

# SANI 2023 成果報告

大阪大学大学院 工学研究科  
環境エネルギー工学専攻  
量子反応工学領域 D1  
藤原 悠



2024 年 3 月 18 日

# 目次

- 派遣先に関して
- 研究活動・成果
  - Microdosimetry
  - Microdosimetry and Medical implants
  - Simulation Studies
  - Results
  - Discussion
  - Future Plan
- 留学生活について
  - College Station
  - Visitation of Neutron Therapeutics @Boston

# 派遣先に関して

## Texas A&M University

### • 基本情報

#### ➤ 規模

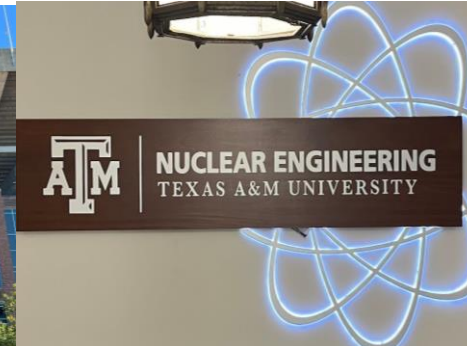
- アメリカ最大の学生数
- 原子力分野で、大学ランキングで3位

#### ➤ 歴史

- テキサス州最古の教育機関
- 農工分野が源流
- 開校当時は士官候補生団への加入が義務づけられていて、現在も**上級軍事大学**に指定

#### ➤ Staff

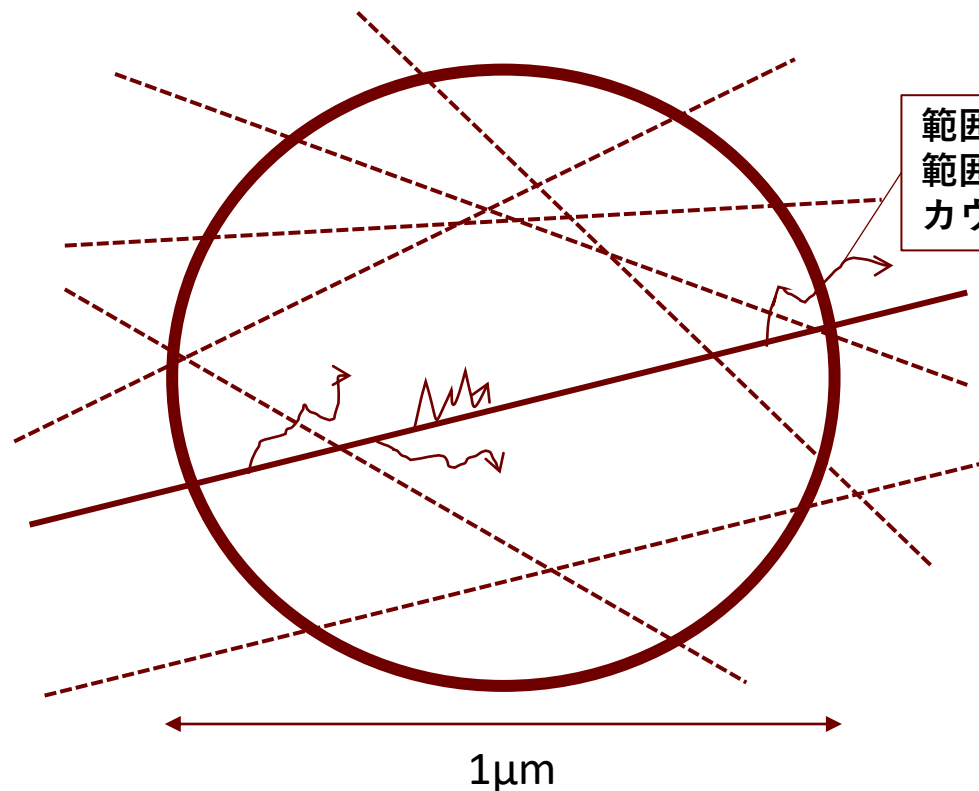
- 豪快な Prof. John Ford と Cameroonian のZavier



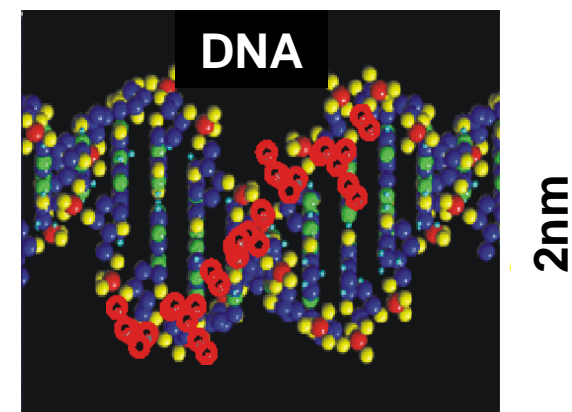
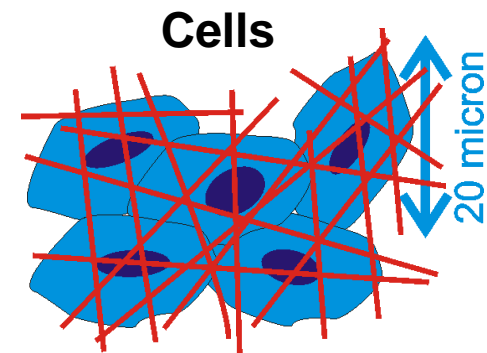
# 研究活動について

