

文部科学省  
平成24年度版

# 原子力基礎基盤戦略研究 イニシアティブ 研究代表者からのメッセージ

平成25年7月



独立行政法人  
科学技術振興機構  
Japan Science and Technology Agency



東京電力株  
福島第一原子力発電所 3号機  
2011年3月14日(月)  
(写真提供/福島中央テレビ)

## はじめに

原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ  
プログラムディレクター（PD）  
茅 陽一

文部科学省では、我が国における原子力分野における研究の裾野をひろげ、基礎的・基盤的研究の充実を図るため、政策ニーズを踏まえて戦略的なプログラムを設定し、競争的環境の中で研究を推進することを目的とする「原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ」を平成20年度創設し、原子力委員会と連携しつつ基礎基盤研究を推進しています。



（独）科学技術振興機構（JST）では、文部科学省からの委託を受け、課題募集、課題審査、課題管理、事後評価に至る事業の執行支援を行っています。本事業の執行支援においても、平成17年度から事業支援を行っている「原子力システム研究開発事業」と同様、課題審査や中間・事後評価などに当たっては産学官の多くの有識者を組織化するとともに、課題管理に当たっても開発目標に向けて研究開発の効率的・効果的な推進に資するため分野や課題毎に担当プログラムオフィサー（PO）を配し、きめ細かなサポートを行っているところです。

研究成果についてはその都度タイムリーな情報発信に努めていますが、研究終了時においても「研究の狙い」、「研究内容と成果」、「今後に向けた課題」などを研究代表者からのメッセージとしてお伝えしております。

今般、平成23年度終了課題も加え、これまでに終了した課題の研究成果をとりまとめた平成24年度版メッセージ集を公表することにしました。

平成23年3月の(株)東京電力福島第一原子力発電所事故は、事故が起こると計り知れないほど大きな影響を及ぼしうることを改めて我々に認識させました。

原点に立ち返り、原子力システムの安全性を高めるため、更なる努力をして参る所存です。

## PD・PO紹介

### プログラムディレクター (PD)

茅 陽一 (財) 地球環境産業技術研究機構理事長  
東京大学名誉教授

### プログラムディレクター補佐 (PD補佐)

本間 清 (独) 科学技術振興機構総括室長  
群馬工業高等専門学校名誉教授

### プログラムオフィサー (PO)

岩田 修一 事業構想大学院大学教授

藤原 佐枝子 (財) 放射線影響研究所臨床研究部長 ※)  
(平成24年3月迄)

中村 典 (財) 放射線影響研究所主席研究員

山名 元 京都大学教授  
(原子炉実験所 原子力基礎工学研究部門)

山中 伸介 大阪大学教授  
(大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻)  
(平成23年3月迄)

小澤 正基 東京工業大学教授  
(原子炉工学研究所 原子力国際共同研究センター)

山本 章夫 名古屋大学教授  
(大学院工学研究科マテリアル理工学専攻)

平成24年7月現在

※) 就任時の職名

## — 目 次 —

1. 戦略的原子力共同研究プログラム	4
・平成22年度終了課題	6
・平成23年度終了課題	22
2. 研究炉・ホットラボ等活用研究プログラム	30
・平成22年度終了課題	32
・平成23年度終了課題	38
3. 若手原子力研究プログラム	40
・平成21年度終了課題	42
・平成22年度終了課題	62
・平成23年度終了課題	78
参考 採択課題一覧（平成20～24年度）	96

## 1. 戦略的原子力共同研究プログラム

プログラムオフィサー(PO)  
岩田 修一

東日本大震災の社会的影響は極めて甚大で、原子力分野の研究には大局観のある戦略の見直しが必要とされている。今回、耐震技術に関しては、建設中にも拘らず倒壊しなかった東京スカイツリー、1両も脱線しなかった鉄道システム、全ての原子炉の核反応のシャットダウンの実施により、技術の完成度の高さが証明された。一方、地震と津波による複合災害に関しては、女川、福島第2、東海サイトの原子炉群は何とか危機を乗り越えることに成功したが、福島第1サイトでは大事故になり、事故現場での事故終息、地域社会の基盤回復、社会全体のガバナンス等々、私達は多くの課題に直面している。本プログラムでは、耐震性、放射線の生物影響、放射性物質の吸着分離、中性子医療や分光、食品照射とリスクコミュニケーション、科学技術ガバナンス、原子力教育等々の幅広い分野の研究が実施され、多くの成果が生み出された。POとしては、この成果が原子力分野の本格的な拠点形成への第一歩へとつながればと願っている。



## — 目次 —

## (平成22年度終了課題)

- ・高経年配管系に関する耐震裕度の定量評価に関する研究…………… 6
- ・クリプトビオシスとリンクした放射線耐性機構の解明研究…………… 8
- ・新規R-BTP吸着剤による簡素化MA分離プロセスの開発…………… 10
- ・加速器中性子源による癌中性子捕捉療法的高度化に関する研究…………… 12
- ・実用化が予想される食品への放射線利用に関する基礎研究…………… 14
- ・原子炉型中性子小角散乱分光器群の先鋭的高度化に関する研究…………… 16
- ・HLW地層処分地選定に関する日本型合意形成モデルの構築…………… 18
- ・学校教育現場との対話に基づく原子力・放射線学習プログラム開発…………… 20

## (平成23年度終了課題)

- ・先進燃料被覆管材料の水素化および照射効果の解明に関する研究…………… 22
- ・超効率的量子篩（ふるい）作用による軽分子同位体分離用ナノ細孔体の開発…………… 24
- ・低線量率長期照射による個体レベルでの遺伝子発現変化の解析…………… 26
- ・植物における量子ビーム誘発突然変異の分子機構解明に関する研究…………… 28

[本文中の所属・職位は研究終了時 ・代表的な特許、論文、受賞は終了後1年以内のもの]


課題名	高経年配管系に対する耐震裕度の定量評価に関する研究		
参画機関	(株) IHI、防災科学技術研究所、横浜国立大学		
事業規模	期間	平成20～22年度	総額 85百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  中村 いずみ 防災科学技術研究所 減災実験研究領域  兵庫耐震工学研究センター 主任研究員</p> 			
<p><b>【研究概要】</b>  配管系はプラントにおける重要な構成要素のひとつですが、長期間の使用に伴い腐食などにより配管の肉厚が減少する「減肉」という劣化の発生が知られています。日本は地震多発国なので、そのような劣化が配管系の耐震安全性にどのように影響するのか、また、設計の想定を超えるような地震に対しての余裕はどの程度あるのかを合理的に評価することが大変重要です。本研究では、設計基準における想定を超える地震動に対する配管系の裕度を評価すること、また、減肉がある配管系の耐震裕度を確認することを目的に実験と解析を行いました。</p> <p>平成22年度には世界最大の振動実験施設である E-ディフェンスを使用した実験を行いました。大規模な配管系モデルを用い、現行の耐震基準で許容される応力レベルを超える加振を実施し、配管の損傷に至るまでのデータを取得しました。この実証実験を通じ、減肉のある配管系の損傷挙動、現行の耐震基準に対する裕度を実証的に評価できました。また、並行して実施した数値解析では、弾塑性応答下における配管系の損傷寿命を評価する解析モデルを構築し、通常の疲労損傷で破損する配管については損傷位置、損傷寿命を精度良く評価できるようになりました。</p>			
<p><b>【その後の取り組み】</b>  本研究で得られた貴重な実験データや、実験と対照して構築した解析手法を用い、今後もさまざまな角度から高経年配管系の耐震安全性の合理的な評価手法や地震後の配管系の健全性評価の手法などを検討したいと考えています。</p> <p>本研究の研究期間終了直前に東北地方太平洋沖地震があり、福島第一原子力発電所の深刻な原子力事故が発生しました。今後、日本の原子力発電がどのような方向に進むかわかりませんが、施設の耐震安全性を合理的に判断するためのひとつのデータとして本研究が役に立てば幸いです。</p>			





図1 平成22年度に実施したE-ディフェンス実験の様子  
左側が減肉のない健全な試験体、右側が減肉のある試験体。右側は、エルボ4ヶ所とティ1ヶ所に、50%程度の全周減肉を模擬しています。



図2 減肉試験体が損傷したときの状況  
設計で許容されるレベルの約5.6倍の入力で加振。左側の健全試験体はまだ損傷していません。

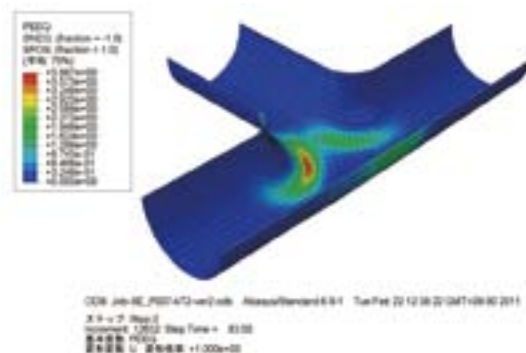


図3 健全試験体・ティ2の解析結果  
累積相当塑性ひずみの分布図。最終的にき裂の発生した位置をよく予測できています。  
(赤くなっている部分)

代表的な特許、論文受賞など

- 1) Izumi Nakamura, Akihito Otani, Yuji Sato, Hajime Takada, Koji Takahashi, and Tadahiro Shibutani, 2011, "Investigation of The Seismic Safety Capacity of Aged Piping System - Shake Table Test on Piping Systems With Wall Thinning by E-Defense", ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2011-57560
- 2) Tadahiro Shibutani, Izumi Nakamura and Akihito Otani, 2011, " Failure Analysis of Piping Systems with Thinned Elbows on Tri-Axial Shake Table Tests", ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2011-57580.
- 3) Akihito Otani, Izumi Nakamura, Hajime Takada, and Masaki Shiratori, 2011, "Consideration on Seismic Design Margin of Elbow in Piping", ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2011-57146.


課題名	クリプトビオシスとリンクした放射線耐性機構の解明研究			
参画機関	鹿児島大学、農業生物資源研究所			
事業規模	期間	平成20～22年度	総額	89百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  奥田 隆 農業生物資源研究所  乾燥耐性研究ユニット ユニット長</p>				
<p><b>【研究概要】</b></p> <p>ネムリユスリカ幼虫は身体の水分をほぼ完全に失っても致死することなく、水に戻すと何事もなかったかのように蘇生します。この極限的な乾燥耐性はクリプトビオシスと呼ばれます。ネムリユスリカを含むクリプトビオシス生物（例：クマムシやアルテミア）は放射線ストレスにも大変強い。例えば 160 Gy の照射を受けてもネムリユスリカ幼虫は、その後、蛹となり成虫へと変態します。乾燥および再水和に伴って幼虫の身体の中では活性酸素が発生します（主にミトコンドリアから）。幼虫は、この酸化ストレスを抗酸化物質を作ることによって軽減を試みますが DNA の切断は果たして不可避でした。しかし蘇生後、損傷を受けた DNA は複数の酵素によって完璧に修復されました。クリプトビオシスに伴う激しい酸化ストレスへの対応システムを長い進化の過程でネムリユスリカは獲得しました。放射線の被爆を受けたときにもこの酸化ストレス耐性機構を発動させることで生体成分を保護していると考えられます。</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b></p> <p>最近、ネムリユスリカ胚子由来の培養細胞を構築しました。この細胞は幼虫同様、乾燥に強く、脱水させた後、常温で長期間保存が可能です。この培養細胞は、乾燥状態でも放射線に対して反応することがわかってきました。この細胞を使うことで、通常の細胞では実施が不可能な実験が可能となります。具体的には、国際宇宙ステーションの船内や船外、福島原発周辺での、長期に渡る放射線被爆の生物影響をこの培養細胞で詳細に調べることができないかと考えています。ネムリユスリカが何らかの形で放射線防護システムの構築に貢献できれば嬉しく思います。</p>				



図1 乾燥と放射線に伴う酸化ストレスに対応した生体成分の軽減および修復機構をもつネムリユスリカ幼虫

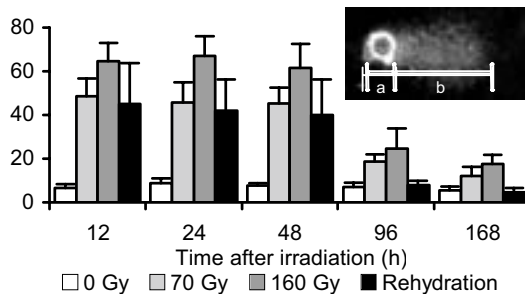


図2 放射線照射後と乾燥から蘇生後(Rehydration)の損傷DNAの量的変化。高いDNA修復能。

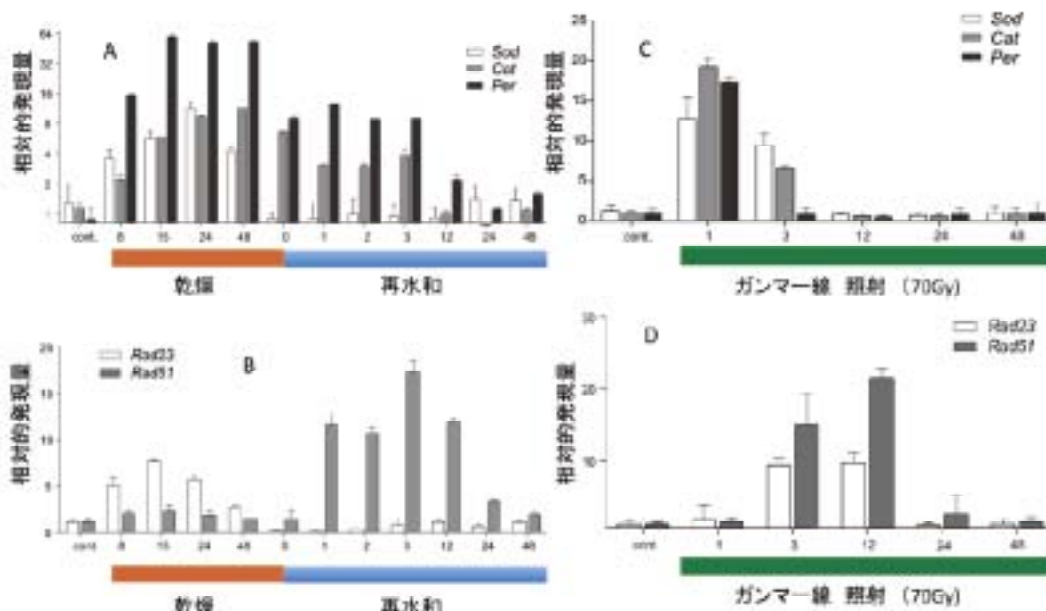


図3 乾燥と放射線ストレスに伴う DNA の損傷と修復に関わる遺伝子の発現パターン A, B : クリプトビオシス区、 C, D :  $\gamma$ 線照射区 横軸：処理後の時間 (h)、縦軸：相対的発現量。上記の結果からネムリユスリカのクリプトビオシスによって生じた DNA の損傷の軽減や修復機構が放射線ストレスの耐性分子機構とリンクしていることが伺える。

代表的な特許、論文受賞など

- 1) Cornette, R. et al. (2010) Identification of anhydrobiosis-related genes from an Expressed Sequence Tag database in the cryptobiotic midge *Polypedilum vanderplanki* (Diptera ; Chironomidae). *Journal of Biological Chemistry* 285 : 35889-35899
- 2) Gusev, O. et al. (2010) Anhydrobiosis-associated nuclear DNA damage and repair in the Sleeping Chironomid : linkage with radioresistance. *PLOS One* 5 (11) : e14008

課題名	新規 R-BTP 吸着剤による簡素化 MA 分離プロセスの開発			
参画機関	東北大学、産業技術総合研究所			
事業規模	期間	平成20～22年度	総額	87百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  倉岡 悦周 東北大学 教授  (サイクロトロン・RI センター)  (現) 上海交通大学 教授 (核科学工程学院)</p> 				
<p><b>【研究概要】</b>  高レベル放射性廃液には、アメリシウムやキュリウム等の長寿命放射性マイナーアクチノイド元素 (MA) が含まれるため、放射性廃棄物の地層処分において環境への長期的な放射性影響が問題となります。MA を分離回収して環境への放射性リスクを最小限にすることが重要な課題です。  様々な放射性元素を含有し、組成と性質が極めて複雑な高レベル廃液から MA を効率よく分離するためには、高い選択性と化学安定性を有する分離材料の開発がキーポイントとなります。本研究では、高性能吸着剤の創製により既存技術に比べ分離工程の大幅な簡素化及び廃棄物量の顕著な低減化が期待できる分離プロセスの開発を目指し、多孔性シリカ担持型新規 R-BTP (含窒素複素環化合物) 吸着剤を合成するとともに、分離性能及び安定性について評価しました。開発した新規吸着剤は、希土類など多種の共存元素を含む模擬廃液から MA を選択的に吸着分離できる結果が得られ、今後の研究開発の方向性を示すことができました。</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b>  高レベル放射性廃液から MA を効率よく分離するには、高い選択性と優れた耐放射線性を持ち合わせる分離材料の開発は最も重要なアプローチですが、これは原子力化学工学分野における世界共通の難題です。R-BTP 化合物は炭素、水素、窒素、酸素で構成され、使用済廃吸着剤の焼却処理が可能です。R-BTP 類化合物は分子設計および精密な合成手法により、性能が異なる多種の分子構造を設計・合成することが可能です。今後も国際共同研究等を通じて、学生たちとともに世界に先駆けて最高性能の新規吸着剤の研究開発にチャレンジしていきたいです。</p>				



図1 簡素化MA分離プロセス概念

単一の吸着剤カラムを用いることで、プロセスが簡素化されています。

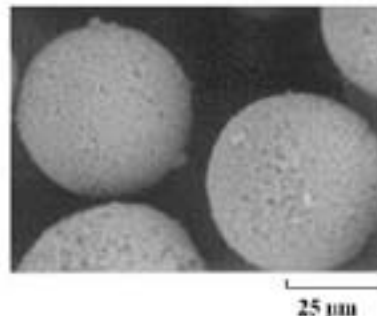


図2 R-BTP/SiO<sub>2</sub>-P吸着剤

粒径 50 μm の均一なシリカ担体に担持され、吸着性能が高いです。

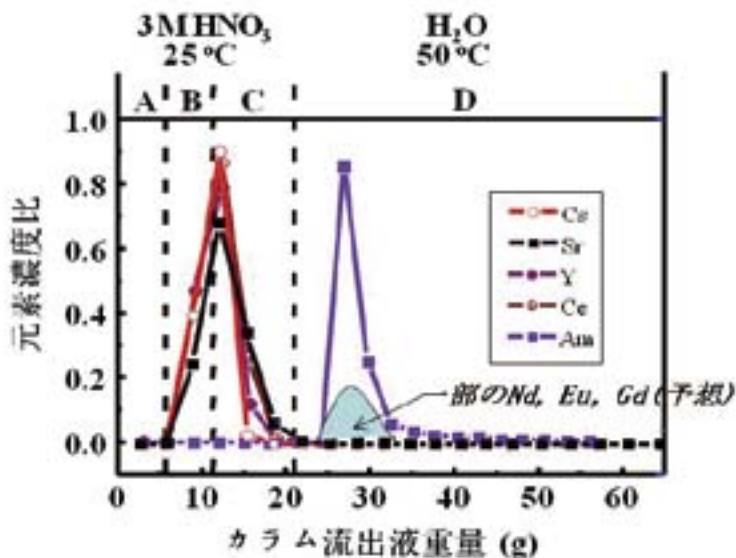


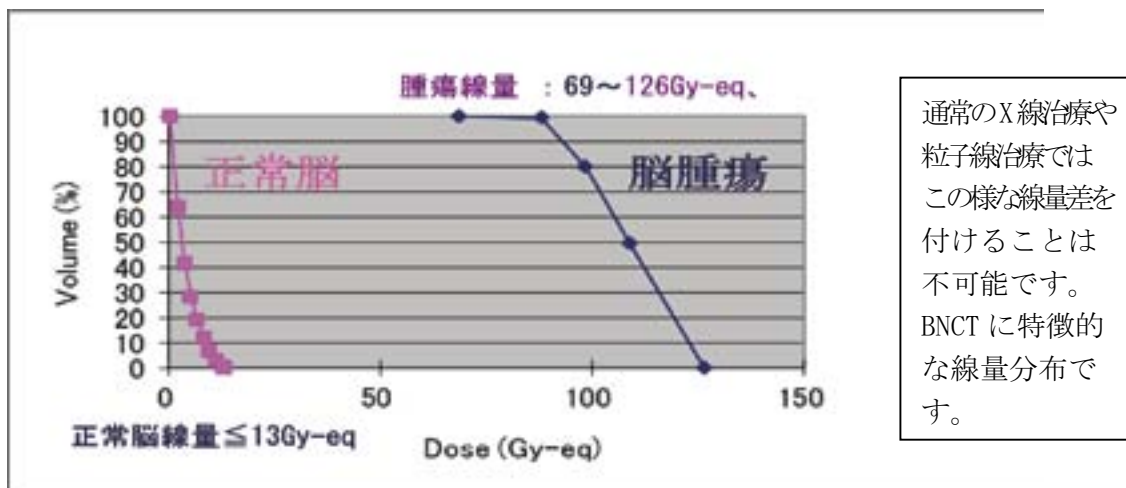
図3 R-BTP吸着剤による模擬高レベル廃液の分離試験結果

高濃度硝酸の模擬廃液から MA がほとんどの共存元素と分離できました。

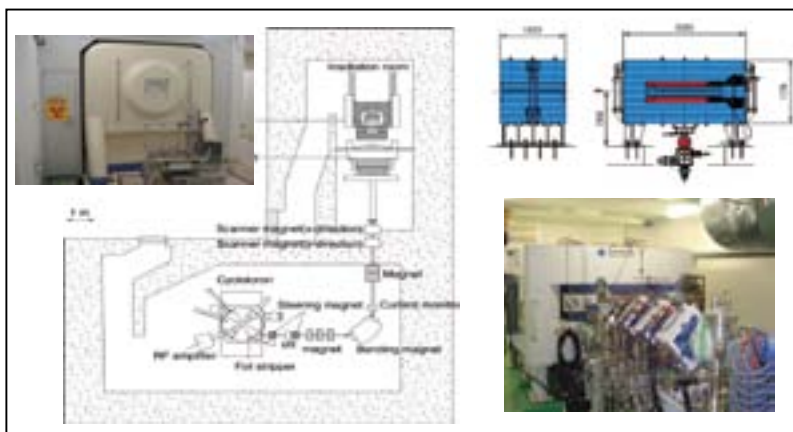
代表的な特許、論文、受賞など

- 1) S. Usuda, R. Liu, Y.-Z. Wei, Y. Xu, H. Yamazaki and Y. Wakui, "Evaluation Study on Properties of a Novel R-BTP Extraction Resin -From a Viewpoint of Simple Separation of Minor Actinides", *J. Ion Exchange*, **21**, 35-40 (2010).
- 2) S. Usuda, Y.-Z. Wei, Y. Xu, Z. Li, R. Liu, S.-Y. Kim, Y. Wakui, H. Hayashi and H. Yamazaki, "Development of a Simplified Separation Process of Trivalent Minor Actinides from Fission Products Using Novel R-BTP/SiO<sub>2</sub>-P Adsorbents", *J. Nucl. Sci. Technol.* **49**, 334-342 (2012).
- 3) R. Liu, Y.-Z. Wei, Y. Xu, S. Usuda, S.-Y. Kim, H. Yamazaki, K. Ishii, "Evaluation Study on Properties of isohexyl-BTP/SiO<sub>2</sub>-P Resin for Direct Separation of Trivalent Minor Actinides from HLLW", *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, DOI 10.1007/s10967-012-1631-3 (2012).

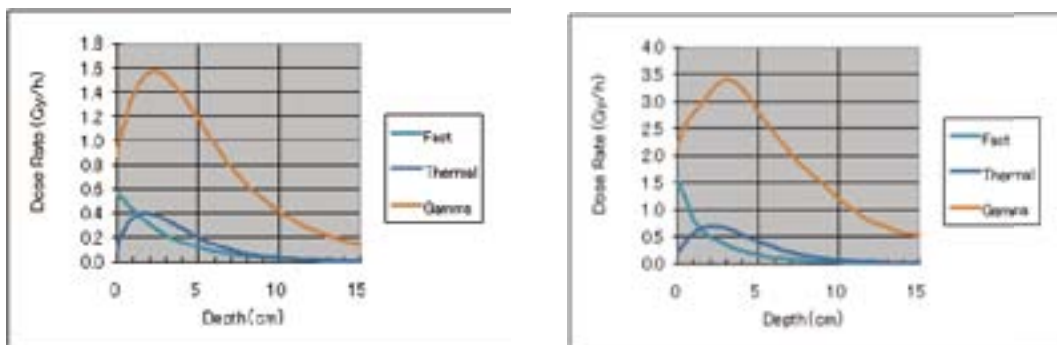
課題名	加速器中性子源による癌中性子捕捉療法の高度化に関する研究			
参画機関	大阪医科大学、大阪府立大学、川崎医科大学、京都大学、日本原子力研究開発機構、放射線医学総合研究所			
事業規模	期間	平成20～22年度	総額	87百万円
<b>【研究代表者】</b> 小野 公二 京都大学教授 (原子炉実験所粒子線腫瘍学研究センター)				
<b>【研究概要】</b> ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) はがん細胞選択的照射が可能な放射線治療として X 線に抵抗性のがんや治療後の再発がんに効果が期待されています。これまでは中性子源に研究用原子炉が使われてきましたが、BNCT が公的承認を得た治療となり一般化するには研究炉に替わる中性子源が不可欠です。私達は企業との共同で加速器中性子源を開発しました。サイクロトロンで 30MeV に加速した陽子を Be 標的に衝突させて中性子を発生させ、減速して BNCT に用いる中性子照射システムです。本研究では、先ずこの中性子ビームの物理学的、生物学的特性を明らかにしました。5cm 深部で京大炉の 2 倍の熱中性子フルエンス率が得られること、ビームの RBE は平均 2.4 であること等が分かりました。新規ホウ素化合物の開発や既存化合物の改良の上で鍵となる腫瘍指向性のチオール基を含むペプチドやタンパク質に BSH を導入する手法も開発できました。更に、現在、BNCT で汎用されている BPA の集積度の高低予測に用いられている $^{18}\text{F}$ -BPA PET に近い精度が $^{14}\text{C}$ 標識メチオニン ( $[\text{C-14}]\text{MET}$ ) で得られることを細胞での集積機序に係る研究から明らかにしました。悪性脳腫瘍や頭頸部癌に対する原子炉 BNCT の臨床経験を研究炉中性子から加速器中性子に置き換えて解析すると、研究炉と同等の安全性と同等以上の効果が期待できることが分かりました。加えて、治療計画システム JCDS が研究炉ビームと加速器ビームの何れにも精度良く応用できる様に改良を行いました。				
<b>【その後の取り組み】</b> 私達による BNCT 用の加速器中性子源の開発は世界初の成果です。この中性子ビームとホウ素化合物 (BPA) を組み合わせた試験によって原子炉中性子ビームと BPA の組み合わせ同様の抗腫瘍効果が確認できました。また、成人サイズのファントムを用いて中性子を含む放射線の全身被曝影響を物理測定と放射線生物学的評価の両面から行い、安全性も確認しました。そして、現在、サイクロトロン中性子源と BPA を組み合わせた BNCT の治験 (薬事承認の為の臨床研究) の為の手続きを進めているところです。可能な限り早期に治験を開始したいと考えているところです。				



1) BNCT での線量体積ヒストグラムの例



2) 京大原子炉実験所における世界初の BNCT 用加速器中性子源と施設



3) バーミンガム大学の静電型加速器 (左) とサイクロトロン (右) との中性子強度の比較 : 強度に 10 倍の差がある。

代表的論文  
特許、受賞

1) H. Tanaka, K. Ono et al., Characteristics comparison between a cyclotron-based neutron source and KUR-HWNIF for boron neutron capture therapy. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B267,1970-1977, 2009.

2) M. Suzuki, K. Ono et al., Impact of accelerator-based boron neutron capture therapy (AB-BNCT) on the treatment of multiple liver tumors and malignant pleural mesothelioma. Radiotherapy & Oncology, 92, 89-95, 2009

3) K. Ono, Hatanaka Award: International Congress of Neutron Capture Therapy 2010

課題名	実用化が予想される食品への放射線利用に関する基礎研究		
参画機関	北海道教育大学、大阪府立大学、日本原子力研究開発機構、農業・食品産業技術総合研究機構、室蘭工業大学		
事業規模	期間	平成20～22年度	総額 86百万円
<p><b>【研究代表者】</b>          鵜飼 光子 北海道教育大学教授          (大学院教育学研究科)</p> 			
<p><b>【研究概要】</b></p> <p>放射線照射による殺菌効果を利用した照射食品が食中毒防止や消毒剤不要による環境との調和性の観点より海外では広く利用されるようになってきましたが、有効な健全性確認手段が確立されておらず、国内では一部の食品を除いて利用されるには至っていませんでした。</p> <p>本研究は照射食品の普及拡大のため、健全性評価技術の基盤技術の確立と有効な広報活動手法の構築を目的に行われました。健全性評価においては、電子スピン共鳴分光装置が食品中に発生する放射線照射誘導ラジカルを定量的に評価できることを世界で初めて見出し、世界標準法に優る分析法構築に資する基盤技術を確立しました。更に、我国で実用化が予想される食品について、線量・照射条件に依存した殺虫や殺菌等の照射効果、食品としての品質や健全性についての検証を行いました。これらの結果をベースとして、食品照射におけるリスクについての消費者を巻き込んだ形でのコミュニケーション活動を開始しました。これらの活動により行政機関の施策決定に資するデータを蓄積することができ、将来の放射線利用食品の社会的受容性向上に貢献できるものと確信しています。</p>			
<p><b>【その後の取り組み・抱負】</b></p> <p>本研究成果を基に汎用型装置開発と分析法の改良を進めています。本研究により若い研究者が多く育っており、我国の照射食品研究が新たにスタートしています。また、広報活動としては、幼稚園から高校までの先生方を対象として「放射線と食品」についての講座を開設するとともに、照射馬鈴薯向け世界初の商業的規模の施設について紹介しています。</p> <p>2011年3月の東日本大震災の後、福島第一原子力発電所事故により放射性物質が飛散し農水産物が汚染されました。風評被害も深刻な問題ですが、放射線と食品が身近になりました。ピンチをチャンスにできるよう放射線の正しい理解とその利用法を更に普及していきたいと思います。</p>			





図1 電子スピン共鳴分光装置

照射誘導ラジカルを確実に計測できるような装置に改造し、信号解析ソフトも開発しました。香辛料や野菜等の検知ができ、照射貯穀害虫の検知にも応用しました。

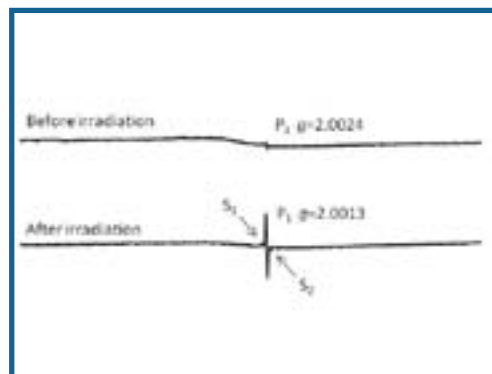


図2 大蒜の分析例

照射の有無が即座に判別できます。分析条件を変えて詳細に計測すると照射履歴を算出したり、ラジカルの種類を解析することもできます。



図3 食品照射のリスクコミュニケーション活動

食の安全・安心の問題に関心をもつ消費者グループとの見学会や体験実験を（独）日本原子力研究開発機構で行いました。

【発表論文】

- 1) 鶴飼光子、放射線照射香辛料の ESR 法による分析、ぶんせき、**3**、132-136 (2011)
- 2) Hiromi Kameya, Hideo Nakamura, Mitsuko Ukai, Yuhei Shimoyama, Electron Spin Resonance (ESR) spectroscopy of gamma irradiated glucose polymers, Applied Magnetic Resonance, **40**(3), 395-404 (2011)
- 3) Masahiro Kikuchi, Hiromi Kameya, Yuhei Shimoyama, Mitsuko Ukai, Yasuhiko Kobayashi, Electron-spin relaxation phenomena in irradiated saccharides detected by pulsed electron paramagnetic resonance spectroscopy, Radiation Physics and Chemistry, in press (2012)

【受賞】

- 1) 亀谷宏美, 齊藤希巴江, 菊地正博, 小林泰彦, 鶴飼光子, 等々力節子, 照射ニンニクの電子スピン共鳴法、光刺激ルミネセンス法、熱ルミネセンス法による検知, 食品科学工学会誌 **57**(11), 472-478 (2010) 「論文奨励賞」受賞
- 2) 平成 23 年度日本原子力学会「原子力知識・技術の普及貢献賞」受賞

代表的な特許、論文受賞など

課題名	原子炉型中性子小角散乱分光器群の先鋭的高度化に関する研究			
参画機関	東京大学、物質・材料研究機構			
事業規模	期間	平成20～22年度	総額	84百万円
<p><b>【研究代表者】</b> 柴山 充弘 東京大学教授 (物性研究所)</p> 				
<p><b>【研究概要】</b> 東京大学では 1993 年より日本原子力研究開発機構改造 3 号炉を使った中性子散乱全国共同利用を大規模に展開し、年間約 300 課題の研究と 5000 人・日規模の研究者を受け入れています。 そのうち、中性子小角散乱は X 線小角散乱とならんでナノスケールの物質研究にとって不可欠な手段で、もっとも多くユーザーに利用されています。本研究では、小角散乱装置 3 台 (2 次元小角中性子散乱装置 SANS-U、中性子スピンエコー装置 iNSE、小型集束型小角散乱装置 mfSANS) について、最新の中性子光学技術を使った高度化研究を行うとともに、共同利用の質的・量的向上を図ることを目的としました。高度化研究には、中性子レンズや中性子ミラーなどの中性子集光素子の開発、高分解能検出器の開発、ビームコリメーターの開発、白色スピンフリップパー、歳差磁場補正の不均一性補正の研究などからなっています。 SANS-U においては、入射中性子束を 3.2 倍に増強し、小角分解能を一桁向上することに成功しました。これにより、サブマイクロオーダーの構造解析が可能となるとともに、受け入れるユーザーを 2 倍以上にすることができました。iNSE では磁場の均一化や、観測時間スケールを 100 ナノ秒以上に高度化することに成功しました。また、mfSANS では、高角検出器を導入し、チタン合金や、バナジウム含有鉄鋼材料などを対象とした広い角度領域での小角散乱実証試験を行いました。</p> <p><b>【その後の取り組み】</b> 高度化した装置群の性能を最大限に生かした共同利用を平成 24 年度から実施する予定でしたが、大震災による 3 号炉の停止により、活動は停止していますが、高度化研究の成果や最終年度に行った実証試験結果をもとに数報の論文を作成、学会誌に掲載されました。現在、更なる高度化研究を継続し、再稼働に備えて準備を行っています。</p>				



大学所有散乱装置: 14台, 東大物性研 9, 東北大3, 京大2  
 年間申請課題: ~300  
 年間利用者数(人・日): 職員 2000, 外部利用者 5000, 計 7000  
 年間論文発表数: ~100

