

財団法人 若狭湾エネルギー研究センター

The Wakasa Wan Energy Research Center

年 報

平成23年度 第14巻

Annual Report of The Wakasa Wan Energy Research Center

Vol.14 2011



— 目 次 —

1. はじめに	6
2. 研究成果	7
2.1. 高エネルギービーム利用研究	7
2.1.1. 品種改良研究	7
2.1.1.1. 品種改良技術開発	7
2.1.1.1.1. DNA 複製細胞二重パルス標識法の検討	7
2.1.1.1.2. イオンビーム照射によるトランスポゾン移動メカニズムの解明	9
2.1.1.2. 植物・菌類の品種改良研究	10
2.1.1.2.1. バラ定芽の X 線感受性	10
2.1.1.2.2. 生物多様性を活用する植物改良新技術の開発	12
2.1.1.2.3. 植物培養細胞からの光合成産物回収	14
2.1.1.2.4. 植物育種の効率化を目指した DNA マーカーの開発	15
2.1.1.2.5. 高温耐性・酵素高発現酵母の選抜育種	16
2.1.1.2.6. タンパク質医薬の生産に汎く利用される工業用哺乳類細胞株の樹立	16
2.1.1.2.7. イオンビームによる園芸植物の新品種開発	17
2.1.1.2.8. イオンビーム照射による白色腐朽菌高性能株の作出と、セルロース系バイオマス前処理への応用	17
2.1.1.2.9. イオンビーム照射によるエタノール発酵糸状菌変異株の構築	18
2.1.1.2.10. 花卉園芸植物へのイオンビーム照射による新品種の育成	18
2.1.1.2.11. イオンビーム照射によるサボテン科植物の育種	19
2.1.1.3. 植物工場関連技術開発	20
2.1.1.3.1. 植物工場等への太陽光集光装置の開発	20
2.1.1.3.2. 反射鏡型太陽光集光装置の開発	21
2.1.1.3.3. CO ₂ 施肥技術の開発研究	22
2.1.1.3.4. イオンビームによる機能性野菜の新品種育成と栽培システムの開発	23
2.1.1.3.5. 植物工場用エネルギーシステム実証研究	23
—イオンビームによる植物工場用作物の新系統育成と工場生産法の確立—	

2.1.1.3.6.	新規な光合成・光形態形成機構モデル搭載の植物工場用光制御システムの開発	24
2.1.2.	粒子線がん治療研究	25
2.1.2.1.	動的照射野形成法開発	25
2.1.2.1.1.	陽子線治療用患者ボース加工技術高度化	25
2.1.2.2.	治療計画システム高度化研究	27
2.1.2.2.1.	治療計画システム高度化研究	27
2.1.2.2.2.	加速器中性子捕捉療法基礎研究	27
2.1.2.3.	粒子線作用の素過程の解明	28
2.1.2.3.1.	膵臓がんに対する粒子線の殺細胞効果と機序の検討	28
2.1.2.3.2.	放射線がん治療における陽子線特異的細胞応答の機構解明	28
2.1.2.3.3.	陽子線がん治療における低線量被ばくによる正常組織反応の機構解明 —それによるがん細胞死の促進機構の解明—	29
2.1.2.4.	その他の粒子線がん治療研究	30
2.1.2.4.1.	粒子線治療の臨床評価に関する研究（施設移動にともなう臨床治療の 継続性担保についての考察）	30
2.1.2.4.2.	粒子線がん治療に係る人材育成プログラム	32
2.1.2.4.3.	医療用低放射化コンクリートの評価研究	33
2.1.3.	ビーム発生分析評価技術開発	34
2.1.3.1.	加速器分析技術開発	34
2.1.3.1.1.	ヘリウムビーム入射による窒素弾性反跳断面積の測定	34
2.1.3.1.2.	薄膜分析のための重イオン RBS 法の開発	36
2.1.3.1.3.	組成分析と画像撮影機能を持つ可搬型 X 線分析装置の開発	37
2.1.3.1.4.	大電流イオン照射した Ni ナノ結晶の欠陥蓄積におけるイオンフラックス依存性	38
2.1.3.2.	材料照射損傷評価技術開発	40
2.1.3.2.1.	加速器を用いた原子炉構造材評価(原子炉構造材料劣化評価)	40
2.1.3.2.2.	原子炉燃料模擬物質の照射損傷評価法の開発	41

2.1.3.3.	加速器運転技術の高度化	42
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	42
2.1.3.3.2.	シンクロトロン入出射ビームライン真空度の改善	43
2.1.3.3.3.	実用型加速器の開発	44
2.1.3.3.4.	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	45
2.2.	エネルギー研究開発	46
2.2.1.	エネルギー・環境材料開発	46
2.2.1.1.	レーザー利用技術開発	46
2.2.1.1.1.	レーザーによる先進材料の改質加工技術の試験	46
2.2.1.1.2.	レーザー技術の原子力・原子炉への応用	47
	原子炉構造物を対象としたレーザー切断技術の確立に向けた研究	
2.2.1.1.3.	レーザー除染装置の開発	48
2.2.1.1.4.	減容安定化処理装置灰化樹脂の廃棄体適合調査	49
2.2.1.1.5.	レーザーによる厚物鋼材切断時の発生物挙動影響調査	50
2.2.1.1.6.	レーザー駆動粒子線治療装置実用化に関する基礎研究	51
2.2.1.2.	次世代半導体製造技術開発	52
2.2.1.2.1.	イオンビームを用いた新物質創製研究	52
2.2.1.2.2.	ナノ欠陥を利用した機能性ヘテロ界面の創製	52
2.2.1.2.3.	高エネルギー重イオン照射によるシリサイド半導体中へのナノ金属相作製	53
2.2.1.2.4.	半導体 $Ba_{1-x}Sr_xSi_2$ の結晶成長と薄膜太陽電池への応用研究	53
2.2.1.3.	極微小駆動材料開発	54
2.2.1.3.1.	磁性薄膜永久磁石の開発研究	54
2.2.1.3.2.	高エネルギーイオンビームによる FeRh の磁性制御	56
2.2.1.3.3.	高分子薄膜アクチュエータの創製	56
2.2.1.3.4.	イオンビームによる高分子・化学系アクチュエータのパターン化 複合電極材の創製と応用	57
2.2.2.	エネルギー有効利用研究	58
2.2.2.1.	太陽熱等利用技術開発	58
2.2.2.1.1.	太陽炉と太陽熱エネルギー利用研究	58

2.2.2.1.2.	太陽炉を用いたもみ殻に含まれるシリコンの高温抽出技術活用研究	60
2.2.2.1.3.	気泡駆動型循環式ヒートパイプによる熱輸送	61
2.2.2.2.	無機酸化物光機能材料開発	62
2.2.2.2.1.	無機酸化物光機能材料の開発	62
2.2.2.3.	バイオ応用環境技術開発	63
2.2.2.3.1.	二酸化炭素の光還元による固定化と有用物質生産	63
2.2.2.3.2.	活性汚泥からのリン資源回収に用いる微生物の研究開発	63
2.2.2.4.	バイオマスエネルギー技術開発	64
2.2.2.4.1.	バイオマスエネルギー技術開発研究	64
2.2.3.	原子力関連先端技術開発	65
2.2.3.1.	若狭湾海洋環境モニタリング研究	65
2.2.3.1.1.	もんじゅ周辺海域リアルタイム流況観測に関する調査	65
2.2.3.1.2.	若狭湾における海洋環境モニタリングシステム等に関する調査研究	66
2.2.3.2.	原子力応用技術開発	68
2.2.3.2.1.	放射線源情報評価手法調査	68
2.2.3.2.2.	野外における放射線源情報評価システムの検証	70
2.2.3.2.3.	原発事故で汚染された可能性のある飲料水のガンマ線検査手法の考察	71
2.2.3.2.4.	セメント工場における「放射線計測」に関する研究	73
2.2.3.2.5.	レアメタルフリー・高強靱性チタン材の開発とその応用	74
2.2.3.2.6.	超高純度金属の精製研究	74
2.2.3.2.7.	放射線計測技術開発	75
2.2.3.3.	科学機器利用技術開発	76
2.2.3.3.1.	イオンビームを用いた再生医療用クラゲコラーゲン修飾培養基材の開発	76
2.2.3.3.2.	蛋白質表面発現酵母に供するプラスミド DNA の構築	78
2.2.3.3.3.	地球温暖化係数が大きなSF ₆ ガスの完全回収装置に関する研究	79
2.2.3.3.4.	BN 膜の切削工具への応用	80
2.2.3.3.5.	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の開発	80

2.2.3.3.6.	走査透過型電子顕微鏡(STEM)による局所分析と最新試料作製技術	81
2.2.3.3.7.	ナノメッキ法による電子材料の微細構造評価	81
2.2.3.3.8.	ケラチン繊維の微細構造解析ならびに成分解析	82
2.2.3.3.9.	リアルナノ・サブナノ・原子スケール分析を目指した光電子分光 及び光吸収分光法の確立	82
2.2.3.3.10.	アルミナゾルの粒径・形状制御技術の研究	83
2.2.3.3.11.	パルマ藻類のバイオシリカ細胞構築メカニズムの可視化	83
2.2.3.3.12.	金属ガラスへのイオン注入法の研究	84
2.2.3.3.13.	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研究	84
2.2.3.3.14.	高速重イオン・レーザー複合照射による金属ナノ構造体の創製研究	85
2.2.3.3.15.	電池用材料の物性及び電気化学的評価・解析	85
2.2.3.3.16.	透過型電子顕微鏡による生物及び繊維内部構造の観察技術の確立	86
2.2.3.3.17.	透過型電子顕微鏡(TEM)による繊維内部構造の観察技術確立	86
2.2.3.3.18.	透過型電子顕微鏡を用いた金属ナノ結晶の構造安定性に関する研究	87
2.2.3.3.19.	銅基板状の自己集合膜の表面分析	87
2.2.3.3.20.	不純物添加酸化チタン薄膜のナノ構造解明による高性能光機能材料の開発	88
2.2.3.3.21.	摩擦を利用したナノ結晶微細構造表面膜の創製と評価	88
2.2.3.3.22.	トラフグ免疫系に関する研究	89
2.2.3.3.23.	維持血液透析患者の抗酸化能に関する研究	89
3. 外部発表、特許、品種登録		90
3.1. 外部発表		90
3.2. 特許		96
3.3. 品種登録		96

1. はじめに

財団法人 若狭湾エネルギー研究センターは平成6年9月に設立され、原子力・エネルギーの医療利用、産業利用等の研究開発および国内外の原子力技術者の養成を行ってきました。

平成22年度からは、「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、事業を推進しています。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、産業育成部および福井県国際原子力人材育成センターが担当し、当財団一丸となって第3期中期事業計画を進めています。

この平成23年度年報は、研究開発部で行われた研究成果を取りまとめたものです。

研究開発部では、これまで培ってきたさまざまな研究の成果を実用化に向けた研究に発展させ、地域の産業振興や活性化に向けてその成果を展開すると共に、海外を含めた研究機関などとの共同研究や研究者交流を通じて研究能力の向上を図ってきました。

当センターの中核施設であるタンデムおよびシンクロトン加速器からのイオンビームを用いた「高エネルギービーム利用研究」と低炭素社会の実現に向けて注目されるエネルギー、環境材料、太陽・生物等の自然エネルギーおよび原子力の応用技術に関する「エネルギー研究開発」を行ってきました。

具体的には、高エネルギービームを利用した品種改良の研究や粒子線がん治療の研究を行うと共に、ビームを用いた材料の分析評価や放射線損傷に関する研究も併せて行いました。さらに、エネルギー研究開発では、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などの研究を行い、それらの研究成果の概要をまとめております。

また、昨年の東日本大震災によって被害にあった福島原子力発電所事故に対応するための当センターのプロジェクトとして、原子力発電施設等の放射能汚染物を除去するためのレーザー除染機の開発などの成果を報告しています。

原子力発電所を取り巻く環境は大変厳しい状況にありますが、資源の乏しい我が国のエネルギー源としての重要性を認識し、安全・安心な運用のための研究はもとより、医療をはじめ様々な分野で原子力を利用した研究開発が求められています。

平成23年度において、活発な研究活動を推進することができましたことは、偏に単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24年10月

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.

DNA 複製細胞二重パルス標識法の検討

Examination of double pulse labeling for DNA replicating cells

高城啓一*

Keiichi TAKAGI

Abstract

In order to trace DNA replication in the same cell at different periods, double pulse labeling using two different nucleotide analogs was examined. By discrete administration of two different nucleotide analogs, 5-bromo-2'-deoxyuridine (BrdU) and 5-ethynyl-2'-deoxyuridine (EdU), in different periods, statuses of DNA replication at two different periods were effectively indicated in the same cell.

要約

同一細胞の異なる時期における DNA 複製状況を追跡するため、2 種類の異なるヌクレオチド類似体を用いた二重パルス標識法の適用を試みた。2 種類の異なるヌクレオチド、5-ブロモ-2'-デオキシウリジン (Brd)、および、5-エチニル-2'-デオキシウリジン (EdU) を異なる時期で別個に投与することにより、同一細胞の異なる時期における DNA 複製状況を効果的に示すことができた。

I. 緒言

粒子線照射による突然変異形成のメカニズムを知るためには、DNA 損傷形成と細胞周期との関係が重要である。通常、細胞が DNA 複製を行なっているかどうかを *in situ* で検出するためには、ヌクレオチド類似体を用いたパルスラベル法が用いられる。これは、培養液等に短時間ヌクレオチド類似体を加えた場合、DNA 複製中の細胞に類似体が DNA 分子中に組み込まれることを利用した方法で、DNA 中に組み込まれた類似体を検出することにより、類似体投与期間中に DNA 複製を行なっている細胞を検出できる。しかし、この方法では、照射前に DNA 複製を行なっていたかどうか、あるいは、照射後に DNA 複製を行ったかどうかを知ることができない。このような問題点を解決する方法としては、照射前後に複数の異なるヌクレオチド類似体を用いた多重パルス標識を行なう方法が考えられる。

本報告では、2 種類のヌクレオチド類似体 BrdU、および、EdU を使用し、DNA 複製細胞の二重パルス標識を試み良好な結果を得たので報告する。

II. 方法

実験材料として、シロイヌナズナ *Arabidopsis thaliana* L. Heynh のエコタイプコロンビアを使用した。4 °C で保存した種子を、アンチホルミンを用いて滅菌した後、2% ショ糖、0.3% ゲランガムを含む 1/2 ムラシゲスクーフ (MS) 培地上に播種し、23 °C、明期 16 時間、暗期 8 時間の条件で 4 から 5 日間無菌栽培した幼苗を実験材料として用いた。

DNA 複製細胞の二重標識処理は、20 μM BrdU (Sigma Aldrich 社)、2% ショ糖を含む 1/2 MS 液体培地に幼苗を 60 分間浸漬し、幼苗を BrdU を含まない培地で洗浄後、引き続き 10 μM EdU (Invitrogen 社)、2% ショ糖を含む 1/2 MS 液体培地に 60 分間浸漬することにより行った。処理後の幼苗は、4% パラホルムアルデヒド (TAAB 社) で固定を行い、脱色、脱脂を行った後、検出操作を行なうまで 70% エタノール中、-20 °C で保存した。

幼苗根端中の標識細胞の検出は、蛍光抗体法を用いた検出には、摘出根端に対して、Sauer らの方法¹⁾を改変したホールマウント法を適用した。BrdU の検出には、抗 BrdU ポリクローナル抗体 (Novus Biologicals 社) を用いた。核の対比染色として抗 H3K4me2 (リジン 4 ジメチル化ヒストン 3) モノクローナル抗体 (Active Motif 社) を用いた。二次抗体には、Alexa Fluor 647 標識抗ヒツジ IgG (Invitrogen 社)、および、Alexa Fluor 568 標識抗マウス IgG (Invitrogen) を用いた。二次抗体の結合処理の後、EdU cell imaging kit (Invitrogen 社) の処方に基づく EdU の標識を行った。

* (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

本研究は、(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。

検出操作後の標本は、共焦点レーザー顕微鏡(Olympus FV-300)により、根端部 118 μm x 118 μm の領域を 0.4 μm ステップで 4 μm の深さにわたってデータ取り込みを行い、画像解析アプリケーション Image Jを用いて画像解析を行った。

III. 結果と考察

抗 BrdU 抗体は、BrdU の臭素を含む塩基部分を認識するため、二重らせんを形成した DNA では、抗体が認識部位に結合することが難しい。本報告では、後の EdU 検出や、抗 H3K4me2 による核検出への影響を低減するため、DNase I による部分分解による、抗原部位露出を試みた。まず、根端を 900 U/ml DNase I(Takara Bio 社)で 37 $^{\circ}\text{C}$ 、0、30 分、あるいは、60 分処理することによる検出像への影響を調べた。その結果、DNase I 処理を行わなかった場合、BrdU は全く検出されることがわかった(図 1A)。一方、DNase I による前処理を 60 分間行った場合、BrdU は検出されるが減衰し(図 1G)、EdU のシグナルが著しく減少した(図 1H)。DNase I 30 分間処理では、BrdU、EdU、H3K4me2 すべてを明確に検出することができた(図 1D,E,F)。したがって、二重標識を行った際には、BrdU 検出の前処理として、DNase I、30 分間の処理が適切であると考えられる。

BrdU、EdU それぞれの取り込み核像を観察すると、BrdU により標識された核の多くは EdU でも標識されていた(図 1J,K)。このことは、BrdU 投与期間中に DNA 複製を行っていた核が、EdU 投与期間中も DNA 複製を継続していたことを示している。EdU にのみ標識された核も存在しており、これは EdU 投与期間中に新たに DNA 複製期(S 期)に進行した細胞の存在を示していると考えられる(データを示さず)。BrdU と EdU で二重標識された細胞では、EdU シグナルが異質染色質様局在を示すものも見られた(図 1K 矢印)。一方、BrdU 標識部位が異質染色質様分布を示した細胞のほとんどは EdU シグナル陽性を示さなかった(図 1L)。これらの結果は、S 期における DNA 複製が前期に真性染色質領域で行われ、後期に異質染色質領域に移行するという従来の知見²⁾と良く一致しており、このような標識パターンは核における DNA 複製の時系列を反映しているものと考えられる。

以上の結果から、本報告で用いた二重標識法が DNA 複製期細胞の追跡に有効であると考えられる。今後は、この手法を *A. thaliana* における S 期長さの推定や、S 期細胞の照射後の挙動解析に適用する予定である。

参考文献

- 1) M.Sauer et al.: Nature Protocols, 1, 99-103 (2006)
- 2) D.M.Gilbert: Curr. Opin. Cell Biol. 14, 377-383 (2002)

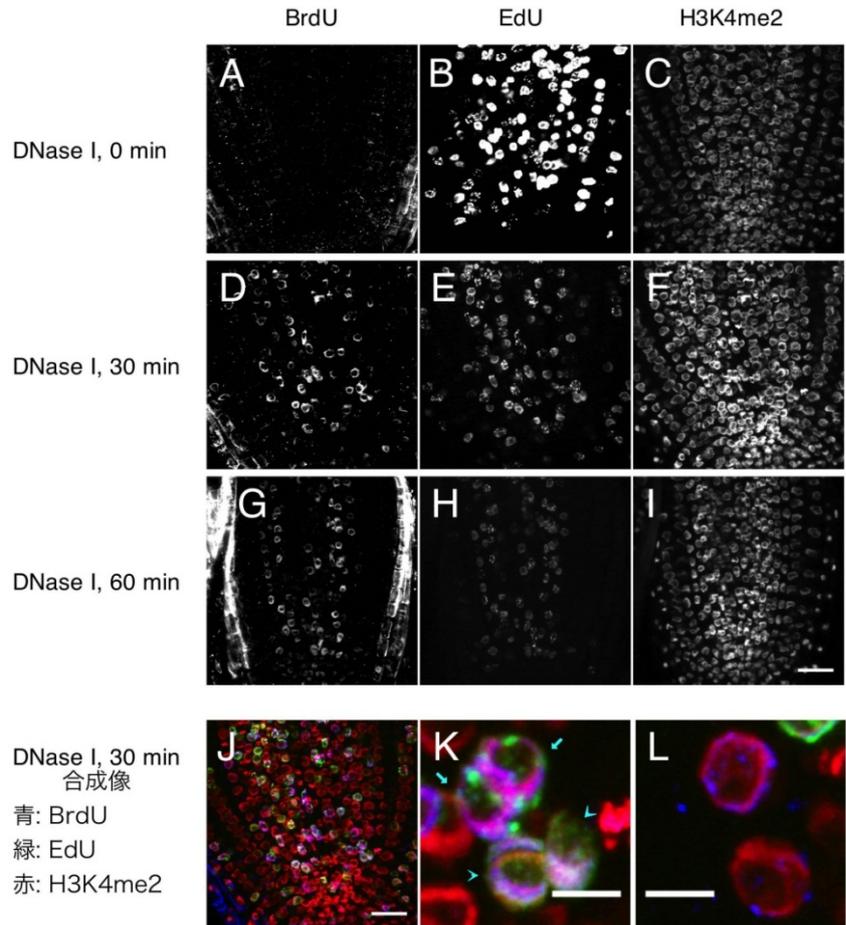


図1 根端における BrdU, EdU の取り込み像

A から I は、DNase I 処理時間による蛍光強度の違いを示す。A, D, G は抗 BrdU シグナルを、B, E, H は EdU シグナルを、C, F, I は抗 H3K4me2 シグナルを示す。I に示したスケールバーは、A から I に対応し、20 μm を示す。

J, K, L は、抗 BrdU を青、EdU を緑、抗 H3K4me2 を赤で示した合成像であり、シグナルの重なりはそれぞれの色の合成色で示されている。J に示されたスケールバーは 20 μm を、K, L に示されたスケールバーは 5 μm を示す。

2.1.1.1.2.

イオンビーム照射によるトランスポゾン移動メカニズムの解明

Analysis of the Transposon Movement Mechanism by the Ion Beam Irradiation

横山慶人^{*1}、沖昌也^{*1}、畑下昌範^{*2}

Yoshihito YOKOYAMA, Masaya OKI and Masanori HATASHITA

トランスポゾンは同一細胞内の染色体上を動き回る事の出来る遺伝子であり、近年、細胞の進化の過程で、重要な役割を担っており、また、個々の細胞の特異性を出すための遺伝子発現調節機構にも関与することが報告され注目を集めている。しかし、トランスポゾンの重要性及び関与は明らかになっているが分子レベルでどのように機能し調節しているかは不明な点が多い。我々は出芽酵母 *S. cerevisiae* をモデル生物として用い、イオンビーム照射により細胞がストレスを受け、それによるトランスポゾンの動きに関して、分子レベルでのメカニズム解明を目的としている。応用面としては、トランスポゾンの動きを自由にコントロールし、効率の良い変異導入システムの開発を目指している。

酵母の種類や性別からは X 線感受性に大きな変化は見られなかった。二倍体では一倍体と比べ X 線への感受性が下がり、生存率が増加した。二倍体酵母株の照射実験後のコロニーは一倍体の照射実験後コロニーと比べ異なる点があった。二倍体の方は生えてきたコロニーに小粒なものが多く見られた。また二倍体酵母 2 種のうちのひとつの種では赤いコロニーが頻繁に観察されるという現象が起きた。コロニーが赤くなる原因は酵母のもつ特定の遺伝子が破壊されたときに見られた。

^{*1} 福井大学大学院・工学研究科・生物応用化学専攻、^{*2}(財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ

2.1.1.2. 植物・菌類の品種改良研究

2.1.1.2.1.

バラ定芽の X 線感受性

X-ray Sensitivity of Normal Buds in Roses

高城啓一*1、名本久臣*2

Keiichi TAKAGI, Hisaomi NAMOTO

Abstract

In order to determine appropriate irradiation dose of proton-beams for the breeding of roses, X-ray sensitivity of normal buds in roses was examined. The results suggested that the irradiation dose for the breeding should be between 25 and 30 Gy.

要約

バラ育種に適切な陽子線照射線量を決定するため、バラ定芽の X 線感受性を調べた。その結果、25 Gy から 30 Gy の照射線量が適切ではないかと考えられた。

I. 緒言

バラは、花卉類の中でも世界中で最も汎く親しまれているものの一つである。我が国においても、キク、カーネーションとならぶ生産高があり、切花、鉢花、あるいは、ガーデニング用の植木として広く流通している。これまでに、交配育種等により様々な品種が生み出されているが、新しい花色、花型品種は依然として強く求められており、新規優良品種は高い市場価値を持つ。

我々は、粒子線照射による新しいバラ品種作出を目指している。育種に際しては、バラの定芽に粒子線を照射し、照射定芽を接木して選抜を行う予定である。そこで本報告では、粒子線照射によるバラの育種を行なうに際して、定芽に対する陽子線の適正照射線量を求めるために、陽子線と生物効果比の近い X 線をバラ苗に照射し、照射後の伸長シュート数や、総シュート長により、線量応答を評価したので、その結果を報告する。

II. 材料と方法

実験材料には、10 品種のバラ、AUSwith、AUSplae、AUSmas、AUSsaucer、ラローズボルドー、アマンディーヌシャネル、アニエスシリジェル、フィッシャーマンズフレンド、スワン、トロイラスの苗を用いた。これらの品種は、シュラブタイプ(半つる性)の樹形で、いずれも同程度の大きさに生長する。また、これらはいずれも 4 倍体と判明しているか、あるいは、交配親から 4 倍体と推定される品種である。

これら 10 品種の苗を、X 線照射装置 (MBR-1520R-3, 日立メディコ) を用いて、0 Gy, 12.5 Gy, 25.0 Gy, 50.0 Gy, 100.0 Gy の線量で、各線量区 2 株ずつ、地上部全体が均質な線量となるよう X 線照射した。照射は、管電



図 1 照射 31 日後のアマンディーヌシャネル苗

圧 150 kV で、0.5 mm Al + 0.1 mm Cu のフィルターを通して行った。照射時の線量率は 1.53 Gy/min であった。照射後のサンプルは、農場で育成を行い、経過を観察した。X 線照射の効果を判断する指標として、苗から新

*1(財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ、*2ロザリアン

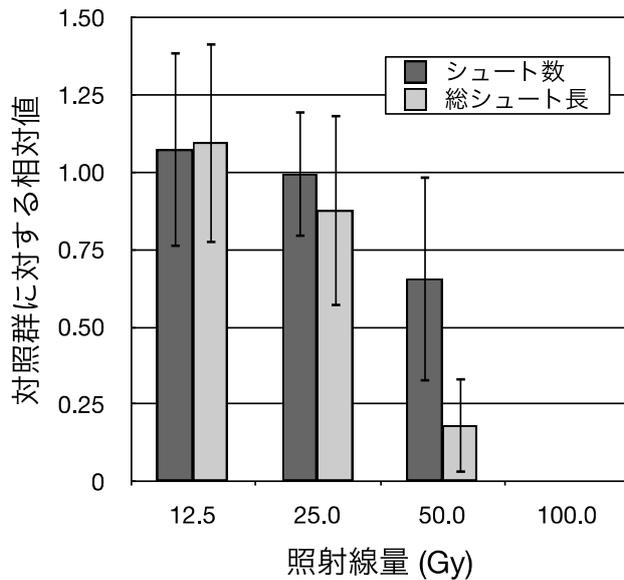


図 2 照射によるシュート数、総シュート長変化

各品種のシュート数、総シュート長を、非照射対照群の値を 1 として規格化し、平均値を求めた。エラーバーは、品種間の標準偏差を示す。



図 3 アニエスシリジェルの変異花

25.0 Gy を照射したアニエスシリジェルから伸長したシュートで現品種とは異なる花色の花の開花がみられた。

たに形成されるシュートの数、および、シュートの長さを用いた。

III. 結果と考察

照射を行った品種は、いずれも 25 Gy を超える線量では、線量に依存して明らかな生長抑制が見られた。図 1 に、一例として、アマンディーヌシャネルの照射 31 日目の状況を示す。

それぞれの品種に関して、照射 31 日後に、照射後に伸長したシュートの数と、伸長したシュートの総長を測定した。10 品種の平均値を図 2 に示す。シュート数、総シュート長ともに、12.5 Gy では、照射の影響をほぼ受けていないと考えられる。25.0 Gy では、シュート数は対照群とほぼ同値を示したが、総シュート長は、低下傾向を示した。50.0 Gy では、シュート数が低下し、総シュート数は著しい低下を示した。100.0 Gy では、いずれの品種においても、新たなシュート伸長は見られなかった。各線量区において、誤差範囲が広がっているが、これは、品種ごとに感受性がかなり異なることを反映している。しかし、いずれの品種においても、50 Gy では、シュート数の明らかな減少とともに、総シュート長の著しい減少が見られており、多くの品種で葉の奇形が見られた(データを示さず)。したがって、この線量では、茎頂分裂組織に著しいダメージを与えているものと考えられる。実際に選抜を行なう際には、照射を行った定芽を接木し、伸長したシュートから開花した花等に対して選抜を行う予定である。接木の歩留まりと、照射による茎頂分裂組織への影響の大きさを考え合わせると、25.0 Gy から 30.0 Gy を照射線量とするのが適切ではないかと考えられる。実際に、本試験照射実験中に開花した 25.0 Gy を照射したアニエスシリジェルの中から、図 3 に示すような花色の変異を示す枝が得られた。このことから、この線量範囲が適切ではないかと考えられる。

今後は、この結果を元に、定芽に対する陽子線照射を行い、定芽を接木後、優良変異花の選抜を行なう。優良形質を示す変異枝が得られたならば、形質の固定を行ない優良品種の作出を目指す。

2.1.1.2.2.

生物多様性を活用する植物改良新技術の開発

Developing Novel Plant Improvement System Based on Biodiversity

三野眞布*1、勝山雄志*1、土井みず保*1、北島佐紀人*2、小田賢司*3、田中良和*4、佐藤健司*1

Masanobu MINO, Yushi KATSUYAMA, Mizuho DOI, Sakito KITAJIMA, Kenji ODA, Yoshikazu TANAKA
and Kenji SATO

Abstract

To analyze the reproductive isolation in plants, comparative transcriptome and proteome analysis were performed using the cultured cell lines of *Nicotiana* interspecific F₁ hybrid (*N. glauca* × *N. glauca*). A series of experiments suggested that *glycine-rich protein*, *proteinase inhibitor*, and *suppressor of G2 allele of skip1 (SGTI)* were plausible candidates for lethality of this F₁ hybrid. To assess whether these genes have a causative relationship with cell death, *Agrobacterium tumefaciens* C58C1 harboring the binary plant expression Ti-plasmid vector carrying cDNA of these genes were prepared. The constructs were delivered into mesophyll cells of leaf tissue of *N. glauca* by agroinfiltration. This transient assay revealed that the expression of *SGTI* of *N. glauca* induced the death of *N. glauca* cells.

要約

タバコ属種間雑種の生殖隔離機構の解明に向け、タバコ種間 F1 雑種より調整した培養細胞を用いたトランスクリプトームならびにプロテオーム解析を実施した。その結果、*glycine-rich protein*、*proteinase inhibitor*、*suppressor of G2 allele of skip1 (SGTI)* の 3 遺伝子が雑種致死に関連する可能性が示唆された。これらの遺伝子が雑種の細胞死の原因となりうるかを調査するため、これらの遺伝子の発現ベクターを構築して *N. glauca* の葉身にアグロインフィルトレーション法により導入したところ、*N. glauca* 由来の *SGTI* がタバコ葉肉細胞の致死を引き起こすことを明らかにした。

I. 緒言

種属間雑種を活用する遠縁交雑育種は、地球温暖化による農業環境の高温化や病虫害発生パターンの変化に迅速に対応する上で重要である。これは、それらに対する抵抗性遺伝子が改良すべき栽培植物の近縁野生種に多く存在するためである。しかし、遠縁交雑には種間の生殖隔離機構により往々にして健全な雑種が得られない問題がある¹⁾。種間の隔離を支配する遺伝子は Dobzhansky-Muller (DM) モデルに準じた遺伝解析からシロイヌナズナ、レタスなどで解明されている^{2, 3)}。しかし、より広範な植物での研究は進んではおらず原因遺伝子の全体像は明らかではない。

本報告では、タバコ属植物の生殖隔離に関連する遺伝子をトランスクリプトームならびにプロテオーム解析から探索し、いくつかの候補遺伝子を見いだした結果について述べる。これらの遺伝子は、いずれも植物の病原応答やストレス応答に関連していた。

II. 材料と方法

1. 実験材料

Nicotiana glauca Domin と *N. glauca* L. の F1 雑種の下胚軸より誘導した培養細胞 GTH4 と GTH4S を用いた。

2. トランスクリプトーム解析

GTH4 の発現遺伝子より、GTH4S の発現遺伝子を差し引いたサブトラクト cDNA ライブラリーを構築した後、differential cDNA screening 法により、GTH4 に優先的に発現する遺伝子の cDNA を単離し、その塩基配列を解析した。

3. プロテオーム解析

GTH4 ならびに GTH4S 細胞より可溶性タンパク質を調整した後、イオン交換クロマトグラフィーと SDS-PAGE により、GTH4 が優先的に産生するタンパク質を特定した。当該のタンパク質を電気泳動ゲルより回収し、

*1 京都府立大学大学院・生命環境科学研究科、*2 京都工業繊維大学、*3 岡山県生物科学研究所、*4 (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

MALDI-TOF-MS で解析すると共に、そのタンパク質遺伝子の cDNA を RT-PCR により調製した後に、その塩基配列を決定した。

4. アグロインフィルトレーション実験

生殖隔離の原因遺伝子として可能性の高いクローンの cDNA の ORF 全長を Ti-プラスミドベクター pRI-101An の 35S プロモーターの下流につないだコンストラクトを作製し、アグロバクテリウム C58C1 に形質転換した後、アグロインフィルトレーション実験を行った。

III. 結果と考察

1. トランスクリプトームおよびプロテオーム解析

本研究で用いた種間 F1 雑種は、発芽後に幼苗致死を引き起こす典型的な生殖隔離の現象をしめす。この現象は 37°C で起きなくなるため、培養細胞 GTH4 も高温で維持可能である。GTH4 は 26°C に移すとただちに細胞死を起こす。GTH4 の突然変異細胞 GTH4S は 26°C でも致死せず、これは細胞死の原因となる遺伝子発現ならびにタンパク質合成が停止していることによると考えられている。この特徴を利用して、GTH4 で発現していて、GTH4S で発現していない遺伝子やタンパク質を探すことから、細胞死の原因を特定できる。

トランスクリプトーム解析では、延べ 10 万クローンについて 1 次スクリーニングした後、発現差を認めた 2,016 クローンを 2 次スクリーニング、さらに 3 次スクリーニングして計 36 クローンを選抜した。これらのクローン全てについて cDNA の塩基配列を決定し、重複したクローンを整理した後、機能推定が可能な 12 クローンと未知のクローン 3 クローンを得た。

プロテオーム解析では、延べ 5,000 のタンパク質バンドについてスクリーニングし、34 タンパク質について差を認め、ゲルから回収可能な 19 タンパク質を MALDI-TOF-MS 解析で調査し、それに対応する遺伝子を単離した。

2. RT-PCR による発現差の詳細解析

1 で発現差を認めた遺伝子群とタンパク質群について、それらの遺伝子発現を RT-PCR で確認した。その結果、*proteinase inhibitor*(PI)、*glycine-rich protein*(GRP)、*suppressor of G2 allele of skp1* (SGT1) が GTH4 で強く、GTH4S で弱く発現することを認めた。これらの遺伝子の両種間での詳細比較から、SGT1 については両親間でアミノ酸配列に違いを認めた。

3. アグロインフィルトレーション実験

3 つの遺伝子の ORF の cDNA を 35S プロモーターの下流につないだコンストラクトをアグロインフィルトレーションにより、*N. tabacum* の葉肉細胞に導入したところ、SGT1 が細胞死を起こすことを認めた。*N. tabacum* 由来の SGT1 では細胞死は起きないが、*N. gossei* 由来の SGT1 では細胞死が起きた。SGT1 は RAR1 と共に HSP90 のコシャペロン分子として働き、植物の病原抵抗性タンパク質である R タンパク質を管理している⁴⁾。R タンパク質は過敏反応細胞死を誘導するため、その管理は正確でなければならない。このため、HSP90 とそのコシャペロンはそれぞれの種において最適の組み合わせとなっていると想定できる。他方、雑種はこれらの分子種が混在する環境にあるため、組み合わせによっては R タンパク質を正しく管理できない場合もある。このようなことが可能性として考えられるなら、コシャペロン分子である SGT1 が雑種の生殖隔離の原因遺伝子になりうることも否定できない。両親の遺伝子のエピスタティック効果が生殖隔離の原因となりうることを予測した DM モデルから見ると、今回の実験結果はその可能性を良く支持するものである。

4. 生殖隔離遺伝子の活用

進化過程において種分化が起きる淘汰圧の種類や程度に違いがあると考えると、生殖隔離に関与する遺伝子は多種類存在すると予想できる。その遺伝子を同定することは、生物が進化する原動力の一端を知る上で重要だが、その遺伝子の発現を抑制することで得にくかった種間雑種をより容易に得る機会を増やすことが期待される。生物多様性を活用する育種が益々重要な植物改良のツールとなる現状を勘案すると、本研究の成果は遠縁交雑育種のポテンシャルを高める技術につながると期待される。

参考文献

- 1) 鶴飼保雄(2002)「植物育種学」東京大学出版会
- 2) K. Bomblie et al. PLoS Biol. 5, e236 (2007)
- 3) M.J.W. Jeuken et al. Plant Cell 21, 3368 (2009)
- 4) K. Shirasu Ann. Rev. Plant Biol. 60, 139 (2009)

2.1.1.2.3.

植物培養細胞からの光合成産物回収
Collection of Photosynthetic Products from Cultured Plant Cells
前田樹夫*1、高城啓一*2
Masuo MAEDA and Keiichi TAKAGI

Abstract

In order to collect photosynthetic products from cultured plant cells, we tried to culture green callus of kudzu (*Puelaria lobata* Ohwi) in sugar-free culture medium. The callus could survive and proliferate in the medium. We could detect small amount of sucrose in conditioned medium of the callus.

要約

植物培養細胞から光合成産物を回収するため、我々は、クズ由来の緑色カルスを作製し、糖分不含培地中での培養を試みた。糖分不含培地中で、緑色カルスは生存可能で、かつ、増殖することができた。カルスを培養した培地からは、少量のショ糖を検出することができた。

I. 緒言

デンプン、ショ糖などの光合成産物は、食料生産、エネルギー生産の面から非常に重要である。農産物から光合成産物の回収では、収穫までに時間がかかり、かつ、収穫部以外の植物部分は廃棄されて無駄になる。光合成が可能な植物細胞を独立栄養的に培養し、そこから光合成産物を効率的に回収することができれば、光エネルギーを効率的に光合成産物に転換できる。

我々は、この観点から、独立栄養的に増殖可能なトレニア多芽体や、クズ緑色カルスを作製してきた。本報告では、クズ緑色カルスの培養を行った後の、元来は糖分を含まない培地において、少量ではあるがショ糖を検出することができたので報告する。

II. 材料と方法

クズ (*Puelaria lobata* Ohwi)の茎部縦切片を、0.5 mg/l 2,4-D (2,4-ジクロロフェノキシ酢酸)、0.1 mg/l カイネチン、3% ショ糖、0.8% 寒天を含む 1/2 ムラシゲ・スクーグ培地上に置床してカルスを誘導し、その中から、緑色を示すものを分離増殖させた。

分離した緑色カルスは、培養用フラスコに入れ、ショ糖、および、寒天を含まない、糖分不含の液体培地上で浸透培養を行った。培養条件は、23 °C で、明期 16 時間、暗期 8 時間で行った。光合成光量子束密度は、 m およそ $110 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。この培養条件下で 2 週間培養を行った後、培地交換を行い、さらに 1 週間後、明期初期(照明開始およそ 3 時間後)に、培地をサンプリングした。サンプリングした培地は、高速液体クロマトグラフィー・質量分析装置を用いて 2 糖、および、単糖類の検出を試みた。

III. 結果と考察

単離したクズ緑色カルスは、固形培地上でも液体培地中においても、糖分不含培地中で生存可能であるだけでなく、増殖可能であった。カルス細胞を蛍光顕微鏡下で観察すると、細胞中に葉緑体に対応すると考えられる、葉緑素に相当する波長域で蛍光を発する色素体顆粒が観察された。液体培地中での浸透培養では、緑色カルスは、ボール状の細胞塊となって生存、増殖した。緑色カルスを培養した後の糖分不含培地中の単糖類、二糖類を分析すると、二糖類であるショ糖が 10.6 mg/l 検出された。この結果は、植物における転流がグルコースの形態では行われず、ショ糖や糖アルコールの形態で行われるという知見と一致することから、光合成産物の一部がショ糖として培地中に放出された可能性が大きいと考えられる。

今後は、光合成産物回収のためにより効率的な培養条件、サンプリング条件の検討について、植物ホルモン条件、外部からの CO₂ 供給や照明強度、波長、サイクル等に関する検討を行う予定である。

*1 福井大学・教育地域科学部、*2(財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ

2.1.1.2.4.

植物育種の効率化を目指した DNA マーカーの開発
 Development of a DNA Marker Improve the Efficiency in Plant Breeding
 田中良和*1、鈴木勝久*2、水野隆*3
 Yoshikazu TANAKA, Katsuhisa SUZUKI and Takashi MIZUNO

Abstract

One of several DNA markers for the efficiency in plant breeding, we developed a DNA marker linked to the tomato *cf-9* disease resistance gene.

