

卒業論文

題目：蛍光ガラス線量計を用いた  
陽子線の郵送線量調査に関する研究

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)

05C15039 山形梨華

(平成 30 年 11 月 22 日 提出)

## 要旨

【目的】放射線治療の領域における照射線量，治療用照射装置の出力線量が全国的に同一基準ということががん治療及び臨床研究の基本である．そこで，第三者的検証の重要性に対する認識が高まっており，IAEA や WHO を始めとした機関により，線量計を郵送して照射装置の出力確認を第三者機関が行う第三者評価プログラムが実施されている．本邦においても医用原子力技術研究振興財団（ANTM）が 2007 年から X 線に限定して実施している．その計測精度は非常に高く郵送調査への有用性は確立している．我々も過去に X 線（校正深吸収線量，定位照射，IMRT），電子線に関して郵送調査を実施し，その有用性を確認している．今回陽子線についても同様の手法を用い，郵送調査の有用性の検討を行ったので報告する．

【方法】協力施設には，ガラス線量計 2 本を内包できる測定用ファーマ形ファントム，ガラス線量計（GD-302）20 本入り 1 箱，測定記録用紙，返送用レターパックを同封しレターパックにて郵送した．エネルギーは各施設において通常多用しているものを中心に，その前後のエネルギーの計 3 ビームにて照射を依頼した．照射条件は水ファントムを使用し，基準点は SOBP 中心として 1Gy（物理線量）とし，その他の条件については各施設の通常測定法に任せた．

【結果】各施設の規定値 1Gy に対する差異は 4%以下であり，ガラス線量計の不確かさを 6%と見積もっても十分な測定精度であった．

【考察】X線，電子線に次いで，陽子線においてもガラス線量計は十分な測定精度を有することが確認でき，陽子線郵送調査の有用性が認められ第三者評価デバイスに適していた。

## 1. 序論

### 1.1 背景

放射線治療における照射線量、治療用照射装置の出力線量が全国的に同一基準とすることががん治療及び臨床研究の基本である。放射線治療の品質管理及び品質保証を行う上で、治療に関わる装置の保守管理が非常に重要となる。

照射線量の品質保証は本来各施設内において実施すべきであるが、近年ではそれに加えて第三者的検証の重要性に対する認識が高まってきており、線量計を郵送して照射装置の出力確認を第三者機関が行う第三者評価プログラムは、IAEA(International Atomic Energy Agency)や WHO(World Health Organization)を始めとした機関により世界各国で実施され、全世界の約 60%の施設が郵送測定による第三者評価プログラムに参加している。<sup>1)</sup> 本邦では公益財団法人医用原子力技術研究振興財団(以下 ANTM)が第三者評価機関として蛍光ガラス線量計の「治療用照射装置の出力線量測定義務」を平成 19 年から開始しているが、X 線のみのものであり陽子線装置における第三者評価プログラムに関しては現在実施されていない。

また平成 23 年・24 年・25 年・27 年度の先行研究では、リニアック X 線校正点吸収線量の精度調査、定位放射線治療の線量評価、電子線線量計測の精度調査、IMRT の線量評価において蛍光ガラス線量計郵送調査の有用性が検証され、結果として有用であると結論付けられており、陽子線への応用の可能性も示している。

## 1.2 蛍光ガラス線量計

### 1.2.1 蛍光ガラス線量計の原理

蛍光ガラス線量計は、銀活性リン酸塩ガラスに電離放射線を照射すると、紫外線励起によってオレンジ色の蛍光を発する現象(ラジオホトルミネセンス:RPL)に基づく個体線量計である。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。放射線の照射によって生じた RPL 中心は、読取操作によって消滅することがなく、何度でも繰り返し読み取りができる真の積算型個体線量計である。

