

卒業論文

題目：蛍光ガラス線量計小型素子システム (Dose Ace) の
高エネルギー領域における基本特性の検討

大阪大学医学部保健学科放射線技術科学専攻

(指導：医用物理工学講座 松本 光弘 准教授)

05C08037 山本安希子

(平成 24 年 1 月 16 日 提出)

要旨

【背景】

Dose Ace の測定範囲は 24keV から 1,250keV (^{60}Co γ 線) までのエネルギーが製造業者 (旭テクノグラス) から示されている。しかしながら放射線治療で用いられているリニアック X 線のエネルギーはそれ以上であるためエネルギー依存性は不明である。また標準仕様は ^{137}Cs γ 線校正であるため、662keV が基準となっている。

【目的】

リニアック X 線 (4, 6, 10MV) による線量測定時に ^{137}Cs γ 線のスタンダード線量計素子 (GDS-301-AH) とリニアック X 線 (4, 6, 10MV) による独自スタンダード線量計素子を作成し測定精度を比較した。さらに高エネルギー領域の蛍光ガラス線量計素子 (以下、GD) の基本特性についても検討した。

【方法】

GD をタフウォーターファントム (30×30×5cm) の中央に中心より 1cm 間隔で 5 個埋め込み、ファントム 2 枚でサンドウィッチした。線量直線性、エネルギー依存性は STD 法で深度 10cm とし、4, 6, 10MV で 1Gy から 6Gy まで照射した。照射野依存性は、同様に 2Gy における一辺 6~14cm で行った。深さ依存性は同様に深度 5、10、15、20cm で照射した。

【結果】

X 線線量依存性試験において、図 1 に示すように ^{137}Cs γ 線による校正 (mode1) では、誤差が平均-14.8%であるのに対して、6MVX 線による校正 (mode3) では、平均 0.51%であった。以後 mode3 を使用して測定を行った結果、それぞれの基本特性の誤差は、線量直線性は、4MV1.37%、6MV1.18%、10MV1.13%。深さ依存性は 1.25%、照射野依存性は 0.55%、エネルギー依存性は 1.90%であった。

【結論】

GD の高エネルギー領域での測定には、自施設のリニアック X 線による校正が重要である。GD の線量計測誤差は概ね 2%以内であった。

1. 序論

1.1. 背景

蛍光ガラス線量計の適用範囲は、個人モニタリング、作業環境モニタリング、環境モニタリングなどである。蛍光ガラス線量計は、低エネルギー領域における高精度の測定が可能で、環境放射線モニタリングに適用されている。¹⁾ 今回は、放射線治療に使用される高エネルギー領域における蛍光ガラス線量計の有用性を調べるために、その校正、基本特性について研究した。

放射線治療における測定について、リファレンス線量計の場合、吸収線量の測定には、これまでコバルト校正定数 N_c の使用が勧告されてきた。しかし、近年のコバルト照射装置の加速器への更新に伴い、全国的に ^{60}Co γ 線場の維持・確保が極めて困難な状況になりつつある。²⁾ この状況は蛍光ガラス線量計の校正にも反映されている。

一般的に低エネルギー領域における蛍光ガラス線量計の標準照射は、照射線量標準とのトレーサビリティが明確な照射線量測定器によって照射線量(率)が測定された γ 線照射装置もしくは標準 γ 線源を用いてJIS Z 4511「照射線量測定器及び線量当量測定器の校正方法」を参考に行う。 γ 線源としては、 ^{60}Co または ^{137}Cs を用いる。¹⁾ 本研究で用いたDose Aceの測定範囲は24keVから1,250keV(^{60}Co γ 線)までのエネルギーが製造業者(旭テクノグラス)から示されている³⁾ が、それより高エネルギー領域のエネルギー特性は不明である。

本研究は ^{137}Cs γ 線源による校正とリニアックビームによる校正の精度の比較、高エネルギー領域における蛍光ガラス線量計の基本特性について検討した。

1.2. 蛍光ガラス線量計の原理と特徴

蛍光ガラス線量計小型システムは、銀イオンを含有した銀活性リン酸塩ガラス素子と読取装置からなる。蛍光ガラス線量計の組成は、質量%で 31.55%P、51.16%O、6.12%Al、11.0%Na、0.17%Ag である。実効原子番号 $Z=12.039$ 、密度 $\rho=2.61$ である。⁴⁾ ガラスは成分や寸法の均一性を高くすることが可能であり、素子の感度の不均一性を小さくすることができる。¹⁾

銀活性リン酸塩ガラスに電離放射線を照射し、その後紫外線で励起するとオレンジ色の蛍光を発する。この現象をラジオフォトルミネッセンス(RPL)といい、蛍光量が放射線量に比例することから、線量計に応用されている。⁵⁾

電離放射線が銀活性リン酸塩ガラスに照射されると、Fig1. のように電子および正孔(ホール)が生じ、電子はガラス構造中の Ag^+ に捕獲され、 Ag^0 となる。一方、正孔は一旦 PO_4 四面体に捕われるが、時間の経過とともに Ag^+ へ移行し、より安定な Ag^{++} を形成する。⁵⁾

