

平成 29 年度  
共用施設(PASTA&SPICE、NASBEE、X/  $\gamma$ 線照射装置)  
成果報告書

**2017 Annual Report of the Research Project  
with NIRS Electrostatic Accelerators**

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構  
放射線医学総合研究所



# 平成29年度共用施設(PASTA&SPICE、NASBEE、X/γ線照射装置) 成果報告書 目次

## PIXE関連課題

課題番号	課題代表者	題名	報告書ページ
P16-CNU01	武田志乃	環境から生物に蓄積されるウランおよび重金属元素の動態解析	3
P16-R&D01	及川将一	PIXE分析装置における高度化技術開発(R&D)	7
P16-SHT01	武田志乃	マイクロPIXEによる生体試料中微量元素の局在量解析手法の検討	11
P17-TSH01	下川卓志	放射線による組織損傷応答に関する萌芽研究	15
P17-TY001	武田志乃	PIXE分析法による水生生物の体内元素分布・局在の解析	19

## SPICE関連課題

課題番号	課題代表者	題名	報告書ページ
S16-AK001	小林亜利紗	ヒト正常及びヒトがん細胞間における放射線誘発バystanダー細胞応答の解析	25
S16-IOL01	小西輝昭	マイクロビーム照射法を応用した放射線誘発防御細胞応答に関する研究	29
S16-IOL02	小西輝昭	The Importance of the Primary and Secondary Bystander Effects Cross-Talk between Human Lung Cancer and Lung Normal Cells after Proton Microbeam Irradiation	33
S16-R&D01	小西輝昭	マイクロビーム細胞照射装置SPICEの研究 & デベロプメント(R & D)	37

## NASBEE関連課題

課題番号	課題代表者	題名	報告書ページ
16CV0001	濱野毅	中性子発生用ターゲットのためのターゲット耐性に関する研究	41
16CV0002	吉井裕	熱外中性子測定用電離箱による加速器中性子場の評価	43
16CV0003	濱野毅	BNCT標準化のためのホウ素量と中性子線量の評価解析	47
16CV0004	吉井裕	ポリマーゲル線量計を用いた中性子線量測定	49
16CV0005	吉井裕	中性子照射された歯のインビボEPR信号の測定とγ線の寄与の検討	51
16CV0006	中島徹夫	硫黄化合物の放射線防護作用に関する研究	55
16CV0007	濱野毅	SOF検出器による熱中性子のリアルタイム測定技術の開発	59
16CV0008	吉井裕	PVK-KIゲル線量計によるリアルタイム測定技術の開発	63
16CV0009	小川原亮	中性子混合照射場評価のためのモニタ検出器の研究開発	65

## 施設共用関連課題

課題番号	課題代表者	題名	報告書ページ
2016-009	赤堀清崇	BNCT用中性子モニターの開発	69
2016-012	望月玲於	ツバキ花粉におけるセシウムおよびストロンチウムの動態解析	71
2016-013	難波一輝	デジタル回路用耐ソフトエラーラッチの耐放射線性能比較	75
2017-003	八高 隆雄	複合構成材の放射線遮蔽特性	79

# PIXE 関連課題



## 生体ウラン濃集の機序に関する研究:骨移行に関する基礎検討

(P16-CNU01)

○沼子千弥<sup>a</sup>、吉田峻規<sup>b</sup>、板倉雄一<sup>b</sup>、及川将一<sup>c</sup>、武田志乃<sup>c</sup>

a:千葉大学大学院理学研究院、b:千葉大学大学院融合理工学府、c:放射線医学総合研究所

廃炉作業が進行し、不慮の事態も起こりえる将来への準備として、ウランがどのような生体組織にどのようにとりこまれるのか、そしてそれらの毒性についての知見を得ておくことは重要である。武田らは、生体に取り込まれたウランが腎臓に蓄積し腎障害を発現することにいち早く注目し、ラットを使ったウラン投与実験によりその発現機序の研究を続けている[1,2]。いったん腎臓に蓄積されたウランは、尿細管上皮の細胞が破壊された後、時間経過とともに減少するが、その後、ウランは骨に移動し蓄積することが他の研究グループにより報告されている[3]。

天然に産する主要なウラン鉱石として、閃ウラン鉱( $\text{UO}_2$ )のほか燐灰ウラン石( $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10\text{-}12\text{H}_2\text{O}$ )がある。地球表層環境でウランは酸化を受けて 6 価のウランイオン( $\text{UO}_2^{2+}$ )として循環しており、溶解度の低いカルシウムのリン酸塩に固溶して鉱物となることが知られている。これと同様のことが生体内、特に高濃度にカルシウムやリン酸を沈着する骨や歯で起こることが類推される。そして骨の代謝の期間、ウランが骨に滞留する可能性が高いため、内部被曝やウランという元素自体の化学毒性による影響が最も大きな期間になることが危惧される。しかし、現在、骨に蓄積するウランの量や経時変化に関する研究はあまりなく、またその化学動態についての知見はほぼ皆無である。そこで本研究グループは、武田が実施しているラットのウラン投与実験の結果得られた骨の試料を用いて、腎臓と対応した骨へのウランの濃集機序の検討を開始した。

本年度は基礎検討として、ウランを投与していないラットの骨に含まれるウランの定量分析と骨の組織の中でのウランの分布を求めることを試みた。幼齢ラットから摘出した大腿骨の断面の凍結切片( $10\mu\text{m}$ )に調製し、マイクロ PIXE 分析を行った。その結果、主成分のカルシウム・リンに加えて、カリウム、硫黄、塩素が多く検出された。これに微量成分として鉄とウランを加えて 2 次元元素マッピングを行ったところ、骨の組織構造と対応した元素分布図を得ることができた。カルシウムとリンは関節軟骨にはほとんど存在せず、新生骨領域に局在していた。一方、カリウムや硫黄は新生骨領域よりも成長板付近で高い分布が認められた。また、ウランを投与していないラットの骨からは、ウランはほとんど検出されなかった。成熟個体になると骨凍結試料の切片が困難になることから、今後試料作成方法をさらに検討し、骨における経時的な元素動態に関する基礎データを収集してゆく予定である。また、バルクの元素の濃度についても、ICP-MS を用いて測定するための試料調製法を検討している。

～報告書(課題番号:P16-CNU01)～

謝辞

本研究成果の一部は JSPS 科研費 16H02971 (研究代表者 武田志乃) の補助を受けた。

参考文献

- [1] S. Homma-Takeda et al., Uranium dynamics and developmental sensitivity in rat kidney. *J. Appl. Toxicol.* 33(2013) 685-694.
- [2] S. Homma-Takeda et al., Cellular localization of uranium in the renal proximal tubules during acute renal uranium toxicity. *J. Appl. Toxicol.* 35(2015) 1594-1600.
- [3] J.D.T. Arruda-Neto et al., Long-term accumulation and microdistribution of uranium in the bone and marrow of beagle dog, *Int. J. Radiat. Biol.*, 80 (2004) 567-575.

## 平成 29 年度研究成果一覧

課題番号：P16-CNU01

課題名：生体ウラン濃集の機序に関する研究：骨移行に関する基礎検討

課題代表者：武田志乃

学会発表（口頭発表、ポスター発表、講演等）

1. 板倉雄一，武田 志乃，沼子 千弥，小西 輝昭，石原 弘  
ICP-MS による骨中ウラン分析のための試料調製法の検討  
日本放射線影響学会第 60 回大会, 2017-10-25～28.
2. 武田 志乃、瀧山和志、板倉雄一、小西輝昭、沼子千弥、上原章寛、佐藤修彰，  
寺田靖子、小久保 年章、石原弘、島田 義也  
ウラン投与ラット腎臓におけるウラン濃集部の動態解析  
日本放射線影響学会第 60 回大会, 2017-10-25～28.



## PIXE 分析装置における高度化技術開発

(P16-R&D01)

○及川将一<sup>a</sup>, 酢屋徳啓<sup>a</sup>, 石川剛弘<sup>a</sup>, 磯浩之<sup>b</sup>, 樋口有一<sup>b</sup>, 松田拓也<sup>b</sup>

a: 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 加速器工学部

b: (株) ネオス・テック

### <はじめに>

量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所の静電加速器棟には、最大ターミナル電圧 1.7 MV の High Voltage Engineering Europe B. V. (HVEE)製の Model4117MC+タンデトロン加速器が設置されており、3 MeV 程度の陽子線を利用した PIXE (Particle Induced X-ray Emission) 分析やマイクロビーム細胞照射などの実験に広く利用されている<sup>1)</sup>。

PIXE 分析法、または 2 次元分析可能なマイクロ PIXE 分析法は、多元素同時分析法として非常に有効なツールであり、国内外の研究機関において生体試料や環境試料などの分析に盛んに応用されている。当施設のマイクロ PIXE 分析装置では、幅広い研究分野における多様な着目元素に対応するため、イオンビーム分析技術に関する高度化技術開発を進めている。近年、歯科材料や口腔外科等の分野においてフッ素分析に関する要望が寄せられていたことから、軽元素分析技術の構築が新たな技術開発課題となっていた。しかし、ナトリウムよりも軽い元素の分析は、PIXE 分析法において一般的に使用する半導体検出器の窓材料(主にベリリウム)の制約によりあまり行われておらず、陽子線照射によって生じる即発 $\gamma$ 線を検出して元素分析を行う、PIGE (Particle Induced Gamma-ray Emission) 分析法が適用されているケースが多い。そこで本研究課題では、 $^{19}\text{F}(p, p'\gamma)^{19}\text{F}$  核反応により発生する比較的エネルギーの低い 110 keV の即発 $\gamma$ 線に着目し、既存の重元素 PIXE 分析用 CdTe 検出器(XR-100T-CdTe、Amptek 製)を応用したフッ素のマイクロ PIGE 分析の検討を進めている。

平成 27 年度は、計測回路等の条件を決定した上で、象牙化石試料を用いた実試料分析を実施した。平成 28 年度からは、 $^{19}\text{F}(p, p'\gamma)^{19}\text{F}$  核反応に共鳴幅の狭い複数の共鳴領域が存在する(例えば 0.935 MeV、1.421 MeV、1.940 MeV、2.322 MeV、2.563 MeV、2.789 MeV...etc)ことを活用し、タンデトロン加速器の加速電圧校正を行うことを主な目的として、加速粒子のエネルギー絶対値測定を進めている。平成 29 年度においては、陽子線のエネルギーが 3.4 MeV 以下の共鳴領域探索を実施したが、施設共用課題の事前準備(分析条件の決定等)やスキャナ電源(最大定格:  $\pm 3.75$  A,  $\pm 50$  V, Oxford Microbems Ltd. 製 OM-40e Scan Amplifier)の故障及び修理により、本研究課題に割り当てられたマシンタイムを数多く消費することとなり、想定したほどの進捗が得られなかった。スキャナ電源の故障については、マイクロ PIXE ユーザーの一部にもマシンタイムをキャンセルするなどの影響を及ぼしたが、平成 29 年度内に復旧を終え、平成 30 年度のマシンタイムが無事に実施されている状況である。本報告では、マシンタイムをキャンセルするまでに至ったスキャナ電源の故障及び修理事例について紹介する。

### ＜スキャナ電源の故障・修理事例の紹介＞

本研究にて使用する  $\text{SrF}_2$  標準試料は、シンチレータと同様(例えば  $\text{CaF}_2$ )のアルカリ土類金属ハロゲン化合物であり、ビーム照射によって照射エリアが発光する特徴を有している。平成 30 年 2 月 6 日、本研究課題のマシントイム中にターゲットをモニタするカメラ映像を観察すると、 $\text{SrF}_2$  標準試料上の発光は縦長のライン形状を示しており、X 方向のビームスキャンが出来ていないことに気付いた。また、それと同時に焦げた様な匂いを感じたことから、発生元を調査するとスキャナ電源付近であることが判明し、速やかに電源入力を遮断した。その後、故障部位を特定することを目的として電源を再投入すると、X スキャン側パワーユニットのホーロー抵抗(3 W, 0.47  $\Omega$ )が赤熱していることを確認した。また、スキャナ電源を一部分解して、電気回路の部品を詳細に調査してみると、赤熱していたホーロー抵抗上流に接続されていた MOSFET の端子間が短絡状態であることが判明した。これらの状況から、設置以来 20 年経過し経年劣化に起因する故障と考え、故障していない Y スキャン側パワーユニットも含めて、ホーロー抵抗と MOSFET の全交換修理を実施した。修理作業完了後に、Au グリッド(#2000)の走査透過イオン顕微像(STIM: Scanning transmission Ion Microscopy)を測定し、動作確認とスキャンのサイズ/縦横比の校正作業を実施した。その結果、修理前後でもスキャンのサイズ/縦横比に大きな違いは見られず、無事に安定的に動作していることを確認できた。



図 1. Oxford Microbeams Ltd. 製 OM-40e Scan Amplifier



図 2. (左)赤熱していたホーロー抵抗 (右)端子間が短絡状態だった MOSFET の一つ

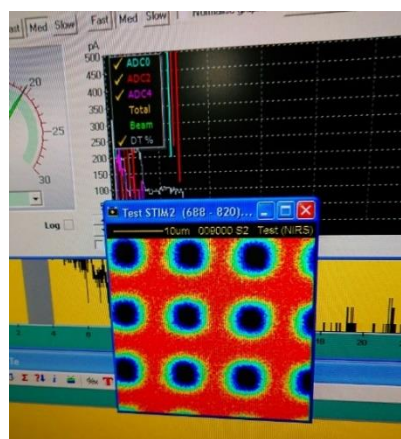


図 3. Au グリッド(#2000)の STIM 測定による動作確認の様子

#### 【参考文献】

- 1) M. Oikawa et al., *Int. J. PIXE* **25** (2015) 215-223.

## 平成 29 年度研究成果一覧

課題番号 : P16-R&D01

課題名 : PIXE 分析装置における高度化技術開発 (R&D)

課題代表者 : 及川将一

### 原著論文

1. 松井敏彦, 及川将一, 齊藤勝美; 街路樹の葉を用いた沿道大気中浮遊粒子の評価 ―葉付着粒子の形態学的分析と葉の元素マップからのアプローチ―, 環境技術, 45(2), 31 - 37, 2016-05.
2. Keiki NAKAMURA, Hidenori HAMBATA, Syozi NAKASHIMA, Alireza SADR, Toru NIKAI, Masakazu OIKAWA, Motohiro UO, Junji TAGAMI; Effects of experimental pastes containing surface pre-reacted glass ionomer fillers on inhibition of enamel demineralization, DENTAL MATERIALS JOURNAL, , 2017-03, DOI:doi:10.4012/dmj.2016-303.
3. Yuki Tsujii, Masakazu Oikawa, Kanehiro Kitayama; Significance of the localization of phosphorus among tissues on a cross-section of leaf lamina of Bornean tree species for phosphorus-use efficiency, Journal of Tropical Ecology, 33(3), 237 - 240, 2017-06, DOI:doi:10.1017/S0266467417000141.

### Proceedings

1. 及川将一, 酢屋徳啓, 石川剛弘, 小西輝昭, 磯浩之, 樋口有一, 松田拓也, 濱野毅  
放医研静電加速器施設 (PASTA & SPICE) の現状 2017  
第 30 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集, 印刷中.

### 学会発表 (口頭発表、ポスター発表、講演等)

1. 及川将一, 酢屋徳啓, 石川剛弘, 小西輝昭, 磯浩之, 樋口有一, 松田拓也, 濱野毅  
放医研静電加速器施設 (PASTA & SPICE) の現状 2017  
第 30 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会, 国立研究開発法人日本原子力研究  
開発機構東濃地科学センター, 2017-07-06.

