

放射線治療領域エネルギーにおける
電子に対する空気の W 値に関する研究

医療健康科学研究科 診療放射線学専攻 610201

佐藤 優樹

目次

目次

図目次

表目次

第1章	序論	6
1.1	放射線計測における空気の W 値	6
1.2	湿潤空気の W 値におけるエネルギー依存性	7
1.3	電子に対する空気の W 値の測定における歴史	9
1.4	研究目的と意義	12
1.5	本論文の構成	12
第2章	空気の W 値の決定原理	14
2.1	空気の W 値の定義	14
2.2	空気の W 値の決定方法	15
2.2.1	カロリメータおよび電離箱測定の比較による決定	15
2.2.2	放射能および照射線量率の比較による決定	16
2.3	グラファイトにおける阻止能の決定	17
2.3.1	質量阻止能	17
2.3.2	電子的阻止能	18
2.3.3	平均励起エネルギー	20
2.3.4	密度効果補正	21
第3章	湿潤空気の W 値におけるエネルギー依存性	22
3.1	方法	22
3.1.1	湿潤空気の W 値の決定方法	22
3.1.2	実験セットアップ	22
3.1.3	湿潤空気での電離電流(湿度補正係数)の測定	26
3.1.4	電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与の計算	28
3.2	結果	30
3.2.1	湿潤空気での電離電流(湿度補正係数)の測定	30
3.2.2	電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与の計算	37
3.2.3	湿潤空気の W 値の決定	38
3.3	考察	39

3.4	まとめ	43
第4章	空気のW値の絶対測定	44
4.1	方法	44
4.1.1	空気のW値の絶対測定の手法	44
4.1.2	実験セットアップ	45
4.1.3	グラファイトカロリメータを用いたグラファイトコアへの吸収線量率の測定	46
4.1.4	グラファイト壁空洞電離箱を用いた電離電流の測定	48
4.1.5	EGS5によるモンテカルロシミュレーションを用いた線量変換係数の算出	50
4.2	結果	52
4.2.1	グラファイトカロリメータを用いたグラファイトコアへの吸収線量率の測定	52
4.2.2	グラファイト壁空洞電離箱を用いた電離電流の測定	53
4.2.3	EGS5によるモンテカルロシミュレーションを用いた線量変換係数の算出	55
4.2.4	空気のW値の決定	56
4.3	考察	57
4.4	まとめ	59
第5章	総括	60
5.1	湿潤空気のW値におけるエネルギー依存性	60
5.2	空気のW値の絶対測定	61
5.3	今後の展望	61

参考文献

謝辞

研究業績

目次

図 1.1 日本の線量校正体系および計量のトレーサビリティ	7
図 1.2 先行研究における低エネルギー領域(15 eV から 7 keV)での W_{air} の測定結果	10
図 3.1 湿潤空気での電離電流測定における実験セットアップ	23
図 3.2 測定中におけるボックス内の温度変動	25
図 3.3 測定中におけるボックス内の相対湿度変動	26
図 3.4 EGS5 によるモンテカルロシミュレーションの計算ジオメトリー	29
図 3.5 6 MV 高エネルギー光子線を照射開始してからの電離箱の出力信号の変化	30
図 3.6 印加電圧を変化させた時 (-400 V \rightarrow +100 V) の電離箱からの出力信号の変化	31
図 3.7 相対湿度を 40 %から 50 %に変化させた時の電離箱からの出力信号の変化	32
図 3.8 高エネルギー光子線における PTW 30013 の湿度変化に対する極性効果補正係数の変動	33
図 3.9 高エネルギー光子線における Exradin A19 の湿度変化に対する極性効果補正係数の変動	34
図 3.10 高エネルギー光子線における PTW 30013 の湿度変化に対するイオン再結合補正係数の変動	35
図 3.11 高エネルギー光子線における Exradin A19 の湿度変化に対するイオン再結合補正係数の変動	36
図 3.12 本研究において測定された高エネルギー光子線における湿度補正係数と Rogers によって計算されたモンテカルロシミュレーションによる湿度補正係数の比較	37
図 3.13 高エネルギー光子線における電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与の計算結果	38
図 3.14 本研究で決定された高エネルギー光子線における湿潤空気の W 値と Niatel によって測定された 50 kV X 線における湿潤空気の W 値の比較	39
図 4.1 実験セットアップ	46
図 4.2 EGS5 コードを用いて作成されたグラフィトカロリメータおよびグラフィト壁空洞電離箱の検出器モデル	51
図 4.3 ^{60}Co γ 線を用いた行われたグラフィトカロリメータにおける等温測定モードの測定結果	53
図 4.4 +100 V から+400 V の範囲における $1/V$ に対する $1/I$ の Jaffe プロット	54
図 4.5 異なる線量率で得られた $I_1(400\text{ V})$ の関数とした $I_1(400\text{ V})/I_2(200\text{ V})$ の測定結果および線形フィット	55

表目次

表 1.1 10 keV 以上のエネルギーにおける W_{air} の報告値.....	11
表 3.1 本研究でを使用した2つのファーマ型電離箱の物質特性.....	24
表 3.2 EGS5 において使用した計算パラメータ	28
表 4.1 EGS5 において使用した計算パラメータ	52
表 4.2 本研究において得られた W_{air}	56
表 4.3 絶対測定システムによって得られた W_{air} の相対標準不確かさ	57
表 4.4 Burns ら(2014)の報告値との比較	59

第1章

序論

本研究では、放射線治療領域のエネルギーにおける電子線に対する空気の W 値に関する研究を行った。本論文では大きく分けて2つの調査について述べており、1つは湿潤空気におけるエネルギー依存性、もう一つは空気の W 値の絶対測定システムの開発である。本章では、研究背景と研究目的を明らかにした後、本論文の構成について説明する。

1.1 放射線計測における空気の W 値

現在、放射線は医療・理工学・産業においてさまざまな形で利用されている。医療の分野では診断および治療において利用され、現代医学では放射線利用が欠かせない技術となっている[1]。医療の進歩に伴い、日本各地で高質な医療を受けることが可能になった一方で、我が国における医療被ばくは世界各国と比較して高いことが指摘されている[2]。病院では放射線を利用した検査を安全に患者へ提供するために、放射線量の測定を通じて被ばく線量の管理や装置の品質管理を行っている。

このようにユーザー側が、放射線を正しく計測できるように各国において国家計量標準が存在する[3]。国家計量標準はその国の国内で行われるあらゆる計量の基準 (標準) となるものである[4]。例えば、ユーザーが病院で使用する電離箱線量計 (以下、電離箱) を校正に出す場合、その校正に用いられる標準器は必ず上位の標準器によって校正されており、これをたどっていくと必ずその国の国家計量標準につながるようになっている。これを「計量のトレーサビリティ」と呼ぶ (図 1.1)。我が国では産業技術総合研究所 (以下、産総研) が国家計量標準機関の役割を担っており、放射線の種類やエネルギーに合わせた様々な標準の開発、維持および供給が行っている[3,4]。

産総研では放射線防護に関わる標準として、X線および γ 線における空気カーマ標準が整備されている[3,4]。空気カーマは国家計量標準である自由空気電離箱やグラフィイ

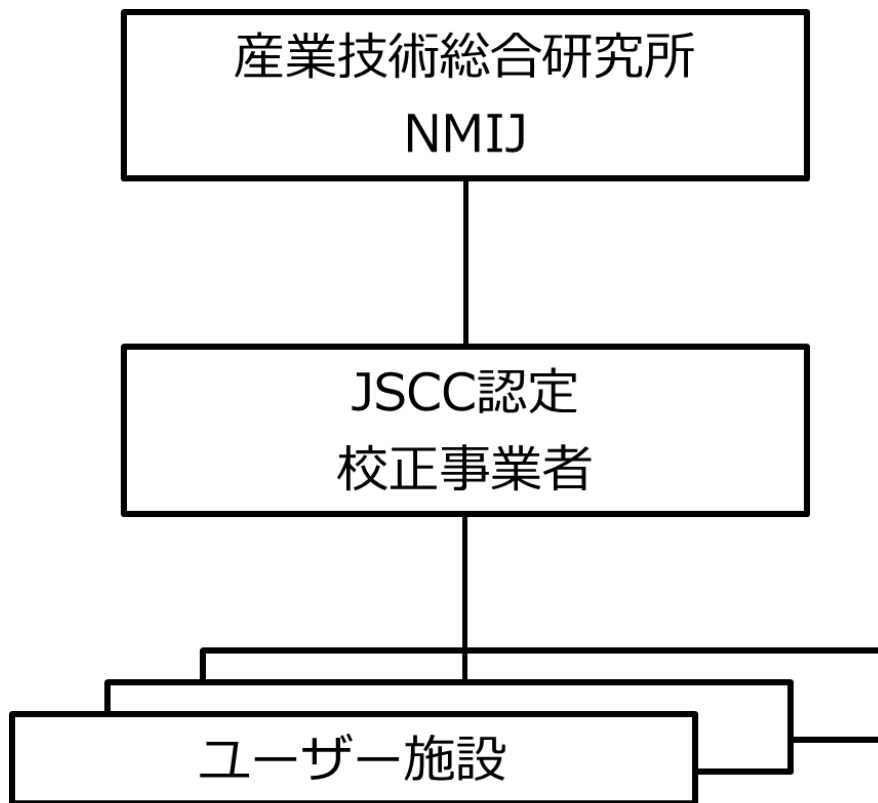


図 1.1 日本の線量校正体系および計量のトレーサビリティ

ト壁空洞電離箱を用いて決定されるが、その際に電子に対する空気のW値（以下、 W_{air} ）という物理量が必要となる。 W_{air} は空気中に一つのイオン対を生成するために必要な平均エネルギーと定義され[5]、空気カーマなどの放射線量を決定する際に欠かせない重要な物理量となっている。この W_{air} は放射線防護のような低エネルギーの放射線だけでなく、放射線治療で使用される高エネルギー放射線にも関連する物理量である。現在、放射線治療では電離箱を用いた水吸収線量フォーマリズムに基づき、水吸収線量が決定されている[6]。このフォーマリズム中に W_{air} が使用されているのは、線質変換係数の算出である。線質変換係数は、電離箱が校正されたときの基準線質（ ^{60}Co γ 線）と実際にユーザーが使用する線質（高エネルギーX線や電子線）が異なることによる電離箱応答の違いを補正する係数である[6]。このように、 W_{air} は放射線を正しく測定し評価するために重要な物理量である。

1.2 湿潤空気の W 値におけるエネルギー依存性

放射線治療における放射線計測では、測定が容易であることや長期安定性の点から自

由空気式電離箱が用いられる。電離箱からの出力信号に対して温度や気圧など様々な補正が行われる。その中で湿度に対する補正も電離箱の出力信号に対する重要な補正の1つである。現在の線量計測プロトコルでは、電離箱を用いた測定は常に相対湿度 20 % から 80 % の範囲で行われていると仮定されており、この範囲において電離箱の湿度影響を無視した時に生じる水吸収線量の不確かさは 0.15 % としている[6]。しかし、これは Niatel[7-8]および Guiho[9]の古い測定結果に基づいている。

およそ 40 年前に Niatel は自由空気電離箱を用いて、50 kV X 線に対する湿度補正係数および湿潤空気の W 値を測定した[7]。過去に Barnard が Bragg 加算則を用いて算出した湿潤空気の W 値は湿度の増加に伴い直線的に減少したが、Niatel が測定した湿潤空気の W 値は低湿度領域で急激な減少が見られ、異なる結果となった[10]。この結果について ICRU Report 31 では、純粋なガス中に少量の不純物が混入した際に電離電流の急激な増加が生じる Jesse 効果に類似すると説明した[11]。また Guiho らは金属壁を有する空洞電離箱を用いて ^{137}Cs および ^{60}Co γ 線における湿度補正係数を測定した。Guiho らの測定結果は Niatel の測定結果と相対湿度 0 % から 30 % の範囲で一致したが、それ以降では乖離が生じた[9]。その後、Niatel は 50 kV X 線における湿潤空気の W 値の測定結果と ^{60}Co γ 線における阻止能比を用いて ^{60}Co γ 線における湿度補正係数を算出し、Guiho の測定結果との整合性を示した[8]。

Rogers and Ross は電離箱空洞内における空気の水蒸気がどのように線量計測へ影響を与えるかを示している[12]。水蒸気が影響を与える因子には湿潤空気の W 値、線衝突阻止能および電離箱空洞内の空気密度がある。しかし、それぞれ乾燥空気における値と比較して最大 1 % の影響しかなく、また幸いなことにこれらが反対方向に変化するため、相対湿度 20 % から 80 % の範囲において湿度補正係が 0.997 ± 0.001 の範囲内に収まることを示した。また彼らは湿潤空気の W 値が放射線の線質には依存しないと仮定した上で、モンテカルロシミュレーションを用いて高エネルギー電子線における湿潤空気の阻止能比を計算し、過去に示された湿度補正係数が高エネルギー光子線および電子線においても使用できることを示した[12]。しかし、これはあくまでシミュレーションにおける研究であり、これらの放射線に対して湿度補正係数を適用する場合には、それぞれの放射線において実測・検証する必要がある。

1.3 電子に対する空気の W 値の測定における歴史

荷電もしくは非荷電の電離放射線が物質中を通過する際、電離放射線は物質を構成する原子や分子と電離・励起などの相互作用を行う。その際、物質中にイオン対が生成されるが、イオン対数は物質中で消費されたエネルギーに比例する。これらのイオンは電離箱のような放射線検出器によって収集され、カーマや吸収線量の放射線量の実用的な決定を可能にする。空気中でイオン対を生成するために必要な平均エネルギーである W_{air} は、次のように定義される[5]。

$$W_{\text{air}} = \frac{T}{N} \quad (1.1)$$

ここで、 T は荷電粒子の初期運動エネルギーであり、 N は空気中で運動エネルギーが完全に消費されたときに生成されるイオン対の平均数である。この定義より、 N は初期および二次荷電粒子によって放出される制動放射線または二次放射線によって生成されるイオンを含むが、初期荷電粒子は含まれない。

W_{air} の定義を完全に満たす測定は、10 keV 未満の運動エネルギーを有する電子に対する直接測定のみである[5]。直接測定はおよそ 15 eV から 7 keV までの範囲において行われており[13-15]、その測定データを図 1.2 に示す。このエネルギー範囲において、 W_{air} はエネルギーに伴い急激に減少することがわかっている[5]。これらのデータを用いて、Buhr ら(2012)は、以下の実験曲線を提案している[16]。

$$W(T) = W_{\infty} \frac{1}{1 - (T/A_1)^{A_2 + A_3 T}} \quad (1.2)$$

ここで、 W_{∞} は W_{air} の漸近値であり、33.97 とされており、 A_1 、 A_2 および A_3 は測定データ近似によって得られる自由パラメータである。図 1.2 に示されたデータに対して重みづけされた最小二乗近似において、 $A_1 = 14.398$ eV、 $A_2 = -0.8179$ および $A_3 = -3.4 \times 10^{-5}$ eV⁻¹ とされている。

より高エネルギー領域での測定は、熱量測定などによって決定されたエネルギー付与および空気中に生成された電荷の測定値が等しいとする間接測定に基づいている[5]。10 keV 以上のエネルギーでは、 W_{air} はエネルギーに対して独立し、33.97 eV の一定値で

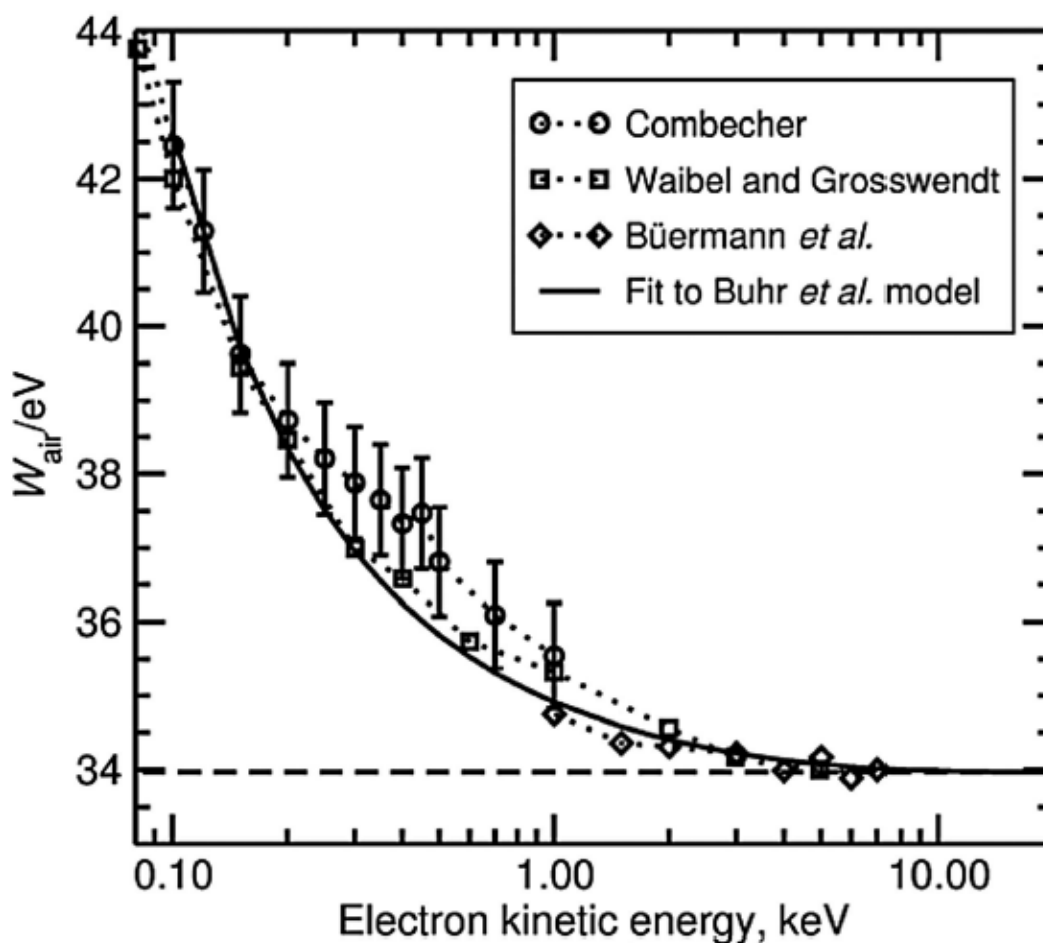


図 1.2 先行研究における低エネルギー領域(15 eV から 7 keV)での W_{air} の測定結果

あると見なされている[5]。表 1.1 に 10 keV 以上のエネルギーにおいて測定および再分析された先行研究の報告値を示す[17-29]。表 1.1 より幅広いエネルギー範囲において W_{air} が測定されているが、 ^{60}Co γ 線における報告値が全体に対して大きなウェイトを占めていることがわかる。10 keV 以上でのエネルギー範囲では、 ^{60}Co γ 線以外のエネルギーにおけるデータ点が少ないこと、高エネルギー電子線においてはエネルギー依存を示唆するデータが報告されていることなど、 W_{air} のエネルギー依存性に関する問題は完全に解決されていないのが現状である。

2014 年に ICRU Report 90 が発行され、放射線計測に関わる物理量の見直しが行われた[5]。その中で W_{air} の見直しも行われ、推奨値は 33.97 eV のままであったが、標準不確かさが 0.05 eV から 0.15 eV へと増加した。この変化の主な理由は、Boutillon and Peroche-Roux[30]がグラファイトと空気の平均励起エネルギー(I 値)の不確か性によるグラフ

表 1.1 10 keV 以上のエネルギーにおける W_{air} の報告値[13-25]

Authors	Radiation source	W_{air}
Bay et al. (1957) [17]	^{35}Sr β 線	33.60
Gross et al. (1957) [18]	^{35}Sr β 線	34.63
Jesse (1958) [19]	^{35}Sr β 線	33.90
Engelke and Hohlfeld (1971) [20]	^{137}Cs γ 線	34.03
Mylers et al. (1961) [21]	^{60}Co γ 線	33.85
Bewley (1963) [22]	^{60}Co γ 線	34.11
Petree and Lamperti (1967) [23]	^{60}Co γ 線	33.83
Guiho and Simoen (1975) [24]	^{60}Co γ 線	33.81
Niatel et al. (1985) #1 [25]	^{60}Co γ 線	33.83
Niatel et al. (1985) #2 [25]	^{60}Co γ 線	33.84
Buermann et al. (2007) [26]	^{60}Co γ 線	33.79
Burns (2012) #1 [27]	^{60}Co γ 線	34.02
Burns (2012) #2 [27]	^{60}Co γ 線	34.05
Burns et al. (2014) [28]	6 MV X 線	33.99
Burns et al. (2014) [28]	10 MV X 線	34.01
Burns et al. (2014) [28]	25 MV X 線	34.06
Cojocaru and Ross (2012) [29]	高エネルギー電子線	33.84