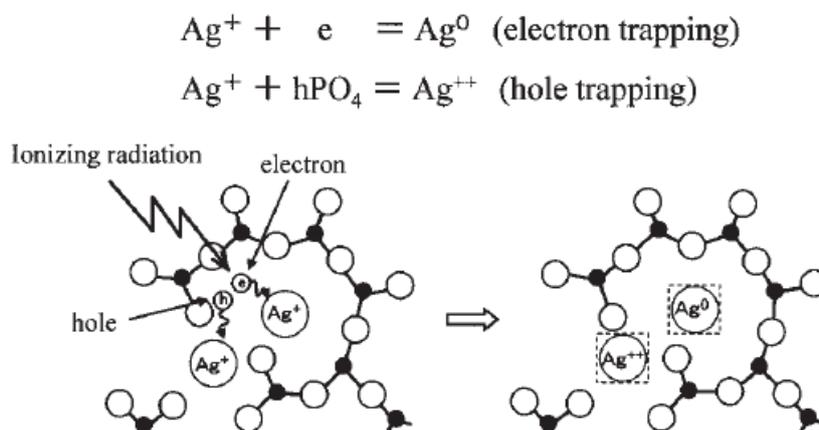


Fig1. ガラス線量計の測定原理

これらの Ag^0 および Ag^{++} がともにガラス中に RPL 中心(蛍光中心)となる。この RPL 中心は 337.1nm の紫外線で励起すると、606nm 近辺にピークを持つ蛍光(RPL)を効率よく発して、元の RPL 中心のエネルギー準位に戻る。^{1),4)}

すなわち、この光刺激による RPL は放射線エネルギーの散逸を伴っておらず、本質的に熱ルミネセンスと異なる。ガラス線量計は、同じ光刺激ルミネセンスの一種である OSL と異なるものである。したがって、読取り操作によって蛍光中心が消滅することがないため、何度も繰返して読取ることができる。⁶⁾

本研究では、治療用蛍光ガラス線量計素子 GD-302M(旭テクノグラス株式会社)を用いた。GD-302M のサイズは直径 1.5mm ϕ 、長さ 12mm である。蛍光ガラス線量計は素子自体にエネルギー依存性があり、低エネルギー領域での使用には、Sn フィルタを装着することで補正がなされる。今回用いた GD-302M はフィルタ不要である。

未照射ガラス素子でも 337.1nm の紫外線照射により、425nm にピークを持つガラス固有の蛍光(プレドーズ)を発生する。¹⁾

本研究で使用した蛍光量の読取りリーダー(FDG-1000, 旭テクノグラス株式会社)は、選択的に RPL だけを取り出す連続パルス励起法を採用している。⁵⁾この方法は、1mGy 以下の低線量の高精度測定の実現を目的として、ガラス素子の固有の蛍光成分であるプレドーズや汚れによる蛍光の影響を除去するために開発された蛍光読取技術である。RPL とプレドーズの蛍光の減衰時間が異なることを利用している。パルス励起光源として、紫外線パルスレーザを使用している。パルス状のレーザ光をガラス素子に照射すると、蛍光が発生するが、これは時間とともに減衰する。蛍光は主に 3 つの成分に分けられる。

- ①汚れとプレドーズによる蛍光 (約 1 μ s までに減衰)
- ②RPL による蛍光 (約 40 μ s までに減衰)
- ③プレドーズによる蛍光で減衰の遅いもの (約 1ms まで延びている)

この中から選択的に②の RPL だけ取出して、汚れやプレドーズの影響を除去する。

また、従来の窒素ガスレーザでは 2 年ほどで出力低下をきたしレーザ管の交換が必要であったが、固体紫外線レーザ装置の搭載により、安定、長寿命化が実現した。

蛍光ガラス線量計素子 (GD-300 シリーズ) の特徴として、

- ①繰り返し読み取りが可能
- ②素子間のばらつきが小さい
- ③フェーディングがほとんどない
- ④超小型素子

であることが挙げられる。

2. 目的

リニアック X 線 (4, 6, 10MV) による線量測定時に ^{137}Cs γ 線のスタンダード線量計素子 (GDS-301-AH) とリニアック X 線 (4, 6, 10MV) による独自スタンダード線量計素子を作成し測定精度を比較した。

さらに高エネルギー領域の蛍光ガラス線量計素子 (以下、GD) の基本特性についても検討した。

基本特性は、次の通り。

- ①線量直線性 (指示値の比例性)
- ②出力係数(OPF)
- ③深さ依存性(TPR)
- ④測定のばらつき

3. 使用器具

装置、器具

- 蛍光ガラス線量計素子 (GD-302M, 旭テクノグラス株式会社)
- ^{137}Cs γ 線のスタンダード線量計素子 (GDS-301-AH, 旭テクノグラス株式会社)
- 高線量用読取マガジン
- 線量計リーダー (FDG-1000)
- アニール用電気炉
- アニールマガジン (FDG-C101)
- プレヒート用恒温器
- プレヒートトレイ (FDG-C102)
- タフウォーターファントム (30×30×5cm)
- 指頭形電離箱線量計 (30010 型, Farmer)
- リニアック

装置名 ONCOR Impression pulse 4.10

製作会社 シーメンス旭メディテック

出力 X線 4, 10MV

- リニアック

装置名 ONCOR Impression pulse 6.10

製作会社 シーメンス旭メディテック

出力 X線 6, 10MV

4. 方法

4.1. リーダの校正方法

ここで述べる校正とは、「標準照射した線量計による内部素子の校正」についてである。¹⁾ 線量測定値のトレーサビリティを確保するため、標準照射した線量計を用いて、リーダに内蔵されている内部素子の線量値の値付けを行う。

