

目次

第1章 放射線の基礎知識

地球ができる前からあった放射線・放射性物質	4
波長の長さや動く速度などさまざまな放射線	5
赤色巨星や超新星爆発により宇宙線を放出	6
放射線の単位はベクレル、グレイ、シーベルト	7
放射線研究でノーベル物理学賞受賞の科学者	8
放射線の性質と利用例－その1：放射線の透過性－	9
放射線の性質と利用例－その2：放射線の電離作用－	16
放射線の性質と利用例－その3：放射線の電離作用－	24
核分裂の連鎖反応を利用した原子力発電	32
身の回りの放射線の強さを検出器で測定	33
測定器は正しい使い方で平均値を出す	34

第2章 放射線の利用

放射線を利用している職業－（医療）放射線科医と放射線技師－	36
医療被ばく低減の目安「診断参考レベル」	42
農業分野における放射線利用－品種改良・害虫の駆除・食品照射－	44
工業分野における放射線利用－その1：半導体の加工－	52
工業分野における放射線利用－その2：性質の改良・非破壊検査－	58
放射線で有害物質を無害化し環境保全	62
科学的研究進むラドン温泉の効能	63
輸血用血液製剤には放射線を事前に照射	64
「ピラミッド透視、長半減期核種の消滅処理など」 ミュー粒子の意外な使い道（その3）	66

第3章 放射線と健康・がん治療

人類は自然放射線と共存して生きてきた	70
進化過程で構築された生体防御システム	71
がん発症までには生体防御の四つの砦	72
DNA 損傷の主役は放射線よりも酸素	73
わずかずつ長期間被ばくなら影響現れず	74

百ミリ Sv 以下ではがん発生率上昇せず	75
日本の原子力作業者の健康影響に関する疫学的調査	76
陽子線がん治療の新たな展開	78
低線量 X 線の全身照射によるがん治療	80
アルファ線でがん細胞を狙い撃ち「量研機構」が新薬剤開発	82
すい臓がんに対する重粒子線の高い治療効果	84

第4章 福島第一原発事故と処理水

緊急作業被ばく量を二百五十ミリ Sv と設定	88
積算線量を考えた避難措置も	89
事故後の放射性物質質量徐々に減少中	90
校庭や公園で遊ぶ子どもたちへの影響	91
コープふくしま陰膳調査で食の安全検証	92
トリチウムって何？何が問題？（その1）	93
トリチウムって何？何が問題？（その2）	95
トリチウムって何？何が問題？（その3）	97
未知の放射性粒子「セシウムボール」を探る（その1）	99
未知の放射性粒子「セシウムボール」を探る（その2）	101
福島第一原子力発電所事故から 10 年：放射線被ばくの影響は？	103

第5章 社会とリスク認知

被ばく線量の表し方は二種類あるので注意	110
新基準値は危険値でなく「管理基準値」	111
リスクの分母をそろえて正確な比較を	112
絶対リスクに比べ大きく見える相対リスク	113
生活習慣の変化で放射線リスクも変わる	114
線量率が下がると発がんリスクも下がる	115
放射線影響蓄積しないとする新仮説も	116
社会的受容性（その1）	117
社会的受容性（その4）	120
福島第一原子力発電所事故から 10 年：原子力への見方はどう変わったのか？	123

原子力 ワンポイント



広く利用されている放射線 ①

原子力産業新聞では、「分かりやすさ」を主眼にして説明する「原子力ワンポイント」コーナーを設けました。今回のシリーズは、「広く利用されている放射線」がテーマです。

理科好きの女子高生「ゆりちゃん」の質問に、ものしり博士の「タクさん」が回答する形式で、米国の著名な学者のアラン・D・ウォルター著「放射線と現代生活」の「アトムとともに暮らす一日」にあるように、日々の生活を豊かにしてくれる放射線について、また、人の目には見えなけれど、私たちの身の周りにおける放射線について、解説します。

できればこのシリーズが、読者の方が、ご家族や知人に放射線について話していただく際の参考になればと願っています。

ビッグバンや超新星爆発などでガンマ線が発生しました。また、放射性物質も作られました。地球ができる前から、放射線は宇宙にあつたので、今でも地球に放射線として降り注いでいます。

タクさん 放射線は宇宙で生まれました。星は一生を終えるときに爆発することがあります。これを超新星爆発と言いますが、この際、非常に波長が短く強烈で、ものを突き抜ける力 きく、電気を帯びていない電磁波が宇宙に放出されます。この電磁波がガンマ線と呼ばれる放射線です。

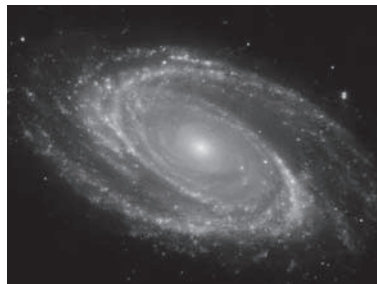
地球ができる前からあつた放射線・放射性物質

（1）宇宙で生まれた放射線

ゆりちゃん 放射線とは何かを聞きたいのですが、その前に、放射線はどのように生まれたのか教えて下さい。

タクさん 観測によると、宇宙は約百三十七億年前にビッグバンと呼ば

銀河のイメージ図。星が爆発・崩壊するたび、宇宙には放射線が放出される（NASA/courtesy of nasaimages.org.）



り、そこから最初の星や銀河が誕生しました。星の内部では水素やヘリウムなどが融合して、より重いホウ素・炭素・鉄などになり、やがて星は寿命を迎えると爆発したり、静かに崩壊して星くずとなります。爆発する場合にはガンマ線が放出されました。

ゆりちゃん 宇宙で作られた放射線はガンマ線だけですか？

タクさん いいえ。この超新星爆発と同時に、鉄よりも重い物質が作られ宇宙にばらまかれたと考えると、この物質はまた集まって星になることを繰り返しますが、星を作った物質の中には、放射線を出すものもたくさんあります。どんな放射線が出るかは、具体的には別の機会に話したいと思います。

ゆりちゃん それでは地球ができる前から放射線はあつたのですか？

タクさん そうです。約四十六億年前に星くずが集まって太陽や地球が生まれましたが、放射線は太陽や地球が生まれる前から宇宙にありました。そして誕生当時の地球は、宇宙から降り注ぐ宇宙線と大地から放出される放射線で満ち溢れていました。小惑星イトカワから帰ってきた小惑星探査機「はやぶさ」も、放射線を浴びながら宇宙を飛行していました。

具体的には、宇宙の誕生と放射線の関係について教えて下さい。

タクさん 観測によると、宇宙は約百三十七億年前にビッグバンと呼ば

る大爆発で生まれましたが、その時の爆発のエネルギーが電子や陽子、中性子に姿を変えました。さらに陽子と中性子が結合して原子核ができ、水素やヘリウムができました。これらが集まって巨大なガスのかたまりにな

（原産協会・政策推進部）

原子力 ワンポイント



広く利用されている放射線 ②

放射線ではありません。

ゆりちゃん 放射線は波長の短い電磁波だけでいいですか？

タクさん いいえ、波長の短い電磁波だけでなく、高速で動く粒子の流れることで発生するX線もあります。

ガンマ線やX線は重きがなく、力強い。に

波長の長さや動く速度などさまざまな放射線

ゆりちゃん 宇宙にもある放射線のガンマ線について教えてください。

タクさん ガンマ線は、原子核（陽子と中性子が結合したもの）から放出される余分なエネルギーで、紫外線（青や紫より波長の短い光）より波長の短い電磁波（電場と磁場が変化する）によって生まれる（波）です。同様ですが、波長が長く、

が放出されることや、壊れた原子核の破片が小さな原子核として飛び出し、もの（高速粒子と呼ぶ）も放射線になります。ゆりちゃん 高速で動きます。

アルファ(α)線 
ベータ(β)線 
中性子線 

く粒子の放射線には、どんな種類の放射線があるのですか？

タクさん アルファ線、ベータ線、中性子線などいろいろな種類があり、宇宙では、太陽で起きている核融合反応や星の誕生や爆発などで作られます。

電波	赤外線	可視光	紫外線	X線/γ線
----	-----	-----	-----	-------

⇒放射線の領域

長い領域～＜波長＞～短い領域

アルファ線は放射性物質（放射線を出すもの）から放出されるアルファ粒子の流れです。アルファ粒子は気球やバルーンの浮揚ガスとして使われているヘリウムの原子核（陽子二個と中性子二個が合成した粒子）と同じで、プラスの電気を帯びています。

ベータ線は、放射性物質の原子核から放出された電子のものがすごく速い流れです。

中性子線は、中性子が原子核から出てくるもので、電気を帯びていない粒子の流れです。

（原産協会・政策推進部）

原子力 ワンポイント



広く利用されている放射線 ③

恒星の内部での核融合と恒星の死である赤色巨星、超新星爆発などにより、放射性元素を含む自然界にある全ての元素がつけられました。このとき宇宙線と呼ばれる粒子線やベータ線などが放出されました。

（3）放射線もばらま

く星の死
ゆりちゃん 星が一

生を終えるときは、超新星爆発以外に何があるのですか？

タクさん 太陽のように輝く恒星の一生は重さ（質量）によって変わります。超新星爆発は、太陽のほぼ八倍より重い恒星の死ですが、それより軽い（太陽の八倍程度以下）の恒星は、晩年になると膨張し、巨大で希薄なガスの集まりである「赤色巨星」になります。半径は元

に放出されるガスは何ですか？

タクさん 恒星の主な成分である水素に加えて、恒星の中で新たに、原子核同士がぶつかって融合する反応（この合道まで達し、地球が太陽（赤色巨星）の中に入ってしまう可能性が高いと考えられています。宇宙に放出されます。

赤色巨星や超新星爆発により宇宙線を放出

す。赤色巨星になると、外側のガスが徐々に宇宙空間に逃げ出し、また、ガスを放出しつづけた後には、色とりどりに輝く「惑星状星雲」になります。ゆりちゃん 赤色巨星になったときに宇宙の重い原子核に吸収さ

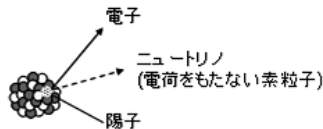
れると鉛などの、より重い元素が作られます。このとき中性子が過剰

になることがあります。中性子が過剰になると、中性子が電子と電荷を持たない素粒子であるニュートリノを放出し、陽子核が一気に大量の中性子を吸収します。中性子が過剰になった原子核は、「崩壊」と呼ばれ、この崩壊により重い元素への変化（↓中性子の吸収）を繰り返すことになります。

近くでおきた核融合反応で余った中性子

中性子が原子核に吸収される

中性子が過剰になると、中性子が電子とニュートリノを放出し、陽子に変身する（ベータ崩壊）



【元となる原子核①】

【原子核①より陽子が一つ多い原子核②】
→ 原子番号が一つ大きい元素が合成された！

ゆりちゃん ところで、超新星爆発で放出される放射線を出す物質は何ですか？
タクさん 自然に作られるウランまでの放射性物質（原産協会・政策推進部）

タクさん 自然に作られるウランまでの放射性物質（原産協会・政策推進部）

ゆりちゃん ところで、超新星爆発で放出される放射線を出す物質は何ですか？

タクさん 自然に作られるウランまでの放射性物質（原産協会・政策推進部）

タクさん 自然に作られるウランまでの放射性物質（原産協会・政策推進部）

タクさん 自然に作られるウランまでの放射性物質（原産協会・政策推進部）

原子力 ワンポイント



広く利用されている放射線 ④

放射能の強さはベクレル(Bq)、放射線の量はグレイ(Gy)とシーベルト(Sv)で表します。放射線は種類により人への影響度も変わるので、シーベルトは、人がどんな放射線を受けたかをいちいち考えなくても、同じ数値ならば人への影響も同じとわかる便利な単位です。

(4) 見えない放射能・放射線を測る単位って何

ゆりちゃん 放射能と放射線はどう違うのですか？

タクさん ウランなど天然に存在する元素の幾つかは、原子核が自然に壊れて別の元素になるときに「放射線」を出します。放射線を出す物質を「放射性物質」、放射性物質が放射線を出す能力を「放射

能の強さを表す単位はベクレル、グレイ、シーベルト

壊することを言います。

「能」と呼びます。懐中電灯に例えると、放射性物質が電球であり、放射線が光になります。

ゆりちゃん 光の強さを表す単位はカンデラで表されますが、放射線を出す単位は何ですか？

放射線の単位はベクレル、グレイ、シーベルト

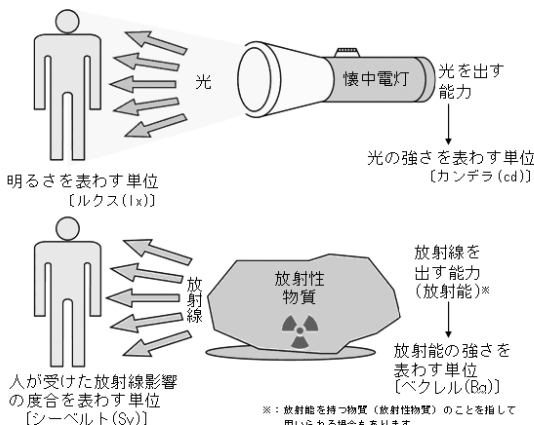
放射能の強さを表す単位はベクレル(Bq)で表されますが、放射線が吸収された時に1Gyと表しますが、同じ量のエネルギーが吸収されても、放射線の種類によって人体への影響が大きく違ってしまいくので、その影響の度合を考慮した単位にシーベルト(Sv)があります。

タクさん 放射能の強さは「一秒間に何個の原子核が崩壊して放射線を出すか」という量に着目してベクレル(Bq)という単位を使います。つまり、1Bqとは、一秒間に一個の原子核が崩壊することになります。

お酒に例えると、

グレイがミリリットル(ml)になりますが、同じ100mlでもビール100mlとウイスキー100mlでは酔い方がまったく違います。そこで、同じ程度のほろ酔いになる量をビールなら何ml、ウイスキーなら何mlと決めて、かりにこれを一単位とします。逆のいい方をしますと、同じ100mlでもウイスキーはビールの六倍強いという具合に、お酒の種類によって決まった係数をかけてから比較するのです。この単位がSvになります。

放射能と放射線



出典：資源エネルギー庁「原子力2008」

ゆりちゃん GyとSv

は放射線の種類により違う数値になるのですか？
タクさん X線やベータ線などと比べると、より重いアルファ線や中性子線は同じエネルギーを吸収した場合でも人体への影響は大きく、およそ五〜二十倍です。また、放射線の同じエネルギーを吸収しても、がんの起こりやすさは体の部分で異なります。

(原産協会・政策推進部)

原子力 ワンポイント

広く利用されている放射線 ⑤



レントゲン



ベクレル

(5) 誰が放射線を発見したのですか
ゆりちゃん 放射線は目に見えず、感じる

レントゲンがX線を発見し、ベクレルが放射線を発見し、キュリー夫人は放射線が放射性元素から出されることを発見しました。レントゲンはノーベル物理学賞を受賞しています。

ことも出来ないのに、誰がどのように発見したのですか？

タクさん 放射線は一九〇五年十一月八日、レントゲン博士が真空放電の実験をしているときに、放電管が黒い紙で覆われていたにもかかわらず、離れた場所にある蛍光板が光っているのを偶然発見しました。博士は、この黒い紙を透過する謎の光が写真乾板を感光させることや、手をかざ

すと手の骨の部分だけが陰になることを発見し、この光を未知の光という意味で「X線」と名づけました。一九〇

このことによりベクレルはウラン化合物がX線に似た放射線を出していることを発見し、

放射線研究でノーベル物理学賞受賞の科学者

一年には第一号のノーベル物理学賞を受賞しています。

ゆりちゃん X線以外の放射線は誰が発見したのですか？

タクさん レントゲン博士がX線を発見した翌年の一九〇六年、

にアルファ線・ベータ線・ガンマ線があることは誰が発見したのですか？

タクさん 一九〇八年にラザフォードがウランから出る放射線には少なくとも二つの種類（アルファ線とベータ線）があることを発見し、

一九〇〇年にはウィットマンが第三の放射線（のちにラザフォードがガンマ線と命名、電磁波であることが示された）を発見しました。その後、ラザフォードは

一九〇八年にアルファ線がヘリウムイオンであることを発見、アルファ線の散乱実験を

行って一九一一年にはウラン化合物から出る放射線の強さを計った結果、ウラン化合物の放射線の強さが、含まれるウランの量に比例していることから、放射線を出す源がウラン原子であることを突き止め、放射線を出す能力を「放射能」と名づけました。

ゆりちゃん キュリー夫人は何を発見したのですか？

タクさん 放射線が放射性元素から出されることを発見しました。キュリー夫人は一九一一年に「ラジウムとポロニウム」の発見、ラジウムの分離とその性質および化合物の研究」でノーベル化学賞を受賞しました。（原産協会・政策推進部）



キュリー



「原子カワンポイント」

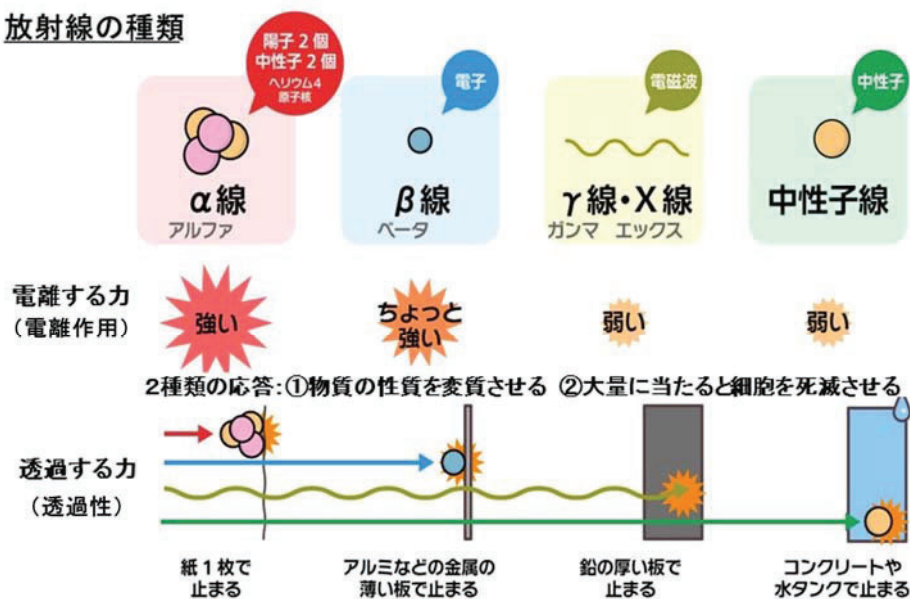
あなたに伝えたい放射線の話 (10)

放射線の性質と利用例ーその1：放射線の透過性ー



- 放射線は、物質を透過する性質を持っています。
- この透過性を利用した放射線利用として、X線撮影、医療診断CT、医療診断PET、非破壊検査(空港にある手荷物検査装置)などを挙げることができます。

放射線の種類



(参考:放射線いろいろ—Higgs Tan)



放射線博士: 前回までの話では、医療、農業、工業のように様々な分野における放射線の利用事例を紹介しました。今回は、視点を変えて、放射線が持つ特性（①物質の中を通り抜ける能力「透過性」、②物質を電離する能力「電離作用」）を軸にし、放射線の利用事例を整理することにしました。

本コラムではまず「①透過性」に的を絞って解説します。



リケジョさん: 私は、分野別に放射線の利用例をまとめれば十分と思うのですが、どうして、放射線の性質で利用例を見直す必要があるのですか？



放射線博士: 実は、令和3年度より、中学校では新学習指導要領が全面実施され、理科の授業において、「放射線の性質と利用にも触れること」が求められているのです。このため、放射線の性質に沿って利用例をまとめてみれば、参考になるのではないかと思います。



リケジョさん：博士の考えはよくわかりました。それでは、「①透過性」について教えてください。



放射線博士：上記の図をもう一度みてください。

放射線には、原子よりも小さな粒子線と波長の短い電磁波の2種類があります。粒子線には、アルファ（ α ）線、ベータ（ β ）線、中性子線などがあり、電磁波には、「エックス（X）線やガンマ（ γ ）線」ⁱがあります。いずれも物質を通り抜ける能力があります。これを「透過性」といいます。

α 線はほかの放射線、例えば β 線に比べると透過力は弱く、薄い紙一枚で止まります。 β 線は紙では通り抜け、アルミニウムなどの薄い金属板で止まります。電磁波である γ 線やX線は、アルミニウムなどの密度の小さな金属板では通り抜け、密度の大きな鉛や厚い鉄の板で止まります。

一方、電気を帯びていない中性子線は、他の放射線とは異なり、アルミニウムや鉛のような金属は簡単に透過してしまうという特殊な能力を持っていますが、水やコンクリートにぶつくと止まってしまいます。



リケジョさん：なるほど、不思議ですね。例えばボールを投げた時、他の物にぶつかればボールは止まりますが、放射線は物をすり抜けることができるのですね。



放射線博士：その通りです。ところで、放射線は目に見えないのに誰が、どうやって見つけたのでしょうか？実は、その答えが、放射線の有効利用に新たな道を切り開くことになったのです。



リケジョさん：確かに、それも不思議ですね。誰がどうやって見つけたのか、教えてください。

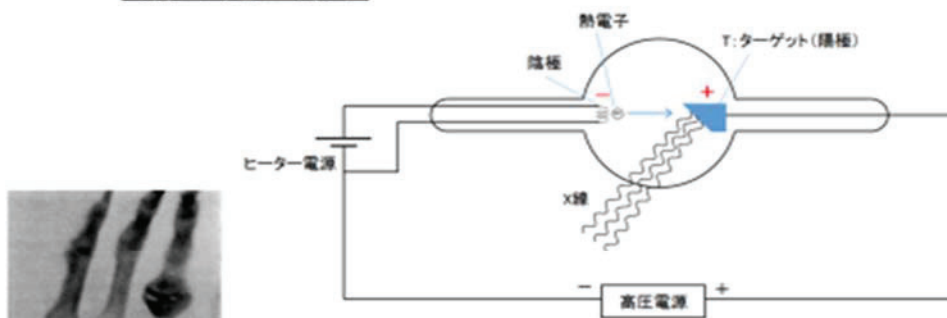


放射線博士：今から約120年前の1895年、ドイツのレントゲン博士（当時ヴェルツブルグ大学教授）は、真空状態にしたガラス管に数千ボルトの電圧をかけて放電させるという実験を行っている時、不思議な光の存在に気づきました。次頁の図を見てください。放電管は、厚い黒色の紙で覆われているにもかかわらず近くに置いてあった蛍光物質が、発光していたのです。博士は、「目には見えない物を突き抜ける不思議な光が出ているのでは？」と考えて、これをX線と名づけました。

博士は、しばらくしてから奥さんに、X線が流れていると思われる道の途中に手をかざしてもらいました。その後で、手の下に置かれていた写真乾板を現像してみると、骨と指輪だけの写真が撮れました。まさに世界で最初のレントゲン写真が撮られた瞬間です。

ⁱ エックス（X）線とガンマ（ γ ）線はいずれも波長の短い電磁波（光と同じ性質）である。両者は兄弟のようなもので、特徴がとても似ており、発生の仕組みによって区別されている。すなわち、X線は、原子核の外側で発生するので「原子核外起源の電磁波」、 γ 線は、原子核の中から放出される電磁波なので「原子核内起源の電磁波」と呼ばれている。

X線の発生原理



レントゲンが初めて撮影した
妻の手のエックス線写真
出典：北島 隆『放射線障害の認定』
会原出版 1971 年

X線は真空中の電極間に高電圧を加えて、
その間を電子が飛んで電極にぶつかった
時に発生します。

(引用：初めてのX線発生装置「Lab BRAINS-アズワン」)

このニュースは世界を驚かせました。人々の間では手のレントゲン写真を撮ること（以下「X線撮影」という）がはやったそうです。レントゲンは1901年、第1回のノーベル物理学賞を受賞しました。

X線には、大きな問題点もあります。大量に浴びると白血病やがんといった病気になる恐れがあります。X線が発見されたころは人体への影響がわかっておらず、学者や助手が病気になることが多くありました。ノーベル賞を2度も受賞したフランスの科学者マリー・キュリーも、放射線を浴び続けたことで白血病になって亡くなりました。

そのため、放射線利用にあたっては、①線源からの距離をとり、②放射線の遮蔽対策を施し、③照射時間は短くする、という外部被ばく防護の3原則をしっかり守って、放射線の悪い影響を防ぐ環境の整備が進められました。

現在は放射線の利用に際し、施設や設備の適切な管理や、放射線作業に従事する人々の被ばく線量を確実に測定することにより、安全を保つよう法律が定められています。わが国では、放射性物質や放射線発生装置などによる放射線の利用は、放射線障害防止法および原子炉等規制法のほか、労働安全衛生法、医療法などいろいろな法律によってきびしく規制されています。



リケジョさん：放射線の安全管理に気をつけてうまく利用すれば、他の方法では得られない有効利用の道が開けるということですね。ところで、透過性を利用した事例はX線撮影以外にもあるのですか？



放射線博士：もちろんです。下記の表を見てください。

放射線の性質と利用例

放射線の性質：透過性

物質を透過するため、生体そのものへの影響を小さく抑えながら、その細部や内部の状態を調べることができます。

放射線の利用事例

⇒X線撮影、X線CT（コンピュータ断層撮影）、PET（陽電子放出断層撮影）、空港にある手荷物の非破壊検査、工場で金属板の厚さを測ることなど。

（詳しくは後述の解説を参照ください。）



リケジョさん：放射線の性質を軸にしてみるのも面白いですね。博士、ありがとうございました！

（原産協会：人材育成部）

「解説：透過性を利用した放射線の具体的な利用例」

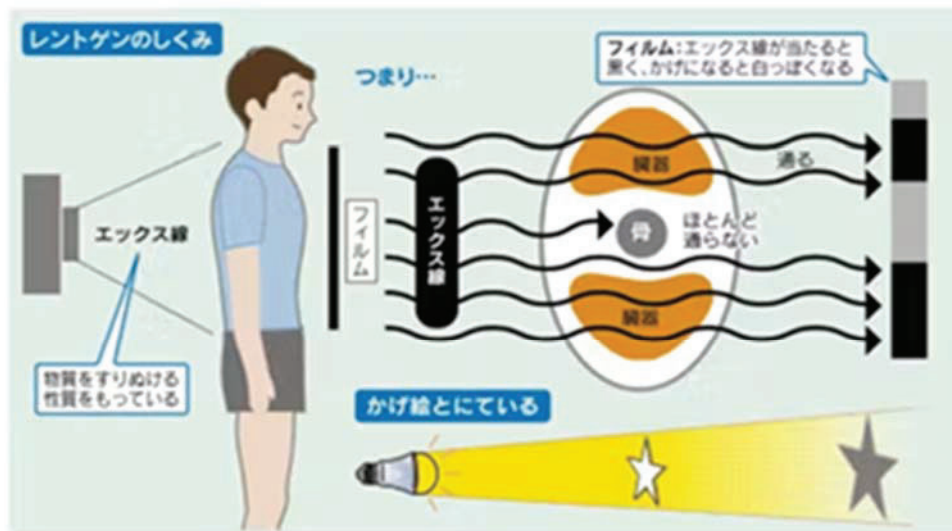
1. X線撮影の原理とその応用

（1）X線撮影の原理

X線は光の一種です。人の体は、とても小さな粒子である「原子」というものから構成されています。原子と原子の間には非常に小さなすき間があって、波長の短いX線はそこを通り抜けることができます。しかし、骨のように密度が高い物質は原子がぎゅうぎゅうにつまっっていて、通り抜けようとするX線をじゃまします。

X線で撮影した写真（以下「X線写真」という）は影絵のようなものです。光を物に当てると、後ろの壁に影ができます。X線写真では、専用のフィルム（写真乾板）が用意されており、X線が当たると黒く、当たらない部分は白くなりますⁱⁱ。それでX線写真は、歯や骨は白っぽく、筋肉などは黒く写ります（次頁図参照）。

ⁱⁱレントゲン博士の時代は「写真乾板」という放射線に反応する特殊な液体が塗られたガラス版を使用していた。そのため、骨や金属の指輪などはX線の進行を阻害して透過させないようにするため写真の上では黒く見えており、現在見慣れているレントゲン画像と比べると白黒が逆転した「反転画像」になっていることに注意する必要がある。



(参考: レントゲンでなぜ体の中が見えるの? Style.Nikkei.com)

(2) X線撮影の応用: 「コンピュータ断層撮影 (CT)」と「陽電子放出断層撮影 (PET)」

レントゲンによるX線の発見によって医療における診断技術が大きく進歩しました。特にがんの診断では、X線撮影を応用したコンピュータ断層撮影 (CT) と、ガンマ線の透過性を利用した陽電子放出断層撮影 (PET) を組み合わせた「PET-CT」システムを使った検査が基本となりつつあります。

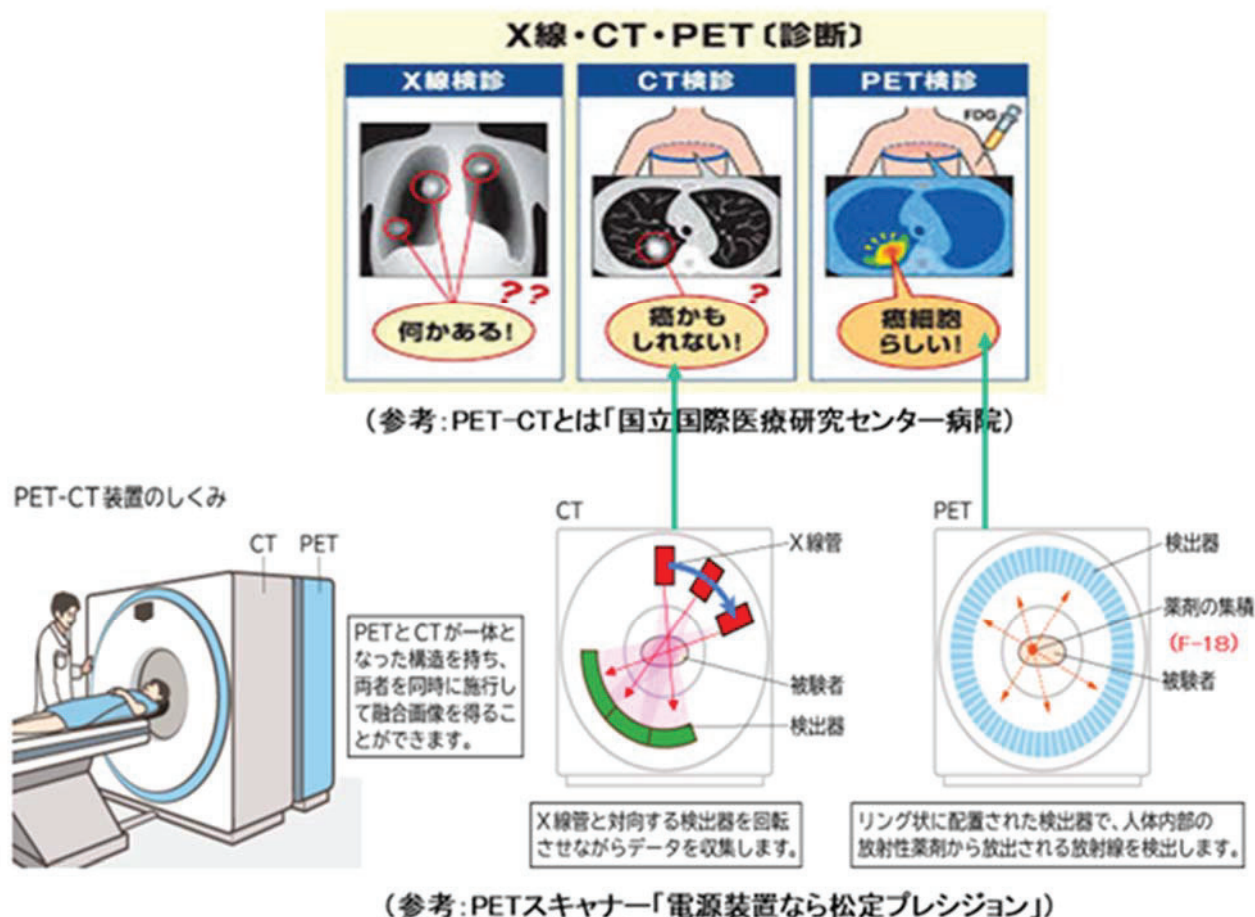
まず、コンピュータ断層撮影 (CT) 装置について説明します。

CT装置では、X線を、患者の体外から広範囲に照射します。そして、X線を照射したときの「透過率」から、コンピュータを使って身体の高切りの画像を作り、その画像を分析することでがん細胞の位置や大きさを調べることができます。

次に、陽電子放出断層撮影 (PET) 装置を使った診断の方法について説明します。

がんなどの悪性腫瘍は多くのブドウ糖を吸収します。そのため、ブドウ糖にフッ素-18 という「放射性同位元素ⁱⁱⁱ」をくっつけた特殊な薬剤を患者の体内に注射すると、がん細胞にたくさん集められます。がん細胞に取り込まれたフッ素-18 から、体外に透過してくるガンマ線を、コンピュータで画像処理することにより、がん細胞の位置や大きさ、進行度合いを調べることができます (次頁図参照)。

ⁱⁱⁱ 原子番号が同じで質量数 (原子核を構成する陽子と中性子の個数の合計) の異なる元素を同位元素という。この同位元素のうち、放射線を放出する能力を持つものを放射性同位元素と呼ぶ。



2. 非破壊検査 (空港にある手荷物検査装置など)

手荷物のすべてを動くベルトに乗せて運び入れる箱型の検査機は、X線を照射して検査官がスクリーンに写しだされた内容を監視するものです。金属製の刃物、ピストルなど危険なものを発見することが目的です。

上で述べたように、X線は、物質を透過することができ、透過する間にエネルギーを失っていく性質があります。失うエネルギーの量は物質ごとに異なります。このことをうまく利用すると、写し出された画像から金属製の危険物の存在を調べることができます。

ちなみに、空港にある手荷物検査機からは、少量ですがX線が出ていますから、手荷物検査を受けながら傍らを通る人たちも、わずかにこれから出ているX線を受けます。測定結果によると、1回の検査で、せいぜい100分の1マイクロシーベルトくらいの被ばくにすぎません。

日本人が日常生活で受けている自然放射線量は、1日当たり約6マイクロシーベルトであり、両者を比較すれば心配する必要のないことがわかります (次頁図参照)。

手荷物のX線検査例



(引用: 政府広報オンライン)



(引用: (株)サンモニター)



「原子カワンポイント」

あなたに伝えたい放射線の話 (11)

