

東京大学放射線取扱者再教育資料 No. 40 (2022)

1. 短寿命アルファ線放出核種への期待とその安全取扱い	1
2. 測定のための単位「シーベルト」の新たな定義とその運用上の課題	4
3. 放射線施設における地震・火災等の一般的な対応	7
4. 核燃料物質の管理に関する国内外の体制と仕組み	9
5. ハンディタイプのエックス線分析装置の特徴と安全取扱い	11

編集：環境安全本部

期待されている核種の概要

飛程が短く LET が高い α 線による癌治療の有効性は、北欧のコンソーシアムで開発された $^{223}\text{RaCl}_2$ の前立腺癌の骨転移治療剤によって初めて実証されました。2013 年 5 月に治療薬 Xofigo が米国 FDA から承認され、2016 年 3 月には我が国でも初めての α 線放射性医薬品として承認されました。 ^{223}Ra (半減期 11 日) のように半減期の短い、いわゆる短寿命 α 線放出核種は、体内に投与された後に癌細胞に対する治療効果を発揮し、減衰および代謝によって速やかに体外に排出されるため、核医学治療に適した核種といえます。Xofigo の成分は、 $^{223}\text{RaCl}_2$ の化学式で表される単なる塩化ラジウムです。近年、短寿命 α 線放出核種を医薬品として有効な化合物に標識して、その有効性を検討する研究開発が我が国でも急速に進展しつつあります。その中でも、 ^{211}At および ^{225}Ac が有望な核種とされています。ハロゲン元素である ^{211}At (半減期 7.2 時間) は、 α 壊変 1 回と EC 壊変 1 回によって安定同位体の ^{207}Pb に壊変します。同族元素のヨウ素と概ね同じ化学的性質のため、有機化合物への標識が主に行われています。アクチノイド元素である ^{225}Ac (半減期 10 日) は、 α 壊変 4 回、 β^- 壊変 2 回によって安定同位体の ^{209}Bi に壊変します。つまり、1 原子で 4 個の α 線を放出します。水溶液中では Ac^{3+} イオンとなることから、キレート剤を用いて標識が行われます。将来、これらの核種が実際に臨床利用される際には、 ^{211}At は国内製造が必要になる可能性が高いですが、一方で、 ^{225}Ac は半減期が ^{131}I (半減期 8 日) よりも長い場合、海外から輸入される可能性もあります。

アイソトープ総合センターでの現状

本学では、これらの短寿命 α 線放出核種を使用できる放射線施設がなかったため、学内の研究者は海外の大学や、国内他大学との共同研究により研究を進めてきました¹⁾。しかし、このような状況を踏まえ、アイソトープ総合センターでは変更申請を行い、2020 年 6 月からいくつかの短寿命 α 線放出核種を、動物実験を含めて使用できるようになりました。使用できる核種および量を表に示します。非常に厳しい空气中濃度限度や排気中濃度限度による制限のため、動物実験に十分な量とはいえませんが、まずは少しでも使用できる環境を作ることを優先しました。今後、研究の進展や需要を踏まえて、使用量を増加させる変更申請を検討することとしています。

表 アイソトープ総合センターで現在使用できる短寿命 α 線放出核種一覧

核種	1 日最大使用数量 (Bq)	3 月間使用数量 (Bq)	年間使用数量 (Bq)
^{211}At	50 M	250 M	1 G
^{213}Bi	0.7 M	35 M	140 M
^{223}Ra	0.7 M	35 M	140 M
^{225}Ac	0.7 M	35 M	140 M

- ・現在、最大量を使用できる作業室での数量であり、他の作業室ではこれよりも少ない
- ・ ^{213}Bi , ^{223}Ra , ^{225}Ac の使用数量は、 ^{211}At の内数である
- ・動物実験の場合には、作業室への立入時間数に制限をかけている

