

令和3年度 東京工業大学
放射線取扱業務従事者登録（継続者）教育訓練

低エネルギーX線の検出と 放射線安全管理上の注意点

大阪府立大学 放射線研究センター
秋吉 優史

先生、ご存じですか？

理科の授業で使っているクルックス管からは
高い強度のX線が漏洩している場合があります！



現行の教科書にも記載されているクルックス管は、製品によっては 15cmの距離で、 $70\mu\text{m}$ 線量当量率が 200mSv/h にも達する高い線量率の低エネルギーX線が放出されている場合があります。知らないで近付いたりすると非常に危険です。

・20keV程度とエネルギーが低いので普通のサーベイメーターは役に立ちません

でも、心配はいりません！

・ごく基本的な誘導コイルの設定と、距離を取って時間を短くするなどの簡単な運用法の改善で、劇的に線量を小さくすることができます。

本当に大丈夫なのか心配・・・

暫定ガイドラインで本当に問題無いか、実証試験を行っています。ガラスバッジを用いた簡単な測定を各学校で行うことができます。詳しくはホームページをご覧ください ↓



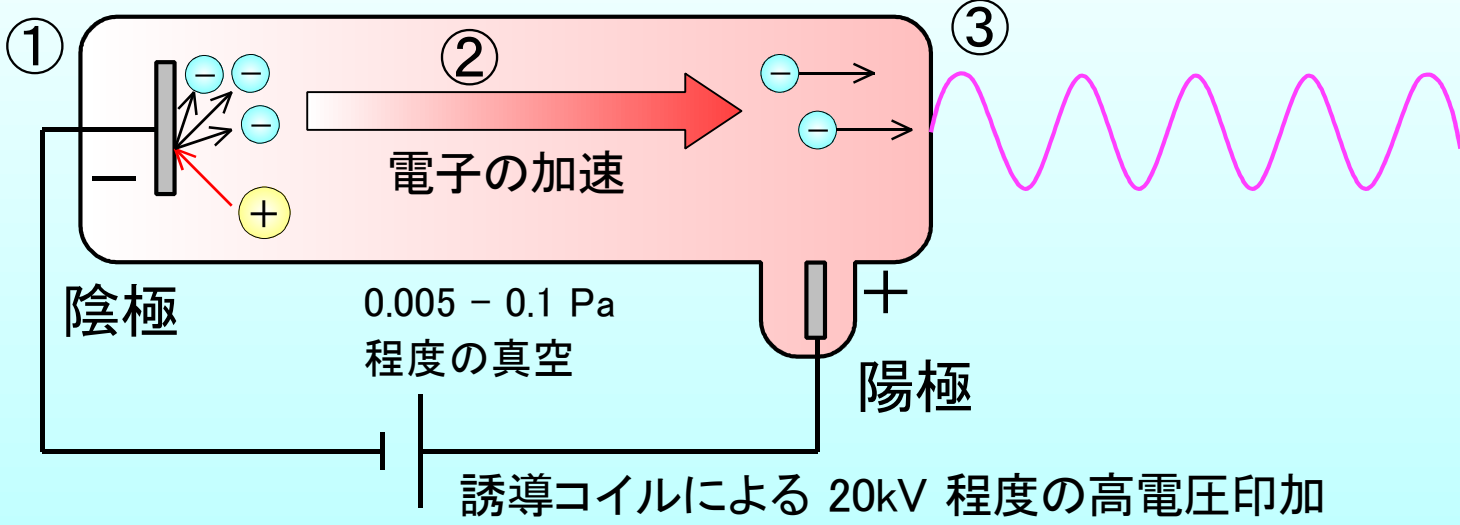
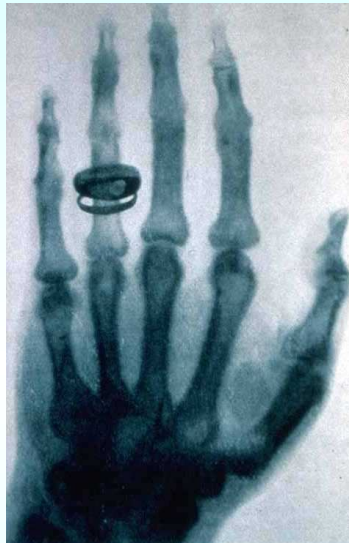
クルックス管とは？

Wilhelm Konrad Rontgen
1895, 真空放電管の研究中にX線を発見
1901, 第一回ノーベル物理学賞を受賞

その後の放射線研究の先駆けとなった歴史的に極めて重要な装置



William Crookes



- ① 管内の気体が電離されて出来た + のイオンが一極に引きつけられて電子を叩き出す (二次電子放出)
- ② 印加電圧に従ったエネルギーに加速される
- ③ ガラス管壁に電子がぶつかり制動放射X線を放出する。20keV程度の電子はガラス管を透過できず、特性X線もエネルギーが低いので遮蔽される。

ICRP 放射線防護の基準を決める三つの原則からの検討

正当化 Justification: リスクを上回る利益がなければならない

→ クルックス管を用いた実演は極めて教育的効果が高く、将来的な放射線教育コンテンツとしても非常に価値が高い。

防護の最適化 Optimization:

できるだけ被ばくを抑える(経済、社会的な要因の考慮)

ALARA(as low as reasonably achievable)の原則

→ 電子線の観察だけであれば低電圧駆動の絶対安全の装置を使うことで被ばくをゼロに出来るためこれを推奨する。が、経済的要因により直ちに全ての学校に要求するのは困難であるため、コンテンツ毎に必要なX線のエネルギーを把握し、出来る限り電圧を抑えて実験を行い被ばくを最小化する。必要に応じて遮蔽などの防護措置も行う。

線量限度 Dose Limit: 線量限度を超えてはならない

→ 放射線取扱業務従事者ではない教員や、さらに労働者でもない生徒に対する被ばく管理目標値を、国内外の規制状況から議論する。低エネルギーX線による不均等被ばくと水晶体への等価線量についても考慮する。

クルックス管からのX線管理に於ける問題点

一般公衆に対する線量限度が法体系に取込まれていない

ICRP 1990/2007年勧告での一般公衆に対する線量限度は我が国の法体系に取込まれておらず、実効線量 1mSv/年という値も事業所境界での線量限度から導かれた値。

X線装置の定義が明確ではない

厚労省 全国規模での規制改革要望に対する見解の確認
<http://www8.cao.go.jp/kisei/siryo/030919/09-2.pdf>

RI法では1MeV以下のX線は対象外であり、定義されている放射線発生装置にも該当しない。電離則においては特定X線装置の定義からは外れるが、「X線装置」の免除レベルが規定されておらず、放射線安全を確保するための法令根拠が明確ではない。

不均等被ばくであり実効線量評価が困難

20keV X線 は水での半価層が 1cm程度であるため、体表からの深さによって線量が大きく変化する。またブロードなエネルギースペクトルを持ち運用条件によってピークエネルギーも変わるが、低エネルギーではわずかなエネルギー変動で大きく透過率が変化する。平面的にも一様ではない。このため、防護量である実効線量の評価は容易ではない。

一般公衆に対する線量限度が法体系に取込まれていない

IAEA の GSR part3

計画被ばく状況として教育での放射線曝露を明示(3.1(e))

労働者への規制の範疇に16-18歳の**職業訓練**に伴う線量限度を提示(**実効線量** 6mSv/y, 眼の水晶体等価線量 20mSv/y, 末端部等価線量 150mSv/y) クルックス管が使われるのは一般的な理科の授業であり、これらとは切り離されるものとして考える必要がある。

ICRP Pub36 科学の授業に於ける電離放射線に対する防護

1983年の物であり実効線量当量での記載で **0.5mSv/y**、目や皮膚のような単一の臓器・組織の線量当量5mSv/yとなっており、**個々の授業**ではその **1/10** とされている。

ICRP-Pub101a 公衆の防護を目的とした代表的個人の線量評価

教育に伴う放射線曝露での線量評価でも代表的個人の考え方を導入する。

ICRP-Pub64 潜在被ばくの防護: 概念的枠組み 及び IAEA BSS

ICRP 1990年勧告(Pub60)では**免除**の要件として線量が trivial であること、防護が最適化されていることとされており、具体的には個人線量が **10 μ Sv/y** のオーダーとしている。

NCRP Report No.180 “Management of Exposure to Ionizing Radiation: Radiation Protection Guidance for the United States”

無視可能個人線量として線源か行為あたり実効線量で **10 μ Sv/y** を勧告。

免除レベルの $10 \mu\text{Sv}$ はどれぐらいの値なのか

歯科レントゲン撮影1回:
 $10 \mu\text{Sv}$



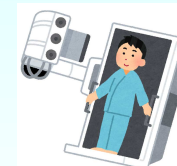
0.01mSv
($10 \mu\text{Sv}$)

胸部レントゲン撮影1回:
 $50 \mu\text{Sv}$



0.1mSv
($100 \mu\text{Sv}$)

胃がん検診1回:
 $600 \mu\text{Sv}$



ICRP 1990/2007年勧告
一般公衆への追加線量限度
年間 1mSv

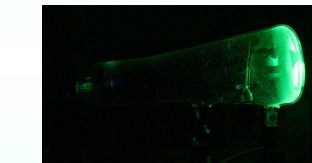
CTスキャン1回:
数mSv



1mSv



国内線の飛行機1回:
 $3 \mu\text{Sv}$ 程度



クルックス管プロジェクトの
到達目標: $10 \mu\text{Sv}/\text{年}$

1ヶ月のBG線量:
 $50 \mu\text{Sv}$
($0.07 \mu\text{Sv}/\text{h}$ の場合)



