

氏 名 橋詰 拓弥

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2066 号

学位授与の日付 平成 31年 3 月 22日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 中性子個人線量計の開発を目的とした蛍光飛跡検出器の中  
性子・光子応答の実験的研究

論文審査委員 主 査 教授 波戸 芳仁  
教授 文珠四郎 秀昭  
准教授 萩原 雅之  
助教 岸本 祐二  
教授 佐波 俊哉  
教授 高田 真志 防衛大学校 応用科学群  
教授 安田 仲宏 福井大学  
附属国際原子力工学研究所

(様式3)

## 博士論文の要旨

氏 名 橋詰 拓弥

論文題目 中性子個人線量計の開発を目的とした蛍光飛跡検出器の中性子・光子応答の実験的研究

中性子個人線量計は、放射線作業従事者の中性子線量モニタリングに用いられる。代表的な線量計として、中性子コンバータと飛跡検出器の組み合わせ（以下、飛跡線量計）が挙げられる。飛跡線量計では、中性子との核反応によりコンバータで発生した荷電粒子を飛跡検出器でカウントし、得られた飛跡密度 [ $\text{mm}^{-2}$ ] を校正定数 [ $\text{mSv}^{-1} \text{mm}^{-2}$ ] で除することで、中性子線量 [ $\text{mSv}$ ] を算出する。

飛跡線量計の検出器には、主に PNTD: Plastic Nuclear track detector が使われてきた (1980's~)。PNTD は、熱、高速中性子の両方を検出できるが、長時間の測定前処理を必要とする。PNTD に代わる飛跡検出器として、2000 年代初期に  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C,Mg}$  単結晶を素材とした蛍光飛跡検出器 (FNTD: Fluorescent nuclear track detector) が登場した。FNTD は、照射後直ぐに測定可能で、早速中性子個人線量計への応用が開始された。FNTD による飛跡検出は、FNTD の励起/発光特性により飛跡を画像化し、それらをカウントすることで達成される。この過程は FNTD リーダーおよび画像解析ソフト（以下、FNTD 測定系）で自動化されているが、実用化には至っていない。

FNTD を中性子個人線量測定に適用するには課題がある: 1. FNTD 線量計システムでは、低線量中性子 ( $\sim 0.1 \text{ mSv}$ ) の測定精度は担保されておらず、また低線量限界 (LLD: Low Limit of Detection) の算出手法も確立していない。2. 低線量測定では、解析ソフトの飛跡読み落としが線量の過小評価に繋がるが、読み落としの原因となる飛跡の性質は調べられていない。3. 光子線混在は中性子由来飛跡の読み落としを誘発するが、飛跡の性質による光子線影響の違いは調べられていない。4. 校正線源とスペクトルが異なる任意の中性子場で線量測定を行うには、中性子由来飛跡の性質から読み落としを予測し、校正定数および LLD の算出が必要になる。

本研究では、FNTD の飛跡画像が中性子・光子照射によってどのように変化するか測定し、その結果を基に、任意の中性子場において FNTD 線量計システムの中性子個人線量測定における適応範囲を決定すること、を目的とした。

FNTD 線量計は FNTD ( $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C,Mg}$  単結晶,  $4 \times 8 \times 0.5 \text{ mm}^3$ ) に 3 種類のコンバータ: 高密度ポリエチレン (HDPE: High Density Polyethylene), リチウムガラス (Li-glass), テフロン (Teflon®,  $(\text{CF}_2)_n$ ), を組み合わせた形状で、各コンバータはそれぞれ、高速中性子、低速中性子、バックグラウンド (BG) 放射線の検出、を可能にしている。照射済み FNTD を FNTD リーダー (FXR-700N ver. 5.7, Landauer, Inc.) でスキャンし (表面深さ:  $2.0, 3.5 \mu\text{m}$ ), 飛跡画像を得た。飛跡画像は 1 枚  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ,  $505 \times 505$  ピクセルで構成され、測定面積に応じて得られる画像枚数が決まる。各ピクセルは APD (Avalanche Photodiode, C10508, Hamamatsu Photonics K.K.) が検出した蛍光強度 (FI:

Fluorescence intensity [mV]) を示す.

