

## 2. 不安に対する考え方

不安は大きく、以下のように分けられます。

### A 感情

不安だという気持ち、そのものです。

### B からだ

動悸、ふるえ、発汗、呼吸困難、赤面、などです。

### C 行動

じっとできない、取り乱す、人にあたる、酒量がふえる、などです。強迫性障害の場合には、何度も手洗いや戸締まり確認をするといった、強迫行為がみられることもあります。

### D 考え

自分はおかしくなってしまう、恥ずかしい、どうしようもない、人からも変だと思われる、などです。

これらの要素はたがいに強めあっています。動悸がすると余計に不安になります。おかしくなってしまう、と思いつくと、じっとしてはいられません。赤面を意識して恥ずかしいと思うと、余計に不安になり、赤面がひどくなります。

ということは、どれか一つの要素だけでも改善すると、それにつられてほかの要素も改善することが多いのです。その方法を順に説明していきます。

## 3. 不安を悪くしている要因のチェック

不安に対処する前に、明らかな原因によって不安が生じていないかを確認しましょう。そうした原因を改善することで不安が軽減されるかもしれません。

現在進行中のストレス（職場の関係、家族や地域の問題など）  
（ ）

心臓疾患

甲状腺機能異常

貧血

不眠症

過剰な運動（息が切れるほどの）

サウナ、熱湯など高温での入浴習慣

カフェイン（元気を出したり、不安を鎮めるためにカフェインに頼っている）

薬剤性

▶ 抗精神病薬の副作用としての落ちつかなさ（静坐不能、アカシジア。手の震え、顔などの筋肉のこわばりを伴うことが多い）

ドグマチール（アビリット）は内科などでも処方されていますので要注意。

- その他、本人が不安の原因だと思っていること  
( )

## 4. カフェイン

カフェインには不安を悪化させる作用があり、アルコールと同様に依存性があります。日本ではこのことはあまり指摘されていませんので、注意してください。不安を感じている住民は、同時に抑うつ的になったり、仕事の能率が上がらないことが多く、それへの対応として意図的にカフェインを飲んでいることがあります。

カフェインの副作用としては次のようなものがあります。

- ① 落ち着かなさ
- ② 不安
- ③ 興奮
- ④ 不眠
- ⑤ 顔面紅潮
- ⑥ 失禁
- ⑦ 胃腸症状
- ⑧ 筋肉のひきつり
- ⑨ まとまりのない思考と発話
- ⑩ 動悸または不整脈
- ⑪ 疲労が感じられない
- ⑫ 精神運動性興奮

カフェインを含んだ飲料には次のようなものがあります。順番に聞いてみましょう。

- ▶ コーヒー ( 杯/日)
- ▶ 紅茶 ( 杯/日)
- ▶ 緑茶 ( 杯/日)
- ▶ コーラ ( ml/日)
- ▶ 健康ドリンク ( 本/日)
- ▶ サプリメント ( 杯・錠/日)

不安が強い人は、できるだけカフェインを減らしてもらいましょう。

ただし一日に数杯のカフェイン飲料を摂取している場合は、急激に減らすと頭痛などの離脱症状が生じるので、1週間毎に1杯くらいの割合で減らしてもらいます。すでに不安障害の診断がついて抗不安薬を投与されている場合でも、カフェインを減らすことで投薬量を減らすこともあり得ます。

コーヒーの好きな方には、カフェインの入っていないコーヒー（デカフェ）が販売

されていることも教えてあげましょう。インスタントコーヒーでもありますし、コーヒーのチェーン点でも出している場合があります。

## 5. 考え方の修正

不安についての悲観的な思い込みは、すべての要素を悪化させてしまいます。次のことを説明してみましょう。

- ① 不安は誰にでも生じる。
- ② 不安は、最初の5分間が一番つらい。安静にしていれば、30分程度で落ち着いてくる。パニック発作のような重度の不安でも、何もしないで休んでいれば60分程度で落ち着くことが多い。
- ③ 原因は脳の中の神経伝達物質が放出されることです。この放出をおさえるメカニズムも備わっています。それにつられて、
- ④ 不安に対して、「もうだめだ」「何とかしなくては」「また不安になるのではないか」というように、二次的な不安を作り上げてしまうと、余計につらくなる。

## 6. 呼吸法の練習

呼吸というのは人間に備わった素晴らしいはたらきです。それは酸素を取り込んで二酸化炭素を出すというだけではなく、不安な気持ちをコントロールするはたらきももっています。

呼吸という言葉を見ると、息を吐く（呼気）ことが先に来て、息を吸う（吸気）が後になっています。しかし過呼吸発作を見ればよく分かるように、不安を感じている人の多くは何か先に息を吸おうとしています。普通の会話でも、話し終わった後に大きく息を吸って、吐くことを忘れていた人がいます。

このようなやり方ではますます不安が悪化してしまいます。そこで次のような呼吸法を練習してもらいましょう。

- ① 口を閉じて、鼻から普通に息を吸い込む。
- ② ゆっくり息を吐き出す。同時に体の力を抜くようにする。
- ③ 息を吐きながら、ゆっくりと1から6まで数を数える。馴れてきたら、だんだん、ゆっくりと数えるようにする。
- ④ 息を止めて3つ数え、それから次の息を吸う。吸うときには胸を動かさないように、穏やかに吸う。
- ⑤ この練習を1回10分、寝る前のリラックスした状態で実行してもらおう。
- ⑥ 日中も、時間が空いたときにはできるだけこの呼吸をする。
- ⑦ 不安が生じたときには、この呼吸法を実施する。日頃から練習していないとなかなかできないので練習が不可欠。