国際線の飛行機での
欧米への旅行1回:
 $100\text{--}200 \mu\text{Sv}$



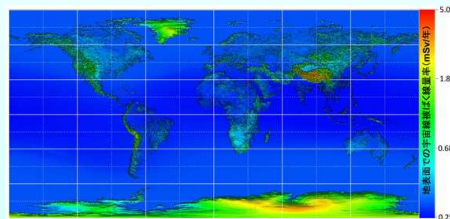
日本人が特有に持っている
 20Bq のポロニウム
 210 による年間被ばく
線量: $800 \mu\text{Sv}$

イランのラムサール地方や
インドのケララ地方などでの
大地からの年間被ばく線量:
 $\sim 10\text{mSv}$

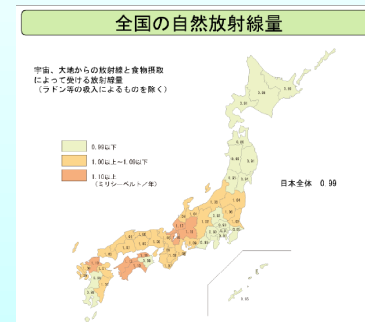


ランタンのマントル* を
1時間体に貼付ける:
Hp(10) $1 \mu\text{Sv}$ (γ 線)
Hp(0.07) $10 \mu\text{Sv}$ (β 線 + γ 線)

*トリウム使用のサウスフィールド ハイパワーDXマントル



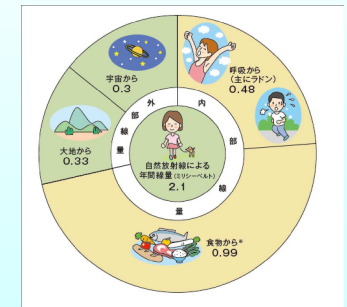
年間の宇宙線量の世界平均と
日本平均の差:
 $50 \mu\text{Sv}$ (日本の方が小さい)



年間の平均外部線量が最も
高い岐阜県と最も低い神奈
川県の差: $400 \mu\text{Sv}$



世界平均と日本平均
でのラドンによる年間
被ばく量の差:
 $800 \mu\text{Sv}$
(日本の方が小さい)



自然放射線による
年間の被ばく線量
日本平均 2.1mSv
世界平均 2.4mSv

クルックス管からのX線評価に於ける問題点

20keV 程度とエネルギーが低い

一般向けに普及している半導体素子を用いた簡易サーベイメータはおろか、放射線計測で信頼されている NaI シンチレーション式サーベイメータもエネルギーが低すぎて実態とかけ離れた値が測定される。

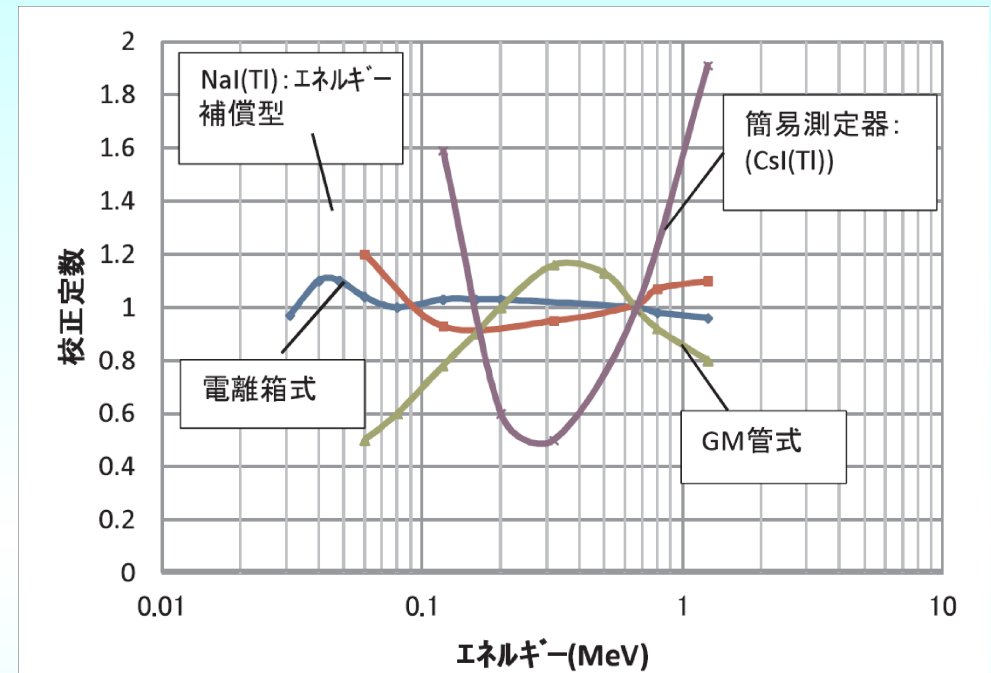
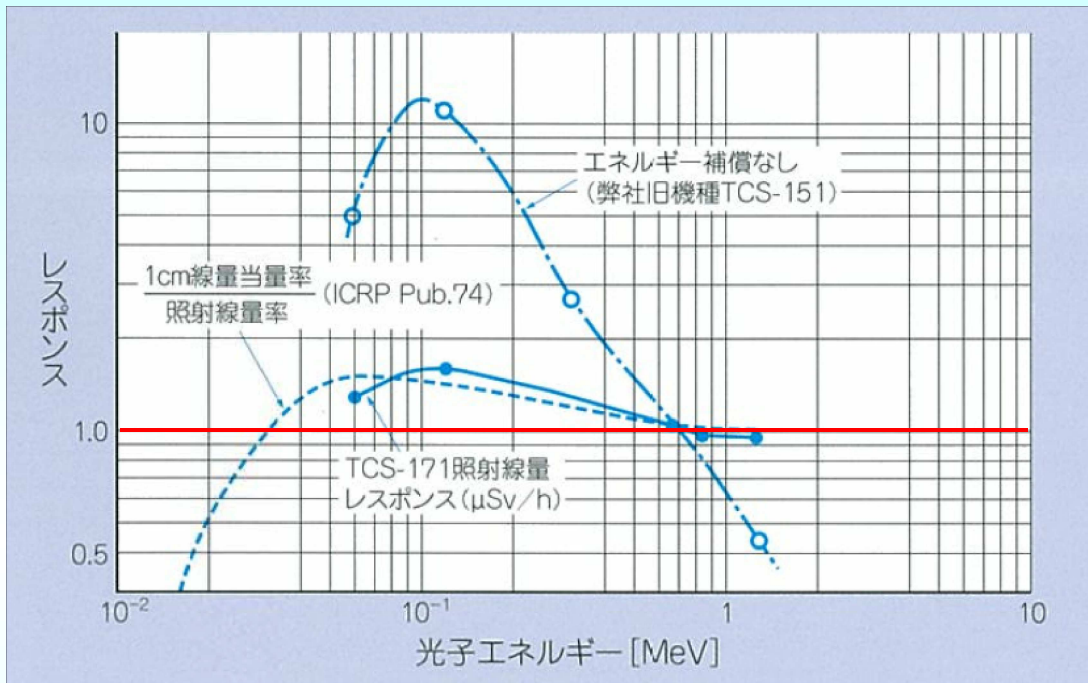
パルス状に放出されている

Be窓を用いた低エネルギーX線用 NaI シンチレーション式サーベイメータなども販売されているが、パルス場であるためパイルアップしてしまい非常に小さい値しか示さない。Be窓のGe検出器や、CdTe(CZT)検出器での測定も、非常に小さなコリメーターを使いカウントレートを落とす必要がある。

電源装置（誘導コイル）が不安定である

同じ装置を同じ設定で動作させても測定結果が大きく異なる事がある。機械的な動作を含む誘導コイルはその日、その時の状況で出力電圧が変動するため、系統的な比較を行うには何らかの方法でモニタしながらの測定が必要。

サーベイメータのエネルギー特性



NaIシンチレーションサーベイメータのエネルギー特性

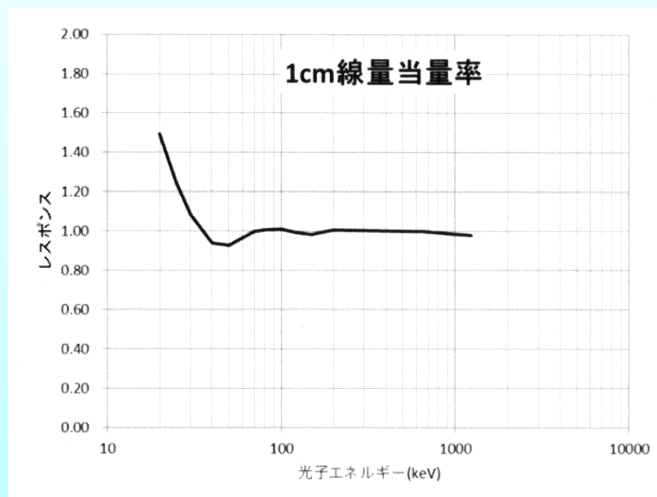
(アロカ TCS-171カタログより)

様々なサーベイメータのエネルギー特性

(放射線計測協会 放計協ニュース No.48, 2011, p6)

電離箱サーベイメータのエネルギー特性

(日立 ICS-1323マニュアルより)



