

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26年度 第17巻

Annual Report of the Wakasa Wan Energy Research Center

Vol.17 2014



目 次

1. はじめに	5
2. 研究成果	6
2.1. 高エネルギービーム利用研究	6
2.1.1. 品種改良研究	6
2.1.1.1. 品種改良技術開発	6
2.1.1.1.1. 抗シロイスナズナ γ H2AX モノクローナル抗体の作製	6
2.1.1.2. 植物・菌類の品種改良研究	8
2.1.1.2.1. イシクラゲ変異株を利用した有用物質の生産	8
2.1.1.2.2. 粒子線照射による花卉類の品種改良	9
2.1.1.2.3. サフラン球根の陽子線照射個体の育成	10
2.1.1.2.4. 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	10
2.1.1.2.5. 新たな特性をもつオオムギ品種の開発を目指した炭素線処理条件の検討	11
2.1.1.3. 植物工場関連技術開発	12
2.1.1.3.1. 植物工場用野菜の栽培システムの開発	12
2.1.1.3.2. 生物多様性を活用する植物改良新技術の開発 － タバコ種間雑种植物のシャペロンタンパク質が誘導する細胞障害について －	13
2.1.1.3.3. トマト栽培ハウス温調用のヒートポンプ・BACH 融合システムの開発	15
2.1.2. 粒子線がん治療研究	16
2.1.2.1. 治療計画システム高度化研究	16
2.1.2.1.1. 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 －	16
2.1.2.1.2. 陽子線治療における品質保証技術の研究開発	18
2.1.2.2. 粒子線作用の素過程の解明	19
2.1.2.2.1. 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	19
2.1.2.2.2. 臨床研究に向けた陽子線と X 線の併用照射効果の細胞生物学的な検討	21
2.1.2.2.3. 粒子線に対する生体内の作用機序の解明	22
2.1.2.2.4. 細胞質への照射によって誘導される細胞応答の解析	22
2.1.2.3. その他の粒子線がん治療研究	23
2.1.2.3.1. 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	23
2.1.2.3.2. 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	25
2.1.2.3.3. 陽子線がん治療における高度な照射法に対応した検証技術の開発	26
2.1.2.3.4. 放射線治療抵抗性腫瘍に対する PET を用いた陽子線治療効果判定に関する基礎 検討	26
2.1.2.3.5. 陽子線がん治療臨床研究	27
2.1.2.3.6. 粒子線の線質測定技術開発	27

2.1.3. ビーム発生分析評価技術開発	28
2.1.3.1. 加速器分析技術開発	28
2.1.3.1.1. 薄膜分析のための重イオン RBS 法の開発	28
2.1.3.1.2. He 後方散乱における核共鳴反応を利用した入射 He イオンのエネルギー校正	29
2.1.3.1.3. 歯根面象牙質における脱灰評価へのマイクロ PIXE/PIGE の応用	31
2.1.3.1.4. フッ化物含有う蝕予防材による脱灰抑制効果のマイクロ PIXE/PIGE による評価	33
2.1.3.1.5. PIXE/PIGE による PFOS 電解時の各相のフッ素の分析	35
2.1.3.1.6. 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と照射量の関係	38
2.1.3.1.7. 茶葉中のアルミニウム分布	39
2.1.3.1.8. 曹洞宗永平寺建物の各種額等の伝統的製造手法の研究調査	39
2.1.3.1.9. 宇宙線照射を模擬した鉱物へのイオン照射実験生成物の評価	40
2.1.3.1.10. TOF-ERDA による薄膜定量分析手法の開発	40
2.1.3.1.11. TOF-ERDA 法によるダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜中水素分析	41
2.1.3.1.12. グロー放電発光分析法(GD-OES)による DLC 膜の水素定量に関する研究	41
2.1.3.1.13. マイクロイオンビーム分析装置の開発と水素分析	42
2.1.3.1.14. RBS 法による $\text{GeO}_2/\text{AlGeO}_x/\text{Ge}$ 積層試料の膜厚と Ge の深さ分布の測定	42
2.1.3.1.15. ダイヤモンド状炭素膜の組成と摩耗率の関係	43
2.1.3.2. 材料照射損傷評価技術開発	44
2.1.3.2.1. 真空蒸着とイオン照射によるプラスチックへの電気伝導性付与	44
2.1.3.2.2. 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)	45
2.1.3.2.3. 金沢大学衛星 Kanazawa-SAT ³ 搭載用アナログ集積回路の放射線耐性試験	47
2.1.3.2.4. 抽出クロマトグラフィ用吸着材の α 線劣化生成物評価	49
2.1.3.2.5. イオン注入に立脚する表面ナノ加工法の開発	50
2.1.3.2.6. 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と各種デバイス創製への応用	50
2.1.3.2.7. 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	51
2.1.3.3. 加速器運転技術の高度化	52
2.1.3.3.1. 若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状	52
2.1.3.3.2. シンクロトロン垂直方向閉軌道の歪み補正	54
2.1.3.3.3. 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	56
2.2. エネルギー開発研究	57
2.2.1. エネルギー・環境材料開発	57
2.2.1.1. レーザー利用技術開発	57
2.2.1.1.1. 30kW ファイバーレーザーを用いた厚板鋼材切断試験	57
2.2.1.1.2. 電動クローラーを用いたレーザー加工技術研究	58
2.2.1.1.3. レーザー切断技術による原子力材料切断時の粉じん挙動データ取得・調査	59
2.2.1.1.4. レーザー照射時のコンクリート熱的応答試験	60
2.2.1.1.5. 原子炉の汚染部品に対するレーザー除染機試験	60
2.2.1.1.6. レーザー除染装置の開発	61

2.2.1.2. 極微小駆動材料開発	62
2.2.1.2.1. ポリイミド系高分子ファイバーの開発	62
2.2.1.2.2. 機能性ナノファイバー電極材の創製とエネルギー変換素子・センサーへの応用	63
2.2.2. エネルギー有効利用研究	64
2.2.2.1. 太陽熱等利用技術開発	64
2.2.2.1.1. 環境負荷低減の観点における太陽炉活用研究	64
2.2.2.1.2. 太陽炉と太陽熱エネルギー利用研究	64
2.2.2.2. バイオ応用環境技術開発	65
2.2.2.2.1. 耐塩性アブラナ系統の遺伝特性と耐塩性特異的 DNA 断片	65
2.2.2.2.2. 微生物を用いた水質浄化研究	67
2.2.2.4. バイオマスエネルギー技術開発	68
2.2.2.4.1. バイオマスエネルギー技術開発研究	68
2.2.2.4.2. マイクロ波加熱を前処理に用いた木質バイオマスのエネルギー化研究	69
2.2.3. 原子力関連先端技術開発	70
2.2.3.1. 原子力応用技術開発	70
2.2.3.1.1. 環境中における線源位置探査解析手法の現場適用試験	70
2.2.3.1.2. 超高純度金属の精製研究	72
2.2.3.1.3. レアメタルフリー・高強靱性チタン材の開発とその応用	73
2.2.3.1.4. 原子力発電所コンクリートの有効利用調査	74
2.2.3.1.5. 放射線源情報評価手法の開発	75
2.2.3.1.6. 放射線遮蔽用可撓性材料の性能評価	76
2.2.3.1.7. 減容安定化処理した粉末形状樹脂の均質・均一固化体製作技術調査	77
2.2.3.1.8. 低放射化コンクリートの基礎検討	77
2.2.3.1.9. 基礎架台コンクリート等への放射性物質等の浸透性評価	78
2.2.3.1.10. 埋設技術基準への適合性に係る検討	78
2.2.3.1.11. 耐放射線性能試験研究	79
2.2.3.1.12. 放射線計測に関する共同研究	79
2.2.3.1.13. 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	80
2.2.3.2. 科学機器利用技術開発	81
2.2.3.2.1. 葛粉に含まれるイソフラボン類の測定	81
2.2.3.2.2. 磁粉探傷技術を用いた伝熱管内壁欠陥観察の高度化	82
2.2.3.2.3. 特殊樹脂を用いた陽子線トラックの可視化技術の生物影響研究への応用に向けた基礎的検討	82
2.2.3.2.4. 線量分布の簡易な取得手法の実用化	83
2.2.3.2.5. 高分子材料表面に形成されためつき膜の成分及び微細構造に関する調査研究	83
2.2.3.2.6. 銅基板上の自己集合膜の表面分析	84
2.2.3.2.7. 異種材料の接合に及ぼす表面状態に関する研究	84
2.2.3.2.8. 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	85

2.2.3.2.9.	アルミナゾルの粒径・形状制御技術の研究	85
2.2.3.2.10.	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	86
2.2.3.2.11.	摩擦を利用したナノ結晶微細構造表面膜の創製と評価	86
3.	外部発表、特許、品種登録	87
3.1.	外部発表	87
3.2.	特許	93
3.3.	品種	93

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26年度は、「研究開発」と「産業支援」を2本の柱とした第3期中期事業計画(平成22年度～26年度)のもとでの事業の最終年度に当たります。前者の研究開発に関しては研究開発部が、後者の産業支援に関しては企画支援広報部、産業育成部および国際原子力人材育成センターが担当し、若狭湾エネルギー研究センター一丸となって第3期中期事業計画を進めてきました。

研究開発部は加速器室、生物資源グループ、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。平成27年2月には、レーザー技術開発室を新たに設置し、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26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2つに分けられ、高エネルギービーム利用研究およびエネルギー開発研究に関するものです。高エネルギービーム利用研究では、品種改良研究、粒子線がん治療研究、ビーム発生分析評価技術開発などであり、エネルギー開発研究ではエネルギー・環境材料開発、エネルギー有効利用研究、原子力関連先端技術開発、さらには科学機器利用技術開発などの研究が挙げられます。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。

原子力利用は、原子力発電によるエネルギー利用のほかにも放射線、放射性同位体、粒子加速器の利用などが挙げられます。当センターでは設立当初から後者の放射線利用研究に重点を置いてきましたが、東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故以来、原子炉の放射能除染に資するレーザー除染機や原子炉構造物のレーザー切断機の開発、環境中における線量分布の測定法の開発などの開発研究も積極的に実施しつつあります。このように当センターでは我が国の原子力の重要性を認識し、それらの利用技術開発と安全と安心な運用のための基礎・応用研究と開発、さらには人材育成を積極的に進めております。平成26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27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. 高エネルギービーム利用研究

2.1.1. 品種改良研究

2.1.1.1. 品種改良技術開発

2.1.1.1.1.

抗シロイヌナズナ γ H2AX モノクローナル抗体の作製

Establishment of monoclonal antibodies raised against *Arabidopsis* γ H2AX

高城啓一^{*1}

Keiichi TAKAGI

Abstract

Mouse monoclonal antibody raised against γ H2AX of *Arabidopsis thaliana* was established. It specifically recognized nuclei of X-Ray irradiated *Arabidopsis* seedlings.

要約

シロイヌナズナの γ H2AX に対するマウスモノクローナル抗体を作製した。この抗体は X 線を照射したシロイヌナズナ幼苗の核を特異的に認識した。

I. 緒言

H2AX は、ヒストン 2 のバリエーションのひとつである。この蛋白質はコアヒストンの一員であり、哺乳類細胞ではゲノム DNA が損傷(主として二本鎖損傷,DSB)を受けると損傷の周囲に存在する H2AX の N 末端部にあるセリン残基がリン酸化されて γ H2AX となる¹⁾ため、DNA 損傷(特に DSB)のマーカーとして用いられている。

著者らは、モデル植物シロイヌナズナの γ H2AX に対するウサギを宿主とするポリクローナル抗体を作製し、この抗体が、放射線等による DNA 損傷を受けた核に特異的に結合すること、他の植物にも適用可能なこと、損傷に応じて結合量が増加することなどを確認してきた。この DNA 損傷に応答する性質を利用すれば、育種適性線量を短期間で決定することへの応用が考えられた。

しかし、宿主動物血清中に含まれるポリクローナル抗体は、宿主となる個体ごとに異なるため、採血した血清を使い尽くすと、同一のものを再び得ることが不可能で、別の動物で作製して特異性を再確認する必要がある。そこで、特定の抗体のみを作り出すハイブリドーマを用いることで、再生産可能な抗体を得ることができるモノクローナル抗体を作製した。

得られた抗体は、X 線照射後のシロイヌナズナ核を特異的に認識し、リン酸化ペプチドを用いた吸収実験から、 γ H2AX のアミノ末端アミノ酸配列を特異的に認識することがわかった。

II. 成果の概要

ハイブリドーマは、細胞工学研究所で作製した。抗原としてシロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana*) γ H2AX の N 末端アミノ酸配列のリン酸化オリゴペプチド(12 mer, CKGDIGSASQEF, S はリン酸化部位)を用いた。

X 線照射には、X 線照射装置(MBR-1520R-3, 日立メディコ)を用い、実効エネルギー 48 kV、線量率約 3.0Gy/min で照射を行った。照射した幼苗は、30 分後に固定した。

抗体特性の検証には、播種 4~5 日目のシロイヌナズナ幼苗主根端を用いた。根端細胞に結合した抗体の検出には Sauer らの手法²⁾を改変した whole mount 法を用いて行った。抗体の組織浸透性検証、および核の位置確認のためウサギモノクローナ

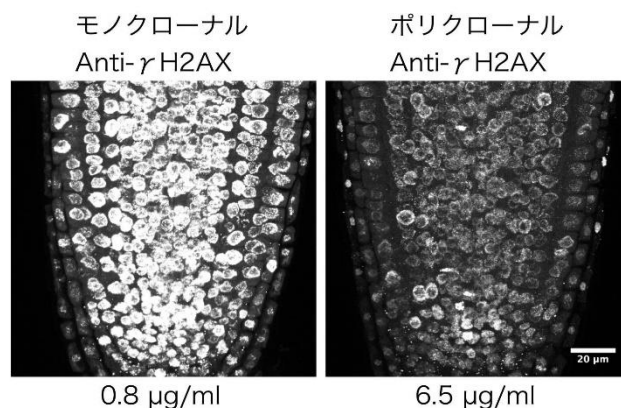


図 1 モノクローナル抗体とポリクローナル抗体の比較
X 線 50 Gy 照射 30 分後の根端を免疫蛍光染色し、同一撮影条件で撮影した。

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

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。

ル抗体、抗 H3K4me2 抗体(abcam 社)を用いた。二次抗体として、Alexa Fluor488 結合抗マウス IgG 抗体(Life Technologies 社)、および Alexa Fluor568 結合抗ウサギ IgG(Life Technologies 社)を用いた。抗体特異性を検証するためには、オリゴペプチドを用い、あらかじめ、一次抗体をこのオリゴペプチドとともに 37°C で 30min インキュベーションした後に標本に適用した。

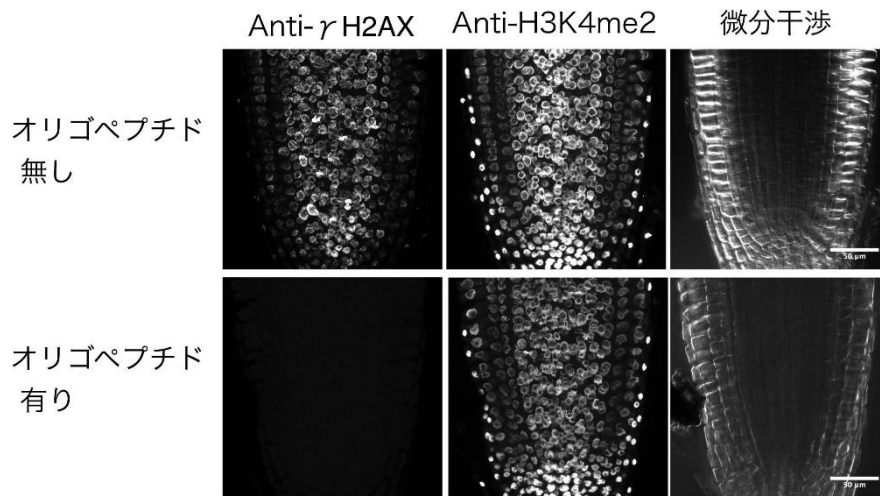


図 2 抗原ペプチドによる抗体吸収試験

X 線 50 Gy 照射 30 分後の根端を抗原ペプチド(上段)、あるいはブロッッキング液(下段)で前処理し、免疫蛍光染色を行った。

グを行った。その結果、組織標本で良好な結果を示した 2 クローンをサブクローニングし、3 種の候補クローンが得られたが、この内 1 クローンは照射組織への結合を示さず、最終的に 2 種の抗 γ H2AX 抗体産生ハイブリドーマ(6F8-2H11-1D6, 6F8-2H11-2D3)が得られた。

得られた、2 種のハイブリドーマの内、6F8-2H11-1D6 の培養上清から精製された抗体を用いて免疫蛍光染色を行い、規存のポリクローナル抗体との比較を行った結果を図 1 に示す。播種 4 日目の幼苗に 50 Gy の X 線を照射し、照射 30 min 後に固定を行った根端に対する両抗体の結合状況は、全体的な結合抗体の分布に関しては両者で差は見られなかった。ポリクローナル抗体を 6.5 μ g/ml で適用し、モノクローナル抗体はその 1/8 以下の濃度である 0.8 μ g/ml で適用したのにもかかわらず、得られた蛍光強度は明らかにモノクローナル抗体の方が高かった。以上の結果は、作製したモノクローナル抗体が、これまでのポリクローナル抗体よりも高い抗原特異性を持つことを示している。6F8-2H11-1D6 が作り出す抗体は、0.4~0.8 μ g/ml の濃度で免疫蛍光染色への適用が可能であった。

次に、6F8-2H11-1D6 で得られた抗体の、抗原結合特異性を確かめるため、播種 4 日目に X 線 50Gy を照射し、照射 30 min 後に固定した根端を材料に、0.4 μ g/ml の抗体を、2.1 μ g/ml の抗原として用いたリン酸化オリゴペプチド(CKGDIGSASQEF, S はリン酸化部位)と 37°C、30 min 前処理した後、根端に適用した場合と、リン酸化オリゴペプチドを含まず、ミルクカゼイン等のタンパク質を含むブロッッキング液で前処理した抗体を適用した場合で免疫蛍光染色を行い照射根端への結合状況を比較したところ、リン酸化オリゴペプチドでプレインキュベーションしてから根端へ適用した標本では、蛍光が極めて低く抗体の核への抗体結合がほとんど見られないことがわかった(図 2)。この結果は、作製した抗体が γ H2AX のリン酸化アミノ末端を特異的に認識していることを示している。

以上の結果より、作製したモノクローナル抗体は、 γ H2AX のリン酸化アミノ末端を特異的に認識する、規存のポリクローナル抗体よりも 8 倍以上感度の高い抗体であることが明らかとなった。

III. 結言

今後は、作製した DNA 損傷マーカーに対するモノクローナル抗体を用いて、シロイヌナズナや他の一般作物で照射早期適正線量決定法の開発を試みる。

参考文献

- 1) E. Rogakou et al.: J. Biol. Chem. 273(10), 5858 (1998)
- 2) M. Sauer et al.: Nature Protocol 1(1), 96 (2006)

2.1.1.2. 植物・菌類の品種改良研究

2.1.1.2.1.

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 these pure culture conditions were established.

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、これらの純培養系を確立した。

I. 緒言

食品、医薬・化粧品、繊維産業などでは、商品価値を高めるための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。大量の細胞外多糖類を分泌し、乾燥や紫外線などの厳しい環境下で生存することが出来る陸生藍藻類は、有用物質の探索候補として有望である。その代表種である *Nostoc commune* (イシクラゲ) は日本全国に自生し、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、これにより県内産業の活性化に資することを目的としたものである。

II. 成果の概要

福井県内の 13 ヶ所で試料となる菌株を採取した後、純培養系を確立するために、パーコールによる密度勾配を用いて細胞外多糖類および夾雑物から細胞を分画した。回収した細胞単体を BG11 プレート上に展開して 24℃、 $50 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の光条件下で培養を行ない、各菌株の純培養体を得ることが出来た。各菌株の DNA を抽出し、16S rDNA および tRNA の DNA 配列を調べた結果、8 株が *Nostoc commune* であり、それぞれは異なる種類のものであることが明らかとなった。

得られた純培養株に対してプロトン照射を行い、変異導入の最適を検討したところ、2000Gy 程度の比較的高い線量が適していることがわかった。この条件検討の過程において、野生株と較べて多量の細胞外多糖類や色素成分を分泌する変異株を複数得ることが出来た。

III. 結言

今後は、イオンビーム照射を行なった菌株に対して紫外線照射による選抜を行ない、紫外線吸収物質であるマイコスポリン様アミノ酸 (MAA) の高生産株や抗酸化活性物質の高生産株の獲得を目指し、その特性と生産量評価を行なう。また、細胞外多糖類の高分泌株の選抜についても並行して実施する予定である。

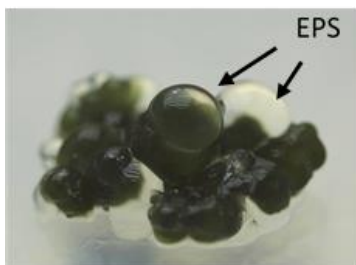


図1 細胞外多糖類を分泌したイシクラゲのコロニー

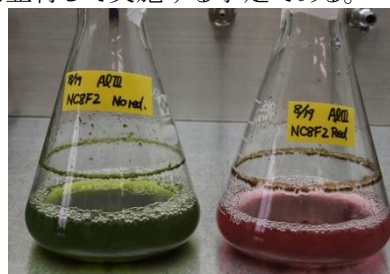


図2 赤色素の高生産株(右)

参考文献

1) 小杉真貴子 菓子野康浩 他 南極資料, 56, 3 (2012)

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ(現 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。

2.1.1.2.2.

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、藤田和義*2、高城啓一*2

Takaharu FUJII, Kazuyoshi FUJITA and Keiichi TAKAGI

Abstract

We have tried to improve ornamental flowers, chiefly sea lavenders and eustomas by ion-beam breeding. We have obtained some candidate of new cultivars with novel flower colors or flower shapes.

要約

スターチス類、ユーストマを中心に花卉類の粒子線照射による品種改良を試みている。これまでに幾つかの原品種とは花色や花型の異なる変異体候補が得られている。

I. 緒言

我々は、スターチス類、ユーストマを主体として粒子線照射による突然変異導入を用いた品種改良を行っている。昨年照射を行った材料からは、スターチス類やユーストマなどで幾種かの変異体系統候補が得られた。

II. 材料と方法

照射材料としてスターチス類(シネンシス、シネラリア、宿根スターチス)の培養苗、ユーストマ、アスター、カルタマス等の乾燥種子を用いた。

粒子線の照射は、福井県若狭湾エネルギー研究センターの W-MAST 生物照射コース(高エネルギー)を用いた。陽子線のエネルギーは 200 MeV, 炭素線のエネルギーは約 450 MeV である。X 線照射には X 線照射装置(MBR-1520R-3, 日立メディコ)を用いた。

照射を行った材料は福花園種苗の試験農場で育成を行っている。

III. 結果と考察

昨年度炭素線照射を行ったスターチス類からは、淡黄色の花弁に変化したシネンシスが得られた。陽子線照射を行ったスターチス類からは、花序が 2 列になる(ブラシ W)シヌアータ(図 3)3 株、淡黄色花弁のシネンシス 2 株、および茶色の萼片を持つシネンシス 1 株が得られた。淡黄色花弁のシネンシスが得られたのは炭素線、陽子線ともにキノラパンという品種であり、この品種で淡黄色変異の頻度が高いと考えられた。

粒子線や X 線を乾燥種子に照射したものからは、X 線を照射したユーストマ種子から、桃覆輪や新奇の紫しぶきの花(図 4)などの変異体候補が得られた。炭素線照射を行ったカルタマス種子からは、早生、中生、中晩生、晩生といった花成の次期が異なる様々な変異体候補が得られた。ユーストマの花色変異に関しては、多くがキメラを形成しており、種子胚中の茎頂分裂組織の一部に突然変異が生じ、これが特定の枝を構成する分裂組織内で大勢を占めたために表現型として表出したものと考えられる。



図 3 ブラシ W のシヌアータ



図 4 紫しぶきのユーストマ

IV. 今後の展開

これまでに得られた変異体を含め、商品価値が高いものや、交配親として有望だと考えられる形質を示すものは、栄養系繁殖により増殖を行うものについては変異枝からの栄養繁殖を繰り返して形質の固定を図る。種子繁殖を行うものについては、自家交配等交配を行って後代の形質確認を行い、形質の固定を図る。このような過程を経て、品種登録可能な品種の確立を目指す

*1 福花園種苗株式会社・生産技術部・生産技術グループ、*2 福花園種苗株式会社・生産技術部・生産技術グループ(現 株式会社 ディービー サービス)、*3(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ(現生物資源研究室)
本研究は、福花園種苗株式会社と(公財)若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究として実施した。

2.1.1.2.3.

サフラン球根の陽子線照射個体の育成
 Growing of Proton Beam Irradiated Saffron Bulbs
 細川宗孝^{*1}、高城啓一^{*2}
 Munetaka HOSOKAWA and Keiichi TAKAGI

I. 緒言

サフラン(*Crocus sativus*)は、雌薬が香辛料や生薬として非常に高価で取引される作物であるが、三倍体で育種が非常に困難である。サフランの開花期変異体を得ることができれば、収穫期までの栽培期間の短縮や、収穫期の延長を図ることが可能で、サフランの生産性を高めることができる。本研究では、開花期変異体を得ることを目標にしている。2013 年に陽子線を照射したサフラン球根の子球の養成を行った。

II. 内容

花芽形成期前、および花芽形成期のサフラン球根(大分県竹田市産)に対して、2013 年に種々の線量で陽子線(200 MeV, 3 Gy/min)を照射し、植物体を育成した。2014 年に萌芽が見られた 40 Gy 未満の線量区の植物体を育成した。20Gy および 10Gy では 2015 年に球根が得られたが、総じて 20Gy では小さな球根しか得られなかった。2014 年から 2015 年にかけてさらに球根養成を行ったが、20Gy 区の球根は全て萌芽しなかった。10Gy 区で得られた球根は球周 5cm 程度に達し、次年度に開花する大きさに達したものも見られた。サフランは開花球に達するまでの期間が長く、線量の影響は球根養成 2 年目にも現れるものと考えられる¹⁾。今後は本年度に引き続き、10Gy 照射個体から分球した球根について栽培し、花の形質調査を行う予定である。

参考文献 1) M. Sharaf-Eldin et al. : Z. Arznei-Gewurzpfla 20, 84 (2015)

^{*1}京都大学大学院・農学研究科、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ(現生物資源研究室)
 本研究は、京都大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究として実施した。

2.1.1.2.4.

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た。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を獲得してきた。この 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構築することができた。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のスクリーニングに成功した。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・生物資源グループ(現生物資源研究室)、^{*2}富山大学・工学部生命工学科
 本研究は、富山大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究として実施した。

2.1.1.2.5.

新たな特性をもつオオムギ品種の開発を目指した炭素線処理条件の検討
 Conditioning of Carbon Beam Irradiation for the Mutation Breeding of New Valuable 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、品質に関わる貯蔵タンパク質組成やリポキシゲナーゼ活性、ポリフェノール含量、 β -グルカン含量に関わる突然変異をイオンビームによって効率的に誘発し、新品種開発に利用する。

II. 内容

六条オオムギ品種ファイバースノウなど 3 品種を材料として、適切な炭素線処理線量を明らかにするために 10～100Gy の線量での処理(各線量・品種)を行った。処理当代 60 粒の苗立ち率及び播種 7 日後の草丈を調査した結果、苗立ち率は 50Gy 以下の処理ではほとんど区で 95%以上、他区に比べて低かった 100Gy 区でも 86%以上となった。草丈は処理線量の増加にともなって、小さくなる傾向がみられ、とくに 100Gy 区ではいずれの品種も無処理区比 26～38%と著しい草丈抑制効果が見られた。この結果から、突然変異育種のための本照射では苗立ちが安定し、草丈抑制に示される照射効果も現われている 50Gy 処理と、苗立ち率・草丈ともに十分な照射効果が現れている 100Gy 処理の 2 区を設け、各品種・線量で約 1000 粒を処理した。照射種子は 2014 年 10 月に中央農業総合研究センター北陸研究センター(新潟県上越市)温室に播種した。アルビノ個体、稔性低下個体が多く見られ、突然変異が効果的に誘発されていると考えられた。今後、 M_2 個体の栽培を 2015 年秋播きで開始し、農業特性や品質特性に関する変異スクリーニングを行い、有用変異を獲得する。

^{*1}農研機構・中央農業総合研究センター・北陸研究センター・作物開発研究領域、^{*2} 農研機構・近畿中国四国農業研究センター・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・生物資源グループ(現 生物資源研究室)
 本研究は、農研機構と(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。

2.1.1.3. 植物工場関連技術開発

2.1.1.3.1.

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. To establish a new light supplement system, the light supplement circuit with a feedback mechanism was developed.

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った。新しい補光システムを確立するために、フィードバック補光回路を開発した。

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。好塩性野菜に関しては、今まで各種照明条件による栽培試験を行い、種々の栽培データを取得してきた。

本研究では、こうした各種照明条件による栽培結果のデータ蓄積を行いながら、栽培予測型の栽培装置の開発を目指している。具体的には、外光の変動を逐次測光しながら、照射光の不足分を算出し、その不足分を LED で補光するフィードバック制御機構を有した新しい栽培装置を開発する。

II. 成果の概要

照射光の不足分をフィードバックして LED 補光するには、(1)外光の分光分布、光強度を計測し、(2)至適分光スペクトルとの比較を行い、不足分の光強度を算出し、(3)各色 LED の補光量を決定し、(4)各色 LED による補光を行い、(5)再度分光分布、光強度を計測し、(6)至適分光スペクトルとの比較を行う、といった流れで補光する必要がある。LED は厳密には、各色素の吸収極大波長にピーク最大を合わせることが出来ないため、追加する補光量を簡便に決定することは、現実的にやや困難である。そこで、光合成の作用感度を数値化する、あるいは波長を決めて、その波長での光強度を目標値にする、といった対応により、その数値に補光量を合わせるような仕組みが補光制御として妥当と判断した。

その数値化に関しては、光合成による光吸収の効果から、光形態形成による抑制の効果を引くことで、異なるスペクトルによる光放射においても光合成量に相関をもつと予測することで、LED 補光量の適正化を図り、それをモデル化することを考えた。

こうした考え方に基づいて、照射光の不足分をフィードバックして補光する光制御装置の試作を行った。実際に外光の変化に追従して補光できるかについて、予備試験を行ったところ、図1に示されるように、自然光に加えて強光を与えると信号が減衰し、強光の付与をやめると信号が増強されることが示され、フィードバック補光が可能であることを確認した。

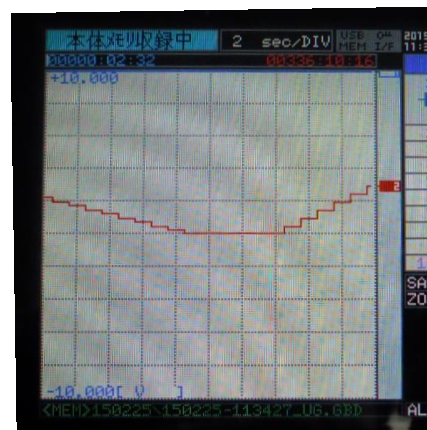


図1 外光を感知して、補光信号を与えている様子

III. 結言

今後は、外光の不足分に相当する光を LED で補光するフィードバック型の補光制御システムを用いて、野菜の栽培試験を行う。無補光および一定補光条件と比較することで、本補光制御システムの検証を行う。

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

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。

2.1.1.3.2.

生物多様性を活用する植物改良新技術の開発

－ タバコ種間雑種植物のシャペロンタンパク質が誘導する細胞障害について －

Developing Novel Plant Improvement System Based on Biodiversity

－ The role of chaperone proteins in cellular impairment of interspecific hybrid of genus *Nicotiana* －

吉岡桃子^{*1}、田中良和^{*2}、三野眞布^{*3}、

Momoko YOSHIOKA^{*1}, Yoshikazu TANAKA^{*2} and Masanobu MINO^{*3}

Abstract

The chaperon protein complex (HSP90, SGT1, RAR1) for R protein might be implicated in the weakness of interspecific F₁ hybrid between *Nicotiana glauca* and *N. tabacum*. To analyze precisely which protein is more involved in the weakness of hybrid, the biochemical analysis was performed by agroinfiltration methods. Changes in the traits including 1) ion leakage, 2) chlorophyll contents, 3) chlorophyll fluorescence, 4) reactive oxygen species, showed the evidences that NgRAR1 is the most effective protein inducing cell lesion of *N. tabacum*.

要約

植物の抵抗性(R)タンパク質を管理するシャペロン複合体(HSP90-SGT1-RAR1)は *N. glauca* Domin x *N. tabacum* L.の雑種致死発現に深く関与し、中でも NgRAR1 の役割が大きい。本研究は、NgRAR1 による *N. tabacum* の細胞障害を、1)イオン漏出、2)クロロフィル含量、3)クロロフィル蛍光収率、4)活性酸素発生、などの生化学的特性から調査した。その結果、NgRAR1 は NtRAR1 よりも強い細胞障害を引き起こすことを確認した。

I. 緒言

遠縁交雑による雑種から新しい品種を育成することは、将来の変動が予測される農業生態環境において植物改良の観点から重要である。しかし、種間に横たわる生殖隔離がその効率を下げるという問題が本育種法の最大の欠点である。それ故、生殖隔離の遺伝的基礎を明らかにすることは、より広範な遺伝子源を植物改良に利用する上で重要な情報を与えてくれる。筆者らはタバコ種間雑種を用いて、この生殖隔離には植物の病原抵抗性に関与するシャペロンタンパク質が深くかかわることを明らかにしてきた¹⁻³⁾。一連の研究から、R タンパク質を管理するシャペロン複合体である suppressor of G2 allele of *skp1* (SGT1)、required for Mla12 resistance (RAR1)、heat shock protein 90 (HSP90)の両親型タンパク質のそれぞれが、雑種において組み合わせることが R タンパク質の管理に不具合を起こさせることが、生殖隔離の現象を説明する好適なモデルとして提唱され、3つのシャペロンタンパク質の内、NgRAR1 の役割が大きいと予測された⁴⁾。本研究は、種間でのシャペロンタンパク質の組み合わせが細胞にどのような影響を及ぼすのかの生化学的特徴を明らかにすることを目的に実施した。

II. 材料および方法

1. 実験材料

N. tabacum の苗をポットに移植し、その後 5 週齢まで人工気象室で(25℃ 16h 明/8h 暗)で栽培し、Agroinfiltration の材料とした。

2. 遺伝子構築

HSP90, SGT1, RAR1 の発現遺伝子構築は塩谷ら⁴⁾の方法に従い作製した。

3. Agroinfiltration 実験

塩谷ら⁴⁾の方法に従い *N. tabacum* の葉身裏面から葉肉細胞間隙に注入した。ネガティブコントロールとして pRI101-AN ベクターを、ポジティブコントロールとして pRI101-MEK^{DD}を用いた。

4. 生化学特性の評価

1)イオン漏出 :Agroinfiltration 後 6、12 日目の葉身についてイオン漏出量を Twin Cond B-173 で調べた。

2)葉緑素含量:DMSO で溶出した葉緑素を 663.8 nm と 646.8 nm の吸光度で測定した。

^{*1} 京都府立大学大学院・生命環境学部 (現イオンアグリ創造株式会社)、^{*2} (公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ (現生物資源研究室)、^{*3} 京都府立大学大学院・生命環境科学研究科、
本研究は、京都府立大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究として実施した。

- 3)クロロフィル蛍光収率:光合成計測器 miniPPM-300(PAM)により測定した。
- 4)活性酸素測定 :DAB 染色により局所的に発生する過酸化水素を測定した。
5. ゲルダナマイシン(GDA) 処理
Agroinfiltration 処理した葉身領域に 2 日後 DMSO で溶解した 1 μ M の GDA を infiltration し、イオン漏出の変化を測定した。

Ⅲ. 結果と考察

1. 生化学的特性

HSP90-SGT1-RAR1 の組合わせで Agroinfiltration を実施した。この時、3 つの遺伝子について Nt-Nt-Nt(#7) の組合わせと Nt-Nt-Ng(#9)の組合わせを 1 セット、さらに Ng-Ng-Nt(#13)と Ng-Ng-Ng(#15)の組合わせを別の 1 セットとした。Agroinfiltration 後の比較は#7 と#9、#13 と#15 との間でそれぞれ行った。

材料および方法に記載した 1)~4)の形質については、#7 よりも#9、また#13 よりも#15 がより強い細胞障害を発生していることが確認された。具体的には、#9 と#15 は共に、それぞれ#7 と#13 よりもイオン漏出率を増大させ、葉緑素をより大きく減少させ、クロロフィル蛍光収率を低下させた(光化学系 II での光エネルギー収率が低下して光合成能が低下していることを示す)。また、活性酸素の発生はより多くなる傾向を示した。以上の所見はシャペロン複合体の組合わせにおいては、*NgRAR1* が最も強い細胞障害を起こす要因であることを示している。三つの遺伝子それぞれを単独に処理すると、*SGT1* と *RAR1* が *N. gossei* 由来であると *N. tabacum* に細胞障害を引き起こすことも確認されたが、その程度は 3 つの遺伝子を組み合わせる場合よりも軽い傾向にあった。他方、*HSP90* は単独では、*N. tabacum* と *N. gossei* いずれにも細胞障害を起こす効果は認められなかった。

2. GDA の効果

GDA は *HSP90* の ATP 結合部位に拮抗的阻害を起こす試薬であり、*HSP90* の機能を低下させる。従って、GDA 処理はシャペロン複合体の機能をも低下させると考えられる。Agroinfiltration 後に GDA を infiltration すると *N. tabacum* の細胞障害は明らかに抑制された。このことから、*NgRAR1* はシャペロン複合体を通して *N. tabacum* に細胞障害を引き起こすと結論できる。

3. まとめ

種間 F₁ 雑種、*N. gossei* x *N. tabacum* においてはシャペロン複合体を構成する *HSP90*、*SGT1*、*RAR1* が両種に由来して混在するだけでなく、その管理下にある R タンパク質もまた混在する。そして、これが雑種における不適なシャペロン複合体の組み合わせ、そして R タンパク質の不適正な管理につながり、結果として不要な抵抗性反応をおこす結果が雑種致死であるとする仮説は説得力がある。この意味で、本研究の結果は塩谷ら⁴⁾が提唱した上述の仮説が細胞レベルで正しいことを実証している。細胞からのイオン漏出は過酸化水素の発生を伴うプログラム細胞死の典型症例であり、*NgRAR1* による *N. tabacum* 細胞の障害が病原に対する抵抗性反応と同じものであることを示している。そして、この障害は植物細胞にとり基本ともいえる光合成能力を低下させる反応を伴うことであることが確認できた。また、GDA による細胞障害の抑制は、*N. gossei* x *N. tabacum* の雑種致死がシャペロン複合体の機能不全が一因となる R タンパク質介在の細胞死によることを強く支持している。

参考文献

- 1) M. Mino et al. 10th International Congress on Plant Molecular Biology, Book of abstract p.306 (2012)
- 2) 三野ら 若狭湾エネルギー研究センター研究年報(平成 23 年度)
- 3) 高田ら 若狭湾エネルギー研究センター研究年報(平成 23 年度)
- 4) 塩谷ら 若狭湾エネルギー研究センター研究年報(平成 24 年度)

2.1.1.3.3.