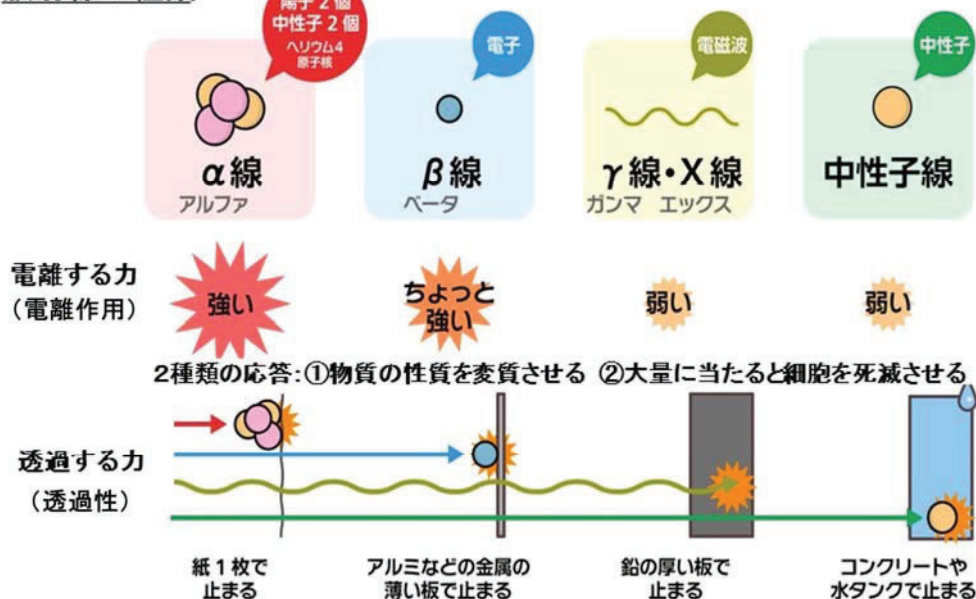
放射線の性質と利用例ーその2：放射線の電離作用ー

応答①「物質の性質を変質させる」



- 放射線は物質を透過する際、その物質を構成している原子にエネルギーを与えて、電子をはじき飛ばします。これを「電離作用」といいます。
- この電離作用が起これと、二つの現象が表れます。
 - ① 物質の性質を変質させる
 - ② 大量に当たると細胞を死滅させる
- 「物質の性質を変質させる」性質の利用例
 - ① 丈夫な素材の開発
 - ② ダイヤモンドに人工的に色を付ける
 - ③ 花や食品の品種改良

放射線の種類



(参考:放射線いろいろ—Higgs Tan)



放射線博士: 前回のコラムでは、放射線が持つ特性として「物質の中を通り抜ける能力（透過性）」に注目し、放射線利用の事例を整理しました。ここで質問ですが、放射線が私たちの体やいろいろな物質を透過すると、どんなことが起こるのでしょうか？



リケジョさん: 高校の理科の授業で、「放射線と物質を構成する原子や分子は、互いに影響を与え合う。これを放射線と物質の相互作用という。」と習った記憶があります。



放射線博士：その通りです。さらに付け加えると、放射線と物質の相互作用といって、放射線が物質を通過する時に物質を構成する原子や分子にエネルギーを与えて電子を弾き飛ばすことを電離作用と呼んでいます。もう一度、放射線の種類と放射線の性質をとりまとめた上記の図を見てください。

「透過性」以外のもう一つの特徴が「電離作用」と呼ばれるものです。この電離する力の最も強い放射線はアルファ（ α ）線であり、ちょっと強いのがベータ（ β ）です。一方、電磁波のガンマ（ γ ）線とエックス（X）はかなり弱く、前回のコラムで紹介した放射線の「透過力」とは真逆の関係にあります。

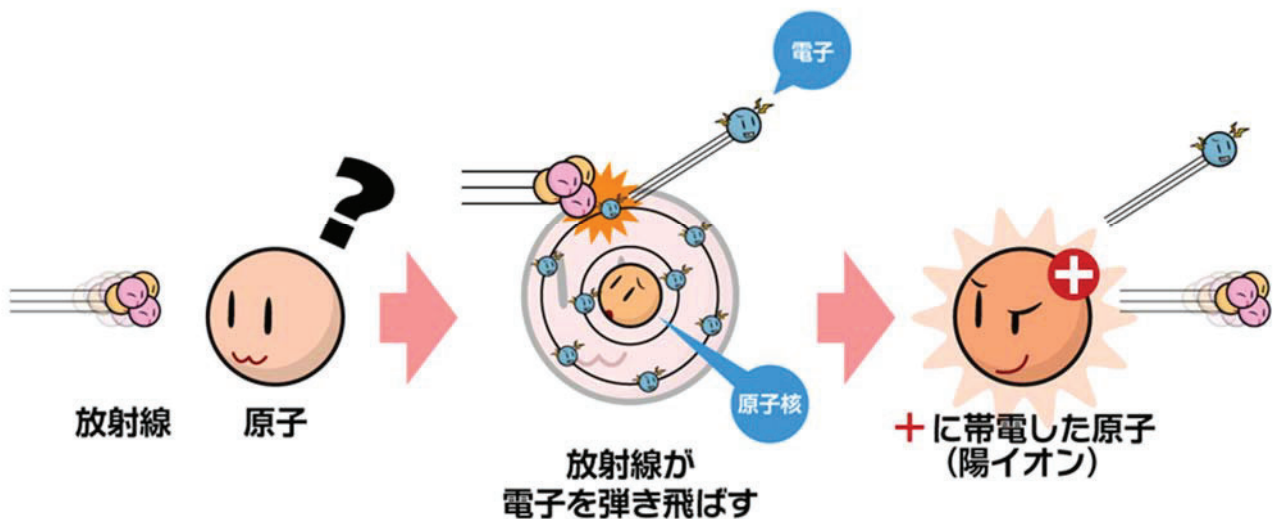


リケジョさん：話の途中ですみませんが、電離作用という言葉を知らない人もいますので、もう少し具体的に説明してくれませんか。



放射線博士：わかりました。下記の図を見てください。

放射線の電離作用



（引用：放射線いろいろ—Higgs Tan）

すべての物質をつくる原子は、原子核が中心にあり、そのまわりをマイナスの電気をもつ電子がまわっています。

放射線は、物質の中を通過するときに、もっているエネルギーをその物質に与えるという特徴があります。具体的にいえば、空気や水、ゴムやプラスチック（高分子材料）、および生物の体などに当たったときに、これらを構成している原子から、原子核の周りをまわっている一番外側の電子をはじき飛ばしてしまうのです。電子はマイナスの電気を帯びているので、原子から電子がはじき出されると、マイナスの電気が減って、原子全体としてはプラスの電気を帯びることになります。このように、プラスの電気をもつ原子とマイナスの電気をもつ電子に分かれることを「電離」といいます。こうして放出された電子は、周辺の原子にさらに電離を生じさせます。

ところで、電子は、原子と原子をつなぐ糊（のり）のような役割ももっています。その糊がなくなってしまうと、結びついていた原子がばらばらに分離してしまいます。水素と酸素の2種類の原子からできている水のような単純な物質では、分離してもすぐに再結合してもとに戻ります。しかし、高分子や生物の細胞のように、複雑な物質が大量の放射線を浴びて、いくつもの分離が同時に起こってしまうと大変です。再び結合しようとしても間違った原子とつながってしまい、突然変異が起きて、性質の違う物質に変化することがあるのです。



リケジョさん：「物質の性質を変化させる」というと凄いことのように感じますが、どのようなイメージが湧かないので、具体的にどのようなところに利用されているか教えてください。



放射線博士：私は以前に本コラムで、医療・農業・工業および文化財と環境保全の各分野で、放射線がどのように利用されているか紹介しました。今回は、「電離作用によってさまざまな物質の性質を変化させる」という「放射線の性質」に焦点を当てて整理し直してみましよう。下記の表を見てください。丈夫な素材の開発やダイヤモンドの色付け、花や食品の品種改良など、私たちのくらしのいろいろなところで利用されています。

放射線の性質と利用例

放射線の性質：電離作用 ①様々な物質の性質を変化させる

局所的に大きなエネルギーを付与してさまざま物質の性質を変化させることにより、これまでの技術では製作が難しかった丈夫な素材の開発や品種改良などができます。

放射線の利用例

- ① 丈夫な素材の開発（自動車のタイヤの強度を高めたり、ラケットのガットを切れにくくする）
- ② ダイヤモンドに色を付ける
- ③ 花や食品の品種改良

（詳細は後述の解説を参照ください）



リケジョさん：今回は、「細胞を死滅させる」をテーマに説明していただけることを楽しみにしています。

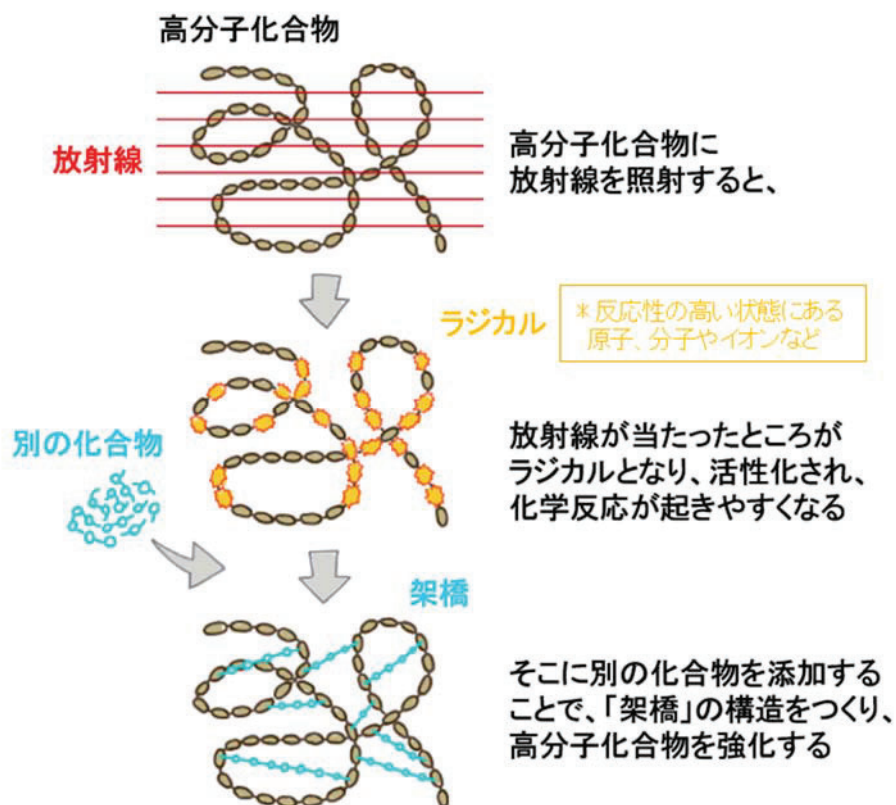
（原産協会：人材育成部）

「解説：物質の性質を変化させる性質を利用した放射線の具体的な利用例」

1. 丈夫な素材の開発

プラスチックやゴム、ナイロンなどの合成繊維は、小さい分子がたくさん並んでできており、「高分子化合物」と呼ばれています。

車のタイヤはゴムでできていますが、天然のゴムでは弱いためそのままでは使用できません。そこで、ゴムに放射線を照射します。すると、ゴムの分子がくっつきあって橋を架けたような状態になり、網目のような構造になってゴムの流動性が抑えられ、位置ずれなどを防ぐことができます。これにより、ゴムシートの厚みを薄くすることができ、材料コストの低減と、タイヤの軽量化、高品質化が可能となりました（下記図参照）。



（参考：多田将の放射線について考えよう）

古いタイヤはドーナツ形をしていて、接地面が丸くなっていましたが、現代のタイヤは接地面が平らになっています。タイヤは風船のように空気を入れて膨らませますから、本来は丸くなるのが自然で、平らにするにはそれなりの技術が必要です。

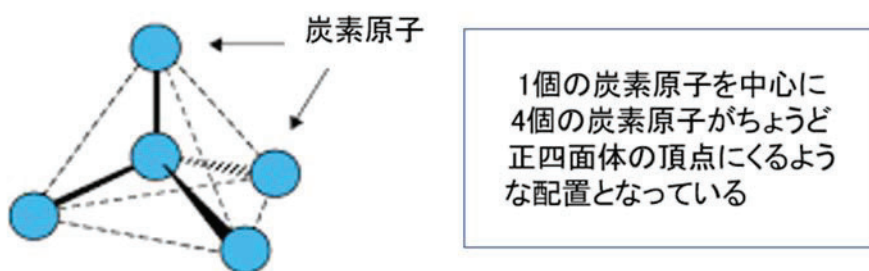
少し細かな説明になりますが、このような形状を保ちつつ強度を確保するためにタイヤは、「カーカス」、「ベルト」、「トレッド」という3層構造になっています。トレッドは地面に接触する層、つまりわれわれが目に見える部分であり、カーカスとベルトはタイヤの強度を保つ補強層です。特に、このカーカスには、架橋と呼ばれる処理が施されています。まさに橋をかけるが如く別の分子を結合してやることで、材料の強度を上げているのです。現在ではほとんどのタイヤが、この放射線照射の工程を経て作られています（下記図参照）。



※タイヤのゴムの流動性を制御するため、タイヤの骨格の役割を持つ「カーカスプライ」や、タイヤの内部にはりつけて空気の透過を抑制する「インナーライナー」への放射線照射が行われている
(参考：タイヤゴムシートへの電子線架橋の利用について (NHV コーポレーション))

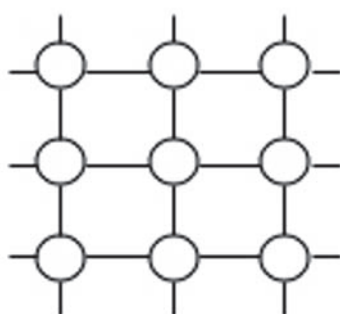
2. ダイヤモンドに人工的に色を付ける

ダイヤモンドは、炭素からできていて、1 個の炭素原子を中心に 4 個の炭素原子がちょうど正四面体の頂点にくるような配置の繰り返しによって結晶が作られています（下記図参照）。



(参考：私立・国公立大学医学部に入ろう！ドットコム)

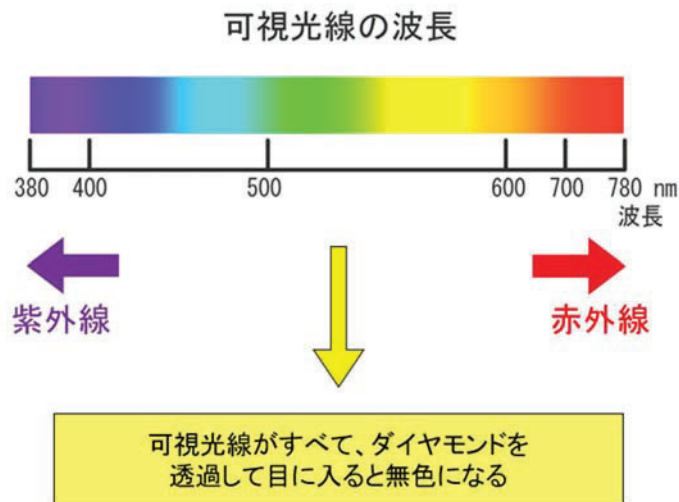
となり合う炭素原子同士は、結びつくために必要な手（電子）を双方の原子が共有することでつくられています。これを二次元で示すと、各炭素原子がそれぞれ 4 本の手（電子）を使って、となりの炭素原子と結合しているように表されます（下記図参照）。



結晶格子

(参考：中央宝石研究所 HP)

このように炭素原子が正確に配列した結晶では、可視光線（目に見える電磁波）が全部透過するので、ダイヤモンドは無色になります（下記図参照）。



（参考：「らでい」レポート～中央宝石研究所編～）

しかし、ダイヤモンドの構造に以下のことが起こると、色がついて見えるのです。

- ① 炭素（C）以外の、窒素（N）、水素（H）、ホウ素（B）などの元素が結晶格子に入り込んだ時
- ② 結晶格子中に炭素原子の抜けた穴があったり、外からの力で一部分が壊れたり歪んだりしている時

この二つの内、放射線照射は②を起こすのです。すなわち、放射線という強いエネルギーを、ダイヤモンドにあてると、電離作用が起こります。すると、結晶格子の並びに変化が生じ、その変化が生じた場所（カラー・センター「着色中心」という）で、可視光線の一部が吸収されます。それによってヒトの目には色がついているように見えるのです。例えば赤色・橙色・黄色の「赤色部」が吸収されると、青色の光線だけがはね返ってきてダイヤモンドは青く見えるのです。

天然のダイヤモンドと人工的にカラー処理を施したダイヤモンドは、外観上は同じ色であっても市場での価値には非常に大きな差があります（下記図参照）。外見では区別がつかなくても、両者を誤りなく鑑別することは、宝石の価値を定めるうえで重要な問題とされています。



（参考：「らでい」レポート～中央宝石研究所編～）

3. 花や食品の品種改良

(1) ゴールド二十世紀梨の作成

最初に紹介するのは「ゴールド二十世紀梨」の作出です（下記図参照）。



「二十世紀梨」



「ゴールド二十世紀梨」

放射線育種によって作られた耐黒斑病
の性質をもつ「ゴールド二十世紀梨」

(参考：放射線育種場 テクニカルニュース No. 29 (1986))

茨城県常陸大宮市にある農業環境技術研究所のガンマ線照射場（ガンマフィールド）では、半径100mのガンマフィールドの中央に設置された塔に ^{60}Co （コバルト 60）線源ⁱを装備し、ここからガンマ線が「二十世紀梨」へ照射されました（下記図参照）。



ガンマフィールドの全体図

(参考：農水省農業生物資源研究所ホームページ)

「二十世紀梨」は、非常に良い品質を持ち、青梨（皮が青色系の梨）の主要品種として栽培されてきましたが、梨黒斑病という病気にかかりやすく、それを防ぐために、ガンマ線の照射により突然変異を得る実験が行われたのです。ガンマフィールドは1962年から照射試験を開始し、1981年に黒斑病に全くかかっていない一本の枝が発見され、1990年に耐黒斑病の性質を持つ「ゴールド二十世紀梨」が誕生しました。

ⁱ ^{60}Co （コバルト 60）はコバルトの同位体の一つで、ガンマ線を放出する。このコバルト 60 を放射線源として使用するものをコバルト 60 線源という。なおガンマ線は放射線の一種で、波長の短い電磁波である。

(2) イオンビームを使った花卉（観賞用の草花）の作成

放射線として従来のガンマ線ではなく、イオンビームⁱⁱを使って品種改良する技術（以降「イオンビーム育種」という）の開発が、純国産技術として 1987 年から始まりました。

その一環として、日本原子力研究所高崎研究所（現・量研機構高崎量子応用研究所）は、世界最初の材料・バイオ研究のための専用施設として設置されたイオン照射研究施設“TIARA”を活用し、世界に先駆けてイオンビーム育種技術を確立すると同時に数多くの花卉（かき）を作出してきました（下記図参照）。



「かがり弁」を持った菊の新品種

**左上:「かがり弁黄」 右上:「かがり弁白」
下:「かがり弁赤紫」**

（参考：愛知県農業総合試験場資料）

愛知県農業総合試験場と共同して創作した華麗な花びらを持つ「かがり弁ギク」です。この品種は、改良前の親ギクに炭素イオンビームを照射して突然変異を誘導して作られ、花卉の先端に複数の突起を生じさせ、花の色も白、赤紫、黄色の3色を発現させた珍しいタイプの花卉となることで注目されました。特に花卉が白の「かがり弁白」は、2018-2019 年のジャパンフラワーセレクションで「ベストフラワー（優秀賞）」を受賞しました。

ⁱⁱイオンビームは電離放射線の一種である。炭素やヘリウムなどのイオンを、サイクロトロンなどの加速器を使って加速した流れである。



「原子カワンポイント」

あなたに伝えたい放射線の話 (12)

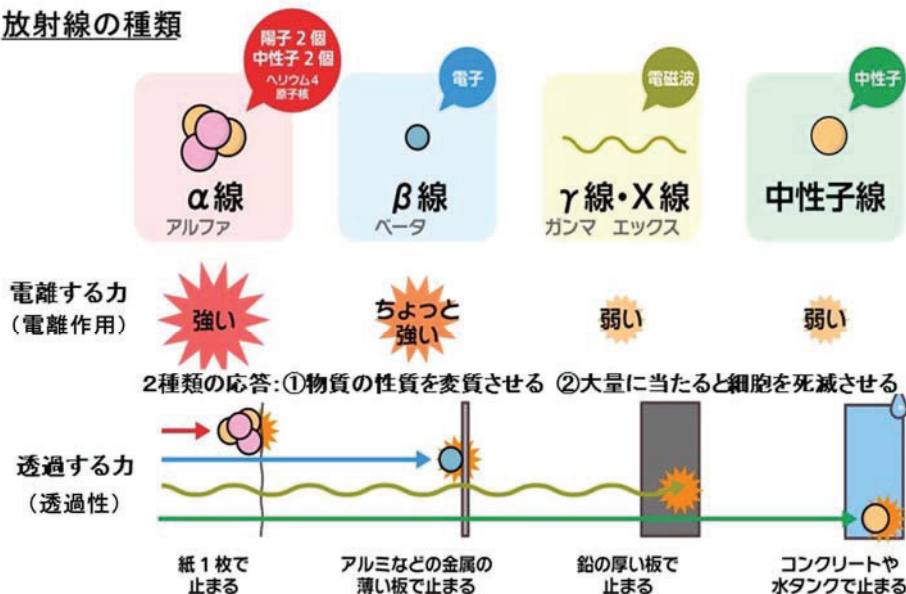
放射線の性質と利用例ーその3：放射線の電離作用ー

応答②「大量に当たると細胞を死滅させる」



- 生き物は、動物も植物も微生物も、すべて細胞からできています
- 細胞の中には、遺伝情報を記録している物質 (DNA) が含まれており、生きるために必要なタンパク質の生成や増殖する指令、を与える重要な役割を果たしています
- 放射線は少ない量であっても DNA を傷つけますが、大量になると DNA にできた傷の修復ができなくなり、細胞が死滅します
- この「細胞を死滅させる」放射線の性質が、さまざまな分野で利用されています
 - ①がん細胞の治療
 - ②注射器などの滅菌
 - ③ジャガイモの芽止め
 - ④害虫の駆除
- 上述分野で照射する放射線量は、数グレイ (Gy) ～数十キログレイ (kGy) の範囲です

放射線の種類



(参考:放射線いろいろ—Higgs Tan)



放射線博士：上記の図を見てください。放射線は物質を通過する際、その物質を構成している原子にエネルギーを与えて電子を弾き飛ばします。これを電離する力（電離作用）といいます。この力によって、①物質の性質を変質させる、②大量に当たると細胞を死滅させる、ことができます。

前回のコラムでは「物質の性質を変質させる」力について解説しました。今回は、大量の放射線が「細胞を死滅させる」力に注目し、人の健康に害を及ぼす「がん

細胞、ジャガイモの芽ⁱ、注射器などに付着した細菌、および害虫」を退治する武器として、放射線が有効に利用されている事例を紹介します。



リケジョさん：「放射線が当たると細胞が死滅する仕組み」について教えてください。



放射線博士：その前に先ず「細胞の構造」を見てみましょう。下記の図1を見て下さい。

すべての生物（動物、植物、微生物ⁱⁱ）のからだは、細胞膜につつまれた細胞からできています。そして、すべての生物は、少なくともひとつ以上の細胞から成り立っています。細胞とは生物の身体をつくる小さな部屋のようなものです。細胞に放射線が当たると、放射線、および細胞を構成する原子からたたき出された電子がそれぞれ、細胞の中をでたらめに走り回り、細胞内小器官（遺伝情報を含む「核」など）に傷をつけます。その結果、細胞が自己増殖できなくなったり、生体に不可欠なタンパク質をつくることができなくなったりして、最悪の場合には細胞が死んでしまいます。

そして、この細胞死が起こる頻度に大きく影響するのが「放射線の強さ」です。細胞は、大量の放射線にあたると「死滅」するのです。

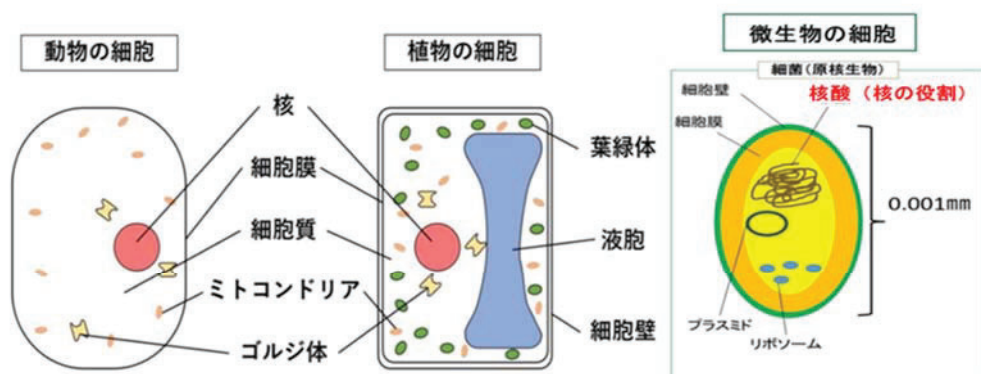


図1(a). 動物と植物の細胞図
引用:単細胞生物・多細胞生物
(中2生物)かめのコブログ

図1(b). 細菌の細胞図
引用:農林水産省資料
(細菌とは何ですか?)



リケジョさん：もう少し具体的に説明してもらえますか？



放射線博士：それでは下記の図2を見て下さい。生き物に、放射線が少し当たって、照射された細胞がわずかに死亡する限りにおいては、残りの細胞だけで十分に組織や臓器の働きを維持することができ、個体への影響は現れません。

しかし、放射線の量がもう少し増えて、死亡する細胞の数が増えると組織や臓

ⁱ ジャガイモの芽には天然の毒である「ソラニン」や「チャコニン」が多く含まれています。双方ともに、一定量以上接種することで腹痛などの食中毒症状を引き起こすといわれています。

ⁱⁱ 微生物とは、一般的に「小さい生物」という意味で、寄生虫、カビ、酵母、細菌、ウイルスなど多くの種類があります。ただし、ウイルスは細胞膜を持たずタンパク質と核酸（DNA・RNA）から構成され、細胞の外で自ら増えることができないことから無生物といわれることもあります。

器の機能が一時的に衰えると、臨床症状が出てきます。その場合でも、正常な細胞の数が元に戻る可能性は高く、症状の回復が期待できます。

ただし、これにも限界があります。生き物は種類によって放射線の感受性が異なっています。そのため一概に、「これだけの量の放射線を浴びると・・・」とはいえませんが、退治しようとする「がん細胞、ジャガイモの芽、注射器などに付着する菌、害虫」にそれぞれ、大量の放射線を当てることによってねらった細胞を死滅させることができるのです。

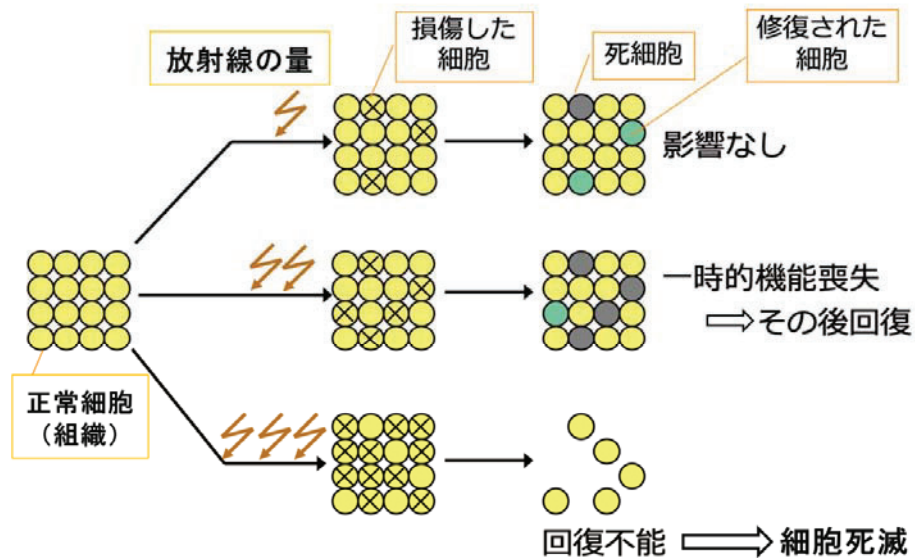


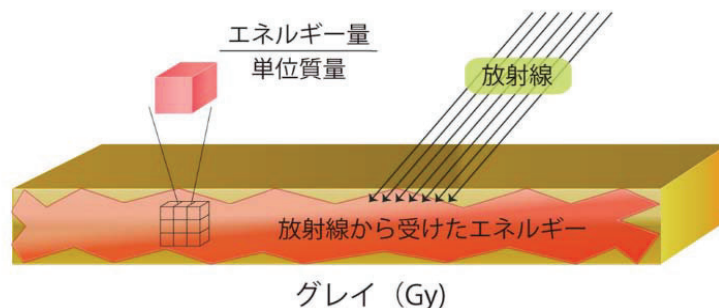
図2. 放射線量の多少による生物への影響イメージ
参考: 放射線の基礎知識と健康影響(環境省のハンドブック)



リケジョさん: それでは、「がん細胞、ジャガイモの芽、注射器などに付着する細菌、害虫」を退治する武器として放射線を利用する場合には、実際、どのくらいの量の放射線が照射されるのですか？



放射線博士: その質問に答えるためには、先ず、放射線の量を表す「グレイ (Gy)」という単位について説明を行う必要があります。下記の図3を見て下さい。



「もの」が単位質量あたりに放射線から受けるエネルギー量
1キログラムあたり1ジュールで1グレイ (Gy)

追記: 人は、全身を放射線被ばくすると、被ばく量が7~10グレイに及ぶと、ほぼ100パーセントの人が死亡するといわれています。

図3. グレイ (Gy) とは？

(引用: 排出放射性物質影響調査「用語解説」グレイとシーベルト)

グレイ (Gy) とは、「もの (物質)」が、単位質量あたりに放射線から受けるエネルギー量を示す単位であり、吸収線量と呼ばれます。物質 1 キログラム (kg) あたりに 1 ジュールⁱⁱⁱ (エネルギーを表す単位) のエネルギーを放射線から受けたということを意味しています。



リケジョさん：わたしたちの生活における放射線の利用量はどのくらいなのでしょう？



放射線博士：北陸原子力懇談会が、「ほくげんこんライブラリ」の中で放射線の利用例と線量と題して「放射線の利用例と線量の関係表」を掲載しています。下記の表 1 を見て下さい。

表 1. 放射線の利用例と放射線量 (単位: グレイ「Gy」)

10^8 Gy	人工衛星の電子部品や原子炉用電線などの信頼性や耐久性の評価、寿命の予測
10^7	超耐熱性炭化ケイ素繊維の製造
10^6	プラスチック・ゴム製品の加工、改質 (生分解性ハイドロゲルなど)
10^5	医療器具や食品容器の滅菌 (20~50 kGy)
10^4	香辛料・食肉魚介類の殺菌 (1~10 kGy)
10^3	熱帯果実などの検疫殺虫 (100~500 Gy)
10^2	ジャガイモなどの芽止め、放射線育種 (~100 Gy)
10	輸血用血液製剤のリンパ球不活化 (15~50 Gy)
1	ヒトの致死線量 (全身急照射の $LD_{50/60} = 4$ Gy)
	放射線がん治療 (X線では一度に 2 Gy ずつ、合計数十 Gy)
0.1	これ以下の線量では、生物への照射効果が見られない
10^{-2}	X線透視、X線CT、核医学検査
10^{-3}	自然界の放射線
	空港の手荷物検査、胸部X線撮影

追記: 害虫を根絶するための方法のひとつに「不妊虫放飼法」があり、沖縄でウリミバエの根絶に成功した際の線量は 60~70 Gy でした。

「参考: ほくげんこんライブラリ (暮らしの中の身近な放射線)」

同表の中で、「がん治療」から「滅菌」までの赤い文字で示した利用例は、すべて放射線の生物効果を利用するものです。同表を見ると、「放射線による細胞の死滅」効果を利用する「がん治療が 2~10 グレイ (Gy)」、「ジャガイモの芽止めが ~100 グレイ (Gy)」、「注射器などの滅菌が 20~50 キログレイ (kGy)」、「害虫の駆除が 60~70 グレイ (Gy)」の放射線が照射されていることがわかります。放射線の生物効果を利用するためには、レントゲン検査や空港の手荷物検査と比べて格段に大きな量の放射線を必要とすることがわかりますね。



リケジョさん：「細胞を死滅させる性質」を利用するにあたっては「放射線の安全管理を十分に行う必要があるということですね。



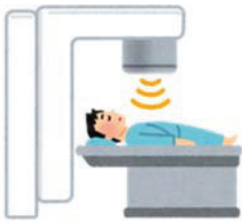
放射線博士：その通りです。わが国の法令では、放射線や放射性物質は管理区域以外の場所で使用することができないように定められています。そして、管理区域内およ

ⁱⁱⁱ 1 ジュールは約 0.24 カロリーであり、標準大気圧 (1 気圧) で 20℃ の水 1 グラムを約 0.24℃ 上昇させるエネルギーに相当します。

び管理区域外の環境のモニタリングが厳密に行われており、作業者と公衆の放射線安全が厳しく守られています。

それでは最後に、大量の放射線が「細胞を死滅させる」力に注目し、「がん細胞の治療、ジャガイモの芽止め、注射器などの滅菌、および害虫の駆除」に利用されている内容について整理しておきましょう。

(1) がん細胞の治療：



がんは、健全な細胞がなんらかの原因で異常な細胞に変わり、それが急激に増えていくものです。がん細胞のように増殖の盛んな細胞ほど放射線の影響を受けやすいのです。そこで、がん組織に的をしばって放射線をあてれば、効率的にがん細胞を殺すことができるのです。放射線を用いる治療法は、外科手術や制がん剤による化学療法とともに広く使われています。

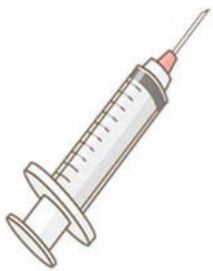
(詳細は後述の解説を参照ください。)

(2) ジャガイモの芽止め：



世界中では多くの国でいろいろな食品の放射線照射が行われています。しかし、日本で認められているのは、ジャガイモに放射線をあてて、発芽を抑えることだけです。実は、発芽すると芽の基底部に有毒な物質が生じてしまうのです。現在、発芽防止の目的でコバルト-60のガンマ線をあてる技術が、北海道で実用化されています。もちろん、ガンマ線をあててもジャガイモが放射能をもつことはありません。

(3) 注射器などの滅菌：



日本も含め、世界中で、さまざまな医療用具（注射器、手術用手袋、メスなど）にコバルト-60のガンマ線をあてて、滅菌が行われています。従来使われているガス滅菌法、高圧蒸気滅菌法に比べ、優れた点（①温度上昇をあまり伴わない、②有害残留物の心配がない、③最終包装形態で滅菌処理できる、④滅菌工程の管理が極めて容易である、⑤同一滅菌条件、同一滅菌効果で多量の製品が連続して滅菌処理できる。）が多く、急速に普及しています。現在は、ガンマ線だけではなく加速器で発生した電子線も利用されています。

(4) 害虫の駆除：



害虫の駆除では、人工ふ化させた害虫のオスのさなぎに、適当な量の放射線をあててやると、その成虫はメスと交尾することはできるが、受精させることはできなくなります。このようなオスの成虫を、自然界の害虫の集団に繰り返して放ってやると、メスが野生の健全なオスと交尾する機会が少なくなり、受精卵ができる割合が減っていくので、ついに害虫集団が絶滅するようになります。日本でも、この方法を用いて、沖縄県と奄美諸島に生息する「ウリミバエ」の絶滅に成功しました。



リケジョさん：「放射線には細胞を死滅せる性質がある」と聞いた時には「怖い」という気持ちが湧いてきました。でも、今では、「放射線は豊かな生活に欠かせない必需品」、と思っています。

博士、いろいろ教えてくれてありがとうございました。

(原産協会 人材育成部)

「総説：放射線によるがん細胞の治療」

がんは、健康な組織にかこまれたなかに存在していますが、適当な量の放射線をあてることにより、がんの細胞だけを死滅させ、普通の細胞に影響をほとんど与えずに治療することができます。