誘導コイルを用いた高電圧印加について



放電極距離

Distance of Discharge Electrodes

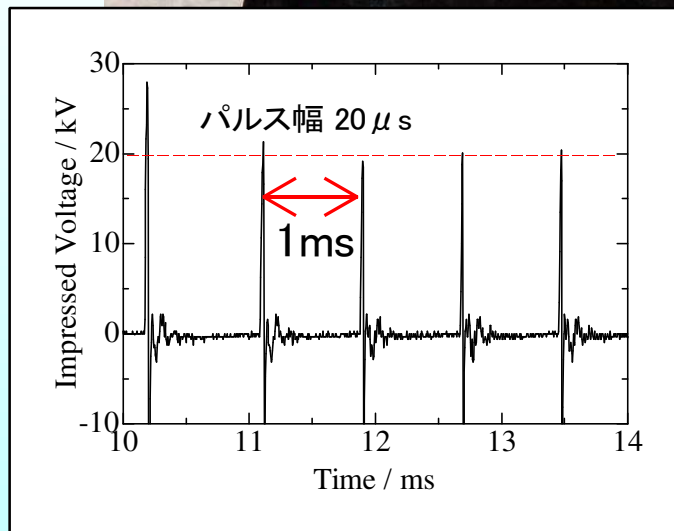
DDE

PW

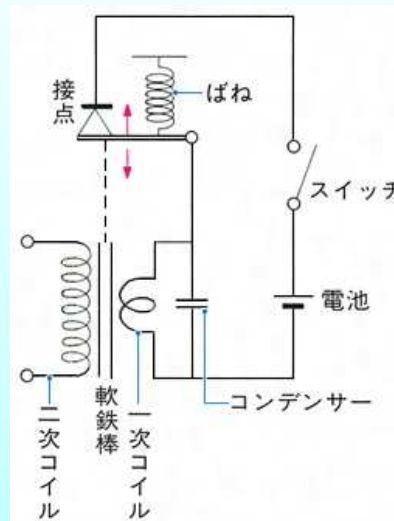
放電出力

放電出力ダイヤルによりトランスの一次側に印加する電圧を変えることで連続的に出力電圧をコントロール可能。空気中での絶縁破壊電圧が 1kV で 1mm 程度であることから、放電極の距離を変えることで印加する最大電圧を規定できる。

→ 20mm にしておくと 20kV 以上かけようとしても空中放電で電流が流れるためそれ以上電圧が上がらない、安全装置となる。



放電極距離 20mm, 放電出力4, 平均電流 80 μ A



ブザーの回路で、一次側に断続的な電圧のパルスが発生させ、トランスで二次側に高圧を出力する。一次側の電圧を変化させると二次側の電圧も変化する。半導体回路で一次側のパルスが発生している装置もある。



箔検電器を用いたX線の線量測定手法の開発

12

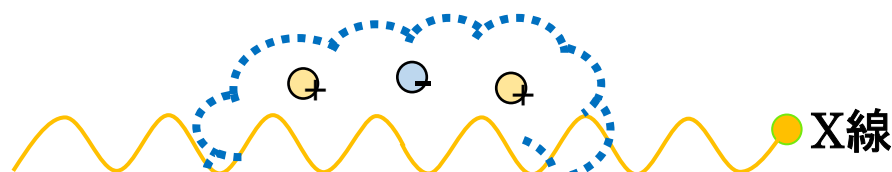
➤ 箔検電器について

箔検電器の箔の閉じる時間は、放射線が空気を電離することによって生成されるイオンの量に依存する。

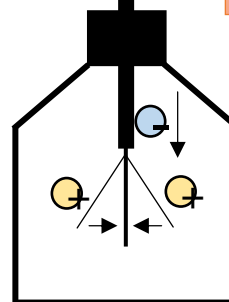


使用した箔検電器
(はく検電器EA)

X線が空気を電離してイオンを生成



逆極性のイオンを収集



箔が中和して閉じていく



※箔検電器と同様の原理を用いた線量計として、ポケットチェンバーという携帯型の線量計が

古くから使われていた。

蛍光ガラス線量計

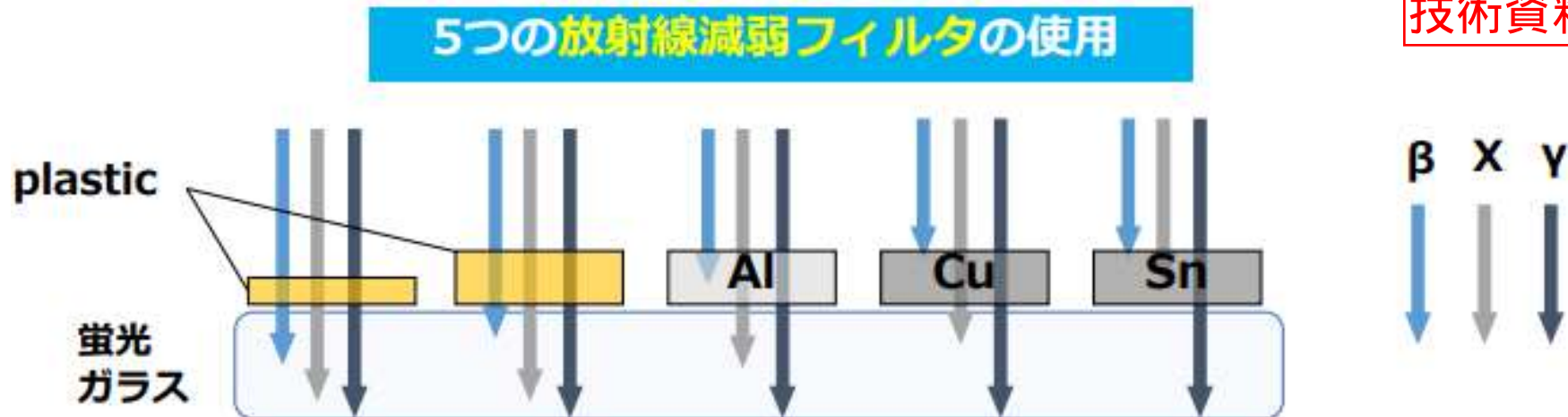
- ・**蛍光ガラス線量計**は**ガラスバッジ**に用いられる固体測定素子であり、銀活性リン酸塩ガラスに放射線を照射した後に生成する**蛍光中心**に**紫外線**を入射すると**オレンジ色**の**蛍光**を発する(ラジオフォトルミネッセンス)。発光量を読み取ることで吸収した放射線の線量を知ることが出来る。
- ・照射した後に時間が経過しても発光量が変化しない(**フェーディングが少ない**)、素子間のばらつきが小さい、エネルギー特性がフラットであるなどの特性を持ち、それまで用いられていたフィルム線量計から置き換わっている。10 μ Svから10Svまでの幅広い線量で使用が可能である。
- ・**複数のフィルタと組み合わせる**ことでエネルギーの異なる γ ・X線、 β 線の測定が一つのバッジで可能である。
- ・ α -Al₂O₃:C を用いた **OSL線量計**も、同様に**Fセンター(色中心)**に捕獲された電子に**緑色**の光を入射すると**青色**の発光(**光輝尽性発光**)を生じ、**クイクセルバッジ**として利用されている。
- ・同様に、照射後に**数100°Cに加熱**することで**蛍光**を発するLiFやBeOなどの熱蛍光物質を用いた、**熱蛍光線量計**は**TLDバッジ**などで使用されている。上記二つに比べるとややフェーディングが大きい。

蛍光ガラスでの線量測定

人体（組織）が受けた線量を蛍光ガラスで測りますが、
人体とガラスは違います

- ⇒ 放射線に対するエネルギーレスポンスの違いを補正する必要がある
- ⇒ そのためには、ガラスバッジにどのような放射線（線種、エネルギー）が入ってきたのか知る必要がある

千代田テクノル
技術資料より



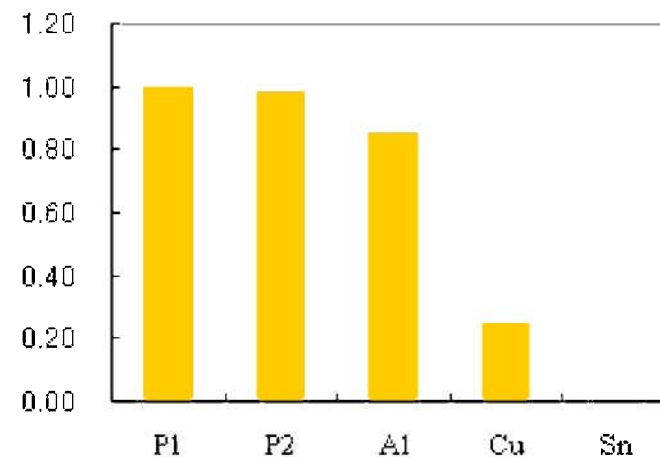
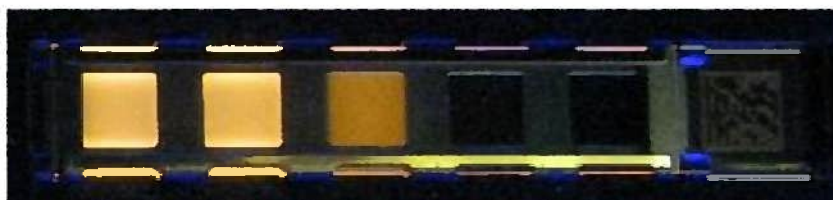
蛍光ガラスの各フィルタ下の発光パターンから、
放射線の種類やエネルギーを知り、レスポンスを補正し線量を求める