トマト栽培ハウス温調用のヒートポンプ・BACH 融合システムの開発

Development of a Hybrid System that Combines Bubble-Activated Circulating Heat Pipe (BACH) and Heat Pump for Greenhouse Facilities of Tomato Culture

畑下昌範^{*1}、永井二郎^{*2}

Masanori HATASHITA and Niro NAGAI

現在、日本国内の施設園芸市場規模は約 2 兆円であり、その施設面積約 5 万 ha の内、約 44%の施設が冬季暖房設備を必要としている。しかし、その暖房設備の 95%が石油暖房方式であり、コスト抑制・安定と通年栽培実現のため、ハウスの断熱性向上と省エネ(低コスト)温調設備導入が強く求められている。ハウスの冬季暖房省エネ化のために、ヒートポンプの導入が最有力視されているが、通常の空気熱源ヒートポンプでは、冬季デフロスト運転が必要なため、積雪寒冷地域においては省エネ化に限界がある。

そこで、地中熱源利用ヒートポンプ(GSHP)が注目されている。従来の GSHP では、地中に長さ数十mの熱交換杭を埋設し、熱媒体として水をポンプで循環させ地中熱を地上に輸送し、ヒートポンプに供給する。しかし、熱交換杭埋設の高初期コストや、熱輸送用ポンプ動力低減が課題となっている。

本研究では、これら GSHP の課題を克服するため、地下 4m の浅層地中熱源を無動力で地上に熱輸送するヒートパイプ BACH と水熱交換型ヒートポンプを直接融合させた省エネ化暖房システムの開発を目的とした。BACH は水冷ヒートポンプ1台につき、8 セット使用し、ヘッダー管で1本にまとめてヒートポンプに接続する方式にした。ヒートポンプは、BACH の作動液を直接熱交換部に流動させることとし、出力側はポンプで水を循環させる方式にした。ハウス内のトマト1畝に、ヒートポンプ2次側熱交換口から温調された水を配水するパイプを設置し、水が循環することを確認した。ただし、BACH 作動液還流の不具合により、ヒートポンプ所定の暖房出力は出していない。今後は、実証データの蓄積とさらなる改良による性能向上を行い、植物工場の空調省エネ化を検討する予定である。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ(現生物資源研究室)、^{*2} 福井大学大学院・工学研究科・機械工学専攻
本研究は、公募型共同研究事業として実施した。

2.1.2. 粒子線がん治療研究

2.1.2.1. 治療計画システム高度化研究

2.1.2.1.1.

陽子線・ヘリウム線による脳壊死モデル作成技術の確立
ー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ー

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}、前田宗利^{*2}、伊東富由美^{*2}、久米恭^{*2}

Natsuko KONDO, Yoshinori SAKURAI, Takushi TAKATA, Hiroki TANAKA,

Tsubasa WATANABE, Minoru SUZUKI, Munetoshi MAEDA, Fuyumi ITO 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.

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。

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、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、計画的なサクリファイスを行った。サクリファ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。

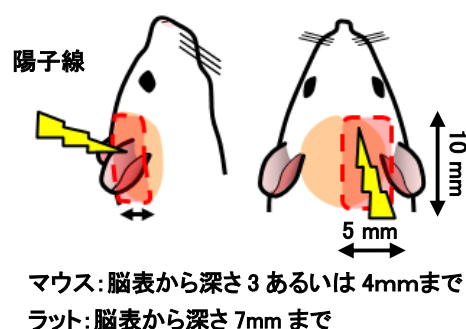


図 1 マウスおよびラットの照射範囲

^{*1}京都大学原子炉実験所、^{*2}(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。

Ⅳ.まとめ

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。

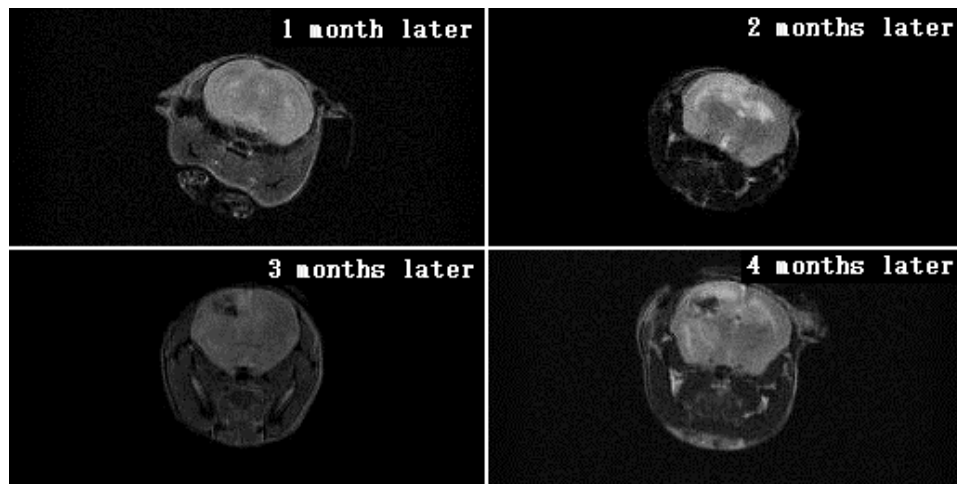


図 2 深さ 3 mm まで 80 Gy を照射したマウスの MRI-T2 強調画像の経時変化

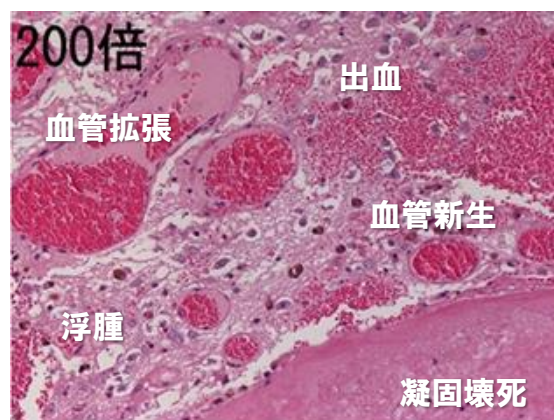


図 3 深さ 3 mm まで 60 Gy を照射したマウスの 8 ヶ月後の脳の病理組織

2.1.2.1.2.

陽子線治療における品質保証技術の研究開発

Research and Development of Quality Assurance Technique for Proton Therapy

西尾禎治^{*1}、田中創大^{*1}、松下慶一郎^{*1}、株木重人^{*1}、酒井和幸^{*1}、前田宗利^{*2}、伊東富由美^{*2}、久米恭^{*2}

Teiji NISHIO, Soudai TANAKA, Keiichiro MATSUSHITA, Sigeto KABUKI,

Munetoshi MAEDA, Fuyumi ITO and Kyo KUME

陽子線治療はブラッグピークを活かすことで腫瘍へ線量を集中することが出来る高精度放射線治療法の一つである。陽子線照射野検証のための絶対線量測定法及び線量分布測定法、また、治療計画における線量計算精度の向上に関する研究開発は、粒子線治療の品質保証の高度化に貢献することであり陽子線治療の更なる発展に寄与する。平成 26 年度は線量計算精度の向上に関する研究開発として、陽子線 CT 画像の取得技術の開発を行った。陽子線治療の治療計画立案時には、陽子線の線量計算において体内の電子密度分布取得が極めて重要であり、従来は X 線 CT 画像によりこの体内電子密度分布取得を行ってきた。X 線 CT 画像の代わりに陽子線 CT 画像の取得とその臨床活用が実現すれば、陽子線治療の高精度化に繋がる。

開発したプロトタイプ陽子線 CT 画像取得システムは、20 cm×20 cm×5 cm 及び 15 cm×15 cm×35 cm のプラスチックシンチレータ、電気冷却タイプ CCD カメラ、被写体回転テーブルを組み合わせた構成である。陽子線照射軸上に上流から回転テーブル上の被写体、プラスチックシンチレータを配置する。被写体を通過した陽子線の残余エネルギーをプラスチックシンチレータで検出し、陽子線照射軸と直交するプラスチックシンチレータ面上の場所ごとのシンチレーション光を計測することで、被写体の周り 360 度方向からの陽子線透視画像を撮影する。撮影した陽子線透視画像を基に画像再構成を行うことで陽子線 CT 画像を取得することができる。若狭湾エネルギー研究センターの多目的加速器システム高エネルギー生物照射装置において、200 MeV、3 nA の陽子線を使用して照射実験を実施した。陽子線はワブラー法により静的に照射野形成した。尚、22 mm φ の円柱型水ファントムを被写体とした。200 MeV の陽子線の場合、被写体及びプラスチックシンチレータ中での散乱効果によって、陽子線透視画像にぼけが発生することを確認できた。本実験より得られた結果から、陽子線エネルギーと被写体厚及びプラスチックシンチレータ厚の最適な組み合わせについて、今後、検討予定である。

^{*1}(独)国立がん研究センター東病院・臨床開発センター・粒子線医学開発分野、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ

本研究は(公財)若狭湾エネルギー研究センターと(独)国立がん研究センター東病院との共同研究契約に基づき実施した。

2.1.2.2. 粒子線作用の素過程の解明

2.1.2.2.1.

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}、長谷川崇^{*1,*3}、田辺久美子^{*1}、村上雅之^{*1}、久米恭^{*1}

Munetoshi MAEDA, Hideki MATSUMOTO, Fuyumi ITO, Takashi HASEGAWA,

Kumiko TANABE, Masayuki MURAKAMI 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

1. 研究の背景と目的

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)回数の低減や周辺部位への被ばく低減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、福井県陽子線がん治療センターにおける治療技術の最適化・高度化に繋がると考えられる。

そこで、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研究し、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の蓄積を目指す。

2. 研究の意義

日本で陽子線によるがん治療が開始されてから約 30 年が経過したが、比較的高コストの設備投資が必要であることもあり、従来の X 線による治療に比べて治療事例はまだ少ない。一般的に、同じ物理線量を照射した場合における陽子線の生物効果は X 線の約 1.1 倍と言われており、治療線量は X 線での治療実績を基に X 線の適正線量の 1/1.1 倍とされている。しかしながら、近年、陽子線のブラッグピーク(図 1)以降の飛程末端部(トラックエンド側)では、これまで考えられてきたよりも生物効果が高い可能性が指摘されつつある。この特徴の詳細な理解は、より治療効果の高い治療線量の設定や治療回数の低減、これに伴う副作用の減少などに繋がると考えられる。より患者負担が少なく治療を受けやすい陽子線がん治療を実現して行く上で、本研究は必要不可欠であると考えられる。

また、基礎的なデータを実際の治療へ反映して行くためには、動物レベルでの検証実験を実施する必要がある。陽子線照射が腫瘍および正常組織に与える影響を詳細に評価することは、陽子線がん治療の高度化に必要不可欠である。

さらに、福井県若狭湾エネルギー研究センターは、国内で唯一、動物に対する陽子線照射実験を実際の治療ビームと同等の条件で実施可能な施設であり、陽子線のがん治療効果のメカニズムの解明を効率よく進めることができる。平成 26 年度以降は、この研究環境を有効に活用し、モデル動物を用いた動物実験を通じて、陽子線によるがん治療効果の向上に向けた各種検討に必要不可欠な基礎的なデータの蓄積に取り組む。

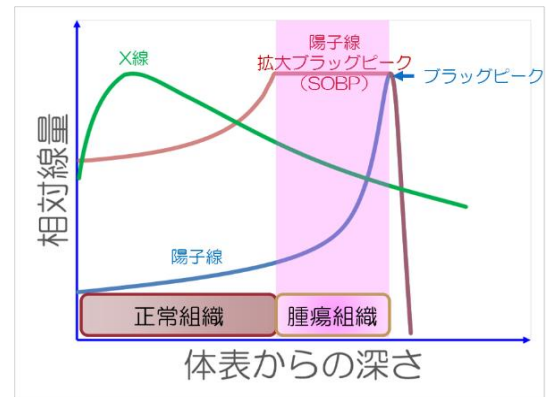


図1 陽子線と X 線の線量分布

X 線の場合、体の表面近くで吸収される放射線量が最も多く、深さと共に次第に減少して行く。陽子線の場合、一定の深さにおいて放射線量がピークになる特性を持ち(ブラッグピーク)、ビームの調整によりこのピークを拡大してがん病巣に合わせて照射する事で、腫瘍組織に集中して線量を与えることができる。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、^{*2}福井大学・高エネルギー医学研究センター、^{*3}(同)ハセテック
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県からの受託研究として実施した。本研究の一部は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと福井大学との共同研究として実施した。

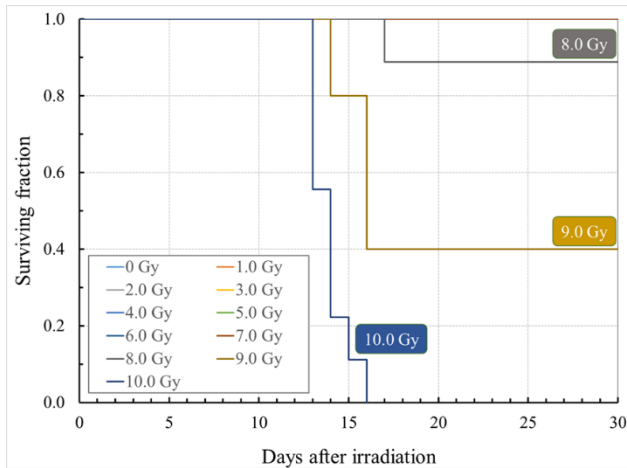


図2 陽子線で全身単回照射した ICR マウスの 30 日生存率

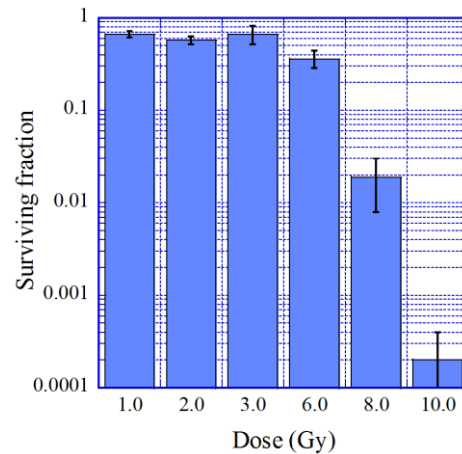


図3 陽子線で全身単回照射した ICR マウスの照射 14 日後における骨髄幹細胞の生存率

II. 成果の概要

1. モデル動物に対する陽子線単回照射の耐用線量の測定

- (1) 陽子線を全身単回照射した ICR マウスの 30 日生存率を測定し、単回照射線量と個体死との関係を明らかにした。8.0～10.0 Gy で照射したマウス群では、概ね 2 週間経過後に死亡が観察されるようになり、致死マウス数は線量の増大と共に増加した(図 2)。また、8.0 Gy 以上の照射群では、照射後 9～18 日目の間に、脱毛を伴う毛並みの悪化、動作の緩慢化、目視可能な耳の皮下毛細血管における血流の悪化、体重の減少、衰弱などの身体症状の悪化が観察された。特に衰弱個体については、死亡に至る場合が多かった。その一方で、これらの身体症状が現れても、8.0～9.0 Gy 照射群の一部のマウスでは、照射後 21 日目以降に身体症状の回復傾向が観察された。
- (2) 陽子線を全身単回照射した ICR マウス的大腿骨中の骨髄幹細胞の生存率を測定し、単回照射線量と造血前駆細胞の増殖能との関係を明らかにした。1.0～3.0 Gy では、造血前駆細胞の増殖能に顕著な差異は認められなかった(図 3)。一方、6.0 Gy 以上では増殖能が顕著に低下し、10.0 Gy では増殖能をほぼ失った(図 3)。以上の結果は、3.0～6.0 Gy の間に骨髄造血系の増殖能の閾値が存在する可能性を示唆すると共に、閾値以上の線量域では、線量の増大と共に個体の生存に不可欠な造血系の回復能が急激に低下して行くことが明らかとなった。

2. 陽子線照射による各種臓器への影響の評価

アポトーシスを指標とした ICR マウスの精巣および腸管におけるダメージ評価を実施した。陽子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。

III. 結言

陽子線治療では、そのエネルギー付与の特性から正常組織への障害の低減化が期待できる。しかしながら、陽子線治療を高度化し更に発展、普及させて行くためには、これまで知られていなかったトラックエンドにおける生物効果の増大や、皮膚から腫瘍までの間、あるいは腫瘍の後方に存在する正常組織に生ずる低線量被ばくの影響を正しく理解して行く必要がある。

平成 26 年度においては、モデル動物に対する陽子線照射実験を実施し、正常モデルマウスにおける、陽子線単回照射の生物学的影響を評価した。今後は、腫瘍を移植したモデル動物(担がんマウス)に対する陽子線照射実験を実施し、耐用線量の測定や組織影響評価、治療を模擬した分割照射による腫瘍動態の解析などを進めて行く必要がある。また、将来的には、更なる陽子線治療の発展と高度化に向け、陽子線治療における正常組織への低線量被ばくに伴う健康影響についても、様々な科学的考察により検証して行く必要があると考えられる。

2.1.2.2.2.

臨床研究に向けた陽子線と X 線の併用照射効果の細胞生物学的な検討

Estimation of the biological effects by combination irradiation with proton and X-ray beams

前田宗利^{*1}、伊東富由美^{*1}、長谷川崇^{*1,*2}、田辺久美子^{*1}、村上雅之^{*1}、久米恭^{*1}

Munetoshi MAEDA, Fuyumi ITO, Takashi HASEGAWA, Kumiko TANABE,

Masayuki MURAKAMI and Kyo KUME

Abstract

To accumulate the basic data for the advancement of radiation cancer therapy, we estimated the cellular effects induced by combination irradiation with proton and X-ray beams with various kinds of biological analysis.

要約

陽子線と X 線の混合放射線療法の確立に向けて、陽子線および X 線の併用照射による細胞レベルでの照射効果について種々の生物学的な解析により評価した。

I. 緒言

陽子線によるがん治療に加えて X 線による治療を実施する「陽子線および X 線の併用による混合放射線治療」は、比較的広範囲に病変が見られる進行がん等に対する新しい治療法として期待されている。福井県立病院陽子線がん治療センターでは、同治療法を用いた臨床研究の検討が進められており、数年以内の開始を目指している。混合放射線治療法の構築に際し、陽子線および X 線の併用照射による細胞レベルでの照射効果および作用機序の詳細は、欠く事のできない重要な情報である。本研究では、細胞生物学的な検討により、陽子線と X 線の併用照射による殺細胞効果およびその分子機構を定量的に評価する。

II. 成果の概要

混合放射線治療法の構築に際し、陽子線および X 線の併用照射による細胞レベルでの照射効果および作用機序の詳細は、欠く事のできない重要な情報である。本研究では、混合治療の効果を定量的に予測/評価するために、併用照射による正常細胞および腫瘍細胞の殺細胞効果の検証を実施し、同時に、正常細胞および腫瘍細胞における殺細胞効果の作用機序の分子生物学的解析を実施した。

1. 併用照射による正常細胞および腫瘍細胞の殺細胞効果の検証

ヒト正常細胞およびヒトがん(食道がん)細胞において、陽子線と X 線の併用照射による細胞致死効果が、陽子線および X 線の単独照射による効果の足し合わせとして予測される細胞致死効果よりも高いことを明らかにした(図1)。

2. 正常細胞および腫瘍細胞における殺細胞効果の作用機序の分子生物学的解析

PCR アレイを用いた遺伝子発現解析から、各照射条件における殺細胞効果に関わる細胞内の情報伝達経路を特定し、陽子線と X 線の併用照射による細胞致死効果が、それぞれの放射線に由来する細胞応答の相互作用によって増強されることを分子機構面からも確認した。

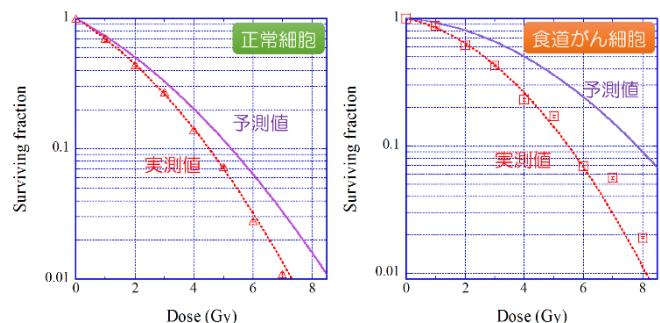


図1 併用照射による細胞致死効果の予測値と実測値

III. 結言

本研究から、陽子線と X 線の併用照射による細胞致死効果が、陽子線および X 線の単独照射による効果の足し合わせとして予測される細胞致死効果よりも高い可能性が明らかになった。引き続き、他のがん細胞における併用照射の効果を検証し、臨床応用研究の実施に向けた基礎的データを蓄積する必要がある。また、上述の研究では一定の条件としていたが、併用照射では線量混合比および照射間のタイムインターバル等の様々な可変パラメーターが存在する。混合放射線治療法の更なる高度化に向けた基礎的データを蓄積するためにも、これらのパラメーターに関する検証研究を継続する必要がある。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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。

2.1.2.2.3.

粒子線に対する生体内の作用機序の解明

The *in vivo* study of the particle beam-induced biological responses

前田宗利^{*1}、松本英樹^{*2}、伊東富由美^{*1}、長谷川崇^{*1,*3}、田辺久美子^{*1}、村上雅之^{*1}、久米恭^{*1}

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

Masayuki MURAKAMI and Kyo KUME

I. 緒言

細胞レベルでの知見を実験動物レベルで検証を行うために、生体内における腫瘍動態を解析するためのモデル動物実験系や実験動物に対する効率的な陽子線照射技術について検討を行った。

II. 内容

平成 26 年度より開始したモデル動物を用いた研究(陽子線治療対象の臓器および周辺の重要臓器を対象に耐容線量の測定や高い生物効果を有する陽子線飛程末端を利用した治療効果の検証など)では、平成 27 年度以降に腫瘍モデル動物実験系として、ヌードマウスに腫瘍組織を移植したマウス(担がんマウス)を用いる予定である。そこで、平成 26 年度には、生体内における腫瘍動態を解析するための腫瘍を移植したモデル動物系(担がんマウス実験系)を構築した。複数種のヒト由来腫瘍細胞を大量培養してヌードマウスの大腿部へ移植し、その生着および腫瘍形成を観察した結果、ヒト肺がん由来 A549 細胞を用いる事で、効率よく腫瘍塊を形成できることを見いだした。また、腫瘍塊を摘出し、適切な大きさに切り分けた上で、照射実験に使用するための担体ヌードマウスへ再移植可能な事を確認した。本研究で構築した動物実験系は、陽子線治療の高度化に向けた種々の検証実験に適用可能であり、腫瘍動態を解析するためのモデル動物実験の効率化に繋がると考えられる。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、^{*2}福井大学・高エネルギー医学研究センター、^{*3}(同)ハセテック
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと福井大学との共同研究として実施した。

2.1.2.2.4.

細胞質への照射によって誘導される細胞応答の解析

Analysis of the cytoplasmic irradiation-induced cellular responses

前田宗利^{*1}、小林克己^{*2}、宇佐美徳子^{*2}、松本英樹^{*3}、富田雅典^{*4}

Munetoshi MAEDA, Katsumi KOBAYASHI, Noriko USAMI, Hideki MATSUMOTO and Masanori TOMITA

我々は、独自に開発した X 線マイクロビームによる細胞局所照射手法を用いて、照射領域と細胞応答の関係、細胞質の放射線応答に関わる細胞内の情報伝達について解析を進め、平成 25 年度までに、細胞全体、細胞核、細胞質をそれぞれマイクロビームで照射した場合の細胞死の線量応答を明らかにした。また、照射された細胞の周辺の非照射細胞(バイスタンダー細胞)における突然変異の誘発頻度の解析から、バイスタンダー細胞群中の不安定な細胞が、一酸化窒素による情報伝達を介して選択的に排除されることを明らかにした。

平成 26 年度は、細胞質への照射の有無による DNA 修復系への修飾について、免疫組織化学的および細胞分子生物学的手法を用いて詳細な解析を実施した。細胞核のみを照射した場合に観察される低線量域における細胞死の増大は、照射によって誘導される細胞周期や DNA 修復系の制御機構が十分に誘導されないために生じると考えられる。換言すると、細胞質に放射線が照射されている場合、細胞質内に何らかの放射線センサーがあり、そこからの情報伝達によって DNA 修復を亢進させる機構が存在すると考えられる。この仮説が正しければ、低線量の X 線で細胞集団を照射した場合に見られる細胞核内の修復関連タンパク質の集積が、同線量で細胞核のみを照射した場合には誘導されないと考えられる。そこで、細胞質への照射がある場合に DNA 修復が亢進する可能性について検証し、細胞質への照射による細胞内応答によって、より低線量域より DNA 修復系が誘導されることを明らかにした。また、細胞質からのシグナリングは DNA 修復関連パスウェイのかなり上流に作用している事を明らかにした。

これらの成果は、低線量放射線のリスクやヒトへの健康影響の評価において、DNA を標的としたリスクモデルに一石を投じる重要な知見と考えられる。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、^{*2}高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・放射光科学研究施設、^{*3}福井大学・高エネルギー医学研究センター、^{*4}(一財)電力中央研究所・原子力技術研究所・放射線安全研究センター
高エネルギー加速器研究機構における実験は、放射光共同利用実験審査委員会(2010G040)の承認の下で行われた。本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが(一財)電力中央研究所および福井大学と共同で実施した研究の一部である。

2.1.2.3. その他の粒子線がん治療研究

2.1.2.3.1.

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
in Super-SCID Mice

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

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

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 lung cancer, prostate cancer and pancreatic cancer, yielding higher relative biological effectiveness (RBE) in all the three cancer tissues. Further studies will be continued and results will be compared with those of carbon and helium ions and reactor neutrons. 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、高いRBEを示した。研究を継続し、その結果は、炭素線、ヘリウム線、中性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, 2)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。さらに、乳がん等を加えて本研究を継続し、他の線種(炭素線、ヘリウム線、中性子線)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. 医薬基盤研究所において、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、医薬基盤研究所より若狭湾エネルギー研究センター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陽子線がん治療水平コース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。

^{*1}(独)医薬基盤研究所、^{*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(独)医薬基盤研究所の共同研究として実施した。

本研究は、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。

医薬基盤・健康・栄養研究所動物実験施設・動物実験委員会および(公財)若狭湾エネルギー研究センター・動物実験委員会の承認の下、ガイドラインに沿って十分に動物愛護上の問題点に配慮して研究を実施した。

III. 結果

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(図1)、前立腺がん415(図2)では、高線量群で腫瘍増殖の抑制効果がみられている(各線量毎移植腫瘍数4)。

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医薬基盤研究所で実施している。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、慎重に実験を進めている。得られた成果については、炭素線、ヘリウム線³⁾との比較を行う。また、乳がん組織への陽子線照射実験も計画する。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。

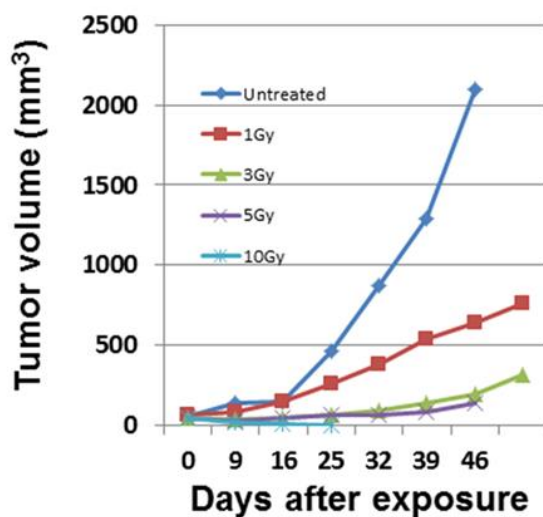


図1. 肺がん症例575

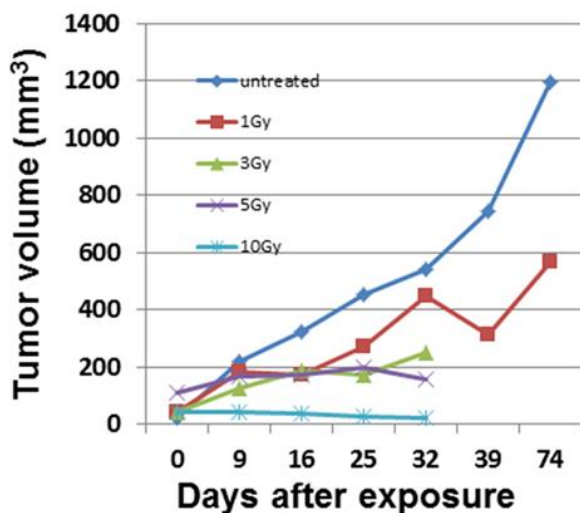


図2. 前立腺がん症例415

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) 基盤研究 A 成果報告書「放射線および化学物質の直接人体影響とそのメカニズム」、代表;野村、2015.

2.1.2.3.2.

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 the normal tissues exposed to protons at low dose
in the proton radiotherapy

松本英樹^{*1}、前田宗利^{*2}、長谷川崇^{*2,*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, the number of surviving stem cells in the bone marrow exposed to protons at low dose were examined using the *in vitro* culturing system.

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、低線量陽子線を全身被ばくしたマウス的大腿骨から骨髓細胞を調製し、骨髓幹細胞培養システムを用いて骨髓幹細胞の生残数を評価した。

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、当該共同研究計画を立案した。

II. 成果の概要

陽子線がん治療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、低線量陽子線を全身被ばく後 14 日間飼育したマウスから大腿骨を摘出し、骨髓細胞分画を調製し、骨髓幹細胞の生残数を骨髓幹細胞培養システムにより評価した。その結果、0.1 Gy 以下の陽子線を全身被ばくしたマウスの生残骨髓幹細胞数は、非被ばくマウスと比較して有意差は認められなかった。

1. 低線量陽子線照射時の線量検証

0.01~0.1 Gy の陽子線のマウスへの全身照射を実施するにあたり、線量の正確性を線量の測定および計算により評価した。その結果、設定値と実測値が最も異なった場合においても、その差異は 5 pulse (線量換算で 4.95×10^{-5} Gy) であり、正確な低線量陽子線のマウス全身照射が可能であることが示された。

2. 低線量陽子線被ばくしたマウス大腿骨の骨髓幹細胞の動態

ICR マウス(jcl:ICR、雄、5 週齢)に 0.01~0.1 Gy の陽子線を全身照射し、照射後 14 日目に両側的大腿骨を摘出し、骨髓細胞を調製し、骨髓幹細胞培養システムにより骨髓幹細胞の生残数を解析した。その結果、0.01~0.1 Gy の陽子線を全身照射したマウス大腿骨の生残骨髓幹細胞数は非照射のマウス大腿骨の数値と比較して有意差は認められなかった(表 1)。

表 1. 1×10^5 個の骨髓細胞あたりの生残骨髓幹細胞数

線量 (Gy)	0	0.01	0.02	0.03	0.05	0.1
生残骨髓幹細胞数 / 1×10^5 個の骨髓細胞	123.9	112.5	125.7	114.0	121.0	121.3
誤差 (±)	10.1	9.8	3.8	6.5	3.6	1.4

III. 今後の課題と展望

0.1 Gy 以下の陽子線全身照射によるマウス大腿骨骨髓幹細胞への影響はほとんど認められなかった。しかしながら今回の解析結果は、照射後 14 日目の結果であり、一旦は影響を受けた骨髓幹細胞が 14 日間の間に回復してきたという可能性は否定できない。従って、今後さらに経時的に 0.1 Gy 以下の陽子線を被ばくした骨髓幹細胞の動態を解析する必要があることが示唆される。

^{*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、^{*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。

2.1.2.3.3.

陽子線がん治療における高度な照射法に対応した検証技術の開発

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}、水嶋慧^{*1}、久米恭^{*1}

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

I. 緒言

急速に増加するがん患者の治療に対応していくためには、より高度で安全かつ安心な放射線治療技術の高度化の研究開発が必要不可欠であるが、リアルタイムで照射野における線量分布のモニタリングや患部の目視確認については実施されていない。そこで、本研究では治療中の線量分布を簡便かつリアルタイムにモニタリングすることを目的として、陽子線を照射された蛍光板の発光現象を用いて照射対象表面における線量分布をリアルタイムに可視化する技術の検討を行った。

II. 内容

蛍光板を貼り合せた二次元検出器を試料台に設置して、加速器から出射した陽子線を試料台に設置した二次元検出器に照射した。陽子線(200 MeV)は、両方の検出器で有意な計測ができるように 0.5 nA のビームを 6 秒間照射した。

照射中の蛍光板の発光現象はビデオカメラを用いて撮影して、陽子線照射時の蛍光板の発光状況を確認した後、imageJ¹⁾を用いて画像解析を行った。画像解析により取得した蛍光板の発光強度と二次元検出器により取得した線量分布の同じ位置の比較をした結果、陽子線ビームのペナンプラサイズは一致し、ビーム径を反映していることを確認した。この結果から、蛍光板の発光現象から線量分布をモニタリングする事が可能であることが分かる。

1) National Institutes of Health, U.S.A, Image Processing and Analysis in JAVA (<http://imagej.nih.gov/ij/>)

^{*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文部科学省からの受託研究として実施した。

2.1.2.3.4.

放射線治療抵抗性腫瘍に対する PET を用いた陽子線治療効果判定に関する基礎検討

The effectiveness of proton irradiation to cancer cells under hypoxic conditions

清野泰^{*1}、森哲也^{*1}、岡沢秀彦^{*1}、久米恭^{*2}

Yasushi KIYONO, Tetsuya MORI, Hidehiko OKAZAWA and Kyo KUME

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、陽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陽子線照射が有効であることを基礎的に検討した。

II. 内容

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 の陽子線を照射した。陽子線照射翌日から 4 日間の細胞数の経時変化を観察した。対象として同様の検討を X 線で行った。その結果、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照射群では、細胞数が有意に低下していた。以上の結果は、X 線照射と異なり陽子線照射は酸素濃度の影響を受けにくいことを示唆しており、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。

^{*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。

2.1.2.3.5.

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

I. 緒言

若狭湾エネルギー研究センター(WERC)に設置されている多目的シンクロtron・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 13 年度から平成 21 年度まで陽子線臨床研究を実施した。前年度までに引き続き、平成 26 年度も経過観察を行った。

II. 内容

臨床研究を実施した期間に受け入れた患者 62 名の経過観察を行い、平成 26 年度までに次の累計を得た。

前立腺がん患者 55 名は、他病死 1 名を除く 54 名が生存している。血中 PSA 値が再上昇し、転移と診断されたのは 1 名である。前立腺がんについては局所制御できているものと思われる。直腸出血等の有害な晩発事象が発生したのは 10 名(グレード 1 は 7 名、グレード 2 は 2 名、グレード 3 は 1 名)である。肝臓がん患者 6 名については全員が死亡した。死亡した 6 名の死因は、肝内再発・転移による原病死が 4 名で、他病死が 2 名であるが、陽子線がん治療対象部位は全例で局所制御できていた。肺がん患者 1 名は、肺がん自体は制御されていたが、他病死した。

WERC における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。

^{*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

2.1.2.3.6.

粒子線の線質測定技術開発

The development of a measurement technique for the particle ion beam quality of radiation

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

I. 緒言

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。具体的には、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 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、直接的に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。

II. 内容

本年度は、オリゴヌクレオチドを蛍光修飾したサンプルに対し、若狭湾エネルギー研究センターにおいて 200 MeV の陽子線を照射する実験を中心に行った。比較のために、大阪大学産業科学研究所のコバルト 60 照射施設の ⁶⁰Co 線源を用いてガンマ線を照射した。陽子線、ガンマ線ともに吸収線量の増加に伴って蛍光分子 FAM の蛍光強度が増大することが示された。一方で、50 mGy 以上は、蛍光強度が一定となる結果が得られた。吸収線量に対し蛍光強度が一定となる要因として蛍光分子 FAM の放射線分解などの理由が考えられる。次年度以降、陽子線、ガンマ線による放射線分解の可能性について検証する。また、標的核破砕反応によるがん治療時の余剰線量測定比較の研究を推進する。

^{*1}福井大学・附属国際原子力工学研究所、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと福井大学との共同研究として実施した。

2.1.3. ビーム発生分析評価技術開発

2.1.3.1. 加速器分析技術開発

2.1.3.1.1.

薄膜分析のための重イオン RBS 法の開発

Development of Heavy Ion RBS Measurement System for Thin Film Analysis

安田啓介^{*1,*2}、中田吉則^{*1}、鈴木耕拓^{*1}

Keisuke YASUDA, Yoshinori NAKATA and Kohtaku SUZUKI

Abstract

From the RBS research up to the year of 2014, the accuracy of surface density is not good. Changing the calculation method of surface density, the accuracy of a gold target surface density becomes 6.4% compared with the literature value. This RBS system can measure very thin targets such as 2 nm, 5 nm, of HfO_2 .