現在、アイソトープ総合センターで実際に ^{211}At を用いた研究を行っているグループがあります。変更申請時の内部被ばく線量計算で示す必要があるように、定められた時間数および1日最大使用数量内での使用であれば、個人の被ばく線量が法令に定められた線量限度を超えないことは自明です。しかし、これまでの海外の大学等との共同研究での経験を踏まえて、手袋のみならず使い捨てのタイベックスーツを着用し、専用の不織布製マスクを二重に着用することで、不要な内部被ばくを防いで実験を行うようにしています。 α 線を測定できるZnS(Ag)シンチレーション式サーベイメータも新たに購入しました。放射線管理に携わる放射線管理チームにとっても短寿命 α 線放出核種を使用するのは初めての経験であるので、当面の間、実験に立ち会って作業環境の測定や汚染検査などのサポートを行うことにしています。そのおかげで、現在のところ、 ^{211}At による実験者の身体汚染は起こっていません。ただ、ダストサンプラーでの測定によって、 ^{211}At の実験室空気中への飛散がある程度起こったことが明らかになっています。着用済みのマスクの放射能を、娘核種であるPoの特性X線測定によって定量することによっても、ある程度の飛散が起こったことが示され、マスク着用による防護効果があることが実証されています。汚染の拡大防止の観点から、実験期間中には、当該実験室を関係者以外立ち入り禁止にし、実験終了後にも1週間立ち入り禁止にしています。

教育訓練資料の例

一般社団法人日本放射線安全管理学会では、「短寿命放射性核種の安全取扱いに関する教育資料作成」事業を、原子力規制委員会放射線安全規制研究戦略的推進事業「短寿命アルファ線放出核種等の合理的安全規制のためのガイドライン等の作成：JPJ007057（代表・大阪大学放射線科学基盤機構附属ラジオアイソトープ総合センター・吉村崇教授）から受託し、教育資料を作成しました。同資料は、実際に短寿命 α 線放出核種を使用した経験のある研究者が主に執筆し、特に以下の各点に留意して作成されています（筆者も執筆者の一人です）。

1. α 線放出核種を中心に医療利用を目的とする短寿命核種の利用者を対象とした教育資料を作成すること。また、適宜、放射線管理担当者等に有用な情報も加えること。
2. 上記短寿命核種の利用者だけでなく、多くの非密封放射性核種の利用者に有用な資料とすること。
3. 基本的な項目に加えて、既存の資料にはない細かな取り扱い方法や防護の具体的方法などを充実させること。
4. ヒヤリ・ハット事例などを含めること。
5. 講義・プレゼンテーションに活用しやすい資料を作成すること。

この教育訓練資料は、同学会のwebサイトで無償公開されています²⁾。本稿執筆時点での最新版は2021年6月に改訂されたものです。パワーポイント形式のスライドであり、殆どのスライドには、講義内容を再現できるような内容の説明が付いています。特に短寿命 α 線放出核種を使用するユーザーや、短寿命 α 線放出核種に興味のある研究者、RIを投与した動物実験を行う研究者、あるいは管理に関わるスタッフにとって非常に有益な資料であると思われるので、ぜひ参考にしてください。

◆出典

- 1) 桧垣 正吾、「スウェーデンにおける短寿命 α 線放出核種の放射線管理の実例」、日本放射線安全管理学会誌 17(1), 29-33, doi:10.11269/jrsm.17.29 (2018).
- 2) 一般社団法人日本放射線安全管理学会、「短寿命放射性核種の安全取扱いのための教育資料作成アドホック委員会 教育訓練資料」、<http://jrsm.jp/slrm-adhoc/>

