

放射線・放射能の 基礎と測定の実際

～放射線・放射能を正しく理解するために～

公立鉦工業試験研究機関長協議会

「放射線・放射能の基礎と測定の実際」 発刊にあたって

現在、我が国には、鉍工業系試験研究機関（以下、公設試とよぶ）が各都道府県あわせて67機関あり、全部で約4,000名の職員が行政の一環として日本のものづくりの中核をになう中小企業を技術支援することで、産業振興をはかる活動を行っております。

2011年3月11日に発生した東日本大震災は地震、津波さらには原発事故をひきおこし、我が国はおおきな被害をうけました。なかでも、原発事故にともなう放射能汚染の問題は住民の健康被害、食の安全、さらには工業製品の安全性等、おおきな問題となりました。公設試の機関長会議では、3月中旬に電話会議にて幹事県の合意をとり、岩手、宮城、福島、栃木、茨城の5県への支援体制を組むことを決定、その後被災県からの具体的支援要請に基づき活動を展開しました。

その主なものを紹介しますと、まずは被災県公設試の試験業務等を他県で引き受けることから開始しました。とくに東京都では被災県からは交通費もかかるということで、被災県企業であれば半額に減免する措置をとったところ、この10月末までで約7,000件の利用がありました。2番目は放射能風評被害対策です。工業製品の輸出にあたって海外から汚染されてない証明書を付ける要請があいつぎ、各県で急きょサーベイメータを整備し、測定サービスを開始しました。同時に、どの県でどういう測定ができるか測定機関、測定機器のデータベースを整備し、各県での情報共有も進めました。

そして3番目が企業向けの放射線対策ガイド、「放射線・放射能の基礎と測定の実際」の発刊です。平成23年7月の公設試機関長協議会での承認をうけ、東京都を中心に全国9つの公設試が力をあわせて、この小冊子の作成に取り組みました。放射線・放射能の基礎知識、検査方法の実態、検査事例等、豊富かつ実践的な内容となっています。

さて、現在復興が徐々に進みつつあります。現在は、土地、建物、社会インフラ等基盤が中心ですが、とくに訴えたいのは産業の復興です。いくら土地、建物が整備されても仕事がなければ生活していくことができません。日本経済を支えている中小企業の復興なくして産業の復興はありません。この小冊子が中小企業の放射線対策に効果をあげ、産業復興の一助となることを切望いたします。

平成24年1月

公立鉍工業試験研究機関長協議会 会長
(東京都立産業技術研究センター 理事長)
片岡 正俊

目 次

「放射線・放射能の基礎と測定の実際」 発刊にあたって	i
第 1 章 福島第一原子力発電所から放出した放射能	1
1.1 放射性物質の大気への放出	1
1.2 放射性物質の拡散と集中（ホットスポット）	1
1.3 工業製品の放射能汚染	4
1.4 農作物の汚染	5
第 2 章 全国公設試における相談・検査の現状	6
2.1 全国公設試に寄せられる相談について	6
(1) 工業製品および原料の放射能汚染についての相談例	6
(2) 海外輸出に関する相談例	8
(3) 測定器および測定法に関する相談例	8
(4) 相談、質問事例の紹介	11
第 3 章 輸出相手国、公設試の対応	13
3.1 輸出相手国の規制状況	13
3.2 全国の公設試の対応状況	14
3.3 工業製品の放射能汚染検査	21
(1) 汚染検査	21
(2) 成績証明書の発行	22
(3) サーベイメータの校正（国際的に通用するトレーサビリティの確保）	22
3.4 食品・肥料の放射能測定	23
(1) 食品中の放射能測定	23
(2) 堆肥・飼料等の放射能測定	26
第 4 章 放射線・放射能検査の事例	28
4.1 依頼試験等による検査事例	28
4.2 製造業者の方の放射能・放射線対策	34
第 5 章 放射線・放射能の基礎知識	35
5.1 放射線・放射能の発見と利用の拡大	35
5.2 放射能と放射線	37
(1) 分子・原子・原子核とは	37
(2) 放射性同位元素とは	38
(3) 放射能	39
(4) 壊変	40
(5) 壊変図式	42

(6) 放射線	43
(7) X線の発生	44
(8) 物質との相互作用	46
5.3 放射線の量と単位	52
(1) 放射線のエネルギー【eV】	52
(2) 放射能【Bq】	52
(3) フルエンス	52
(4) 吸収線量【Gy】	52
(5) 照射線量【C/kg】	52
(6) 空気カーマ【Gy】	52
(7) 等価線量、実効線量、1 cm線量当量【Sv】	53
第6章 環境・医療と放射線	56
6.1 環境と医療の放射線	56
(1) 自然の中の放射線	56
(2) 医療に用いられる放射線	58
6.2 放射線の人体影響	59
(1) 放射線影響の内容	59
(2) 確率的影響と確定的影響	60
(3) 「がん」について	62
(4) 遺伝的影響について	64
6.3 放射線防護の基礎	65
(1) 放射線防護の考え方	65
(2) 外部被ばくからの防護	66
(3) 内部被ばくの防護	67
第7章 放射線測定器の基礎知識	69
7.1 放射線測定装置の種類と原理	69
(1) 気体の電離を利用する測定器	70
(2) 固体の電離を利用する半導体検出器	74
(3) 発光を利用するシンチレーション型検出器	75
(4) その他の測定器	78
(5) 被ばく管理用測定器	80
7.2 放射線を計測する際の注意点	83
(1) バックグラウンド	83
(2) 統計変動	83
(3) 計数の数え落とし	83
(4) 計数効率	84
(5) 検出器の校正と点検	87
7.3 測定機器の選択	88
(1) 放射線の種類による分類	88
(2) 測定の目的による選択	88

第8章 放射線測定の基礎	89
8.1 γ 線スペクトル測定	89
(1) マルチチャンネルアナライザ (MCA)	89
(2) ゲルマニウム半導体検出器の構成	90
(3) ゲルマニウム半導体検出器による放射能測定	92
8.2 環境中の放射能測定	93
(1) 大気浮遊塵中の放射能測定	93
(2) 降下物 (雨水や降下した塵など) 中の放射能測定	93
(3) 環境中の線量モニタリング	94
(4) 市販品GM計数管型サーベイメータを用いる場合の注意点	94
参考資料	95
用語解説	98
おわりに	102
■公立鉾工業試験研究機関長協議会一覧	103

第1章 福島第一原子力発電所から放出した放射能

第1章

第2章

第3章

第4章

第5章

第6章

第7章

第8章

1.1 放射性物質の大気への放出

2011年3月11日の東日本大震災により福島第一原子力発電所が緊急停止し、その後、1号機（3月12日）、3号機（3月14日）の原子炉建屋で水素爆発が起きました。その時に建屋内の放射性物質が原子炉建屋の屋外に放出されたと考えられています。

1.2 放射性物質の拡散と集中（ホットスポット）

東北地方や関東地方でも3月14日ごろから平常時以上の放射線量が観測され始めました。これは、福島第一原子力発電所から放出された放射性物質が、水蒸気や粉塵（ほこり）などの形で大気中に拡散し、風の流れに乗って運ばれてきたものと考えられます。風により運ばれてきた放射性物質は、拡散しながら重力で降下するものと、雨と一緒に降下するものがあります。放射性物質の拡散状況を調査した結果は、文部科学省のホームページで報告されています（<http://ramap.jaea.go.jp/map/>）。

また、大気中に放出された放射性物質の核種ごとの放出量の時間的変化は、文部科学省緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム（SPEEDI）を活用した試算結果として公表されています（http://www.nsc.go.jp/mext_speedi/index.html）。

ヨウ素（I）-131、セシウム（Cs）-137は原子炉燃料であるウラン（U）-235の核分裂生成物です。Cs-134はCs-133の中性子捕獲反応により生成したものです。Cs-133は、核分裂により生成されるものと、核分裂生成物のキセノン（Xe）-133が β 壊変し、生成されるものがあります。福島第一原子力発電所の事故により放出されたCsは、Cs-134:Cs-137はほぼ1:1の割合で観測されています。

地面に落ちた放射性物質の挙動は、落ちた場所の状態や放射性物質の化学状態により異なります。例えばCsは、土壌表層の粘土粒子の結晶の中に吸着されます。地表の非常に薄い層、1～数センチ以内にほとんどが存在し、土壌内部まで浸透しません。

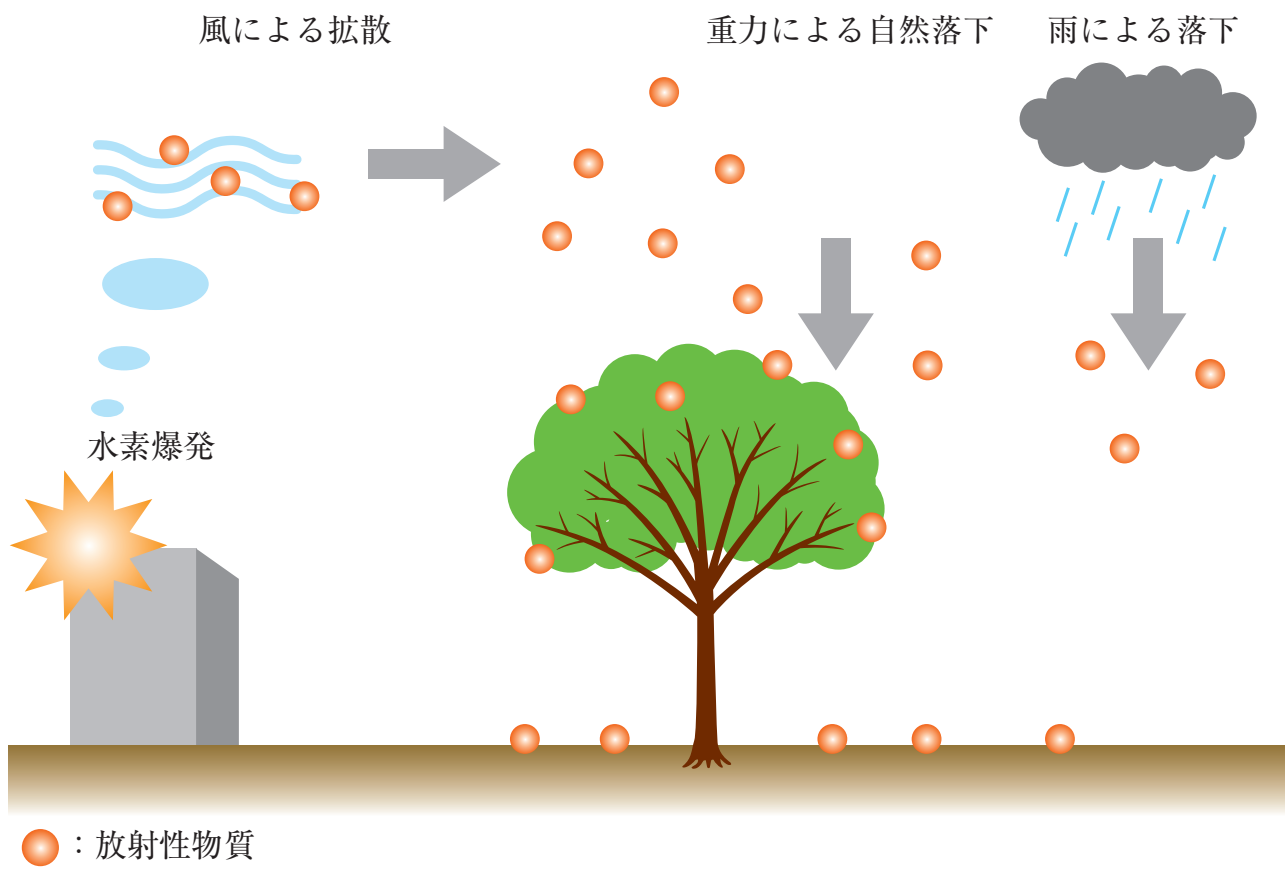


図1.1 放射性物質の拡散と降下

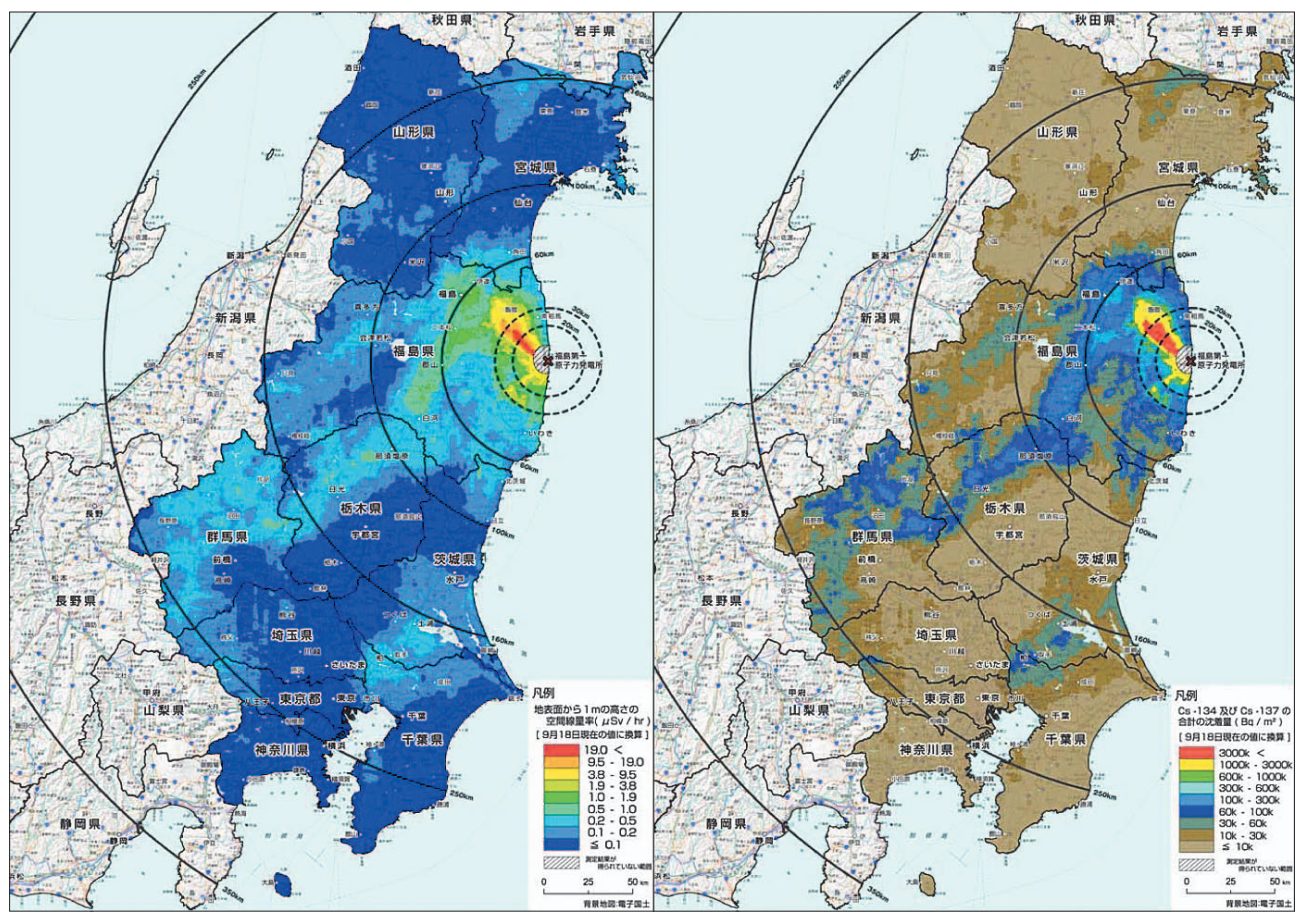


図1.2 空間線量率分布(左)とCsの沈着量分布(右)
 (文部科学省 2011年10月6日報道発表資料)

埃に付着した放射性物質や雨に含まれた放射性物質は、再び埃や土とともに飛散したり、雨により流れたりしながら、ある個所に集中することがあります。吹き溜まりや、雨水が集中的に集まってくる場所などです。そのため、放射性物質が飛ばされてしまった場所や雨で流れた場所は、放射能濃度が低くなりますが、一方集まってしまう場所は、放射能濃度が周囲よりも高くなってしまいます。これがホットスポットと呼ばれているものです。

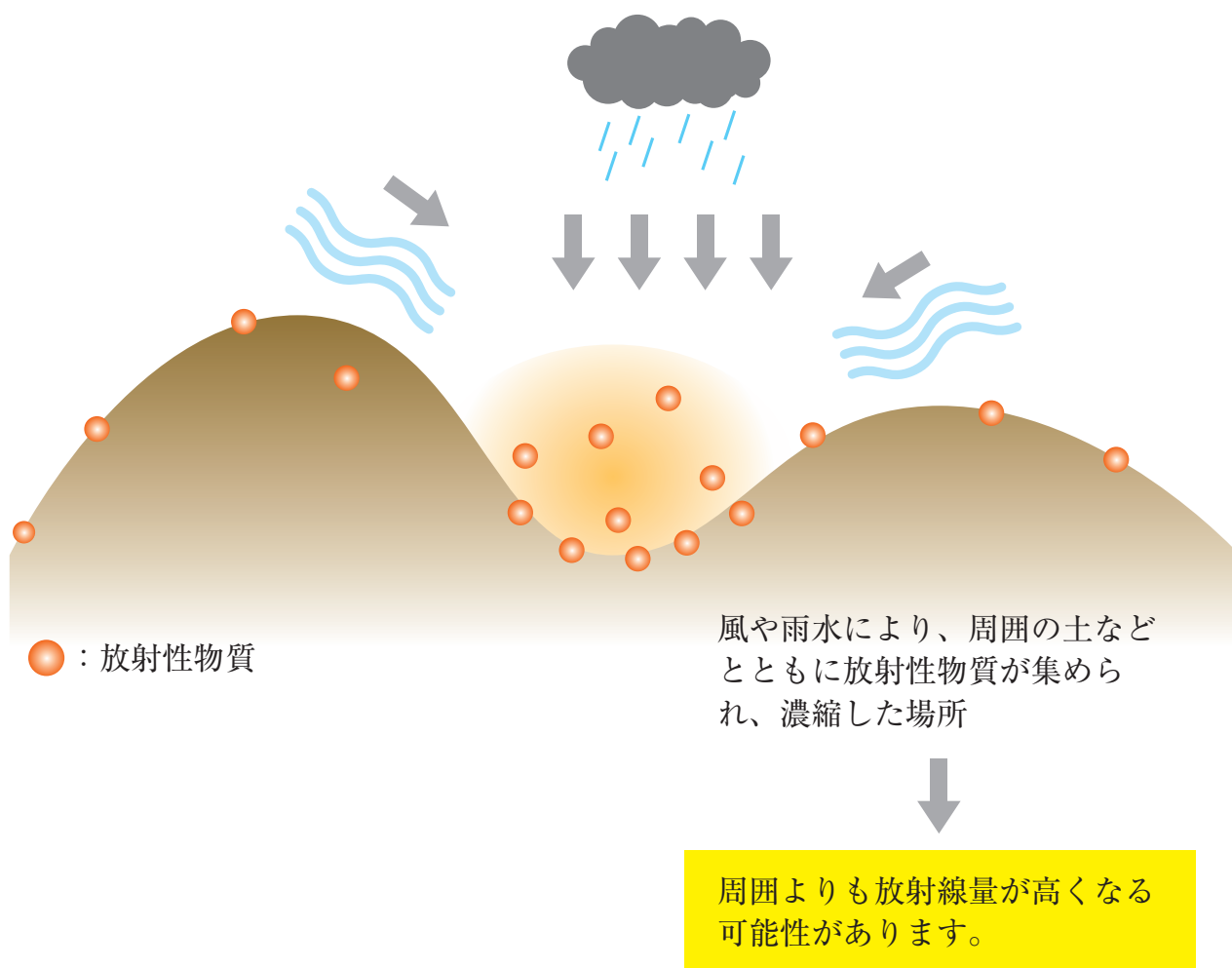


図1.3 ホットスポット

1.3 工業製品の放射能汚染

工業製品の放射能汚染は、どうして生じるのでしょうか？ 原因としては、

- ① 福島第一原子力発電所が水素爆発し放射性物質が放出されて以後、製品や部品を屋外にむき出しで出していた。ちょうどそこに放射性物質が降下した。
- ② 放射性物質が降下し汚染した場所に、製品や部品を置いた。
- ③ 製品の材料中に放射性物質が混入していた。

などが考えられます。

①、②の場合は、製品表面に付着しているだけなので、洗浄すれば除染できます。汚染の有無と除染できたかどうかは、GM計数管型サーベイメータを用いて検査すれば分かります。

③の様に材料中に混入している場合は、洗浄しても除染できませんので、放射性物質を含んだ材料の部品を交換する必要があります。

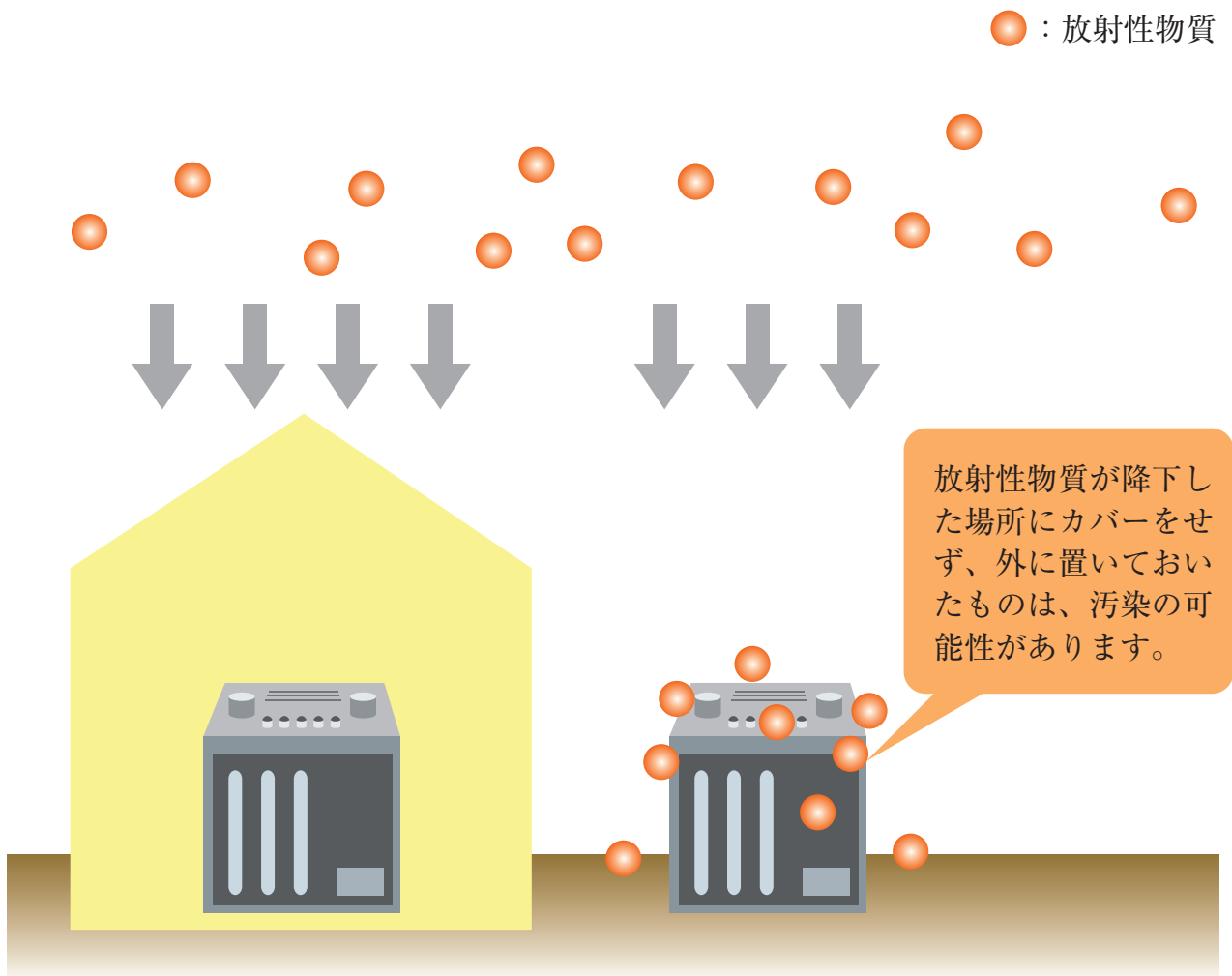


図1.4 工業製品の汚染の可能性

1.4 農作物の汚染

田畑で栽培した作物の汚染経路としては、

- ①工業製品と同様に、水素爆発時に放出された放射性物質が降下した時に付着したもの。
- ②土壌中の放射性物質が養分や水分とともに吸収された。
- ③大気中の放射性物質が葉から吸収された。

などが考えられます。①の汚染は、表面に付着したものなので洗うことにより除染できると考えられます。除染されたかどうかはGM計数管型サーベイメータで検査すれば分かります。②や③の様に養分や水分とともに、作物内部に吸収されてしまった場合でも、洗浄や調理により放射性物質を除去できる可能性があります（参考文献：食品の調理・加工による放射性核種の除去率, 財団法人原子力環境整備センター 1994年）。

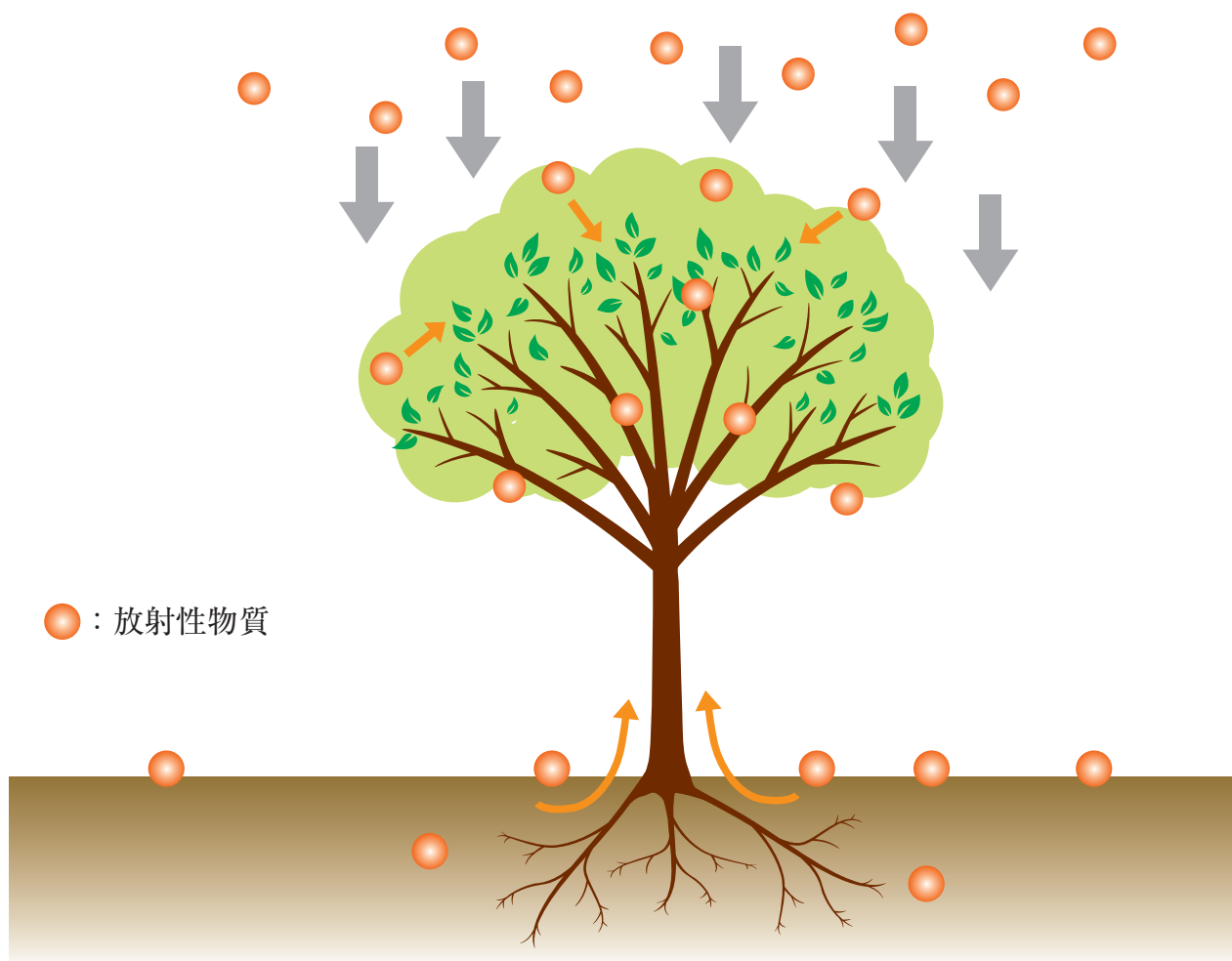


図1.5 農作物などの汚染の可能性

第2章 全国公設試における相談・検査の現状

2.1 全国公設試に寄せられる相談について

福島第一原子力発電所の放射能漏れ事故以来、各県の公設試には放射線・放射能に関する様々なご質問が寄せられています。事故が起こった当初は、人体への影響などが多く、その後、食料品や飲み水に放射性物質が検出されると、その影響について質問が多くなりました。また、海外に於いては日本製製品の輸入時に放射能汚染検査が求められるようになると、工業製品の放射能検査についてご相談が多くなりました。

これまでに全国の公設試に寄せられた相談とその回答を紹介いたします。

(1) 工業製品および原料の放射能汚染についての相談例

相談：客先から放射線測定依頼があったので、木製学童用品の放射線量を測定してほしい。

回答：表面の汚染は、GM計数管型サーベイメータで測定ができます。木材のような放射性物質が浸透する可能性のある製品の場合は、Bq単位の測定を行うべきです。

相談：稲ワラを原料としたワラ製品の放射線測定を行ってほしい。

回答：木材と同様に稲ワラも放射性物質が付着・浸透する可能性があるため、Bq単位での精密測定を勧めました。

相談：原料が米である蒸留後の製品の放射能汚染への影響について教えてほしい。

回答：基本的にはもろみに放射能物質が混入していても蒸留されません。しかし、蒸留するときに、蒸気を極端に激しく吹き込むなどの操作を行いますと、ミスト状になったもろみが製品へ移行する（飛沫同伴）ことがあるので操作は慎重にする必要があります。

相談：水道水中や野菜、海産物、畜産物などの放射線量について教えてほしい。

回答：これらは放射能（Bq/lやBq/kgなど）の測定が必要ですので、通常ゲルマニウム半導体検出器により測定しています。測定方法としては「緊急時における食品の放射能測定マニュアル（2002年3月）厚生労働省」に則って行います。

相談：砂が放射能に汚染されているか調べて欲しい。

回答：GM計数管型サーベイメータを用いて工業製品の表面を検査する方法で可能です。砂や土壌などの場合は、放射能の種類を特定してその量（単位Bq/kg）を調べるのが一般的ですので、ゲルマニウム半導体検出器などによる検査が必要と思われます。また、袋などに入れた状態で袋表面からの検査では、内側の砂の汚染を調べることにはなりません。検査対象の砂の一部を平らな容器などに広げて、その砂に検出器を近づけて調べる方法でよろしければ、検査は可能です。

相談：大きな機械装置だが、放射能汚染が心配なので調べたい。

回答：製造現場に出向いて工業製品の表面の検査を行っている公設試もありますのでお問い合わせください。その場合は、大きな装置なども検査対象です。しかし、非常に大きな機械の全面を複数台について検査するとなると時間的にも難しいですので、台数や測定部位をある程度絞るなど相談させていただきます。

相談：取引先から製品検査の他に工場内の放射線量の検査を求められているが、可能ですか。

回答：製造現場に出向いて検査を行っている公設試でしたら可能ですので、お問い合わせください。その場合は、製品の放射線量検査結果の他にバックグラウンドを併記した報告書を発行しています。バックグラウンドの測定は、工場内の放射線量の測定と同じような意味になります。シンチレーション型サーベイメータという空間線量計（単位 $\mu\text{Sv/h}$ ）を用いる検査が良いと思います。

相談：割り箸、木製スプーン、そろばん、机、木製装飾品などの木製品については徐々に内部汚染（Csの土壌からの吸収）が進行するため、いつの時点で表面汚染測定からBq測定に移行するのが良いのでしょうか。また、いずれもBq単位では基準値がありませんが、どう判断すればよいのでしょうか。

回答：福島第一原子力発電所事故が発生して間もない時点では、放射能は木の表面に付着したものが測定対象でした。今後は土壌から、養分とともに木の内部に放射能が入り込み、木全体に放射能汚染が生じる可能性もあります。そのため、木の内部に放射能があるかどうか、検査していく必要があります。具体的には、木を細かく切断し、ゲルマニウム半導体検出器により測定します。割り箸などの製品になったものについては、GM計数管型サーベイメータにより測定し、バックグラウンドと比較して、カウント数が多いものについて詳細に測定するという方法が良いと思います。

相談：わら玉や焼却灰など飛散の可能性がある物も持ち込まれる事例が増えてきました。測定場所の放射能汚染を拡散する原因にもなるので、受入から環境の維持、測定時の管理方法を教えてください。

回答：飛散する可能性がある試料は、ビニル袋などに密閉した状態で測定場所に受け入れた方が良いでしょう。測定場所が汚染してしまうと、他の測定に影響が出てきます。試料を測定室内に運び入れる前と後に、その場の放射線量を測定し、汚染が生じなかったことを確かめましょう。また、測定場所の床や机には、大きな口紙などを引いておき、汚染が生じてしまった場合は、口紙ごと撤去します。サーベイメータも汚染する可能性があるため、ラップなどで覆っておくのが良いでしょう。測定者は、手袋、白衣等の作業着、靴はビニル等で覆うなどの対策が必要です。

相談：測定対象形態は固体と書いてありますが、粉状のサンプルの測定はお願いできますか？

回答：粉状のサンプルは飛散して測定室や測定器を汚してしまうケースがありますので、

粉体そのものを直接測定する依頼はお受けすることはできません。粉体をビニル袋に入れた外側から測定する間接的な測定であればお受けすることができます。ただし、本来計測されるべき放射線がビニル袋によって一部遮蔽されてしまうケースが考えられますので、測定値には多少誤差が生じることがあります。

相談：工業製品で汚染が検出された場合、除染の具体的方法が分かりません。単に「拭き取る」が主体と思われそうですが、さらに効果的に除染する方法を教えてください。

回答：放射能は埃などと一緒に工業製品の表面に付着しています。そのため、通常の汚れを落とす方法で対応できます。ふき取りで取れない場合は、中性洗剤などを使うのが効果的です。隙間などの場合は、ブラシを使うのが良いでしょう。

相談：GM計数管型サーベイメータ、ゲルマニウム半導体検出器で測定した製品の測定結果報告書に、安全性を証明する記載をしてくれますか。

回答：測定結果報告書は、あくまで試験体を測定した結果としての数値データを報告するものですので、データの評価に関する証明等、安全性等を保証する類の記載依頼には対応できません。

相談：放射能汚染している牧草を刈ったハサミ十数丁を洗浄して再利用したいが、放射能が残っていないか測定してほしい。

回答：GM計数管型サーベイメータでハサミの表面汚染の測定ができます。汚染がないことを確認してください。

(2) 海外輸出に関する相談例

相談：工業原材料輸出相手（欧州）側から放射線の安全性について問い合わせがありました。

回答：輸出相手国が日本製輸入品に対して放射線量・放射能検査を求めてくる場合があります。規制に合わせて、測定装置を選択する必要があります。

外国は $\mu\text{Sv/h}$ を求めることが多いです。輸出相手国が線量率（ Sv/h ）をもとめている場合は、シンチレーション型サーベイメータ、 Bq/kg や Bq/cm^3 等の放射能をもとめている場合は、ゲルマニウム半導体検出器などを使用して測定します。

相談：輸出時の放射線測定を要求されているものがあります。貴センターにおいて、何かしらの基準などありますか？何か参考になるものがありましたら、教えてください。

回答：相手国の規制に従うのが通常です。規制については、独立行政法人日本貿易振興機構（ジェトロ）のホームページ（<http://www.jetro.go.jp/world/shinsai/navi.html>）が参考になります。

(3) 測定器および測定法に関する相談例

相談：表面汚染による放射線の計数値（cpm）を表面線量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）に換算できますか？

回答：大口径GM計数管型サーベイメータを用いた場合、通常、放射線の計数値はcpmで表示されます。表面線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) への換算は正確にはできませんので、NaI(Tl) シンチレーション型サーベイメータを用いて実測しています。

