

ガフクロミックフィルムを用いた 炭素線の測定

群馬大学 重粒子線医学研究センター
川嶋 基敬

背景

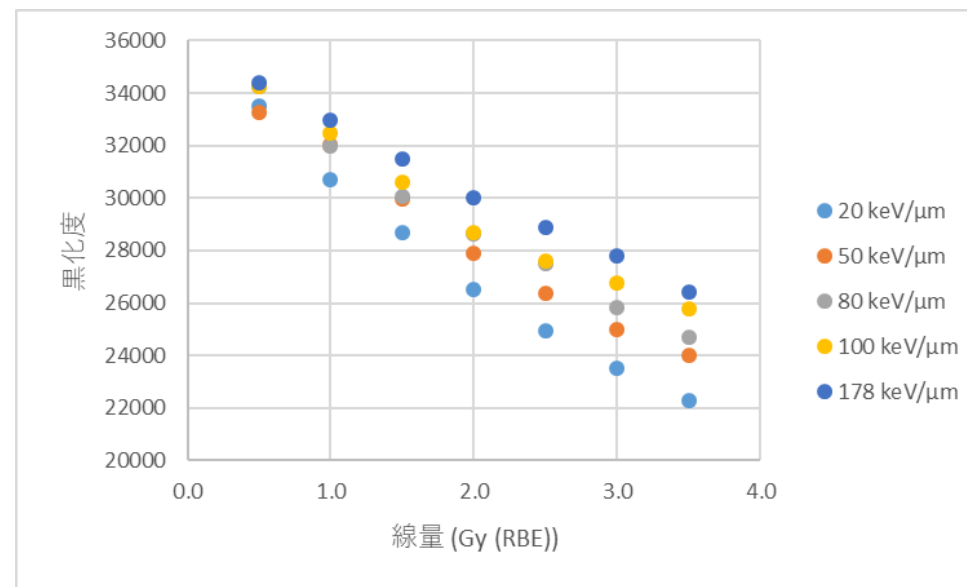
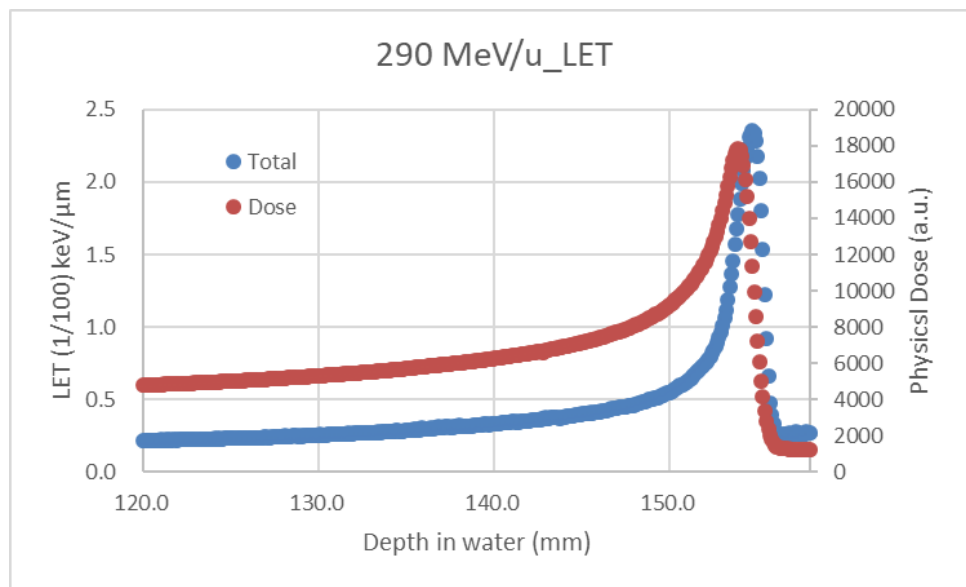
- 高精度放射線治療では、高分解能な測定が可能となるフィルムは非常に有用な測定ツールである。
- radiochromicフィルムを用いた炭素線の測定はLET (linear energy transfer)によって黒化度の抑制が起きる。黒化度がLETと線量に依存するため、黒化度のみで正確な線量を測る事ができない。

目的

- 炭素線のLETと線量をフィルム (EBT3) 測定から求める方法の確立を目指す。

炭素線のフィルム反応の特徴

- 単一エネルギー炭素線に対する各深さのLETと物理線量
(GEANT4によるシミュレーション)
- 計算されたLETに対して各深さで求めた
キャリブレーションカーブ。



