ノート

論文受付
2015年6月16日

論文受理
2015年12月24日
Code No. 812

X線CT装置の半価層測定における 非接続形X線出力アナライザ専用鉛ケースの開発

赤石泰一¹ 武田浩光² 金澤仁幸¹ 吉井勇治¹ 浅沼 治²

¹ 札幌医科大学医学部教育研究機器センター

² 札幌医科大学附属病院放射線部

緒言

2004年、Gonzalezら¹⁾がX線診断の被ばくによってがんの発生する確率を推計した結果、日本は先進15カ国の中で最も高いと報告された。更に、2011年には東北地方太平洋沖地震に伴う福島第一原子力発電所事故が起こり、一般公衆の放射線被ばくに対する関心が高まっている²⁾。2015年6月には医療被ばく研究情報ネットワーク (Japan Network for Research and Information on Medical Exposures: J-RIME) から、日本としての診断参考レベル (diagnostic reference levels: DRL) が公表され、今後はより一層、医療被ばく管

理の重要性が増すと考えられる。

特に、computed tomography (CT) 検査による被ばく線量は、医療被ばくの中で占める割合が最も多く、わが国の国民1人あたりの年間被ばく線量が5.3 mSv/年であるのに対して、CT検査による年間被ばく線量は2.3 mSv/年であり、全体の43%を占めると報告されている³⁾。このため、CT検査における線量評価、被ばく管理を行うことが重要である。

CTの線量評価における指標としては、multiple scan average dose (MSAD[Gy])⁴⁾、CT dose index (CTDI[Gy])⁵⁾、dose length product (DLP[Gy·cm])⁶⁾、

Development of a Lead-covered Case for a Wireless X-ray Output Analyzer to Perform CT Half-value Layer Measurements

Hirokazu Akaishi,^{1*} Hiromitsu Takeda,² Yoshiyuki Kanazawa,¹ Yuji Yoshii,¹ and Osamu Asanuma²

¹ Biomedical Research, Education and Instrumentation Center, Sapporo Medical University

² Division of radiology and Nuclear Medicine, Sapporo Medical University Hospital

Received June 16, 2015; Revision accepted December 24, 2015

Code No. 812

Summary

Measurement of the half-value layer (HVL) is a difficult task in computed tomography (CT), because a nonrotating X-ray tube must be used. The purpose of this study is to develop a lead-covered case, which enables HVL measurements with a rotating CT X-ray tube. The lead-covered case was manufactured from acrylic and lead plates, which are 3 mm thick and have a slit. The slit-detector distance can be selected between 14 mm and 122 mm. HVL measurements were performed using a wireless X-ray output analyzer "Piranha." We used the following exposure conditions: tube voltages of 80, 100, and 120 kV; a tube current of 550 mA; and an exposure time of 1.0 s. The HVLs were measured by using the following two methods: (a) Nonrotating method—a conventional method that uses the nonrotating exposure mode. (b) Rotating method—a new method that uses the lead-covered case and the rotating exposure mode. As a result, when the slit-detector distance was 58 mm, the HVL values obtained by the nonrotating and rotating methods were 4.38 and 4.24 mmAl at 80 kV, 5.51 and 5.37 mmAl at 100 kV, 6.61 and 6.48 mmAl at 120 kV, respectively. A lead-covered case, which enables the measurement of the HVL in a rotating X-ray tube, was developed. The case is useful in measuring the HVLs at facilities that cannot fix the X-ray tube.

Key words: computed tomography (CT), half-value layer (HVL), lead-covered case, effective energy, semiconductor detector

* Proceeding author

size-specific dose estimates (SSDE[Gy])⁷⁾などが用いられる。しかし、これらの線量指標は空気カーマに基づいた値であり、実効線量や吸収線量を意味するものではない。人体における被ばく線量をより詳細に評価するうえでは、臓器、組織レベルにおける吸収線量を把握することが望ましい⁸⁾。そのためには、人体ファントム内に配置した線量計を用いて測定した照射線量に、組織の吸収線量変換係数を乗じる必要がある。この吸収線量変換係数は線質に応じて変化するため、実効エネルギー測定が必要不可欠となる⁹⁾。