これまでの治療では、コバルト-60 から出るガンマ線を、細いビーム状にしぼって、体の外からがんの部分に集中的にあてる方法が多く用いられてきました。現在は、放射線を使った最新療法として、以下の2つの方法が注目されています。

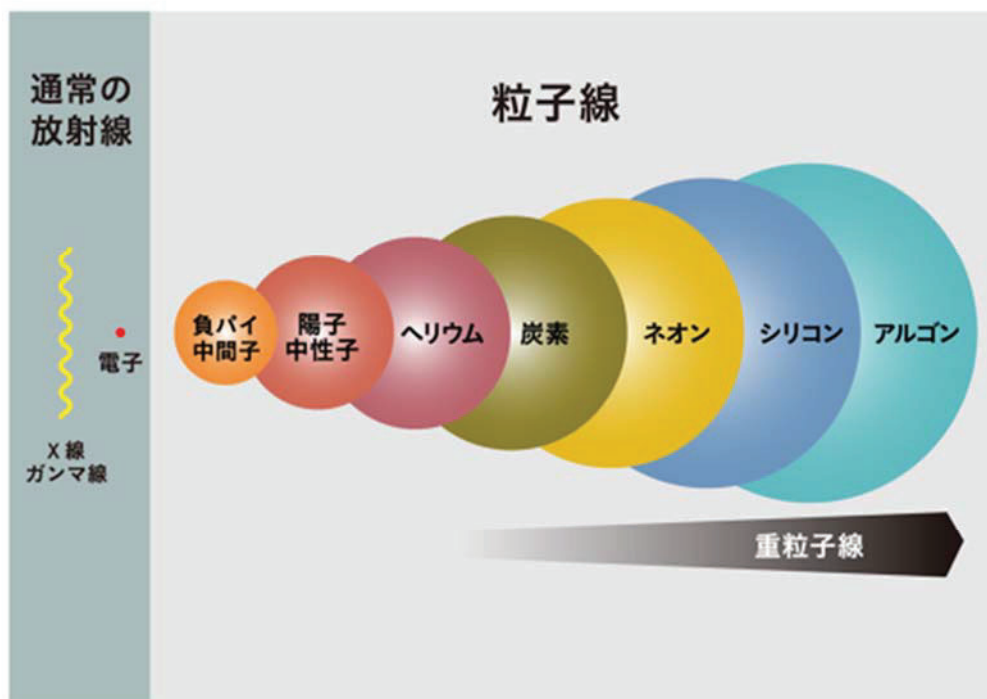
(1) 重粒子線治療：陽子や炭素の粒子放射線を病巣に照射する方法で、正常細胞へのダメージを最小限に抑えつつ、がん細胞を攻撃します。

(2) ホウ素中性子補足療法 (BNCT)：ホウ素をがん細胞に取り込ませ、中性子線を低エネルギーで照射することで、がん細胞だけを選んで破壊します。

以下に順を追って解説します。

「解説1：重粒子線療法とは？」

放射線の中で電子より重いものを粒子線、ヘリウムイオン線より重いものを重粒子線と呼びます(下記の図参照)。

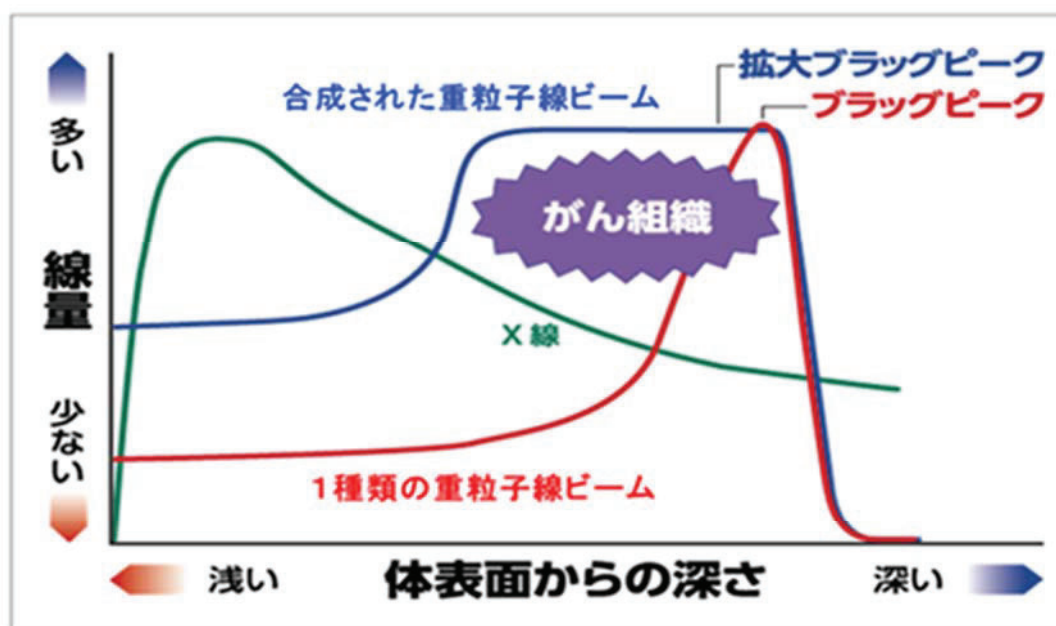


重粒子線がん治療最前線(原子力産業新聞)

重粒子線療法とは、この重粒子線を活用した放射線治療法です。がん治療に対しては、特に、炭素イオン線が活用されています。具体的には、炭素原子をイオン化して光の速度の約 70%まで加速し、体の深部のがん細胞に当てて、これを消滅させます。

この技術は、量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所が、世界に先駆けて実運用に成功したものであり、1994 年から 2016 年 5 月までに 15,000 名以上の患者が治療を受けています。

放射線療法について話をする場合には、最初に、利用する放射線によって体内の線量分布が異なることを説明する必要があります（下記の図参照）。



重粒子線とX線の体内線量分布

（参考：国立がん研究センターが運営する公式サイト「がん情報サービス」）

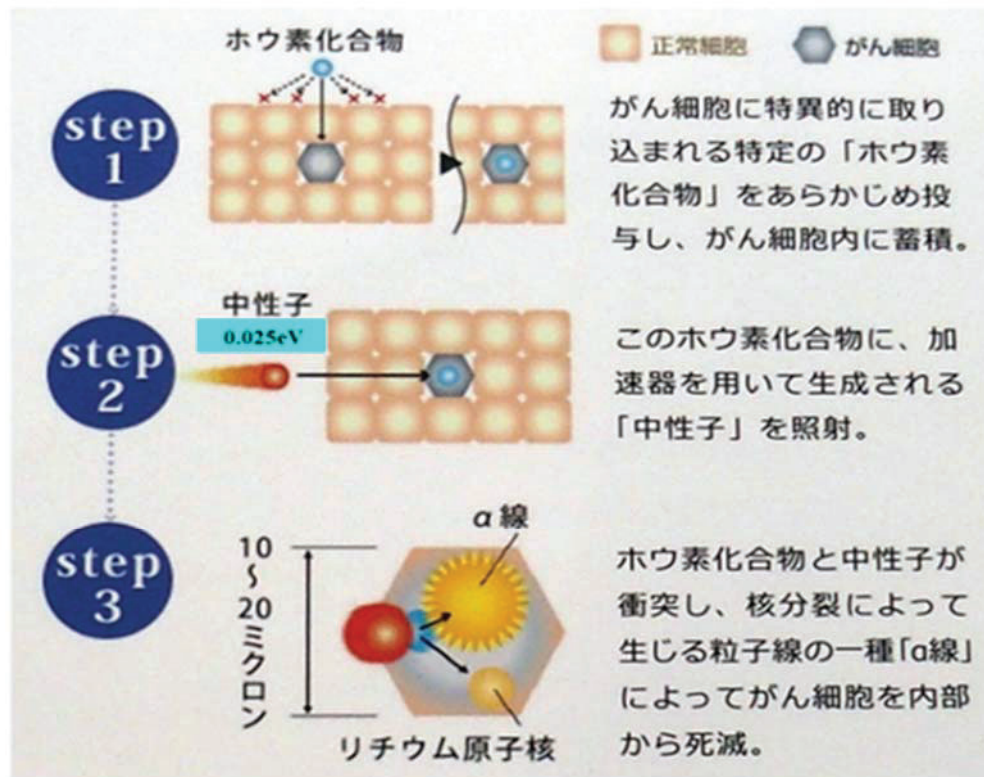
（１）従来の X 線を使った放射線治療では、体の表面近くで放射線量が最大となり、それ以降は体内に入るに従って放射線量が徐々に減少することがわかります。このことから、一方向からの X 線照射で、体の奥にあるがん細胞に十分なダメージを与えようとする、体表面近くの正常細胞も、大きなダメージを受けることになります。これを避けるため、できるだけ弱い X 線をいろいろな方向から照射して、体表面近くの正常な細胞が受ける放射線量を減らす工夫がなされています。

（２）これに対して、重粒子線は、体の表面近くではエネルギーを放出せず、狙ったがん細胞だけに高い放射線量を与える特徴があります。この現象は、発見者の名をとって「ブラッグ・ピーク」と呼ばれています。通常、がん細胞が集まってできる「がん病巣」は、深さ方向に厚みを持った塊として存在します。そのため、実際のがん治療においては、ブラッグピークを重ね合わせて「拡大ブラッグピーク」を形成し、がんの塊全体を狙って照射する方法がとられています。

重粒子線療法には、まるで将棋の桂馬のように途中にある臓器などを飛び越して、がんの塊だけに放射線を照射してそれ以外には照射しないという優れた特性があります。

「解説 2：ホウ素中性子補足療法とは？」

昨今、エネルギーが低い熱中性子を患部にピンポイントで照射し、そこでがん細胞に集まる性質を備えたホウ素薬剤を活性化させるがんの根治療法（BNCT と呼ぶ）が、手術・抗がん剤・放射線（X線）・免疫療法に次ぐ「第5の治療法」として注目されています（下記の図参照）。



（参考：がん情報サイト「オンコロ」BNCTについて知っておきたい4つのこと）

がん細胞は、急速な細胞増殖を維持するため、糖やアミノ酸を取り込む必要があります。この性質に注目して、がん細胞が自発的に取り込む、「ホウ素化合物（例えばボロノフェニルアミン「BPA」という物質）」が開発されました。このBPAを患者にあらかじめ投与しておけば、時間とともにがん細胞内に蓄積します（これが上図のステップ1です）。

次に、体の外からこのホウ素化合物を狙って、エネルギーの低い熱中性子（0.025 エレクトロンボルト）を照射します。ここで注意しなければいけないのは、①正常な細胞では、熱中性子は、ほとんど影響を与えず通過していきませんが、②エネルギーの高い速中性子が含まれていると、正常細胞と衝突して悪影響を及ぼす可能性があるということです（これが上図のステップ2です）。

最後に、がん細胞に取り込まれたホウ素化合物は、熱中性子と反応してアルファ線とリチウム原子核を放出、がん細胞に衝突してこれを破壊するのです。このときアルファ線とリチウム原子核が飛ぶ距離は、おおむね細胞1個分と極めて短く、がん細胞周囲の正常細胞に悪影響を及ぼす可能性はほとんどありません（これが上図のステップ3です）。

そして、2020年5月20日には、BNCTが保険適用になり早速（同年5月26日）、総合南東北病院（福島県郡山市）において、BNCTによる世界初のがん治療が行われました。

原子力 ワンポイント



広く利用されている放射線 ⑥

核分裂とは原子核が分裂して異なる原子核に分かれる現象で、新しい原子番号の元素を見つければよいとして発見されました。ウラン²³⁵の原子核に中性子が飛び込むと、原子核は不安定な状態になり、原子核が二つ以上に分かれ、多くの熱エネルギーを放出します。

核分裂

ゆりちゃん 中性子が一九三二年にチャドウィックによって発見された後の研究には何があるのですか？

タクさん イタリあの物理学者フェルミはいろいろな原子に中性子を当てると、新しい原子番号の元素になる可能性を示し、一九三四年から実験を行いました。中性子が当てられ

(6) 新しい元素を見つ

た核分裂
けようとして発見され
た核分裂
ゆりちゃん 中性子が一九三二年にチャドウィックによって発見された後の研究には何があるのですか？

核分裂の連鎖反応を利用した原子力発電

次に、ドイツの化学者

ハーンが中性子を当てたウランから放射能を出すことを発見しました。この変化を説明したのが、ユタヤ人の物理学者マイトナーです。ハーンから知らせを受けて取ったマイトナーは、エネルギー保存則の計

算をして、ウラン原子がほぼ半分に分かれた（核分裂が起こった）結果であるとし、一九三九年に科学雑誌ネイチャーに投稿しました。ハーンは核分裂の発見者であり、マイトナーは核分裂の概念の確立者として、ドイツの化学者

次

算をして、ウラン原子がほぼ半分に分かれた（核分裂が起こった）結果であるとし、一九三九年に科学雑誌ネイチャーに投稿しました。ハーンは核分裂の発見者であり、マイトナーは核分裂の概念の確立者として、ドイツの化学者

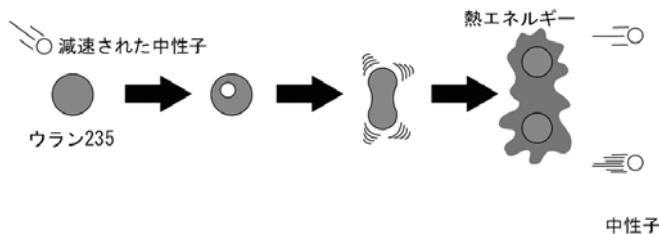
算をして、ウラン原子がほぼ半分に分かれた（核分裂が起こった）結果であるとし、一九三九年に科学雑誌ネイチャーに投稿しました。ハーンは核分裂の発見者であり、マイトナーは核分裂の概念の確立者として、ドイツの化学者

算をして、ウラン原子がほぼ半分に分かれた（核分裂が起こった）結果であるとし、一九三九年に科学雑誌ネイチャーに投稿しました。ハーンは核分裂の発見者であり、マイトナーは核分裂の概念の確立者として、ドイツの化学者

算をして、ウラン原子がほぼ半分に分かれた（核分裂が起こった）結果であるとし、一九三九年に科学雑誌ネイチャーに投稿しました。ハーンは核分裂の発見者であり、マイトナーは核分裂の概念の確立者として、ドイツの化学者

算をして、ウラン原子がほぼ半分に分かれた（核分裂が起こった）結果であるとし、一九三九年に科学雑誌ネイチャーに投稿しました。ハーンは核分裂の発見者であり、マイトナーは核分裂の概念の確立者として、ドイツの化学者

●軽水炉の核分裂



飛び込むと、原子核は不安定な状態になり、原子核が二つ以上に分かれ、多くの熱エネルギーを放出します。この分裂によりウラン以外の物質が生まれるとともに、

たくさんの中性子が放出され、同時に数個の中性子も放出されます。核分裂によって生まれた物質核（核分裂生成物）の総量は、核分裂する前の原子核より軽くなっています。この差が熱になります。ところで、核分裂により新しく生まれた中性子が、他のウラン²³⁵原子核に当たることによって、核分裂を引き起こすことを「核分裂の連鎖反応」といいます。

原子力発電所では核分裂の連鎖反応が一定の量で続くよう調節しています。そしてこの状態が続くことを「臨界」といいます。（原産協会・政策推進部）

原子力 ワンポイント



広く利用されている放射線⑨

五感で感じることはできません。そこで、専用の検出器を使って、放射線の強さを測ります。

ゆりちゃん 検出器はどのようにして放射線の強さが分かるのですか？

タクさん 例えば、ベータ線やガンマ線を測るガイガー・ミュラー・カウンタ（GMカウンタ）は、ガスを入れた容器のなかに電極を入れ、電極間に高

電圧をかけます。この容器のなかに放射線が入ると、ガスが電離（イオン化）して、そのイオンが電極に引かれ電流が流れます。このとき流れる電流の大きさを測ることにより、入った放射線の強さを測ることができます。



ゆりちゃん どんな種類の検出器がありますか？

身の回りの放射線の強さを検出器で測定

タクさん 貸し出しの放射線の強さが分かる検出器はありますか？

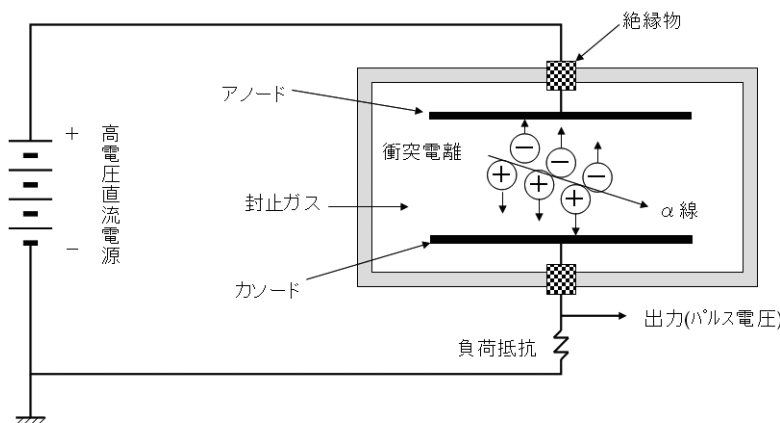
ゆりちゃん 一つの検出器で全ての放射線を測ることが出来ますか？

タクさん いいえ、放射線の種類に合わせた検出器を選択する必要があります。

うにしたらアルファちゃんやベータちゃんを借りられますか？

タクさん 無料貸し出しを実施している団体があります。使用料や送料等の費用は一切かかりませんし、測定試料も一緒に借りることができます。インターネットで「放射線検出器 無料貸し出し」で検索してみてください。ちなみに、銀座で放射線の強さを測ってみると車道で〇・〇四九μSv（シーベルト）、歩道で〇・〇九九μSvとなり、皆さんも検出器を借りて身の回りの放射線の強さを測ってみましょう。ところで、銀座の車道と歩道で放射線の強さが違った原因は、歩道に花崗岩（ウラ

タクさん 貸し出しされている検出器としては、アルファ線の測定には「アルファちゃん」、ベータ線の測定には「ベータちゃん」（II写真、ガンマ線の測定には「ガンマくん」「はかるくん」があります。ゆりちゃん どのよ



ガイガー・ミュラー・カウンターのしくみ

原子力 ワンポイント



日本の放射線・放射能基準
——福島第一原発事故（番外編⑧）

放射線は専用の測定器を使って、大人・学童の場合は地上高1mで、また幼稚園児なら地上50cm高で測ります。地面を測ると十倍以上になることもあり注意が必要です。

ゲンくん 放射線は専用の測定器を使って、放射線の強さを測るそうなんですけど、どんな測定器があるの。
カワさん 測定器には目的別に二タイプが

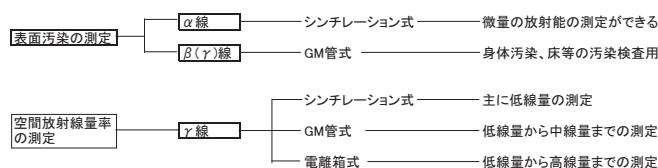
あります。一つは土などの表面の線量率や空間に漂っている埃などによる空間線量率の計測を目的とするものと、もう一つは空間や対象物に放射能があるかの汚染チェックのためのもので、ベータ線が入射出来るような雲母の膜の窓のあるサーベイメータなどが該当します。
ゲンくん 線量率を測る測定器には何があるの。
カワさん 汚染を検

測定器は正しい使い方で平均値を出す

のセンサーの付いたGM管式サーベイメータ／シンチレーション式サーベイメータや円筒形のセンサーを持つ電離箱式サーベイメータがあります。最近では、α線とγ線が測定できるシリコン半導体の線量計なども出てきました。
合は地上高1mで、幼稚園児を対象とする場合は地上50cm高で測るなど、身長差を考慮に入れて測定する必要があります。また、測定は一回だけでなく、何回か測定して平均を出してください。一般に、地上50cm高での

た。
ゲンくん どうやって測るの。
カワさん 国が公表している放射線量は空間の線量率なので、空間線量率の測り方を説明します。空間の線量測定を行う機器では、

線量率は一m高の線量率より地面からの放射線の影響をより受けませんが、一〇%高くらいにしかありません。しかし、この測定器を土の表面に置いて測ると、地面からの放射線の影響をたくさん受けるので、文部科学省が新聞などに公表している線量率の十倍以上になることもあり、注意が必要になります。例えば、地上高1mとの説明は普通省かれています。東京都で空間線量率〇・五〇・〇七μSv/h（二時間当たりのマイクロシーベルト）の場所では、地面にその測定器を置いて測ると「〇・一μSv」くらいに表示されます。ゲンくん それで、「ここは新聞の発表値よりも二十倍も高い危険な場所だ！」という話も出てきたんだね。カワさん 一般人が測定器を使うと、地面での測定をして、自分も周りもパニックになってしまう。特に（原産協会・政策推進部）



測定器によって必要な測定時間も決められているので、あわせてよく確認をしてください。
ゲンくん ところで、cpm（一分間あたりの計数）で表示されている測定器の場合はどのようにシーベルトに直すの。
カワさん 正確に変換しようとすると、放射性物質ごとに放出する放射線のエネルギーの分布が異なるので換算率が変わるので難しいのですが、百cpmで1μSvとみなして大雑把な評価をしてくだい。
一般人が測定器を使うと、地面での測定をして、自分も周りもパニックになってしまう。特に（原産協会・政策推進部）



「原子カワンポイント」

あなたに伝えたい放射線の話（５）

放射線を利用している職業－（医療）放射線科医と放射線技師－

●2019年に好評を博した放射線科を舞台とするTVドラマ「ラジエーションハウス」の続編が2021年10月より放送開始されるなど、昨今放射線医療への関心が高まりつつあります。

●上記ドラマのメインテーマは、放射線を利用してからだの状態を撮影して病床を「診断」することになっていますが、放射線科のもう一つの仕事である「治療」を忘れてはなりません。

●放射線診断の分野では最近、PET-CT検査により、従来は難しかった悪性リンパ腫の広がり具合まで診断することができ、注目されています。

●放射線治療の分野では近年、重粒子線療法、およびホウ素中性子捕捉療法（BNCT）により、従来は治療が困難だった再発性のがんおよび同じ臓器にいくつもできる多発性のがんを治療することができ、注目されています。



放射線を利用してからだの状態を診断・治療する仕事

放射線科医

放射線技師

- ・放射線科医は、放射線診断専門医と放射線治療専門医の2種類がある。放射線技師とチームを組んで仕事をする。
- ・放射線技師は、放射線被ばくを管理しながら、診断に必要な身体内部の画像を撮影したり、放射線治療装置を操作したりする。

***2019年に好評を博した放射線科を舞台とするTVドラマ「ラジエーションハウス」の続編が2021年10月より放映開始されるなど、昨今、放射線医療への関心が高まりつつある。**



リケジョさん：医療の分野で放射線は、どのように利用されているのですか？



放射線博士：下記の図を見てください。



放射線の利用方法は大きく分けて「病気の診断」と「病気の治療」の二つになります。

「病気の診断」では現在、コンピュータ断層撮影（CT）装置と陽電子放出断層撮影（PET）装置を組み合わせた「PET-CT」システムが多用されているそうです。

一方、「病気の治療」では、放射線を照射してがん細胞を殺傷する治療を思い出します。最近では、重粒子線療法およびホウ素中性子捕捉療法（BNCT）という言葉をよく耳にします。



リケジョさん：それではまず、「病気の診断」について、もう少し詳しく教えてください。



放射線博士：最初に、新型コロナの肺検査でもよく耳にする、CT 検査について説明します。X 線を利用する画像診断の代表的な装置を CT 装置と呼びます。CT 検査では、X 線を患者に照射したときの「透過率」から、コンピュータを使って身体の高断層の画像を作り、その画像を分析してからだの状態が診断されます。

次に、がんの診断に多用されている PET 検査について説明します。①がんなどの悪性腫瘍は、さかんな増殖を行うために多くのブドウ糖を必要とします。②ブドウ糖にフッ素-18 (^{18}F) という「放射性同位元素」¹ をくっつけた薬剤を体内に注射すると、がん細胞にたくさん集まります。③PET 検査では、 ^{18}F から体外に放出される放射線（ガンマ線）を測定することにより、がん細胞の位置や大きさだけでなく、がんの進行度合いも同時に調べられます。



リケジョさん：なぜ、CT 装置と PET 装置を組み合わせた PET-CT 検査が多用されるのですか？



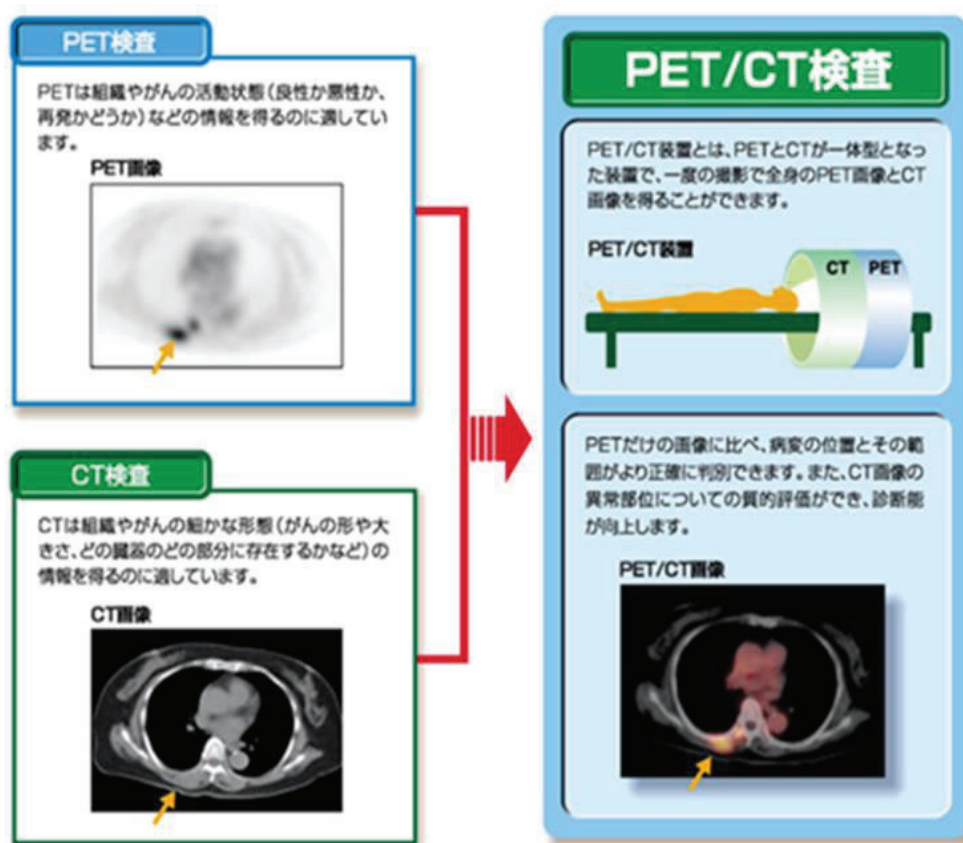
放射線博士：話を進める前に、「悪性リンパ腫」を例にして、CT 検査と PET 検査の違いをもう一度、整理してみましょう。

¹ 原子番号が同じで質量数（原子核を構成する陽子と中性子の個数の合計）の異なる元素を同位元素という。この同位元素のうち、放射線を放出する能力を持つものを放射性同位元素と呼ぶ。

悪性リンパ腫ですが、これはリンパ球という血液細胞のがんで、全身のリンパ節がはれたり、骨や肝臓などの内臓に病巣を発生することがあります。したがって、この病気が疑われたときは、細胞をとって形状を調べると同時にどこまで病巣が広がっているか？総合的に評価することが求められます。

CT検査では、首や胸、腹など撮影した範囲の多数の断層画像からリンパ腫のはれ（形の変化）を診断することができます。一方、PETでは通常、頭から太ももまで全身の画像を撮影し、輪切りの画像から全身像を作り、病巣の広がり（病巣の活性度）を診断することができ、おとなしいがん？たちの悪いがん？どちらであるかまで判断することができます。

このように異なる特徴のあるCT検査とPET検査を組み合わせれば、がんの大きさや場所の特定だけでなく、良性・悪性の区別、転移状況、再発の診断など、総合的な診断が可能となるのです。



一般の方向け情報(日本メジフィックス株式会社)



リケジョさん：「放射線を利用する治療」についても、もう少し詳しく教えてください。



放射線博士：現在、放射線を利用する治療では、「がんの治療」が最も重視されています。

私はこれまで、がんになったら手術して、抗がん剤を飲むのが普通と考えてきましたが、最近わが国でも放射線治療を受ける人が増えていることを実感しています。その先端をゆく技術が「重粒子線療法」と「ホウ素中性子捕捉療法（BNCT）」です。放射線療法には、身体への負担が少なく、治療後の生活の質を阻害するリスクが小さい、という利点があります。高齢化が進むにつれて、今後、放射線療法を選択する人が増えるのではないのでしょうか（「重粒子線療法」と「BNCT」の詳細については後段の「解説1」および「解説2」を参照ください）。



リケジョさん：病気の診断やがん治療に、なぜ放射線が使われるのか、その原理がわかったような気がします。ところで、放射線を利用して病気の「診断」や「治療」を行うのは、どんな人たちですか？



放射線博士：つい最近、テレビで放送された「ラジエーションハウス」をみてよくわかったのですが、放射線を利用してからだの状態を診断・治療する仕事は、放射線科医が放射線技師とチームを組んで行っています。放射線科医とは、日本医学放射線学会が指定した施設で5年間の修練を積み、試験に合格した医師のことで、放射線診断医と放射線治療医の2種類があります。日本では現在、放射線診断専門医は約5,600名余り、放射線治療専門医は約1,200名余りしかおらず、深刻な人手不足のようです。

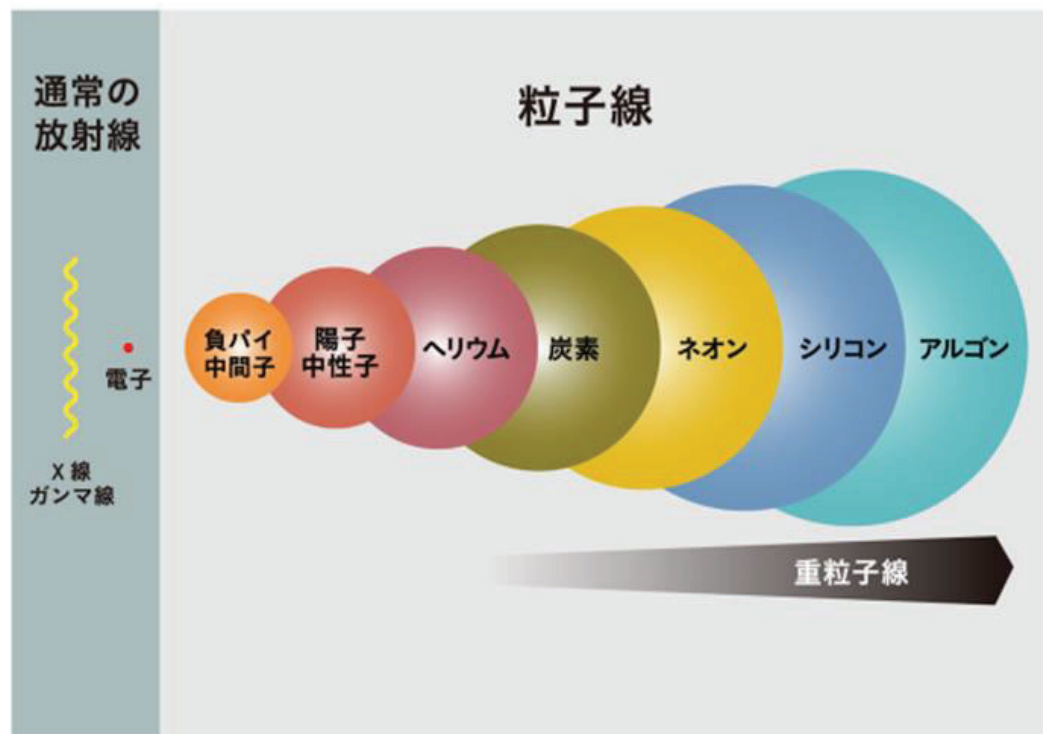


リケジョさん：私の友達も「ラジエーションハウス」をみたそうです。今まであまり注目を浴びなかった放射線科医と放射線技師が、若い方たちの興味を引き、就職希望する人が増えるのではないのでしょうか。博士、ありがとうございました！

(原産協会：人材育成部)

「解説1：重粒子線療法とは？」

放射線の中で電子より重いものを粒子線、ヘリウムイオン線より重いものを重粒子線と呼びます(下記の図参照)。

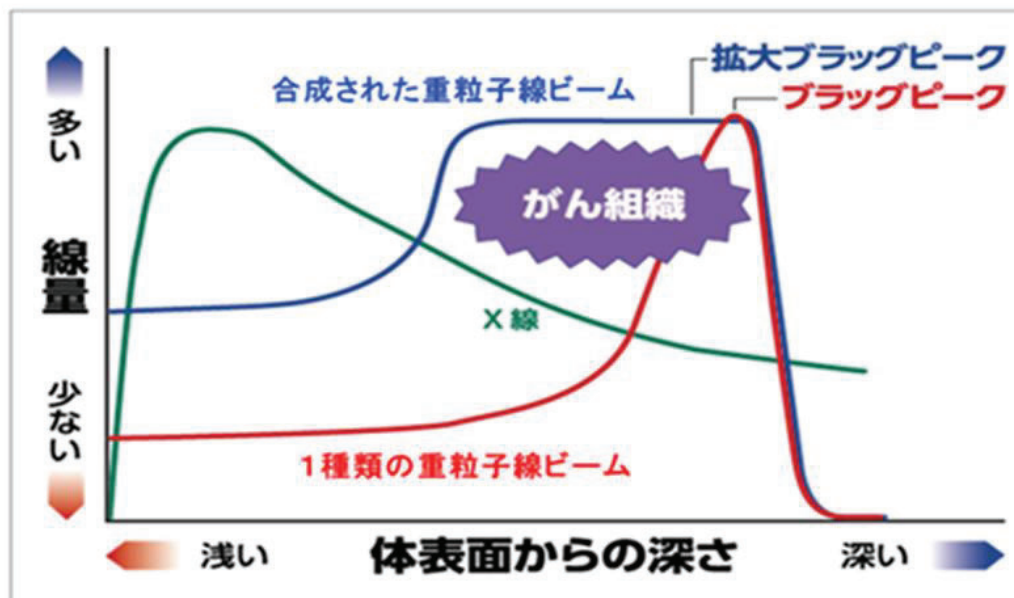


重粒子線がん治療最前線(原子力産業新聞)

重粒子線療法とは、この重粒子線を活用した放射線治療法です。がん治療に対しては、特に、炭素イオン線が活用されています。具体的には、炭素原子をイオン化して光の速度の約70%まで加速し、体の深部のがん細胞に当てて、これを消滅させます。

この技術は、量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所が、世界に先駆けて実運用に成功したものであり、1994年から2016年5月までに15,000名以上の患者が治療を受けています。