## Microdosimetry

- 個々の細胞や亜細胞構造に沈着したエネルギーのゆらぎや荷電粒子の微視的な飛跡[ICRP 103]線エネルギーを基準とし，2次粒子の微視的評価そして生物学的効果の評価に応用される



範囲外に飛び出る粒子は範囲内で蓄積されないのでカウントされない。



# 研究活動について

## Microdosimetric quantities

➤ Lineal Energy Frequency Distribution,  $yf(y)$

$$f(y) = \frac{dF(y)}{dy}, \quad \bar{y}_F = \int_0^\infty yf(y)dy$$

➤ Dose distribution,  $yd(y)$

$$d(y) = \frac{yf(y)}{\bar{y}_F}, \quad \bar{y}_D = \int_0^\infty yd(y)dy = \frac{1}{\bar{y}_F} \int_0^\infty y^2 f(y)dy$$

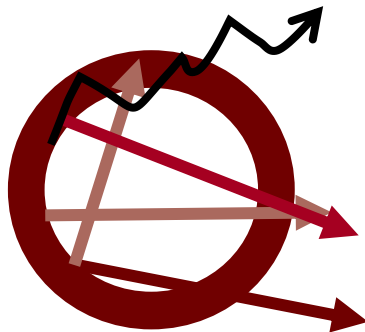
### • スペクトルのイメージ：陽子線源の場合

Proton

Root A

Root B

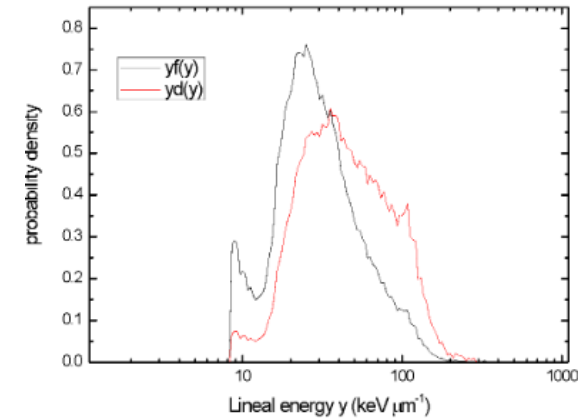
Root C



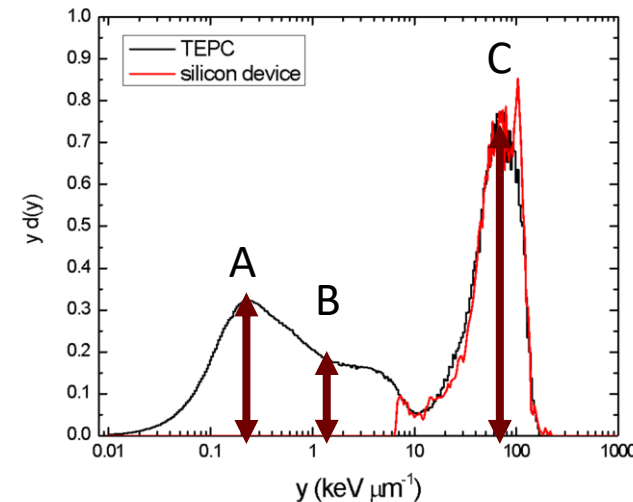
A: 低LET $\gamma$ 線によるピーク

B: エッジ放射

C: 反動陽子



頻度 ( $f(y)$ ), 線量 ( $d(y)$ )  
それぞれの確率分布に  
線エネルギーを乗じる。



# 研究活動について

## Microdosimetry と生物学的効果の関係

### ➤ 線質係数 [ICRU Report 40, 1986]

放射線の種類やエネルギーの違いによる生体への影響を評価する指標。

RBE の値を決定する際にも重要な指標となる。

$$\bar{Q} = \int_0^{\infty} Q(y)d(y)dy$$

Where,

$$Q(y) = \frac{5510}{y} \left( 1 - \exp\left\{(-5 \times 10^{-5} \times y^2 - 2 \times 10^{-7} y^3)\right\}\right)$$