蛍光ガラスの発光パターン例

千代田テクノル
技術資料より

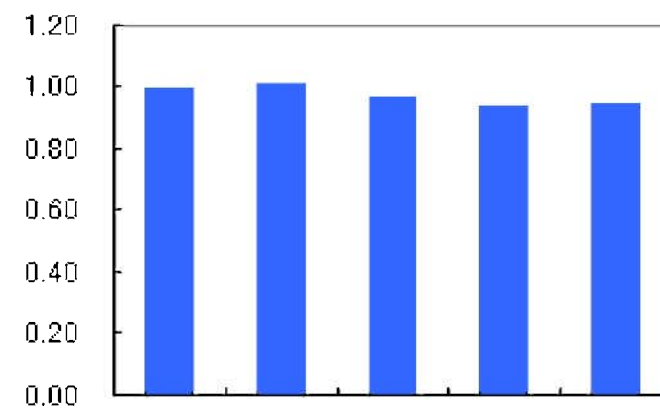
✓ 30 keV X線

P1 P2 Al Cu Sn



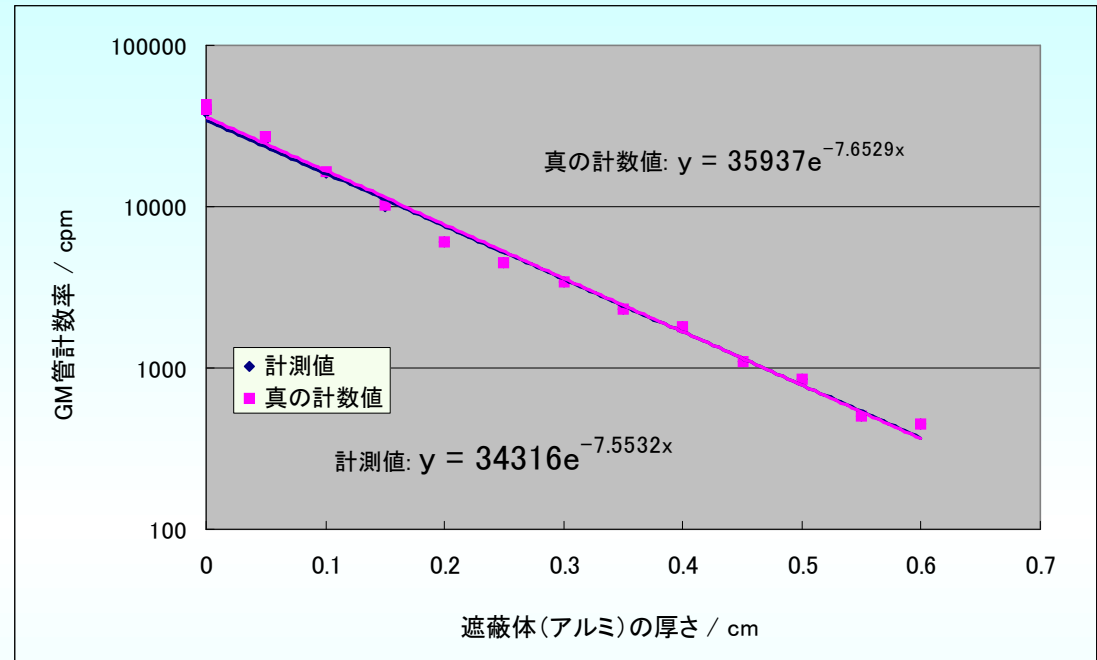
✓ ^{137}Cs γ 線(662 keV)

P1 P2 Al Cu Sn



目次へ

GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価



GMサーベイメーターの前にアルミ遮蔽板を置いていき、透過率を測定した。測定結果から線減衰係数を求めると、 7.65cm^{-1} となり、放電針距離の 20mm から想定されるエネルギー20keV強でのアルミの線減衰係数と**非常に良い一致を示した**。

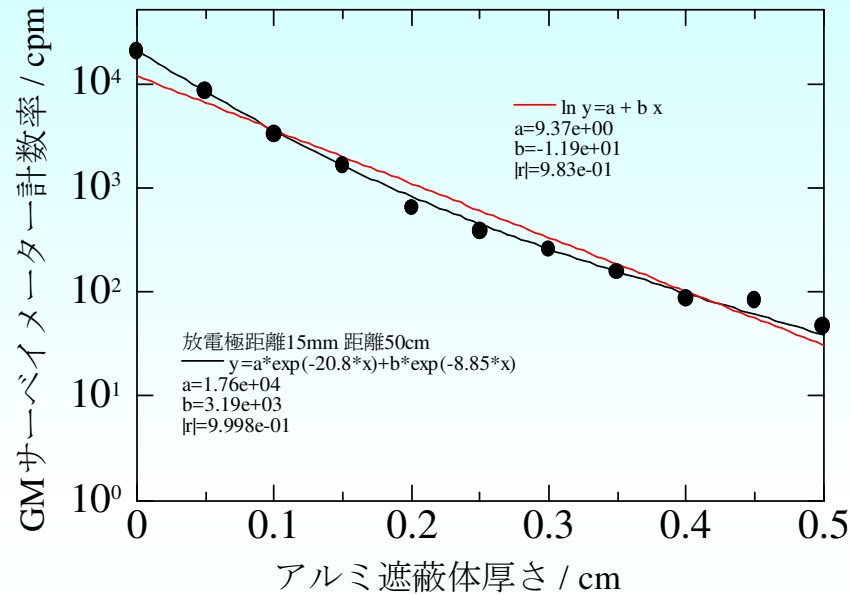
当初低エネルギー側に尾を引いたスペクトルを想定しており、遮蔽が薄い領域で計数率が高くなる事が予想されたが、**単一のエネルギーだけで説明できてしまった**。

遮蔽体を用いた測定前後での遮蔽無しでの測定値はほぼ一致しており安定していた。また、クルックス管から 30cm位置、50cm位置で測定し、評価結果はほぼ同じであった。