要約

平成 25 年度までの研究では元素密度の定量評価の精度が悪かったが、評価方法の変更により精度を向上させることが出来た。金の面密度にして 6.4%の精度で決定することができた。また酸化ハフニウムの薄膜試料について測定し 2 nm や 5 nm といった極薄膜についても測定できることを示した。

I. 緒言

近年では半導体デバイスやハードディスクといった分野では高密度化が加速し、厚さ数 nm の極薄膜が使用されるようになってきた。このような薄膜は元素等の分析が困難であるが、イオンビームを用いた手法によって分析が可能となってきている。本研究では薄膜分析や重元素不純物高感度測定に資することを目的として、極薄膜を高感度で分析可能な重イオン RBS 法の開発を行った。従来の RBS 法では主にヘリウムビームを用いて、散乱イオンを半導体検出器で、そのエネルギーのみ測定していた。これに対して重イオン RBS 法では炭素イオン等の重い元素をビームとし、散乱イオンに対して透過型検出器で飛行時間測定を行う。これにより深さ分解能の向上、高感度化が期待される。

II. 成果の概要

表面密度の算出にはこれまでターゲット電流、検出器の立体角の情報を用いて行っていた。これらの誤差が大きいと判断し、従来の RBS により評価することによって精度の向上を行った。図1には金薄膜標的での深さ方向に対する密度評価の違いを示す。点線がこれまでの評価、実線が今回の評価での値であり、今回の測定の方が文献値の値 60.2×10^{21} に近いことが分かる。図 2、図 3 にはそれぞれ 2 nm、5 nm の酸化ハフニウムを測定した場合のハフニウムの厚さと密度の関係を示す。数 nm といった極薄膜試料も測定できていることが分かる。

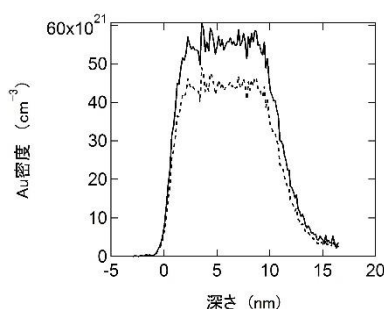


図 1 金の表面密度

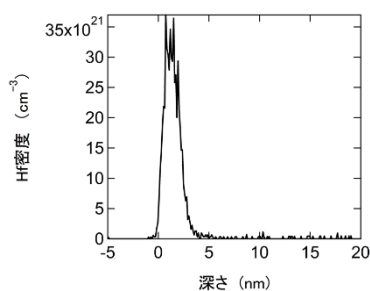


図 2 酸化ハフニウム(2 nm)

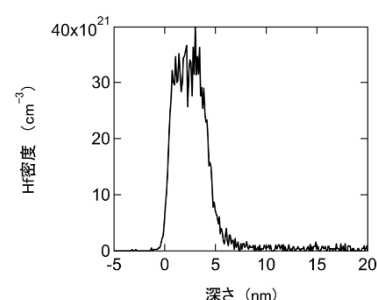


図 3 酸化ハフニウム(5 nm)

III. 結言

飛行時間測定を用いた RBS 手法を開発することにより、nm オーダーの極薄膜を測定することが可能となった。薄膜の密度情報の導出も改良され、定量性が向上した。

^{*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}現京都府立大学・生命環境科学研究科・応用生命科学専攻
本研究は、(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。

2.1.3.1.2.

He 後方散乱における核共鳴反応を利用した入射 He イオンのエネルギー校正
Energy Calibration with Elastic Nuclear Reaction on Backscattering of He Ions戸崎充男^{*1}、安田啓介^{*2,#1}、石神龍哉^{*2}

Mitsuo TOSAKI, Keisuke YASUDA and Ryuya ISHIGAMI

Abstract

We have performed an energy calibration for incident He ion energies through a use of resonance peaks observed in the backscattering spectra. We present the energy calibration method by analyzing the resonance profiles by several energies of the incident He ions, which were arranged to produce the excitation function (the cross section of elastic nuclear reaction) around the resonance.

要約

He 後方散乱スペクトル上に観測されるシャープな共鳴ピークの解析によって、入射 He エネルギーの校正が可能である。入射 He のエネルギーを変更し、観測されるスペクトル上の共鳴ピークのプロファイル（励起関数（反応断面積：入射エネルギーの関数）と見立ててつなぎ合わせ、その再構築したプロファイル（励起関数）を入射 He エネルギースケールに変換することで、入射 He イオンのエネルギー校正が出来る。

I. 緒言

我々は、核共鳴を伴う He イオンの後方散乱実験で、入射エネルギーを数keV 幅でスキャンして、共鳴ピークプロファイルの変化を詳細に測定し、標的内部の構成、濃度分布等を調べている。この複合核共鳴反応を利用すれば、加速器の He ビームのエネルギー設定値とは別に、測定実験サイドから入射 He イオンのエネルギーを決定することが出来る。今回、これまで我々が核共鳴を伴う He 後方散乱実験研究を推進していく際に、利用してきた入射 He のエネルギー確認方法を報告する。このエネルギー校正（確認）方法は、複合核共鳴反応を有するイオン散乱系であれば、どの後方散乱実験にも応用できるものと考えている。

II. 方法

シリコン(Si-28)とHe-4との複合核共鳴反応(共鳴エネルギー:5.374 MeV)に着目して、散乱角 160 度でシリコン基板から散乱される He エネルギースペクトルを測定する。共鳴エネルギー(5.374 MeV)以上の He エネルギーで照射すると、He ビームは標的(シリコン基板)中をエネルギー損失しながら進入し、共鳴エネルギーと一致した所で核共鳴反応が起こる。その後は運動学的要因(k-factor)を乗じたエネルギーで後方散乱し、標的の中を再びエネルギー損失しながら進み、標的表面から出射してそのエネルギーが測定される。測定されるエネルギースペクトルでは、通常の RBS スペクトル(連続分布)とその分布上に明確な共鳴ピークが観測される。共鳴ピークの形は共鳴反応の励起関数(断面積)を反映する。入射エネルギーを変化させ、共鳴ピークの形の全貌を明らかにし、励起関数を再現して共鳴ピークエネルギー値を決定し、加速器のエネルギー設定値と比較する。

III. 解析

1. 測定結果

標的 Si に入射 He エネルギー5372 keV から 5468 keV (6-15 keV ステップ)を照射した時の後方散乱スペクトルを図1に示す。すべてのスペクトルを重ね合わせて表示してある。入射エネルギー毎に、対応する励起断面積の分布を反映したスペクトルが観測される。ただし、このエネルギースペクトル(図1)からは直接入射 He エネルギーの校正(確認)はできない(難しい)。このスペクトルで陽に表されている関係は、後方散乱で決まるエネルギー関係である。

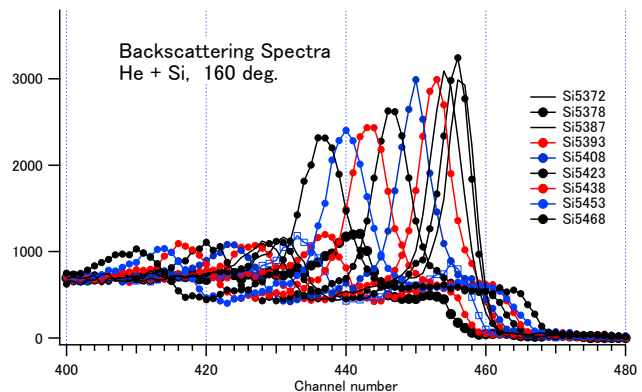


図1 核共鳴を伴う後方散乱エネルギースペクトル

^{*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、^{#2}(現)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. 励起関数の構築

図1の各エネルギースペクトルをチャンネル(X 軸)上で平行移動させ、共鳴ピークプロファイル(共鳴エネルギー5375 keV)に対応する励起関数(共鳴ピーク断面積)の分布を再構築する。各共鳴ピークの形を励起断面積の形を再現するように重ね合わせる。図1のスペクトルを再構成したスペクトルを、図 2 に示す。図 1 と 2 の個々は同じスペクトルだが、それぞれの図の X 軸の意味(基準)が全く異なる。図 2 のスペクトルの包絡線が励起関数を表している。

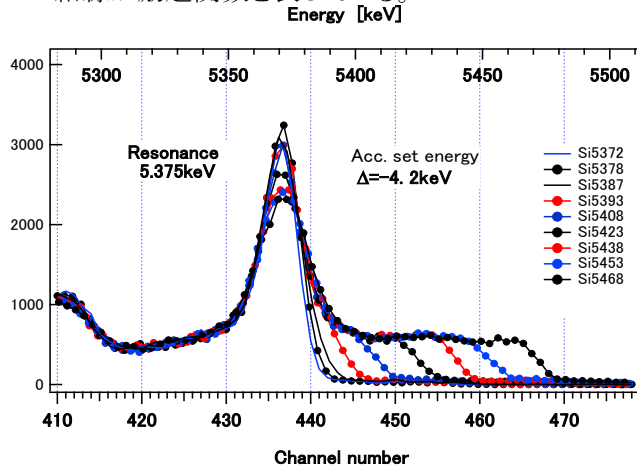


図 2 励起関数(共鳴ピーク)を反映するように後方散乱エネルギースペクトルを再構築。上段の X 軸は各スペクトルの立ち上がり位置でエネルギー校正(図 3 の結果)

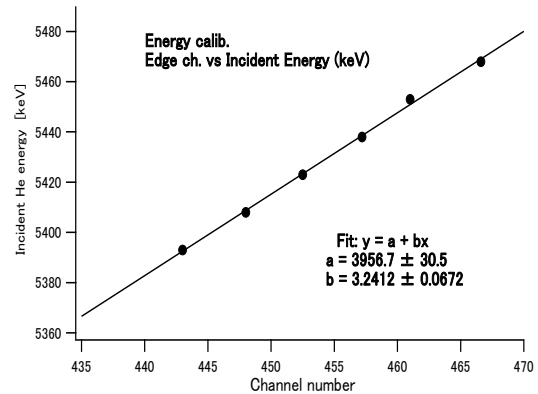


図 3 図 2 の再構成したエネルギースペクトルの立ち上がり(エッジ)のチャンネルと入射 He エネルギーの関係(一次式)

再構築した X 軸(チャンネル)は、励起関数のエネルギーに対応している(してなければならない)。後方散乱のエネルギー損失のエネルギー依存性や損失の揺らぎが大きくないので、図 2 に見るように励起関数が各スペクトルの包絡線となる。したがって、現象が表面近くで深くないこと、また入射 He エネルギーの損失のエネルギー依存は無視してよい場合がこの手法の適用条件となる。実際、図 2 の 410 チャンネルあたりの振る舞いも励起関数を再現出来ていて、注目する共鳴周りの励起関数は正しく再現されていると見なせる。図 2 の励起関数として見立てたときのエネルギースケール(X 軸)を決定するために、図 2 の各入射エネルギースペクトルの立ち上がり(エッジ中点)を誤差関数でフィットして求め、この入射エネルギーとエッジ中点の関係を定める。一次式で非常に直線性のよい結果が得られた(図 3 参照)。これは加速器の静電制御の良さ(線形性)を反映している。

IV. 結論・考察

我々は、本来核共鳴を伴う後方散乱実験研究を通して、共鳴ピークを指針にして内部構造、濃度分布等の探索への応用研究を推進してきた。加速器の設定エネルギーとは別に、我々の実験から、共鳴ピークを用いてエネルギー校正することを考えた。もし、加速器で設定したエネルギーが正しければ、共鳴エネルギーに合わせれば、最高の収率(ピーク断面積)が得られるはずである。しかし、現実にはエネルギー分解能、後方散乱等の影響により一義的に判断しづらい。我々の方法では、励起関数の共鳴ピークの全貌をみて、そのスペクトル(解析的にはスペクトルの包絡線的に再構築されたスペクトル)ピークから決定することが可能であり、誤差も少ない。

今回の例では、共鳴ピークエネルギー換算で、加速器の設定値は 5370.8 keV と評価(校正)された。提供されている共鳴エネルギーは 5374 keV なので、加速器の設定値が約 3.2 keV 低いことを示す。ただし、核データで提供される共鳴エネルギーも誤差を含み、実際、核データの共鳴エネルギーの誤差は 10-20 keV である。一方加速器サイドでは静電的に keV の精度で決定できている。したがって、エネルギー校正では、常に絶対値を、何を基準に求め、どの程度の精度が必要か(本来の研究に)を正しく判断する必要がある。我々の手法は、実験的に再現できる相対的に精度の高い決定法であると考えている。絶対値に関しては、注目する共鳴現象が捉えられていること、そして、現在の加速器のエネルギー設定で、電圧の変更(相対的)によるエネルギーの精度は十分にあるので、実験の再現性も含め信頼性の高い実験データが収集できていると考えている。

参考文献

- (1) イオンビーム分析に有用なデータライブラリー: Ion Beam Analysis Nuclear Data Library (IBANDL)

<https://www-nds.iaea.org/exfor/ibandl.htm>

2.1.3.1.3.

歯根面象牙質における脱灰評価へのマイクロ PIXE/PIGE の応用

Evaluation of Demineralization on Root Dentin Used by Micro PIXE/PIGE

奥山克史^{*1, #1}、山本洋子^{*2}、松田康裕^{*1, #2}、小松久憲^{*1}、佐野英彦^{*1}、安田啓介^{*3, #3}、鈴木耕拓^{*3}、林美加子^{*2}、能町正治^{*4}、菅谷頼仁^{*4}Katsushi OKUYAMA, Hiroko YAMAMOTO, Yasuhiro MATSUDA, Hisanori KOMATSU, Hidehiko SANO,
Keisuke YASUDA, Kohtaku SUZUKI, Mikako HAYASHI, Masaharu NOMACHI and Yorihiro SUGAYA

Abstract

The relevance with demineralization and fluoride uptake on root dentin was evaluated by micro PIXE/PIGE, when fluoride-containing dental material was applied on root dentin for 1 month and after then the dentin specimens were stored into demineralizing solution for 3 days. Comparison with control, there are higher fluoride uptake and lower calcium-loss on material group. Since there was a negative correlation between fluoride uptake and calcium-loss, we suggested that there seem to be a correlation between distribution of fluoride and calcium on tooth structure.

要約

フッ化物含有歯科材料を歯根面象牙質に1ヶ月作用させた後、材料除去後脱灰溶液に3日間浸漬した試料について、マイクロ PIXE/PIGE 装置で脱灰の評価と取り込まれたフッ素との関連を検討した。材料を用いない群と比較して材料を用いた群では、有意に大きなフッ素取り込み量と、有意に小さいカルシウム喪失量を示した。また、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たことから、歯質内のフッ素とカルシウムの動態に相関性があることが示唆された。

I. 緒言

従来フッ素によるう蝕抑制効果を、歯質脱灰の程度(ミネラル量)を指標に評価してきた。その評価法として Transvers Micro Radiography 法が多く用いられてきたが、試料の作製が困難なことや解析法が煩雑といったことが挙げられる。本研究では歯質内のカルシウムとフッ素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マイクロ PIXE/PIGE 装置を用いて歯根面象牙質の脱灰の評価と、フッ素と脱灰との関連を検討した。

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歯を半切した。一方の露出面にフッ化物含有のグラスアイオノマーセメント(アドシールド GI)を、他方は何も塗布せず、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半切したときと同じ方向に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フッ素およびカルシウム濃度を測定した。その後再び象牙質表層を除いてワックスで被覆した後、脱灰溶液 (pH:4.5) に3日間浸漬し、再度同部位の濃度を測定した。

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%カルシウム濃度の位置と規定した。銅箔を基準とすることで脱灰処理後試料において脱灰前表層の位置が規定された。カルシウム喪失量およびフッ素の取り込み量は表層から 10 μm ごと 500 μm の深さまでの間の積算濃度で比較検討した。

III. 結果

フッ化物含有材料を用いた群では有意に大きなフッ素の歯質への浸透が認められ、有意に小さいカルシウム喪失量を示した(図 1)。歯質に取り込まれたフッ素量とカルシウム喪失量との相関係数は、試料1ヶ月保存後では $r=-0.694$ ($p<0.01$)、その後3日間脱灰後では $r=-0.684$ ($p<0.01$)となり負の相関を示した(図 2)。

^{*1}北海道大学大学院・歯学研究科、^{*2} 大阪大学大学院・歯学研究科、^{*3} (公財) 若狭湾エネルギー研究センター、^{*4} 大阪大学・核物理研究センター ^{#1} 現 朝日大学・歯学部、^{#2} 現 北海道医療大学・歯学部、^{#3} 現 京都府立大学

本研究は、北海道大学大学院歯学研究科、大阪大学大学院歯学研究科、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。

本研究の一部は科学研究費補助金 (25293387, 26462879) の助成の下に行われた。

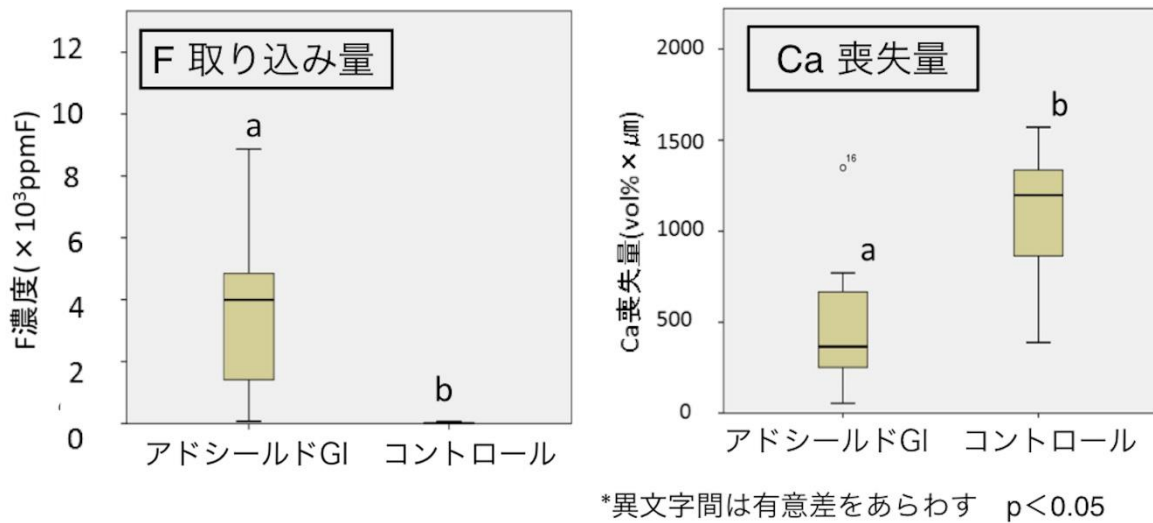


図 1 各材料におけるフッ素取り込み量(左)とカルシウム喪失量(右)

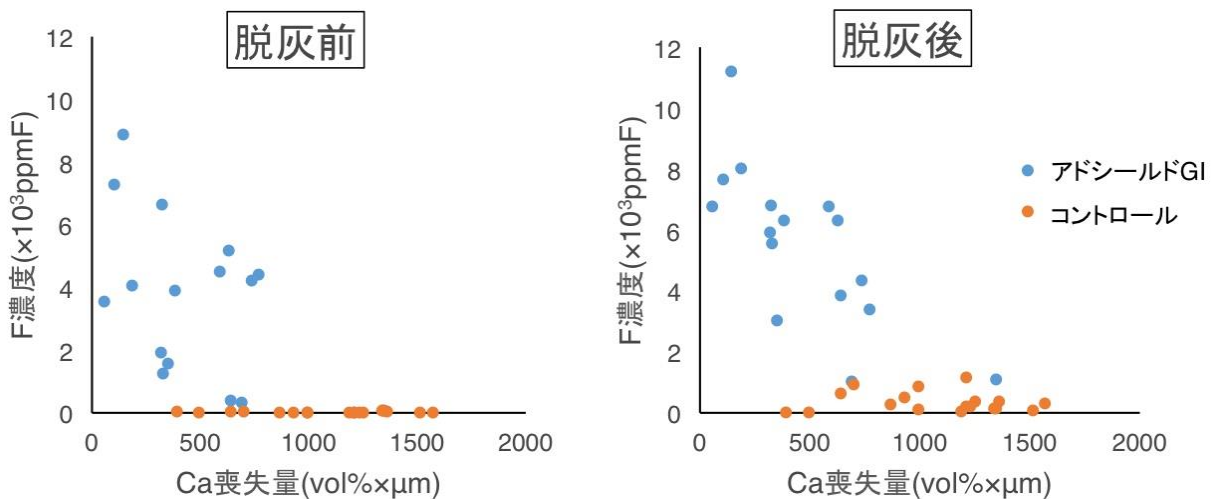


図 2 脱灰前(左)と脱灰後(右)におけるフッ素濃度とカルシウム喪失量との関係

IV. 考察

基準として銅箔を設置することにより得られた脱灰前後の線分析データを重ね合わせることが可能となり、試料最表層の位置を規定することで、積算カルシウムおよびフッ素濃度の差を算出することができた。フッ素量とカルシウム喪失量との関係は、カルシウムの一部がフッ素と結合し、フッ化カルシウムおよびフルオロアパタイトを形成することで、脱灰が進みにくい環境に変化したことによると考えられる。

V. 結語

マイクロPIXE/PIGEを用いることで脱灰前後の歯質内のカルシウムとフッ素の動態の相関性を確認することができ、う蝕予防の評価に有用な測定法であることが示唆された。

参考文献

Yasuda *et al.*: Nucl. Instr. and Meth. B 269(20), 2180–2183 (2011).

2.1.3.1.4.

フッ化物含有う蝕予防材による脱灰抑制効果のマイクロ PIXE/PIGE による評価

Evaluation of Demineralization on Root Dentin Used by Micro PIXE/PIGE

松田康裕^{*1,*1}、奥山克史^{*1,*2}、山本洋子^{*2}、小松久憲^{*1}、江夏 昌志^{*3}、佐藤隆博^{*3}、

佐野英彦^{*1}、安田啓介^{*4,*3}、鈴木耕拓^{*4}、林美加子^{*2}、能町正治^{*5}、菅谷頼仁^{*5}

Yasuhiro MATSUDA, Katsushi OKUYAMA, Hiroko YAMAMOTO, Hisanori KOMATSU, Masashi KOKA,

Takahiro SATO, Hidehiko SANO, Keisuke YASUDA, Kohtaku SUZUKI, Mikako HAYASHI,

Masaharu NOMACHI and Yorihiro SUGAYA

Abstract

Fluoride containing sealing materials (FCSMs) are widely used for prevention of pit and fissure caries of primary teeth. The present study examined the demineralization inhibition effect of various sealants for primary teeth using an automatic pH-cycling system. After filling teeth with FCSMs, single section specimens were simulated using an automatic pH-cycling system to five weeks. Every each week, transverse microradiography (TMR) was taken and the integrated mineral loss (IML) was calculated to analyze a demoralization. Specimens not filled with sealant were used as a control. The enamel surfaces of specimens demineralized with an automatic pH-cycling system for five weeks were observed with a scanning electron microscope (SEM). In addition, levels of fluoride inside enamel were assessed using micro-PIGE/PIXE. As a result, the FCSMs group showed the demineralization inhibiting effect and fluoride uptake were confirmed by micro PIGE/PIXE system.

要約

フッ化物含有う蝕予防材を乳歯歯冠に充填した後、自動 pH サイクル装置にてう蝕負荷試験を行った。負荷試験中に 1 週間毎に Transversal Micro Radiography を撮影し脱灰の進行を評価した。また、充填直後でう蝕負荷試験前と 5 週間のう蝕負荷試験後での試料をマイクロ PIXE/PIGE 装置でフッ素の取り込みを測定した。材料を用いない群をコントロールとして材料を充填した群では、有意に脱灰抑制効果を示す材料や、フッ素の取り込みを示す材料が認められた。これらのことから、フッ化物含有う蝕予防材は乳歯に対して多くのフッ素を歯質に供給し、脱灰抑制効果を示すことが示唆された。

I. 緒言

フッ化物含有う蝕予防材は乳歯の小窩裂溝う蝕予防に広く使用されているが、脱灰抑制効果を経時的に観察した研究は少ない。本研究では、自動 pH サイクル装置を使用し、乳歯に対する各種シーラントの脱灰抑制効果を、Transvers microradiography 法を用いて歯質脱灰の程度(ミネラル量)を分析し、また、歯質へフッ素の取り込みを高崎量子応用研究所のマイクロ PIXE/PIGE 装置を用いて分析し、フッ化物含有う蝕予防材による歯質へのフッ素の取り込みと脱灰抑制効果について検討した。

II. 方法

試料は健全ヒト抜去乳臼歯に窩洞形成を行い、フッ化物含有う蝕予防材としてティースメイト F-1 2.0 (TM)、ビューティシーラント (BS)、フジⅢLC (ⅢLC) を充填した後、厚さ 200 μm に切断した切片を用いた。自動 pH サイクル装置を使用し試料の脱灰と再石灰化を 1～5 週繰り返した後に Transverse Micro Radiography (TMR) 撮影を行い、シーラント周囲のエナメル質の Integrated Mineral Loss (IML) と Lesion depth (Ld) を算出した。シーラントを充填しなかったものをコントロールとした。自動 pH サイクル装置により 5 週間脱灰させた試料のエナメル質表層を Scanning Electron Microscope (SEM) を用いて観察し、また、マイクロ PIGE/PIXE を使用して、エナメル質内のフッ素量を測定した。

^{*1}北海道大学大学院・歯学研究科、^{*2}大阪大学大学院・歯学研究科、^{*3}日本原子力研究機構・高崎量子応用研究所、^{*4}(公財)若狭湾エネルギー研究センター、^{*5}大阪大学・核物理研究センター、^{*1}現 北海道医療大学・歯学部、^{*2}現 朝日大学・歯学部、^{*3}現 京都府立大学
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと京都大学の共同研究として実施した。

本研究は、北海道大学大学院歯学研究科、大阪大学大学院歯学研究科、大阪大学大学院理学研究科、日本原子力研究機構高崎量子応用研究所、(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。

本研究の一部は科学研究費補助金 (26293403, 25670804)の助成の下に行われた。

III. 結果

フッ化物含有う蝕予防材はコントロール群と比較して IML、Ld は減少し、最も低い値を示したⅢLC 群の IML と Ld は、それぞれコントロール群と比較して 79.3%、90.4%低い値を示した。シーラント群の中では、ⅢLC 群、BS 群、TM 群の順に低い値を示した。また、シーラントを填塞したエナメル質内のフッ素量はⅢLC でコントロールの約 177 倍と非常に高い値を示し、次いで TM 群、BS 群の順であった。pH サイクル後の試料におけるシーラント周囲のエナメル質の SEM 観察を行った。各シーラント群では、コントロール群と比較してエナメル質の脱灰が少なく、ⅢLC 群の脱灰が最も少ない傾向が見られた。

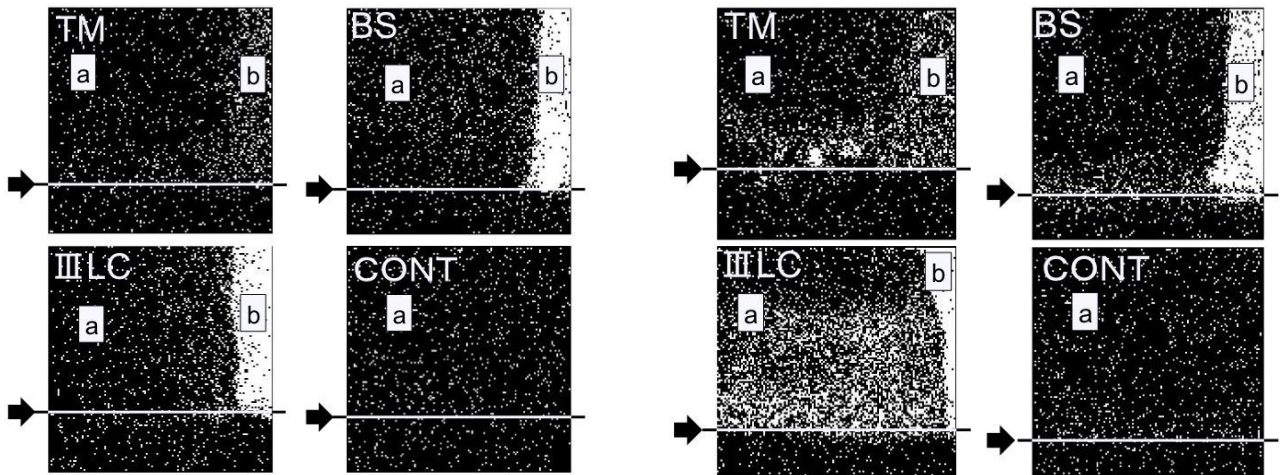


図 1 各材料におけるフッ素取り込み う蝕負荷試験前(左)と 5 週間後(右)
マイクロ PIGE/PIXE によるイメージ像 a:乳歯エナメル質、b:う蝕予防材を示す

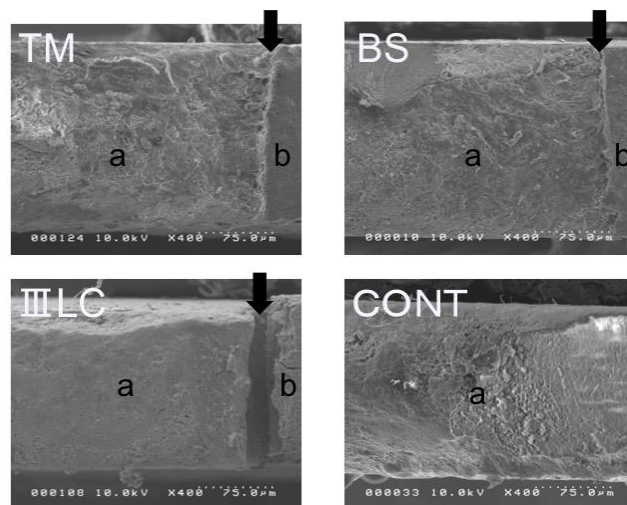


図 2 pH サイクル後の試料の SEM 観察像
A:乳歯エナメル質、b:う蝕予防材を示す

IV. 考察および結論

これらの結果から、フッ化物含有う蝕予防材は乳歯に対して多くのフッ素を歯質に供給し、脱灰抑制効果を示すことが示唆された。フッ化物含有う蝕予防材料のなかでもⅢLC が最も高い脱灰抑制効果を示し、またエナメル質へのフッ素の取り込みも最も高かった。しかしながら、BS と TM では脱灰とフッ素の取り込みの関係は異なるものであった。エナメル質へのフッ素の取り込まれる量と脱灰抑制効果には濃度依存性ではない可能性が示唆された。歯質の脱灰抑制効果にはフッ素が深い関わりを示しているものの、必ずしもフッ素量のみが脱灰抑制効果に関与するのではなく、ストロンチウムイオンなど、他の因子も脱灰抑制効果に影響を及ぼすと考えられる。

2.1.3.1.5.

PIXE/PIGE による PFOS 電解時の各相のフッ素の分析

PIXE/PIGE analysis of fluorine in the solution and gas phase during the electrolysis of perfluorooctane sulfonate
 橋口亜由未^{*1}、藤川陽子^{*2}、米田稔^{*3}、谷口省吾^{*4}、尾崎博明^{*4}、高田卓志^{*2}、安田啓介^{*5}、久米恭^{*6}
 Ayumi HASHIGUCHI, Yoko FUJIKAWA, Minoru YONEDA, Shogo TANIGUCHI, Hiroaki OZAKI,
 Keisuke YASUDA, Takushi TAKATA, and Kyo KUME

Abstract

In this research, the amount of fluorine in the solution and gas phase during the electrolytic decomposition of PFOS was determined by PIXE/PIGE analysis. As a first step to clarify the degradation pathway of PFOS by electrolysis, we tried to identify the phase where decomposition products (DCPs hereafter) of PFOS are present. To prove or disprove the presence of gaseous DCPs of PFOS, we made a air-tight cell with gas-circulation system to minimize the adsorption breakthrough of unknown DCPs from low temperature (−100 and −180 degrees Celsius) activated carbon (AC) traps, and analyzed the fluorine mass in the AC. In addition, we conducted electrolysis of aqueous solutions containing 10 and 20 mg/L PFOS for 10 and 20 hrs, and fractionated the compounds in the solutions before and after the electrolysis by solid-phase extraction (SPE) using AC and a few other resins. The fluorine in the SPE resins was determined by PIXE/PIGE to estimate the amount of fluorine that could be adsorbed to the resins from the solution. Fluorine was not detected in the low temperature AC trap, suggesting that gaseous DCPs of PFOS do not exist. The amount of fluorine in the AC used for SPE of the solution before electrolysis was equal to the amount of fluorine in the PFOS spike (i.e., 100 % recovery). After electrolysis, 81, 30, 63, 39 and 100% of the initial fluorine mass in the solution was detected in the AC used for SPE (decomposition of PFOS was 58, 83, 78, 90 and 31%, respectively). The results suggest that most of the DCPs probably were present in the solution, and that adsorption of the DCPs in the solution to AC was lower than that of PFOS.

要約

本研究では、PFOS の電気分解において分解過程を明らかにする第一段階として、電解前後の PFOS 由来のフッ素が存在する相と初期フッ素量に対する存在割合を明らかにした。その過程において、ガスタイト電解セルを構築し、活性炭セルを液体窒素に浸漬して生成ガス中の含フッ素化合物の捕集とそのフッ素量の分析を試みた。また、高濃度 PFOS 溶液(10ppm および 20ppm)の長時間電解実験を行い、電解前後の溶液中で活性炭その他の固相抽出剤に吸着するフッ素量の分析を行った。その結果、ガスタイト実験系で液体窒素温度の活性炭トラップからは、フッ素は検出できなかった。また、電解前の溶液を通液した活性炭からは添加した PFOS 由来のフッ素とほぼ同量のフッ素が検出された。電解後の溶液を通液した活性炭からは電解前の全フッ素の 81、30、63、39、100% (各々の PFOS 分解率 58、83、78、90、31%) が検出され、かなりの分解産物が溶液中に残っているが、分解産物の活性炭などの固相抽出剤への吸着性は、親物質である PFOS のそれより低くなった可能性のあることを明らかにした。

1. 緒言

ペルフルオロオクタンスルホン酸(PFOS)、ペルフルオロオクタン酸(PFOA)は炭素鎖が 8 つ、C-F 結合を 15 から 17 個も持つ長鎖有機フッ素化合物で、環境中では極めて分解されにくく、生体への蓄積性も高い^{1,2)}。PFOS は 2009 年 5 月に行われた第 4 回残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約(POPs条約)で DDT などと並ぶ付属書 B に追加され、化学物質審査規制法(化審法)では 2010 年 4 月に第一種特定化学物質に指定され、原則として製造・輸入が禁止された。これらのことから、現在環境中に残留している PFOS をはじめとする PFCs の除去・分解技術の開発が急務となった。本研究では、下水や排水中に含まれる PFOS の分解処理技術の確立のため、その基盤となる PFOS 分解過程のフッ素収支を解明することを目的としている。特に PFOS 分解効率が高くコストの安い電気分解法において³⁾、その分解生成物のフッ素収支が追跡できず、分解手法としての信頼が得られない点に注目し、(1)PFOS 電解に伴う含フッ素のガス状生成物が存在する場合、これを液体窒素温度のコールドトラップを用いて捕集し、なおかつトラップからの破過を最小限にする実験系を構築して、コールドトラップ中の全フッ素を PIXE/PIGE 分析することを目指した。(2)電解後の溶液中に、これまで著者らがやってきた燃焼イオンクロマトグラフィーによる全フッ素分析で定量できない含フッ素化合物が存在している場合

^{*1} 京都大学・工学研究科・都市環境工学専攻(現香港科技大学・土木及環境工学)、^{*2} 京都大学・原子炉実験所、^{*3} 京都大学・工学研究科・都市環境工学専攻、^{*4} 大阪産業大学・工学部、^{*5} (公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ(現京都府立大学・生命科学部生命環境科学研究科・応用生命科学専攻)、^{*6} (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
 本研究の一部は、京都大学が(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。

を想定し、電解後溶液を活性炭に通液し、これを PIXE/PIGE 分析に供することとした。(3) 現有の PIXE/PIGE システムにおいてフッ素の ROI に試料由来でないガンマ線成分が混入している可能性を検討するため、BGO に代えてエネルギー分解能の高い Ge 半導体検出器の使用も検討した。

II. 方法

(1) 支持電解質として 50mmol/L Na_2SO_4 を含む溶液に PFOS 濃度が 4mg/L (ガスタイト実験、図 1) と 10mg/L (オープンセル実験) になるように添加した溶液を 500mL 作成し、そのうち 450mL を電解に供した。白金電極 2 本に、直流安定化電源により最大 33V 印加し、1.0A (電流密度 425 mA/cm^2) の定電流をそれぞれ 6 時間と 10 時間通電した。ガスタイト実験で分解時に発生するガスを、水分除去用のシリカゲル中を通したのち、 -100°C 中および液体窒素温度に浸漬した活性炭 (ACTIVATED CARBON TX070, Calgon Mitsubishi Chemical Corporation Japan 製) を各々 60mg および 100mg 充填したカラムに逐次通気した。ガスタイト実験の操作は WERC の試験室で実施し、ガス中の物質を捕集した活性炭試料は PIGE 分析まで液体窒素温度で保管し、液体窒素から引き揚げた後直ちにセルに詰めて PIXE/PIGE による全フッ素分析に供して、ガス中に PFOS 分解に伴う揮発性の有機フッ素化合物が含まれているか否かを検討した。

(2) PFOS 電解後溶液の陰イオンクロマトグラフィーによる分析 (カラム: Dionex IonPac AS27、溶離液: KOH、通液: グラジエントモード) で、分解生成物の可能性のあるピーク (図 2 参照、以下、IC 分画成分) が得られた。そのピークが出現するリテンションタイムに合わせてフラクションコレクターで溶液を分取し、電解前後の溶液と分画試料を活性炭および Oasis WAX (弱陰イオン交換樹脂)、AGI-X8 (強陰イオン交換樹脂)、Supelite DAX8 (中極性) に通液した後、自然乾燥させてから PIXE/PIGE による総フッ素分析に供した。また、図 3 に活性炭および選定した固相への吸着方法を示す。IC 分画成分が活性炭にどの程度吸着するのかを確認するために IC 分画成分 25mL を活性炭カラムに逐次 2 回通液して、通液前後の液を先述の陰イオンクロマトグラフィーで分析した。

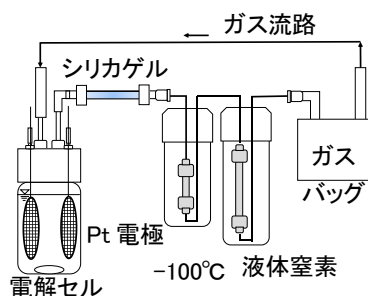


図 1 実験装置図

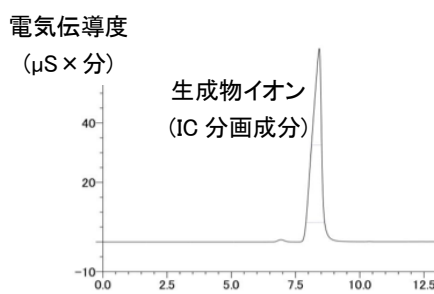


図 2 分画した生成物イオン

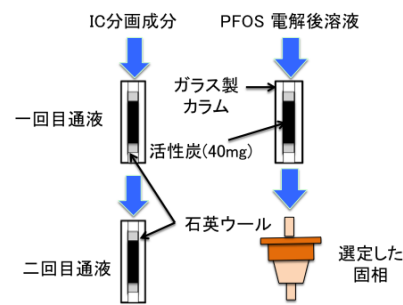


図 3 サンプルの吸着方法

(3) PIXE/PIGE 分析の LOD・LOQ の決定および BGO シンチレーション検出器と Ge 半導体検出器との比較
フッ素濃度の定量は主に活性炭中に保持された物質について行うこととしたため、検量線用の標準試料は、固体 PFOS 標準物質 (和光純工業(株)) と活性炭をめのう乳鉢上で粉碎混合・均一化したものとした。まず、ブランク試料の測定時に実サンプル中フッ素と類似したピークを検出したため、ビーム由来のバックグラウンドが PIGE のフッ素分析に影響していると疑って、ビーム出口の 2m 上流の地点 F (F1: 2012 年時、F2: 2014 年時)⁴⁾ とタンデム型加速器のファラデーカップのすぐ上流の地点 T (2014 年)⁵⁾ でビームを止めた状態で、試料台に試料を置かずバックグラウンドの測定を行った。また、実サンプルの分析については、若狭湾エネルギー研究センターの加速器を使用し 2.5MeV の陽子線による大気圧下での PIXE/PIGE 分析を行った。加速器のビーム電流は 2012 年、2013 年、2014 年の測定時でそれぞれ 2nA、1.4nA、6nA であった。窓材質は 200 μm の Si_3N_4 (Slison Ltd.) とし、試料中のフッ素からの高エネルギー γ 線を BGO 検出器により測定した。加速器運転中のビーム強度には変動があるため、 Si_3N_4 (窓に粒子が当たることによって発生する Si からの K-X 線の数から試料に入射する陽子数を見積もり、ビーム強度の指標とした⁶⁾。図 4 に試料を充填したセルの様子、図 5 にブランク試料のスペクトル (BGO 検出器)、図 6 に PFOS10ppm 溶液を通過させた活性炭試料のスペクトル (BGO 検出器)、図 7 に PFOS100000ppm の活性炭試料のスペクトル (Ge 検出器) を示す。