## マイクロPIXEによるウラン投与幼若ラット組織中微量元素の

### 局在解析

(P16-SHT01)

○武田志乃<sup>a</sup>、吉田峻規<sup>b</sup>、板倉雄一<sup>a, b</sup>、沼子千弥<sup>c</sup>、小久保年章<sup>a</sup>、及川将一<sup>a</sup>

a:放射線医学総合研究所 b:千葉大学大学院融合理工学府 c:千葉大学大学院理学院

福島原発廃炉作業においては炉内で発生した燃料デブリや汚染水、廃棄物等の処理過程での二次的な汚染が危惧されることから、関連核種の生体影響に関する科学的知見の整備が求められている。中でもウランは腎毒性物質であり、幼齢期での腎毒性重症化が報告されているが、小児期影響のリスク評価の基礎となる小児期のウラン体内挙動に関するデータが乏しいのが現状である。これまでマイクロPIXE法や放射光蛍光X線分析やなどのマイクロビーム元素分析手法による成熟ラット腎臓内のウラン解析を行ってきた。その結果、ウランは腎臓内の下流部位近位尿細管に選択的に蓄積すること、下流部位近位尿細管上皮には数ミクロン四方程度の領域のウラン濃集部が存在すること、この濃集部はウラン単回投与後の急性腎毒性の回復期においても検出されること等が明らかとなった<sup>1, 2)</sup>。幼若ラットは成熟個体に比べ腎臓のウラン代謝が遅く、高容量では感受性が高くなることから、腎発達と対応した腎臓内ウラン挙動やウラン濃集部の残存性を把握する必要があると考えた。これまでマイクロPIXEにより、成熟個体においては近位尿細管下流領域でウランと共存するリンやカリウムの濃集部の散在が検出されている。そこで本研究では、ウランばく露の幼齢ラット腎臓について、マイクロPIXE分析によりリン・カリウムの腎臓動態と局所定量手法の検討を行った。

幼齢ラットに酢酸ウランを0.5あるいは2 mg/kgの割合で背部皮下に投与し、経日的に解剖して腎臓サンプルを得た。今年度はウランによる急性腎毒性初期の腎臓サンプルを中心に解析を行った。高用量モデルにおいては腎臓横断面試料に対し外辺部より皮質、髄質外辺部にかけての領域を250～2000 ミクロン四方の領域毎にスキャンすることにより、リン・カリウム濃集部を検出することができた。一方薄切分析標準によるリン・カリウムの定量化の検討では、1 ミクロンの空間分解能の測定において100～500 µg/gの範囲で良好な検量線が得られた。ウランが選択的に蓄積する近位尿細管下流領域では、成熟個体と同様に幼齢個体においても尿細管上皮上にリンの濃集部が散在した。これらのリン濃集部はカリウムに加えカルシウムの濃集を伴っており、成熟個体に比べカルシウムの共存が顕著であった。低用量モデルについては、外辺部から髄質外辺部にかけての領域でリンの濃集部は検出されなかった。両者とも1例ずつの結果であり、今後症例数や経時変化を考慮してデータを取得し、幼齢期における生体微量元素の腎臓動態特性を示し、ウラン残存性と対応必要があると考えられた。

～報告書(課題番号:P16-SHT01)～

謝辞

本研究成果の一部は JSPS 科研費 16H02971 の補助を受けた。

参考文献

- [1] S. Homma-Takeda et al., Uranium dynamics and developmental sensitivity in rat kidney. *J. Appl. Toxicol.* 33(2013) 685-694.
- [2] S. Homma-Takeda et al., Cellular localization of uranium in the renal proximal tubules during acute renal uranium toxicity. *J. Appl. Toxicol.* 35(2015) 1594-1600.

## 平成 29 年度研究成果一覧

課題番号 : P16-SHT01

課題名 : 生体ウラン濃集の機序に関する研究 : 骨移行に関する基礎検討

課題代表者 : 武田志乃

学会発表 (口頭発表、ポスター発表、講演等)

1. Shino Homma-Takeda, Yuichi Itakura, Chiya Numako, Masakazu Oikawa, Teruaki Konishi, Yasuko Terada, Toshiaki Kokubo, Hiroshi Ishihara, and Yoshiya Shimada  
Cellular localization and chemical condition of uranium in kidney of rats exposed to uranyl acetate by  $\mu$ PIXE, SR- $\mu$ XRF, and  $\mu$ XAFS  
1st International Symposium on Quantum Science and Technology, 2017/7/25.
2. 武田 志乃  
マイクロビーム分析による組織中ウランおよび生体微量元素の濃集部の解析  
第 36 回生体と金属・化学物質に関する研究会, 2017/8/7.
3. Shino Homma-Takeda, Chiya Numako, Masakazu Oikawa, Yasuko Terada, and Toshiaki Kokubo  
Distribution of phosphorus and uranium in kidney of rats exposed to uranyl acetate  
6th International Symposium on Metallomics, 2017/8/14.
4. 武田志乃  
バイオ・ケミカルイメージング : ウラン生体濃集と化学形変化.  
分子研研究会, 2017/8/27.
5. 武田志乃  
バイオ・ケミカルイメージングを目指して～ウラン腎臓内動態と組織影響～  
第 98 回日本化学会春季年会, 2018/3/23.



## イオンビーム育種研究への元素分析の有効性の検討

P17-TSH01

○下川 卓志<sup>a</sup>、東 梨佳子<sup>a,b</sup>、佐々木 伸大<sup>c</sup>

a: 放射線医学総合研究所 放射線障害治療研究部 障害分子機構解析研究チーム

b: 東邦大学大学院 理学研究科 生物分子科学専攻

c: 東洋大学 食環境科学部食環境科学科

### 報告書本文

研究は、HIMAC 共同利用で進められている粒子線を利用した育種研究・変異誘導研究の評価内容の拡大による、研究課題の推進を目的としている。HIMAC 共同利用研究では現在複数の課題において変異誘導研究が実施されている。すでに幾つかの変異体を得られており、その表現型や遺伝子変化の解析が徐々にでは有るが進んでいる。花の色や細胞の抗酸化能にはそれぞれ異なる元素の関与が知られているが、その解析は一般的には非常に困難である。放医研の有する PIXE による解析技術は、元素濃度を 2D マッピング可能であり、その解析能力はとても高い。HIMAC での変異誘導と PIXE による元素マッピング解析を組み合わせることにより、現在進められている変異誘導研究において、より詳細な分析が可能になるだけでなく、新しい解析指標の追加による育種研究の方向性の多様化をすすめることが可能となると考えられる。そこで、本課題では、HIMAC 共同利用での育種課題である J501 課題で対象となっている植物、及び今後照射を検討している候補植物を中心に元素分布解析の検討を行った。

今年度は前期 2 回、後期 2 回の解析 MT を利用して、HIMAC 課題において実際に育種実験に用いられているリンゴ果樹、カーネーション花卉と今後の実験対象候補にあがっている根野菜類と観賞植物の元素マッピングをおこなった。

カーネーション (*Dianthus caryophyllus*) の花卉とジュエルオーキッド (*Macodes sp.*) の葉はそのまま、または切断後に乾燥させ、解析に用いた。花卉の解析では、K の偏在が確認された。葉の解析では、葉脈に沿った Cl, K の高分布や Ca の高局在部位の点在が認められた。

ジャガイモ (*Solanum tuberosum*)、ニンジン (*Daucus carota*) などの根野菜類は薄く切断後に、乾燥させ、解析に用いた。今回解析に用いた根野菜では、実部分への高濃度の K の蓄積と皮部分への Fe などの蓄積が認められた。ただしその蓄積分布は、それぞれ大きく異なっており、来年度も引き続き解析を進め、その系統分類と蓄積分布の関係について明らかに

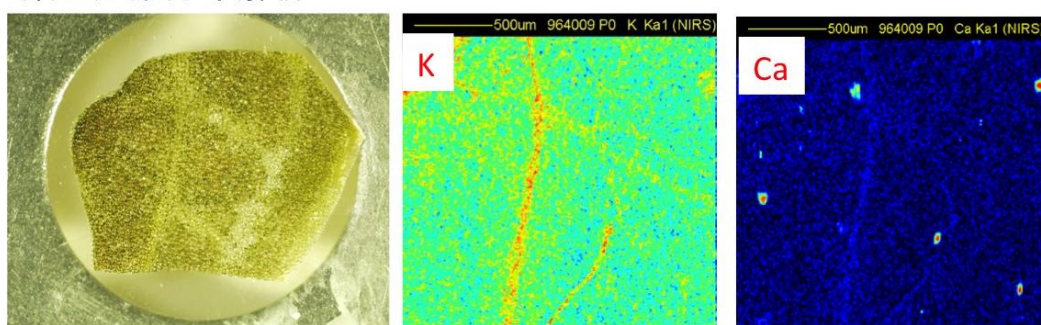
## ～報告書(課題番号:P17-TSH01)～

する予定である。

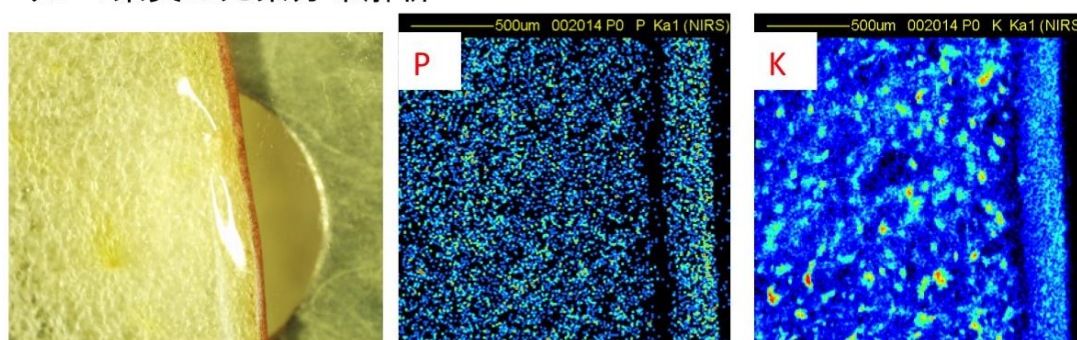
リンゴ (*Malus × domestica* cv. 'Fuji') は、皮を含む果実を薄く切断後に、乾燥させ、解析に用いた。乾燥サンプルは、果実部分が細胞ごとの網目構造となり、分布解析への影響が認められた。しかし、果皮及び果実への特徴的なカリウムの蓄積を確認することができた。

今回用いたどのサンプルの解析においても、PIXE の持つ元素分布の詳細なマッピングと高い定量性を確認することができた。このことは、J501 課題で進める育種研究の解析手段の一つとして PIXE の有効性を示すものである。今後も引き続き育種対象植物などの解析を進め、イオンビームにより樹立した変異体を用いた、元素を起点とする機能解析の可能性を検討していく予定である。

### 葉の元素分布解析



### リンゴ果実の元素分布解析



～報告書(課題番号:P17-TSH01)～

## 平成 29 年度研究成果一覧

課題番号：P17-TSH01

課題名：イオンビーム育種研究への元素分析の有効性の検討

課題代表者：下川卓志

学会発表（口頭発表、ポスター発表、講演等）

1. 下川卓志

イオンビームの特性と育種への利用

岩手生物工学研究センター 第 229 回公開セミナー, 2017-10-10.



## PIXE 分析法による水生生物の体内元素分析

(P17-TYO01)

高榮晋平<sup>a</sup>・小西岳<sup>a</sup>・中田愛理<sup>a</sup>・鈴木享子<sup>a</sup>・吉富友恭<sup>a</sup>・

及川将一<sup>b</sup>・武田志乃<sup>b</sup>

a:東京学芸大学 b:放射線医学総合研究所

海水の Sr 濃度は淡水と比較し 100 倍以上高く、この差を利用し、耳石に蓄積された Sr から魚類の回遊履歴を再構築する研究が行われている。本研究では、河川と海洋を行き来する通し回遊魚であるカマキリ(*Cottus kazika*) 及びアユ(*Plecoglossus altivelis*) の回遊履歴を推定するため、PIXE 分析法によりフィールドで採捕した個体の耳石に含まれる Sr の分析を行った。また、曝露環境下における実験としては、ホテイアオイ(*Eichhornia crassipes*) による水域の重金属除去を目的としたファイトレメディエーションの基礎的研究を行い、水中に溶存する Pb 及び Cu のホテイアオイへの蓄積傾向を明らかにした。

### (1) カマキリ

カマキリは、降河回遊型の生活史を有する淡水性のカジカ魚類である。近年、河川改修等生息環境の悪化により生息数の減少が危惧されており、本種の保全策の立案に不可欠な生活史や生息環境に関する基礎知見の蓄積が求められている。本研究では、木浦川(新潟県)に生息するカマキリを対象として、本種の河川生活期における生態を明らかにすることを目的とした。

耳石の Sr:Ca 分析による回遊履歴の推定では、5 月から 7 月に採捕されたカマキリは、海域から遡上後まもない個体であることが明らかになった。成長解析と食性解析の結果と照合し、当歳魚の餌資源は主としてカゲロウ目幼虫やハエ目幼虫等の底生生物(ベントス)であり、本種当歳魚が河川生活期に移行する際に海洋性ベントスを主たる餌資源としていた食性が切り変わり、周囲に生息する河川性ベントスの摂食が直ちに始まる可能性が示唆された。

### (2) アユ

近年、河川生態系を健全に保つ上で重要な種であるアユの遡上が、荒川水系の黒目川(東京都・埼玉県)でも確認されており、アユの資源管理に向けた方策の構築につながる知見が求められている。本研究では、埼玉県黒目川のアユを対象として、耳石の微量元素分析により回遊履歴を推定した。また、上述の木浦川のアユとの比較も行い、両個体群の生活史の傾向を明らかにした。

PIXE による耳石 Sr の面分析の結果から、黒目川アユと木浦川アユはともに生活史の中で汽水域と海水域を行き来していることが示された。また、耳石 Sr: Ca の線分析の結果から、黒目川アユは汽水域・海水域での生活が比較的短く、淡水域での生活が長かったのに対し、木浦川アユは汽水域・海水域での生活が比較的長く、淡水域での生活が短いことが示された。

### (3) ホテイアオイ

侵略的外来生物であるホテイアオイを防除の対象として扱うだけでなく、汚染物質を除去するファイトレメディエーションという観点から活用を検討することが期待されている。本研究では、ホテイアオイによるファイトレメディエーションの基礎的研究として、水中に溶存する Pb 及び Cu のホテイアオイへの蓄積の傾向について、形態と対応させて明らかにすることを目的とした。

Pb 及び Cu 添加水での水耕(曝露)実験を行った結果、Pb 添加区のホテイアオイの根から Pb の顕著なピークが確認され、Cu 添加区については対照区と比較して高い Cu のピークが確認された。Pb と Cu の結果を比較すると、Pb よりも Cu の方が全体としての蓄積量が多いことがわかり、吸収速度が高いものと考えられた。また、実験の早い段階で黄化が観察された。

さらに、面分析の結果、Pb は基部の側根、先端部の主根及び側根においては一様に分布し、基部の主根においては表皮や皮層に対応して分布する傾向が認められた。また、Cu は基部の主根及び側根、先端部の主根及び側根の組織において一様に分布していた。

## 平成 29 年度研究成果一覧

課題番号：P17-TYO01

課題名：PIXE 分析法による水生生物の体内元素分布・局在の解析

課題代表者：武田志乃

### 原著論文

1. 近藤直紀, 鈴木享子, 吉富友恭, 及川将一, 武田志乃  
マイクロ PIXE 分析を用いたサワガニ (*Geothelphusa dehaani*) の鰓における銅の分布解析  
環境毒性学会誌, In press.

### 学会発表(口頭発表、ポスター発表、講演等)

1. 高榮晋平, 鈴木享子, 吉富友恭  
上越地域の小河川に生息するカマキリ (*Cottus kazika*) の回遊と生息場に関する基礎研究  
応用生態工学会・日本景観生態学会・日本緑化工学会 3 学会合同大会: ELR2017, 2017.9.22-25



# **SPICE 関連課題**



## Analysis of radiation-induced bystander response between human normal cells and cancer cells

ヒト正常及びヒトがん細胞間における放射線誘発バイスタンダー細胞応答の解析

S16-AKO01

○A. Kobayashi<sup>a</sup>, M. Oikawa<sup>a</sup>, Y. Furusawa<sup>a</sup>, J. Wang<sup>b</sup>, A. Narongchai<sup>c</sup>,  
T.A.F.Tengku Ahmad<sup>d</sup>, T. Konishi<sup>a</sup>

a: National Institute of Radiological Sciences b: Chinese Academy of Sciences,

c: Chiang Mai University, d: Malaysian Nuclear Agency

### Background

The aim of radiation cancer therapy as an effective tool is to target the tumor accurately, while limiting the exposure to normal tissue. Although the target is the tumor cells, the exposure effect also occurs in the normal tissue surrounding the tumor area. Therefore, it is essential to investigate the intercellular signaling process between irradiated cells and non-irradiated cells in surrounding areas, known as radiation-induced bystander effect. In previous study, we reported that a signal from the bystander normal cells have modulated the DNA double strand breaks (DSB) repair in irradiated cancer cells exhibiting a rescue effect [1]. However, the question arises now is how radiation-induced bystander effect is facilitated? There are two major pathways that permit cell to cell interaction; Gap-junction and Media Transfer technique. Therefore, in this study we proceed with our previous findings to determine which pathway is involved in rescue effect.

### Method

We established an in vitro method to mimic tumor micro environment in radiation therapy by using the microbeam system, which targets only cancer cells (A549-GFP) co-cultured with normal cells (WI38). To identify the involvement of secretable factor signaling pathways or GJIC pathway in the A549-GFP/WI38 co-

cultures, a gap junction inhibitor (18- $\alpha$ -glycyrrhetic acid : AGA) was used. After exposure, cells were fluorescently immunostained against  $\gamma$ -H2AX as a measurement of DSB, and the total fluorescence yield per each nucleus was calculated from the microscopic images [Fig1].