相談：GM計数管型サーベイメータで測定したcpm値について、 Bq/cm^2 や Bq/kg (ℓ) 値への単位換算は可能でしょうか？

回答：GM計数管型サーベイメータの検出器窓面積値等を考慮し、cpmから Bq/cm^2 への換算は可能です。ただし、この換算には、測定条件をある特定の状態として仮定しているため、換算結果には誤差が含まれることをご理解いただき、おおよその目安としてお考えください。

また、GM計数管型サーベイメータの測定は測定対象物の重量・体積を考慮していないことから、 Bq/kg への単位換算については対応できません。食料品等、 Bq/kg 単位での基準値が設定されているものについては、ゲルマニウム半導体検出器により測定しています。

相談：機器校正の間隔や委託先はどこがよいでしょうか。

回答：校正は年1回程度行うのが良いでしょう。校正用線源を持つ機関に委託します。測定器の購入先にお問い合わせください。

相談：測定室が汚染されていないかをどのようにチェックしますか。

回答：バックグラウンド（測定試料がない状態での線量）を、測定前と後に測定し確認すれば分かります。

相談：ゲルマニウム半導体検出器を所有していない機関で、食品の放射能測定にシンチレーション型サーベイメータで対応できますか。

回答：測定方法は、厚生労働省の「緊急時における食品の放射能測定マニュアル」に、記載されています。ただし、サーベイメータの場合、食品が何で汚染されているか（核種）が分からないことや、精度の点から、詳細は分かりません。

相談：今回の事故では、どのような核種が多く検出されていますか？

回答：福島第一原子力発電所から放出された、 γ 線放出核種以外の α 線放出核種や β 線放出核種については、文部科学省から報告されています。

(http://radioactivity.mext.go.jp/ja/distribution_map_around_FukushimaNPP/0002/5600_0930.pdf#search=種の状況)

相談：Cs-134とCs-137の光電ピーク (ROI) を定量するためのエネルギー幅設定が異なるため、測定値に大きな差異が生じています。NaI (Tl) スペクトロメータを使用したCsの放射能定量分析の方法を教えてください。

回答：NaI (Tl) シンチレーション型検出器により、Cs-134とCs-137が存在する試料の γ 線スペクトルを測定すると、Cs-134の605keVとCs-137の662keVの γ 線ピークが重なります。そのため、ピークを分離しそれぞれの放射能をもとめます。ピーク分離法としては、ガウス分布の2つピークを仮定してそれらを重ね合わせます。

仮定の重なったピークを実際のピークに合うように、仮定の2つのピークのパラメータを調整し、実際のピークを2つに分離する方法などが考案されています。

相談：木炭、稲ワラ製品およびきのこと類など、Bq/kg単位での測定が必要であるがコスト的に合わない製品をどのようにして全数検査するか、技術相談を多数受けています。サーベイメータ等を使用した全数検査法はないのでしょうか。

回答：Bq/kgの単位でデータを出す場合は、試料内部に含まれている放射能も測定する必要があります。試料が厚くなりますと、内部からのβ線が測定できませんので、γ線を測定対象とし、核種を判別できる「ゲルマニウム半導体検出器によるγ線スペクトロメトリ」により放射能を算出するのが、一般的です。しかし、ゲルマニウム半導体検出器は高額であるために、その依頼試験も高額になります。普通の安価なサーベイメータでは、γ線スペクトルが得られないために、核種の判別ができず、放射エネルギーを得ることは困難です。γ線スペクトルが得られるサーベイメータと標準線源を使用すれば、ゲルマニウム半導体検出器よりも安易に測定できる可能性があり、費用も抑えることができますが、精度は落ちます。また各種サーベイメータについてCs-137の換算係数 (Bq/kg/cps) が公表されています (<http://www.jrias.or.jp/index.cfm/6,15496,110,1,html>)。

(4) 相談、質問事例の紹介

東京都立産業技術研究センターと山形県工業技術センターにおける相談内容と検査目的の割合を示します。相談内容としては、工業製品の測定や測定法についてが多く寄せられております。放射能汚染検査の目的としては、輸出用証明書や国内用証明書など、製品の放射能汚染についての証明書の要求が多くあります。

* 証明書・成績書は、測定データを記述し、その数値を証明するものです。安全性を証明するものではありません。

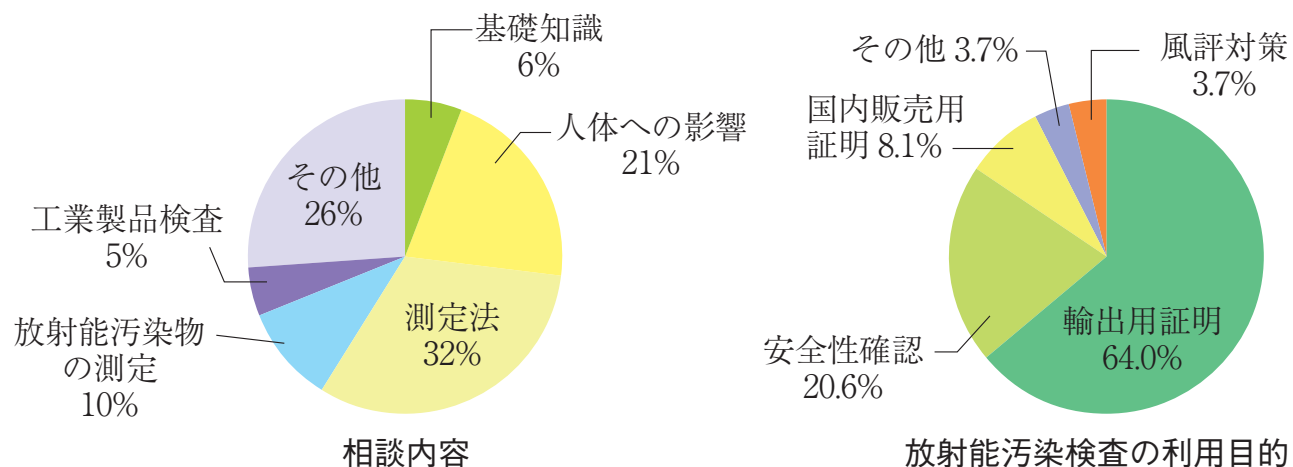


図2.1 東京都立産業技術研究センターにおける相談内容と検査の目的
(2011年3月～5月初旬の集計)

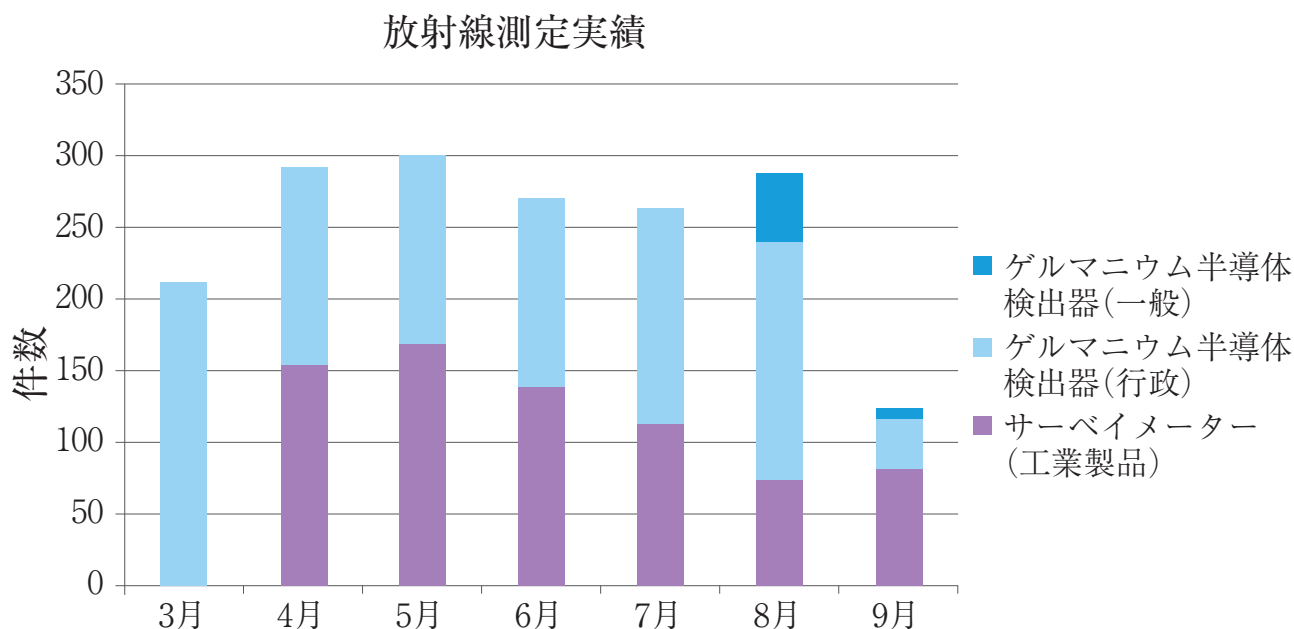
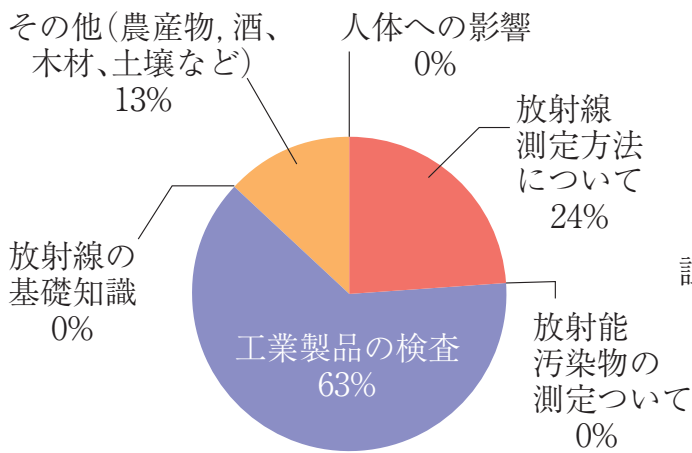
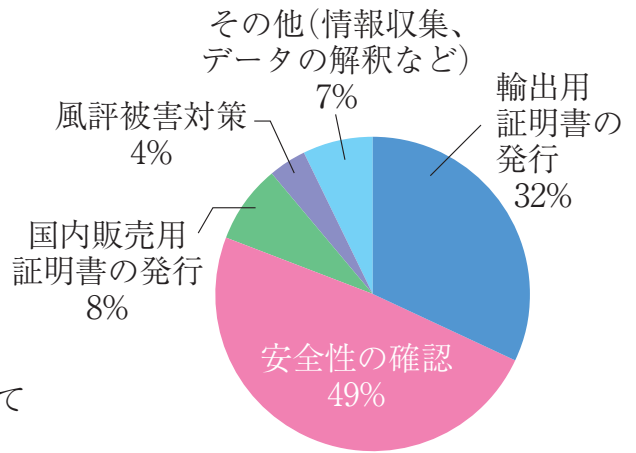


図2.2 東京都立産業技術研究センターにおける依頼試験の推移
(平成23年3月～9月の依頼試験の推移)

* 工業製品の依頼試験は4月15日から実施



相談内容(山形県工業技術センター)



利用目的(山形県工業技術センター)

図2.3 山形県工業技術センターにおける相談内容と利用目的の割合

第3章 輸出相手国、公設試の対応

第1章

第2章

第3章

第4章

第5章

第6章

第7章

第8章

3.1 輸出相手国の規制状況

輸出相手国の規制については、独立行政法人日本貿易振興機構（ジェトロ）のホームページをご参照ください。

<http://www.jetro.go.jp/world/shinsai/navi.html>

以下に海外における輸入時の放射線量検査の実施状況について抜粋します。

表3.1 海外の主な放射能検査実施状況（2011年9月21日現在）

国・地域	対象品目	基準等
米国	日本からの船舶、輸入品	米国税関国境保護局の担当官が検査を実施 福島第一原子力発電所の50マイル（約80キロメートル）域内を航行した船舶については、入港前に沿岸警備隊が検査を実施
EU （加盟国へ勧告）	日本からの船舶、コンテナ	船舶、コンテナの放射能汚染評価基準について0.2 μ Sv/hを推奨。2011年7月19日、EUの港湾において船舶及びコンテナに対する組織的な検査の必要性がなくなったとの意見を示す文書を発出。
オランダ	日本からの船舶、コンテナ	荷揚げ前のコンテナを検査。規制値は、4 Bq/cm ²
ロシア	日本からの輸入品	規制値は、0.3 μ Sv/h（自然放射線含まず）
中国	日本からの船舶、航空機、輸入品	国家品質監督検査検閲総局が各地の検査検疫機関に対し、通関港での核物質と放射能の監視業務に取り組むよう要請。
台湾	機械等658品目 コンテナ（指定13港）	規制値は、0.2 μ Sv/h。超えた場合は、その所有者は除染を行うか、送り返すかの措置をとる。

3.2 全国の公設試の対応状況

2011年12月現在

表3.2 放射線量測定状況一覧 サーベイメータ測定に対応している機関

機関名	測定対象製品	測定方法	結果表示
地方独立行政法人岩手県工業技術センター	工業製品 1社5検体まで 内箱、梱包箱を希望により測定	密着測定、30秒×5回測定の平均値、バックグラウンド(BG)データ差し引き表示 測定風景の写真も成績書に添付	cpm、 $\mu\text{Sv/h} \pm \text{S.D}$ を記載。BGと差の検定を実施。和文英文併記。希望により和文英文の署名入りコメントを発行。
秋田県産業技術センター	工業製品 持ち込み可能な大きさのもの	密着測定、数10秒×5回測定の平均値、BGデータ差し引き表示	$\mu\text{Sv/h}$
山形県工業技術センター	工業製品 1回5検体まで 企業への出張訪問による測定	近接測定、30秒×3回の平均値、BGデータ併記	cpm、 $\mu\text{Sv/h}$
宮城県産業技術総合センター	工業製品 1日1企業6測定まで 持ち込み品の測定、及び現場測定	近接測定：サンプルの形態(梱包・箱詰)等は依頼者の要望に従う 時定数30秒として、90秒、120秒、150秒の3回計測し平均値をとる。(厚生労働省 食安発0317第3号の測定マニュアル手順を参考) BGも同様の手順で計測して報告書に記入。測定風景の写真(プローブとサンプルの位置関係)も報告書に添付	cpm、 $\mu\text{Sv/h}$ (依頼者が選択)
福島県ハイテクプラザ 福島県ハイテクプラザいわき技術支援センター	工業製品 1企業5検体まで 1辺1m以内、30kg以内	近接測定：時定数10秒として5点以上測定し、最大値、最小値、平均値、BGを併記	cpm
茨城県工業技術センター	工業製品(食品、液体不可) 1企業5検体まで 1辺1m以内、30kg以内	近接測定：10回の測定を行い、平均値を記載、BGデータ併記	cpm(報告書は英文併記)

機関名	測定対象製品	測定方法	結果表示
栃木県産業技術センター	工業製品 1企業5検体まで 1辺1m以内、30kg以内	密着測定 30秒×10回測定の平均値を記載	cpm (成績書は英文併記)
群馬県立群馬産業技術センター	工業製品 1企業5検体まで 1辺1m以内、30kg以内 加工食品 (簡易測定) 1日3検体まで 固形は1kg以上、液体は2kg以上	測定場所：管理区域外の部屋を用意。 BGを一定にするため	$\mu\text{Sv/h}$ (成績書は英文・和文選択可) cps(和文のみ)
埼玉県産業技術総合センター	工業製品 (食品、粉体、液体、液状のものは対象外) 検体数の制限なし 1辺80cm以内、30kg以内	表面近接 (5mm程度) 測定 ○GM計数管型サーベイメータ：30秒×10回測定の平均値及びBGデータも併記 ○シンチレーション型サーベイメータ：30秒×10回測定の平均値及びBGデータも併記、測定風景の写真を報告書に添付	cpm、 $\mu\text{Sv/h}$ (希望者に英文併記対応)
千葉県産業支援技術研究所	工業製品 (食品、粉体、液体、液状のものは対象外) 1企業5検体まで 1辺1m以内、30kg以内	表面近接 (5mm程度) 測定 ○GM計数管型サーベイメータ：30秒×10回測定の平均値及びBGデータも併記 ○シンチレーション型サーベイメータ：10秒×10回測定の平均値及びBGデータも併記	cpm、 $\mu\text{Sv/h}$
地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター	工業製品 1企業5検体まで 1辺1m以内、30kg以内	○GM計数管型サーベイメータ 密着測定、時定数：10秒、30秒×10回測定の平均値から、BGデータ差し引き表示 ○シンチレーション型サーベイメータ密着測定、時定数：3秒、15秒毎に10回読む。BGも同様に測定	cpm、 $\mu\text{Sv/h}$ (英文成績書対応)

機関名	測定対象製品	測定方法	結果表示
神奈川県産業技術センター	工業製品（食品、農林水産物、土壌、大気及び液体は除く） 1企業5検体まで 1辺1m以内、30kg以内	検体の大きさや形状に応じて、1検体あたり数か所の放射線を測定する。1か所あたり10回測定の平均値と標準偏差を記載	cpm、 $\mu\text{Sv/h}$
新潟県工業技術総合研究所	工業製品 立会試験は1企業5検体まで 1辺1m以内	機器貸付で対応。（使用者の指定がなければ、近接測定30秒×10回測定 of 平均値、BG同様測定データ併記）	立会報告書の発行、 $\mu\text{Sv/h}$ 、cpm 希望者に英文対応
長野県工業技術総合センター	工業製品 1企業10検体まで 持ち込み：1m×1m×0.5m以内、30kg以内 現地測定：長野県内に限り、対応	近接測定、30秒×10回測定 of 平均値及び最大値を記載、BGデータ併記	cpm、 $\mu\text{Sv/h}$ 和文成績書、英文及び和文併記成績書対応
山梨県工業技術センター	工業製品（食品および液体は対象外） 1企業3検体まで（1検体につき、最も放射線量の高い領域1箇所のみ測定） 80cm×100cm×100cm以内、30kg以内	密着測定 30秒×10回測定 of 平均値を記載 BGデータは差し引かない（BGのデータを併記する）※持ち込む際はビニル袋に入れ、測定はそのままの状態で行う	cpm、 $\mu\text{Sv/h}$
愛知県産業技術研究所	工業製品（食品は対象外） 1企業5検体まで 1辺1m以内、30kg以内	表面から5mmの距離の地点で測定 10秒×5回測定 of 平均値を記載、BGデータも併記	cpm、 $\mu\text{Sv/h}$
名古屋市工業研究所	工業製品（食品・液体は対象外） 1企業5検体まで 1辺1m以内、30kg以内	表面から5mmの距離の地点で測定、10秒×5回測定 of 平均値を記載、BGデータ併記	$\mu\text{Sv/h}$

機関名	測定対象製品	測定方法	結果表示
岐阜県産業技術センター	工業製品（食品は対象外） 1企業5検体まで 1辺1m以内、30kg以内	○NaI (Tl) シンチレーション型サーベイメータ：表面から5mmの距離の地点で測定、時定数：30秒で、1分30秒毎に5回測定の平均値を記載、BGデータ併記 ○GM計数管型サーベイメータ：表面汚染β線量測定にのみ対応、表面から5mmの距離の地点で測定、時定数：30秒、1分30秒×10回測定の平均値を記載、BGデータ併記	μSv/h、cpm（成績書は英文・和文選択可）
岐阜県セラミックス研究所	工業製品（食品は対象外） 1企業5検体まで 1辺1m以内、30kg以内	表面から5mmの距離の地点で測定、時定数：30秒 1分30秒毎に5回測定し平均値を記述、BGデータ併記	μSv/h、cpm（成績書は英文・和文選択可）
三重県工業研究所	県内企業の輸出に関する工業製品のみを対象（食品・液体は対象外） 1企業5検体まで 1辺1m以内、30kg以内	一次スクリーニングを運搬してきた車内等で行い、一定基準以上の場合は本測定を実施しない。 直接測定法、時定数30秒で5回測定した平均値を記載。BGも同様に測定し、差し引きの値を標記（BGは標記しない）。	μSv/h（成績書は英文併記可）
富山県工業技術センター	工業製品（食品・液体は対象外） 1辺1m以内、30kg以内	直接測定法：製品にプローブ先端を近接させて、10回程度測定、BGデータ併記	cpm、μSv/h
石川県工業試験場	工業製品（食品・液体は対象外） 1辺1m以内、30kg以内、1企業5検体まで	直接測定法：時定数10秒、30秒間隔で3回測定し、平均値を記載、BGデータ併記	cpm、μSv/h
滋賀県工業技術総合センター	工業製品（食品・液体は対象外） 1辺1m以内、30kg以内、1企業5検体まで	製品表面から約5mmの距離で測定 15秒毎に10回測定した平均値と標準偏差を記載、BGデータ併記	cpm
滋賀県東北部工業技術センター			
京都市産業技術研究所	輸出用工業製品（食品、液体は対象外）	表面から5mmの距離の地点で測定、BGデータ併記	cpm

機関名	測定対象製品	測定方法	結果表示
奈良県工業技術センター	工業製品（食品は対象外） 1企業5検体まで 1辺1m以内、30kg以内	表面から5mmの距離の地点又は密着測定 30秒×5回測定 of 各最大値を記載、BGデータ併記	$\mu\text{Sv/h}$
兵庫県立工業技術センター	工業製品（食品、土壌、水などの液体は対応不可）、概ね1辺1m以内、30kg以内、1企業5検体まで	GM計数管型サーベイメータ：表面近接測定、時定数は10秒で、30秒×10回測定 of 平均値、BGも同様に測定し、データ併記	cpm
地方独立行政法人鳥取県産業技術センター	輸出用工業製品、または部品、1辺1m以内、30kg以内	表面汚染測定： 日本工業規格JIS Z4504「放射性表面汚染の測定方法」（ISO 7503-1と技術的に同等）に準拠	cpm
島根県産業技術センター	県内で製造した輸出用工業製品 1辺1m以内 出張測定も対応	表面汚染測定： 日本工業規格JIS Z4504「放射性表面汚染の測定方法」（ISO 7503-1と技術的に同等）に準拠	cpm
香川県産業技術センター	輸出用工業製品 1辺1m以内、30kg以内 1企業5検体まで	表面から約5mmの距離で測定、時定数を10秒とし、10秒ごとに10回測定して、平均値及び最小値と最大値を記載し、BGを併記 1試料あたり最大6点を測定	cpm、 $\mu\text{Sv/h}$ （英文及び和文併記成績書可）
愛媛県産業技術研究所	企業が製造・出荷する工業製品及び加工食品で次を満たすもの。 ・依頼者が搬入搬出 ・1辺1m以内、30kg以下、1企業5試料まで	スクリーニングを運搬車内で行い、基準値以上の場合は本測定を実施しない。 近接測定、30秒間×10回測定した平均値を記載。BG併記。	cpm、 $\mu\text{Sv/h}$

機関名	測定対象製品	測定方法	結果表示
佐賀県工業技術センター	県内企業が屋内で製造する工業製品（食品、飲料の内容物、液体は対象外）※輸出用の工業製品優先、※原則、汚染の可能性が低く、安全性の確認が目的であることが前提 1企業5検体まで 1辺1m以内、30kg以内	密着測定 30秒×10回測定の平均値を求め、BGデータ差し引き表示	cpm、 $\mu\text{Sv/h}$
長崎県工業技術センター	県内企業、組合および県内に事業所を有する製造業者が製造する工業製品（液体・食品は対象外）※輸出用の工業製品に限定。※汚染の可能性が低く、安全性の確認が目的であることが前提。 1企業5検体まで 1辺1m以内、30kg以内	基本として表面から約5mmの位置、測定手法は依頼者との打合せによる。 実測値表示、BGデータ併記	cpm、 $\mu\text{Sv/h}$
長崎県窯業技術センター	同上	同上	同上
宮崎県工業技術センター	工業製品、加工食品及びその原料 ・県内製造業事業者及び罹災証明書を持つ被災事業者を対象とする。 ・1日につき1企業5検体まで。	○表面汚染：表面汚染測定用シンチレーション式サーベイメータ使用 ・JIS Z4504に準拠 表面から約5mmの位置、30秒×10回測定の平均値、BGデータ差し引き表示 ○食品等：NaI (TI) シンチレーションスペクトロメータ使用	○表面汚染 cpm、 Bq/cm^2 ○食品等 Bq/kg
宮崎県食品開発センター	・表面汚染測定は、1辺1m以内、30kg以内 ・食品等は1kg以上、2kg以内	文部科学省「NaI (TI) シンチレーションスペクトロメータ機器分析法」により測定	

*料金につきましては、各機関にお問い合わせください。

表3.3 ゲルマニウム半導体検出器による測定に対応している機関

機関名	測定対応品目	今までに測定した品目	試料容量 U8/マリネリ
福島県ハイテクプラザ、 福島県ハイテクプラザ会 津若松技術支援センター	県内に住所・事務所 または事業所を有す る食品加工業者が、 県内で製造し、出 荷・販売する加工食 品（飲料を含む）	味噌、醤油、酒、 そば等	U8
栃木県産業技術センター	県内で製造し、出荷 する製品（ただし、 国の生産規制・流通 規制の対象製品を除 く）	清酒、醤油、漬物、 ジャム、小麦粉 等	U8
地方独立行政法人東京都 立産業技術研究センター	農畜産物、水産物、 浄水、工業製品など	野菜、果物、茶、 小麦、原乳、食肉、 アユ、浄水、大気 浮遊塵、堆肥等	U8
香川県産業技術センター	輸出する農産物、畜 産物、水産物、加工 食品	加工食品、水産物 等	U8/マリネリ

第1章

第2章

第3章

第4章

第5章

第6章

第7章

第8章

3.3 工業製品の放射能汚染検査

(1) 汚染検査

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故により、国内外から放射能汚染検査が求められるようになりました。公設試では、この要望に対応するため、工業製品等の放射線量測定試験を行っています。持ち込まれた工業製品の表面汚染検査や表面線量測定のほか必要に応じて出張試験を実施している機関もあります。



図3.1 検査風景

- * 各都道府県の対応状況や検査費用に関しましては、最寄りの機関にご相談ください。
- * 輸出先国によっては、放射線の測定結果について、公的機関等の証明（放射能基準適合証明）を求められることがあります。都道府県等の発行する証明書が必要となる場合は、事前に受ける検査機関にご相談下さい。

○地方独立行政法人東京都立産業技術研究センターの例

東京都立産業技術研究センターでは、以下のように持込検査と出張検査を行っております。

① 持込検査

工業製品で持ち込みが可能なサイズ（1m×1m×1m以内、30kg以内）の放射線量測定が対象となります。

表面汚染（cpm又はBq/cm²）や表面線量率（μSv/h）の測定結果を提示しています。

② 出張検査

持ち込みが困難な製品や物流倉庫等で保管しているものについては、現地出張試験を実施しています。

- * 各県の対応状況や費用に関しましては、最寄りの機関にご相談ください。
- * 輸出先国によっては、放射線の測定結果について、公的機関等の証明（放射能基準適合証明）を求められることがあります。都道府県等の発行する証明書が必要となる場合は、事前に受ける検査機関にご相談下さい。

③ 表面汚染の測定法

- 測定器：大口径GM計数管型サーベイメータ
- 測定ポイントの決定：依頼品全体をサーベイし、
 - ☆高い数値を示したとことがあればその場所。
 - ☆数値が同等であれば、中央等代表的なところ。

c) 測定方法：

☆プローブを測定箇所に着させ、時定数を10秒とし、30秒ごとに10回 数値を読み取り、平均値と標準偏差求める。

☆プローブから測定対象物を遠ざけ、バックグラウンドを同様にして測定する。

d) 結果の表示

☆〇〇測定装置 測定点A 58 ± 17 cpm

バックグラウンド (BG) 61 ± 15 cpm

e) 結果の評価

BGの標準偏差の3倍 (3σ) 以上を有意な値と見なす。

(2) 成績証明書の発行

成績証明書は、諸外国の基準等を考慮して、表面汚染測定結果をcpmあるいはBq/cm²で、表面線量測定を μ Sv/hで表記します。必要に応じて、公立試験研究機関の成績証明書が国際的な商取引で通用するよう商工会議所が「サイン証明」を行う仕組みもあります。

日本商工会議所

http://www.jcci.or.jp/gensanchi/shomei/20110325_radioactivity_level_rev01.pdf

(3) サーベイメータの校正（国際的に通用するトレーサビリティの確保）

表面汚染測定に用いられる放射線計測器は標準線源を用いて校正されています。国内では、社団法人日本アイソトープ協会他の標準器が独立行政法人産業技術総合研究所計量標準総合センター（以下、「産総研NMIJ」という。）の国家標準に対してトレーサブルになっており、国際的にも相互承認されています。

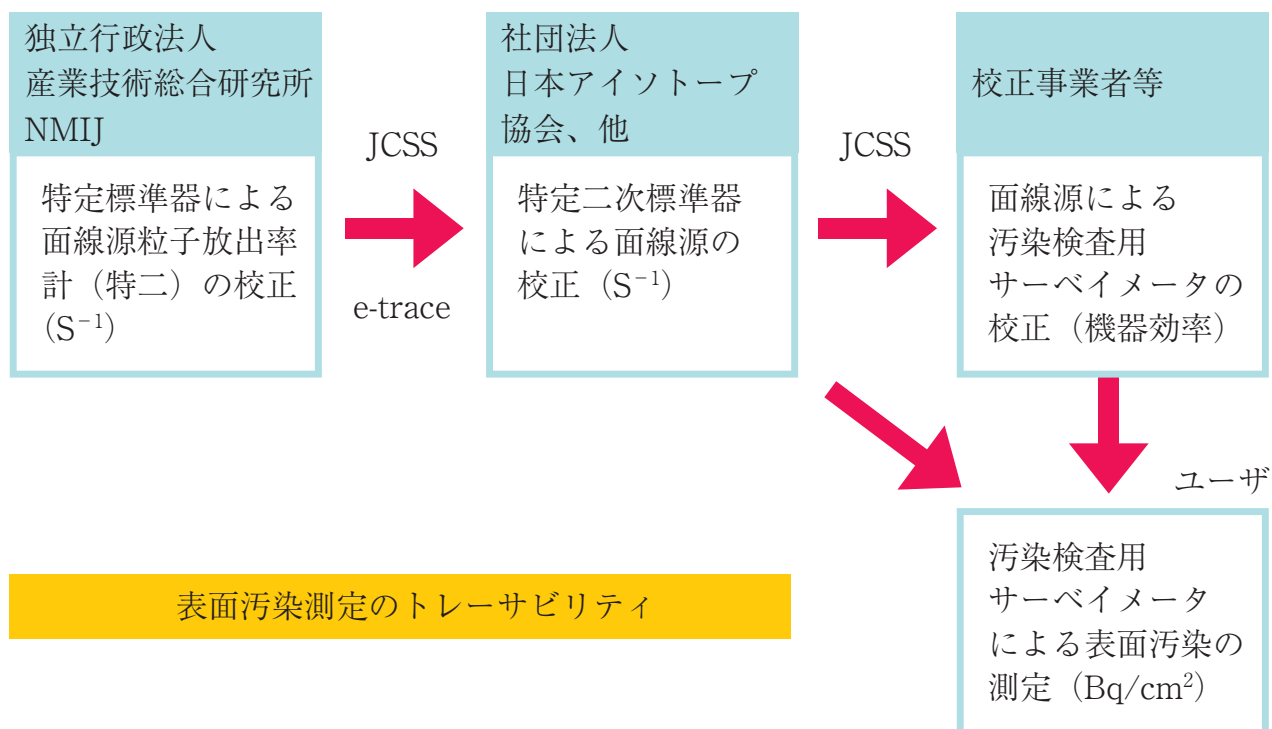


図3.2 トレーサビリティの確保

3.4 食品・肥料の放射能測定

(1) 食品中の放射能測定

放射能汚染のおそれのある食品については、「緊急時における食品の放射能測定マニュアル」(2002年3月)にそって検査を実施することが、厚生労働省から通知されました(2011年3月17日付)。当分の間、原子力安全委員会から示された指標値(表3.4)を暫定規制値とし、これを上回る食品については食用に供されることがないように、地方自治体に処置が求められています。測定方法としては、ゲルマニウム半導体検出器を用いた γ 線スペクトロメトリによる方法及びNaI(Tl)シンチレーション型サーベイメータを用いる簡易方法が位置づけられています。

(a) ゲルマニウム半導体検出器による核種分析

- ①測定器：ゲルマニウム半導体検出器(検出器の相対効率15%以上)
- ②容器：小型容器(50mm ϕ ×50mm、U-8容器など)、2Lマリネリ容器、0.5～1L) タッパー容器等
- ③試料調製：「緊急時における γ 線スペクトロメトリのための使用前処理法」(1992年)に準じて、食品衛生法の食品、添加物等の規格基準(2008年11月26日厚生省告示第239号)、洗浄方法については厚生労働省通知にしたがって前処理をおこなう。
- ④測定時間：都産技研では原則としてU-8容器を用いて2000秒
- ⑤測定値：都産技研では有効数字2桁で表記
- ⑥検出限界値：都産技研では、目的の核種から放出された γ 線の計数率が計数率誤差*の3倍に満たない測定値は不検出とし、検出限界値を併記



図3.3 野菜の測定

*計数率誤差とは

γ 線スペクトルの中で、目的核種のピークを拡大すると図3.4のようになります。ベースライン(ア)とピークの立ち上がり部(イ、ウ)を線で結ぶと、AとBの領域ができます。領域Aは目的の核種から放出された γ 線の計測時間(t)当たりの計数(N_a)を示し、Bは計測時間(t)当たりのバックグラウンドの計数(N_b)を示します。ここで $N=N_a+N_b$ とすると、 $N_a/t=(N/t-N_b/t) \pm \sqrt{N/t^2+N_b/t^2}$ というように、計数率誤差は $\sigma=\sqrt{N/t^2+N_b/t^2}$ と表すことができます。

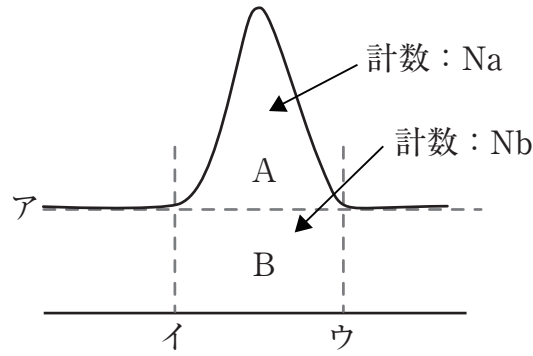


図3.4 計数誤差とは

(b) NaI(Tl) シンチレーション型サーベイメータによる簡易測定

*本測定はサーベイメータを用いるために、 γ 線スペクトルが得られません。そのため、核種毎の放射能測定はできませんので、緊急時における簡易的な測定法として使用してください。

- ①測定器：NaI(Tl) シンチレーション型サーベイメータ
- ②容器：2Lマリネリ容器、0.5～1Lタッパー容器等
- ③測定操作：サーベイメータの検出部をポリエチレン袋で包み、試料の入った容器に検出器を密着させる。30秒間隔で指示値を3回読み取り平均を算出する。水の入った測定容器について同条件で測定し、バックグラウンドの平均値を計算する。
- ④測定値：試料の測定値からバックグラウンドの平均値を差し引き、正味の値を計算し、換算係数 (Bq/L/cps) から核種濃度を求める。
- ⑤適用核種：I-131、Cs-137
- ⑥換算係数：緊急時マニュアルでは、緊急事態発生直後を想定してI-131濃度で評価しているが、I-131の半減期が8日であるため、福島第一原子力発電所事故から数ヵ月後においては、放射性Csの評価が重要である。(社)日本アイソトープ協会が、市販機器の機器校正を実施し公表しているCs-137の換算係数(第2版2011年6月20日)を用いて換算する。

*方法・換算係数について

(<http://www.jriass.or.jp/index.cfm/6、15496、c、html/15496/20110620-095125.pdf>)

表3.4 食品の暫定規制値（抜粋）

核種	暫定基準値（Bq/kg）	
放射性I （混合核種の代表核種：I-131）	飲料水、牛乳・乳製品 ^{注1)}	300
	野菜類（根菜、芋類を除く）	2000
放射性Cs ^{注2)} （平成23年12月時点における規制値）	飲料水、牛乳・乳製品	200
	野菜類、穀類	500
	肉・卵・魚・その他	
放射性Cs ^{注3)} （平成24年4月から適用予定の新規制値）	乳児用食品、牛乳	50
	飲料水	10
	その他一般食品	100