イトと空気の阻止能比の不確かさを過小評価したためである。 W_{air} の不確かさの増加は、我が国の国家計量標準である産総研における空気カーマの決定精度に直接影響を与えている[31]。ICRU Report 90 の発行以降、 W_{air} に関する調査が注目されており、最近の研究では、特に高エネルギー電子線における W_{air} の測定および再解析が行われている[28,29]。しかし、上述したエネルギー依存を示唆するデータを完全に否定することはできておらず、また ^{60}Co γ 線よりも低エネルギーでの測定は、50-70 年以上行われていないままである。今後、 W_{air} に関する調査は推奨値の不確かさの低減を目指すべく、より低い不確かさで決定された W_{air} のデータが強く求められる。

1.4 研究目的と意義

上述したように、ICRU Report 90 の発行により、 W_{air} の標準不確かさが 0.05 eV から 0.15 eV へと増加した。これは、先行研究による不確かさの見積もりの不十分であり、過去に報告された W_{air} の不確かさが増加したことが原因である。また $^{60}\text{Co}\gamma$ 線以外のエネルギー点が少ないこと、さらに高エネルギー電子線に対する W_{air} ではエネルギー依存性を示唆するデータが報告されているなど W_{air} に関する研究は解決すべき課題が多く残っている。また、電離箱に対する湿度影響の補正についても、湿潤空気の W 値が放射線の線質には依存しないと仮定した上で、モンテカルロシミュレーションを行い、低エネルギーで測定された湿度補正係数が高エネルギー光子線および電子線においても使用できるとされている。

そこで本研究では、初めに高エネルギー光子線および電子線に対する電離箱の湿度影響を調査するため、ファーマ型電離箱を用いて高エネルギー光子線に対する湿度補正係数を測定した。また湿度補正係数の測定結果とモンテカルロシミュレーションによって算出した電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与を用いて、湿潤空気の W 値のエネルギー依存性について評価することを目的とした。加えて、将来的に空気の W 値のエネルギー依存性に関する問題を解決すべく、空気の W 値の絶対測定システムの開発を目的とした。この絶対測定システムはグラファイトカロリメータによる熱量測定とグラファイト壁空洞電離箱による電流測定を組み合わせることで開発された。また単に W_{air} を測定するのではなく、これまでに報告されている不確かさよりも低い不確かさで W_{air} を決定可能な絶対測定システムの開発を目的としている。このシステムはこれまでに多くの測定が行われている $^{60}\text{Co}\gamma$ 線を用いて開発され、先行研究の報告値と比較することによって評価された。さらに、本研究で決定された $^{60}\text{Co}\gamma$ 線における W_{air} は、先行研究における報告値に対して、データセットの 1 つとして報告する。

1.5 本論文の構成

本論文は全 5 章からなる。第 1 章では、放射線治療領域エネルギーにおける電子線に対する空気の W 値に関する研究の現状を説明し、本研究の目的と意義を述べた。続く第 2 章では、空気の W 値の決定理論に関する説明を行う。ここでは、空気の W 値の決

定方法や空気の W 値を決定の際に重要となる阻止能について説明する。第 3 章では、湿潤空気の W 値のエネルギー依存性に関する調査の説明を行い、第 4 章では、空気の W 値の絶対測定システムの開発の説明を行う。最後の第 5 章では全体の内容のまとめを行った後、今後の展望を述べ、本論文の総括とする。

第2章

空気の W 値の決定原理

本章では空気の W 値の定義を確認し、定義に基づいた空気の W 値の決定方法について説明する。この決定方法には、カロリメータおよび電離箱測定の比較から決定する方法と放射能および照射線量率測定の比較から決定する方法がある。また空気の W 値の決定する際に重要となるグラファイトの平均励起エネルギーおよび密度効果補正に使用するグラファイト密度の選択について、電子に対する阻止能式に触れた後に説明する。

2.1 空気の W 値の定義

W_{air} は空気中でイオン対を生成するために必要な平均エネルギーと定義される[1]。定義より、 W_{air} は式 (2.1) を用いて算出される[5]。

$$W_{\text{air}} = \frac{T}{N} \quad (2.1)$$

ここで、 N は初期運動エネルギー T を持つ荷電粒子が空気中で完全にエネルギーを消費したときに生成されるイオン対の平均数である。 N には制動放射線によって生成された電子または荷電粒子によって放出された他の二次放射線含まれるが、初期荷電粒子は含まれない。電離箱のような小体積の空洞で全エネルギーを消費するためには、電子のエネルギーは 10 keV 未満でなければならない。

10 keV 以上の運動エネルギーを有する電子に対する W_{air} の決定は、 W_{air} の微分値である w_{air} が用いられる。

$$w_{\text{air}} = \frac{dT}{dN} \quad (2.2)$$

ここで、 dT はある厚さの空洞を通過する際に運動エネルギー T を持つ荷電粒子が、空洞に付与する平均エネルギーである。 dN は dT が空洞中でエネルギーを消費するときに生

成するイオン対の平均数である。 W_{air} および w_{air} の違いは、生成されるイオン対が荷電粒子の持つ運動エネルギーが完全に消費するのかそれとも一部を消費するのかに起因する。したがって、これらの2つの量は以下のように関連付けられる[1]。

$$W_{\text{air}}(T_0) = T_0 / \int_I^{T_0} \frac{dT}{w_{\text{air}}(T)} \quad (2.3)$$

ここで、 I は媒質の最低イオン化ポテンシャル、 T_0 は荷電粒子が減速するときの瞬間的な運動エネルギーである。 w_{air} が一定値であると仮定した場合、 w_{air} は W_{air} と等しくなる。本研究では10 keV以上の運動エネルギーを持つ電子に対する W_{air} である w_{air} を決定するが、便宜上、表記は W_{air} とした。

2.2 空気の W 値の決定方法

W_{air} の決定する方法として、Niatel によって ^{60}Co γ 線を用いて提案された2つの方法がある[25]。1つ目はカロリメータおよび電離箱測定の比較から決定する方法であり、もう一つは、放射能および照射線量率測定の比較から決定する方法である。これらの方法では、 W_{air} に空気に対するグラファイトの制限質量衝突阻止能の平均比である $\bar{s}_{\text{c,a}}$ を掛け合わせた $W_{\text{air}}\bar{s}_{\text{c,a}}$ 積を測定し、既知の $\bar{s}_{\text{c,a}}$ を除すことで W_{air} を決定する。以下にそれぞれの決定方法について説明する。

2.2.1 カロリメータおよび電離箱測定の比較による決定

1つ目の方法は、グラファイトカロリメータによる吸収線量率とグラファイト壁空洞電離箱による電離電流の測定の比較から $W_{\text{air}}\bar{s}_{\text{c,a}}$ 積を得る方法である[25]。電離箱によって測定された吸収線量率 \dot{D}_{ion} は、以下の式から得られる。

$$\dot{D}_{\text{ion}} = J W_{\text{air}}\bar{s}_{\text{c,a}} K_p \quad (2.4)$$

ここで、 J はグラファイト壁空洞電離箱で得られた電離電流を電離箱空洞内の空気質量で除した値である。 K_p は空洞による擾乱に対する補正係数である。 \dot{D}_{ion} がグラファイトカロリメータによって測定された吸収線量率 \dot{D}_{cal} と等しいとした場合、次の関係式を得ることができる。

$$W_{\text{air}}\bar{s}_{c,a} = \frac{\dot{D}_{\text{cal}}}{J K_p} \quad (2.5)$$

2.2.2 放射能および照射線量率の比較による決定

2つ目の決定方法は、直接測定された照射線量率と⁶⁰Co線源の放射能から計算された照射線量率を等しいと仮定することで得る方法である[25]。線源 S から距離 r における照射線量率は、線源の放射能 A から計算することができる。

$$\psi = (AE_\gamma/4\pi r^2)K_s \quad (2.6)$$

ここで、 E_γ は各崩壊時に放出される光子エネルギーである。また K_s は一次光子の減弱と散乱光子の生成およびコリメータ端による散乱光子の生成を考慮する補正係数である。距離 r でのエネルギーフルエンス率 ψ に対応する照射線量率 \dot{X} は以下の式で得られる。

$$\dot{X} = \psi(\mu_{\text{en}}/\rho)_a/W_{\text{air}} \quad (2.7)$$

ここで、 $(\mu_{\text{en}}/\rho)_a$ は空気の質量エネルギー吸収係数である。

一方、線源 S から距離 r における照射線量率は、グラファイト壁空洞電離箱を用いて以下の式で決定される。

$$\dot{X} = \frac{I}{v\rho_{\text{air}}} \bar{s}_{c,a} \frac{(\mu_{\text{en}}/\rho)_a}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_c} K_x \quad (2.8)$$

ここで、 I はグラファイト壁空洞電離箱で測定された電離電流であり、 v は空洞体積、 ρ_{air} は空気の密度である。 $\bar{s}_{c,a}$ は空洞を横切る電子におけるグラファイトと空気の制限質量衝突阻止能の平均比である。 $(\mu_{\text{en}}/\rho)_a$ と $(\mu_{\text{en}}/\rho)_c$ は、検出器に入射する光子スペクトルに渡って平均された空気とグラファイトの質量エネルギー吸収係数である。 K_s は空洞電離箱の補正係数の積である。計算および測定された照射線量率が等しいと仮定すると、 $W_{\text{air}}\bar{s}_{c,a}$ 積は以下の式で得られる。

$$W_{\text{air}}\bar{s}_{c,a} = AE_\gamma(\mu_{\text{en}}/\rho)_c \frac{v\rho_{\text{air}}}{4\pi r^2 I} \frac{K_s}{K_x} \quad (2.9)$$

2.3 グラファイトにおける阻止能の決定

上述した空気のW値の決定方法より、 $W_{\text{air}}\bar{s}_{\text{c,a}}$ 積を測定する実験から W_{air} を抽出するためには $\bar{s}_{\text{c,a}}$ の知識が必要である。 $\bar{s}_{\text{c,a}}$ の値は、グラファイトの平均励起エネルギー (*I-value*) および密度効果補正を計算するために使用されるグラファイト密度の選択に大きく影響を受ける。以下に電子に対する阻止能式に触れた後にグラファイト密度の選択についての説明を行う。

2.3.1 質量阻止能

荷電粒子が物質中に入射すると、物質での相互作用 (電離、励起、散乱) により、エネルギーを失う。荷電粒子が単位距離あたりに失うエネルギーを阻止能という[32]。密度 ρ の物質中を通過する際の荷電粒子に対する質量阻止能 S/ρ は、以下の式で与えられる。

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl} \quad (2.10)$$

ここで、 dE は物質中を距離 dl 移動する際に荷電粒子が失う平均エネルギーである。阻止能および質量阻止能の単位がそれぞれJ/mおよびJ m²となることから分かるように、阻止能と質量阻止能は巨視的断面積と微視的断面積の関係にあり、質量阻止能は標的物質の容積密度には依存しない量である。基礎物理学の分野では質量阻止能が微視的断面積であることに着目して、阻止断面積と呼ばれることが多い。質量阻止能は次の3つの要素で構成される。

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\text{el}} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\text{rad}} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{\text{nuc}} \quad (2.11)$$

ここで、第1項の $(1/\rho)(dE/dl)_{\text{el}} = (1/\rho)S_{\text{el}}$ は、電離または励起をもたらす原子や電子との相互作用による質量電子的 (または衝突) 阻止能である。第2項の $(1/\rho)(dE/dl)_{\text{rad}} = (1/\rho)S_{\text{rad}}$ は、原子核または原子電子の電場における制動放射の放出による質量放射阻止能である。そして第3項の $(1/\rho)(dE/dl)_{\text{nuc}} = (1/\rho)S_{\text{nuc}}$ は、反跳エネルギーが原子に与えられる弾性クーロン相互作用による質量核的阻止能である。本研

究の調査対象である電子の場合、この質量核的阻止能は無視することができる。

2.3.2 電子的阻止能

電子的 (衝突) 阻止能は、入射粒子から標的原子の持つ電子へのエネルギー転移によるエネルギーを失うものである。エネルギー転移 ω が生じる衝突の (電子あたりの) 微分断面積 $d\sigma/d\omega$ を使用すると、質量電子的阻止能は次のように表すことができる。

$$\frac{1}{\rho}S_{\text{el}}(T) = NZ \int_0^{\omega_{\text{max}}} \omega \frac{d\sigma}{d\omega} d\omega \quad (2.12)$$

ここで、 T は粒子の初期運動エネルギー、 ω_{max} は電子との衝突で発生する最大のエネルギー損失、 N は物質の質量当たりの原子数、 Z は原子番号である。量 N は、 $N = N_A/M_A = (uA)^{-1}$ であり、ここで、 N_A はアボガドロ定数、 M_A はモル質量 (g mol^{-1})、 A は相対原子質量 (または原子量)、そして u は原子質量定数で ^{12}C の原子質量の $1/12$ である。

式(2.12)は衝突によるエネルギー損失が生じない ($\omega = 0$)、即ち、電子へのエネルギー移動が発生しない点の微分断面積 $d\sigma$ が無限大に発散してしまうため、そのままでは計算することができない。Bethe らは式(2.12)の計算方法として、カットオフ値 ω_c に対するエネルギー転移 ω の大小によって遠隔衝突と近接衝突の2つに分類し[33,34]、エネルギー移動が生じない最小の ω の値として、平均励起エネルギー I を用いることを提案した。ここで、カットオフ ω_c は便宜的に仮定されたものであり、原子電子の結合エネルギーと比較して十分に大きい値であるとする。質量阻止能は遠隔衝突と近接衝突それぞれの質量阻止能の合計であることから、

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho}S_{\text{el}}(T) &= \frac{1}{\rho}S_{\text{el}}(\omega < \omega_c) + \frac{1}{\rho}S_{\text{el}}(\omega > \omega_c) \\ &= NZ \int_0^{\omega_c} \omega \frac{d\sigma}{d\omega} d\omega + NZ \int_{\omega_c}^{\omega_{\text{max}}} \omega \frac{d\sigma}{d\omega} d\omega \end{aligned} \quad (2.13)$$

となり、Bethe は遠隔衝突 ($\omega < \omega_c$) の質量阻止能を次の式で導出した。

$$\frac{1}{\rho}S_{\text{el}}(\omega < \omega_c) = NZ \int_0^{\omega_c} \omega \frac{d\sigma}{d\omega} d\omega = \frac{2\pi r_e^2 m_e c^2}{\beta^2} \frac{Z}{uA} z^2 \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \omega_c}{(1-\beta^2)I^2} \right) - \beta^2 \right] \quad (2.14)$$

ここで、 r_e は古典的な電子半径、 c は真空中での光速 ($m_e c^2$ は電子の静止エネルギー)、 β は入射粒子の速度 v を光速で割った値、 z は入射粒子の電荷、そして I は物質の平均励起エネルギーである。Mohr ら(2012)の物理定数[35]を使用すると、 $2\pi r_e^2 m_e c^2 / u = 0.153537 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}$ となる。

一方、近接衝突 ($\omega > \omega_c$) による質量阻止能は、高速で移動する入射粒子に対し、標的電子が実質的に自由で静止しているように見えることから、次のようになる。

$$\frac{1}{\rho} S_{\text{el}}(\omega > \omega_c) = NZ \int_{\omega_c}^{\omega_{\text{max}}} \omega \frac{d\sigma}{d\omega} d\omega \quad (2.15)$$

ここで、 $d\sigma/d\omega$ は静止している自由電子との衝突におけるエネルギー転移 ω の微分断面積であり、

$$\omega_{\text{max}} = \frac{2\tau(\tau + 2)m_e c^2}{[1 + 2(\tau + 1)(m_e/M) + (m_e/M)^2]} \quad (2.16)$$

ここで、 $\tau = T/(Mc^2)$ は入射粒子の運動エネルギーとその静止エネルギーの比であり、 m_e/M は電子の質量と入射粒子の質量の比である。

電子の場合、式(2.16)は $\omega_{\text{max}} = T$ となり、式(2.15)の大きなエネルギー転移は、Møller (1932) 断面積[36]によって支配され、

$$\frac{d\sigma}{d\omega} = \frac{2\pi r_e^2 m_e c^2}{\beta^2} \times \left\{ \frac{1}{\omega^2} + \frac{1}{(T - \omega)^2} - \frac{2\tau + 1}{(\tau + 1)^2} \frac{1}{\omega(T - \omega)} + \left(\frac{\tau}{\tau + 1} \right)^2 \right\} \quad (2.17)$$

となる。しかし、実際には入射粒子が電子の場合、入射電子と放出電子の区別がつかないため、阻止能はこれらの電子のうち速い方で評価される。そのため、 ω_{max} は $T/2$ とみなされる。電子における阻止能の最終的な式は次のように記述できる。

$$\frac{1}{\rho} S_{\text{el}}(T) = \frac{2\pi r_e^2 m_e c^2}{\beta^2} \frac{Z}{uA} \times \left[\ln \left(\frac{T}{I} \right)^2 + \ln \left(1 + \frac{\tau}{2} \right) + F(\tau) - \delta \right] \quad (2.18)$$

ここで、

$$F(\tau) = (1 - \beta^2)[1 + \tau^2/8 - (2\tau + 1) \ln 2] \quad (2.19)$$

式(2.18)における δ は密度効果補正である。

本研究で関連する量である制限質量電子阻止能は、選択されたカットオフエネルギー Δ までのエネルギー転移 ω を含む電離もしくは励起による平均エネルギー損失として定義される。電子の場合、この量は以下のように記述することができる[3]。

$$\frac{1}{\rho} S_{\Delta}(T) = \frac{2\pi r_e^2 m_e c^2 Z}{\beta^2 uA} \times \left[\ln\left(\frac{T}{I}\right)^2 + \ln\left(1 + \frac{\tau}{2}\right) + H(\tau, \eta) - \delta \right] \quad (2.20)$$

ここで、 $\eta = \Delta/T$ は分数カットオフエネルギーであり、

$$H(\tau, \eta) = -1 - \beta^2 + \ln[4(1 - \eta)\eta] + (1 - \eta)^{-1} + (1 - \beta^2) \left[\frac{\tau^2 \eta^2}{2} + (2\tau + 1)\ln(1 - \eta) \right] \quad (2.21)$$

である。

2.3.3 平均励起エネルギー

平均励起エネルギーは、電子の質量電子阻止能を求める式(2.18)および(2.20)において重要な物理量である[32]。本研究で主に扱うグラファイトの平均励起エネルギーについては、古くから多くの研究が行われ議論されている。ICRU Report 37において4つの測定値[37-39]から得られたグラファイトの平均励起エネルギーの推奨値は、 $I_g = 78 \pm 4$ eVであった[32]。このレポートの発行以来、3つの I_g を決定する研究[40-42]が行われており、これらの新しい値のすべてが78 eVよりも大きく、不確かさについても相対的に小さい値が報告されている。

これらの3つのデータにおける加重平均は $I_g = 81.5 \pm 0.8$ eVであり、Burns (2012) によって得られた $I_g = 81.1 \pm 2.0$ eVと近い値である[43]。Burns (2012) によって報告された値は W_{air} のデータおよび $W_{air} \bar{s}_{c,a}$ の積のデータ含んでおり、全体のデータセットと一致する I_g および W_{air} の値を得るため再分析されたものである。その後Burns (2014) による研究では、リニアックからの光子線を用いて独立した推定値 $I_g = 81.1 \pm 1.8$ eVを得ている[44]。これらのデータよりICRU Report 90 (2014) では $I_g = 81 \pm 1.8$ eVを推奨値としている[5]。

2.3.4 密度効果補正

相対論的効果が有意となるエネルギー領域では荷電粒子のクーロンポテンシャルが荷電粒子の進行方向に収縮し、楕円状のクーロンポテンシャルとなる。ポテンシャルが収縮すると、その方向に強力な電場が生じることとなるため、物質中に分極が生じ、荷電粒子の速度を減少させる方向に作用する力が減少するため、結果として阻止能が減少する[32]。この減少は、同じ組成の気体における減少と比較して固体の物質の方が大きいと見られるため、密度効果と呼ばれる。

本研究で使用するグラファイトにおける密度効果は、グラファイトが多孔性物質であるため、実際の相互作用が起こるグラファイト結晶中の密度 (2.265 g cm^{-3}) を使用して評価することが推奨されている[5]。これは、密度効果の原因となるグラファイト原子の分極は、主にグラファイト結晶構造の誘電特性によるためである。このように荷電粒子と標的原子の相互作用は微視的領域で行われているため、密度効果の影響は微視的領域の密度である結晶密度で計算する必要がある。一方、阻止能は巨視的領域における相互作用であるため、容積密度で計算する必要がある。

第 3 章

湿潤空気の W 値におけるエネルギー依存性

湿潤空気の W 値のエネルギー依存性は、ファーマ型電離箱を用いた湿潤空気中での電離電流の測定結果とモンテカルロシミュレーションによる電離箱空洞の湿潤空気へのエネルギー付与の計算結果から評価された。湿潤空気中での測定は、相対湿度 10 % から 70 % の範囲で行われた。またモンテカルロシミュレーション時の電離箱空洞内の湿潤空気の密度は ICRU Report 37 に記載されている乾燥空気および水蒸気の組成データを用いて計算され、実測のジオメトリを忠実に再現して計算が行われた。本章では、初めに実験および計算方法を記述し、その結果と考察について記述する。