要約

植物育種の効率化を目指し DNA マーカーの開発を進めているが、その一つとしてトマト葉かび病抵抗性遺伝子 (*cf-9*)を検出するための DNA マーカー作成を試みた。

I. 緒言

野菜の育種は多くの病害抵抗性を付与することが求められており、そのために育種法の効率化が必要である。本研究は DNA 判定に用いる特定塩基配列 (DNA マーカー) を見つけ出し、植物育種の効率化に寄与することを目的とするものである。本年度は、トマト葉かび病に対する抵抗性遺伝子 (*cf-9*) を保有した品種を判別するための DNA マーカーの作成を試みた。

II. 方法

トマト葉かび病抵抗性品種として、CF ネネ、桃太郎 EX、桃太郎コルト、感受性品種としてネネ、桃太郎8、さらに *cf-9* とは異なる抵抗性遺伝子として *cf-4* を有する桃太郎ヨーク、桃太郎ファイトを供試材料とした。CTAB 法を用いて各材料の葉から DNA を抽出し、DNA データバンク上の *cf-9* 塩基配列を元に作成した 10 組のプライマーセット (図1) を用いて PCR を行った。反応には KOD FX Neo (東洋紡社製) を用いた。PCR 産物の確認は 0.7%アガロースゲルを用いた電気泳動で行った。*cf-9* 遺伝子の有無によって差異が現れたプライマーセット 7 については、その周辺領域の塩基配列情報から更に 8 個のプライマーを作成して順次 PCR を行った。

III. 結果と考察

CF ネネ (*cf-9*) とネネ (感受性) を用いて、図1に示した 10 組のプライマーセットによる PCR を行ったところ、プライマーセット 7 において、CF ネネでは約 600bp の増幅断片が得られ、ネネでは増幅が起きないという差が認められた。そこで、プライマーセット 7 の近傍配列から新たにプライマーを作成して PCR を行ったところ、*cf-9* 遺伝子の 1000bp 付近に作成したプライマーで増幅断片の有無が認められたことから、この領域に差異を生じる原因があると考えられた。この結果をもとに、*cf-9* 遺伝子の 1000bp から下流側にリバースプライマーを作成し、F7プライマーとの PCR を行ったところ、*cf-9* を有する桃太郎 EX で 1.1kb と 1.4kb、*cf-9* ヘテロの桃太郎コルトでは 1.1kb、1.3kb、1.4kb、そして *cf-9* を有しない桃太郎 8 では 1.1kb の増幅断片を生じるプライマーセットを得ることが出来た (図 2)。このプライマーの組合せを用いれば、比較的大きな DNA 増幅断片を生じるので簡易なアガロースゲルによって *cf-9* 遺伝子に関する検定が可能である。

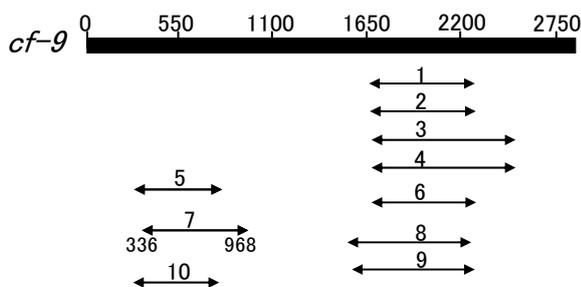


図 1 *cf-9* 遺伝子内に作成した各プライマーセットによる PCR 断片。数字は *cf-9* 遺伝子の塩基配列をしめたものである。

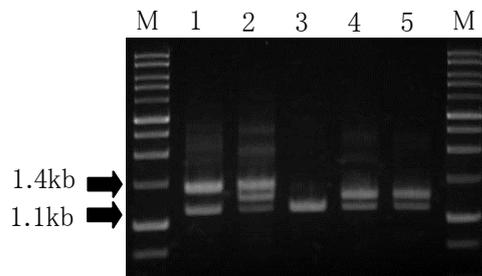


図 2 プライマー F7 と R7-4 による PCR の電気泳動。M: kb ラダー、1: 桃太郎 EX、2: 桃太郎コルト、3: 桃太郎 8、4: 桃太郎ヨーク、5: 桃太郎ファイト

*1 (財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ、*2 ハクサンインターナショナル株式会社、*3 プランツファーム SETO

2.1.1.2.5.

高温耐性・酵素高発現酵母の選抜育種

Breeding of high temperature tolerant and high enzyme expression yeast

仁宮一章^{*1}、畑下昌範^{*2}

Kazuaki NINOMIYA and Masanori HATASHITA

昨今、環境負荷の少ない再生可能なエネルギーの世界的な研究開発が行われてきている。その中でも、食料となる農産物やその廃棄物あるいは廃木材などを原料としたバイオエタノールが注目されてきている。本研究は、エタノール生産酵母のイオンビーム照射による突然変異誘発技術を確立し、バイオエタノール生産に必要な高セルロース分解能と高温耐性等を有する酵母を育種することを目的としている。

エタノール生産酵母に対して、イオンビームを種々の線量で照射し、増殖率を指標として線量反応を調査した。前年度に照射した菌体を用いて、線量と生存率の関係の解析を行ったところ、カーボンビームでは 50Gy の照射で生存率が 10% 以下になった。エタノール生産酵母によるエタノール生産において必須であるセルラーゼの分泌と反応を良好に達成する高温耐性株の選抜を容易に行うために、前年度から継続して、色素の分解や着色で選抜可能な実験系を構築し、この実験系を用いて、イオンビーム照射による変異体の選抜を現在実施中である。今後は、選抜された有望な変異体について、高セルロース分解能と高温耐性を指標に変異導入の効果を検証する予定である。イオンビーム照射を利用することにより、高セルロース分解能と高温耐性等を有する酵母を育種できれば、同時糖化発酵におけるエタノール生産速度の向上などが期待できる。

^{*1} 金沢大学、^{*2} (財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ

2.1.1.2.6.

タンパク質医薬の生産に汎く利用される工業用哺乳類細胞株の樹立

Establishment of Mammalian Cell Lines Extensively Used for Industrial Production of Pharmaceutical Proteins

寺田聡^{*1}、千田泰史^{*1}、高城啓一^{*2}

Satoshi TERADA, Yasuhito CHIDA and Keiichi TAKAGI

近年、タンパク質医薬品の市場が急成長しており、その生産には動物細胞培養が用いられている。その生産性向上のためには、培養あたりの生産細胞数増大が有効であるが、過剰な増殖がおこった場合には、培養環境が悪化して培養期間が短縮してしまい、結果的に生産性が低下することになっているのが実状である。

そこで、必要な細胞数まで増殖できた時点で、それ以上の「過剰な増殖を抑制」することが有効と考えられる。そのために、高エネルギービーム照射を用いて細胞に対し変異を導入することで、増殖制御可能な工業用動物細胞株を取得する。変異誘導の対象には、まだ組み換えタンパク質遺伝子が導入されていない細胞を用いることで、いわゆる「汎用株」を樹立する。

変異を誘導するには、ある程度細胞にダメージを与えるが、しかしそのダメージから回復できるレベルで行うことが効率的である。適切なレベルを決定する目的で、細胞に X 線を様々な強度で照射し、コロニー形成法によって細胞の生存率を測定した。得られた生存率に基づいて、変異誘導のための X 線の照射強度を決定した。次に、変異導入株から、目的の増殖自己制御株を取得する方法として、増殖細胞を死滅させる作用を持つ HU や 5-FU を併用する手法を考案した。そして HU や 5-FU の濃度や処理時間を検討し、スクリーニング条件として設定した。現在、これら検討によって定めた条件に基づいて、増殖制御可能な工業用動物細胞株の育種に取り組んでいる。今後、増殖制御株を樹立し、その特性を解析するとともに、医薬品生産遺伝子を導入し、効率的な医薬品生産を実現する。

^{*1} 福井大学大学院・工学研究科、^{*2} (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
本研究は、公募型共同研究事業として実施した。

2.1.1.2.7.

イオンビームによる園芸植物の新品種開発

Development of Commercial Varieties of Horticultural Plants by Ion Beam Irradiation

井村裕治*1、畑下昌範*2、高城啓一*2

Yuji IMURA, Masanori HATASHITA and Keiichi TAKAGI

植物の品種改良は、農業の生産性の向上や生活の豊かさに大きな役割を果たしてきた。現在もなお、農産物などは産地間競争や海外との競争、その他消費者ニーズの高まりもあって、植物の育種目標は多様化する傾向があり、品種改良となる母材の重要性はより高まってきている。その元となる遺伝資源は、その収集が各地で行われているが、世界環境会議において、自国遺伝資源に関して主権的権利を有することが規定されてからは、遺伝資源への権利意識が各国に広まった。このような背景の中で、多様な遺伝資源を自らの手により作出し、保存するために、我々は、モデル植物において従来の変異原よりも突然変異率が高いことおよび変異スペクトルが広いことが確かめられているイオンビームを用いて、育種母材となりうる有用な変異形質の作出を試みている。現状では、トゲの発生しないナスや粒径の大きいエダマメの新系統を作出している。その他、トウガラシ、オキザリス、マツバギク、エゾギク、カナリアナス、行者ニンニクなどについて、種子繁殖もしくは栄養繁殖で材料を展開し、形質の変化したものを選抜している。今年度は、大がかりな照射が出来なかったものの、新しい材料として、ツルニンジンを加えて、それぞれの繁殖系で変異形質の選抜を繰り返し行っている。

*1 福井シード株式会社、*2 (財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ

2.1.1.2.8.

イオンビーム照射による白色腐朽菌高性能株の作出と、セルロース系バイオマス前処理への応用

Development of High-Performance White-Rot Fungus by Ion Beam Irradiation

and Application to Pretreatment of Cellulosic Biomass

櫻井明彦*1、畑下昌範*2

Akihiko SAKURAI and Masanori HATASHITA

化石燃料の枯渇や地球温暖化、原子力エネルギー代替などの観点から、バイオ燃料への期待が高まっている。特に、木材などの非可食バイオマスを原料とする第2世代バイオ燃料の実用化が望まれている。第2世代バイオ燃料は、木質中のセルロースやヘミセルロースなどの多糖類を加水分解する糖化工程と、得られた糖をエタノールなどに変換する発酵工程からなり、糖化工程の効率化が実用化に向けた最重要課題である。

本研究では、安価かつ省エネルギーに木質(セルロース系)バイオマスの糖化を行うための前処理方法として、白色腐朽菌が生産するリグニン分解酵素の利用を試みた。具体的にはイオンビーム照射によるリグニン分解酵素高生産株の育種と、リグニン分解酵素による木質バイオマスの糖化前処理を検討した。

白色腐朽菌 L-25 株(野生株)にカーボンビームを照射したところ、1000Gy 照射したのからマンガンペルオキシダーゼ(MnP)とリグニンペルオキシダーゼ(LiP)の両方を生産する変異株が得られた。白色腐朽菌が生産したマンガンペルオキシダーゼを用いて糖化前処理(リグニン分解)を行うことにより、セルラーゼによる糖化効率を向上させることができた。

*1 福井大学大学院・工学研究科・生物応用化学専攻、*2 (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
本研究は、公募型共同研究事業として実施した。

2.1.1.2.9.

イオンビーム照射によるエタノール発酵糸状菌変異株の構築

Construction of Ethanol Fermentation Filamentous Fungi Mutants by Ion Beam Irradiation

星野一宏^{*1}、高野真希^{*1}、畑下昌範^{*2}

Kazuhiro HOSHINO, Maki TAKANO and Masanori HATASHITA

近年、原油価格の高騰や化石燃料枯渇への懸念に伴い、再生可能なバイオエネルギーの効率的生産法の開発が急務となっている。特に、注目を集めているバイオエタノールは、その原料が容易に糖分が得られる穀物や糖質原料であるため、食糧との競合に関する問題が顕著化している。それ故、この問題を避けるため未利用なバイオマス資源からのエタノール生産が注目されている。近年では、エタノール発酵に関与する遺伝子やペントース代謝遺伝子を組換えた大腸菌、酵母、コリネ菌などの開発が進んでいるが、このような遺伝子組換え微生物を用いてもグルコースと同程度の効率でエタノールを生産できるものは皆無である。そこで求められるのが、“キシロースも発酵できる野生のエタノール発酵微生物”である。このような背景から、我々はペントースを高収率でエタノール発酵できる糸状菌の検索を行ってきた。その結果、接合菌が、好気および嫌気培養の条件下で、グルコースのみならずキシロースも発酵できることを新規に見いだした。しかし残念なことに、キシロース発酵能は弱い。そこで、本研究において発見した接合菌 *Mucor* sp. の分生子にイオンビームを照射し、キシロースからのエタノール高生産変異株を構築することを目指した。

今年度は、照射実験が行えなかったため、前年度に照射した材料を用いて、再現性試験を行った。カーボンイオン照射による変異株の獲得を試みた。その結果、2,500Gy までは生育に対して全く変化は認められなかったものの 3,000Gy では増殖阻害を強く受け、4,000Gy では全く生育する株は認められなかった。変異誘導が強い 3,000Gy 照射した分生子から高エタノール生産株のスクリーニングを行った。高キシロース濃度の条件下で、かつ、25 g/L のエタノールの存在下で生育する変異株を最終的に得た。

*1 富山大学、*2(財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ

2.1.1.2.10.

花卉園芸植物へのイオンビーム照射による新品種の育成

Development of Commercial Varieties of Flowering Plants by Ion Beam Irradiation

鈴木勝久^{*1}、水野隆^{*1}、畑下昌範^{*2}、高城啓一^{*2}

Katsuhisa SUZUKI, Takashi MIZUNO, Masanori HATASHITA and Keiichi TAKAGI

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

花の販売においては、シリーズ化が重要なポイントである。そこで、我々は、ビンカに注力して、その茎頂分裂組織に対して、放射線照射を行ってきた。その後の枝変わり型の変異体の選抜から、特徴的な性質を示した枝については挿し木により植物体を残した。また、品種登録および品種登録出願を行った 6 品種について、無菌化苗を作成し、培養系での系統の保存を行った。

*1 ハクサンインターナショナル株式会社、*2(財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ

2.1.1.2.11.

イオンビーム照射によるサボテン科植物の育種

Breeding of cacti by Ion Beam Irradiation

加藤孝義^{*1}、畑下昌範^{*2}、高城啓一^{*2}

Yuji IMURA, Masanori HATASHITA and Keiichi TAKAGI

従来、世界各国で発表された園芸植物は、種苗会社によっていち早く情報がとらえられ、国内の生産者やホームセンター、その後消費者に流通される形態がとられていたが、近年の情報化社会の進展とともに、新品種や希少品種に関する情報は、すべての段階の人々が同じタイミングで受け取るようになってきた。このために、種苗会社は以前にもまして特徴のあるオリジナル品種を開発、所有する必要性が生じてきた。また、サボテン科植物については、多くは国内に持ち込まれたもので、その後品種改良した例はほとんどない。こうした背景のもと、我々が所有するサボテン科植物を素材として、新しい突然変異原として期待されているイオンビームを用いて、新品種の育成を行うことを計画した。前年度においては、まず、サボテン科植物のイオンビームに対する感受性を調査するために、数種の種子と数種の植物体を材料として、種々の線量でプロトンビームを照射した。その後の育成結果から、変異誘発のための大量照射用の適正線量を見極めた。今年度は、照射実験が行えなかったが、既存の照射材料の育成を継続して、変異形質の選抜を試みている。サボテンは、生育に数年の年月がかかる大変育種に労力の必要な植物であるが、品種間でのイオンビームに対する感受性を把握しながら、選抜を行っている。

^{*1} 株式会社岐孝園、^{*2} (財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ

2.1.1.3. 植物工場関連技術開発

2.1.1.3.1.

植物工場等への太陽光集光装置の開発

Development of a Spherical Mirror Solar Collector for a Plant Factory and Other Lighting Applications

峰原英介*

Eisuke J. MINEHARA

Abstract

Development of a spherical mirror solar collector for a plant factory and other lighting applications is briefly described below.

要約

植物工場や他の照明応用のために球面鏡太陽光集光装置の開発を行った。以下に概略を記述する。

I. 緒言

財団法人若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)で平成 23 年度に数社と共同研究として実施した植物工場等への太陽光集光装置の開発について述べる。

II. 実験方法及び結果

石英光ファイバーを用いた太陽光・人工光併用自動照明装置を植物工場などに応用する開発研究、またこれ以外の植物工場関連技術の検討開発を行った¹⁾。石英光ファイバー伝送太陽光集光装置を太陽熱発電装置へ応用する可能性を検討した。

レーザーでは 10 μm 径の石英光ファイバーに 10 kW 以上が伝送可能である。石英光ファイバー以外の手段を用いた太陽光集光装置は昔からエネルギー危機が叫ばれるたびに開発が繰り返し行われてきた。H21 年度から、それらを上回る実用的で、安価な大規模システムの可能性を、石英光ファイバー伝送装置を用いた数種類の 1 kW 級までの樹脂製球面鏡の試作と集光パワー計測、追尾モデル計算によって再確認した。H22 年度は消費電力 0.13 kW から 2.5 kW に相当する人工光と太陽光の自動切換を含めた最小単位要素の試作と計測実験、それらのスケールモデル等でアウトリーチや広報も含めた研究活動を行った。これ以外の温度湿度炭酸ガス濃度など植物工場内環境調節などの関連機器の検討と開発を行った。石英光ファイバー伝送太陽光集光装置を太陽熱発電装置へ応用する可能性を確認する作業を行った。H23 年度に新しい光ファイバーとして、より結合損失が小さな、入射角が大きく取れるフォトニッククリスタルファイバー(PCF)の利用を計画した。

H21 年度は、植物工場等への太陽光集光装置の開発のために、準備、試作、計算、特許出願などを行った。日本生物環境工学会植物工場部会(SHITA 研究会)、この関連研究会地方支部例会、関連展示会への参加、発表、宣伝を行った。小規模太陽光人工光併用光源装置の試験とモデル作成とモデル実験を行った。これらの広報・アウトリーチ活動も行った。石英ファイバー耐熱被覆やフォトニッククリスタルファイバーなどの開発と樹脂製球面鏡開発で其々、三菱電線・信州大学・湖北工業、NAC-KS 社と共同研究或いは立案と打診を行った。

H22 年度は、アウトリーチ活動として APEC 閣僚会議や展示会での宣伝を考えたが、残念ながら若狭湾エネルギー研究センターこれと兼用の小規模集光装置の試験とモデル作成とモデル実験を行った。スターリングエンジン²⁾を用いた広報・アウトリーチ活動も行った。植物工場用照明装置の特許出願 1 件³⁾、石英ファイバー耐熱被覆開発で三菱電線と協力、NAC-KS 社と共同研究で樹脂製球面鏡開発試作 10 種類などを行った。

H23 年度は、消費電力 0.13 kW から 2.5 kW 相当人工光の自動切換を含めた最小単位要素の試作と計測実験、それらのスケールモデル等でアウトリーチや広報も含めた研究活動を行った。温度湿度炭酸ガス濃度など植物工場内環境調節などの関連機器の検討と開発を計画した。

参考文献

- 1) 峰原英介:若狭湾エネルギー研究センター年報平成 21 年度第 12 巻 82 頁, (2009)
- 2) 峰原英介:若狭湾エネルギー研究センター年報平成 22 年度第 13 巻 32 頁, (2010)
- 3) 峰原英介:特許出願:植物工場照明装置、出願番号 2010-85680

* (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、(財)若狭湾エネルギー研究センターが、それぞれ、三菱電線工業株式会社、ナック・ケイ・エス株式会社との協力及び共同研究として実施した。

2.1.1.3.2.

反射鏡型太陽光集光装置の開発
Development of a Spherical Mirror Solar Collector

峰原英介*

Eisuke J. MINEHARA

Abstract

Development of a spherical mirror solar collector for a plant factory and other applications at WERC is briefly described below. Plastic mirrors used for the solar collectors are made from a PMMA (Polymethyl methacrylate) plate at NAC-KS corporation.

要約

財団法人若狭湾エネルギー研究センター(WERC)において植物工場と他の応用のために行った球面鏡太陽光集光装置の開発を以下に概略述べる。太陽光集光装置のために使用した樹脂製反射鏡は NAC-KS 社の協力により 1 枚の PMMA(ポリメチルメタクリエイト)板から作られている。

I. 緒言

財団法人若狭湾エネルギー研究センター(エネ研で平成 23 年度に実施されたナック・ケイ・エス株式会社との共同研究である反射鏡型太陽光集光装置の開発成果について述べる。

II. 実験方法及び結果

ナック・ケイ・エス株式会社もっている太陽光集光に使用できる高精度反射鏡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反射鏡型太陽光集光装置の光学的最適化技術と伝送装置技術を組み合わせ、植物工場照明装置、太陽光集熱装置などに応用するための基礎技術の開発を行ってきた。この開発達成により、植物工場では、採算が取れる品種の拡大を図る基礎技術を確立することが可能、また太陽光集熱装置では大規模化を図れる基礎技術を確立することが可能になると考えられる。ナック・ケイ・エス株式会社は、太陽光集光に使用できる樹脂製高精度球面及び非球面反射鏡の製造技術開発を担当した。若狭湾エネルギー研究センターは、反射鏡型太陽光集光装置の光学的最適化と伝送装置技術開発を担当した。

H21年度は、準備研究、反射鏡型太陽光集光装置の光学的最適化と伝送装置の開発準備を行った^{1,2)}。H22年度は、球面反射鏡の最適化と伝送装置の試作計測、集光計測実験、これらの製造技術の検討、途中経過のまとめと報告を行った。H23 年度は、現在の太陽炉のフレネルレンズの効率 50-60%だが反射鏡は 98%程度以上が可能である。これをファイバーで転送する場合光の結合部でフレネルレンズと同様な減衰が起こり、最終的な効率はフレネルレンズより小さいがやはり減少する。また太陽視差 9.3mrad から予想される1m焦点距離で約 9mm 以下の集光径であった。これよりも短い焦点距離での縮小投影となると 1mm 径以下の集光も試験し、確認した。球面鏡は反射率が高いため、特に上昇温度は見られなかった。石英製結合部はフレネルレンズと同様な理由で高い温度まで昇温していた。経緯台を天体望遠鏡で自動導入と呼ばれる太陽追尾を試験し、確認した。図 1 は自動追尾試験した天体望遠鏡の経緯台の写真である。ファイバーと集光点との結合部が問題で、開口率を合わせないと、もっとも広い角度のエアクラッド構造でも結局、エアクラッドから通常の石英クラッドに入る部分で漏れて昇温し、破損する。もっと原点に戻って光ダクトやパイプのような光輸送のロスが多いが、技術的困難も少ないシステムをローテクで実現するほうが現実的である。



図 1: 自動追尾試験した経緯

参考文献

- 1) 峰原英介:若狭湾エネルギー研究センター年報平成 21 年度第 12巻81頁, (2009)
- 2) 峰原英介:若狭湾エネルギー研究センター年報平成 22 年度第 13巻32頁, (2010)

* (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、(財)若狭湾エネルギー研究センターがナック・ケイ・エス株式会社との共同研究として実施した。

2.1.1.3.3.

CO₂ 施肥技術の開発研究

Developmental Research of the CO₂ Fertilization Device and Method

峰原英介*1、毛利幸生*2、小林良久*2

Eisuke J. MINEHARA, Yukio Mouri, and Yoshihisa Kobayashi

Abstract

Development of a CO₂ Fertilization Device for plant factory at WERC is briefly described below. The basic plan to condense CO₂ gas in air is a simple but difficult to realize in a small-sized scale for the CO₂ fertilization in plant factories.

要約

財団法人若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)における植物工場のための CO₂ 施肥装置技術の開発研究について、以下に概略を述べる。空気中の CO₂ を濃縮するという基本的な考えは簡単であるが多くの植物工場において CO₂ 施肥を小規模に実現することは困難である。

I. 緒言

大規模な炭酸ガス分離膜装置はすでに産業規模で実用化されている。この技術で CO₂ 排出の大きな工場では燃焼ガスの中から、含まれているほとんど全量の CO₂ ガスを低コストで分離して精製し、液化炭酸ガスやその他の化学原料として頒布され、利用されている。この(株)ナカテックとの共同研究の目的は、もっと小規模の CO₂ 濃縮装置であって、4-5 倍程度に濃縮する装置であって、99.9%以上の高い純度が必要な炭酸ガスの分離装置や回収装置ではない。

II. 方法と結果

開発内容は、以下の2点である。①人工ゼオライトと圧カスイング法を用いた5倍程度の空気中の炭酸ガスの濃縮を行う。更に②圧縮したガスのエネルギーを利用したエネルギー回収システムで電気利用効率を、数倍から十数倍まで高める。図1は「CO₂ ガス濃縮装置とその方法」の説明図である。

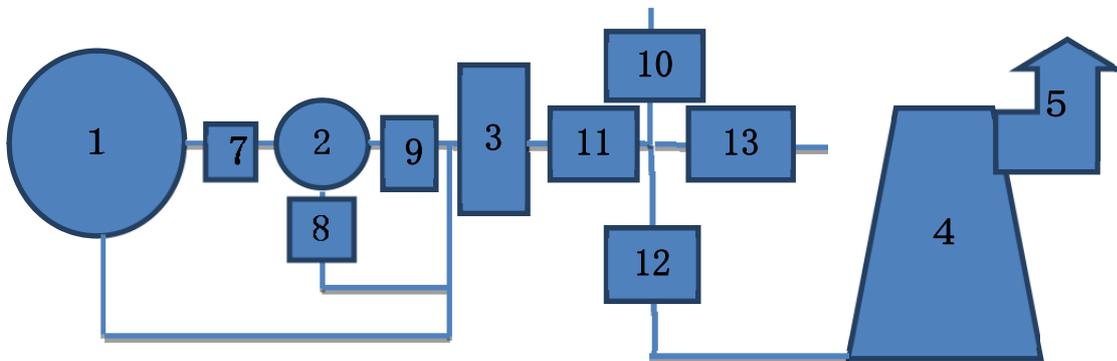


図 1: CO₂ ガス濃縮装置とその方法を説明する図である。図中の番号は以下の部品である。

1: 空気貯蔵圧力容器、2: CO₂ 濃縮圧力容器、3: 電動圧縮機(空気エンジン発電機)、4: 植物工場と園芸用温室とこの2つに類似の準密閉空間で植物を栽培する装置、5: 煙突或いは煙道の構造、6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13: 遠隔自動弁

動作は複雑に見えるが、3の電動圧縮機を用いて容器に空気を加圧する。これを比較的短時間で逆流させて、CO₂ 施肥を行うとともに空気エンジン発電機として動作させ、圧縮空気のエネルギーを回収する。これによって単独では採算に合わないこの濃縮システムを採算に合うように工夫している。一応、システムを組んで動作試験を開始した。また試作機を作る予算をナカテックと共同で申請する準備を行った。

参考文献 1) 特許出願、名称「CO₂ 回収方法とその装置」、出願作業中(峰原英介、小林良久)

*1(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株式会社ナカテック
本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターが株式会社ナカテックとの共同研究として実施した。

2.1.1.3.4.

イオンビームによる機能性野菜の新品種育成と栽培システムの開発
Production of New Variety of Functional Vegetables by Ion Beam Irradiation
and Development of Cultivation System

畑下昌範*

Masanori HATASHITA

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は葉菜類で普及してきている。しかし、果菜類や根菜類その他薬用植物などについては未だ確固たる生産技術を備えていない。さらに機能性成分の高蓄積化などについては、その条件が示されていない。

本研究では、高ミネラル低カロリーで好塩性の野菜であるシーアスパラガスを対象として、イオンビームによる高栄養価で食感の良い系統の育成および最適な工場生産法の開発、さらにある種の制御機構を搭載した店産型栽培装置の開発を行う。今年度の結果は以下の通りである。

- 1) シーアスパラガス種子に対して、放射線を照射し、その後の発芽率や生存率を求め、線量反応を解析した。
- 2) 生長性を指標とした養液条件の検討から、原品種における栽培条件を見出した。
- 3) 人工照明を搭載した店産型栽培装置のプロトタイプを製作した。

*(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
本研究は、(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。

2.1.1.3.5.

植物工場用エネルギーシステム実証研究
—イオンビームによる植物工場用作物の新系統育成と工場生産法の確立—
Experimental Study of Energy System for Plant Factory

—Production of New Variety of Vegetable for Plant Factory and Establishment of Cultivation Method—

畑下昌範*

Masanori HATASHITA

本事業では、栽培条件やLEDを主とする光源が葉菜類の生育に及ぼす効果の評価で培った栽培システムを基盤として、施設園芸などで最も多く生産されているトマトを取り上げ、その高機能化、省力化系統の育成および栽培条件やLED補光条件による高機能化の検討を行う。また、太陽光併用型の植物工場におけるエネルギー負荷の低減を図る目的で、地中熱源を活用した温度制御システムの検討を行う。

トマトの高機能化、省力化系統を放射線育種により育成するにあたって、その基礎的条件である照射条件を検討した。照射後の苗の定植率やその後の生育状況から、組織においては50Gy以下、種子においては100Gy以下の線量が適切であることが判明した。よって、変異誘発のための大量照射においては、組織には50Gy、種子には60Gyを照射することを決定した。トマト果実に含まれる機能性成分である糖類、リコピン、GABA、ビタミンC、β-カロテンについて、糖度計、HPLCおよびアミノ酸分析計を用いて、それらの分析手法を確立した。植物工場(ハウス)空調動力低減を目的として、水冷ヒートポンプとヒートパイプBACHを融合させた空調システムを設計した。予備的試験においては、BACHは、集熱で200~400W/個、放熱で200~300W/個の熱輸送を示した。

*(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
本研究は、文部科学省地域イノベーション戦略支援プログラムとして実施した。

2.1.1.3.6.

新規な光合成・光形態形成機構モデル搭載の植物工場用光制御システムの開発
Development of New Illuminant Control System Containing Mechanistic Model
of Photosynthesis and Photomorphogenesis for Plant Factory

明石行生^{*1}、畑下昌範^{*2}

Yukio AKASHI and Masanori HATASHITA

近年、天候や場所にとらわれない生産が可能であり、無農薬、高栄養価などの高付加価値の作物を作る植物工場による農業生産が試みられている。しかし、植物工場で収益を得るためには、環境制御にかかるコストの低減が課題である。植物工場の生産性を向上させるためには、まず、植物を成長させる光の貢献度を光合成と光形態形成の作用感度に基づいて測定し、植物の成長と収穫時期を予測できるようにすることが重要である。

本研究では、光合成・光形態形成の機構モデルを構築すること、およびそのモデルに基づく光受容センサーと制御アルゴリズムを搭載した植物工場を開発することを目的とする。今年度は、3種の LED を搭載した照明装置を用いて、リーフレタスを育成する実験を行い、光合成・光形態形成の機構モデルを構築した。構築した機構モデルに基づき、光受容センサーと制御アルゴリズムを開発した。それらを搭載したオフィス用レタス栽培システムを試作した。

^{*1}福井大学大学院・工学研究科・建築建設工学専攻、^{*2}(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
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. 動的照射野形成法開発

2.1.2.1.1.

陽子線治療用患者ボラス加工技術高度化

Improvement of a fabrication process of a patient bolus used for proton therapy

久米恭^{*1}、高田卓志^{*1}、長谷川崇^{*1,*2}、武本泰夫^{*3}、久保拓也^{*4}、坂本靖^{*5}Kyo KUME, Takushi TAKATA, Takashi HASEGAWA, Yasuo TAKEMOTO, Takuya KUBO
and Yasushi SAKAMOTOAbstract

Improvement of a fabrication process of a patient bolus used in proton therapy is reported. Difference in proton dose distribution between boluses of the past method and the present one is discussed. The organs subject of this improvement is also discussed.

要約

陽子線治療用患者ボラス加工技術の高度化について検討した。従来の加工法と今回の加工法による陽子線線量分布の比較を行った。またこの高度化された加工技術の適用となる疾患について検討した。

I. 緒言

日本国内において粒子線治療施設はさらに普及が進んでおり、平成24年8月現在、陽子線治療専用施設は6施設、炭素線治療専用施設は2施設、陽子線治療・炭素線治療併用施設は1施設が稼働している。粒子線治療施設が全国に普及することに伴い、一般社会における粒子線治療の認知度がさらに進むことが予想され、一施設あたりの患者数のさらなる増加が見込まれる。そのため、効率的に患者を受け入れる手法の開発が求められることとなる。患者の効率的な受け入れにあたって患者ボラスの加工時間の短縮が必要となる。前年度は加工方案の改良による高速化を検討し、陽子線線量分布に影響の軽微な範囲で加工時間を従来の1/8程度に短縮可能であることを示した。今年度は引き続き加工方案の陽子線線量分布に対する影響を検討するとともに、対象疾患についても検討した。

II. 方法

1. 新規の加工方案の陽子線線量分布に対する影響の検討

ボラス材料(ケミカルウッド)に最適化した新たなエンドミルを使用し、またボラス材料に最適化した加工方案を開発することによって、従来加工方案(2時間程度)よりも1/8程度(15分程度)に加工時間を短縮することで前立腺がん患者用のボラス(図1)を作成した。陽子線200 MeVブロードビームを使用し、従来加工方案による患者ボラスで得た陽子線線量分布、新規加工方案による患者ボラスで得た陽子線線量分布とを比較した。深部線量分布については図2、拡大ブラッグピーク(SOBP)中心におけるビーム横断方向の線量分布を図3に示した。図2と図3には治療計画出力も付してある。

2. 新規の加工方案の適用対象疾患の検討

新規の加工方案による時間短縮効果をもっとも発揮できる疾患を考察するために、実際の症例を参考に検討した。

III. 結果と考察

1. 新規の加工方案の陽子線線量分布に対する影響の検討

深部線量分布の測定結果(図2)、ビーム横断方向の線量分布の測定結果(図3)について、従来加工方案と新規加工方案の比較を実施した。治療計画による設計値と測定結果が系統的にズレているのは測定原点の取り方に依存するためであるが、それ以外に設計値と測定結果には、有意な差が見られなかった。

^{*1}(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}ハセテック、^{*3}瑞穂工業株式会社、^{*4}八十島プロシード株式会社、^{*5}日立ツール株式会社

本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターが、瑞穂工業株式会社、八十島プロシード株式会社、日立ツール株式会社との共同研究として実施した。

陽子線の散乱は媒質の材質に依存するが、媒質の切削精度には鈍感であることを示すものである。また汎用ボーラス開発の余地もあることがわかる。

2. 新規の加工方案の適用対象疾患の検討

新規の加工方案による時間短縮効果をもっとも発揮できる疾患を考察するために、実際の症例を参考にして検討した。参考にしたのは頭頸部腫瘍、肺がん、肝臓がん、前立腺がんである。

今回試験加工したボーラスは前立腺がん患者用の治療計画出力によるものである。前立腺がんの場合は、他臓器への転移のない段階では腫瘍のある臓器(前立腺)全体を標的とし、各種のマージンを付与することで、臓器の形状を膨張させたようなボーラス形状を治療計画で出力することが多い。前立腺は「くるみ」形状であり、球状の対称的な形状であることから、高速の加工方案には適していることがわかる。

頭頸部腫瘍は視神経や脳幹などの重要臓器が複雑に幹部に近接していることから、治療計画出力で得られるボーラス形状は対称的な形状ではないことが多い。場合によれば、ボーラス空間に突起部がある形状が治療計画で出力されることもある。そのため、高速の加工方案に適していない場合が頻繁に起こる。

肺がんについては、不均質物質(肺臓=空気の部分が多い)が主となるため、ボーラス形状は複雑になるケースがあり、やはり高速の加工方案に適していない場合が起こり得る。

肝臓がんについては、重要臓器である門脈を避ける治療計画を立案することがあり、そのような場合には治療計画出力が複雑なボーラス形状を出力することがある。

以上の考察により、この高速加工方案は前立腺が最も適した対象症例であることがわかった。

IV. 結語

陽子線線量分布を検討することにより、新規の加工方案と従来の加工方案とでは陽子線線量分布に有意な差がないことが判明した。このことから、患者個別のボーラスではなく汎用ボーラスの検討も可能である旨の示唆が得られた。また新規の高速加工方案が最も効率的に適用可能な症例は前立腺がんであることが判明した。

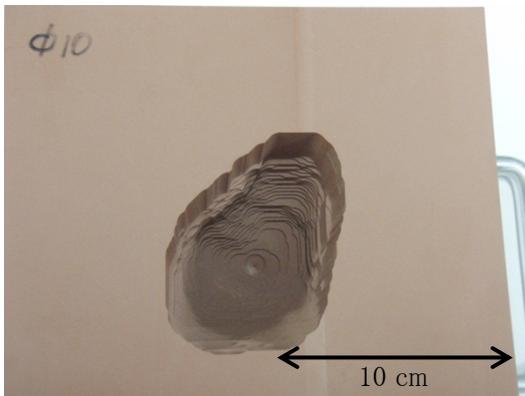


図 1 患者ボーラス

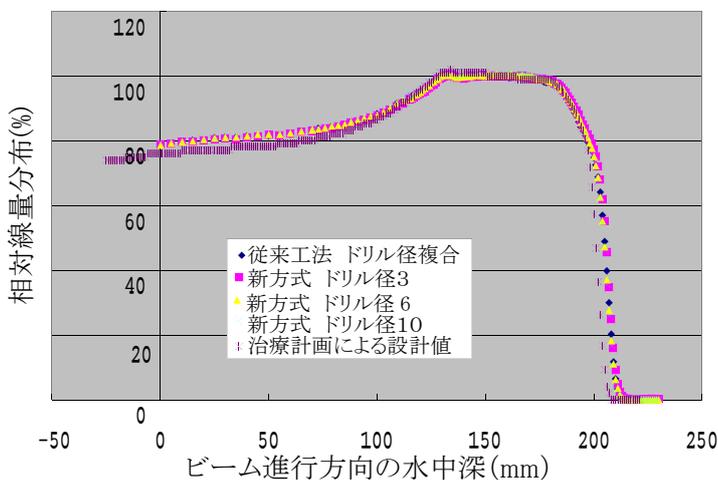


図 2 ビーム進行方向の水中線量分布

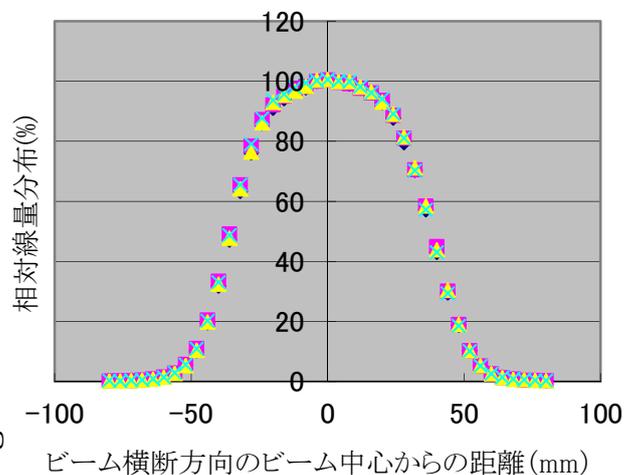


図 3 ビーム横断方向の線量分布

2.1.2.2. 治療計画システム高度化研究

2.1.2.2.1.

治療計画システム高度化研究

Research and Development of Advanced Radiation Therapy Planning System

高田卓志^{*1}、久米恭^{*1}、熊田博明^{*2}

Takushi TAKATA, Kyo KUME and Hiroaki KUMADA

放射線治療を行うにあたって、事前に線量分布を予測計算することにより、ターゲットへの投与線量の決定や周辺臓器線量が耐容線量以下であることの確認を行うことは、効果的かつ安全な治療を行うために非常に重要なプロセスである。当然のことながら、線量分布の予測計算には正確性が求められる。計算アルゴリズムの一つであるモンテカルロ法では、従来のペンシルビーム法と比較して、肺等の不均一領域においても正確な計算が可能であり、臨床での利用が期待されている。

本研究では、X線や粒子線といった多様な治療モダリティを統一的に扱うことのできる治療計画システムの開発を目指しており、線量分布計算はその重要な要素の一つである。昨年度から、まず陽子線を対象として、モンテカルロ法を用いた線量分布計算に関する検討を開始している。若狭湾エネルギー研究センターのがん治療研究装置のビームラインの簡易モデル化を行い、モンテカルロ法により線量分布を計算した結果、実測した線量分布と比較して、入射直後のプラトー部分で過小評価となることが確認された。この理由として、ビームライン機器のモデル化が不十分であることが考えられる。特に、揺動磁場によって陽子ビームを振るために使用するウォブラー電磁石のモデル化において、正確な磁場強度と磁場形状を入力することが重要であることが分かってきた。これらのパラメータを正確に把握することは困難であるため、基準として取得した線量分布が計算により再現されるようにパラメータを設定する方法を試みているところである。今後もモンテカルロ法による陽子線線量分布計算について、他の計算アルゴリズムや実測との比較を行い、より詳細な検討を行っていく予定である。

^{*1}(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}筑波大学
本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターと筑波大学との共同研究として実施した。

2.1.2.2.2.

加速器中性子捕捉療法基礎研究

Research on Accelerator-Based Neutron Capture Therapy

高田卓志^{*1}、久米恭^{*1}、櫻井良憲^{*2}、田中浩基^{*2}、土田秀次^{*3}

Takushi TAKATA, Kyo KUME, Yoshinori SAKURAI, Hiroki TANAKA and Hidetsugu TSUCHIDA

中性子捕捉療法(NCT)では、正常組織への傷害を十分に低減しつつ、腫瘍に高線量を投与することが可能である。そのため、X線等の既照射症例を扱うことも少なくない。また、近年では、NCTでの線量分布不均一性を補うために、X線や陽子線の前・追照射の試みもなされている。

複数のモダリティを用いて治療を行う場合、治療効果や副作用の正確な把握のためには、モダリティ間で整合性の取れた線量評価を行うことが重要であり、その手法の開発が本研究の目的である。今年度は、アラニン線量計の陽子線、および中性子線に対する応答について検討した。

アラニン線量計は、アラニンとポリエチレン等を圧縮成形したもので、照射によるアラニンラジカル生成量と吸収線量が比例関係にあることを利用した線量計である。人体組織とほぼ等価な元素組成と密度を有し、小型素子状に成形可能なため、電離箱のように空洞を有する線量計と比べて放射線場の擾乱が少なく、線量分布を正確に測定することができる。高い線エネルギー付与(LET)を有する荷電粒子線に対しては、感度が低下することが知られており、ブラッグピーク近傍の低エネルギー陽子線や、中性子照射により生じる低エネルギー二次荷電粒子において、感度低下の影響を考慮する必要があることが昨年度までの測定により明らかとなっていた。そこで、荷電粒子の飛跡構造に基づいたモデル計算により、感度低下の程度を概算した。陽子線については、拡大ブラッグピークの終端以深において、約80%まで感度が低下する結果を得た。また、中性子線については、熱中性子に対して約40%に感度が低下する結果を得た。これらの結果は、実験や文献から得られた感度と概ね同等であり、モデルの有用性を確認することができた。本モデルにより感度低下を補正することが可能であり、線量評価の正確さの向上が期待できる。

^{*1}(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}京都大学原子炉実験所、^{*3}京都大学大学院・工学研究科
本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターと京都大学原子炉実験所との共同研究として実施した。

2.1.2.3. 粒子線作用の素過程の解明

2.1.2.3.1.

