
第13回研究報告会

予 稿 集

日時： 平成22年10月27日(木)13 時～16 時 30 分

場所： 福井大学 総合研究棟Ⅰ 13階会議室

《主催》

財団法人若狭湾エネルギー研究センター

《共催》

福井大学

ふくい未来技術創造ネットワーク推進協議会

プ ロ グ ラ ム

開会挨拶

(財)若狭湾エネルギー研究センター 理事長 旭 信 昭

国立大学法人 福井大学長 福 田 優

座長：研究開発部長 峰 原 英 介

「ブラッグピーク付近の陽子線がH2AX リン酸化に与える影響」・・・・・・・・・・ 1
13:15~13:35

生物資源 Gr 主任研究員 高城 啓一

「陽子線がん治療における低線量被ばくによる正常組織反応の機構解明」・・・・・・・・ 3
13:35~13:55

福井大学 准教授 松本 英樹

「レーザー除染機の開発」・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5
13:55~14:15

研究開発部長 峰原 英介

「放射線源情報評価手法の調査」・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7
14:15~14:35

粒子線医療研究 Gr 研究員 高田 卓志

－ 14:35~14:50 休憩 －

「イオンビームによる表面修飾を用いた、ワグコーゲンからなる再生医療用培養基材の開発」・・・・ 9
14:50~15:10

(独)医薬基盤研究所 プロジェクト研究員 柳原 佳奈

「X線照射に感受性の高いトラフグの免疫細胞種」・・・・・・・・・・・・・・・・ 11
15:10~15:30

福井県立大学 教授 宮台 俊明

「環境半導体鉄シリサイド薄膜(β -FeSi₂)の創製」・・・・・・・・・・・・・・・・ 13
15:30~15:50

エネルギー開発 Gr 主任研究員 笹瀬 雅人

「マイクロアクチュエータのための磁性薄膜創製」・・・・・・・・・・・・・・・・ 15
15:50~16:10

エネルギー材料 Gr 主任研究員 石神 龍哉

総括質疑

閉会挨拶

ブラッグピーク付近の陽子線が H2AX リン酸化に与える影響

Effects of Proton Beams in the Vicinity of the Bragg's Peak on the Phosphorylation of H2AX

高城啓一^{*1}、畑下昌範^{*1}、久米恭^{*2}、高田卓司^{*2}、長谷川崇^{*3}

Keiichi TAKAGI, Masanori HATASHITA, Kyo KUME, Takushi TAKATA, and Takashi HASEGAWA

Abstract

Localization of phosphorylated H2AX (γ -H2AX) after the irradiation of proton beams was examined in the vicinity of the Bragg's peak (BP). Track-like γ -H2AX foci in single nucleus was often observed at around the BP, suggesting concentrated DNA damages along the path of a proton with high LET near the end of its range. Total volume of γ -H2AX foci in a nucleus reached peak at the position slightly posterior to the BP. Survival rate of cells at that position seemed to be lower than that at the BP. These results suggest the peak location of biological effects of proton beams exists slightly posterior to the BP.

要旨

陽子線照射後のリン酸化 H2AX (γ -H2AX) 分布をブラッグピーク (BP) の近傍で調べた。BP 近傍では、一つの核内で γ -H2AX フォーカスがトラック様の分布を示している像がしばしば観察された。これは、飛程末端付近の高 LET 陽子線の通過経路に沿って DNA ダメージが集中することを示唆している。核内の総 γ -H2AX 容積は、BP よりもやや後方でピークを示した。BP よりもやや後方位置での細胞生産率も、BP 位置のそれを若干下回るようであった。これらの結果は、陽子線による生物効果のピークが、BP よりもやや後方に位置していることを示唆している。

I. 緒言

我々は、生物育種のための手段として、陽子線、および、炭素線を用いている。これらの内、陽子線に関しては、従来、X 線や γ 線に近い生物効果を持つと考えられてきた。しかし、近年、陽子線がこれらとは異なる効果をもたらす可能性を示す報告が集積されつつある。また、陽子線においても、飛程末端付近のごく短い領域では線エネルギー付与 (LET) が炭素線などの重粒子線に近い値となる。したがって、飛程末端付近における生物効果は、重粒子線に類似したものになる可能性がある。

そこで我々は、陽子線が BP 付近において起こす効果について、二本鎖損傷を引き起こした部位の周辺に現れると考えられている γ -H2AX の分布を指標として調べた。また、BP 周辺の領域における細胞生存率についても調べた。

II. 材料と方法

実験材料としてマウス線維芽細胞株 BALB-3T3 を用いた。

陽子線照射は、W-MAST の高エネルギー汎用照射コース (200 MeV) を使用して行った。照射深度は、ソリッドウォーターを用いて調節した。細胞周期の影響を低減するために、細胞をコンフルエント状態まで培養したスライドフラスコを培地で満たして背合わせにし、培地中でビーム方向並行になるように配置して照射した。

照射後の細胞は、通常条件で 30 分間培養を継続した後、固定を行い、間接免疫蛍光法を用いて γ -H2AX を検出した。

蛍光の検出は、共焦点レーザー顕微鏡 (オリンパス FV-300) を用いて行い、Image J を用いて蛍光画像を解析した。

III. 結果と考察

1. トラック様 γ -H2AX フォーカス

初期フルエンス 16 protons/100 μm^2 で陽子線を照射し、BP 近辺での γ -H2AX フォーカスを調べたところ、核内で点線上にフォーカスが形成されているのがしばしば観察された (図 1A)。このフルエンスでは、核 1 個あたりおよそ 8 個の陽子が入射すると推定され、入射した個々の陽子によって一直線上にフォーカスが形成される確立は極めて低いと考えられる。炭素線やアルゴン線などの高い LET を持つ粒子の入射では、点線状、あるいは、値直線上にフォーカスが形成されることが知られている。陽子線においても、飛程末端付近の極短い距離では、LET が 50 keV/ μm を超えることが推定されている。したがって、飛程末端付近の単一の陽子が、飛跡上に近接して DSB を引き起こし、このような点線状のフォーカス分布が形成されたのではないかと考えられる。

2. BP 周辺での γ -H2AX フォーカス容積

^{*1} 生物資源グループ、^{*2} 粒子線医療グループ、^{*3} ハセテック

初期フルエンスおよそ $320 \text{ protons}/100 \mu\text{m}^2$ で照射を行い、BP 近傍の幾つかの位置において一つの核あたり形成される γ -H2AX フォーカスの容積を求めた(図 1B)。その結果、フォーカス容積は、ピークをもつ 2 相性の変化を示すが、ピークの位置は BP よりも 3 mm 程度後方にあった。このことは、BP よりも後方の、相対線量が低下した位置において、BP 位置よりも多くの DSB が形成されたことを示唆している。

3. 細胞生残率生残率

水等価深度で BP よりも 10 mm 上流、BP 位置、および、BP 位置よりも 3 mm 下流で同一線量の陽子線を照射し、細胞生残率を比較した(図 1C)。その結果、同一線量では、BP、および、BP 3 mm 後方での生残率が、BP 10mm 上流よりも明らかに低いことがわかった。また、BP と BP 3 mm 下流では、BP 3 mm 下流の方が低い生残率を示す傾向が見られた。このことは、同じ線量であっても、BP のほうが BP 上流よりも生物効果比(RBE)が高いことを示し、かつ、BP よりも下流の位置で RBE が BP 位置よりも大きくなることを示唆している。

IV. 結語

陽子線においても、BP 付近では重粒子に類似し、飛跡に沿って集中した DSB が起こることを示唆する結果を得た。また、BP 位置、および、BP よりやや下流位置では、上流位置と比較すると、より多くの DSB が形成され、RBE も高くなることを示唆する結果を得た。以上の結果は、BP のやや下流位置では、核を通過する陽子の内、止まり際の LET が高い陽子が占める割合が高くなるため、平坦部や BP よりも生物効果が高くなることを示唆している。また、これらの結果は、陽子線でも BP 付近の利用により、重粒子線に類似した育種効果をもたらす可能性を示している。