解析方法

- フィルムの反応は線量と黒化度を二次以上の多項式や指数・対数で表すことが多い。
- 本研究では解析を簡単にするために以下の二次式を用いた：

$$Dose = A \cdot netOD^2 + B \cdot netOD$$

A, B は各LETの時に最適化した係数。

$netOD$ は以下の式から求めた。

$$netOD = \log_{10} \frac{PV_{unexp} - BG}{PV_{exp} - BG}$$

ここで、 BG は透過を一切しない時のスキャナの読み値、 PV_{exp}, PV_{unexp} は照射したフィルムと照射していないフィルムの読み値となる。これは「Mária Martišíková et. al. 2010 *Phys. Med. Biol.* **55** 3741」で報告されている形となる。

解析方法

- これらの式に線量を x Gy と $2x$ Gy 照射したフィルムであてはめると、

$$Dose = A_{(LET)} \cdot netOD_{(x)}^2 + B_{(LET)} \cdot netOD_{(x)}$$

$$2 \times Dose = A_{(LET)} \cdot netOD_{(2x)}^2 + B_{(LET)} \cdot netOD_{(2x)}$$

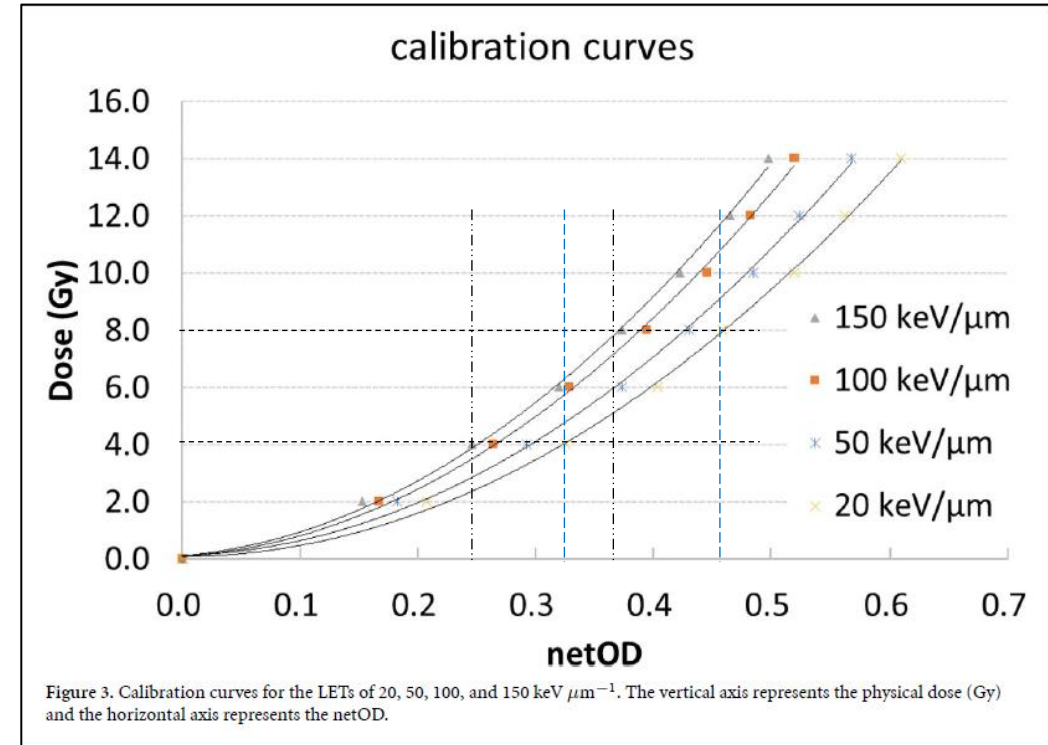
となる。

ここで $A_{(LET)}$, $B_{(LET)}$ は LET の関数である。また、 $netOD_{(x),(2x)}$ は括弧内の線量を照射したときのフィルムの黒化度となり、実験より求められる値となる。

- これらの式を解く事で、LET の関数となる。

$$0 = A_{(LET)}(2 \cdot netOD_{(x)}^2 - netOD_{(2x)}^2) + B_{(LET)}(2 \cdot netOD_{(x)} - netOD_{(2x)})$$