$d(y)$ : Microdosimetric Dose Distribution

---

### ➤ RBE [5,6]

放射線の種類やエネルギーの違いによる生体への影響を比で評価したもの。

様々なRBEの計算モデルが生まれ、RBEの算出が試みられている。

$$RBE = 1.151 \times \left( \sqrt{\alpha^2 + 0.336} + \alpha \right)$$

Where,  $\alpha = 0.0351 \times \bar{y}_D + 0.0885$

Microdosimetry は上記のパラメータの算出に重要な役割を果たす。

# 研究活動について

## 検出器：Tissue-Equivalent Proportional Counter, TEPC

- 概要：組織等価ガス (TE-gas) を封入した比例計数管の1種
  - 構成
    - TE-gas としては**プロパン**などが用いられている
    - 比例計数管の壁には**導電性プラスチック**で覆われており、A-150プラスチックが用いられている。
  - 形状：球状・円柱 (図) etc...
- 動作原理
  - **パルスモード**で動作
  - **放射線**, TE-gas間の反応によって生じた**電子のエネルギー沈着**を信号として取得
  - **ガス増幅**により, 信号とノイズを区別して出力

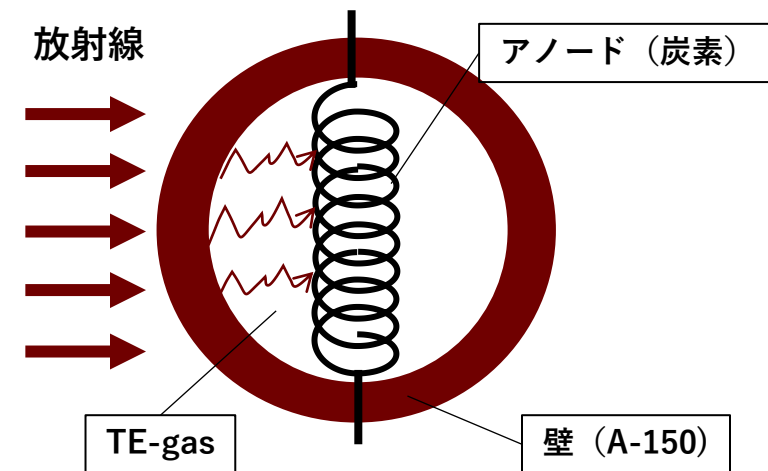


図5：実際のTEPC[7]