注1) 100Bq/kgを超えるものは、乳児用調製粉乳及び直接飲用に供する乳に使用しないよう指導すること

注2) 食事による被ばく量の上限を年5 mSvとして算出

注3) 食事による被ばく量の上限を年1 mSvとして算出

表3.5 主な食品とその検体（例）

食品	検体 ※
米	玄米
小麦及びライ麦	玄麦
大麦及びそば	脱穀した種子
とうもろこし	外皮、ひげ及びしんを除いた種子
ぶどう	果硬を除去したもの
なし及びりんご	花おち、しん及び果硬の基部を除去したもの
こまつな	根及び変質葉を除去したもの
しいたけ	可食部
たまねぎ	外皮及びひげ根を除去したもの
えだまめ	花硬を除去したもの
ほうれんそう	赤色根部を含み、ひげ根及び変質葉を除去したもの
アユ（内水魚）	全量

注) 食品、添加物等の規格基準（1999年11月26日厚生省告示第239号）等をもとに作成

注) 厚生労働省通知「緊急時における食品の放射能測定マニュアル」に基づく検査における留意事項について（2011年3月18日）により、「野菜等の試料の前処理に際しては、付着している土、埃等に由来する検出を防ぐため、これらを洗浄除去し、検査に供すること。なお、土、埃等の洗浄除去作業においては、汚染防止の観点から流水で実施するなど十分注意すること」とされている。

(2) 堆肥・飼料等の放射能測定

放射性Csに汚染された動植物性堆肥原料（家畜排泄物、魚粉、わら、もみがら、樹皮、落ち葉、雑草、残さ等）を用いて生産された堆肥を農地土壤に施用したとき、農作物の放射性Cs濃度が食品衛生法の暫定規制値を超過する可能性があることから、2011年8月1日付で「放射性Csを含む肥料・土壤改良資材・培土及び飼料の暫定許容値の設定について（農林水産省）」が通知されました。

参照：<http://www.maff.go.jp/j/syouan/soumu/saigai/shizai.html>

(a) ゲルマニウム半導体検出器による核種分析

- ①測定器：ゲルマニウム半導体検出器（放射性Csについて定量下限値が50Bq/kg以下であること）
- ②容器：マリネリ容器、ポリエチレン瓶、タッパーウェア等（測定機器に適した大きさのもので、0.2～2.0L程度の容量のもの）
- ③測定時間：都産技研ではU-8容器を用いて1～2千秒
- ④検出限界値：都産技研では計数誤差の3倍に満たない測定値は不検出とし、検出限界値を併記。

(b) NaI(Tl) シンチレーション型スペクトロメータを用いる分析

- ①測定器：NaI (Tl) シンチレーション型スペクトロメータ（定量下限値がCs-134及びCs-137の合計量について50Bq/kg以下であること）
- ②容器：マリネリ容器、ポリエチレン瓶、タッパーウェア等（測定機器に適した大きさのもので、0.2～2.0L程度の容量のもの）
- ③機器の校正：標準線源を用い機器校正を行い、標準線源の測定値からバックグラウンドの測定値を差し引いた結果が標準線源の放射線量とよく一致することを確認する。
- ④適用核種：Cs-134及びCs-137

参考文献

* 試料調整について

「肥料中の放射性セシウム測定のための検査計画及び検査方法の制定について（農林水産省<http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/hiryuu/kennsa.html>）」を参照。

* 測定方法について

放射能測定シリーズ

「NaI(Tl) シンチレーション型スペクトロメータ機器分析法（<http://www.kankyo-hoshano.go.jp/series/lib/No6.pdf>）」及び

「緊急時におけるγ線スペクトル解析法

（<http://www.kankyo-hoshano.go.jp/series/lib/No29.pdf>）」を参照。

表3.6 堆肥・飼料等の暫定基準値

対 象		暫定許容値
肥料等	肥料・土壌改良資材・培土中に含まれる放射性Csの暫定許容値	400Bq/kg ^{注1)}
飼料	牛、馬、豚、家きん等用飼料中に含まれることが許容される最大値	300Bq/kg (粗飼料は水分含有量8割ベース、その他飼料は製品重量) ^{注2)}
	養殖魚用飼料中に含まれることが許容される最大値	100Bq/kg(製品重量)

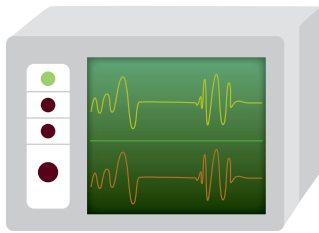
注1) ①農地で生産された農産物の全部又は一部を当該農地に還元施用する場合、②畜産農家が飼料を自給生産する草地・飼料畑等において自らの畜産経営から生じる家畜排せつ物又はそれを原料とする堆肥を還元施用する場合、③畜産農家に供給する飼料を生産している農家等が、当該飼料を生産する草地・飼料畑等において、当該飼料の供給先の畜産経営から生じる家畜排せつ物又はそれを原料とする堆肥を還元施用する場合、においては、この限りでない。

注2) 乳用牛（経産牛及び初回交配以降の牛）又は肥育牛以外の牛のうち、当分の間、と畜出荷することを予定していない牛に給与される粗飼料であって、その生産者自ら生産したもの、又は、単一若しくは近隣の複数の市町村内で耕畜連携の取組等により生産したものについては、例外的に3000ベクレル/kg（水分含有量8割ベース）まで使用を認める。この飼料を摂取した育成牛は、肥育牛として12ヶ月以上肥育した後にと畜出荷することとされている。

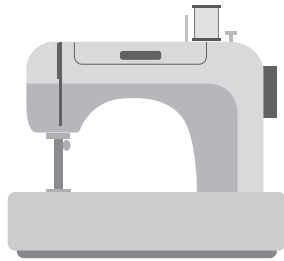
第4章 放射線・放射能検査の事例

4.1 依頼試験等による検査事例


(1) 具体事例

検査品目 機器類 検査品の用途 海外輸出向け製品	
依頼目的 輸出相手国から放射線量の証明書を求められた	
測定条件 <ul style="list-style-type: none">・検出器 GM計数管型サーベイメータ、TGS-133、日立アロカメディカル株式会社製・測定方法 プローブ先端を製品に近接させ、30秒毎の数値(cpm)を読み取り、平均値を報告した。また、バックグラウンド(BG)を併記した。	依頼品 
結果 BGと同レベルであり、表面汚染は確認されなかった。 BG：64cpm、製品：0 cpm ※測定値は、実測値からBG値を差し引いた値	


(2) 具体事例

検査品名 ミシン	
検査品の用途 輸出用のミシン	
依頼目的 輸出相手国の取引先から、放射線検査を求められた。	
測定条件 <ul style="list-style-type: none">・検出器 NaI (Tl) シンチレーション型サーベイメータ、TCS-171、日立アロカメディカル株式会社製・測定方法 製品表面に近づけ、30秒毎の数値($\mu\text{Sv/h}$)を読みとり平均値を報告した。また、BGを併記した。	依頼品 
結果 BGと同レベルであり、表面汚染は確認されなかった。 (2検体：0.06~0.07 $\mu\text{Sv/h}$)	
コメント等 英文併記の報告書を発行。取引先へ製品を輸出済み(報告書添付)。	


(3) 具体事例

<p>検査品名 ポット</p> <p>検査品の用途 輸出用ポット、お茶用</p>	
<p>依頼目的 輸出相手国の取引先から、放射能汚染状況の検査を求められた。</p>	
<p>測定条件</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 検出器 GM計数管型サーベイメータ、TGS-146B、日立アロカメディカル株式会社製 ・ 測定方法 製品表面に近づけ、30秒毎の数値（cpm）を読みとり平均値を報告した。BGを併記した。 	<p>依頼品</p> 
<p>結果 BGと同レベルであり、表面汚染は確認されなかった。 (5 検体：40～60cpm)</p>	
<p>コメント等 英文併記の報告書を発行。取引先へ製品を輸出済み（報告書添付）。</p>	

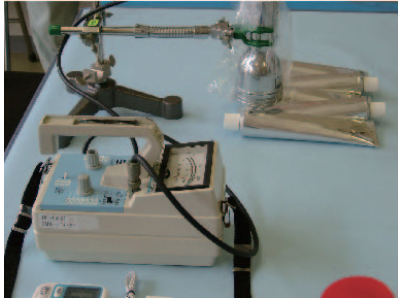
(4) 具体事例

<p>検査品名 タンス</p> <p>検査品の用途 海外輸出向け</p>	
<p>依頼目的 風評被害対策</p>	
<p>測定条件</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 検出器 GM計数管型サーベイメータ、TGS-133、日立アロカメディカル株式会社製 ・ 測定方法 製品表面から5mm離し、30秒経過後10秒間隔で10回測定の数値（cpm）を読み取り、BGを差し引いた平均値を記載した。また、BGを併記した。 	<p>依頼品</p> 
<p>結果 BGと同レベルであり、表面汚染は確認されなかった。 BG：68cpm、製品：0cpm(BGとの差)</p>	
<p>コメント等 英文併記の証明書を発行。相手国に発送し、許可された。</p>	

(5) 具体事例

検査品名 鉄器 検査品の用途 海外輸出向け	
依頼目的 風評被害対策	
測定条件 <ul style="list-style-type: none">・ 検出器 NaI (Tl) シンチレーション型サーベイメータ、TCS-172、日立アロカメディカル株式会社製・ 測定方法 製品表面から5 mm離し、30秒経過後30秒間隔で5回測定の数値 ($\mu\text{Sv/h}$) を読み取り、BGを差し引いた平均値を記載した。また、BGを併記した。	依頼品 
結果 BGと同レベルであり、表面汚染は確認されなかった。 BG : $0.06\mu\text{Sv/h}$ 、製品 : $0.01\mu\text{Sv/h}$ (BGとの差)	
コメント等 英文併記の証明書を発行。相手国に発送し、許可された。	

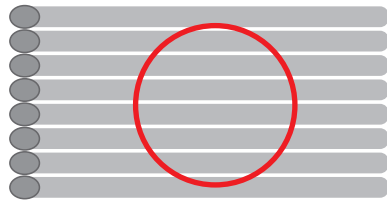
(6) 具体事例

検査品名 漆入りチューブ 検査品の用途 海外輸出向け	
依頼目的 風評被害対策	
測定条件 <ul style="list-style-type: none">・ 検出器 GM計数管型サーベイメータ、TGS-133、日立アロカメディカル株式会社製・ 測定方法 製品表面から5 mm離し、30秒経過後30秒間隔で5回測定の数値 (cpm) を読み取り、BGを差し引いた平均値を記載した。また、BGを併記した。	依頼品 
結果 BGと同レベルであり、表面汚染は確認されなかった。 BG : 71cpm、製品 : 5cpm (BGとの差)	
コメント等 英文併記の証明書を発行。相手国に発送し、許可された。	

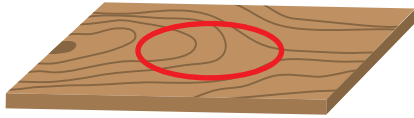
(7) 具体事例

<p>検査品名 理美容鋏</p> <p>検査品の用途 海外輸出向け</p>	
<p>依頼目的 風評被害対策</p>	
<p>測定条件</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 検出器 GM計数管型サーベイメータ、TGS-133、日立アロカメディカル株式会社製 ・ 測定方法 製品表面から5 mm離し、30秒経過後30秒間隔で5回測定の数値 (cpm) を読み取り、BGを差し引いた平均値を記載した。また、BGを併記した。 	<p>依頼品</p> 
<p>結果 BGと同レベルであり、表面汚染は確認されなかった。 BG：105cpm、製品：0cpm(BGとの差)</p>	
<p>コメント等 英文併記の証明書を発行。相手国に発送し、許可された。</p>	


(8) 具体事例

<p>検査品名 注射針</p> <p>検査品の用途 海外輸出向け</p>	
<p>依頼目的 輸出相手国から、放射線量の測定結果を求められた。</p>	
<p>測定条件</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 検出器 GM計数管型サーベイメータ、TGS-136、日立アロカメディカル株式会社製 ・ 測定方法 注射針は細長い形状であるため、製品を束ねることで測定面積を確保し、5 mm程度まで近づけて測定した。30秒毎の数値 (cpm) を10回読み取り、算出した平均値と標準偏差を報告した。また、BGを併記した。 	<p>依頼品</p> <p>○印が測定箇所</p> 
<p>結果 BGと同レベルであり、表面汚染は確認されなかった。</p>	
<p>コメント等 英語併記の測定結果報告書を発行。輸出国の相手企業から許可されたとのこと。</p>	

(9) 具体事例

検査品名 木材（板材） 検査品の用途 国内住宅メーカー等	
依頼目的 取引先から、放射線量の測定結果を求められた。	
測定条件 <ul style="list-style-type: none">・ 検出器 GM計数管型サーベイメータ、TGS-136、日立アロカメディカル株式会社製・ 測定方法 製品表面に5mm程度まで近づけて測定した。30秒毎の数値（cpm）を10回読み取り、算出した平均値と標準偏差を報告した。また、BGを併記した。	依頼品 ○印が測定箇所 
結果 BGと同レベルであり、表面汚染は確認されなかった。	

(10) 具体事例

検査品名 日本酒 検査品の用途 国内への出荷	
依頼目的 国内取引先より、放射能測定の測定結果を求められた。	
測定条件 <ul style="list-style-type: none">・ 検出器 ゲルマニウム半導体検出器、GEM20-70、オルテック社製・ 測定方法 U8容器（高さ50mm）に試料を入れ、3000秒で測定をした。試料は液体であるため、前処理は行わなかった。BG測定は5万秒とした。	依頼品 <ul style="list-style-type: none">・ 依頼者は製品の状態（4合瓶）で持ち込み。 
結果 Cs-134、Cs-137ともに検出されなかった。	

(11) 具体事例

検査品名 漬物

検査品の用途 国内への出荷

依頼目的 国内取引先より、放射能測定の結果を求められた。

測定条件

・ **検出器**

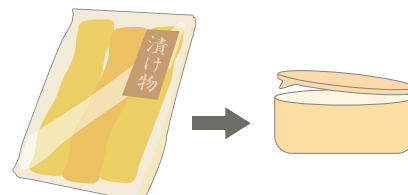
ゲルマニウム半導体検出器、GEM20-70、オルテック社製

・ **測定方法**

依頼者が持ち込んだ前処理（5 mm以下に粉碎）済みの試料をU8容器（高さ50mm）に詰め、3000秒で測定をした。BG測定は5万秒とした。

依頼品

・ 依頼者は前処理品をタッパー容器に詰めて持ち込み。



結果 Cs-134、Cs-137ともに検出されなかった。

4.2 製造業者の方の放射能・放射線対策

製造業の方は、製造した製品が放射能汚染されていないか心配になることかと思えます。福島第一原子力発電所から、大気中に放射性物質が放出されたのは、2011年3月の水素爆発の時と考えられます。その影響が治まってからは、空間線量率は低下し安定してきました。そのため今後、放射能汚染から製品を守るには、地表に残っている放射性物質の付着を防ぐことであると考えられます。また、福島第一原子力発電所の近隣に製造現場がある企業の方は、風評被害にも気を付ける必要があります。

- ① 製品を汚染の可能性のある場所に置いていた場合は、GM計数管型サーベイメータで、汚染検査をしましょう。放射性物質が付着しているかどうかは、測定しなければ判断できません。
- ② 輸出時は、相手国や相手企業が規制をしているかを調べ、規制している場合は、その規制値の単位が、cpm、 $\mu\text{Sv/h}$ 、 Bq/cm^2 、 Bq/kg などの何れか確認します。その規制値に対応する測定器を選択し、検査します。公的機関の証明書をもとめられている場合は、お近くの公設機関に御相談ください。
- ③ 測定器の選択
 $\mu\text{Sv/h}$ の場合は、NaI(Tl) シンチレーション型サーベイメータ
cpm、 Bq/cm^2 の場合は、GM計数管型サーベイメータ
 Bq/kg 、 Bq/cm^3 の場合は ゲルマニウム半導体検出器

(注意) 測定する場合は、必ず校正してある測定器を使用しましょう。

5.1 放射線・放射能の発見と利用の拡大

放射線の歴史は、1895年のヴィルヘルム・コンラート・レントゲンの発見から始まります。レントゲンは、真空放電の実験中に真空管から透過力の強い「光」が出ることを発見し、X線と名付けました。このX線により手の骨格写真の撮影に成功し、現在でも「レントゲン撮影」として医療で用いられています。

1896年にアントワヌ・アンリ・ベクレルは「暗黒下で写真乾板を感光させる性質」を持つ鉱物（ウラン化合物）を発見しました。この感光性の目に見えないX線に似た光を放射線、放射線を放出する性質を放射能と名付けました。ベクレルの名前は、現在、放射能の単位になっています。

1898年にピエール・キュリーとマリー・キュリーは、放射能を持つ鉱石からラジウム元素（アイソトープの一つ）の分離に成功しました。その後、アーネスト・ラザフォードにより、ウランから放出されている放射線は2種類（ α 線と β 線）あることを発見しました。

1900年にポール・ヴィラールは、電荷を持たず透過力の高い放射線を発見しました。これは γ 線と名付けられました。

原子力（核分裂エネルギー）の歴史は1938年のオットー・ハーンの見つけから始まります。オットー・ハーンは、ウランに中性子をあてるとバリウムが生成されることを見出しました。これは、中性子の照射により、ウランが核分裂を起こし、バリウムが生成されたことを意味しました。その後、エンリコ・フェルミが核分裂の連鎖反応を初めて成功させ、原子力発電などの原子力利用を発展させました。

放射線は、発見と同時に医療に積極的に利用されました。さらにその後、原子炉や放射線発生装置が開発され、人工アイソトープが製造されたために、医療分野では、レントゲン撮影、X線CT、ポジトロンCT (PET:



図5.1 放射線・放射能の発見者たち

Positron Emission Tomography) などの診断や、がんの放射線治療などで活躍しています。また、工業分野では、非破壊検査、厚さ計、レベル計、機器分析、材料の改良などに、農業分野では、品種改良、害虫駆除などに使用されるようになり、放射線、放射能は広く使われるようになってきました。

同時に放射線による人体の障害も報告されてきました。X線発見の翌年1896年には手の放射線皮膚炎や脱毛が報告されています。放射能を発見したアントワーヌ・アンリ・ベクレルは、ラジウム化合物をポケットに入れていて皮膚に紅班を生じました。マリー・キュリーは、白内障や再生不良貧血の放射線障害で亡くなっています。

また1900年～1930年ごろにかけて、ラジウムを使用した夜光塗料が使用されていましたが、この生産工場の女子従業員の上あごや下あごが、壊死してしまうという事故が発生しました。これは夜光塗料を塗る筆を従業員が整えるときになめたことから体内にラジウムが取り込まれ、顎の骨にラジウムが沈着したためであることが分かっています。

X線や放射性物質が利用されるに従い、放射線の人体影響の解明や防護技術の重要性が高まり、研究が進んでいます。

表5.1 放射線の発見・発展の歴史

西暦	出来事	研究者
1895	X線の発見	ヴィルヘルム・コンラート・レントゲン
1896	ウランの放射能の発見	アントワーヌ・アンリ・ベクレル
1898	ラジウムの分離	ピエール・キュリー、マリー・キュリー
1898	α 線、 β 線の発見	アーネスト・ラザフォード
1900	γ 線の発見	ポール・ヴィラール
1928	GM計数管の開発	ガイガー、ミュラー
1932	中性子の発見	ジェームズ・チャドウィック
1934	放射性同位元素の製造に成功	イレーヌ・ジョリオ・キュリー、フレデリック・ジョリオ・キュリー
1938	核分裂の発見	オットー・ハーン
1942	原子炉の開発	エンリコ・フェルミ
1968	X線CT装置の開発	ゴッドフリー・ニューボルド・ハウンスフィールド

5.2 放射能と放射線

(1) 分子・原子・原子核とは

全ての物や生物は、原子が結合して集まった分子や結晶で出来ています。原子は原子核と電子で構成されています。原子核はプラスの電荷をもつ微粒子「陽子」と電氣的に中性な「中性子」でできています。このため原子核は電氣的にプラスとなります。プラスの電荷をもつ原子核を中心に、陽子とほぼ同数の電子が周りを取り囲んでいます。陽子の数が多い場合を陽イオン、電子の数が多い場合を陰イオンと呼んでいます。同数の場合は電氣的には中性で、中性原子と呼んでいます。

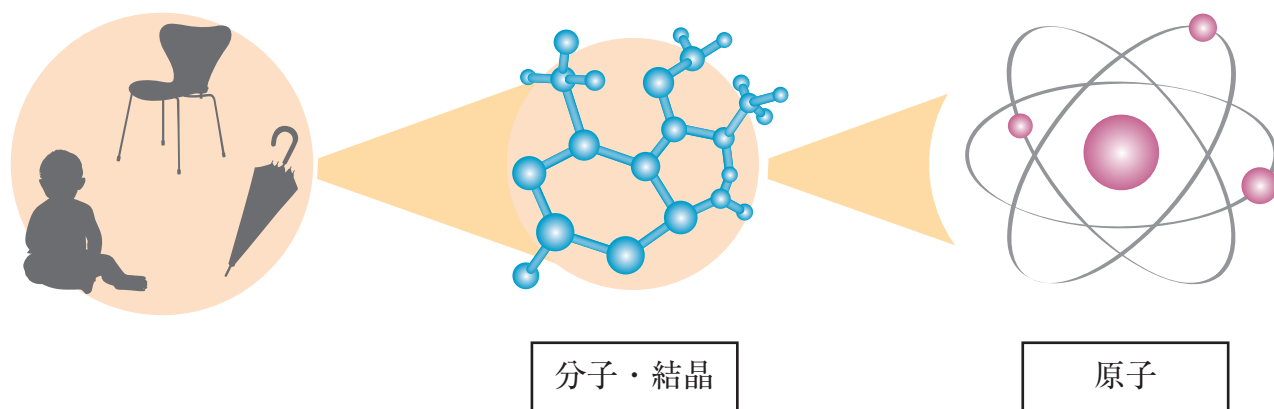


図5.2 材料、分子・結晶、原子

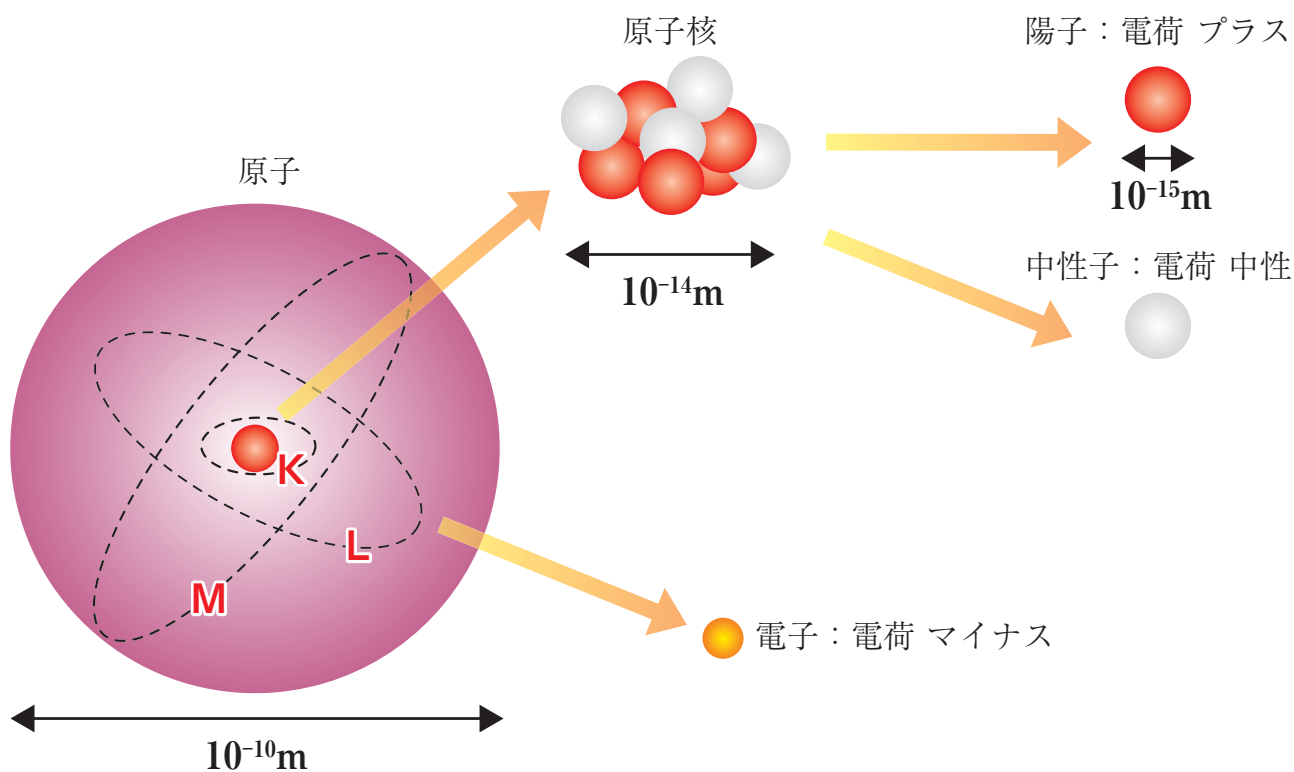


図5.3 原子の構造

(2) 放射性同位元素とは

原子の種類（元素）は、原子核の陽子の数で決まります（陽子の数と原子番号は同数）。陽子の数が同じであれば中性子の数が違っていても化学的性質は同じです。陽子の数が等しく中性子の数が異なる元素を同位元素（アイソトープ）とよびます。中性子の数の違う同位元素を区別するため、元素名に陽子と中性子の数を合計した数値（質量数）を付けて表します。

同位元素の中には、原子核が不安定で余分なエネルギーを出して他の原子核に変わる（壊変）ものがあります。これを放射性同位元素（ラジオアイソトープ）とよび、このときに原子核から放出されるエネルギーが放射線です。

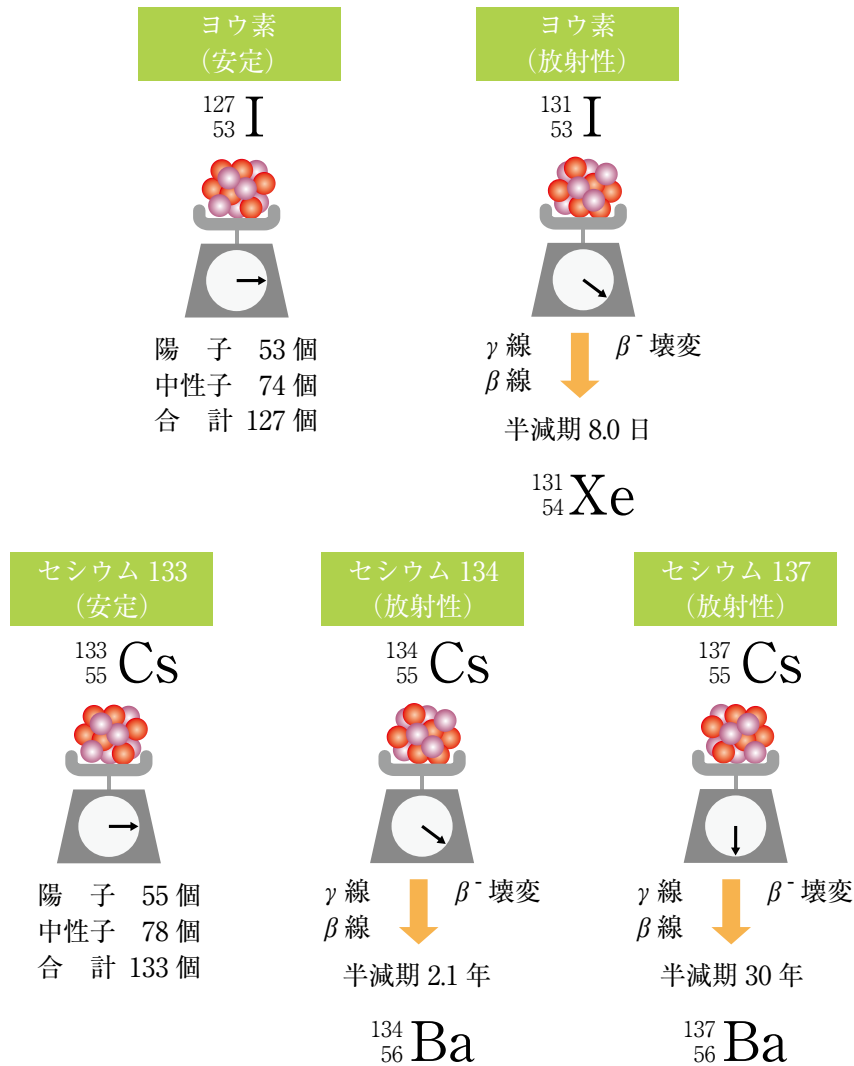
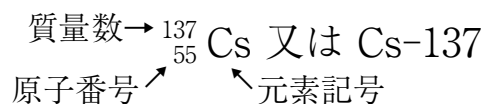


図5.4 放射性同位元素

Iの同位体の中で、質量数127は放射線を出さない安定同位体です。質量数131は放射線を出す放射性同位体です。Csの同位元素の中で、質量数137は放射線を出す放射性同位元素で、質量数133は放射線を出さない安定同位体です。

原子番号、質量数、元素記号の表示の仕方をCs-137を例に示します。



質量数 ⇒ 陽子の数 + 中性子の数

(3) 放射能

放射能とは、原子核が放射線を放射し他の核種に変化する（壊変）性質（Radioactivity）あるいはその強さ（activity）を示します。放射能の強さは、1秒間あたりに壊変する回数で表し、単位はベクレル（Bq）です。

放射能 A は時間が経つにつれ減少します。最初の放射能 A_0 、経過時間 t 、定数 λ （壊変定数）とすると、

$$A = A_0 \exp(-\lambda t)$$

で表すことができます。壊変定数は放射性同位元素の種類により異なり、半減期（ $T_{1/2}$ ）が分かれば次式で求められます。

$$\lambda = 0.693 / T_{1/2}$$

上式をCs-134（ $T_{1/2} = 2.0648$ 年）とCs-137（ $T_{1/2} = 30.1671$ 年）について、当初100Bqあった場合の減衰曲線を示したのが図5.5です。現在の放射能が分かれば、経過時間後の放射能を算出できます。

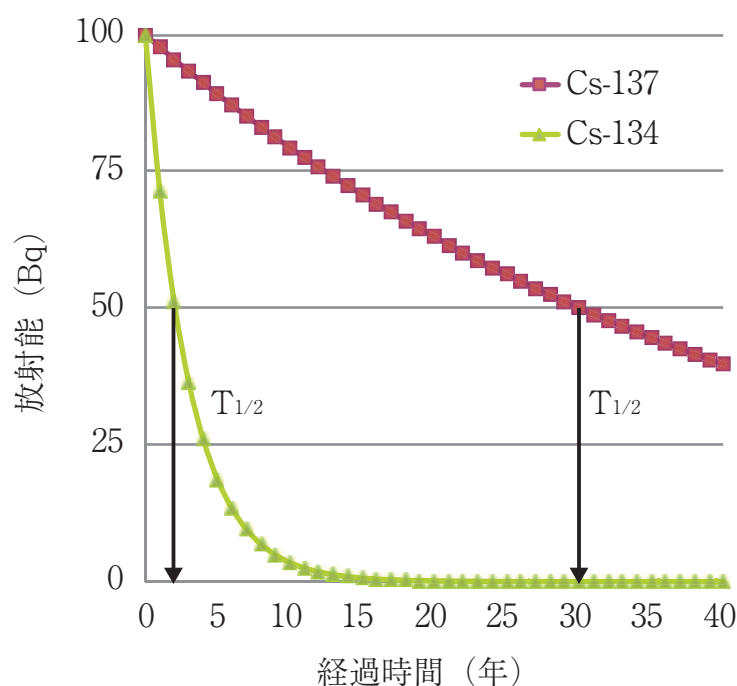


図5.5 放射能の減衰

(4) 壊変

壊変とは、放射性同位元素が放射線を放出して異なる原子核に変化する現象で、 α 壊変、 β^- 壊変、 β^+ 壊変、軌道電子捕獲、 γ 放射などがあります。壊変前の核種を親核、壊変後を娘核とよびます。

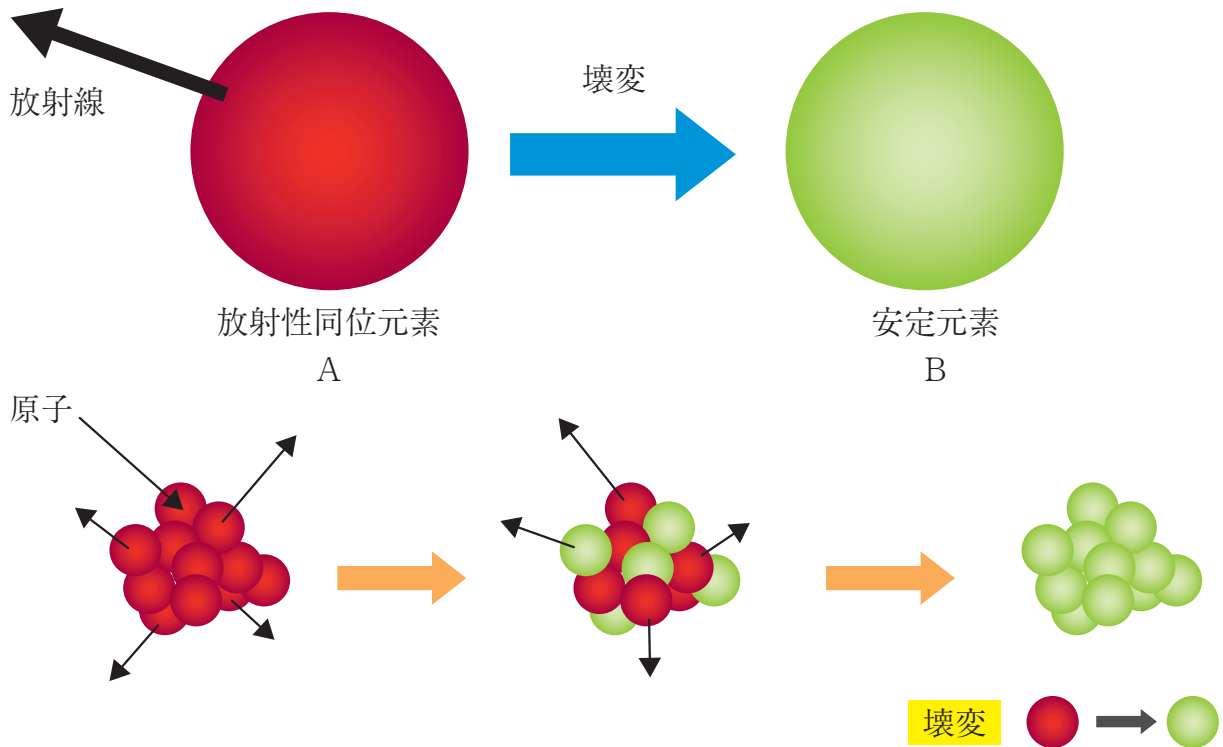


図5.6 壊変

(a) α 壊変：親核がHe核を放出し、原子番号が2少なく、質量数が4少ない娘核になります。例えば、 $^{226}_{88}\text{Ra}$ は、4.784MeV、4.602MeVの α 線（Heの原子核）を放出して、 $^{222}_{86}\text{Rn}$ に壊変します。このとき質量数は226から222となり4小さくなります。また、原子番号は88から86へ2小さくなります。



(b) β 壊変： β^+ 、 β^- 壊変の2種類があります。

β^+ 壊変は、原子核が陽電子とニュートリノ (ν) という微粒子を放出し、原子核中の陽子が中性子に変換される壊変です。原子番号が1少なくなり、質量数は変わらず、同数の娘核になります。陽電子 (β^+) とは、プラスの電荷をもつ電子のことで、放出後は付近の電子と結合し、0.51MeVの γ 線を2本、互いに正反対の方向に放出し消滅します。例えば $^{22}_{11}\text{Na}$ は β^+ 線を放出し $^{22}_{10}\text{Ne}$ に壊変します。



β^- 壊変は、原子核が電子 (β^- ：電荷はマイナス) と反ニュートリノ ($\bar{\nu}$) という微粒子を放出し、原子核中の中性子が陽子に変換される壊変です。原子番号が1多く、質量数は変わらず、同数の娘核になります。例えばSr-90は、 β^- 線を放出しY-90に壊変します。



(c) 軌道電子捕獲 (EC : Electron Capture)

軌道電子が原子核に捕獲され、原子核中の陽子が中性子に変換されニュートリノを放出する現象です。原子番号が1少なく、質量数は変わらず、同数の娘核に変化します。捕獲された軌道電子の位置には外側の軌道電子が遷移するので、このとき特性X線が放射されます。