Dose Ace の線量計リーダ (FDG-1000) は mode ごとに校正、計測ができる。

校正の手順は次の通り。

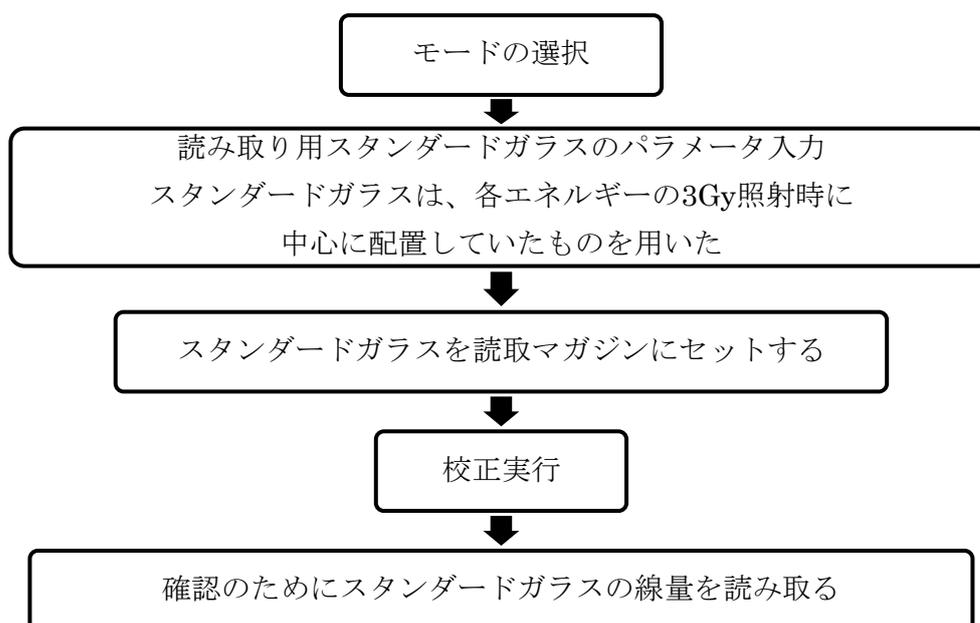


Fig 2. 校正の手順

mode の使い分けは次のように行った。

各エネルギーの校正には、照射線量 3Gy の実験時に 10 個の素子の平均をとり、平均値に一番近いガラス素子を校正に用いた。

Table 1. mode 別のビームの種類

mode	エネルギー
1	^{137}Cs γ 線 (662keV)
2	リニアック X 線 4MV
3	リニアック X 線 6MV
4	リニアック X 線 10MV

4.2. 照射方法

GD をタフウォーターファントム (30×30×5cm) の中央に中心より 1cm 間隔で 5 個埋め込み、ファントム 2 枚でサンドウィッチした。



Fig 3. 照射時の様子(左：素子の配置 右：リニアックとファントムの配置)

線量直線性、エネルギー依存性は STD 法で深度 10cm とし、4, 6, 10MV で 1Gy から 4Gy まで照射した。照射野依存性は、同様に 200MU における一辺 6~14cm で行った。深さ依存性は同様に深度 5、10、15、20cm で照射した。