---

### (説明の例)

呼吸の仕方が感じ方に影響を与えるということはたくさんの方が知っていますね。例えば、感情が高ぶった時には、深呼吸をして落ち着きなさい、と言うでしょう？ でも本当は、深く呼吸することではなくて、ゆっくりと落ち着いて呼吸することが大切なのです。気持ちを鎮めるためには、普通に息を吸って、ゆっくりと長い時間をかけて吐き出します。息を吐くときにリラックスしやすくなります。そこで、息を吐く時に、「1、2、3、4、5、6」と数を数えて、ゆっくりと吐いてみて下さい。ゆっくり呼吸するために、もう1つやってみて欲しいことがあります。息を吐いた後、肺が空っぽになったところで、次の息を吸うのを、3～4秒待ってください。つまり、こうするのです。「吸って（普通速度で）——吐いて（非常にゆっくり長く）、1、2、3、4、5、6、息を止めて、1、2、3、吸って（普通に）、吐いて」という具合です。息を吐くときに、肩やお腹の力も徐々に抜いていくようにしてみてください。

---

## 7. 不安のたとえ話（説明のヒント）

しゃっくりは不安の発作に似ています。

突然生じる、人前で生じると恥ずかしい。止めようと思っても急には止まらない。しかししゃっくりで精神科に来る人はほとんどいません。なぜでしょうか。

(相談者に考えてもらって下さい)

- ・誰にでも生じる（しゃっくりをしている人は見れば分かる）
- ・いつかは止まる
- ・原因が分かっている（横隔膜のけいれん）
- ・自分で少しは対応できる（息を吸って止める） など

(不安の発作はしゃっくりに似ていないでしょうか)

しかし次のように思っているかもしれませんね。

- ・自分だけだと思う  
(不安は目に見えないので、他人に生じているかどうか、分からない)
- ・ずっと続くと思う
- ・原因は自分の弱さだと思う
- ・まったく対応できない

こうした思い込みに対して、先に紹介した「考え方の修正」をもう一度説明して下さい。また呼吸法を用いた対応ができること、不安を悪化させるようなカフェインな

どを控える、という対応についても、もう一度説明をして下さい。

## 8. 不安のモニタリング

漠然と不安というだけではなく、点数をつけてモニタリングをする癖をつけてもらいましょう。不安で倒れそうになり、救急車を呼びたくなるようなレベルを100とし、何もないときを0とします。自分の不安が何点くらいなのかを常に考えるようにしてもらってください。

そして不安が生じたとき、点数がどのように変わっていくのか、特に自然に減少していく様子に注意をするように指導して下さい。そうすることで不安について見通しをもつことができるようになり、落ち着きにつながります。

## 9. 話し方を身につけよう

相談を受けるとき、相手の不安を軽減するというだけではなく、安心感を与えことも大切です。その際に重要なのは、何を話すかということだけではなく、どのように話すのか、話す人がどういう態度や声の使い方をするのか、ということです。こちらが落ち着かない様子だと、何を話しても住民は安心できませんよね。

そうしたことの練習として、まずは同僚とロールプレイをしてみてください。

ロールプレイというのは、住民役と、保健師（相談員）役に分かれて、模擬面接をやってみることです。この練習を通じて、自分の癖が分かったり、困ったときにはどのように対応すればよいのかが分かります。

実際に相談業務を行った後でも、一日の中で印象に残った住民のお話を思い出して、ロールプレイをするのも、非常に有効です。

これは決して、誰かが誰かを批判するために行うものではありません。いろいろなやり方をお互いに試して、楽しく練習することで、自分のレパートリーを広げて下さい。

## ロールプレイの進め方

### ① メンバー

気心の知れた人同士で結構です。何かを「教えてくれる」人がいなくても大丈夫です。

住民役、保健師（相談員）役が1人ずつ。できれば第三者的にそれを観察する役の人を入れて、3人で行って下さい。3人目の観察者は、人手が足りないときにはいなくても構いませんが、いてもらおうと非常に役に立ちますので、できるだけ3人で組になって下さい。

### ② シナリオ

住民の相談の内容を考えて下さい。架空の相談で構いません。架空の場合は、あまり深刻な話にしないようにして下さい。特に自分が実際に体験した深刻なことは、決

して題材にしないで下さい。たとえば親を亡くした体験などをシナリオにしてしまうと、ロールプレイの間に感情が高ぶって動揺することがあります。あくまでも架空の話にして下さい。

または、実際に相談活動の中で住民から聞いた話をシナリオにしても結構です。

住民役の人は、どのようなシナリオで話すのか、あらかじめ決めておいて下さい。

長さとしては、最初のうちは、せいぜい5分以内で終わるように考えて下さい。馴れてきたら、もっと長くしても構いません。

### ③ 始め方

住民役の人はあらかじめ考えたシナリオに沿って話してみてください。保健師（相談員）役の人は、普段自分が行っているような態度で、応答をして下さい。

### ④ 観察者のポイント

観察者の方は、以下の点を意識して聞いていて下さい。

観察者がいないときには、住民役の人は以下のことを意識するようにして下さい。

- A. 保健師（相談員）の声の感じ（明るい、きつい、など）、間合いの取り方、相づちの打ち方
- B. 保健師（相談員）の応答があったときに、住民が話しやすくなっているかどうか。
- C. もっと違った応答の仕方はあるだろうか。

### ⑤ 話し合い

ロールプレイが終わったら、まず住民役の人は、どのような印象をもったのか、保健師（相談員）役の人にコメントをしましょう。観察役の人は、それに対して気のついたことをコメントして下さい。保健師（相談員）役の人は、難しかったところ、工夫してみたところを教えてください。後はどうぞ自由に話し合いをして下さい。

