若狭湾エネルギー研究センター

開所20年のあゆみ

研 究 年 報 平成29年度 第20巻





目 次

Ι	開所2	0年の	あゆみ

1	ごあいさつ ・公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター 理事長
2	若狭湾エネルギー研究センターのあゆみ 財団法人設立の経緯・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3	研究開発活動 (1)研究開発事業の概要 ~経緯と変遷~ ···· ·9 (2)主な研究活動と成果 ···· ·17 (3) 今後の研究活動 ···· ·37 (4) 公募型共同研究(関西・中京圏との連携推進) ···· 40 (5)特許及び新品種登録等の知的財産 ···· 42
4	企画支援広報部の活動 技術支援・相談 技術支援・相談 科学機器等の利用支援と利用実績 科学機器利用研修の開催 48 公募型競争的資金の獲得の概要 広報活動と見学者対応
5	産業育成部の活動 (1)産学官ネットワークの推進と研究会活動
6	福井県国際原子力人材育成センターの活動 (1)国際的な原子力人材の育成の概要

1. 研究成果

1.1. エネルギー・環境分野

1.1.1. レーザー技術を応用した除染技術、切断技術の開発

1.1.1.1	レーザーを用いた異種材料溶接とNiP めっき材料の焼き入れ
1.1.1.2	30 kW ファイバーレーザーを用いた低合金鋼の切断
1.1.1.3	レーザー剥離技術を用いた除染
1.1.1.4	熱的切断工法による気中及び水中切断時の粉じん挙動調査80
1.1.1.5	同軸光学系レーザーヘッド内蔵光信号計測器向け集光光学系の特性調査81
1.1.1.6	鉄鋼材料のレーザー切断特性のシステム依存性調査
1.1.1.7	耐放射線性ロボットレーザー除染基礎技術開発および
	廃止措置人材育成のための操作実習

1.1.2. 廃炉段階で役立つ情報の収集・整理・分析と技術の開発

1.1.2.1	原子力発電所コンクリートの有効利用調査	85
1.1.2.2	アスファルト固化体リコンディショニングの成立に向けた実規模試験	87
1.1.2.3	クリアランス確認後の金属再利用に関する成立性の調査	88

1.1.3. 放射線計測技術の開発

1.1.3.1	瓦礫等による放射線源出現に対する評価手法の検討	89
1.1.3.2	ガンマ線分光によるセメント産出物の放射能測定	91

1.1.4. 未利用エネルギー利用技術開発

1.1.4.1	マグネシウムの酸化還元反応を活用した水素エネルギー循環サイクルの構築	93
1.1.4.2	バクテリアを用いた水素製造技術の導入調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	96
1.1.4.3	太陽炉と太陽熱エネルギー利用研究	97

1.2. 医療分野

E.

1.2.1. 粒子線がん治療高度化のための生物応答解明研究

1.2.1.1	異種放射線の併用によるがん治療の高度化に向けた治療生物学的な検討 98
1.2.1.2	子宮頸がんに対する粒子線治療の有効性と治療効果予測に関する基礎的検討 99
1.2.1.3	陽子線頭頸部がん治療における放射線口腔粘膜障害の発症動態
	および病態の解析
1.2.1.4	細胞の放射線感受性を決定する情報伝達機構の解明
1.2.1.5	Silicon-on-insulator microdosimeter を用いた粒子線場における
	脳壊死形成に関するマイクロドジメトリ

1.2.2. 粒子線照射技術の高度化研究

1.2.2.1	陽子線オンライン	/線量分布測定シ	/ステムの開発	1	04
---------	----------	----------	---------	---	----

1.3. 農業·生物分野

1.3.1. 植物・菌類のイオンビーム育種研究

1.3.1.1	DNA 修復機構を利用した変異誘発促進技術の開発
	- KU70, RAD54 欠損変異体の生存率に対する X 線照射の影響107
1.3.1.2	イオンビーム利用技術研究開発(品種改良)
	- 酵母のセルレニン耐性変異取得率に対する選抜開始時期の影響109
1.3.1.3	真菌類を用いた新規免疫賦活剤の開発
1.3.1.4	イオンビーム照射による山田錦のテーラーメード育種ライブラリーの開発と
	福井県に適した「新山田錦」の育成
1.3.1.5	冬虫夏草変異株を用いた新規抗腫瘍物質の生産
1.3.1.6	イオンビーム照射によるストックの育種
1.3.1.7	イオンビーム突然変異処理による新たな特性を持つオオムギ品種の開発120
1.3.1.8	重イオンビーム育種技術の高度化
1.3.1.9	イオンビーム照射による耐熱性有機酸発酵変異株の構築122
1.3.1.10	観葉植物へのイオンビーム照射による新品種の育成
1.3.1.11	粒子線による突然変異を利用した野菜の品種開発

1.3.2. 植物工場関連技術開発

1.3.2.1	植物工場に適したレタス新品種の特性
1.3.2.2	植物育種の効率化を目指した DNA マーカーの開発
1.3.2.3	抗酸化活性評価法の開発

1.4. 多様な分野の活動を支える技術開発

1.4.1. 加速器技術の開発・高度化

1.4.1.1	若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状	6
1.4.1.2	シンクロトロンの出射制御系の開発	8

1.4.2. 加速器利用分析技術の開発・高度化

1.4.2.1	シリコン薄膜中の水素分析
1.4.2.2	He-Li 反応断面積の測定とビーム電流計測装置の開発132
1.4.2.3	大気中 ERDA 分析技術の開発
1.4.2.4	TOF-ERDA 測定におけるバックグラウンド軽減の試み136

1.4.3. 放射線場で利用される機器・材料の評価技術開発

1.4.3.1	人工衛星搭載用マイクロコンピュータの耐放射線シミュレーション138
1.4.3.2	室内実験と探査機の連携で解明する氷天体内部進化:イオン照射による
	宇宙風化モデリング
1.4.3.3	宇宙機適用に向けたペロブスカイト太陽電池の耐放射線性に関する評価142
1.4.3.4	イオン照射した低チタンバナジウム合金の組織発達過程に及ぼすチタン
	添加依存性

1.4.3.5	放射線遮蔽用可とう性材料の性能評価
1.4.3.6	ジルカロイ2に不純物として含まれる水素化物への重イオン照射効果146
1.4.3.7	宇宙機搭載用機器に対する高エネルギー陽子線照射技術の開発148
1.4.3.8	火星衛星探査機 MMX 搭載用撮像素子の耐放射線性評価基礎研究148
1.4.3.9	低放射化建築用部材の性能評価研究

1.4.4. 材料技術の開発

1.4.4.1	水素の安全な輸送と取り扱いに利用可能な水素吸蔵合金の開発150
1.4.4.2	シリコンの成膜による絶縁性材料の着色
1.4.4.3	高分子材料上の金属めっきの密着性に関する研究
1.4.4.4	ポリイミド系高分子ファイバーの開発
1.4.4.5	新材料を用いた超小型レーザービーム走査ミラーの作製とそれを用いた
	眼鏡型ディスプレイの実現
1.4.4.6	ラジカル含有リチウム酸化物を用いた常温水分解法による水素発生シス
	テムの開発
1.4.4.7	X線 CT スキャンによるロータス型ポーラスマグネシウムの気孔形態観察161
1.4.4.8	ナノ複合めっきに析出した粒子の微視的評価
1.4.4.9	フレキシブル導電材料のための金属皮膜の耐久性向上に関する調査研究163
1.4.4.10	超強加工による微細結晶粒金属材料の創製と評価
1.4.4.11	ラテックス上の窒化物粒子の微視的評価

2. 外部発表、特許、品種登録

2.1.	外部発表	3
2.2.	特許	1
2.3.	品種	1

Ⅲ 資料編

1	研究報告会における演題および発表者一覧175
2	公募型共同研究 件名一覧
3	歴代理事長·所長
4	公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター理事会
5	公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター評議員会

I 開所20年のあゆみ

1 ごあいさつ

ごあいさつ

福井県若狭湾エネルギー研究センターは、平成10年11月に開所し、今年で開所20周年を 迎えました。当センターは、様々な原子炉が集積している福井県の特徴を活かし、エネルギー に関する研究開発や加速器を用いた研究、国内外の研究者・技術者の交流の拠点として福井 県が設置したものです。

平成17年には、福井県を原子力を中心としたエネルギーの総合的な研究開発拠点地域と するために「エネルギー研究開発拠点化計画」が策定され、現在、当センターでは、この計画 の推進機能を担うとともに、「研究開発」「産業支援」「人材育成」の3本を柱として事業を行って います

「研究開発」では、設立当初から、加速器を用いた放射線の医療利用や農作物の品種改良 等に取り組んできました。特に陽子線がん治療は、当センターで臨床研究を行い、平成23年から福井県立病院において多くの方々の治療に活かされています。品種改良では、新しい鑑賞 用草花を開発したほか、植物工場用に成長の早いレタスの開発などをしており、平成29年には 理化学研究所と連携した育種相談窓口を設置し、西日本における育種研究の拠点となることを 目指しています。

最近では、陽子線とX線の併用など放射線治療のさらなる高度化、人工衛星などの宇宙放射線への耐性試験、レーザーを用いた原発廃炉の除染技術や構造物切断の実証研究、水素利用の調査研究など様々な分野の研究に取り組んでおり、成果が期待されます。

「産業支援」では、産学官連携や県内企業の技術支援・相談、新製品開発への支援を進めています。また、県内企業の原子力関連業務への参入促進のための研修、商談会等を行っており、原発廃止措置の具体化に伴い平成28年からは電力事業者の説明会および元請会社との情報交換会を実施しています。これらにより、県内産業の振興に今後とも貢献していきたいと考えています。

「人材育成」では、平成23年に関係機関の協力を得て、当センター内に「福井県国際原子 カ人材育成センター」を設置し、県内企業の原子力分野への参入促進のための研修や原子力 の安全を支える国内外の原子力人材の育成のための研修等を行ってきました。

特に、平成25年にIAEAと福井県が署名した原子力人材育成等に関する協力のための覚書 に基づき、海外からの研修生の受入れを積極的に実施しており、参加者から高い評価を得て いるところです。

開所20周年を契機として、当センターがさらに、原子力・エネルギー分野の研究および原子 力人材育成の拠点としての役割を果たし、地域産業の発展に貢献できるよう努めてまいります。

県民の皆様や産業界、大学、関係機関におかれては、より一層の御支援、御協力を賜ります ようお願いいたします。

> 公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター理事長 石 塚 博 英

ごあいさつ

福井県若狭湾エネルギー研究センターは平成 10 年 11 月に開所して以来、今年で開所 20 周年を迎えます。原子力利用は原子力発電によるエネルギー利用の他に放射線の利用などが 挙げられます。当センターでは設立当初から後者の放射線利用研究に重点を置いてきました が、東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故以来、原子炉の放射能汚染対策に資 するレーザー除染や原子炉構造物のレーザー切断の開発などの研究も積極的に実施してきま した。

当センターの中核となる研究設備が多目的シンクロトロン・タンデム加速器です。加速器利用 分析技術の開発では、粒子線励起X線分光法により歯のう蝕とフッ素の関連性、イネの根が取 り込む金属元素の挙動に関する研究などを行ってきました。また、飛行時間差測定反跳粒子検 出法によってリチウムイオン電池における元素分布の測定やシリコン上のカーボン極薄膜を世 界最高の分解能で検出することに成功しました。ところで、太陽宇宙線の主成分はエネ研のシ ンクロトロンで加速された陽子線と線質が類似していることから、人工衛星に搭載する電子デバ イスの宇宙線による劣化の研究を地上でのシミュレーション実験によって行っています。宇宙線 による半導体デバイスの誤動作の機構解明や防止対策の研究を行っています。当センターで 試験した機器が宇宙探査機に搭載されています。

イオンビームを利用した品種改良では、イオンビーム照射によりDNAに損傷を与え突然変異 の起こる頻度を増加させることで目的の性質をもった育種の発現頻度を高めることができます。 この技術を利用してさまざまな観賞用の植物や野菜、人に役立つ菌類、真菌類の性能改良を 行っています。陽子線がん治療は、従来のX線治療に比べて副作用が少なく、治療効果が高 い治療法です。当センターにおいて陽子線がん治療の62例の臨床研究が実施されました。こ れらの当センターにおけるがん治療の成果を活かして、平成23年に福井県立病院に陽子線が ん治療センターが開設されました。

原子炉等の廃炉に伴い、コンクリートや金属などの切断および除染などの技術開発が必要 になります。原子炉等の安全な切断、解体時に発生する粉じんなどの拡散を抑制する必要があ り、水中におけるレーザー切断技術は、その拡散を抑制する有望な候補技術となります。当セ ンターでは水中切断用のレーザーヘッドをファイバーレーザーに組み込んだ水中金属厚板切 断技術を開発しました。また、極短パルスレーザーを用いた構造部材の表面汚染を効率的に 除染する装置の開発を推進しています。また、次世代エネルギーとして有望視されている水素 エネルギーの製造に関する技術開発を開始しました。

当センターにおいて活発な研究活動を推進することができましたことは、偏に皆様方のご支援とご指導によるものであり、厚く御礼を申し上げます。職員一同、これまで以上の努力を重ね、より高度な研究開発とその成果の産業・社会への還元を目指していく所存ですので、皆様方の、 今後一層のご支援とご鞭撻のほどをよろしくお願い申し上げます。

> 公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター所長 中嶋英雄

ごあいさつ

福井県では、様々な原子炉が集積する福井県の特徴を活かし、原子力を中心としたエネル ギーの総合的な研究開発拠点を目指すため、平成17年に国、大学、事業者、各研究機関とと もに「エネルギー研究開発拠点化計画」を策定し、推進しているところです。

この計画の一環となる原子力人材育成については、平成 21 年度に「福井県国際原子力人 材育成協議会」を設立し、今年度で第 9 回目の国際会議となる「アジア原子力人材育成会議」 の第1回目を平成22年度に福井県内で開催するなど、国内外の関係機関の協力を得て、平成 23 年 4 月に「福井県国際原子力人材育成センター」を若狭湾エネルギー研究センター内に設 置しました。

当センターは、「国際的な原子力人材の育成」、「国内の原子力人材の育成」、「国際会議の 開催等を通じた国内外の人材育成機関との連携強化」を3つの柱として事業に取り組んできた ところであります。これまで関係機関の力強いご協力をいただきながら、多くの成果を上げてき たと考えています。

特に国際原子力機関(IAEA)との連携については、元 IAEA 事務局次長の故町末男氏のお 力添えにより、IAEA と福井県が、原子力人材育成等に関する協力のための覚書に署名し、地 方自治体と IAEA との間では異例とも言える協力をいただいており、緊密な連携のもと、当セン ターが実施する研修の高度化につながっています。これまでに研修を受講した海外からの研修 生は約 550 名に達しており、各国では次の年度の受講生に当センターでの研修の高い評価を 語りついでいただいていることも聞き及んでいます。また、平成27年度以降は、町末男氏の後 任として、元 OECD/NEA 事務局次長の下村和生氏とアジア原子力協力フォーラムの日本側コ ーディネーターである和田智明氏にご指導をいただいているところです。

福島第一原子力発電所の事故以降、原子力利用については様々な意見が交わされていま すが、国際的に活動できる国内外の優秀な原子力人材の確保は必須であることから、今後とも 有益な人材育成を進めていきたいと考えております。今後とも、関係各位のご指導、ご鞭撻を お願いします。

> 福井県国際原子力人材育成センター長 北端 琢 也

2 若狭湾エネルギー研究センターのあゆみ

2 若狭湾エネルギー研究センターのあゆみ

(1) 財団法人設立の経緯

福井県は、若狭湾地域に原子力発電所が集中立地している特性を活用して、エネルギー関連技術 の地域産業への波及等を通じ、地域振興を図る「アトムポリス構想」の実現に向け、昭和 56 年から取り 組んできた。こうした中、昭和 62 年に第 13 回日本学術会議が「地域型研究機関構想」を創り、地方に 研究所を整備し、その研究を地域振興に活かすべきと提言した。これを契機として国、福井県、民間が 一体となって事業を推進する財団法人が設立されることになり、平成 6 年 9 月に通商産業省(現経済 産業省)と科学技術庁(現文部科学省)の認可を得て、財団法人若狭湾エネルギー研究センターが発 足した。

当法人は、平成6年9月に若狭湾地域における原子力及びエネルギーに係る科学技術の活用に関 する調査及び研究開発、技術者等の研修、内外関係機関等との交流及び協力等を行うことにより、原 子力及びエネルギー関連科学技術の地域産業への普及等を通じて地域の活性化を図り、もって我が 国経済の健全な発展及び科学技術の振興に寄与することを目的に発足した。

平成6年9月設立当初、当法人はプラザ萬象(福井県敦賀市東洋町)内に事務所を設け、役職員4名 でスタートした人員を、翌平成7年度末には8名(内研究者は所長を含め3名)に拡充し、企画管理部、 研究部及び研修・交流部の3部体制で研究、研修及び交流事業を開始した。

(2) 福井県若狭湾エネルギー研究センターの開所

福井県が当法人の活動拠点となる施設の整備を進め、平成10年11月に「福井県若狭湾エネルギ ー研究センター」(福井県敦賀市長谷)が開所し、研究・研修・交流等の事業が本格的に展開できる環 境が整った。同センターには、中核設備である、医学分野、農林水産分野、工業分野等の様々な分野 で利用可能な加速器システム(名称:多目的シンクロトロン・タンデム加速器 W-MAST)が整備され、平 成12年7月にはその運用を開始した。さらに、各種の分析評価等において必要な研究設備として、50 種類以上の高度な科学機器の導入を進め、研究機関としての十分な体制整備を図った。



福井県若狭湾エネルギー研究センター開所記念式典(平成10年11月11日)

平成10年11月のセンター開所に合わせ、研究員をはじめとした職員を増員し、平成11年度末には常 勤職員33名、研究員22名の体制として業務にあたった。

研究部内に「粒子線理工学グループ」、「化学・バイオグループ」、「安全・環境グループ」、「システム グループ」、「産業技術開発グループ」の5グループを設け、加速器の運転、開発等を行う「加速器室」、 陽子線がん治療研究を行う「粒子線医療研究室」を新設した。平成12年度には、業務内容を勘案し、 「化学・バイオグループ」を「物性・バイオグループ」に改称した。

平成16年4月には、研究推進体制の強化と地域産業との連携強化を図るため、理事長と所長をそれ ぞれ経営と研究のトップに据え、「企画管理部」と「研修・交流部」を統合し、新たに「企画交流部」を設 置するとともに、「研究部」、「加速器室」及び「粒子線医療研究室」を統合し、「研究開発部」として再編 した。

(3)「エネルギー研究開発拠点化計画」の策定

平成17年3月には、福井県は地域と原子力の自立的な連携を目指し、「エネルギー研究開発拠点化 計画」を策定した。この計画は、様々な原子炉が集積する本県の特徴を活かし、原子力を中心としたエ ネルギーの総合的な研究開発拠点を目指し、「安心・安全の確保」、「研究開発機能の強化」、「人材の 育成・交流」、「産業の創出・育成」の4つを基本理念に掲げて、国、自治体、事業者、大学、産業界な どが一体となって具体的な施策を実行するものである。当法人は、同計画を推進するため外部から幅 広く人材の参画を求め、当法人内に「エネルギー研究開発拠点化推進組織」として「産学官連携チー ム」、「技術支援チーム」、「人材育成・交流チーム」を組織し、「研究開発機能の強化」、「人材の育成・ 交流」及び「産業の創出・育成」について、同計画の推進に向けた総合的なコーディネートとともに、地 域産業界等の要請に応えられるよう、地域密着型の研究機関として活動を開始した。



エネルギー研究開発拠点化推進組織 開設記念式典(平成17年7月24日)

(4) 福井県国際原子力人材育成センターの設立

平成 23 年 4 月には、「エネルギー研究開発拠点化計画」の一環として、アジアをはじめ世界の原子 力発電導入や原子力利用を計画する国々の安全技術と人材育成に貢献し、また、国内外の原子力の ニーズに応え国際的に活躍できる国内技術者を養成するため、当法人の一組織として「福井県国際原 子力人材育成センター」を設け、センター長のもと、「国際人材育成グループ」と「国内人材育成グルー プ」の 2 グループにおいて国内外の原子力人材育成の推進体制を構築した。

平成 29 年 3 月には、国際人材育成グループの活動拠点をアクアトム(福井県敦賀市神楽町)に移転し、より効果の高い国際研修を実施できる体制を整えた。



アジア原子力人材育成会議(平成27年2月3日 福井県国際交流会館にて開催)

なお、平成23年度の当法人の組織改正により、原子力・エネルギーに係る産業の創出・育成を図る 目的で、「産業育成部」が新たに設置され、「産学官ネットワーク形成の推進」、「研究開発支援」 「県内企業の原子力関連業務への参入支援」などの「新産業創出支援」に取り組んでいる。

(5) 公益財団法人への移行から現在まで

平成25年4月には、公益法人制度改革への対応として、従来の財団法人から、内閣総理大臣の認 定による公益財団法人に移行した。

また、平成25年4月から、当センターの中核設備である加速器の管理・運用を担っている加速器グ ループを「加速器室」とし、他グループとの連携強化を図った。

平成27年2月、レーザー除染をはじめとしたレーザー技術を専門的かつ組織的に実施するため「レ ーザー技術開発室」を設置した。

平成27年4月に生物資源グループを「生物資源研究室」に、平成30年4月に粒子線医療研究グル ープを「粒子線医療研究室」とし、機能強化を図った。 平成 30 年 9 月末現在、当法人は、管理部、企画支援広報部、産業育成部、研究開発部及び福井 県国際原子力人材育成センターの4部1センター体制、役職員等 57 名で運営している(「エネルギー 研究開発拠点化推進組織」は、事務局長を組織の長とし、部長、技術活用コーディネータ等で構成す る)。



平成25年4月~現在

3 研究開発活動

3 研究開発活動

(1) 研究開発事業の概要 ~ 経緯と変遷 ~

① 平成 10 年度~平成 11 年度

(財)若狭湾エネルギー研究センターの設立に先立ち、平成6年3月にまとめられた基本計画に従って、研究開発事業を実施してきた。基本計画では、研究テーマの例として、(1)地球環境や地域システムを課題とするエネルギーの有効利用、(2)信頼性科学や環境放射線等に関する安全科学、(3)医学、農林水産、理工学分野の放射線利用等の先端核科学が挙げられている。

この期間の研究成果は、以下のとおりである。

- ・エネルギーの有効利用では、原子力発電所の温排水の有効利用や雪を利用した氷温貯蔵システムを検討した。
- ・安全科学では、原子力エネルギー認識の調査や放射線利用の社会的受容性の調査などを行った。
 ・先端核科学では、めっき廃液の処理に関する研究、窒化物半導体の加工法の開発、ダイヤモンド 薄膜の作製、和紙の微量元素分析などを実施した。また、CT 撮像用ベッドと放射線照射用ベッド
 を共通化したシステムを考案し、陽子線がん治療の位置決めの高精度化、簡便化を可能にした。

② 平成 12 年度~平成 16 年度

平成12年度からの加速器の供用開始に合わせ、平成6年3月の基本計画を踏まえて平成12年 度から平成16年度までの5年間に実施する重点事業を設定し、中長期事業計画を策定した。

研究開発事業の分野	研究の内容
加速器を用いた研究	
1.陽子線によるがん治療研究	・平成13年度末までの臨床研究開始を目指し、その後5年
	間程度の臨床研究の継続
2.材料創製と分析技術開発研究	・高速イオン注入・照射による半導体などの高機能材料創製
	及び加速器を用いた極微量元素などの分析技術の開発
3.農産物の品種改良研究	・福井県農業試験場等関係機関と連携したイオンビームによ
	る農産物の品種改良研究
エネルギーの開発・有効利用研究	
1.環境負荷低減型エネルギー源	・二酸化炭素を放射線を用いて水中でメタン等の可燃性物質
の開発	に還元生成させる研究など
2.エネルギーの有効利用	・発電所の排熱等を地域冷暖房等に利用する場合のモデル
	ケースを想定し、技術的成立性と経済性の基礎的研究など

平成12年度から5年間を対象とした中長期事業計画

この期間の研究成果は、以下のとおりである。

- ・陽子線がん治療研究では、平成14年度の治験に引き続き、平成15年度から臨床研究を開始し、 平成21年度までに62名の治療実績を蓄積した。この臨床研究の成果を反映して、平成23年3 月に福井県立病院陽子線がん治療センターが開設された。
- ・半導体関連では、異種半導体の接合に関る研究や窒化ガリウム半導体の製造技術の開発などの成果を挙げた。分析技術では、極微量分析手法や炭素分布測定方法の開発に取り組んだ。
 ・農産物の品種改良では、倒れにくいコシヒカリの品種などを作出した。

③ 平成 17 年度~平成 21 年度

平成17年度から平成21年度までの中期事業計画では、第1期計画が基礎的な研究に偏っている 面もあったことから、企業のニーズを踏まえた上で既存産業の育成及び新産業の創出につながる実用 化・応用研究を重視すること、並びに先端的な新産業分野及び有望な技術分野から事業の選択と集 中を進めることを改定の視点とした。

研究開発事業の分野	研究の内容	
1.高エネルギービーム利用研究		
(1)陽子線がん治療研究	・臨床研究を継続するとともに、治療計画システム高度化など	
	の治療高度化研究を進める	
(2)高精度薄膜製造技術開発	・半導体製造技術開発に加えて、新規事業として磁性体薄膜	
	や高分子機能性材料などの技術開発に取り組む	
(3)先端分析·照射技術開発	・極微量分析技術の信頼性向上や原子力関連機器、宇宙開	
	発関連機器の照射損傷評価などを推進	
	・イオン照射による品種改良の研究を継続し、突然変異誘発	
	機構を解明し、効率的な品種改良技術の開発を目指す	
2.エネルギー開発研究		
(1)太陽エネルギー利用技術開発	・シリコン薄膜太陽電池開発や太陽光エネルギー利用技術開	
	発	
(2)生物資源エネルギー開発	・植物を用いた水質浄化システムの開発や酵素・微生物によ	
	る分解・発酵反応の研究などのバイオ応用技術開発に取り	
(3)エネルギー利用高度化技術開	組む	
発	・熱備蓄・熱輸送技術開発を新規事業として実施する	
(4)原子力関連先端技術開発	・放射線照射損傷評価技術開発や若狭湾海洋環境モニタリ	
	ングシステムの研究を進める	

平成17年度から5年間を対象とした中期事業計画

第2期計画に基づく代表的な研究成果は、以下のとおりである。

・前述した陽子線がん治療の臨床研究が最大の成果である。

・高精度薄膜製造技術開発では、単結晶の環境半導体鉄シリサイド薄膜の作製や駆動装置として 作動する新しい高分子材料の作製などに成功した。

- ・先端分析・照射技術開発では、水素吸蔵合金の水素吸蔵・放出過程のリアルタイム観察技術、太陽電池や半導体発光デバイスの照射損傷評価、原子炉構造材料の照射加速試験、ビーム通過に伴うDNA損傷形成の確認、花卉や穀物・野菜類の品種改良実績の蓄積などである。
- ・生物資源エネルギー開発では、品種改良したアブラナ科植物が汽水域で水中の窒素を吸収する ことを確認した。
- ・このほか、フレネルレンズを用いた世界最大級の太陽炉や泡駆動式ヒートパイプの開発を行った。

④ 平成 22 年度~平成 26 年度

平成 22 年度から平成 26 年度までの第 3 期中期事業計画は、地域ニーズに応じた技術の研究開発、及び実用化・応用研究に軸足を置いた研究開発を改定の視点として策定した。

研究開発事業の分野	研究の内容
1.高エネルギービーム利用研究	
(1)品種改良技術開発	・花卉、穀物・野菜類に加えて、医薬品や健康食品に応用で
	きる菌類の新品種開発の強化。新規事業として植物工場で
	の生産に適した品種作出や植物工場関連の技術開発
(2)粒子線がん治療研究	・高品質で信頼性の高い照射を目指した治療計画システムの
	開発や陽子線の治療効果の検証のほか、新規事業として動
	物照射技術の開発を開始
(3)ビーム発生分析評価技術開発	・重イオンビームを用いた分析技術の高度化、マイクロビーム
	を用いた二次元元素分析の開発や宇宙開発関連機器の照
	射損傷評価。加速器の安定化、効率化を目指した運転技術
	の高度化にも注力
2.エネルギー開発研究	
(1)エネルギー・環境材料開発	・新規事業として原子力発電所の廃止措置や材料加工に応
	用可能なレーザー利用技術開発に取り組む
(2)エネルギー有効利用研究	・フレネルレンズ式太陽炉の用途拡大を目指した研究やバイ
	オ応用技術開発も継続
(3)原子力関連先端技術開発	・放射線照射損傷評価技術開発や若狭湾海洋環境モニタリ
	ングシステムの研究

平成22年度から5年間を対象とした中期事業計画

第3期計画に基づく代表的な研究成果は、以下のとおりである。

- ・品種改良研究では、花卉や穀物・野菜類の品種改良実績のさらなる蓄積とともに、抗がん物質を多 く含む冬虫夏草菌の作出に成功した。また、植物工場に適した高生長性リーフレタスや単為結果 性大玉トマトの作出に成功するとともに、好塩性の機能性野菜であるシーアスパラガスの工場生産 法を開発した。
- ・粒子線がん治療研究では、患者の負担が少ない適正な照射線量を把握するための基礎研究や生 体の持つ放射線応答機構を活用した治療効果の向上のための検証研究などを実施した。

- ・ビーム発生分析評価技術開発では、飛行時間測定弾性反跳粒子検出法(TOF-ERDA)やラザフォード後方散乱法(RBS)の開発やマイクロビームを用いた二次元元素分析の開発などを実施した。 また、原子炉構造材料や宇宙機搭載用機器の照射損傷評価も引き続き実施した。タンデム加速器の耐電圧性能の向上や制御方法の多様化、シンクロトロンの出射ビーム強度の安定化などを実現した。
- ・エネルギー・環境材料開発では、レーザー技術による高度な除染性能の実証、厚さ 300mm のステ ンレス鋼の高速切断の成功などがある。また、薄膜製造技術において、ポリイミド系高分子電解質 膜の作製とマイクロポンプへの応用、鉄白金薄膜永久磁石の保磁力向上などにも成功した。
- ・エネルギー有効利用研究では、木質バイオマスからのエタノールの生成・回収に成功した。

⑤ 平成 27 年度~平成 31 年度

平成 27 年度から平成 31 年度までの第4期中期事業計画は、基礎から応用までの多様な段階の研究を発展させるとともに、競争的資金等を活用し、産学官と連携を図りながら、実用化・応用化を目指すことを改定の視点として策定した。

研究開発事業の分野	研究の内容
1.エネルギー・環境分野	
ア レーザー技術を応用した除染	・遠隔操作技術の高度化、3次元ビーム制御技術の開発や
技術、切断技術の開発	レーザー加工技術の研修、研究会の開催等
イ 廃炉段階で役立つ情報の収	・廃コンクリートの再利用シナリオの調査・検討や液体廃棄物
集・整理・分析と技術開発	固化体の処理技術の検討
ウ 放射線計測技術の開発	・高所や水中など接近困難な場所での測定技術の開発
エ 未利用エネルギーの利用技術	・バイオマス資源を有効活用するため、マイクロ波加熱分解
開発	法を用いた有用物質の生産・回収技術の開発
オ 生物作用を利用した環境浄	・耐塩性アブラナや光エネルギーを利用して暴食する光合
化・修復技術の開発	成細菌を用いた水質浄化法の開発
2.医療分野	
ア 粒子線がん治療高度化のため	・県立病院陽子線がん治療センターと連携し、患者への負
の生物応答解明研究	担が少ない適正な照射線量の把握に向けた研究
イ 粒子線照射技術の高度化研究	・治療時の腫瘍部における線量分布評価法の開発
3.農業·生物分野	
ア 植物・菌類のイオンビーム育種	・育種期間や変異率の向上を目指したイオンビーム育種技
研究	術の開発研究と、育種現場への技術展開に努める
イ 植物工場関連技術開発	・施設栽培用ミディトマト品種の開発や LED 補光技術開発
4.多様な分野の活動を支える技術	
開発	
ア 加速器技術の開発・高度化	・加速器の絶縁性能向上やビーム取り出し技術の改良
	・茶葉中の元素分析の実施や TOF-ERDA 法によるリチウム

平成27年度から5年間を対象とした中期事業計画

イ 加速器利用分析技術の開発・	定量分析法の開発
高度化	・原子炉構造材料への照射や劣化評価法の研究、宇宙機
ウ 放射線場で利用される機器・材	搭載用機器(放射線検出器等)の耐性評価
料の評価	・ポリイミド系高分子を用いた光ファイバーの開発
エ 材料技術の開発	

現在、第4期計画の3年が経過した時点であるが、これまでに完了した主な研究成果としては、以下のようなものが挙げられる。

- ・エネルギー・環境分野では、レーザーによる自走式小型除染システムの開発、原子炉圧力容器の 構造材と同材質で厚さ 300 mmの低合金鋼のレーザー切断試験、光合成菌による汽水湖の浄化進 展の確認などがある。
- ・医療分野では、陽子線照射による被ばく細胞と非被ばく細胞の両方に誘導される遺伝子発現変化の発見、陽子線線量分布のオンライン可視化システムの開発などがある。
- ・農業・生物分野では、優れた保水力を持つ多糖類の生産性が高いイシクラゲ変異株の発見、有用物質を生産できる希少真菌類のイオンビーム育種、シーアスパラガスの通年栽培を可能とするLED 補光方法などがある。
- ・多様な分野の活動を支える技術開発では、高分子材料への金属めっきの密着性を向上させる表 面凹凸の制御方法の確立や金属・プラスチック・ガラスに適用可能なシリコン成膜着色技術の開発 のほか、原子炉構造材料や宇宙機搭載用機器の照射損傷評価も引き続き実施した。

今後も、現時点ではまだ継続実施中の水素関連の研究、原子力施設での配管内壁のレーザー除 染実証試験、理化学研究所との連携による品種改良や変異誘発促進技術の開発などに取り組んでい く。

研究開発の変遷

1 加速器を用いた研究

2 エネルギーの開発・有効利用研究

第2期中期事業計画(平成17~21年度)

1 高エネルギービーム利用研究

2 エネルギー開発研究



(注) 下線は新規項目を示す。



(2) 主な研究活動と成果

加速器室の研究活動

羽鳥聡、栗田哲郎、

林豊、山田裕章、廣戸慎、清水雅也、大矢龍輝、山口文良、淀瀬雅夫、長崎真也、渕上隆太 (以前の在籍者:濱地寿和、橋本鉄也、島田麻亜久、小田桐哲也、金井清、香川弘成、中田吉則、 山田和彦、丸田恭央、和田一人、原裕也、山本久雄、大谷暢夫、峰原英介、福本貞義)

活動の概要

エネ研開所とともに加速器施設の建設が開始された。2000 年、実験利用を開始した後、ビーム供給の一方で加速器システムの安定運転と性能向上をはかり、医療・生物学・材料研究での応用利用が定常的に行われるようになり、2007 年にはタンデム加速器の年間運転時間は 4500 時間を越えるようになっていた。

2005年に打ち出された「エネルギー研究拠点化推進計画」の中でうたわれている「陽子線がん治療 を中心としたがん治療研究施設の整備」の結果、福井県立病院に陽子線がん治療センターの建設が 計画され、エネ研における陽子線がん治療臨床研究は2009年に終了した。新たな研究テーマ立ち上 げの必要性が増す中で、炭素ビームなどの重イオン加速の要求が高まりつつあった。シンクロトロンに おける重イオンの高効率加速には入射ビームの高エネルギー化が重要であるが、建設開始から10年 を迎える頃にはタンデム加速器の絶縁性能の劣化がめだつようになっていた。

臨床研究終了後のエネ研加速器施設の次なる 10 年はタンデム加速器の加速高電圧復活を目指した大規模修繕でスタートした。タンデム加速器はより精度の高い加速高電圧の安定化と、長期間の安定運転を目指し開発を行っている。シンクロトロンは真空系改良、ビームフィードバック改良、出射ビーム制御改良による加速効率やビーム照射野形成の信頼性向上を目指している。

主要な成果

1. タンデム加速器

2007 年度、タンデム加速器の高電圧発生時間は 4500 時間を越えたが、2008、2009 年度は 3300 時 間程度の運転となった(図 1)。2008 年度には高電圧発生用の多段倍電圧整流回路が組み上げられ ている絶縁コラム内部で整流回路を短絡するような損傷が発生し、高周波発振回路や整流回路に損 傷を与えた。絶縁コラム表面も整流回路を短絡する無数の放電痕に覆われ発電効率が損なわれた。 2011 年、劣化した絶縁コラムを全て交換した。交換の際、加速管にも損傷が認められ、加速管全てをメ ーカーで修繕した。

放電現象の解析を行い、メンテナンス方法にフィードバックする取り組みを行っている。絶縁構造物上での放電を抑えるため、絶縁構造物状での電位分布の均一化をはかる取り組みがなされている。絶縁ガス SF₆の循環冷却や整流回路や高電圧分割回路に用いられている素子の抵抗値の均一化管理である。

加速高電圧の安定化の改良のため、電圧計測方法の改良や多元化が行われている。回転発電電 圧計(Generating Voltage Meter GVM)の改造やコラム分割抵抗の電流値計測による制御、ビーム位置 計測(Beam Position Monitor BPM)による制御などである。BPM 制御はビーム位置をロックすることがで きるため、精密スリットを用いるマイクロビーム利用実験に用いられる。 温暖化ガスである絶縁ガスSF6を環境中に放出しないための開発も行われている。

2. シンクロトロン

シンクロトロンへの入射、シンクロトロンでの加速、シンクロトロンからの出射効率を向上するための一 手段として、真空系の見直しが行われた。真空シール材の変更やポンプの更新による排気性能の向上 を図った。

加速性能向上のため、加速高電圧のビームフィードバック制御の信頼性向上を図った。加速高周波 の位相固定ループ用副発振器として用いられるアナログ発振器の一種 VCO の使用をやめ、完全デジ タル化を行ったり、放射線環境下における誤動作や信号伝送系に重畳するノイズを避けるため、制御 装置の移設を行った。加速位相制御に現れる位相振動のメカニズムも究明し、対策を行った。

シンクロトロンからのビームの遅い取出しの制御方法の改良も行われていて、ウォブラー電磁石を用いる照射野形成においても、その平坦度に対する信頼性を向上させるとともに、カウンター実験への可 能性も開いた。

3. 加速器利用研究テーマと加速器開発

図1はタンデム加速器の運転時間をイオン種とイオン源の運転方法別(a)および研究テーマ別(b)に まとめたものである。2009 年臨床照射終了以後、医療開発実験、生物照射研究は一定の実験時間が 確保されている一方、イオンビーム分析や材料照射研究の実験時間に閉める割合が増えてきた。

イオンビーム分析には主にタンデム加速器のビームが用いられる。粒子線誘起 X 線(Particle Induced X ray Emission PIXE)やy線(Particle Induced Gamma ray Emission PIGE)を測定する方法や ラザフォード後方散乱(Rutherford BackScattering RBS)を測定する方法や弾性反跳粒子を検出する 方法(Elastic Recoil Detection Analysis)などが用いられる。エネ研ではマイクロビームを用いてこれらの 分析を行うことができるが、エネ研で開発した、マイクロビームを大気中に取出すシステムでは、通常の 真空中での利用と同じようにビームを掃引(スキャニング)することができる。マイクロビーム利用のため ビーム位置をロックできる加速電圧制御(BPM 制御)の開発もおこなわれている。

さらにエネ研で開発された、飛行時間(Time Of Flight)測定とERDA を組み合わせた TOF-ERDA 法 は、水素やリチウムなどの軽元素の面密度の深さ分布計測の精度を向上させるものであり、深さ方向分 布の位置分解能は世界一を誇る。入射ビームにはヘリウムや炭素などが用いられてきたが、反跳され る軽元素のエネルギー精度を上げるため、より質量数の大きな重イオンビームが求められてきている。 パワー半導体の耐放射線性能調査研究においては線エネルギー付与の大きな重イオンビームが求め られる。sd 殻核(Si など)や fp 殻核(Cu や Ni など)のイオン化、タンデム加速に対する取り組みが行わ れている。

線エネルギー付与の大きな炭素ビームは生物照射研究においても有用であり、照射室 3 がん治療 コースは臨床照射利用終了後、炭素ビーム搬送が可能となるよう改良が行われた。

半導体を用いた各種電子デバイスは様々な放射線環境下で用いられているが、特に、地球の衛星 軌道や惑星軌道など宇宙機に搭載される機器の宇宙放射線耐性試験や動作試験などがシンクロトロ ンのビームを用いて行われるようになっており、加速や照射技術やビーム計測技術の開発が進んでい る。





図1 タンデム加速電圧発生時間推移

各年度の棒の長さは総発電時間を示している。(a)、(b)ともに、発電時間を分割、色分けしてある。(a)はイオン 種およびイオン源の運転方法で分類してある。DC はイオン源から直流ビームを引き出したことを示し、タンデ ム加速器ビームを照射室1、2で利用する時間をあらわしている。Pulse はパルスビームを引き出し、シンクロトロ ンビームを利用したことを表す。(b)はそれぞれの年度運転時間を研究テーマ別ごとの運転時間で分類してあ る。

今後の研究展開

建設開始から10年間、加速器システムを利用した研究の大きな柱の一つは陽子線がん治療臨床研 究であった。現在まで続く次の10年は臨床研究後の新たな利用法模索の期間であった。タンデム加 速器はまず絶縁性能を回復し安定して高エネルギービームを供給できるようにすることが必要であり、 シンクロトロンもその加速効率の向上や加速性能や信頼性の向上のため、ビームフィードバック制御や 遅い取出し制御の改良を行うことが重要であった。現在、加速性能の向上や安定化に加え、加速粒子 の多様化や取出し搬送技術の向上に取り組んでいる。分析精度の向上に加え、分析可能な元素や同 位体が増える。照射野面積や全照射線量に加え、線エネルギー付与にも着目した照射ビームの線質 選択が可能となる。



【加速器室員(2018年8月現在)】

高城啓一、田中良和、畑下昌範、遠藤伸之、長友仁郎、高畠欣司、元山つや子、柳原理沙、永友 真未(以前の在籍者:山口真実、久保俊明、平河早智、田中美穂、南奈々)

活動の概要

生物資源研究室は、イオンビーム照射による生物の品種改良、及び未利用生物資源の有効活用を主要な研究テーマとしている。

イオンビーム照射による生物の品種改良では、外部の試験研究機関や大学、種苗会社などと共同で 観賞用の草花や植物工場用の野菜などの植物、薬剤を生産するための微生物等、有用な生物品種の 開発に携わる研究を行っている。また、品種改良に関わる基礎研究として、イオンビームによる突然変 異の特徴を調べる研究や、突然変異形成のメカニズムに関わる研究、有用な生物を見分けるための DNAマーカーや、品種を特徴づける有効成分分析に関する研究も行っている。これらの研究の結果蓄 積されたイオンビーム育種に関するノウハウ等は、県内の公設試験研究機関に積極的に情報提供を 行っている。

未利用生物資源の有効活用については、湖沼の富栄養化原因物質を吸収する植物や微生物の開発、陸生ラン藻類の活用研究、バイオマス廃棄物の有効活用研究を行っており、現在は、ラン藻を利用した水素生産を中心とした研究を行っている。

主要な成果

イオンビーム照射による生物の品種 改良に関し、民間の種苗会社と共同で 観賞用草花の品種改良を実施してお り、これまでにペチュニア 1 品種、ネメ シア1品種、ビンカ5品種の品種登録 を行った。現在、ビンカ1品種、オレガ ノ1 品種が登録出願中である(図 1)。こ れらの品種はすでに流通しており、市 場で入手が可能である。植物工場や、 施設園芸用野菜の品種改良では、民 間種苗会社と共同で、植物工場用に 工場環境下で通常よりも2割程度成長 速度の早いリーフレタスの開発に成功 した(図 2)。このレタスは品種登録出願 を終え、近々植物工場での試験栽培 が開始される予定である。また施設栽 培用に、着果のための手間が非常に 少ない中玉トマトの開発にも成功した。



図1民間種苗会社と共同で開発した観賞用草花(青枠内 は品種登録済み、青枠外は出願中)



図 2 開発した植物工場用レタス(下段,上下段と も定植 21 日目) 微生物(真菌類、細菌類)の品種改良では、抗 がん剤成分の生産性を高めた冬虫夏草菌の開 発(福井大学との共同研究)や、化学処理を用い ずに、微生物のみで高効率にカニ殻などに含ま れるキチンを分解して N-アセチルグルコサミンを 生産できる土壌細菌の開発(福井県立大学との 共同研究)に成功した。また、福井県食品加工研 究所に対して行ったイオンビーム育種研修の結 果として、イオンビーム照射による新たな吟醸酒 用酵母も誕生した。

品種改良に関わる基礎研究では、ビームの照 射後に生じる DNA 損傷の変化を、DNA 損傷マ

ーカーを用いて調べ、その結果を用いると、品種改良に必要な照射線量決定過程を短縮できる(通常数ヶ月~1年必要な過程を2週間程度に短縮)可能性を示した。また、戦略的イノベーション創造プログラム次世代農林水産業創造技術オミクス解析技術等の育種への応用の構成員として、炭素ビームだるイネ有用突然変異の選抜と、炭素ビームがイネに引き起こす突然変異様式の解析に取り組んだ。 未利用生物資源の有効利用研究では、富栄養物質を吸収させるため汽水湖面で育成可能なアブラ

ナ品種の開発や、富栄養物質を吸収して増殖し、生分解性プラスチック原料等を蓄積する微生物の開発、紫外線吸収物質や高分子多糖を多く生産する陸生ラン藻の開発、木質バイオマスを中心とした廃 棄物バイオマスをマイクロ波を用いて分解し、有用物質を生産する手法の開発研究などを行った。

今後の研究展開

生物資源研究室の活動は、イオンビーム照射による品種改良研究と生物資源の有効活用研究の2 つに大別されるが、両者は独立したものではなく、生物資源を有効活用するためにイオンビーム育種を 利用するなど相互に作用し合うものである。

今後の研究展開は、イオンビーム照射による品種改良に関し、引き続き福井県内外の外部機関と共 同で、実用的で地域社会に貢献できる植物や微生物の品種改良に取り組む。また、基礎研究面にお いては、理化学研究所との共同研究のもと、DNA 損傷修復機構に干渉することでイオンビームの特性 を強化する品種改良手法の開発や、染色体レベルでの突然変異を高頻度で誘発する育種手法の開 発に取り組む。

イオンビームによる品種改良のみならず、県産 品のPRやその他の品種改良手法にも役立てるこ とのできる研究として、県産品の DNA マーカー や、有用成分のカタログ作成研究に取り組む。ま た、現在確立が望まれている食品の抗酸化力評 価手法の確立に取り組み、福井県特産物の評価 や、食育への活用を試みる。

未利用生物資源の有効活用研究では、ラン藻 を用いた光エネルギーによる水素生産手法の開 発や、陸生ラン藻の有効活用研究に取り組む。



【生物資源研究室員(2018年8月現在)】

久米恭、前田宗利、長谷川崇、山東新子、水嶋慧、前田未佳 (以前の在籍者:山本和高、丸山市郎、福田茂一、高田卓志、伊東富由美、横濱則也、上西潤、 村上雅志、田辺久美子、五丁元子)

活動の概要

粒子線医療研究室(2010~2017 年度:粒子線医療研究グループ)は、福井県若狭湾エネルギー研 究センター(WERC)に設置された多目的シンクロトロン・タンデム加速器を利用した研究の一環として、 主に陽子線がん治療ならびにその周辺分野の研究を実施してきた。陽子線がん治療については基礎 研究や臨床研究、ならびに治療高度化に向けた各種付帯技術の開発研究を実施した。さらに、陽子 線治療専用施設(福井県立病院陽子線がん治療センター)の整備に携わり、円滑な立ち上げに貢献し た。また、災害対応として、東日本大震災に起因する福島第一原子力発電所過酷事故への対処に係 る研究活動を行った。その他、加速器利用系装置(高エネルギー生物照射装置、陽子線がん治療研 究装置)の運転および維持管理によるビーム提供や、陽子線がん治療研究装置改造、動物実験施設 の整備などに取り組んだ。本稿では、この10年間の主要な成果を紹介する。

主要な成果

1. 陽子線がん治療臨床研究

2002 年度に実施した陽子線がん治療装置の治験に引き続き、2003~2009 年度には、陽子線がん 治療の臨床研究を実施した(図1)。この8年間に治療した累計患者数は62例であり、その内訳は、前 立腺がん55例、肝細胞がん6例、非小細胞肺がん1例であった。5年間の経過観察期間における局 所制御率は良好で、問題となるような副作用は報告されなかった。この成果を受けて、陽子線治療専 用施設である福井県立病院陽子線がん治療センターが開設され、2011年3月に運転を開始した。こ の運転開始にあわせて、WERC における臨床照射を終了し、成果、知見および経験などを陽子線がん 治療センターへ引き継いだ。



図 1 当センターにおける陽子線がん 治療臨床研究の実施の模様



図 2 福井県立病院陽子線がん治療センター 当センターでの陽子線がん治療臨床研究の 成果を受けて建設された。

2. 福井県立病院陽子線がん治療センターの立ち上げへの貢献

福井県立病院陽子線がん治療センターの施設整備および運用開始に伴って、専門的な人材の確保が必要となった(図 2)。医師については、WERC において陽子線がん治療の臨床研究に専門的に

携わった人材を提供した。また、医学物理士については、WERC において人材育成を行い、同センタ ーでの円滑な業務実施を可能とした。診療放射線技師については、WERC で実施した臨床研究にお いて実地研修を行う形で人材を育成した。さらに、治療可能な患者数の増加を目指した陽子線治療高 度化事業を協同で行い、WERC で培った X 線 CT 位置決め手法を同センターにおける実用化などに 結実させた。これらの成果によって、同センターの円滑な運用開始に大きく貢献した。なお、現在も同 センターとは協力して研究活動を継続しており、医生物学的基礎研究やより多くの患者を受け入れるた めの方策などの検討を実施している。

3. 陽子線がん治療高度化に向けた開発研究

陽子線がん治療の高度化に向けて、既存装置の性能向上や新規照射技術の確立を目指した開発 研究を推進した。対応可能な症例を増やすために、照射野の拡大を実現することで既存装置の性能 の向上を図り、上述の臨床研究に活用した。また、新規照射技術であるスキャニング法の実装に係る検 討を実施し、その成果の一部を既存装置の制御システム冗長化に応用した。また、簡便で効率的な陽 子線線量分布の取得を目指した陽子線測定技術の開発研究に取り組んだ。リアルタイム二次元線量 分布測定システムの開発に向けて、ファイバーシンチレータを用いた測定システムの基礎検討や、蛍 光増感紙とCMOS センサーを組み合わせた安価な測定システムの開発試作、実証研究を実施した(図 3)。またゲル線量計等の三次元線量分布測定手法に係る開発研究を実施した。



図 3 オンライン二次元線量分布 測定システム試作機



図 4 新たに整備した動物実験室

4. 陽子線がん治療高度化に向けた基礎研究

陽子線の生物影響の詳細な解析やモデル動物を用いた治療効果の検証など、医生物学の観点から陽子線がん治療の高度化に向けた基礎研究を推進した。より治療効果が高く患者への負担が少ない適正な治療線量を把握するために、種々の治療生物学的なデータの蓄積およびその評価を実施した。従来、陽子線はX線の概ね1.1倍の効果を持つとされてきたが、生体に対する陽子線の効果はX線と比して一定ではなく、照射条件や細胞腫に依存して変化することを明らかにした。また、動物レベルでの検証から、実際の治療に用いられている陽子線分割照射の一回線量を既存値よりも高く設定できることが示唆された。さらに、将来の集学的治療の実現を見据え、陽子線とX線の併用による殺細胞効果およびその分子機構の定量評価を行った。それぞれの線種の単独照射の結果から予測されるよりも効率よく細胞死が誘導されることを見出すとともに、その分子機構の一端を明らかにした。これらの成果は、福井県立病院陽子線がん治療センターにおける「混合化学放射線療法」の臨床研究に活用さ
れている。この他、幹細胞への陽子線作用の解明および生物学的線量評価手法の開発、陽子線がん 治療効果を予測するための核医学的診断手法の開発、陽子線がん治療と光線力学療法の併用効果 の検証、蛍光修飾オリゴヌクレオチドや CR39 を用いた線質測定技術開発などを実施した。

5. 福島第一原子力発電所過酷事故への対処に係る研究活動

地域住民の帰還時における飲用水の安全性を担保する事を目的に、旧避難準備区域における飲 用の井戸水についてガンマ線分析による汚染調査を行った。WERC の有するゲルマニウム半導体検 出器を用いてスペクトル分析を実施した結果、全 613 サンプルについて残留放射能が測定限界以下 であることが確認された。また、帰還困難区域における無人へリコプターによって測定された空間線量 率分布の測定データ評価の高度化を目指した放射線源情報評価手法の開発に取り組んだ。逆問題 解析法の応用により地表付近での線源分布を効率的に明確化することに成功した。さらに、過酷事故 発生時の瓦礫などを線源とする上空における空間線量率分布の模擬計算を行った。

6. 加速器利用系装置の運転、維持管理によるビーム提供ならびに陽子線がん治療周辺分野の研究

陽子線がん治療では、イオンビームを大気中で制御ならびに評価している。したがって、大気中でイ オンビームを照射する必要のある他の研究分野でも、陽子線がん治療用のビーム制御および評価技 術を応用することができる。当研究室は、加速器利用系装置である高エネルギー生物照射装置と陽子 線がん治療研究装置の維持管理および運転を所掌しており、加速器室と連携しながらビーム供給やビ ーム整形、照射線量評価などを行っている。当該装置のユーザーは、生物資源研究分野、材料科学 分野、土木建築学分野、宇宙科学分野など多岐にわたっており、これらのユーザーと共同研究をおこ ない、各分野における課題解決に努めている。

7. 施設整備

陽子線がん治療研究装置は、2007 年度に厚生労働省によって医療機器として製造承認された後、 臨床研究の終了した 2009 年度に製造承認が廃止された。これを受けて、陽子線がん治療の周辺分野 における研究用途へも同装置を使用するための改造を行った。現在は、垂直コースでは炭素線を用い た生物照射が可能となっており、試料を遠隔操作で移動することのできる試料台を有し、効率的な炭素 線照射実験の実施が可能である。水平コースでは引き続き、陽子線の拡大ブラッグピークを用いた照 射実験を実施している。また、WERC での臨床照射を専用施設である福井県立病院陽子線がん治療 センターへ引き継ぐにあたり、研究面で専用施設をサポートするために、2012 年度に動物実験環境を 整備した(図 4)。これらの施設整備などを通じて、モデル動物を用いた粒子線治療研究を実施可能な 国内有数の施設となった。

8. 人員の変遷

臨床研究の実施期間には、医師2名、研究員2名、診療放射線技師2名、看護師1名が配置され、 陽子線がん治療の実施にあたった。臨床研究の終了後には、2~3名の研究員により研究開発事業を 実施するとともに、1~3名の派遣職員あるいはアルバイトの配置により円滑な業務実施を継続してきた。 また全期間を通して専門員1名の助勢を得てきたとともに、各分野に精通する協力研究員の皆様にも ご助力を賜ってきた。本誌面を借りて、各位からの多大なるご協力に感謝申し上げたい。

今後の研究展開

2018 年度からは、粒子線医療研究室が再発足した。今後も引き続き粒子線医療および関連分野の 研究開発を推進し、地域と学界に貢献していく所存である。特に、モデル動物へのイオンビーム照射が 可能な貴重な研究施設として、粒子線医療の臨床分野への成果応用に努めていく。加えて、福井県 立病院陽子線がん治療センターと連携し、各種研究テーマに取り組むことを通じて、同センターの受け 入れ可能患者数の拡大に寄与していく。また、2019 年 9 月には、福井市において第 118 回日本医学 物理学会学術大会を開催される予定であり、当研究室が中心となって同大会の企画立案運営にあた る。WERC の認知が、これまで以上に学界や一般市民へ拡大する機会となると考えられる。



【粒子線医療研究室員(2018年8月現在)】

④ エネルギー材料グループの研究活動

石神龍哉、安永和史、鈴木耕拓

(以前の在籍者:安田啓介、Chuluunbaatar Batchuluun、篠田佳彦、笹瀬雅人、中田吉則)

活動の概要

エネルギー材料グループでの研究は材料技術の開発・改質と材料の分析に分けられる。材料技術の開発・改質では主にイオン注入や薄膜作製を行っている。材料の分析では、イオンビームを用いた分析と耐放射線性評価、透過型電子顕微鏡による微細構造観察を行っている。2010年度から2012年度には、太陽炉を用いた研究も行った。使用した主要な機器は、タンデム加速器およびビームライン、マイクロ波イオン源イオン注入装置、多目的成膜装置、300 kV 透過型電子顕微鏡、10 kW 大型太陽炉である。

材料の開発・改質では、主にマイクロ波イオン源イオン注入装置と多目的成膜装置が利用されている。イオン注入と水素中での加熱により鉄白金薄膜永久磁石の保磁力を向上させる方法、シリコンの成 膜により金属表面を着色する方法を開発した。耐摩耗性向上のための硬質窒化ホウ素膜、水素放出 温度が低い薄膜状水素吸蔵合金の研究も行った。また、太陽炉を用いてもみ殻からシリコンや炭化ケ イ素を抽出する技術の開発を行った。

材料の分析では、高い付加価値を持つ材料・安価な代替材料等の開発、観察・分析技術の高度化、 企業等からの要請に応じた材料関連技術支援等に取り組んできた。具体的には軽元素を添加した高 強度チタン合金の開発・微細組織分析による析出物の同定及び強度・延性への影響評価、摩擦を利 用したナノ結晶微細構造表面膜の創製と評価、繊維・高分子フィルム上のめっき膜の分析、カーボン ナノチューブ等のナノ粒子へのめっき技術の開発・分析、銅表面の酸化膜の薬品による除錆効果の可 視化、太陽電池と銀(Ag)電極界面の接合状態と接触抵抗の関係の解明等である。

イオンビーム分析では、通常のラザフォード後方散乱(RBS)法や弾性反跳粒子検出(ERDA)法に加 え、直径がマイクロメートルサイズに絞られたイオンビーム(マイクロビーム)を用いた元素の二次元分布 測定法や大気中での元素分布測定法、飛行時間測定弾性反跳粒子検出(TOF-ERDA)法等が開発 され、内部ユーザーや共同研究によって利用されている。また飛行時間測定法の開発により、水素やリ チウム等の軽元素の深さ分布測定、ナノメートルレベルの深さ分解能での元素分析が可能となり、リチ ウムイオン二次電池材料中のリチウムイオンの分布測定、ダイヤモンド様炭素(DLC)膜中の水素分析 に利用されている。耐放射線性評価のためのイオンビーム照射も、太陽電池、化合物半導体電子デバ イス、薄膜永久磁石、撮像素子等に対して行われている。また、組成分析と透過X線像撮影が可能な ポータブルX線装置を開発し、文化財資料の分析を行った。

主要な成果

1. 鉄白金薄膜永久磁石の性能向上と耐放射線性評価

近年、機械的動作と電気的動作を集積回路のような形状の部品に組み込んだ Micro Electro Mechanical System (MEMS)と呼ばれる小型部品の開発が盛んである。電磁式アクチュエータは非磁性 材料の影響を受けない等の利点があるが、マイクロメートルサイズの永久磁石の開発が遅れているため 電磁式アクチュエータの小型化は進んでいない。本研究では MEMS への利用に適した鉄白金薄膜永 久磁石の性能を向上させる技術の開発と、宇宙航空用機器への適用を想定した耐放射線性試験を行

った。

大気中での加熱で表面酸化膜が形成されたシリコン(Si) 基板に、電子ビーム加熱蒸着装置で鉄(Fe) と白金(Pt)を交互に成膜して、厚さが約 100 nm の多層膜試料とした。何もイオン注入せずそのまま真 空中での加熱を行った場合の保磁力は 11.4 kOe であったが、窒素イオンを注入後に真空中での加熱、 水素ガス中での加熱を行うことで保磁力を約 1.5 倍の 17.2 kOe まで向上できた。また、イオンの照射量 と保磁力の関係を調べ、イオン照射による保磁力の低下は、イオン種やエネルギーによらず弾き出し原 子密度で決まることを明らかにした。

2. シリコンの成膜による金属表面の着色法の開発

固体表面の着色は、道具や部品などを区別するという機能的な面だけでなく、素材の無機質的な色 を隠し、親しみやすさ、高級感を出すために重要な役割を果たしている。着色においては、ペンキやイ ンクのように様々な色の無機物、有機物を塗布する方法は容易かつ安価であるため広く使われている が、色の数だけ着色剤が必要で溶剤などに弱く密着性が低いという欠点がある。それに対して本研究 では、金属表面上に Si を成膜して光の干渉効果を利用して着色する手法を開発した。