放射線療法について話をする場合には、まず最初に、利用する放射線によって体内の線量分布が異なることを説明する必要があります（下記の図参照）。



重粒子線とX線の体内線量分布

（参考：国立がん研究センターが運営する公式サイト「がん情報サービス」）

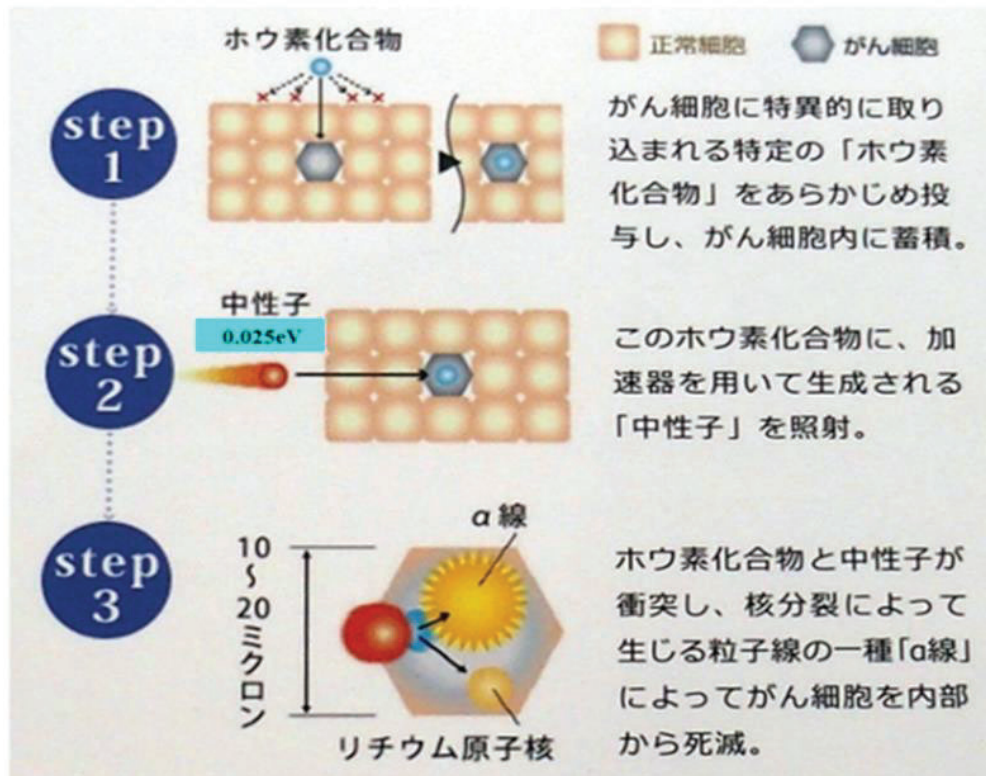
（１）従来のX線を使った放射線治療では、体の表面近くで放射線量が最大となり、それ以降は体内に入るに従って放射線量が徐々に減少することがわかります。このことから、一方向からのX線照射で、体の奥にあるがん細胞に十分なダメージを与えようとすると、体表面近くの正常細胞も、大きなダメージを受けることになります。これを避けるため、できるだけ弱いX線をいろいろな方向から照射して、体表面近くの正常な細胞が受ける放射線量を減らす工夫がなされています。

（２）これに対して、重粒子線は、体の表面近くではエネルギーを放出せず、狙ったがん細胞だけに高い放射線量を与える特徴があります。この現象は、発見者の名をとって「ブラッグ・ピーク」と呼ばれています。通常、がん細胞が集まってできる「がん病巣」は、深さ方向に厚みを持った塊として存在します。そのため、実際のがん治療においては、ブラッグピークを重ね合わせて「拡大ブラッグピーク」を形成し、がんの塊全体を狙って照射する方法がとられています。

重粒子線療法には、まるで将棋の桂馬のように途中にある臓器などを飛び越して、がんの塊だけに放射線を照射してそれ以外には照射しないという優れた特性があります。

「解説２：ホウ素中性子捕捉療法（BNCT）とは？」

昨今、エネルギーが低い熱中性子を患部にピンポイントで照射し、そこのがん細胞に集まる性質を備えたホウ素薬剤を活性化させるがんの根治療法（BNCTと呼ぶ）が、手術・抗がん剤・放射線（X線）・免疫療法に次ぐ「第５の治療法」として注目されています（下記の図参照）。



(参考：がん情報サイト「オンコロ」BNCTについて知っておきたい4つのこと)

がん細胞は、急速な細胞増殖を維持するため、糖やアミノ酸を取り込む必要があります。この性質に注目して、がん細胞が自発的に取り込む、「ホウ素化合物（例えばボロノフェニルアミン「BPA」という物質）」、が開発されました。このBPAを患者にあらかじめ投与しておけば、時間とともにがん細胞内に蓄積します（これが上図のステップ1です）。

次に、体の外からこのホウ素化合物を狙って、エネルギーの低い熱中性子（0.025 エレクトロンボルト）を照射します。ここで注意しなければいけないのは、①正常な細胞では、熱中性子は、ほとんど影響を与えず通過していきませんが、②エネルギーの高い高速中性子が含まれていると、正常細胞と衝突して悪影響を及ぼす可能性があるということです（これが上図のステップ2です）。

最後に、がん細胞に取り込まれたホウ素化合物は、熱中性子と反応してアルファ線とリチウム原子核を放出、がん細胞に衝突してこれを破壊するのです。このときアルファ線とリチウム原子核が飛ぶ距離は、おおむね細胞1個分と極めて短く、がん細胞周囲の正常細胞に悪影響を及ぼす可能性はほとんどありません（これが上図のステップ3です）。

そして、2020年5月20日には、BNCTが保険適用になり早速（同年5月26日）、総合南東北病院（福島県郡山市）において、BNCTによる世界初のがん治療が行われました。

【原子力フロンティア55】医療被ばく低減の目安「診断参考レベル」

福島第一原発の事故の後、放射線の健康影響が大きな関心をよんでいます。実は放射線は、暮らしの中のさまざまな分野で利用されています。最も身近なものは病院での放射線利用です。病気の診断に欠かせない放射線を使う検査で、放射線量をどのくらいに抑えるのが望ましいのでしょうか。医療被ばく研究情報ネットワーク（J-RIME）らは2015年6月7日、わが国初の「診断参考レベル」を正式に発表しました。

ゆりちゃん：J-RIMEってどのような組織なのですか。

タクさん：医療被ばく研究情報ネットワーク（J-RIME）は2010年3月、医療被ばくに関するさまざまな研究情報を収集し、国際機関への対応を協議・実践する目的で設立された組織です。放射線医学総合研究所の米倉義晴理事長が代表となり、日本医学放射線学会や日本診療放射線技師会など12の団体が構成されています。

ゆりちゃん：この診断参考レベルの意味について教えてください。

タクさん：診断参考レベルは、国際放射線防護委員会（ICRP）により1996年、「検査の放射線量が必要以上に高くなっている医療施設に注意を喚起し、過剰な被ばくを減らす有効な手段」として導入が勧告されました。具体的には、刊行物「Publication 73」の中で診断参考レベルは、「（1）医療用X線画像診断や核医学診断を受ける患者の放射線被ばくに適用する。（2）放射線治療には適用しない。（3）患者の線量を医療目的とバランスが取れるように管理する手段（トレードオフの考え方）である。（4）医学関連学会などが行うCTやX線検査などの実態調査において、「検査の適正さをオペレータ（検査技師など）に示す科学的な指標（線量指標など）」を数値の低い順から並べ、最適といえる値（J-RIMEは、原則として、下から“4分の3”に位置する値）を選択する。（5）国の保健・放射線防護当局と共同し、医学団体によって設定されるべきである」と述べています。

ゆりちゃん：今回の診断参考レベルはどのようなものですか。

タクさん：J-RIMEらによって公表された診断参考レベルは、「X線CT」、「一般撮影」、乳がんを調べる「マンモグラフィ」、歯科の「口内法X線撮影」、「IVR（放射線診断技術の治療的応用）」、放射性物質を体内に投与して行う「核医学」の6種類の検査が対象でした。それらの中でも特に、「X線CT」検査が、医療診断における被ばく線量を押し上げています。CTの線量を表す指標には、CTDI（CT線量指標）とDLP（線量長さ積）があります。CTDIは、「図1のガントリに取り付けられているX線発生器が一回転するとき、ベッドに置かれた人体模型（ファントム）が受ける線量（通常、模型内に固定した“電離箱検出器”で測定）を示す指標（単位は“ミリグレイ”）」です。DLPは、「この“CTDI”に、患者をスキャンする軸方向の長さ（センチメートル）を掛け合わせた量（単位は“ミリグレイ・センチメートル”）」です。最近のCT装置では、コンソール上に、これらの数値が自動表示されます。J-RIMEらは、このようなCT検査に固有の2つの指標について、診断参考レベルを設定しています。表1にその一例を示します。指標の種類によって、「数値の大きさがかなり違う」ことが分かります。なお公衆被ばくの線量限度は「実効線量（ミリシーベルト）」で管理されていますが、「先のDLPに、ICRPが定めた“実効線量換算係数”を掛けること」で概算できます。一般の方に説明する際には、「指標の意味や単位」を丁寧に説明する必要があります。それと同時に、国（厚生労働省）との連携を密にして「国際的に認知させる努力」が強く求められます。



図1. マルチスライスCTの構成
(東芝メディカルシステムズ・プレスリリースより)

表1. 診断参考レベルの例 (X線CT)

線量指標 検査	CTDI (線量指標)	DLP (線量長さ積)	換算	実効線量
	mGy	mGy・cm		mSv
成人頭部CT	8.5	1350	}	2.8
成人胸部CT	15	550		7.7
小児頭部CT (1～5歳)	4.7	660		4.4 (1歳換算)
小児頭部CT (1～5歳)	1.4	300		7.8 (1歳換算)

出典：最新の国内実態調査に基づく診断参考レベルの設定 (J-RIME)

(一部日本放射線技術学会作成資料より)



「原子カワンポイント」

あなたに伝えたい放射線の話（6）

農業分野における放射線利用－品種改良・害虫の駆除・食品照射－



- 放射線照射で誘導される遺伝子突然変異を利用すれば品種改良できます。ガンマ線を照射することによって黒斑病に強い「ゴールド二十世紀梨」が誕生しました。
- 害虫駆除の技術の一つに、放射線を当て不妊化したオスの害虫を野外に放して害虫の数を減らすユニークな方法があります。日本では、奄美諸島のウリミバエの根絶に成功しました。
- 食品に放射線を照射すると、発芽防止、殺菌、殺虫等の効果が得られ、保存期間を延長できます。しかし、わが国で認められているのは、唯一、ジャガイモの発芽防止だけです。



「二十世紀梨」



「ゴールド二十世紀梨」

放射線育種によって作られた耐黒斑病の
性質をもつ「ゴールド二十世紀梨」(右)

【出典】 放射線育種場 テクニカルニュース、No. 29 (1986)



リケジョさん：農業の分野で放射線はどのように利用されているのですか？



放射線博士：次の図を見てください。農業の分野で放射線は、農作物や家畜の生産性向上のための品種改良（黒斑病に強い梨等）、害虫の駆除（ウリミバエ等）、食品照射（ジャガイモの発芽防止等）などに利用されています。



リケジョさん：たくさんの利用方法があるんですね。それではまず、「品種改良」についてもう少し詳しく教えてください。



放射線博士：「私達が日常的に食べている作物は“遺伝子突然変異”したもの」というと、意外に思う人もいるかもしれません。実は、農業は昔から自然に生じた遺伝子変異というものを利用し、発展してきた営みなのです。なぜなら、野生の植物は、成熟するに伴って「穂」から自然に離れる性質があり、実った種が落下してしまうため、収穫できる割合が少なくなります。そのため人々は昔から、自然界で生じる突然変異によって、「実っても落ち難くなった種」を選抜することによって、品種改良を試みてきました。それが今では放射線を利用して、自然に生じる遺伝子変異よりもさらに変異の頻度を高め、効率的に優れた品種を開発して育成する新しい道を切り開いてきたのです。



リケジョさん：放射線による品種改良を行った例に、どんなものがあるのでしょうか？



放射線博士： 先ず最初に紹介するのは、1 ページ目の写真「ゴールド二十世紀梨」の作出です。下の図を見てください。茨城県常陸大宮市にある農業環境技術研究所のガンマ線照射場（ガンマフィールド）の全体図です。半径 100m のガンマフィールドの中央に設置された塔に、 ^{60}Co （コバルト 60）線源ⁱを装備し、ここからガンマ線が「二十世紀梨」へ照射されます



ガンマフィールドの全体図
(参考: 農水省農業生物資源研究所ホームページ)

ⁱ ^{60}Co （コバルト 60）はコバルトの同位体の一つで、ガンマ線を放出する。このコバルト 60 を放射線源として使用するものをコバルト 60 線源という。なおガンマ線は放射線の一種で、波長の短い電磁波である。

「二十世紀梨」は、非常に良い品質を持ち、青梨（皮が青色系の梨）の主要品種として栽培されてきましたが、梨黒斑病という病気にかかりやすく、それを防ぐために、ガンマ線の照射により突然変異を得る実験が行われたのです。

ガンマフィールドは1962年から照射試験開始、1981年に黒斑病に全くかかっていない一本の枝が発見され、1990年に耐黒斑病の性質を持つ「ゴールド二十世紀梨」が誕生しました。

一方で、放射線として上述のガンマ線ではなく、イオンビームⁱⁱを使って品種改良する技術（以降「イオンビーム育種」という）の開発が、純国産技術として1987年から始まりました（イオンビーム育種の詳細については後段の「解説」を参照ください）。

その一環として、日本原子力研究所高崎研究所（現・量研機構高崎量子応用研究所）は、世界最初の材料・バイオ研究のための専用施設として設置されたイオン照射研究施設“TIARA”を活用し、世界に先駆けてイオンビーム育種技術を確立すると同時に数多くの花卉（かき）ⁱⁱⁱを作出してきました。

下の写真は、愛知県農業総合試験場と共同して創作した華麗な花びらを持つ「かがり弁ギク」です。この品種は、改良前の親ギクに炭素イオンビームを照射して突然変異を誘導して作られ、花卉の先端に複数の突起を生じさせ、花の色も白、赤紫、黄色の3色を発現させた珍しいタイプの花卉となることで注目されました。特に花卉が白の「かがり弁白」は、2018-2019年のジャパンフラワーセレクションで「ベストフラワー（優秀賞）」を受賞しました。

「かがり弁」を持った菊の新品種



左上：「かがり弁黄」 右上：「かがり弁白」
下：「かがり弁赤紫」

（参考：愛知県農業総合試験場資料）



リケジョさん：身近な農産物に放射線が利用されているのですね。それでは次に、「害虫の駆除」についてももう少し詳しく教えてください。



放射線博士： 先ずは一般論ですが、人工的に飼育した害虫のオスの「さなぎ」に、適量の放射線を照射すると、それから羽化した成虫は、正常なメスの成虫と交尾することはできますが、受精

ⁱⁱ イオンビームは電離放射線の一種である。炭素やヘリウムなどのイオンを、サイクロトロンなどの加速器を使って加速した流れである。

ⁱⁱⁱ 観賞用になるような美しい花をつける植物の総称。

させることができなくなります。このようなオスの成虫を、自然界の害虫集団に継続的に大量に放し飼いと、メスが受精能力のあるオスと交尾する機会が少なくなり、受精卵を生む割合が減り、やがて害虫集団の絶滅が期待されます。このような害虫防除方法を「不妊虫放飼法」と呼んでいます（下記の図を参照下さい）。

不妊虫放飼法による沖縄県のウリミバエの根絶

沖縄県本土復帰の前年の1971年、沖縄と奄美で事業開始
ゴーヤ（ニガウリ）などの野菜の本土への出荷が可能に

- ・害虫ウリミバエを大量に飼育し、ガンマ線を照射。
- ・不妊化した蛹を防除対象地域の野外に大量に放ち、
- ・野生のウリミバエ同士の交尾機会を減らし、
- ・野生の個体数を減らし、
- ・島ごとに数年かけて……1993年、ついに根絶！
- ・新たな侵入に備えて、今も「放飼」を継続中。



（引用：北陸原子力懇談会資料）

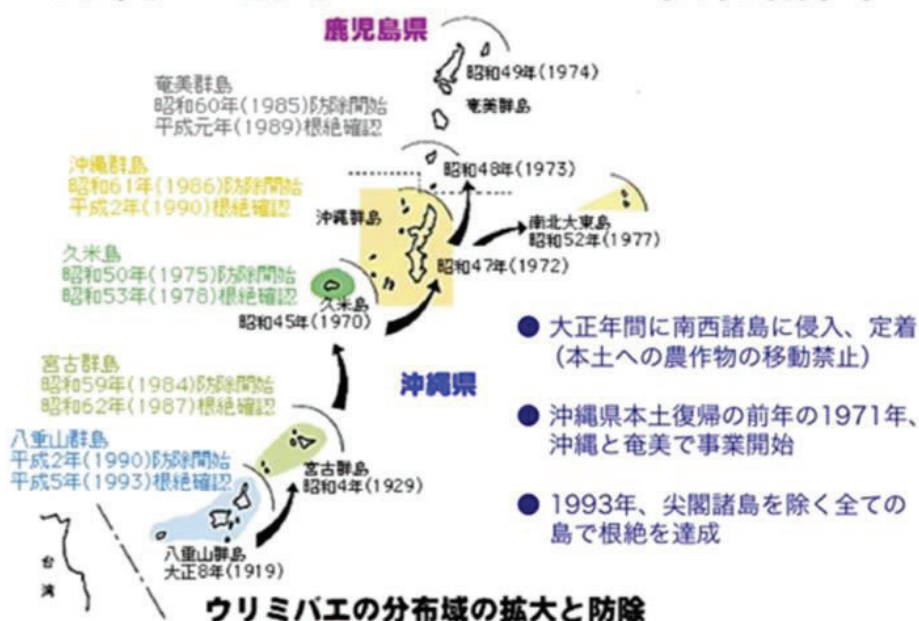


リケジョさん：害虫を直接殺虫するのではなく、交尾を利用するという発想に驚きました。日本で実施した例はあるのでしょうか？



放射線博士：わが国では、上記の図で説明した「不妊虫放飼法」により沖縄県と奄美群島に生息する「ウリミバエ」にコバルト 60 ガンマ線を照射して根絶する事業が、1972 年から行われています。次の図を見てください。

沖縄・奄美のウリミバエ根絶計画



（参考：沖縄県病害虫防除技術センターHP）

1993年にこれらの地域からウリミバエが根絶されたことにより、ゴーヤなど、ウリミバエが寄生する果菜類の移動規制が解除され、県外への出荷ができるようになりました。しかし、沖縄県は常に南方の国々からウリミバエが侵入する危険にさらされているため、現在でも、不妊虫放飼法を用いてウリミバエの侵入・定着の防止を図っています。

海外では、農作物に影響する害虫に限らず、人の健康に関係する害虫についても放射線を利用した除去法が用いられています。IAEA(国際原子力機関)は「ジカ熱」の感染拡大が認められる中南米諸国などに対して、「ジカウイルス」を媒介とする蚊の不妊虫放飼法に関する技術を提供する取り組みを実施しています。



リケジョさん：「害虫駆除」についてもよくわかりました。それでは最後に、「食品照射」についてももう少し詳しく教えて下さい。



放射線博士：殺菌や殺虫、発芽防止のために、食品・農作物への放射線照射を行うことを「食品照射」といい、放射線で処理された食品を「照射食品」と呼びます。食品照射のメリットとして、①温度がほとんど上がらないため、生鮮食品や冷凍食品の処理が可能で、色や香り、栄養素が高品質に保たれる、②薬剤の使用による残留毒性や環境汚染の問題がない、③食品を内部まで均一に処理することが可能で、効果の信頼性が高い、④密封包装後の処理が可能で、微生物や害虫による再汚染を防ぐことができる、ことを挙げることができます。

一方、デメリットとして、①コストが高い。実用化されるのは商品価値が高くメリットが大きい場合や、他に有効な手段がない場合に限られる、②許認可手続きの負担が大きい、③食品によって向き不向きがある。食材や照射条件によっては、風味や加工適性が変わることがある、④放射線は、怖いイメージが持たれやすく、誤解・敬遠される恐れがある、ことを挙げることができます。



リケジョさん：どのような食品に対して、放射線照射が行われているのですか？

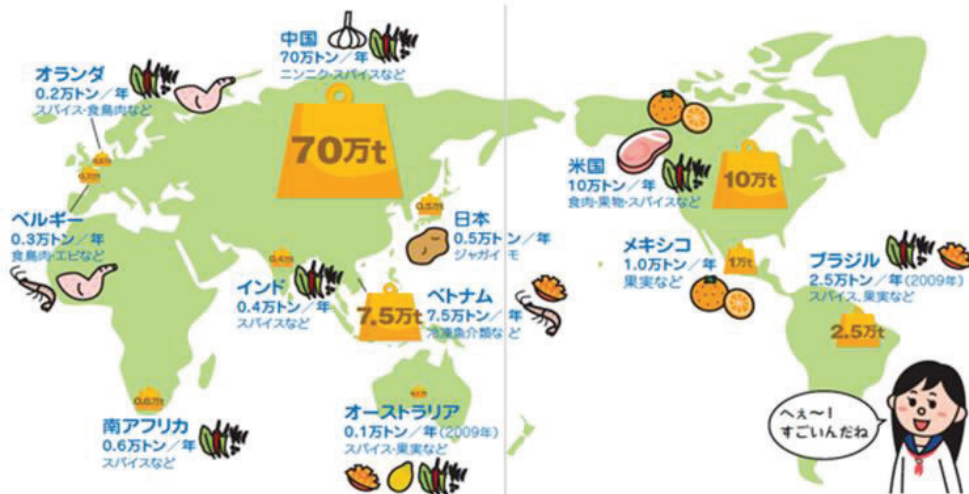


放射線博士：「食品照射」という言葉を聞いて、私は、今から約10年前の2010年、山崎直子宇宙飛行士が宇宙ステーションで、放射線を照射した「スモークターキー」をおいしそうに食べていたのを思い出しました。これも「食品照射」の一例です。宇宙では長期間保存ができないと宇宙食としては使えません。宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、常温で長期間(1年半以上)保留できるようにするために、放射線照射で滅菌処理した食品を用意したのです。

さて、世界における食品照射の情報状況は、国連食糧農業機関(FAO)/国際原子力機関(IAEA)がデータベースにしています。下記の図を見てください。2013年の、世界における食品照射の処理量を整理したものです。約40の国・地域で、合計約100万トンに及ぶ様々な種類の食品照射が行われています。今世界で、最も多くの量の食品照射を実施している国は中国です。

世界で利用されている放射線への食品照射（2013年）

＊2013年の世界における食品照射の処理量は
約100万トンと推定されています。



参考：放射線が“食品の衛生や保存の役に立つ”って知ってる？
（日本原子力産業協会 2016年3月）

下記の図を見てください。食品や農作物に使われる線量範囲は、滅菌（すべての有害な微生物を死滅、または除去すること）を必要とする宇宙食や病人食のような特別な場合を除いて、0.15 キログレイ（kGy）～10 キログレイ（kGy）^{iv}の範囲にあります。

加熱や薬剤と比べた放射線照射のメリット

- 非加熱処理のため、色や香り、栄養素が高品質に保たれる
- 薬剤を使わないので、残留毒性や環境汚染の心配が無い
- 透過力が強く、包装後に内部まで均一に処理できる

食品照射の実用例と必要な線量

1. 芽止め（保存中の発芽防止） ジャガイモ、タマネギ、ニンニク	～0.15kGy
2. 病害虫・寄生虫の殺虫 穀類、熱帯果物、食肉・魚介類、切り花	0.1～1 kGy
3. 病原菌・腐敗菌の殺菌 スパイス・ハーブ類、食肉・魚介類、果実、生薬	～10 kGy
4. 無菌化（滅菌） 宇宙食、病人食、食品容器、無菌動物用飼料	20～50 kGy

（注）緑色の品目は食品ではないが参考として併記

（引用：北陸原子力懇談会資料）

ところで、日本で現在、放射線照射が認められているのは、唯一、ジャガイモの芽止めだけです。ジャガイモは、時間が経過すると発芽して食べられなくなってしまうますが、ジャガイモの芽にコバルト 60 ガンマ線を当てることによって発芽を抑えることができますので、ジャガイモを長く保存することが可能となるのです。

^{iv} グレイ とは、放射線によって人体をはじめとした物体に与えられたエネルギーを表す単位。子どもが胸部 CT 検査を 1 回受けると、肺の被ばく線量は約 0.25 グレイと言われている。



リケジョさん：ガンマ線を当てると、なぜ、ジャガイモの発芽を抑えることができるのですか？



放射線博士：ガンマ線をジャガイモに照射すると、芽のもとになる細胞（発芽細胞という）

の遺伝子を傷つけて芽が出るのを抑えることができます。ガンマ線はジャガイモを透過してしまうので、ジャガイモの中には残りません。ジャガイモは収穫後2〜3か月の休眠期間が過ぎると発芽してしまうため、通常は低温貯蔵（2℃前後）しています。しかし、気温が高くなってくる春先はスーパーの店頭などでどうしても発芽してしまうため、ガンマ線を当てて芽が出ないようにしています。芽が出たジャガイモは、ソラニンという有害物質が増えて、食中毒を起こすことがあります。

少し細かい話になりますが、1972年に厚生省（当時）がジャガイモの放射線照射を許可しました。そして、1973年の収穫期から北海道の士幌町にあるコバルト60ガンマ線照射施設で「商業照射」が始まりました。しかし、ガンマ線を照射したジャガイモの近年の出荷量は減少傾向にあるようです。ジャガイモの照射許可の後にわが国では、大規模なボイコット運動が起きましたが、その時に提唱された「放射線は怖い」という言葉の影響が残っているのかもわかりません。その後、国際機関の安全性評価の結論[▽]が出されても、ジャガイモだけではなく、それ以外の照射食品の安全性についても議論が進まず、今日に至っています。

そのような時に次のような記事を目にしました。北海道足寄町（あしよろちょう）教育委員会給食センターから発信された情報（2021年5月26日（水）の給食）です。すなわち、「じゃがいもといえば、十勝では士幌町が有名です。こちらではガンマ線照射で芽止めがされております。発芽を抑えることで長期間栄養を損なわないで保存ができ、品薄になる時期でも鮮度をたもって使用できるのが利点です。『放射線を当てるので心配な声もありますが、放射線は食物には残らないとされております。』そんな士幌産じゃがいもを使用して、今日は辻栄養教諭自慢の給食が提供されました。」

考えさせられますね。



リケジョさん：放射線が農業の分野でも有効に利用されていることがよくわかりました。でも食品照射の実用化については、日本が世界から取り残されているような印象が残ります。消費者理解が難しいと最初からあきらめず、まずは、科学的に安全性をはっきりと確かめて、そのうえで社会的な合意形成をはかる道を探ることも大事なことでないでしょうか。博士、ありがとうございました！

（原産協会 人材育成部）

「解説：イオンビーム育種の特徴」

イオンビームは、TIARA等の大型加速器を用いて、原子核（イオン）を光に近い高速度で加速し、正に電荷したビームを取り出す仕組みです。このビームの透過性は、ガンマ線に比べて低いものの、植物の種子や培養体に照射することにより、突然変異を起こすなどの局所的に大きなエネルギーを与え、また透過深度も調整できるという特徴があります。

[▽] 世界保健機構（WHO）は1980年に「定められた方法で放射線を使用すれば、新たに生成される化学物質による悪影響も、栄養成分の増減も、従来の加工方法と差はない」と結論した。具体的には、「10kGy以下の総平均線量でいかなる食品を照射しても、毒性学的な危害を生じることはない」という結論が出された。

植物への応用では、たとえば、種子に照射して、ある遺伝子のみに突然変異を起こすことが可能であり、従来利用されてきたガンマ線とはひと味違った品種改良の可能性を秘めています。
下記の表と図を見てください。キクの品種改良の一例です。

イオンビームとガンマ線におけるキク花色変異スペクトルの比較

変異原	変異体の発生頻度(%)					
	白	薄桃	濃桃	橙	黄	複色／条斑
非照射	0	0.3	0	0	0	0
ガンマ線	0	27.7	2.1	0	0	0
イオンビーム	0.3	4.6	0.3	0.3	0.2	10.2



[出典] S.Nagatomi et al. : JAERI-Review 96-017, 50-52(1997)

日本原子力研究所（現在は量子科学技術研究開発機構）はイオンビームを用いて 1998 年 6 月に、従来のガンマ線の照射では得られなかった「複色」や「斑条（まだらな縞模様）」の新種（かがり弁ギク）を作り出すことに成功しました。ガンマ線では、ほとんどの変異体では淡桃か濃桃への花色変異を示し、しかも大部分が単色でしたが、イオンビーム照射では白、黄、赤紫などに種類が広がり、また同時に一つの花に二色以上が混ざる複色や、花卉にストライプのはいる縞模様タイプの変異体が誘発されることが発見されました。



「原子カワンポイント」

あなたに伝えたい放射線の話（7）

工業分野における放射線利用ーその1：半導体の加工ー

- 半導体を作るため、放射線が利用されています。
- 半導体は、エアコンの温度センサー、炊飯器の火力制御、パソコンを動かすCPU(中央演算処理装置)など、さまざまなデジタル家電製品に使われています。
- 半導体技術を活用することによって、私たちの暮らしがより安全で快適なものになると同時に、地球環境への負荷の軽減に寄与しています。



リケジョさん：工業の分野で放射線はどのように利用されているのですか？



放射線博士：上記の図を見てください。放射線の利用の中で、工業利用はかなりの割合を占めていますが、その中で一際目立つのが、細かい細工を必要とする「半導体の加工」です。



リケジョさん：半導体って、聞いたことはあるけれど、あまりよく知りません。半導体とは何なのか、教えてもらえますか。



放射線博士：実は半導体は、私たちの身の回りにたくさんあり、知らない間に使いこなしています。家庭の中で使われている半導体については、後で紹介しますが、まずは下記の図を見てください。



参考: はじめての半導体(株)フェローテックホールディングス

半導体とは、電気を通す導体と電気を通さない絶縁体の中間の性質を持つ物質で、条件によっては電気を通したり、通さなかったり、両方の性質を持ち、しかもその性質を人間が制御できるということでもユニークな物質です。

半導体とはもともと、シリコン (Si) やゲルマニウム (Ge) などの物質を意味する言葉でした。これらは、通常、絶縁体のように電気を通さないのですが、ある条件（温度の変化、光の照射、不純物など）を加えると、電気を通すように変化する特性を備えています。

しかし、最近は、半導体の素材であるシリコンだけではなく、シリコンから作られるダイオードやトランジスタ、およびこれらの「半導体素子」を組み合わせた電気回路（IC：集積回路といいます。詳しくは後段の「解説1」を参照ください。）などを総称して「半導体」と呼ぶケースが多く見られるようになりました。



リケジョさん：ちょっと難しいですね。ダイオードやトランジスタという言葉が出てきましたが、それってどんなものですか？



放射線博士：まずダイオードですが、これを一口でいうと、電気の流れを片方だけに制限する機能（整流機能という）を持った素子です。下記の図を見てください。



電圧を一定にする

交流を直流に交換したり、逆流を防ぎます。



電気の流れを整える

電源電圧の基準となったり、過電圧から回路を保護します。



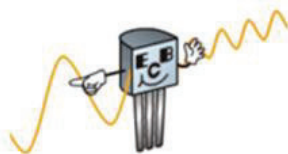
検波する

ラジオなどの無線信号から、音声信号を取り出します。

参考:ダイオードとは？村田製作所技術記事

ダイオードは、交流を直流に交換したり、逆流を防ぎます。また、過電圧から電気回路を保護します。さらに、ラジオなどの無線信号から、音声信号を取り出します。

次に、トランジスタについて説明します。下記の図を見てください。



信号を増幅する

小さな信号を何倍にも大きくします。



回路をオン/オフする

信号によって電気を流したり、止めたりします。

参考:トランジスターとは？村田製作所技術記事

トランジスタを一口でいうと、小さい電気の信号を大きくしたり（増幅機能という）、電気の信号の流れを高速でオン、オフするスイッチのような機能を持った素子です。

トランジスタラジオは、増幅回路にトランジスタを用いたラジオ放送受信機の総称ですが、1950 年ごろまで使われていた真空管の代わりに、半導体素子のトランジスタを使うことで大幅な消費電力の低減がもたらされ、さらに小型化・軽量化・携帯化が可能になりました。



リケジョさん：やっぱり、なかなか難しいですね。でも、ダイオードやトランジスタが重要であることはわかった気がします。ところで、放射線は何か関係があるのでしょうか？



放射線博士：さきほど説明した通り、ダイオードやトランジスタはおもにシリコンを素材として作られています。適量の不純物として、ごくわずかな原子（ホウ素やリンなど）を、加速器ⁱを使ってイオンの状態でシリコンに打ち込むと、「不純物半導体」と呼ばれるものになります。ダイオードやトランジスタは、この不純物半導体から製造されます。これが、半導体加工における放射線利用の一つです。

加えて、もう一つ、微細な半導体集積回路「IC」を描く工程に、放射線（電子線やイオンビーム）が有効利用されています（詳しくは後段の「解説2」を参照ください）。



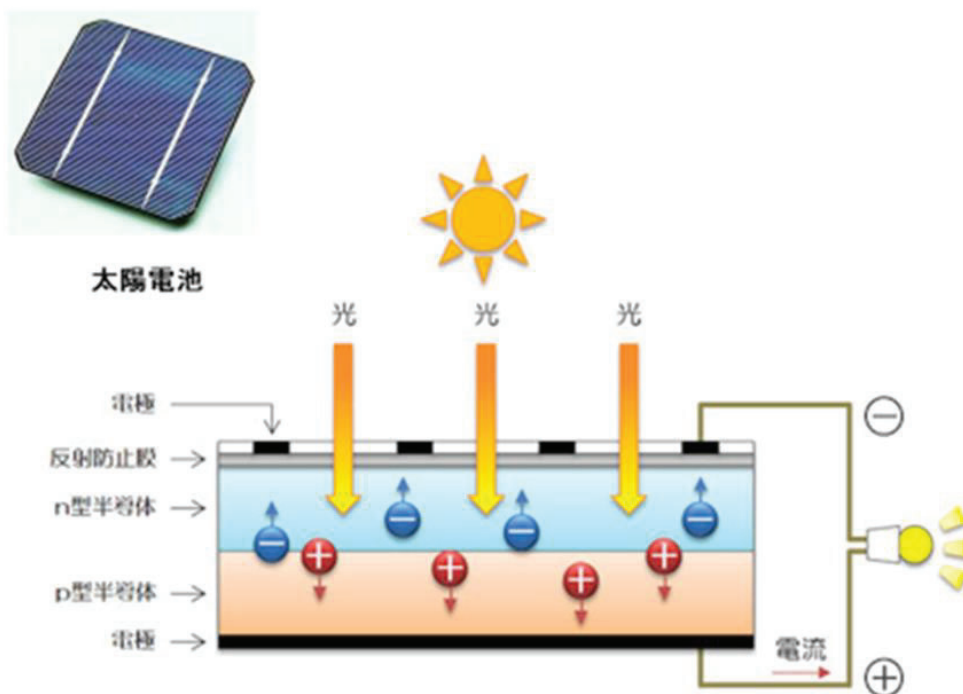
リケジョさん：半導体が放射線を利用して作られているのですね。そのような半導体は、私たちの暮らしの中でどのように使われているのですか？



放射線博士：まず家庭の中で使われている半導体の事例を挙げてみましょう。

エアコンには温度センサーが使われていますが、そのセンサーは半導体でできています。炊飯器でおいしくご飯を炊けるのも、半導体で火力をきめ細かく制御しているからです。パソコンを動かすCPU（中央演算処理装置）も半導体です。そのほか、携帯電話やスマートフォン、デジタルカメラ、テレビ、洗濯機、冷蔵庫など、さまざまなデジタル家電製品に半導体は使われています。