### ⑥ ロールの交替

話し合いが終わったら、順番に役割を変えてやってみましょう。それぞれの、違ったシナリオを使って下さい。

---

### ◆ヒント◆

\*話しているときの、保健師（相談員）役の人の姿勢、視線、癖などにも気をつけましょう。天井をキョロキョロと見たり、髪の毛にさわったりしていないでしょうか。そうした癖が出たときに、住民役の人がどんな印象をもったのか、聞いてみましょう。

\*どういう答え方がよいのかを判断する手がかりは、そういう答えをした後で住民役の人が話しやすくなるのかどうか、ということです。住民役の人は、自分が話しやすかったかどうか、積極的にコメントをして下さい。

\*少し馴れてきたら、こんなことをしてみましょう。

→相手の話の一部をゆっくりと、気持ちを込めて繰り返してみる。

「～つらかったのですね」「～心配なのですね」など

その後で、話し合ってみてください。一見すると共感的な答えのようですが、それが表面的になってしまうのはどういうときか、しみじみと心にとどくのはどういうときか、を考えてみましょう。何かほかに言った方がよいことは、あるでしょうか。

---

## 10. 不安に対する専門的治療

次のような場合には、専門的治療が必要になります。

- ① 著しく苦痛が強い
- ② 上述のマネジメントを理解できない、十分に実行できない
- ③ 生活機能に影響が出ている
- ④ 不安を生じさせるような原因が見当たらない
- ⑤ 下記のタイプのいずれかに該当しそうである。

→ 精神科医、心療内科医、心理士に紹介することを考慮して下さい。

## 11. 不安の分類

不安は次のような特徴をもつことがあります。ここまで述べてきたことは、どのタイプの不安にも当てはまります。こうした分類が必ずしも有効な治療に結びつくわけではありませんが、相談者の不安を理解するための手がかりにして、参考のために紹介します。

- ① **全汎性不安**：不安と言うよりは安心感の欠如である。様々な情報、人の言葉を悪い方向に受け取り、実際には存在していないつらい出来事が生じるのではないかと取り越し苦労をする。
- ② **恐怖症**：特定の対象（動物、車、高所、医療など）に対して強い不安を抱き、時にパニック発作を起こす。そうした対象に接していないときには概ね落ち着いているが、不安になりたくないために行動に制約が生じたり、回避のための努力に没頭することもある。
- ③ **対人不安（社交不安）**：人と接するときだけに限局した不安である。多くは相手から自分の行動を評価されるような場面、またはそのような人の前で感じる。教師、上司の前や接客場面などが多い。いわゆる対人恐怖である。赤面、吃音、発汗などの自律神経症状を伴うことが多い。
- ④ **予期不安**：将来悪いことが起きるのではないかと、自分を取り乱してしまうような不安を生じるのではないかと、ということに不安に思う。些細な出来事を悪い予兆としてとらえやすい。
- ⑤ **パニック発作**：突発的な強い不安（人によっては恐怖と表現する）とともに著

しい自律神経発作を生じる。特に動悸、呼吸困難が著明である。そのために本人は自分はこのままどうになってしまうのかという二次性の不安を強く抱く。

- ⑥ **トラウマ性不安**：生死の危険に瀕して、記憶についての恐怖が形成されることによって、当時の感情と出来事の記憶がフラッシュバックのように再体験され、強い不安を生じる。PTSD など。
- ⑦ **強迫**：理性的には馬鹿げていると分かっているが、同じ観念を何度も思い浮かべては不安を抱く（強迫観念）。確認したり安心するための反復行為を伴うと強迫行動である。戸締まりを心配して何度も確認する、不潔ではないかと思っただけで何度も手を洗う、等である。



●  
●  
**放射線の基礎知識**  
●  
●

# (1) 放射線・放射能

担当：中村 吉秀

## 要約

放射線防護の観点からは、被ばくする放射線量はできる限り低く保ちつつ、定められた限度の値を超えないことを常に確認して、許容されるリスクレベルが増加しないように管理する必要があります。そのためには放射線およびその発生源となる線源の放射能の数量を精度よく把握しておかなければ、適確な放射線管理を実施することはできません。放射線は私たちの目や耳、皮膚などの五感では全く感じる事ができないため、放射線量や放射能の数量を放射線測定器によって測定する技術が放射線管理に不可欠となっています。

放射線管理で行われる通常の放射線測定に関して、放射線測定器はどうして放射線を測定できるのか、どのような種類のものがどのように使われるのか、などの基礎的なことは、放射線防護やその管理方法をご理解いただくのに役立つものと思います。また、放射線測定は放射線・放射能の性質や特性を利用した応用技術ですから、放射線測定をご理解いただくためには、放射線・放射能そのものの基礎知識も必要となりますので、それらを含めて説明したいと思います。

## 1. はじめに

私たちが放射線・放射能の影響から身体を守るための放射線防護を適確に実施するためには、被ばく線量の程度やその放射線を発する放射性物質の放射能の数量をできるだけ正確に把握する必要があります。また、医学や理工学などの広い分野で放射線・放射能が利用されていますが、その多くは放射線・放射能を測定する技術（応用放射線計測技術）が基本となっています。

ここでは、主として放射線防護に関する一般的な放射線・放射能の測定に関して、放射線測定器の種類や簡単な測定原理、測定時の留意事項、測定器の校正と測定値の信頼性などについて説明することとします。放射線測定の話に入る前に、どうしても必要な放射線・放射能に関する基礎的なところから進めて行きたいと思います。

## 2. 放射線・放射能発見の歴史

自然界には、太陽や銀河系宇宙から地球に飛来する放射線（宇宙線と言います。）や地球に存在するウラン（U）やトリウム（Th）などの自然放射性物質から放出される自然放射線があります。これらの自然放射線は人類が誕生するはるか昔の地球ができたときから存在しているのですが、放射線は目には見えず、触感などの五官では感じる事ができないため、1895年にドイツのヴィルヘルム・レントゲンが放射線の