マグネトロンスパッタ法での Si 成膜時に水素ガスを放電ガスに混合する方法と、Si 成膜後に窒化シリ コン(SiN_x)を成膜することで、赤、黄、青、緑など様々な色に着色できた。鏡面研磨されていない面にも 着色可能、見る方向による色の変化が少ない、溶剤に強いなどの長所があり、プラスチックやガラス基 板でもチタンなどをめっきすることで着色可能である。

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

非破壊で簡便に測定できることから X 線を用いた材料分析は広く用いられているが、比較的大型の 装置が必要であり、測定できる試料の形状も限定されてしまう。文化財調査、野外での鉱物や植物の 調査などでは、可搬型測定装置を用いて現場で測定することによって、スクリーニングなどに威力を発 揮すると考えられる。また、文化財研究施設などに装置を持ち込んで測定することができれば、保存さ れている資料を持ち出すことなく分析することが可能になる。本研究では可搬型で電池駆動が可能、 屋外でも使用可能なポータブル X 線分析装置の開発を行った。またその装置を用いて遺跡から出土 したガラス玉の X 線透過画像の撮影と蛍光 X 線による元素分析を行った。

4. 高分子材料上の金属めっきの密着性向上技術開発

ポリイミド (PI) に無電解ニッケル (Ni) めっきした後、めっき面に貼り付けたセロハンテープを引きはが す試験により、PIとNi めっきの密着性を評価した。アルカリ処理時間の増加に伴い PI の表面窪みが顕 著になり、PI 表面に平行な数十 nm の長軸をもつ楕円形状 (壺形窪み) 及び数 nm の球状の表面窪み が PI と Ni めっきの密着性を強固にしていると考えられた。さらに、PI のアルカリ溶液耐性の表面不均 一性の存在が密着性に影響している可能性を指摘した。

5. 水素の安全な輸送と取り扱いに利用可能な水素吸蔵合金の開発

自動車、鉄道、船舶等の輸送機器だけでなく、除雪機やフォークリフト、農業機械といった作業機械 や発電機の燃料として軽油やガソリンが使われているが、化石燃料の枯渇や地球温暖化の問題から水 素を燃料とする水素社会の実現が望まれている。水素は常温常圧で気体であり密度が低いことから、 水素を効率的に輸送・利用するために適した水素吸蔵合金を作製する方法に関する調査を行った。 水素化マグネシウム(MgH₂)は水素を7.6 質量%と高密度で含むが、水素放出温度が300℃以上と高 く実用的ではない。文献調査の結果、放出温度の低下には結晶構造の不安定化、結晶子の微細化、 適切な触媒物質の添加、MgH₂と触媒物質との接触が重要であることが分かった。また、マグネトロンス パッタ蒸着により作製した MgH_x薄膜(厚み 100 nm)は多結晶体で、その結晶構造は電子線回折像の 解析により純 Mg と同一の六方晶と同定された。格子定数もほぼ純 Mg と同一であった。これらの結果 から、水素は MgH_x中の4 面体位置さらには一部空孔に蓄積されていると考えられた。さらに、MgH_x薄 膜からの水素放出に対する各種金属の触媒効果を調べ、Ni が水素放出温度の低下に対して有効で あることが分かった。

これまで、水素吸蔵合金中の水素濃度を測定するには、重量増加を測定するのが直接的な手法で あった。しかし、薄膜など微量のものについては直接測定することができなかった。そこで、大気中にお けるイオンビーム分析手法を応用し、直接水素を測定する装置を開発した。本装置を用いて 50 nm 程度の MgH₄薄膜においても水素の検出を確認し、定量分析の可能性を示した。

6. 薄膜分析のための重イオン RBS 法の開発

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 法の開発を行った。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 5~20 nm 程度、測定感度は 0.001~10 at%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 1 nm 程 度、測定感度についても従来法より 1~2 桁の向上を目指した。厚さがおよそ 10 nm の金薄膜試料を 測定した結果、表面、および界面の立上り、立下りから深さ分解能を評価し、それぞれ 1.6 nm、3.3 nm という値が得られた。

7. 加速器を用いたリチウム定量分析法の開発

リチウムイオン電池は、携帯電話やモバイルパソコンに代表される携帯機器のみならず、航空機や 自動車といった大型製品にも搭載されるようになってきた。現在流通しているリチウムイオン電池は電解 質に液体溶媒を用いており、発火などの危険性があるため、全固体リチウムイオン電池の開発が盛ん に行われている。全固体電池は液体に比ベエネルギー密度やイオン移動度の低さなどの課題があっ たが、近年克服されつつある。このような研究開発では、電極間のリチウム分布や充放電時のリチウム 挙動を直接測定することで、高性能化の方向性に指針を与え開発速度が増す。しかしながらリチウムな どの軽元素は非破壊で定量分析する手法がないため、本研究ではイオンビームを用いた TOF-ERDA による分析手法を開発している。

TOF-ERDA はイオンビームにより試料中元素を弾き出し、その元素を直接測定するものである。この時、元素のエネルギーと速度を同時に測定することで、元素の種類を特定することが出来る。また試料表面からの深さ方向に関する元素分布を数 nm の決定精度で測定が可能である。これまで、リチウム定量分析のため、ヘリウムビームとリチウムの反応断面積をビームエネルギー 1.6-5.0 MeV の領域で取得した。また、ビーム照射量計測のためのビーム電流計測装置の開発を行ってきた。

8. 大気中におけるイオンビーム分析手法の開発

イオンビーム分析は数 MeV のイオンビームを用いるため、通常は真空中で測定を行う。しかし、生体 試料や水素吸蔵材料などの真空下で変質・変化する試料については分析できない。これまでに大気 中における粒子線励起蛍光 X線分析(PIXE)法を開発し、マイクロビーム二次元マッピングによる生体・ 植物試料の測定を行ってきた。さらに定量かつ試料表面からの深さ方向分布の測定が可能な RBS・ ERDA にも大気中分析を適用させる開発を行っている。イオンビームが大気中を通過する距離が長い ほど深さ分解能が悪化するため、大気通過距離を極力短くした装置を作製した。大気中 RBS および ERDA が可能な施設は世界的にもほとんどないため、非常にユニークな分析が可能である。

今後の研究展開

材料の開発・改質に関する研究では、イオン照射・注入や薄膜形成による表面改質が中心となる。イ オン照射による損傷形成や結晶構造の変化といった準安定状態の形成、イオン注入による微量不純 物添加や非化学量論組成の物質の作製により新規材料の開発を行う。また薄膜形成においても、撥 水性や耐摩耗性などの機能の付与、異なる機能の膜の積層による高機能多層膜の作製、低温での成 膜による準安定状態の合金の形成などの方法により、新しい機能を持った材料の開発を行う。材料の 分析については、観察対象物・観察領域、観察装置に適した試料調整、各種の観察・分析技術の高 度化により、大学等の教育機関はもとより企業等からの要請に応じた材料関連技術支援等に今後とも 取り組む。

材料開発・改良を行う上では、分析により物質状態を把握することが必要不可欠である。若狭湾エネ ルギー研究センターの加速器と分析専用ビームラインを活用し、薄膜や多層膜の元素分析を進展させ てゆく。元素濃度や元素分布を高精度で決定する装置改良や新規作製のほか、大気中分析技術の開 発を進める。大気中分析は国内のみならず世界的にも稀有な技術であり、新たな材料研究分野への 適応を見据える。またイオンビーム元素分析技術は、生体試料におけるがんや有害物質、さらに植物 などにおける金属元素分析にも適用できるため、分野拡大を行うと共に分析技術の改良を行っていく。



【エネルギー材料グループ員(2018年8月現在)】

西尾繁、篠田佳彦、山田洋右、山岸隆一郎

(以前の在籍者:天田健一、小野真宏、重田達雄、鳥取章二、大西東洋司、笹瀬雅人、伊藤英樹、 峰原英介、匂坂明人、田村浩司、坂東文夫、藤田義彦、前田祐司、藤井和行、明里栄策)

活動の概要

エネルギー開発グループは、原子力・新エネルギーの研究開発とエネルギー有効利用の研究開発 を担っている。この 10 年間は、廃炉段階で役立つ情報の収集・整理・分析と技術の開発、未利用エネ ルギーの利用技術開発、材料技術開発、原子力関連先端技術開発、科学機器利用技術開発と多岐 にわたる研究を行ってきた。

現在は、廃炉段階で役立つ情報の収集・整理・分析と技術の開発、未利用エネルギーの利用技術 開発に取り組んでいる。

主要な成果

1. 廃炉段階で役立つ情報の収集・整理・分析と技術の開発

(1) 原子炉施設の解体

原子炉本体は、最も放射能レベルが高い領域であることから、解体作業時の作業員の被ばく低減と 解体に伴う放射性廃棄物の発生量低減は重要である。そこで炉心を構成する材料を水中でプラズマ 切断法や機械切断(アブレイシブウォータージェット切断)法により切断する試験を実施し、切断時の粉 じん挙動評価システムを構築とデータ取得を実施した。次いでレーザー切断法でも取り組んだが、 2015 年 2 月のレーザー技術開発室発足後は、同室が取り組みを続けており、同室の研究活動にまと めて記載されているのでここでは割愛する。

また、解体撤去物等の汚染レベルに応じた分別管理に資するため、コンクリートの表面やひび割れ 部から放射性物質等が浸透する挙動を想定し、「浸透範囲が必ずしも否定できない範囲」を特定・分離 するロジックの評価・検討を行った。さらに復水器の基礎架台コンクリートを供試体として、放射性物質 等の浸透性を評価した。

(2) 放射性廃棄物の廃棄体製作技術

使用済みイオン交換樹脂を減容安定化処理した灰化樹脂を、廃棄に係る技術上の基準(廃棄体技術基準)に適合する廃棄体とする技術を確立するための調査・試験を実施し、廃棄体製作が可能であることを確認した。

また、液体廃棄物の廃棄体製作において、装置の試運転時等、通常とは異なる条件で製作したため廃棄体技術基準に適合しないものについて、適合するよう再度処理する手法を確立するための試験を実施した。

(3) 廃棄物のリサイクル

廃コンクリートについて、路盤材や骨材への再生利用シナリオ案の策定とコスト試算・削減を検討した。

クリアランス金属再利用の実情を調査し、再利用の抑制要因を分析するとともに再利用製品の社会 受容検討を行い、再利用製品の候補を選定した。さらに再利用促進のため、その製造・設置などにつ いて調査・検討した。

- 2. 未利用エネルギーの利用技術開発
- (1) 太陽熱エネルギー利用技術

透過型のフレネルレンズで太陽光を集光する太陽炉 (10kW、1.4kW、0.7kW、0.3kW)が作り出す超高温場を利用し て物質の創製、さらにその物質からの水素や酸素の生成、発 電システムの開発などについて研究している。1800℃以上の 高温と気密性能を両立させ、その中で目的の化学反応を起 こさせる石英管型のソーラ反応器を開発し、10kW 太陽炉(フ レネルレンズの大きさ:縦 3.3m、横 3.3m)には遮光幕開度で 太陽光を絞って加熱温度を自動調整する装置を装備するな どして研究を進めている(図 1)。また、自然条件によらず安定 的な試験が可能な電気炉も必要に応じて使用している。



図1 10kW 太陽炉

水素製造や炭酸ガスの還元剤と知られているウスタイト(FeO)は、鉄鉱石(Fe₂O₃、Fe₃O₄)をコークス等 の炭素を用いて高温で還元されている。Fe₂O₃は大気中 2300℃の高温で還元されウスタイトに変わるこ とが知られている。そこで太陽炉によるウスタイトの製造とこれを水と反応させて水素を生成する実験を 行い、水素を生成した。

鉄(純鉄)は水と反応して水素を発生する。この反応性を大きくするため、太陽炉で海綿鉄を生成し、 海綿鉄を水と反応させる水素製造を行った。酸化鉄の炭素による熱還元反応を太陽炉を用いて実験し、 生成した海綿鉄を微細化し水中に投じたところ、ほぼ理論量の水素発生を確認した。

もみ殻に約 20%含まれるシリカからシリコンや炭化シリコンを抽出する技術の開発研究では、太陽炉 による還元反応を最適化するために電気炉を用いて反応プロセスを評価して生成条件を見出し、高温 環境下で還元・抽出できることを確認するとともに、太陽炉でシリコン生成を確認した。

現在は、酸化マグネシウムを太陽炉で還元して得られたマグネシウムを輸送・貯蔵し、オンデマンド で水と反応させて水素を製造、同時に生成される水酸化マグネシウムは、加熱して酸化マグネシウムに 戻し再利用する、持続可能なエネルギーサイクルの実現に向けた検討を開始している。

そのほか、超高温場による酸化グラフェンからの高結晶性グラフェンの形成に関する実験、月土壌から酸素を生成するシステムの構築のための実験、セリウムの酸化還元特性を活用した水または二酸化炭素の分解による水素、一酸化炭素の生成や熱交換器設計要素技術の検証試験、スターリングエンジン発電システムの開発などを実施した。

(2) 蓄熱·熱輸送技術

未利用熱を蓄熱コンテナに蓄熱して運搬するシステムについて、コンテナモデル実験により化学蓄 熱の特性を実験室規模で確認するとともに、導入効果のケーススタディーを実施した。

若狭湾エネルギー研究センターが発明した気泡駆動型循環式ヒートパイプについて、地熱利用の 実証としてカーブミラーに適用して曇り防止効果を確認する試験などを実施した。また、熱の輸送方向 を下部から上部へではなく、上部から下部へ切替可能なヒートパイプのループを考案し、実験により確 認した。

3. 材料技術開発

(1) 半導体鉄シリサイド薄膜

格子整合条件の制約を大幅に緩和する方法としてイオンビームにより改質した基板表面を介した成 長方法を提案し、半導体鉄シリサイド薄膜の作製において、原子オーダーに制御されたヘテロ界面の 生成を達成した。

(2) 無機酸化物光機能材料

光と物質の相互作用をテーマに、光エネルギー変換材料、光エネルギー発生材料、光エネルギー 操作材料の開発を行った。バナジウム酸化物担持非晶質シリカ可逆性感湿材料の開発、チタン添加 酸化ジルコニウム発光材料の簡便な合成法の開発等に成功している。

(3) 超高純度金属の精製

超高純度金属材料は、強度、靭性、耐食性、経年安定性に優れているが、コストが高い。そこで低コ ストの精製技術開発に取り組んだ。まずアルミニウムついて、縦型溶融精製装置を試作して大型の高 純度アルミニウムを作製し、塩酸に対する耐食性向上を確認した。次にステンレス鋼について、高真空 および減圧下 He 環境で、浮揚溶解でない高周波溶解による高純度化実験を行い、50%以上の不純物 を除去できることを確認した。

4. 原子力関連先端技術開発

(1) 若狭湾海洋環境モニタリング

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を開発した。

高速増殖原型炉「もんじゅ」周辺海域を含む「白木海域」が一望できる2地点に海洋レーダー観測設備を設置して連続流況観測データを取得し、遠隔リアルタイム流況観測の実用性及び適応性について検討した。

海洋環境への影響予測等に資することを目的とした基礎的な情報収集として、若狭湾地域の主要 河川を調査対象とした試料採取および放射性元素等の分析を実施し、現状における分布状況を把握 した。

(2) 高速増殖炉の熱を利用して製造した水素の不純物除去

高速炉の熱を用いて水素を精製するハイブリット熱化学法で発生することが懸念される硫化水素等の不純物ガスを、吸着剤を使用して除去分離回収する方法について、吸脱着の基礎試験と自動化連続運転の可能性を評価する試験を実施した。また、パイロット規模施設の設計・建設技術に関する情報を調査し整理した。

(3) 加速器照射による原子炉構造材の中性子照射スエリング予測

「もんじゅ」の炉心構造材の開発で重要なスエリング特性データの取得には、中性子照射では5年以上を要する。そこで、タンデム加速器を用いたイオン照射を適用して、より短時間で候補材のスエリング特性を評価した。

(4) 放射線計測技術開発

大面積放射能分布測定を可能とする技術を開発するため、蛍光板と高感度の光学素子を組み込ん だオンライン放射能分布評価システムのプロトタイプを試作し、野外における試験から、日陰の場所さ えあれば、サンプル中の数十 kBq から数 MBq程度までの強度の線源位置を同定可能と分かった。

5. 科学機器利用技術開発

福井県若狭湾エネルギー研究センターの 50 種類以上の科学機器を有効に利用し、地域の企業の

ための分析技術や製品評価への応用技術開発として、アルミナゾルの粒径・形状制御技術、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の調査などについて、それぞれ県内企業と共同研 究を実施した。

今後の研究展開

福井県内では、7 基の原子炉が廃止措置中または廃止を決めおり、それらの廃止措置が安全を確保した上で、合理的かつ着実に進められることは重要な課題である。一方、今年 7 月に閣議決定された第 5 次エネルギー基本計画では、原子力を重要なベースロード電源と位置付けるとともに、2030 年に向けた政策対応として、徹底した省エネルギー社会の実現、水素社会実現に向けた取組の抜本強化などを掲げている。

今後も、廃炉で発生する廃棄物の処理・処分、再資源化等、廃炉の円滑な推進に貢献する技術の 検討と、未利用エネルギーや水素エネルギーの利用技術などエネルギーの多元化に寄与する研究に 取り組む。



【エネルギー開発グループ員(2018年8月現在)】

⑥ レーザー技術開発室の研究活動

中嶋英雄、門脇春彦、西尾茂、都築聡、嶋津正、近藤雅義、桑室直俊、山岸隆一郎、野元賢一 (以前の在籍者:峰原英介、遠山伸一、重田達雄)

活動の概要

レーザー技術開発室は2015年に新設され、原子力発電所の廃止措置に適用可能なレーザー利用 技術や、放射性廃棄物の処理技術の実用化をめざした、将来的に地域社会・経済に貢献する研究開 発を進めている。具体的にはレーザー技術を応用した除染技術・切断技術の開発と、福井県内の企業 等との協力による技術開発を行っている。

主要な成果

1. レーザー除染・切断

レーザー除染の技術開発では、汚染した試料を対象として高度な除染性能を実証するとともに、遠 隔操作技術開発と耐放射線性能の評価と改善に取り組んだ。クローラーにレーザー除染機材を搭載し た自走式小型除染装置を開発し、機材の小型パッケージ化のノウハウを取得した。また、原子炉の廃 止措置工事等への適用に向けた機器仕様の調査、検討を行った。

レーザー切断の技術開発では、原子炉施設の構造材の最大厚さ300 mm を想定し、炭素鋼とステン レス鋼および原子炉圧力容器の材質である低合金鋼を対象として当該厚板を切断できることを確認し た。この切断の際において、放射化が想定される粉じんの発生状況を評価するとともに、微小粉じんの フィルター除去の効率を向上させるための技術的知見を得た。また、大型配管等の構造物を模擬した 材料の切断試験を行い、レーザー切断による細断等の応用技術の多様化を図った。その他、レーザー 切断機材を搭載した自走式の切断装置を開発し、また、レーザー取扱い安全性の向上のためのダン パーブロックの耐久性を評価する等、レーザー切断の運用性の向上についても開発を実施した。

上記の開発した技術について、県内に原子炉施設をもつ電力会社や原子力機構と協議して、廃止 措置のニーズと技術開発のすり合わせを行うとともに、技術伝達により企業の廃止措置事業への参入 を促している。

2. 福井県内の工業技術センターや民間企業との協力

レーザー加工技術の高度化研究およびレーザー加工の普及の取り組みの一環として工業技術セン ター職員、民間企業を対象として、レーザー焼入れ研修を実施した。

民間企業では、産業用のチェーンに使われるピンの高性能化に取り組んでいる。チェーンピンについては、力の伝達時のせん断応力と、回転時の耐摩耗性が重要になる。せん断応力については、鉄 鋼材料が強く、耐摩耗性については、焼き入れされた NiP 等が高い硬度のため、適切である。しかしな がら、母材を鉄鋼、表面を NiP めっきにすると、従来のような電気炉を用いた焼き入れでは、鉄鋼材料 まで焼き入れが入ってしまい、せん断強さが低下する。そこで、母材を鉄鋼材料、表面に NiP 等のめっ きを施し、レーザー照射により、NiP めっき層のみの焼き入れができれば、より高性能なチェーンが作製 できる。工業技術センターと民間企業との間で先行して高強度 CW レーザーをデフォーカスさせた状 態で照射を行っていたが、焼き入れによる硬度改善は見られず、より高価なパルスレーザーを用いて 照射する予定であった。しかながら、焼き入れは熱処理であることからエネルギーの観点で、CW レー ザーの方が有利であり、高出力 CW レーザー光源を用いて、高速走査することで自己冷却できるエネ ルギーに抑えることで硬度改善ができるのではと考え、若狭湾エネルギー研究センターの設備を用い てレーザー照射試験を行い照射条件と NiP の硬度変化を調べた。レーザー照射後と電気炉焼き入れ との比較では、レーザー焼き入れの方が僅かに硬度が低いが、レーザーの照射前後においては、硬 度の上昇が確認できた。レーザー焼き入れは電気炉と比較して、短時間で処理が行えること、また、母 材を変質させることなく表面のみ選択的に焼き入れができることから、チェーンピンのような素材に対し てレーザー焼き入れを行うことは有効であり、産業応用が期待できる。今後もレーザー焼き入れに関す る研究を継続して取り組む予定である。

3. レーザー加工における運用技術の開発

今のところ、レーザー加工における加工条件の最適化はオペレータの経験と勘が頼りである。このた め、加工条件の最適化には長い時間と手間を要している。また、経験と勘に頼る性質上、技能継承に も困難が生じている。客観的な情報(材料物性、加工条件、レーザー照射時の材料の応答)のみで、レ ーザー加工条件を最適化する技術を開発し、レーザー加工に要する時間と手間を大幅に節約すること は、レーザー加工の利用拡大を図る上で極めて重要である。本事業では、レーザー加工条件を自動 最適化する技術の開発を目指して、種々の基礎データを蓄積した。今後も基礎データの蓄積を継続し、 レーザー加工条件自動最適化技術の開発と早期実用化を目指す。

今後の研究展開

原子炉施設の廃止措置が本格的になりつつあり、除染および切断の技術開発のニーズが高まって いる。レーザー除染および切断は一般工法に比べて二次廃棄物の発生量を少なくできる特徴があり、 廃棄物の処分費用の低減に有利であるなど、レーザー工法は廃止措置に有用である。一方でレーザ ー工法は普及があまり進んでおらず、レーザー機材費用は割高で、またレーザー取扱いに習熟した作 業者も少ないのが現状である。当レーザー技術開発室は有用技術をもつ大学や企業との共同研究を 通じてレーザー技術の高度化を図るとともに、民間へのレーザー取扱い技術の伝達や、レーザーを用 いた工事の事業化に必要なデータの取得を進める。また、廃止措置の現場でレーザー工法の実績を 作り、民間企業の廃止措置への参入を促進するように技術開発および情報発信を行っていく。



【レーザー技術開発室員(2018年8月現在)】

①加速器室

タンデム加速器においては、継続的なテーマとして加速高電圧の安定化に今後も取り組んでいく。また、軽元素分析の精度向上と多様化のため、加速可能な重イオン種(ケイ素、鉄、コバルト、 ニッケル)を増やすことも重要と考えている。

シンクロトロンについては、将来的な設備維持を目的に、低出力高周波系の完全デジタル化への取り組みに着手する。ビーム取り出しの制御方法に関しては、これまでは取り出しビーム強度に



よっていたが、 シンクロトロン 内に蓄積され 残っている電 荷量を帰還す る方法に発想 を転換し研究 開発に努めて いく。

タンデム加速器

シンクロトロン

② 生物資源研究室

品種改良研究の分野では、平成29年に理化学研究所と連携して設置したイオンビーム育種相 談窓口の活動を進めるとともに、福井県内外の企業、試験研究機関と共同で、それぞれの共同研 究先のニーズに応じた植物や微生物の品種をイオンビーム育種により作り出していく。

イオンビーム育種技術開発では、イオンビームが引き起こす突然変異の特徴を強化させるため、 DNA損傷応答系に作用する薬剤処理を併用する技術や、より飛程末端近くの生物効果の高いビ ームを利用した照射技術の開発を行う。また、品種改良を効率的に進めるための、遺伝子マーカ ー作製や有効成分の分析、評価法の開発も行っていく。



チョレイマイタケの菌糸体 (左:元株 右:変異株)



イオンビーム照射によるシロイヌナズナ の根のDNA損傷(黄色部分) (左:変異修復機構阻害なし 右:阻害あり)

③ 粒子線医療研究室



粒子線医療研究の物理工学分野の研究開発として、 引き続き陽子線がん治療の品質向上を目指した照射 野測定技術の開発を行うとともに、陽子線がん治療研 究で培ったビーム制御技術を活用して、宇宙機搭載用 機器(半導体部品、放射線検出器等)の宇宙線耐性評 価などの高エネルギーイオンビーム利用の高度化に取 り組んでいく。

宇宙機搭載予定機器の照射試験

究テーマとしては、がんの集学的治療の実現に繋げる研究として、異種放射線および薬剤の併用が細胞致死効果に与える影響の評価を行うほか、マイクロビーム照射技術を活用した細胞応 答機構の解明や放射線の生物影響のメカニズムレベルでの解明 により、科学的エビデンスに基づいたより正確な放射線治療評価の実現を目指す。



細胞へのX線照射による DNA損傷状況

④ エネルギー材料グループ

水素吸蔵合金として有望なマグネシウム系水素吸蔵合金の開発研究では、質量当たりの水素 含有量が大きく移動可能な水素燃料タンクの充填材料として有望であるが、水素放出温度が高い ことが欠点として挙げられる。このため、触媒の添加などの改良を加えることで水素放出温度を下 げる研究を進めていく。

粒子線医療研究の

放射線生物分野の研

エネ研では、イオンビームを用いた分析技術として、軽元素も含む多元素同時分析が可能な飛 行時間測定弾性反跳粒子検出法(TOF-ERDA)や、大気中における水素分析技術など、国内外 においても稀有な独自技術を有している。今後はこれらの分析技術を改良し、これまで測定できな かったリチウムイオン電池や水素吸蔵材料などの分析に着手するとともに、同時にマイクロビーム を用いた三次元マッピング分析技術の新規開発にも注力していく。



TOFーERDA法によるリチウム定量分析の概念図と分析機器

⑤ エネルギー開発グループ

太陽炉による熱な ど、持続利用可能な エネルギー源を用い て酸化マグネシウム の還元=再生を実 現させることで、再生 したマグネシウムと水 との反応による水素 製造など、人工燃料 として利用するマグ ネシウム循環サイク



Mgを活用した水素エネルギー循環サイクルの概念図

ルの構築を目指していく。この研究では、マグネシウム循環社会に関わる技術全般について研究 開発を行っているマグネシウム循環社会推進協議会と連携を図って、構想の実現や社会展開へ の道筋を志向していく。

⑥ レーザー技術開発室

現在進めている廃止措置のためのレーザー技術の開発(レーザー切断およびレーザー除染) については、近々に実用化できる技術レベルへ到達させることを目指して研究を進めていく。

さらに、レーザー工法を応用した次の技術開発として、レーザー焼き入れによる材料表面のみの硬度の調整、レーザー表面処理によるコンクリート表面の石英化を応用した有害物質の内部浸透の抑制、レーザーによる塗膜・錆の除去、レーザー超音波法の適用による構造材の非破壊調査などのテーマに取り組んでいく。





照射ヘッド搭載ロボットアームの 半自動教示システム

(4) 公募型共同研究(関西・中京圏との連携推進)

当法人では「エネルギー研究開発拠点化計画」の一環として、県内の原子力・エネルギー研究の充 実を図るため、関西・中京圏等の大学・研究機関の研究者等が、当センターに設置している施設・設備 を利用し、当法人の研究員と共同で行う研究を平成19年度から公募して行っている。

平成19年度から23年度までは、特別推進研究と一般研究に分けて公募を行った。

【特別推進研究】

大学・研究機関の研究者等と当法人の研究員が、当法人が進める研究分野において、当セン ターに設置している科学機器、加速器を利用する等、共同で行う研究。

【一般研究】

大学・研究機関の研究者等と当法人の研究員が、当センターに設置している科学機器等を利 用して共同で行う研究。

また、平成24年度からは、産学連携研究と基礎研究に分け、公募を行っている。

【産学連携研究】

事業化/実用化を目指す企業を研究体制に加え、「関西・中京圏等の大学・研究機関」、当法人の3者と共同で行う研究。

研究経費(募集件数):500万円以内(2件程度)

【基礎研究】

当法人の研究者と共同で研究開発することの優位性を有する研究。

研究経費(募集件数):200万円以内(4件程度)

直近5年間の実績は、次のとおりである。

公募型共同研究【基礎研究件名】	提案機関	当センター 研究グループ	H25	H26	H27	H28	H29
革新的陽子線がん治療のための腫瘍分子イメ ージング技術開発	福井大学	粒子線医療	•				
イオンビーム照射による白色腐朽菌の高性能 化と、そのセルロース系バイオマス前処理への 応用	福井大学	生物資源	•				
鋳型フリー水熱中有機無機変換合成法による 窒化炭素系ナノチューブ材料の開発と組成分 析および光触媒・水素吸蔵特性	名古屋大 学	エネルギー 材料	•				
陽子線・ヘリウム線による脳壊死モデル作成技 術の確立-放射線脳壊死のメカニズム解明と 治療法開発を目指して-	京都大学	粒子線医療	•				
太陽炉を用いた酸化グラフェン高温処理による 高品質グラフェン大量製造技術の探索	大阪大学	エネルギー 開発	•				
トマト栽培ハウス温調用のヒートポンプ・BACH 融合システムの開発	福井大学	生物資源		•			
低酸素環境下のがん細胞に対する陽子線治 療メカニズムの解明	福井大学	粒子線医療		•	•	•	
陽子線がん治療における低線量被ばくし た正常組織での組織幹細胞動態の解明	福井大学	粒子線医療		•	•	•	

公募型共同研究【基礎研究件名】	提案機関	当センター 研究グループ	H25	H26	H27	H28	H29
陽子線・ヘリウム線による脳壊死モデル作成技 術の確立-放射線脳壊死のメカニズム解明と 治療法開発を目指して-	京都大学	粒子線医療		•			
冬虫夏草変異株を用いた新規抗腫瘍物質の 生産	福井大学	生物資源			•	•	•
イオンビーム照射による山田錦のテーラーメー ド育種ライブラリの開発と福井県に適した「新山 田錦」の育成	福井県立 大学	生物資源			•	•	•
高分解能 TOF-ERDA 測定システムの開発	京都府立 大学	エネルギー 材料			•		
石油を作る微細藻類 Botryococcus brauniiの 重イオンビーム照射による変異株ライブラリー の作出	大阪工業 大学	生物資源				•	
子宮頸がんに対する粒子線治療の有効性と治 療効果予測に関する基礎的検討	福井大学	粒子線医療					•
ラジカル含有リチウム酸化物を用いた常温水 分解法による水素発生システムの開発	名城大学	エネルギー 材料					•
陽子線頭頸部がん治療における放射線口腔 粘膜障害の発症動態および病態の解析	福井大学	粒子線医療					•
Silicon-on-insulator microdosimeter を用いた 粒子線場における脳壊死形成に関するマイクロド ジメトリ	京都大学	粒子線医療					•

公募型共同研究【産学連携研究】	提案機関	当センター 研究グループ	H25	H26	H27	H28	H29
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	福井大学	生物資源	•				
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	福井大学	生物資源	•				
機能性ナノファイバー電極材の創製とエネルギ ー変換素子・センサーへの応用	福井大学	生物資源		•			
イオンビーム励起反応場を利用した鉄ロジウム 合金の磁気改質技術開発と各種デバイス創製 への応用	大阪府立大 学	エネルギー 材料		•	•	•	
新材料を用いた超小型レーザビーム走査ミラ ーの作製とそれを用いた眼鏡型ディスプレイの 実現	福井大学	エネルギー 材料			•	•	•

平成19~29年度までに、19の大学・研究機関と共同で77のテーマについて研究を行った。なお、関連する資料を巻末の「資料編」に添付している。

(5) 特許及び新品種登録等の知的財産

① 特許取得状況

当法人では、研究開発を通じて得られた新技術等の発明については、積極的に特許出願を行い、 知的財産の取得と活用を図っている。

特許取得までには出願から複数年を要するため、研究開発の成果が直ちに特許取得に至るわけで はないが、当法人が蓄積してきた技術・成果を証するものとなっている。これまでに発明 64 件を特許出 願しており、そのうち 32 件の特許を取得し(2件は特許取得後失効)、7件の発明が出願中である。

亚口.	発明の名称	文次 日日 1	登録		借	±×.
留万	光明の石林	光	番号	年月日	小用	与
1	イオンビームを用いた炭素分析方法	安田啓介	4242748	H21.1.9	H 30 失3	.1.9 効
2	分離型スノートを有する粒子線治療装置	福本貞義、山本和高、 福田茂一、久米恭、鍵 谷豪、近藤道也	4402851	H21.11.6		
3	発光装飾器具	新宮秀夫、大谷暢夫	4510037	H22.5.14		
4	金属材料中のヘリウム含有量計測方法	伊藤慶文、遠藤伸 之、他	4584288	H22.9.10	H 28. 失望	9.10 効
5	ルーフ。型ヒートハ゜イフ。	新宮秀夫、大谷暢夫	4771964	H23.7.1		
6	集光装置における集光レンズ位置調節機 構	新宮秀夫、大谷暢 夫、室岡裕之、重田 達雄	4953119	H24.3.23		
7	サイフォン式循環型ヒートパイフ゜	新宮秀夫、大谷暢 夫、大西東洋司	5067692	H24.8.24		
8	ベナジウム酸化物を含有する可逆性感湿材 料、及びその製造方法	西尾繁	5099444	H24.10.5		
9	移動式ソーラ調理装置	新宮秀夫、大谷暢 夫、大西東洋司 重田達雄	5110488	H24.10.19		
10	液中装飾体観賞器、及び液中装飾体観 賞器の製造方法	高城啓一	5177351	H25.1.18		
11	海綿鉄を利用した水素製造方法	新宮秀夫、大谷暢 夫、大西東洋司	5311334	H25.7.12		
12	冬虫夏草の突然変異体及びその変異体 の培養法	畑下昌範、他	5343264	H25.8.23		
13	高速製錬可能な低温製鉄法	新宮秀夫、大谷暢 夫、大西東洋司	5413821	H25.11.22		
14	高速中性子の線量分布測定方法	高田卓志	5464351	H26.1.31		
15	光分析装置の拡散反射用アタッチメント	西尾繁	5483015	H26.2.28		
16	ビーム量測定機能に優れたイオンビーム分析 装置	安田啓介	5489032	H26.3.7		

特許出願·取得状況

釆巳	※ 明 の 名 称		登	録	備老
宙力	元列の石松	光明八	番号	年月日	
17	SF6ガス回収装置、及びSF6ガス回収方 法	峰原英介	5517128	H26.4.11	
18	物体の存在領域の検知方法および物体 検知システム並びに無線送受信集合装置	黒瀬直樹、他	5531205	H26.5.9	
19	植物工場照明装置	峰原英介	5598814	H26.8.22	
20	ポリイミト・系高分子アクチュエータ、及びその製造方法	畑下昌範、他	5598817	H26.8.22	
21	高分子アクチュエーター及びその製造方法	畑下昌範、他	5604676	H26.9.5	
22	レーザー除染装置	峰原英介	5610356	H26.9.12	
23	バルク超伝導体の臨界電流密度制御方 法、及びアンジュレータ用バルク超伝導 体の製造方法	久米恭、他	5751538	H27.5.29	
24	金属メッキ材料の製造方法	畑下昌範、他	5756657	H27.6.5	
25	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	鳥取章二、他	5887682	H28.2.26	
26	保磁力に優れた鉄ー白金系磁性合金の 製造方法	石神龍哉	5942360	H28.6.3	
27	加熱温度調節機能を備えた太陽炉	重田達雄、篠田佳彦	5988237	H28.8.19	
28	熱輸送方向が自動反転するヒートパイプ	鳥取章二	6041187	H28.11.18	
29	CO2 ガス濃縮装置、及び CO2 ガス濃縮 方法	峰原英介、他	6083665	H29.2.3	
30	長距離レーザ切断装置	田村 浩司	6210456	H29.9.22	
31	植物育成のための光制御装置、光制御 方法、光制御プログラム及び光制御のた めのデータ収集装置	畑下昌範、他	6233623	H29.11.2	
32	RIセシウムの分離除去方法、及びその装置	峰原英介	6284092	H30.2.9	
33	高分子アクチュエータの制御方法、高分子アク チュエータ及びこの高分子アクチュエータを利用 した微少流体送出装置	畑下昌範、他			出願中
34	金属着色方法	石神龍哉			出願中
35	トリチウムを含む汚染水を処理する処理装 置および処理方法	中嶋 英雄			出願中
36	放射線モニタリングシステム	伊東富由美、久米恭			出願中
37	放射線感応性ゲルインジケータ、及びそ の調製方法、及びその使用方法、及びそ の処理方法	畑下昌範、久米恭、 他			出願中
38	2次元光走査ミラー装置、その製造方法、 2次元光走査装置及び画像投影装置	石神龍哉、他			出願中
39	溶接機能付き管内形状測定装置、及び 小内径管用の管内形状測定装置	伊東富由美			出願中

② 品種登録取得状況

当法人では、イオンビーム育種技術により作出した新品種についても積極的に品種登録出願を行い、 育成権の取得を図っている。

品種登録のためには、作出した新品種の特徴が世代交代を重ねても安定して表れることが必要であ り、長期的に栽培・管理できる施設が必要となる。このため、出願した新品種は全て企業との共同研究 により作出したものである。植物の種類も、園芸用の花きが殆どであるが、平成30年5月には花き以外 で初めて高生長性のリーフレタスについて出願した。

これまでに 20 品種の品種登録出願をしており、そのうち7 品種が登録され、3 品種が現在出願中である。

N.		発明の名称	本代李		確定	
INO.	品種の名称	植物の種類	1月17日	No.	登録日	
1	せと福	へ。チュニア属	畑下昌範、高	17659	1101 0 0	
	ホワイトハ・リエカ・ータ	Petunia Juss.	城啓一、他	17000	П21.3.2	
0	せと福	にちにちそう(旧ビンカ)種	畑下昌範、高	10570	1101 11 00	
	CAMR	Catharanthus roseus (L.) G. Don	城啓一、他	19970	H21.11.20	
0	せと福	にちにちそう(旧ビンカ)種	畑下昌範、高	10577	LI01 11 0C	
3	UMR	Catharanthus roseus (L.) G. Don	城啓一、他	19977	H21.11.20	
1	せと福	ウルンア	畑下昌範、高	01070		
4	NVLB		城啓一、他	21373	Π24.2.2	
5	せと福	リアナ リアナ みら(ロレシンカ)番	畑下昌範、高	91649	L194 9 10	
5	САР	にらにらて入口レン別種	城啓一、他	21043	П24.3.19	
6	せと福	にたいたそら(旧どいか)番	畑下昌範、高	25110	U00 2 25	
0	GPN	にらにらて人口レジル州里	城啓一、他	20110	1120.0.20	
7	せと福	にたにたそら(にいっか)番	畑下昌範、高	95111	U00 2 25	
1	RMR	にらにらて人口レジルが重	城啓一、他	20111	1120.0.20	
8	サレ垣 いいゆ	にたにたそう(旧ドンカ)種	畑下昌範、高		山塱中	
0			城啓一、他		山府下	
0	せと福	オリガナト	畑下昌範、高		山塱中	
J	LGV		城啓一、他		山加大	
10	フナルトナ	1,27	畑下昌範、高		山風中	
10					出願屮	

品種登録出願·取得状況



1 せと福ホワイトバリエガータ



3 せと福UMR



5 せと福CAP



7 せと福RMR



2 せと福 CAMR



4 せと福NVLB



6 せと福GPN



10 フォルトナ

4 企画支援広報部の活動

4 企画支援広報部の活動

(1) 技術支援·相談

企業の技術開発段階で生じたトラブル等に対し、研究員・オペレータ等が相談に応じ、課題解決に むけてサポートを行っている。また、適切な外部機関・大学への橋渡しをはじめとしたコーディネート活 動により、技術開発はもとより事業化を見越した技術支援を行い、県内企業の技術・研究開発の支援を 行っている。

開所当初より、当センター科学機器の利用者に対して機器操作の補助を行ったり、分析方法の相談 を受け付けたりしていたが、平成16年度に地域産業との連携強化を図るため「地域支援・交流グルー プ」を設置し、また、平成17年7月には、「エネルギー研究開発拠点化推進組織」の開設に伴って組 織の見直しを行い、地域の企業との連携を促進し地域産業の活性化を図るための組織「技術支援・相 談チーム」を設置して、活動を強化してきた。「技術支援・相談チーム」は、科学機器利用の補助等にと どまらず、製品製造上の不具合の解決方法の検討や、新規技術開発を行うための支援制度の紹介、 補助金獲得に向けてのサポートを行うなど、技術支援・相談のため幅広く活動を展開してきた。

さらに、平成25年2月には、東日本大震災のため原子力発電所が長期停止する影響を受ける嶺南 地域の中小企業をサポートするため、敦賀商工会議所・県工業技術センター等との協力のもと「嶺南地 域中小企業特別相談窓口(技術開発)」を開設し、嶺南地域にある企業が新事業へ展開する際の技術 的課題解決のサポートなどを行ってきた。

現在では企画支援広報部にある「技術相談室」が技術支援・相談に対応しており、「エネルギー研究 開発拠点化推進組織」の開設以降、平成29年度までの12年間で3,900件以上の相談等に対応して いる。(下図参照。ただし、平成23年度以前の実績には科学機器利用申込みへの対応も含む。)



技術相談・支援件数の推移(直近10年間)

(2) 科学機器等の利用支援と利用実績

当法人では、企業等の課題解決をサポートするため、多分野にわたる研究者の専門知識や技術ノウ ハウ、多目的シンクロトロン加速器や 50 種類以上の高度な科学機器等、当センターが有する人的、物 的資源を活かして、技術相談から機器の利用、測定・分析ノウハウの提供まで、ワンストップのサービス を提供している。

当センターにある科学機器は低料金で利用でき、利用者科学機器による測定・分析には、ノウハウを もったオペレータや研究員がサポートしている。外部利用が可能な機器は、センターの開所時(平成10 年11月)には43種類であったが、当センターの研究利用のため整備してきた機器を順次外部利用に 供し、平成30年9月現在で53種類の機器が対応している。

利用実績では年間 200 件前後の利用があり、平成 29 年度では、県内の企業・大学等からはこれまでで最も多い 32 社・機関(嶺南:12、嶺北:20)、県外の企業・大学等からも 19 社・機関で利用があり、 合計 292 件の利用があった。試験研究・製品開発・品質管理上のトラブル解決に大いに役立っている。



科学機器外部利用実績の推移(直近10年間) (加速器利用系装置の実績を含まず。共同研究利用を除く。)

(3) 科学機器利用研修の開催

当センターでは、県内企業をはじめとした技術者の方々を対象に、商品開発やトラブル対応等に役 立てて頂くことを目的とした科学機器の研修を毎年度実施している。受講費用は無料(H29 より研修1 回あたり¥1,000-)で、研修には、機器メーカに講義・実習指導を委託し、受講者は自身が分析したい 試料を持ち込み、当センターにある科学機器を実際に操作しながら、機器の原理・特徴や操作にあた ってのノウハウ等の習得を図った。そのほか、当センターにある科学機器を活用した分析事例について 紹介するセミナー等も開催した。

過去 20 年間で、14 の機器を研修対象として 102 回の研修を実施し、のべ 762 名の方が研修を受講

した。受講者からは、「分析方法のアドバイスをいただき、大変参考になった」「もう少し研修の頻度を増やして受講しやすいようにして欲しい。」などの反応が多く高評価で、研修受講をきっかけに当センター科学機器を高頻度に利用して製品品質管理に役立てている県内企業の技術者もあり、県内企業の分析・技術力向上に貢献している。



(講 義)



(FE-SEM) 研修の様子



(FT-NMR)

機器の用途	研修対象機器	実施回数、 (累	、受講者数 計)
〈セミナー〉	エネ研科学機器、分析事例紹介	5回	81名
	表面分析機器机上講習会	4回	110名
〈形態観察〉	走查電子顕微鏡装置(LV-SEM)	16回	89名
	走查電子顕微鏡装置(FE-SEM)	14回	81名
	超高分解能高圧分析電子顕微鏡装置(TEM)	2回	12名
	薄膜試料作製装置(試料前処理)	7回	34名
〈表面分析〉	電子プローブマイクロアナライサー装置(EPMA)	21回	149名
	高分子結合状態解析システム(XPS)	10回	71名
	オージェ電子分光装置(AES)	7回	41名
	原子間力顕微鏡(AFM)	1回	5名
<元素、組成分析>	微小領域エックス線回折装置(XRD)	3回	18名
	フーリエ変換赤外分光光度計(FT-IR)	1回	3名
	高分解能質量分析装置(GC-MS)	4回	26名
	誘導結合高周波プラスマ質量分析装置(ICP-MS)	1回	2名
〈構造解析〉	電子スピン共鳴装置(ESR)	2回	14名
	フーリエ変換核磁気共鳴装置(FT-NMR)	4回	26名
	습 計	102回	762名

科学機器利用研修の開催実績(20年間の累計)

(4) 公募型競争的資金の獲得の概要

「エネルギー研究開発拠点化計画」等に基づき、地域の産業の振興を図るため、産学官連携による 新事業創出に向けた研究開発・事業化支援を行ってきた。この取組みの一環として、県内企業等の技 術開発、商品開発を支援するため、国等の競争的資金を活用し産学官が連携した研究開発事業を平 成18年度以降実施し、当法人は事務局として事業の展開に協力してきた。 その主な事業は以下の表に示す。

所管	事業名	プロジェクト名	事業の概要
経	戦略的基盤技術高	高品質固体レーザー遠隔切断技術開発	ファイバーレーザーを用い
済	度化支援事業(サ	(H18~H20)	た水中切断技術の開発
産	ポイン)	世界最大出力レーザーによる次世代重電産	100kWレーザー装置での
業		業での超厚板溶接技術開発(H25~H27)	超厚板溶接技術開発
省	地域資源活用型研	越前和紙技法とセルロースゲルを活用した	セルロースゲルを和紙
	究開発事業	低収縮性和紙開発	に含浸させた低収縮性
		(H19~H20)	和紙の開発
	低炭素社会システ	ヒートポンプを用いた大空間環境制御インテ	ヒートポンプを用いたト
	ム実証モデル事業	リジェンスモデル(H21)	マトのハウス栽培
NE	新エネルギー技術	地中熱利用空調補助システム開発(H23・	気泡駆動型ヒートパイ
DO	革新事業	H24)	プによる地中熱源活用
文	地域イノベーション	原子力・エネルギー関連技術を活用した新	県内外の企業とともに
部	クラスタープログラ	産業の創出(若狭エリア)(H20~H22)	各グループに分かれて
科	ム(都市エリア型)	・気泡駆動型無動力液体循環ヒートパイプ	研究開発を実施
学		(BACH)開発 ・植物工場用野菜の新品種開	
省		発 ・白色腐朽菌を用いたダイオキシン類処理シ	
		ステム開発 ・キチン分解細菌変異株による	
		NAG 製造技術開発等	
	地域イノベーション	健やかな少子高齢化社会の構築をリードす	治療時の放射線量を可
	戦略支援プログラム	る北陸サイエンスクラスター(H25~H29)	視化できる装置の開発
JST	廃止措置等基盤研	福島第一原子力発電所の燃料デブリ分析・	大学生を対象に、小型
	究・人材育成プロ	廃炉技術にかかわる研究・人材育成	レーザー除染ロボットを
	グラム	(主管:福井大学;H27~H30)	用いた操作実習
内閣	戦略イノベーション	戦略的オミクス育種技術体系の構築	理化学研究所を代表と
府·	創造プログラム(次	(H26~H30)	する計 20 機関が参
農水	世代農林水産業創		加。エネ研はイネのイオ
省	造技術)		ンビーム育種を担当
JA	イノベーションハブ	月土壌の水素還元システムの構築(H28)	小型太陽炉を用いて低
XA	構築支援事業		品位鉱物の還元実験

(5) 広報活動と見学者対応

当法人は、設立当初からエネルギーや科学についての関心と理解を深めるための講演会開催等の 事業を展開するとともに、当法人の活動状況や成果を周知するための広報誌(旧「エネ研ニュース」、 「機関誌 E-lfe」)やホームページによる情報提供を行ってきた。エネルギー研究開発拠点化計画策定 後の平成 18 年 7 月からは、計画の実施状況をタイムリーにお知らせするため、「エネルギー研究開発 拠点化ニュース」を毎月発行するようになった。平成 20 年 5 月からは記事の内容を拡大し、当法人の 研究内容や科学機器の紹介、イベントの実施状況の報告など、活動全体の情報をお伝えするべくこれ をリニューアルして現在の「エネ研ニュース」を創刊し、平成 30 年 8 月末で第 123 号と、ほぼ毎月1回 発行している。

また、当センターの開所以降、施設を広く一般に公開するイベントをほぼ毎年行っており、平成12年 からは、「エネ研てんこもり」の名称で開催し、平成30年8月の開催で19回目となった。

てんこもり来場者(直近5年)

年 度	度 H26 H		H28	H29	H30
来場者数	600	500	430	1,300	1,000

このほか、加速器施設等の見学者を随時受け入れ、研究その他の活動に対する理解を深めていただけるよう努めている。

施設見学者(直近5年)

年 度	H25	H26	H27	H28	H29
見学者数	733	487	696	462	577



レーザーを使った定規作りと完成見本



フォトフレーム作りと着色したリング



研究紹介展示とクイズ&ゲームラリー



ボトルフラワー工作



ミニSL乗車体験



施設見学(太陽炉)



施設見学(加速器)

平成 30 年 8 月 開催「エネ研てんこもり 2018」

5 産業育成部の活動

5 産業育成部の活動

当センターは、平成17年7月に、「エネルギー研究開発拠点化推進組織」を設置し、福井県が策定 した「エネルギー研究開発拠点化計画」を推進するエンジン役として、「研究開発機能の強化」、「人材 の育成・交流」、「産業の創出・育成」にかかる事業を展開してきた。産業育成部では、「産学官ネット ワーク形成の推進と研究会活動」、「研究開発・新製品開発支援事業」「県内企業の原子力関 連業務への参入支援」などの「産業の創出・育成」に取り組んでいる。

(1) 産学官ネットワーク形成の推進と研究会活動

平成 17 年度から、(財)ふくい産業支援センターと連携し、福井県内に新たな産業クラスターの形成 を目指す「ふくい未来技術創造ネットワーク推進事業」の一環として、産学官ネットワークを構築するた めの研究会活動を実施した。

具体的には、同事業の下で設置された 5 つの研究会のうち、当センターは原子力・エネルギー関連 技術活用研究会の事務局となり、同研究会の下に放射線利用材料開発、グリーン資源・エネルギー開 発、保守技術・廃止措置技術開発の3分科会を設置し、さらに、平成18年度には海洋資源・生物資源 活用分科会を追加して、事業化が見込まれる研究テーマについて、産学官の調査グループによる可 能性試験調査研究を実施した。

平成20年度には、研究開発から事業化までを促進するため、当センターと(財)ふくい産業支援セン ターが一体となって産学官連携体制として、新たに「ふくい未来技術創造ネットワーク推進協議会」を設 立し、事業化を目的とした課題解決のために、8研究会を設置した。当センターは、そのうち4研究会 (放射線利用・材料開発研究会、環境適合性材料・エネルギー開発研究会、保守技術・検査技術開発 研究会、海洋資源・生物資源活用研究会)の事務局を務め、研究会の中に課題を同じくする小グルー プの形成を促し、具体的な研究開発活動を促進するとともに、協議会会員企業に対して、事業化や販 路開拓のための支援を行った。

平成26年度には、当該年度の「エネルギー研究開発拠点化計画推進方針」に基づき、今後の事業 化可能性が高いと見込まれる市場分野において、産学官の共同研究、新産業の創出を促進するため に、「ふくい未来技術創造ネットワーク推進協議会」を「新ふくい未来技術創造ネットワーク」へと見直し た。

さらに、平成27年度には、技術支援や経営支援に関するネットワークを拡充し、事業化に向けた活動がさらに推進される体制に発展的に改組し、「新ふくい未来技術創造ネットワーク」から「ふくいオー プンイノベーション推進機構(FOIP)」へ移行した。

この間、平成26年9月には、名古屋大学の天野浩教授らを招いて、技術講演会「ふくい成長産業創造フォーラム『窒化物半導体デバイスが創造する未来の省エネルギー社会』」を開催し、約40名の参加を得た。また、平成27年10月には、千葉大学の野波健蔵特別教授を招いて「新ふくい未来技術創造ネットワークフォーラム講演会『ドローン開発による新ビジネス展開』」を開催し、約120名の参加を得た。

また、平成28年3月には、「ふくいオープンイノベーション推進機構(FOIP)」の下、「災害対応ロボット技術開発研究会」を設立し、災害調査用の空陸両用型ドローンの製作に取り組み、平成29年度末までに研究会を4回開催し、計33社44名の参加を得た。

その他、県内企業向けの技術支援の一環として、平成 29 年 11 月に、レーザー加工の基本を市販 のキットを組み立てたレーザー装置を用いて学ぶ「レーザー加工DIYセミナー」を開催し、9 社 9 名の 参加を得た。

年 月	名称
平成 20 年 7 月	ふくい未来技術創造ネットワーク推進協議会
平成 26 年 4 月	新ふくい未来技術創造ネットワーク
平成 27 年 6月(設立)	とくいま、プレイノベーションが准修携(FOID)
平成 27 年 10 月(移行)	ふくいえ ーノンイノバーション 推進機構 (FOIP)

○産学官ネットワーク 組織の変遷



ふくい成長産業創造フォーラム



新ふくい未来技術創造ネットワーク技術講演会

(2) 研究開発·新製品開発支援事業

当センターは、可能性試験調査研究事業、嶺南企業新産業創出シーズ発掘調査事業(平成26年 度からは、新産業創出シーズ発掘事業)、嶺南地域新産業創出モデル事業、拠点化計画促進研究開 発事業を実施して、福井県内の企業の事業化、新技術・新製品開発等の支援を行ってきた。

① 可能性試験調査研究事業(平成17年度~平成25年度)

前述した「ふくい未来技術創造ネットワーク推進事業」の下で、市場拡大が見込まれる分野の事業 化・新商品開発促進のため、可能性試験調査研究事業(FS)を実施し、調査研究費等の助成を行った。

平成 25 年度までに延べ 66 件(複数年にわたる補助案件については、年度ごとにカウントしている) の支援を行い、11 件が製品化された。

年 度	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	合計
支援件数	5	5	6	7	9	9	9	12	4	66
交付額(千円)	7,294	4,927	5,880	7,718	10,102	9,281	9,100	11,843	5,935	72,082
製品化数 注1	0	0	0	0	1	1	1	2	2	11注2

○可能性試験調査研究事業の実績

注1)製品化数は、当該製品化年度以前に支援した研究開発の成果の製品化件数であり、必ずしも製品化年度に支援したものではない。 注2)製品化数の合計には、平成26・27年度に製品化した件数を含む。





電子線照射を活用した超耐熱、超耐久性の漆塗り食器の開発

盆栽用苔の粉末化に関する技術開発

② 嶺南企業新産業創出シーズ発掘調査事業補助金(平成18年度~平成25年度)・ 新産業創出シーズ発掘事業補助金(平成26年度~)

嶺南地域の企業を対象に、新技術・新製品の開発に係るシーズ調査を支援する補助制度として、平成18年度から、「嶺南企業新産業創出シーズ発掘調査事業」を開始した。

平成25年度には、補助対象分野について、既存の原子力・エネルギー分野に、地域産業活性化分野、環境分野を追加した。

さらに、平成26年度には、「エネルギー研究開発拠点化計画推進方針」に基づく「ふくい未来技術 創造ネットワーク推進協議会」の活動の見直しに合わせ、前述の「可能性試験調査研究事業」を終了さ せたことに伴い、従来までは嶺南企業のみを対象としていた「嶺南企業新産業創出シーズ発掘調査事 業」を再構築し、嶺北企業も活用できる「新産業創出シーズ発掘事業」に改めた。

平成 29 年度までに延べ 76 件(複数年にわたる補助案件については、年度ごとにカウントしている)の支援を行い、16 件が製品化された。

年 度	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	合計
支援件数	9	5	5	8	9	6	10	2	4	6	7	5	76
交付額(千円)	2,543	1,085	1,904	2,503	2,992	1,963	2,729	769	2,232	1,937	3,090	2,335	26,082
製品化数	0	0	0	1	1	1	3	2	1	1	3	3	16

○嶺南企業新産業創出シーズ発掘調査事業補助金・新産業創出シーズ発掘事業補助金の実績

注)製品化数は、当該製品化年度以前に支援した研究開発の成果の製品化件数であり、必ずしも当該製品化年度に支援したものでは

ない。



ポリエチレン袋による飲料カップ用テイクアウトバック の開発



シーアスパラガスの専用 LED 栽培設備による周年栽培 技術の開発



放射線照射技術を活用した新規木材の開発に 向けた研究

福井梅を原料とした「機能性表示食品:梅ウォーター」 の開発

③ 嶺南地域新産業創出モデル事業補助金(平成18年度~)

嶺南地域の「ものづくり」産業を支援し、新技術・新製品の開発の取組みを促進するため、平成18年 度から、「嶺南地域新産業創出モデル事業」を開始した。

平成24年度には、補助対象分野の拡大(既存の原子力・エネルギー分野に、地域産業活性化分野、 環境分野を追加)などの制度変更を行った。

平成 29 年度までに延べ 106 件(複数年にわたる補助案件については、年度ごとにカウントしている)の支援を行い、29 件が製品化された。

年 度	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	合計
支援件数	8	9	5	4	9	8	14	8	12	9	12	8	106
交付額(千円)	22,490	19,579	11,656	14,857	22,062	22,796	31,112	23,191	35,346	31,264	31,039	26,208	291,600
製品化数	0	0	2	2	0	2	2	4	5	5	2	5	29

○嶺南地域新産業創出モデル事業補助金の実績

注)製品化数は、当該製品化年度以前に支援した研究開発の成果の製品化件数であり、必ずしも当該製品化年度に支援したものでは

ない。



福井梅を使用したリキュールなどの開発



友禅柄の越前和紙キューブメモの開発
④ 拠点化計画促進研究開発事業補助金(平成 24 年度~平成 27 年度,平成 29 年 度~)

福島第一原子力発電所の事故を踏まえて、平成24年度から、「原子力防災・危機管理機能の向上」 および「エネルギー源の多角化」に資する事業として、福井県の「エネルギー研究開発拠点化計画」に 基づき、「原発事故に対応する技術開発の推進」、「エネルギーの多元化への対応」および「将来の廃 炉に備えた対応」に係る地元企業等の新製品・新技術の開発の取り組みを支援することを目的として、 「拠点化計画促進研究開発事業」を開始し、平成27年度まで実施した。

また、平成29年度からは、新たに補助対象分野を「再生可能エネルギー、省エネルギーに関する 技術開発」として、福井県を主体に同事業を実施しており、当センターは、企業から提出された事業提 案書について助言・指導を行う等の支援を行っている。

平成 29 年度までに延べ 26 件(複数年にわたる補助案件については、年度ごとにカウントしている)の支援を行い、4 件が製品化された。

産業育成部では、今後も、県内外で開催される展示会等を活用して補助金内容の周知や成果事例の紹介を行い、また県内の商工会議所、金融機関等とも連携して、当補助金事業により県内企業の新技術・新製品の開発を支援していく。

○拠点化計画促進研究開発事業補助金の実績

年 度	H24	H25	H26	H27	H28	H29	合 計
支援件数	4	7	8	5	_	2	26
交付額(千円)	24,179	54,168	79,384	55,734	—	24,174	237,639
製品化数	0	1	3	0	0	0	4

注)製品化数は、当該製品化年度以前に支援した研究開発の成果の製品化件数であり、必ずしも当該製品化年度に支援したものでは ない。



身体汚染防護服の機能性向上に向けた研究開発



水底放射能測定装置の研究開発

(3) 県内企業の原子力関連業務への参入支援

県内企業の原子力関連業務への参入、受注拡大を支援するため、プラントメーカーや、メンテナンス 業務を行っている元請会社と県内企業との情報交換会や展示商談会を開催してきた。また、県内の原 子力発電所の廃止を受けて、廃止措置工事への県内企業の参入促進のため、元請会社と県内企業と の情報交換会を開催してきた。

 プラントメーカーと県内企業との情報交換会および展示商談会(平成 19 年度~平 成 26 年度)