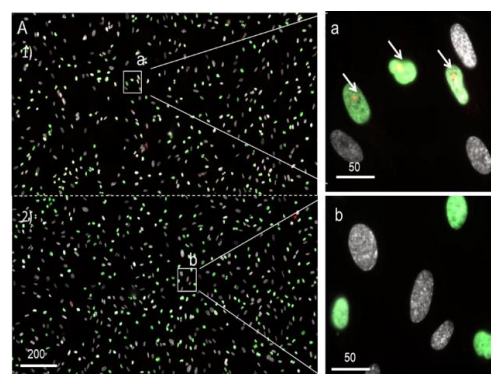


Figure 1. Representative images of a mixed cell population fixed at 1h after irradiation. Upper half (A 1)-a) shows targeted area, lower half (A 2)-b) shows non-targeted area. Green is A549-GFP cells, white is WI-38 cells. Red spot in A549-GFP is  $\gamma$ -H2AX, a marker for DNA double strand breaks. Bar:  $\mu$ m

### Result

$\gamma$ -H2AX levels were normalized against the non-irradiated controls at each time point. Fig2A illustrates the temporal dependency of  $\gamma$ -H2AX levels in targeted A549-GFP cells. One hour and towards 24h post-irradiation,  $\gamma$ -H2AX levels were observed to be significantly reduced in targeted A549-GFP cells, in both mock-

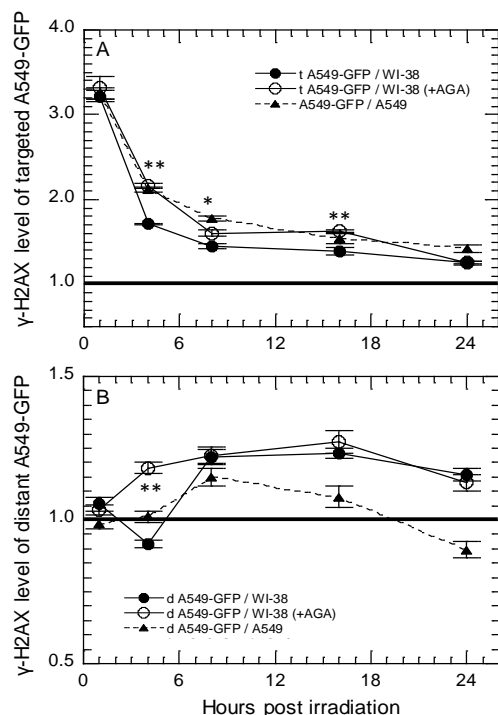


Figure 2. Time dependency of  $\gamma$ -H2AX levels in: A) targeted A549-GFP cells (t A549-GFP), B) distant A549-GFP cells (d A549-GFP). The A549-GFP/WI-38 co-cultures were mock-treated (solid circle) or AGA treated (50 $\mu$ M; open circle) prior to irradiation, and changes in  $\gamma$ -H2AX levels were observed for up to 24h. Statistical significance was presented as \* =  $P < 0.10$  and \*\* =  $P < 0.05$ , for comparison between mock- and AGA-treated cells.

treated and AGA-treated cells. This indicates that DSB induced by microbeam irradiation were repaired up to 24h post-irradiation. However,  $\gamma$ -H2AX levels of targeted A549-GFP cells in AGA-treated A549-GFP/WI-38 co-culture were significantly higher than those in the mock-treated cell culture at 4, 8 and 16h post-irradiation, indicating that DSB repair was suppressed by inhibition of GJIC. In contrast, the  $\gamma$ -H2AX level in non-targeted A549-GFP cells [Fig2B] was increased with the existence of WI-38 cells and inhibition of GJIC did not alleviate  $\gamma$ -H2AX levels in bystander A549-GFP cells to similar levels in the A549-GFP/A549 co-culture. Thus, the existence of WI-38 can enhance the DSB repair in targeted A549-GFP by GJIC

pathway, however GJIC pathway was not dominant for the induction of  $\gamma$ -H2AX in non-targeted A549-GFP cells

## Conclusion

Intercellular signaling between cancer cells and normal cells influence the cells' sensitivity to radiation as well as their sensitivity to bystander effect. Finally, by using microbeam technology and cancer/normal cells co-culture method, this study is able to expand the knowledge of intercellular signaling in radiation cancer therapy.

## Acknowledgements

This work was supported by the International Open Laboratory (IOL) program of the National Institute of Radiological Sciences (NIRS) and in part, by JSPS KAKENHI (Grant Number 17H04268 and 17K16496).

## Reference

- [1] A. Kobayashi, T. A. F. Tengku Ahmad, N. Autavapromporn, M. Oikawa, S. H. Takeda, Y. Furusawa, J. Wang, T. Konishi. Enhanced DNA double-strand break repair of microbeam targeted A549 lung carcinoma cells by adjacent WI38 normal lung fibroblast cells via bidirectional signaling. *Mutat Res Fund Mol Mech Mutagen.* 803-805 (2017) 1-8.

## 平成 29 年度研究成果一覧

課題番号 : S16-AKO01

課題名 : ヒト正常及びヒトがん細胞間における放射線誘発バystanダー細胞応答の解析

課題代表者 : 小林亜利紗

### 原著論文

1. A. Kobayashi, T. A. F. T. Ahmad, N. Autsavaporn, M. Oikawa, S. H. Takeda, Y. Furusawa, J. Wang, T. Konishi,  
Enhanced DNA double-strand break repair of microbeam targeted A549 lung carcinoma cells by adjacent WI38 normal lung fibroblast cells via bi-directional signaling  
Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis, 803-805, 1~8, 2017. 06

### 学会発表（口頭発表、ポスター発表、講演等）

1. Alisa Kobayashi, Narongchai Autsavaporn, Tengku Ahbrizal Farizal Tengku Ahmad, Masakazu Oikawa, Shino Homma-Takeda, Yoshiya Furusawa, Jun Wang, and Teruaki Konishi.  
Bystander WI-38 normal lung fibroblast cells modulate DNA double-strand break repair in microbeam-targeted A549 cells through gap junction intercellular communication  
17th International Symposium on Microdosimetry, Venice (Venezia), Italy, 2017.11.7



**Studies on radiation induced defensive cellular communication  
using SPICE-NIRS microbeam**

**マイクロビーム照射法を応用した放射線誘発防御細胞応答に関する研究  
(S16-IOL01)**

Teruaki Konishi <sup>a,b)</sup>, Jun Wang <sup>a,c)</sup>, Tengku Ahbrizal Tengku Ahmad <sup>a,d)</sup>, Narongchai  
Autsavapromporn <sup>a,e)</sup>, Masakazu Oikawa <sup>a,f)</sup>, Alisa Kobayashi <sup>a,f)</sup>, Yoshiya Furusawa <sup>a,b)</sup>,

- a. SPICE-BIO research core, NIRS-International Open Laboratory, National Institute of Radiological Sciences (NIRS), National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)
- b. Dept. of Basic Medical Sciences for Radiation Damages, NIRS-QST
- c. Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of China
- d. Division of Agrotechnology and Biosciences, Malaysian Nuclear Agency
- e. Dept. of Radiology, Faculty of Medicine, Chiang Mai University
- f. Dept. Accelerator and Medical Physics, NIRS-QST

## **1. Purpose of Research**

In classical radiation biology, it is described that initial DNA damages induced directly by energy deposition of radiation are the main cause for the varieties of radiobiological consequences, thus the DNA is considered to be the primary target of radiation. However, in the past few decades, there are many phenomena were reported that cannot be explained by this classical dogma. These findings indicated the existence of non-DNA/secondary targets, that may affect the fate of irradiated and nearby non-irradiated cells. The possibility is that this non-DNA/secondary target has been activated by direct energy deposition in the cytoplasm. Our aim is to provide answers to questions such as what is the non-DNA/secondary target and how does it involve with the damages in the primary target. Therefore microbeam technology would be the effective method to fulfill our demands.

## **2. Preliminary Results:**

We examined the velocity of DNA double-strand break (DSB) repair in microbeam irradiated WI-38 human normal fibroblast cells that were targeted in the nucleus, cytoplasm, or both nucleus/cytoplasm using SPICE-NIRS microbeam. Cells were fixed at various time points between 1 to 24 hr post- irradiation, then immuno-stained against  $\gamma$ -H2AX to quantify the residual DSB/nucleus from the obtained microscopic images. Microbeam irradiation significantly induced  $\gamma$ -H2AX, which were proportional to the number of protons per nucleus (Fig1A). Contrary to

nucleus targeted cells,  $\gamma$ -H2AX level did not show a significant increase compared to the control at 1hr post-irradiation. However, at 4 hrs post irradiation,  $\gamma$ -H2AX was significantly higher than the controls, and the increase was proportional to the delivered number of protons.(Fig1B)

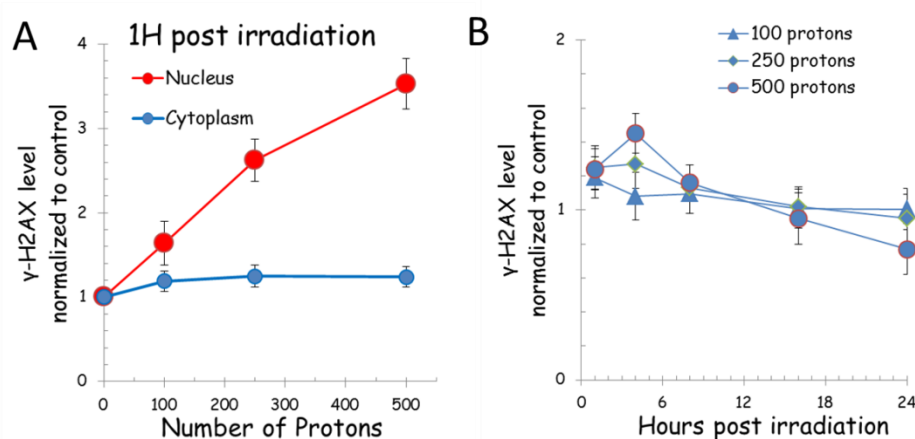


Figure 1. Panel A, dose response of g-H2AX with the nucleus and cytoplasm targeted cells at 1hr post irradiation. Panel B, Time dependency of g-H2AX of cytoplasm irradiated cells.

However, for cells irradiated with 500 protons per nucleus, we found less residual of  $\gamma$ -H2AX in the cells with additional 200 and 500 protons irradiation in cytoplasm at 16 hrs and 24hrs post-irradiation. Taken together, cytoplasmic damage enhances repair of DSB induced by nucleus irradiation. Further study is needed to clarify the type of cytoplasmic damage and responsible intracellular signaling for the enhanced cellular response against DSB are still need to be investigated.

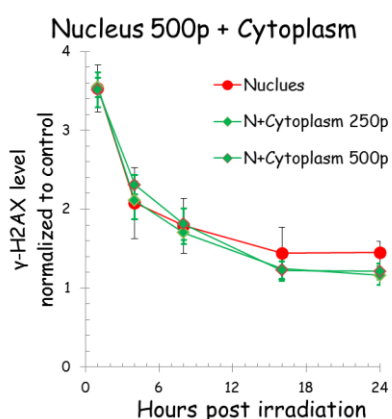


Figure.2 DSB repair kinetics of nucleus targeted cells and both nucleus/cytoplasmic irradiation.

## Acknowledgements

This study was supported in part by a JSPS KAKENHI Grant-in-Aid for Challenging Exploratory Research (16K15586). Authors would like to thank the NIRS-IOL program for the support and have accelerated our international collaboration.

## 平成 29 年度研究成果一覧

課題番号 : S16-IOL01

課題名 : マイクロビーム照射法を応用した放射線誘発防御細胞応答に関する研究

課題代表者 : 小西輝昭

### 学会発表(口頭発表、ポスター発表、講演等)

1. Teruaki Konishi, Masakazu Oikawa, Alisa Kobayashi, Daisuke Ohsawa, Shino Homma-Takeda, Yoshiya Furusawa, Tsuyoshi Hamano  
SPICE-NIRS microbeam: A focused vertical system for proton irradiation of a single cell for radiobiological research.  
1st QST International Symposium "Quantum Life Science" -The pathbreaking life-scientists with quantum eyes and hands-, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST), 2017-07-25
2. Teruaki Konishi  
Invited talk : SPICE-NIRS microbeam: Current developments and radiobiological studies  
15th Chinese Biophysics Congress, Biophysical Society of China, 2017-11-05
3. Teruaki Konishi  
Invited talk: SPICE-NIRS microbeam: Current developments and radiobiological studies  
Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Science, 2017-11-7
4. Teruaki Konishi, Jun Wang, Alisa Kobayashi, Narongchai Autsavapornporn, Tengku Ahbrizal Farizal Tengku Ahmad, Daisuke Ohsawa, Yoshiya Furusawa  
Studies on defensive cellular response induced by cytoplasm/nucleus targeted irradiation using SPICE-NIRS microbeam  
1st QST International Symposium Quantum Life Science, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST), 2017-07-25



## **The Importance of Primary and Secondary Bystander Effects Cross-Talk between Human Lung Cancer and Lung Normal Cells after Proton Microbeam Irradiation** (S16-IOL02)

Narongchai Autsavapornporn <sup>a,b)</sup>, Cuihua Lui <sup>b,c)</sup>, Tengku Ahbrizal Tengku Ahmad <sup>b,d)</sup>,  
Alisa Kobayashi <sup>b,e)</sup>, Masakazu Oikawa <sup>b,e)</sup>, Yoshiya Furusawa <sup>b,c)</sup>, Teruaki Konishi <sup>b,c)</sup>

- a. Department of Radiology, Faculty of Medicine, Chiang Mai University
- b. SPICE-BIO research core, NIRS-International Open Laboratory, NIRS-QST
- c. Dept. of Basic Medical Sciences for Radiation Damages, NIRS-QST
- d. Division of Agrotechnology and Biosciences, Malaysian Nuclear Agency
- e. Dept. Accelerator and Medical Physics, NIRS-QST

### **1. Purpose of Research**

The objective of this study is to investigate the role and mechanism underlying of GJIC in determining human response to proton radiation. This study particularly focused on the communication of the primary bystander signaling events between protons-irradiated cancer cells/normal cells and bystander normal cells. In addition, the secondary bystander signaling events between the primary bystander normal cells and the secondary bystander normal cells will also be determined. Communication of stressful or protective effect between human lung cancer cells and human lung normal cells after protons microbeam irradiation may amplify or mitigate the damage in bystander normal cells.

### **2. Specific Aims:**

The radiation studies outlined in the project have been initiated during Run at the SPICE-BIO, NIRS-QST during 2016-2017. In studies related to the 2 specific aims to examine the following:

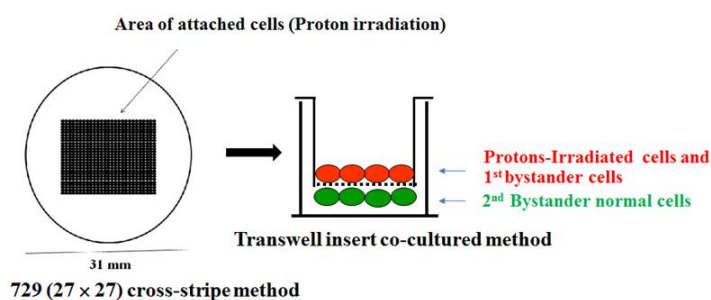
1. Test the hypothesis that the primary-and secondary bystander responses in normal cells occur at particle fluences so low that only 0.036-0.4% of cancer cells in a culture dish are traversed by protons.
2. To examine the protective effect of gap-junction inhibitor (AGA) and carboxy-PTIO (NO inhibitor) in the secondary bystander normal cells.

### **3. Experiment Strategy:**

#### **Preliminary Results:**

1. We found that the protons microbeam irradiation-induced bystander response in both A549 cancer cells and WI-38 normal cells. (Fig. 2).

2. The secondary bystander responses are propagated from proton microbeam-exposed A549 cancer cells to neighboring non-irradiated WI-38 normal cells. Gap-junction intercellular communication (GJIC) is the major mediator of the induced bystander effect detecting by using insert transwell co-culture strategy. (Fig. 1&2). The results demonstrated that GJIC amplifies the toxic effects and secondary bystander responses of proton irradiation in normal cells, which is directly relevant to cancer radiotherapy.
3. Demonstrated that the NO play a minor role in mediating proton microbeam irradiation induced-secondary bystander response in normal WI-38 cells (Fig 3).



**Fig 1.** The schematic diagram of the experimental protocols

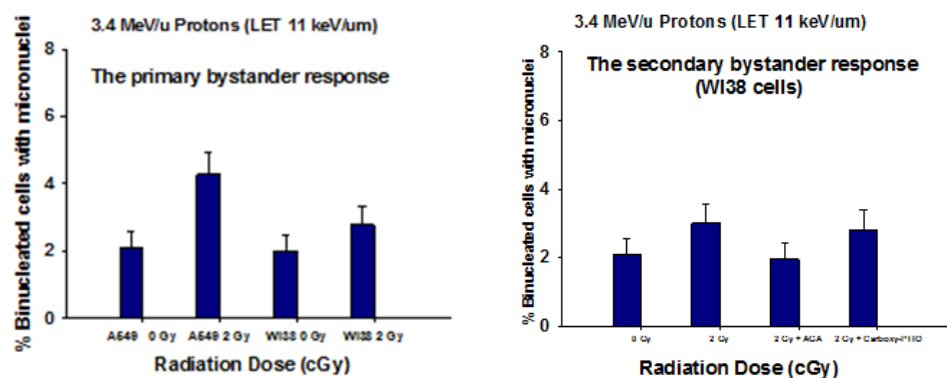


Figure 2. (Left) Confluent human A549 cancer cells and normal WI-38 cells were exposed to dose of 2 Gy from proton microbeam with a LET of 11 keV/μm and assayed for micronucleus formation (n=3).

Figure 3. (Right) Micronucleus formation in the secondary bystander WI-38 cells (n=3).

