システムが自然界の高エネルギー光子線観測可能場所においても使用可能であることを示しており、自然界の雷由来放射線の観測への適用にも期待が持てることがわかる。

以上のことから、スピル構造の評価には解決すべき課題があるものの、本計測システムでのビーム構造評価が可能であることがわかった。

IV. 結言

高エネルギーイオンビームを大気中で照射する際に発生する二次放射線(ガンマ線)計測のため、高エネルギー光子線計測システムを用い、二次放射線(高エネルギーガンマ線)エネルギースペクトルを取得し、そのエネルギー情報をもとにビーム出射時刻の同定、ビーム強度変化の追跡を行うことができた。また自然界における高エネルギー光子線スペクトルと発生時間情報の取得も行った。今後はビームのフルエンス計測を行うことにより照射量の同定に努めていく。

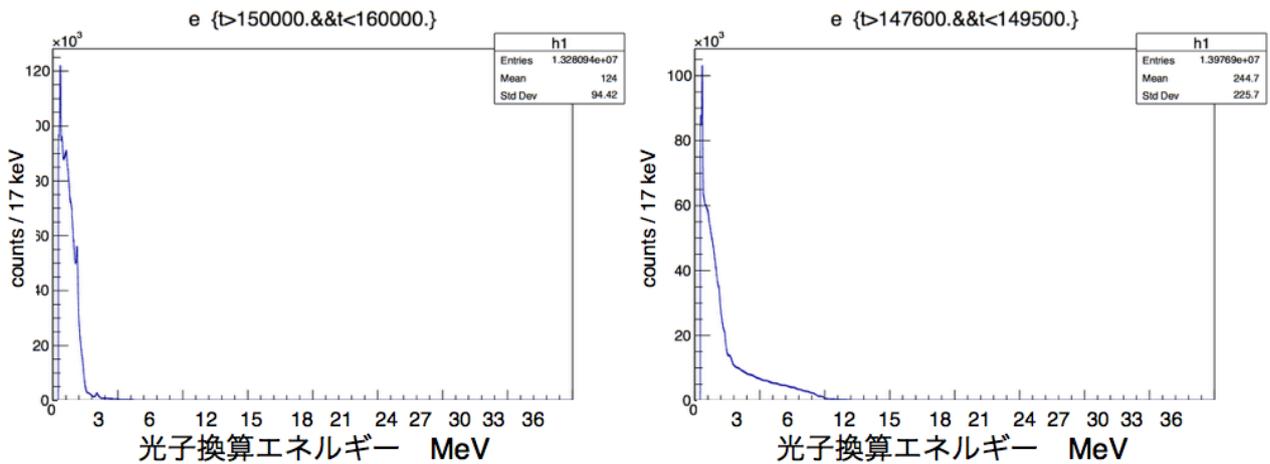


図 1 WERC で取得した陽子線 80 MeV 出射停止直後(左)ならびに同じ陽子線出射中(右)の光子線エネルギースペクトル。

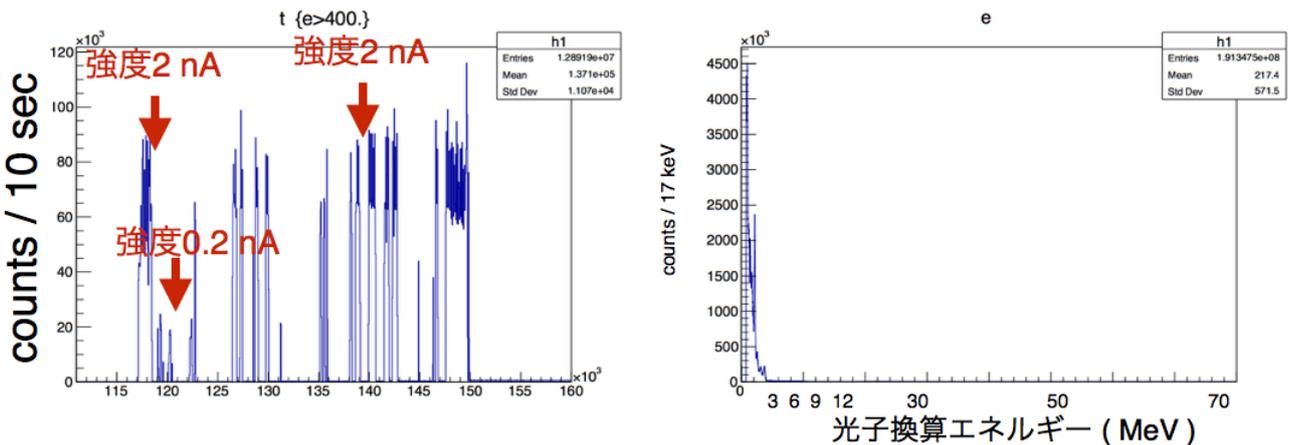


図 2 陽子線 80 MeV 出射中に取得した $E > 3$ MeV 以上の頻度分布。横軸は平成 28 年 11 月 22 日午前 0 時からの経過時間(秒)、縦軸は 10 秒ごとのイベント数。

図 3 乗鞍観測所で取得した光子線エネルギースペクトル。

2.4.3.4

放射線遮蔽用可撓性材料の性能評価

Performance Evaluation of Flexible Material for Radiation Shielding

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

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

Abstract

Neutron attenuation of flexible material for radiation shielding was measured. Neutrons generated by fragmentation reaction of incident ion beam were used. It is found that attenuation coefficient of continuous energy neutron between 20 and 100 MeV for the flexible material is about 2/3 of that for ordinary concrete.

要約

放射線遮蔽用可とう性材料の中性子遮へい性能を測定した。核破砕反応による連続エネルギー中性子を使用した。この材料の 20 MeV から 100 MeV の連続エネルギー中性子に対する減弱係数は一般的なコンクリートの 2/3 程度であることが分かった。

I. 緒言

加速器施設でコンクリート等を配置することが困難な箇所に適用できるように開発された可とう性を有する材料の放射線遮蔽性能を調べることを目的とする。He イオンビームの核破砕反応で生成される連続エネルギー中性子を使用して、この可とう性材料の中性子の透過量を調べた。

II. 方法

中性子透過量測定実験は、若狭湾エネルギー研究センター多目的加速器システム照射室4高エネルギー生物照射装置で行った。

放射線遮蔽用可とう性材料は、ウレタンをベースにした、水素含有量をコンクリートと同程度に高めたもので、密度が 1.0 g/cm^3 の材料であり、厚さを 0 cm から 20 cm まで 5 cm 毎に変化させた。可とう性材料としてホウ素を含有していない黄色のものと同程度の低エネルギー中性子の遮蔽能力を向上させるためにホウ素を添加した黒色の材料を準備した。使用した可とう性材料を図 1 に示す。比較のために市販のコンクリート板も試料として使用し、厚さを 0 cm から 18 cm まで 6 cm 毎に変化させた。

この実験では、加速器からのビームを核破砕ターゲットに入射し、発生した連続エネルギー中性子の透過量を測定することで、可とう性材料の遮蔽性能を評価することとした。この実験では 55 MeV/u He を図 2 の右側からターゲットである厚さ約 50 mm の水に入射し、核破砕反応で生成された連続エネルギー中性子を遮蔽体に照射し、透過した中性子を後方(図の左側)に設置した液体有機シンチレータで測定した。中性子のエネルギーは水ターゲットのすぐ上流に設置したプラスチックシンチレータと液体有機シンチレータ間の飛行時間法により決定した。

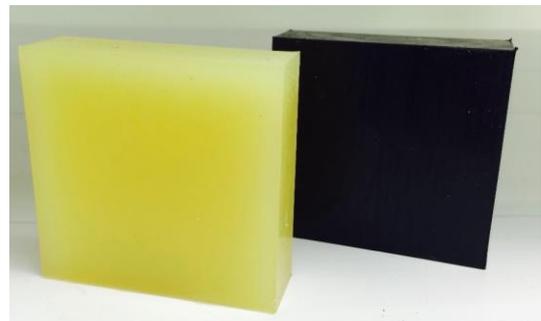


図 1 放射線遮蔽用可とう性材料のボロンなし(左)とボロン入り(右)。



図 2 中性子透過量測定の設定アップ。

*1九州大学・大学院工学研究院・エネルギー量子工学部門、*2(株)フジタ・技術センター、*3(同)ハセテック、*4(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ
本報告は(公財)若狭湾エネルギー研究センターと九州大学、ならびに(公財)若狭湾エネルギー研究センターと(株)フジタとの共同研究契約に基づいて実施した研究成果である。

III. 結果と考察

測定の結果得られた中性子エネルギースペクトルの例を図 3 に示す。左図はホウ素なし可とう性材料の場合、右図はコンクリートの場合のデータである。約 100 MeV までの中性子が発生していることがわかる。いずれの材料でも中性子透過量の減少と遮蔽体の厚さが相関していることがわかる。丸印が実験結果、線が PHITS¹⁾によるシミュレーション結果であり、シミュレーションは中性子の最大エネルギー付近の実験値を再現しているが、中性子のエネルギーが低い領域ではあまり再現されていない。

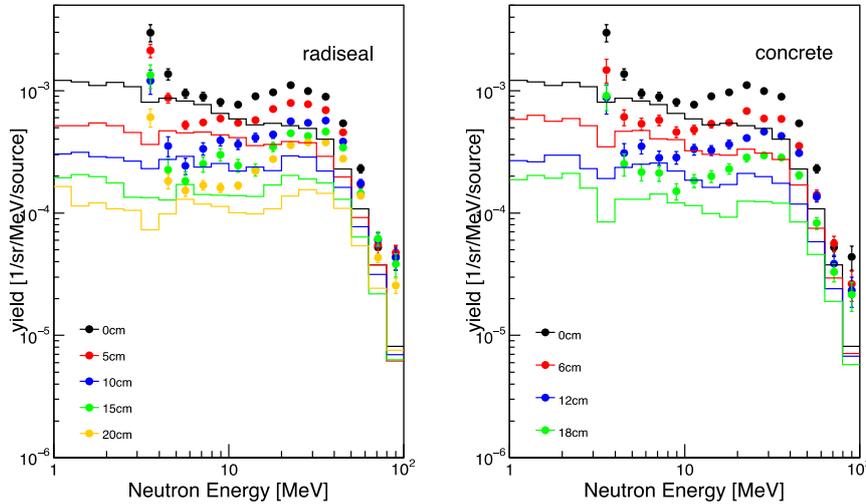


図 3 可とう性材料を透過した中性子のエネルギースペクトル。左はホウ素なし材料、右は一般的なコンクリートの結果。丸が実験値、直線が PHITS による計算結果を示す。

この結果を中性子のエネルギーが 20 MeV 以上の範囲で積分し、厚さに対する中性子透過量をまとめた結果を図 4 に示す。この時の直線の傾きが中性子の減弱係数を示す指標の一つになる。この図から、20 MeV 以上の連続エネルギー中性子に対する減弱係数は、ホウ素なし可とう性材料で 0.040 cm^{-1} 、コンクリートで 0.061 cm^{-1} という結果が得られる。可とう性材料の水素の含有量がコンクリートに近いにも関わらず中性子の減弱係数が異なるのは、コンクリートにはケイ素やカルシウムなど水素、炭素より原子番号の大きな元素が多く含まれるために特にエネルギーの高い中性子を可とう性材料よりも遮蔽できるためと考えられる。

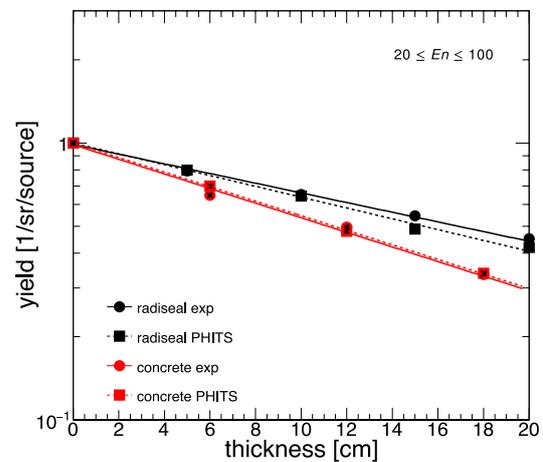


図 4 遮蔽体の厚さを変化させた時の 20 MeV 以上の連続エネルギー中性子に対する減弱の様子。

IV. 結言

ホウ素なしの可とう性材料の線減弱係数は 0.040 cm^{-1} で、一般的なコンクリートと比較して $2/3$ 程度であることが分かった。これは中性子含有量が同程度でも密度が異なるためであると考えられる。モンテカルロ粒子輸送コード PHITS で計算した結果が実験データを支持していることを確認できた。

今後は、200 MeV 陽子ビームを利用し、より高いエネルギーの中性子に対する遮蔽性能を評価することを計画している。

参考文献

- 1) T. Sato, et al., Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol.: 50, 9, 913 (2013)

2.4.3.5

層状珪酸塩鉱物における太陽風プロトンの影響: 反射スペクトル形状変化とプロトン照射量の関係
 Influence of Solar Wind Proton on Hydrated Silicate Minerals: Relationship between Spectral Shape and Fluency

仲内悠祐^{*1*2}、松本徹^{*2}、安部正真^{*2*1}、土山明^{*3}、北里宏平^{*4}、安田啓介^{*5}、中田吉則^{*6}、鈴木耕拓^{*6}
 Yusuke NAKAUCHI, Touru MATSUMOTO, Masanao ABE, Akira TSUCHIYAMA, Kohei KITAZATO,
 Keisuke YASUDA, Yoshinori NAKATA and Kohtaku SUZUKI

Abstract

The surface of airless bodies undergoes influence space weathered by solar wind and/or micro impacts. The main component of solar wind is H⁺, however, it has not understood yet. In this study, we observed the spectral change of irradiated sample which is powdered antigorite.

The spectra of antigorite are changed by H₂⁺ irradiation. That indicate a step-by-step change: the first step is decrease of original hydroxyl groups, second step shows decrease of original hydroxyl groups and create new H₂O. The last step shows create new H₂O. Furthermore, this study suggests that spectral change shows saturation at 10¹⁸ ions/cm².

要約

大気のない天体表層は太陽風や微小隕石衝突などにさらされ、宇宙風化作用の影響を受けている。太陽風の主成分は水素イオンだが、水素イオンによる宇宙風化の影響はよくわかっていない。本研究では、天体表層に存在すると考えられる鉱物に太陽風を模擬した水素イオンを照射し、そのスペクトル変化を観察した。

本結果から Antigorite におけるスペクトル変化は照射量に対して、(1)結晶構造中の OH 基の減少→(2)結晶構造中の OH 基の減少と新たな H₂O の生成→(3)新たな H₂O の生成と、段階的に変化することがわかった。さらに、スペクトルの変化は 10¹⁸ ion/cm² で飽和することが示唆された。

I. 緒言

天体表層の太陽光反射スペクトルは、表層に存在する物質等の情報を持つ。しかし天体が大気を持たない場合、表層は宇宙空間に暴露されているため、微小隕石衝突や太陽風・銀河宇宙線の照射による宇宙風化作用の影響により天体表層の反射スペクトル形状が変化してしまう。実際、隕石やそれらの構成鉱物に対する宇宙風化実験は多く行われ、反射スペクトルの変化が再現されている¹⁾。宇宙風化作用は表層物質の同定を困難にするため、天体表層の反射スペクトルを用いた表層物質の推定には、宇宙風化作用の理解が重要である。

宇宙風化作用によるスペクトル形状の変化は、ある程度の照射量に対して飽和することが考えられる。本研究では、C 型小惑星に存在すると考えられる鉱物に段階的に水素イオンビームを照射し、その反射スペクトル変化と照射量の関係を見出すことを試みた。

II. 実験方法

本実験は、マイクロ波イオン源イオン注入装置を用いて、太陽風を模擬した水素イオンビームを試料に段階的に照射し、照射量とスペクトル変化量の関係性を明らかにすることを試みた。

実験では H₂⁺ビームを

- ① 0 ions/cm²
- ① 1.53 × 10¹⁶ ions/cm²
- ② 6.10 × 10¹⁶ ions/cm²
- ③ 1.53 × 10¹⁷ ions/cm²
- ④ 1.07 × 10¹⁸ ions/cm²
- ⑤ 1.67 × 10¹⁸ ions/cm²

と段階的に追加照射し、その都度 FTIR(Perkin Elmer Spectrum 2000)を用いて反射スペクトルを測定し、各波長での変化量を比較した。試料には含水小惑星に存在すると考えられる Antigorite を用いた。

^{*1}総合研究大学院大学、^{*2}(国研)宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所、^{*3}京都大学、^{*4}会津大学、^{*5}現京都府立大学、^{*6}(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

本研究の一部は、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所と若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究である。

III. 結果・考察

測定結果を図 1 に示す。Antigorite の反射スペクトルは、まず OH 基の伸縮振動に由来する 2.7 μm 付近の吸収強度が減少した。さらに追加照射により、3 μm 帯の H₂O の対称振動などに由来する吸収強度の増加が見られた。④と⑤の alteration ratio の比をとると、形状に変化がないことがわかる(図 2)。よって、Antigorite の太陽風プロトンによるスペクトルの形状変化は、約 10^{18} ions/cm² で飽和することが示唆された。

上記結果から、照射された水素イオンは鉱物中の結晶構造を段階的に切断することが示唆された。第一段階として、水素イオンにより本来 Antigorite 中に存在する metal-OH 結合の切断が行われ、第二段階として H₂O の生成が行われる。metal-OH の結合の切断についてはノイズが大きいため判断できない。

IV. 結言

Antigorite の反射スペクトルは太陽風プロトンにより段階的に変化することがわかった。さらに、照射された水素イオンが鉱物中でどのように存在しているのかの照射量依存性の示唆を得た。

参考文献

- 1) S. Sasaki et al.: Nature, 410, 555 (2001).

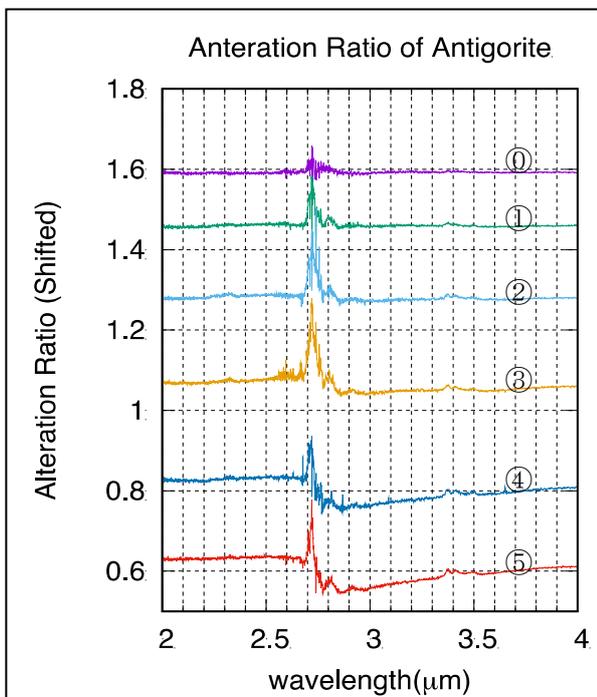


図 1 水素イオン追加照射前後のスペクトル比較。計算式：

$$\text{AltRat}_{(i)} = R_{\text{irrad}} / R_{\text{unirrad}}$$

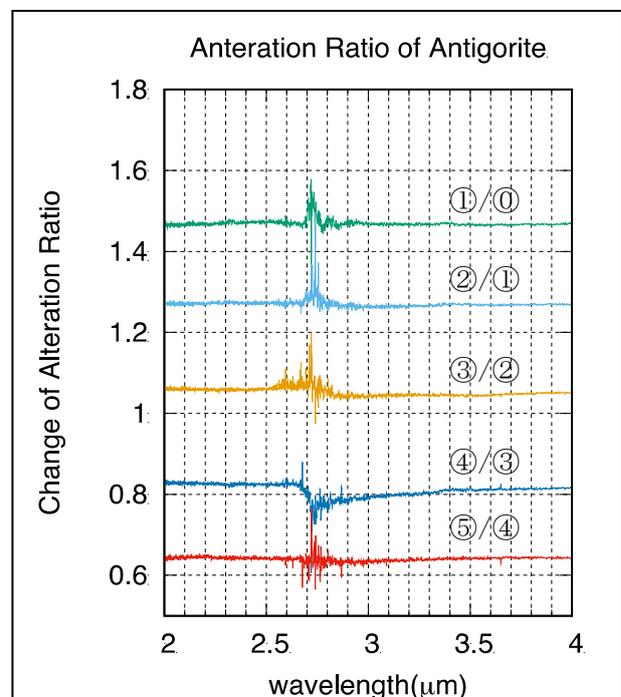


図 2 水素イオン追加照射によるスペクトル変化比較。計算式：

$$\text{Ratio} = \text{AltRat}_{(i)} / \text{AltRat}_{(i-1)}$$

2.4.3.6

陽子及び重粒子線を用いた衛星搭載用デバイスの放射線耐性の検証

Radiation Tolerance Verification of Electrical Devices for Satellite using Proton and Heavy Ion beams

有元誠^{*1,2}、谷津陽一^{*2}、針田聖平^{*2}、村木雄太郎^{*2}、松下将典^{*3}、古賀将哉^{*3}、太田佳^{*3}、羽鳥聡^{*4}、久米恭^{*4}、水嶋慧^{*4}、山東新子^{*4}、長谷川崇^{*5}Makoto ARIMOTO^{*1,2}, Yoichi YATSU^{*2}, Shohei HARITA^{*2}, Yutaro MURAKI^{*2}, Masanori MATSUSHITA^{*3}, Masaya KOGA^{*3}, Kei OHTA^{*3}, Satoshi HATORI^{*4}, Kyo KUME^{*4}, Satoshi MIZUSHIMA^{*4}, Shinko SANDO^{*4} and Takashi HASEGAWA^{*5}

Abstract

To accomplish a space-satellite mission, a variety of challenges need to be overcome. Particularly, one of the most important challenges is a verification of radiation tolerance of electrical devices for space satellites. Our research group currently develops technology components for a future-generation small satellite and performed radiation tests on radiation tolerance for several key devices at the synchrotron beam line of the Wakasa Energy Research Center. The devices are irradiated with 90 MeV proton beam with a dose of 10-year operation in orbit. We successfully selected appropriate devices for space mission and obtained important knowledge by examining if those devices work stably.