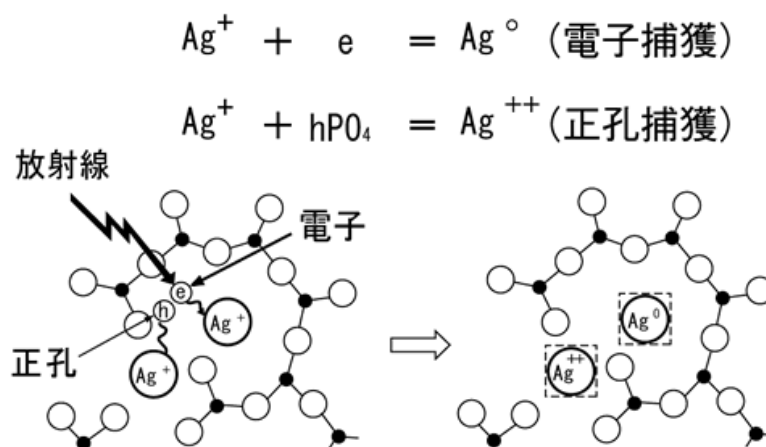


Fig.1 RPL 中心の形成

電離放射線が銀活性リン酸塩ガラスに照射されると、電子及び正孔(ホール)が叩き出され、電子はガラス構造中の  $\text{Ag}^+$  に捕獲され、 $\text{Ag}^0$  となる。一方、正孔は一旦  $\text{PO}_4$  四面体に捕えられるが、時間の経過とともに  $\text{Ag}^+$  へ移行し、より安定な  $\text{Ag}^{++}$

を形成する。これらの AG0 及び AG++が共にガラス中で RPL 中心(蛍光中心)となる。2)

本研究では治療用蛍光ガラス線量計素子 GD-302M を用いた。測定選手は陽子線、測定線量範囲は 10 $\mu$ Gy $\sim$ 100Gy、ガラス素子寸法は直径 1.5 mm、長径 12 mmで、ホルダ寸法は直径 2.8 mm、長径 13 mmである。

ガラス線量計素子(GD-300 シリーズ)の特徴としては、

- 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

があげられる。

### 1.2.2 蛍光ガラス線量計の使用手順

ガラス素子に欠損・汚れ・白曇りがあると励起光が拡散され正確な読み取りができない。使用前に外観検査として、素子の欠損・汚れを確認し、欠損のあるものは使用を控え、汚れがあるものは汚れをアルコールシートでふき取った。その後、ガラス素子に蓄積した積算線量を消失させるために 400 $^{\circ}$ Cで 20 分のアニール処理を行った。

その後照射を行った。放射線が照射されたガラス素子にはラジオホトルミネセンスの蛍光量が時間の経過とともに増加して安定化するというビルドアップ特性がある。この時間変化を短時間で完了させるため、プレヒート処理を行う。本研究では70℃で30分間のプレヒート処理を行った。



Fig.2 ガラス素子の外観

## 2. 目的

陽子線装置を用いて蛍光ガラス線量計に陽子線を照射し、測定値と吸収線量の誤差を求め、陽子線測定 of 精度確認をした。

さらに、蛍光ガラス線量計が、陽子線測定 of 郵送線量調査に適したデバイスであるのか検証した。

### 3. 使用器具及び郵送先

- ・リニアック治療装置

- ・蛍光ガラス線量計・小型素子システム Dose Ace(AGC テクノグラス株式会社)

線量計小型素子                      高エネルギー測定用    GD-302M

線量計リーダー                      FGD-1000

読取マガジン                        FGD-M151

アニールマガジン                    FGD-C101

アニール用電気炉                    NEW-1CT

プレヒート用恒温器                DKN-302

プレヒートトレイ                    FGD-C102

- ・PTW30013 型ガラス素子測定用ファントム(防水型)

- ・郵送協力

南東北がん陽子線治療センター      粒子線治療装置    陽子タイプ(三菱電機)

兵庫県立粒子線医療センター          陽子線治療装置    回転ガントリ 2号機(日立  
製作所)

大阪陽子線クリニック                MELTHEA(三菱電機)

神戸陽子線センター                  MELTHEA V(三菱電機)

社会医療法人 高清水 高井病院        陽子線治療システム(住友重機械工業)

## 4. 方法

### 4.1 郵送前調査、陽子線エネルギーにおける線質補正係数の算出

#### 4.1.1 実験方法

ガラス素子(GD-302M)の線量計リーダーの校正を 6MVX 線で行っているため、陽子線エネルギー解析の補正が必要である。そのため、南東北がん陽子線治療センターの協力の下、陽子線測定における補正係数を算出し、線量補正をした。陽子線治療装置(三菱電機)を使用し、150MeV、210MeV、230MeV の 3 ビームにて、GD を 2 本挿入した測定用ファーマ形ファントムを用いて SOBP 中心に 1Gy 照射した。その後返却された素子をプレヒート処理し、FDG-1000 で測定した。読み取り装置はあらかじめ、6MVX 線によるオリジナルスタンダード線量計素子を作成し、FDG-1000 の高エネルギー測定用に校正済みである。