膵臓がんに対する粒子線の殺細胞効果と機序の検討
 Antitumor Effect of Ion Beam Irradiation to Pancreatic Cancer
 藤永晴夫*¹, 久米恭*²
 Haruo FUJINAGA and Kyo KUME

I. 緒言

膵臓がんは最も治療が困難ながんの一つであり、新しい有効な治療方法の出現が望まれている。このような状況を背景として、放射線照射による周囲組織への影響を最小限とし、局所への高線量の照射が可能となる陽子線、炭素線などの粒子線を用いた膵臓がんの臨床的・分子生物学的な研究が進みつつある¹⁾。

II. 内容

これまで膵がん細胞株 (MIAPaCa, Capan-1, Capan-2) の 3 種の細胞株に対して、陽子線、炭素線、X線の照射を行い、生存率の評価、DNA microarray による発現遺伝子の解析を行ってきた。またヌードマウスの右下肢へ MIAPaCa の皮下注射を行って Xenograft model を作成し、陽子線、X線の照射を行い、照射後の生存率、腫瘍径の評価、発現遺伝子の解析を行ってきた。さらに MIAPaCa に対して陽子線、あるいはX線照射を行った後の生き残った細胞に対して、X線、あるいは陽子線の再照射を行ない、生存率の評価、発現遺伝子の解析を行ってきた。上記に加えて、Xenograft model、再照射後の細胞についても、DNA microarray を用いた経時的な発現遺伝子の解析を進めている。

参考文献

1) Matsui Y, et al. Am J Clin Oncol 2004;27:24-28.

*¹ 金沢大学・医学部・恒常性制御学分野、*² (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、(財) 若狭湾エネルギー研究センターと金沢大学との共同研究として実施した。

2.1.2.3.2.

放射線がん治療における陽子線特異的細胞応答の機構解明
 Mechanism Elucidation of Proton Beam Specific Cellular Response for Radiation Therapy
 畑下昌範*
 Masanori HATASHITA

本研究は、陽子線が他の放射線である X 線や炭素線に比べて特異的に突然変異率が低いというヒトがん細胞株で見いだされ現象に注目して、これらの細胞応答の分子機構を、特に一酸化窒素 (NO) ラジカルの関与について検討を加えながら、分子生物学的、細胞生物学的手法により明らかにすることを通じて、放射線がん治療による二次発がんの予防およびオーダーメイド放射線がん治療へとつながるエビデンスの蓄積を目的とする。

ヒト正常細胞およびヒトがん細胞を用い、種々の放射線照射後の放射線感受性を解析した。0~10Gy の X 線、陽子線、陽子線ピーク位置、炭素線をそれぞれ照射した細胞を試料とした。また、NO ラジカルの関与を解析するために、NO 捕捉剤である c-PTIO を培地に添加したものおよび NO ラジカル発生剤である硝酸イソソルビドを培地に添加したものについて、同様に照射したものを試料とした。コロニー形成法で生残細胞数を定量し、種々の放射線による放射線感受性を解析した。

次に、種々の放射線照射後の突然変異率を解析した。0~6Gy の X 線、陽子線、陽子線ピーク位置、炭素線をそれぞれ照射した細胞を試料とした。照射後の細胞を継代培養し、6~8 回の分裂後に 6-チオグアニン耐性コロニーの出現数を定量し、hprt 遺伝子の突然変異率を解析した。

* (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
 本研究は、JSPS 科研費 23591854 の助成を受けた。

2.1.2.3.3.

陽子線がん治療における低線量被ばくによる正常組織反応の機構解明

—それによるがん細胞死の促進機構の解明—

Mechanisms of Normal Tissue Responses induced by Exposure to Low Dose Protons

—Stimulation of Cell Death by the Responses—

松本英樹^{*1}、畑下昌範^{*2}

Hideki MATSUMOTO and Masanori HATASHITA

近年、国内外ともに粒子線がん治療施設が増え、粒子線がん治療が急速に普及している。中でも様々な利点から陽子線がん治療施設が急増している。陽子線の生物学的効果比は 1.1 とそれ程大きくはないが、粒子線の特徴であるブラッグ・ピークを有する為優れた線量分布を示す。しかしながら、腫瘍手前の皮膚から腫瘍までの正常組織にブラッグ・ピークの約 30%程度の線量付与がある。

本研究は、陽子線がん治療において陽子線の低線量被ばくを受けた正常組織の応答機構を明らかにし、治療成績向上を目指す陽子線がん治療の最適化に貢献することを目的とした。マウス個体への陽子線および炭素線の全身照射により、小腸および精巣において誘導される TUNEL 陽性細胞(アポトーシス細胞)の分布を比較検討した。その結果、小腸および精巣において、それらの分布が組織幹細胞の位置と非常によく一致し、また小腸では陽子線および炭素線とではそれらの分布が異なることが明らかとなった。

^{*1}福井大学・高エネルギー医学研究センター、^{*2}(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
本研究は、公募型共同研究事業として実施した。

2.1.2.4. その他の粒子線がん治療研究

2.1.2.4.1.

粒子線治療の臨床評価に関する研究 (施設移動にともなう臨床治療の継続性担保についての考察)

Clinical qualification of particle therapy (Continuation of clinical treatment at a hospital transfer)

山本和高*、久米恭*

Kazutaka YAMAMOTO and Kyo KUME

Abstract

Submission rules of articles for results of research activities at WERC are described. All articles should follow the instruction mentioned below. This instruction may be overwritten since it should also have followed the format.

要約

福井県立病院陽子線がん治療センターを新規に立ち上げ、既存の若狭湾エネルギー研究センターから臨床治療機能を移動し、臨床治療を開始した経緯について評価した。また、新施設立ち上げに際して必要となる遮へい設計について、既存の粒子線治療施設の遮へい計算の再評価により、遮へい設計の適正化に関する知見を得た。

I. 緒言

粒子線治療は、イオンビームの特徴的な線量分布を活かすことにより、患者に対して患者の QOL を維持できる低侵襲性を確保したがん治療法として、近年、特に評価が高まりつつある。若狭湾エネルギー研究センター(WERC)においても、陽子線がん治療研究装置(PT)を整備し、平成 14 年度に臨床試験を開始して以来、平成 21 年度まで陽子線がん治療臨床研究を継続して実施し、良好な成績を得ている。

福井県地方特有の要請としては、同地方において高度に集積された原子力技術の利活用により、同地方を原子力関連技術の研究拠点としてより一層の地域振興を図ることがあげられており、その一環として福井県立病院陽子線がん治療センター(FPC)が建設され、平成 23 年 3 月に開院した。FPC 建設の経緯を考慮すると、WERC での臨床治療経験を FPC に移転し、FPC において円滑に患者受け入れ数を増やすことが必須であるといえる。

本テーマにおいては、既存施設(WERC)から新施設(FPC)への臨床機能の円滑な移転について検証した。同時に、既存施設建設に用いた遮へい計算の再評価により、新施設の遮へい設計の適正化に資する方法を検討した。

今回はこれらについて報告する。

II. 既存施設から新施設への円滑な臨床機能の移転方法についての考察

1. 臨床機能移転の方法

既存施設(WERC)から新施設(FPC)への臨床機能移転準備のため、FPC の基本設計時から WERC から 4 名(医師 1 名、研究員 3 名(原子力 1 名、医学物理 2 名))が福井県に併任採用され、福井県庁職員とともに実施設計等に携わった。その後、FPC 固有の職員(医師と医学物理)を採用し、医学物理職員については WERC において研修を実施した。福井県に併任採用された医師は最終的に FPC に異動し、陽子線治療全般を統括することとなった。

2. 臨床機能移転の結果

FPC では平成 23 年 3 月から治療を開始し、主に肺、肝、前立腺、頭頸部を治療対象部位として臨床照射を実施している。これらは WERC において臨床研究を実施したか、あるいは臨床研究プロトコルを策定した部位で

*(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、平成 23 年度厚生労働科学研究費補助金がん臨床研究事業「粒子線治療の有効性、適応、費用対効果に関する総合的研究」による成果の一部である。

ある。開設された平成 23 年 3 月からの 1 年間の目標受け入れ人数(110 名)に達した。これらの事実により、既存施設から新施設への臨床機能の移転は円滑に行われたと判断してよいものと考えられる。

3. 臨床機能移転について考察

粒子線治療新施設の立ち上げに際しては、既存他施設において長期間にわたり研修することが行われるが、本テーマのように近隣の既存施設の知見や機能をそのまま新施設に移転することは稀であり、今後も既存施設の代替として近隣に新施設を建設することはあまり見込めないことから、珍しい例となることも考えられる。ただし基本計画立案段階から粒子線治療担当者が職務として携わることのメリットを示す例ともいえる。

Ⅲ. 既存施設での遮へい計算検討を踏まえた新施設建設遮へい設計の適正化に関する研究

1. 新施設建設遮へい設計の適正化に関する研究の方法

粒子線治療施設の遮へい設計では、安全性・確実性の観点から、過去に使用された実績のある計算手法を採用する場合がある。実際に、FPC の遮へい設計では、WERC において使用実績のある計算手法を採用した。一方で、近年の計算機性能の向上により、より確度の高い計算手法の利用が可能になっている。この手法を使用することで遮へい設計の適正化が期待されるが、安全性・確実性の観点から旧来手法との整合性を把握しておくことが必要となる。

そこで WERC の施設の遮へい計算について、確度の高い計算手法を用いて再評価を行い、旧来手法との比較を行った。

2. 新施設建設遮へい設計の適正化に関する研究結果と考察

旧来手法として、HILO86R 断面積データと多群放射線輸送計算コード ANISN を使用した。この手法は、WERC で使用された遮へい計算手法とほぼ同等である。より確度の高い手法として、JENDL-HE 断面積データとモンテカルロ輸送計算コード MCNPX を使用した。

両者の計算結果を比較すると、特に補助遮へい体に鉄を使用している箇所において差異が見られた。これは、ANISN コードではエネルギー領域ごとに平均化した断面積データを使用しているのに対して、MCNPX コードでは連続エネルギーの断面積データを使用していることに起因していると考えられる。

今後、両手法による遮へい計算結果の差異について詳細な検討を行っていく予定である。

IV. 結論

既存施設から新施設への円滑な臨床機能の移転方法について考察した。新施設建設計画立案時から両施設間において人的交流を十分に図り、また異動や研修を充分に行うことによって円滑な臨床機能の移転をなし得たことを明らかにした。

新施設建設遮へい設計の適正化について検討した。既存の粒子線治療施設の遮へい計算の再評価により、より確度の高い遮へい計算手法に関する知見を得た。

参考文献

- 1) 山本和高、日本海側初の陽子線がん治療を開始 一福井県立病院陽子線がん治療センター、原子力 eye 57(7):7-8, 2011
- 2) 山本和高、公立病院での陽子線治療と採算性 陽子線がん治療センターオープン半年強を踏まえて、新医療 2011 年 12 月号

2.1.2.4.2.

粒子線がん治療に係る人材育成プログラム

The OJT (On the Job Training) program of particle therapy human resource

久米恭^{*1}、山本和高^{*1}、高田卓志^{*1}、長谷川崇^{*1,*2}

Kyo KUME, Kazutaka YAMAMOTO, Takushi TAKATA and Takashi HASEGAWA

Abstract

The OJT (On the Job Training) program of particle therapy human resource has been carried out at The Wakasa Wan Energy Research Center with cooperating research institutes and hospitals. This activity is briefly reported.

要約

若狭湾エネルギー研究センターでは、他の協同機関とともに、粒子線がん治療に係る人材育成プログラム(若狭湾エネルギー研究センターにおける OJT)を実施した。本報では最終年度における成果について報告する。

I. 緒言

若狭湾エネルギー研究センター(WERC)においては、国内の粒子線がん治療関連施設・団体と協同で、「粒子線がん治療に係る人材育成プログラム」に参画し、陽子線治療に携わる医学物理士養成を実施している。本節ではこれについて報告する。

II. 方法

粒子線治療は国内での普及が進んでおり、それに携わる人材の確保が課題となっている。WERC では国内の粒子線がん治療関連施設・団体と協同し、平成19年度から文部科学省から「粒子線がん治療に係わる人材育成プログラム(若狭湾エネルギー研究センターにおける OJT)」を受託している。WERC では医学物理士に対して講義と研修を実施してきた。同プログラムの参加機関は次に記す通りである。

- ・ (財)医用原子力技術研究振興財団
- ・ (独)放射線医学総合研究所重粒子医科学センター
- ・ 国立大学法人 筑波大学陽子線医学利用研究センター
- ・ 国立がん研究センター東病院
- ・ 静岡県立静岡がんセンター
- ・ (財)若狭湾エネルギー研究センター (WERC)
- ・ 兵庫県立粒子線医療センター
- ・ 国立大学法人 大阪大学医学部附属病院

平成 23 年度においては、他参加機関と共同で全機関のプログラム参加者に対する講義を実施するとともに、当事業で蓄積した 2 次元陽子線線量分布の効率的取得法に対する検証試験を実施した。

III. 結果と考察

講義については他参加機関との共同により、計画した内容すべてを参加者が受講した。この結果、WERC で研修を受けた参加者のうち一名が医学物理士として認定された。これにより福井県立病院における陽子線治療の円滑な実施に寄与した。また同時に大阪大学核物理センターのリングサイクロトロン(200 MeV)陽子線を用い、2 次元陽子線線量分布を効率的に取得し、WERC で蓄積した 2 次元陽子線線量分布取得法の検証とした。

IV. まとめ

粒子線医療に係る人材育成の一環として医学物理士の養成にとりくみ、平成 22 年度に引き続き医学物理士一名の認定を受けるなど、福井県立病院での陽子線治療の実施継続に寄与するとともに、当該事業で蓄積した陽子線線量分布の効率的取得法の検証も実施した。

^{*1}(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}ハセテック

本事業は文部科学省の科学技術人材養成等委託事業による委託業務として、(財)若狭湾エネルギー研究センターが実施した平成 23 年度「粒子線がん治療に係る人材育成プログラム(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における OJT)」の成果の一部である。

2.1.2.4.3.

医療用低放射化コンクリートの評価研究

Performance Evaluation of Low-Activation Concrete for Medical Facility

高田卓志*1、木村健一*2、久米恭*1

Takushi TAKATA, Ken-ichi KIMURA and Kyo KUME

高エネルギー加速器を使用する粒子線治療施設では、粒子線が構造物等を衝撃することにより、中性子が発生するため、重厚なコンクリート遮へいが使用されている。コンクリート遮へいを構成する元素の同位体の中には、中性子との核反応により長寿命の放射性同位体となるものもあり、医療従事者の被爆の原因となり、また、施設廃止時の放射性廃棄物が問題となることが予想される。

これまで、複数種の低放射化コンクリートについて、コンクリート壁中での中性子束分布の測定を行ってきた。その中で、コンクリート内で熱化された中性子が壁の内側方向に反射していることを確認しており、この反射熱中性子がコンクリート等の構造物の更なる放射化の原因となっていることが示唆された。そこで、反射熱中性子の低減のため、コンクリート壁の内側に塗布する塗料に中性子吸収材を含有させる方法について検討を開始した。

中性子吸収塗料として、エポキシ樹脂に炭化ホウ素を含有させたものを使用し、Am-Be 線源からの中性子を用いて、中性子吸収性能について基礎的な試験を行っている。Am-Be 線源はポリエチレン遮へい体の中に保管されており、遮へい体中心部の空洞では、ポリエチレンで熱化された中性子の割合が多くなっている。この空洞に中性子吸収塗料を板状に固化させ積層したサンプルを挿入し、金箔の放射化法を用いて熱中性子の減衰率を測定している。サンプル表面から塗料を 1mm 通過すると、金の放射化量が 1/4 に減少し、熱中性子が吸収されていることが確認できた。

今後は、実験と同時に計算評価を実施し、実際の施設を模擬した体系で、どの程度の厚さの塗料が必要になるかを概算し、中性子吸収塗料の実用性を評価する予定である。

*1(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 協力研究員

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.

ヘリウムビーム入射による窒素弾性反跳断面積の測定

Measurements of nitrogen elastic recoil cross sections for He beam incidence

安田啓介*1、土田秀次*2、間嶋拓也*2

Keisuke YASUDA, Hidetsugu TSUCHIDA and Takuya MAJIMA

Abstract

Measurements of nitrogen recoil cross sections for TOF-ERDA using He beams have been performed in the energy range between 4.3 MeV and 5.5 MeV at the recoil angle of 40 degree. The theoretical calculation cannot reproduce the present results.

要約

ヘリウムビームを用いた TOF-ERDA による窒素定量測定に必要な反跳断面積の測定を行った。入射ヘリウムエネルギーが 4.3~5.5 MeV の範囲で反跳角 40° における反跳断面積を測定した。理論計算コードによって得られた断面積との比較を行い、理論計算は実験データを再現できないことを明らかにした。

I. 緒言

飛行時間測定弾性反跳粒子検出(TOF-ERDA)法はイオンビーム分析手法の一つで、水素から酸素程度までの軽元素を同時に測定することができる。我々は数 MeV のヘリウムビームを用いた TOF-ERDA 法による軽元素分析法の開発を行っている。TOF-ERDA 測定で元素濃度の定量分析を行うには反跳断面積のデータが必要となる。He と軽元素の反跳断面積は核力の影響を受けるため、ラザフォード散乱断面積からずれることが知られており、実験によって求める必要がある。我々は 2~5 MeV のエネルギー領域において He と Li から O までの元素の反跳断面積の系統的な測定を行っている。本講演では He を N に衝撃させた際の反跳断面積の測定について報告する。

II. 実験

実験は京都大学大学院工学研究科付属量子理工学教育研究センターの 2MV ペレトロンタンデム加速器を用いて行われた。4.3~5.5 MeV の ^4He ビームを、金をコートした厚さが 50nm の窒化シリコン薄膜に照射し、83.6° と 165° に散乱された ^4He イオンをシリコン半導体検出器で検出した。 ^4He の散乱角 83.6° は ^{14}N の反跳角が 40° に相当する。実験では ^4He が ^{14}N によって 83.6° に散乱された時の散乱断面積を測定し、これから運動学的計算によって反跳角 40° での反跳断面積を求めた。また、散乱角 165° の測定はヘリウムビームによる窒素後方散乱測定のための断面積データ取得を目的として行った。

III. 結果と考察

図 1 に 83.6° に設置した検出器による測定で得られたエネルギースペクトルを示す。 ^4He イオンの ^{197}Au 、 ^{28}Si 、 ^{14}N による弾性散乱イベントが S/N 良く測定できていることがわかる。 ^{14}N と ^{197}Au の弾性散乱イベントの数から、ラザフォード散乱で規格化された断面積は以下の式で求められる。

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_{N,Ruth}} = \frac{\sigma_{Au,Ruth}}{\sigma_{N,Ruth}} \frac{\sigma_N}{\sigma_{Au,Ruth}} = \frac{\sigma_{Au,Ruth}}{\sigma_{N,Ruth}} \frac{\sigma_N}{\sigma_{Au}} \quad \text{ここで、}\sigma_X \text{ は元素 X の散乱断面積、}\sigma_{X,Ruth} \text{ は元素 X のラザフォード断面積、}Y_X \text{ は X の弾性散乱収量、}N_X \text{ はターゲット中の X の面密度をそれぞれ示す。また、このエネルギー領域では }^{197}\text{Au} \text{ の断面積はラザフォード断面積に等しいことを用いている。}$$

$$= \frac{\sigma_{Au,Ruth}}{\sigma_{N,Ruth}} \frac{Y_N}{Y_{Au}} \frac{N_{Au}}{N_N}$$

*1(財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*2京都大学大学院・工学研究科

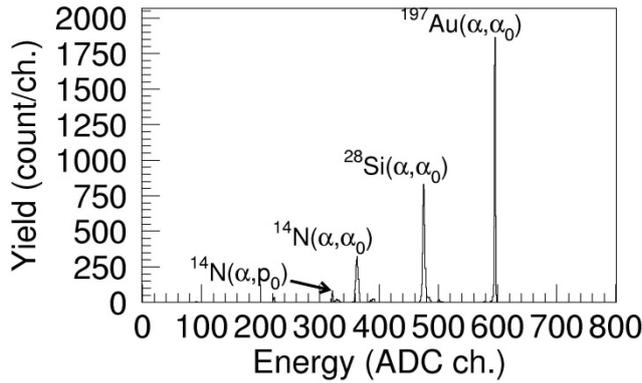


図1 散乱角 83.6° 、入射エネルギー 5.238MeV の測定で得られたエネルギースペクトル

$N_{\text{Au}}/N_{\text{N}}$ は 2MeV のヘリウムビームを用いたラザフォード後方散乱 (RBS) 測定によって求めた。反跳断面積は以下の運動学的計算で求められる。

$$\sigma_{\text{recoil},N}(\phi) = 4 \cos(\phi) \frac{\sin^2 \theta \cos(\theta_{\text{CM}} - \theta)}{\sin^2 \theta_{\text{CM}}} \sigma_N(\theta)$$

$$\frac{\sigma_{\text{recoil},N}}{\sigma_{\text{recoil},N,\text{Ruth}}}(\phi) = \frac{\sigma_N}{\sigma_{N,\text{Ruth}}}(\theta)$$

ここで、 $\sigma_{\text{recoil},N}$ は窒素の反跳断面積、 $\sigma_{\text{recoil},N,\text{Ruth}}$ は窒素のラザフォード反跳断面積、 θ は実験室系での散乱角、 θ_{CM} は質量中心系での散乱角、 ϕ は実験室系での反跳角をそれぞれ表す。

図2、図3に測定で得られた反跳角 40° の反跳断面積および散乱角 165° の散乱断面積をそれぞれ示す。ここで、断面積はラザフォード断面積で規格化したもの、すなわちラザフォード断面積との比として示してある。実験データは理論計算 (SigmaCalc¹⁾) との比較を行った。また、散乱角 165° の断面積データは過去の実験データ²⁾ との比較も行った。測定で得られた散乱角 165° の散乱断面積は過去のデータとよく一致した。また、SigmaCalc コードによる理論計算は実験データをよく再現することがわかった。これに対し、反跳角 40° の反跳断面積については SigmaCalc コードによる理論計算は実験データを再現しない。このことから反跳断面積については SigmaCalc コードの精度は低く、TOF-ERDA による窒素定量測定には反跳断面積の実験データが必要であることがわかった。

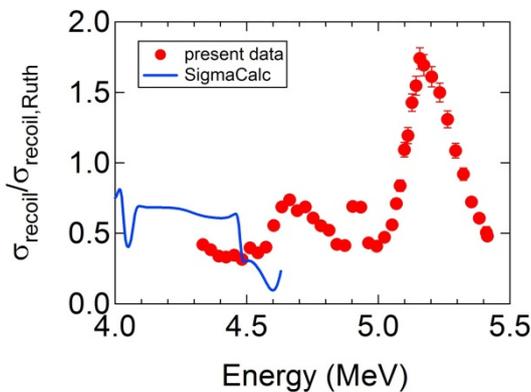


図2 反跳角 40° における $^4\text{He}+^{14}\text{N}$ 反跳断面積。赤丸は実験データ、青線は SigmaCalc コードによる計算結果を示す。

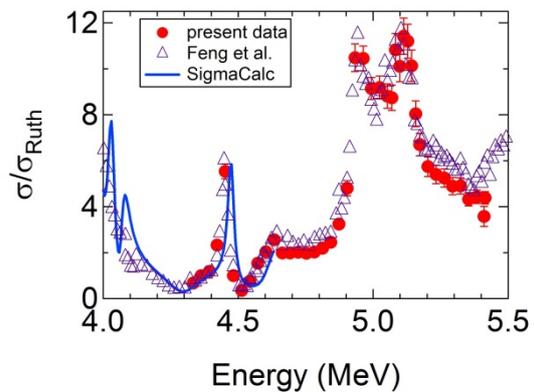


図3 散乱角 165° における $^4\text{He}+^{14}\text{N}$ 弾性散乱断面積。赤丸は実験データ、三角は Feng らによる測定データ²⁾、青線は SigmaCalc コードによる計算結果をそれぞれ示す。

IV. 謝辞

本研究は科学研究費補助金 (基盤研究 (C) 22560835) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) <http://www-nds.iaea.org/sigmacalc/>
- 2) Feng Ye, Zhou Zhuying et al., Nucl. Instr. and Meth. B94 (1993), 11.

2.1.3.1.2.

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*

Keisuke YASUDA

Abstract

A transmission type of ion detector has been added in the TOF-RBS measurement system. Time resolution for time-of-flight measurements was improved from 2.4 ns to 0.61 ns.

要約

重イオン TOF-RBS 測定系に透過型検出器を1台追加した。これによって飛行時間測定の世界分解能が従来の 2.4 ns から 0.61 ns に向上した。

I. 緒言

近年、半導体デバイスやハードディスク記憶装置において厚さが数 nm の極薄膜が使用されるようになってきており、このような極薄膜の元素分析を行うことができる手法が求められている。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 法の開発を行っている。従来の RBS 法では主にエネルギーが数 MeV のヘリウムビームを用いて、散乱イオンを半導体検出器を用いて検出する。従来法での深さ分解能は5~20nm程度、測定感度は0.001~10at%程度である。これに対して重イオン RBS 法では入射ビームに炭素イオン等の重イオンを用い、散乱イオンに対してイオン透過型検出器を用いた飛行時間測定を行う。深さ分解能が 1nm 程度、測定感度についても従来法より 1~2 桁の向上を目指している。平成23年度は飛行時間測定の世界分解能向上を目指して測定系にイオン透過型検出器を追加した。また、チェックソースを用いた性能評価試験も実施したので、これらについて報告する。

II. 測定系

図1に測定系の概略図を示す。新たに後方透過型検出器を製作した。また、これを設置するチェンバーを新たに製作した。後方透過型検出器の有感領域、すなわち炭素フォイルホルダーの開口を 10 mm φとした。また、炭素フォイルは面密度が $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ のものを用いた。

III. 性能評価試験と結果

改良した重イオン RBS 計測系を用いた測定試験を実施した。試験には 5.486 MeV の α 粒子を放出する ^{241}Am 線源を使用し、線源からの α 線を直接測定することによって2台の透過型検出器を用いた飛行時間測定の世界分解能の測定を行った。得られた飛行時間スペクトルを図2に示す。また、後方透過型検出器を取り外して前方透過型検出器とシリコン半導体検出器(SSD)を用いた飛行時間測定の世界分解能の測定も行い、結果の比較を行った。2台の透過型検出器による飛行時間測定の世界分解能は 0.61 ns で、前方透過型検出器とシリコン半導体検出器(SSD)を用いた飛行時間測定の世界分解能は 2.4 ns だった。これは、後方透過型検出器を追加したことによって世界分解能が 4 倍ほど改善されたことを示している。

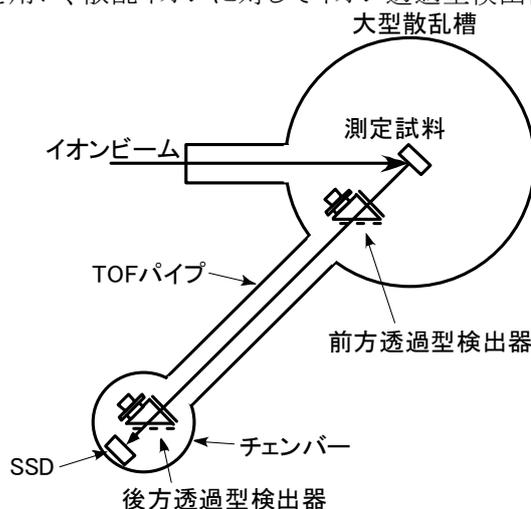


図1 測定系の概略図

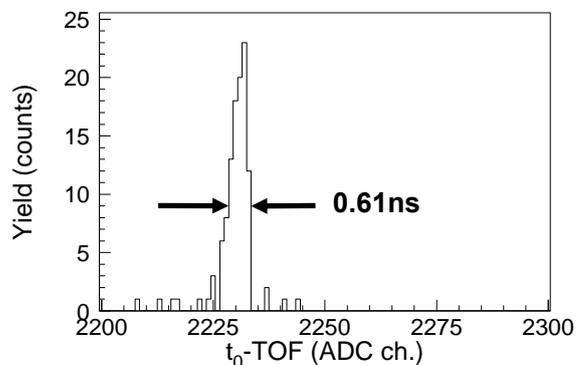


図2 2台の透過型検出器を用いて測定された飛行時間スペクトル

*(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、(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、北陸電力株式会社からの受託研究として実施した。

2.1.3.1.3.

組成分析と画像撮影機能を持つ可搬型 X 線分析装置の開発

Development of Portable X-ray Fluorescence Spectrometer with Radiography Function

安田啓介*1、チュルーンバートル・バトチュルーン*1、川越光洋*2

Keisuke YASUDA, Batchuluun CHULUUNBAATAR and Mitsuhiro KAWAGOSHI

Abstract

Modifications of the case of the portable X-ray analysis device and tests of quantitative analysis of X-ray fluorescence (XRF) measurements have been performed. The thickness of a part of the case for X-ray shield has been changed from 2 mm to 4 mm for preventing the X-ray leakage at the X-ray tube voltage of 40 kV. In the tests of quantitative analysis of XRF measurements, measured values agreed well with the certified values for the SUS304 sample, however discrepancy between measured and certified values was seen for Cu standard sample.

要約

可搬型X線分析装置開発において X 線遮蔽用ケースの改良、蛍光 X 線分析による定量分析試験を行った。X 線遮蔽用ケースはX線発生器の最大管電圧である 40kV でも漏えいがないよう、一部の厚さを 2 mm から 4 mm に変更した。定量分析試験では、SUS304 については測定値は標準値とよく一致したが、銅標準試料測定では測定値と標準値の間に違いが見られた。

I. 緒言

X 線を用いた材料分析は測定対象を破壊せずに内部の様子や組成を測定することができ、考古学的な資料や埋蔵遺物の科学的な分析に威力を発揮する。本研究では小型で持ち運びができ、電池駆動も可能なポータブル X 線分析装置を開発した。

II. 開発実験

平成22年度に製作した試作機は、遮蔽の関係から管電圧が 35kV に制限されていた。この制限を解除しX線発生器の最大管電圧である 40kV でも測定を行えるようにするために、X 線遮蔽用ケースの改良を行った。平成22年度の試験から、管電圧が 40kV の時はステンレスの厚さが 4mm であればX線を遮蔽できることが分かっている。しかし、ケース全体を厚さが 4mm のステンレスに置き換えると重量がおおよそ 40kg となってしまう、可搬性に問題が生じる。そこで、X線発生器からのX線が直接当たる部分のみのステンレスの厚さを 4mm としたケースを製作した。このときの装置の重量は 14kg で、可搬性には問題ない。

本測定装置の安全性を確認するために、動作時の漏えいX線の測定を行った。X線発生器を動作させ、ガイガーチューブ計数管を用いて装置の周りでX線計数率の測定を行ったところ、すべての測定でX線計数率はバックグラウンドを超えることはなかった。このことから、装置の改良によってX線発生器の最大管電圧動作時でも漏えいX線の計数率は測定下限以下に抑えられたことが分かった。

蛍光X線測定で定量分析を行うために解析ソフトウェア (Amptek XRS-FP) を導入した。このソフトウェアは FP(Fundamental Parameter)法を用いて元素濃度を求める。本測定装置を用いた定量分析の精度を確認するために、組成が既知である標準試料を測定して定量し、標準値との比較を行った。試料には炭素鋼、ステンレス鋼 (SUS304) および銅の標準試料を用いた。ステンレス鋼の測定結果を図 1 に示す。SUS304 および炭素鋼標準試料については、測定装置で得られた定量値は標準値とよく一致した。これに対して銅標準試料測定では本装置での測定値と標準値の間に最大で 170%程度の違いが見られた。

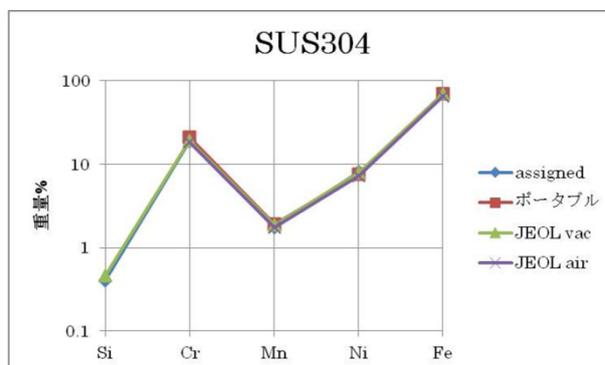


図1 SUS304 標準試料の定量結果。青は標準値、赤は試作した分析装置での定量値、緑と紫は市販蛍光X線分析装置を用いた真空中および大気中測定での定量値、をそれぞれ示す。

*1(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福井県立一乗谷朝倉氏遺跡資料館
本研究は、福井県立一乗谷朝倉氏遺跡資料館との公募型共同研究として実施した。

2.1.3.1.4.

大電流イオン照射した Ni ナノ結晶の欠陥蓄積におけるイオンフラックス依存性

Flux dependence of defect accumulation in nanocrystalline Ni irradiated by high-current He ions

土田秀次*1、チウルーンバトール・バトチウルーン*2、安田啓介*2

Hidetsugu TSUCHIDA, Batchuluun CHULUUNBAATAR and Keisuke YASUDA

Abstract

Ion implantations to nanocrystalline Ni samples with 190 keV He ions were performed at different fluxes under the constant fluence. Positron annihilation Doppler broadening measurements were carried out as a function of the sample depth. For unirradiated samples, we found that positron diffusion length was almost the same as the nanocrystal grain sizes. We also found that the diffusion length was about two times larger than the grain size for the sample irradiated at the high flux of 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. The latter result suggests that the fine structure of crystal interface changes, as a result, positrons can diffuse between the grain boundaries.

要約

ニッケルナノ結晶材料に対し、イオンフルエンス一定の条件下で異なるイオンフラックスでの 190 keV の He⁺イオン注入を行った。照射した試料の試料深さ毎の陽電子消滅ドップラー拡がりの測定を行った。陽電子拡散モデルを用いた解析から、未照射試料では陽電子拡散長はナノ結晶の粒径サイズとほぼ一致したのに対し、イオンフラックスが 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ のとき陽電子拡散長は結晶粒径の約 2 倍になった。この結果は、ナノ結晶界面の微細構造に変化が生じたことを意味しており、陽電子が粒界構造の変化により複数の粒界を拡散できることを示唆している。

I. 緒言

ナノ結晶材料は、多くの結晶粒界を有し、それが照射欠陥のシンクとしてはたらくため、照射損傷に対して耐性を示す材料として知られている。最近、米国 Los Alamos 国立研究所の研究者によって、ナノ結晶材料の照射損傷低減に繋がる新たな機構が計算機シミュレーションによって提案された¹⁾。これによると、ナノ結晶の粒界面において、照射欠陥の自己修復が効率よく起こる機構があり、これが照射欠陥の低減に寄与すると述べられている。他方、実験的研究において、ナノ結晶材料が照射損傷耐性に優れた材料である多くの結果が得られているが、この要因の解明には至っていないのが現状である。本研究では、高い照射損傷速度でナノ結晶材料に欠陥を導入した場合、それがナノ結晶の照射損傷耐性にどう影響を与えるかを調べた。具体的には、ナノ結晶の金属試料に大電流のイオンビームを照射することで、ある結晶粒の周辺に発生した照射欠陥同士に、ある時間内でオーバーラップ現象を起こさせた場合、照射欠陥の成長や蓄積がイオンフラックスに依存するか否かを調べる。実験では、イオンフルエンス一定の条件下で、異なるイオンフラックスで照射した Ni ナノ結晶に対して陽電子解析を行い、照射欠陥および結晶粒界近傍の微細構造を調べた。

II. 実験

用いたナノ結晶試料は、Goodfellow 社の Ni (厚さ: 10 μm) で、電子顕微鏡観察によって調べた平均粒径は約 30~50 nm であった。イオン照射実験は、若狭湾エネルギー研究センターの 200 kV 大電流イオン注入装置からの 190 keV の He⁺イオンを使って行った。照射条件は、フルエンスが約 2×10^{16} ions/cm² に到達するまで、以下 3 種類のフラックス (2, 10, 100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) を用いて行った。ビーム電流の揺らぎが無いように加速器のパラメータを注意深く調整し、照射中常にビーム電流の変動をモニターした。更に、照射領域におけるビーム強度の均一性を、カプトン膜におけるビームの焼き付けの濃淡によって確認した。また、照射中の試料温度は試料表面に取り付けた熱電対を使って測定し、試料温度は粒成長温度以下であった。本実験では、比較のため、結晶粒径を数 μm に成長させた試料に対しても同様の実験を行った。この試料はナノ結晶試料を約 800°C で 1 時間熱処理し作製した。

*1 京都大学大学院・工学研究科、*2 (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

III. 結果と考察

図 1 は、エネルギー可変の陽電子ビームを使って、試料深さ毎の陽電子消滅ドップラー拡がり測定した結果である。縦軸は S パラメータ、横軸は入射陽電子のエネルギー(試料深さに対応)である。S パラメータは試料表面近傍で高い値を示し、試料深さが増すに従い小さくなる。これは、陽電子の拡散に関係しており、試料に打ち込まれた陽電子は、拡散過程を経てトラップ場所(空孔、界面や表面など)を探索することに起因している。得られた結果を、陽電子拡散モデル²⁾を使って解析すると、陽電子拡散長(L)が得られる。図 1 には拡散長(L)の fitting 結果も示している。未照射試料では(図 1 の(a))、 $L=30 \pm 5 \text{ nm}$ であり、この結果は、ナノ結晶の粒径サイズ(電子顕微鏡観察から得られた結果)とほぼ一致している。照射試料した試料では(図 1 の(b)~(d))、イオンフラックスが $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ のとき、明らかに陽電子拡散長が増加しており、結晶粒径の約 2 倍になっている。この結果は、ナノ結晶界面の微細構造に変化が生じたことを意味しており、陽電子が粒界構造の変化により複数の粒界を拡散できることを示唆している。本実験により、ナノ結晶の粒界構造は、イオンフラックスに依存して変化することが初めて明らかとなった。この要因の一つとして、照射した He 原子の界面蓄積が考えられる。現在、これを解明するため、昇温脱離法(TDS 法)を用いた解析から粒界構造の同定を行っている。

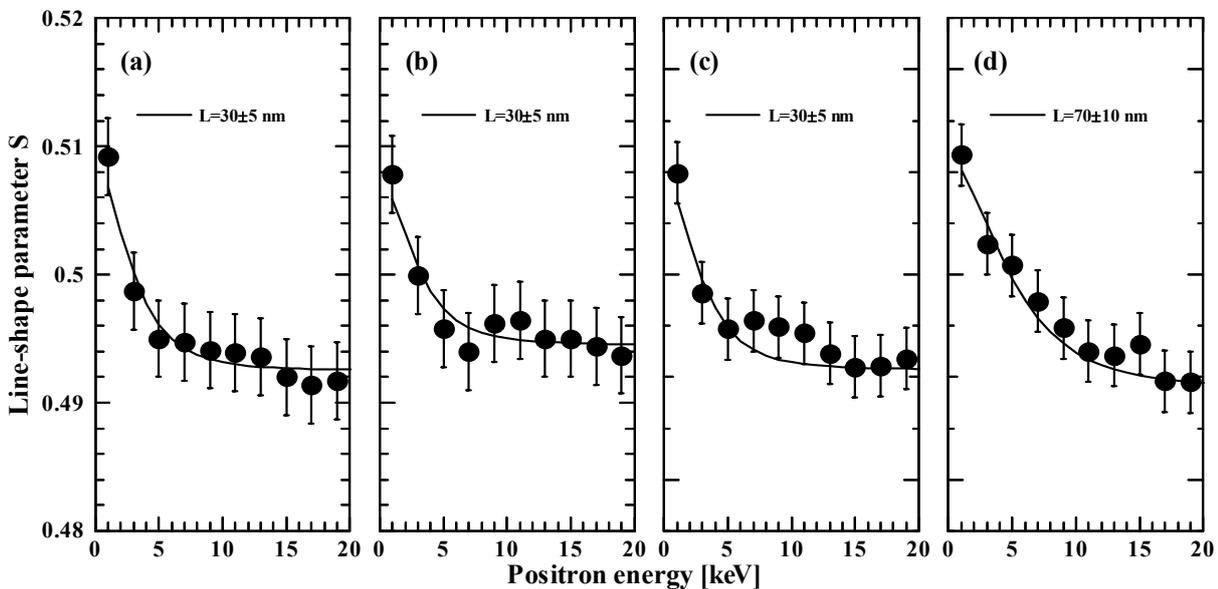


図 1 S パラメータの陽電子エネルギー依存性、線は陽電子拡散モデルによる fitting, (a)未照射, (b)フラックス $2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, (c) $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, (d) $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

謝辞 本研究は東京大学工学研究科の岩井岳夫博士の協力の下で行ったものです。ここに感謝致します。

参考文献

- 1) X.M.Bai et al.: Science, 327, 1631-1634 (2010)
- 2) T.Britton et al.: Phil. Mag. Lett., 57, 165-169 (1988)

2.1.3.2. 材料照射損傷評価技術開発

2.1.3.2.1.

加速器を用いた原子炉構造材評価(原子炉構造材料劣化評価)

Estimation of Nuclear Reactor Structure Material by Using Accelerators

(Degradation Estimation of Nuclear Reactor Structure Material)

石神龍哉^{*1}、チュルーンバートル バトチュルーン^{*1}、大谷暢夫^{*2}、福元謙一^{*3}

Ryoya ISHIGAMI, Chuluunbaatar BATCHULUUN, Nobuo OHTANI and Ken-ichi FUKUMOTO

Abstract

Surfaces of stainless steel irradiated with ions instead of neutrons were indented by a nanoindenter, and the periphery of the indentation was observed by TEM. The nature of dislocation formed by the indenter and the effect of the irradiation was investigated.