要約

人工衛星のミッションの遂行には様々な課題を解決する必要があり、特にその中でも重要な課題のひとつが、搭載デバイスの放射線耐性である。我々の研究・開発グループは、次世代小型衛星ミッションの要素開発を進めており、その中でも衛星ミッションの成否を左右するキーデバイスの放射線耐性の評価試験を、若狭湾エネルギー研究センター・シンクロトロンビームラインにて実施した。衛星軌道上で 10 年分に相当する陽子を照射し、デバイスの安定動作の成否を評価することで、衛星に搭載可能なデバイスの弁別および知見を得ることに成功した。

I. 緒言

高エネルギー X 線天体现象の放射メカニズムやその起源を明らかにするうえで、大気の影響を受けない人工衛星を用いた観測は必須である。しかしながら、宇宙環境では X 線センサーやその周辺装置が多量の宇宙線にさらされるため、機器の動作異常や永久故障を引き起こし、衛星機能そのものに致命的な影響を及ぼす。例えば、我々のグループでは、2014 年 11 月に小型衛星 TSUBAME¹⁾の打ち上げを行った。この衛星は宇宙最大の爆発現象である γ 線バーストからの偏光を検出し、ブラックホール誕生直後の極限の物理現象の探索を行うことを目的としていたが、打ち上げから～1ヶ月後に通信機器の不具合により、通信が途絶し衛星ミッションの終了を余儀なくされた。その後の原因解析により、通信機器用電源 IC の放射線損傷による故障であることが判明しており、このことからわかるように衛星の基本コンポーネントを構築する上で、事前に放射線の影響を丹念に精査することが極めて重要であり、衛星ミッションの成否を左右する。

本研究では、現在我々が検討を進めている次世代の衛星ミッションの中で、基幹の動作を司るデバイスや新規開発した LSI の放射線耐性評価について、若狭湾エネルギー研究センター・シンクロトロンビームラインにて実施した。

II. 照射ターゲット

本研究でターゲットとした主要な電子デバイスについて述べる。いずれも次世代衛星のミッション動作の中核を担っている。

A) アバランシェフォトダイオード用 ASIC

我々の研究グループが独自に開発した ASIC であり²⁾、多チャンネルの読み出し回路が搭載されている。光センサー・アバランシェフォトダイオードからの微弱な電荷読み出しに特化しており、これにより天体から放射される X 線の検出を行う。

^{*1} 早稲田大学理工学術院総合研究所、^{*2} 東京工業大学理学院物理学系、^{*3} 東京工業大学工学院機械系、^{*4} (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部、^{*5} (同) ハセテック

本研究は、MEXT KAKENHI (科研費) No. 24103002 の助成を受けて実施した。

本研究は、東京工業大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究として実施した。

B) GAGG 結晶

GAGG(ガドリニウム・アルミニウム・ガリウム・ガーネット)結晶は、X 線に反応してシンチレーション光を発する新しいシンチレータである。これまで多用されてきた CsI 結晶などに比べて、潮解性がなく密度も高いため X 線阻止能が高い等メリットが多い一方で、衛星搭載実績がないため本研究では放射化による影響を評価する。

C) オンボードコンピュータ用 IC

衛星の動作を統括する IC として、Armadillo-420 および Raspberry Pi 2 Model B を検討している。いずれも過去の衛星に搭載された実績がないため、本研究が初めての実証試験となる。ほか、電源系の動作を統括するマイコンとして、PIC18F8680 についても試験を行った。

D) 衛星測位システム用 IC

GPS を用いた衛星測位システム(Global Navigation Satellite System; GNSS)を利用した IC であり、特に本研究で照射したデバイス「Firefly」は、低コストで入手可能であるため、次期衛星搭載への最有力候補である。

E) 電源 IC

Liner Technology 社が提供する DC/DC コンバータ LTM4609 をターゲットとして選定した。高効率での高電圧出力(~40V)を実現し放熱が少ないため、熱条件の制約が厳しい衛星にも対応可能である。

III. 陽子照射試験方法

本試験では、軌道 10 年分相当(3×10^{10} 個/cm²)の 90MeV の陽子を照射し、電子デバイスの動作をリアルタイムでモニターしながら試験を進めた。評価を行う上で、幾つかの評価する方法があるが、本研究ではシングルイベントラッチアップおよびシングルイベントアップセットの発生を確認することを主要目的として、実験を進めた。前者のシングルイベントラッチアップとは、半導体素子に荷電粒子が入射した際に粒子の電離相互作用もしくはハドロン相互作用により、一過性の電流が生じる効果である。特に近年の IC は CMOS プロセスで製作されているため、寄生サイリスタ構造を持ち一過性の電流が途絶することなく流れ続け、素子の永久故障をもたらす可能性がある。この場合、電流モニターすることで検知が可能である。またシングルイベントアップセットとは、生じた一過性の電流によりデジタル回路内のフリップフロップで制御されるビットが反転する現象であり、入力データと出力するデータの差を取るなどして検知を行うことが可能である。

IV. 照射結果

1. アバランシェフォトダイオード用 ASIC

照射結果を図1に示す。この ASIC は正と負の2系統の電源(±1.65V)を有しているため、それぞれの電流値をモニターした。多少の電流の変化はあるものの、シングルイベントラッチアップに特有な急激な電流変化は見られず、安定動作することを検証した。また読み出し回路の入力に常に一定の電荷を注入することでテストパルスの波高値をモニターした。正常であればこの波高値は一定値となることが予想されるが、本照射結果では 10%程度の変化があることが判明した。ただしこの変化は 10 年分に相当するため、例えば軌道上で半年毎に較正を行うことで十分に対応できるため、実効上問題ないレベルと判断した。またこの ASIC 内部には、デジタル信号の反転を検知する機能が搭載されており、10 年分相当の照射を行ってもビット反転は一切見られなかった。これらの結果については、Nuclear Instrument Method 雑誌に投稿予定である。

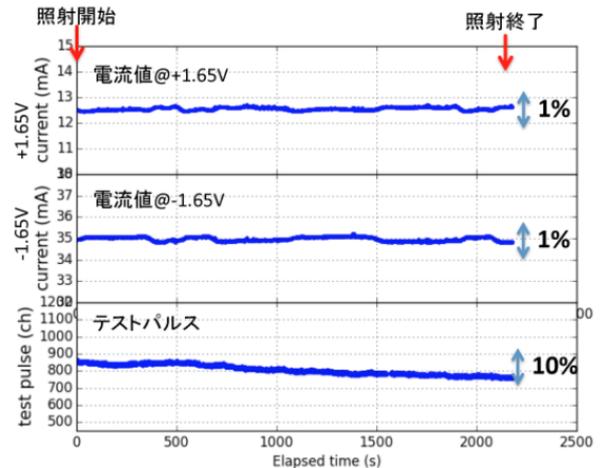


図1 アバランシェフォトダイオード用 ASIC への陽子照射の結果。電流値の変化は1%以内であり、テストパルスの波高値の変動も10%以内に抑えることができている。

2. GAGG 結晶

10 年分の照射を行ったのち、ゲルマニウム検出器を用いてγ線スペクトルを取得し、放射化の影響を調べた。特に照射後の時間経過に伴って、そのスペクトルが大きく変化することが予想されるため、照射後3ヶ月に渡って複数回測定を実施した。図2が得られたスペクトルであり、時間経過するごとに連続成分の強度は低減す

る一方で、輝線の成分が如実に増えていることが見て取れる。これは連続成分に比べて、輝線成分の時定数が長いことを示しており、異なる核種からの寄与であることを示している。これらの詳細解析は現在進行中であり、今後、学会および学術雑誌で発表予定である。

3. オンボードコンピュータ用 IC、衛星測位システム用 IC および電源 IC

搭載用オンボードコンピュータの候補のひとつである Raspberry Pi 2 に照射を行ったところ、陽子照射直後から消費電流が増大し、ただちに電源側で規定しているカレントリミットにかかる現象が見られ、宇宙用途としての採用は厳しいことが判明した。それに対して、Armadillo-462 は、照射後から機上換算にして2週間程度で再起動がかかるものの、電流値の異常値など見られず Raspberry Pi に比べ、強い放射線耐性を有していることがわかった。

また衛星測位システム用 IC は、照射後から、機上換算で4年経過後に再起動が発生するのみにとどまり、非常に安定した動作を発揮することがわかった。電源 IC(LTM4609)についても同様に、非常に堅牢な性能を有しており、出力電圧がほぼ変化することなく安定動作することを確認した。

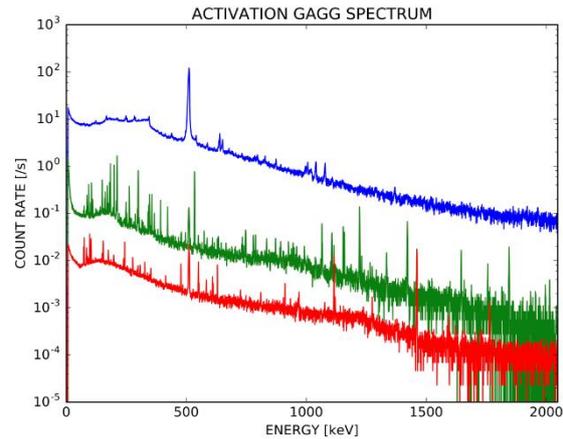


図2 陽子線で放射化させた GAGG 結晶の γ 線スペクトル。(青)照射10分後、(緑)6日後、(赤)2ヶ月後

V. 結言

本研究では、次世代小型衛星搭載を目的に、衛星のミッション部の中核を司る様々なデバイスの放射線耐性試験を行った。その結果、これまで放射線耐性が不明であったものに対して、定量的な評価を与えることに成功した。また今回我々が放射線耐性試験を行った素子は小型衛星の搭載のみならず、将来の大規模な衛星プロジェクトに資するものであり、非常に有益な知見を得ることができた。

また本試験(2015年12月実施)の後になるが、JAXAにて公募のあった「革新的衛星技術実証1号機」に、我々の研究グループのテーマ(深層学習を応用した革新的地球センサ・スタートラッカの開発³⁾)の採用が決定した。今回の放射線耐性試験の結果はこの新しい衛星に向けた要素開発の基礎となる一方で、今後打ち上げに向けてさらなる開発が必要であり、若狭湾エネルギー研究センターと共同して開発を鋭意進めていく所存である。

参考文献

- 1) YATSU et. al., “Pre-flight performance of a micro-satellite TSUBAME for X-ray polarimetry of gamma-ray bursts”, Proceedings of the SPIE, Volume 9144, id. 91440L 13pp. (2014)
- 2) ARIMOTO et. al., “Development of the Hard X-ray Monitor onboard WF-MAXI”, Proceedings of the SPIE, Volume 9144, id. 91445Z 10pp. (2014)
- 3) 革新的衛星技術実証1号機のテーマ公募の選定結果 <http://www.ard.jaxa.jp/pickup/kakushin.html>

2.4.3.7

MA 回収用 CMPO 吸着材の α 線劣化生成物評価
 Alpha-ray Degradation Products of CMPO Adsorbent for MA Recovery
 渡部 創^{*1}、佐野雄一^{*1}、石神龍哉^{*2}
 Sou WATANABE, Yuichi SANO and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

Alpha-ray degradation products of CMPO adsorbent were evaluated by GC/MS, NMR and FT-IR analyses on He^{2+} irradiated adsorbents. One of the degradation products might suppress elution of Am from the adsorbent.
 要約

抽出クロマトグラフィ技術において使用する CMPO 吸着材の α 線劣化生成物の調査のため、 He^{2+} ビームを照射した吸着材について分析を行った。本試験により、Am の溶離率の低下のメカニズムが明らかになった。

I. 緒言

抽出クロマトグラフィ法を用いた使用済燃料からのマイナーアクチノイド(MA: Am, Cm)回収技術は、放射性廃棄物の減容化及び有害度低減の観点より注目されており、日本原子力研究開発機構では吸着材やプロセス工程の開発を進めている。本技術の安全性を確保する観点から、吸着材中に含まれる有機物質の酸や放射線による劣化生成物について調査を進める必要がある。本研究では、劣化生成物の化学形態や発生量を把握し、それらのプロセスへの影響を評価することを目的として、CMPO 吸着材に He^{2+} イオンビームを照射し、劣化生成物を同定することで α 線照射に伴う性能変化のメカニズムの解明を試みた。

II. 実験

アルミ製の照射容器に 30 mm×20 mm×1 mm 厚の板状のスチレンジビニルベンゼンポリマーを調製し、これに CMPO(図 1)を含浸させたものを試料とした。照射実験は若狭湾エネルギー研究センターのタンデム加速器を用い、イオン注入コースにて実施した。²⁴¹Am からの α 線を想定し、5 MeV に加速した He^{2+} イオンビームを 200 nA で 30 分間照射した。照射対象試料の重量は 0.4 g であり、照射したエネルギーを全て吸着材が吸収したとすると、吸着材の吸収線量は 2.25 MGy となる。照射済み吸着材と 1,2-ジクロロエタンとを接触させて有機化合物成分を抽出し、GC/MS 分析等によって化合物の同定を行った。

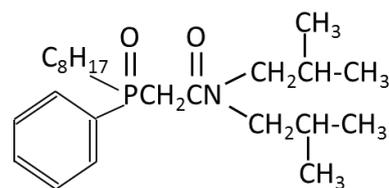


図 1 CMPO の構造式

III. 結果および考察

CMPOは2座配位の抽出剤であり、図1に示す分子内の酸素原子の部位に電荷の偏りを生じることで、MA等が配位し抽出される。CMPOの放射線劣化によって生成する物質の内、酸素原子が残存している物質が複数見られ、これらの分子は、Am抽出能力を有している可能性がある。今までの実験から、 α 線照射に伴ってCMPOからのAmの逆抽出性能が低下することが分かっている。したがって、抽出能力を有するこれらの放射線劣化生成物がAmに配位し、CMPOとは異なる電子配置を有するために、逆抽出性能が低下したことが示唆される。抽出クロマトグラフィ法の安全性を担保するためには、分離塔内部におけるMAの蓄積を抑制することは必要不可欠であり、これらの物質からのMA溶離率を評価するとともに、適切な洗浄液の検討が必要である。今後、MAと強く錯形成するDTPAなどの錯形成剤を用いて、劣化溶媒からのMAの洗浄について検討を行う。

IV. 結言

²⁴¹Amからの α 線を模擬した He^{2+} イオンビームをCMPOに照射し、放射線劣化生成物を同定することが出来た。本試験によって、放射線劣化に伴うAm溶離率の低下のメカニズムが明らかとなり、今後システムの安全性確保に向けた研究に反映する。

^{*1}(国研)日本原子力研究開発機構・福島技術開発試験部、^{*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、(国研)日本原子力研究開発機構が(公財)若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究として実施した。

2.4.3.8

人工衛星搭載用半導体検出器とアナログ集積回路の耐放射線シミュレーション

Radiation Tolerance Simulation Test for Si Devices and Analog ASICs aboard the micro satellite Kanazawa-SAT³米徳大輔^{*1}、澤野達哉^{*1}、吉田和輝^{*1}、加川保昭^{*1}、伊奈正雄^{*1}、遠藤友^{*1}、
羽鳥聡^{*2}、久米恭^{*2}、長谷川崇^{*2}、水嶋慧^{*2}Daisuke YONETOKU, Tatsuya SAWANO, Kazuki YOSHIDA, Yasuaki KAGAWA, Masao INA, Yu ENDO,
Satoshi HATORI, Kyo KUME, Takashi HASEGAWA and Satoshi MIZUSHIMA

Abstract

We performed radiation tolerance simulation experiments for Silicon semiconductor devices, an application specific integrated circuit (ASIC) used for electric readout of detectors, as well as peripheral circuit elements aboard a micro satellite Kanazawa-SAT³. The ASICs contain 64 channels of charge sensitive amplifiers, shaping (filtering) amplifiers, sample-hold circuits and analog-to-digital converters. The digitized signals are transferred to the control FPGA with serial data transfer. The peripheral elements are A/D converter, voltage level shifter, operation amplifiers of consumer product level (not space quality). As main results of experiments, we estimated the cross-section of single event upset is about 10^{-11} cm² which is equivalent to the SEU rate of about 0.1 SEU/year in low earth orbit using proton, helium, and carbon beams with 200 MeV. Moreover, we confirmed that ADC and voltage level shifters are significantly tolerant for particle beam irradiation while the operation amplifiers show a slightly change of their linearity and offset voltage.