X線エネルギー (keV)	アルミ中の 線減衰係数 μ (cm^{-1})
10	69.5
15	20.8
20	8.9
30	2.8

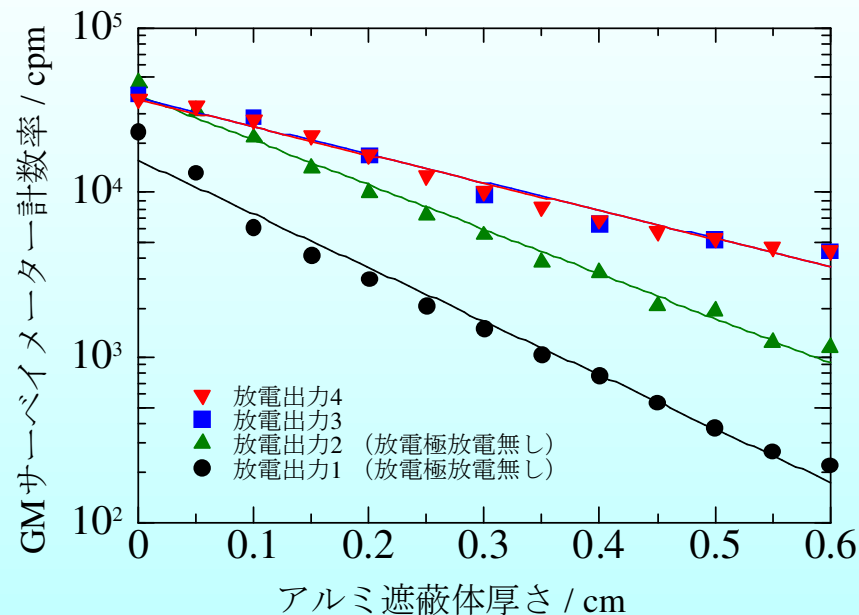
GMサーベイメーターによるX線エネルギー評価

放電極距離15mmでの測定では、15keVの成分だけでは説明できず、20keVの成分との足し合わせで説明された。



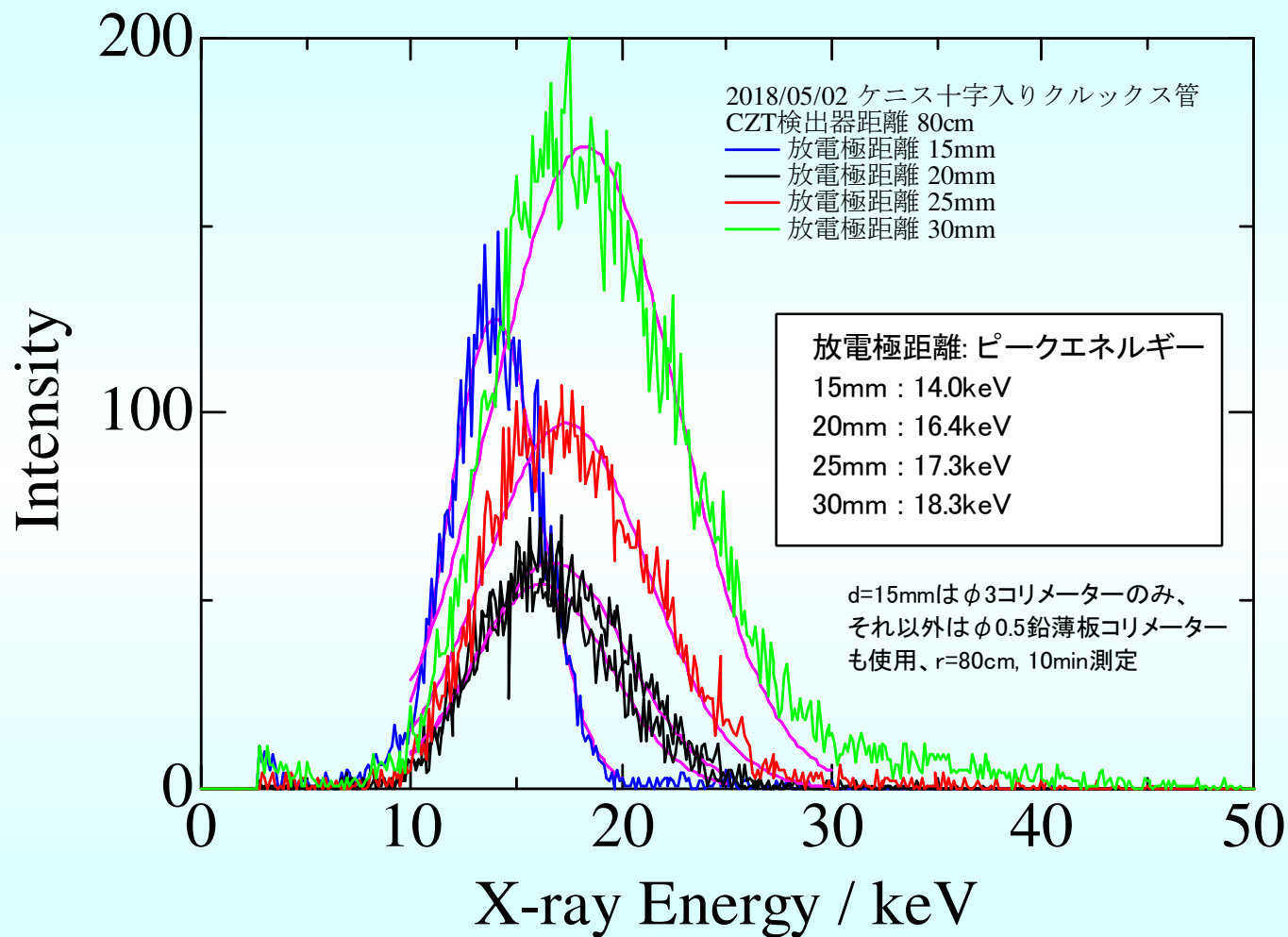
X線エネルギー (keV)	アルミ中の 線減衰係数 μ (cm^{-1})
10	69.5
15	20.8
20	8.9
30	2.8

放電極距離は30mmで一定で、放電出力を変化させると線減衰係数が変化していき、放電極で放電が起こる出力3目盛以上で一定となった。

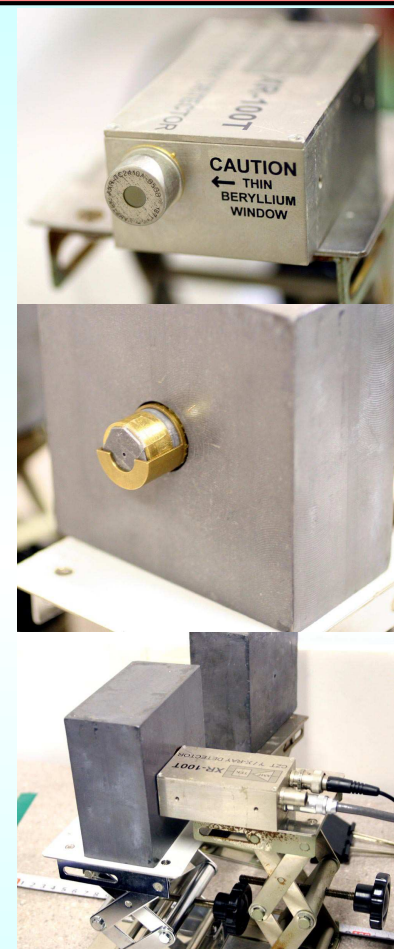


放電出力 (目盛)	線減衰係数 (cm^{-1})
1	7.50
2	6.05
3	3.92
4	3.89

CZT半導体検出器によるスペクトル評価



φ0.5mm鉛コリメーターにより数cps程度まで下げること、
ようやくパイルアップせずに測定できるようになった

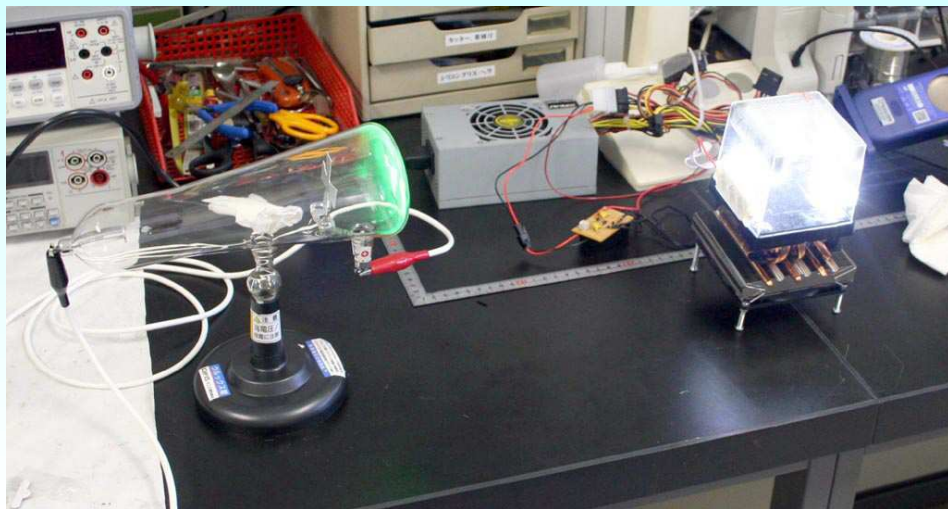


Amptek XR-100T-CZT
CZT(Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te)検出器
Be窓、ペルチェ冷却

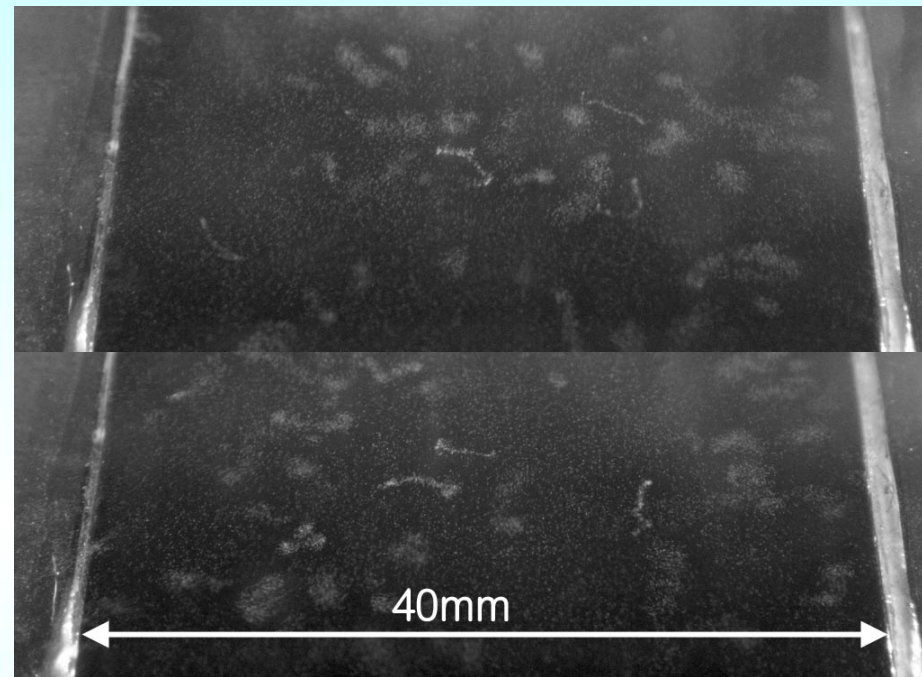


φ3同軸鉛コリメーター
φ2同軸黄銅コリメーター
φ1.0鉛薄板コリメーター
φ0.5鉛薄板コリメーター

クルックス管を利用したX線のエネルギー評価



飛跡の長さは4mm程度であり、空気中での20keV電子線の飛程6mm程度より若干短い
→制動放射X線のピークは入射電子線エネルギーの $\frac{2}{3}$ で、良く一致。