一般撮影装置における実効エネルギー測定の方法としては、アルミニウム板または銅板を用いて減弱曲線を作成して得られた半価層から線減弱係数を求めて算出する方法が一般的である^{10, 11)}。しかし、この方法をCT装置に応用するためには、メーカー側の協力のもと、メンテナンスモードによってCT装置のX線管を固定しX線を照射(固定照射)する必要があるため、容易に測定することができなかった¹²⁾。

そこで、CT装置の実効エネルギー測定の簡便法として、X線管の固定を必要としないアルミリング法¹³⁾や鉛ケース法^{12, 14, 15)}、銅パイプ法¹⁶⁾、inner-metal center-air ratio法(IMCAR法)¹⁷⁾といった方法が報告されてきた。これらの方法はすべて、X線管が回転している状態でX線を照射(回転照射)し、実効エネルギーを測定することが可能であるが、電離箱線量計を用いた測定を対象としており、非接続形X線出力アナライザPiranha(RTI社製)を用いた測定には対応していなかった。このため、これまでPiranhaを用いてCT装置の半価層測定(CT半価層測定)を行う場合、メンテナンスモードによる固定照射が必要であった。電離箱線量計と比較した場合、Piranhaはアルミニウム板を用いて減弱曲線を作成する必要がなく、気圧や温度による影響が少なく、一回の照射で半価層測定が可能であり、無線でpersonal computer(PC)と接続したデータ転送が可能であるなど、優れた点が多い^{18, 19)}。もし、Piranhaを用いた回転照射によるCT半価層測定が可能となれば、CT装置の線質評価が簡易に効率よく実行することができる。

本研究では、Piranhaを用いた回転照射によるCT半価層測定を可能とするPiranha専用鉛ケースを開発したので報告する。

1. 方法

1-1 使用機器

本研究では、X線CT装置として東芝メディカルシステムズ社製 Aquilion CX(64列)を用い、線量計とし

Fig. 1 Design (a) and photograph (b) of the lead-covered case. The lead-covered case was manufactured from acrylic and lead plates, which are 3 mm thick and have a slit.

てRadcal社製の電離箱線量計(model20X6-3CT)およびRTI社製の非接続形X線出力アナライザPiranha(R&F/M657)を使用した。Piranhaはシリコン素材のPINフォトダイオードを用いた半導体線量計である。検出器の実効中心は表面下10mmにあり、3×21mmの実効面積内に3×3mmの半導体検出器が複数並び内部構造となっている^{18, 19)}。半導体検出器の表面には厚さの異なるフィルタが配置されており、それぞれのフィルタを通して減弱したX線を各検出器で検出し、それらの信号比から自動的に半価層が計算される仕組みとなっている¹⁹⁾。このため、1回の照射で半価層を測定することが可能である(Quick-HVL測定)。鉛ケースの材料は、鉛板として厚さ3mm、純度99.99%以上の純鉛板(ヨシザワLD社製)、アクリル板として厚さ3mmのメタクリル樹脂押出板コモグラス(クラレ社製)を使用した。

1-2 鉛ケースの作成

鉛ケースは、0時方向のみにスリットを開けたケースの内部に線量計を配置することによって、0時方向以外の各方向から照射されるX線を遮蔽できる構造となっている。鉛ケースの寸法はFig.1に示すとおりである。3mm厚のアクリル板を溶接して骨組みを作り、その外側に3mm厚の鉛板を接着することで鉛ケースを作成した。なお、本研究の予備実験として3mm厚の鉛板で360°全方向を遮蔽した鉛ケースを用いて回転照射を行った結果、Piranhaの検出限度以下までX線を低減可能であることを確認しており、3mm厚の鉛板は十分な遮蔽能力を有する。一般的な

Fig. 2 Photographs of the acrylic stand.
(a) Without Piranha
(b) With Piranha

Fig. 3 Arrangement (a) and photograph (b) of the nonrotating method. The size of the lead-covered case was 25×25×15 cm.