図1. JAEA 3号炉に設置された東大物性研が行っている中性子散乱全国共同利用装置群



図2. SANS-U に設置された新高分解能検出器とその駆動系

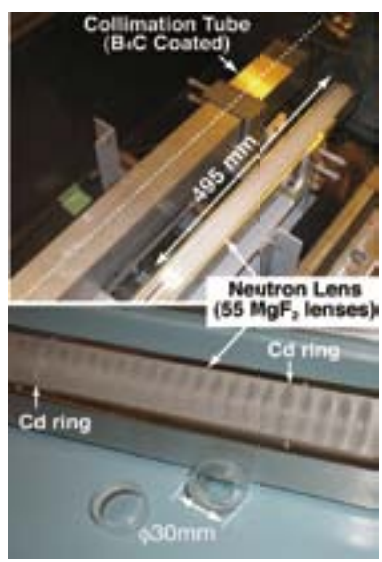


図3. SANS-U に設置された中性子レンズ

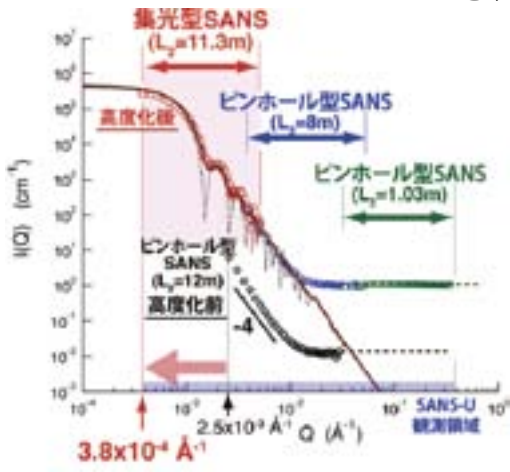



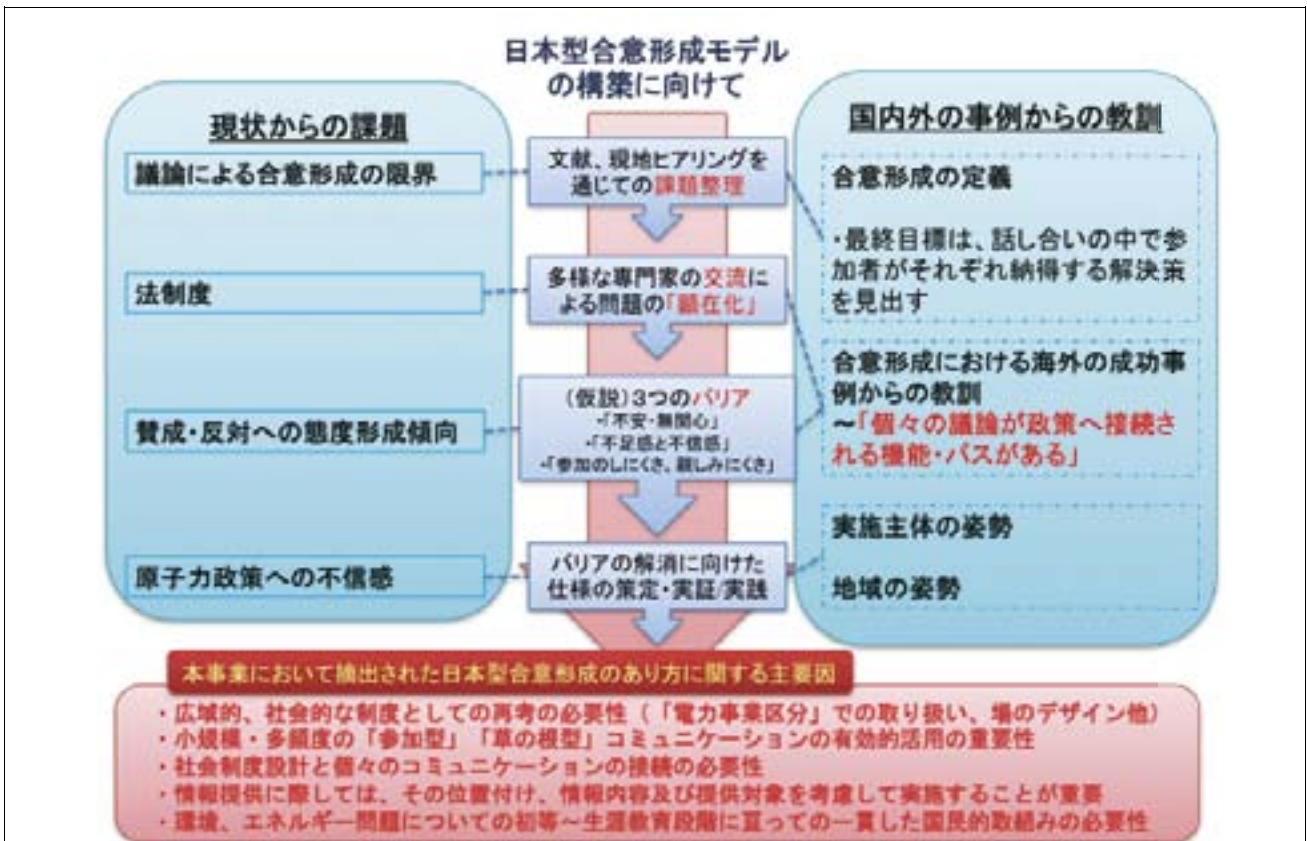
図4. 集光レンズを用いた小角散乱実験例。従来のピンホール系に比べて最小観測散乱角が一桁向上

代表的な特許、論文、受賞など

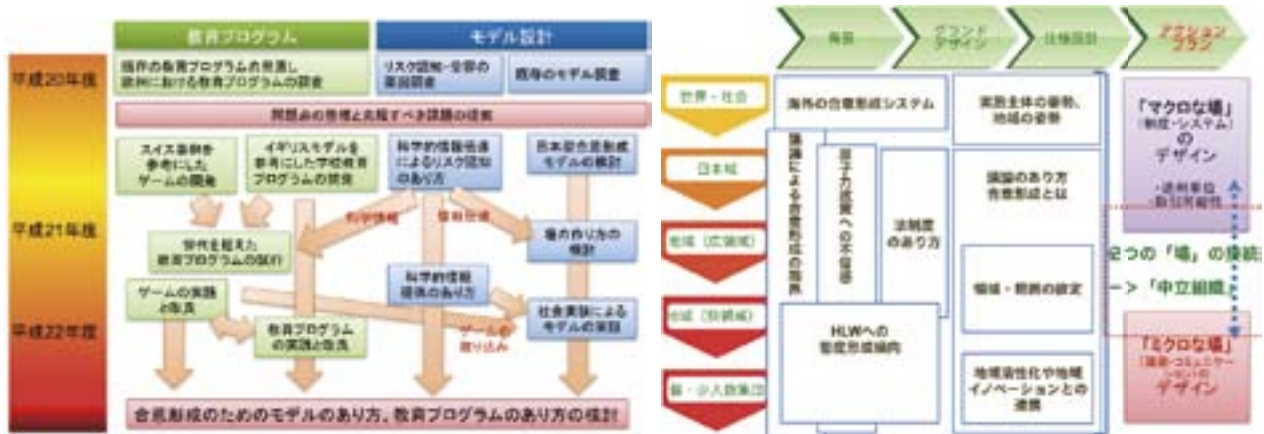
- 1) Iwase, H., Modernization of the small-angle neutron scattering spectrometer SANS-U by upgrade to a focusing SANS spectrometer, *J. Appl. Cryst.*, 44, 558 (2011).
- 2) Matsunaga, T., SANS Studies on Tetra-PEG Gel under Uniaxial Deformation, *Macromolecules*, 44, 1203 (2011).
- 3) Takeda, M., Rheo-SANS Studies on Shear-thickening/thinning in Aqueous Rod-like Micellar Solutions. *Langmuir*, 27, 1731 (2011).

受賞: 柴山充弘、高分子学会賞、中性子散乱による高分子ゲルの精密構造解析、2010年5月(高分子学会、パシフィコ横浜)

課題名	HLW 地層処分地選定に関する日本型合意形成モデルの構築			
参画機関	鹿児島大学、静岡大学、放射線医学総合研究所			
事業規模	期間	平成20～22年度	総額	31百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  興 直孝 静岡大学学長  (現) 静岡文化芸術大学教育研究担当理事</p> 				
<p><b>【研究概要】</b>  高レベル放射性廃棄物 (HLW) 処分地問題に関しては、日本法令・体制の整備が図られ、国及び関係機関の取組みにも拘らず、一向に解決に向かったの道筋が得られるものになってきていません。このように処分地問題が困難になっている背景としては、エネルギー利用の便益を受ける個人、社会とも積極的に考えたくない状況 (NIMBY 問題) に加え、真剣に考える必然性に追い込まれていない状況があると考えられます。こうした現状を打破すべく、「みんなでともに考えていく」—「協働」の考え方に立った「日本型合意形成モデルの構築」の検証を行い、貴重な示唆を提示することが出来ました。</p> <p>成果の社会実装へ向けた実践が重要で、市民参加型のワークショップの継続試行、教育現場での実践とその検証によって、従来のリスクコミュニケーション分野では、取扱われることがなかった広域的・社会的な制度の再考の必要性、小規模・多頻度の「巻き込み型」「草の根型」の有効性の活用、社会制度設計と個々のコミュニケーションの接続の必要性、提供内容及び対象を考慮した情報提供の在り方の重要性、初等教育段階から生涯教育段階に亘っての一貫したエネルギー・環境への国民的な取組みの必要性が示されました。そして、問題の解決への具体の提言を行いました。</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b>  現在、本研究を基盤として、科学技術ガバナンスの形成のための科学教育論の構築に関する基礎的研究の一環として、HLW を含む原子力・放射線教育のあり方について検討を進めています。これらの成果が、様々な社会的な合意を必要とされる問題の解決に資することを期待しています。又、わが国を含む各国及びそれを構成する様々な集団のリスク認知・受容要因を明らかにする調査・分析を進めることの必要性から今後の取組みを検討しています。異分野の研究チームの活動を継続・発展させています。</p>				



事例・教訓から学ぶ日本型合意形成モデルのあり方



3年間の研究の流れ

場のデザインの考え方

代表的な特許、論文受賞など

1) 興直孝 他、高レベル放射性廃棄物の最終処分地選定での日本型合意形成モデル構築にむけて、原子力 eye, Vol.56 No.12 pp.25-39

課題名	学校教育現場との対話に基づく原子力・放射線学習プログラム開発			
参画機関	北海道大学、放射線教育フォーラム、放射線医学総合研究所、 東京大学			
事業規模	期間	平成20～22年度	総額	36百万円
<p><b>【研究代表者】</b>            杉山 憲一郎 北海道大学教授            (大学院工学研究院エネルギー環境システム部門)</p>				
<p><b>【研究概要】</b>            新学習指導要領との整合性・レベルを吟味し、小、中、高等学校の社会科、理科、技術・家庭科、道徳などの教科および総合学習で展開可能な原子力・放射線学習プログラムを開発しました。リーダー教師グループへの情報提供・対話・試作・実践・改訂を繰り返し、児童・生徒の反応を確認して完成させました。開発した教師指導案を効果的に活用して頂くため、現役の教師、教師を目指す教育大生、女子大生等用の教科書も作りました。動画・画像も取り込んだCD版は教室で直ぐに使えて効果も大きく好評です。            例えば、東日本大震災との関連で展開できる小6理科「土地のつくりと変化」、中1理科「生きている地球」の単元用に開発した学習プログラムでは、札幌市防災マップを活用した液状化実験、防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター「Eディフェンス」による実物モデルによる実験動画(図1)、大間原子力発電所基礎岩盤・鉄筋構造の画像(図2)等が用意されています。児童の簡単な感想文から、視覚的に強い印象を与え小学校高学年段階から地震のリスクと地震に対する備えを学ぶ上で極めて効果的であることが判明しています。教師・学生用教科書では、原子力発電所の耐震設計の考え方、スイスの住民が選択した原子力発電と地域原子力熱利用(図3)、フランスの高レベル廃棄物地層処分場開発の進捗状況が説明されています。</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b>            学校教育現場に居て、児童・生徒と毎日顔を合わせる教師が納得するレベルで原子力・放射線学習プログラムを主体的に開発して頂いた。それ故、福島第一事故以降、児童・生徒が放射線に興味を持っている今だからこそ、原子力・放射線教育が小学校段階から必要と強く認識し、平成23年度も小学校と中学校の教師が連携して、主体的・定期的に放射線学習プログラム改訂版の検討・試行を行っています。平成24年度は、印刷代を確保し、関心を持つ多くの教師に現場で実践を行って頂く予定です。</p>				



図1 コンクリート建物の振動実験：実際の破壊過程が確認できる。

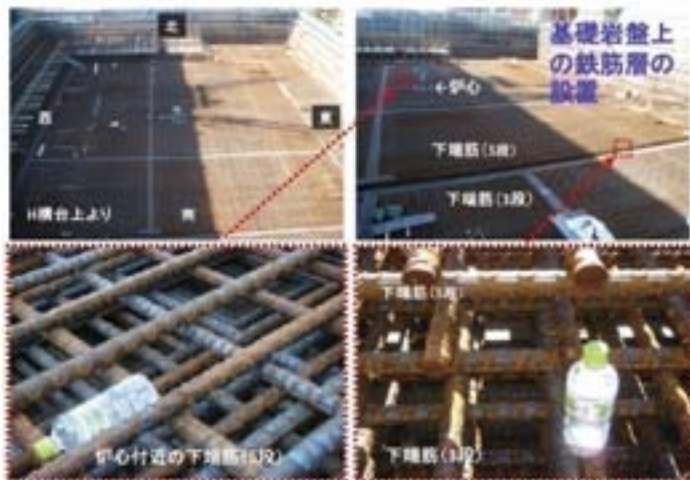


図2 基礎岩盤上の鉄筋設置工事：太い鉄筋を多層に組み立てる。○○

**スイスの原子力エネルギーの有効利用：**  
**ベツナウ原子力発電所と**  
**ゲスゲン原子力発電所では、発電に加えて、地域熱供給を行い、暖房、給湯および工場用熱源として利用しています。**  
**(ロシアでは一般的な利用法です。)**

**ベツナウ発電所1号機・2号機とその後方の熱供給地区(NOK/シフレット)**



図3 操業から42年が経過したベツナウ発電所と原子力熱利用地域の一部

代表的な特許、論文受賞など

- 1) 日本電気協会(電気新聞) 第5回エネルギー教育賞 小学校部門 最優勝賞受賞
- 2) 杉山 憲一郎、スイスのエネルギー・原子力発電・地層処分、スイスを通して日本を学ぶエネルギー環境教育情報、日本原子力学会誌、vol. 51(no. 8)、pp. 611-615(2009)
- 3) 田中 隆一、学習指導要領に基づいた放射線等の取扱いに関する考察、エネルギー環境教育研究、vol. 3(no. 2)、pp. 73-79(2009)

課題名	先進燃料被覆管材料の水素化および照射効果の解明に関する研究			
参画機関	大阪大学、東京大学、東北大学、日本原子力研究開発機構、ニュークリアデベロップメント			
事業規模	期間	平成21～23年度	総額	89百万円

### 【研究代表者】

阿部弘亨 東北大学教授（金属材料研究所）



### 【研究概要】

エネルギー自給率が僅か4%の我が国ではエネルギー確保は大変重要で、さらに世界的規模でのエネルギー需要の急激な増加への対応も必要です。これらの大きな課題解決のため原子力発電の更なる安全性向上は重要な対策の一つです。軽水炉燃料被覆管には放射性物質の閉じ込めという本質的に重要な機能が求められますが、同時に高温高压水と放射線照射という過酷環境に曝され表面の腐食や材料の水素化により機械的性質が劣化します。Zr-Nb合金は、現在使われている材料（ジルカロイ）と比較して腐食量や水素吸収量が少なく、安全性に優れた材料として期待されています。

そこで本研究では、Zr-Nb合金の腐食、水素化、照射の劣化影響を機構論的に解明することを目的としました。そして、ナノからマクロまでを実験と理論の双方からカバーした複数の機関から構成される研究チームにより、劣化の機構モデル化と工学的評価を行いました。

成果は以下のようにまとめられます。まず、腐食試験と化学分析によりZr-Nb合金の高耐食性と低水素吸収性を改めて確認しました。これは腐食初期に形成される腐食被膜が緻密かつ丈夫であることに起因します。水素化合物はジルカロイと同一の性状でしたが、その形成挙動が大きく異なることが分かりました。またジルカロイと同等の照射影響を示した一方で、そのメカニズムは全く異なり、母相中の過飽和なNbの照射誘起析出という新しい現象によるものであることが明らかになりました。このような挙動は原子炉環境下においても発揮されるものと工学的にも評価され、より安全性の高い燃料被覆管材料として期待されます。

### 【その後の取り組み】

本研究成果は、被覆管材料の開発研究に対して学が主体として貢献したもので、特に材料劣化機構解明に取り組んだ総合的研究として評価されます。実用にあたってはこの劣化メカニズムが機械強度に及ぼす影響が明確にされるべきです。そのための新しい取り組みを我々は既に始めており、バルク材料強度へのイオン照射効果等の新技術開発など、Zr-Nb合金を始めとした被覆管材料に幅広く適用可能な技術の完成を目指しています。



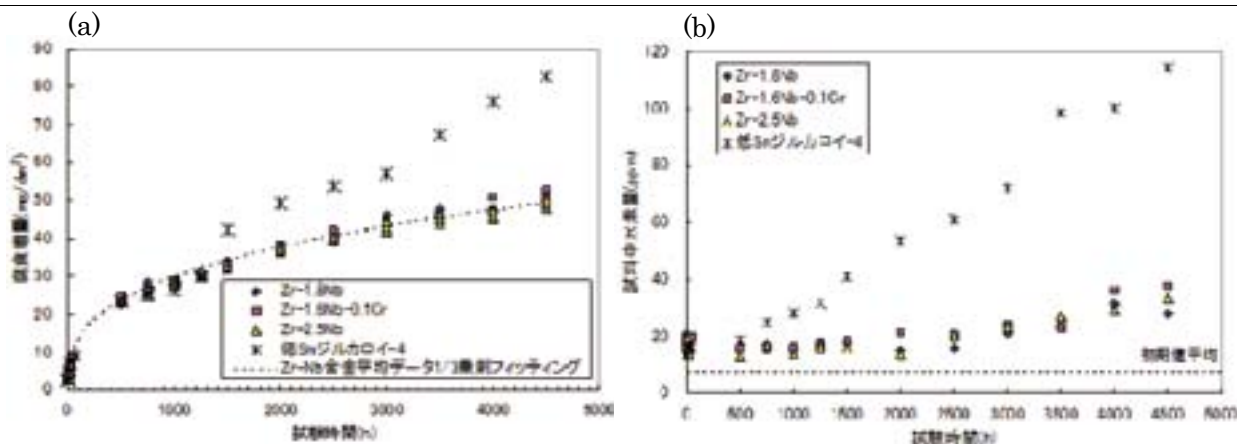


図 1. 腐食試験による (a) 腐食量と (b) 水素吸収量の変化。 Zr-Nb 合金では、1500 時間超で腐食が抑制され、水素吸収量も大幅に少ないという特徴があります。

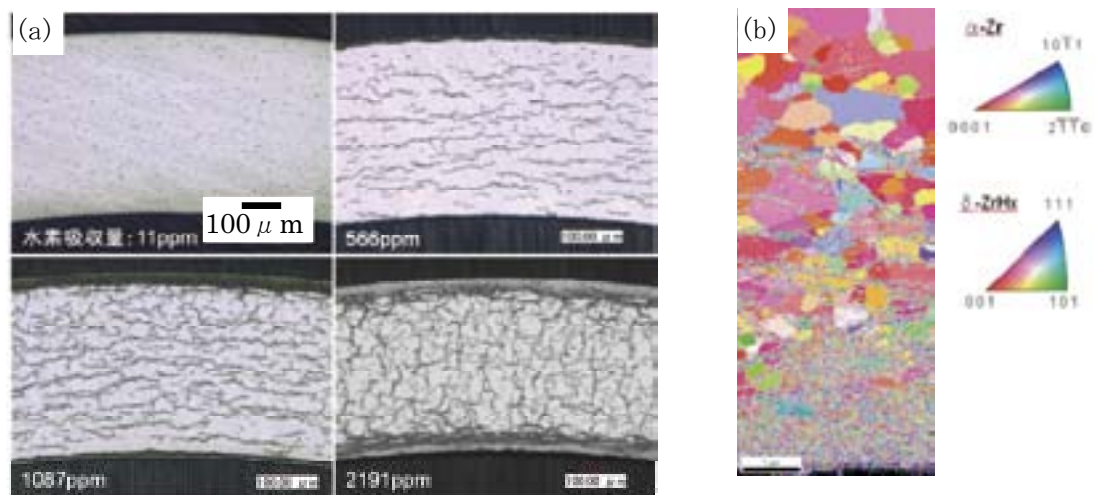


図 2. 水素化した Zr-Nb 合金の断面組織。(a) は水素化物をエッチングした組織、(b) は電子線後方散乱回折分析結果。1000ppm 超の水素注入により、(b) 下部に示すような高濃度の微細な水素化物が被覆管表面近傍に形成されることが分かりました。

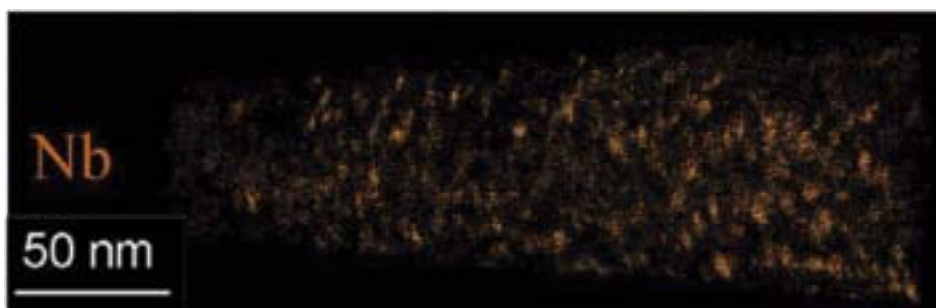


図 3. 三次元アトムプローブによる位置敏感元素分析 (イオン照射量 7.4dpa 相当)。サイズ数 nm の Nb クラスタが形成され照射硬化の要因であることが明らかになりました。

代表的な  
特許、論文  
受賞など

- 1) "Effect of Sn and Nb on Generalized Stacking Fault Energy Surfaces in Zirconium and Gamma Hydride Habit Planes", Y. Udagawa et al, Philosophical Magazine 91 (2011) 1665-1678
- 2) "Microstructural Evolutions under Hydrogenation, Corrosion and Irradiation in Zr-Nb Alloys", H. Abe et al, 1st Asian Nuclear Fuel Conference (ANFC) (2012).
- 3) "Microstructural Evolutions and Mechanical Property Change under Hydrogenation, Corrosion and Irradiation in Zr-Nb Alloys", H. Abe et al, The Nuclear Materials Conference (NuMat 2012) keynote lecture

課題名	超効率的量子篩作用による軽分子同位体分離用ナノ細孔体の開発			
参画機関	信州大学、千葉大学、日本原子力研究開発機構			
事業規模	期間	平成21～23年度	総額	68百万円

### 【研究代表者】

金子 克美 信州大学特別特任教授  
(エキゾチックナノカーボンプロジェクト拠点)



### 【研究概要】

電子の数は同じですが、中性子の数が異なり重さが違う元素を同位体と言います。水素  $H_2$  と重水素  $D_2$  は代表的な同位体分子で、重水素の分子量は水素の2倍です。低温になるほど軽い分子の揺らぎが大きく、分子が大きく膨張しているように振舞う量子分子篩効果を利用して、 $H_2$  と  $D_2$  および  $^{12}CH_4$  と  $^{12}CD_4$  (あるいは  $^{13}CH_4$ ) の同位体混合ガスを効率よく分離できるナノメートル (nm) サイズの小さな細孔を持つナノ細孔体を見出す研究を行いました。ナノ細孔体による  $H_2$  と  $D_2$  の量子分子篩分離は、核融合の燃料である  $D_2$  を効率的に分離して濃縮するのに役立ちます。 $H_2$  と  $D_2$  の量子分子篩分離には、1nm より小さな細孔を持つゼオライトなどが適しています。分離が極めて困難なメタンの同位体についても、単層カーボンナノホーンという新物質が、素晴らしい量子分子篩分離能を持つことを明らかにしました。このカーบอนは、牛の角のような形をしたナノホーンが互いに集まりウニのような構造体を作っており、その隙間がメタン同位体の分離に有効です。このメタンに対する量子分子篩作用は、放射性炭素  $^{14}C$  の分離・濃縮に役立つと期待できます。

### 【その後の取り組み】

電子を放出する放射性炭素  $^{14}C$  の半減期は5730年であり、多量にあると生態系への影響が深刻です。世界中の黒鉛型原子炉で廃棄しなければならない放射性炭素  $^{14}C$  を含むグラファイトは、200,000トン程度もありますが、安全で有効な処理・有効化の技術はありません。私達が見出したカーボンナノホーンのメタン同位体に対する優れた量子分子篩能は、この世界的な難題である黒鉛型原子炉から出る甚大な量の放射性炭素を含むグラファイトの有効活用に道を開きます。つまり、グラファイトを酸化して二酸化炭素に、更に分子量の小さなメタンに変換します。次に量子分子篩分離によって、放射性メタンを分離濃縮します。その放射性メタンを触媒反応で放射性ナノチューブに変換して、有効な電子源に活用する取り組みをしています。一般の実験室では放射性炭素を取り扱えませんが、安全な  $^{13}C$  と  $^{12}C$  を用いて、量子分子篩分離能力の向上、ナノチューブ創製反応の開発などの研究を進めています。化学工学的な技術開発も今後必要となり、広い視点での連携が必要です。

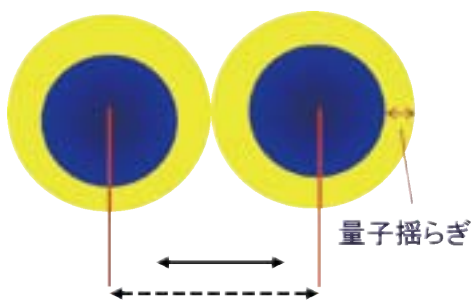


図 1 古典分子と量子揺らぎのある量子分子との大きさの比較

古典的分子は青の部分、軽い分子は量子の性質で揺らぎ、黄色の領域までの大きさがあるように振舞います。-196 °C で  $D_2$  は  $H_2$  は 0.03nm だけ小さいため、ナノ細孔に多く入ります。

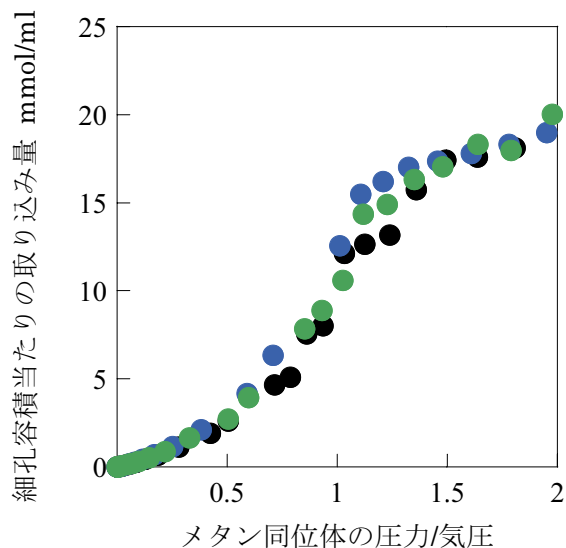


図 2 量子的計算による 0.38nm のスリットカーボン細孔へのメタン同位体の取り込み量の圧力変化

青丸は  $^{12}CD_4$ 、緑は  $^{14}CH_4$ 、黒は  $^{12}CH_4$  を示します。 $^{12}CD_4$  と  $^{12}CH_4$  の取り込みの違いは実験で確認できました。理論では  $^{14}CH_4$  の分離性も予測できました。

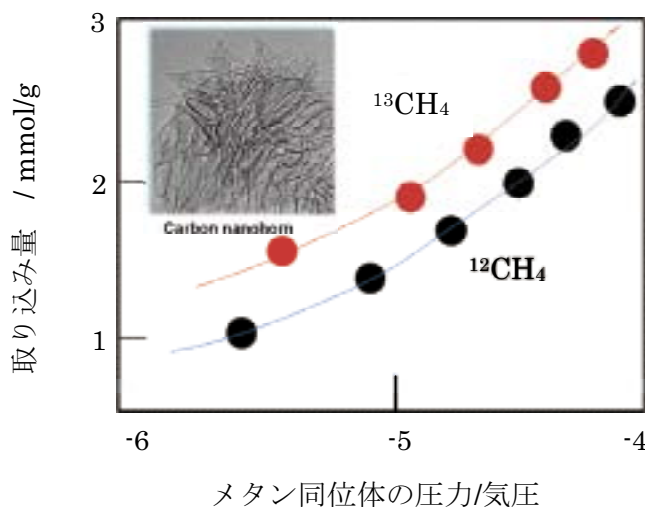


図 3 -161°C でのカーボンナノホーンへのメタン同位体の取り込み量の圧力変化

(左図) 重い  $^{13}CH_4$  のほうが 25% 多く取り込まれるので効率よく分離できます。ナノホーンの電子顕微鏡写真を図中に示します。

【出願特許】

1. 黒鉛からの炭素同位体の分離法および黒鉛からの炭素同位体の分離装置、特願 2011-141883、出願日 2011 年 7 月 22 日、金子克美。

【発表論文等】

1. K. Kaneko, "Quantum molecular sieving of isotopic hydrogen and methane :application potential to control of radioactive elements", American Institute of Chemical Engineering, Symposium Plenary, Minneapolis, USA, October 16-21, 2011.
2. S. Niimura, T. Fujimori, D. Minami, Y. Hattori, L. Abrams, D. Corbin, K. Hata, K. Kaneko, "Dynamic Quantum Molecular Sieving Separation of  $D_2$  from  $H_2$ - $D_2$  Mixture with Nanoporous Materials". *J. Am. Chem. Soc.*, 134, 18483—18486 (2012).

【受賞】

1. 金子 克美、英国王立化学会フェロウ (Fellow of Royal Society of Chemistry), 2013 年 3 月。

代表的な特許、論文受賞など

課題名	低線量率長期照射による個体レベルでの遺伝子発現変化の解析			
参画機関	東北大学、放射線医学総合研究所、環境科学技術研究所			
事業規模	期間	平成21～23年度	総額	86百万円

### 【研究代表者】

小野哲也 東北大学教授  
 (大学院医学系研究科ゲノム生物学専攻)  
 (現) 環境科学技術研究所理事長



### 【研究概要】

少量の放射線が生体にどのような影響をおよぼすかはまだよく分かっていません。この問題を解決する一つの方法として、低線量放射線を長期間被ばくした時にどのような生体影響が見られるかを調べる研究があります。

放射線は細胞死、遺伝子の変異、遺伝子発現の変化をとおして生体に障害をもたらします(図1)。本研究では遺伝子発現の変化に注目し、放射線長期照射終了後長い時間を経た後まで残存する変化がないかについて、メッセンジャーRNAと蛋白質を指標にして解析しました。調べたのはマウスの肝臓です。照射用の部屋(図2)で、1日20 mGyの放射線を400日間連続照射した直後には数十種類の遺伝子の発現に変化がみられました。しかしそのすべてはその後1日から1ヶ月の間に消失してしまいました。ただし照射終了後1ヶ月、3ヶ月、5ヶ月では別の遺伝子の発現変化がみられました。その中には照射直後に変化していたものが一度消えた後改めて変化を示すものもありました。これは低線量率放射線長期照射によって誘発される遺伝子発現の変化が、照射終了後の時間経過の中で変遷してゆくことを示しており、全く予想されない結果でした(図3)。今後このような現象が何故、どのようにして起るのかについて解析を進める必要があります。

### 【その後の取り組み】

放射線が発見されてからまだ100年余ですが、その利用範囲は病気の診断、治療だけでなく広い分野に及んで日常化しています。そのなかで低線量放射線の生体影響を解明することは放射線のリスクを正しく理解する上でも、またそのリスクを軽減化する方法を探る上でも不可欠です。生物はさまざまに特殊化した細胞や臓器の大きな集合体であり、それぞれの放射線への反応も異なります。この複雑な系を生体分子の変化を手がかりにして解明すべく、RNAと蛋白質の網羅的な解析を新たな視点から続けていきます。

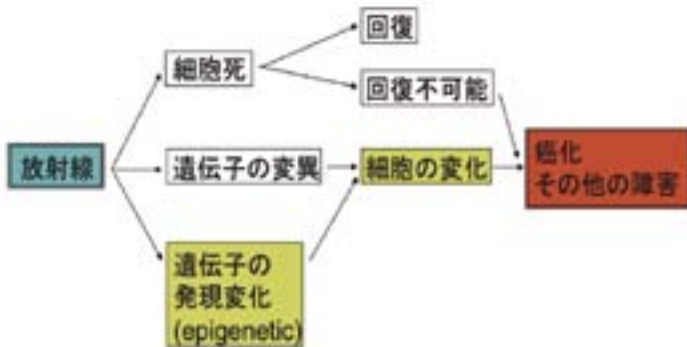
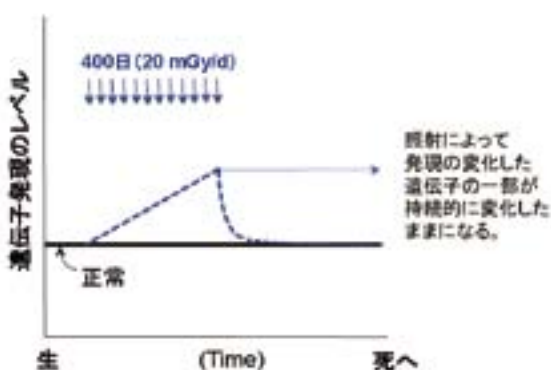


図1. 放射線による生体影響生成のプロセス



図2. 低線量率放射線長期ばく露実験施設

A. 研究を始める前の想定



B. 解析の結果分かったこと

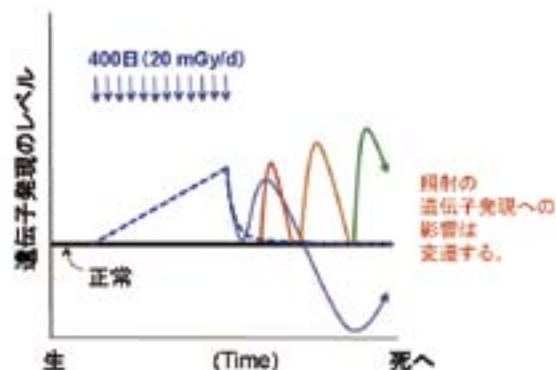


図3. 低線量率放射線を長期照射したときの遺伝子発現の変化

横軸はマウスが生まれてからの時間経過を、縦軸は遺伝子の発現レベルを模式的に示しています。被ばくしていないマウスのレベルを水平線で示し、1日20 mGy ずつ400日間連続照射によりそこから逸脱するものを点線で示しました。図では発現の増加するものだけを示しましたが実際には減少するものもあります。研究を始める前は、連続照射によって変化するものの一部が照射終了後も残存し、それが放射線の長期的影響に関与すると考えました (A)。しかし研究の結果、照射終了直後に見られる変化のすべては短期間のうちにすべて消失し、終了後1、3、5ヶ月を経た所で見ると照射直後とは別の遺伝子の発現レベルが変化しており、変化が変遷することが分かりました (B)。一部は変化が一度消失した後で再び増加や減少していました。

代表的な  
特許、論文  
受賞など

- 1) Yoshihiko Uehara, et al., Gene expression profiles in mouse liver after long-term low dose-rate irradiation with gamma-rays. Radiat Res, (2010) 174 (5): 611-617.
- 2) Guillaume Vares, et al., Transcription factor-recognition sequences potentially involved in modulation of gene expression after exposure to low-dose-rate  $\gamma$ -rays in the mouse liver, J Radiat Res, (2011) 52: 249-256.
- 3) Nasrin B., et al., Does ionizing radiation influence Alzheimer's disease risk? J Radiat Res, (2012) 53: 815-822

課題名	植物における量子ビーム誘発突然変異の分子機構解明に関する研究			
参画機関	東北大学、日本原子力研究開発機構、農業生物資源研究所			
事業規模	期間	平成21～23年度	総額	89万円

### 【研究代表者】

日出間 純 東北大学准教授  
 (大学院生命科学研究科  
 生態システム生命科学専攻)