クルックス管からのX線によって弾き出された光電子の霧箱観察結果(放電針距離20mm)。

エネルギー既知のX線を入射して飛跡の長さのヒストグラムを作成し、エネルギーに拡がりを持つX線のスペクトルが評価できないか？

**霧箱を用いた低エネルギーX線の
エネルギースペクトル評価の可能性**

霧箱によるクルックス管からのX線の観察

①

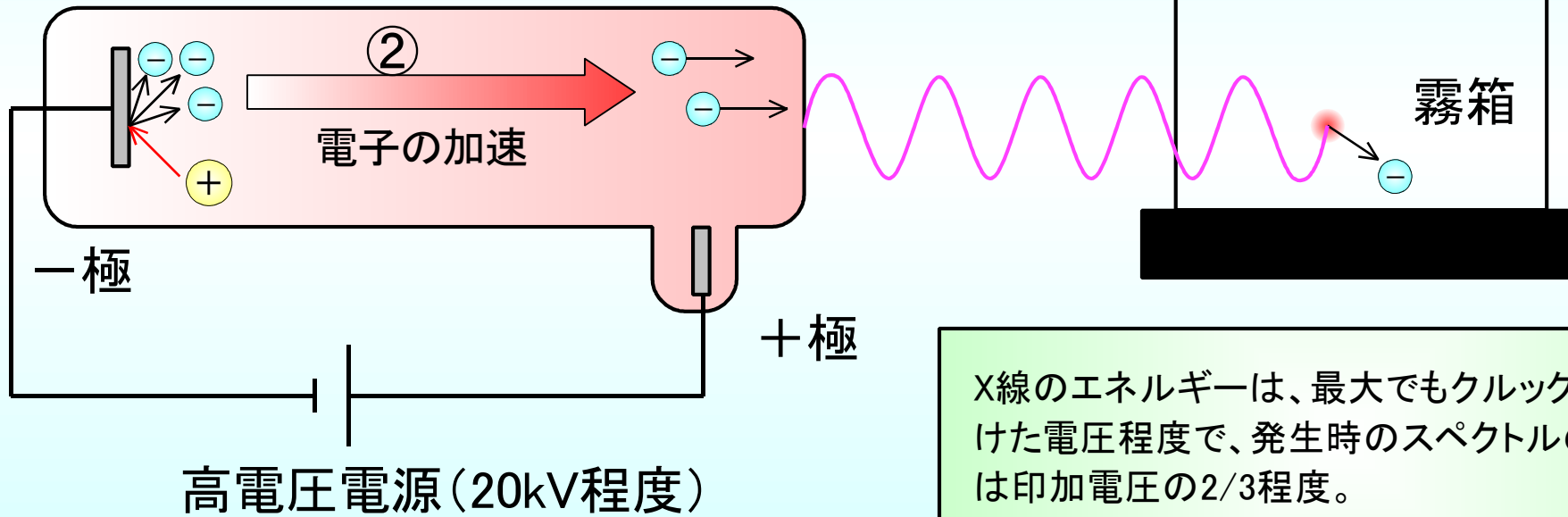
＋のイオンが－極に引きつけられて電子を叩き出す
(二次電子放出)

③

電子がガラス管の壁に衝突するときに、制動放射X線を放出する

④

X線は最終的に原子の周りを回る電子を光電効果などで弾き飛ばして(電離作用)、弾き飛ばされた高速の光電子はβ線と同じように振る舞う。



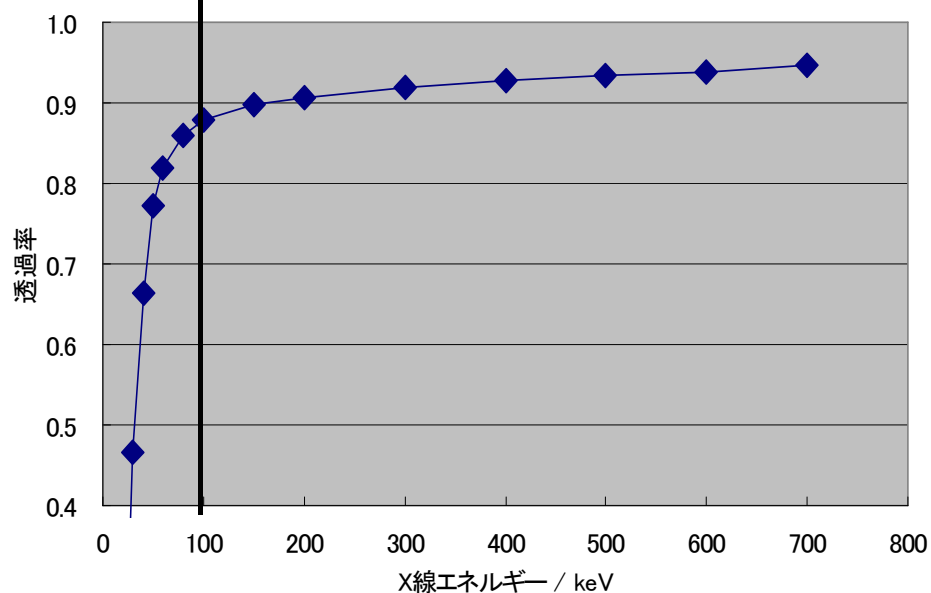
X線のエネルギーは、最大でもクルックス管にかけた電圧程度で、発生時のスペクトルのピークは印加電圧の2/3程度。

電子を弾き出すという放射線の本質を直感的に理解できる。また、エネルギーの違いを弾き出された電子の飛跡の長さという形で理解できる。

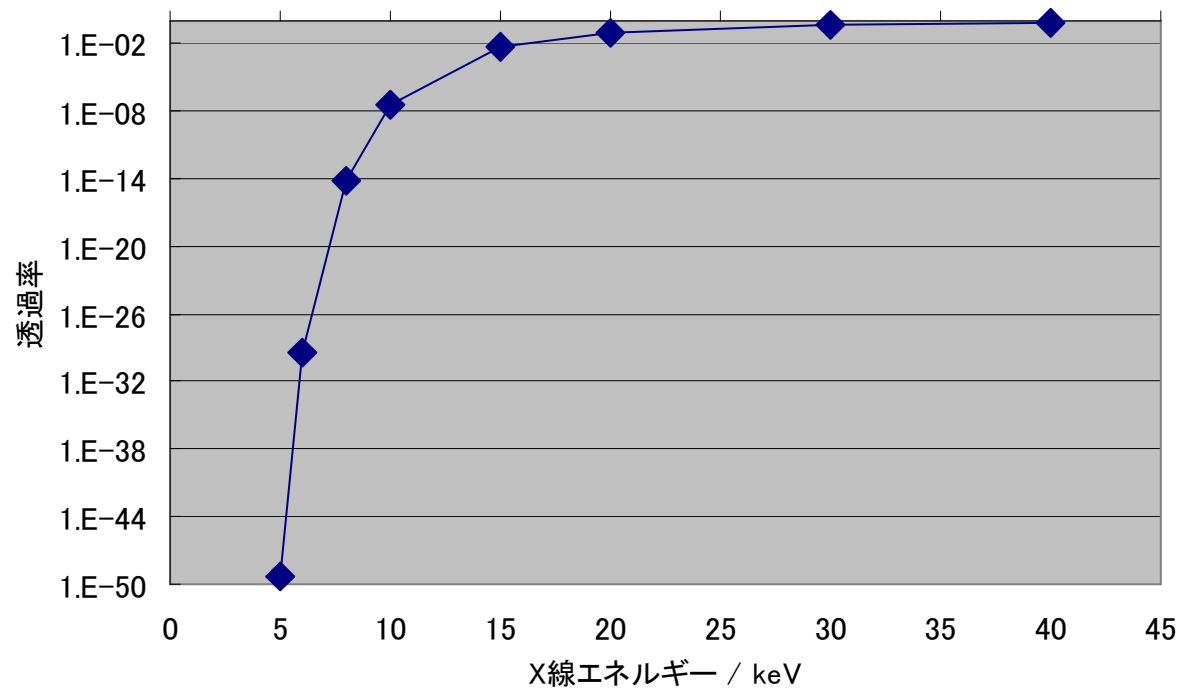
わずかな印加電圧低下での大きな線量の変化

20keV 前後のX線は僅かなエネルギー変動により、クルックス管自体を構成するガラス管の透過率が何桁も変わる。

100keV 以上のエネルギーでは
余り大きく変わらない



30keV と 15keV で約100倍違う。

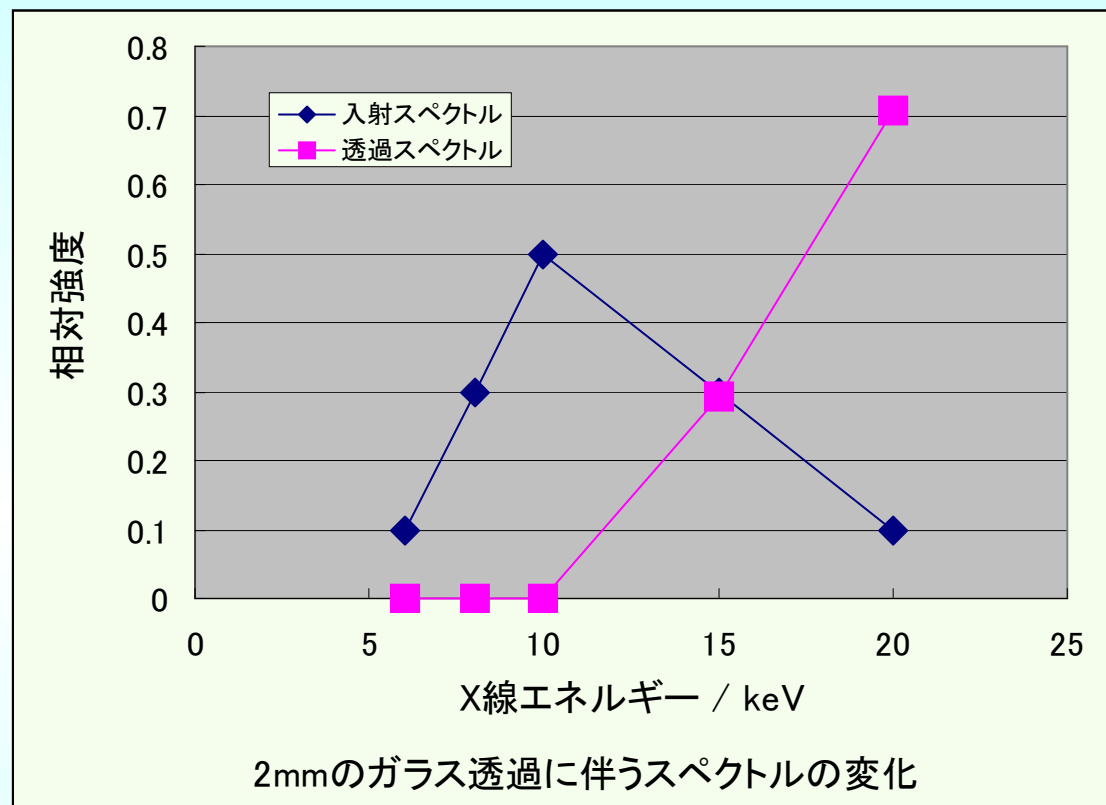


3mmのガラスに対するX線の透過率

クルックス管のガラスによるスペクトル変化

エネルギー (keV)	質量減衰係数 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	厚さ(cm)	透過率
6	87.29	2.59	0.2	2.31E-20
8	42.13			3.33E-10
10	22.16			1.03E-05
15	6.809			2.94E-02
20	2.973			2.14E-01