CT 半価層測定用の鉛ケース(電離箱線量計専用)¹²⁾の場合、鉛ケース内部に発泡スチロールを詰めることで鉛板を支持しているため、発泡スチロールによる X 線の減弱や散乱の影響が懸念されるが、本研究ではアクリル板の骨組みにより鉛板を支持することで鉛ケース内部の空洞化を実現したため、それらの影響が全くない設計となっている。また、鉛板は他の金属板と比べ柔らかいため一定の形状を保つことが難しく、歪みや位置ずれ等の変形が起こりやすい。当施設では、鉛板を回転式リードバイスによって平面状に整形したうえで、電動丸鋸で必要な寸法に切断し、アクリル骨組みの平面部分に接着することで、歪みや位置ずれを防止し、耐久性を確保している。スリットの寸法は Fig.1 のとおり 3×22 mm であり、Piranha の検出素子の実効面積を考慮し設定している。アクリル板および鉛板にスリットを加工する際は、卓上ボール盤と電動糸鋸盤を用いた。また、Piranha を設置する高さを調整するため、鉛ケース内部には、アクリルガイドを設置し、鉛ケースのスリット部分から Piranha の検出器実効中心までの距離(スリット検出器間距離)を 14, 36, 58, 80, 102, 122 mm の 6 段階で調節可能な設計とした。Piranha をセットするアクリルスタンドは、

Fig. 2 に示すように Piranha に位置ずれがないように設計した。

1-3 測定および評価方法

本研究では、X 線管を固定した状態で電離箱線量計を用いて半価層を測定する方法(固定照射法)と、X 線管が回転している状態で Piranha を用いて半価層を測定する方法(回転照射法)により半価層を測定し比較検討を行った。また、これらの方法で得られた半価層から質量減弱係数を算出し、質量減弱係数データベースおよびデータ検索ソフトウェア mu-4²⁰⁾に入力することで実効エネルギーを求めた。

管電圧は 80, 100, 120 kV とし、管電流は固定照射法では 200 mA、回転照射法では十分な線量を得るため 550 mA に設定した。また、照射時間は 1 秒、回転照射法ではノンヘリカルスキャンモードで回転速度を 1 s/rot. とした。ビーム幅は 32 mm、焦点サイズは L (1.6×1.4 mm)、ボウタイフィルタは S とした。

1-3-1 固定照射法

幾何学的配置は Fig. 3 に示すとおりで、ガントリ中心に電離箱線量計の実効中心が位置するように配置し、メンテナンスモードから X 線管を 0 時方向に固

Fig. 4 Arrangement (a) and photograph (b) of the rotating method.

定した状態で照射を行った。厚さ 3 mm の鉛板を電離箱線量計の周囲に配置し、0 時方向に開口幅 2 cm のスリットを開くことで、ガントリ内外からの散乱線を遮蔽した。また、アルミニウム板は JIS 合金番号 1105 (純度 99.5% 以上) のものを使用した。アルミニウム板の厚さを変化させながら、各厚さにおいて照射線量を 5 回ずつ測定し、それらの平均値を用いてアルミニウム減弱曲線を作成することにより半価層を得た。

1-3-2 回転照射法

幾何学的配置は Fig. 4 に示すとおりで、スリット検出器間距離を 6 段階調整しながら、それぞれのスリット検出器間距離において Piranha の実効中心がガントリ中心に位置するように寝台の高さを調整した。鉛ケースを用いて 0 時方向の X 線のみが Piranha の検出器部分に入射するように配置した状態で回転照射を行った。測定は Piranha の Quick-HVL 測定機能を使用して、各条件で 5 回半価層を求め、一番大きい値と一番小さい値を除いた三つの値の平均値を半価層の測定値とした。各スリット検出器間距離における半価層の測定値を固定照射法の測定値と比較することで、スリット検出器間距離が測定精度に及ぼす影響を検証した。

2. 結果

固定照射法における半価層と実効エネルギーの測定結果を Table 1 に、回転照射法における半価層と実効エネルギーの測定結果を Table 2 に示す。また、Table 3 に回転照射法で得た半価層および実効エネルギーの固定照射法に対する絶対誤差および相対誤差を示す。回転照射法で得た半価層および実効エネルギーの値は、固定照射法と比較して小さい値を示す傾向があった。また、スリット検出器間距離が短い場合、誤差が大きい結果となったが、距離を長くすることで固

Table 1 Results for half-value layers (HVLs) and the effective energy obtained from the nonrotating method

Tube voltage (kV)	HVL (mmAl)	Effective energy (keV)
80	4.38	39.5
100	5.51	44.3
120	6.61	48.6