3.1 方法

3.1.1 湿潤空気の W 値の決定方法

本研究では、湿潤空気の W 値を湿潤空気中でのファーマ型電離箱を用いた電離電流 (湿度補正係数) の測定と EGS5 によるモンテカルロシミュレーションを用いた電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与の計算を組み合わせ、以下の式で決定した。

$$\frac{W_X}{W_{50}} = \frac{I_{50} \varepsilon_X}{I_X \varepsilon_{50}} \quad (3.1)$$

ここで、 W は湿潤空気の W 値、 I は湿潤空気中で測定された電離電流および ε は電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与である。また下付き文字の 50 および X はそれぞれ相対湿度 50 % および相対湿度 X % を示す。

3.1.2 実験セットアップ

実験は産総研に設置されている医療用リニアック (Elekta AB, Precise Treatment System) を用いて行われた。リニアック室内の温度および湿度は、 22 ± 0.5 °C および 45 ± 5 % になるように制御されている。図 3.1 に実験セットアップを示す。本研究では、電離箱空洞内の温度および湿度を一定に保つためにシールドボックスが開発された。ボックスの

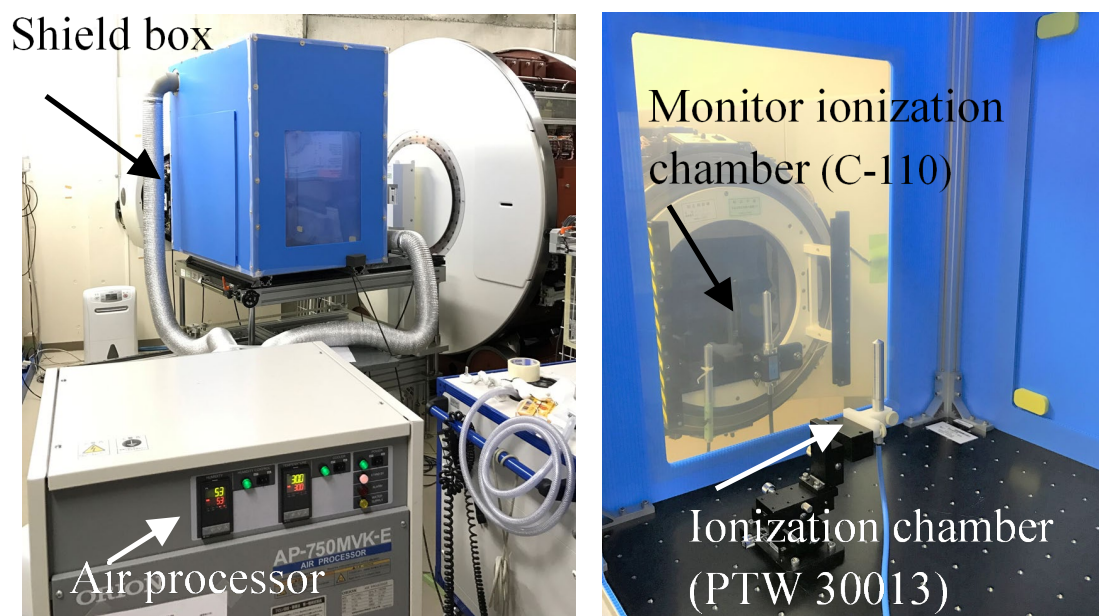
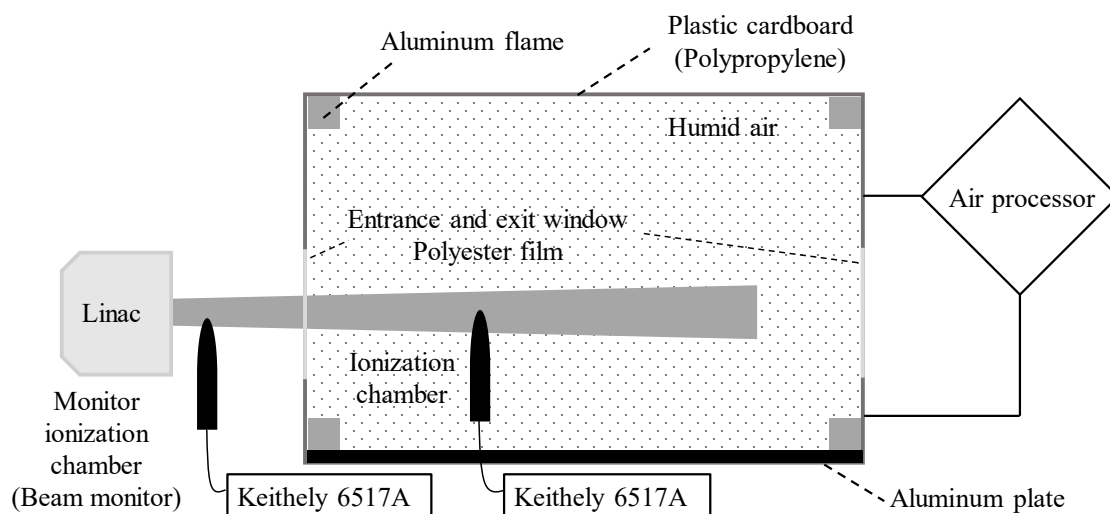


図 3.1 湿潤空気での電離電流測定における実験セットアップ。上図は実験セットアップの概要であり、下の写真はシールドボックスの内側および外側を示す。

大きさは、幅 70 cm × 高さ 100 cm × 奥行 100 cm である。ボックス壁は 5 mm 厚のポリプロピレン製プラスチック段ボールであり、ボックス内部と外部の気圧が等しくなるように小さな穴が空いている。入射窓には 0.25 mm 厚のポリエステルフィルムが用いられ、入射光子に影響を与えない材質となっている。ボックス底部は 15 mm 厚のアルミプレート、ボックスフレームはアルミニウム製 (MiSuMi-VONA, NFSL6-3030) を用いた。ボックス内の温度、気圧および湿度は JCSS (Japan Calibration Service System) 認定校正

事業者において校正された気圧湿度温度計変換器 (Vaisala PTU300) を用いて測定した。ボックスは空調機 (ORION 機械株式会社、AP-750MVK-E、<http://www.orionkikai-pap.com>) と接続し、ボックス内部の温度は 22 °C 一定、相対湿度は 30 % から 70 % の範囲で制御した。空調機の送風量は 4 m³ / min から 7 m³ / min であり、湿度設定後、ボックス内の湿度はおよそ 5 分で設定値に達する。本研究では、ボックス内にシリカゲルを設置することで乾燥空気での測定を試みた。この時、ボックスと空調機の接続を取りやめボックスの接続管同士を接続することで、ボックス内を密封させた。

本研究では、PTW30013 および Exradin A19 の 2 つのファーマ型電離箱を用いて測定を行った。2 つの電離箱における物質特性を表 1 に示す。これらの電離箱はボックス内に設置され、医療用リニアックからの 6、10 および 15 MV 高エネルギー光子線が照射された。測定はすべて空中で行われたため、PTW 30013 には 3.9 mm 厚のアルミニウム製ビルドアップキャップ、Exradin A19 には 2.8 mm 厚の C-552 製ビルドアップキャップをそれぞれ装着した。モニター線量計 (応用技研、C-110) がリニアックヘッドの照射口に設置され、照射野のペナンプラ領域に保持された。モニター線量計の温度は、リニアック室内に設置された温度計 (PT100 が備え付けられた Fluke 8846A) によって測定された。ボックス内外における電離箱の出力信号は、基準条件 (温度 22 °C、気圧 101.325 kPa) に対して補正された。またそれぞれの電離箱は、産総研において校正された電位計 (Keithely、model 6517A) に接続され、中心電極の印加電圧を +300 V とした。本研究で用いる測定値は、ボックス内に設置した電離箱の出力信号をモニター線量計の出力信号で規格化したものとした。

測定中におけるボックス内の温度および相対湿度の変化を図 3.2 および 3.3 にそれぞれ示す。ボックスに空調機を接続したとき、ボックス内の温度は 22 ± 0.1 °C、相対湿度

表 3.1 本研究で使用した 2 つのファーマ型電離箱の物質特性

Farmer-type ionization chamber			Buildup cap	
Chamber type	Wall material	Central electrode	Material	Thickness
PTW 30013	PMMA/graphite	Al	Al	3.9 mm
Exradin A19	C-552	C-552	C-552	2.8 mm

は設定値に対して $\pm 1.5\%$ の範囲で制御されていることが確認できる。空調機の相対湿度を70%に設定したとき、ボックス内の相対湿度は他の相対湿度と比較して不安定であった。これはボックスの断熱が十分ではないことが原因の1つとして考えられる。しかし、 $\pm 1.5\%$ の湿度変動が後述する湿度補正係数に与える影響は、 $\pm 0.01\%$ 未満であるため、本研究への結果に大きな影響を与えないとした。ボックス内にシリカゲルを設置した場合、ボックス内の温度は $22.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ からわずかに乖離したが、一定の温度に保たれている。また相対湿度については、ボックス内にシリカゲル設置することでボックス内の相対湿度をおよそ10%まで下げることができた。

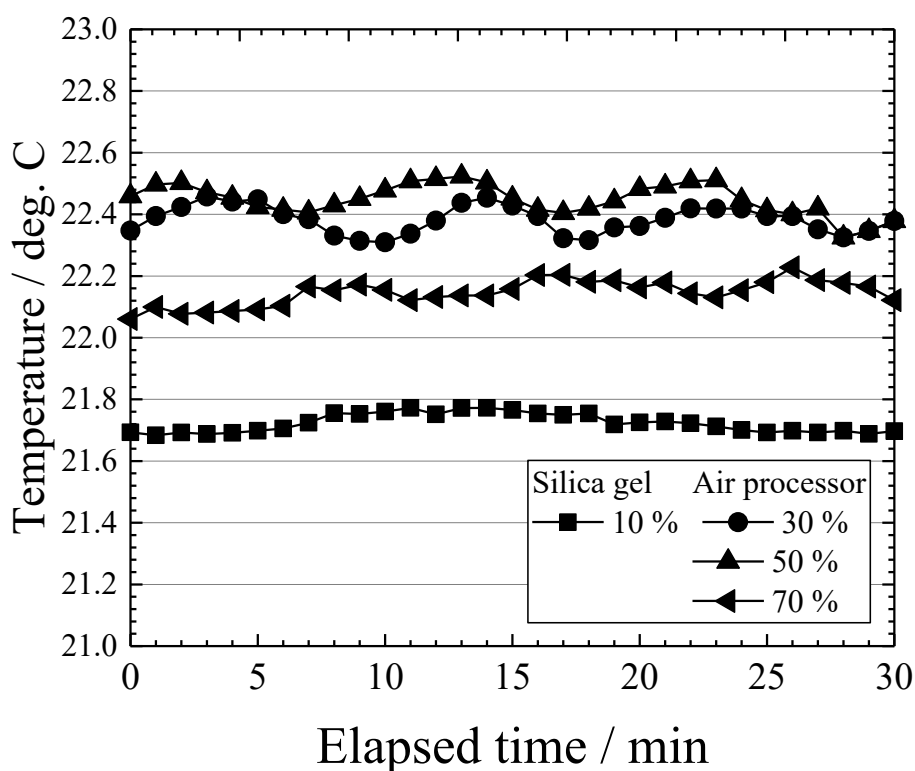


図 3.2 測定中におけるボックス内の温度変動。ボックスに空調機を接続したときのシールドボックス内の温度は、 $22.0\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ で制御されている。またボックス内にシリカゲルを設置したとき、 $22.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ からわずかに乖離したが一定の温度に保たれている。

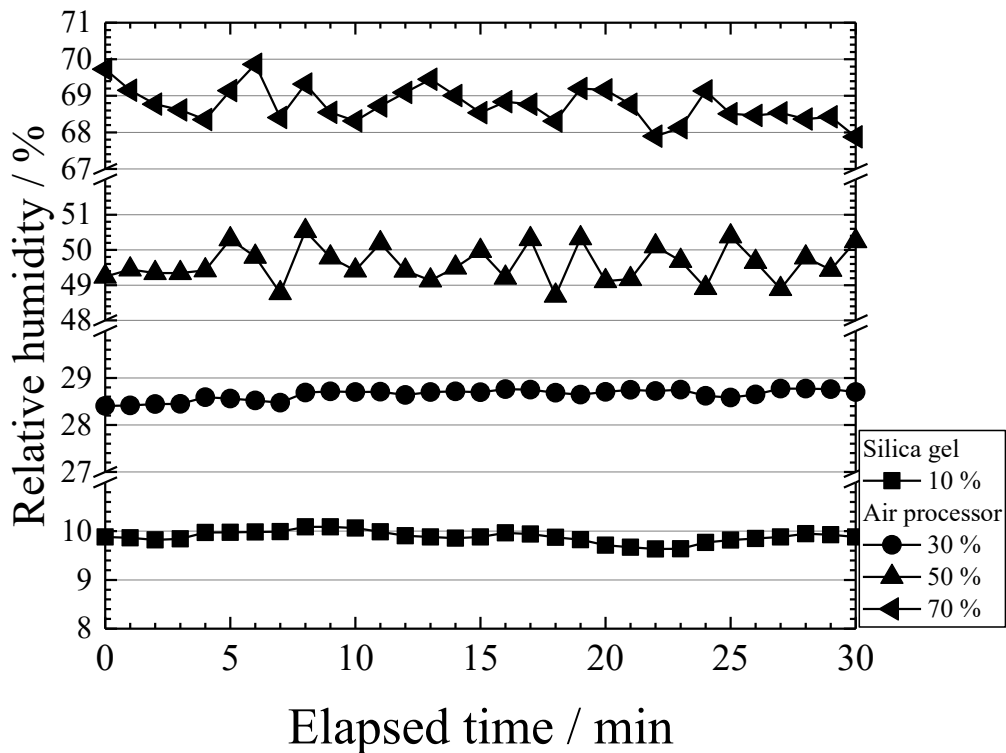


図 3.3 測定中におけるボックス内の相対湿度変動。ボックスに空調機を接続したときのシールドボックス内の相対湿度は、設定値に対して $\pm 1.5\%$ の範囲で制御されている。またボックス内にシリカゲルを設置したとき、相対湿度はおよそ 10%まで下げることができた。

3.1.3 湿潤空気での電離電流(湿度補正係数)の測定

初めに PTW 30013 を用いて、出力信号が照射開始から安定するまでの時間および印加電圧を変更後に安定するまでの時間を評価した。相対湿度がX%のとき、電離箱の出力信号 I_X は以下の式で表される。

$$I_X = \frac{\overline{i_X}}{\overline{i_M}} \quad (3.2)$$

ここで、 $\overline{i_X}$ および $\overline{i_M}$ はそれぞれ測定中におけるボックス内外の電離箱およびモニター線量計の平均出力信号である。 $\overline{i_X}$ および $\overline{i_M}$ は、温度および気圧に対する補正がされている。

次に PTW 30013 を用いて、湿度変更後に出力信号が安定するまでの時間を評価した。湿度安定における時定数は、温度や気圧と比較して長いと考えられており、ウェル型電離箱内の空気が入れ替わるには、およそ相対湿度 10 % の変化に対して 800 分も要することを示されている[45]。本研究で用いるファーマ型電離箱は有感体積の大きさが異なるため、湿度安定の時定数はウェル型電離箱よりも短くなると考えられる。しかし、ファーマ型電離箱の湿度安定における時定数は正確には知られていない。測定は、ボックス内の相対湿度が設定値に達してからすぐに開始した。測定間隔は測定開始から 1 時間は 15 分毎、その後は 1 時間毎とした。このとき、各測定点における測定時間は 2 分とした。得られた出力信号を用いて、湿度設定を変更してから出力信号が安定するまでの時間を評価した。

さらに PTW 30013 および Exradin A19 を用いて相対湿度の変化に対する極性効果補正およびイオン再結合補正係数の変動を評価した。相対湿度が X % のとき、極性効果補正係数 k_{pol} を次の式で決定した[6]。

$$k_{\text{pol}} = \frac{|I_{\text{X}}^+| + |I_{\text{X}}^-|}{2|I_{\text{X}}^+|} \quad (3.3)$$

ここで、 I_{X}^+ は印加電圧が正の時の出力信号、 I_{X}^- は印加電圧が負の時の出力信号である。また相対湿度が X % のとき、イオン再結合補正係数 k_{s} を次の式で決定した[6]。

$$k_{\text{s}} = a_0 + a_1 \left(\frac{I_{1,\text{X}}}{I_{2,\text{X}}} \right) + a_2 \left(\frac{I_{1,\text{X}}}{I_{2,\text{X}}} \right)^2 \quad (3.4)$$

ここで、 $I_{1,\text{X}}$ および $I_{2,\text{X}}$ は印加電圧が +300 V および +100 V のときの相対湿度 X % での電離箱からの出力信号である。印加電圧の比が 3 であるため、式(3.4)中の a_0 、 a_1 および a_2 の値はそれぞれ 1.198、-0.875 および 0.677 を用いた[6]。

最後に PTW 30013 および Exradin A19 を用いて、湿度補正係数の測定を行った。相対湿度が X % であるときの出力信号に対する湿度補正係数 $k_{\text{h},50}$ を、湿度設定を変更してから一定時間が経過して得られた出力信号を用いて、以下の式で定義した。

$$k_{h,50} = \frac{I_{50}}{I_X} \quad (3.5)$$

ここで、 I_{50} および I_X はそれぞれ相対湿度 50 %および X %のときに得られた出力信号である。使用した出力信号には、上述した極性効果補正およびイオン再結合補正を行った。

3.1.4 電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与の計算

電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与は、Electron Gamma Shower Version 5 (EGS5)[46]および EGS5-MPI ((Message Passing Interface))[47]を用いたモンテカルロシミュレーションによって計算された。EGS5-MPI は EGS5 を並列計算化するための拡張パッケージである。計算はクラスターマシン (TATARA、九州大学) によって行われた。クラスターマシンのスペックは、64 nodes, 1024 cores, 22.1 TFLOPS である。Phased space file は清水らが計算した 6、10 および 15 MV 高エネルギー光子線を用いた[47]。光子線のヒストリー数は $\sim 10^{11}$ とし、計算の統計不確かさは 0.01 %であった。表 3.2 にモンテカルロシミュレーションの際に用いた計算パラメータを示す。電離箱空洞内の湿潤空

表 3.2 EGS5 において使用した計算パラメータ

Parameter	Value	Note ⁽²¹⁾
PCUT	0.010 MeV	Cut off energy for photon
ECUT	0.521 MeV	Cut off energy for electron
IPHTER	1 (ON)	Switches for PE-angle sampling
IEDGFL	1 (ON)	K & L-edge fluorescence
IAUGER	1 (ON)	K & L-Auger
LRAYLR	1 (ON)	Rayleigh scattering
LPOLAR	1 (ON)	Linearly-polarized photon scattering
INCOHR	1 (ON)	S/Z rejection
LPOFR	1 (ON)	Doppler broadening
IMPACR	1 (ON)	Electron impact ionization
IBRDST	1 (ON)	Koch and Motz formula for Bremsstrahlung photons Koch and Motz formula 2BS
IPRDST	2 (ON)	Motz, Olsen and Koch formula for pair-production Motz, Olsen and Koch formula 3D-2003

気へのエネルギー付与は、3.1.2 で示した実験セットアップと同じジオメトリーにおいて PTW 30013 を用いて計算された。図 3.4 に EGS5 によるモンテカルロシミュレーションで用いた計算ジオメトリーを示す。このジオメトリーには、ビルドアップキャップを装着した PTW 30013、シールドボックス、ポリエステルフィルム、アルミニウムプレート、ボックスフレーム、湿潤空気が含まれている。PTW 30013 は製造者のブループリント設計書、シールドボックスは実際のボックスをそれぞれ参照して作成した。

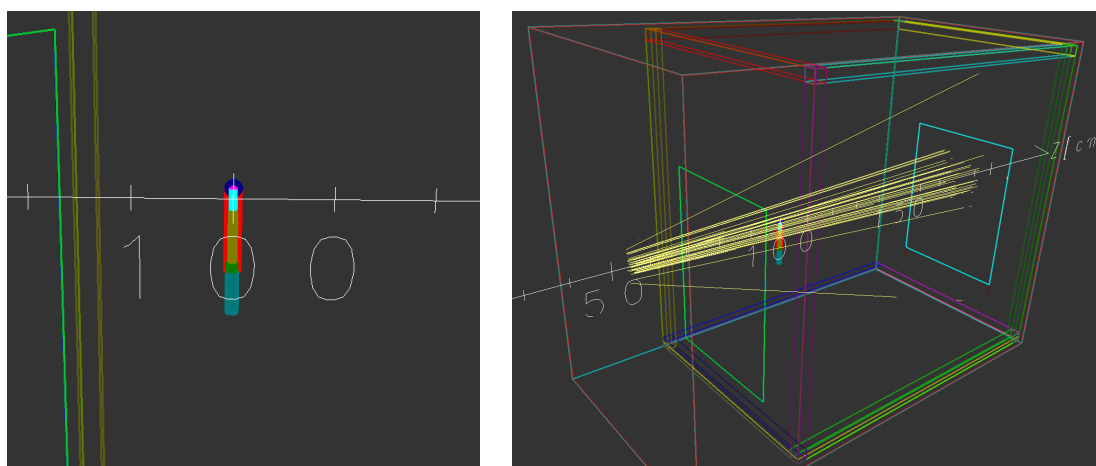


図 3.4 EGS5 によるモンテカルロシミュレーションの計算ジオメトリー。ジオメトリデータは CG view ver. 2.4.0 を用いて作成した。左図は電離箱(PTW 30013)であり、右図はシールドボックスの全体像である。

