

放射線教育訓練

～講習 X～

「エックス線の構造と取扱方法」

および

「エックス線透過写真作業方法」

1. 電離放射線とエックス線

原子を直接的または間接的に電離する電磁波や粒子のことを電離放射線という。「電離放射線防止規則」では、電離放射線を次に示す4種類に分類している。

グループ a) α 線, 重陽子線および陽子線

いずれも正電荷を帯びた粒子の流れで、軽い原子の原子核が大きなエネルギーをもって運動している状態である。放射性同位元素の崩壊中、原子核から放出されるヘリウム原子核の流れを α 線、重水素の原子核の流れを重陽子線、水素の原子核の流れを陽子線という。

グループ b) β 線および電子線

負電荷を帯びた電子の流れを電子線、原子核から放出される電子を β 線という。

グループ c) 中性子線

原子核分裂のような核反応の際に、核から放出される中性子の流れを中性子線という。

グループ d) エックス線およびガンマ線

共に波長の短い電磁波で、その本性は全く同じものであるが、発生原因によってエックス線とガンマ線に区別される。

エックス線: 電子線を金属に衝突させる際に発生する電磁波で、発生原因は核外の電子にある。

ガンマ線: 原子核が壊変するときに付随して発生する電磁波で、発生原因は原子核にある。

電磁波の波長とエネルギーの関係を図1に示す。エックス線は赤外、可視、紫外線と同じ電磁波である。図1に示すように、エックス線の波長は0.001~10nmの範囲にあり、長波長側は紫外線に移行し、短波長側はガンマ線と重なる。波長が短くなれば物体を透過する力が強くなり、長くなればなるほど、熱を持つようになる。エックス線は人間の目には見えず、人体を透過する非常に強いエネルギーを持っている。

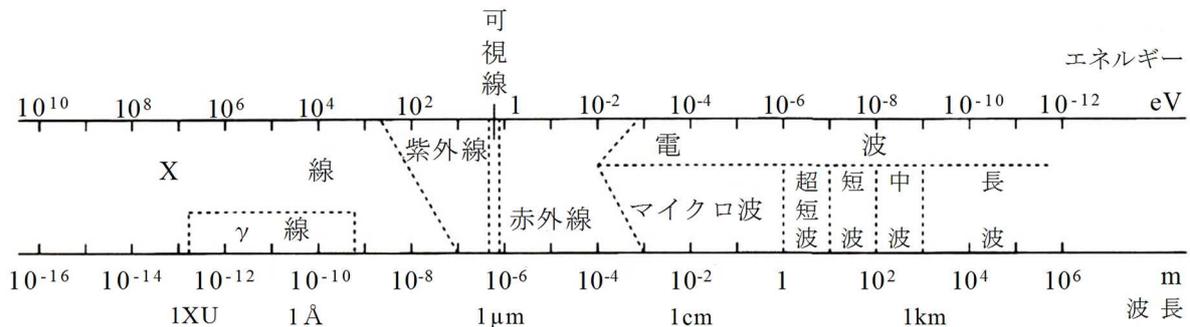


図1 電磁波の波長とエネルギーの関係

2. エックス線の発生

図2にエックス線管の構造を示す。エックス線管には陰極と陽極があり、陰極のタングステン・フィラメントに電流を通すと電子が真空中に放出される。陰極と陽極との間に高い電圧を与えると電子は陰極から陽極に向かって加速され、大きな運動エネルギーを持った電子が陽極の金属に衝突してエックス線が発生する。加速された電子が陽極のターゲットに衝突し、エックス線が発生する部分を実焦点といい、これをエックス線束の利用方向から見たものを実効焦点という。透過試験で像質のよい写真を撮影するた

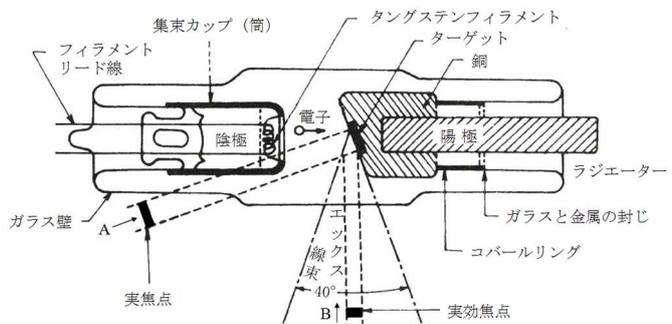


図2 エックス線管の構造

めには実効焦点の寸法は小さい方がよい。

エックス線管から発生するエックス線の波長と強度の関係は図3のようなスペクトルを示す。連続した波長分布を示す連続エックス線と、ターゲットの元素に特有なスペクトルを示す特性エックス線とからなる。