## Acknowledgements

NA would like to thanks the Japanese Society for the Promoting of Science and the JSPS Alumni Association of Thailand (JATA) for the JSPS Bridge fellowship 2016 (BR161201). Authors would like to thank the NIRS-IOL program for the support and have accelerated our international collaboration. This study was supported in part by a JSPS KAKENHI Grant-in-Aid for Scientific Research B (17H04268).

## 平成 29 年度研究成果一覧

課題番号 : S16-IOL02

課題名 : The Importance of the Primary and Secondary Bystander Effects Cross-Talk between Human Lung Cancer and Lung Normal Cells after Proton Microbeam Irradiation

課題代表者 : 小西輝昭

### 原著論文

1. Narongchai Autsavapornporn, Cuihua Liu, Teruaki Konishi  
Impact of Co-Culturing with Fractionated Carbon-Ion-Irradiated Cancer Cells on Bystander Normal Cells and Their Progeny  
Radiation Research, 188(3), 335 – 341, 2017-9
2. Narongchai Autsavapornporn, Teruaki Konishi, Cuihua Liu, Noriko Usami, Tomoo Funayama, Edouard I. Azzam, Masao Suzuki  
A correlation of long term effects and radiation quality in the progeny of bystander cells after microbeam radiations: The experimental study of radiotherapy for cancer risk mitigation.  
Journal of Physics: Conference Series, 860, 12026, 2017-6

### 学会発表（口頭発表、ポスター発表、講演等）

1. Narongchai Autsavapornporn, Pitchayaponne Klunklin, Busyamas Chewaskulyong, Wirote Tuntiwechapikul, Ariyapong Wongnoppavich, Suwapat Amphol, Sittiruk Roytrakul, Kanokporn Rithidech, Teruaki Konishi, Masahiro Hosoda, Shinji Tokonami  
Identification of Potential New Biomarkers for Early Detection of Lung Cancer Risk in High Residential Radon: A Preliminary Study in Chiang Mai, Thailand  
Identification of Potential New Biomarkers for Early Detection of Lung Cancer Risk in High Residential Radon: A Preliminary Study in Chiang Mai, Thailand  
Consortium of Biological Sciences 2017 (ConBio 2017), The Japanese Biochemical Society, The Molecular Biology Society of Japan, 2017-12-6



## マイクロビーム細胞照射装置 SPICE のリサーチ&デベロプメント(R&D) (S16-R&D01)

小西輝昭<sup>a</sup>, 小林 亜利紗<sup>b</sup>, 及川将一<sup>b</sup>, 濱野毅<sup>b</sup>

- a. 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 放射線障害治療研究部  
b. 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 加速器工学部

### 1. 目的

マイクロビームは、特に放射線医科学分野並びに低線量放射線影響研究において重要なツールであり、マイクロビームなくして得ることができない科学的知見は少なくない。特に、放医研SPICEは国内唯一の陽子線マイクロビーム細胞照射装置である。また、ビームサイズ $2\mu\text{m}$ を安定的に提供できていることから、細胞核のみならず細胞質への照射も可能である。このような性能を有するまたは、共用施設として運営しているマイクロビーム施設は、世界的に見ても稀である。

過去数年を見ても所内、国内のみならず海外研究機関の利用が多数みられることから、その重要性は顕著である。そのため、本装置の高度化および保守・維持管理（メンテナンス）は必須である。

### 2. メンテナンス概要

現在までに当時の仕様をベースに様々な高度化を進めてきた。しかし、SPICEは、2003年度に導入された装置であり、主要部位は既に15年を経過しており、老朽化にともなう故障等が頻発している。今年度における整備状況について、以下にいくつか例示する。

#### 1) SPICE顕微鏡VCMステージの故障

VCMステージは、SPICEの高速性・高精度照射を担保する心臓部とも言える部分である。細胞位置精度を分解能 $40\text{nm}$ で保証しつつ、かつ毎分400個の細胞への照射を実現している。昨年度と同様に、ステージ位置の読み取り、駆動指示系統に異常が発生したため、ステージ制御用ドライバーの調整、エンコーダー位置調整等を行った。

#### 2) SPICE顕微鏡レンズスライダー（S軸）の動作不良

レンズスライダーには、細胞観察用レンズと粒子線検出器を搭載している。ビーム位置の決定および照準精度は、このレンズスライダーの位置分解能（ $0.1\mu\text{m}$ ）によって保障されている。また、細胞への照準はレンズを用いて細胞画像を取得、照射時には粒子線検出器への切り替える役割を担っている。このレンズスライダーが経年劣化のために昨年に続いて故障したため、スライダー駆動部分を

## ～報告書(課題番号:S16-R&D01)～

更新した。

- 3) 1)、2)ともに、ビーム位置、細胞位置を決定するための最重要制御部である。  
また、ビーム出口・ステージ・顕微鏡・高感度カメラのすべての再アライメントを実施した。

### 3. 見学対応・共用利用

1) 見学：S P I C Eは最先端放射線照射技術であり、新規に課題申請を検討している所内・外の研究者には、見学を含めた事前説明を行った。

- ① MD Anderson Cancer center, 2名
- ② Chiang Mai University (タイ) 1名
- ③ 立教大学理学部 5名
- ④ 放医研人材育成事業のカリキュラム内における見学

#### 2) 新規課題予定者へのビームタイムデモの実施

S P I C Eによる照射実験は、単一細胞への照射と観察を実現する一方で、一般的なブロードビームによる実験と比較すれば生物試料の作成手順、またはその後の実験手法に制限が生じる。これは、マイクロビームを使用した経験のない研究者にとって、もっとも大きなハードルとなり得る。そこで、本課題に廃部されたR&Dマシンタイムにおいて、可能な限り、新規課題申請予定の研究者に実際の細胞試料を用いたデモ照射実験を行っている。以下が今年度の実績である。( )で実施した日数を示した。

Mr. D Flint, Dr. S J Bright, Dr. Gabriel Sawakuchi, MD Anderson Cancer Center (1日)

Ms. Nahathai Dukaew, Chiang Mai University (1日)

下川卓志 放医研 放射線障害治療研究部 (1日)

中島徹夫 放医研 放射線影響研究部 (1日)

### 4. 今後の課題

世界トップクラスの性能の維持し、先端的な放射線医科学・影響研究を継続的に実施するためには、高度化を進めつつ、メンテナンスを十分に実施していく必要がある。

次年度においては、1) 粒子線検出器の再設計、2) 顕微鏡部位のオーバーホール、3) 制御用ソフトウェアの更新を予定している。

## **NASBEE 関連課題**



## 中性子発生用ターゲットのためのターゲット耐性に関する研究

16CV0001

○小川原 亮、須田 充、萩原 拓也、濱野 毅

放射線医学総合研究所

### 研究目的

放医研 NASBEE 装置では現在 Be 標的を用いて中性子場を提供しているが、より単色性の高い速中性子を得るため固体 Li 標的の研究開発を行っている。これまでの研究で固体 Li 標的の作成は成功しており、今期マシンタイムでは作成した Li 標的の性能評価と耐久試験を目的とした実験を行った。

### 研究内容

Li 標的は Be 標的に比べ熱伝導度と融点が低く、大強度ビームを照射する場合熱的な問題から Li 標的の安定運用は Be 標的に比べ困難である。NASBEE 装置では、サーモカメラを用いて照射中の Li 標的の温度分布をモニタしている。一般的に赤外線を利用するサーモカメラや放射温度計は放射率と呼ばれる波長や観察試料の色、表面状態に依存する物理量が存在する。したがって汎用的な各物質の校正係数は精度が低く、温度校正は実際の観察試料に対して行う必要がある。開発した Li 標的は表面を窒化クロム膜で覆っているため、実際の標的の窒化クロム膜に対して 140℃まで熱電対とサーモカメラの校正を行った。

${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$  反応は吸熱反応であり、入射する proton のエネルギーに依存して発生する中性子の最大エネルギーが大きく変化する。今季のマシンタイムでは 2.5 MeV, 4MeV の 2 種類のエネルギーの proton ビームを使用し、金箔( $5 \times 5 \times 0.01 \text{ mm}^3$ , 株式会社ニラコ)を用いた熱中性子束測定を行った。検出器後方には厚さ 70 mm のポリエチレン(PE)を設置し、検出器前方には 0 ~ 230 mm の厚さの PE フィルタを設置し実験を行った。この時フィルタに入射する中性子ビームの情報を揃えるため、source to surface distance (SSD)を 600 mm で固定して照射を行った。また、最大の熱中性子束が得られたときの PE フィルタを用いた条件において、 ${}^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線で校正を行った電離箱(1 cc, IC-17A, Far West Technology Inc.) を用いて線量測定を行った。

### 結果と考察

図 1 左図にビーム電流を 100 ~ 500  $\mu\text{A}$  に変化させた場合のサーモカメラの測定結果を示す。図 1 左図から、ビームが照射されている範囲の温度分布が不均一であることが確認できるが、これは温度の高い領域はビーム照射によって黒色化し放射率が増加している可能性が示唆される。したがって、窒化クロム

膜用の温度校正係数が使用できるのは図 1 左図における、各ビーム条件の (X,Y)=(100, 100) 近辺の画素値のみであると考えられる。よって、図 1 右図の検量線は (X,Y)=(100, 100) の画素値を用いて解析した結果を示している。これらの結果から、開発した Li 標的の温度は NASBEE の最大出力である 800  $\mu\text{A}$  において 151.3 $^{\circ}\text{C}$  と見積もることが可能であり、Li の融点である 180.5 $^{\circ}\text{C}$  以下の標的運用が可能である。

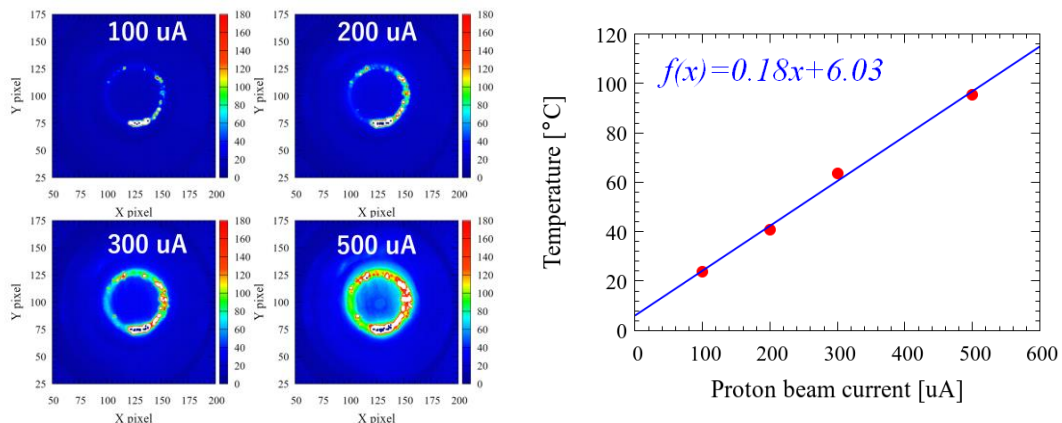


図 1. サーモカメラによる固体 Li 標的測定結果。

図 2 に 2.5 MeV, 4 MeV proton ビームを用いた場合における、熱中性子束の PE フィルタ厚依存性を示す。最大の熱中性子束が得られる PE フィルタの厚さは、2.5, 4 MeV でそれぞれ 20, 30 mm であり、その時の熱中性子束は  $6.37 \times 10^4 / \text{cm}^2 / \text{s} / \mu\text{A}$ ,  $2.85 \times 10^5 / \text{cm}^2 / \text{s} / \mu\text{A}$  という結果が得られた。4 MeV proton ビームを使用した場合、2.5 MeV に対して約 4.47 倍の熱中性子束が得られており、この差はエネルギーに依存する発生中性子数に起因すると考えられる。また、4 MeV proton ビームを使用した場合の電離箱による線量測定では、単位照射電荷当たり 0.46 Gy/C という結果が得られ、これは  ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$  反応の 2.3 倍であり、 ${}^9\text{Be}(D, n){}^{10}\text{B}$  反応の 0.28 倍である。

## 結論

開発した Li 標的は NASBEE の最大出力でも問題なく安定運用可能であることを示した。また 2.5, 4 MeV proton ビームを使用した場合において、熱中性子束が最大となる実験体系を明らかにした。

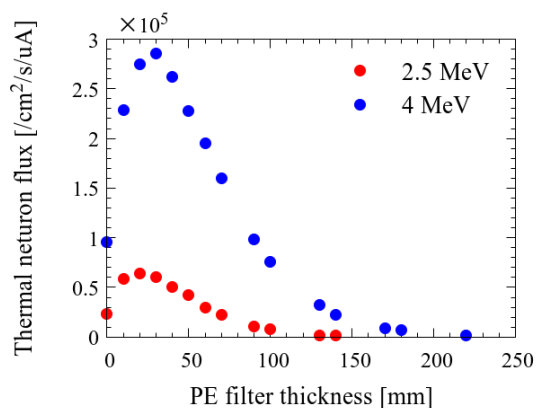


図 2. 2.5, 4 MeV proton ビームを用いた場合の熱中性子束。

## 熱外中性子測定用電離箱による加速器中性子場の評価

(16CV0002)

○佐藤 齊<sup>a</sup>, 中島絵梨華<sup>a</sup>, 須田 充<sup>b</sup>, 濱野 毅<sup>b</sup>,  
吉井 裕<sup>b</sup>, 遠藤 暁<sup>c</sup>, 田中憲一<sup>c</sup>, 星 正治<sup>c</sup>

a: 茨城県立医療大学, b: 放射線医学総合研究所, c: 広島大学

**目的:** 加速器中性子発生場は、ガンマ線、熱中性子線、熱外中性子線、高速中性子線の放射線混合場である。放射線混合場の線量および線質の変化などを精密に評価するためには、照射中の各放射線由来の線量を分離して測定する線量モニタシステムが必要とされる。特に、熱外中性子線の線量モニタでは高精度かつ安定した測定が求められる。

本研究では、加速器中性子発生場における熱外中性子線の線量を高精度に評価するために試作した電離箱を用い、加速器中性子場の評価システムの構築に関して検討する。これにより、試料等への照射精度が向上し、加速器中性子発生場における実験精度の向上に寄与することが期待される。昨年度までに構築した多重電離箱による計測システムを用いて、電離箱の応答特性と測定の再現性等に関する測定を実施した。

**方法:** 放射線医学総合研究所低線量棟のタンデム型ダイナミトロン(HVEE): NASBEE を用いて測定実験を行った。検出器として、加工性が高いホウ素入り素材による電離箱として試作した熱外中性子線用 LBO 電離箱, グラファイト壁電離箱(IC-17: Far West Technology), ボロン入り電離箱(IC-17B: Far West Technology)、組織等価型電離箱(IC-17: Far West Technology) を用いて測定した。

それぞれの電離箱中心電極をプラス電位として 300V の電圧を印加し、各電離箱からの出力を電位計(6517A, 6517B, 6823: Keithley)に接続して電離電荷または電離電流を計測した。加速器ターゲット電流のモニタとして、サブレスした出力電流を IF 変換後にカウンタ(C2100: Laboratory equipment)で測定してビーム出力変動の補正に用いた。また、気温計(7563: YOKOGAWA), 気圧計(MT110: YOKOGAWA)を用いて温度気圧補正に用いた。これらの計測値をほぼ同時に PC に取得する測定システムとして構築した。

照射口から 150 mm の位置に 300 mm×300 mm×300 mm のポリエチレンファントムを配置し、各電離箱をファントム内に埋め込み、ファントム表面からの深さ 15 mm から 250 mm まで 10 mm 間隔で測定を実施した。

**結果・考察：** 各電離箱による測定結果の例を Fig.1,2 に示した. それぞれ同一条件で測定を 4 回実施した平均値と標準偏差であり, 測定値の再現性は 5%以内で良好であることが確認できた. 直径約 22 mm の電離箱をファントム中央に 20 mm 間隔で配置しているが, ビームプロファイルの測定により, ビーム中心の値に対して 98%の範囲内の領域であることを確認した. 電離箱を同時配置した場合の擾乱影響の程度について検討する必要がある.

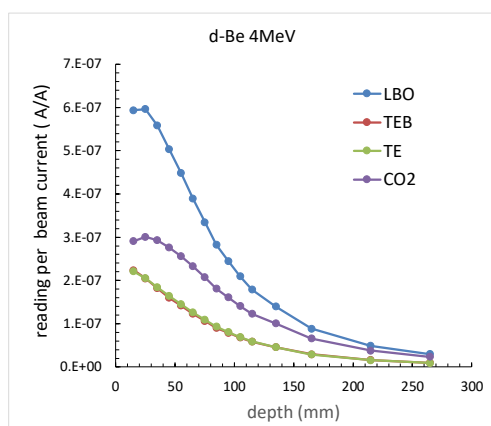


Fig.1 Depth-dependent responses.  
(d-Be 4MeV)

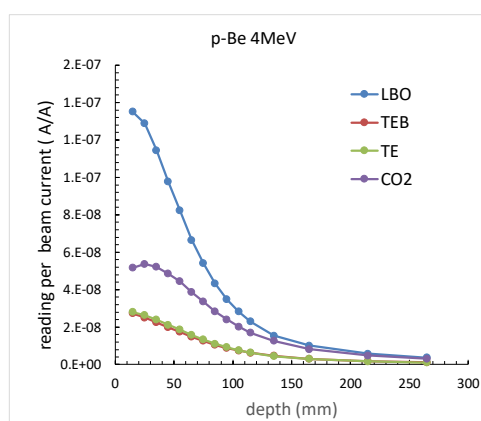


Fig.2 Depth-dependent responses.  
(p-Be 4MeV)

また, 前年度までに実施した金箔法による測定結果から, 遠藤らにより LBO 電離箱の応答感度は, 熱中性子線に対して  $2.23 \times 10^{-7} \pm 17\%$  pC $\cdot$ cm<sup>2</sup>, 熱外中性子線に対して  $2.00 \times 10^{-5} \pm 6\%$  pC $\cdot$ cm<sup>2</sup> の値が得られた<sup>1)</sup>. LBO 電離箱は熱外中性子線に対して十分な感度を有し, 金放射化法を併用することにより熱中性子線と熱外中性子線の分離測定が可能であることが示されたが, 吸収線量へ換算するためには速中性子線に対する応答感度を調べる必要がある.