LET を解くことができる。



ここで一例を挙げる。

4と8 Gyを照射した時を考える。

LETが150 keV/ μm の時は、2.4と3.8、

LETが20 keV/ μm の時は、3.2と4.7である。

比率は1:1.58、1:1.47となる。

キャリブレーションカーブの作成

- 使用ビーム

monoビーム・SOBP60mmビーム

Energy : 290 MeV/u、Wobbler半径 : 77mm

- キャリブレーションカーブの作成条件

- monoビーム

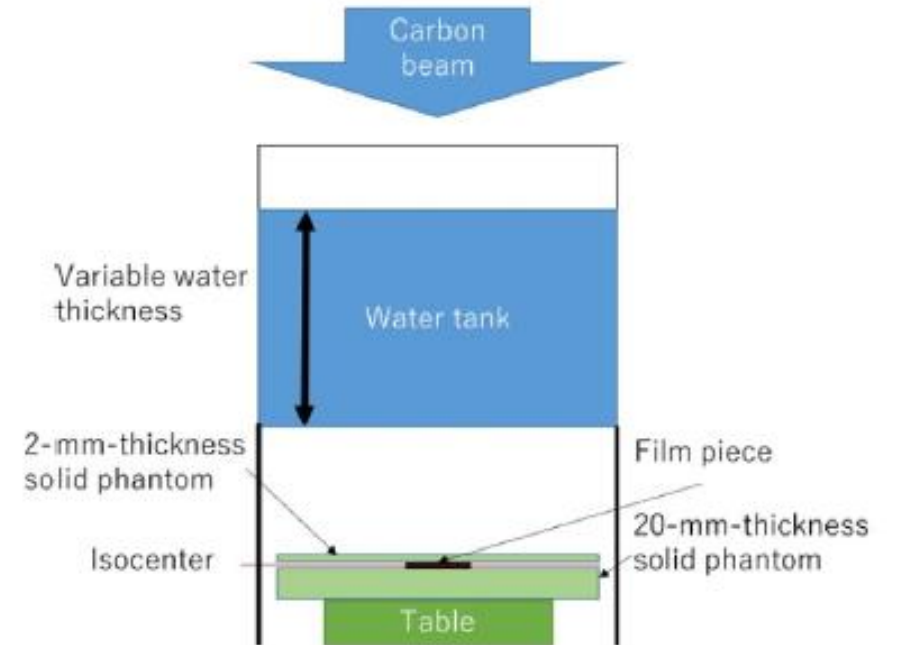
LET : 20, 50, 100, 150 keV/ μ m

Physical dose : 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 Gy