#### 4.1.2 線質指標の検討

以下の式(1)より各エネルギーで補正係数を算出し、残余飛程  $R_{res}$  と実用飛程  $R_p$  それぞれについての線質依存性を調べた。

$$\frac{\text{実測値}[cGy]}{\text{FDG1000 の測定値}[cGy]} \dots \text{式(1)}$$



## 4.2 郵送調査

測定用素子セット(GD-302M)20本、測定用ファントム(PTW300013型ガラス素子ファントム：防水型)、ガラス素子返送用として、日本郵便のレターパック500、照射方法を示した手順書、照射時の条件などを記入してもらうための記入シートを、陽子線照射を実施している4施設に郵送した。

蛍光ガラス線量計 郵送調査用シート			
基本的に測定基準は標準計測法12の第5章陽子線の水吸収線量計測(P-81-95)に準拠する 線質指標の測定はP-84の表5.1、計測の基準条件はP-85の表5.2に準拠する			
装置名			
加速器	( シンクロトロン ・ サイクロトロン)		
メーカー名			
I 最も頻度の高いエネルギー		測定日:	
加速エネルギー		MeV	
公称線量率		MU/min	
実用飛程Rp		g/cm <sup>2</sup>	
SOBP形成方法			
基準ファントム	【水 ・ ( )】		
基準SSD		cm	
基準照射野もしくは通常使用照射野	x	cm <sup>2</sup>	
基準深Zref		g/cm <sup>2</sup>	
線質Q (Rres)		g/cm <sup>2</sup>	
電離箱	(ファーマー ・ 平行平板)		
電離箱 型番			
電位計名			
電位計印加電圧	300V ・ 400V ・ ( ) V		
水吸収線量校正定数		Gy/nC	
校正日			
校正深(SOBP中心)		g/cm <sup>2</sup>	
温度気圧補正係数			
極性効果補正係数			
イオン再結合補正計数			
モニタ設定値		MU	
リファレンス線量計表示値		nC	
必要な補正を施した電圧V1における表示値			
M k <sub>TP</sub> k <sub>elec</sub> k <sub>POL</sub> k <sub>S</sub>		nC	
線質変換計数kQ			
基準深における水吸収線量Dw,q(Zref)			
M <sub>Q</sub> N <sub>DW</sub> k <sub>Q</sub>		Gy	
基準深におけるDMU		cGy/MU	

Fig.3 データ記入シート

ガラス素子用シート					
I 最も頻度の高いエネルギー		測定日:			
使用ガラス素子のID	①	先頭			
	②	後ろ			
II 次に頻度の高いエネルギー		測定日:			
使用ガラス素子のID	①	先頭			
	②	後ろ			
III 3番目に頻度の高いエネルギー		測定日:			
使用ガラス素子のID	①	先頭			
	②	後ろ			

Fig.4 使用素子記録シート

#### 4.2.1 照射方法

測定用ファーマ形ファントム（タフウォーター製：防水加工）の先端を左回しで開け、ガラス素子(GD-302M)を2個続けて入れる。この時、ガラス素子の向きは必ずID側から挿入してもらうよう依頼した。

エネルギーは各施設において使用頻度が1番高いエネルギー、2番目のエネルギー、3番目のエネルギーの計3ビームにて照射を依頼した。1照射につき2素子で行い、各ビーム2回ずつの照射、計12個の素子を使用する。照射条件は水ファントムを使用し、基準点はSOBP中心として1Gy(物理線量)とし、その他の条件については各施設の通常測定法に任せた。素子を保管する場合はデシケータ内で保管してもらった。