要約

中性子照射の代わりにイオン照射により損傷を与えられたステンレス鋼試料の表面を押し込み硬さ試験機で変形し、その圧痕周辺を TEM 観察して押し込みにより生じた転位の性状と損傷による影響を調べた。

I. 緒言

原子炉内構造物のステンレス鋼は中性子照射によって性質が大きく変化しており、高温の水にさらされる環境中で応力や歪が付加されると応力腐食割れが促進される。この現象が照射誘起応力腐食割れであり、軽水炉の高経年化において考慮しなければならない最も重要な材料劣化現象の一つである。

本研究では、中性子に代わり加速器により発生したイオンビームを利用した原子炉材料の損傷現象を解明する手法の開発、およびイオンビームを用いることの妥当性の評価を行った。

II. 実験方法及び結果

1. 超微小試験と電子顕微鏡観察

イオンビーム照射では中性子照射と異なり、イオンの飛程程度の深さにまでしか損傷を与えることができない。そこで、欠陥組織が導入された表層のみを微小硬さ試験機と透過型電子顕微鏡を用いて分析する手法を開発することを目的とした。真空中で 2 時間、1050℃で焼鈍した SUS316 試料の表面を研磨し、190 keV の H イオンを照射した。照射時の試料の温度は 300℃または 500℃とした。表面から 150 nm の深さにおける dpa (displacement per atom)が 0.01、0.05、0.1 となるように照射量を調整した。すべり面およびすべり方向を考慮して押し込み硬さ試験機のダイヤモンド圧子を押し込み、圧痕周辺を透過型電子顕微鏡で観察した。その結果、押し込みによって生じたすべりはほとんどが刃状転位であること、イオン照射によって生じた欠陥集合体によって転位運動が阻害され 2 次、3 次のすべり系が観察される場合とこの欠陥集合体を超えて運動している転位が観察される場合があること、圧痕からの方向によって優先的に発生する転位の性状が異なることが分かった。

2. 水素イオン照射の妥当性の評価

材料に損傷を与えるために照射された H イオンは水素原子の原子核であり、元々材料に含まれていない成分である。そのため照射後にそのまま材料中に残留した場合、材料の機械的性質とその評価測定に影響を及ぼす可能性がある。水素原子は鉄鋼材系の媒質中では容易に移動することが分かっているが、確かめた例は少ない。22 年度には、表面垂直から 70° の方向から 50 keV の H₂⁺イオンを注入した SUS304 中の残留水素量を弾性反跳粒子検出法で測定し、検出限界以下であることを確認した¹⁾。23 年度には、その実験方法と注入量が妥当であることを確かめるため、SUS304 板、Ni 板、Ti 板、Zr 板、および Si 板上に成膜された Ti 膜および Zr 膜に 22 年度と同じ方向とエネルギーで H₂⁺イオンを注入し、弾性反跳粒子検出法で残留水素量を測定した。その結果、SUS304 および Ni 中の水素量は検出限界以下であったが、Ti および Zr に注入された水素はほぼ全て残留していることが分かった。このことから、水素の残留の確認方法が妥当であることが確かめられた。

参考文献 1) 石神龍哉他、若狭湾エネルギー研究センター年報平成 22 年度:13, 56 (2010)

^{*1}(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}協力研究員、^{*3}福井大学・附属国際原子力工学研究所
本研究は、(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。

2.1.3.2.2.

原子炉燃料模擬物質の照射損傷評価法の開発

Development of radiation damage characterization method for nuclear fuel simulation materials

笹瀬雅人^{*1}、石川法人^{*2}

Masato SASASE and Norito ISHIKAWA

本研究は、高エネルギー粒子を照射することによって原子力燃料模擬セラミックス中に形成される損傷量および損傷寸法の定量化、および高照射量領域での複雑な損傷の組織観察を系統的に行うことにより、燃料体の損傷評価法を構築することを目的とする。

具体的には、 UO_2 と同じ結晶構造をもつ酸化物セラミックス(CeO_2)等に、高エネルギー粒子を照射することによって損傷が形成する挙動を電子顕微鏡により直接観察する。高照射量領域での損傷評価を行うことで、損傷同士のオーバーラップによる効果を定量化し損傷評価法の構築に役立てる。簡単な物質系での損傷との比較を行うために純シリコン中での照射損傷についても同様の実験を行う。

燃料模擬物質 CeO_2 のセラミックス薄膜(厚さ約 $0.3 \mu\text{m}$)に対して、日本原子力研究開発機構東海研究開発センターの 20 MV タンデム加速器から供給される高エネルギー重イオン(200MeV Au, Xe, Ni イオン)を高照射量レベルの 1×10^{13} ions/cm² 前後の照射量まで照射した。若狭湾エネルギー研究センターにおいて、照射後試料の損傷状態を評価するために必要な試料微細化加工の最適条件を明らかにした。さらに、透過型電子顕微鏡を用いて、照射損傷状態、特に高エネルギーイオン照射時に特有な損傷(イオントラック)を評価した。

その結果、燃料模擬物質 CeO_2 中での、電子的阻止能(イオンからターゲット中の電子への伝達エネルギー密度)とイオントラック寸法との相関が明らかとなった。また、形成したイオントラックは、その内部が非晶質にならないこと、また、その断面は結晶歪を伴う四角い形状を示すことが、高分解能透過型電子顕微鏡(HRTEM)観察により初めて明らかとなった。H24年度には、その相関についての定量的な評価を行い、損傷評価法を構築する。また、従来観察例のない四角柱形状のイオントラックの形成メカニズムを検討する。

^{*1}(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}(独)日本原子力研究開発機構
本研究は、(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と共同で実施した研究の一部である。

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*、栗田哲郎*、林豊*、山田裕章*、島田麻亜久*、小田桐哲也*、山口文良*、
淀瀬雅夫*、長崎真也*、香川弘成*、山田和彦*、山本久雄*、峰原英介*、福本貞義*Satoshi HATORI, Tetsuro KURITA, Yutaka HAYASHI, Hiroaki YAMADA, Mark SHIMADA,
Tetsuya ODAGIRI, Fumiyoshi YAMAGUCHI, Masao YODOSE, Shin'ya NAGASAKI, Hiroshige KAGAWA,
Kazuhiko YAMADA, Hisao YAMAMOTO, Eisuke J. MINEHARA and Sadayoshi FUKUMOTOAbstract

We replaced whole the insulation column system and refurbished the all the accelerating tube of the tandem accelerator 11 years after the installation. In these proceedings, it is described how the machine was rebuilt.

要約

若狭湾エネルギー研究センター加速器施設のタンデム加速器は設置開始から 11 年を経て絶縁コラムの交換や加速管の修理を行った。以下に修理状況について述べる。

I. 緒言

若狭湾エネルギー研究センター加速器施設は 5 MV タンデム加速器、200 MeV シンクロトロンを中心とし、それらのビームを利用する各種ビームラインからなる。タンデム加速器は、施設でビーム利用実験を行う際には必ず運転される。高電位差を加速に用いるこのタイプの加速器は、ビーム利用以外にも加速高電圧の維持のための運転（コンディショニング）を行う必要があり、2007 年度には発電時間は 4540 時間に達した。しかし、その後は高圧ターミナルや加速管を支える絶縁構造物（絶縁コラム）の内部、表面に絶縁性能の劣化が認められるようになり、電圧上限を 80% に設ける運転や、マシンを停止しての内部の点検・修理を余儀なくされた。絶縁性能を回復させる目的で 2010 年度に絶縁コラムの総取り替えを行った。2011 年度には総取り替え作業後のコラムの取り付け再確認、調整、発電システムの点検などを行う必要があったが、その工程途中で加速管が破損した。加速管の修理を行ったため、2011 年度のビーム利用は中止し、通常行えない整備を行った。

II. 絶縁コラムの耐高電圧絶縁性能

絶縁コラムは、PET 樹脂を主原料にガラス繊維、無機フィラーを充填複合し、押し出し形成の後、加熱積層プレスした板材料¹⁾、ユニレート®（ユニチカ製）を用いて製作されている。多年の荷重負荷によるものと考えられる剥離性損傷が絶縁破壊を引き起こしている。表面の沿面放電痕も、絶縁性能の劣化の原因である。多段倍電圧整流回路が組み込まれる高エネルギー側での絶縁不良は発電機構の損傷を引き起こした。そこで、絶縁コラムをすべて取り替えることで絶縁性能の回復を試みた。コラムのみの昇圧試験では耐電圧性能 5.5 MV 以上を確認し、5 MV の定格運転も可能となることがわかった。旧品コラムはすべて超音波探傷による非破壊検査を行った。内部に剥離性損傷のあるコラムがみつきり、全数交換と言う予防措置の正しさを確信した。

III. 加速管の修理

タンデム加速器により加速されるビームは 4 本の加速管の中を搬送される。1 本の加速管は 80 組の皿状のチタン製電極とパイレックス製絶縁リングを熱可塑性樹脂系接着剤で接合して製作する。4 本全てで接着面の完全剥離・脱落が起こった。すべて、製造元の High Voltage Engineering Europe 社において、再生を完了した。2012 年度に加速器システムに組み込みコンディショニングを行った後、加速試験を行う予定である。

IV. その他の整備と今後

タンデム加速器に関しては入出射ビームラインの真空系の点検と光学機器の再アラインメントを実施した。システムの再構築と加速試験を行い、2012 年には、照射実験にビーム供給を再開する。

参考文献 1) <http://www.unitika.co.jp/plastics/unilate/index.html>

*1 (財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・加速器グループ

加速器整備は、(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として実施した。

2.1.3.3.2.

シンクロトロン入出射ビームライン真空度の改善

Improvements of Vacuum of Injection/Extraction Beam Lines at W-MAST Synchrotron

栗田哲郎*、羽鳥聡*、林豊*、香川弘成*、長崎真也*、小田桐哲也*、島田麻亜久*

山田裕章*、山口文良*、淀瀬雅夫*、山田和彦*

Tetsuro KURITA, Satoshi HATORI, Yutaka HAYASHI, Hironari KAGAWA, Shinya NAGASAKI

Tetsuya ODAGIRI, Mark SHIMADA, Hiroaki YAMADA, Fumiyoshi YAMAGUCHI

Masao YODOSE and Kazuhiko YAMADA

Abstract

In order to improve vacuum of the synchrotron in WERC, vacuum of injection and extraction beam lines are improved. The details are described in this report.

要約

若狭湾エネルギー研究センター加速器施設のシンクロトロンの真空度を向上させるため、接続されているビームラインの真空度を向上させる対策を行った。その結果を報告する。

I. 緒言

若狭湾エネルギー研究センター加速器施設のシンクロトロンのカーボンビームの加速効率は、真空度に大きく制限されていた。2009 年度には2台のイオンポンプ(140 L/s)をクライオポンプ(1400 L/s)への置換、入出射部のチャンバーの O-ring の材質をニトリルゴムから耐放射線性パイドンに変更、ベーキングを行った¹⁾。2010 年度にはイオンポンプの更新が行われ、排気量が 140 L/s から 220 L/s に増強された²⁾。これによって、平均真空度が 7.5×10^{-7} Pa まで向上した。また、20 MeV 入射時のカーボンビームの加速効率が 8% から 39% に向上した。

実際にビームを輸送する際にビームラインに接続すると、ビームラインの真空度の影響を受け、シンクロトロンの真空度は 1.3×10^{-6} Pa まで真空度が悪化する。シンクロトン本体だけでなく、接続されるビームラインの真空度も向上させる必要がある。

II. 入出射ビームラインの真空度対策

シンクロトロンの入出射ラインの真空度の向上を図るべく以下の対策を行った。

- ・超高真空計の設置
- ・包括的なリークチェックおよびリーク箇所の修繕
- ・ビームラインダクトのメタルシール化

ビームラインダクトのフランジには O-ring シールの ISO-KF フランジが使われていた。このフランジの O-ring を独自の締結具を開発し、EVAC 社のアルミエッジシールに交換した。これにより、入射ラインの真空度が 2.7×10^{-4} Pa から、 2.1×10^{-5} Pa まで向上した。出射ラインについては、三台設置されているプロファイルモニタすべてに真空リークが発見された。設置場所および部材調達の都合で、2011 年度の整備期間内には完全にリークを修繕することができなかった。このため、出射ラインの真空度は 3.5×10^{-4} Pa にとどまっている。図 1 に入出射ビームラインのゲートバルブを開閉させた時の、シンクロトロンの入出射部の真空度の変化を示す。入射部のゲートバルブを開いても、シンクロトロンの真空度はほぼ変化しないが、出射部のゲートバルブを開くとシンクロトロンの真空度に影響する。次回の整備期間中に、プロファイルモニタのリーク対策を行うことを予定している。

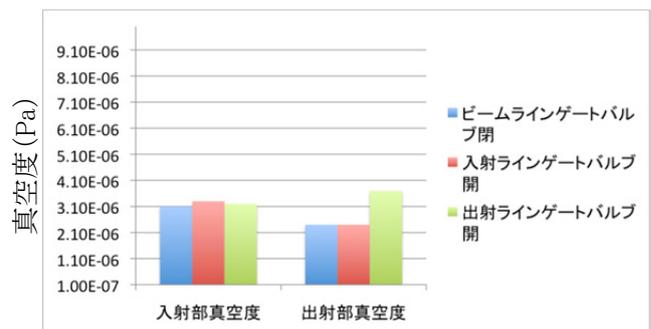


図 1 入出射ビームラインのゲートバルブを開閉したときの真空度の変化

- 参考文献 1) 栗田哲郎 他、若狭湾エネルギー研究センター成果報告書、12, 14, (2010)
2) 栗田哲郎 他、若狭湾エネルギー研究センター成果報告書、13, 59, (2011)

*1 (財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・加速器グループ

2.1.3.3.3.

実用型加速器の開発

Development of the Superconducting Accelerator Module Usable for Industrial Applications

峰原英介*

Eisuke J. MINEHARA

Abstract

Development of the Superconducting Accelerator Module Usable for Industrial Applications at TIT (Tokyo Institute of Technology), WERC and AIST is briefly described below. The superconducting accelerator system using Nb cavities are converted from the JAERI superconducting FEL (free-electron laser) system at JAEA Tokai site.

要約

本報は、財団法人若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)で平成 23 年度に実施された東工大、産業技術総合研究所つくばとの共同研究である超伝導加速器を用いた実用型加速器に関する研究の開発成果をまとめたものである。

I. 緒言

エネ研で平成 23 年度に実施された産業技術総合研究所つくばとの共同研究である超伝導加速器を用いた実用型加速器に関する研究の開発成果について述べる。

II. 実験方法及び結果

東京工大原子炉工学研究所と産業技術総合研究所つくばと協力して実用的な小型超伝導加速器について総合的な開発をおこなっている。特に超伝導加速器の利用を拡大するため、その隘路であった冷凍機と空洞共振器を安価に簡便に利用できる超伝導加速器システムの新規の開発研究を行った。併せてこれを産業利用可能で、可搬型とする開発研究も行った。

この共同研究で、目標或いは内容としたのは次の 3 点である。①医療・産業用電子線照射装置の小型化・効率化による超伝導加速器の利用可能性の調査。②クライオスタット(極低温冷凍装置)熱履歴故障低減技術と冷凍機低速運転とコールドメンテによる省エネ技術の開発。③実用的な小型超伝導加速器概念設計¹⁾と内製化技術開発。上記目標或いは内容 3 点は、①が応用をまず医療・産業用とし、小型化効率化で利用可能性調査²⁾を行うこと、②はこの技術で隘路となる冷凍装置と冷凍機についての開発を挙げて、③では実用化のまえに概念設計とコスト的にネックとなる高価な部品の内製化に必要な技術について研究開発を行った。

この研究は、H21 年度から進めており、初年度は、東工大と可能性試験調査の実施と冷却試験成功、共同で加速器の整備、医療・産業分野における超伝導加速器の利用可能性の調査、H22 年度は複数の国内外特許出願対応、共同で加速器の試験準備整備、国内外学会発表、国際加速器会議と電子源と光源の上海ワークショップ³⁾などで発表、研究会発表、論文 1)等。医療用超伝導電子線加速器の可能性試験調査の実施、複数の国内外特許出願、国内外学会発表、国際会議発表、研究会発表、論文等の作業を行った。

H23 年度は、①医療・産業用超伝導電子線照射装置の小型化・効率化、その応用可能性調査 ②熱履歴低減、冷凍機低速運転、コールドメンテなど極低温省エネ技術の開発 ③実用的な小型超伝導加速器概念設計と内製化技術開発を行った。具体的には冷却試験前の液体ヘリウム貯槽、予冷用液体窒素の移送管など周辺機器の整備と、液体 He 温度まで急速冷却を行う簡易冷凍装置試験、更に新しい小型産業用超伝導加速器の開発を行うために既設の試験用クライオスタットを分解して新しい試験クライオスタットを設計製作した。

参考文献

- 1) B. E. O'Rourke(AIST), E. Minehara(WERC), and N. Hayashizaki(TIT) et.al., Rev.Sci.Instruments, Accepted,, "Simulations of slow positron production using a low energy electron accelerator".
- 2) 峰原英介:若狭湾エネルギー研究センター年報平成 22 年度第 13 巻 65 頁, (2010).
- 3) E.J. Minehara(WERC): Abstracts Book of China-Korea-Japan Joint Workshop on electron/photon sources and applications, "The Compact Superconducting rf Linac based FEL Technologies and Applications for Nuclear Decontamination, Eisuke Minehara (WERC, Japan)".

*1(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、(財)若狭湾エネルギー研究センターが(独)産業技術総合研究所と東京工業大学との共同研究として実施した。

2.1.3.3.4.

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
 Developmental Research Program of the Positron Beam Source
 Utilizing A Superconducting Accelerator System
 峰原英介*¹, B.E.オローク*²
 Eisuke J. MINEHARA and B. E. O'Rourke

Abstract

Developmental research program of the positron beam source utilizing a superconducting accelerator system at WERC and AIST (Agency of Industrial Science and Technology) is briefly describe below. The superconducting accelerator system using Nb cavities are converted from the JAERI superconducting FEL (free-electron laser) system at JAEA Tokai site.

要約

本報告は、財団法人若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)で平成 23 年度に実施された産業技術総合研究所つくばとの共同研究である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の開発成果をまとめたものである。

I. 緒言

エネ研で平成 23 年度に実施された産業技術総合研究所つくばとの共同研究である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の開発成果について述べる。

II. 実験方法及び結果

産業技術総合研究所つくばの極微欠陥計測グループと共同して超伝導加速器を用いた陽電子ビーム発生法の共同研究を行ってきた。陽電子顕微鏡、陽電子微小欠陥計測器などの最先端陽電子ビーム計測性能限界を極限まで拡大するため、その隘路であった偶発の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ている。必ずしもCWでなくても擬似的にCWと見做せるか、その性能劣化が少ないほど尖頭電流値が大きい場合は含めることにしている。併せてこの超伝導加速器システムを産業利用可能で、安価で、使い易い、可搬型とする開発研究も行って来た。

超伝導加速器を用いて陽電子ビームを発生するための技術的な検討を行い、その陽電子発生システムの最適設計や、陽電子顕微鏡などの最先端陽電子ビーム計測機器など各種構成デバイスのより実用的な仕様についてまとめた。陽電子発生システム、陽電子顕微鏡などの最先端陽電子ビーム計測機器と超伝導加速器装置は産業技術総合研究所つくば中央サイトに設置し、冷凍装置の設計検討は若狭湾エネルギー研究センターにおいて実施した。また東工大原子炉工学研究所が主導した、ビーム光学設計検討成果をこの研究開発にも利用する予定である。H21年度は伝導加速器を用いた陽電子ビーム発生法の概念設計、準備、検討を行った。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具体的検討を行った¹⁾。H22年度は陽電子ビーム発生用超伝導加速器システムの冷凍機、加速器本体モジュール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²⁾。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う予定であったが震災により超伝導加速器が破損したために延期して、破損個所の同定と修理を行うこととなった³⁾。この開発が成功すれば、超伝導加速器を用いた陽電子ビーム発生法の実用化が期待される。CW加速は同時計測を行う陽電子計測に最適であり、飛躍的に高い精度や計測効率などの実現が期待される。これらの成果により、超LSIなど極微細構造物の極微欠陥検査に使用できる陽電子ビームの利用が可能となると期待される。

参考文献

- 1) 峰原英介:若狭湾エネルギー研究センター年報、平成 21 年度第 12 巻 18 頁, (2009)
- 2) B. E. O'Rourke(AIST), E. Minehara(WERC), et al.,: Rev.Sci.Instruments, Accepted,, "Simulations of slow positron production using a low energy electron accelerator".
- 3) 峰原英介:若狭湾エネルギー研究センター年報、平成 22 年度第 13 巻63頁, (2010)

*¹(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(独)産業技術総合研究所・つくば・極微欠陥評価研究グループ
 本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターが(独)産業技術総合研究所と東京工業大学との共同研究として実施した。

2.2. エネルギー研究開発

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.

レーザーによる先進材料の改質加工技術の試験

Analytical Surveillance of the Advanced Surface Modification Technologies Utilizing Pulsed and CW Lasers

峰原英介*

Eisuke J. MINEHARA

Abstract

Analytical surveillance of the advanced surface modification technologies utilizing pulsed and CW (continuous wave) lasers is briefly described below.

要約

本報は、財団法人若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)で平成 23 年度に JAEA((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レーザーによる先進材料の改質加工技術の試験をまとめたものである。

I. 緒言

エネ研で平成 23 年度に実施された財団法人若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)で平成 23 年度に JAEA((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レーザーによる先進材料の改質加工技術の試験について述べる

II. 実験方法及び結果

(財)若狭湾エネルギー研究センターは、日本原子力研究開発機構の役務契約として「レーザーによる先進的材料の改質加工技術を普及するための予備的構築」と名付けられた調査を実施した。調査内容は、レーザーを用いた表面改質技術の開発を進めるにあたって初年度に予備的構築として検討と準備を行ったものである。原子炉内の各種構造材を構成する材料は、製造時の冷間加工や温間加工時に材料の表面に多種多様な劣化や表面残留引張応力など、材料劣化の元となる粒内・粒界周辺のナノ構造が発生する。さらに長時間暴露される放射線場や高温高圧により、これらの劣化が大きく進展し、孔食の発生、応力腐食割れや金属疲労などの材料の劣化が進み、材料の長期健全性を損なうこととなる。材料劣化のもととなる材料結晶粒/粒界のナノ構造の発生を改質により防止する、或いは劣化の元を発生させずに加工できる超高出力極短パルスレーザーや長パルスレーザーを用いることにより、最先端の性能を持つ難加工材に適用可能で、且つ孔食や割れなど原子炉運転環境下での劣化を大きく抑制できる、あるいは防止できる革新的な材料加工・材料改質技術が求められて来た。

このレーザーによる先進材料の改質加工技術の開発の成果を広く、原子力の研究開発分野、さらに広く産業界に普及することを目的とし、腐食、金属疲労、応力腐食割れなどが起きない、高品質の加工・改質された表面を持つ新材料の創出を実現するための予備的な検討と準備を行った。

ここで産業界に広く普及すると述べた具体的な産業応用の例として、1)「越前打ち刃物工業組合におけるレーザーの応用」と2)原子炉の冷却水1次系などで良く知られた「応力腐食割れの防止への応用」をまとめた。種々の劣化が問題となる材料が知られているが、ここでは少数の対象物質と定められたステンレス鋼 SUS304,316 とアルミ合金 A5052 に対する各種レーザー試験、各種分析、各種検討を実施した。

参考文献

「レーザーによる先進的材料の改質加工技術を普及するための予備的構築」調査報告書(2011)

* (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、(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の役務契約として実施した。

2.2.1.1.2.

レーザー技術の原子力・原子炉への応用
 原子炉構造物を対象としたレーザー切断技術の確立に向けた研究
 Applications of Laser Technologies for Nuclear Facilities and Reactors
 Research of Laser Cutting Technologies for the Internal Components of the Nuclear Reactors
 峰原英介*
 Eisuke J. MINEHARA

Abstract

Analytical Surveillance of the applications of laser technologies for nuclear facilities and reactors (alternative title: research of laser cutting technologies for the internal components of the nuclear reactors) is briefly described below. The analytical surveillance has been jointly organized by the JAEA laboratories and Laserx Corporation.

要約

本報は、財団法人若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)で平成 23 年度に JAEA((独)日本原子力研究開発機構)と(株)レーザックスと共同研究として実施したレーザー技術の原子力・原子炉への応用(副題として、原子炉構造物を対象としたレーザー切断技術の確立に向けた研究)をまとめたものである。

I. 緒言

財団法人若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)で平成 23 年度に JAEA((独)日本原子力研究開発機構)と(株)レーザックスと共同研究として実施したレーザー技術の原子力・原子炉への応用(副題として、原子炉構造物を対象としたレーザー切断技術の確立に向けた研究)について述べる。

II. 実験方法及び結果

原子炉構造物を対象としたレーザー切断技術の確立に向けた研究を行った。これに先行して数年前からファイバーレーザー装置を整備して、原子炉廃止措置に必要な遠隔薄板切断、気中厚板切断、水中切断を先行研究として行い、これで大型構造物の水中切断を模擬した実験などに大きな成果を上げたが課題も残った。この課題の解決と、解決までは至らないまでもより実用的な原子炉廃止措置に必要な技術開発を進めるためにこの研究開発を進めた。特に厚板の切断に対してはステンレス鋼の切断は性能的に不十分で、新たな切断概念と技術開発が必要である。

この共同研究の目的は、厚板など切断幅の大きな原子炉構造物に対するレーザー切断技術の確立を目標とし、これに向けた共通・補完的な技術的基礎課題を解決するための研究を実施するものである。具体的な内容は、例えばレーザー照射条件などをパラメータとした実験において、試験片レーザー切断時の空間温度分布計測および熔融金属排出挙動観測を行うとともに、アシストガス噴流の 3 次元流動状況の定量評価を行い、ここでこの結果を踏まえてアシストガス噴流ノズル構造の最適性の評価を行うことであった。さらに、ファイバーレーザーによる原子炉構造物切断時に多量に発生するドロス抑制・制御技術の高度化に向けて、次年度以降の共同研究内容の策定を行った。実際に実験や作業を行う場所や主体は、共同研究を担う JAEA, およびレーザックス社と若狭湾エネルギー研究センターである。関連する機関は随時、必要に応じて商業的あるいは非商業的に共同研究に参加した。

H22 年度は、レーザー照射条件、アシストガス噴流条件などをパラメータとした実験および数値解析によるそれらの最適化、構造物切断過程の現象論的把握などを通じ、ファイバーレーザーによる原子炉構造物切断時のドロス抑制・制御・回収技術の高度化を図るための準備研究を行った。特に計測・評価方法に関する検討を行い、次年度の実施項目を検討した。レーザー照射条件、アシストガス噴流条件などをパラメータとした実験および数値解析によるそれらの最適化、構造物切断過程の現象論的把握などを通じ、ファイバーレーザーによる原子炉構造物切断時のドロス抑制・制御・回収技術の高度化を図るための準備研究を行った。特に金属試験片を用いてレーザー切断を行った際の挙動を実験的に観測し、切断時のパラメータ評価を行った。また、計測・評価方法に関する検討を行い、平成 23 年度の実施項目を検討した。H23 年度は、レーザー切断時のドロス挙動に影響を及ぼす因子などの定量評価を行った。

参考文献 E. J. Minehara et al.:Nucl. Instr. Method., C ,(47) R425 (1993)

* (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、(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、(株)レーザックスとの共同研究として実施した。

2.2.1.1.3.

レーザー除染装置の開発

Development of the Laser Cleaner for Decontamination at Nuclear Power Reactors

峰原英介*

Eisuke J. MINEHARA

Abstract

Development of the laser cleaner for decontamination at nuclear power reactors is briefly described below. The laser cleaner for decontamination at nuclear power reactors have been tested to clean up the most contaminated plate in the primary cooling water loop in the JAEA Fugen heavy water reactor.

要約

本報は、財団法人若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)で平成 22 と 23 年度に西日本クリエイト株式会社を幹事会社として実施した嶺南地域新産業創出モデル事業補助金のレーザー除染装置の開発成果をまとめたものである。

I. 緒言

エネ研で平成 23 年度に実施された西日本クリエイト株式会社を幹事会社として実施した嶺南地域新産業創出モデル事業補助金のレーザー除染装置の開発成果について述べる。

II. 実験方法及び結果

この研究課題においては、レーザー除染装置を種々のレーザー発振器装置とその周辺機器を用いて実現する可能性について研究開発を行ってきた。フェムト秒自由電子レーザー¹⁾、水噴流導光レーザー、Q スイッチ YAG、ファイバーレーザーなどを用いて行った。レーザーを集光して昇華するために十分なエネルギー面密度にするのでどのレーザーを用いても表面深く、熔融することなく除去が出来て、RIを用いない汚染模擬体での除染率は百万以上の、きわめて高い値が得られた。これを実用とするために、レーザー除染装置を試作開発する計画を進めて来た²⁾。開発内容は、レーザー除染装置に使用する、今まで使用されてきたレーザーとは異なる形式の種々のレーザー発振器を用いて、さらに異なる方式の光輸送系等の開発を行ってきた。小型のハンディタイプから比較的大型の定置式、さらに大型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、概念設計検討などを行い、実用化を進めて来た。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、試験サービスに参加する予定である。レーザー除染機に対する今までとは異なる形式のフラクタルレーザー、FEL、最も安価な産業用レーザーなど種々のレーザー発振器、異なる方式の集光系、光輸送系等の各種部品の開発を行った。現状の除染機の適応対象である原子炉 1 次系の重度の汚染から、2 次系、保管設備、ホットラボ、原子燃料加工設備、原子力事故に伴う汚染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。

各機関、企業との共同研究の立上げ、必要な機器の借用先、異なる適用分野の専門部署、機関と共同研究を行う予定で準備を行ってきた。今後計画中のマルチファンドと次年度のモデル事業などマッチングファンドに対応しない研究開発部分を協力関係にある教育機関、特に大学、研究機関、企業と協力して実施した。H21 年度は、レーザー除染特許を出願し³⁾、可能性試験調査の実施とその重要な一部であるふげんの原子炉 1 次系配管のホット除染試験に成功した⁴⁾。H22 年度のモデル事業にて、除染用レーザー発振器機器調査と除染用レーザー発振器借用機器による実験を実施、これにより小型レーザー除染機の試作に成功し、コールド試験にてウエットサンドブラスト除染と同等の 0.3-1g 毎分の実処理速度を確認、さらに 10-30g 毎分処理速度の可能性を評価により確認した。今後、複数の国内外特許出願と取得予定、国内外学会発表、国際会議発表、展示会発表、論文、解説記事等を予定している。

H23 年度は、レーザー除染試験サービス、製作した装置の特許出願、原子力学会等研究会等発表、国際会議等発表、県内国内外展示会発表、定置式レーザー除染機・蒸気発生器除染機概念設計調査、廃炉措置中のふげんにおけるレーザー除染機ホット実験を行った。

参考文献 1) E. J. Minehara et al.: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A557(2006) 16-22. 2) 峰原英介: 若狭湾エネルギー研究センター年報平成 21 年度第 12 巻 79 頁, (2009) 3) 特許出願、名称「レーザー除染装置」、2011/10/25 出願番号 2011-234385 4) 峰原英介: 若狭湾エネルギー研究センター年報平成 22 年度第 13 巻 68 頁, (2010)

* (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、(財) 若狭湾エネルギー研究センターが西日本クリエイト株式会社、他との共同研究として実施した。

2.2.1.1.4.

減容安定化処理装置灰化樹脂の廃棄体適合調査

Analytical Surveillance of the Nuclear Waste Package Processing of the Spent Ion-Exchange Resin Residuals

峰原英介*1、遠藤伸之*2

Eisuke J. MINEHARA and Nobuyuki Endo

Abstract

Analytical Surveillance of the nuclear waste package processing of the spent ion-exchange resin residuals in the JAEA Fugen heavy water reactor under decommissioning is briefly described below.

要約

以下の文章は、財団法人若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)で平成 23 年度に JAEA((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減容安定化処理装置により減容・安定化した灰化樹脂の廃棄体適合調査をまとめたものである。

I. 緒言

財団法人若狭湾エネルギー研究センターが平成 23 年度に独立行政法人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減容安定化処理装置により減容・安定化した灰化樹脂の廃棄体適合調査について述べる。

II. 内容等

(財)若狭湾エネルギー研究センターは、(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(以下、「ふげん」という。)の役務契約として「ふげん」灰化樹脂を対象とした廃棄体製作技術のための調査を実施した。

原子炉の 1 次系などの系統水の浄化などによって 2 次廃棄物である使用済イオン交換樹脂が発生する。これを減圧酸素プラズマ方式により減容・安定化後、その残渣(灰化樹脂)をセメントで固化して廃棄体として処理・処分する技術の調査である。

「ふげん」において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・処分するため導入を計画している減圧酸素プラズマ方式による減容安定化処理方式の調査の一環として、本処理装置の原型となる実証機を用いた減圧酸素プラズマでの模擬樹脂の低減容処理(以下、「1st ステージ処理」という。)後の灰化樹脂について、減容性能等を把握し、廃棄体の技術要件等への適合性の観点から、低減容灰化樹脂による処分の可能性を調査し、以下の結果を得た。

- (1) 均質・均一固化体の仕様の詳細調査を実施し、1st ステージ処理後の灰化樹脂がこれに適合する見通しを得た。
- (2) 1st ステージ処理における減容性能等を把握するため、実樹脂を模擬した模擬樹脂を作製し、この模擬樹脂の 1st ステージ処理を行い、減容性能等を確認し、その対策を明確にした。
- (3) 1st ステージ処理によって得られた灰化樹脂を分析することにより、灰化樹脂中に含まれる成分と減容状況を明確にした。
- (4) 1st ステージ処理によって得られた灰化樹脂をセメント固化し、基本条件確認試験とパラメータ試験を実施することで、必要とされる強度を満たすための混合割合を明確にし、そこで得られる強度を確認した。
- (5) 上述の試験の結果により、1st ステージ処理で得られる灰化樹脂のセメント固化体が、廃棄体の技術要件を満たす見通しを得るとともに、ここで考えられる課題を整理した。

参考文献

「ふげん」灰化樹脂を対象とした廃棄体製作技術のための調査報告書 (2011)

*1(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 生物資源グループ。
本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターが日本原子力研究開発機構の役務契約として実施した。

2.2.1.1.5.

レーザーによる厚物鋼材切断時の発生物挙動影響調査

Product Behavior Influence Investigation when Cutting the Thick Steel Plate by Laser

重田達雄*1、遠藤伸之*2、長友仁郎*3

Tatsuo SHIGETA, Nobuyuki ENDO and Jinro NAGATOMO

Abstract

We performed Laser Cutting Test in the air and under the water, using thick steel plates. And acquired shift data or behavior data of the particulate materials which are produced by Cutting Test.

要約

気中及び水中において厚物鋼材をレーザー切断した際に発生する粒子状物質の挙動調査を実施した。

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役務契約により、レーザー切断技術の高度化を目的として、レーザー切断時におけるドロスや粉じんの挙動を調査するとともに基礎データを取得するため、厚物鋼材に対するレーザー切断試験を実施した。

II. 実験方法及び結果

平成 18 年度から昨年度まで、水中プラズマ切断試験、水中高圧水ジェット切断(研掃材を使用するウォータージェット切断、略称 AWJ) 試験及び気中レーザー切断試験を実施し、捕集した気中浮遊物、水中浮遊物及び落下(沈降)固形物の重量分析及び成分分析を行って来たが、今年度は気中レーザー切断試験と水中レーザー切断試験を実施し、同様の分析作業を行った。レーザー発振器は WERC 所有器を使用し、切断試験で生じた粉じん等二次生成物の分析は、SEM・EPMA・ICP-MS 等の科学機器を用いて WERC が実施した。

気中切断試験は、Zr 合金製圧力管/カランドリア管、SUS304 板及び炭素鋼板を切断対象材料とし、切断材板厚(1.9~50mm)、レーザー出力(4~10kW)、ヘッド供給ガスの種類と量、切断速度(30~3,000mm/min)や切断長(35~120mm)を変化させて計 64 ケースを実施した。

水中切断試験は、試験装置の製作を行った後に性能確認を主目的として、SUS304 板及び炭素鋼板を切断対象材料に計 6 ケースを実施した。図 1 に水中試験水槽本体と架台、図 2 に水中切断試験の様子を示す。

調査では、二次生成物である気中浮遊物、水中浮遊物、落下(沈降)固形物の量及び性状が各種切断条件により様々に変化することを確認し、たとえば次のような傾向があることが分かった。

- ・ 気中切断試験において、切断速度以外の切断条件をそろえた 4 ケースの試験結果から、切断速度が速くなるに従い気中浮遊物重量及び同重量割合は明らかに減少する。
- ・ 同一切断条件で行った気中切断試験と水中切断試験の結果から、気中浮遊物重量及び同重量割合は気中切断よりも水中切断の方が少ない傾向であり、一桁から二桁違うほどの大きな差を示す。

これらの調査によって、原子炉の炉心を構成する材料に対するレーザー切断時における粉じん挙動に係る基礎データ等を取得調査することができた。



図 1 水中試験水槽本体と架台

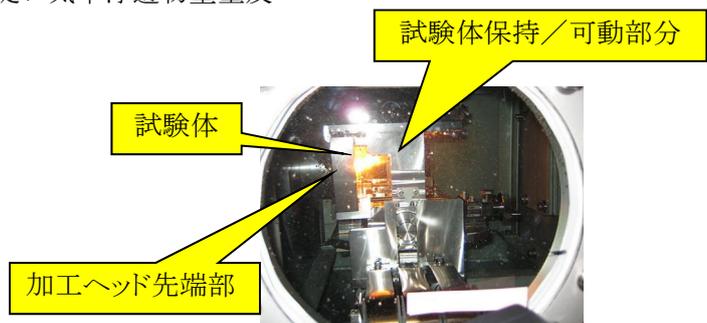


図 2 水中切断試験の様子

*1(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 生物資源グループ、*3同 企画支援広報部
本研究は、(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。

2.2.1.1.6.

レーザー駆動粒子線治療装置実用化に関する基礎研究

Basic Research for Development of Laser-Driven Particle Therapy System

匂坂明人*¹、高田卓志*²、久米恭*²、峰原英介*¹、小倉浩一*³、西内満美子*³、Alexander S. Pirozhkov*³、
余語覚文*³、福田祐仁*³、榊泰直*³、近藤公伯*³

Akito SAGISAKA, Takushi TAKATA, Kyo KUME, Eisuke MINEHARA, Koichi OGURA, Mamiko NISHIUCHI,
Alexander S. PIROZHKOV, Akifumi YOGO, Yuji FUKUDA, Hironao SAKAKI, and Kiminori KONDO

若狭湾エネルギー研究センターでは、加速器を用いた陽子線治療装置・技術の開発研究を進めている。このような陽子線治療装置は、がんの放射線治療法の一つとして期待されている。一方、日本原子力研究開発機構では、レーザーによる高エネルギー粒子発生とその医療利用を目指した研究を行っている。このような中、若狭湾エネルギー研究センターの粒子線加速器施設と日本原子力研究開発機構のレーザー駆動粒子線研究施設の双方を利用することは、測定手法等の開発に有効であると考えられる。

平成 23 年度は、日本原子力研究開発機構においてレーザー駆動粒子線発生実験を行った。今後は、若狭湾エネルギー研究センターの粒子線加速器施設や日本原子力研究開発機構のレーザー駆動粒子線研究施設を用いて、粒子線検出器などの評価等を行う予定である。

*¹(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 粒子線医療研究グループ、*³(独)日本原子力研究開発機構
本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターと(独)日本原子力研究開発機構との共同研究として実施した。

2.2.1.2. 次世代半導体製造技術開発

2.2.1.2.1.

イオンビームを用いた新物質創製研究
 Synthesis of new materials by ion beam techniques
 笹瀬雅人*
 Masato SASASE

金属ナノ粒子が絶縁体中に分散した材料は、可視光領域において、大きな非線形感受率と、ピコ秒レベルの応答性を有している材料であるため、全光化された大容量高速伝送化に対応した次世代スイッチング素子材料として期待されている。一方、ナノ構造制御による動作波長の調整、ナノ粒子の相安定性などがその特性向上に不可欠である。

イオンビームは照射エネルギー・照射量などのパラメーターを制御し、局所的に高エネルギーを付与することが可能であるため、物質中のナノ構造制御に有効な手法の一つである。本研究では、ガラス母相中に金ナノ粒子が規則正しく配列した試料に対して、高エネルギー重イオン照射によりナノ構造制御を試みた。

本研究で用いた試料は、SiO₂ 母相中に成長させた Au ナノ粒子を用いた。この試料に対して原子力機構、タンデム加速器を用いて 200 MeV Au¹³⁺ イオン及び 200 MeV Xe¹²⁺ イオンを室温にて照射した。照射量は、5 x 10¹¹ から 5 x 10¹³ ions/cm² まで変化した。イオン照射後、Au ナノ粒子の形状及び微細構造の変化は透過型電子顕微鏡(TEM, JEM-3000F)により観察した。

イオン照射前の Au ナノ粒子の形状は、ほぼ球形である。大きさは、平均直径 24 nm で、SiO₂ 母相内に分散している。一方、高エネルギー重イオン照射により、Au ナノ粒子は、イオン照射方向に沿って形状が変化することが明らかとなった。200 MeV Au¹³⁺ を 5 x 10¹² ions/cm² 照射すると、Au 粒子の形状が大きく変化した。得られた TEM 像から、照射後の粒子は、イオン入射方向に伸びたロッド状となることが明らかとなった。さらに照射量を 5 x 10¹³ ions/cm² まで増大させると、最大で長さ 200 nm のワイヤー状に変化した。

* (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、(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と共同で実施した研究の一部である。

2.2.1.2.2.

ナノ欠陥を利用した機能性ヘテロ界面の創製
 Synthesis of functional heterointerface by ion beam techniques
 笹瀬雅人*
 Masato SASASE

本研究では、Si 基板上への鉄シリサイド(β -FeSi₂)薄膜成長を通して、スパッタ処理により基板に導入された欠陥が薄膜成長に果たす役割を検証し、原子オーダーで整列したヘテロ界面を実現する。さらに本法において欠陥を利用したユニークな材料創製法として種々の成膜に応用範囲を広げ、その手法を確立することを目的とする。

イオンビームスパッタ蒸着(IBSD)法による成膜において、基板へのスパッタ処理条件によって膜質が変化することから、膜質及び形成される界面に与えるスパッタ処理の最適条件が存在すると考えられる。H23 年度ではスパッタ条件のうち、イオンビームの加速エネルギー及び照射量を変化させ、その最適条件を検討した。

その結果 IBSD 法により成膜した場合、1 keV, Ne⁺、照射量 3 x 10¹⁶ ions/cm² が成膜の最適な処理条件であることが分かった。この条件は結晶性及び表面構造を損なわない適度な欠陥層が基板表面に生成し、円滑な相互拡散を促し、基板と急峻な界面を持つ結晶性の良好な薄膜が得られたものと考えられる。一方、生成したヘテロ界面は、まだ原子オーダーでは、微細な歪み及び欠陥の混入が認められる。我々が目的としている原子オーダーに制御されたヘテロ界面の生成にはまだ至っていない。更なる条件の最適化が必要であるため、今後は詳細なスパッタ条件(加速エネルギー及び照射量以外の条件)の検討が必要である。

* (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、JSPS 科研費 23561025 の助成を受けた。

2.2.1.2.3.