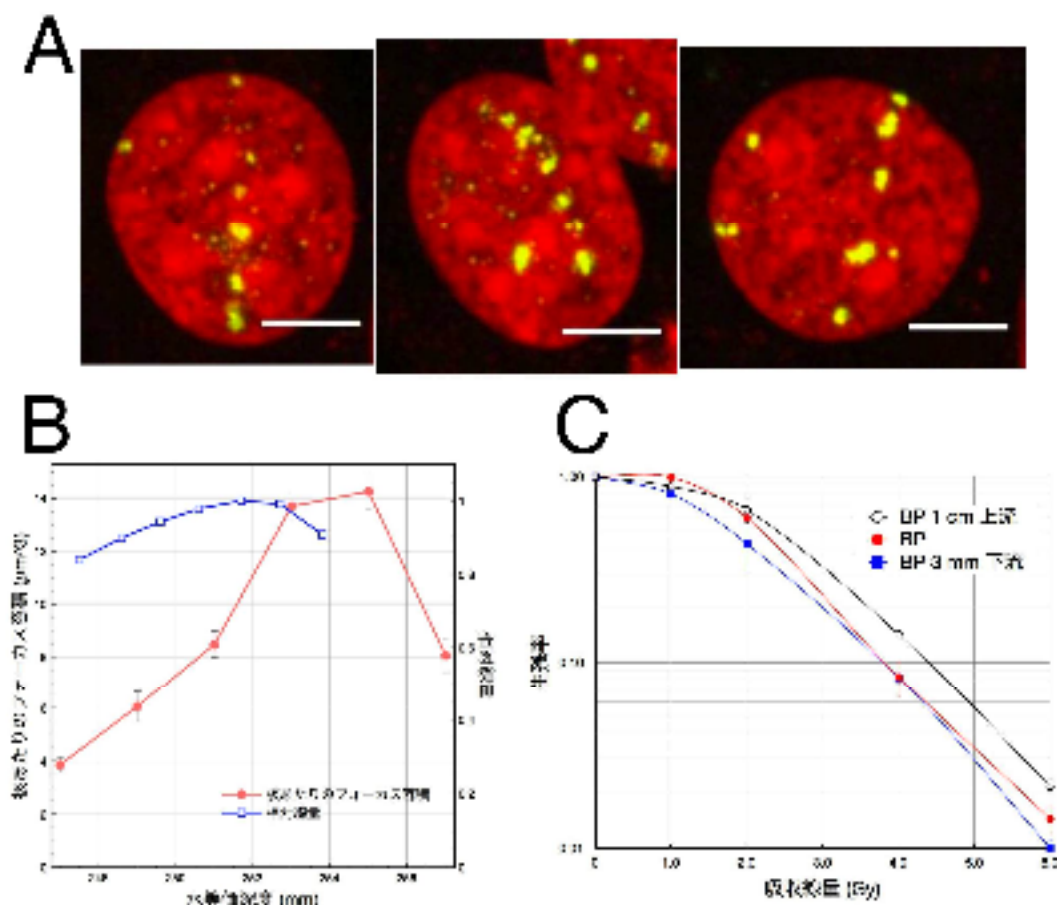


図 1 BP 前後に形成される γ -H2AX フォーカス、照射深度によるフォーカス容積変化、および、照射深度による生残率変化

A: トラック様 γ -H2AX フォーカス。赤色蛍光は核を、黄色蛍光は γ -H2AX 蛍光を示す。Bar = $5 \mu\text{m}$

B: 初期フルエンスおよそ $320 \text{ protons}/\mu\text{m}^2$ で照射した時の、核あたり γ -H2AX フォーカス容積の照射深度による変化、青色のプロットは相対線量の実測値、赤色のプロットは、フォーカス容積変化を示す。

C: BP 1 cm 上流、BP、BP 3 mm 下流における生存曲線。

1. はじめに

「ヒトはどれだけ放射線を被ばくしても健康に支障はないか」という放射線のリスク線量は、高線量被ばくした細胞・動物、そして原爆被爆者からのデータに基づいて評価されている。これは慎重に且つ控えめに吟味されたものであるが、ヒトを含めた生物は低線量／低線量率放射線に対して高線量／高線量率放射線に対するそれとは異なった応答様式を備えている可能性を示唆する知見が数多く報告されている。放射線適応応答、放射線超感受性とその回復、遺伝的不安定性、放射線誘発バースタンダー応答等が低線量／低線量率放射線に特有の応答現象であり、放射線生物学における古典的な「標的説」では説明できない「非標的現象」が含まれている。

近年、放射線がん治療においては、従来の X 線照射装置の弱点である治療期間・線量分布・生物効果の不均一性等の克服を目指し、自動挿入式密封小線源治療装置や強度変調放射線治療装置の導入が図られ、さらに加速器技術の進歩により陽子線や炭素線による粒子線治療装置の導入も盛んに行われている。しかしながらこれらの照射装置を用いても、周辺の正常組織に低線量／低線量率放射線の被ばく域が存在している。

このような背景を踏まえて、陽子線がん治療における低線量被ばくした正常組織の応答様式とそのメカニズムを明らかにすることを目的とした研究を若狭湾エネルギー研究センター公募型共同研究助成により平成 19 年から遂行している。今回の(財)若狭湾エネルギー研究センター主催第 13 回研究報告会においては、放射線誘発バースタンダー応答および放射線適応応答を概説し、平成 22 年度当該共同研究において得られた成果の一部を紹介する。

2. 放射線誘発バースタンダー応答

1992 年、Nagasawa と Little が非標的細胞における、放射線によって誘発された DNA 損傷に因らない間接的な放射線影響について報告したのが放射線誘発バースタンダー応答の最初の論文である[1]。その後多くの放射線誘発バースタンダー応答に関する論文が報告され、これによる細胞死の亢進、姉妹染色分体交換、染色体不安定性および突然変異の増加、細胞内活性酸素種の増加、p53 細胞内含有量の減少あるいは増加等様々な生物現象が観察されている。また放射線誘発バースタンダー応答は培養細胞のみならず、培養組織・個体(マウス)においても認められている。

放射線誘発バースタンダー応答のメカニズムは十分に明らかにされていないが、放射線に直接曝露された標的細胞とそうでない非標的細胞(バースタンダー細胞)間のシグナル伝達が重要な役割を果たしていることに疑いの余地はない。この細胞間シグナル伝達にはギャップ結合、リガンドとその受容体の結合、可溶性のバースタンダー因子等が関与していることが報告されている。可溶性のバースタンダー因子として活性酸素種(reactive oxygen species, ROS), TNF- α , TGF- β 1, IL-1 β 、および IL-6 等が候補として報告されている。我々は可溶性バースタンダー因子の一つが内因性の一酸化窒素(NO)であることを見出した[2]。

この放射線誘発バースタンダー応答には、バースタンダー細胞にとって不利な(有害な)ものばかりでなく、有利な(有益な)ものも報告されている。我々は放射線が誘発する NO を介したバースタンダー応答により放射線抵抗性が誘導されることを見出した[2,3]。

3. 放射線適応応答

1984 年、Wolff らがヒトリンパ球を用い、予め[α - 3 H]チミジンで標識した細胞では、未処理の細胞に比して、高線量放射線による染色体異常の誘発率が低下することを報告したのが放射線適応応答の最初の論文である[4]。つまり DNA に取り込まれた[α - 3 H]から放出される微量の β 線によって内部被ばくした細胞は、未処理の細胞に比べて高線量放射線に対して抵抗性を示した。その後異なった細胞系を用いて彼らの発見を支持する多くの論文が発表され、染色体異常、突然変異、放射線感受性等の様々な生物現象において確認されている。放射線適応応答は、培養細胞のみならず個体(マウス等)においても観察される応答現象であり、その誘導には「適応線量(Window of priming dose)」(効果的に適応応答を誘発する予備照射線量)および「適応時間(Interval period between priming and challenge irradiations)」(予備照射と本照射の間隔時間)が重要である。

未だ放射線適応応答の誘導メカニズムの全容は明らかにされていないが、幾つかの仮説が提唱され、新たな DNA 修復機構および細胞周期調節機構に関与する遺伝子群の転写およびタンパク質合成が放射線適応応答

には必要であることが示されている。我々は、誘導型 NO 合成酵素 (inducible nitric oxide synthase, iNOS) が放射線適応応答の誘導において重要な役割を担い、NO が放射線適応応答の誘導のイニシエーターであることを明らかにした[5,6]。

4. 平成 22 年度若狭湾エネルギー研究センター公募型共同研究により得られた成果

I. 研究目的

正常マウス(ICR マウス)を用いて、陽子線により誘発される小腸および精巣におけるアポトーシスを指標として、マウス個体における陽子線誘発バイスタンダー応答を解析することを目的とした。

II. 材料と方法

- (1)マウス: ㈱日本クレアの ICR マウス(jcl:ICR)、雄、5 週齢を通常飼育したものを用いた。
- (2)マウスへの粒子線照射: 陽子線(200 MeV/u, 0.5 keV/μm)を全身照射、上半身(剣状突起より頭側全て)照射、あるいは下半身(剣状突起より尾側全て)照射した。上半身および下半身の遮へいは真鍮のコリメーターにより行なった。コリメーターの裏側での散乱放射線の線量は目的線量の 1/100 程度であった。
- (3)小腸および精巣におけるアポトーシス解析: 照射後 36 時間目に小腸および精巣を摘出し、中性ホルマリン固定後、パラフィン切片を作製し、TUNEL 染色によりアポトーシスの誘発頻度および誘発細胞種を解析した。