要約

金沢大学が開発している超小型人工衛星 Kanazawa-SAT³ への搭載を目指したシリコン半導体検出器とアナログ集積回路(ASIC)、および周辺回路素子の放射線耐性試験を実施した。ここで利用した ASIC は、検出器が X線を受けた際に生成する電荷信号を読み出すためのもので、64 系統の電荷積分アンプ・波形整形フィルター・サンプルホールド・A/D 変換器がすべて含まれており、外部の FPGA に向けてシリアル通信でデータを転送するものである。また、周辺回路素子としては、A/D コンバータ、レベルシフター、オペアンプなどを評価した。主な実験結果として、陽子線・ヘリウム線・炭素線照射による ASIC のシングルイベント・アップセットの発生断面積は 10^{-11} cm² 程度であり、地球周回低軌道においては 0.1 SEU/year 程度の頻度であることを確認した。周辺回路素子においては、A/D コンバータとレベルシフターは非常に高い放射線耐性を有するが、オペアンプ類は線形性およびオフセット電圧などが若干ではあるが変化していることが確認できた。

I. 緒言

金沢大学では、2018 年頃の打ち上げを目標に 50 cm 立方、50 kg 級の超小型衛星の開発を進めている。理学ミッション機器として、重力波発生源の一つとして考えられている「短時間ガンマ線バースト」と呼ばれる爆発現象の方向を決定するための広視野 X線撮像検出器を搭載する。本実験の目的はでは、半導体検出器の読み出し集積回路(ASIC)と周辺回路素子(A/D コンバータ、レベルシフター、オペアンプ等)に対する放射線耐性試験を実施し、衛星軌道上で長期間にわたって動作可能であるかを検証する。特に、周辺回路素子は民生部品であることから、放射線耐性を十分に評価しておく必要がある。衛星軌道上における粒子線の主成分である約 200MeV の陽子・ヘリウム照射による放射線損傷による性能変化と、重粒子イオンの代表である炭素イオンを用いてシングルイベント・アップセット(SEU)の耐性について評価する。

II. 方法

人工衛星の軌道を高度 500km、軌道傾斜角 30 度とした場合、通常観測時に平均的に晒される宇宙線フラックスは約 10^8 proton/cm²/s/yr である。また、南大西洋異常帯(SAA)と呼ばれるヴァン・アレン帯の一部を通過することを考慮すると、その 30 倍程度の粒子線に晒されることになる。宇宙線の主な構成要素は陽子であり、その平均的な粒子エネルギーは数 100 MeV 程度であることから、本実験では 200 MeV の陽子線を照射した。また、宇宙線における重粒子の主要成分は炭素イオンであることから、200MeV の炭素イオンビームを用いた評価を行った。このとき、ASIC 内部における電離損失エネルギーが十分に高くなるよう、ASIC へ入射する直前の炭素イオンのエネルギーが 10MeV 程度となるようにビーム出射口から照射体までの距離を調整した。

*¹金沢大学理工研究域数物科学系、*²(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・加速器室
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として実施した。

III. 結果

ASIC の SEU 耐性について、2014 および 2015 年度の実験のコンフィギュレーションを表 1 にまとめた。また、測定結果を総合したものを図 1 に示す。図 1 の左から陽子、ヘリウム、炭素ビームのエネルギー損失を示している。四角印は実際に SEU が発生した際の照射量から換算した断面積を表し、下向き矢印は SEU が発生しなかったことから勘定される 90%上限値を表している。照射した核種による明確な差異はなく、おおよそ 10^{-11}cm^2 程度と捉えることが妥当と考えられる。すなわち、直接的な SEU を引き起こすのに必要な LET は $2.3 \text{ MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$ よりも大きいこと、多数の粒子の照射によって ASIC 内部に電荷蓄積が生じ、その結果として SEU が発生すると考えられる。また、この測定から、衛星軌道上での SEU 発生率は約 0.1 回/年と考えられ、Kanazawa-SAT³ で十分に使用可能と判断できる。

また、シングルイベント・ラッチアップの発生についても調査したが、実験の最中に1度も発生しなかった。

次に、周辺回路素子として利用する A/D コンバータ、レベルシフター、オペアンプ、計装アンプに対しても陽子ビーム試験を行った。各素子の用途を以下の表 2 に示す。これらの素子は搭載機器における部品点数が多いこともあり、高価な宇宙用素子を利用することが困難であるため、民生部品に対して十分な放射線耐性試験を実施することで利用の可否を判断する

表 2 民生用部品リスト

回路素子	用途
A/D コンバータ	回路基板上的電圧、電流、温度等をモニターするためのデジタル変換素子
レベルシフター	ASIC と FPGA の論理レベルの電圧差を補間するための素子
オペアンプ	ASIC のから出力される微弱な DC 電圧レベルを増幅させるための素子
計装アンプ	回路基板上で電流値を測定するために必要な素子

A/D コンバータおよびレベルシフターについては、100 krad 程度の照射に対しても機能を維持しており、消費電流等の変化もほとんど無いことから、衛星搭載品として十分に採用できると結論づけている。

図 2 は計装アンプにおいて、照射量ごとの線形性応答を示したものであるが、5krad 程度で変化が見え始めている。オペアンプについても 10krad 程度で変化が見えている。10krad 程度であっても許容できる変化量ではあるが、今後、追試験により詳細に評価するとともに、代替部品についても調査を進める必要がある。

IV. 結言

本実験により、ASIC は衛星軌道における放射線耐性が十分に高く、Kanazawa-SAT³ の運用目標である 3 年の間には粒子線による性能の変化は見られず、SEU/SEL が発生する確率は極めて低いことを検証できた。今後は周辺回路素子も含めて、読み出し回路系全体の放射線耐性試験を実施する予定である。本実験結果の一部は、Sawano et al. (2016)¹⁾, Yoshida et al. (2016)²⁾, および吉田和輝(金沢大院生)修士論文³⁾として報告した。

参考文献

- 1) T. Sawano, D. Yonetoku, T. Mihara, et al., UNISEC Takumi Journal, in press (2016)
- 2) K. Yoshida, D. Yonetoku, T. Sawano et al., SPIE Conference Proceedings, in press (2016)
- 3) 吉田和輝 修士論文 (2016)

表 1 実験日程とビーム情報

実験日	照射粒子	照射エネルギー	照射対象
2015/2/5-6	炭素	200 MeV	ALEX-01
2015/9/24-25	ヘリウム	220 MeV	ALEX-01
2015/12/9-10	陽子	200 MeV	ALEX-02

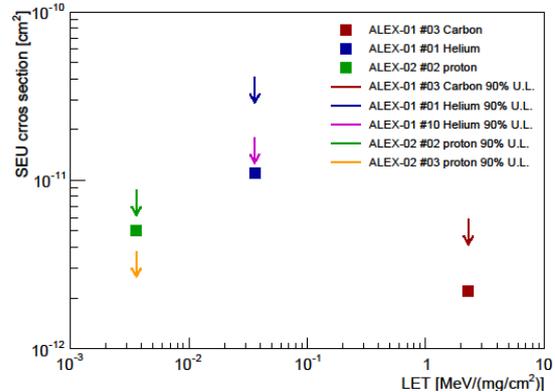


図 1 SEU 発生頻度 (発生断面積)

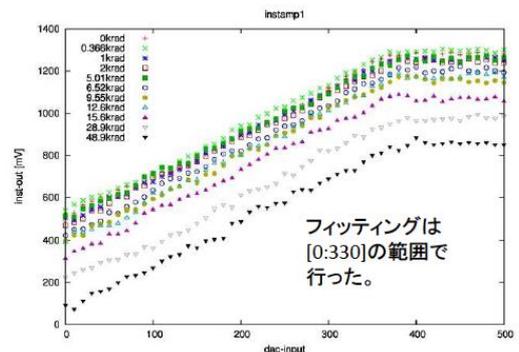


図 2 計装アンプの性能変化

2.4.3.9

超小型衛星搭載放射線検出器の性能評価

Evaluation of Performance of a Radiation Detector onboard the ChubuSat-2 satellite

山岡和貴^{*1}、羽鳥聡^{*2}、久米恭^{*2}

Kazutaka YAMAOKA, Satoshi HATORI, Kyo KUME

我々は名古屋大学、大同大学、中部地区の航空宇宙産業中小企業連合(MASTT)で 50 kg 級の超小型衛星 ChubuSat プロジェクトを進めている。2014 年 8 月に X 線衛星 ASTRO-H と相乗りで ChubuSat 衛星 2 号機が打ち上げられることが決定し、ChubuSat-2 に搭載する放射線検出器(Radiation Detector: RD)の開発をスタートしてきた。同時期、同軌道に打ち上げることで ASTRO-H の天体観測にとってバックグラウンドとなる放射線環境をモニタし、ASTRO-H のサポートすることが狙いである。放射線検出器はプラスチックシンチレータの角棒(1 cm x 1 cm x 10 cm)を横に 10 本並べ、10 層積層し、下部に GAGG シンチレータの 10x10 アレイを置く。さらにプラスチックシンチレータは、反同時計数による荷電粒子除去のため、プラスチックシンチレータ平板で 6 面取り囲まれる(アンチシンチレータ)。すべてのシンチレータは最新の光センサ MPPC で独立に読み出される構造になっている。中性子が入射すると、プラスチックシンチレータを構成する水素原子と弾性散乱し、反跳した陽子の飛跡をとらえることで検出できる。

今回は 2015 年 11 月 16 日、17 日の 2 日間で、シンチレータを部分的に組み込んだ要素試作モデル(BBM)に中性子の代わりに陽子を照射することでその飛跡追跡性能、アンチ機能を確認することにした。運動エネルギー 200 MeV と 100 MeV(減速材を挿入)の陽子で、レートを 100Hz 程度に究極まで絞こむことで、宇宙空間で予想される環境を模擬した。センサは部分的なものではあったが、その中で飛跡性能やアンチ除去性能を確認し、設計に問題ないことが分かった。この結果をもとに、2016 年 2 月 17 日に X 線衛星 ASTRO-H との相乗りで JAXA 種子島宇宙センターから打ち上げている。

^{*1}名古屋大学理学研究科^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ
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との共同研究として実施した。

2.4.3.10

宇宙線照射を模擬した鉱物へのイオン照射実験

Ion Irradiation Experiments into Minerals as Cosmic Ray Irradiation Analogues

土山明^{*1}、瀧川晶^{*1}、内田はるか^{*1}、三宅亮^{*1}、鈴木耕拓^{*2}、中田吉則^{*2}Akira TSUCHIYAMA, Aki TAKIGAWA, Haruka UCHIDA, Akira MIYAKE, Kohtaku SUZUKI
and Yoshinori NAKATA

小惑星や月のような大気のない天体表面では、太陽風照射により宇宙風化がおこることが、はやぶさ計画やアポロ・ルナ計画で採取された小惑星イトカワや月サンプルの分析で知られている。一方、星間空間においても、超新星爆発により加速されたイオン粒子が星間塵粒子に照射され、鉱物の非晶質化などがおこると考えられている。我々の研究グループは、このような宇宙風化を理解することを目的として、宇宙でのイオン粒子照射を模擬した実験を若狭湾エネルギー研究センターのイオン注入装置を用いておこなっている。平成 27 年度は、照射のターゲットとして、これまで用いてきたカンラン石、コランダムに加えて、隕石に含まれる代表的な太陽系外物質(フォルステライト、エンスタタイト、エンスタタイト組成ガラス、サーペンティン、スピネル、ピロータイト、ニッケル-鉄)を用いて、 10^{16} 、 10^{17} 、 10^{18} ions/cm² での 40 keV H₂⁺の照射実験をおこなった¹⁾。

実験生成物表面の SEM 観察により、ブリスタ(水ぶくれ構造)生成の有無やその特徴(形状、サイズ、空間分布)は、ターゲット鉱物により多様性を持つことがわかった。(1)ブリスタ生成の照射量閾値は鉱物によって異なる(エンスタタイトは 10^{16} ions/cm² でブリスタが生成するが、エンスタタイトガラスやニッケル-鉄は 10^{18} ions/cm² でもブリスタは生成しなかった)。(2)同じ化学組成(エンスタタイト)でも結晶と非晶質物質とでは、(1)のようにブリスタ生成効率が大きく異なる。(3)多くの鉱物では 1-5 μm 程度の楕円形状をもつブリスタが生成されたが、エンスタタイトでは細長い、またサーペンティンでは不均質なブリスタ分布が見出された。一部のサンプルについては、表面を FIB サンプリングして TEM 観察をおこなった。これにより、エンスタタイトはカンラン石とコランダムの中間的な構造をもつこと、ピロータイトでは非晶質化はおこらず、c 軸方向の超構造が破壊されることがわかった。

参考文献 1) H. Uchida et al.: Abstract of WS in Goldschmidt2016 (2016)

^{*1}京都大学・理学研究科・地球惑星科学専攻、^{*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、京都大学と若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究である。
本研究は、MEXT KAKENHI 15H05695 の助成を受けた。

2.4.4. 材料技術の開発

2.4.4.1

シリコンの成膜による金属表面の着色

Coloring of Metal Surfaces by Depositing Silicon Films

石神龍哉*1

Ryoya ISHIGAMI

Abstract

We developed a method of coloring of metal surfaces such as stainless steel, titanium, and aluminum by depositing silicon thin films using radio frequency (RF) magnetron sputtering. It is possible to put various color on these metal surfaces by varying thickness of the silicon films between a few nanometers and several tens of nanometers.

要約

ステンレス鋼板、チタン板、アルミニウム板などの金属の表面に、高周波マグネトロンスパッタ法でシリコンを成膜することにより着色する手法を開発した。シリコンの膜厚を数 nm から数十 nm の範囲で変えることにより、金属表面に様々な着色ができた。

I. 緒言

固体表面の着色は、道具や部品などを区別するという機能的な面だけでなく、素材の無機質的な色を隠し、親しみやすさ、高級感を出すために重要な役割を果たしている。一般的に金属表面の着色では、様々な色の有機物を塗布する方法が安価で広く使われているが、色の数だけ塗料が必要で、着色膜が厚いため下地の凹凸が消されてしまい装飾性が弱い。また、表面に酸化膜を形成し、光の干渉で発色させる陽極酸化法では、対象となる材料に限られ、赤系の色など発色させにくい色がある。本研究では、高周波マグネトロンスパッタ法によりシリコンを成膜することで、ステンレス鋼、チタンなどの金属の表面を様々な色に着色する手法を開発した。

II. 成果の概要

成膜基板は、ステンレス鋼、チタン、アルミニウムとした。実用性を考慮し、これらの板の表面は鏡面研磨せず、購入した状態のままとした。これを真空チェンバー内にセットして 150°C から 300°C に加熱し、放電ガスとして 6×10^{-1} Pa 程度までアルゴンガスを導入した後、高周波マグネトロンスパッタ装置によりシリコンを成膜した。なお、成膜を行う前に、成膜基板の表面を 20 分間スパッタクリーニングした。成膜時のマグネトロンスパッタ装置への投入電力は 100 W、成膜基板の電位は -20 V とした。成膜の結果、シリコンの膜厚を数 nm から数十 nm の範囲で変化させることにより、鮮やかな色に着色できることが分かった。図 1 (a) に、シリコンの膜で着色されたステンレス鋼板の写真を示す。反応性ガスを導入することで、さらに色を変化させることができる。図 1 (b) に、作製条件を変えて着色したステンレス鋼板の写真を示す。それぞれ青色、赤色に着色していることが分かる。チタンを成膜基板とした場合でも、ステンレス鋼板と同じ条件で成膜すれば同じ色になることから、基板の元素とは無関係であることが分かった。

III. 結言

この手法は色の種類が多く鮮やかであり、見る方向による色の変化が非常に小さいことが特長であるが、今回の研究では、シリコンの屈折率が大きいこと以外、発色の原理が解明できていない。そのため今後は発色の原理を解明し、それを利用してさらに色の種類を増すことを目標とする。

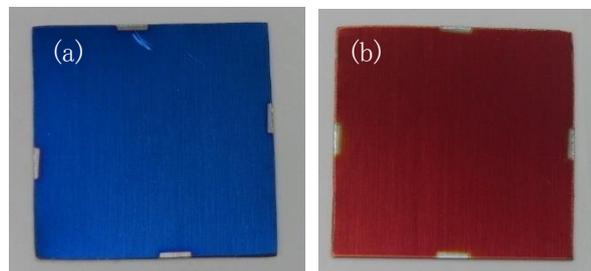


図 1 (a) シリコンの成膜によって青色に着色されたステンレス鋼板、(b) 反応性ガスを導入して成膜することにより赤色に着色されたステンレス鋼板

*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。
この手法については平成 27 年度に特許出願した(特願 2015-187495)。

2.4.4.2

高分子材料上の金属めっきの密着性に関する研究
 Influence of Surface Condition of Polymer Material on Plate Adhesion
 安永和史*¹
 Kazufumi YASUNAGA

Abstract

Surface conditions of materials influence adhesion force between materials and plating film. Alkali treatment of polymer material such as polyimide (PI) film is often applied before non-electrolytic plating. To examine the effects of various alkali treatments on the roughness, surface of the PI films was measured by atomic force microscope (AFM).

要約

材料の表面状態はめっきとの密着力に影響する。ポリイミド(PI)フィルム等の高分子材料では通常、無電解金属めっきの前処理としてアルカリ処理がなされている。アルカリ処理条件を変化させ PI フィルムの表面起伏がどのように変化するのかについて原子間力顕微鏡(AFM)を用いて評価した。

I. 緒言

電子機器に使用されるフレキシブル基板においては、高分子材料と金属を接合することが必要となる。現状の多くのフレキシブル基板においては、高分子フィルムと金属箔を接着層を介して貼り合わせることで製造されているが、近年、密着性のさらなる向上および製造工程の簡略化を目指しためっき技術を適用した高分子フィルム上への金属配線の直接形成法が検討されている。この手法では、まずアルカリ処理により高分子材料表面に微細な凹凸を形成させた後に触媒化処理し、さらに無電解めっきすることにより金属配線を形成する。しかし、高分子材料の表面状態によっては金属配線が形成されない領域が存在することがある。特に、立体配線の凸部領域でのめっき不良問題が存在し、アルカリ処理後の高分子材料の表面状態との関連は明らかとなっていない。そこで、本研究では表面改質による高分子材料の表面状態を定量化し、金属材料との密着性の関連を明らかにすることを目的とした。

II. 成果の概要

試料として高分子材料の PI フィルム(東レ・デュポン(株)、規格 200H、50 μm 厚)を用い、アルカリ溶液は、粒状の水酸化ナトリウム(NaOH、和光純薬工業(株)の試薬特級)を蒸留水に溶解した強アルカリ性の水溶液を使用した。なお、PI フィルムのアルカリ処理は、濃度 1 および 2 mol/l、温度 20 および 56 $^{\circ}\text{C}$ 、処理時間 5 min~14 h で行った。また、試料の表面起伏の定量的な評価には AFM(JEOL JSPM-5200)を用いた。測定用のプローブは MikroMasch 社製の HQ タイプである。図 1 には測定例として 1 mol/l の NaOH 水溶液、温度 20 $^{\circ}\text{C}$ で 60 min 処理した PI フィルムの表面状態を示した。また、AFM 像は走査領域 500 nm \times 500 nm で取得した。下段は AFM 像中の 2 本の矢印で示された約 300 nm の直線区間の起伏のラインプロファイルである。2 本の水平線で示したように、このアルカリ処理条件により PI フィルムには約 8 nm の高低差が生じている。

図 2 は様々なアルカリ処理条件における PI フィルムの凹凸高低差の平均値と処理時間の関係をグラフ化したものである。PI フィルムの表面には元来 1.6~2.3 nm の起伏が存在することから水色の横棒でその範囲を示した。アルカリ溶液の高濃度化や高温化により、短時間で凹凸の高低差が増大することが明らかとなった。ただし、皺や粗大な凹凸の形成等の場所的に不均一な表面状態であった。

III. 結言

PI フィルムをアルカリ溶液処理し、AFM を用いて表面状態を評価することにより nm サイズで起伏の変化を明らかにした。今後、表面起伏と触媒化処理性や金属めっきの密着性の関係の詳細を明らかにする。

*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
 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された。

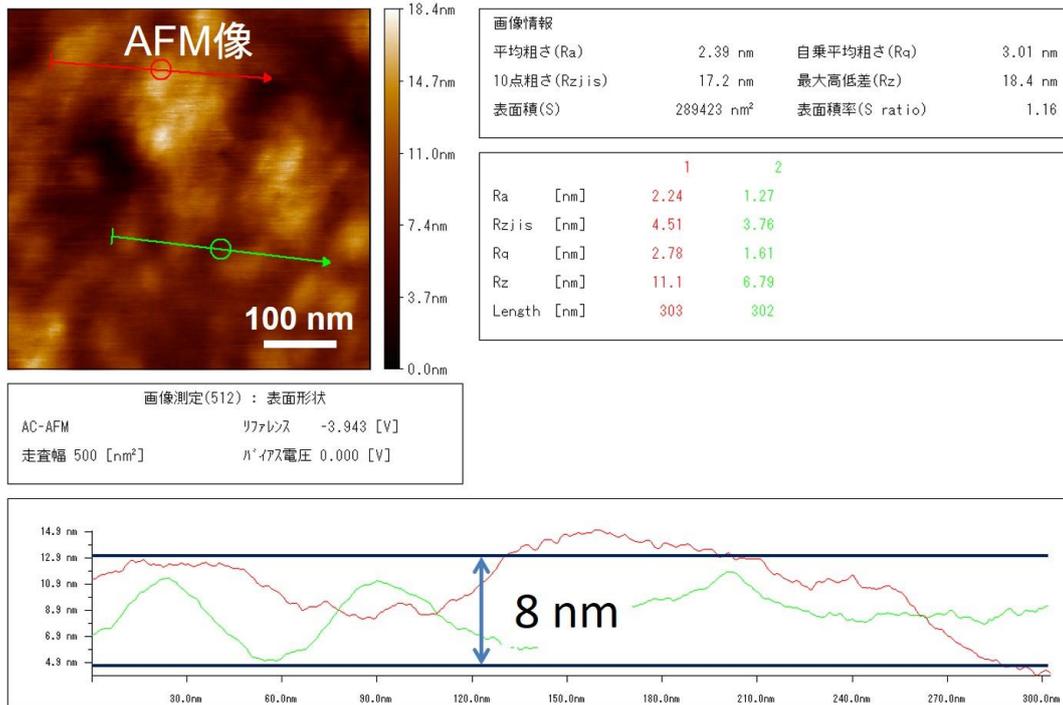


図1 PI フィルム表面の AFM による測定例

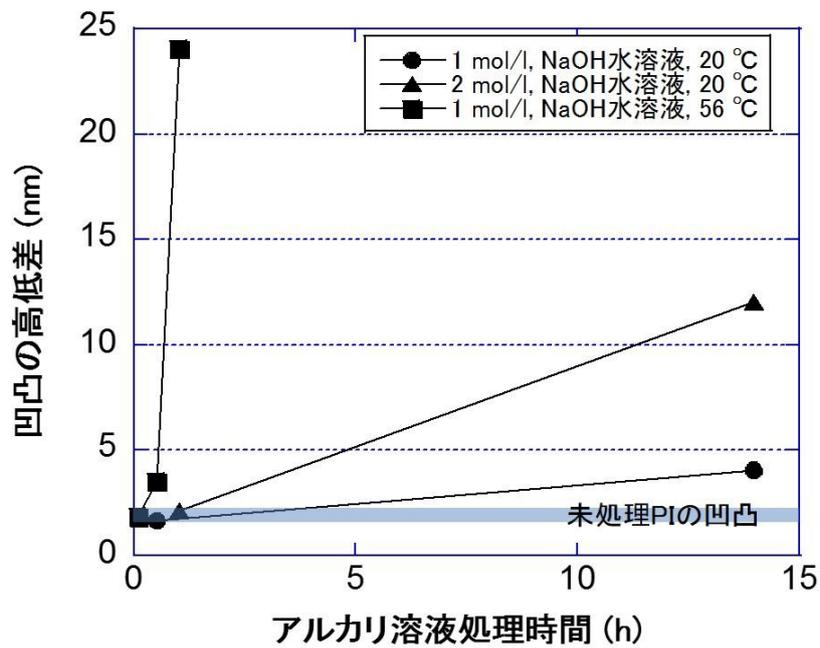


図2 様々なアルカリ処理条件におけるPIフィルムの凹凸高低差の平均値と処理時間の関係

2.4.4.3

ポリイミド系高分子ファイバーの開発
 Development of Fiber Produced by Polymer Containing Polyimide Structure
 畑下昌範*¹
 Masanori HATASHITA

Abstract

It is well-known that aromatic polyimides have found wide applications in many industrial fields due to their excellent thermal stability, high mechanical strength and superior chemical resistance. To development a new polymer fiber, polymers containing polyimide structure have been focused at this time and were synthesized. In this study, aromatic polyimides composed of carboxylic dianhydrides, diamines having sulfonic acid and diamines were used for heating test. The thermal property of these polymers was discussed.