高エネルギー重イオン照射によるシリサイド半導体中へのナノ金属相作製

Structural change in the nano-region of iron disilicide (β -FeSi₂) thin films by high-energy heavy ion irradiation笹瀬雅人*¹、岡安悟*²

Masato SASASE and Satoru OKAYASU

本研究では、鉄シリサイド薄膜に対し高エネルギー重イオンビームを照射することで、高密度電子励起状態を作り、相転移を引き起こさせ、半導体中にナノオーダーの金属相や絶縁相を作製し、オールシリコン一体型デバイス作製を目指すものである。高エネルギー重イオン照射によりナノ領域における三次元の構造相転移が可能となれば、オールシリコン一体型デバイス作製への道が拓け、同時に超高集積化・極微細化に伴い問題となっている信号伝達の遅延を抜本的に解決するための大きな指針となる。

環境半導体鉄シリサイドに対し高エネルギー重イオンビームを照射することで、高密度電子励起状態を作り β (半導体)- α (金属)相転移を引き起こさせ、半導体中にナノオーダーの金属相を作製する。併せて高分解能透過型電子顕微鏡を用いて高エネルギー重イオン照射によるナノ領域の微細構造観察を行い、シリサイド半導体中での高密度電子励起効果と相転移との相関について調べる。

本研究では、イオン照射により引き起こされるナノ構造変化を観察し、半導体相(β -FeSi₂)中への金属相、すなわち非晶質相の導入による物性変化の可能性について検討を行った。その結果、エネルギー付与量を 25 keV/nm にすることで、シリサイド中に円柱状欠陥を生成し、構造変化を確認した。さらに極微電子線回折法により、ナノ領域での照射による β (半導体)から α (金属相)への相変態現象を確認した。

H24 年度には、さらにパラメーターを変化させて円柱状欠陥のサイズの制御を試み、微細構造の詳細な観察により相変態現象の制御性を向上させる。さらに円柱状欠陥生成メカニズムの検討を行う。

*¹(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(独)日本原子力研究開発機構
本研究は、(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と共同で実施した研究の一部である。

2.2.1.2.4.

半導体 Ba_{1-x}Sr_xSi₂ の結晶成長と薄膜太陽電池への応用研究Epitaxial growth and photoresponse properties of BaSi₂ layers toward Si-Based high-efficiency solar cells笹瀬雅人*¹、末益崇*²

Masato SASASE and Takashi SUEMASU

BaSi₂ は、資源が豊富な元素で構成され、禁制帯幅が約 1.3 eV の間接遷移型半導体であるが、1.5 eV 帯において大きな光吸収係数(10⁵ cm⁻¹)を持つなど、従来の太陽電池材料には無い優れた特徴をもつ。原料の省量化が可能で、資源が豊富で社会的受容性が高い安全・安心な材料だけを利用した半導体を用いて、SiO₂ 基板上でも高品質薄膜結晶成長が可能で、且つデバイスの動作原理が明確な太陽電池を目指す。具体的には、Si/SiO₂ 基板上に光吸収層の膜厚が 1 μ m 程度の pn 接合を形成し、エネルギー変換効率 20%を目指す。

BaSi₂ は Si(111)面にエピタキシャル成長可能であるが、BaSi₂/Si ヘテロ界面には電子親和力の差に起因する大きなバンド不連続があるため、H22 年度の研究でヘテロ界面に n⁺-BaSi₂/p⁺-Si トンネル接合を形成することで解決し、また、トンネル接合上に形成したアンドープ BaSi₂ 膜にトンネル接合から Sb が拡散する問題を解決する成長方法も見出していた。本方法でトンネル接合上にアンドープ BaSi₂ 膜を形成し、分光感度特性を評価した。

n⁺-BaSi₂/p⁺-Si トンネル接合上に、室温でアモルファス Si 膜(10 nm)を堆積し、600°C で 1 min アニールすることで固相成長させ、c-Si を得た。この c-Si 層に Ba を照射して熱反応堆積法により BaSi₂ 種結晶を形成し、この上に、厚さ 400 nm のアンドープ BaSi₂ 膜を MBE 成長した。オーミック電極形成のため、表面に厚さ約 50 nm の n⁺-BaSi₂ を堆積した。表面には楕形のオーミック電極を、裏面にもオーミック電極を形成し、試料の表面と裏面間にバイアス電圧を印加した状態で、分光感度測定を行った。分光感度は、禁制帯幅以上のエネルギーで急峻に立ち上がり、バイアス電圧 2 V のとき、1.55 eV で 0.37 A/W の値が得られた。これは、シリサイド半導体の中でも飛びぬけて大きな値であり、反射率を考慮すると内部量子効率 は 70%を超えた。今後、アンドープ BaSi₂ 膜の厚さを 3 μ m にすることで、現状でも内部量子効率を 90%以上にすることが可能である。

*¹(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筑波大学
本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターが筑波大学と共同で実施した研究の一部である。

2.2.1.3. 極微小駆動材料開発

2.2.1.3.1.

磁性薄膜永久磁石の開発研究

Development of thin-film permanent magnets

石神龍哉*

Ryoya ISHIGAMI

Abstract

Iron-platinum thin films are implanted with nitrogen ions and treated by annealing in hydrogen gas combined with rapid thermal annealing. An Fe-Pt thin-film permanent magnet having a thickness of 100 nm and with an in-plane coercivity of 17.2 kOe is obtained. Fe-Pt magnets with an in-plane coercivity of 8.2 kOe are irradiated with 180 keV ^{20}Ne ions. It is shown that the effect of irradiation with 180 keV ^{20}Ne ions on decrease in the coercivity is two order of magnitude larger than that with 180 keV ^4He ions, as is estimated with a TRIM simulation program. It indicates that the cause of the decrease in the coercivity is atomic displacement due to the ion irradiation.

要約

鉄白金薄膜磁石の保磁力を向上させるため、窒素イオン注入と、高速昇温加熱および水素中加熱を組み合わせた熱処理を行った。その結果、厚さ約 100 nm で面内方向の保磁力が 17.2 kOe の鉄白金薄膜磁石が得られた。また面内方向の保磁力が 8.2 kOe の鉄白金薄膜磁石に 180 keV の ^{20}Ne イオンを照射した。その結果、TRIM シミュレーションで予測された通り、180 keV の ^4He の照射量と比較して 2 桁少ない照射量で保磁力が減少した。これは照射イオンによる原子の弾き出しが保磁力減少の原因であることを示している。

I. 緒言

近年、半導体集積回路のようなチップ内に、様々な機械的動作と電氣的動作を行う部品を搭載し一つのシステムを形成した、マイクロエレクトロメカニカルシステム(Micro Electro Mechanical System、略称 MEMS)またはナノエレクトロメカニカルシステム(NEMS)と呼ばれる小型装置が普及し始めている。機械的動作には静電式、電磁式、圧電式、熱式などのアクチュエータが用いられるが、電磁式アクチュエータには、磁石の力で引き付けることにより、電力を消費することなく状態を保持できるという特長があり、その特長を生かしたスイッチも開発されている。また、非磁性材料が磁石間に存在しても力の伝達に影響しないという利点もある。

電磁式アクチュエータを MEMS および NEMS に用いるには小型の永久磁石が必要であるが、現在世界最高の性能を持つ希土類磁石は薄膜化すると性能は大きく落ち、しかも耐腐食性に劣るため薄膜永久磁石としては使用が難しい。一方、鉄白金系、コバルト白金系磁石は、薄膜化が容易で耐腐食性が高く、展性があり加工しやすいため小型装置へ搭載しやすいという利点を持っているが、性能は希土類系よりやや劣る。そのためここでは鉄白金系薄膜磁石の性能を向上させること、およびイオン照射による耐久性の評価を行うことを目的とした。

窒素イオン注入による保磁力の向上実験は平成 22 年度にも行われたが¹⁾、熱処理温度と時間が一種類であり、熱処理の方法の最適化は行われていない。そのため平成 23 年には、22 年度に使用した試料と比較して、窒素添加が行われなかったときの保磁力がより大きい試料を用い、熱処理でも昇温レートを大きくすることで、瞬間的に試料の温度を高くして鉄白金合金の秩序化を進めた。

高エネルギーイオン照射による劣化試験は、これまでには主に希土類系永久磁石について調べられており、磁化の減少は電子的阻止能に依存することが分かっている³⁾。一方、鉄白金磁石では、イオンによる原子の弾き出しが磁石の劣化の原因であることが示されているが⁴⁾、入射イオンは 180 keV の ^4He と 90 keV の H の 2 種類と少ない。その 2 種類のイオンでは、イオンの入射数 1 個当たりの弾き出し原子密度に 1 桁しか違いがなく、その範囲を超えた領域でのデータが存在しない。180 keV の Ne イオンは 180 keV の ^4He と比較してイオン 1 個当たりの弾き出し原子密度が 100 倍大きいことがシミュレーションプログラム TRIM により分かっている。そこでここでは ^{20}Ne イオンを照射して、照射量と保磁力の関係を調べた。

II. 窒素イオン注入による保磁力向上

用いた試料は、表面に厚さ約 100 nm の酸化層が形成された Si(100)ウェハに Fe と Pt を電子ビーム加熱蒸

* (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、(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として実施した。

着装置で成膜して作製された。組成比は Fe:Pt=56:44、膜の厚さは 120 nm である。窒素を添加せず真空中で 650°C15 分間の加熱を行った後の面内方向の保磁力は 11.4 kOe である。この試料に室温で、N 原子の注入量が 3.5×10^{17} atoms/cm² になるように、130 keV の N₂⁺ イオンを注入した。その後に赤外線加熱炉で、450°C まで 4 秒で昇温し、5 秒間保持した後、5 秒で室温に戻るようプログラムして高速熱処理を行った。ただし、温度測定に用いた熱電対の熱容量は試料より大きいので、試料の温度が設定値より大きくなったことが予想される。降温もガス冷却などは行わず自然冷却としたので、設定値より降温速度は小さくなった。この熱処理直後の保磁力は 14.1 kOe であった。この高速熱処理の後、最高温度までの到達時間が 10 分間である通常の熱処理を行った。

真空中で 450°C15 分間、550°C15 分間、650°C15 分間の通常の熱処理を行ったが、面内方向の保磁力はそれぞれ 14.2、14.3、14.1 kOe とほとんど変化しなかった。しかしその後、0.1 気圧の水素中で 350°C30 分間の熱処理を行うことで、保磁力が 17.2 kOe に向上した。

図1に、平成 22 年度に得られた、窒素の添加量に対する面内方向の保磁力の値に 23 年度の結果を加えたグラフを示す。このグラフから、同じ注入量でも使用した試料と熱処理方法の変更により保磁力をさらに向上させることができることが分かる。この値は、窒素添加により達成した保磁力としては、文献の中に見られる最大の値 16.4 kOe²⁾を超えた。

III. ネオンイオンの照射による保磁力低下

試料は表面に酸化層が形成された Si(100)ウェハーに Fe および Pt を合計 120 nm 成膜後、真空中で 650°C 15 分間の加熱を行った Fe-Pt 薄膜磁石で、面内方向の保磁力は 8.2 kOe 程度である。これに室温で 180 keV の ²⁰Ne⁺ イオンを照射した後、面内方向の保磁力を測定した。図 2 に、この実験で得られた結果とともに、文献 4 で示されている 180 keV の ⁴He または 90 keV の H を照射した後の保磁力も示した。図 2 から、²⁰Ne の照射では ⁴He の照射と比較して 2 桁程度少ない照射量で保磁力が減少していることが分かる。これは、TRIM でのシミュレーションにおける、弾き出された Fe および Pt 原子密度の傾向と一致した。これらの結果から、運動エネルギーが 100~200 keV 付近においては、H のような軽イオンであっても ²⁰Ne のような重イオンであっても、照射による Fe-Pt 薄膜磁石の保磁力の減少の原因は、入射イオンによる原子の弾き出しであると推測される。

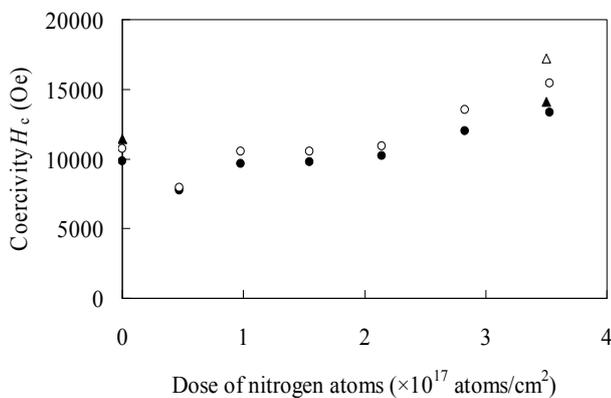


図1 窒素の注入面密度に対する Fe-Pt 薄膜磁石の面内方向の保磁力。黒の三角 (▲) は真空中での加熱後、白の三角 (△) は 0.1 気圧の水素ガス中での 350°C15 分間の加熱後の保磁力。

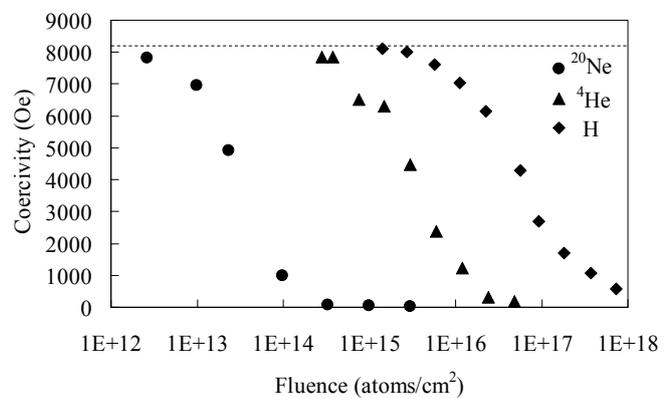


図2 180 keV ²⁰Ne、180 keV ⁴He、90 keV H イオンの照射密度に対する、面内方向の保磁力。

参考文献

- 1) 石神龍哉、若狭湾エネルギー研究センター年報:13,82 (1997)
- 2) C. Y. You, Y. K. Takahashi et al.: J. Appl. Phys., 98, 013902 (2005).
- 3) Y. Ito, K. Yasuda et al.: Nucl. Instr. Meth., B,183,323 (2001).
- 4) R. Ishigami, C. Batchuluun et al.: Nucl. Instr. Meth., B,275,63 (2012).

2.2.1.3.2.

高エネルギーイオンビームによる FeRh の磁性制御

Control of Magnetic Properties of FeRh Alloy by Using High Energy Ion Beam

岩瀬彰宏*¹、松井利之*¹、唐木淳志*¹、石神龍哉*²

Akihiro IWASE, Toshiyuki MATSUI, Atsushi TOHKI and Ryoya ISHIGAMI

I. 緒言

FeRh合金にアルゴンイオン照射、および照射後の熱処理を行うことにより、その磁性を、反強磁性、強磁性、常磁性と自由に制御できることが分かった。ここでは、その研究内容について報告する。

II. 実験方法及び結果

FeRh合金薄膜をイオンスパッタ法で作成し、若狭湾エネ研のイオン注入装置で 50keV のアルゴンイオンを照射した。照射量は $5 \times 10^{12}/\text{cm}^2 \sim 1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ である。照射後、SQUIDを用いて5Kにおける磁化を測定した。その結果、 $5 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ の照射量では、磁化は大きく増大し試料が、反強磁性から強磁性になったことを示した。さらに多い照射量で照射した結果、磁化は減少し、常磁性を呈した。常磁性を呈した試料のXRDスペクトルは、FeRhがイオン照射によって、高温相であるA1 (FCC) 相に変態したことを示した。常磁性になった試料を 100K ~ 800K の温度で1時間ずつ等時焼鈍を行って、磁性とアニール温度の関係を調べた。その結果、300-400K の温度範囲で、試料は常磁性から強磁性に変化し、さらに高温では、元の状態である反強磁性になることがわかった。また、磁性変化の温度は、照射量が大きいほど高温にシフトすることも判明した。本研究結果から、FeRh合金の磁性をイオン照射と照射後の熱処理によって自由に制御できることが見出された。本結果を利用して、FeRh合金に微細な磁気パターンを作成し、磁気デバイス機能を持たせるといった応用が期待される。なお、本研究結果の一部は、下記の参考文献¹⁾で報告している。

参考文献 1) A.Tohki, K.Aikoh et al.: J. Appl. Phys.111, 07A742 (1993)

*¹大阪府立大学、*²(財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ
本研究は、大阪府立大学が(財)若狭湾エネルギー研究センターの公募型共同研究として実施した。

2.2.1.3.3.

高分子薄膜アクチュエータの創製

Development of the Polymer-Thin-Film Actuators

畑下昌範*¹、庄司英一*²

Masanori HATASHITA and Eiichi SHOJI

高分子アクチュエータは、成型が容易である、マイクロ化が可能である、軽量であるという特徴を有し、生体環境に直接触れうるデバイスや、遠隔操作型のパーソナルロボットのアクチュエータとして用いられることが期待されている。従来の高分子アクチュエータの研究では、高分子電解質に Nafion (デュポン社)を用い、それに白金を電極として接合した接合体のみが用いられてきた。Nafion はイオン交換容量(単位重量あたりのイオン性基数)が低いために、屈曲の原理であるイオン移動が少ないことから、動作性能を十分に発揮していないことが予想される。

本研究では、より高いイオン交換容量を有する高分子を作製し、さらに電極構造および接合条件も含めて検討を行うことで、新しい高分子アクチュエータを設計、開発することを目標としている。今年度は、作製したポリマーが無電解めっき時のアルカリ水溶液条件で溶解してしまうという問題に対して、均一性や再現性に課題はあるものの、解決する手法を見出して、無電解めっきによる白金電極化を可能とした。また、作製したポリマーにイオン注入を行った。分光分析によりイオン注入後のポリマーの構造変化を確認した。

*¹(財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ、*²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、(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。

2.2.1.3.4.

イオンビームによる高分子・化学系アクチュエータのパターン化複合電極材の創製と応用
Development and Application of Chemical Actuators with Patterned Multiple Electrode by Ion Beams庄司英一^{*1}、畑下昌範^{*2}

Eiichi SHOJI and Masanori HATASHITA

イオンビーム照射と無電解めっき法により、膜材の表面構造の改質から無電解めっきのパターン化が可能となる。この独自のパターン化方法により、曲面が制御できる新しい高分子アクチュエータの創製について検討を行った。パターン化アクチュエータを制御する制御システムの設計についても検討を行った。

イオンビーム照射による表面改質効果を膜表面の分光分析により解析した。イオンビームを照射することで、膜表面の化学構造の変化が起こり、膜の改質効果としてめっき性が変化することを確認した。次に、無電解めっきにより電極を接合する条件について、めっき条件を種々の条件で検討した。さらに、得られた高分子アクチュエータの運動性とめっき条件との相関について検討した。イオンビーム照射量と無電解めっき性の関係性について検討した。イオンビームの照射・非照射部分の選択により、無電解めっき性が大きく変化した。最後に、電極がパターン化された高分子アクチュエータを制御する拡張性をもったマルチチャンネルのバイポーラ電源装置を開発した。

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

2.2.2. 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.

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

Abstract

Regarding “the Solar Furnace” with which the super high temperature was produced by collecting clean and unlimitedly existing sunlight with the Fresnel lens, we carried out improvement of various equipment, and we succeeded in generation of a slight amount of Si/SiC on the extraction research of Si/SiC from the rice husk. Additionally, we succeeded in continuous five hours operation after improving the electrical generator consisting of the solar furnace and Stirling engine.

要約

クリーンで無尽蔵な太陽光をフレネルレンズで集光することにより超高温を作り出す「太陽炉」について、各種装備の充実化を図るとともに、もみ殻からの Si/SiC 生成研究を行い、微量回収に成功した。加えて、太陽炉とスターリングエンジンを組み合わせた発電装置を熟成し、連続 5 時間運転に成功した。

I. 緒言

地球上にあまねく降り注ぎクリーンかつ無尽蔵な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) や小型太陽炉はんたか (1.4kW、0.7kW、0.3kW) を製作し、附属装備の充実化を実施して来た。そして、その太陽炉で得られる超高温を利用する技術開発では、もみ殻から微量 Si/SiC の回収に成功した。

II. 装備の充実

昨年度に手動調整まで作り上げた大型炉加熱温度自動調整装置を完成させて、特許申請を行った。電動式の太陽光絞り機構による調整装置であり、高温域なので±50℃程度の精度ではあるものの、設定温度での連続加熱が自動で可能となった。加えて、たとえば陽射しが薄雲で弱まった場合に、遮光幕開度を拡げて設定温度を保つというようなこともできるようになった。図 1 に写真を示す。そのほか、大型炉については仰角調整ボールねじ部にジャバラ型カバーの設置を行い、より安全で使いやすい設備となった。図 2 に写真を示す。

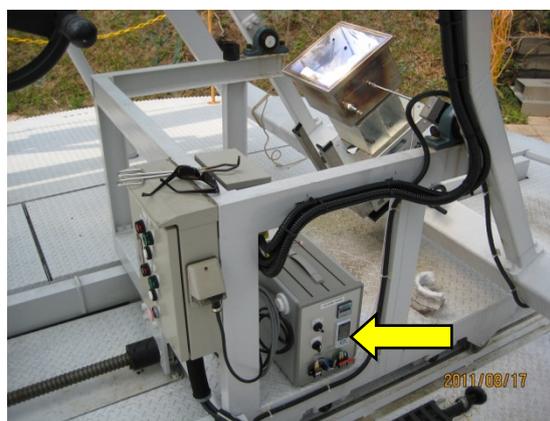


図 1 加熱温度自動調整装置 電動式の太陽光絞り機構(左図)とコントローラー(右図矢印部)

*¹(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 エネルギー材料グループ



図 2 ジャバラ型ボールねじカバー 伸長時(左図)と縮小時(右図)

III. もみ殻からの Si/SiC 生成

農業廃棄物であるもみ殻にはシリコン酸化物 SiO_2 が約 20%含まれており、空気流入下 800°C 程度の加熱で高純度の SiO_2 を回収できることを確認した。そこから、Si/SiC を熱炭素による還元反応を活用して、太陽炉による高温下での生成実験を行い、微量回収に成功した。太陽炉による還元反応を最適化するために電気炉での加熱実験を行い、還元反応プロセスの評価を行い、Si/SiC 生成条件を見いだした。これにより、もみ殻に含まれているシリコン酸化物から、太陽炉の高熱による還元反応でシリコンを生成しうる目途を得た。

IV. スターリングエンジンによる発電

はんたか2号に百瀬機械設計(株)製の発電機一体型小型スターリングエンジン (500°C の入熱によって 1,500rpm で出力 120W が可能) を組み合わせ、内部鏡面の曲管を用いて熱移送することでエンジン受熱部を加熱するという方法によって運転に成功したのは昨年度である。しかしながら、複雑な構造である受熱部分が災いしてごく短時間の運転にとどまった点を踏まえ、集光した太陽熱をエンジン受熱部に直接当てるという単純な方式に替えて熟成を加えた結果、連続 5 時間運転を達成することができた。図 3 に運転時の写真を示す。



図 3 はんたか+スターリングエンジン

V. 対外活動他

前出のはんたかスターリングエンジンは、9 月に開催された第 10 回産官学連携推進会議(於東京国際フォーラム)でパネル展示/動画再生を行った。図 4 に写真を示す。

2 月には「レンズ位置調節機構」で特許を取得、(株)共和製作所に製造販売権を与えているはんたかの今年度販売実績は 3 台(累計 7 台)であった。

VI. まとめ

大型炉装備の充実化を図り、はんたか 2 号に発電機一体スターリングエンジンを組み合わせて長時間運転を達成し、もみ殻からの Si/SiC 生成研究を行い微量回収に成功した。太陽炉は設備的にはほぼ完成の域に達しているため、今後はレンズ交換やメンテナンスによって性能維持を図り、超高温利用技術開発を更に進めていきたい。



図 4 産官学連携推進会議の展示ブース

2.2.2.1.2.

太陽炉を用いたもみ殻に含まれるシリコンの高温抽出技術活用研究
Study on the high temperature extraction technology using solar furnace
- application to silicon in rice husk -

篠田佳彦^{*1}、重田達雄^{*2}

Yoshihiko SHINODA and Tatsuo SHIGETA

Abstract

We have been researching and developing a high temperature reduction process by using solar furnace to extract silicon and silicon carbide from silica included in the rice husk which was a waste of the rice farming.

要約

太陽炉に関する技術を活用して、稲作農業の廃物であるもみ殻からシリコンや炭化ケイ素とする高価値物を抽出する高温還元技術を開発研究を実施した。

I. 緒言

若狭湾エネルギー研究センターの太陽炉に関する技術を活用して、稲作農業の廃物であるもみ殻からシリコンや炭化ケイ素とする高価値物を抽出する技術を確認し、もみ殻の処分に関わる環境影響の低減と高価値を有するシリコンや炭化ケイ素の低コスト化生成および安定供給を実現する。

本研究は、福井県特別電源所在県科学技術振興事業補助金研究「太陽炉を用いた農業廃物中のシリコン抽出技術活用研究¹⁾」として実施したものである。

II. 実施内容

まず、もみ殻に含まれる非晶質シリカ(二酸化ケイ素)を高純度で抽出する方法(シリカ抽出プロセス)を確認し、99%以上の純度のシリカを得る。

その後、抽出したシリカを高温環境化で還元し、シリコンや炭化ケイ素を得るプロセス(シリカ還元プロセス)について基礎情報を収集する。そのために、電気炉や熱分析装置で基礎的な加熱実験を行い、もみ殻由来のシリカの熱還元反応プロセスを明らかにし、粉末炭化ケイ素やバルク状の金属シリコンを有量生成していく。そこで得た成果に基づいて、太陽炉の適用性を確認するための加熱実験を行っていく。

III. 実施結果

以下を実施し、太陽炉によるシリコン抽出に目途を得た。

- ・ 大型、小型太陽炉用の密閉式加熱炉を整備し、高純度アルゴン環境下で加熱実験を行えるようにした
- ・ もみ殻からシリカを高純度で抽出する方法を検討し、シリカを非晶質のまま抽出する条件を見出した
- ・ もみ殻やもみ殻固形燃料の燃焼灰などの性状について評価し、それぞれの加熱特性を把握した
- ・ 電気炉や熱分析装置による実験から、シリカと炭素の反応では、1300℃程度から一酸化ケイ素:SiO₂に還元される挙動を見せ、1600℃程度・数時間程度の保持によって、SiO₂と炭素が反応し、炭化ケイ素および条件により金属シリコンが生成されることを確認し、炭素熱還元反応機構(シリカ還元プロセス)を評価した
- ・ 炭素熱還元反応では、シリカと炭素の混合率が還元後に生成する物質に大きな影響を及ぼし、炭素不足の場合に金属シリコンまで還元される可能性があることを見いだした。
- ・ 電気炉を用いてもみ殻由来のシリカからバルク状の金属シリコン(純度 96%程度)生成に成功した

IV. まとめ

もみ殻から高純度シリカを抽出し、高温環境下でシリコンや炭化ケイ素に還元し、抽出できることを確認し、太陽炉を用いたもみ殻に含まれるシリコンの高温抽出技術活用に目途を得た。

参考文献

- 1) 篠田佳彦、太陽炉を用いた農業廃物中のシリコン抽出技術活用研究業務報告書(2011)

^{*1}(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}同 エネルギー開発グループ
本研究は、(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。

2.2.2.1.3.

気泡駆動型循環式ヒートパイプによる熱輸送

Heat Transport of Bubble-Actuated Circulating Heat Pipe (BACH)

鳥取章二*1、永井二郎*2

Shouji TOTTORI and Niro NAGAI

Abstract

We experimentally measured the heat transport characteristics of Bubble-Actuated Circulating Heat Pipe (BACH).

要約

気泡駆動型循環式ヒートパイプについて熱輸送の特性を把握するための実験を行い、また実証試験を実施している。

I. 緒言

未利用エネルギーや廃熱等を利用するために効率的な熱輸送技術の開発が求められており、無動力で熱を輸送するヒートパイプは重要な機器である。本研究が対象とする気泡駆動型循環式ヒートパイプ(Bubble-Actuated Circulating Heat Pipe: BACH)は、若狭湾エネルギー研究センターが発明したものである。(図1) (特許第4771964号)

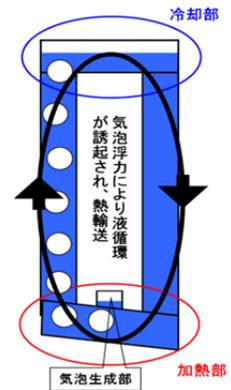


図1 BACH概念図

II. 熱輸送方向を切替可能なヒートパイプ

気泡駆動型循環式ヒートパイプは、外部動力なしに下部受熱・上部放熱の熱輸送(以下、「ボトムヒート」という)のみならず、上部受熱・下部放熱の熱輸送(以下、「トップヒート」という)も可能である。各々のモードにおいて熱輸送の特性等が研究されて来たが、少数の弁を用いて一つのループで両方の機能を発揮できる気泡駆動型循環式ヒートパイプのループを考案し、これを実験により確認した。

ボトムヒート及びトップヒートの両機能を具備する気泡駆動型循環式ヒートパイプのループ構成として構成-I及び構成-ロの2案を考案し、実験用のループを組み熱輸送量の確認を行った。(図2)

構成-Iは2個の弁の開閉状態を切替えることによりボトムヒートとトップヒートを選択するものである。また、構成-ロは弁を1個に減らしたものであり、1個の弁の開閉状態を切替えることによりボトムヒートとトップヒートを選択できる。

実験装置は外径約 20mm の配管(流れを観察するため一部をガラス製にして可視化)、外径約 60mm の円筒容器等で構成し、作動流体には 70%エタノール水を使用した。

実験により得られた熱輸送量測定結果のうち、構成-Iでの例を図3に示す。横軸は受熱(高温)側と放熱(低温)側との温度差である。

温度差が増加するに伴い熱輸送量も増加しており、一つのループで弁の開閉状態を切替えることによりボトムヒートとトップヒートの両方の機能を発揮できることを確認できた。

今後は熱輸送特性の把握を進め、性能の向上を図って行く予定である。

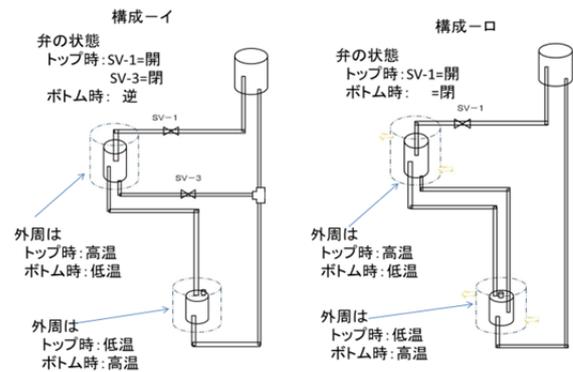


図2 ループ構成の例

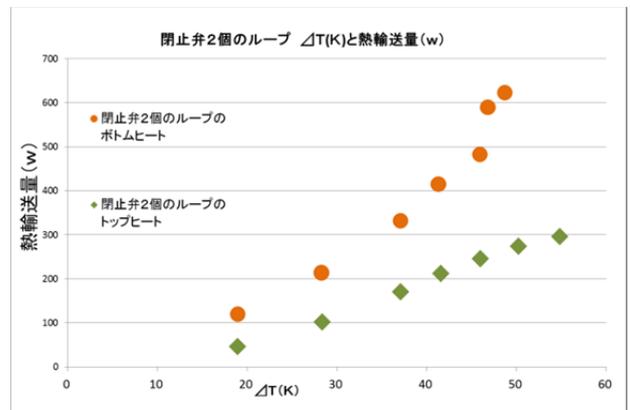


図3 熱輸送量

*1(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福井大学
本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターが福井大学との共同研究として実施した。

2.2.2.2. 無機酸化物光機能材料開発

2.2.2.2.1.

無機酸化物光機能材料の開発

Research and Development of Oxide-based Novel Photofunctional Materials

西尾繁*

Shigeru NISHIO

チタン添加酸化ジルコニウム発光材料は、レアアースを含まず、無害で、さらに明るくという特長を持つ発光材料である¹⁾。昨年度、このチタン添加酸化ジルコニウム発光材料の簡便な合成方法を開発する事に成功したが、この合成方法で作製した試料の発光強度は、レアアース含有発光材料の1/4程度だった²⁾。この材料の発光強度をレアアース含有発光材料に高めることを目的として、今回、発光強度の焼成温度依存性を800℃から1600℃の範囲で調査した。焼成は大気中で6時間実施した。実験の結果、発光強度は焼成温度が1400℃の時に最も大きくなった。その強さは、典型的なレアアース含有発光材料であるYAG:Ceの発光強度の2/3程度に達した。

参考文献

- 1) J. F. Sarver: J. Electrochem. Soc. 113, 124 (1966)
- 2) 西尾繁:若狭湾エネルギー研究センター研究センター年報 第13巻、92頁(2011)

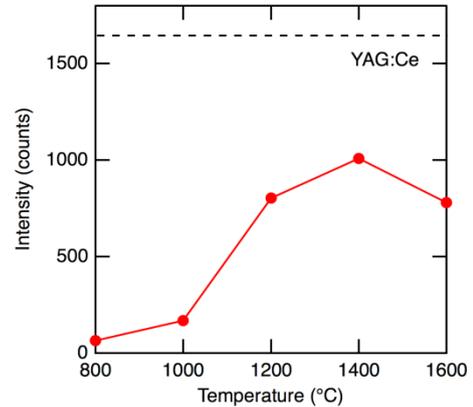


図1 チタン添加酸化ジルコニウム発光材料の合成温度と発光強度の関係。比較のために典型的なレアアース含有発光材料であるYAG:Ceの発光強度も示した。

*(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

2.2.2.3. バイオ応用環境技術開発

2.2.2.3.1.

二酸化炭素の光還元による固定化と有用物質生産
Useful Substances Production by Photo-Chemical Reduction of CO₂
遠藤伸之*
Nobuyuki ENDO

現代社会は化石燃料にエネルギー源の大半を依存しており、資源の枯渇や化石燃料の使用によって排出される二酸化炭素の環境への影響が大きな問題となっている。このような社会的ニーズの増加の中で、地球温暖化の原因として排出削減が必須となっている二酸化炭素を吸収・固定化し、炭素源として他の物質と反応させて有用な資源に変換して利用する技術開発の研究を実施している。二酸化炭素の反応には光を利用し、エネルギー投与を極力小さくすることで環境負荷が低いクリーンなエネルギーとして生産することを目標にする。本研究では単純な構造の化学種を反応剤として利用し、二酸化炭素を付加させる物質においても価値の低いものを利用することで低コスト化を目指している。本年度は反応性向上に有効な二酸化炭素吸着法の評価検討、前年度に見出した二酸化炭素の存在下で活性分子を生成する光増感反応の解析と、より反応性の高い増感剤の剛性を目指して研究を実施した。その結果、アルカリ溶液への二酸化炭素吸収で得られる溶液で、本研究で利用している光増感剤を用いた反応を進めることができ、排気ガスに含まれることが予想される塩素・硫酸は反応に影響ないことが分かった。ただし、反応量は非常に少なく、二酸化炭素存在下で多数の光反応が生じているが詳細は未だ不明な部分が多い。現状では有用な物質を産出するまでには至っていないが、今後の目標として、二酸化炭素を他分子に付加させる反応をより多く生じさせる増感剤の探索と改良合成の継続と、二酸化炭素と反応し有用な物質となる化合物の探索を行う、また、混合ガスからの二酸化炭素の吸収技術を改良し、システムを構築することを併せて実施する予定である。

* (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
本研究は、(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.

活性汚泥からのリン資源回収に用いる微生物の研究開発
Research and Development of Microorganisms used for Phosphorus Recovery from Activated Sludge
田中良和*
Yoshikazu TANAKA

リンは、生物が生きていく上で必須の元素であり、現在の食糧生産を維持するために欠かせないものであるが、日本で産出されないリン鉱石の埋蔵量は世界中で約 40～50 年分と予測され、その価格は近年 2～5 倍に高騰している。一方、下水処理場から排出される余剰汚泥は、日本の年間輸入量に匹敵するリンを含有しながらも、その殆どが未利用のまま廃棄されている¹⁾。本研究では、下水処理場の活性汚泥中からリン資源を回収するため、リンの固定に関わるリン蓄積細菌を選抜し、リン蓄積能力が飛躍的に向上した変異体細菌の作成を行うことにより、資源の有効利用および環境保全に資することを目的とした。本年度は、ポリリン酸合成に関わる遺伝子の改良を目的として、関連遺伝子の1つである *PhoU* 遺伝子に対して PCR (Polymerase Chain Reaction) を用いた変異導入の条件検討を行い、変異要因であるマグネシウムイオン濃度、アニーリング温度などの条件を決定した。これによって、本遺伝子内に 1 から 3 個程度のアミノ酸変異が起きる条件を決定することが出来た。現在、その他のリン蓄積に関連する遺伝子を単離している段階であり、それらの遺伝子に対しても同様の変異導入を実施して、高いリン蓄積能を示す菌体の作成を行っていく予定である。また、土壌中に存在する菌群から抽出した DNA 由来のリン蓄積に関連する遺伝子ライブラリーの構築を試みた。土壌試料から抽出した DNA を使用して、コスミドベクター SuperCos1 に対してクローニングを行ったものでは、平均サイズが 10kb 以下の DNA 断片が主となる独立したクローンを得ることが出来た。これについては、長鎖 DNA を得ることが困難であることから、今後は cDNA ライブラリーの作成を並行して行う予定である。

参考文献 1) 黒田章夫、滝口昇他 J. Environ. Biotechnol., 4, (2) 87 (2005)

* (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
本研究は、(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。

2.2.2.4. バイオマスエネルギー技術開発

2.2.2.4.1.

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*、田中良和*
Nobuyuki ENDO and Yoshikazu TANAKA

バイオマス資源は、化石燃料資源の代替として利用することで二酸化炭素排出が抑制でき、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、食糧と競合しない植物資源で、狭い国土で大半が森林を占める我が国では重要な資源である。しかし、現状では木質系バイオマスのエネルギー化は直接燃焼して熱源として利用する以外には実用化段階になく、利便性が高いメタン・アルコール等への変換技術開発が強く求められている。本研究では大規模な熱源や設備投資を必要としない微生物・酵素反応を応用し、生物化学的処理によって高効率変換プロセスを構築することを目的としている。前年度までに得られた成果をもとに、木質系バイオマスを利用した国際的にも競争力のあるバイオエタノール生産を可能にするため、セルロース分解酵素遺伝子に対する変異導入を行った。ランダム突然変異導入によって、アミノ酸レベルで数ヶ所に変異が導入された遺伝子断片を新たに得ることが出来た。また酵素を分泌する菌株に対し紫外線照射ならびに臭化エチジウムによる変異導入処理を行い、このうち紫外線を照射したものから野生株に比べて早い段階でセルロース分解酵素を分泌すると思われる菌株を得ることが出来た。微生物の改良と並行して、生物反応に適し、投入エネルギーの少ないバイオエタノール生産システムの構築を目的として、昨年度に検討した複数の処理槽での反応を分けるシステムを利用し、太陽エネルギーを利用して送液とエタノール回収を行う試験装置を試作した。反応の持続性が低いため、エタノール生成量はまだ非常に少ないものの、高濃度のエタノール回収に成功し、電力を必要としないバイオエタノールの生産に成功した。

* (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
本研究は、(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。

2.2.3. 原子力関連先端技術開発
 2.2.3.1. 若狭湾海洋環境モニタリング研究

2.2.3.1.1.

もんじゅ周辺海域リアルタイム流況観測に関する調査

Study of sea radar on remote sensing method of ocean current at surrounding areas of Monju Site

鳥取章二*、伊藤英樹*、
 Shouji TOTTORI and Hideki ITO

Abstract

We have examined the feasibility and suitability of a remote-control and real-time observation for sea current by sea radars at "Shiraki sea area" including the surrounding areas of Monju Site.

要約

もんじゅ周辺海域を含む「白木海域」での海洋レーダーによる遠隔リアルタイム流況観測の実用性および適応性について検討を行った。

I. 緒言

従来の流況調査は、船舶やブイを利用するため観測範囲が限定的または局所的(点)で、得られる観測データは間欠的なものとなっていた。近年、国内では海洋レーダーを用いた広範囲かつリアルタイムで流況を連続観測できる技術の研究が進められており、海洋環境調査への適用性等を検討するとともに、広域にわたる観測データの取得、信頼性向上を図ることができる実用化技術の開発に資する。

II. 調査内容

若狭湾東部海域において海洋レーダーによる連続流況観測の実施及び船舶調査により取得した現場流況観測データ(0.5 m 層)と海洋レーダー観測データ(約 0.3 m 層)との比較を行った。

III. 調査結果

海洋レーダーによる観測は気象条件の比較的悪い冬季であったにもかかわらず、もんじゅ前面を含む広範囲で連続の流況データを取得することができた(図1)。船舶による現場流況観測データとの比較では、海洋レーダー設備に近い観測点で良い一致がみられた(図2)。

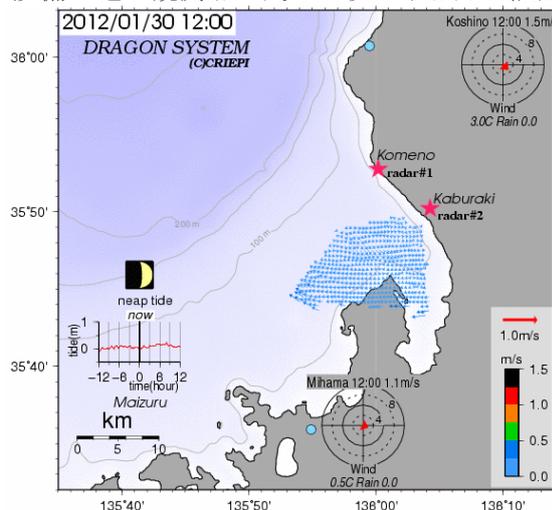


図1 海洋レーダーによる観測例

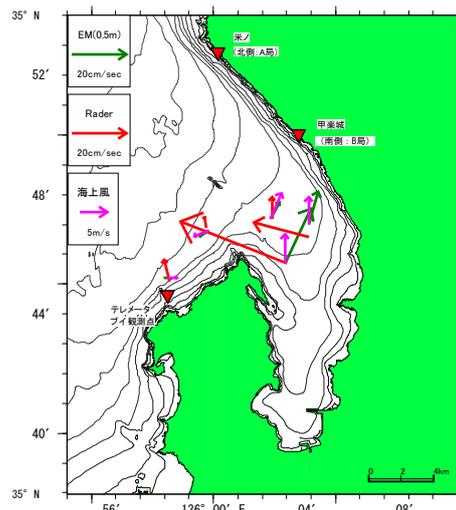


図2 海洋レーダー観測値と現場流況との比較

IV. まとめ

若狭湾東部海域において海洋レーダーによる流況観測の可能性に見通しを得た。船舶による流況観測データとの比較では、レーダー観測範囲の外縁部で整合が取れていない場合もみられた。これはレーダー設備から発せられる電波の減衰により観測頻度が少なくなったことが要因と考えられた。そのため観測時には、対象となる海域の観測頻度が高くなるようなレーダー設備の配置を検討することが重要と考えられる。

* (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、(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。

2.2.3.1.2.