一種である X 線（エックス線）を発見するまでは、人類はその存在を全く知りませんでした。

レントゲンは、放電管による陰極線の実験を行っていたとき、放電管を厚い紙で覆っているにもかかわらず、近くにおいてあった蛍光物質が発光していることに気がつきました。放電管から目には見えないが、物質を透過する力をもった未知の何かが発していると考え、未知数を表す記号によく使われる X に因んで X 線と名づけました。

レントゲンによる X 線の発見は、多くの科学者を X 線の研究に熱中させました。ベクレルは蛍光物質が X 線を放射しているのに違いないと考え、その仮説を証明するために、黒い厚紙で光を遮断した写真乾板の上に蛍光物質を置いて日光にあてる実験をしていました。日光の刺激で発生する蛍光は黒い厚紙を透過することはありませんが、その中に透過力の強い X 線が含まれれば、蛍光物質が写真に写るはずですが、いつものように、蛍光物質として当時よく使われていたウラン塩に、黒い厚紙で覆った写真乾板をセットして実験の準備をしていたときに幸運がやって来ました。曇天が続き日光を当てられず、実験ができなかったのです。実験セットを机の引き出しの中に数日間そのままの状態でしまっておき、数日後に日光に当てていない状態の写真乾板を現像したところ、予想に反してウラン塩の鉱石がはっきりと写真乾板に写っていました。1896年3月2日のことでした。日光による刺激がないので蛍光は出ていないはずなのに写真乾板に像が写ったということは、ウラン塩は日光がなくても写真乾板を感光する X 線、またはそれに似た透過力の強い未知の何か（放射線）を持続的に放出しているのではないかと考えました。ベクレルは硫化亜鉛や硫化カドミウムのようなほかの蛍光物質についても同様な実験をしましたが、このような現象は現れず、ほかの蛍光物質にはないウラン(U)に特有の性質であるということも確かめました。さらに、ベクレルの行った有名な実験として、ウラン塩と写真乾板の間に X 線を通しにくい銅の十字架をおくと、十字架の部分だけが感光されずに残って、十字架の陰影がはっきりと写し出されたのです。こうして間違った仮説に偶然が重なり、後に「放射能」と呼ばれる現象が発見されたのです。

この現象、すなわち放射線を出す性質や能力のことを「放射能」と命名したのはマリー・キュリー（キュリー夫人）でした。キュリー夫妻はピッチブレンド（瀝青（れきせい）ウラン鉱）と呼ばれるピッチ状の油脂光沢をもつ鉱物から化学的に分離し、1898年の7月にはポロニウム(Po)を、同年の12月にはラジウム(Ra)という放射性元素を発見したのです。大量のピッチブレンドからの分離精製作業には、夫ピエール・キュリーが発明した微弱電流計と呼ばれる、当時最新鋭の放射線測定器が絶大な威力を発揮しました。放射線の存在やそこから出てくる放射線を感知するには放射線測定器がなければできないことで、それは今でも同じことです。

その後、一口に放射線と言っても異なる数種類の放射線があることが分かってきました。イギリスのアーネスト・ラザフォードは、1898年にウラン(U)から2種類の

異なる放射線が出ていることを発見し、プラスの電気を帯びた重い粒子、すなわちヘリウム(He)の原子核の流れである放射線をアルファ線( $\alpha$ 線)と名づけ、マイナスの電気をもった軽い粒子、すなわち電子の流れをベータ線( $\beta$ 線)と命名しました。放射性元素から放出される主な放射線には、アルファ線とベータ線のほかにガンマ線( $\gamma$ 線)と呼ばれるものがあります。これは物質に対する透過性が高く、アルファ線やベータ線と異なり磁場の影響を受けません。すなわち電荷をもたない放射線であることが、フランスのポール・ヴィラールによって1900年に観察されました。ラザフォードはこの現象をさらに詳しく調べ、これが電磁波であることを突き止め、1903年にガンマ線と名づけました。

もう一つ重要な放射線に中性子線(n線)というものがあります。中性子は陽子とともに水素原子を除くあらゆる原子の原子核を構成する重要な粒子です。当時の放射線測定器は放射線と物質との相互作用によって生じた電離電荷を測定するものが主流であったため、電荷をもたず直接は電離作用を行わない中性子の発見やその性質の特定には時間を要し、1932年にイギリスのジェームズ・チャドウィックの実験まではその存在が明らかにされませんでした。

### 3. 放射線と放射能

このように物質を透過したり、物質中に電荷を与えたり、さらには写真乾板を感光させたりもする謎の光のようなものがまず発見され、「放射線」と呼ばれるようになりました。放射線を発する物質を調べていったところ、放射線を出す能力をもつ元素(原子)があることに辿りつき、そのような能力あるいは性質を「放射能」と名づけました。放射能の性質をもつ元素を「放射性元素」、あるいは少し難しい表現で「放射性同位元素」と言います。放射性同位元素の英語(radioisotope)をそのまま使って「ラジオ・アイソトープ」とも言いますが、日本語では単に「アイソトープ」だけで「ラジオ・アイソトープ」を意味することもあります。

放射性元素というのは特殊な元素ではありません。元素の周期表に記載されているように存在する元素は百数種類だけであって、これ以外の元素はなく(発見されていない)、そのほとんどの元素は安定元素なのですが、同じ元素でも放射性同位元素が自然界に存在したり、人工的に造ることができるのです。例えば、水素(H)には3つの異なる元素が存在します。3つとも水素ですから元素の周期表では一番左の最上段の位置、すなわち周期表1番目に位置します。3つとも「同じ位置」に入りますから「同位元素(同位体)」と呼ばれるのです。この3つの元素は原子核の質量数(原子核を構成する陽子と中性子のそれぞれの数の和)が異なるために、 $^1\text{H}$ 、 $^2\text{H}$ 、 $^3\text{H}$ と原子記号の左肩に質量数を表記して区別します。このうち、 $^1\text{H}$ と $^2\text{H}$ は放射性同位元素ではありませんが、 $^3\text{H}$ は放射性同位元素でトリチウム(三重水素)と呼ばれます。そして $^3\text{H}$ を組成とする水( $\text{H}_2\text{O}$ )のように放射能の性質をもつ物質のことを総称し