III. 結果および考察

陽子線を全身照射した場合(4 Gy)、小腸において TUNEL 陽性細胞が非照射群に比べて有意に増加していた。また TUNEL 陽性細胞が認められる部位は小腸腺窩の基底部であった。これらの TUNEL 陽性細胞が分布する位置は、Potten らが、小腸幹細胞として提唱している position 4 細胞および前駆細胞として提唱している position 5 および 6 細胞の位置と非常によく一致している。陽子線の上半身照射により小腸においてバイスタンダー応答によると思われるアポトーシス誘導、すなわち TUNEL 陽性細胞が顕著に認められた。バイスタンダー応答による TUNEL 陽性細胞が認められた部位も小腸腺窩の基底部であり、そこに位置するといわれている小腸幹細胞および前駆細胞がアポトーシスを起こしていることが示唆された。精巣においても、TUNEL 陽性細胞が認められた部位は精巣小体の周辺部であり、精子幹細胞および前駆細胞がアポトーシスを起こしていることが示唆された。これらの陽子線誘発アポトーシスは、NO 捕捉剤である carboxy-PTIO の照射前腹腔内投与により抑制された。

IV. まとめ

正常マウス(ICR マウス)の小腸および精巣において、低線量および高線量陽子線の直接被ばくおよび高線量陽子線部分被ばくによるバイスタンダー応答によってアポトーシスが誘導されることが示された。また照射前の carboxy-PTIO 腹腔内投与によりアポトーシス誘導が抑制されることが示され、個体でのアポトーシス誘導に NO が重要な役割を担っていることが示唆された。またアポトーシス誘導される細胞が小腸幹細胞および前駆細胞、精子幹細胞および前駆細胞である可能性が示唆された。

引用文献

- [1]Nagasawa, H., Little, J.B., *Cancer Res.*, **52** (1992) 6394.
- [2]Matsumoto, H., Hayashi, S. *et al.*, *Int. J. Radiat. Biol.*, **76** (2000) 1649.
- [3]Matsumoto, H., Hayashi, S. *et al.*, *Radiat. Res.*, **155** (2001) 387.
- [4]Olivieri, G., Bodycote, J., Wolff, S., *Science*, **223** (1984) 594.
- [5]Matsumoto, H., Takahashi, A., Ohnishi, T., *Cancer Res.*, **67** (2007) 8574.
- [6]Takahashi, A., Matsumoto, H., Ohnishi, T., *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, **71** (2008) 550.

レーザー除染装置の開発

Development of the Laser Cleaner for Decontamination at Nuclear Power Reactors

峰原英介

Eisuke J. MINEHARA

この研究課題においては、レーザー除染装置を種々のレーザー発振器装置とその周辺機器を用いて実現する可能性について研究開発を行ってきた。フェムト秒自由電子レーザー¹⁾、水噴流導光レーザー、Q スイッチ YAG、ファイバーレーザーなどを用いて行った。レーザーを縮小光学系などで集光して昇華するために十分なエネルギー面密度にするのでどのレーザーを用いても表面深く、溶融することなく除去が出来て、RI を用いない汚染模擬体での除染率はきわめて高いものが得られた。これを実用とするために、レーザー除染装置を試作開発する計画を進めて来た²⁾。

開発内容は、レーザー除染装置に使用する、今まで使用されてきたレーザーとは異なる形式の種々のレーザー発振器を用いて、さらに異なる方式の光輸送系等の開発を行ってきた。小型のハンディタイプから比較的大型の定置式、さらに大型蒸気発生器専用のレーザー除染機などの RI を扱うホット試験や RI を扱わないコールドの試験、サービス、概念設計検討などを行い、実用化を進めて来た。

モデル事業での小型レーザー除染機試作によるホット試験、試験サービスに参加する予定である。レーザー除染機に対する今までとは異なる形式のフラクタルレーザー、FEL、最も安価な産業用レーザーなど種々のレーザー発振器、異なる方式の集光系、光輸送系等の各種部品の開発を行った。現状の除染機の適応対象である原子炉 1 次系の重度の汚染から、2 次系、保管設備、ホットラボ、原子燃料加工設備、原子力事故に伴う汚染など軽度の汚染へ適用範囲を広げるために開発を行った。

各機関、企業との共同研究の立上げ、必要な機器の借用先、異なる適用分野の専門部署、機関と共同研究を行う予定で準備を行ってきた。今後計画中のマルチファンドと次年度のモデル事業などマッチングファンドに対応しない研究開発部分を協力関係にある教育機関、特に大学、研究機関、企業と協力して実施した。

H21 年度は、レーザー除染特許を出願し⁴⁾、可能性試験調査の実施とその重要な一部であるふげんの原子炉 1 次系配管のホット除染試験に成功した³⁾。H22 年度のモデル事業にて、除染用レーザー発振器機器調査と除染用レーザー発振器借用機器による実験を実施、これにより小型レーザー除染機の試作に成功し、コールド試験にてウェットサンドブラスト除染と同等の 0.5-1g 毎分の実処理速度を確認、さらに 40g-100g 毎分処理速度の可能性を評価により確認した。今後、複数の国内外特許出願と取得予定、国内外学会発表、国際会議発表、展示会発表、論文、解説記事等を予定している。

H23 年度は、レーザー除染試験サービス、実施特許出願など、知的財産の取得、原子力学会等研究会等発表、国際会議等発表、県内国内外展示会発表、定置式レーザー除染機・蒸気発生器除染機概念設計調査、ふげんと敦賀 1 号機など実際の発電用原子炉における小型レーザー除染機ホット実験を予定している。図1は、小型レーザー除染機製作開発の参考になっているレーザー塗装剥離機の製品の使用状況、図 2 は、やはり参考になっている定置式大型サンドブラスト除染装置の製品外観である。



図1、小型レーザー除染機製作開発の参考になっているレーザー塗装剥離機の製品。



図2、参考になっている定置式大型サンドブラスト除染装置の製品外観。



図3、定置式レーザー除染機と類似の機能を持つレーザー加工装置の例。

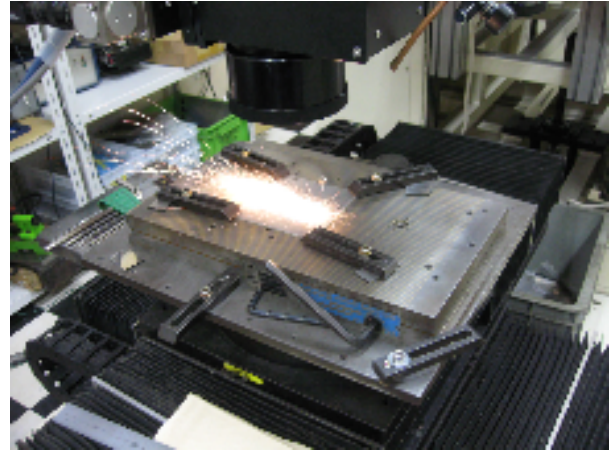


図4、高速で除染を模擬しているレーザー表面剥離中の模擬サンプルの様子。

図3は、定置式レーザー除染装置で、図4は、高速で除染を模擬しているレーザー表面剥離中の模擬サンプルの写真である。

参考文献

- 1) E. J. Minehara et al.: Development and Operation of the JAERI superconducting Energy Recovery Linacs, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A557(2006) 16-22.
- 2) 峰原英介: 若狭湾エネルギー研究センター年報平成 21 年度第 12 巻 79 頁, (2009)。
- 3) 峰原英介: 若狭湾エネルギー研究センター年報平成 21 年度第 12 巻 80 頁, (2009)。
- 4) 特許出願、名称「除染装置及び除染方法」、出願番号 2009-109062。

放射線源情報評価手法調査

Development of a new detection system of positions and directions of radioactive sources

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

Kyo KUME, Takushi TAKATA, Nobuo OTANI and Takashi HASEGAWA

I. 緒言

本調査では、原子力施設の異常時・事故時に環境大気中に漏えいする放射性物質について、大気中の分布を測定する技術の評価してまとめた。

大気中の放射線源の分布を測定する技術として、アンフォールディング計算技術を用いた評価手法を検討した。この手法を適用して放射線源を評価する為の検出器システムを試作し、機能を確認するとともに、検出装置の課題を抽出した。この放射線源情報評価システムを、「もんじゅ」とその周辺のモニタリングポストにおける放射線計測を模擬した体系に適用し、線源情報の計測の可能性と課題を評価した。

II. アンフォールディング計算技術を用いた放射線源評価手法調査と検討

(1) 方法

放射線源情報評価システムに適用される検出器について検討した。本システムの検出器を原子力施設周辺のモニタリングポストに設置する場合、多数の検出器が必要となるが、そのコストを抑える事を目的として、検出素子(NaI 結晶)の最適な形状を評価した。又、線源情報の評価精度を向上するために、放射線の飛来する方向を検知する機能を持つ検出器を検討した。