若狭湾における海洋環境モニタリングシステム等に関する調査研究
 Study on Marine Environment Monitoring System for Wakasa Bay Area
 鳥取章二*、伊藤英樹*、
 Shouji TOTTORI and Hideki ITO

Abstract

Several numbers of nuclear power plants are generating electricity in Wakasa bay area. The plant operating companies and local government agency are monitoring radioactivity in the environment. In such monitoring activities, it is often pointed out that the monitoring in ocean is not speedy in data acquisition in comparison with the ones on land. This study started to give a solution to the problem in 2007 and will last until 2011. The study in 2011 made a detailed survey in coast of the bay following the previous survey conducted over the bay in 2007. A computer analysis methods and simulation model were also investigated based on the results obtained in the surveys.

要約

多数の原子力発電所が立地する若狭湾の沿岸部では、事業者及び地方自治体等により環境放射線モニタリングが実施されているが、陸上における環境放射線モニタリング体制に比べて、海洋における環境放射線モニタリングの現状は、リアルタイムにデータが得られず、迅速性に欠ける点がある。このため、各種モニタリング技術を駆使し、若狭湾における海洋環境モニタリングシステムの構築に資する調査研究を 2007 年度からの 5 ヶ年計画で開始している。本年度は若狭湾の概要を調べるために行った湾全体の調査結果を踏まえて、同湾の沿岸部を詳細に調査し、その結果を踏まえて長期の海洋環境のシミュレーションを行う解析モデルの構築を行った。

I. 緒言

若狭湾は国内でも有数の好漁場であるとともに、その沿岸部には多数の原子力発電所が立地しており、我が国の原子力発電所立地地域として先駆的な役割を果たしてきた。今後も原子力の平和利用を推進する上では、地域住民から一層の信頼を得ることが必要不可欠であり、迅速な情報提供と住民の安全確保を図るために、海洋環境におけるモニタリング体制を充実させることは重要である。

これを受けて、本研究では平常時における若狭湾の海洋環境の安全性を確認するための調査と、万一の事故等に備えた海洋への放射性物質の拡散・堆積状況を予測するためのモデル開発を進めてきた。平成 23 年度は 5 カ年計画の最終年度として、若狭湾沿岸部を中心とした調査及び開発した解析モデルによる放射性物質拡散予測の試算を行った。

II. 調査の実施及び解析モデルの開発

(1) 平成 23 年度は若狭湾の沿岸部海域において 20 点の海底堆積物を採取した。また 5 河川の河口付近において河床堆積物を採取した。これにより若狭湾全域における元素等の分布特性を把握するためのデータ(海底堆積物 105 地点、河床堆積物 25 地点)を得た。調査実施場所を図 1 に示す。

採取した試料については、安定元素、放射性核種、粒度組成、含水率、強熱減量、有機態炭素、無機態炭素、オパール態ケイ酸、全リン、全窒素の分析・測定を実施した。

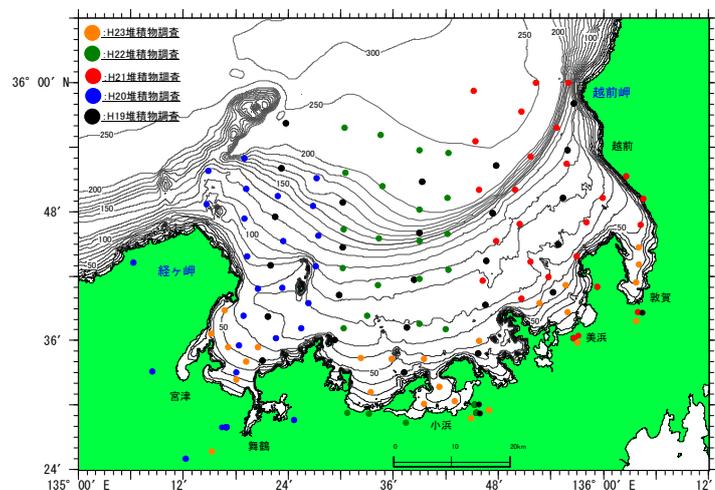


図1 調査実施場所(●2011年度)

* (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、文部科学省のエネルギー対策特別会計委託事業による委託業務として、(財) 若狭湾エネルギー研究センターが実施した平成 23 年度「若狭湾における海洋環境モニタリングシステム等に関する調査研究」の成果の一部である。

(2) 放射性物質の中長期的な拡散・堆積に関する解析モデルの開発については、中長期用流動モデルとして、流量収支が厳密に保たれるMAC法(Marker and Cell Method)¹⁾を若狭湾に適用した。水温・塩分の初期分布及び境界流速については、JCOPE(日本沿海予測可能性実験計画)データのうち、2003年から2006年までの4年間平均値を用いることとし、定常または準定常に達するまで計算を行い、放射性物質の拡散・堆積状況を計算するための基本流動場を得ている。放射性物質の拡散・堆積計算については、OECD/NEA(経済協力開発機構原子力機関)²⁾のモデルを用いることとした。パラメータ類はOECD/NEAの値に加えて、調査で得られた浮遊物質質量等の実測値も用いた。

III. 結果及び考察

(1) 若狭湾地域における海洋環境調査

若狭湾における底質は平成19年度から23年度までの調査結果から、概ね砂質または砂泥で占められており、湾口付近中央の大陸棚斜面域及び湾奥付近に泥質が存在していた。これらの分布は過去の知見³⁾から大きく変化していなかった。

人工放射性核種は ^{137}Cs のみ検出され、その他の核種は検出されなかった。検出された ^{137}Cs 濃度は、全国の発電所周辺海域における海洋環境放射能測定結果の変動範囲内であった。若狭湾の ^{137}Cs 分布は、湾口中央部から東部の大陸棚斜面付近や沿岸部の舞鶴湾、小浜湾内といったシルト、粘土・コロイドの割合が多い海域で高くなる傾向を示しており、 ^{137}Cs は吸着した細粒子とともに移動・堆積しているものと考えられる(図2)。

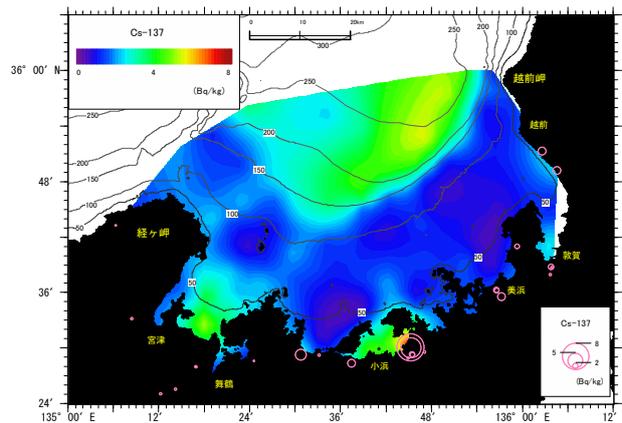


図2 若狭湾の ^{137}Cs 濃度分布

(2) 放射性物質の中長期的な拡散・堆積に関する解析モデルの開発

開発した中長期放射性物質拡散モデルを用いて、仮定した条件(放出点:敦賀半島先端部、核種: ^{137}Cs 、計算期間:30年)で試算を行った結果、海水中ならびに海底層における ^{137}Cs の濃度分布は放出点近傍の敦賀湾内に偏る分布を示し、若狭湾内の流れの状況を反映した結果となっている。

IV. まとめ

本研究は、若狭湾における現状の元素分布特性を把握するとともに、若狭湾沿岸部に立地する原子力発電所を対象として海域の放射性物質の拡散・堆積状況を予測するシミュレーションモデルの開発を行い、海洋環境モニタリングシステムの充実を図るものである。これらの海洋調査のデータは、若狭湾地域の漁業関係者への海流や底質等に関する情報や水産資源の保護、育成、変動予測などへの活用が期待されることから、本研究が、わが国の原子力の平和利用促進に資するのみならず、若狭地域の産業振興の一助になれば幸いである。

V. 謝辞

最後に、原子力産業と立地地域の産業振興に貢献できる研究の機会を与えて頂いた文部科学省のエネルギー対策特別会計委託事業に感謝するとともに、同事業における委員会でご指導を頂いた委員の先生方、更にご協力とご支援を頂いた地域の漁協関係団体、福井県水産課の方々に心から御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 小林紘士, 和田明, 角湯正剛: 数値流体実験, 朝倉書店, (1989)
- 2) 和田明: 海洋環境水理学, 丸善株式会社 (2007)
- 3) 林 勇夫, 志岐常正 (1985) 若狭湾(1)地質. 日本全国沿岸海洋誌, 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編, 東海大学出版会, pp.947-957.

2.2.3.2. 原子力応用技術開発

2.2.3.2.1.

放射線源情報評価手法調査

Study of examination methods of atmospheric radiation distribution unexpectedly delivered from nuclear power stations

久米恭^{*1}、高田卓志^{*1}、大谷暢夫^{*2}、長谷川崇^{*1,*3}

Kyo KUME, Takushi TAKATA, Nobuo OTANI and Takashi HASEGAWA

Abstract

We have studied the examination methods of atmospheric radiation distribution unexpectedly delivered from nuclear power plants. Data transformation, collection, and calculation systems were investigated to verify positions and specification of radiation sources with a help of unfolding calculation techniques, while these data are expected to be measured at several radiation monitoring equipment.

要約

原子力施設の異常時・事故時に環境大気中に漏えいする放射性物質の大気中分布を測定評価する技術を調査した。地上に設けられた複数の放射線モニタリング装置のデータから、放射線源の位置や核種をアンフォールディング計算技術を用いて評価するシステムについて、計測に用いる放射線検出装置、測定データの転送と集積手法を検討した。

I. 緒言

大気中に漏えいし、大気の流れによって移動していく放射線源については、測定によってその状態を細かく確認する技術は開発されていない。本報告では、大気中に漏えいした放射性物質の核種や大気中での分布を、測定によって評価する技術について調査検討した。

II. 方法

放射線源情報を測定するシステムに適用される検出装置を検討した。検出装置システムはガンマ線の検出素子である NaI と光電子増倍管、信号増幅器、波高分析装置、データの集積・転送・計算評価を行う小型計算機で構成される。これまでの検討で、計測されたデータの転送に放射線計数率に対応する時間よりも多大な時間を必要とする事が確認されており、ここでは、波高分析装置から計算機に転送されるデータの形式を改変する事によってデータ転送時間を飛躍的に短縮し、リアルタイムで線源情報を測定評価することを可能とする装置開発を試みた。

線源情報評価システムにおいて、其々の測定個所に設置される測定装置の構成と、装置を構成する多チャンネル波高分析装置(MCA)から計算機に転送される計測系の内容を図 1 に示した。また本研究では、図の MCA に各放射線のエネルギー情報を集積する機能を付加し、集積されたエネルギー情報、即ち、通常の波高分析データを(MCA control PC)に転送する様に改良し(図 1)、多点での計測情報をリアルタイム評価可能にするシステムを構築した。

(MCA control PC)に波高分析データを転送する装置について、⁶⁰Co 線源の放射線を測定する事によって、その機能を確認した。線源と NaI 検出器の間の距離を変化させる事による検出器位置の放射線強度をパラメータとして、1 個の放射線検出毎にデータを転送する設定(リストモードと称する。)と集積された波高分析データを転送する設定(MCA モード)で測定した。このシステムについて、データの取りこぼしが発生しない条件探索用の実験を実施した。

III. 結果

図 2 に計測時間1分について放射線強度をパラメータとした転送時間を示す。横軸の放射線強度は(1 cm 線量当量率、 μ Sv/h)で表示されている。計測時間が終了した後、MCA に残存しているすべてのデータが(MCA

^{*1}(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 協力研究員、^{*3}ハセテック
本研究は、(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。

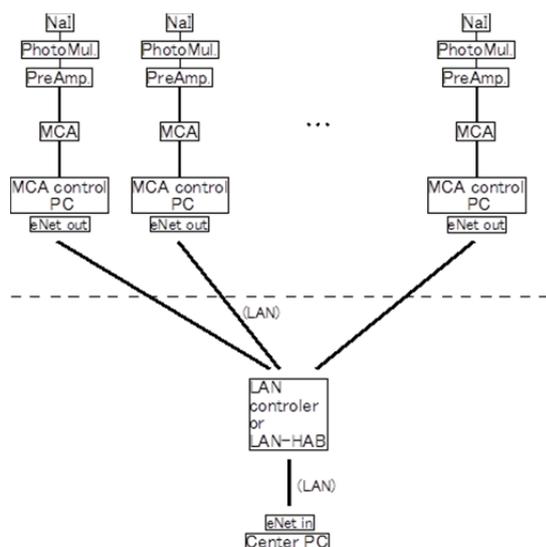


図1 放射線源情報評価システム。点線より上部は個別の計測系、点線より下部が新規に開発した monitor-PC 部。

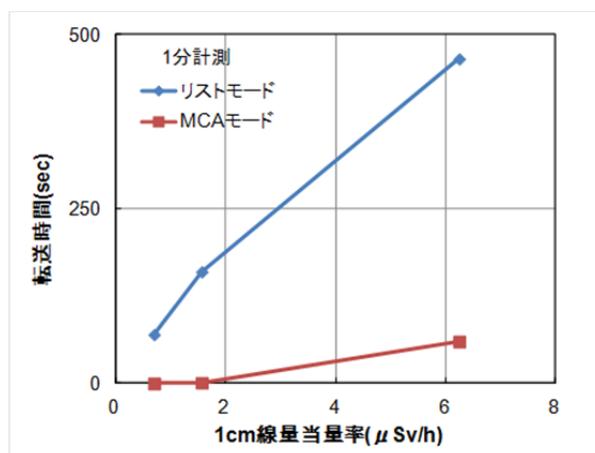


図2 データ測定1分後、データ転送に有した時間と線量率の関係。

control PC)に転送されるのに必要な時間を示しているが、適用している装置の仕様によって単純な比較にはなっていない。即ち、リストモードでは、本装置は計数と並行して測定データを転送しており、あらかじめ設定された時間で測定を終了した時点で、既に(MCA control PC)には一部のデータの転送が終わり、図に示された時間は、MCAに残存している部分のみの転送時間である。MCAモードでは、MCAにすべてのデータがリストモードの形式で残っており、そのデータを波高分布の形にMCA内で変換してから転送している。その結果、リストモードでは、計数率が充分小さければ、測定を中断する事なくデータが転送されるが、MCAモードでは測定終了後、データの転送時間中は測定が中断される。図に示されている様に、MCAモードとする事によって、転送時間は大幅に短縮され、 2μ Sv/h程度以下では、データ転送に伴う遅れは無視できるレベルである。放射線強度 $\sim 6 \mu$ Sv/hで5分間計測した場合、リストモードでは30分程度の測定の中断が必要であり、MCAモードでも5分程度の測定中断が発生する。

IV. 考察

本装置を適用する場合には、測定位置の放射線強度によって、測定の周期(測定時間とデータ転送時間)を最適な値に選択する必要がある。今回の改良によっても、計数率が高い場合には、測定に有意な中断が発生する。原子力施設への適用では、放射線測定時刻の記録等をMCAではなく制御計算機で行うことが可能であると考えられ、更に合理的な装置の選択が可能である。

V. 結語

大気中に漏えいした放射性物質の核種や大気中での分布を、測定によって評価する技術について調査検討した。複数の放射線計測器を結合して構成した放射線源情報評価システムのデータ量に対する性能を線源を用いて評価した。

参考文献

- 1) 久米恭、高田卓志、大谷暢夫、日本原子力研究開発機構受託研究報告書(2010)。
- 2) 久米恭、高田卓志、大谷暢夫、日本原子力研究開発機構受託研究報告書(2011)。

2.2.3.2.2.

野外における放射線源情報評価システムの検証

A stability examination of a new detection system of positions and directions of radioactive sources

久米恭^{*1}、高田卓志^{*1}、長谷川崇^{*1,*2}、鴨川仁^{*3}

Kyo KUME, Takushi TAKATA, Takashi HASEGAWA and Hitoshi KAMOGAWA

Abstract

A new detection system of positions and directions of radioactive sources was examined in a field environment, to verify its stabilities in a real outside situation.

要約

放射線源情報評価システムを野外環境で試用運転することにより、実運用に対する課題抽出の一助とした。

I. 緒言

別報で報告した放射線源情報評価システムについて、野外環境での試用運転により実運用に対する課題抽出の一助とするものとした。本節ではこの結果について報告する。

II. 方法

放射線源情報評価システムを特徴的なガンマ線を測定可能な極地に設置し、その実用性を検証するものとした。今回は極地として富士山(剣が峰)山頂(標高 3776 m)の富士測候所 1 カ所を選定し、放射線源情報システムを構成する 1 台の NaI 検出システムを設置して、7 月初旬から 8 月下旬までの約 2 ヶ月間の連続運転を試みた。なお今回は東日本大震災後に実施したことにより、人員の調整がつかなかったため、本来は複数の NaI 検出システムによって構成される放射線源情報評価システム全体での評価は不可能であり、同システムの構成要素である単体の NaI 検出システムの健全性を試験することにとどまった。

本来の放射線源情報評価システムは、単体の NaI 検出システム(NaI ガンマ線検出器、プリアンプ併設型の高電圧印可装置、リストモードでのデータ取得可能なマルチチャンネルアナライザー、データ収集用コンピュータから構成される)を複数台接続すること構成される。今回はこれらに加え、NaI 検出システムに GPS を接続して検出時刻を同期した。また停電に備えて無停電電源も接続した。その他、遠隔からの装置状況監視のため、携帯電話網を介したモデムも接続した。

運転期間中は装置状況確認のために 1 週間に 1 度程度現地を訪問した以外は無人運転とした。

III. 結果と考察

試運転期間中、富士山頂では晴天が長続きせず、頻繁に停電等が発生した。富士山頂周辺は商用電源のバックアップが乏しく、悪天候になれば送電が停止する時間が長くなることから、用意した無停電電源の容量をこえて停電が続くことも多くあった。最終的には、測定データを取得できた日数は 7 週間のうちの 2 週間程度であり、野外における無人運転における課題が明らかとなった。

電源の問題については、無停電電源を重層化するほか、非常用電源を用意する必要があることも明らかとなった。

取得したデータを解析した結果、強力な雑音が生じた信号の数の減少の原因となっていることが判明した。これはマルチチャンネルアナライザーの不調が重なったことも原因としてあげられる。今後の改良点として対応を検討する必要がある。

IV. 結語

放射線源情報評価システムを野外で試用し、運用上の課題を抽出した。

*1(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ハセテック、*3東京学芸大学

2.2.3.2.3.

原発事故で汚染された可能性のある飲料水のガンマ線検査手法の考察

Improvement of measurement methods of possible radioactive contamination in drinking water

久米恭^{*1}、高田卓志^{*1}、長谷川崇^{*1,*2}、村上雅之^{*1}

Kyo KUME, Takushi TAKATA, Takashi HASEGAWA and Masayuki MURAKAMI

Abstract

Gamma-ray measurement methods of possible radioactive contamination from nuclear accidents are discussed.

要約

原子力事故により汚染された可能性のある飲料水をガンマ線分析により検査するための手法について検討を行った。

I. 緒言

平成 23 年 3 月に発生した福島第一原子力発電所事故では、大気に漏洩された放射性物質の量は 3×10^{16} Bq 以上と見積もられており、周辺地域において現在も避難区域が指定されるなど、住民の生活に対して極めて深刻な影響を与えている。この状況の中で、旧緊急時避難準備区域に指定されていた地域(南相馬市、田村市、川内市、広野町、楡葉町)の復旧を支援するため、文部科学省から放射線モニタリングアクションプランが平成 23 年 10 月に発表された。¹⁾この中で、自治体の要望を踏まえたモニタリングとして、飲用の井戸水等のモニタリングを実施することとなり、若狭湾エネルギー研究センター(WERC)が実施機関の一つとして参画することとなった。今回は、この対応手法について報告するとともに、一般的な RI 施設が原発事故で汚染された可能性のある環境試料のガンマ線分析を実施するための検査手法構築について考察する。

II. 方法

WERC は通常の RI 施設であり、放射線発生装置、密封線源、非密封線源を取り扱うための放射線管理区域が設定されている。この管理区域内で発生した放射化物等を分析するため、ゲルマニウム半導体ガンマ線検出システム(Ge)を有している。今回のモニタリングではこの Ge を使用し、市販の U-8 容器(U8)に試料(水)を入れて測定するものとした。ただし、放射線管理区域内に管理区域外から汚染された可能性のある試料を持ち込むため、汚染が拡大しないように以下の措置を講じた。

試料は、対象区域の各家庭において、使用済 500 cc 飲用ペットボトル(PB)に対象の井戸水を注水し、これを自治体が収集する。収集された PB を現地において段ボール箱(DB)に入れ、WERC を含む各分析機関に発送する。この収集と発送の過程において、PB や DB の表面を汚染している可能性がある。そこで試料全般を受け入れる際に、汚染を拡散しないため、(1)DB を開けて PB を取り出す作業、(2)PB から U-8 容器に水を移し替える作業のそれぞれにおいて、特別区画を設置して作業実施するものとした。(1)用区画は、コンクリート床で側溝と流水用のホースのある屋根付き駐車場をそのまま使用した。(2)用区画は放射線管理区域手前の一般区域の居室スペースに、壁や床等にポリシートを敷き詰めて除染を容易な構造に変更した。(1)用区画においては、運送業者から DB を受け取った直後に汚染サーベメータで DB 表面や内側を測定し、汚染の有無を確認した。また PB 表面についても汚染の有無を確認した。その上で(1)用区画において PB 表面を流水で洗い、汚染拡散防止につとめた。流水で洗った PB を(2)用区画に移動し、U8 に移し替えた。U8 はビニール袋で覆い、放射性物質飛散の可能性を低減して Ge の場所へ移送した。U8 にはおおむね 80 cc の井戸水を入れ、測定した。測定を終了した試料等については、再試を求められる可能性を考慮して、(2)用区画で保管するものとした。

III. 結果と考察

平成 23 年 10 月 19 日から平成 23 年 12 月 8 日までの間に受け入れた PB の数は 463 本にのぼった。当初の計画¹⁾では、WERC が分担するサンプル数は一週あたり 100 本程度とされており、平均すると一週あたり 70 本程度を受け入れたことになる。PB 受け入れから分析終了までは 1-2 週間程度となった。いずれのサンプルからも原子力事故起源の放射性物質による有意な汚染は確認されず、天然放射性物質のみが確認された。図 1 に測

^{*1}(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}ハセテック

2.2.3.2.4.

セメント工場における「放射線計測」に関する研究

Developmental Research Program of the Radioisotope Measurement at Cement Factory

峰原英介*1、高田卓志*2、下河良*3

Eisuke J. MINEHARA, Takushi Takada and Ryou Shimokawa

Abstract

Developmental research program of the radioisotope measurement at Tsuruga cement factory is briefly describe below. After the TEPCO (Tokyo Electric Power Company) Fukushima first Nuclear Power Plant was demolished by the huge earthquake and tsunami in March 11th 2011, products from a cement factory should be checked to avoid radioisotope contamination originated from the nuclear power plant.

要約

昨年 2011 年 3 月 11 日の地震と津波による東電福島第 1 発電所の大規模核事故以後、セメント工場は放射性 Cs による原料や製品の汚染を避けるために、常に Cs の放射線計測を行う事が必要となった。以下の文章は、財団法人若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)で平成 23 年度に実施された敦賀セメントとの共同研究であるセメント工場における「放射線計測」に関する研究をまとめたものである。年間にわたる計測の結果、セメント製品、中間生成物や原料に放射性 Cs は検出されなかった。

I. 緒言

昨年 2011 年 3 月 11 日の地震と津波による東電福島第 1 発電所の大規模核事故以後、セメント工場は放射性 Cs による原料や製品の汚染を避けるために、常に Cs の放射線計測を行う事が必要となった。このエネ研で平成 23 年度に実施された敦賀セメントとの共同研究であるセメント工場における「放射線計測」に関する研究について述べる。

II. 実験方法及び結果

特に以下の 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
- ② セメントの製造検査技術の開発
- ③ 知的財産の取得と報告と開発結果のまとめ

具体的な計測例を以下に説明するが、結論からいえば、表 1 の様に年間にわたる計測の結果、セメント製品、中間生成物や原料に放射性 Cs は検出されなかった。唯一クリンカーダストの中から Cs がクリアランスレベル以下ではあるが測定された。放射性セシウムの分離をセメント工場のロータリーキルンを用いて行うことを検討した。実際に約 10 か月程度にわたって天然の Cs の同位元素を用いて Cs 塩化物として焼成炉の残渣とクリンカーダストへ分離の割合や焼成物+焼成炉残渣とクリンカーダストの重量比を調べた。数回の計測の間、安定してロータリーキルンの焼成物+残渣は 22-25%、クリンカーダストは 75-78%で大部分クリンカーダストに分けられる。焼成物と焼成物残渣はクリンカーダストに比べて約 1000 倍弱の重量である。これは 2012 年 3 月に福井大学で行われた原子力学会の部会招待講演で発表された¹⁾。この結果から最適な条件で運転しているわけではないが、セメント焼成用のロータリーキルンは、セシウムの塩化物を用いて放射性セシウムを分離することが可能である。特に 400 Bq/kg 程度の汚染土壌や瓦礫ではそのまま分離できてクリアランスレベルの 100 Bq/kg 程度に分離除染が可能と考えられる。これは日処理量 3000 トン級の焼成炉の例である。

表1:クリンカーダストとセメントの放射線計測結果の例

採取日	γスペクトロメトリー [Bq/g]		測定時間 [sec]	試料重量 [g]	CI 濃度 [%]
	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs			
6 月 6 日クリンカーダスト	0.051 ± 0.012	0.080 ± 0.012	1000	45.0	26.0
6 月 6 日セメント	ND 不検出	ND 不検出	1000	100	0

参考文献

1)峰原英介、高田卓志、遠藤伸之、焼却炉による放射性セシウム塩化物の高効率の生成と分離除去、2012 年 3 月 19-21 日原子力学会春の年会予稿集 806 頁

*1(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 粒子線医療研究グループ、*3 敦賀セメント株式会社
本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターが敦賀セメント株式会社との共同研究として実施した。

2.2.3.2.5.

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 material
笹瀬雅人*
Masato SASASE

本研究では、粉末冶金法を基調とし、完全固相(非溶解)プロセスにより様々な課題を解決し、チタンにおける特定サイトへの酸素固溶強化と CNT 単分散強化といった従来の金属複合化手法にはない革新的な材料・プロセス設計の構築を目指す。その結果、優れた強度と延性を両立する完全レアメタルフリー・高強靱性純チタン材を創製する。最終的には、開発チタン材に関して、常温での引張強さ;1000MPa 以上、破断伸び 20%以上の実現を目指す。

H23 年度は、高分解能透過型電子顕微鏡を用いて、特定サイトへ導入された酸素及び CNT 分布を観察し、チタン中の固溶及び単分散化を検討した。

その結果、酸素固溶チタン材において、格子縞が確認される比較的結晶性の良好な部分に、転位の存在が確認できた。我々は、この転位近傍に酸素が集まりやすくなり、凝集しているとした。すなわち、転位と呼ばれる結晶が乱れた部分に固溶した酸素がチタンと置き換わることで、強度を持たせることに成功したと考えた。

また CNT 単分散強化においては、CNT 添加量 0.1, 0.3 and 0.8 mass%のチタン材について、微細組織の観察を行った。CNT の導入により機械的強度を増加させると言われている微細粒子及び転位の混入が確認できた。さらに CNT 添加量の増加とともに密度及び大きさの増加も確認できた。これは、CNT がチタン中に均一に分散していることを示唆しており、単分散化が実現されたといえる。

* (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、(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、北陸電力株式会社からの受託研究として実施した。

2.2.3.2.6.

超高純度金属の精製研究
High purity metal development
笹瀬雅人*
Masato SASASE

実用材料から効率的な精製を目指し、縦型高真空帯溶融精製技術の開発を行った。本手法は、試料を縦型に設置して、加熱には電気抵抗加熱炉(および高融点金属の銅、マンガン等には高周波加熱)を用い、静かに、効率よく溶融帯を移動させ、不純物を分離させる精製法である。さらに本装置では、超高真空化による不純物の除去、特に従来取り除くのが難しかったガス性不純物の除去を行うことで、より良質な超高純度材料の創製を可能とする。また、縦型超高真空溶融精製炉を使い、超高純度アルミニウムとしては非常に大きい直径 33 mm、長さ 500 mm のアルミニウムの精製を試みた。その結果、以下の点について明らかとした。

- (1) 装置改造の結果、非常に大きな試料にも対応でき、超高純度化の肝になる溶融帯移動速度と溶融回数の最適化も図ることができた。
- (2) 残留抵抗比 (RRR-R(300 K)/R(4.2 K))は、すべての領域で増加を観、特に粒径が最大となった領域で、14000 となり、試料純度の向上を確認した。
- (3) 不純物元素の測定を GD-MS 法により試みた。不純物元素を 0.01 ppm オーダーでの定量が可能になり、その結果内部の不純物元素についても 15 %程度の精製除去がなされた点を確認した。
- (4) 大気中の精製実験により、アルミニウム及び銅試料において、溶融状態の最適化が図られた。

現時点では、帯溶融精製法と超高真空溶解法を併用した縦型高真空溶融装置として試作したに過ぎない。今後アルミニウムの効率的な精製を行い、実用化に即した高純度化・合金化の研究開発を行う。

* (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、(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、北陸電力株式会社からの受託研究として実施した。

2.2.3.2.7.

放射線計測技術開発

Research and Development of Radiation Measurement

西尾繁^{*1}、久米恭^{*2}、高田卓志^{*2}

Shigeru NISHIO, Kyo KUME and Takushi TAKATA

本研究は、発光量の大きい革新的なシンチレータ材料と放射能分布可視化手法の二面を融合して開発し、より一層の原子力安全に資することを目的として実施したものである。

シンチレータ材料開発分野では、まずシンチレータ候補材料の高速合成-選抜技術の開発を行った。図1に示したのは、今回開発した高速合成法の概念図である。次に、この技術を実際に活用して 1620 種類のサンプルを合成し、シンチレータとしての性能を評価した。放射能分布可視化手法開発分野では、蛍光板とカメラを用いた放射線分布評価の基礎検討を行った。この結果、大面積の既存シンチレーション素材を用いた発光分布計測が、可視光の画像解析により可能であることを見いだした。

本研究開発事業の継続は、安価で高性能な小型放射線計測器の開発や、広範に飛散した放射性物質の分布を安価で効率的に取得する技術の開発に繋がると期待される。

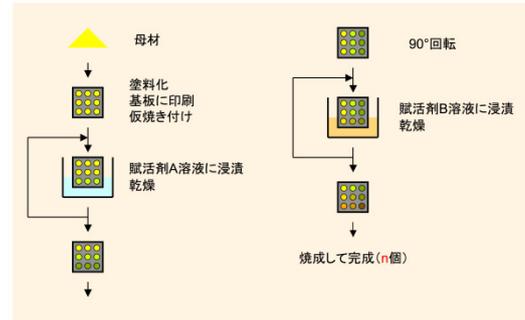


図1 今回開発したシンチレータ候補材料高速合成法の概要

^{*1}(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 粒子線医療研究グループ
本研究は、(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、北陸電力株式会社からの受託研究として実施した。

2.2.3.3. 科学機器利用技術開発

2.2.3.3.1.

イオンビームを用いた再生医療用クラゲコラーゲン修飾培養基材の開発

Development of Jellyfish Collagen-Modified Scaffold Biomaterial for Regenerative Medicine by Using Ion Beams

柳原佳奈*¹、寺田聡*²、清水雅史*²、番戸博友*³、高城啓一*⁴、畑下昌範*⁴Kana YANAGIHARA, Satoshi TERADA, Masashi SHIMIZU, Hiroto Banko, Keiichi TAKAGI
and Masanori HATASHITA

Abstract

In the culture of stem cells for regenerative medicine, scaffold materials play important roles for cell behaviors and functions. We focused on jellyfish collagen as a scaffold for the sake of safeness against zoonotic infections. In the present report, we examined the method for fixing jellyfish collagens on the matrix surface. After the irradiation of ion beams to a polylactide film, we successfully made cross-links between jellyfish collagen and surface carboxyl groups. On this scaffold, proliferation of HepG2 cell lines (originated from human hepatic carcinoma) was accelerated, suggesting that this scaffold material is effective for cell culture.

要約

再生医療における幹細胞の培養には、足場素材が細胞の挙動や機能に重要な働きを示す。我々は、人畜共通感染症に対する安全性の観点からクラゲコラーゲンに着目した。本報告では、クラゲコラーゲンの基質表面上への固定法の検討を行った。ポリ乳酸フィルムへのイオンビーム照射することで、クラゲコラーゲンとフィルム表面カルボキシル基との間に効果的に架橋結合を行なうことができた。この足場素材上で、ヒト肝癌由来培養細胞の増殖は促進された。このことは、この足場素材が細胞培養に有効であることを示唆している。

I. 緒言

再生医療における幹細胞培養技術では、細胞の足場となる培養基材が重要となる。現行の足場基材には、ポリ乳酸などの生分解性合成高分子のみから構築されている基材があるが、安全性が高く、取扱いが容易であるものの、細胞に対する効果が低いという欠点がある。そのため、基礎研究では哺乳類由来因子からなる培養基材が多く用いられている。しかしながら、哺乳類由来因子を用いることは、コスト高で人畜共通感染症の懸念があるため安全性に乏しい。臨床応用を考慮した場合、調製した細胞を人体に投与するのであるから、哺乳類由来因子は培養プロセスから一切除外されねばならない。

そこで、我々は哺乳類由来因子の代替として、クラゲから抽出したコラーゲンに着目した。これまで、我々はクラゲコラーゲンが株化細胞および正常細胞に対して有効であることを見出している。これらの知見をふまえて、本研究では生体由来因子としてクラゲコラーゲンを用い、イオンビームを用いて基材を改質する技術を組み合わせることで、合成高分子と生体由来因子の特性を兼ね備えた足場基材を構築する。

II. 材料と方法

1. イオンビームを用いた生分解性高分子フィルムへのカルボキシル基の導入

ポリ乳酸フィルムに、マイクロ波イオン源イオン注入装置を用いて、ヘリウムイオンを照射し、カルボキシル基が露出表面を形成した。フィルム上のカルボキシル基の量は、トルイジンブルー法で評価した。

2. ポリ乳酸フィルムへのクラゲコラーゲン架橋反応

カルボキシル基を露出させたポリ乳酸フィルムに架橋剤、NHS (N-ヒドロキシサクシミド)、および EDC(1-エチル-3-(3-ジメチルアミノプロピル)カルボジイミド塩酸塩)を用いてクラゲコラーゲン、あるいは、ブタコラーゲンを架橋した。固定化されたコラーゲン量は、抗原抗体反応、および、ニンヒドリン反応で評価した。

*¹(独)医薬基盤研究所難病・疾患資源研究部、*²福井大学大学院・工学研究科、*³日華化学株式会社・先端技術開発部、*⁴(財)若狭湾エネルギー研究センター生物資源グループ

本研究は、公募型共同研究事業として実施した。

3. 作製した足場材料の培養細胞に対する効果

クラゲコラーゲン、あるいは、ブタコラーゲンを架橋して作製した足場材料を 24well マルチウェルプレートにセットし、滅菌した後、5%ウシ胎児血清を含む DMEM(ダルベッコ改変イーグル培地)を用いて、ヒト肝がん細胞株 HepG2 細胞を播種し、5 日間培養した。5 日目の細胞数をアラマブルー染色法にて測定した。

4. 間葉系幹細胞の増幅及び分化に対する効果

クラゲコラーゲンを塗布し、乾燥させることにより、コラーゲンコートした 24well プレートにラット骨髄より単離した間葉系幹細胞(MSC)を播種し、継代培養し、細胞の増幅に関して評価した。また、クラゲコラーゲンをコートした 6well プレートに、MSC を 20 万 cells/well で播種し、骨分化培地で 14 日間培養し、骨分化誘導に対する効果を検討した。細胞増殖の測定は、トリパンプルー排除法にて生細胞および死細胞を計数した。細胞の骨分化は、細胞の石灰化沈着をアリザリン染色法で評価し、さらに Image J を用いて赤斑点占有率(赤斑点面積/全面積)を数値化した。

III. 結果と今後の展望

1. 間葉系細胞に対するクラゲコラーゲンの効果

中胚葉系幹細胞に対するクラゲコラーゲンの効果を確かめるため、MSC を用いた細胞応答実験を行った。MSC の増殖に対するクラゲコラーゲンの効果を検討したところ、クラゲコラーゲン上では、プラスチック上よりも細胞を旺盛な増殖が見られた。一方、MSC の骨分化誘導に対するクラゲコラーゲンの効果に関しては、ブタコラーゲン上よりもクラゲコラーゲン上で細胞の石灰化沈着が促進されており、骨分化が促進されていた。このように、クラゲコラーゲンは哺乳類由来因子を代替するだけでなく、再生医療に用いられる細胞に対してより高機能な足場となることを見出した。

2. イオンビーム照射による基材表面へのカルボキシル基の導入とコラーゲン架橋反応

プラズマ処理を施したポリスチレン表面のような親水性素材では、コラーゲンを塗布し、乾燥させることでコラーゲンコートが可能であるが、ポリ乳酸フィルムにこの方法を適用することは難しい。また、塗布乾燥法によるコートは結果の均質性に乏しく、耐久性が低い。そこで、イオンビーム照射によりポリ乳酸フィルム表面にカルボキシル基を露出させ、露出させたカルボキシル基とコラーゲン分子の間に架橋反応を施すことで、ポリ乳酸フィルム表面上へのクラゲコラーゲンの固定を試みた。

イオンビームを照射することで、生分解性高分子フィルム(ポリ乳酸フィルム)へのカルボキシル基を導入することができ、照射量を調節することで導入するカルボキシル基量を調節することができた。導入したカルボキシル基量は培養基材を構築するのに十分量であった。

十分量のカルボキシル基を導入したポリ乳酸フィルムへブタコラーゲンおよびクラゲコラーゲンを固定化した。架橋剤の濃度を最適化することで、高密度にコラーゲンを固定化することができた。また、固定化したコラーゲン量は、ニンヒドリン反応および、抗原抗体反応をもちいて定量化することができた。

3. コラーゲン架橋ポリ乳酸フィルム上での肝由来細胞株の増殖

高密度にブタコラーゲン、あるいはクラゲコラーゲンを固定化した足場材料上では、イオンビーム照射なしでコラーゲンを固定化した足場材料上と比較して HepG2 細胞の増殖が促進された。このように、作製した足場材料は培養細胞に対して有効であることを見出した。

4. 今後の展望

本報告の結果、クラゲコラーゲンが、幹細胞の一つである MSC の増殖と分化に対して促進的効果を持つことが明らかとなった。また、細胞外マトリックス等での修飾が難しいポリ乳酸素材に対して、イオンビーム照射と架橋反応を組み合わせることで、効果的にコラーゲンが固定できることを確認し、コラーゲンを固定したポリ乳酸フィルム上で、肝がん由来細胞の増殖が促進されることを確認した。

今後は、構築した足場材料の表面構造、均一性を評価し、構築法を改善するなどして、再生医療用細胞の培養に最適な足場材料を構築する。さらに、様々なクラゲコラーゲン画分を固定化した足場材料を作製し、ヒト由来の幹細胞を含む細胞で評価する。このようにして最適化した足場材料の品質を評価し、さらに改善することで、将来的に商品化を目指す。

2.2.3.3.2.

蛋白質表層発現酵母に供するプラスミド DNA の構築
Surface display of Nitroreductase on *Saccharomyces cerevisiae*

向當綾子*1、田中良和*2、高山勝己*1

Ayako KOUTO*1, Yoshikazu TANAKA*2 and Katsumi TAKAYAMA*1

Abstract

Nitroreductase (NIR) catalyze reduction of 4-nitrophenol. We constructed the plasmid to display NIR on the cell surface of *Saccharomyces cerevisiae* MT8-1 using a glycosylphosphatidylinositol (GPI) anchor linked to the C-terminal region protein.