- SOBPビーム

LET : 20, 44, 56, 78, 98, 147 keV/ μ m

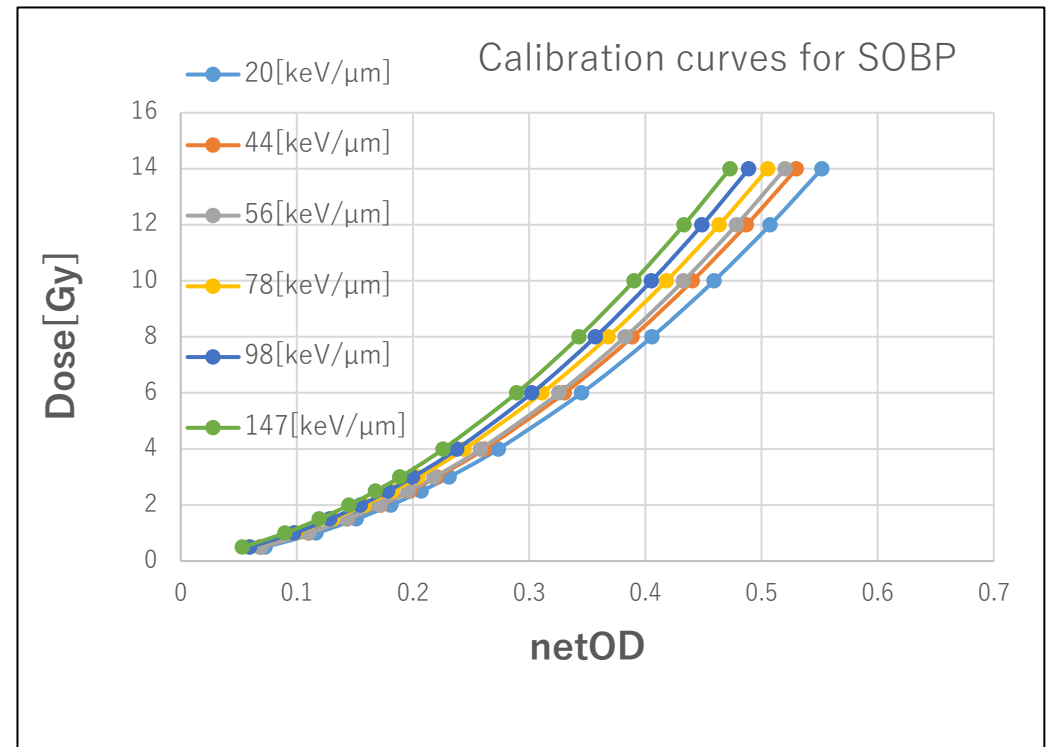
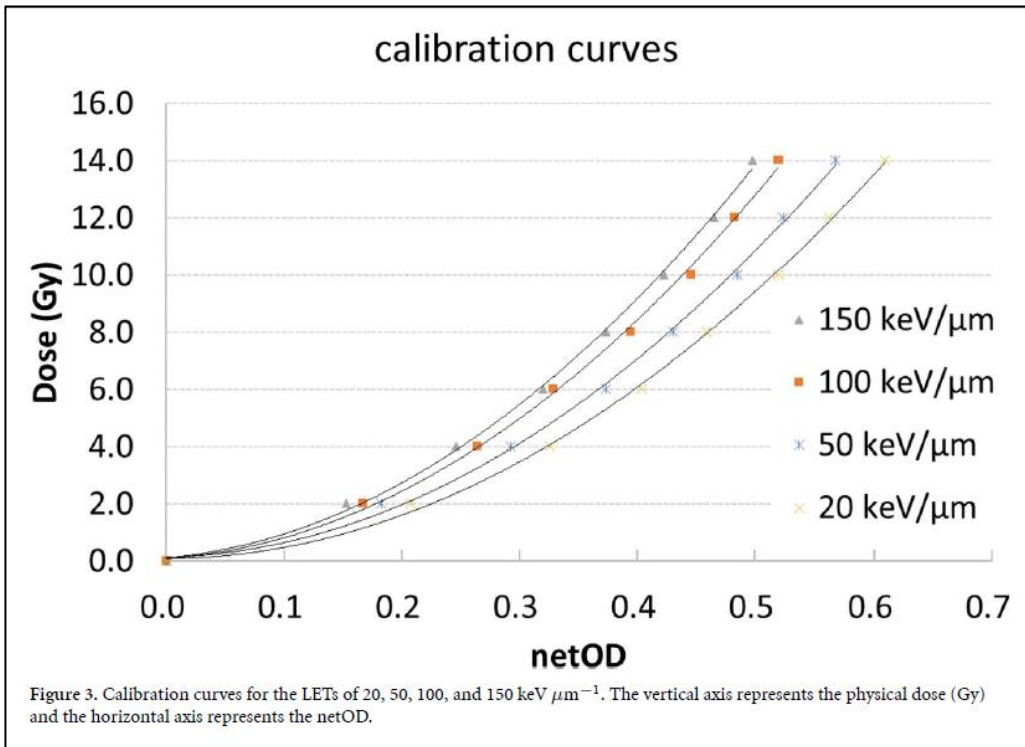
Dose : 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14 Gy



セットアップ

キャリブレーションカーブ

- monoビームとSOBPビームで線質が異なるため、抑制の具合も変化する。左がmonoビームを用いて測定したキャリブレーションカーブで、右がSOBPビームを用いて測定したキャリブレーションカーブ。