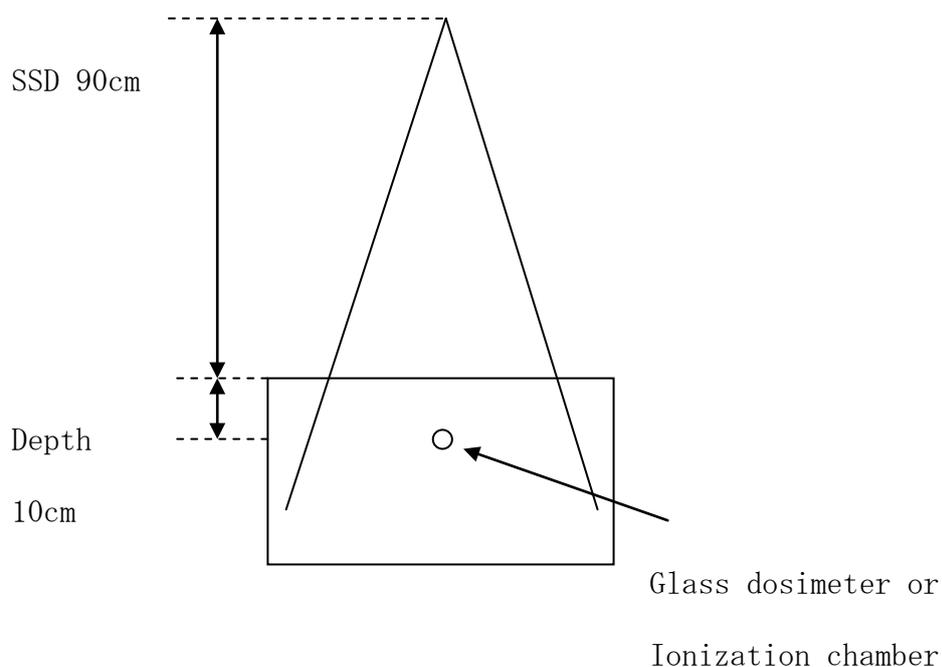


Fig 4. 幾何学的配置

4.3. 計測の手順

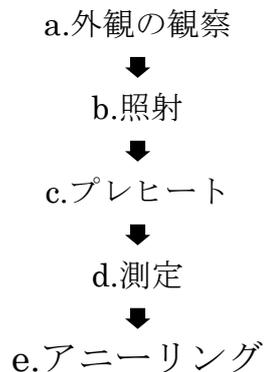


Fig 5. 計測の手順⁷⁾

a. 外観の観察

素子の汚れ、欠損がないか確認し、アルコールシートで拭きとった。

b. 照射

照射方法は 4.2. を参考。

c. プレヒート

プレヒートとは、放射線に照射されたガラス素子のラジオホトルミネセンスの光量を短時間にビルドアップさせるために行う加熱操作のことである。本研究では、70°C30 分行った。

d. 測定

リーダ使用時には、読取り前に十分なウォーミングアップの時間(本研究では、20 分)をおくようにした。

高線量読取マガジンに 20 本ガラス素子をセットし、1 本につき繰り返し 10 回測定を行い、その平均値を 1 本の素子の測定値とした。測定は 1 回とし、各条件の平均値をデータとした。各条件に用いた素子は 10 本である。

e. アニールング

アニールングとは、ガラス素子が記憶しているラジオホトルミネセンス成分を除去し、放射線照射以前の状態に戻すために行う加熱処理、再生処理のことである。本研究では、400℃ 1時間行った。

5. 結果

5.1. 線量直線性

ガラス素子を 120 個用意し、10 個ずつ 12 群に分け、4, 6, 10MV のそれぞれのエネルギーにおいて、1, 2, 3, 4Gy を照射した測定結果は次の通り。

Table 2. リニアック 4MV 照射線量と mode 別の測定結果 単位 (Gy)

	1Gy	2Gy	3Gy	4Gy
mode1	0.874	1.709	2.507	3.364
mode2	1.046	2.042	3.002	4.019
mode3	0.999	1.996	3.023	3.989
mode4	0.989	1.932	2.831	3.806

Table 3. リニアック 6MV 照射線量と mode 別の測定結果 単位 (Gy)

	1Gy	2Gy	3Gy	4Gy
mode1	0.851	1.656	2.489	3.383
mode2	1.021	1.991	2.995	4.011
mode3	0.997	1.986	2.989	3.990
mode4	0.964	1.890	2.843	3.788

Table 4. リニアック 10MV 照射線量と mode 別の測定結果 単位 (Gy)

	1Gy	2Gy	3Gy	4Gy
mode1	0.847	1.693	2.569	3.302
mode2	1.013	2.030	3.071	3.957
mode3	0.999	1.999	3.003	3.988
mode4	0.953	1.919	2.903	3.727

また、エネルギー別、mode 別の誤差は次の通り。

Table 5. 線量直線性の誤差 単位 (%)

	4MV	6MV	10MV	平均
mode1	-14.84	-16.11	-15.59	-15.50
mode2	1.82	0.45	1.04	1.11
mode3	0.07	-0.38	-0.05	-0.12
mode4	-3.73	-4.89	-4.68	-4.44