また近年、地球温暖化対策の一つとして「太陽光発電システム」が注目されています。下記の図を見てください。



参考：太陽電池の発電原理(solartech.jp)

ⁱ 加速器は、電場や磁場を用いて電子やイオンなどの荷電粒子を加速する装置である。これによって加速された荷電粒子は電離放射線となる。

太陽電池は、不純物半導体（n型半導体とp型半導体）からできています。

このように、半導体技術を活用することによって、私たちの暮らしがより安全で快適なものになると同時に、地球環境への負荷の軽減に寄与しているのです。

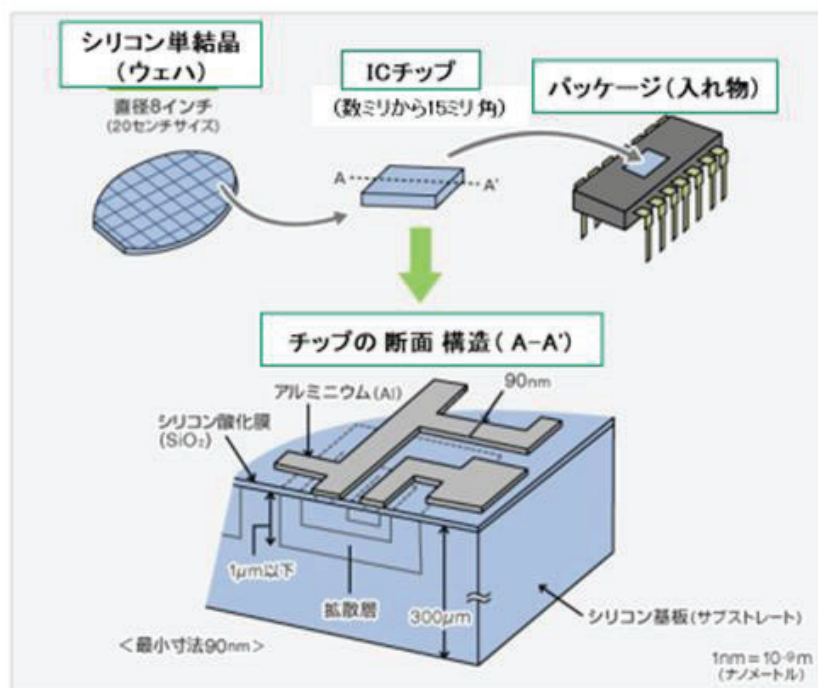


リケジョさん：ちょっと難しかったですが、半導体が放射線で作られていることを知れて良かったです。でも、多くの人には知らないのではないのでしょうか。放射線が私たちの身の回りで役立っていることが、もっと多くの人に知ってもらえるといいですね。博士、ありがとうございました！

（原産協会 人材育成部）

「解説 1：集積回路（IC）とは？」

集積回路（Integrated Circuit：IC）は、1つの極微小な IC チップの上に、ダイオード、トランジスタなどの単機能（ディスクリート）半導体を多数作り、まとめた電子部品であり、複数の端子を持つパッケージに封入されています（下記図参照）。



集積回路（Integrated Circuit）は、ひとつのシリコン半導体基板の上に、トランジスタ、抵抗（電気抵抗）、コンデンサなどの機能を持つ素子を多数作り、まとめた電子部品です。このICは、複数の端子を持つパッケージに封入されています。

参考：IC(集積回路) について：半導体の部屋：日立ハイテク

「解説 2：放射線による半導体集積回路（IC）の微細加工技術」

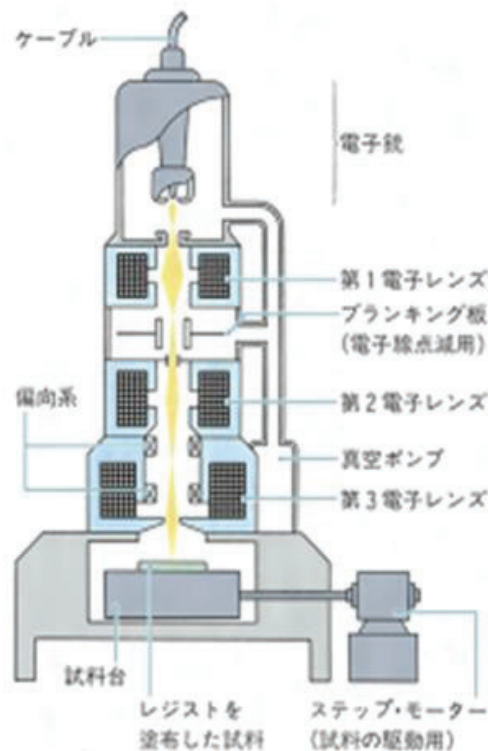
5 ミリメートル角ほどの半導体集積回路（IC）の中には、数百万個の素子があり、IC 回路のパターン（電子回路）の線の幅は、なんと髪の毛の太さの 50～100 分の 1、バクテリアやスプレーの霧の粒く

らの大きさに相当します。実はこのような微細な電子回路を描く工程の一つに放射線（電子ビーム）が有効に利用されています。

電子ビームを作ったり、一点に集めたり、向きを変えるためには電気の力を利用します。電子はマイナスの電気を持った粒子ですから、プラスの電圧がかかっている金属板（陽極）に引き寄せられます。陽極の中央に穴をあけておけば、そこから電子が飛び出していきます。

このようにして電子ビームを作ることができます。最終的には、電子レンズを用いて細く絞った電子ビームを、電子ビームの無機を変えるための装置を利用してビームの方向を制御し、シリコン・ウェハの目的の位置に当たるようにすることができます。

シリコン・ウェハにあらかじめ、電子ビームに反応する物質（レジストといいます）を塗っておくと、電子ビームが照射されたところに回路構造を描くことができます（下記図参照）。



電子線描画装置の原理(日本大百科全書 電子線リソグラフィーの解説)



「原子カワンポイント」

あなたに伝えたい放射線の話（８）

工業分野における放射線利用－その２：性質の改良・非破壊検査－



- ラケットのガットや車のタイヤに放射線を当てることによって、より丈夫なものにすることができ、寿命を延ばすことができます。
- 放射線を利用すれば、目には見えない物体の内部の様子も、調べることができます。



リケジョさん：前は半導体について教えてもらいましたが、他にも工業の分野で放射線が利用されていたら、ぜひ教えてください！



放射線博士：上記の図を見てください。工業の分野で放射線は、「半導体の加工や評価」以外にも、ラケットのガットやタイヤなどの「性質の改良」、空港の手荷物検査やエンジン内部の点検などの「非破壊検査」など、さまざまな分野で幅広く利用されています。

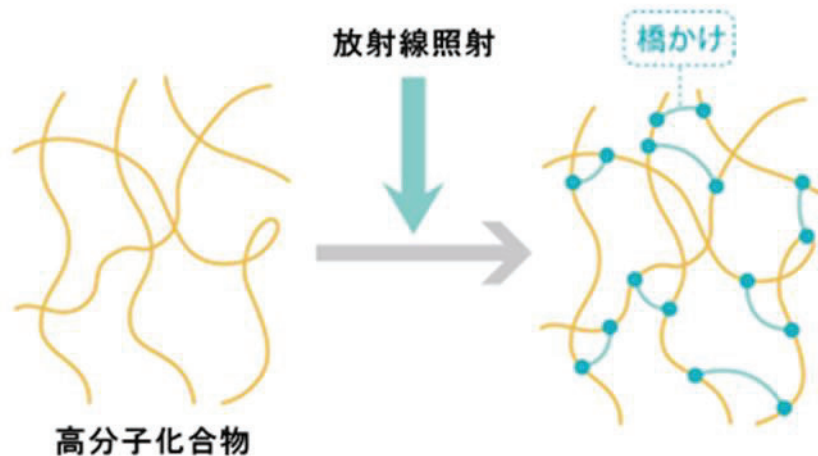


リケジョさん：ラケットのガットや車のタイヤですか？私の家にもありますが、放射線のイメージは全くありません。どういう関係があるのでしょうか？



放射線博士：プラスチックやゴム、ナイロンなどの合成繊維は、小さい分子がたくさん並んでできていて、これらを「高分子化合物」といいます。ガットやタイヤは、高分子化合物からできています。高分子化合物はしなやかで強く、いろいろな形がつけられるという性質がありますが、高分子化合物にいろいろな機能を加えて、さらに使いやすくするために放射線が使われています。

ガットは主にナイロンのような高分子化合物を素材として作られています。下記の図を見てください。



放射線による高分子化合物の橋かけ(架橋)応答

「参考: 岩崎電気(株)光・環境分野関連資料」

放射線を照射すると、まるで高分子化合物に橋がかかったような状態（橋かけ、または架橋といいます）になります。そうするとラケットのガットに弾力性が生まれ、テニスボールをコントロールしやすくなると同時に耐久性も高めることができるのです。

車のタイヤ加工にも放射線が利用されています。下記の図を見てください。



*** タイヤのゴムの流動性を制御するため、タイヤの骨格の役割を持つ「カーカスプライ」や、タイヤの内部にはりつけて空気の透過を抑制する「インナーライナー」への放射線照射が行われている。**

**参考: タイヤゴムシートへの電子線架橋の利用について
(NHVコーポレーション)**

タイヤはゴムでできていますが、天然の生ゴムでは弱いためそのままでは使用できません。そこで、ゴムに放射線を照射します。するとラケットのガットと同様に、ゴムの分子がくっつき合って橋を架けたような状態になり、網目のような構造になってゴムの流動性が抑えられ、位置ずれなどを防ぐことができます。これにより、ゴムシートの厚みを薄くすることができ、材料コストの低減と、タイヤの軽量化、高品質化に貢献しているのです（放射線による橋かけの詳細につきましては後段の解説を参照ください）。



リケジョさん：放射線にはすごい能力が潜んでいることはわかりましたが、身近なものが放射線で作られていると聞くと、ちょっと怖い気がします。放射線で作られたものに触っても、被ばくはしないのでしょうか？



放射線博士：多くの方が、「放射線をあびると放射能をもつようになる」と、恐れを抱いているようです。しかし健康診断でエックス線ⁱ撮影をしても自分の身体が放射能をもつようになるとは誰も思わないでしょう。

さきほど説明した車のタイヤの加工では、電子線ⁱⁱの照射が行われています。また、ガットにはガンマ線ⁱⁱⁱが利用されています。いずれの場合も、それほど高いエネルギーの放射線は使われていないので、放射線の照射によって素材が「放射能」を帯びることはありません。放射線で作られたものに触っても被ばくの心配はありません。



リケジョさん：触っても大丈夫なのですね。安心しました。さて、二つ目に空港の手荷物検査などに利用されているということでしたね。空港の手荷物検査といえば、開けていないのに中身が透けて見える映像を見たことがあります。もしかしてあれが放射線なののでしょうか？



放射線博士：その通りです。中身が透けて見えるなんて、不思議ですね。人の五感に頼らずに、物体の内部の状態を調べることができるようになったのは、19世紀に放射線の一種であるエックス線が発見されてからです。

放射線は物質を透過することができ、透過するあいだにエネルギーを失っていく性質があります。失うエネルギーの量は、物質ごとに異なります。このことをうまく利用すると、例えば空港での手荷物検査のように、カバンやスーツケースなどに当てたエックス線が透過した画像から、金属製の危険物の存在を調べることができるのです。



手荷物のエックス線検査例
「参考：(株)サンモニターX線検査機一覧」

ⁱ 高エネルギーの電磁波で、放射線の一種。一般に高速の電子を金属に衝突させることで発生する。

ⁱⁱ 一定方向に進む電子の流れで、放射線の一種。電子ビームともいう。

ⁱⁱⁱ エックス線と同じ高エネルギーの電磁波で、放射線の一種。放射性物質の崩壊により発生する。

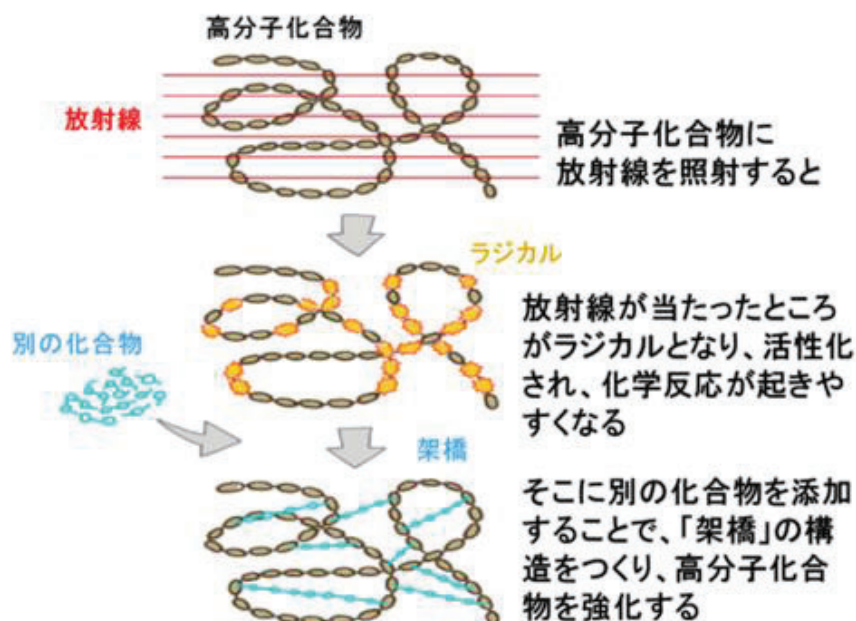


リケジョさん：これまでどちらかというと、放射線って怖いもの、と思っていたのですが、工業の分野でこれほど多く利用されていることを知った今では、放射線ってなくてはならないもの、との気持ちが大きくなってきました。博士、ありがとうございました！

(原産協会 人材育成部)

「解説：放射線をあてると高分子化合物に橋がかかる」

放射線を高分子化合物にあててラジカルを作った後に別の化合物を加えると、高分子の鎖の間に橋がかかったような構造ができることもあります。橋かけ（架橋）といい、3次元の網目構造ができるので、高分子化合物の性質が大きく変わります（下記図参照）。



(参考: 多田将の放射線について考えよう)

古いタイヤはドーナツ形をしていて、接地面が丸くなっていますが、現代のタイヤは接地面が平らになっています。タイヤの仕事は、地面にしっかりと取り付くことですから、接地面が広い平らな形状の方が性能はよいのですが、タイヤは風船のように空気を入れて膨らませますから、本来は丸くなるのが自然で、平らにするにはそれなりの技術が必要です。

このような形状を保ちつつ強度を確保するために、車のタイヤは、「カーカス」、「ベルト」、「トレッド」という3層構造になっています。トレッドは地面に接触する層、つまりわれわれが目に見える部分であり、カーカスとベルトはタイヤの強度を保つ補強層です。特に、このカーカスには、架橋と呼ばれる処理が施されています。まさに橋をかけるが如く、別の分子を結合してやることで、材料の強度を上げているのです。現在ではほとんどのタイヤが、この放射線照射の工程を経て作られています。

原子力 ワンポイント



広く利用されている放射線 ⑬

原子力産業新聞では、二〇一一年一月に、「身の周りにある放射線の基礎」について解説する「原子力ワンポイント」コーナーを設けました。

その後、福島第一原発事故に対応して同年四月からは、「緊急時の放射線影響・管理」に論点をシフトして「日本の放射線・放射能基準へ番外編」をとりあげてきました。今、事故から約二年半が過ぎ、今年の八月八日には原発から二十キロ圏内の警戒区域とその外側の計画的避難区域の再編が完了しました。完全な復興にはまだまだ多くの課題が残されていますが、生活再建を目指して将来設計の構築に向けた第一歩が踏み出されたと言えます。ここではもう一度、初心に帰り、「広く利用されている放射線」について解説したいと思います。

今回は、日本が中心となって進めてきた放射線（電子ビーム）を利用して燃焼排煙中の硫黄酸化物や窒素酸化物を除去する環境保全技術などについて紹介します。

ゆりちゃん 放射線で有害な物質を無害なものに変えることが出来るって聞いたけど、本当ですか？

タクさん 火力発電所などで、石炭や石油を燃やしたときに出る煙には、窒素酸化物（ NO_x ）や硫黄酸化物（ SO_x ）といった有害物質が含まれていて、大気中で

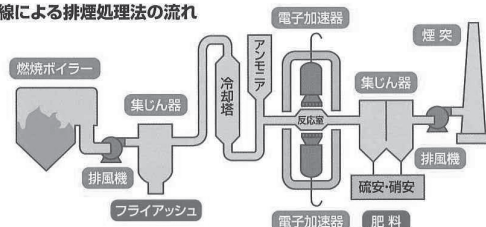
太陽光の作用を受けて硫酸や硝酸に変化します。これが、雨に含まれて地上に達したものが酸性雨であり、樹木の枯死などの被害をもたらします。わが国では一九七三年頃から注目され、諸外国に先駆けて、効果的な処理技術の開発が図られています。そして予め添加硫酸や硝酸に変化しているアンモニアとの中和反応によって最終的には硝酸アンモニウム（硝安）、および硫酸アンモニウム（硫安）などの有用な肥料になります。つまり、有害物質から肥料を作ることができるのです。

放射線でも有害物質を無害化し環境保全

発が進められました。すなわち、この煙にアンモニアを加えた後に、図中の電子加速器から出てくる電子ビームを当てると、窒素酸化物や硫黄酸化物はそれぞれ硝酸（ HNO_3 ）、および硫酸（ H_2SO_4 ）に変わり、その後ボーランドや中国の火力発電所でも有効に活用され、大気汚染の緩和にすいぶん役立てられたのです。ゆりちゃん 下水処理にも「放射線は有効」って聞いたことがあ

出典：中部原子力懇談会パ
ンフレット「生活に役立つ放射線」

電子線による排煙処理法の流れ



放射線を当てて、肥料や土壌改良剤にするリサイクル技術が、インドやアルゼンチンでは実用化しています。

ゆりちゃん 放射線はそのほかにも環境改善に役立つ可能性があるので、本当ですか？

タクさん まだまだたくさんあります。その一つとして発ガン性のあるタイオキシシンに電子ビームを当てて分解・減少化する技術開発がなされ、ごみや汚染土壌の焼却灰を土木原料などに再利用するための焼却施設などでの実用が期待されています。（原産協会・人材育成部）

原子力 ワンポイント

温泉水にラドンが含まれるのを発見したのは H. S. アレンです。一九〇三年、世界遺産「キングズ・バス(英国)」で見いだされました。日本で鳥取県三朝(ラドン)温泉が発見されたのはその約七百年前です。それ以来長く「湯治の湯」として親しまれてきました。



広く利用されている放射線 ⑬

ゆりちゃん ラドンって何ですか？

タクさん キュリウムが発見した「ラジウム」は知っていますか。

ラドンはこのラジウムが崩壊してできたものです。ラドンは大気中に浮遊する自然放射能で、日本では、室内の空気一立方メートル中には平均で、ほぼ十五ベクレル(本コラムではこの数値をバックグラウンドと呼ぶことにします)含まれています。温泉から出てきたラドンを吸気、あるいは皮膚から吸収すると内部被ばくを生じます。でもその量は、とても少なく、放射線影響を心配する必要のないことが、岡山大学と

科学的研究進む ラドン温泉の効能

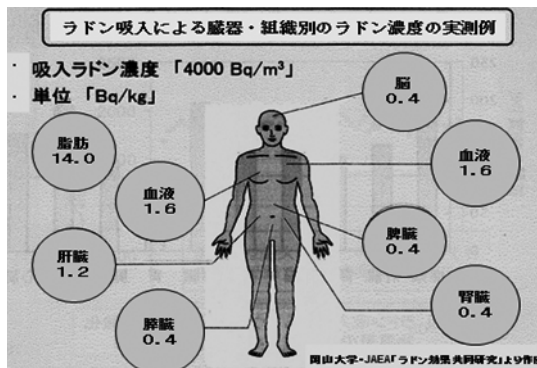
日本原子力研究開発機構(JAEA)の共同研究で科学的にもはっきりしてきました。

ゆりちゃん どういうことですか？

タクさん 岡山大学は、三朝地区に医学部付

属病院三朝医療センターを設置して温泉治療をしています。またバックグラウンドの約三百倍に近いラドンサウナ(約四千ベクレル)を設置し、一日一回約四十分、隔日で三〜四週間、合計六〜八時間過ご

間、合計六〜八時間過ご



まだよくわかっていないラドンの体内挙動を明らかにでき、生体に及ぼす刺激効果を科学的に証明できれば、ラドン温泉を利用した医療の発展に貢献できるので

は、三朝地区に医学部付

す。ゆりちゃん それでどうなったのですか。タクさん

共同研究は二〇〇七年度から開始されました。岡山大学とJAEAは、マウス百五十匹を飼育しながらラドンの体内挙動を高濃度ラドンを吸気させる「大規模動物実験設備」を構築しました。また、最近、これまでは計算でしか予測できなかった吸入ラドンの「臓器別の蓄積量」を、動物

【原子力フロンティア56】輸血用血液製剤には放射線を事前に照射

医療において輸血は欠かすことができない治療法です。しかし多くの人々は、「輸血用の血液製剤が事前に放射線照射されている事実」を知らないようです。なぜ、輸血用の血液製剤に放射線を照射するのでしょうか。今回はその理由を探ってみます。

ゆりちゃん：輸血用の血液製剤にはどのようなものがあるのですか？

タクさん：血液を試験管に入れたまましばらく放置すると、図1に示すように、上下2つの層に分かれます。上層の液体成分が血漿（けっしょう）で、下層は有形成分（赤血球、白血球、血小板）である血球です。輸血用の血液製剤にはこれらを分離・精製した「血漿製剤」、「赤血球製剤」、「血小板製剤」、「全血製剤」があります。血漿製剤は「凝固因子の欠乏により出血しやすくなった患者」、赤血球製剤は「外科手術等による出血や、慢性貧血の改善」、血小板製剤は「血小板の減少や異常により止血が不十分なとき」に使用されています。全血製剤は、血液に保存液を加えたもので、大量輸血時などに使用されることもありますが、現在ではほとんど使われていません。

ゆりちゃん：輸血用の血液製剤に、なぜ、放射線を照射する必要があるのですか？

タクさん：輸血には、ウィルスなどに感染するリスク対策も大事ですが、供血者（ドナー）の血液製剤に、免疫の機能を持つリンパ球（白血球の一種）がもたらす副作用である「輸血後GVHD（移植片対宿主病）」、を起こさないようにすることが必要です。輸血後GVHDとは、輸血用の血液中に含まれるドナーのリンパ球が排除されず、患者のリンパ球を異物と見なして攻撃し、臓器などを傷つける病態です。以前は、免疫不全の患者にのみ発症すると考えられていましたが、図2に示すように、血縁者から輸血を受けるような場合にも生じることがわかり、今ではできるだけ血縁者からの輸血は回避すべきとされています。典型的な輸血後GVHDの症状は、輸血を受けてから1～2週間の後に発熱・紅斑が起り、さらに肝障害・下痢等の症状が続き、輸血から1年以内にほとんどの人（99.9%以上）が死に至ります。治療法は未だ確立されていません。発症予防が唯一の対策方法です。そのため、厚生労働省は1999年、「輸血療法の実施に関する指針」を策定し、輸血用の血液製剤に、「15Gy（リンパ球の増殖を抑制する最低線量）～50Gy（治療に必要な赤血球・血小板の機能や寿命を損なわない上限線量）の放射線を照射、ドナーのリンパ球を根絶してから輸血を行う」という具体案を示しました。ちなみに人が一時に全身にエックス線の照射を受けた場合、被ばく者の半数が60日以内に死に至るとされる線量は、約4Gyです。日本赤十字社では同指針に基づき、放射線照射した輸血用の血液製剤（リンパ球のない血漿製剤は除外）を15年以上にわたり医療機関へ供給しており、「2000年以降は現在に至るまで輸血後GVHDはゼロに抑えられている」といいます。

ゆりちゃん：放射線照射された血液製剤を、患者に輸血しても、放射線による影響はないのですか？

タクさん：血液製剤の照射に用いる専用装置は、線源の種類により、エックス線血液製剤照射装置とガンマ線血液照射装置に大別されます。放射線の照射はスイッチのオン／オフにより制御でき、照射をやめれば直ちに放射線の発生を止めることができます。また、放射線を照射したからといって、エックス線やガンマ線が、血液製剤中に危険物質（例えば放射線を出す物質など）が生成し、残留することはありませんし、放射線照射された血液を輸血された人に健康障害が生じた事実はありません。放射線照射によって重篤な輸血後GVHDが防げたのです。

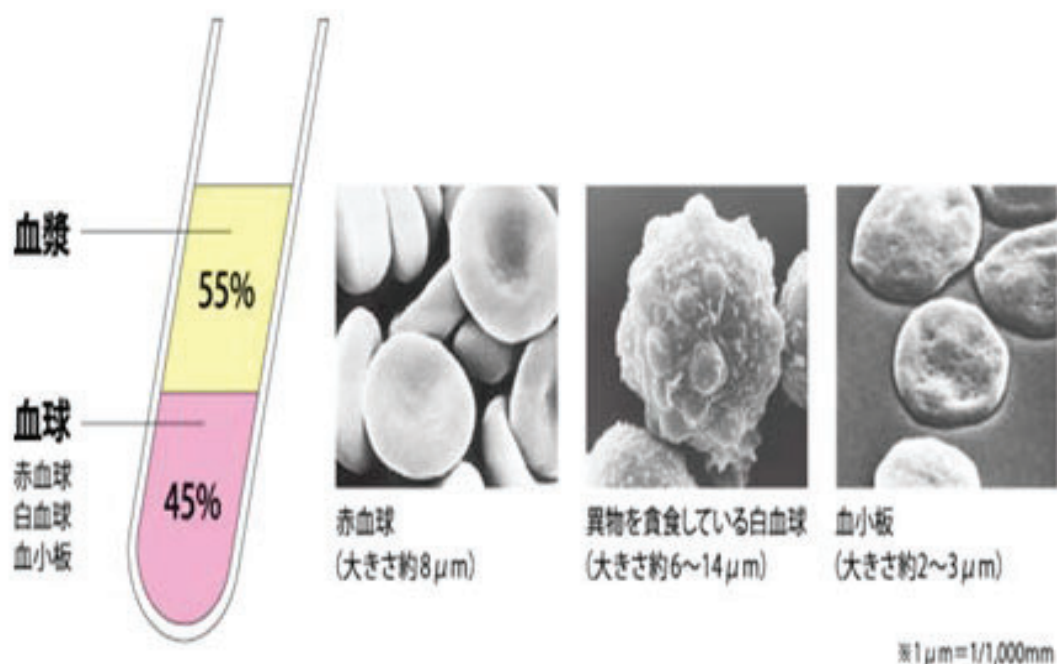
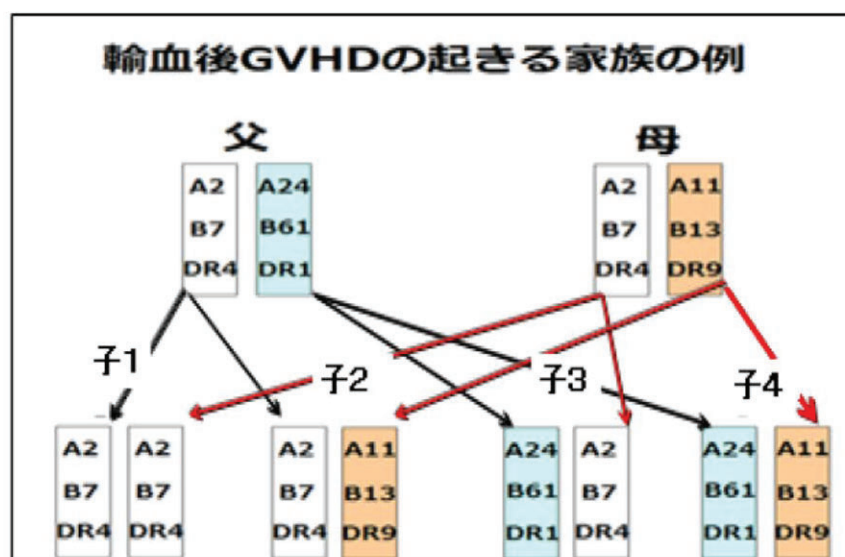


図1 血液の成分(日本赤十字社資料より)



赤血球に血液型(A型、B型、O型など)があるように、白血球にも血液型(表面に付着したマーカー「A,B,DRなど」で決まる)がある。本図は、4人の子供がマーカーを両親から一つずつ受け継いだ様子を表すものです。同じ種類のマーカーを受け継いだ「子1」がドナーとなって、片方のマーカーだけが同じな「父・母・子2・子3」に輸血された場合には、ドナーが患者を異物とみなして攻撃し「輸血後GVHD」を引き起こす。しかし、「子1→子4や子1が被輸血者」になる場合には、ドナーを異物と認めて患者が抵抗し、「輸血後GVHD」を起さない。

図2 免疫不全でない患者が輸血後GVHDになる場合

【原子力ワンプoint】 広く利用されている放射線

(113) 「ピラミッド透視、長半減期核種の消滅処理など」ミュー粒子の意外な使い道(その3)

広く利用されている放射線(46)で、「福島第一原子力発電所（以下、福島第一原発）事故で溶け落ちた核燃料の位置や大きさを、宇宙からの放射線“ミュー粒子”で探る技術が話題になっている」と紹介しました。その後、「ミュー粒子による原子炉の透視」は成功したのでしょうか。今一度、探ってみましょう。

ゆりちゃん：もう一度、簡単に「ミュー粒子による原子炉透視」の目的を教えてください。

タクさん：前の紹介から早や3年が経過、覚えていなくて当然ですね。東京電力は今、原子炉の廃止措置にむけた取組みを真剣に進めています。溶け落ちた核燃料（以下、燃料デブリ）の位置や大きさを知り、安全に取り除く方法を早く決めなくてはならないのですが、“燃料デブリ”が在る場所の放射線レベルは極めて高く、人が近づくことができません。そのため、エジプトのピラミッド探査で活躍したミュー粒子（前回の本コラムで紹介）を使って原子炉内部を透視する試みが、2015年2月から9月にかけて福島第一原発1号機で、2016年3月から8月に2号機で、2017年5月から9月に3号機でそれぞれ行われました。

ゆりちゃん：ミュー粒子を使った原子炉透視の内容について、もう少し具体的に教えてください。

タクさん：図1を見て下さい。ミュー粒子を使った透視技術には散乱法と透過法があります。散乱法は透過法より詳細に燃料デブリ分布を識別できるという長所がありますが、高度な分析のために検出器が大型になってしまうという短所があります。一方、透過法は細かな分析が「苦手」という短所がありますが、検出器を小型化できるという長所があります。福島第一原発では燃料デブリの位置と分布のおおよその状況を早期に知る必要があったため、検出器を比較的簡単に設置できる「透過法」を採用し、ミュー粒子などの「荷電粒子」が通過すると蛍光する「シンチレータ」を使って、ミュー粒子の強度と入射方向を測定し、燃料デブリの位置と分布状況を評価しました。

ゆりちゃん：実際に原子炉の透視を行った結果はどうだったのですか？

タクさん：図2を見て下さい。福島第一原発の1号機、2号機および3号機において原子炉を透視した結果が次のように整理されています。すなわち、「1号機では炉心域に燃料デブリの大きな塊はないことが観測された。このことから、熔融した燃料のほぼ全量が格納容器に落下し、元々の炉心部には燃料がほとんど存在していない」と推定されました。また、「2号機では原子炉圧力容器の底部に燃料デブリと考えられる高密度な物質の存在が観測された。また、炉心の内部にも燃料が一部存在している可能性のあることが観測された。これらのことから、熔融した燃料の一部は原子炉圧力容器下部プレナムおよび格納容器に落下したが、燃料の一部は元々の炉心部に残存している」と推定されました。さらに、「3号機では炉心の内部に燃料デブリの大きな塊は観測されなかった。このことから、多くの燃料デブリが格納容器に落下している」と推定されました。これまで未知であった「燃料デブリ」の状況が垣間見えてきました。

ゆりちゃん：森島先生も、福島第一原発の燃料デブリの観測に参加されたと聞きましたが、本当ですか？

タクさん：広く利用されている放射線(111)で森島先生を「ミュー粒子を検出する特殊な写真フィルム（原子核乾板）を開発してピラミッド内部を探査した人」と紹介しましたが、覚えていてくれたのですね。その通りです。そして、2号機原子炉内部の透視に挑戦しました。2015年3月20日のプレスリリースで「原子核乾板は小型で電源を必要としないため、放射線量が高い場所でも短時間で設置できた。そして、事故により炉心熔融が疑われる2号機と健全な状態の5号機において、ミュー粒子の同時測定を行った。その結果、2号機の炉心内部の物質質量（燃料デブリも含む）は5号機よりも有意に少なく、事故によって炉心

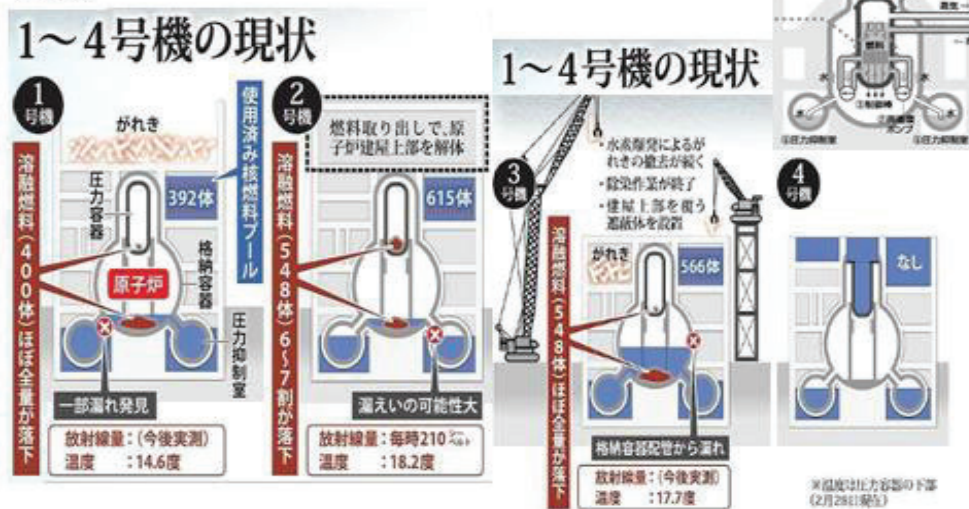
溶融が起こったことを裏付けるデータ取得に成功した」と述べています。その後、東京電力は2018年1月22日、2号機で実施した原子炉格納容器の内部調査の撮影動画を公開しました。圧力容器下部の損傷がそれほど見られず、炉心部に燃料の一部が留まっている可能性が高くなりました。これにより「ミュオン粒子を活用して原子炉内部を透視する技術の実用可能性が裏付けられた」といえるでしょう。

(原産協会・人材育成部)

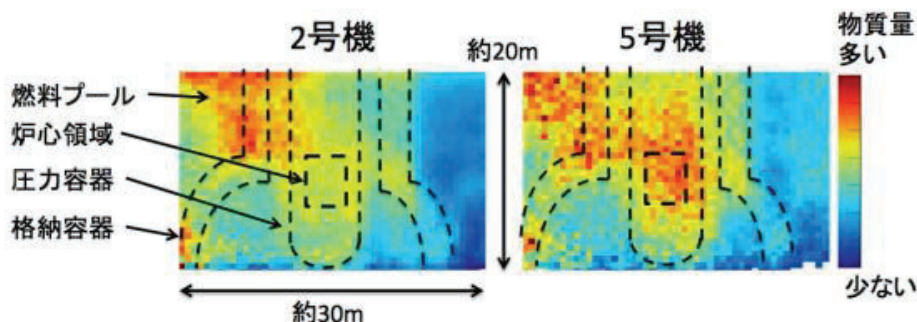
図1. ミュオン粒子を用いた物質分布測定の実理
(東芝作成資料より)