キャリブレーションカーブより求めた係数

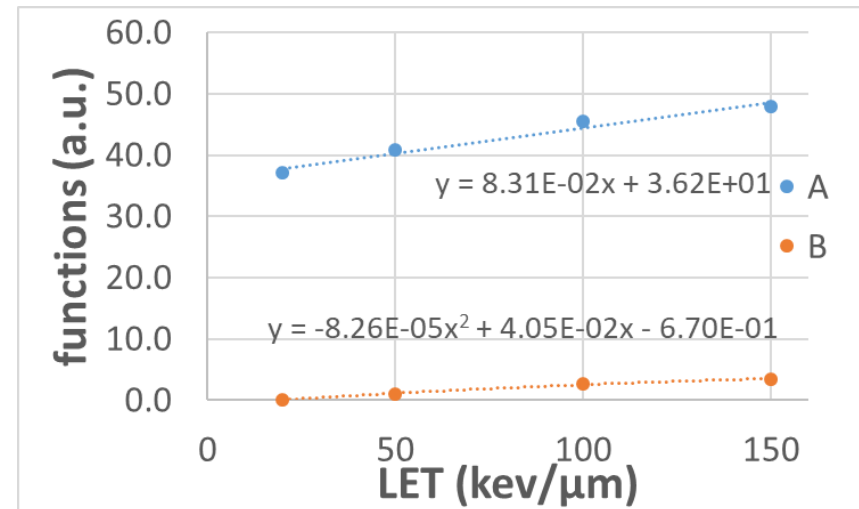
- monoビームとSOBPビームに対してそれぞれ、各LETに対するキャリブレーションカーブの係数 $A_{(LET)}$, $B_{(LET)}$ を求めた。

$$\text{近似式 } (Dose = A_{(LET)} \cdot netOD^2 + B_{(LET)} \cdot netOD)$$

- 一例としてmonoビームの係数とLETを以下のテーブルと図に纏めた。

LET	A	B
20	37.05	0.156
50	40.79	1.043
100	45.53	2.629
150	47.87	3.518

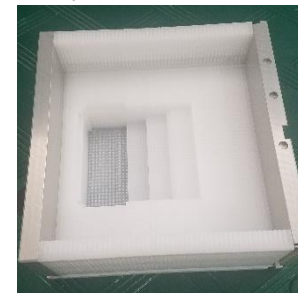
キャリブレーションカーブを求めたLETに対する、近似式の係数AとBの値。



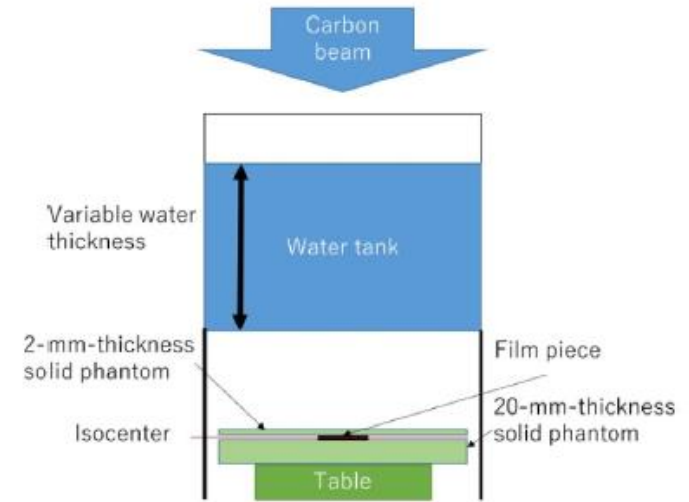
係数Aは一次関数、係数Bは二次関数で近似した結果。

検証実験

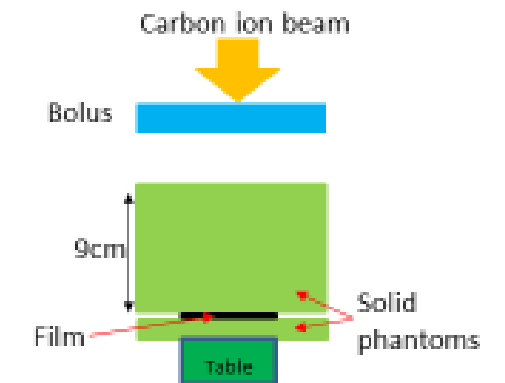
- monoビームに対する絶対値の検証
 - キャリブレーションカーブを作成した深さ以外でEBT3片を照射。
 - 使用した深さ：ピーク手前2, 5, 10, 20mm
 - 本実験では3種類の物理線量（4, 8, 12 Gy）でEBT3片を照射。
 - これらの条件で照射されたフィルムを解析して、線量とLETを求めた。
- SOBPビームに対するプロファイルの検証
 - ボーラスと9cm深の個体ファントムを用いて照射野のプロファイルを測定。
 - 照射時のPreset値(粒子数)は20,000, 40,000, 60,000。
 - これらの条件で照射されたフィルムからプロファイルの一部で解析を行った。
 - フィルムによる測定結果は電離箱の測定とシミュレーションと比較した。