1) Satoru Endo,Hitoshi Sato,Takuto Shimazaki,Erika Nakajima,Kei Kotani,Mitsuru Suda,Tsuyoshi Hamano,Tsuyoshi Kajimoto,Kenichi Tanaka,Masaharu Hoshi. Determination of the thermal and epithermal neutron sensitivities of an LBO chamber. Radiat Environ Biophys (2017) 56:269–276

～報告書(課題番号:16CV0002)～

## 平成 29 年度研究成果一覧

課題番号 : 16CV0002

課題名 : 熱外中性子測定用電離箱による加速器中性子場の評価

課題代表者 : 吉井裕

### 原著論文

1. Satoru Endo,Hitoshi Sato,Takuto Shimazaki,Erika Nakajima,Kei Kotani,Mitsuru Suda,Tsuyoshi Hamano,Tsuyoshi Kajimoto,Kenichi Tanaka,Masaharu Hoshi  
Determination of the thermal and epithermal neutron sensitivities of an LBO chamber.  
Radiat Environ Biophys, 56, 269-276, 2017.6



## BNCT 標準化のためのホウ素量と中性子線量の評価解析

(16CV0003)

○濱野毅<sup>a</sup>、須田充<sup>a</sup>、小川原亮<sup>a</sup>、鬼柳善明<sup>b</sup>、土田一輝<sup>b</sup>、瓜谷章<sup>b</sup>、吉橋幸子<sup>b</sup>、渡辺賢一<sup>b</sup>、市川豪<sup>b</sup>、古澤大貴<sup>b</sup>、佐藤和也<sup>b</sup>、石川諒尚<sup>b</sup>、平田悠歩<sup>b</sup>、松井秀樹<sup>c</sup>、古矢修一<sup>c</sup>、小野俊朗<sup>c</sup>、花房直志<sup>c</sup>、植田愛<sup>c</sup>、加来田博貴<sup>c</sup>、瀧奥真歩<sup>c</sup>、花房慶郎<sup>c</sup>、道上宏之<sup>c</sup>、許家琪<sup>c</sup>、福永 麻美<sup>c</sup>、井川和代<sup>c</sup>、Li Jiatong<sup>c</sup>、Aurelie Morytko<sup>c</sup>、市川康明<sup>c</sup>

a:放射線医学総合研究所 b: 名古屋大学、c: 岡山大学

### 報告書本文

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) は、加速器を用いた BNCT の非臨床試験をするための施設は限られている。そこで、*in vitro* 実験をするための熱中性子細胞照射減速体を作成し、NASBB の中性子源を用いた BNCT の非臨床試験施設として検証することを目的とする。

まず、細胞照射するための熱中性子減速体を作成し(図 1)、熱中性子束、カドミウム比 (Cd 比)、 $\gamma$  線線量実測した (表 1)。本年度の熱中性子減速体系は、ポリエチレンの減速材の中に 9 本のマイクロチューブが縦に挿入できる体系になっており、細胞試料設置位置は 1~9 までナンバリングされている。それに加えて、中性子束測定の参照一として中央位置 (5) の上部に 10 番目を設置した。細胞照射試験の前日に中性子束とガンマ線量の測定を行った。中性子束は金箔を用いた放射化法で評価した。照射ごとの加速器の電流変動が大きいため、その影響を避けるために、本年度は中性子束を  $\mu$  C 単位で評価できるようにした。さらに熱中性子束を得るための Cd 比をより正確に測定するため、Cd に金箔を装填する方法を改善した (図 2)。表 1 に 1~9 の各位置における熱中性子束と Cd 比の 3 回の計測の平均値とガンマ線吸収線量の比較を示す。熱中性子束の測定から、中央の位置 (5) で偶数位置 (2,4,6,8) よりも 4%ほど高く、奇数位置 (1,3,7,9) よりも 8%ほど高いことがわかる。また、中央位置上部 (10) は、1~9 位置の約 1.9 倍になる。各位置での測定値のばらつきは 2~3%であり、再現性は十分であるといえる。一方、ガンマ線吸収線量は、中性子の影響が少なく BNCT の現場で用いられている TLD 線量計に加えて、より使い易い OSL (nanoDot) 線量計を用いて評価した。2 つの線量計から得られるガンマ線吸収線量は、OSL で測定した方が若干高い値を示す。これは中性子の影響を受けたことが考えられる。今後、TLD に用いられる BeO の入手の困難さを考えると nanoDot で測定できる方が望ましいことから、nanoDot の中性子による影響を調査する必要がある。つぎに、ヒト口腔がん細胞 (SAS) において熱中性子線および  $\gamma$  線を照射し、colony forming assays (CFAs)を行い、熱中性子線量の生物学的効果を評価した (図 3)。

～報告書(課題番号:16CV0003)～

さらに、SAS を  $200 \mu\text{g}^{10}\text{B}/\text{ml}$  存在下で 24 時間培養後、低、中線量、高線量の熱中性子を照射し、CFA を行い (図 4)、ホウ素中性子捕捉反応を評価した (図 5)。 $^{10}\text{B}$  として現在臨床で用いられている  $^{10}\text{B}$ -パラボロノフェニルアラニン (BPA)、 $\text{Na}_2\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{SH}$  (BSH) を投与、コントロール群は  $^{10}\text{B}$  非投与とした。CFA の結果より中性子線量の増加に伴い腫瘍細胞生存曲線の低下を認めた。特に BPA 投与群においてはより強い殺細胞効果が認められた。今後の BNCT の発展のため、加速器中性子源を用いた新規ホウ素化合物の抗腫瘍効果、種々の腫瘍細胞における抗腫瘍効果を評価する施設として改善の余地はあるものの、充分機能すると考えられる。

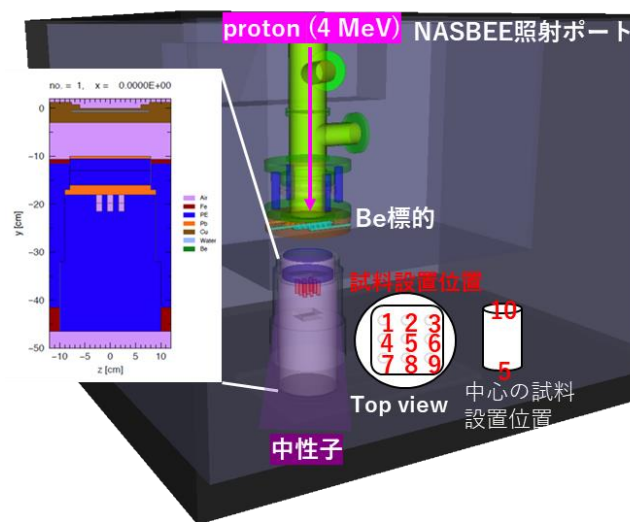


図1 熱中性子細胞照射減速体系

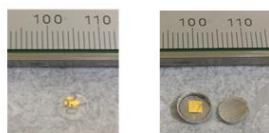


図2 金箔と Cd 装填金箔

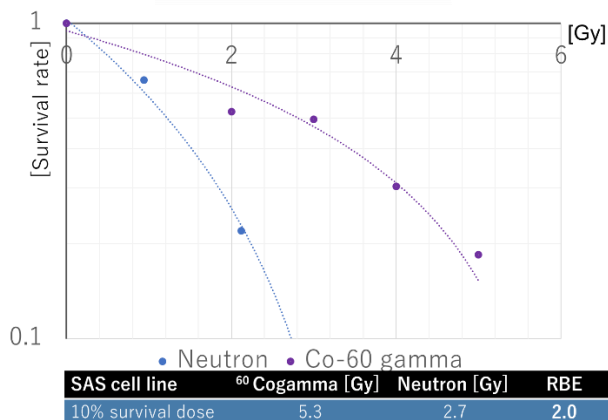


図3 生物学的効果比 (RBE)

表1 熱中性子束とガンマ線吸収線量評価

位置	熱中性子束 (n/cm <sup>2</sup> /μC)	Cd比	TLD (Gy/h)	nanoDot (Gy/h)	TLD/ nano Dot
1	$3.37 \times 10^5$	8.6	1.81	2.21	0.82
2	$3.54 \times 10^5$	9.4	1.95	2.10	0.92
3	$3.36 \times 10^5$	8.9	1.98	2.11	0.94
4	$3.59 \times 10^5$	9.8	2.02	2.15	0.94
5	$3.69 \times 10^5$	9.3	2.11	2.21	0.95
6	$3.55 \times 10^5$	9.8	1.94	2.18	0.89
7	$3.41 \times 10^5$	9.4	2.13	2.18	0.98
8	$3.55 \times 10^5$	9.4	1.97	2.30	0.86
9	$3.37 \times 10^5$	9.7	2.19	2.13	1.03

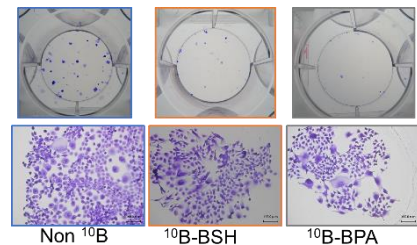


図4 中性子照射10日後のコロニー  
[ $3 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ ]

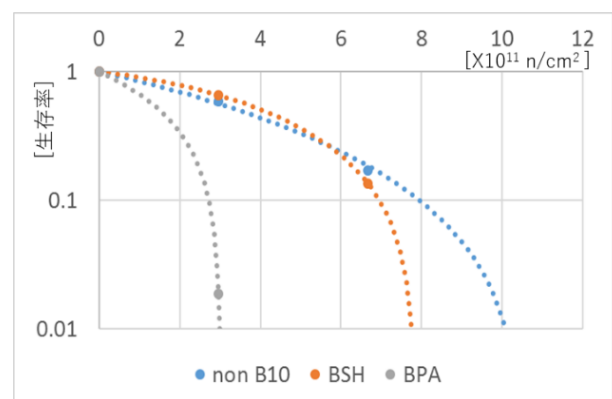


図5 細胞生存率の評価

## ポリマーゲル線量計を用いた中性子線量測定

(16CV0004)

○川村 拓<sup>a</sup>、吉井 裕<sup>b</sup>、松山 嗣史<sup>b</sup>、須田 充<sup>b</sup>、佐藤 斉<sup>a</sup>、濱野毅<sup>b</sup>

a: 茨城県立医療大学

b: 放射線医学総合研究所

本研究グループでは化学線量計であるポリマーゲル線量計(ゲル線量計)を利用し、中性子場の放射線量計測・評価を行っている。ゲル線量計は3次元線量測定が可能な化学線量計であり、現在放射線治療における3次元照射の際の線量計測、治療計画評価への応用が期待されている。本研究では中性子線量計測に応用し、中性子照射場の3次元評価を行うことを目的としている。

平成27年度では試薬を配合した自作ゲル線量計による線量測定手法の確立を行った。平成28年度ではゲル線量計作製時における真空脱泡装置を用いた脱気の線量応答性への影響と照射時の幾何学的配置による線量応答性についての影響を検討した。本年度は前年度に引き続き、①幾何学的配置変化によるゲル線量計応答等についての検討および②ゲル線量計内の試薬配合割合の応答性への検討を行った。

①ゲル線量計のビーム垂直方向上流にポリエチレンファントムを配置しない場合および配置しポリエチレン厚を1～3mmまで変化させた場合について、3Gy照射した。線量応答の評価法としては1.5Tesla MRIでゲル線量計の緩和速度 $R_2(1/s)$ を測定した。結果を図1に示す。ポリエチレンファントムを配置しない場合(厚さ0mm)の場合には、射出口からの中性子が直接ゲル線量計に照射され、高い応答が見られるものの、ポリエチレンファントムを置くことで中性子とポリエチレンファントムが反応し、中性子量が減少し、ゲル線量計の応答が低下したと考えられる。ポリエチレンファントムを1mmずつ重ねていくと、中性子とポリエチレンファントムが反応した結果生じる反跳陽子や $\gamma$ 線がゲル線量計に到達することによってゲル線量計の応答も増加すると考えた。今後さらに検討を重ね、ゲル線量計の中性子に関する応答、中性子とポリエチレンとの反応によって発生する反跳陽子や $\gamma$ 線のゲル線量計の応答についても詳細に調査する必要があると考える。

②ゲル線量計内の試薬配合割合の応答性への検討については、今回自作ゲル線量計であるPAGAT(Poly-Acrylamide, Gelatin And THPCから)を使用しているが、組成中のBisアクリルアミドおよびアクリルアミド量を従来の1.5% w/wから3% w/wに変化させ、それぞれ作製したゲル線量計に対して0-6Gyまでの線量- $R_2$ 応答曲線を算出し、曲線の傾き(線形近似)から線量感度比較を行った。得られ

た結果を図 2 に示す。中性子線量- $R_2$  応答曲線の傾きは、1.5% w/w で  $0.079(1/\text{Gy}\cdot\text{s})$ 、3% w/w で  $0.218(1/\text{Gy}\cdot\text{s})$  となった。3% w/w において約 2.8 倍傾きが大きくなった今回の結果から線量応答性の面では Bis アクリルアミドおよびアクリルアミド量を増やせば傾きが大きくなり、小さい線量でも検出可能であることから有利であることが分かった。一方で量を増やすことで融点が低く析出してくる場合もあり、照射環境によっては 3 次元情報を得られない場合があるため試薬増加量に限界があることも考えられる。今後も化学線量計である特徴を生かして増感作用を含む薬剤などを混合することを考えている。

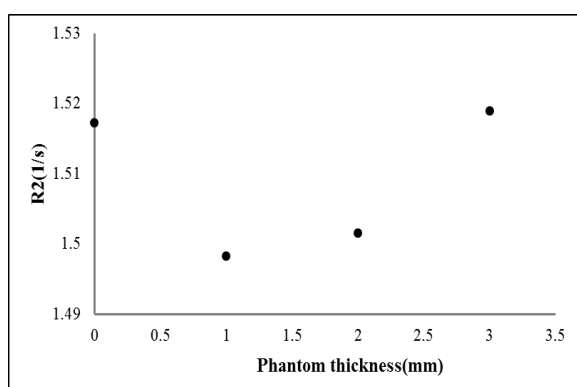


図 1. ビーム垂直方向上流にポリエチレンブロックを配置しない場合および、配置し 1mm ずつ重ねた場合の線量応答性の変化

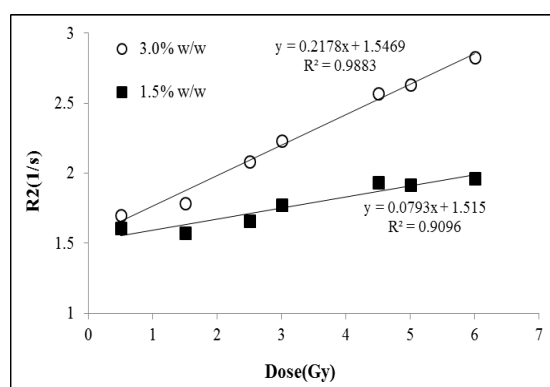


図 2. Bis アクリルアミドおよびアクリルアミド量を 1.5% w/w、3% w/w とした場合の線量応答性

## 中性子照射した歯のインビボ EPR 信号の測定

(16CV0005)

○山口一郎<sup>a</sup>, 佐藤 齊<sup>b</sup>, 川村 拓<sup>b</sup>, 濱野毅<sup>c</sup>, 須田充<sup>c</sup>, 吉井裕<sup>c</sup>, 小川原亮<sup>c</sup>, 三宅実<sup>d</sup>

a: 国立保健医療科学院、b: 茨城県立医療大学、c: 放医研、d: 香川大学

### 1. 研究目的

大規模な事故発生時における対象者の優先度を定める選別（トリアージ）のための線量評価に関する手法の確立が、解決すべき課題となっている。多くの対象者に短時間で、0.5-1.0Gy 以上の放射線被ばくの有無を検査するには、複数手法の組み合わせを確立する必要がある。この課題に対し、本院はヒトを対象として計測できる L バンド電子常磁性共鳴測定法（EPR）により線量を推計する装置を国内で唯一開発・保有しており、上顎切歯での計測のためにデザインされたサーフェスコイル型リゾネータに関し EPR Center at Dartmouth と北大で開発されたものがそれぞれ使用可能となっている。これまで、線量評価を事故現場で行うことを想定しフィールドでの測定の実用性（Radiation Protection Dosimetry, 2016）や歯のエナメル質の厚みの影響（Health Physics, 2017）、種類が異なる放射線への応答特性（Radiation Protection Dosimetry, 2016）の検証を進めてきており、実用段階に達してきた。