アイソトープ総合センター
助教 桧垣 正吾
再教育項目：安全取扱い・人体影響

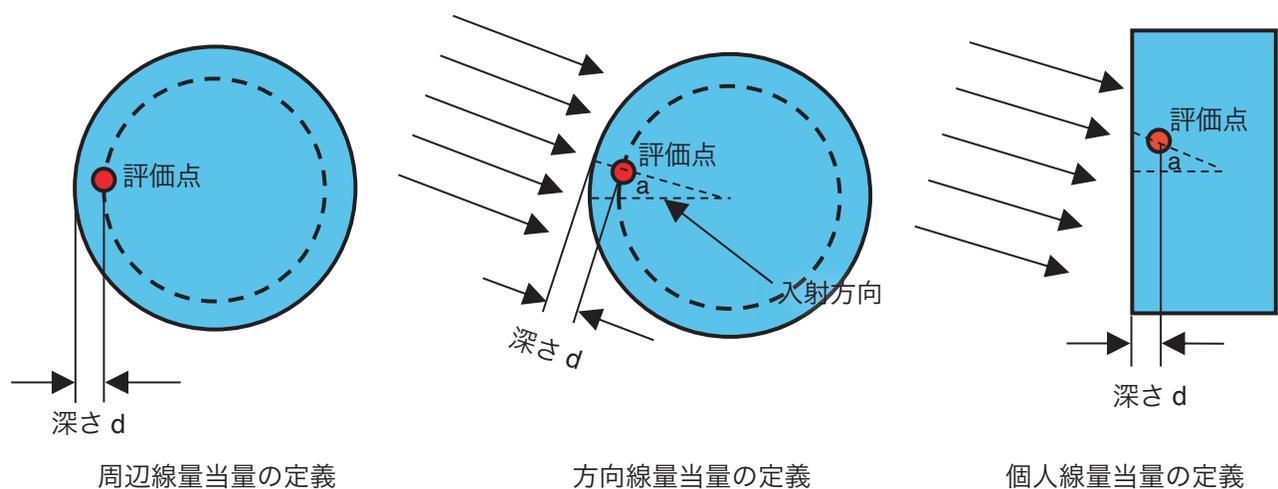
2

測定のための単位「シーベルト」の新たな定義とその運用上の課題

放射線防護では、実効線量及び等価線量が「防護量」として国際放射線防護委員会 (ICRP) により導入され、いずれの単位も「シーベルト」となっています。

これら防護量は、人体の臓器、組織の線量から計算で求められる量であるため、実際に測定器を用いて測定することができません。そこで、国際放射線単位測定委員会 (ICRU) では、測定・評価するため「実用量」の概念を導入しています。

現行実用量は、場の測定では、人体等価物質でできた球 (ICRU 球_直径 30cm) 及び個人の被ばく線量測定では、平板 (ICRU スラブファントム_30cm×30cm×15cm) により、全身や皮膚といったモニタリング対象によって定められた深さ (1m, 3mm, 0.07mm) における吸収線量 (Gy) に線質係数 (放射線の種類や線質 (エネルギー) により生体に及ぼす影響が異なることがあり、この影響の違いを数量的に表す係数) を乗じて線量当量 (この単位もシーベルト) を求めています。



この実用量は、上述のとおり、測定・評価のための線量当量を求めていることから、防護量 (実効線量) を上回る (保守的となる) ように定められています。

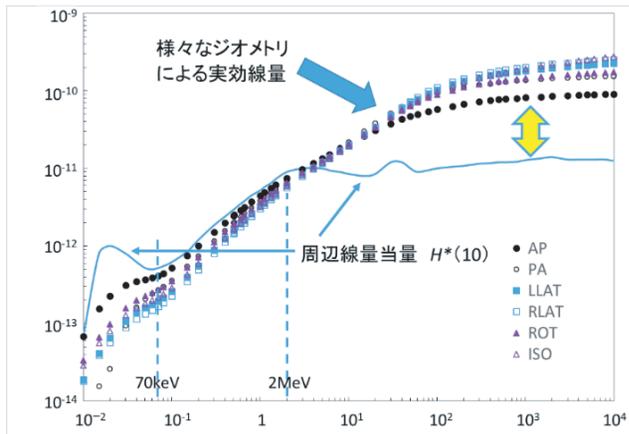
しかしながら、近年、加速器施設の利用や航空機搭乗時の宇宙線被ばく、宇宙開発にともなう被ばく等高いエネルギーまでの換算係数が必要となってきています。

ICRP Publ. 116 (2010 年) ではこれらを踏まえ、光子、中性子、電子に加え、陽電子、ミュー粒子、パイ中間子、ヘリウムイオンを追加し、エネルギー範囲も大幅な引き上げ¹が行われています。