使用した
階段状のボーラス



monoビームの実験の
セットアップ



SOBPビームの実験の
セットアップ

結果 monoビームのフィルム解析

- 各々の深さで照射したフィルムのnetODを以下のテーブルに纏める。

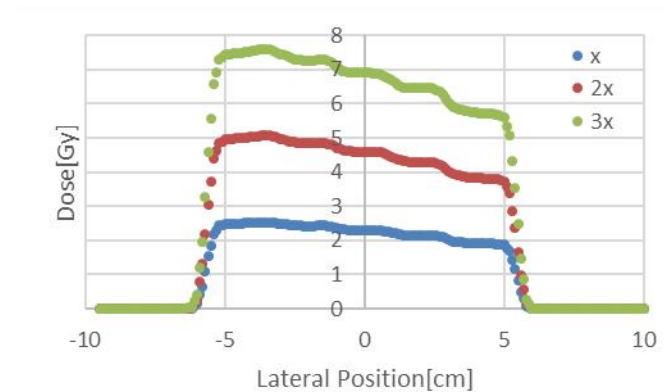
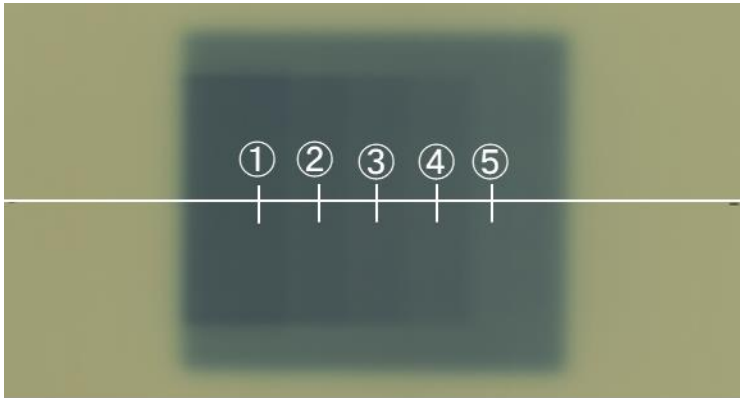
depth	-20mm			-10mm			-5mm			-2mm		
Dose (Gy)	x	2x	3x	x	2x	3x	x	2x	3x	x	2x	3x
netOD	0.325	0.465	0.561	0.308	0.444	0.542	0.295	0.428	0.523	0.269	0.398	0.485

- これらのデータから最も一致するLETと線量を求めた。
- シミュレーション結果と比較した今回の実験より求めた値を以下のテーブルに示す。

depth	simulation		film	
	LET	Dose (Gy)	LET	Dose (Gy)
-20mm	28	4.0	11	3.88
-10mm	38	4.0	41	4.05
-5mm	50	4.0	55	3.96
-2mm	74	4.0	94	3.88

結果 SOBPビームのフィルム解析

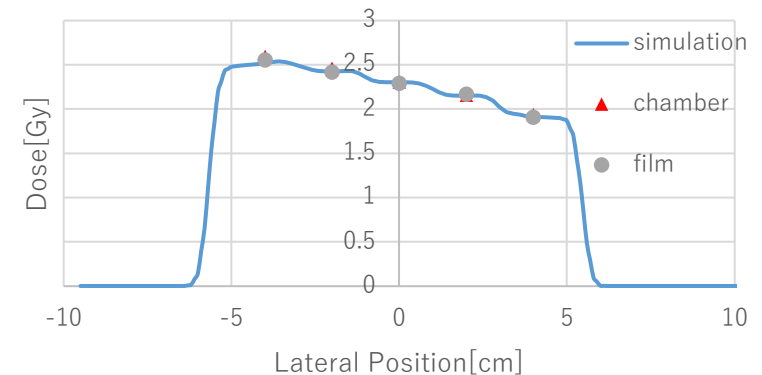
- 各々の線量で照射したフィルムの結果を以下に示す。



- 左図で示した5点の解析結果を以下のテーブルに纏める。

また、

9cm	chamber		Film analysis			
	LET[keV/ μm]	Dose[Gy]	LET[keV/ μm]	diff[keV/ μm]	Dose[Gy]	diff[%]
1	49	2.59	45	-4	2.56	-1.5
2	50	2.46	54	4	2.42	-1.8
3	56	2.30	70	14	2.29	-0.6
4	65	2.16	91	26	2.17	0.4
5	84	1.94	134	50	1.91	-1.5