(d) γ 線放射

励起状態にある原子核が、 γ 線を放出し基底状態に移る現象です。 α ・ β 壊変によって生じた娘核が励起状態にあることがあり、それらの核種が γ 線を放出して基底状態になります。このとき原子番号、質量数は変化しません。基底状態になるには、 γ 線を放出する以外に、軌道電子にエネルギーを与え電子を放出する【内部転換 (IC : Internal Conversion)】という現象もあります。また、励起状態が、比較的安定的ですぐには基底状態にならない場合もあり、この状態を核異性体とよびます。質量数の後に「m」を入れ、例えば、 ${}^{137\text{m}}\text{Ba}$ と記述します。核異性体がエネルギーを放出し基底状態に移ることを【核異性体転移 (IT:Isomeric Transition)】といいます。

例えば、 ${}^{60}\text{Co}$ は β^{+} 壊変し ${}^{60}\text{Ni}$ になりますが、励起状態の ${}^{60}\text{Ni}$ になるため、1.333MeVと1.173MeVの γ 線を放出し、基底状態の安定した ${}^{60}\text{Ni}$ になります。

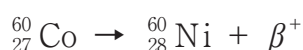


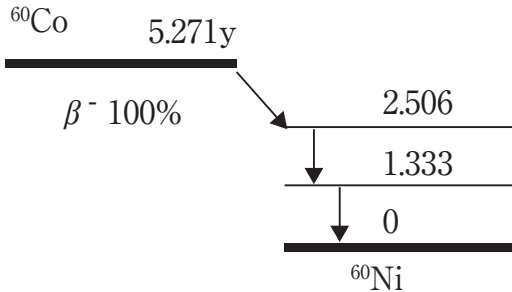
表5.2に壊変前後の原子番号、質量数の変化を記します。

表5.2 壊変方式と原子番号・質量数の変化

壊変	放出	原子番号	質量数
α 壊変	α 線 (He核)	-2	-4
β^{+} 壊変	陽電子	-1	変化なし
β^{-} 壊変	電子	+1	変化なし
軌道電子捕獲	特性X線	-1	変化なし
γ 線放射	γ 線	変化なし	変化なし

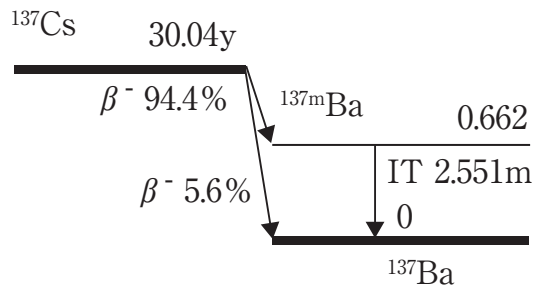
(5) 壊変図式

放射性核種の壊変を分かり易く図示したものが壊変図式です。図5.7に示すように最上位に親核を、最下位に娘核を記入します。半減期や壊変方式、エネルギー状態を指定の位置に記し、原子番号が増える壊変の場合は右に、減る場合は左にずれ、 γ 線を放出しエネルギー状態が低くなると下に移動して記述します。



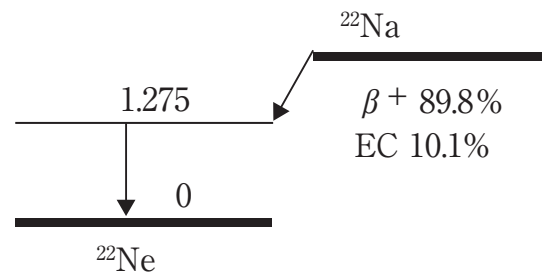
(a) ^{60}Co の壊変図式

コバルト (Co) -60が β^- 線を放出し、ニッケル (Ni) -60に壊変します。Ni-60は、壊変当初、励起状態にあるため、 $2.506-1.333=1.173\text{MeV}$ と 1.333MeV の γ 線を放出し安定します。



(b) ^{137}Cs の壊変図

Cs-137が β^- 線を放出し、バリウム (Ba) -137に壊変します。Cs-137は、壊変当初、励起状態のBa-137mであるため、 0.662MeV の γ 線を放出し安定します。あるいは γ 線を放出する代わりに、軌道電子にエネルギーを与え、その電子が放出される「内部転換」により安定します。



(c) ^{22}Na の壊変図式

ナトリウム (Na) -22が β^+ 線を放出し、ネオン (Ne) -22に壊変します。Ne-22は、壊変当初、励起状態であるため、 1.275MeV の γ 線を放出し安定します。あるいは β^+ 線を放出する代わりに軌道電子捕獲 (EC:原子核が軌道電子を捕獲し、ニュートリノを放出する壊変) も起こります。

図5.7 壊変図式の例

(6) 放射線

放射線には、 α 線、 β 線、 γ 線、X線、中性子線等があり、発生原因から、①原子核が壊変するときに放射される粒子や電磁波、②放射線発生装置から放射される粒子や電磁波（法令上は1 MeV以上のエネルギーを有する電子線およびX線）に分けられます。放射性同位元素が壊変した時に放出されるのが、 α 線や β 線です。また、壊変時に原子核が励起状態になることがあります。励起状態の原子核が安定になる時に放出されるのが γ 線です。 α 線、 β 線、 γ 線は原子核から放出されることが特徴です。

これらの放射線の正体は特別なものではなく、 α 線はヘリウムイオン、 β 線は電子、 γ 線は電磁波です。

原子核の周りにある軌道電子が励起状態から安定状態になる時や動いている電子がスピードを落とした時に放出されるのがX線です。X線も電磁波です。加速器で電子を加速してから、電場などで電子の軌道を曲げ、その時にX線を発生させるのが「放射光」と呼ばれている加速器です。

中性子線は核分裂したときなどに原子核から放出される電氣的に中性の粒子です。

放射線は種類により大きく物体を透過する力が異なります。ヘリウムイオンである α 線は透過力が弱く、薄い紙一枚で止まります。 β 線は α 線よりも透過力が大きいのですが、薄いアルミニウム板などで遮へいすることができます。電磁波である γ 線やX線は透過力が大きく、特に γ 線は鉛等を使わないと遮へいが困難です。中性子線は電荷をもたない粒子であることから物質を透過する力が大きく、遮へいは水素を多く含む物質（ポリエチレンやパラフィンなど）により減速させ、ボロン（B）-10を含む物質で捕獲するという遮へいが用いられます。

表5.3 主な放射線とその実体

種類	発生機構	発生源	実体	透過力
α 線	α 壊変	放射性物質	He原子核	小
β^- 線	β^- 壊変	放射性物質	電子	中
β^+ 線	β^+ 壊変	放射性物質	陽電子	小
γ 線	γ 放射	放射性物質	電磁波	大
中性子線	核反応	放射性物質、加速器、原子炉	中性子	大
電子線	電場・磁場によるエネルギー付与	加速器	電子	中
X線	軌道電子の遷移、加速電子の減速	加速器、X線管、放射性物質	電磁波	中～大
イオンビーム	加速器	加速器	イオン	小

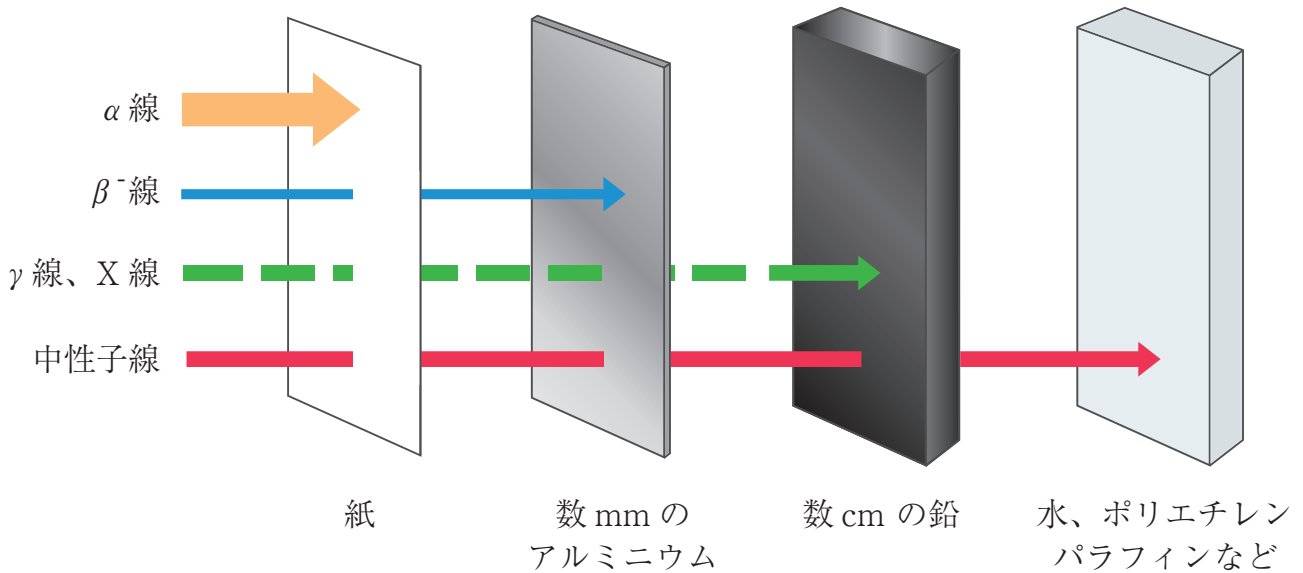


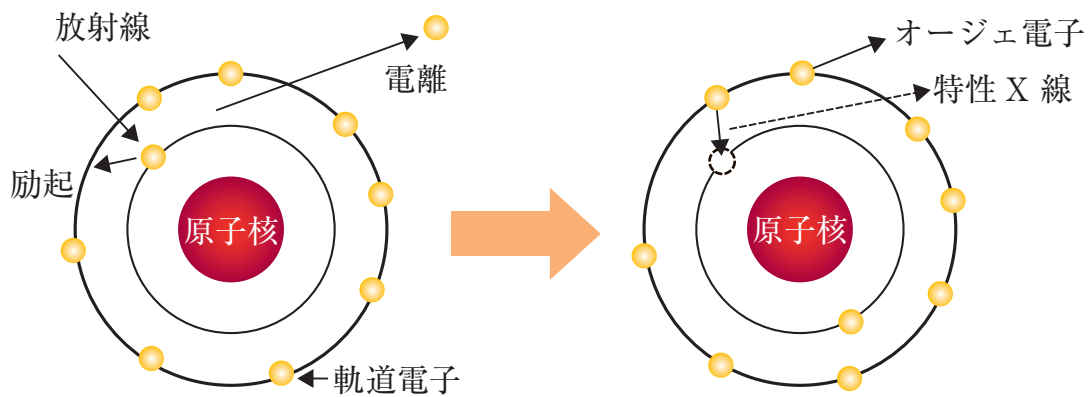
図5.8 放射線の種類と透過性能

(7) X線の発生

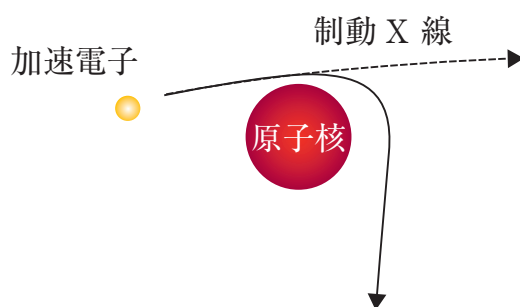
X線は、発生過程から特性X線と制動X線の2種類に分けられます。特性X線は放射線や電子線などによる原子の電離や励起により、空席になった軌道に外側の軌道電子が遷移し、軌道間のエネルギー差がX線として放射される現象です。そのため、特性X線のエネルギーは決まった値（元素固有の値）を示します。X線が放射されずに、軌道電子が飛び出す場合もあり、この電子をオージェ電子と呼びます。

制動X線は、加速した電子が原子核の正の電場の影響で軌道を曲げられたとき、減速分のエネルギーがX線として放射される現象です。このエネルギーは決まった値を示さず、連続しています。

図5.10にX線管の構造を示します。電流をフィラメントに流し、熱電子を放射させ金属陽極へ向けて電子を照射します。すると金属原子との相互作用により、制動X線と特性X線の両方が放射されます。エネルギースペクトルは、特性X線の成分と制動X線の成分が重なった形を示します。陰極-陽極間の電圧を管電圧、フィラメント電流を管電流といい、制動X線のエネルギーは管電圧により制御され、特性X線のエネルギーは陽極の金属種により異なります。X線の強度は管電流により調整できます。



(a) 特性X線（蛍光X線）の発生



(b) 制動X線の発生

図5.9 X線の発生原理

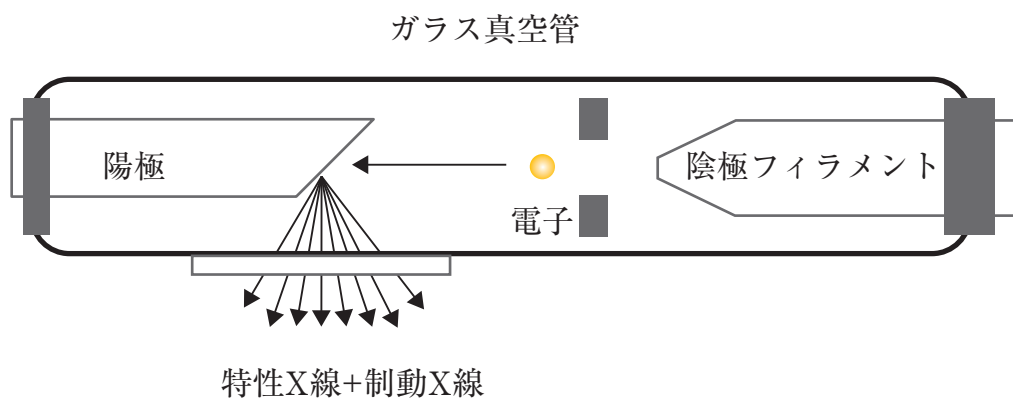


図5.10 X線管の構造

(8) 物質との相互作用

放射線が物質中を通過するとき、そのエネルギーを物質に与え、はじめに電離や励起作用など原子レベルで相互作用を起こします。その後、反応が化学的変化や生物的变化に進展することがあります。

- * **電離作用**：放射線が照射された物質中の電子にエネルギーを与えます。すると電子は原子の軌道を離れ飛び出す現象です。電氣的に中性の原子が、負の電荷をもつ電子と正の電荷を帯びた原子（陽イオン）に分かれます。
- * **励起作用**：放射線により物質中の原子内の軌道電子が、エネルギーの低い状態（基底状態）からエネルギーの高い状態（励起状態）に移ります。励起状態にある電子は基底状態に戻る時に余分なエネルギーを光として放出することがあります。
- * **化学作用**：放射線により、原子や分子が電離や励起された結果、化学反応が引き起こされます。写真フィルムの黒化（写真作用）や分子の分解反応などがあります。
- * **生物作用**：放射線によって生物内で起こる、電離、励起、化学反応の結果、DNAに傷が付いたり切断されたりして、細胞に影響がでてきます。

(a) α 線の相互作用

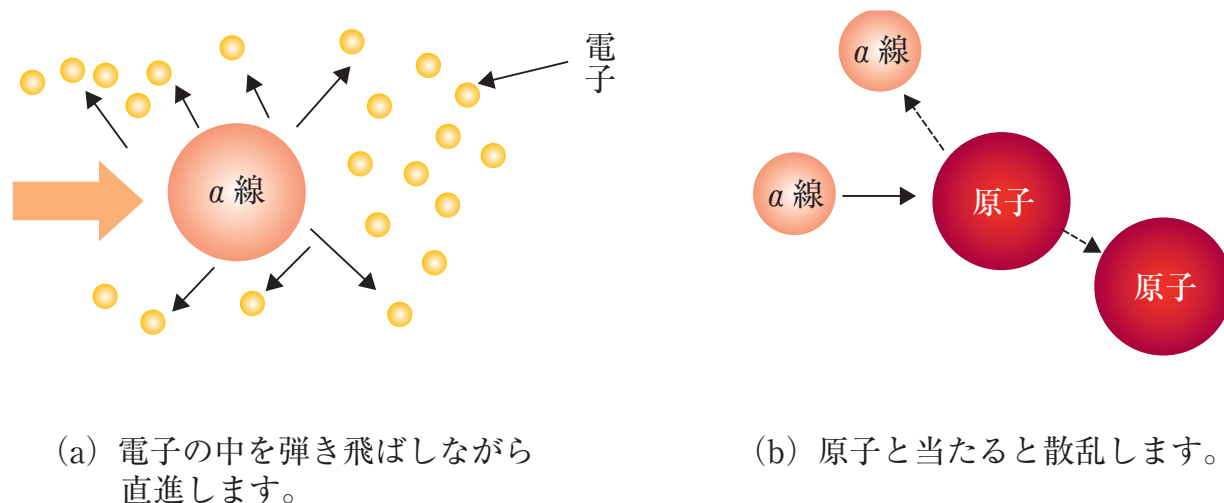
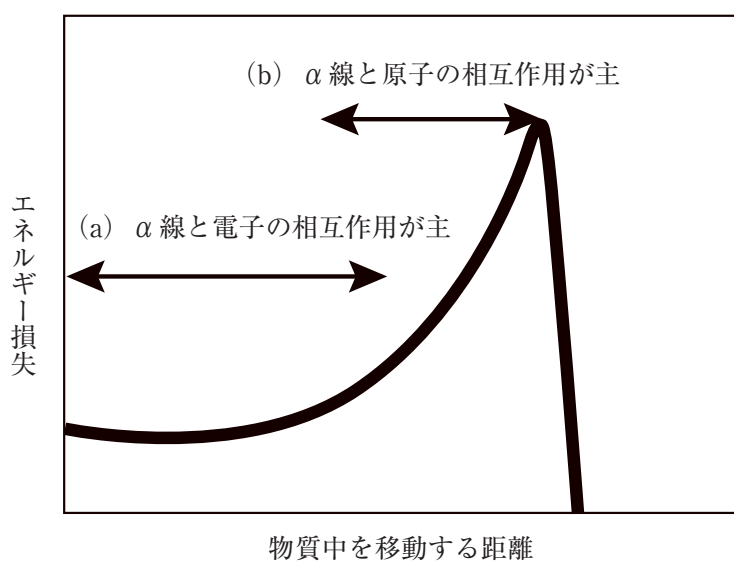
α 線は物質内に入射すると、電子および原子核と相互作用を起こします。原子核との相互作用にはラザフォード散乱や核反応などがありますが確率が低く、電子との相互作用が主です。 α 線は電子と比較してサイズ、質量が大きいため、電子を弾き飛ばしながら物質内を直進します。エネルギーを失い停止するまでの距離を飛程と呼びますが、 α 線の場合（エネルギーが1～5 MeV）、空気中で3 cmから4 cm、水中ではその約1000分の1程度です。 α 線の空気中における飛程は次式で与えられます。

$$R = 0.318 \times E^{1.5}$$

ここで、R:15℃、1気圧の空気中の飛程（cm）、E： α 線のエネルギー（MeV）です。 α 線の核反応は、 ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ 等があり、 ${}^{241}\text{Am}$ からの α 線を ${}^9\text{Be}$ に照射し、中性子線を得るという線源【Am-Be中性子線源】に応用されています。

- * ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ ： ${}^9\text{Be}$ の原子核に α 線が衝突した時に中性子（n）を放出し、 ${}^{12}\text{C}$ に変換される反応を示します。

α 線は電子との相互作用により2次的に、散乱電子、2次電子、オージェ電子、特性X線、制動X線が発生します。

図5.11 α 線と物質との相互作用図5.12 α 線の物質中のエネルギー損失（ブラッグ曲線）

α 線はエネルギーが高い時は、図5.11 (a) の電子との作用が主となります。この衝突によりエネルギーが徐々に低くなると、図5.11 (b) 原子との作用が主となり、急激にエネルギーが低下し、止まります。この関係を示したのが図5.12 です。

(b) β 線の相互作用

β 線は物質内の電子と相互作用し、励起、電離させエネルギーを失います。また、原子核の電場により、軌道が曲げられ、エネルギーを損失する現象もあり、そのとき制動X線が放射されます。これらの結果、物質に電子が照射されると、相手物質から、2次電子、散乱電子、オージェ電子、特性X線、制動X線が放出されます。

β 線の透過力は α 線よりも強く、アルミニウム中の飛程が次式で与えられます。

$$E > 0.8 \text{ MeV} \text{ のとき } R = 542 E^{-1.33}$$

$$0.8 \text{ MeV} > E > 0.15 \text{ MeV} \text{ のとき } R = 407 E^{1.38}$$

ここで、R:アルミニウム中の最大飛程 (mg/cm^2)、E: β 線のエネルギー (MeV) です。

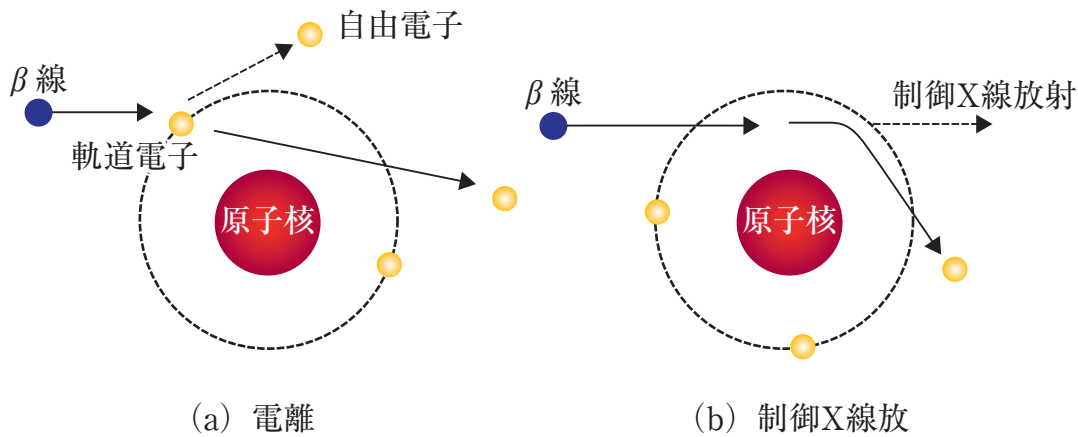


図5.13 β 線・電子線の相互作用

*** β^+ 陽電子の相互作用**

陽電子は電子と相互作用し、電子-陽電子対を作り、その後、両者は消滅し γ 線を2本放出します。これを消滅 γ 線といい、エネルギーは電子の静止エネルギーに相当する0.511MeVです。そのため、陽電子が発生する β^+ 壊変の時には、 γ 線の発生を考慮する必要があります。

(c) γ 線、X線の相互作用

γ 線、X線の入射エネルギーの低い順に、①光電効果、②コンプトン散乱、③電子対生成という電子との相互作用を起こします。

①光電効果：図5.14 (a) に示すように、 γ 線はエネルギーを全て軌道電子に与え、軌道電子を放出させます。放出した電子を2次電子または光電子といい、エネルギー E_e は次式で与えられます。

$$E_e = E_\gamma - B$$

E_γ ： γ 線エネルギー、 B ：軌道電子の結合エネルギー

放出した軌道電子の空席には、上位の軌道電子が移ってきて、そのときに軌道準位の差が特性X線あるいはオージェ電子が放出されます。

②コンプトン散乱：図5.14 (b) に示すような γ 線と電子の散乱現象で、電子を放出させます。電子の静止質量に相当するエネルギーを $m_e c^2 (= 0.511\text{MeV})$ とし、散乱前後の γ 線エネルギーをそれぞれ E_{γ_1} 、 E_{γ_2} 、散乱角 θ とすると次式となります。

$$E_{\gamma_2} = E_{\gamma_1} / \{ 1 + E_{\gamma_1} (1 - \cos\theta) / m_e c^2 \}$$

③電子対生成：図5.14 (c) に示すように、1.02MeV以上の γ 線が原子核に接近したときに、電子と陽電子の対を生成し γ 線は消滅する現象です。電子 E_e と陽電子 E_{e^+} の運動エネルギーの和は、

$$E_e + E_{e^+} = E_\gamma - 2 m_e c^2$$

と表すことができます。生成した陽電子は電子と結合し、0.511MeVの γ 線を2本放出します。

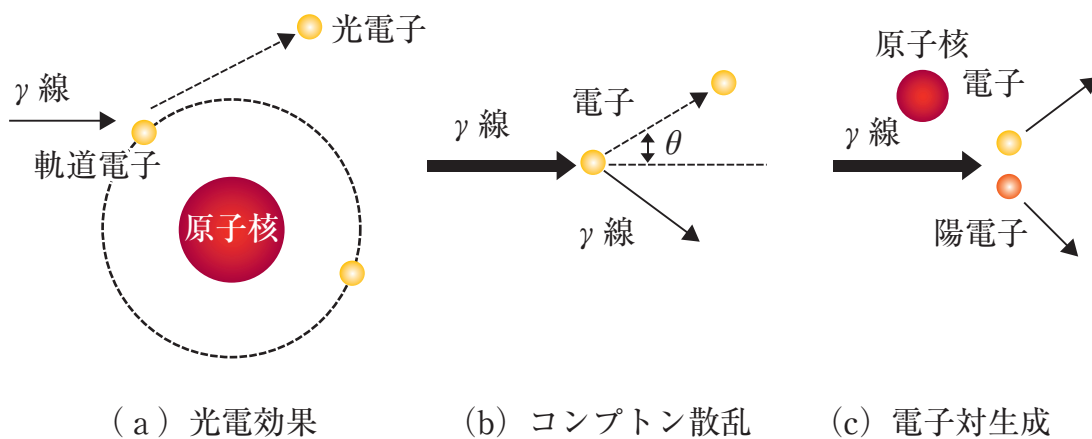


図5.14 γ線と電子の相互作用

これらの相互作用の結果、 γ 線は物質中で減衰することになります。図5.15に示すように、直線状の γ 線の入射前の強度を I_0 、透過後の強度を I 、透過する物質の厚さを x とすると

$$I = B \times I_0 \times \exp(-\mu x)$$

で表すことができます。ここで μ は線減弱係数または線減弱係数 (cm^{-1}) と呼ばれ、物質により異なる値です。 μ を物質の密度 ρ で割った値 $\mu_m = \mu/\rho$ は質量減弱係数といいます。Bはビルドアップ係数といい、狭いビーム状の γ 線の場合は1、広がりのある γ 線の場合は、文献値を用います。図5.16にAl、Pb遮へい体についての計算結果を示します。透過強度が $1/2$ になる厚さを半価層、 $1/10$ になる厚さを $1/10$ 価層と呼びます。

γ 線を遮蔽する場合、この式を用いてどのくらいの厚さにするかを決定します。

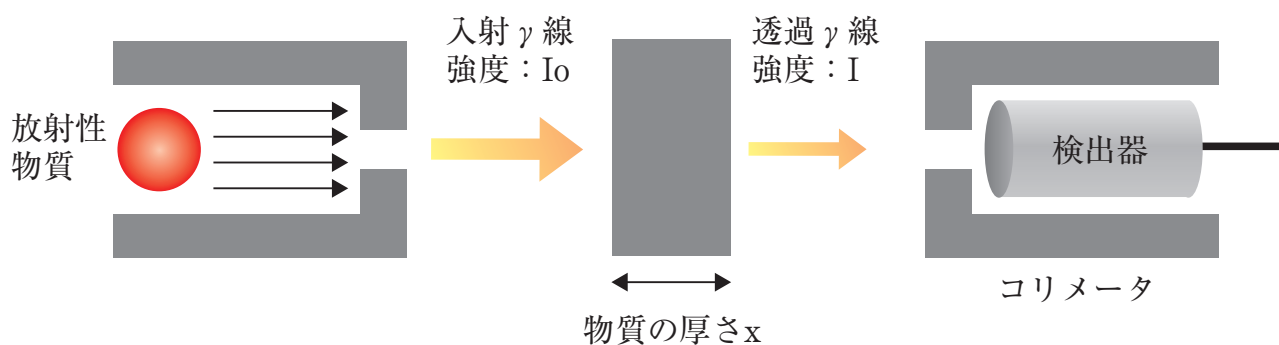


図5.15 γ線の透過強度

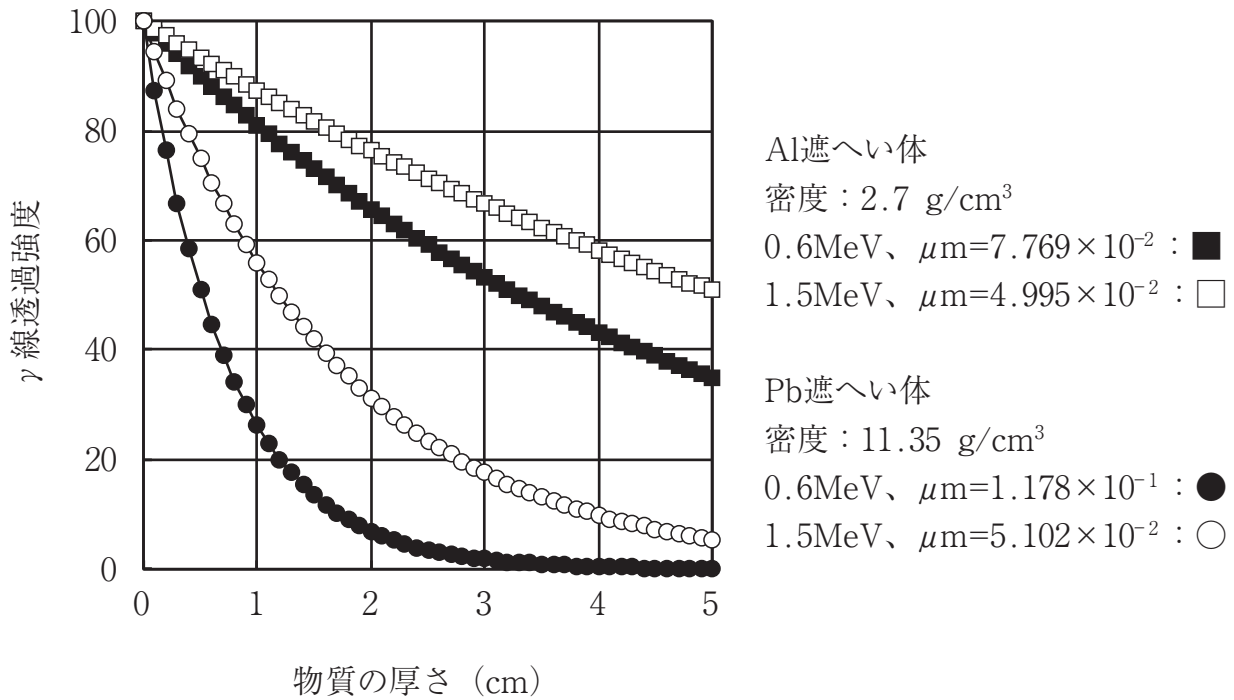


図5.16 物質の厚さと透過強度の関係

(d) 中性子線の相互作用

中性子は原子核との相互作用のみとなります。原子核との反応は以下の4つの現象に分けることができます。

- ①弾性散乱：中性子が原子核と衝突し、散乱されます。このとき散乱前後の中性子の運動エネルギーが保存される散乱を弾性散乱とよびます。
- ②非弾性散乱：中性子が原子核と衝突したときに原子核が励起され、その分中性子の運動エネルギーが減少する散乱です。励起された原子核は γ 線を放出して安定状態になります。
- ③捕獲：中性子が原子核と衝突したときに、原子核に吸収される現象です。原子核の質量数が1増加します。そのとき、 γ 線が放出されます。
- ④核分裂：中性子が ^{235}U や ^{239}Pu などと捕獲反応を起こすと核分裂し、2個の核分裂生成物ができます。このとき中性子や γ 線が放出されます。

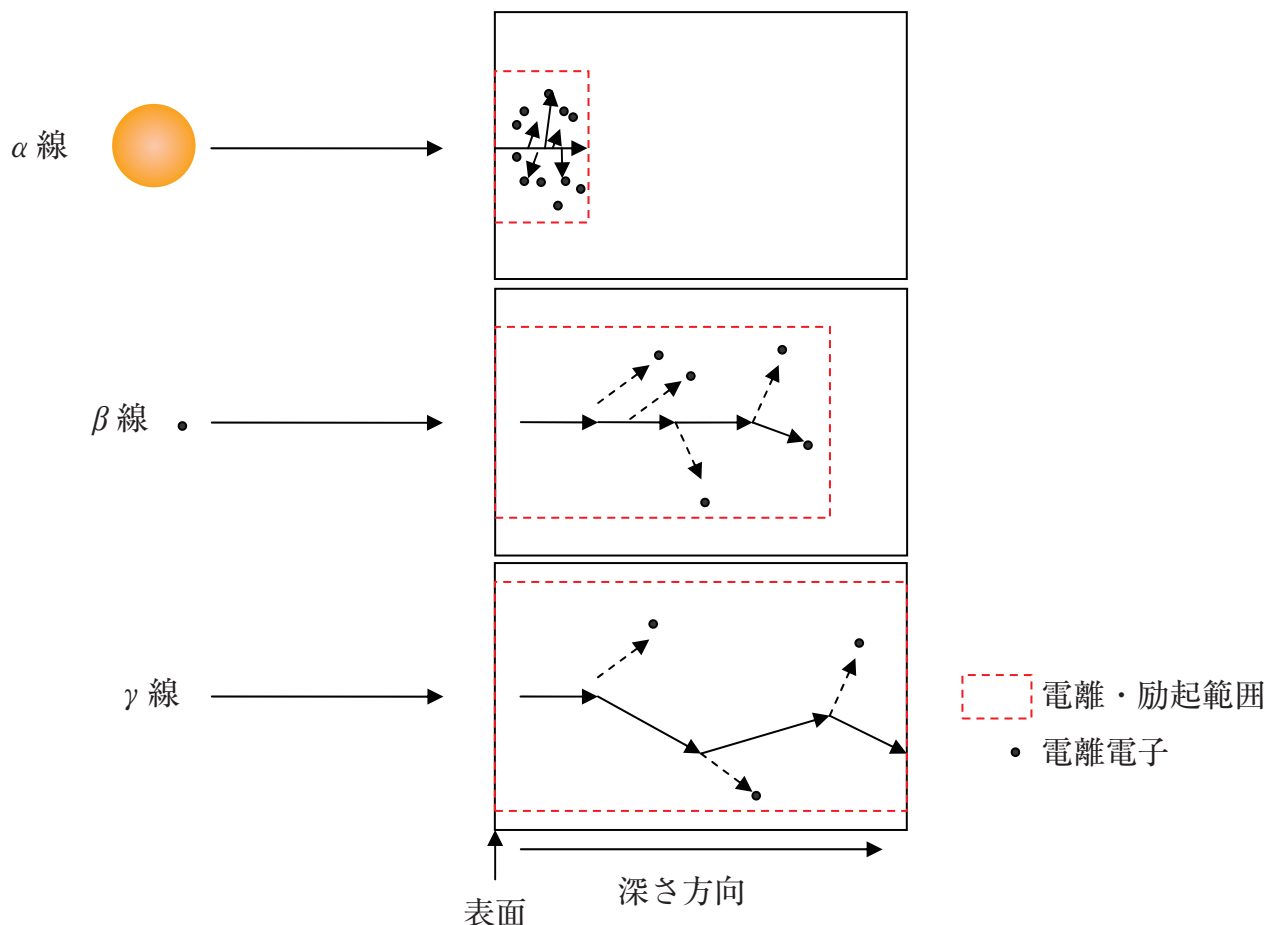


図5.17 放射線の種類と物質中の電離・励起範囲

図5.17に放射線の種類と放射線が物質に与える影響（電離・励起）の範囲を示します。 α 線は物質の表面でエネルギーを消費し、停止します。電離・励起範囲は、浅いのですが電離や励起の密度は高くなります。 β 線は、軌道電子との相互作用や制動X放射によりエネルギーを消費します。 α 線よりも深い位置まで侵入します。 γ 線は、軌道電子と相互作用しながらエネルギーを消費します。

5.3 放射線の量と単位

(1) 放射線のエネルギー[eV]

放射線のエネルギーは通常、電子ボルト (eV) が使用されます。1 eVとは、電子が1ボルトの電位差で加速されたときの運動エネルギーです。このSI単位のジュール (J) で表すと、 $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$ という関係にあります。

γ 線やX線などの電磁波のエネルギー E は、 $E = h\nu$ (h はプランク定数： $4.135 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ 、 ν は振動数) で計算できます。

(2) 放射能 [Bq]

放射能の単位は、単位時間の壊変数で定義され、単位はベクレル (Bq) です。Bqが使用される前はキュリー (Ci) という単位が使用されていました。これらは、 $1 \text{ Bq} = 2.703 \times 10^{-11} \text{ Ci}$ という関係になります。

(3) フルエンス

(a) 粒子フルエンス [個/m²]