要約

芳香族ポリイミドは、その高い熱安定性、優れた機械的強度および高い耐薬品性といった性質により、工業分野の様々な用途に用いられている高分子である。新しい高分子ファイバーを開発するにあたり、今回このポリイミド構造を有する高分子に着目し、合成を行った。本研究では、カルボン酸二無水物、スルホン酸基を有するジアミン、イオン性基をもたないジアミンからなる芳香族ポリイミドの加熱試験を行った。これら高分子の耐熱性を考察した。

I. 緒言

従来、ポリイミドは、不溶融、溶媒不溶性であるために、ファイバー化は困難であるとされてきた。今までに行ってきた研究から、ポリイミドのモノマーの1つであるジアミンにイオン性基を導入することにより、溶媒への溶解性が変化することが見いだされた。新規なモノマーの組合せによる高分子合成を行い、溶媒溶解性の高い高分子を合成した。今回、その高分子の加熱試験を行い、高分子の耐熱性について考察した。

II. 成果の概要

ポリイミドのモノマーの1つであるジアミンにイオン性基を導入したポリイミドスルホン酸高分子 1 (モノマーは、1,4,5,8-naphthalene-tetracarboxylic dianhydride / 2,2'-benzidinedisulfonic acid / 4,4'-Oxydianiline = 2 : 1 : 1 モル比) を用いて、加熱処理による高分子の重量変化を計測した(図1)。約 100°C 付近である T1 において、数%の重量減少が見られた。これは高分子に含まれる水の蒸発によるものと思われる。次に、約 250°C よりも高い温度 T2 で重量減少が認められ、350°C までに重量は約 10% 減少した。この結果と T2 前後における X 線光電子分光分析においてスルホン酸基由来の元素 S が T2 以上で消失したことから、T2 領域でスルホン酸基の脱離が起こったものと考えられた。このとき、イミド環由来の元素 N や元素 C にはスペクトル上の変化は見られなかった。また、加熱処理後の高分子は有機溶媒に不溶になった。

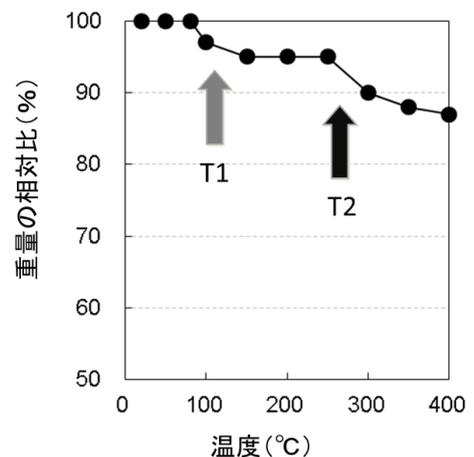


図1 高分子1の加熱処理による重量変化

III. 結言

ポリイミドスルホン酸高分子を合成し、加熱試験を行った。250°C 以上 350°C までの温度範囲において、約 1 割の重量減少が認められ、X 線光電子分光分析の結果と合わせると、この減少はスルホン酸基の脱離によるものと考えられた。よって、合成した高分子は 250°C 以上に加熱することにより、溶媒に不要なポリイミドに変換できることが示された。

*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関西電力株式会社・日本原子力発電株式会社・北陸電力株式会社の 3 社からの受託研究として実施したものである。

2.4.4.4

レアメタルフリー・高強靱性チタン材の開発とその応用
 Development of Rare Metals Free and High Toughness Titanium Materials
 安永和史*¹
 Kazufumi YASUNAGA

Abstract

Microstructure of Ti-0.9 wt%N specimen was examined by TEM. Low density of dislocations and lens-shaped precipitates were formed in the matrix. Analysis of the electron diffraction patterns taken from the matrix and the precipitates showed that the c-plane of the matrix and the precipitates are almost parallel, and the lattice constants of c-axis and a-axis of the precipitates are larger than those of the matrix.

要約

窒素処理チタン(Ti)粉末を放電プラズマ焼結および熱間押出加工により作製した Ti-0.9 wt%N 試料の内部組織を TEM 観察した。結晶粒内には析出物が存在しており、母相との結晶方位関係や格子定数を電子線回折図形の解析により評価した。析出物の c 軸および a 軸の格子定数は母相と比較して増大しており、母相と比較して窒素濃度の高い析出物の可能性が高いことが明らかとなった。

I. 緒言

Ti への添加元素としてレアメタルではなく、酸素(O)や炭素(C)さらには窒素(N)等の軽元素を用い、レアメタル添加材よりも廉価でリサイクル性に優れ、高い強度と延性を併せ持つ軽元素添加 Ti 複合材料を開発してきた。本年度は Ti-0.9 wt%N 試料の結晶粒内に存在する窒化物と考えられる析出物の母相との結晶方位関係や格子定数を TEM 像や電子線回折図形の解析により明らかにした結果について報告する。

II. 成果の概要

窒素強化型 Ti 材、Ti-0.9 wt%N の結晶粒内には低密度の転位線や凸レンズ形状の析出物が存在する。析出物の母相との結晶方位関係や格子定数を電子線回折図形の解析により評価した。その際に用いた電子線の入射条件は $[01\bar{1}0]$ である。図 1(a)は、母相および析出物が含まれる領域から得られた TEM 明視野像および電子線回折図形である。右上がりの棒状の領域が析出物である。母相の c 面は紙面に水平で線分上に $(0002)_{\text{Matrix}}$ と表示している。点線にて析出物の長軸の方向も示しており、母相の c 面から約 19° 右上がりに傾斜している。図 1b は、図 1(a)の破線で囲まれた母相と析出物の境界を含む矩形領域から得られた高分解能像である。母相と析出物は c 面がほぼ平行な状態で積層していることがわかる。

図 2 は、母相および析出物からの回折斑点を指数付けした電子線回折図形である。緑および橙色の直線は、母相および析出物の回折斑点上を通るよう引いた補助線である。緑および橙色の長方形は 0000 、 0002 、 $2\bar{1}\bar{1}\bar{2}$ および $2\bar{1}\bar{1}0$ の 4 つの回折斑点から構成されており、下付文字の Matrix および Pre. はそれぞれ母相および析出物からの回折斑点であることを表している。 $0002_{\text{Pre.}}$ はこの写真では 0002_{Matrix} の強度が高く分離できていないため表示していない。補助線および長方形の配置から、析出物は母相から低角度ではあるが時計方向に傾いていること、析出物の長方形のサイズが母相のそれと比して小さいことから、析出物の格子は母相よりも膨張していることが分かる。詳細な解析により、この析出物は母相の c 面に対して約 1.2° 回転しており、析出物の c 軸と a 軸の格子定数は母相とそれらと比較してそれぞれ 5.3%および 5.0%増大していると評価された。

次に、析出物の長軸方向(最大成長方向)について議論する。母相の c 面からある傾斜角度をもって析出物の長軸が成長する場合、母相の c 面に対して鏡像関係となる傾斜角度正および負の成長方向は等価と考えられる。そこで個々の析出物の長軸の長さおよび長軸の母相の c 面に対する傾きの関係を調べた。図 3(a)は析出物の TEM 暗視野像である。大小様々なサイズの水平線からやや傾きをもった細長い白いコントラストが析出物である。図 3(b)は総数 60 個の析出物の長軸の長さおよび長軸の母相の c 面に対する傾きの関係を示したグラフである。ここで、析出物の長軸の母相の c 面に対する角度を、母相の c 面に対して右上がりを正(例:析出物 A)、右下がりを負(例:析出物 B)の角度と定義した。長軸の長さは 6~302 nm、長軸の母相の c 面に対する傾斜角は $-27\sim+38^\circ$ の範囲に角度 0° の垂直軸に対してほぼ線対称にデータが分布している。具体的には角度が正の析出物は 35 個、負のものは 25 個と約半数のデータが正と負の値をもち、析出物の母相の c 面に対

*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された。

する正負の成長方向の等価性が確認された。傾斜角の多様性は、析出物のその長短軸方向への成長比率の違いに基づくと考えられる。

III. 結言

5 年間の研究期間に軽元素として、O、C および N を純 Ti に添加した複合材料を作製し、全ての添加元素による Ti 複合材料において目標とする機械的特性、引張り強度 1000 MPa 以上、延性 20%以上を実現した。Ti の母相には添加元素は完全には固溶しておらず、nm サイズの酸化物、炭化物、窒化物という形態で析出していることが明らかとなった。析出物の存在は転位の移動抵抗となり析出強化に寄与していると考えられるが、母相と析出物の界面での破壊や析出物の異方的な形状による不均一変形が誘起される可能性がある。析出物の形成を抑制した Ti 複合材料の作製条件を見いだすことにより機械的性質をさらに改善する可能性があると考えられる。

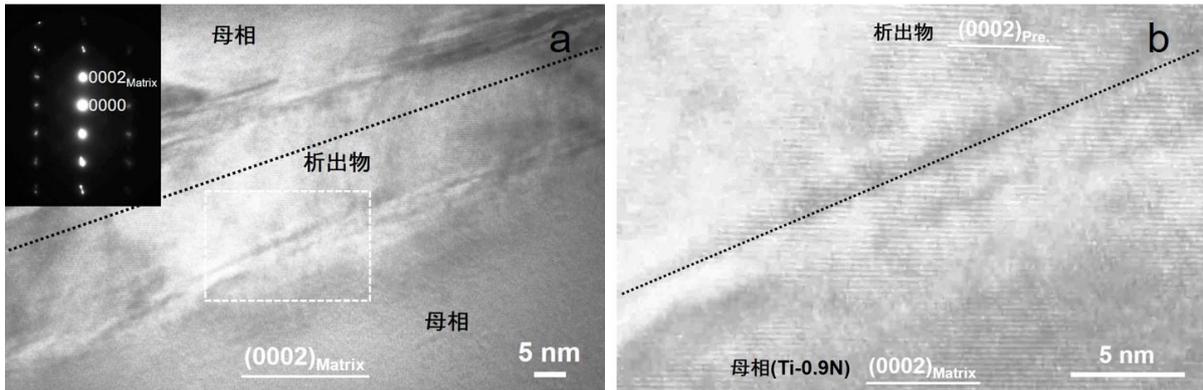


図 1 Ti-0.9 wt%N 試料に形成された析出物と母相を含む領域の TEM 明視野像および電子線回折図形(a)、析出物と母相の境界を含む領域(a の破線矩形領域)の高分解能像(b)。

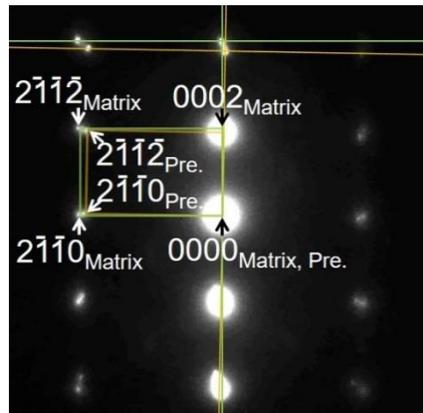


図 2 Ti-0.9 wt%N 試料に形成された析出物および母相を含む領域の電子線回折図形。

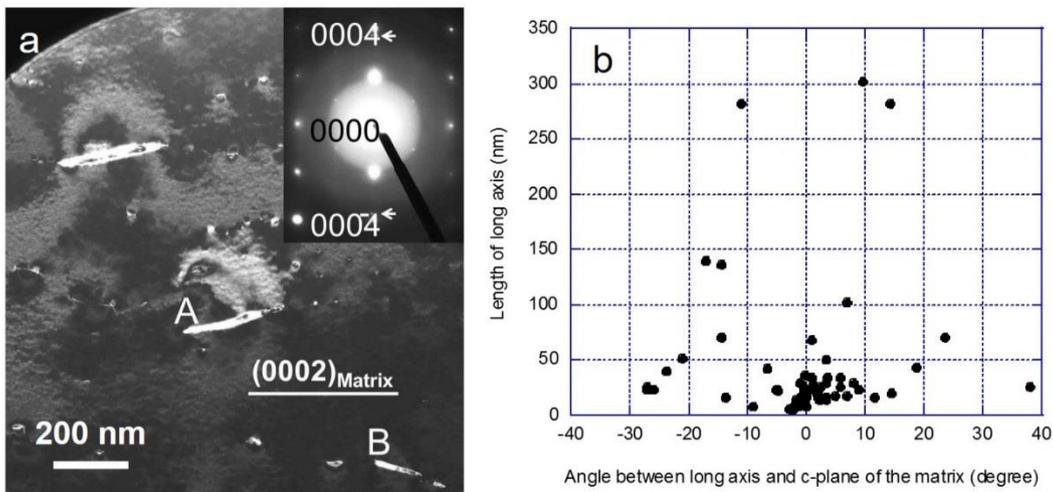


図 3 Ti-0.9 wt%N 試料に形成された析出物の TEM 暗視野像(a)、および析出物の長軸長さと長軸の母相の c 面からの角度の関係(b)。

2.4.4.5

超高純度金属の精製研究
Preparation of Ultra Pure Alloy
西尾繁*1
Shigeru NISHIO

Abstract

To prepare cheap ultra pure stainless steel the alternative purification method which uses alumina crucible and magnesia powder is examined. More than 50 percent of impurity in stainless steel was removed by this method.

要約

高純度ステンレス鋼を安価に製造するために、アルミナるつぼとマグネシア粉末を用いた新しい精製法を試した。実験の結果、高真空雰囲気で 50%以上の不純物を除去することが出来た。

I. 緒言

原子力発電プラント等で使用される金属材料には、高温腐食、磨耗、応力腐食割れ、照射誘起応力腐食割れ等に対する高い耐久性が求められる。金属の耐久性を向上させるための有効な手法の一つが「高純度化(不純物元素を可能な限り除去すること)」で、既に様々な金属で高純度化が試され、耐久性の向上が実証されている。ステンレス鋼もその一つで、原子力施設構造材用途の高純度ステンレス鋼が既に開発されている。

現行の超高純度ステンレス鋼は2段階の高純度化工程を経て製造されている。1段目の工程では熔融金属原料を電磁氣的に浮遊させるため、2段目の工程では電子ビームを利用するために、超高純度ステンレス鋼の製造コストは極めて高い。もし安価に高純度ステンレス鋼を製造することが出来れば、優れた特性を持つ高純度ステンレス鋼の利用分野が大きく広がると期待される。

II. 実験と結果

今回高純度化実験に用いた原料は市販のステンレス鋼(SUS316L)丸棒である。これを高純度マグネシア粉末を充填したアルミナるつぼ中に埋没させて、高周波加熱熔融精製した。精製雰囲気は高真空及び減圧 He である。熔融時間は1時間程度とした。精製処理したステンレス鋼中に残留する不純物元素はグロー放電質量分析(GD-MS)と脱ガス分析(IGA)を組み合わせで定量した。

実験の結果、高真空雰囲気で 50%以上の不純物を除去できることが分かった(図1)。

III. 結言

アルミナるつぼとマグネシア粉末を用いた簡便な精製法で、ステンレス鋼中に含まれる不純物のうち 50%以上を除去することができた。実用の目安となる 90%以上の不純物除去率にはまだ開きがあるが、C、N を簡便かつ効率的に除去出来ることから、本事業で開発した方法は新しいステンレス鋼の精製方法として非常に興味深いものといえる。

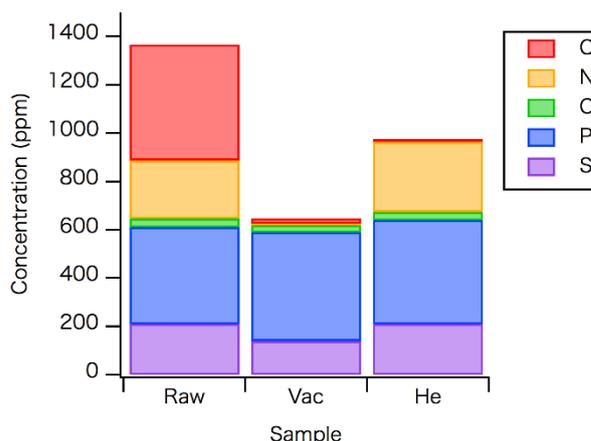


図1 熔融条件と残留元素濃度合計の関係(Raw; 未処理、Vac;高真空雰囲気、He;減圧 He 雰囲気)

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー開発グループ

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。

2.4.4.6

高性能高分子のカプセル化

Encapsulation of High Functional Polymer

伊東富由美*1、山ノ井航平*2、久米恭*1、乗松孝好*2

Fuyumi ITO, Kohei YAMANOI, Kyo KUME, Takayoshi NORIMATSU

Abstract

Stress Corrosion Cracking (SCC) sometimes occurs in the heat exchanger pipes of aging nuclear power plants. Magnetic particle Testing (MT) is used to facilitate visual observation on SCC. We manufactured a capsule of high functional polymer to apply a capsule to a heat transfer pipe.