連続エックス線

加速された電子が陽極に衝突して減速され、減速された分の電子の運動エネルギーがエックス線に変換される。一般に荷電粒子が原子核近傍の強い磁界の中を通過するとき大きな加速度を受けて、その運動のエネルギーの一部を電磁波の形で放出する過程を制動放射といい、減速のされ方は個々の電子により異なるので、種々のエネルギーのエックス線が発生するが、これらが連続して重なり合うエックス線を白色エックス線、制動エックス線または阻止エックス線ともいう。

連続エックス線の全強度 I は管電流 i 、管電圧 V 、ターゲットの原子番号 Z 、比例定数 k とすると次の式(1)の関係があることが実験的に確かめられている。

$$I = k i V^2 Z \quad (1)$$

特性エックス線

エックス線管内で加速された電子が陽極に衝突時、そのターゲット原子の殻電子をたたき出すこともある。この状態の原子は非常に不安定であるため、外側の殻にある電子が空位を埋める。この際、両殻のエネルギー準位差に相当するエネルギーを特性エックス線として放出する。特性エックス線の波長は管電圧を高めても変化せず、ターゲット元素特有のものである。一般に特性エックス線の波長はターゲット元素の原子番号が大きくなると共に短くなる。

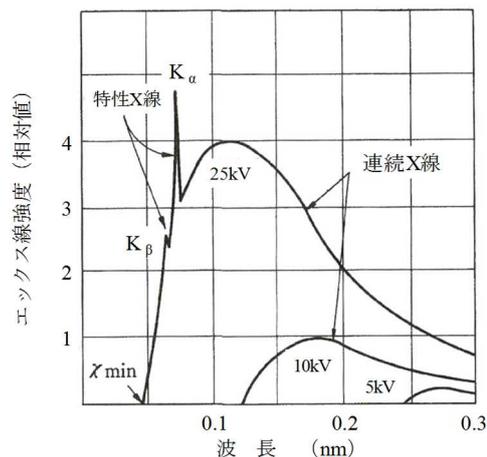


図3 モリブデン・ターゲットのエックス線管に種々の管電圧をかけた場合のエックス線スペクトル

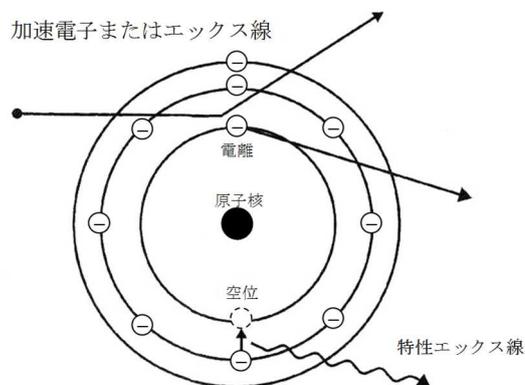


図4 特性エックス線の発生機構

3. エックス線と物質の相互作用

エックス線が物質中を通過するとき、エックス線は物質とさまざまな相互作用を起こす。その過程で、強度や伝播方向が変化したりする。エックス線と物質との相互作用には種々の形態があるが、主なものは次の4つである。

光電効果

エックス線が軌道電子にエネルギーを与えて、これを原子の外へ飛び出させ、光子自身はエネルギーを失って、消滅してしまう現象(図5)である。

弾性散乱 (レーリー散乱)

エックス線の光子が軌道電子と弾性的に衝突して、方向が変わる現象(図6)で、弾性散乱によって波長(エネルギー)は変わらない。

非弾性散乱 (コンプトン散乱)

エックス線の光子が軌道電子と衝突して、電子を原子の外へ飛び出させ、自らは運動の向きを変える現象(図7)である。飛び出した電子のことをコンプトン散乱電子という。この電子のエネルギー分だけ光子のエネルギーが減少する。

電子対生成

エックス線が原子核付近を通過するとき、エックス線が消滅し、1対の陽電子と陰電子が生成する現象(図8)で、陽電子は短時間に再び陰電子と結合して、0.51MeVのガンマ線を2本出して、消滅する。したがって、この作用は1.02MeV以上の高いエネルギーのエックス線でしか起こりえない。