単位面積を通過する粒子の数を示し、個/m²等の単位で表します。単位時間当たりのフルエンスを粒子束密度またはフルエンス率といい、【個/m²/s】で表します。

(b) エネルギーフルエンス [J/m²]

単位面積を通過する放射線のエネルギー量を示し、J/m²で表します。単位時間当たりの量をエネルギー束密度またはエネルギーフルエンス率【J/m²/s】で表します。

(4) 吸収線量 [Gy]

物質 (人体も含む) に放射線を照射したときのエネルギー吸収量を示します。1 Gyとは、「物質1 kgあたり1 J (=0.24カロリー) のエネルギーが吸収された場合」と定義されています。以前は、ラド (rad) という単位を使用していましたが、その関係は、 $1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$ です。

(5) 照射線量 [C/kg]

空気を γ 線やX線により照射したときの電離電荷量を示します。以前はレントゲン (R) を使用していましたが、その関係は、 $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$ です。

(6) 空気カーマ [Gy]

空気カーマとは、空気の単位微小体積中で γ 線やX線により生成される2次電子の初期運動エネルギーの総和を単位微小体積で割った値です。2次電子の放射損失が無視できる場合は、照射線量 (R) と空気カーマ (Ka) は次式の関係があります。WはW値 (eV) のことで、気体中でイオン対を1個生成するのに要する平均エネルギーです。さらに空気カーマ (Ka) は空気吸収線量 (Da) と一致します。

$$Ka = W \times R = Da$$

(7) 等価線量、実効線量、1 cm線量当量 [Sv]

同じ吸収線量であっても、放射線の種類やエネルギーによって、人間の組織・臓器への影響が異なります。そこで人体に対しての放射線の種類やエネルギーによる影響を考慮した放射線量として、「組織・臓器の等価線量」が定義されています。単位はシーベルト (Sv) で、組織・臓器における吸収線量に放射線の種類やエネルギーによって定められている放射線荷重係数との積で表します。

$$\text{等価線量 (Sv)} = \text{放射線荷重係数} \times \text{ある組織・臓器の吸収線量 (Gy)}$$

γ 線に対する放射線荷重係数は1なので、等価線量は吸収線量 (Gy) と等しい値となります。

さらに、各臓器の確率的影響の差を考慮した係数である組織荷重係数で補正した線量である「実効線量」が定義されています。

$$\text{実効線量 (Sv)} = (\text{各組織の等価線量} \times \text{組織荷重係数}) \text{の総和}$$

表5.4 放射線荷重係数ICRP1990年勧告

放射線の種類		係数
γ 線、X線	全てのエネルギー	1
電子および μ 粒子	全てのエネルギー	1
中性子	10keV未満	5
	10keVを超え100keVまで	10
	100keVを超え2 MeVまで	20
	2 MeVを超え20MeVまで	10
	20MeVを超えるもの	5
陽子 (反跳陽子を除く)	2 MeVを超えるもの	5
α 線、核分裂片、重原子核		20

表5.5 組織荷重係数 ICRP1990年勧告

組織、臓器	係数	組織、臓器	係数
生殖線	0.2	乳房	0.05
骨髄	0.12	肝臓	0.05
結腸	0.12	食道	0.05
肺	0.12	甲状腺	0.05
胃	0.12	皮膚	0.01
膀胱	0.05	骨表面	0.01
		残りの組織、臓器	0.05

外部被ばく線量を測定するためには各臓器の被ばく線量が必要となりますが、それぞれの臓器ごとに線量を測定することは、実際にできません。そのため、実効線量を測定・評価するために「1 cm線量当量」が用いられています。これは人体と同様の物質で作られた球へ照射したとき、深さ1 cmにおける線量です。 γ 線を人体が受けた場合、人体表面よりも深い部分の被ばく量が高くなることから、実効線量に1 cm線量当量が用いられています。被ばく線量測定用サーベイメータの表示は、1 cm線量当量で校正されています。

線源から放出される γ 線のエネルギーが測定地点まで変わらないときには、線源からの距離 d (m)と1 cm線量当量率 D ($\mu\text{Sv/h}$)の関係は次式で計算できます。

$$D = \Gamma \times Q/d^2$$

ここで、 Γ ：1 cm線量当量率定数 ($\mu\text{Sv} \times \text{m}^2 \times \text{MBq}^{-1} \times \text{h}^{-1}$)、 Q ：線源強度 (MBq) です。1 cm線量当量率定数の値は、アイソトープ手帳11版 (日本アイソトープ協会)などに記されています。例えばCs-137：0.0927、Cs-134：0.249です。

この式から、被ばく線量は、距離の2乗に反比例し減少していくことが分かります。

図5.18にCs-137とCs-134がそれぞれ100MBqあったときの1 cm線量当量率を示します。

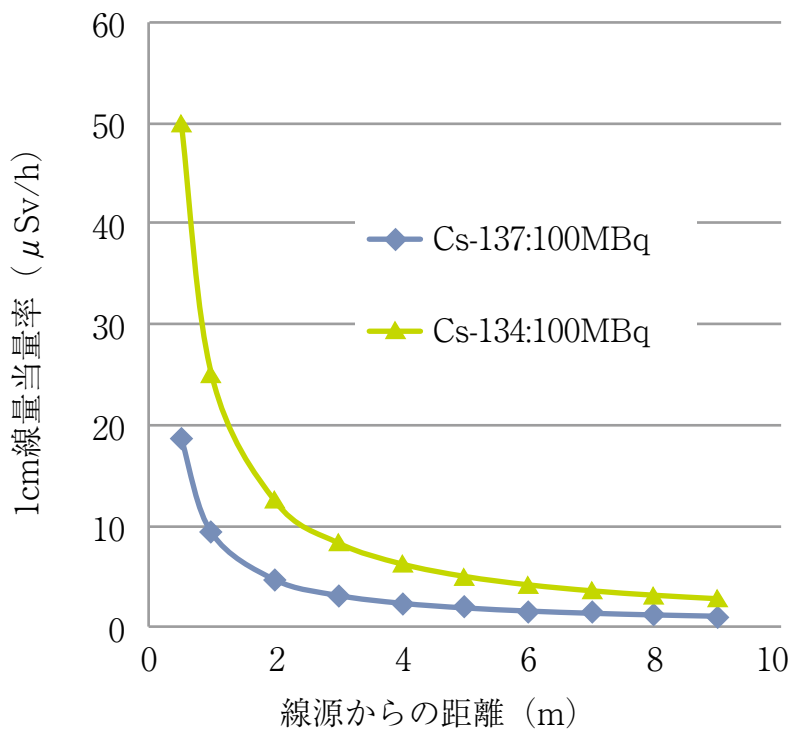


図5.18 距離と線量率の関係

*空間線量率の経時変化

福島第一原子力発電所の事故後、降雨などで地上に沈着した放射性物質で今後、空間線量率に寄与するのはCs-134とCs-137です（当初はI-131の寄与が大きかったのですが、半減期が8.02日であるので、2011年10月現在では、ほとんど無視できると考えられます）。

1 cm線量当量率定数は、Cs-134：0.249、Cs-137：0.0927であることから、空間線量率に寄与する割合は、Cs-134は73%、Cs-137は27%と算出されます。Cs-134の半減期は2.065年、Cs-137は、30.17年であるので、今後の空間線量率の経時変化は、図5.19のようになります。実際には流出や大地への浸透などにより、空間線量率は、もう少し低くなることが予想されます。この図から空間線量率は3年で約半分、10年で約1/4になると予想できます。

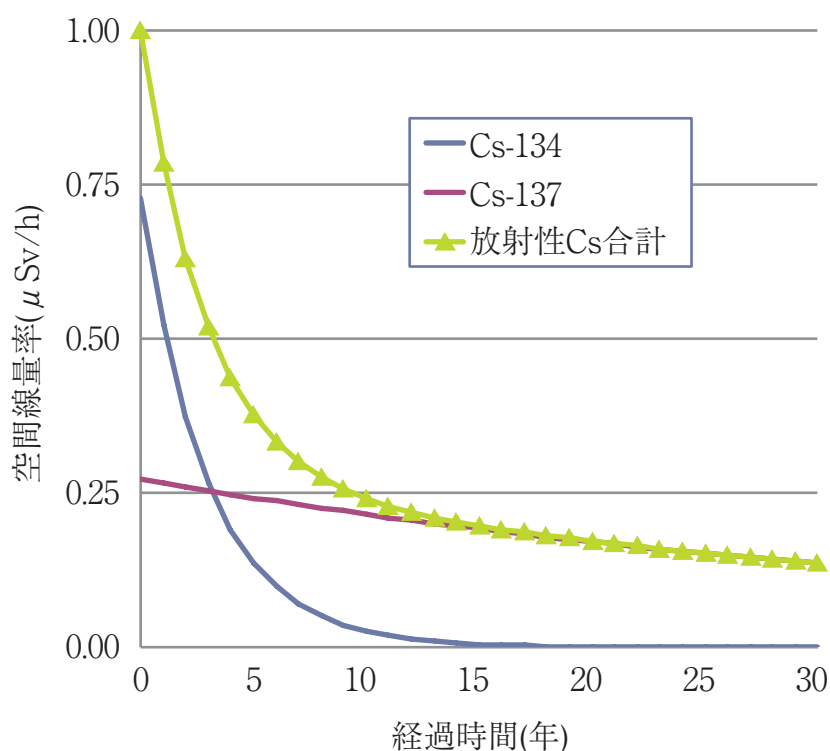


図5.19 放射性Cs由来の空間線量率の経時変化

第6章 環境・医療と放射線

6.1 環境と医療の放射線

放射線は、目に見えず、臭いも無く、音もしないので、私たちは、生活の中で放射線を受けているとは意識していません。しかし、私たちの周りには微量のアイソトープがあり、放射線をいつも受けています。

私たちが受ける放射線には、宇宙線と大地や空気中のアイソトープから放出されるものがあり、さらに体内に含まれるアイソトープからの放射線があります。このほかに、X線診断のような医療診断で受ける放射線や、事故などで放出されたアイソトープからの放射線があります。

(1) 自然の中の放射線

人体が自然の放射線を浴びる量は地域によって異なりますが、世界平均で1年間に2.4mSvです。外部被ばくは、宇宙線により0.39mSv、大地から0.48mSv、内部被ばくは、呼吸により1.26mSv、食事により0.29mSvと算定されています（日本の平均は年間1.5mSvです）。

内部被ばくの主たる原因は空気中に含まれるラドンで、壊変により生成する核種が肺に沈着するため年間1.3mSvの寄与があるといわれています。また、人体必須元素のK（カリウム）には、 β 線や γ 線をだすK-40という放射性同位体が0.0117%含まれており、人体には体重60kgあたり4,000Bq程度のK-40が常に存在します。一般公衆が自然や医療以外の放射線被ばくを受ける限度値として、ICRP（国際放射線防護委員会）は年間1 mSvという値を勧告しています。

*シーベルト（Sv）：人体に対する放射線の影響を考慮した放射線量
 μ （マイクロ）：100万分の1、m（ミリ）：1000分の1

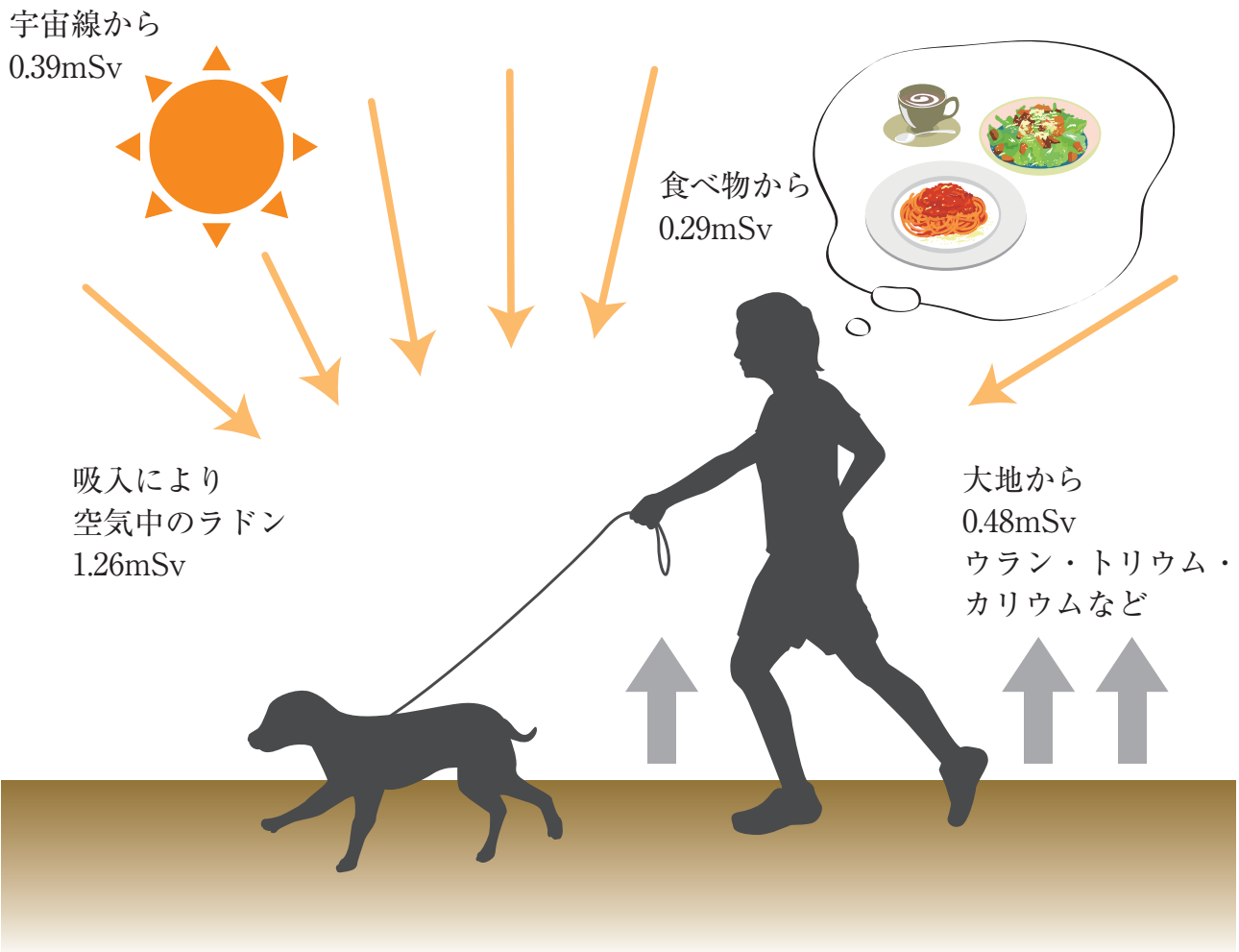


図6.1 私たちが1年間に受ける自然放射線の量
一人当たりの世界平均 (国連科学委員会2008年報告)

(2) 医療に用いられる放射線

レントゲンが骨の写真をX線により撮影したことから、発見当初から医療分野でX線は活躍してきました。この技術が発展し、3次元的に内部構造を観察できるようになったのが、X線CT装置です。体の周りを、X線管と検出器が1周することにより断面が撮影でき、さらに人体の上下方向に撮影していくことで、内部が立体的に把握できます。また、体内に放射性同位元素を注入し、その体内分布を撮影する技術も発展しました。2次元の分布をみるシンチグラフィや3次元的に撮影できるPET (Positron Emission Tomography) などがあり、がんの早期発見などに役立っています。一方、 γ 線や粒子線などの放射線のがん治療などに用いることも行われています。人間が人工の放射線で被ばくする場合、医療による被ばくがほとんどです。世界平均で年間0.6mSv、日本の平均は年間2.3mSvと見積もられています。

表6.1 診断被ばくの推定線量

項目	1件あたりの実効線量 (mSv)
一般X線検査	0.1~7.4
X線CT検査	2.4~12
核医学検査	4.5~19
歯科X線検査	0.2~1.3

(国連科学委員会・2008年報告)

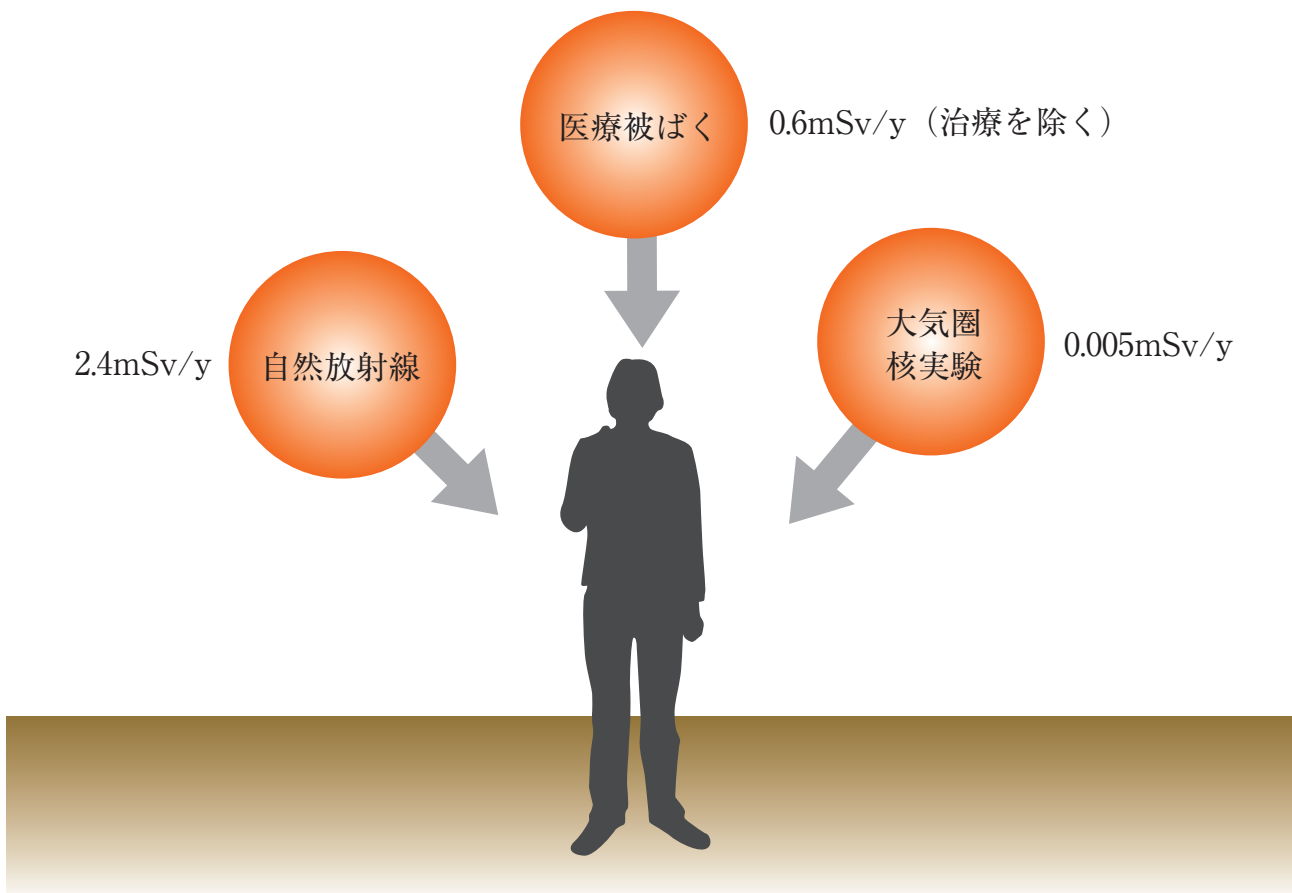


図6.2 自然放射線と医療放射線などによる被ばくの世界平均値
国連科学委員会・2008年報告

6.2 放射線の人体影響

(1) 放射線影響の内容

放射線が人体に影響（障害）を及ぼすことがわかったのは、1895年にレントゲンがX線を発見してほどなく、すなわち100年以上前のことです。放射線の人体影響に関する知識がなかった当初、「骨が透視できる」ことがただちに医学に利用されましたが、一方これをショーとして見せることも行われ始め、無秩序に使用されました。そのため皮膚障害を含めた影響が、X線発見の翌年から記録されています。それから丁度50年後の広島・長崎への原爆投下（1945年）、冷戦時代の核実験における被ばく事故（例えばビキニ事件1954年）、さらに記憶に新しいところではチェルノブイリ原子力発電所事故（1986年）や東海村臨界事故（1999年）などを通じ、近年にいたるまで主として高線量の影響に関する知識が蓄積されてきました。例えば4 SvのX線または γ 線に全身が一度に被ばくすると、その半数の人は2ヶ月以内に死亡します。仮に体重60kgの人がこの線量を被ばくしたとすると、熱量で表すと240ジュール（約57.4カロリー）ほどで、これは温かいコーヒーを一すすりした程度のエネルギー吸収にすぎない量です。放射線の場合、この程度のエネルギー吸収に相当する線量が致死量となるということは、生体は放射線に感受性が高いことを意味します。

4 Svほどの高線量で人体に放射線が照射された場合、遺伝子に修復不可能な損傷が生じ、組織を構成する細胞が大量に死滅し、組織ごとのしきい線量を越えるとその組織の機能が低下または停止することにより、死に至ることが知られています。

しかしながら、核戦争または原子力を含む放射線関連施設の重大事故などが無い限り、治療以外で人類が高線量の放射線に被ばくすることは、ほとんどないと考えられるので、現在の人体影響に関する関心事の中心は、低線量放射線によるがんのリスクです。これを知る手がかりとして、原爆被爆者、原子力施設や放射線科医などの放射線業務従事者、高自然放射線地域住民（中国の揚江、インドのケララ州他）などを対象とした疫学調査と動物実験（発がんや寿命調査）、さらには細胞や分子レベルで放射線発がんの機構を調べる実験が、精力的に進められています。疫学調査のうち、特に原爆は、高線量の影響についてもさることながら、「集団規模が大きい」、「男女ともあらゆる年齢が含まれる」、「個人ごとに推定された被ばく線量が広範囲」、「死亡率やがん罹患率に関するデータの質が高い」ことなどから、低線量の影響を評価するデータベースとしても最も重要視されています。これまでのところ、広島・長崎の被爆者の調査から、平均200mSv以上でがん（リスクが1.1倍）や白血病（通常1000人のうち7人、被ばく1000人のうち10人）のリスクが上がるということがわかっています（朝日新聞2011.4.7）。

(2) 確率的影響と確定的影響

さて、上に述べたような放射線の影響は、「誰に」「何時」「どのように」生じるのか、という視点で区分され研究されています。

「誰に」とは、影響を受けたのが被ばく者本人か被ばく者の子孫かという区分で、前者の場合は身体的影響、後者の場合は遺伝的影響を示します。障害を受けた細胞が体細胞（生殖細胞以外のすべての細胞）か生殖細胞か、と言い換えることもできます。注意を要するのは「奇形」で、これはすべて遺伝的影響と誤解されることもありますが、大半は胎児の胎内被ばくによる発生異常、すなわち身体的影響です。

「何時」とは、被ばくから影響が観察されるまでの期間の長さによる区分です。被ばく後数週間以内なら早期（あるいは急性）影響、数ヶ月以降なら晩発的影響といいます。前者の代表的なものは骨髄障害、胃腸障害、脱毛を含む皮膚障害など、後者はがんや白内障、再生不良性貧血などです。

「どのように」とは、線量により、何が変化するか、という区分です。ある線量（しきい線量）を越えると発症し、線量の増大に伴ってその症状が重くなる影響を確定的影響（ICRP2007年勧告では「組織反応」；ただし併記可）、一方しきい線量はないと仮定され、線量の増大に伴って発生頻度のみ増加する影響を確率的影響（ICRP2007年勧告では「がんおよび遺伝的影響」）とよんでいます。確率的影響はがんと遺伝的影響に限定されるので、それ以外の影響はすべて確定的影響です。ICRPは放射線防護の目的を、「利益をもたらすことが明らかな、放射線被ばくを伴う行為を不当に制限することなく、**確定的影響を防止し、確率的影響を容認できるレベルにまで制限**」することにあるとしています。表6.2は確率的影響と確定的影響の違いをまとめたものです。

胎児は放射線に対する感受性が高く、100mSvを超えると奇形が現れることがあります。成人では250mSv位から臨床的に観察可能な影響（染色体異常や精子減少）が現れ始めます。この「〇〇Svを超えるとある症状が現れる」ということは、逆にいえば「その線量より低ければその症状は現れない」ことでもあり、その線量のことを「しきい線量」とよびます。この「しきい線量」はとても重要な概念です。

表6.2 確率的影響と確定的影響

身体的影響	早期影響 (被ばく後数週間以内に現われる)	骨髄障害、消化管障害など(全身被ばく)	確定的影響 しきい線量：存在する
		皮膚紅斑・脱毛など(局所被ばく)	
遺伝的影響	晩発的影響 (被ばく後2ヶ月～数年後に現れる)	白内障、胎児奇形など	確率的影響 しきい線量：存在しないものと仮定
		白血病を含む各種のがん 遺伝性疾患の可能性 (ヒトでは具体例の報告なし)	

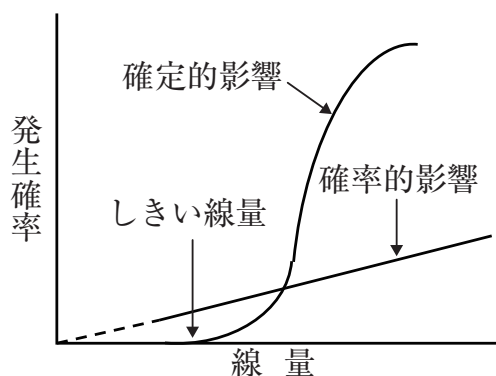


図6.3 確定的影響と確率的影響

表6.3 組織ごとのしきい線量

組織	影響	急性被ばくのしきい線量 (Gy)
精巣	一時不妊	0.15
	永久不妊	3.5～6
卵巣	一時不妊	0.65～1.5
	永久不妊	2.5～6
水晶体	混濁	0.5～2
	白内障	1.5～10
骨髄	機能低下	0.5(全骨髄被ばく)
皮膚	紅斑・乾燥皮膚炎	5(広範囲被ばく)
胎児	奇形	0.1
	重度精神発達遅滞	0.12～0.2

放射線の強さと影響 (高い線量の場合)

(単位：ミリシーベルト)

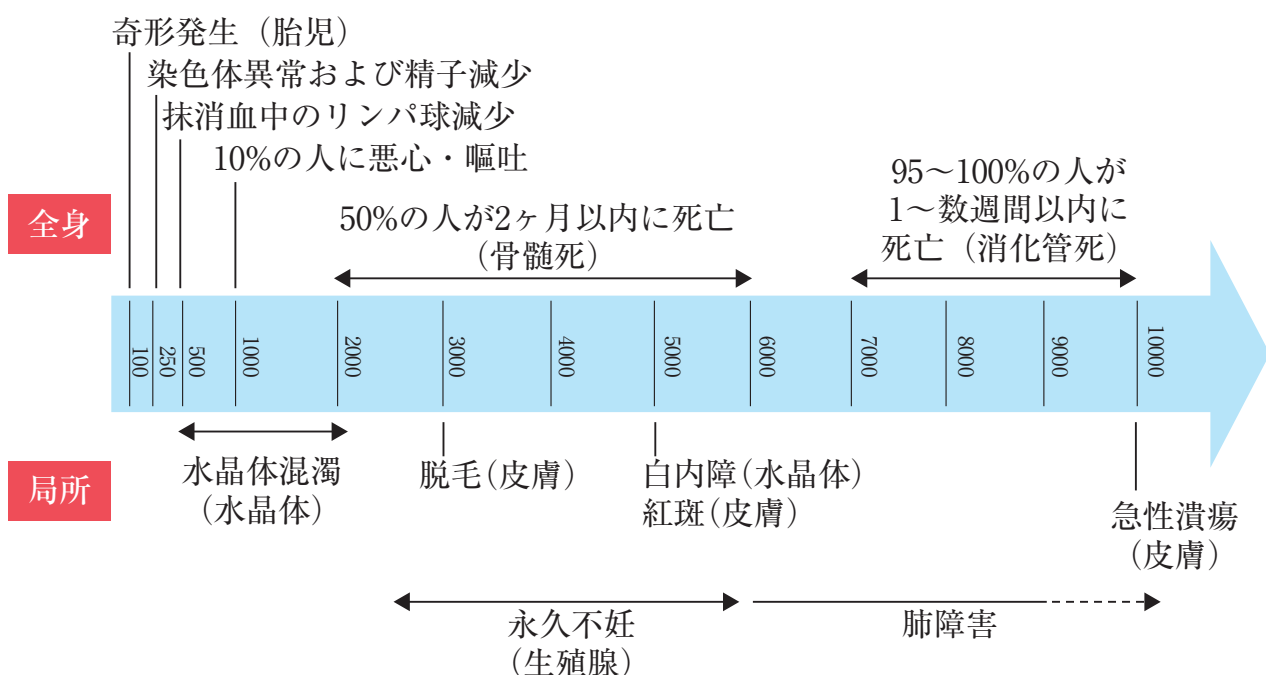


図6.4 高線量被ばくによる確定的影響

(3) 「がん」について

がんには「しきい線量」がない、と仮定されています。実は原爆被爆者の調査で、血液のがんである白血病については200mSv以上、それ以外のがん（固形がんといいます）では約100mSv以上でほぼ直線的（白血病については、厳密には低い方で直線、高い方で二次曲線的）に増加することが分かっているので、増加したという確実な証拠のないそれ以下の線量でも恐らく線量の増加に伴って直線的に増加するであろうと安全側にたって「仮定」されています。しかし、この程度の線量（100mSv）以下で本当にかんが増えるのかどうかはよくわかっていません。

また、自然放射線のレベルが他の地域よりも2～6倍程度高い地域（日本の鳥取県三朝温泉、中国の広東省陽紅県、ブラジルのガラパリ、インドのケララ地方など）が存在しますが、それらの地域で長年生活する人々の健康調査をしても、特にがんが統計的に多いという結果は得られていません。

文部科学省は地震のあった2011年3月11日から2012年3月11日までの1年間の、福島県の各連続観測地点における放射線の積算線量の推定値を発表しました（2011年6月11日時点）。それによりますと、福島第一原子力発電所の北西にある浪江町や葛尾村では100mSvを超過している地点がありましたが、それ以外の地点では100mSvを下回っています。浪江町などの地点の線量は、これを一度に浴びればがん罹患するリスクのあるレベルに達する線量ですが、それが「1年間の積算」ということですから、いわば「じわじわと浴びる」ということであり、原爆のようにいちどきに被ばくした場合と単純にそのリスクの比較をすることはできません。

この「いちどきに浴びる」か「じわじわと浴びる」か、つまり「浴び方」は重要で、「線量率＝単位時間あたりの線量；mSv/時間などと表現」という概念として重視されます。一般にトータルの被ばく線量が同じならば、線量率が低いほど影響も小さいことがわかっていて、これを“線量率効果”とよびます。

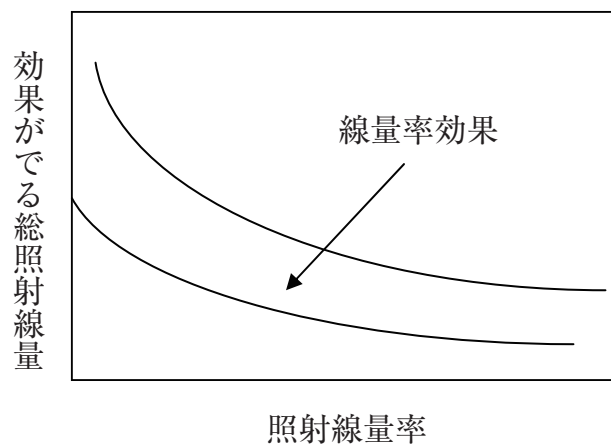


図6.5 生物学的効果の線量と線量率の関係

縦軸にある効果が出る総線量、横軸に線量率をとったグラフです。線量率が低い場合、同じ効果を得るためには総線量を多くする必要があることを示します。

上記の地点以外ではいわゆる低線量であって、仮にその線量をいちどきに浴びたとしても、がんが増加したことを統計的に立証することが困難なレベルの線量ということになるでしょう。

ところでチェルノブイリ原子力発電所事故や今回の事故を通じてよく知られるようになったように、I-131が甲状腺に蓄積しやすいのと同様、元素によっては特定の臓器・組織に蓄積しやすいものが知られています。古くは1920年代に、夜光時計の文字盤に α 放射体である放射性のラジウム226および228(カルシウムと置き換わるため、骨に沈着します)を含む蛍光塗料を、筆を“舐めながら一筆の先を揃えるために”塗る作業をしていた職人さんが長年経口摂取し続けた結果、顎の骨がボロボロになる奇病(“ラジウム顎”と当時は呼ばれたようです)や骨肉腫が多発した例、また第二次世界大戦中のドイツおよび日本などで、 α 放射体であるトリウム232(肝臓や脾臓、骨髄に沈着)を造影剤(通称トロトラス)として用いていたため、この診断を受けた患者の間に肝硬変や肝臓がん、白血病などが多発した例が有名です。これらの事例に共通しているのは、いずれも全身均等被ばくではなく、「局所に大線量被ばくをした」、という事実です。

今回の事故後、福島第一原子力発電所周辺で微量検出された β 線放射体であるSr-90は、カルシウムと置き換わって骨に沈着し、骨髄(すべての血液細胞のもとになる細胞を生み出す組織)を含む骨組織を長期間(半減期約29年)照射し続けます。その結果、骨腫瘍や白血病のリスク増加につながることが知られています。そしてこの核種は γ 線を出さないため化学分離以外に検出手段がなく、またその分離にはおそろしく手間がかかるというやっかい者です。

また、放射線が原因で出来たがんと他の原因で出来たがんとは区別が付きません。さて、放射線以外の原因として、最たるものは食生活だそうです。加熱調理で生じるタンパク質の変性物、食塩、高脂肪・高カロリー、それに何と野菜にも実は結構発がん物質としてノミネートされる物質が含まれています。ただ野菜(および果物)の場合、ビタミンや抗酸化物質も豊富に含まれていて、トータルとしてはがんのリスクを下げる食物とのことです。その他にはご存知タバコ、カビ、紫外線、アルコール、ピロリ菌(胃がん)、ウイルス、ストレス、遺伝的要因などが挙げられます。これらの因子は細胞の遺伝子を傷つけます。その傷は細胞が頑張っただけで修復しようとはしますが、ある確率で治し間違え(エラーを起こし)ます。その過程で私達すべてが持っている複数の「がん関連遺伝子—ふだんは細胞の増殖の調節や細胞死に関わっている遺伝子」が突然変異を起こし、これが不必要に働き過ぎたり、逆にまったく働かなくなったりして細胞の暴走的な増殖を許します。つまりアクセルだけでブレーキのない車状態になるというのが、細胞がん化の第一歩と大まかに考えられています。

しかしこれだけでは私達はそう簡単には、がんになりません。それは、修復し損なってがん細胞予備軍となった細胞を自殺(アポトーシス)に追い込む機構が細胞に備わっており、さらにはそうした網をかいぐってがん化してしまった細胞を異物とみなしてこれを排除する免疫機能といった“多重防御機構”が備わっているからです。それでもなお「2人に1人」ががんになるということは、そうした機構・機能は人の一生を通じて一定不変のものではなく、加齢と共に衰えるということに関係しているようです。

(4) 遺伝的影響について

遺伝的影響については、ショウジョウバエやマウスを用いた動物実験では、これが線量依存的に直線的に増加することが確認されています。しかし、ヒトでは、放射線被ばくによりこれが有意に増加したというはっきりした証拠が、現在ありません。被爆者次世代の奇形・性比・成長と発育・染色体異常・発がん・死亡率・遺伝子突然変異など、多様な遺伝的指標で調査が行われましたが、増加は確認されませんでした。集団規模としては、原爆と共に大きいチェルノブイリ被災者でも今のところ、増加はみられません。しかし「見つかっていない」と「ない」とはイコールではありません。ヒトの場合は上記のような動物実験の場合と異なり、調査し得た集団サイズが、統計的に有意な差を検出できるだけ大きくはなかったか、あるいは感度の高い検出指標が見出されていないことなどがその原因と考えられています。それでもヒトの自然突然変異率、およびマウスを用いた放射線誘発突然変異の実験から、暫定的なリスク推定は行われています。それは自然突然変異率を2倍にする線量（倍加線量）という表現の指標ですが、米国科学アカデミーの「電離放射線の生物学的影響に関する委員会」第7次報告書2005年（BEIR VII）によれば、この値は1 Gyと推定されています。一方、ICRP2007年勧告では第2世代までの遺伝的リスクの推定値は、1 Gy当たり約0.2%としています。