平成 19 年度から平成 26 年度にかけて(平成 22 年度を除く)、原子力・エネルギー産業への参入を 目指す県内企業がプラントメーカーに対して自社の製品や技術力のPR等を行う情報交換会を開催し た。また、平成 22 年度には、プラントメーカーやメンテナンス業務を行っている元請会社との展示商談 会を開催した。

なお、平成 25 年度からは、情報交換会の開催に当たって「原発事故の収束・復旧作業や将来の 廃炉に備えた対応等」の分野を追加した。

これらの情報交換会および展示商談会には、延べ165社の県内企業が参加した。

年 度	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	合計
プラントメーカー	三菱	三菱	㈱東芝	展示	三菱	三菱	日立グル	三菱	_
	重工業㈱	電機㈱		商談会	重工業㈱	電機㈱	ープ3社	重工業㈱	
参加県内企業数	20	13	25	30	21	16	12	28	165

○プラントメーカーと県内企業との情報交換会および展示商談会の実績





プラントメーカーと県内企業との情報交換会

② 廃止措置工事に係る「電力事業者の説明会」および「元請会社と県内企業との情報交換会」(平成28年度~)

平成28年度から、福井県の「エネルギー研究開発拠点化計画」に基づき、廃炉業務への県内企業の参入促進および県内企業が保有する技術の廃止措置への活用を図るため、「廃止措置工事に係る 電力事業者の説明会」および「廃止措置工事に係る元請会社と県内企業との情報交換会」を開催して きた。平成29年度末までに、「電力事業者による説明会」を1回、「元請会社との情報交換会」を3回 開催し、「全体説明会」「個別面談会」ともに、多数の県内企業の参加を得ている。

本格的な廃炉時代を迎えようとしている近年の情勢の下、産業育成部では、個別面談を含む情報 交換会や説明会等の開催を通じて、県内企業が原子力関連業務へ参入し、その技術力を発揮するこ とができるよう、今後も支援を行っていく。

開催日	件名	参加企業数	参加人数
H28.7.1	廃止措置工事に係る電力事業者の説明会 [関電美浜 1,2 号機]、[原電敦賀 1 号機]、 [原子力機構ふげん]	227 社	403 名
H29.3.6	廃止措置工事に係る元請会社との情報交換会 [関電美浜 1,2 号機] 対象工事:系統除染工事	全体説明会 54 社 個別面談会 21 社	全体説明会 87名 個別面談会 37名
H30.1.31	廃止措置工事に係る元請会社との情報交換会	全体説明会	全体説明会
	[関電美浜 1,2 号機]	70 社	110 名
	対象工事:タービン建屋内機器等解体工事	個別面談会	個別面談会
	原子炉容器内外 放射能調查	21 社	35 名
H30.3.28	廃止措置工事に係る元請会社との情報交換会 [原電敦賀1号機] 対象工事:タービン・発電機等解体工事 機械工作室エリア周辺機器解体工事 制御棒駆動ユニット等解体工事	全体説明会 68 社 個別面談会 34 社	全体説明会 94名 個別面談会 49名



廃止措置工事に係る電力事業者の説明会



廃止措置工事に係る元請会社との情報交換会に おける個別面談

6 福井県国際原子力人材育成センターの活動

6 福井県国際原子力人材育成センターの活動

原子力人材育成については、平成17年に策定された「エネルギー研究開発拠点化計画」に基づき、 若狭湾エネルギー研究センターに「エネルギー研究開発拠点化推進組織」を設置し、そのもとに「人材 育成・交流チーム」を設け、国内の原子力人材育成活動をスタートさせた。

原子力人材育成の一層の推進を目的として、平成21年度に「福井県国際原子力人材育成協議会」 を設立し、国内外の関係機関の協力を得て、平成23年4月に若狭湾エネルギー研究センターに「福 井県国際原子力人材育成センター(FIHRDC)」を設置した。以降FIHRDCでは「国際的な原子力人材 の育成」「

国内の原子力人材の育成」「国内外の人材育成機関との連携強化」を事業の柱として、発足当初より、福井県の研究機関、人材育成機関および大学等と連携して、『原子力人材育成の拠点』として事業を推進してきた。特に国際原子力機関(IAEA)等との協力を通じて、国内はもとよりアジア・中東圏の原子力導入計画国をはじめとする世界の原子力の安全を支える人材育成に取り組んできた。

このように FIHRDC では国内外の関係機関と協力し、研修や研究者受入れ等、国際的な人材の育成に取り組むとともに、県内企業の原子力分野への参入促進を目的とした研修や国内人材の国際化対応等、国内人材の育成にも取り組んできた。

(1) 国際的な原子力人材の育成の概要

国外からの研修生を対象とする研修は、日本の原子力規制、福島第一原子力発電所の事故及びその教訓、原子力広報、地域住民の合意形成、原子力発電所建設のためのプロジェクト管理等の基礎的な講義の他、研修内容に応じて、リスクコミュニケーション、確率論的安全評価、環境影響評価、低線量放射線の人体への影響などの専門的な講義を、「エネルギー研究開発拠点化計画」に参画する電力事業者、研究機関、県内外の大学教員、自治体関係者、原子力規制庁、経済産業省等からの講師派遣を受けつつ、当センター職員自身も講義や討論の進行を行ってきた。

施設見学では、福井県内に 15 基の原子炉が立地する原子力発電所をはじめ、関連する研究施設 や訓練施設、さらには日本原子力発電等の運転訓練シミュレータを用いた実習を行ってきた。

特に IAEA とは、平成 25 年に IAEA と福井県が、原子力 人材育成等に関する協力のための覚書に署名したことを踏 まえ、原子力発電、原子力安全および原子力科学・応用分 野における協力を推進してきた。国や関係機関と協議・調整 を図り、IAEA と共催で研修や国際会議を福井県内で開催し たほか、IAEA 制度による研修生の受入れ、および海外で開 催される研修等へ県内講師等を派遣する等、当センターは 全国の中でも特に積極的に活動を行っている。

IAEA 関連の研修コースや後述するアジア原子力人材育成



西川知事と天野事務局長による覚書署名

会議には IAEA の原子力局や原子力安全局からも事務局次長以下多くの幹部に出席いただいているが、

原子力発電所、緊急時対応施設、環境監視機関、教育訓練施設、広報施設など、原子力発電を行うのに 必要な多くの施設を 30 分から 1 時間の移動で効率的に見学できることなどから、当センターは世界的にも 優れた訓練施設であるとの評価を受けている。

研修の実施にあたっては、研修生の募集、選定、渡航手続きを行うほか、航空券の手配を含む移 動・滞在手段の提供を行っている。幸いなことに、研修の内容並びに移動・滞在面の運営についても 研修生から常に高い評価を受けている。

これらの研修は、文部科学省、経済産業省、外務省関連の以下の事業を受託する形態で実施する ほか、IAEA 関連の研修については、IAEA と福井県が費用分担している。平成 29 年度までの国外からの研修生の受け入れ数は、後述する研究者受入数と合わせて累計で 556 名に達している。



海外からの研修生の受入れ人数の推移

各研修の概要は、以下のとおりである。

① IAEA との連携に基づく研修コース

IAEA との連携に基づく研修コースでは、メンタリングコース、ポリシースクール、原子力安全のリーダ ーシップに関する ANSN 講師育成研修、原子力エネルギーマネージメントスクール、原子力発電基盤 訓練コースを実施してきた。 <メンタリングコース>

対象者:アジア、アフリカの原子力関係の行政官 期間:約2週間のコース(うち、当法人は3~4日間 を担当

実施状況:平成25年度から28年度まで毎年実施 国内の原子力関連施設等を視察し、原子力発電に対 する日本の技術や人材育成を含めた安全対策等に関す る研修を実施した。

<ポリシースクール>

対象者:アジア10ヶ国

期 間:1週間

実施状況:平成25年度から27年度まで毎年実施

原子力発電の円滑な導入に貢献するため、IAEAの方針 や日本の原子力政策、立地地域と原子力発電に関わってき た経験に関する研修を実施した。

<原子力安全のリーダーシップに関する ANSN 講師育成研修>

対象者:アジア7ヶ国

期 間:1週間

実施状況:平成26年度から毎年実施

アジアを

中心とする世界の原子力安全に関わる講師人 材の育成のため、IAEAの国際基準や福島事故の教訓、 リーダーシップ等に関する研修を実施した。

<原子力エネルギーマネージメントスクール> 対象者:アジア、欧州 13 ヶ国 期間:約2週間

実施状況:平成28年度に実施

原子力発電新規導入国における若手リーダーの育成を 目的とした原子力防災等に関する研修を実施した。



H27 年 メンタリングコース原子力防 災に関する講義



H27年 ポリシースクール 関西電力 (株)大飯発電所見学



H29年 ANSN 講師育成研修 日本原電(株)敦賀発電所見学



H28 年 マネージメントスクール講義の様子

<原子力発電基盤訓練コース>

対象者:アジア、アフリカ 11 ヶ国 期 間:4週間~6週間 実施状況:平成 28 年度から毎年実施

原子力発電の基礎知識、原子力発電基盤整備を行 うために必要な行動指針や実務的知識を習得するため の研修を実施した。



H28 年 原子力発電基盤訓練コース IAEA の専門家による協議

② 文部科学省支援による研修コース

文部科学省支援による研修コースでは、原子力プラント安全コース、原子力行政コース、原子力施 設立地コースを実施してきた。

<原子力プラント安全コース>

対象者:アジア 12 ヶ国

期 間:4週間

実施状況:平成23年度から毎年実施

アジア諸国における原子力安全と人材育成に貢献する ため、原子力施設等に係る安全技術(安全設計の考え方、 保守技術等)について、体系的かつ実践的に学ぶ研修を 実施した。

<原子力行政コース>

対象者:アジア 12 ヶ国

期 間:4週間

実施状況:平成24年度から毎年実施

アジア諸国における原子力利用の安全確保および人材 育成に貢献するため、原子力技術利用の安全に関する行 政の管理等に必要な幅広い内容に関する研修を実施した。

<原子力施設立地コース>

対象者:アジア 11 ヶ国

期 間:1週間

実施状況:平成26年度から毎年実施

アジア諸国における原子力発電プラント立地を円滑に進めるため、原子力施設等の立地に係る法律、審査事項や パプリックに対する広報、リスクコミュニケーション等に関す る研修を実施した。



H27 年 原子力プラント安全コー ス オフサイトセンター見学



H28 年 原子力行政コース 新型転 換炉原型炉ふげん見学



H29年 原子力施設立地コース 開講式

③経済産業省支援による研修コース

経済産業省支援による研修コースでは、PAコース、原子力発電安全基盤コースを実施してきた。

<PA コース>

対象者:ベトナム

期 間:1週間

実施状況:平成23年度から28年度まで毎年実施 原子力発電プラント立地予定地域を中心とした原子力 発電の理解促進や広報等の人材育成に貢献するため、 広報・理解啓発活動に関する研修を実施した。

<原子力発電安全基盤コース>

対象者:ベトナム

期 間:2週間

実施状況:平成24年度から27年度まで毎年実施 ベトナムが今後導入する原子力発電プラントの安全 確保人材育成に貢献するため、原子力発電の安全基 盤技術等について、高度な内容の研修を実施した。

<原子力安全基盤コース>

対象者:トルコ

期 間:2週間

実施状況:平成28年度から毎年実施

トルコにおける原子力発電計画の安全基盤整備に向け た人材を育成するため、原子力安全に関する知識を習得 するための研修を実施した。

<原子力 PA コース>

対象者:トルコ

期 間:1週間

実施状況:平成29年度から毎年実施

トルコにおける原子力発電導入に向けた PA 活動を進めるため、国民合意形成の促進に関する知識を習得する研修を実施した。



H27 年 PA コース エネ研(長谷) での集合写真



H27 年 原子力発電安全基盤コース開講式風景



H28年トルコ向け原子力安全基盤コ ース敦賀 3,4 号機建設準備工事見学



H28 年トルコ向け原子力 PA コース 講義風景

(2) 国際会議等の開催・誘致

福井県の「エネルギー研究開発拠点化計画」に基づき、国際会議の開催や誘致を進めてきた。

平成 22 年度から毎年、原子力発電の導入を計画する国の原子力動向を把握し、人材育成の課題 等について協議を行うことで、福井県の原子力人材育成事業を充実するとともに海外との人的ネットワ ークを構築することを目的に、東南アジアの原子力導入計画国の行政機関・研究機関等のトップを招 聘して、福井県及び若狭湾エネルギー研究センターの共催で、「アジア原子力人材育成会議」を開催 している。

また、IAEA の技術会合として、平成 27 年度に「原子力発電計画における広報・理解促進活動に関 する技術会合」、平成 29 年度に「アジア原子力技術教育ネットワーク会議」を開催した。さらに、我が国 がアジア諸国との国際協力の枠組みとして、放射線利用開発や原子力安全等の分野での協力を推進 しているアジア原子力協力フォーラム(FNCA)の会合を平成 18 年度以降、計6回、福井県で開催した。



西川知事のあいさつ



基調講演の様子



意見交換の様子



会議参加者

第4回アジア原子力人材育成会議(平成26年3月開催)

(3) 国内の原子力人材の育成の概要

若狭湾エネルギー研究センターでは、「エネルギー研究開発拠点化計画」に基づき、福井県内企業 の育成、原子力分野への参入促進を図るため、原子力人材の育成として様々な取り組みを行っている。

平成17年度から県内原子力発電所の現場ニーズに応じた研修を実施し、毎年約1,000名の受講者 を受け入れてきた。福島第一原子力発電所事故以降、原子力発電を取り巻く状況が大きく変化してい る中、廃炉等新たな現場ニーズに対応した研修の見直しを行い、平成26年11月には受講者の累計が 1万人を超えた。

社会人向け研修

ア)福井県委託事業(文部科学省補助金事業)「原子力関連業務従事者研修」

県内企業が原子力発電設備の保守点検業務及び廃止措置業務等への参入にあたり、必要となる 基礎的な知識や技術の習得を目指す「一般研修」、およびより実践的な知識や技能の習得を目指す 「専門研修」を実施している。平成17年度から運用している。

(一般研修の例)

・原子力施設で行われる一般的な業務を把握する入門研修

・専門研修を受講するにあたって基礎となる知識・技術を習得する基礎研修

・県内企業の経営者や管理者等を対象とした原子力技術醸成研修

(専門研修の例)

・原子力発電施設及びその周辺設備の保守点検業務に必要な知識と技能を習得する研修

・廃止措置業務に必要な知識と技能を習得する研修

・保守点検や廃止措置の業務に共通的に必要な研修

	平成27年度	平成28年度	平成29年度
研修数	55	54	53
(研修人数)	(740)	(834)	(862)





研修実施風景

イ)経産省委託事業「原子力の安全性向上を担う人材の育成研修」

原子力発電所の安全を確保するための人材を維持・発展させるため、「原子力の自主的安全性向 上の取組の改善に向けた提言」及び「軽水炉安全技術・人材ロードマップの課題」などを踏まえて、主 に社会人を対象に現場技術の向上を目的とした研修を実施している。

	平成27年度	平成28年度	平成29年度
研修数	21	18	21
(研修人数)	(133)	(135)	(150)
トピックス	演習系の研修を強化	廃止措置技術研修見直	廃止措置技術セミナー
	(CRM研修)	L	を開始

(原子力の安全性向上を担う人材の育成研修の例)

・現場技術者の技能向上研修



現場密着型技術研修(ポンプ)

•廃止措置技術向上研修





リスクマネジメント研修(演習)



廃止措置技術セミナー (エナジーソリューション社 コリン副社長)

ウ) 電気事業者支援事業 「福井県原子力保修技術技量認定講習·試験」

国内の原子力発電所の安全な運転維持のための人材確保に資するという観点から、原子力保修技術技量認定講習を実施している。平成20年度から運用し、平成25年度からは事業の継続性を高めるため、技量認定講習について有料化を図っている。

受験人数	平成27年度	平成28年度	平成29年度
あと施工アンカー作業	新規:59	新規:81	新規:73
	更新:62	更新:75	更新:53
配管締付継手作業	新規:16	新規:72	新規:44
	更新:44	更新:48	更新:33
電線結線·端末処理	新規:23	新規:9	新規:19
	更新:25	更新:18	更新:19
計	229人	303人	241人



あと施工アンカー



電線結線·端末処理

<受講者数の推移>

受講者数の推移は、平成29年度には合計1,231名の研修生を受け入れ、平成17年度以降の累計としては13,912名に上っている。



原子力関連業務従事者の研修受講者数と参加企業数の推移



配管締付継手作業

② その他の研修

ア) 文部科学省公募事業 「廃止措置セミナー」

平成23年度からは文部科学省国際原子力人材育成イニシアティブ事業の公募に参画し、平成27 年度からは「廃止措置セミナー」を実施。高専生、大学生等を対象に、福井県の原子力資源を活用した廃炉本格化時代に向けた人材の育成事業を実施している。

	平成27年度	平成28年度	平成29年度
研修人数	高専生 12	高専生 10	高専生 8
	大学生等 14	大学生等 19	大学生等 16
	計 26 人	計29人	計24人

カリキュラム

- ・原子力プラント主要設備の概要、シミュレータを用いたプラントの運転制御
- ・廃止措置概論、福島第一発電所の廃止措置
- ・放射性廃棄物の処理処分、クリアランスレベルと再利用、国内外の廃止措置の経験と最近の 課題
- ・廃止措置のプロジェクト管理、放射能評価、廃止措置の解体技術
- ・原子力産業ロボットの活用紹介と操作体験
- ・原子炉廃止措置研究開発センター(ふげん)廃止措置現場見学
- ・レーザー技術の適用、開発(切断、除染)
- ・グループ討論・発表、海外廃止措置技術者との意見交換



レーザー除染の実演



海外廃止措置技術者との意見交換

イ)原子力規制庁公募事業「原子力規制庁職員への放射線安全研修」

原子力規制庁職員を対象に、エネ研にて放射線の基礎、放射線計測の基礎等についての講義や、 放射線測定実習を実施し、あわせて福井県原子力環境監視センターにて、放射線監視テレメータや モニタリングシステムのデモおよび実習、原子力施設から排出される放射性物質と監視設備について の講義を実施している。

年 度	平成27年度	平成28年度	平成29年度
研修人数	8	9	11



放射線計測実習



放射線監視テレメータ、モニタリングシステム講義

ウ)「エネルギーに関して県内高校生等を対象に英語による研修(グローバルスクール)」

福井県内の高校生等を対象に国際人材の育成を目指した丸一日の英語での研修を、平成29年度 より実施している。初年度である29年度は、英国・米国大使館館員や、国際機関に勤務経験のある職 員等を講師に迎え、国際機関の役割、日本のものづくりと原子力の課題と人材育成、英国・米国の文 化と原子力・エネルギー情勢についての講義と、グループに分かれての討議、発表を施した。

	平成29年度
研修人数	高校生 36
	大学生等 2
	計 38人



米国大使館 キャメロン・サロニー氏講義



グループ発表

エ)「スーパーサイエンスハイスクール科学実験研修」

県内SSH4校(藤島、高志、武生、若狭)を対象とした科学実験研修(平成15年度~、平成17年度 からはエネルギー研究開発拠点化計画の一環として支援を実施)

年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度
研修人数	149	139	149

No	研修テーマの例
1	環境水等に含まれる微量金属分析
2	プログラミングと近似計算の基礎
3	電子顕微鏡によるミクロ組織の観察
4	蛍光X線分析の基礎と応用
5	アルデヒド脱水素酵素の遺伝子型判定
6	β線とγ線の吸収曲線の測定(放射線と物質の相互作用)
7	金属の蒸発と薄膜生成実験
8	蛍光多重染色による細胞分裂像の観察
9	発光ダイオード(半導体)の特性と光子数の算出



人間の目が判別できる光子数の算出実験



発表での質疑応答の様子

③ メンテナンス業務を行っている元請会社と県内企業との情報交換会

当センターでは、平成18年度から、原子力関連業務への参入または受注拡大をめざして、当センターが実施した原子力関連業務従事者研修を受講した県内企業や同研修の受講を予定する県内企業 に対して、県内原子力施設の保守点検業務等に携わる元請会社と、現場の実状や具体的な業務の内 容、求められる技術レベル等についての情報交換会を開催した。

						-							
年 度	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	合計
元請会社数	8	8	8	8	8	8	7	9	9	8	8	8	97
参加県内企業数	16	8	15	13	16	8	8	12	10	7	8	5	126

○メンテナンス業務を行っている元請会社と県内企業との情報交換会の実績





メンテナンス業務を行っている元請会社と県内企業との情報交換会

(4) 海外研究機関等との研究交流

研究開発拠点の形成をめざす取組みの一環として、当センターは海外の研究機関、大学等との共同研究、研究者の交流・研修等を積極的に進めてきた。原子力安全の確保等、国際的に活躍できる人材を育成するため、国際性の向上を目指したセミナー等も実施してきた。

○文部科学省事業「原子力研究交流制度」

原子力研究交流制度により、平成22年度から平成29年度にベトナム、バングラデシュ、 タイ及びマレーシアから計7名の研究員を当法人に受入れた。

○IAEA 事業 「研修員制度(フェローシップ)」

研修員制度(フェローシップ)により、平成27年度にタイから「放射線作業開始 前における放射線安全教育訓練」「加速器の運転、管理に関する知識、技術の習得」 の研修内容で1名の研修員を当法人に受け入れた。

○福井県補助金事業「海外研究者・研究生受入制度」

海外研究者·研

究生受入制度により、平成24年度から若狭湾エネルギー研究センターのほか、福井大学、福井工業大学、原子力安全システム研究所に毎年計3名~5名を受入れ、平成30年度までに計32名の海外研究者・研究生を受け入れてきた。

若狭湾エネルギー研究センターでは「イオンビーム分析のための分析集計の開発および 信号処理系の構築」「イオンビームを用いた薬用植物の品種改良」「放射線誘発突然変異 育種の効率を向上するための DNA マーカーの開発」等を研究テーマとした研究生を受け 入れてきた。





		平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	
	人数 1名(タイ)		1名(ベトナム)	1名 (タイ)	
工ネ研	研究 テーマ	イオンビームを用いた 薬物植物の品種改良	放射線誘発突然変異 育種の効率を向上する ためのDNAマーカー 開発	数MeV単色エネルギ ーの電子線源の開発	
	人数	4名(リトアニア、バング ラデシュ、インドネシア、マ レーシア)	2名 (ウクライナ、ベトナ ム)	3名 (ウクライナ、ベトナ ム、バングラデシュ)	
福井 大学	研究 テーマ	 ・平常時と原子力災害時における放射線環境 時における放射線環境 モニタリングに関する調 査研究 ・革新的な核解析ソフト と熱流動ソフトを用いた 原子炉の炉心シミュレ ーションと炉心解析 	・平常時と原子力災害時における放射線環境 モニタリングに関する調 査研究 ・小型加速器駆動システムにおけるパルス中 性子実験の解析 ・PREPROコードを用 いた多群中性子断面 積ライブラリの作成、評 価と検証	 ・平常時と原子力災害時における放射線環境 キニタリングに関する調査研究 ・粒子線がん治療における核破砕反応の研究 ・VVER-1200のMOX炉心の解析 	
福井	人数			1名 (タイ)	
工業大学	研究 テーマ			高気圧マイクロ波放電 法によるヨウ素捕集技 術の研究	

「海外研究者・研究生受入制度」による受入れ状況 (受入機関:福井大学、福井工業大学、エネ研) ○国内原子力人材の国際性向上事業に係る留学支援事業

原子力分野において国際的に活躍できる人材の育成と原子力の安全性向上に貢献することを 目的に、福井大学附属国際原子力工学研究所を中核とした関西・中京圏等の大学との広域連携 拠点形成の促進に資するため、平成23年度より毎年3名程度の大学院生の留学支援を行って いる。

年度	所 属	留学先	研究テーマ
	福井大学大学院 工学研究科	中国	フッ化物溶融塩における Ni
	原子力・エネルギー安全工学	中国科学院上海	基合金の腐食挙動の解明
	専攻	応用物理研究所	
	福井大学大学院 工学研究科	ドイツ	廃止措置エンジニアリング技
H27	原子力・エネルギー安全工学	カールスルーエ	術(STARCCM+を用いた配管内
	専攻	工科大学	の固液二相流の解析)
	名古屋大学大学院 工学研究	フィンランド	キャビティーリングダウン分
	科 量子工学専攻	ユヴァスキュラ	光に基づく放射性炭素同位体
		大学	分析システムの開発
	福井工業大学大学院 工学研	カナダ	ゲル線量計の中性子効果の研
	究科 応用理工学専攻 原子	オンタリオ工科	究
	力技術応用工学コース	大学	
	大阪大学大学院 工学研究科	ドイツ	ガス浮遊法による炉心溶融物
H28	環境・エネルギー工学専攻	ドイツ航空宇宙	の物性評価
		センター	
	福井大学大学院 工学研究科	チェコ	造血幹細胞の DNA 損傷時に核
	原子力・エネルギー安全工学	チェコ科学アカ	内で形成される斑点に着目し
	専攻	デミー	た放射線影響解析
	福井大学大学院 工学研究科	ベルギー	MCF7 へのアスコロビン酸添加
	原子力・エネルギー安全工学	ベルギー原子力	による放射線保護効果評価
H29	専攻	研究センター	
	福井大学大学院 工学研究科	オランダ	IGA 法に基づく中性子輸送計
	原子力・エネルギー安全工学	デルフト工科大	算手法の研究開発と検討検証
	専攻	学	

Ⅱ 平成 29 年度 研究年報

1. 研究成果

1.1. エネルギー・環境分野

1.1.1. レーザー技術を応用した除染技術、切断技術の開発

1.1.1.1

レーザーを用いた異種材料溶接とNiP めっき材料の焼き入れ Welding Condition of Different Type of Metals and Hardening of NiP Metal Coat by Laser 都築聡^{*1} Satoshi TSUZUKI

Abstract

Welding condition of different type of metals by laser was investigated. NiP metal coat laser hardening was investigated.

要約

レーザーを用いた異種材料溶接の溶接条件について調査した。また、NiP めっきのレーザー焼き入れ条件の 調査を行った。

緒言

異なる性質の金属を溶接することは困難であるが、産業の高度化に伴い、異種材料の溶接ニーズは高くなってきている。良好な溶接を行う為には、溶融部を合金化し、2種類の金属のそれぞれで強い結合をつくることが 重要である。そのため異種材料の溶接条件を調査した。

チェーンピンについては、力の伝達時のせん断応力と、回転時の耐摩耗性が重要になる。せん断応力については、鉄鋼材料が強く、耐摩耗性については、焼き入れされた NiP 等が高い硬度のため、適切である。しかしながら、母材を鉄鋼、表面を NiP めっきの場合は、従来のような電気炉を用いた焼き入れでは、鉄鋼材料まで焼き入れが入ってしまい、引張り強度を低下させてしまう。そこで、母材を鉄鋼材料、表面に NiP 等のめっきを施し、レーザー照射により、NiP めっき層のみの焼き入れを行った。

成果の概要

溶接については、SUS304、A5052、銅の突き合わせ溶接を実施した。SUS304とA5052においては、走査速度100 mm/min、SUS304と銅においては、500 mm/min(図1)にて良好な溶接を確認した。

NiP めっき焼き入れについては、CW レーザーを用いて熱処理を 行った。試験条件は、レーザー出力を 300 W、ビーム径を1 mm と し、走査速度を変えてレーザー照射を行った。照射後については、 ビッカース硬さを測定し、硬度の評価を行った。

レーザー照射を行ったピンを図2に示す。走査速度は450 mm/s の場合が最も硬度が高かった。さらに、吸収率を複素屈折率から計 算し、27.2%と見積もった。

結言

異種材料溶接については、SUS304、A5052、銅について突き合わせ溶接を実施し、良好な溶接条件を得た。NiP めっき焼き入れについては、母材に焼き入れを行うことなく、表面の NiP めっき層のみに焼き入れを行うことができた。今後は、レーザー照射による表面硬化のメカニズムを詳しく調べる。



図1 溶接試験の縦断面図



図2 レーザー照射を行ったピンの外観

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室

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

30 kW ファイバーレーザーを用いた低合金鋼の切断 Cutting of Low-Alloy Steel using 30 kW Fiber LASER 門脇春彦^{*1}、石神龍哉^{*2} Haruhiko KADOWAKI and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

The cutting test of low-alloy steel as a simulant material of reactor pressure vessel by 30 kW fiber LASER was conducted, and it was confirmed that test pieces with 300 mm in thickness were cuttable. The dust generation during the cutting was evaluated and it was found that fine dust concentration in cutting environment reduced by water spraying.

要約

30 kW ファイバーレーザーを用いて圧力容器模擬材の低合金鋼の切断試験を実施し、厚さ 300 mm の試料 を切断できることを確認した。切断時の粉じん発生について評価し、水スプレーを吹き付けることにより切断環境 中の微小粉じん濃度が低減できることを見出した。

緒言

レーザー切断工法は遠隔操作性に優れ、また比較的切断速度が速い性能を持つため、原子炉施設の廃止 措置への適用が期待される。これまで原子炉施設の主要構造材である SUS や炭素鋼の厚板の切断試験を行ってきた。今年度は原子炉圧力容器と同材質(SQV2A)である低合金鋼の厚板の切断を行った。また、放射化 対象物の切断を想定し、汚染を有することが予想される切断時の粉じんの粒径分布を評価した。

成果の概要

圧力容器のフランジ部を模擬した厚さ300 mmの低合金鋼を、 30 kWファイバーレーザーを用いて切断した。図1に切断試験 時の写真を示す。この試験において試料厚さ-切断速度-レーザ ー出力のパラメーター試験を行い、データを取得した。厚さ100 mmに対し切断速度10 mm min⁻¹/出力10 kWに関係比で条件 を設定することにより、厚さ300 mmまでの試料が切断できること を確認した。これまでの成果から、原子炉施設を構成する金属製 の機器・配管はレーザー工法によって全て切断できることが示さ れた。

切断環境中の粉じんの測定を行った。出力 10 kW の場合では 粒径 0.13~0.33 µm の分布が高かったが、30 kW の場合では 0.06 以下~0.22 µm の分布が高くなり、出力が高いほど粒径分 布のブロードピークの位置が微小側にシフトした。30 kW 時の水 スプレー有り/無しの場合の粒径分布を図 2 に示す。水スプレー 無しに比べて水スプレー有りの場合は、粒径 0.06 µm 以下の分 布が減少することが分かった。粉じんについて、発生メカニズム の調査や抑制の検討等を次年度に実施する予定である。

結言

低合金鋼の厚板の切断を行い、原子炉施設の金属構造物がレ ーザー工法によって切断可能であることを確認した。レーザー切断 時の粉じんの発生状況を調査し、微小粉じんが水スプレーで低減 できることを見出した。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが関西電力株式会社、日本原子力発電株式会社、北陸電力株式会社の3社からの受託研究 として実施したものである。



図1 切断試験時の写真



レーザー剥離技術を用いた除染 Decontamination by Laser Peeling Technique 都築聡^{*1},嶋津正^{*2}, 桑室直俊^{*2} Satoshi TSUZUKI, Tadashi SHIMAZU and Naotoshi KUWAMURO

Abstract

About laser decontamination machine, we fabricated a dust collection assembly, developed small decontamination machine, and conducted a peel test.

要約

小型レーザー除染機において、飛散物回収機構の製作、小型除染システムの開発、剥離試験を行った。

緒言

若狭湾エネルギー研究センターではこれまで原子力発電所の廃止措置に向けにレーザー除染の研究を行ってきた。レーザー除染は、除染対象物に高出力レーザーを照射することで対象物表面を昇華させ、急激な熱膨張剥離によって表層だけを除去する除染技術である。ブラスト方式のようにブラスト材を使わないので反力がなく、二次廃棄物がほとんど出ないという特徴があるが、一方で装置が大がかりになるデメリットがあった。本研究ではレーザー除染の実用化に向け飛散物回収機構を製作、小型除染システムを開発し、剥離試験を行った。

成果の概要

小型除染機の実用化に向けて以下の課題について取り 組んだ。

(1) 飛散物回収機構の製作

発生する粉じんを効率的に回収するため、小型の飛散 物回収機構の設計、製作を行った。新規に製作した回収 機構は風の流れを作ることによってガラス面の保護と飛散 物の回収を行う仕組みになっている。

(2) 小型除染システムの開発

レーザー発振器、レーザーヘッド、飛散物回収機構をク ローラに搭載した小型除染システムを開発した(図1)。この 小型除染システムは、リモートで制御に対応している。

(3) 除染システムの剥離試験

飛散物回収試験を行い、剥離の性能評価を行った。剥 離した状態を図2に示す。表面状態の観察結果から照射 速度1000 mm/s付近が剥離の最適条件と思われる。ま た、発生粉じんについて、サイクロンで大きな粒子を取り除 き微粒子をHEPAフィルターで捕集することで、0.3 μm 以上の粒子を99.97%以上捕集できる。

結言

今後はレーザー除染技術の現場適用を目指して、実証試 験に必要となる条件、装置仕様などの調査を行う。また、金 属表面の剥離に対応した小型レーザーヘッドを開発し、実 際に剥離試験を行う予定である。



図1 小型レーザー除染機



図2 レーザー照射後のコンクリート表面

^{*1(}公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・企画支援広報部 本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが関西電力株式会社、日本原子力発電株式会社、北陸電力株式会社の3社からの受託研究 として実施したものである。

熱的切断工法による気中及び水中切断時の粉じん挙動調査 Investigation for Dust Behavior of Cutting in Air and Cutting Underwater by Thermal Cutting Methods 副島吾郎^{*1}、岩井紘基^{*1}、中村保之^{*1}、都築聡^{*2}、安永和史^{*3}、久米恭^{*4} Goro SOEJIMA, Hiroki IWAI, Yasuyuki NAKAMURA, Satoshi TSUZUKI, Kazufumi YASUNAGA and Kyo KUME

Abstract

1.1.1.4

We investigated the behavior of the dust generated by laser and plasma-arc cutting. Both behaviors were compared with cutting underwater and in air for the simulant material of reactor components (SUS304) and the pressure and calandria tube (Zr-2.5%Nb, Zry-2) of the prototype reactor "FUGEN".

要約

「ふげん」で利用されている原子炉構造材(SUS304)や二重管(内側 Zr-2.5%Nb、外側 Zry-2)の模擬材を対象とし、プラズマアーク切断工法及びレーザ切断工法により、気中切断や水中切断を行った際に発生する粉じんの挙動を調査した。

緒言

「ふげん」では、原子炉を安全に解体するため、これまでに原子炉構造物の模擬材を対象に、プラズマアーク 切断工法及びレーザ切断工法を用いた切断試験を行っており、切断で発生した粉じんや沈降、落下固形物等 の重量分析を実施してきた¹⁾。平成29年度は平成28年度に引き続き、熱的切断工法であるプラズマアーク切 断及びレーザ切断を用いた場合の気中切断、水中切断における切断条件毎の粉じんの発生量、粒径を調査し た。

試験の概要

気中切断ブース及び水中切断用の水槽を用いてプラズマアーク切断及びレーザ切断を行い、切断試験体の 観察や粉じん、ドロス量の測定を行った。切断装置は、前年度に引き続き、最大出力 600 A のプラズマ電源装 置と最大出力 30 kW、波長 1070 nm のファイバーレーザ発振器を用いて、試験体には、「ふげん」で利用されて いる原子炉構造材 (SUS304) や二重管 (Zr-2.5%Nb、Zry-2)の模擬材を用いた。

今年度は、①切断工法の違いによる粉じん移行影響調査、②出力の違いによる粉じん移行影響調査、③材 質の違いによる粉じん移行影響調査、④試験体系内に滞留する粉じん量調査の4テーマについて試験を実施 した。

これらの試験では、カーフ幅、ドロス重量、フィルターで捕集した粉じん重量等のデータを取得すると共に、 TEM 観察により粉じんの粒径を調査した。

結言

本調査により、プラズマアーク切断工法及びレーザ切断工法の各工法において、気中及び水中環境下にて 原子炉構造材である SUS304、Zr-2.5%Nb、Zry-2の模擬材を切断した際に発生する粉じんの発生量、粒径を取 得することができた。「ふげん」では、今後も原子炉の廃止措置に向けてさらなる試験データの拡充に努める予 定である。

参考文献

1) 副島吾郎 他、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報平成28年度、19、9(2016)

^{*1(}国研)日本原子力研究開発機構・バックエンド研究開発部門・原子炉廃止措置研究開発センター(ふげん)・技術開発部・技術開発課、*2(公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室、*3(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グ ループ、*4(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ

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

同軸光学系レーザーヘッド内蔵光信号計測器向け集光光学系の特性調査 Investigation of Properties of Additional Condensing Optics Applicable to the Laserhead Featuring Co-axial Probing Optics 西尾繁^{*1}

Shigeru NISHIO

Abstract

This study aimed at collecting basic data of the condensing optics which can be used for the laser-head featuring a co-axial probing geometry with high optical throughput.

要約

同軸光学系レーザーヘッドに内蔵された光信号計測器向けの集光光学系を検討するための基礎デー タを収集-蓄積した。

緒言

レーザー切断パラメータを自動制御するためには、まずレーザー照射中のワークの状態を知る手段が必要である。レーザー切断中、ワークは高温に加熱され、強く発光する。ワークの切断状態のプローブとして、この発光 を利用する方法が積極的に検討されている。

発光を捉えるための光信号計測器の配置としては、光信号計測器をレーザーヘッド光学系の外に設置する 配置(非同軸光学系)と、レーザーヘッド光学系の中に設置する配置(同軸光学系)の2つが考えられる。後者の 同軸光学系は、レーザーヘッドをコンパクトに出来るだけでなく、得られる光信号が全方位の移動に対し等価 で、さらにスパッタ/ヒュームによる汚染から光信号計測器を保護することが容易なことから、応用上極めて有利 である。反面、発光がレーザーノズル(通常直径 2mm 程度)を通ることから、光信号計測器に入力できる光量が 非同軸光学系と比較して小さく、したがって、光信号の出力電圧が小さいという短所がある。この短所は光軸上 に新たに集光光学系を挿入することによって改善される可能性があるが、このために必要な基礎データは今の ところ得られていない。

本件は同軸光学系レーザーヘッドに内蔵された光信号計測器向けの集光光学系を検討するための基礎デ ータを収集-蓄積することを目的として実施したものである。

成果の概要

同軸光学系レーザーヘッド内蔵光信号計測器向け集光光学系の設計に有用なデータ(レンズを用いた場合、レンズの焦点距離が大きくなるにつれて、また、光源の位置が合焦位置(原点)から外れる(位置が大きくなる)につれて光信号計測器の出力電圧は小さくなる、また、レンズを用いなかった場合は、出力電圧は著しく小さくなる)などのデータが蓄積された。

結言

ー連の試験を通して、同軸光学系レーザーヘッドに内蔵された光信号計測器向けの集光光学系を検討する ための基礎データが蓄積された。レーザー切断パラメータの自動決定技術の実用化を念頭に、今後も調査を継続する。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・レーザー技術開発室

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

鉄鋼材料のレーザー切断特性のシステム依存性調査 Investigation of Facility Dependence of Laser-cutting Quality of Steels 西尾繁^{*1} Shigeru NISHIO

Abstract

In this study relationship between laser-cutting quality of steels and cutting conditions was investigated and compared with that investigated with other laser-cutting facility to provide basic data for examination of the theoretical model.

要約

鉄鋼材料のレーザー切断特性がどのようにシステムに依存するかを知ることは、レーザー切断の自動化のため極めて重要である。今回、鉄鋼材料に対して既存システムで実施された切断試験と同一の条件で切断試験 を実施し、得られた結果を既存システムの場合と比較した。

緒言

レーザー光を材料に照射した時に発生する大量の熱を利用したレーザー切断は、レーザーの主要な利用分野のひとつであり、材料の切断法として既に市民権を得ている。

他の切断方法と同様、レーザー切断においても、対象材料の物性・状態に応じて、切断パラメータ(レーザー 出力など)を適切に調節することが良好な切断品質を得るために必要である。長年オペレータの感覚に委ねら れてきたこの調節作業を自動化する要望が年々高まっている。これを実現するためには、まず無数にあるパラメ ータの中から切断品質を強く支配するパラメータを選び出し、これらを切断品質と定量的に関連づけることが必 要である。

あるワークが与えられた時、使用するレーザー切断システムと関係なく同程度の切断品質を得るためにコント ロールすべき必要最小限のパラメータは、理論的考察から、レーザー波長、レーザー出力、焦点位置、レーザ ー入射角、スタンドオフ、レーザーノズル孔径、アシストガス種、アシストガス圧、ヘッド移動速さと考えられてい る。しかし、このことはまだ実験的に検証されていない。

本件は、上記のパラメータ群が切断品質を支配するに十分か判断するための基礎データを提供するため に、鉄鋼材料(SS400 および SUS304)に対して既存システムで実施された切断試験と同一の条件で切断試験を 実施し、得られた結果を既存システムの場合と比較することを目的として実施したものである。

成果の概要

レーザーパワー1.8kW の場合は、試験体の材質、アシストガス圧と関係なく、試験体を切断することは出来なかった。この結果は、既存システムで得られた試験結果と一致した。レーザーパワー3kW の場合、既存システムにおいて試験片を切断できたアシストガス圧でも、本試験では切断できなかったケースがあった。

結言

ー連の試験を通して、鉄鋼材料のレーザー切断特性がどのようにシステムに依存するかが明らかとなった。レ ーザー切断の自動化を念頭に今後も調査を継続し、データの充実を目指す。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・レーザー技術開発室

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

耐放射線性ロボットレーザー除染基礎技術開発および廃止措置人材育成のための操作実習 Development of Basic Technology for Radiation Resistance Robot Laser Decontamination and Practical Training of Human Resource Development for Decommissioning 山岸隆一郎*1、桑室直俊*2 Ryuichiro YAMAGISHI and Naotoshi KUWAMURO

Abstract

We carried out development of basic technology for radiation resistance robot laser decontamination machine constructed by the WERC and training of human resource development for decommissioning using our laser decontamination setups.

要約

エネ研開発のロボットレーザー除染装置の耐放射線性向上のための基礎技術開発と、除染装置を用いた廃 止措置人材育成のための操作実習を行った。

緒言

営業運転を終了した原子力発電所や福島第1等の廃止措置現場では、除染技術や人材が求められている。そこで、エネ研の開発したロボットレーザー除染装置を活用して、廃止措置に供するための基礎技術開発や、将来的に廃炉に関わる可能性のある人材の育成事業を行った。

実施概要

本事業は、文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推 進事業」に関わる福井大学担当の「福島第一原子力発電所の燃料デブリ分析・廃炉技術に関わる研究・人材育 成」に基づき実施されたものである。

1. 耐放射線性ロボットレーザー基礎技術開発

ロボットレーザー除染装置など、廃止措置への適用を想定して開発される機械類は、実際の放射線曝露環境 下での作業可能時間(耐放射線性)や作業性等の性能評価試験が必要となるが、放射線曝露環境下での作業 実績がないものは、放射線曝露環境への投入が困難であるという二律背反に陥っており、開発における大きな 障壁となっている。

そこで、モーションキャプチャ技術を活用し、非放射線環境下においても放射線曝露環境を模擬し、実際の除染作業計画毎に変化する装置累積線量の増減を事前評価可能とする技術開発を行った。

本技術では、光学式モーションキャプチャ技術を、除染装置のある時点での滞在位置取得手段として利用する。取得した位置情報は表計算ソフトウェアで取り扱い可能な行列形式で出力されるため、位置情報に対して空間線量を任意に設定し、表計算ソフトウェアの関数機能等を活用して自動積算することで、一連の作業に伴う累積線量等が出力される。

図 1 に本技術を用いて 6 m 四方のモーションキャプチャエリア内で床面専用ロボットレーザー除染装置を操作した実際の除染軌跡データを示している。このエリア内の軌跡データに対し、任意に設定した空間線量の異なる領域区分(例:Field 1 ~3)を重ね合わせることで、床面専用ロボットレーザー除染装置実機が除染した面積と、様々な環境想定による累積線量の検討が、非放射線環境下でも実施可能となる。

2. ロボット操作実習

廃止措置作業に関わる人材の育成を目的として、エネ研開発の床面専用ロボットレーザー除染装置と上記累 積線量評価技術や、手先軌道自動計算ロボットアーム等を用い、平成29年度2月に、(国研)日本原子力研 究開発機構楢葉遠隔技術開発センターにて、14名の参加者に対して実施をした(図2)。

^{*1(}公財)若狭湾エネルギー研究センター・企画支援広報部・技術相談室、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・企画支援広報部 本事業は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井大学からの受託事業として実施したものである。



図1 モーションキャプチャエリア内に設定された各領域と、 床面除染軌跡の一例



図2 JAEA 楢葉にて実施した床面専用ロボットレーザー除染装置を用いた実習の風景

結言

モーションキャプチャ技術を活用した廃止措置作業に関わる累積線量の事前評価技術の開発を行い、人材育成実習にも供することで、効果的な事業実施ができた。

1.1.2. 廃炉段階で役立つ情報の収集・整理・分析と技術の開発

1.1.2.1

原子力発電所コンクリートの有効利用調査 Investigation on Recycling Concrete Waste Caused by Decommissioning 篠田佳彦*1 Yoshihiko SHINODA

Abstract

From FY 2014 until FY 2017, we had been investigating the possibility of recycling the concrete waste caused by the decommissioning of nuclear reactors. It is necessary to recycle the concrete waste into high-quality aggregate at low cost in the recycling design.

要約

平成 26 年度から平成 29 年度まで、原子力発電所の廃炉で発生するコンクリート廃棄物の再利用に関して検討してきた。再利用方策において、高品質な再生骨材として安価に再利用することが重要である。

緒言

原子力発電所を1基解体すると、コンクリート廃棄物が約 50 万トン発生する。福井県には複数の原子力発電 所が立地し、発生時期が重なるなどの状況によっては発生余剰となることが危惧される。よって、廃炉で発生す るコンクリート廃棄物を有効利用できるように予め検討しておくことが廃炉の円滑化に結びつく。

成果の概要

(1) 平成 26 年度成果 1)

1) 福井県におけるコンクリート廃棄物の現状調査

平成20年度実績では、福井県における一般産業から生じるコンクリート廃棄物として、コンクリート片は 41.7万トン発生し、主に再生路盤材として98.4%がリサイクルされていた。

2) 将来期待されるコンクリート廃棄物利用法の調査

再生路盤材として活用するためには、発生量に見合う道路工事などが求められ、発生余剰となる恐れ がある。そこで、コンクリート用の再生骨材として活用することを視野とすることも必要である。

3) 原子力発電所コンクリートの再利用シナリオ案の策定

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

- A. 現在最も実績のある再生路盤材を中心としたシナリオ
- B. 近年急速に進歩した再生骨材(再生骨材を用いたコンクリート)を中心としたシナリオ

の2パターンとして、原子力発電所コンクリートの再利用シナリオ案を策定した。

(2) 平成 27 年度成果 2)

想定した 2 パターンの再利用シナリオをもとに人件費、設備費および運賃などを設定し、各工程に要する 作業人数を加味して必要な経費を算出した。再生路盤材や再生骨材に処理する施設を原子力発電所内に配 置し、電力事業者が自ら処理を行う場合と中間処理業者に委託した場合などの場合分けをした。

(3) 平成 28 年度成果 3)

コンクリート用の再生骨材に着目した。再生骨材を用いたコンクリートは再生骨材の品質により、(H),(M), (L) と区分される。高品質な再生骨材(H)は天然資源から採取する普通骨材と同程度で、JIS A 5308 によりレ ディーミクストコンクリートへの使用が認められ、普通コンクリートと同等に扱うことができる。しかし、再生骨材 (H)は、製造コストが普及の大きな障害となっている。再生骨材の利用促進、普及に国や地方自治体の協力を 得て、公共工事への利用を通して再生骨材コンクリートの導入増加を目指すことと同時に出荷量を確保(増 加)することで、大規模コンクリート製造企業の参入を促し、再生骨材品質の安定化を図ることが普及の引き金 となっていく。そして、一般産業から生じるコンクリート廃棄物による再生骨材リサイクルの確立に結び付けてい く。その上で、原子力発電所コンクリートによる再生骨材利用を促進していくことが重要である。

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

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが関西電力株式会、日本原子力発電株式会社、北陸電力株式会社の3社からの受託研究として実施したものである。

(4) 平成 29 年度成果

再生路盤材として再利用することを原則とするが、再生路盤材の使用実績や廃炉計画などを勘案すれば 年間で 0.5 万トン~8.5 万トン程度が余剰となり、再生骨材(H)として再利用する必要が生じる。再生骨材(H)の 製造として一般的な加熱すりもみ法を適用する。同手法は、300℃まで加熱し、すりもみ作用を与えることで原 骨材を取り出す。1 トンの原コンクリートを処理すると 0.25 トンの細骨材、0.35 トンの粗骨材が再生できる。



図1 再生骨材 H の製造コスト(余剰量ごと)



図2 再生骨材 H の製造コスト(再生処理設備量の影響)

再生骨材として利用することが 想定される年間余剰量が 0.5, 1.5, 3.5, 8.5 万トンであった場合 に再生骨材製造に必要な経費を 算出した。結果を図 1 に示す。再 生処理設備の処理能力は稼働時 間として年間 250 日、1 日あたり 6 時間で処理できる規模に設定し た。余剰量 0.5 万トン/年では年 間で約 1.2 億円の経費が必要に なる。それぞれの余剰量での経費 を 1 トンあたりに換算すると 24169, 10665, 6240, 4619 円/年 /トンになる。

それぞれの余剰量において、 再生処理量を増加させた場合の 経費への影響度を評価した。余剰量

0.5 万トン/年での結果を図2に示す。 処理量増加に応じて設備費が上昇する が、人件費などは減少するので最適値 が表れる。余剰量0.5万トン/年では、 48トン/時のとき年間経費が約0.59億 円となる。天然骨材販売単価を基準に すると再生骨材製造が採算を確保する ためには0.04億円以下にする必要が あり、経費は10倍以上かかっている。

再生骨材(H)の製造コストを低減しう る水中パルスパワー放電法に着目す る。熊本大学ではテストプ

ラントを整備している4)。同手法は、コン

クリートに短時間で大電流を放電させて生じたプラズマによる膨張圧で破砕し、同時に発生した衝撃波によって 骨材からモルタルを剥離し微粉化させる。開発中の技術であり、現時点では設備規模を1トン/時程度しか評 価しえないが、4トン/時の設定条件であれば、年間経費は0.87億円/年となる。図2のように最適な設備規 模で採算コストを満たす可能性は十分にあると評価する。

結言

コンクリート廃棄物の発生量や時期を考慮すれば、普通骨材と同程度品質の再生骨材(H)を安価に製造する 必要がある。既存の方法では限界があり、開発中の水中パルスパワー放電法に可能性がある。

参考文献

- 1) 篠田佳彦、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報平成26年度、17、74(2014)
- 2) 篠田佳彦、(公財) 若狭湾エネルギー研究センター研究年報平成 27 年度、18、12-13 (2015)
- 3) 篠田佳彦、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報平成28年度、19、12-13 (2016)
- 4) 熊本大学、パイロットプラントお披露目会兼第7回コンソーシアム会議資料(2010)

1.1.2.2

アスファルト固化体リコンディショニングの成立に向けた実規模試験

Full-scale Re-conditioning Test of the Bituminization for Radioactive Wastes

岡田翔太*1、手塚将志*1、土田大輔*1、山田洋右*2、遠藤伸之*3、久米恭*4

Shota OKADA, Masashi TEZUKA, Daisuke TSUCHIDA, Yosuke YAMADA, Nobuyuki ENDO and Kyo KUME

Abstract

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

要約

アスファルト固形物を技術基準に適合させるための検討の一環として、リコンディショニング試験を実施した。 実機と同サイズの模擬体の性状確認により、技術基準の一つである固型物の均質性確保の見通しを得た。

緒言

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

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

成果の概要

廃棄体技術基準に適合しない可能性のあるアスファルト固型物を基準に適合させるためのリコンディショニン グ手法の確立に向けた技術開発の一環として、リコンディショニングの成立条件を調べる試験を行った。

1. 実規模模擬体の製作

アスファルト固型物を模擬した、200Lドラム缶サイズのコールド試験体(以下、「模擬体」という。)を製作した。 2. 模擬体のリコンディショニング

製作した模擬体が均質・均一になるよう、タンブラー方式による混合でリコンディショニングを実施した。 3. リコンディショニング前後の性状等の検証

リコンディショニング前後の模擬体について目視観察するとともに、密度、塩含有率、イオン濃度などを測定 することにより性状を確認した。

4. 非破壊検査用試験体の製作

アスファルト固型物を模擬した、20Lペール缶サイズのコールド試験体(以下、「模擬体」という。)を製作した。 5. 中性子水分計を用いた非破壊検査の適用可能性の調査・検討

リコンディショニング前の模擬体および試験体を対象に中性子水分計(中性子散乱法)を用いて水相の有無を 測定した。本水分計による水相の有無判定は困難であると考えられる。

結言

本年度は、アスファルト固型物をモデル化した模擬体を製作し、リコンディショニングする試験を実施した。処 理後の均質性確保の見通しを得るとともに、リコンディショニング成立のための課題を抽出した。

^{*1(}国研)日本原子力研究開発機構・バックエンド研究開発部門・原子炉廃止措置研究開発センター(ふげん)・技術開発部・開発実証課、*2(公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー開発グループ、*3(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究 室、*4(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ

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

1.1.2.3

クリアランス確認後の金属再利用に関する成立性の調査 Preliminary Study on Recycle of Waste Metals below Clearance Levels for Radionuclides 江原里泰^{*1}、大谷洋史^{*1}、忽那秀樹^{*1}、山田洋右^{*2}、久米恭^{*3} Noriyasu EBARA, Hiroshi OHTANI, Hideki KUTSUNA, Yosuke YAMADA and Kyo KUME

Abstract

We produced parking blocks preliminarily in order to promote recycling waste metals below clearance levels. 要約

クリアランス確認後の金属再利用を促進するため、「福井県内で製造し普及させていくために適した再利用製品」として、福井県をアピールする図柄をあしらった「車止め」の鋳造品を普通の金属スクラップを用いて製作するとともに、その成立性について調査した。

緒言

原子力施設の廃止措置では、施設の解体に伴って放射線管理区域内で発生した解体物のうち、「核原料物 質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」(原子炉等規制法)第61条の2に基づき国の認可・確認を 受けた、放射能汚染が極めて低く人の健康への影響がほとんどない解体金属は、クリアランス金属として搬出さ れる。このクリアランス金属は有価物であることから「循環型社会形成推進基本法」による基本理念や「資源の有 効な利用の促進に関する法律」、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」、「建設工事に係る資材の再資源化 等に関する法律」等により再利用を行うことが原則であり、再利用ができない場合、福井県では福井県産業廃棄 物等適正処理指導要綱等により県内処分となる。しかし、福井県の廃棄物処理計画にはクリアランス金属は含 まれておらず受入施設がない状況にある。このような状況を踏まえ、新型転換炉原型炉ふげんから近く搬出され るクリアランス金属の再利用を促進するための調査を実施した。

成果の概要

1. 再利用製品のデザイン

「福井県内で製造し普及させていくために適した再利用製品」としての車止めにあしらう、福井県をアピールする図柄を作成した。

2. 再利用製品の製作

再利用製品の製作図を作成し、これに基づいて鋳造模型を製作した。さらに普通の金属スクラップを用いて 車止め(材質:FC300)を製作した。

3. 再利用製品の設置場所検討

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の施設などの駐車場を調査し、再利用製品の設置場所の候補 及び設置台数を選定した。

4. 鋳造会社の検討

福井県内の鋳造会社において、将来、クリアランス金属を再利用して車止めを鋳造するための調査・検討を 実施した。

5. 県内リサイクル業者へのアンケート

県内のリサイクル業者を対象にクリアランス制度についてアンケート調査を実施した。

結言

新型転換炉原型炉ふげんから近く搬出されるクリアランス金属の再利用を促進するために、再利用製品の製造・設置などについて調査・検討した。

^{*1(}国研)日本原子力研究開発機構・バックエンド研究開発部門・原子炉廃止措置研究開発センター(ふげん)・計画管理課、*2(公財)若狭湾エネル ギー研究センター・研究開発部・エネルギー開発グループ、*3(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ 本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが(国研)日本原子力研究開発機構からの役務契約として実施したものである。
1.1.3. 放射線計測技術の開発

1.1.3.1

瓦礫等による放射線源出現に対する評価手法の検討 Study of Verification Method for New Radiation Source caused by Radioactive Rubbles at Nuclear Severe Accidents 久米恭*1、川崎郁夫*2、中村晶*2 Kyo KUME, Ikuo KAWASAKI and Akira NAKAMURA

Abstract

For radioactive rubbles exhibited outside at nuclear severe accidents, applying drones is an effective way to explore radiation sources. This research aims in simulating a spacial dose distribution caused by single radioactive rubble for this purpose.

要約

原子力災害で放射性の瓦礫が発生する場合には、ドローンにより放射線源を探査することが有効であると考えられる。この目的のため、本研究では単体の放射性瓦礫が発生した場合の空間線量分布を模擬した。

緒言

原子力災害に備えるため事象進展予測技術が開発されている¹⁾。また発電所構内(建屋外)において瓦礫等 による放射線源が出現する可能性があるため、上空からドローンにより放射線測定を実施する対策が進められ ている²⁾。ドローンで取得する測定データを活用することで地上での被ばく線量評価の実施が可能となり、事象 進展予測と比較することで正確な緊急時対応が可能となる。

本研究では、今年度、モンテカルロ計算の採用により、ガンマ線源として地上に落下した単体の瓦礫を模擬 し、測定位置における線量値を瓦礫からの距離の関数として表現することを目的とした。

方法·結果

本研究では、モンテカルロ計算により、ガンマ線源として地上に落下した単体の瓦礫を模擬し、測定位置における線量値を瓦礫からの距離の関数として表現した。

モンテカルロ計算コードとしては PHITS 3.0.2³を採用した。計算体系として、地表に原点を置き、原点から 200 m 以内のほぼ半球内を計算体系とした。計算体系のうち地表よりも上部は空気で満たされ、地表よりも下部 は土壌とした。瓦礫は上述のように単体とし、原点に配置した。瓦礫は立方体で土壌と同一の化学成分とし、放 射線源としては¹³⁷Cs が均等に瓦礫中に配置されているものとした。瓦礫の寸法は1mx1mx1mとした。線 源強度は可変とした。

線源強度を1 MBq/cm³としたとき(すなわち瓦礫全体の線源強度は1 TBq)の PHITS 計算出力を図1、2に 示す。図1は原点(瓦礫のある場所)を含む垂直断面における空間線量分布、図2は原点(瓦礫のある場所) に直交する高度方向の空間線量分布である。



*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、*2(株)原子力安全システム研究所。 本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが(株)原子力安全システム研究所と共同で実施したものである。 考察

図 1,2 により、ドローンにより計測した上空での線量値を瓦礫周囲での線量値に換算することが可能となる。 図 2 から、高度 Z[m]と線量値 D[・Sv/h]の相関は、指数関数的なものではなく、高度のべき乗によるものであ ると推定できる。このことから、次式を換算式とすることにした。

$$D = A Z^{-B} \tag{1}$$

ここで A は定数である。地上における線量値により A を決定することにし、残る B については K・二乗検定により決定することとした。その結果、A=5.893, B=2.534 とすれば良いことがわかった。この結果を用いて近似した結果を図 2 に示す。

今回の検討では、1 m 立方の単体の瓦礫、また放射性核種として¹³⁷Csのみを条件に入れた。今後、より実態に即した条件を計算することも必要である。

実際には、ドローンとの信号制御にこの換算式をどうやって盛り込むか、あるいは現行の商用ドローン制御端 末でのみ表示されている線量値をどのように外部で処理するか、などの問題もはらんでいる。これらについては 今後も検討を継続する必要がある。

結言

原子力事故の事象進展予測技術を用い、事故によって発生しうる放射性瓦礫等を上空からのドローンによる 計測値を評価することにより、より正確な緊急時対応が可能となる。

本研究では、モンテカルロ計算の採用により、地上に落下した単体の放射性瓦礫を線源として空間線量分布 を瓦礫からの距離の関数として表現することができた。今後は、より実態に即した条件での検討、ならびにドロー ンへの実装に向けた検討等の課題を解決すべきものと考えられる。

参考文献

- 1) 吉田至孝他、INSS JOURNAL、Vol. 21 2014 RV-II、223 (2014)
- 2) 日本原子力発電(株)ホームページ、http://www.japc.co.jp/emergency-support/index.html
- T. Satoet al., Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913–923 (2013)

1.1.3.2

ガンマ線分光によるセメント産出物の放射能測定 Radiation Measurement of Cement Materials using Germanium Gamma Ray Spectrometer 久米恭*1、水島慧*1、山東新子*1 Kyo KUME, Satoshi MIZUSHIMA and Shinko SANDO

Abstract

In order to establish a radiation measurement method of cement materials at the factory of Tsuruga Cement Co.Ltd. using a germanium gamma ray spectrometer, we are carrying out measurements of residual radiation contaminant of radioactive Cs isotopes in cement materials for past 7 years after the 2011 TEPCO Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. The data taken in 2017 were reported.