要約

耐放射線物質であるポリイミド溶液を用いたカプセル化の基礎検討を行った。ポリイミド溶液と類似構造を持つ66ナイロン樹脂球のみが被膜された。カプセルに内包される樹脂球の材質によりポリイミド溶液の被膜状態が異なることを確認した。

I. 緒言

非破壊検査の一つに、複雑な形状および深さが数ミクロンの微小欠陥を検出することが可能な磁粉探傷試験(Magnetic Particle Testing : MT)があり、この MT は欠陥内部に磁粉が入込む可能性があり、MT により検出した欠陥を補修する場合、欠陥に入り込んだ磁粉の除去が不可欠となる。これまでに、磁粉と蛍光色素をマイクロカプセル(MC)に内包する技術を開発してきた。磁粉内包蛍光 MC を用いた MT を軽水炉の熱交換器に適用させる場合、放射線の影響を考慮すると、MC の壁膜物質を耐放射線物質にする必要がある。そこで本研究では、耐放射線性を有するポリイミド溶液を用いた高性能高分子 MC の作製手法を検討した。

II. 成果の概要

MC 作製法には化学的方法、物理的・化学的方法、機械的方法があり、蛍光磁粉内包 MC は物理化学的方法を用いた。物理化学的方法とは水相(W)に油相(O1)を分散させ O1/W を作製する。その後、別の油相(O2)に注入し攪拌すると、O1/W は O2 に分散される。この時に温度を高くすると、W 相の溶液が蒸発し、MC 壁を形成する物質の濃度が濃くなり、最終的に MC 壁が形成される。本研究では O1 として、66ナイロン樹脂球(PA66)・ポリプロピレン樹脂球(PP)・ポリアセタール樹脂球(POM)、W としてポリイミド溶液¹⁾、O2としてシリコーンオイル(KF-96 10cst)を用いた。

PA66 をポリイミド溶液に入れて、PA66 表面をポリイミド溶液で覆った。その後、攪拌棒の回転速度が 123 rpm の O2 中に PA66 を入れて、60°C で 1 時間加熱攪拌を行った。加熱攪拌後、O2 からポリイミド溶液で覆われた PA66 を取り出し、直径 100 μm の穴あけを行った。その後、ポリイミドの被覆 PA66 をギ酸の中に入れて PA66 のみを溶解させ、ポリイミド球を作製した。PP および POM についても同様に行った。その結果、PA66 表面は全体をポリイミドのみ被覆された。PP (化学式: $(\text{CH}_2\text{CHCH}_3)_n$) は、主鎖が炭素のみである。また PA66 (化学式: $[\text{CO}(\text{CH}_2)_4\text{CONH}(\text{CH}_2)_6\text{NH}]_n$) および POM (化学式: $(\text{CH}_2\text{O})_n$) は、主鎖が炭素以外の構造であることが特徴である。PA66 の化学式は 4,4'-ジアミノジフェニルエーテルの化学式と類似であり、加熱攪拌中に PA66 のアミノ基とピロメリット酸のエーテル基が反応し、PA66 の表面全体がポリイミドで被覆したと考えられる。

III. 結言

ポリイミドの類似構造である PA66 球の表面はポリイミド膜で被覆することを確認した。今後、PA66 の直径を制御しポリイミドカプセルを作製する。また、磁粉を混入した PA66 を作製し、この PA66 表面にポリイミド溶液を覆い加熱攪拌を行うことで磁粉が内包したポリイミドカプセルを作製することが可能となる。

参考文献

- 1) 大阪大学レーザーエネルギー学研究所共同研究成果報告書, 2015B2-08, 2015

*1 (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、*2 大阪大学・レーザーエネルギー学研究所
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大阪大学との共同利用・共同研究として実施した。

2.4.4.7

収差補正機能付き分析電子顕微鏡による構造材料の高精度定量分析

The Quantitative Analysis of nm-sized Defects in Structural Materials with Cs-corrected STEM

安永和史*¹、渡邊英雄*²

Kazufumi YASUNAGA and Hideo WATANABE

Abstract

Fully annealed Zircaloy-2 specimen was examined by Scanning Transmission Electron Microscopy (STEM), TEM and STEM-EDS (Energy Dispersive Spectroscopy). Microstructure consists mainly of precipitates whose diameters range from 2 to 800 nanometers. STEM-EDS analysis revealed their compositions to be $Zr_2(Fe, Ni)$ and $Zr(Fe, Cr)_2$.

要約

ジルカロイ 2 の焼鈍材の微細組織について STEM (Scanning Transmission Electron Microscopy) および TEM 観察、さらには STEM-EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) による元素分析を行った。ジルカロイ 2 の焼鈍材の微細組織は圧延により導入された転位はほとんど存在せず、析出物の形成が主であった。STEM-EDS 分析により析出物には 2 種類の存在が確認され、それぞれ組成は $Zr_2(Fe, Ni)$ および $Zr(Fe, Cr)_2$ であると同定された。

I. 緒言

ジルコニウム (Zr) は熱中性子吸収断面積が小さく高温高压水中で耐食性が高い等の性質をもつ。Zr を母相とし、その性質 (機械的特性、耐酸化性、耐食性) の改善を目的として様々な元素 (Fe, Cr, Ni, Sn) が添加された Zr 合金が開発されており、その一種であるジルカロイ 2 は沸騰水型の軽水炉 (BWR) の燃料被覆管材料として用いられている。ジルカロイ 2 は高燃焼度において脆化することが知られており、照射欠陥や析出物と水素吸収との関連が指摘されている。そこで重イオン照射後に水素を注入する模擬実験により欠陥形成と脆化との関連を明らかにする調査を計画している。本年度は、まず重イオン照射前のジルカロイ 2 焼鈍材の微細組織について調査した結果を報告する。

II. 成果の概要

試料はジルカロイ 2 であり、製造時の化学組成を表 1 に示す。上段は Zr への添加元素、中段および下段は不純物元素である。試料は 3 mm 厚の板状のジルカロイ 2 を 0.1 mm 厚に圧延後、3 mmφ のディスク形状に打ち抜き TEM 観察用の形状に加工した。焼鈍前にはクロム酸 25 g、リン酸 202 ml、精製水 40 ml からなる電解液を用いて、液温室温、電圧 15 V の条件で電解研磨した。焼鈍条件は、真空度 3.0×10^{-4} Pa、温度 630 °C、2 h である。焼鈍後の試料は、メタノール 950 ml、過塩素酸 50 ml からなる電解液で TenuPol-5 を用いてツインジェット研磨法により薄膜化した。研磨条件は、液温 7 °C、液流量 29、電圧 24 V、電流 165~180 mA、光感度 30 で、薄膜化までの時間は約 20 s であった。試料の微細組織の観察には TEM (JEM-3000F) を用いた。加速電圧は 300 kV である。STEM (Scanning Transmission Electron Microscopy) および TEM 観察、さらには STEM-EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) により元素分析を行った。

ジルカロイ 2 焼鈍材の微細組織は圧延により導入された転位はほとんど存在せず、析出物の形成が主な状態であった。そこで形成された析出物を分類した結果について記す。図 1-1 は 5 つの析出物を含む領域の STEM 明視野像である。a および b と印した長軸約 260 nm の楕円形状および直径約 125 nm の球状の析出物が存在している。析出物 a には破線で囲んだ長軸約 100 nm の析出物が付着したように存在している。この析出物のコントラストは析出物 a および b よりも若干低い。同様のコントラストの低い粒径約 26 nm および 27 nm の塊状の析出物も破線囲みで示した。これらの析出物を構成する元素を明らかにする STEM-EDS マップを図 1-2 に示す。析出物 a および b は Zr, Fe, Ni を含んでおり、特性 X 線強度の解析から Zr, Fe, Ni の割合がほぼ 4:1:1 の $Zr_2(Fe, Ni)$ であると同定された。一方、図 1-1 中に破線囲みで示した 3 つの析出物は、析出物 a および b の Ni に替わり Cr を含み、Zr, Fe, Cr の割合がほぼ 1:1:1 の $Zr(Fe, Cr)_2$ であると同定された。析出物 a の近傍に存在する $Zr(Fe, Cr)_2$ には図 1-2 の Cr のマップ中に矢印を付けている。この $Zr(Fe, Cr)_2$ は析出物 a の外周に沿うような形状であることから、 $Zr_2(Fe, Ni)$ の析出後にその近傍に析出したと考えられる。この析出物の形成順序を示

*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九州大学応用力学研究所との共同研究として実施した。本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けた。

唆する析出物の分布は他の領域でも確認された。図 2 は Ni(青)および Cr(赤)の分布を示す STEM-EDS マップの重ね合わせ像である。青で表示された長軸約 740 nm の粗大な $Zr_2(Fe, Ni)$ の周囲に、赤で表示された角張った 40~140 nm の $Zr(Fe, Cr)_2$ が複数析出しており、先の析出順序を支持する結果である。

ジルカロイ 2 には $Zr_2(Fe, Ni)$ および $Zr(Fe, Cr)_2$ であると同定された析出物に加えて、高密度で微細な析出物も確認された(図 3)。現時点では析出物を構成する元素は未同定であるが、黒い点状のコントラストを呈する粒径約 2~3 nm の微小析出物である。これらの微小析出物は電子線照射下で特徴的な挙動を示した。図 4 は粒径約 2 nm の 2 つの析出物が存在する領域の TEM 明視野像である。矢印で示した析出物は左斜め上方向に約 1 nm 位置が変化している。さらに、2 つの析出物ともに形状も変化していることが確認される。粒径約 10 nm の微小な析出物が中性子照射後のジルカロイ 2 の 3 次元アトムプローブ分析により確認されており Fe および Cr のクラスターと同定されている¹⁾が、熱処理のみでも形成される可能性が指摘される。

III. 結言

ジルカロイ 2 焼鈍材には、 $Zr_2(Fe, Ni)$ 、 $Zr(Fe, Cr)_2$ および微小析出物の 3 種が存在することが明らかとなった。今後、加速器を用いた重イオン照射による損傷組織の発達過程と水素脆化との関係について調査する予定である。

参考文献 1) 電力中央研究所報告書 L11021, 2011.

表 1 製造時のジルカロイ 2 の化学組成

	Sn		Fe		Cr		Ni		O		Zr
wt.%	1.20-1.70		0.07-0.20		0.05-0.15		0.03-0.08		0.07-0.15		Bal.
ppm	H	C	N	Mg	Al	Si	P	Cl	Ti	V	<20
ppm	25	270	80	20	75	120	30	20	50		
ppm	Mn	Co	Cu	Nb	Mo	Cd	Hf	Ta	W		
ppm	50	20	50	<50	<10	0.5	100	<100	100		

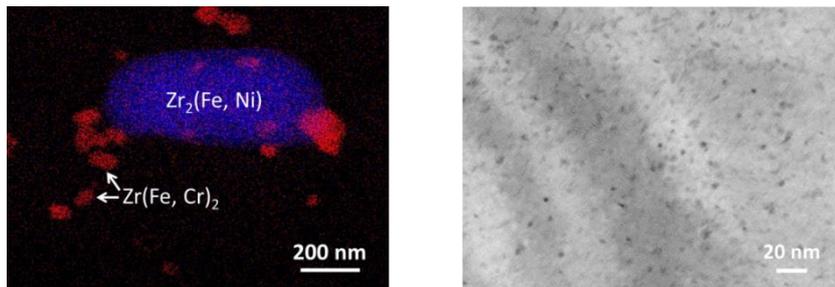


図 1 ジルカロイ 2 焼鈍材の STEM 明視野像(1)および STEM-EDS マップ(2)

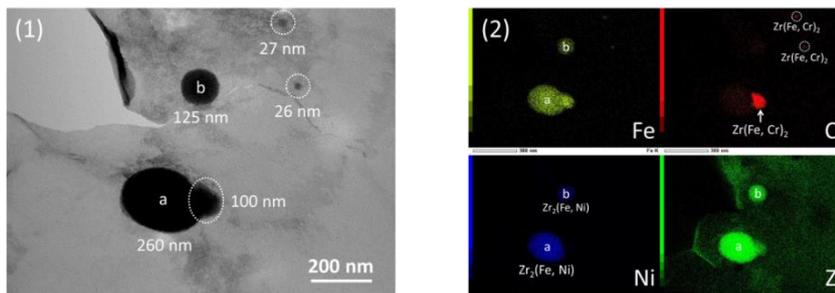


図 2 Ni(青)と Cr(赤)分布を示す STEM-EDS マップ 図 3 微小析出物の STEM 明視野像

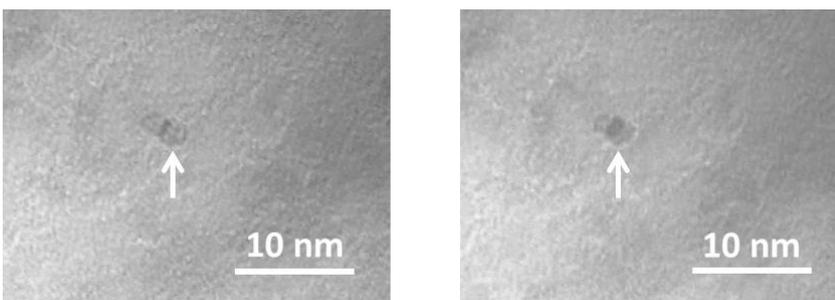


図 4 電子線照射下での微小析出物の可動性および形状変化を示す TEM 明視野像

2.4.4.8

イオンビーム励起反応場を利用した鉄ロジウム合金の磁気改質技術開発
Modification of Magnetic Properties of FeRh Alloy by Using Energetic Ion Beam

岩瀬彰宏*1、松井利之*2、鶴野浩行*3、斎藤勇一*4、佐藤隆博*4、石神龍哉*5

Akihiro IWASE, Toshiyuki MATSUI, Hiroyuki UNO, Yuichi SAITOH, Takahiro SATOH and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

By using the relationship between the irradiation-induced magnetization and the depth profile of the deposited energy, we estimated the magnetic structure of ion irradiated FeRh as a function of the depth.

要約

イオン照射誘起磁化とイオンによる付与エネルギーの相関および SRIM コードを用いて計算した付与エネルギーの深さ分布を使って、He イオン照射した鉄ロジウムバルク試料における深さ方向の磁化変化を評価した。

I. 緒言

今までの研究により、鉄ロジウム合金は、イオン照射を行うことにより、本来の反強磁性から強磁性、非磁性と磁氣的性質が変化することが分かった。このことを利用して、本研究では、鉄ロジウム試料の深さ方向への磁気変調構造を作製することを試みた。

II. 実験と解析方法

鉄ロジウムバルク試料を 2 MeV He イオンで照射し、イオンと鉄ロジウムとの弾性的相互作用によって与えられるエネルギーと照射誘起磁化との関連を調べた。一方、計算コード SRIM により、鉄ロジウムの深さ方向へのエネルギー付与を評価した。これら 2 種類のデータを用いることにより、鉄ロジウムの深さ方向へ、どのような磁気構造が発現しているかを評価した。

III. 実験結果と考察

図1に 2 MeV He を $1.4 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 照射量したときの予測される飽和磁化分布を示す。表面から $2.8 \mu\text{m}$ までは強磁性層、そのあと付与エネルギーが大きくなるため、300 nm 厚の非磁性層が現れ、さらに深いところで 200 nm 厚の強磁性層、そしてその背後に反強磁性層が発現すると評価された。強磁性、非磁性、強磁性、反強磁性からなる磁気多層構造は、交換バイアス発現のための必要条件である。

IV. 結言

イオン照射を利用して、鉄ロジウム合金の深さ方向へ磁気変調構造を作製することが可能になった。さらに照射条件を最適化することにより、トップダウン方式で鉄ロジウム中にいろいろな多層磁気構造を作成し、磁気デバイスへ応用する可能性が開けたといえる。

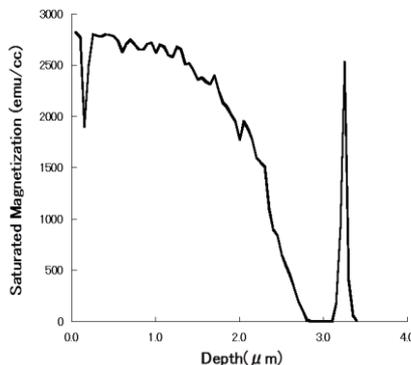


図1 2 MeV He を $1.4 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 照射したときの予測される飽和磁化の深さ依存性。

*1 公立大学法人・大阪府立大学・工学研究科、*2 公立大学法人・大阪府立大学・21 世紀科学研究機構、*3 住重試験検査株式会社、*4 (国研) 日本原子力研究開発機構(現、量子科学技術研究開発機構)、*5 (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部
本研究は、(公財) 若狭湾エネルギー研究センターと大阪府立大学、住重試験検査株式会社、(国研) 日本原子力研究開発機構との公募型共同研究として実施した。

2.4.4.9

新材料を用いた超小型レーザビーム走査ミラーの作製とそれを用いた眼鏡型ディスプレイの実現
 Laser Beam Scanning Mirrors composed of a New Material and its Application to Eye-Wear Displays
 勝山俊夫*¹、石神龍哉*²、寺田恵一*³、慶光院利映*⁴、岩堀一夫*⁵、福村康和*⁶

Toshio KATSUYAMA, Ryoya ISHIGAMI, Keiichi TERADA, Yoshiteru KEIKOIN, Kazuo IWAHORI and
 Yasukazu FUKUMURA

Abstract

A prototype of the laser beam scanning MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) mirror has been fabricated using new Fe-Pt magnetic thin films. These mirrors can be applied to the eye-wear image displays.

要約

眼鏡型レーザ・ディスプレイの実現を目標に、新磁性材料である Fe-Pt 磁性薄膜を用いて画像生成用レーザビーム走査 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) ミラーのプロトタイプを作製した。

I. 緒言

近年、映像端末としてのディスプレイ分野の発展は著しく、とくに画像を網膜へ直接投影する眼鏡型のディスプレイは、今後大いに発展すると期待されている¹⁾。この実現のためには、カラー画像を得るための三原色レーザ光源と、それから出射する三本のレーザビームを一本にする合波器^{2,3)}、およびレーザビームを 2 次元に走査する走査用 MEMS ミラーを一体化した「光学エンジン」の超小型化が課題となっている。

ここでは、この「光学エンジン」の基幹部品である走査用 MEMS ミラーとして電磁駆動型を採用し、新材料である Fe-Pt 薄膜⁴⁾を用いて MEMS ミラーを実際に作製した結果を報告する。

II. 実験方法と実験結果

MEMS ミラーの超小型化を目的に、1) Fe-Pt 磁性薄膜の作製と最適化、2) MEMS ミラーの構造と作製プロセスの最適化、および 3) MEMS ミラープロトタイプの作製の 3 項目について検討した。以下項目ごとに検討結果を示す。

1. Fe-Pt 磁性薄膜の作製と最適化

電子ビーム加熱蒸着法で成膜し、その後、赤外線加熱装置でアニーリング(650℃で 15 min.)して Si 基板上に作製した Fe-Pt 薄膜の膜厚は 142 nm、組成は Fe が 56%、Pt が 44%であった。この薄膜の代表的な磁気ヒステリシス曲線を図 1 に示す。図から分かるように、面内方向保磁力は、10 kOe 程度のものが得られ、この値は、よく知られているフェライトより 3~4 倍と大きい。また、残留磁化は、0.8 Tesla 程度のものが得られ、永久磁石として Fe-Pt 薄膜は使用可能であることが示された。

また、Fe-Pt 薄膜への着磁を磁場強度 5 Tesla で行った。この結果、着磁した試料が外部磁石からの反発力を受けたことから、Fe-Pt 薄膜が実際に永久磁石化していることを確認することができた。

2. MEMS ミラーの構造と作製プロセスの最適化

MEMS ミラーの可動ミラー部分形成のための構造と微細加工プロセスの最適化検討を行った。Si 基板上に、光ビーム走査用可動ミラーと、それを自由に傾けることのできる機構を形成するために、(i) 可動ミラー部分の構造最適設計として、CAD (Computer Aided Design) 技術を援用した設計を行った。また、(ii) 可動ミラー部分の作製プロセスの設計とプロセス条件の最適化を、従来の MEMS ミラー作製プロセスを参考にして行った。

その結果、最終目標であるディスプレイのピクセル解像度が XGA (1024×768 ピクセル) にするためのミラーの大きさは、500×300 μm となり、この設計した構造の作製プロセス条件の最適化を行った結果、図 2 に示すように、電磁方式 MEMS ミラーの可動ミラー部分を再現性良く作製することができた。

*¹福井大学産学官連携本部、*²(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*³ケイ・エス・ティ・ワールド株式会社開発部、*⁴株式会社メムス・コアビジネス推進本部、*⁵株式会社シャルマン製造部、*⁶小松電子株式会社商品部
 本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと福井大学、ケイ・エス・ティ・ワールド株式会社、株式会社メムスコア、株式会社シャルマン、小松電子株式会社との公募型共同研究として実施した。

3. MEMS ミラープロトタイプ of 作製

まず、眼鏡型ディスプレイの画像形成に必要な超小型レーザビーム走査ミラーに関して、ビーム振れ角の最適化、モジュールのビーム照射部に設置するコリメートのための集光レンズの形状、焦点距離、設置位置等の最適化を、光線追跡シミュレータ(ZEMAX_OpticStudio)を用いて行った。その結果、ビーム振れ角として、30 deg. (± 15 deg.) あれば、十分な視野角で大画面を形成できることが示された。また、合波光源からの光ビームが MEMS ミラーでどのように反射されるかを検討した。レンズを用いて出射したレーザビームの拡がり角を 6 deg. 程度にできれば、出射ビームとミラーの基準角が 45 deg. の場合でかつ、出射端とミラーとの距離が 2.9 mm 以下の場合、合波光源と MEMS ミラーとの光結合が 80% 以上の高効率でできることが示された。