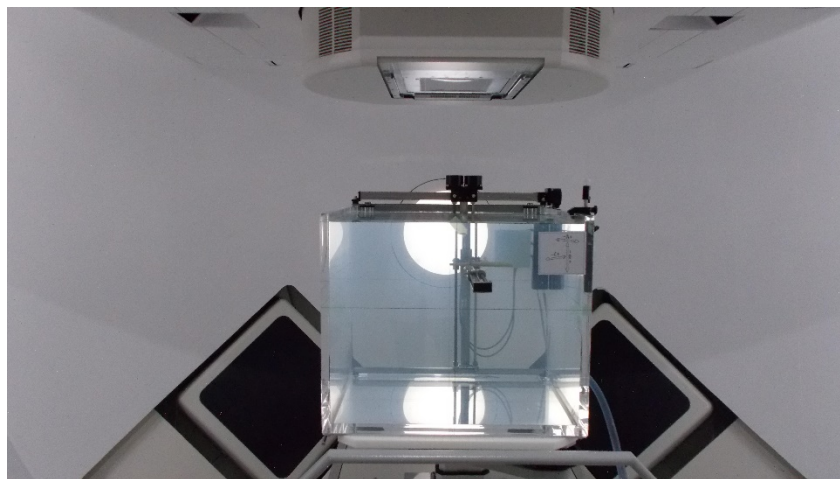


Fig.5 蛍光ガラス線量計設置風景

#### 4.2.2 回収及び測定

照射が終了したガラス素子は、照射後できるだけ早くレターパック 500 で返送してもらいように依頼した。回収した素子は、返却後すぐに 70°C で 30 分間のプレヒート処理を行い、読取装置(Dose Ace)で測定した。2 回繰り返し測定し、平均値を測定値として使用した。

#### 4.2.3 解析

測定値を線質補正係数により線量補正し、以下の式(2)を用いて誤差を求め、精度を確認した。

$$\frac{\text{補正後の測定値} - 100[\text{cGy}]}{100[\text{cGy}]} \times 100 \dots \text{式(2)}$$

## 5. 結果

### 5.1 陽子線の実用飛程 $R_p$ における線質補正係数の算出

公称エネルギーと残余飛程  $R_{res}$ 、実用飛程  $R_p$  それぞれとの相関を Table.1 および Fig.6 に示す。

Table.1 エネルギーと  $R_{res}, R_p$

Energy(MeV)	$R_{res}(g/cm^2)$	$R_p(g/cm^2)$
150	3.5	14.2
210	3.8	26.0
230	4	30.4

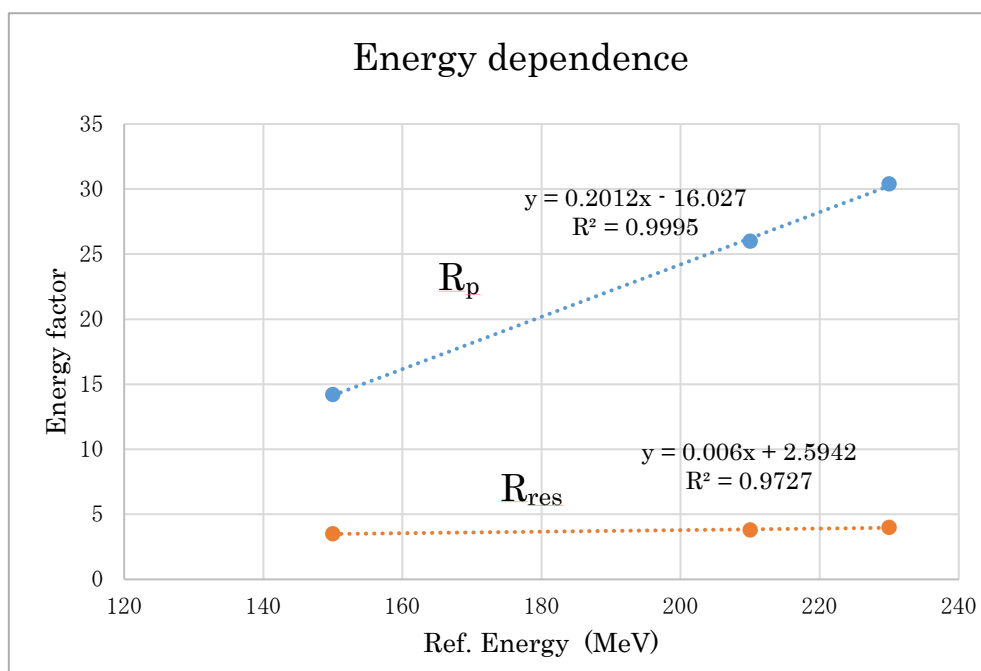


Fig.6 公称エネルギーと  $R_{res}, R_p$  との相関

公称エネルギーと  $R_{res}, R_p$  どちらにおいても強い相関がみられた。

$R_{res}, R_p$  それぞれと測定結果との相関を Table2 及び Fig.7 に示す。なお、これは大阪大学医学部附属病院の 6 MV リニアック X 線による基準照射でキャリブレーションしたモードでの測定結果である。