要約

ニトロレダクターゼ酵素は 4-ニトロフェノールを還元し 4-アミノフェノールに変換する酵素である。これを酵母の細胞表層に GPI アンカーを介して発現させるための表層発現用プラスミドを構築することを目的とした。

I. 緒言

パラチオンなどの有機リン系農薬は、害虫に対し優れた殺虫効果を示す一方で、生体内において神経伝達に致命的な障害を与える急性毒性も強い。日本では製造・使用ともに禁止されているが、諸外国では未だに使用され続けているため、輸入農産物に対する残留農薬の簡便・迅速・高感度な検出方法が強く望まれている。本研究では有機リン系化合物を選択的に検出できるバイオセンサーの構築を目指し、センサー触媒の一つとなる大腸菌ニトロ還元酵素(NIR)表層発現酵母の創製を目的として、NIR 表層発現用プラスミドの構築を行った。

II. 方法

NIR 遺伝子配列のクローニングは、E.coli DH5 α 株の染色体上にある NIR の ORF から行った。プライマーは Primer F 5' atcaccagatctatggatattcatt3' 及び Primer R 5' atcagatccaccacttcggtaa3' を用いて PCR 増幅を行い、両末端に任意の配列を付加した NIR インサートを作製した。PCR には KOD[®] FX Neo(TOYOBO 製)を使用し、NIR インサートは MinElute[®] PCR GelExtraction Kit (QIAGEN 製)を使用して精製した。pWIFS プラスミドは、pWIFSigOPH を鋳型とし、Primer F 5' atcaccagatctatggatattcatt3' 及び Primer R 5' atcagatccaccacttcggtaa3' を用いたホールプラスミド PCR によって線状の pWIFS を作製した。その後、NIR DNA 断片と線状化した pWIFS プラスミドを用いて In-Fusion を行った。クローニングには In-Fusion[®] HD Clonig Kit(TaKaRa 製)を使用した。50°C で 15 分間インキュベーションを行った In-Fusion 溶液を用いて *E. coli* DH5 α コンピテントセル (TaKaRa 製) へ形質転換を行い、翌日まで 37°C で培養した。

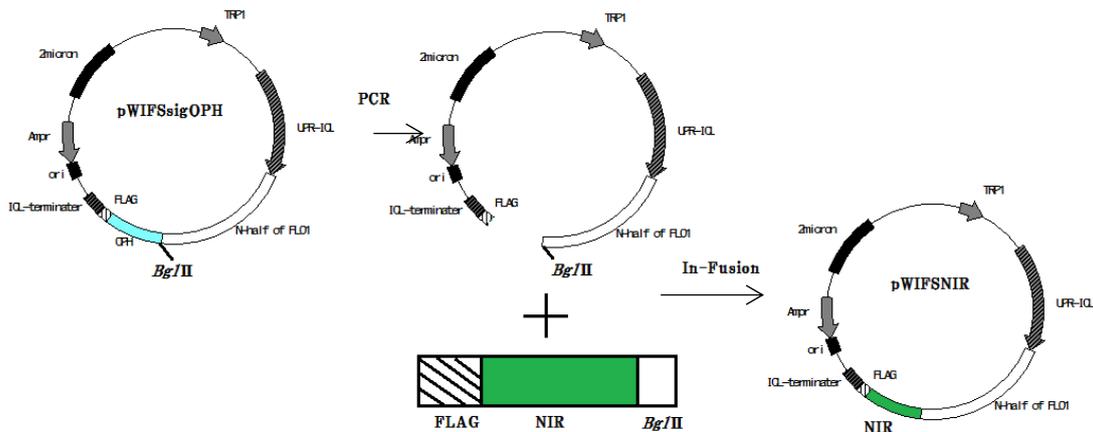


図1 蛋白質表層発現用プラスミドの構築の流れ

III. 結果

NIR 酵母表層発現用プラスミドである pWIFSNIR の In-Fusion クローニングを用いた構築に成功した。シーケンスによって、NIR 遺伝子配列が正しく挿入されたことを確認した。

*1福井工業高等専門学校、*2(財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源グループ

2.2.3.3.3.

地球温暖化係数が大きな SF₆ ガスの完全回収装置に関する研究
A Full Recovery System for SF₆ Gas as a High Global Warming Potential

峰原英介*

Eisuke J. MINEHARA

Abstract

Development of a full recovery system for SF₆ gas as a high global warming potential at WERC is briefly described below. Cryosorption using liquid Nitrogen and mechanical refrigerator is adopted to recover fully residual SF₆ gas and others in the accelerator pressure vessels.

要約

以下の文章は、財団法人若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)で平成 23 年度に実施された低温吸着ポンプを用いた地球温暖化係数が大きな SF₆ガスの完全回収装置に関する研究をまとめたものである。

I. 緒言

この研究の目的は、温暖化ガスである SF₆ガスの環境への放出を完全にゼロとするため、極低温吸着真空ポンプ(機械式クライオポンプとモレキュラーシーブス等の液体窒素など液冷媒冷却クライオソープションポンプ)を用いた SF₆ガス完全回収装置を開発することである。このエネ研で平成 23 年度に実施した共同研究である地球温暖化係数が大きな SF₆ガスの完全回収装置に関する研究について以下に述べる。特に、若狭湾エネルギー研究センターを含めて、静電加速器は、回収時に残留する SF₆ガスの放出が大きく、温暖化に大きく寄与するので、通常型の SF₆ガス回収装置に付加し、完全回収するため、実用的な SF₆ガス容量の試験と将来の実用的な規模のシステムの試作と実用化の研究を進めた。

II. 方法と結果

開発内容は、以下の 2 点である。①極低温吸着真空ポンプ(機械式クライオポンプとモレキュラーシーブス等の液体窒素など液冷媒冷却クライオソープションポンプ)を用いた SF₆ガス完全回収装置開発試験を行う。更に②SF₆ガス完全回収装置システムの最適設計や、各種構成デバイスの実用的な仕様についてまとめる。

この温暖化ガスである SF₆ガスの環境への放出を完全にゼロとする、世界に類例のない SF₆ガス完全回収システムを実用化できると考えられた。このシステムは、仕組みが簡単で安価に簡便に利用できる。最初の確認として、1 気圧 200 L 程度の SF₆ガスの吸着と 200 L の容積で数トル程度での減圧時の吸着排気速度が数分以内であることを確認できた。

H22 年度に温暖化係数 24000 と最も影響の大きな温暖化ガスの一つである SF₆ガスの環境への放出を完全にゼロとするため、借用した極低温吸着真空ポンプ(機械式クライオポンプ)を用いた SF₆ ガス完全回収装置に関する大容量吸着研究を行った。モレキュラーシーブス等の液体窒素など液冷媒冷却クライオソープションポンプを用いるシステムを設計検討した。特に通常型の SF₆ ガス回収装置に付加するため、実用的な SF₆ ガス容量の試験と将来の実用的な規模のシステムの試作と開発を行った。1 気圧 200 L 程度の SF₆ ガスの吸着に成功した。数十 L の容積で数トル程度の減圧時の吸着時間が数分以内であることを確認した。AMS研究会やタンデム加速器研究会で発表を行った。SF₆ 完全回収装置の特許出願を行った(出願番号 2010-150405)。

H23 年度に温暖化ガスである SF₆ガスの環境への放出を完全にゼロとする、世界最初の SF₆ガス完全回収システムを試験できた。安価に簡便に利用できる同システムの大規模システムの設計検討が可能である。これに必要な主要要素の製造検討を共同で行った。

参考文献

- 1) 特許出願、名称「SF₆ 完全回収装置」、出願番号 2010-150405
- 2) 峰原英介:若狭湾エネルギー研究センター年報平成 21 年度第 12 巻 17 頁、(2009)、平成 22 年度第 13 巻 66 頁、(2010)
- 3) 峰原英介:第 23 回タンデム加速器研究会要旨集 89 頁、(2010)7 月 2-3 日「静電加速器の絶縁ガス性能と絶縁ガス取り扱い方法」
- 4) 峰原英介:第 13 回 AMS シンポジウム報文集 55 頁、(2011)1 月 28-29 日「静電加速器の絶縁ガス取り扱い方法」

* (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

2.2.3.3.4.

BN 膜の切削工具への応用

Cutting tool application for boron nitride films prepared by dry process

笹瀬雅人*

Masato SASASE

立方晶型窒化ホウ素 (c-BN) 膜は、高硬度、高耐酸化性、高熱伝導率、低摩擦係数を有しているため、工具、機械部品などのへの応用が期待されている。我々は、工具類など複雑形状部での密着性向上、さらに量産成膜に対応する高速化を目標として、磁界励磁型イオンプレーティング法により、c-BN 膜の創製を試みた。

XRD 測定により、生成した薄膜が BN 膜であることを確認した。また、機械的特性試験の結果から、この薄膜が 5000 Hk 以上の硬度を持ち、0.1 の低摩擦係数を示す良好な薄膜であることが明らかとなった。

そこで生成した BN 膜構造を明らかにするために、高分解能透過型電子顕微鏡 (HRTEM) 法による構造解析を行った。その結果、生成した薄膜は、結晶性 BN / Amorphous BN / TiN の層構造を示していることが明らかとなった。特に、表面付近を詳細に観察したところ、六方晶型の h-BN 中に 5 nm 程度の粒径を持つ立方晶型の c-BN 粒子の生成が確認できた。おそらくこの c-BN 微粒子が、薄膜の機械的特性に影響を与えていると考えられる。平成 24 年度では、機械的特性を支配する表層結晶性 BN 膜内の微細構造を中心に検討する。

高温の熱衝撃で剥離しない c-BN 膜の構造について TEM 観察できれば、機械応用可能な c-BN 膜が明確になり、応用特性が予測できるようになる。

*(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、(財)若狭湾エネルギー研究センターが神港精機株式会社と共同で実施した研究の一部である。

2.2.3.3.5.

ウェットプロセスによるシリコンインターポーザ形成技術の開発

Development of Electrochemical Preparation Process for a High-performance Silicon Interposer

笹瀬雅人*¹、常光幸美*²

Masato SASASE and Yukimi JYOKO

本研究では、「オールウェットプロセスー電気化学プロセス」によるシリコンインターポーザ形成技術の開発を目指すものである。

ニッケル触媒活性化処理を施した p-Si(100)ウエハー基板上にグリオキシル酸を還元剤に用いた非ホルマリン型無電解銅めっき Cu/Ni/p-Si(100)薄膜(膜厚 $\sim 1 \mu\text{m}$)を作製した。その試料について、断面透過電子顕微鏡法(STEM-ED)による微細構造及び結晶構造解析、エネルギー分散型 X 線分光法(EDS)による組成分析、ならびに X 線光電子分光法(XPS)による化学結合状態分析を行った。その結果、めっき条件にも依存するが、かなり急峻な Cu/Ni 界面の fcc Cu/Ni 2 層膜構造がほぼ全体に均一に形成しており、Cu-Ni 合金化の可能性は低かった。また、Ni/p-Si(100)界面においては、非晶質 SiO₂ 層($\sim 0.1 \mu\text{m}$ 、絶縁層)および Ni ナノ結晶(粒径 $\sim 10\text{-}20\text{nm}$)混在の非晶質 Ni-Si 複合水和酸化物あるいは複合水酸化物層($\sim 0.25 \mu\text{m}$)の存在を示唆する電子回折ハロー図形および XPS プロファイルも観測された。これは、めっき条件に依存したより複雑な結晶成長機構とその界面構造の形成を意味するものである。

さらに、熱処理による無電解めっき Cu/Ni/p-Si(100)薄膜の微細構造および組成分布の変化ならびにその結晶構造についても評価・解析した結果、熱処理条件(473K, 2h (Ar))においては膜質に顕著な変化はなく、熱処理条件(723K, 2h (Ar))では、Ni 層、特に Cu/Ni 界面層の膜質が変化し、Ni 層中に Cu の混入も観察された。しかし、p-Si(100)基板への Cu および Ni の拡散、拡散による Ni-Cu 固溶合金化や Ni ナノ結晶の結晶構造における変化は認められなかった。また、界面非晶質 Si 酸化物層厚および Ni ナノ結晶の粒径分布の変化、ならびにその電気的特性(絶縁性)との相関性についても評価・検討中である。

*¹(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福井工業高等専門学校

本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターが福井工業高等専門学校と共同で実施した研究成果の一部である。

2.2.3.3.6.

走査透過型電子顕微鏡(STEM)による局所分析と最新試料作製技術
Local analysis for thin films by scanning transmission electron microscope (STEM)笹瀬雅人*
Masato SASASE

透過型電子顕微鏡は、結晶構造から電子構造までをナノスケールで解明できる装置として進化し続けている。このような大きなポテンシャルを持った電子顕微鏡を材料科学に有効利用することは、材料科学の進歩に欠かせない。一方、電子顕微鏡は高度に発達した装置であり、そのオペレーションにはハードに対する深い理解が必要であり、さらに得られた結果の解釈には高度の専門知識が必要である。また、観察する材料の薄片化も原子オーダーの制御が必要となり、難易度が高い。本研究では、最先端分析手法である走査透過型電子顕微鏡(STEM)による局所分析手法を学び、その分析手法に用いる、高分解能観察が可能な電顕試料の試料作製技術手法を開発する。

鉄シリサイド薄膜とシリコン基板の界面観察を行うために、イオンリング法を用いて、原子オーダーの観察が可能な非常に薄い電顕試料を、再現性良く薄片化することに成功した。さらに本電顕試料を、STEM 法による界面状態の観察を行った。

その結果、H22 年度はシリサイド/シリコン界面において、従来の電子顕微鏡では観察できなかった、原子オーダーのずれを確認したのみであったが、H23 年度はそのずれの定量的な評価をすることができた。今後は構造によるずれと同時に、電子状態を「その場」で観察を行い、物性値を同時に明らかにすることを目指す。

材料が多様化し、さらにナノオーダーサイズまで微細化した組織変化を明らかにする必要がある昨今、透過型電子顕微鏡の必要性はますます増加している。本研究は、電顕観察にもっとも重要である試料薄片化技術と、その試料の分析手法の習得にある。これが成し遂げられたら、様々な材料を扱う県内企業の要求にも迅速に対応でき、産業高度化にも役立つものとなりうる。

* (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

2.2.3.3.7.

ナノメッキ法による電子材料の微細構造評価
Microstructure observation of electronic materials prepared by nano plating method笹瀬雅人*
Masato SASASE

粒子をナノサイズ化すると、触媒効果や量子サイズ効果等の新しい機能が発現し、従来では考えられなかった様々な用途展開が可能となる。現在、マイクロエレクトロニクス分野では、数 μm から数 nm の幅を有する結晶の表面や粒界面の特異的な機能を利用した高性能化が進んでおり、プリント基板分野でも製品の幅や厚さが年々微細化し、数十 nm の部品が見受けられるようになった。そこで、本研究では、ナノめっき技術を利用したナノ粒子の創製法の開発を行う。

平成 23 年度は、ナノめっき手法によりポリイミド樹脂フィルム上に形成した導電パターン、特に無電解ニッケルめっき膜とポリイミドフィルムとの界面の構造について、高分解能透過型電子顕微鏡により検討を行った。本観察に用いる試料は、トリプルビームを持つ集束イオンビーム加工法を用いた。本装置は、従来の加工の際、ガリウムイオンビームによりついたダメージを低速のアルゴンビームを用いることで、取り除くことができ、良質な観察用試料の作製が実現できる。

観察の結果、従来方法のめっき皮膜と比べて、本手法のナノめっき皮膜は、特徴的な金属/高分子混合層を持つとともに優れた屈曲耐性を有することが明らかとなった。このことは、金属ナノ粒子が高分子基材に潜り込んでいる界面構造をとることからアンカー効果による強固な密着性及び高屈曲耐性が得られていることが、透過型電子顕微鏡による微細構造解析から得られた。

* (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、(財)若狭湾エネルギー研究センターが福井大学と共同で実施した研究の一部である。

2.2.3.3.8.

ケラチン繊維の微細構造解析ならびに成分解析
 Microstructural analysis and component analysis of a keratin fiber
 笹瀬雅人*
 Masato SASASE

ヒトの毛髪は身近な生体由来繊維であるにもかかわらず、その微細構造は未だ明らかにされてない。毛髪は、ケラチン繊維で構成されており、大きく分けて、マイクロフィブリル、それが束となったマクロフィブリル、それらを包むように最外層に鱗状のキューティクルが5~6層重なっている。美容を目的とした毛髪へのカラーリング(毛染め)施術やパーマメントウェーブ施術において、用いられる酸化還元反応を利用した薬剤処理による変化についても毛髪を構成している上記組織での化学変化・構造変化までは十分な議論がなされておらず、薬剤の最適化を図る上で詳細な検討が必要である。本研究では、TEM, AFM, SEM,さらにはそれらに付属する元素分析装置を用いて、毛髪の微細構造解析を行い、薬剤処理による構造変化の解明を行う。

平成 23 年度は、ヒト毛髪組織のカラー施術やパーマ施術による各薬剤の浸透度合いや各薬剤処理における各組織の微細構造変化を測定するために施術毛髪の断面方向ならびに縦方向の切片を TEM にて観察した。加えて、毛髪表面への処理剤の付着や処理効果を確認するために、AFM を用いて測定を行った。

その結果、毛髪断面の観察では、キューティクルの層構造およびマクロフィブリルとその間隙に存在する CMC が観察され、さらには、薬剤処理による構造的な欠落、すなわち、ダメージが観察された。また、前例の少ない毛髪の縦方向の観察方法を確立し、毛髪微細構造の確認や薬剤による毛髪組織の構造変化を観察することができた。カラー処理を施した毛髪では、特にキューティクルの CMC でのダメージが顕著に観察され、ダメージを緩和する処理剤の使用では、そのダメージ緩和効果を TEM 観察により観察することができた。パーマ処理を施した毛髪では、キューティクル CMC、マクロフィブリル CMC、およびマクロフィブリルにてダメージが観察され、ダメージを緩和する処理剤の使用では、そのダメージ緩和効果を TEM 観察により観察することができた。また、還元剤、酸化剤の強弱によってもダメージ度合いが変化することを観察できた。AFM によってヘアケア処理剤の使用前後の毛髪表面状態を観察することができた。

* (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、(財)若狭湾エネルギー研究センターが日華化学株式会社と共同で実施した研究の一部である。

2.2.3.3.9.

リアルナノ・サブナノ・原子スケール分析を目指した光電子分光及び光吸収分光法の確立
 Application of photo-emission and absorption spectroscopy to characterization of atoms,
 cluster and nanoparticles
 笹瀬雅人*1、高廣克己*2
 Masato SASASE and Katsumi TAKAHIRO

本研究では、光電子分光・オージェ電子分光を用いて原子レベルからサブナノメートル・ナノメートルサイズの粒子(以降「ナノ・サブナノ粒子」とよぶ)に対する分析法の開発・確立を目指す。そのために、平成23年度には、以下の研究内容を実施した。1)黒鉛基板上にAgナノ・サブナノ粒子を作製。2)光電子分光、光吸収分光、X線回折および電子顕微鏡を用いて作製した試料のキャラクタリゼーション。3)電子および走査プローブ顕微鏡による直接観察と各種スペクトルとの相関を検討した。

高配向性熱分解黒鉛(HOPG)上の銀のXPS Ag 3d_{5/2}内殻準位およびAg MNN オージェ電子スペクトルにおいて、バルク値からのピークシフトをAg蒸着量に対して調査した。Ag 3d_{5/2}内殻準位スペクトルでは、ピークシフト量は高々0.2 eVであった。一方、Ag MNN オージェ電子スペクトルでは、ピークシフトはAg蒸着量の増加にともない-0.9 eVから-0.2 eVへと著しく変化した。この変化は、蒸着Ag原子がクラスター、サブナノ粒子を経て、ナノ粒子へと成長したことによる。また、3d_{5/2}/MNNピーク強度比がAg蒸着量に依存することを見出した。ピーク強度比は、Agナノ粒子中での光電子とオージェ電子の減衰長に関係するため、その値はAgナノ粒子の粒径を反映することが推測された。しかし、電子および走査プローブ顕微鏡による直接観察の結果とピーク強度比との相関は認められなかった。現在、3d_{5/2}/MNNピーク強度比の再現性を検討している。

*1 (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 京都工芸繊維大学

本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターが京都工芸繊維大学と共同で実施した研究の一部である。

2.2.3.3.10.

アルミナゾルの粒径・形状制御技術の研究

Controll techniques of grain size and shape for alumina sol by sol-gel method

笹瀬雅人*

Masato SASASE

アルミニウムアルコキンドを原料とするゾルゲル法によって得られるアルミナゾルは、透明性が高く、蒸留精製したアルミニウムイソプロピレートが原料であるため化学的純度が高いという特徴がある。これまで、排気ガス浄化用触媒担体用のバインダーとして高い評価を得ている柱状粒子の高濃度化について検討を行い、現行の 2 倍の高濃度化を実現した。そこで、他の形状制御されたアルミナゾルの高濃度化の実現、さらに TEM 観察を主体とした種々の分析方法を駆使してファイラーや表面処理剤等、新規用途の部材評価を実施することによって、新規用途への応用展開を目指してきた。これまでの研究で得られた粒子形状制御技術および高濃度化技術を用いて、柱状粒子以外の粒子形状(板状など)を有するアルミナゾルの高濃度化製法を確立した。また、これまでの研究では安定剤として酢酸を使用していたことから、本年度は新規用途展開およびユーザー要求への対応のため、安定剤に硝酸を使用したアルミナゾルの粒子形状制御技術および高濃度化技術確立を目指す。

本年度は、安定剤に硝酸を使用したアルミナゾルの粒子形状制御技術および高濃度化技術確立について検討を行った結果、以下の結果が得られた。1) 安定剤に酢酸を使用したアルミナゾルと同様に、安定剤の投入前に熟成工程を実施することにより、粒子の結晶成長を促すことで現行の2倍の濃度アップが可能になった。2) パイロット製造装置を使用したスケールアップ品とラボ品を比較したところ、各工程での TEM での粒径・形状観察結果から、スケールアップしたゾルは、ラボ試作品と同等の粒子形状であることが確認できた。

安定剤として酢酸だけではなく硝酸を使用した高濃度アルミナゾルのスケールアップをパイロット製造装置にて実現できたことにより、排気ガス浄化触媒バインダー用途としての拡販が望める。また、安定剤の種類が増えたことで、新規用途への応用展開の幅が広がった。

* (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、(財)若狭湾エネルギー研究センターが川研ファインケミカル株式会社と共同で実施した研究の一部である。

2.2.3.3.11.

パルマ藻類のバイオシリカ細胞構築メカニズムの可視化

HRTEM-analysis of silicon biomineralization process during cell wall formation in Parmales algae

笹瀬雅人*¹、大城香*²、桑田晃*³

Masato SASASE, Kaori OHKI and Akira KUWATA

パルマ藻と系統的に近縁で、2 枚のバイオシリカ細胞壁を持つ珪藻類では、細胞壁は細胞分裂面に存在する小胞に Si 分子が集積し細胞壁合成が開始される。パルマ藻でも類似メカニズムで細胞壁が形成されているという作業仮説をたて、この仮説を検証するために、パルマ藻細胞中にしばしば観察される小胞構造に着目し TEM 法だけでなく、コントラスト差が画像に反映する HAADF-STEM 法を用い、超薄切片の厚さを変えてバイオシリカ主成分である Si と O の検出を試みた。

元素分析で Si のシグナルは、細胞の染色固定に用いたオスミウムのシグナルに近接して現れ Si シグナル検出を妨害している可能性があるため、今年度はオスミウム酸染色固定を行わない試料を作成し、分析をおこなった。その結果、一部の試料の細胞中の小胞に含まれる不定形の電子密度の高い構造体から、HAADF-EDS 点分析および線分析法により、Si と O の存在が検出された。さらに H22 年度には、面分析では確認されなかった Si 元素が、今年度は、HAADF-EDS 面分析法でもはっきり確認でき、視覚化に成功した。また、H22 年度同様、小胞に含まれる細胞壁に類似した構造体からは、Si, O とも検出されなかった。

パルマ藻同様のバイオシリカ細胞壁を持つ珪藻類では、細胞壁は細胞分裂面に存在する小胞に Si 分子が集積し細胞壁合成が開始されると考えられている。今回観察された不定形の電子密度の高い構造体は、前駆物質の可能性が考えられた。

シリカは半導体・ガラス・セラミックスなどの原料として多用されている。今後、バイオシリカの形成機構に関与する制御因子が明らかになれば、シリカ沈着制御を材料工学分野へ応用する可能性が考えられる。

*¹(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福井県立大学、*³(独)水産総合研究センター・東北区水産研究所
本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県立大学と(独)水産総合研究センター・東北区水産研究所と共同で実施した研究の一部である。

2.2.3.3.12.

金属ガラスへのイオン注入法の研究

Ion induced structural modification and nano-crystalline formation of Zr-Al-Ni-Cu metallic glasses

笹瀬雅人^{*1}、永田晋二^{*2}

Masato SASASE and Shinji NAGATA

金属ガラス相を形成しやすい合金では貴金属の混入によって金属ガラス相の安定化、すなわち過冷却領域の拡張や、耐摩耗性の向上が期待されている。これまでは、イオン注入によるナノ結晶形成を中心に観察してきたが、本年度はガラス形成能が高いとされる Zr-NiAlCu 合金試料に対し、Au,Ag,Pt などの貴金属イオン注入を行い、透過・走査電子顕微鏡観察により局所構造変化を観察するとともに、X線回折による長周期の構造変化、さらに基板との界面におけるイオンミキシングの影響について調べた。とくに二体衝突にもとづくシミュレーションで予想されるはじき出し量と回折ピーク強度との比較、ラザフォード後方散乱実験で得られる界面での混合原子数との比較を行い、核的衝突効果と拡散その他の効果について検討を行った。

数百 keV から 1 MeV 程度の貴金属イオンを ZrNiAlCu 結晶合金表面に室温で数 at.% $\times 10^{16}$ /cm² 程度注入することで、非晶質化が認められた。イオン注入ではピコ秒のオーダーでカスケードが形成されるので、局所的な溶融、急冷と同等の効果が現れたと考えられる。また、ZrCu₂ の回折ピーク強度は計算されるはじき出し量にほぼ比例して増加することから、衝突によるはじき出し効果が非晶質化の重要なパラメータであることが示された。断面 SEM 観察ではスパッタで作製した非晶質薄膜が柱状構造を持っていることがわかるが、イオン照射をほどこすと、より微細な組織へと変化する。合金の構成元素である Zr,Ni,Cu 原子はわずかに基板側へと入り込んでいる一方、基板である Si 原子の薄膜合金への流入はほとんど見られない。この結果は拡散を考慮しない衝突のみのシミュレーション結果と類似しており、ZrNiAlCu 系への室温イオン注入では衝突過程が支配的であると考えられる。現時点ではイオン注入によって、非晶質表面層が容易に得られることを示したところであり、得られた非晶質表面の機械的特性を評価する必要がある。

^{*1}(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}東北大学
本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターが東北大学と共同で実施した研究の一部である。

2.2.3.3.13.

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研究

Microstructure observation of plating film on polymer prepared by μ DP³ process笹瀬雅人^{*}

Masato SASASE

フレキシブルプリント回路基板(FPC)は、エレクトロニクス産業に欠かせない材料である。フレキシブルプリント回路基板の導電パターンの形成においては、フィルム基材と金属導電体との界面の密着性の向上が重要であることが広く知られており、この界面構造についての研究が広く行われている。

セーレン(株)では、ポリイミド樹脂フィルム上に導電パターンとなるめっき膜をダイレクトに形成する新規の回路形成技術 μ DP³ (μ Direct Pattern Printing and Plating)プロセスを開発した。 μ DP³プロセスは従来工法と比べて、フィルム基材と金属導電体との界面の密着性が高いことが期待されている。本研究では、 μ DP³プロセスによってポリイミド樹脂フィルム上に形成した導電パターン、特に無電解ニッケルめっき膜とポリイミド樹脂フィルムの界面構造について透過型電子顕微鏡法により解析した。

その結果、 μ DP³ 工法で形成しためっき皮膜は、金属/高分子界面において金属ナノ粒子が高分子基材に潜り込んだニッケル/ポリイミド混合層(厚み 60 nm 以上)が存在していることがわかった。すなわち、混合層中のめっきはナノ粒子からなり、めっき金属の高分子材料に対するアンカー効果が期待でき、高密着性の可能性を示唆していた。

^{*}(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、(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共同で実施した研究の一部である。

2.2.3.3.14.

高速重イオン・レーザー複合照射による金属ナノ構造体の創製研究

Control of particle-shape and morphology with ion-laser co-irradiation and swift heavy ion irradiation

笹瀬雅人*¹、武田良彦*²

Masato SASASE and Yoshihiko TAKEDA

絶縁体中に分散した金属ナノ粒子は、表面プラズモン共鳴により可視光領域において粒子内の局所場が著しく増強され、大きな光学非線形性とピコ秒レベルの応答性を有する。局所場自身も非線形項を内包するため、光入力強度によって、局所電場の帰還回路的な制御が可能で、情報の大容量高速伝送化に対応した単一粒子構造によるフォトニクススイッチ動作が期待できる。この機能特性を実現するためには、ナノ構造体制御による局所場の調整、ナノ粒子構造の相安定性の向上などの技術開発が不可欠である。

ナノ粒子構造体の形状制御及び光学特性測定を物質・材料研究機構にて行い、当センターでは高分解能透過型電子顕微鏡(HRTEM)により、照射により変化したナノ粒子の微細組織、形状・大きさ・分散度についてキャラクターゼーションを行う。以下の4点について、共同研究期間にて検討を行う。

- 1) 誘電体媒質中への金・銀ナノ粒子の精製(サイズ、分布、形状制御)
- 2) 高エネルギー重イオン・レーザー複合照射によるナノ粒子の形態・形状制御
- 3) 照射により elongation したナノ粒子・ナノ惑星微細組織の高分解能電子顕微鏡による観察
- 4) 電子励起効果と形状制御との相関

平成 23 年度は、粒子サイズを制御した銀ナノ粒子材料では、その光学非線形性の波長分散が表面プラズモン共鳴による粒子内の局所電場の増強を直接的に反映していることがわかった。また、非線形性は粒子サイズとともに増大するが、波長分散が大きく変化することがわかった。これは、強い非線形性により、局所電場自身が変調されているためであると考えられ、スイッチ動作の可能性を示唆するものである。高速重イオン照射によるナノ粒子構造制御では、ナノ惑星粒子を有する伸長ナノ粒子構造体の作製に成功した。

*¹(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(独)物質・材料研究機構(NIMS)
本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターが(独)物質・材料研究機構と共同で実施した研究の一部である。

2.2.3.3.15.

電池用材料の物性及び電気化学的評価・解析

Powder properties of cathode active materials relations electrochemical behavior

笹瀬雅人*

Masato SASASE

電池材料において、素材の電子状態や化学結合状態は性能に直接影響することが知られている。従来は粒径や形状・結晶構造など素材としての物理的な特徴と、実用としての電気化学的評価を比較することで開発を行っていた。本研究では、電池性能の向上を図るため、リチウムイオン電池用正極材料について田中化学研究所にて電気化学的特性を評価し得られた情報と、本研究センター所有の、XPS、SEM、TEM などの結晶構造、電子状態、化学結合状態を直接分析できる装置で得られた解析結果を用い、評価技術法の確立を目指す。最終的には得られた評価技術を基に新規素材開発や生産条件に反映させる。

本年度は、通称 3 元系と呼ばれるニッケル・コバルト・マンガンから構成されるリチウムイオン電池用素材について、粒子内の結晶サイズ(粒界)の大きさや粒界単位での結晶方位及びそのばらつきに関する情報を取得する技術を開発した。平成 23 年度は充放電前後における結晶内でのリチウムイオンの配置、存在割合に関する知見を得ることを目的とした。3 元系と呼ばれるニッケル・コバルト・マンガンから構成されるリチウムイオン電池用素材について、充放電前後における結晶内でのリチウムイオンの配置、存在割合に関する知見を調べた。未充電及び充放電させた粒子を正極板の状態に取り出したのち、FIB 加工装置を使用し TEM 観察可能な薄片とした。これを日本電子製 JEM-ARM200F を用い STEM-HAADF 像観察を行ったところ、これまでは確認できなかったリチウム原子層が確認でき、欠陥の存在及び遷移金属との置換が確認された。充放電前後では充放電後時のみ、リチウム層が均一になっている様子が確認された。今年度はリチウムイオン電池用正極材料の充放電に伴うリチウム層の変化やその濃度に関する情報を取得することができた。

*¹(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、(財)若狭湾エネルギー研究センターが株式会社田中化学研究所と共同で実施した研究の一部である。

2.2.3.3.16.

透過型電子顕微鏡による生物及び繊維内部構造の観察技術の確立

Establishment of an observation method for soft materials using by transmission electron microscopy

笹瀬雅人*

Masato SASASE

最近、日華化学(株)やKB セーレン(株)などの県内企業から、毛髪や細胞等の生物系材料及び繊維や高分子などのソフト系材料の組織観察の要求が非常に増えており、今後、その研究開発結果により県内企業の活性化を促すことが期待される。一方、エネ研現有の JEM-3000F では、ソフト系材料の組織観察で期待される低倍率及び軽元素の高コントラスト化が非常に難しく、その要求に応えられない。また、我々のグループでは生物やソフト系材料の電顕観察のための試料薄片化技術について、未熟であり、多くの改善点を抱えている。

本研究では、福井大学にある低倍率から高倍率まで高いコントラストで良質な組織像が観察できる透過型電子顕微鏡 (JEM-2100TM JEOL 製)を用いて、生物やソフト系材料の電顕試料の試料作製及び観察技術手法の習得を試みた。H23 年度は、KB セーレンのカーボンナノチューブ入り繊維材料を対象として研究を行った。CNT 複合繊維材料は、少ない添加量で高伝導率を実現する新規の導電糸として期待されている。その導電特性は CNT の添加量だけでなく、分散状態や方向にも大きく依存する。従って、CNT 複合繊維中の CNT 分散状態、配置分布および方向と、繊維としての電気抵抗値変化との関連を検討する必要がある。CNT 複合繊維中の CNT 分散状態、配置分布および方向を観察するためには透過型電子顕微鏡によるナノ領域の観察が必要である。一方、CNT 複合繊維材料は導電糸になる柔らかい繊維の中に非常に硬い CNT を含むために、マイクロームを用いて試料を切片化する際に、硬い CNT に引っ掛かり、均一に薄くすることが難しいことがわかっている。そこで、本年度は試料を液体窒素温度にて冷却させ、冷やすことで硬さを均一にし、CNT 複合繊維の切片を試みた。その結果、冷却し硬さを均一にすることで非常に薄い試料の切片化に成功した。切片の厚みは、条件により 50~100 nm まで、均一に切片化することができた。その結果、繊維軸方向に対する CNT の分散状態を観察することが出来る試料の作製が再現性良く、実現することができた。

* (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、(財)若狭湾エネルギー研究センターが福井大学と共同で実施した研究の一部である。

2.2.3.3.17.

透過型電子顕微鏡(TEM)による繊維内部構造の観察技術確立

Technology establishment for the internal structure observation of fibers

using Transmission electron microscopy

笹瀬雅人*

Masato SASASE

近年、カーボンナノチューブ(CNT)等の機能性粒子を樹脂中に複合化させた材料を繊維化し、新規の機能性を持つ繊維の研究開発が行われている。その研究開発を円滑に行うためには、複合繊維中の機能性粒子の分散状態や樹脂-粒子界面の状態を詳細に観察する必要性が増している。一方、分散状態や界面状態の微細構造を解析するためにはナノレベルでの観察技術が必要であり、主として透過型電子顕微鏡 (TEM)を用いる必要がある。さらに、観察をおこなうためには、目的にあった試料作製技術、観察技術と解析技術が必要であり、特に試料作製には多くのノウハウが必要になる。本研究では、TEM 試料作製法及び前処理技術の検討、条件の最適化、そして樹脂材料(繊維材料)における TEM 観察・解析技術の検討を行った。

H23 年度は、CNT 複合繊維について、繊維作製条件および各製造工程での CNT 複合繊維中の CNT 分散状態、配置分布および方向と、繊維としての電気抵抗値変化との関連を検討した。また、CNT 複合繊維中の CNT-樹脂界面状態観察技術の検討および界面状態が及ぼす繊維特性との関連を検討した。その結果、以下の点が明らかとなった。(1) CNT 複合繊維の繊維軸方向に対する CNT の分散状態を観察することが出来るようになった。CNT 複合繊維を繊維軸方向に配向させた場合、CNT 分散状態も配向が認められた。(2) CNT-樹脂界面観察では、ウルトラマイクロームでの作製切片、FIB での作製切片を比較するとウルトラマイクロームでの作製の方が、より明確な界面が観察されることが判明した。しかし、繊維作製条件による CNT-樹脂界面の剥離といった現象は、認められなかった。

* (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、(財)若狭湾エネルギー研究センターが KB セーレン株式会社と共同で実施した研究の一部である。

2.2.3.3.18.

透過型電子顕微鏡を用いた金属ナノ結晶の構造安定性に関する研究
Structural stability of nanocrystalline metal prepared by gas deposition method笹瀬雅人^{*1}、稲見隆^{*2}

Masato SASASE and Takashi INAMI

結晶粒径が 10 nm のオーダーであるナノ結晶は優れた力学特性を示すが、一般には熱的に不安定とされている。このことは工学的に重要な問題である。ガスデポジション法で作製した金ナノ結晶は極めて良い熱的安定性を示した。金ナノ結晶の電顕観察で、ナノオーダーのバブルが多数確認された。このバブルも熱的安定性の要因の一つと考えられる。このバブルは、He ガス気流中で生成した金ナノ粒子にヘリウム(He)原子が付着、デポジション中のナノ結晶に混入して生成した可能性が考えられる。しかし、一般に、金属と不活性ガスは弾性相互作用が大きく、容易に拡散してしまい、結晶中には殆ど含有されない。バブルに多量の He が含まれているとすると、ナノ結晶特有の性質の一つと考えられ、どのような挙動を示すか興味ある問題である。そこで、電顕観察によりバブルの構造および分布状態を調べ、昇温試験より He ガスの放出温度および放出量を求め、金ナノ結晶にける He バブルの挙動および熱的安定性との関連を検討した。

ガスデポジション法で平均粒径が異なる金ナノ結晶を作製した。X 線回折法により平均結晶粒径および粒径分布を評価した後、電顕観察および昇温脱離試験により He バブルの存在状況及びその結晶粒径依存性を確認した。昇温脱離試験により、平均粒径が小さく熱的に安定な金ナノ結晶ほど多量の He を吸収していることが確認された。電顕観察から、熱的に安定な金ナノ結晶では粒界の三重点にトラップされている He バブルの存在及び焼鈍による He バブルの成長も確認された。熱的に安定な金ナノ結晶では、He バブルが粒界の三重点にトラップされて、ある大きさに成長して安定に存在するため拡散移動しにくいことが示唆された。多量の安定な He バブルの存在が金ナノ結晶の高い熱的安定性に関与していると考えられる。ガスデポジション法による金ナノ結晶の熱的安定性は He バブルの存在が原因の一つであることが明らかに成りつつある。He バブルによる安定化機構の解明が進めば、ナノ結晶の優れた機械的特性を活かすための実用化に大きく資することができる。

^{*1}(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}茨城大学
本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターが茨城大学と共同で実施した研究の一部である。

2.2.3.3.19.

銅基板上の自己集合膜の表面分析

Surface analysis on copper substrate by self-assembled monolayers

笹瀬雅人*

Masato SASASE

情報通信の高速化に伴い、電子機器に使われる銅樹脂複合体においては、高密度化、高速伝送化、薄型化の要求が高度化し、これまでの物理接合では対応が難しく、新しい銅・樹脂接合材料が求められている。本事業では、銅基板上の自己集合膜の定性・定量的な評価方法の確立により情報通信の高速化に対応できる銅・樹脂接合材料の開発に寄与することを目的とする。

銅基板上の自己集合膜の定量・定性分析においては、極表面の接合材料の定量・定性及び化学結合状態を解析する必要があり、XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy : X 線光電子分光装置)が最適と考えられる。従って、銅基板上に自己集合膜を容易に形成し、且つ樹脂に強固に化学接合できる接合材料を分子設計、銅基板上に自己組織化し、自己集合膜の定量・定性分析及び化学結合状態を XPS にて解析した。銅基板上に調整した自己集合膜の定量・定性及び化学結合状態の解析を行った結果、銅と自己集合膜との化学結合状態がより明確となり、XPS が非常に有益であり、目的とする接合材料の自己集合膜の定性・定量及び化学結合状態を解析することができた。また、銅基板状の約 5 nm 厚みを持つ自己集合膜の微細構造を評価するために、透過型電子顕微鏡により構造解析を行った。H23 年度は、主に電顕観察用試料の作製を行った。その結果、銅基板状の自己集合膜はおよそ 5 nm と非常に薄く、さらに金属と高分子の 2 層ヘテロ構造であるので、電顕試料作製時に選択的スパッタリング効果により、自己集合膜のみ削れてしまい、界面観察用の電顕試料作製に至らなかった。平成 24 年度には電顕試料作製法について、マイクロームやクライオイオンスライサーなどの試料作製法の検討が必要であることが分かった。

^{*}(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、(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共同で実施した研究の一部である。

2.2.3.3.20.

不純物添加酸化チタン薄膜のナノ構造解明による高性能光機能材料の開発

Development of high-photofunctional materials by investigating
nano structure of titanium dioxide films with impurities笹瀬雅人^{*1}、鷹野一朗^{*2}

Masato SASASE and Ichiro TAKANO

本研究では、無機材料、特に酸化チタンを用いた可視光シフト型のデバイス創製を目指す。平成23年度は、反応性スパッタリング法の成膜条件を変化させることで、構造の異なる TiO₂ 薄膜を作製し、鉄(Fe)又は銅(Cu)を TiO₂ 薄膜の表面に担持することによって光機能特性の改善を試みた。次に、光機能特性の可視光化を目的として、TiO₂ 成膜時において N 添加 TiO₂ 薄膜の作製を行いバンドギャップ 0.1eV 以上の縮小化と、さらに N 添加 TiO₂ 薄膜と TiO₂ 薄膜を積層構造にすることによって、紫外光下で光触媒効果を維持しつつさらなる可視光下での光触媒効果の向上を目指した。数値目標としては、N 添加による紫外光下の活性維持と可視光領域での効率向上として50%を目指す。その結果、反応性スパッタリング法における薄膜作製時の O₂ 流量と結晶構造の関係を明確にすることができた。すなわち、O₂ 流量のコントロールによって、Rutile 型、Rutile・Anatase 混晶、Anatase 型を高い結晶性をもって作製することが可能となった。また、TiO₂ 薄膜に Fe、Cu を担持することで光機能特性を改善し、紫外光下では混晶の TiO₂ 薄膜の方が、可視光下では Anatase 型の TiO₂ 薄膜で担持効果が高くなり、Cu の方が Fe よりも優れていることを明らかにした。また、反応性スパッタリング法による N 添加を行い、O₂+N₂ 混合雰囲気ガス中での、Rutile・Anatase の混晶への N 添加により吸収端が長波長側へシフトし、光学バンドギャップが 0.20eV 狭窄した。紫外光下での光触媒効果は維持できなかったが、可視光照射下で光触媒効果が10%向上した。さらに、積層型 N-TiO₂/TiO₂ 薄膜を作製したところ、積層型薄膜の膜構造は TiO₂ の膜厚が厚いほど結晶性が高くなり、N-TiO₂ 層を持つ薄膜において光学バンドギャップの狭窄が見られた。

*1(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工学院大学

本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターが工学院大学と共同で実施した研究の一部である。

2.2.3.3.21.