(2) 結果・考察

放射線源情報評価システムでは、放射線計測装置として NaI 検出器を用いるが、検出器に用いる NaI の結晶は、その大きさによって価格が大きく異なる。多数の検出器を複数のモニタリングポストに配置する事を考慮して、合理的な結晶の形状を評価した。NaI 結晶は円筒形状であるが、評価システムが対象とする放射線源の位置、即ち、放射線が飛来する方向は限定されており、放射線感度の方向依存性の小さい、球状に近い結晶を用いる事が必ずしも必要とは言えない。評価の結果、対象とするエネルギーも限定されている事から、断面が正方形に近い結晶と比較して、円筒軸方向の長方形断面の面積が同等な、即ち、体積の小さい結晶で同等の感度が得られる事が確認された。

III. 放射線源情報評価システムの検証

(1) 方法

放射線源情報評価システムを小型の線源を用いた測定の実験データによって評価し、課題を抽出した。本システムでは、地表に設置された検出器の放射線測定結果から、離れた大気中の線源強度の分布を評価するが、ここでは既知の線源に対して測定を行い、検出器の応答から、その線源の位置が評価できるかを検証した。ここでは、実験施設規模のやや大きな体系(産業技術総合研究所の標準コバルト場)で、高強度の線源を用いた測定実験について述べる。

(2) 結果・考察

放射線源を用いた測定試験によって、評価システムの機能を検証した。実験を行った施設は、屋外に解放された構造の施設であり、数 GBq 程度の強い線源を用いて試験を実施した。評価システムにおいて測定値は、検出位置における放射線の線束評価と線源位置の評価の 2 段階で処理される。線束評価においては、上記の検出装置の課題が明らかになったと共に、測定を行う周辺のコンクリート壁等の構造物や地面による放射線のエネルギー減衰や反射が観測される事が確認された。評価システムで複数の放射性物質を含む放射線源を扱う場合には、高いエネルギーの放射線のエネルギー減衰が、別の放射性物質から放出される低いエネルギーの放射線の測定値と重なる可能性がある。検出器を設置する周辺の構造物等の状況を事前に評価に反映しておく

^{*1} 研究開発部・粒子線医療研究グループ、^{*2} 協力研究員、^{*3} ハセテック

本事業の一部は(独)原子力研究開発機構による委託業務の成果の一部を含む。

必要がある。

線源位置については、測定試験で得られた放射線スペクトルデータを用いて、評価システムによる線源位置についての評価結果を検討した。評価システムにとって最適な検出器配置に対して、いくつかの配置を対象として解析をおこない、検出器の配置に必要な条件と評価結果の配置依存性を確認した。実際の運用に際しては、モニタリングポストの配置を自由に選べる訳ではないので、現実的な制限を取り入れた評価が必要である。

IV. 「もんじゅ」に対する放射線源情報評価システムの適用性評価

(1) 方法

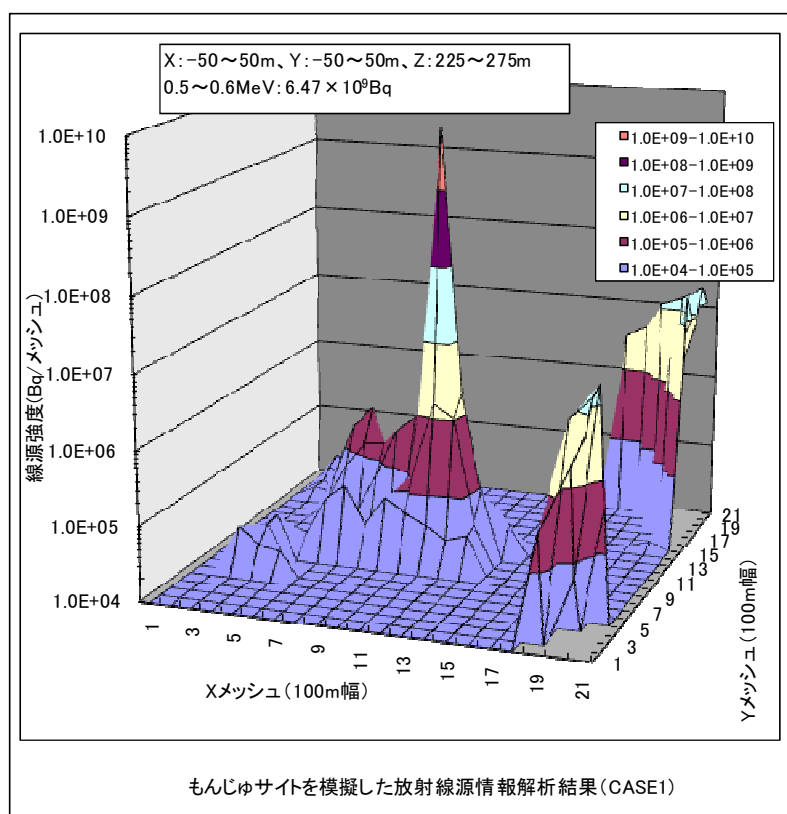
「もんじゅ」を念頭においた位置的条件を模擬し、本システムの適用性を評価した。即ち、「もんじゅ」の安全評価で想定されている放射能の漏えいについて、周辺のモニタリングポストに配置された本システムの検出器によって、その位置等が評価できるかを確認した。

(2) 結果・考察

評価システムを「もんじゅ」の周辺の地形的な位置関係を考慮した体系に適用した場合のふるまいを評価した。評価システムが対象とすると考えられる放射性の希ガスが放出されたとして、「もんじゅ」とその周辺のモニタリングポストの位置を模擬した体系について計算を行い、モニタリングポスト位置の測定データから、「もんじゅ」で放出された放射線源の位置（即ち、「もんじゅ」位置）が同定できる事（図1）、線源が南北に500m移動した際に、その移動が検出器で得られるデータの処理によって確認できる事、放出放射能の量が数10%の精度で評価できる事等が確認された。一方、各検出器のバックグラウンドのレベルに対する放出された放射能による放射線のレベルが、評価システムの適用性において重要であるとの評価を得た。大気中に放出された放射線源のふるまいは、気象とも関連して複雑であり、適切な仮定の設定と評価が不可欠である。

IV. まとめ

本研究により、放射線源情報評価システムの基本的な機能と課題を明らかにした。



イオンビームによる表面修飾を用いた、クラゲコラーゲンからなる再生医療用培養基材の開発
Development of Jellyfish Collagen-modified Biomaterial as a Scaffold for Regenerative Medicine by Surface
Modification Using Ion-Beams

柳原佳奈^{*1}、寺田聡^{*1}、番戸博友^{*2}、高城啓一^{*3}、畑下昌範^{*3}、チウルーンバートル バトチウルーン^{*4}
Kana YANAGIHARA, Satoshi TERADA, Hiroto Banko, Keiichi TAKAGI, Masanori HATASHITA, and
Chuluunbaatar BATCHULUUN^{*4}

要約

クラゲ由来コラーゲンが間葉系幹細胞の分化に与える影響を調べた。その結果、クラゲコラーゲンが間葉系幹細胞の骨分化を促進することがわかった。

コラーゲンを培養基質に安定的に被覆するために、イオンビーム照射による基材の前処理を試みた。イオンビーム照射は基質表面の化学反応性を改善することがわかった。

Abstract

The effects of jellyfish collagen on the differentiation of mesenchymal stem cells were examined. Jellyfish collagen effectively enhanced the differentiation of mesenchymal stem cells into osteogenic cells.

To achieve stable coating of collagen on the surface of a matrix, ion-beams were irradiated prior to the application of collagen. Ion beam irradiation improved the surface reactivity of the matrix.