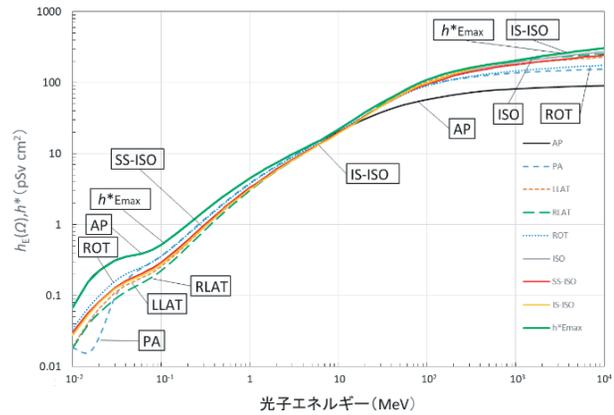
ICRP Publ. 116 におけるエネルギー範囲の引き上げを受け、国際放射線単位測定委員会 (ICRU) において、従来の実用量の見直しが検討されています。主な見直しの点は以下のとおりです。

- ①エネルギー範囲の引き上げに伴う影響（高エネルギー領域における実効線量に対する過小評価）
- ②実用量の定義を従前の ICRU 球、ICRU スラブファントムの特定深さにおける線量当量率から防護量への直接の関連づけへの見直し

前述のとおり、現行の実用量は防護量に対して保守的な値をとるように定められていますが、エネルギーの高い領域では、この関係性が崩れることが問題点として指摘されています。下左図は、現行実用量と実効線量（防護量）の関係を示したものです。下右図は現在検討されている新たな実用量の定義に基づく実用量と防護量の関係を示したものです。



現行実用量と実効線量との関係ⁱⁱ



様々な照射ジオメトリでの実効線量への換算係数 $h_E(\Omega)$ と周辺線量への換算係数 $h^*_{E_{max}}$ の関係ⁱⁱⁱ

新たな実用量の定義では、「ある点におけるフルエンス（又は空気カーマ）の計測量に広いビームで照射される放射線場において様々な照射ジオメトリ（AP（前方 - 後方照射）, PA（後方 - 前方照射）, RLAT（右側面 - 左側面照射）, ISO（等方向照射）等）で最も評価結果が高くなる実効線量への換算係数を乗じた値」として規定されています。

これにより、実用量が高エネルギー領域において実効線量に対して過小評価となる課題は解決されることとなりますが、実効線量に基づき実用量が定義されることから、以下の実効線量算出式のとおり、組織加重係数等、実効線量の評価方法が見直される度に実用量の見直しが必要となることが指摘されています。

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R W_R D_{T,R}$$

※ E ：実効線量、 w_T ：組織加重係数、 H_T ：等価線量、 W_R ：放射線加重係数、 $D_{T,R}$ ：放射線 R による臓器 T の吸収線量

これに対しては、様々な照射ジオメトリで最も評価結果が高くなる換算係数に一律のファクターを乗じて予め保守的に評価しておき、組織加重係数等の見直しの影響を吸収しておくなどが検討されています。

その他、新たな実用量の定義が、照射される放射線場において様々な照射ジオメトリで最も高くなった実効線量への換算係数をフルエンス（又は空気カーマ）に乗じた値であることから、例えば、Cs-137（661keV）の測定では、現行の実用量の定義では、 $H^*(10)/E$

は 1.2 程度となりますが、新たな実用量の定義で校正された測定器を用いた場合、 H^*/E (∵ 661keV では $H^*=E(AP)=E$ のため) は 1.0 となります。このため、現場に実用量の定義が異なる測定器が混在するような場合は、測定値も混在することとなり、管理上の注意が必要となります。

また、現在の放射線測定器が新たな換算係数の適用に係り、その応答特性に追従できるかなどの課題も指摘されており、原子力規制庁が行った平成 30 年度原子力規制庁委託費「実用量及び防護量としての実効線量に係る動向調査」において、電離箱式、半導体式測定器の場合には、低エネルギー X 線の入射を抑制するフィルターを用いることや、NaI(Tl) シンチレーション式では、エネルギー毎の換算定数 ($G(E)$ 関数) を変更する等の対応が必要であることが報告されており、今後の検討動向に注目する必要があります。