以上の最適化のもと、MEMS ミラープロトタイプは、自作のソレノイド・コイルと実際に作製した可動ミラー部を組み合わせて形成した。形成した MEMS ミラープロトタイプの写真を図 3 に示す。図から分かるように、サイズが $5 \times 5 \times 3$ mm の超小型 MEMS ミラーが実現していることが分かる。図 4 は、このミラーに実際にレーザビームを照射して、反射した光をスクリーン上に投影したものである。図から分かるように、縦方向に目標の 30 deg. のビーム振れ角が得られている。このときの動作電圧は、2 V と低電圧動作も達成されている。

III. 結言

Fe-Pt 磁性薄膜を用いることにより、2 次元走査が可能で、サイズが $5 \times 5 \times 3$ mm と超小型の MEMS ミラーを実現した。このサイズは、従来の電磁駆動型 MEMS ミラーのサイズに比べて、1 桁程度低減されており、コイルの小型化が更に達成できれば、より小型にすることが可能である。また、動作電圧として 2 V の低電圧動作も達成できた。ミラーのサイズに関しても、 0.5×0.3 mm の小型化が達成できており、今回作製した電磁駆動型 MEMS ミラーを用いて、眼鏡型ディスプレイを実現できる目処を立てることができた。

参考文献

- 1) B. Kress, Frontiers in Optics 201, San Jose, USA, FTu2C.1 (2015)
- 2) A. Nakao et al., Opt. Commun. 330, 45-48 (2014)
- 3) A. Nakao et al., The 22nd International Display Workshops (IDW '15), Otsu Prince Hotel, Otsu, Japan, PRJp1-5L (2015)
- 4) R. Ishigami, C. Batchuluun, and K. Yasuda, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 275, 58-62 (2012)

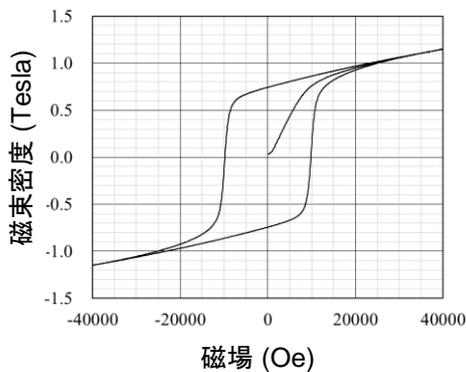


図 1 作製した Fe-Pt 膜の磁気特性

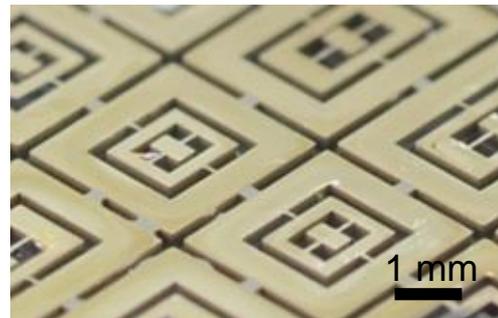


図 2 作製した可動ミラー部分

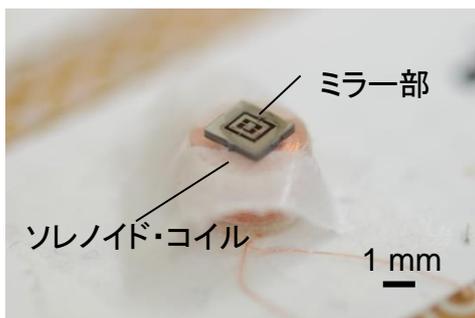


図 3 形成した MEMS ミラープロトタイプ

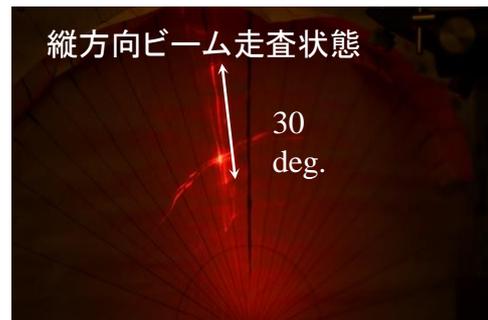


図 4 レーザビーム走査特性

2.4.4.10

磁場中凝固による高アスペクト比・規則化ロータスメタルの製法開発と機能材料への応用
Development of a Fabrication Method of High-Aspect-Ratio Lotus Metals Solidified under High Magnetic Field and Application to Functional Materials

安永和史*1、山岸隆一郎*2、中嶋英雄*3

Kazufumi YASUNAGA, Ryuichiro YAMAGISHI and Hideo NAKAJIMA

金属の熔融状態と凝固状態の水素の溶解度差を利用して一方向凝固によって気孔が一方向に揃ったロータス(レンコン)型ポーラス金属を作製することができる。固相から吐き出された水素が固液界面で濃化して固相の気孔の形成源として供給されるならば、気孔の成長は持続して長い気孔が形成されるはずであるが、液相中では重力の影響を受けて対流が起こっている。その結果、濃化するはずの水素が対流によって液相中に広く拡散してしまい、凝固する固相内の気孔の成長に寄与しなくなってしまう。本研究では10テスラの強磁場を金属の溶解凝固過程に印加して融液の対流を抑制し大きなアスペクト比を有するロータス金属を創製することを目的とした。グラファイト坩堝にマグネシウム(純度99.9%)素材を挿入し、超電導マグネットのボア内に設置した連続铸造装置を用いて無磁場および定常強磁場10テスラにおけるロータスマグネシウムの作製実験を行った。所定の加圧水素雰囲気下でマグネシウムを溶解し600sの間、所定の温度にした後、アクチュエーターによりトランスファーロッドを所定の一定速度で下方に移動させることによって一方向凝固を行わせた。作製されたマグネシウム鑄塊ロッドはワイヤーカット放電加工機で切断後、断面観察を行った。また、X線CTスキャナーにより鑄塊ロッド内の気孔形態を非破壊的に観察した。さらに、アルキメデス法によりロータスマグネシウムの密度を測定し気孔率を評価した。気孔形態を詳細に観察した結果、強磁場による気孔形態の顕著な相違を見出すことができた。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・企画支援広報部・技術相談室、*3(公財)若狭湾エネルギー研究センター・所長
本研究は、JSPS 科研費 25249107 の助成を受けた。

2.4.4.11

局所加熱プロセスを与えた水素イオン注入剥離欠陥の観察
Effects of Localized Annealing on Damaged Layer Caused by Hydrogen Ion Implantation

岩田博之*1、石神龍哉*2

Hiroyuki IWATA and Ryoya ISHIGAMI

I. 緒言

高ドーズ水素イオン注入されたシリコン(Si)ウェハを加熱すると表面にブリストリングや剥離が発現することが知られる。ここでは加熱プロセスにおいて局所的に高温を与えることにより、ブリストリングあるいは剥離の形成効率の向上を目指している。そのとき内部に生成する欠陥層の様子を透過型電子顕微鏡(TEM)により明らかにした。

II. 内容

試料にはSi単結晶を用いている。イオン注入由来のボイド内残留ガスの放出と加熱により発生する膨張力が原動力となり、表面が局所剥離する。この時赤外レーザを表面に集光し局所加熱を併用するとイオン注入層が多数のボイドを形成し断熱効果を発揮し表面層のみが融点近くまで加熱される。このとき局所的な熱膨張に伴う内部応力とイオンガスによる剥離の相互作用により多数の転位が形成されることがわかった。図1は加熱後の剥離の端部の断面TEM像である。なお、剥離面積およびブリストリングの高さは局所加熱を使用しないときに比べ1~2桁大きくなっていることが確認できた。

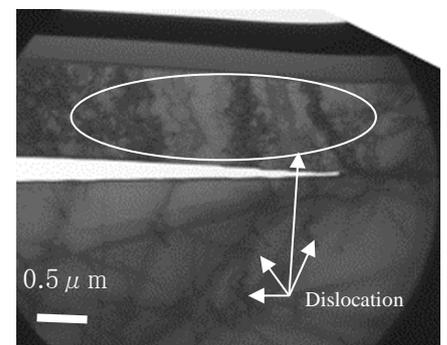


図1 溝加工部の断面TEM像

*1愛知工業大学・工学部・電気学科、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと愛知工業大学が共同研究として実施した。

2.4.4.12

ナノ複合めっきに析出した粒子の微視的評価

Distribution of Nanometer-Sized Diamond Particles Dispersed into the Ni Plating

安永和史*1、佐々木達也*2

Kazufumi YASUNAGA and Tatsuya SASAKI

材料表面に耐摩耗性や高摺動性(低摩擦性)をはじめとした種々の性能を付加する機能性めっきとして、ナノダイヤモンドやカーボンナノチューブ(CNT)、ポリテトラフルオロエチレン(PTFE)等のナノ粒子を複合した無電解ニッケル-リンめっきに関する研究を行っている。めっきのマトリックスであるニッケル-リン合金中におけるナノダイヤモンドは、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた表面観察により粒径数百 nm の塊状の黒いコントラストとして確認されており、これらが添加したナノダイヤモンドに起因したものとすると、そのマトリックス中での存在状態は単分散ではなく凝集状態ではないかと考えている。本研究では様々なめっき条件で分散状態の異なるナノ複合めっき試料を作製し、透過型電子顕微鏡(TEM)等を用いてナノ粒子の分散状態を評価し、ナノ複合めっきの作製技術の確立に寄与することを目的とした。使用したナノ粒子は不定形で塊状のメジアン径 50 nm のナノダイヤモンドである。無電解 Ni-P めっき液中に添加剤を用いてナノダイヤモンドを分散させ、SUS304 の板材に 14.7 μm の膜厚でめっきした試料を作製した。TEM 観察のために SUS304 の領域からアルミナ懸濁液を用いたディンプル加工および 6 kV の Ar^+ を用いたイオン研磨により背面研磨し、めっき領域を薄膜化した。マトリックス中には、ナノダイヤモンド粒子が単分散したものや 2~5 個の集合体を形成したものが存在しており、凝集したものが多くことが明らかとなった。集合体は 100~200 nm の大きさであり、SEM により表面において観察された塊状粒子は表面近傍に存在するナノダイヤモンドの集合体であることが確認された。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*2アイテック株式会社・新事業開発本部
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターとアイテック株式会社との共同研究として実施された。

2.4.4.13

フレキシブル導電材料のための金属皮膜の耐久性向上に関する調査研究

Auger Analysis of Surface Metal Layer on a Flexible Material

安永和史*1、野坂敬之*2、辻本和久*2

Kazufumi YASUNAGA, Takayuki NOSAKA and Kazuhisa TSUJIMOTO

近年、医療介護・ヘルスケア・スポーツ等の分野で、ウェアラブルデバイスの開発が注目されており、密着性が高くフレキシブルな導電材料へのニーズが高まっている。そこで、ニッケル(Ni)や銅(Cu)めっきに加えて、はんだ濡れ性に優れたスズ(Sn)や展延性の高い銀(Ag)のめっき皮膜に着目し、ウェアラブルデバイスやモバイルデバイスに求められているフレキシブル性と高い耐久性を有する導電材料の開発を目指している。本年度はポリイミドフィルム上に Cu をめっきし、さらに Sn めっきを施した 3 層構造のフレキシブル導電材料に関わる研究を行った。3 層構造フィルムには直径 1 μm 程度の傷が生じる場合があり、この領域が変色して外観を損なうという問題がある。この変色を伴う傷は、3 層構造のフィルムを作製する際の加工熱処理の過程で形成されたものと考えている。そこで、傷の存在する領域とめっきが正常に施された領域において、オージェ電子分光分析(AES)により Sn および Cu の深さ方向の分布を評価・比較することにより Sn めっき表面の変色の原因を調べることを目的とした。表面から深部にわたり測定領域をアルゴンイオンで徐々にスパッターすることにより AES 深さ分布測定した結果、傷の存在する領域においては最表面から Sn に加えて Cu が検出された。一方、傷の存在しない領域においては表面には Sn のみの層が確認され、深部において Cu が検出された。傷の存在する領域においては加工後の熱処理により Sn-Cu 合金化した深部が露出し変色として観察される原因になったと考えられる。

*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セーレン株式会社・研究開発センター・開発研究第一グループ
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターとセーレン株式会社との共同研究として実施された。

2.4.4.14

太陽電池の Si ウエハー・電極界面の微視的評価
 TEM Analysis of an Interface between Si Wafer and Ag Electrode of Solar Cell
 安永和史^{*1}、渡辺静晴^{*2}
 Kazufumi YASUNAGA and Shizuharu WATANABE

太陽電池の表面には光励起によりシリコン(Si)のpn接合で発生した電力を外部に取り出すために、銀(Ag)の配線が縦横に印刷形成されている。しかし、Si基板表面には絶縁体である窒化ケイ素(Si₃N₄)が光反射防止膜(Anti-Reflection Coating: ARC)としてAg電極形成前に100nm程度の厚みで有機金属気相成長法(Metal Organic Chemical Vapor Deposition: MOCVD)により形成されている。Ag電極とSi基板との接合状態およびARCのAg電極直下での分解除去状態は接触抵抗に大きな影響を与える。すなわち、ARCを十分除去した低接触抵抗のAg電極とSi基板界面を形成できれば、太陽電池性能の向上が期待される。そこで、TEM断面観察によりAg電極とSi基板界面の微細構造および組成を明らかにすることを目的とした。Ag電極はAgペースト(Ag粉末、ガラス粉末、有機バインダの混合物)をSi基板にスクリーン印刷した後に焼成することにより形成される。焼成中にARCはガラス粉末の成分との反応により分解除去される。Pb-Te-Bi系およびBa-Te-Zn系のガラス粉末を含むAgペーストを用いて試料を作製し接触抵抗を評価した結果、Pb-Te-Bi系はBa-Te-Zn系と比較して約4桁も接触抵抗が低いことが明らかとなった。接触抵抗の低い試料ではARCはほぼ分解され、Si基板上でのAgの析出やガラス中でのAgTe合金の析出が確認された。AgTe合金の存在はガラス相の電気伝導度を増加させる可能性も指摘される。一方、接触抵抗の高い試料ではARCがほぼ蒸着時の厚みでSi基板上に残存しており、ARCとAgペースト中のBa-Te-Zn系ガラスとの反応性の低さが明確となった。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、^{*2}大研化学製造販売株式会社・新技術開発部
 本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと大研化学製造販売株式会社との共同研究として実施された。

2.4.4.15

ウェットプロセスによるシリコンインタポーザ形成技術開発に関する研究
 Development of Electrochemical Processing for a High-Performance Silicon Interposer
 安永和史^{*1}、常光幸美^{*2}
 Kazufumi YASUNAGA and Yukimi JYOKO

めっきプロセスによりシリコンインタポーザを作製することを目的として、シリコン(Si)基板上に一度のめっき処理により、絶縁層として機能する非晶質の二酸化ケイ素(SiO₂)層および無電解銅めっきの触媒となるニッケル(Ni)層の積層を実現する技術開発を行っている。試料は自然酸化膜を除去するために苛性エッチングしたSi基板にNi触媒活性化処理によりSiO₂層およびNi層を形成し、さらに最表面に無電解銅めっきを施した3層構造である。Ni触媒活性化処理条件は、めっき浴中Ni濃度0.1M、pH8.7、浴温70℃である。本研究では絶縁層として機能するSiO₂層の厚みに及ぼすNi触媒活性化処理時間について調べるために、①3分、②5分触媒化処理し、その上に同一条件で無電解銅めっきした試料を作製した。無電解銅めっき条件は、めっき浴中Cu濃度0.03M、pH10.3、浴温62℃である。めっきプロセスにより作製された試料は、イオンスライサを用いてArイオンで薄膜化することによりTEM断面試料とし、STEM-EDX法により元素分布像を取得した。その結果、条件①ではSiO₂層201nm、Ni層234nm、条件②ではSiO₂層224nm、Ni層246nmと評価された。条件①と比較して②の方がSiO₂層では約20nm、Ni層では約10nm増加しており、Ni触媒活性化処理の長時間化はSiO₂層の厚みを増す効果があることが明らかとなった。しかし、これまでpHや浴温を様々に変化させた実験条件で得られた内部微細組織と同様に、本研究の2つのNi触媒活性化処理条件で得られた試料にも直径数nmのNiナノ粒子がSi基板近くのSiO₂層において高密度に析出していることが確認された。SiO₂層の絶縁性能を低下させると考えられるNiナノ粒子の形成を抑制しつつ、厚いSiO₂層を形成する条件を見いだす必要がある。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、^{*2}福井工業高等専門学校物質工学科
 本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと福井工業高等専門学校との共同研究として実施された。

2.4.4.16

摩擦を利用したナノ結晶微細構造表面膜の創製と評価

Friction-Induced Ultra-Fine and Nanocrystalline Structure on Metal Surfaces by Dry Sliding

安永和史^{*1}、加藤寛敬^{*2}

Kazufumi YASUNAGA and Hiroataka KATO

ピンオンディスク法は金属材料の表層数 μm に超強加工を施し高密度の格子欠陥を導入し、合金元素の添加に頼ることなく材料の高強度化が可能な方法である。本研究では摩擦により生成した金属表層の微細組織の結晶構造や力学的特性を明らかにするとともに、その生成機構を明確にすることを目的としている。さらに耐摩耗性・耐凝着性に優れた摩擦表層組織を有する材料を開発しトライボロジー分野への応用の可能性を検討している。昨年度、真空中で摩擦速度 0.05 m/s で強加工された炭素鋼(S45C)は、微細組織観察によりナノ結晶化していること及び摩擦摩耗特性評価試験により、同一素材の機械加工のみの材料と比較して一桁以上耐摩耗性に優れると評価された。本年度の試験片はピンオンディスク摩擦試験機を用いて真空中($\sim 10^{-4}\text{ Pa}$)、負荷荷重 50 N 、摩擦速度 0.5 m/s で 30 min 表面強加工した S45C である。摩擦試験片であるピンおよび回転円盤はともに S45C の焼鈍材である。試験後のピンは FIB を用いて加工し、摩擦方向に垂直な断面方向から TEM 観察した。摩擦速度 0.5 m/s の S45C の電子線回折により得られたデバイ・リングは間欠的な斑点から構成されており、結晶粒の方位分布に偏りが生じていた。また結晶粒の構造は摩擦試験前の S45C の同じ体心立方構造であった。TEM 暗視野像からの結晶粒の形状評価により、長軸長さ $38\sim 256\text{ nm}$ 、短軸長さ $22\sim 67\text{ nm}$ 、アスペクト比 $1.2\sim 5.1$ の形状を有した等軸および長軸をもつナノ結晶粒が混在していることが確認された。電子線回折図形には BCC 以外の構造に起因する回折斑点も離散的に存在しており、これらのある回折斑点を用いて暗視野像を得たところ粒径約 50 nm の塊状の結晶粒が確認された。このコントラストは現時点では炭化物である Fe_3C の形成に起因したものと考えている。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・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と福井工業高等専門学校との共同研究として実施された。

2.4.4.17

ミクروسコーピックな視点から見た核燃料中での希ガス析出挙動の解明

Cavity Formation in 130 keV He^+ Ion Irradiated Oxide Ceramics安永和史^{*1}、篠田佳彦^{*1}、遠山伸一^{*1}、鈴木耕拓^{*1}、山岸隆一郎^{*2}Kazufumi YASUNAGA, Yoshihiko SHINODA, Shin'ichi TOYAMA, Kohtaku SUZUKI
and Ryuichiro YAMAGISHI

核燃料であるウラン(UO_2)の焼結や燃焼中に空孔の集合により形成されるボイドの形状には、蛍石型の結晶構造に特有の切頂八面体が知られている¹⁾。また、ボイドの内部に希ガスが存在する場合、その形状は希ガスの内圧に依存して変化することが単結晶 UO_2 を用いた実験により明らかにされている²⁾。セリア(CeO_2)は固体電解質や触媒として、さらには UO_2 と同一の結晶構造であることから核燃料の模擬物質として様々な物性の評価がなされている。本研究では、 CeO_2 を用いて蛍石型結晶における希ガスの析出挙動に関する知見を得ることを目的とした。試料は、 $\text{SrTiO}_3(001)$ 基板上にスパッタ法により成膜された CeO_2 薄膜(膜厚約 800 nm)で、成膜後にマッフル炉を用いて大気中、 1000°C で 2 時間焼鈍したものである。高崎量子応用研究所のイオン注入装置を用いて、 CeO_2 薄膜へ 130 keV の He^+ イオンの注入を室温で照射量 $3.75 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ まで行った。注入後、大気中、 1400°C で 2 時間焼鈍して He を放出させた。イオン研磨により薄膜化した試料の断面を $[011]$ 方向から TEM 観察し、得られた電子線回折図形の解析からキャビティーのファセットの指数づけを行った。 CeO_2 薄膜には、数 $\text{nm}\sim 30\text{ nm}$ 未満のキャビティーが多数形成されていた。粒径約 10 nm のキャビティーを解析した結果、その壁面は $\{111\}$ および $\{001\}$ のファセットで構成されていることが判明した。形成されたキャビティー形状は UO_2 と同様に切頂八面体であることが示唆される結果と考えられる。