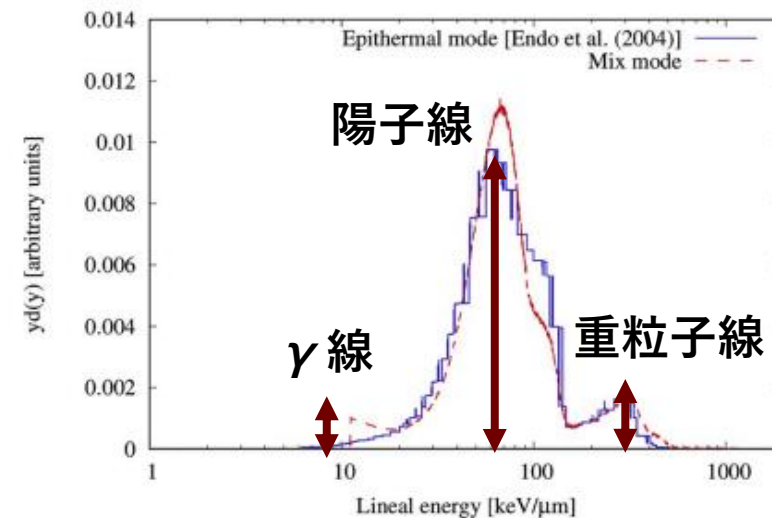
# 研究活動について

## Microdosimetry と BNCT

BNCTでは、以下4つの指標がRBEに影響を与えるとされる。

- 体内組織と線源： $\gamma$ 線
- 体内窒素：炭素イオン線
- 体内水素：反跳陽子
- ホウ素起源： $\alpha$ 線とリチウムイオン線

BNCT の治療環境に基づいてMicrodosimetry スペクトルを評価。



博士課程での研究  
放射線発生装置が治療に  
どのような影響を与えるか

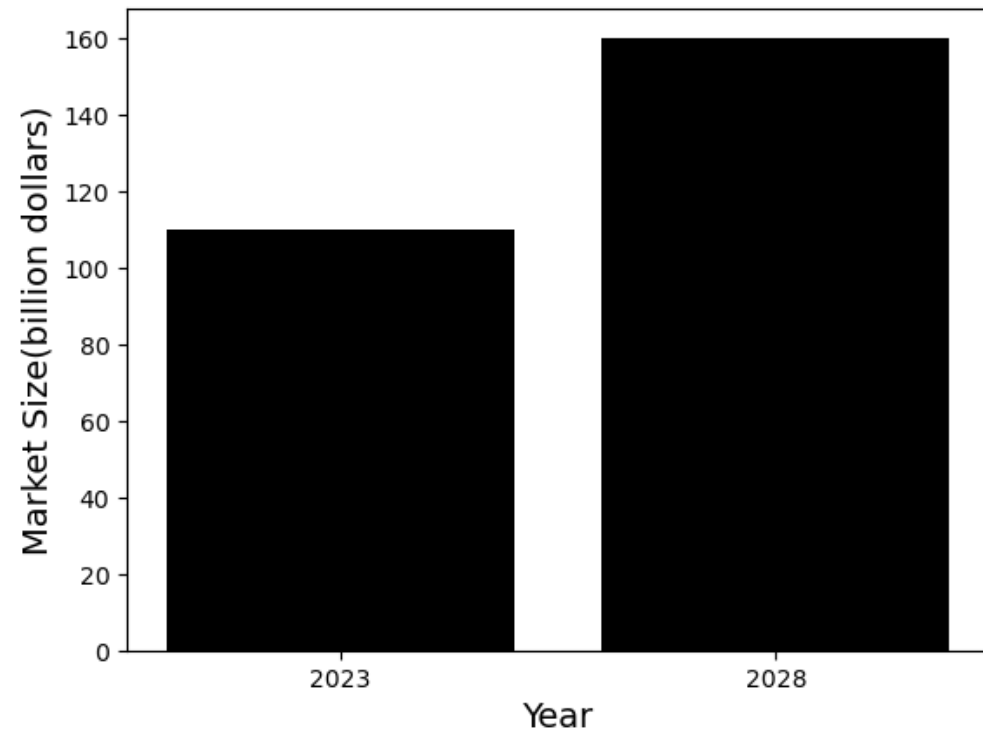
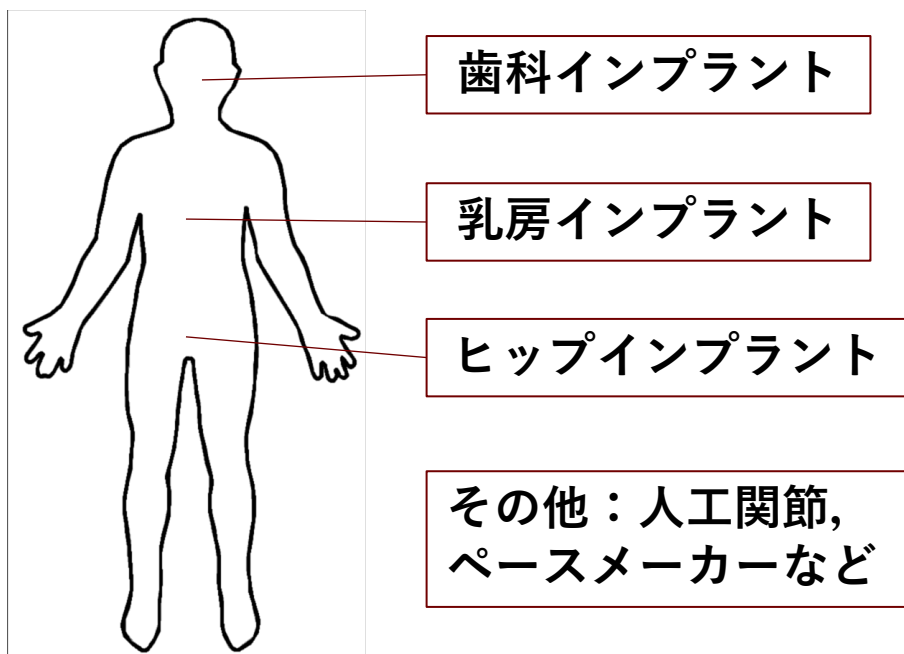