ガラス管を透過する前のX線のエネルギースペクトル(最大エネルギー20keVでその半分の位置にピークを持つ)を適当に決め、2mmのガラスで遮蔽された後の強度を透過率から求めた後、全体の強度が1となるように規格化した。



入射スペクトル	透過スペクトル	規格化
0.1	2.31E-21	7.62E-20
0.3	9.99E-11	3.30E-09
0.5	5.17E-06	1.71E-04
0.3	8.82E-03	2.91E-01
0.1	2.14E-02	7.08E-01

元のスペクトルよりも透過率が支配的となり、最大エネルギーである20keVがほとんどを占めるスペクトルとなった。

γ線・X線の減衰

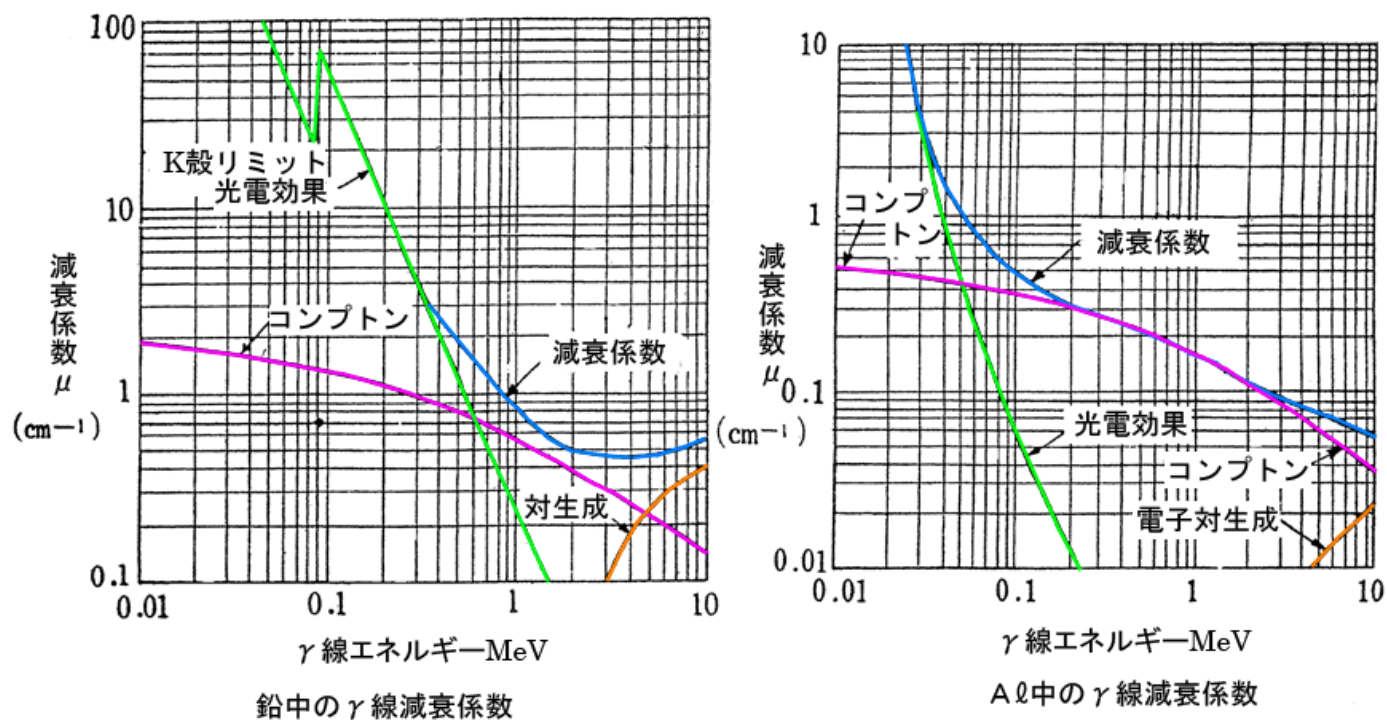


図3 γ 線のコンプトン効果

[出典] 三浦 功、菅 浩一、俣野恒夫:「放射線計測学」、裳華房、p.21

ターゲットとなる物質の原子番号 Z の増加と共に、線源弱係数は

光電効果 $Z^4 \sim 5$ に比例
 コンプトン効果 Z に比例
 電子対生成 $Z(Z+1)$ に比例
 となって Z が大きくなると急激に遮蔽能力が高くなる。

入射光子のエネルギー増加と共に、物質との相互作用を起こす効果が変わっていく。比較的低エネルギーではレイリー散乱、光電効果が主であり、次第にコンプトン散乱が支配的となる。高エネルギーでは電子対生成が主となる。光核反応は12-24MeV 付近で最大断面積となるが μ への寄与は5%程度である。また、低エネルギーではK殻電子やL殻電子の電離エネルギー以上になると光電効果を起こせるがそれ以下では起こせないため、光電効果の効率が不連続に変化する。これをK吸収端、L吸収端と呼ぶ。

放射線量について

- ・放射線を被ばくしたときの全身への影響を、ICRP等が定めたしきたりに従って評価したのが、「実効線量」。普通、線量と言えばこの実効線量のことを指す。
- ・ベータ線など、透過力の弱い放射線を被ばくした場合、皮膚表面だけが被ばくしていることになる。この時皮膚だけに対する影響を評価するのが、「皮膚等価線量」。最近では、眼の水晶体に対する「水晶体等価線量」も問題となっている。
- ・実効線量の評価は非常に複雑である。このため、体の表面から1cmの深さの一点での吸収線量が全身の線量を代表するという、簡易的な「1cm線量当量」をサーベイメーターは測定している。同様に、皮膚の等価線量は深さ70 μ mの深さの一点での吸収線量である、「70 μ m線量当量」で測定する。
- ・クルックス管からのX線は透過力が中途半端で、皮膚だけ、と言うわけではない一方で、1cm進むと半分程度に減衰するため、「1cm線量当量」では5倍以上の過大評価となり、慎重な評価が必要。現在は表面での線量としての70 μ m線量当量での測定を行っている(あとで実効線量への換算が容易)。20keVでの実効線量はおおよそ70 μ m線量当量の1/10。

被ばく管理に用いられる量(実用量)

等価線量や実効線量は実際には

直接測定することが出来ない!

(ある放射線場に人間が居た場合の影響を計算で求めた防護のための量)

線量当量 dose equivalent (Sv)

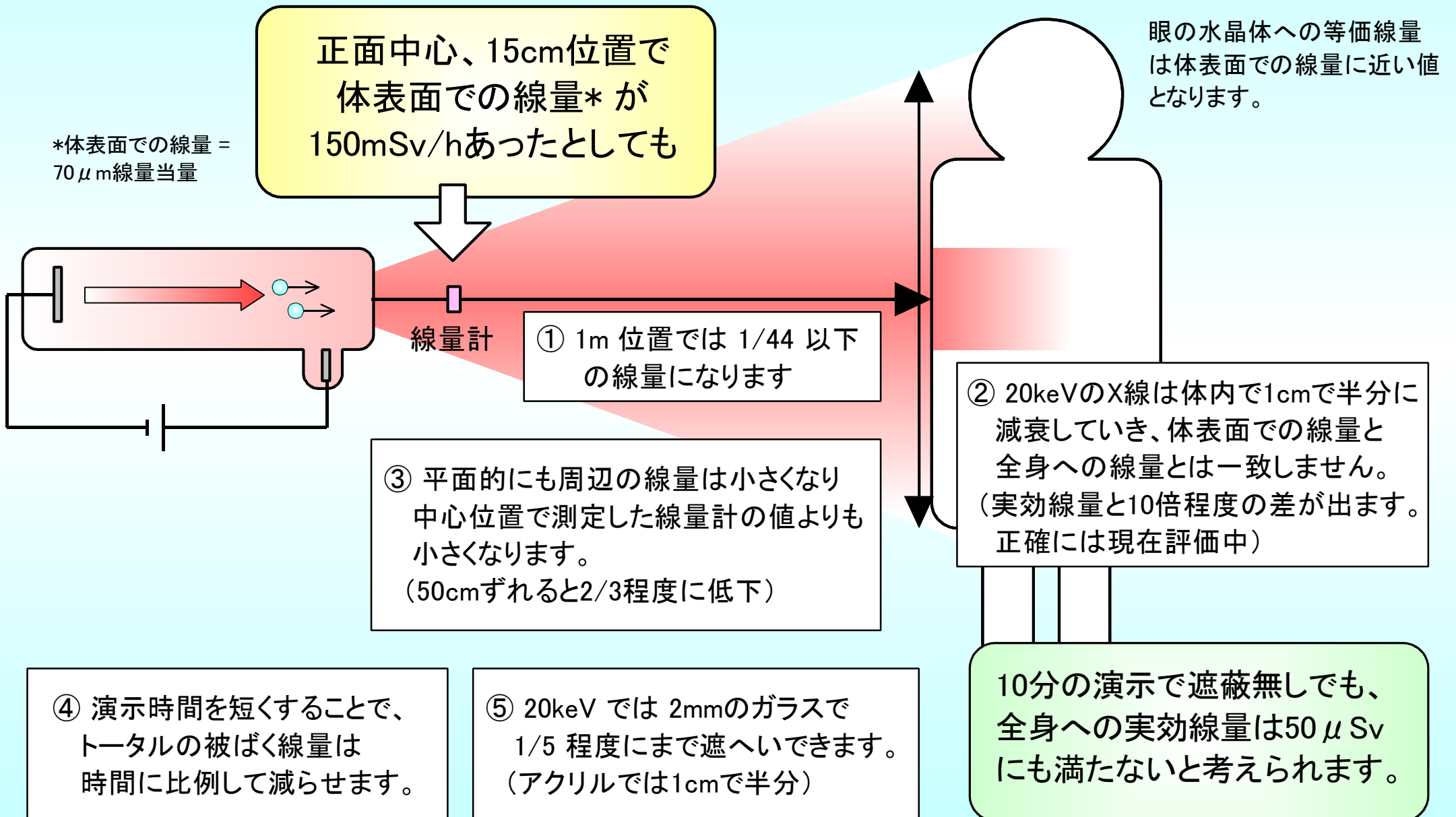
定義: 拡張整列場(どの点を取っても均質な平行ビームの放射線場)の中に置いたICRU球の表面から1cm, 70 μ mの深さの微小体積に於ける吸収線量