参考文献 1) M.R. Castell, Phys. Rev. B, 68, 235411 (2003)

2) H. Serizawa et al., Crystal Growth & Design., 13, 2815 (2013)

^{*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}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・企画支援広報部・技術相談室

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが国立研究開発行政法人日本原子力研究開発機構、および国立大学法人東京大学大学院工学系研究科との連携重点研究により実施された。

3. 外部発表、特許、品種登録

3.1. 外部発表

平成 27 年度における外部発表(論文等及び国際会議、国内会議における発表)は次のとおりである。

- (1) 論文等(学協会誌等への掲載。解説、総説などを含む。)
1. Mina Masuda, Masanori Hatashita, Shinya Fujihara, Yu Suzuki and Akihiko Sakurai, Simple and efficient isolation of cordycepin from culture broth of a *Cordyceps militaris* mutant, *J Biosci Bioeng*, S1389-1723(15), 158-159, 2015
 2. Go Kagiya, Ryohei Ogawa, Rajani Choudhuri, John A. Cook, Masanori Hatashita, Yoshikazu Tanaka, Kana Koda, Kei Yamashita, Makoto Kubo, Fumitaka Kawakami and James B. Mitchell, Selective enhancement of hypoxic cell killing by tempol-regulated suicide gene expression, *Oncol Rep*, 34(2), 1065-73, 2015
 3. Kyo KUME, Tran Van Dien, Takashi HASEGAWA, Satoshi HATORI, Fuyumi ITO, Tetsuro KURITA, Munetoshi MAEDA, Satoshi MIZUSHIMA, Masayuki MURAKAMI and Takushi TAKATA, Development of a beam application technique in atmosphere for multi subjects including proton therapy, *医学物理*, Vol.35, Suppl.1, p.64, 2015
 4. Fuyumi ITO, Takashi HASEGAWA, Satoshi MIZUSHIMA, Munetoshi MAEDA, Masayuki MURAKAMI and Kyo KUME, Discussion of highly accurate dose control, *医学物理*, Vol.35, Suppl.1, p.65, 2015
 5. Chao Lin, Kyo Kume, Tetsuya Mori, Miguel Ernesto Martinez, Hidehiko Okazawa and Yasushi Kiyono, Predictive value of early stage uptake of 3'-deoxy-3'-18F-fluorothymidine in colorectal cancer treated with charged particle irradiation, *The Journal of Nuclear Medicine*, Vol.56 Issue 6, p945-950, 2015
 6. Kyo Kume, Nobuo Ohtani, Yukihisa Sanada, Tatsuo Torii, Yoshiharu Sato, Katsuya Nishihara, Takashi Hasegawa, Hideki Ito and Takeshi Sugita, Development of an efficient application of a NaI survey meter system in a high dose rate environment, *医学物理*, Vol.35, Suppl.3, p.110, 2015
 7. Fuyumi ITO, Takashi HASEGAWA, Satoshi MIZUSHIMA, Munetoshi MAEDA, Masayuki MURAKAMI and Kyo KUME, Development of confirmatory method of proton beam dose distribution, *医学物理*, Vol.35, Suppl.3, p.168, 2015
 8. Masanori Tomita, Hideki Matsumoto, Tomoo Funayama, Yuichiro Yokota, Kensuke Otsuka, Munetoshi Maeda and Yasuhiko Kobayashi, Nitric oxide-mediated bystander signal transductions induced by heavy-ion microbeam irradiation, *Life Sciences in Space Research*, 6, 36-43, 2015
 9. Masanori TOMITA and Munetoshi MAEDA, Mechanisms and biological importance of photon-induced bystander responses: do they have an impact on low-dose radiation responses, *Journal of Radiation Research*, 56, 205-19, 2015
 10. 前田宗利、松本英樹、小林克己、宇佐美德子、富田雅典、〈総説〉細胞局所へのエネルギー付与による細胞死、*放射線生物研究*、50、36-53、2015
 11. 松本英樹、前田宗利、富田雅典、〈総説〉電離放射線により誘導される一酸化窒素を介するシグナル伝達の重要性、*放射線生物研究*、50、18-35、2015
 12. 中嶋英雄、発電以外の原子力利用の課題と展望(特別寄稿)、*電気評論*、2015年5月号、7~13ページ、2015.5
 13. 中嶋英雄、特集「発電以外の原子力利用の課題と展望」の表紙画面および表紙の説明「原子炉および加速器で製造された放射線の医療、工業、農業などへの応用」、*学術の動向*、第20巻、6号、表紙および3ページ、2015
 14. 中嶋英雄、特集「発電以外の原子力利用の課題と展望」企画世話人挨拶(扉原稿)、*学術の動向*、第20巻、6号、9ページ、2015
 15. 中嶋英雄、特集「発電以外の原子力利用の課題と展望」総合討論、*学術の動向*、第20巻、6号、48~54ページ、2015.6
 16. 中嶋英雄、井手拓哉、ロータス型ポーラスアルミニウムおよび合金の製法開発、*アルトピア*、第45巻、7号、29~37ページ、2015
 17. Koji Tamura, Ryoya Ishigami and Ryuichiro Yamagishi, Laser cutting of thick steel plates and simulated steel components using a 30 kW fiber laser, *Journal of Nuclear Science and Technology* 2015
 18. 羽鳥聡、辻宏和、奥田修一、第12回日本加速器学会年会報告、「加速器」、Vol.12、No.3、pp167-172、

2015

19. 中嶋英雄、随筆「半世紀続いている放射能の移動研究調査」、エネルギーレビュー、第 35 巻・第 11 号、3 ページ、2015
20. 中嶋英雄、若狭湾エネルギー研究センターにおける原子力の研究、日本学術会議 中部地区会議ニュース、第 139 巻、9～11 ページ、2015
21. Hideo Nakajima and Masakazu Tane, Properties of Lotus-type Porous Metals, Encyclopedia of Materials Science and Technology, 2015
22. Hideo Nakajima and Shinsuke Suzuki, Fabrication of Lotus-type Porous Metals, Encyclopedia of Materials Science and Technology, 2015
23. Masakazu Tane, Tsuyoshi Mayama, Ai Oda and Hideo Nakajima, Effect of Crystallographic Texture on Mechanical Properties in Porous Magnesium with Oriented Cylindrical Pores Acta Materialia, **84**, 80-94, 2015
24. Go Kagiya, Ryohei Ogawa, Fuminori Hyodo, Kei Yamashita, Mizuki Nakamura, Ayumi Ishii, Yukihiko Sejimo, Shintaro Tominaga, Masaharu Murata, Yoshikazu Tanaka and Masanori Hatashita, Development of a real-time imaging system for hypoxic cell apoptosis., 5, 16009-17, 2016
25. Hikari Takahara, Ryoya Ishigami, Kenji Kodama, Atsushi Kojyo, Tatsuya Nakamura and Yoshihiro Oka, "Hydrogen analysis in diamond-like carbon by glow discharge optical emission spectroscopy", Journal of Analytical Atomic Spectrometry 31, 940-947, 2016
26. Takashi Ishida, Yuichiro Miyata, Yoshihiko Shinoda and Yoshihiro Kobayashi, Anomalous restoration of graphitic layers from graphene oxide in ethanol environment at ultrahigh temperature using solar furnace, 応用物理学会誌, 2016
27. Koji Tamura and Ryuichiro Yamagishi, Observation of the cutting process of 300mm thick carbon steel and stainless steel plates using a 30kW fiber laser, Journal of Physics D, 2016

(2) 国際会議論文(国際会議論文集への掲載。)

1. Munetoshi MAEDA, Modification of the Cell Death by the Irradiation to the Cytoplasm, 15th International Congress of Radiation Research (ICRR 2015) Abstracts Data (USB メモリ配布): 4-D-SY-48-02, Kyoto, Japan, 2015
2. Hideki Matsumoto, Masanori Tomita, Munetoshi Maeda, Masanori Hatashita, Tomoo Funayama, Yuichiro Yokota, Yasuhiko Kobayashi, Ryoichi Hirayama and Teruaki Konishi, A Multitudinous Development of Microbeam Radiation Research in Japan. 15th International Congress of Radiation Research (ICRR 2015) Abstracts Data (USB メモリ配布): 5-D-SY-57-05, Kyoto, Japan, 2015
3. Masanori Tomita, Munetoshi Maeda, Noriko Usami, Akinari Yokoya, Ritsuko Watanabe, Hideki Matsumoto and Katsumi Kobayashi, Effects of DNA Double-strand Break Induction and Repair and Cell Killing by K-shell Absorption of Phosphorus in Human Cell lines, 15th International Congress of Radiation Research (ICRR 2015) Abstracts Data (USB メモリ配布): 5-C1-SY-60-04, Kyoto, Japan, 2015
4. Mitsutoshi TSUKIMOTO, Akihiro KITAMI, Yasuhiro OHSHIMA, Takujiro HOMMA, Akina SUZUKI, Munetoshi MAEDA, Noriko USAMI, Katsumi KOBAYASHI and Shuji KOJIMA, Biphasic ATP release through two different pathways after X-ray microbeam irradiation, The 12th International Workshop on Microbeam Probes of Cellular Radiation Response (IWM2015) Abstract Booklet, p.94. Fukui, Japan, 2015
5. Munetoshi MAEDA, Katsumi KOBAYASHI, Hideki MATSUMOTO, Noriko USAMI and Masanori TOMITA, Suppression of the Mutagenesis in Bystander Cells Caused by Selective Cell Killing via Nitric Oxide-Mediated Bystander Response. The 12th International Workshop on Microbeam Probes of Cellular Radiation Response (IWM2015) Abstract Booklet, p.95, Fukui, Japan, 2015
6. Masanori TOMITA, Munetoshi MAEDA, Hideki MATSUMOTO, Noriko USAMI and Katsumi KOBAYASHI, Biological Implications of the Low-LET Photon-Induced Bystander Responses. The 12th International Workshop on Microbeam Probes of Cellular Radiation Response (IWM2015) Abstract Booklet, p.91. Fukui, Japan, 2015
7. Masanori Tomita, Munetoshi Maeda, Kotaro Hieda, Noriko Usami, Akinari Yokoya, Ritsuko Watanabe and Katsumi Kobayashi, Induction of DNA strand breaks of plasmid DNA and human cell lines by K-shell

Absorption of Phosphorus, 8th Auger Symposium Programme & Abstracts, Kyoto, Japan, 2015

8. Tota Ushiroda, Dai Fukushima, Daiki Nunokawa, Atsushi Ito, Masanori Tomita and Munetoshi Maeda, Time dependence of development of the bystander effect induced by X-ray microbeam, 15th International Congress of Radiation Research (ICRR 2015) Abstracts Data (USB メモリ配布): 4PS1B-06, Kyoto, Japan, 2015
9. Koji Tamura, Laser Cutting of Thick Steel with 30 kW Fiber Laser for Nuclear Decommissioning, Proceedings of The 23rd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE23), ICONE23-1630, Makuhari Messe (Chiba) 2015
10. Takushi Takata, Natsuko Kondo, Yoshinori Sakurai, Hiroki Tanaka, Takashi Hasegawa, Kyo Kume and Minoru Suzuki, Localized Dose Delivering by Ion Beam Irradiation for Experimental Trial of Establishing Brain Necrosis Model, Applied Radiation and Isotopes Vol. 106, pp. 104-106, 2016
11. Natsuko Kondo, Yoshinori Sakurai, Takushi Takata, Nobuhiko Takai, Yosuke Nakagawa, Hiroki Tanaka, Tsubasa Watanabe, Kyo Kume, Taichiro Toho, Shin-ichi Miyatake, Minoru Suzuki, Shin-ichiro Masunaga and Koji Ono, Localized radiation necrosis model in mouse brain using proton ion beams. Applied Radiation and Isotopes Vol. 106, pp. 242-246, 2016

(3) 国際会議発表

1. Suwimol Jetawattana, Masanori Hatashita and Nantana Choomchuay, The influence of radiation quality on mutation induction of mammalian cells in vitro by high energy protons and carbon ions, Space Radiation and Heavy Ions in Therapy Symposium 2015(SRHITS 2015), Osaka, 2015.5
2. Hideki Matsumoto, Masanori Tomita, Munetoshi Maeda, Masanori Hatashita, Tomoo Funayama, Yuichiro Yokota, Yasuhiko Kobayashi, Ryoichi Hirayama and Teruaki Konishi, A Multitudinous Development of Microbeam Radiation Research in Japan, The 15th International Congress of Radiation Research (ICRR 2015), Kyoto, 2015.5
3. Fuyumi ITO, Akihiko NISHIMURA, Kyo KUME and Hirokazu TSUJI, Development of Inspection Technology using Micro Capsules and Observation System.23rd International Conference on Nuclear Engineering, Chiba, Japan, 2015
4. Munetoshi MAEDA, Modification of the Cell Death by the Irradiation to the Cytoplasm, 15th International Congress of Radiation Research, ICRR 2015. Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, 2015.5 (招待講演)
5. Hideki Matsumoto, Masanori Tomita, Munetoshi Maeda, Masanori Hatashita, Tomoo Funayama, Yuichiro Yokota, Yasuhiko Kobayashi, Ryoichi Hirayama and Teruaki Konishi, A Multitudinous Development of Microbeam Radiation Research in Japan. 15th International Congress of Radiation Research, ICRR 2015, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, 2015.5(招待講演)
6. Masanori Tomita, Munetoshi Maeda, Noriko Usami, Akinari Yokoya, Ritsuko Watanabe, Hideki Matsumoto and Katsumi Kobayashi, Effects of DNA Double-strand Break Induction and Repair and Cell Killing by K-shell Absorption of Phosphorus in Human Cell lines, 15th International Congress of Radiation Research, ICRR 2015, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, 2015.5(招待講演)
7. Mitsutoshi TSUKIMOTO, Akihiro KITAMI, Yasuhiro OHSHIMA, Takujiro HOMMA, Akina SUZUKI, Munetoshi MAEDA, Noriko USAMI, Katsumi KOBAYASHI and Shuji KOJIMA, Biphasic ATP release through two different pathways after X-ray microbeam irradiation, The 12th International Workshop on Microbeam Probes of Cellular Radiation Response, IWM2015, The Wakasa Wan Energy Research Center, WERC, Fukui, Japan, 2015.6
8. Munetoshi MAEDA, Katsumi KOBAYASHI, Hideki MATSUMOTO, Noriko USAMI and Masanori TOMITA, Suppression of the Mutagenesis in Bystander Cells Caused by Selective Cell Killing via Nitric Oxide-Mediated Bystander Response, The 12th International Workshop on Microbeam Probes of Cellular Radiation Response, IWM2015. The Wakasa Wan Energy Research Center, WERC, Fukui, Japan, 2015.6
9. Masanori TOMITA, Munetoshi MAEDA, Hideki MATSUMOTO, Noriko USAMI and Katsumi KOBAYASHI, Biological Implications of the Low-LET Photon-Induced Bystander Responses, The 12th International Workshop on Microbeam Probes of Cellular Radiation Response, IWM2015, The Wakasa Wan Energy

- Research Center, WERC, Fukui, Japan, 2015.6
10. Yasushi KIYONO, Chao LIN, Kyo KUME, Tetsuya MORI, Miguel Ernesto MARTINEZ and Hidehiko OKAZAWA, Predictive value of early stage uptake of 3'-deoxy-3'-¹⁸F-fluorothymidine in colorectal cancer treated with charged particle irradiation, 北米核医学会(SNMMI2015), Baltimore, 2015
 11. Masahiro Saito, Manabu Fujita, Yasuhito Aoki, Masanobu Yoshikawa, Keisuke Yasuda, Ryoya Ishigami and Yoshinori Nakata, TOF-ERDA analysis on the effect of water for SEI formation in Li-ion batteries, 22nd International Conference on Ion Beam Analysis, Grand Hotel 4 Opatijska Cvijeta, Opatija, Croatia, 2015
 12. H. Kato, K. Yasunaga and N. Suiya, Microstructure and Wear Properties of Friction Induced Nanocrystalline Layers of Carbon Steels, International Tribology Conference, Tokyo, 2015.
 13. Koji Tamura, Laser Cutting of Thick Steel with 30 kW Fiber Laser for Nuclear Decommissioning, The 23rd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE23), Makuhari Messe (Chiba), 2015
 14. Eisuke Minehara, Consideration on the Laser Assisted Decontamination and Decommissioning at the TEPCO Fukushima First Nuclear Power Plant Using High Power FELs and Fiber Lasers, The 37th International Free Electron Laser Conference (KOREA), 2015
 15. Yasushi Kiyono, Kyo Kume, Tetsuya Mori and Hidehiko Okazawa, Predictive value of 3'-deoxy-3'-¹⁸F-fluorothymidine uptake in colorectal cancer treated with carbon ion irradiation under hypoxic condition, 北米核医学会(SNMMI2016), San Diego, 2016
 16. Masanori Hatashita, Keiichi Takagi, Keisuke Yasuda and Satoshi Hatori, Single Cell Irradiation System at the Wakasa Wan Energy Research Center, The International Workshop on Microbeam Probes of Cellular Radiation Response(IWM2015), Tsuruga, 2015.5
 17. Go Kagiya, Ryohei Ogawa, Masanori Hatashita, Yoshikazu Tanaka, Kei Yamashita, Mizuki Nakamura, Ayumi Ishii and Yukihiko Sejimo, Development of Non-invasive Real-time Imaging System of Hypoxic Cell Apoptosis, The 15th International Congress of Radiation Research (ICRR 2015), Kyoto, 2015.5
 18. Masanori Tomita, Munetoshi Maeda, Kotaro Hieda, Noriko Usami, Akinari Yokoya, Ritsuko Watanabe and Katsumi Kobayashi. Induction of DNA strand breaks of plasmid DNA and human cell lines by K-shell Absorption of Phosphorus. 8th International Symposium on Physical, Molecular, Cellular, and Medical Aspects of Auger Processes. Multipurpose Auditorium, Kansai Photon Science Institute, KPSI, Japan, 2015.5
 19. Takaya TERADA, Daisuke Kitsunai, Akihiko NISHIMURA and Fuyumi ITO, Development of laser cladding and non-destructive inspection technology in heat exchanger tube, The 7th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, Kitakyushu, Japan, 2015.5
 20. Tota Ushiroda, Dai Fukushima, Daiki Nunokawa, Atsushi Ito, Masanori Tomita and Munetoshi Maeda, Time dependence of development of the bystander effect induced by X-ray microbeam, 15th International Congress of Radiation Research, ICRR 2015. Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, 2015.5
 21. Mitsutoshi TSUKIMOTO, Akihiro KITAMI, Yasuhiro OHSHIMA, Takujiro HOMMA, Akina SUZUKI, Munetoshi MAEDA, Noriko USAMI, Katsumi KOBAYASHI and Shuji KOJIMA, Biphasic ATP release through two different pathways after X-ray microbeam irradiation, The 12th International Workshop on Microbeam Probes of Cellular Radiation Response, IWM2015. The Wakasa Wan Energy Research Center, WERC, Fukui, Japan, 2015.6
 22. Masayuki Matsuo, Takayuki Murayama, Kazuto Koike, Shigehiko Sasa, Mitsuaki Yano, Shun-ichi Gongga, Akira Uedono, Ryoya Ishigami, Kyo Kume, Tomomi Ohtomo, Erika Furukawa, Yoshiki Yamazaki, Kazunobu Kojima and Shigefusa Chichibu, Polarity Dependent Radiation Hardness of GaN, "The 2015 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai", Kyoto, 2015.6
 23. Munetoshi MAEDA, Katsumi KOBAYASHI, Hideki MATSUMOTO, Noriko USAMI and Masanori TOMITA, Suppression of the Mutagenesis in Bystander Cells Caused by Selective Cell Killing via Nitric Oxide-Mediated Bystander Response, The 12th International Workshop on Microbeam Probes of Cellular Radiation Response, IWM2015. The Wakasa Wan Energy Research Center, WERC, Fukui, Japan, 2015.6
 24. Masanori TOMITA, Munetoshi MAEDA, Hideki MATSUMOTO, Noriko USAMI and Katsumi KOBAYASHI, Biological Implications of the Low-LET Photon-Induced Bystander Responses, The 12th International Workshop on Microbeam Probes of Cellular Radiation Response, IWM2015, The Wakasa Wan Energy