図 4 サンプル充填セル

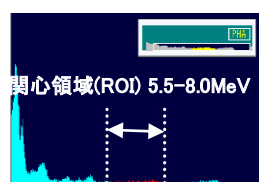


図 5 Blank

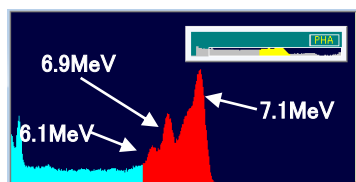


図 6 PFOS 10ppm

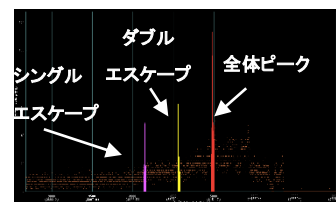


図 7 PFOS 100000ppm (Ge)

Ⅲ. 結果と考察

(1) PFOS 分解後生成ガス中のフッ素量分析

PFOS の電解除去率が 58% (once-through 通気時) および 90% (循環通気時) 時の液体窒素温度の活性炭トラップからは、フッ素は検出できなかった。活性炭中フッ素分析の検出下限はおよそ BGO 検出器で 40mg-F/kg、Ge 半導体検出器で 760 mg-F/kg (Ⅲ.(3)参照)で、これに対し、PFOS 分解産物がすべてガス化し液体窒素温度のトラップに捕捉されたたすれば、活性炭トラップ中のフッ素濃度は 6,000-19,000 mg-F/kg という計算となった。このことから、ガス状の PFOS 分解産物は少ないと考えた。

(2) 電解前後の溶液及び IC 分画成分中のフッ素分析

電解前後の溶液を活性炭に通液したものを PIXE/PIGE による全フッ素分析に供した。電解前の溶液を処理した活性炭からはほぼ理論値通りの PFOS 由来の全フッ素が検出された。電解後の溶液を通液した活性炭からは電解前の全フッ素の 81、30、63、39、100% (各々の PFOS 分解率 58、83、78、90、31%) が検出され、PIGE 分析ではかなりの分解産物が溶液中に残っているという結果となった。また、電解による PFOS 除去率 83% 時の溶液から得た IC 分画成分を 1 回通液した活性炭からは電解前の初期 PFOS 量から算出されるフッ素の 6%、PFOS 除去率 78% 時の溶液から得た IC 分画成分を逐次 2 回通液した活性炭からは電解前の初期 PFOS 量から算出されるフッ素の 91% のフッ素がそれぞれ検出された。また 10ppm の PFOS 電解後溶液 (この時の PFOS 除去率 78%) を通液した AG1-X8 からは電解前の初期 PFOS 量から算出されるフッ素の 4%、20ppm の PFOS 電解後溶液 (この時の PFOS 除去率 31%) から電解前の初期 PFOS 量から算出されるフッ素の 53% が検出された。なお、この値は通液前のブランク値を差し引いた値である。これらのことから、PFOS の電気分解後に生成するフッ素化合物の一部は、溶液中で活性炭では電解前の PFOS に比べると捕集されにくく、イオン交換樹脂により分離される成分であったことがわかった。図 8 に 10ppm PFOS 分解前後のフッ素収支、図 9 に IC 分画成分の活性炭への吸着試験の結果を示す。

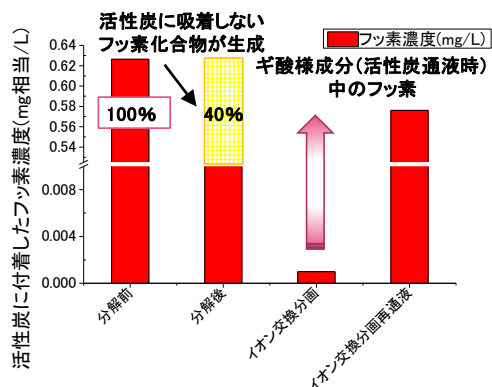


図 8 PFOS 電解前後のフッ素収支

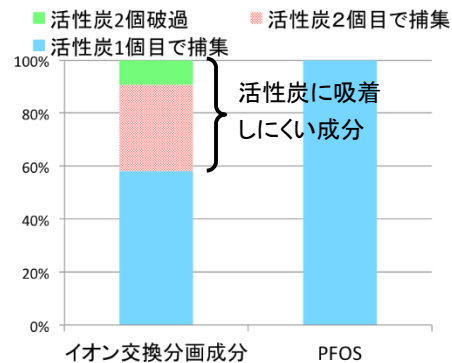


図 9 IC 分画成分の活性炭への吸着試験

(3) PIXE/PIGE 分析の LOD・LOQ の決定および BGO シンチレーション検出器と Ge 半導体検出器との比較

BGO 検出器を使用した場合の LOD と LOQ は、それぞれ、44mg-F/kg と 295mg-F/kg であった。一方で Ge 検出器を用いた場合、BGO 検出器では検出できる 6.9MeV と 7.1MeV のような高エネルギーの γ 線は検出器を透過してしまい、検出することが出来ず、 γ 線の検出効率も高くなかったことから、この高エネルギー領域では、Ge 検出器の LOD と LOQ はそれぞれ 756.9mg-F/kg と 5046.4-Fmg/kg となり、結果的に LOD と LOQ は BGO 検出器を使用した場合に比べて高くなった。Ge 半導体検出器の測定ではビームを異なる位置で止めた時のバックグラウンドスペクトルに大きな差はなく、バックグラウンドを形成する核反応の特定には至らなかった。これは高エネルギーガンマ線の計数効率が Ge 半導体検出器で著しく低下したためと見られた。

参考文献

- 1) 谷口省吾、尾崎博明: 第 12 回日本水環境学会シンポジウム講演集, 103-104 (2009)
- 2) Public Health England: PFOS+PFOA Toxicological overview, p9, (2009), http://www.hpa.nhs.uk/web/HPAweb_C/1246260032570
- 3) 橋口亜由未他: 環境技術, 44, 7, 391-401, (2015)
- 4) S. Hatori et al.: Nucl. Instrum. Meth. B 241, pp862-869, (2005)
- 5) K. Yasuda et al.: Nucl. Instrum. Meth. B 210, pp.27-32, (2003)
- 6) K. Yasuda et al.: Nucl. Instrum. Meth. B 269, 2180-2183, (2011)

2.1.3.1.6.

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と照射量の関係

Influence of Solar Wind Proton on Hydrated Silicate Minerals: Relationship between Spectral Shape and Fluence

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

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。

しかし一方で、宇宙風化作用によるスペクトルの変化量を指標として、どの程度宇宙空間にさらされていたかという時間情報を得ることができると考えられる²⁾。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年代の関係性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 H_2^+ ビームを① 4.1×10^{17} ion/cm²、② 4.9×10^{17} ion/cm²、③ 1.1×10^{17} ion/cm² と段階的に追加照射し、その都度 FTIR 分光計(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 C 型小惑星に存在すると考えられる Antigorite を用いた。

III. 結果

測定結果を図 1 に示す。Antigorite の反射スペクトルは、①の照射により OH 基の伸縮振動に由来する $2.7 \mu m$ 付近の吸収強度が減少し、 $3 \mu m$ 帯の H_2O の対称振動などに由来する吸収強度の増加が見られた。さらに②の量の追加照射により、追加照射前に比べ $2.7 \mu m$ 付近の吸収強度のさらなる減少を確認した。しかし、 $3 \mu m$ 帯においては変化が見られなかった。②の量の水素イオンビームに加え、③の量の水素イオンビームを追加照射すると、③を追加照射前に比べ $2.7 - 3 \mu m$ の水素結合を持つ OH 基の吸収強度の増加が確認された。

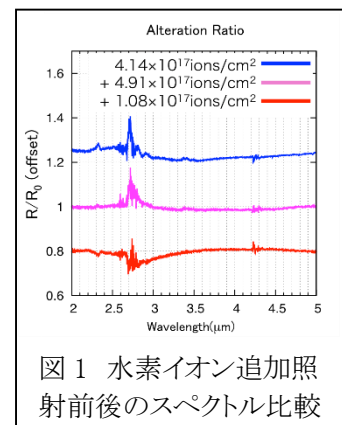


図 1 水素イオン追加照射前後のスペクトル比較

IV. 考察

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、水素イオンは Antigorite 中にもともと存在する metal-OH の結合の切断と H_2O の生成に使われ、第二段階として H_2O の生成損失量は平衡状態に達するが、metal-OH の結合の切断は継続する。最終段階では、OH 基に由来する結合が新たに生成されることにより $2.7 - 3 \mu m$ の吸収が増加するのだと考えられる。

V. 結言

Antigorite の反射スペクトルにおける $3 \mu m$ 帯は、水素イオンビーム照射量の増加により変化することがわかった。さらに、照射量を段階的に増加させることにより、照射された水素イオンビーム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。しかし、本実験では FTIR 測定スポットにおける変化量の違いが現れている。照射量と変化量の定量的関係性を見出すためには、照射スポットにおけるビームの不均一性を明らかにする必要がある。

参考文献 1) S. Sasaki *et al.*: Nature, 410, 555 (2001). 2) M. Yamada *et al.*: Earth Planets Space, 51, 1255 (1999).

^{*1}総合研究大学院大学、^{*2}(独)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}(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、^{#1}現(国研)宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所、^{#2}現京都府立大学
 本研究の一部は、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所が(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。

2.1.3.1.7.

茶葉中のアルミニウム分布

Aluminum Distribution in Tea Leaf

春山洋一^{*1}、安田啓介^{*2,#1}、藤原嗣久^{*1}、鈴木耕拓^{*2}

Yoichi HARUYAMA, Keisuke YASUDA, Tsuguhisa FUJIWARA and Kohtaku SUZUKI

この数年来、マイクロビーム装置を用いた PIXE/PIGE 測定で茶葉中の元素分析を行い、(1)アルミニウム濃度や空間分布の経時的変化を解明し、(2)アルミニウム、シリコン、フッ素などの元素が表皮に局在して存在していることを明らかにしてきた。とりわけアルミニウムとシリコンの空間分布が極めて類似しており、アルミニウムの無毒化にシリコンが寄与している可能性が分かってきた。26 年度は、マイクロビームの空間分解能を更に向上させて、表皮細胞内での分布をより詳細に測定することを目的とした。アルミニウムの細胞内分布については表皮細胞の細胞壁に存在するという電子顕微鏡での測定結果が過去に数件報告されている。

細胞壁や細胞質内オルガネラを識別するために 26 年度の測定ではイオンビーム径を 3 μ m 程度まで絞り、表皮細胞数個の範囲を走査して元素分布を調べた。ビーム径を絞り込むために、ビーム電流が減少し、元素分布像の統計が不十分であったが、年度前半の測定では、アルミニウムとシリコンは表皮細胞の細胞質側に存在していることを示唆するデータが得られた。このような測定結果に再現性が強く見られたために、この結果をスロベニアで開催された BioPIXE 国際会議で発表した。

ところが、国際会議以降に、表皮試料断面の作り方を変えたところ、前述の分布とは異なり、アルミニウムは細胞壁に分布していることを示唆するデータが連続して得られた。現在は引き続き、試料作成法の見直しと、作成法の違いによる表面状態の観察を検討している。

^{*1} 京都府立大学・生命環境学部・環境情報学科・環境計測学、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、^{#1} 現 京都府立大学・生命環境学部・環境情報学科・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と京都府立大学との共同研究として実施した。

2.1.3.1.8.

曹洞宗永平寺建物の各種額等の伝統的製造手法の研究調査

Research for traditional production and restoration techniques for historical framed pictures of the Sotoshu

Eiheiji

伊部孝幸^{*1}、辻本正^{*1}、安永有史^{*2}、遠藤伸之^{*3}、安田啓介^{*2,#1}

Takayuki IBE, Tadashi TSUJIMOTO, Kazufumi YASUNAGA, Nobuyuki ENDO and Keisuke YASUDA

曹洞宗本山「永平寺」より、永平寺法堂に設置してある額の修復依頼があり、歴史的技法と現代的技法の塗装顔料等の整合を図るため、額の成分分析を行った。

額の塗装顔料成分の分析の結果から、顔料等の塗りは制作当時の絵具による仕上げと考えられた。越前漆器協同組合では、この種の手法は扱っていないため、永平寺と多仁照廣博士と協議し、漆塗りの技法で額の修復を実施することになった。修復における手法、技法については、漆器産地の漆塗り職人が持つ最高の技術を用いた。

今回の漆塗りの技術を活かした修復は、産地としても満足できるものであり、他の美術品の修復など様々な用途にもこの技術が生かすことができると考えられる。歴史的な制作物の修復については、製作当時の手法や技術、材料、顔料などの分析は出来るものの、現在の材料等との整合を図りながら、依頼者の意見を取り入れて修復作業に当たる必要がある。

^{*1}越前漆器協同組合、^{*2}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ、^{#1} 現京都府立大学・生命環境科学研究科・応用生命科学専攻
本研究は、越前漆器協同組合と(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。

2.1.3.1.9.

宇宙線照射を模擬した鉱物へのイオン照射実験生成物の評価

Ion Irradiation Experiments into Minerals as an Analogue of Cosmic Ray Irradiation

土山明^{*1}、瀧川晶^{*1}、松本徹^{*1}、松野淳也^{*1}、安田啓介^{*2, #1}、中田吉則^{*2}

Akira TSUCHIYAMA, Aki TAKIGAWA, Toru MATSUMOTO, Junya MATSUNO, Keisuke YASUDA and Yoshinori NAKATA

I. 緒言

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。我々の研究グループは、このような宇宙風化作用を理解することを目的として、宇宙でのイオン粒子の照射を模擬した実験を福井県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 26 年度は実験生成物の SEM、TEM によるキャラクタリゼーションをさらにすすめた。

II. 内容

カンラン石試料[(Mg,Fe)₂SiO₄]では、プリスタと呼ばれる水ぶくれ構造が照射量 0.3×10^{18} ion/cm² を越えると生成されるが、それ以前にも非晶質化と空隙生成がおこっていることがわかった。はやぶさやアポロサンプル(小惑星および月)にも同様のプリスタ構造が観察されるが、非晶質層中の空隙は観察されない。この違いは、イオン照射のフラックスの違いで説明でき、天然サンプルにおける照射損傷のタイムスケールの推定には注意が必要であることがわかった。一方、アルミナ試料では、非晶質化ではなくγ-アルミナあるいはこれに類似する結晶への相転移が観察された。また、TEM/EELS による分析により注入された He を確認することができた。さらに、照射サンプル表面の酸処理をおこない、プレソーラー粒子と比較することにより、プレソーラー粒子が超新星爆発の衝撃波によると考えられるイオン照射を受けたことを示すことができた。

^{*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、^{#1}現京都府立大学・生命環境科学研究科・応用生命科学専攻

本研究は、京都大学大学院理学研究科と(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。

2.1.3.1.10.

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, #1}、石神龍哉^{*2}、中田吉則^{*2}

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

Cu イオン 20 MeV のビームを用いて、LIB 負極の表面皮膜(SEI)の TOF-ERDA 測定を実施した。試料変質を抑えるために、グローブバックを用いて、到達露点-45℃で大気非曝露のまま試料をチャンバーへ導入した。その結果、被膜膜厚の異なる 2 試料についてデータを取得でき、深さ換算を行うと被膜部分について明確な試料間差を確認できた。また、MCP の検出効率補正のために別途取得した基礎データから、エネルギーと検出効率の関係式を導出¹⁾し、この式からエネルギースペクトルを補正するプロトコルを作成した。Li は入射イオンとして使用できないため、H、He、C における阻止能と検出効率の関係から外挿する形で Li の検出効率を求めた。これらのデータから、TOF-ERDA スペクトルからデプスプロファイルを構築する方法を確立できた。

参考文献 1) Y. Zhang *et al.*: Nucl. Instr. and Meth. B, 149, 477 (1999).

^{*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}(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、^{#1}現京都府立大学・生命環境科学研究科・応用生命科学専攻

本研究は、(株)東レリサーチセンターと(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。

2.1.3.1.11.

TOF-ERDA 法によるダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜中水素分析
Analysis of the Hydrogen in Diamond like Carbon (DLC) Films with TOF-ERDA Method日比章五^{*1}、安田啓介^{*2}、
Shogo HIBI and Keisuke YASUDA

I. 緒言

軽元素分析の有力手法である TOF-ERDA について定量性の評価を進めており、今回 DLC 膜中の水素について従来法の吸収体 ERDA 法との比較を行った。併せて DLC 成膜条件と水素量の関係を調査した。

II. 内容

CH₄ と Ar を使用し、高周波グロー放電でシリコン基板上に DLC を成膜した。この際、3 水準の高周波出力で成膜した。まず吸収体 ERDA 法により DLC 膜中の水素量を見積もると、夫々の膜中水素量は RF 出力の変化に対し殆ど変化は見られなかった。次に TOF-ERDA 法と吸収体 ERDA 法の検出水素量の相関を調査した。その結果が図1である。測定は上記の 3 種類の DLC 膜とポリエチレンテレフタレートフィルムについて行った。水素量の見積もりは炭素量を基準として比較した。今回2法の相関が明確に確認できなかったが、今後さらに水素量の異なる DLC 膜について調査し2法の相関を明確にして、TOF-ERDA 法の定量性向上をはかる予定である。

表1 各試料の水素濃度

試料名	吸収体 ERDA 法 水素濃度 (atom%)	RF パワー (W)
S14070 1	25.5	1000
S140702	24.5	1500
S140704	26.5	500

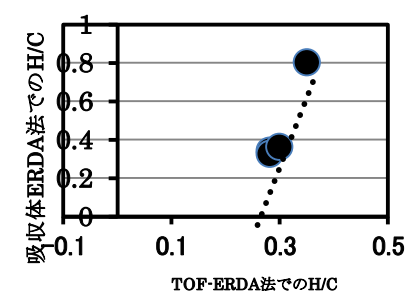


図1. TOF-ERDA法と吸収体ERDA法の比較

^{*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(現京都府立大学)
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと(株)豊田中央研究所の共同研究として実施した。

2.1.3.1.12.

グロー放電発光分析法(GD-OES)による DLC 膜の水素定量に関する研究
Quantification of Hydrogen in DLC with Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy (GD-OES)高原晃里^{*1}、岡好浩^{*2}、石神龍哉^{*3}
Hikari TAKAHARA, Yoshihiro OKA and Ryoya ISHIGAMI

I. 緒言

ダイヤモンドライクカーボン(DLC)は、高硬度、低摩擦係数、耐化学性などさまざまな特長を有し、自動車や産業機械等の摺動部品に適用され始めている。DLC の特性を左右するパラメーターの一つとして水素含有量がある。一般に DLC 膜に含まれる水素量の分析はイオンビームを利用した弾性反跳粒子分析法(ERDA)により行われている。本研究は、より簡便で汎用な手法としてグロー放電発光分析法(GD-OES)を用いた水素分析について、詳細な検討を行うことを目的とした。

II. 内容

昨年度実施できなかった低水素濃度領域の DLC 膜試料を RF 高電圧パルス重畳 PBIID 法により作製し、ERDA および GD-OES の測定を行った。この結果を昨年度取得した高濃度水素領域における結果と比較し、広範囲の水素濃度に対する GD-OES の水素強度の変化について議論した。GD-OES の水素強度は、低濃度領域では水素濃度の増加に対して緩やかに増加するが、水素濃度が高くなると急激に増加する傾向があった。

また研究段階である大気圧プラズマ法でも DLC 膜試料の作製を試みた。同様に ERDA および GD-OES の測定を行い、その結果から、水素濃度や膜質が成膜条件でどのように変化するか知見を得ることができた。

参考文献 1)高原晃里、石神龍哉、岡好浩: New Diamond, 13, 1 (2015)

^{*1}(株)リガク、^{*2}兵庫県立大学、^{*3}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと兵庫県立大学、(株)リガクとの共同研究として実施した。

2.1.3.1.13.

マイクロイオンビーム分析装置の開発と水素分析

Development of Micro-Ion Beam Apparatus and Hydrogen Recoil Detection Analysis

山口寛太^{*1}、近藤広基^{*1}、加藤政彦^{*1}、曾田一雄^{*1}、石神龍哉^{*2}、安田啓介^{*3}

Kanta YAMAGUCHI, Hiroki KONDO, Masahiko KATO, Kazuo SODA, Ryoya ISHIGAMI and Keisuke YASUDA

超臨界水は高い酸化力を持ち、金属との反応では一般に金属酸化物が生成されることが知られている。そこで、常温、大気圧下で水素化物を作ることが知られている Nb について、その超臨界水中での挙動に興味をもたれた。事実、10 GPa の超高压超臨界水中で加熱すると Nb の酸化物の他に、水素化物を作ることが X 線回折で示唆された。本研究では、ガラスキャピラリーを用いたマイクロイオンビーム分析装置を開発し、そのマイクロイオンビームを用いた弾性反跳粒子検出法 ERDA によって生成された Nb 水素化物の水素の深さ分布および NbH_x 組成を明らかにすることを目的としている。マイクロイオンビームを用いる理由は、作製された試料の大きさが 100 μm³ という極小試料であるためである。

現在、名古屋大学工学部で開発中のガラスキャピラリー・マイクロイオンビーム分析装置の実効性を事前に検証するため、福井県若狭湾エネルギー研究センターのマイクロイオンビーム分析設備を利用し μ-ERDA 法によって、超高压超臨界水中で作製された、NbH_x 組成を明らかにした。

超高压超臨界水中で加熱処理しなかったバージンな Nb 箔においても表面から深いところまで一様な水素分布が見られたが、これは、Nb に、元々吸蔵されていた H によるものと思われる。超高压超臨界水中で加熱した試料に対しても、バージンな Nb 箔と同様の表面からの深さ分布が見られたが、水素量が 2 倍に増加していた。このことは、超高压超臨界水中の加熱処理で水素化物ができたことを示している。H の濃度は、化学量論的な NbH_x 組成ではなく、Nb 原子数に対する H の原子数の比として、H/Nb ~ 0.2 であった。

^{*1}名古屋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}(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(現京都府立大学)

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

2.1.3.1.14.

RBS 法による GeO₂/AlGeOx/Ge 積層試料の膜厚と Ge の深さ分布の測定RBS Analysis of GeO₂/AlGeOx/Ge Interfacial Structure柴山茂久^{*1}、中塚 理^{*1}、財満鎮明^{*1}、加藤政彦^{*1}、曾田一雄^{*1}、石神龍哉^{*2}、安田啓介^{*3}

Sige-hisa SIBAYAMA, Osamu NAKATSUKA, Shigeaki ZAIMA, Masahiko KATO, Kazuo SODA, Ryoya ISHIGAMI and Keisuke YASUDA

次世代 CMOS 素子の実現に向けて、低い界面準位密度と低 SiO₂ 等価膜厚とを同時に実現する High-k ゲート絶縁膜/Ge 構造の作製法(成膜技術)の確立が待たれている。そこで、我々は、熱的に安定で、高い比誘電率を有する Al₂O₃ を Ge 基板に成膜することを行っているが、Al₂O₃/Ge 構造において、低界面準位密度は、実現されておらず、界面準位密度の低減が必要とされている。そこで、Al₂O₃/Ge 構造に対する酸化熱処理による界面構造制御と界面準位密度の低減法の確立を目指している。

平成26年度においては、p 型 Ge 清浄表面基板に Al₂O₃ を ALC 法で 1 nm 蒸着した試料を、さらに、大気中で、様々な温度で熱酸化して試料を作製し、その試料の界面の元素分析と膜厚分析を行った。通常の RBS 分析法で膜厚と界面の大まかな元素分析を行った。詳細な分析を、シングルアラインメント高分解 RBS 法(HRBS)を用いて行った。

その結果、熱処理によって Ge は Al₂O₃ 中を拡散し、表面に偏析した Ge は酸化され、GeO₂ のキャップ層を形成する。さらに、Al₂GeO₃/Ge 界面にも、数層の GeO₂ 層が形成されることが分かった。

^{*1}名古屋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}(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(現京都府立大学)

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

2.1.3.1.15.

ダイヤモンド状炭素膜の組成と摩耗率の関係

Relationship between the Composition and Wear Rate of the Diamond-Like-Carbon Film

神田一隆^{*1}、岩井善郎^{*2}、安田啓介^{*3}、石神龍哉^{*4}

Kazutaka KANDA, Yoshiro IWAI, Keisuke YASUDA and Ryoya ISHIGAMI

I. 緒言

ダイヤモンド状炭素(DLC)膜は耐摩耗性があり低摩擦係数を示すことから、摺動部用薄膜材として注目されているが、製造法や組成によってトライボロジー特性が大きく変わるという問題がある。そこで、DLC の摩耗特性を評価する一手法として、我々は従来からマイクロスラリージェットエロージョン(MSE)法を提案¹⁾し、様々なDLCの摩耗特性を調べてきた。本研究では、特に耐熱性や油中の潤滑特性に優れると言われているSi含有DLCを対象に、組成とMSE法による摩耗率の関係を調べた。

II. 内容

これまでの我々のMSE法によるSi含有DLCの評価では、Si含有率の増加とともに、摩耗率が増加することが明らかとなっている。一方、硬さ測定からはDLCのSi含有率を変えても硬さがあまり変化しないことが明らかとなっている。このことから、Si含有DLCの摩耗は硬さだけの効果ではないことが明らかとなった。そこで、この現象を説明するため、Si含有率の増加にともない、DLCのクラスターサイズが大きくなり、摩耗がクラスター単位で進行するため、Si含有率の増加とともにMSEによる摩耗率が大きくなると予想した。そして、DLCのクラスターサイズは水素含有率の増加と正の相関を持つという従来の報告を参考に、ERDA法とRBS法を用いて様々な条件を変えて作製したDLCのSi含有率と水素含有率を調べた。その結果、DLCのSi含有率の増加にともない、H含有率も約22%から26%へと増加するが、MSE摩耗率の変化に比べれば格段に小さいことが分かった。このことから、Si含有DLCの摩耗の要因に関しては明確な結論が出ず、引き続き検討することになった。

参考文献 1) Y. Iwai *et al.*: Wear, 251,861 (2001)

^{*1}福井工業大学、^{*2}福井大学大学院、^{*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(現京都府立大学)、^{*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、福井工業大学、福井大学の共同研究として実施した。

2.1.3.2. 材料照射損傷評価技術開発

2.1.3.2.1.

真空蒸着とイオン照射によるプラスチックへの電気伝導性付与

Improvement of the Electrical Conductivity of Plastics by Vacuum Evaporation and Ion Irradiation

石神龍哉^{*1}

Ryoya ISHIGAMI

Abstract

Perylene-3,4,9,10-tetracarboxylic dianhydrides are deposited on polycarbonate plates by vacuum evaporation. Plastic plates having light transmissivity and electric conductivity near the surface are made the by irradiation of 15 keV Ar ions.

要約

真空蒸着法によりペリレン 3,4,9,10 テトラカルボン酸二無水物をポリカーボネート板に成膜後 15 keV の Ar イオンを照射することにより、光透過性を持ち表面に電気伝導性のあるプラスチックを作製した。

I. 緒言

プラスチックは軽量、成型が容易、希少な元素を含まないなどの利点のため、各種の容器、包装、家電製品の外装など幅広い分野で利用されている。プラスチックの多くは絶縁体であり、静電気がほこりの付着や発火の原因となるため、帯電防止の要求は多い。しかし、導電性を持つプラスチックの種類は限られているため、電気的絶縁性のプラスチックに導電性を持たせる方法がこれまでに開発されてきている。カーボン、金属繊維など導電性材料を練り込む場合、練り込む量が比較的多く、強度の低下、色調の変化が生じる。金属箔のめっきの場合、薄いと摩擦に弱く、厚いと光透過性が落ちる。界面活性剤を含む帯電防止スプレーでは効果が持続しない。

そこで本研究では、多種類のプラスチックに対応可能で、光透過性を持ち摩擦に強い導電性の膜を形成する手法の開発を行った。

II. 成果の概要

イオン照射によって導電性が生じる材料として、ペリレン 3,4,9,10 テトラカルボン酸二無水物を選択した。これは、この有機物のモノマーが炭素の二重結合を多く含んでいるからである。成膜基板は、光透過性、電気絶縁性、表面の平坦性を考慮してポリカーボネート板を選択した。これにペリレン 3,4,9,10 テトラカルボン酸二無水物を真空蒸着し、15 keV の Ar イオンを照射した。電流密度は約 $2.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ であった。この膜中における Ar イオンの飛程、および弾き出された炭素などの原子の分布は TRIM2008 を用いて計算された。弾き出された原子は表面から深さ 60 nm 付近にまで分布することが分かった。

蒸着膜の厚さが 56 nm、Ar イオンの照射時間が 30 分間のときに得られた試料を通して蛍光灯の照明を撮影した写真を図1に示す。

20 mm×20 mm の大きさの試料の、外周に幅約 2 mm の橙色の部分があり、その内側が灰色になっている。蒸着は試料全体に対して行われたが、Ar イオンの照射は灰色の部分だけである。図1の写真から、灰色の部分を通して、プラスチックケースに書かれた赤い文字がはっきり読めることから、光透過性があることが分かる。また、灰色の部分に穴を開けて電極を取り付けて測定された電気抵抗は $2.5 \text{ M}\Omega$ であった。



図1 ペリレン 3,4,9,10 テトラカルボン酸二無水物を蒸着後 Ar イオンを照射したポリカーボネート板。

III. 結言

炭素の二重結合を持つ材料はここで用いられた物以外にも多く、特にフラーレン C_{60} には二重結合が多い。近年は C_{70} などの不純物を含んではいるが比較的安価に C_{60} を扱えるようになったため、平成 27 年度にはこれを用いた実験を行う。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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。

2.1.3.2.2.

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

An interaction between a mobile dislocation and a cavity in the light ion-irradiated molybdenum was observed in a tensile test with the “in situ” TEM observation. From the measurement of bow-out behavior of dislocation interacted at the cavity, the obstacle barrier strength of the cavity for hardening increase was estimated. Using the same experimental technique, the “in situ” TEM observation for the light ion-irradiated SUS316 steels was examined to get the information about the interaction between a mobile dislocation and a defect cluster.

要約

イオン照射された Mo に対して、転位が障害物であるボイドを乗り越える過程を TEM によりその場観察し、障害物が転位の動きを妨げる最大強さ、障害物強度を評価した。また、イオン照射された SUS316 で転位の動きのその場観察を行った。

I. 緒言

原子力政策の重要課題の一つに「安全確保を大前提とした既存原子力発電所の適切な活用」が挙げられており、原子力政策の推進には安全性の確保が最重要課題となっている。このような背景から、原子炉の安全性・健全性の評価について懸念が高まっている。また、電力需要の見通しが難しいこと、核燃料の再処理や最終処分を行うバックエンド事業の確立がまだ完結していないこと、国民の理解を得るための課題が存在することから、原子力発電所の新設が困難な状況となっている。それに伴い、当初の評価設計において目安とされていた 30～40 年間という原子炉の運転期間が過ぎても、特別点検に合格し、延長期間の劣化状況に関する技術的評価の審査を受け認可され、長期保守管理方針に基づく追加保全策を実施すれば 20 年を上限として運転を継続できる制度が設けられ、今まで以上に長期にわたる原子炉の運用が求められている。このような背景から、原子炉の高経年化に関して今まで以上に精度の高い評価法の確立が求められている。中でも原子炉圧力容器の照射脆化は軽水炉の運転寿命を決める重要な因子であると言える。したがって、軽水炉の中性子照射脆化を精度良く把握することは高経年化政策の最重要課題である。

照射後の試料に応力を加えて照射損傷組織ですべりを発生させ、照射硬化挙動、転位と照射欠陥との相互作用を観察することは可能であるが、照射硬化の原因となる転位運動に対する障害物の強度、つまり転位の動きを妨げる強さについては分からない点が多い。障害物にはサイズ、数密度、構造が複数存在するため、降伏応力の増加などマクロな機械的特性の変化からは障害物強度の計算値を検証できていない。そこで本研究では、イオン照射されたモリブデン(Mo)の透過型電子顕微鏡(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、障害物強度を測定した。また、イオン照射したステンレス鋼に対して TEM 内引張試験を行い、転位チャンネル形成の直接観察を試みた。

II. 内容

1. イオン照射された Mo の引張応力印加時における転位の「その場」観察と障害物強度の測定

TEM 内で引張試験を行いながら被照射領域を観察する試料として Mo を選択した。これは同じ BCC 金属であるバナジウム(V)、鉄(Fe)に関する実験データが既に得られて比較でき、V、Fe と比較して剛性率が高いためである。Mo 板を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。190 keV の水素(H)イオンおよびヘリウム(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 JEM-2100TM を使用した。加速電圧は 200 kV、試験温度は室温とした。TEM 内引張「その場」観察により得られた動画から転位が障害物を乗り越える過程を抽出して、障害物を乗り越える直前の転位線の張り出し角 ϕ を測定した。障害物を乗り越える直前の画像を図 1 に示す。図 1 から、矢印の部分の障害物で転位の動きがピン止めされ、障害

^{*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 社から受託し、福井大学と共同で実施した。

物の間に転位が張り出していることが分かる。電子ビームの入射方向がすべり面に垂直ではないため角度の補正を行った。障害物粒子をせん断するために必要なせん断応力 τ_c 、転位運動を阻止する能力として障害物粒子の強度はそれぞれ

$$\tau_c = \mu b / L_0 \times \cos(\phi/2)$$

$$f_c = \mu b^2 \cos(\phi/2)$$

と表される。ここで μ は剛性率、 b はバーガースベクトルの長さ、 L_0 は転位の張り出し間隔である。障害物の種類やサイズにより変化するのは $\cos(\phi/2)$ のみであるため、これを障害物強度 α とした。Mo に対して得られた値を、V および Fe に対して得られた値と比較した。Mo、Fe、V において、ボイド径に対する障害物強度をプロットしたグラフを図 2 に示す。Mo に関しては、照射温度を 600 または 650℃ の低い温度領域から 800℃ の高い温度に上げたとき、ボイド径は 3.2、3.3 nm から 5.0 nm へ増加したが、数密度は 1.4×10^{23} 、 $1.5 \times 10^{23} / \text{m}^3$ から $7.6 \times 10^{21} / \text{m}^3$ に減少し、障害物強度は 0.66 ± 0.01 、 0.63 ± 0.02 から 0.54 ± 0.03 に減少するという結果が得られた。Kumar らは Mo と同じ BCC 構造の金属である純 Fe 中のボイドのせん断応力はボイド径に比例している¹⁾。Xiong らはシミュレーションにより強い障害物、弱い障害物の 2 つに対して転位との相互作用を見ており、強い障害物の方は障害物間隔が大きくなると臨界張り出し角が大きくなる、つまり障害物強度が小さくなるが、弱い障害物の方は強い障害物と比較するとそれほど大きな変化は見られないという結果を得ている²⁾。Mo は Fe、V と比較して剛性率が高いため転位の単位長さ当たりの弾性ひずみエネルギーが大きく、転位が動きにくいいため Mo 中のボイドは強い障害物と考えられる。そのため、Fe、V では障害物間隔に影響されないため Kumar の報告通り、図 2 のようにボイド径の増加とともに障害物強度が増加したが、Mo では 800℃ での照射を行った方が障害物間隔は大きいため、障害物強度が小さくなったと推測される。

2. TEM 内引張試験によるステンレス鋼 SUS316FR 中の転位運動の「その場」観察

転位が障害物を乗り越える過程を直接観察する手法を用いて、転位チャンネル形成過程の直接観察を試みた。溶体化熱処理と電解研磨の後に、損傷ピークにおいて 0.2 dpa となるように 190 keV の He イオンを 300℃ で照射し、損傷部分が残るように電解研磨を行った。暗視野像による観察の結果、積層欠陥を持ったフランク型の不動転位による転位ループが、 $10^{22} / \text{m}^3$ 程度の密度で形成されていることが分かった。

TEM 内引張試験により、欠陥集合体が掃破されて欠陥が存在しない帯状の組織の中を転位が運動する転位チャンネルリング運動が観察できた。観察された動画から抽出された画像を図 3 に示す。動画により、転位が左上方向に集団で運動する様子が観察された。しかし、転位が損傷組織を掃破する観察結果は得られなかったため、転位チャンネル自体を形成する際の転位運動を直接観察するためにはさらなる改善策が必要である。

参考文献

- 1) N. Naveen Kumar *et al.*: Computational Materials Science, 53, 258 (2012)
- 2) L. Xiong *et al.*: Int. J. Plast., 65, 33 (2015)

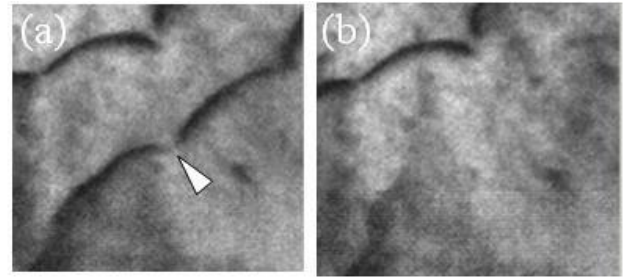


図1 イオン照射 Mo 材で観察された転位—キャビティ相互作用。(a) 矢印の位置の障害物でピン止めされ、障害物の間に張り出した転位の写真、(b) ピン止めが外れて障害物から離脱した後の写真。

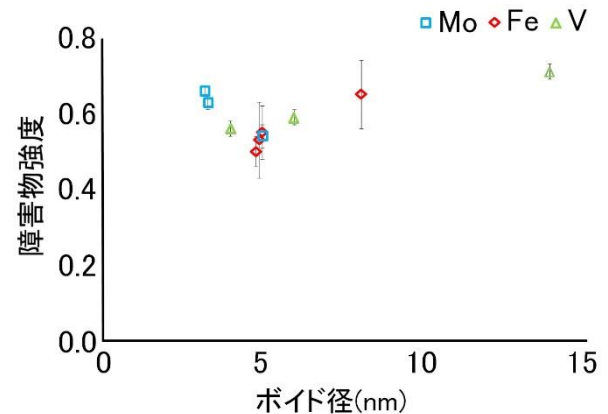


図 2 Mo、Fe、V 中のボイド径に対する障害物強度。

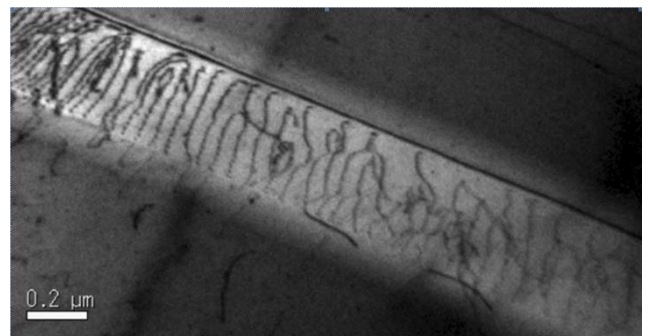


図 3 イオン照射 SUS316FR 材の TEM 内引張試験による転位チャンネル内での転位運動の画像。転位が集団で時間と共に左上方向に移動した。

2.1.3.2.3.