【参考文献】

- ・「ICEP Publication 116 外部被ばくに対する放射線防護のための換算係数」：概要と改訂ポイント，遠藤 章 (JAEA) ,Isotope News 2015 年 8 月号 ,No.736
- ・ICRP,ICRU における防護量と実用量に関する最新の検討状況，遠藤 章 (JAEA) ,保健物理 ,52 (1) ,39 ~ 41 (2017)
- ・ICRP/ICRU レポート "Operational Quantities for External Radiation Exposure" について，黒澤 忠弘 (産業技術総合研究所)
- ・平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書，実用量及び防護量としての実効線量に係る動向調査，公益財団法人原子力安全研究協会

ⁱ ICRP.Publ74 では、光子及び電子は 10MeV、中性子は 180MeV までの換算係数を提供。ICRP.Publ116 では、光子、電子、陽子、中性子、ミュー粒子は 10GeV、パイ中間子は 200GeV、ヘリウムイオンは 100GeV までの換算係数を提供。

ⁱⁱ 出典：平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書，実用量及び防護量としての実効線量に係る動向調査，公益財団法人原子力安全研究協会

ⁱⁱⁱ 出典：同上

環境安全本部 客員研究員
原子力安全技術センター
杉崎 則彦
再教育項目：取扱・法令

地震は地震動そのものによる被害のほか、二次的に起こる火災でも人的、物理的に大きな被害をもたらします。また、ひとたび火災が発生すると、甚大な被害のみならず、放射線施設外へ放射性物質の漏えい、放射線障害の発生の可能性も懸念されます。1995年の阪神淡路大震災以降の被害の教訓から、耐震補強、転倒・落下防止など多くの対策が進みましたが、これら災害に対する対応について考えてみましょう。

1. 災害対策と点検

実際に災害が発生した場合は、放射線障害予防規程で定める災害時の施設点検等を定めるに従い実施する必要がありますが、災害への対策は、放射線施設であっても他の施設と大きくは変わらず、人命確保と放射性物質を含めた危険物による二次災害の防止にあります。災害への事前対策について具体例を挙げますと、

- ・ 高圧ボンベ、装置、棚、ロッカーなど重量物は転倒・落下防止のため固定する。
- ・ 遮蔽物、遮蔽体などは、倒壊しないように補強・固定する。
- ・ 消火設備、消火器の設置（使用する対象物に適応した種類の消火器を常備）。
- ・ 廊下、通路、出入口付近に避難の障害となるようなロッカー等を置かない。
- ・ 廊下、通路などには物品等を放置したままにせず、整理整頓を心がける。
- ・ 薬品の漏えいから起こる二次災害が発生しないよう、転倒・落下防止の措置だけでなく、容器同士が接触して破損しないよう、容器を固定又は仕切りを用いる、緩衝材を使用するなどの対策を行う。
- ・ 放射性物質や薬品類を使用した後は、指定された場所へ保管する。
- ・ 可燃性物質や引火性物質は、熱源等の傍に置かない。

といったものです。特に後半の例は、普段の心がけがないと成果が上がらない項目で、皆さんの協力が不可欠です。

2. 連絡体制

災害発生時に連絡体制に沿って行動することで、災害や危険な状況を最小限に食い止め又は回避することができます。緊急時に速やかに通報・行動ができるよう、居室、管理区域の出入口付近などのわかり易い場所に緊急連絡体制図や行動マニュアルを掲示しておきましょう。

災害が発生したら、まず災害の状況を緊急連絡体制図に従い通報します。このとき、「あわてず」、「はっきり」、「正確に」、状況を伝えましょう。通報・連絡は、火災などの災害や怪我、放射線障害の恐れがあるときだけに限りません。判断に迷うような事象であればそのことを含めて、連絡しましょう。例えば、実験中に出火したらすぐに通報するのは必然ですが、すぐに消火できた場合も同様です。