次に線量直線性とその誤差のグラフを示す。

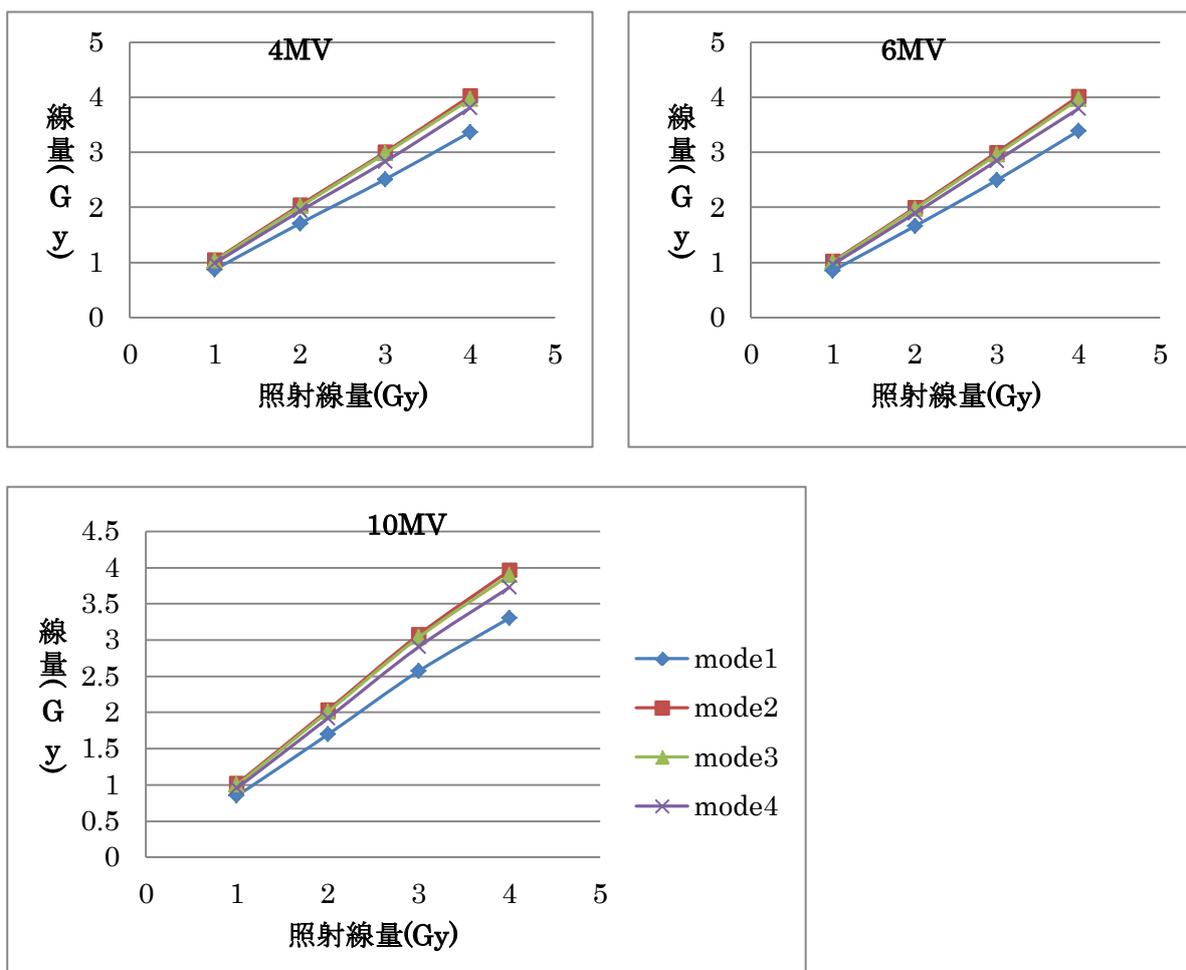


Fig 6. 線量直線性

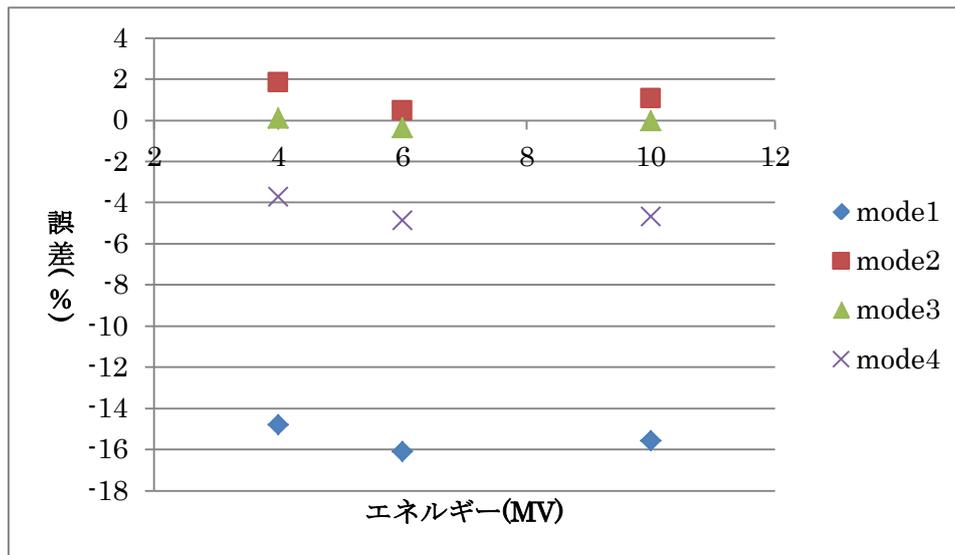


Fig 7. 線量直線性の誤差

また、mode3 の各エネルギーの比例関係⁸⁾については、次の結果を得た。

Table 6. mode3 の照射線量と測定結果の関係性

エネルギー	回帰式	決定係数 R ²
4MV	$y=1.0007x$	0.9999
6MV	$y=0.9967x$	0.9999
10MV	$y=0.9988x$	0.9999

以後の基本特性の実験は mode3 で測定を行った。

5.2. 出力係数(OPF)

ガラス素子を150個用意し、15群に分け、4, 6, 10MVのそれぞれのエネルギーにおいて、照射野の一辺の長さを6~14cmの2cm間隔で変化させて200MU照射を行った。

4MVの実験時に、14cmの測定結果に異常が見られたので、後日、10cm、14cmの照射のみ行った。それをTable 5の4MVの2段目に表す。

Table 7. 照射野サイズ変化に対するエネルギー別の測定結果 単位(Gy)

	6cm	8cm	10cm	12cm	14cm
4MV	1.382	1.462	1.524	1.566	
			1.514		1.614
6MV	1.465	1.531	1.596	1.637	1.664
10MV	1.587	1.640	1.700	1.737	1.768

照射野一辺が10cmの測定結果を基準とした相対値OPFを算出したものを以下示す。

Table 8. GDの測定結果から算出したOPF

	6cm	8cm	10cm	12cm	14cm
4MV	0.906	0.959	1.000	1.027	1.065
6MV	0.918	0.959	1.000	1.025	1.043
10MV	0.933	0.965	1.000	1.022	1.040

Table 9. ICの測定結果から算出したOPF

	6cm	8cm	10cm	12cm	14cm
4MV	0.902	0.957	1.000	1.036	1.065
6MV	0.916	0.963	1.000	1.030	1.054
10MV	0.932	0.970	1.000	1.024	1.043