### 【研究概要】

イオンビームを用いた突然変異育種は、従来の変異原を用いた育種では作出できなかった植物素材を数多く創出し、種苗、花き産業等への新たな展開が期待されています。しかしながら、突然変異育種は手軽な手法ではあるものの、変異体の獲得が偶発的であるため、目的の変異体作出には多大な労力が費やされています。今後、目的の変異を高頻度で誘発し、より効率的な育種素材を創生する技術を開発し、産業化へと発展させることが強く望まれています。

本研究では、カーボンイオンビームによる特徴的な変異誘発の分子メカニズムに着目して研究を行いました。その結果、イオンビームによる変異誘発は、DNAの二本鎖切断が主要な変異誘発のためのDNA損傷であり、その損傷を修復する際に間違った修復を行い、これまでの変異原（ガンマ線等）とは異なった変異を引き起こしていることが分かりました。その結果を基に、これらの修復に関わる修復酵素を欠失させることで、さらに特徴的な変異の誘発を可能にすること、さらに、DNAポリメラーゼ zeta の触媒サブユニットである酵素のアミノ酸を改変することで、突然変異高度誘発株の作製に世界で初めて成功するなど、効率的な育種素材を作出する技術の方向性を示すことが出来ました。

### 【その後の取り組み】

イオンビーム育種は、世界を先導する我が国発祥の独創的な技術です。本研究成果を今後は、産業化への応用を図ることを目的に研究開発を展開することで、特に、今日の遺伝子組換え育種の将来に閉塞感を抱き始めていた種苗、花き産業業界、食品業界に新しい展開の希望を与え、さらには、国際的食糧問題にかかわる多収穀類の開発、劣悪な環境でも生育可能なストレス耐性作物の作出といった緊急課題の解決にも貢献できると私は確信しています。

今後もイオンビーム育種研究を通して、安心して安全な植物（作物）育種にチャレンジしていきたいと思っております。

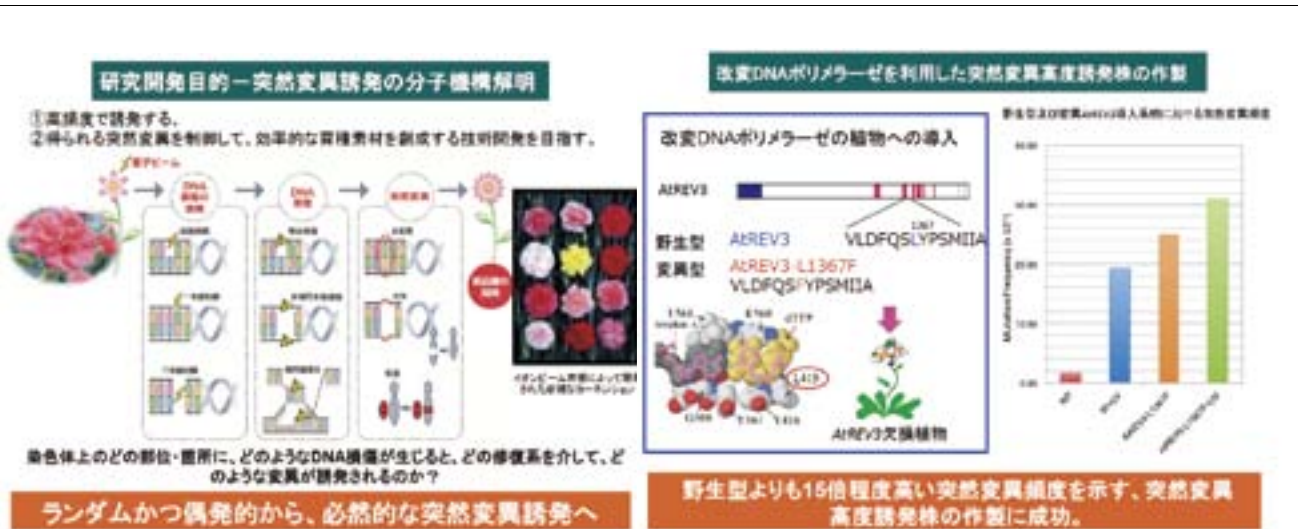


図3 本研究成果の産業、社会、基礎科学分野への貢献

代表的な特許、論文、受賞など

1) Hase et al. (2012), Mutagenic effects of carbon ions near the range end in plants. Mutation Res. 731: 41-47.  
 2) Endo et al. (2012) Selection of Transgenic rice plants using a herbicide tolerant from of the Acetolactate synthase gene. Methods in Mol. Biol. 847: 59-65.  
 3) Takano et al. (2013) Isolation of a Novel UVB-Tolerant Rice Mutant Obtained by Exposure to Carbon-Ion Beams. J. Radiat. Res. (in press) doi: 10.1093/jrr/rrt007

## 2. 研究炉・ホットラボ等活用研究プログラム

プログラムオフィサー (PO)

山名 元

申請者が所有したり利用に関わっている施設を活用する、様々な意欲的な研究が提案され、多くの成果が得られました。国内にあるホットラボや研究炉を活用することで、その施設を利用する研究活動を活性化し、同時に、新しい研究成果を挙げて欲しいという気持ちで、POとして各々の研究をフォローしてきました。

京都大学原子炉実験所による、「研究炉とホットラボ利用を高度化する研究」は、KURや附属ホットラボでの実験機能を強化することで、同大学が目指している複合原子力科学研究への道を加速するという役割を果たしました。原子力機構のJRR3併設のホットラボを活用する「RI-DDSの研究」は、ホットラボを活用しつつ医師・薬剤開発研究者・RI製造販売業者・放射化学研究者が連携して新しい治療法の開発に取り組むという、新しいモデルの可能性を示しました。原子力機構による「広域連携によるアクチニド研究」は、国内の複数のホットラボを相互に利用する新たな枠組みを構築するという新しい連携研究のモデルを構築しました。阪大と福井大の核燃料物質使用施設を用いた「SPS法と低温物性測定を利用した難燃結性(U,Th)O<sub>2</sub>ペレットの燃料物性評価」は、高融点セラミックスの焼結を容易にするSPS法を適用することで、トリウムの混合酸化物の熱伝導率や格子定数などの物性を精度よく測定し、新たなデータベースの構築に成功しました。

これらの活動が、施設の利用活性化だけでなく、ホット施設を拠点とする連携研究という新しいスタイルを切り開くきっかけになった事は間違いありません。これらの研究を介して、若手研究者や学生等の参画が増え、国内の研究者の層が厚くなった事も確かだと思います。今後も優れた成果が出され人材育成にも繋がるよう、POとして努力する所存です。





— 目次 —

(平成22年度終了課題)

- ・京大炉 (KUR) 及びホットラボの利用高度化に関する研究 ..... 32
- ・先進的ながん診断・治療を実現するRI-DDS開発研究 ..... 34
- ・広域連携ホットラボ利用によるアクチノイド研究 ..... 36

(平成23年度終了課題)

- ・SPS法と低温物性測定を利用した難焼結性(U, Th)O<sub>2</sub>ペレットの燃料物性  
評価 ..... 38

[本文中の所属・職位は研究終了時 ・代表的な特許、論文、受賞は終了後1年以内のもの]

課題名	京大炉 (KUR) 及びホットラボの利用高度化に関する研究			
参画機関	大阪府立大学、京都大学			
事業規模	期間	平成20～22年度	総額	119百万円

### 【研究代表者】

川端 祐司 京都大学教授  
(原子炉実験所粒子線基礎物性研究部門)



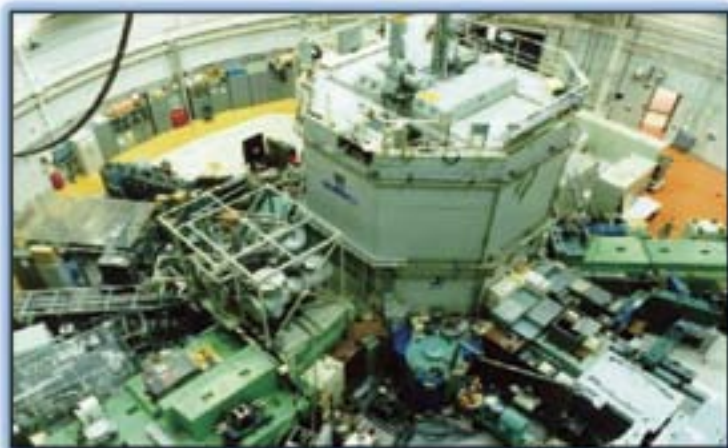
### 【研究概要】

京都大学研究用原子炉(KUR)は、日本唯一の大学附置中型熱中性子研究炉であり、全国共同利用に供せられています。京大炉は、中小型炉としての機動性を持ち、広いユーザーへの汎用性を確保しつつも、京大炉ならではの特徴的研究を遂行しています。その考えにのっとり、本研究では次の5つのテーマを掲げて実施しました。1) 医学生物照射のための線量評価高度化に関する研究、2) 微量元素総合計測システム構築に関する研究、3) 大電流利用二相流研究対応中性子イメージング装置の開発、4) 材料照射測定用照射後試験装置の整備、5) 合理的管理のための放射線管理。

1) では KUR が世界をリードする新しいがん治療法であるホウ素中性子捕捉療法(BNCT)の高度化を進め、2) では総合的微量元素分析体系を確立すると共に、世界初の試料環境を自由化した即発γ線分析装置を実現しました。3) では世界唯一の大電力利用を可能とした中性子イメージングシステムを設置し、原子力安全に必須な気液二相流研究を進めました。4) では精密照射装置を用いて照射条件を厳密化した原子力材料中性子照射研究を行い、5) では多様な放射線作業環境を生かした放射線管理研究を行いました。

### 【その後の取り組み】

日本学術会議が、平成22年に我が国初の全分野にわたる大型計画のマスタープランを策定し、全学術分野から43課題が選定されました。京都大学原子炉実験所が提案した「複合原子力科学の有効利用に向けた先導的研究の推進」が唯一「原子力」を表看板として掲げたものとして選定されました。これは、研究炉・加速器を利用して「広義の原子力」を推進しようというものです。我々は本課題によって KUR の特徴的利用研究のさらなる高度化を行うことができました。この成果は京都大学原子炉実験所の全国共同利用制度を通じて、全国の研究者に展開していきます。我々は、学術会議が選定した日本にとって重要な計画の中核部分を担当しており、今後この研究を積極的に推進することにより、学術の発展に貢献する重要な責務を果たさなければならないと考えています。



京都大学研究用原子炉(KUR)  
一大学が所有・運転を行うものとしては世界最大級のものです。



中性子イメージングと即発 $\gamma$ 線分析の同時測定

試料の構造と材料(元素)が同時に測定できます。ここで測定されているものは、IAEAから供給された、大型即発 $\gamma$ 線測定のために作られた古代の壺のレプリカです。

代表的な特許、論文、受賞など

- 1) Y. Saito et al., "Development of Neutron Radiography Facility for Boiling Two-Phase Flow Experiment in Kyoto University Research Reactor", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 651 (2011) 36-41.
- 2) Q. Xu et al., "Can helium actually improve the mechanical properties of a metal?", Philosophical Magazine Letters, Vol.91, no.11(2011)724-730.
- 3) H. Tanaka et al., "Development of a Neutron Flux Monitor Using a Small Scintillator Coupled with Quartz Fiber for a Cyclotron-Based Boron Neutron Capture Therapy", 2010 IEEE nuclear Science Symposium Conference Record, Tennessi, U.S.A, N34-307

課題名	先進的ながん診断・治療を実現するRI-DDS開発研究		
参画機関	(株)千代田テクノル、京都大学、群馬大学、千葉大学、東京大学、日本原子力研究開発機構		
事業規模	期間	平成20～22年度	総額 68百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  橋本 和幸 日本原子力研究開発機構  量子ビーム応用研究部門 研究主幹</p> 			
<p><b>【研究概要】</b>  課題名にあるRI-DDSとは、RI（放射性同位元素）を標識した薬剤の送達システム（ドックデリバリーシステム）を表したものです。RIは医療分野において病気の診断用としてかなり利用されていますが、治療に用いる試みは、未だ限られているのが現状です。そこで我々は産官学の連携のもと、がん治療にRIを応用することを目指し、原子炉を用いたがん治療用RIの大量製造技術の開発から新たな放射性薬剤の開発・特性評価までを統合的に進めました。</p> <p>その結果、研究炉（日本原子力研究開発機構 JRR-3）で照射した物質から、放射性レニウムや放射性ルテチウムなど必要なRIだけを高純度で取り出すための分離条件や精製方法を確立することに成功しました。さらに、RIを腫瘍へ選択的に運び、できるだけ骨髄など正常な組織への被ばくを低減するための薬剤を開発し、担がんマウスを用いて治療効果を調べたところ、腫瘍の増殖を抑える効果があることを認めました。</p> <p>本研究の成果は、RI薬剤開発の技術的可能性を示しただけでなく、研究炉やホットラボを利用したRI製造研究と薬剤開発等の医療研究を一体となって進める開発モデルを構築できた点だと思っています。</p>			
<p><b>【その後の取り組み】</b>  次のステップとしては、本プログラムの実施により構築した「RI標識薬剤の純国産技術としての開発モデル」を実際の薬剤開発に近いレベルへ展開することが重要であり、臨床応用を視野に入れたより大きな体制を再構築してさらに研究を推進して行きます。一般的な薬剤の開発も薬剤として承認されるまで10年以上かかると言われています。未だ克服する課題は多いと思いますが、日本発の新たながん治療用放射性薬剤の開発に貢献したいと思いをします。</p>			

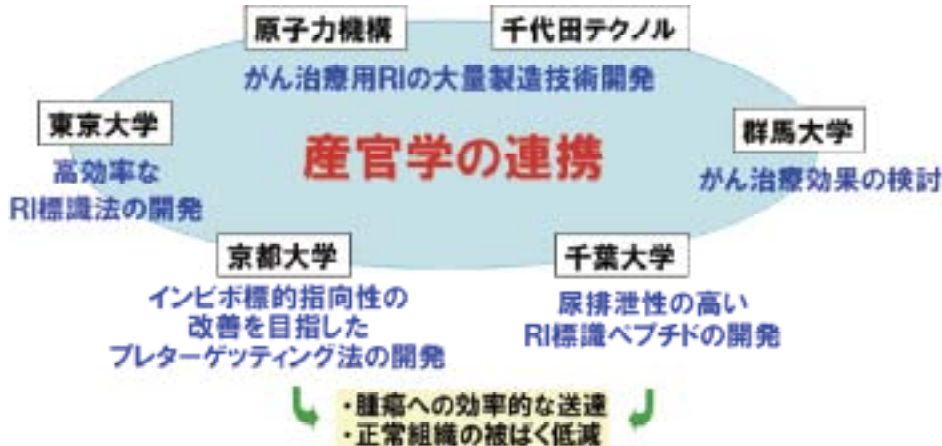


図1 研究体制と研究課題

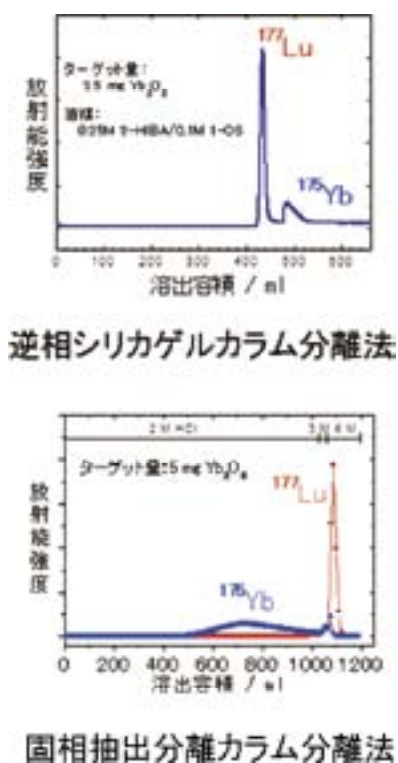


図2 本研究で使用したルテチウム-177 ( $^{177}\text{Lu}$ ) 分離法

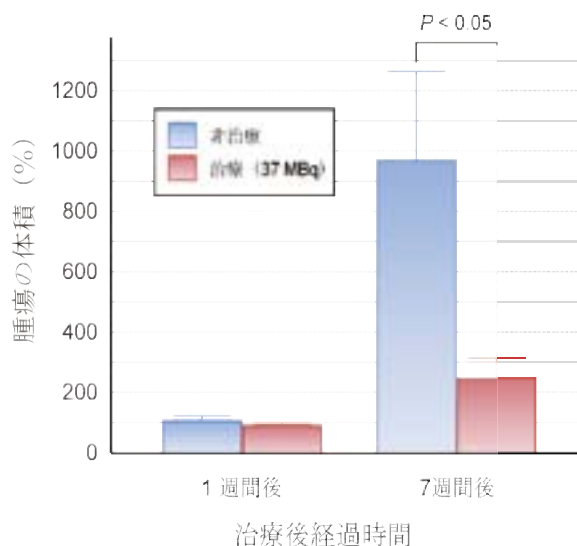



図3 放射性レニウム ( $^{186}\text{Re}$ ) 薬剤の腫瘍増殖抑制効果

代表的な  
特許、論文  
受賞など

- 1) 渡辺智ら、「抗体標識が可能な無担体  $^{177}\text{Lu}$  の分離精製法」、特開 2010-223827 (特願 2009-072558)
- 2) 花岡宏史ら、「新規放射性核種『ルテチウム-177』標識抗体によるがん治療」、第 14 回日本がん免疫学会総会 (2010.7.23)
- 3) H. Kawashima *et. al.*, "Pretargeted radioimmunotherapy of tumor using a novel radiorhenium-labeled biotin derivative and streptavidin conjugated anti-cytokeratin 19 monoclonal antibody", SNM 2011 Annual Meeting (2011.6.5-7)

課題名	広域連携ホットラボ利用によるアクチノイド研究			
参画機関	京都大学、東京大学、東北大学、日本原子力研究開発機構、新潟大学			
事業規模	期間	平成20～22年度	総額	113百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  湊 和生 日本原子力研究開発機構  原子力基礎工学研究部門 研究主席</p>				
				
<p><b>【研究概要】</b>  アクチノイドとは、ウランやプルトニウムその他、ネプツニウム、アメリシウム、キュリウムなどを含む元素群の総称です。アクチノイドの固体や溶液中のふるまいを明らかにすることは、核燃料、再処理、地層処分などの原子力技術の根幹を支えるとともに、原子力技術の開発や持続的発展のために不可欠です。  本研究では、最先端のナノ解析手法の一つである NMR（核磁気共鳴）測定や先端的な分光学的実験手法である放射光 XAFS（X線吸収微細構造）測定を適用するなどして、アクチノイド化合物の物性・電子構造、電解質溶液中のアクチノイドイオンや錯体の化学挙動などを世界に先駆けて明らかにし、革新的核燃料や革新的再処理技術の開発につながる貴重な知見を得ることができました。  本研究を実施する際には、ホットラボ施設の広域連携のもとに、研究活動の相互乗り入れや実験試料の相互移動など、研究ネットワークの整備にも留意しました。アクチノイドの研究には、特別な研究施設・設備が必要だからです。これにより、取り扱いの難しいアクチノイドの研究を効果的・効率的に進めることができました。</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b>  原子力利用を進める上で、より安全な革新的原子力技術を追求していくことは必須のことです。アクチノイドの基礎的、基盤的研究は、新しいアイデアや新技術の研究開発を進展させる原理的知見を生み出すものであり、今後とも、継続的に実施していく必要があります。そのために、本研究で構築してきた、施設の連携を含む研究ネットワークを拡充・利用しながら、アクチノイドの研究をとおして、放射性廃棄物処分を含む革新的原子力技術の研究開発に貢献していきます。</p>				

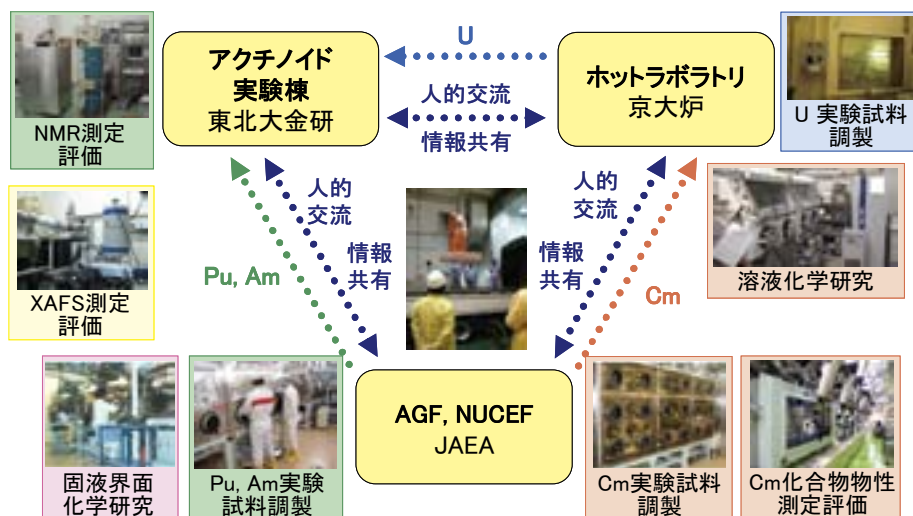


図1 ホットラボ施設の連携によるアクチノイド研究  
研究ネットワークを構築しました。

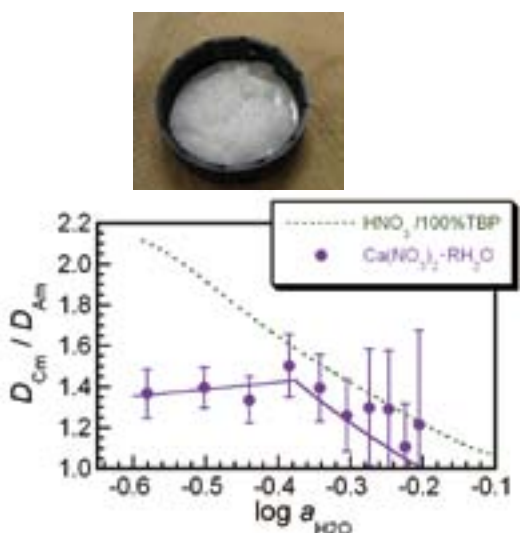


図2 硝酸カルシウム水和物融体中の  
Cm イオン及び Am イオンの挙動  
(写真は硝酸カルシウム水和物)  
革新的再処理技術の開発につながります。

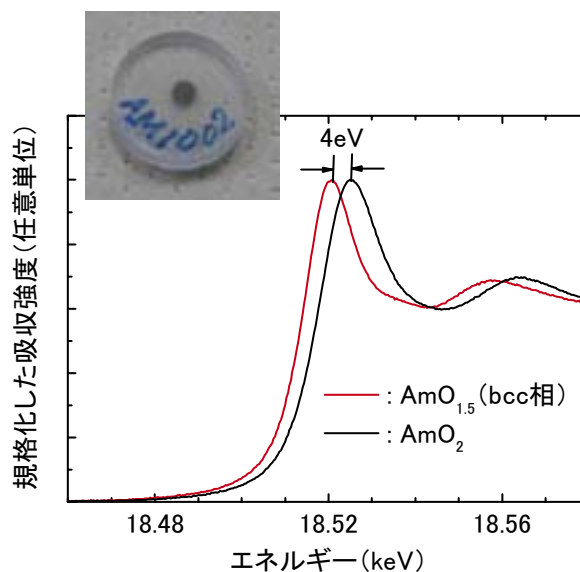


図3 Am 酸化物の放射光 XAFS 測定  
(写真は AmO<sub>1.5</sub> 試料の外観)  
革新的核燃料の開発につながります。

代表的な  
特許、論文  
受賞など

- 1) K. Minato, K. Konashi, T. Fujii, A. Uehara, S. Nagasaki, N. Ohtori, Y. Tokunaga, S. Kambe, Basic actinide chemistry and physics research in close cooperation with hot laboratories, Mater. Sci. Eng., 9, 012018 (2010).
- 2) T. Fujii, G. Okude, A. Uehara, S. Sekimoto, H. Hayashi, M. Akabori, K. Minato, H. Yamana, Coordination characteristics of trivalent lanthanides and actinides in molten hydrate salts of Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> and CaCl<sub>2</sub>, J. Radioanal. Nucl. Chem., 288, 181-187 (2011).
- 3) A. Uehara, T. Fujii, H. Matsuura, N. Sato, T. Nagai, K. Minato, H. Yamana, Y. Okamoto, EXAFS analysis of uranium(IV) and thorium(IV) complexes in CaCl<sub>2</sub> hydrate melts, Proc. Radiochim. Acta, 1, 161-165 (2011).

課題名	SPS法と低温物性測定を利用した難焼結性(U, Th)O <sub>2</sub> ペレットの燃料物性評価		
参画機関	大阪大学、福井大学		
事業規模	期間	平成21～23年度	総額
			94百万円
<p><b>【研究代表者】</b>          牟田 浩明 大阪大学助教          (環境・エネルギー工学専攻)</p> 			
<p><b>【研究概要】</b>          トリウム酸化物は資源が豊富に存在し、原子炉で使用した際にプルトニウムの生成量が桁違いに少ないなどの長所を有しているため、近年代替燃料として注目されています。          しかし、トリウム酸化物は焼結が難しく、またその燃料物性の評価例は少ないのが現状です。本研究では、放電プラズマ焼結法の適用によって高密度試料を作製し、実験および計算による燃料物性データベースの構築を目的としました。          トリウム酸化物は溶液等から調製した微粉末を使い、高温で数時間かけて焼結させる手法が一般的です。ここでは放電プラズマ焼結法により、前処理をしない、また組成の異なる多様な試料粉末について、たった10分の焼結で理論密度比90%以上の高密度試料を得ることができました。          組成に依存せず高密度試料が得られるので、燃料物性の評価も高精度に行うことができます。本研究では装荷時の初期燃料組成であるトリア・ウラニア固溶体、また燃焼時に形成される核分裂性生成物(FP)が固溶したトリウム酸化物、FP析出物の3つの化合物群について高密度試料を作製し、熱・機械物性を測定しました。この結果、例えば任意の温度と密度における、また任意のFP固溶元素と酸素欠陥を含有したトリウム酸化物の熱伝導率を定量的に導出する式・パラメータを決定することなどができました。これは炉内燃料温度の予測に役立つと考えられます。          (SPS : Spark Plasma Sintering、放電プラズマ焼結)</p> <p><b>【その後の取り組み】</b>          本研究ではこれまで報告例の少なかったトリウム酸化物燃料の物性データ、特にFP元素の影響について、系統的に評価することができました。今後もこうしたウランおよびトリウムを取り扱える大阪大学および福井大学におけるセミホットラボ施設を活用し、トリウムを含む様々な燃料の物性研究を通じて現行燃料の安全性向上および新規燃料の実現に寄与して参ります。</p>			



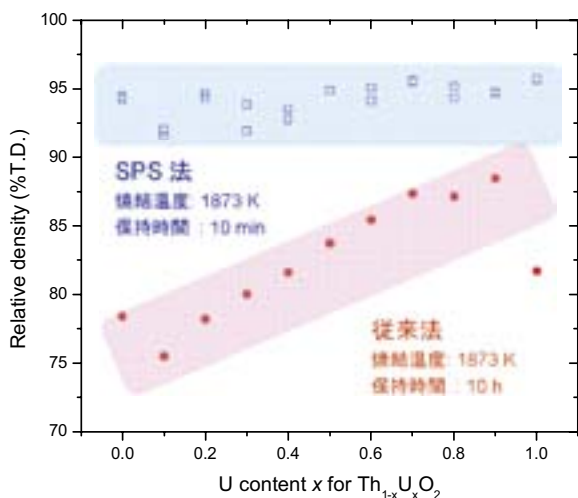


図1 焼結後の試料密度の比較<sup>1)</sup>  
SPS 法により高密度試料が得られています。

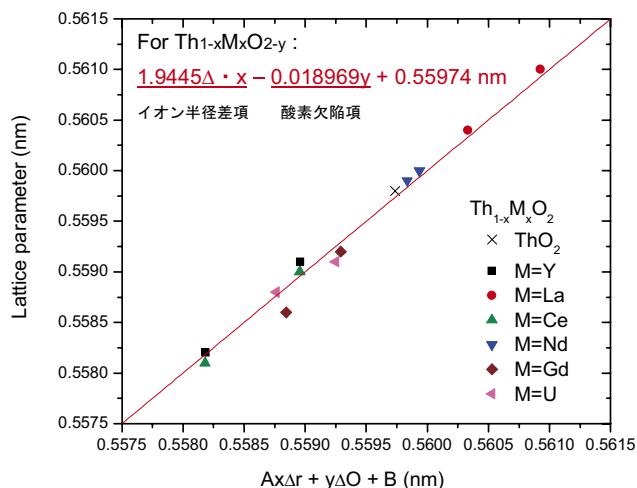


図2 トリウム酸化物固溶体の格子定数<sup>2)</sup>  
任意の元素による変化を求められます。

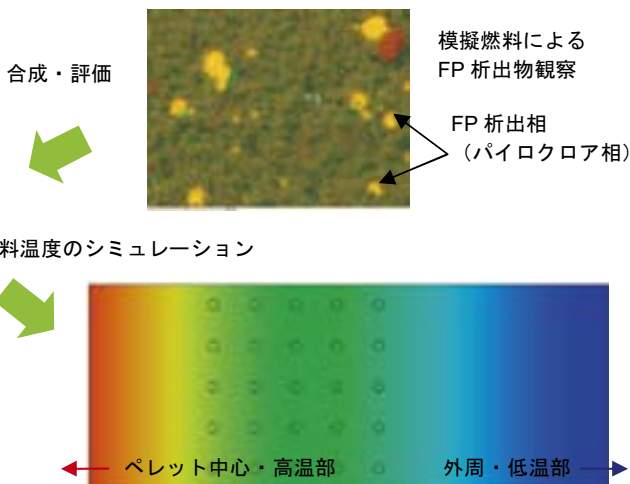
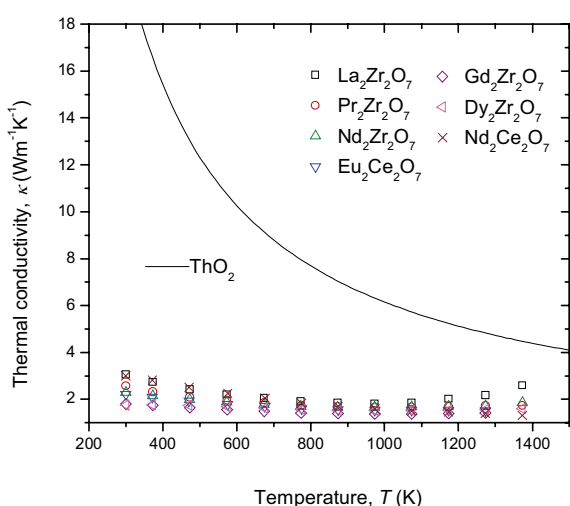


図3 FP 析出物：パイロクロア相の熱伝導率<sup>3)</sup>と燃料温度のFEM 計算結果

析出物による熱伝導率の変化が定量的に求められ、炉内燃料温度の評価に役立ちます。

【発表論文】

代表的な  
特許、論文  
受賞など

- 1) 「Thermophysical properties of Th<sub>1-x</sub>U<sub>x</sub>O<sub>2</sub> pellets prepared by SPS technique」, H. Muta, Y. Murakami, M. Uno, K. Kurosaki, and S. Yamanaka, J. Nucl. Sci. Tech., 51, 181-187 (2013)
- 2) 「Lattice parameter and thermal conductivity of Th<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub>O<sub>2-y</sub> (M=Y, La, Ce, Nd, Gd, U)」, H. Muta, T. Kawano, M. Uno, Y. Ohishi, K. Kurosaki, and S. Yamanaka, J. Nucl. Mater., 434, 124-128 (2013).
- 3) 「Characterization and thermomechanical properties of Ln<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (Ln=La, Pr, Nd, Eu, Gd, Dy) and Nd<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub>」 T. Kawano, H. Muta, M. Uno, K. Kurosaki, S. Yamanaka, 2012 MRS Fall meeting proceeding

### 3. 若手原子力研究プログラム

プログラムオフィサー (PO)  
小澤 正基

若手型研究は年齢が40歳までの研究者を対象とした事業で、独自のアイデアと構想に基づき研究代表者自らが汗を流しつつ果敢にチャレンジするユニークなプログラムです。採択課題数は多めで、新規性が高いためにハイリスク・ハイリターンといえます。中間フォローではJSTの担当者殿とともに全国各地の大学や研究機関の研究代表者を訪問し、研究の進捗状況や研究の進め方及び課題について、膝を交え議論したことが思い出されます。しかしながら、「事業」と名がつく以上、既存の基礎研究プログラムとは若干性格が異なります。担当POとしてはこの成果が実用化に繋がるよう、費やす研究時間が実りあるものであるようフォローしてきました。このためにはJST事務局の支援や文科省ご担当者との連携が重要でした。そのようにして遂行されたプログラムのあるものは上級プログラムにステップアップし、あるものは実際の設計へと研究成果を提供しています。研究を成功に導くには、研究者自身は懸命の努力を続けるが時には冷静に勝機を見極めること、そして研究管理者は、的確なフォローと適正な評価を行うことが人材育成には重要であり、POとして今後もそのような処し方をしていきたいと考えます。



プログラムオフィサー (PO)  
山本 章夫

本成果集の内容をご覧いただくと明らかであるが、若手分野の対象課題は、マテリアル、放射線、炉物理、ライフ、耐震評価、リスク評価、熱流動、保全など、大変幅が広い。原子力は総合工学である。このような幅広い分野における基礎基盤研究の重要性は、継続的に指摘されており、また、現在の原子力が置かれている状況下において、さらに高まっている。本事業は、特に次世代を担う若手の研究者の方々に基礎基盤研究を着実に推進していただき、研究のスキルアップをはかっていただいたという人材育成の観点からも大変意義のあるものであったと考えている。本事業を遂行していただいた若手研究者の方は、次世代の原子力を担う中核的なメンバーとしてご活躍いただくことを期待している。なお、POとしてこのように多様な課題を担当できたことは、私自身の視野を広げる上で大変役に立った。このような機会を与えていただいたことに大変感謝している。



— 目次 —

(平成21年度終了課題)

- ・微量放射性核種AMSによる原子力施設環境モニタリング研究 …… 42
- ・原子炉予防保全高度化のための新型高温水質センサの開発 …… 44
- ・マイクロ・ナノ試験による個別粒界強度評価に関する研究 …… 46
- ・革新的原子力エレクトロニクス技術を活用した原子炉制御・保全システムに関する基盤研究 …… 48
- ・静電力と表面機能制御によるナノ流体核種分離システムの開発 …… 50
- ・放射線誘発プリン介在型細胞間情報伝達の解明とがん治療への応用 …… 52
- ・放射線発がん突然変異誘発の総括的説明 …… 54
- ・超高感度広エネルギー領域ガンマ線検出器CROSSの開発 …… 56
- ・イオン液体含浸有機隔膜によるLi同位体分離技術に関する研究 …… 58
- ・DNA二重鎖切断の認識・修復の初期過程に関する研究 …… 60

(平成22年度終了課題)

- ・放射線発がんにおける非遺伝子変異的プロセスの解明 …… 62
- ・重イオンビームによる植物変異固定の利用のための基盤研究 …… 64
- ・核拡散リスクの確率論的定量評価手法の開発 …… 66
- ・硫化反応を用いる核燃料再処理法の基礎研究 …… 68
- ・中高エネルギー陽子による核破砕片の系統測定に関する研究 …… 70
- ・放射光を用いたFBR炉心構造材料に関する研究 …… 72
- ・PGAを用いた次世代高燃焼度燃料用エルビア濃度測定法の研究 …… 74
- ・ステンレス鋼亀裂先端部における応力印加下その場欠陥解析 …… 76

(平成23年度終了課題)