Table 2 Results for half-value layers (HVLs) and the effective energy obtained from the rotating method

Tube voltage (kV)	Slit-detector distance (mm)	HVL (mmAl)	Effective energy (keV)
80	14	3.97	37.9
	36	4.21	38.9
	58	4.24	39.0
	80	4.24	39.0
	102	4.23	38.9
	122	4.22	38.9
100	14	4.96	42.0
	36	5.32	43.5
	58	5.37	43.7
	80	5.37	43.7
	102	5.39	43.8
	122	5.35	43.6
120	14	5.99	46.2
	36	6.36	47.7
	58	6.48	48.2
	80	6.54	48.4
	102	6.56	48.4
	122	6.61	48.6

定照射法に近い値が得られるようになり、58 mm 以上に設定した場合、半価層の誤差は 0.001~0.160 mmAl (0.01~3.65%)、実効エネルギーの誤差は 0.003~0.651 keV (0.01~1.55%) であった。

Table 3 The differences in HVLs and effective energy between the nonrotating and the rotating methods

Tube voltage (kV)	Slit-detector distance (mm)	HVLs difference (mmAl)	HVLs error (%)	Effective energy difference (keV)	Effective energy error (%)
80	14	0.407	9.28	1.583	4.01
	36	0.167	3.81	0.638	1.62
	58	0.137	3.12	0.522	1.32
	80	0.137	3.12	0.522	1.32
	102	0.150	3.42	0.574	1.45
	122	0.160	3.65	0.612	1.55
100	14	0.547	9.92	2.314	5.22
	36	0.187	3.39	0.777	1.75
	58	0.140	2.54	0.581	1.31
	80	0.140	2.54	0.581	1.31
	102	0.123	2.24	0.512	1.16
	122	0.157	2.84	0.651	1.47
120	14	0.624	9.44	2.414	4.96
	36	0.254	3.84	0.969	1.99
	58	0.127	1.93	0.484	0.99
	80	0.068	1.02	0.257	0.53
	102	0.051	0.77	0.192	0.39
	122	0.001	0.01	0.003	0.01

3. 考 察

本研究ではCT装置の半価層および実効エネルギー測定において、Piranhaと鉛ケースを用いた回転照射法の測定値を固定照射法と比較し、精度の検証を行った。

80, 100, 120 kVのいずれの管電圧においても、回転照射法で得られた半価層および実効エネルギーが固定照射法と比較して小さい値となる傾向があった。これは、X線管からの直接X線だけでなく、鉛ケースのスリット部分から発生した散乱線がPiranhaの検出器部分に入射し、低エネルギー成分が増加したためと考えられる。特に、スリット検出器間距離が最も短い14 mmの場合、半価層の相対誤差は最大9.9%、実効エネルギーの相対誤差は最大5.2%となり、差異が大きい結果となった。しかし、スリット検出器間距離を増加させることで精度が改善され、スリット検出器間距離を58 mm以上に設定した場合、実効エネルギーの相対誤差は80, 100 kVにおいて2%未満、120 kVにおいて1%未満となり、固定照射法と同等な値を得ることができた。この要因としては、スリット検出器間距離を離すことによって、スリット部分から発生した散乱線の、検出器部分まで到達する量が減少したことが考えられる。更に、スリット検出器間距離を58 mmより大きい値に設定すると、120 kVにおいては徐々に精度が改善したが、80, 100 kVにおいては大きな変化はなく改善が認められなかった。よって、120 kV

においてはスリット検出器間距離58 mmの時点で実効エネルギーの相対誤差が1%未満と十分な精度で測定することができていることと、80, 100 kVにおいては58 mm以降でスリット検出器間距離の増加に伴う精度の改善が認められなかったことから、必要最小限のスリット検出器間距離は58 mmであると考えられる。