I. 緒言

再生医療における幹細胞培養技術では、細胞の足場となる培養基材が重要となる。既存の生分解性合成高分子基材は、安全性が高く、取扱いが容易であるものの、細胞に対する効果が低いという欠点がある。そのため、基礎研究では、哺乳類由来のマトリックスタンパクを表面被覆することが多い。しかしながら、臨床応用を考慮した場合、哺乳類由来因子を用いることは、コスト高で、かつ、人畜共通感染症を引き起こす病原性物質の混入が懸念される。

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

II. 方法

1. 再生医療用細胞に対するクラゲコラーゲンの効果～間葉系幹細胞の骨分化に対する効果

300 μ g/ml のクラゲコラーゲンコートした 6well プレートに、ラット骨髄より単離した間葉系幹細胞を 20 万 cells/well で播種し、骨分化培地で 14 日間培養した。このとき 3 日おきに培地交換した。細胞の骨分化は、細胞の石灰化沈着をアリザリン染色法で評価し、さらに Image J を用いて赤斑点占有率（赤斑点面積/全面積）を数値化した。

2. イオンビームを用いた支持体へのカルボキシル基の導入法の確立

イオンビーム照射にはマイクロ波イオン源イオン注入装置を用いた。ポリエチレン(3cm×3cm、厚さ 0.5mm)にアルゴンイオン(100 keV)を 1×10^{12} 個/cm²(0.5 μ A)、 1×10^{13} 個/cm²、 1×10^{14} 個/cm²(1 μ A)でそれぞれ 4 枚ずつ照射した。その後、80%アクリル酸溶液に 62℃で 30 分間浸潤し、カルボキシル基を導入した。導入したカルボキシル基の量は、トルイジンブルーで測定した。

3. カルボキシル基へのコラーゲンの固定化法の確立

カルボキシル基が結合している 96well プレートに NHS を終濃度 0.26g/l、1-エチル-3-(3-ジメチルアミノプロピル)カルボジイミド塩酸塩(EDC)を終濃度 0.08～8.0g/l で添加し、ブタ由来 I 型コラーゲンを終濃度 0.22g/l を添加して、24 時間室温で振とうし、コラーゲンを架橋した。固定化されたコラーゲン量は、コラーゲンの抗体を用いて免疫染色し、その後コラーゲナーゼで剥がして上清中の蛍光強度を測定することで評価した。

^{*1} 福井大学大学院工学研究科、^{*2} 日華化学株式会社、^{*3} 生物資源グループ、^{*4} エネルギー材料グループ
本研究は、公募型共同研究事業として実施した。

Ⅲ. 結果

1. クラゲコラーゲンの間葉系幹細胞分化に対する効果

間葉系幹細胞の骨分化に対するクラゲコラーゲンの効果を検討したところ、哺乳類由来コラーゲン上よりもクラゲの難溶性コラーゲン画分上で細胞の石灰化沈着が促進されており、骨分化が促進されていた(図1)。このように、クラゲコラーゲンは哺乳類由来因子を代替するだけでなく、再生医療に用いられる細胞に対してより高機能な足場となることを見出した。

2. ポリエチレンフィルムへのアルゴンビーム照射

アルゴンイオンを 1×10^{14} 個/cm² で照射することで、ポリエチレンフィルムへのカルボキシル基をある程度導入できた(図2)。今後、この技術をポリ乳酸などの生分解性高分子へ適用し、照射条件および化学修飾の反応条件を最適化することで、フィルム上のカルボキシル基量を精密に制御する。

3. コラーゲンの基材への結合

カルボキシル基へのコラーゲンの固定化法に関しては、架橋剤の濃度を変化させることによって、コラーゲンの固定化量をある程度制御することができた。この架橋法と、イオンビームによるカルボキシル基の導入技術を組み合わせ、クラゲコラーゲンを固定化した機能性足場基材を構築する。

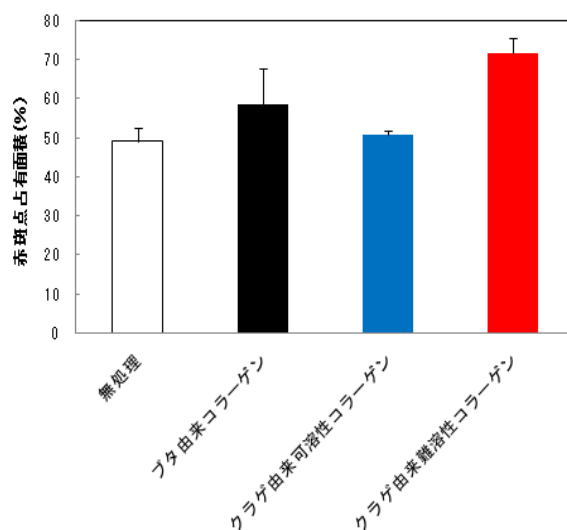


図1. 骨分化誘導 14 日目の細胞の石灰化

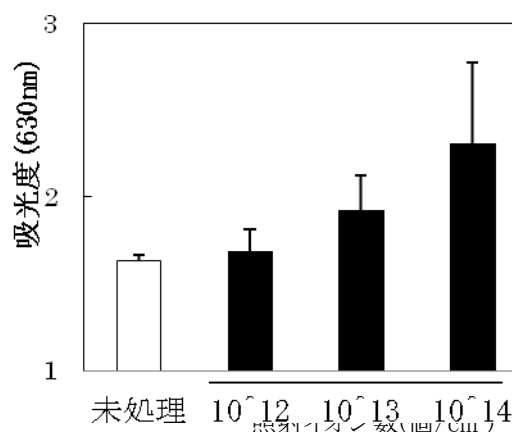


図2. フィルムへのカルボキシル基の導入効率

Ⅳ. 今後の展望

今期の検討では、研究を達成するために3つの重要な成果を得ることができた。今後は、これらの技術をふまえて、生分解性高分子へのクラゲコラーゲンの固定化量を調節し、さらに見出した再生医療用細胞に有効なクラゲコラーゲン画分を用いることで、幹細胞に対して高効率な足場基材を創製する。

X線照射により障害を受けるトラフグの免疫細胞種と耐病性に及ぼす影響

宮台俊明*¹、高城啓一*²

Toshiaki MIYADAI and Keiichi TAKAGI

Abstract

Fish culture industries have been commercially threatened worldwide by infectious diseases with bacteria, viruses and parasites. To prevent the massive loss of cultured fish, the immunological defense of fish against the pathogens should enhance by some sort of artificial methods. However, critical roles of each lineage of leucocytes to eliminate the pathogens have not been well known yet. In this study, we irradiate X-ray to torafugu, *Takifugu rubripes*, to destroy the hematopoietic cells. Fifty percent of fish irradiated with X-ray of 10 Gy were died in 25 days post inoculation. None of differentiating haematocytes in the kidney, which is haematopoietic organ of fish, were observed under microscope. We also cDNA-cloned CD34 and c-kit, which are cell surface maker proteins of haemopoietic stem cells. Both of the works will provide for the investigation on the function of leucocytes of fish.

要約

感染症は世界の魚類養殖の利益を損なう大きな要因となっている。養殖環境は自然環境とは異なるため、養殖魚の感染症を予防するためには、人為的に魚の免疫力を向上させる必要がある。しかし、魚類の免疫に関する知見は少なく、特に白血球の役割に関する研究は緒に就いたばかりである。本研究では、トラフグにX線を照射して白血球を破壊し、免疫力が低下するかどうかを調べた。その結果、10Gyを照射すると25日以内に半数の魚が死亡した。また、造血器官である腎臓内の白血球像を検鏡したところ、分化途上の細胞を認めることができなかった。本研究では、造血幹細胞の細胞マーカーの cDNA クローニングを行った。その結果、CD34 と c-kit の2つの遺伝子のクローニングに成功した。これらの結果を踏まえ、今後は感染実験を組み合わせ、どの細胞種が感染症予防に主要な役割を果たしているかを探索する研究に進む。

I. 緒言

近年、魚類は健康食品として優れていることが知られるようになり、魚類の需要は世界的な増加をみせている。漁獲量の減少と排他的経済水域の設定などによって、獲る漁業は衰退し、養殖業がこれらの需要を賄う産業として発展傾向にある。しかし、家畜や農産物とは異なり、魚類養殖では、養殖に適した品種を育種するまで技術が成熟したおらず、天然魚の形質を保持した魚類を生簀内で集約的に飼育しているのが実態である。自然環境とは異なる状態で生育させるため、予期しない疾病が多発し、全国規模にまで感染症が流行して、壊滅的な被害を蒙ったこともあった。その対策として、抗生剤が多用されたが、安全食品に対する社会的関心が高まるなか、使用規制は強化される傾向にある。北欧、北米ではワクチン開発が進んでいるが、病原体によっては効果的なワクチンの作製に成功しないことも多い。

魚類の感染症予防を、研究が進んでいる哺乳類の免疫機構と同一と仮定すると、免疫学的に説明できないことがしばしばある。そこで、我々は魚類の免疫機構に関する研究を続けてきた。魚類は抗体を産生する動物として初めて地球上に出現した。ヒト・家畜に接種するワクチンは抗体産生を促進させる働きがある。適応免疫といわれるこの免疫システムは、原始的体制に留まっていると考えられる。一方、無脊椎動物にも存在している貪食細胞、レクチン(細菌の凝集を起こすタンパク質)などの免疫システムは魚類にも存在している。魚類免疫では自然免疫が優位に機能している点で哺乳類と異なっているのではないかと予測されるが、未だに予測の域を出ていない。

本研究では、どの細胞種が魚類の主要な免疫を担っているかを調べるため、以下のような実験を行った。

① X 線のトラフグに対する半数致死照射量、② 半数致死照射量の X 線照射における、造血組織(腎臓)における血球種の変化、③ 造血幹細胞の細胞表面マーカーの cDNA クローニング。

今後は、既に検出している細胞マーカーと、本研究で明らかにしたマーカーを用い、X 線障害によって、失われた細胞を特定し、感染症に対する耐性の減少と対照し、どの細胞種が感染症に対して大きな防御効果を発揮しているのかを検証する。