	散乱法	透過法
測定方式	散乱角度	平面強度分布
測定原理		
特徴	・粒子の散乱角度の解析から物質の種類まで識別できる。 ・分解能が高い(30cm単位での識別)。 ・ミュオン粒子の検出器は大型(10m単位)である。 ・検出器の稼動に電源が必要。	・物質の「ある、なし」の判定に優れている。 ・分解能が低い(1m単位での識別)。 ・ミュオン粒子の検出器は小型化(1m単位)できる。 ・検出器の稼動に電源が不要。

図2



毎日新聞(2017年3月3日付)から引用



※カラースケールは、赤い色ほどその方向の物質が多く、青い色ほど物質が少ない。縦軸のスケールは炉心位置における長さ(単位はm)

図3. ミュオン粒子を用いた原子核乾板による福島第一原子力発電所2号機と5号機の透視結果

(参考:名古屋大学プレスリリース「2015年3月20日」より)

原子力 ワンポイント



広く利用されている放射線 ⑪

ら受ける放射線はどこでも同じですか？

を多く含んでいるためといわれています。ゆりちゃん 高くなると放射線はどうなりますか？

タクさん 大地から受ける放射線は地域によって異なります。日本国内では、花崗岩の多い関西地方が高く、関東地方は低い傾向にあります。大阪では年

タクさん 高いところに行く宇宙からくる放射線（宇宙線）をさえるので、富士山頂では平地の五倍の宇宙線を受けます。また、航

私たちは、呼吸や食事などの日常生活を通して、年間約二・四ミリシーベルト（mSv）の自然放射線を受けているのです。また、食べ物によりカリウム40という自然放射性物質が体の中にあつており、ここから放射線が出ています。

(11) 自然の中にある放射線

ゆりちゃん 自然界にある放射線（自然放射線）とはどのようなものですか？

タクさん 自然放射線とは、私たちの身の回り、地球ができたときから自然界にもともと存在しています。私たちは、呼吸や食事などの日常生活を通して、年間約二・四mSv（世界平均）の自然放射線を受けているのです。

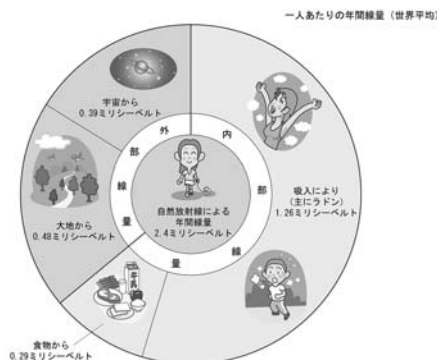
自然放射線のうちわけは、太陽も含めて宇宙から〇・三九mSv、大地から〇・四八mSv、食物から〇・二九mSv、大気中にあるラドンなどで一・二六mSvです。

ゆりちゃん 大地から受ける放射線は年間で平均三・八mSvです。これは土壌中のモナザイトという鉱物がトリウムという放射性物質

人類は自然放射線と共存して生きてきた

間平均〇・四六mSvに対して、東京では年間平均〇・三二mSvと少なくなっています。海外をみると、インドのケララでは、大地から受ける放射線は年間平均三・八mSvです。これは土壌中のモナザイトという鉱物がトリウムという放射性物質

自然放射線から受ける線量



体内、食物中の自然放射性物質

●体内の放射性物質の量

（体重60kgの日本人の場合）

カリウム40	4,000ベクレル
炭素14	2,500ベクレル
ルビジウム87	500ベクレル
鉛210・ポロニウム210	20ベクレル

●食物中のカリウム40の放射線量（日本）

（単位：ベクレル/kg）

干しこんぶ 2,000	干しいたけ 700	ポテトチップ 400
生わかめ 200	ほうれん草 200	魚 100
牛乳 50	食パン 30	米 30
		ビール 10

電事連「原子力・エネルギー」図面集 2011 より

カリウムは自然界に存在するミネラルの一種で、人間の体内で塩分を低下させ血圧の上昇を抑えるなど、健康を保つために必要不可欠な成分です。このカリウムにはカリウム40という放射性物質がごくわずか（〇・〇一％程度）ですが存在していて、いろいろな食品に含まれています。そして、私たちの体内に入ると一部は排泄されますが、一部は体内に残ります。こうして、人の体の中にも、いつもほほ一定のカリウム40という自然放射性物質がたまっていることとなります。

（原産協会・政策推進部）

原子力 ワンポイント



広く利用されている放射線 ②

ルイ・パストゥール医学研究センターの宇野賀津子先生は、「放射線と体内の水との反応によって生じる『活性酸素』が発がんを生じるリスクの主役です。でも生体には、このがん化を抑制する何重もの防御システムが備えられています」と説いています。

ゆりちゃん 「活性酸素が発がんリスクの主役」ってどういうことですか。

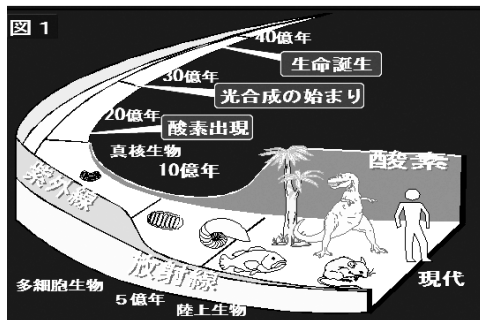
タクさん その理解には人間の長い進化の歴史をたどる必要があります(Ⅱ図1)。まずは「アミノ酸」の生成です。これには諸説ありますが、「炭素・窒素・水素を主成分とする原始の大気と、高エネルギーの宇宙線が反応して創

性の生物であり、発生場所は、深い海の中だったということですよ。

ゆりちゃん それからどうなったのですか。酸を基にして、細胞分裂して子孫を残すことができる「生命」が誕生したのです。ここで注意すべきことは、当時、地球

進化過程で構築された生体防御システム

に酸素がほとんど無く、空からは多量の紫外線が降り注いでいたため、「生まれた生命は、酸素を利用する『好気性の生物』ではなく、増殖に酸素を必要としない『嫌気



出典：電力中央研究所第十六回エネルギー未来技術フォーラム

一部は酸素の少ない海底深くに逃れていきましたが、ほんの一握り、思いもよらぬ行動に出たものがいました。彼らは、「先ず仲間同士で融

大きな「DNA」になったのです。一方、地上では、海中から移動してきた酸素の濃度が徐々に高まってきたので、今から約五億年前にはかなり厚いオゾン層が形成されます。これにより、有害な紫外線が遮られ、生物が地上で生活できるようになりました。しかしここで大きな問題が生じます。それはミトコンドリアに関する問題でした。ミトコンドリアが営む「酸素代謝」によって、動物が活動に必要なエネルギーを得る一方で、代謝に使われた酸素の一部が酸化力の強い活性酸素に変化し、「DNA」を傷

(原産協会・人材育成部)

原子力 ワンポイント



広く利用されている放射線 21

前回の本紙「原子力ワンポイント」では人類が、長い進化の過程を経て、「がん」を抑制する何重もの生体防御システムを構築した歴史をまとめてみました。今回は、この防御システムの実際の構成と機能について紹介します。

ゆりちゃん がんが怖い病気なのは常識ですが、そもそもがんとは何ですか。謎だらけです。

タクさん がんとは、

体の主要な構成要素である「たんぱく質」の設定図である「遺伝子」が傷ついて、正しく情報が伝わらず、分裂・増殖の制御機能を失った細胞が生み出され、この数が

がん発症までには 生体防御の四つの砦

遺伝子の数は二万〜二万五千個と言われている。しかし、どの遺伝子が傷ついても、がんになるというわけではありませ

と、逆に細胞の増殖を抑制する「がん抑制遺伝子」と呼ばれる二つのグループが、深く関係しているのです。これらはちょうど車のアクセルとブレーキの関係にあり、遺伝子に傷が付いて異常な細胞に変異し、両

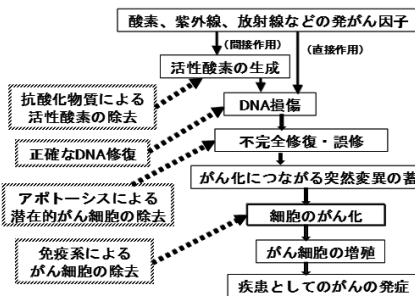
個のがん細胞になった時です。最初に一つのがんの元になる細胞ができてから、がんが発症するまでには、早くても数年、遅い場合には三十年以上の時間が必要です。ゆりちゃん がんの元になる細胞ができた

ら、誰でもいつかは、がんになるのですか。タクさん いいえ、そんなことはありません。生命の進化の過程で構築された「生体防御システム」が有効に働いて、低線量放射線（百ミリのシーベルト以下）であれば、心配することはない

この場合の第三段目が、増殖途中の細胞を自殺（原産協会・人材育成部）

に追い込む「アポトーシスの仕組み」です。次は第四段目の「免疫」です。免疫は、外部からの異物を処理する仕組みですが、身体の中に生じた変異細胞が少しでも残った場合には備えた最後の砦と言えるでしょう。さらに、ルイ・パス

図1 生体の多重防護システム



出典：電中研レポート No. 53

あります。生体防御システムは、第一段目では、酸化物質と呼ばれる物質を使っ

た遺伝子を修復する仕組みです。遺伝子は「緑黄色野菜や果物

広く利用されている放射線 22



タクさん 酸素が、工

ネルギーを生産する体内の工場（ミトコンドリア）で消費されると、反応性の高い物質（活性酸素）がつくられます。この活性酸素がDNAと反応してDNAに傷をつけるのです。一方、放射線の場合は、①DNAに衝突して直接的に傷

DNA損傷の主役は放射線よりも酸素

射線（γ線やガンマ線）がDNAに衝突して直接的に傷をつける割合は、全体の5%くらい」と述べていますが、実は、放射線の場合も酸素と同様、DNAの大部分の傷は「活性酸素」による場合（二本鎖切断）、

よってつくられるので
す。

②鎖が一本だけ切れる場合（一本鎖切断）、③塩基だけが傷つく場合（塩基損傷）——です。一本鎖切断と塩基損傷はほぼ100%修復されることがわかっています。これに較べて二本鎖切断は治しにくく、がん発症の主な原因と考えられています。酸素がつくる二本鎖切断の割合は「一千万個の傷のうち一個程度」なのに、放射線がつくる割合は「百個の傷のうち二個程度」と多いのです。このことかから、従来、体内に取り込まれた酸素が作るDNAの傷は「修復可能」だが、放射線がつくる傷は

損傷の種類 作用源	DNA損傷(総数) (個/細胞/日)	DNA損傷(2本鎖切 断)(個/細胞/日)
酸素(細胞呼吸)	1,000,000	0.1
自然放射線 (1mSv/年 ≒25 μ Sv/日)	0.005	0.0001

「修復不能」という常識
 ができあがっていたの
 です。

ゆりちゃん 日常生活
 活で酸素と自然放射線
 のどちらがDNA損傷
 の主役ですか。

タクさん 米国のマ
 イロン・ポリコーフ博士
 は「がん発症までには生

体防御の四つの砦（前回の原子力ワンポイント）があることを考慮して、「呼吸する酸素と自然放射線が、一日当たり、一個の細胞当たり、何個の傷をDNAにつけるか」、理論的に計算しました。その結果を表1に示します。驚くことに、自然放射線がつくる二本鎖切断の数は、酸素がつくる傷の約千分の一しかないのです。つまり日常生活で、修復不能なDNAの傷をつくっている主役は、放射線ではなく、「人が呼吸して体内に取り入れる酸素」だったのです。

（原産協会・人材育成部）

原子力 ワンポイント



広く利用されている放射線 25

同じ量の放射線を浴びても、短時間で一挙に被ばくした場合と、長い時間をかけてわずかずつ受けた場合とは、影響に違いのあることが分かってきました。

放射線の影響評価には「線量」よりも「線量率」の重要性を指摘する声が高まっています。

ゆりちゃん 線量率の重要性について良く分か

りません。例を示して教えてください。

タクさん 世界には日本よりも数倍、数十倍、自然放射線レベルが高くて多くの人が住む地域があります。このような場所を「高自然放射線地域」と呼んでいます。代表的な地域の一つとしてインド南西端ケララ州のアラビア海に面した海岸地帯があり、約四十万人が暮らしています。一九九〇年に入ってから、当時トリバリスクの増加は確認さ

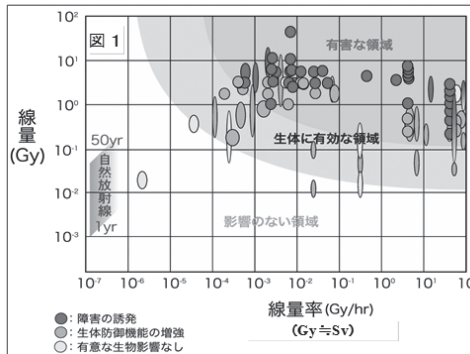
れませんでした」と述べ、放射線防護の専門家を驚かせました。一方、短時間で被ばくした広島・長崎の健康調査では、同じ線量（六百ミリSv）を超えて被ばくした人々に、明確なリスク上昇が確認されています。r博士等は二〇〇九年までのデータを解析し、同じ量の放射線を浴び

わずかずつ長期間被ばくなら影響現れず

てその結果を米国「ヘルス・フィジックス」誌に発表しました。その中で、「最も多く被ばくした人々の線量は、生まれてからこれまでの累積と「線量率」で放射線影響を予測できるのですか。

タクさん 電力中央

図1 放射線影響の線量・線量率マップ



出典：月刊エネルギー，Vol. 39, No.3, 2006 (Gy ≡ Sv 追記)

研究所が月刊エネルギー（二〇〇六年）で「放射線影響の線量・線量率マップ（図1）」を紹介しています。さまざまな研究機関の研究成果をもとに、線量（縦軸）と線量率（横軸）の位置を横軸に沿って目

ることは、放射線の量率が「十ミリSv/時」を超えた辺りから有害な領域に入ることが分かります。一方、自然放射線に相当する線量率の領域であれば「線量」がいくらか増えていても有害な領域は現れません。このことから放射線の影響は「線量率」によって決められそうだとすることが分かりました。放射線影響は、従来、線量で評価されてきました。そして、放射線はわずかでも生体に悪い影響を及ぼすと考えられてきましたが、「線量」よりも「線量率」の重要性を指摘する声が高まっています。（原産協会・人材育成部）

原子力 ワンポイント

日本の放射線・放射能基準
—福島第一原発事故（番外編⑬）—



広島・長崎の原爆生存者がガンになったデータからは、低線量放射線といわれている百ミリシーベルト（mSv）未満の被ばくでは有意なガン増加は見られていません。

査から明らかに増えている。けれども、弱い放射線を浴びたらガンになるのか科学的データはあまりないんだ。

ゲンくん 科学的データがないって、それ分らないってこと？

百ミリSv以下では がん発生率上昇せず

ゲンくん そう、分らないからどう考えたていいる。弱い放射線、正確に言うとお百mSv未満の低線量放射線について、国際放射線防護委員会（ICRP）は念のため、用心から「低線量放射線でもガンになりやすさは放射線の強さに

ゲンくん 放射線を浴びた人はガンになるって聞いたけど、放射線をちょっとでも浴びたらガンになるの？

テツにい 強い放射線なら、浴びた放射線が強いほどガンになりやすくなることは広島・長崎の原爆生存者の調

て、国際放射線防護委員会（ICRP）は念のため、用心から「低線量放射線でもガンになりやすさは放射線の強さに

テツにい 低線量放射線を浴びてもガンになった人がいないことを示している主なデータは、広島・長崎の原爆で被爆しながら生存した人たちのものだ。広島

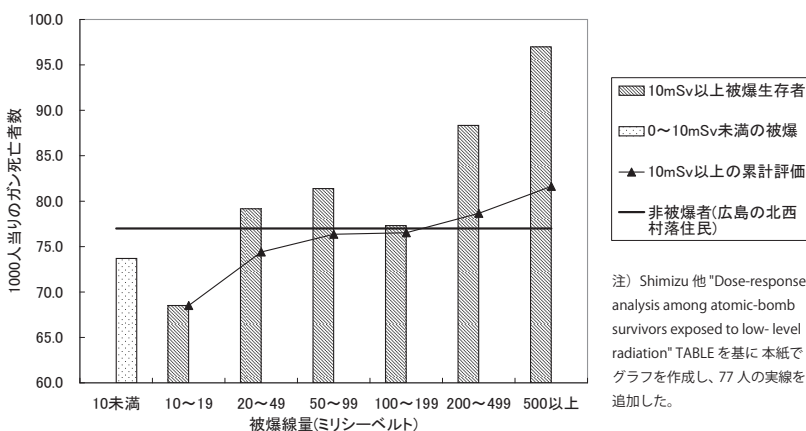
の放射線影響研究所（RERF）では、被爆生存者の健康について五十年以上にわたって追跡調査している。ゲンくん、最近、RERFのデータにもとづいて低線量放射線について書かれた本が次々に出版されているのを知っているかな。

ゲンくん 知らない。僕にもわかるように教えてください。

テツにい 米国ミズーリ大学のラッキー名誉教授（米国アポロ計画で宇宙飛行士の健康管理に協力）は論文「電離放射線の生物学的効果——日本に贈る一視点」（出典①）の中で、REERFの清水氏らの

データから広島と長崎で被爆した人を被爆線の大ききで7つのグループに分け、ガンによる死亡率の違いをみた（出典②）。特に、十〜十九mSv被爆したグループ（七千四百三十人）の低線量が目に付くが、そこではガンで死亡した人の割合は千人当り六十八・五人だった。図には被爆を免れた村落の住民のガンで死亡した割合（千人当り七十七人）が実線で示されている。十mSv以上二百mSv未満の原爆生存者二万八千四百二十人におけるガンで死亡した割合を計算してみると、千人当り七十六・五人（図中の▲折れ線）となり、被爆していない北西村落住民のガンで死亡した割合七十七人とほぼ同じであり、少なくとも百mSv未満

図 被爆生存者の全ガン死亡率



（出典①）T. D. Luckey, "Biological Effects of Ionizing Radiation: a Perspective for Japan", Journal of American Physicians and Surgeons Volume16 Number 2 Summer 2011(茂木弘道訳『放射線を怖がるな!』、日新報道、2011 年に訳文収録)

（出典②）Wade Allison, "Radiation and Reason: The Impact of Science on a Culture of Fear", Wade Allison Publishing 2009 (峯村利哉訳『放射能と理性：なぜ「100 ミリシーベルト」なのか』、徳間書店、2011 年)

の低線量放射線では、発がんの影響が生じていないという事なんだ。この他にも、英国オックスフォード大学のアリソン名誉教授（物理も含めた広島・長崎の被爆生存者八万六千六百十一人を対象、一九五〇〜二〇〇〇年までに固形ガンで死亡した一万百二十七人から、『百mSv未満の一回の被ばくでは無視できない発がんリスクが生じること示す研究データは存在しない』と言っている。

爆生存者八万六千六百十一人を対象、一九五〇〜二〇〇〇年までに固形ガンで死亡した一万百二十七人から、『百mSv未満の一回の被ばくでは無視できない発がんリスクが生じること示す研究データは存在しない』と言っている。

（原産協会・政策推進部、監修 関西大学・土田昭司）

【原子力ワンポイント68】日本の原子力作業者の健康影響に関する疫学的調査

公益財団法人放射線影響協会（放影協）は、2016年1月15日のウェブサイト上で、「英米仏3カ国統合原子力作業者の疫学調査（INWORKS調査）と日本の低線量率疫学調査とは、喫煙が及ぼす影響の違いや、更には人種に関わる違いがあると考えられることから、この3カ国統合の調査結果がそのまま日本に当てはまるかどうか疑問である」といいます。どういうことでしょうか。ちょっと調べてみましょう。

ゆりちゃん：日本の原子力作業者の疫学的調査はどのように行われているのですか？

タクさん：図1を見てください。本調査の対象集団（コホート）は、放射線従事者中央登録センターに登録された原子力発電施設等で現在も放射線業務に従事、または従事していた人達です。本調査では、住民票により生死を確認するとともに、死因と被ばく線量との関係を統計学的に解析します。本調査の対象集団（コホート）の総人数は204,103人、一人当たりの平均観察期間は14.2年、そして一人当たりの平均累積線量は13.8mSvです。

ゆりちゃん：3カ国統合の調査結果がそのまま日本に当てはまるかどうか疑問ってどういうこと？

タクさん：同調査を行った国際がん研究機関（IARC）などのチームは2015年7月、「低線量率放射線を長期間浴びると、原爆被ばく者と同じように白血病のリスクが上昇する」と、英医学誌ランセットに発表しました。一方、放影協は、コホートを累積線量で6群（5mSv未満、5mSv～10mSv、10mSv～20mSv、20mSv～50mSv、50mSv～100mSv、100mSv以上）に分け、白血病（放射線とは無関係といわれている慢性リンパ性白血病は除く）による死亡リスクを計算、同じ地域に住む日本人男性の白血病死亡率と比較、その差として過剰相対リスク“ERR”を推計しています。表1にその結果を示します。同表をみると日本の原子力作業者の白血病による死亡リスクは、逆に、被ばく線量が増えると下がる（マイナスとなる）傾向となっています。この相反性は何でしょうか。まさに「人種に関わる違い」を示唆しているのではないのでしょうか。

ゆりちゃん：それでは喫煙が及ぼす影響の違いってどういうこと？

タクさん：IARCなどのチームは2015年10月、新たに「100mSv以下の低線量被ばくで白血病以外のがん死亡リスクも増加する。ただし、喫煙による交絡の影響はみられなかった」と、英医学誌ブリティッシュ・メディカル・ジャーナルに発表しました。一方、放影協は、「全悪性新生物（白血病を除く）から、喫煙の影響を最も強く受けられる肺がんによる死亡者を除いてみたら、過剰相対リスク（ERR）は驚くことに1.20（90%信頼区間、0.43～1.96）から0.66（90%信頼区間、-0.18～1.50）に低下し、累積線量と死亡率との関連性が消えてしまいました。IARCなどのチームは、「喫煙は交絡要因として影響しない」と述べていますが、日本の調査では、「喫煙は低線量率放射線被ばくによるがん死亡リスクに大きく影響する」といえます。この違いはいったいどこから出てくるのでしょうか。一つ考えられることは、日本の疫学調査は、中性子被ばくがほとんどない放射線業務従事者を調査対象として行われているということです。また、今回も、「人種に関わる違い」が関係しているかもわかりません。いずれにしてもIARCなどのチームの発表に基づいて、「100mSv未満の低線量被ばくでも、線量に応じて、がんで死亡するリスクは高まる」と結論付けるのは時期尚早ではないのでしょうか。

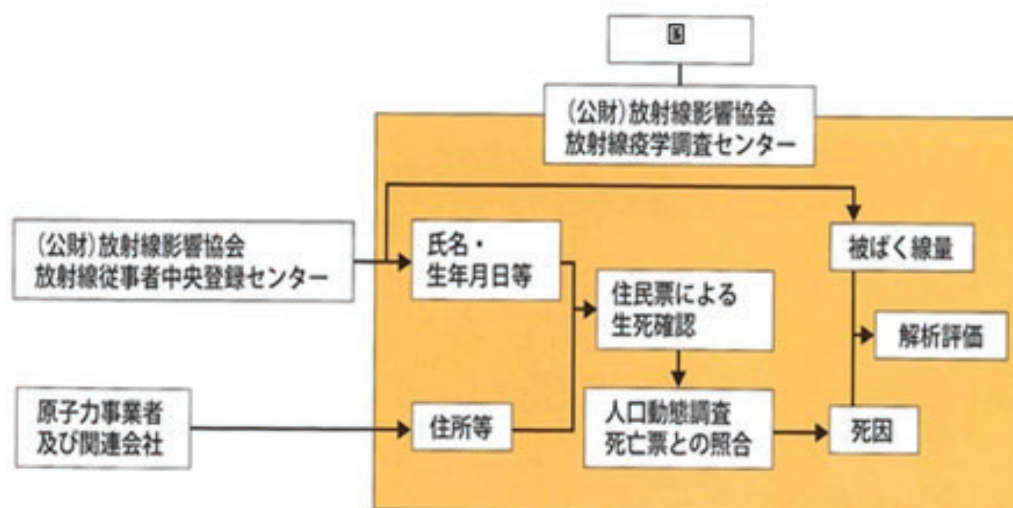


図1. 疫学調査の方法
(出典:放射線影響協会ホームページ)

表1. 調査対象者204,103人における全死亡、白血病および悪性新生物
(白血病を除く)の死因別過剰相対リスク(ERR)

被曝累積線量(mSv)		<5	5~	10~	20~	50~	100~	10mSv当たりの 過剰相対リスク (ERR)
潜伏期:全死亡0年、白血病2年	人数	133,419	17,780	18,175	18,826	9,395	6,508	90%信頼区間
悪性新生物:10年	平均線量	0.7	7.2	14.4	31.8	70.1	165.8	
全死亡	死亡	12929	2013	2008	2033	944	597	
	%	9.7	11.3	11.0	10.8	10.0	9.2	0.29
	O/E比	0.96	1.15	1.08	1.06	1.01	0.96	-0.09, 0.68
	95%信頼区間	0.94, 0.98	1.1, 1.2	1.05, 1.14	1.02, 1.11	0.95, 1.08	0.89, 1.04	
白血病 (慢性リンパ性白血病を除く)	死亡	129	25	15	25	8	5	
	%	0.10	0.14	0.08	0.13	0.09	0.08	-0.27
	O/E比	0.95	1.38	0.81	1.3	0.85	0.84	-4.07, 3.52
	95%信頼区間		(0.46-1.07)	(1.05-3.35)	(0.68-3.27)	(1.46-8.35)	(2.45-14.30)	
悪性新生物 (白血病を除く)	死亡	5249	688	708	738	367	178	
	%	3.93	3.87	3.90	3.92	3.91	2.74	1.20
	O/E比	0.97	1.06	1.07	1.08	1.15	1	1.43, 1.96
	95%信頼区間	0.94, 0.99	0.98, 1.14	0.99, 1.15	1, 1.16	1.04, 1.28	0.85, 1.15	

※O/E比:観察死亡数(O)/期待死亡数(E)

「参考:原子力規制委員会原子力規制庁委託調査報告書「低線量放射線による人体への影響に関する疫学調査(第Ⅴ期調査)」

【原子力ワンプoint 69】陽子線がん治療の新たな展開

岡山大学は津山中央病院と共同運用で2016年3月、がん陽子線治療センターを開設し、同センターで初めてとなる小児がん患者への治療を9月13日より開始しました。陽子線を含む粒子線がん治療の分野では、今、日本が世界をリードしています。なぜ陽子線が、がん治療に有効なのでしょう。今回はその理由を探ってみましょう。

ゆりちゃん：陽子線ってどんなものですか？

タクさん：陽子とは、水素原子（H）から電子を一つ取り去ったもので、プラスの電荷を帯びた粒子です。この粒子が、加速器で加速され、束になって流れている状態を陽子線といいます。このときの陽子のスピードは、光速の70%近くになります。

ゆりちゃん：陽子線がん治療は、これまでの放射線がん治療と、どこが違うのですか？

タクさん：これまでの放射線治療法では、X線やガンマ線が利用されています。図1を見てください。X線は、体の表面近くで、吸収される放射線量が最大となる特徴があります。その後、放射線量は体の中で緩やかに減っていきます。このため、標的となるがん組織の後ろ側の正常組織も、影響を受けてしまいます。一方、陽子線は、ある深さまで到達すると突然失速、そこでエネルギーの大半を放出、停止します。この位置は、体に打ち込む陽子線のエネルギーを調整し、自在に変更できます。近年、日立製作所の開発した「病巣へ線量を集中して正常組織への不要な線量付与を抑える照射技術（スポットスキニング照射技術という）」を使い、いろいろな形状をした複雑ながんでも、その形状に合わせて高い精度で陽子線を照射することができ、がんの周辺にある正常組織への影響を最小限に抑えることができるようになりました。

ゆりちゃん：陽子線がん治療は、どのような部位のがんに向いているのですか？

タクさん：筑波大学陽子線医学利用研究センター長の秋根康之教授がホームページ「日立原子力情報」のなかで、「いままでの臨床実績からみると、最も多いのは肝臓がん。次に食道がん、肺がん、頭蓋内腫瘍と続く。陽子線は特定の病巣に照射することで治療効果をあげるから、形のはっきりしたがんに力を発揮する」と掲載されています。

ゆりちゃん：今後、陽子線がん治療はどのように発展していくのでしょうか？

タクさん：原産新聞の本コラム「原子力ワンプoint 42（2014年12月11日）」で、「がん細胞の塊を注意して観察すると、がん細胞を次々に生み出す、まるで女王バチのような“がん幹細胞”が見つかります。そしてこの細胞が残っている限り、がん再発の可能性を消し去ることはできない」と紹介しました。がん幹細胞は、通常、酸素濃度が低い環境（大気中の酸素濃度は約21%。一方、がん細胞のある環境は1%程度）に身を潜め、酸素が生み出す活性酸素の攻撃を受けないようにしてがん治療への抵抗性を高めています。福井大学高エネルギー医学研究センターの研究チームは2008年度から、「低酸素環境にあるがん細胞を標的とした陽子線がん治療の効果」を調べる研究を進め、これまでに、「陽子線はX線よりも効果的に低酸素環境にある大腸がん細胞（C o l o n - 26細胞）を殺傷する」事実を確認しています。図2を見てください。今後、幹細胞を標的にした「陽子線治療効果」が実証されれば、より効果的ながん治療が可能となるでしょう。

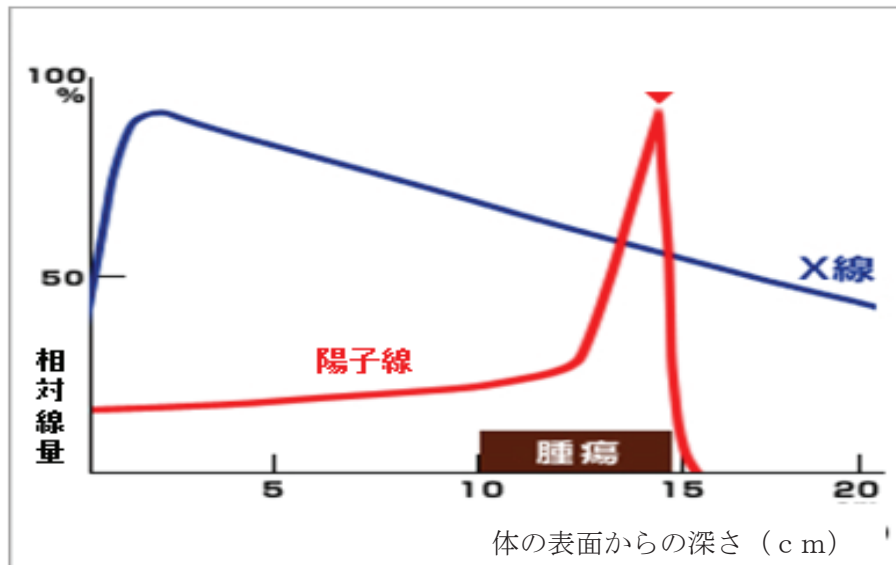


図1. 各種放射線の生体内における線量分布

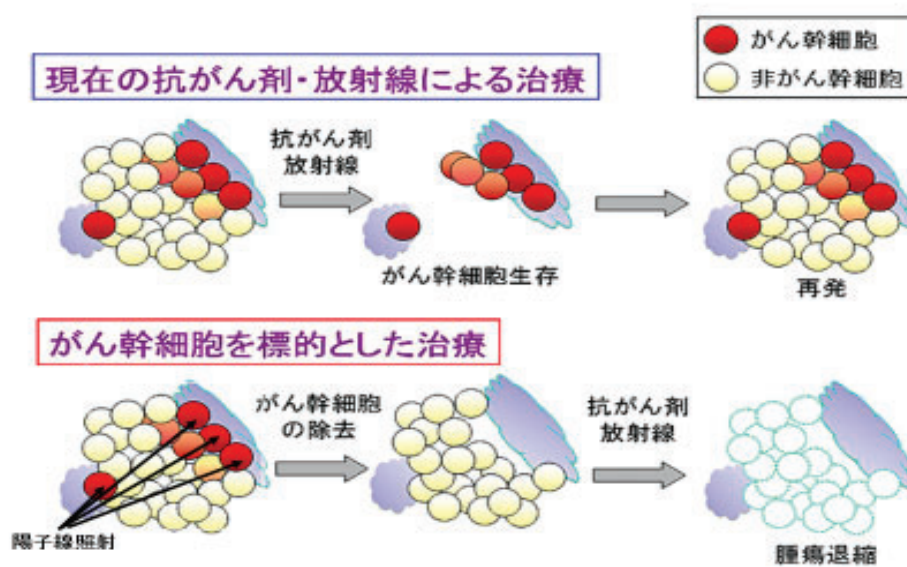


図2. がん幹細胞を標的とした陽子線治療のイメージ
(参考: 慶応義塾大学病因医療・健康情報サイト)

【原子力フワポイント77】 低線量 X 線の全身照射によるがん治療

本シリーズでは前回、京都大学本庶 佑 ほんじょ たすく 名誉教授らが、「がん細胞に抑えられていた免疫細胞の力を回復する新たな“免疫療法”を開発」と紹介しました。免疫療法は、本来、免疫細胞自身の活性化を目指すものでした。その一つの興味深い事例が、東北大学坂本澄彦教授主導の「低線量 X 線の全身照射によるがん治療」です。この治療法はあまり知られていないと思います。どんな方法なのか調べてみましょう。

ゆりちゃん：いかに低線量でも X 線を全身照射されたら、がんは逆に、増えるのではないのですか？

タクさん：専門家から、「放射線は、零に近くてもがんリスク有り」と聞けば普通、「いかに低線量の放射線でもがんを発症する恐れがあり、低線量 X 線を全身に当てて、がん治療を行うのは絶対に無理」と思いますよね。でも坂本先生が、いろいろな強さの X 線をマウスに照射する基礎的な実験を行ってみると、予想に反して、「0.1～0.15 グレイ」の強さで X 線を照射する時に限ってマウスの免疫力が顕著に高まる」、という興味深い現象が観察されました。この基礎実験は約 10 年続けられました。0.1～0.15 グレイの X 線をマウスに照射して、体内に移植したがん細胞が変化の様子を詳しく観察してみると、①がん細胞の除去率を高める、②遠隔転移を抑えることが示唆され、この時点で坂本先生は、「低線量 X 線の全身照射によるがん治療」に期待を持ったといえるでしょう。

ゆりちゃん：坂本先生には、臨床研究に踏み切る「きっかけ」があったのですか？

タクさん：坂本先生は、原子力 eye (Vol.54 No.9,2008) で、「(専門的な用語ですが) S 字状結腸の患者を診た。がんが肝臓に転移していたことにより、肝臓が肥大し、さらに肥大した肝臓が骨盤腔の中まで入り込んでいて、黄疸で顔が黄色くなっていた。様々な治療を試みたが効果が現れなかったため、1 回、0.1 グレイの全身照射のみを週 3 回の頻度で試みたところ、5 回照射したところで腹部の腫れが引き始め、4 週目に入って 10 回照射したところで肥大していた肝臓も触診できなくなり、黄疸もなくなって退院した。この患者は 8 ヶ月後に再発し、再入院することになった。しかし、0.1 グレイの全身照射が、がん治療に有効と判断し、その後、約 10 年におよぶ組織的な臨床研究を開始することにした」と書いています。