また、電離箱線量計における鉛ケースを用いた回転照射法と固定照射法の実効エネルギーの誤差については、松原ら¹⁴⁾の報告では0.1~0.3 keV(0.2~0.7%)、近藤ら¹⁵⁾の報告では0.0~0.6 keV(0.0~1.1%)とされている。本研究ではスリット検出器間距離58 mmに設定することでPiranhaを用いた回転照射法と固定照射法の実効エネルギーの誤差は0.5~0.6 keV(1.0~1.3%)となり、電離箱線量計における先行研究と同等な結果が得られた。これらのことから、本研究で自作した、スリットサイズが3×22 mmのPiranha専用鉛ケースを用いて適切な遮蔽を行うことによって、Piranhaにおいても回転照射法を用いた半価層および実効エネルギーの測定が可能であると考えられる。

一般的なCT半価層測定用の鉛ケース(電離箱線量計専用)¹²⁾を実際に作成した場合、重量は6~7 kg程度となる。実験時の作業負担を軽減し利便性を保つためには少しでも軽いことが望ましい。また、強度の面でも鉛板の面積が増加すると、厚さ3 mmの亚克力板で作成した骨組みにかかる負担が増加し、耐久性が

Fig. 5 Photograph of the lead-covered case which is optimized for sale.

低下する可能性がある。これらの観点から、鉛ケースのコンパクト化は重要であり、スリット検出器間距離を必要最小限の 58 mm に最適化したコンパクトな鉛ケースを作成することで、利便性、耐久性の向上、および材料費の低減が可能と考える。実際にスリット検出器間距離を 58 mm に最適化した鉛ケース (Fig. 5) を作成したところ、重量は 2.6 kg となり電離箱線量計用鉛ケースの 6~7 kg と比較して半分以下の重量に抑えることができた。

鉛ケースの材料として用いた厚さ 3 mm の鉛板は、加工が容易であり丸鋸や糸鋸などの工作用設備を所有していれば鉛ケースを自作することができる。工作用設備が整っておらず、自作することが困難な場合は、当施設で製造した製品版鉛ケース (Fig. 5) をアクロバイオ社から購入することも可能である。この製品版鉛ケースは、本研究の成果をアクロバイオ社に提供したものであり、スリット検出器間距離についても本研究で最適と判断した 58 mm に設定して製品化している。よって、Piranha を所有している施設においては鉛ケースを自作もしくは購入することで、メンテナンスモードを必要としない回転照射法による CT 半価層測定が可能となった。

電離箱線量計を用いた鉛ケース法^{12, 14, 15)}の場合、アルミニウム減弱曲線を作成するため、アルミニウム板の厚さを変化させ、その度に複数回の照射が必要となり、CT 装置の X 線管にかかる負荷は多くなる。本研究の Piranha と鉛ケースを用いた回転照射法では、Piranha の Quick-HVL 測定機能を利用することで、1 回の照射で半価層を測定することが可能であり、X 線管負荷の低減につながると考えられる。しかし、

Piranha の Quick-HVL 測定機能を利用する場合、Piranha の有効感度領域すべてに X 線を入射させる必要があるため、ビーム幅の設定に注意する必要がある。また、数秒間に複数回 X 線が入射した場合、間欠照射により Piranha が誤作動を起こす可能性があるため、X 線管の回転数を 1 回転に設定し、Piranha への X 線の入射を 1 回に制限する必要がある。

本研究では、管電圧を 80, 100, 120 kV に限定しており、135 kV や 140 kV といった高管電圧における検証は行っていない。これは、当施設で所有している Piranha が初期型のものであり、Quick-HVL 測定機能で精度が保証されている管電圧の範囲が 60~120 kV となっているためである。しかし、近年新たに発売された Piranha の後継機 Black Piranha においては、Quick-HVL 測定機能の精度保証される管電圧範囲が 45~160 kV と広範囲になっているため、高管電圧における半価層測定が可能である。本研究結果より、120 kV においてスリット検出器間距離が長くなるにつれて精度の改善が認められたことから、120 kV より高い管電圧においては最適なスリット検出器間距離が 58 mm より大きくなる可能性があるため、今後、Black Piranha を使用する機会があれば、135 kV や 140 kV といった高管電圧における検証も行っていきたい。

4. 結 語

本研究では Piranha を用いた回転照射による CT 半価層測定を実現するため、Piranha 専用鉛ケースを作成し、スリット検出器間距離を変化させて精度の検証を行った。スリット検出器間距離を 58 mm 以上に設定することで、固定照射法と同等の精度で測定可能であることが明らかになった。これによって、メーカー協力のもとメンテナンスモードから X 線管を固定する必要がなくなり、Piranha を所有する施設においては、CT 半価層測定を行うことが容易となった。今後、この手法が普及し、CT 装置における線質評価の一助となることを期待する。