て「放射性物質」と言います。

$^1\text{H}$ 、 $^2\text{H}$ 、 $^3\text{H}$ はすべて水素ですから原子核の陽子の数はいずれも1個ですが、中性子の数は、 $^1\text{H}$ は0個、 $^2\text{H}$ は1個、 $^3\text{H}$ は2個と異なります（図1）。このように同じ元素でありながら原子核構成が異なる元素を区別して表現するときに「核種」という言葉をよく使います。例えば「水素という元素には3つの核種が存在します」のように使います。もちろん、「水素という元素には3つの同位元素が存在します」とも言えます。

$^1\text{H}$ 、 $^2\text{H}$ および $^3\text{H}$ の化学的性質、特性は水素の性質を示しますからお互いにその化学的挙動はほとんど同じです。ごく特殊なことを除けば、全く同一の挙動をするといっても問題はありません。 $^3\text{H}$ だけが放射線を放出する（物理的な性質）ことだけが違うのです。言いかえれば、放射線を測ること以外に、放射性物質と通常の物質を区別することは一般的には難しいのです。水素の質量数の違いはほかの元素と比較すると相対的に大きな違いとなるため、 $^2\text{H}_2\text{O}$ （重水）や $^3\text{H}_2\text{O}$ （トリチウム水）組成の水の質量は普通の水（軽水）よりは確かに重いのですが、比重も物理的性質の一つです。物理的性質が異なるだけで化学的性質は同じであるということは、水素に限らずほかのすべての同位元素についても同様です。

放射線測定に関しても、表題では「放射線・放射能の測定」としておりますが、放射能の数量を直接測定することは一部の例外を除いてできません。測ろうとしている物質から放出される放射線の量を測定し、その放射線の数量（強さ）からその源となる放射能の数量を間接的に推定するのです。

## 4. 放射線の放出

原子核は陽子と中性子から構成されていますが、安定な原子核ではその数が決まっています。陽子も中性子もその質量はほぼ同じで（正確には、中性子の方がわずかに重い）、陽子がプラスの電荷をもっているのに対し、中性子は電荷をもっていません。低い原子番号の原子では両者の数が同じくらいが安定ですが、高い原子番号の原子になると、陽子間に電氣的斥力が強くなるために、中性子数が多くなった方が安定になります。核反応によって人工的に陽子や中性子の数を変えますと、安定な状態の原子でない放射性同位元素を生成することができます。不安定な原子核とはエネルギーが高い状態にあることであり、そのような放射性同位元素は自然に余分なエネルギーを放出して、安定な状態に移行しようとしています。このときアルファ粒子（1個のアルファ線に着目するときなどにアルファ粒子という言い方をします）やベータ粒子（電子）を放出して、安定な陽子と中性子の数になります。また、アルファ粒子の放出やベータ粒子の放出だけでは、安定な陽子、中性子の数になっても余分のエネルギーをすべて放出しきっていない状態になる場合もあります。この状態の原子核は核異性体と呼ばれ、通常、ガンマ線、すなわち電磁波を放出してエネルギーレベルを下げることに

よって安定核へと移行します。放出されるアルファ粒子、ベータ粒子、ガンマ線のことを総称して放射線と呼び、放射性同位元素が放射線を出して安定同位元素に移行する現象を放射性壊変と言います。アルファ粒子を出す場合をアルファ壊変、ベータ粒子を出す場合をベータ壊変と言いますが、ガンマ線を出す場合はガンマ線壊変とは言わずに核異性体転移 (IT) と言います。ベータ壊変には高速の電子を放出するベータマイナス壊変 ( $\beta^-$ 壊変)、プラスの電荷をもった陽電子を放出するベータプラス壊変 ( $\beta^+$ 壊変)、および原子核が軌道電子を取り込む軌道電子捕獲壊変の三つの形式があり、これらを総称してベータ壊変と呼びます。

放射性壊変にはこのほかに、ウランやトリウムといった重い原子核が分裂してほぼ2つの原子核になる核分裂反応があります。核分裂反応では前述のアルファ壊変、ベータ壊変、核異性体転移とは異なる膨大なエネルギーが放出されるほか、多くの放射性同位元素が分裂によって生成されます。

## 5. 核データ

ある放射性核種が放射性壊変をする形式、すなわち、放出する放射線の種類、エネルギー、放出される割合、壊変する割合などはその核種に特有のもので、物理的に決まっています。例えば、「 $^{137}\text{Cs}$  (セシウム 137) という放射性核種は、半減期 30.1671 年でベータマイナス壊変して、5.6% は安定な  $^{137}\text{Ba}$  に移行し、94.4% は  $^{137}\text{Ba}$  (バリウム 137) の核異性体である  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  に移行する。 $^{137}\text{Ba}$  への移行時には最大エネルギー 1,176 keV のベータ線を放出し、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$  への移行時には最大エネルギー 514 keV のベータ線を放出する。 $^{137\text{m}}\text{Ba}$  は半減期 2.552 分で、 $^{137}\text{Cs}$  の 1 壊変当たり 85.1% の割合で、662 keV のガンマ線を出して安定核  $^{137}\text{Ba}$  に移行する。 $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の半減期は 2.552 分である。 $^{137\text{m}}\text{Ba}$  からは Ba の特性エックス線が放出される。……」(アイソトープ手帳第 11 版より) などといった具合です。このような核種固有の情報は核データと呼ばれ、放射線測定には必須のものです。核データを図で示したものが壊変図式と呼ばれるもので、 $^{137}\text{Cs}$  の壊変図式を図 2 に示します。放射線測定器で測れるのは検出部に飛来してきた放射線に関するエネルギーや数の情報だけです。測定によって知り得た情報を核データと照らし合わせて、その放射線の源 (放射線源) となっている核種の種類を決定し、それから放射能の数量等を算定することができるのです。