ゆりちゃん：臨床研究の結果はどうだったのですか？

タクさん：繰り返しになるかも知れませんが、通常の放射線がん治療とは、腫瘍組織に局限して放射線を照射する「局所照射」の方法を意味します。そして、低線量 X 線の全身照射は、この局所照射と併用することにより、悪性腫瘍に対して、①相乗的な治療効果、②悪性腫瘍の転移を抑制する効果、を高めることが、基礎研究で証明されています。本臨床研究では、腫瘍が発見された時点で転移している可能性の高い「悪性リンパ腫」に注目しました。局所照射では通常、2 グレイという高線量の放射線を、1 日に 1 回の頻度で週 5 回、総線量が 60～70 グレイとなるように照射します (図 1)。これに対して低線量の全身照射では、0.1 グレイの全身照射を週 3 回、総線量が 1.5 グレイとなるように照射します (図 2)。図 3 を見てください。坂本先生は、放射線腫瘍学会誌 (第 9 巻、1997 年) で、「局所照射だけだと、治療後 5 年経過した時の生存率は約 65%であるのに対して、低線量 X 線の全身照射を併用した時には、約 84%まで生存率を上げることができた」と記述しています。近年のがん治療の方法は多様性に富んでいますが、本療法は、すでに全身に転移、あるいは他に有効な治療法がない悪性のがんに対して、適用性が高そうですね。

(原産協会・人材育成部)

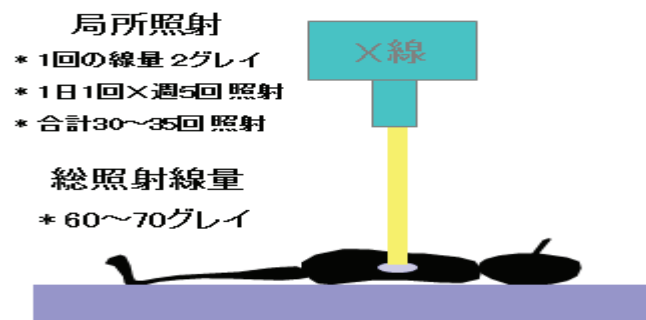


図1 放射線がん治療の一般的な照射の方法

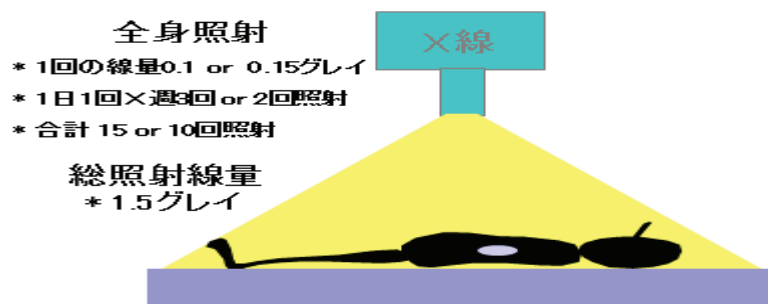


図2 東北大学で行われた低線量X線全身照射の方法

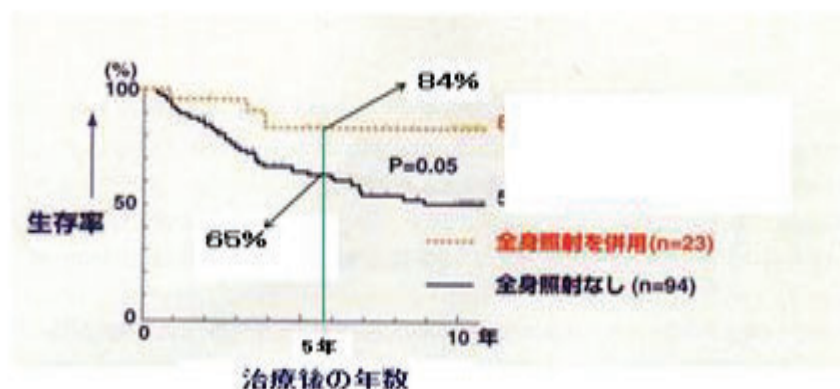


図3 悪性リンパ腫(非ホジキンリンパ腫)治療5年後の生存率
 (坂本澄彦、日本放射線腫瘍学会誌9巻1997、一部改編)

【原子力ワンプoint78】アルファ線でがん細胞を狙い撃ち「量研機構」が新薬剤開発

日本経済新聞は2016年6月13日、「量子科学技術研究開発機構（量研機構）が、体内で放射線を放ち、ピンポイントでがん細胞をたたき薬剤を開発」と記事を掲載しました。放射線医学総合研究所、および日本原子力研究開発機構の量子ビーム（一部）・核融合研究部門が統合して生まれた新組織（量研機構）がプレスリリースした3つ目の研究成果を紹介する記事でした。興味深いですね。早速、調べてみましょう。

ゆりちゃん：「体内で放射線を放ち、ピンポイントでがん細胞をたたき」って、どういう意味ですか？

タクさん：放射線を“銃弾”に例えるなら、「銃（アイソトープ）を、体内にセットして、がん細胞にピンポイントを合わせて狙い撃つ」というイメージですね。医療の専門分野では、「核医学治療（内用療法とかアイソトープ療法）」と呼ばれています。核医学治療では、アイソトープをがんに集まりやすい薬剤に組み込んで体内に投与します。薬剤は体内で血流に乗って標的（がんなど）に集積し、そこで放射線による一斉攻撃が始まるというわけです。

ゆりちゃん：量研機構が開発した核医学治療について詳しく教えてください。

タクさん：ゆりちゃんはアルファ線と呼ばれる放射線を知っていますか。透過力が極めて弱く、体内で進む距離はわずかに10マイクロメートル（細胞約1個分）です。アイソトープを、腫瘍ができた部位まで正確に運ぶ薬剤ができれば、周囲の正常な細胞を傷つけることなく患部だけを集中的に攻撃できます。でも国内では、アルファ線を利用した核医学治療は行われていませんでした。その理由として、①がんを集まりやすい薬剤（ドラッグデリバリー）の開発が遅れていたこと、②アイソトープの製造から臨床研究までを切れ目なく見据えた効率的な研究体制が十分に構築されていなかったこと、の二つをあげることができます。この二つの課題が、2016年4月の「量研機構」の発足により、解消されたのです。石岡典子上席研究員らは、「高崎量子応用研究所内にある加速器などを使用し、アルファ線を放出する“アスタチン 211”（表1参照）を効率的に製造することに成功した。そして今回、治療研究対象にした褐色細胞腫（副腎に発生し国内で年間約3千人が発症し、その約1割は悪性で全身に転移する難治性疾患の一つ）の周囲に集積する性質がある物質を見つけ、この元素を組み込んで新薬剤「アスタチン 211-MABG」（ ^{211}At -MABG）を開発した。研究グループが、褐色細胞腫を移植したマウスに新薬剤を1回投与したところ、大きさは7日後までに半分に縮小し、がんの増殖を約20日間抑制できた（図1参照）」といいます。本研究成果は、これまで別々の研究機関（日本原子力研究開発機構と放射線医学総合研究所）に属していた研究チームが、統合を契機に、基礎研究から臨床研究までを共同で行う体制を構築し、それぞれが有していたアイソトープ製造技術と薬剤合成技術を融合させることにより初めて実現できたものといえます。

ゆりちゃん：アルファ線治療といえば「ホウ素中性子補足療法（BNCT）」という方法もありますね。

タクさん：ずいぶん難しい言葉を知っていますね。本シリーズ「広く利用されている放射線⑧（2013年11月14日）」で一度、BNCTの原理を説明しています。福島民報が2016年2月23日、「最先端がん治療法“ホウ素中性子捕獲療法” 南東北 BNCT 研究センター臨床試験開始」と報道しました。次回に詳しく紹介します。

（原産協会・人材育成部）

表 1. 核医学治療に利用可能なアルファ (α) 放射性核種

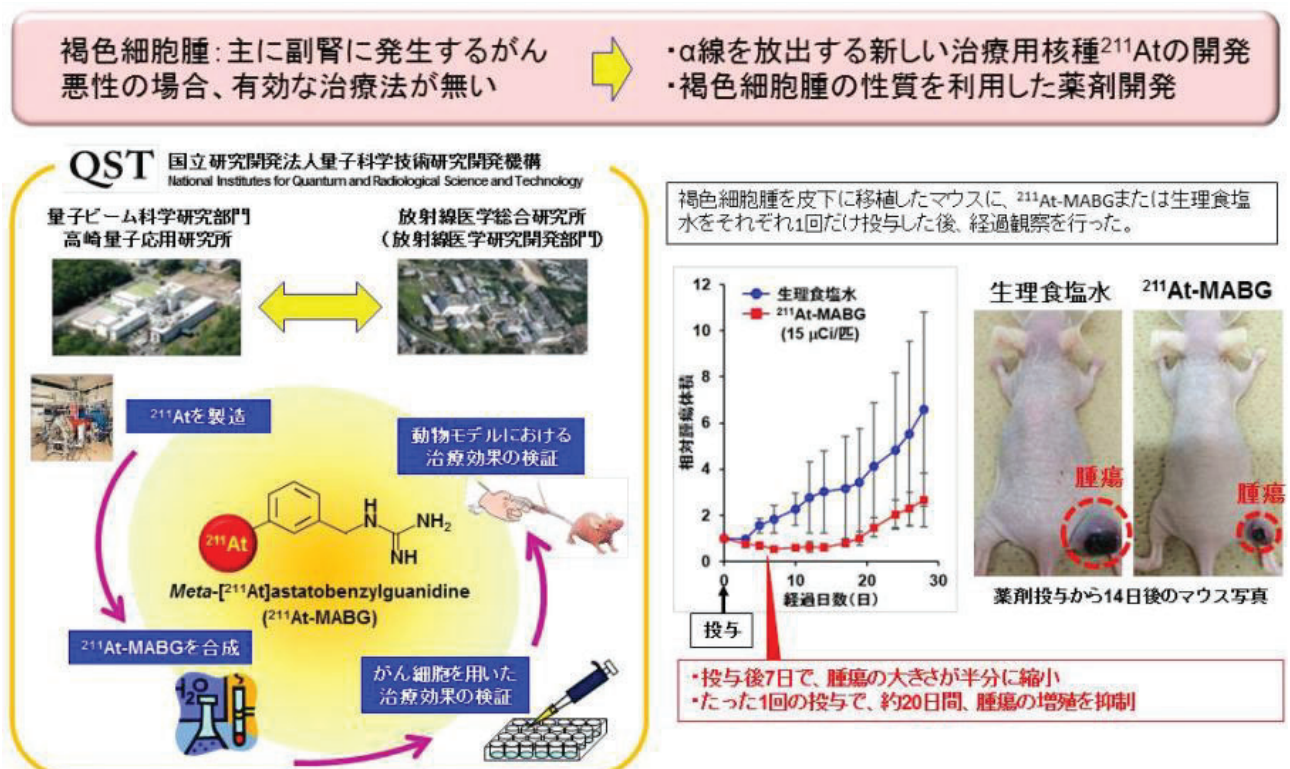
核種	放出粒子	半減期	アルファ線エネルギー (MeV)
Tb-149	1 α	4.1h	3.97
At-211	1 α	7.2h	6.78
Bi-212	1 α、1 β	60.6m	7.80
Ac-225	4 α、2 β	10.0d	6.87
Bi-213	1 α、2 β	45.6m	8.33
Th-227	5 α、2 β	18.7d	6.45
Ra-223	4 α、2 β	11.4d	6.60
U-230	5 α	20.8d	6.71
Th-226	4 α	30.6m	6.92

* アルファ線エネルギーは娘核種を含むすべてのアルファ線のエネルギーの平均値

* . . . 既に臨床試験で利用された放射性核種

(第 49 回 RI・放射線利用促進セミナー「α線を出すアイソトープを使ったがん治療」より一部改変)

図 1. がん細胞を狙い撃ちするアルファ線放出核種を標識した新しい治療薬を開発
(国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構)



<http://www.qst.go.jp/information/itemid034-000280.html>

【原子力ワンプoint 71】すい臓がんに対する重粒子線の高い治療効果

国立がん研究センターなどの研究班は2016年1月19日、がん患者を10年間追跡して集計した10年後の生存率を日本で初めて公表しました。全てのがんの10年生存率は58.2%、最も低いのは「すい臓がん」わずかに4.9%でした。量研機構（放医研）は、「重粒子線を使った放射線治療がすい臓がんには有効」といいます。

ゆりちゃん：がん患者の10年生存率は、がんの種類によって違うのですか？

タクさん：10年生存率は、全国がんセンター協議会に加盟する16施設で、1999年から2002年に、がんと診断された約3万5千人を追跡調査してがんの種類、および進行度合い（ステージ）別に集計されました。表1を見てください。主な部位別では、甲状腺の91%が最も高く、前立腺（84%）、子宮体（83%）、乳房（80%）と続きます。最も低いのはすい臓（4.9%）で、肝臓（15%）、胆のう・胆道（20%）、食道（30%）と続きます。ずいぶん違いますよね。この10年生存率は、治療でどのくらい生命を救えるかを示す国の指標となります。

ゆりちゃん：すい臓がんの生存率が特に低くなる理由は何ですか？

タクさん：図1を見てください。すい臓は胃の後ろにあり、長さ20cmほどの細長い臓器です。ふくらんだ部分は頭部といい、十二指腸に囲まれています。反対側の幅が狭くなっている端は尾部といい、脾臓に接しています。すい臓は、食物の消化を助けるすい液と、血糖値の調節に必要なホルモン（インスリンなど）を生産する役割を果たしています。すい液は、すい管によって運ばれ、主すい管と呼ばれる1本の管に集まり、十二指腸へと流れていきます。すい臓がんの90%以上はこのすい管の細胞にできます。すい臓がんは予後の悪いがんです。その理由は、（1）初期のすい臓がんは殆ど無症状で、がんが進行して具合が悪くなってから発見されることが多い、（2）様々な臓器と隣接していることから、手術や従来のX線放射線治療では、正常な細胞まで傷つけてしまう怖れがある、（3）X線や抗がん剤治療の効果を高めるためには酸素が必要であり、低酸素状態にあるがん細胞は、死に難いことがわかっています。つまり通常、「すい管」は酸素濃度の低い環境にあり、すい臓がん細胞の多くは「低酸素状態」にあります。このため、X線や抗がん剤に強い抵抗性を示します。このような条件が重なってすい臓がんは、難治療のがんの代表となっているのです。

ゆりちゃん：どうして重粒子線治療が、すい臓がんにも有効なのですか？

タクさん：前回の「原子力ワンプoint（70）」では、放医研が、「重粒子線を複雑な形状に調節してがん細胞だけを狙って照射できる技術を開発」と紹介しました。この技術開発によって周囲の正常な細胞に傷をつけることなくすい臓がんを狙って重粒子線を照射することが可能になりました。山田滋博士（重粒子医科学センター病院第2治療室長）は学術情報誌「V i t a」の中で、「重粒子線の特徴は、①優れた線量分布、②高い生物学的効果を有することである。重粒子は優れた線量分布を有することから、X線と比べて周囲の十二指腸など、放射線感受性の高い正常組織の被ばく線量を大きく減らすことができ、すい臓がん細胞だけに高線量を集中させることができる。さらに、高い生物学的効果により、重粒子線は、低酸素環境に多くある“すい臓がん細胞”にも十分な“殺細胞効果”を発揮することができる」と述べています。近い将来、すい臓がんを早く見つける新たな技術の開発が進むと同時に、重粒子線治療が広く利用されてすい臓がんに対する治療成績の向上につながると思います。

表1. がんの種類別10年生存率

	病 期				全 体 ()は5年
	1	2	3	4	
食道	64.1	36.9	15.4	4.8	29.7 (38.1)
胃	95.1	62.7	38.9	7.5	69.0 (70.9)
結腸	98.6	85.2	74.8	8.7	70.6 (72.0)
直腸	94.1	83.3	63.0	6.0	68.5 (72.2)
大腸	96.8	84.4	69.6	8.0	69.8 (72.1)
肝臓	29.3	16.9	9.8	2.5	15.3 (32.2)
胆嚢(たんのう)・ 胆道	53.6	20.6	8.6	2.9	19.7 (23.6)
膵臓(すいそう)	29.6	11.2	3.1	0.9	4.9 (6.5)
喉頭	93.9	63.0	53.0	54.1	71.9 (81.2)
肺	69.3	31.4	16.1	3.7	33.2 (39.5)
乳房	93.5	85.5	53.8	15.6	80.4 (88.7)
子宮頸 (しきゅうけい)	91.3	63.7	50.0	16.5	73.6 (78.0)
子宮体	94.4	84.2	55.6	14.4	83.1 (83.8)
卵巣	84.6	63.2	25.2	19.5	51.7 (59.2)
前立腺	93.0	100	95.6	37.8	84.4 (87.4)
腎・尿管	91.3	76.4	51.8	13.8	62.8 (65.9)
膀胱(ぼうこう)	81.4	78.9	32.3	15.6	70.3 (74.1)
甲状腺	100	100	94.2	52.8	90.9 (92.4)
全 体	86.3	69.6	39.2	12.2	58.2 (63.1)

(東京新聞(2016年1月20日朝刊)より)

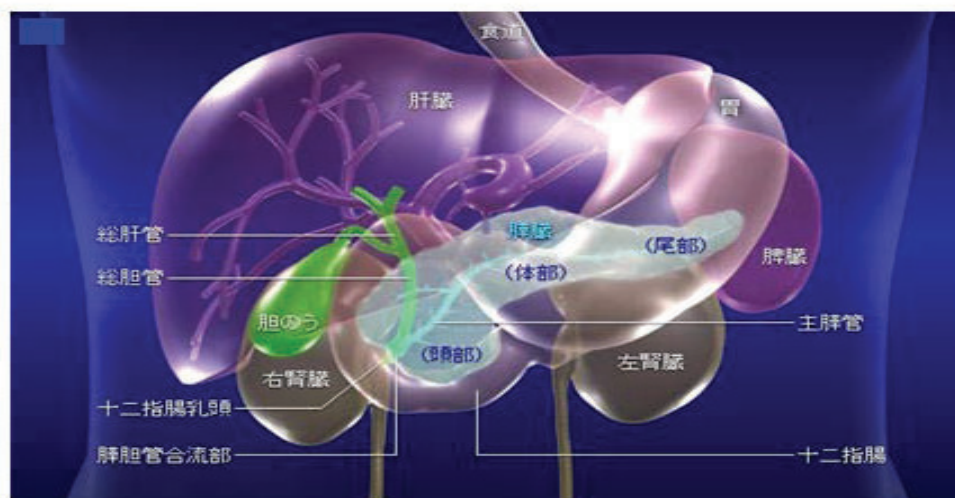


図1. すい臓の構造

(<http://pan.ono.jp/public/cancer/pancreas/>)



参考図: 日本国内の重粒子線治療施設
(重粒子線治療ガイドより)

原子力 フンポイント



日本の放射線・放射能基準 ――福島第一原発事故（番外編）――

百 μ Svから同二百五十 μ Svに変更しました。

経産省は三月十五日の告示40号「平成二十三年東北地方太平洋沖地震の特にやむを得ない緊急の場合に係る実用発電用原子炉の設置・運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示」として、

今年一月から始めたこの放射線解説シリーズですが、東日本巨大地震で福島第一原子力発電所が甚大な被害を受け、炉心損傷という未曾有の原子力事故が起きました。事故拡大を防止するため働く作業員の被曝のほか、大気・海洋に放射能が放出され、東北や関東地方などの野菜や牛乳、魚、飲料水などにも含まれるようになりました。今回はこのシリーズの番外編として、それらの我が国の基準値などについて解説します。男子高校生の「ゲン君」の質問に、ものしり博士の「カワさん」がどこまで答えられるでしょうか。

ゲン君 被災当初、省や厚労省は、今回の電気もつかない現場で、大震災を受けて、東京困難な復旧作業を行っていた作業員の人たち事故対応に当たるため、非常時の作業員の被曝の被曝は、大丈夫かな。カワさん 経済産業線量限度を、従来の計

急電用原子炉の設置・運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示として、原子力災害特別措置法に基づく原子力緊急事態宣言が出された日から、同解除宣言が出された日まで、線量限度は、実効線量について二百五十 μ Svとしました。

国際放射線防護委員会（ICRP）が定めた国際基準では、緊急作業での上限を一時的に白血球の減少がみられる計五百 μ Svとしています。なお、通常の放

射線業務従事者の線量限度は、五年間で計百 μ Sv（年平均では二十 μ Sv）または一年間で五十 μ Svのいずれかの制限が課せられています。これらの数値をオーバーしそうになったら、働きたくても現場では働けなくなります。

ゲン君 福島第一の現場で被曝し、入院し緊急作業被曝量を二十二百五十 μ Svと設定

た人がいて心配されたけど。カワさん 福島第一3号機のタービン建屋地下で三月二十四日、電気ケーブルの敷設作業を行っていた協力会社の作業員三名が、個人線量計で約百七十 μ Svの被曝をしました。ベ物の基準値は？。カワさん 厚労省は

十七日、原子力安全委員会が定めた防災指針の指標値を、食品衛生法に基づく暫定的な規制値とし、これを上回る食品について、同法の規制制限食品として、食用に供されないような対応を各自自治体に通知しました。

暫定規制値では、放射性ヨウ素は飲料水と牛乳・乳製品は三百ベクレル/kg、根菜・芋類を除く野菜類と魚介類は二千ベクレル/kg。牛乳・乳製品に関して、百ベクレル/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としています。

放射性セシウムは飲料水と牛乳・乳製品は二百ベクレル/kg、野菜類、穀類、肉・卵・魚・その他が五百ベクレル/kgとなっています。これらの規制値は、一日の平均的な摂取量を一年間飲食し続けた場合でも、一般公衆の線量限度の一 μ Svの被曝にとどまるという基準で定められています。

ゲン君 放射能は半減期があると習ったよ。カワさん 放射能には物理的にだんだん弱くなる性質があり、その強さが半分になる時間を半減期と呼びます。一方で、生物には食物連鎖でしだいに体内で放射能が蓄積される性質と、生物学的半減期といって、取り込んだ放射能が排泄などで体外に排出される性質もあります。

（原産協会・情報・コミュニケーション部）

ゲン君 今回の事故で沢山の人たちが避難することになったね。

カワさん 地震が起きた三月十一日の二十一時二十三分、原子力

防災指針では、十^リSv以上の放射線を浴びる可能性がある場合には屋内退避、五十^リSv以上の場合には避難を検討するとしています。三月十五日には、新たに二十^{km}〜三十^{km}圏内の屋内待避を求めました。福島第二原子力発電所から半径十^{km}圏内にも避難指示が出されています。

ゲン君 その後三月二十五日にお知らせがあった「自主避難」ってどういうことかな。

カワさん 政府は、半径二十^{km}〜三十^{km}圏内の住民に対し、「生活支援及び自主避難を積

極的に促進するとともに、避難指示を想定した諸準備も加速化する必要がある」ことを伝えています。これは放射線防護とは関係なく、生活する上での物資の入手が難しい地域が出てきているので、それぞれの状況に応じて柔軟な対応をするという

積算線量 避難

こうです。

ゲン君 四月十一日には「計画的避難区域」が発表されていたよ。

カワさん 政府は東京電力福島第一原発から半径二十km避難指示圏外で、気象条件や地理的条件によって放射線物質の年間積算量が

極的に促進するとともに、避難指示を想定した諸準備も加速化する必要がある」ことを伝えていきます。これは放射線防護とは関係なく、生活する上での物資の入手が難しい地域が出てきているので、それぞれの状況に応じて柔軟な対応をするという

二十リシvを超え、恐れのある地域を「計画的避難区域」にする」と発表しました。これは国際放射線防護委員会(ICRP)、国際原子力機関(IAEA)の緊急時被ばく状況における放射線防護の基準値、年間二十〇百リシvという基準値を考慮しています。

二十リ Sv を超える恐れのある地域を「計画的避難区域」にすると発表しました。これは国際放射線防護委員会（ICRP）、国際原子力機関（IAEA）の緊急時被ばく状況における放射線防護の基準値、年間二十〇百リ Sv という基準値を考慮しています。

を考えた 旧置も

対象地域に半年以上住み続けた場合の放射性物質による影響を考慮したもので、国や県、対象自治体が調整して、約一か月をめどに避難を開始する方針です。

葛尾村、浪江町、飯館村、川俣町の一部、南相馬市の一部が対象となり

ます。特に、子供、妊婦要介護者、入院患者などは、この区域に入らないよう呼びかけています。この区域内の保育所や幼稚園、小中学校及び高校は休園、休校となっています。

また、福島第一原発から計画的避難区域を除く半径二十km〜三十km圏内を「緊急時避難準備区域」としました。この地域の住民へは、緊急時に屋内退避や避難ができるよう準備を求めています。広野町、楢葉町、川内村、田村市の一部、南相馬市の一部が対象となります。具体的には、今後、政府と地元自治体で調整し、数日のうちに決定される見込みです。

ゲン君 農場でも影

響が出てきているね。

カワさん 福島県は、県内五十四か所の水田で土壌の放射性物質の詳しい調査を行いました。その結果、「計画的避難区域」などの対象となっている浪江町と飯館村では、国の基準とした土壌 1 kg 当たり五千ベクレルのおよそ六倍、二万九千ベクレルの放射性セシウムが検出されました。それ以外の自治体では基準を超える放射性セシウムは検出されず、県は四十六の市町村について、稲の作付けに問題は無い」とする見解を示しました。

(原産協会・情報コミュニケーション部)

原子力 ワンポイント

日本の放射線・放射能基準 ――福島第一原発事故（番外編③）――



ゲンくん ヨウ素剤が配布された地域もあるみたいだね。

カワさん 原子力災害対策現地本部は三月十六日より「避難区域（半径二十km）からの避難時における安定ヨウ素剤投与の指示」を県

その後も、服用が指示されたもの、四月にはぐっと下がりほぼ横ばいになりました。これは、まず原子力発電所からは放射性物質がも

事故後の放射性物質 量徐々に減少中

知事および十二市町村宛に発出しました。一部の町ではすぐ服用し

てしまうなど混乱もあつたようですが、ヨウ素剤の効果持続時間

は二十四時間なので正しいタイミングで服用

はより高い濃度の汚染

することが重要です。また四十歳以上は被ばくしても甲状腺がんの発症率は高くないため、四十歳未満が対象です。同本部は二十一日、服用は本部の指示を受けてから医療関係者の立ち会いのもとで服用するものであり、個人の判断で服用しないよう指示しました。

その後も、服用が指示されたもの、四月にはぐっと下がりほぼ横ばいになりました。これは、まず原子力発電所からは放射性物質がも

た、四十歳未満が対象です。同本部は二十一日、服用は本部の指示を受けてから医療関係者の立ち会いのもとで服用するものであり、個人の判断で服用しないよう指示しました。

その後も、服用が指示されたもの、四月にはぐっと下がりほぼ横ばいになりました。これは、まず原子力発電所からは放射性物質がも

た、四十歳未満が対象です。同本部は二十一日、服用は本部の指示を受けてから医療関係者の立ち会いのもとで服用するものであり、個人の判断で服用しないよう指示しました。

その後も、服用が指示されたもの、四月にはぐっと下がりほぼ横ばいになりました。これは、まず原子力発電所からは放射性物質がも

た、四十歳未満が対象です。同本部は二十一日、服用は本部の指示を受けてから医療関係者の立ち会いのもとで服用するものであり、個人の判断で服用しないよう指示しました。

その後も、服用が指示されたもの、四月にはぐっと下がりほぼ横ばいになりました。これは、まず原子力発電所からは放射性物質がも

た、四十歳未満が対象です。同本部は二十一日、服用は本部の指示を受けてから医療関係者の立ち会いのもとで服用するものであり、個人の判断で服用しないよう指示しました。

水が海水に流出するのを防ぐため、やむなく四日から十四日の十日間、比較的低濃度の水約一万トンを海に放出しました。その後、海水モニタリングの調査地点を新たに六か所増やして調査を強化しています。

東京電力福島第一原子力発電所の周辺の海水から検出される放射性物質の濃度は、高濃度の放射性汚染水の流出を止めてからは下が

る傾向にあります。2号機の取水口付近では十七日、放射性ヨウ素1cc当たり二百十ベクレル（国の基準の五千三百倍）が検出されました。引き続き注意深く監視していくとしてい

ます。ゲンくん 今回の事故で水道水も汚染され

た。カワさん 各地の水道水中に通常の値を超える量の放射性ヨウ素131が検出され、東京都でも三月二十二日、金

町浄水場で採取された水道水から1kgあたり二百十ベクレルが検出

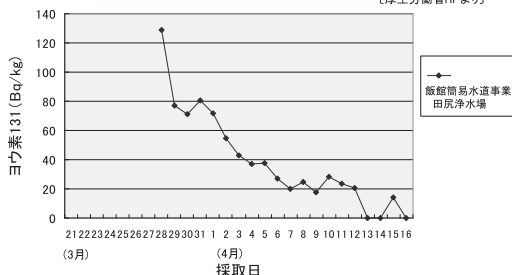
されました。グラフは福島県の飯館村の検出結果ですが、三

月末より急激に下がってきているのがわかります。四月十九日現在、

水道水の摂取制限の出

水道水中の放射性物質（放射性ヨウ素131）の検出

〔厚生労働省HPより〕



原子力 ワンポイント

日本の放射線・放射能基準

――福島第一原発事故（番外編④）――



カワさん 文部科学

福島第一発電所の事故による子どもたちへの放射線の影響が話題になっていきます。学校などで行われている放射線対策についてカワさんが紹介します。

ゲンくん 子どものいる家庭では環境放射能の影響を気にしているね。

時間を屋外で過ごすという前提で計算し、一時間当たり三・八マイクログラムを安全上問題がないとされる屋外での放射線量の目安としました。この目安を上回る

避難区域や緊急時避難準備区域の学校を除き、福島市、郡山市、伊達市にある計十三の保育園、幼稚園、小中学校がこの基準を超えており、校庭などの利用制限の対象となりました。このうち四校は、二十二日の再調査で制限を解

校庭や公園で遊ぶ 子どもたちへの影響

放射線が検出された場合は、校庭や屋外での活動を制限します。放射線量の測定は夏休みが終わるまで毎週行い、

郡山市の一部の学校などで、校庭の表面の土を取り除くことになりましたが、除去した土の処分や作業員の安全など懸念する声もあります。

年間で二十ミリシーベルト以上の放射線を浴びるべきではないとしています。さらに子どもが一日八

休校中である計画的に解除されます。ゲンくん 子どもたち

ちはやっぱり外で遊びたいと思うな。カワさん 十三の公園についても二十二日、環境放射線モニタリング調査を行いました。その結果、五つの施設が一時時間当たり三・八マイクログラムの暫定基準値を上回り、利用制限の対象になりました。当該公園の利用については、一日あたり一時間程度としています。また、再調査は概ね一週間以内に行われます。

ゲンくん 校庭や公園で遊ぶときには、どんなことに気をつけたらいいのかな。カワさん 基本的な考え方としては、余分な放射線は浴びないこ

とが大事とされていますが、濡れたら拭き取れば大丈夫です。ただし、現在の放射線量では必要以上の心配はいりません。

ゲンくん 避難してきた子どもたちが「放射線がうつる」などと間違ったことを言われているのはかわいそう。先生や保護者も正しい理解が大切だね。

カワさん 心配しすぎるのがストレスとなってしまう場合もあります。直接放射線を防ぐことにはなりません。舞文部科学省などでも、わかりやすい資料を用意していますので、不安解消に役立ててください。

（原産協会・情報・コミュニケーション部）

原子力 ワンポイント



広く利用されている放射線 27

国連科学委員会は二日、福島第一原発事故の影響について、「福島県の住民全体でみたがんの増加は確認できないほど少ない」と発表しました。これを裏付けるものとして、福島県「コープふくしま」の陰膳方式による調査結果を紹介します。

ゆりちゃん「コープふくしま」による陰膳（かげぜん）調査って何ですか。

タクさん 陰膳というのは「もともと旅行者などその場にはいない人の健康を願って、食卓のみんなと同じ食事をもつ一セットつくって供える」という日本古来の風習です。コープふくしまの陰膳調査とは、普段その家で食べている食

事をもう一人分、余計につくって提供してもらい、食材に含まれる放射性物質（放射性セシウム）濃度を測定し、日々の食事から受ける内部被ばく線量を予測・評価

してみましょう。調査は、福島県の五地区に居住する組合員、百家庭を対象として行われました。中通りに位置する県北地域の四十二家庭および県中地域三十八家庭、合わせて八十家庭が、全体の八割を占めて

コープふくしま陰膳 調査で食の安全検証

するものです。

ゆりちゃん 陰膳調査の方法を教えてください。

タクさん 第一回目の陰膳調査（二〇一一年十一月～二〇一二年四月）を例にとって説明

図1 地区別調査協力家庭数



出典：食品分析開発センターHP
佐藤理「食の安全安心セミナー講演」

れる計画です。

ゆりちゃん 結果はどうだったのですか。

タクさん 第一回目と第二回目の陰膳調査の結果が英国の学術誌(Journal of Radiological Protection n. 33, 2013)に掲載されました。この陰膳調査の期間は、二〇一一年十一月～二〇一二年三月と、二〇一二年六月～二〇一二年九月で行われた活動で、しかも国際的に評価が高い科学誌の論文であるという点で、大変意義深い」とのコメントが寄せられているそうです。

食」が宅配便で検査センターに送られ、ゲルマニウム半導体検出器で放射能測定がなされます。陰膳調査は約六か月毎に一回、ほぼ同様な方法でこれまでに五回、延べ五百家庭を対象として行われました。二〇一四年度も継続して実施される

（原産協会人材育成部）

【原子力ワンポイント】 広く利用されている放射線

(114) トリチウムって何？何が問題？(その1)

河北新報は2018年1月12日、「原子力規制委員会の更田（ふけた）豊志委員長が11日に福島県いわき市役所で清水敏男市長と面会し、東京電力福島第一原発で増え続ける放射性物質“トリチウム（ ^3H ）”を含む処理水については、薄めて海洋放出するしか選択肢がないと述べた」との記事を掲載しました。一方、 ^3H の海洋放出には漁業関係者ら地元の反発が強いことも事実です。 ^3H って何？そして何が問題なのでしょうか。今一度、考えてみましょう。

ゆりちゃん：「今一度、 ^3H について考えてみましょう」っていうけれど、どんなことを考えているの？

タクさん：いつものように、最初にゆりちゃんの質問を聞いて、これに答えるつもりでいたのだけれど、今回は福島第一原子力発電所の廃水にも含まれる ^3H について、多面的に理解してもらおうと思います。最初に、① ^3H の性状および、② ^3H の健康影響に関する最近の国際的知見についてまとめ、その後、③原子力施設の通常運転時に発生した ^3H はどのような考え方に基づいて海洋放出されているのか？また、④仮に福島第一原子力発電所で ^3H が海洋放出された場合の被ばく影響はどの程度なのか？などを探ってみようと思います。