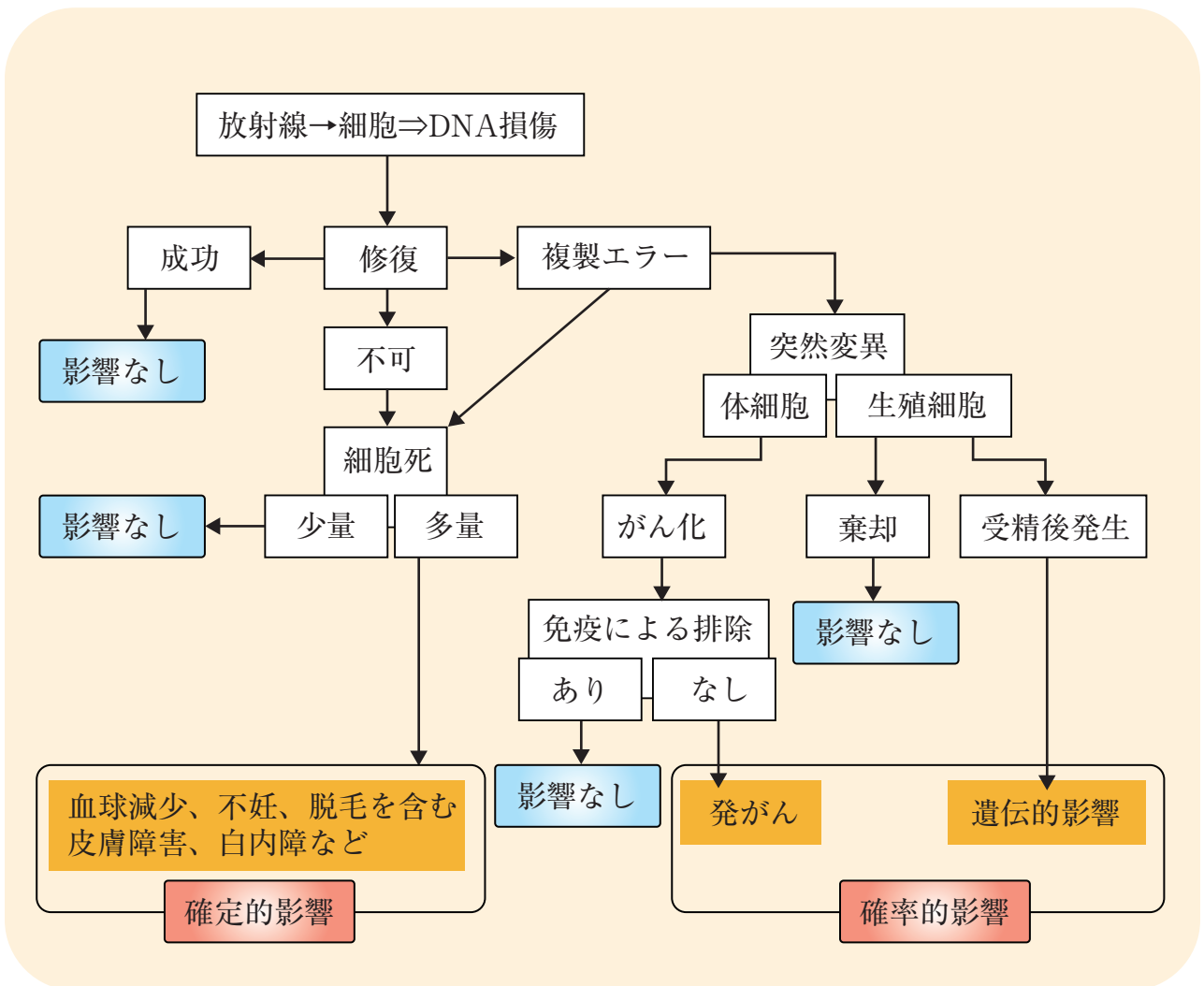


図6.6 DNAの放射線損傷から人体的影響までの経過

6.3 放射線防護の基礎

(1) 放射線防護の考え方

放射線やアイソトープが発見された当初は、放射線の生物に及ぼす影響に関する知識がなかったため、それらの研究や利用に従事して大量の被ばくをした多くの人々の間に重い放射線障害が発生しました。白血病でなくなったキュリー夫人もそうした犠牲者の一人と考えられています。その後大量の放射線は人体に有害な影響を及ぼすことが広く認識されるようになりました。

国際放射線防護委員会（ICRP）は、放射線防護の目的は、確定的影響を「防止」し、確率的影響を「容認できるレベルにまで制限する」ことにあるとしています。

ICRPでは、放射線を用いる場合は、次の3項目を念頭に行うべきであるという勧告を行いました（1990年勧告）。

- ・被ばくを伴う行為は、放射線障害を相殺するのに十分な便益を生む行為でなければ採用すべきではない。
- ・放射線被ばくは経済性などを考慮し合理的に達成できる限り低く保つべきである。
- ・個人被ばく線量は、線量限度に従い、放射線リスクを受けないようする。

つまり、被ばくを伴う作業などは、利益とリスクを比較し、十分に利益が大きい場合のみ認められ、その時は、経済性などを考慮の上、可能な限り被ばく量は少なくすることが必要であるとしています。

医療でレントゲン撮影やX線CTが用いられていますが、これも被ばくが伴います。しかし骨折などの治療に不可欠であり、かつ被ばくよりも利益が優る時に限り診療に用いられることとなります。

放射線防護の三原則

ICRP勧告

1. 行為の正当化 (justification)

：正味でプラスの利益がもたらされること。

2. 被ばくの最適化 (optimization)

：被ばくを合理的に達成できる限り、低く保つ。

3. 個人の線量制限 (limitation)

：線量限度（一般公衆1mSv/年、線従事者50mSv/年、100mSv/5年）を超えてはならない。

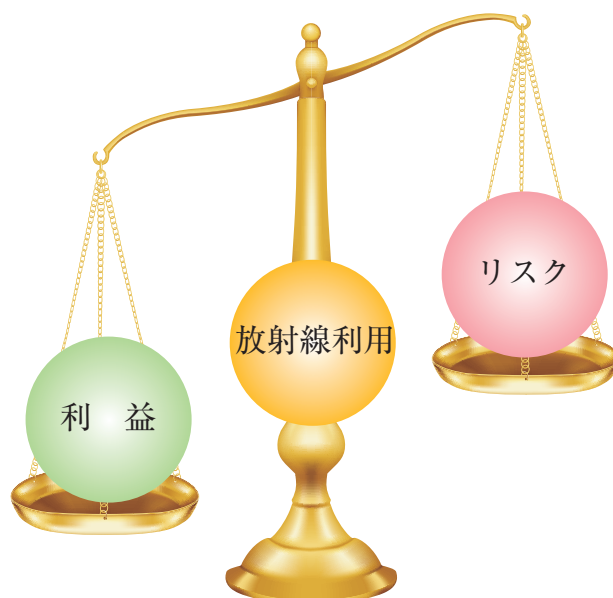


図6.7 放射線防護の原則

(2) 外部被ばくからの防護

放射線被ばくは、外部の放射性物質から放射線を浴びる外部被ばくと、放射性物質を体内部に取り込んでしまった場合の内部被ばくがあります。外部被ばくからの防護は、「時間」、「距離」、「遮蔽」の3つが原則です。

- ①時間：作業の計画をしっかりと立て、放射性物質を扱う時間をできるだけ短くする。
放射線に当たっている時間が長くなるとそれだけ被ばく量が多くなります。そのため、効率よく迅速に作業を終了するように、計画を立て、事前に模擬線源を使用し練習を行います。
- ②距離：放射線源との距離を可能な限り長くとり、被ばく量を減らす。
放射線の量は、放射線源からの距離の2乗に反比例します。遠隔操作用具（トング、作業ロボット）を用いるなど、放射線源から離れることにより被ばく量を減らすことができます。
- ③遮蔽：放射線源と作業者との間に遮蔽物を設置する。
 α 線の場合は、透過力が低いので衣服で十分に遮蔽でき人体までたどり着きません。
 β 線の場合は、アクリル板1cm程度で遮蔽できます。しかし高エネルギーの β 線の場合は、制動X線の影響が出てきますので、アクリル板の後ろに（人体側）にX線遮蔽用の鉛が必要になります。
 γ 線は透過力が高いため、鉛などの高原子番号の材料で遮蔽する必要があります。
中性子線の場合は、中性子の弾性散乱と中性子捕獲を利用する必要があります。水素を多く含む材料（ポリエチレン等）により、中性子を散乱により減速させ熱中性子までエネルギーを低くさせ、B-10を含む材料により、熱中性子を吸収させます。

以上の3つを組み合わせにより、最適な防護方法を検討する必要があります。

外部被ばくの線量評価には、電離箱やシンチレーション型サーベイメータが用いられます。電離箱は空気吸収線量を直接求めることができます。しかし、感度が悪いため高線量率の場に用いられます。シンチレーション型は、感度が良く低い線量の場で用いられます。

また、個被ばく線量計（ポケット線量計、フィルムバッジ）を作業時には身に付け、作業時間積算の被ばく量を測定する必要があります。

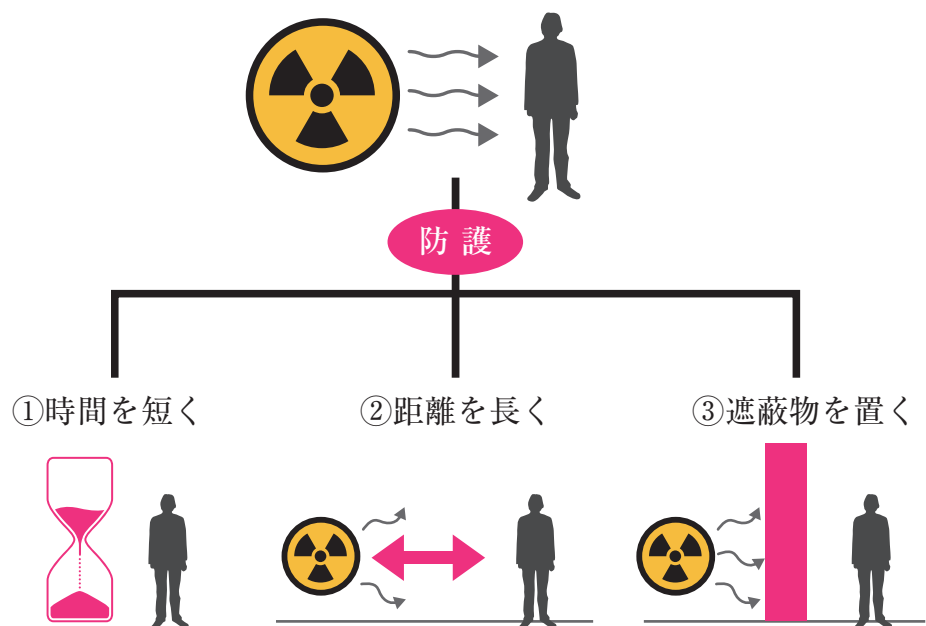


図6.8 外部被ばくからの防護

(3) 内部被ばくの防護

内部被ばくとは、体内に放射性物質を取り込んでしまい、体内において放射線被ばくするものを示します。体内に放射性物質を取り込む経路3つあります。

- ① 吸入摂取・・・呼吸時に放射性塵や放射性ガスを吸入した場合
- ② 経口摂取・・・飲み物、食べ物から体内に放射性物質を取り込んでしまった場合
- ③ 直接摂取・・・皮膚や傷、眼からの体内に放射性物質を取り込んでしまった場合

体内部に取り込まれた放射性物質は、生物学的半減期 T_b （代謝や排泄などによる減少）と物理学的半減期 T_p （放射能の半減期）による減少の両者を考慮した有効半減期 T_e （体内の放射性物質が実質的に半減する期間）を考慮して、どの位被ばくがあったかを算出します。これらの関係は、 $1/T_e = 1/T_p + 1/T_b$ という式で表されます。

表6.4 主な核種の半減期

核種	物理学的半減期	生物学的半減期	有効半減期
ストロンチウム (Sr)-90	29年	49年	18年
I-131	8日	120日（甲状腺）	8日
Cs-134	2年	～200日	157日
Cs-137	30年	70日	70日
ラジウム (Ra)-226	1600年	45年	44年
プルトニウム (Pu)-239	24000年	100年	100年

*生物学的半減期は、文献により異なる値の場合がありますので参考値とお考えください。

呼吸により放射性物質をどのくらい取り込んでしまったかは、空気中の浮遊塵をフィルタに採取し、放射能を求めることが必です。浮遊塵を採取したフィルタをゲルマニウム半導体検出器などの核種と放射能が測定できる検出器により分析し、空気中放射能濃度を算出します。

また食べ物については、食物をゲルマニウム半導体検出器などで分析し、放射能濃度を測定します。テレビや新聞で、「ハウレンソウから食品衛生法の暫定基準値を超える放射能が検出された」という報道をお聞きになっていると思いますが、「そういうものを食べて〇〇Bqの放射能を摂取したとすると、どの位の線量 (Sv) を被ばくすることになるのか？」ということを求める必要があります。事故で放出される可能性のある放射能（放射性核種）を、吸入摂取した場合と経口摂取した場合のそれぞれ1ベクレルあたりの線量 (Sv) について、国際放射線防護委員会 (ICRP) という国際機関が核種ごとにその数値（線量換算係数または実効線量係数）を定め、表として提示しています。それによりますと、例えばI-131については1 Bqあたり経口摂取で 2.2×10^{-8} （1億分の2.2Sv）です。そこで仮に放射性Iの野菜に関する暫定基準値である1 kgあたり2000BqのI-131で汚染されたハウレンソウを100g食べたとします。すると摂取するI-131の量は $2000 \times 100 / 1000 = 200$ Bq。これによる被ばく線量は $200 \times 2.2 / 1 \text{億} = 100$ 万分の4.4Sv = 1000分の4.4 mSv（ミリシーベルト） = 4.4 μ Sv（マイクロシーベルト）となります。無論私達が毎日食べるのはハウレンソウだけでなく、他の野菜も米もあります。それらがすべて汚染されたまま洗わ

ずに食べればその数値はすべて加算されます。

野菜などの表面に放射性物質が付着した場合の汚染は1～2回の水洗で半分以下に落ちるといふ報告もあります（猪越幸雄他；「チェルノブイリ原子力発電所事故に係る環境放射能測定結果とひばく線量評価」東京都立アイソトープ総合研究所研究報告 1988年2月第5号別冊）ので、できるだけ食べる前に洗うことが必要です。

表6.5 線量換算係数の例

核種	半減期	経口摂取 (Sv/Bq)	吸入摂取* (Sv/Bq) 【成人の場合】
I-129	1570万年	1.1×10^{-7}	3.6×10^{-8}
I-131	8.04日	2.2×10^{-8}	7.4×10^{-9}
I-133	20.8時間	4.3×10^{-9}	1.5×10^{-9}
Cs-134	2.06年	1.9×10^{-8}	2.0×10^{-8}
Cs-136	13.1日	3.0×10^{-9}	2.8×10^{-9}
Cs-137	30.0年	1.3×10^{-8}	3.9×10^{-8}
Sr-89	50.5日	2.6×10^{-9}	7.9×10^{-9}
Sr-90	29.1年	2.8×10^{-8}	1.6×10^{-7}

*吸入摂取の場合、吸入TypeがF：急速に吸収されるもの、M：中程度の速度で吸収されるもの。S：不溶性でゆっくり吸収されるものに分かれています。ここでは最も大きい係数を示しました。

表6.6 年齢の違いによる線量換算係数の例

年齢	経口摂取 年齢による違い (Sv/Bq)		
	I-131	Cs-134	Cs-137
3ヶ月	18×10^{-8}	2.6×10^{-8}	2.1×10^{-8}
1年	18×10^{-8}	1.6×10^{-8}	1.2×10^{-8}
5年	10×10^{-8}	1.3×10^{-8}	0.96×10^{-8}
10年	5.2×10^{-8}	1.4×10^{-8}	1.0×10^{-8}
15年	3.4×10^{-8}	1.9×10^{-8}	1.3×10^{-8}
成人	2.2×10^{-8}	1.9×10^{-8}	1.3×10^{-8}

ICRP Pub.72(1996)

(http://www.remnet.jp/lecture/b05_01/4_1.html)

7.1 放射線測定装置の種類と原理

放射線の測定は、放射線と物質の相互作用を利用します。相互作用としては、気体や固体の電離、発光現象、化学変化などを利用したものがあり、その結果生じた電流・電圧や化学量の変化から、放射線のエネルギーや強度をもとめています。

放射線測定に用いられる機器には、目的や対象とする放射線の種類などにより、様々な機構のものがあります。放射線の検出は、物質と放射線の相互作用を電気信号などの計測できる信号に変化させ、その後目的に応じて処理することが基本で、表7.1に示すように、相互作用の種類により様々な検出方法が開発されています。

表7.1 放射線検出器の種類

放射線との相互作用		検出器
電離	気体	電離箱、比例計数管、GM計数管
	固体	半導体検出器
励起（発光）		シンチレータ
電子（正孔）捕獲		TLD、OSL、ガラス線量計
化学作用		鉄線量計、セリウム線量計、アラニン線量計
感光作用		写真乳剤
電荷収集		ファラディカップ
発熱作用		カロリメータ
原子核反応		BF ₃ カウンタ、 ³ Heカウンタ、箔検出器

(1) 気体の電離を利用する測定器

電離箱、比例計数管、GM計数管などがこの仲間になります。

対象とする放射線種： γ 線、 β 線

単位：cpm、Sv/h、Gy/hなど

用途：GM計数管は、表面汚染検査などに、電離箱は高レベルの空間線量測定に使用されます。

原理：ガスを封入した容器中を放射線が通過すると、図7.1示すように気体の分子が正イオンと電子に電離します。電極に電圧をかけると、電子は陽極に、正イオンは陰極に移動し、電極に電流が生じるので、この電気信号を増幅処理して、放射線の計測に利用しています。 β 線や α 線は透過力が低いので、薄膜で出来ている窓から入射するようにしなければ測定できません。

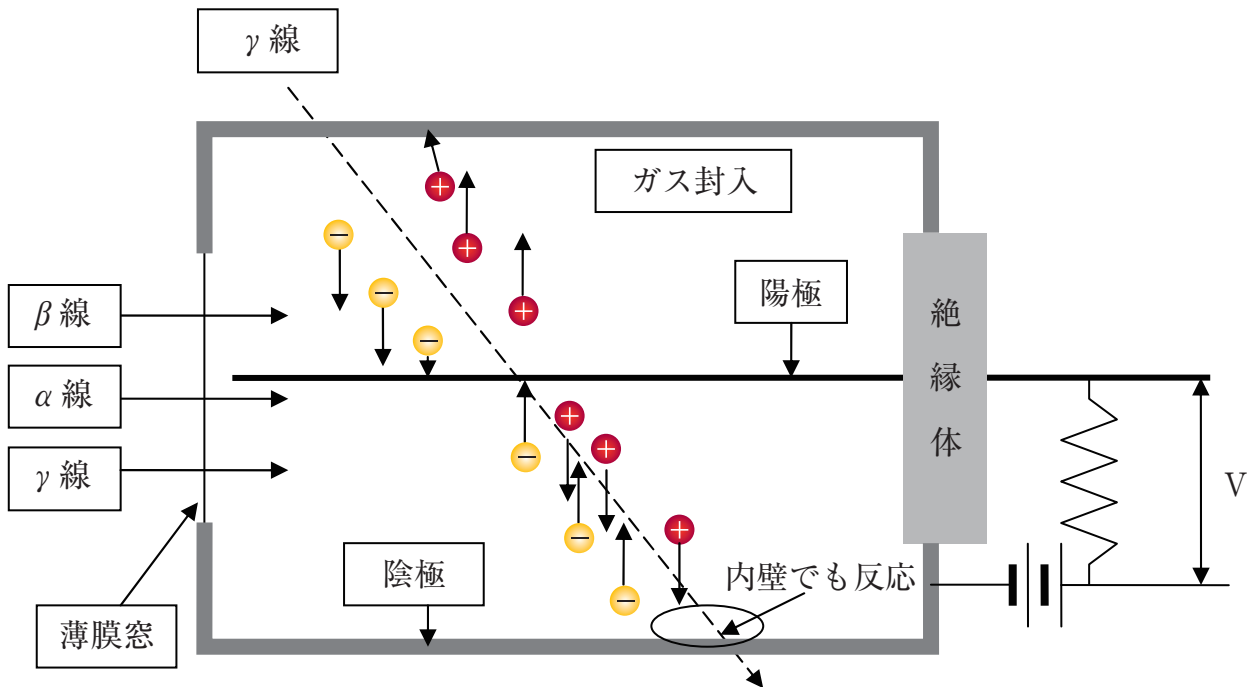


図7.1 陽イオン・陰イオンの生成

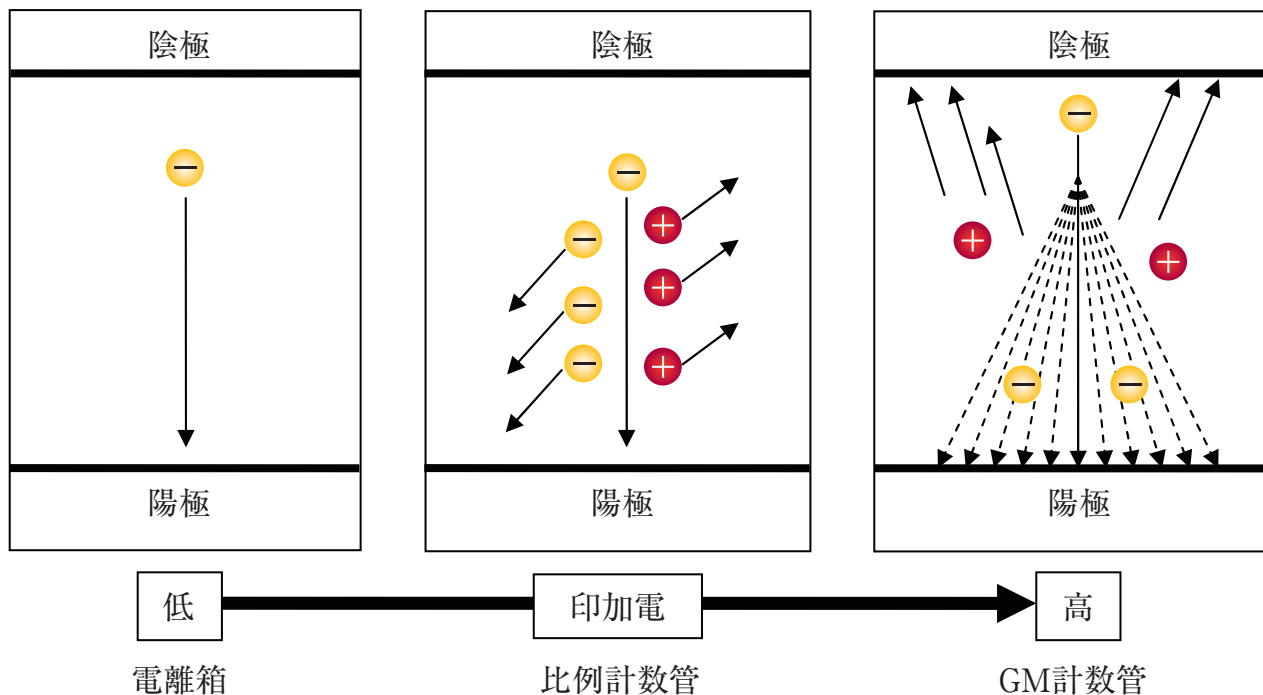


図7.2 印加電圧と陽イオン・陰イオンの生成数の変化

印加電圧とイオン対生成の関係を図7.2に示します。電圧を高くするとイオン対の生成が多くなり、電離電流が増大してきます。印加電圧とイオン対生成の関係は、次の6つの領域に分けることができます。

①イオン再結合領域

印加電圧が低いと陽陰イオン対の一部は電極への移動中に再結合してしまうので、印加電圧変化に収集電荷量は大きく依存します。そのために、この領域は測定に適しません。

②イオン飽和領域

電圧が上がると、再結合が減少し、生成されたイオン対が全て収集されるようになります。電圧変化に対する収集電荷量が飽和し一定になるので、測定の安定性が保たれます。この領域で電離箱型検出器は動作しています。

③比例領域

さらに印加電圧を上げると、収集電荷量は飽和量よりも増えるようになります。これは、放射線により生成したイオン対が、電極に向かう間に、管内のガスをさらに電離させ、2次イオン対を生成し、増幅していることを示しています。これは、印加電圧が高くなったことにより起こる現象で、1次イオン対が2次イオン対を生成し、さらにイオン対を次々と増幅していく現象で、「電子なだれ」と呼んでいます。このように、「電子なだれ」により、最終的に収集電荷が増える現象を「ガス増幅」といいます。比例領域では、収集電荷量は、1次イオン対の電荷量に比例した量となり、放射線によるエネルギー弁別が可能です。比例計数管はこの領域で動作しています。

④制限比例領域

さらに印加電圧を上げると、増幅率が増加し、1次イオン対電荷量と収集電荷量の比例関係が崩れてきます。これは、2次イオン対生成で作られる陽イオンと陰イオン（電子）の移動速度の差に起因します。電子は陽イオンに比べて移動速度が早いため、電子が電極に到達してから、陽イオンは陰極に到達します。この現象が、管内の電界分布を変化させ増幅作用が非線形性になります。

⑤ガイガー・ミュラー(GM) 領域

印加電圧をさらに高くすると、1次イオン対量に無関係に収集電荷は一定となります。つまり、放射線が入り、イオン対が生成されると、ガス増幅が起こり、電荷が収集されますが、その量は、エネルギー、放射線の種類に関係なくなります。そのために、図7.3に示すように、 α 線5MeVと β 線1MeVの放射線が入射した場合、比例領域までは波形により区別可能ですが、GM計数管では波形により区別できません。しかし、大きなパルスを得ることが出来るので、感度が良いという長所があります。

⑥連続放電領域

放射線の有無に関係なく高電圧のために放電する領域で、測定には使用できません。

以上の関係を図7.3に示します。

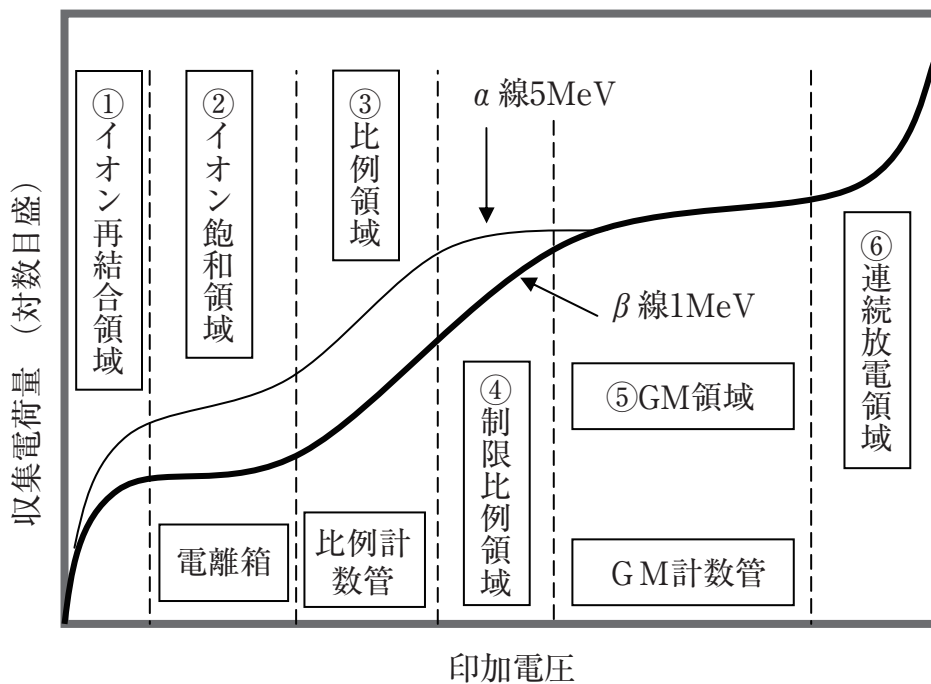


図7.3 ガス電離型計数管における印加電圧と収集電荷量の関係

気体の電離を利用した測定器は、これらの特性を活かして放射線の測定を行う構造となっています。以下に測定器の特徴を記します。

①電離箱型測定器

ガスとしては空気、窒素、水素、二酸化炭素などが使用され、特に空気の場合は、照射線量が測定できます。信号は電流を測る装置と電圧パルスを測る装置があります。印加電圧はイオンと電子が再結合せずに収集でき、かつイオン数が増幅しない「イオン飽和領域」の範囲で動作させます。

②比例計数管型測定器

電離箱よりも印加電圧を高くし、イオン対を増殖させ測定します。そのため出力パルスが高くなり、加えてエネルギー情報も含んだ情報が得られます。低エネルギー X線測定や中性子の測定に用いられています。充填ガスとしては、価格の点からアルゴンやアルゴンとメタンの混合ガスなど、高い効率を求める場合はクリプトンキセノンなどの原子番号の高いガスが使用されます。熱中性子用としては、BF₃や³Heが使用されます。比例領域で動作させます。

③GM(ガイガー・ミュラー) 計数管型測定器

1928年にガイガーとミュラーによって開発された測定器です。高い印加電圧により、放射線による電離で生じた電子が新たな電離を連鎖的に起こし、電極へ瞬間的な放電が生じます。この放電による電気パルスで放射線を検出します。感度よく放射線を検出でき、放射性物質による汚染検査などに用いられています。充填ガスは、ヘリウム、アルゴンなどにアルコールやハロゲンガスを微量混合したものが使用されます。パルス波高とエネルギーや放射線種の関係は無く、エネルギー分析は出来ません。

(2) 固体の電離を利用する半導体検出器

固体の電離を利用しているのがゲルマニウム半導体検出器です。ゲルマニウム半導体中を放射線が通過すると、通過したエネルギーに比例した高速二次電子と電子が抜けた後の孔（正孔）の対が多数生成します。そこに電圧を印加すると電子-正孔を収集できます。ちょうどガスの電離したところに電圧を印加すると電子-イオンが収集できるのと同様です。これを電気信号に変換することにより、放射線のエネルギーと強度が測定できます。

シンチレーション型検出器よりも、エネルギー分解能が良いので、核種分析に用いられます。

対象とする放射線種： γ 線

単位：エネルギー毎の強度

用途： γ 線を放出する核種の分析

原理：放射線は物質との相互作用による電離を利用したのですが、固体は、気体と比べて密度が高いことから、相互作用の割合が高くなり、感度が良くなります。また、ガス入り検出器よりもサイズが小さくてすむという長所があります。エネルギー分解能が優れ、 γ 線スペクトル測定に用いられています。

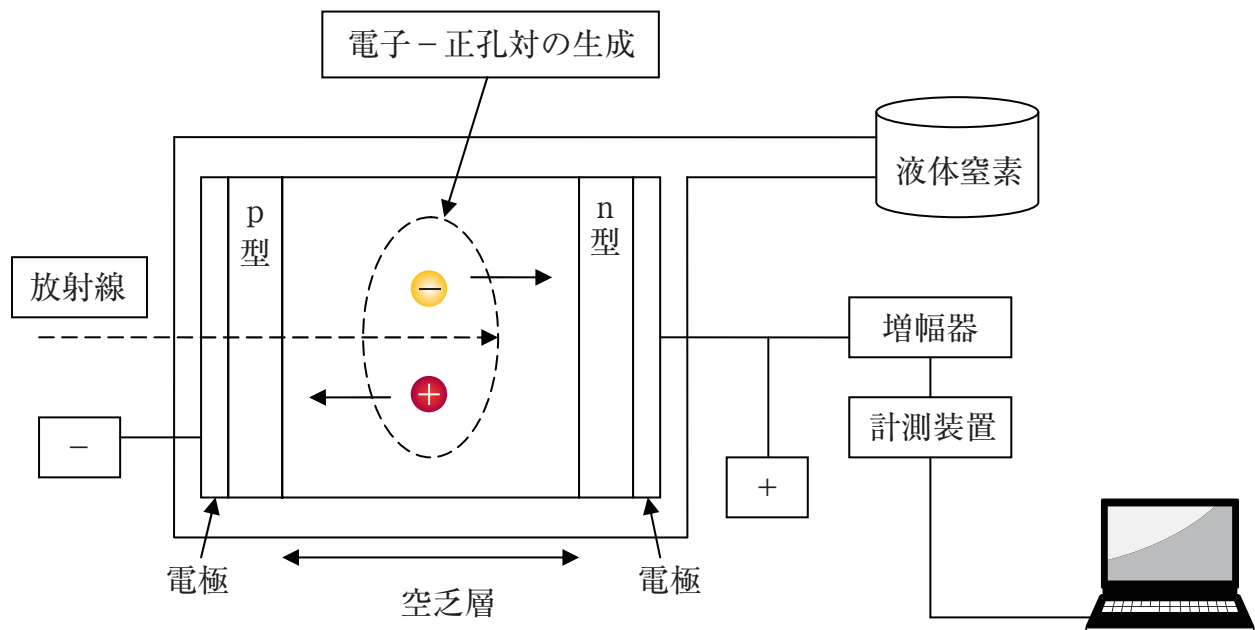


図7.4 半導体検出器の構成

(3) 発光を利用するシンチレーション型検出器

放射線がNaI (Tl) などの結晶中に入ると、可視光が放出されます。このように放射線が照射されると可視光を放射する物質をシンチレータとよびます。この可視光を光電子増倍管あるいはフォトダイオードで検出し電気信号に変換することで、放射線のエネルギーと強度が分かります。

対象とする放射線種： γ 線

検出部は、放射線により生成した可視光を検知するため外からの光を遮断することが必要です。また結晶を湿気から守るなどのために、アルミニウムなどにより密封されています。そのため、 α 線や β 線は結晶部まで到達できないため測定できません。 γ 線のみを検出します。

単位：cpm、Sv/h、Gy/h

用途：低レベルの γ 線空間線量測定

原理：放射線が通過するときに発光する物質（シンチレータ）に入ると、原子あるいは分子が励起状態になります。励起状態のものは可視光を放出し元の基底状態になります。このときの可視光を光電子増倍管やフォトダイオードで検出します。シンチレータには、無機固体、有機結晶、有機液体、プラスチックなどがあります

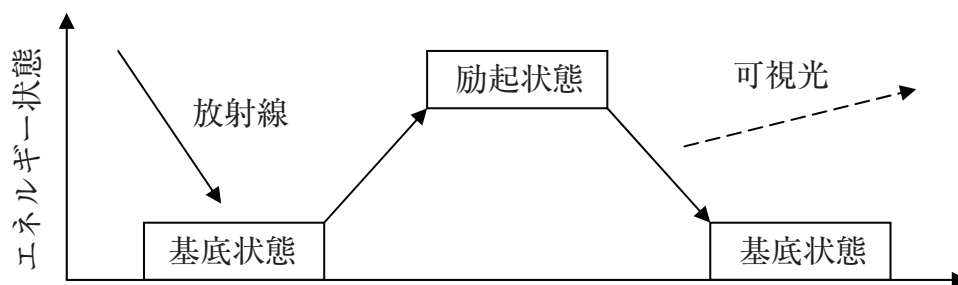


図7.5 無機シンチレータの発光

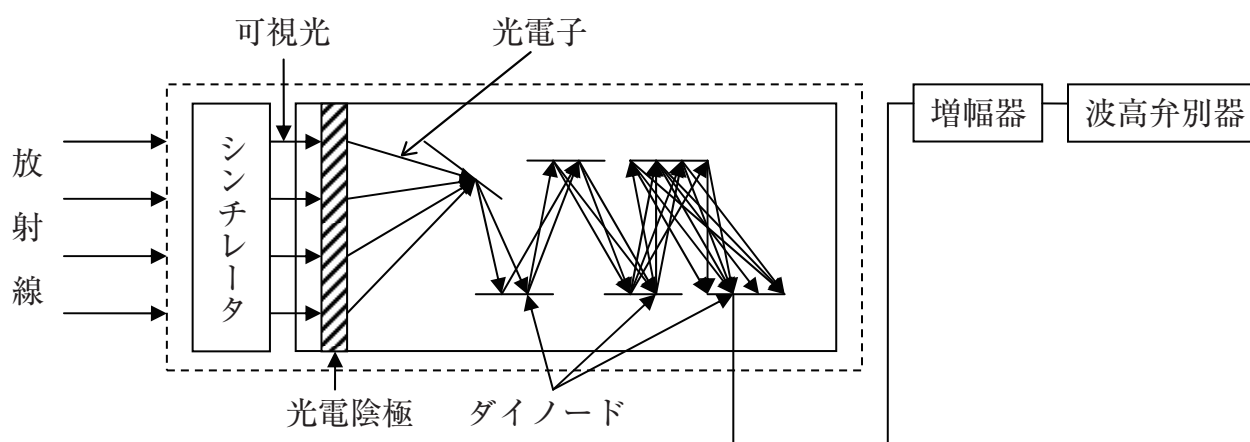


図7.6 光電子増倍管の原理

①無機固体シンチレータ

シンチレータには、NaI(Tl)、CsI(Tl)、CsI(Na)、CaF₂(Eu) などがあり、エネルギースペクトル分析や空間線量率の測定などに使用されています。カッコ内の元素は、活性化物質を示し、少量この元素を添加することにより、発光を効率的にします。