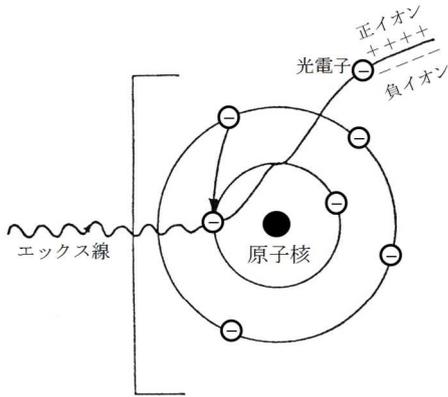


図5 光電効果

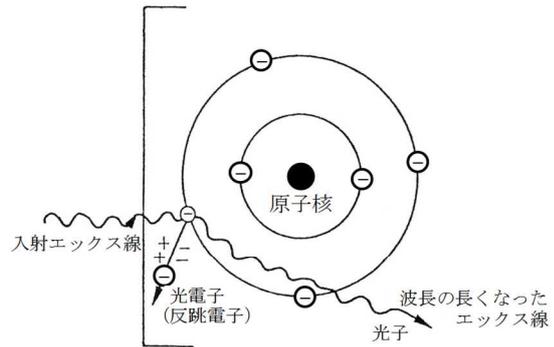


図7 非弾性散乱 (コンプトン散乱)

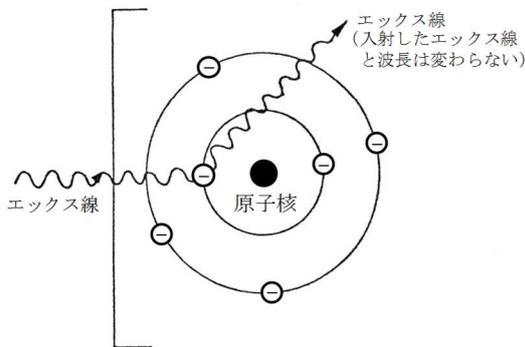


図6 弾性散乱 (レーリー散乱)

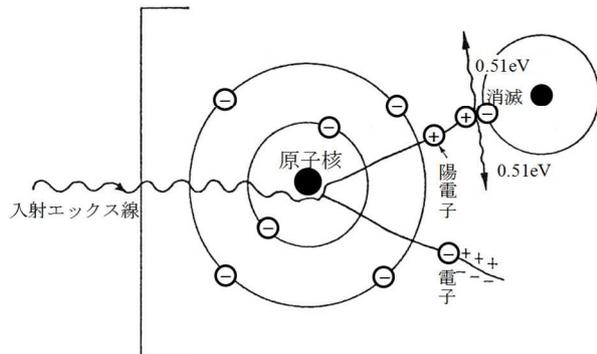


図8 電子対生成

4. エックス線の線質

エックス線が物質中を通過すると、相互作用を起こして減弱する。単一エネルギーのエックス線が物質を透過した後の強さを I とすると、次式(2)で表せる。

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2)$$

ここで、 x は物質の厚さ、 I_0 は物質の厚さが0のときのエックス線強さ、 μ は減弱係数を表す。減弱係数は物質の相互作用を表し、光電効果による係数を τ 、レーリー散乱による係数を σ_R 、コンプトン散乱による係数を σ_C 、電子対生成による係数を κ とすれば、次式(3)で表される。

$$\mu = \tau + \sigma_R + \sigma_C + \kappa \quad (3)$$

図9は、鉄の減弱係数を4つの物質の相互作用による減弱係数に分けて示したものである。横軸にはエックス線のエネルギーを対数目盛で表し、縦軸には減弱係数を普通目盛で表している。 τ と σ_R はエックス線のエネルギーが増すと急速に低下する。0.5~1MeV 付近での減弱は大部分が σ_C による減弱である。また、1MeV 以上では電子対生成による減弱が大きくなる。

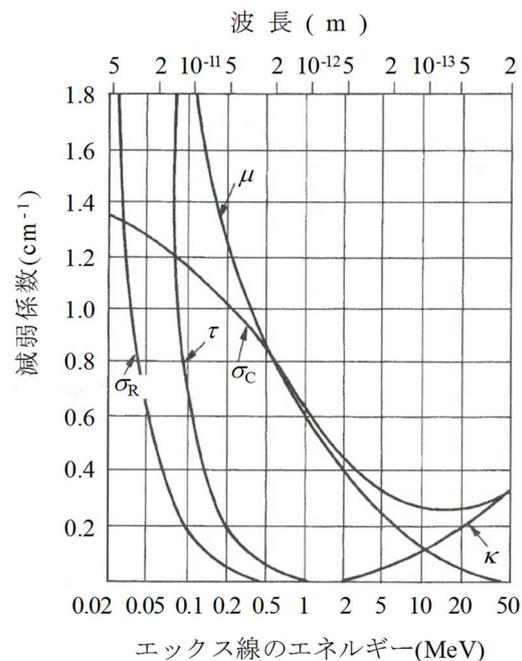


図9 鉄の各種減弱係数とエックス線エネルギーの関係

図10は種々の金属に対する減弱係数 μ をエックス線のエネルギーと波長に対して表したものである。エネルギーが増すほど減弱係数は小さくなるのが分かる。鉛の約90keV付近の不連続な部分は、K吸収端といい、鉛のK特性エックス線の励起電圧に相当している。