電離箱空洞内の湿潤空気の密度は、ICRU Report 37 に記載されている乾燥空気および水蒸気の組成データを用いて計算した[32]。絶対湿度が x のとき、湿潤空気の密度 ρ_x は次のように与えられる。

$$\rho_x = \rho_{\text{air}} - \left(\frac{\rho_{\text{air}}}{\rho_{\text{vapor}}} - 1 \right) x, \quad (3.6)$$

ここで、 ρ_{air} および ρ_{vapor} は乾燥空気および水蒸気の密度であり、絶対湿度 x は水蒸気圧 e および温度 T より、以下のように決定される。

$$x = \frac{0.794 \times 10^{-2} \times e/\text{Pa}}{1 + 0.00366 \times T/^\circ\text{C}} \quad (3.7)$$

また水蒸気 e は、相対湿度 RH および飽和水蒸気圧 e_s より以下の式で算出できる。

$$e = (RH/100) \times e_s / \text{Pa} \quad (3.8)$$

ここで、飽和水蒸気圧 e_s は、Tentens's の式より、以下のように求めることができる[48]。

$$e_s = 611 \times 10^{7.5T/(T+237.3)} \quad (3.9)$$

3.2 結果

3.2.1 湿潤空気での電離電流(湿度補正係数)の測定

図 3.5 に 6 MV 高エネルギー光子線を照射開始してからの電離箱からの出力信号の変化を示す。図より、出力信号は照射開始より安定しているのがわかる。また、図 3.6 に

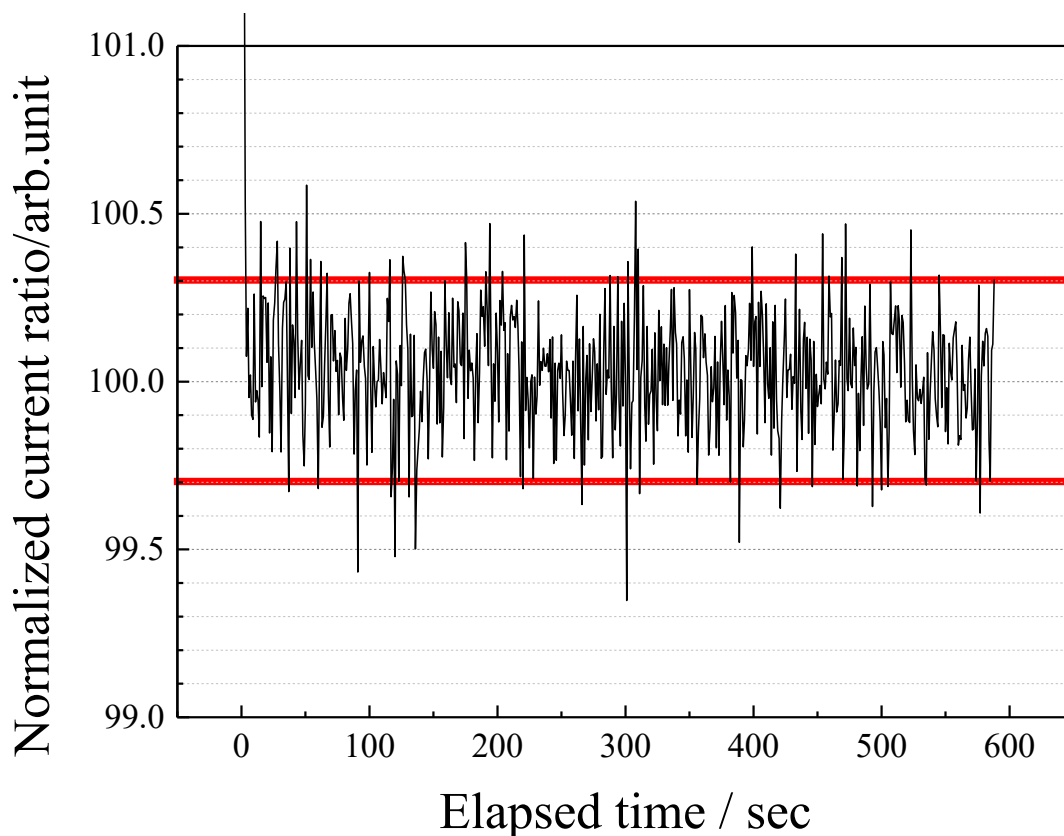


図 3.5 6 MV 高エネルギー光子線を照射開始してからの電離箱の出力信号の変化。縦軸は電離箱とモニター線量計の出力信号の比×100 である。赤い線は±0.3 %の範囲の許容レベルを示している。

高エネルギー光子線を照射中に印加電圧 (-400 V から+100 V) を変更させたときの電離箱からの出力信号の変化を示す。こちらも印加電圧を変更直後より出力信号が安定していることがわかる。ここで、図 3.5 および 3.6 中の赤い線は $\pm 0.3\%$ の許容レベルを示している。したがって、測定を開始するタイミングは、電離箱へのプレ照射を考慮して照射開始 300 秒後とした。

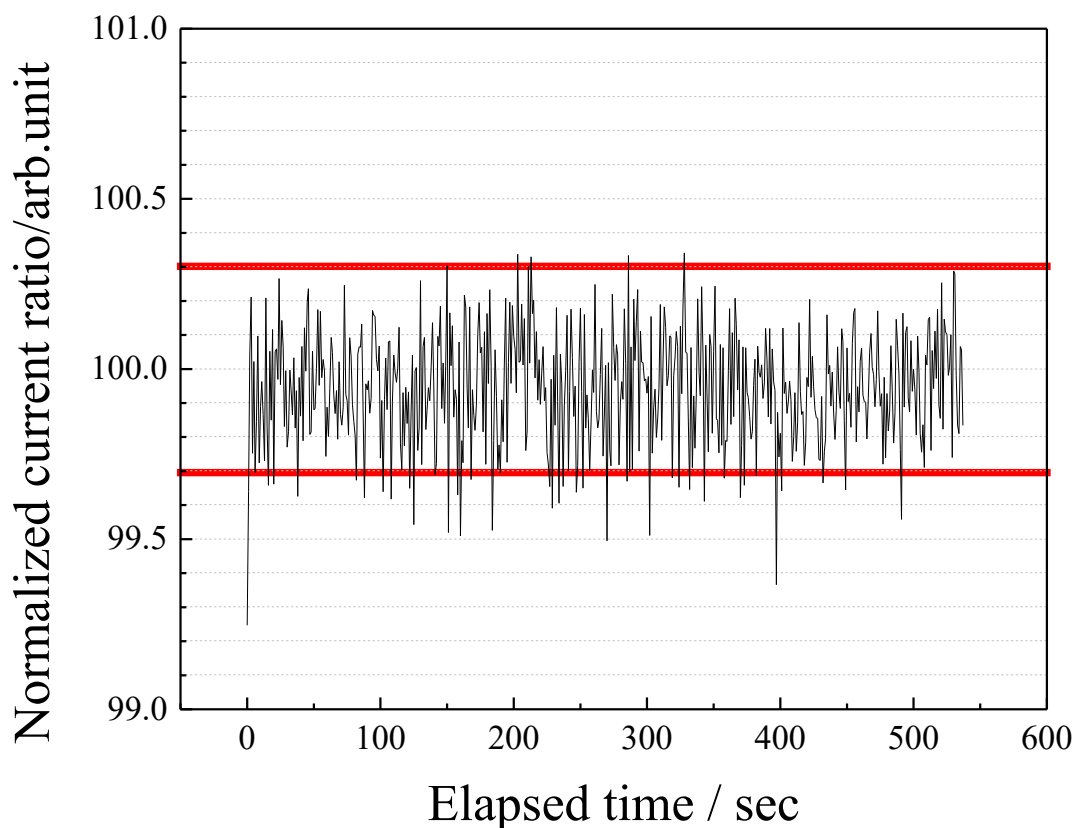


図 3.6 印加電圧を変化させた時 (-400 V \rightarrow +100 V) の電離箱からの出力信号の変化。縦軸は電離箱線量計とモニター線量計の出力信号の比 $\times 100$ であり、赤い線は $\pm 0.3\%$ の範囲の許容レベルを示している。

図 3.7 に相対湿度を 40 %から 50 %に変化させたときの 6 MV 高エネルギー光子線における電離箱からの出力信号の経時的変化を示す。出力信号は照射開始より急激に増加し、1 時間経過すると徐々に安定し始め、3 時間以内に安定することがわかる。このとき、各測定値における相対拡張不確かさは 0.04 % ($k=2$)であった。したがって、湿度変更後 3 時間経過して得られた出力信号をその相対湿度における測定値として用いることとした。

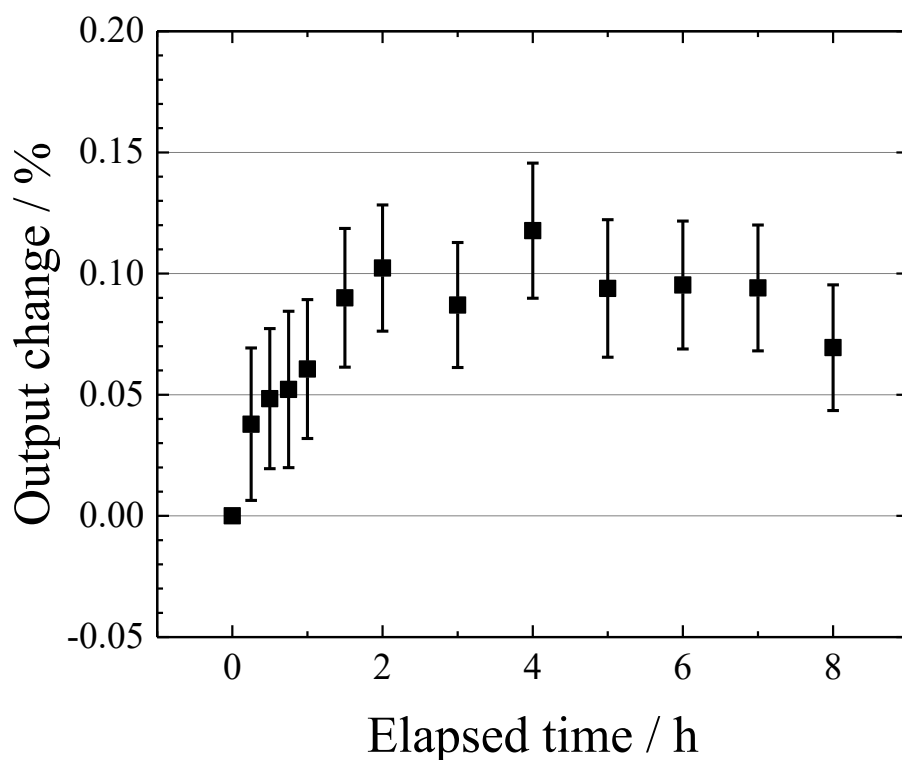


図 3.7 相対湿度を 40 %から 50 %に変化させた時の電離箱からの出力信号の変化。縦軸は経過時間 0 時間での出力信号に対する相対的な出力変化を示している。

図 3.8 および 3.9 に印加電圧+300 V のときの 6、10 および 15 MV 高エネルギー光子線における PTW 30013 および Exradin A19 の湿度変化に対する極性効果補正係数の変動をそれぞれ示す。図より、極性効果補正は湿度変化に対して一定であり、Exradin A19 における極性効果補正は 1 より大きい結果となった。極性効果補正における相対拡張不確かさは 0.09 % ($k=2$) であった。また図 3.10 および 3.11 に 6、10 および 15 MV の高エネルギー光子線における PTW 30013 および Exradin A19 の湿度変化に対するイオン再結合補正係数の変動をそれぞれ示す。イオン再結合補正係数においても極性効果補正係数と同様に湿度変化に対して一定であった。イオン再結合補正における相対拡張不確かさは 0.13 % ($k=2$) であった。

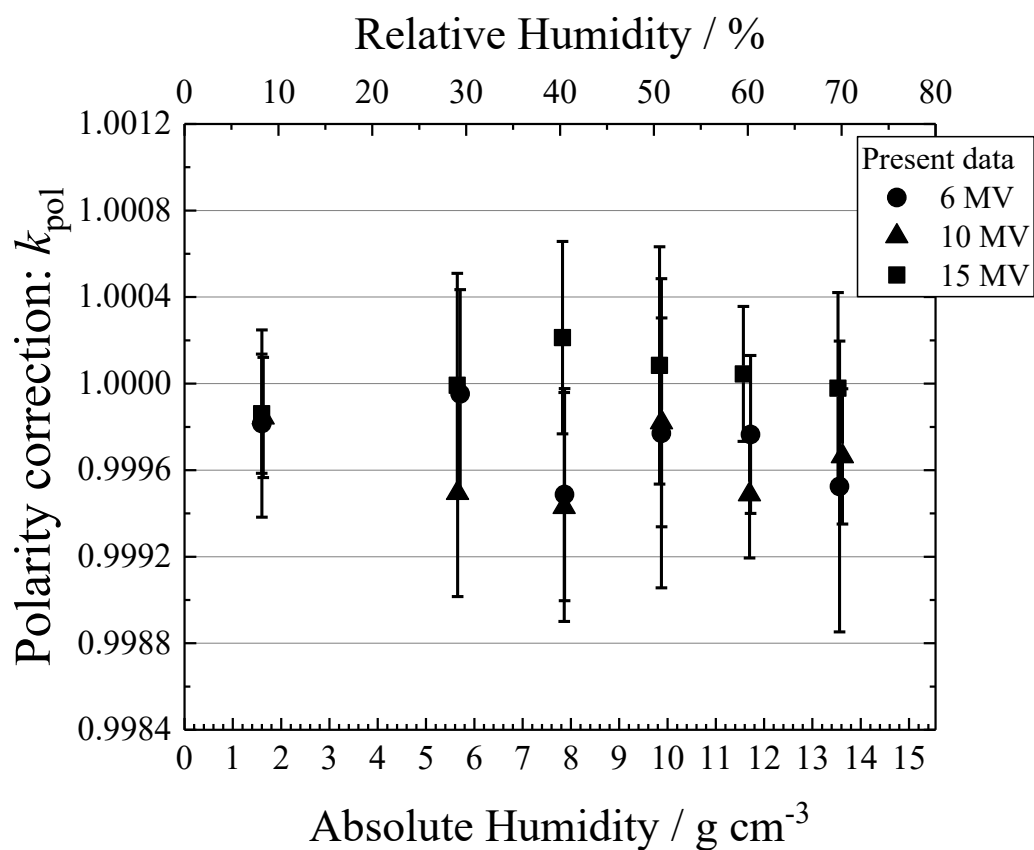


図 3.8 高エネルギー光子線における PTW 30013 の湿度変化に対する極性効果補正係数の変動。図の上下の横軸は、それぞれ相対湿度および絶対湿度である。エラーバーは各測定点での相対拡張不確かさ ($k=2$) を示す。

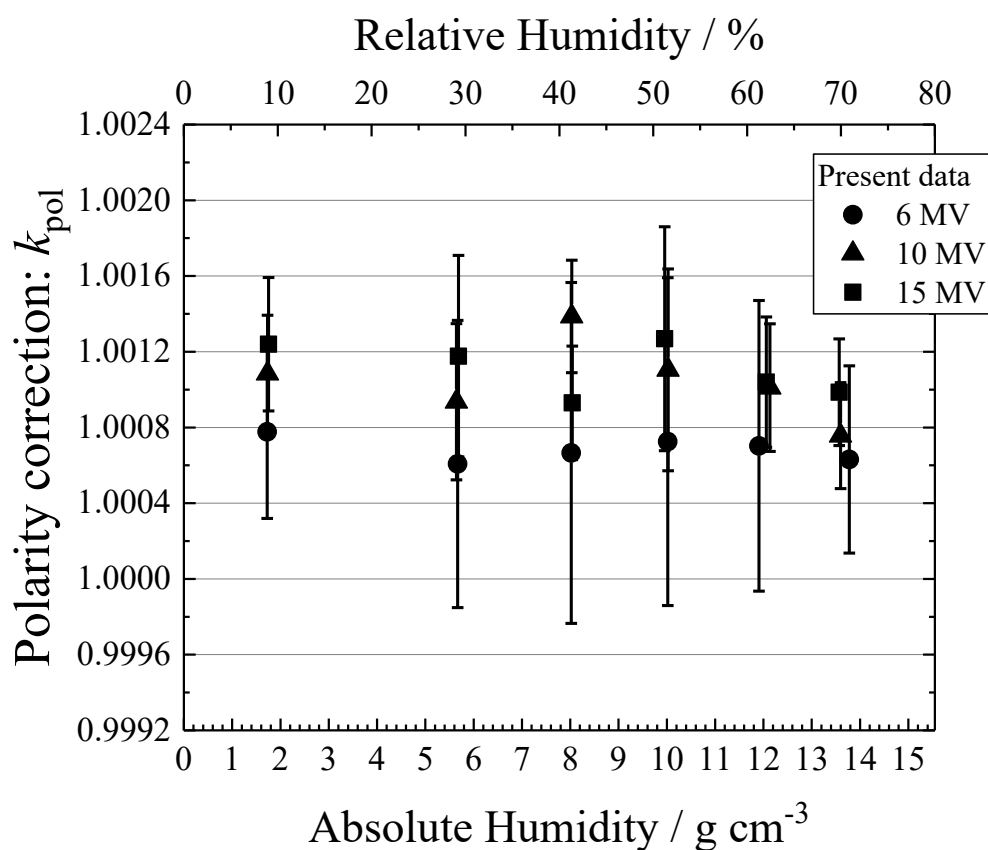


図 3.9 高エネルギー光子線における Exradin A19 の湿度変化に対する極性効果補正係数の変動。図の上下の横軸は、それぞれ相対湿度および絶対湿度である。エラーバーは各測定点での相対拡張不確かさ ($k=2$) を示す。

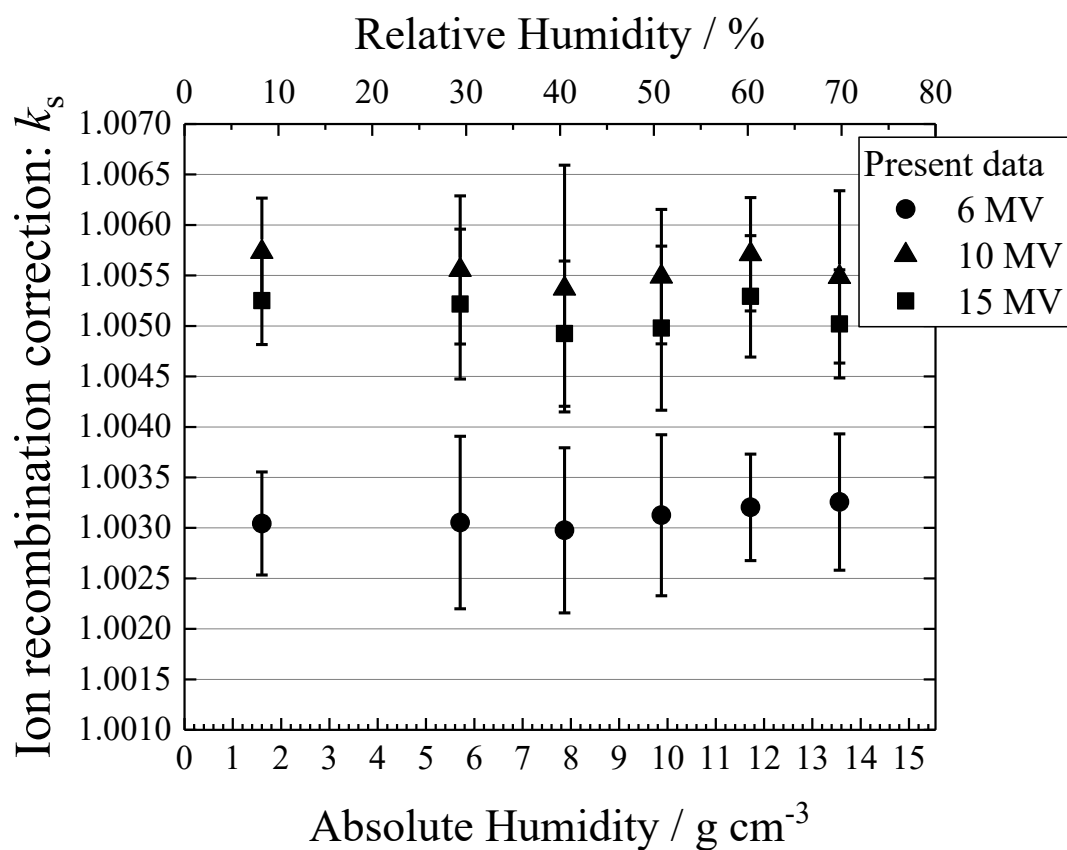


図 3.10 高エネルギー光子線における PTW 30013 の湿度変化に対するイオン再結合補正係数の変動。図の上下の横軸は、それぞれ相対湿度および絶対湿度である。エラーバーは各測定点での相対拡張不確かさ ($k=2$) を示す。