指頭形電離箱線量計(IC)の測定結果から算出した OPF との誤差を以下示す。

Table 10. GD と IC の OPF の誤差 単位(%)

	6cm	8cm	12cm	14cm
4MV	0.523	0.264	-0.820	0.084
6MV	0.237	-0.387	-0.419	-1.028
10MV	0.199	-0.505	-0.167	-0.281

次に GD の測定結果から算出した OPF と IC と比較したときの誤差をグラフに示す。

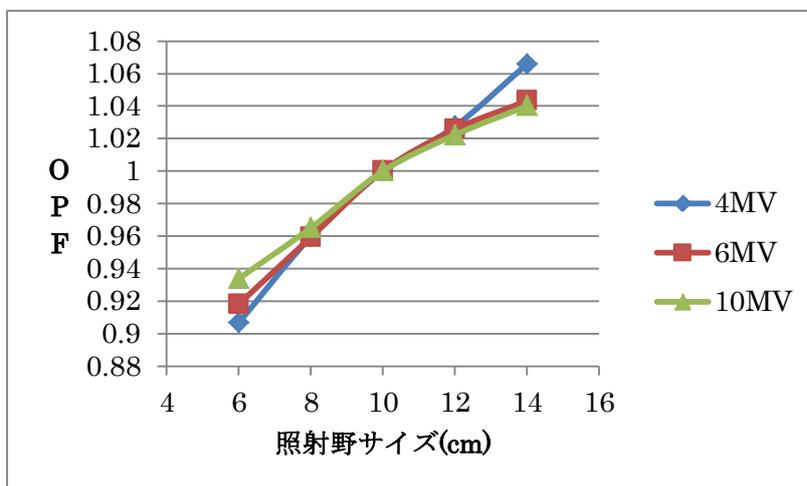


Fig 8. GD の測定結果より算出した OPF

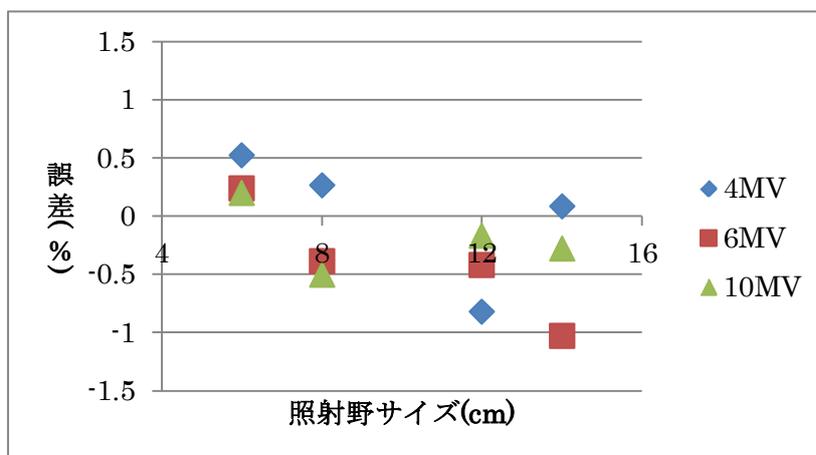


Fig 9. GD と IC の OPF の誤差

5.3. 深さ依存性(TPR)

ガラス素子を 150 個用意し、10 個ずつ 15 群に分け、4, 6, 10MV のそれぞれのエネルギーにおいて、深さを 5~20cm の 5cm 間隔で変化させて 200MU 照射を行った。結果を示す。

Table 10. 深さ変化に対するエネルギー別の測定結果 単位(Gy)

	5cm	10cm	15cm	20cm
4MV	1.878	1.548	1.222	0.966
6MV	1.833	1.553	1.258	1.042
10MV	1.957	1.670	1.438	1.211

照射野一辺の長さ 10cm の測定結果を基準とした相対値、つまり TPR を算出したもの、指頭形電離箱線量計の測定結果から算出した OPF との誤差を次に示す。

Table 11. TPR

	5cm	10cm	15cm	20cm
4MV	1.213	1.00	0.789	0.624
6MV	1.180	1.00	0.810	0.670
10MV	1.171	1.00	0.860	0.725

Table 12. TPR の誤差 単位(%)

	5cm	10cm	15cm	20cm
4MV	-0.534	0	-0.925	0.225
6MV	-0.042	0	-1.792	-0.028
10MV	3.021	0	-0.590	-2.146