A&M での研究  
治療時に、細胞にどれだけの  
影響を与えられているのか



# 研究活動について

## Medical Implants

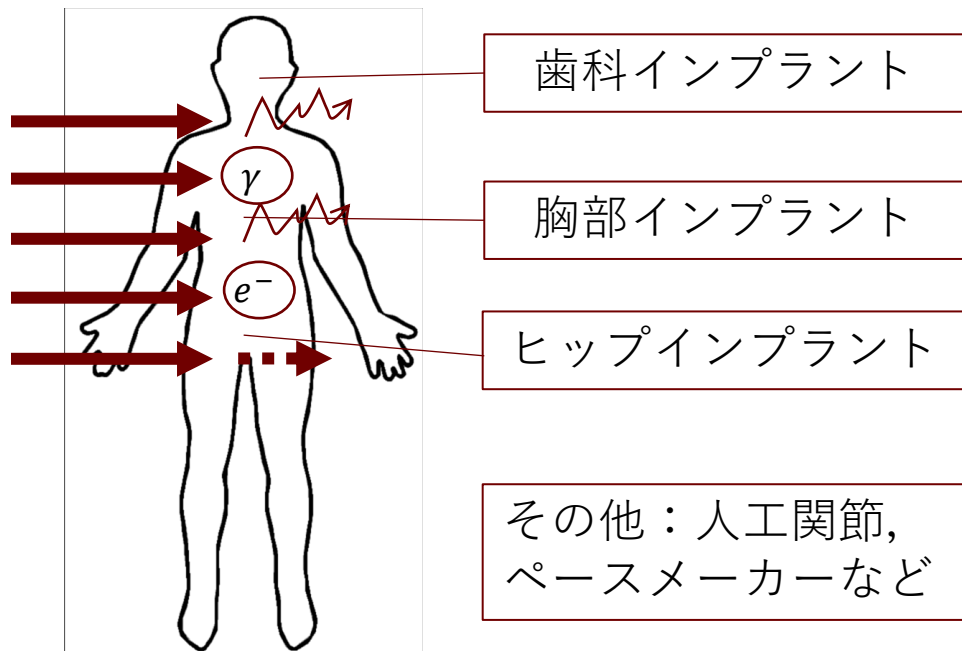


インプラントの**多様化と需要増加**に伴い、今後その市場規模は**増加していく**と予想される。

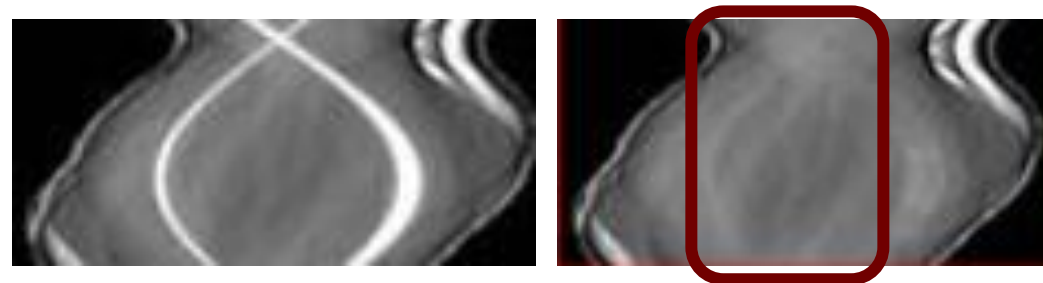
# 研究活動について

## Medical Implants の課題

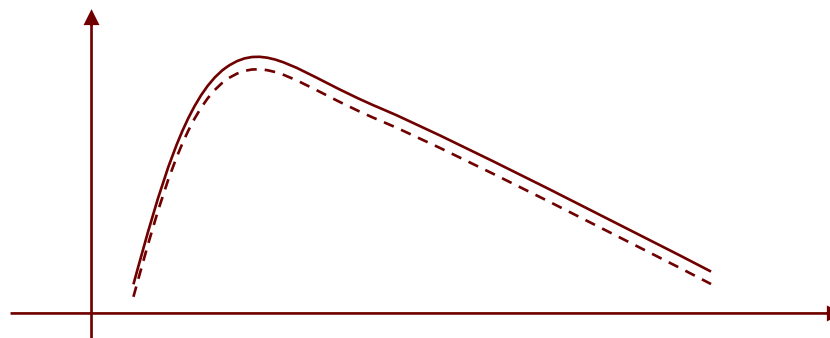
放射線の吸収と散乱による2次粒子の発生



影響①：Metal Artifact Reduction, CT画像の不明瞭化[4]



影響②：Dose Reduction, 線量の減衰



治療時の生物学的効果の推定には、微細構造における2次粒子の影響を考慮する必要がある。

# 研究活動について

研究概要の整理:医療用インプラントによって生じる2次粒子の影響を Microdosimetry に基づいて評価する。

問題

放射線治療時に医療用インプラントがあることで、**正常組織と異なる反応（吸収・散乱）**が起これ、**治療計画の作成に影響**を及ぼす。

手段

Microdosimetryは、**微細構造(細胞1個分など)のスケール**で荷電粒子を検出し、**線量分布等を求める**ことができる。  
この物理量は、放射線治療時の**線質係数**や**RBE**と密接に関係している。

効果

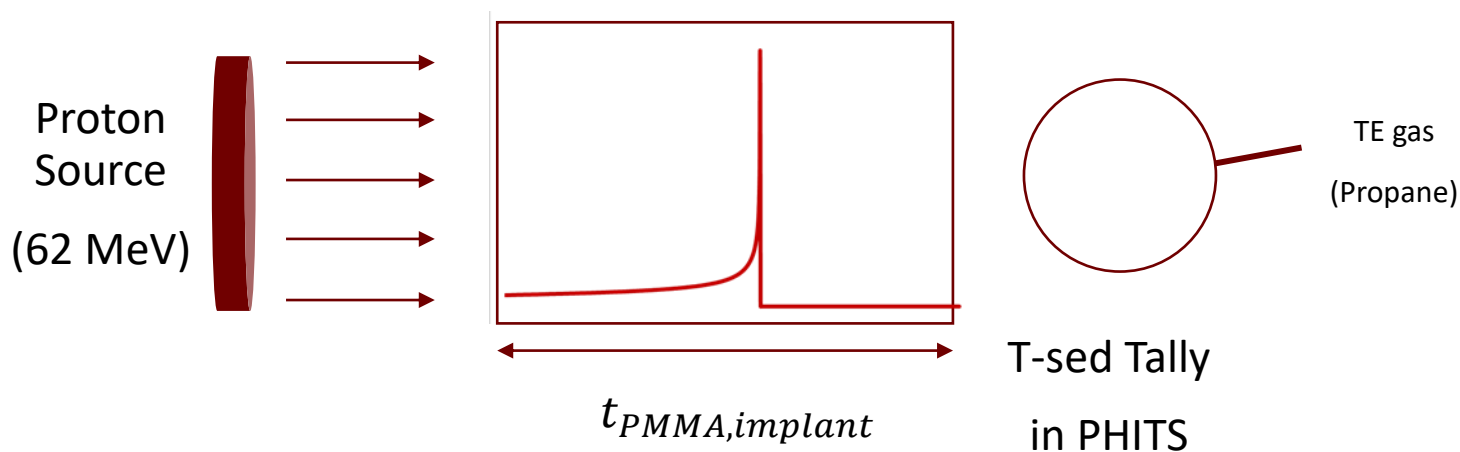
Microdosimetryによって評価された線質係数やRBEによって、**安全な治療計画**が作成される。