金沢大学衛星 Kanazawa-SAT³ 搭載用アナログ集積回路の放射線耐性試験Radiation Tolerance Test for Analog ASICs aboard the micro satellite Kanazawa-SAT³米徳大輔^{*1}、澤野達哉^{*1}、高田俊介^{*1}、吉田和輝^{*1}、加川保昭^{*1}、羽鳥聡^{*2}、久米恭^{*3}、長谷川崇^{*3}、水嶋慧^{*3}

Daisuke YONETOKU, Tatsuya SAWANO, Shunsuke TAKATA, Kazuki YOSHIDA, Yasuaki KAGAWA,

Satoshi HATORI, Kyo KUME, Takashi HASEGAWA and Satoshi MIZUSHIMA

Abstract

We performed some experiments for radiation tolerance of an application specific integrated circuit (ASIC) used for electric readout of silicone semiconductor devices onboard 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. As main results of experiments, we demonstrated the functions of ASICs were not changed by the radiation level during 10 years in the low earth orbit using proton beams with 200 MeV. Moreover, using carbon ion beam with the energy of 200 MeV, we estimated a cross section of single events upset (SEU) as $2.2 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{carbon}/\text{chip}$, and no single event latch-up (SEL) was observed. According to the result, we expect no SEU and SEL for the amount of carbon ions more than a million years in orbit, and we demonstrated the ASICs are significantly tolerant for the particle radiations.

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アナログ集積回路(ASIC)の放射線耐性試験を実施した。ここで利用した ASIC は、シリコン半導体検出器が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。地球周回低軌道における 10 年分以上に相当するプロトン照射量においても、ASIC の機能は全く変化しないことが実証できた。また、炭素イオン照射を行うことでシングルイベント・アップセットの発生率を評価し、その発生断面積が約 $2.2 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{carbon}/\text{chip}$ であると得られ、シングルイベント・ラッチアップは観測されなかった。これは軌道上における炭素イオン量の 200 - 300 万年分でもシングルイベントは発生しないことに相当し、極めてシングルイベント耐性が高いことも実証できた。

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、宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バーストの方向を決定するための小型X線撮像検出器を搭載する予定である。本実験では、半導体検出器の読み出し集積回路(ASIC)の放射線耐性を確認し、衛星軌道上で長期間にわたって動作可能であることを検証した。特に、衛星軌道上における粒子線の主成分である約 200MeV のプロトン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)およびラッチアップ(SEL)の耐性について評価することが目的である。

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 $10^8 \text{proton}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{yr}$ 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、本実験では若狭湾エネルギー研究センター(WERC)の加速器を用いて 200 MeV のプロトンを照射した。

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、WERC の加速器を用いて 200 MeV 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を十分に高くするため(Linear Energy Transfer として数 $\text{MeV cm}^2/\text{mg}$ よりも大きくするため)、ASIC へ入射する直前の炭素イオンのエネルギーが 10 MeV 程度となるようにビーム射出口から照射体までの距離を調整した。入射粒子フラックスは、光電子増倍管とプラスチックシンチレータを用いて事前に計測し、Geant4 シミュレーションと整合することを確認している。

*1 金沢大学理工研究域数物科学系、(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・*2 加速器室、*3 粒子線医療研究グループ
本研究は、金沢大学が(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。

◆本実験で使用した ASIC (ALEX-01)

図1に示すように、幾何学サイズ 7.46mm×8.80mm の集積回路の中に、64 系統の独立な電荷信号処理系が含まれており、外部の FPGA に対して A/D 変換を行った後の波高データをシリアル通信で送ることができる。世界的に見ても増幅率が極めて大きく設計されている。ALEX-01 の主要諸元を表1に示す。

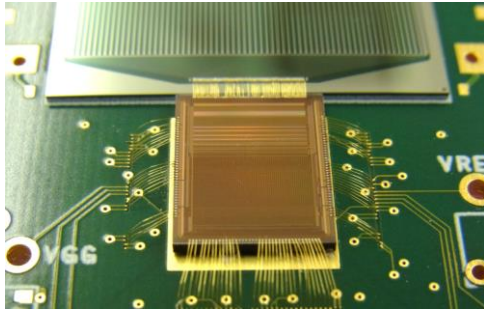


図1. 本研究で利用した ASIC (ALEX-01)

表1. ASIC ALEX-01 の主要諸元

Chip name	ALEX-01 (ASICs for low energy X-ray ver. 01)
Chip size	8.800 mm x 7.460 mm
No. of channels	64
Pad pitch of analog input	91.2 μ m
Fabrication and process	X-FAB XH-035 (0.35 μ m CMOS)
Gain of pre-amplifier	55 mV/fC (@ Cf= 0.016 pF)
Time constant of pre-amplifier	700 μ sec
Total gain	750 mV/fC
Peaking time of fast/slow amplifier	~0.8 μ sec (fast) & ~4 μ sec (slow)
Power rail	± 1.65 V (analog and digital), +3.3 V (digital)
Power consumption	~120 mW
Dynamic range	6300 e ⁻ (23 keV for Si)
Typical noise level (no-load)	88 e ⁻

II. 結果

本実験で得られた結果の概要は以下のとおりである。

(1) プロトン照射について

衛星軌道上(南大西洋異常帯も含む)で 10 年分相当のプロトン照射を行いながら、テストパルス波高値の推移やノイズレベルの変動をモニターした。ALEX-01 のビット分解能である 1024 ch の範囲で変化が見られなかったことから、プロトンによるゲイン変動・ノイズレベルの変動は 0.1%未満であると判断できる。さらに、軌道上 50 年分に相当する照射を行った場合でも、ゲイン・ノイズレベルともに大きな変動は確認できず、SEU も発生しなかった。

(2) 炭素イオン照射について

図2に、炭素イオンビームを照射しながら測定したスペクトル波高値の推移を示す。図中の最もカウント数の高い部分はノイズレベル(ペDESTAL値)に相当し、入射粒子数の増加とともにノイズ波高値が増大し、450 秒照射後には電源レベルに張り付いて出力が見えなくなっている。しかしながら、450 秒間の炭素イオン照射量は、軌道上における約 40 万年相当の粒子数に相当し、現実的には問題ないと判断している。

炭素イオンビームのプロファイルを考慮すると、1チップに対して合計で 6×10^{11} 個の炭素イオンを入射したと見積もることができた。これは衛星軌道上で約 200 - 300 万年に相当する量の粒子数であり、この実験の最中に SEU が 2 回発生した。ALEX-01 チップのレジスタ数は 2080 bit であることから、SEU が発生する断面積は、およそ 2×10^{-12} cm²/carbon/chip であり、信頼度 99% の上限値として 9.3×10^{-12} cm²/carbon/chip と見積もられた。

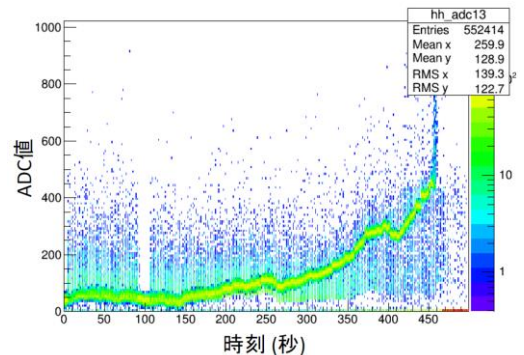


図2. ASIC に炭素イオンを照射している最中のスペクトル波高値の推移。ビーム照射量の増加に応じて、ノイズレベル(ペDESTAL値)が増加し、450 秒後(軌道上で約 40 万年相当)に測定不能となった。

III. まとめ

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。

参考文献

- 1) D. Yonetoku et al., SPIE, 9144-99 (2014)
- 2) D. Yonetoku et al., UNISEC Space Takumi Journal, Vol.5, No.2, 19-27 (2014)
- 3) 高田俊介 修士論文 (2015)

2.1.3.2.4.

抽出クロマトグラフィ用吸着材の α 線劣化生成物評価

Alpha-ray degradation products of an extraction chromatography adsorbent

渡部 創^{*1}、佐野雄一^{*1}、石神龍哉^{*3}

Sou WATANABE, Yuichi SANO and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

Alpha-ray degradation products of an extraction chromatography adsorbent was evaluated by GC/MS, NMR and FT-IR analyses on He^{2+} irradiated adsorbents. Those products might not influence safety of the extraction chromatography process.

要約

抽出クロマトグラフィ技術において使用される吸着材の放射線劣化生成物を調査するため、 He^{2+} イオンビームを照射した吸着材について分析を行った。 α 線照射によって生成する劣化生成物は引火点、発火点の観点より安全上危惧する必要はないと言える。

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ニド(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、吸着材に He イオンビームを照射し、劣化生成物を同定することで α 線劣化挙動を調査した。

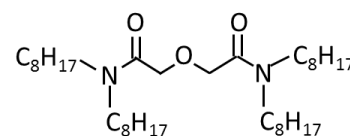


図 1 TODGA の構造式。

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 TODGA(N,N,N',N'-tetraoctyl-3-oxapentane-1,5-diamide, 図 1)抽出剤を含浸させ、真空中にて減圧乾燥させたものを照射用試料とした。照射実験は福井県若狭湾エネルギー研究センターのタンデム加速器、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 にて 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、吸着材への照射線量は 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、NMR、FT-IR 分析によって化合物の同定を行った。

表 1 TODGA の分解生成物。

名称	構造式
ジオクチルアミン	
名称不明	
N,N-ジオクチルアセトアミド	

III. 結果および考察

表 1 に He^{2+} イオンビーム照射によって生成した化合物を示す。ジオクチルアミン及び名称不明の物質が検出されたが、これらの物質は硝酸浸漬によって生成することが分かった。N,N-ジオクチルアセトアミドは、TODGA 分子における中央のエーテル結合における酸素の部位にて分解していると考えられる。したがって、酸によって TODGA 分子中の N の部位が分解しやすく、 α 線の影響によって、エーテル結合が分解する傾向にあるといえる。これは真空中における照射であることから、 He^{2+} イオンビームと TODGA 分子との直接的な影響によるものと考えられる。これらの劣化生成物は、引火点、発火点の観点より安全上危惧する必要はないと言える。今後は、生成が確認された化学種の Am 吸着・溶離性能を確認するとともに、その生成量と照射線量との相関を評価することでより実用性のある安全性データとして整理する必要がある。

^{*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。

2.1.3.2.5.

イオン注入に立脚する表面ナノ加工法の開発
 Nano Fabrication Caused by High Dose Ion Implantation
 岩田博之^{*1}、石神龍哉^{*2}
 Hiroyuki IWATA and Ryoya ISHIGAMI

I. 緒言

高ドーズの軽元素イオン注入と試料内部の局所加熱を組み合わせることにより、高精度、ドライ、デブリフリー、省資源、清浄などの特徴を持つ表面ナノ加工手法を開発している。

II. 内容

高ドーズイオン注入を要素技術とする、表面に並行に高精度かつ結晶品質の高い薄膜剥離技術は既に知られている。この技術に局所的アニールを組み合わせることにより、高精度でデブリの発生がない周期的凹凸形状が表面に発現することを見出した。

試料にはシリコン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アニールにより発生する膨張力が原動力となり、内部応力の相互作用および転位の存在が構造に影響を与え、溝形成、局所剥離の促進および抑制が発現する。図1は幅 60 nm、深さ 20 μ m の溝加工(亀裂形成)部の断面TEM像である。精度、再現性、清浄性に優位性が得られている。断面の結晶構造解析から動的挙動と発現メカニズム解明を進めている。

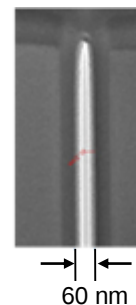


図1 溝加工部の断面TEM像。

^{*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の共同研究として実施した。

2.1.3.2.6.

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と各種デバイス創製への応用
 Study on Modification of Magnetic Properties of FeRh Alloy by Using High Energy Ion Beam for the Synthesis
 of Magnetic Devices

岩瀬彰宏^{*1}、鵜野浩行^{*2}、斉藤勇一^{*3}、松井利之^{*1}、石神龍哉^{*4}
 Akihiro IWASE, Hiroyuki UNO, Yuichi SAITOH, Toshiyuki MATSUI and Ryoya ISHIGAMI

我々はこれまでに、FeRh 合金にイオン照射することで、照射量に応じて反強磁性、強磁性、常磁性へと変化し、また熱処理することで常磁性から強磁性、反強磁性へと戻ることを見出した。さらに、マイクロビームを利用した照射から、照射量に応じた常磁性への変化は表面 2 次元方向のマイクロメートルスケールでも生じることを明らかにした。平成 26 年度には引き続き、イオンビームの照射とアニールにより面内方向だけでなく深さ方向にもマイクロメートルスケールで磁気特性を制御する実験を行った。

厚さ 60 nm の FeRh 合金に 2 MeV の H イオンを 10 μ m $\times$ 10 μ m の範囲で $2 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 、 $2 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 、 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ 照射し照射量に応じて反強磁性から強磁性、さらに常磁性へ変化することを確認したのち、423 K、473 K、523 K、573 K でアニールを行った。その結果、アニールにより強磁性から反強磁性に戻ること、常磁性からは強磁性へ変化することが分かった。また、試料表面付近にのみエネルギーを付与する 30 keV Ga イオンと、主に試料深部にエネルギーを付与する 2.9 MeV He イオンを、総付与エネルギーが同じになるように照射したところ、試料全体の磁性を測定する SQUID 磁束計では大きな差が現れないが、試料の極表面の磁性のみを検出する XMCD では、30 keV Ga イオンの場合には強磁性を示すスペクトルが得られたのに対し、2.9 MeV He イオンの場合には強磁性を示さなかった。これにより、イオンの種類とエネルギーを変えた照射を行うことにより、試料の深さ方向のある狭い領域の磁性を制御できることが示された。

^{*1}公立大学法人・大阪府立大学工学研究科、^{*2}住重試験検査株式会社・開発部、^{*3}(独)日本原子力研究開発機構・放射線高度利用施設部
 (現(国)日本原子力研究開発機構・放射線高度利用施設部)、^{*4}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ
 本研究は、公募型共同研究事業として実施した。

2.1.3.2.7.

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

Investigation of proton irradiation effects on semiconductor devices for spacecraft

小林大輔^{*1}、三田信^{*1}、梯友哉^{*1}、伊藤大智^{*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^{*3,*4}Daisuke KOBAYASHI, Makoto MITA, Yuya KAKEHASHI, Taichi ITO, Kazuyuki HIROSE,
Atsushi TOMIKI, Yasuhiro KAWAKATSU, Ryu FUNASE, Kyo KUME and Takashi HASEGAWA

宇宙は過酷な放射線環境である。人工衛星などの宇宙機に搭載される半導体部品は放射線を浴びる。半導体部品は一般的に放射線の影響を受けやすい。その結果、誤動作や故障を起こす。搭載にあたっては部品の健全性を確認することが必要である。平成 26 年度は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その効果を評価した。

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、50 MeV または 60 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。末端で 1 nA 程度のビームを半値全幅 50 mm 程度のガウス型に形成し、その中心に部品を置いた。ドーズモニターで確認しながら凡そ 1×10^{11} protons/cm² に達するまで照射した。インビームで部品の特性を観測した。大気中照射の利点を活かして 50 を超える部品点数を効率的に調査した。実験の結果、実験に供した光部品の特性がプロトン照射によって劣化すること、そしてその劣化の度合いは照射量が増えるにつれて大きくなることが認められた。

一般に半導体光部品はプロトンによるはじき出し損傷効果の影響を受けやすいことが知られており、本結果もその影響と考えると矛盾がなかった。劣化の様子を解析した結果、いくつかの部品については要求される寿命を満たさないことがわかった。また、実験結果から、部品の動作点を調整することで長寿命化が可能であることが認められた。そこで実験結果を元にパラメータを最適化し寿命を確保して搭載することができた。本成果は第 59 回宇宙科学技術連合講演会で発表される¹⁾。

参考文献 1) 伊藤他: 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 1G15 (2015)

^{*1}(独)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と(独)宇宙航空研究開発機構との共同研究契約に基づき実施した。

2.1.3.3. 加速器運転技術の高度化

2.1.3.3.1.

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}、山口文良^{*1}、淀瀬雅夫^{*1}、長崎真也^{*1}、山田和彦^{*1}、清水雅也^{*1}
Satoshi HATORI, Tetsuro KURITA,
Yutaka HAYASHI, Hiroaki YAMADA, Tetsuya ODAGIRI, Makoto HIROTO, Fumiyoshi YAMAGUCHI,
Masao YODOSE, Shin'ya NAGASAKI, Kazuhiko YAMADA and Masaya SHIMIZU

Abstract

During the operation of the tandem accelerator in 2013, humidity in the insulation gas SF₆ is controlled for the steady generation of the maximum high tension of 5 MV. The situation has been continued by November in 2014, however, beyond that time, the insulation column could not sustain the higher tension than 4 MV by the creeping discharge on the surface of the insulation column. Although we scheduled the start of the maintenance of the accelerator in March in order to extend the machine time for one month, the repairs in the accelerator tank suppressed the time of the generation of the high tension to 4248 hours same as in 2014.

要約

2013 年度にタンデム加速器は絶縁ガス SF₆ の含有水分量を抑えることにより、恒常的に 5 MV の最高電圧での運転が可能となったが、2014 年度は 11 月以降、再び絶縁コラム上の沿面放電により高電圧の維持が困難となった。定期検査を1ヶ月遅らせることで、マシンタイム期間を延ばしたが、放電対応によるタンク開放のため、高圧発生は前年度と同じ 4248 時間に留まった。

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方法を検討・実施することにより、加速電圧は 5 MV 超を回復し、2013 年度のマシンタイムでは期間を通じて安定して高電圧を発生していた。SF₆ の含有水分量の常時モニター、管理とマシンタイム期間中の改善を目的として絶縁ガス循環システムに水分除去ラインをあらたに設けた。

しかし、2014 年 11 月 19 日、12 月 10 日に放電を起こし、そのつど対応していたが、12 月 17 日の放電をうけて、2014 年度残りのマシンタイムは最高電圧を 4 MV に制限をして実験を行った。

2014 年度は夏場の加速ビーム種を去年の水素、ヘリウムの DC ビーム(タンデムビーム)に加え、炭素のタンデムビームも用いることとし、夏場のマシンタイム効率の向上をねらった。また、通常定期点検を 2 月、3 月で行うところ、3 月、4 月で行うようにし、マシンタイム期間の延長も考慮した計画となった。夏場の利用効率は向上したが、マシンタイム後半の放電とそのためのタンク開放を伴う修繕作業により、加速高電圧の総発生時間は前年度と同じ、4248 時間に留まった。

シンクロトロンに関しては垂直 COD 補正が行われている。これは稿を割き詳細に報告する。

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ひとつと考えられている。また、絶縁構造物に温度勾配がうまれることにより電界の不均一性をうみ、それが放電の起こしやすさの原因の一つにあげられる。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。

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は当然行いが、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。

改善が見られないため、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、また、加速管電極間での放電がないかのチェックを今後行ってゆく。

^{*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

加速器保守や運転は、(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事業(指定管理)として実施した。

Ⅲ. 2014 年度マシンタイム

2014 年度は 166 日の実験(2013 年度は 151 日)が計画されたが、放電対応のため実験実施日は 155 日に留まった。コンディショニングも含め、タンデム加速器の昇圧運転は 203 日、4248 時間であった。最大運転時間 4540 時間に達した 2007 年度は実験予定日 191 日、昇圧日 204 日であった。照射室の直上流のビームシャッターを開いている時間(利用系時間)は 2007、2013 年度でそれぞれ、1668、1301 時間であり、1 実験日あたりの利用系時間はそれぞれ 8.9、8.6 時間である。しかし、2007 年度は医療照射を行っており、医療照射以外の利用系時間は 1 日当たり 7 時間である。2013 年度は 1 日のうちにシンクロトン、タンデムビームの両方を利用する計画を回避することができ、効率のよい運用が可能となった。これは 2014 年度にも同じことが言え 8.6 時間であった。

また、2012 年度からのころみとして、電力需要の大きな 7 月中旬から 8 月末まではシンクロトンビームや重イオンビームを利用しない期間としたが、この期間は 1 昇圧日あたりの利用系時間を 5.4 時間にまで押し下げてしまった(2007 年度は 8.2 時間)。2014 年度はタンデム加速による重イオンビーム利用を行った。その結果、1 昇圧日当りの利用時間は 7.6 時間であった。この期間の 1 実験日当りの利用系時間は 9.9 時間に達し、タンデムを用いた重イオンユーザーが精力的に実験を行った結果である。

Ⅳ. まとめと今後

2012 年度に再開した加速器運転と加速器ビーム利用は 2013 年において加速器運転時間、利用時間、加速器の性能が 2007 年以前に復旧したが、2014 年度は、期間の終わりにシェンケルコラム上での放電を起こし、加速器の性能は、その加速高電圧において 8 割に低下してしまった。

シンクロトンへの入射器としての性能は充たしているが、5 MV の加速電圧を必要とするタンデムユーザーもいるため、放電の原因の特定と対策が急がれる。シェンケルコラム内部に放電を引き起こす原因がないか、また、電位のバランスを崩す原因の探査、加速管電極間の放電の有無のチェックなどを行ってゆく。

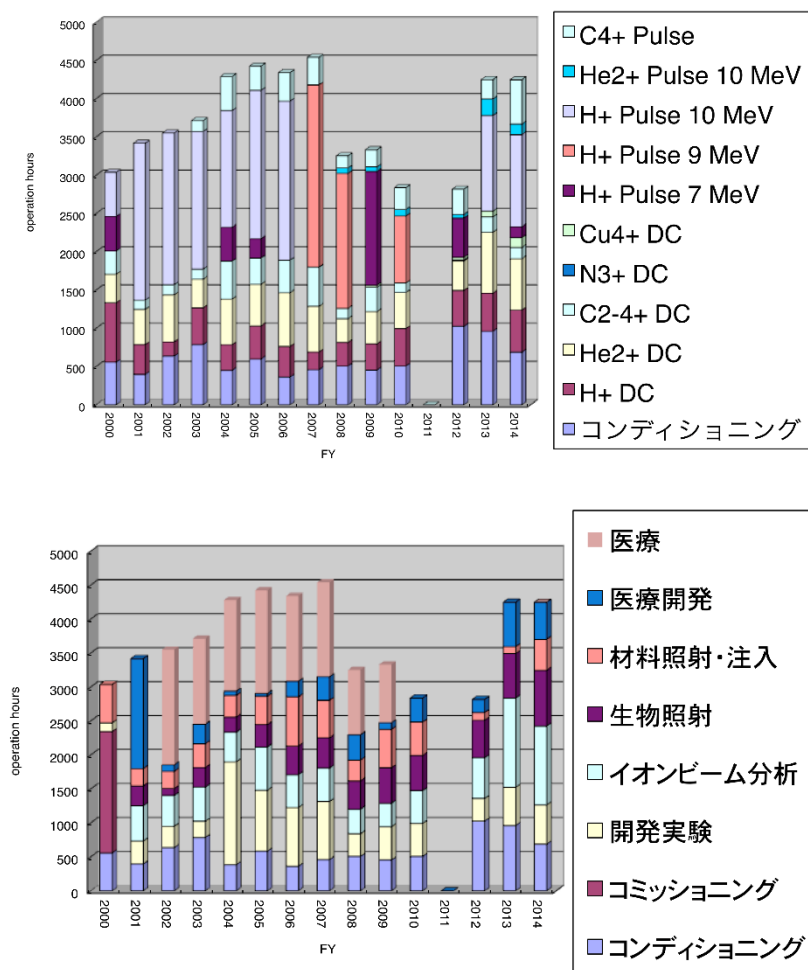


図 1 タンデム加速器運転時間推移

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。

2.1.3.3.2.

シンクロトロン垂直方向閉軌道の歪み補正

Correction of Vertical Closed Orbit Distortion of the Synchrotron at WERC

栗田哲郎^{*1}、林豊^{*1}、長崎真也^{*1}、廣戸慎^{*1}、小田桐哲也^{*1}、山田裕章^{*1}、山田和彦^{*1}、山口文良^{*1}、
淀瀬雅夫^{*1}、清水雅也^{*1}、羽鳥聡^{*1}

Tetsuro KURITA, Yutaka HAYASHI, Shinya NAGASAKI, Shin HIRORO, Tetsuya ODAGIRI
Hiroaki YAMADA, Kazuhiko YAMADA, Fumiyoshi YAMAGUCHI, Masao YODOSE, Masaya SHIMIZU
and Satoshi HATORI

Abstract

In 2003, it was found that the vertical closed orbit distortion (COD) of the synchrotron at WERC has changed from the former state. The investigation of new vertical kicks and the correction method have already been reported. In 2004, a back-leg winding is added into QD1 for a new vertical steerer which can be pattern-operated. The vertical COD has been corrected in 2 mm

要約

2013 年度に、若狭湾エネルギー研究センターのシンクロトロンにおいて、垂直方向の閉軌道の歪み(COD)が以前と変化している事が発見された。新たなキック源の推定と補正方法の検討した結果を報告した。2014 年度には、QD1 にバックレグコイルを巻き、パターン運転を行える垂直ステアラを移動させ COD 補正を行った。その結果を COD は約 2mm 以内に補正することができた。

I. 垂直 COD の現況

若狭湾エネルギー研究センターのシンクロトロンでは、垂直方向の閉軌道の歪み(COD)を発生させるキック源として、出射セプトム電磁石 SM1, SM2 の電流フィードラインが発生させる磁場と偏向電磁石(BM)と変化に比例するエラー磁場があることがわかっている。

これらのエラー磁場による COD を補正する為に、3台のステアラ(STV1, QD2V, QD3V)が用意されていた。STV1, QD3V は、時間変化しない静磁場を発生させる電磁石で、時間変化をしない SM1,2 に起因する COD の補正に用いている。QD2V は、パターン運転を行い偏向電磁石と比例するエラー磁場による COD の補正に用いている。QD2V と QD3V は四極電磁石のバックレグコイルとして設置されている。COD の測定のために、垂直方向のビーム位置の測定が行える静電型のビーム位置モニタが2台(BPM3, BPM6)が用意されている。フラットベースでの COD の測定に2台のワイヤー型プロファイルモニタ(PR1, PR2)をあわせて用いる。

図 1 に 2006 年と 2013 年の SM1,2 およびすべての垂直ステアラを OFF にした時の、フラットベースの垂直 COD を示す。2013 年に、SM1,2 に起因するエラー磁場は変化が無く、偏向電磁石に比例して変化するエラー磁場が変化していることが発見された。2013 年の COD を再現する QD2V のキックを最小自乗法に求めた物を図 1 の赤線に示す。QD2V では、2013 年の COD をうまく再現できない。COD 補正はステアラで COD を再現するキック角を求め、その逆極性の COD を発生させることによって、エラー磁場による COD を打ち消すことを原理とするので、QD2V では COD 補正が行えないことになる。COD が変化した原因として考えられるのは、偏向電磁石のアライメントの変化であると考えている¹⁾。

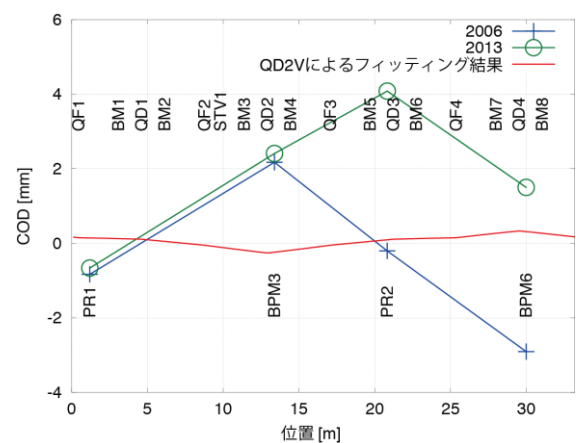


図 1 2006 年と 2013 年の垂直 COD の比較。
SM1,2 とすべてのキッカーを OFF。

II. COD 補正

検討の結果、QD1 の位置にステアラを移設できれば COD 補正が行えることがわかった¹⁾。QD1 にバックレグコイルを巻き(QD1V とする)、QD2V に接続している電源を接続し直すことによって、COD 補正を行った。

次の手順で COD 補正を行った。

^{*1}(公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・加速器室

1. SM1,2 からの漏れ磁場の補正
 - フラットベースで SM1,2 を ON/OFF にした時の COD の変化分を、STV1, QD1V, QD3V で補正する。
2. 偏向電磁石に比例するエラー磁場の補正
 - SM1,2 を OFF にして、フラットベースで偏向電磁石と比例するエラー磁場による COD を QD1V で補正する。フラットトップでの値は、フラットベースで求めた値を $B\rho$ 比でスケールすることによって得る。
3. 手順2で求めた QD1V のパターンに手順1で求めた QD1V のオフセット成分を足し合わせる。

Proton 10MeV 入射 200MeV 出射における COD 補正の結果を示す。図 2 は手順 1 の出射セプトラム電磁石 SM1,2 由来の COD の補正結果である。SM1,2 を ON/OFF したときの COD 差分(青線)を垂直ステアラ STV1,QD1V,QD3V で再現するキック角を最小自乗法によって求めた(緑線)。赤線は COD の補正をおこなった結果である。

図 3 は手順 2 の偏向電磁石に比例するエラー磁場の補正結果である。青線が COD の測定値であり、緑線が最小自乗法によって COD の測定値(青線)をもっとも近い COD を与える QD1V のキック角を求めた結果である。この逆極性のキックを QD1V に与えることによって補正した結果が赤線である。

最終的な COD の補正結果を図 4 に示す。青線がフラットベースで補正が無い場合の COD である。手順1による SM1,2 にエラー磁場を補正すると、赤線になり、さらに手順に2によって偏向電磁石に比例する成分を補正すると水色線になる。COD は約 2mm 以内に補正することができた。

QD1V のフラットトップでの値は、手順2で求めた値を $B\rho$ 比でスケールした値に、手順1で求めた SM1,2 のエラー磁場を補正するオフセット成分を足し合わせた。図 5 に BPM3,6 の時間変化を示す。加速に従って変化していくことはないで、フラットベースからフラットトップにかけて期待通りの補正が行われていることを示している。

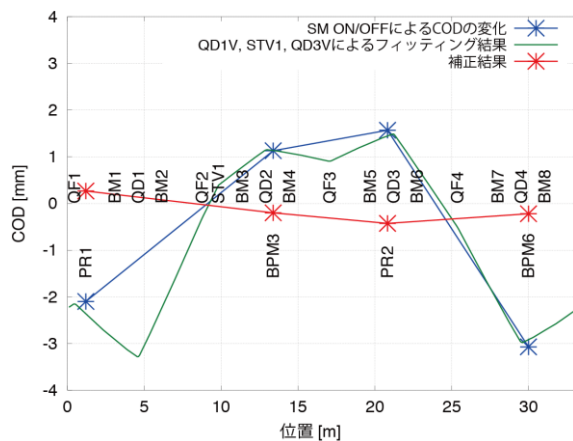


図 2 SM1,2 が発生するエラー磁場による COD の補正

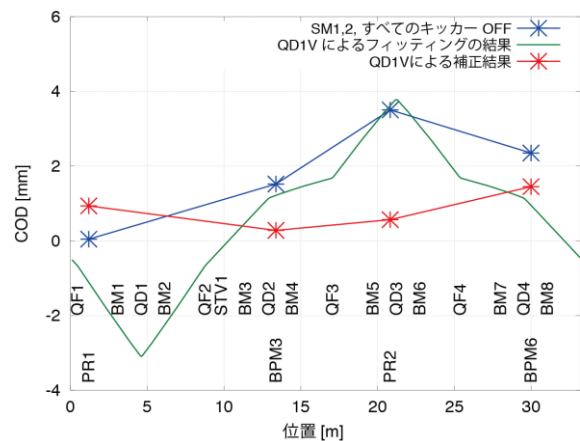


図 3 偏向電磁石に比例するエラー磁場による COD の補正

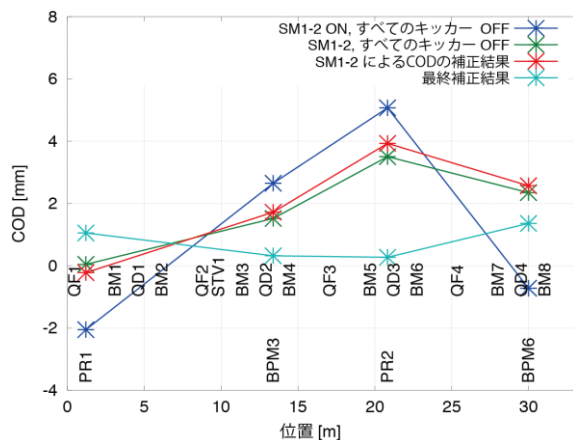


図 4 すべてのエラー磁場による COD の補正

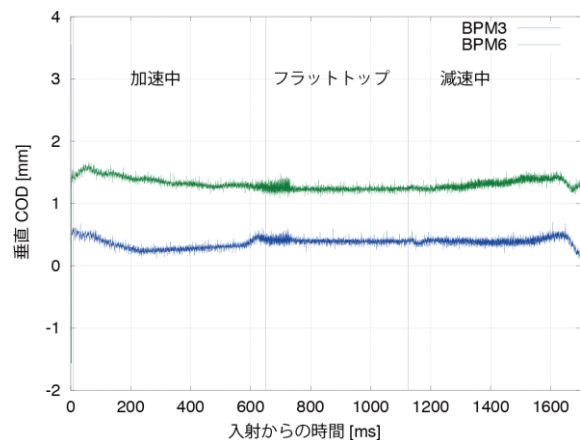


図 5 BPM3,6 の時間変化

参考文献

栗田哲郎 他、若狭湾エネルギー研究センター研究年報、16, 46, (2013)

2.1.3.3.3.

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

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大きなパルス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行った。

H21 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。H22 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。H23 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 2011.3.11 地震による 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。H24 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。H25 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。H26 年度は、運転体制を組んで定常的な運転を行うことができた。産総研内部で次期計画として予算を要求する段階まで来ている。

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て、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。H26 年度に産総研と共同で4K 予冷の関連論文、報告を投稿し、受理された。

^{*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開発グループ

2.2. エネルギー開発研究

2.2.1. エネルギー・環境材料開発

2.2.1.1. レーザー利用技術開発

2.2.1.1.1.

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}、田村浩司^{*1#}、石神龍哉^{*2}

Shin'ichi TOYAMA, Koji TAMURA and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

The development of laser cutting of thick steel plates was continued using a 30 kW fiber laser with a compact irradiation head loadable onto a robot arm which was manufactured after confirming optical performance by the prototype irradiation head. The cutting performances of steel plates with thickness of 300 mm were demonstrated with the specimens of stainless steels and carbon steels.

要約

昨年度に引き続き高出力 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。平成 25 年度試作の照射ヘッドの光学性能を試験で確認した上で、ロボットアームに搭載可能な小型化照射ヘッドを試作し、板厚 300mm のステンレス鋼や炭素鋼の切断を実施した。

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 30kW ファイバーレーザーに新しい照射ヘッドを導入して気中鋼材レーザー切断を継続し、照射レーザービーム特性と切断対象を考慮した最適切断条件の検討や狭隘部へアクセス可能な小型照射ヘッドの技術開発等を行い、板厚 300mm のステンレス鋼や炭素鋼の切断を実施した。

II. 成果の概要

今年度の試験では、図1に示すように、平成 25 年に試作した照射ヘッドと、その運転結果をもとに今年度試作した照射ヘッドの両方を用いて試験を実施した。コリメーションレンズとフォーカシングレンズの焦点距離比を保ちつつ短距離化することによりビーム特性を維持し、全体の大きさを半分に、重量を 15kg に小型軽量化した。熱負荷によるフォーカスシフトは若干増大したが動作に問題はない。図 2 に厚み 300 mm のステンレス鋼の切断試験の様子を示す。ここでは小型化照射ヘッドをロボットアームに搭載し水平方向に掃引しながら鋼材を切断している。今回の試験では、スタンドオフを通常のレーザー切断よりも大きい 60 mm 付近に設定し、アシストガス(圧縮空気)の流量を 1000ℓ/min. とすることにより、板厚 300mm までのステンレス鋼及び炭素鋼を切断することが出来た。最高掃引速度は板厚 300mm の時、ステンレス鋼で 8 mm/min.、炭素鋼で 12 mm/min. である。

III. 結言

以上の切断試験により原子炉圧力容器部材の切断の見通しを得た。今後は、カーブ幅の最適化や実際のプラント機器を想定した切断深さの試験やロボットアームを用いた遠隔切断技術の開発等を計画している。

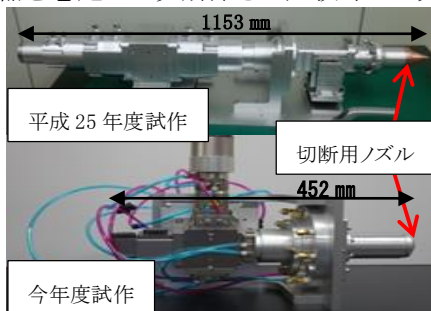


図1 試験に使用した照射ヘッド



図2 切断試験の様子

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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、[#]現(国研)日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究センター・レーザープロセス研究グループ
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県からの受託研究として実施した。

2.2.1.1.2.