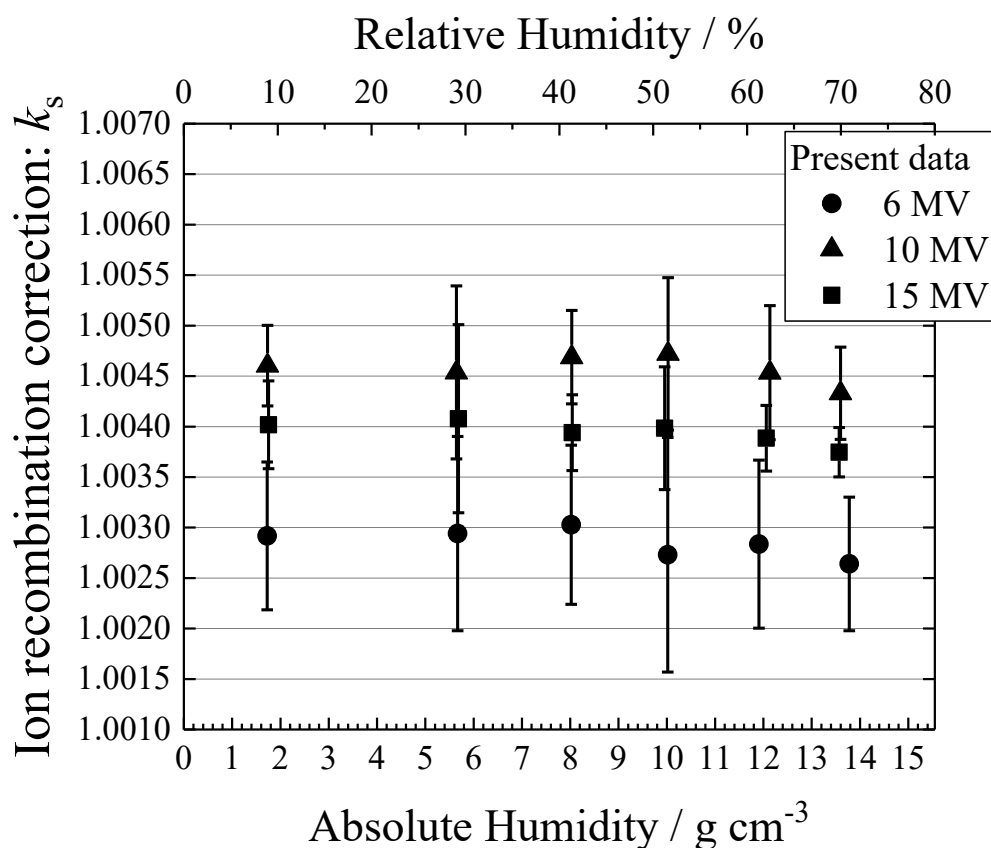


図 3.11 高エネルギー光子線における Exradin A19 の湿度変化に対するイオン再結合補正係数の変動。図の上下の横軸は、それぞれ相対湿度および絶対湿度である。エラーバーは各測定点での相対拡張不確かさ($k=2$) を示す。

図 3.12 に高エネルギー光子線を用いて測定された湿度補正係数と TG-21 において Rogers がモンテカルロシミュレーションを用いて算出した湿度補正係数[12]の比較を示す。本研究で測定した湿度補正係数は、相対湿度 10% から 70% の範囲で Rogers の計算結果と同様の挙動を示し、相対不確かさ 0.18% ($k=2$) で一致した。また、湿度補正係数にエネルギー依存性が見られなかった。

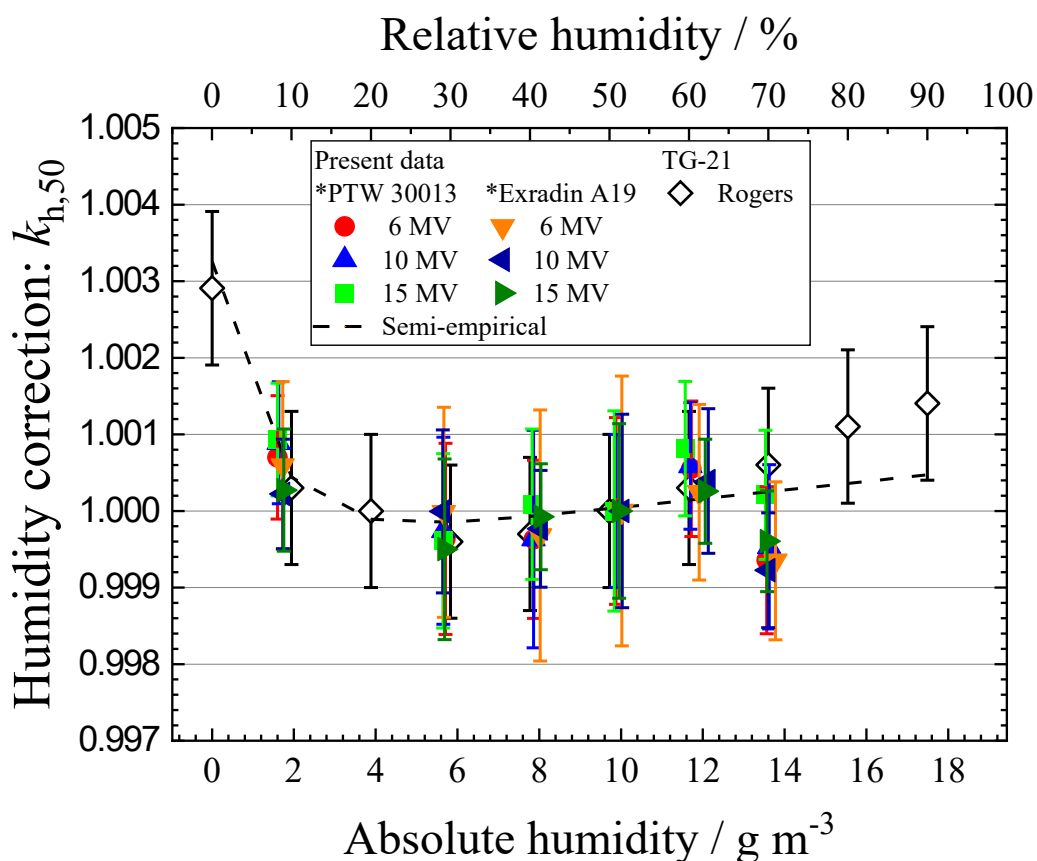


図 3.12 本研究において測定された高エネルギー光子線における湿度補正係数と Rogers によって計算されたモンテカルロシミュレーションによる湿度補正係数の比較。図中の破線は、本研究における半経験式における計算結果である (3.3 参照)。

3.2.2 電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与の計算

図 3.13 に EGS5 によるモンテカルロシミュレーションを用いて計算された高エネルギー光子線における電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与を示す。ここで、 ε_{50} および ε_X はそれぞれ相対湿度 50 % および X % のときの電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与である。エネルギー付与は湿度の増加に伴い、直線的に減少した。高エネルギー光子線間において線質依存は見られなかった。

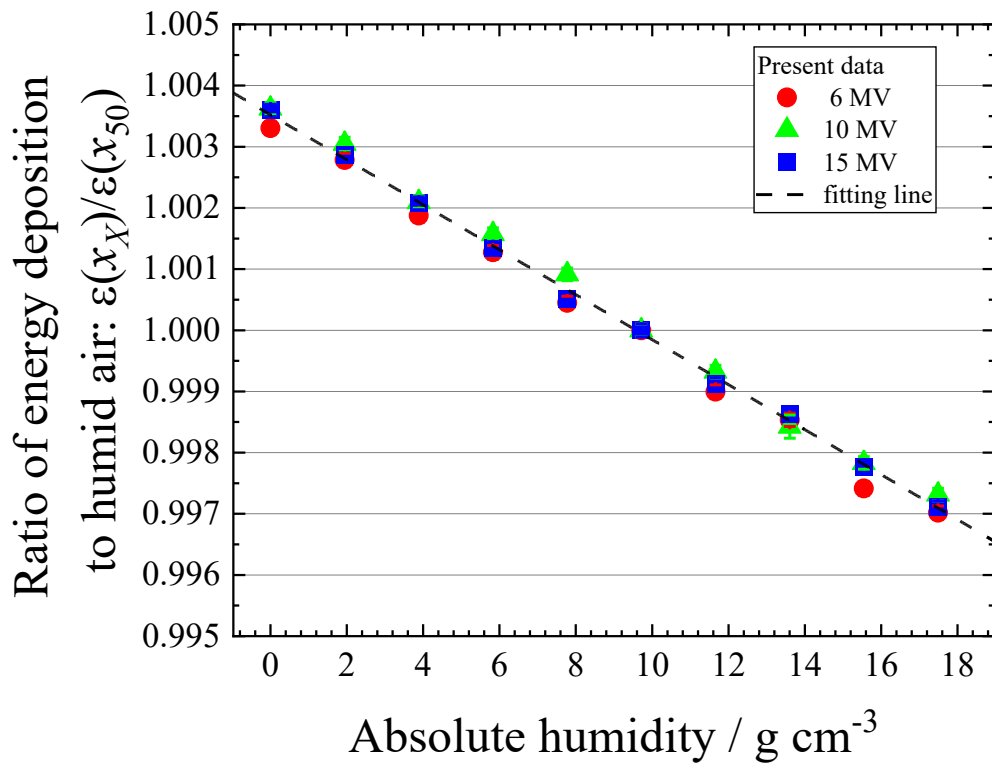


図 3.13 高エネルギー光子線における電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与の計算結果。縦軸は相対湿度 X %および 50 %の湿潤空気におけるエネルギー付与の比である。図中の破線はすべての計算結果を用いた線形近似の結果である。

3.2.3 湿潤空気の W 値の決定

湿潤空気の W 値の比は、湿度補正係数の測定結果および EGS5 による電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与の計算結果より決定された。湿潤空気の W 値の比である W_X/W_{50} の算出式である式(3.1)を改めてここで示す。

$$\frac{W_X}{W_{50}} = \frac{I_{50} \varepsilon_X}{I_X \varepsilon_{50}} \quad (3.1)$$

ここで、 W_{50} および W_X はそれぞれの相対湿度 50% および X% のときの湿潤空気の W 値である。図 3.14 に高エネルギー光子線における湿潤空気の W 値の比および Niatel によって 50 kV X 線を用いて測定された湿潤空気の W 値の比[7]の比較を示す。本研究で決

定された湿潤空気の W 値は相対湿度 10% から 70% の範囲において、Niatel の測定結果と相対標準不確かさ 0.18% ($k=2$) で一致した。

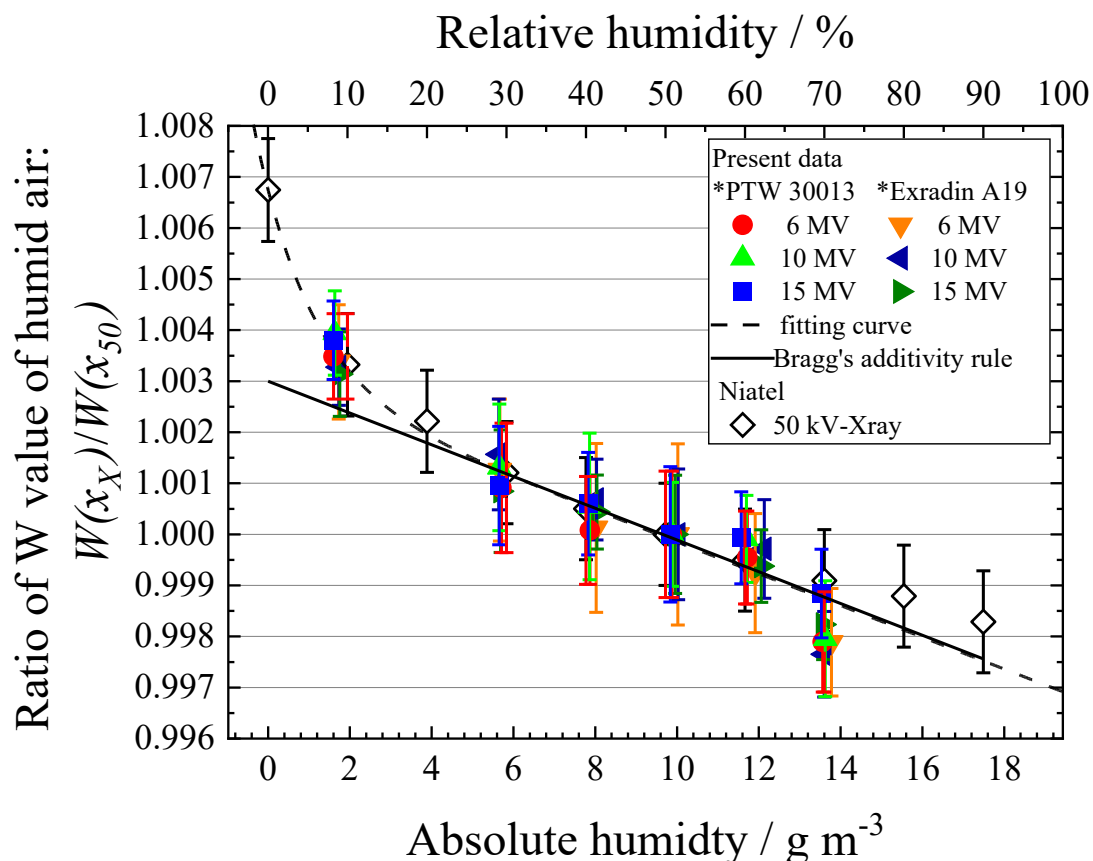


図 3.14 本研究で決定された高エネルギー光子線における湿潤空気の W 値と Niatel によって測定された 50 kV X 線における湿潤空気の W 値の比較。図中の破線は全測定結果におけるフィッティングの結果である(3.3 参照)。

3.3 考察

図 3.7 に示した相対湿度を 40% から 50% に変化させたときの出力信号の変化における測定結果より、ファーマ型電離箱における湿度の安定時間はおよそ 3 時間であることを確認した。今回得られたファーマ型電離箱の時定数は Poirier and Douysset によって報告されたウェル型電離箱の時定数よりも短くなった[45]。これは電離箱間の有感体積の違いであると考えられ、ファーマ型電離箱の有感体積は 0.6 cm^3 に対して、ウェル型電離箱の有感体積は 200 cm^3 となっている。またファーマ型電離箱においても湿度が安定

するために長時間要した理由としては、電離箱空洞内の空気と大気中の空気の交換は、コネクタおよびケーブルを通して行われるためであると考えられる。この結果より、QA等の測定でデシケータにおいて保管されている電離箱を用いる際は、長い時間をかけて測定環境に馴染ませる必要があることを示している。

極性効果補正およびイオン再結合補正の湿度影響の結果より、これらの補正は調査された相対湿度の範囲において測定の不確かさで一致し、湿度変化に対して補正值の変動が見られなかった。湿潤空気において生成される電荷は、乾燥空気と異なるはずであるが、温度 22 °Cでの相対湿度 70 %の湿潤空気における水蒸気圧の割合はわずか 1.8 %である。したがって、極性効果補正およびイオン再結合補正における湿度影響は日常で観察されない。

医療用リニアックからの高エネルギー光子線を用いて測定されたファーマ型電離箱の湿度補正係数は、Rogers の計算結果[12]と非常によく一致し、湿度補正係数のエネルギー依存は見られなかった。また、今回調査した PTW 30013 および Exradin A19 における湿度補正係数は同様の傾向を示した。この結果より、電離箱の壁材および中心電極に用いられるグラファイト、C552 およびアルニミウムは湿度の影響を受けないことを示唆している。

電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与の比である ϵ_X/ϵ_{50} は、湿度の増加に伴い直線的に減少した。これは ϵ_X/ϵ_{50} がブラッグの加算則に従うためである。相対湿度 X % のときのエネルギー付与 ϵ_X は、以下の式によって説明することができる。

$$\epsilon_X = \omega_{\text{air}}\epsilon_{\text{air}} + \omega_{\text{vapor}}\epsilon_{\text{vapor}} \quad (3.10)$$

$$\omega_{\text{air}} + \omega_{\text{vapor}} = 1 \quad (3.11)$$

ここで、 ϵ_{air} および ϵ_{vapor} は乾燥空気および水蒸気のエネルギー付与であり、 ω_{air} および ω_{vapor} は空気中の乾燥空気および水蒸気の質量割合である。したがって、 $\epsilon_X/\epsilon_{\text{air}}$ は次のように与えられる。

$$\frac{\epsilon_X}{\epsilon_{\text{air}}} = 1 - K\omega_{\text{vapor},X} \quad (3.12)$$

$$K = 1 - \frac{\varepsilon_{\text{vapor}}}{\varepsilon_{\text{air}}} \quad (3.13)$$

ここで、 $\omega_{\text{vapor},X}$ は相対湿度が X%のときの空気中の水蒸気の質量割合であり、 K は定数である。したがって、 $\varepsilon_X/\varepsilon_{50}$ は、以下の式で与えられる。

$$\frac{\varepsilon_X}{\varepsilon_{50}} = \frac{1}{1 - K\omega_{\text{vapor},50}} - \frac{K\omega_{\text{vapor},X}}{1 - K\omega_{\text{vapor},50}} \quad (3.14)$$

ここで、 $\omega_{\text{vapor},50}$ は相対湿度が 50 %のときの空気中の水蒸気の質量割合である。 ^{60}Co γ 線および高エネルギー光子線における電離箱の実用的な湿度補正係数を提案するために $\varepsilon_X/\varepsilon_{50}$ のすべての計算結果を用いて線形近似式を以下のように算出した。

$$\varepsilon_X/\varepsilon_{50} = 1.0035 - 3.67552 \times 10^{-5}x \quad (3.15)$$

ここで、 x は絶対湿度であり、図 3.13 に線形近似式を示した。図からわかるように、この近似式はすべての高エネルギー光子線における計算結果と一致している。

高エネルギー光子線において決定された湿潤空気の W 値は Niatel の測定結果[8]と一致し、線質に依存しなかった。先行研究より、乾燥空気における W 値は 10 keV 以上で一定とみなされている。したがって、湿潤空気における W 値においても線質による影響は受けないと考えられる。Barnard は Bragg の加算則を用いて湿潤空気の W 値を算出したが、Niatel の測定結果と一致しなかった[10]。この相違の主な理由は、低湿度領域での急激な減少が生じる Jesse 効果によるものである[11]。このことから、湿潤空気の W 値の比である W_X/W_{50} は、Bragg の加算則および Jesse 効果の畳み込みとして以下のように説明できる。

$$\frac{W_X}{W_{50}} = \left(\frac{W_X}{W_{50}}\right)_{\text{Bragg}} + \left(\frac{W_X}{W_{50}}\right)_{\text{Jesse}} \quad (3.16)$$

ここで、 $(W_X/W_{50})_{\text{Bragg}}$ および $(W_X/W_{50})_{\text{Jesse}}$ はそれぞれブラッグの加算則および Jesse 効果の項である。ブラッグ加算則の項は、以下の式で与えられる。

$$\left(\frac{W_X}{W_{50}}\right)_{\text{Bragg}} = \frac{1}{1 - C\omega_{\text{vapor},50}} - \frac{C\omega_{\text{vapor}}}{1 - C\omega_{\text{vapor},50}} \quad (3.17)$$

$$C = 1 - \frac{W_{\text{vapor}}}{W_{\text{air}}} \quad (3.18)$$

ここで、 C は定数である。また本研究では、Jesse 効果の項は以下のように指数関数による減衰モデルを用いた。

$$\left(\frac{W_X}{W_{50}}\right)_{\text{Jesse}} = R_0 \exp\left(-\frac{x}{x_\tau}\right) \quad (3.19)$$

ここで、 R_0 および x_τ はフィッティングパラメータであり、 x は絶対湿度である。本研究において測定された高エネルギー光子線のデータおよび Niatel による 50 kV X 線のデータ[8]より、湿潤空気の W 値の比における近似式は、以下のように与えられる。

$$W_X/W_{50} = 3.79 \times 10^{-3} \exp(-x/1.3) + 1.003 - 3.11 \times 10^{-4}x \quad (3.20)$$

ここで、 x は絶対湿度である。図 3.14 に近似式および近似式中の Bragg 加算則に対応する項を用いて算出した湿潤空気の W 値の比に追加でプロットした。図からわかるように、本研究で提案した近似結果は、全ての高エネルギー光子線における測定結果と一致し、 W_X/W_{50} における式(3.16)で提案したモデルは実験結果をうまく説明している。