エックス線が物質を透過しやすいか否かを示す目安として、透過力の強いエックス線を「硬いエックス線」といい、透過力の弱いエックス線を「軟らかいエックス線」といってエックス線の質的な違いを表現することもある。

5. エックス線の利用

エックス線を利用する方法は透過法、散乱法、回折法および分光法に大別できる。表1に、これらの方法を用いたエックス線装置を用途によって分類したものを示す。

透過法

エックス線が物質を透過する度合いは、物質の種類、厚さおよび密度によって変化する。したがって、透過線の強度変化から欠陥の状態、厚さの変化、混合物の分布状態あるいは組立品の内部構造などを調べることができる。

散乱法

エックス線が物体に照射されると、物体から散乱線が発生する。散乱線のうち入射エックス線となす角度が90°以上の範囲の散乱線を後方散乱線という。この後方散乱線の強さは物体の厚さの増加にともなって増加する。この性質を利用して物体の厚さを測定する方法が散乱法である。

回折法

多くの物質は結晶からできており、結晶内部では原子またはイオンが規則正しく配列して空間格子を形成している。物質の種類によって、原子の並ぶ間隔が定まっているので、エックス線回折装置を用いて試料を構成している物質の微細な結晶構造を明らかにできる。さらに回折エックス線のピーク強度を測定すれば、試料を構成している混合物あるいは化合物の定量分析を行うことができる。

分光法

分光法とは、試料にエックス線を入射させたときに発生する特性エックス線を、結晶面間隔が分かた分光用結晶に入射させて、原子の空間格子間隔を求める方法である。蛍光エックス線装置は、物質を非破壊的に迅速に高い精度で分析ができる。

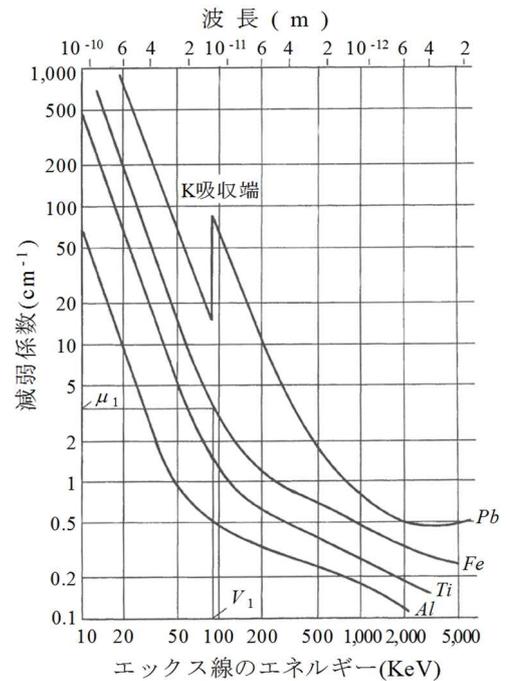


図10 エックス線エネルギーと種々の金属の減弱係数との関係

表1 用途によるエックス線装置の分類

分野	名称	原理	用途
理工学	X線透過試験装置	透過(吸収)	透過写真の撮影, 透視, 材料欠陥の検出等
	X線解析装置	回折	物質の結晶構造の解析, 定性, 定量分析
	X線応力測定装置	回折	金属の溶接, 熱処理・鋳造等による残留応力測定
	蛍光X線分析装置	分光	元素の定性・定量分析
	X線マイクロアナライザー	分光	マイクロ領域の元素分析
	X線厚み計	吸収, 散乱	金属の厚さ測定
医学	診断用X線装置	透過(吸収)	直接撮影, 間接撮影, 透視
	治療用X線装置	透過(吸収)	表皮および深部治療

6. エックス線量の単位

吸収線量

単位質量の物質が放射線を吸収して得たエネルギー量であり、単位は Gy (=J/kg) と定義されている。

照射線量

エックス線による空気の電離量であり、単位は C/kg である。

空気カーマ

カーマとは電荷を持たない放射線（中性子線、エックス線やガンマ線）によってある組織・臓器の単位質量中に遊離されたすべての荷電電離粒子の初期運動エネルギーの和として定義される。カーマの単位は J/kg または Gy である。空気カーマは、線量測定のためのために間接電離粒子の場を、適切な物質である空気に対するカーマで表した量である。