EPR 法では、これまでγ線について応答特性の評価が行われてきているが、実際のトリアージでは中性子被ばく線量についても評価を行うことが求められる。これまでの検討で、NASBEE の中性子場では診断領域の X 線に対して 8%程度の応答であり、水に対するハイドロキシアパタイトでの陽子の反跳によるエネルギー付与と同程度であることが確認されていた。本研究では、照射している場の特性をより詳細に把握し、歯のインビボ EPR 測定での中性子線応答特性を調べるために中性子照射場の特性を変化させ、その応答を得て、本測定法の特性理解を深めることを目的に実施した。また、照射後から短い時間でのフェーディングの確認を試みた。

### 2. 研究内容

高 LET 放射線として量研機構放射線医学総合研究所の NASBEE を用いて中性子を日本人の臼歯に照射した。中性子は、Be(d, n) 反応で得た。照射は日本人の健常な臼歯を対象とし（N=11）、まずポリエチレンのスラブのファントムを用いて行った（N=6）。

その後、図 1 に示すような条件で、照射する場の放射線特性を変えるために、鉛やポリエチレン、カドミウムを用いた場をつくり、その特性を把握すると共にそれぞれの場で放射した歯の L band EPR tooth dosimetry をおこなった。また

## ～報告書(課題番号:16CV0005)～

フェーディングの影響を調べるために照射終了直後からの測定を行った。昨年度の計測では照射室内が中性子照射により放射化し照射室への入室で、減衰を待つ必要があった。今年度は照射口を塞いで照射をターゲット付近で行うことで、室内への中性子量の漏えいを小さくし、照射直後から照射室に入室できるようにした。

### 実験セットアップと照射線量

本実験では試料を照射ポート内に設置し、Be標的に近づけることで線量率を上げたセットアップを行った。この実験セットアップでは照射後の空間線量が低いため、通常の照射に比べて短い時間で照射室に入室できるというメリットもある。今回は以下の3条件で照射を行った。

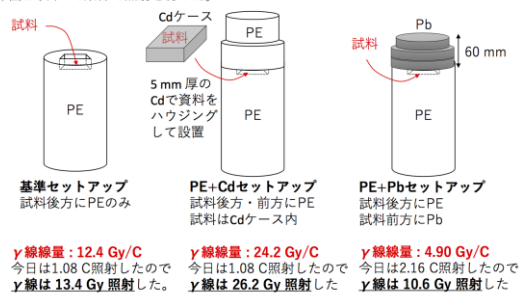


図 1a. ターゲット近傍での室内での照射でのγ線量の計測

### CR-39による速中性子線照射量

γ線感度のないCR-39を用いて速中性子照射量を測定

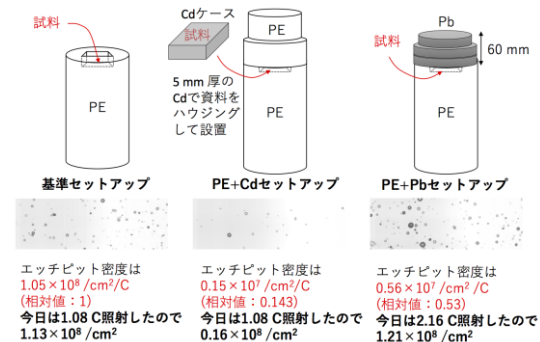


図 1b. ターゲット近傍での室内での照射での中性子線量の計測

## 3. 研究結果:

### 3.1 中性子場での応答

それぞれの歯別に計測した単位線量あたりの EPR 信号を図 2 に示す。歯による線量の応答の違いが大きい、150kV の X 線照射に比べると、平均で 8% (範囲: 2-15%) の応答が観測された。Cs-137 のγ線と比べると 32%程度の応答であると考えられた。

### 3.2 フェーディングの影響

100Gy を照射し、その後の変化を示す (図 3)。チューニング条件の変化によると考えられる相対的な応答の低下が観察されているが、照射直後からの読み取りでも明確なフェーディング現象は観察できておらず放射化量とそれにより線量の見積もりとも一致した。

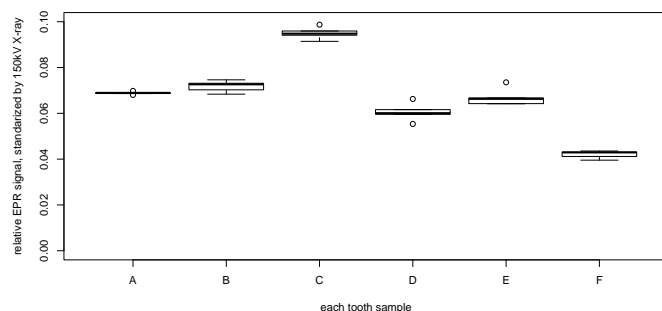


図 2. 中性子照射時の EPR 信号

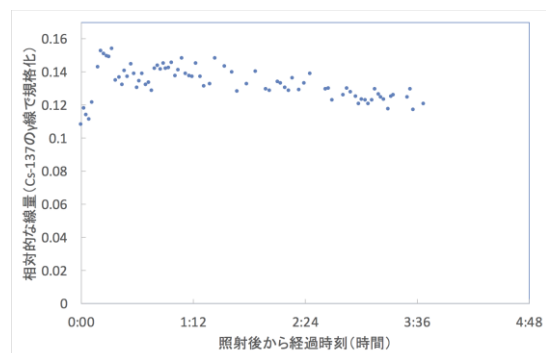


図 3. 中性子照射直後からの信号の変化

### 3.3 中性子照射場の特性を変えた EPR 測定

これらのセットアップで EPR 信号を中性子量と  $\gamma$  線の線量で説明する回帰モデルで解析したところ、ほぼ  $\gamma$  線の線量で EPR 信号の大きさを説明がつく結果となった。中性子量は、CR-39 を用いたエッチピット密度 [ $/\text{cm}^2$ ] で解析したが、エッチピット密度では無視できないエネルギー依存性が確認されており絶対線量の議論には至っていない。PE+Cd セットアップでは  $\gamma$  線で 2 倍、速中性子をほぼ一桁小さくするセットアップに成功していると考えられる。PE+Pb セットアップでは  $\gamma$  線が 0.79 倍、速中性子が 1.07 倍とほぼ PE セットアップと同様の照射場になっている。PE+Cd で照射量を半分にすれば、PE セットアップに比べ  $\gamma$  の影響を 1 倍、速中性子影響を 0.07 倍にする体系も可能ではないかと考えられた。このように場の特性を変化させることで、応答の特性を明らかにする照射実験が実施可能であると考えられる。

### 4. 今後の研究予定

OSL やゲル線量計などを用いて、歯照射条件における X 線照射場、 $\gamma$  線照射場、中性子場の計測もあわせて行い場の特性の把握を深め、計算による予測と測定値を比較することで本計測法の応答特性把握の質を向上させる。

## 平成 29 年度研究成果一覧

課題番号：16CV0005

課題名：中性子照射した歯のインビボ EPR 信号の測定

課題代表者：吉井裕

### 原著論文

1. Umakoshi M., Yamaguchi I., Hirata H., Kunugita N., Williams B., Swartz H., Miyake M.  
In vivo Electron Paramagnetic Resonance Tooth Dosimetry: Dependence of Radiation-induced  
Signal Amplitude on the Enamel Thickness and Surface Area of ex vivo Human Teeth  
Health Physics, 113(4), 262-270, 2017

### 学会発表（口頭発表、ポスター発表、講演等）

1. Miyake M, Nakai Y, Yamaguchi I, Hirata H, Kunugita N and Swartz HM.  
In-vivo tooth dosimetry using a deployable L band EPR spectrometer  
International Conference on Electron Paramagnetic Resonance Spectroscopy and Imaging of  
Biological Systems (EPR-2017), 2017.7.16-22
2. Yamaguchi I, Nakai Y, Miyake M, Kunugita N  
Influence of Ultraviolet Rays in In Vivo EPR Tooth Dosimetry  
ISMAR 2017, 2017.7.23-28

## 硫黄化合物の放射線防護作用に関する研究

16CV0006

○中島徹夫<sup>a</sup>、Guillaume Vares<sup>b</sup>、二宮康晴<sup>a</sup>

a:量研機構・放医研, b: 沖縄科学技術大学院大学

天然由来成分の効用は様々な分野で検討されている。放射線影響の分野でも様々な物質が評価されてきている。硫黄含有化合物は天然由来の中にもあり、我々が注目している硫黄含有成分 DADS はニンニク油の硫黄成分を主な成分である。DADS は化学発がんでの防護効果や抗がん作用などが調べられているが放射線防護の観点での評価が詳細に検討されていなかった。我々は細胞添加実験とともに特に経口摂取できるものとして個体での評価も行い、その中で DADS は細胞でもマウス個体への投与でも X 線によって生じる小核の頻度を軽減させる効果があることを明らかにした。現在、重粒子での評価を行っているが、同時に中性子による影響への防護効果を評価するため本課題を提案した。ここでは培養細胞やマウス個体で X 線での防護作用が確認できた小核形成の系を用いて DADS の中性子での小核形成への防護効果をみる。中性子線での防護効果が認められれば、ISS（国際宇宙ステーション）内で懸念されている中性子線の防護対策の点からも宇宙滞在での利用が期待される。

### （実験内容）

マウス骨髄での評価の結果からヒトでの評価系としてヒト骨髄由来幹細胞（MSC）を用いた。MSC を培養し、カバーガラスを入れた培養ディッシュ上に播種する。1 日培養後、照射 1 時間前から DADS を添加する。昨年度の照射実験で照射の条件の検討を踏まえ、0.5Gy で照射を行い、放射化の冷却後、照射室から持ち出し、培地を交換し小核形成検出のため 2 日間培養後に固定、染色し、形成された小核を計数、評価した。DNA 損傷への影響に基づく生物学的影響が中性子のエネルギー領域により異なると考えられるため[1]、照射する中性子として Deuteron-Be での照射と Proton-Be による照射の 2 条件を行なって検討した。

### （結果）

Deuteron-Be は 10MeV 領域までの広いエネルギー領域での中性子線を当てる条件 (0.1 Gy/min)、Proton-Be は 2MeV 以下の中性子線のための照射 (5mGy/min) となる。このようなエネルギーの違いが細胞における小核の形成、防護剤の効果における違いを生じさせるかの検討も含め評価を行なった。その結果、Proton-Be における照射の場合の方が小核の発生頻度が高めに出る傾向を見いだしたが、どちらの領域の中性子についても DADS の防護効果は認められなかった。今後は照射後初期の DNA 損傷について gammaH2AX foci の形成の変化、

～報告書(課題番号:16CV0006)～

DADS や抗酸化物質の効果等についての検討を行なう予定である。

(参考論文)

[1] Baiocco G., et al. (2016) Scientific Reports | 6:34033 | DOI: 10.1038/srep34033

## 平成 29 年度研究成果一覧

課題番号 : 16CV0006

課題名 : 硫黄化合物の放射線防護作用に関する研究

課題代表者 : 中島徹夫

学会発表(口頭発表、ポスター発表、講演等)

1. 中島徹夫

Differences between photon and particle radiations in terms of their biological effects :  
Evaluation and protection.

第 55 回日本生物物理学会年会 シンポジウム 「Frontiers in radiation biophysics  
utilizing quantum beam technologies」, 2017.9.19-21.

2. 中島徹夫

宇宙滞在における放射線防護のためのバイオマーカーと防護剤の探索.

日本放射線影響学会第 60 回大会 シンポジウム「宇宙における放射線防護を考える -  
影響の多面性と評価-」, 2017.10.25-28.



## SOF 検出器による熱中性子のリアルタイム測定技術の開発

16CV0007

○小川原 亮<sup>a</sup>、村山 祐輝<sup>b</sup>、馬場 健太郎<sup>c</sup>、菅野 理沙<sup>d</sup>、須田 充<sup>a</sup>、  
濱野 毅<sup>a</sup>、石川 正純<sup>e</sup>

a:放射線医学総合研究所、b:北海道大学大学院保健科学院、c:北海道大学大学院医理工学院、  
d:北海道大学医学部保健学科、e:北海道大学大学院保健科学研究院

### 研究目的

NASBEE 装置は速中性子の生物影響を精査するために開発されたが、近年熱中性子場の利用希望が増加している。北海道大学との共同研究により、熱中性子フラックス分布を実測することで照射場特性の評価方法を検討すると共に、効率的な照射が可能な体系を検討することにより熱中性子フラックスの増強を目指す。

### 研究内容

従来、熱中性子束の評価は金線の放射化法が一般的であったが、加速器中性子源では加速器パラメータなどの変化によりフラックスが変動するため、リアルタイムで熱中性子束の評価が可能な検出器が必要となってきた。リアルタイムで熱中性子束測定が可能な検出器として、光ファイバの先端にプラスチックシンチレータを取り付けた検出器（SOF 検出器；Scintillator with Optical Fiber Detector）<sup>[1]</sup>が開発されており、この SOF 検出器を用いることで NASBEE における熱中性子場の評価、長期安定性試験、測定システムの構築を行うとともに、SOF 検出器の改良についても検討する。

現在使用されている SOF 検出器プローブは、シンチレータ内に <sup>6</sup>LiF を含むものと含まないプローブ 2 本を併置し、これらの差分をとることにより熱中性子のみを測定している<sup>[1]</sup>。しかし、2 本のプローブペアを用いる場合、プローブの柔軟性が損なわれ、患者表面などへの固定が困難な場合が生じるという問題があった。そこで、光ファイバ内における光子輸送をシミュレートすることで 2 層構造のシンチレータからの信号を弁別できる可能性を検討し、高感度 CCD カメラを用いて熱中性子による信号のみを弁別できる新たな測定システムを構築し、柔軟性の高い新しい SOF 検出器の確立を目指した。

SOF 検出器は高い空間分解能を有し、またリアルタイム測定を可能としているため、放射化測定に比べ容易に高精度で熱中性子束プロファイルの測定が可能である。一方、最大熱中性子束に対して 95%以上の範囲を平坦領域と定義した場合、これまでの検討から水深 40 mm において平坦領域は 94.2 mm として得られている。照射実験では全ての試料に対し同様の条件で照射することが

望ましいため、熱中性子を広範囲で均一に照射できる照射場が求められている。したがって本研究では熱中性子束プロファイルの平坦化を目的として、フィルタを用いた中央遮蔽法による熱中性子束分布の改善を試みた。

#### 研究結果・考察

2層シンチレータを用いたシングルプローブ SOF 検出器は、内側のシンチレータにのみ  ${}^6\text{LiF}$  を添加している。したがって内側シンチレータでは熱中性子と BG、外側シンチレータでは BG のみ検出しそれらを減算解析することによって熱中性子を検出する思想とした。光ファイバによって輸送後の光強度分布を解析することによって、内側と外側のどちらが光源となったかを弁別可能である。リファレンスとなる従来型 SOF 検出器と同様の結果が得られるように、弁別に必要なパラメータを最適化した決定した結果を図 1(a)に示す。今後の展開としては、これらの弁別に必要なパラメータを高精度に実測で取得する実験体系を確立する。

水中における熱中性子束プロファイルの平坦化には、 $\text{LiF}$  添加サーモプラスチックと  $\text{B}_2\text{O}_3$  添加ポリエチレンの2つの材質を用いたフィルタを利用した。フィルタのデザインは Geant4 Monte Carlo code を用いたシミュレーションに基づき複数の円盤フィルタを作成した(直径 30~50 mm, 厚さ 10 mm を 5 枚、厚さ 5 mm を 1 枚)。図 1(b)に水深 40 mm において直径 50 mm, 厚さ 30 mm の  $\text{B}_2\text{O}_3$  添加ポリエチレンフィルタを設置した場合の熱中性子束プロファイルを示す。フィルタにより相対的な熱中性子強度は 7.7% 減少したが、平坦領域は 121.5 mm となり 30.0% の向上を示した。

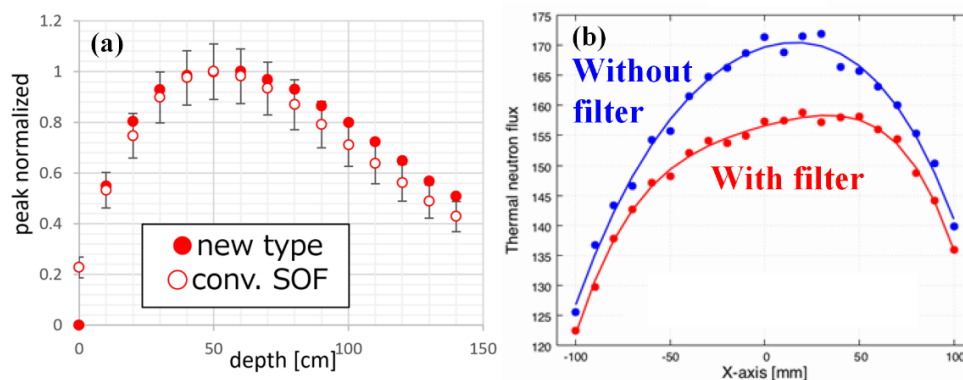


図 1. (a) 開発した 2 層式シングルプローブの SOF 検出器と従来型 SOF 検出器の水中における熱中性子束測定結果。(b) 従来型 SOF 検出器で測定した、平坦化フィルタの有無における熱中性子束プロファイル。

#### 参考文献

- [1] M. Ishikawa, et al., Development of a wide-range paired scintillator with optical fiber neutron monitor for BNCT irradiation field study. *Nucl. Instrum. Meth. A* 551 (2005) 448-457.