以上の結果から、湿度補正係数を式(3.15)および式(3.20)を用いて、次のように半経験的に求めることができる。

$$k_{h,50} = \frac{\varepsilon_{50} W_X}{\varepsilon_X W_{50}} \quad (3.21)$$

この式から得られる湿度補正係数を図 3.12 に追加でプロットした。式(3.21)を用いて算出した補正值は相対湿度 0%から 70%の範囲において、本研究の測定結果および Rogers の計算結果[12]と相対不確かさ 0.10% ($k=2$) の範囲内で非常によく一致した。この結果は、電離箱の湿度影響を良く説明しており、この半経験式を用いることで電離箱の湿度影響を補正することができる。また、相対湿度 50%を基準としたときに、相対湿度

10 %から 90 %において相対拡張不確かさの範囲内で一致していることから、この範囲の相対湿度において湿度補正係数を 1 として扱っている日本の線量計測プロトコルである標準計測法 12[6]を支持している。

3.4 まとめ

ファーマ型電離箱における湿度安定の時定数はおよそ 3 時間であった。極性効果補正およびイオン再結合補正に対する湿度影響はなく、相対湿度 10 %から 70 %の範囲において相対拡張不確かさ内で一致した。本研究で測定された高エネルギー光子線における湿度補正係数は、Rogers によるモンテカルロシミュレーションの計算結果とよく一致した。また実測された湿度補正係数と電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与の計算結果から決定された高エネルギー光子線における湿潤空気の W 値は、Niatel による 50 kV X 線の測定データと非常によく一致した。このことから湿潤空気の W 値におけるエネルギー依存性は確認されなかった。本研究で提案した湿度補正係数の半経験式を用いることで簡易的に電離箱の湿度影響を補正可能であることを示した。

第4章

空気の W 値の絶対測定

空気の W 値の絶対測定システムはグラファイトカロリメータによる熱量測定とグラファイト壁空洞電離箱値による電離電流測定を組み合わせで開発された。またモンテカルロシミュレーションを用いてグラファイトコアへの吸収線量率を空気への吸収線量率を決定するための線量変換係数を算出した。この絶対測定システムは、これまでに多くの空気の W 値が報告されている ^{60}Co γ 線を用いて評価された。本章では、初めに空気の W 値の絶対測定の手法を記述し、その後方法、結果および考察について記述する。

4.1 方法

4.1.1 空気の W 値の絶対測定の手法

本研究において開発した空気の W 値の絶対測定システムは、2.2.1 で説明したカロリメータおよび電離箱測定の比較による決定に基づいている。式(2.5)に基づき、本研究ではグラファイトカロリメータおよびグラファイト壁空洞電離箱を用いて、以下の式を用いて W_{air} の決定を行った。

$$W_{\text{air}} = \frac{\dot{D}_{\text{air}}}{I_{\text{air}}/m_{\text{air}}} = \frac{\dot{D}_{\text{core}}}{I_{\text{air}}/m_{\text{air}}} \left(\frac{D_{\text{air}}}{D_{\text{core}}} \right)_{\text{MC}} \quad (4.1)$$

ここで、 I_{air} はグラファイト壁空洞電離箱の有感体積で得られた電離電流であり、 m_{air} は有感体積の空気質量である。 W_{air} の決定には、左辺に示すように有感体積の空気への吸収線量率 \dot{D}_{air} が必要であるが、 \dot{D}_{air} を直接決定することが難しい。Niatel の方法における \dot{D}_{core} から \dot{D}_{air} の変換は、空気に対するグラファイトの制限質量衝突阻止能の平均比である $\bar{s}_{\text{c,a}}$ を用いて行われた[25]。しかし、本研究ではグラファイトカロリメータのグラファイトコアへの吸収線量率 \dot{D}_{core} およびモンテカルロシミュレーションを用いて算出された線量変換係数 $(D_{\text{air}}/D_{\text{core}})_{\text{MC}}$ を組み合わせで \dot{D}_{air} を決定した。

4.1.2 実験セットアップ

実験は産総研に設置されている⁶⁰Co線源発生装置を用いて行われた。図4.1に実験セットアップの概略図および写真を示す。⁶⁰Co線源からの γ 線放射線場は、産総研における水吸収線量率の一次標準を確立するために使用されている[3,4]。装置が設置されている照射室内の温度は 22 ± 0.5 °Cで保たれており、気圧および湿度は制御されていないが、測定時の湿度は20%から80%の範囲で管理されていた。室内の温度、気圧および湿度は、JCSS 認定校正事業者によって校正された気圧湿度温度計変換器 (Vaisala PTU300) によって連続的に記録された。この変換器は、気圧、湿度および温度の3つの気象要素を1台の変換器で計測可能である。

本研究で使用した検出器であるグラフアイトカロリメータおよびグラフアイト壁空洞電離箱は、 $30 \times 30 \times 30$ cm³の水ファントム内に配置された。カロリメータを水中に配置したのは、水ファントム内の水温が恒温槽 (LAUDA, PROLINE RP845) により一定 (26 °C) に保たれており、カロリメータ内部 (コア、ジャケットおよびシールド) の温度管理がしやすいためである。水ファントム内の水温は、M9182APXI デジタルマルチメータ (Keysight) によって監視された。 W_{air} は、特定の位置での関心領域に付与されるエネルギーとそこで発生する電荷の比較から決定されるため、各検出器における関心領域の正確な設置が非常に重要となる。検出器に使用されたグラフアイトは様々な密度を持つ物質であり、この密度変動は検出器の正確なセットアップに大きな影響を与える。そのため、検出器を水中に配置しグラフアイトの密度を水の密度として扱うことで、検出器の関心領域を特定の位置へ正確に配置することを可能にした。各検出器の基準点は、線源から検出器までの距離 (SDD: Source to Detector distance) 100 cm の水中 5 g cm⁻² の位置においてファントム中心に設置された。

⁶⁰Co線源は直径8 cm、長さ15.5 cmの円形形コリメータを備えた厚い壁に囲まれた照射器内部に配置されている[49]。照射野サイズは、線源から1 mの位置で直径11 cmである。照射器には2つのシャッターが備わっている。1つは照射器に設置されているスローシャッターである (図4.1には示していない)。このシャッターの開閉にはおよそ20秒かかるが、線源からのほとんどの放射線を遮蔽することができる。もう1つのシャッターはコリメータ直下に設置された高速シャッターであり、シャッターの開閉にはおよ

そ 0.3 秒かかる。高速シャッターとコリメータの間にはわずかな隙間があるため、このシャッターが閉じている場合でも放射線が照射器から漏れる。しかし、実際に測定する位置ではこの放射線の漏れは無視できることがわかっている[49]。したがって、照射は高速シャッターを使用して制御された。

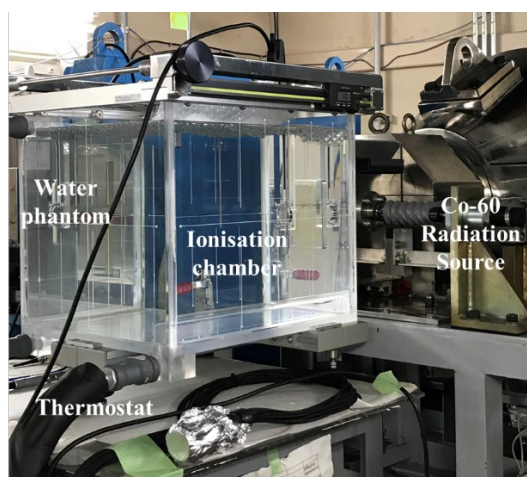
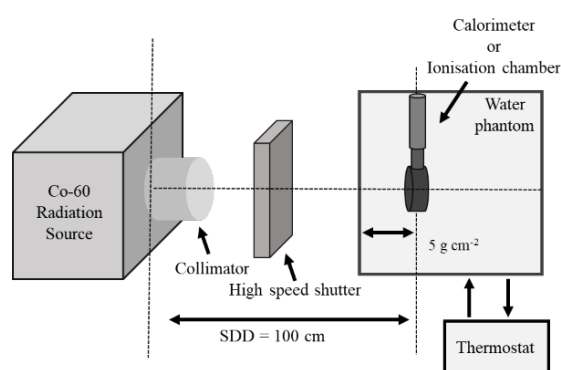


図 4.1 実験セットアップ。(a)に概略図、(b)に写真を示す。

4.1.3 グラファイトカロリメータを用いたグラファイトコアへの吸収線量率の測定

グラファイトカロリメータは産総研において組み立てられ、Domen 型構造のカロリメータである[50]。このカロリメータは医療用リニアックからの高エネルギー光子線および電子線の水吸収線量標準のために開発された[4,51]。カロリメータは、密度が 1.934 g cm^3 の高純度グラファイトから作られたコア、ジャケットおよびシールドの 3 つの層から構成されており、コアはジャケットとシールドに囲まれている。これらの部品は、1 mm ギャップによって互いに分離されており、PolyEtherEtherKetone (PEEK) により所定の位置に固定されている。さらに各グラファイト素子には温度センサーとヒーターセンサーの役割を持つ直径 0.5 mm のサーミスタ (芝浦電子、PB9-43) が取り付けられている。コアの形状は直径 20 mm、厚さ 2 mm の円盤型である。コアの質量は産総研で校正された電子天秤を使用して測定され、1.2216 g であった。カロリメータは 50 mm × 210 mm、ビーム軸方向の厚さが 18 mm の PolyMethyl Methacrylate (PMMA) 製の長方形スリーブで囲まれている。カロリメータ内の気圧は、オイルフリー真空ポン

プを使用して PMMA スリーブを介して 0.01 Pa 未満に排気された。

グラファイトカロリメータを用いた熱量測定の方法には、等温測定モードと断熱測定モードの2つがある[51]。前者は ^{60}Co γ 線のような安定した出力を持つ連続放射線の測定に優れており、後者は時間変化の激しいリニアックのようなパルス放射線の測定に優れている。本研究で使用した放射線は ^{60}Co γ 線であるため、等温測定モードで操作され、熱量測定が行われた。等温測定モードでは、グラファイト素子に取り付けられた温度センサーとヒーターセンサーを使用して各グラファイト素子の温度の PID 制御を行い、検出部分であるコア、ジャケットおよびシールドを常に一定温度になるように維持している[51]。各素子の温度は、ヒーターサーミスタに供給する電流を調整することによって変化させ、温度変化は実効動作電圧 0.2V の AC ホイートストンブリッジを使用したロックインアンプの出力として測定された。高速シャッターを制御してグラファイト素子の温度が変化すると、それに応じてヒーターサーミスタからヒーター電力が消費される。消費電力の差はヒーターサーミスタによって供給される電力 (P_{rad}) に相当する。

P_{rad} を使用すると、グラファイトコアへの吸収線量率である \dot{D}_{core} は、次のように表すことができる[51]。

$$\dot{D}_{\text{core}} = \frac{P_{\text{rad}}}{M_{\text{core}}} \cdot k_{\text{hc}} \cdot \prod k_i \quad (4.2)$$

ここで、 M_{core} はサーミスタを含むグラファイトコアの質量であり、産総研において校正された電子天秤を使用して測定された。 k_{hc} は熱欠損補正係数であり、グラファイトの熱損失を補正する。グラファイトの場合、 k_{hc} は 0.1% の相対標準不確かさで 1.0 とみなされる[5]。 $\prod k_i$ はコア、ジャケットおよびシールド間の空気層、コアの不純物および線量プロファイルによる放射線の擾乱を補正する。これらの補正は暗黙的にモンテカルロシミュレーションに含まれるため、 $\prod k_i$ は 1.0 とした。

i 番目に決定された P_{rad} ($P_{\text{rad},i}$) は、非照射および照射時における消費ヒーター電力の差から次のように計算される。

$$P_{\text{rad},i} = \frac{P_{\text{OFF,before},i} - P_{\text{OFF,after},i}}{2} - P_{\text{ON},i} \quad (4.3)$$

ここで、 $P_{\text{OFF,before}_i}$ および $P_{\text{OFF,after}_i}$ は、照射前後の非照射時の i 番目のヒーター消費電力である。 P_{ON_i} は照射時の i 番目の消費ヒーター電力である。 P_{rad_i} の算出に使用されたこれらの値は、消費ヒーター電力が安定している範囲での平均値である。グラフアイトカロリメータによる P_{rad_i} の一連の決定は 100 回繰り返され、統計的不確かさを 0.1% 未満に減らした。グラフアイトカロリメータの基準点はコアの中心とした。

4.1.4 グラフアイト壁空洞電離箱を用いた電離電流の測定

グラフアイト壁空洞電離箱は平行平板型であり、応用技研において組み立てられた。電離箱は密度が 1.920 g cm^{-3} の高純度グラフアイトから作られた中心電極、入射壁および側壁の 3 つから構成されている。グラフアイトカロリメータとグラフアイト壁空洞電離箱のグラフアイト密度はおよそ 0.7% の差がある。この影響は後述するモンテカルロシミュレーションの感度分析によって調査された。各部品は東京都立産業技術総合研究所の高精度画像測定機 QVI Vantage 300 を用いて測定された。空洞の直径は 22 mm、厚さは 4 mm である。これは 1 mm のエアギャップに囲まれたカロリメータコアの設計と同じである。入射壁と中心電極の厚さは、それぞれ 3 mm および 0.3 mm であった。ビーム軸方向のグラフアイトおよび空気の厚さは、それぞれ 10 mm および 4 mm であり、これもカロリメータと同じ設計となっている。またグラフアイト壁空洞電離箱はグラフアイトカロリメータと同様に PMMA スリーブに囲まれている。グラフアイト壁空洞電離箱の有感体積は 1.4295 cm^3 であった。22 °C の温度および 101.325 kPa の気圧における空気密度 ρ_{air} は、Picard によって提案された式[52]に基づき、 1.1963 kg m^{-3} と計算された。したがって、有感体積における空気の質量は、 $m_{\text{air}} = 1.7103 \times 10^{-6} \text{ kg}$ であり、相対標準不確かさ 0.07% であった。

本研究で使用したグラフアイト壁空洞電離箱は、この研究のために作成された。そのため、電離電流測定を行う前に極性効果、イオン再結合補正、および漏れ電流を評価した。産総研において校正された電位計 (EMF 521) からの読み取り値である I_{raw} を使用して、補正された電離電流である I_{air} は次の式から得られた。

$$I_{\text{air}} = I_{\text{raw}} \cdot k_{\text{TP}} \cdot k_{\text{pol}} \cdot k_s \cdot k_h \cdot k_{\text{elec}} \quad (4.4)$$

ここで、 k_{TP} は温度気圧補正係数であり基準条件への補正を行う。温度および気圧の基準条件は、それぞれ 22 °C および 101.325 kPa とした。ここで使用された温度は、M9182A PXI デジタルマルチメーターを使用して測定された水ファントム内の水温である。また使用された気圧は、気圧湿度温度計変換器 (Vaisala PTU300) によって測定された照射室の気圧と同じ値である。 k_{pol} および k_s は、それぞれ極性効果およびイオン再結合の補正係数である。これらの補正係数は、後で詳細に議論する。 W_{air} は乾燥空気に対して定義されるため、湿度補正係数 k_h が読み取り値に適用される。ICRU Report 90 で推奨されているように、 k_h は 0.9970 とみなされ、相対標準不確かさ 0.1% である[5]。 k_{elec} は電位計校正定数であり 1.0 とした。電位計を使用して+400 V の電圧が、電離箱の中心電極に印加された。一般的に平行平板型電離箱の基準点は空洞前壁の中心である。しかし、グラフィイトカロリメータの関心領域に入射する電子フルエンスと一致させるために、グラフィイト壁空洞電離箱の基準点は空洞中心とした。

電離箱を用いて電荷を収集する際、印可電圧の極性の違いによって電離箱の表示値に差が生じる。極性効果補正である k_{pol} はこの表示値の差を補正するもの係数である。 k_{pol} は、次の式で決定された[6]。

$$k_{pol} = \frac{|I_{raw}^+| + |I_{raw}^-|}{2|I_{raw}^+|}, \quad (4.5)$$

ここで、 I_{raw}^+ および I_{raw}^- はそれぞれ正負の印加電圧での電位計の読み取り値である。 k_{pol} は印加電圧±100 から±400 V の範囲で評価した。

電離箱空洞内に発生した正負のイオンは再結合が起こるため、必ず発生した電荷を全て収集できるとは限らない。このイオン再結合は初期再結合と一般再結合の2種類に分けられ、イオン再結合補正係数はこの不完全な収集を補正するための係数である。前者は単独の電離飛跡に沿って発生した電荷が再結合することであり、重粒子などの高 LET 放射線で優位となる。一方、後者は電離空洞内の全ての電離飛跡に沿って発生した電荷の再結合に関連し、線量率に依存する。一般的に k_s は、イオン再結合補正係数を簡便に推定できる二点電圧法を用いて決定される[6]。しかし、本研究では Niatel によって提案された方法 (以下、Niatel 法) を採用し[53]、イオン再結合を初期再結合と一般再結合に分けて評価した。

Niatel 法に基づき、 k_s は次のように決定された[53]。

$$k_s = 1 + \frac{a_0}{(n-1)} + \frac{a_1}{(n^2-1)} I_1 \quad (4.6)$$

一連の線量率において、印加電圧 V_1 および $V_2 (= V_1/n)$ において I_1 および I_2 がそれぞれ測定された。線源から電離箱までの距離 (SCD: Source to chamber distance) を変更することによって、線量率を変化させた。 n は Jaffe プロットによって決定される印加電圧の比である。次に I_1/I_2 のグラフを I_1 の関数として作成した。初期 ($k_{s,init}$) および一般再結合補正係数 ($k_{s,gen}$) は、 I_1/I_2 のグラフに対する線形フィットの切片 ($1 + a_0$) および傾き (a_1) から導出された。

$$k_{s,init} = \frac{a_0}{(n-1)} \quad (4.7)$$

$$k_{s,gen} = \frac{a_1}{(n^2-1)} \quad (4.8)$$

Jaffe プロットにおける評価は、極性効果において用いた電圧と同様に+100 から+400 V の範囲とした。

4.1.5 EGS5 によるモンテカルロシミュレーションを用いた線量変換係数の算出

線量変換係数 $(D_{air}/D_{core})_{MC}$ は、EGS5[46]および EGS-MPI[47]を用いて計算された。計算は九州大学の大型計算機である ITO によって行われた。線量変換係数 $(D_{air}/D_{core})_{MC}$ は、グラフアイトカロリメータによって得られたグラフアイトコアへの吸収線量率を空気への吸収線量率に変換する係数である。計算に使用されたグラフアイトカロリメータおよびグラフアイト壁空洞電離箱の検出器モデルを図 4.2 に示す。これらの検出器モデルは、製造元の設計図を参考に EGS5 コードを用いて忠実に再現されている。入射ビームのデータは、黒澤らによって計算された線源から 100 cm での ^{60}Co γ 線のエネルギースペクトル[54]が使用された。計算された光子ヒストリーの総数は $\sim 10^{13}$ であり、計算の統計的不確かさは 0.05%未満であった。

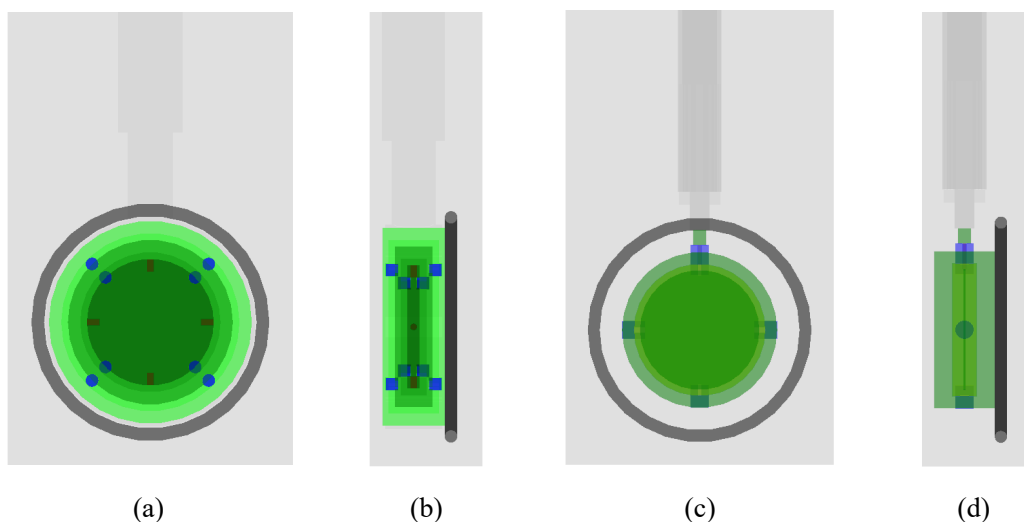


図 4.2 EGS5 コードを用いて作成されたグラファイトカロリメータおよびグラファイト壁空洞電離箱の検出器モデル。(a) および (b) は、グラファイトカロリメータの正面図および側面図を示す。3枚のグラファイトディスク (緑) は、中心からコア、ジャケットおよびシールドである。3つのディスクは、PEEK シリンダー (青) によって 1 mm の間隔で互いに分離されている。コアに取り付けられている 4本の細い円柱 (赤) はサーミスタである。シールドの後ろ側に配置されているのは、O リング (黒) である。一方、(c) および (d) は、グラファイト壁空洞電離箱の正面図と側面図を示す。薄いグラファイトディスク (緑) は電離箱空洞 (黄色) 内に配置された中心電極であり、グラファイト壁 (緑) がこれらを囲んでいる。中心電極は支持体 (青) によって固定されている。グラファイト壁の後ろのリングは O リング (黒) である。両検出器を囲んでいる長方形のスリーブ (グレー) は PMMA 製である。