- ・沸騰機構解明のための伝熱面温度／熱流束同時計測技術の開発研究 …… 78
- ・放射線がん治療時のオンラインマイクロサイズ線量計の開発 …… 80
- ・RIMSを用いた高精度な燃料タグガス分析のためのレーザー光学系の開発 …… 82
- ・摩擦攪拌接合によるNa高速炉炉心材料の新たな接合技術に関する研究 …… 84
- ・化学溶解を用いた窒化物燃料の革新的乾式再処理プロセスの研究 …… 86
- ・原子力機器用鉄クロム系材料の相分離現象に関する基礎的研究 …… 88
- ・放射線被ばくのバイオマーカー測定法開発の基盤研究 …… 90
- ・放射線活性型プロドラッグの創出に向けた分子設計に関する研究 …… 92
- ・着床前期の胚における放射線に対する防御機構の解明 …… 94

[本文中の所属・職位は研究終了時 ・代表的な特許、論文、受賞は終了後1年以内のもの]

課題名	極微量放射性核種 AMS による原子力施設環境モニタリング研究			
参画機関	筑波大学			
事業規模	期間	平成 20～21 年度	総額	20 百万円
<p><b>【研究代表者】</b>            笹 公和 筑波大学准教授            (大学院数理物質科学研究科物理学専攻)</p>				
<p><b>【研究概要】</b>            自然環境中には、様々な放射性核種が存在しています。最先端分析手法である加速器質量分析法(Accelerator Mass Spectrometry: AMS)は、環境中の極微量放射性核種を高感度・高精度に検出できる画期的な手法です。対象核種を加速器で高エネルギーに加速し、物質中のエネルギー損失の違いを利用して妨害となる同重体や分子イオンを分離識別し、粒子検出器を用いて 1 個単位で計測します。極少量の試料から、数分程度の計測時間で高感度な核種検出が可能です。            本研究では、筑波大学にある大型タンデム型静電加速器などを用いて、塩素 36 (半減期 30.1 万年)やヨウ素 129 (半減期 1570 万年)などの重い極微量放射性核種の AMS による高感度検出法を開発しました。特に塩素 36 に関しては妨害となる硫黄 36 を分離することが難しく、研究代表者が開発した AMS が国内で実用的測定が可能な唯一の分析装置となっており、塩素 36 同位体比で <math>10^{-16}</math> という高い検出感度を達成しています。            また、AMS による極微量放射性核種の検出手法について、原子力関連施設の環境モニタリング研究や中性子積算線量推測に適用しました。土壌・地下水・降水などに存在する放射性核種の環境動態研究に関して、本研究成果は重要な役割を果たすと期待されます。</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b>            東日本大震災では研究代表者の所属する研究施設も甚大な被害を受けました。しかし、本研究で得られた成果をもとにして、福島第一原子力発電所事故により放出された環境中の放射性核種に関する環境動態調査に積極的に携わっています。現在、福島県周辺の表層土壌に沈着したヨウ素 129 の AMS 測定を行っています。ヨウ素 129 から、甲状腺被ばくの原因となるヨウ素 131 の降下・沈着量の調査・推定を進めています。</p>				

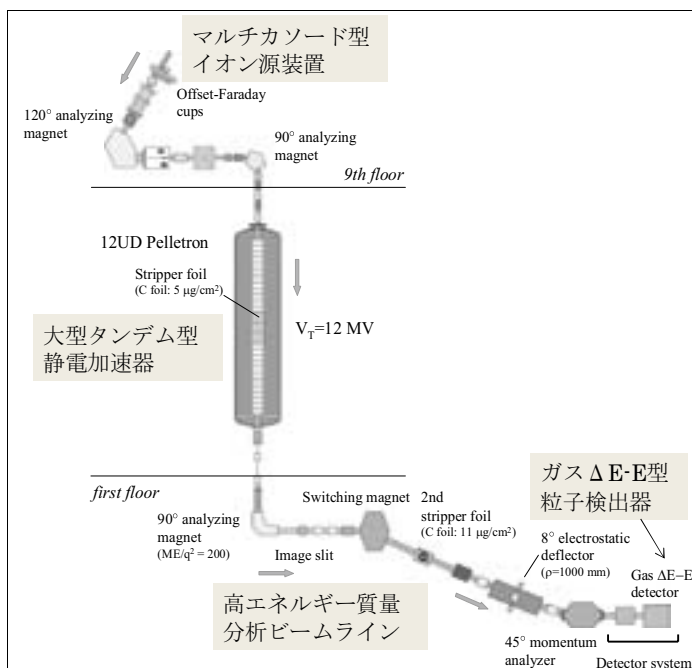


図1 筑波大学の高エネルギー加速器質量分析装置の概略図。高エネルギー粒子加速により高感度な質量分析測定ができます。粒子検出器で対象核種を1個単位で検出可能な分析装置です<sup>1)</sup>。

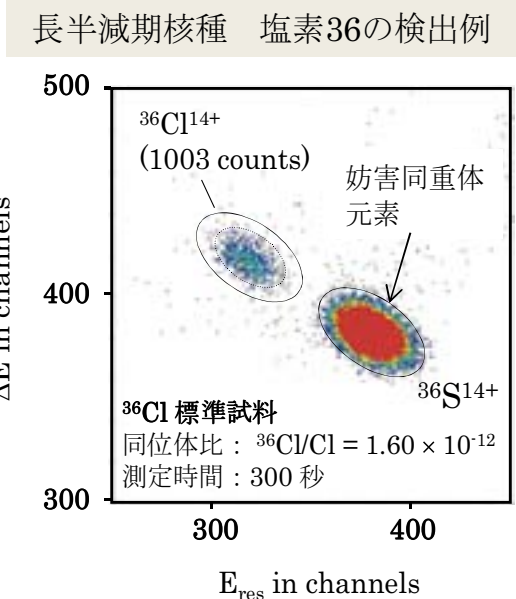


図2 長半減期核種である塩素 36 の AMS 検出結果<sup>2)</sup>。同位体比  $1.60 \times 10^{-12}$  の標準試料で、5 分間計測により約 1000 個の塩素 36 が検出できます。

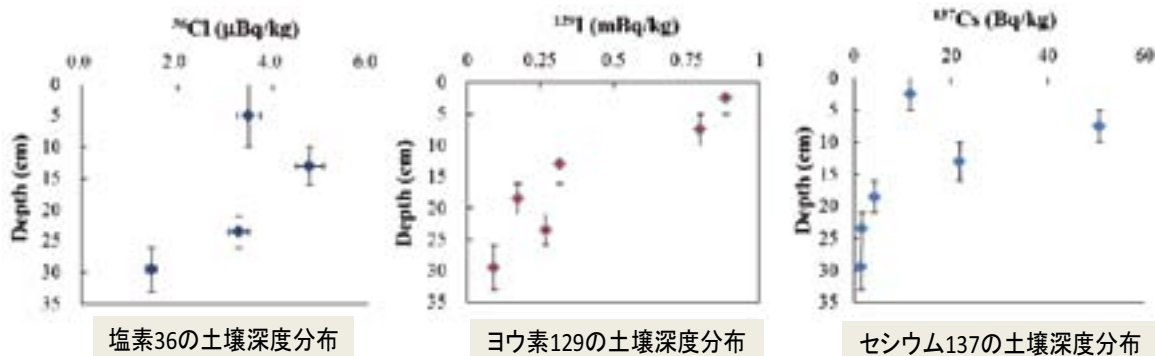


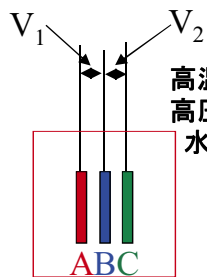
図3 福島第一原子力発電所事故前に計測した土壌中の塩素 36、ヨウ素 129、セシウム 137 の土壌深度分布。土壌採取場所は、福島第一原子力発電所から 4 km の地点です。本研究成果は、事故前の放射性核種の分布として貴重なデータとなっています。

[発表論文等]

代表的な特許、論文受賞など

- 1) Kimikazu Sasa et al., Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting, 815-817 (2009).
- 2) Kimikazu Sasa et al., Multi-nuclide AMS system at the University of Tsukuba, AIP Vol. 1235, 152-158 (2010).
- 3) Norikazu Kinoshita, Keisuke Sueki, Kimikazu Sasa et al., First assessment of individual radionuclides distributions from the Fukushima nuclear accident covering central-east Japan, Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 108, 49, 19526-19529 (2011).

課題名	原子炉予防保全高度化のための新型高温水質センサの開発			
参画機関	日本原子力研究開発機構			
事業規模	期間	平成20～平成21年度	総額	20百万円
<p><b>【研究代表者】</b> 佐藤 智徳 日本原子力研究開発機構</p> 				
<p><b>【研究概要】</b></p> <p>原子力発電プラントでは、原子炉内の構造材料や燃料の健全性確保と作業員の被ばく低減のために、原子炉冷却水の水化学（水質）制御を実施しています。この水化学制御の最適化には、強い放射線照射下にある冷却水の水質のその場測定が有効と考えられます。そこで私達は、照射下にある高温水中の化学種濃度のその場測定を可能とする耐久性の高い水質センサとして、「異種金属アレイ型センサ」の原理を考案しました。図1に示すように、ある水環境に曝されている金属表面には、材料の種類と曝されている環境に依存した特定の電位が発生します。このため、環境依存性が異なる複数の金属を電極材とし、各電極間の電位の差を実測することで、環境の同定を可能とする新しい原理に基づく水質センサの開発を目指しました。この方法によれば、最適な電極材料を組み合わせることで、様々な化学種の濃度を同時にその場測定することが可能になると期待されます。</p> <p>本研究では、センサ開発のファーストステップとして、放射線のない条件で、高温高压試験槽(図2)を用いて、センサ開発に必要な基礎データを取得しました。そして、高温水中に溶存する <math>O_2</math> 濃度、<math>H_2</math> 濃度、<math>H_2O_2</math> 濃度の同定を試み、今後さらに測定精度の向上が必要ですが、濃度のその場測定が可能であるという結果を得ました(図3)。</p> <p><b>【その後の取り組み】</b></p> <p>放射線照射下でも利用可能な耐久性の高い高温水質センサの需要は、今後も高まっていくと考えられ、発電所での作業員の被ばく低減のためにも重要な研究テーマと考えています。今後は、センサによる水質評価の精度をさらに向上させるための手法を検討するとともに、実際に放射線照射下で実験を行い、このセンサが照射下でも機能することを実証し、実用化に向けた研究を続けたいと考えています。</p>				



異種金属アレイ型  
センサのイメージ

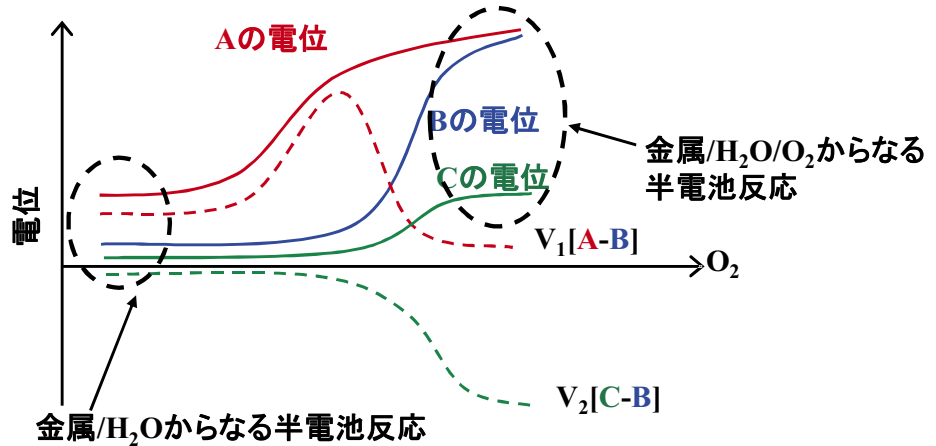


図1 センサの基本コンセプト



図2 高温高圧試験槽

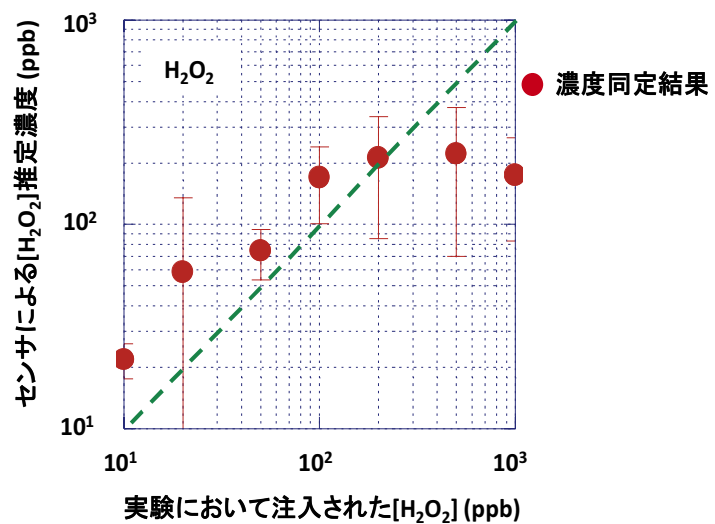


図3 過酸化水素の濃度測定に関する  
センサ検証結果

代表的な  
特許、論文  
受賞など

1) T. Satoh et al., "A New Concept Sensor for Determination of Oxygen and Hydrogen Peroxide Concentrations in Nuclear Reactor Coolant", Proceedings of 14th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, Virginia, USA, Aug. 23-27 (2009)


課題名	マイクロ・ナノ試験による個別粒界強度評価に関する研究		
参画機関	京都大学		
事業規模	期間	平成20～21年度	総額 19百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  澄川 貴志 京都大学講師  (大学院工学研究科機械理工学専攻)</p> 			
<p><b>【研究概要】</b>  金属材料は、無数の結晶粒が集まって構成されており、結晶粒同士の間には結晶粒界と呼ばれる境界が存在します。結晶粒界はエネルギー状態が高く、高温環境下や腐食環境下において極めて破壊しやすいことが知られています。原子力発電プラントに使われる構造部材も例外ではなく、中性子が照射されると結晶粒界では「照射誘起応力腐食割れ」と呼ばれる破壊を生じます。プラントの信頼性を高めるためには、中性子照射によって結晶粒界がどの程度弱くなるのかを定量的に調べる必要があります。しかし、結晶粒の大きさは数十～数百 <math>\mu\text{m}</math> と非常に小さく、個別の結晶粒界の強度を特定することは極めて難しいとされてきました。</p> <p>本研究では、結晶粒よりも更に小さい試験片を作製することで、結晶粒界の強度を自在に評価できるマイクロ試験手法を開発しました。加えて、破壊が生じるまでに材料内部で何が起きているかを電子顕微鏡によって観察できるナノ試験手法も開発しました。これらの技術は、これまでわからなかった中性子照射が及ぼす粒界強度低下への影響やそのメカニズムを解明する手助けとなります。</p> <p><b>【その後の取り組み】</b>  本研究では、目的とする粒界の強度を特定できる試験手法を開発することができました。殆どの構造物は、通常、粒界や界面から破壊を生じます。特定の粒界（界面）の強度を評価できる本手法は、原子力発電プラントに限らず、あらゆる産業において無くてはならない技術です。現在は、試験手法に更なる改良を加え、電子デバイス等のナノテクノロジー分野に応用しています。原子力産業の研究から生まれた技術が、世界中の産業の発展に貢献できるよう、今後も研究開発を進めて行きます。</p>			





図 1 炉心シュラウドにおける応力腐食割れ（経済産業省 HP より）

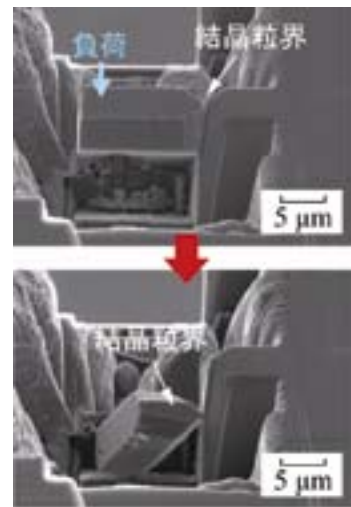


図 2 マイクロ試験における粒界破壊の様子と荷重－変位関係

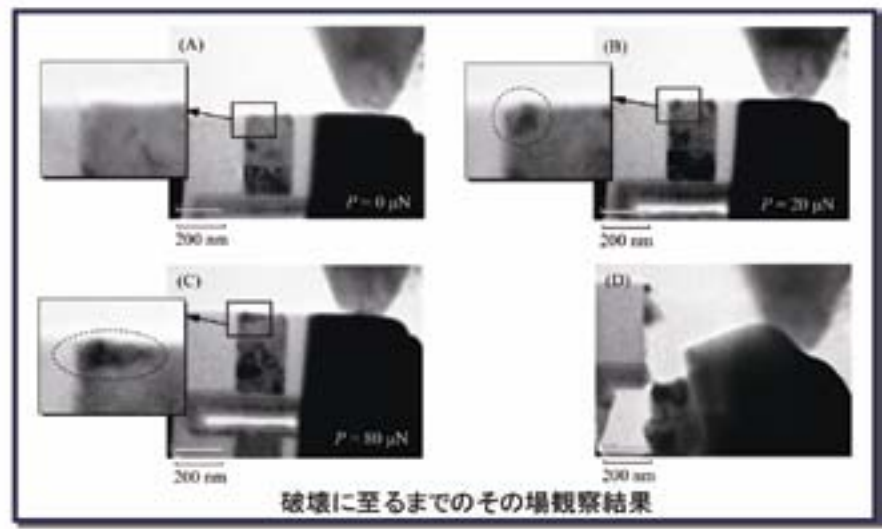
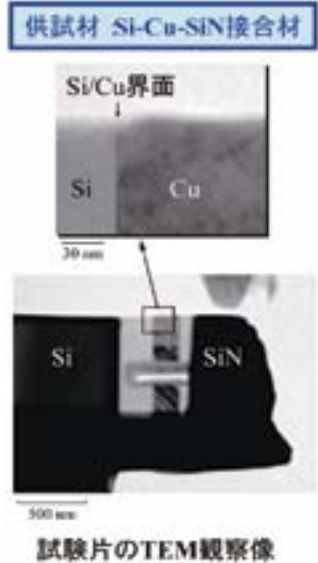
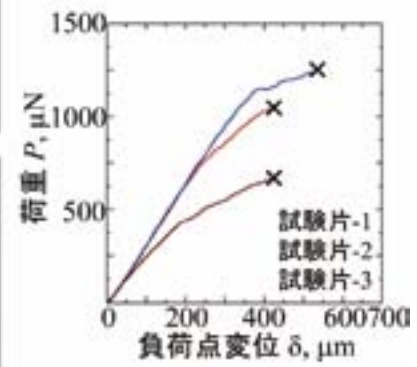


図 3 開発したナノ試験手法と破壊の様子の観察(1,2)

代表的な特許、論文受賞など

1) 論文：透過型電子顕微鏡を用いたナノスケール構造体中の塑性領域に対するその場観察手法の開発、日本機械学会誌、Vol.76-772 (2010)  
 2) 受賞：一般社団法人 日本機械学会 論文賞（題名：透過型電子顕微鏡を用いたナノスケール構造体中の塑性領域に対するその場観察手法の開発）

課題名	革新的原子力エレクトロニクス技術を活用した原子炉制御・保全システムに関する基盤研究			
参画機関	産業技術総合研究所、日本原子力研究開発機構			
事業規模	期間	平成20～21年度	総額	20百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  田中 保宣 産業技術総合研究所主任研究員  (エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ)</p>				
				
<p><b>【研究概要】</b>  現在の原子炉施設では、電子回路を用いた各種電動機器の駆動システムが至るところで使用されています。例えば、制御棒の上下駆動機構や原子炉内蔵型再循環ポンプなどが挙げられます(図1)。しかし、Siを基材とする半導体素子は耐放射線性が極めて低い為、低放射線場への駆動回路の設置や、駆動回路自体を短いメンテナンスサイクルで交換する事により対処されてきました。その結果、配線ケーブルの長尺化等による原子力施設の肥大化、複雑化を招く結果に繋がっています。  本研究では、SiC(炭化珪素)という耐放射線性の極めて高い半導体材料を活用した各種電動機器の駆動システムを構築する事により、駆動回路自体を電動機器のすぐ傍に設置させる事でシステム全体の小型化、メンテナンス性向上を図る事を目的とした研究を進めました。  本研究では、我々が新たに開発した SiC-SIT(静電誘導トランジスタ)を活用したモータ駆動用 SiC チョッパー変換モジュールを作製し、耐放射線性評価を行いました。その結果、原子炉事故時の超高放射線量も想定した積算放射線量 10MGy を照射しても、他の Si スイッチング素子と比較して、オン電圧や閾値電圧において大きな特性劣化は観察されず、極めて優れた耐放射線性を実証する事に成功しました。</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b>  本研究で開発した技術は、高線量下で活躍する作業ロボットや点検ロボット等への応用も可能な技術であり、今後の福島第一原発の事故処理や廃炉へ向けた作業の中で、十分その威力を発揮する技術であると考えています。一方で、デバイス作製プロセスの最適化、歩留まり向上などの諸問題が未だ残されており、SiC ウェハの高品質化やプロセス技術の改善の努力を引き続き行っていく予定です。</p>				

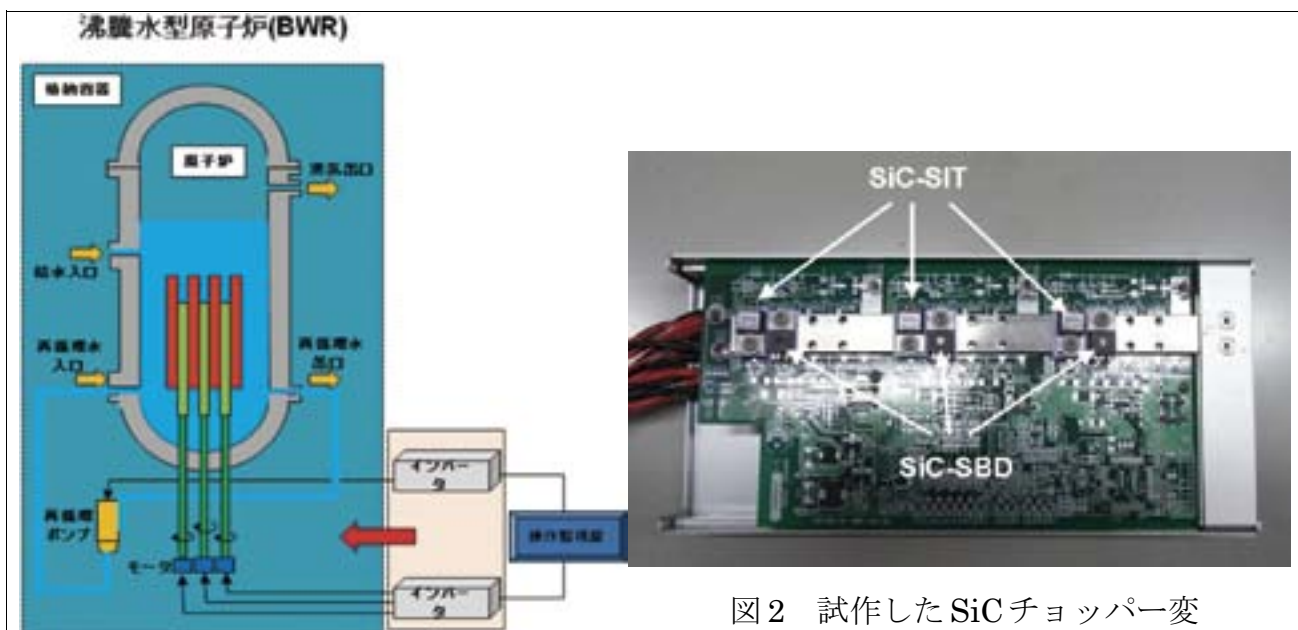


図1 耐放射線性半導体素子の応用例

図2 試作したSiCチョッパー変換モジュール

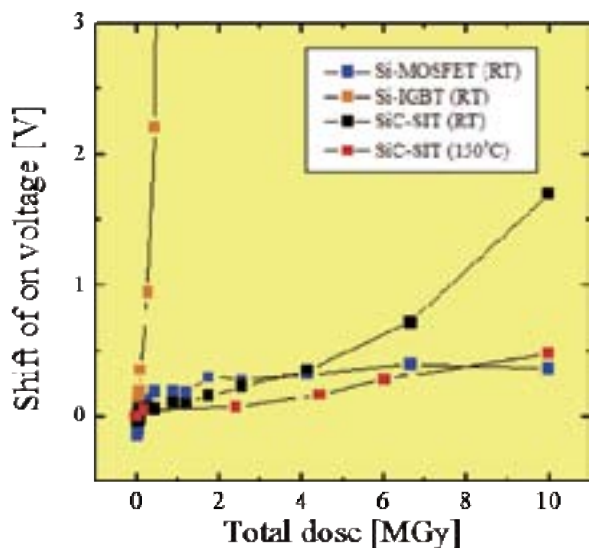


図3 各種 Si スイッチング素子と SiC-SIT のオン電圧の積算線量による変化

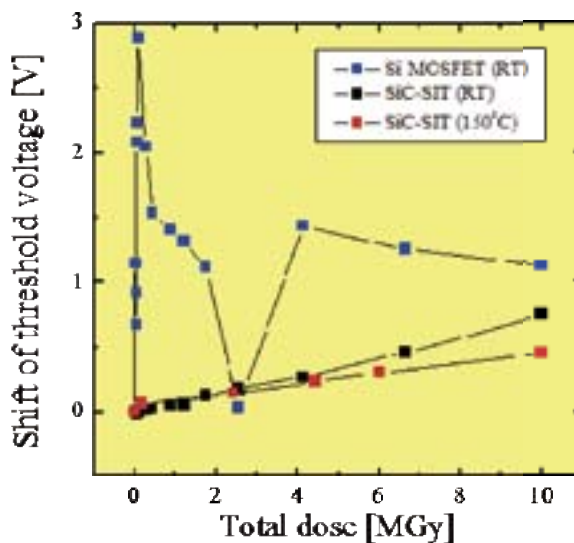



図4 各種 Si スイッチング素子と SiC-SIT の閾値電圧の積算線量による変化

代表的な特許、論文受賞など

- 1) 田中保宣、「原子力用耐放射線性炭化ケイ素(SiC)半導体デバイス開発」、第4回高崎量子応用研究シンポジウム (2009)、口頭発表
- 2) Y. Tanaka, S. Onoda, A. Takatsuka, T. Ohshima, and T. Yatsuo, "Radiation hardness evaluation of SiC-BGSIT", Materials Science Forum Vols. 645-648 (2010) p. 941.
- 3) 大島武、小野田忍、田中保宣、新井学、「耐放射線性の炭化ケイ素半導体デバイスの開発」 Isotope News, 686号(2011), p.8.

課題名	静電力と表面機能制御によるナノ流体核種分離システムの開発			
参画機関	東京工業大学			
事業規模	期間	平成 20～21 年度	総額	20 百万円
<p><b>【研究代表者】</b>            塚原 剛彦 東京工業大学助教            (原子炉工学研究所)</p>				
				
<p><b>【研究概要】</b></p> <p>100 ナノメートル (髪の毛の太さの 1000 分の 1) までサイズを小さくしたナノ流路内 (基板に彫り込んだ微細な溝) に存在する流体は、通常我々が触れるバルクの流体とは全く異なるため、バルクでは類推できないユニークな分離機能を発現します。本研究では、トップダウンとボトムアップナノ加工技術を組み合わせ、ナノ流路内に様々なナノ構造物を規則的に配置し、核種と壁面間の相互作用の差に応じた流れを誘起することによって、“標的核種を単一かつワンスルーで選択的に分離・回収できる極限デバイス”の技術と方法論を創成しました。同価数の核種 (Ce(III)/La(III)/Eu(III) 等) や同種類の核種 ((U(IV))-U(VI) 等) であっても、ナノ流路に溶液を流すだけで、速く流れる核種と遅い核種に能動的に分かれていきます。煩雑で長時間の操作が必要と成らざるを得ないバルク的操作に比べ、本法は極微量, 高効率, 低被ばく量をもたらし、環境負荷低減や安全性向上に大きく寄与できます。</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b></p> <p>本研究成果は、従来にない機能や特性を持つ分離デバイスの技術と方法論を提供するものであり、学術的にも社会的にも波及効果は極めて大きく、核燃料サイクルに新展開をもたらすと期待できます。放射性廃液からの有用元素 (レアアース, レアメタル) の分離・回収・再資源化へ展開できるばかりか、原子力発電所や地層処分場などから地層中へ漏れ出した放射性物質の移行挙動に関する知見を得るための新しい研究ツールとなる可能性があります。本研究は世界的にも認められつつあり、現在、「最先端・次世代研究開発支援プログラム」へ採択され、一頭地抜きんでた当該分野のリーダーとなるべく、ナノ流体の高度化に努めています。</p>				

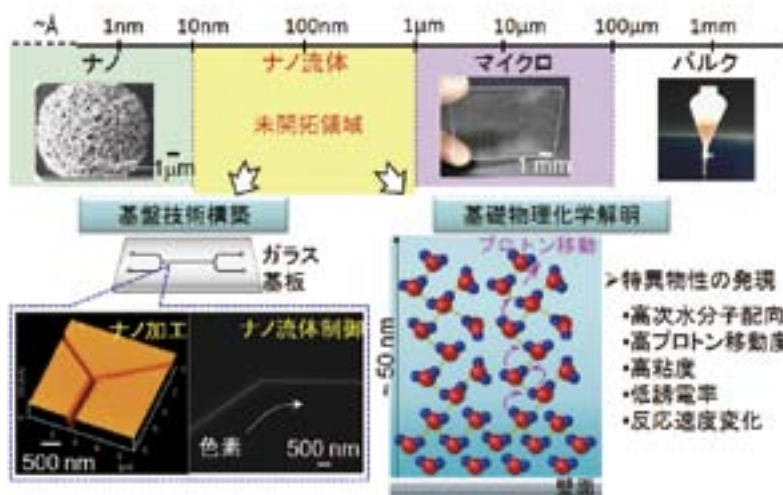


図1 ナノ流体の特異性

10~100nm スケール空間をナノ流体空間と呼び、この空間では様々な特異性を発現します。

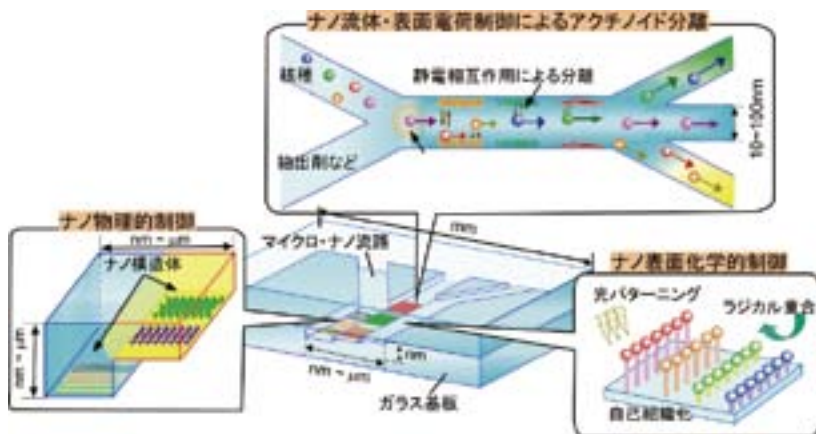


図2 本研究の概念図

ナノ流路の壁面に物理的・化学的な機能を集積化して、核種分離を実現します。

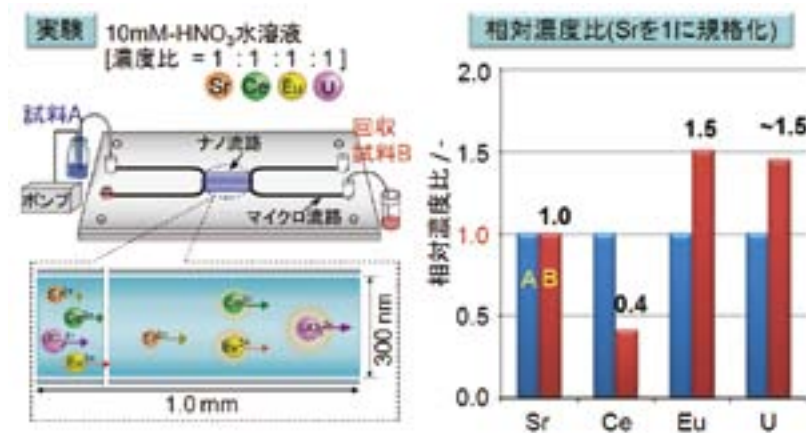


図3 ナノ流体分離システムと分離結果例

イオン毎に流量が異なり、同価数イオンの相互分離が容易。

代表的な特許、論文受賞など

【論文】

- 1) T. Tsukahara, *Bull. Res. Nucl. React.*, 33, 41 (2009).
- 2) T. Tsukahara, K. Mawatari, and T. Kitamori, *Chem. Soc. Rev.*, 39, 1000 (2010).

【受賞】

- 1) 日本化学会優秀講演賞「拡張ナノ流体制御を利用した放射性金属核種分離に関する研究」日本化学会第90回春季年会(2010).