私たちが行っている実験や分析などの操作、薬品の使用などには多くの危険が潜んでいて、後から思い出してみると、トラブルまでには至らない小さな問題が発生していたこと

があります。しかし、それらは災害のリスクを内包したトラブル（幸いにして無事故に終わったもの）の一つです。

災害を起こさないためには、これらの情報をできるだけ多く収集し再発防止策を整えること、そして事例への対応策を皆で共有する、すなわち安全教育が実はとても重要なことなのです。

3. 教育訓練

地震が発生した際の行動は、

- ・まず身の安全を確保する。
- ・あわてず行動する。
- ・揺れがおさまったら火の元を確認する（出火した際は落ち着いて初期消火）。
- ・揺れがおさまっているときに戸を開け出口を確保する。

と皆さんも防災教育やパンフレット等でよく聞く知識だと思います。しかし、順番やタイミングはどうしたらよいですか？と聞かれたらどうでしょうか。また、非常口、非常階段や避難ハッチ、AEDの設置場所、避難所、避難場所をご存知ですか。いざ、災害時に悩まず行動できるよう、防災訓練には積極的に参加しましょう。

また、外国人留学生を受け入れた場合には、特に丁寧な教育が必要です。地震を経験したことのない方は、地震や余震の揺れによる恐怖でパニックを起こすことが想定されます。国により防災ルールも違いますので、緊急時に混乱のないよう学内で実施する訓練だけでなく、各研究室で日頃から防災について話し合い、災害時には「慌てなくても大丈夫」、「みんな避難できるから落ち着いて」といった行動がとれるようにしておきましょう。

4. まとめ

地震・火災等への対応の第一歩は事前の災害対策や安全教育です。そして、これらの災害に備えるためには、決して他人事と思わず、一人一人の防災意識や防災・減災への取り組みが重要になります。

環境安全本部 客員研究員
日本アイソトープ協会
中村 美和
再教育項目：法令・取扱

放射性物質のうち核燃料物質（核分裂性のウラン、トリウム、プルトニウム）については、その平和利用の維持のために、国内法制による管理だけでなく、国際社会における管理も行われています。核燃料物質の不適切な取扱いについては、国内法に問われるばかりでなく、国際的な問題にもなり得ます。ここでは、その核燃料物質の取扱いに関する基本的な仕組みについて紹介します。

1. 国際的な管理

核軍縮・核不拡散・原子力の平和利用を3本の柱とする、「核兵器の不拡散に関する条約（Treaty on the Non-proliferation of Nuclear Weapon: NPT）」が発効（1970年、日本は1976年に批准）しており、日本や核兵器保有国を含む191か国・地域（2021年5月現在）が締約しています。これに基づき、日本をはじめとする非核兵器国は、国際原子力機関（IAEA）による保障措置を受けることが求められています。

保障措置とは、核燃料物質等が核兵器に転用されることなく、平和目的にのみ利用されていることの担保を受けることです。具体的には、IAEAと各国が保障措置協定（日本は1977年に締結）に基づき、事業者による計量管理（指定の場所における核燃料物質の増減や在庫量の管理）、封印・監視カメラ等による封じ込め（核燃料物質を所定の場所からむやみに持ち出さないための処置）、査察（保障措置の実施状況の確認）を行います。さらに、保障措置協定の強化のために追加議定書が発効（日本は1999年に締結）しており、その中では、IAEAへの提供情報の拡大や査察対象の拡大（補完的アクセス）が定められ、直前（24時間前もしくは2時間前）の通告による査察が可能になりました。以上のように、核燃料物質の取扱いにあたっては、常日頃から適切に管理することが、国際的に求められています。例えば、計量管理が不正確であることが査察で指摘されれば、核物質を不正に保有しようとしているかのような疑いを生じさせるかもしれません。封印が外れていたり、監視カメラの映像が不鮮明であったりした場合には、核物質の不正な使用が疑われるでしょう。また、何らかの事情により査察が行われなければ、それは不適切な核物質の使用を隠そうとしていると誤解されるかもしれません。これらの状況は国際社会における核物質の利用に関する日本の信用を大きく損ないかねません。国際的な取り決めに基づいた適切な管理を、核物質を取扱う組織が責任をもって実施する必要があります。