表4.1にEGS5の計算パラメータを示す。本研究におけるグラファイトの密度補正は、ICRU Report 90の推奨[5]に従い、粒子密度 2.265 g cm^{-3} および平均励起エネルギー $I_g = 81 \text{ eV}$ を用いて行われた。上述したように、本研究で使用したグラファイトカロリメータおよびグラファイト壁空洞電離箱間のグラファイト密度が異なる。そのため、グラファイト密度の相違が $(D_{\text{air}}/D_{\text{core}})_{\text{MC}}$ に与える影響について、グラファイト密度を変更して感度分析を行った。

表 4.1 EGS5 において使用した計算パラメータ

Parameter	Value	Note ⁽²¹⁾
PCUT	0.010 MeV	Cut off energy for photon
ECUT	0.521 MeV	Cut off energy for electron
IPHTER	1 (ON)	Switches for PE-angle sampling
IEDGFL	1 (ON)	K & L-edge fluorescence
IAUGER	1 (ON)	K & L-Auger
LRAYLR	1 (ON)	Rayleigh scattering
LPOLAR	1 (ON)	Linearly-polarized photon scattering
INCOHR	1 (ON)	S/Z rejection
LPOFR	1 (ON)	Doppler broadening
IMPACR	1 (ON)	Electron impact ionization
IBRDST	1 (ON)	Koch and Motz formula for Bremsstrahlung photons Koch and Motz formula 2BS
IPRDST	2 (ON)	Motz, Olsen and Koch formula for pair-production Motz, Olsen and Koch formula 3D-2003

4.2 結果

4.2.1 グラファイトカロリメータを用いたグラファイトコアへの吸収線量率の測定

図 4.3 に ^{60}Co γ 線を用いた行われたグラファイトカロリメータにおける等温測定モードの測定結果を示す。図中の黒線は高速シャッターを制御されたときのコアのロックインアンプ出力を示す (左軸)。シャッターが開くと出力が急激に増加し、シャッターが閉じると出力は急激に減少する。どちらの場合においても、PID 制御によって数分後には出力がゼロに戻る。また図中の灰色の線は、コアに取り付けられているヒーターサーミスタからのヒーター電力を示している (右図)。こちらもシャッターが操作されると、ヒーター出力が急激に変化し、階段状に変化する。図中の黒い破線は、照射前後における非照射時のヒーター消費電力である $P_{\text{OFF,before}_i}$ および $P_{\text{OFF,after}_i}$ の平均値を示している。この破線と照射時のヒーター消費電力である P_{ON_i} の差が、 ^{60}Co γ 線の照射によって供給される P_{rad_i} に対応する。 P_{rad_i} を 100 回繰り返し測定して

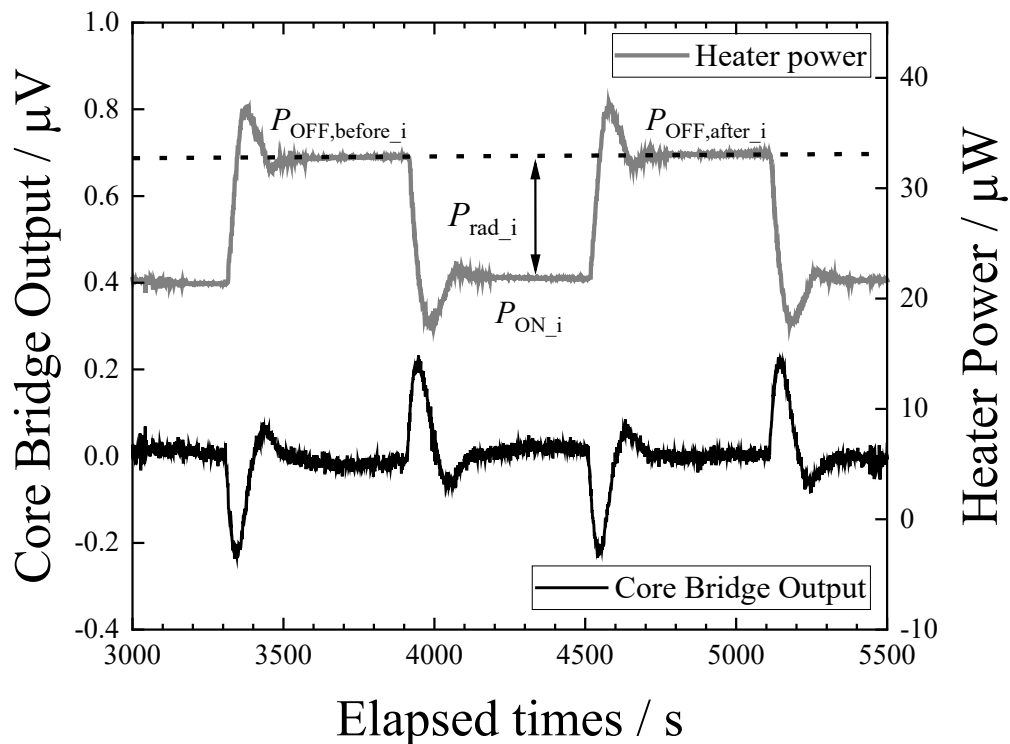


図 4.3 ^{60}Co γ 線を用いた行われたグラファイトカロリメータにおける等温測定モードの測定結果。黒およびグレーの線は、それぞれロックインアンプ出力 (左軸) とコアのヒーター出力 (右軸) を示す。 $P_{\text{OFF,before}_i}$ および $P_{\text{OFF,after}_i}$ は、 i 番目の照射前後における非照射時の消費ヒーター電力である。 P_{ON_i} は i 番目の照射時における消費ヒーター電力である。黒い破線は $P_{\text{OFF,before}_i}$ および $P_{\text{OFF,after}_i}$ の平均値である。消費されたヒーター電力の差は、 ^{60}Co γ 線の照射によって供給される P_{rad_i} に対応する。

得られた平均値は $\overline{P_{\text{rad}}} = 11.725 \mu\text{W}$ であり、統計的不確かさは 0.07% であった。したがって、グラファイトコアの質量と測定結果を組み合わせると、グラファイトコアへの吸収線量率 $\dot{D}_{\text{core}} = 9.2309 \text{ mGy/s}$ が得られ、相対標準不確かさは 0.15% であった。

4.2.2 グラファイト壁空洞電離箱を用いた電離電流の測定

極性効果に対する補正の最大値は $\pm 100 \text{ V}$ のとき 1.0005 であり、最小値は $\pm 400 \text{ V}$ のとき 1.0001 であった。電離箱の極性効果は非常に小さく ($< 0.1\%$)、極性効果補正係数の相対標準不確かさは 0.05% ($k=1$) であった。

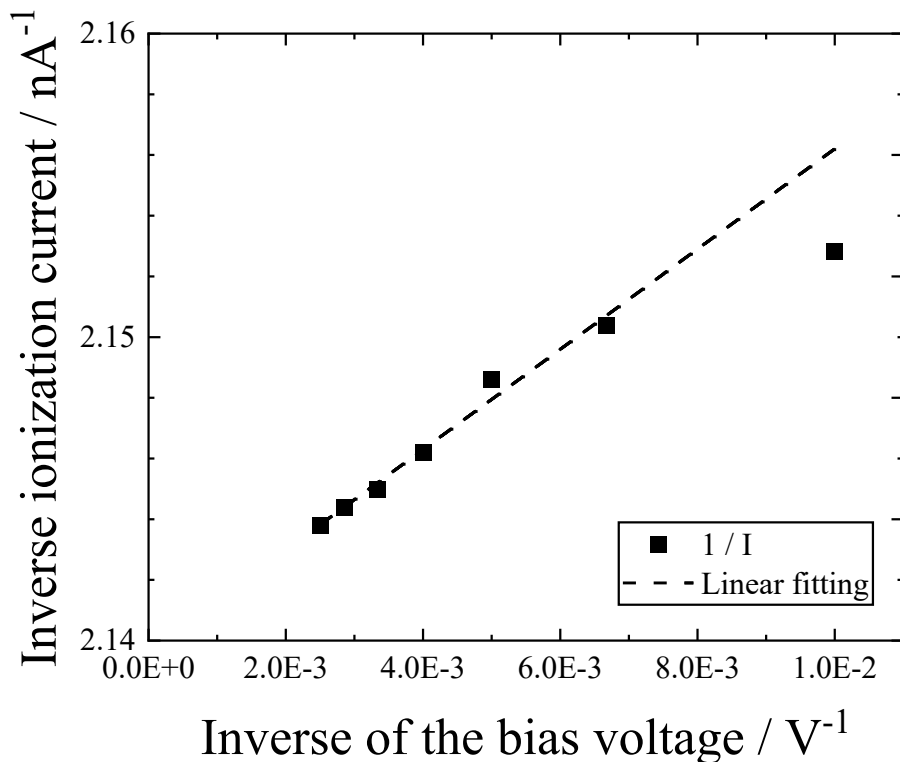


図 4.4 +100 V から+400 V の範囲における $1/V$ に対する $1/I$ の Jaffe プロット。+250 V から+400 V の範囲において直線性が確認された。図中の破線は理論値を意味しており、印加電圧が 100 V になるまで理論値からの乖離が見られない。

治療レベルの連続ビームの場合、後述するように、イオン再結合は一般再結合よりも初期再結合が支配的となる。初期再結合は電離電流の逆数 ($1/V$) と印加電圧の逆数 ($1/I$) の間に直線関係を示す。図 4.4 は+100 V から+400 V の範囲における $1/V$ に対する $1/I$ の Jaffe プロットを示す。また図中の線形フィッティングは予想される理論値を示す。Jaffe プロットにおいて $1/V$ に対する $1/I$ の直線性は、印加電圧+250 V から+400 V の範囲で確認されており、100 V 以下までは理論値から大きく乖離が生じないことがわかる。このことから、 I_1 および I_2 を測定する際に使用される印加電圧 V_1 および V_2 は、それぞれ+400 V および+200 V とし、式(5.3)から(5.5)中の印加電圧比である n は2とした。

図 4.5 は異なる線量率で得られた $I_1(400 V)$ の関数とした $I_1(400 V)/I_2(200 V)$ の測定結果および線形フィットを示す。本研究で使用された電離箱の極性効果は 0.1 %未満であるため、 I_1 および I_2 は温度気圧に対する補正のみ行った。線形フィットの傾き (a_1) およ

び

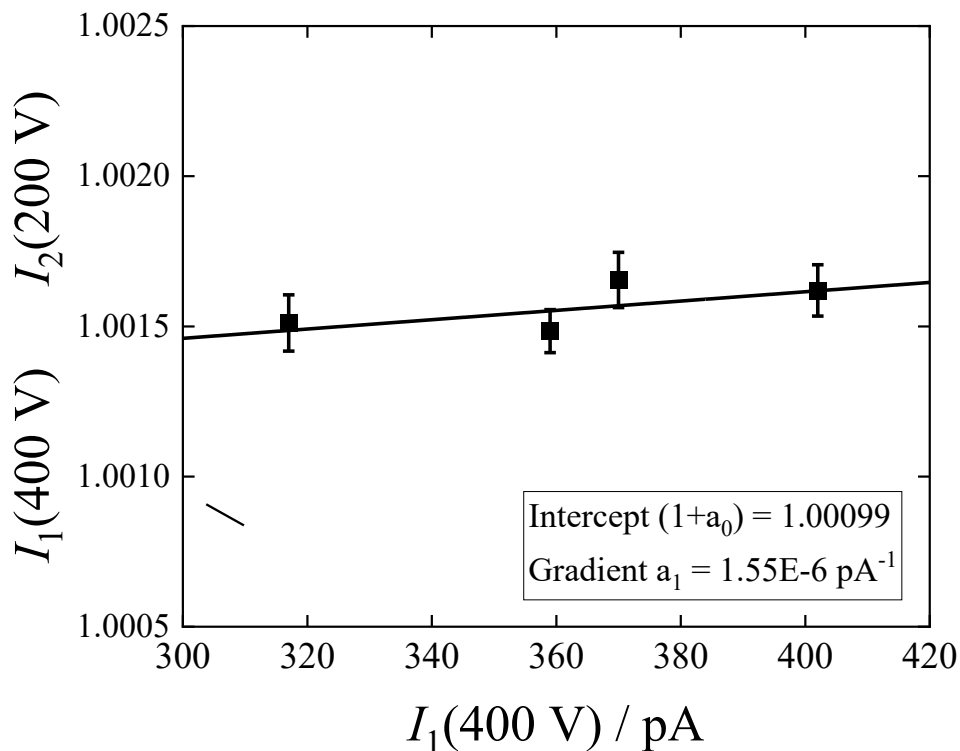


図 4.5 異なる線量率で得られた $I_1(400 \text{ V})$ の関数とした $I_1(400 \text{ V})/I_2(200 \text{ V})$ の測定結果および線形フィット。Niatal法を用いて得られた初期および一般再結合はそれぞれ0.01 および0.0002であった。そのため、イオン再結合補正は1.0012を得た。

切片 $(1 + a_0)$ から初期 ($k_{s,init}$) および一般再結合補正係数 ($k_{s,gen}$) はそれぞれ 0.010 および 0.0002 であった。したがって、イオン再結合補正 k_s は 1.0012 であり、相対標準不確かさは 0.05 % ($k=1$) であった。また、漏れ電流の影響は測定値に対して 0.001 % であった。電離電流測定により $I_{air} = 358.42 \text{ pA}$ が得られ、相対標準不確かさは 0.13 % ($k=1$) であった。測定結果と有感体積の空気質量を組み合わせると、空気質量あたりの電離電流は $I_{air}/m_{air} = 272.13 \text{ } \mu\text{A}/\text{kg}$ であり、相対標準不確かさは 0.15 % ($k=1$) であった。

4.2.3 EGS5 によるモンテカルロシミュレーションを用いた線量変換係数の算

出

空洞空気およびグラファイトコアへの線量の計算における統計的不確かさ (Type A) は、それぞれ 0.04 % および 0.01 % であった。Burns et al. (2014) は、“シミュレーションにおいて最も厳しい側面は、空洞空気への線量のロバストな計算である”と述べている [44]。Burns (2006) による以前の研究では、空洞空気への線量計算における不確かさは、電子輸送パラメータを慎重に選択することで 0.05 % 未満になる可能性があるとして結論付けている [55]。本研究において行われたモンテカルロシミュレーションの感度分析の結果より、グラファイトカロリメータおよびグラファイト壁空洞電離箱間のグラファイト密度における 0.7 % の相違は、計算結果に最大 0.07 % 与えることがわかった。これらの空洞空気への線量計算および密度影響の不確かさを合成し、非統計的 (Type B) 不確かさは 0.1 % とみなした。空洞空気およびグラファイトコアへの線量の計算組み合わせると線量変換係数は $(D_{\text{air}}/D_{\text{core}})_{\text{MC}} = 1.000$ であり、相対標準不確かさは 0.11 % であった。

4.2.4 空気の W 値の決定

表 4.2 に本研究で開発された絶対測定システムによって得られた W_{air} を示す。実験セットアップ間の再現性を評価するためにグラファイトカロリメータおよびグラファイト壁空洞電離箱を使用した一連の測定を 2 回繰り返した。表 4.2 の 1 行目および 2 行目に、異なる日に独立して決定された 2 つの W_{air} を示す。表 4.2 の 3 列目に示されている相対標準不確かさは Type A および Type B の不確かさを組み合わせたものであり、これらの不確かさの構成を表 4.3 に示す。各列の W_{air} における平均値が最終列に示されており、本研究で得られた空気の W 値は $W_{\text{air}} = 33.91 \text{ eV}$ であり、相対標準不確かさは $0.08 \text{ eV} (k=1)$ であった。

表 4.2 本研究において得られた W_{air}

Data set	W_{air}	Standard uncertainty ($k=1$)
1	33.90 eV	0.078 eV
2	33.92 eV	0.078 eV

Average	33.91 eV	0.08 eV
---------	----------	---------

表 4.3 絶対測定システムによって得られた W_{air} の相対標準不確かさ

Component	Type A / %	Type B / %
\dot{D}_{core}		
Difference in the heater output: P_{rad}	0.07	0.05
Heat defect		0.10
Mass of core	0.01	0.04
I_{air}/m_{air}		
Raw ionization current	0.01	0.05
Polarity effect		0.05
Ion recombination		0.05
Relative humidity		0.1
Mass of air		0.07
$(D_{cav}/D_{core})_{MC}$		
Energy deposition to interest regions	0.05	0.1
Combined relative standard uncertainty ($k = 1$)	0.23	

4.3 考察

図 4.6 に ^{60}Co γ 線で測定および再分析された先行研究の値との比較を示す[21-28]。先行研究の値およびその不確かさは ICRU Report 90 の表 5.6 に対応しており、グラフアイトの密度効果は ICRU Report 90 によって推奨されている粒子密度および平均励起エネルギーを用いて再計算されている[5]。Niatel (1985) #1 および#2 の値は、それぞれ第 2 章で述べた 2.2.1 カロリーメータおよび電離箱測定の比較と 2.2.2 放射能および照射線量率測定の比較から決定された W_{air} である[25]。また、Burns (2012) #1 および#2 は Ref.

[27]のデータセット 9 および 10 を使用して再分析された W_{air} である。さらに Burns et al. (2014) は ^{60}Co γ 線およびリニアックから 6 - 25 MV の光子線を用いて決定されている [28]。図中の本研究のデータとその不確かさは、表 4.2 の最終列に対応しており、エラ

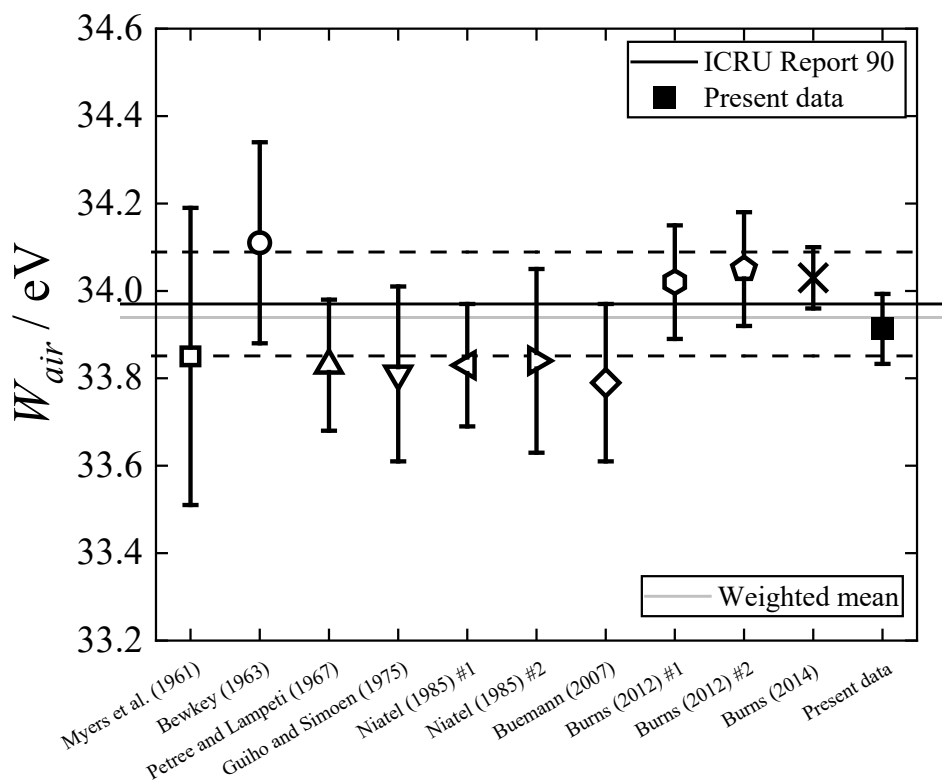


図 4.6 ^{60}Co γ 線で測定および再分析された先行研究との比較。エラーバーは相対標準不確かさ ($k=1$) を示す。オープンプロットは先行研究のデータであり、■は本研究での平均値である。黒い実線および破線は、ICRU Report 90 の推奨値およびその相対標準不確かさ ($k=1$) を示す。

エラーバーは相対標準不確かさを示している ($k=1$)。図 4.6 より本研究で開発した絶対測定システムを使用して得られた W_{air} は、先行研究における報告値と不確かさの範囲内で一致している。さらに本研究における値 W_{air} は、ICRU Report 90 の推奨値 (33.97 eV)[5]とよく一致した。

^{60}Co γ 線およびリニアックから 6 - 25 MV の光子線を用いて決定された Burns et al. (2014) の結果[28]との比較を表 4.4 に示す。彼らによって報告された W_{air} は本研究と同様の方法で決定され、その相対標準不確かさは 0.21%であった。これはこれまでに W_{air} を決定した研究の中で最も不確かさが小さい。本研究で得られた W_{air} の不確かさは