## 6. 半減期

半減期は重要な核データの一つです。放射性核種の壊変は統計的現象ですから、特定の放射性核種がいつ壊変するかを予想することはできません。しかしながら、原子数という膨大な数の集団で見ると明確な確率分布に従って壊変します。このように、たくさんの放射性核種が順々に壊変して、元の数の半分に減る時間はその核種に特有の時間であり、半減期と言います。半減期が経過すると放射性核種の数が 1/2 になる

のですが、同時に放射能の量も 1/2 になります (図 3 参照)。

半減期の長さは非常に短いものから、億年、兆年という単位の非常に長いものまで様々です。地球ができたときから自然放射能が存在していたと述べましたが、地球誕生のときにあった多くの放射能はそれぞれの半減期に従って減衰し、ほとんどの放射性核種が地球の長い時間とともに消滅したのです。半減期の非常に長いものだけが残っていて、現在の自然界に存在する自然放射能となっています。半減期約 45 億年の  $^{238}\text{U}$  (ウラン 238)、約 140 億年の  $^{232}\text{Th}$  (トリウム 232)、約 12.5 億年の  $^{40}\text{K}$  (カリウム 40) などがその例です。中には何兆年といった地球年代をはるかに超える半減期の長い核種もありますが、それらは安定核種に近いものと言えます。

このように放射性核種は半減期に従ってその量はたえず減衰 (増加はしません) しますから、測定に当たっては放射能、放射線の量を算定するだけではなく、測定時刻も併せて記録して、半減期による補正をしなければなりません。測定結果には、いつの時点でいくらの放射能であったとしなければなりません。非常に短い半減期の放射性核種を長時間かけて測定する場合には、測定中にも刻々と減衰することを無視できない場合もあります。そのような場合には、測定開始時間と終了時間を正確に記録して、測定中の減衰補正をしなければならないこともあります。

## 7. 放射平衡

放射性核種が壊変すると多くは安定な核種になりますが、壊変した先の核種も放射性核種となって、さらに壊変を繰り返していく場合があります、このような現象を逐次壊変と呼びます。2 段階、3 段階、……と続くものもありますが、最初の核種を親核種、2 番目以降の核種を子孫核種といいます。親核種の半減期 ( $T_1$ ) が子孫核種の半減期 ( $T_2$ ) よりも長いと ( $T_1 > T_2$ )、子孫核種の放射能はその半減期では減衰せずに、見掛け上、親核種の半減期に従って減衰するため、親核種と子孫核種の放射能に平衡状態が成立します (過渡平衡)。さらに  $T_1$  が  $T_2$  に比べて極端に長くなると ( $T_1 \gg T_2$ ) 一定時間経過後は親核種の放射能と子孫核種の放射能が等しくなります (永続平衡)。

親核種の放射能を知りたいときに、子孫核種の放射能を測定の方が容易ならば、親核種の放射能を測らずに子孫核種の放射能を測定すればいいわけで、放射線測定ではよく利用されます。核データの項で例として挙げました、 $^{137}\text{Cs}$  の壊変先の  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  は  $^{137}\text{Cs}$  の子孫核種であり、それぞれの半減期は 30.1671 年  $\gg$  2.552 分ですから永続平衡が成り立ちます。通常、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$  から放出されるガンマ線を測定して ( $^{137}\text{Cs}$  からは厳密にはガンマ線は放出されません)、 $^{137}\text{Cs}$  の放射能を算定しています (図 2 参照)。

また、自然界に存在している  $^{238}\text{U}$  と  $^{232}\text{Th}$  は逐次壊変を多数回繰り返して、安定な鉛に移行していくのですが、それらの子孫核種の半減期は親の  $^{238}\text{U}$  や  $^{232}\text{Th}$  と比較して非常に短いため、それぞれ永続平衡が成り立っています。子孫核種の半減期が短い

のに、子孫核種の放射能が<sup>238</sup>U や<sup>232</sup>Th の放射能と同じだけ残っているのは放射平衡となっているからです。

## 8. 放射線と物質の相互作用

レントゲンがX線を発見したのは、放射線が物質中を透過するという、ほかのものにはない能力をもっているからでした。しかしながら、放射線は何でも透過したり、透過してどこまでも進み続けるものではありません。放射線は物質中で相互作用を繰り返すことによってエネルギーを失い、やがては停止して放射線ではなくなります。

放射線測定のもくのものはこのような放射線と物質（放射線測定の場合は放射線検出部の物質）との相互作用をその測定原理としています。放射線測定と特に関係の深い、いくつかの相互作用について説明します。

### (1) 電離作用・励起作用

アルファ粒子やベータ粒子のように電荷をもった粒子を荷電粒子と言いますが、荷電粒子が物質中の原子の近くを通過すると、原子の中の軌道電子と電気的な相互作用を起こします。その結果、軌道電子を原子からはじき出したり（電離）、外側の軌道に移したり（励起）します。軌道電子を弾き出された残りの原子は電子が一つ不足してイオンとなり、電離によって電子-イオン対が生成されることとなります。

ガンマ線は電荷をもたないので、直接そのものが電離や励起を起こすことはありませんが、ガンマ線が物質と引き起こす相互作用、すなわち「光電効果」、「コンプトン効果」、「電子対生成」によって生じる二次的な高速電子が十分なエネルギーをもって、間接的に電離・励起を引き起こします。