## 平成 29 年度研究成果一覧

課題番号：16CV0007

課題名：SOF 検出器による熱中性子のリアルタイム測定技術の開発

課題代表者：濱野毅

学会発表（口頭発表、ポスター発表、講演等）

1. 村山祐輝、馬場健太郎、小川原亮、石川正純

Optical photon transport simulation with GEANT4 for the paired SOF detector improvement

第 113 回医学物理学会, 2017.4.13-16

2. 村山祐輝、馬場健太郎、石川正純

C-MOS カメラを用いた single probe SOF 検出器の開発に向けた検討

第 14 回日本中性子捕捉療法学会学術大会, 2017.9.29- 30

学位論文

1. 村山 祐輝

光ファイバ内光子輸送計算に基づくシングルプローブ SOF 検出器の基礎検討

北海道大学大学院

2. 菅野 莉沙

NASBEE 中性子照射場における熱中性子束分布の評価と改良

北海道大学



## PVA-KI ゲル線量計による中性子線量測定

16CV0008

○吉井 裕<sup>a</sup>、砂川武義<sup>b</sup>、吉橋幸子<sup>c</sup>、濱野 毅<sup>a</sup>、須田 充<sup>a</sup>、青木祐太郎<sup>b</sup>、本田祥梧<sup>b</sup>

a:放射線医学総合研究所

b:福井工業大学、c:名古屋大学

### 報告書本文

福井工業大学の砂川教授が開発した PVA-KI ゲル線量計は、PVA 中の酢酸基とヨウ化カリウムの酸化反応によって生じる  $I_3^-$  との錯体形成により赤い呈色反応を示す化学反応を利用した線量計である。これまでに X 線・ガンマ線や陽子線を照射することにより呈色が確かめられてきた。近年、ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) が注目を集めている背景から、PVA-KI ゲル線量計の適応拡大を目指して、NASBEE による中性子線照射実験を実施し、中性子線による反応を評価することを目的とした。PVA-KI ゲル線量計は福井工業大学で準備し、照射実験・計測、粒子輸送計算 (PHITS2.88、JENDL-4.0) は放医研および名古屋大学が担当した。

使用したゲル線量計の基本組成は、KI 9wt%、ホウ素 0.41wt% である。図 1 は、照射実験の体系図を示す。ポリエチレンの減速材のなかにゲル線量計を入れて中性子を照射した。ゲル線量計の評価は、可視分光法を用いた。照射前後のゲル線量計の吸収スペクトルを計測し、ランベルト・ベールの法則を用いて照射後の吸光度を算出した。

図 2 は、中性子線照射後のゲル線量計の変化を示す。中性子照射後にゲルが赤く変化していることがわかる。図 3 は、中性子線照射後の吸収スペクトルを示す。波長 490nm 付近にピークが確認できる。この波長に着目して、照射時間経過ごとの吸収ピークの吸光度をプロットした結果を図 4 に示す。同図より、照射時間を長くするにつれて呈色反応が進み、吸光度が高くなることを示すことが出来た。

しかしながら NASBEE による中性子場には多くのガンマ線が含まれている。PVA-KI ゲルは放射線による電子剥離反応で  $I^- \rightarrow I^\bullet$  となり錯体を形成して呈色する。すなわち図 4 の結果には中性子とガンマ線の両方の寄与が含まれることが推測される。今後、中性子線とガンマ線による寄与の弁別について検討する予定である。

～報告書(課題番号:16CV0008)～

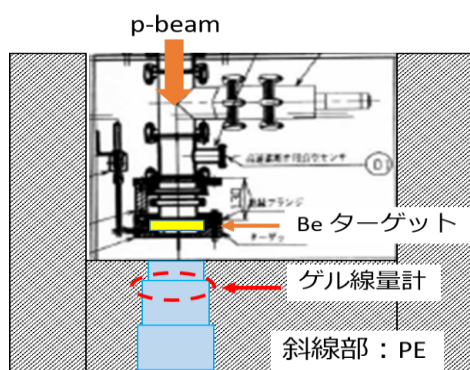


図 1 実験体系図

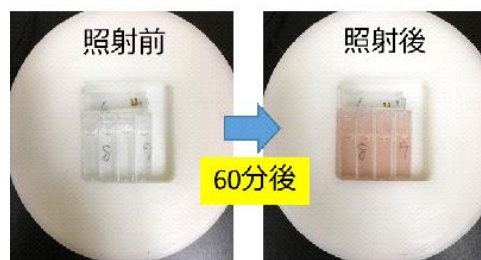


図 2 中性子線照射後のゲル線量計の変化

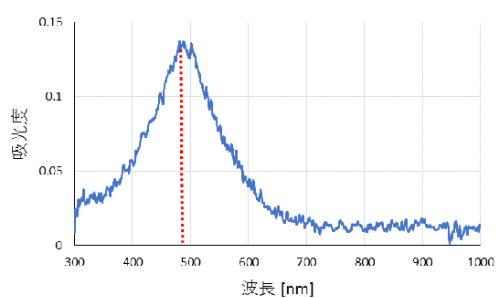


図 3 中性子線照射後の吸収スペクトル

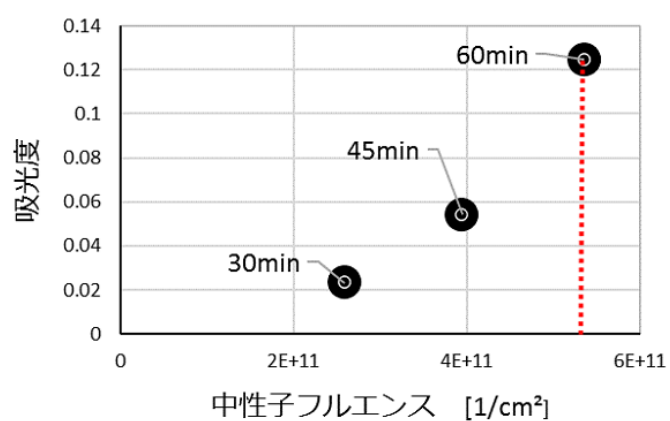


図 4 照射時間ごとの吸光度

## 中性子混合照射場評価のためのモニタ検出器の研究開発

16CV0009

○小川原 亮<sup>a</sup>、小平 聡<sup>a</sup>、須田 充<sup>a</sup>、馬場 健太郎<sup>b</sup>、石川 正純<sup>c</sup>、濱野 毅<sup>a</sup>

a: 放射線医学総合研究所 b: 北海道大学大学院 医理工学院、

c: 北海道大学大学院 保健科学研究院

### 研究目的

一般的に中性子場には熱中性子、速中性子、ガンマ線などが混在する混合放射線場となる。本研究では単一の検出器で速・熱中性子と $\gamma$ 線を弁別可能なパルス波形弁別解析技術を、加速器直下で使用可能な Scintillator with optical fiber (SOF)検出器<sup>[1]</sup>に実装することによって、混合照射場における各成分を同時にモニタ可能な検出器の研究開発を目的とする。

### 研究内容

本研究では放医研 NASBEE 中性子照射施設を利用している。先ず本年度は NASBEE 中性子場の特性を知るため、熱中性子束、速中性子線量、 $\gamma$ 線線量のリファレンス測定を行った。熱中性子束は金箔( $5 \times 5 \times 0.01$  mm<sup>3</sup>、株式会社ニラコ)を用いた放射化測定を行い、厚さ 0.5 mm の Cd で金箔を覆った条件での照射も行い Cd 比を測定した。 $\gamma$ 線線量は速中性子感度が低く $\gamma$ 線感度の高い Optically stimulated luminescence (OSL)線量計(InLight, 株式会社長瀬ランダウア)を使用して測定を行った。速中性子線量は $\gamma$ 線と速中性子の両者に感度のある電離箱(1 cc, IC-17A, Far West Technology Inc.)によって得られた吸収線量(速中性子と $\gamma$ 線)から、OSL 線量計で得られた線量( $\gamma$ 線)を減算することによって取得した。

本実験では 4 MeV の proton と Deuteron を用いた  $^9\text{Be}(p, n)^9\text{B}$  反応と  $^9\text{Be}(\text{D}, n)^{10}\text{B}$  反応による中性子場におけるリファレンス測定を行った。それぞれ検出器を source to target distance (STD) 1000 mm に設置し、検出器後方には厚さ 70 mm のポリエチレン(PE)を設置した。このとき検出器前方に設置する PE フィルタの厚さを 0 ~ 230 mm 変化させ、それぞれの厚さにおける熱中性子束、速中性子線量、 $\gamma$ 線線量を測定した。またそれぞれのビーム条件で熱中性子束が最大となる PE フィルタの厚さにおいて、照射野中心から -150 ~ 150 mm の範囲におけるプロファイルを測定した。また、その実験セットアップにおいて STD を 800 – 1200 mm 変化させ測定を行い、この時 Cd 比の測定も行った。

### 結果と考察

$^9\text{Be}(p, n)^9\text{B}$  反応と  $^9\text{Be}(\text{D}, n)^{10}\text{B}$  反応それぞれにおける、検出器前方の PE フィルタ厚に依存する熱中性子束、 $\gamma$ 線線量、速中性子線量を図 1 に示す。最大

の熱中性子束は PE フィルタ厚が  ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$ 、 ${}^9\text{Be}(\text{D}, n){}^{10}\text{B}$  反応においてそれぞれ 30 mm、40 mm の時に  $3.25 \times 10^4 / \text{cm}^2/\text{s}/\mu\text{A}$ 、 $1.45 \times 10^5 / \text{cm}^2/\text{s}/\mu\text{A}$  として得られた。 ${}^9\text{Be}(\text{D}, n){}^{10}\text{B}$  反応における単位ビーム電流当たりの熱中性子束は  ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$  反応に比べ 4.46 倍である。また Cd 比は  ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$ 、 ${}^9\text{Be}(\text{D}, n){}^{10}\text{B}$  反応においてそれぞれ 5.01 と 4.76 であり約 4.8% の差が生じた。一方、 $\gamma$  線線量は  ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$ 、 ${}^9\text{Be}(\text{D}, n){}^{10}\text{B}$  反応でそれぞれ  $25.8 \times 10^{-13} \text{ Gy}/n_t$ 、 $44.5 \times 10^{-13} \text{ Gy}/n_t$  であり、速中性子線量は  $34.9 \times 10^{-13} \text{ Gy}/n_t$ 、 $72.0 \times 10^{-13} \text{ Gy}/n_t$  という結果が得られた。 ${}^9\text{Be}(\text{D}, n){}^{10}\text{B}$  反応における単位熱中性子束当たりの  $\gamma$  線線量と速中性子線量は、それぞれ 1.72 倍と 2.06 倍である。したがって熱中性子場のみを考慮した場合、 ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$  反応の方が  $\gamma$  線と速中性子の混入線量の少ない場であるため実験に適していると考えられる。熱中性子束が最大になる PE フィルタを検出器前面に設置した場合、熱中性子束が照射野中心に対して 95% 以内となる領域は  ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$ 、 ${}^9\text{Be}(\text{D}, n){}^{10}\text{B}$  反応においてそれぞれ 110.7 mm と 107.3 mm となり、その差は 3.07% と非常に小さい結果が得られた。

## 結論と今後の課題

NASBEE における  ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$ 、 ${}^9\text{Be}(\text{D}, n){}^{10}\text{B}$  反応における中性子場の評価を行った。今季マシンタイムに得られたこれらの結果を元に、来期のマシンタイムでは開発した SOF 検出器の照射体系のデザイン、また線量校正を行う。

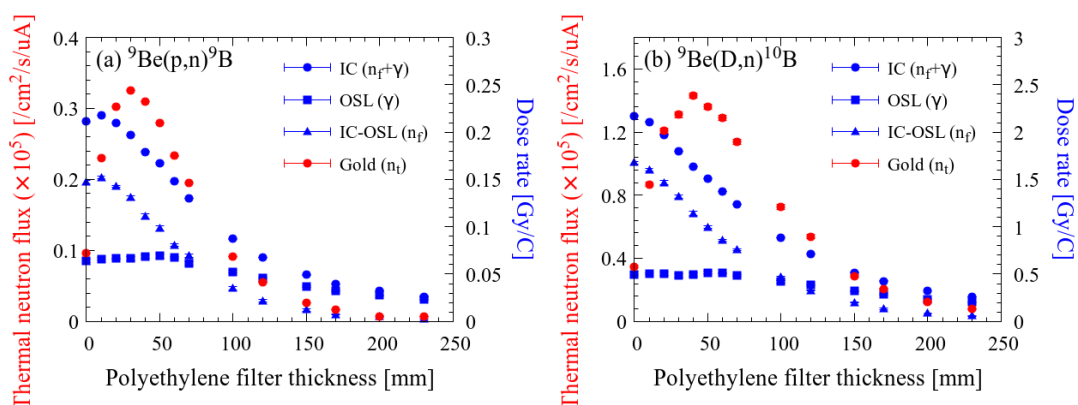


図 1. (a)  ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$  反応と (b)  ${}^9\text{Be}(\text{D}, n){}^{10}\text{B}$  反応による NASBEE 中性子場における、検出器前方の PE フィルタ厚に依存する熱中性子束( $n_t$ )、 $\gamma$  線線量、速中性子線量( $n_f$ )。図中の IC は電離箱(ionization chamber)での測定結果を示している。

## 参考文献

- [1] M. Ishikawa, et al., Development of a wide-range paired scintillator with optical fiber neutron monitor for BNCT irradiation field study. *Nucl. Instrum. Meth. A* 551 (2005) 448-457.

## 施設共用関連課題



## BNCT 用中性子モニターの開発

(2016-009)

○赤堀 清崇

住友重機械工業株式会社

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT: Boron Neutron Capture Therapy) とは、ホウ素と熱中性子の反応を利用してがん細胞へ選択的にダメージを与える放射線療法である。BNCT 治療装置の QA (品質保証) として治療前のビーム品質の確認作業がある。現在、中性子計測手法として金の放射化法が広く用いられているが測定手順が複雑なためより簡便で高速な手法が強く望まれている。住友重機械工業 (株) では、BNCT 治療の普及を狙って BNCT 装置の QA 向けに中性子モニターを開発している (図 1)。

今回、NASBEE を用いて中性子モニターのダイナミックレンジを評価した。高強度な熱中性子場を生成するために 4MeV 重陽子ビームを使用し、発生する高速中性子を減速させるためにポリエチレンブロックを減速体として用いた。ターゲットからポリエチレン減速体表面までの距離は 30mm とし、ポリエチレン表面から中性子検出器の距離は 30mm とした。金箔のカドミ差分法により測定したところ、本照射体系ではビーム電流値が  $300\mu\text{A}$  の時に約  $2\times 10^9\text{n/cm}^2/\text{s}$  の熱中性子束を得られた。今回、2 桁のダイナミックレンジを確認するために、ビーム電流値を下げることで  $2\times 10^8\text{n/cm}^2/\text{s}$  の熱中性子場を作り、さらにターゲットから減速体表面までの距離を徐々に広げることで  $2\times 10^7\text{n/cm}^2/\text{s}$  の熱中性子場における測定を実施した。

開発中の中性子モニターは複数のチャンネルを持っている。本実験では 2 本の検出器を同時に使用して中性子モニターの出力する中性子カウントレートと放射化法により測定した熱中性子束の関係を実測した (図 2)。図 2 が示すように  $1.8\times 10^7\text{n/cm}^2/\text{s}$  から  $2.2\times 10^9\text{n/cm}^2/\text{s}$  の間で線形性が保たれており良好な結果を得られた。住友重機械工業 (株) 製の BNCT 治療装置では約  $2\times 10^9\text{n/cm}^2/\text{s}$  の熱中性子場を生成できる。今回の実験結果により開発中の中性子モニターが BNCT 装置の QA に適用可能なことが示唆された。しかし、今後 BNCT 装置の出力は増強していくことが予想されるため、さらに強い中性子場においても線形性が保たれているか確認する必要がある。



図 1 中性子モニタプロトタイプ

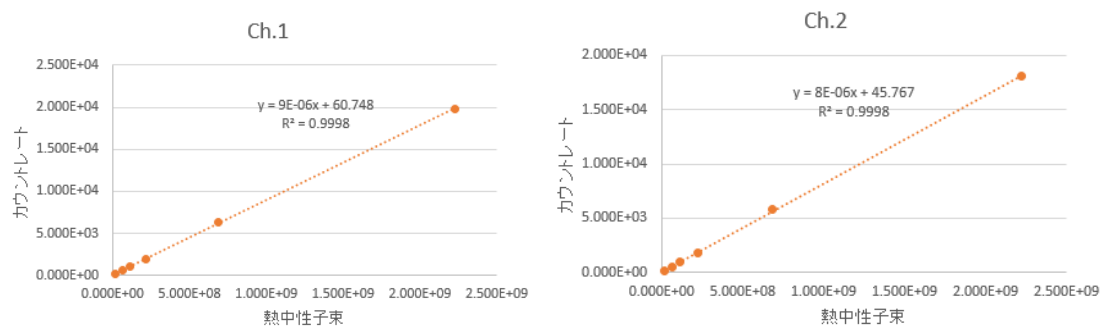


図 2 カウントレート vs 熱中性子束の測定結果

## ツバキ花粉におけるセシウムおよびストロンチウムの動態解析

(2016-012)

