

診断用X線装置におけるコンプトン散乱X線スペクトルを用いた 実効エネルギーの評価

村中 明, 成廣 直正, 林 明子,
天野 貴司, 荒尾 信一, 福見 敦

Evaluation of Effective Energy Using Compton-Scattering Measurement of Diagnostic X-ray Spectrum

Akira MURANAKA, Naomasa NARIHIRO, Akiko HAYASHI,
Takashi AMANO, Shinichi ARAO and Atsusi HUKUMI

キーワード：90度散乱X線スペクトル, CdTe, 診断用X線, Al 半価層, 実効エネルギー

概 要

90度コンプトン散乱X線スペクトルを用いて, 診断用X線装置から発生するX線の実効エネルギーを評価し, その精度を従来の評価方法と比較した。90度散乱線から一次X線スペクトルに逆算すると, 直接線と比較し, エネルギー分解能は若干劣るもののほぼ形状は一致した。さらに照射線量スペクトルに変換し, 不規則な散乱線やノイズをカットするために17keV以上の部分についてAlによる減弱を計算し, 半価層と実効エネルギーを算出した。透視条件において90度散乱線から算出した値は, 直接線の値と比較し実効エネルギーで1～2%小さくなったが, ほぼ近い値が得られた。撮影条件では, 測定条件を調整し計数率を1500cps以下にすると, 90度散乱線から算出した実効エネルギーはAl吸収板を用いた実測値と1%程度の誤差で一致した。これらの結果から, この評価方法は種々の診断用X線装置に応用できる簡便で有用な方法であると考えられた。

1. 緒 言

診断用X線発生装置から放出されるX線の線質を知ることが, 画質評価や被ばく線量算出のために欠くことができない。X線発生装置から放出されるX線は複雑なエネルギースペクトルを持っており, 診断領域のX線の線質を表わすには実効エネルギーを用いることが一般的である。実効エネルギーを求めるには, 付加フィルタによる照射線量減弱曲線を測定し第1半価層を求め, その値から算出する。減弱曲線の測定方法には, アルミニウム (Al) フィルタ付加による減弱曲線実測法 (以下, Al フィルタ法という) とX線スペクトルを用いた減弱曲線計算法がある^{1,2)}。

Al フィルタ法では, X線発生装置出力の再現性, 照射線量計のエネルギー依存性, 使用するAl フィルタ

の純度, 等が測定精度に影響する。一方, スペクトルからの計算法は, 正確なX線スペクトルが1回測定できれば, Alの質量減弱係数データを用いて照射線量の減弱を計算することによって, 比較的簡単に実効エネルギーを算出することができる。しかし, 診療に使用されている条件では線量率が高過ぎるため, X線管から発生する正確な一次X線スペクトルを直接測定することが困難なことが多い^{3,4)}。

近年, 散乱体を用いて90度方向に散乱させたX線を測定し, 散乱X線スペクトルから計算によって一次X線へ逆算するコンプトン散乱法が開発され, 一次X線スペクトルの比較的簡単な測定法として, 種々の診断用X線装置における有用性が報告⁵⁻⁷⁾されている。今回我々は, 90度散乱X線スペクトルを用いて実効エネルギーの評価を試み, 従来の方法と比較した。また, スペクトル測定条件や算出条件の実効エネルギーに及ぼす影響を検討した。

(平成23年10月19日受理)

川崎医療短期大学 放射線技術科

Department of Radiological Technology, Kawasaki College of Allied Health Professions

2. 研究方法

X線照射には、東芝製のX線発生装置（KXO-1000, L2）とX線管（DRX-290 HD）を使用した。X線スペクトル測定は、CdTe半導体検出器（結晶の大きさ：縦3mm×横3mm×厚さ1mm）と1024チャンネル波高分析器（0.2keV/channel）を用いたRAMTEC 413型X線スペクトルアナライザ（東洋メディック社製）で行った。90度散乱X線の測定には炭素の専用散乱体を使用した。炭素散乱体は、直径2cm、高さ2cmの円柱を斜め45°に切断した形状で、散乱体とコリメータおよび検出器を正確に配置できるように炭素繊維容器で固定されている。散乱体中心から検出器までの距離は12cmである。Stripping法によるスペクトルのレスポンス補正、90度散乱X線から一次X線スペクトルへの逆算、光子数スペクトルから照射線量スペクトルへの変換は、専用のスペクトル補正ソフト（東洋メディック社製：Version 2.0）で行った。