電動クローラーを用いたレーザー加工技術研究
Electric Motorized Crawler Developments for Laser Beam Machining
峰原英介^{*1}
Eisuke MINEHARA

Abstract

An electric motorized crawler assembled into a laser beam peeling machine has been developed in order to be operated at a work site for peeling.

要約

剥離作業現場での活用を目指した、レーザー剥離機積載の電気モーター駆動クローラーを開発した。

I. 緒言

危険を伴う剥離作業(ケレン作業)を安全かつ高速で実施できる手段として、レーザー剥離機を積載したクローラー装置の利用が考えられる。こうした装置は現場において作業員が操作することが基本となるが、安全面を考慮した場合、遠隔操作が可能な仕様が望ましい。このことから、レーザー熱破碎高速剥離機付ロボットアームを電気モーター駆動クローラーに積載し、運用する技術開発を実施した。

II. 成果の概要

熱破碎高速剥離については、処理面積の増大を図るため、剥離速度を向上させる必要がある。しかし、剥離速度の向上には、剥離対象の材質に合わせレーザーの種類、パワー、面密度、走査速度の最適化が条件となる。今回コンクリートや低密度セラミックなどを対象に、パルスや波長の異なるレーザーを用いて、最適条件の検証を行った。また、剥離性能向上のため、対象物への予備過熱や水噴霧等の試験を実施した。条件により高速かつ高精度な剥離結果が得られたものの、結果にばらつきが見られることから、今後その原因究明が課題である。

クローラーについては、高額な機種では普及に大きなハードルとなることから、大量生産で比較的安価な農業用クローラーをベースに、遠隔制御の構築や保守点検が容易になるよう、エンジン部分をガソリンエンジンからインバーター制御の減速ギア付モーターに取替え、レーザー熱破碎高速剥離機付ロボットアームを積載し、製作した(図1)。動作については、安全面や現場での状況に合わせられるよう微速、低速、中速、高速での移動が可能なよう、設定を行った。

また、遠隔操作を実現するためには、光ファイバー、有線LANケーブル、3相200V電力線をねじれなく、送り出し、巻き取る必要がある。従来の回転ドラムでは不可能であった、ねじれなしを実現するため、固定ドラムと回転ドラムを組み合わせた複合ドラムを新たに開発した。

通信が途絶えた場合、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。クローラー制御パラメーターを適切に調整し、各走行状態での実試験を行い、危険性がない時間で停止するよう設計を行った。



図1 レーザー剥離機をアームに積載した移動用クローラー写真

III. 結言

今後は、製作した電気モーター駆動クローラーを用いて、ロボット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、大面積の床壁天井や大型構造物等のケレン作業や表面研磨作業の実証を行い、性能を確認する。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県からの受託研究として実施した。

2.2.1.1.3.

レーザー切断技術による原子力材料切断時の粉じん挙動データ取得・調査

Investigation of the Particulate Matters

Produced by Laser Cutting Process of Nuclear Materials

重田達雄^{*1}、田村浩司^{*2, #}、遠藤伸之^{*3}、山岸隆一郎^{*4}

Tatsuo SHIGETA, Koji TAMURA, Nobuyuki ENDO, Ryuichiro YAMAGISHI

Abstract

We performed nuclear materials Laser Cutting Test under the water with a small laser head, and acquired shift data or behavior data of the particulate matters which were produced by the Laser Cutting Test.

要約

水中において小型レーザーヘッドによる原子力材料の切断試験を行い、各種切断条件が粒子状物質の発生挙動に与える影響を調査した。

I. 緒言

日本原子力研究開発機構敦賀本部レーザー共同研究所からの委託により、小型のレーザーヘッドを用いて各種原子力材料を切断した際に発生するドロスや粒子状物質の挙動と各切断条件との関係を調査し、粒子状物質の拡散を防止することを目的として、水中においてレーザー切断を行った際の粒子状物質の気中及び水中への移行量及び移行率等のデータを取得した。

II. 試験方法及び結果

平成 18 年度から前年度まで、水中プラズマアーク切断試験・水中高圧水ジェット切断(略称 AWJ)試験・気中／水中レーザー切断試験を実施して、捕集した気中浮遊物や沈降／落下固形物等の重量分析及び成分分析を実施してきた。今年度は小型レーザーヘッドによる水中レーザー切断試験を主に行うこととし、WERC 所有のレーザー発振器を使用し、切断対象物である Zr 合金製配管材・SUS 鋼平板・アルミニウム平板切断時に発生する粒子状物質の分析は、SEM・EPMA・ICP-MS 等の科学機器を用いて WERC が実施した。

既存の水中切断試験装置を一部改造(右図参照)し、14 ケース・25 回の切断試験を実施、気中浮遊物や沈降固形物等の量及び性状が各種切断条件により変化することを確認した。試験結果から確認されたことは、たとえば次のとおりである。

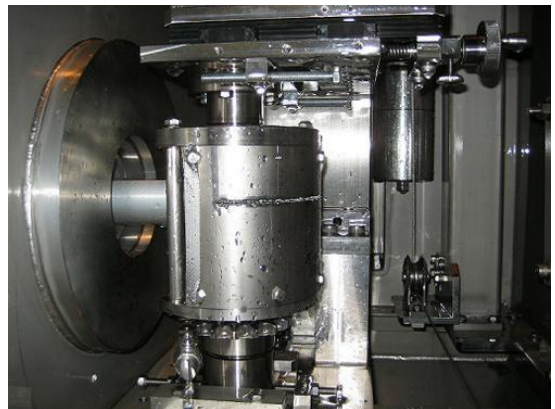


図 Zr 配管材の水中レーザー切断機構
(水槽内部、水張り前)

- 三種類の切断対象物で気中浮遊物重量を比較すると、ステンレス鋼平板:アルミニウム平板:Zr 合金製配管材の比はおおよそ 30:16:1 である(ただし、板厚や切断条件は同一ではない)。
- 三種類の切断対象物で気中浮遊物重量割合(切断試験体の切断時喪失重量に対する割合)を比較すると、アルミニウム平板:ステンレス鋼平板:Zr 合金製配管材の比はおおよそ 8:3:1 である(ただし、板厚や切断条件は同一ではない)。
- 切断条件を吟味することにより、レーザー出力 6kW・切断速度 30mm/分で Zr 合金製配管が切断可能である。

本調査により、原子炉を構成する材料を対象として、小型レーザーヘッドによる水中レーザー切断時の発生挙動に係る基礎データを取得することができた。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室、^{*2}同 エネルギー開発グループ、^{*3}同 生物資源研究室、^{*4}同 企画支援広報部、[#]現 (国研)日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究センター・レーザープロセス研究グループ
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが(国研)日本原子力研究開発機構からの受託研究として実施した。

2.2.1.1.4.

レーザー照射時のコンクリート熱的応答試験

Study on the thermal response of concrete and its related materials to laser irradiation

西尾繁^{*1}

Shigeru NISHIO

コンクリートの加工におけるレーザーの利用と、レーザー照射時にコンクリートが示す挙動の理解は、現在のところ極めて限定的である。本業務は、レーザーによるコンクリート加工の実用化を念頭に、5種類の異なるコンクリート類試験片(セメントペースト、モルタル、模擬コンクリート(セメントペースト+粗骨材)、コンクリート、骨材原料岩石)にレーザーを照射し、その際に誘起される熱的応答等の詳細な観察したものである。

まず、試験片に 15 対の熱電対を埋設した上でレーザー(照射強度:10W/cm²)を照射し、レーザー照射時の温度分布変化を測定することによって、試験片に発生する熱とその伝播に対する材料構成の影響を調査した。試験の結果、直接レーザー照射を受ける領域は 600℃以上に急速加熱されることが分かった。

続いて、試験片のレーザー照射挙動をフレーム同期照明とビデオカメラを用いて高鮮明度で観察した。試験の結果、500W/cm²-2 秒の条件では、全ての試験片に破碎/熔融が認められた。一方 10W/cm²-100 秒の条件では、外観の変化が全くないか、表面にわずかな変質がみられる程度だった。

最後に、セメント3種類(ポルトランドセメント(普通/中庸熱)、フライアッシュセメント(B 種))、骨材4種類(石英、石灰岩、那智黒石、砂岩)対し 1000℃付近までの熱重量-示差熱分析を実施した。分析の結果、全てのセメントの重量は加熱によって 20%以上減少し、加えて、100℃、450℃、700℃付近に吸熱ピークを示すことが分かった。また骨材の中で石灰岩は約 600℃~800℃の間に 45%程度の重量を失い、この時同時に大きな吸熱のピークを示すことが分かった。

^{*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(独)日本原子力研究開発機構(現(国研))からの役務契約として実施した。

2.2.1.1.5.

原子炉の汚染部品に対するレーザー除染機試験

Laser Decontamination Device Trials for Radiologically-contaminated Parts in Nuclear Power Reactors

峰原英介^{*1}

Eisuke MINEHARA

現在、JAEA 敦賀事業本部レーザー共同研究所では、レーザー技術の原子力施設への展開を図る技術の開発を進めている。本共同研究は、原子力施設におけるレーザー技術を用いた新たな除染技術を開発することを目的としている。対象を現在から将来の重水炉や軽水炉の 1 次系の廃止措置や定期点検などで必要となる除染技術と考えて、レーザー除染が現在の機械的方法や化学的方法に代わる除染方法として、除染機費用、除染処理費用、除染処理速度、除染率、2 次汚染量などの評価パラメーターをあきらかにすることである。レーザー共同研究所が進めている原子力施設へのレーザー技術のひとつとして新たな展開に期待するとともに、若狭湾エネルギー研究センターにおいても、この技術の応用範囲は広く一般産業界への展開技術として期待している。

H24 年度に JAEA 原子炉廃止措置研究開発センターの放射線管理区域内において、放射能に汚染された実機材を用いてレーザー汚染の実地試験を実施し、除染係数、除染速度、2 次汚染率、2 次廃棄物発生量などのデータを採取した。JAEA のふげんで 1MBq/kg の汚染物のレーザー除染試験を行い、検出限界以下まで除染可能であることを確認した。H25 と H26 年度は、初めて大型実汚染物を直接除染することを計画したが、了解が得られず、また残念ながら、福島対応のために、ATOX 社の汚染対応の専門家が不足して年度末対応ができなかった。H25 と H26 年度の除染試験は中止した。来年度以降に実汚染物の検出限界以下までの除染を再度実行したい。国内外特許出願と取得、国内外学会発表、国際会議発表、展示会発表、論文、解説記事、解説書等を出した。

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

2.2.1.1.6.

レーザー除染装置の開発
Developmental Works of Laser Decontamination Devices
峰原英介^{*1}、田村浩司^{*1, #}、
Eisuke MINEHARA and Kouji TAMURA

レーザー除染装置に用いる、今までとは異なる形式の種々のレーザー発振器、異なる方式の光輸送系等の開発を行った。又、ハンディタイプから大型除染箱式、蒸気発生器専用のレーザー除染機などのホットコールド試験、サービス、概念設計検討を行い、実用化を進めた。さらに溶射被膜除去、塗装剥離、ケレン作業など一般加工分野での応用を検討し、運用方法を開発した。電力関連企業、再処理工場などの市場調査を行った。

H23 年度で終了したモデル事業での小型レーザー除染機試作によるホット試験、除染サービスを計画した。シングルモードファイバーレーザーの伝送距離を長くするために1kW100mの伝送試験を行った。JAEA のふげんで実汚染物の除染試験を行い、レーザー除染の優位性を確認する計画を立案した。現状の除染機の適応対象である原子炉 1 次冷却水系の重度の汚染から、2 次冷却水系、保管設備、ホットラボ、原子燃料加工設備、など軽度の汚染へ適用範囲を広げるために開発を行った。溶射被膜除去、塗装剥離、ケレン作業など一般加工分野での応用を検討し、関連企業と共同研究或いは秘密保持契約下で協力研究を実施した。H24 年度にふげん実汚染物で検出限界以下になり、完全除染が達成された。除染係数は 10^4 以上と考えられた。

H25 年度で1kW100m伝送に成功したが、ラマン散乱によるレーザー品質の劣化が0.9kW以上で見られた。H25 と 26 年度に JAEA のふげんで実汚染物のレーザー除染試験を行う予定であったが、指導により中止した。国内外特許出願と取得、国内外学会発表、国際会議発表、展示会発表、論文、解説記事、解説書分担執筆等を行った。H24 年度に H23 年度に出願した特許の 19 条補正を行った。H25 年度に審査請求を、H26 年度に特許取得した。また 4 か国で国際 PCT 出願を行った。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室, [#]現(国研)日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究センター・レーザープロセッシング研究グループ

本研究は日本原子力研究開発機構レーザー共同研究所、同ふげん廃止措置研究開発センター、若狭技研工業(株)、西日本クリエイト(株)、(株)ATOX と協力して実施した。

2.2.1.2. 極微小駆動材料開発

2.2.1.2.1.

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 on at this time and were synthesized. Some kinds of carboxylic dianhydrides, diamines having sulfonic acid and diamines were used for synthesis of novel aromatic polyimides. Polymerization of mixtures was carried out in the presence of catalytic agents. The mixture was poured into acetone and purified. The relationships between molecular structures and solvent solubilities were 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。幾種類かの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が、この新しい芳香族ポリイミドを合成するために用いられた。高分子の重合反応は、触媒下で進行した。反応生成物はアセトン中に流し込むことで、精製された。高分子の分子構造と溶媒溶解性との関係を考察した。

I. 緒言

従来、ポリイミドは、不熔融、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高分子薄膜アクチュエータの開発において、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。本研究では、溶媒溶解性の向上を目的として、新規なモノマーの組合せによる高分子合成とその構造解析を行った。さらに、ファイバー化に適用可能な溶媒溶解性のある高分子を見極めるために、今までに合成を行ってきたポリイミド系高分子の溶媒溶解性を検討した。

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の合成を実施した。1例を示すと、化合物 A (1,4,5,8-naphthalene-tetracarboxylic dianhydride) と化合物 B (2,2'-benzidinedisulfonic acid) と化合物 C (4,4'-Oxydianiline) とを、A : B : C = 2 : 1 : 1 のモル比で調製し、m-クレゾール、安息香酸存在下で、180℃、20 時間加熱することにより、ポリイミドスルホン酸高分子を得た。この高分子を DMSO に溶解させ、アセトンを用いて再沈殿を2回行った。真空乾燥の後、精製した高分子を得た。この方法を用いて、モノマーを変えて複数のポリイミド系高分子を合成した。それらの高分子に対し、複数の有機溶媒に対する溶解性を調べた。モノマーに付加している官能基の電子供与性および電子吸引力から、分子構造と溶媒溶解性との関係について整理した。

III. 結言

ポリイミド系高分子の合成と溶媒溶解性を検討した。高分子の合成はある触媒の存在で容易に進行することが確認された。高分子の溶媒への溶解性を高める因子については、モノマーに付加している官能基の電子供与性および電子吸引力で整理することができた。この溶媒への溶解性は、紡糸において重要になってくるので、さらにより溶解性の高い高分子を合成していく予定である。

さらに、ファイバー化には、電解紡糸法やその他の方法を用いるが、紡糸条件と生成したファイバーの性状との関係を詳細に調べる必要がある。

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

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。

2.2.1.2.2.

機能性ナノファイバー電極材の創製とエネルギー変換素子・センサーへの応用
Development of Electrode Material by Functional Nanofiber and Application to
Energy Converting Elements and Sensing Elements

畑下昌範^{*1}、庄司英一^{*2}

Masanori HATASHITA and Eiichi SHOJI

本研究では、耐薬品性、耐熱性、強靱性、耐放射線性などの高機能性を有する高性能なナノファイバー、さらに、そのナノファイバーに電子伝導層が導入された導電性ナノファイバーの創製とその一連の創製手法を確立することを目的とする。ナノファイバーの特徴である、超比表面積効果、超分子配列効果からアクチュエータ、太陽電池、センサーの高性能化などへの応用性につなげる。

耐薬品性、耐熱性、強靱性、耐放射線性などの高機能性が期待できる高分子共重合体を得るために、置換基の構造を変化させた各種の高分子共重合体を合成し、それらの高分子物性を整理した。ナノファイバーの作製には、エレクトロスピンニング法を用いるが、従来の装置は小規模に実験するには不具合があった。そのために、少ない原料でも確実にエレクトロスピンニングができるアタッチメントを開発した。また、生成したナノファイバーを巻き取り器からよりダメージを与えずに、より簡単に脱離できる方法を工夫し、治具を製作した。さらに、機能化のために行う後続化学反応においてナノファイバーを傷つけずに処理する方法を見出した。

今後は、安定してナノファイバーが作製できる条件から、ナノファイバーマットの量産を行う。また、導電性の導入を行って、導電性のナノファイバーマットを作製し、種々のエネルギー変換素子やセンサーへの応用につなげ、それら分野の革新を具体的に図る。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ(現生物資源研究室)、^{*2} 福井大学大学院工学研究科知能システム工学専攻

本研究は、公募型共同研究事業として実施した。

2.2.2. エネルギー有効利用研究

2.2.2.1. 太陽熱等利用技術開発

2.2.2.1.1.

環境負荷低減の観点における太陽炉活用研究

Study on applications by a solar furnace in light of environmental impact reduction

篠田佳彦^{*1}、重田達雄^{*2}

Yoshihiko SHINODA and Tatsuo SHIGETA

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」の環境負荷低減に向けた応用について探索的な調査研究を行っている。この中で太陽炉の適用範囲を飛躍的に向上させることを目指して、1800℃以上の高温と気密性能を両立させ、その中で目的の化学反応を起こさせる石英管型のソーラ反応器を開発した。このソーラ反応器を用いて、平成 25 年から大阪大学(小林慶裕教授)では、大阪大学で吸排気系を改良したソーラ反応器を用いて、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っている。加熱雰囲気は減圧条件やエタノールを導入した反応性雰囲気とし、大阪大学にて小型太陽炉、およびエネ研にて大型太陽炉による加熱実験を行った。その結果、太陽炉による熱処理で、目標とした高品位グラフェンに至る品位を確保しうることを確認した。

また、太陽炉を有効に活用する候補として、

①過熱蒸気による有機系廃棄物の炭化による二酸化炭素の削減、有機廃棄物の減容

②酸化マグネシウムの熱還元によるエネルギーサイクルの確立

③セリウムの酸化還元特性を活用した水や二酸化炭素の分解による水素や一酸化炭素の生成

④月面における月面砂(レゴリス)の熔融による構造部材の生成と酸素の発生

など、太陽炉でなければ成立しえない適用先について検討してきた。

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

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。

2.2.2.1.2.

太陽炉と太陽熱エネルギー利用研究

The Solar Furnace and the Research about Utilization of Solar Thermal Energy

重田達雄^{*1}、篠田佳彦^{*2}

Tatsuo SHIGETA and Yoshihiko SHINODA

I. 緒言

自然エネルギー源である太陽光を透過型のフレネルレンズで集光して超高温場を作り出す「太陽炉」研究は平成 17 年度から当センターで開始され、大型太陽炉(10kW)や小型太陽炉はんだか(1.4kW、0.7kW、0.3kW)を完成かつ熟成し、各種の実験や研究に供して来た。今年度の主な研究内容と設備性能維持業務については以下のとおりである。

II. 研究内容等

化学剥離グラフェン修復等の高温活用研究を進めるために、1800℃以上の高温と気密性能を両立させ、その中で目的の化学反応を起こさせるように石英管型のソーラ反応器を改良した。これを実験に供するとともに、石英管の大径化の可能性についても検討した。更に、大阪大学が敦賀市内の業者に特注した発展型小型太陽炉の構造等に対する設計検討(操作性改善や位置決め精度向上)を行い、共同研究に供した。なお、これにより地元業者による小型太陽炉の製造販売実績は、累計 9 台となった。

III. 設備性能維持業務

大型太陽炉について、日常点検等により設備性能維持に努めた。また、劣化したレンズ遮光幕の更新を行い、設備設置後初めて故障した方位角調整用モーター(内蔵ブレーキの不具合)の交換修復作業を実施した。

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

2.2.2.2. バイオ応用環境技術開発

2.2.2.2.1.

耐塩性アブラナ系統の遺伝特性と耐塩性特異的 DNA 断片

Studies on Genetic Nature of Salt Resistant Brassica and Salt Resistance-Specific DNA fragments

高城啓一^{*1}

Keiichi TAKAGI

Abstract

It is revealed that the hereditary mode of salt resistance of bred Brassica is dominant. The DNA fragment that is closely related to the phenotype of salt resistance was found.

要約

再戻し交配の結果から、作出したアブラナの耐塩性が優性の遺伝形を持つことがわかった。耐塩性と強く連鎖する DNA 断片マーカーを見つけた。

I. 緒言

昨年度までの研究から、炭素線照射種子から作出されたアブラナ耐塩性系統が優性の遺伝様式を持つことを強く示唆する結果を得た。また、RAPD 解析により、変異系統に特異的な DNA 断片を見つけることができた。

今年度は、昨年度に作出した耐塩性変異系統の戻し交配個体にさらに戻し交配を実施し、再戻し交配後代の耐塩性を調べることで、作出した耐塩性系統の遺伝様式を調べた。また、RAPD 解析を進めて、新たに変異系統特異的な DNA 断片を見つけるとともに、再戻し交配個体の耐塩性と DNA 断片の連鎖を解析した。

その結果、作出した系統の耐塩性が優性の遺伝様式を持つことがわかった。また、昨年度見つけた DNA 断片は、耐塩性との相関が低かったが、今年度見つけた DNA 断片は、耐塩性と強い相関を示すことがわかった。

II. 成果の概要

昨年度の研究から、作出した耐塩性系統の親系統との戻し交配の結果得られる個体はほぼすべて耐塩性を示した。そこで、今年度はこの戻し交配後代に対してさらに戻し交配を実施し、再戻し交配個体の耐塩性を調査した。もし、耐塩性の遺伝様式が優性であるのなら、再戻し交配個体の耐塩性は理論上、耐塩性:非耐塩性 = 1:1 の分離比を示す。再戻し交配個体の耐塩性を調査したところ、46 個体の再戻し交配個体中、25 個体が耐塩性を示した。この結果は、耐塩性:非耐塩性が ほぼ 1:1 に分離したことを示しており、この結果から、作出したアブラナ変異系統の耐塩性が優性の遺伝様式を持つことを示している。

昨年度は、54 種類のプライマーを用いて RAPD を実施し、プライマー9、あるいはプライマー10 を用いて PCR を実施した時、750 塩基対付近に変異系統に特異的な DNA 断片が現れることがわかった。今年度はさらに 49 種類のプライマーについて RAPD を実施し、その結果新たに 3 種類の変異系統特異的 DNA 断片を見つけた(表 1)。

再戻し交配個体でこれまでに見つけた変異系統特異的 DNA 断片と耐塩性との連鎖を調べたところ(表 2)、昨年度発見したプライマー10 による 750 塩基対断片は、耐塩性とはほぼ連鎖しないことがわかった。一方、今年度見つけたプライマー82 により見られる 750 塩基対付近の DNA 断片は、耐塩性と高い連鎖を示すことがわかった。

表 1 変異系統特異的な DNA 断片とその塩基対の長さ

プライマー No.	親系統 (位置)	変異系統 (位置)
9		750付近
82		750付近
92		2700付近
94	2300付近	1100付近

プライマー94 では、1100 塩基対付近に変異系統特異的な断片が現れるとともに、2300 塩基対付近に親品種に特異的な断片が現れた。

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

表 2 再戻し交配個体の耐塩性と変異系統特異的 DNA 断片の連鎖

BC2	耐塩性	非耐塩性	プライマー				
			変異系統特異				親系統
			10	82	92	94	44
1-1		○	-	-	-	-	-
1-2		○	○	x	x	○	○
2-1		○	x	x	x	○	○
2-2		○	○	x	x	x	○
2-3	○		○	○	○?	x	○
2-4	○		○	○	x	○	○
3-1	○		○	○	○	○	○
3-2		○	○	x	○	○	○
3-3	○		x	○	○	○	○
3-4	○		x	○?	○	x	○
4-1	○		○	x	x	○	○
4-2	○		○	○	○	○	○
4-3		○	-	-	-	-	-
4-4		○	○	x	○?	x	○
5-1	○		x	○	○	○	○
5-2		○	○	x	x	x	○
5-3	○		x	○	○	○?	○
5-4	○		x	○	○	○?	○
	10	8	6/16	14/16	11/16	9/16	16/16

表は左から、戻し交配の個体番号、耐塩性・非耐塩性、変異系統特異的 DNA 断片が現れたプライマー番号、および親系統特異的な DNA 断片が現れたプライマー番号を示す。プライマーを示す表中の○×は、特異的断片の有無を示す。耐塩性、非耐塩性と断片の有無が一致した場合、セルの色を水色で示した。断片の存在が不明瞭な場合、セルの色をオレンジで示した。セルの色がグレーで、表中に-が表記されているのは、DNA の抽出ができなかった個体を示す。表最下段の数字は、分子が耐塩性の有無と DNA 断片の有無が一致した個体数、分母が DNA が抽出できた再戻し交配個体の総数を示す。

Ⅲ. 結言

今後は、耐塩性と強く連鎖する DNA 断片の塩基配列を調べ、その結果を元に耐塩性の原因となった遺伝子の特定を試みる。

2.2.2.2.2.

微生物を用いた水質浄化研究

Study of Improvement of Water Quality by Photosynthesis Bacteria

畑下昌範^{*1}

Masanori HATASHITA

Abstract

A water purification technique using photosynthesis bacteria was examined to improve water quality in wide-closed water area polluted by waste water. The clarification function of photosynthesis bacteria in brackish water condition was 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。光合成微生物の汽水条件下における浄化試験を実施した。

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、対策を求められている。生物を用いた環境浄化には、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。

今までの研究より、三方五湖や北潟湖から集積培養により光合成微生物を 41 系統単離した。これらのうちの数系統の光合成微生物に対しイオンビーム照射を行い、有用な変異体の獲得を試みてきた。次に、こうした改良微生物を実際の湖沼に適用した場合に、環境への影響を最小限にする必要が生じるため、微生物の高分子ゲルへの包埋を検討し、湖沼に適用可能な浄化システムの構築を進めた。今回、実地試験に向けた試みとして、単離、選抜してきた光合成微生物の汽水条件下での浄化能を評価した。

II. 成果の概要

今までの研究より、三方五湖、北潟湖から単離、選抜してきた光合成微生物を用いて、汽水条件で調製した水槽での浄化試験を実施した。

塩化ナトリウム濃度を3水準とした模擬液を調製し、光合成微生物を包埋した高分子ゲルをその中に入れ、試験を始めた。1日おきに模擬液のサンプリングを行い、液中の硝酸イオン濃度、亜硝酸イオン濃度、リン酸イオン濃度、アンモニウムイオン濃度を測定した。

その結果の一例を図1に示す。硝酸イオンに関しては、開始後2日目において、淡水条件で7割近く減少し、その時汽水条件においても、6割以上が減少した。開始後6日目には、硝酸イオンはいずれの条件においても検出限界以下になった。その他のイオンについても同様な傾向が見られ、汽水条件における吸収速度は、淡水条件と比べてあまり大きく変わらないことが明らかになった。

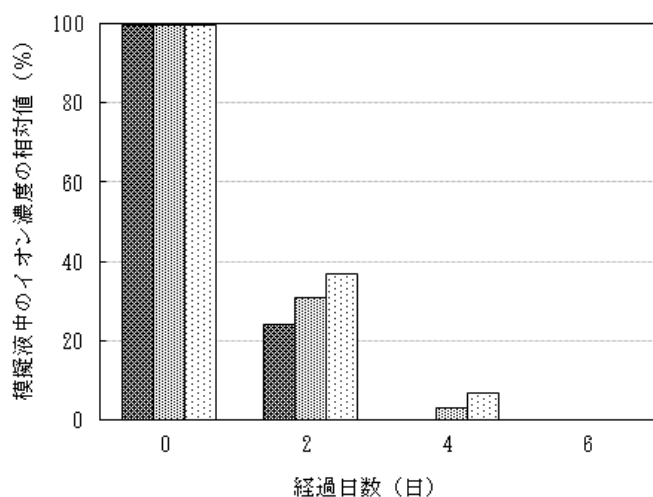


図1 汽水条件における光合成微生物の硝酸イオン吸収
(■:塩濃度0%、▨:塩濃度1%、□:塩濃度2%)

III. 結言

今後は、光合成微生物の増殖速度の光強度依存性および高分子ゲルの充填量と光透過性の経時変化を調査する。それらの結果をもとに、浄化ユニットの設計、製作を行い、その製作された浄化ユニットを用いて実地試験を行う予定である。

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

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。

2.2.2.3. バイオマスエネルギー技術開発

2.2.2.3.1.

バイオマスエネルギー技術開発研究
 Research and Development of Energy Production from Biomass
 遠藤伸之^{*1}
 Nobuyuki ENDO

Abstract

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

要約

バイオマス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分析から分解の効果を評価した。

I. 緒言

バイオマス資源は、化石燃料の代替として二酸化炭素の排出抑制ができるなど環境調和型の新エネルギーとして期待されている。特に木質系バイオマスは、食料と競合しない重要な資源であり、その活用が望まれている。しかしながら、現状では直接燃焼など利用範囲が限られている状況であり、可搬性・汎用性の高い液体燃料に変換する技術が求められているが、効率が悪く未だ大規模な実用化には至っていない。

小規模でエネルギー投入が少ない地産地消型エネルギー需給システムの構築を目指し、木質バイオマスだけでなく、海洋バイオマス資源等も活用できるマイクロ波急速加熱分解法と誘導加熱-触媒反応によって、石油代替となる液体燃料を製造するための研究を実施した。

II. 成果の概要

1. 生成するバイオオイルの改質に関する評価

- ・木質バイオマスのマイクロ波分解では、通常の外部加熱(ヒーター加熱)では起こらない分解生成物を生じ、粉体試料の微細化、見かけの減容化を起こすことができた。220℃までのマイクロ波加熱処理で流動性が高い液状の生成物が得られたが、微粉末が懸濁した状態であり、油状の生成物は得られなかった(図1)。
- ・塩化ナトリウム、炭酸水素ナトリウム、酢酸アンモニウムといった可溶性電解質の添加でマイクロ波が熱に変換される効率は向上するが、分解反応そのものは大きく変化しなかった。酸やアルカリを含む加熱処理では分解生成物はそれぞれ異なるが、糖成分を多く回収するには中性条件が適当であった。

2. フロー反応装置における反応効率向上

- ・非加圧で簡単な装置として設計できる 100℃までのマイクロ波加熱では連続的に試料を加熱処理しても、通常加熱との差異は認められず、マイクロ波処理の優位性はなかった。
- ・加圧マイクロ波加熱(220℃)分解後の反応溶液は、液体部分を分離し、新しいバイオマスの分解溶液として再度用いることができた。液体部分を繰り返し使用することで試料の減容化、エネルギー投入量の抑制、生成物の濃縮が可能である。

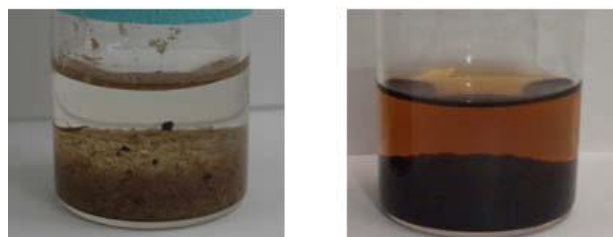


図1 松木粉に水を加えた試料(左)に対し、加圧マイクロ波加熱を 220℃、20 分間行った後の試料(右)

III. 結言

油状の生成物を取得する加熱分解が実現できる条件等を見出すことができず、水を溶媒とした処理条件では含水率が高いことから、処理生成物をそのまま燃料として利用することは困難であった。流動性の向上は見られたことから、固体試料の微粉化による可搬性の向上や減容化には応用できる。マイクロ波加熱によって分解生成した低分子の有機物の生成量は、従来の加熱法よりも多く、化成品・医薬品原料を回収することで廃棄物から有用資源を回収できる可能性がある。流動性の向上による可搬性の向上と減容化によって回収コストの低減化を図り、マイクロ波加熱分解特有の低分子化分解反応を活用・制御することで、生物由来廃棄物から有用成分を回収し化学原料として活用する技術に活用できる。

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

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。

2.2.2.3.2.

マイクロ波加熱を前処理に用いた木質バイオマスのエネルギー化研究

Study of Microwave-assisted Pretreatment of Woody Biomass for Enzymatic Degradations

遠藤伸之^{*1}、田中良和^{*1}

Nobuyuki ENDO and Yoshikazu TANAKA

木質バイオマスは、食料と競合しない資源として活用が望まれてものの、現状では直接燃焼など利用範囲が限られている状況であり、可搬性・汎用性の高い液体燃料に変換する技術が求められている。本研究ではエネルギー投入量が少なく高効率でエネルギー物質に変換する技術として生物反応に着目した。分解反応の遅い生物反応を加速させるため、木質バイオマスに対しマイクロ波加熱を前処理として実施し、有効性を検討した。

松木粉をバイオマス試料とし、市販セルラーゼを用いて分解を行った系では、マイクロ波加熱処理を 100℃10 分間行った試料は未加熱に比べて 24 時間後のグルコース生成量が 6% 高く、220℃10 分間処理したものでは 20% (マイクロ波加熱時の分解物の量を除くと 10%) 高くなっていた。通常加熱では未加熱と差がなく、マイクロ波加熱前処理で分解が促進されることが判った。平成 23 年度までに実施した研究で獲得した改良微生物を分解に用い、同様の分解実験を行ったところ、マイクロ波加熱処理でわずかにグルコース生成量の増加が認められたが、市販セルラーゼ分解試験に比べ、糖の濃度は低くなった。これは微生物自身による消費と見られる。

微生物分解はセルラーゼ分解に比べて未反応の木粉の量が少ないが、菌体として成長しているため、残渣の重量としては大きく変わらなかった。菌体の成長など自己消費を抑えて分解産物が回収できるよう、更なる微生物の改良が必要であるものの、マイクロ波加熱は微生物分解反応の加速に有効であった。

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

2.2.3. 原子力関連先端技術開発

2.2.3.1. 原子力応用技術開発

2.2.3.1.1.

環境中における線源位置探査解析手法の現場適用試験

On-site Application Evaluation of Radiation Source Detection Method in Environment

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

Takushi TAKATA, Nobuo OHTANI, Kyo KUME, Takashi HASEGAWA, Yukihisa SANADA, Tatsuo TORII
and Takeshi SUGITA

Abstract

A radiation source evaluation system using the method of inverse problem analysis has been carried out in environment as an on-site application in Fukushima area.

要約

逆問題解法を用いた線源位置探査解析手法を福島県内の環境中の実地において取得したデータについて適用し、評価した。

I. 緒言

本試験では、福島県双葉郡の帰還困難区域内において日本原子力研究開発機構が無人ヘリコプターを用いて測定した放射線測定データを用い、地域に飛散沈着した放射性物質の更に詳細な分布を評価する事を目的として、当該地域の地表面で線量率分布を測定し、そのデータを評価した。

II. 方法

上空 50 m 及び 70 m で測定された放射線分布に基づいて評価された線量率分布、又は、放射能分布を参照して、地形や線量率分布がやや複雑な領域を対象として選択し、地表での線量率分布を測定した。

地表測定を実施したエリアで得られている無人ヘリコプターによる上空の放射線測定データに逆問題解法を適用し、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。

III. 結果

地表面での線量率を測定した福島県双葉郡双葉町のエリアは、これまでに測定を実施してきた河川敷や休耕田を主とするエリアよりは線量率が高く、局所的に非常に線量率の高い場所や、広い範囲で線量率が大きく変化する場所等があり、特徴的な線量率分布のデータが得られた。又、簡便な方法で測定できる範囲で、樹木に付着した放射性物質の測定を試みたが、今回の測定の高さ(～8 m)の範囲では、樹木に付着した放射性物質の残存は確認されなかった。

また無人ヘリコプターによる測定が困難な送電線周辺の地表面測定も行ったところ、無人ヘリコプターを再接近させて取得したデータをもとに計算評価された線量率分布が地表面測定データと矛盾がないことを示した。

無人ヘリコプターで取得した上空の放射線測定データの逆問題解法適用による解析については、平成 25 年度の検討では、逆問題解析手法の適用においては評価領域の境界で正常な結果が得られない事が確認されたが、平成 25 年度に解析されたデータを用いて詳細な数値解法に関する検討を行い、仮想的な評価領域の拡張によって正しい結果が得られる事が明らかとなった。地表面における線量測定値との比較でも良好な一致が得られ、改めて逆問題解法が有効である事を確認した。

IV. 考察

山林においては樹木に付着した放射性物質の残存が確認できなかったことから、無人ヘリコプターで取得済みの山林のデータと地表で取得したデータとの比較により、土壌に残存する放射性物質が空中で取得したデータの主要因である可能性、ならびに樹木の葉が一定の遮蔽効果を与えていることがわかる。

^{*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}(同)ハセテック、^{*3}(株)環境総合テクノス、^{*4}(独)日本原子力研究開発機構・福島研究開発部門・福島環境安全センター、^{*5}(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(独)日本原子力研究開発機構から請け負った役務契約として実施した。

送電線周辺については、無人ヘリコプターが接近不可能でありながら、再近接時に取得したデータと地表面測定データとが矛盾せず、これまでの無人ヘリコプターでのデータ取得が一定の効果をあげていることを示唆する結果を得た。

上空で取得したデータに逆問題解法を適用することにより地表面における線量測定値との比較でも良好な一致が得られたことについては、地表面での分布の模擬計算を複数パターン実施し、逆問題解法が適用可能な条件を見出すことができた。

V. 結語

日本原子力研究開発機構が無人ヘリコプターを用いて上空 50 m 及び 70 m で測定した放射線測定データに対し、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。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ことから、本手法が有効である事を確認した。また送電線周辺等の無人ヘリコプター測定が困難な場所での地表面測定データの検証や、山林等の複雑な形状の場所等における無人ヘリコプター取得データの解釈を行い、上空から効果的に放射性物質の2次元分布を取得可能な無人ヘリコプターの有効性を確認した。



図 5 帰還困難区域における地表データ測定の例。



図 2 山林におけるデータ測定の例。

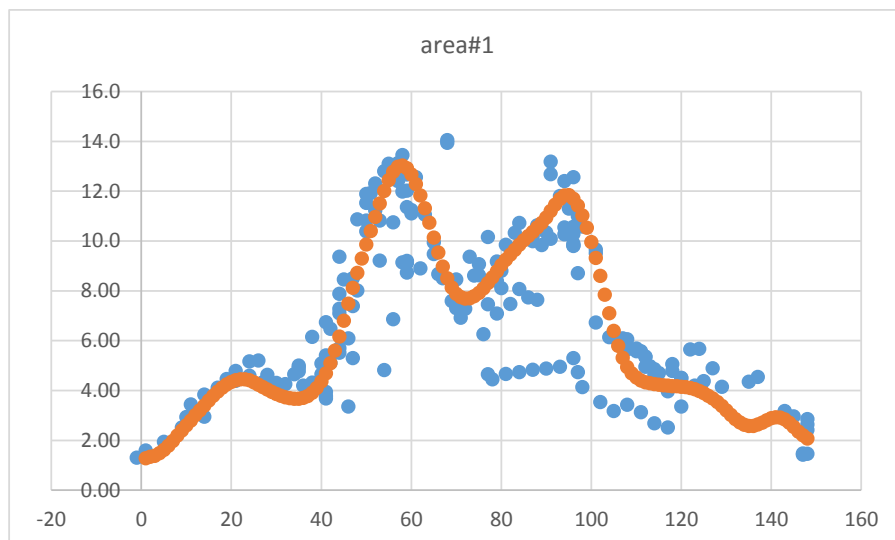


図 3 無人ヘリコプターで取得したデータを逆問題解法によって処理して得た地表 1 m での線量率分布(茶丸)と地表 1 m での測定データ(青丸)の例。横軸:原点からの水平方向メッシュ数(1メッシュは 10 m)、縦軸:線量率(μ Sv/h)。

2.2.3.1.2.