要約

敦賀セメント(株)のセメント工場からの産出物等についてのゲルマニウム検出器を用いた放射能計測法を確 立するため、平成23年の東電福島第一原発(1F)事故以降7年間にわたり放射性Csの残留放射能計測を行 っている。今回は平成29年度の計測状況について報告する。

緒言

教賀セメント(株)で産出されたセメントと副産物について、(公財)若狭湾エネルギー研究センター(WERC) の Ge ガンマ線分光装置による放射線計測を行った。セメント、クリンカーダスト(CD)などの計測を長期間行うこ とで、分離された放射性 Cs が CD に集積されることが明らかになった。CD はアルカリ金属ハロゲン化物が主体 であり、塩化物として放射性 Cs が集積するものと考えられる。平成 29 年度も計測を継続し、この傾向が確認さ れた。

クリンカーダスト	ガンマ線ス・	ペクトロメトリー [Bq/g]	測定時間	試料重量	Cl 濃度
採取日	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	[sec]	[g]	[%]
2017年4月17日	不検出(0.021 未満)	0.029 ± 0.006	1000	66.8	13.2
2017年5月15日	不検出(0.019 未満)	0.016 ± 0.005	1000	63.1	7.4
2017年6月12日	不検出(0.017 未満)	不検出(0.020 未満)	1000	64.6	10.0
2017年8月7日	不検出(0.022 未満)	不検出(0.018 未満)	1000	56.9	10.5
2017年9月11日	不検出(0.019 未満)	不検出(0.019 未満)	1000	68.0	9.1
2017年10月16日	不検出(0.024 未満)	不検出(0.019 未満)	1000	62.2	12.1
2017年11月13日	不検出(0.017 未満)	0.018 ± 0.005	1000	71.5	6.4
2017年12月11日	不検出(0.015 未満)	0.016 ± 0.005	1000	70.8	9.4
2018年2月19日	不検出(0.007 未満)	0.016 ± 0.004	1000	65.1	9.7
2018年3月12日	不検出(0.011 未満)	0.012 ± 0.003	1000	72.0	11.0

表1 平成29年度のクリンカーダスト採取日と計測値

方法結果考察等

平成 29 年度も敦賀セメント(株)の生産工程で得られた CD と普通ポルトランドセメントについて WERC の Ge ガンマ線分光装置でガンマ線分析を継続して実施した。計測結果を表 1 と表 2 に示す。この結果からは、普通 ポルトランドセメントに続いて CD においても放射性 Cs が検出限界以下程度になりつつあることがわかる。

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

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが敦賀セメント(株)と共同で実施したものである。

過年度の結果も総合すると、セメントとクリンカーは平成23年度から平成29年度まで検出限界以下である。 CD は平成23年度0.1 Bq/g程度¹⁾、平成24年度0.05-0.09 Bq/g程度²⁾、平成25年度から平成27年度ま で微減^{334/56)}、前年度から今年度までのデータでは検出限界以下が多く見られた。1F事故からの時間経過とと もに放射性Cs濃度が低下しているものと考えられる。

結言

1F 事故後7 年を経過して、セメント工場での生産物等の放射線レベルは継続して低下している。濃縮の性質がある CD も検出限界以下が多く見られた。

並通ポルトランドセンル制造日	ガンマ線ス・	測定時間	試料重量	
日通41/11/シトビハント設定日	^{134}Cs	¹³⁷ Cs	[sec]	[g]
2017年4月上旬(1~15日)	不検出(0.012 未満)	不検出(0.009 未満)	1000	126.6
2017年4月下旬(15~30日)	不検出(0.011 未満)	不検出(0.010 未満)	1000	117.4
2017年5月上旬(1~15日)	不検出(0.009 未満)	不検出(0.010 未満)	1000	119.4
2017年5月下旬(16~31日)	不検出(0.012 未満)	不検出(0.009 未満)	1000	112.8
2017年6月上旬(1~13日)	不検出(0.011 未満)	不検出(0.011 未満)	1000	115.3
2017年6月下旬(14~30日)	不検出(0.009 未満)	不検出(0.011 未満)	1000	114.2
2017年7月上旬(1~15日)	不検出(0.012 未満)	不検出(0.010 未満)	1000	114.6
2017年7月下旬(16~31日)	不検出(0.011 未満)	不検出(0.011 未満)	1000	114.0
2017年8月上旬(1~9日)	不検出(0.012 未満)	不検出(0.007 未満)	1000	109.7
2017年8月下旬(25~31日)	不検出(0.013 未満)	不検出(0.008 未満)	1000	122.4
2017年9月上旬(1~12日)	不検出(0.012 未満)	不検出(0.008 未満)	1000	110.9
2017年9月下旬(13~30日)	不検出(0.013 未満)	不検出(0.010 未満)	1000	111.7
2017年10月上旬(1~15日)	不検出(0.014 未満)	不検出(0.011 未満)	1000	112.9
2017年10月下旬(16~31日)	不検出(0.012 未満)	不検出(0.008 未満)	1000	112.8
2017年11月上旬(1~14日)	不検出(0.013 未満)	不検出(0.008 未満)	1000	111.8
2017年11月下旬(15~30日)	不検出(0.010 未満)	不検出(0.009 未満)	1000	132.1
2017年12月上旬(1~12日)	不検出(0.012 未満)	不検出(0.008 未満)	1000	128.1
2017年12月下旬(13~28日)	不検出(0.007 未満)	不検出(0.004 未満)	1000	129.1
2018年1月下旬(27~31日)	不検出(0.005 未満)	不検出(0.004 未満)	1000	120.3
2018年2月上旬(1~15日)	不検出(0.006 未満)	不検出(0.005 未満)	1000	117.3
2018年2月下旬(16~28日)	不検出(0.007 未満)	不検出(0.005 未満)	1000	121.3
2018年3月上旬(1~11日)	不検出(0.005 未満)	不検出(0.004 未満)	1000	121.8

表2 平成29年度の普通ポルトランドセメント製造日と計測値

参考文献

- 峰原英介、高田卓志、下河良、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報平成 23 年度、14、73 (2012)
- 峰原英介、高田卓志、下河良、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報平成 24 年度、15、82 (2013)
- 3) 峰原英介、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報平成25年度、16、68(2014)
- 4) 峰原英介、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報平成26年度、17、79(2015)
- 5) 峰原英介、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報平成 27 年度、18、 20-21 (2016)
- 6) 久米恭、水嶋慧、ガンマ線分光によるセメント産出物の放射能測定、(公財)若狭湾エネルギー研究センタ ー研究年報平成28年度、19、16-17(2017)

1.1.4. 未利用エネルギー利用技術開発

1.1.4.1

マグネシウムの酸化還元反応を活用した水素エネルギー循環サイクルの構築 Development of Hydrogen Energy Cycle System Using Redox Reaction of Magnesium 篠田佳彦^{*1}、山岸隆一郎^{*2}、遠藤伸之^{*3} Yoshihiko SHINODA, Ryuichiro YAMAGISHI and Nobuyuki ENDOU

Abstract

Hydrogen is a promising energy source to replace fossil fuels. However, social implementation of hydrogen energy has many problems. Therefore, the purpose of this project will be to solve the problems of using hydrogen energy by the concept of energy career. We began the feasibility study toward the development of the sustainable energy cycle system using redox reaction of magnesium. Then, we have studied smelting technology of magnesium oxide by solar heat and hydrogen production practice by reaction of water and magnesium.

要約

水素は化石燃料に代わる次世代エネルギー源として期待されているが、社会実装には課題も山積する。そこで、マグネシウムをエネルギーキャリアとして、その酸化還元反応を介在させることで課題を解消し、同時に持続可能なエネルギーサイクルの実現に向けた検討を開始した。太陽熱による酸化マグネシウムの還元と水とマグネシウムの反応による水素生成に関わる技術が、エネルギーサイクルの実現に向けた要技術となる。

緒言

戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)のテーマに『水素に関わる種々の課題の解決を目指したエネルギ ーキャリア技術開発』が組み込まれた¹⁾。マグネシウムもエネルギーキャリア担体候補で、水素利用に伴う課題を 解消する能力と共に持続利用可能なエネルギーシステムの構築を可能とする能力を備えている物質である²⁾。 マグネシウムをエネルギー資源として、水素エネルギー循環サイクル(以下、当該サイクル)を成立させるため

には、マグネシウムの還元技術が要となる。一般的に、マグネシウムは石炭(や電力)などのエネルギーを用いて、酸化マグネシウム(MgO)などマグネシウム化合物を原料として精錬(還元)することで得られる。

還元されたマグネシウムは酸化反応によって熱(エネルギー)を発生するので、エネルギー資源となる。利用の形態として、酸素と反応させて熱や電気を発生する直接燃焼と水と反応させて熱と水素を発生させ、その水素を利用して熱や電気を発生する(水素介在)間接燃焼に大別できる。両利用形態とも、マグネシウムを活用した後には水酸化マグネシウム(Mg(OH)2)が残存する。この Mg(OH)2を加熱して得られる MgO を再びマグネシウムに変換(還元)し、再度利用すればエネルギーの循環システムが構築できる。

すなわち、持続利用可能なエネルギー源による MgO の還元は、燃料や水素源としてのエネルギー資源の製造(人工燃料)に相当する。マグネシウムは安定な固体で、高圧水素気体や液化水素などに比して輸送や貯蔵が容易であるので、地域的偏在が課題ともなる持続利用可能エネルギー源を適地で使用可能とするシステムが可能となる。故に、繰り返し利用可能な人工燃料となる特性を活かして、地球規模の持続的エネルギー循環利用が可能となる。これが当該サイクルの社会展開における最終的なイメージである。

成果の概要

本事業では当該サイクル構想の具現化に要求される技術の開発や実証を目指す。なお、マグネシウムのエ ネルギー利用の観点においては、水素インフラの普及・整備を想定して水との反応による水素製造(間接利用) を扱う。

- ・マグネシウム還元再生技術開発と太陽炉の適用
- ・マグネシウムと水の反応による水素製造技術開発
- 2テーマを関連する研究機関や企業と共同しながら研究開発することで本事業を推進する。

^{*1(}公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー開発グループ、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・企画支援広報部・ 技術相談室、*3(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室

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

マグネシウム還元再生技術開発と太陽炉の適用

マグネシウム還元において工業的に主流な方法は珪素熱還元反応(ピジョン法)である。反応式は、 2MgO + 2CaO + Si[Fe] → 2Mg(g) + Ca₂SiO₂ + [Fe]

ここで、Si[Fe]は還元剤:フェロシリコンで、生産にはエネルギーを要する。1200 ℃程度の減圧下で反応が進展し、発生したマグネシウム蒸気を冷却回収することで反応を右側に進めることができる。反応後の残物は Ca2SiO2で反応系外へ排出・廃棄される。

太陽炉を活用して、珪素熱還元法による実証実験を行うために 図1に示す反応容器を設計、製作し、小型太陽炉に設置した。図 2に宮崎県日向市で実施した小型太陽炉での実験風景を示す。







N

図2 実験風景(日向市)

反応容器は2重の石英管 構造で、気密保持機能を担う 外側石英管では、試料の加 熱で脱する成分の付着を防 止する構造とし、太陽光を遮 蔽しないようにした。黒鉛るつ ぼの中に装荷した試料ペレッ ト(直径 Φ14、厚さ5 mm 程 度、反応式に基づき各物質 の粉末を混合)を先端に保持 する石英管(内側)は反応で 生じたマグネシウム蒸気を内 面低温部に付着させる機能を 持たせた。反応容器内は真 空ポンプで1Pa台に減圧 し、3時間程度の加熱実験を 実施した。試料付近の温度は

900℃から1000℃に達し、石英管(内側)の内壁中央部に付着物(図3上部写真参照)が生じた。

反応容器内部付着物の元素同定を電子プローブマイクロアナライザー(EPMA)で行った。測定は石英管(内側)を割断して実施した。図3下部:グラフに ZAF 法に基づいて特性 X線強度から各元素の濃度(atom%)を算出した結果を示す。るつぼ外部のマグネシウムと酸素の比率はほぼ1:1 で MgO の状態で付着している。 MgO は高融点物質であることから、試料中の MgO が還元後に付着したものが再酸化されたとみなすことができる。 中間部にマグネシウム比率が高い部位が存在する。付着物表面に生成した酸化被膜の厚さは評価していないが、当該部位は付着量が他部位より多く、酸化被膜内部にマグネシウム層が存在しているものと判断できる。

太陽炉による実証実験の基礎情報を得ることを目的とした、電気炉(赤外炉と縦型管状炉)を活用とした加熱 実験を同時に行った。赤外炉は試料が加熱されている状況を観測、記録できる。実証実験に用いた試料は、粉 末状態での反応性は低いが、加圧成型によって粉末界面の接触面積を増やすことで1000℃程度から反応が 起こり出し、1100℃で反応が活発化することを確認した。

さらに、液相レーザーアブレーションによる直接分解および MgO 電気分解による方法も継続検討していく。

マグネシウムと水の反応による水素製造技術開発

マグネシウムと水の反応による水素生成効率の向上と装置化をイメージした概念設計と実証評価を行ってい る。様々な方法が候補となるが、オンデマンドな水素生成・利用可能なシステム構築を目指す。本年度は、実験 室レベルの実験装置によって、高温水、過熱蒸気、酸、触媒を活用した水素製造方法を評価し、過熱蒸気によ る発生方法を第一候補として、酸を用いる方法を次点候補として選定した。

目標への到達に向けた活動(年次計画)

表1に両テーマの実績と今後の計画を示す。本事業の到達目標は、企業や研究機関による実用化段階に 移行できるだけの情報を確保し、実用化可能性を高めておくことである。

		実績		計画			
		H28 H29		Н30	H31	H32	
Mg還元再	再生技術開発と太陽炉の適用	実験環境	亁整備	実験環境維持			
			実証・開始	実証・改善			
	珪素熱還元		反応容器製作	実用化想定反応容	器		
~			Mg回収・検出	定量評価			
	炭素熱還元				適用性評価		
	去 对 店	敦 / 进	珪素熱還元反応特	性評価			
電气炉	01 7 F X-	空调	太陽炉実証評価デ	ータ	炭素熱還元反応特	生評価	
电 Xi M	管计后	救债	反応容器製作	反応残物回収	還元剤Si[Fe]生成		
		歪哺	Mg回収機構		炭素熱還元反応特	生評価	
	I			実用化検討		実用化概念設計	
Mgと水の反応による水素製造技術開発				製造規模設定			
			実験室レベル実験 過熱蒸気を選定	Mg供給形態設定 実用化水素発生装		置に必要な情報取	
				エネルギー低消費	(実験研究)		
				予備評価実験			

表1 目標への到達に向けた活動(年次計画)

結言

エネルギーキャリア担体物質としてマグネシウムに着目して、持続利用可能なエネルギー源である太陽熱を 用いた MgO のリサイク(還元)を実現させることで、当該サイクルの具現化(社会展開に向けた原理実証と可能 性評価)に取組んでいる。太陽炉によるマグネシウム還元は実証実験を開始し、技術的な成立性を確認した。マ グネシウムによる水素発生において、装置化を目指すには過熱蒸気を活用することが好ましいと判断した。

この構想の実現で、高圧水素気体や液化水素などで輸送・貯蔵する方法に比べてエネルギー資源を安定に 保持できる。そして、持続利用可能なエネルギー源による水素製造も可能となり、製造/輸送・貯蔵/利用の全 局面で有効的に機能するものとなる。

参考文献

1) 内閣府、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) エネルギーキャリア リーフレット (2016)

2) 小濱泰昭、NGO「キュレム」、大丈夫だよ! 心配ないから―マグネシウム社会の未来(2014)

バクテリアを用いた水素製造技術の導入調査 Research on Carbon-Free Hydrogen Production Using Bacteria 田中良和*1 Yoshikazu TANAKA

Abstract

Photoproduction of hydrogen by photosynthetic bacteria is one of the key technologies that produce carbonfree hydrogen. However, there are still a lot of challenges, for example, low growth rate and low hydrogen productivity. Therefore, we started the project with the aim of making the high hydrogen producing mutant lines of cyanobacteria using ion-beam breeding technology.

要約

光合成細菌のバイオプロセスを利用した水素生産はエネルギー密度が低い太陽光を有効に利用する技術として有望であるが、実用化にはまだ多くの課題がある。そこで光合成および窒素固定能を持つシアノバクテリアに着目し、イオンビーム育種技術を用いて高水素生産能をしめす菌株の作成を行うこととした。

緒言

日本は水素社会の実現を目指しているが、その生産過程において も二酸化炭素を排出しない水素には、再生エネルギーの利用、化石 燃料からの脱却など根本的な技術革新が必要となる。本事業では、 水素生産方法の多様化の一つとして、シアノバクテリアの水素生産機 能に着目し、イオンビーム育種技術を用いて水素生産能力を向上さ せたシアノバクテリア変異株の作成を目的とする。

成果の概要

本年度は水温が高くシアノバクテリアの繁殖が旺盛な夏期に、主に 福井県三方五湖周辺において試料採集を実施し、定法によってシア ノバクテリアの単離培養を行った。これらは BG110 培地を用いた培養 (25℃、1800 ルクス)で生育可能であった。16S rDNA の塩基配列を 確認したところ、新たに14種のシアノバクテリアを得ることが出来た。 その中の1つは、昨年採取した Anabena 属のシアノバクテリアと同種 であったが、これにイオンビーム照射を行って得られた変異株よりもへ テロシスト細胞の出現頻度が高いものであった(図1)。培養系を確立 した菌体に対するイオンビーム照射は群馬県高崎市の高崎量子応用 研究所にあるイオン照射研究施設 TIARA で実施した。現在、照射 後の試料の選抜作業と継代培養を繰り返し実施しているところであ る。シアノバクテリアの水素生産に直接関与する遺伝子としてはニトロ ゲナーゼとヒドロゲナーゼ遺伝子が知られているが、照射試料から各 遺伝子を PCR を用いて増幅した後、アジレントテクノロジー社の Agilent 2100 バイオアナライザ電気泳動システムを用いて DNA 断片 の大きさを調べ、変異体の検出を行うことを検討中である(図2)。

結言

今後は、変異導入操作後の菌株を小スケールで培養し、発生水素 量を直接モニタリングする方法を検討する。微生物を用いた水素生産

は、他の方法に比べて生産コストが高くなることは否めない。したがって、水素の生産だけでなく、増殖した菌体 そのものの有効利用法を考え、トータルで生産コストを下げる方法を検討していく。



図1 新しく採取したシアノバクテリア



M: DNA サイズマーカー、hup: ヒドロゲナーゼ、 nif: ニトロゲナーゼ

図2 バイオアナライザを用いた DNA 解析

^{*1(}公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室

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

1.1.4.3

太陽炉と太陽熱エネルギー利用研究 Research on Applications of Solar Thermal Energy by Solar Furnaces 篠田佳彦^{*1}、山岸隆一郎^{*2} Yoshihiko SHINODA and Ryuichiro YAMAGISHI

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

以来、太陽炉の新たな展開を模索し、無尽蔵の高温活用方策の充実を目指してきた。2016 年度には、JST/ JAXA による『「太陽系フロンティア開拓による人類の生存圏・活動領域拡大に向けたオープンイノベーション」に 関する研究提案』において「月土壌の水素還元システムの構築 ---低品位原料の工業的利用を目指して--」 の実施に至った。

さらに、「新エネルギー技術調査研究事業」(水素研究)のうちの「マグネシウムの酸化還元反応を活用した水 素エネルギー循環サイクルの構築」において、太陽炉を活用したマグネシウム還元法の開発を2017年度から 取り組んでいる。ここでは、マグネシウム製錬で主流となっている珪素熱還元法を適用した実証実験を開始して いる。詳細は、別稿「マグネシウムの酸化還元反応を活用した水素エネルギー循環サイクルの構築」に記す。

今後も太陽炉の新たな展開を模索し、フレネルレンズを用いた透過・屈折型の太陽炉の頑強性など利点を活 かすことで、これまでに蓄積したエネ研の独自かつ特徴的な成果を示し続けていく。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー開発グループ、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・企画支援広報部・ 技術相談室

1.2. 医療分野

1.2.1. 粒子線がん治療高度化のための生物応答解明研究

1.2.1.1

異種放射線の併用によるがん治療の高度化に向けた治療生物学的な検討 Therapeutic Biological Verifications for Advanced Treatment of Cancer by Combining Heterologous Radiation 前田宗利^{*1}、松本英樹^{*2}、前田未佳^{*1}、長谷川崇^{*1,*3}、水嶋慧^{*1}、山東新子^{*1}、久米恭^{*1} Munetoshi MAEDA, Hideki MATSUMOTO, Mika MAEDA, Takashi HASEGAWA, Satoshi MIZUSHIMA, Shinko SANDO and Kyo KUME

Abstract

Clinical trials of a new "Combined Concurrent Chemoradiotherapy" that combines general X-ray irradiations and proton beam irradiations which can deposit energy concentrated to the local tumor site have been started in Fukui Prefectural Hospital. We are pursuing various therapeutic biological verifications in anticipation of further advancement of this treatment method under cooperation rooted in Fukui area. 要約

福井県立病院において、一般的なX線治療と線量分布の良い陽子線治療を併用する新しい「混合化学放射線療法」の臨床研究が開始されている。我々は、地域に根差した連携の下、本治療法の更なる高度化を見据 えた様々な治療生物学的検証を進めている。

緒言

がん治療の高度化を図る方法の一つに、既存治療法の長所を組み合わせた集学的治療法の積極的な活用 が挙げられる。これまでの研究から、陽子線照射とX線照射の併用により、両者の単独照射の結果から予測さ れるよりも効率よく細胞死が誘導されることが見出された。本研究は、陽子線照射とX線照射の順番、線量比、 照射の間隔が細胞死の誘導に与える影響を解析し、併用照射による細胞死増大の最適化条件およびその分 子機構の解明を目指すものである。また、動物実験により異種放射線の併用が治療効果に与える影響を解析し、 混合放射線療法の更なる高度化に向けた基礎的なデータを蓄積して行く。本研究の推進を通じて、がん治療 の高度化のみならず生化学や分子生物学分野への波及効果が期待され、がんの集学的治療の実現に向けた 新規薬剤の開発にも資すると考えられる。

成果の概要

本研究では、故障中であった福井県若狭湾エネルギー研究センター(WERC)の加速器システムの代替として、量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所のAVFサイクロトロンを用いて陽子線照射実験を実施した。一方で、同機構は、WERCのX線照射装置と同種の装置を有しておらず、当初予定していたX線を併用する実験は実施できなかった。そこで、X線照射の代替として、X線と同種の光子放射線であるγ線を用いた照射実験を同機構のコバルト60ガンマ線照射施設・食品照射棟において実施した。ヒト胎児肺由来正常細胞(WI-38)を用い、それぞれの照射線量をそろえて(線量比=1:1)、陽子線を照射した6時間後にマ線を照射した場合の細胞致死効果について詳細な線量応答解析を実施した。その結果、陽子線とX線の合計線量が7.0 Gy以下の場合において「γ線照射後に陽子線を照射した場合」よりも有意に細胞致死効果が高いことが明らかとなった。

結語

本研究では、引き続き、併用照射における可変パラメーターである「線量比」および「照射の間隔」が細胞致 死効果に与える影響の検証を進める。併せて、照射条件と、DNA 損傷の量および質、その修復効率と細胞致 死効果の関係についても検証を進める必要がある。そこで、蛍光抗体法を用いて DNA 損傷修復関連タンパク 質を継時的に可視化解析し、併用照射条件と DNA 損傷の誘発量、重篤度、および修復効率との関係を明らか にして行く。また、動物レベルにおける治療効果の検証を念頭に置きつつ、遺伝子発現解析などを通じて、これ らの興味深い現象の分子機構についても検証を進めて行く予定である。

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

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

子宮頸がんに対する粒子線治療の有効性と治療効果予測に関する基礎的検討 Predictive Value of ¹⁸F-FDG and ¹⁸F-FLT Uptake in Cervical Cancer Treated with Charged Particle Irradiation.

清野泰*1、牧野顕*1、森哲也*1、岡沢秀彦*1、久米恭*2

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

Abstract

The reduction of ¹⁸F–FLT uptake preceded the change in cell proliferation ability at 26 hr after irradiation. Although further ¹⁸F–FLT–PET study using tumor bearing mice are needed, ¹⁸F–FLT is a promising tracer for monitoring the early response of tumor to X–ray irradiation in cervical cancer.

要約

子宮頸部腺がんの放射線治療においては、¹⁸F-FLTの集積量低下を指標に治療効果を予測できる可能性が示された。

緒言

子宮頸がんの中でも、腺がんといわれるタイプが増加傾向にあり問題となっている。腺がんは検診で見つかり 難い上に、放射線治療や化学療法が効きにくい性質を持っている。このため腺がんに対する有効な治療法の 開発が望まれている。これまでの共同研究成果では、粒子線治療は放射線治療抵抗性のがん細胞に対して従 来の放射線治療よりも効果があるということがわかっていることから、子宮頸がんの腺がん細胞に対する粒子線 治療の有効性検討を目的とした。加えて、治療戦略の決定や患者の Quality of life (QOL)の向上に重要なフ ァクターである治療開始早期における治療効果予測を PET 分子イメージングにより達成可能であるかを基礎実 験にて検証することを目的とした。

方法

子宮頸がん腺がん細胞株である HeLa 細胞に、0、0.1、0.5、1、5、10 Gy の X 線を照射した。照射1日から4 日後までの生細胞数を計測した。また、照射 26 時間あるいは 50 時間後に、PET 薬剤である¹⁸F-FDG および ¹⁸F-FLT を添加し、それぞれの薬剤の細胞への集積量を測定した。

結果·考察

細胞数計測実験において、X線照射24時間後から継続して細胞数が有意に減少した10Gy照射群、また48時間後から継続して有意に減少した5Gy照射群では、照射26時間後の¹⁸F-FLTの取込量に有意な減少がみられた。72時間後にのみ細胞数が有意に減少した1Gy照射群においては¹⁸F-FLTの取込量に有意な 減少ではなく増加がみられた。¹⁸F-FLTの取込量が減少した0.1Gy照射群において、細胞数に有意な変化は みられなかった。一方、¹⁸F-FLTの取込量が有意に増加した0.5、1Gy照射群において、細胞数に有意な変化は みられなかった。また、照射50時間後の¹⁸F-FLTの取込量に有意な変化はみられなかった。さらに、照射 26、50時間後の¹⁸F-FDGの取込量に有意な変化はみられなかった。以上の検討より、¹⁸F-FLTの集積量低 下を指標にX線照射の治療効果を予測できる可能性が示された。しかし、低線量照射(0.5と1Gy)で¹⁸F-FLTの集積が上昇する原因などを解明しなければ、有効な治療効果予測のツールとしては不十分である。

今回は X 線のみの検討であったが、さらに陽子線や炭素線などの治療効果の検討を行い、陽子線や炭素線 が子宮頸部腺がん細胞に対して有効な治療法であるかを検討する必要がある。

結言

子宮頸部腺がんの放射線治療においては、¹⁸F-FLTの集積量低下を指標に治療効果を予測できる可能性が示された。ただし、臨床現場で¹⁸F-FLTを治療効果に用いるためには、さらに詳細な、[18F]FLTの細胞内 集積の検討が必要である。

^{*&}lt;sup>1</sup>福井大学・高エネルギー医学研究センター、*²(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ 本研究は、公募型共同研究事業として(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井大学と共同で実施したものである。

陽子線頭頸部がん治療における放射線性口腔粘膜障害の発症動態および病態の解析 Analysis of Pathophysiological Kinetics and Symptoms of Oral Mucositis Developed during Radiotherapy for Head/Neck Cancer 松本英樹^{*1}、前田宗利^{*2}、前田未佳^{*2}、長谷川崇^{*2}、山東新子^{*2}、久米恭^{*2} Hideki MATSUMOTO, Munetoshi MAEDA, Mika MAEDA, Takashi HASEGAWA, Shinko SANDO and Kyo KUME

Abstract

The oral mucositis is developed in most of the head/neck cancer patients treated with radiotherapy as a side-effect. However, a medicine for oral mucosal diseases remains undeveloped until now. The patients developing oral mucosal disease is treated with symptomatic treatment using a mouthwash and analgesics and the radiotherapy is interrupted in the patients with worsening symptoms. This project was performed to elucidate pathophysiological kinetics and symptoms of oral mucositis developed during radiotherapy for head/neck cancer.

要約

頭頸部がんに対する放射線治療において、ほぼ全ての患者に副作用として発症するのが放射線性ロ腔粘 膜障害である。しかしながら、放射線性ロ腔粘膜障害に対する予防薬/治療薬は存在せず、発症後に含嗽によ る口腔ケア、ステロイド軟膏塗布による粘膜保護、鎮痛消炎剤による痛みの緩和といった対症療法によって対処 されているのみである。そこで放射線性ロ腔粘膜障害の発症動態および病態を明らかにするために、正常マウ スへのX線照射により口腔周辺の正常組織反応の動態メカニズムを放射線生物学的、組織化学的、細胞生物 学的および分子生物学的に明らかにすることを目的として本研究を実施した。

緒言

これまでの研究において陽子線に対する正常組織反応の詳細な解析を実施し、陽子線がん治療における正常組織の低線量被ばくの安全性担保に資する科学的エビデンスを蓄積してきた。本研究では、陽子線頭頸部がん治療の際に発症する放射線性ロ腔粘膜障害の発症動態および病態を明らかにするための対照データとして、頭頸部(顎関節より前方部)をX線照射した正常マウスにおける同障害の発症動態および病態を解析した。

成果の概要

- (1) マウス頭頸部へのX線(20 Gy)照射後の口腔粘膜障害の病態評価:X線照射後7日目から顕著な体重減少 が認められ、20日目以降に回復した。この体重減少に伴い、口腔粘膜障害の発症が認められ、照射後12 ~16日目で症状が憎悪し、その後回復した。照射後14日目では舌の粘膜上皮の剥離および浮腫した舌横 紋筋への炎症細胞の浸潤が認められた。
- (2) 放射線性口腔粘膜障害の細胞生物/分子生物学的解析:今後予定している陽子線照射実験の対照データとして、X線照射後14日目に摘出した舌において、①TUNEL 染色法によるアポトーシス誘導動態の解析、 ②ウェスタンブロット法による炎症性サイトカインの誘導動態の解析、③Agilent Expression Array (DNA マイクロアレイ)を用いた網羅的遺伝子発現解析を実施した。
- (3) 個体識別ツールとしてのマイクロチップの導入:多数のマウスを飼育する際の個体識別ツールとして大腿部 皮下に装着した Trovan 社製マイクロチップ (ID-162B/1.4/R)の有効性を確認した。

結語

頭頸部がんに対する放射線治療を想定して、マウスの頭頸部にX線を局所照射し、口腔粘膜障害の発症動態を解析した。摂餌・飲水困難による体重減少および口腔粘膜障害の病態から、照射後7日目より口腔粘膜障害を発症することが明らかとなった。また症状のピークは照射後12~14日目で、舌粘膜上皮が完全に剥離して結合組織が露出し、舌横紋筋の浮腫も認められた。粘膜上皮の剥離は粘膜上皮幹細胞の死滅による粘膜再生能の欠如によると考えられ、舌横紋筋の浮腫は炎症性サイトカインの発現誘導によるマクロファージの浸潤によるものと考えられる。

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

本研究は、公募型共同研究事業として(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井大学と共同で実施したものである。

細胞の放射線感受性を決定する情報伝達機構の解明 Analysis of the Signal Transduction Mechanism Deciding Cellular Radiosensitivity 冨田雅典^{*1}、前田宗利^{*2} Masanori TOMITA and Munetoshi MAEDA

Abstract

Low-energy soft X-ray microbeams have sufficiently short range of secondary electrons in the irradiated cells, therefore the responses of molecules and cells corresponding to the irradiated regions within the cells can be clearly evaluated. We have been studying the relationship between the irradiation domain and the molecular and cellular responses by using soft X-ray microbeams.

要約

低エネルギーの軟 X 線マイクロビームは、照射した細胞内での 2 次電子の飛程が十分に短いため、細胞内の照射領域に応じた分子や細胞の応答を明確に評価することができる。我々は、軟 X 線マイクロビームを用いて細胞局所を照射することにより、照射部位と細胞応答および細胞内の分子応答との関係について解析を進めている。

緒言

これまでの研究において、X線マイクロビームによって細胞の局所を照射した場合、その照射領域に依存して細胞の放射線感受性が異なる事を明らかにしている。本研究では、我々が細胞核ー細胞質間の情報伝達に 関与する重要因子として特定した ATM (ataxia-telangiectasia mutated)タンパク質の役割をより明確にするため、 ATM に依存して活性化する DNA 修復タンパク質の細胞内局在変化を検討した。

成果の概要

免疫抗体染色が容易であるヒト子宮頸がん HeLa 細胞を用いて、活性化型リン酸化 ATM (ATM pS1981)とATM の活性化により DNA 損傷部位に集 積してフォーカスを形成する NBS1 タンパク質の細 胞内局在を、蛍光抗体染色により観察した。本実験 には、(一財)電力中央研究所の実験室型マイクロビ ーム X 線照射システム ¹⁾を用いた。

このシステムでは 1.49 keV のアルミニウム K 殻特 性 X 線を、フレネルゾーンプレートを用いて収束させ た細胞核よりもはるかに小さい直径約 5 µ m 以下の 軟 X 線マイクロビームを、1 箇所ごとに線量を変えて 標的照射することが可能である。

HeLa 細胞を細胞接着因子である fibronectin で表面をコーティングした厚さ3µmのポリプロピレン膜から成る照射ディッシュ上に播種して一晩培養した。細胞核に1~60 Gy のマイクロビームを照射し、30 分後に固定して蛍光抗体染色を行なった結果、1 Gy では NBS1、活性化型リン酸化 ATM 共に照射部位での集積は認められなかったが、5 Gy 以上になると照射部位に集積して共局在することが明らかになった(図1)。この結果は、高エネルギー加速器研究機構の放射光 X線マイクロビーム照射装置を用いてヒト



図 1 軟 X 線マイクロビーム照射 30 分後の HeLa 細胞における NBS1、リン酸化 ATM (ATM pS1981)の細胞核内局在。バーの長さ は 20 µ m。

- *1(一財)電力中央研究所・原子力技術研究所・放射線安全研究センター、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ
- 本研究は、(一財)電力中央研究所と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

正常線維芽細胞 WI-38 の細胞核のみを照射し、 DNA 損傷のマーカーであるγ-H2AX(リン酸化ヒスト ンH2AX)の照射部位への集積を観察した際に見出 した結果を裏付けるものである。

放射線照射によって生じた DNA 損傷により活性 化した ATM は、DNA 損傷修復経路の一つである 相同組換え修復を活性化することが知られている ため²⁾、次に相同組換え修復の指標の一つである Rad51の照射部位への集積を観察した。

これまでの実験から、「細胞核に与える線量をそろえて」X線マイクロビームで照射すると、細胞核のみを照射した場合に比べて細胞全体を照射した場合には放射線感受性が減弱されることを明らかにしており、その原因として細胞質への照射が無い場合、細胞質から細胞核へのATMの移行(nucleo-shuttling)が起こらず、低い線量域においてDNA 損傷修復機構が誘導されていない可能性が示唆されている。

本実験では、ヒト正常線維芽細胞 WI-38 を用い、 照射ディッシュ上に播種して一晩培養した後、細胞 核、細胞質の位置を正確に識別するために

CellTracker Orange CMRA を用いて蛍光染色を行った。各細胞に軟 X線マイクロビーム 2 Gy を細胞核内の1ヶ所のみ、もしくは細胞核内1ヶ所と細胞質内2ヶ所の計3ヶ所に標的照射した。照射2時間後に細胞を固定し、蛍光抗体染色を行った(図2)。

DAPI (細胞核)
NBS1

Image: Dapid (細胞核)
Image: Dapid (lambda dapid)

Image: Dapid (lambda dapid)
<td

図 2 軟 X 線マイクロビーム照射 2 時間後の WI-38 細胞における NBS1、Rad51 の細胞核 内局在。N は細胞核内 1 か所のみ、N+C は 細胞核内 1 か所と細胞質 2 か所の計 3 か所 を照射した。照射線量は 2 Gy。バーの長さは 50 µ m。

照射システムに組み込まれている共焦点レーザー顕微鏡を用いて観察した結果、細胞核のみを照射した細胞(N)と比較して、細胞核と細胞質を照射した細胞(N+C)では、NBS1、Rad51の照射部位への集積がより明確 となることを見出した。また、10 Gyの高線量を同様に照射した場合には、照射部位への集積に差がないことも 確認した。

以上の結果から、照射線量が少なくとも2Gy以下の場合には、細胞核への照射線量は同じであるにもかかわらず、細胞質への照射の有無によって相同組換え修復の活性化が異なることが示唆されたことから、細胞核に加えて細胞質を照射することによって生じるATMの核内移行が、細胞核内におけるATMを介したシグナル伝達機構の活性化に重要な役割を果たしていると考えられる。

結言

細胞核に加えて細胞質を放射線照射することによって開始される ATM を介した細胞核ー細胞質間の情報 伝達は、照射細胞の DNA 損傷修復や放射線感受性のみならず、ATM を介した細胞間情報伝達因子の生成 や放出を司るメカニズム 3 も制御あるいは修飾していることが考えられる。今後の更なる研究の推進により、細胞 質を起点とした細胞内および細胞間情報伝達機構の詳細を明らかにして行く。

参考文献

- M. Tomita, K. Kobayashi, M. Maeda, Microbeam studies of soft X-ray induced bystander cell killing using microbeam X-ray cell irradiation system at CRIEPI. J. Radiat. Res., 53, 3, 482-488 (2012)
- M. Tomita, Involvement of DNA-PK and ATM in radiation- and heat-induced DNA damage recognition and apoptotic cell death. J. Radiat. Res., 51, 5, 493-501 (2010)
- 3) M. Tomita, M. Maeda, Mechanisms and biological importance of photon-induced bystander responses: do they have an impact on low-dose radiation responses. J. Radiat. Res., 56, 2, 205-219 (2015)

Silicon-on-Insulator Microdosimeter を用いた粒子線場における脳壊死形成に関するマイクロドジメトリ Microdosimetry for Formation of Brain Radiation Necrosis in Particle Irradiation Field using Silicon-on-Insulator Microdosimeter

櫻井良憲^{*1}、近藤夏子^{*2}、高田卓志^{*1}、呼尚徳^{*3}、久米恭^{*4}、前田宗利^{*4}、伊東富由美^{*4} Yoshinori SAKURAI, Natsuko KONDO, Takushi TAKATA, Naonori KO, Kyo KUME, Munetoshi MAEADA and Fuyumi ITO

陽子線、ヘリウム線、中性子線等の異なった粒子線照射により形成される脳壊死に伴い生じる血管内皮、神経・グリア細胞などに対する生物学的効果について、silicon-on-insulator microdosimeter (SIM)を用いたマイクロドシメトリにより物理的な視点からのアプローチを試みている¹⁾。

SIM への中性子照射に関するシミュレーション解析結果から、中性子線に対するマイクロドジメトリの可能性が 確認された。パイロット的に行った京都大学研究炉(KUR)におけるマウスへの中性子照射実験では、投与線量 が低かったため、MRI 画像上の明確な変化は見ることができなかった。脳への集中度をより高めた、より高線量 の中性子照射を行う必要があることが示唆された。これまでに作成した脳壊死モデルについて²⁰、MRI 画像や 染色病理像の解析だけでなく、液体クロマトグラフィー質量分析等による解析も行った。これらの解析結果から、 慢性期に神経細胞やアストロサイトからのリゾホスファチジルコリン放出、ミクログリアの活性化が続いていること、 等が推測された。

引き続き、KURを用いて中性子に関する脳壊死形成に関するマイクロドシメトリ研究を進めるとともに、若狭湾 エネルギー研究センターの加速器を利用して陽子線等の荷電粒子線に関する研究も進める予定である。

参考文献 1) L. T. Tran et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 62, 504 (2015).

2) N. Kondo et al., Appl. Radiat. Isot., 106, 242 (2015).

*1京都大学・原子炉実験所・放射線生命科学研究部門、*2京都大学・原子炉実験所・粒子線腫瘍学研究センター、*3京都大学大学院・工学研究 科・原子核工学専攻、*4(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ

本研究は、公募型共同研究事業として(公財)若狭湾エネルギー研究センターが京都大学と共同で実施したものである。

1.2.2. 粒子線照射技術の高度化研究

1.2.2.1

陽子線オンライン線量分布測定システムの開発 Development of an Online Dose Distribution System 久米恭^{*1}、伊東富由美^{*1}、前田宗利^{*1}、長谷川崇^{*1}、山東新子^{*1}、水嶋慧^{*1}、 佐々木誠^{*2}、前田嘉一^{*2} Kyo KUME, Fuyumi ITO, Munetoshi MAEDA, Takashi HASEGAWA, Shinko SANDO, Satoshi MIZUSHIMA, Makoto SASAKI and Yoshikazu MAEDA

Abstract

Wakasa Wan Energy Research Center conducted R&D on the online 2–D dose distribution visualization system to create a prototype of a <u>Radiation Dose Distribution visualization system</u>, RDD. This article describes the present status of RDD.

要約

若狭湾エネルギー研究センター(WERC)は、オンライン2次元線量分布可視化システムの研究開発を行い、 放射線線量分布可視化システム(RDDビジュアライゼーションシステム;RDD)の試作機を完成させた。本稿で は RDD 開発の概要と現状について述べる。

緒言

粒子線および X 線治療における線量分布検証では、構造が複雑で長時間の計測を必要とする装置が用いられている。このため、簡易に操作可能で効率的に線量分を計測できる新しい装置の需要があると考えられる。 WERC では、蛍光板と安価な光学機器を組み合わせた新しいオンライン2次元線量分布可視化技術を開発し、線量分布可視化システム(RDD)の試作機を作製した。

装置·方法等

RDD は、シンチレーションスクリーン(蛍光板)を用いて画 像処理をおこなうシステムである。 蛍光板として DRZ-STD (三菱ケミカル)を使用した。この蛍光板を制御計算機(HP, EliteBook 820 G3)に接続した安価な Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)カメラ(acA1300-30uc、 BASLER)により動画撮影するシステムを構築した。なおレン ズには FL-HC6Z1218-VG(リコー)を採用した。このシステ ムにより、イントラネットを介した照射中の観察を実現するとと もに、動画記録と事後の解析も可能としている。動画撮影お よび記録には、ScopeView 3.0(アズワン)を使用した。また、 事後の画像解析には、C#6.0 言語(Microsoft)を用いて自 作した解析ソフトウエアを用いた。このソフトウエアでは、照 射中に記録した蛍光の動画を照射終了後にフレームごとに 加算することで、2次元蛍光(線量)分布、ならびに直交座 標の原点を通る断面における1次元蛍光(線量)分布を表 示可能としている。システム全景を図1に示した。本システム では、制御計算機のオペレーティングシステム

(Windows10Professional)が有する固有機能のリモートデス



図 1 RDD 試作機

クトップを用いることで、イントラネット上の他の計算機からの操作が可能である。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、*2福井県立病院陽子線がん治療センター 本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが文部科学省地域イノベーション戦略支援プログラム「健やかな少子高齢化をリードする北陸ラ イフサイエンスクラスターの形成」事業の一環として実施したものである。また本研究の一部は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県 立病院と共同で実施したものである。本研究は、科研費15K19215の助成を受けた。 RDD 試作機の開発に引き続き、WERC、福井県立病院陽子線がん治療センター、量子科学技術研究開発 機構・放射線医学総合研究所(NIRS)の3箇所の陽子線施設において本機を試用し、問題点を摘出した。福井 県立病院ではブロードビーム照射法と積層照射法、WERCとNIRS ではブロードビーム照射法により、それぞれ 検証をおこなった。

結果·考察

上記の3施設において、RDD 試作機を用いて問題なく陽子線の線量分布を取得することができた。得られた画像を図2と3に示す。現在、取得したデータの詳細な解析をおこなっている。

また、医療現場における検証試験では、本機の動 作環境等について更なる改善を図る必要性が示唆さ れた。蛍光板の重量は数グラム程度と非常に軽く、治 療室で設置する場所を選ばない。その反面、CMOS カメラの設置位置については、医療用照射機器との 干渉を考慮しなければならない。今後は、システム改 良により課題を解決していく必要がある。

さらに、製品化を視野に入れ、システム紹介用のパ ンフレット(図4)を作成するとともに、関連企業へのマ ーケティング調査や国際学会等での展示もおこなっ た。

結言

オンライン2次元線量分布可視化システムを開発 し、線量分布可視化システムの試作機を作製した。同 機の性能実証試験を実施するとともに、将来、市場に 投入するために必要な改良点についても課題を摘出 した。今後は、医療現場への実装を考慮して試作機 の改良を進めていく予定である。



図 2 WERC での実験で取得したシステム画面 左上は動画、右上は累積蛍光(線量)分布、 左下は蛍光の時間分布を示す



図 3 福井県立病院での実験で取得したデータ



図 4 システム紹介用のパンフレット

1.2.2.2

PVA-KI ゲル線量計を用いた線量評価技術研究 Study of Dose Evaluation Technology using PVA-KI Gel Dosimeter 砂川武義*1、Glenn HARVEL *2、青木祐太郎*1、畑下昌範*3、久米恭*4、佐倉俊治*5 Takeyoshi SUNAGAWA, Glenn HARVEL, Yutaro AOKI, Masanori HATASHITA, Kyo KUME and Toshiharu SAKURA

放射線を使用したがん治療において、放射線の可視化は正確な線量分布の評価のために必要不可欠な技術である。本研究グループは、これまでに低コストで作製可能な PVA-KI ゲル線量計を開発してきている¹⁾。本研究では、PVA-KI ゲル線量計に特化した光源とカメラを組み合わせた測定システムを開発し、本ゲルへの X線照射による吸収線量測定を試みた。本ゲルは吸光度測定用のディスポセルに入れて照射を行った。X線照射の条件は、管電圧:150kV、管電流:20mA、フィルタ:Al 0.5mm + Cu 0.1mm、線量率:2Gy/min である。2Gy ずつ照射し、その都度紫外可視分光光度計による吸光度測定と本研究で製作した測定システムで色の測定を行った。その後、本研究で作成したゲル解析ソフトを用いて、画像の RGB 解析を行った。RGB 解析した結果、R(赤)の値は吸収線量の増大と共に増加するが、線形性を示さなかった。G(緑)の値は、2Gy で極大を示し、吸収線量の増大と共に減少する傾向を示した。B(青)の値は吸収線量の増大と共に減少し、線形性を示した。B の値が線形性を示す理由を検討するために、PVA-KI ゲル線量計の吸光度測定を行った。吸光度測定した結果、PVA-KI ゲルの吸光度は、490nm 付近に極大を示し、吸収線量の増大と共に比例して増加する傾向を示した。また、測定装置に使用した光源の発光スペクトルは、490nm に極大を持ち、本波長に極大を持つ光の色は青色に相当する為、RGB 値の中で B の値が線形的に減少したと考える。

参考文献 1)T. Sunagawa et al.: Memoirs of Fukui University of Technology, 47, 105-110 (2017).

*1福井工業大学工学部原子力技術応用工学科 *2オンタリオ工科大学、*3(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究 室、*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、*5(株)NUCLEAR TECHNOLOGY 本研究は、福井工業大学、(公財)若狭湾エネルギー研究センター、(株)NUCLEAR TECHNOLOGY の共同研究として実施したものである。 1.3. 農業·生物分野

1.3.1. 植物・菌類のイオンビーム育種研究

1.3.1.1

DNA 修復機構を利用した変異誘発促進技術の開発

- KU70, RAD54 欠損変異体の生存率に対する X 線照射の影響 -

Development of a Method for Enhancing Mutation Rate by Utilizing DNA Damage Response

- The Effects of X-ray Irradiation on the Survival of Arabidopsis Seedlings Lacking KU70 or RAD54 -

髙城啓一*1、畑下昌範*1、石井公太郎*2、市田裕之*2、阿部知子*2

Keiichi TAKAGI, Masanori HATASHITA, Kotaro ISHII, Hiroyuki ICHIDA, and Tomoko ABE

Abstract

The effects of X-ray irradiation on Arabidopsis seedlings which lack a function of KU70 or RAD54 was examined.

要約

DNA 修復因子 KU70、および RAD54 の機能を欠損したシロイヌナズナ変異体幼苗の生存率に対する X 線 照射の影響を調べた。

緒言

イオンビームは、これまでに無い突然変異原として着目されているが、さらに高い突然変異体取得率を得ることや、変異の種類やサイズをより正確に制御することが求められている。我々は、DNA 修復因子に干渉する薬剤を用いることで、これらの技術課題を解決することを試みている。この目的を達するためには、まず複数あるDNA 修復経路のどれに干渉することが有効かを知らねばならない。また、薬剤が正確に作用を及ぼしているかを評価するために、目的とする修復因子の機能が損なわれた場合に起こる現象を把握する必要がある。これらの目的からまずDNA 二本鎖切断(DSB)の2 つの主要な修復経路、正則的非相同末端結合(canonical non-homologous end-joining, C-NHEJ)、および相同組換え(homologous recombination, HR)に関し、それぞれの構成因子 KU70、および RAD54 の機能欠損変異体を作製し、これに対する X 線照射の効果を、種々の線量で X 線を照射した幼苗の生存を指標として評価した。

材料と方法

シロイヌナズナの KU70 の機能欠損変異体として、SALK_123114 株を(以下 KU70 -/-と表記)、RAD54 の機 能欠損変異体として SALK_038057 株を(以下 RAD54 -/-と表記)、それぞれ The European Arabidopsis Stock Center より入手し、目的の遺伝子のホモ変異体であることを確認した上で自殖により種子を得て実験に用い た。野生型として、Arabidopsis thaliana のエコタイプ Columbia を用いた。

これらの種子は、2% スクロース、0.3% ゲルゼンを含む 1/2 MS 培地上に無菌的に播種し、播種 4 日目の幼 苗に X 線照射装置(MBR-1520R-3、日立メディコ)を用いて X 線(実効エネルギー 33 keV、線量率 4.3 Gy/min)を 50 Gy、100 Gy、および 200 Gy 照射した。

照射後の幼苗はそれぞれの変異体、線量区ごとに25個体ずつ同じ組成の培地で栽培を継続し、播種25日 目、判断が困難なものについては播種47日目で生存状況を判断した。

結果と考察

図 1、および図 2 に示したように、野生型のシロイヌナズナの生存率は、100 Gy までほぼ低下せず、200 Gy で 60%まで低下した。一方 KU70 -/-では、100 Gy で生存率が 60%まで低下し、200 Gy では生存個体が見られ なかった。RAD54 -/-では、線量の増加に伴う生存率変化は、野生型とほぼ同様の経過をたどった。

^{*1(}公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、*2(国研)理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・イオン育種研 究開発室

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

以上の結果から、KU70の機能欠損はシロイヌナズナ幼苗のX線感受性を増加させるのに対して、RAD54の 機能欠損は生存率に対するX線感受性にほとんど影響を及ぼさないことを示している。RAD54はHRに必要 な修復因子の一つであり、HRはC-NHEJと比較して正確な修復を行うことから、KU70の機能欠損を欠損させ ると修復が正確なHRが主導となる一方、RAD54の機能を欠損させた場合、修復がC-NHEJが主導となるた め、RAD54の機能を欠損させた場合の方が、X線感受性が高まることが予想されたが、KU70の機能欠損はX 線感受性を顕著に増大させる一方で、RAD54の機能を欠損したシロイヌナズナの吸水種子にガンマ線を照射し た場合、野生型に比べて本葉の数が有意に減少したが、差は僅かであった¹⁾。HRの構成因子の機能を欠損さ せてもDNA 二本鎖切断損傷に対する感受性が野生型からあまり変化しないことは、同じくHRの構成因子であ る RAD51の機能を欠損させた変異体においても報告されている²⁾。このような結果となった原因に関しては、シ ロイヌナズナの茎頂や根端の分裂組織において、構成細胞の多くが、HRが機能しない G1 期にあるため RAD54の欠損がほとんど影響しない可能性や、新しい組織を形成する茎頂や根端では、HRがDSBに対する 有効な修復形式として機能していないのではないかという可能性が考えられる。



図 1. 播種 25 日目(照射 21 日目)の幼苗生育状況 (Bar=30 mm)

図 2. 野生型、および変異体の生存曲線

結言

今後は、KU70 -/-や RAD54 -/- における放射線照射後の DNA 損傷マーカー変動や、DNA 合成を行う細胞の変動などの、照射初期応答を調べるとともに、これらの変異体におけるイオンビーム照射後の突然変異の頻度や種類を調査し、C-NHEJ や HR の機能を止めることが、突然変異の頻度や種類に与える影響を調べる。 また、他の修復経路についても機能欠損変異体を作製し、同様の実験を行う予定である。

参考文献

- 1) K. Osakabe et al., Plant J., 48, 827 (2006)
- 2) U. Markmann-Mulisch et al., Plant Cell, 19, 3080 (2007)

イオンビーム利用技術研究開発(品種改良)

- 酵母のセルレニン耐性変異取得率に対する選抜開始時期の影響 -

Influence of the Initiation Timing of the Selection on Efficiency for Obtaining Cerulenin-Resistant Yeasts

高城啓一*1

Keiichi TAKAGI

Abstract

In order to obtain more selecting cerulenin-resistant mutants of Saccharomyces cerevisiae by means of the irradiation of ionizing radiations, it was better to start selection after the cells restarting proliferation than to start just after the irradiation.

要約

酵母で放射線照射によるセルレニン耐性変異の選抜を行う場合、照射直後から選抜を開始するよりも、細胞 増殖が回復してから選抜を行う方が、変異体取得効率が良いことを示す結果を得た。

緒言

一般に酵母で放射線照射による突然変異体選抜を行う場合、照射直後から抗菌物質等による選抜を開始する。しかし、照射直後では照射よって生じた DNA 損傷の回復に、選抜操作が影響して変異体取得効率を低下させている可能性がある。そこで本報告では、酵母の香気成分高生産性株選抜等に使用される抗菌剤セルレニン耐性を指標に、照射直後、DNA 修復完了後、および細胞増殖再開後に選抜を開始し、変異体取得効率の比較を行った。その結果、細胞増殖再開後に選抜を開始した方がより多くのセルレニン耐性株を得ることができたので報告する。

材料と方法

実験材料には実験用半数体酵母 YPH499 を用いた。なるべく実際のイオンビーム照射を用いた選抜作業の 状況に近づけるため、液体培地(YPDA)で増殖させ、対数増殖期にある細胞を、一旦メンブレンフィルター (Dulapore membrane filter、 φ 25 mm)に付着させ、4℃で1昼夜おいた後、照射を行い、照射後に再び4℃で一 昼夜おいた後、菌体を再懸濁、接種するという手順を踏んだ。X線照射には、X線照射装置(MBR-1520R-3、 日立メディコ)を用い 500 Gy の X線(実効エネルギー33 keV)を照射した。

細胞回復のための前培養を行わずに選抜を開始する場合(照射直後からの選抜に相当)、20μMのセルレニンを添加した培地に、DNA修復終了、あるいは細胞増殖再開まで回復期間をおいた後選抜を開始する場合は、セルレニンを含まない培地にメンブレンフィルター(Hybond N+、φ82 mm)を置き、この上に2.0x10⁷個の照射菌体を接種した。DNA修復完了まで回復期間を置く場合は、3時間培養を行った後、細胞増殖再開まで回復期間を置く場合は6時間、セルレニンを含まない培地上で培養を行った後、メンブレンフィルターを、セルレニンを含む培地上に移動させた。セルレニンを含まない培地上での回復期間は、抗γH2A抗体やDNA量のフローサイトメトリーの結果から決定した(データは示さず)。また、メンブレンフィルター上で培養を行い、メンブレンフィルターごと細胞を移動させるのは、前培養期間中に増殖した変異酵母が拡散して見かけ上の耐性変異コロニー数が増えるのを防ぐためである。

培養中の酵母は、培養2日目に、メンブレンフィルターごと新しいセルレニン含有培地上に移動させ、培養4 日目まで培養して耐性コロニー数をカウントした。途中でメンブレンフィルターを移動させるのは、同一培地上で 培養を継続した場合、セルレニンの不活性化により、非耐性菌の増殖が顕在化するためである(データは示さ ず)。

結果と考察

図1に、培養4日目にメンブレンフィルター上に形成されたセルレニン耐性コロニーの画像を示した。非照射のメンブレン上では耐性コロニーは全く見られないが、照射を行った細胞を接種したメンブレンフィルター上で

^{*1(}公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室

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

は、複数のコロニーが形成されていることがわかる。図2に培養2日目、培養3日目、培養4日目におけるそ れぞれの実験群でのセルレニン耐性コロニー数を示した。セルレニン耐性コロニーは、培養2日目に目視可能 となった。前培養期間を置かずに選抜を開始したものと比較すると、6時間前培養を行ったものはセルレニン耐 性コロニー数が多いことが、どの培養日数においても明らかであった。この結果は細胞増殖が回復するまで回 復期間を置いた方が、変異体取得効率が高いことを示している。セルレニンは脂肪酸合成に関わる阻害剤であ る。照射による DNA 損傷のストレスに、脂肪酸合成阻害のストレスが重なるため、全体的な生存率が下がり、本 来耐性変異を生じるはずであった細胞の一部が、修復を完遂できずに変異が固定する前に死ぬことが原因とし て推定される。細胞増殖が再開した状態では、セルレニン耐性変異をもたらすような DNA 損傷は、修復により 変異として固定されているため耐性コロニー数が増加したものと思われる。



図 1. 培養 4 日目のメンブレンフィルター上のセルレ ニン耐性コロニー

10.00 対照 翌日接種直後 翌日接種3時間後 7.50 7.50 5.00 2.50 0.00 指養2日目 <t

図 2. 培養日数による耐性コロニー数の変化(対照群は、 コロニーが形成されなかったためカラムが表示されていない、Bar=S.D.)

結言

以上の結果より、少なくともセルレニン耐性変異に関する限り、細胞増殖が再開するまで回復期間を置いてから選抜を開始したほうが、変異体取得効率が高くなることがわかった。今後はこの結果を酵母のイオンビーム育種を行う際に活用する。

真菌類を用いた新規免疫賦活剤の開発 Development of Novel Immunostimulator with Use of Fungi 畑下昌範^{*1}、高城啓一^{*1}、市田裕之^{*2}、阿部知子^{*2} Masanori HATASHITA, Keiichi TAKAGI, Hiroyuki ICHIDA and Tomoko ABE

Abstract

It is well known that β -D-glucans from fungi are effective initiators of cell-mediated immunity in humans. β -D-glucans isolated from various fungi differ in their chemical structures and consequently in their immunomodulatory activities. For example, schizophyllan classified as a medicine, β -D-glucan extracted from the fungus *Schizophyllum commune*, stimulates the immune system. In this study, several extremely rare fungi with immunostimulatory activities are focused. In the latest study, we examined dose dependence of mycelial growth against the irradiation of iron ion and argon ion beams. Several transient mutants with high proliferative activity were isolated by carbon ion beam irradiation and some mutants whose phenotype remained stable after repeated cultures were obtained.