本研究では FNTD の照射に, 1.  $^{241}\text{Am}$ - $\alpha$  線 (5.48 MeV), 2. 陽子線 (2 MeV), 3.  $^{137}\text{Cs}$ - $\gamma$  線, 4. 中性子 ( $^{241}\text{AmBe}$ , 5.0 MeV), 5. いばらき中性子医療研究センター (iBNCT) での治療用中性子ビーム, を用いた. 1, 2 では, 中性子線量測定で検出対象となる  $\alpha$  粒子, 陽子の飛跡画像と読み落としの関係調べるため, フルエンス, 角度, エネルギー (LET) を調整した粒子を FNTD に照射した. 照射済み FNTD で得られた飛跡画像を ImageJ (National Institute of Health) に取り込み, 飛跡と BG 領域それぞれの FI 値を測定した. 一方で, 画像解析ソフトの飛跡読み取り効率:  $T_{eff} = \text{出力飛跡密度} \div \text{目視による飛跡密度の絶対量}$ , を算出した. 3 では, すでに  $\alpha$  線あるいは陽子線照射した同一 FNTD に  $^{137}\text{Cs}$ - $\gamma$  線を追加照射した. 一定線量  $\gamma$  線を追加するごとに FNTD を測定し, 飛跡画像および  $T_{eff}$  の変化を得た. 4 では, FNTD 線量計 (FNTD とコンバータのセット) に中性子照射 ( $^{241}\text{AmBe}$ , 5.0 MeV) を行った.  $^{241}\text{AmBe}$  照射サンプルでは, 測定系の出力飛跡カウント (出力飛跡密度  $\times$  測定面積) の平均値:  $\bar{N}$  (5 個ずつ) と変動係数: CV (coefficient of variation) の関係を求めた. 5.0 MeV 中性子サンプルでは, 得られた飛跡画像の解析から飛跡の角度分布を求め, モンテカルロシミュレーション (PHITS: Particle and Heavy Ion Transport code System) の計算結果と比較した. さらに飛跡の角度分布から  $T_{eff}$  の推定手法を開発し, 校正定数, LLD の算出式を定義した. 5 では, 校正線源とはスペクトルの異なる中性子実用場として, iBNCT 治療室にて LLD の算出, 線量測定を実践した.

FNTD 線量計システムの  $^{241}\text{AmBe}$  中性子に対する平均出力飛跡カウント:  $\bar{N}$  と変動係数: CV には,  $CV = 1/\sqrt{\bar{N}}$  の関係が成り立った. ただし, この出力飛跡カウントは, 測定系の飛跡読み落としを含む. そこで, 飛跡の性質 (エネルギー (LET)  $\cdot$  角度) と  $T_{eff}$  の関係を調べた. その結果,  $T_{eff}$  は飛跡の入射角度に依存して低下傾向を示した ( $^{241}\text{Am}$ - $\alpha$  線,  $0^\circ \rightarrow 60^\circ$  において,  $0.87 \pm 0.02 \rightarrow 0.82 \pm 0.02$ ). 一方, 50~581 keV/ $\mu\text{m}$  の範囲において, 飛跡読み取り効率は粒子の LET に依存しなかった. 飛跡画像の解析では, 入射角度が大きい飛跡ほど FI 値が低く, 読み落としの原因の一つとして考えられた.  $\gamma$  線混在による飛跡読み落としは, 入射角度の大きい飛跡ほど顕著に見られた. また飛跡画像の解析から, 蛍光強度の低い角度飛跡ほど  $\gamma$  線照射による FI 値のバラつき増加の影響を受け, 検出が難しくなることが分かった. 中性子照射では, 5.0 MeV  $0^\circ$  照射に対して,  $T_{total}$  (全飛跡に対する  $T_{eff}$ ):  $0.86 \pm 0.01$  が得られ, これは反跳陽子飛跡の角度分布と, 前述の角度飛跡に対する  $T_{eff}$  から予測することができた. 最終的に, 任意の中性子スペクトルに対する LLD (CV = 40%) を, 測定面積, BG 飛跡密度, 校正定数, 角度分布,  $\gamma$  線量によって予測することを可能にした. iBNCT での中性子線量測定では, Li-glass 下の飛跡密度に対して  $LLD_{(CV=0.4)}$  を計算し,  $LLD_{(CV=0.4)}$  以上での中性子線量測定が可能であることを実証した.