次に TPR とその誤差のグラフを示す。

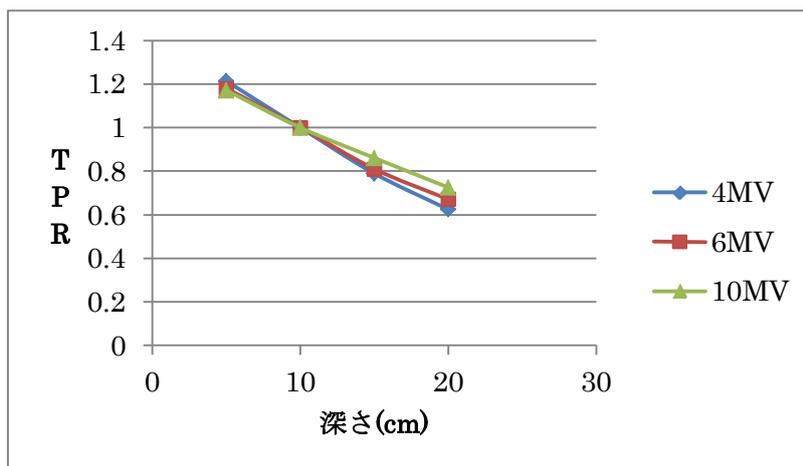


Fig 10. GD の測定結果より算出した TPR

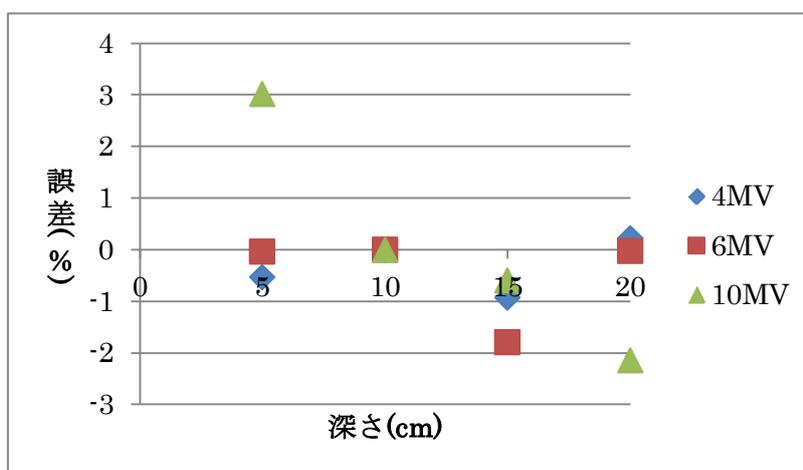
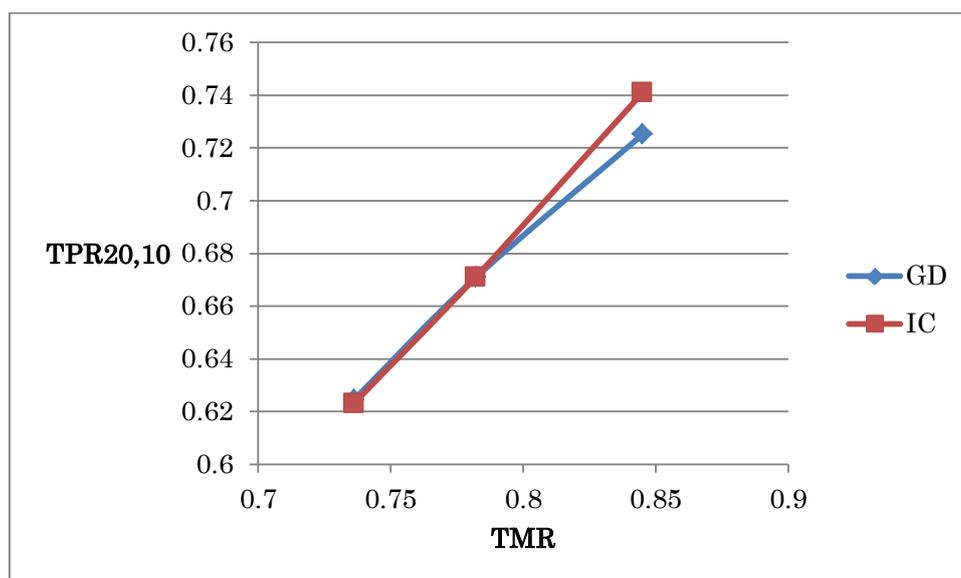


Fig 11. GD と IC の TPR の誤差

TPR_{20,10} の関係を示す。

Fig12. TMR と TPR_{20,10} の関係

5.4. 測定のばらつき

Table 13. 線量直線性の実験データの変動係数(%)

	4MV	6MV	10MV
1Gy	3.5	2.5	2.1
2Gy	2.0	2.5	1.7
3Gy	3.6	2.5	1.6
4Gy	2.8	1.9	3.0

※各変動係数の n 数は 10 である。

Table 14. 200MU 照射データの変動係数(%)

	4MV	6MV	10MV
200MU	2.2	3.0	4.3

※n 数は 20 である。

ただし、10MV のデータのみ 1 個の素子に異常値が見られたので、n=19 である。

これらの変動係数の自乗和平方根をとると次の結果の通り。

Table 15. 一部の試験結果より求めた変動係数(%)