要約

真菌類由来の多糖類であるβ-グルカンは免疫反応の効果的なイニシエーターとして知られている。種々の 真菌類から単離したβ-グルカンはそれぞれの化学構造が異なっており、その結果として免疫調整作用が異な るとされている。例えば、スエヒロタケから抽出されたβ-グルカンであるシゾフィランは医薬品として分類、使用 されているが、これはヒトの免疫系に作用することが明らかにされている。本研究では、免疫賦活能が予め明ら かにされているいくつかの希少な真菌類について検討することにした。今年度は、鉄イオンビームおよびアルゴ ンビーム照射に対する菌糸体増殖の線量依存性の検討およびカーボン照射した菌株からの高増殖性変異体 の選抜を行い、形質の安定した変異株の取得を試みた。

緒言

本研究では、真菌類の希少種を取り上げて、それらが生産する生理活性物質の単離とその機能評価および イオンビーム育種による高生産株の育種を実施することを計画している。これらの希少種を取り扱うにあたり、ま ず培養条件の検討を行った。培地組成として、炭素源と窒素源の組成比を変化させた培地を複数調製して、真 菌類の菌糸体の増殖性を調査し、最適な培地組成を決定した。生育温度に関しては、5℃から35℃の温度領 域における菌糸体の増殖性を調査し、25℃から30℃が最適な培養温度であることを明らかにした。イオンビー ム照射による変異体選抜を行うために、真菌類のプロトンビーム照射に対する菌糸体増殖性の線量依存性を調 査した。いずれの線量においても照射後の増殖の遅延が見られたが、その後増殖を再開するまでの日数に線 量依存性が確認された。また、1,500Gy では増殖速度の顕著な回復は見られなかった。2,000Gy では、菌糸体 は増殖を示さないことが明らかになった。菌糸体の主要な構成成分である多糖類β-グルカンを分離する方法 について検討した。β-グルカンが熱水に可溶でエタノールには不溶であるという性質に着目して、乾燥した菌 糸体を用い、エタノール抽出後の残渣に対し、熱水抽出を行い、その後抽出物のエタノール沈殿を行うことで、 白色の沈殿物を得た。これらは、コンゴーレッドとの混合による色調変化試験より、β-グルカンであることが確認 された。今年度は、鉄イオンビームおよびアルゴンビーム照射に対する菌糸体増殖の線量依存性の検討および カーボン照射した菌株からの高増殖性変異体の選抜を行い、形質の安定した変異株の取得を試みた。

結果の概要

イオンビーム照射をする真菌類として、Fuscoporia obliqua、Cordyceps militaris、Polyporus umbellatus を用いた。培地として、Potato Dextrose Agar 培地(以下、PDA 培地)、YM Ager 培地(以下、YM 培地)を用いた。そ れぞれ調製した培地はオートクレーブ後にプレートに分注し、固形培地を得た。照射日の4日前に、F. obliqua、 C. militaris は PDA 培地に、P. umbellatus は YM 培地に植え付け、25℃暗黒下で培養を続けた。理化学研究

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

若狭湾エネルギー研究センター研究年報(平成29年度)

所仁科加速器科学研究センターのイオン加速器を用い、鉄イオンビームやアルゴンイオンビームを種々の線量 で前述の植菌したプレートに照射した。照射後、菌糸体を少量サンプリングし、新たに準備した固形培地上に植 菌し直し、経時的にプレートを写真撮影し、菌糸体コロニーの成長を記録した。撮影した写真をもとに、菌糸体 が形成するコロニーの直径を計測した。各種真菌類の菌糸体の増殖性を線種、線量から整理した(表1)。いず れの条件においても高線量になるに従い、菌糸体の増殖速度は低下した。また、*P. umbellatus* においては、ア ルゴンビームの 300Gy で、菌糸体の増殖はほとんど見られなかった。プロトンビームは 1,500Gy あるいは 2,000Gy の条件で、菌糸体の増殖が抑制されたことから、これらの重イオンビームの増殖抑制効果はプロトンビ

ームの数倍あることが わかった。F. obliqua においては、特に高線 量区において、固形培 地が茶色に着色するも のが認められた。これ らは、照射の影響によ り、何らかの応答反応 を示したものと思われ る。

平成28年度に菌糸 体にカーボン照射した 菌株からは、複数の高 増殖性を示す変異体 が選抜された。しかし、 一部の変異体に関し ては、継続して培養を 続けているうちに、野 生株と同等の増殖速 度に戻る現象が見られ た。そのような株は候 補から外した。継代培 養を繰り返し行っても 高増殖性を示し続け、 形質が固定されたと思

菌株	イオン種	線量 (Gy)	照射した後に植え継ぎした後の 8日目のコロニー径の相対比(%)
Fuscoporia obliqua	Fe	0	100.0
		100	82.0
		200	60. 7
	Ar	0	100.0
		150	67.6
		300	50. 8
Cordyceps militaris	Fe	0	100.0
		150	90. 5
		300	85. 3
	Ar	0	100.0
		200	96. 8
		400	80. 1
Polyporus umbellatus	Fe	0	100.0
		100	94. 2
		200	56. 8
	Ar	0	100.0
		150	99. 1
		300	5.3

われる変異株を残した。その P. umbellatus における変異体の1例を図1に示す。また、この変異体は、液体培地を用いた表面培養においても野生株に比べて高い増殖性を示すことを確認した。

今後の課題と展望

真菌類へのイオンビーム照射による高増殖性変異株の作出に 関しては、プロトンビームよりもカーボンビームの方が変異体の獲 得数が多く、変異体作出には重イオンビーム照射が有効であるこ とが示唆された。今年度得られた鉄イオンビームやアルゴンビー ムを照射した菌株から、選抜試験を繰り返して行う中で、多数の 高増殖性変異体を獲得し、その中で最も高い増殖性を示す変異 体の選抜を行う予定である。さらに、タンク培養に適した液体中の 培養が可能な変異体の作出も試みる予定である。



野生株変異株図1菌糸伸長速度が速くなった菌株

イオンビーム照射による山田錦のテーラーメード育種ライブラリの開発と福井県に適した「新山田錦」の育成 Development of Tailor-Made Breeding Library of 'Yamadanishiki' by Ion-Beam Irradiation and Breeding of 'New Yamadanishiki' for Fukui Prefecture 三浦孝太郎^{*1}、髙城啓一^{*2}

Kotaro MIURA and Keiichi TAKAGI

Abstract

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

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

緒言

酒米イネ品種「山田錦」は、日本の酒造好適米のトップブランドである。しかしながらその生産地は兵庫県の 一部地域に限られており、福井県内酒造会社は高価な兵庫県産山田錦を仕入れるか、県内で自社生産せざる を得ない。山田錦は草丈が高くなりやすいため倒伏しやすく、栽培管理が困難な品種である。また、出穂期が遅 い晩生の品種であるため、福井県内での生産では登熟期間に低温にさらされ易く、未熟米が多発する問題点 がある。そこで、我々はイオンビーム、及び変異原性化学物質を組み合わせる事で、山田錦に高効率かつ多様 な有用変異を誘発したテーラーメイド育種ライブラリを構築し、矮性や早生の形質を組み合わせることで福井県 内の栽培に適した「新山田錦」の育成を目指して研究を実施している。これまでに実施した変異体スクリーニン グにより、矮性、早生系統及び、山田錦の不良形質である脱粒性を失った系統を選抜した。平成29年度は、こ れらの有望系統を用いた栽培試験を実施し、その単位面積当たり収量と酒米として重要なデンプン形質の評価 を行った。

材料と方法

植物材料および栽培条件

平成 28 年度に選抜した山田錦変異体の矮性系統 8 系統、早生系統 24 系統、難脱粒系統 7 系統の M3 種 子を、平成 29 年 4 月 2 日にベンレート T 水和物に 24 時間浸漬した後に水に浸漬して 24 時間吸水させ、各 系統 200 粒を播種した。上記の方法で1ヶ月間育苗したサンプルを、平成 29 年 5 月 10 日に福井県立大学生 物資源開発研究センター内の水田に定植した。栽培条件は、条間 25cm、株間 20cm で 1 系統あたり 100 個体 とした。

栽培特性の調査

各変異系統の出穂日を決定するために、7月1日より毎日圃場を観察した。各系統の出穂日から平均気温 を累積し、積算温度が1000℃となる9月中旬頃から収穫を開始した。20 cm×25 cm で栽培した 20 株を 収穫する事で1 m³収量とし、全ての調査項目は、3反復の平均値で比較した。収穫後、1 週間から10日 間ほど天日干しを行い、水分含量が14-15%まで乾燥させた。乾燥させた各個体の穂数、草丈、穂長、一次 枝梗数(主稈)、種子数(主稈)を測定した。籾摺り機【正式名称:テスト籾摺り機、会社:株式会社サタケ、 型:THU35B】を用いて脱穀した籾から籾殻を取り除き、粗玄米重を測定した。その後、60gを量り取り、段ふ るい機【正式名称:大屋式坪刈試験用縦目段篩、合名会社 大屋丹蔵製製作所、型:type S】を用いて 1.9mm 未満の種子(くず米)と1.9mm 以上の種子(精玄米)に分けて重量を測定した。また、この精玄米の 玄米千粒重、玄米長、玄米幅、玄米厚を測定した。デンプンの品質には、ラピッドビスコアナライザー(RVA、ペ ルテン社)を用いて70%精米の粘度増加開始温度を比較した。

¹福井県立大学・生物資源学部・生物資源開発研究センター、*²(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室 本研究は、公募型共同研究事業として(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県立大学と共同で実施したものである。

結果と考察

矮性変異体の収量調査

矮性変異体の収量調査を行った結果、植物ホルモンのジベレリンの欠損やブラシノステロイドの欠損変異体に 類似する表現型を示す系統が2系統あり、ジベレリンの欠損変異体によく見られる種子稔性の低下や、ブラシノ ステロイド型矮性変異体によく見られる種子が小さくなる形質が見られ、これら不良形質を示す2系統は不適と判 断した。不良形質の見られない6系統について栽培試験を実施し、特性調査と収量調査を行ったところ、山d11 は草丈が高くなり、籾数も減少したことから不適と判断した(表1)。その他の5系統は山田錦よりも収量が増加し ていた(表1、図1)。山d3については、矮性表現型を示すと同時に出穂日が10日早くなっており、早生化したた め矮性表現型を示している変異体であると推測した(表1)。

早生変異体の収量調査

早生変異体の収量調査を行った結果、細葉や矮性が分離するなど、不良形質を示す系統が4系統見つかった。そのため、これら4系統を除き、20系統を用いて収量調査を行った。その結果、山早8だけが山田錦よりも収量が低下した(表1)が、その他の19系統は収量が山田錦よりも増加した(表1、図2)。

難脱粒変異体の収量調査

難脱粒変異体の収量調査の前に、握りしめ法による脱粒性検定を行った所、難脱粒性が固定されている系統は7系統中2系統だけであった。そこで、この2系統について収量調査を行った所、KEMS238は山田錦と同程度の収量を示し、KEMS239は著しく多収となった(表1、図3)。

<u>デンプン品質の調査</u>

山田錦を早生化した変異体でデンプン品質が変化しているか確認するために、出穂日が早い系統から遅い 系統を用いて粘度増加開始温度を測定した。その結果、出穂が早い系統ほど粘度増加開始温度が高く、出穂 が遅い系統ほど粘度増加開始温度が低くなる傾向が確認できた(表2)。最も出穂が遅い山田錦が最も低い粘 度増加開始温度を示した(表2)。

結言

これまでに得られた矮性、早生、難脱粒変異体の収量調査で、多くの系統で多収となる有望系統が得られた。 山田錦の福井県での栽培には登熟期に気温が低すぎることを証明し、これを回避する有望な育種素材が得ら れたと考えられる。一方で、酒米品質の重要な要素であるデンプンの品質は、早生になるほど粘度増加開始温 度が上昇し、低下している事が示された。即ち、山田錦の多収化と品質の維持はトレードオフの関係にある事が 明らかになった。このことから、山田錦の品質を維持しつつ、多収化に繋がる「僅かに早生」の系統を育成するこ とが重要であると判断した。また、難脱粒変異体は収量が安定し、非常に有望であると判断した。今後は、これら の有望系統を用いて「難脱粒かつ僅かに早生」の系統を育成することで、福井県での栽培に最適化した「新山 田錦」の育成を目指したい。

Ū	•								
山早13	11 古川	山早15	山早16	山早17	山早18	山早19	山早22	山早23	山早24
				_	-]	11	5 -	_	

_	_	_	_	_	_		_	_	_	_	_	_	_	_						_	_		_	_	_		_	_	_
1mi籍玄米重	311.4	393.6	426.4	371.3	347.3	474.1	445.1	198.6	479.6	473.2	452.1	478.4	430.5	446.3	454.7	446.4	439.1	474.3	413.6	532.6	436.5		1mi精玄米重	352.0	397.9	443.8	399.2	560.9	353.1
1.9mm(/60a)	56.26	38.69(/40g)	38.45/(40g)	56.75	56.16	58.48	58.38	50.97	56.76	55.73	56.94	57.28	57.63	57.08	56.47	57.70	57.58	56.66	55.34	57.24	58.12		1.9mm(/60g)	46.63	56.16	55.40	55.86	56.44	57.34
親玄米重	332.14	406.92	443.62	392.60	371.09	486.43	457.48	233.73	506.99	509.43	476.36	501.14	448.18	469.16	483.17	464.24	457.60	502.22	448.46	558.29	450.61		粗玄米重	452.92	425.06	480.65	428.79	596.23	369.51
親重量	410.67	509.11	584.67	502.52	471.31	604.60	571.24	325.68	634.59	643.59	594.42	631.37	562.93	587.15	600.00	576.44	573.40	626.18	564.10	696.21	559.74		初重量	561.93	543.58	604.77	550.63	731.70	458.69
玄米厚	2.07	2.06	2.07	2.01	2.17	2.08	2.04	2.08	2.06	2.10	2.09	2.11	2.09	2.11	2.09	2.09	2.11	2.11	2.16	2.10	2.19		玄米厚	2.01	2.09	2.06	2.10	2.06	2.14
玄米幅	3.08	3.06	3.09	2.99	3.04	3.12	3.02	2.98	3.04	3.02	3.06	3.10	3.09	3.09	3.07	3.09	3.10	3.10	3.07	3.10	3.12		玄米幅	3.00	3.00	3.02	3.11	3.08	3.24
玄米長	5.26	5.31	5.37	5.30	5.63	5.31	5.18	5.42	5.33	5.19	5.26	5.35	5.30	5.49	5.45	5.39	5.39	5.30	5.71	5.50	5.54		玄米長	5.28	5.40	5.43	5.37	4.99	4.93
玄米千粒重	24.32	25.96	25.89	24.49	26.98	26.09	25.21	24.86	25.11	24.43	25.70	25.30	26.40	25.64	25.59	25.74	25.70	25.56	27.42	26.38	26.88		玄米千粒重	23.28	23.87	25.45	24.57	24.50	26.37
親厚	2.28	2.20	2.29	2.20	2.28	2.26	2.31	2.18	2.29	2.24	2.25	2.28	2.30	2.28	2.19	2.19	2.26	2.27	2.23	2.25	2.32		親厚	2.13	2.32	2.22	2.32	2.24	2.35
親幅	3.47	3.41	3.55	3.38	3.57	3.61	3.60	3.45	3.43	3.39	3.53	3.49	3.57	3.45	3.50	3.53	3.58	3.50	3.54	3.54	3.54		籾幅	3.43	3.40	3.54	3.60	3.46	3.74
親長	7.22	7.70	7.46	7.49	8.11	7.52	7.32	7.65	7.44	7.22	7.40	7.32	7.61	7.37	7.71	7.50	7.47	7.37	8.03	7.59	7.73		親長	7.17	7.60	7.85	7.51	7.39	7.43
親千粒重	27.58	30.26	29.62	28.13	31.34	30.81	29.11	24.93	28.73	28.03	28.75	29.37	30.48	29.75	29.60	29.78	30.24	29.35	30.55	30.67	30.33		籾干粒重	26.31	27.44	29.56	27.79	27.68	30.87
重子数(主稈)	112.3	78.3	97.7	85.7	68.0	92.7	92.3	105.7	97.0	90.7	100.3	102.7	71.7	85.7	103.3	87.7	92.3	86.0	94.7	77.3	70.0		重子数(主稈)	96.7	91.0	101.0	73.0	81.0	103.3
一次枝梗数(主程)	10.7	9.7	9.7	10.0	7.0	9.7	9.7	9.0	9.0	8.3	9.7	10.0	8.0	8.7	10.0	9.0	9.0	9.7	8.0	8.3	8.3			9.3	9.3	9.3	9.0	9.7	9.7
發展	254.0	189.7	234.7	227.0	242.7	227.7	237.0	245.7	242.0	239.0	230.7	254.0	223.0	224.0	243.3	232.0	235.7	232.3	224.7	226.7	206.0		穂長	223.0	212.0	230.7	202.3	226.3	212.7
草大	122.0	96.0	107.9	107.5	107.9	112.7	111.3	113.7	122.1	111.2	118.2	116.3	115.6	113.7	115.1	114.2	113.7	114.6	110.1	112.5	101.7		草丈	106.7	104.7	109.5	86.4	114.1	105.2
穂数	13.7	15.3	18.0	16.0	18.3	15.3	18.7	15.7	19.7	18.7	16.7	16.3	16.0	15.7	15.7	17.7	19.3	17.7	21.7	18.7	17.3		穗数	16.0	19.0	19.0	26.3	20.0	16.7
日瀬日	8月18日	7月21日	7月30日	7月31日	7月26日	7月30日	7月30日	8月7日	8月14日	8月1日	8月10日	8月10日	8月10日	8月7日	8月7日	8月10日	8月10日	8月7日	8月2日	8月3日	7月31日		出穂日	8月14日	8月14日	8月3日	8月14日	8月14日	8月14日
変異原		DEB	C125	C100	EMS	C100	EMS	EMS	C100	EMS	C100	C100	C100	C100	DEB	DEB	DEB	DEB	EMS	EMS	不明		変異原	C125	EMS	EMS	EMS	EMS	EMS
早生変異体	山田錦コントロール	山早1	山早2	山早3	山早4	山早5	山早6	山早8	6者巾	山早11	山早12	山早13	山早14	山早15	山早16	山早17	山早18	山早19	山早22	山早23	山早24	镁性峦星体	音要	LId1	Llid2	цідЗ	LLId5	ццd11	Шd13

_								
443.8	399.2	560.9	353.1		1m精玄米重	303.0	268.0	
55.40	55.86	56.44	57.34		1.9mm(/60g)	57.64	57.02	
480.65	428.79	596.23	369.51		粗玄米重	315.38	281.98	
604.77	550.63	731.70	458.69		和重量	397.46	354.26	
2.06	2.10	2.06	2.14		玄米厚	2.05	2.13	
3.02	3.11	3.08	3.24		玄米幅	3.11	3.14	
5.43	5.37	4.99	4.93		玄米長	5.60	5.61	
25.45	24.57	24.50	26.37		玄米千粒重	26.56	26.65	
2.22	2.32	2.24	2.35		親厚	2.32	2.27	
3.54	3.60	3.46	3.74		靱幅	3.48	3.55	
7.85	7.51	7.39	7.43		親長	7.74	7.63	
29.56	27.79	27.68	30.87		親千粒重	30.62	30.08	
101.0	73.0	81.0	103.3		種子数(主稈)	75.3	84.7	
9.3	9.0	9.7	9.7		一次技模数(主程)	8.3	9.3	
230.7	202.3	226.3	212.7		穂長	221.7	244.3	
109.5	86.4	114.1	105.2		草丈	115.8	117.5	
19.0	26.3	20.0	16.7		穂数	14.0	12.7	
8月3日	8月14日	8月14日	8月14日		出穂日	8月14日	8月14日	
EMS	EMS	EMS	EMS		系統名	EMS-238-5	EMS-238-10	
d3	d5	111	113	変異体	¢,	<u> </u>	<u></u> 258	

489.5 325.0 55.85 56.98 436.72 349.12 2.05 627.62 515.42 2.09 3.07 3.12 5.57 2.28 25.79 5.64 2.26 25.67 3.48 29.74 7.62 3.45 7.49 29.58 78.3 73.0 9.0 8.3 222.0 226.3 113.3 113.4 13.0 17.3 EMS-238-11 8月14日 EMS-239-6 8月14日 離脱較過 勝号 世脱53 山影58 山脱68

表1山田錦変異体の栽培特性データ

早生変異体



図1 山田錦矮性変異体の収量



図3 山田錦難脱粒変異体の収量



図2 山田錦早生変異体の収量

系統番号	出穂日	粘度増加開始 温度(℃)	1㎡精玄米重 (g)				
山早1	7月21日	69.4	394				
山早4	7月26日	67.1	347				
山早2	7月30日	67.1	426				
山d3	8月3日	67.1	444				
山早15	8月7日	66.4	446				
山早12	8月10日	66.4	452				
山d1	8月14日	66.5	352				
山d2	8月14日	65.7	398				
山d5	8月14日	65.7	399				
山脱59	8月14日	64.2	325				
山田錦	8月18日	62.9	311				

表2 早生系統を用いた粘度増加開始温度測定

冬虫夏草変異株を用いた新規抗腫瘍物質の生産 Production of Novel Antitumor Agents with the Use of *Cordyceps militaris* Mutant 櫻井明彦^{*1}、畑下昌範^{*2} Akihiko SAKURAI and Masanori HATASHITA

Abstract

From the viewpoint of practical application of nucleoside antimetabolites, cordycepin production by submerged culture was investigated using *Cordyceps militaris* mutant. One of the mutants obtained by ion beam irradiation showed twenty-five-fold increase in cordycepin productivity in the submerged culture. In addition, the derivatization of cordycepin was carried out for the improvement of efficiency in vivo. Several derivatives were successfully synthesized with carboxylic acid anhydride and showed very high antibacterial activity against opportunistic bacteria.

要約

本研究ではヌクレオシド系核酸代謝拮抗剤の実用化の観点から、コルジセピンを効率よく生産する技術と、生体内での有効性を高めるためのコルジセピン誘導体の開発を試みた。タンク培養でのコルジセピン生産を目的として、イオンビーム照射を用いて振盪培養で親株の25倍の生産性を示す変異株を取得した。また、カルボン酸無水物によりコルジセピンの誘導体化を行った。得られた誘導体はコルジセピンが効果を示さない日和見感染菌に対して高い抗菌性を示した。

緒言

冬虫夏草が生産するコルジセピン(図1)は、抗腫瘍ばかりでなく 抗菌、抗ウイルスなどの様々な生理活性を示すことから、医薬品や 機能性食品、化粧品の原料として期待されている。しかしながら、 天然の冬虫夏草が生産するコルジセピンは極微量であり、またコル ジセピンの工業生産技術(冬虫夏草の培養技術)が確立されてい ないことから、コルジセピンの利用に関する研究は進んでいない。 このため筆者らはコルジセピン高生産株の作出を検討し、液体表



図 1 コルジセピンの化学構造

面培養において高い生産性を示す冬虫夏草変異株の作出に成功している。しかしながら、この変異株のタンク 培養でのコルジセピン生産性は著しく低く、実用レベルには達していない。一方、コルジセピンは細胞レベルで は高い生理活性を示すが、生体内ではアデノシンデアミナーゼにより酸化(分解)されて急速に生理活性が低 下する場合がある。

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

方法

1. 深部培養用コルジセピン生産菌の育種

コルジセピン生産菌株(親株)としては、以前の研究でイオンビーム照射によって作出した液体表面培養用 冬虫夏草 Cordyceps militaris G81-3¹⁾を用いた。プレート上に増殖させた G81-3株(親株)の菌糸にイオンビ ーム(プロトン、カーボン)を照射した。照射後の菌糸体の増殖性およびコルジセピン生産性を基にタンク培養 用有望株を選択し、培養条件を最適化した。

2. コルジセピンの誘導体化

G81-3を用い液体表面培養²⁾および回転円板培養でコルジセピンを生産し、晶析法³⁾により純度 95%以上に精製した。これを原料とし、カルボン酸無水物/ピリジン系の反応を用いてコルジセピンのアミノ基またはヒドロキシ基のアシル化を検討した。

^{*1}福井大学・学術研究院工学系部門・生物応用化学講座、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室 本研究は、公募型共同研究事業として(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井大学と共同で実施したものである。

 コルジセピン誘導体の生理活性の評価 誘導体化したコルジセピンの日和見感染菌に対する増 殖抑制効果と分解耐性について、液体振盪培養法を用 いて評価した。

結果と考察

1. 深部培養用冬虫夏草変異株の作出

プロトンビーム照射により作出した変異株 H2000dO の 振盪培養条件を最適化したところ、親株である G81-3 の 振盪培養の約 25 倍のコルジセピン生産量(約 6g/L)が 得られた(図 2)。この値は、G81-3 の液体表面培養での 最大値(9g/L)の 75%に相当する。G81-3 と H2000dO と では、増殖量と増殖形態の両方が異なっていることから、 菌糸を構成する多糖類の組成などが異なっていると考え られる。

今後、遺伝子解析により変異箇所を特定する ことによって深部培養が困難な他の微生物への 応用展開が期待できる。

2. コルジセピンの誘導体化

コルジセピンの6位のアミノ基、2'位または5' 位のヒドロキシ基をアシル化するために種々の カルボン酸無水物を用いて反応条件を検討し た。その結果、溶媒として塩基性溶媒であるピリ ジンを用い窒素雰囲気下25℃で180分間程度 反応させることで、高い反応率が得られた。

合成した誘導体の構造を LC/MS、NMR で解 析したところ、図 3 に示す種々の誘導体が生成 していることが明らかとなった。

3. コルジセピン誘導体の生理活性

得られた誘導体を合成溶媒中から回収し、種々の日和 見感染菌の培養液に加えて増殖抑制効果を確認した。 その結果、プロピオニルコルジセピンとアセチルコルジセ ピンは、コルジセピンでは増殖の抑制が難しい緑膿菌 *P. aeruginosa*に対して、強い抗菌作用を示すことが明らか になった(図 4)。

結言

液体表面培養用の冬虫夏草変異株へのイオンビーム 照射により、タンク培養に適したコルジセピン生産変異株 の作出に成功した。また、カルボン酸無水物とコルジセピ ンの反応により合成したアシル化コルジセピンは、日和 見感染菌に対して高い抗菌性を示した。

今後は、コルジセピン誘導体の大量合成を行い、抗菌 効果を詳細に評価する予定である。また、がん細胞に対 する増殖抑制効果を評価する予定である。



図 2 変異株と野生株とのコルジセピン生産性の 比較



図 3 合成したコルジセピン誘導体 RCO:アシル基



図 4 緑膿菌に対するコルジセピン誘導体の増殖 抑制効果(抗菌性)

参考文献

- 1) 増田美奈他、冬虫夏草の突然変異体及びその変異体の培養法、特許第 5343264 号(2013)
- M. Masuda et al., Efficient production of cordycepin by the *Cordyceps militaris* mutant G81-3 for practical use. Process Biochem., 49, 181 (2014)
- 3) 櫻井明彦他、コルジセピンの製造および精製方法、特許第 5850497 号(2015)

イオンビーム照射によるストックの育種 Breeding of Stock (*Matthiola incana*) Cultivars by Ion Beam Irradiation 藤井崇治*1、髙城啓一*2、畑下昌範*2 Takaharu FUJII, Keiichi TAKAGI and Masanori HATASHITA

Abstract

We achieved to obtain flower color variants of a certain stock (*Matthiola incana*) cultivar by irradiation of carbon beams to dry seeds.

要約

ストック乾燥種子に対する炭素線照射により、あるストック品種の花色変異を得ることができたので報告する。

緒言

ストック (Matthiola incana)は、アブラナ科の多年草(日本では一年草として扱われる)であり、観賞用作物として花壇栽培や切り花に利用されている。我々は、イオンビーム照射を用いてストックの花色バリエーションを増やすことを試みている。その試みの中からこれまでに福花園種苗がオリジナル品種として所有していなかった花色系統の作出に成功したので報告する。

材料と方法

福花園種苗オリジナル品種 ムーンフェアリーの乾燥種子を出発材料に、若狭湾エネルギー研究センターの 生物照射コース(高エネルギー)を用いて、450 MeVの炭素線 (LET 57 keV/µm、線量率 30 Gy/min)を照射した。

照射した種子は福花園種苗の研究圃場で栽培し、照射2代目種子(M2)を得た。M2世代、あるいはM3世代で花色変異の選抜を行った。



図 1. 現品種と変異系統(13-19、13-32)の花

結果と考察

照射した M₁種子を圃場栽培したが、M₁世代 では花色変異は得られなかった。しかし、M₁個 体の後代種子を圃場展開したところ 10 Gy を 照射した系統の M₂、あるいは M₃世代で、通常 の青、ないし黄色の花色以外の赤やピンクの花 色を示す系統が現れた。これらの中からオリジ ナル品種として所有していない赤やピンクの個 体を選抜し、後代の形質を確認したところ、図 1 に示したように花色が赤(13-19)やピンク(13-32)に固定された系統を得ることができた。

結言

今回得られた系統は、新規花色品種として 利用することを考えている。今後はさらに有用 な新品種の作出を試みる予定である。

*1福花園種苗株式会社生産技術部、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室本研究は、福花園種苗株式会社と(公財)若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究として実施したものである。

イオンビーム突然変異処理による新たな特性を持つオオムギ品種の開発 Ion Beam Mutation Breeding for New Useful Characteristic Barley 長嶺敬*¹、中田克^{*1}、池田達哉^{*2}、高城啓一^{*3} Takashi NAGAMINE, Masaru Nakata, Tatsuya M. IKEDA and Keiichi TAKAGI

Abstract

To improve barley quality, the progenies of carbon beam irradiated barley "Fibersnow" were analyzed for seed protein composition and amylose content. Appropriate exposure dose of carbon beam for the air-drying seed was about 50-100 Gy. Useful starch mutants were identified by a urea-gelatinization method using the progenies of 50Gy carbon beam radiated six-row barley. These mutants should be useful resources to improve barley quality and functionality.

要約

オオムギの品質改善を目的として、炭素線照射による突然変異誘発を試みた。風乾種子に対する適切な照 射線量は50~100Gyの線量であると判断された。六条オオムギ品種「ファイバースノウ」の50Gy炭素線照射後 代からは尿素崩壊性を指標とするスクリーニングによって、デンプン特性が変化した難糊化性変異、易糊化性 変異、モチ性変異が見いだされた。これらの変異体は今後の大麦の品質、機能性改良の有用な母本となること が期待される。

緒言

若狭湾エネルギー研究センターが立地する福井県は食用六条オオムギの国内一の産地であり、品質特性を 向上させたオオムギ新品種の開発は地域農業における重要課題となっている。そこで、本課題においては新た なオオムギ品種や有用遺伝資源の開発にむけて、オオムギ種子への炭素線照射を行い、品質特性に関わる有 用突然変異の選抜を行った。

材料及び方法

1. 炭素線照射条件の検討

六条オオムギ品種「ファイバースノウ」、二条オオムギ品種「Ethiopia 1」の風乾種子を材料として、適切な炭素 線処理線量を明らかにするために 10~100Gy の線量での処理(各線量・品種)を行った。処理当代 60 粒の苗 立ち率及び播種 7 日後の草丈を調査した。

2. 炭素線照射後代の養成

六条オオムギ品種「ファイバースノウ」、二条オオムギ品種「Ethiopia 1」の風乾種子に 50 もしくは 100Gy を照 射した種子(M₁)を中央農業総合研究センター北陸研究拠点(新潟県上越市)温室に播種し、品種・照射条件ご とに混合採種した M₂ 個体を温室栽培し、約 2000 個体について個体別の採種を行った。

3. 種子貯蔵タンパク質変異の探索

大麦粉の生地物性を用途の広い小麦粉生地に近づける効果が推察される種子貯蔵タンパク質 D-ホルデインの突然変異の獲得を目的として、上記の M2 個体別に採種した M3 種子を用いて、変異のスクリーニングを行った。スクリーニングは SDS-ポリアクリルアミド電気泳動法(SDS-PAGE)を用いる長嶋・石川(1995)の方法 ¹⁾で行った。

4. デンプン変異の探索

デンプン特性はオオムギの炊飯特性や食感に大きく影響するとともに、でんぷん特性の変化にともなって健 康機能性成分β-グルカンの含量も変化する事例が知られている。そこで、尿素崩壊性を指標としてデンプン変 異のスクリーニングを行った。50 Gy 炭素線照射を行った「ファイバースノウ」の後代 M2 1500 個体を温室内でポ ット栽培して採種した個体別 M3種子について、各個体別 2 粒をスクリーニングに用いた。切断種子は半粒を易 糊化性変異を検出する 3M 尿素液、残りの半粒を難糊化性変異を検出する 4M 尿素に 1 晩浸漬した後、0.2% ヨウ素/2% ヨウ化カリウム溶液を加え、溶解したデンプンによる呈色の程度によりデンプン特性を評価した。なお、 易糊化性系統について 2.5M 尿素により二次スクリーニングを行った。

^{*1}農研機構・中央農業研究センター・北陸研究拠点・作物開発研究領域、*2農研機構・西日本農業研究センター・水田作研究領域、*3(公財)若 狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室

本研究は、農研機構・中央農業研究センターと(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

結果

1. 炭素線照射条件の検討

六条オオムギ品種「ファイバースノウ」、二条オオムギ品種「Ethiopia 1」の風乾種子を材料とした炭素線処理 当代 60 粒の苗立ち率及び播種 7 日後の草丈を調査した結果、苗立ち率は 50Gy 以下の処理ではほとんどの 区で 95%以上、他区に比べて低かった 100Gy 区でも 86%以上となった。草丈は処理線量の増加にともなって、 小さくなる傾向がみられ、とくに 100Gy 区ではいずれの品種も無処理区比 26~38%と著しい草丈抑制効果が見 られた。この結果から、突然変異育種のための本照射では苗立ちが安定し、草丈抑制に示される照射効果も現 われている 50Gy 処理と、苗立ち率・草丈ともに十分な照射効果が現れている 100Gy 処理が適切と判断された。 2. 炭素線照射後代の養成

上記の2品種・2条件での照射種子(M₁)を播種・養成した結果、アルビノ個体、稔性低下個体が多く見られ、 突然変異が効果的に誘発されていると考えられた。品種・照射条件ごとに混合採種した M₂ 個体は温室でポット 栽培し、約 2000 個体について個体別の採種を行った。

3. 種子貯蔵タンパク質変異の探索

M2 個体別に採種した M3 種子を用いて、SDS-ポリアクリルアミド電気泳動法(SDS-PAGE)でのスクリーニング を行った結果、一部に貯蔵タンパク質のバンドパターンが変化した個体が見られたが、複数のバンドが同時に 変化していることから他家受粉した個体であると判断され、目標とした D-ホルデインの分子量が低減した系統を 見出すことはできなかった。

4. デンプン変異の探索

尿素崩壊性を指標としてデンプン変異のスクリーニングを行った結果、4 M 尿素で糊化しない難糊化性系統が7系統(図1)、2.5 M 尿素で糊化する易糊化性系統が3系統得られた。その他に赤紫に呈色する低アミロース(モチ)系統が11系統、青紫に呈色する高アミロース系統が3系統得られた。



図1 難糊化性系統のスクリーニング結 果の例

各系統2粒を横断面で切断し、半粒を2 ウェルに入れ、4 M尿素によりデンプン を糊化した。親品種「ファイバースノ ウ」を黒実線で、難糊化性を示す3系統 を白破線で示した。

考察

SDS-PAGE で検出できる分子量変異型の種子貯蔵タンパク質変異はみいだされなかったため、今後はアミノ酸置換型の変異を探索する必要がある。また、今回見出されたデンプン変異は大麦の品質改善を図るうえで、 貴重な育種素材になると考えられる。アミロース含量の変異であるモチ性変異や高アミロース性変異はオオムギ の食感を大きく変化させると考えられ、新たなオオムギ食品の開発につながる可能性がある。既知のオオムギ高 アミロース変異遺伝子 *amol* やもち性遺伝子 wxは機能性成分 β-グルカンを向上させる多面作用を持つことが 知られ、本研究で見いだされた変異が β-グルカン含量に及ぼす効果については今後検討する必要がある。

結言

これまで国内のオオムギ育種においてはイオンビームを用いた突然変異育種の例はほとんどない。本研究で は炭素線照射により、有用なデンプン変異を作出することができ、大麦育種におけるイオンビーム育種の有用 性を示すことが出来たと考えられる。今回得られた有用変異の育種活用など今後の展開が期待される。

参考文献

1) 長嶋等·石川直幸、育雑、45、87-90 (1995)

重イオンビーム育種技術の高度化

Improvement of Heavy Ion Beam Breeding

高城啓一*1、畑下昌範*1、仲下英雄*2、三浦孝太郎*2、市田裕之*3、阿部知子*3

Keiichi TAKAGI, Masanori HATASHITA, Hideo Nakashita, Kotaro MIURA, Hiroyuki ICHIDA, and Tomoko

ABE

日本国内には生物試料にイオンビーム照射を行うことができる加速器施設が4箇所あり、この内の、若狭湾 エネルギー研究センター(若エネ研)を含む3箇所が、戦略的イノベーション創出プログラム「戦略的オミクス育 種技術体系の構築」において、重イオンビーム育種技術の高度化研究に参画している。

重イオンビーム育種技術の高度化では、イネの品種「ニホンバレ」を対象に、それぞれの照射施設が、それぞれの施設に特徴的なイオンビームを照射し、現れる突然変異の特徴を明らかにすることで、望む様式(変異のタ イプやサイズ)の突然変異を得るためにはどの施設のどのようなビームを照射すればよいかということに関して体 系化を図っている。

若エネ研の炭素ビーム(450 MeV, LET ca. 60 keV/µm, 100-150 Gy)で照射したニホンバレ種子より得られた 大粒変異等数種の変異体の照射第3世代(M₃)の全ゲノム解析を行い、生じた変異を調べたところ、変異体あた りおよそ 100 の変異が確認された。発生していた変異の種類は、1 塩基置換と欠失変異が 8 割以上を占めてお り、欠失変異の中でも 100 塩基以下の欠失がおよそ 90%を占めていた。このことは、若エネ研の炭素ビームが小 規模欠失を高頻度で起こすのに適していることを示している。ホモの変異は、1系統あたりおよそ 30 であると推 定され、解析結果から原因遺伝子を推定することが可能であると考えられた。

今後は、生じた変異のより詳細な解析を行うとともに、それぞれの変異体における原因遺伝子の探索を行う。 *1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、*2福井県立大学・生物資源学部・生物資源開発研究センター、*3(国研) 理化学研究所・仁科加速器研究センター・イオン育種研究開発室

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが SIP 次世代農林水産業創造技術に基づき農研機構からの受託研究として、福井県立大学、 (国研)理化学研究所と共同で実施したものである。

1.3.1.9

イオンビーム照射による耐熱性有機酸発酵変異株の構築 Construction of Heat-Resistant Organic Acid Fermentation Filamentous Fungi Mutants by Ion Beam Irradiation 畑下昌範*¹、高野真希*²、星野一宏^{*2} Masanori HATASHITA, Maki TAKANO and Kazuhiro HOSHINO

化石燃料の使用量の低減や二酸化炭素の排出量の抑制のために、草本植物や木本植物などのバイオマス 資源の有用物質への生物変換プロセスが最近注目されてきている。稲わらや廃木材などのセルロース系バイオ マスからのバイオリファイナリー技術の確立を最終目的として、次世代の発酵技術として知られている糖化発酵 同時進行プロセスによるリグノセルロース系バイオマスからの効率的なリンゴ酸の直接生産を担子菌であるスエ ヒロタケを用いて検討した。各種セルロース系バイオマスを用いたスエヒロタケの糖化発酵同時進行プロセスに おけるリンゴ酸の直接生産能の把握とイオンビーム照射による高生産性変異株の構築が本研究の目的である。 スエヒロタケは 100g/L グルコースの存在下、好気条件、28℃下で、12 時間培養された。この時、グルコースは 完全に消費された一方で、リンゴ酸は約 40g/L という高効率で生産された。試験したセルロース系バイオマスの 中では、α-セルロースとイネのもみ殻からのリンゴ酸の直接生産が可能であった。しかし、Avicel や Sigmacell などといった結晶構造をもったセルロース系材料では、リンゴ酸は生成されなかった。これは、スエヒロタケからの エンドグルカナーゼ (EG)やセロビオヒドロラーゼ (CBH)の分泌量がβ-グルコシダーゼ (BGL)の分泌量よりもか なり低いためではないかと考えられた。そのため、これらの酵素の分泌量が高い株を得るために、炭素ビームに よるイオン照射実験を野生株に対して行った。獲得した変異株の1株については、結晶構造の高い各種セルロ ース系材料を用いた糖化発酵同時進行反応において、EG および BG の分泌が改善され、Avicel からのリンゴ 酸の直接生産が可能になった。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、*2富山大学大学院・理工学研究部 本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが富山大学と共同で実施したものである。

観葉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 Ornamental Foliage Plants by Ion Beam Irradiation 畑下昌範^{*1}、高城啓一^{*1}、鈴木勝久^{*2} Masanori HATASHITA, Keiichi TAKAGI and Katsuhisa SUZUKI

栄養繁殖系の植物材料を用いることにより、照射当代において枝変わり変異を選抜することができれば、それらの変異体を挿し木や組織培養等の方法によって形質を安定に保ったまま増殖することで、短期間での新品種育成が期待できる。我々は、従来からニチニチソウ(*Catharanthus roseus*)など花き類の茎頂分裂組織に対してイオンビーム照射を行い、特徴的な変異体の選抜とその品種化を行ってきた。昨年度は、ニチニチソウの花色のシリーズ化を目的として、今までに品種登録の実績のない花色である紫色のニチニチソウを材料として、その吸水種子にイオンビーム照射し、その後育成したものの中から、花に絞りのある変異体を選抜し、形質の安定性などを確認した後、せと福 VMR と命名し、品種登録出願を行った。

今年度は、花き類と並んで需要のある園芸植物として観葉植物を取り上げ、葉色に変化のある変異体を獲得 することを目的とした。観葉植物としては、栄養繁殖系の増殖が可能で、シソ科の多年草であるオレガノを材料と して用いた。オレガノの穂木に炭素イオンビームを照射し、その後育成したものの中から、枝変わりとして葉の中 心部は緑色のままで、その周縁部が淡緑色をしている変異株を選抜、固定した。

本変異体は葉色の特徴から親品種と比べて有意に区別できることから、新品種に値すると判断した。また、同 一世代で同時に挿し木して栽培した株はすべて同じ形質を示し、作期間でもそれらの形質が安定していたこと から、品種登録の要件である区別性、均一性、安定性をいずれも満たしていると考えられた。これより、本変異 体をせと福LGV と命名し、品種登録の出願を行った。

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

1.3.1.11

粒子線による突然変異を利用した野菜の品種開発 Breeding of Vegetables by Particle Beam-induced Mutation

髙城啓一*1、田中良和*1、畑下昌範*1、山本絢也*2、棚橋知弘*2、後藤勇太郎*2

Keiichi TAKAGI, Yoshikazu TANAKA, Masanori HATASHITA, Junya YAMAMOTO, Tomohiro TANAHASHI, and Yutaro GOTO

我々は、イオンビーム照射を行った乾燥種子を用いてアブラナ科、マメ科、およびナス科野菜の品種改良を 試みている。

平成 29 年度はこれまでに照射した作物の栽培を継続するとともに、陽子線照射を行った落花生 2 品種(JB-1, HRS1606)の照射第1世代を展開し、照射第2世代の種子を得た。JB-1 に関しては、播種した 28 粒中 17 個体から種子を得ることができたが、HRS1606 では、85 粒中、6 個体からしか種子を得ることができなかった。この結果は、品種間の放射線感受性の差が反映されたものと考えられた。

育種と並行して、品種改良を効率的に行うための DNA マーカー作製を試みており、レタス品種識別用マーカーの作製を実施した。また、RAPD(ランダム増幅 DNA 多型)法を用いてミニトマトやミディトマトの単為結果性検出に用いることができる新たなトマト単為結果性マーカーの探索を行い、いくつかの候補 DNA 断片を見つけたが、確実なものはまだ見つけられていない。

今後は、これまでに照射を行った落花生等の後代調査、平成28年度までに実施した線量応答調査に基づく、種子のイオンビーム照射と有用形質の選抜を実施する。また、DNAマーカーの探索も継続して実施し、品種 開発が求められているトマト単為結果性を識別することができるマーカーの確立を目指す。

^{*1(}公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、*2株式会社アサヒ農園

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが株式会社アサヒ農園と共同で実施したものである。

1.3.2. 植物工場関連技術開発

1.3.2.1

植物工場に適したレタス新品種の特性 Varietal Characteristics of New Varieties of *Lactuca sativa* Suitable for Plant Factory

畑下昌範*1、高城啓一*1、井村裕治*2

Masanori HATASHITA, Keiichi TAKAGI and Yuji IMURA

近年、天候や場所にとらわれず連続生産が可能であり、無農薬、高栄養価などの高付加価値の作物を作ることができる植物工場による農業生産が行われてきている。こうした人工的な栽培環境の制御下において作物を 周年生産するシステムにおいては、環境制御にかかるコストを低減することが課題であるが、品種毎による栽培 条件の最適化や植物工場に適した品種の選択や開発については、あまり検討が行われていない。本研究にお いては、葉菜類などの野菜に対する組織培養技術とイオンビーム育種技術とを組合せた新しい育種技術およ び栽培環境条件の最適化などにより、短期間で高生長する植物工場に適した高生産性品種を選抜、開発して きた。こうした取り組みを通じて、植物の工場生産にかかる環境負荷の低減に寄与できると考えている。

昨年度までの研究において、人工光下での水耕栽培条件で、高生産性の候補品種について、従来品種との 生育差、同一世代における生育差、世代間での生育差を調査し、本候補品種は、品種登録の要件である区別 性、均一性、安定性をいずれも満たしていることを確認した。今年度は、土耕栽培を行い、品種登録に必要な特 性である、種子の色、葉身の切れ込みの型、株の幅、葉の形、外葉の色相、葉のアントシアニン着色の有無、葉 の凹凸の強弱、葉身の周縁の波打ちの強弱、葉身の先端部の切れ込みの有無、葉身の先端部の切れ込みの 深さ、抽だい始期に関し、標準品種との比較を行うことで、品種特性を明らかにした。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、*2福井シード株式会社 本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井シード株式会社と共同で実施したものである。

1.3.2.2

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 for Improvement toward Higher 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

本研究は、多種多様な市場のニーズに対応して迅速かつ効率的に植物の品種改良を行うために、その選抜 過程で使用する DNA マーカーを作成し、新品種育成の効率化に寄与することを目的とするものである。この方 法を用いれば、旧来の選抜試験と比べて短期間かつ季節要因に左右されない選抜が可能となるだけでなく、選 抜に用いる圃場や栽培に関わる人件費の削減も出来る。これまでに、トマト葉かび病抵抗性遺伝子 CF-9を保 有する品種を区別する DNA マーカーおよびメロン F1 品種を識別する DNA マーカーを作成したほか、現在は イチゴの四季成り性や、トマトの単為結果性を識別するための DNA マーカー作成を継続中である。また、既報 の DNA マーカー¹⁾を用いてトマトモザイクウイルス抵抗性遺伝子 (Tm-2a)保有株の判定作業を行っている。本 年度は、メロン F1 品種の判別について 18 株、トマト Tm-2a 判別について約 200 株の判定作業を実施した。一 連の作業工程は、検体毎に1 枚の葉を冷蔵状態で郵送してもらい、その約 5 mm角を抽出バッファー中で摩砕し たものを用いて PCR を行い、アガロースゲル電気泳動によって判定した結果を返送するものであり、これをプロ トコル化して試料到着から約 5 時間の作業時間で良好な結果を出すことが可能となった。今後は、現在作成中 の DNA マーカーを実用化レベルにするほか、新しいニーズに迅速に応える事が出来るようマーカー作成技術 の向上を行っていく。

参考文献 1) 愛知農総試研報 44:7-12(2012)

*1(公財) 若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室、*2 ハクサンインターナショナル株式会社、*3 プランツファーム SETO 本研究は、(公財) 若狭湾エネルギー研究センターがハクサンインターナショナル株式会社、プランツファーム SETO と共同で実施したものである。
1.3.2.3

抗酸化活性評価法の開発

Development of Reactive Oxygen Species Detection Method for Evaluation of Antioxidative Activity

遠藤伸之*1

Nobuyuki ENDO

食品の機能性の中でも抗酸化活性は、生活習慣病や老化、発がんとの関連性が示唆される酸化ストレスを抑制する能力として特に注目されている。近年、抗酸化活性を有する成分は五大栄養素、食物繊維に次いで「第七の栄養素」と呼ばれ注目されており、抗酸化活性の高い食品は付加価値が高まる例が多い。このため、抗酸化活性を有する成分を多く含む食品の検索が進められているが、抗酸化活性を簡便かつ確実に評価する方法は少ない。生体内での主な酸化反応を起こすものは、活性酸素種と呼ばれており、抗酸化活性とは活性酸素種を消去する力といえる。しかしながら活性酸素種は反応性の高さゆえに測定が困難であり、生体内での生成や消去の機構など詳細な挙動は推測でしかない場合が多い。

我々はこれまでの研究で電子スピン共鳴装置を生体内で発生する活性酸素を測定する手法として用い、医 学、科学の分野で成果をあげている。電子スピン共鳴装置を用いた活性酸素測定法は操作が煩雑で測定結果 解析の難易度が高いものの、短寿命な活性酸素を高感度かつ特異的に分析する手法として非常に優れてい る。本研究は、さまざまな状態(液体、固体、粉末、脂状、水溶液など)である食品に対して、活性酸素種抗酸化 力を正しく評価できる新しい手法を開発することを目的としている。ヒトの体内で実際に生成、作用していることが 明らかとなっているヒドロキシルラジカル、スーパーオキシドアニオンラジカル、ペルオキシドラジカル、一重項酸 素や過酸化水素などの活性酸素種を光照射系で安定かつ簡便に発生できる系を開発し、それらと種々の食品 中栄養成分との反応性に関して、さまざまな条件下で電子スピン共鳴装置を用いた分析を行い、既存の方法よ り簡便で再現性の高い発生系の確立を目指した研究を実施している。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室

1.4. 多様な分野の活動を支える技術開発
 1.4.1. 加速器技術の開発・高度化

1.4.1.1

若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状 Current Status of the Accelerator Facility at the WERC 羽鳥聡^{*1}、栗田哲郎^{*1}、 林豊^{*1}、山田裕章^{*1}、山口文良^{*1}、淀瀬雅夫^{*1}、長崎真也^{*1}、和田一人^{*1}、廣戸慎^{*1}、清水雅也^{*1}、大矢龍輝^{*1}、 原裕也^{*1}、渕上隆太^{*1} Satoshi HATORI, Tetsuro KURITA,

Yutaka HAYASHI, Hiroaki YAMADA, Fumiyoshi YAMAGUCHI, Masao YODOSE, Shin'ya NAGASAKI, Kazuto WADA, Makoto HIROTO, Masaya SHIMIZU, Ryuki OYA, Yuya HARA and Ryuta FUCHIKAMI

Abstract

In the periodic inspections in 2016 and 2017, we checked and reduced the distribution of the resistors dividing the terminal voltage within the finite controlled limit. This control of the distribution of the dividers yielded the uniform distribution of potential on the column and along the acceleration tubes. After the inspection in 2017 and during filling SF6 insulation gas into the accelerator tank, we found the adhesions of the accelerator tubes peeled off and all the tubes could not keep the vacuum inside of themselves. Replacement of all of the tubes is now in progress, therefore, the reduction of the discharge has not been made certain. 要約

2016年度以来、タンデム加速器は昇圧回路や電圧分割回路に用いられる素子抵抗値を管理し電位分布の 一様化による放電抑制の取り組みを行っている。2017年度の定期点検では放電抑制の成果を確認したが、一 部の放電ギャップに放電が認められ、これが2016年度後半の耐電圧性能劣化につながった。是正を行ったが その成果は未確認である。定期点検終了直前に加速管の電極・絶縁体接着面の剥離が発見され、剥離により 気密を保てなくなった加速管の交換の必要が生じたためである。

緒言

タンデム加速器は2016年度、一時期ではあるが、加速高電圧を定格5MVまで昇圧する運転を行うことができたが、2017年4月現在、加速高電圧を4MVに制限した運転を余儀なくされている。タンデム加速器の加速高電圧発生には多段倍電圧整流回路(シェンケル回路)が用いられているが、何段かの倍電圧整流回路を短絡するような放電が起こったためである。

2017年度は前年度からのビーム供給を4月まで行い、5~7月に定期点検(定検)を行った。シェンケル回路の組み込まれた絶縁コラム(シェンケルコラム)表面に回路を短絡する沿面放電痕、コラム表面、ダイオードスタックやコラム分割抵抗を保護する放電ギャップ、加速管や加速管分割抵抗を保護する放電ギャップにアーク放 電痕が、2017年度の定検ではほとんど見出されなかった。2016年度より、これらの放電を抑制するために放電 ギャップの電位差を設計値になるべく近づけ、電位不均衡による放電開始を抑える取り組みを行っている。すな わち、分割抵抗、ダイオードスタックの限流抵抗、ダイオードの順方向/逆方向抵抗の抵抗値分布を管理する 取り組みであるが、その成果であるといえる。一部の放電ギャップにアーク放電痕が見つかったが、2016年9月 15日の倍電圧整流回路短絡放電(これ以後最高電圧を4 MV に制限)に至った原因と考えている。2017年度 定検で是正がなされたがその成果は未確認である。

2017年度定検を終え、タンデム加速器圧力タンクに絶縁ガス6フッ化イオウSF6を充填する際に、加速管へのSF6漏洩が見出された。加速管電極と絶縁ガラス(加速管1本あたり80段)の接着面の剥離が原因であり、4本の加速管すべての交換を余儀なくされた。

シンクロトロンに関してはビームの遅い取出しの制御の開発を行っているが、これは稿を割き詳細に報告する。

^{*1(}公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・加速器室

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県から施設管理を受託、実施する中で行ったものである。

定期点検~タンデム加速器放電

絶縁コラム表面や放電ギャップでの放電は電位分布のバランスが崩れることが原因の一つとなり引き起こされると考えている。加速器タンク内には複数の熱源が存在し温度勾配が生まれる。絶縁コラム表面の絶縁抵抗や ターミナル電圧を分割する分割抵抗などが温度勾配に比例し電界の不均一性を生み、それが放電の起こしや すさの原因と考え、絶縁ガスを循環冷却することで、温度勾配を抑える取り組みを行っている。

温度勾配によらずとも分割抵抗の抵抗値の分布による電界の不均一性も発生しうる。抵抗値の分布は工場出 荷時の公差、劣化による多くの場合低抵抗値側にテールを引く分布などである。全ての素子の抵抗値を計測 し、平均値、分布の幅を導出した。平均値に対する分布の幅が、加速管分割抵抗、ダイオードスタック限流抵 抗、コラム抵抗に関しては、それぞれ、8.8、1.2、0.8%以内になるように管理した。素子に乱数を与え、その昇 順で取り付け位置を決定した。

2017 年度の定検で加速管、コラムの放電ギャップや絶縁コラム上の放電痕が調査されたが、一部を除いて放 電痕は見出されなかった。素子の均一化を図る取り組みの結果があらわれたものと考えている。高エネルギー側 加速管の中間連結部を支えている箇所で加速管電位とシェンケルコラム電位が放電ギャップを挟み対峙する が、この部分にアーク放電痕がみつかった。ギャップ長の調整が間違っていたことが原因であり、9月15日の放 電につながったと考え、設計通りに修正した。修正の成果は未確認である。

加速管交換

2017 年度定検を7月はじめに終え、絶縁ガスSF₆を充填を行った。0.15 MPa gauge 充填時に加速管の真空 度の悪化が見られた。加速管を排気する真空ポンプから排出される気体にSF₆リークディテクター(検出下限3 g/a = 1.6×10^{-6} Pa·m³/s)が反応した。また、タンデム加速器の出射ビームラインに設置した四重極質量分析計 もSF₆の分解生成物SF₅を検出した。

タンデム加速器は負イオン、正イオン加速セクションがあり、それぞれ、2本の加速管で構成される。加速管は 全長 2118 mm、外径 330 mm の円筒形をしている。『底の中心に穴の開いたスープ皿』状のチタン電極 81 枚と 円筒形の硼珪酸ガラス製絶縁体が 1 インチピッチで積層接着される。調査の結果、4本の加速管すべてにおい て、電極/ガラス絶縁体の接着面に剥離が認められ、最大 1.4×10⁻⁵ Pa·m³/s の漏洩が認められた(加速器や ビームラインの真空気密管理基準は 10⁻¹⁰ Pa·m³/s 未満)。

2017年度の加速器利用はすべて取りやめることとし、加速管を新たにハイボルテージ・エンジニアリング・ヨーロッパ社に発注、全ての加速管を交換することとした。2017年度末、加速管交換作業が進められている。

結言

2016年度から取り組んでいる昇圧回路素子の抵抗値均一化の試みは、加速器の多くの場所での放電を抑制する結果を生んでいる。2016年度一時的に5 MVの加速電圧が復活したが、再び放電を起こしたのは一部の放電ギャップの取付けミスであることがわかった。2017年度定検でこれらが確かめられ、是正すべき箇所の是正も行った。しかし、加速管の気密破壊による加速管交換の必要性が生じたため、2017年度は加速器の運転を行っておらず、高電圧発生のパフォーマンス確認もなされていない。

1.4.1.2

シンクロトロンの出射制御系の開発 Development of the Beam Extraction System of the Synchrotron at the WERC 栗田哲郎^{*1} Tetsuro KURITA

Abstract

A beam extraction system of the synchrotron at the WERC has been updated. In addition, a spill feedback system to obtain constant beam intensity has been improved. The design of the new system and a preliminary result of the beam test of the spill feedback system are reported. 要約

老朽化のため継続的なメンテナンスが困難になったシンクロトロン出射制御系の更新を行うとともに、出射ビ ーム(スピル)の時間構造を一定にするフィードバック制御の改善を行った。新しい制御系の設計とスピルフィー ドバック制御の試験結果を報告する。

緒言

若狭湾エネルギー研究センターのシンクロトロンでは、帯域ノイズを用いた RF キッカー法によって遅い取り出 しを行う。すなわち、加速終了後に六極電磁石を励磁することにより3次共鳴のセパラトリクスを形成する。周回 する粒子のベータトロン振動に相当する周波数の高周波を横方向に印加することよって周回粒子を拡散させ る。セパラトリクスを超えた粒子は、急激に振幅を増大し出射用静電デフレクタに入るとビームラインに出射され る。

周回粒子のベータトロン振動数には拡がりがあるため、印加する RF には約 1kHz 間隔の線スペクトラムで構成される帯域ノイズを重畳させ周波数に広がりを持たせている。また、数百 ms の時間をかけて一定強度でビームを出射するために、出射用高周波の振幅を時間的に変化させ出射電流量を制御する必要がある。

出射制御系の更新

従来の出射制御系は、ISA バスのカスタム DA ボードによって、帯域ノイズおよび出射用高周波のアンプのゲインパターン生成していた。Windows NT 4 が動作する PC が必要であり、故障が発生した時に復旧できない状況にあった。継続的な保守性を確保するために、汎用品の組み合わせ PC への依存性が低い出射制御系を開発した。

出射制御系の更新前後の概念図を図1、2に示す。どのような PC にも接続できるように、制御機器は全て USB で接続される。新たなカスタム品は導入せず、汎用品および既存品を組み合わせて設計した。制御プログ ラムは、Windows 7 上で Visual Basic.Net および Windows Presentation Foundation を用いて製作した。

スピルフィードバックの改良

出射スピルを一定にするために、出射ビームの電流量をイオンチェンバーで測定し、その信号を出射用高周 波振幅にフィードバックするフィードバック制御(スピルフィードバック)を改良した。従来のフィードバック制御系 は、図1にあるように、スピルモニタの信号から生成した信号を中心周波数の減衰器にフィードバックしていた ¹⁾。ビームが増えた時に減衰させることしかできず、スピルを十分に一定にすることができなかった。そこで、図2 のように、フィードバック信号を出射高周波の振幅にフィードバックするようにした。

フィードバック回路の詳細を図3に示す。フィードバック信号の演算回路の作成にはMTT社のDSP(Digital Signal Processor)開発キットsBoxを用いた。帯域ノイズを用いたRFキッカー法のスピルの特徴として、図4の 下段のようにスパイク状の変動が重畳する。このスパイク状の変動を低域通過フィルター(LPF)で除去する。その 信号をリファレンスと比較し差分を出射高周波のゲイン信号としてフィードバックする。

このフィードバック制御で得られた結果が図4である。LPF 通過させたスピル信号が一定になっていることが わかる。試験時の各種パラメータを表1に示す。フィードバック系の各種時定数は先行する事例¹⁾と実際の制御 結果を確認しながら調整した。

^{*1(}公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・加速器室

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井県から施設管理を受託、実施する中で行ったものである。



図1 従来の出射制御系

図2 新出射制御系





図3 スピルフィードバック回路

図 4 フィードバック制御時のスピル信号; 下段:スピル信号,上段:LPF 通過後のスピル信号

シンクロトロン	プロトンの出射エネルギー	200 MeV			
	出射高周波(tune 換算)	3.460 MHz±25 kHz (1.682–1.672)			
フィードバック系	AD サンプリング周波数	100 kHz			
	1/TLPF	500 rad/s			
	1/TL	5.2 rad/s			
	1/TH	500 rad/s			

表1 スピルフィードバック試験時のパラメータ

結言

シンクロトロンの出射制御系の開発を行い、老朽化したシステムを更新した。またフィードバック制御系の試験 では良好な結果が得られた。平成29年度は加速器がほぼ停止しており、ビームを用いた制御系の試験が行え なかった。平成30年度から試験および運用を開始する予定である。

参考文献

- 1) T.Kruita et al., AN IMPROVEMENT OF MATCHING CIRCUIT OF RF KICKER ELECTRODES, The Proceedings of EPAC'06 (2006)
- 2) H. Nishiuchi *et al.*、医療用シンクロトロン向けビーム出射制御システムの開発、第6回日本加速器学会年 会プロシーディングス、287 (2009)

1.4.2. 加速器利用分析技術の開発・高度化

1.4.2.1

シリコン薄膜中の水素分析 Hydrogen Analysis in Silicon Thin Films 鈴木耕拓^{*1}、石神龍哉^{*1}、中田吉則^{*2} Kohtaku SUZUKI, Ryoya ISHIGAMI and Yoshinori NAKATA

Abstract

On the coloring by the silicon deposition, hydrogen quantity in deposited silicon thin films is related with vivid coloring on metal surfaces. Hydrogen quantities of the silicon thin films in various deposit conditions were measured using Elastic Recoil Detection Analysis (ERDA). Hydrogen quantities of the films were determined by comparison with a high molecular film.