実効線量と等価線量（単位：Sv）

放射線が人体に与える影響を確率的影響と非確率的影響に分類し、確率的影響を評価するための量を**実効線量**という。また非確率的影響を評価するための量を**等価線量**といい、人体の特定の組織における線量を表す。

実用の線量（単位：Sv）

1センチメートル線量当量 (H_{1cm})

外部被ばくによって人体の組織が受ける実効線量ならびに外部被ばくにより皮膚を除く人体の組織が受ける等価線量を評価するための指標として用いられる量であり、人体表面から深さ 1cm の箇所における線量に相当する量である。

70マイクロメートル線量当量 ($H_{70\mu m}$)

外部被ばくにより皮膚が受ける等価線量を評価するための指標として用いられる量である。人体表面から深さ 70 μm の箇所における線量に相当する量である。

7. 被ばく防護の3原則

外部被ばくの防護には、(1) 線源から距離をとる、(2) 被ばく時間を短くする、(3) 適切な遮蔽を行うことが重要である。

距離

線源が点状であるとみなされるときには、単位面積当たりの放射線の量は距離の二乗に反比例する。

時間

線量率が一定の場合には、被ばく量は作業時間に比例する。

遮蔽

エックス線の空気中での透過率を図11に示す。10keV以下のエックス線は1mあれば1/2以下に減弱されるが、20keVのエックス線では10m必要になる。したがって、通常用いる50~100keVのエックス線では室内程度の空気では全く減弱されず、遮蔽が必要である。

エックス線が物質にあたると図12に示すようなさまざまな相互作用を起こす。実験者を被ばくから守るためにエックス線装置の周辺を鉛、鉄、鉛ガラス等の板、あるいは鉛等の重金属を含む透明なプラスチック板等で遮蔽する方法がよく用いられている。図13に遮蔽効果の例を示す。エックス線の遮蔽には重金属、特に鉛が

図12 エックス線の物質との相互作用
有効である。吸収端があつてやや複雑であるが、密度の大きいものほど有効である。

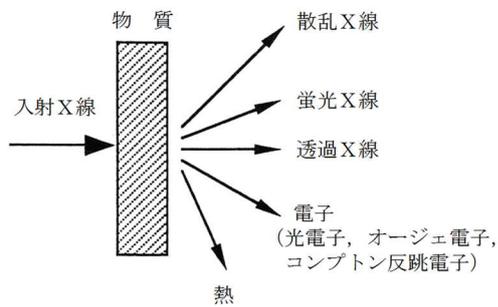


図4 X線の物質との相互作用

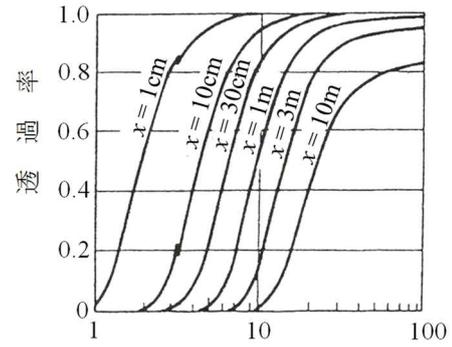


図13 材質が異なった場合に透過線量が等しくなる厚さ

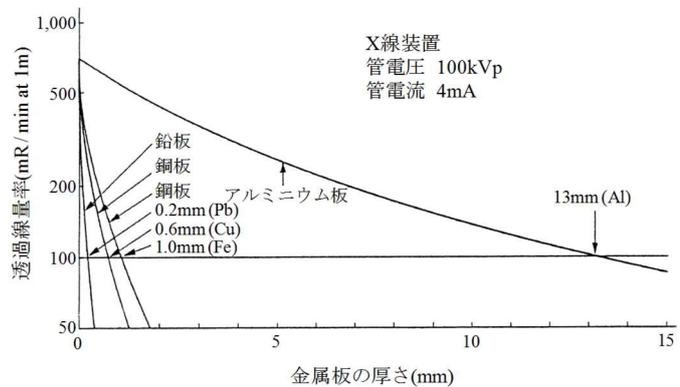
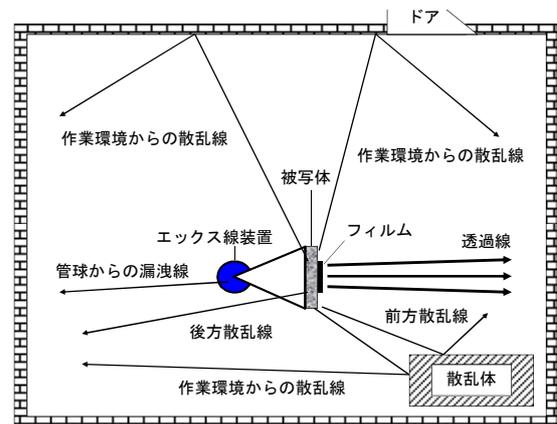