→ 1cm線量当量、70 μ m線量当量

線量当量(Sv) = **線質係数** × 吸収線量(Gy) (空間の一点)

線質係数: 放射線の水中における衝突阻止能 = 線エネルギー付与 LTE の関数

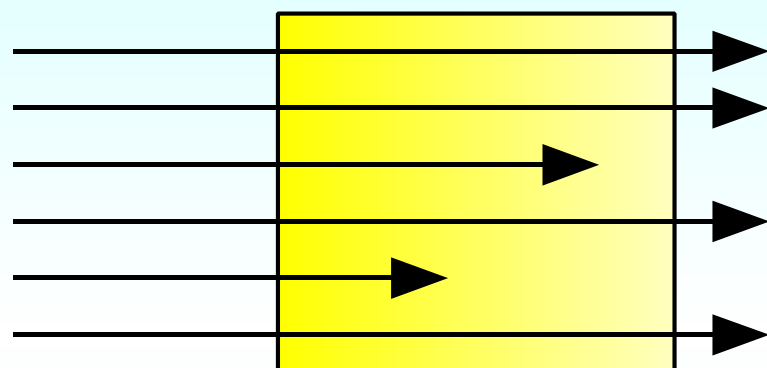
クルックス管からのX線の不均一性



エネルギー吸収の違い

強透過性放射線

$$H_p(0.07) \leq 10 H_p(10)$$



整列拡張場

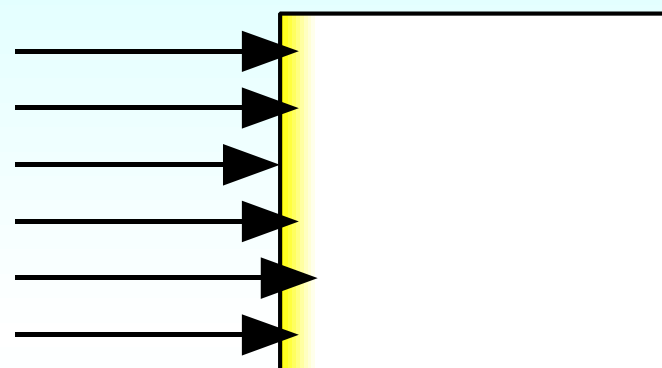
高エネルギーガンマ線などの場合透過力が高く、ほぼ均等にエネルギーを与える。

人体の場合、荷電粒子平衡を考慮して深さ1cmでの点での吸収線量(1cm線量当量)が全体を代表する。対象の厚さが大きいと、指数関数的に徐々に線量は下がっていく。

クルックス管からの20keVの低エネルギー엑스線の場合、 $H_p(0.07) = 2 H_p(10)$ 程度であり、弱透過性と言うほどでは無いが、1cmの深さでの吸収線量は体全体を代表せず、減衰を考慮する必要がある。

弱透過性放射線

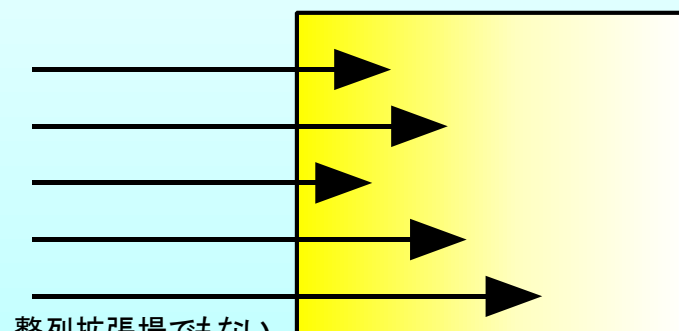
$$H_p(0.07) > 10 H_p(10)$$



整列拡張場

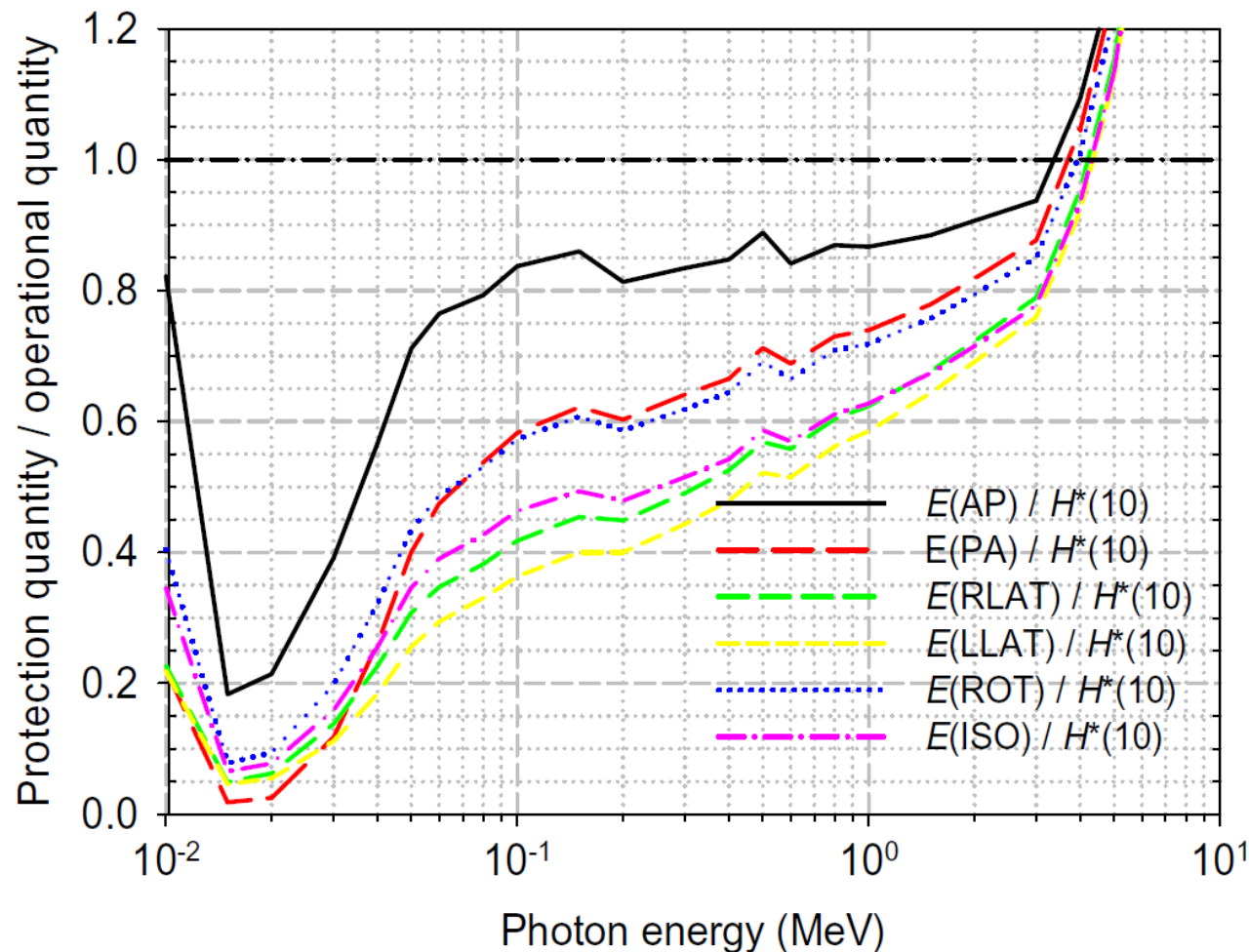
α 線、 β 線などの場合透過力が低く、表面近傍にのみ局所的にエネルギーを与える。

人体の場合、深さ70 μ mでの点での吸収線量(70 μ m線量当量)が皮膚の等価線量を代表する。



整列拡張場でもない

防護量と実用量の違い



ICRP Pub116
Fig.5.2

測定に際しては荷電粒子平衡は取られていない。平衡を取ってやれば高エネルギーでも安全側に評価となる。

AP, PA 等は放射線の入射方向に対する人体の向きを表わし、APは正面、PAは背面、RLAT・LLATは右・左側面、ROTは立位で水平回転、ISOは等方からの入射を表わしている。

実効線量 $E / 1\text{cm}$ 線量当量 $H^*(10)$ のエネルギーによる変化。1cm線量当量は20keVでは5倍程度の過大評価となる。100keV-3MeV程度までは変化は小さく、常に若干の過大評価となっている(安全側に評価)。