図1にX線装置における一次X線スペクトルの直接測定（以下、直接線スペクトルという）と90度散乱X線スペクトルの測定配置を示す。

透視条件では管電圧を100kV、管電流0.5mA一定とした。直接線測定ではX線管焦点—検出器間距離は200cmで、コリメータは孔径0.1（検出器側）と0.2mm（X線管球側）（コリメータ間距離は3.6cmで固定）を用いた。

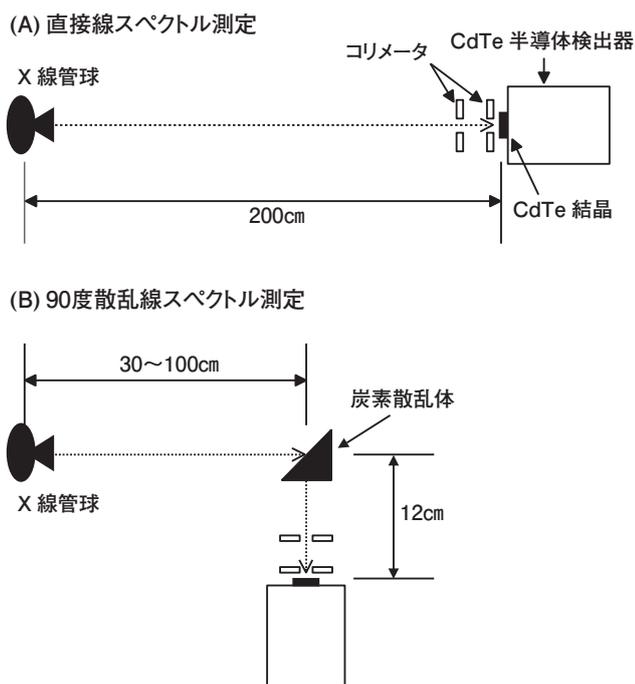


図1 X線スペクトル測定の配置

90度散乱線測定ではX線管焦点—散乱体間距離は30～100cm、コリメータは孔径1.6mmを2枚用いた。照射時間は300秒で、収集全計数は直接線で 3×10^5 、90度散乱X線で 3×10^4 カウント程度を目安とした。また、X線管球照射口にAl 1.5mmまたはAl 1.5mm + Cu 0.2mmのフィルタを付加し、X線スペクトルを変化させたときの実効エネルギーも評価した。

撮影条件では管電圧を100kV、管電流50～100mAとし、90度散乱線測定におけるX線管—散乱体間距離は30～100cm、コリメータは孔径0.8mmを2枚または1.6mmを2枚用い、照射時間0.2秒で繰り返し照射した。また、Al吸収板（純度99%）とRAMTEC 1500B型診断用線量計およびDC-300型3cc指頭型チェンバ（東洋メディック社製）を用いて、Alフィルタ法による半価層の実測を行った。X線管球焦点と指頭型チェンバの距離を100cmとし、Al吸収板はその中間に配置した。照射口にはT11039型モニタ線量計（PTW社製）を配置し、X線装置出力の変動を補正した。

図2にX線スペクトル測定から実効エネルギーを算出する手順を示す。はじめに、測定した直接線および90度散乱線スペクトルをStripping法により補正し、90度散乱線については逆算して一次X線スペクトルを求める。つぎに、その光子数スペクトル（エネルギーごとの光子フルエンスの相対値）を空気の質量エネルギー吸収係数を用いて照射線量スペクトルに変換する。そして、Alフィルタを付加したときの光子エネルギーごとの照射線量の減弱を計算する。フィルタ厚を変数として繰り返し計算し、フィルタを付加していな