謝 辞

本研究は、北海道支部の平成 26 年度放射線技術研究の助成を受けて行われました。ここに厚くお礼申し上げます。

なお、本研究の要旨は、第 42 回日本放射線技術学会秋季学術大会 (2014 年 10 月、札幌) にて発表した。

参考文献

- 1) Gonzalez AB, Darby S. Risk of cancer from diagnostic X-rays: estimates for the UK and 14 other countries. *Lancet* 2004; 363 (9406): 345-351.
- 2) 岡崎龍史, 大津山彰, 阿部利明, 他. 福島県内外の一般市民および医師の福島第一原子力発電所事故後の放射線被曝に対する意識調査. *産業医科大学雑誌* 2012; 34(1): 91-105.
- 3) 赤羽恵一. 医療被ばくの現状. *Innervision* 2010; 25(6): 46-49.
- 4) IAEA. International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. Vienna, IAEA SAFETY SERIES No115, 1996.
- 5) ICRP publication87. Managing patient dose in computed tomography. *Annals of the ICRP*, 2000.
- 6) Huda W, Ogden KM, Khorasani MR. Converting dose-length product to effective dose at CT. *Radiology* 2008; 248(3): 995-1003.
- 7) AAPM Report No. 204. Size-specific dose estimates (SSDE) in Pediatric and adult body CT examinations, 2011.
- 8) 松原孝祐, 越田吉郎, 鈴木正行, 他. X線CT装置間での線量プロファイルおよび患者被ばく線量の比較評価. *日放技学誌* 2005; 61(5): 683-690.
- 9) 橘 昌幸, 泉 隆. X線スペクトルによる吸収線量変換係数: 半価層による方法との比較. *日放技学誌* 2002; 58 (3): 383-389.
- 10) 小山修司. 診断領域X線の線量測定 of キーポイント. *日放技学誌* 2000; 56(7): 909-918.
- 11) 大釜 昇. 診断領域X線の実効エネルギー測定. *日放技学誌* 2001; 57(5): 550-556.
- 12) 日本放射線技術学会計測分科会編. 医療被ばく測定テキスト. 放射線医療技術学叢書(25). 日本放射線技術学会, 京都, 2012: 55-72.
- 13) Kruger RL, McCollough CH, Zink FE. Measurement of half-value layer in x-ray CT: a comparison of two noninvasive techniques. *Med Phys* 2000; 27(8): 1915-1919.
- 14) Matsubara K, Ichikawa K, Murasaki Y, et al. Accuracy of measuring half- and quarter-value layers and appropriate aperture width of a convenient method using a lead-covered case in X-ray computed tomography. *J Appl Clin Med Phys* 2014; 15(1): 4602.
- 15) 近藤博仁, 松原孝祐, 廣澤文香, 他. X線CT装置における簡便化された各種実効エネルギー評価法の比較. *日放技学誌* 2014; 70(5): 453-460.
- 16) 飯田泰治, 能登公也, 三井 渉, 他. 銅製パイプ型吸収体を用いた新しい実効エネルギー測定法. *日放技学誌* 2011; 67(9): 1183-1191.
- 17) 長島宏幸, 須永眞一, 見留豊久, 他. X線CT装置の線量評価に不可欠な実効エネルギーの新たな測定および算出法の検討. *日放技学誌* 2005; 61(3): 385-391.
- 18) 猪岡由行, 有賀英司, 西尾直美, 他. 非接続形X線出力アナライザの精度評価. *日放技学誌* 2013; 69(10): 1153-1160.
- 19) 古畑 優. 無線式アナライザー Piranha について: 半導体検出器の構造と原理ならびに Piranha の特徴. *日本診療放射線技師会誌* 2014; 61(8): 933-935.
- 20) 加藤秀起. 光子の物質に対する質量エネルギー転移係数. *日放技学誌* 2014; 70(7), 684-691.

問合せ先

〒060-8556 札幌市中央区南1条西17丁目
札幌医科大学教育研究機器センターラジオアイソトープ部門 赤石泰一