超高純度金属の精製研究

Preparation of Ultra Pure Alloy

西尾繁^{*1}, 前田裕司^{*1}, 藤井和行^{*1}

Shigeru NISHIO, Hiroshi MAETA, and Kazuyuki FUJII

abstract

Stainless steel was purified in either high vacuum condition or helium atmosphere. It was found that ten to twenty percent of impurities can be removed in these conditions.

要約

高真空及び減圧下 He 環境でステンレス鋼の不純物元素除去実験を実施した。その結果、10～20%程度不純物を除去出来た。

I. 緒言

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段階目の高純度化工程では熔融金属原料を電磁氣的に浮遊させ、2段階目の工程では電子ビームを利用する。そのため製造コストが極めて高い。本研究は、安価な超高純度ステンレス鋼の精製技術開発を目指して実施したものである。

II. 成果の概要

坩堝を使用した安価な熔融処理がステンレス鋼の不純物元素除去に有効かどうかを検証するため、H26 年度は新規高純度化手法(高真空及び減圧下 He 環境での熔融-凝固)を試した(図1)。熔融-凝固させ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。その結果、新規高純度化手法を用いることによって最大 10～20%程度不純物を除去出来ることが分かった(図2)。また、接触する耐火物粉末(マグネシア)からの汚染がないことも分かった。接触する耐火物粉末(マグネシア)からの汚染がなかったことは本事業で実施した方法の有効性を示すものといえる。

III. 結言

H26 年度は高真空及び減圧下 He 環境での熔融-凝固を初めて導入したので、安全性を見極めるために保持時間を5分程度という極めて短い時間に留めた。るつばからの汚染がないことを確認したので、除去効率は熔融時間に比例して大きくなると予想される。今後、熔融時間を長くする等、実験条件などの検討を重ね、実用化の目処となる 90%以上の不純物除去効率を目指す。



図1 熔融-凝固させたステンレス鋼原料。中央の光沢のある不部分がステンレス鋼、その外側の灰色の部分マグネシア粉末、その外側がアルミなるつばである。

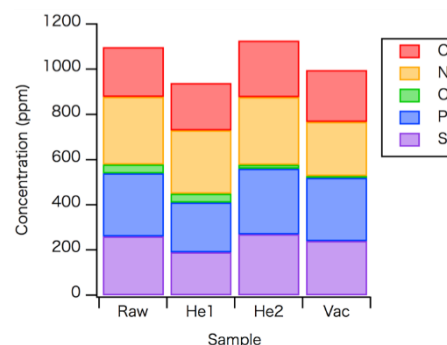


図 2.3-16 溶融条件と残留元素濃度合計の関係。(Raw; 未処理、He1; 減圧 He 雰囲気-結晶粒の小さい端部付近、He2; 減圧 He 雰囲気-結晶粒の大きい中央部付近、Vac; 高真空雰囲気)

^{*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。

2.2.3.1.3.

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

Ti-0.9 wt%N specimen was fabricated by the spark plasma sintering of nitride Ti powder and subsequent hot extrusion. Room temperature tensile test of Ti-0.9 wt%N specimen showed the ultimate tensile strength of 1054 MPa and elongation of 29.8%.

要約

窒素処理 Ti 粉末を放電プラズマ焼結および熱間押出加工することにより焼結ビレットとして成形することにより 0.9 wt%の窒素を含む Ti 材料を試作した。機械的特性の評価により Ti-0.9 wt%N 試料は最大引張強さ 1054 MPa、破断伸び 29.8%を示した。

I. 緒言

チタン(Ti)への添加元素としてレアメタルではなく軽元素を用い廉価でリサイクル性に優れ、かつ従来のレアメタル添加材よりも高い強度と延性を有する軽元素添加 Ti 複合材料を開発している。これまでに作製された Ti 複合材料は酸素(O)または炭素(C)を添加したものであり、それぞれ主として粒内固溶強化および粒界強化に基づき機械的性質を改善した。本研究では軽元素として窒素(N)を添加した Ti 複合材料の作製およびその機械的性質の評価、さらには TEM を用いた微細組織の評価および STEM-EDX による元素マッピングをおこなった。

II. 成果の概要

純 Ti 中への N の添加は、横型雰囲気管状炉内で窒素ガスを流入させながら純 Ti 粉末を熱処理して窒素処理 Ti 粉末とすることによりおこなった。その後、窒素処理 Ti 粉末は放電プラズマ焼結および熱間押出加工することにより焼結ビレットとして成形された。今回試作された窒素強化型 Ti 材は、Ti-0.9 wt%N である。

機械的特性の評価により Ti-0.9 wt%N は、最大引張強さ 1054 MPa、破断伸び 29.8%を示し、これまで開発された酸素または炭素添加された Ti 複合材料と同様に高い強度と延性を併せ持っていた。TEM による内部組織観察により結晶粒内には低密度の転位線や凸レンズ形状の析出物の存在を確認した(図1)。転位線および析出物共に結晶粒内および異なる結晶粒間における分布の不均一性が高い。析出物を含む領域での STEM-EDX による元素マッピングから、母相と比べた場合の析出物近傍での窒素の濃化等の組成に関する情報は現時点では得られていない。

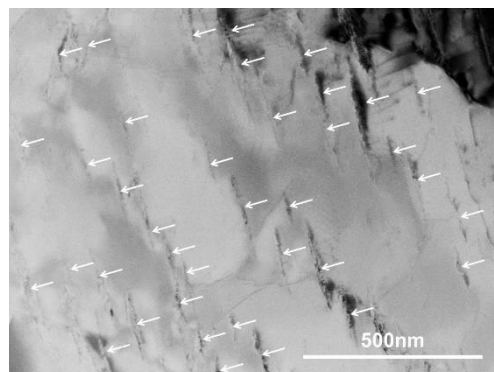


図1 Ti-0.9 wt%N 試料の結晶粒内の TEM 明視野像。形成された析出物を白矢印にて示した。

III. 結言

Ti へ添加する軽元素として、これまで研究対象としてきた O、C に加え、N の添加による純チタン複合材料を作製した。窒素強化型 Ti 材は、酸素強化型 Ti 材と同様に主として添加軽元素の Ti 中への固溶により機械的性質の改善を目指したものである。今回試作された窒素強化型 Ti 材の N の添加量は 0.9 wt%のみであり、N 添加量を変化させた試料を作製し、機械的性質や微視的組織に与える Ti 材中の N 濃度の影響を評価することが課題として残っている。それらの評価をとおして力学的特性の最適化を図る。さらに、Ti-0.9 wt%N 試料の微視的組織の TEM 観察により結晶粒内において析出物の存在が確認されているが、その構造の詳細は不明である。これについては高分解能電子顕微鏡法等を用いた解析を行う予定である。

*¹(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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。

2.2.3.1.4.

原子力発電所コンクリートの有効利用調査

Research study on the recycle utilization of the concrete waste caused by decommissioning

篠田佳彦^{*1}

Yoshihiko SHINODA

Abstract

We examined the recycle utilization of concrete waste caused by decommissioning of nuclear power plants.

要約

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検討した。

I. 緒言

標準的な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ており、発生時期が重なると従来の利用法だけでは消費できずに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。

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ていく。そこから、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ていく。

ここにおいて、再利用シナリオ策定における留意点を、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、および③地元企業との連携、社会的受容性の向上等へも配慮とし、福井県に適した「原子力発電所コンクリートの有効利用」に資することを目論むものである。

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について調べた。また、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。また、原子力発電所 1 機の廃炉で発生するコンクリート廃棄物を 50 万トンとすると、概算で処分に 10 億円、運送に 15 億円程度となる見込みを示した。

2) 将来期待されるコンクリート廃棄物利用法の調査

国内では、コンクリート廃棄物の大半が破碎して粒度調整した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。ただし、再生路盤材として活用するためには、対象コンクリートをサンプルし、再生路盤材の試作とともに各種の溶出試験などで健全性を評価する必要があることがわかった。さらに、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、状況によっては、発生量が余剰となる可能性があることもわかった。

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。

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。

^{*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。

2.2.3.1.5.

放射線源情報評価手法の開発
Advanced evaluation of radiation source
鴨川仁*1、久米恭*2
Masashi KAMOGAWA, Kyo KUME

Abstract

A new information in movement of radioactive materials from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident was determined by estimation of radiation source height distribution at Mt.Fuji. Also a new information to solve a question at a thunder lightning was determined in high energetic radiation measurement at Mt.Fuji.

要約

富士山における放射線源高度分布の評価により、福島第一原子力発電所事故起源の放射性物質移行に関する知見を得た。また富士山における高エネルギー放射線の測定により、雷発生メカニズムの解明に関する新たな知見を得た。

I. 緒言

放射線源の同定の高精度化には、バックグラウンド放射線量の評価が重要である。宇宙線や天然放射性核種以外にも、福島原発事故や第 3 の自然放射線源とみなすことのできる雷雲に関連する高エネルギー放射線はバックグラウンド放射線となりうる事象であるため、これらの定量的評価は重要視される。本共同研究では、富士山における放射線高度分布の同定および雷雲から発生する放射線の発生機構を観測的見地から解明した。

II. 福島第一原子力発電所事故起源の放射性物質移行に関する富士山での放射線源高度分布測定

福島第一原子力発電所事故起源のセシウム線量率を、富士山山頂(標高 3776 m)と 5 合目に位置する太郎坊(標高 1200 m)において調査した。

2011 年に事故 3 ヶ月後の山頂で採取した積雪をゲルマニウム半導体検出器で測定した所、 ^{134}Cs は測定限界以下であった。同時期に太郎坊で採取した雨水と霧水については、有意な量の ^{134}Cs が含まれていた。次に、2014 年山頂、2015 年太郎坊において、ゲルマニウム半導体測定器によりガンマ線空間線量率の連続測定を 1 ヶ月間行った。その結果、太郎坊のおおよそ 1 万分の 1 程度の ^{134}Cs が山頂に存在することを明らかにした。

後方流跡線解析によると、福島事故起源のプルームが大気中に存在する期間に、山頂に直接 ^{134}Cs が到達したことは考えにくい。同様に、太郎坊の大気に含まれる ^{134}Cs が谷風で山頂に持ち上げられることも同期間では考えにくい。福島事故起源のプルームが偏西風により東側に運ばれ、上昇気流などの影響で自由対流圏に到達し、世界中を回って自由対流圏に位置する富士山山頂に到達した可能性を示唆する。

III. 雷発生メカニズムに関する富士山での高エネルギー放射線測定

本研究では雷雲に伴う高エネルギー X 線の発生源および仕組みを解明するために富士山頂において放射線と大気電場の測定を行い、データ解析を行った。

2013 年夏季に富士山頂で取得した高エネルギー放射線、および雷雲が作る大気電場の測定データ中、雷雲が上空を通過した 7 月 26 日に放射線量の急増とともに大気電場値が大きく変動したことがわかった。自然環境中の Rn よりもエネルギー領域が高く、雷雲起因の高エネルギー X 線であると断定できる。また X バンドレーダー解析により、このとき発生した雷雲は通常の積乱雲と比べ、規模は小さいながらも三極構造をとっていると推測される。高エネルギー X 線検知時の富士山頂での大気電場値は -30 kV/m 程度であった。X バンドレーダーの解析より、富士山頂上空の高度 5.8~7.2 km に 1 つの負の球電荷を想定したシミュレーションを行ったところ、球電荷の表面は 103 kV/m となり RREA 大規模に生じるとされる電場に至らなかった。この事例を再現して行ったモンテカルロシミュレーションから RREA が起こると考えられる高度で、約 100 kV/m で放射線が 1 割増加していた。このことは算出した球電荷の表面の電場を支持する結果となった。

*1 東京学芸大学・教育学部・自然科学系・物理科学分野、*2 (公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ
本研究は東京学芸大学と(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。

2.2.3.1.6.

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}、久米恭^{*2}、長谷川崇^{*2,*3}、今富宏祐^{*1}、三根貴大^{*1}、李恩智^{*1}、木村健一^{*4}

Nobuhiro SHIGYO, Kyo KUME, Takashi HASEGAWA, Kosuke IMATOMI, Takahiro MINE, Eunji LEE and Ken-ichi KIMURA

Abstract

Neutron attenuation of flexible material for radiation shielding was measured. Neutrons generated by reaction of water and 55 MeV/u He beam were used. It is found that neutron attenuation coefficient for the flexible material is about 75 % of that for ordinary concrete.

要約

放射線遮蔽用の可撓性材料の中性子遮蔽性能を測定した。55 MeV/u の He ビームを水で完全に停止させて生成される連続エネルギー中性子を使用した。この材料の中性子に対する減弱係数は一般的なコンクリートの 75%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撓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。平成 26 年度は、核子当たり 55 MeV の He ビームを水に照射することで生成される連続エネルギー中性子を使用して、この可撓性材料の中性子の透過量を調べた。

II. 方法

中性子透過量測定の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高エネルギー生物照射装置で行った。試料の可撓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、厚さを 0 cm から 20 cm まで 5 cm 毎に変化させた。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。

55 MeV/u の He ビームを厚さ約 5 cm の水に照射した際に生成される連続エネルギー中性子を試料に当て、透過する中性子量を下流に設置した中性子検出器で測定した。He ビームの強度は約 10^5 pps でビーム出射口のすぐ下流に設置した厚さ 2 mm のプラスチックシンチレータで計測した。下流側の中性子検出器には直径と長さが 12.7 cm の NE213 シンチレータを使用し、この検出器のすぐ上流側に荷電粒子識別用の厚さ 2 mm のプラスチックシンチレータを置いた。この実験体系で、エネルギーが約 5 MeV 以上の中性子に対して透過量を測定した。

NE213 シンチレータからのデータには中性子だけではなく、ガンマ線や荷電粒子によるデータも含まれる。このため荷電粒子識別用シンチレータのデータから中性子とガンマ線によるデータのみを抽出し、さらに NE213 シンチレータの発光特性を利用して中性子によるデータのみを抽出した。

III. 結果

測定結果は厚さが 0 cm のときの中性子量で規格化し、厚さに対する中性子透過量の変化で表した。この結果、可撓性材料の線減弱係数は 0.053 cm^{-1} であり、一般的なコンクリートと比較して 75%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。同じ条件でモンテカルロ粒子輸送コード PHITS¹⁾で計算した結果は実験データを支持していることが確認された。

IV. 結語

放射線遮蔽用可撓性材料の中性子遮蔽性能を測定した。平成 27 年度以降は別の可撓性材料についてのデータを取得することを予定している。

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)

^{*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}(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)フジタ・技術センター

本報告は(公財)若狭湾エネルギー研究センターと国立大学法人九州大学との共同研究契約に基づいて実施した研究成果である。

2.2.3.1.7.

減容安定化処理した粉末形状樹脂の均質・均一固化体製作技術調査

Technical Surveillance on Production Methods of Homogeneous and Uniform Solid Materials from Spent Ion Exchange Residuum after Ion Coupled Plasma Volume-Reduction Process

大谷洋史^{*1}、水井宏之^{*1}、東浦則和^{*1}、明里栄策^{*2}、遠藤伸之^{*3}、山岸隆一郎^{*4}、久米恭^{*5}、
小野崎公宏^{*6}、平野孝^{*6}

Hiroshi OHTANI, Hiroyuki MIZUI, Norikazu HIGASHIURA, Eisaku Akari, Nobuyuki ENDO, Ryuichiro YAMAGHISHI, Kyo KUME, Kimihiro ONOZAKI and Takashi HIRANO

I. 緒言

原子炉運転中に発生した使用済イオン交換樹脂等を安全かつ効率的に放射性廃棄物として処理・処分することを目的とした減圧酸素プラズマ方式による減容安定化処理装置の実用化への調査の一環として、原型となる大型試験装置を使って粉末形状イオン交換樹脂を 1st ステージ処理のみ実施する低減容処理を行い減容安定化処理した後の残渣を用い、セメント混練固化に関する手法の調査及び試験を行った。

II. 内容

セシウム、コバルト、鉄、及び塩素を吸着した模擬樹脂に対して、低減容安定化処理を行い、セメント混練固化試験に供する低減容処理灰化樹脂を作製し、事前浸漬及び粉碎による脱気処理を施してセメント混練を行い、セメント混練固化体を得た。このセメント混練固化体について各種試験を行った。これらの試験結果及び検討結果から、これまでに実施した高減容処理灰化樹脂と同様、低減容処理灰化樹脂についても、脱気処理による発泡抑制効果が確認され、廃棄体の技術要件を満足する固化体製作が可能であることを確認した。また、化学混和剤を使用することで、固化体の流動性、固化体の強度、灰化樹脂充填率の3つの条件を制御できる見通しを得た。

^{*1}(独)日本原子力研究開発機構・敦賀本部・原子炉廃止措置研究開発センター、^{*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・生物資源グループ、^{*4}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・企画支援広報部・技術開発室、^{*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、^{*6}富士電機(株)・発電プラント事業部。

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請け負った役務契約として実施した。

2.2.3.1.8.

低放射化コンクリートの基礎検討

Fundamental Study on Low-Activation Concrete

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

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

I. 緒言

低放射化コンクリートは放射線利用施設において、被ばく低減や放射性廃棄物減容といった観点から開発実用化が進んでいる。特に遮へい用途で使用されているコンクリート(安価で適度な遮へい性能を有する)は使用されている物量が極めて大きく、製造時の価格が安価であることから放射性廃棄物となった場合の管理費用は、対製造費といった観点で他の材料と比較すると影響度が高い。このことから低放射化コンクリートの研究開発の重要性が高まっている。

II. 内容

平成 26 年度の研究では、主に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実験を実施した。試料としては 30 cm×30 cm で 6 cm 厚のコンクリートブロックを使用し、18 cm 厚(3枚)まで変化させ、55 MeV/u の He ビームを厚さ 5 cm の水タンクに照射した際に生成される中性子の透過量を NE213シンチレーターで測定した。この結果、上記の実験体系が有意なデータを生成可能なことを確認した。今後は、金属試料やレムカウンタなども含めて透過量を評価する予定である。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、^{*2}(ト)ハセテック、^{*3}(株)フジタ・技術センター、^{*4}九州大学・大学院工学研究院・エネルギー量子工学部門

本報告は、(株)フジタと(公財)若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究契約、ならびに九州大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究契約による成果の一部である。

2.2.3.1.9.

基礎架台コンクリート等への放射性物質等の浸透性評価
 Estimation of Radioactive Substance Penetration in Basement Concrete
 手塚将志^{*1}、香田有哉^{*1}、藤田義彦^{*2}、久米恭^{*3}
 Masashi TEZUKA, Yuya KOUDA, Yoshihiko FUJITA and Kyo KUME

I. 緒言

本業務では、解体撤去物等の汚染レベルに応じた分別管理に資するため、「ふげん」のタービン建屋内に敷設されていた復水器の基礎架台コンクリートを供試体として、予め表面のひび割れ状況等の事前観察を行った上で、供試体内部の汚染状況を調査した。

II. 内容

事前観察において、供試体のひび割れは鉄筋腐食により生じたものと推察された。次いで、イメージングプレート(IP)を用いた非破壊の汚染調査を行うとともに、供試体から試料を採取して γ 線放出核種及び β 線放出核種の分析を行った結果、供試体の表面から内部に至るまで汚染は認められなかった。また、海水由来と推測される大気中の塩素元素が供試体に浸透しているか否か屋外から採取した試料との比較分析を行い、接液環境以外からの物質の浸透挙動に関して検討を加えた。さらに、ひび割れ範囲の確認方法として、コンクリート探傷剤を用いたひび割れ範囲の可視化を検討したところ、目視で容易に確認できたことから、有効な手法であることが判明した。

以上の検討結果に基づき、鉄筋腐食によるひび割れが明らかな基礎架台コンクリートについては、保守性を確保する観点から、表面より最大ひび割れ深さ付近までの範囲は確実に分離・除去すること、次いで分離・除去された表面にひび割れ部が残存していれば、既往報告に示された「浸透汚染が必ずしも否定できない範囲」を特定・分離するロジックを適用すべきであることを示した。

^{*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・開発実証課、^{*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・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。

2.2.3.1.10.

埋設技術基準への適合性に係る検討
 Review on Conformance to Technical Criteria for Near Surface Disposal
 手塚将志^{*1}、香田有哉^{*1}、藤田義彦^{*2}、遠藤伸之^{*3}、久米恭^{*4}、
 Masashi TEZUKA, Yuya KODA, Yoshihiko FUJITA, Nubuyuki ENDO and Kyo KUME

I. 緒言

「ふげん」には、濃縮廃液を固型化したアスファルト固化体が保管され、それらの中には廃棄体の埋設処分に係る基準(埋設技術基準)に適合しないものも存在する可能性があるため、これらは現状のままでは埋設処分できない。そこで、上記の基準に適合しない可能性のある「アスファルト固型物」が基準に適合するよう「再度処理」することを想定し、具体的方策に関する机上調査に加え、予備的な試験も合わせて行った。

II. 内容

机上調査では、アスファルトやアスファルト固化体となった時の性状、「アスファルト固型物」の取り扱いや検査方法等について情報を整理した。

机上の調査・検討結果から得られた情報をもとに、ごく小規模な「アスファルト固型物」の模擬体や再度処理を想定した固化体(セメント固化体、充填固化体)を試作し、それらの固化特性や化学的特性に関して予備的な試験を行うことで、今後の「再度処理」の検討に資する知見を得た。

以上の調査・検討及び試験の結果を踏まえ、現在の埋設技術基準への適合を図っていくための考え方を整理した。そして、整理した考え方に基づき、今後取り組んでいくべき項目を提示し、3～5か年程度の期間を想定したロードマップを作成した。

^{*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・開発実証課、^{*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・生物資源研究室、^{*4}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ
 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。

2.2.3.1.11.

耐放射線性能試験研究

Radiation Resistance Performance Test Research

峰原英介^{*1}

Eisuke MINEHARA

I. 緒言

主に関西電子ビーム株式会社の電子線加速器を、補助的に JAEA の γ 線照射施設を用いて、ロボットとレーザー除染機等の部品に電子線と γ 線の照射を行い、耐放射線性能の試験研究を行った。特にモーター等電気電子部品とファイバー等レーザー関連部品の耐放射線性能に関する試験計測を行った。

II. 内容

①関西電子ビーム株式会社の電子線加速器を用いて、ロボットレーザー除染機の電気部品や電子部品に対する放射線耐性計測を行った。②関西電子ビーム株式会社の電子線加速器を用いて、ファイバーなどレーザー関連部品に対する耐放射線性能計測を行った。③最後にまとめと報告を行った。

関西電子ビーム(株)の電子線は、1回32kGy/10 秒の線量率が最大で、温度上昇を避けるために 10 分間隔の繰り返し照射を行った。約 1 時間まで照射した。これと JAEA⁶⁰Co 線源の γ 線との比較を行った。現在は、電子線とガンマ線の照射効果を比較して、耐放射線性能試験を短時間でを行う方法を確立する段階である。現在までに積算線量4. 2MGyまで照射が完了した。次年度に目標の10MGy以上の積算線量照射を行い、これに耐える必要がある。半導体回路機器を除いて、廃炉措置や原子炉事故などで使用する機器類の耐性を上げて、高放射線量領域での寿命の長いレーザー除染システムの完成が期待される。この研究に必要な高強度線源や極高線量計が利用できないなど困難があった。東電福島第 1 原発 1、2、3 号機のデブリを回収するためには高い耐放射線性能が必要である。

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

2.2.3.1.12.

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

I. 緒言

敦賀セメント株式会社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開発している放射線計測装置とその運用技術を組み合わせて、セメントとその副産物などの「放射線計測」基礎技術の開発を行った。これにより、セメント工場における「放射線計測」基礎技術を確立す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2年間行い、クリンカーダストに多く集まることが明らかになった。放射性 Cs の約 78%(焼成時間の最適化後ほぼ 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. 内容

セメント工場における「放射線計測」基礎技術を確立するために以下の 3 点について共同研究を行った。

①セメントの放射線計測技術の開発、通常の Ge 検出器で検出できた。濃縮されている CD 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、CD で0. 09－0. 05Bq/g 程度濃度を得た。時折、CD 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。

H23 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、H24 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。H25 と H26 年度は H24 年度と同様の傾向で、検出限界以下が散見された。

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

2.2.1.1.13.

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

I. 緒言

福井県内の企業等がもっている焼却炉やその関連部品や関連熱設計技術と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・減容技術を組み合わせて、塩化セシウム除染分離・減容技術の開発・実用化の研究を検討した。この技術の完成により、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。併せてゼオライトによる CO₂ の脱吸着による濃縮を用いた CO₂ 分離技術の開発実用化研究を行った。

II. 内容

焼却炉を用いた塩化セシウム除染分離技術を開発する。併せてゼオライトによる CO₂ の脱吸着による濃縮を用いた CO₂ 分離技術を開発する。そのために以下の技術開発と作業を行う。①塩化セシウム除染分離技術の開発研究と実用化研究, ② CO₂ 分離技術の開発実用化研究, ③関連する知的財産の取得と開発結果のまとめと報告。本年度は、前年度に引き続き、福井県内企業等が保持する技術による抽気装置を検討した。また若エネ研と協力して焼却炉の煙道における気体と固体との分離機であるサイクロンや電気集塵機などを用いる検討計画した。ナカテックが可能性調査研究で購入した装置を借用してゼオライトの直径或いは厚みと着脱量の変化計測を破砕片を用いて行った。着脱量が増える傾向はあるが粒径がそろっておらず、且つ不十分な着脱量であった。細かな粒径或いは薄膜では、放出量は増加する。十分な量の放出が短い時間でエネルギーの消費少なく行えるかどうかは、環境を決めて今後の試験を進める必要がある。

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

2.2.3.2. 科学機器利用技術開発

2.2.3.2.1.

葛粉に含まれるイソフラボン類の測定

Measurement of Isoflavones in Starch Powder from Root Tubers of Kudzu

高城啓一^{*1}、遠藤伸之^{*1}、柳原理沙^{*1}

Keiichi TAKAGI, Nobuyuki ENDO and Risa YANAGIHRA

Abstract

Starch powder from root tubers of kudzu contains puerarin, one of the isoflavones that is specifically contained in kudzu plant. The content of it was greatly different for each product.

要約

葛粉中にはクズに特徴的なイソフラボン類であるプエラリンが含まれていたが、含量は製品によって大きく異なっていた。

I. 緒言

葛粉は、高級デンプン粉として高価で販売されており、若狭地方の特産物の一つでもある。葛粉は、クズ (*Pueraria lobata* Ohwi) の冬期塊根からデンプンを抽出して乾燥させたものである。クズの塊根を乾燥させたものは葛根と呼ばれ、漢方薬としても広く知られている。葛根中の主要有効成分のひとつはプエラリンと呼ばれるイソフラボン類である。プエラリンには、骨粗しょう症抑制効果作用¹⁾の他、様々な薬効^{2),3)}が報告されている。

そこで本研究では産地等の異なる複数製品の葛粉に含まれるプエラリンの含量を調べ、プエラリンは葛粉に含まれているが、含有量は製品によって大きく異なることがわかったので報告する。

II. 成果の概要

若狭産の葛粉 A、九州産葛粉 B、C、吉野産葛粉 D、E、および葛粉混合でんぷん粉(甘藷澱粉混合) F からイソフラボン類をメタノール抽出し、逆相カラムを用いた HPLC によりプエラリン、およびプエラリンの前駆物質であるダイゼインの分離、分析を行った。また、敦賀市長谷周辺で採取したクズの葉、および花からも同様の抽出、分離、分析を実施した。

表 3 葛粉製品、およびクズ葉、花に含まれるプエラリンとダイゼイン

製品	プエラリン(μg/g)	ダイゼイン(μg/g)
A	0.024	0.049
B	0.044	0.677
C	0.742	18.479
D	0.375	13.656
E	0.049	0.040
F	0.005	0.184
クズ葉(長谷)	14.304	夾雑ピークで測定不能
クズ花(長谷)	0.000	夾雑ピークで測定不能

結果を表 3 にしめす。プエラリンの含有量は、九州産 B、C 間や吉野産 D、E に見られるように同一産地であっても製品によって大きく異なっていた。高い値が得られた葛粉のプエラリン含有量は、クズの葉のおよそ 1/20 であった。高いプエラリン含有量を示した製品では、前駆物質であり、大豆イソフラボンの 1 種でもあるダイゼインの含有量も高い値を示した。

プエラリン含有量は、同一産地であっても製品によって大きく異なったことから、葛粉に含まれるプエラリンの含有量差は、産地よりもまず製造方法に起因するのではないかと考えられた。

III. 今後の展望と課題

葛粉中に薬効を持つプエラリンが多く含まれることは、葛粉の付加価値を高めるのではないかと考えられる。今後は、製造段階を追ってプエラリンを始めとするイソフラボンの含有量を追跡し、これらが大きく減少するプロセスは何かを突き止め、若狭地方の特産物である葛粉の付加価値を高めることに貢献したいと考えている。

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

2.2.3.2.2.

磁粉探傷技術を用いた伝熱管内壁欠陥観察の高度化

Development of an Inspection Technique Using Magnetic Particle Testing for a Heat Exchanger Pipe

伊東富由美^{*1}、久米恭^{*1}

Fuyumi ITO and Kyo KUME

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事が可能な磁粉探傷試験(Magnetic Particle Testing : MT)があり、この非破壊検査方法は磁気特性や形状変化を受けにくいという長所がある。しかし、欠陥内部に磁粉が入り込む可能性があり、MT により検出された欠陥を補修する場合、欠陥部に入り込んだ磁粉を除去する事が必要不可欠となる。そこで本研究では、欠陥形状の観察が容易となる MT とマイクロカプセル(MC)技術を組み合わせた磁粉内包 MC の大量生産できるシステムの検討を行った。

II. 内容

暗室での観察を容易にするための蛍光色素と磁粉を内包した MC を作製するためには、まず蛍光色素と磁粉を分散させたポリビニルアルコール水溶液(W1 相)を MC の殻となるポリスチレン溶液(O 相)に内包させたエマルジョン(O 相/W1 相)を作製した。その後、このエマルジョンをポリビニルアルコール水溶液(W2 相)に滴下し加熱攪拌する事により蛍光磁粉 MC を作製した。しかし、これまでの方法¹⁾では蛍光磁粉 MC は少量しか得られないため、大量生産が可能な二重ノズル装置を開発した。この二重ノズル装置には 3 種類のノズルがあり、ノズルの先端サイズによりエマルジョンの大きさを決定することができるため、ノズル先端サイズの最適化を行った。エマルジョンサイズを小さくする場合、各溶液の流速だけでなく、W1 相の通過するノズル先端サイズと、O 相の通過するノズル先端サイズに依存することを明らかにした。直径が 60 ミクロン程度の磁粉分散液を通過させるためには、W1 相の通過するノズル先端サイズの下限値は 0.7 mm、O 相の通過するノズル先端サイズは 1.0 mm である事を確認した。これらのノズルを用いて作製した結果、直径 1.5 mm の蛍光磁粉内包 MC を作製する事ができた。1) F. Ito, A. Nishimura, E-Journal of Advanced Maintenance, 4, 2, pp.57-63 (2012)

^{*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

2.2.3.2.3.

特殊樹脂を用いた陽子線トラックの可視化技術の生物影響研究への応用に向けた基礎的検討

Basic study of proton beam track visualization technology using the special resin for the biological studies

前田宗利^{*1}、松本英樹^{*2}、伊東富由美^{*1}、長谷川崇^{*1,*3}、田辺久美子^{*1}、村上雅之^{*1}、久米恭^{*1}

Munetoshi MAEDA, Hideki MATSUMOTO, Fuyumi ITO, Takashi HASEGAWA,

Kumiko TANABE, Masayuki MURAKAMI and Kyo KUME

I. 緒言

これまでの研究から、陽子線の物理的な線量が最大となるブラッグピークよりも後方において、細胞死が効率良く誘導されることが明らかとなった。また、陽子線治療では、その飛跡に沿って腫瘍患部前面に位置する皮膚から腫瘍までの間の正常組織に低線量被ばく域が存在する。これらのブラッグピーク後方の生物影響および低線量被ばく域における正常組織の反応動態等の詳細な解明は、陽子線によるがん治療の高度化を目指す上で必要不可欠である。そのためには、粒子線の飛跡を正確に検出し、組織内で粒子が通過した領域としていない領域を区別して生物学的解析を行う必要がある。

II. 内容

本研究では、特殊樹脂を用いて実際の陽子線治療に用いられているエネルギーの陽子線トラックを可視化し、陽子線の分布密度を正確かつ簡便に可視化するための基礎的な研究を実施した。

複数種の特特殊フィルムに対して陽子線照射を行い、高温高アルカリ処理によるエッチング法を用いて、処理時間を変えて形成された各エッチピットの状態を精査した。位相差顕微鏡および市販の画像解析ソフトを用いて各エッチピットを解析し、レーザー顕微鏡や原子間力顕微鏡を使用せずに、簡易かつ効率よくエッチピットを観察する事に成功した。以上の成果より、陽子線トラックの検出に最適なフィルムを選定すると共に、適切なエッチング条件を見いだした。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、^{*2}福井大学・高エネルギー医学研究センター、^{*3}(同)ハセテック
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと福井大学との共同研究として実施した。

2.2.3.2.4.

線量分布の簡易な取得手法の実用化

Application of a simple dose distribution measurement method

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

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

I. 緒言

粒子線ならびに X 線のいずれの治療法においても利用可能で簡易な線量分布取得手法の開発を目標とする。これは治療領域の線量付与に対して発光体により可視光を発光させ、低廉な受光素子によって取得する発光分布を画像処理で線量分布とする技術である。低廉な受光素子を採用することにより、素子が放射線損傷を受けても素子の低廉な交換が可能となる。この手法を実用化し放射線治療の更なる普及に貢献する。

II. 内容

校正用線源からビームに至るまでの様々な強度の線源を用い、医療 X 線透視撮影用蛍光板の発光強度を測定した。受光素子として低廉な民生用デジタルカメラや冷却式高感度 CCD カメラにより試験した。その結果、線源強度に対応した感度の受光素子を選択することで、線源分布を画像解析によって取得可能であることが明らかとなった。治療用ビームにより形成される線量分布は蛍光板と低廉な受光素子の組み合わせにより取得可能であることがわかる。

次に、蛍光板と低廉な受光素子の組み合わせにより、蛍光板に臨床用強度(約 0.5 nA)の 200 MeV 陽子線を照射してビーム断面方向の発光分布を取得し、2 次元電離箱アレイ線量分布測定器による線量分布測定値と比較した。その結果、臨床用強度の陽子線については発光分布が線量分布に対応することが判明した。

今後は、リアルタイム性を有する簡便な線量分布計測システムを構築していく。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、^{*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文部科学省からの受託研究として実施した。

2.2.3.2.5.

高分子材料表面に形成されためっき膜の成分及び微細構造に関する調査研究

Surface Microstructure of a Pressed Polyimide Film

安永和史^{*1}、吉田哲文^{*2}、辻本和久^{*2}

Kazufumi YASUNAGA, Tetsufumi YOSHIDA and Kazuhisa TSUJIMOTO

3次元的な形状のフレキシブルプリント基板を作製するために、めっき前処理後に加工を施されたポリイミドフィルムは、一部加工領域でめっき性の低下による配線不良を生じることがある。そこで、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて同様のめっき前処理および加工を施したポリイミドフィルムを断面方向から観察し、めっき前処理により担持させた触媒粒子の分布状態からポリイミドフィルムの表面微細構造を評価した。

ポリイミドフィルムの加工度の大きな領域には、フィルム表面に平行な数 100 nm にわたり触媒粒子の数密度が減少した領域が複数確認された。さらに、それらの領域に存在する触媒粒子はフィルム表面に垂直な方向に 80-140 nm の範囲に散らばって分布していた。これらの触媒粒子の分布状態は、加工度の大きいポリイミドフィルムの表面が 100 nm 程度の起伏をもつ荒れた状態であることを示唆している。よって、めっき不良はポリイミドフィルムの表面平滑性および触媒粒子面密度の低下に起因している可能性が高いと考えられる。

今回の微視的組織の解析結果は、高分子フィルム表面に μ DP³工法(μ Direct Pattern Printing and Plating、ポリイミドフィルム上に導電パターンとなる金属膜をめっきにより直接形成する新規の回路形成技術)を用いてニッケル膜を形成する際のポリイミドフィルムの前処理条件や加工条件に反映することができると考えられる。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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がセーレン株式会社との共同研究として実施した。

2.2.3.2.6.

銅基板上の自己集合膜の表面分析

Surface Analysis of Self-Assembled Monolayers on Copper Substrate

安永和史^{*1}、坂口昌弘^{*2}

Kazufumi YASUNAGA and Masahiro SAKAGUCHI

1-チオグリセロール(1-TG)水溶液は銅表面に存在する酸化被膜の除去と同時に防錆効果を発揮するため、銅の表面処理剤として使用されている。本研究では、1-TG 水溶液の除錆の機構を明らかにすることを目的として、酸化した銅試料の 1-TG 水溶液処理-未処理界面を TEM 断面観察した。

電気炉を用い大気中 150℃, 43 h 強制酸化した褐色を呈する銅試料を作製した。この熱処理条件により銅試料表面に生じた酸化銅の厚みは約 220 nm である。1-TG 水溶液と反応させないために一部領域に銀ペーストを塗布した試料を、10 分間 1-TG 水溶液に浸漬した。1-TG 水溶液処理により銀ペースト被覆のない酸化した褐色面は金属光沢面へと変化した。銀ペースト被覆および未被覆の領域を FIB 加工することにより TEM 断面試料とした。1-TG 水溶液への浸漬により金属光沢を取り戻した表面と銀ペースト被覆により酸化銅が保護された表面の界面には急峻な段差が生じ、金属光沢面は 1-TG 水溶液の作用により選択的に酸化銅のみが除去されていることが確認された。この観察結果から、表面酸化された銅の 1-TG 水溶液による除錆の機構は、酸化銅が 1-TG と反応し 1-TG 銅塩となり、1-TG 銅塩が水溶性であるために 1-TG 水溶液中に溶解されるエッチング反応であることが判明した。

^{*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}旭化学工業株式会社・福井事業所・研究部研究課
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが旭化学工業株式会社との共同研究として実施した。

2.2.3.2.7.