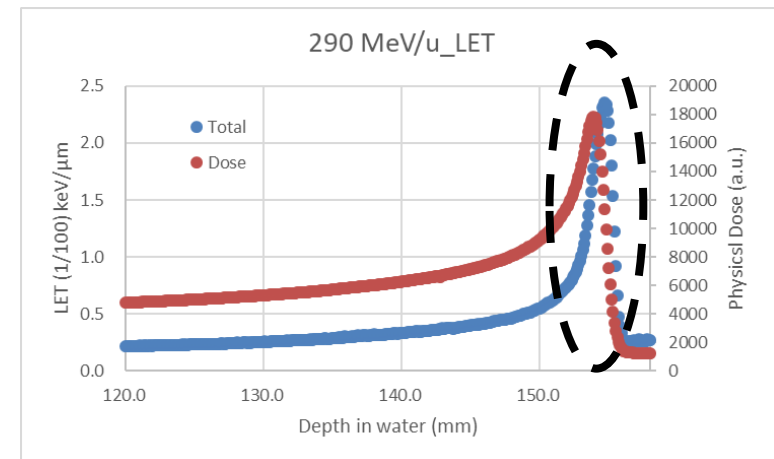
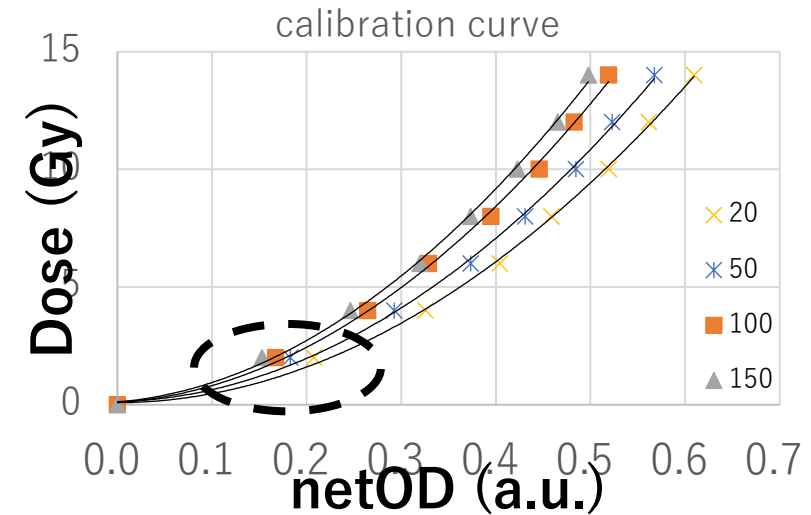


考察

- 炭素線をフィルムを用いて測定を行い、3%以内の線量で一致した。
- LETに関してはmonoビームの解析で20 keV/ μm 以内で一致し、SOBPビームでは変化の抑制の変化が小さくなる高LET部分では50 keV/ μm となった。
- 本手法の誤差の要因として、近似式の精度やLETの誤差が考える。

考察 誤差の要因

- 近似式の精度
 - 全てLETに対して、精度の良い近似式を使用する必要があるが、本研究で用いた近似式では低LETで低線量の部分の誤差が大きい。
- LETの誤差
 - ピーク付近ではLETが0.1mmで10 keV/ μ m程度変わってくる。LET150の測定精度は他の部分より誤差が大きくなるため、誤差の見積もりが重要となる。



抑制を用いたその他の研究

- 2種類の異なる熱ルミネッセンス線量計を用いて、各々の変化の抑制から陽子線のLETを求めた報告。

Parisi A, Chiriotti S, De Saint-Hubert M et. al.

“A novel methodology to assess linear energy transfer and relative biological effectiveness in proton therapy using pairs of differently doped thermoluminescent detectors.”

Phys Med Biol. 2019 Apr 5;64(8):085005.

- 薄膜太陽電池を用いたLETによる信号の抑制を基に陽子線のLETを測定した報告。

Jeong S, Kim C, An S et. al.

“Determination of the proton LET using thin film solar cells coated with scintillating powder.”

Med Phys. 2022 Sep 22.

まとめ

- 本研究で紹介した解析方法によって、フィルム測定よりLETと物理線量の特定ができた。
- この手法の精度向上のため、以下の点で改善が考えられる。
 - キャリブレーションカーブの近似式を変更する事で、より不確かさを小さくする。
 - LETの不確かさを正確に見積もり、近似式作成時に誤差を検討して作成を行う。