Table.2 測定結果

$R_{res}(g/cm^2)$	$R_p(g/cm^2)$	Measured dose(cGy)
3.5	14.2	88.5
3.8	26.0	89.8
4	30.4	90.4

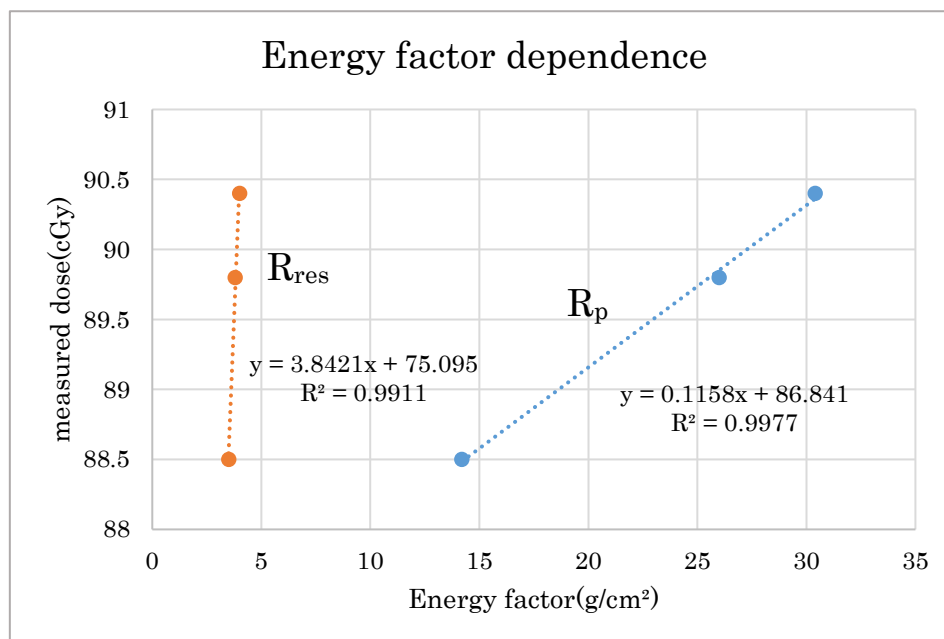


Fig.7  $R_{res}, R_p$  と測定結果との相関

$R_{res}, R_p$  それぞれと測定値はどちらにおいても強い相関がみられた。

続いて、 $R_{res}, R_p$  と補正係数との相関を Table.3 及び Fig.8 に示す。

Table.3 各エネルギーの  $R_{res}, R_p$  と補正係数

$R_{res}(g/cm^2)$	$R_p(g/cm^2)$	Factor
3.5	14.2	1.129
3.8	26.4	1.113
4	30.4	1.106