異種材料の接合に及ぼす表面状態に関する研究

Surface analysis for Polymer Material

安永和史^{*1}

Kazufumi YASUNAGA

工業製品は複数の材料により構成され、異種材料の接合面を含む。産業利用に容易なプロセスとして、アルカリ溶液を用いた高分子材料の表面改質による金属材料との接合がある。高分子表面の微視的状态と金属の接合性の関係は十分に研究されていないため、まずは高分子材料の表面状態を定量化することを目的とした。

実験に用いた高分子材料は、ポリイミドフィルム(PI フィルム、東レ・デュポン(株)、規格 200H、50 μ m 厚)である。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である。試料のアルカリ処理条件は、室温(20℃)にて濃度 1 mol/l (pH13.5)の溶液中への 14 h の浸漬である。試料の表面微細構造の定量的な評価には原子間力顕微鏡(AFM; JEOL JSPM-5200)を用いた。測定用のプローブ(探針)は MikroMasch 社製の HQ タイプである。

PI フィルムには未処理時に光学顕微鏡で観察可能な突起(直径数 μ m、高さ数百 nm)が存在した。そこで、そのような突起が存在しない“平坦度の高い”領域においてアルカリ溶液処理前後の PI フィルムの凹凸の変化を調べた。処理前の試料には約 19 nm の間隔で凹凸が存在し、その高低差は約 1.6 nm 未満であった。一方、処理後の試料には、約 23 nm 間隔で凹凸が存在しその高低差は約 3.6 nm 未満であった。すなわちアルカリ溶液処理により PI フィルム表面の凹凸間隔はほぼ変化せず、その高低差に最大 2 nm の変化が生じると評価された。

^{*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

2.2.3.2.8.

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

Application for Functional Materials and Development of a Fabrication Method of High-Aspect-Ratio Lotus Metals Solidified under High Magnetic Field

安永和史^{*1}、山岸隆一郎^{*2}、中嶋英雄^{*3}

Kazufumi YASUNAGA, Ryuichiro YAMAGISHI and Hideo NAKAJIMA

磁場中のガス雰囲気下で金属を一方向凝固することにより、現在得られているものよりも高いアスペクト比(縦方向と横方向の長さの比)をもつガス気孔が多数存在するロータスメタルの製造方法を開発している。これは磁場を負荷することにより熔融金属中に渦電流を生じさせ、対流を制御し攪乱のない状態でガス気孔を配列させた細長い長尺の気孔をもつ多孔質ロータスメタルを作製するためである。本年度は、金属材料の熔融および凝固中に超伝導マグネットにより高い定常磁場(中心磁場 10 T、直径 100 mm)を負荷することが可能な抵抗加熱溶解凝固炉の試作および熔融金属引き出し装置部品の動作検証を行った。

抵抗加熱溶解凝固炉の作製方法を以下に記す。まず 30 mm ϕ のアルミナ管の外周に約 5 mm の間隔で 1 mm ϕ の Mo 線(抵抗加熱体)を巻き付けた。その後、Mo 線の両端には 0.7 mm ϕ のステンレス線を巻き付け、その両端を捻ることにより Mo 線をアルミナ管に固定した。さらにアルミナ管には熱電対を取り付け、その後に Mo 線を被覆するためにアルミナセメントを塗布して乾燥させた。完成した抵抗加熱溶解凝固炉は加熱試験をすることにより 1000°C 程度まで昇温可能であることを確認した。

熔融金属引き出し装置部品の動作検証には、10 T の定常磁場を負荷した状態で熔融金属引き出し領域に設置したアクチュエーターを駆動させ、正常に機能することを確認した。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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。

2.2.3.2.9.

アルミナゾルの粒径・形状制御技術の研究

Control Techniques of Grain Size and Shape for Alumina Sol by Sol-Gel Method

安永和史^{*1}、蛭川望^{*2}

Kazufumi YASUNAGA and Nozomu Hirukawa

アルミナゾルの粒子形状制御技術を用い、種々の粒子形状を有するアルミナゾルをバインダー、フィラーや表面処理剤として、さらには新規用途への応用展開を目指した研究を実施している。今年度は、触媒作用をもつアルミナゾルの開発を目的として、銀(Ag)ナノ粒子のアルミナゾル表面における担持の偏在性に関して調査した。アルミナゾルへ Ag ナノ粒子を均一かつ高密度に担持させたいが、現状では多くのアルミナゾルには Ag ナノ粒子が全く担持されていない。その原因を解明するために、アルミナゾルの結晶性に注目した解析を行った。TEM 観察用の試料は、マイクログリッドに固定した Ag ナノ粒子担持処理されたアルミナゾルのナノ粒子である。アルミナゾルは繊維状で、長軸が数 μm 、短軸が直径約 4 nm の形状ある。Ag ナノ粒子が目的どおり担持されたアルミナゾルには、直径 3~10 nm で球状の Ag ナノ粒子がアルミナゾルの長軸に沿って数 10 nm の間隔で存在していた。Ag ナノ粒子が担持されたアルミナゾルおよび担持されていないアルミナゾルのそれぞれについて、アルミナゾルから電子線回折図形を取得し解析した結果、アルミナゾルの結晶性に大きな違いを確認することは出来なかった。また、アルミナゾルの繊維形状にも大きな違いは存在しなかった。今後、アルミナゾルへの Ag ナノ粒子担持処理の方法を検討し担持量にどう影響するのかについて明確にする予定である。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、^{*2}川研ファインケミカル株式会社 ファイン事業部 研究開発第 2 部 福井研究グループ
本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと川研ファインケミカル株式会社との共同研究として実施した。

2.2.3.2.10.

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

無電解銅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)、さらに無電解銅めっきの触媒となるニッケル(Ni)層の積層を可能と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(めっき処理)を施したものである。めっき処理条件は、①めっき浴中 Ni 濃度 0.1 M、pH8.3、浴温 82 °C、めっき時間 3 min、及び②めっき浴中 Ni 濃度 0.1 M、pH8.7、浴温 82 °C、めっき時間 3 min である。なお pH はアンモニア水(NH₄OH)の添加量により調整している。本研究では特にめっき浴の pH を高めることにより絶縁層として機能する SiO₂ 層の厚みの増加可能性について明らかにすることを目的とした。

それぞれの条件で Si 基板上にめっきした後に、TEM 断面試料を FIB 法により作製して STEM-EDX により元素分布像を取得した。その結果、条件①では SiO₂ 層 375 nm、内 Ni 層 193 nm、条件②では SiO₂ 層 497 nm、内 Ni 層 145 nm と評価された。pH の高い条件の方が SiO₂ 層の膜厚が約 120 nm 増加しており、めっき浴の高アルカリ性化の効果が確認された。しかし、詳細な微細組織観察により、Ni のナノ粒子(直径数 nm)が SiO₂ 層深部にまで多数析出しており、これらの存在が SiO₂ 層の絶縁性能を低下させる可能性が示唆された。さらに、SiO₂ 層中には結晶水(構造水:Si 水和酸化物層あるいは Si 水酸化物層)も存在し、熱を加えた際にはガスとなりめっき膜中に空洞を形成する可能性もある。水がめっき膜に取り込まれない、あるいはめっき膜品質を劣化させず有効に除去するような対策を考える必要がある。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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した。

2.2.3.2.11.

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 in Dry Sliding

安永和史^{*1}、加藤寛敬^{*2}

Kazufumi YASUNAGA and Hirotaka 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可能で、結晶粒径が数 μm 以上の従来の粗大粒材と比較して高強度な材料を合金元素の添加に頼ることなく作製可能である。本研究では摩擦により生成した表層の超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。さらに超微細組織金属表層の摩擦摩耗特性を評価し、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。

摩擦試験片であるピンおよび回転円盤の材質はともに焼鈍された炭素鋼(S45C)である。試験片はピンオンディスク摩擦試験機を用い、真空中($\sim 10^{-4}$ Pa)において摩擦速度 0.05 m/s で表面強加工したものである。負荷荷重は 50 N、試験時間は 30 min である。TEM 観察は摩擦方向に対して垂直な方向から行った。

ピンの表層に凝着した移着膜および母相の微細組織について TEM を用いて評価した。移着膜には 10~100 nm の、母相には 50~200 nm の摩擦方向にほぼ平行な長軸をもつ微細結晶が実像(暗視野像)から確認されナノ結晶化していることが判明した。さらに移着膜および母相から得られた電子線回折像から、その結晶構造を解析した結果、移着膜および母相は摩擦試験前の S45C の結晶構造と同じ体心立方構造(BCC)であることが判明した。これらの結果から、摩擦に伴う温度上昇の程度が低いと考えられる低摩擦速度 0.05 m/s において、S45C の表層には相変態を伴うことなく超微細組織が生成されることが明らかとなった。

^{*1}(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・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した。

3. 外部発表、特許、品種登録

3.1. 外部発表

平成 26 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. 篠田佳彦、山野直樹、敦賀市における放射線とリスクに関する意識調査、日本原子力学会和文論文誌、日本原子力学会和文論文誌 Vol.14, No.2, 2014.6
2. Tetsuro Kurita, Development of a current monitor using a negative impedance circuit, submitted to Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 764, Pages 7-10, 2014.11
3. 仲村龍介、戸田達也、津久井茂樹、多根正和、石丸学、鈴木健之、中嶋英雄、Diffusion of oxygen in amorphous Al_2O_3 , Ta_2O_5 and Nb_2O_5 , Journal of Applied Physics(米国応用物理学会誌)、Vol.116、033504-1~033504-8、2014.12
4. Mizuho Aoki-Nakano, Yoshiya Furusawa, Akiko Uzawa, Yoshitaka Matsumoto, Ryoichi Hirayama, Chizuru Tsuruoka, Takashi Ogino, Teiji Nishio, Kazufumi Kagawa, Masao Murakami, Go Kagiya, Kyo Kume, Masanori Hatashita, Shigekazu Fukuda, Kazutaka Yamamoto, Hiroshi Fuji, Shigeyuki Murayama, Masaharu Hata, Takeji Sakae, and Hideki Matsumoto, Relative biological effectiveness of therapeutic proton beams for HSG cells at Japanese proton therapy facilities. J Radiat Res.,55(4), pp812-815, 2014
5. Munetoshi MAEDA, Katsumi KOBAYASHI, Hideki MATSUMOTO, Noriko USAMI, Masanori TOMITA. X-ray-induced Nitric Oxide-mediated Bystander Cell Death Suppresses Spontaneous Mutagenesis in V79 Cells. Photon Factory Activity Report Part A Highlight, #31, 56-57, 2014
6. 笹瀬雅人、安永和史、安田啓介、3 次元アトムプローブおよび TEM による酸素固溶強化型チタン材の酸素分布評価、大阪大学 接合科学共同利用・共同研究拠点 共同研究報告書、pp122-123、2014
7. A. Kinomura, T. Yoshiie, A. Chayahaya, Y. Mokuno, N. Tsubouchi, Y. Horino, Q. Xu, K. Sato, K. Yasuda, R. Ishigami, Neutron-enhanced annealing of ion-implantation induced damage in silicon heated by nuclear reactions, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 334, pp48-51, 2014
8. Jérôme Leveneur, John Kennedy, G. V. M. Williams, Masato Sasase, James B. Metson, Andreas Markwitz, International Journal of Nanotechnology, 11, No.5/6/7/8, pp466-476, 2014
9. Ryoya Ishigami, Yoshinori Nakata, Keisuke Yasuda, Kazufumi Yasunaga, Deterioration in coercivities of Fe-Pt and Co-Pt thin film magnets by ion irradiations, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 336, pp123-129, 2014
10. 岩井善郎、坂野薫、朴鐘輝、柴田賢一、木幡護、神田一隆、宮島敏郎、橋本賢樹、石神龍哉、安田啓介、MSE 法を用いた DLC 膜の表面強度特性の評価 ―水素含有率と表面強度の関係―、精密工学会誌、80 巻、8 号、pp771-776、2014
11. 篠田佳彦、土田昭司、木村浩、エネルギーと原子力に関する定期意識調査(首都圏住民)、日本原子力学会和文論文誌 13(3).94-112、2014
12. 井手拓哉、常深昭寛、中嶋英雄、Fabrication of Porous Copper with Directional Pores by Continuous Casting Technique through Thermal Decomposition of Hydride、Metallurgical and Materials Transactions B, Vol.45B、1418-1424、2014
13. 藤本慎司、中嶋英雄、伏屋実、Kelly Alvarez、玄丞均、ロータス型ポーラス・ステンレス鋼の腐食挙動と生体親和性、材料と環境、Vol.63、No.6、365-370、2014
14. 羽鳥聡、栗田哲郎、真空ジャーナル、151 号、Pages 20-21、2015.1
15. H. Yamamoto, Y. Iwami, K. Yagi, M. Hayashi, H. Komatsu, K. Okuyama, Y. Matsuda, K. Yasuda, Evaluation of caries progression in dentin treated by fluoride-containing materials using an in-air micro-PIGE and micro-PIXE measurement system, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B, 2015.2
16. Y. Shinoda, Y. Kawamoto, Trend of Citizens' Attitude toward the Use of Nuclear Energy—Results of Continuous Opinion Survey on Nuclear Energy—、福井大学大学院工学研究科研究報告 第 63 巻、109-114、2015.3

17. B.E. O'Rourke, E.J. Minehara, N. Hayashizaki, N. Oshima, R. Suzuki, Reduction of helium loss from a superconducting accelerating cavity during initial cool-down and cryostat exchange by pre-cooling the re-condensing cryostat, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 776, 2015.3
18. 中嶋英雄、平成26年度 日本学術会議近畿地区会議学術講演会、日本学術会議・近畿地区会議ニュース、2015.3
19. Chao LIN, Kyo KUME, Tetsuya MORI, Miguel Ernesto MARTINEZ, Hidehiko OKAZAWA, Yasushi KIYONO. Predictive value of early stage uptake of 3'-deoxy-3'-¹⁸F-fluorothymidine in colorectal cancer treated with charged particle irradiation. Journal of Nuclear Medicine pii: jnumed.114.152983. 2015
20. Masanori Tomita, 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
21. 前田宗利、松本英樹、小林克己、宇佐美徳子、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
22. 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的重要性、放射線生物研究 50、18-35、2015
23. K. Yasuda, H. Tsuchida, T. Majima, "Cross-section measurements of $\alpha + {}^{14}\text{N}$ elastic scattering for He beam TOF-ERDA", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 343, pp1-4, 2015
24. A. K. Das, R. Ishigami, I. Kamal, Proton implantation effect on (SUS-316) stainless steel, Journal of Alloys and Compounds, 629, pp319-321, 2015
25. 高原晃里、石神龍哉、岡好浩、グロー放電発光分析法によるDLCの水素定量の検討、NEW DIAMOND、第116号、第31巻、第1号、pp26-27、2015
26. H. Serizawa, S. Yamamoto, K. Yasunaga, T. Hakoda, Y. Kaji, Preparation of CeO₂ Thin Film containing Image Crystal by Precipitated Helium injected by 400-keV ion implanter of TIARA, JAEA Takasaki Annual Report, p44, 2015

(2) 国際会議論文(国際会議論文集への掲載。)

1. Munetoshi MAEDA, Katsumi KOBAYASHI, Hideki MATSUMOTO, Noriko USAMI, Masanori TOMITA. Suppression of spontaneous mutagenesis by nitric oxide-mediated bystander cell death. 41st Annual Meeting of the European Radiation Research Society, ERR2014 Abstract Book.p.236, Rhodes, Greece, 2014
2. Masanori TOMITA, Munetoshi MAEDA, Noriko USAMI, Akinari YOKOYA, Ritsuko WATANABE, Katsumi KOBAYASHI. DNA double-strand breaks and cell killing effect of human cell lines induced by monochromatic X-rays on the K-shell absorption peak of phosphorus. 13th International Workshop on Radiation Damage to DNA (Abstract Book) p.37, Cambridge, USA), 2014
3. Masanori TOMITA, Hideki MATSUMOTO, Tomoo FUNAYAMA, Yuichiro YOKOTA, Kensuke OTSUKA, Munetoshi MAEDA, Yasuhiko KOBAYASHI. Heavy-ion induced bystander responses in normal human fibroblasts and 3D skin models. 60th Annual Meeting of the Radiation Research Society Abstract Book, PS1-55, Las Vegas, USA, 2014
4. Koji Tamura, Developments of Laser Decontamination and Laser Cutting for Nuclear Decommissioning, The Proceedings of the 14th Symposium on Advanced Photon Research on 14-15th November 2013 (JAEA-Conf 2014-001, p18), Kizu

(3) 国際会議発表

1. Youichirou MATUO, Nakahiro YASUDA, Takashi TAKATA, Kyo KUME, Yoshinobu IZUMI, Fundamental Study on Dose Evaluation Technique by Using Fluorescence-modified Oligonucleotide as a Model of DNA Damage, The fourth Asian and Oceanic Congress on Radiation Protection (AOCRP-4), Kuala Lumpur, 2014.5

2. Takushi Takata, Natsuko Kondo, Yoshinori Sakurai, Hiroki Tanaka, Takashi Hasegawa, Kyo Kume, Minoru Suzuki, Localized Dose Delivering by Ion Beam Irradiation for Experimental Trial of Establishing Brain Necrosis Model, 16th International Congress on Neutron Capture Therapy. Helsinki, 2014.6
3. Masanori TOMITA, Munetoshi MAEDA, Noriko USAMI, Akinari YOKOYA, Ritsuko WATANABE, Katsumi KOBAYASHI. DNA double-strand breaks and cell killing effect of human cell lines induced by monochromatic X-rays on the K-shell absorption peak of phosphorus. 13th International Workshop on Radiation Damage to DNA. Cambridge, USA, 2014.6
4. YAMAMOTO Hiroko, IWAMI Yukiteru, YAGI Kyoko, HAYASHI Mikako, OKUYAMA Katsushi, MATSUDA Yasuhiro, KOMATSU Hisanori, YASUDA Keisuke, Evaluation of caries progression in dentin treated by fluoride-containing materials using PIGE/PIXE system, 14th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications, Italy, 2014.7
5. Chao Lin, Kyo Kume, Tetsuya Mori, Miguel Ernesto Martinez, Hidehiko Okazawa, Yasushi Kiyono, Predictive value of early stage uptake of ¹⁸F-FLT in colorectal cancer treated with charged particle radiotherapies, The World Molecular Imaging Congress 2014 (WMIC2014), ソウル、2014.9
6. 中嶋英雄、Fabrication, Properties and Applications of Porous Metals with Directional Pores、Lee Hsun 記念講演、中国 瀋陽(招待講演)、2014.9
7. Youichirou Matsuo, Keisuke Toda, Kyo Kume, Takushi Takata, Takashi Hasegawa, Yoshinobu Izumi, Nakahiro Yasuda, Study on radiation-induced damage of DNAs using an oligonucleotide with fluorescence modification, The 26th International Conference on Nuclear Tracks in Solids, Kobe, 2014.9
8. Natsuko Kondo, Yoshinori Sakurai, Takushi Takata, Hiroki Tanaka, Nobuhiko Takai, Kyo Kume, Tsubasa Watanabe, Taichiro Toho, Shin-ichi Miyatake, Minoru Suzuki, Shinichiro Masunaga, Koji Ono, Experimental trial of establishing brain necrosis mouse model using proton beam, The 26th International Conference on Nuclear Tracks in Solids. Kobe, 2014.9
9. Munetoshi MAEDA, Katsumi KOBAYASHI, Hideki MATSUMOTO, Noriko USAMI, Masanori TOMITA. Suppression of spontaneous mutagenesis by nitric oxide-mediated bystander cell death. 41st Annual Meeting of the European Radiation Research Society, ERR2014, Rhodes, Greece. 2014.9
10. Masanori TOMITA, Hideki MATSUMOTO, Tomoo FUNAYAMA, Yuichiro YOKOTA, Kensuke OTSUKA, Munetoshi MAEDA, Yasuhiko KOBAYASHI. Heavy-ion induced bystander responses in normal human fibroblasts and 3D skin models. 60th Annual Meeting of the Radiation Research Society. Las Vegas, USA, 2014.9
11. Tsuguhisa Fujiwara, Taisuke Yoshida, Keisuke Yasuda, Manabu Saito, Yoichi Haruyama, Localization of Aluminum in Epidermal Cells of Mature Tea Leaves, 8th International Symposium on BioPIXE, Slovenia, 2014.9
12. Ayumi HASHIGUCHI, Yoko FUJIKAWA, Minoru YONEDA, Shogo TANIGUCHI, Hiroaki OZAKI, Keisuke YASUDA, Kyo KUME, Paul LEWTAS, Study on decomposition of perfluorinated compounds in dissolved form by various techniques, International conference on Asia environmental chemistry 2014, Thailand, 2014.11
13. Fuyumi Ito, Akihiko Nishimura, “Development of Inspection Technology using Micro Capsules and Observation System for various reactors”, International Symposium on Integrated Molecular/Materials Science and Engineering (IMSE2014), Southeast University (China), 2014.11
14. Y. Nakauchi, M. Abe, A. Tsuchiyama, K. Kitazato, K.Yasuda, INFLUENCE OF THE SOLAR WIND PROTON IN MINERALS CONTAINED C-TYPE ASTEROIDS, Hayabusa 2014: 2nd Symposium of Solar System Materials, JAXA 相模原キャンパス, 2014.12
15. Y. Nakauchi, M. Abe, A. Tsuchiyama, K. Kitazato, T. Matsumoto, R. Ishigami, WEATHERING EFFECTS OF SOLAR WIND PLOTONS SPECTRAL SHAPE OF SILICATE MINERALS, 46th Lunar and Planetary Science Conference, USA, 2015.3

(4) 国内会議発表

1. 久米恭、高田卓志、長谷川崇. Development of a low-cost radiation measurement equipment with a help of a fluorescent screen used in medical diagnostics. 第 107 回日本医学物理学会学術大会. 横浜、2014.4
2. NAKAUCHI Yusuke, ABE Masanao, KITAZATO Kohei, TSUCHIYAMA Akira, YASUDA Keisuke, Weathering effect of solar wind proton on hydrated silicate minerals、日本地球惑星科学連合 2014 大会、横浜市、2014.4
3. 鍵谷豪、小川良平、畑下昌範、田中良和、山下慶、中村美月、福田茂一、松本英樹、低酸素領域におけるアポトーシス細胞の可視化システムの構築、第 52 回日本放射線腫瘍学会生物部会学術大会、京都市、2014.7
4. 高城啓一、若狭湾エネルギー研究センターにおけるイオンビーム育種研究、イオンビーム育種研究会第 10 回大会、水戸市、2014.7
5. 長崎真也、羽鳥聡、栗田哲郎、林豊、山田裕章、小田桐哲也、淀瀬雅夫、山口文良、山田和彦、廣戸慎、清水雅也、辻宏和、若狭湾エネルギー研究センターにおける絶縁ガス充填回収装置自動運転化と温暖化ガスとしての絶縁ガスの環境への放出低減への取り組み、第 27 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、京大宇治キャンパス木質ホール、2014.7
6. 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、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 27 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、京大宇治キャンパス木質ホール、2014.7
7. 松尾昌幸、八木信治、小池一步、原田義之、佐々誠彦、矢野満明、石神龍哉、久米恭、三酸化モリブデン薄膜の分子線エピタキシャル成長と放射線耐性、平成 26 年度第 2 回半導体エレクトロニクス部門委員会第 1 回研究会、大阪大学吹田キャンパス、2014.7
8. 田村浩司、レーザー化学法を用いたセシウム同位体分離技術の開発、六ヶ所・核燃料サイクルセミナー“放射性廃棄物の分離・変換・利用・資源化戦略”、青森県六ヶ所村 六ヶ所村文化交流プラザ『スワニー』、2014.7
9. 峰原英介、田村浩司、高濃度の放射性物質に汚染された原子炉 1 次冷却水系ステンレス鋼に対して新たに開発した除染装置を用いて行ったレーザー除染試験について、六ヶ所・核燃料サイクルセミナー、六ヶ所村文化交流プラザ、2014.7
10. 栗田哲郎、羽鳥聡、林豊、山田裕章、小田桐哲也、廣戸慎、清水雅也、山口 文良、淀瀬 雅夫、長崎真也、山田和彦、辻宏和、若狭湾エネルギー研究センターシンクロトロン機の現状、第 11 回日本加速器学会年会、リンクステーションホール青森(青森市文化会館)、2014.8
11. 辻宏和、多様な側面を持つ原子力利用は私達に何をもたらす？ー量子ビームを活かす技術の現状と未来ー、第 108 回 発明教室 未来技術セミナー、石川県地場産業振興センター(金沢)、2014.9
12. 橋口亜由未、藤川陽子、米田稔、谷口省吾、尾崎博明、安田啓介、久米恭、放射線照射で生成されるラジカルの有機フッ素化合物分解への影響と PFOS 電気分解過程の解明、第 17 回日本水環境学会シンポジウム、滋賀県立大学、2014.9
13. T.Ishida, Y.Miyata, T.Kusumoto, K.Yamamoto, Y.Shinoda, Y.Kobayashi, Ultrahigh temperature process of graphene oxides, Using solar furnace for their structural restoration, 第 47 回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム、名古屋大学、2014.9
14. 山野直樹、泉佳伸、安田仲宏、松本義久、林崎規託、篠田佳彦、原子力合意形成学に関する一考察(VII)ー低線量影響に対するリスクコミュニケーション:平成 25 年度活動結果と現状報告ー、日本原子力学会 2014 年秋の大会、京都大学吉田キャンパス、2014.9
15. 土田昭司、篠田佳彦、別府庸子、木村浩、神崎典子、諸葛宗男、久保稔、丸山剛史、竹中一真、「原子力ムラ」の境界を越えるための研究;(9)市民と専門家の原子力に関する認識の変化、日本原子力学会 2014 年秋の大会、京都大学吉田キャンパス、2014.9
16. 田村浩司、石神龍哉、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、日本原子力学会 2014 年秋の大会、京都大学吉田キャンパス、2014.9
17. 峰原英介、山岸隆一郎、レーザー除染装置における耐放射線性能の向上日本原子力学会 2014 年秋の大会、京都大学吉田キャンパス、2014.9

18. 中嶋英雄、ロータス型ポーラス金属の作製、物性および応用開発、日本金属学会秋期大会(村上記念賞受賞記念講演)、名古屋大学、2014.9(招待講演)
19. 中嶋英雄、ロータス型ポーラス金属の製法とヒートシンクへの応用、日本機械学会年次大会、東京電機大学、2014.9(招待講演)
20. 仲内悠祐、安部正真、土山明、北里宏平、安田啓介、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の年代変化、日本惑星科学会 2014 年秋季講演会、東北大学、2014.9
21. 安田啓介、中田吉則、炭素ビームを用いた TOF-RBS 法の開発、第75回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学、2014.9
22. 高野真希、畑下昌範、星野一宏、エタノール発酵糸状菌のイオンビーム変異による高温耐性株の構築、第 66 回日本生物工学会大会、札幌市、2014.9
23. 唐木田哲、明石行生、畑下昌範、落盛仁、三浦実華、田中紘一、高効率な植物育成用照明システムに関する研究、照明学会第 47 回全国大会、さいたま市、2014.9
24. 松本英樹、大塚健介、畑下昌範、隈部篤寛、平山亮一、尾崎匡邦、李恵子、山下慶、古澤佳也、低線量炭素線被ばくにより特異的にアポトーシスが誘導されるのは組織幹細胞か?、日本放射線影響学会第 57 回大会、鹿児島市、2014.10
25. 伊藤敦、後田藤太、福嶋大、山口力、前田宗利、富田雅典、バイスタンダー細胞における DNA 損傷、日本放射線影響学会第 57 回大会、鹿児島、2014.10「招待講演」
26. 前田宗利、松本英樹、高田卓志、長谷川崇、村上雅之、久米恭、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 16 回研究報告会、福井市、2014.10
27. 橋口亜由未、藤川陽子、米田 稔、谷口省吾、尾崎博明、安田啓介、高田卓志、久米恭、PFOS 電解後溶液中に存在する生成物イオンの分画とそのフッ素量の分析、第30回 PIXE シンポジウム、岩手医科大学、2014.10
28. 小松久憲、奥山克史、松田康裕、山本洋子、岩見行晃、八木香子、林美加子、安田啓介、歯質フッ素含有量と耐酸性との関連性、第30回 PIXE シンポジウム、岩手医科大学、2014.10
29. 藤原嗣久、吉田泰輔、安田啓介、斉藤学、春山洋一、成熟した茶葉の表皮細胞における Al の局在、第30回 PIXE シンポジウム、岩手医科大学、2014.10
30. 宅間雅代、小野将嗣、飴田恵理、藤原嗣久、安田啓介、斉藤 学、春山洋一、PIGE による茶葉中フッ素とアルミニウム濃度測定、第30回 PIXE シンポジウム、岩手医科大学、2014.10
31. 前田宗利、松本英樹、宇佐美徳子、小林克己、富田雅典、バイスタンダー細胞における突然変異の抑制のメカニズムの解析、日本放射線影響学会第 57 回大会、鹿児島、2014.10
32. 清野 泰、Lin Chao、久米恭、森哲也、Martinez ME、高田卓志、岡沢秀彦、¹⁸F-FLT を用いた粒子線治療効果予測のための基礎的検討、第 54 回日本核医学会学術総会、吹田市、2014.11
33. 高城啓一、インビトロ観賞用植物マイクロフローラの開発-これまでの経緯とこれからの課題-、H26 園芸学会北陸支部シンポジウム、金沢市、2014.11
34. 金森洋史、篠田佳彦、化学モデル模擬月土の試作、第 58 回宇宙科学技術連合講演会、長崎、2014.11
35. 田村浩司、若狭湾エネルギー研究センターにおけるレーザー除染及び切断技術開発、第 5 回レーザー共同研究所成果報告会、独立行政法人日本原子力研究開発機構レーザー共同研究所、2014.11
36. 神田一隆、岩井善郎、木幡護、高澤拓也、石神龍哉、安田啓介、MSE 試験および摩擦試験による DLC 膜の摩耗特性の比較、トライボロジー会議 2014 秋 盛岡、アイーナいわて県民情報交流センター、2014.11
37. 伊東富由美、西村昭彦、Development of Inspection Technology using Micro Capsules and Observation System for Various Reactors、第 15 回光量子科学研究シンポジウム、京都、2014.11
38. 田村浩司、超高出力レーザー切断、平成 26 年度多元技術融合光プロセス研究会 第 4 回研究交流会、若狭湾エネルギー研究センター、2014.12
39. 山口貫太、近藤広基、加藤政彦、曾田一雄、石神龍哉、安田啓介、超臨界水中合成 Nb 水素化物微小試料のマイクロイオンビーム分析、第 46 回日本原子力学会中部支部研究発表会、名古屋大学ベンチャービジネスラボラトリ、2014.12

40. 木野村淳、義家敏正、茶谷原昭義、李野由明、坪内信輝、堀野裕治、徐虬、佐藤紘一、安田啓介、石神龍哉、イオン注入 Si の原子炉照射による結晶性回復とその温度依存性評価、京都大学原子炉実験所専門委員会「材料照射効果と応用」、京都大学原子炉実験所、2014
41. 峰原英介、次世代放射光XFELとERLの現状、第 23 回放射線利用総合シンポジウム、主催(社団法人)大阪ニュークリアサイエンス協会、大阪大学中之島センター、2015.1
42. Y. Nakauchi, M. Abe, A. Tsuchiyama, K. Kitazato, T. Matsumoto, K. Suzuki, The possibility of OH/H₂O production by solar wind protons on the lunar and asteroidal surface, 第16回惑星圏研究会、東北大学(仙台)、2015.2
43. 畑下昌範、庄司英一、イオンビーム照射による高分子電解質膜の改質と高分子アクチュエータ創製への応用、日本化学会第 95 春季年会、船橋市、2015.3
44. 石田俊、宮田雄一郎、篠田佳彦、小林慶裕、太陽炉を用いた超高温・反応性雰囲気での酸化グラフェン処理による高結晶性グラフェン形成、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、東海大学湘南キャンパス、2015.3
45. 金森洋史、篠田佳彦、月資源からの建築資材の製造に関する基礎検討、第 34 回宇宙エネルギーシンポジウム、宇宙科学研究所(相模原市)、2015.3
46. 久米恭、高田卓志、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、無人ヘリモニタリングデータの解析高度化の試み、日本原子力学会 2015 年春の年会、茨木大学日立キャンパス、2015.3
47. 田村浩司、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Ⅱ、日本原子力学会 2015 年春の年会、茨城大学日立キャンパス、2015.3
48. 峰原英介、遠隔レーザー除染装置、日本原子力学会 2015 年春の年会、茨城大学日立キャンパス、2015.3
49. 山野直樹、泉佳伸、安田仲宏、松本義久、林崎規託、篠田佳彦、原子力合意形成学に関する一考察(VIII);低線量影響に対するリスクコミュニケーション:平成 26 年度活動結果と現状報告、日本原子力学会 2015 年春の年会、茨城大学日立キャンパス、2015.3
50. 峰原英介、「ストリークレーザーの動作」人材育成レーザー加工研究会、若狭湾エネルギー研究センター、2015.3
51. 安田啓介、石神龍哉、中田吉則、日比章吾、重イオンビームを用いた TOF-ERDA 測定、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、東海大学湘南キャンパス、2015.3

3.2. 特許

平成 26 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. 「高分子アクチュエーターの制御方法、高分子アクチュエーター及びこの高分子アクチュエーターを利用した微小流体送出装置」(特願2014-154925)畑下昌範、庄司英一
2. 「長距離レーザー切断装置」(特願2014-110619)田村浩司

(2) 特許登録

1. 「SF6ガス回収装置、及びSF6ガス回収方法」(特許第5517128)峰原英介
2. 「物体の存在領域の検知方法および物体検知システム並びに無線送受信集合装置」(特許第5531205) 黒瀬直樹、村井敬司、文野浩次、岡本正昭、木下忠俊、笥瑞恵
3. 「植物工場照明装置」(特許第5598814)峰原英介
4. 「ポリイミド系高分子アクチュエータ、及びその製造方法」(特許第5598817)畑下昌範、庄司英一
5. 「高分子アクチュエーター及びその製造方法」(特許第5604676)畑下昌範、庄司英一
6. 「レーザー除染装置」(特許第5610356)峰原英介

3.3. 品種

平成 26 年度における品種出願、品種登録は次のとおりである。

(1) 品種出願

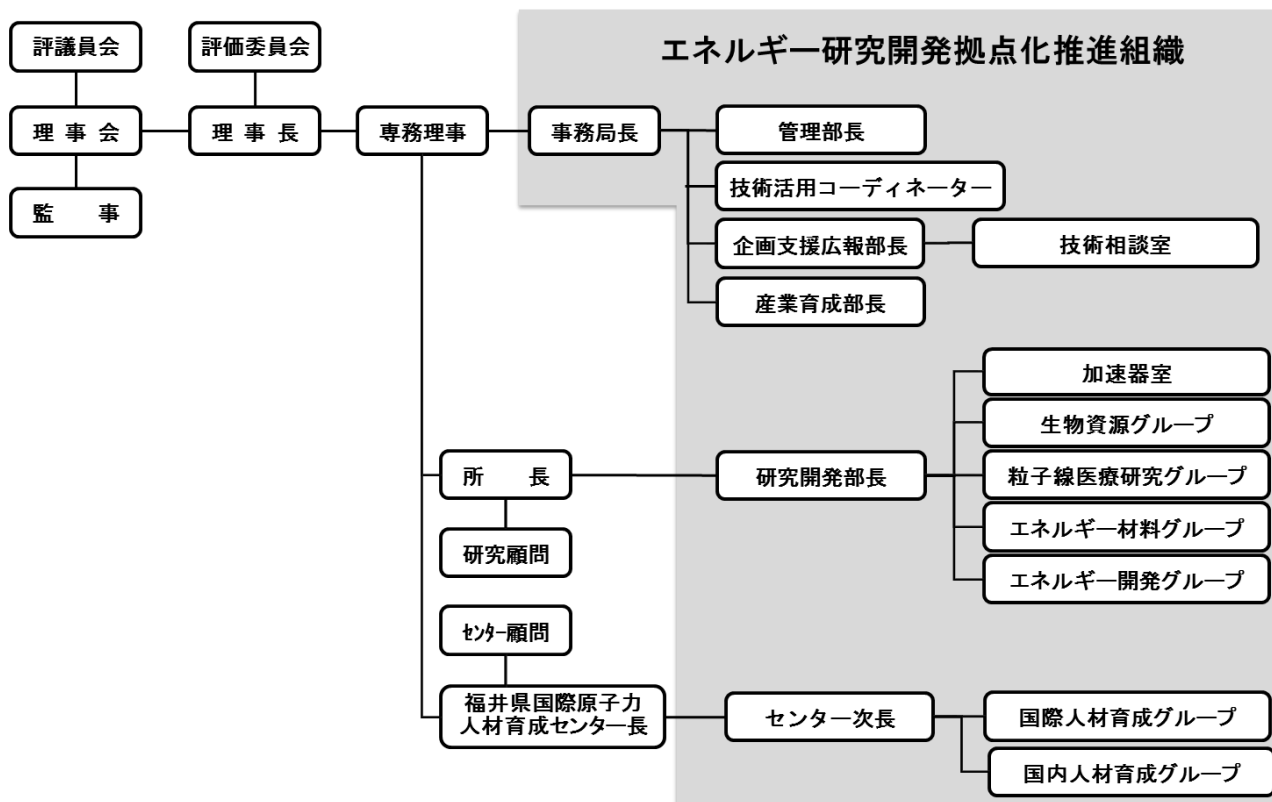
1. 「せと福 GPN」高城啓一、畑下昌範、鈴木勝久、水野隆 品種登録出願番号 第29150号
2. 「せと福 RMR」高城啓一、畑下昌範、鈴木勝久、水野隆 品種登録出願番号 第29151号
3. 「せと福 NBPN」高城啓一、畑下昌範、鈴木勝久、水野隆 品種登録出願番号 第29152号

(2) 品種登録

なし

公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター 組織図

(平成 26 年 4 月 1 日 現在)



平成 26 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 17 卷

発行:平成 27 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