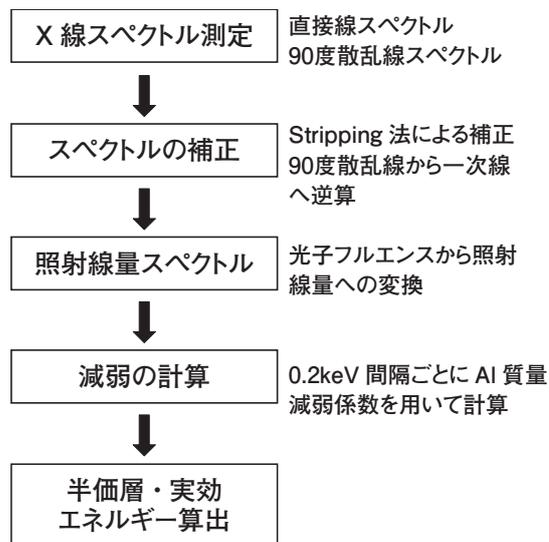
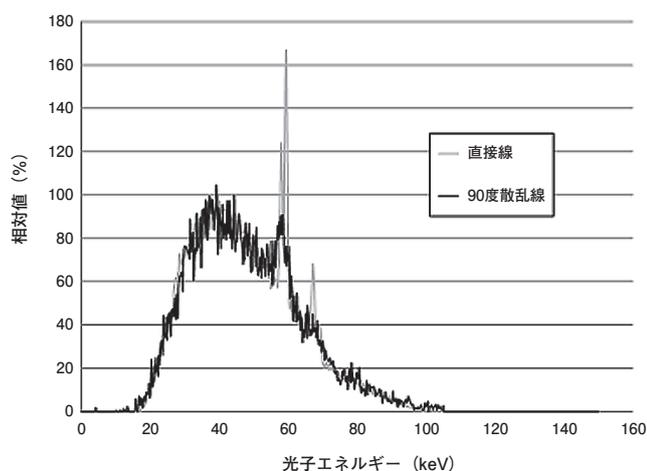


図2 実効エネルギー算出の手順

(A) 光子数スペクトル



(B) 照射線量スペクトル

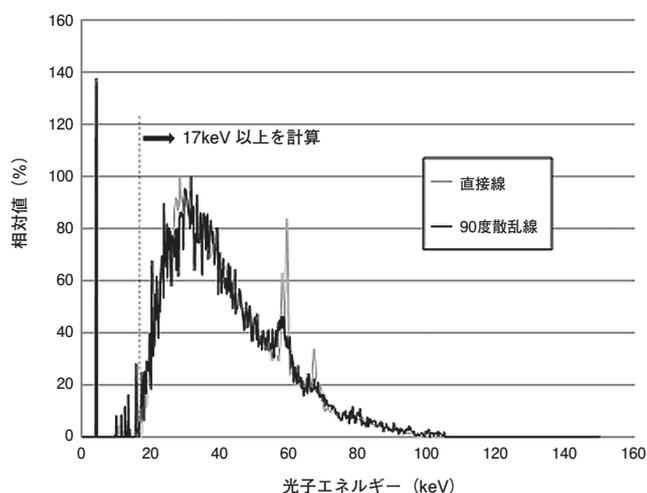


図3 直接線と90度散乱線から逆算した一次X線スペクトルの比較

い最初の照射線量を半分にする Al の第 1 半価層を求める。さらに、その半価層から実効エネルギーを算出した。照射線量の減弱の計算に用いた Al 質量減弱係数は、Al 光子減弱係数データ⁸⁾を基に、5 ~ 150keV の範囲について 0.2keV 間隔の値を対数補間法で算出した。

3. 結 果

図 3 に、直接線と 90 度散乱線から逆算した一次 X 線スペクトルの比較を示した。(A) は光子数スペクトルで、90 度散乱線スペクトルでは直接線に比べて計数率が約 1/10 で総計数も約 1/10 のため統計的変動が大きくなった。また、特性 X 線ピークが広がりエネルギー分解能の低下がみられたが、全体的なスペクトルの形状は一致した。(B) は(A) を照射線量スペクトルに変換したものであるが、変換のために使用する空気