### (2) 蛍光作用

励起作用が蛍光物質中で起こると、その結果として光を放出する場合があります。放射線だけでなく蛍光は起こりますが、放射線による蛍光をシンチレーションと言い、放射線が当たると蛍光を発する物質をシンチレータと言います。

### (3) 写真作用

ベクレルが放射線を発見したのは写真乾板にウラン塩の像が写し出されたからでした。放射線がハロゲン化銀を含む写真乳剤中の原子に電離・励起作用を起こし、銀イオンを還元して潜像が生じます。

## 9. 放射線の物質中における透過

放射線は物質との相互作用によってエネルギーを徐々に失い、やがて止まります。どのくらいの距離（飛程と言います）を進むことができるのかは、同じ種類の放射線



でもエネルギーによって大きく変わってきますが、放射線の種類別におおよそのところは次の通りです（図4）。

### （1）アルファ線

アルファ粒子はヘリウム（He）原子の原子核であり、電子に比べてはるかに質量が大きいため、散乱によってあまり進路を変えることはありません。同じエネルギーのベータ線と比較すると速度は遅く、電荷が大きい（電子の2倍）ので、アルファ線の飛程は $\beta$ 線よりもはるかに短く、薄紙1枚程度で完全に遮断することができます。空気中での飛程も数 cm 程度しかありません。

### （2）ベータ線

ベータ線は電離・励起作用で大部分のエネルギーを失います。また、エネルギーの高いベータ線は原子核の近くまで到達して、電磁波を放射して（制動放射線と言います）エネルギーを失うことがあります。ベータ線が物質中でエネルギーを全部失うには非常に多数回の相互作用を行い、また質量が軽く散乱で大きく進行方向が曲げられるためジグザグに進みます。アルミニウムなどの軽い金属、数 mm で停止します。空気中の飛程は高エネルギーのベータ線でも高々数 m です。

### （3）ガンマ線およびX線

ガンマ線はアルファ線やベータ線と異なり直接は電離・励起作用はしないため、物質中で相互作用を起こす確率は非常に低いのです。前述の光電効果・コンプトン効果・電子対生成の相互作用が起こると、1回の作用ですべての、または大半のエネルギーを失うこととなります。光電効果はX線や比較的低エネルギーのガンマ線が起こしやすく、コンプトン効果は中程度から高エネルギーのガンマ線に支配的です。電子対生成は1.02 MeV以上のガンマ線でないと起こりません。前にも述べましたが、これらの過程で生じた高速電子がベータ線と同様に原子を電離・励起します。

ガンマ線の物質との相互作用は荷電粒子のアルファ線やベータ線に比べて小さいため、物質中の透過力は非常に大きいものとなります。放射性同位元素から放出されるガンマ線でも、 $^{60}\text{Co}$ （コバルト60）のように高エネルギーのガンマ線ですと厚い鉛の板でも完全に遮へいすることは難しくなります。

### （4）中性子線

中性子も電荷をもたないので、中性子が原子を電離したり励起したりすることはありません。物質中の原子核との衝突によってエネルギーを失います。衝突によっていろいろな方向にはね返されるので、中性子は物質中をジグザグに進むこととなります。放射化といって、核反応を起こして放射性同位元素を生成することがあります。

中性子は一般的にガンマ線よりも透過力が大きいと言えます。しかしながら中性子とほぼ同質量である陽子と衝突すると、相手の陽子に多くのエネルギーを与えて自身は減速します。水素原子の原子核は陽子1個からできているため、水素を多く含む水やパラフィン中では中性子は透過力を失います。

放射線の物質との相互作用を理解することは、放射線測定に大変重要なことと申しましたが、それと併せてこのような放射線の物質中における透過力に関する挙動も重要なファクタとなります。放射線測定器は一般的に、放射線が入射したことを検知する検出部と検出したものを処理して表示する測定部（表示部、計数部などとも呼ばれます）から構成されます。検出部は特にデザインされたもの以外は、普通は検出器を保護するために金属製またはプラスチック製の容器に収納されています。放射線が検出部まで到達するためには、その容器を透過しなければなりません。ガンマ線を測るなら、適切な厚さのアルミニウムのような金属で囲っても支障はありませんが、ベータ線はいくら薄くても金属では透過する量が減ってしまいます。ベータ線用測定器ではベータ線が検出部に入射する部分（入射窓と言います）をプラスチックなどの軽い元素でできた薄膜で覆います。アルファ線ですと薄いプラスチックでも透過できずに計測できません。アルファ線測定でさらに注意しなければならないことは、入射窓が十分に薄い測定器であっても空気中の飛程が数 cm ですから、線源と測定器の距離を 5 cm も離すと全く測定できないということです。

ここで普通、厚さというと、mm とか cm などの長さの単位で表しますが、同じ長さの厚さでも、プラスチックでの 1 mm と鉛の 1 mm では放射線透過力の観点では全く異なってきます。そこで放射線関連で扱う厚さ（長さではありません）を単位面積当たりの物質の質量（普通は  $\text{mg}/\text{cm}^2$  の単位を使います）で表すことが多いのです。例えば比重 1 のプラスチックの 1 mm は  $100 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 、比重 11.3 の鉛 1 mm ならば  $1,130 \text{ mg}/\text{cm}^2$  ということになります。同じ 1 mm でもプラスチックと鉛では放射線に与える影響はずいぶんと違うことが表現できるのです。空気 10 cm でも  $13 \text{ mg}/\text{cm}^2$  ありますから、放射線の種類によっては無視できないことがお分かりだと思います。