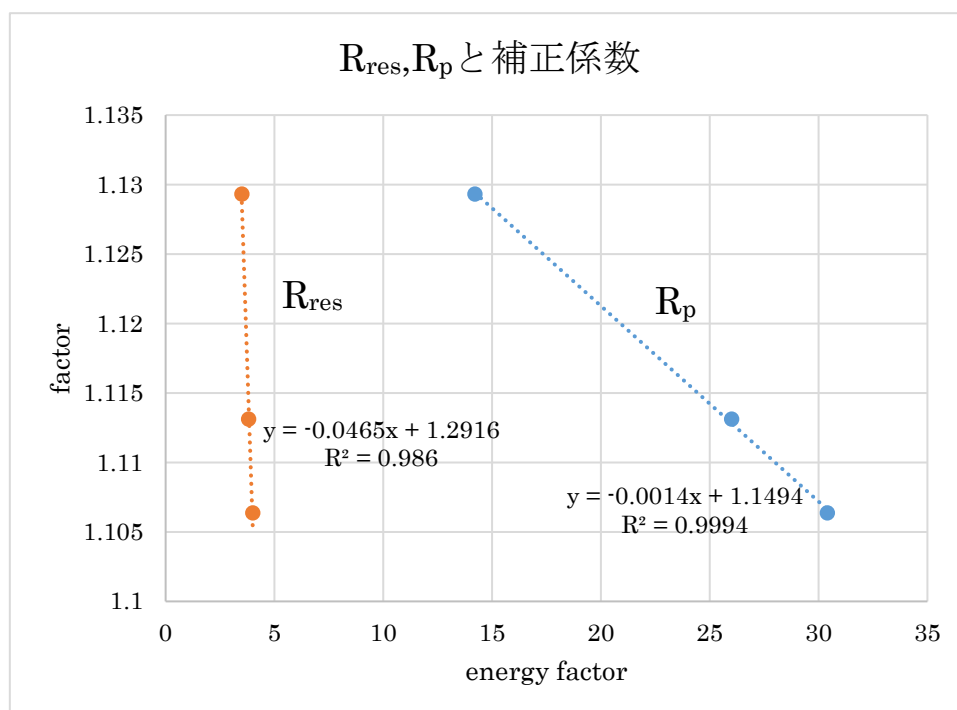


Fig.8  $R_{res}$ 、 $R_p$  と補正係数との相関



さらに、 $R_{res}$ 、 $R_p$ それぞれと補正係数との回帰式を Table.4 に示す。

Table.4  $R_{res}, R_p$  と補正係数との関係

	回帰式	決定係数 $R^2$	相関係数 $\gamma$
$R_{res}$	$y=-0.0465x+1.2916$	0.986	-0.993
$R_p$	$y=-0.0014x+1.1494$	0.9994	-0.9997

$R_{res}$  に関して相関係数は-0.993、 $R_p$  に関して相関係数は-0.9997 となり、 $R_p$  の方が補正係数との相関が強くみられた。そのため、今回の研究においては  $R_p$  を線質指標として採用し、線量補正を行った。

## 5.2 郵送調査

郵送調査に協力いただいた4施設の測定値を、5.1の $R_p$ における回帰式より求めた補正係数により補正を行い、算出した誤差をTable.5に示す。

Table.5 郵送調査における測定値から求めた誤差(%)

	Energy(MeV)	$R_p(\text{g/cm}^2)$	factor	Dose(cGy)	Error (%)
病院 A	150	14.76	1.129	101.95	1.95
	210	26.68	1.112	99.88	-0.12
	230	31.19	1.106	100.59	0.59
病院 B	153	16.1	1.127	100.58	0.58
	183	22.1	1.118	99.08	-0.92
	210	28	1.110	98.27	-1.73
病院 C	118	9.41	1.136	99.97	-0.03
	183	20.93	1.120	98.38	-1.62
	210	26.75	1.112	96.38	-3.62
病院 D	150	13.77	1.130	103.46	3.46
	190	20.52	1.121	103.38	3.38
	230	28.7	1.109	102.03	2.03
平均					$0.33 \pm 2.14$