II. 方法

トラフグの造血器官である腎臓への照射を試みた。トラフグの腎臓は体表からおおよそ 2 cm の位置にある。そ

*¹福井県立大学海洋生物資源学部、*²生物資源グループ

本研究は、公募型共同研究事業として実施した。

こで、水深 2 cm の位置での線量を照射線量とした。深さ方向の線量分布を測定したところ、腎臓位置の線量は体表のおよそ 75% となる。また、底部における線量は、体表の 50% 以下になると推定される。横方向の線量分布は、中心から半径 5 cm 以内で、ほぼ平坦な線量分布となった。1、5、12 分間の照射を行った。各照射線量は約 1、5、10 Gy/個体となる。各照射線量につき、4 個体を用いた。照射後、38 日間飼育して生死を観察し、一部の個体の末梢血、腎臓、脾臓の血球をメイギムザ染色して血球種の観察を行った

ヒト・マウスの血球幹細胞のマーカー遺伝子と相同の配列をトラフグのゲノムデータベースから選抜し、トラフグの腎臓 mRNA 中にそれらの遺伝子が発現しているかどうかを、RT-PCR 法によって検出した。さらに RACE 法によって cDNA をクローニングし、各臓器における遺伝子の発現解析を行った。

III. 結果と考察

(1) X 線による造血障害

10Gy の X 線を照射することによって、半数の個体が25日までに死亡した。生存した個体の血球を観察したところ、末梢血では好中球などの顆粒球は全く観察されなかった。リンパ球数も激減した。非照射個体の赤血球の細胞質には網状構造が観察され、哺乳類の未分化赤血球に類似しているが、照射個体の赤血球の細胞質は均一な単黄色に染色され、あきらかに非照射個体の赤血球とは異なっていた。また、腎臓には分化途上の血球が多数観察される一方、照射個体には未分化白血球はほとんど観察されず、分化した赤血球だけが観察された(図 1)。これらの結果から、腎臓が位置する部位に体外からX線を照射することにより、造血が阻害されることがわかった。特に顆粒球の減少が顕著であったことから、感染症に対する顆粒球の役割を検討できるものと考えられる。

(2) 造血幹細胞マーカーの遺伝子クローニング

我々は抗体産生細胞のマーカー、T 細胞のマーカーのクローニングを行ってきた。しかし、血液幹細胞のマーカーは全魚種を通じて c-kit 以外でクローニングされていない。造血幹細胞は X 線照射に感受性が高いといわれていることから、血液幹細胞の動向を掌握するためにも、複数のマーカーを入手する必要がある。トラフグ造血幹細胞のマーカー候補を検索した結果、2 種類の CD34 をクローニングすることができた。哺乳類の CD34¹⁾と c-kit は全ての造血幹細胞で発現し、分化が進行すると消失する。トラフグの c-kit はすでに Williams ら (2002)²⁾によって遺伝子が特定されている。組織別発現解析を行ったところ、CD34a および c-kit が腎臓と胸腺に発現していることが明らかになった(図2)。今後は血球を分離して in situ ハイブリダイゼーションを用いて発現細胞と特定する必要がある。また、造血幹細胞だけを障害するX線線量を照射し、生存した細胞による免疫活性を測定することにより、感染におよぼす免疫細胞の役割を明らかにしたい。

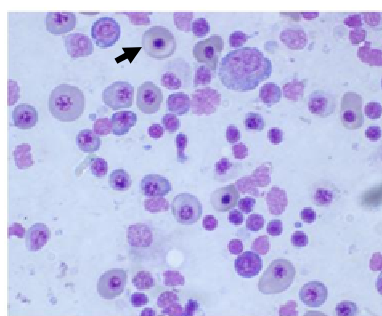


図1 腎臓の白血球。矢印は赤血球を示す。X 線照射により、赤血球以外の細胞の多くは消失した。

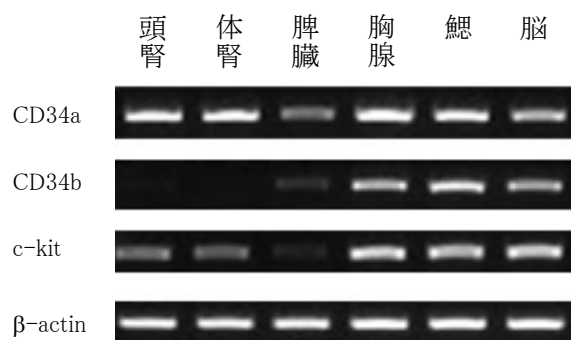


図2 造血幹細胞のマーカー遺伝子の発現。造血器官である腎臓に CD34a と c-kit の発現がみられた。

IV. 謝辞

本研究は若狭湾エネルギー研究センターの研究費により遂行したものであり、同財団には心からの感謝と敬意を表する。

V. 参考文献

- 1) S. Matsuoka, Y. Ebihara et al. : Blood ,**97**, 419-425 (2001)
- 2) H. Williams, S. Brenner, et al. : Gene, **295**: 255-264.(2002)

環境半導体鉄シリサイド薄膜(β -FeSi₂)の創製
Fabrication of "ecologically friendly semiconductor iron dicilicide
films (β -FeSi₂) by Ion Beam Sputter Deposition (IBSD) method

若狭湾エネルギー研究センター：笹瀬雅人
The Wakasa-wan Energy Research Center : Masato SASASE

概要

イオン照射により改質した基板表面を用いることで、良質な β -FeSi₂ を成長させる手法を開発した。さらに、成膜におけるイオン照射の有効性について、透過型電子顕微鏡を用い、ナノレベルの構造を観察することにより明らかにした。

I 緒言

地球上に豊富に存在し、かつ、人体や環境に負荷の少ない元素である鉄とシリコンから構成される環境半導体 β -FeSi₂ は、多くの優れた特性を示すことから注目される材料である[1]。我々は、超高真空中で成膜が可能なイオンビームスパッタ蒸着(Ion Beam Sputter Deposition, IBSD)法を用いて Si 基板上に配向した β -FeSi₂ 薄膜の作製を試みてきた[2,3]。本方法では、Fe と Si の相互拡散が重要な成長過程の 1 つになることが予想される。

本研究では、イオン照射により Si 基板表面を相互拡散が生じやすい構造に改質し、さらにその条件を最適化することで、良質なエピタキシャル薄膜の作製を行った。講演では、断面方向から観察した膜のナノ構造の結果を中心に報告する。

II 実験方法

β -FeSi₂ 薄膜は、IBSD 装置を用いて作製した[2]。基板には、n 型 Si(100)面を用いた。成膜前に Si 表面の自然酸化膜や、炭化物等の汚れを除去した上で、Si 基板表面の改質を行う目的で Ne⁺イオンによるスパッタ処理を行った。処理条件は、加速電圧を 1, 2, 4 keV、照射量を 3×10^{18} , 3×10^{19} , 3×10^{20} ions/cm² と変化させた。また、蒸着は、35 keV の Ar⁺ (180 μ A) を Fe ターゲットに照射し、その近傍に Si 基板を置くことにより行った。成膜速度は、0.5 nm/min、膜厚は 30 nm で一定とし、基板は、973 K に保持した。薄膜のナノ構造は、高分解能透過型電子顕微鏡(Transmission Electron Microscope : TEM, JEM-3000F)を用い、断面方向から観察した。

III 実験結果

Fig. 1 に示したように加速電圧 1 keV、照射量 3×10^{19} ions/cm² では、界面が急峻で高配向膜の生成が確認された。一方、加速電圧を増加させるとダメージ量が大きくなるとともに表面平坦性も急激に悪くなり、多数の結晶粒が島状になって生成して連続膜は得られなかった。また照射量 3×10^{19} ions/cm² 以下では、表面のコンタミが取りきれず相互拡散が抑制され、結晶性の良好な連続膜が得られなかった。スパッタ処理を行わない場合は、高配向膜が得られないことから、これらの結果は、スパッタ処理に最適条件が存在することを示唆している。

IV まとめ

本研究では、成膜前にスパッタによる表面処理を行い、IBSD 法で作製した β -FeSi₂ 薄膜の結晶性について断面方向からの TEM 観察を行った。この結果、IBSD 法にとって加速電圧 1 keV、照射量 3×10^{19} ions/cm² が最適な処理条件であることがわかった。本照射条件により結晶性及び表面構造を損なわない適度な欠陥層が生成し、基板原子と蒸着原子との相互拡散が促進された結果、結晶性の良好な薄膜が得られたものと考えられる。