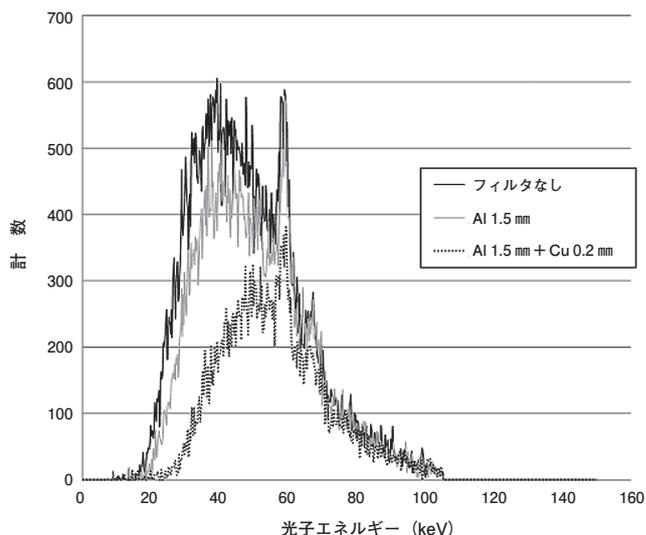


図4 フィルタ付加によるX線スペクトルの変化

表1 透視条件における直接線と90度散乱線X線スペクトルから算出した実効エネルギーの比較

(管電圧：100kV, 管電流：0.5mA, 照射時間：300sec)

測定条件	直 接 線		90度散乱線 ^{a)}	
	Al 半価層 (mm)	実効エネルギー (keV)	Al 半価層 (mm)	実効エネルギー (keV)
フィルタなし	平均値：3.737 (データ数：7, 変動係数：0.69%)	37.0	平均値：3.670 (-1.8%) ^{b)}	36.7 (-0.8%)
フィルタあり				
Al 1.5mm	4.515	40.0	4.386 (-2.9%)	39.5 (-1.2%)
Al 1.5mm + Cu 0.2mm	6.631	48.7	6.345 (-3.7%)	47.8 (-1.8%)

a) X線管焦点-散乱体間距離：50cm

b) () 内の数値は直接線の値に対する比率

エネルギー吸収係数が低エネルギー光子ほど大きくなるために、低エネルギー側の散乱線やノイズが大きく強調された。この領域は測定ごとに一定にならず不安定であり、照射線量の減弱にも大きく影響した。したがって、半価層を求める場合にはこの領域をカットし、17keV 以上の照射線量について減弱の計算を行った。

図 4 に X 線管照射口にフィルタを付加した場合の 90 度散乱から逆算した一次 X 線スペクトルの変化を示した。フィルタがない場合に比べて、フィルタを付加した場合には低エネルギー成分の吸収が大きく、スペクトル全体のエネルギーは高エネルギー側にシフトした。

表 1 に透視条件における直接線と 90 度散乱線スペクトルから算出した Al 半価層および実効エネルギーの比較を示した。X 線管からの出力は同一条件にして両者の比較を行った。フィルタなしの条件では、90 度散

表2 算出実効エネルギーに及ぼすX線管焦点—散乱体間距離の影響

X線管焦点—散乱体間距離 (cm)	計数率 (cps)	90度散乱線	
		Al半価層 (mm)	実効エネルギー (keV)
30	323	3.558 (-4.8%) ^{a)}	36.2 (-2.2%)
50	118	3.676 (-1.6%)	36.7 (-0.8%)
100	29	3.726 (-0.3%)	36.9 (-0.3%)

a) () 内の数値は表1の直接線から算出した値に対する比率

表3 撮影条件における90度散乱X線スペクトルを用いた実効エネルギー算出

(管電圧: 100kV, 照射時間: 0.2 sec/1回, X線管焦点—散乱体間距離: 50cm)

条件	管電流 (mA)	コリメータ孔径 (mm)	計数率 (cps)	Al半価層 (mm)	実効エネルギー (keV)
A	150	1.6	30185	4.668 (+26.0%) ^{b)}	40.8 (+11.1%)
B	50	1.6	14270	4.063 (+9.6%)	38.2 (+4.1%)
C	100	0.8	1460	3.773 (+1.8%)	37.1 (+1.1%)
実測値 ^{a)}	100	—	—	3.706	36.7

a) 実測値: Alフィルタを用いて, 照射線量の減弱から実測した値

b) () 内の数値は実測値に対する比率

乱線から算出した値は, 直接線の値と比較し半価層では約2%, 実効エネルギーでは約1%小さくなったが, ほぼ近い値が得られた。5~7回繰り返し測定誤差は, Al半価層について直接線と90度散乱線の両者において変動係数1%未満であり, 安定した値が得られた。フィルタを付加してスペクトルを変化させた条件では, Al 1.5mmまたはAl 1.5mm + Cu 0.2mmの両者のフィルタにおいても, 90度散乱線から算出した値の直接線の値に対する誤差は若干拡大したものの, 半価層で-3~-4%, 実効エネルギーで-1~-2%になった。