図5 材質が異なった場合に透過線量が等しくなる厚さ

8. エックス線の安全取扱

- (ア) 図14に示すようにエックス線装置からは透過線、漏洩線および散乱線がでてい。作業者を被ばくから守るためにエックス線装置の周辺を、鉛、鉛ガラス、あるいは鉛等の重金属を含むプラスチック板等で遮蔽する。
- (イ) 利用線錐の経路内に身体部分を入れない。
- (ウ) 試料交換作業は必ず装置の電源を切つて行う。
- (エ) 上記が不可能な場合はシャッターが閉じていることを確認してから行う。
- (オ) 作業方法、装置の改善等を検討し、作業の短縮化をはかり、無用な被ばくを避ける。
- (カ) ターゲットの取替え可能な装置については、取替えの都度、漏洩エックス線の有無をサーベイメータで確認する。

図14 エックス線の装置から出る透過線、散乱線および漏洩線



9. 主要なエックス線（電子線）装置からの漏洩とその防護

回折用エックス線装置

回折用エックス線装置は1次エックス線量が極めて多い。また研究用エックス線装置の大部分を占め、使用者も多いため、放射線障害例も多い。そのため、以下のような事項に注意を払い、作業手順を十分に検討しかつ適切な遮蔽をすることが必要である。

図11 空気によるエックスの減弱

- (1) 1次エックス線の線量率が高い。図15はエックス線管球窓からの距離を変えたときの1次エックス線量率の変化である。ターゲットは銅、モリブデンおよびコバルトで作動させたときの値である。モリブデン・ターゲットの場合、10cmの位置において10Gy/mである。調整や試料交換時に被ばくするおそれのある15cm程度の位置では6Gy/mであり、1分間被ばくすれば、紅斑や脱毛などの症状が発生するだろう。さらに、図16に示すように散乱エックス線量も多い。試料中心から30cmの作業者が位置しそうなところでは100 μ Gy/hである。
- (2) 細いビームが問題となる。細いビームに対しては局部の線量率が問題となるが、サーベイメータでの測定値は低い値を示す。正確な線量率の測定には大きな断面積のビームが必要である。
- (3) 装置によってエックス線の照射、漏洩が大きく異なる。エックス線回折装置には種々の形態の装置がある。現在では多くの装置が自動化され、安全性の高い装置が多い。しかし、実験の性格上エックス線を照射しながら試料の調整をする必要のある装置などもある。また旧式の装置を使用しているところもある。安全性の高い装置が多い故に、それらの装置を使用する場合には十分に注意しなければならない。
- (4) 表2に大学における回折エックス線装置による事故例を示す。日常的に使用する装置であるため、放射線が発生する装置を使用しているという認識が不足になりがちである。特にシャッターの開閉は事故例も多いため、使用の都度、確認する必要がある。また、個人被ばく線量の測定の際に使うガラスバッチはビームの方向により面積が変わることがあるので、図17に示すように着用面を確かめ、男性は胸部、女性は腹部の作業衣の前面に着用しなければならない。

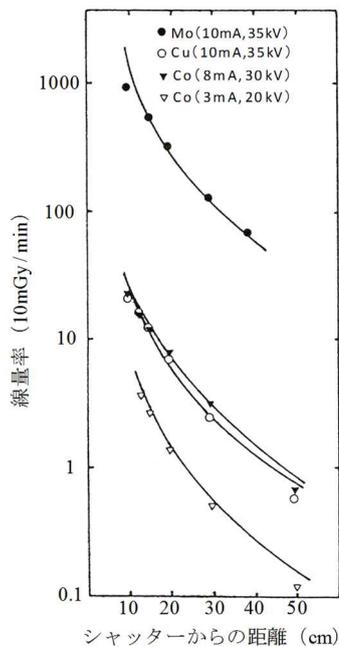


図15 回折用エックス線装置の一次エックス線量率 (小西ら、1982)

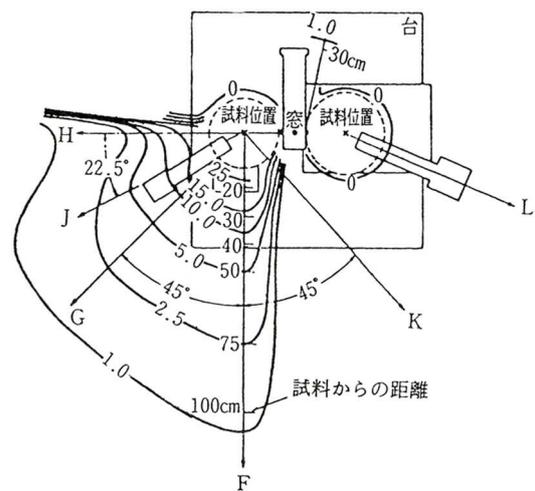


図16 エックス線装置からの漏洩散乱エックス線量率 (単位は10 μ Gy) の分布 (Coターゲット、30keV、20mA、試料鉛)