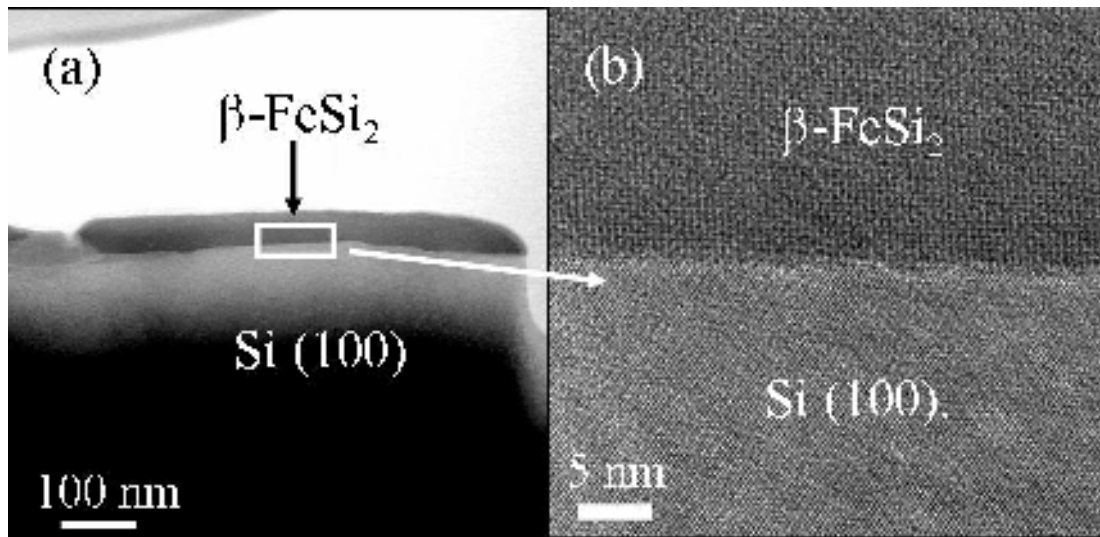


Fig. 1 Bright field images of the film by cross-sectional TEM observation
 (a) Low magnification and (b) High resolution near the interface.

参考文献

- [1] D. Leong, M. Harry, J K. Reeson, and K P. Homewood, *Nature*, **387** (1997) 686.
- [2] M. Sasase, T. Nakanoya, H. Yamamoto and K. Hojou, *Thin Solid Films*, **401** (2001) 73.
- [3] M. Sasase, K. Shimura, H. Yamamoto, K. Yamaguchi, S. Shamoto and K. Hojou, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 4929.

I. 緒言

原子力発電所は高温高压で放射性物質を取り扱う施設であるため、非常に高い信頼性が要求される。信頼性確保のためには設備の定期的な点検が不可欠であるが、放射線の線量が非常に高いエリアもある上、蒸気発生器のように細管が密集している場所もあるため検査は極めて困難である。そのため、人間の代わりに検査を行うマイクロマシンが必要とされており、それに用いるためのマイクロアクチュエータ、センサーなどの開発も必要とされている。本研究では磁気マイクロアクチュエータ、磁気センサーなどの小型化・高速化に利用可能な高性能薄膜永久磁石の開発、および耐放射線性の試験と劣化の原因の解明を目的とした。

II. 実験

Fe-Pt 薄膜は、電子ビーム加熱蒸着装置を用いて作製された。成膜基板には厚さ約 120 nm の酸化層を形成した Si ウェハを使用した。この成膜基板への Fe-Pt 膜の吸着力を向上させるため、最初に成膜基板を 600℃ に加熱した状態で Pt を 10 nm 蒸着し、100℃まで温度を下げた後、Fe 層と Pt 層を交互に蒸着した。Fe-Pt 多層膜の全体の厚さは断面 SEM 像から 110～120 nm であった。Fe-Pt 膜の組成は、SEM に付属のエネルギー分散 X 線分光装置およびラザフォード後方散乱法により測定された。赤外線加熱炉での熱処理後に試料振動型磁力計によって測定されたヒステリシス曲線から、試料面水平方向の方が垂直方向より磁気容易方向に近いことが分かった。

窒素イオンの注入による保磁力の増大実験では、熱処理を行う前の、Fe 層と Pt 層の積層構造多層膜を試料とした。N₂⁺イオンのエネルギーは、イオンの飛程が Fe-Pt 膜の厚さの約半分となるように 120 または 130 keV とした。注入量はビーム電流と照射時間から計算された。照射後に、真空中 650℃15 分間の熱処理と、それに続いて 0.1 気圧の水素ガス中 350℃30 分間の熱処理が行われた。それぞれの熱処理後に、Fe-Pt 薄膜の試料面水平方向と垂直方向のヒステリシス曲線が測定された。窒素イオン注入後と 650℃の熱処理後に、6.0 MeV の ⁴He イオンによる後方散乱測定で Fe-Pt 膜中の窒素原子密度が測定された。また、それぞれの熱処理後に、X 線回折パターンが測定され、回折ピーク幅から結晶子の大きさが求められた。

イオン照射による磁化容易方向の変更実験では、Fe 層と Pt 層の積層構造多層膜を試料とした。50 keV の C⁺イオンまたは 120 keV の N₂⁺イオンが照射された。Fe-Pt 薄膜試料の後ろに熱電対を取り付けた銀板を置き、その下に石英ウールを敷いて試料を熱的に絶縁し、イオンの照射により温度が上がりをやすくした。さらにその下にサマリウムコバルト磁石を置き、注入中に試料内を試料面垂直方向に磁束が通るようにした。照射チャンバー内において、試料は照射前にヒーターで 250℃に加熱され、さらにイオンの照射により最大 560℃まで昇温された。

イオンの照射による磁気特性の劣化試験では、Fe-Pt 多層膜を作製後、真空中で 650℃15 分の加熱を行った Fe-Pt 薄膜を試料とした。加熱後に、磁力計でヒステリシス曲線を測定すると同時に、試料面水平方向または垂直方向に磁化した。磁力計で掛けられた最大磁場は 40 kOe であった。試験では、Fe-Pt 膜を貫通するように 180 keV の ⁴He⁺イオンまたは 90 keV の H⁺が照射された。照射後に、試料は照射前と同じ向きに磁力計に入れられ、ヒステリシス曲線が測定された。

III. 実験結果

図一1 (a)および(b)にそれぞれ、N の注入量に対する試料面水平方向および垂直方向の保磁力を示す。真空中で 650℃15 分間の加熱を行った Fe-Pt 膜では、注入量 3.5×10^{17} atoms/cm² まで保磁力が増加し、最大で 13.3 kOe になった。さらに 0.1 気圧の水素中で 350℃30 分間の加熱を行うことで、最大で保磁力が 15.4 kOe に増加した。試料面垂直方向でも同様に、注入量が 3.5×10^{17} atoms/cm² で保磁力がそれぞれ 12.7 kOe および 14.4 kOe まで増加した。

N の注入量が 1.6×10^{17} atoms/cm²、 3.2×10^{17} atoms/cm² の試料の、注入前、注入後、650℃15 分間の加熱後の後方散乱スペクトルから、Fe-Pt 膜中の N の面密度を求めた。その結果、注入後の N の密度は誤差の範囲で注入量と一致した。これは、注入した N は全て Fe-Pt 膜中に留まっていることを意味している。また、加熱することで N の密度は誤差の範囲で 0 まで減少した。X 線回折パターンから、N の注入量が多いほど結晶子は小さ

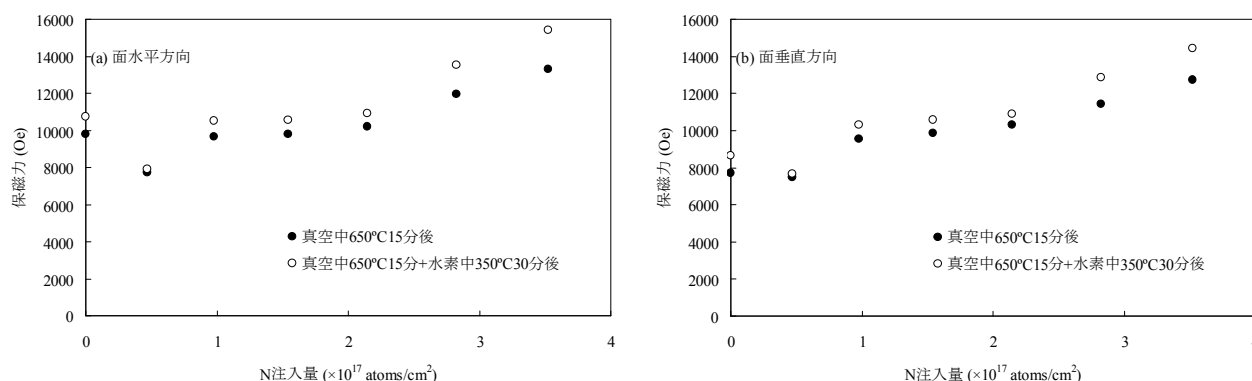
くなるが、水素中での加熱は大きさに影響しないことが分かった。

注入した N 原子が FePt 結晶の成長を阻害したため、または加熱によって N 原子が放出され、残った空孔を介して Fe および Pt 原子の拡散が促進されたため FePt 結晶の秩序化が進み保磁力が増加したと考えられている。ここでの実験では水平方向に 57%、垂直方向に 87%保磁力が増加した。Fe-Pt 膜作製時の窒素ガス導入、または Fe-Pt 膜の窒素ガス中加熱により Fe-Pt 膜に窒素を添加する方法により保磁力が増加したという報告はあるが、増加割合はここでの実験より小さい。これは、イオン注入法は熱平衡状態で吸収できる密度を超えて N 原子を添加できるためと推測される。