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

笹瀬雅人^{*1}、加藤寛敬^{*2}

Masato SASASE and Hiroataka KATO

本研究では、摩擦表層の金属学的調査(トライボメタラジー、Tribo-metallurgy)により、摩擦条件と表層組織との関係を明確にし、ナノ結晶化・組織微細化する摩擦表層の生成条件・生成メカニズムやその物性を明らかにすることを目的とした。摩擦方法は、回転するディスクにピンの端面を押し付けてすべり摩擦を行うピンオンディスク摩擦方式を採用した。試験材料は、炭素鋼 S45C および純 Cu である。摩擦条件として、摩擦速度は 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 5.0m/s の5種類、負荷荷重は 19.6~49.1N として真空中または大気中で試験を行った。その後、摩擦試験したピンと新品のディスクを用い、摩擦速度 0.1m/s、負荷荷重 19.6N の条件で摩擦テストを行った。また、これとは別に摩擦試験したピンの断面組織を光学顕微鏡で観察し、微小ビッカース硬さ試験機を用いて摩擦の影響を受けた表層付近の硬さ(負荷荷重:0.098 N)を測定した。その結果以下の点が明らかとなった。(1)摩擦速度を 0.05m/s~5.0m/s と変化させて摩擦試験したピンを用いて摩擦テストを行った結果、摩擦速度が最も速い 5.0m/s のピンでテスト終了(摩擦距離:400 m)まで緩やかなマイルド摩擦が続く耐摩耗性に優れていた。しかし、それ以外の摩擦速度のピンでは、摩擦テスト初期のマイルド摩擦からある摩擦距離(摩擦距離:20 m)で激しい摩耗(シビア摩耗)に変化した。(2)摩擦速度が 5.0m/s のピンでは、結晶粒が全く観察できない程組織が微細化していてナノ結晶化していると考えられる超微細組織が観察された。(3)摩擦試験したピン断面のビッカース硬さ試験では、いずれの摩擦速度のピンにおいても、最表面で HV600 程度まで硬さが上昇していた。しかし、摩擦速度 0.05m/s では、測定場所によっては硬さがあまり上昇していないところがあった。以上の知見から耐摩耗性に優れた摩擦表層を得るには、摩擦速度を相当速くしてナノ結晶化していると思われる超微細組織を表面全体に生成することが必要であることが分かった。

*1(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福井工業高等専門学校

本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターが福井工業高等専門学校と共同で実施した研究の一部である。

2.2.3.3.22.

トラフグ免疫系に関する研究

Studies on the Immune System of Tiger Puffer (*Takifugu rubripes*)宮台俊明^{*1}、高城啓一^{*2}

Toshiaki MIYADAI and Keiichi TAKAGI

嶺南地方の漁業の中で重要な位置を占めるフグ養殖は、魚病の克服が大きな課題の一つであり、食の安全性の問題から、ワクチン開発が強く望まれている。効率的にワクチン開発を行なうためには、未だ未知の部分が多い魚類免疫機構の理解が必須である。

そこで本研究では、フグの免疫機構解明のため、細胞免疫に関与する主要な細胞の一つであるマクロファージが、食作用を示した後どの器官に集積するかを調べ、それが脾臓内のエリプソイド細胞に集積することを明らかにした。また、サイトカインの1種であるインターロイキン 6 の造血幹細胞への影響を調べ、インターロイキン 6 が、分泌型抗体を生産する形質細胞の分化を促進することを示唆する結果を得た。さらに、幹細胞特性を示す細胞の所在を明らかにするため、X線照射を行い、造血系を賦活化したフグに対して、別個体からの血球細胞や造血器官細胞の移植を試みた。この実験に関しては、いまのところ確実な結果とは言えないが、従来のマウス等を用いた移植実験とは異なる反応を示唆する結果を得ており、魚類の免疫系に関する重要な知見が得られる可能性がある。

今後は、実験を繰り返し、結果を確実なものとすると共に、フグにおける造血幹細胞の所在と役割を明らかにしたいと考えている。

^{*1} 福井県立大学海洋資源学部、^{*2} (財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・物資源グループ
本研究は、公募型共同研究事業として実施した。

2.2.3.3.23.

維持血液透析患者の抗酸化能に関する研究

Research on Serum Antioxidant Capacity in Patients with Chronic Kidney disease

遠藤伸之^{*1}、大和田滋^{*2}

Nobuyuki ENDO and Shigeru OOWADA

腎不全患者の主要死因として血管合併症があり、腎不全では動脈硬化が促進されている。酸化ストレスはこれらの病態形成に関与し、その臨床指標の確立は合併症予防や死亡率を減少させる意味で重要であることが知られている。これまでに様々な方法によって酸化ストレスを臨床指標として用いる検討がなされている。これまでに、血清のヒドロキシルラジカル消去能について電子スピン共鳴(ESR)装置を用いて評価し、健常人と透析患者では有為に差が有ることを見いだしている¹⁾。本研究では、更に種々の活性種について消去活性を評価し、健常人と血液透析患者の透析前後から得られる血清試料の抗酸化能を精度よく評価する手法を確立することを目的とした。

健常人および透析患者の血清を試料とし、各種フリーラジカルその他、一重項酸素などの活性酸素種についての消去活性を、電子スピン共鳴(ESR)装置を用いて測定しデータ蓄積を図った。前年度に得られた知見をもとに、従来の蛍光法等1種のフリーラジカルのみを対象とした既存の消去活性測定法に替って、種々の活性種に対して測定が可能な ESR 法を生体由来試料に対して簡便に測定適用できるような新しいプロトコール(測定法・手順)を検討した。活性酸素種を中心に6種のフリーラジカルに対する消去活性を ESR 法で実施した。ESR を用いた測定法は、既存法に比べて簡便で、個々の活性種に対する評価が可能である。血清試料に於いては、健常者と腎不全患者では消去パターンに明瞭な差が認められた。抗酸化能の違いとなる原因物質は確認できていないが、消去パターンの差異を利用することで腎疾病の診断や治療に利用できる可能性がある。本研究で用いた測定法に関して、学術論文として纏め報告した³⁾。

- 参考文献 1) N. Endo, S. Oowada et al.: J. Clin. Biochem. Nutr., 45, 193-201 (2009)
2) M. Kamibayashi, S. Oowada et al.: Free Radic. Res., 40, 1166-1172 (2006)
3) S. Oowada, N. Endo et al.: J. Clin. Biochem. Nutr., in press.

^{*1} (財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・物資源グループ、^{*2} 医療法人あさお会
本研究は、(財)若狭湾エネルギー研究センターと医療法人あさお会が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23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. Keisuke Yasuda, Chuluunbaatar Batchuluun, Ryoya Ishigami and Shogo Hibi, Depth resolution of TOF-ERDA using a He beam, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, **269**, (9), 1019-1022, 2011.
2. K. Yasuda, M. Nomachi, Y. Sugaya, H. Yamamoto and H. Komatsu, Progress of in-air microbeam system at the Wakasa Wan Energy Research Center, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, **269**, (20), 2180-2183, 2011.
3. H. Komatsu, H. Yamamoto, Y. Matsuda, T. Kijimura, M. Kinugawa, K. Okuyama, M. Nomachi, K. Yasuda, T. Satoh and S. Oikawa, Fluorine analysis of human enamel around fluoride-containing materials under different pH-cycling by μ -PIGE/PIXE system, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, **269**, (20), 2274-2277, 2011.
4. H. Yamamoto, Y. Iwami, S. Ebisu, H. Komatsu, M. Nomachi, Y. Sugaya and K. Yasuda, Fluoride Uptake into Human Teeth from a Fluoride-Releasing Thin Layer after a Long Period of Filling, International Journal of PIXE, **21**, (1&2), 31-38, 2011.
5. 小池一步, 天野武志, 青木隆裕, 藤本龍吾, 佐々誠彦, 矢野満明, 権田俊一(大阪工業大学), 石神龍哉, 久米恭(若狭湾エネ研), 単結晶酸化亜鉛薄膜に対する8 MeV プロトンの照射効果, 材料学会誌 **60**(11) 988-993, 2011.
6. Mina Masuda, Shonkor Kumar Das, Shinya Fujihara, Masanori Hatashita and Akihiko Sakurai, Production of cordycepin by a repeated batch culture of a cordyceps militaris mutant obtained by proton beam irradiation. Journal of Bioscience and Bioengineering, **111**(1), 55-60, 2011.
7. Sachiko Hayashi, Ken Koshiba, Masanori Hatashita, Takefumi Sato, Yutaka Jujo, Ryuta Suzuki, Yukie Tanaka, and Hiroki Shioura, Thermosensitization and induction of apoptosis or cell-cycle arrest via the MAPK cascade by parthenolide, an NF- κ B inhibitor, in human prostate cancer androgen-independent cell lines. International Journal of Molecular Medicine **28**(6), 1033-1042, 2011.
8. Hideki Matsumoto, Masanori Tomita, Kensuke Otsuka, Masanori Hatashita, and Nobuyuki Hamada, Nitric Oxide Is a Key Molecule Serving as a Bridge between Radiation-Induced Bystander and Adaptive Responses. Current Molecular Pharmacology **4**(2), 126-134, 2011.
9. Keiichi Takagi, Tomonari Hirano, Yusuke Kazama, Teruyo Tsukada, Yoriko Hayashi, and Tomoko Abe, Immunofluorescence of γ -H2AX in a root tip of arabidopsis thaliana after the irradiation of X-ray. RIKEN Accelerator Progress Report, **44**, 266, 2011.
10. Katsumi Takayama, Shin-ichiro Suye, Yoshikazu Tanaka, Ashok Mulchandani, Kouichi Kuroda, and Mitsuyoshi Ueda, Estimation of Enzyme Kinetic Parameters of Cell Surface-displayed Organophosphorus Hydrolase and Construction of a Biosensing System for Organophosphorus Compounds. Analytical Science, **27**(8), 823-826, 2011.
11. 高田卓志, 櫻井良憲, 久米恭, 田中浩基, 土田秀次, ESR線量計の粒子種およびLET依存性のモデル計算, 医学物理 第31巻 Supplement No. 1, 184, 2011.
12. Akihiro Morii, Ryohei Ogawa, Akihiko Watanabe, Satoshi Kakutani, Qing-Li Zhao, Kyo Kume, Takashi Kondo and Hideki Fuse, Regulation of gene expression in prostate cancer cells with an artificially constructed promoter responsive to radiation, Gene Therapy, **19**, 219-227, 2012, doi:10.1038/gt.2011.89; published online 23 June 2011.
13. 小池一步, 天野武志, 青木隆裕, 藤本龍吾, 佐々誠彦, 矢野満明, 権田俊一, 石神龍哉, 久米恭, 単結晶酸化亜鉛薄膜に対する8MeVプロトンの照射効果.材料 Vol. **60**, No. 11 988-993, 2011
14. 藤川博司, 越田吉郎, 松原孝祐, 山本瑛一, 上田伸一, 磯村直樹, 久米恭, 高エネルギーX線, 電子線, 陽子線におけるポリマーゲル線量計の特性, 日本放射線技術学会中部部会誌13号:74-75,

- 2011.
15. T. Tamegai, T. Tean, H. Yagyuda, Y. Nakajima, S. Okayasu and M. Sasase, Low-field anomaly of vortex dynamics in iron-pnictide superconductors, *Physica C*, **471**, 777-780, 2011.
 16. Ryohei Ogawa, Akihiro Morii, Akihiko Watanabe, Zheng-Guo Cui, Go Kagiya, Shigekazu Fukuda, Kyo Kume, Takashi Hasegawa, Masanori Hatashita, Hironori Izumi, Tstsuya Ishimoto and Loreto B. Feril, Regulation of gene expression in retrovirus vectors by X-ray and proton beam radiation with artificially constructed promoters. *Journal of Gene Medicine* **14**(5), 316-327, 2012.
 17. Ryoya Ishigami, Chuluunbaatar Batchuluun and Keisuke Yasuda, Increase in coercivity of Fe-Pt thin film permanent magnets by N_2^+ ion implantation and heat treatment in hydrogen gas, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* **275**, 58-62, 2012.
 18. Ryoya Ishigami, Chuluunbaatar Batchuluun and Keisuke Yasuda, Degradation of Fe-Pt thin film permanent magnets by irradiation with 4He and H, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* **275**, 63-68, 2012.
 19. M.Sasase, H. Yamamoto and S. Okayasu : Radiation Effects for film formation and nano-structural change of iron dicalicide thin film, *Nuclear Instrument method and Method B* **272**, 318 - 321, 2012.
 20. M. Sasase, H. Yamamoto and H. Kuara : Formation of atomically flat β -FeSi₂/Si(100) interface using ion irradiated substrate, *Thin Solid Films* **520**, 3490-3492, 2012.
 21. Mamiko Nishiuchi, Alexander S. Pirozhkov, Hironao Sakaki, Koichi Ogura, Timur Zh. Esirkepov, Tsuyoshi Tanimoto, Masato Kanasaki, Akifumi Yogo, Toshihiko Hori, Akito Sagisaka, Yuji Fukuda, Yoshihiro Matsumoto, Shiro Entani, Seiji Sakai, Ceri M. Brenner, David Neely, Tomoya Yamauchi, Sergei V. Bulanov, and Kiminori Kondo, Quasi-monochromatic pencil beam of laser-driven protons generated using a conical cavity target holder, *Physics of Plasmas*, **19**, 030706, 2012.
 22. 峰原英介、新しいレーザー除染装置、*Laser Review(レーザー学会誌)*、**40**, No.3, 165-170, 2012.
 23. 峰原英介、ファイバーレーザーによる水中切断技術、*日本興業出版「配管技術」*、**54**, (5), 36-40, 2012.
 24. 峰原英介、原子力発電所やその他の関連施設のための新しいレーザー除染装置の開発、*デコミッションング技報*、**45**, 10-18, 2012.
 25. Yoshimi Sueishi, Misa Ishikawa, Daisuke Yoshioka, Nobuyuki Endo, Shigeru Oowada, Masashi Shimmei, Hirotada Fujii and Yashige Kotake, Oxygen radical absorbance capacity (ORAC) of cyclodextrin-solubilized flavonoids, resveratrol, and astaxanthin as measured with the ORAC-EPR method. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition* **50**(2), 127-132, 2012.

(2) 国際会議論文(国際会議論文集への掲載)

1. Aoki Takahiro, Ryugo Fujimoto, Kazuto Koike, Shigehiko Sasa, Mitsuaki Yano, Shun-ichi Gonda, Ryoya Ishigami and Kyo Kume, Irradiation effect of 8 MeV protons on single-crystalline zinc oxide, 2011 International Meeting for Future of Electron Devices (IMFEDK 2011) 88-89, Suita, Osaka, Japan (2011)
2. Tatsuya Yabe, Takahiro Aoki, Yuki Higashiyama, Kazuto Koike, Shigehiko Sasa, Mitsuaki Yano, Syunichi Gonda, Ryoya Ishigami and Kyo Kume, Radiation-proof characteristic of ZnO/ZnMgO HFETs, 2011 International Meeting for Future of Electron Devices (IMFEDK 2011), 90-91, Suita, Osaka, Japan (2011)
3. Akihiro Nohtomi, Nobuyuki Sugiura, Tetsuo Itoh, Gen-ichiro Wakabayashi, Takeji Sakae, Toshiyuki Terumuma, Kazutoshi Yabuta, Masaya Tamura, Toshio Fujibuchi, Takushi Takata and Kyo Kume, Proposal of a novel concept on neutron energy evaluation by the measurement of recoil-proton spatial distribution, *Proceedings of the 6th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics and the 11th Asia-Oceania Congress of Medical Physics*, C7-3, Fukuoka, Japan (2011)
4. Kyo Kume, Takashi Hasegawa, Takuya Kubo, Yasuo Sakamoto, T. Takata and Yasuo Takemoto, Improvements in fabrication process of the patient bolus for prostate cancer used at particle therapy, *Proceedings of the 6th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics and the 11th Asia-Oceania Congress of Medical Physics*, A4-2, Fukuoka, Japan (2011)
5. Norio Miyoshi, Kyo Kume, Kotaro Tsutumi, Yukihiro Fukunaga, Shinji Ito, Yoshiaki Imamura and

Andriana Bibin, Application of Titanium Dioxide (TiO₂) Nanoparticles in Photodynamic Therapy (PDT) of an Experimental Tumor, THE 4TH NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY SYMPOSIUM (NNS2011): An International Symposium. AIP Conference Proceedings, Volume 1415, pp. 21-23 (2011)

6. Andriana Bibin, Kyo Kume, Kotaro Tsutumi, Yukihiro Fukunaga, Shinji Ito, Yoshiaki Imamura and Norio Miyoshi, Observation the distribution of titanium dioxide (TiO₂) nano-particles in an experimental tumor tissue by a Raman microscope., THE 4TH NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY SYMPOSIUM (NNS2011): An International Symposium. AIP Conference Proceedings, Volume 1415, pp. 55-58 (2011).

(3) 国際会議発表

1. K. Yasuda, M. Nomachi, Y. Sugaya, H. Yamamoto and H. Komatsu, "In-air microbeam system at the Wakasa Wan Energy Research Center", 7th International Symposium on Bio-PIXE, Sendai, Japan, 2011.
2. Takahiro Aoki, Ryugo Fujimoto, Kazuto Koike, Shigehiko Sasa, Mitsuaki Yano, Shun-ichi Gonda (大阪工業大学), Ryoya Ishigami and Kyo Kume (若狭湾エネ研), "Irradiation Effect of 8 MeV Protons on Single-Crystalline Zinc Oxide", "The 2011 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai", 関西大学, 2011.
3. Kazuto Koike, Takahiro Aoki, Ryugo Fujimoto, Shigehiko Sasa, Mitsuaki Yano, Shun-ichi Gonda (大阪工業大学), Ryoya Ishigami and Kyo Kume (若狭湾エネ研), "Radiation Hardness of Single-Crystalline Zinc Oxide Films", 16th Semiconducting and Insulating Materials Conference (SIMC-XVI) Stockholm, Sweden, 2011.
4. Akihiro Iwase, Atsushi Tohki, Shinya Kosugi, Kazuma Aikoh, (Department of Materials Science), Kyo Kume, Chuluunbaatar Batchuluun, Ryoya Ishigami (The Wakasa Wan Energy Research Center) and Toshiyuki Matsui (Research Organization of the 21st Century, Osaka Prefecture University), "Effect of high temperature annealing on ion-irradiation induced magnetization in FeRh thin films", 56th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Scottsdale, Arizona, USA, 2011.
5. M. Zamri, P. Ghosh, M. Sasase, A. Hayashi, Y. Hayashi and M. Tanemura, "N In Situ TEM Structural Characterization of Pristine and Composite Ion-Induced Carbon Nanofibers in Field Electron Emission Process", 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2011), Nagoya, Japan, September 28-30, 2011.
6. D. P. Datta, Y. Takeda, H. Amekura, N. Kishimoto and M. Sasase, "Formation of Extended Au Nanoparticle by MeV Ion Irradiation of Au Nanoparticles", Japan- Materials research Society (J-MRS), Yokohama, Japan, December 19 - 21, 2011.
7. K. Yamaguchi, F. Esaka, M. Sasase, H. Yamamoto and K. Hojou, "Application of sputter etching treatment to the formation of semiconducting silicide film on Si substrate", Japan- Materials research Society (J-MRS), Yokohama, Japan, December 19 - 21, 2011.
8. 峰原英介 (若エネ研)、B. E. O'Rourke (産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 極微欠陥評価研究 G)、低速陽電子生成用超伝導線型加速器モジュールの無蒸発型4K クライオスタートにおける 2-3 の極低温に関する改善、韓国大田市 WCI Center for Quantum-Beam-based Radiation Research, KAERI、University of Science & Technology、2012.
9. Go Kagiya, Ryohei Ogawa, Masanori Hatashita, Yoshikazu Tanaka, K. Kouda, Shigekazu Fukuda and James B. Mitchell, Enhancement of hypoxic cell killing by the nitroxide Tempol, TAT2012, Nederland, 2012.
10. Akihiro Nohtomi, Nobuyuki Sugiura, Tetsuo Itoh, Gen-ichiro Wakabayashi, Takeji Sakae, Toshiyuki Terumuma, Kazutoshi Yabuta, Masaya Tamura, Toshio Fujibuchi, Takushi Takata and Kyo Kume, "Proposal of a novel concept on neutron energy evaluation by the measurement of recoil-proton spatial distribution", The 6th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics and the 11th Asia-Oceania Congress of Medical Physics, Fukuoka, 2011.
11. Kyo Kume, Takashi Hasegawa, Takuya Kubo, Yasuo Sakamoto, Takushi Takata and Yasuo Takemoto, "Improvements in fabrication process of the patient bolus for prostate cancer used at particle therapy",

- The 6th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics and the 11th Asia-Oceania Congress of Medical Physics, Fukuoka, 2011.
12. Takeshi Amano, Ryugo Fujimoto, Takehiro Aoki, Kazuto Koike, Shigehiko Sasa, Mitsuaki Yano, Shunichi Gonda, Ryoya Ishigami and Kyo Kume, "Irradiation effect of 8 MeV protons on single-crystalline zinc oxide", International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, (IMFEDK), Kansai University, 19-20 May 2011.
 13. Tatsuya Yabe, Takehiro Aoki, Yuki Higashiyama, Kazuto Koike, Kazuto Koike, Mitsuaki Yano, Shunichi Gonda, Ryoya Ishigami, Kyo Kume, "Radiation-proof characteristic of ZnO/ZnMgO HFETs", International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai University, (IMFEDK), 2011.
 14. Norio Miyoshi, Kyo Kume, Kotaro Tsutumi, Yukihiro Fukunaga, Shinji Ito, Yoshiaki Imamura and Andriana Bibin, Application of Titanium Dioxide (TiO₂) Nanoparticles in Photodynamic Therapy (PDT) of an Experimental Tumor, THE 4TH NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY SYMPOSIUM (NNS2011), Bali, 2011.
 15. S. Uomori, K. Takahashi, K. Yasuda, M. Saito and Y. Haruyama, "Aluminum Distribution in Tea Leaves", 7th International Symposium on Bio-PIXE, Sendai, Japan, 2011.
 16. M. Sasase, S. Okayasu, N. Ishikawa and H. Yamamoto, "Shape transformation of buried Au nanoparticles in SiO₂ induced by swift heavy ion irradiation", European Materials research Society (E-MRS) spring meeting, Nice, France, 2011.
 17. M. Sasase, S. Okayasu and H. Yamamoto, "Semiconductor - metal phase transition of iron disilicide (α -FeSi₂) thin films by high-energy heavy ion irradiation", 2nd Nanotoday Conference (NANO 2010), Hawaii, USA, 2010.
 18. Masanori Hatashita, Keiichi Takagi, Kyo Kume, Go Kagiya and Hideki Matsumoto, "Response of Human Cells to Proton Irradiation Compared to X-Ray Irradiation", The 14th International Congress of Radiation Research, Poland, 2011.
 19. Sachiko Hayashi, Masanori Hatashita, Hiroki Shioura, Akiko Hayashi and Yukie Tanaka, "Enhancement of radiosensitivity by topoisomerase II inhibitor, amrubicin and amrubicinol, in human lung adenocarcinoma A549 cells and kinetics of apoptosis and necrosis induction", The 14th International Congress of Radiation Research, Poland, 2011.
 20. Hideki Matsumoto, Masanori Tomita, Kensuke Otsuka, Munetoshi Maeda, Nobuyuki Hamada, and Masanori Hatashita, "Nitric Oxide is a Key Molecule Serving as a Bridge between Radiation-Induced Bystander and Adaptive Responses", The 14th International Congress of Radiation Research, Poland, 2011.
 21. Tomonari Hirano, Keiichi Takagi, Yoichiro Hoshino, and Tomoko Abe, "Analysis of DNA damage response in male gametes of *Cyrtanthus mackenii* during pollen tube growth", International Botanical Congress 2011, Australia, 2011.
 22. Kyo Kume, Takashi Hasegawa, Takuya Kubo, Yasuo Sakamoto, Takushi Takata and Yasuo Takemoto, "Improvement on the fabrication process of the patient bolus used for ion beam therapy", PTCOG 50, Philadelphia, 2011.

(4) 国内会議発表

1. 魚森駿也、高橋希佳、安田啓介、斉藤学、春山洋一、"二次元マッピングによる茶葉の断面の元素分布"、第 24 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究、奈良女子大学、2011 年
2. 安田 啓介、石神 龍哉、Chuluunbaatar Batchuluun、"ヘリウムビームを用いた TOF-ERDA のための反跳断面積の測定"、2011 年秋季 応用物理学会学術講演会、山形大学、2011 年
3. (招待講演) 安田 啓介、"TOF-ERDAによる軽元素分析法の開発"、京都大学工学研究科 GCOE セミナー、京都大学、2011 年
4. 安田 啓介、石神 龍哉、Chuluunbaatar Batchuluun、日比章五、"ヘリウムビームを用いた TOF-ERDA のための反跳断面積の測定"、第 12 回イオンビームによる表面・界面解析特別研究会、東京大学、2011 年
5. 青木隆裕、藤本龍吾、小池一步、佐々誠彦、矢野満明(大阪工業大学ナノ材研センター)、権田俊一(大阪大学産業科学研究所)、石神龍哉、久米恭(若狭湾エネ研)、"単結晶 ZnO 薄膜に対する 8MeV

- プロトンビームの照射効果”、2011 年秋季 第 72 回応用物理学会学術講演会、山形大学小白川キャンパス、2011 年
6. 石神龍哉、Chuluunbaatar Batchuluun(若狭湾エネルギー研究センター)、福元謙一(福井大学)、“ステンレス中に照射された水素の残留量の測定”、日本原子力学会 2011 年秋の大会、北九州国際会議場 他、2011 年
 7. 大谷暢夫、石神龍哉(若狭湾エネルギー研究センター)、杉田武志(科学システム研究所)、福元謙一(福井大学)、“プロトンと中性子の原子はじき出し過程の比較”、日本原子力学会 2011 年秋の大会、北九州国際会議場 他、2011 年
 8. A,B 駒形栄一、B 河裾厚男、B 藪内敦、B 前川雅樹、C チュルーンバートル バトチュルーン、C 安田啓介、C 石神龍哉、C 久米恭、A 岩瀬彰宏、A 堀史説 (A 大府立大工、B 原子力機構高崎、C 若狭湾エネルギー研究センター)、“H⁺照射により照射欠陥及び水素同時注入した B2 型 FeAl の低速陽電子ビーム測定”、日本物理学会 2011 年秋季大会、富山大学五福キャンパス、2011 年
 9. 米田和弘 1、唐木淳志 1、石神龍哉 2、松井利之 1、岩瀬彰宏 1(1 大阪府立大工学研究科、2 若狭湾エネルギー研究センター)、“FeRh 膜におけるイオンビーム照射誘起強磁性の熱的回復挙動”、応用物理学会励起ナノプロセス研究会、国際障害者交流センター ビッグ・アイ(大阪府堺市茶山台 1-8-1)、2011 年
 10. (招待講演) 石神龍哉、“鉄白金薄膜磁石の性能向上と耐放射線試験”、京都大学 GCOE セミナー、京都大学桂キャンパス、2011 年
 11. 篠田佳彦、“レーザー加工プロセス時に発生する熔融金属熱流動挙動の予備的測定試験”、第 8 回レーザー共同研究所セミナー、敦賀(JAEA レーザー共同研究所)、2011 年
 12. 中武 貞文、篠田 佳彦、川本 義海、下田 宏、“HLW 地層処分地選定に関する合意形成(4)日本型合意形成の在り方とその実践”、日本原子力学会 2011 年秋の大会、北九州、2011 年
 13. 笹瀬雅人、岡安悟、石川法人、山本博之、“Au ナノ粒子の高エネルギー重イオン照射効果”、2011 年秋季 第 72 回応用物理学会学術講演会、山形大学小白川キャンパス、山形県、2011 年
 14. 笹瀬雅人、岡安悟、山本博之、“高エネルギー重イオンによる Au ナノワイヤーの作製”、平成 23 年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会金沢歌劇座、石川県、2011 年
 15. 出井淳基、稲見隆、小椋山守、笹瀬雅人、前田裕司、石川法人、須貝宏行、古野茂美、“ガスデポジション法で作製した金ナノ結晶における He バブルの生成挙動”、金属学会・2011 年秋季講演大会、沖縄コンベンションセンター、沖縄、2011 年
 16. 武田良彦、Rodrigo Sato、笹瀬雅人、靱田浩義、大沼正人、大野隆央、“Ag ナノ粒子の非線形光学特性のサイズ依存性”、金属学会・2011 年秋季講演大会、沖縄コンベンションセンター、沖縄県、2011 年
 17. 馬場昭充、辻本和久、笹瀬雅人、“高分子材料表面に形成されためっき膜の成分および微細構造に関する調査研究”、第 18 回「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム、パシフイコ横浜 神奈川県、2012 年
 18. 笹瀬雅人、岡安悟、山本博之、“高エネルギー重イオン照射によるシリサイド半導体中へのナノ金属相作製”、2012 年春季 第 59 回応用物理学会学術講演会、早稲田大学、東京都、2012 年
 19. 出井淳基、稲見隆、小椋山守、笹瀬雅人、前田裕司、須貝宏行、古野茂美、“ガスデポジション法で作製した金ナノ結晶の熱的安定性と He バブルの関係”、金属学会・2012 年春講演大会、横浜国立大学、神奈川県、2012 年
 20. 野間正男、所敏夫、山下満、笹瀬雅人、“c-BN 膜の耐熱特性”、2012 年度精密工学会春季大会学術講演会、首都大学東京 南大沢キャンパス、東京都、2012 年
 21. 峰原英介、原子炉の廃止措置と修理のためのレーザー除染サービス、第 1 回レーザー共同研究所成果報告会、アクアトム 原子力機構レーザー共同研究所、2010 年
 22. 峰原英介、レーザー除染機の性能向上とその応用、日本原子力学会 2012 年春の大会、福井市 福井大学文教地区、2012 年
 23. 峰原英介、高田卓志、遠藤伸之、加速器・ビーム科学部会企画セッション「加速器・ビーム科学分野における福島原発事故への取り組み」(2) 焼却炉による放射性セシウム塩化物の高効率の生成と分離除去、日本原子力学会 2012 年春の年会、福井市、福井大学文教地区、2012 年
 24. 永井二郎、浅野真臣、鳥取章二、「気泡駆動型循環方式ヒートパイプ(BACH)のトップヒート化と熱輸送特性」、日本機械学会 2011 年度年次大会、東京工業大学、2011 年

25. 毛利直人、佐野一哉、林宏一、岩井紘基、重田達雄、「レーザー気中切断における粉じん挙動試験」、日本原子力学会 2011 年秋の大会、北九州市、2011 年
26. 西中瑤子、遠藤伸之、荒井俊之、新規一重項酸素消去剤による細胞傷害の緩和 日本化学会第 91 春季年会、横浜、2011 年(震災により開会中止の為、予稿集のみで発表扱い)
27. 畑下昌範、内田博之、沖昌、山川喜輝、HMR 境界領域におけるトランスポゾン特異的な Non-coding RNA の解析、日本分子生物工学会第34回年会、横浜、2011 年
28. 大西浩平、森山展行、能登亜由美、畑下昌範、高城啓一、木元久、末信一朗、低環境負荷型のアセチルグルコサミン生産を目指した *Paenibacillus* 属細菌のイオンビーム変異育種、日本生物工学会第 63 回大会、東京、2011 年
29. 増田美奈、堀圭輔、櫻井明彦、畑下昌範、冬虫夏草変異株を用いた生理活性物質コルジセピンの高効率生産、化学工学会第77年会、東京、2012 年
30. 千田泰史、高城啓一、寺田聡、高エネルギー線育種による増殖制御可能な動物細胞株の創出、日本動物細胞工学会 2011、東京、2011 年
31. 藤原伸哉、瀬瀬由香菜、青木俊憲、栗田知明、畑下昌範、南保幸男、櫻井明彦、マンガンペルオキシダーゼ生産における増殖形態および遺伝子発現の解析、化学工学会第77年会、東京、2012 年
32. 松本英樹、大塚健介、富田雅典、前田宗利、畑下昌範、古澤佳也、舟山知夫、小林泰彦、エネルギー付与の不均一性に着目した放射線生物影響研究の展望、PF 研究会、茨城、2011 年
33. 羽鳥聡、栗田哲郎、林豊、山田裕章、島田麻亜久、小田桐哲也、中田吉則、山口文良、淀瀬雅夫、長崎真也、香川弘成、山田和彦、峰原英介、福本貞義、「若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状」、第 24 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、奈良、2011 年
34. 高田卓志、櫻井良憲、久米恭、田中浩基、土田秀次、「ESR 線量計の粒子種および LET 依存性のモデル計算」、第 101 回日本医学物理学会学術大会、Web 開催、2011 年
35. 高田卓志、久米恭、櫻井良憲、田中浩基、丸橋晃、「生物実験用加速器ベース中性子照射場の基礎検討—軽水減速体の性能測定—」、第 8 回日本中性子捕捉療法学会学術集会、徳島、2011 年
36. 鴨川仁、大河内博、保田浩志、鳥居建男、土井妙子、久米恭、永淵修、横山明彦、緒方裕子、田原大祐、米山直樹、土器屋由紀子、「福島原発事故の影響は富士山で見えたか?」、NPO 法人富士山測候所を活用する会第 5 回成果報告会、東京、2012 年
37. 久米恭、長谷川崇、高田卓志、久保拓也、坂本靖、武本泰夫、「粒子線治療用患者ボラス加工法案の最適化」、第 101 回日本医学物理学会学術大会、Web 開催、2011 年
38. 三好憲雄、Andriana Bibin Bintang、久米恭、堤孝太郎、「診断と治療両用半導体レーザー開発」、第 1 回ポルフィリン-ALA 学会年会、東京、2011 年
39. 久米恭、「粒子線がん治療の現状」、第 32 回日本レーザー医学会シンポジウム、横浜、2011 年
40. 久米恭、福井における陽子線治療の現状(医療ツーリズムを鑑みて)、第 12 回北陸韓国経済交流会議専門分科会、韓国慶州市、2011 年
41. 久米恭、「若狭湾エネルギー研究センターにおける陽子線治療研究の現状」、放射線業務従事者講習、福井大学、2011 年、(講演会の講師として)
42. 久米恭、身近な放射線とがん治療の話(粒子線がん治療の紹介)、福井県立敦賀高校「S トーク」、敦賀高校、2011 年
43. 藤本龍吾、和田涼太、小池一步、佐々誠彦、矢野満明(大阪工業大学ナノ材研センター)、権田俊一(大阪大学産業科学研究所)、石神龍哉、久米恭(若狭湾エネルギー研究センター)、「単結晶酸化亜鉛への 8MeV プロトンビーム照射と熱処理効果」、応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012 年
44. 石神龍哉、チュルーンバートル バトチュルーン、「Fe-Pt 薄膜に対する低エネルギーイオン照射」、応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012 年
45. 西尾繁、「シリカ上で合成した $V_2O_5 \cdot nH_2O$ が放置中に受ける構造変化のその場ラマン分光」、日本セラミックス協会第 24 回秋季シンポジウム、札幌、2011 年
46. 西尾繁、「感湿材料全自動繰り返し評価システムの構築」、日本セラミックス協会第 24 回秋季シンポジウム、札幌、2011 年
47. 西尾繁、「雰囲気制御下での電子スピン共鳴全自動評価システムの構築」、第 15 回日本セラミックス協会北陸支部秋季研究発表会、高岡、2011 年
48. 西尾繁、「 V_2O_5 の可視光誘起着色の動作メカニズム」、日本セラミックス協会 2012 年年会、京都、2012 年

年

49. 西尾繁、「五酸化バナジウムゲルの光化学合成」、日本化学会第 92 春季年会、横浜、2012 年
50. 佐藤久美、栗津原理恵、原田和樹、遠藤伸之、長尾慶子、調製方法の異なる味噌汁の抗酸化能の変化、日本家政学会 第 63 回大会、千葉、2011 年
51. 長尾慶子、佐藤久美、栗津原理恵、原田和樹、遠藤伸之、きんぴらごぼうの抗酸化能に及ぼすアク抜きおよび醤油添加量の影響、日本家政学会 第 63 回大会、千葉、2011 年
52. 長尾慶子、佐藤久美、栗津原理恵、遠藤伸之、原田和樹、加熱調理操作の違いによる鶏つくねの抗酸化能の変化、日本調理科学会 平成 23 年度大会、群馬、2011 年
53. 長尾慶子、佐藤久美、栗津原理恵、遠藤伸之、原田和樹、ORAC 法および化学発光法を用いた和食献立の抗酸化能評価、日本調理科学会 平成 23 年度大会、群馬、2011 年
54. 栗田哲郎、羽鳥聡、福本貞義、林豊、香川弘成、峰原英介、長崎真也、中田吉則、小田桐哲也、島田 麻亜久、山田 裕章、山口文良、淀瀬雅夫、二宮重史>(*KEK)、「若狭湾エネルギー研究センターシンクロトロン」の現状、つくば、2011 年

3.2. 特許

平成 23 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. 「光線力学診断・治療用の多波長レーザー装置」(特願 2011-103518)久米恭、三好憲雄、堤孝太郎
2. 「保磁力に優れた鉄-白金系磁性合金の製造方法」(特願 2011-184294)石神龍哉
3. 「加熱温度調節機能を備えた太陽炉」(特願 2011-210796)重田達雄、篠田佳彦
4. 「レーザー除染装置」(特願 2011-234385)峰原英介
5. 「放射性同位元素セシウムの分離除去方法、及びその装置」(特願 2011-252183)峰原英介
6. 「五酸化バナジウムゲルの製造方法」(特願 2011-262985)西尾繁
7. 「熱輸送方向を切替可能なヒートパイプ、及び逆止弁により熱輸送方向の自動切替が可能なヒートパイプ」(特願 2012-55038)鳥取章二、永井二郎

(2) 特許登録

1. 「ループ型ヒートパイプ」(特許第 4771964)新宮秀夫、大谷暢夫
2. 「集光装置における集光レンズ位置調節機構」(特許第 4953119)新宮秀夫、大谷暢夫、室岡裕之、重田達雄

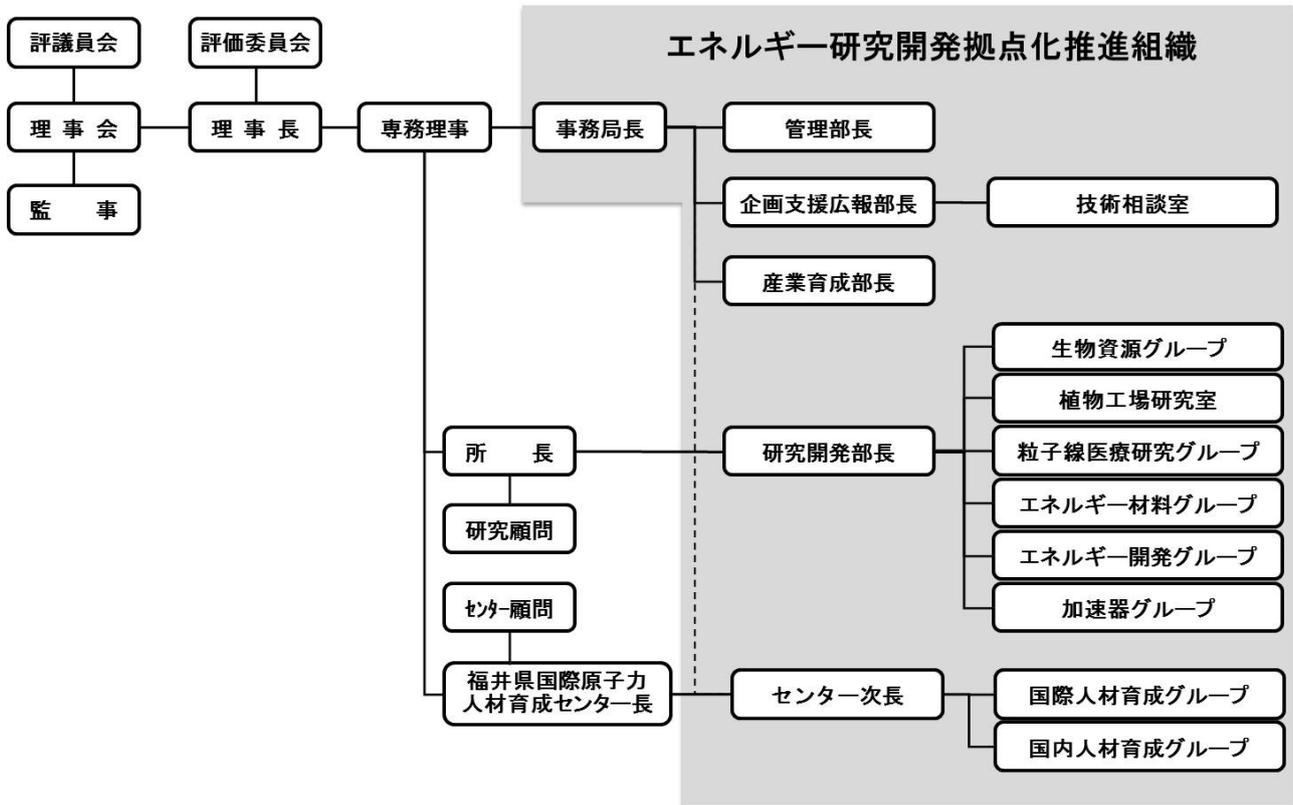
3.3. 品種登録

平成 23 年度における品種登録は次のとおりである。

1. 「せと福 NVLB」(品種第 21373)水野隆、畑下昌範、高城啓一、鈴木勝久
2. 「せと福 CAP」(品種第 21643)水野隆、畑下昌範、高城啓一、鈴木勝久

財団法人若狭湾エネルギー研究センター 組織図

(平成 23 年 4 月 1 日 現在)



平成 23 年度

財団法人 若狭湾エネルギー研究センター

年 報 第 14 卷

発行:平成 24 年 10 月

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