全体の誤差の平均値は、 $0.33 \pm 2.14\%$ であった。

また、郵送調査におけるエネルギーと誤差を Fig.7 に示す。

全 12 ビーム中、1SD 内には 9 ビーム、2SD 内には全 12 ビームが入っていた。

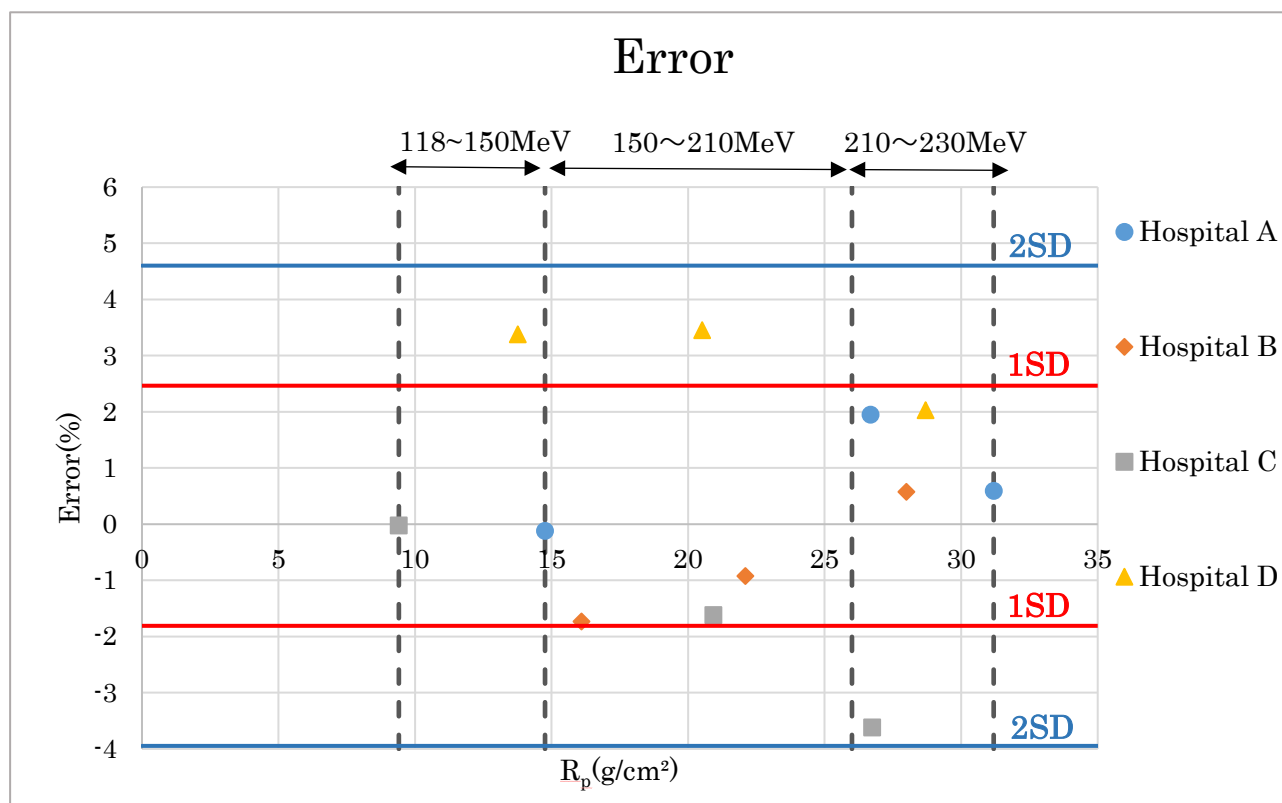


Fig.9 郵送調査の結果

### 5.3 不確かさの見積もり

ファーマ形線量計の線量測定の不確かさの見積もり

Table.6 ファーマ形線量計による陽子線測定の不確かさの見積もり<sup>3)</sup>

物理量または手段	相対標準不確かさ(%)
線量校正における不確かさ	
ステップ1:標準構成機関	
特定二次標準器の校正定数 $N_{D,w}$	0.40
特定二次標準器による基準 $\gamma$ 線場の決定	0.18
二次線量標準機関におけるユーザ電離箱線量計の測定値	0.27
ステップ1の合成不確かさ	0.52
ステップ2:ユーザ施設の陽子線	
ユーザ電離箱線量計の長期安定性	0.3
基準条件の設定	0.4
モニタ設定値に対する表示値 $M_{raw}$	0.6
補正係数 $k_i$	0.4
線質変換係数 $k_Q$ (計算値)	1.7
ステップ2の合成不確かさ	1.9
$D_{w,Q}$ の相対合成標準不確かさ (ステップ1+2)	2.0

また、本実験での蛍光ガラス線量計の不確かさの見積もりを Table.6 に示した。

Table.7 本実験の不確かさの見積もり

標準不確かさ	
素子間の感度ばらつき (新品)	1.1%
読み取り再現性	0.3%
Position 間のばらつき	1.7%
合成標準不確かさ	2.0%
ファーマ形線量計+ガラス線量計の相対合成標準不確かさ	2.8%
相対拡張標準不確かさ (包含係数 $k=2$ )	6%

## 6. 考察

計測結果と実用飛程  $R_p$  との相関係数は-0.9997、残余飛程  $R_{res}$  との相関係数は-0.993 であり、 $R_p$  のほうが  $R_{res}$  よりも相関が良かったため、 $R_p$  を線質指標として線質補正係数を算出した。

陽子線計測の不確かさの見積もり値から、本実験での相対拡張標準不確かさは包含係数 2 で±6%である。結果 5.2 から、平均の誤差は  $0.33\% \pm 2.14\%$ 、最大誤差は  $-3.62\%$  であり、全てのビームが不確かさの範囲内であった。また、全 12 ビーム中 1SD 内には 9 ビーム、2SD 内には全 12 ビーム含まれていたことから、郵送調査による測定は十分な精度であった。病院 D において、3 ビームとも  $2.03\% \sim 3.46\%$  と誤差が大きくなった原因として、照射からプレヒートまでに 6 日間とスパンが開いたことが考えられる。平成 25 年の先行研究により、照射から 6 日後のタイミングでプレヒートをした場合、ビルドアップにより 2~3%増加傾向があるという結果を得ており、それにより今回の測定で他の施設に比べ誤差が大きくなったと考えられる。