課題名	放射線誘発プリン介在型細胞間情報伝達の解明とがん治療への応用			
参画機関	東京理科大学			
事業規模	期間	平成20～21年度	総額	20百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  月本 光俊 東京理科大学助教  (薬学部薬学科)</p>				
<p><b>【研究概要】</b>  がん治療において放射線治療は、殺癌効果を示す有効な治療法の一つですが、二次的に血管新生亢進や癌転移促進などの副作用も生じてしまいます。しかし、そのメカニズムが分かっていないので、その対策を立てることができません。  放射線による生物作用は、まだまだ分かっていないことが多く、放射線自体による細胞への影響のほか、二次的に放出される分子が放射線を被曝していない細胞にまで影響を与えている可能性が示唆されています。  私は、この二次的に放出される分子が ATP (プリンヌクレオチド) などのヌクレオチドであることを突き止めました。放出された ATP は、被ばくした細胞やその周囲の細胞の表面にある ATP 受容体 (プリン受容体) に結合して、放射線による作用を伝達していることが分かりました。放射線による血管新生亢進は、ATP 受容体阻害薬によって抑制されたことから、ATP と ATP 受容体が放射線による二次的副作用 (血管新生など) に関わっている可能性が示唆されました。このように、ATP と ATP 受容体という放射線治療予後改善の新規標的を示すことに成功しました。</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b>  本研究課題終了後も引き続き、放射線誘発プリン介在型細胞間情報伝達について詳細に検討を行ってきています。研究課題実行当時は、まだ誰も ATP が放射線生物影響に関わっているとは思っていませんでしたが、論文発表後、世界の研究者からの問い合わせも多く、たいへん注目されています。私自身もその後、放射線によってどのように ATP が放出されるか、どんな受容体を介しているのか、どのような作用に関わっているのかについて詳細に検討を行っており、その結果、ATP が放射線生物影響に非常に重要な分子であることが次々に分かってきました。今後、放射線被ばくの影響を考えるうえでも無視できないメカニズムとなりそうです。</p>				

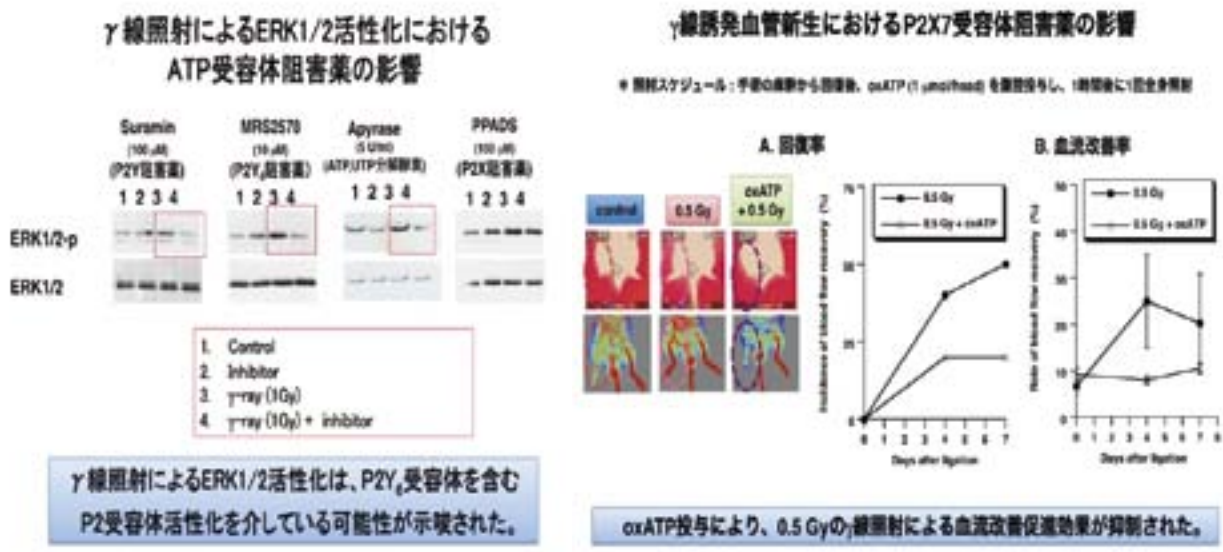


図1 放射線被ばくによる細胞内の変化には、細胞の外へ放出されたATPが関わっていることを発見しました（左図）。また、放射線照射によって生じる血管新生亢進は、プリン受容体の阻害薬によって抑制できる可能性を示しました（右図）。

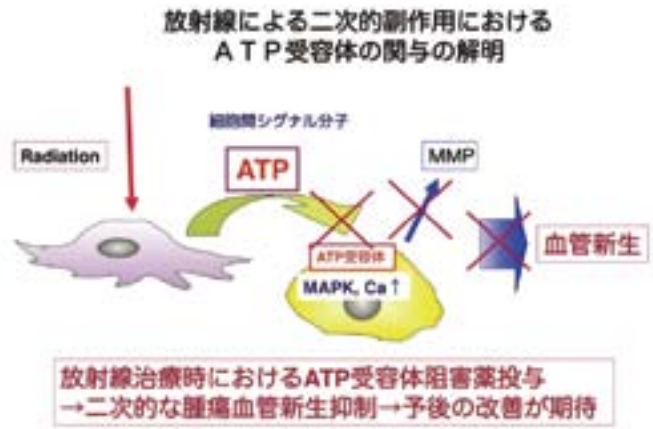



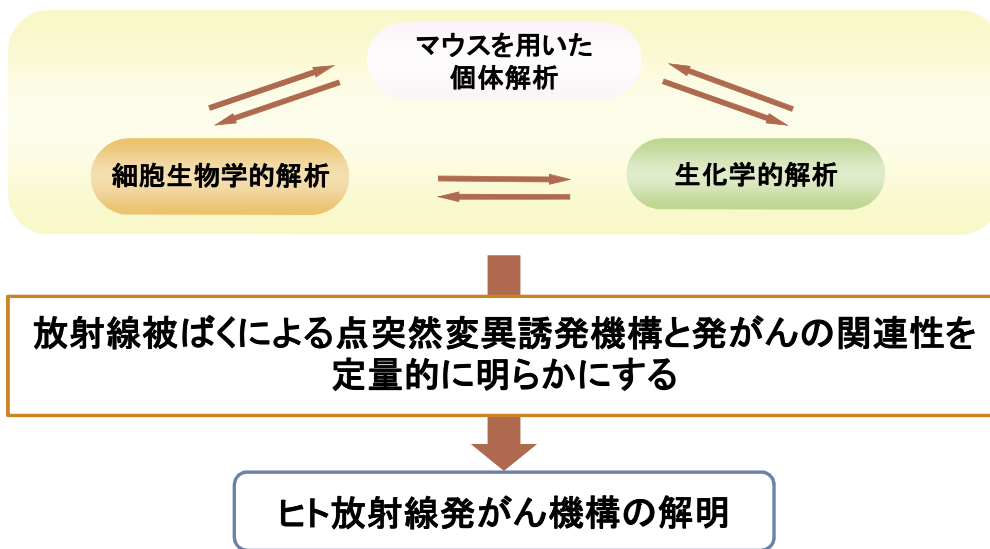
図2 放射線照射によって細胞から放出されたATPが細胞表面のATP受容体を活性化させて細胞内の変化や血管新生亢進などに関与していることがわかりました。

代表的な特許、論文受賞など

- 1) Tsukimoto M. et al., Involvement of Purinergic Signaling in Cellular Response to Gamma-Irradiation. *Radiation Research*, 173 (3), 298-309 (2010)
- 2) Tsukimoto M. et al., Gamma-Irradiation Induces P2X<sub>7</sub> Receptor-dependent ATP Release from B16 Melanoma. *Biochimica et Biophysica Acta-General Subjects*, 1800(1), 40-46 (2010)
- 3) Tsukimoto M. et al., P2Y<sub>6</sub> receptors and ADAM17 mediate low-dose gamma-ray-induced focus formation

課題名	放射線発がん と 突然変異誘発 の 総括的 説明		
参画機関	広島大学		
事業規模	期 間	平成 20 ～ 21 年度	総 額
			19 百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  豊島めぐみ 広島大学助教  (原爆放射線医科学研究所)</p> 			
<p><b>【研究概要】</b></p> <p>放射線による生物影響に発がんがあげられます。広島、長崎の原爆被ばく者による疫学研究から、うけた放射線量が高くなるほど、がんになるリスクが高くなることが報告されています。放射線がどのようにして発がんに関与しているかについての研究から、放射線が直接、細胞内 DNA に傷をつけることによって突然変異が生じ、結果としてがんになるという機構だけでは説明がつかないと考えられています。</p> <p>本研究では、実験モデルマウスを用いることにより、細胞内にもともと備わっている修復機構の異常が放射線発がんに関与することを世界で初めて明らかにしました。本研究を更に明らかにしていくことで、放射線が直接 DNA に傷をつける以外に、細胞内のゲノム恒常性の維持機構の異常を介して発がん機構に寄与するという新規概念を提唱することができるのではないかと考えています。</p>			
<p><b>【その後の取り組み】</b></p> <p>本研究の成果は世界の放射線発がんの機構解明に先駆的な貢献ができたといえます。突然変異誘発に関与する損傷修復機構の分子メカニズムを更に追求していくことによって、放射線発がんに関与する新規因子の発見に取り組んでいます。新規因子の発見は、新しい実験モデルマウスの作成につながります。放射線発がんを高感受性の実験モデルマウスの開発は、将来的に、これまで検証されていない放射線防護上、最も重要な低線量放射線リスク評価に役立つことが期待されます。</p>			

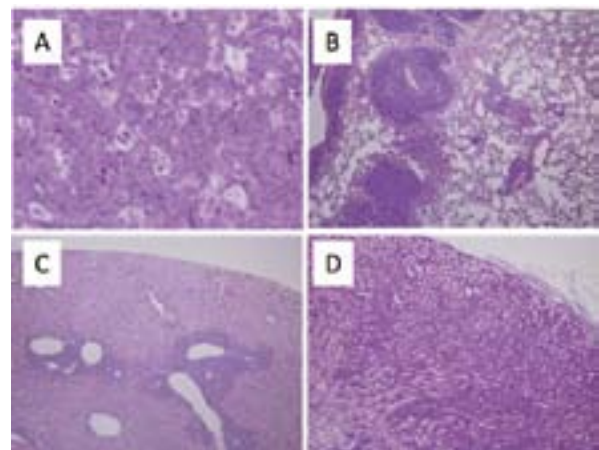




本委託研究の研究体制



Co<sup>60</sup> γ線研究用照射装置  
RE-1082型(1.22 Gy/ min)




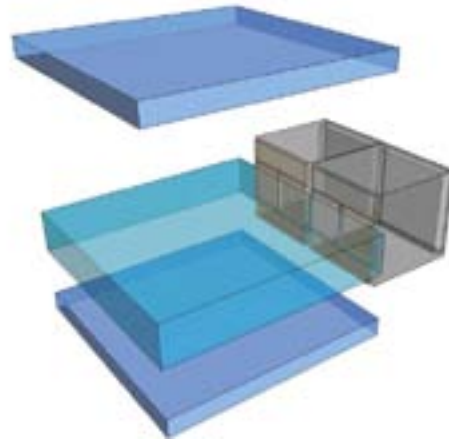
本研究で観察された胸腺リンパ腫

- A : 胸腺リンパ腫
- B : 肺に浸潤した胸腺リンパ腫
- C : 肝臓に浸潤した胸腺リンパ腫
- D : 腎臓に浸潤した胸腺リンパ腫

代表的な  
特許、論文  
受賞など

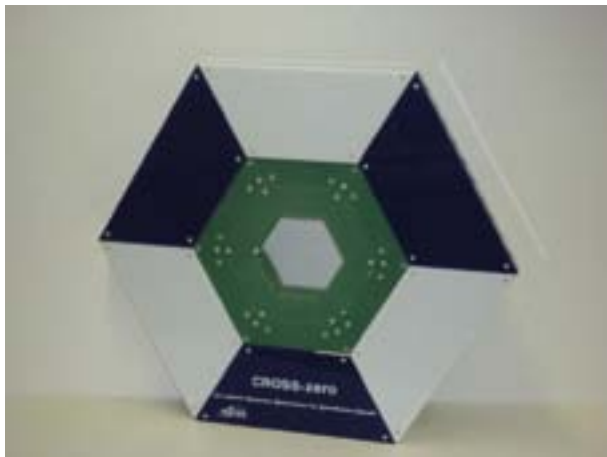
- 1) Jinlian Piao, Yuji Masuda, Kenji Kamiya, Specific amino acid residues are involved in substrate discrimination and template binding of human REV1 protein, *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 392, 140-144, 2010
- 2) Yuji Masuda, Jinlian Piao, Kenji Kamiya, DNA replication-coupled PCNA mono-ubiquitination and polymerase switching in a human in vitro system, *Journal of Molecular Biology*, 396, 187-500, 2010
- 3) 豊島めぐみ, 習陽, 三家本隆宏 他, 損傷乗り越えポリメラーゼ Rev1 の放射線発がんに与える影響, *広島医学*, 63(4): 345-347, 2010

課題名	超高感度広エネルギー領域ガンマ線検出器CROSSの開発		
参画機関	放射線医学総合研究所		
事業規模	期間	平成20～21年度	総額
			20百万円
<p><b>【研究代表者】</b></p> <p>中村 秀仁 放射線医学総合研究所研究員  (基盤技術センター研究基盤技術部)  (現) 京都大学助教  (原子炉実験所原子力基礎科学研究本部)</p> 			
<p><b>【研究概要】</b></p> <p>本研究の目的は、ガンマ線を検出する新法を確立するためガンマ線検出器への適応に不向きとされていた有機素材を無機素材と複合化した検出器CROSSのプロトタイプを開発し、同検出器の性能評価を行うものです。</p> <p>本研究では、CROSSシステムを具現化し、部分的に新しい放射線検出方法(各種放射線の測定・分解能の向上・画像化)の原理を実証しました。これらの結果から要素技術的に有益な知見が得られました。また、副産物として得られたペットボトル樹脂の放射線による蛍光の発見は、今後の発展に大きな期待がされています。</p>			
<p><b>【その後の取り組み】</b></p> <p>本研究期間を振り返り一番に思うことは、研究者として独り立ちするために最低限必要な能力が鍛えられたことにあります。特に、国際論文を自力でまとめあげられるようになったことは、非常に大きな自信へと繋がりました。また英国王立協会から出版されました論文はグローバルな展開を引き起こし、海外の研究スピードの速さに驚かされる機会となりました。</p> <p>最後に、本事業を通して、世界と競うためには、個人ではなくグループとして研究を進めなければならないと痛感しました。その教訓をもとに、現在、『産・学・官連携』による新プロジェクトを立ち上げ、研究開発に邁進しています。</p>			



**図1 CROSS モジュールの写真と概要図**

短期間で CROSS を開発するため、検出器にモジュール化を採用しました。一つのモジュールは、有機素材、無機素材、光センサーで構成します。



**図2 プロトタイプ検出器 CROSS-zero**

6つの CROSS モジュールで構成した本装置を用い性能評価を行いました。<sup>1) 2)</sup>



**図3 ペットボトル樹脂**

本樹脂を用いアルファ線・ベータ線・ガンマ線の測定を実証しました。<sup>3)</sup>

代表的な  
特許、論文  
受賞など

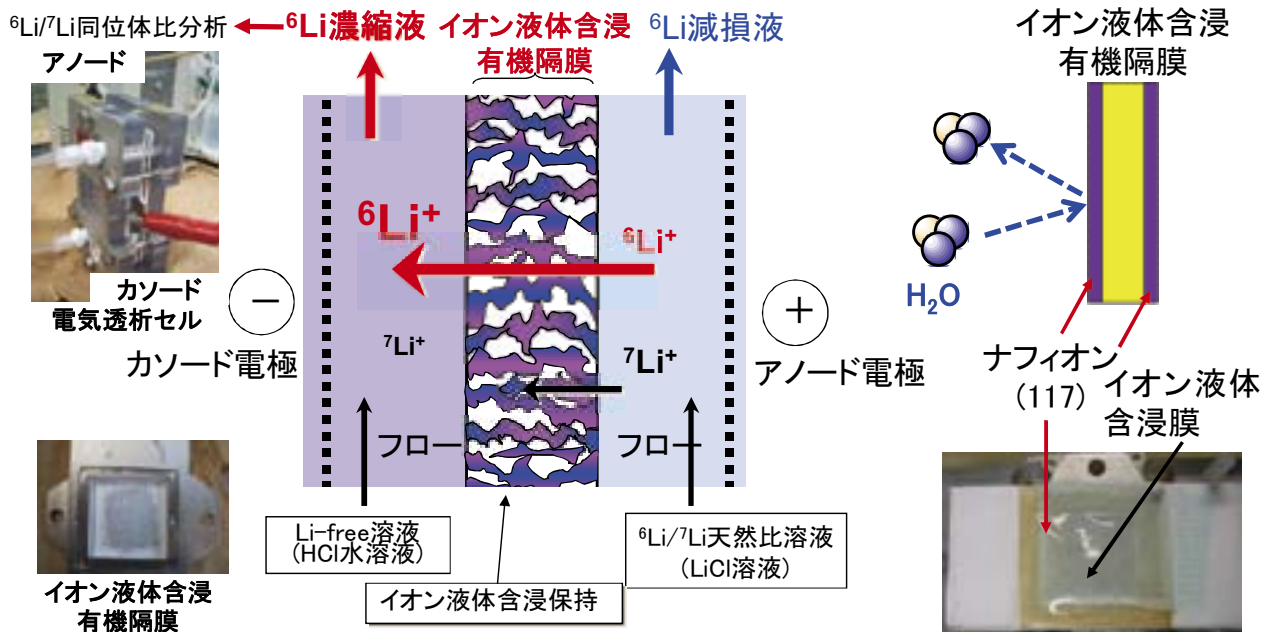
**【取得特許】**

- 1) 特許 4897881 号、「ガンマ線検出器とガンマ線再構築法」、出願人：(独) 放射線医学総合研究所
- 2) 特許 4600947 号、「ベータ線検出器とベータ線再構築法」、出願人：(独) 放射線医学総合研究所

**【発表論文等】**

- 3) H. Nakamura et al., “Radiation measurements with heat-proof polyethylene terephthalate bottles”, vol. 466, p. 2847-2856/ rspa.2010.0118, 2010

課題名	イオン液体含浸有機隔膜による Li 同位体分離技術に関する研究			
参画機関	日本原子力研究開発機構			
事業規模	期間	平成20～21年度	総額	19百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  星野 毅 日本原子力研究開発機構  核融合研究開発部門 研究員</p>				
<p><b>【研究概要】</b>  核融合炉の燃料として必要なトリチウムは、核融合炉内に装荷したリチウムセラミックス中のリチウム 6(<math>{}^6\text{Li}</math>)と中性子との核反応により生産します。しかし、天然の Li には <math>{}^6\text{Li}</math> が約 7.6%しか存在せず、核融合炉の定常運転に必要なトリチウム量を確保するためには、Li の同位体(<math>{}^6\text{Li}</math> と <math>{}^7\text{Li}</math>)比が天然より高い 30～90%濃縮 <math>{}^6\text{Li}</math> が必要です。希少な <math>{}^6\text{Li}</math> 濃縮試料は海外から大量に調達することは不可能なだけでなく、工業化や大量製造へのスケールアップが可能な <math>{}^6\text{Li}</math> 同位体分離技術も日本は有していません。  そこで、近年リチウムイオン電池の新たな電解質材料として期待されている Li イオンを選択的に透過させるイオン液体(PP13-TFSI)に着目し、Li 同位体分離技術への適応を提案しました。天然同位体比の Li 水溶液(アノード側)と Li の無い溶液(カソード側)の間をイオン液体を含浸させた有機膜にて隔てた電気透析セルに電位を加え、Li を移動させます(図 1)。その際、<math>{}^6\text{Li}</math> イオンは <math>{}^7\text{Li}</math> イオンより移動速度が速いため、<math>{}^6\text{Li}</math> の分離指標となる <math>{}^6\text{Li}</math> 同位体分離係数は最大 1.4(分離できない場合は 1.0)、分離効率の良い範囲は 1.05～1.15 と、海外にて唯一報告されている水銀を用いた <math>{}^6\text{Li}</math> 同位体分離法の 1.06 を大きく上回る高い値を得ることに成功しました(図 2)。</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b>  今回提案した技術は、工業化(量産化)し易い革新的基礎技術と言えます。更に、本新技術を発展させることで、海水からの Li 資源回収に見通しを得たことから、今後、大きな Li 需要が期待される自動車用大型 Li イオン電池産業への波及効果も期待できます。Li 資源安定確保のため、官民一体となった Li 争奪戦が様々な国によって行われていますが、海水には約 2300 億トンのほぼ無尽蔵のリチウム資源が存在すると推定されているため、資源の乏しい日本においても海水からのリチウム資源回収が実現すれば、持続的に Li 資源を得ることが可能です。温暖化緩和に向けた低炭素化社会への貢献、環境エネルギー先進産業の発展等の観点から、グリーン・イノベーション推進に大きな社会的貢献を果たすことを私は目標としています。</p>				

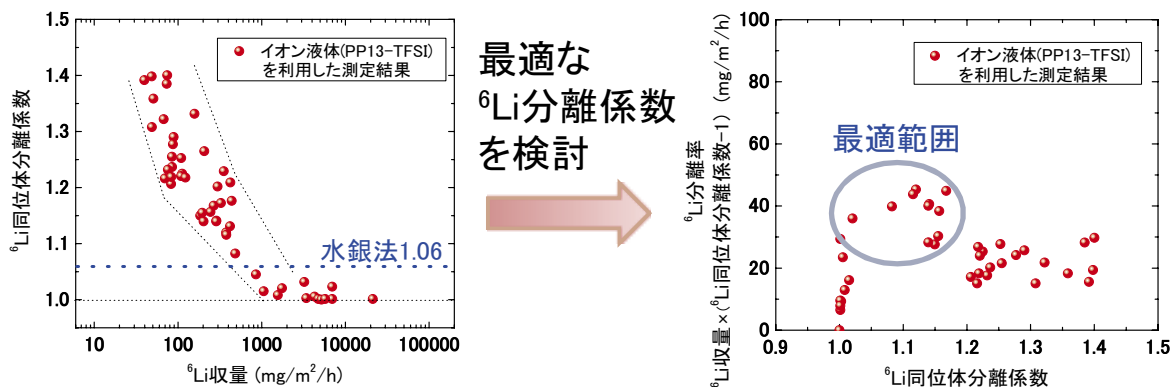


工業化し易い革新的基礎技術。今後、海水中のLi資源回収へ展開。

図1 イオン液体を用いた高効率<sup>6</sup>Li同位体分離技術の原理<sup>1-2)</sup>  
<sup>6</sup>Liは<sup>7</sup>Liより速く移動します。イオン液体はナフィオンで保護しました。

<sup>6</sup>Li分離効率を次式で定義し、<sup>6</sup>Li分離効率の<sup>6</sup>Li同位体分離係数依存性を調べた。  

$${}^6\text{Li分離効率} = {}^6\text{Li収量} \times ({}^6\text{Li同位体分離係数} - 1)$$



同位体分離係数は最大1.4。1.05~1.15付近が同位体分離効率が高い。

図2 <sup>6</sup>Li同位体分離係数の<sup>6</sup>Li収量依存性と最適<sup>6</sup>Li同位体分離効率の検討  
<sup>6</sup>Li同位体分離係数の最大値は1.4と、水銀法の1.06より高い値を得ました。

代表的な特許、論文、受賞など

- 1) T. Hoshino, T. Terai, "Basic technology for <sup>6</sup>Li enrichment using an ionic-liquid impregnated organic membrane", J. Nucl. Mater., 417 (2011) 696-699.
- 2) T. Hoshino, T. Terai, "High-Efficiency Technology for Lithium Isotope Separation using an Ionic-Liquid Impregnated Organic Membrane", Fusion Eng. and Des., 86 (2011) 2168-2171

課題名	DNA二重鎖切断の認識・修復の初期過程に関する研究			
参画機関	東京工業大学			
事業規模	期間	平成20～21年度	総額	20百万円
<p><b>【研究代表者】</b>          松本 義久 東京工業大学准教授          (原子炉工学研究所)</p>				
<p><b>【研究概要】</b>          放射線の生体に対するさまざまな作用の原因は、遺伝情報を担う物質であるDNAへの損傷であると考えられています。一方で、生体には放射線によるDNA損傷から自らを守る仕組みが備わっています。本研究は、さまざまなDNA損傷の中で最も重傷であるDNA二重鎖切断が起こったとき、細胞がまずどのように応答するかを明らかにすることを目的として行いました。特に注目したのは、Ku70、Ku86、DNA-PKcs、XRCC4、DNAリガーゼIV、XLFという6つの分子です。Ku70、Ku86、DNA-PKcsは、タンパク質リン酸化酵素となってDNA二重鎖切断の「センサー」として働きます。また、XRCC4、DNAリガーゼIV、XLFは切れたDNAを最終的につなぎ合わせます。本研究では、①DNA-PKcsがどのタンパク質を、何のためにリン酸化するのか、②細胞内でDNA二重鎖切断を修復する装置はどのような分子から、どのような仕組みで構成されるのかを研究しました。その中で、DNA-PKcsがXRCC4をリン酸化する場所と意義が明らかになりました。</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b>          今日の医療において、放射線は各種の疾病診断や癌治療などにおいて極めて大きな役割を担っています。そこで私たちは、この成果の医療への応用、具体的には放射線増感剤の開発を目指しています。放射線増感剤とは、癌治療などにおける放射線の効果を高めるための薬剤です。本研究で分かったDNA-PKcsがXRCC4をリン酸化する場所周辺の構造を元にした薬剤を作ることで、細胞内でのDNA二重鎖切断の修復を阻害し、放射線による癌治療効果を高めることができるのではないかと考え、更に研究を進めています。また、昨年3月の東日本大震災、それに伴う福島第一原子力発電所の事故以来、放射線の人体への影響に対する関心が高まっています。本研究の成果を低線量・低線量率放射線の影響解明に結びつける試みも行っています。</p>				





図1 放射線照射(被ばく)から影響が現れるまで

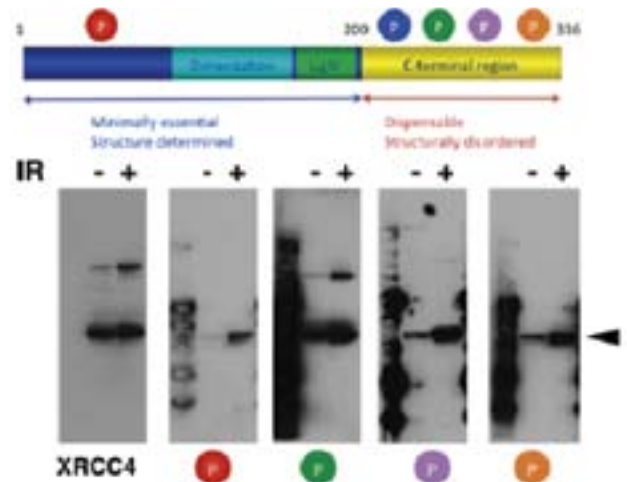


図2 放射線照射細胞内で起こるXRC4のリン酸化。(上)リン酸化される位置のマップ。(下)ヒト白血病MOLT-4細胞における放射線照射後(γ線20Gy)のリン酸化。色は上のマップの位置に対応している。

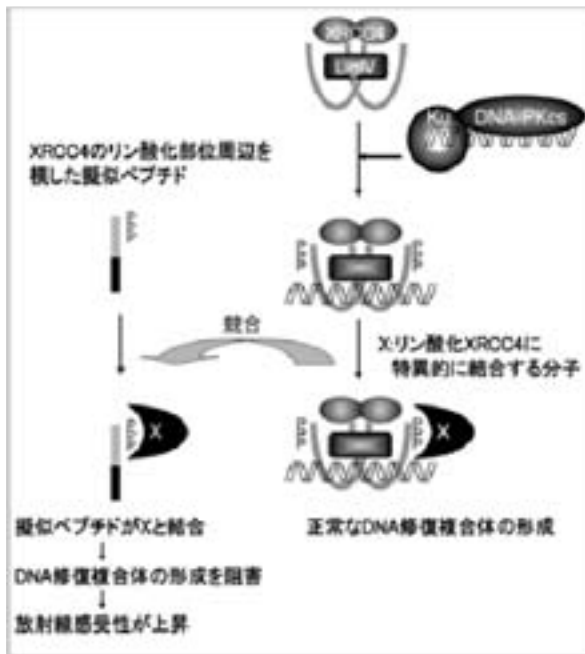


図3 XRC4のリン酸化を利用した放射線増感剤開発のコンセプト

代表的な特許、論文受賞など

- 1) Kamdar, R.P. and Matsumoto, Y. Radiation-induced XRC4 Association with Chromatin DNA Analyzed by Biochemical Fractionation. *J. Radiat. Res.*, **51**, 303-313 (2010)
- 2) 松本義久 「DNA切断の「認識」の分子生物学—The End is the Beginning」電気学会 光・量子デバイス研究会 資料番号 OQD-10-002 (2010)
- 3) 松本義久, Mukesh Kumar Sharma, Radhika Pankaj Kamdar 「非同末端結合の素過程の解明と臨床応用への展望」癌の臨床 **56**, 431-435 (2010).
- 4) Kamdar, R.P., \*Matsumoto Y. DNA double-strand break repair through non-homologous end-joining: Recruitment and assembly of the players. DNA Repair, Edit. Kruman, I. ISBN: 978-953-307-697-3, InTech (2011)

課題名	放射線発がんにおける非遺伝子変異的プロセスの解明			
参画機関	放射線医学総合研究所			
事業規模	期間	平成21～22年度	総額	7百万円
<b>【研究代表者】</b> 今岡 達彦 放射線医学総合研究所 放射線防護研究センター 主任研究員				
<b>【研究概要】</b> 放射線防護において悪性腫瘍の誘発リスクは、疫学調査で明らかの中高線量での影響を基に、「しきい値のない直線モデル」を用いて低線量に外挿し、評価されています。このモデルの機構論的な根拠には、放射線がDNAに発生させる二重鎖切断やそれに起因する遺伝子変異の頻度が線量に比例するという観察結果のほか、腫瘍形成における放射線の主要な役割が、腫瘍の元になる細胞へ遺伝子変異を誘発することであるという前提があります（図1）。この前提は、現在の科学的知見からはもっともらしいと考えられるものですが、これが成り立たなければ、実際のリスクはこのモデルが予測するより高いことも低いこともありえます。				
本研究では、放射線が遺伝子変異誘発以外のプロセスによって腫瘍形成を促進しているかどうかを、生物学的な実験によって調べました。この実験では、放射線を照射されたラット個体の中に、すでに遺伝子変異を有する細胞を置きました（図2）。するとこの細胞が、自身は放射線に当たっていないにもかかわらず、照射された組織からの影響を受けて、腫瘍をよく形成するようになる場合があります（図3）。照射されない個体においてこの細胞が腫瘍を形成しにくい仕組みについては、DNAメチル化という、遺伝子変異ではない機構が働いていることを示す知見を得ました。				
このように放射線は、従来知られていたような遺伝子変異誘発のプロセス以外にも、遺伝子変異を有する細胞から腫瘍が形成されるプロセスに促進的に働くかもしれないことが示されました。				
<b>【その後の取り組み】</b> 今回の実験では中高線量域の放射線を用いましたが、この現象がどれくらい低い線量でも見られるのかを明らかにすることと、どのようなメカニズムでこれが起こるかを明らかにすることが、今後の課題です。この効果が確かに放射線によるものであり、しかも中高線量域と低線量域において異なるようであれば、「しきい値のない直線モデル」の前提に疑問を提示することにつながるかもしれないからです。今後も個体レベルの研究を通して、放射線防護体系の検証や精緻化に資する科学の進展に貢献したいです。				



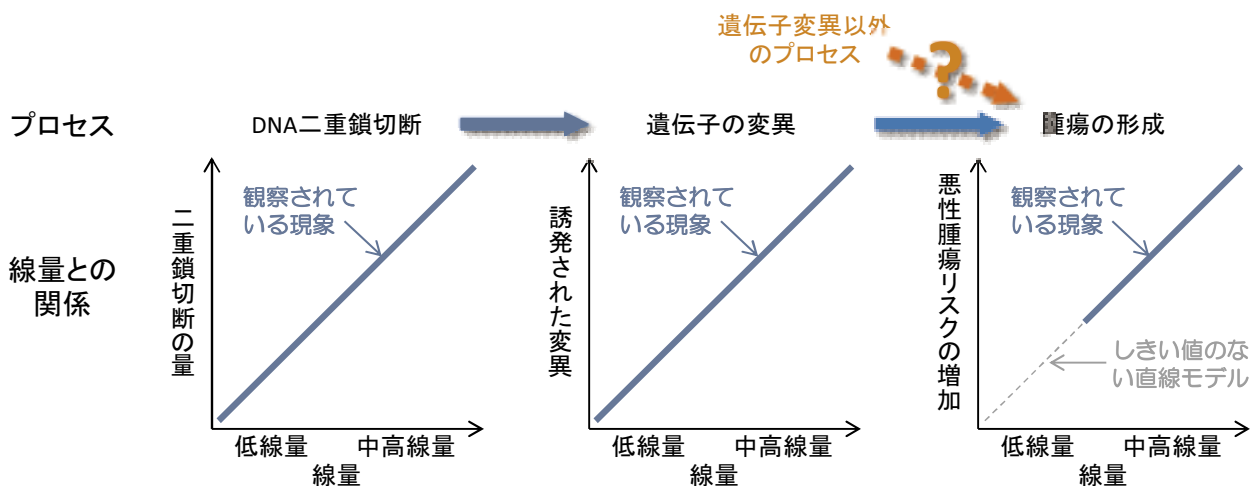


図1 放射線悪性腫瘍リスク評価の機構論的根拠

遺伝子変異誘発による腫瘍形成促進が主要であることが前提となっている。

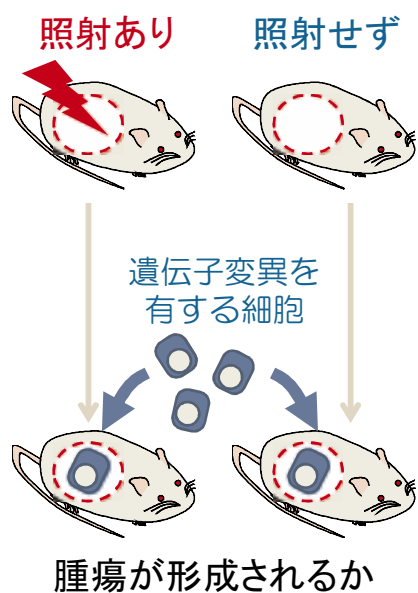


図2 実験の概念図

移植した細胞からの腫瘍形成を観察。

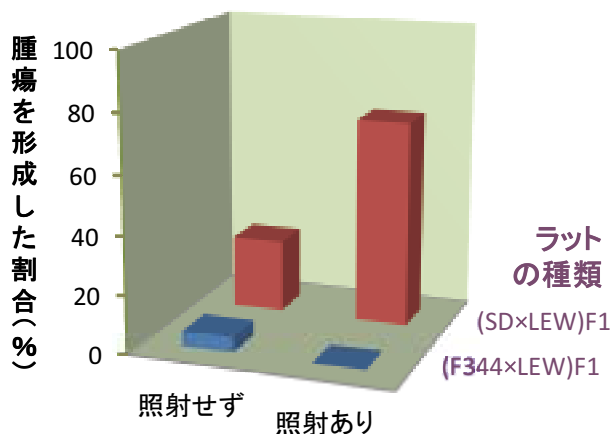


図3 実験結果の一部

照射されたラットの一部分で、照射されない細胞からの腫瘍形成が促進された。

代表的な特許、論文、受賞など

- 1) Imaoka T, et al. "Radiation-induced mammary carcinogenesis in rodent models: what's different from chemical carcinogenesis?" J Radiat Res 50(4), 281-293, 2009.
- 2) 第4回放射線影響研究奨励賞（放射線防護の精緻化に資する影響評価研究及び放射線発がん機序の解明研究）

課題名	重イオンビームによる植物変異当代固定の利用のための基盤研究		
参画機関	農業・食品産業技術総合研究機構		
事業規模	期間	平成21～22年度	総額 20百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  今西 俊介 農業・食品産業技術総合研究機構  野菜茶業研究所 主任研究員</p> 			
<p><b>【研究概要】</b>  野菜などの作物では、環境適性・病虫害耐性などを求める生産ニーズおよび急速に多様化する消費ニーズに対応するため、“より良い”品種を“より早く”育成することが求められています。重イオンビーム照射は、他のエネルギー線より数千倍程度大きな影響を軌跡に沿った極微小範囲の物質に与えるという特長を持っており、目的形質だけに変異を生じた系統を分離しやすく、有用な突然変異体を効率的に得ることができる手法として注目されています。</p> <p>本研究では、トマトをモデルとして、重イオンビーム照射による誘発変異発生分子メカニズムを明らかにし、照射当代における突然変異の効果的な誘発方法確立のための基盤整備をすることを目的として、照射当代で表現型変異が見られたトマト系統について、遺伝子発現を網羅的に解析しました。</p> <p>乾燥種子に重イオンビームを照射した矮性トマト「マイクロトム」から単離した花器官異常変異株（図1）について、花器官異常変異株で1/1000以下に発現が抑制された270遺伝子の中に、雄蕊と機能的に関連づけられているものが14含まれていました（図2、3）。このことからこの花器官異常変異株は、雄蕊発達制御を司る遺伝子に変異が生じていると考えられました。</p>			
<p><b>【その後の取り組み】</b>  本研究で材料とするトマトは、日本においても世界においても最も多く消費されている野菜であり、得られた成果はトマトを含むナス科野菜に限らず他の作物の育種の効率化に応用できる可能性があります。本研究で整備した基盤を、さらに発展させることによって、トライ&amp;エラーの側面が大きい育種技術開発に科学的な根拠を提供し、計画的にデザインされた育種を効率的に行うことが可能となると考えられます。</p>			



図 1 花器官異常変異株（外観と花部分の拡大写真） ブロッコリーのように見え、花びらが確認できません。

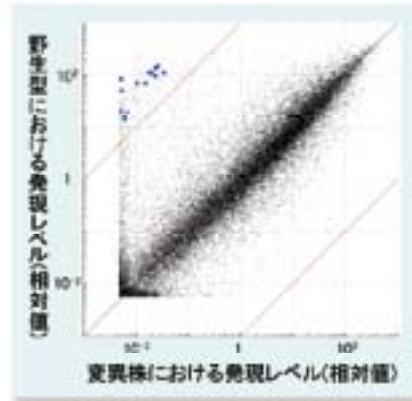


図 2 花器官異常変異株において発現が抑制されている雄蕊に機能づけられた遺伝子 開花当日の花における発現プロファイルです。赤線は 1000 倍と 1/1000 を、青点は雄蕊と機能的に関連づけされているクローンを示します。