0.23%であり、Burns et al. (2014) の不確かさと同等である。したがって、我々のデータは先行研究において報告された ^{60}Co γ 線のデータに対して信頼できる W_{air} を提供する。本研究で得られたデータおよび先行研究におけるデータを全て使用して加重平均を算出した場合、33.94 eV が得られる。この値は ICRU Report 90 によって報告された ^{60}Co γ 線の加重平均の値 (33.95 eV) と一致する[5]。したがって、本研究の結果は ICRU Report 90 の推奨をサポートする。

表 4.4 Burns ら(2014)の報告値との比較

Data set	W_{air}	Standard uncertainty ($k = 1$)
Present work	33.90 eV	0.23%
Burns et al. (2014)	34.03 eV	0.21%

4.4 まとめ

本研究で開発した絶対測定システムを使用して得られた空気の W 値は、 $W_{\text{air}} = 33.91$ eV であり、相対標準不確かさは 0.08 eV ($k = 1$) であった。この値は ^{60}Co γ 線を用いて測定または再分析された先行研究の値と不確かさの範囲内で一致した。また、不確かさにおいても、 W_{air} を決定した研究で最も不確かさが低い調査である Burns et al.(2014) と同等であったことから、精度の高い W_{air} を得ることができた。したがって、本研究で開発された空気の W 値の絶対測定システムを使用すれば、本研究の最終目標である幅広いエネルギーでの W_{air} を決定することが可能であると考えられる。

第 5 章

総括

本研究では主に湿潤空気の W 値におけるエネルギー依存性および空気の W 値の絶対測定システムの開発を行った。湿潤空気の W 値におけるエネルギー依存性は、ファーマ型電離箱を用いて実測された湿度補正係数とモンテカルロシミュレーションによって算出された電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与を組み合わせることで評価を行った。一方、空気の W 値の絶対測定システムは、グラファイトカロリメータによる熱量測定とグラファイト壁空洞電離箱による電離電流測定を組み合わせることで開発した。本章では、これらの調査において得られた結果をまとめ、今後の展望について述べる。

5.1 湿潤空気の W 値におけるエネルギー依存性

本研究では、初めに高エネルギー光子線を用いてファーマ型電離箱の湿度補正係数を測定した。実測された湿度補正係数は、Rogers によるモンテカルロシミュレーションの結果[12]とよく一致した。そのため、Rogers による湿度補正係数の計算値は、高エネルギー光子線や電子線に対しても適用できることがわかった。続いて、実測された湿度補正係数とモンテカルロシミュレーションによって算出された電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与から高エネルギー光子線における湿潤空気の W 値の評価を行った。湿潤空気の W 値においても、Niatel によって測定された 50 kV X 線における湿潤空気の W 値[7]と非常によく一致した。湿潤空気の W 値においてはエネルギー依存性が確認されなかった。さらに本研究では、湿度補正係数を算出可能な半経験式の提案を行った。この式を用いることでファーマ型電離箱に対する湿度影響を簡易的に補正できる。

5.2 空気の W 値の絶対測定

本研究では、将来的に幅広いエネルギーでの W_{air} の決定を行っていくために、空気の W 値の絶対測定システムの開発を行った。このシステムの評価は、これまでに多くの測定が行われてきた ^{60}Co γ 線を使用して行われ、本システムによって得られた空気の W 値は $W_{\text{air}} = 33.91$ eVであり、相対標準不確かさは 0.08 eV ($k = 1$) であった。得られた W_{air} は、 ^{60}Co γ 線を用いて測定または再分析された先行研究の報告値[21-28]と不確かさの範囲内で一致し、さらに ICRU Report 90[5]の推奨値 (33.97 eV) とも不確かさの範囲内で一致した。これらの値との比較から、本研究において開発された絶対測定システムの妥当性が確認された。また本システムによって得られた W_{air} の不確かさは 0.23% であった。 W_{air} を決定した先行研究の中で最も不確かさが低い Burns et al. (2014)による不確かさ (0.21%) と同等の不確かさで W_{air} を決定することができた[28]。つまり、これは ^{60}Co γ 線における W_{air} を非常に精度高く決定することができたことを意味する。本研究で開発された空気の W 値の絶対測定システムを使用すれば、本研究の最終目標である幅広いエネルギーでの W_{air} を決定することが可能であると考えられる。

5.3 今後の展望

第 1 章で述べたように、これまでの W_{air} の測定は主に ^{60}Co γ 線を用いて行われており、他のエネルギー領域での測定がほとんど行われていない。また高エネルギー電子線ではエネルギー依存を示唆するデータが報告されているなど、 W_{air} のエネルギー依存の問題は解決されていない。さらに ICRU Report 90[5]の発行により W_{air} の不確かさが増加するなど、過去に測定された W_{air} の結果における不確かさが大きいことも問題の一つである。

今後の展望として、まずは高エネルギー電子線での W_{air} の決定を行う予定である。このエネルギー領域ではエネルギー依存を示唆する研究[29]が報告されているため、早急な調査が求められているのが現状である。もし W_{air} にエネルギー依存がある場合、上述したように線質変換係数の算出に影響を与え、これは放射線治療分野の水吸収線量フォーマリズム全体へ大きな影響を与えることになる。現在の水吸収線量フォーマリズムでは、 W_{air} のエネルギー依存はないと仮定して扱われているため、重要な調査であると考

える。

次に ^{137}Cs γ 線における W_{air} の決定を行う予定である。実際には ^{137}Cs γ 線を用いて測定はすでに行っている。しかし、産総研に設置されている ^{137}Cs γ 線発生装置の線源強度が弱いため、グラフアイトカロリメータを用いた熱量測定において放射線照射による温度上昇をうまく測定できなかった。そのため、金属カロリメータ代用することを考えている。このカロリメータは放射線照射による温度上昇をより感度高く測定可能であるため、線源強度が弱い ^{137}Cs γ 線発生装置でも W_{air} の決定が可能であると考ええる。 ^{137}Cs γ 線における W_{air} は、過去に Engleke and Hohlfeld (1971)[20]による研究の報告値しか存在せず、表 1.1 に示した値もこのデータを基に Thomson and Rogers (2010)によって再分析されたデータ[56]である。またこのデータは不確かさが 0.44 % と高く、精度の高いデータとは言えない。 ^{137}Cs γ 線のエネルギーは放射線防護のエネルギー範囲に相当するあるため、 ^{137}Cs γ 線における空気の W 値の決定は放射線診断領域において安全な放射線利用に貢献できると考える。

参考文献

- 1 赤羽恵一, 遠藤真広. 医療放射線防護学. 国際文献社. (2020).
- 2 UNSCEAR 2008 Report. Sources and effect of ionization radiation. (2008).
- 3 黒澤忠弘, 齋藤則生. 産総研における放射線線量標準の現状. 日本原子力学会誌 Vol. 58, No.4 (2016).
- 4 清水森人. 放射線量の国家計量標準について.
- 5 International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Key Data for Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards and Applications. ICRU Report No. 90. ICRU (2014).
- 6 日本医学物理学会 編. 外部放射線治療における水吸収線量の標準計測法 (標準計測表 12). 通商産業研究社. (2012).
- 7 Niatel MT. Etude experimentale de l'influence de la vapeur d'eau sur l'ionisation produite dans l'air. C R Acad Sci Paris. 268:1650.(1969).
- 8 Niatel MT. Influence de la vapeur d'eau sur l'ionisation de l'air dans le cas d'une chambre a cavite. C R Acad Sci Paris.281:361.(1975).
- 9 Guiho JP, Pavlicsek I, Ostrowsky A et al. Influence de l'etat hygromertique de l'air sur l'ionisation produite par les rayonnements X ou γ . C R Acad Sci Paris. 278:69. (1974).
- 10 Barnard GP, Aston GH, Marsh AR. The effect of variations in the ambient air on the calibration and use of ionization dosimeters. Phys Med Biol. 5:117-118. (1960).
- 11 ICRU (International Commission on Radiation Units). Average energy required to produce an ion pair, ICRU Report No. 31. ICRU (1979).
- 12 Rogers DWO, Ross CK. The role of humidity and other correction factors in the AAPM TG-21 dosimetry protocol. Med Phys.15, 40-48. (1987).
- 13 Combecher, D. Measurement of W values of low-energy electrons in several gases. Radiat. Res. 84, 189-218 (1980).
- 14 Waibel, E. and Grosswendt, B. Determination of W values and backscatter coefficients for slow electrons in air. Radiat. Res. 76, 241-249 (1978).

- 15 Büermann, L., Grosswendt, B., Kramer, H. M., Selbach, H. J., Gerlach, M., Hoffmann, M., and Krumrey, M. Measurement of the x-ray mass energy-absorption coefficient of air using 3 keV to 10 keV synchrotron radiation. *Phys. Med. Biol.* 51 (20), 5125-5150 (2006).
- 16 Buhr, H., Büermann, L., Gerlach, M., Krumrey, M., and Rabus, H. Measurement of the mass energyabsorption coefficient of air for x-rays in the range from 3 to 60 keV. *Phys. Med. Biol.* 57, 8231–8247 (2012).
- 17 Bay, Z., Mann, W. B., Seliger, H. H., and Wyckoff, H. O. Absolute measurement of W_{air} for sulfur-35 beta rays. *Radiat. Res.* 7, 558–569 (1957).
- 18 Gross, W., Wingate, C., and Failla, G.. Average energy lost by sulfur-35 beta rays per ion pair produced in air. *Radiat. Res.* 7, 570–580 (1957).
- 19 Jesse, W. P. Absolute energy to produce an ion pair in various gases by beta particles from S35. *Phys. Rev.* 109, 2002–2004 (1958).
- 20 Engelke, B. A., and Hohlfeld, K. A calorimeter as a standard device to measure absorbed doses and the determination of the mean energy absorbed to generate an ion-pair in air (translated from German),” *PTB Mitteilungen* 71, 336–342 (1971).
- 21 Myers, I. T. LeBlanc, W. H. Fleming, D. N., and Wyckoff, O. H. An Adiabatic Calorimeter for High Precision Source Standardization and Determination of W (air). Hanford Laboratory Report HW-SA-2165 (Hanford Atomic Products Operation, Richland, WA) (1961).
- 22 Bewley, D. K. The measurement of locally absorbed dose of megavoltage x rays by means of a carbon calorimeter. *Br. J. Radiol.* 36, 865-878 (1963).
- 23 Petree, B. and Lamperti, P. A comparison of absorbed dose determinations in graphite by cavity ionization measurements and by calorimetry. *J. Res. Natl Bur. Stand.* 71, 19-27 (1967).
- 24 Guiho, J. P and Simoen, J. P. Determination experimentale de l’energie moyenne necessaire a la production d’une paire d’ions dans l’air. *J. Appl. Radiat. Isot.* 26, 714-719 (1975).
- 25 Niatel, M. T., Perroche-Roux, A. M. and Boutillon, M. Two determinations of W for electrons in dry air. *Phys. Med. Biol.* 30, 67-75 (1985).
- 26 Büermann, L., Gargioni, E., Hilgers, G. and Krauss, A. Comparison of ionometric and calorimetric determination of absorbed dose to water for cobalt-60 gamma rays. in *Workshop on Absorbed Dose and Air Kerma Primary Standards (Laboratoire National de Metrologie et d’Essais, Paris)* (2007).
- 27 Burns, D. T. An analysis of existing data for W_{air} , I_c and the product W_{airsc} , air. *Metrologia* 49 (4), 507-512 (2012).
- 28 Burns, D. T., Picard, S., Kessler, C. and Roger, P. Use of the BIPM calorimetric and ionometric standards in megavoltage photon beams to determine W_{air} and I_c . *Phys. Med. Biol.* 59, 1353–1365. (2014).
- 29 Cojocar, C. D., and Ross, C. K. Extracting W_{air} from the 1976 electron beam measurements of Domen and Lamperti. *Med. Phys.* 39, 4645–4645 (2012).
- 30 Boutillon, M., and Perroche-Roux, A. M. Re-evaluation of the W value for electrons in dry air. *Phys. Med. Biol.* 32, 213–219. (1987).

- 31 産業技術総合研究所 計量標準総合センター. ICRU Report90 に対応した空気カーマ(率)標準への変更について.
- 32 International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Stopping Powers for Electrons and Positrons. ICRU Report No. 37. ICRU (1984).
- 33 Bethe, H. Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie. Ann. Phys. 397, 325–400 (1930).
- 34 Fano, U. Penetration of protons, alpha particles, and mesons. Ann. Rev. Nucl. Sci., 13, 1–66 (1963).
- 35 Mohr, P. J., Taylor, B. N., and Newell, D. B. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010,” J. Phys. Chem. Ref. Data 41, 043109-1–84 (2012).
- 36 Møller, C. Zur Theorie des Durchgangs schneller Elektronen durch Materie. Ann. Phys. 406, 531–585 (1932).
- 37 Bakker, C. J., and Segre¹, E. Stopping power and energy loss for ion pair production for 340-MeV protons,” Phys. Rev. 81, 489–492 (1951).
- 38 Bichsel, H., and Tschala²r, C. Range-difference measurements for protons in C, Al, sapphire, Si, quartz, Ge, and Ag,” Bull. Am. Phys. Soc. 10, 723 (1965).
- 39 Nordin, J. A., and Henkelman, R. M. Measurement of stopping power ratios for 60 MeV positive or negative pions,” Phys. Med. Biol. 24, 781–792. (1979).
- 40 Bichsel, H., and Hiraoka, T. Energy loss of 70 MeV protons in elements,” Nucl. Instrum. Meth. B66, 345–351 (1992).
- 41 Sakamoto, N., Ogawa, H., and Shiomi-Tsuda, N. Stopping powers of carbon for protons from 4 to 13 MeV,” Nucl. Instrum. Meth. B 115, 84–87 (1996).
- 42 Büermann, L., Gargioni, E., Hilgers, G. and Krauss, A. Comparison of ionometric and calorimetric determination of absorbed dose to water for cobalt-60 gamma rays. in Workshop on Absorbed Dose and Air Kerma Primary Standards (Laboratoire National de Metrologie et d’Essais, Paris) (2007).
- 43 Burns, D. T. An analysis of existing data for Wair, Ic and the product Wairsc, air. Metrologia 49 (4), 507-512 (2012).
- 44 Burns, D. T., Picard, S., Kessler, C. and Roger, P. Use of the BIPM calorimetric and ionometric standards in megavoltage photon beams to determine Wair and Ic. Phys. Med. Biol. 59, 1353–1365. (2014).
- 45 Poirier A, Douysset G. Influence of ambient humidity on the current delivered by air-vented ionization chambers revisited. Phys Med Biol.51:4995–5006. (2006)
- 46 Hirayama, H., Namito, Y., Bielajew, A. F., Wilderman, S. J. and Nelson, W. R. The EGS5 code system. SLACR-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005)
- 47 Shimizu, M. Morishita, Y. Kato, M. T, Kurosawa. T, Tanaka. N, Takata. and N, Saito. Calculation of the characteristics of clinical high-energy photon beams with EGS5-MPI. J. Phys: Conf. Ser. 489, 012023 (2014).
- 48 Tetens, O. Über einige meteorologische Begriffe. Z. Geophys.. 6. 297–309. (1930).

- 49 Morishita, Y., Kato, M., Takata, N., Kurosawa, T., Tanaka, T., and Saito, N. A standard for absorbed dose rate to water in a ^{60}Co field using a graphite calorimeter at the National Metrology Institute of Japan. *Radiat. Prot. Dos.* 154 (3), 331-339 (2013).
- 50 Domen, S. R. and Lamperti, P. J. A. A heat loss compensated calorimeter: theory, design, and performance. *J. Res. NBS A* 78, 595 (1974).
- 51 清水森人. 高エネルギー光子線標準場による電離箱線量計の校正について. 放射線治療品質管理講習会 (2015).
- 52 Picard, A., Davis R. S., Glaser, M. and Fujii, K. Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). *Metrologia* 45, 149-55 (2008).
- 53 Andreo, P. Burns, D. T. Nahum, A. E. Seuntjens, J. and Attix, F. H. *Fundamentals of Ionizing Radiation Dosimetry*. Wiley-VCH (2017) ISBN 978-3-527-40921-1
- 54 Kurosawa, T., Takata, N., Koyama, Y., and Kato, M. AIST monograph of metrology, No. 7. National Metrology Institute of Japan (2005).
- 55 Burns, D. T. A new approach to the determination of air-kerma using primary-standard cavity ionization chambers *Phys. Med. Biol.* 51 (4), 929-942 (2006).
- 56 Thomson, R. M., and Rogers, D. W. O. Re-evaluation of the product of W/air and the graphite to air stopping-power ratio for ^{60}Co air kerma standards, *Phys. Med. Biol.* 55, 3577-3595. (2010).

謝辞

本論文は駒澤大学大学院 医療健康科学研究科 診療放射線学専攻において、藤田幸男准教授のご指導のもと研究成果をまとめた物である。研究に際して、多くの方々のご助力を賜りましたことを末尾ながらここに御礼申し上げます。

指導教官である藤田幸男准教授には、前任の保科正夫教授から指導教官を快くお引き受けいただいたことに御礼申し上げます。研究ミーティングを通じて、有益なご指摘とご助言を頂きましたことに心より感謝の意を表します。また、佐藤昌憲教授には学部生時代から研究指導だけでなく、人として成長させていただきました。大学1年生のときに佐藤研究室の門を叩いて本当に良かったと心から思います。北海道から上京してきた未熟な私を温かく見守り、ここまで育てていただいたことに御礼申し上げます。

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 計量標準総合センターの清水森人主任研究員には、修士課程時代からおよそ6年にわたって研究指導を行って頂き、本研究全般から研究姿勢に至るまで様々なご指導を賜りましたことに御礼申し上げます。産総研での研究を通じて、放射線計測の研究が楽しいと感じられたのも清水主任研究員のおかげです。これからも放射線計測に関する研究を楽しんで行っていきたいと思います。また森下雄一郎主任研究員には、修士課程時代に熱心に論文執筆のご指導を賜りましたことに御礼申し上げます。Medical Physics への投稿する際、白熱した議論をしたのは今でも良い思い出です。

東京医科歯科大学病院 放射線治療科の吉村亮一教授には、博士課程進学の際にご指導とご助言を頂きましたことに御礼申し上げます。放射線部の大谷慎一技師長および笹森浩司副技師長には、働きながら大学院進学するにあたりご助力を頂きましたことに御礼申し上げます。また放射線部の皆様、特に放射線治療に関わる診療放射線技師の皆様

には、ご迷惑をおかけしたこともあったと思いますが、ご助力いただきありがとうございました。

最後に、9年間にわたる私の学生生活を支え、いつも応援してくれた父と母に深く感謝しております。また妻には博士課程入学当時から研究に集中できるように支えてくれたことに感謝いたします。将来、一人前の研究者、そして立派な大学教員になれるよう、感謝の気持ちを忘れずに日々精進したいと思います。ありがとうございました。

佐藤 優樹

研究業績

学術雑誌等に発表した論文

1. Y. Sato, M. Shimizu, Y. Morishita, M. Sato and M. Hoshina
“Experimental study of humidity effect on charge measurement of reference ionization chambers in clinical high-energy photon beams”,
Medical Physics Vol. 46, Issue 9, 4177-4183 (2019)
2. Y. Sato, M. Shimizu, M. Takeda, Y. Fujita, M. Kato, T. Kurosaw and M. Sato
“DEVELOPMENT OF ABSOLUTE MEASUREMENT SYSTEM FOR W_{AIR} IN ^{60}CO GAMMA RAYS”,
Radiation Protection Dosimetry, Vol.199, Issue 3, 262-269 (2022)

国内学会における発表

1. 佐藤 優樹, 齋藤 拓也, 清水 森人, 加藤 昌弘, 黒澤 忠弘, 佐藤 昌憲, 保科 正夫,
“Development of absolute measurement method of W values of air for electron beams”,
第 119 回日本医学物理学会学術大会, 2020 年 4 月, 横浜.
2. 佐藤優樹, 平山憲, 清水森人, 森下雄一郎, 佐藤昌憲, 保科正夫,
“Humidity Effect of a Free-air Type Ionization Chamber”
第 113 回日本医学物理学会学術大会, 2017 年 4 月, 横浜.

国際学会における発表

- 1 Y. Sato, M. Shimizu, Y. Morishita, M. Sato, M. Hoshina,
“Experimental Study of Humidity Effect on Charge Measurement of Reference Ionization
Chambers in Clinical High-Energy Photon Beams”,
AAPM2017 – AAPM 59 th Annual Meeting & Exhibition, Denver, Colorado, 30 July – 3
August, 2017.

受賞・表彰等

- 1 AAPM 2017 Annual Meeting CIRMS Ribbon Award, Yuuki Sato, July 30, 2017.

外部資金獲得等

1. 佐藤 優樹（代表）,
“軟 X 線および中硬 X 線領域の電子線に対する空気の W 値の絶対計測”,
日本学術振興会 科学研究費助成事業 研究活動スタート支援,
2019 年 4 月 – 2021 年 3 月.