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏 名 橋詰 拓弥

Title  
論文題目 中性子個人線量計の開発を目的とした蛍光飛跡検出器の中性子・光子応答の実験的研究

中性子個人線量計の素子として広く用いられている CR-39 などのプラスチック核飛跡検出器(PNTD)には、0.1-50mSv という実用上問題のない範囲で使用可能であり、光子感度がないという長所がある一方、測定後処理に数時間が必要、再利用ができないことなどの欠点があり、より良い素子の開発が望まれている。中性子個人線量計の新たな素子の候補の一つである蛍光飛跡検出器(FNTD)は、測定後処理が不要、再利用可能という大きな利点を持つ一方、光子に対して感度を持つ、飛跡読みだし領域が小さく感度が低いなどの欠点があり、中性子個人線量計として実用できるまでに至っていない。

そこで出願者は、FNTD 検出器の元データ=「飛跡を含む画像データ」に立ち返り、FNTD 素子を個人線量計に応用する際の性能の評価を行った。具体的には、中性子入射時に発生する粒子を種々の特性が既知である状態で FNTD に照射する実験を行って、粒子の種類・エネルギー・入射角度による飛跡画像と検出感度の違いを調べることで、FNTD の性質を調べ、中性子個人線量計として用いる場合の問題点の定量的に明らかにするという問題設定を行った。エネルギー・角度を変えた  $\alpha$  線・陽子線を直接 FNTD に打ち込むというアイデアを実行し、飛跡画像の特性、飛跡検出効率、 $\gamma$  線の影響などを個々に実験的に明らかにした。その過程で、FNTD 検出器の  $\alpha$  線検出効率の角度依存が理解され、また、CR-39 の検出効率と FNTD 検出器の検出効率の違いとその原因が理解された。さらに光子照射時の荷電粒子の数え落としの原因が、二次電子によるノイズの変動であることを解明し、その程度を定量化した。そして 4 種類の高速中性子場における FNTD の校正定数および測定下限を決定した。この手法は他の中性子場にも適用可能であるため、例としてこれまでにない強度の高い中性子線をオープンスペースで扱う iBNCT 施設の治療室での FNTD の適用可能性を(世界で初めて)実証し、校正定数と測定下限を求めた。測定下限は既存のソフトウェアを用いている限りでは約 1mSv であり、目標とする 0.1mSv には及ばないが、これがソフトウェアの問題に起因しており、素子としては十分低い下限値が得られていることを明らかにした。

FNTD を中性子線量測定に用いた際の不確かさについて、すでに英文雑誌に掲載されており、荷電粒子の飛跡を読み出す際の  $\gamma$  線分布の影響についても英文雑誌にすでに掲載された。この他に、角度を持った飛跡の  $\gamma$  線影響と iBNCT への素子の応用の 2 報の論文について投稿準備を進めている。また、国際会議でも複数回の発表を行っており英語力に問題がないことが確認された。

中性子個人線量計の標準的な素子が PNTD から FNTD に今後置き換わるとすれば、本博士論文は、その移行のための Mile Stone として重要な研究として位置づけられるであ

ろう。

以上の理由により、審査会は、本論文が学位の授与に値すると全員一致で判断した。