表2 大学における回折用エックス線装置による事故経験例（小西ら、1982）

番号	当事者	人数	使用方法	発見の端緒	主な被曝部位	推定被曝線量	原因
1	学生	3		臨床症状	手指	約9Gy	いたずらをして骨を透視した
2	学生	1	カ	本人が気づいた	眼	<0.2Gy	ビーム・ビューの鉛ガラスがはずれていた
3	職員	2	メ	フィルムバッジの情報	胸, 顔	0.9mGy< 9mGy<	同上
4	学生	1	ラ	本人が気づいた	眼	3-11mGy	ビーム・ビューをつけ忘れた
5	職員	1		同上	眼	1mGy<	同上
6	学生	1	法	同上	手指	200mGy	シャッター「開」に気づかず試料をとりつけた
7	学生	1		同上	顔	40-130mGy	シャッター「開」に気づかず光軸調整をした
8	学生 職員	4 1	自	フィルムバッジの情報	胸	0.5-1mGy	使わない側のシャッターが、長期間「開」であった
9	学生	1	動	本人が気づいた	手指, 顔, 胸	0-1Gy	シャッター「開」に気づかずスリットをとりつけた
10	学生	1	記	同上	腹	3mGy	シャッター「閉」と誤認して電源を入れた
11	学生	1	録	フィルムバッジの情報	胸	4.9mGy	不明
12	学生	1	法	同上	胸	1.8mGy	不明
13	職員	1		本人が気づいた	手背	25mGy	シャッター「開」に気づかず試料をとりつけた

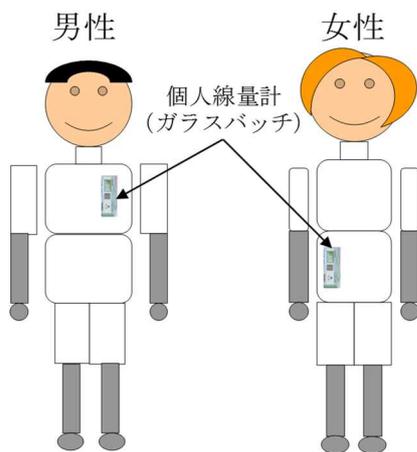


図17 個人線量計（ガラスバッジ）の着用位置

ろうえいの原因	説明	ろうえいの場所
つぎ目におけるすきま	パッキングの劣化, 摩擦, しめつけ具合が関係する	電子銃, 試料室, 観察窓枠
障壁の厚さの不足	鉛ガラスの鉛当量不足。ビーム直下の双壁が薄い	観察窓, カメラ室下部
しゃへい物の欠陥	鏡体との間にすきまがしやすい構造	コンデンサー・レンズ下部
しゃへい物の不適当な使用	故障のためしゃへい物を一部はずしていた	操作台下部