# 研究活動について

## Simulation Studies: モンテカルロシミュレーションによるモデリング

**PHITS:** T-sed Tally の利用により  
線量分布を計算可能

**FLUKA:** Detect Card の利用により  
電子のエネルギー蓄積を計算  
→ 線量分布を式から算出する



※ PMMA:ポリメチルメタクリレート  
陽子線治療の際のブラッグピークを表現するために用いる。

密度  $1.18 \text{ g/cm}^3$

Implant にはチタンを利用(密度 $4.5 \text{ g/cm}^3$ )

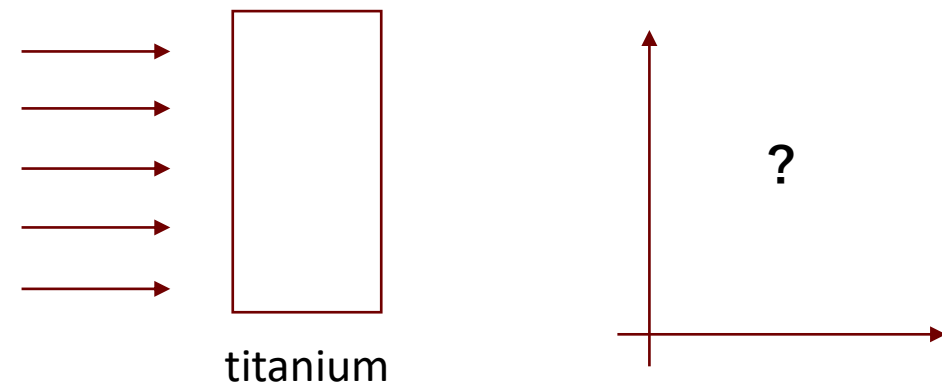
# 研究活動について

## Evaluation

### 手順①：インプラント単独での影響を調査

インプラントそれ自体の吸収・散乱の影響を  
スペクトルの変化によって調査

$t_{ti}$  : 2mm, 4mm, 6mm, 8mm

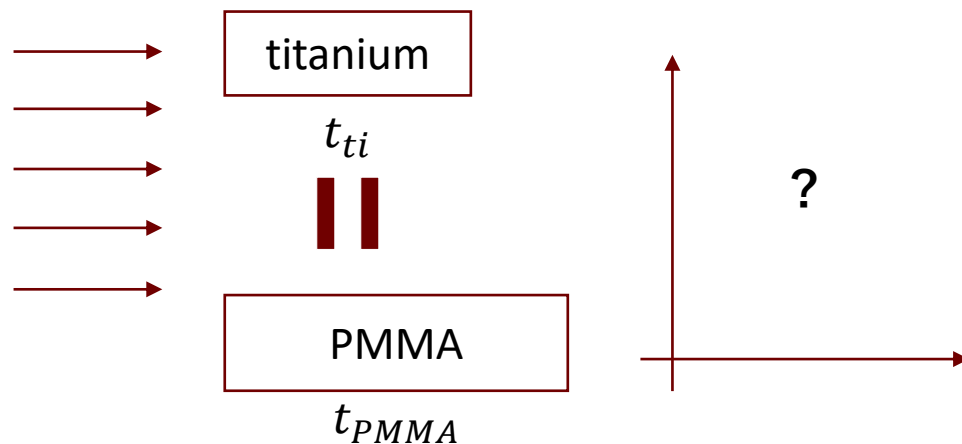


### 手順②：等価厚さの応用

特定の厚さのチタンと等価になるPMMAの厚さを求め、  
両者のスペクトルの形状と  $\bar{y}_d$  の値を比較する

$$t_{ti} = t_{PMMA} \times \frac{\rho_{PMMA}}{\rho_{ti}} \times \frac{S_{PMMA}(E=initial\ energy)}{S_{ti}(E=initial\ energy)}$$