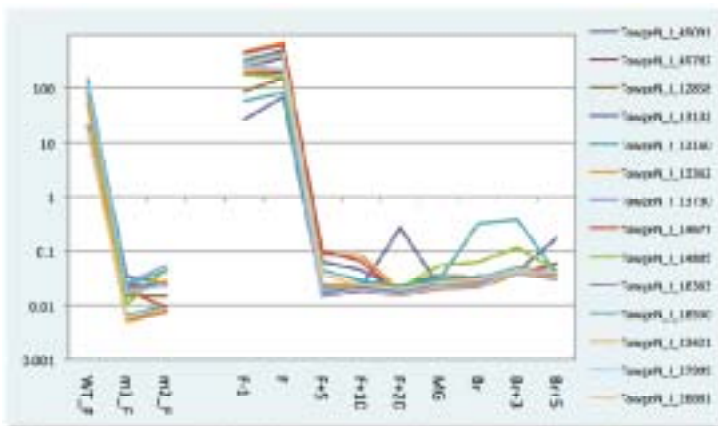



図 3 雄蕊に機能づけられた遺伝子の発現パターン m1,2\_F, 開花当日の変異株の花; WT\_F, 開花当日の野生型系統の花; F-1, 開花前日の花; F, 開花当日の花; F+5, 開花 5 日後の花; F+10, 開花 10 日後の発達中果実; F+20, 開花 20 日後の発達中果実; MG, 緑熟期の果実; Br, 催色期の果実; Br+3, 催色期 3 日後の果実; Br+5, 催色期 5 日後の果実、におけるそれぞれの発現レベルを表します。

代表的な  
特許、論文  
受賞など

- 1) S. Imanishi, A. Noguchi, N. Yokotani, Y. Kazama, T. Hirano, Y. Hayashi, I. Honda and T. Abe, "Development of libraries for mutations induced by heavy-ion-beam irradiation in 'Micro-Tom' tomato". *RIKEN Accelerator Progress Report*, **44**, p272, (2011)
  - 2) S. Imanishi, A. Noguchi, Y. Kazama, T. Hirano, Y. Hayashi, T. Abe, K. Kikuchi, S. Matsuo and T. Suzuki, "Analysis of gene expression levels in tomato mutants induced by heavy-ion-beams irradiation", *SOL & ICuGI 2011*, p66, (2011)
  - 3) S. Imanishi, T. Suzuki, A. Noguchi, N. Yokotani, I. Honda and T. Abe, "Examining the conditions for high efficient mutagenesis in tomato induced by heavy ion-beam irradiation". *The 7th International Solanaceae Conference*, p212, (2010)
- 1) 原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ若手表彰 (2012. 02)

課題名	核拡散リスクの確率論的定量評価手法の開発			
参画機関	東京大学			
事業規模	期間	平成21～22年度	総額	7百万円
<p><b>【研究代表者】</b>          小田 卓司 東京大学助教          (工学系研究科原子力国際専攻)          (現) 米国テネシー大学研究員 (材料科学専攻)</p>				
<p><b>【研究概要】</b></p> <p>近年の原子力発電の世界的な利用増加に伴って、核不拡散への懸念が高まっています。しかし、必ずしも有効な対策が実施されているとは言えません。その原因は、政治的・技術的・社会的要因が複雑に絡み合っ生じる核拡散リスクを、十分に把握できていないことにあると考えました。そこで私の研究では、核拡散を決定する因子を整理し、それらの因子の関係性を歴史事例を参考にしながら調整することで核拡散をモデル化し、核拡散リスクを定量的に評価する方法を開発することを目指しました。その原因は、政治的・技術的・社会的要因が複雑に絡み合っ生じる核拡散リスクを、十分に把握できていないことにあると考えました。そこで私の研究では、核拡散を決定する因子を整理し、それらの因子の関係性を歴史事例を参考にしながら調整することで核拡散をモデル化し、核拡散リスクを定量的に評価する方法を開発することを目指しました。</p> <p>具体的なモデル化手法としては、対象とする地域に属する国家をアクターとして考える「マルチエージェントシミュレーション」を採用しました。経済力などの予測が困難な因子については、乱数を利用した複数回のシミュレーションを行い、核開発を試みる国が現れる確率を評価しました。そして、確率として得られる評価値を、対象地域の核拡散リスクとして定義するという方法を提案しました。</p> <p><b>【その後の取り組み】</b></p> <p>現在は、モデルの妥当性を向上させる方法を検討しています。最終的な目標は、核拡散リスクを低減するための対策を考えるときに、一つの定量的な指標として利用されるような方法論を構築することです。核拡散リスクだけでなく、核兵器を保有する国と保有しない国の間での不公平感も減らせるような、優れた核不拡散体制の構築に貢献したいと思っています。</p>				

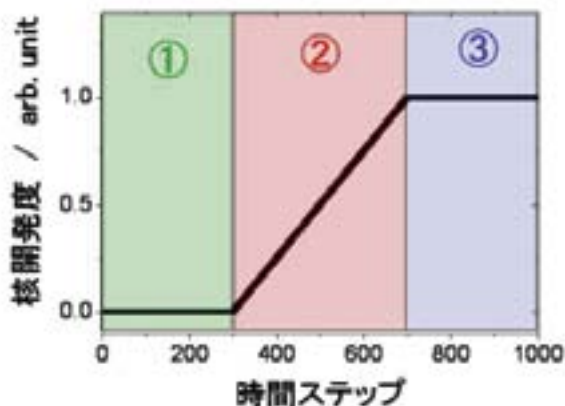


図1：核兵器の開発・保有状況の分類。①非兵器国が核開発の動機を獲得する段階、②非兵器国が核開発を継続あるいは断念する段階、③核兵器国が核の保有を継続あるいは断念する段階の3つを考え、本研究では①を対象としました。

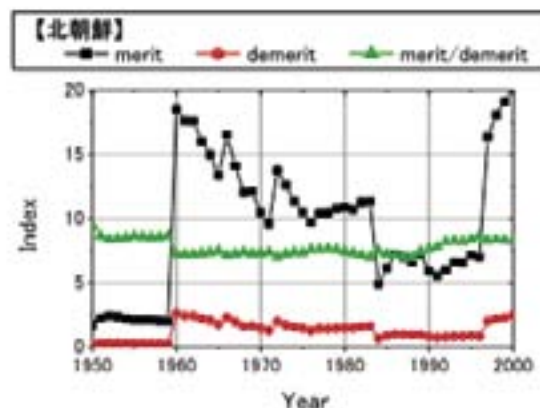


図2：核拡散リスク評価モデルにおける北朝鮮の核開発の動機の変遷。北朝鮮、インド、パキスタン等を対象として、歴史事例を再現するようにモデルを構築しました。核開発のメリットをデメリットで割った値が1を越えたときに動機が発生すると定義しています。

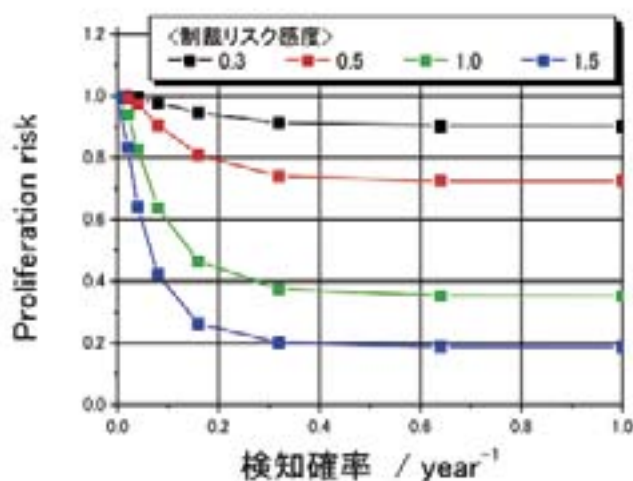



図3：核拡散リスクと核兵器検知確率との相関。構築したモデルを用いた評価結果の一例です。核開発検知確率の増加に伴い、核拡散リスクは低下しますが、その傾向は国の状況や性質に大きく依存することが確認できます。（「核拡散リスク感度」が大きな国は、経済制裁などのデメリットを考え、核開発に魅力を感じ難い国に相当します。）

代表的な  
特許、論文  
受賞など

- 1) 小田卓司, 田中知, 「核拡散リスクの確率論的評価手法の検討」, 2010年原子力学会春の年会, 2010年3月
- 2) 小田卓司, 「核拡散リスクの確率論的定量評価手法-事例との比較を通じたモデル構築手法の検討-」核物質管理学会日本支部第8回研究会, 2010年8月.
- 3) Yusuke Kuno, Takuji Oda, et al., "Study on Effectiveness Assessment of Proliferation Resistance", INMM 2011, 2011年7月.

課題名	硫化反応を用いる核燃料再処理法の基礎研究			
参画機関	東北大学、日本原子力研究開発機構			
事業規模	期間	平成21～22年度	総額	18百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  桐島 陽 東北大学助教  (多元物質科学研究所)</p> 				
<p><b>【研究概要】</b>  化石資源の枯渇や地球温暖化により、原子力への依存性が高まりつつある現在、より効率的に資源を利用するために、新たな使用済核燃料の再処理法の開発が求められています。</p> <p>この研究では、U および Pu の分離回収、廃棄物低減および省工程化に優れた新しい乾式湿式ハイブリッド再処理法として、核分裂生成物の選択硫化と生成した硫化物の酸溶解に基づく方法を提案し、その基礎的研究を行いました。この方法では、まず使用済み核燃料を紛体化・酸化処理（ボロキシネーション）します。次にこの酸化物試料について、核分裂生成物（FP）中の特に中性子経済に影響をおよぼす希土類を主に分離すべき対象として、硫化剤として二硫化炭素（CS<sub>2</sub>）を用いて選択的に硫化しました。この状態で、希硝酸溶液を用いて洗浄することにより、FP およびマイナーアクチノイドを溶出分離しました。この結果、核燃料物質を UO<sub>2</sub> および PuO<sub>2</sub> として回収することを目指しました。プロセスの中心となる硫化の条件をいろいろ検討したのですが、特に硫化時の温度の影響が大きく見られました。図1には硫化処理の温度を変えたときの各元素の酸への溶解率の変化を調べたものです。このようにプロセスを最適化するための条件を検討した結果、現時点では表1に示したような分離効率を得ることが出来ました。</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b>  硫黄の化学特性はとてもユニークで、今回取り扱った条件ではウランに対しては還元剤として働くのに、分離したい希土類元素に対しては硫化剤として働くという大変都合の良い特性を示してくれました。この方法についてはまだまだいろいろな課題も残っていますが、今後も、この研究で得られた成果を基に、独創的な再処理方法の概念を考えていきたいと思えます。</p>				

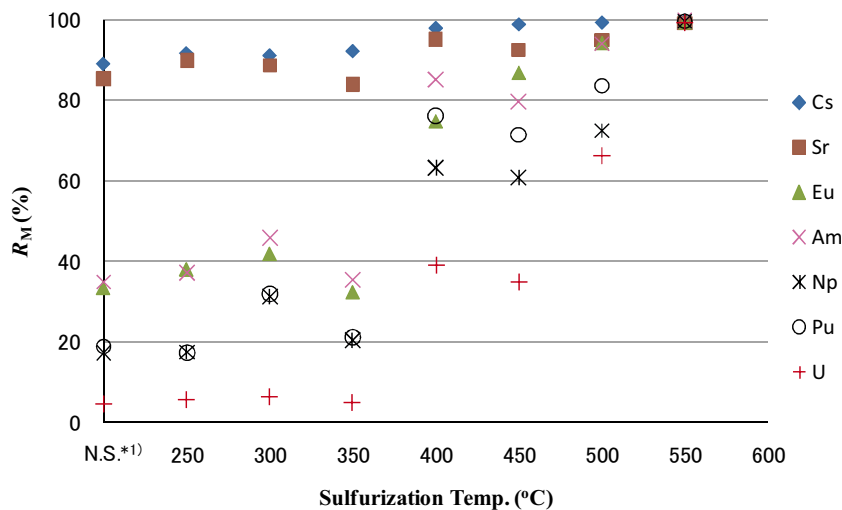


図 1 各元素の溶解率の  
硫化温度依存性  
\*1): 未硫化試料

写真 グローブボックス内で  
作製した、U, Pu, Am等を含む  
模擬使用済核燃料の試料



表 1 トレーサー試料を用いた試験結果より算出した各元素の U からの分離係数  
(硫化温度：400°C、硫化時間：1 h、酸溶解処理：0.1M HNO<sub>3</sub>、50°C、1 h)

	U	Cs	Sr	Eu	Am	Np
分離係数 (SF)	—	170	47	16	13	3

代表的な  
特許、論文、受賞  
など

1) Fundamental Study of the Sulfide Reprocessing Process for Oxide Fuel (I) Study on the Pu, MA and FP Tracer-Doped U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, Akira KIRISHIMA, Toshiaki MITSUGASHIRA, Takashi OHNISHI, Nobuaki SATO, *Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY*, Vol. 48, No. 6, p. 958-963 (2011).  
2) 硫化反応を用いる核燃料再処理法の基礎研究 (1) トレーサー試料の硫化、桐島陽, 大西貴士, 佐藤修彰, 2010 日本放射化学会年会・第 54 回放射化学討論会(2010/9/29)

課題名	中高エネルギー陽子による核破砕片の系統測定に関する研究			
参画機関	高エネルギー加速器研究機構			
事業規模	期間	平成21～22年度	総額	14百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  佐波 俊哉 高エネルギー加速器研究機構 准教授  (共通基盤研究施設 放射線科学センター)</p>				
<p><b>【研究概要】</b></p> <p>近年、粒子線を用いたガンの治療など、加速器で作成した比較的高いエネルギー(中高エネルギーと呼ばれます)を持つ粒子の応用が進められています。この中高エネルギーの粒子は、物質と反応を起こした際に、低いエネルギーの粒子に比べて、多くの種類の粒子を生成します。生成された粒子には比較的大きな粒子(核破砕片といいます)が含まれます。核破砕片は小さな領域に大きなエネルギーを付与するので大きな照射影響を持ちます。中高エネルギー粒子の応用を高度化するためには、どのような粒子がどのような割合でどの方向に放出されるかをモデル化し、照射影響の評価に用いることが必要です。しかし、現状ではこの核破砕片の生成が、モデルに正しく組み込まれているとは言えません。</p> <p>本研究では中高エネルギーの陽子が、さまざまな物質に入射して生成する核破砕片を効率よく測定する検出器(ブラックカーブカウンターBCC)を開発し、核破砕片を網羅的に測定することを目的としました。BCCには核破砕片を広いエネルギー範囲で測定できるように、入射窓や粒子弁別方法について工夫を施しました。生体を構成する元素(炭素、酸素、窒素)と、中程度までの重さの元素(アルミニウム、チタン、銅)の試料に陽子をさまざまなエネルギーで入射し、Li(リチウム)、Be(ベリリウム)、B(ボロン)、C(炭素)などの比較的小さい核破砕片を測定しました。この測定データを用いて、現状のモデルを用いた計算がどの程度核破砕片放出を再現するかを確かめることができました。実験データを解析式に当てはめ、核破砕片放出の様子を簡単に記述することができるようになりました。</p> <p><b>【その後の取り組み】</b></p> <p>核破砕片測定用の検出器を開発することにより、核破砕片の種類、放出エネルギー、角度の分布を網羅的に得ることができました。今後は核破砕片による局所的エネルギー付与の影響について研究を進めるとともに、核破砕片が生成する反応の機構をモデル化して、より正しく記述できるようにしていきたいと考えています。粒子ビームの応用を支える日本発の基礎データとして、世界に発信していきたいと考えます。</p>				



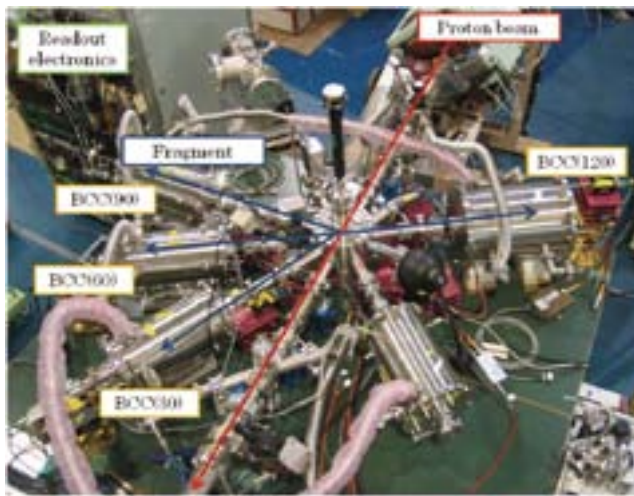


図1 大阪大学核物理研究センターのビームラインに設置した検出器群。陽子ビーム(Proton Beam)は赤矢印方向に進み試料箱に入射する。試料箱で生成された核破碎片(Fragment)は4台の検出器(BCC30-120)で核種が判別され、エネルギーが測定される<sup>1)</sup>

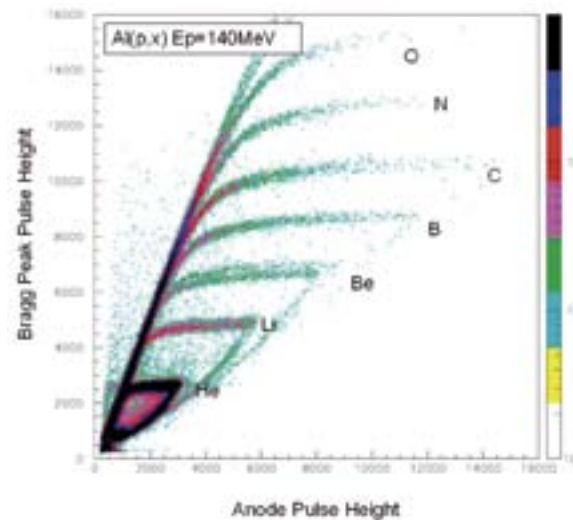


図2 検出器(BCC)からは核破碎片ごとにブラックピークの高さとエネルギーの情報が得られる。上図はアルミニウムに140MeVの陽子を入射した場合について、横軸にエネルギー(Anode Pulse height)、縦軸にブラックピークを取って、測定事象をプロットしたもの。粒子が明瞭に弁別されている<sup>1)</sup>

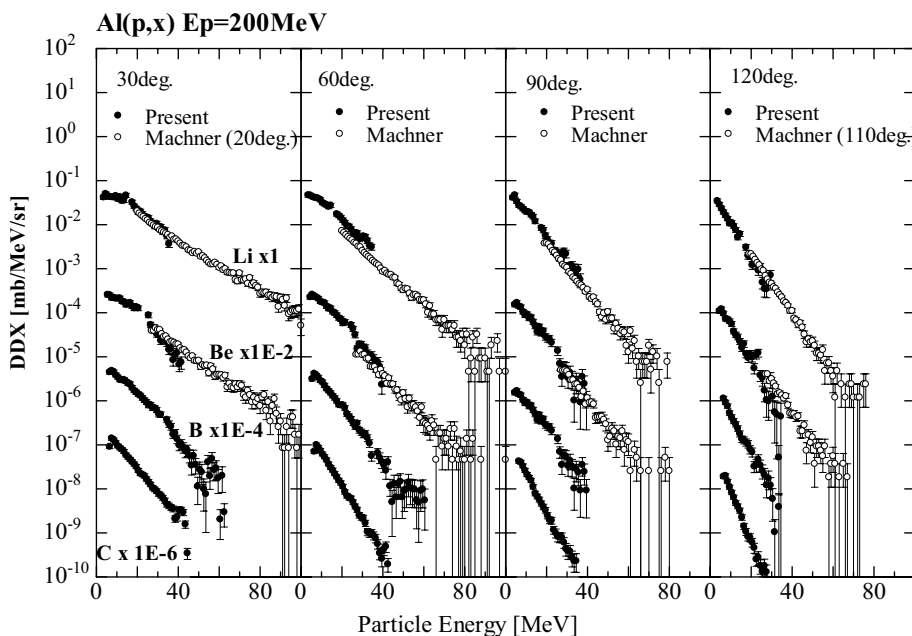

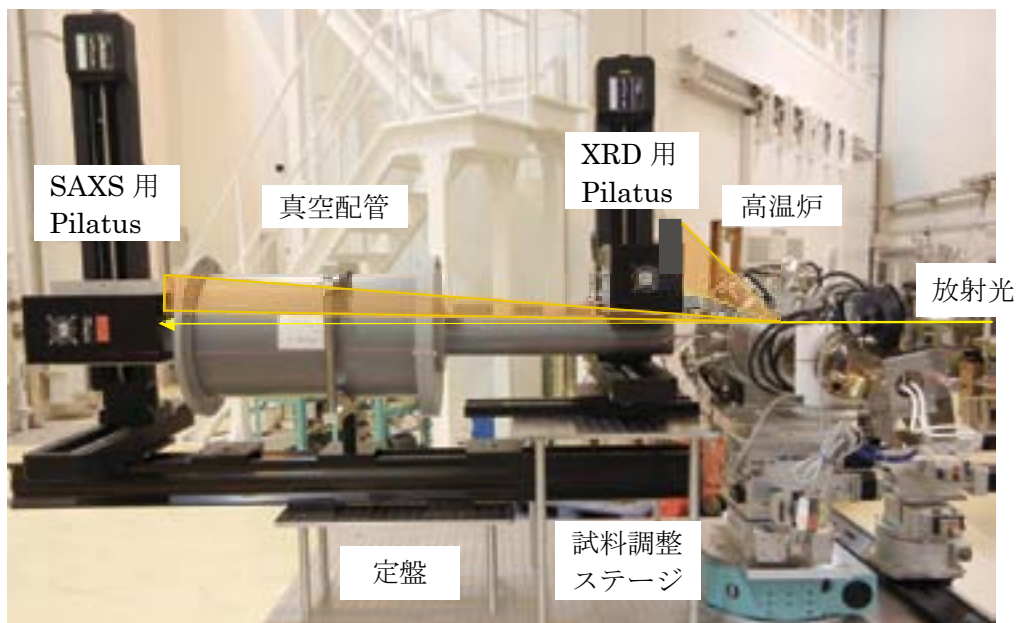


図3 測定データの例。アルミニウムに200MeV陽子が入射した場合の放出粒子ごと、放出角度ごとのエネルギー分布。本研究の結果を黒丸で、他の研究の結果を白丸で示す。本研究の結果は、他の研究に比べ収量の多い低いエネルギーまで測定値が得られている<sup>1)</sup>

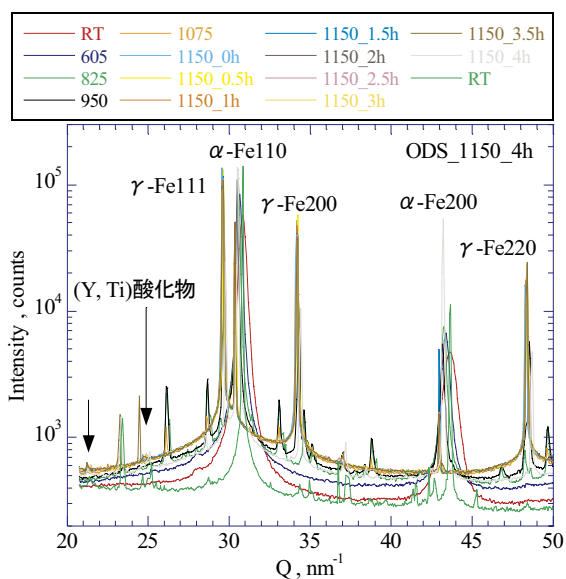
表的な特許、論文受賞など

1) T.Sanami et al, Experimental studies of light fragment production cross section for nucleon induced reaction at intermediate energies, JAEA-Conf-2011-002, pp59  
 2) T.Sanami et al, Fragment DDX Measurement of Proton Induced Reactions on Light-medium Nuclei for Energy Range from Reaction Threshold to a Few Hundred MeV, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 59, No. 2, August 2011, pp. 1805

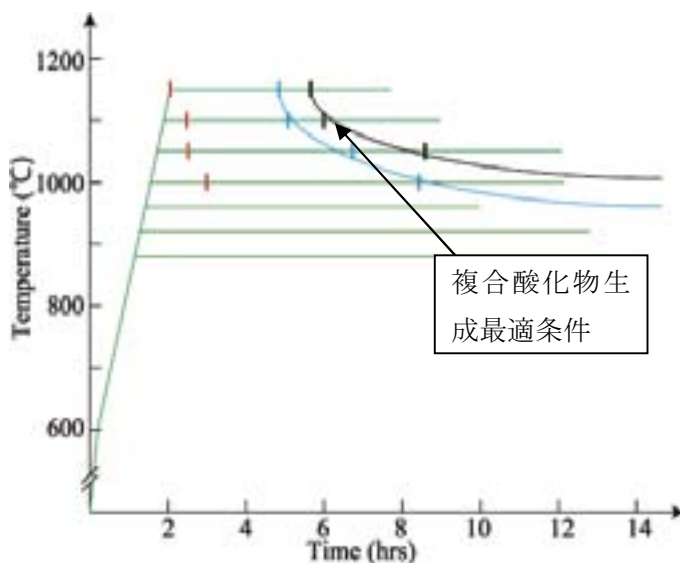
課題名	放射光を用いた FBR 炉心構造材料に関する研究		
参画機関	日本原子力研究開発機構		
事業規模	期間	平成 21～22 年度	総額 11 百万円
<p><b>【研究代表者】</b>          菖蒲 敬久 日本原子力研究開発機構          量子ビーム応用研究部門 副主任研究員</p> 			
<p><b>【研究概要】</b>          高速増殖炉における高燃焼度化による長期運転サイクル実現のために、炉心燃料被覆管の最有力候補材料として提案されている酸化物分散強化型フェライト鋼（ODS 鋼）の強度は、生成過程に発生する超微細ナノサイズ酸化物粒子に依存することがこれまでの研究から明らかになっています。本研究では、被覆管製造プロセスの製品性能向上と品質安定化をめざして、高温中で析出するナノサイズ酸化物粒子の高温熱処理中の析出機構を明らかにし、これに基づき ODS 鋼被覆管製造プロセスの最適温度条件の決定を行いました。</p> <p>大型放射光施設：SPring-8 から得られる高輝度放射光 X 線と X 線回折法（XRD）と小角散乱法（SAXS）、そして高温炉を組み合わせた高温その場同時測定システムを開発し（図 1）、高温中で発生する酸化物が鉄鋼材料に含まれるチタンと別途加えるイットリウム酸化物で合成された複合酸化物であることを明らかにしました（図 2）。そして、条件を変えながらこの実験を繰り返すことにより、図 3 に示す相図中の青と黒線間の温度と時間の条件がこの複合酸化物の最適温度時間条件であることを導き出しました。</p>			
<p><b>【その後の取り組み】</b>          検討事項として、最適条件により製造された燃料被覆管の強度評価が上げられますが、平成 23 年 3 月の震災の影響により、高速炉関連の研究は一時ストップしているために、その検討は先送りとなっています。</p> <p>しかしながら、本研究で開発したシステム自体は材料評価に利用可能であり、高温炉の部分を実測したい実環境を模擬した装置（例えば、負荷中、低温下、またはこれらの複合下）に組み替えることによりその場観察することが可能で、金属凝固過程における核生成メカニズム解明等の研究にも利用され、ものづくりの分野での利用が大いに期待されます。</p>			



**図1 XRD および SAXS 高温その場同時測定システム**  
 高温中の材料内の組織変化などをその場観察することができます




**図2 XRD による測定結果**  
 非常に微弱なシグナルが計測できます

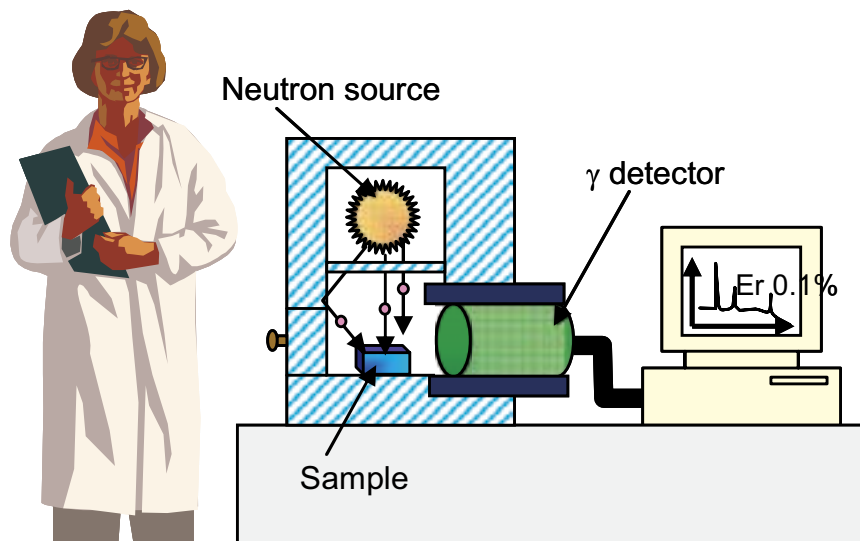


**図3 相図**  
 XRD、SAXS より複合酸化物生成最適条件を導出しました

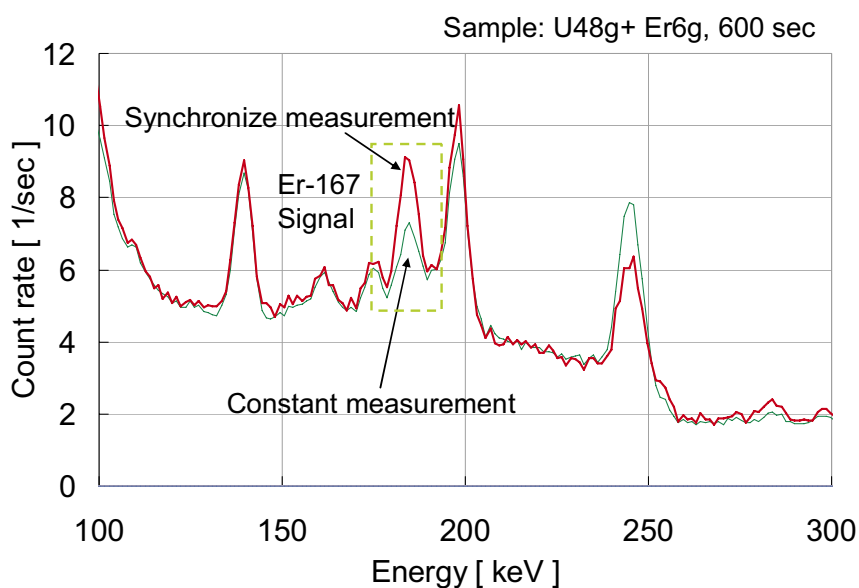
代表的な  
 特許、論文  
 受賞など

- 1) 菖蒲敬久、金思雄、放射光を用いた 9Cr-ODS 鋼酸化物粒子の構造解析、日本金属学会春の年会、2010年4月
- 2) 金思雄、菖蒲敬久、9Cr-ODS 鋼酸化物粒子生成現象のその場観察、日本金属学会秋の分科会、2010年9月
- 3) 菖蒲敬久、金思雄、豊川秀訓、XRD および SAXS 高温その場同時測定によるナノサイズ複合酸化物粒子析出条件の導出、日本放射光学会年会、2011年1月

課題名	PGA を用いた次世代高燃焼度燃料用エルビア濃度測定法の研究			
参画機関	原子力エンジニアリング、京都大学			
事業規模	期間	平成21～22年度	総額	19百万円
<b>【研究代表者】</b> 高松 輝久 原子力エンジニアリング 解析サービス本部 解析グループ				
<b>【研究概要】</b> 原子炉から発生する使用済燃料の処分が社会的問題になってきていますが、この使用済燃料を減らす方法の一つに、より長く使える燃料を開発するというものがあります。燃料をより長く使えるようにすることで、最終的に発生する使用済燃料の数を削減するもので、このような燃料のことを「高燃焼度燃料」と呼びます。ただし、高燃焼度燃料にも欠点があり、燃料の反応性が高いために、安全管理にはより注意が必要になります。「エルビア入り高燃焼度燃料」は安全性の高い次世代の高燃焼度燃料として提案されているもので、エルビアというレアアースの一種を燃料に僅かに混ぜることで、余分な反応を抑えることが出来ます。 エルビア入り高燃焼度燃料では、燃料にエルビアが入っていることを確認することが、安全上重要です。そこで、我々はPGA(即発ガンマ線分析)という分析法を応用し、高燃焼度燃料中のエルビア濃度を測定する手法を開発しました。研究の結果、0.2%のエルビア濃度測定精度を達成し、この手法の有効性が確認されました。PGAを利用するには、通常、研究用原子炉など大きな施設が必要ですが、この研究では、大幅に小型な装置を用いてPGAを行いました。小型装置によるPGAが一般的に実現すれば、様々な分野に応用が可能で、この研究成果はその一歩でもあります。				
<b>【その後の取り組み】</b> この研究課題が完了したころに、東日本大震災が発生し、福島第一原子力発電所の事故に繋がりました。これを受けて、原子力発電の安全性について疑問がもたれています。今、第一に取り組むべき原子力の技術研究課題は福島第一発電所の処置に係るもので、その次が原子力発電の安全性に係るものではないかと思えます。この研究で用いた分析技術は、次世代燃料開発だけでなく、破損した原子炉から得られたサンプルの分析などにも応用できる可能性があり、そういった方向での取り組みも検討しています。原子力発電に係る技術者として、こうした技術的課題に対して少しでも貢献できればと考えています。				



PGA を用いたエルビア濃度測定装置のイメージ図



実験結果の一例

中央の枠内が測定対象のエルビア信号波形

代表的な  
特許、論文、受賞  
など

- 1) 「Preliminary Experimental Results on Measurement of Erbium Content in Uranium Fuel Using PGAA」、Teruhisa Tkamatsu, Naoki Sugimura, Tadafumi Sano、ANS 2010 Winter Meeting
- 2) 「PGA を用いた次世代高燃焼度燃料用エルビア濃度測定法の研究 (3) 中性子照射場の改良」、高松 輝久、杉村 直紀、石垣 敏弘、泥谷 雅之、佐野 忠史、林 裁瑛、日本原子力学会 2011 年春の年会
- 3) 「PGA を用いた次世代高燃焼度燃料用エルビア濃度測定法の研究 (4) ウラン試料を用いた PGA 実験」、佐野 忠史、林 裁瑛、高松 輝久、杉村 直紀、石垣 敏弘、泥谷 雅之、日本原子力学会 2011 年春の年会
- 4) 「Measurement of Erbium Content in Uranium Fuel Using PGAA with a Compact Neutron Source」、Takamatsu, Naoki Sugimura, Tadafumi Sano、ICAPP 2011

課題名	ステンレス鋼亀裂先端部における応力印加下その場欠陥解析			
参画機関	日本原子力研究開発機構			
事業規模	期間	平成21～22年度	総額	18百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  前川 雅樹 日本原子力研究開発機構  先端基礎研究センター 研究員</p>				
				
<p><b>【研究概要】</b>  原子炉で多用されているステンレス鋼は、応力腐食割れ(SCC)により予測寿命より早く割れが生じます。SCCが生じにくいといわれている低炭素ステンレス鋼でさえSCCが発見され、メカニズムの解明が急務となっています。最近の分析結果からは、原子が一つ抜けたような微細な欠陥(原子空孔)が集まることで亀裂が進展するのではないかという新しい考えが生まれています。しかし、亀裂先端でそのような原子空孔の振る舞いを精度良く観察することは、これまでの測定手法では不可能でした。そこで本研究では、新たな視点から材料を解析する方法として、原子空孔を高感度に検出できる陽電子消滅法を用います。ここでは、世界最高レベルの高い空間分解能で空孔分布測定が行える陽電子マイクロビーム装置を開発し、亀裂先端という特定領域での測定を行いました。亀裂を発生させながら原子空孔分布を測定したところ、実際に亀裂先端で原子空孔が集積している様子の観察に初めて成功しました。さらに、原子空孔は亀裂進展により発生する局所的な材料の変形によって主に発生していることも明らかにしました。これらは陽電子マイクロビームを用いた空孔分布測定を行うことによってはじめて得られた、これまでにない観察結果です。</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b>  亀裂先端部での原子空孔の振る舞いには、まだまだ不明な点があります。亀裂先端のどのような場所を、どのような速度で、どのような温度やひずみで移動して行くのかなどを、これまでに無く高い精度で明らかにすることで、SCCが発生しにくい材料の開発や、SCC抑制に効果的な金属加工の方法などを見出すことができるかもしれません。そのために、陽電子マイクロビーム装置の高性能化といった、測定技術の進展についても取り組んでいます。</p>				