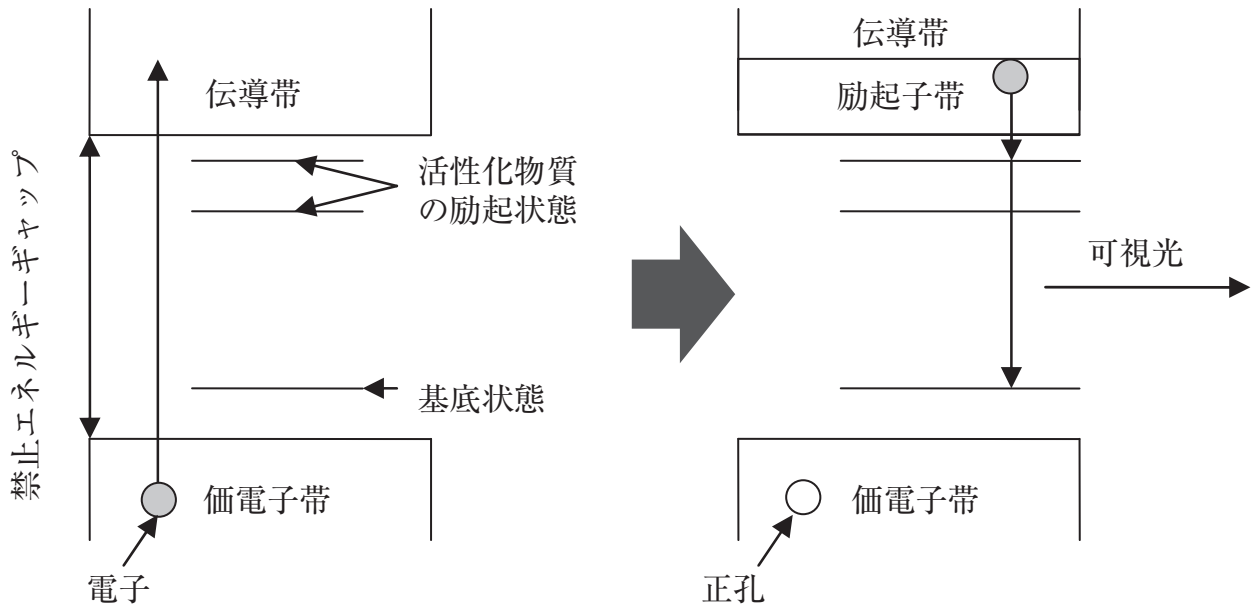


図7.7 無機シンチレータの発光

図7.7に示すように無機結晶は、電子のエネルギー状態により、価電子帯と伝導帯に別れます。その間を禁止エネルギーギャップと呼び、その領域のエネルギー状態は存在しません。しかし、結晶内に活性化物質と呼ばれる不純物を入れると、禁止エネルギーギャップ中に活性化物質の励起状態と基底状態を作り出します。

この無機結晶内に放射線が入射し、軌道電子にエネルギーを与えると、軌道電子が価電子帯から伝導帯へ移動します。伝導帯に上がった軌道電子は、価電子帯に正孔を残し、電子・正孔対が作られます。電子が伝導帯に上がるのに十分なエネルギーが得られなくても励起子という状態になります。励起子は、伝導帯の電子のように自由に移動できませんが、価電子帯よりも高いエネルギー状態にあるといえます。これらの励起状態にある電子が、活性化物質の励起状態に移り、基底状態に移るときに可視光を放出します。これをシンチレーション光といいます。

表7.2に無機シンチレータの特性を示します。

表7.2 無機シンチレータ

	NaI(Tl)	CsI(Tl)	ZnS(Ag)	BGO (Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂)
実効原子番号*	53	54	30	83
密度 (g/cm ³)	3.67	4.51	4.09	7.13
吸湿性	有	僅か	無	無
用途	γ (X)	γ, X	α	γ, X

*実効原子番号とは、化合物や混合物の成分から算出される仮想的な原子番号を示します。

γ 線に対し、この原子番号の元素と同様の減弱係数になります。

参考文献「野口正安/富永洋；放射線応用計測（日刊工業新聞社）」

②有機結晶シンチレータ

発光は、分子エネルギー準位の遷移によって起こります。基底状態にある分子が放射線により励起されると励起状態のエネルギー準位になります。励起状態にある分子が光を放出し基底状態になります。

シンチレータには、アントラセン (C₁₄H₁₀)、トランススチルベン (C₁₄H₁₂) などが使われています。

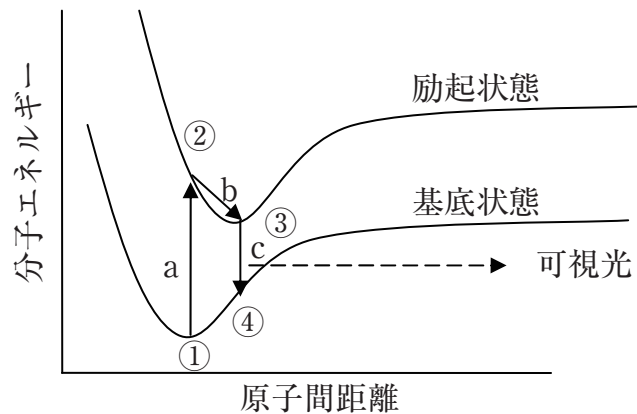


図7.8 有機シンチレータの発光

発光は、分子エネルギー準位の遷移によって起こります。基底状態にある分子①が放射線により励起されると励起状態のエネルギー準位②に移ります (a)。②は最低のエネルギー状態になるために、熱エネルギーを放出し③の状態に移ります (b)。③は励起状態にあるので可視光を放出し、④の基底状態に移ります (c)。

③液体シンチレータ

液体溶剤に溶質を溶かしたもので、発光機構は有機固体シンチレータと同様です。溶剤としては、キシレン、トルエン、ヘキサメチルベンゼンなどがあり、溶質としてはp-ターフェニル ($C_{18}H_{14}$)、PBO ($C_{27}H_{19}NO$)、POPOP ($C_{24}H_{16}N_2O_2$) などがあります。

液体シンチレータの特徴は、測定試料を溶液に混ぜ込むことができるので、 β 線は、ほぼ100%の効率で検出できます。また低エネルギー β 線など、透過力の低い放射線も測ることができます。液体シンチレータが着色したり汚れたりすると、光が検出部まで届かないために、誤差が生じますので注意が必要です。

④プラスチックシンチレータ

有機シンチレータを溶媒に溶かし、その後高分子化して固溶体にしたものをいいます。プラスチックは成形加工が容易で、液体シンチレーション型のように容器が不必要であることが特徴です。

(4) その他の測定器

①写真乳剤

写真フィルムはゼラチン基材にハロゲン化銀粒子 (主にAgBr) を分散した乳剤をガラスやセルロースフィルム上に塗布したものが使われています。ここに放射線を照射し現像処理を行うと、放射線が通った後が黒化するので、この濃度を測定すると線量が求められ、トラックの長さ (飛程) はエネルギーや放射線の種類に関係します。

写真乳剤は、放射線の2次元的な強度分布が分かるので、非破壊検査や生物中に導入した放射性物質の分布をみるオートラジオグラフィに用いられていましたが、イメージングプレート、イメージインテンシファイア、フラットパネル等の発展により、利用が減少しています。

②化学線量計

放射線が物質中を通過する際に、電離・励起を起こし、その結果として化学変化が生じます。この化学変化を測定し放射線量を得る方法が化学線量計です。

*鉄線量計 (フリッケ線量計)

硫酸溶液中で第一鉄イオン (Fe^{2+}) が放射線照射により第二鉄イオン (Fe^{3+}) に酸化される反応を利用しています。 Fe^{3+} 濃度は分光光度計を使用し、 Fe^{3+} の吸収ピーク波長である304nmの紫外線吸光度を測定し求めます。照射前後の濃度差を求め、G値 (100eVのエネルギー吸収により変化するイオンまたは分子数。 $^{60}Co\gamma$ 線で15.5) から吸収線量が算出できます。測定範囲は50Gy~2kGyです。

*セリウム線量計

酸性溶液中の Ce^{4+} が照射により Ce^{3+} に還元される反応を利用します。濃度の変化量は波長320nmの紫外線吸光度から求め、吸収線量を算出できます。鉄線量計よりも高い線量の測定に用いられ、測定範囲は10~50kGyです。

*アラニン線量

アラニンの微結晶粉末をポリスチレンなどで固化したものに放射線が照射されるとラジカルが生成します。これを電子スピン共鳴測定装置で測定し吸収線量を求めます。1 Gy～100kGyの範囲で使用でき精度が高いことが特徴です。

③熱ルミネセンス線量計

フッ化リチウムなどの無機結晶に放射線が照射され吸収されると、電子の一部が電離・励起し、準安定状態になります。これを加熱することによりさらに励起し、それが基底状態に戻るときに光が放出されます。この現象を熱ルミネセンスといい、発光量は吸収した放射線エネルギーに比例するので、線量測定ができます。数 μ Gy～数Gyの広範囲で線量を測定できることが特徴です。

④蛍光ガラス線量計

銀活性化リン酸ガラスに放射線が照射されると、電子と正孔の対が多く生成されます。そこに紫外線レーザーを照射すると蛍光（波長～600nm）が放射されるので、発光量を測定することにより放射線量を算出する方法です。フィルムバッジに代わって個人被ばく線量計などに広く使用されています。

(5) 被ばく管理用測定器

① 様々なサーベイメータ

被ばく管理には、空間線量率測定、表面汚染検査、個人被ばく線量測定が必要です。個人被ばく管理以外はサーベイメータが使用されますので、表7.3に示すような目的に適した様々なサーベイメータが開発されています。

表7.3 各種サーベイメータ

機器名	検出器	対象	目的	備考
電離箱型	電離箱	X、 γ	照射線量の測定	高精度、 単位：mSv、Gy
GM計数管型	GM計数管	X、 γ 、 β	簡易検出	γ 、 β に対応、 単位： μ Sv、cpm
シンチレーション型	NaI(Tl) 結晶	γ 、X	簡易検出	高感度、 単位： μ Sv
ガスフロー型	比例計数管	β 、 α	汚染検査	大面積検出器、 単位：cpm
α 線用	ZnS(Ag) 結晶	α	汚染検査	単位：cpm
中性子用	BF ₃ 、 ³ He	中性子	線量測定	中性子のみ測定。 単位：cpm、 μ Sv



中性子用

電離箱型

GM計数管型

α 線用

I-125用

GM計数管型
線量測定用



GM計数管型



シンチレーション型

図7.9 代表的なサーベイメータ

サーベイメータは、図7.10のような構成になっています。表示はアナログ、デジタルあるいは両方を併用したものがあり、単位は、被ばく管理用はSv/hや積算Svであり、その他に、cpmなどのカウント数やGy/h表示などがあります。

操作方法（ここに示すのは例です。実際には説明書をお読みください。）

- スイッチを「電池 (Battery)」にし、電池のが正常に機能するかチェックします。
- スイッチを「HV(ハイボルテージ)」にし、高電圧がかかるかチェックします。
- スイッチを「測定」にし、測定を開始します。
- 時定数は、小さいと反応が速くなりますが、測定値のふらつきが多くなります。大きくすると測定値のふらつきは少なくなります、反応が遅くなります。線量測定時、精度よりも早く線量をもとめたい場合は、時定数は小さくします。

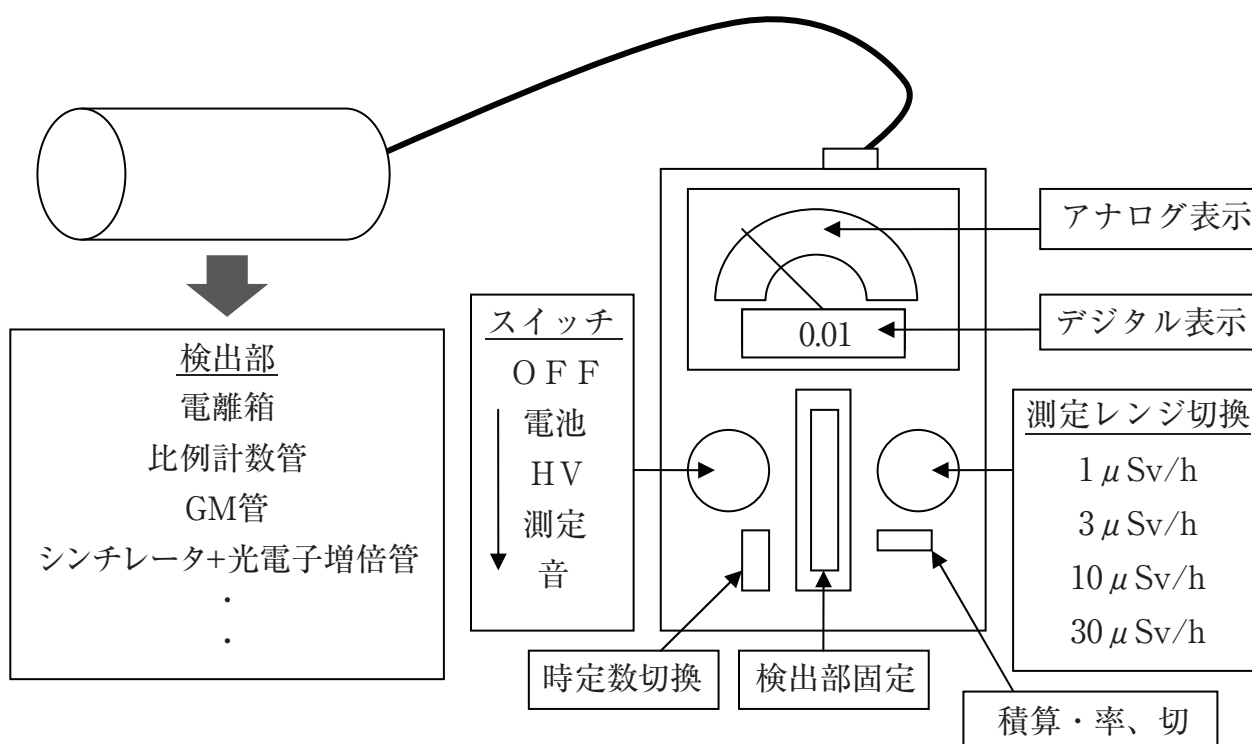


図7.10 サーベイメータの構成例

② 空間線量率測定

X線や γ 線の空間線量率測定には、電離箱型、GM計数管型、シンチレーション型サーベイメータが使用されています。照射線量測定には電離箱型が最も適していますが、感度が悪いので $1 \mu\text{Sv/h}$ 以下の低線量を測るには適しません。感度が良いのはシンチレーション型でNaI(Tl)が良く使用されています。NaI(Tl)はエネルギー特性が良くないので、電子回路による補正が行われています。また、方向特性もあるので測定時には考慮する必要があります。

中性子線には、 BF_3 や ^3He 比例計数管が使用されています。高速中性子を減速させるために、検出器の周りをポリエチレンなどの減速材により囲んでいるために、他のサーベイメータよりも大型になっています。 γ 線が共存している場合でも、 γ 線に対する反応が無視できるので、中性子だけの線量を測定できます。

③ 表面汚染検査用

表面汚染検査用には感度が良いGM計数管型が適しています。しかしGM計数管型は α 線や低エネルギー β 線は測定できません。その場合は、スミアろ紙で検査品の表面をふき取り、スミアろ紙をガスフロー型検出器や液体シンチレーション型検出器で測定します。また、検出窓を非常に薄くし α 線や低エネルギー β 線を測る構造にした検出器もあります。

④ 個人被ばく線量計

個人用には積算被ばく量を記録するためのものと直ぐに被ばく量が分かる直読式があります。積算記録型には、フィルムマジック、TLD、などがあり、直読式には電離箱型と半導体型があります。半導体型はSi検出器を用いており感度が高く、アラーム付きのものもあります。

線量計には体に装着する方向があるので、写真のような記述を確認してから装着する必要があります。



図7.11 個人被曝線量計の装着方向

7.2 放射線を計測する際の注意点

(1) バックグラウンド

放射線源が無い時でも検出器は自然放射線などの影響を受けます。これをバックグラウンド（以下、BGという）といいます。そのため、線源が無い状態でBGを測定し、線源の測定値からその値を差し引く必要があります。BGの起源としては、①から④などがあります。

- ①検出器や付近にある材料中の放射能
- ②大地からの放射能
- ③空気中の放射能
- ④宇宙線の1次、2次成分

(2) 統計変動

壊変はランダムに起こり、計数率は常に一定ではありません。そのために、数回測定し、平均値や変動幅を求める必要があります。統計モデルとしては、2項分布、ポアソン分布、ガウス分布などが考えられています。

1回の測定値Nを得たときは、 $N \pm \sqrt{N}$ と記し、これは、 $N - \sqrt{N}$ と $N + \sqrt{N}$ の間に真の平均値が含まれる確率が68.3%であることを意味します。BGを考慮した計数率は、N:BGを含む計数值、Nb:BGの計数值、t:計測時間、tb:BGの計測時間とすると次式で表ことができます。

$$\text{計数率} = \frac{N}{t} - \frac{Nb}{tb} \pm \sqrt{\frac{N}{t^2} + \frac{Nb}{tb^2}}$$

(3) 計数の数え落とし

検出器に連続して放射線が入射した場合、それぞれ分離して数えることが必要ですが、1つの放射線が入射してから、次の放射線を検出するまでに一定の時間が必要になります。この時間を不感時間といい、この間に放射線が入射しても計測することができません。計数率が高い場合にこの影響が大きくなり、補正が必要になります。

真の計数率：n、記録された計数率：m、装置の不感時間： τ とすると、 $n-m=nm\tau$ 、 $n=m/(1-m\tau)$ と表すことができます。

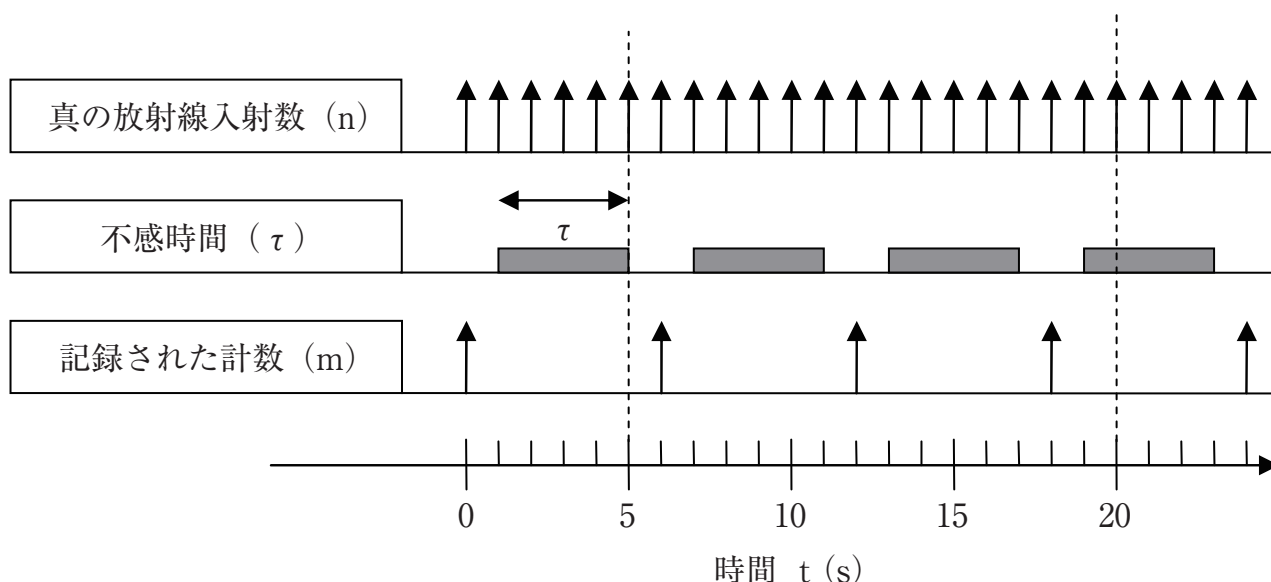


図7.12 不感時間と数え落とし

(4) 計数効率

放射線源から放出した放射線を全て測ることはできません。それは、放射線が線源から 4π 方向に放出されることや、 γ 線などは透過率が高いので、 γ 線の一部分が検出器を通過してしまうことなどが原因です。そのため、測定系の計数効率を求めることが重要となります。そのため、測定系の計数効率を求めることが重要となります。計数効率は、絶対効率と固有効率に分けて考えることができます。

(a) 絶対効率=記録されたパルスの数/線源より放出された放射線の数

(b) 固有効率=記録されたパルスの数/検出器に入射した放射線の数

β 線をGM計数管により測定するとき、絶対効率は次のように書けます。

$$\text{絶対効率} = f_g \cdot f_\beta \cdot f_m \cdot f_\tau \cdot f_\omega \cdot f_b \cdot f_s$$

ここで、 f_g : 幾何学的効率、 f_β : GM計数管の固有効率、 f_m : 多重計数の補正、 f_τ : 不感時間の補正、 f_ω : 線源からGM計数管内部までの間に起こる吸収補正、 f_b : 線源支持台などによる後方散乱補正、 f_s : 線源自身の自己吸収補正を示します。

① 幾何学的効率: f_g

幾何学的効率は、図7.13に示すように、線源の形状、検出器の直径、線源と検出器間の距離などで決まり、点線源の場合は次式で算出できます。

$$\text{点状線源の場合 } f_g = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + R^2}} \right)$$

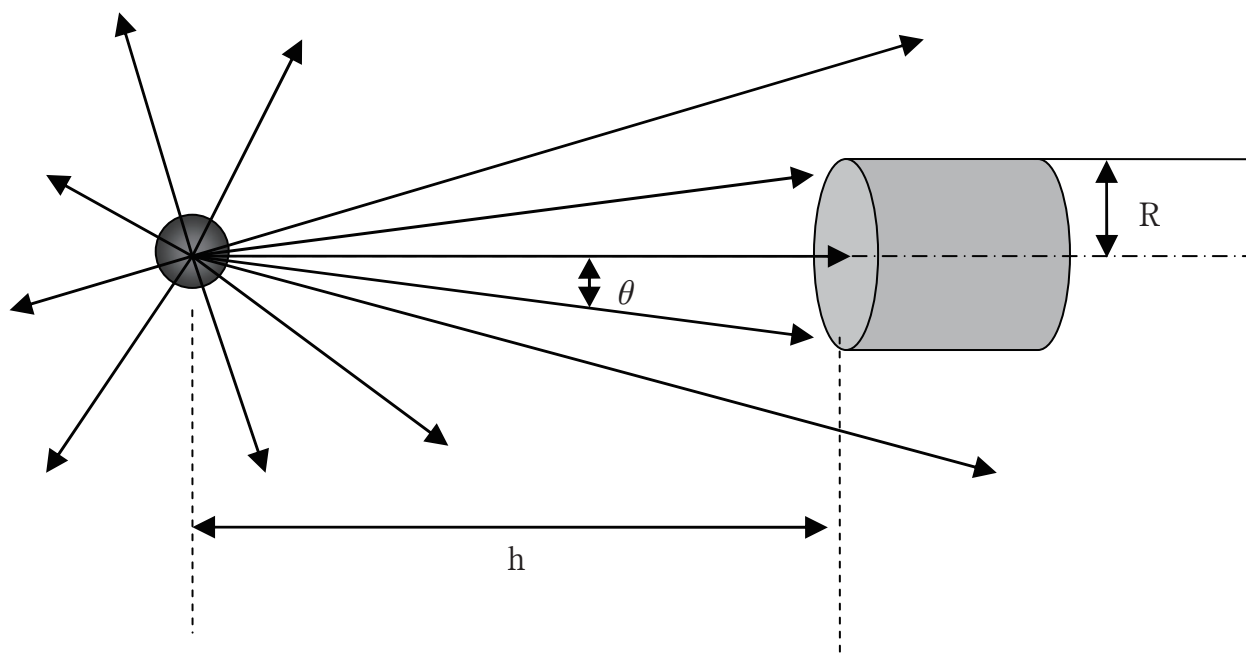


図7.13 幾何学的効率 f_g

② GM計数管の固有効率： f_β

GM計数管内に入った β 線が、放電を起こす割合です。有効体積中に入った β 線はほぼ100%放電を起こすので、1とおけます。

③ 多重計数の補正： f_m

GM計数管内の正イオンは陰極に到達すると、金属の電子と結合し中和されます。このときに陰極から電子が放出し、その電子がさらの放電を起こすという多重放電となりますが、これを防ぐために、ガス中に消滅ガスを少量まぜ、多重放電を防いでいます。消滅ガスが消費されていくと多重放電が増加します。

f_m は、不感時間の補正をした後の計数率と管内で起きた1次放電の数との比を示します。消滅ガスが減っていくと f_m 値は増加します。

④ 線源からGM計数管内部までの間に起こる吸収補正： f_w

線源とGM計数管の間には、空気やGM計数管窓が存在し、そこで β 線が吸収されます。そのいため、窓の材質や空気層の厚さから吸収を補正します。

⑤ 線源支持台などによる後方散乱補正： f_b

これはGM計数管とは反対側に放出された β 線が散乱によりGM計数管側に向かい計数されるという「後方散乱」を補正するものです。散乱の頻度は、線源を支持する材料や厚さ、 β 線のエネルギーにより異なり、ごく薄いものの上に線源を置けば、 $f_b=1$ となります。

⑥ 線源自身の自己吸収補正： f_s

線源の厚さが検出器に到達する放射線量に及ぼす影響を表す係数です。自己吸収が無い場合、有る場合のGM計数管で計数をそれぞれ C_0 、 C とすると自己吸収計数は、

$$f_s = C/C_0$$

と表すことができます。図7.14に示すように、線源の厚さを s とすると厚さ dx からでる β 線の数は、

$$dC_0 = \frac{C_0}{s} dx$$

となりますので、表面から x の層から放出される β 線の数は、吸収を考慮すると

$$dC = \frac{C_0 \exp(-\mu x)}{s} dx$$

となり、積分し総数を求めると、

$$C = \int_0^s \frac{C_0 \exp(-\mu x)}{s} dx = \frac{C_0}{\mu s} \left\{ 1 - \exp(-\mu s) \right\}$$

したがって、

$$f_s = \frac{C}{C_0} = \frac{1}{\mu s} \left\{ 1 - \exp(-\mu s) \right\}$$

となります。この関係は、線源と検出器の距離が近いときによく合いますが、距離が離れてくると散乱の影響が大きくなってくるので、ずれが大きくなります。

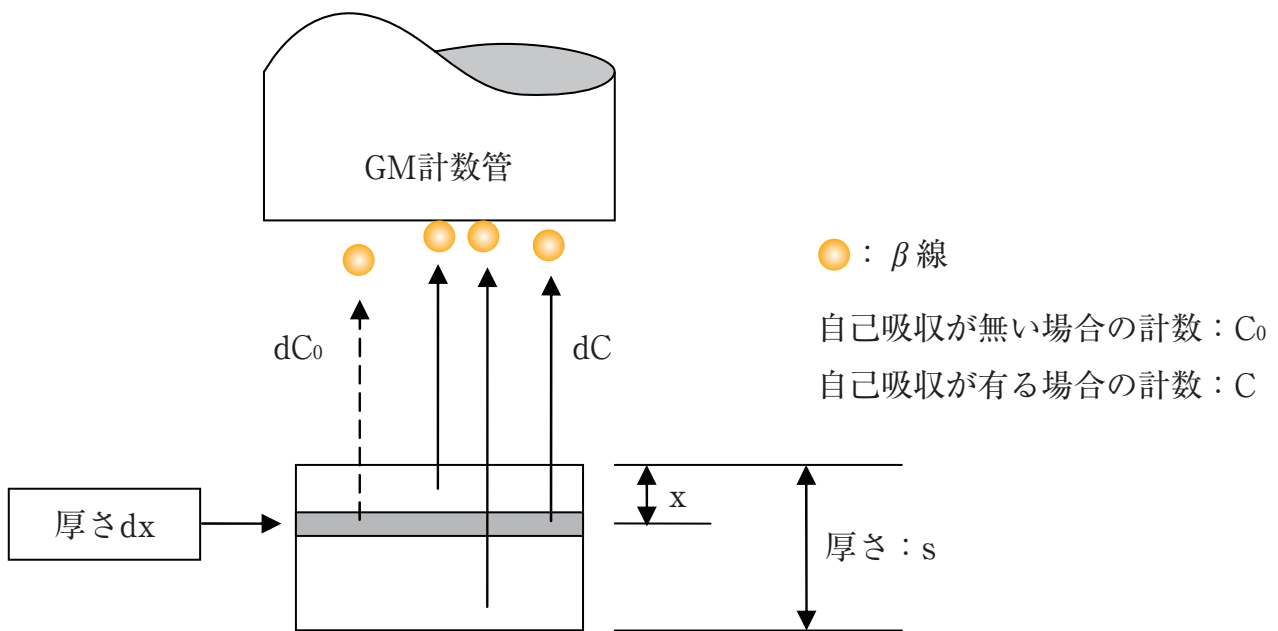


図7.14 自己吸収の補正

(5) 検出器の校正と点検

サーベイメータなどで正しい測定値を示すためには、定期的に校正をする必要があります。校正方法は「JIS Z 4511 照射線量測定器、空気カーマ測定器、空気吸収線量測定器及び線量当量測定器の校正方法」、「JIS Z 4521 中性子線量当量（率）計の校正方法」に規格化されています。また計量法に基づき指定された登録事業者は、JCSS校正の証明書を発行できます。校正には基準線源や基準測定器を設置する必要があり、広い校正場所も必要であるので、校正サービス機関で行うことが適切です。校正の頻度は、使用状況にもよりますが、測定値を証明書などに用いる場合は、年1回程度行うのがよいでしょう。

日常的に行うサーベイメータ等の点検としては、電池のチェックやチェック線源による動作確認等があります。またバックグラウンドを定期的に測定することにより、測定場所の汚染チェックもできます。

7.3 測定機器の選択

放射線の種類や目的によりある程度検出器の種類が決まってきます。以下に、基本的な選択方法を示します。

(1) 放射線の種類による分類

- ① α 線：透過力が小さいため、検出器窓が非常に薄い作りになっている α 線専用検出器が必要です。あるいは線源を検出器内部に設置し測定するガスフロー型検出器を用います。
- ② β 線：GM計数管が主に使用されます。エネルギーが低い β 線の場合は、液体シンチレーション型検出器やガスフロー型検出器を使用します。
- ③ γ 線：電離箱型、GM計数管型、シンチレーション型、ゲルマニウム半導体検出器などが使用されます。
高い空間線量を測る場合は電離箱型、低い空間線量を測る場合はシンチレーション型を用います。 γ 線のエネルギーを分析し、放射能濃度を測定する場合はシンチレーション型検出器やゲルマニウム半導体検出器が用いられますが、複数の核種が混在する試料の測定には、エネルギー分解能が高いゲルマニウム半導体検出器を用います。
- ④中性子線：検出器内で核反応を起こさせ、核分裂生成物による電離作用から線量を求めます。 ^3He 比例計数管、 BF_3 比例計数管、バブルディテクタなどが使用されます。

(2) 測定の目的による選択

- ①外部被ばくの管理：電離箱（高線量の場合）、シンチレーション型サーベイメータ（低線量の場合）、個人被ばく線量計（保存用と直読式の両方）など
- ②表面汚染検査：GM計数管型サーベイメータ（cpmで表示する場合）、シンチレーション型サーベイメータ（Sv/hで表示する場合）
- ③高線量測定：化学線量計、電離箱など
- ④放射能測定：ゲルマニウム半導体検出器、 4π ガスフロー計数管、液体シンチレーション型検出器、GM計数管など
- ⑤ γ 線エネルギー分析：シンチレーション型検出器、ゲルマニウム半導体検出器、比例計数管
- ⑥放射線・放射能分布：写真乳剤、イメージングプレート、イメージインテンシファイアなど

8.1 γ 線スペクトル測定

(1) マルチチャンネルアナライザ (MCA)

γ 線スペクトルを得るための検出器としては、シンチレーション型検出器あるいはゲルマニウム半導体検出器が使用されます。シンチレーション型検出器の方が安価ですが、ゲルマニウム半導体検出器の方が、エネルギー分解能が良く、核種分析や放射エネルギー (Bq) の測定に推奨されます。検出器からのパルス波高をチャンネル番号に振り分け、計数を積算していく装置がMCAです。検出器からのパルスは、アナログなので、まずADCによりデジタル化し、その波高をチャンネルに振り分けます。チャンネル数はゲルマニウム半導体検出器では4096チャンネルが一般的です。チャンネルナンバーと γ 線のエネルギーは、対応していることが重要であり、分析前にエネルギーが既知である標準試料を用いてエネルギー校正します。一般的にゲルマニウム半導体検出器の場合は1チャンネル当たり0.5keVに設定します。

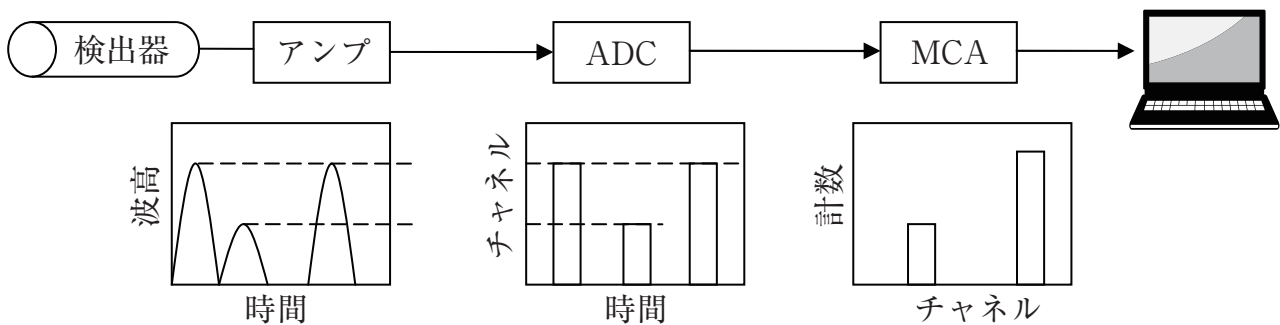


図8.1 MCAによる波高分析

(2) ゲルマニウム半導体検出器の構成

図8.2に構成例を示します。検出器の周りは、バックグラウンドを低くするために、10cm厚程度の鉛などで周囲を囲います。

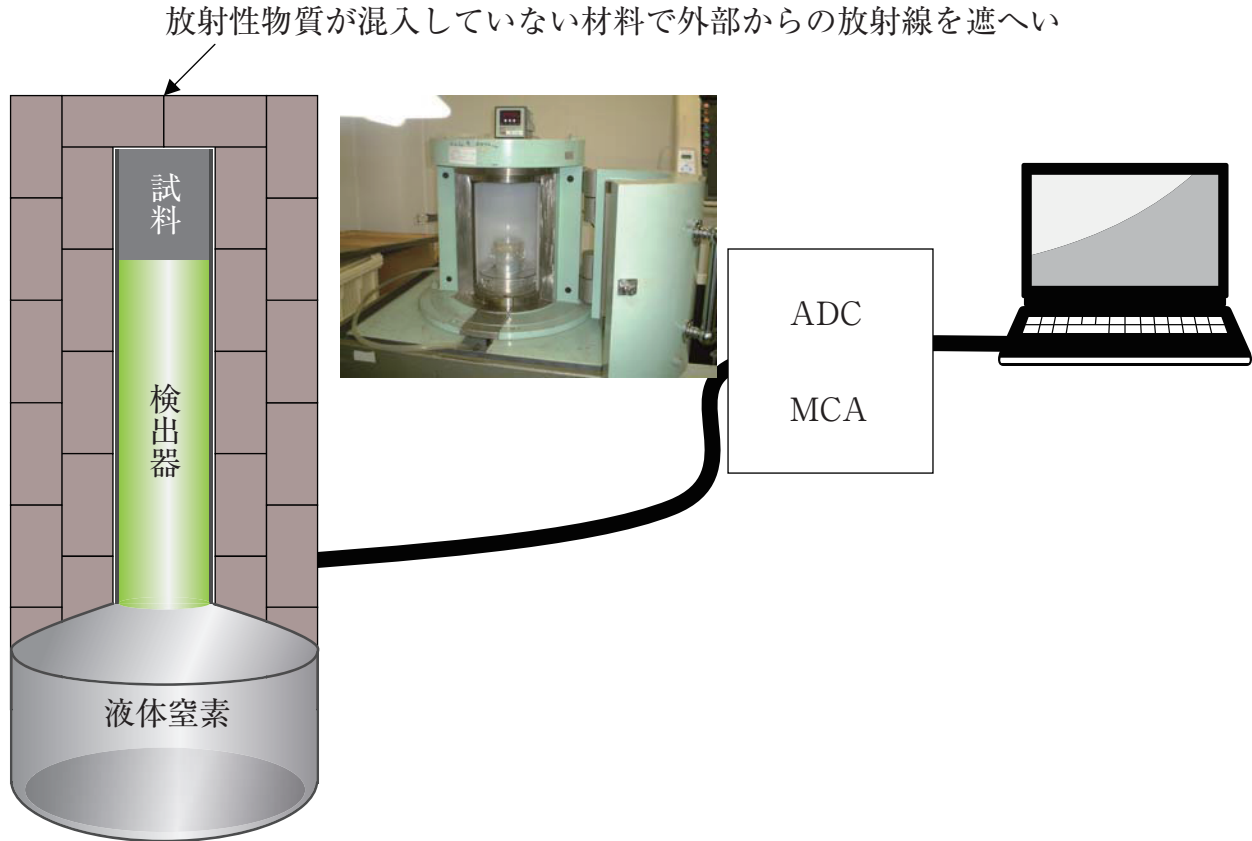


図8.2 ゲルマニウム半導体検出器による測定

測定する試料を入れる容器としては、U-8容器やマリネリ容器を使用します。これらの容器を使用することにより、試料形状が一定となるため、幾何学的効率が一定になります。