表2に90度散乱X線スペクトルから算出したAl半価層および実効エネルギーにおよぼすX線管焦点—散乱体間距離の影響を検討した結果を示した。距離を大きくするほど, 算出したAl半価層および実効エネルギーは表1の直接線から算出した値に近づいた。一方, 計数率はほぼ距離の2乗に反比例して減少し, 100cmの距離では測定に必要な計数を収集するのに長時間を要した。

表3に, 撮影条件において90度散乱X線スペクトルからAl半価層および実効エネルギーを算出し, Alフィルタ法による実測値と比較した結果を示した。また, 図5に計数率によるX線スペクトル(照射線量)の変

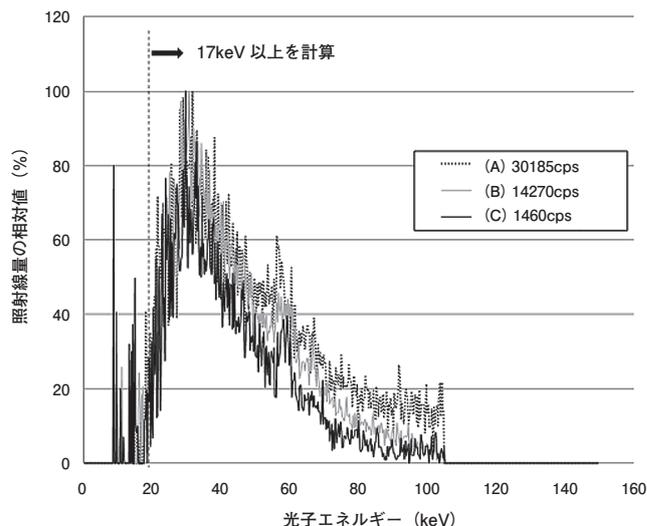


図5 計数率によるX線スペクトルの変化

化を示した。透視条件と同様に, 低エネルギー部分に不規則な散乱線とノイズの成分が見られるため, 照射線量の減弱の計算には17keV以上を用いた。管電流が大きく計数率が高い(A)や(B)の条件では, X線スペクトルは最大エネルギー付近になっても計数が低下せず, 見掛け上高エネルギー成分が増加した。算出した半価層および実効エネルギーも実測した値に比べて高くなり, 高計数率の条件ほど高値を示した。使用コリメータの孔径を小さくし計数率を1500cps程度に低下させた(C)の条件では, X線スペクトル形状は透視条件のスペクトルとほぼ同じになり, スペクトルから算出した値も実測値と比べて, 半価層で+2%, 実効エネルギーで+1%程度に近づいた。

4. 考 察

診断用領域X線の実効エネルギー測定において, 従来から広く用いられているAlフィルタ法による実測では, 使用する照射線量計のエネルギー依存性, Alフィルタの純度, X線発生装置の出力の変動等によって数%程度の誤差があることが知られている^{1,2)}。一方, 一次X線スペクトルからの計算法の精度は, 検出器レスポンス補正の正確さ, X線ビームのコリメーション, 減弱計算に用いるデータ等に影響される。高純度Ge半導体検出器を使用し, 測定したスペクトルから計算した実効エネルギーの値とAlフィルタ法による実測値を比較すると, 最大誤差2%以内で一致すると報告⁹⁾されている。今回我々が使用したCdTe半導体検出器を使用した同一測定装置の場合でも, スペクトル

からの計算値と実測値を比較すると、半価層で5%程度の誤差であると報告¹⁰⁾されている。実効エネルギーに換算すると約2~3%の誤差になると推定され、高純度Geの場合とほぼ一致する。

今回我々が行った90度散乱X線スペクトルからの実効エネルギーの評価では、低エネルギー部分に見られた不規則な散乱線やノイズが精度に大きく影響した。光子数スペクトルではほとんど目立たない程度の小さな計数であるが、照射線量に変換すると大きく強調され、この部分を減弱計算に含めるか否かによって半価層と実効エネルギーの計算値が大きく変化した。この成分はX線発生装置の多重絞リ、コリメータ、検出器しゃへい体等からの散乱線の影響やスペクトル補正の不備等が原因として考えられる。今回の評価ではこの部分を全てカットし、17keV以上の成分を計算に用いることによって、繰り返し誤差の少ない安定した値と、直接線や実測値から得た値に近い値を得ることができた。