望月 玲於、中村 真由、青柳 秀紀

筑波大学大学院 生命環境科学研究科 細胞機能開発工学研究室

### 1. はじめに

2011年に発生した福島第一原子力発電所事故により、森林地帯に飛散した放射性のセシウム（Cs）の動態や挙動はほとんど解析されておらず、未解明な部分が多い。森林地帯のCsの動態解析にあたり、樹木細胞におけるCsの動態の解析は重要である。特に、樹木細胞の中でも花粉は生殖（繁殖）に重要な役割を果たしている。本研究ではモデルとしてツバキの花粉を用い、Csの存在下で培養し、マイクロPIXE分析によりCsの元素マップを取得することで、これまで未解明であった、花粉におけるCsの動態を解明した。

### 2. 実験方法

本研究室で独自に開発した高純度セルロースシート(Ultrapur Cellulose Sheet)を寒天培地の上に設置し、その上に花粉を播種して培養するUCS法を用いてツバキ花粉を培養した。今回は花粉におけるCsの動態の解析に焦点をあて、取り扱いが容易な非放射性Csを実験に用いた。50 mMのCsClを含む寒天培地とコントロール培地(CsCl無添加の寒天培地)を作成し、UCS法を用いてツバキ花粉を培養後、発芽していない花粉を試料台に乗せた。超純水で花粉に付着した培地成分を洗浄し、液体窒素により急速凍結させた後、凍結乾燥を行い、試料を作成後、マイクロPIXE分析を行い、比較解析した。

### 3. 結果および考察

CsClを含む培地で培養した花粉(図1)とコントロール培地の花粉(図2)のマイクロPIXE分析の結果を比較したところ、CsClを含む培地で培養した花粉では、顕著にCsが検出された。この結果、ツバキ花粉の培養時にCs<sup>+</sup>がツバキ花粉へ吸着または蓄積したことが示唆された。

CsとKは同じアルカリ金属元素であるため同様の動態を示す可能性がある。CsClを含む培地で培養したツバキ花粉において、Csの存在部位はKと同様であった。しかし、いずれの元素も細胞内に遍在している可能性があり、KとCsがツバキの花粉粒において同様の挙動を示すのかを明らかにすることはできなかった。

また、CsClを含む培地上で培養した花粉でのみClが顕著に検出されたことから、ClはCs<sup>+</sup>と同時にツバキ花粉へ吸着または蓄積していることが示唆された。

本研究は国内外を通じてはじめて、花粉におけるセシウムの動態解析を行った研究である。

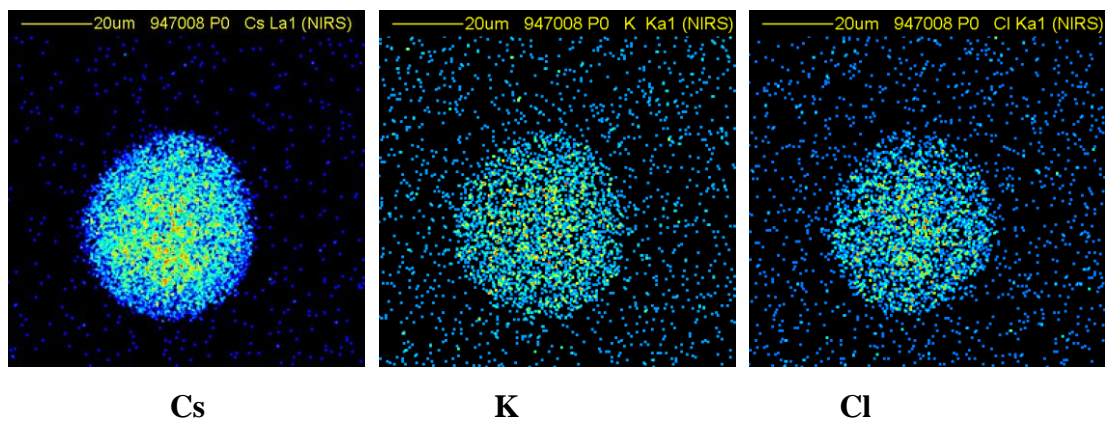


図 1. 50 mM CsCl を含む培地で培養したツバキ花粉の Cs, K, Cl の元素マッピング画像

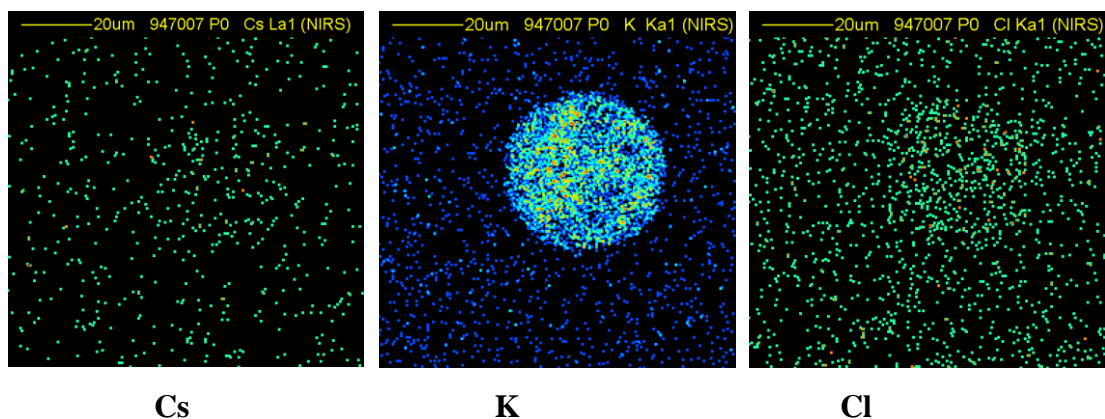


図 2. コントロール培地で培養したツバキ花粉の Cs, K, Cl の元素マッピング画像

～報告書(課題番号:2016-012)～

## 平成 29 年度研究成果一覧

課題番号：2016-012

課題名：ツバキ花粉におけるセシウムおよびストロンチウムの動態解析

課題代表者：望月玲於

学会発表（口頭発表、ポスター発表、講演等）

1. 青柳秀紀、望月玲於

セシウムが花粉の生理活性に及ぼす影響の解析（第 2 報）

日本花粉学会第 58 回（2017 年）大会, 2017.9.15-18

学位論文

1. 望月玲於

セシウムがツバキ花粉の生理活性に及ぼす影響の解析

筑波大学大学院生命環境科学研究科生物資源科学専攻



## ディジタル回路用耐ソフトウェアラッチの耐放射線性能比較

(2016-013)

○難波 一輝

千葉大学

近年の半導体技術の発展により、VLSI(Very Large Scale IC) は高集積化，高密度化，低消費電力化を実現しているが，それに伴いソフトウェアの問題がより深刻化している．ソフトウェアとは，宇宙線由来の高エネルギー中性子線などの衝突により生じる一時的な現象である．中性子線がシリコン部分に衝突すると核反応により正孔と電子が生じ，それらがドレインノードに集まる．すると過渡電圧として観測されその結果としてメモリなどの記憶素子の値が誤って保存される．従来はメモリーシステム上でのソフトウェアに限って重大な問題であるとされてきた．しかし，近年の VLSI 技術においては論理回路におけるソフトウェアに関しても無視できない問題となってきた．理由として，スケールダウンのされた VLSI においては微小時間振動現象によるエラーに対する耐性が無いからである．この問題を解消すべく，多くの研究者によって耐ソフトウェア手法が提案されてきた．多くの手法は実際のデバイスによる評価を行うことが最適であるが，シミュレーションだけで評価が行われていることも少なくない[1,2]．

本照射実験は従来の手法の妥当性検証を目的としている．複数のフリップフロップによって構成されたシフトレジスタを搭載したチップを作成した(図 1, 2)．それぞれのフリップフロップは 2 ラッチのマスタスレーブ構造により構成されており，耐ソフトウェア性ラッチと耐性の無いノーマルラッチそれぞれでのみ構成された 2 回路を比較として用いた．中性子線は直接パッケージされたチップへと照射した．その結果，従来手法のシミュレーションによる評価の妥当性が得られた．具体的に図 3 に示すように，耐ソフトウェア性ラッチ(DICE)を用いて構成されたフリップフロップにおいては，ビーム強度  $320\mu\text{A}$  の中性子線を照射してもエラーの発生が見られなかった．一方，耐性の無いラッチ(NORMAL)で構成されたフリップフロップはビーム強度にほぼ比例してエラー数が増えることが確認できた．

### 参考文献

- [1] Kazuteru Namba, Takashi Ikeda and Hideo Ito, "Construction of SEU Tolerant Flip-Flops Allowing Enhanced Scan Delay Fault Testing," IEEE Trans. Very Large Scale Integr. Syst., Vol.18, No.9, pp.1265-1276, Sep., 2010.
- [2] Yoichi Sasaki, Kazuteru Namba and Hideo Ito, "Circuit and Latch Capable of Masking Soft Errors with Schmitt Trigger," J. Electronic Test.: Theory & Appl. Vol.24, No.1-3, pp.11-19, June, 2008.

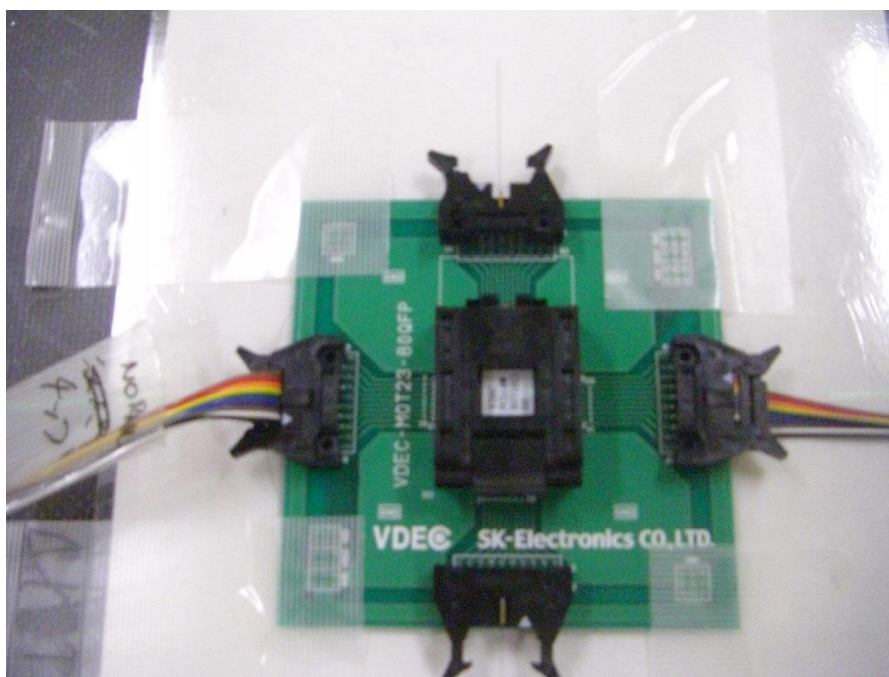


図1 照射対象デバイスの外観

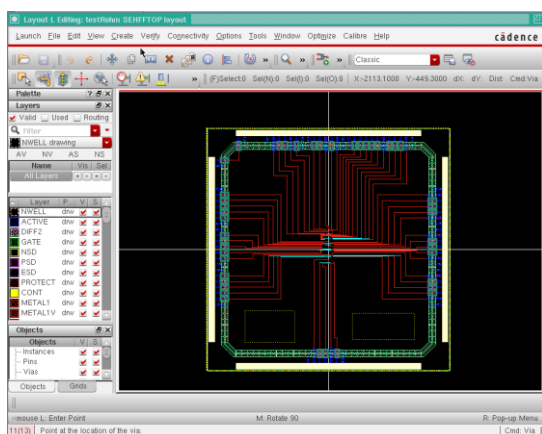


図2 照射対象デバイスのレイアウト

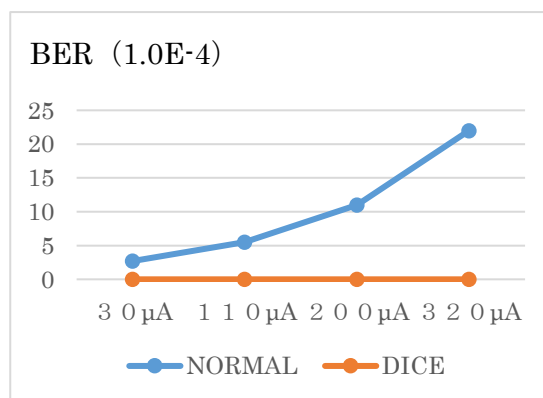


図3 各ビーム強度における誤り率

## 平成 29 年度研究成果一覧

課題番号 : 2016-013

課題名 : デジタル回路用耐ソフトエラーラッチの耐放射線性能比較

課題代表者 : 難波一輝

学会発表(口頭発表、ポスター発表、講演等)

1. 上野 弘貴, 難波 一輝

耐ソフトエラー性ラッチ回路に対する中性子線照射実験の調査と評価

電子情報通信 機能集積情報システム研究会, 2017.6.16

2. 上野 弘貴, 堀田 奈央, 難波 一輝

DICE 構造を元にした耐エラーラッチへの放射線照射実験の評価

ソフトエラー(などの LSI における放射線効果)に関する第 5 回勉強会, 2017.7.25



## 複合構成材の放射線遮蔽特性

(2017-003)

○坂本 智<sup>a</sup>、八高 隆雄<sup>b</sup>

a:横浜国立大学教育学部

b:横浜国立大学名誉教授

X線やガンマ線に対する遮蔽特性の優れた工業材料を開発するため、鉛(Pb)と同程度の放射線遮蔽特性を有する、タングステン(W)繊維を利用した材料の利用を検討してきた。この一連の研究の中で、通気性を有し被服材としても利用可能なWメッシュを重ね合わせ材の成果を明らかにしてきた。W繊維を単位面積当たりの質量が $1\text{kg/m}^2$ 以上になる様に重ねた場合には、X線に対しても、ガンマ線に対しても、ほぼ等々の質量の板材に相当する放射線遮蔽効果を有することを明らかにした<sup>[1]</sup>。

今年度はその続きとして、タングステン繊維を解きバラバラにした後にプレスし、フェルト状に加工した材料を作製し、市販されている各社の放射線遮蔽材と比較した。タングステン繊維はフェルト状に加工することにより通気性と曲げ変形に対する柔軟性を有することになる。そのため比較材も柔軟性を有するタングステン粒子分散プラスチックとした。これらの材料に対して放射線医学総合研究所のガンマ( $\gamma$ )線発生装置およびX線発生装置を用いて、 $\gamma$ 線照射実験では $^{137}\text{Cs}$ の $10\text{ mGy/h}$ の強度(実効エネルギー $661.7\text{keV}$ )、X線ではタングステントargetを用い加速電圧 $150\text{kV}$ で電流 $12.5\text{mA}$ ( $0.5\text{ mmCu}$ フィルターと $0.5\text{mmAl}$ フィルター使用;線量は $15\text{ Gy/h}$ ;実効エネルギー $74\text{keV}$ )と加速電圧 $100\text{ kV}$ で電流 $10\text{ mA}$ ( $1.0\text{mmAl}$ フィルター使用;線量は $27\text{ Gy/h}$ ;実効エネルギー $38\text{ keV}$ )の2条件で調べた。

その結果、現在市販されているタングステン粒子分散プラスチック遮蔽材はいずれもタングステン板の80%前後の遮蔽率にとどまったが、フェルト状に加工したタングステン材は、X線に対してもガンマ線に対しても、単位面積当たりの質量が $1\text{kg/m}^2$ から $45\text{kg/m}^2$ までの実験範囲の試料が、タングステン板材とほぼ同等の放射線遮蔽特性を示すことを明らかにした。さらに実効エネルギーが $38\text{keV}$ のX線に対しては単位面積当たりの質量が $5\text{kg/m}^2$ 以上ではほぼ100%の遮蔽が可能なが分かった。

### 参考文献

[1] 八高 隆雄, 坂本 智, 大谷 忠, 印南輝久:メッシュ状タングステンのガンマ線およびX線に対する放射線遮蔽効果, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.852, 全8 P, 2017



《平成 29 年度 共用施設(PASTA&SPICE、NASBEE、X/γ線照射装置)成果報告書 編集事務局》

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所

加速器工学部 静電加速器運転室

石川 剛弘、三浦 厚

事務局連絡先 e-mail: infopixe@qst.go.jp

ホームページ <http://www.nirs.qst.go.jp>

《編集発行》

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所

加速器工学部 静電加速器運転室

〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

TEL: 043-206-3031 FAX: 043-255-3192

---

平成 29 年度 共用施設(PASTA&SPICE、NASBEE、X/γ線照射装置)

成果報告書

2018 年 12 月発行

---

印刷 (株)エイ・エフ・エイ

©2018 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

Printed in Japan

QST-M-17