Fig.10 にその結果を示す。<sup>4)</sup>

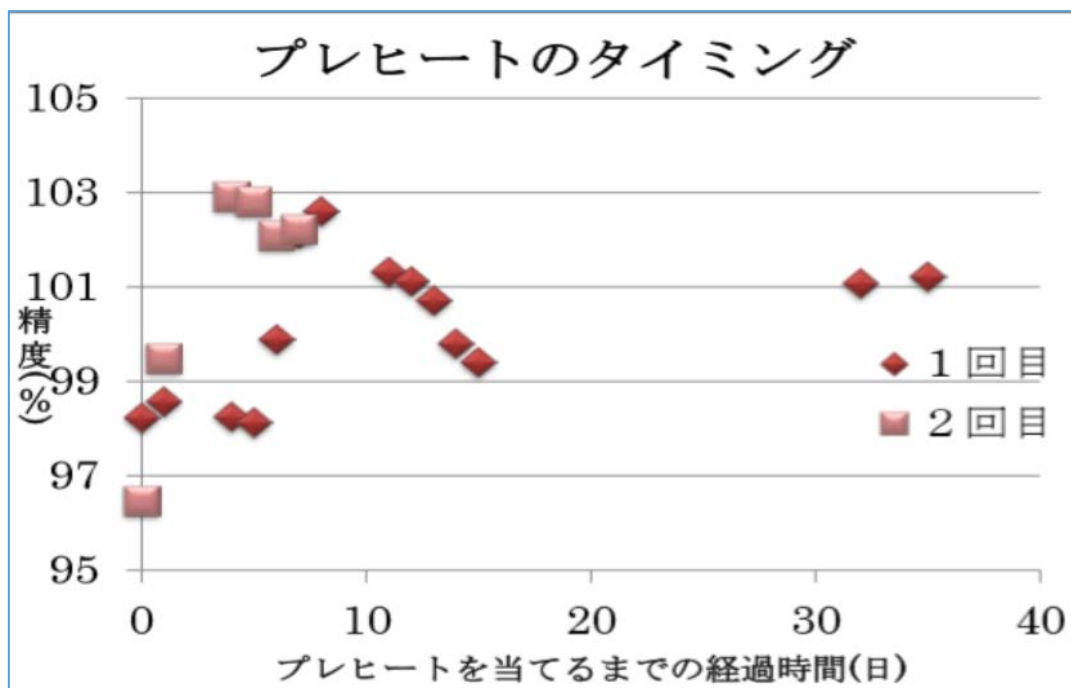


Fig.10 プレヒート処理の時期によるビルドアップの影響

## 7. 結論

ガラス線量計郵送線量調査において、測定値は相対拡張標準不確かさの範囲内であり、陽子線線量調査においても郵送調査の有用性が証明された。

## 8. 謝辞

本卒業論文を作成するにあたり、多くのご指導、ご協力をいただきました大阪大学大学院医学系研究科医用物理講座 松本光弘准教授に深く感謝いたします。

また、実験にご協力いただいた

大阪大学医学部附属病院放射線部 井ノ上技師、有村技師、

郵送調査にご協力いただいた施設

南東北がん陽子線治療センター

兵庫県立粒子線医療センター

医療法人伯鳳会 大阪陽子線クリニック

神戸陽子線センター

社会医療法人高清会 高井病院

に深く感謝の意を示します。



## 9. 参考文献

- 1) 公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団 治療用出力線量測定事業
- 2) 株式会社千代田テクノル・旭硝子株式会社 AGC 電子カンパニー, 蛍光ガラス線量計・小型素子システム Dose Ace Dose Ace Xe 説明資料, 平成 21 年 8 月
- 3) 外部放射線治療における水吸収線量の標準計測法 (標準計測法 12), 日本医学物理学会 編
- 4) 白岡彩奈, ガラス線量計のプレヒート処理の時期によるビルドアップの影響に関する研究, 平成 25 年度卒業論文