要約

シリコン成膜による着色技術ではシリコン薄膜中の水素が鮮やかな色に関係していると考えられる。そこで 様々なシリコン成膜条件で作製した試料に対して、イオンビーム分析である反跳粒子検出法(ERDA)を用いて 水素量を測定した。既知の高分子フィルム中の水素量と比較を行った結果、シリコン成膜条件ごとに水素量を 導出できた。

緒言

若狭湾エネルギー研究センターで開発されたシリコン成膜による着色技術には、マグネトロンスパッタを用いた乾式着色法を用いている。アルゴンと水素の混合ガスを用いてシリコンをスパッタすると、鮮やかな着色ができることが分かっている。これは単なるシリコンの成膜ではなく水素との混合物が形成されているためであると考えられるが、水素分析が困難なことから水素量の測定は実施されていなかった。そこで唯一水素定量分析が可能なイオンビーム分析である ERDA を用いて、シリコン薄膜中の水素分析を行った。

水素定量分析

シリコン成膜の放電ガスであるアルゴンと水素の導入条件を変更し、次の①~④の4種類の試料を作製した。試料はすべてテンパックス(ガラス)上に成膜した。ガス導入条件と触針式段差計で測定した膜厚も記す。

\bigcirc	SiHx/テンパックス	Ar:20 sccm, H ₂ :20 sccm	膜厚 375 nm
2	SiHx/テンパックス	Ar:20 sccm, H ₂ :5 sccm	膜厚 402 nm
3	SiHx/テンパックス	Ar:20 sccm, H ₂ :2 sccm	膜厚 377 nm
4	SiHx/テンパックス	Ar:20 sccm, H ₂ :0 sccm	膜厚 371 nm
5	PPS 膜/テンパックス	比較試料、成膜なし	$1.2~\mu\mathrm{m}$

イオンビーム分析で水素定量を行う場合の一つとして、水素量が既知の薄膜試料と比較することで評価する 方法がある。ここでは高分子フィルムである PPS (ポリフェニレンサルファイド、C₆H₄S)を用いた。PPS フィルム厚 は 1.2 µm で、面密度は 162 µg/cm²、3.61×10¹⁸ 個/cm² である。

ERDA で測定を行うために、試料を設置した様子を図1に示す。図1の上からテンパックス上に成膜した SiHx 試料で、①から順番に並んでいる。成膜条件によってオレンジ色から茶色まで変化していることが分かる。 4 つの試料の下にはテンパックス上に張り付けられた PPS フィルムを設置している。ERDA 測定では 4.5 MeV ヘリウムビームを試料に照射し、30°に散乱された水素を検出した。30°方向に散乱された水素は 15 µmのチタ ン箔を通過し、検出器でエネルギーを測定する。チタン箔により水素以外の元素を排除した。取得したエネルギ ー分布を図2に示す。ヒストグラムの色は、それぞれ①:黒、②:赤、③:緑、④:青、PPS:水色に対応している。

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

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

各試料の絶対値はビームの電流総量で規格化している。横軸 200-500 チャンネルの間のカウント数を積算する ことで水素量の比較を行う。ここで表面や界面に付着した水分は水素定量のバックグラウンドとなるため、水素ガ スを導入していない④の試料を用いてバックグラウンドの差し引きを行った。①から③の総カウント数から④の試 料の総カウント数を引き、水素量とした。これを PPS の結果と比較すると次の結果となった。

- ① 9.09×10^{17} [個/cm²]
- ② 6.29×10^{17} [個/cm²]
- ③ 4.55×10^{17} [個/cm²]

仮にシリコンが通常の固体と同じ密度で成膜されているとすれば、①の試料はシリコンに対して約 50%の水素 が含まれていることになる。また水素ガスの導入量を 1/10 に減らしても、水素含有量は半分程度ほどしか減ら ないことが分かった。

結言

着色のためのシリコン成膜試料には水素が含まれており、薄膜中水素量を測定することで発色との関連性を 定量的に評価できる。そこで実験条件を変更して試料を作製し、イオンビーム分析である ERDA を用いて成膜 されたシリコン中の水素量の比較を行った。今後、技術移転や大量生産を行う場合には、装置ごとに実験条件 を探索する必要がある。このような場合に目視以外の判断手法として、膜厚と水素量の関係から定量的に比較 を行うことが可能となった。



図1 試料①から④とPPS フィルム。試料 番号①から順上からに貼り付けている。



図2 水素のエネルギー分布。試料番号とヒストグ ラムの色はそれぞれ①:黒、②:赤、③:緑、④:青、 PPS:水色に対応している。

1.4.2.2

He-Li 反応断面積の測定とビーム電流計測装置の開発 Measurement for He-Li Cross Section and Development of Measuring System for Beam Current 鈴木耕拓^{*1}、中田吉則^{*2} Kohtaku SUZUKI and Yoshinori NAKATA

Abstract

Quantitative analysis of lithium with accelerators and a time-of-flight elastic recoil detection analysis (TOF-ERDA) system has been developed at the Wakasa Wan Energy Research Center in Fukui Prefecture. The differential cross section for Li(α , α)Li was measured with same setup of the last year, and the cross section values were determined in helium beam energies of 1.65 to 5.0 MeV. A measuring system for beam current was developed, and tested with beam irradiation.

要約

福井県若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)は加速器と飛行時間測定反跳原子検出法(TOF-ERDA) 測定装置を用いたリチウム定量分析手法の開発を行っている。昨年度と同様にヘリウムビームを入射粒子とした ときのリチウムとの反応断面積を求める実験を行い、入射ヘリウムのエネルギー1.65 MeV から 5.0 MeV まで の範囲で反応断面積を導出した。またビーム電流を計測するための装置を開発し、ビーム照射テストを行った。

緒言

リチウムイオン二次電池はエネルギー密度が高く、長寿命であるといった特徴から、現在ではほぼすべての携帯電話やノートパソコンなどのバッテリーに用いられている。しかし、電解質に液体の有機溶媒が用いられており、液漏れや発火の事故が起こっている。そこで全固体リチウムイオン電池の開発が世界で盛んに行われている。全固体のリチウムイオン電池は不燃・難燃性の電解質を用いているため発火の危険がほぼ無く、全固体であるため液漏れも起きない。また構造が単純になるため、安価に製造できるといった可能性を持つ。しかしながら全固体リチウムイオン電池では液体媒質のものよりリチウムの移動が少なく、電池としての性能が低いという問題点があるが、近年解消されつつある。

全固体リチウムイオン電池の開発を加速させるには、電極内でのリチウムの移動を分析し、振舞いを調べるこ とが最も良い指標となる。しかし非破壊でリチウムの定量分析を行う手法は存在しないため、ほぼ非破壊で軽元 素の定量分析が可能なイオンビーム分析の一種である TOF-ERDA 測定法を用い、リチウム定量分析手法を開 発する。リチウム挙動を調べることで、リチウムイオン電池の研究開発の加速が期待される。

TOF-ERDA によるリチウム分析では標準試料なしでリチウム量を導出する手法を開発している。このためには、入射ビームとして用いるヘリウムとリチウムの反応断面積、ビーム電流計測、検出器の検出効率の3つのデ ータが必要である。本研究ではこれらのデータ蓄積および装置の開発を行っていく。

ヘリウムとリチウムの反応断面積の導出

TOF-ERDA におけるリチウム分析では、リチウムと質量の近いビーム粒子を用いることで反跳エネルギーが 高くなり効率的に分析を行うことができる。エネ研ではヘリウムまたは炭素が選択肢となる。この中でヘリウムは軽 いため、同じエネルギーでも物質中飛程が長く表面から深い部分の情報を得ることができる。しかしながら軽い 元素同士の散乱では、数 MeV のエネルギー領域においてラザフォード散乱の反応断面積からずれが生じる。 このため、分析に使用するエネルギー範囲で反応断面積を求めておく必要がある。

平成 28 年度にヘリウムとリチウムの反応断面積を 1.65-3.6 MeV の範囲で求めていた。しかし 2.0-3.2 MeV の領域で核反応による影響が見られ、反応断面積の変化が激しかった。今年度はさらに高いエネルギーのデータを求め、イオンビーム分析に使用しやすい領域を探す。使用した試料および実験セットアップは平成 28 年度と同様である¹⁾。ヘリウムエネルギー 3.6 MeV 以上においても、同様に 50 keV ステップでエネルギーを変更し、反応断面積のデータを取得した。

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが関西電力株式会社、日本原子力発電株式会社、北陸電力株式会社の3社からの受託研究 として実施したものである。

^{*1(}公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザ

一技術開発室

図1にヘリウムとリチウムの反応断面積を示 す。横軸がヘリウムビームのエネルギー、縦軸 がラザフォード散乱との比である。反応断面積 に用いられた試料のベースは窒化シリコンで、 さらに金を蒸着している。ヘリウムとシリコン、お よび金はこのエネルギー範囲でラザフォード散 乱として記述できるため、比較に用いることが出 来る。赤で示した点がシリコンで規格化、黒で 示した点が金で規格化したデータである。シリコ ンは 3.2 MeV 以上で核反応の寄与が生じ、金 は 2.0 MeV 以下で電子遮蔽の効果が現れる ため省略した。どちらで規格化した場合でも 2.0-3.2 MeV の領域で反応断面積は一致し た。1.8 MeV 以下の領域ではラザフォード散乱 に近づき、2.0-3.2 MeV および 4.0 MeV 以上 で核反応の影響が見られる。そこで 3.2-4.0 MeV のヘリウムビームを用いれば反応断面積 の変化が緩やかで分析に使用しやすいことが 分かる。

ビーム電流計測装置

TOF-ERDA では試料をビームに対して 20°程 度に傾けて設置する。このように試料を傾けると、 ビーム照射時に二次電子を放出し、試料ごとに放 出割合が異なるためビーム電流を測定することが 困難である。また実際のリチウムイオン電池の計測 では、電圧をかけながらの測定が必要であり、この ような場合は試料位置で電流計測ができない。そ こで、試料直前にビーム電流を計測するための回 転金属羽を開発した。図2に試料台(右)と金属羽 (左)を取り付けた様子を示す。これはマイクロ波イ オン源イオン注入装置の試料チャンバー中に導入 したときの写真である。金属羽は回転導入機に接 続されており、試料までビーム通しと電流計測を交 互に行うことができる。実際に 50 keV 水素イオン を照射し、ビーム電流が計測できていることを確認 した。



図1 ヘリウムとリチウムの反応断面積比。縦軸がラザフォー ド散乱との断面積比、横軸がヘリウムエネルギーである。



図2ビーム電流計測装置。右側に試料台、左側に計 測用回転羽がある。

結言

ヘリウムとリチウムの反応断面積を 1.65-5.0 MeV の領域で求めた結果、3.2-4.0 MeV の領域は緩やかな 変化を示し、イオンビームの定量分析に使用しやすいエネルギー領域であることが分かった。また試料によらず ビーム電流を計測するため、回転金属羽のビーム電流計測装置を開発し、実際に電流計測ができることを確認 した。イオンビームにおける定量分析のためには、さらに検出器の検出効率等のデータが必要となる。今後は検 出器の性能を数値化し、定量のためのデータとする。

参考文献

1) 鈴木耕拓、中田吉則、安田啓介、(公財)若狭湾エネルギー研究センター研究年報平成28年度、19、76 (2016)

1.4.2.3

大気中 ERDA 分析技術の開発 Development of In-air ERDA Method 鈴木耕拓*1、中田吉則*2 Kohtaku SUZUKI and Yoshinori NAKATA

Abstract

Ion beam analysis is usually performed in the vacuum because it often use several MeV ions. A in-air ERDA system for hydrogen storage materials has been developed in the Wakasa Wan Energy Reserch Center. Hydrogen analysis for high molecular films was performed by using the developed system, and it confirmed the hydrogen quantification.

要約

イオンビーム分析では数 MeV のイオンビームを用いるため、通常は真空中で測定が行われる。水素吸蔵材料などの試料は真空中で測定が困難な場合があるため、若狭湾エネルギー研究センター(エネ研)では大気中で水素などの軽元素が測定可能な装置の開発を行っている。開発した装置を用いて高分子フィルム中の水素分析を行い、水素定量分析が可能であることを確認した。

緒言

元素分析手法は様々あるが、加速器を用いたイオンビーム分析手法は、定量が可能、ほぼ非破壊、かつ軽 元素も測定可能といった特徴を持つ。ただし、よく用いられるイオンビームのエネルギーは数 MeV であり、基本 的に真空中で測定が行われる。この場合、生体試料などは、試料を乾燥処理してから設置する必要があるが、 乾燥処理による変質・変形に注意しなければならない。そのほか、水素吸蔵材料などの場合は、真空中に設置 することが吸蔵ガスの放出につながるため、正確な分析を行うことが出来ない。このように試料によっては大気や ガス雰囲気下で測定する必要がある。イオンビームを大気に取り出すと、数センチメートルでエネルギーをすべ て失ってしまうため、大気中測定を行うためには装置に工夫が必要である。陽子ビームを用いることが多い、粒 子線励起蛍光 X 線分析 (PIXE) やラザフォード後方散乱法 (RBS) は、大気中飛程が長いため、日本国内や世 界でもいくつかの施設で行われている。しかしながら水素などの軽元素が測定可能な反跳粒子検出法 (ERDA) については、試料をビームに対して浅い角度で設置する必要があることや、ヘリウム以上のビームを用いなけれ ばならないため、ほとんど例がない。

本研究では大気中で計測可能な ERDA の装置を開発した。まずは水素の定量分析を目指し、将来的には 深さ分解能よく水素分布を測定できる装置を目指す。

大気中 ERDA 装置

エネ研で開発している大気中 ERDA 装置は、放射線 研究棟照射室1元素分析コースに設置されている。本 装置はビーム取り出し窓として窒化シリコン膜を用いて いる。図1に大気中 ERDA 装置を示す。図1中央に長 方形のビーム取り出し窓があり、試料台に設置した試料 へ照射する。試料台は左右・奥行方向に動かすことが でき、ビーム照射位置やビーム取り出し窓との距離を調 節できる。ビームによって散乱された試料中の水素は、 同じビーム取り出し窓を通り真空中へ導かれ、検出器で 検出される。またビーム取り出し窓の奥には X 線検出 器が設置され、試料などからの X 線を測定することがで きる。



図1 大気中 ERDA 装置

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー
た術開発室

水素分析結果

イオンビーム分析では、反応断面積や ビーム照射量から定量を行うことができる が、元素量が既知の物質と比較すること が最も簡単である。水素の場合は分子構 造が既知の高分子フィルムを用いる場合 が多い。そこで厚さ100 µmのポリエチレ ンテレフタレート(PET)と厚さ1.5 µmの芳 香族ポリアミド(アラミド)フィルムに対して 大気中水素分析を行った。

図2に検出器で検出した水素のエネ ルギー分布を示す。横軸が水素のエネ ルギー、縦軸は検出した数に対応してい る。 上段が PET フィルムのもの(青)、 下 段がアラミドフィルムのもの(赤)である。 アラミドフィルムはチタン板上に張り付け たため、単なるチタン板のデータも黒線 で示している。水素のエネルギーは表面 付近で散乱したものが最も高く、試料内 部で散乱するほど物質中のエネルギー 損失により低く測定される。PET およびア ラミドフィルムの結果とも 1500 チャンネ ル付近から立ち上がる様子を示し、フィ ルム表面付近で散乱した水素である。ア ラミドフィルムの場合は、1000 チャンネル 付近から減少しはじめており、厚さ1.5 μ のフィルム裏面付近の水素が測定されて



図2 水素のエネルギー分布

いる。それに対して PET フィルムの場合は 100 µmと厚いため、より低いエネルギーの水素が検出されている。 2000 チャンネル付近にある小さいピーク構造は、ビーム取り出しウインドウ表面や大気中の水(水蒸気)からの 影響と考えられる。

大気中における ERDA を用い、高分子フィルム中の水素分析を行った結果、表面から深さ数μm程度まで測定可能であることが分かった。

結言

水素吸蔵材料中の水素定量分析を行うため、大気中で ERDA 分析が可能な装置の開発を行っている。これ までに高分子フィルム中の水素の測定を行い、これらフィルムと比較することで未知試料の水素定量分析が可 能なことが分かった。今後は各種の水素吸蔵材料の水素分析を行うほか、窒素などのガス中において測定でき るよう装置の改良を行っていく。

1.4.2.4

TOF-ERDA 測定におけるバックグラウンド軽減の試み Attempt for Background Reduction in the TOF-ERDA Measurement 安田啓介^{*1}、黒田虹輝^{*2}、中田吉則^{*3}、鈴木耕拓^{*4} Keisuke YASUDA, Kouki KURODA, Yoshinori NAKATA and Kohtaku SUZUKI

Abstract

A new shield covering a transmission detector was made for the background reduction in the TOF-ERDA measurement. Test for the new shield was conducted using an electron source, and it was found that the number of electrons counted by the transmission detector was reduced to 24% compared to conventional by using the new shields.

要約

TOF-ERDA 測定におけるバックグラウンド軽減を目的として、透過型検出器を覆う遮蔽体を新たに製作した。 電子源を用いて試験を行い、新しい遮蔽体によって電子のカウント数が従来使用していた遮蔽体を用いた場合 の24% となることがわかった。

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法の一つで、軽元素を元素分離して 優れた深さ分解能で分析することが可能である¹⁾。TOF-ERDA測定では2台の透過型検出器と1台のシリコン 半導体検出器を用いるが、透過型検出器に用いるマイクロチャネルプレート(MCP)検出器は電子に感度を有 するため、測定の際に試料やチェンバー内で発生する二次電子をカウントする。これはバックグラウンドとなり、 測定感度を低下させる要因となる。現在の測定系では二次電子がMCP検出器に入射することを防ぐために前 方透過型検出器の前に金属製の板状のコリメータを設置しているが、バックグラウンドのカウント数は反跳イオン のカウント数の80倍以上と非常に高く、高感度測定のためにはバックグラウンドをより減少させる必要がある。そ こで、本研究では前方透過型検出器を覆うようなコリメータを新たに製作し、その効果を評価した。

実験

加工しやすいアクリル板を用いて新しい遮蔽体を作 製した。従来の測定で使用していた遮蔽体が前面の みを覆うのに対し、新しい遮蔽体は側面および上面も 囲える形状とした。製作した遮蔽体の効果を検証する ために、実際の測定系を用いて実験を行った。実験は 若狭湾エネルギー研究センター放射線研究棟照射室 2のイオン分析コースで行った。図1に本実験のセット アップを示す。ビーム照射により発生する二次電子の 代わりに電子源としてイオンゲージを使用した。遮蔽体 と前方透過型検出器を散乱層内のターンテーブルに 設置後、これまでのTOF-ERDA 測定と同じ条件にな るよう位置を調整した。遮蔽体は前方透過型検出器と イオンゲージを隔てるような配置になっている。各透過 型検出器の MCP の出力を Constant Fraction



Discriminator (CFD) を通してスケーラーでカウントした。セットアップの完了後真空引きを行い、真空度が安定 した後 10~60 秒程度計数し、これを数回繰り返した。まず新たに作製した遮蔽体を設置して測定を行い、次に 従来使用してきた遮蔽体を設置して行った。比較のために遮蔽体なしでの測定も行った。これらの測定からそ れぞれの遮蔽物の有無による1 秒間当りのカウント数の違いを調べた。

^{*1}京都府立大学大学院・生命環境科学研究科・応用生命科学専攻、*2京都府立大学・生命環境学部・環境・情報科学科、*3(公財)若狭湾エネル ギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室、*4(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ 本研究は、京都府立大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

結果と考察

遮蔽体がある場合とない場合のカウント数の比較から遮蔽体の効果を評価する。この場合、両者の測定でイ オンゲージからの電子放出数が同じである必要がある。しかし、イオンゲージからの電子放出数は真空度に依 存する。そこで、遮蔽体なしの場合のデータを一次式でフィッティングすることにより、前方透過型検出器でカウ ントされる電子の個数と真空度の関係を求めた。その結果、イオンゲージで計測した真空度(x Pa)と遮蔽物を設 置していない場合の前方透過型検出器の1秒間当りのカウント数(y)について次式が得られた。

$y = 3.60 \times 10^7 x + 2.30 \times 10^3 \quad (1)$

これを用いて各測定の条件での遮蔽体がない場合の前方透過型検出器のカウント数を求めた。

遮蔽体	カウントレート	真空度(Pa)	遮蔽なしカウント	電子検出率	遮蔽率 (%)
	(/sec)		レート (/sec)	(%)	
新型	350	7.60×10 ⁻⁴	2.97×10 ⁴	1.2	98.8
従来型	564	2.50×10 ⁻⁴	1.13×10 ⁴	5.0	95.0

表1 実験結果

表1に真空が安定した状態での各遮蔽体を用いた測定結果を示す。カウントレートは前方透過型検出器で のカウント数を計測時間で割った値の平均値であり、1秒間当りの電子の計数を示す。真空度は各測定におい てイオンゲージで測定したチェンバー内の圧力である。遮蔽なしカウントレートは遮蔽体がない場合の前方透過 型検出器の1秒間あたりのカウント数で、真空度の値を(1)式に代入して求めた。電子検出率は遮蔽体がある場 合のカウントレートを遮蔽なしカウントレートで割った値で、電子が遮蔽されることなく前方透過型検出器に入射 する割合を示す。この値が小さいほど遮蔽体の効果が大きい。また、遮蔽率は1から電子検出率を差し引いた ものである。従来型遮蔽体と新型遮蔽体の電子検出率を比較すると、前者が5.0% であるのに対し後者は1.2% と前者の24% となった。これは、新型遮蔽体を使用した場合、電子のカウント数が従来型遮蔽体を使用した場 合の24% に減少することを示している。イオンビームを用いた測定でも二次電子によるバックグラウンドが同程 度減少することが期待され、検出感度の向上が見込まれる。

結言

TOF-ERDA 測定に用いる前方透過型検出器の遮蔽体を新たに製作し、電子源を用いてその性能評価を行った。その結果、従来型の遮蔽体を使用したときと比べて電子のカウント数が24%に減少することを確認した。 また、遮蔽率は従来型の95.0%から98.8%に向上した。イオンビームを用いた TOF-ERDA 測定においても二 次電子によるバックグラウンドは同程度に減少することが期待され、検出感度が向上することが見込まれる。 後、加速器からのイオンビームを用いた TOF-ERDA 測定を行い、バックグラウンドと測定感度の評価を行う予 定である。

参考文献

1) 安田啓介、TOF-ERDA による軽元素分析法の開発、まてりあ、52、8(2013)

1.4.3. 放射線場で利用される機器・材料の評価技術開発

1.4.3.1

人工衛星搭載用マイクロコンピュータの耐放射線シミュレーション

Radiation Tolerance Simulation Test for Microcomputer Onboard the Micro Satellite Kanazawa-SAT³ 米徳大輔^{*1}、澤野達哉^{*1}、吉田和輝^{*1}、加川保昭^{*1}、伊奈正雄^{*1}、太田海一^{*1}、 羽鳥聡^{*2}、久米恭^{*3}、長谷川崇^{*4}、水嶋慧^{*3} Daisuke YONETOKU, Tatsuya SAWANO, Kazuki YOSHIDA, Yasuaki KAGAWA, Masao INA, Kaichi Ota,

Satoshi HATORI, Kyo KUME, Takashi HASEGAWA and Satoshi MIZUSHIMA

Abstract

We performed radiation tolerance test on microcomputers onboard a micro-satellite, Kanazawa-SAT³, developed by Kanazawa University. The microcomputer is equipped with a nonvolatile memory using a ferroelectric (FRAM), and is planned to be used for control of a gamma-ray detector, a real time packet communication device, and several satellite-bus devices. Through the radiation tolerance test, we were able to verify that we can operate the FRAM microcomputer for about 10 years in satellite orbit by restarting when a single event occurs.

要約

金沢大学が開発している超小型衛星 Kanazawa-SAT³に搭載するマイクロコンピュータに対する放射線耐性 試験を実施した。ここで用いるマイコンは強誘電体を用いた不揮発性メモリ(FRAM)を搭載したもので、 Kanazawa-SAT³のガンマ線検出器¹⁾²⁾やリアルタイムパケット通信装置³⁾、バス機器の制御で用いる予定であ る。本実験により、シングルイベントが発生した際には再起動することを条件に、宇宙空間で約10年にわたって 動作可能であることを検証することができた。

緒言

金沢大学では、2019年頃の打ち上げを目標に50 cm 立方,50 kg 級の超小型衛星の開発を進めている。理 学ミッション機器として、重力波発生源の一つとして考えられている「短時間ガンマ線バースト」と呼ばれる爆発 現象の方向を決定するための広視野X線撮像検出器や、詳細な発生時刻を知るためのガンマ線検出器を搭載 する。また、発見したガンマ線バーストの情報をリアルタイムで地上に伝送するために、イリジウム衛星を利用し たパケット通信装置を搭載する。本実験の目的は、ガンマ線検出器やリアルタイムパケット通信装置、衛星バス 機器の制御で利用するマイクロコンピュータ(以後、FRAM マイコンと呼ぶ)に対する放射線耐性試験を実施し、 衛星軌道上で長期間にわたって動作可能であるかを検証した。

方法

2017 年 4 月 5 日~6 日 (照射は 4 月 6 日)に、FRAM マイコンに対して 100 MeV のプロトン照射試験を実施 した。ビームサイズは ϕ 60mm (@FWHM)、ビーム強度は SEU 試験の際は約 10⁷ particle/cm²/s, トータルドーズ 試験の際は約 10⁸ particle/cm²/s と設定している。

図1に実験セットアップの概略および写真を示す。照射対象はマイコンチップのみであるため、評価基板に 搭載されているデバッグ用 IC 素子は鉛ブロックで遮蔽した。FRAM マイコンを立ち上げる際に FRAM 領域へデ ータを書き込み、その後は書き込んだデータを参照値と比較し続けるようなプログラムを走らせている。データ領 域において、参照値と異なるビットを検出した場合は、プロトン照射により Single Event Upset (SEU) が発生した ことに相当するため、外部に設置した橙色 LED の点滅周期を変化させることで知らせるようになっている(図1 中、右参照)。一方で、プログラム動作に関わる部分(例えばレジスタ等)で SEU が発生した場合は、LED が点 灯したままや消滅したままになるなど、想定外の挙動を示すことになるため、判別が可能となっている。

^{*1}金沢大学理工研究域数物科学系、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・加速器室、*3(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、*4(同)ハセテック

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

本研究は、科学研究費補助金(16H06342, 15H00780)および文部科学省宇宙航空科学技術推進委託費の助成を受けた。

ウェブカメラにてモニタールームから状況を確認し、SEUが発生した場合はビーム照射を止め、状況を把握した上で再起動することを繰り返した。このような実験により、SEUの頻度を定量化するとともに、マイコンでプログラムが動き続けるかを検証できるようにしている。また、放射線照射による消費電流の変化もモニターした。



結果

2 つの FRAM マイコンに対してプロトン照射を行った際に、SEU が発生した時点でのドーズ量と粒子フルエンスを表1にまとめる。

マイコン No.	Dose [krad]	Total Fluence [particle/cm ²]	プログラムの挙動
	0.7	7.38×10^{9}	2 つの LED がついたまま
#1	1.1	1.17×10^{10}	2 つの LED 点滅周期が約 3 sec まで伸びる
	0.2	2.01×10^{9}	2 つの LED が消えたまま
#2	1.6	$1.60 imes 10^{10}$	2 つの LED が消えたまま
	1.9	$1.95 imes 10^{10}$	2 つの LED 点滅周期が互い違い

表 1. FRAM マイコンで SEU が発生した際のドーズ量および粒子フルエンス

実験結果および考察を簡潔にまとめると、

- ・ SEU 発生頻度は、平均的に(6.4±5.0)×10⁹ particle/cm² で1回程度と考えられる
- ・ FRAM 内よりもプログラム動作に関わる部分の方が SEU の発生頻度が高いと考えられる
- ・ 3×10¹⁰ particle/cm² 程度を照射した時点でプログラムが完全に停止した
- ・ プログラムが停止するまでに、消費電流の変化はほとんど観測されなかった

衛星軌道上では、3×10⁹ particle/cm²/yr 程度の粒子被曝が想定されていることから、誤差は大きいものの、約2年間に1回のSEUが発生すると見込まれる。この場合でも、FRAMマイコンを再起動することで機能を復帰できることが確認できた。また、3×10¹⁰ particle/cm² まではプログラムが動作することを確認できたため、衛星バス CPU で FRAM マイコンの健全性を把握し、適宜、再起動をかけるなどの運用を行えば、軌道上で10年程度は利用できると考えている。以上の実験から、本 FRAM マイコンはガンマ線検出器 ^{1) 2)}や小型リアルタイム通信装置 ³⁾、衛星バス機器の制御で利用できると判断した。

結言

Kanazawa-SAT³で用いる FRAM マイコンが、運用目標である3年間は動作可能であることを検証できた。

参考文献

1) 伊奈正雄 金沢大学自然科学研究科 修士論文(2018)

- 2) K. Yoshida, D. Yonetoku, T. Sawano et al., The International Society for Optical Engineering (SPIE) Conference Proceedings, in press (2018)
- 3) 北昴之 金沢大学自然科学研究科 修士論文(2018)

1.4.3.2

室内実験と探査機の連携で解明する氷天体内部進化:イオン照射による宇宙風化モデリング Evolution of Icy Moon's Interior Uncovered by Laboratory Experiment and Exploration: Modeling of Space Weather by Ion Irradiation 木村智樹*^{1#}、仲内悠祐^{*2}、木村淳^{*3}、鈴木耕拓^{*4}、中田吉則^{*5}、玉川徹^{*1}、早藤麻美^{*1}、 中野俊男^{*1}、村上豪^{*2}、吉岡和夫^{*6} Tomoki KIMURA, Yusuke NAKAUCHI, Jun KIMURA, Koutaku SUZUKI, Yoshinori NAKATA, Toru TAMAGAWA, Asami HAYATO, Toshio NAKANO, Go MURAKAMI and Kazuo YOSHIOKA

Abstract

In our solar system, the subsurface ocean inside icy body is potentially habitable environment for the extraterrestrial life. Focusing on Jupiter's icy moon, we uncover the evolutions of subsurface ocean based on the space weathering on solid surface that is driven by irradiation of energetic plasma around planets. Long-term space weathering at the icy moons through Giga years is modeled by plasma irradiation to surface materials with laboratory experiment. Duration of the icy moon's magnetic field excited by molten interior flow is discussed based on dependence of the space weathering on the surface magnetic field strength. We are going to pin down the subsurface ocean evolution from the magnetic field duration. In this report, we describe current status of our laboratory experiment made with an ion injector at the Wakasa Wan Energy Research Center.

要約

太陽系の氷天体内部に存在する水の海「地下海」は、潜在的に最も可能性の高い地球外生命環境である。 我々は、特に木星の氷衛星に関して、惑星のプラズマが表面物質に照射されて進行する「宇宙風化」という物 理化学に基づいて、地下海の内部進化を解明する。ガニメデ表面物質を模したサンプルに、木星プラズマを模 した荷電粒子を照射する実験室実験に基づいて、10億年に至る長期の宇宙風化を模擬する。この宇宙風化の 進行具合が持つ、表面磁場強度依存性に基づいて、ガニメデの固有磁場の発生年代と継続時間を解明する。 固有磁場は、天体内部の流体物質の分化・運動によって駆動されていることから、磁場の発生年代から、地下 海の発生年代を制約する。本年報では、長期の宇宙風化模擬実験の実施に向けて、若狭湾エネルギー研究セ ンター(WERC)のイオン注入器で実施した予備実験の結果を報告する。

緒言

我々の最終目的は、惑星やその周囲の宇宙空間に存在しうる、生命環境の成り立ちを普遍的に理解することである。特に、太陽系内に多数存在する氷天体に注目する。いくつかの氷天体の内部には、液体の水の海「地下海」の存在が確認されている。地下海には、海底生物のような地球外生命が存在する可能性がある。我々は、2030年代、欧州宇宙機関やJAXAと共同で、木星の衛星である氷天体「ガニメデ」「エウロパ」に探査機を送り込み、氷天体表面や周囲の宇宙環境を精密に測定する。本研究は、それらの環境を、実験室実験で再現し、地下海の発生と進化を解明する。

地下海の発生や進化の鍵となるのが、氷天体を取り囲む宇宙空間のプラズマである。地球や木星は、固有磁場や自転をエネルギー源として、宇宙空間のプラズマを加速・加熱する。そのプラズマは、氷天体に照射され、 表面物質に化学反応や劣化「宇宙風化」をもたらす。宇宙風化は、最高何億年にも渡って氷天体表面で進行 する。氷天体自身も、内部の流体物質の運動に起因して磁場を持っており、惑星プラズマを反射する。氷天体 表面の磁場の強弱は、宇宙風化の度合いに濃淡を生み出す。本研究は、探査機観測と実験室実験の連携で、 宇宙風化の濃淡から、ガニメデやエウロパにおける磁場の発生年代を特定し、内部物質の分化過程や、地下海 の発生年代について制約を試みることを目的とする。

^{*1}理化学研究所・仁科加速器研究センター、*2宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所、*3大阪大学・理学研究科、*4(公財)若狭湾エネルギー 研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*5(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・レーザー技術開発室、*6東京大 学・大学院新領域創成科学研究科

本研究は、理化学研究所奨励課題研究個人型発芽研究課題 "Evolution of Habitable Environments at Icy Bodies in Our Solar System Investigated by Laboratory Beam Experiment"の補助を受け、理化学研究所と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

実験結果

ガニメデやエウロパの表面物質として可能性の高い、硫酸マグネシウム水和物を、直径 20 mm 厚さ3 mm の 同カップに入れ、油圧ポンプによって 20 MPa の圧力で圧縮することでペレタイズする(図 1)。WERC のイオン 注入器を用いて、この試料ペレットに、木星プラズマを模した 50 keV の1 価酸素イオンを照射する。ビーム総 電流は 2.6 µ A から 23 µ A に設定し、2.5 時間から 28.5 時間照射した。これは氷衛星において、2000 年から

20万年程度のプラズマ照射時間に相当する。



図 1:イオン注入機の試料ステージに設置した試料ペレットの様子(左)と、照射後の試料ペレット(右)

照射後の試料表面のスペクトルに有意に赤化と暗化が認められた。赤化と暗化の度合いは、荷電粒子の照 射累積量に比例することが明らかになった。これは、氷衛星の表面スペクトルから、プラズマによる宇宙風化の 年代の測定が可能であることを意味する。本実験では、2000年から20万年程度の年代測定の範囲をカバー することができた。この実験結果は、日本地球惑星連合2018年大会において報告された¹⁾。

今後の研究では、更に大強度の照射を行い、200万年以上に相当する累積照射量を試み、風化が飽和する か調査し、より長期の宇宙風化の年代測定を目指す。また、測定されたスペクトルの変化をもたらす、化学物質 の同定、より現実的な氷試料への照射などに取り組む予定である。

結言

本研究は、氷天体の内部進化の解明を目的に、天体表面におけるプラズマ宇宙風化を再現する室内実験を 実施した。その結果、2000年から20万年スケールの風化について、年代測定を可能にする試料の反射スペク トルの変化が認められた。今後は、より長期の宇宙風化を再現するための実験を実施予定である。

参考文献

1) Tomoki KIMURA et al., Icy Moon's Interior Uncovered by Modeling of Space Weather with Laboratory Experiment, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, PPS01-P02 (2018)

宇宙機適用に向けたペロブスカイト太陽電池の耐放射線性に関する評価 Evaluation of Radiation Tolerance of Perovskite Solar Cells aiming at Space Application 金谷周朔^{*1}、Dayna Erdmann^{*2}、Gyu Min Kim^{*3}、池上和志^{*3}、沼田陽平^{*3}、宮坂力^{*3}、挾間優治^{*4*5}、 秋山英文^{*4*5}、鈴木耕拓^{*6}、小薗江幹太^{*7}、山本知之^{*7}、宮澤優^{*1}、豊田裕之^{*1}、廣瀬和之^{*1} Shusaku KANAYA, Dayna ERDMANN, Gyu Min KIM, Masashi IKEGAMI, Youhei NUMATA, Tsutomu MIYASAKA, Yuji HAZAMA, Hidefumi AKIYAMA, Kohtaku SUZUKI, Kanta OSONOE, Tomoyuki YAMAMOTO, Yu MIYAZAWA, Hiroyuki TOYOTA and Kazuyuki HIROSE

Abstract

To investigate radiation tolerance and mechanism of radiation-induced degradation of perovskite power generation layers, the perovskite single-layer samples instead of perovskite solar cells were irradiated with protons. Those were not degraded by proton irradiations with fluences up to 1×10^{14} /cm². 要約

ペロブスカイト太陽電池の放射線耐性と放射線によって引き起こされる劣化のメカニズムを調査するために、 ペロブスカイト太陽電池ではなく発電層であるペロブスカイト単膜に陽子線を照射した。その結果、1×10¹⁴/cm² 以下のフルエンスでは劣化が見られず、高い放射線耐性を持つことが明らかになった。

緒言

近年、ペロブスカイト太陽電池は目覚ましい発展を遂げている。発電効率は研究レベルで 20% を超え、塗布 により作製可能で Roll to Roll による安価な量産が見込めることから注目を浴びている。太陽電池セル構造で高 い放射線耐性を持つ過去の研究結果 ¹⁾から、ペロブスカイト単膜(発電層)のみに陽子線照射(50 keV、フルエ ンス:1×10¹³、1×10¹⁴、1×10¹⁵(/cm²))を実施し、その前後で走査電子顕微鏡(SEM)、X 線回折装置 (XRD)、フォトルミネッセンス(PL)、時間分解能フォトルミネッセンス(TRPL)測定を実施して、構造的変化とキャ リア寿命の観点から影響を評価した。グレインサイズは約 240 nm、約 340 nm、約 690 nm の 3 種類を準備し、 比較評価を行った(図 1)。陽子線のエネルギー50 keV は、ペロブスカイト単膜内でとどまり大きな損傷を与える ことから選択した。

成果の概要

SEM および XRD 測定では、陽子線照射による変化は見られなかった。一方で PL 発光強度はフルエンス1×10¹⁵ (/cm²)で明らかに減少し、グレインサイズが小さいほど発光強度は小さかった。また TRPL によるキャリア 寿命測定から、ペロブスカイト単膜(発電層材料)が、フルエンス1×10¹⁴ (/cm²)以上の放射線耐性を持つことが

確認された。グレインサイズへの依存性は 見られず、一様にフルエンス1×10¹⁵ (/cm²)でキャリア寿命が低下した。

ペロブスカイト単膜の放射線劣化要因 は再結合中心の増加であり、バルク内に 生じる再結合中心はフルエンス1×10¹⁵ (/cm²)でキャリア寿命に影響を及ぼす濃 度になることを明らかにした。



図1 ペロブスカイト単膜 SEM イメージ (左:グレイン小、中:グレイン中、右:グレイン大)

結言

本研究では、ペロブスカイト太陽電池が陽子線照射に対し高い耐性を持つことを示した。今後は宇宙機への 採用に向けて、電子線、UV 特性、熱特性といった諸特性の評価を進めてゆく。

参考文献 1) Y. Miyazawa et al., iScience., 2, 148-155 (2018)

^{*1(}独法)宇宙航空研究開発機構、*²マサチューセッツ工科大学、*³ 桐蔭横浜大学、*⁴東京大学物性研究所、*⁵ 産総研・東大 先端オペランド計測 技術オープンイノベーションラボラトリ、*⁶(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*⁷ 早稲田大学 本研究は、(国研)宇宙航空研究開発機構と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

1.4.3.4

イオン照射した低チタンバナジウム合金の組織発達過程に及ぼすチタン添加依存性 Dependence of Ti Addition on Structure Development of Ion Irradiated Vanadium Alloy 福元謙一*1、利根薫*1、石神龍哉*2 Ken-ichi FUKUMOTO, Kaoru TONE and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

TEM observation and nano-indenter test were examined for model alloys of V-4Cr-xTi (x is less than 4 wt.%) irradiated with ion accelerator with helium ions. From surveillance examination with the helium ion irradiation, there was same tendency of competition process on both void formation and Ti(CON) precipitate formation depending Ti addition concentration. There is a threshold concentration of void formation an Ti(CON) precipitate formation between x = 0.3 to 1% in the V-4Cr-xTi alloy.

要約

低チタンバナジウム合金の照射組織形成に及ぼす Ti 添加依存性を調べるため、中性子照射材とHe イオン 照射材を用いて TEM 観察とナノインデンター硬さ試験を行った。Ti 添加量によって照射欠陥形成はボイド形 成と Ti/(CON)/Ti 析出物形成の競合過程であることがわかった。V-4Cr-xTi 合金において Ti 濃度が 0.3~1 の間にボイド形成のしきい Ti 添加濃度が存在することがわかった。

緒言

低放射化バナジウム合金である V-4Cr-4Ti は、核融合炉ブランケット構造材として期待されている。ボイドス エリングによる寸法不安定化を抑制するために Ti を添加しているが、Ti を添加することにより、TiO 構造を持ち アニオン副格子に O、C、Nの元素が混在する Ti(CON)析出物が形成され、照射脆化を引き起こす原因となる。 本研究では Ti(CON)析出物形成を抑えるために、Ti 添加量を 1%未満に抑えた V-4Cr-xTi(x=0.1、0.3、1)合 金の中性子照射材および He イオン照射材を用いて、照射微細組織の TEM 観察およびナノインデンター硬さ 試験による照射硬化の計測を行った。また Ti 添加濃度を抑え Cr 添加濃度を増やしたバナジウム合金に He イ オンを照射し、Ti 添加濃度抑制に伴う材料強度の低下を、Cr 添加によってカバーできるかをナノインデンター 硬さ試験によって計測した。

実験方法

He イオン照射実験

バナジウム合金の照射硬化および照射後の微細組織構造を見るため、若狭湾エネルギー研究センターのタンデム加速器を用いて、2 MeV、500℃、1 dpa および 2 dpa で He イオン照射を行った。

ナノインデンター硬さ試験

He イオン照射を行ったバナジウム合金を用いてナノインデンター硬さ試験を行った。バナジウムは bcc 構造 であるため、すべり方向<111>に最大せん断応力がかかるように圧子を打ち込む結晶を選定し測定した。

● 照射微細組織観察

損傷量1 dpaのHeイオン照射したバナジウム合金(V-4Cr-0.1Ti、V-4Cr-0.3Ti、V-4Cr-1Ti)の照射微細組 織観察を行うため、FIBを用いてTEM 試料を作製し観察を行った。TEM 観察は室温、200 kVの条件で行った。

結果·考察

He イオン照射材

図1に、Heイオン照射したバナジウム合金の照射硬化量ΔUMHを示す。V-4Cr-0.1Ti及びV-4Cr-0.3Ti 合金では、ボイド形成による照射硬化は、同程度の増加であったが、V-4Cr-xTi合金のTi添加量の増加に伴 い、Ti添加による典型的な硬度の変化にかかわらず、照射硬化が増加していることが確認された。

● 照射組織断面 TEM 観察

図 2 に 2 MeV、500℃、1 dpa の条件で He イオン照射を行った V-4Cr-xTi(x=0.1、0.3、1)合金の照射断面 TEM 観察を示す。深さ 2 µm 付近に損傷ピーク位置が形成されていた。V-4Cr-0.1Ti 合金と V-4Cr-0.3Ti 合

^{*1}福井大学、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ 本研究は、福井大学と(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

金では図 2 から分かるように照射欠陥のプロファイルはほとんど同じであったが、V-4Cr-1Ti 合金では欠陥プロファイルは同じであるものの、直径 100 nm 程度の Ti (CON) バルク析出物が形成されていた。損傷ピーク付近の断面組織観察を図 3 に示す。1 dpa 照射した V-4Cr-1Ti 合金ではボイドの形成は見られなかったが、電子回折像からマトリックス中 Ti (CON) 析出物形成が見られた。一方、V-4Cr-0.1Ti および V-4Cr-0.3Ti では析出物の形成は見られなかったが、損傷ピーク付近にボイドが形成されており、両合金のボイド平均直径および数密度は、それぞれ約 2 nm および>10²³/m³であった。He イオン照射した V-4Cr-xTi 合金の微細組織観察から、ボイド形成と Ti (CON) 析出物形成が共存している組織は観察されず V-4Cr-1Ti には結晶構造が TiO 結晶と同じ構造と考えられる円状の析出物が見られたことから、ボイドおよび析出物形成に係る Ti 添加濃度のしきい値は、Ti 添加濃度 0.3%<x<1%の範囲で存在していることが分かった。

バナジウム合金の最適組成

中性子照射材および He イオン照射材の微細組織観察から、1%の Ti 添加によってボイドスエリングを十分に 抑制できることが確認された。また、ナノインデンター硬さ試験の結果から Ti の代わりに Cr を添加しても、Ti の ような照射硬化の促進は見られなかった。以上のことから、核融合炉ブランケットに用いるバナジウム合金は Ti 添加濃度 0.3%~1%および Cr 添加濃度>8%の合金(例えば V-10Cr-1Ti 合金など)が最適であると考えられる。

結言

Ti(CON)析出物による低照射硬化と中性子照射によるボイドスエリング抑制のバランスをとる Ti 添加量の最 適化を検討するため、V-Cr-xTi 系合金を用いた中性子照射材および He イオン照射材の解析を行った。He イ オン照射した V-4Cr-xTi の微細構造における Ti 添加濃度依存性を調べるために、TEM 観察およびナノイン デンター硬さ試験を行った。V-4Cr-1Ti 合金では、すべての実験条件において Ti(CON)析出物の形成が確 認された。また、中性子照射実験と He イオン照射実験から、ボイド形成と Ti(CON)析出物形成が共存するマト リックスが見られなかったことから、ボイド形成と Ti(CON)析出物形成に係る欠陥種は同一であることが確認され た。V-Cr-Ti 系合金の照射硬化には Ti 添加濃度が依存しており、これは TiO 析出物が転位に対する主要な 障害物であると考えられる。V-8Cr-1Ti 合金においては、Cr 添加量の増加に伴う照射硬化の促進は確認され ず、低チタンバナジウム合金の材料強度を上げるために Cr を添加することは有効であることが確認された。



図1 He イオン照射後の照射硬化量AUMH (上)V-4Cr-xTiのTi添加量によるAUMH依存性 (下)低Ti添加合金のCr濃度によるAUMH依存性







1.4.3.5

放射線遮蔽用可とう性材料の性能評価 Performance Evaluation of Flexible Material for Radiation Shielding 執行信寛^{*1}、今富宏祐^{*1}、三根貴大^{*1}、木村健一^{*2}、長谷川崇^{*3}、久米恭^{*4} Nobuhiro SHIGYO, Kosuke IMATOMI, Takahiro MINE, Ken-ichi KIMURA, Takashi HASEGAWA and Kyo KUME

Abstract

Neutron attenuation of flexible material for radiation shielding was measured by activation method. Neutrons generated by spallation reaction were used. It is found that attenuation coefficient of continuous energy neutron between 0.01 eV and 200 MeV is 0.052 cm^{-1} .

要約

放射線遮蔽用可とう性材料の中性子遮蔽性能を放射化法により測定した。この材料の 0.01 eV から 200 MeV の連続エネルギー中性子に対する減弱係数は 0.052 cm⁻¹となることがわかった。

緒言

加速器施設でコンクリート等を配置することが困難な箇所に適用できるように開発された可とう性を有する材料の放射線遮蔽性能を調べることを目的とする。200 MeV 陽子ビームと鉄の核反応で生成される連続エネルギー中性子を使用して、この可とう性材料の中性子の透過量を調べた。

方法

実験は、若狭湾エネルギー研究センター多目的加速器システム照射室4高エネルギー生物照射装置で行った。放射線遮蔽用可とう性材料は、ウレタンをベースとして水素含有量をコンクリート程度に高めたもので、密度 1.0 g/cm³のラディシールとさらにホウ素を添加した密度 1.18 g/cm³のホウ素入りラディシールを準備し、どちらも厚さ 10 cm の試料を使用した。

実験では 200 MeV 陽子を厚さ6 cm の鉄板に入射し、核反応により生成された連続エネルギー中性子を使用した。可とう性材料遮蔽体の前後に¹²C、²⁷Al、⁶³Cu、¹¹⁵In、¹⁹⁷Au、²⁰⁹Bi 放射化測定用金属箔を設置し、中性子を 90 分照射した。照射終了後放射化反応生成物からの崩壊ガンマ線をゲルマニウム検出器で測定した。崩壊ガンマ線の計数値、放射化断面積、照射時間などから遮蔽体前後の放射化検出器を通過する中性子束を導出して、中性子透過率を求めた。

結果と考察

図1に0.01 eV から200 MeV までの中性子が厚さ10 cm の可とう 性材料を透過した量を示す。この結果から線減弱係数はラディシー ルで0.052 cm⁻¹、ホウ素入りラディシールで0.054 cm⁻¹となった。ホウ 素入りラディシールの方は密度が高いこととホウ素を含有しているた め主に低エネルギー中性子の遮蔽能力が向上していることがわか る。

結言

可とう性材料の連続エネルギー中性子透過率を測定することで中性子遮蔽性能の指標となる線源弱計数を得ることができた。



図 1 ラディシールとホウ素入りラディシールの 0.01 eV から 200 MeV までの連続エネルギー中性子の 減弱の実験結果

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

本研究は、九州大学、(株)フジタ、(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

1.4.3.6

ジルカロイ2に不純物として含まれる水素化物への重イオン照射効果 Radiation Effects of Heavy Ions on Hydride Impurity in Zircaloy-2 安永和史*1、渡邉英雄*2 Kazufumi YASUNAGA and Hideo WATANABE

Abstract

Heavy ion irradiation effect on hydride as impurity in a Zircaloy-2 specimen was examined by scanning transmission electron microscopy (STEM). STEM revealed that the decrease in volume density of hydride especially for the size below 150 nm in diameter occurred probably due to the reaction between vacancies induced by displacement damage and hydrogen atoms.

要約

ジルカロイ2 に製造時から存在する水素化物への重イオン照射効果について STEM (Scanning Transmission Electron Microscopy)により調査した。150 nm 未満のサイズの水素化物の体積密度が顕著に低下する現象が 観察され、その原因として弾き出し損傷により生じた Zr 空孔とHの反応が考えられる。

緒言

ジルカロイ2は沸騰水型の軽水炉(BWR)の燃料被覆管材料として用いられている。この材料は母相のZr に、機械的特性、耐酸化性、耐食性の改善を目的として様々な元素(Fe、Cr、Ni、Sn)が添加されており、添加 元素の一部は金属間化合物として母相に析出している。ジルカロイ2は高燃焼度において脆化することが知ら れており、金属間化合物、水素化物、照射欠陥の存在が複雑に絡まり合った現象と考えられる。

昨年度は、ジルカロイ2中の添加金属元素が母相のZrに析出した金属間化合物の構成元素の重イオン照射による変化について調査した。元素分析による金属間化合物中のFeの含有率の減少の程度の評価により、 重イオン照射下での相安定性はZr₂(Fe, Ni)の方がZr(Fe, Cr)₂よりも高いことが明らかとなった。本年度は、ジル カロイ2の製造時において存在する水素化物(不純物として含まれるHに由来)への重イオン照射効果につい て報告する。

成果の概要

試料はジルカロイ2で、その成分元素(上段)及び不純物元素(下段)の分析値を表1に示す。焼鈍したジル カロイ2試料に、九州大学応用力学研究所に

設置されたタンデム型加速器を用いて重イオン を照射した。重イオンの照射条件は、イオンエ ネルギー及びイオン種は 3.2 MeV の Ni³⁺、試 料温度は 400℃、ピーク照射量は 30 dpa で ある。重イオン照射された試料は、断面方向 から観察するために集束イオンビーム装置 (Focused Ion Beam; FIB、FB-2100、 HITACHI)を用いて薄膜化された。試料の微 細組織の観察には透過型電子顕微鏡

表 1 ジルカロイ 2 の成分元素(上段)及び不純物元素 (下段)の分析値

	Sn	Fe	Cr	Ni	Zr
wt.%	1.38	0.15	0.09	0.05	Bal.
	Н	С	Ν		
wt. ppm	25	270	80		

(TEM、JEM-3000F、JEOL)を用い、STEM 明視野像を取得した。電子の加速電圧は 300 kV である。図1は、 重イオン照射されたジルカロイ2を断面方向から観察した STEM 明視野像である。Ni イオンの入射方向は図左 から右である。筋状の黒いコントラストを呈する水素化物が存在しており、一例としてある水素化物を点線の楕円 で囲んで示した。水素化物の分布には縦破線の左右で顕著な違いが認められ、破線より左の領域では右の領 域と比較して密度が低い。破線は試料表面から 2 µm の深さである。この深さは弾き出し損傷により析出物の組 成に顕著な変化が確認された領域の表面からの距離に対応している(平成 28 年度)。試料表面から 2 µm の領

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが九州大学応用力学研究所と共同で実施したものである。 本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けた。

^{*1(}公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*2九州大学応用力学研究所・核融合力学部門・先進炉材料分野

undamaged

area

域において水素化物の密度が低いことは、析出物の組成変化と同様に弾き出し損傷に起因していると考えられる。そこで以下では、破線の左右の領域を損傷領域及び非損傷領域とよぶことにする。

次に、弾き出し損傷が水素化物の密度やサイズにどの程度の影響を与えているのかについて定量的に示す。水素化物の体積密度は、非損傷領域において1.9×10²⁰/m³、損傷領域において9.2×10¹⁹/m³と評価され

beam

た。損傷領域における体積密度は、非損傷 領域の48±8%である。図2は水素化物の サイズとそのカウント数を非損傷領域(a)およ び損傷領域(b)について計測した結果であ る。ここで、横軸は水素化物のサイズ(長軸 長さ)、縦軸はそのカウント数である。非損傷 領域と損傷領域のサイズ分布を比較すると、 顕著な違いが150 nm 未満のサイズの水素 化物に確認された。この領域は図2中に破 線及び矢印で明示している。150 nm 未満の サイズの水素化物の全体積密度に占める割 合は、非損傷領域では63±10%、損傷領域 では24±8%である。

表2は、サイズが150 nm 未満及びそれ以 上に分布する水素化物の体積密度を損傷領

direction 2 μm

damaged

area

図1 重イオン照射されたジルカロイ2を断面方向から観察 した STEM 明視野像。水素化物を楕円で囲んで示した。

域及び非損傷領域で比較した結果である。サイズが150 nm 以上では、損傷領域及び非損傷領域において水

素化物の体積密度に変化はみられない。一方、サイズが 150 nm 未満では、損傷領域における水素化物の体積密 度は非損傷領域の18±6%に過ぎない。これらの結果か ら、損傷領域での水素化物の体積密度の減少は、弾き出 し損傷により150 nm 未満のサイズの水素化物が顕著に 消滅したことに起因すると考えられる。この機構として、弾 き出しにより生ずる空孔とHの反応による母相の Zr への Hの再固溶等が考えられる。Zr 中での水素化物(長軸長 さ約 100 nm)の存在は、製造時に不純物として含まれて いた 50 wt. ppm の H に起因するとの報告¹⁾がある。本研 究で用いたジルカロイ2にも同様に製造時にHが不純物 として 25 wt. ppm 含まれており(表1)、水素化物として存 在していた可能性が高い。すなわち、今回の結果は一定 量のHを含有するジルカロイ2中での水素化物の照射 下安定性に関するものである。炉の運転中、母相である Zr 中のH濃度は、被覆管表面と高温水との反応等によ り増加するため、サイズのより小さな水素化物でも安定な 可能性が指摘される。

結言

重イオン照射によるジルカロイ2 試料中の損傷及び 非損傷領域の微細組織を比較することにより、製造時からの存在と考えられる水素化物の弾き出し環境下での挙動を調査した。その結果、弾き出し損傷により150 nm 未満のサイズの水素化物の密度が低下する現象が確認され、過剰空孔を含む母相の Zr 中に空孔とHの反応によりHが再固溶した可能性が考えられる。

参考文献

1) 山田進、亀山高範、電力中央研究所報告書 Q06020、p4-5 (2007)



図2 非損傷領域(a)および損傷領域(b)における 水素化物のサイズ分布の比較

表 2 サイズ 150 nm 未満及び以上の水素化物の 体積密度の損傷及び非損傷領域での比較

	体積密度 (m⁻³)		
サイズ	損傷領域	非損傷領域	
150 nm未満	2.2x10 ¹⁹	1.2x10 ²⁰	
150 nm以上	7.0x10 ¹⁹	7.0x10 ¹⁹	

1.4.3.7

宇宙機搭載用機器に対する高エネルギー陽子線照射技術の開発

Development of a Proton Irradiation Technique for Electronic Devices to be Mounted on Spaceships 久米恭*1、水嶋慧*1、山東新子*1、長谷川崇*2、羽鳥聡*3、瀧田正人*4、鳥居建男*5

Kyo KUME, Satoshi MIZUSHIMA, Shinko SANDO, Takashi HASEGAWA, Satoshi HATORI, Masato TAKITA and Tatsuo TORII

当センターでは、近年の宇宙開発のニーズの高まりを受け、当センターに設置されている 200 MeV 陽子シン クロトロンによる宇宙線模擬照射試験環境の提供に取り組んでいる。今回はこの取り組み状況について報告す る。

平成29年度は、当センターに設置されている多目的イオン加速器システムが故障したことを受け、当センタ ーでの宇宙線模擬照射試験を代替実施できる施設を調査した。その結果、一部の試験に対しては、(国研)量 子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所の70 MeV 陽子サイクロトロンが有望であることを見出し た。そしてユーザーからの要求に応じ、同施設において照射野形成試験と宇宙線模擬照射試験を実施した。

また並行して、宇宙線模擬照射のビーム試験で二次粒子として発生する高エネルギーガンマ線の計測技術 開発のため、ビーム試験時に発生するガンマ線と類似のエネルギー領域の光子線の測定が期待できる東京大 学宇宙線研究所乗鞍観測所において、前年度に引き続き、Nal スペクトロメーターを使用した高エネルギー光 子線連続測定を実施した。現在、時間的な光子線分布について解析を継続している。

平成30年度には、当センターでの加速器運転再開とともに、当センターでの宇宙線模擬照射ビーム試験を 再開する。また乗鞍観測所での NaI 検出器のテスト運転の結果を踏まえ、当センターでのビーム試験時に高エ ネルギーガンマ線の計測を行う計画である。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ、*2(同)ハセテック、*3(公財)若狭湾エネルギー研究センター・ 研究開発部・加速器室、*1東京大学宇宙線研究所、*5(国研)日本原子力研究開発機構

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが東京大学宇宙線研究所の共同利用研究 D05 で得た成果の一部を含む。

1.4.3.8

火星衛星探査機 MMX 搭載用撮像素子の耐放射線性評価基礎研究 Basic Study for Radiation Tolerance Test of Martian Moons eXploration's Scientific Imagers 尾崎正伸*1、石神龍哉*2 Masanobu OZAKI and Ryoya ISHIGAMI

2024 年打上予定の火星衛星探査機(Martian Moons eXploration)MMX に搭載する科学観測用カメラ素子の 耐放射線性評価を目的とした実験を行った。劣化の主な原因はプロトンが半導体結晶格子をずらすことで起こ る non-ionization energy loss であるため、評価は一般に加速器のプロトンビームを用いて行われる。

素子は差渡し20 mm 以上と、制御されたビームの直径に比べ大きい為、素子各部の被爆量を制御するには 工夫が必要になる。我々は収束した8 MeV プロトンビームを金薄膜に入射し、その薄膜上の一点で散乱したプ ロトンを素子に照射するというアプローチを取っている。この方法の技術的な難しさは、散乱断面積の低さを補う ために大ビーム強度が必要なことと、素子各部での線量を制御するために真空中で用いる可動遮蔽体が必要と なることである。

照射実験は4月初旬に1日間行った。当初計画通りの2µAを金薄膜に照射したところ、急激なアウトガスを 生じたため、結果として1/10のビーム電流で実験を実施した。照射完了後に実験装置を観察したところ、ビー ム経路近傍のプラスチック基板に著しい焦げが発見され、これがアウトガスの原因と考えられる。ビームの広がり を過小評価したことによる事象であり、次実験ではビームに面する場所は全て接地した金属で被覆する処理が 必要との知見を得た。なお、可動遮蔽体は真空度を損なうことなく正常に動作した。

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

初回の失敗を受け2度目の実験を計画していたが、加速器故障により本年度は実施できなかった。

^{*1(}国研)宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・太陽系科学研究系、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料 グループ

1.4.3.9

低放射化建築用部材の性能評価研究

Fundamental Investigation on Performance Evaluation of Low Activation Building Materials 木村健一*1、森大樹*1、長谷川崇*2、執行信寛*3、高田卓志*4、久米恭*5 Ken-ichi KIMURA, Taiki MORI, Takashi HASEGAWA, Nobuhiro SHIGYO, Takushi TAKATA and Kyo KUME

医療用加速器施設での使用を想定した放射線遮蔽用建材の低放射化性能の評価を行うための基礎的な検討を進めている。放射化が問題となる数 MeV以下の中性子源として、タンデム加速器で発生させた陽子を鉄ターゲットに入射させて発生する中性子場をPHITSコード(Ver3.02)により評価した。その結果、現状のビーム条件(9 MeV陽子、8 μA)で 30 分程度照射すれば、前方方向に発生する中性子により、10 cm厚のコンクリート中の金箔(11 mm φ、60 mg)の放射能値が数百 Bq程度となるので、この体系で実験を行うことが可能であることがわかった。さらに、実験を想定した照射室2は、ターゲット以降の空間があまり広くないことから、周りからの反射中性子を減らし材料の透過中性子量を評価できるように、ホウ素入りのコンクリート遮蔽材を配置することとした。

これらの基礎検討を下に、2018年度は実際のビームを使った試験を実施する予定である。

*1(株)フジタ・技術センター、*2(同)ハセテック、*3九州大学・大学院工学研究院・エネルギー量子工学部門、*4京都大学原子炉実験所、*5(公財)若 狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・粒子線医療研究グループ

本研究は、(株)フジタ、九州大学、京都大学、(公財)若狭湾エネルギー研究センターの共同研究として実施したものである。

1.4.4. 材料技術の開発

1.4.4.1

水素の安全な輸送と取り扱いに利用可能な水素吸蔵合金の開発 Development of Hydrogen Storage Alloy for Safe Transporting and Handling of Hydrogen 石神龍哉^{*1}、安永和史^{*1}、鈴木耕拓^{*1} Ryoya ISHIGAMI, Kazufumi YASUNAGA and Kohtaku SUZUKI

Abstract

We investigated a method for manufacturing hydrogen storage alloy suitable for transporting and handling of hydrogen that is used as fuel for transport equipment such as automobiles and railway vehicles, work equipment such as agricultural equipment and forklift, and portable generator. Magnesium hydride MgH₂ contains 7.6 wt% hydrogen but is not practical because the hydrogen release temperature is as high as 300°C or higher. We surveyed the literature on methods of lowering desorbing temperature of hydrogen and gave an idea to develop new hydrogen storage alloys. Various metal layers such as Nb, Ni, Ti, and Co were deposited on MgH_x films and the temperature was raised at a rate of 5°C/min. Starting temperature of hydrogen release was lowest by depositing a Ni layer. Hydrogen release started at 130°C and finished at 200°C.