U-8 容器



マリネリ容器

容器名	容量	検出限界
U-8	100mL	Cs-137 : 4 Bq/kg(水 100mL、5000秒測定)
マリネリ	2000mL	Cs-137 : ≒0.4Bq/kg(水 2000mL、5000秒測定)

図8.3ゲルマニウム半導体検出器に用いる容器

図8.4にゲルマニウム半導体検出器とNaI (Tl) シンチレーション型検出器によるCo-60の γ 線スペクトルとCs-134、Cs-137、K-40の γ 線スペクトルを示します。ゲルマニウム半導体検出器の方が、エネルギー分解能が良いことが分かります。

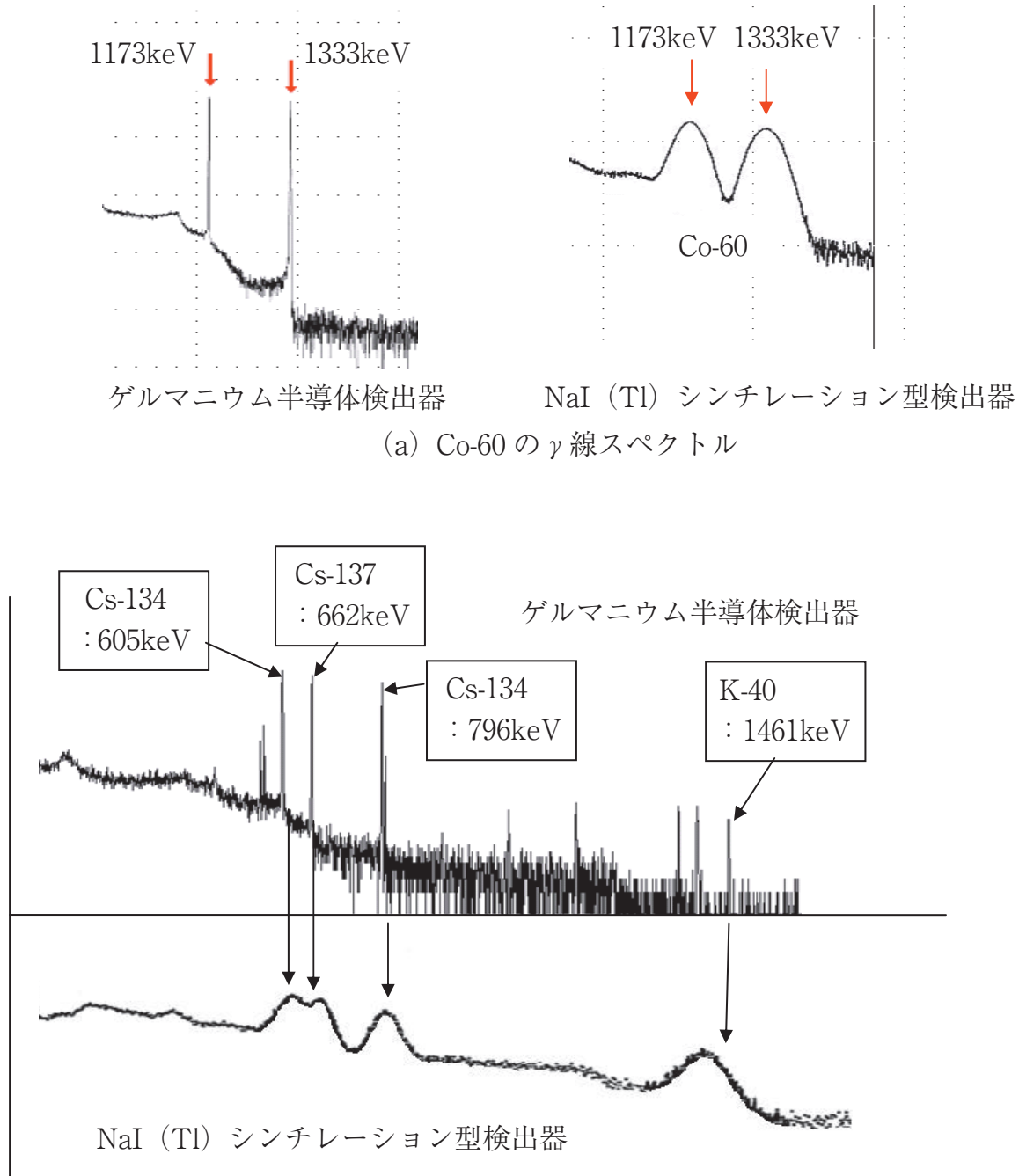


図8.4 検出器による γ 線スペクトルの違い

(3) ゲルマニウム半導体検出器による放射能測定

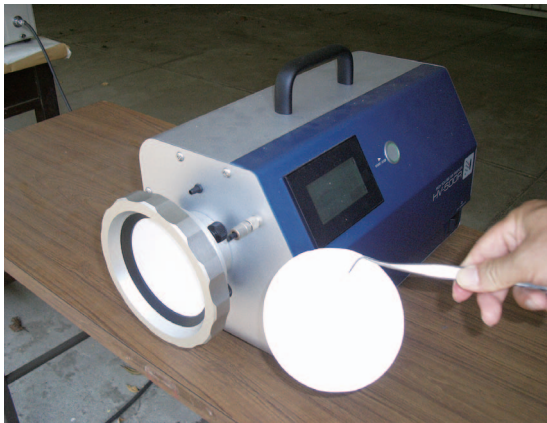
ゲルマニウム半導体検出器を用いて、放射能 (Bq) 量を求めるためには、 γ 線スペクトルから検出された核種を特定することから始まります。核種を特定し、検出された計数率 (cps) からBGや計数効率や幾何学的効率を考慮して、真の放出されている放射線の計数率を算出します。そのため、その核種の情報のみでなく、親核種、娘核種、孫核種と続く放射系列も把握する必要があります。

しかし、現実的には、計数効率や幾何学的効率などを算出することは困難であるので、U-8やマリネリ容器の標準線源 (核種とその放射能Bqが分かっている線源) を用いて測定し、その値と試料を比較することにより放射能を算出しています。

8.2 環境中の放射能測定

(1) 大気浮遊塵中の放射能測定

600 ℓ /分で空気を採取する集塵機を用いてガラス繊維ろ紙上に浮遊塵を捕集し、ゲルマニウム半導体検出器を用いてγ線スペクトロメトリにより核種濃度 (Bq/m³) を定量します。



浮遊塵収集器とフィルタ



フィルタの測定



図8.5 大気浮遊塵中の放射能測定

(2) 降下物（雨水や降下した塵など）中の放射能測定

図8.6の様な上部が開いている容器を屋外に設置し、そこに降下する雨水や塵などを集め、放射能濃度 (Bq/m²) を測定します。



図8.6 降下物収集器

(3) 環境中の線量モニタリング

NaI (TI) シンチレーション型検出器を用いて、空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) を常時計測します。この装置を「モニタリングポスト」といいます。全国に各県1カ所以上、設置されており、放射線量の測定を行っています。

測定場所や天気などで異なりますが、平常時は $0.05\mu\text{Sv/h}$ 程度です。福島原子力発電事故では、東京都でも短時間ですが、 $0.5\mu\text{Sv/h}$ を超える空間線量率を記録しました。

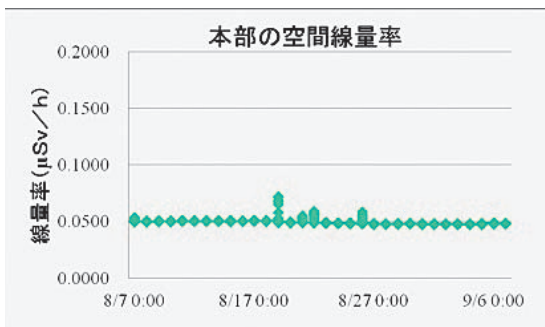


図8.7 NaI(Tl) シンチレーション型検出器を用いたモニタリングポストと線量表示部

(4) 市販品GM計数管型サーベイメータを用いる場合の注意点

GM計数管型サーベイメータで空間放射線量 ($\mu\text{Sv/h}$) を測定する場合は、検出器を厚さ4 mm程度のアルミニウム板などで覆うことが重要です。アルミニウム板の覆いがないと β 線が入射するので、測定結果がより高くなります。

なお、一般に市販されている小型のGM計数管型サーベイメータのうち、 β 線を遮へい機能が十分でない機種では、エネルギーが高い β 線も計測されてしまいます。そのため、計測結果 (cpm等) から換算してSvに表示する機種においては、値が高くなり誤った放射線量値を示してしまいます。

ご自分で検査用に放射線検出器をご購入される場合は、校正されているかどうかをご確認の上ご購入ください。

参考資料

表1 単位の接頭語

倍数	記号	読み	倍数	記号	読み
10 ²⁴	Y	ヨタ	10 ⁻¹	d	デシ
10 ²¹	Z	ゼタ	10 ⁻²	c	センチ
10 ¹⁸	E	エクサ	10 ⁻³	m	ミリ
10 ¹⁵	P	ペタ	10 ⁻⁶	μ	マイクロ
10 ¹²	T	テラ	10 ⁻⁹	n	ナノ
10 ⁹	G	ギガ	10 ⁻¹²	p	ピコ
10 ⁶	M	メガ	10 ⁻¹⁵	f	フェムト
10 ³	k	キロ	10 ⁻¹⁸	a	アト
10 ²	h	ヘクト	10 ⁻²¹	z	zepto
10 ¹	da	デカ	10 ⁻²⁴	y	ヨクト

表2 放射線に関する単位

	記号	読み方	備考
エネルギー	eV	エレクトロンボルト	1 eV=1.602×10 ⁻¹⁹ J
放射能	Bq	ベクレル	1 Bq=2.703×10 ⁻¹¹ Ci
旧単位	Ci	キュリー	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
吸収線量	Gy	グレイ	1 Gy= 1 J/kg、 1 Gy=100rad
旧単位	rad	ラド	1 rad= 1 ×10 ⁻² Gy
照射線量	C/kg	クーロン／キログラム	1 C/kg=3876R
旧単位	R	レントゲン	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
線量当量	Sv	シーベルト	1 J/kg(1 Sv=100rem)
旧単位	rem	レム	1 rem= 1 ×10 ⁻² Sv

表3 ICRP1990年勧告における線量限度

	職業被ばく	公衆被ばく
実効線量	50mSv/y 及び 100mSv/ 5 y	1 mSv/y
組織等価線量 眼の水晶体	150mSv/y	15mSv/y
組織等価線量 皮膚	500mSv/y	50mSv/y

表4 食品など暫定放射能規制値

核種	基準値 (Bq/kg)	
	I-131	Cs-137, Cs-134
飲料水	300(乳児は100)	200
牛乳・乳製品	300(乳児は100)	200
野菜類・魚介類	2000	500
肉、魚、卵	—	500
肥料・土壌改良資材・培土中	—	400
牛、馬、豚、家きん等用飼料中	—	300
養殖魚用飼料中	—	100
放射性Cs (平成24年4月から適応予定の 新規制値)	乳児用食品、牛乳	50
	飲料水	10
	その他一般食品	100

*変更される可能性がありますので、最新情報を得てください。

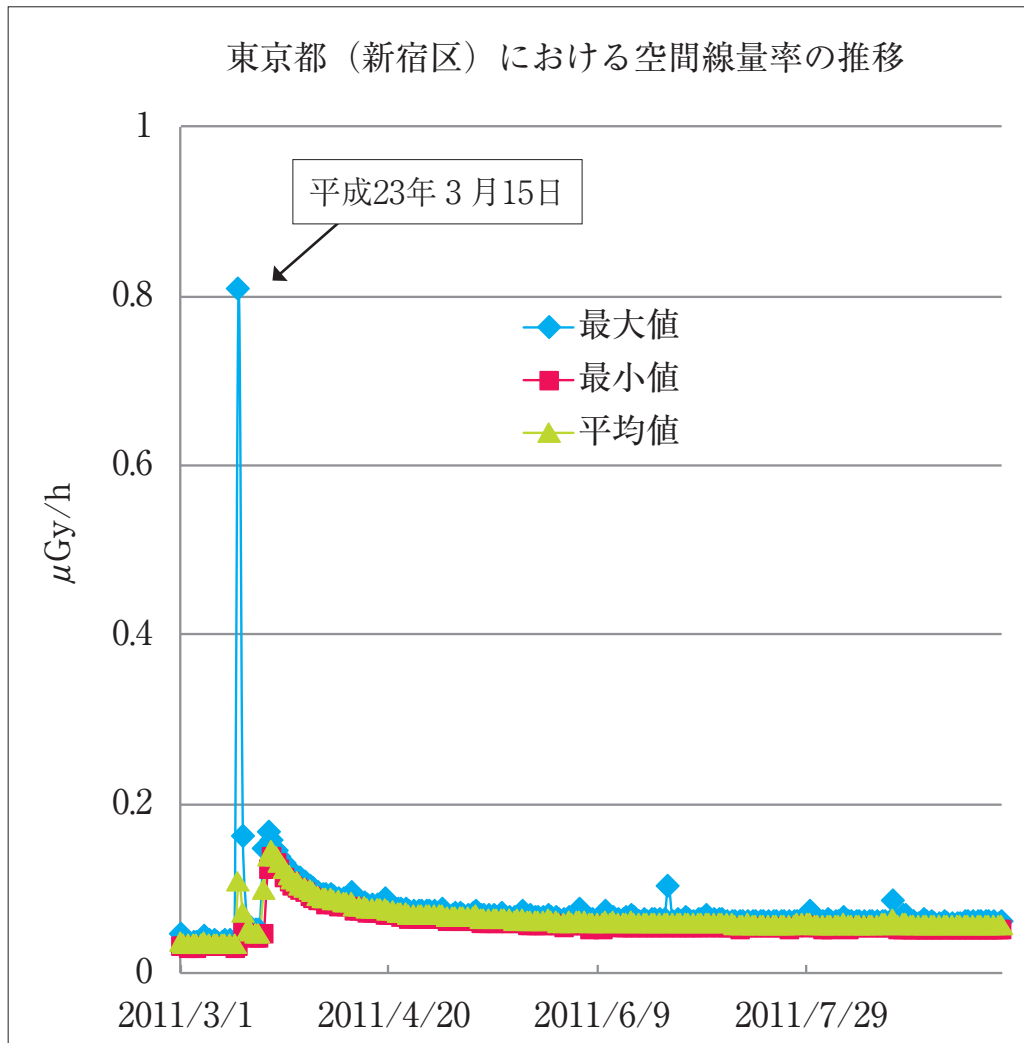


図1 東京都健康安全研究センターのモニタリングポストによる測定結果

表5 東日本大震災直後の経過

日 時	福島第一原子力発電所における出来事
2011年 3月11日14:46	東日本大震災発生
3月11日15:30頃	東日本大震災による津波襲来
3月12日15:36	1号機の原子炉建屋で水素爆発
3月14日11:01	3号機原子炉建屋で水素爆発
3月15日 6:00頃	2号機圧力抑制室付近で爆発音 4号機原子炉建屋で火災（水素爆発と推定）

表6 ギリシャ文字一覧

大文字	小文字	読み方
A	α	アルファ
B	β	ベータ
Γ	γ	ガンマ
Δ	δ	デルタ
E	ϵ	イプシロン
Z	ζ	ゼータ
H	η	イータ
Θ	θ	シータ
I	ι	イオタ
K	κ	カッパ
Λ	λ	ラムダ
M	μ	ミュー
N	ν	ニュー
Ξ	ξ	グザイ
O	o	オミクロン
Π	π	パイ
P	ρ	ロー
Σ	σ	シグマ
T	τ	タウ
Y	υ	ウプシロン
Φ	ϕ	ファイ
X	χ	カイ
Ψ	ψ	プサイ
Ω	ω	オメガ

用語解説

国際機関

IAEA (International Atomic Energy Agency) : 国際原子力機関

ICRP (International Commission on Radiological Protection) : 国際放射線防護委員会

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) : 国連科学委員会

壊変 (崩壊)

放射性壊変 (崩壊) : 不安定な放射性同位体が放射線を放出し、他の元素に変化すること。

α 壊変 : α 線を放出し、陽子2個・中性子2個を減じた核種に変わる壊変

β 壊変 : 質量数は変化せず、陽子・中性子の変換が行われる反応で、 β^- 壊変、 β^+ 壊変、軌道電子捕獲がある。

γ 放射 : 壊変後に原子核に過剰なエネルギーが残った場合、 γ 線を放出し安定になる反応

核分裂反応 : U-235などに中性子はあたると、その核が質量の小さな原子核に分裂し、巨大なエネルギーを放つ。

自発核分裂 : 核分裂反応のうち、中性子の照射を受けることなく起きる核分裂を指す。

核異性体転移 (IT) : 原子番号と質量数ともに同じで、エネルギー準位が異なる核種をいう。例えば、 ^{99}Tc と $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は核異性体である。エネルギー準位が高いほうは記号mを付けて区別する。 γ 線を放出して、安定な方の核異性体に変化することを、核異性体転移という。原子核の原子番号と質量数はともに変化しない。

内部転換 : 一部の核異性体転移では、 γ 線が軌道電子にエネルギーを与えてはじき出す。これを内部転換という。放出される電子を内部転換電子という。

軌道電子捕獲 (EC : Electron Capture) : 軌道電子が原子核に取り込まれ、捕獲された電子が原子核内の陽子と反応し中性子となり、ニュートリノが放出される反応

放射線

放射線 : 壊変の時に放出される粒子や電磁波を示す。アルファ (α) 線、ベータ (β) 線、ガンマ (γ) 線、エックス (X) 線、中性子線などがある。

α 線 : α 壊変の時に放出される放射線。実体はヘリウムの原子核。正の電荷をもつ。

β 線 : β 壊変の時に放出される放射線。実体は電子であり、電荷がプラスの陽電子線とマイナスの電子線がある。

γ 線 : γ 放射の時などに放出される放射線。実体は電磁波

中性子線 : 核分裂の時などに放出される放射線。電氣的に中性である。

X線 : 軌道電子の軌道が移動したときや、自由電子が減速した時に放射される放射線。実体は電磁波。一般的に γ 線よりもエネルギーが低い。

放射線障害防止法の放射線の定義：電磁波又は粒子線のうち、直接又は間接に空気を電離する能力をもつもので、(1) α 線、重粒子線、陽子線その他の重荷電粒子線及び β 線、(2) 中性子線、(3) γ 線及び特性X線（軌道電子捕獲に伴って発生する特性X線に限る。）、(4) 1メガ電子ボルト以上のエネルギーを有する電子線及びX線

原子

原子：物質の最小単位。半径は約 10^{-10}m 。

原子核：原子の中心にある半径 $10^{-15}\sim 10^{-14}\text{m}$ の正の電荷をもつ粒子。陽子と中性子などで構成されている。陽子の数が、原子番号に等しい。

電子：原子を構成する粒子で、原子核の周囲にある軌道上に存在するのを軌道電子、エネルギーを得て移動しているものを自由電子などと呼ぶ。負の電荷をもつ。

質量数：陽子と中性子の数の合計

核種：質量数で特定される原子の種類

同位体（同位元素）：陽子の数が等しく（原子番号が等しく）、質量数が異なる（中性子の数が異なる）核種

アイソトープ：＝同位元素

放射性同位体RI (Radioisotope)：同じ元素で中性子の数が異なる核種を同位体と呼ぶ。同位体は安定なものとは不安定なものがあり、不安定なものは時間とともに放射性壊変（崩壊）して放射線を放出する。壊変し放射線を放出する同位体を放射性同位体という。

電離：軌道電子がエネルギーを得て原子核から離れること。

放射能

放射能：放射線を出す能力、または単位時間に壊変する数。単位はベクレル (Bq)

放射性物質：放射能をもつ（放射線を放出する）物質

核分裂生成物：核分裂反応の結果、生成される核種

物理学的半減期（半減期）：放射性核種の数が壊変により、半分になるまでの時間

放射線検出器

シンチレーション型検出器：NaI (Tl) などの放射線が入射すると発光する結晶を用いた放射線検出器

ガイガー・ミュラー (GM) 計数管型検出器：放射線による気体の電離現象を利用した放射線検出器。主に β 線、 γ 線を測定する。表面汚染検査などに用いる。

電離箱型検出器：放射線による気体の電離現象を利用した放射線検出器。主に γ 線の空間線量を測定する。

比例計数管型検出器：放射線による気体の電離現象を利用した放射線検出器。 γ 線やX線のエネルギーを判別できる。

ゲルマニウム半導体検出器：放射線によるゲルマニウム半導体の電離現象を利用した検出器。 γ 線のエネルギーを分析できる。核種の特定と放射能の測定に用いる。

化学線量計：放射線による物質の化学変化を利用した放射線量測定法。鉄線量計、セリウ

ム線量計などがある。

サーベイメータ：放射線を測定する携帯用の放射線測定機器。γ線用、β線用、α線用、中性子用がある。方式は電離箱、比例計数管、GM計数管型、シンチレーション型、半導体型がある。

トレーサビリティ：測定器は、それを用いた測定の信頼性を確保するため、基準測定器により校正されていなければならない。基準測定器もまた国家標準により校正されていることが必要である。測定器が高位の基準測定器によって校正され、国家標準につながる経路が確立されていることを測定器のトレーサビリティと呼ぶ。

計数効率：放射線源からの放射線を計測器で測定する場合、検出部に入射し計数される数は、放射線源から放出される全放射線の一部である。その原因として、線源・検出器間の幾何学的効率、線源内部でおこる自己吸収、検出部に入射した放射線に対する固有の効率などの影響がある。線源から放出される全放射線の単位時間あたりの数 (N) と検出された放射線の数 (n) の比 ($\epsilon=n/N$) を計数効率 ϵ という。

放射線計測

吸収線量：物質内のある領域dm (kg) に放射線からエネルギー dE (ジュール) を与えられたときに、吸収線量Dは、 $D=dE/dm$ で定義される。単位は、Gy(グレイ)

照射線量：空気のある領域dm (kg) に光子 (γ線やX線) が入射したときに、電離現象により2次電子が多数生成される。その2次電子がすべてエネルギーを失い停止するまでに、さらに空気を電離し、電子-イオン対を形成する。そのとき生成する電子又はイオンの一方の電荷をdQとしたときに、照射線量Xは、 $X=dQ/dm$ で定義される。単位は、C/kg(クーロン/キログラム)

粒子フルエンス：断面が単位面積になる球を通過する粒子の総数。単位は、個/m²

エネルギーフルエンス：断面が単位面積になる粒子や光子のエネルギーの総和。単位は、J/m²

空気カーマ：空気の微小体積中dmで光子により生成された全ての荷電粒子の初期運動エネルギーの総和dEをその微小体積の質量で割った値。 $K=dE/dm$ 。単位は、J/kg(=Gy)

バックグラウンド：大地からの放射線や宇宙線など、自然からの放射線量

放射線防護

等価線量：放射線防護の目的で使用される線量。放射線の種類により異なる放射線荷重係数 (例えばγ線は1) を吸収線量に掛けたもの。単位はSv (シーベルト) で吸収線量とは次式の関係である。等価線量 (Sv) = 放射線荷重係数 × 吸収線量 (Gy)

実効線量：放射線防護の目的で使用される線量。各臓器における確率的影響の発生確率を考慮した組織荷重係数を各組織の等価線量にかけた線量。実効線量 (Sv) = (各組織の等価線量 × 組織荷重係数) の総和

生物学的半減期：生体に取り込まれた放射性物質が代謝、排泄されて、半分の量まで排出されるまでの時間

実効(有効)半減期：体内に取り込まれた放射性物質は、核種の壊変と代謝・排泄により減少する。この放射能が半分になるまでに要する時間を有効半減期または実効半減期

と呼ぶ。実効半減期（ T_e ）は物理学的半減期（ T_p ）と生物学的半減期（ T_b ）とすると、 $1/T_e = 1/T_p + 1/T_b$ の関係が成り立つ。

外部被ばく：生体の外部に放射線源があり、体外から被ばくすること。

内部被ばく：生体の内部に放射線源があり、体内から被ばくすること。

確率的影響：低い線量でも障害の発症の可能性がある放射線障害

確定的影響：ある線量以上の被ばくを受けると、ほぼ確実に発症する放射線障害。

しきい値：確定的影響における障害の発症する最低の限界線量

実効線量係数：体内に摂取された放射性物質の量と被ばく線量の関係を表す係数

福島第一原子力発電所事故関連

福島第一原子力発電所：福島県大熊町・双葉町に建設された東京電力の沸騰水型商用原子力発電所。出力は、1号機46万キロワット、2号機～5号機78.4万キロワット、6号機110万キロワット

水素爆発：水素と酸素が混合したガスが引火し爆発する現象

ホットスポット：周囲よりも放射線量（放射能汚染）が多い地点。風や雨水の流れにより、堆積していた放射性物質が集まって濃縮された地点であると考えられる。

おわりに

放射線や放射能に関するご相談やお問い合わせが、公設試にも数多く寄せられています。相談内容は、測定法や製品検査に関するものなど多岐にわたっていますが、健康への影響や農畜水産物などについては衛生関連や農林水産関連の公立試験研究機関でも相談を承っておりますので、ご利用ください。

■地方衛生研究所一覧（地方衛生研究所全国協議会）

<http://www.chieiken.gr.jp/somu/meibo.html>

お問い合わせ、配布希望は、次ページに示すお近くの公設試にお願いします。

■公立鉱工業試験研究機関長協議会一覧

地区	機関名／URL	所在地
北海道・東北	地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 産業技術研究本部 工業試験場 http://www.iri.hro.or.jp/	北海道札幌市北区北19条西11丁目
	地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 環境・地質研究本部 地質研究所 http://www.gsh.hro.or.jp/	北海道札幌市北区北19条西12丁目
	北海道立工業技術センター http://www.techakodate.or.jp/center/	北海道函館市桔梗町379
	地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 産業技術研究本部食品加工研究センター http://www.food.hro.or.jp/	北海道江別市文京台緑町589-4
	地方独立行政法人 青森県産業技術センター 工業総合研究所 http://www.aomori-itc.or.jp/index.php?id=2262	青森県青森市大字野木字山口221-10
	地方独立行政法人 岩手県工業技術センター http://www.pref.iwate.jp/~kiri/	岩手県盛岡市飯岡新田3-35-2
	秋田県産業技術センター http://www.rdc.pref.akita.jp/	秋田県秋田市新屋町字砂奴寄4-11
	秋田県総合食品研究センター http://www.arif.pref.akita.jp/	秋田県秋田市新屋町字砂奴寄4-26
	山形県工業技術センター http://www.yrit.pref.yamagata.jp/	山形県山形市松栄2-2-1
	宮城県産業技術総合センター http://www.mit.pref.miyagi.jp/	宮城県仙台市泉区明通2-2
	福島県ハイテクプラザ http://www4.pref.fukushima.jp/hightech/	福島県郡山市待池台1-12
関東・甲信越・静	茨城県工業技術センター http://www.kougise.pref.ibaraki.jp/	茨城県東茨城郡茨城町長岡3781-1
	栃木県産業技術センター http://www.iri.pref.tochigi.lg.jp/	栃木県宇都宮市刈沼町367-1
	群馬県立群馬産業技術センター http://www.tec-lab.pref.gunma.jp/	群馬県前橋市亀里町884-1

地区	機関名／URL	所在地
関東・甲信越・静	埼玉県産業技術総合センター http://www.saitec.pref.saitama.lg.jp/	埼玉県川口市上青木3-12-18
	千葉県産業支援技術研究所 http://www.pref.chiba.lg.jp/sanken/	千葉県千葉市若葉区加曽利町889
	地方独立行政法人 東京都立産業技術研究センター http://www.iri-tokyo.jp/	東京都江東区青海2-4-10
	神奈川県産業技術センター http://www.kanagawa-iri.go.jp/	神奈川県海老名市下今泉705-1
	横浜市工業技術支援センター http://www.city.yokohama.jp/me/keizai/shien/sien-c/	神奈川県横浜市金沢区福浦1-1-1
	新潟県工業技術総合研究所 http://www.iri.pref.niigata.jp/	新潟県新潟市中央区鏡西1-11-1
	長野県工業技術総合センター http://www.gitc.pref.nagano.lg.jp/index.html	長野県長野市若里1-18-1
	山梨県工業技術センター http://www.pref.yamanashi.jp/yitc/	山梨県甲府市大津町2094
	静岡県工業技術研究所 http://www.iri.pref.shizuoka.jp/index.html	静岡県静岡市葵区牧ヶ谷2078
東海・北陸	愛知県産業技術研究所 http://www.aichi-inst.jp/	愛知県刈谷市恩田町1-157-1
	名古屋市工業研究所 http://www.nmiri.city.nagoya.jp/	愛知県名古屋市熱田区六番3-4-41
	岐阜県産業技術センター http://www.cc.rd.pref.gifu.jp/iri/	岐阜県羽島郡笠松町北及47
	岐阜県機械材料研究所 http://www.cc.rd.pref.gifu.jp/metal/	岐阜県関市小瀬1288
	岐阜県情報技術研究所 http://www.cc.rd.pref.gifu.jp/imit/	岐阜県各務原市テクノプラザ1-21
	岐阜県セラミックス研究所 http://www.cc.rd.pref.gifu.jp/ceram/	岐阜県多治見市星ヶ台3-11
	岐阜県生活技術研究所 http://www.cc.rd.pref.gifu.jp/~life/	岐阜県高山市山田町1554

地区	機関名／ URL	所在地
東海・北陸	三重県工業研究所 http://www.mpstpc.pref.mie.jp/kou/	三重県津市高茶屋 5-5-45
	富山県工業技術センター http://www.itc.pref.toyama.jp/	富山県高岡市二上町150
	石川県工業試験場 http://www.irii.jp/	石川県金沢市鞍月 2丁目 1番地
近畿	福井県工業技術センター http://www.fklab.fukui.fukui.jp/kougi/	福井県福井市川合鷺塚町61字北稲田10
	滋賀県工業技術総合センター http://www.pref.shiga.jp/f/kougyo/	滋賀県栗東市上砥山232
	滋賀県東北部工業技術センター http://www.hik.shiga-irc.go.jp/	滋賀県長浜市三ツ矢元町27-39
	京都府中小企業技術センター http://www.mtc.pref.kyoto.lg.jp/	京都府京都市下京区中堂寺南町134
	京都府織物・機械金属振興センター http://www.silk.pref.kyoto.jp/index-sub.html	京都府京丹後市峰山町荒山225
	京都市産業技術研究所 http://kitc.city.kyoto.lg.jp/	京都府京都市下京区中堂寺栗田町91
	奈良県工業技術センター http://www.pref.nara.jp/dd_aspx_menuid-1751.htm	奈良県奈良市柏木町129-1
	大阪府立産業技術総合研究所 http://tri-osaka.jp/	大阪府和泉市あゆみ野2-7-1
	地方独立行政法人 大阪市立工業研究所 http://www.omtri.or.jp/	大阪府大阪市城東区森之宮1-6-50
	兵庫県立工業技術センター http://www.hyogo-kg.go.jp/	兵庫県神戸市須磨区行平町3-1-12
和歌山県工業技術センター http://www.wakayama-kg.go.jp/	和歌山県和歌山市小倉60	
中国・四国	地方独立行政法人鳥取県産業技術センター http://www.tiit.or.jp/	鳥取県鳥取市若葉台南7-1-1
	島根県産業技術センター http://www.shimane-iit.jp/	島根県松江市北陵町1番地
	岡山県工業技術センター http://www.pref.okayama.jp/sangyo/kougi/	岡山県岡山市北区芳賀5301

地区	機関名／ URL	所在地
中国・四国	広島県立総合技術研究所 http://www.pref.hiroshima.lg.jp/page/1177480336470/	広島県広島市中区基町 10-52
	広島市工業技術センター http://www.itc.city.hiroshima.jp/	広島県広島市中区千田町 3-8-24
	地方独立行政法人 山口県産業技術センター http://www.iti-yamaguchi.or.jp/	山口県宇部市あすとぴあ 4-1-1
	徳島県立工業技術センター http://www.itc.pref.tokushima.jp/	徳島県徳島市雑賀町西開 11-2
	香川県産業技術センター http://www.itc.pref.kagawa.jp/	香川県高松市郷東町587-1
	愛媛県産業技術研究所 http://www.iri.pref.ehime.jp/	愛媛県松山市久米窪田町 487-2
	高知県工業技術センター http://itc.pref.kochi.jp/	高知県高知市布師田3992-3
	高知県立紙産業技術センター http://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/151406/	高知県吾川郡いの町波川 287-4
九州・沖縄	福岡県工業技術センター http://www.fitc.pref.fukuoka.jp/	福岡県筑紫野市上古賀 3-2-1
	佐賀県工業技術センター http://www.saga-itc.go.jp/	佐賀県佐賀市鍋島町大字八戸溝114
	佐賀県窯業技術センター http://www.scrl.gr.jp/	佐賀県西松浦郡有田町黒牟田丙3037-7
	長崎県工業技術センター http://www.pref.nagasaki.jp/kogyo/	長崎県大村市池田2-1303-8
	長崎県窯業技術センター http://www.pref.nagasaki.jp/yogyo/	長崎県東彼杵郡波佐見町稗木場郷605-2
	熊本県産業技術センター http://www.kmt-iri.go.jp/	熊本県熊本市東町3-11-38
	大分県産業科学技術センター http://www.oita-ri.go.jp/	大分県大分市高江西 1-4361-10
	宮崎県工業技術センター http://www.iri.pref.miyazaki.jp/	宮崎県宮崎市佐土原町東上那珂16500-2
宮崎県食品開発センター http://www.iri.pref.miyazaki.jp/fdc/	宮崎県宮崎市佐土原町東上那珂16500-2	

地区	機関名／ URL	所在地
九州・ 沖縄	鹿児島県工業技術センター http://www.kagoshima-it.go.jp/	鹿児島県霧島市隼人町小田 1445- 1
	沖縄県工業技術センター http://www.koushi.pref.okinawa.jp/	沖縄県うるま市字州崎 12- 2
	沖縄県工芸技術支援センター http://w1.nirai.ne.jp/okikousi/top.htm	沖縄県島尻郡南風原町字照 屋213

執筆者一覧

○編集及び執筆者

地方独立行政法人 東京都立産業技術研究センター
朝倉 守、伊瀬洋昭、碓井正雄、金城康人、櫻井 昇
鈴木隆司、谷口昌平、永川栄泰、武藤利雄

○資料提供・執筆機関

地方独立行政法人 岩手県工業技術センター
山形県工業技術センター
栃木県産業技術センター
長野県工業技術総合センター
兵庫県立工業技術センター
地方独立行政法人 鳥取県産業技術センター
地方独立行政法人 山口県産業技術センター
鹿児島県工業技術センター

発行 公立鉦工業試験研究機関長協議会
発行日 2012年1月31日 登録番号 23(西)27
事務局 地方独立行政法人 東京都立産業技術研究センター 経営企画部
所在地 〒135-0064 東京都江東区青海2-4-10 TEL 03-5530-2426
FAX 03-5530-2458