2. 国内の管理

日本では、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉等の規制に関する法律（原子炉等規制法）」に基づき、国内保障措置制度を定めています。NPT等に基づく保障措置の対象となる核燃料物質等の使用にあたって、必要な許可を得ること、所定の記録を残すこと、計量管理規定を定めそれを守ること、保障措置検査を受けること、などが求められています。日本における国内保障措置は原子力規制委員会が担当しており、国内の核物質の管理状況を集約し、IAEAに報告しています。法律に定める国内における保障措置を適切に実施することは、国際的な保障措置を遵守するための必要条件となります。

さらに、原子炉等規制法とその関係法令では、核燃料物質等を取り扱う施設に関する要件も定められています。核燃料物質等を取り扱う施設は、技術基準を満足することで許可を受けた施設で、定められた方法で核燃料物質等を取り扱わなくてはなりません。

環境安全本部 客員研究員
JAEA 大洗
橋本 周
再教育項目：核燃料物質

5

ハンディタイプのエックス線分析装置の特徴と安全取扱い

簡便に非破壊で土壌・岩石・廃棄物等の元素分析ができるハンディタイプの蛍光エックス線分析装置が市場に出始めてから既に 20 年以上が経過し、現在では日用品に含まれる有害元素の分析、考古学や鉱脈探索など幅広い用途に使用されています。蛍光エックス線分析法は、試料に低エネルギーのエックス線を照射することにより、軌道電子をたたき出し、空位に外殻電子が遷移する際に発生するエックス線（蛍光エックス線）の波長から物質の同定を、その強度から定量を行う手法です。エックス線源も高出力ではないために液体窒素による冷却も不要であり、また電子線やイオンビームに比べて真空を必要としないためコンパクトで持ち運び易く敏速な分析が可能です。特に電子線励起と比較するとバックグラウンドが低く、分析精度が高いというメリットがあります。ハンディタイプの装置には試料が試料窓に密着していなければエックス線が照射されないインターロックシステムが搭載されています。そのため、取扱い説明書に従い正しく操作していれば被ばくの危険性は極めて低いです。但し、可搬型のエックス線装置のため管理区域も装置に付随して移動するので照射方向前方を含む周囲を管理区域に設定して立入り禁止とし、「照射中」を

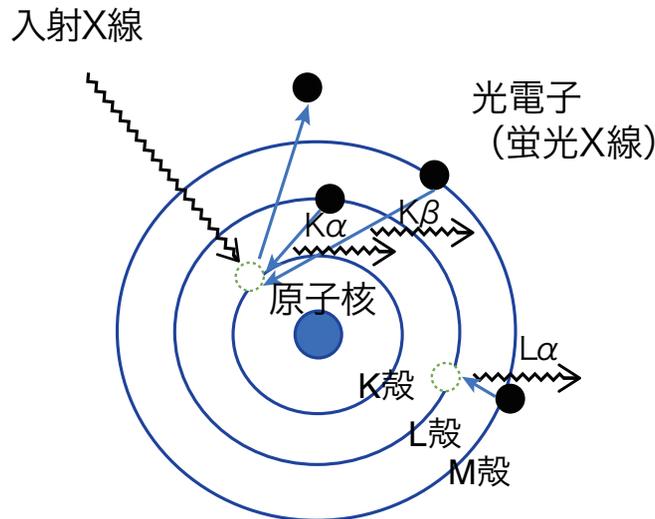


図1 蛍光 X 線発生装置の仕組み

EL	%	+/-
Fe	59.198	0.065
Cr	22.409	0.046
Ni	11.371	0.011
Mo	1.15	0.098
Mn	0.646	0.021
Cu	0.344	0.014

図2 分析結果イメージ

示すランプの点灯にも留意すべきです。装置の不良や誤った使用方法による被ばくの可能性は否定できませんが、一部の機器では最大で国際線に搭乗した際の機内線量率程度の被ばくの可能性があるとしています。



図3 ハンディタイプ蛍光エックス線装置使用時の注意事項

医学系研究科放射線分子医学部門
講師 榎本 敦 (文)
医学部放射線管理室
中田 よしみ (図・イラスト)
再教育項目：エックス線