表3 電子顕微鏡からのエックス線漏洩の原因（小西ら、1982）

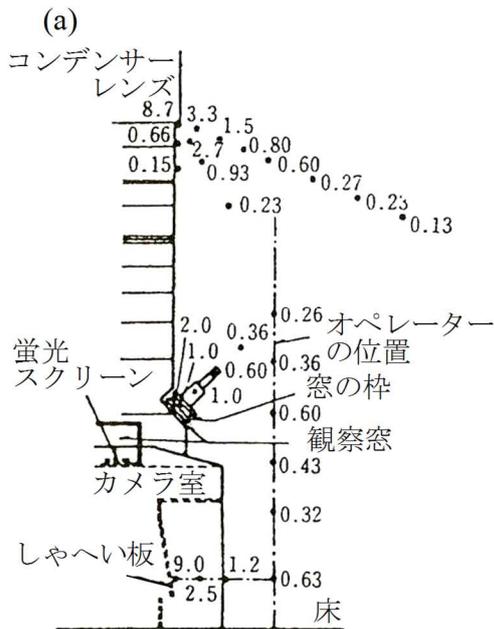


表4 管電圧に対する性質の変化

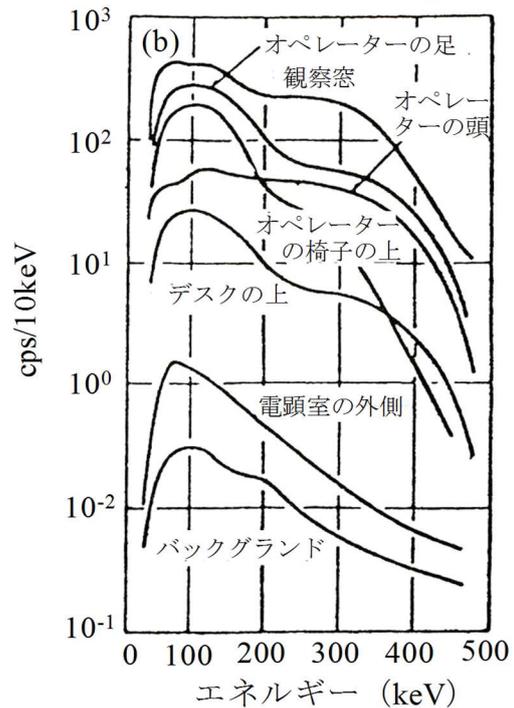


図18 大型電頭(500kV,19 μ A)からの漏洩エックス線 (a)垂直断面の線量率、(b)エネルギースペクトル(NaI)

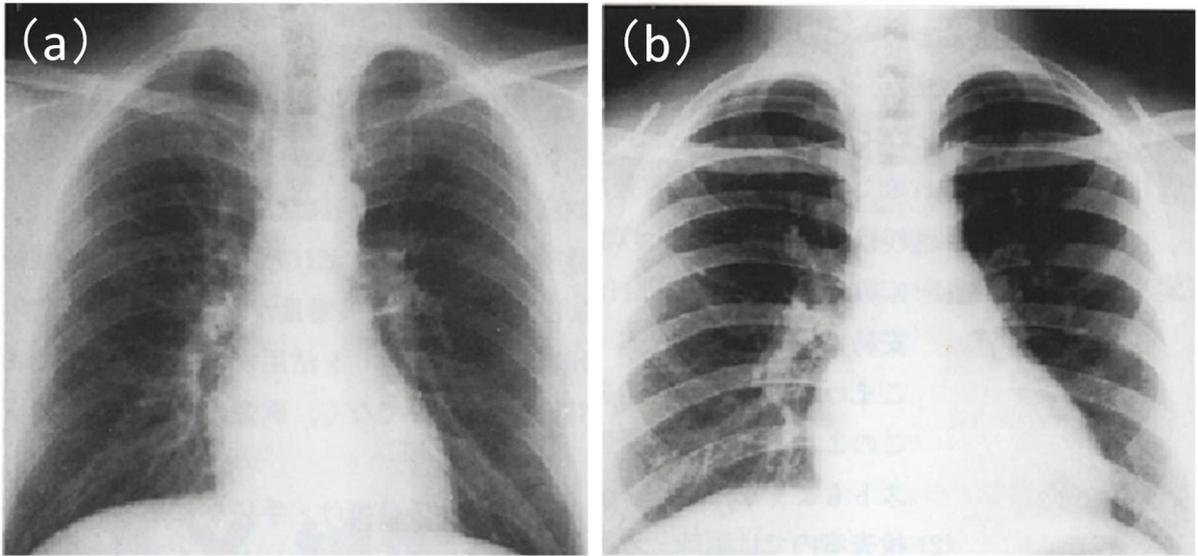
電子顕微鏡

電子顕微鏡ではエックス線を直接使用するわけではないが、電子線がレンズや試料で制動されると、エックス線が発生する。漏洩しているエックス線の種類とエネルギーを図18に示す。主な漏洩箇所は、電子銃、試料室、観察窓、カメラ室下部等であり、その原因は表3に示すようなものが挙げられる。

10. 透過写真撮影

エックス線装置により透過写真を撮影する際には、撮影条件として、エックス線管電圧、エックス線管電流および照射時間を設定する。ここで、管電圧を変化させたときの性質の変化を表4に示す。エックス線写真撮影における写真のコントラストは、管電圧が高圧になると小さくなる。図19に管電圧を変えて人体の透過写真を撮った例を示す。高圧撮影では通常電圧撮影よりややコントラストが悪い。

管電圧	線質	透過力	人体吸収	散乱線	写真コントラスト
高圧 ↑	硬線 ↑	強い ↑	少ない ↑	多い ↑	小 ↑
低圧 ↓	軟線 ↓	弱い ↓	多い ↓	少ない ↓	大 ↓



参考文献

電子科学研究所編、“エックス線作業主任者講習会テキスト” 廣濟堂、2001.
九州大学アイソトープ総合センター“X線取扱講習会テキスト”

図 19 高圧撮影と通常電圧撮影、(a)高圧撮影（管電圧 14 万ボルト）(b)通常電圧撮影（管電圧