

# 修士論文概要書

Master's Thesis Summary

Date of submission: 01 / 06 / 2021

専攻名 (専門分野) Department	物理学及 応用物理学専攻	氏名 Name	田中 稜	指導 教員 Advisor	片岡 淳 印 Seal
研究指導名 Research guidance	放射線応用 物理学研究	学籍番号 Student ID number	5319A038-9		
研究題目 Title	陽子線治療に向けた二次中性子線量分布イメージングシステムの開発				

## 【研究背景】

陽子線治療は、正常細胞への影響を最小限に抑制しつつ腫瘍へ決定的なダメージを与えることのできる有効ながん治療法として、近年注目を集めている。一方で、真鍮製コリメータおよび患者人体に陽子線が照射されることで、高速の二次中性子線が大量に発生する。これらは、人体に予期せぬ二次被曝をもたらすことが懸念されている。しかしながらこの影響は、現状の治療では正確に評価・反映されておらず、治療環境下で実測による評価を行った研究もいまだ存在していない。そこで本研究では、陽子線照射下で発生する 20MeV 程度までの高速中性子の線源方向イメージング、およびそれによる人体の被曝線量の評価に挑戦した。

## 【中性子カメラの原理と構成】

今回開発したカメラは前後の 2 層に分かれ、各層で 1 回以上弾性散乱した中性子イベントを測定対象とする。1 つのセンサーユニットは n $\gamma$  波形弁別型プラスチックシンチレータと小型 PMT からなり、これを前層に 4、後層に 12 ユニット並べて図 1 のようなイメージング装置とした。具体的な動作原理としては、図 2 のように、中性子が前層で反跳した陽子のエネルギー、および両層間の TOF (Time Of Flight) から散乱中性子のエネルギーを測定する。これらより計算される散乱角と両層での反応位置をもとに、図 2 のような円錐面を描く。これをイベントごとに重ねることで、中性子の到来方向を特定する。さらに本研究では、TOF と PSD (Pulse Shape Discrimination; 波形弁別) を併用して n $\gamma$  弁別を行い、さらなる画像の S/N 比向上を目指した。

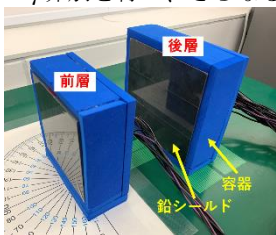


図 1 中性子カメラの構成

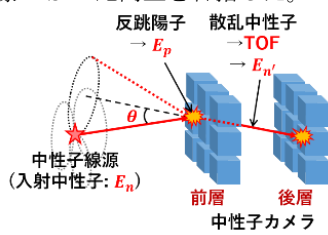


図 2 中性子カメラの原理

## 【中性子線源 <sup>252</sup>Cf のイメージング】

開発したカメラで中性子がイメージング可能であることを確かめるため、まず、中性子線源 <sup>252</sup>Cf を用いて実験を行った。その際に得られた TOF と PSD をそれぞれ図 3(左)と(中)に示す。図のように TOF および PSD でカットをかけて中性子イベントを選別した結果、線源をカメラの視野中心に置いた場合の再構成イメージは図 3(右)のようになり、正しくイメージングすることができた。図中の数字は収束位置であり、角度分解能は 17° (FWHM)であった。

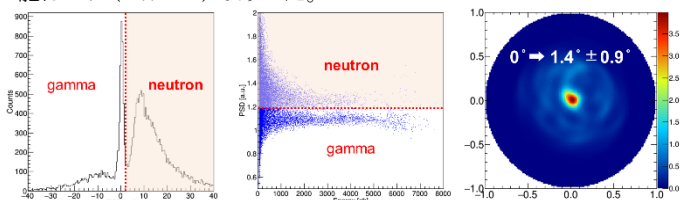


図 3 <sup>252</sup>Cf の実験で得た TOF(左)、PSD(中)、再構成イメージ(右)

## 【70MeV 陽子線照射下で発生する二次中性子のイメージング】

つづいて、陽子線治療環境を模擬するため、放射線医学総合研究所において、コリメータを模した真鍮、および人体を模した水ファントムに 70MeV の陽子線ビームを照射した際に発生する二次中性子を測定した。前述のようなカットをかけた結果、各ファントムをカメラの視野中心(0°)およびその 30°右に置いた場合の再構成イメージは図 4 のようになり、いずれも正しくイメージングすることができた。図中の数字は収束位置であり、角度分解能は真鍮で平均 21°、水で平均 19°であった。

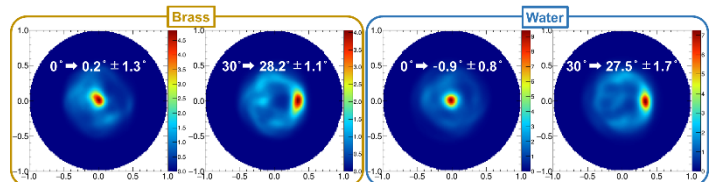


図 4 真鍮(左)および水(右)から発生する二次中性子の再構成イメージ

## 【線量評価と線量分布イメージング】

さらに、G(E)関数法を利用して測定結果の線量評価を試みた。G(E)関数法は、入射中性子のスペクトル計算を経由せずに、検出器の波高分布から線量を直接評価する方法である。本研究では、PHITS シミュレーションで作成したカメラの応答関数をもとに G(E)関数を計算し、これと実験で得た波高分布から、線量を算出した。それを上記の二次中性子の再構成イメージに重ね合わせた結果、線量分布のイメージングに成功した(図 5)。求めた線量率は、真鍮で 307 ± 51 μSv/min、水で 88.1 ± 14.7 μSv/min であり、シミュレーションによる結果とそれぞれ 86%、64%の精度で一致した。

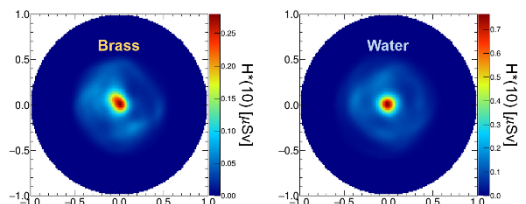


図 5 真鍮(左)および水(右)から発生する二次中性子の線量分布イメージ

## 【まとめと今後の展望】

本研究では、開発した中性子カメラを用いて、中性子線源 <sup>252</sup>Cf のイメージング、ついで 70MeV 陽子線照射下で真鍮および水ファントムから発生する二次中性子のイメージングに成功した。さらに、その際に発生する線量分布のイメージングも達成した。今後は、より実際に近い状況を模擬し、広がった線源の撮像や陽子線治療施設における実験も行っていくたい。

## 【おもな研究業績】

- ①《国際学会(oral, online)》 R. Tanaka et al., "Development of a neutron camera to visualize direction and dose of secondary neutrons in real-time for proton therapy", 2020 IEEE NSS virtual conference, 2020.
- ②《国内学会(oral, online)》 田中 稜(ほか), 「陽子線治療オンラインモニタに向けた二次中性子ドシメトリカメラの開発」, 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, 2020.