	4MV	6MV	10MV
N	60	60	59
CV	2.9	2.5	2.7

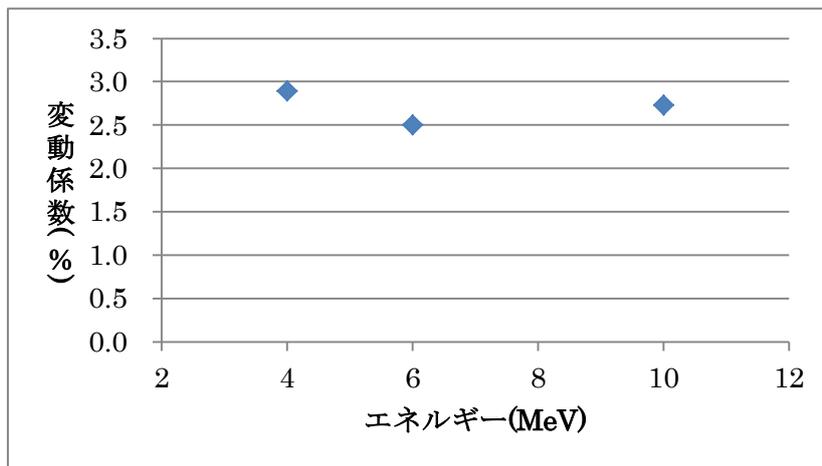


Fig 13. 測定のばらつき

6. 考察

GD の測定精度は 3%以内が旭テクノグラス株式会社の理想誤差に示されるが、標準仕様の ^{137}Cs γ 線校正で行った測定誤差は-15%と大幅に下回っていた。高エネルギー領域において ^{137}Cs γ 線校正での測定は不適であり、自施設でのリニアック X 線による校正が望ましい。mode3 (6MV 校正) の測定精度が一番高いことより、以後の基本特性の実験には mode3 で測定を行った。mode3 の精度が一番いい理由として、3つのエネルギーに対して線質が一番近いからだと考える。逆に mode4 の精度があまりよくないのは、線質が一番離れているからだと言える。

基本特性の結果から、各エネルギーで線量直線性がみられる。mode 別の誤差は mode2 (4MV 校正) が 1.11%、mode3 (6MV 校正) が-0.12%、mode4 (10MV 校正) が-4.44%であった。mode2 (4MV 校正) と mode3 (6MV 校正) のみに着目すると、誤差は±2%以内で、製造業者千代田テクノルの規格±2%の範囲内であり、荒木氏⁹⁾の結果と同程度である。mode3 の測定結果から単回帰解析をした結果を Table 6 に示しているが、良好な比例関係が見られる。

出力係数と深さ依存性の実験結果から、GD を用いた場合も IC に近いレスポンスが得られることがわかる。GD と IC の OPF の最大誤差は-1.028%で、±2%以内である。GD と IC の TPR の誤差の最大誤差は 3.021%、約±3%以内である。また、出力係数の実験結果では、照射野サイズが大きくなるにつれて、蛍光ガラス線量計のレスポンスが増加しているのは、照射野拡大に伴って、低エネルギーの散乱光子が増大するためと考えられる。深さ依存性の実験結果では、深さつまりタフウォーターファントム中の通過距離が長くなるにつれて、減弱が大きくなり、レスポンスが低下していると考えられる。

実験の際の測定異常は、照射したはずの素子をマガジンにセットして読み取りを開始しても「素子なし」と表示されたものである。以後、そういった異常は見られなかったため、一時的な装置の不具合と考えられる。

測定のばらつきの実験結果は、変動係数は3%以内であった。測定のばらつきにおけるエネルギー依存性は見られなかった。本研究で、蛍光ガラス線量計の測定における不確かさについて、項目別に調べることはできなかったが、この測定のばらつきは、X線出力の安定性、読取り再現性による誤差も加味されていると考える。

文献を探していると、これまでの蛍光ガラス線量計の研究は、低エネルギー領域において実施されることが多かったように思う。本研究で、高エネルギー領域においては自施設のリニアックビームの校正により、蛍光ガラス線量計の有用性が示されたので、放射線治療の品質管理に利用が広がることを期待する。

7. 結論

GD の高エネルギー領域での測定には、自施設のリニアック X 線による校正が重要である。

GD の線量計測誤差は概ね 2%以内、変動係数は 3%以内であり、GD は電離箱線量計の測定精度には及ばないが、郵送調査に役立てることができるため、その利便性により、高エネルギー領域においても有効な線量計といえる。

8. 謝辞

本卒業論文を作成するにあたり、多くの有益な助言を賜りました大阪大学大学院医学系研究科医用物理工学講座松本光弘准教授に深く感謝いたします。また、実験器具をご提供していただいた大阪大学大学院医学部附属病院放射線部井ノ上技師に深く感謝の意を表します。

9. 引用論文

- 1) 蛍光ガラス線量計を用いた環境 γ 線量測定法, 放射能測定法シリーズ 27, 文部科学省 科学技術・学術政策局 原子力安全課防災環境対策室, 財団法人 日本分析センター, 2002 年
- 2) 吸収線量の標準測定法-標準測定法 01-, 日本医学物理学会編, 97, (株)通商産業研究社, 2008 年
- 3) 旭テクノグラス株式会社 サイテック事業部 線量計グループ, 蛍光ガラス線量計・小型素子システム DoseAce 基本特性資料, 2000 年
- 4) 荒木不次男, 蛍光ガラス線量計を用いたナロービームにおける線量の高度評価に関する研究報告, 日本放射線技術学会雑誌 60(7), 939-947, 2002 年
- 5) 株式会社千代田テクノル, DoseAce DoseAceXe 説明資料, 23, 2007 年
- 6) 野村貴美, 蛍光ガラス線量計, Radioisotopes51(2), 35-45, 2002 年
- 7) 旭テクノグラス株式会社 サイテック事業部 線量計グループ, DoseAce DoseAceXe 線量計素子 GD-300 シリーズ取扱説明書, 2004 年
- 8) 白川誠士, 蛍光ガラス線量計の基本特性の検討, Medicine and biology 155(5), 293-298, 2011 年
- 9) 名古安伸, 蛍光ガラス線量計特性 放射線治療領域, 日本放射線技術学会雑誌 61(10), 2005 年 10 月