$\rho$ : 物質の密度,  $S$ : 物質の阻止能



# 研究活動について

## Result ①：巨視的な線量測定と比較

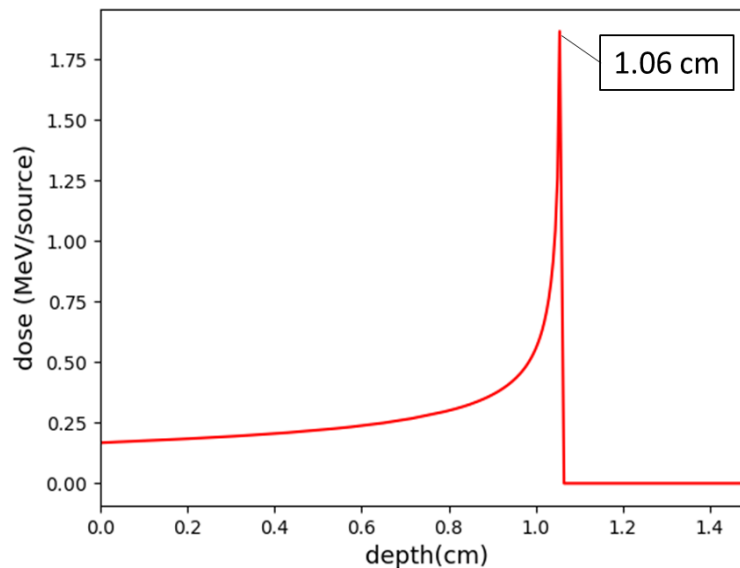
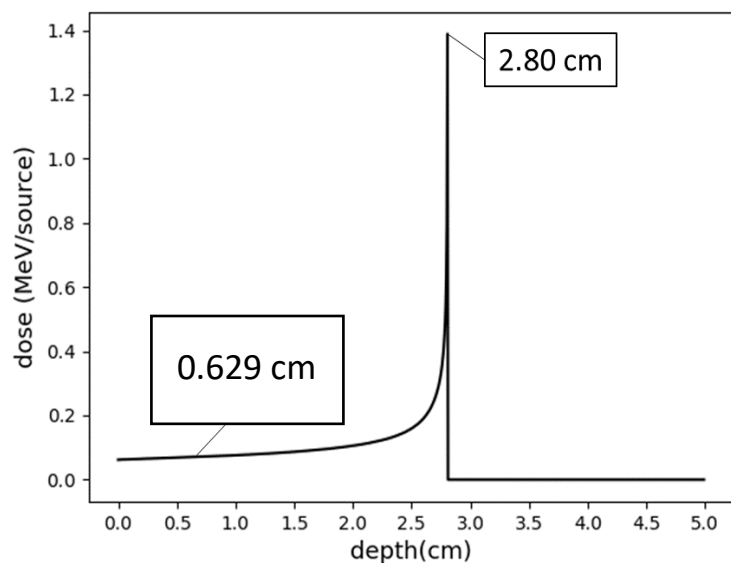


表  $t_{PMMA}$  と  $t_{Ti}$  の対応表

Case	$t_{PMMA}$	$t_{Ti}$
1	0.629	0.234
2	1.629	0.606
3	2.629	0.978
4	2.79	1.038
5	2.8	1.042
6	2.81	1.045
7	2.85	1.060

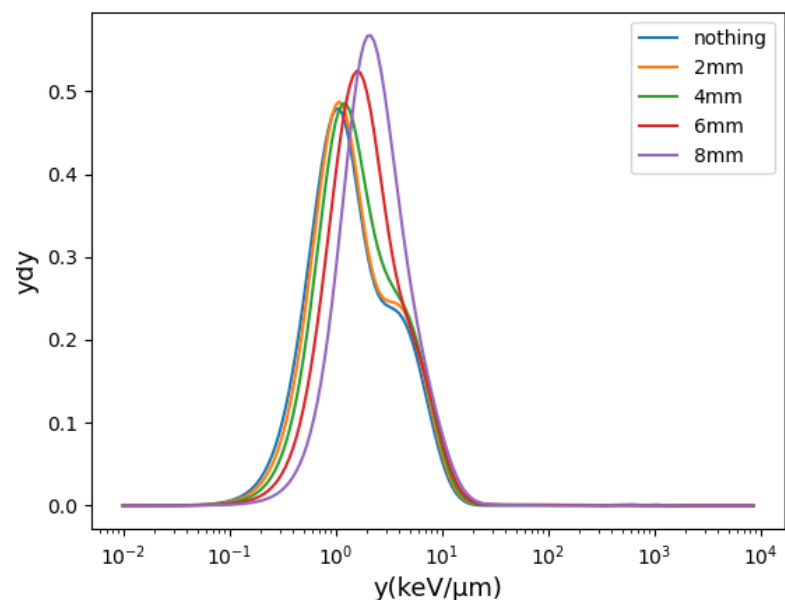
※ 0.629 cm は、実際の実験で用いる検出器周りを覆っているA-150等の影響を等価厚さの考え方をもとに  $t_{PMMA}$  に換算したものの。