Research Center, WERC, Fukui, Japan, 2015.6

25. Keisuke Yasuda, Yoshinori Nakata, Ryoya Ishigami and Shogo Hibi, Development of TOF-ERDA measurement system for thin film analysis, 22nd International Conference on Ion Beam Analysis, Croatia, 2015.6
26. Keisuke Yasuda, Yoshinori Nakata, Ryoya Ishigami and Shogo Hibi, Depth Resolution of TOF-ERDA measurement using He and Cu beam, 22nd International Conference on Ion Beam Analysis, Croatia, 2015.6
27. Masahiro Saito, Manabu Fujita, Yasuhito Aoki, Masanobu Yoshikawa, Keisuke Yasuda, Ryoya Ishigami and Yoshinori Nakata, TOF-ERDA analysis on the effect of water for SEI formation in Li-ion Batteries, 22nd International Conference on Ion Beam Analysis, Croatia, 2015.6
28. Go Kagiya, Ryohei Ogawa, Masanori Hatashita, Yoshikazu Tanaka, Kei Yamashita, Mizuki Nakamura, Ayumi Ishii and Yukihiko Sejimo, Development of non-invasive real-time imaging system of hypoxic cell apoptosis. 12th Meeting of the Asian Society for Neuro-Oncology (ASNO2015), Manila, Philippines, 2015.9
29. M. Matsuo, T. Murayama, K. Koike, S. Sasa, M. Yano, S. Gonda, A. Uedono, R. Ishigami, K. Kume, T. Ohtomo, E. Furukawa, Y. Yamazaki, K. Kojima and S. Chichibu, Radiation tolerance of $\pm c$ polar gallium nitride, International Workshop on Advanced Materials and Devices II, Osaka, 2015.9
30. Kiichi Tsunoda, Maki Takano, Masanori Hatashita and Kazuhiro Hoshino, Constriction of Thermotolerant Ethnaol Producing Fungi by Ion-beam Mutation and Its Application to Simulaneous Saccharification and Fermentation of Lignocellulose, Asian Congress on Biotechnology 2015(ACB 2015), Malaysia, 2015.11
31. Kazuhiro Hoshino, Maki Takano, Eri Nagane and Masanori Hatashita, Direct production of L-malic acid from lignocellulose by consolidated bioprocessing with Schizophyllum commune, The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (PACIFICHEM2015), Honolulu, USA, 2015.12
32. Tatsuo Torii, Yukihisa Sanada, Yukiyasu Nishizawa, Tsutomu Yamada, Tadashi Orita, Koji Muraoka, Masayuki Sato, Akira Watanabe, Kyo Kume, Takashi Hasegawa and Takeshi Sugita, Measurement of radiation caused by thunderstorm activities by a sounding balloon, an airplane, and the ground, アメリカ地球物理学連合(AGU) 2015 秋季大会, サンフランシスコ, 2015.12

(4) 国内会議発表

1. Fuyumi ITO, Takashi HASEGAWA, Satoshi MIZUSHIMA, Munetoshi MAEDA, Masayuki MURAKAMI and Kyo KUME, Discussion of highly accurate dose control, 第 109 回日本医学物理学学会学術大会、横浜市、2015.4
2. Kyo KUME, Tran Van Dien, Takashi HASEGAWA, Satoshi HATORI, Fuyumi ITO, Tetsuro KURITA, Munetoshi MAEDA, Satoshi MIZUSHIMA, Masayuki MURAKAMI and Takushi TAKATA, Development of a beam application technique in atmosphere for multi subjects including proton therapy, 第 109 回日本医学物理学学会学術大会、横浜市、2015.4
3. Tatsuo TORII, Yukihisa SANADA, Yukiyasu NISHIZAWA, Tsutomu YAMADA, Tadashi ORITA, Koji MURAOKA, Masayuki SATO, Akira WATANABE, Kyo KUME, Takashi HASEGAWA and Takeshi SUGITA, Measurement of radiation caused by thunderstorm activities by a sounding balloon, an airplane, and the ground, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会(JPGU)、千葉市、2015.5
4. 清野泰、Lin CHAO、久米恭、森哲也、Miguel Ernesto MARTINEZ、高田卓志、岡沢秀彦、3'-deoxy-3'-[18F]fluorothymidine-PET による粒子線治療の効果予測に関する基礎的研究、日本分子イメージング学会、東京都、2015.5
5. 加藤 寛敬、安永 和史、推谷 信昭、摩擦表層に生成した超微細組織のトライボメタラジー、トライボロジー会議 2015 春 姫路、姫路商工会議所、2015.5
6. 仲内悠祐、松本徹、安倍正真、土山明、北里宏平、鈴木耕拓、小天体表層での太陽風プロトンによる np-Fe 生成の可能性(The possibility of np-Fe production by solar wind protons on the airless body surfaces)、日本気球惑星科学連合 2015 年大会、幕張メッセ国際会議場、2015.5
7. 羽鳥聡、栗田哲郎、林豊、山田裕章、小田桐哲也、山口文良、淀瀬雅夫、長崎真也、山田和彦、廣戸 慎、清水雅也、丸田恭央、辻宏和、若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状、第28回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、仙台市(東北大学)、2015.7
8. 清水雅也、羽鳥聡、栗田哲郎、林豊、山田裕章、小田桐哲也、山口文良、淀瀬雅夫、長崎真也、丸田恭

- 央、山田和彦、廣戸慎、辻宏和、タンデム加速器絶縁ガス循環冷却システム、第28回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、仙台市(東北大学)、2015.7
9. 羽鳥聡、栗田哲郎、林豊、山田裕章、高城啓一、久米恭、安田啓介、石神龍哉、辻宏和、若狭湾エネルギー研究センターの加速器施設の開発と応用、第 12 回日本加速器学会年会、敦賀市、2015.8
 10. 平野智也、高城啓一、星野洋一郎、阿部知子:重イオンビームを用いた雄性配偶子の DNA 損傷応答解析、SIP 新しい育種技術 2 系/3 系 突然変異グループ合同ワークショップ、新潟、2015.9
 11. 久米恭、大谷暢夫、眞田幸尚、鳥居建男、佐藤義治、西原克哉、長谷川崇、伊藤英樹、杉田武志. 高線量エリアにおける NaI 線量率計の効率的な運用方法の開発、第 110 回日本医学物理学会、札幌市、2015.9
 12. 山野直樹、泉佳伸、安田仲宏、篠田佳彦、松本義久、林崎規託、原子力合意形成学に関する一考察 (IX); -低線量影響に対するリスクコミュニケーション:低線量影響ガイドブックと実装ガイドンスー、日本原子力学会 2015 年秋の大会、静岡大学静岡キャンパス、2015.9
 13. 遠山伸一、石神龍哉、30kW ファイバーレーザーを用いた厚板鋼材切断試験(Ⅲ)、日本原子力学会 2015 年秋の大会、静岡大学静岡キャンパス、2015.9
 14. 峰原英介、レーザー切断・レーザー除染のための遠隔操作ロボットに用いる耐放射線性部品と素材の開発と実証、日本原子力学会 2015 年秋の大会、静岡大学静岡キャンパス、2015.9
 15. 池田輝之、児島孝文、川口裕美、井手拓哉、中嶋英雄、一方向に伸びた孔をもつ多孔質熱電材料の創製、日本熱電学会学術講演会、九州大学筑地区、2015.9
 16. 木野村淳、義家敏正、茶谷原昭義、空野由明、坪内信輝、堀野裕治、徐ぎゅう、佐藤紘一、安田啓介、石神龍哉、イオン注入 Si の中性子照射による結晶性回復と温度依存性、2015 年日本金属学会秋期講演大会、九州大学伊都キャンパス、2015.9
 17. 児島孝文、池田輝之、川口裕美、井手拓哉、中嶋英雄、一方向に伸びた孔をもつ多孔質熱電材料の創製、2015 年日本金属学会秋期講演大会、九州大学伊都キャンパス、2015.9
 18. 伊藤大智、小林大輔、三田信、富木淳史、川勝康弘、船瀬龍、久米恭、PROCYON チーム、PROCYON における COTS の利用と耐放射線性設計、第 59 回宇宙科学技術連合講演会、鹿児島市、2015.10
 19. 前田宗利、松本英樹、伊東富由美、田辺久美子、長谷川崇、水嶋慧、山東新子、久米恭. 放射線によるがん治療の高度化に向けた取り組みー陽子線および X 線の併用照射が腫瘍細胞に与える影響の評価ー陽子線による細胞へのダメージ評価による照射線量の適正化研究、公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター第 17 回研究報告会、福井市、2015.10
 20. 仲内悠祐、松本徹、安倍正真、土山明、北里宏平、鈴木耕拓、層状珪酸塩鉱物における太陽風プロトンの影響:OH/H₂O生成量の推定、2015 年秋季惑星科学会、東京工業大学、2015.10
 21. 藤原嗣久、鈴木耕拓、安田啓介、春山洋一、PIXE+PIGE を用いた茶葉中の元素分布測定、第 31 回 PIXE シンポジウム、原子力機構高崎量子応用研究所、2015.10
 22. Makoto Sasaki, Hiroyasu Tamamura, Yoshikazu Maeda, Yuji Tameshige, Hisato Nakazawa, Shigeru Kasahara, Yutaka Yasukawa, Satoshi Shibata, Yoshitaka Sato, Shigeyuki Takamatsu, Mariko Kawamura, Kazutaka Yamamoto, Kyo Kume and Munetoshi Maeda, Construction of New Combined Radiotherapy System for Advanced Esophageal Cancer, 日本放射線腫瘍学会第 28 回学術大会、前橋市、2015.11
 23. 高橋成企、平岡大和、檜山太旗、増田旭、中島恭平、小川泉、玉川洋一、鈴木耕拓、小林正明、GAGG シンチレータの発光特性、日本物理学会北陸支部定例学術講演会、金沢大学、2015.11
 24. 中嶋英雄、松田進、谷口仁美、田島朋子、ポーラス銅の抗菌効果、日本銅学会 第 55 回講演大会、大阪大学吹田キャンパス、2015.11
 25. 久米恭、鳥居建男、瀧田正人、長谷川崇. 宇宙機搭載用機器に対する高エネルギー陽子線照射技術の開発. 平成 27 年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会. 東大宇宙線研. 2015.12
 26. 安田啓介、鈴木耕拓、石神龍哉、中田吉則、日比章五、TOF-ERDA measurements using heavy ion beam, 第 16 回「イオンビームによる表面・界面解析」特別研究会、奈良女子大学、2015.12
 27. Tatsuya SAWANO, Daisuke YONETOKU, Tatehito MIHARA, Kazuki YOSHIDA, Asuka TOYANAGO, Yasuaki KAGAWA, Kentaro KAWAI, Masao INA, Yu Endo, Hirokazu IKEDA, Satoshi HATORI, Kyo KUME, Satoshi MIZUSHIMA and Takashi HASEGAWA, X-ray Sky Monitor Aboard a Micro Satellite for Soft X-ray Transients Including Gravitational Wave Sources, The 6th UNISEC Space Takumi Conference, Tokyo Institute of Technology, Tokyo (Tokyo Institute of Technology), 2016.3

28. 有元誠、針田聖平、谷津陽一、河合誠之、池田博一、富田洋、上野史郎、三原建弘、芹野素子、常深博、吉田篤正、坂本貴紀、羽鳥聡、久米恭、水嶋慧、山東新子、長谷川崇、「広天域硬 X 線モニター用低ノイズ LSI の開発と性能評価」、日本物理学会第71回年次大会、仙台市(東北学院大学)、2016.3
29. 檜山太旗、平岡大和、高橋成企、中島恭平、小川泉、玉川洋一、鈴木耕拓、2重ベータ崩壊実験用 CaF₂ シンチレーターの特性測定、日本物理学会第71回年次大会、仙台市(東北学院大学)、2016.3
30. 高橋成企、平岡大和、檜山太旗、増田旭、中島恭平、小川泉、玉川洋一、鈴木耕拓、小林正明、GAGG シンチレーターの発光特性、日本物理学会第71回年次大会、仙台市(東北学院大学)、2016.3
31. 畑下昌範、庄司英一、イオンビーム照射によるパターン化複合電極材の創製、日本化学会第 96 春季年会、京田辺市、2016.3
32. 佐藤有司、藤田義彦、下村達雄、シリコンオイル等難燃性廃油の無害化处理、日本原子力学会 2016 年春の年会、東北大学川内キャンパス、2016.3
33. 渡部創、佐野雄一、小藤博英、竹内正行、石神龍哉、抽出クロマトグラフィ用吸着材の放射線劣化挙動、日本原子力学会 2016 年春の年会、東北大学川内キャンパス、2016.3
34. 峰原英介、山岸隆一郎、石神龍哉、遠山伸一、「廃炉における除染の仕組み、除染方法と除染装置 複数の除染の仕組み、除染方法と除染装置との比較」、日本原子力学会 2016 年春の年会、東北大学川内キャンパス 2016.3
35. 峰原英介、山岸隆一郎、遠山伸一、「若狭湾エネルギー研究センター/福井大学におけるレーザー除染機の開発(展示)」、日本原子力学会 2016 年春の年会 併設 展示会、東北大学川内キャンパス、2016.3
36. 山岸隆一郎、石神龍哉、遠山伸一、峰原英介、完全除染可能な原子炉廃炉のためのレーザー剥離技術の検討、日本原子力学会 2016 年春の年会、東北大学川内キャンパス 2016.3
37. 遠山伸一、石神龍哉、峰原英介、山岸隆一郎、30kWファイバーレーザーを用いた厚板鋼材切断試験(IV)、日本原子力学会 2016 年春の年会、東北大学川内キャンパス 2016.3
38. 児島孝文、池田輝之、川口裕美、井手拓哉、中嶋英雄、一方向に伸びた孔をもつ多孔質 Si および Mg₂Si の創製、日本金属学会、東京理科大学、2016.3
39. 栗田哲郎、羽鳥聡、林豊、長崎真也、廣戸慎、小田桐哲也、山田裕章、山田和彦、山口文良、淀瀬雅夫、清水雅也、辻宏和、若狭湾エネルギー研究センターシンクロトロン の現状、第 12 回日本加速器学会年会、敦賀市、2015.8
40. Fuyumi ITO, Takashi HASEGAWA, Satoshi MIZUSHIMA, Munetoshi MAEDA, Masayuki MURAKAMI, and Kyo KUME. Development of confirmatory method of proton beam dose distribution. 第 110 回日本医学物理学会学術大会、札幌市、2015.9
41. 星野一宏、高野真希、畑下昌範、イオンビーム変異法による高温耐性エタノール発酵糸状菌の構築、第 67 回日本生物工学会大会、鹿児島市、2015.10
42. 芹澤弘幸、加治芳行、山本春也、安永和史、大石佑治、山中伸介、ヘリウム析出に伴い発現するイメージクリスタルの形状観察と今後の展望、第 10 回高崎量子応用研究シンポジウム、群馬、2015.10
43. 高城啓一、三浦孝太郎、畑下昌範、草島美幸、仲下英雄、炭素イオンビーム育種の高度化、SIP 推進会議、和光市、2016.1
44. 山下聖樹、高野真希、畑下昌範、星野一宏、イオンビームによる耐熱性乳酸生産糸状菌の Xylose 発酵変異株の構築およびリグノセルロースからの同時糖化発酵への応用、日本農芸化学会 2016 年度大会、札幌市、2016.3

3.2. 特許

平成 27 年度における特許出願、特許登録は次のとおりである。

(1) 特許出願

1. 「放射線モニタリングシステム」(特願 2015-79747)伊東富由美、久米恭
2. 「有色シリコン薄膜の形成方法」(特願 2015-187495)石神龍哉
3. 「トリチウムを含む汚染水を処理する処理装置および処理方法」(特願 2015-246514)中嶋英雄

(2) 特許登録

1. 「バルク超伝導体の臨界電流密度制御方法、及びアンジュレータ用バルク超伝導体の製造方法」(特許第 5751538)久米恭、紀井俊輝
2. 「金属めっき材料の製造方法」(特許第 5756657)畑下昌範
3. 「熱輸送方向を切替可能なヒートパイプ、及び逆止弁により熱輸送方向の自動切換が可能なヒートパイプ」(特許第 5887682)鳥取章二

3.3. 品種

平成 27 年度における品種出願、品種登録は次のとおりである。

(1) 品種出願

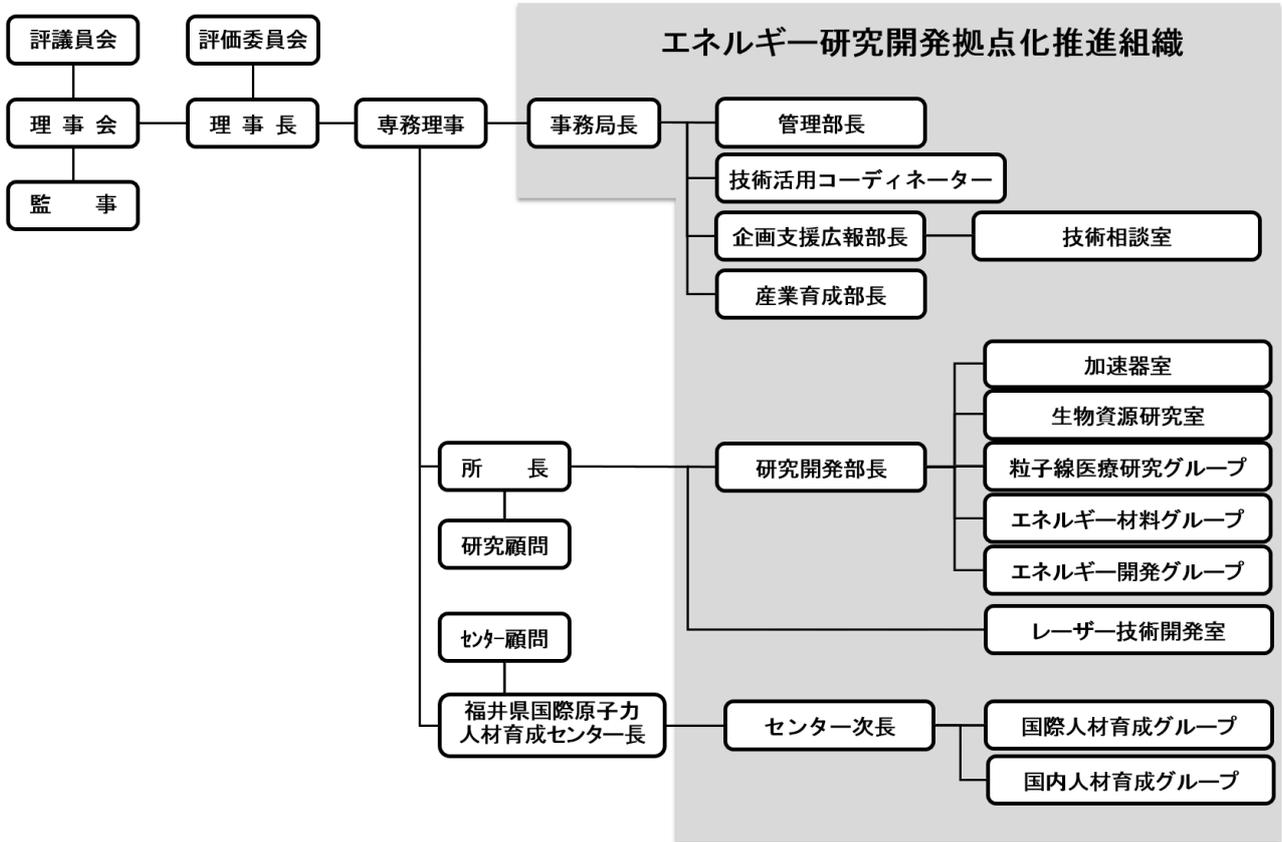
なし

(2) 品種登録

1. 「せと福GPN」高城啓一、畑下昌範、鈴木勝久、水野隆 品種登録番号 第 25110 号
2. 「せと福RMR」高城啓一、畑下昌範、鈴木勝久、水野隆 品種登録番号 第 25111 号

公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター 組織図

(平成 27 年 4 月 1 日 現在)



平成 27 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 18 卷

発行:平成 28 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