放射線測定器が放射線を検出するには、その検出部を囲う容器を透過する必要があり、特にアルファ線やベータ線のような弱透過性の放射線を測定するときは注意が必要であると述べましたが、いったん放射線が検出器に入ると話は逆になります。アルファ線やベータ線は電離・励起が中心となって相互作用を起こすため、入射すれば高確率で検出部で検知されます。すなわち高い計数効率となります。それに対してガンマ線や高エネルギーの X 線は透過力が強く、せっかく検出器に入射しても、何の相互作用も起こさずに通過してしまう可能性が大きいのです。その割合は、放射線のエネルギーと検出器の大きさによって決まるのですが、一般的にガンマ線はアルファ線

やベータ線に比べて計数効率は低く、低感度であると言えます。

## 10. 放射線測定器

放射線、放射能の性質や特性の中で、特に放射線測定に関係する項目についていくつか説明してきましたが、この項では放射線防護や環境放射線測定にどのような測定器が使われているか紹介していくこととします。しかしながら、いろいろな種類の測定器について、その動作原理や構造、特性などを多くの参考書が扱っていますし、紙面も限られていますので、放射線測定器の詳細についてはそれら参考書を参照いただくこととして、ここでは代表的な測定器の簡単な紹介に留めることにいたします。

### (1) 電離作用を利用した測定器

電離作用で生じた電荷量を測定して、どれくらいの量の放射線であるかを測ります。放射線・放射能発見の歴史のところで述べましたように、ピエール・キュリーが開発した微弱電流計を駆使してポロニウム、ラジウムを分離・抽出に成功しましたが、この微弱電流計の検出部は電離作用を利用した最初の放射線測定器であると言われていいます。電離作用を利用した測定器には気体の電離と固体の電離を利用するものに分けられます。気体を利用するものが電離箱、比例計数管、GM 計数管などであり、固体を利用するものにはゲルマニウム (Ge) やシリコン (Si) などの半導体検出器があります。半導体検出器は厳密には気体中の電離作用とは異なりますが、動作原理を理解するには電離として扱った方が分かりやすく、固体電離箱などとも呼ばれています。

#### <電離箱>

電離箱は 1920 年代に開発が進められたもので、正負の電極間に空気、アルゴン、窒素などのガスが封入されています。気体が電離されても電圧がかかっていなければ、プラスとマイナスの電気はお互いに引き合って、消滅してしまいます (再結合)。電極間に電圧がかかっていると、電子は正の電極へ、プラスの電荷のイオンは負の電極へ移動します。電荷が動くので電流が発生し、放射線が入ったことを検出できます。電子 1 個の電荷は、 $1.60 \times 10^{-19}$  クーロンですから、電離によって生じる電荷は非常に微弱な量であって、簡単に測れるものではありません。したがって感度は低く、通常は 1 個の入射放射線を電離箱で測定することはなく (パルス形電離箱といって個々の放射線を測るように設計された特殊なものもあります)、継続的に電離箱に入射する放射線の量を計測の対象とします。適用する放射線はガンマ線が主で、空間線量の測定や井戸形電離箱といって比較的高い放射能の数量を測定するためのものもあります。電離箱の概念図を図 5 に示します。

### <比例計数管>

電離箱の電極間の電圧を増加させていくと、電離した電子がガスと衝突して電離作用を起こして二次電子が発生し、さらに二次電子が電離を起こすという電子-イオン対生成がカスケード状態となります（電子なだれ）。芯線近くで生じる電子なだれがあまり大きくならないように工夫して、一次荷電粒子のガス中で失ったエネルギーに比例した電気信号を取り出すことができる領域で使用する計数管を比例計数管（英語名をそのままに、プロポーショナル・カウンターとも言います）と言います。比例計数管にはアルゴン、イソブタンなどの気体を封入したものが多く、主にアルファ線やベータ線の測定に用いられます。

### <GM 計数管>

細い芯線（プラス極）とそれを取り囲む円筒をマイナス極とする電極にさらに高い電圧をかけると、芯線近くの強い電界で電子なだれが生じます。この電子なだれは比例計数領域と違って、入射放射線の種類やエネルギーに比例せずに、一定の大きさ（飽和）まで成長するため、放射線の種類、エネルギーに関係なく一定出力の大きな電気的パルスが得られます。これが1928年にドイツのハンス・ガイガーとヴァルター・ミュラーが開発したGM計数管（ガイガー計数管）です。アルゴンガスなどに、放電抑制用にアルコール、ハロゲンガスなどを少量混ぜて封入した計数管です。計数管の一端に雲母（マイカ）の薄膜（2~3 mg/cm<sup>2</sup>程度）で覆った入射窓をもつものが多く、端窓形GM計数管と呼ばれています。端窓形GM計数管の例を図6に示します。端窓形GM計数管はベータ線測定用に設計されたものですが、入射窓を通過できないアルファ線や低エネルギーベータ線は測れません。入射したベータ線は100%計数しますが、ガンマ線はほとんどが透過してしまうため、1%程度の計数効率でしかありません。海外製品には入射窓を設けずにガラスや金属に気体を封入したGM計数管で、ガンマ線の空間線量を測定するためのものもあります。

GM計数管の電極間の電圧をさらに上げていくと、連続放電の領域となり放射線測定はできなくなります。

### <半導体検出器>

半導体検出器は通常のダイオードと同じくp層-空乏層-n層（PIN接合）から構成されますが、ダイオードと異なるのは空乏層が厚いことであり、キャリアが存在しないこの層を荷電粒子が通過すると飛跡に沿って電子と正孔（ホール）の対を生成します。正孔とは、半導体において価電子帯（電子で充満している）の電子が欠落した状態の穴で、相対的に正の電荷を持っているように振る舞いますから、電離作用の電子・イオン対と同じように電気信号として取り出すことができます。従来からSi半導体検出器とGe半導体検出器が広く用いられてきましたが、最近ではCdTeなど