An analysis of the electron diffraction pattern of a MgH_x thin film deposited by radio-frequency magnetron sputtering revealed that the structure of the MgH_x is hexagonal with almost the same lattice constant of pure Mg. This result suggests that the possible occupied sites of hydrogen atoms in MgH_x with hexagonal structure are tetrahedral site (interstitial), and moreover, partly Mg lattice vacancy site.

On the in-air ion beam analysis, it is required for changing scattering and target angles on thickness of thin films. Therefore, in-air systems were developed in some of the patterns. 要約

自動車、鉄道車両等の輸送機器や、農耕機具やフォークリフトといった作業機器、可搬型発電機などの燃料として水素を輸送・利用するために適した水素吸蔵合金を作製する方法に関する調査を行った。水素化マグネシウム MgH₂ は水素を 7.6 質量%と高密度で含むが水素放出温度が 300℃以上と高く実用的ではない。水素の放出温度を低下させる方法について文献調査し、新しい水素吸蔵合金の開発指針を示した。さらに、マグネトロンスパッタ蒸着により作製された MgHょ薄膜に様々な金属を成膜し、5℃/分で昇温すると Ni を成膜したときの水素の放出温度が最も低くなり、130℃で放出が始まり 200℃で終了した。MgHょ薄膜から得られた電子線回折像の解析から、MgHょは純 Mg と同一構造の六方晶であり、格子定数もほぼ純 Mg と同一であった。この解析結果から、水素は 4 面体位置(格子間)さらには空孔に一部蓄積されていると考えられる。大気中イオンビーム分析では測定したい試料の膜厚によって散乱角度や試料設置角度を変更する必要がある。そこで複数の散乱角度および試料設置角度に対応する装置の開発を行った。

緒言

石炭や石油といった化石燃料は有限であり、また燃焼により地球温暖化ガスである二酸化炭素が発生するため、再生可能エネルギーである水素を利用する水素社会の実現が望まれている。自動車、鉄道のような輸送機器や作業機械などの燃料として水素を利用する場合には、貯蔵容器はできるだけ軽量になるようにし、かつ容器が事故などで壊れても安全であり、複雑な工程を経ずに内燃機関または燃料電池へ水素を供給できなければならない。また、水素の補給も安全に行える必要がある。

水素吸蔵合金は、水素の放出が吸熱反応であるので発火しにくく、圧力が数気圧程度と低いため扱いやすい。一方で質量当たりの水素含有量が小さく、実用レベルでは2質量%程度に留まっている。本研究では輸送 機器の燃料供給用材料として水素吸蔵合金を利用するために必要な技術の開発を行った。

成果の概要

1. マグネシウム系水素吸蔵合金の水素放出特性に関する文献調査

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

水素化マグネシウム MgH₂ は水素含有量が 7.6 質量%と大きいが、水素放出温度が約 300℃であるため、合金の温度を上げるためのエネルギーが大きくなり、また温度上昇に必要な時間も長くなる。温度上昇に必要なエネルギーの減少と加熱時間の短縮のためには合金を改良しなければならない。そこで、水素の放出温度を低下させる方法について文献調査を行い、新しい水素吸蔵合金の開発指針を示した。

調査した文献の多くでは粉末 MgH₂をボールミル処理で粉砕しているが、処理には数時間を必要としており 効率が悪く、また安定な結晶構造が大部分となるため水素放出温度が大きく下がる報告は少ない。一方で成膜 法では、成膜基板に Mg を密着性良く成膜した後に水素化することで、膨張により結晶構造を不安定化し水素 放出温度を下げる方法が報告されている。水素放出を促進する物質には、Ni、In、Cu、Ti、Co、Pd といった単体 金属、TiF₃、V₂O₅、TiC といったフッ化物、酸化物、炭化物、TiFe、Mg₂Ni といった合金、カーボンナノチューブ、 グラフェンといった立体構造を持つ物質など様々な物質が有効であることが分かった。ボールミル処理で MgH₂ と触媒物質との接触面積を大きくするには、触媒物質をナノ粒子の形状とする必要があるが、成膜法では MgH₂ 層と触媒層との接触を容易に行うことができる。Nb と Mg とを交互に成膜して水素化することで、室温付近から 水素が放出されるという結果が報告されている。これらの結果から、成膜法の場合と同等の水素圧力下で Mg を 蒸発させ、液体窒素で冷却した基板に MgH₂の組成で堆積させることで不安定な結晶構造とし、また Ni、Nb な どの触媒物質と交互に積層させ MgH₂と触媒物質との接触面積を増大させるという方法が、水素吸蔵合金の作 製方法としては有効であると推測される。

2. 真空蒸着法による水素化マグネシウム(MgHx)薄膜の構造解析

高周波マグネトロンスパッタ 装置を用い真空蒸着法で作 製された MgH_xの構造を電子 線回折像を解析することにより 行った。図1は左から右に、 蒸着直後のMgHょ薄膜の実 像(TEM 暗視野像)、電子線 回折像、構造模式図である。 実像中の白いコントラストを示 す不定形の粒が MgH_xの個々 の結晶粒である。電子線回折 像において、離散的な斑点か ら構成される同一半径の円 を、中心点からの距離が近い 順に1~5と番号を付してい る。1~5の円は、六方晶 (hcp)の構造である Mg (a=0.32094 nm, c=0.52105



図1 MgH_x薄膜の暗視野像、電子線回折像、構造の模式図

nm)の(*hk*)面、(100)、(002)、(011)、(01-2)、(2-10)で指数付けされた。すなわち、MgH_xは hcp 構造の Mg と同 一構造で格子定数もほぼ同一であると同定された。hcp 構造の金属の場合、主として 4 つの金属原子が形作る 正四面体の中(T サイト、4 面体位置とよばれる)に H が存在していることが中性子回折等の実験により明らかと なっている¹⁾。本研究においてマグネトロンスパッタ法により作製した MgH_x試料も同様に、H が T サイトに格子 間原子として主として存在していると考えられる。一部の H は、Mg 空孔に蓄積されている可能性を指摘してお く。

3. 触媒物質の成膜による MgH_x薄膜からの水素放出特性の改良

平成 28 年度には、水素化マグネシウム MgH_xからは 350℃でも水素が放出されなかったが、MgH_x層に Pd 層を堆積することで、水素放出開始温度を 110℃に低下させることができることが分かった。しかし、Pd は貴金 属であるため水素吸蔵合金の触媒として利用するには高価である。そこで、Pd 以外の金属を触媒として MgH_x 層の上に堆積し、水素放出特性を観察した。 ステンレス鋼板上に、ArとH2の混合ガスを放電ガスとして高周波マグネトロンスパッタ法で Mgを堆積することで厚さ 1.9 µmの MgHx膜を作製した。水素化マグネシウム膜の組成比は測定していないため MgHxと表記している。成膜中にステンレス鋼板の加熱は行わなかった。触媒物質としては Nb、Ni、Ti、Coを選択した。触媒物質の膜の厚さは 50 nm とした。成膜には二台のマグネトロンスパッタ装置が付属した成膜装置を用い、試料を大気にさらすことなく MgHxと触媒物質を連続して成膜した。成膜装置から大気中に取り出された試料は 5 分以内

に赤外線ランプアニール炉に入れられて真空引 きされ、真空引きから2時間後に5℃/分の速度 で昇温し、温度に対する真空度の値が測定され た。温度と真空度の関係を図2に示す。図に示 したように、触媒物質を成膜しなかった試料、 Nb、Tiを成膜した試料では、水素の放出開始温 度が270℃以上であり、触媒効果は観察されな かった。一方で、Niを成膜したときには 130℃付 近から水素の放出が始まり、195℃でピークに達 した後、200℃までに急速に放出が終了した。Co の場合には160℃付近から水素の放出が始ま り、210℃でピークになった後、急速に放出が終 了した。このように、NiとCoには水素の放出を 促進させる触媒効果があり、特に Ni は Pd より も20℃程度高いがほぼ同じ傾向を示したこと から、NiにはPdに近い触媒効果があることが 分かった。



図2 触媒金属を成膜したMgHx膜の昇温に対する真空度の変化

4. 大気中イオンビーム分析装置の改良・作製

これまでイオンビーム分析手法である反跳粒子検出法(ERDA)を大気中で行う装置を開発し、50 nm 程度の 薄膜においても水素の検出ができることを確認した。ERDA による水素分析ではヘリウムビームを試料に照射 し、反跳水素を測定する。このとき、散乱角度が浅いほど反応断面積が大きくなり検出効率が高まる。しかし散 乱角度が浅ければイオンビームの大気中におけるエネルギー損失が大きくなるため、深さ分解能の悪化が起こ り、また表面から浅い部分の情報しか得られない。分析したい試料によって散乱角度および試料設置角度を変 更する必要があるため、散乱角度として 30、35、40°、試料設置角度として 15、20°の各パターンで実験が行 えるよう複数の装置を作製した。

結言

自動車、鉄道などの輸送機器や作業機械の燃料として水素を利用するときの取り扱いを容易にするために用いる水素吸蔵合金の改良方法について文献調査を行った。

マグネトロンスパッタ蒸着法により作製された MgH_x薄膜の結晶構造は、純 Mgと同一の六方晶で、格子定数 もほぼ純 Mgと同一であった。水素は MgH_x中の4面体位置さらには一部空孔に蓄積されていると考えられる。

Nb、Ni、Ti、Coを水素化マグネシウム薄膜に成膜して昇温し、水素が放出される温度を測定した。その結果、 Niには Pd に似た水素放出温度を下げる効果があることが分かった。

参考文献

1) 深井有、田中一英、内田裕久、水素と金属 次世代への材料学、内田老鶴圃 材料学シリーズ、第2版、 p.56

1.4.4.2

シリコンの成膜による絶縁性材料の着色 Coloring of Insulating Materials by Depositing Silicon Films 石神龍哉*1 Ryoya ISHIGAMI

Abstract

Electrically insulating materials such as plastic plates and glass plates were colored by deposition of silicon films. Plastic plates and glass plates were colored in various colors by deposition of titanium films as a reflective layers and further deposition of silicon films as an interference layers of light.

要約

プラスチック板、ガラス板といった電気的に絶縁性の材料の表面を、シリコンを成膜することにより着色した。 光の反射層としてチタンを成膜し、その上に光の干渉膜としてシリコンを成膜することで、プラスチック板、ガラス 板を様々な色に着色することができた。

緒言

材料上に光透過性の膜を形成し、光の干渉を利用して着色する方法は、それぞれの色に対応した塗料やインク等を用意する必要が無く、紫外線で退色することもないという特長を持っている。光の干渉を利用した着色法についてはこれまでに多くの報告があり、本研究でも平成28年度まで金属を対象としてシリコンを成膜し着色する手法の開発を行ってきた。しかし、塗料を付着させる方法では、固体であればほぼすべての物質を対象とすることができるのに対し、本研究では金属のみを対象としており、適用範囲が狭かった。そのため平成29年度には、プラスチック板とガラス板を対象として着色を行う手法の開発を行った。

実験結果

成膜にはすべて、高周波マグネトロンスパッタ装置を用いた。プラスチック板には安価で一般的に使われているという理由からポリカーボネートを選択した。光の反射層としてチタンを100 nm 成膜した後、放電ガスをArとH2の混合ガスとして、ヒーターによる加熱を行わずSiを成膜した。チタン膜が試料台と電気的に接触するように、ポリカーボネート板を押さえる金属の爪がチタン膜に接触するように改良した。投入電力100 Wで13 分間 成膜したときのポリカーボネート板の写真を図1(a)に示す。この写真から青色に着色できたことが分かる。ガラス 板には、テンパックスと呼ばれる硼珪酸ガラスを用いた。これにチタンを100 nm 成膜した後、設定温度を70℃とし、放電ガスをArとH2の混合ガスとして投入電力100 WでSiを成膜した後、さらに放電ガスをN2ガスとして 投入電力200 WでSiを成膜することで着色を行った。ArとH2の混合ガスで14.5分間、N2で25分間Siを成 膜されたガラス板の写真を図1(b)に示す。この写真から、緑色に着色できたことが分かる。ポリカーボネートに対しても、ArとH2の混合ガスでSiを成膜した後にN2を放電ガスとしてSiを成膜することで黄色、赤などにも着色できた。ただし、N2を放電ガスとして成膜するときには、プラズマ中のイオンの入射やマグネトロンスパッタ装置の ターゲットからの輻射熱による温度上昇を抑えるため、投入電力は140 Wとした。

結言

Siの成膜による着色方法の対象を金属以外に 広げるためプラスチックの一種であるポリカーボネ ートと、テンパックスと呼ばれる耐熱ガラスに着色す る試験を行った。その結果、様々な色に着色可能 であることが示された。ただし、プラスチックを着色 する場合には、プラズマ中のイオンの入射やマグ ネトロンスパッタ装置のターゲットからの熱輻射によ る軟化に注意する必要がある。



図1(a) Siの成膜によって青色に着色されたポリカー ボネート板と(b)緑色に着色された硼珪酸ガラス板

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

1.4.4.3

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

Abstract

Polyimide (PI) films categorized as super engineering plastics were treated non-electrolytic plating subsequent to alkali and catalytic treatments for flexible wiring boards. Cross-sectional TEM observations showed that the surface roughness increased with alkali treatment time, which increased interface area and strength.

要約

スーパーエンジニアリングプラスティックに分類されるポリイミド(PI)をアルカリ及び触媒化処理後に無電解めっきを施した。アルカリ処理時間の増加に伴い表面粗さが増大し、PIと金属めっきの界面面積が増大していることを断面 TEM 観察により確認した。界面面積の増大は PIと金属めっきの密着強度を高めている可能性が高い。

緒言

スーパーエンジニアリングプラスティックに分類されるポリイミド(PI)は、アルカリ耐性が比較的低い性質を利用した表面粗化(表層限定高野豆腐化)が可能である。PIを表面粗化後に触媒化処理により触媒として働く貴金属系ナノ粒子を担持させることで、無電解めっきが触媒ナノ粒子を起点として成長、PI表面を一様に被覆する。本研究では、アルカリ処理時間が高分子材料と金属めっきの密着性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。密着性の評価は、PI上に無電解Niめっきを施した試料を断面方向からTEM 観察し、PIとNiの接合界面の微視的状態をnmレベルで定量することにより行った。

成果の概要

実験に用いた高分子材料は、50 µm厚のPIフィルム(東レ・ デュポン(株)、規格 200H)である。PIのアルカリ処理には、水 酸化カリウム(KOH、和光純薬工業(株)の試薬特級)を蒸留水 に溶解した強アルカリ性の水溶液(1 mol/L、pH13.7)を用いた。 処理条件は液温 27℃、処理時間 1~30 分である。表1 にこれ らについてまとめたものを示す。触媒化処理及び無電解金属め っきの条件は固

表1 アルカリ処理条件

処理試料	ポリイミド(PI)
溶液	1 mol/LのKOH水溶液、1 L
液温(°C)	27,40
時間(min)	1~30

			e diel/unit	
定し、それらの詳細け表9及び3		表 2 触媒化処理条件	表3 無電解 Ni めっき	条件
に示す。無電解	溶液1	0.005 mol/LのSnCl2水溶液、1 L	次亜リン酸Na (g/200 mL)	13.2
Ni めっきに至る 冬工程間でけ十	液温(℃)	27	硫酸アンモニウム (g/200 mL)	66.0
分な水洗を行っ	時間(min)	1	クエン酸Na (g/200 mL)	51.6
た。ここで、触媒	溶液2	0.011 mol/LのPdCl₂水溶液、1 L	硫酸Ni (g/200 mL)	15.4
1L処理俗极及い 無電解 Ni めっき	液温(℃)	27	水酸化Na (g/200 mL)	10.0
液、各種処理条	時間(min)	1	液温(°C)	40
忤については植 物の葉の葉脈に	処理法	溶液1、2の順序で交互に3回	処理時間(min)	5

対するめっきを参考(http://www.japse.or.jp/rikadaisuki/plant/plant01.html)し一部改変した。

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

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

図1はアルカリ処理によるPIの表面粗化、触 媒化処理によるPI表層領域へのPdの付与、 PI表層上への無電解めっきの一連の流れを 模式図で示したものである。アルカリ処理によ りPI表面にはnmレベルの窪みが形成され、 触媒化処理により直径数nmのPdナノ粒子が PI表面に担持、Pdナノ粒子を起点とした触媒 反応により金属めっきが無電解の条件でPI表 面を被覆する。これらの一連の過程は全て水 溶液中にPIを浸漬することで実現される。

触媒化処理された PI の断面 TEM 像を図 2 に示す。最表面には 3.5~8.5 nm の範囲に分 布し平均直径 6.7 nm の触媒ナノ粒子が、ア ルカリ改質層には 1.5~4.0 nm の範囲に分 布し平均直径 2.4 nm の触媒ナノ粒子が存 在している。アルカリ改質層に担持された触 媒ナノ粒子のサイズ分布から、PI の表面下 には 4 nm 以上の気孔径を有する空隙・連 結気孔が高濃度アルカリ溶液の浸透により 生成されたと評価される。

図3はPIと無電解めっきにより形成され た Ni の境界状態のアルカリ処理時間依存 を示す断面 TEM 像である。処理時間の増 加に伴い、PIの表面には粗大化した窪みが 観察される。この粗大化窪みは、10 min 及 び 30 min において白矢印で指し示した。そ れらの形状は、主として試料表面(二つの黒 矢印の延長線上)に平行な数十 nm の長軸 をもつ楕円形状であり、壺形窪みと名付け ることにする。壺形窪みの数密度は処理時 間の長時間化に伴い増加していることが10 min 及び 30 min の像の比較により明らかで ある。処理時間 10 min 及び 30 min におい ては壺形窪みとそれよりも微細な窪み(数 nm)が共存していることが特徴である。これ らの窪みの存在は PIと金属めっきの界面 の面積の増大をもたらしている。また、これ ら形状及びサイズ分布の異なる nm サイズ の PI 表面近傍の窪みの存在が PI と金属 めっき(Ni)の密着性を強固にしている可能 性が指摘される。

結言

アルカリ処理後の触媒化処理及び無電 解めっきの条件を固定して、アルカリ処理 時間の PI と無電解 Ni めっきの接合状態



図1 PIのアルカリ処理、触媒化処理、無電解金属めっきまでの一連の流れ



図 2 触媒化処理された PI の断面 TEM 像。サイズ分布の 異なる触媒ナノ粒子が PI の最表面さらには表面下の改質 層に担持されている。



図 3 PIとNiの界面のアルカリ処理時間による変化を示す断面 TEM 像(PIのアルカリ処理条件:1 mol/Lの KOH 水溶液、 処理温度 27℃、処理時間 1 min~30 min)

に与える影響を調査した。その結果、アルカリ処理時間の長時間化に伴い PIの表面は粗大な窪み及び微細な 窪みが混在する状態へと変化した。Ni めっきはこれらの窪みを充填していることから、PI-Niの界面面積の増大 および楔効果が接合強度上昇・密着性向上に寄与していると考えられる。

1.4.4.4

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

Abstract

It is well-known that aromatic polyimides have found wide applications in many industrial fields due to their excellent thermal stability, high mechanical strength and superior chemical resistance. To develop a new polymer fiber, polymers containing polyimide structure have been focused at this time and were synthesized. Aromatic polyimides composed of carboxylic dianhydrides, diamines having sulfonic acid and diamines without any ionic residues were heat-treated for desulfonation. The properties of obtained polyimide polymer were investigated. These polyimide polymers showed higher heat resistants and higher mechanical strength properties than the existing polymer materials as plastic optical fiber (POF). In this study, the film forming method with polyimide sulfonic acid polymer was examined. The optical transparencies in the near-infrared of the obtained desulfonated polyimide polymer and the polymer as POF were compared. **要約**

芳香族ポリイミドは、その高い熱安定性、優れた機械的強度および高い耐薬品性といった性質により、工業分野の様々な用途に用いられている高分子である。新しい高分子ファイバーを開発するにあたり、本研究ではこのポリイミド構造を有する高分子に着目し、合成を行った。カルボン酸二無水物、スルホン酸基を有するジアミン、イオン性基をもたないジアミンからなる芳香族ポリイミドの加熱による脱スルホン化処理を行った。得られたポリイミド系高分子の物性を調査した。本高分子は既存のプラスチック光ファイバーの高分子素材よりも高い耐熱性と高い機械強度を示した。今回は、ポリイミドスルホン酸高分子を用いた成膜方法を検討し、脱スルホン化して得られたポリイミド系高分子膜の近赤外域での光透過性を既存のプラスチック光ファイバー用高分子素材のそれと比較した。

緒言

従来、ポリイミドは、不溶融、溶媒不溶性であるために、ファイバー化は困難であるとされてきた。今までに行っ てきた研究から、ポリイミドのモノマーの1つであるジアミンにイオン性基を導入することにより、溶媒への溶解性 が変化することが見いだされた。新規なモノマーの組合せによる高分子合成を行い、溶媒溶解性の高いポリイミ ドスルホン酸高分子を合成した。この高分子を加熱処理後に得られた高分子は有機溶媒に不溶になり、脱スル ホン化したポリイミド系高分子であることが示唆された。本高分子は高い耐熱性を示した。また、引張試験におけ る引張強度および破断伸びから、従来プラスチック光ファイバーとして用いられているポリメタクリル酸メチルに 比べて有意に高い機械的強度を示すことが明らかになった。今回は、ポリイミドスルホン酸高分子による成膜性 を検討し、その後脱スルホン化して得られた均一な高分子膜を用いて近赤外域の光透過性を透明性の高い既 存の高分子素材と比較することにより評価した。

成果の概要

今までの研究から、芳香族ポリイミドのファイバーを得るためには、まず何らかの形で溶媒に可溶な化合物を 得たのち、溶液状態でファイバーを作製し、その後不要な官能基を除去することが最も適切な方法であると考え られた。そこでまず、溶媒溶解性を高めるために、ポリイミドのモノマーに、イオン性のスルホン酸基、および屈曲 性の構造を有する化合物を用いた系で、ポリイミド系高分子を合成することにした。イオン性ジアミンとして、エー テル基を有しイオン性基はスルホン基であるジアミン、非イオン性ジアミンとしては、パラ位にアミノ基を導入し非 対称性をもたせたジアミンを用いて、ポリイミドスルホン酸高分子を合成した。具体的には、モノマーの酸無水物 としては、1,4,5,8-ナフタレンテトラカルボン酸無水物(以下、NCA)、スルホン酸を含むジアミンとしては、4,4'-ジ アミノジフェニルエーテル-2,2'-ジスルホン酸(以下、AES)、非イオン性のジアミンとしては、ビス[4-(3-アミノフェ

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・生物資源研究室

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが関西電力株式会社、日本原子力発電株式会社、北陸電力株式会社の3社からの受託研究 として実施したものである。

ノキシ)フェニル]スルホン(以下、3APS)を用いた。NCA/AES/3APS(モル比、5:1:4)のポリイミドスルホン酸 高分子を合成した。

種々の高分子材料を用いて近赤外域の分光分析を行うことにより、ポリイミド系高分子の光透過性を評価する ことにした。最も簡便に比較する方法としては、成膜を行ってフィルム状態で分光分析を行うことが挙げられる。 そこで、ポリイミドスルホン酸高分子を成膜し、フィルムにした状態で、加熱処理を行い脱スルホン化した後で、 ポリイミド系高分子として、他の高分子と同様に近赤外の分光分析を行うことにした。従来、高分子の成膜では 広く溶媒キャスト法が用いられてきた。この方法では溶媒の蒸発と共に膜表面にしわが入ってしまい、均一なポ リイミドスルホン酸高分子膜を得ることは難しかった。溶媒キャスト法はその特性上、膜と大気との界面がより乾燥 しやすく、膜の内部に溶媒が残留してしまう。乾燥した部分は流動性を失い、未乾燥の部分は溶媒の蒸発と共 に収縮してゆく。この収縮は流動性を持たない高分子の表面部分に対して、膜の中心方向に向かう応力を加 え、高分子膜にしわを作る要因となる。そこで、従来は常圧下で行っていた溶媒キャスト法による成膜を基本とし て、膜表面のみの急激な乾燥を防ぐために、減圧下での成膜法を検討した。真空乾燥法では、まず、過剰な溶 媒を除去するために常圧下において溶媒除去を行った。その後高分子溶液が流動性を失うまで常圧下で静置 し、真空乾燥によって残留溶媒を除去することで均一な膜を得た。

高分子材料を光ファイバーなど、近赤外域(波長 0.8~1.6µm)における光通信素材として用いる場合に問題 となるのは、その光透過における損失である。高分子材料における光透過の損失原因には、大きく分けて「散 乱」と「吸収」の2つがある。光通信に用いられる光の波長は、技術の進展とともに長波長化している。具体的に は、可視光から 0.85、1.30、1.55µm へと長波長化している。分子の化学構造として本質的な赤外振動吸収が光 損失の主な要因となって、高分子材料の光透過特性に制約を与えることが推測される。そこで、各種高分子材 料の近赤外域での光透過性を測定し、整理した(表1)。ポリイミド系高分子の分光スペクトルからは、ポリメタクリ

ル酸メチル(PMMA)に比べて、700nm以下の 波長領域で透過率が劣るものの、850nm以上 の波長領域では透過率が高くなる傾向がみら れた。試験した高分子の中では、ポリスチレン (PS)の光透過性が良好であり、ポリカーボネ ート(PC)もそれに続く透過性を示した。一方、 ポリプロピレン(PP)は近赤外領域において著 しく低い透過率を示した。芳香族ポリイミドはア ルキル鎖の C-H 結合を持たず、単位体積あ たりの C-H 結合の分率が低いため、PMMA や PS に比べて近赤外域における光透過性が 著しく高いと予想されたが、本試験において は、ほぼ同等の光透過性を示した。

表1 各種高分子材料の近赤外域での光透過性

高分子膜	透過率(%)		
	750nm	850nm	950nm
degulferented reluimide	01 E	90 E	90.4
desulfonated poly1mide	91.5	89.5	89.4
PMMA	91.7	88.7	88.6
PC	91.4	88.3	86.7
PS	92.7	89.8	89.3
PP	66.2	63.3	64.5

結言

今までの研究から、通常溶媒に不溶なポリイミドにイオン性基を導入したポリイミドスルホン酸高分子を合成す ることにより、溶媒に可溶な高分子を作製することができた。この溶媒に可溶な高分子を用いることで、ファイバ ーを作製することができた。このポリイミドスルホン酸高分子は300℃の加熱処理によって、イミド環の骨格構造 を損なうことなく、最も放射線耐性のない官能基であるスルホン酸基を脱離することができた。スルホン酸基を脱 離したポリイミド系高分子は、市販品のポリイミドであるカプトンと同様に、溶媒には不溶であり、高い耐熱性を示 した。引張試験における引張強度および破断伸びの測定から、従来プラスチック光ファイバーとして用いられて いるポリメタクリル酸メチルに比べて有意に高い機械的強度であることが明らかになった。さらに、光通信波長 (近赤外域)での光透過性に関しては、従来の光学用高分子素材と比較しても同等の光透過性を示した。

これらのことを踏まえて、今後は、光ファイバーの作製に必要な屈折率の異なる2種の高分子を得るために、 高分子の共重合構造に関して共重合比を変化させることで屈折率に差を作ることができないか、また一軸延伸 することで屈折率に差を作ることができないか、さらに、放射線の線量と光透過性の変化の相関を明らかにする こと、について検討を行っていく予定である。

1.4.4.5

新材料を用いた超小型レーザビーム走査ミラーの作製とそれを用いた眼鏡型ディスプレイの実現 Laser Beam Scanning Mirrors Composed of a New Material and its Application to Eye-Wear Displays 勝山俊夫^{*1}、石神龍哉^{*2}、寺田恵一^{*3}、慶光院利映^{*4}、岩堀一夫^{*5}、鈴木雅也^{*6}、福村康和^{*7} Toshio KATSUYAMA, Ryoya ISHIGAMI, Keiichi TERADA, Yoshiteru KEIKOIN, Kazuo IWAHORI, Masaya SUZUKI and Yasukazu FUKUMURA

Abstract

Ultra-small Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) mirrors have been fabricated by improving the thickness and the coercivity of the Fe-Pt magnetic films. The optical engine with the MEMS mirror has also been fabricated, which establishes the basic technology for the eye wear laser displays.

要約

眼鏡型レーザ・ディスプレイの実現を目標に、Fe-Pt 磁性薄膜の厚膜化と保磁力の増大を同時に図り、超小型の Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)ミラーを作製した。また、この MEMS ミラーを搭載した実装用 光学エンジンを試作し、眼鏡型ディスプレイの基本技術を確立した。

緒言

近年、映像端末としてのディスプレイ分野の発展は著しく、とくに画像を網膜へ直接投影する眼鏡型のディス プレイは、今後大いに発展すると期待されている¹⁾。この実現のためには、カラー画像を得るための三原色レー ザ光源と、それから出射する三本のレーザビームを一本にする合波器^{2,3)}、およびレーザビームを2次元に走査 する走査用 MEMS ミラーを一体化した「光学エンジン」の超小型化が課題となっている。

ここでは Fe-Pt 磁性薄膜⁴⁾の厚膜化と保磁力の増大を同時に図り、それを用いて走査用 MEMS ミラーの高 性能化を図った結果を報告する。また、この MEMS ミラーを組み入れた光学エンジンの試作結果と、それを用 いた眼鏡型ディスプレイに関する検討結果についても報告する。

実験方法と実験結果

眼鏡型レーザ・ディスプレイの実現を目標に、主に、1.光走査用 MEMS ミラーの Fe-Pt 磁性薄膜の特性向上 と膜評価、2.実装用光学エンジンの設計と試作、および 3.光学エンジンの眼鏡フレームへの搭載最適化と眼鏡 型ディスプレイ・プロトタイプの作製について検討した。以下項目ごとに検討結果を示す。

1. 光走査用 MEMS ミラーの Fe-Pt 磁性薄膜の特性向上と膜評価

昨年度の検討で、Fe-Pt 磁性膜の膜厚を、一昨年度の 100 nm から 500 nm 程度に増大化することができた が、保磁力は逆に 10 kOe から 4 kOe とやや小さくなった。保磁力が大きいほど外部環境の変化等に対するミラ 一特性の劣化が小さいので、今年度は、Fe-Pt 磁性膜の膜厚を 500 nm に保ったまま、保磁力の向上を図っ た。

成膜条件と熱処理条件を種々変えて検討した結果、鉄の組成比 51.3%の試料を 750℃で熱処理した Fe-Pt 磁性薄膜の保磁力が最も大きく、8 kOe 程度であることが分かった。この時の磁気ヒステリシス曲線を図 1 に示す。また、組成がずれて、鉄の組成比が 53.8%や 46.9%になると、保磁力はそれぞれ 7 kOe、6 kOe と多少小さくなるが、昨年度作製した磁性膜の保磁力 4 kOe より大きくなっている。以上の結果より、鉄の組成比 51.3%の試料を 750℃で熱処理した Fe-Pt 磁性薄膜が、MEMS ミラー用磁性薄膜として、現時点で最適であることが分かった。

2. 実装用光学エンジンの設計と試作

有限要素法に基づく共振周波数シミュレーションを用いて、MEMSミラーの共振周波数が、一つの軸周りの 振動で 4~9 kHz、もう一つの直交する軸周りの振動で 16~30 kHz になるように設計した。次に、深掘りエッチ ング技術等を用いて、バリなどの突起もなくきれいに端面がエッチングされた MEMSミラーを作製した(図 2)。

^{*1}福井大学産学官連携本部、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*3ケイ・エス・ティ・ワールド株式 会社開発部、*4株式会社メムス・コアビジネス推進本部、*5株式会社シャルマン製造部、*6東海光学株式会社開発部、*7小松電子株式会社商品 部

本研究は、公募型共同研究事業として(公財)若狭湾エネルギー研究センターが福井大学、ケイ・エス・ティ・ワールド株式会社、株式会社メムス・ コア、株式会社シャルマン、東海光学株式会社、小松電子株式会社と共同で実施したものである。

最後に、この MEMS ミラーを用いて実際に光学エンジンプロトタイプを作製した(図 3)。この場合、外部への 電気的な接続端子は、光学エンジンの一方の端に集約し、外部へのリード線を接続しやすい構造にした。

3. 光学エンジンの眼鏡フレームへの搭載最適化と眼鏡型ディスプレイ・プロトタイプの作製

実装用光学エンジンは、眼鏡フレームに装着し、眼鏡型ディスプレイ・プロトタイプは、光学エンジンから出射 する赤、青、緑のレーザビームを、眼鏡ガラス上に形成した半透明反射板で反射し、瞳孔に導かれる構造とし た。これらの機能をすべて眼鏡上に搭載した場合の眼鏡型ディスプレイ・プロトタイプの構成例を図4に示した。 今後引き続き、この構成のディスプレイの実用化を図っていく予定である。

結言

若狭湾エネルギー研究センターで研究開発を進めている新しい磁性薄膜材料である Fe-Pt 薄膜を用いた電磁駆動型 MEMS ミラーを基本として、集積化三原色合波光源と光走査用 MEMS ミラーを集積した実装用光学 エンジンの作製検討を進め、それの眼鏡への搭載検討を行った。

その結果、鉄の組成比 51.3%の試料を 750℃で熱処理した Fe-Pt 磁性薄膜が MEMS ミラー用磁性薄膜とし て最適であることが分かった。また、深掘りエッチング技術等を用いて、Fe-Pt 磁性薄膜を用いた 2 次元走査 MEMS ミラーを試作し、それを用いた実装用光学エンジンを作製した。また、光学エンジン搭載のための眼鏡フ レームの構造最適化と、映像生成の検討を行い、眼鏡型ディスプレイプロトタイプの基本構成を形成することが できた。

参考文献

- 1) B. Kress, Frontiers in Optics 201, San Jose, USA, FTu2C.1 (2015)
- 2) A. Nakao et al., Opt. Commun., 330, 45 (2014)
- A. Nakao *et al.*, The 22nd International Display Workshops (IDW '15), Otsu Prince Hotel, Otsu, Japan, PRJp1-5L (2015)
- 4) R. Ishigami, C. Batchuluun and K. Yasuda, Nucl., Instr. Meth. B, 275, 58 (2012)



図1 Fe-Pt 磁性膜特性

図2 作製した MEMS ミラー



図3 試作光学エンジン外観



1.4.4.6

ラジカル含有リチウム酸化物を用いた常温水分解法による水素発生システムの開発 Development on Hydrogen Production System by Water Splitting at Room Temperature Using Radical Doped Lithium Oxides 土屋文^{*1}、高廣克己^{*2}、鈴木耕拓^{*3}、石神龍哉^{*3} Bun TSUCHIYA, Katsumi TAKAHIRO, Kohtaku SUZUKI and Ryoya ISHIGAMI

Abstract

The effects of irradiation with 10 keV D_2^+ ions on the hydrogen and water absorption and desorption characteristics of Li_2ZrO_3 and platinum-coated Li_2ZrO_3 (Pt- Li_2ZrO_3) were investigated by employing weight gain measurements (WGM). The WGM results indicated that the amounts of H and H₂O absorbed into the ion irradiated bulk Li_2ZrO_3 and Pt- Li_2ZrO_3 samples in air at room temperature increased up to 2-3 times, as compared with those of the unirradiated ones.

要約

Li₂ZrO₃および Pt-Li₂ZrO₃の水吸収および脱離特性における 10 keV の重水素(D₂⁺)イオン照射効果が重量 増加(WGM)法を用いて観測された。D₂⁺イオン照射された Li₂ZrO₃および Pt-Li₂ZrO₃を室温において空気中に 曝したところ、吸収された水および水素量は、未照射試料と比較すると 2~3 倍まで徐々に増加することが WGM によって示された。

緒言

水素吸収、貯蔵および放出特性を有するラジカル含有リチウム酸化物水素吸蔵貯蔵材料を用いた常温水分解-水素生成システム開発の基礎を築くことを目指した。具体的には、10 keV の重水素(D₂⁺)イオン(即ち、5 k eV の D⁺イオン)スパッタリング、約 25 nm のプラチナ(Pt)被覆および約 400℃までの真空加熱等の表面改質を 組み合わせることにより、電子励起、電離および弾き出し現象を引き起こし、約 10 nm 以下のリチウム酸化物表 面のみに電荷を帯びたラジカルを形成させ、室温における水分解、水素吸収および貯蔵、水素生成等の水素 輸送機構に関与する素過程を向上させることを目標とした。

実験

これまでの研究成果に基づき、炭酸リチウム(Li₂CO₃)粉末を1100℃以上の高温および空気雰囲気において 焼結することによって、直径 8 mm、厚さ1 mmのディスク状のLi₂ZrO₃ 試料を作製した。この試料を約 1x10⁻⁵ Pa 以下の高真空装置内に導入し、室温においてコルトロン型加速器からの 5 keVのD⁺イオン(10 keV のD₂⁺イ オン)を試料表面に対して垂直に約 0.5~1.0×10¹⁸ ions/cm²の照射量まで照射した。または、マグネトロンスパ ッタリング装置を用いて、室温および真空雰囲気において試料両面に厚さ約 25 nm のPt を蒸着した。

結言

試料の重量増加の割合は、全ての試料に対して空気暴露時間の増加とともに増加した。この重量増加の空気暴露時間依存性はH濃度増加の結果に対応しており、重量増加は大気中の水蒸気吸収が要因の一つであると考えられる。特に、D⁺イオン照射Li₂ZrO₃およびPt-Li₂ZrO₃試料の重量増加の割合は、約2000 hrsで約9~12 wt%に達し、未照射Li₂ZrO₃試料の重量増加量の約2~3倍以上になることがわかった。従って、試料表面における水分解特性がイオンスパッタリングおよびPt触媒効果による表面改質によって向上されることが判明した。

参考文献

1) B. Tsuchiya et al., Int. J. Hydrogen Energ., 42, 23746-23750 (2017)

^{*1}名城大学・理工学部・教養教育、*2京都工芸繊維大学・材料化学系、*3(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ

本研究は、公募型共同研究事業として(公財)若狭湾エネルギー研究センターが名城大学と共同で実施したものである。
1.4.4.7

X線 CT スキャンによるロータス型ポーラスマグネシウムの気孔形態観察 Observation of Pore Morphology in Lotus-type Porous Magnesium by means of X-ray CT Scan 中嶋英雄^{*1}、安永和史^{*2}、山岸隆一郎^{*3}、野村光^{*4}、井手拓哉^{*5} Hideo NAKAJIMA, Kazufumi YASUNAGA, Ryuichiro YAMAGISHI, Hikaru NOMURA and Takuya IDE

Abstract

Lotus-type porous magnesium was fabricated by means of continuous crucible solidification method in pressurized hydrogen and helium. The morphology of the pores in lotus magnesium was observed through X-ray CT(computed tomography) scan technique. Influence of partial pressure of hydrogen to the morphology of lotus magnesium was investigated. It is found that the porosity increases with increasing partial pressure of hydrogen under the constant total pressure of mixed gas, which is attributed to pore evolution due to hydrogen.

要約

加圧水素とヘリウム雰囲気中での連続坩堝凝固法によってロータス型ポーラスマグネシウムが作製された。その気孔形態をX線CTスキャン法によって観察した。水素分圧のロータスマグネシウムに及ぼす影響を調べた。混合ガスの全圧を一定に維持した条件下で気孔率が水素分圧の増加と共に増加した。これは気孔の生成源が水素であるためである。

緒言

マグネシウムおよびその合金は最軽量実用金属材料としてさまざまな工業分野での用途が拡大しつつある。 このマグネシウムを多孔質化できれば更なる軽量化を図ることができる。強度を兼ね備えたロータス型ポーラス マグネシウムの作製は従来、研究がなされている¹¹が、気孔形態を3次元イメージングとして測定し、気孔率、気 孔径と共に気孔長さを系統的に実測した研究は皆無であった。本研究ではX線CTスキャン法を用いて3次 元気孔形態を詳細に測定し、気孔形態に及ぼす水素およびヘリウムガスの影響を調べた。

実験方法

純度 99.9%のマグネシウムロッドをグラファイト坩堝に挿入し全圧 0.5MPa の水素およびヘリウム混合ガス中で白金電気炉で 750℃に加熱して溶解し た後、アクチュエーターによって 0.33mm/s の速度で坩堝を下方に移動さ せて一方向凝固を行わせた。X線 CT スキャン法によりロータスマグネシウ ムの気孔形態を観察した。

実験結果

図1に示すように、混合ガスの全圧を0.5MPaに維持した条件下で気孔率が水素分圧の増加と共に増加した。X線CTスキャンイメージングを解析し、気孔率、気孔直径、気孔長さ、そのアスペクト比を求めた。

結言

坩堝を用いた一方向凝固によってロータスマグネシウムの作製が可能に なった。今後、気孔のアスペクト比を増加させる研究を行なう。

参考文献

1) M. Tane *et al.*, Acta Materialia, Vol. 84, 80–94 (2015).



図1 X線 CT スキャンによって 測定されたロータスマグネシウム

34.3%

0.5MPa

(e)

^{*1(}公財)若狭湾エネルギー研究センター、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*3(公財)若狭湾エ ネルギー研究センター・企画支援広報部・技術相談室、*4大阪大学工学研究科、*5(㈱ロータスサーマルソリューション 本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターが㈱ロータスサーマルソリューションと共同で実施したものである。

ナノ複合めっきに析出した粒子の微視的評価 Distribution of Sn Nanoparticles on Carbon Nanotubes 安永和史*1、堀田大輔*2、佐々木達也*2 Kazufumi YASUNAGA, Daisuke Hotta and Tatsuya SASAKI

Abstract

A coating technology of tin layer on carbon nanotubes (CNT) has been developed to increase sliding properties. TEM observation revealed that inhomogeneous distribution of Sn nanoparticles on individual CNT s.

要約

摺動特性の改善を目的として、カーボンナノチューブ(CNT)上に錫(Sn)を被覆する技術を開発中である。 TEM 観察により、Sn は凝集状態のナノ粒子として CNT 上に不均一に分布していることが判明した。

緒言

材料表面に耐摩耗性や高摺動性(低摩擦性)をはじめとした種々の性能を付加する機能性めっきとして、ナノ ダイヤモンドや CNT、フラーレン等のナノ粒子を複合した無電解 Ni-P めっきに関する研究を行っている。様々 なめっき条件で分散状態の異なるナノ複合めっき試料を作製し、透過型電子顕微鏡(TEM)等を用いてナノ粒 子のめっき皮膜中での分散状態を評価し、ナノ複合めっきの作製技術の確立に寄与することを目的とした。本 研究では、特に高摺動性が期待される CNT 上への Sn 被覆の状態について調査した。

成果の概要

ナノ複合粒子として多層カーボンナノチューブ(multi-walled carbon nanotube; MWNT)と Sn の複合粒子を作製した。目標とするナノ複合 粒子は、MWNT の周囲に一様に Sn が被覆されたものである。MWNT への Sn の被覆の実現には、めっきの技術を用いている。ナノ複合粒 子は水に懸濁しており、この懸濁液をマイクロピペットを用いて TEM 用のグリッドメッシュに滴下、真空デシケーター中での十分な乾燥後 に TEM 観察した。図1は Sn めっき処理した MWNT の状態を示す 走査型透過電子顕微鏡明視野像(STEM-BF 像)である。矢印で示し た MWNT の直径は約25 nm である。点線で囲んだ領域には直径数 nm のナノ粒子が凝集している。他の領域も同様に、程度は異なるが 凝集したナノ粒子が MWNT の局所領域を被覆している。図2は図1 を含む広い範囲で撮影した STEM-BF 像及び走査型透過電子顕微



図1 MWNTとSnのナノ複合粒子のSTEM-BF像

鏡エネルギー分散型 X 線マッピング (STEM-EDS 像)である。STEM-EDS 像は 炭素(C)を緑、Sn を赤で表示している。凝 集したナノ粒子の成分は Sn で、MWNT に 異なる凝集状態で偏在していることが明ら かである。

結言

CNT を Sn で被覆する初期的な実験で図 2は、一様な被覆ではなく Sn ナノ粒子がBFCNT の局所領域に凝集した。今後、めっきの条件を調整して一様被覆を実現する予定である。



図 2 MWNTとSnのナノ複合粒子の元素分布を示すSTEM-BF 像及び STEM-EDS 像

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*2アイテック株式会社・新事業開発本部 本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターがアイテック株式会社と共同で実施したものである。

1.4.4.9

フレキシブル導電材料のための金属皮膜の耐久性向上に関する調査研究 Research Study of Durability Enhanced Metal Film for Flexible Conductive Materials 山岸隆一郎*1、安永和史*2、笠嶋赳充*3、辻本和久*3 Ryuichiro YAMAGISHI, Kazufumi YASUNAGA, Takemichi Kasashima and Kazuhisa TSUJIMOTO

Abstract

Copper-silver (Cu-Ag) and silver (Ag) coated conductive textiles were fabricated, and their heat resistance were investigated. Auger Electron Spectroscopy (AES) revealed that Cu migrated to the surface in the Cu-Ag coated conductive textile, and X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) revealed that the oxidation of Ag took place in the Ag coated conductive textile.

要約

エレクトロニクス分野向けの新素材として、繊維素材に銅(Cu)めっきや銀(Ag)めっきを施した種々の導電性 繊維素材を開発中である。これらの開発中の素材には、高温や通電環境下で変色や導電性の低下が発生する ものがあり、耐久性の向上が課題となっている。本研究では、環境耐久性向上を目的として、各種導電性素材 の変色や導電性低下部位の表面分析を行った。その結果、Cu-Ag めっき布では高温下において表層への Cu の拡散が、Ag めっき糸では高温や通電下において Ag の酸化が起きていることが明らかになった。

緒言

エレクトロニクス分野向けのフレキシブルな新規導電性材料として、繊維に金属を付与した導電性繊維素材の開発に取り組んでいる。これらの導電性繊維素材には、高い環境耐久性が求められている。現在開発中の、

ポリエステル布帛に Cu めっきや Ag めっき処理を施し ためっき布、およびポリエステル糸に Ag めっき被膜を 形成した Ag めっき糸は、繊維のフレキシブル性と金属 の導電性を両立した新素材である。しかしながら、高温 試験あるいは通電試験において、変色や導電性の低 下が起こることが確認され、耐久性の向上が課題とな っている。本研究では、それぞれの試料に対してオー ジェ分析、XPS 分析を行い、変色等の原因を解析する とともに、更なる耐久性向上の可能性について検討し た。

成果の概要

Cu-Ag めっき布の高温試験(100℃、1000 時間)で 変色(銀白色から茶または青紫色)が確認された。変 色部位について、オージェ電子分光法を用いて元素 分析を行った。元素情報の測定は最表面から約 800 nm まで約 10 nm 刻みとした。図 1 に Cu-Ag めっき布 のブランク(別試料の非変色部位)と変色部位の表面 から深さ方向で約 800 nm までの元素分布を示した。 ブランクでは表層に Ag が存在するのに対し、変色部 位の方は Cu が表層に存在している。低温試験(-40℃)では変色がみられなかったことから、100℃の高 温試験中に Cu が表層へ拡散し変色が起きたと考えら れる。





^{*1(}公財)若狭湾エネルギー研究センター・企画支援広報部・技術相談室、*2(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー 材料グループ、*3セーレン株式会社・研究開発センター・開発研究第一グループ

本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターがセーレン株式会社と共同で実施したものである。

若狭湾エネルギー研究センター研究年報(平成 29 年度)

Ag めっき糸(ニット組織)の高温試験(100℃、250時間)と通電試験(電圧印加6時間)により導電性の低下 が確認された。導電性低下部位について、X線光電子分光法(XPS)を用いて元素分析を行った。Ag めっき糸 は絶縁糸とともに編み込まれた状態のため、表面状態が均一なシート状試料に比べて凹凸がありかつ帯電しや すいため、励起源が電子銃であるオージェ分析では正確な結果を得ることが困難と考えた。そこで絶縁試料で も表面分析が可能な XPS を選択し、最表面から約 200 nm までの元素情報を約 10 nm 刻みで測定した。図 2 に Ag めっき糸のブランク(試験未投入)、高温試験、通電試験の各サンプル表面から深さ方向で約 200 nm ま での元素分布を示した。これらの図から、導電性の低下がみられた高温試験および通電試験では O の割合が 表層において約 28%であり、ブランクと比べて 10%程度増加していることが確認された。また Ag と反応しやすい 硫黄(S)は検出されなかったことからも(図 2 中の S 濃度はノイズレベルと判断)、Ag の酸化が起きていると考え られる。さらに、Ag(3d 5/2)のピークシフトの確認も試みたが、酸化物へのシフト幅(-1.0~-0.1)に当てはまる 傾向は確認できなかった。Ag 単体と Ag の酸化物のピークが近接していること、および帯電しやすいことが、光 電子の運動エネルギーの微妙な差を精確に検出・測定する困難さをもたらしたと考えられる。



図 2 Ag めっき糸のブランクと変色部位の表面から深さ方向への元素分析

結言

Cu-Ag めっき布および Ag めっき糸の変色や導電性の低下は、それぞれ Cu の拡散、Ag の酸化に起因する ことが明らかになった。これは周囲の熱のみならず、通電時に発生する抵抗熱によっても引き起こされることがわ かった。

1.4.4.10

超強加工による微細結晶粒金属材料の創製と評価 Ultra-Fine and Nanocrystalline Structure Induced by Severe Plastic Deformation of Metal Surfaces 安永和史*1、加藤寛敬*² Kazufumi YASUNAGA and Hirotaka KATO

Abstract

Carbon steel (S45C) with the diameter of sliding surfaces of $40 \sim 50 \text{ mm } \phi$ was burnished at 1200 rpm, which was observed by cross-sectional Transmission Electron Microscopy (TEM). The dark-field observation and Scanning Transmission Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy (STEM-EDS) revealed that both size of crystal grains and carbides changed from µm-size to nano-sized structure after burnishing. **要約**

炭素鋼(S45C)表面の加工摺動直径 40~50 mm φの領域を試料回転速度 1200 rpm の条件でバニシング加工した。断面薄膜化後に、暗視野像及び STEM-EDS マッピング像を取得することにより、バニシング加工前に μm サイズを有する結晶粒及び炭化物共に nm サイズにまで微細化されることが明らかとなった。

緒言

バニシング加工は、回転する金属材料に高硬度で滑らかな表 面をもつ球面工具を押しつけ、切りくずを出さずに金属表面を鏡 面状態に仕上げることを第一義とする表面処理法である。この手 法は金属の表面粗さを低下させるのみならず、工具による摩擦に より金属表層が塑性変形され高硬度化、耐摩耗性や疲労強度等 の機械的性質を向上する効果があると考えられているが、金属表 層の微視的組織が十分に評価されているとはいえない。これらの 知見により、流通量が多く安価で構造用機械材料として多用され る炭素鋼に対して、さらなる機能性を付与することが可能である。

成果の概要

試料は焼きならした炭素鋼 (S45C) 製の円盤 (60 mm ϕ 、5 mm 厚) である。バニシング加工は、試料回転速度 1200 rpm で回転 させた旋盤に固定した円盤形の S45C に、超硬合金 (WC-Co) 製 のボール (6 mm ϕ)を用いて荷重 500 N、送り速度 0.00937 mm/ 回転、大気中、室温、無潤滑の条件で行った。加工摺動直径は 40~50 mm ϕ である。図 1 はバニシング加工時の S45C 及び WC-Co 製のボールの配置等を示す模式図である。

図2は、バニシング加工したS45Cのイオン研磨による薄膜化前の断面の模式図である。斜線で示したバニシング加工による強加工領域を含む直方体のS45Cは、低速ダイヤモンドホイールソー(Model 650 Low Speed Diamond Wheel Saw)を用いて、図1の円盤のオレンジ色の加工領域の一部から切り出した。その後、エポキシ系接着剤によりバニシング加工最表面をシリコンと接着した。その理由は、イオン研磨時に摩擦強加工されたS45C最表面近傍のスパッタリングによる損耗・消失を防止することがシリコンによる被覆で可能なためである。さらに、シリコンの厚みを270 µm とした理由は、イオン研磨により薄膜化される領域の物理的な



図1 円盤形の炭素鋼(S45C)のバニシ ング加工時の模式図



図2 バニシング加工した S45C のイオン 研磨による薄膜化前の断面模式図

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

位置調整のためである。試料薄膜化に用いたイオン研磨装置はイオンスライサー(IB-09060CIS)で、粗研磨6 keV 及び仕上げ研磨2 keV のアルゴンイオン(Ar⁺、入射角 1.7°)のスパッタリングにより S45C を薄膜加工した。Ar⁺の入射方向は図2の上から下である。

図3は、試料回転速度1200 rpmでバニシング加工した S45Cの薄膜化後の断面の光学顕微鏡像であり、図2の模 式図と幾何学的な配置は同じにしている。エポキシ系接着剤 とバニシング加工された炭素鋼の境界に孔(白点線囲み、電 子顕微鏡観察に適した厚みの数 nm から数十 nm の薄膜領 域)が生じており、この開孔部周辺を透過型電子顕微鏡 (TEM)を用いて観察した。

図4はバニシング加工したS45Cの断面微細組織のTEM 暗視野像及び制限視野電子線回折像(左上)である。上部か ら下部に向かって試料の最表面近傍から約560 nmの深さま での領域である。粒径が数 nm から100 nm 未満の微細結晶 粒の形成及び炭化物の微細化と考えられる現象が確認され た。多数の白のコントラストが結晶粒及び炭化物の存在に起 因したものである。一例として粒径53 nmの単一の結晶粒の 存在を点線で囲んで示した。結晶粒及び析出物のナノサイズ への微細化は、機械的性質を大きく改善する可能性がある。

図5はバニシング加工したS45Cの断面微細組織の STEM-EDSマッピング像である。鉄は緑、炭素は赤で表示し ている。最表面からの距離(図中央の表面からの最短距離) が25µmの領域(図5右)には試料表面にほぼ平行な細長 い形状(高アスペクト比)の炭化物が複数観察される。一方、 0.5µmの領域には炭化物はアスペクト比、サイズ共に小さく、 体積密度も低い。これらの結果から、表層においては炭化物 の微細化が誘起されること、さらに炭素の原子レベルでの母 相の鉄への過飽和の固溶が誘起されている可能性がある。ま た、微細な炭化物の存在は粒成長を抑制することで微細結晶 粒の形成に影響を与えている可能性が指摘される。



図 3 バニシング加工した S45C のイオン 研磨による薄膜化後の断面の光顕像

摩擦方向 ↓工具荷重方向



図4 バニシング加工した S45C 表面近傍の 微細組織の TEM 暗視野像及び制限視野 電子線回折像(左上)



図5 バニシング加工した S45C の表層及び深部の STEM-EDS マッピング像(緑:鉄、赤:炭素)

結言

試料回転速度 1200 rpm の条件でバニシング加工した S45C の最表面を含む表層領域及び深部領域を TEM 断面観察した。深部領域と異なり表層領域においては、結晶粒及び炭化物(炭化物については特に短 軸)の nm サイズへの微細化が同時に引き起こされた。これらの微細化は S45C の表層領域の機械的性質を改 善する可能性がある。

1.4.4.11

ラテックス上の窒化物粒子の微視的評価 Microstructure of TiN-Latex Layer for a Separator Coating in PEFC 安永和史*1、畠山賢彦*2 Kazufumi YASUNAGA and Masahiko HATAKEYAMA

Abstract

Microstructures of a TiN-Latex layer for a separator coating in polymer electrolyte membrane fuel cell (PEFC) were observed by STEM (Scanning Transmission Electron Microscopy), and the shape, size, and the distribution of TiN particles on latex particles were investigated. TiN particles have various forms, and mean diameter of them range nano to micrometers in size. Mainly nanometer-size TiN particles adhere to the latex particles.