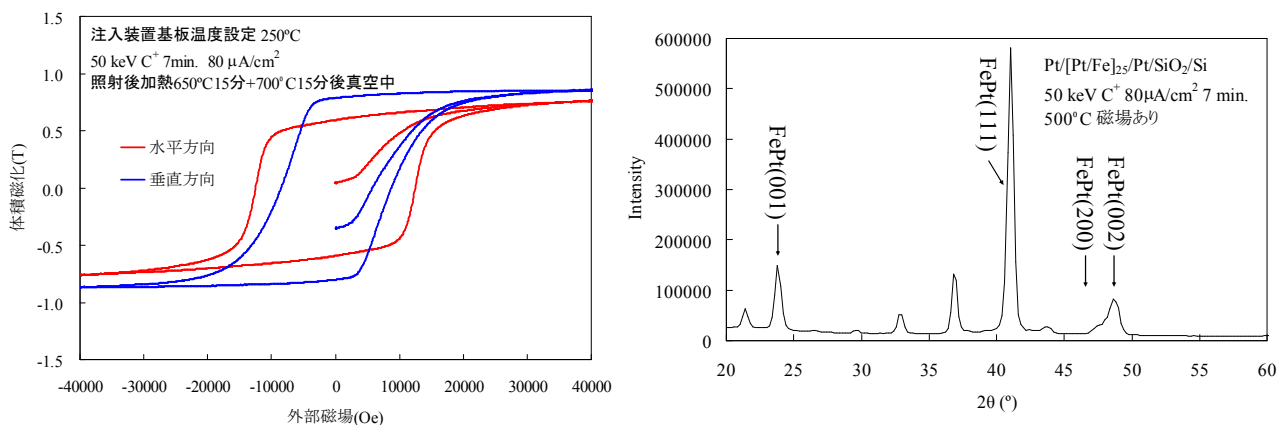
図一2 に、 C^+ イオンを照射中に温度が $500^{\circ}C$ に上がった試料に対して、真空中 $650^{\circ}C$ 15 分間の加熱と $700^{\circ}C$ 15 分間の加熱を行った後に測定されたヒステリシス曲線を示す。照射は電流密度 $80 \mu A/cm^2$ で 7 分間行った。この図から、保磁力は水平方向の方が大きいが残留磁化は垂直方向の方が大きいことが分かる。その結果、最大エネルギー積は水平方向および垂直方向でそれぞれ $64 kJ/m^3$ および $109 kJ/m^3$ となった。これは、垂直方向の方が磁気特性が優れていることを示している。図一3 に、 $\theta - 2\theta$ 法で測定した X 線回折パターンを示す。この図から、磁化容易方向が垂直方向を向いていることを示す(002)からのピークが現れていることが分かる。

照射時の温度が $380^{\circ}C$ または $440^{\circ}C$ のときには、水平方向の方が最大エネルギー積は大きかった。 $120 keV$ の N_2^+ を照射したときには、照射によって試料温度が $460^{\circ}C$ にしか上昇しなかった場合、水平方向の方が最大エネルギー積は大きかった。 $560^{\circ}C$ まで上昇した場合、垂直方向の方が最大エネルギー積は大きくなったが $34 kJ/m^3$ にしかならなかった。これらの結果から、Fe-Pt 薄膜磁石の垂直方向の磁気特性を向上させるには、磁場中において C^+ イオンを $500^{\circ}C$ 以上で照射する必要があることが分かった。しかし、C イオン注入が Fe-Pt 膜に与える影響が分かっていないため、他のイオン種およびエネルギーでさらに実験を行う必要がある。

図一4 (a)および(b)に、 4He または H イオンを照射した後に測定されたヒステリシス曲線を示す。水平方向では照射量の増加とともに保磁力が減少するが、磁場が無いときの磁化はほとんど変わらないのに対し、垂直方向

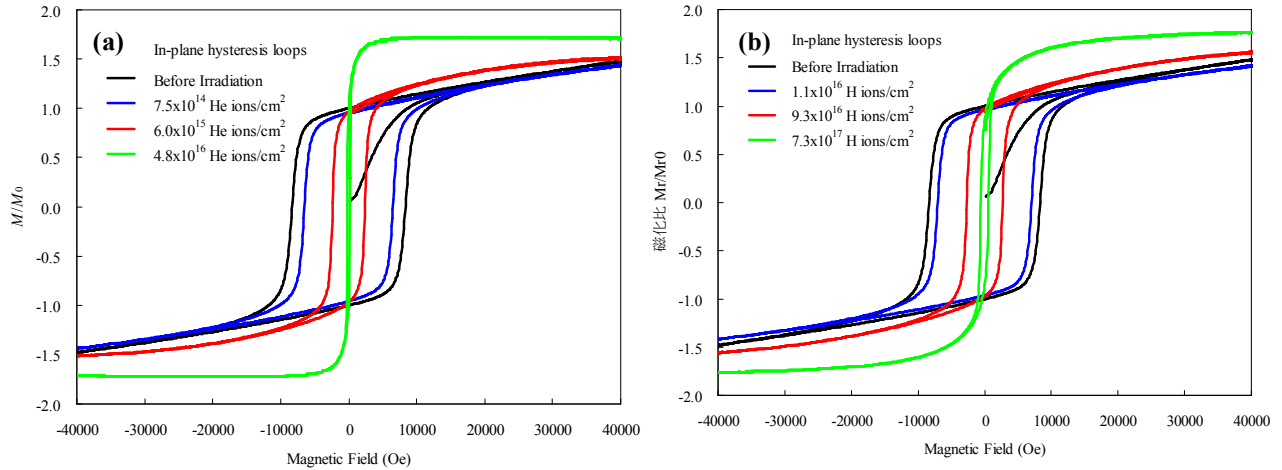


図一1 N の注入量に対する、真空中 $650^{\circ}C$ 15 分間の熱処理後、および水素中 $350^{\circ}C$ 30 分間の熱処理後の Fe-Pt 薄膜の保磁力。(a)が試料面水平方向、(b)が試料面垂直方向である。



図一2 C^+ イオン注入後 $650^{\circ}C$ と $700^{\circ}C$ で真空中で熱処理した後の試料面水平方向と垂直方向の磁化曲線

図一3 C^+ イオン注入後 $650^{\circ}C$ と $700^{\circ}C$ で真空中で熱処理した後の X 線回折パターン



図一4 180 keV の ^4He イオンまたは 90 keV の H イオンを照射する前および照射した後のヒステリシス曲線

では保磁力の減少とともに、磁場が無いときの磁化も減少することが分かる。また、磁石の劣化が同程度に進むのに必要な 90 keV の H イオンの照射量は、180 keV の ^4He イオンの照射より約 1 桁大きい。SRIM2008 を用いて電子的阻止能で比較すると、 ^4He の方が H より約 2 倍大きいだけであり、説明がつかない。一方弾き出された原子の密度を TRIM でシミュレーションすると ^4He の照射の方が H の照射より約 1 桁大きいことが分かった。着磁しても磁化が回復しないことから、Fe-Pt 磁石の劣化は結晶構造の乱れが原因であると推測される。

IV. 結語

Fe-Pt 積層膜に窒素イオンを照射した後、真空中 650°C 15 分間および 0.1 気圧水素中 350°C 30 分間の熱処理を行うことにより、試料面水平方向および水平方向の保磁力をそれぞれ 15.4 kOe および 14.4 kOe に向上させることができた。また、650°C の熱処理により Fe-Pt 膜中の N は抜けてしまうことが分かった。

磁場中で昇温しながらイオン照射することで、水平方向より垂直方向の方が磁気特性が優れた薄膜磁石を作製できる可能性を示した。その現象は、窒素イオンの照射では生じないが炭素イオンの照射では生じること、照射中の温度は 500°C 以上に上げる必要があることが分かった。

180 keV の ^4He イオンまたは 90 keV の H イオンを照射することで、Fe-Pt 薄膜磁石の耐放射線性の試験を行った。その結果、性能の劣化は照射によって弾き出された原子の密度に依存すること、および再着磁しても性能が回復しないことが分かった。これらの結果から、Fe-Pt 永久磁石のイオンビーム照射による劣化は、結晶の乱れが原因であることが分かった。