透視の条件で、90度散乱線スペクトルからの算出実効エネルギーに及ぼすX線管焦点-散乱体間距離の影響を検討すると、距離が大きくなると直接線の値に近づき、距離が小さくなると誤差が大きくなる傾向が見られた。これは、距離が小さいと90度散乱線以外の様々な散乱線が入射しやすくなるためと考えられる。一方、計数率はおよそ距離の2乗に反比例して減少するため、実際のスペクトル測定では計数率に配慮しながらX線管焦点-散乱体間距離を決める必要がある。

撮影条件では管電流が大きく、計数率が高い場合には検出器出力のパイルアップが問題になる。出力のパイルアップが起こるとスペクトルは高エネルギー成分が増加し、半価層や実効エネルギーが大きな値を示すことになる。今回の測定では計数率が1500cps程度の条件のとき、スペクトルにパイルアップの影響は見られず、算出した実効エネルギーもAlフィルタ法によって実測した値に近づいた。

これらのことから、正確な実効エネルギー評価のためには、照射条件によってコリメータの孔径とX線管焦点-散乱体間距離を適切に選択し、計数率をパイルアップが生じないレベルにする必要がある。

今回の90度散乱X線スペクトルからの実効エネルギー算出の精度は、透視、撮影条件およびフィルタを付加してスペクトルを変化させた場合も含めて、従来の評価法であるAlフィルタ法による実測値や直接線スペクトルからの計算値と比較し、±2%以内の誤差であった。この誤差は、従来の実効エネルギー評価法が

持つ誤差の大きさを考慮すれば、十分に実用に耐える範囲内であると考えられる。松本⁷⁾はAl半価層について、実測値に対する90度散乱スペクトルからの計算値の誤差は+4.5%(管電圧:100kV)であったと報告している。この値は実効エネルギーに換算すると約2%程度になると推定され、我々の評価精度もこれとほぼ同程度であった。

CdTe半導体検出器を用いたX線スペクトル測定装置は小型で可搬性に優れており、コンプトン散乱法を用いれば種々の診断用X線装置のスペクトルを比較的簡単に測定可能である。今回の結果から、その90度散乱X線スペクトルを用いた実効エネルギー評価法は、従来の方法と遜色のない精度を有しており、手技の簡便性とあわせて種々のX線装置に応用できる実用的な方法であると考えられる。

5. 謝 辞

本研究にご協力いただいた、川崎医療短期大学放射線技術科第32期生の犬熊彩加、草地文子、菅 裕成、吉母真由の各氏に心より感謝いたします。

6. 文 献

- 1) 大釜 昇: 診断領域X線の実効エネルギー測定, 日本放射線技術学会雑誌57: 550-556, 2001.
- 2) 津坂昌利: 診断領域X線の照射線量の現状と問題点 4. 半価層測定精度と実効エネルギー評価, 日本放射線技術学会雑誌51: 539-547, 1995.
- 3) 金森仁志: 診断用X線スペクトル, 日医放線物理部会誌 Sup. 21: 33-80, 1985.
- 4) 松本政雄: 直接線と散乱線のX線スペクトルの測定, 日医放線物理部会誌 Sup. 43: 43-80, 1994.
- 5) Matscheko G and Ribberfors R: A Compton scattering spectrometer for determining x-ray photon energy spectra, Phys. Med. Biol. 32: 577-594, 1987.
- 6) Maeda K, Matsumoto M and Taniguchi A: Compton-scattering measurement of diagnostic x-ray spectrum using high-resolution Schottky CdTe detector, Med. Phys. 32: 1542-1547, 2005.
- 7) 松本政雄: 診断用X線装置のスペクトル測定, 医学物理 25 (Sup. 4): 1-24, 2005.
- 8) Seltzer SM and Hubbell JH: 光子減弱係数データブック: 日本放射線技術学会, 京都, 1995.
- 9) 大釜 昇, 藤本信久, 西谷源展, 山田勝彦: 散乱X線の実効エネルギー計測に関する研究, 日本放射線技術学会雑誌 51: 695-701, 1995.
- 10) 前田浩志, 松本政雄, 谷口 明, 金森仁志: 高分解能 Schottky CdTe 検出器を用いた診断領域X線スペクトルの測定とその補正, 医学物理24: 49-59, 2004.