要約

固体高分子形燃料電池(PEFC)のセパレータ材料の被覆層である TiN-ラテックス層の微細組織を TEM 観察し、TiN 粒子の形状やサイズ、さらにはラテックス上での TiN ナノ粒子の分布を調査した。TiN 粒子は様々な 形を呈し、それらの平均サイズは nm から µm に及ぶこと、さらに nm サイズの TiN 粒子がラテックス表面に主とし て分布していることが明らかになった。

緒言

PEFC のセパレータ特性を向上させる方法には、セパレータとガス拡散層(GDL)との接触抵抗の低減がある。 PEFC のセパレータ材料であるステンレス鋼を TiN-ラテックス層で被覆すると、未処理材と比較して接触抵抗が 1/10 に低下することが明らかとなっている。TiN-ラテックス層を構成する TiN 及びラテックスの粒子の形状やサ イズ、ラテックス粒子上の TiN 粒子の分布について調査した。

成果の概要

SUS316L 基材への被覆と同一条件で TEM 観 察用のメッシュにビーカー中にて泳動電着した TiN-ラテックス層を STEM 観察した。図1に示す ように TiN-ラテックス層は、様々な形状の TiN 粒 子及び直径が1µmを超える球状のラテックス粒 子から構成されている。TiN の形状は直方体、三 角錐、長軸がµm サイズで高アスペクト比の棒状 に主に分類される。ラテックスの表面には数密度 が高く nm サイズの直方体の TiN 粒子が主に付 着しており、接触抵抗の低減に大きく寄与してい ると考えられる。

結言

TEM 観察用のメッシュに泳動電着した TiN-ラ テックス層を STEM 観察した。TiN-ラテックス層に は粒径が nm から µm サイズの TiN 粒子がラテッ クスを取り囲むように分布しており、特に nm サイ ズの直方体形状の TiN が高密度にラテックス表 面に付着することで接触抵抗の低減に寄与して いる可能性が高いことが明らかになった。



図1 球状のラテックス(右下)及びその近傍に存在する 様々な形状、サイズ分布をもつ TiN 粒子。ラテックス表 面には nm サイズの直方体形状の TiN 粒子の付着が顕 著である。粗大で高アスペクト比の TiN 粒子のみ明示し ている。

*1(公財)若狭湾エネルギー研究センター・研究開発部・エネルギー材料グループ、*2富山大学大学院・理工学研究部本研究は、(公財)若狭湾エネルギー研究センターと富山大学と共同で実施したものである。

2. 外部発表、特許、品種登録

2.1. 外部発表

平成 29 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. Hideo Nakajima, Macro and Nano Porous Materials, Research and Reports on Metals, Vol.1, p.1, 2017
- 2. 多根正和、宋榮換、中嶋英雄、一方向性気孔を有するポーラス純鉄および炭素鋼の衝撃エネルギー吸 収特性、金属、第87巻、第6号、60-66頁、2017
- 3. 中嶋英雄、日本学術会議提言「材料工学から見たものづくり人材育成の課題と展望」、日本粉体工学会 誌、第54巻、第10号、704-707頁、2017
- 4. 中嶋英雄、日本学術会議提言「材料工学から見たものづくり人材育成の課題と展望」、日本金属学会会報 「まてりあ」、第56巻、第11号、649-652頁、2017
- 5. Hiroki Takino, Misako Furuya, Atsuko Sakuma, Sumiko Yamamoto, Saki Hirano, Masato Tsuro, Tatsuya Yanagimoto, Yoshikazu Tanaka and Masanobu Mino, The siRNAs targeting the left or right terminal region of chrysanthemum stunt viroid (CSVd) sequence suppress the development of disease symptoms caused by CSVd infection of chrysanthemum, but do not suppress viroid propagation, The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, DOI: 10.1080/14620316.2017.1402668, 2017
- 6. Kyo Kume, Takashi Hasegawa, Satoshi Hatori, Masato Takita and Hirokazu Tsuji, Space engineering application of therapeutic broad proton beam for cosmic ray simulation, 医学物理, Vol.37, Supplement, p.112, 2017
- 7. 砂川武義、Glenn HARVEL、青木祐太郎、梅田昌幸、速水醇一、榊原和久、五東弘昭、蛯名武雄、田口 光正、長澤尚胤、吉橋幸子、畑下昌範、久米恭、佐倉俊治、PVA-KI 系ゲルインジケータの開発、福井工 業大学研究紀要、第47 号、105-110 頁、2017
- 8. Fuyumi Ito, Takashi Hasegawa, Munetoshi Maeda and Kyo Kume, Development of an online proton dose distribution monitoring system by using a fluorescent screen (I), 医学物理, Vol.37, Supplement, p.52, 2017
- 9. 安永和史、収差補正機能付き分析電子顕微鏡による構造材料の高精度定量分析、平成 28 年度九州大学応用力学研究所共同利用研究成果報告書、第 20 号、166-167 頁、2017
- 10. 遠山伸一、峰原英介、高出力ファイバーレーザーを用いた切断及び除染の技術開発、デコミッショニング 技報、第56号、55-65頁、2017
- Koji Tamura and Shin'ichi Toyama, Laser cutting performances for thick steel specimens studied by molten metal removal conditions, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.54, Issue 9, 1011– 1017, 2017
- 12. Hideo Nakajima, Mechanical, Thermal and Electrical Properties of Lotus-Type Porous Metals, Materials Science and Applications, Vol.9, 258-267, 2018
- 13. 中嶋英雄、連載 多孔質が創る材料と機能(1)「自然界の多くはポーラス構造」、金属、第88巻、第3 号、51-56頁、2018
- 14. 中嶋英雄、連載 多孔質が創る材料と機能(2)「泡立てた金属の作り方」、金属、第88巻、第4号、54-60 頁、2018
- 15. 岩永幹夫、福井県における環境放射線モニタリングと原子力災害時の自治体対応について、学術の動向、第23巻、第3号、54-58頁、2018
- 16. Makoto Arimoto, Shohei Harita, Satoshi Sugita, Yoichi Yatsu, Nobuyuki Kawai, Hirokazu Ikeda, Hiroshi Tomida, Naoki Isobe, Shiro Ueno, Tatehiro Mihara, Motoko Serino, Takayoshi Kohmura, Takanori Sakamoto, Atsumasa Yoshida, Hiroshi Tsunemi, Satoshi Hatori, Kyo Kume and Takashi Hasegawa, Development of a 32-channel ASIC for an X-ray APD detector onboard the ISS, Nuclear Instruments and Methods in Physical Research, A882, 138-147, 2018
- (2) 国際会議論文(国際会議論文集への掲載。)
- 1. 1. Fuyumi Ito, Takashi Hasegawa, Munetoshi Maeda and Kyo Kume, Development of a prototype online dose distribution monitoring system, 医学物理, Vol.37, Supplement, p.176, 2017

(3) 国際会議発表

- Makoto Sasaki, Hiroyasu Tamamura, Yoshikazu Maeda, Yuji Tameshige, Hisato Nakazawa, Satoshi Shibata, Yoshitaka Sato, Kazutaka Yamamoto, Kyo Kume, and Munetoshi Maeda, Concurrent Chemoradiotherapy Using X-ray and Proton Beam Irradiation for Advanced Esophageal Cancer, 56th Annual Conference of the Particle Therapy Co-Operative Group (PTCOG56), 幕張メッセ&パシフィコ横 浜, 2017.5
- 2. Yoshikazu Maeda, Yoshitaka Sato, Satoshi Shibata, Sayuri Bou, Hiroyasu Tamamura, Kazutaka Yamamoto, Nobukazu Fuwa, Shigeyuki Takamatsu, Makoto Sasaki and Kyo Kume, Interfractional variations of prostate and seminal vesicles for the In-room CT-image guided proton therapy with lateral beams for prostate cancer, 56th Annual Conference of the Particle Therapy Co-Operative Group (PTCOG56), 幕張メッセ&パシフィコ横浜, 2017.5
- 3. Fuyumi ITO, Takashi HASEGAWA, Munetoshi MAEDA and Kyo KUME, Development of an online proton dose distribution monitoring system by using a fluorescent screen, 56th Annual Conference of the Particle Therapy Co-Operative Group (PTCOG),幕張メッセ&パシフィコ横浜, 2017.5
- 4. Natsuko Kondo, Mamoru Honda, Kenji Nakayama, Yoshinori Sakurai, Takushi Takata, Kyo Kume, Shinichi Miyatake, Osamu Ogawa and Minoru Suzuki, Lipid alteration following proton beam irradiation in mouse brain of radiation necrosis model, 5th Quadrennial Meeting of the World Federation of Neuro-Oncology Societies, Zurich, Switzerland, 2017.5
- Yasushi Kiyono, Momoko Murata, Akira Makino, Kyo Kume, Tetsuya Mori, Tatsuya Asai and Hidehiko Okazawa, Predictive value of 3'-deoxy-3'-18F-fluorothymidine uptake in colorectal cancer treated with proton irradiation under hypoxic condition, Society of Nuclear Medicine and Moleculer Imaging (SNMMI) 2017 Annual Meeting, Denver, 2017.6
- Kazuhiro Hoshino, Maki Takano and Masanori Hatashita, Direct Production of L-Malic Acid from Lignocellulose with *S. commune* Mutant Constructed by Ion-beam Irradiation, The 13th Asian Congress on Biotechnology (ACB2017), Thailand, 2017.7
- Maki Takano, Satoki Yamashita, Masanori Hatashita and Kazuhiro Hoshino, High Temperature Ethanol Production from Rice Straw by Cellulase Secreting Fungi Mutant Induced by Ion-beam Irradiation, The 13th Asian Congress on Biotechnology (ACB2017), Thailand, 2017.7
- 8. Hideo Nakajima and Takuya Ide, Fabrication, Properties and Applications of Porous Metals with Direction Pores, Metfoam2017, Nanjing, China, 2017.9
- 9. Yoshikazu Maeda, Yoshitaka Sato, Satoshi Shibata, Sayuri Bou, Hiroyasu Tamamura, Kazutaka Yamamoto, Nobukazu Fuwa, Shigeyuki Takamatsu, Makoto Sasaki, Yuji Tameshige, Kyo Kume, Hiroki Minami, Yusuke Saga and Makoto Saito, The margin estimations of prostate and seminal vesicle for the CT-image guided proton therapy for prostate cancer, 2017 American Society for Radiation Oncology (ASTRO) Annual Meeting, San Diego, 2017.9
- K. Morita, B.Tsuchiya, J. Ohnishi, Y. Iriyama, H. Tsuchida, T. Majima, K. Suzuki, High Resolution Li Depth Profiling of Li Ion Battery by TERD Technique with High Energy Light Ions, The 22nd International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions, Dresden, Germany, 2017.9
- 11. H. Nakajima, K. Yasunaga, R. Yamagishi and S. Matsuda, Antimicrobial Effect of Porous Copper with Directional Pores, Metfoam2017, Nanjing, China, 2017.9
- 12. K. Suzuki and Y. Nakata, Development of an in-air-ERDA system for hydrogen analysis, The 23rd International Conference on Ion Beam Analysis, Shanghai, China, 2017.10
- 13. Takane Kobayashi, Rongbin Ye, Kohtaku Suzuki, Satoshi Wada and Mamoru Baba, Depth profiling of lithium in an all-solid-state lithium-ion battery using time-of-flight elastic recoil detection analysis, The 23rd International Conference on Ion Beam Analysis, Shanghai, China, 2017.10
- 14. Satoki Yamashita, Maki Takano, Masanori Hatashita and Kazuhiro Hoshino, Construction of a Highperforming Fungus by Ion-beam Irradiation for Ethanol Production from Cellulosic Materials, The 4th International Cellulose Conference (ICC2017), Fukuoka, 2017.10
- 15. Natsuko Kondo, Kenji Nakayama, Yoshinori Sakurai, Takushi Takata, Kyo Kume, Shin-ichi Miyatake, Osamu Ogawa and Minoru Suzuki, Elucidation of phospholipid alteration in brain after irradiation using brain radiation necrosis mouse model, The 22nd Annual Scientific Meeting of the Society for Neuro-Oncology (SNO), San Francisco, 2017.11

- 16. Kazuo Soda, Shinya Sugiura, Kanta Yamaguchi, Masahiko Kato, Ken Niwa, Masashi Hasegawa, Kohtaku Suzuki, Tatsuya Ishigami and Eiji Ikenaga, Microbeam hard X-ray photoelectron and ion-beam analyses of Nb hydrides formed in supercritical water, 11th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices, Kauai, Hawaii, 2017.12
- Kazuma Kamata, Haruna Maeda, Mitoki Tanaka, Masanori Hatashita, Hiroyuki Uchida and Masaya Oki, Analysis of irradiation resistance mechanism in *S. cerevisiae*, 2017 American Society for Cell Biology Annual Meeting, Philadelphia, 2017.12
- Hideo Nakajima, Fabrication, Physical Properties and Application of Lotus-type Porous Metals, The 19th International Symposium on Eco-materials Processing and Design, Jaipur, India, 2018.2
- 19. Natsuko Kondo, Takako Yasuda, Yoshinori Sakurai, Takayuki Kajihara, Kenji Nakayama, Takushi Takata, Shin-ichi Miyatake, Kyo Kume, Osamu Ogawa and Minoru Suzuki, Increased lysophosphatidylcholine is associated with recruitment of reactive microglia and astrocytes in radiation brain necrosis mouse model, American Assosiation for Cancer Research (ACR) Special Conference on Immunobiology of Primary and Metastatic CNS Cancer: Multidisciplinary Science to Advance Cancer Immunotherapy, San Diego, 2018.2
- (4) 国内会議発表
- 1. 増田孝充、片岡淳、有元誠、高部美穂、西尾禎治、松下慶一郎、山本誠一、稲庭拓、歳藤利行、羽鳥 聡、チェレンコフ光を用いた陽電子放出核種生成核反応断面積の高精度推定、第113回日本医学物理 学会学術大会、パシフィコ横浜、2017.4
- 2. Kyo Kume, Takashi Hasegawa, Satoshi Hatori, Masato Takita and Hirokazu Tsuji, Space engineering application of therapeutic broad proton beam for cosmic ray simulation, 第113回日本医学物理学会学 術大会, パシフィコ横浜, 2017.4
- 3. Fuyumi ITO, Takashi HASEGAWA, Munetoshi MAEDA, and Kyo KUME, Development of an online proton dose distribution monitoring system by using a fluorescent screen (I), 第 113 回日本医学物理学 会学術大会, パシフィコ横浜, 2017.4
- 4. 篠田佳彦、若狭湾エネルギー研究センターにおける太陽熱利用研究(フレネルレンズを用いた透過・屈折 式太陽炉の開発と環境負荷低減に向けた応用)、日本材料学会北陸信越支部第33期総会・特別講演 会、福井大学、2017.4
- 5. 宮崎康典、渡部創、佐野雄一、小藤博英、竹内正行、江夏昌志、佐藤隆弘、石神龍哉、抽出クロマトグラ フィ法に適用する MA 回収用吸着材の放射線劣化研究、日本原子力学会北関東支部平成 29 年度若手 研究者発表会、東海村、2017.4
- 6. 伊東富由美、山ノ井航平、長井圭治、久米恭、西村昭彦、乗松孝好、高性能高分子のカプセル化、光・量 子ビーム科学合同シンポジウム 2017、2017.5
- 7. 上木裕友、山本啓太郎、加藤寛敬、安永和史、バニシング加工による耐摩耗性向上、トライボロジー会議 2017 春、東京都、2017.5
- 8. 内田はるか、瀧川晶、土、山明、鈴木耕拓、中田吉則、三宅亮、高山亜紀子、宇宙風化を模擬した多様な 鉱物への水素イオン照射実験、日本地球惑星科学連合連合大会 2017、東京ベイ幕張ホール、2017.5
- 9. 八木香子、山本洋子、上村玲央、奥山克史、松田康裕、鈴木耕拓、林美加子、In-air micro-beam PIXE/PIGE による Ca を含有したグラスアイオノマーセメントを塗布した根面象牙質の耐酸性評価、日本 歯科保存学会 2017 年度春季学術大会(第146回)、青森市、2017.6
- 篠田佳彦、若狭湾エネルギー研究センターにおける太陽熱利用研究(フレネルレンズを用いた透過・屈折 式太陽炉の開発とMg循環社会に向けた応用)、Mg-Day in Tokyo at TOKYO BIG SIGHT 公開セミナ ー、東京ビッグサイト、2017.6
- 11. 羽鳥聡、栗田哲郎、林豊、山田裕章、小田桐哲也、山口文良、淀瀬雅夫、長崎真也、廣戸慎、清水雅 也、和田一人、大矢龍輝、辻宏和、高山宏一、若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状、第30 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、土岐市、2017.7
- 12. 中野絢菜、中山裕貴、相井城太郎、田中宥司、高城啓一、池田達哉、長嶺敬、炭素線照射によるオオム ギ(Hordeum vulgare)の突然変異の誘発1.種子貯蔵タンパク質の変異、第54回北陸作物·育種学会、上 越市、2017.7
- 13. 山岸隆一郎、Direct decontamination technique by fiber laser、第2回福島第一廃炉国際フォーラム、いわき市、2017.7

- 14. 畑下昌範、微生物を用いた水質浄化研究、第13回石川・福井湖沼水質浄化対策研究会、福井市、2017.8
- 15. 岩永幹夫、モニタリング・ポストの現状と現場自治体の対応、日本学術会議主催学術フォーラム「放射性物質の移動の計測と予測 ーあのとき・いま・これからの安心・安全ー」、日本学術会議講堂、2017.8
- 16. 栗田哲郎、羽鳥聡、林豊、山田裕章、小田桐哲也、山口文良、淀瀬雅夫、長崎真也、廣戸慎、清水雅 也、和田一人、大矢龍輝、辻宏和、若狭湾エネルギー研究センターシンクロトロンの現状、第14回日本 加速器学会年会、北海道大学、2017.8
- Munetoshi Maeda, Analysis of the modification of cell death by energy deposition to a local site in a cell, 第 55 回日本生物物理学会年会シンポジウム「Frontiers in radiation biophysics utilizing quantum beam technologies(量子ビーム技術を活用した放射線生物物理学の最前線)」, 熊本大学, 2017.9
- 18. 砂川武義、Glenn Harvel、青木祐太郎、梅田昌幸、速水醇一、田口光正、長澤直胤、畑下昌範、久米 恭、佐倉俊治、PVA-KI ゲルインジケータの陽子線照射効果に関する研究、第 60 回放射線化学討論会、 産業技術総合研究所つくば中央、2017.9
- 19. 梶取悠太、大石桃未、安田啓介、春山洋一、中田吉則、鈴木耕拓、TOF-ERDA での酸素の検出感度評価、第78回応用物理学会秋季学術講演会、福岡国際会議場、2017.9
- 20. 山岸隆一郎、レーザー除染されたコンクリート表面状態の照射エネルギー依存性、日本原子力学会 2017 年秋の大会、北海道大学、2017.9
- 21. 高野真希、山下聖樹、畑下昌範、星野一宏、耐熱性乳酸生産糸状菌のイオンビーム変異誘導による Xylose 発酵性向上における機能解析、第69回日本生物工学会大会、早稲田大学、2017.9
- 22. 山下聖樹、高野真希、畑下昌範、星野一宏、イオンビーム照射による直接 Ethanol 生産のための Cellulase 分泌糸状菌の構築、第69回日本生物工学会大会、早稲田大学、2017.9
- 23. 星野一宏、高野真希、畑下昌範、スエヒロタケ変異株を用いた糖化発酵同時進行によるリグノセルロース からの直接 L-リンゴ酸生産、第69回日本生物工学会大会、早稲田大学、2017.9
- 24. 日坂隆行、佐々木肇、奥友希、羽鳥聡、石神龍哉、久米恭、プロトン照射が GaN HEMT の長期信頼性 に与える影響、第78回応用物理学会秋季学術講演会、福岡市、2017.9
- 25. 鍵谷豪、小川良平、畑下昌範、兵藤文紀、田中良和、非侵襲的リアルタイムネクローシス可視化システムの構築、日本放射線影響学会第 60 回大会、千葉市、2017.10
- 26. 清野泰、村田桃子、牧野顕、久米恭、森哲也、浅井竜哉、岡沢秀彦、低酸素がん細胞に対する粒子線治療の効果予測に関する基礎的検討、第57回日本核医学会学術総会、パシフィコ横浜、2017.10
- 27. 前田嘉一、佐藤義高、柴田哲志、坊早百合、山本和高、玉村裕保、不破信和、高松繁行、佐々木誠、為 重雄司、久米恭、南大樹、佐賀友輔、斎藤真、前立腺がん陽子線治療における同室 CT 装置画像を利用 した骨盤内臓器の移動解析と対向陽子線飛程の変化解析、第14回日本粒子線治療臨床研究会、札幌 サンプラザ、2017.10
- 28. 近藤夏子、中山憲司、櫻井良憲、高田卓志、久米恭、宮武伸一、小川修、鈴木実、放射線脳壊死(RN)マ ウスモデルを用いた照射後脳組織リン脂質変化の解明、日本脳神経外科学会第76回学術総会、名古屋 国際会議場、2017.10
- 29. 前田宗利、松本英樹、小林克己、冨田雅典、マイクロビーム放射線研究が解き明かすバイスタンダー応答の生理的な意義、日本放射線影響学会第60回大会シンポジウム「放射線影響研究の将来を拓くマイクロビーム生物学」、千葉市、2017.10
- 30. 冨田雅典、前田宗利、X線マイクロビーム生物研究の現状と将来展開、日本放射線影響学会第60回大会シンポジウム「放射線影響研究の将来を拓くマイクロビーム生物学」、千葉市、2017.10
- 31. 奥山克史、山本洋子、松田康裕、八木香子、安田啓介、鈴木耕拓、林美加子、斎藤隆史、佐野英彦、玉 置幸道、フッ化物含有合着材周囲象牙質におけるフッ素との結合状態、第33回 PIXE シンポジウム、京 都大学宇治キャンパス、2017.10
- 32. 高城啓一、畑下昌範、放射線照射後のシロイヌナズナ幼苗根端における VE-821 の影響、放射線影響学 会第 60 回大会、千葉市、2017.10
- 33. 畑下昌範、高城啓一、プロトンビーム照射によるシロイヌナズナのサイクリン依存性キナーゼ遺伝子の転写制御、日本放射線影響学会第60回大会、千葉市、2017.10
- 34. 前田宗利、松本英樹、伊東富由美、田辺久美子、長谷川崇、水嶋慧、山東新子、久米恭、陽子線による 細胞へのダメージ評価による照射線量の適正化研究、若狭湾エネルギー研究センター第 19 回研究報告 会、福井大学、2017.10

- 35. 田中良和、イシクラゲ変異株を利用した有用物質の生産、若狭湾エネルギー研究センター第19回研究 報告会、福井大学、2017.10
- 36. 畑下昌範、庄司英一、ポリイミド系高分子ファイバーの開発、若狭湾エネルギー研究センター第 19 回研 究報告会、福井大学、2017.10
- 37. 勝山俊夫、石神龍哉、寺田恵一、慶光院利映、岩堀一夫、鈴木雅也、福村康和、新磁性材料を用いた光 ビーム走査ミラーの実現とレーザー投影装置への応用、若狭湾エネルギー研究センター第 19 回研究報 告会、福井大学、2017.10
- 38. 羽鳥聡、栗田哲郎、林豊、山田裕章、山口文良、淀瀬雅夫、長崎真也、廣戸慎、清水雅也、原裕也、大 矢龍輝、若狭湾エネルギー研究センターWERC加速器施設の現状、若狭湾エネルギー研究センター第 19回研究報告会、福井大学、2017.10
- 39. 石神龍哉、シリコンの成膜による金属表面の着色手法の開発、若狭湾エネルギー研究センター第 19 回 研究報告会、福井大学、2017.10
- 40. 篠田佳彦、遠藤伸之、山岸隆一郎、マグネシウムの酸化還元反応を活用した水素エネルギー循環サイク ルの構築、若狭湾エネルギー研究センター第19回研究報告会、福井大学、2017.10
- 41. 門脇春彦、30 kW ファイバーレーザーを用いた厚板の切断試験、若狭湾エネルギー研究センター第 19 回研究報告会、福井大学、2017.10
- 42. 三浦孝太郎、高城啓一、酒米のブランド品種「山田錦」の矮性化、難脱粒化、早生化に成功!、若狭湾エネルギー研究センター第 19 回研究報告会、福井大学、2017.10
- 43. 櫻井明彦、畑下昌範、冬虫夏草変異株を用いた新規抗腫瘍物質の生産、若狭湾エネルギー研究センタ ー第 19 回研究報告会、福井大学、2017.10
- 44. 松本英樹、前田宗利、陽子線がん治療時に低線量被ばくした正常組織の安全性を担保できるか?、若狭 湾エネルギー研究センター第19回研究報告会、福井大学、2017.10
- 45. 清野泰、久米恭、低酸素領域のがんに対する粒子線治療の効果予測は可能か?、若狭湾エネルギー研 究センター第19回研究報告会、福井大学、2017.10
- 46. 田中創大、西尾禎治、恒田雅人、高部美帆、増田孝充、久米恭、長谷川崇、株木重人、上坂充、シンチレ ータと CCD カメラを用いた線量積算型陽子線 CT 画像取得法の研究、日本放射線腫瘍学会第 30 回学 術大会、大阪市、2017.11
- 47. 青木祐太郎、梅田昌幸、Glenn Harvel、畑下昌範、久米恭、佐倉俊治、砂川武義、PVA-KI ゲルインジケ ータの陽子線照射効果の研究、第6回3次元ゲル線量計研究会、自治医科大学、2017.11
- 48. 門脇春彦、30kW ファイバーレーザーによる厚板切断試験、レーザー応用産学連携成果報告会(平成 29 年度)、敦賀市、2017.11
- 49. 阿部知子、市田裕之、高城啓一、畑下昌範、未来を作るイオンビーム育種技術、平成 29 年度園芸学会 北陸支部大会、福井市、2017.12
- 50. 高城啓一、畑下昌範、阿部知子、北陸にもあるイオンビーム照射施設:若狭湾エネルギー研究センターで のイオンビーム育種研究、平成29年度園芸学会北陸支部大会、福井市、2017.12
- 51. 大西崇太、杉浦康友、畑下昌範、櫻井明彦、イオンビーム照射によるセルラーゼ欠失白色腐朽菌の作 出、化学工学会金沢大会 2017、金沢市、2017.12
- 52. 久米恭、山東新子、水嶋慧、鳥居建男、瀧田正人、長谷川崇、宇宙機搭載用機器に対する高エネルギー 陽子線照射技術の開発(乗鞍観測所利用)、東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会、東京大 学宇宙線研究所、2017.12
- 53. 山本啓太郎、加藤寛敬、安永和史、バニシング加工による炭素鋼のナノ組織、日本金属学会・日本鉄鋼 協会北陸信越支部平成 29 年度総会・連合講演会、福井大学、2017.12
- 54. K. Morita, B. Tsuchiya, J. Ohnishi, T. Yamamoto, Y. Iriyama, H. Tsuchida, T. Majima and K. Suzuki, High Resolution Li Depth Profiling of Thin Films Stacked Li Ion Battery by Means of TERD Technique with 5 MeV He⁺² Ion Beam, 第 18 回「イオンビームによる表面・界面解析」特別研究会,物質・材料研究 機構(並木地区,つくば市), 2017.12
- 55. Keisuke Yasuda, Yuta Kajitori, Momomi Oishi, Yoichi Haruyama, Yoshinori Nakata and Kotaku Suzuki, Evaluation of sensitivity for oxygen by means of TOF-ERDA, 第 18 回「イオンビームによる表面・界面解 析」特別研究会,物質・材料研究機構(並木地区,つくば市),2017.12
- 56. 高城啓一、畑下昌範、平野智也、風間祐介、林依子、阿部知子、若狭湾エネルギー研究センターの加速 器システム、およびそれを用いた育種研究-照射初期応答解析とその育種への応用可能性-、理研シン ポジウム、和光市、2018.1

- 57. 畑下昌範、高城啓一、鈴木勝久、井村裕治、櫻井明彦、星野一宏、阿部知子、若エネ研における地域と 連携したイオンビーム育種研究の成果、理研シンポジウム、和光市、2018.1
- 58. 小北哲也、鈴木耕拓、イオンビーム分析の産業利用の最前線、平成 29 年度関西支部セミナー、産総研 関西センター(大阪府池田市)、2018.2
- 59. 久米恭、福井県内の医学物理士に関する話題提供~第118回日本医学物理学会学術大会平成31年 開催に向けて~、第27回福井県放射線治療研究会、ユアーズホテルフクイ、2018.2
- 60. 中嶋英雄、ロータス型ポーラス金属の機械的性質および物理的性質、日本金属学会 2018 年春期講演大会、千葉工業大学新習志野キャンパス、2018.3
- 61. 栗田哲郎、羽鳥聡、林豊、山田裕章、廣戸慎、清水雅也、山口文良、淀瀬雅夫、長崎真也、和田一人、 大矢龍輝、若狭湾エネルギー研究センターシンクロトロンにおける位相振動の抑制、日本物理学会第73 回年次大会、東京理科大学野田キャンパス、2018.3
- 62. 久保義人、橋本直哉、高城啓一、畑下昌範、イオンビーム育種を活用した清酒酵母の育成、福井県食品 加工研究所平成 29 年度成果発表会、坂井市、2018.3
- 63. 青木祐太郎、梅田昌幸、Glenn Harvel、田口光正、長澤直胤、久米恭、畑下昌範、佐倉俊治、砂川武義、 PVA-KI ゲルインジケータにおける放射線効果、日本原子力学会 2018 年春の年会、大阪大学吹田キャ ンパス、2018.3
- 64. 山口航平、竹原佳那、木戸慎太郎、高城啓一、岩崎行玄、三浦孝太郎、福井県に適した山田錦突然変 異体の選抜と有用性評価、日本育種学会第133回講演会、九州大学箱崎キャンパス、2018.3
- 65. 小楠夏海、増田美奈、畑下昌範、櫻井明彦、冬虫夏草を用いたコルジセピン生産に及ぼす酸素供給量の 影響、化学工学会第83年会、関西大学千里山キャンパス、2018.3

2.2. 特許

平成29年度における特許出願、特許登録は次のとおりである。

(1)特許出願

なし

- (2)特許登録
- 1. 「長距離レーザ切断装置」(特許第 6210456)田村浩司
- 2. 「植物育成のための光制御装置、光制御方法、光制御プログラム 及び光制御のためのデータ収集装置」(特許第 6233623)畑下昌範、明石行生、田中鉱一
- 3. 「RIセシウムの分離除去方法、及びその装置」(特許第 6284092)峰原英介
- 2.3. 品種

平成29年度における品種出願、品種登録は次のとおりである。

(1)品種出願

- 1. 「せと福 LGV」高城啓一、畑下昌範、鈴木勝久、水野隆 品種登録出願番号 第 32973 号
- (2) 品種登録

なし

Ⅲ 資料編

1 研究報告会における発表演題および発表者一覧

本研究センターが開催した研究報告会における演題と発表者の一覧を示す。

·第1回研究報告会

平成12年3月3日 エネ研にて開催		
(1)若狭湾エネルギー研究センター加速器システムの建設	羽鳥	聡
(2)陽子線がん治療に向けて	山本	和高
-環状リッジフィルターによる照射野形成の検討-	福田	茂一
(3)地域産業への科学技術活用に関する調査	橋本	和興
(4)研修・交流の取組みについて	加藤	啓之
(5)粒子線微量元素分析法による和紙の生産地推定と	伊藤	慶文
エビ養殖技術の評価への適用		
(6)超音波による遺伝子導入法の検討	小川	良平
(7)原子力と放射線に対する社会認識	辻本	忠
(8)発電所温排水を利用した簡易型植物育成システムの開発	吉岡	譲

•第2回研究報告会

平成12年12月5日 福井商工会議所にて開催		
平成 12 年 12 月 7 日 エネ研にて開催		
(1)若狭湾エネルギー研究センターの加速器の状況	羽鳥	聡
(2)陽子線がん治療臨床研究計画の進展	山本	和高
(3)高度分析機器を用いた真鍮製パイプの水漏れの原因調査	丸山	忠司
ー地元企業との協力調査ー		
(4)希土類強磁性材料の耐放射線性の研究	伊藤	慶文
(5)「ソバ」の自家不和合性打破に関する研究	畑下	昌範
(6)発電所廃熱を利用した総合効率向上に関する研究	小泉	真範

·第3回研究報告会

平成 13 年 10 月 22 日 福井商工会議所にて開催		
平成 13 年 10 月 25 日 エネ研にて開催		
(1)イオンビーム照射によって作出した種間雑種の染色体解析	高城	啓一
(2)加速器イオンビームを用いた材料分析とその開発	伊藤	慶文
(3)温排水の熱回収システムに関する性能試験	松田	寿
(4)陽子線がん治療研究の現況	山本	和高
(5)原子力施設立地地域における原子力世論調査	大西	輝明

·第4回研究報告会

平成 14 年 10 月 7 日 エネ研にて開催

平成14年10月11日 福井商工会議所にて開催

(1)イオンビームを用いた機能材料創製

(2)雪と寒剤による氷温貯蔵システムに関する研究	小泉	真範
(3)新しい可視光機能材料の開発研究	西尾	繁
(4)陽子線がん治療の現状	山本	和高
(5)耐倒伏性コシヒカリの作出	畑下	昌範

·第5回研究報告会

平成 15 年 11 月 25 日 エネ研にて開催

- (1)炭素イオン注入による単結晶 3C-SiC 生成と半導体デバイスへの応用 伊藤 慶文
- (2) 温排水からの熱回収・利用システムに関する研究 伊藤 晴夫

(3)陽子線がん治療の高度化研究について

- (4)(財)若狭湾エネルギー研究センターにおける分析支援業務の概要 遠藤 伸之
- (5)12C(p,p'y)反応を用いた炭素分析測定

•第6回研究報告会

平成 17 年 2 月 24 日 エネ研にて開催

- (1) 生物照射技術開発(ガラス容器内栽培植物の品種改良) 高城 啓一 (2)材料照射技術開発(マイクロビーム照射技術開発研究) 安田 啓介 (3) 陽子線がん治療の高度化研究 山本 和高 (4)加速器と科学分析装置による分析(銅鐸に含まれる微量元素分析) 遠藤 伸之
- (5) 透過型電子顕微鏡による分析 (半導体基板上の磁性薄膜微細構造分析) 笹瀬 雅人
- (6) 研究協力と技術支援の取組み状況について 岸田 亮二

·第7回研究報告会

平成18年2月8日 福井大学にて開催

(2)太陽光エネルギーを用いた水素の製造

- (1)がん細胞に対するイオンビームの生物効果 鍵谷 豪
- 福井大学医学部助手 三好 憲雄
 - 笹瀬 雅人

伊藤 慶文

山本 和高

安田 啓介

- 福井大学工学部教授 竹下 晋正
- (3)電子スピン共鳴装置(ESR)による大線量ガンマ線照射の評価 遠藤 伸之 (4)半導体発光デバイス照射損傷評価
 - 福井工業大学教授 権田 俊一
 - 伊藤 慶文
- (5)イオンビームによるトマトの品種改良 日華化学㈱アグリ事業部部次長 笠原 康一
 - 高城 啓一
 - 畑下 昌範
- (6) 研究協力と技術支援の取組み状況について 野坂 明信

·第8回研究報告会

平成 18 年 10 月 24 日 福井大学にて開催

	(1)イオンビーム照射による品種改	良の効率化	高城	啓一
			畑下	昌範
		福井大学医学部助教授	松本	英樹
	(2)観賞用ボトルフラワーの開発	福井大学教育地域科学部教授	前田	桝夫
		福井大学教育地域科学部教授	奥野	信一
			高城	啓一
	(3)加速器による中性子を用いたが	ぶん治療技術の開発	福田	茂一
		京都大学原子炉実験所教授	丸橋	晃
	(4) 虫歯予防に有効な歯質中フッ素	素の測定		
		大阪大学大学院歯学研究科招へい教員	山本	: 洋子
			安田	啓介
	(5)イオンビーム照射による SUS 材	の変形挙動評価		
		㈱原子力安全システム研究所副主任研究員	藤井	: 克彦
			伊蕂	慶文
	(6) 若狭湾の海水流動モデルの開	発	小野	, 真宏
•第	9 回研究報告会			
	平成 20 年 1 月 22 日 福井大学に	こて開催		
	(1)太陽炉による炭酸ガスの消滅		大西	東洋司
			重田	達雄
		福井大学大学院教授	竹下	晋正
	(2)バナジウム酸化物担持非晶質ジ	~リカの感湿材料への応用	西尾	繁
	(3)気泡駆動型循環式ヒートパイプ	の熱輸送特性		
		福井大学大学院准教授	永井	二郎
			大西	東洋司
	(4)栄養繁殖系花卉組織へのイオン	ンビーム照射による新品種の育成		
		ハクサンインターナショナル(株)	鈴木	勝久
			高城	啓一
			畑下	昌範
	(5)陽子線を用いるがん治療の臨り	長研究と高度化基礎研究の成果	久米	恭
			山本	和高
haka				
•第	10 回研究報告会	→ □□ /Ψ		
	半成20年11月19日 福井大学(- <u>1</u> +1~ ,-1-+	* +
	(1)水素聚造法としての鉄と水の利	用	新呂	<u> </u>
			大谷	「勝天」
	(아) 분쇄) : > 루는고 비 ㅋ 미 이 관 군!		天 凸	東 拝 可
	(2) 廃熱から電気を生み出す熟電権	オ科の特性評価と局度化 大阪大字助教	黒崎	侹

- 笹瀬 雅人
- (3)酵素を用いた有機リン系農薬の検出 福井工業高等専門学校准教授 高山 勝己
 - 田中 良和

	(4) 放射線による癌治療用遺伝子の制御	富山大学講師	小川	良平 茶一
	(5)雪冷熱利用システムの実証試験		m 重田	戊— 達雄
			鳥取	章二
•第	11 回研究報告会			
	平成 21 年 12 月 9 日 福井大学にて開催			
	(1)新型ヒートパイプ BACH の開発研究	福井大学准教授	永井	二郎
			新宮	秀夫
			大西	東洋司
			鳥取	章二
	(2)飽和水蒸気雰囲気によるシリカ上担持 V2O5・nH2Oの)構造変化	西尾	繁
	(3)ポータブル蛍光 X 線分析装置の開発		安田	啓介
		チュルーンバートル	バトチェ	ュルーン
	福井県立一刻	乗谷朝倉氏遺跡資料館	川越	光洋
	(4)若狭湾エネルギー研究センターにおける粒子線治療	、臨床・基礎	山本	和高
			久米	恭
	(5)イオンビーム照射によって変異誘発された冬虫夏草菌	菌による生理活性物質の		
	効率的な生産法の開発		畑下	昌範
		福井大学教授	榊原	三樹男
		福井大学	増田	美奈
	(6)実験前立腺がんに対する陽子線照射効果の共同研究	究 福井大学助教	三好	憲雄
		福井大学	福永	幸裕
			福田	茂一
			久米	恭
	(7)プラズマ処理による高強度炭素繊維/プラスチック複	[合材料の創製		
	京	都工芸繊維大学准教授	奥林	里子
			石神	龍哉
、生	19 同研究報生今			
ैफ्रे	12 回初元報日云			
	平成 22 平 10 月 28 日 袖井八子に (用催 (1) 阻 7 約式) 海底防止研究の (1) 阻		11.+	카루
	(1) 陽丁祿かん 宿療 臨床 研究の 成条	\.}	山本	和尚
	(2)イオンビーム照射によるキナン分解神風変異体を用い		44 7%	┯╸┵╸┵┶
	N-Fでナルクルコサミン製造技術開発	(株)エル・ロース	能登	田 有夫
		(株)エル・ロース	(株山) (大山)	展行
			局城	啓一
			畑下	昌範
		福井県立大学准教授	木元	久
	(3)イオンビームによる植物工場用野菜の新品種開発		畑下	昌範
		福井県立大学教授	大城	閑
			高城	啓一

- 福井シード(株) 井村 裕治
- (4)太陽熱エネルギー利用による熱交換器設計要素技術の検証試験
 - 三菱重工業(株) 大久保 剛
 - 三菱重工業(株) 堀江 茂斉
 - 天田 健一
 - 重田 達雄

(5) 高分子電解質および電極構造の制御による化学アクチュエータの創製

- 福井大学准教授 庄司 英一
 - 畑下 昌範

(6)低酸素領域がん幹細胞を標的とした陽子線がん治療 福井大学准教授 吉井 裕

- 福井大学助授 吉井 幸恵
 - 久米 恭
- 放射線医学総合研究所 藤林 康久

(7)細胞増殖制御が可能な工業用動物細胞の育種 高城 啓一

- 福井大学 千田 泰史
- 福井大学 川原 渉
- 福井大学准教授 寺田 聡

(8) 放射線同位元素分析によるズワイガニの年齢評価

小野 真宏

今 攸

- 関電プラント(株) 白木 秀人
- 元越前海遊公社 大間 憲之

第13回研究報告会

平成 23 年 10 月 27 日 福井大学にて開催

再生医療用培養基材の開発

- (1)ブラッグピーク付近の陽子線がH2AXリン酸化に与える影響 高城 啓一
 - 畑下 昌範
 - 久米 恭
 - 高田 卓志
 - 合同会社ハセテック 長谷川 崇

(2) 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

- 福井大学准教授 松本 英樹
 - 畑下 昌範
- (3)レーザー除染装置の開発 峰原 英介
- (4)放射線源情報評価手法調查 高田 卓志
 - 久米 恭
 - 大谷 暢夫
 - 合同会社ハセテック 長谷川 崇
- (5)イオンビームによる表面修飾を用いた、クラゲコラーゲンからなる
 - (独)医療基盤研究所 柳原 佳奈
 - 福井大学准教授 寺田 聡
 - 日華化学(株) 番戸 博友

高城 啓一

畑下 昌範

チウルーンバートル バトチウルーン

(6)X線照射により障害を受けるトラフグの免疫細胞種と耐病性に及ぼす影響

- 福井県立大学教授 宮台 俊明
 - 高城 啓一
- (7)環境半導体鉄シリサイド薄膜(β-FeSi₂)の創製 笹瀬 雅人
- (8)Fe-Pt 薄膜磁石の性能向上と耐放射線試験 石神 龍哉

·第14回研究報告会

平成 24 年 10 月 31 日 福井大学にて開催

(2) 単為結果性トマト品種の育成

- (1)シロイヌナズナ幼苗根端におけるヒストン H2AX のリン酸化
 - (独)理化学研究所 平野 智也
 - (独)理化学研究所 塚田 晃代
 - (独)理化学研究所 安部 知子
 - 畑下 昌範

高城 啓一

- 福井シード(株) 井村 裕治
- 福井大学客員教授 井上 雅好

(3)熱輸送方向を切替可能なヒートパイプの開発と地中熱利用空調への適用

- 福井大学大学院准教授 永井 二郎
 - 板東 文夫
 - 日本原子力発電(株) 鳥取 章二
- (4)陽子線がん治療研究装置の高度化 ~生体試料への対応~ 久米 恭
 - 高田 卓志
 - 前田 宗利
 - 山本 和高
 - 村上 雅之
 - 合同会社ハセテック 長谷川 崇
- (5)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 伊藤 英樹
 - 日本原子力発電(株) 鳥取 章二
- (6)粒子ビーム照射による超伝導バルク磁石の性能向上 京都大学准教授 紀井 俊輝
 - 峰原 英介
- (7)イオンビーム手法を用いて室温形成させたナノ材料の精密構造解析 笹瀬 雅人
 - 名古屋工業大学教授 種村 真幸
- (8)軽元素分析のための TOF-ERDA 測定システムの開発 安田 啓介
 - (株)豊田中央研究所 日比 章五

•第15回研究報告会

- 平成 25 年 10 月 23 日 福井大学にて開催
- (1)イオンビーム育種の高効率化に関する研究

高城 啓一

(2)植物工場のためのフィードバック補光システムの開発

- 福井大学大学院教授 明石 行生
 - 日野電子(株) 岡田 正一郎
 - 福井シード(株) 井村 裕治
 - 畑下 昌範

(3)環境中における放射性物質沈着量分布評価法の開発

- 久米 恭 高田 卓志
- 合同会社ハセテック 長谷川 崇
 - 大谷 暢夫

(4)イオンビームによる表面修飾を用いた、クラゲコラーゲンからなる

- (独)医療基盤研究所 柳原 佳奈
 - 福井大学准教授 寺田 聡
 - 海月研究所 馬場 崇行
 - 日華化学(株) 番戸 博友
 - 畑下 昌範
 - 高城 啓一 遠藤 伸之

(5)健康増進に役立つ活性酸素測定法の開発

再生医療用培養基材の開発

- 京都大学医学部附属病院 荒井 俊之
 - 医療法人あさお会 大和田 滋
 - 東京家政大学 長尾 慶子
- (6)陽子線による細胞へのダメージ評価による照射線量の適正化研究 前田 宗利
 - 高田 卓志
 - 合同会社ハセテック 長谷川 崇
 - 久米 恭
- (7)薄膜分析のための重イオン RBS 法の開発 安田 啓介

·第16回研究報告会

- 平成 26 年 10 月 29 日 福井大学にて開催
- (1)イオンビーム照射による耐塩性アブラナの作出

高城 啓一

- (2)陽子線による細胞へのダメージ評価による照射線量の適正化研究 前田 宗利
 - 福井大学准教授 松本 英樹
 - 高田 卓志
 - 合同会社ハセテック 長谷川 崇
 - 村上 雅之
 - 久米 恭

(3) 革新的陽子線がん治療のための腫瘍分子イメージング技術開発

福井大学教授 清野 泰

- 福井大学 岡沢 秀彦
- 福井大学 森 哲也
 - 久米 恭
 - 高田 卓志

- (4)加速器を用いた極薄膜中の軽元素分析法の開発
 (株)豊田中央研究所
 日比 章五
 (5)負性抵抗回路を用いた小型シンクロトロン用電流モニタの開発
 第日 哲郎
 (6)原子炉における放射性同位元素の発生とその汚染と除染の仕組み
 - ーレーザーは汚染を完全に除去できるか? -
 - 畑下 昌範
 - .
 - 福井大学 庄司 英一
- (8)太陽炉を用いた酸化グラフェンの超高温処理による高結晶性グラフェン形成
 - 大阪大学大学院教授 小林 慶裕
 - 篠田 佳彦

峰原 英介

·第17回研究報告会

平成 27 年 10 月 29 日 福井大学にて開催

(7)高分子薄膜アクチュエータの開発

- (1)原子力施設の解体切断を目指した大出力レーザー技術の開発 遠山 伸一
 - 石神 龍哉

峰原 英介

- (2)原子力施設をレーザーで除染するロボットの開発
 - 多くの除染方法の比較紹介を含めて-
- (3)環境浄化を目的とした環境中からの光合成微生物の単離とその機能強化 畑下 昌範
- (4) 放射線によるがん治療の高度化に向けた取り組み

-陽子線およびX線の併用照射が腫瘍細胞に与える影響の評価- 前田 宗利

福井大学准教授 松本 英樹

- 伊東 富由美
- 田辺 久美子
- 合同会社ハセテック 長谷川 崇
 - 水嶋 慧
 - 山東 新子
 - 久米 恭

(5)陽子線・ヘリウム線による脳壊死モデル作成技術の確立

ー放射線脳壊死のメカニズム解明と治療法開発を目指して-

- 京都大学助教 近藤 夏子
 - 京都大学 櫻井 良憲
 - 京都大学 高田 卓志
 - 京都大学 仲川 洋介
 - 京都大学 田中 浩基
 - 京都大学 鈴木 実
 - 伊東 富由美
 - 久米 恭

(6)冬虫夏草による生理活性物質の生産

- イオンビームを用いた高性能株の作出と、コルジセピン生産技術の開発-

- 福井大学大学院教授 櫻井 明彦
 - 畑下 昌範

	 (7)植物育種を加速する DNA マーカーの開発 ハクサンインターナショナル(株) プランツファーム SETO (8)加速器を利用した超薄膜分析技術の開発 	 田中 鈴野 赤田 	良勝隆耕 略 格 が
•第	18 回研究報告会		
	平成 28 年 10 月 31 日 福井大学にて開催		
	(1)大出力レーザーを用いた原子力施設の解体切断技術の開発	遠山	伸一
		石神	龍哉
	(2)レーザー除染・剥離機の実用化		
	ーレーザー除染・剥離機の普及に向けた取り組み-	峰原	英介
	(3) 陽子線がん治療における低線量被ばくした正常組織での組織幹細胞動態の解	郓	
	- 正常組織の低線量被ばくの安全性を担保するためのエビデンスの蓄積-		
	福井大学准教授	松本	英樹
		前田	宗利
		田辺	久美子
	合同会社ハセテック	長谷	川崇
		水嶋	慧
		山東	新子
		久米	恭
	(4)モノクローナル抗体を用いた植物 DNA 損傷マーカーの検出と適正線量決定~	ヽ の適月	
		高城	啓一
	(5)人工光栽培による葉菜類の育成と機能性成分の生成に及ぼす光質の効果	畑下	昌範
	(6)シリコン成膜による金属表面の着色	石神	龍哉
	(7)イオンビームによる材料改質 一磁気的性質を中心として一		la e e la
	大阪府立大学教授	岩瀬	彰宏
		石神	龍哉
	大阪府立大学	松井	利之
	量子科学技術研究開発機構	斉藤	<u>勇</u> 一
	量子科学技術研究開発機構	佐滕	隆博

- 住重試験検査(株) 鵜野 浩行
- 住重試験検査(株) 坂根 仁

·第19回研究報告会

平成 29 年 10 月 31 日 福井大学にて開催

(1)医学、生命科学における放射線利用の現状と可能性

東京工業大学准教授 松本 義久

(2)陽子線による細胞へのダメージ評価による照射線量の適正化研究 前田 宗利

- 福井大学准教授 松本 英樹
 - 伊東 富由美

田辺 久美子

- 合同会社ハセテック 長谷川 崇
 - 水嶋 慧
 - 山東 新子

 - 久米 恭 田中 良和

(3)イシクラゲ変異株を利用した有用物質の生産

(4) 新磁性材料を用いた光ビーム走査ミラーの実現とレーザ投影装置への応用

- 福井大学客員教授 勝山 俊夫
 - 石神 龍哉

ケイ・エス・ティ・ワールド(株) 寺田 恵一

- (株)メムス 慶光院 利映
- (株)シャルマン 岩堀 一夫
- 東海光学(株) 鈴木 雅也
- 小松電子(株) 福村 康和
 - 畑下 昌範
 - 福井大学 庄司 英一
- (6) 光技術・経営融合による起業、第二創業 光産業創成大学院大学長 加藤 義章
- (5)ポリイミド系高分子ファイバーの開発

2 公募型共同研究件名一覧(H19~23:特別推進研究、H24~30:産学連携研究)

此 夕	提宏機問	H10	H20	H91	H22	H23	H94	H25	H26	H27	H28	H20	H30
実験前立腹痛に対する陽子線昭射効果の共同研究	福井大学	•	•	•	1122	1120	1124	112.0	1120	1121	1120	1123	1150
10kW太陽炬を利用したケイ酸塩の結晶合成法の開発	京都学園大学	•	•	•									
不均一照射野に適した照射野形成法の研究	静岡がんセンター	•	•	-	+								
イオンビーム照射によって変異誘導された冬虫夏草菌による生理活性物質の効率的な生産法の開発	福井大学	•	•										
低線量/低線量率宇宙粒子放射線に対する細胞応答の機構解明	福井大学	•	•										
腫瘍低酸素と陽子線治療に関する研究	福井大学		•										
高分子・化学系アクチュエータの複合電極材創製と作動特性に関する イオンビーム照射効果	福井大学		•	•	•								
組み替え酵母による藻類からのエタノール化実用化研究	京都大学		•										
細胞増殖制御の可能な工業用動物細胞の育種	福井大学		•	•	٠								
低酸素領域がん幹細胞を標的とした陽子線がん治療	福井大学			•									
陽子線が生体内で引き起こす損傷の分布とDNAへの効果	福井大学			٠	٠								
希土類酸化物量子切断材料の創製による太陽光発電の高効率化の 検証	京都大学			•									
マイクロRNAを利用した遺伝子発現制御システムの開発	富山大学			•									
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 ーそれによるがん細胞死の促進機構の解明-	福井大学			•	•	•							
高エネルギーイオン照射による軽合金材料、耐熱材料の新規高度化 の研究	大阪府立大学			•	•								
粒子線照射による新型バルク超伝導体アンジュレータの性能向上に 関する基礎的研究	京都大学			•	•	•							
フェムト秒レーザーピーニング機構解明のための材料学的アプローチ	大阪大学			•	•								
酸化亜鉛系電子デバイスの耐放射線特性に関する研究	大阪工業大学				•								
メディエーター修飾プライマーを用いたDNA高感度センシングシステ ムの開発	福井大学				•								
腫瘍内がん幹細胞局在低酸素領域を標的とした陽子線がん治療	福井大学				٠								
イオンビームによる表面修飾を用いた、クラゲコラーゲンからなる再生 医療用培養基材の開発	福井大学、医薬基 盤研究所				•	•	•						
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	一乗谷朝倉氏遺跡 資料館				•	•							
粒子線作用の素過程の遺伝学的解析	京都大学				•								
太陽熱を利用した籾殻由来シリコンの高純度化に関する探索研究	大阪大学				•								
液相レーザーアプレーションによる酸化チタンナノ粒子生産技術の研 究開発	レーザー技術総合研究所				•								
微生物発酵によるN,N'-ジアセチルキトビオース製造技術の開発	福井県立大学					•	٠						
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	福井大学					•	•	•					
革新的陽子線がん治療のための腫瘍分子イメージング技術開発	福井大学					•							
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	福井大学					•	•	•					
高エネルギーイオンビームによる新機能磁性材料の創製	大阪府立大学					•							
実験腫瘍モデル動物のレーザー照射と併用陽子線照射技術の開発	福井大学					•							
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	福井大学					•							
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	福井大学					•							
陽子線と同時照射用レーザーファイバー先端駆動装置の開発	福井大学						٠						
イオンビーム励起反応場を利用した新規磁性構造作成法の開発	大阪府立大学						•						
生物個体・組織レベルでの長期保存に関する実用化試験	大阪大学						•						
機能性ナノファイバー電極材の創製とエネルギー変換素子・センサー への応用	福井大学								•				
イオンビーム励起反応場を利用した鉄ロジウム合金の磁気改質技術 開発と各種デバイス創製への応用	大阪府立大学								•	•	•		
新材料を用いた超小型レーザビーム走査ミラーの作製とそれを用いた 眼鏡型ディスプレイの実現	福井大学									•	•	•	
レーザー除染技術の土木建築分野への応用・実用化研究 ーレーザーによる遠隔防水途膜剥離施工技術の確立-	光産業創成大学院 大学												•

公募型共同研究件名一覧(H19~23:一般研究、H24~30:基礎研究)

件名	提案機関	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30
異常低熱伝導率系熱電材料の局所構造観察	大阪大学	٠											
気泡駆動型循環式ヒートパイプの熱解析	福井大学	•											
細胞内で生成する活性酸素種の電子スピン共鳴装置を用いた同定	京都大学	•											
有機リン加水分解酵素表層発現酵母を用いた有機リン農薬検査法の開発	福井工業高等専門 学校	•	•										
放射線により制御可能な人工プロモーターの構築と癌の放射線遺伝子治療への応用	富山大学	•	•										
マンガンペルオキシダーゼの工業生産に向けた白色腐朽菌増殖形態の解析	福井大学	•											
耳石の微量元素分析による希少回遊魚類の生態解明	福井県立大学	•	•										
タリウムテルライドにおける異常熱伝導率挙動の解明と熱電特性の高度化研究	大阪大学		•										
プラズマ処理による高強度炭素繊維/プラスチック複合材の創製	京都工芸繊維大学		•										
光合成人工葉の構築	福井大学		•	•									
イオンビーム手法を用いて室温形成されたナノ材料の精密構造解析	名古屋工業大学			•	•	•							
廃熱を電気に変える熱電材料の局所構造観察と高性能化	大阪大学			•									
酸化亜鉛系電子デバイスの耐放射線特性に関する研究	大阪工業大学			•									
ダイヤモンド状炭素 (DLC)膜の組成と摩擦・摩耗特性に関する研究	福井工業大学			•	•								
メディエーター修飾プライマーを用いたDNA高感度センシングシステムの開発	福井大学			٠									
X線照射により障害を受けるトラフグの免疫細胞種と耐病性に及ぼす影響	福井県立大学			٠	•	•							
形態・細胞構成元素から、海洋環境中の微小真核植物プランクトン群集構造と 動態を探る	福井県立大学			•									
電子スピン共鳴と好中球を用いた一重項酸素の検出とその特異的消去剤の試 作	京都大学				•								
革新的陽子線がん治療のための腫瘍分子イメージング技術開発	福井大学	000000000000000000000000000000000000000					٠	•			000000000000000000000000000000000000000		
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	福井大学						•						
イオンビーム照射による白色腐朽菌の高性能化と、そのセルロース系バイオマ ス前処理への応用	福井大学						٠	•					
鋳型フリー水熱中有機無機変換合成法による窒化炭素系ナノチューブ材料の 開発と組成分析および光触媒・水素吸蔵特性	名古屋大学						•	•					
植物の発芽・成長関連タンパク質の発現に及ぼす電界効果	福井工業高等専門 学校						٠						
分子レベルでの制御機構の解明による簡便かつ高効率照射手法の確立	福井大学	000000000000					٠				000000000000000000000000000000000000000		
陽子線・ヘリウム線による脳壊死モデル作成技術の確立-放射線脳壊死のメカ ニズム解明と治療法開発を目指して-	京都大学							•					
太陽炉を用いた酸化グラフェン高温処理による高品質グラフェン大量製造技術 の探索	大阪大学							•					
トマト栽培ハウス温調用のヒートポンプ・BACH融合システムの開発	福井大学								•				
低酸素環境下のがん細胞に対する陽子線治療メカニズムの解明	福井大学								•	•	٠		
陽子線がん治療における低線量被ばくした正常組織での組織幹細胞動態の 解明	福井大学								•	•	٠		
陽子線・ヘリウム線による脳壊死モデル作成技術の確立-放射線脳壊死のメカ ニズム解明と治療法開発を目指して-	京都大学								•				
冬虫夏草変異株を用いた新規抗腫瘍物質の生産	福井大学									•	•	•	
イオンビーム照射による山田錦のテーラーメード育種ライブラリの開発と福井県 に適した「新山田錦」の育成	福井県立大学									٠	٠	•	
高分解能TOF-ERDA測定システムの開発	京都府立大学									٠			
石油を作る微細藻類Botryococcus brauniiの重イオンビーム照射による変異株 ライブラリーの作出	大阪工業大学										٠		
子宮頸がんに対する粒子線治療の有効性と治療効果予測に関する基礎的検 キ+	福井大学								ĺ			•	•
²¹ ラジカル含有リチウム酸化物を用いた常温水分解法による水素発生システムの 開発	名城大学											•	•
場子線頭頸部がん治療における放射線口腔粘膜障害の発症動態および病態 の解析	福井大学					<u>.</u>					<u></u>	•	•
Silicon-on-insulator microdosimeter を用いた粒子線場における脳壊死形成 に関するマイクロドジメトリ	京都大学											•	•
福井県での栽培に最適化した酒米"新山田錦"の育成	福井県立大学												•
カバノアナタケによる抗糖化物質の生産とその解析	福井大学												•
DLC膜の医用応用のための親水性制御に関する研究	京都大学												•

3 歴代理事長·所長

理事長

氏名	任期
垣花秀武	平成6年度~平成15年度
石井佳治	平成16年度~平成17年度
旭 信 昭	平成17年度~平成30年度
石塚博英	平成30年度~

所長

12122	
氏名	任期
清水彰直	平成7年度~平成10年度
近藤道也	平成11年度~平成15年度
新宮秀夫	平成16年度~平成20年度
小林紘二郎	平成21年度~平成23年度
中 嶋 英 雄	平成24年度~

4 公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター理事会

- 1 職務
- (1)法人の業務執行の決定
- (2)理事の職務の執行の監督

(3) 理事長及び専務理事並びに常務理事の選定及び解職

2 理事(13名) (平成 30 年 9 月 30 日現在)

役 職	氏名
理事長	石塚 博英
専務理事	岩永 幹夫
公益社団法人関西経済連合会 常務理事	櫟 真夏
関西電力株式会社 常務執行役員原子力事業本部 地域共生本部長	右城 望
学校法人金井学園 理事長	金井 兼
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構副理事長・敦賀事業本部長	田口 康
北陸電力株式会社 執行役員 福井支店長	竹内 正美
福井県 総合政策部長	豊北 欽一
敦賀市長	渕上 隆信
日本原子力発電株式会社 常務取締役 敦賀事業本部長	前川 芳土
国立大学法人福井大学 学長	眞弓 光文
福井県経済団体連合会 専務理事	宮崎 和彦
北陸経済連合会 専務理事	山下 義順

監事(2名)

~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~	氏名
関西電力株式会社 執行役員 原子力事業本部副事業本部長 (原子力企画部門統括)	善家 保雄
敦賀市 会計管理者	道白 恵美

- 6 公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター評議員会
- 1 職務
 - (1)理事及び監事の選任又は解任
 - (2)理事及び監事の報酬等の額
 - (3)評議員に対する報酬等の支給の基準
 - (4)貸借対照表、正味財産増減計算書及び財産目録の承認
 - (5) 定款の変更
 - (6)残余財産の処分
 - (7) 基本財産の処分又は除外の承認
 - (8)その他評議員会で決議するもとして法令又は定款で定められた事項
- 2 評議員(10名) (平成 30 年 9 月 30 日現在)

役職	氏 名
公益財団法人ふくい女性財団 理事	今冨 廣子
関西電力株式会社 原子力事業本部 地域共生本部 副本部長	大濱 稔浩
電気事業連合会 立地環境部長	小川 喜弘
敦賀商工会議所 専務理事	奥井 純子
武生特殊鋼材株式会社 取締役会長	河野 通亜
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門 敦賀総合研究開発センター長代理 兼高速炉・新型炉研究開発部門 敦賀総合研究開発センター 拠点化推進室長 兼高速炉・新型炉研究開発部門 敦賀総合研究開発センター 高速炉プラント技術開発部長	鈴木 隆之
中部電力株式会社 執行役員 コーポレート本部 部長	鍋田 和宏
公立大学法人福井県立大学 事務局長	前田 洋一
北陸電力株式会社 福井支店 総務部長	三上 健太郎
日本原子力発電株式会社 常務執行役員 敦賀事業本部副事業本部長兼立地·地域共生部長	吉田 邦弘

若狭湾エネルギー研究センター 開所20年のあゆみ 研究年報(平成29年度)第20巻

編集発行: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) FAX (0770) 24-2303

印 刷:若越印刷株式会社 〒914-0037 福井県敦賀市道口63号10-1 TEL(0770)22-5600代) FAX(0770)23-2288