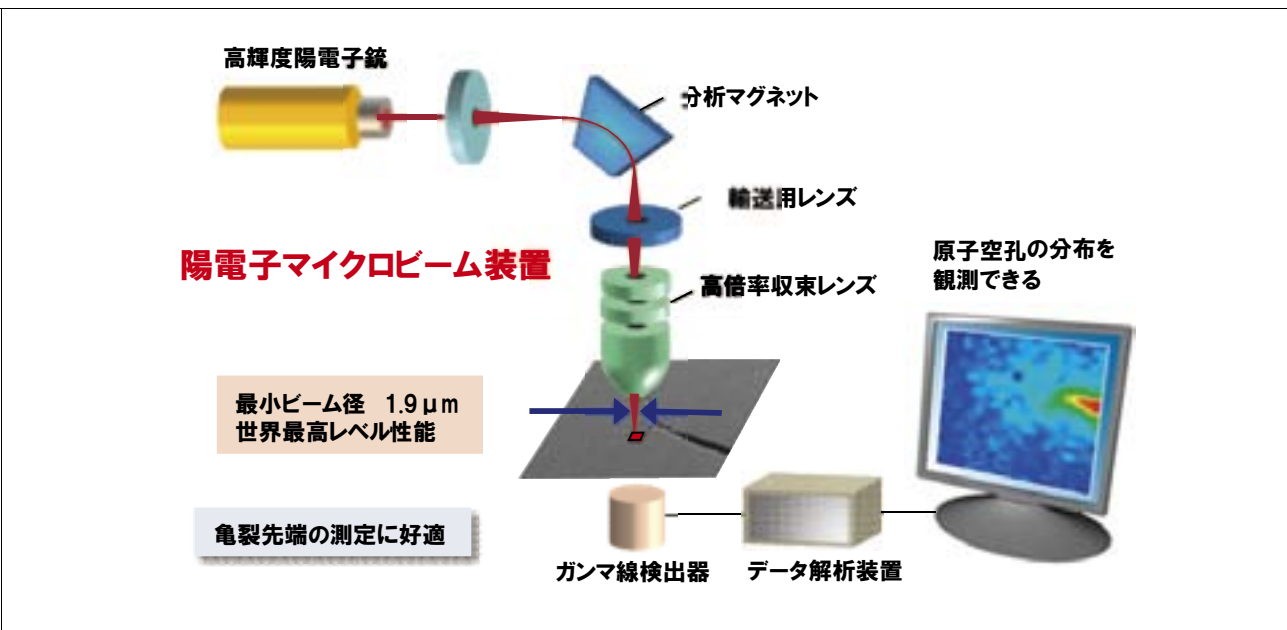


図1 測定に用いた陽電子マイクロビーム装置の概略図。亀裂先端などにある原子空孔の分布を観察できる。

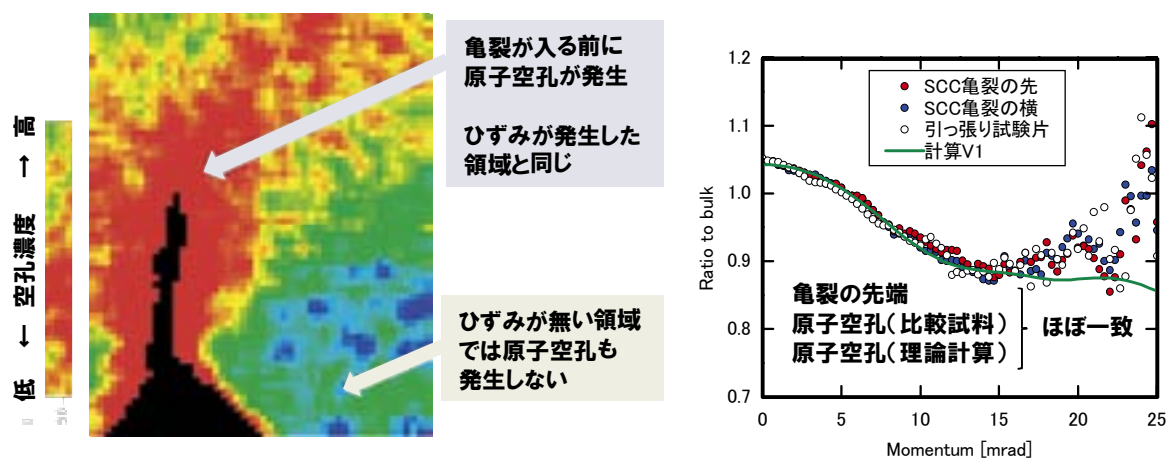


図2 SCC 亀裂周辺において観測された原子空孔濃度の分布 (左)。ひずみが生じる場所でのみ原子空孔が発生している。ガンマ線の詳細な測定 (右) から、これが原子が一つだけ抜けた孔であることを突き止めた。

代表的な特許、論文、受賞など

- 1) "Vacancy defects in a stress-corrosion-cracked Type 304 stainless steel investigated by positron annihilation spectroscopy", A. Yabuuchi, M. Maekawa, A. Kawasuso, J. of Nucl. Mater. 419 (2011) 9-14.
- 2) "Evaluation of stainless steel under tensile stress using positron microbeam", M. Maekawa, A. Yabuuchi and A. Kawasuso, J. of Phys. Conf. Ser., 225 (2010) 012033.
- 3) "Positron microbeam study on vacancy generation caused by stress corrosion crack propagation in austenitic stainless steels", A. Yabuuchi, M. Maekawa and A. Kawasuso, J. of Phys. Conf. Ser., 262 (2011) 012067.

課題名	沸騰機構解明のための伝熱面温度／熱流束同時計測技術の開発研究			
参画機関	日本原子力研究開発機構			
事業規模	期間	平成22～23年度	総額	20百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  劉 維 日本原子力研究開発機構  原子力基礎工学研究部門 研究主幹</p> 				
<p><b>【研究概要】</b>  沸騰熱伝達は、沸騰水型原子炉、熱交換器、ボイラー等の基幹技術として数多くの研究が行われてきましたが、そのメカニズムについては完全には解明されていませんでした。本研究では、沸騰熱伝達機構を解明するために必要な伝熱面温度と熱流束分布を高密度かつ高速度で同時計測する技術を開発し、必要な実験データを取得し、沸騰熱伝達機構を解明することを目的としました。</p> <p>沸騰気泡直下伝熱面温度・熱流束分布を計測するには、①伝熱面上にセンサ等を設置しない非接触計測技術；②蒸気泡と伝熱面の接触領域は半径1mm程度であることから、1mmあたり数点の計測ができる高密度計測技術；及び③500Hz以上の周波数で変動する蒸気泡直下温度を計測できる技術が要求されます。</p> <p>これらの要求を満たすために、新型温度センサを開発し、伝熱面から深さ2μm未満の位置に1mmあたり最大6点の温度センサを設置する技術を確立しました。そして新型温度センサを設置した沸騰試験体を用いてプール沸騰実験を実施し、気泡周期における気泡直下伝熱面温度・熱流束分布及び気泡形状データを取得できました。気泡の形成に伴い、表面熱流束は急速に上昇します。可視化画像との比較から、固、気、液の三相界面近傍で熱流束が高いことが確認できることから、「三相界面近傍での伝熱が沸騰熱伝達を支配している」という沸騰熱伝達機構の仮説が妥当であることを実験的に明らかにしました。</p> <p><b>【その後の取り組み】</b>  高密度かつ高速度で伝熱面温度・熱流束同時計測技術の確立および沸騰伝熱機構の解明により、沸騰伝熱を利用する沸騰水型原子炉、火力発電所、化学プラントなどの工業機器の設計の高精度化に広く寄与できます。今後は、長焦点顕微レンズによる固気液三相界面を可視化すると共に、さまざまな実験条件でデータ数を増やし、統計的な手法を利用し、各パラメータの沸騰熱伝達の影響を調べ、高機能伝熱面の開発に繋げていきたいと考えています。</p>				



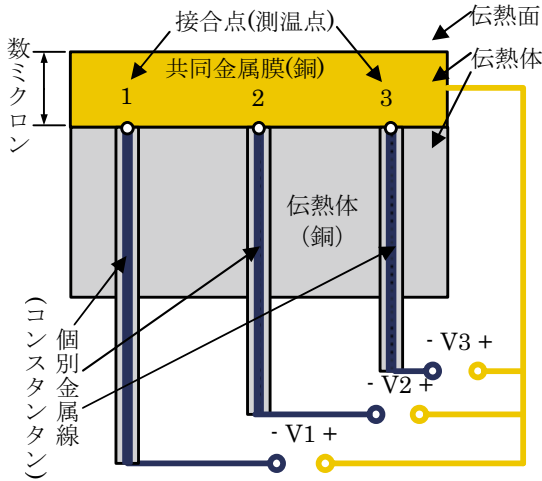


図1 新型温度センサ原理図

複数の個別金属線（コンスタンタン線）と一つの共同金属膜（銅）を持つ新型温度センサです。

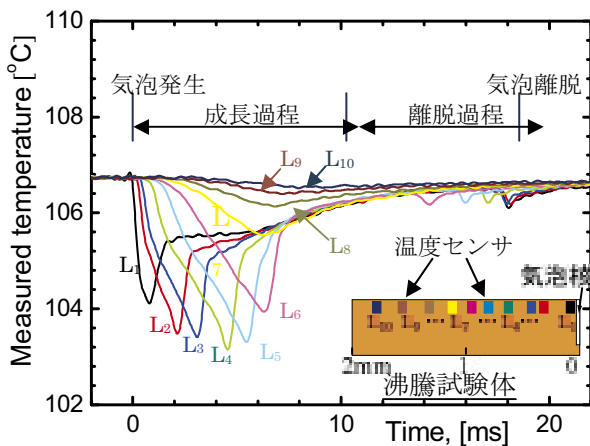


図3 計測した温度の時間変化

気泡の発生から離脱までの周期における気泡直下伝熱面の温度分布取得に成功しました。

三相界面近傍熱流束が高くなっています。沸騰熱伝達機構が三相界面伝熱モデルに近いことが分かりました。

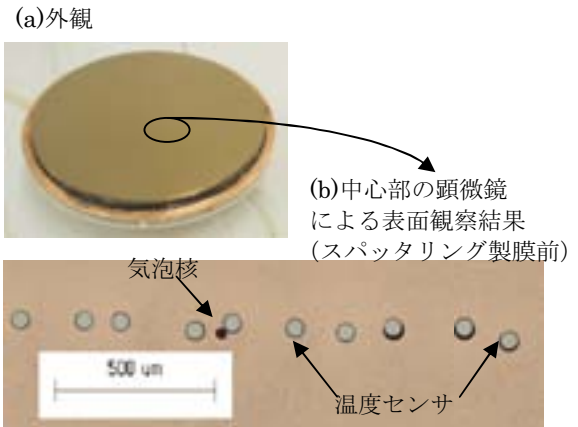


図2 新型温度センサを設置した沸騰試験体

新型温度センサを開発しました。伝熱面から深さ  $2 \mu\text{m}$  未満、 $1 \text{mm}$  当たり最大6点の温度センサを配置できる技術を確認しました。

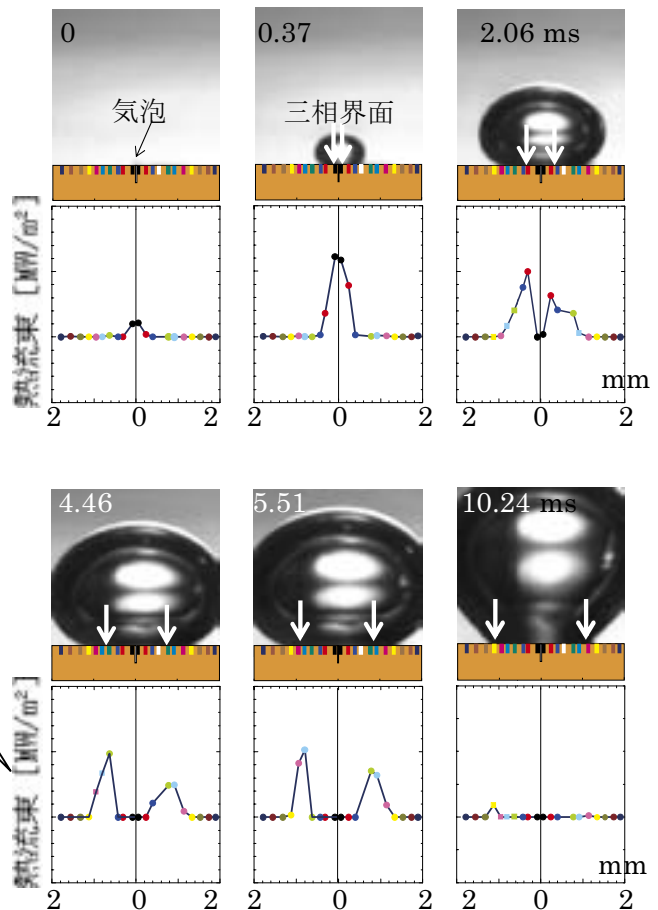



図4 成長過程における気泡下熱流束分布

代表的な特許、論文受賞など

- 1) Wei Liu, Kazuyuki Takase, Development of measurement technology for surface heat fluxes and temperatures, Nuclear Engineering and Design, Vol.249, pp.166-171
  - 2) Wei Liu, Taku Nagatake and Kazuyuki Takase, Proceedings of 8th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety, (2012)
- 表彰：平成25年2月、文部科学省原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ 若手表彰。

課題名	放射線がん治療時のオンラインマイクロサイズ線量計の開発			
参画機関	名古屋大学			
事業規模	期間	平成22～23年度	総額	18百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  渡辺 賢一 名古屋大学准教授  (大学院工学研究科マテリアル理工学専攻)</p>				
<p><b>【研究概要】</b>  放射線治療は、外科的手術、化学療法に並ぶがんの三大治療法の一つです。放射線治療技術は、日々進歩しており、腫瘍の無い部位への放射線照射量を極力減らし、かつ腫瘍には漏れなく放射線を照射し確実に腫瘍細胞をやっつけることを目指しています。このように近年の放射線治療は高度化されて、非常に複雑な照射が可能になってきています。一方で、どれだけの放射線が照射されたかについては、事前に詳細な計画立案・評価を行なった上で、使用する機器の健全性に関する確認を定期的に行うことで担保しているのが現状で、実際の治療中に患者さんの体内にどれだけの放射線が照射されているかをモニタリングすることは稀です。  そこで本研究では、超小型ゆえに少ない負担で患者さんの体内に挿入可能な放射線の線量計の開発を進めました。近年、デジタルX線フィルムとして用いられている輝尽性蛍光体と光ファイバを組み合わせることで、外径を1mmに抑え、放射線治療で一般的に照射される放射線量のおよそ千分の1にあたる1mGyから検知可能な線量計を実現しました。</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b>  現在、放射線医学総合研究所等で実施されている重粒子線治療時の体内線量モニタリングを目指し、基礎実験を進めています。重粒子線は非常に精細な線量分布を形成することが可能で、前立腺がんの治療時に中を通っている尿道を避けて照射することが検討されています。1回の治療で照射できる線量は、正常な部位に照射されてしまう線量で制限されていますが、尿道に照射される線量を抑えることで、治療を行う回数を減らすことが可能となります。このような新しい照射法を実施するためには、どれだけの線量が抑えられているかを確認することが求められており、今回開発した線量計が期待を集めています。</p>				

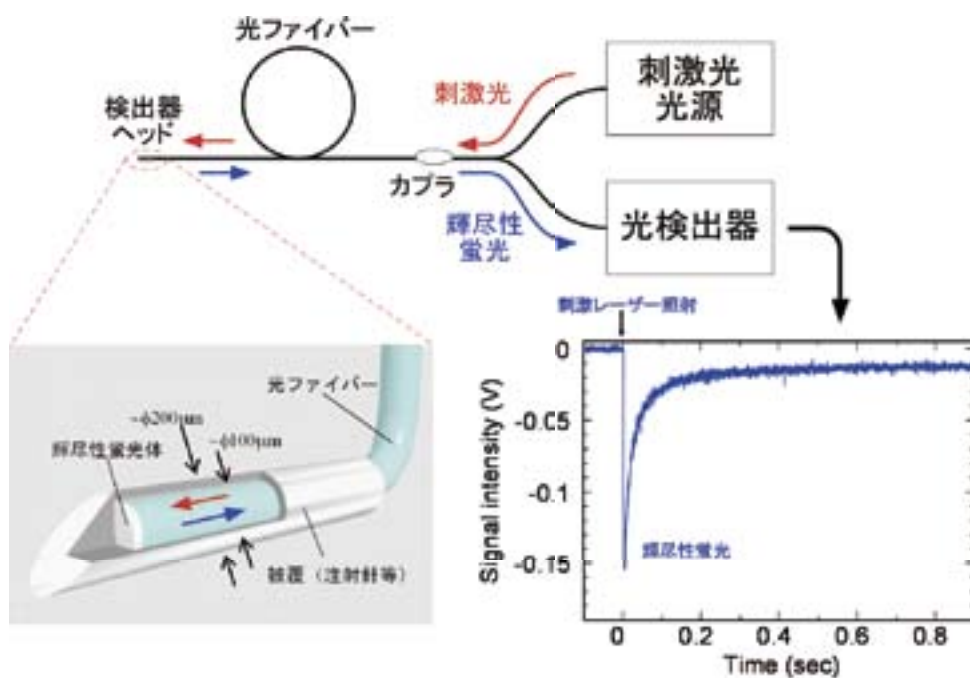


図1 開発したオンラインマイクロサイズ線量計の概念図  
光ファイバを介してセンサ部である輝尽性蛍光体に蓄積された放射線照射情報を遠隔読み出しすることができます。



図2 作製したマイクロサイズ線量計の外観写真  
光ファイバの外径とほぼ同じ直径のセンサ部を実現（約1mm）。  
体内挿入時の患者さんの負担を軽減できます。

代表的な  
特許、論文  
受賞など

- 1) Kotaro Nakahashi, Kenichi Watanabe, Atsushi Yamazaki, Akira Uritani, Eiji Ariga, "Feasibility Study on a Micro-size Dosimeter Using an Optical Fiber Probe Based on a Photostimulable Phosphorescence", *Radiation Measurements*, **46**, 1547-1550 (2011)

課題名	RIMS を用いた高精度な燃料タグガス分析のためのレーザー光学系の開発			
参画機関	日本原子力研究開発機構			
事業規模	期間	平成22～23年度	総額	18百万円
<p><b>【研究代表者】</b>          岩田 圭弘 日本原子力研究開発機構          大洗研究開発センター高速実験炉部          高速炉技術課 博士研究員</p>				
				
<p><b>【研究概要】</b>          高速炉では、燃料から発生する熱を液体ナトリウムで伝達して電気に変換しています。燃料は原子炉容器内に密に配置されていますので、燃料が破損した場合に短時間でかつ正確に破損燃料を見つける必要があります。破損燃料位置の同定には、レーザーを用いた手法が有効です。燃料ピンに予めクリプトン及びキセノンガスを封入し、それらの同位体比が燃料集合体間で異なるように設定しておきます。特定の燃料が破損した場合には、原子炉容器上部のアルゴンガスに漏れ出してきたクリプトン又はキセノン原子のみをレーザーでイオン化して、質量分析計で同位体比を測定することで破損した燃料集合体を同定できます。</p> <p>本研究では、レーザー波長の変換過程及びレーザー光量の有効活用に着目して光学系を改良し、クリプトン及びキセノンのイオン化効率が飛躍的に向上しました。その結果、約40分の短時間測定で誤差3%という高精度な分析が可能となりました。これは、高速増殖原型炉「もんじゅ」で燃料が破損した場合に約99%の確率で破損燃料を含む集合体を同定可能なことを意味し、高速炉の安全性向上に大きく貢献できるものと期待されます。</p> <p>(RIMS : Resonance Ionization Mass Spectrometry、レーザー共鳴イオン化質量分析法)</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b>          本研究の成果は、高速炉の安全運転を実現する上でレーザー分析が強力なツールであることを示唆しています。今後は、レーザー波長の安定化対策など、操作性向上を目指した研究を進めていきたいと考えています。</p> <p>レーザー分析を切り口として、高速炉開発に貢献するとともに、原子力の新しい分野を開拓していきたいですね。</p>				

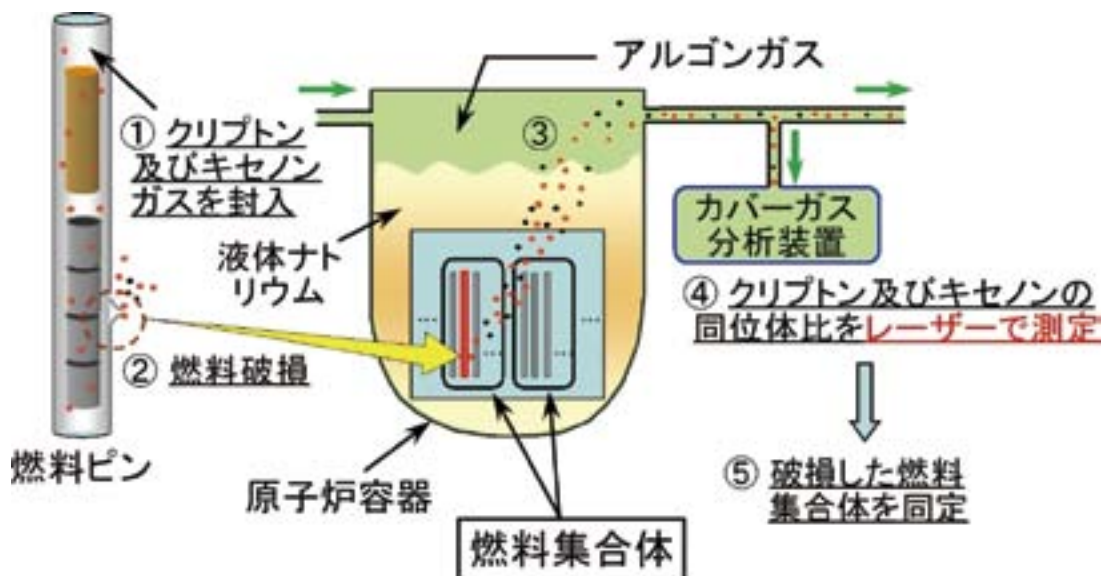


図1 レーザーを用いた破損燃料位置の同定方法

燃料ピンから放出されたクリプトン及びキセノンの同位体比をレーザーを用いて測定します。

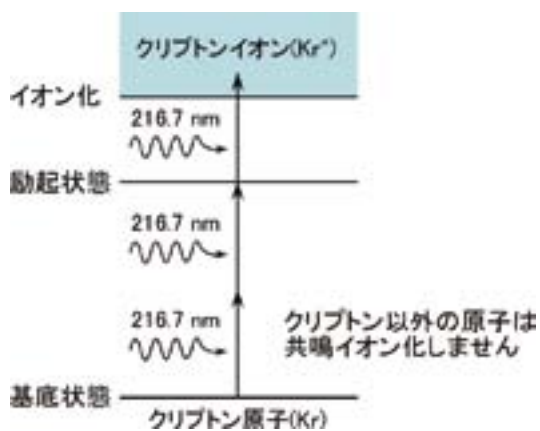


図2 共鳴イオン化の仕組み (クリプトンの場合)

特定の波長をもつレーザーによりクリプトン又はキセノン原子のみイオン化させることができます。

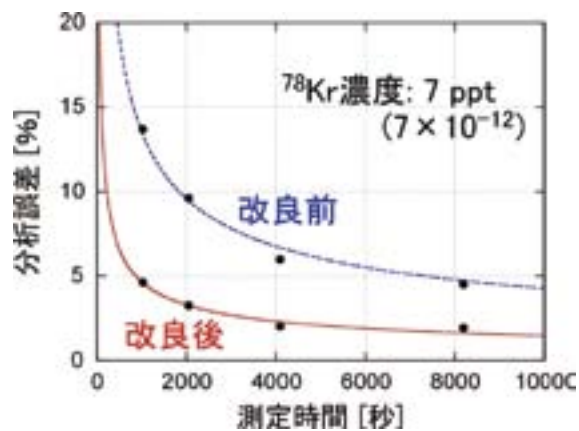


図3 光学系の改良による同位体比分析性能の向上

光学系の改良によりイオン化効率を向上させて、短時間で精度の良い測定が可能となりました。

代表的な特許、論文受賞など

- 1) Yoshihiro Iwata, Chikara Ito, Hideki Harano, "Reliability evaluation for failed fuel identification using resonance ionization mass spectrometry", Hyperfine Interactions DOI: 10.1007/s10751-013-0816-7 (2013).
- 2) Yoshihiro Iwata, Hideki Harano, Chikara Ito and Takafumi Aoyama, "Upgrade of the Resonance Ionization Mass Spectrometer for Precise Identification of Failed Fuel in a Fast Reactor", AIP Conference Proceedings 1412 (2011) 295-302.

課題名	摩擦攪拌接合による Na 高速炉炉心材料の新たな接合技術に関する研究			
参画機関	東北大学、日本原子力研究開発機構			
事業規模	期間	平成22～23年度	総額	19百万円
<p><b>【研究代表者】</b> 佐藤 裕 東北大学准教授（材料システム工学専攻）</p>				
				
<p><b>【研究概要】</b></p> <p>次世代の高速炉ラップ管を製造する場合、2種類の異なった特性を有する鋼材（耐スエリング性に優れたフェライト鋼と SUS316 オーステナイト系ステンレス鋼）を接合する必要があります。</p> <p>しかし、既存の溶接・接合技術では、異なった鋼材を接合することが難しいため、本研究では、摩擦攪拌接合（FSW）という新しい固相接合法を用いて、炉心材料用の異なった鋼材の接合に取り組みました。また、攪拌部の特性は、材料学的なマイクロ構造に依存し、マイクロ構造は接合条件によって変化するため、これらの関連性をデータベース化しました。</p> <p>本研究を通じて、FSW による異材接合を欠陥なく行える接合条件を明らかにしました。攪拌部は母材よりも強化されており、引張破断試験においても両鋼材の接合界面から破断しないことを確認し、異材接合技術を確立しました。また、接合条件を調整して接合時のツール温度を 700℃以下に保つことにより、極めて微細なマイクロ構造を効果的に得ることができ、その結果、攪拌部の諸特性を高められることを明らかにしました。</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b></p> <p>事業途中、東日本大震災が発生して本学も甚大なダメージを受け、一時事業推進が危ぶまれましたが、無事最終目標に達することができ、大変自信になりました。現在は、本研究により達成された異材接合技術を炉心構造体に利用するため、接合後熱処理による靱性改善効果について継続して研究を進めています。また、本研究の成果は、特性の大きく異なる鋼材の異材接合が FSW により可能であることを示しており、原子力用途以外への適用も広がる可能性を秘めています。今後もこの研究分野の発展にチャレンジし、原子力分野の安全性向上、更には他の適用分野への拡大へ貢献していきたいと思っております。</p>				

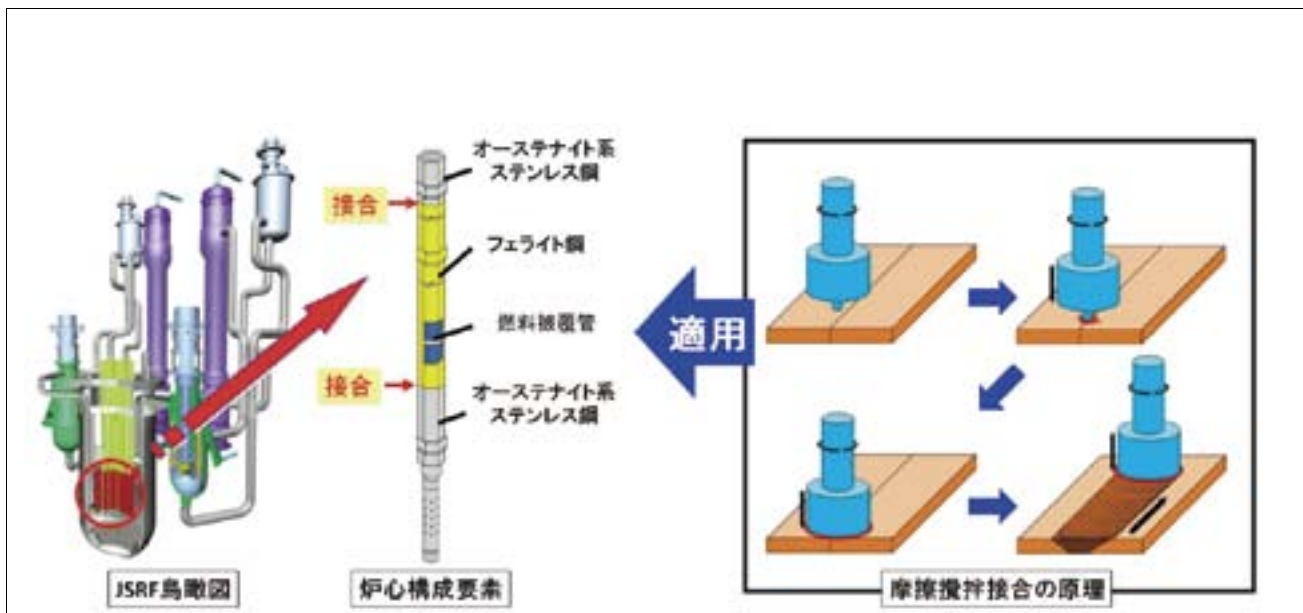
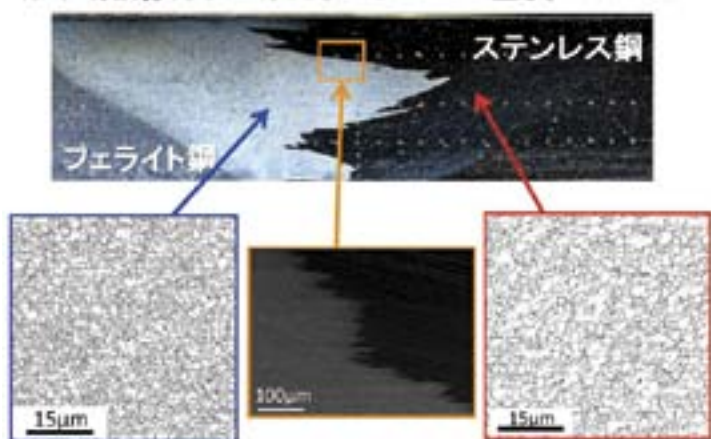
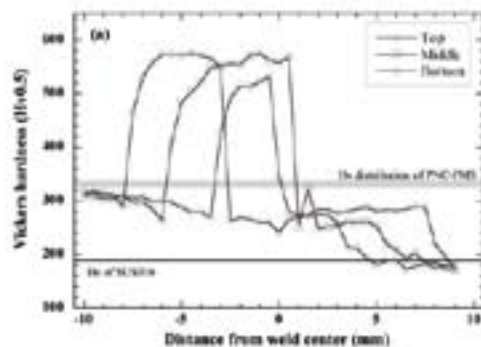


図1 本研究の概念

無欠陥接合に成功 (ツール温度: 680°C)



極めて微細なマイクロ構造  
強固な接合界面



接合部で硬さ上昇

攪拌部:  
ステンレス鋼の1.7倍の強度  
(室温)

図2 本研究成果のまとめ

代表的な  
特許、論文  
受賞など

- 1) Y.S. Sato, H. Kokawa, Y. Yano, Y. Sekio, "Effect of welding parameters on the microstructure and mechanical properties of a friction stir welded 11Cr-ferritic/martensitic steel," Friction Stir Welding and Processing VII, TMS, 91-99 (2013).
- 2) Y. Yano, Y.S. Sato, Y. Sekio, S. Ohtsuka, T. Kaito, R. Ogawa, H. Kokawa, "Mechanical properties of friction stir welded 11 Cr-ferritic/martensitic steel," Journal of Nuclear Materials, in press (2013).

表彰:

- 1) 平成25年2月、文部科学省原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ 若手表彰。

課題名	化学溶解を用いた窒化物燃料の革新的乾式再処理プロセスの研究			
参画機関	日本原子力研究開発機構			
事業規模	期間	平成22～23年度	総額	18百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  佐藤 匠 日本原子力研究開発機構  原子力基礎工学研究部門 研究員</p>				
<p><b>【研究概要】</b>  窒化物燃料は高熱伝導率かつ高融点のため安全余裕度が高く、高いマイナーアクチノイド（MA）含有率で効率的に核変換を行うための燃料として期待されています。原子力機構では、加速器駆動システム(ADS)による MA 核変換用の、約 60mol%の不活性母材を含む窒化物燃料について、使用済み燃料の乾式再処理を含んだ燃料サイクルの研究開発を行ってきました。これまでに検討してきた熔融塩電解による窒化物燃料の乾式再処理では、不活性母材の添加による窒化物の陽極溶解速度の低下と、再処理工程で組成が異なる2種類の製品ができることが課題でした。</p> <p>本研究では、窒化物の化学溶解と向流多段抽出を組み合わせた乾式再処理プロセスを提案し、主要要素技術である熔融塩中で窒化物燃料を化学溶解する技術の開発と、プロセスの成立性の評価を行いました。このプロセスは、再処理工程からの製品の均一化、処理速度の向上などの利点があります。PuN の化学溶解試験では、目標とする 550℃、加熱時間 12 時間の条件で、CdCl<sub>2</sub> との反応により大部分の Pu を熔融塩中に溶解でき、不活性母材である ZrN 及び TiN は不溶解残さとなることを明らかにしました。マスバランスの評価では、目標とするアクチノイド回収率と希土類の除染係数の値を達成でき、このプロセスが原理的に成立することを確認できました。</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b>  現在は、これまで未着手だった燃料ピンのせん断工程や、不溶解残さとなる不活性母材を分離・回収してリサイクルまたは処分する手法について検討しています。この研究で開発した熔融塩中で窒化物燃料を化学溶解する技術は、従来の熔融塩電解によるプロセスでも、陽極残さを溶解するために必要不可欠であるため、技術基盤として有用です。これまでは実験室規模の実験による検討を進めてきましたが、今後は工学規模の実用機器開発も視野に入れて窒化物燃料の乾式再処理についての研究を進めていきたいと思っております。</p>				



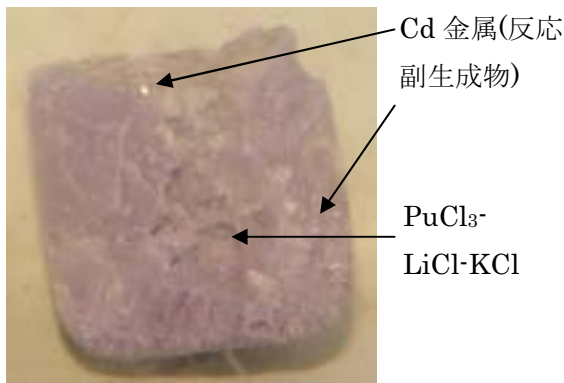


図1 PuN 溶解試験後の試料

PuN と CdCl<sub>2</sub> との反応によって、PuCl<sub>3</sub> が得られました。

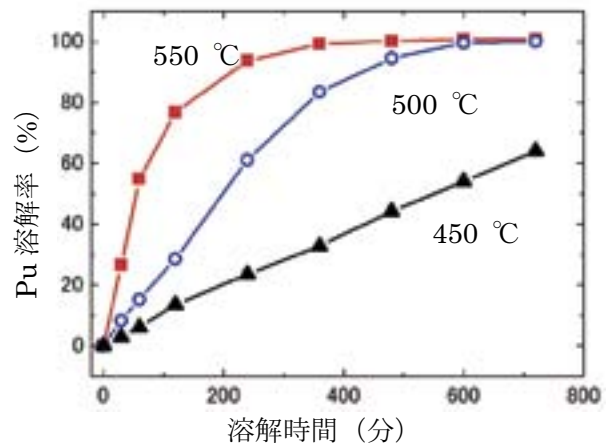


図2 温度による PuN 溶解速度の比較

目標とした溶解温度 550°C 以下、加熱時間 12h 以内の条件で、Pu の溶解率はほぼ 100% となりました。

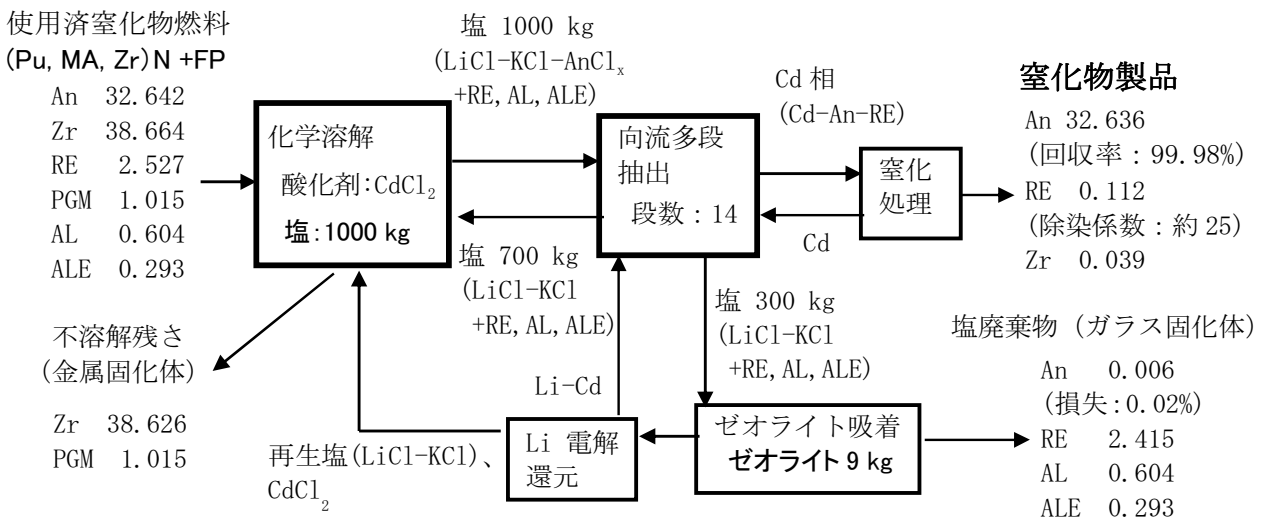



図3 化学溶解による再処理プロセスのマスバランス評価結果 (一日の処理量、単位: kg)

目標とする MA を含むアクチノイド元素の回収率 99.95% 以上、希土類 (RE) の除染係数 4 以上を満たし、このプロセスが原理的に成立することが確認できました。

代表的な特許、論文受賞など

- 1) 佐藤匠、西原健司、高野公秀、熔融塩中での CdCl<sub>2</sub> による窒化プルトニウムの化学溶解挙動、日本原子力学会 2012 年秋の大会
- 2) T. Satoh, et al., "Development of Reprocessing Process of Spent Nitride Fuel by Chemical Dissolution in Molten Salt –Preliminary Results on Rare-Earth Mononitride–," Proc. GLOBAL 2011, Dec. 11-16, 2011, Makuhari, Japan.
- 3) T. Satoh, et al., "Development of Reprocessing Process of Spent Nitride Fuel by Chemical Dissolution in Molten Salt –Result on Plutonium Nitride Containing Inert Matrix Materials–," Proc. 12th Information Exchange Meeting Actinide and Fission Product Partitioning, Sep. 24-27, 2012, Prague, Czech.