ブラッグピーク周辺における陽子線のエネルギー損失は**確率的**であるため、Microdosimetry でどのような線量分布になるかが重要となる。

# 研究活動について

## Result ②：インプラント単独による影響の調査

\*Nothing は PMMA や チタンを加えていない場合を表す

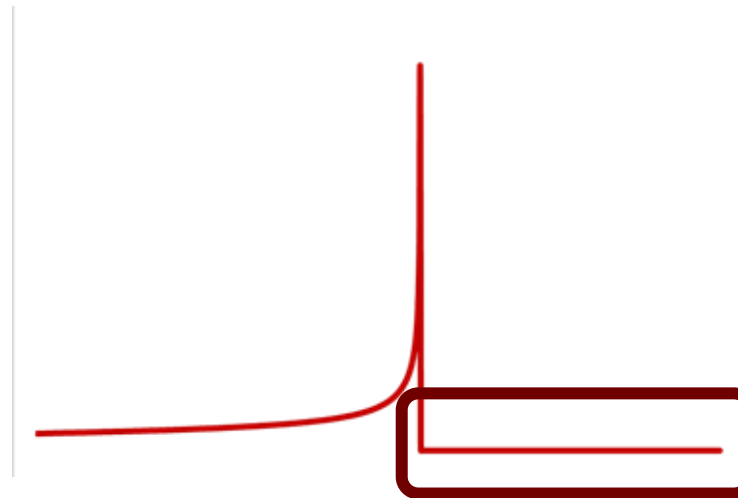
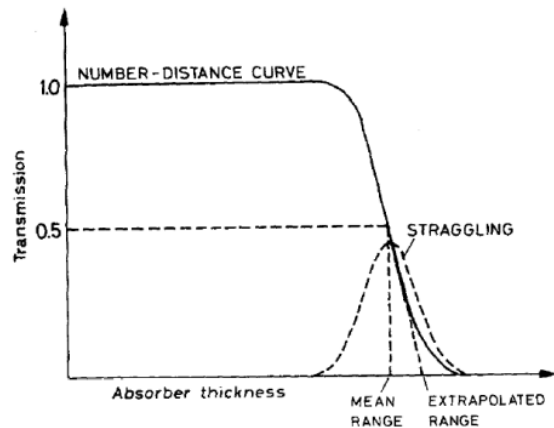


- 材質の厚さを大きくする(=ブラッグピークに近づける) 毎に, スペクトルが高エネルギー側にずれる  
→ インプラントによる吸収によってピークの位置がずれる.
- この段階では, 低エネルギー  $\gamma$  線の影響等, その他の2次粒子の影響は観察されない.

# 研究活動について

## Discussion

- 材質の厚さを大きくする(=ブラッグピークに近づける)毎に，両者の  $y_d$  に違いが生じる。  
→ 飛程が巨視的な議論に基づいていることの裏付け。
- ブラッグピークを越えると，低い線エネルギー領域に別のピークが生じる。  
→ ブラッグピークを越えると**低LETのガンマ線**が生じ，ピークを与える。  
→ 線質係数の観点から考察すると，ブラッグピークを越えた深さに腫瘍がある場合，**治療効果に大きな影響を与える危険性**がある。



低エネルギー  $\gamma$  線の影響が大きくなる。



# 研究活動について

## Future Plan

- **他の放射線源での検討**

- ▶ 重荷電粒子 ( $^{12}\text{C}$ )
- ▶ 電磁波 ( $\gamma$ , neutron)

- **他のインプラントでの検討**

- ▶ 材質 (Si, Au, etc...)
- ▶ 物質の状態 (個体、液状)
- ▶ サイズ

- **実験による実証**

- ▶ 測定装置 (TEPC) の作成



# 留学生活について

## College Station

### • 日常生活

- 筋トレ @ Rec Center
- 外食 with friends in A&M

### • イベント

- アメリカンフットボール
- テキサス観光
  - ✓ Johnson Space Center @Houston
  - ✓ Fort Worth Stockyards @Dallas



左：Kyle Field で行われたアメリカンフットボールの試合。

下：留学先でできた友達。



# 留学生活について

## Visitation of Neutron Therapeutics @Boston

- Neutron Therapeutics
  - BNCT 用の加速器を製造する会社
  - 施設見学と研究発表を行った

※ 西尾さんにも会ってきました！



# まとめ

## • 今回の成果

- 異国での生活
- 放射線治療における治療効果測定技術の理解
- 研究テーマの立ち上げと推進
- 人脈形成

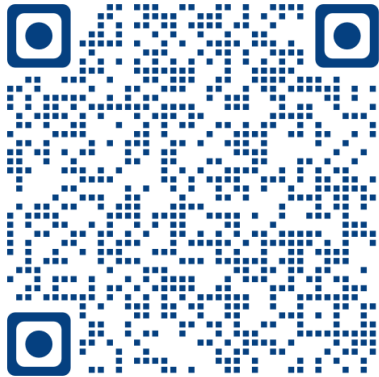
※ちょっとした喧嘩

## • 今後の展望

- 他の放射線源での検討
- 成果を The International Youth Nuclear Congress 2024 で報告 (アブスト準備中)

※ビザの手続きは念入りに...

ご清聴ありがとうございました



LinkedIn



HP