課題名	原子力機器用鉄クロム系材料の相分離現象に関する基礎的研究			
参画機関	京都大学			
事業規模	期間	平成22～23年度	総額	20百万円
<p><b>【研究代表者】</b>          笠田 竜太 京都大学准教授（エネルギー理工学研究所）</p>				
<p><b>【研究概要】</b>          鉄クロム系合金は、ステンレス鋼や耐熱鋼の基本組成であり、原子力のみならず日常生活においても重要な材料です。この鉄クロム系合金を 475℃付近の温度で長時間使用すると、時間とともに脆くなってしまいう「475℃脆化」が生じる場合があります。475℃脆化は、そもそも均一に混ざり合っていた鉄クロム系合金中の鉄原子とクロム原子が、475℃付近の温度で保持することによって、それぞれの濃度が高くなる領域がナノメートル（10億分の1メートル）スケールで形成する「相分離現象」によって引き起こされることが知られています。材料が脆くなると、機器の安全な利用上問題となるため、相分離現象のメカニズムの理解と、早期検出方法の開発は極めて重要となります。加えて、中性子照射下で用いられる原子力機器材料の場合、相分離現象に及ぼす照射影響の理解が必要となります。そこで本研究では、イオン加速器照射実験とナノインデンテーション硬さ試験を組み合わせた実験結果をもとに、相分離過程を支配する拡散過程のモデル化を軸とした研究を進めるとともに、新たな相分離検出法としての陽電子消滅測定法の適用性について検証しました。          重要な成果として、鉄クロム系合金の相分離の初期過程、しかも 475℃脆化として強度特性に変化が現れる前の段階を、陽電子消滅同時係数法によって検出可能であることを世界で初めて実証しました（図1）。また、鉄クロム合金系のナノインデンテーション硬さ試験を活用することによって、数百ナノメートル程度の深さ領域から取得したナノインデンテーション硬さからバルク材料の硬さを導出可能な新しい解析モデルの妥当性を確認し、イオン照射材の硬さ評価法として確立することができました（図2）。</p> <p><b>【その後の取り組み】</b>          本事業の終了後、鉄クロム合金の中性子照射実験および照射後試験を進めています。また、第一原理計算によって、鉄クロム合金の鉄サイトにおける陽電子の優先的消滅挙動を実験と理論の両面より明らかにしつつあります。更に、本事業で得られた知見と合わせて、ナノインデンテーション法によるイオン照射材の強度評価の高度化・高精度化に向けた多角的なアプローチを展開しています。</p>				

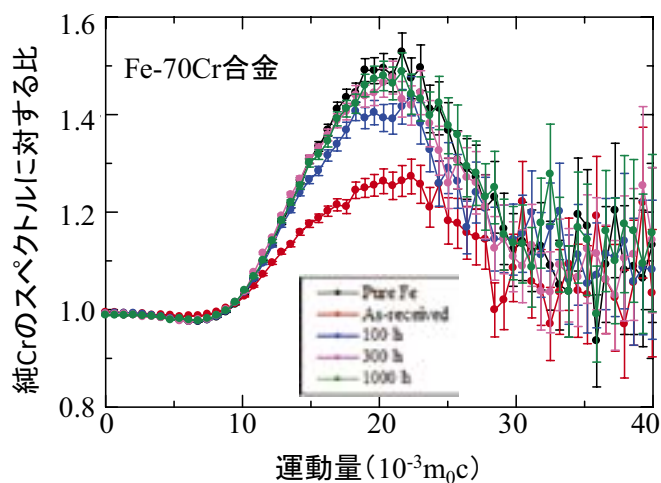
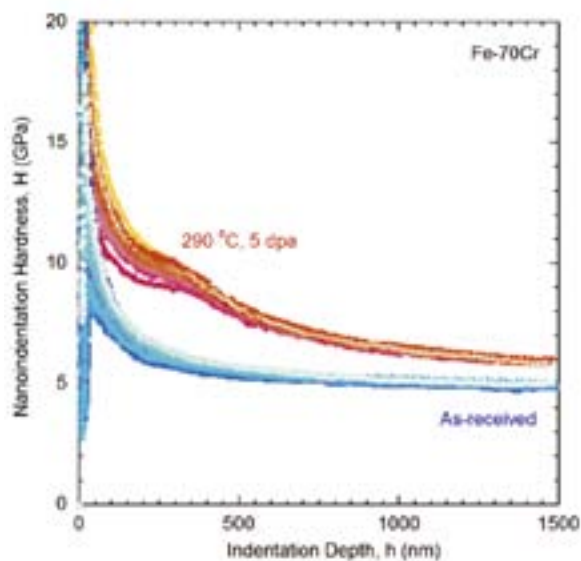


図1 鉄-クロム(70%)合金の同時計数法による運動量分布比率曲線の形状変化。本合金では、約50%程度の陽電子が鉄原子に帰属する電子と消滅することを示唆しており、陽電子がクロムより鉄の電子と多く消滅する傾向にあることを示している。また、熱時効前475°Cでの熱時効により、時間とともに純鉄(Pure Fe)に近い分布形状へ変化しており、鉄原子との消滅割合が増加していることが明確に示されている。このことは、ナノメートルスケールでの相分離現象に対応しており、極めて初期の相分離を本手法により検出できることが確認できた。

図2 受入まま(As-received)およびイオン照射(290°C、5dpa)した鉄-クロム(70%)合金のナノインデンテーション硬さの押し込み深さ依存性。受入まま材では押し込み深さの減少にともなう硬さの増加、すなわちインデンテーションサイズ効果が見られます。また、イオン照射材では、イオン照射領域から非照射領域への遷移に伴う押し込み深さ依存性の変化が見られます。このようなデータからイオン照射領域のバルク材料相当の硬さを導く手法を確立しました。



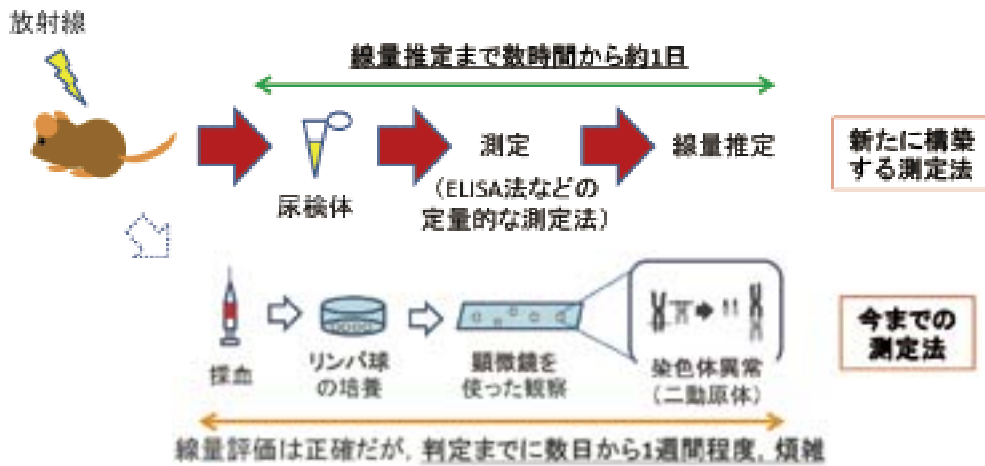
代表的な  
特許、論文  
受賞など

- [1] 笠田竜太、佐藤統一、「原子力機器用鉄クロム系材料の相分離現象に関する基礎的研究」、日本原子力学会秋の年会 (H23. 9. 21)
- [2] 佐藤統一、笠田竜太、「陽電子消滅分光法を用いた Fe-Cr 二元系合金の相分離現象の検出」、日本金属学会秋期大会 (H23. 10. 9)
- [3] 佐藤統一、笠田竜太、「陽電子消滅分光法を用いた Fe-Cr 二元系合金の相分離現象の検出 (2)」、日本金属学会秋期大会 (H24. 9. 18)
- [4] 笠田竜太、佐藤統一、「原子力機器用鉄クロム系材料の相分離現象に関する基礎的研究 (2)」、日本原子力学会秋の年会 (H24. 9. 21)

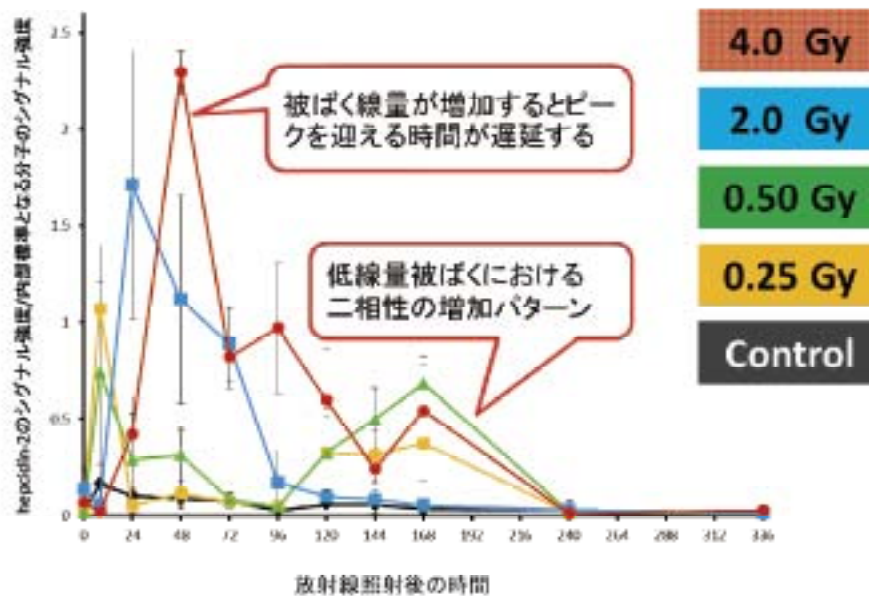
課題名	放射線被ばくのバイオマーカー測定法開発の基盤研究		
参画機関	広島大学		
事業規模	期間	平成22～23年度	総額
			19百万円
<p><b>【研究代表者】</b> 飯塚 大輔 広島大学助教（原爆放射線医科学研究所）</p> 			
<p><b>【研究概要】</b></p> <p>原子力発電所事故などの大規模な放射線災害では、多量の放射線を被曝するケースがあります。その際、被曝線量は個人被ばく線量計によりわかりますが、線量計を持っていない場合はどれくらい放射線に被曝したのかわかりません。そこで用いられるのが血液中のリンパ球の染色体異常を指標とした生物学的線量評価法（バイオドシメトリー）です。この手法は線量の推定は正確ですが、手技が煩雑で熟練を要することが知られています。本研究では採取が容易な尿に含まれる分子を指標としたバイオマーカー測定法を開発を行うことを目的としています。</p> <p>放射線照射したマウスから継時的に尿を採取し、幾つかの方法で尿を処理した後に質量分析計と呼ばれる分子の量やその分子がどういったものであるのかを明らかにできる機械で調べることにより新たに4個のバイオマーカー候補となる分子を見つけることができました。また、すでに見つけ出していた hepcidin-2 と呼ばれる分子の詳しい解析を行ったところ、ある程度の放射線量を推定できるような検出結果が得られましたが、単純な変化パターンではなかったため、正確な推定は困難であると思われました。</p> <p><b>【その後の取り組み】</b></p> <p>私たちが当初考えていたよりも放射線被ばくのバイオマーカー候補となる分子を見つけることが難しく、また見つかった分子もマウスにしかないものであったり、困難が続きました。しかしながら、質量分析計は技術革新が目覚ましく、新しい機械や手法を用いることにより、今後、新規の候補分子を見つける可能性が高いこと、ならびにマウスしかない分子もその分子の機能を調べることにより、ヒトにあるほかの分子が同じように候補となる可能性があることなどから、今後も精力的に放射線被ばくのバイオマーカー探索を行っていく予定です。最終的には尿の中で新たに見つけた分子で放射線量を迅速かつ簡便に測定できる方法を考案したいと考えています。</p>			

ねらい

採取が簡単な尿の中にどの程度放射線に被曝したか推定できる分子を見つけ出し、それらの分子を用いた迅速な測定法の開発を行う



被ばく時における尿中hepcidin-2の経時変化と線量依存性(質量分析計での結果)



代表的な特許、論文受賞など

【発論文】

1. 飯塚 大輔, 河合 秀彦, 吉岡 進, 泉 俊輔, 西村 まゆみ, 島田 義也, 鈴木 文男, 「Hepcidin 2はマウスにおける放射線被ばくの尿中バイオマーカーである」, 広島医学, in press.

課題名	放射線活性化型プロドラッグの創出に向けた分子設計に関する研究			
参画機関	京都大学			
事業規模	期間	平成22～23年度	総額	16百万円
<p><b>【研究代表者】</b>  田邊 一仁 京都大学准教授  (大学院工学研究科  物質エネルギー化学専攻)</p>				
				
<p><b>【研究概要】</b>  がんの治療では、より高い生存率が求められると共に、より高い機能温存と形態の保持が要求されます。こうした障害が比較的少ない治療法の一つとして、抗がん剤を使う化学療法と放射線療法を併用する化学放射線療法があります。この治療法は手術に匹敵する治療成績を示すことから、がん治療におけるダメージの少ない新手法として期待されています。しかし、使用する抗がん剤の副作用等の理由から、患者の容態によっては適用できないといった問題点が指摘されてきました。</p> <p>本研究では、化学放射線療法に応用しやすく、かつ副作用の軽い放射線活性化型プロドラッグの開発を進めました。プロドラッグとは、化合物そのものは毒性を示しませんが、放射線(X線)照射を受けると、化学構造が活性な薬剤へと変わり、病変部位で選択的に薬効を示すスマートな薬剤です。具体的には、次の3種のプロドラッグ候補化合物群を合成し、評価しました。第一に各種抗がん剤に化学的に修飾を加えた「放射線活性化型プロドラッグ抗がん剤」、第二に mRNA の切断活性をもつ機能性 DNA オリゴマーを化学修飾することで作成した「遺伝子を標的とする放射線活性化型核酸医薬品」、第三に放射線照射により崩壊し、内包した薬剤を放出する「放射線活性化型分子カプセル」を開発しました。いずれも、数 Gy の放射線照射で高い薬効を発現することを確認しました。</p>				
<p><b>【その後の取り組み】</b>  現時点では、プロドラッグ活性化のために低いものでも 6Gy の放射線照射が必要です。実際の実用化を目指すためには、より低線量での活性化が課題です。現在、種々の官能基変換を進め、1 Gy 未満の線量で活性化が可能な分子を探索しています。実際の医療現場に使える薬剤となるには、まだまだ道のりは険しいですが、「独創的なものづくり」ができることが化学・放射線化学の醍醐味です。学生とともに楽しく研究を進め、実験を積み重ねていきたいと思っています。</p>				

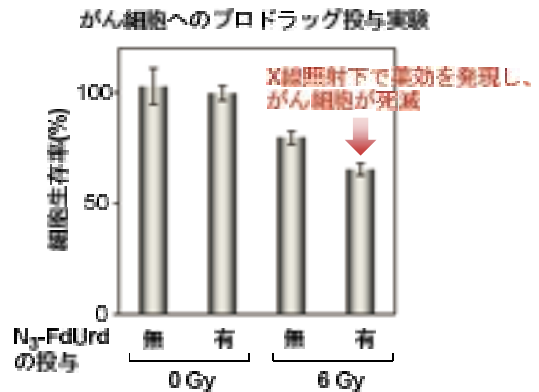
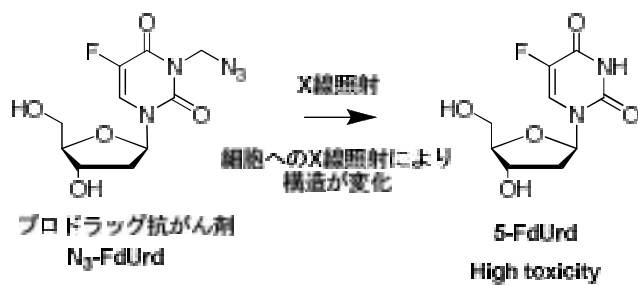


図1 放射線活性化型プロドラッグ抗がん剤の例：アジドメチル基をもつ抗がん剤5-FdUrdプロドラッグのX線による活性化<sup>1)</sup>

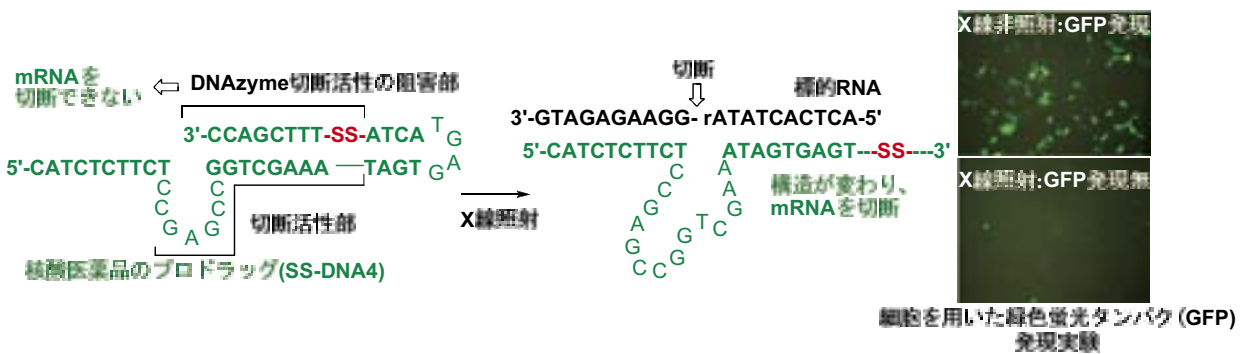


図2 放射線活性化型核酸医薬品：放射線照射下で特定の遺伝子発現を抑制

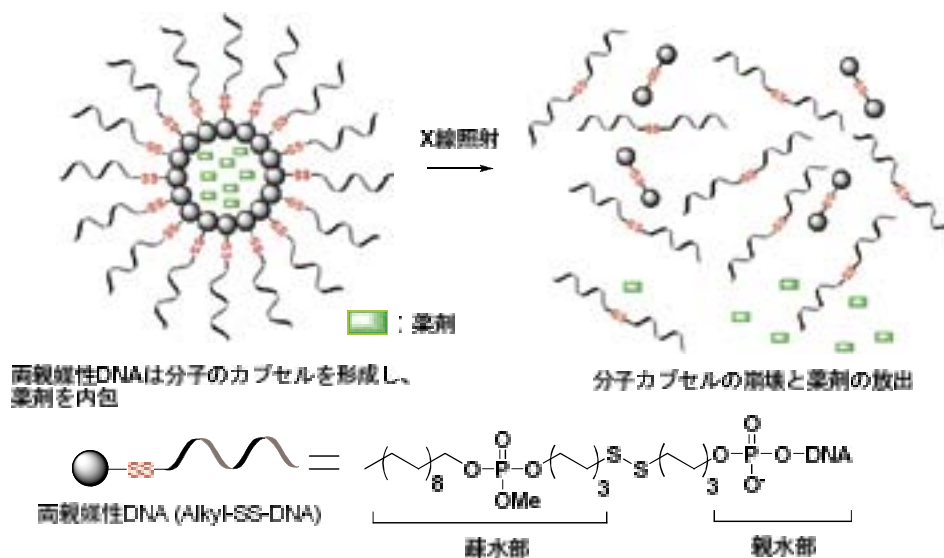



図3 放射線照射により薬剤を放出する放射線活性化型分子カプセル<sup>2), 3)</sup>

代表的な特許、論文受賞など

- 1) Reductive activation of 5-fluorodeoxyuridine prodrug possessing azide methyl group by hypoxic X-irradiation, K. Tanabe et al. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* 22, 1682–1685, (2012)
- 2) Radiolytic reduction characteristics of drug-encapsulating DNA aggregates possessing disulfide bond, K. Tanabe et al. *Bioconjugate Chem.* 23, 1909–1914, (2012)
- 3) Aggregate formation and radiolytic degradation of amphiphilic DNA block copolymer possessing disulfide bond, K. Tanabe et al. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* 22, 7045–7047, (2012).

課題名	着床前期の胚における放射線に対する防御機構の解明			
参画機関	大阪市立大学			
事業規模	期間	平成22～23年度	総額	19百万円
<p><b>【研究代表者】</b> 吉田 佳世 大阪市立大学准教授（分子生物学専攻）</p>				
<p><b>【研究概要】</b></p> <p>原子力の安全対策にとって、人体に対する放射線の影響を解析することは重要です。本研究の目的は、着床前期の胚に対する放射線の影響を調べ、胚のもつ防御機構を解明することです。マウス初期胚にX線を照射後、胚盤胞期胚までの発生を顕微鏡で形態の変化を観察した結果、X線の線量の増加に伴って、正常発生率は低下し、異常な発生や死亡した胚が増加しました。8細胞期胚よりも早い前核期胚ではより死亡率が高かったことから、複数の細胞の集合体である8細胞期胚では細胞同士の連携や細胞の代替により発生することが示されました。</p> <p>また、緑色の蛍光タンパク（GFP）を発現しているマウス胚性幹細胞（ES細胞）にX線を照射し、マウス初期胚にマイクロインジェクションにより注入したキメラ胚について、ES細胞へのX線照射の影響が胚発生にどのように影響するか顕微鏡を用いて経時的に観察した結果、初期胚に直接X線を照射した場合に比べ、X線に対する影響が少なく、胚の細胞が発生を補っていることが示唆されました。</p> <p>このようなキメラ胚の中で、細胞がアポトーシスを起こしているかどうかキットを用いて調べた結果、アポトーシスを起こしている細胞が胚の外側に局在し、排除されていることがわかりました。</p> <p><b>【その後の取り組み】</b></p> <p>本研究により、8細胞期胚にX線を照射した場合でも、胚が胚盤胞になったり、あるいは収縮したりすることが繰り返し観察されました。また、1個の胚のなかに、放射線を照射されたES細胞がある場合、それらが他の細胞と相互作用し、アポトーシスを起こした細胞の排除など、動的な調和の中にあることもわかりました。これからは、さらに遺伝子の変異をもつものを用いて新たな解析のシステムを確立し、放射線防御における細胞のコミュニケーションを明らかにしたいと考えています。</p>				



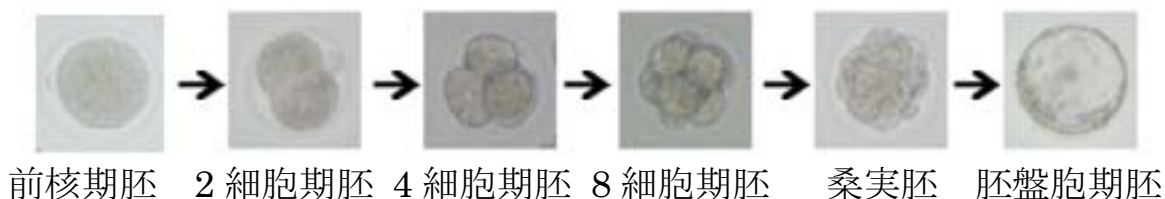


図1 マウス初期発生過程

マウスは受精直後の前核期から分裂を繰り返し、8細胞期胚、桑実胚、胚盤胞期胚へと発生していきます。

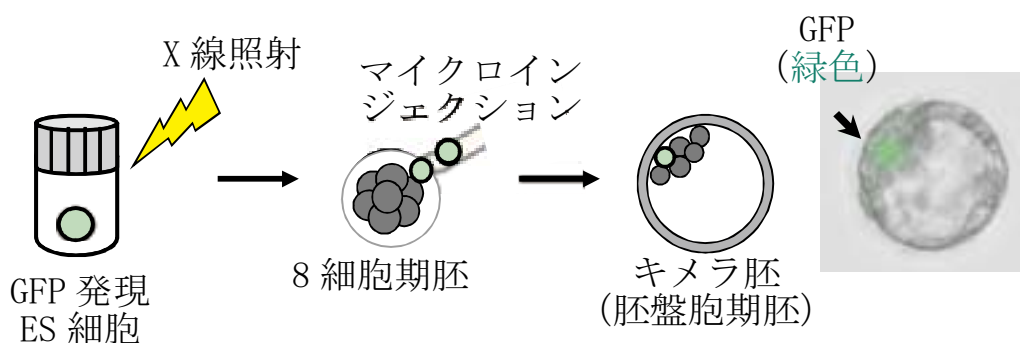


図2 マウス ES 細胞の初期胚への注入

X線照射したマウス ES 細胞を8細胞期胚にマイクロインジェクションにより注入し、その後の発生を観察しました。

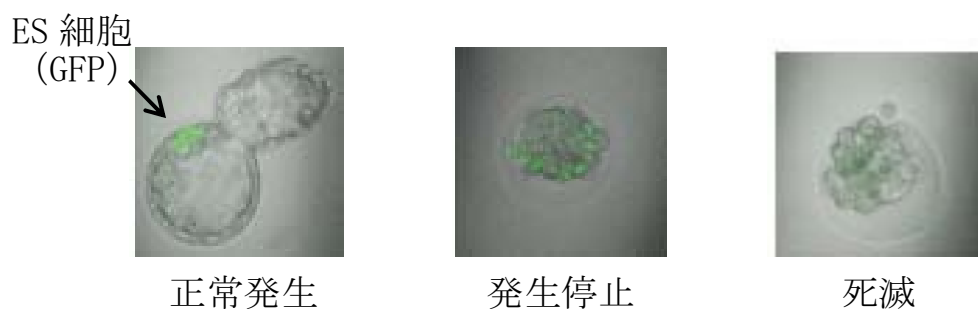


図3 ES細胞を注入した胚の発生と異常

正常に発生した胚の中でマウス ES 細胞は GFP タンパクで増殖し緑色に光っています (左)。また、X線照射により、発生が停止する胚 (中央)、さらに死滅する胚 (右) もありました。

代表的な  
特許、論文  
受賞など

1) 吉田佳世、吉田周平、笠井清美、森田隆：「マウス初期胚に対する X 線の影響の解析」  
第 35 回日本分子生物学会年会、福岡県福岡国際会議場・マリメッセ福岡、2012 年 12 月

## 《参考》

### 採択課題一覧（平成20～24年度）

#### 1. 戦略的原子力共同研究プログラム

（平成20年度採択課題）

- ・高経年配管系に関する耐震裕度の定量評価に関する研究
- ・クリプトビオシスとリンクした放射線体制機構の解明研究
- ・新規R-BTP吸着剤による簡素化MA分離プロセスの開発
- ・加速器中性子源による癌中性子捕捉療法の高度化に関する研究
- ・実用化が予想される食品への放射線利用に関する基礎研究
- ・原子炉型中性子小角散乱分光器群の先鋭的高度化に関する研究
- ・HLW地層処分地選定に関する日本型合意形成モデルの構築
- ・学校教育現場との対話に基づく原子力・放射線学習プログラム開発

（平成21年度採択課題）

- ・先進燃料被覆管材料の水素化および照射効果の解明に関する研究
- ・超効率的量子篩（ふるい）作用による軽分子同位体分離用ナノ細孔体の開発
- ・低線量率長期照射による個体レベルでの遺伝子発現変化の解析
- ・白色中性子源を用いた中性子線量計の革新的校正法に関する研究
- ・植物における量子ビーム誘発突然変異の分子機構解明に関する研究

（平成22年度採択課題）

- ・核燃料に関する計算組織学的な解析技術の開発
- ・地震加速度付加時の気液二相流の詳細予測技術高度化に関する研究
- ・高機能性キセロゲルによる原子力レアメタルの選択的分離法の開発
- ・小児期被ばくの放射線感受性とDNA修復に関する研究
- ・国際核燃料サイクルシステムの構築と持続的運営に関する研究

（平成23年度採択課題）

- ・電気化学的吸着脱離によるコンパクトで再利用可能なセシウム分離回収システム
- ・粒界制御法適用による高信頼性原子炉材料の開発
- ・JMTRを用いた放射化法による $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ の国産化技術開発

（平成24年度採択課題）

- ・原子力復旧・防災のための高エネルギーX線検査システムの開発
- ・原子炉容器下部ヘッダの溶融物挙動の機構論的研究
- ・新機能水素吸蔵材料による無電力型爆発防止システムの開発研究

- ・表面・界面効果を考慮した溶融燃料中の揮発性核分裂生成物の挙動評価
- ・リスクマネジメント基盤技術としての地震リスク評価の信頼度向上に関する研究
- ・原子力発電所事故時の放出量および再飛散量推定手法高度化に関する研究
- ・多様なセシウム汚染廃棄物の中間・最終処分安全評価のための機関連携による多角的研究
- ・放射性物質により汚染された植物バイオマスの減量化総合処理システムの開発研究
- ・原子力産業への社会的規制とリスク・ガバナンスに関する研究
- ・原子力施設の地震・津波リスクおよび放射線の健康リスクに関する専門家と市民のための熟議の社会実験研究
- ・「原子力カムラ」の境界を越えるためのコミュニケーション・フィールドの試行
- ・原発事故のミティゲーション措置に関する貨幣的評価

## 2. 研究炉・ホットラボ等活用研究プログラム

(平成20年度採択課題)

- ・京大炉（KUR）及びホットラボの利用高度化に関する研究
- ・中性子照射超伝導材料の高磁場、極低温下での物性に関する研究
- ・先進的ながん診断・治療を実現するRI-DDS開発研究
- ・広域連携ホットラボ利用によるアクチノイド研究
- ・もんじゅ性能試験データを用いた高速炉技術に関する先端的研究

(平成21年度採択課題)

- ・研究炉JRR-3中性子輸送の高効率化が拓く新しい物質・生命科学-機能場における水・プロトンの輸送現象の解明を目指して-
- ・SPS法と低温物性測定を利用した難焼結性（U, Th）O<sub>2</sub>ペレットの燃料物性評価

(平成22年度採択課題)

- ・原子炉圧力容器オーバーレイクラッドの劣化機構に関する研究
- ・FFAG加速器を用いた加速器駆動未臨界炉用材料挙動の解明

## 3. 若手原子力研究プログラム

(平成20年度採択課題)

- ・極微量放射性核種AMSによる原子力施設環境モニタリング研究
- ・原子炉予防保全高度化のための新型高温水質センサの開発
- ・マイクロ・ナノ試験による個別粒界強度評価に関する研究
- ・革新的原子力エレクトロニクス技術を活用した原子炉制御・保全システムに関する基礎研究

- ・静電力と表面機能制御によるナノ流体核種分離システムの開発
- ・放射線誘発プリン介在型細胞間情報伝達の解明とがん治療への応用
- ・放射線発がんと突然変異誘発の総括的説明
- ・超高感度広エネルギー領域ガンマ線検出器CROSSの開発
- ・イオン液体含浸有機隔膜によるLi同位体分離技術に関する研究
- ・DNA二重鎖切断の認識・修復の初期過程に関する研究

(平成21年度採択課題)

- ・放射線発がんにおける非遺伝子変異的プロセスの解明
- ・重イオンビームによる植物変異当固定の利用のための基盤研究
- ・核拡散リスクの確率論的定量評価手法の開発
- ・硫化反応を用いる核燃料再処理法の基礎研究
- ・中高エネルギー陽子による核破砕片の系統測定に関する研究
- ・放射光を用いたFBR炉心構造材料に関する研究
- ・PGAを用いた次世代高燃焼度燃料用エルビア濃度測定法の研究
- ・ステンレス鋼亀裂先端部における応力印加下その場欠陥解析

(平成22年度採択課題)

- ・沸騰機構解明のための伝熱面温度／熱流束同時計測技術の開発研究
- ・放射線がん治療時のオンラインマイクロサイズ線量計の開発
- ・RIMSを用いた高精度な燃料タグガス分析のためのレーザー光学系の開発
- ・摩擦攪拌接合によるNa高速炉炉心材料の新たな接合技術に関する研究
- ・化学溶解を用いた窒化物燃料の革新的乾式再処理プロセスの研究
- ・原子力機器用鉄クロム系材料の相分離現象に関する基礎的研究
- ・放射線被ばくのバイオマーカー測定法開発の基盤研究
- ・放射線活性型プロドラッグの創出に向けた分子設計に関する研究
- ・着床前期の胚における放射線に対する防御機構の解明



## サイエンスプラザ

【交通】 JR総武線、営団有楽町線・南北線、都営新宿線  
市ヶ谷駅 徒歩10分

お問い合わせ先

独立行政法人

科学技術振興機構

原子力業務室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ5階

Tel : 03-3238-7681 Fax : 03-3238-7695

URL : <http://www.jst.go.jp/nrd/nuclear.html>