タクさん：始めに、 ^3H の物理的・化学的性状について探ってみましょう。図1の上段を見てください。 ^3H は水素原子と同じ元素“原子番号が同じ”ですが、質量数が異なり“三重水素”と呼ばれ、原子核は2つの中性子と1の陽子で構成されています。そして、約12年の半減期で最後には放射線を出さない安定した“ヘリウム（ ^3He ）”に壊変します。 ^3H から放出される β 線のエネルギーはとても低い（最大で18.6 keV）ので、ヒトの表皮の部分で止まってしまうため、外部被ばくの影響についてはほとんど心配する必要がありません。そのため、専門家が重視するのは主に“内部被ばく”です。図1の下段を見てください。自然環境中に存在する ^3H の種類（化学形態）は主に、①トリチウムガス（HT）、②トリチウム水（HTO）、③有機結合型トリチウム（OBT）に分けられます。①のHTは水素ガスと同じ化学的性質を持ち、目に見えない無臭の気体です。②のHTOは水と同じ性質を持ち、無色無臭です。③のOBTは植物または動物がHTOを取り込んだあと、 ^3H の一部が炭水化物あるいはタンパク質と結合したものの総称です。HTやHTOに比べて長く体内にとどまることが特徴です。このため、OBTを問題視する専門家もいます。この内容については次回のコラムで詳しく説明します。

タクさん：それでは次に、自然界に広く分布する ^3H の生成量と存在量について探ってみましょう。図2を見て下さい。自然界では大気中の窒素および酸素が宇宙線（特に中性子）と反応し、年間約 7.2×10^{16} ベクレル（Bq）の ^3H が生成しています。これにより、地球上には約 1.275×10^{18} Bqの ^3H が常に存在しています。加えて、核実験によって放出された ^3H が存在します。1960年代前半までに放出された総量は約 2.4×10^{20} Bqと推測されていて、その後の壊変（減衰）により、1990年時点で約 5.2×10^{19} Bqまで減少したと推定されています。

タクさん：それでは次に、世界各国における大気中の ^3H 濃度の経年変化（1940～1995年）を探ってみましょう。図3を見て下さい。1950年代の初頭、 ^3H 濃度は 3×10^{-10} Bq/cm³以下でした。しかし、1950年代後半から1960年代前半にかけて行われた核実験により急激に濃度が上昇し、1970年代初めには約3桁（ 1×10^{-7} Bq/cm³）も高い濃度となりました。その後、核実験の停止により、1990年代で約1桁濃度が下がりましたが、核実験の影響は現在も残っています。

タクさん：今回のコラムの終わりとして、宇宙線や核実験などで生成された ^3H が自然環境を循環していく様子（環境動態）を探ってみましょう。自然環境においては ^3H の99%以上が水蒸気トリチウム（HTO）の化学形態で存在します。図4を見て下さい。多くは雨（雪）として地表へ落下し、自然の水循環経路にとり込まれます。すなわち、土壌などから植物へ移行し、また食物連鎖により動物へと移行します。私たちはこの経路にそって外部被ばくおよび内部被ばくを受けます。次回は、 ^3H の被ばく形態と健康影響について詳しく説明しましょう。

（原産協会・人材育成部）

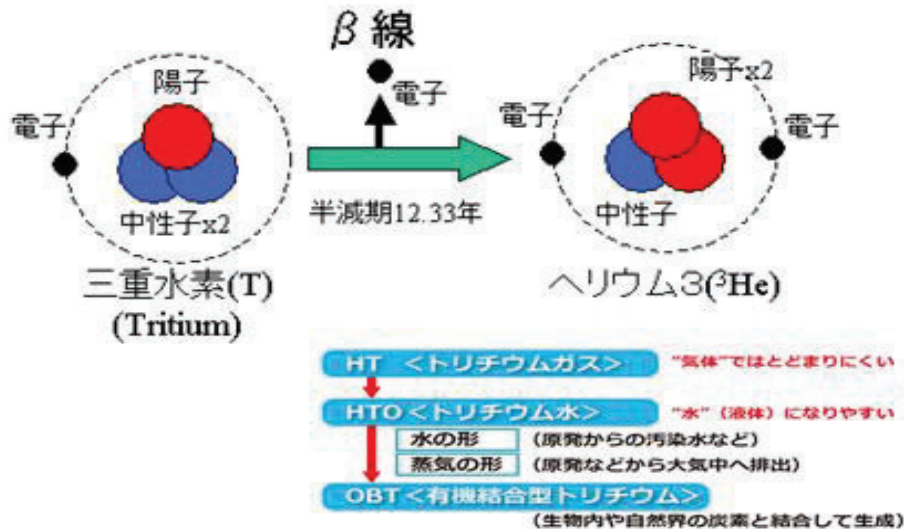
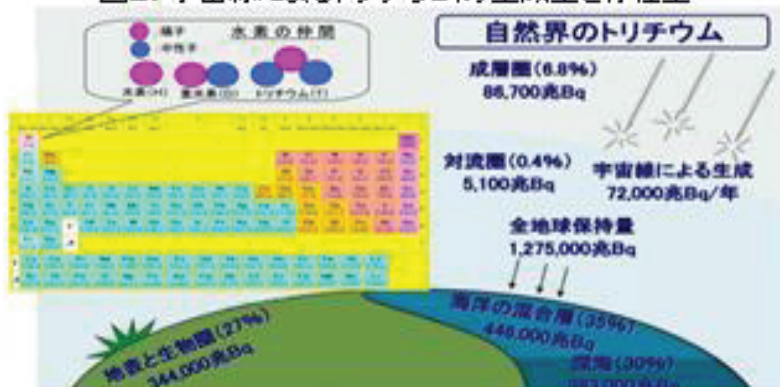


図1. トリチウム(^3H)の物理的性質

（参考：http://swebry.info/sp/cha-mame.at.swebry.info/200602/article_6.html）

図2. 宇宙線によるトリチウムの生成量と存在量



（参考：UNSCEAR2000年報告、1997年報告）

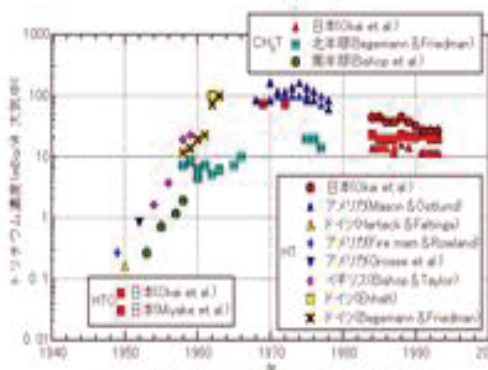


図3. 大気中のトリチウム濃度の経年変化

（参考：西島剛幸ほか、日本原子力学会誌、39(11)、1997）



図4. 自然界でのトリチウムの生成と循環

（参考：<https://www.nrc.gov/docs/ML1029/ML102990100.pdf>）

【原子力ワンプoint】 広く利用されている放射線

(115) トリチウムって何？何が問題？(その2)

前回の本コラムでは、①トリチウム (^3H) の物理的・化学的性状、②自然界に分布する ^3H の生成量と存在量、③世界各国における大気中の ^3H 濃度の経年変化および④宇宙線や核実験などで生成された ^3H が自然環境を循環していく様子（環境動態）を紹介しました。今回は、 ^3H の被ばく形態（種類）と健康影響について探ってみましょう。

ゆりちゃん：それでは最初、「 ^3H (T と書く場合もある)」の被ばく形態について教えてください。

タクさん：図 1 を見て下さい。被ばくの形態には“外部被ばく”と“内部被ばく”があります。でも ^3H の場合、放出される β 線（電子）のエネルギー（速度）がとても低いので（最大で 18.6 keV）、衣服および皮膚で止まり、外部被ばくの影響は無視できます。問題となるのは内部被ばくです。 ^3H による健康への影響を伝える報道記事に多く見られる主張は、「体内に取り込まれたトリチウム水 (HTO) や有機結合型トリチウム (OBT) によって臓器が被ばくするだけでなく、遺伝子 (DNA) にも障害を与える。胎児も被ばくする。加えて、短期間被ばくに比べ長期間、体内に残留する OBT による被ばくが無視できない」というシナリオに基づいています。

ゆりちゃん： ^3H の内部被ばくって、怖いですね。

タクさん：上記のシナリオを耳にしたら、誰でもゆりちゃんと同じように不安を感じるでしょうね。でも、私が言いたいことは、「何故、誰も、放射線影響が見られる ^3H の量には触れないのか」ということです。

ゆりちゃん：タクさんの言う意味がよくわかりません。どういうことですか？

タクさん：放射線から人や環境を守る仕組みを勧告する国際的な学術組織「国際放射線防護委員会 (ICRP)」は、体内に摂取した放射性物質の濃度（ベクレル「Bq」）から、生涯にわたって受ける被ばく線量（内部被ばくの場合には「預託実効線量」と呼ぶ）に換算する係数（「実効線量係数」と呼ぶ）を与えています。実効線量係数が大きいほど、ヒトに及ぼす放射線影響は大きくなります。表 1 を見て下さい。 ^3H を経口摂取する場合、OBT の実効線量係数は約 2.3 倍（ $=4.2 \times 10^{-11} / 1.8 \times 10^{-11}$ ）大きくなっており、確かに OBT の放射線影響は HTO より大きいことに間違いはありません。しかし、他の放射性物質と比べたらどうなるのでしょうか？ 試しに、放射性セシウム (^{137}Cs) および放射性カリウム (^{40}K) を経口摂取した場合と比べてみましょう。驚くことに、OBT の実効線量係数は、 ^{137}Cs の約 1/310、また、 ^{40}K の約 1/150 と極めて小さな値となっています。これは何を意味するのでしょうか？ それは、「経口摂取した濃度 (Bq) が同じなら、 ^3H の放射線影響は、同量の ^{137}Cs および ^{40}K より小さい」という、とても大事なことを示唆しているのです。このように、体内摂取した ^3H の放射線影響を考える時には、「どれだけの量の ^3H をとり込んだのかをまず確認し、その上で放射線影響の大きさを判断する習慣」を育むことが大事です。ゆりちゃん、わかってくれましたか。

ゆりちゃん：それでは、「放射線影響が見られる ^3H の量」って、いったいどのくらいなのですか？

タクさん：カナダでは、「水素が 2 つ融合した重水素 “ ^2H ” を多く含む「重水」を使って中性子を減速し、この中性子を天然ウラン (^{238}U) に直接当ててエネルギーを取り出すユニークな原子力発電システム (CANDU 炉) を開発しました。カナダにおける発電用原子炉は全てこの CANDU 炉です。このシステムには天然ウランを濃縮する必要がないという利点がある反面、 ^2H が中性子を吸収して、 ^3H を大量に発生する欠点があります。そのため、カナダ原子力安全委員会 (CNSC) は、「 ^3H の放射線影響調査プロジェクト

ト」を立ち上げ、動物実験およびヒトの調査の結果を詳しく分析し、2010 年、総合報告書「INFO-0799」を作成しました。動物実験結果については確定的影響（しきい値がある放射線影響）として、①致死性、②胎児の催奇性、③生殖器に及ぼす影響など、また、確率的影響（しきい値のない影響）として、①発がん性、②遺伝的影響など、さらに「OBT の健康影響」について詳細な分析がなされました。同報告書には、「ある条件化では³H による確定的影響として、胎児の成長への影響（催奇性）、確率的影響として遺伝的影響および発がん誘発の事例が見つかった。しかし、いずれも高線量の放射線を当てる実験であり、放射線影響を誘発するために必要な³H の量は、体重 60kg 当たり 10¹⁵（ペタ）ベクレルのオーダーであり、およそ 500 ミリシーベルト（mSv）を超えないと、がんの誘発を招く事例は見つからなかった」と記述されています。次回はヒトの疫学調査の結果について紹介します。

(原産協会・人材育成部)

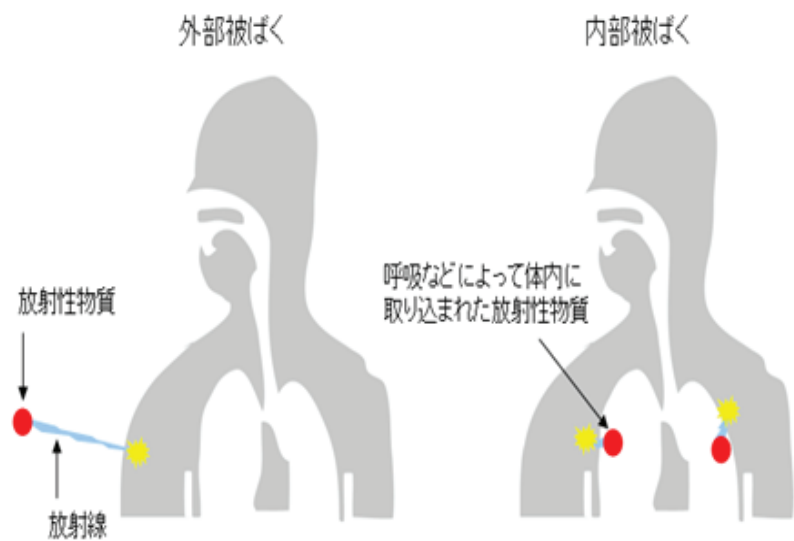


図1. 被ばくの種類
 (引用：自然放射性物質データベース「放射線医学総合研究所」)

表1. 経口摂取による成人の実効線量係数

核種		実効線量係数 (Sv/Bq)
³ H	HTO	1.8×10 ⁻¹¹
	OBT	4.2×10 ⁻¹¹
¹³¹ I		2.2×10 ⁻⁸
¹³⁷ Cs		1.3×10 ⁻⁸
⁴⁰ K		6.2×10 ⁻⁹

(参考：ICRP Publication 72)

【原子力カワポイント】 広く利用されている放射線 (116) トリチウムって何？何が問題？(その3)

前回の本コラムでは、トリチウム (^3H) 被ばく形態および「放射線影響が現われる ^3H 量」を説明しました。今回は、「放射線業務従事者、その子孫および原子力施設の周辺住民」に的を絞り、「疫学研究」の側面からどのようなことが言えるのか探ってみましょう。

ゆりちゃん：最初に基本的なことを聞きますが、疫学研究って何ですか？

タクさん：図 1 を見て下さい。疫学研究とは、人間の集団を調べて、さまざまな病気の広がりや原因を明らかにし、予防や治療の方法を探る研究のことを言います。病気の原因となる要因を研究し、その原因が寄与する大きさを調べる学問分野を「分析疫学」と呼びます。この中に、①コホート研究、②症例対照（ケースコントロール）研究、③生態学的（相関）研究が含まれています。 ^3H 疫学研究でも、これら 3 つのタイプの研究が行われています。

ゆりちゃん：3 つのタイプの疫学研究の違いって何ですか？

タクさん：もう一度、図 1 を見て下さい。「コホート研究」は最も強力なタイプの疫学研究です。ある要因（環境、食べ物等）に被ばく（ばく露）したヒトの集団（ばく露群）と、被ばくしていない集団（非ばく露群）に分けて、それぞれ一定期間、健康状態を追跡調査し、病気の発生頻度を比較します。コホート研究の信頼性は高いのですが、多数の被験者と長期にわたる追跡調査が必要であり、多額な費用がかかるという欠点があります。「症例対照研究」は、ある病気に関して、病気のヒト（症例群）とそうでないヒト（対照群）の 2 つの集団を選定、過去にさかのぼって、その病気との関連が疑われる要因を調べます。この方法はコホート研究よりは簡便にできるのですが、適切な対照群の選定が難しく、放射線影響の場合は過去の被ばくの状況（有無）を見誤る可能性があり、コホート研究よりはかなり信頼性が劣ります。一方、「生態学的（相関）研究」は、分析の対象は個人ではなく集団（国、県、市町村等）として、異なる地域や国の間で要因と疾病の関係を調べます。この研究はコホート研究および比較対照研究に比べてより簡単に行えるのですが、個人の被ばくを調査しないので、疾病がどの要因により生じたかを確かめることが難しいという欠点があります。

ゆりちゃん： ^3H 疫学研究では、どんな疫学研究の方法が適用されているのですか？

タクさん：日本では原爆被爆者、放射線業務従事者および医療被ばくの詳細な疫学研究がなされています。しかし、 ^3H 被ばくを含む疫学研究では、他の放射線、特にガンマ線による外部被ばくも同時に受ける場合が多いのです。すなわち、 ^3H 被ばくに固有のデータは存在しないと言えます。この状況は欧米の各国においても同様です。その中において、カナダでは ^3H 影響調査に関する調査研究が行われていて、カナダ原子力安全委員会が ^3H およびその他の核種による内部被ばくに焦点を当てて作成した包括的な調査報告書「INFO-0799、2010 年」がよくまとめられていると思います。本コラムでも同報告書を主に参照しました。表 1 を見て下さい。調査対象者は、①放射線業務従事者、②放射線業務従事者の子孫、③原子力施設周辺の住民です。 ^3H 疫学研究として、①では「コホート研究（一部、症例対照研究を含む）」、②では「症例対照研究」、③では「生態学的（相関）研究」が適用されています。

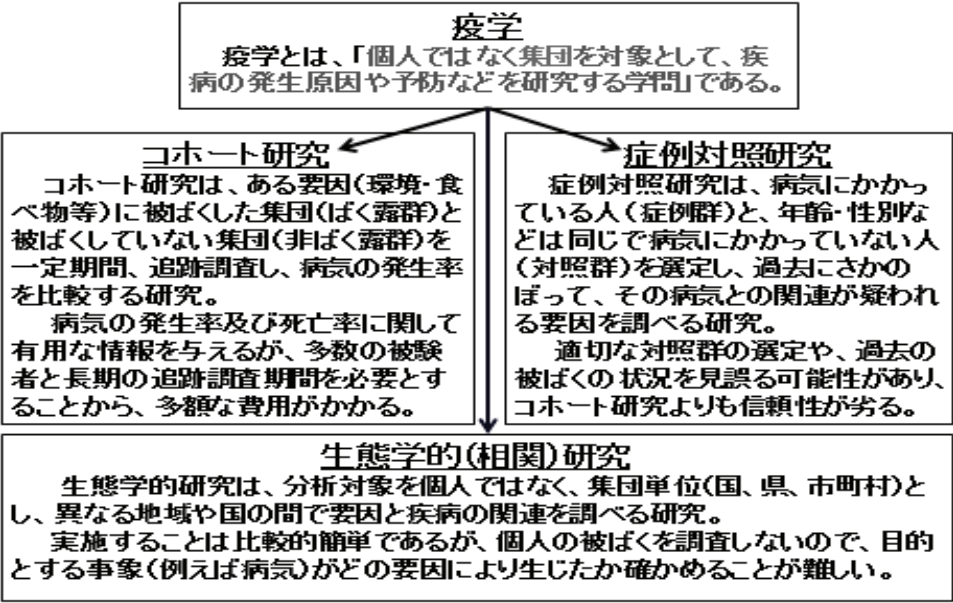
ゆりちゃん：実際に調査された ^3H 疫学研究は、何件ぐらいあったのですか？

タクさん：もう一度、表 1 を見て下さい。放射線業務従事者の疫学調査研究としては英国が最も多く、合計で 21 件の研究報告が引用されています。放射線業務従事者の子孫の疫学調査研究としては英国、米国、カ

ナダのそれぞれ 1 件の研究報告が引用されています。そして、原子力施設周辺住民の疫学調査研究としては英国、米国、カナダ、ドイツ、フランスに固有の 27 件の研究報告、複数の研究を集めて多角的に分析したメタ解析が 1 件、レビューが 5 件引用されています。これらの多岐にわたる疫学研究からどのような結果が導かれるのでしょうか。また、³H を大量に発生する発電用原子炉（CANDU 炉）を運転するカナダでは、³H の健康影響をどのように考えているのでしょうか。興味が湧きますね。その結果は次回に紹介します。

(原産協会・人材育成部)

図 1. 3 種類の疫学研究



(参考：木原雅子、木原正博 監訳、2008、WHO の標準疫学 (第 2 版))

放射線業務従事者の疫学調査研究 (研究件数)	放射線業務従事者子孫の疫学調査研究 (研究研究)	原子力施設周辺住民の疫学調査研究 (研究件数)
「コホート研究」	「症例対照研究」	「生態学的 (相関) 研究」
1. 英国原子力公社 (UKAEA) 放射線業務従事者 (5 件)	1. 英国原子力発電所の周辺の小児白血病 (5 件)	1. 英国原子力発電所周辺の小児白血病 (9 件)
2. 英国核兵器機関 (AWE) 放射線業務従事者 (2 件)	2. 米国 Hanford 周辺サイトの先天性奇形 (1 件)	2. 米国原子力発電所周辺の先天性奇形、小児白血病 (3 件)
3. 英国 (UKAEA, AWE, Sellafield) の職種別従事者 (1 件)	3. カナダ Ontario Hydro Power 放射線業務従事者の子孫の先天性異常 (2 件)	3. カナダ原子力施設周辺の先天的欠損症、小児白血病、乳児死亡率及びその他の健康指標 (3 件)
4. 英国核燃料公社 Capenhurst 工場放射線業務従事者 (2 件)		4. ドイツ原子力発電プラント周辺の小児がんと白血病 (9 件)
5. 英国 Chapelcross 原子炉従事者 (1 件)		5. フランス原子力事業所周辺の小児白血病 (3 件)
6. 英国 Sellafield 原子力従事者 (2 件)		6. 小児白血病のメタ解析 (複数の研究を多角的に分析) (1 件)
7. 英国の国家登録された放射線業務従事者 (1 件)		7. カナダ原子力施設周辺の小児白血病レビュー (3 件)
8. 米国 Savannah River サイトの原子力従事者 (3 件)		8. 英国内部被ばく委員会による放射線リスクのレビュー (1 件)
9. カナダ原子力公社の原子力従事者 (4 件)		9. 英国独立諮問グループ (AGIR) トリチウム疫学レビュー (1 件)

表 1. トリチウムの健康影響「疫学調査研究の事例」一覧表

(参考：トリチウム被ばくの疫学調査「INFO-0799」カナダ原子力安全委員会)

【原子力ワンポイント】 広く利用されている放射線

(102) 未知の放射性粒子「セシウムボール」を探る(その1)

日本経済新聞は 2017 年 6 月 11 日付け朝刊で、「東京電力福島第一原子力発電所事故の際、放射性セシウムを含む未知の微量子（セシウムボール）が原子炉から放出され、関東地方まで飛んできたことが最近の研究で分かった。従来知られてきたセシウム放出物とは体内に取り込んだ場合の健康への影響も異なると考えられる。自己の進展を推測する手がかりとしても注目される」と紹介しました。セシウムボールとは、いったいどういうものなのでしょうか？

ゆりちゃん：セシウムボールが存在するって、誰が、いつ、どこで、どのようにして、思いついたのですか？

タクさん：福島原発事故当時、茨城県つくば市にある気象研究所の構内で粉塵（エアロゾル）をフィルターろ過し、大気中に浮遊する放射性物質の濃度の変化を測定していました。図 1 を見てください。放射性物質の濃度が 2011 年 3 月 14 日～3 月 15 日と 3 月 20 日～21 日に急上昇していることがわかります。ここで注意してほしいのは特に前者です。実は、この時期に福島第一原発 2 号炉と 3 号炉で炉心溶融（メルトダウン）が起きていました。研究員がフィルター上に“GM 管式サーベイメータ”を当ててみると、指針が大きく振れ、通常時の数百万倍もの放射性物質が集められていることを知りました。最初、気象研究所の研究チームは、原発事故で発生したガス状で粒子径も小さい（0.1 μm 以下）放射性セシウム（Cs と略す）が、大気中のエアロゾルに付着して関東まで運ばれてきたかと思っていました。しかし、調査が進むにつれて、「フィルター上に捕集された放射性物質はサイズも放射能強度もはるかに大きく、ガス状で粒子径も小さい Cs がエアロゾルに付着して運ばれてきたのではなくて、濃縮されたサイズの大きな粒子状の Cs（セシウムボール）が直接、風に乗って運ばれてきたのではないか」と考えるようになりました。

ゆりちゃん：セシウムボールの存在をより確かなものとした根拠は、何だったのですか？

タクさん：NHK サイエンス ZERO シリーズ原発事故⑬「謎の放射性粒子を追え！」（2014 年 12 月 21 日放映）で、気象研究所の研究チームの 1 人である足立光司氏が、わかりやすく説明しています。足立研究員は原発事故当時、アメリカの大学で電子顕微鏡を使った研究をしていました。しかし、気象研究所が電子顕微鏡の専門家を探していることを知ると、2011 年 9 月に帰国。イメージングプレート（IP）と電子顕微鏡観察を巧みに使って、フィルター上の放射性物質の特性調査に邁進（まいしん）しました。

ゆりちゃん：ちょっと待ってください。IP って何ですか？

タクさん：IP とは、「放射線を感じする写真乾板」のようなもので、フィルター上に数週間、置いておくと、放射線を出している部分が黒く感光します。図 2 を見てください。3/14 21:10-3/15 09:10 のフィルター上に、約 100 個の肉眼でも見える黒い点（この時点ではまだ Cs とは同定されていませんでした）の存在することがわかりました。

ゆりちゃん：それではセシウムボールって、どのようにして確認されたのですか？

タクさん：セシウムボールであることを確認するためには黒点の部分の一つ一つ切り取って、一つずつスライドガラスに載せていき、電子顕微鏡の“元素分析機能”を活用し、黒点が本当に Cs かどうか調べる必要がありました。研究を開始してから 4 か月が過ぎた時、直径 2.6 μm の丸い粒子が見つかりました。元素分析してみると Cs が含まれていることが確認されました。まさに Cs ボールが発見された瞬間です。詳しく解析してみると、Cs に加えて、酸素、ケイ素、鉄、亜鉛を主体として、微量の塩素、マンガンなどを含

むことがわかりました。どうりで一つの粒子のサイズが大きくなるわけですね。この粒子は水に溶けない“非水溶性”の粒子であることがわかりました。このフィルターを採取した時点（2011年3月14日）にさかのぼって、この粒子の放射能濃度を計算してみると、Cs-134が 3.31 ± 0.06 ベクレル (Bq)、Cs-137が 3.27 ± 0.04 Bqであることがわかりました。しかし、原発事故の進展過程を知り、健康影響の全体像を把握するためには未だ情報が十分ではありません。セシウムボールの特性について、さらに詳しい研究が必要です。次回にもう一度、兵庫県の播磨科学公園都市にある大型放射光施設（SPRING-8）を使ったセシウムボールの特性調査など、その後の関連研究について紹介します。

（原産協会・人材育成部）

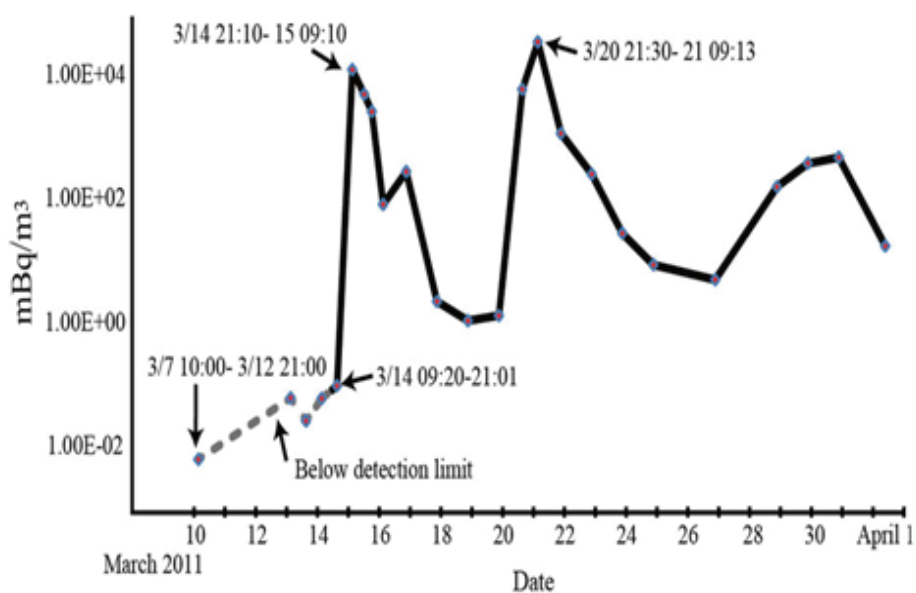


図1 気象研究所(つくば市)構内で測定した大気中放射能濃度の時間変動特性
(参考:地球化学49, 185-193(2015))

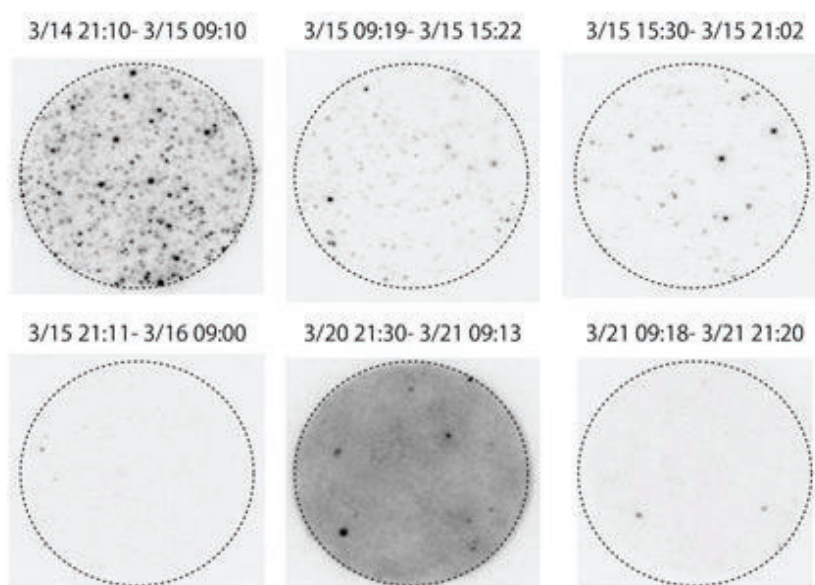


図2 イメージングプレート(IP)によるフィルター上の放射性物質の分布測定例
(参考:地球化学49, 185-193(2015))

【原子カワポイント】 広く利用されている放射線

(103) 未知の放射性粒子「セシウムボール」を探る(その2)

本コラムで前回、「セシウム (Cs) ボールは極めて水に溶けにくい」と紹介しました。これまで、原発事故で放出された Cs は「大気中の粉塵 (硫酸ミストなど) と混合、水に溶けやすい性質をもって広がっていく」と考えられてきました。Cs ボールは何故水に溶けにくいのでしょうか？ 東京理科大学の中井泉教授および阿部善也助教の研究グループは、兵庫県播磨科学公園都市にある「大型放射光施設 (SPring-8)」を使って、Cs ボールの正体を探る実験を行いました。

ゆりちゃん：最初に基本的なことを聞きますが、大型放射光施設 (SPring-8) ってどのような施設ですか？

タクさん：ゆりちゃんはまだ生まれていなかったのでは知らないでしょうが、1998 年、和歌山で「カレー毒物混入事件」が起きました。そのとき活躍したのが SPring-8、事件の 1 年前の 1997 年、国立研究開発法人理化学研究所によって建設されました。図 1 を見てください。SPring-8 は 4 つの加速器で構成された「大型放射光施設」です。ちょっと専門的になりますが、放射光とは、電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、磁石によって進行方向を曲げた時に発生する太陽の約 10 億倍もの輝度を持つ電磁波 (X 線) のことです。物質にこの高輝度な X 線を照射すると元素固有の X 線が発生する原理を利用し、発生した X 線の種類 (エネルギーまたは波長) と量を測定することによって、物質に含まれる元素や微量元素の種類と量を識別できます。これを蛍光 X 線分析法と言います。この蛍光 X 線分析法を使って、カレーに混入されたごく微量の毒性の強い「亜ヒ酸」が容疑者の保有する「亜ヒ酸」と同一であると鑑定したのです。放射光発生技術は進化し、X 線のビームをさらに細く (約 $0.1 \mu\text{m}$) することができ、現在では物質の原子配列を解明する構造解析あるいは物質がどのような元素から構成されているかを調べる「蛍光 X 線分析」など、幅広く利用されています。レントゲンが X 線を発見したのが 1895 年、それから約 120 年が過ぎた今、放射線利用の分野は驚くほど広がりましたね。

ゆりちゃん：中井先生らは、この SPring-8 を使って、どのような調査を行ったのですか？

タクさん：中井先生らは、原発事故直後につくば市の気象研究所で採取された Cs ボールに対して、SPring-8 において複合的な (測定器をいろいろ変える) X 線分析研究を行いました。図 1 をもう一度見てください。具体的には、Cs ボールの詳細な化学組成、化学状態、結晶構造に関する情報を調べるため、蓄積リングに付属する 1 本のビームライン (BL37XU) で集められた X 線を用いて蛍光分析を行いました。その結果が 2014 年 8 月 8 日にプレス発表されました。発表資料から引用します。「Cs 以外にどのような元素が含まれているのかを調べたところ、(図 2 に示す通り) バリウム (Ba) やルビジウム (Rb)、モリブデン (Mo) など燃料の核分裂生成物と思われる元素と共に、一部の粒子には、燃料であるウラン (U) の含まれることが明らかとなった。この分析結果は、揮発性の高い共有結合性の Cs だけが、炉から大気中に放出されたのではなく、燃料である U そのものを外部に放出しうる程度に、事故当時、炉が破損していた可能性を示している」と述べられました。

ゆりちゃん：ちょっと頭を整理したいので少し考える時間をください。

タクさん：そうですね。さて、それではまた発表資料に戻しましょう。「さらに Cs ボールには、核燃料由来の元素だけでなく、ケイ素 (Si) や鉄 (Fe)、亜鉛 (Zn) など炉自体の構成物に由来する元素も多く含まれていた。そして X 線の吸収効果と回折現象 (X 線が障害物のうしろへ回り込む現象) を分析することによって、Cs ボールがガラス状態、かつ高酸化状態 (CsO や CsO_2 など) で生成したことを突き止めた。これ

らの分析結果から、Cs ボールが採取された 2011 年 3 月 14 日～3 月 15 日に事故を起こした原子炉内部（多分 2 号炉）では、核燃料だけでなく、容器や構成物も溶融し混合された状態にあり、それが大気中に放出され急冷されたことでガラス状になったという“Cs ボールの生成・放出シナリオ”を推定することができる。本研究で示された Cs ボールの生成シナリオは、メルトダウンした核燃料が容器の底を抜けて落下したとする事故当時の炉内状況に関する指摘を科学的に裏付ける研究と言える」と述べられました。大きさが僅か 2 ミクロンの微粒子から、「事故当時の原子炉の状況や放射性物質の大気放出に関する多くの情報」が得られることには驚かされます。しかし、原発事故の進展過程を知り、健康影響の全体像を把握するためには、Cs ボールについてのさらに詳しい研究が必要になるでしょう。

（原産協会・人材育成部）



* Spring-8とは、兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高の放射光を生み出すことができる大型放射光施設。放射光とは、電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、磁石によって進行方向を曲げた時に発生する、細く強力な電磁波(X線)のことである。

* Spring-8は線形加速器、シンクロトロン、蓄積リングおよびニュースパルの四つの加速器で構成され、蓄積リングは高輝度・硬X線の生成と利用を主目的とする施設である。

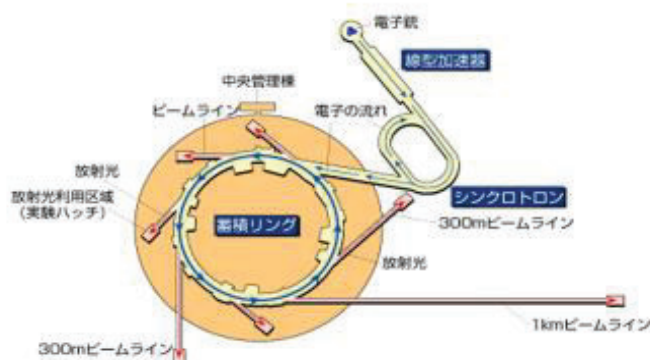


図1 大型放射光施設(Spring-8)の外観と機器構成
(参考:理化学研究所資料)

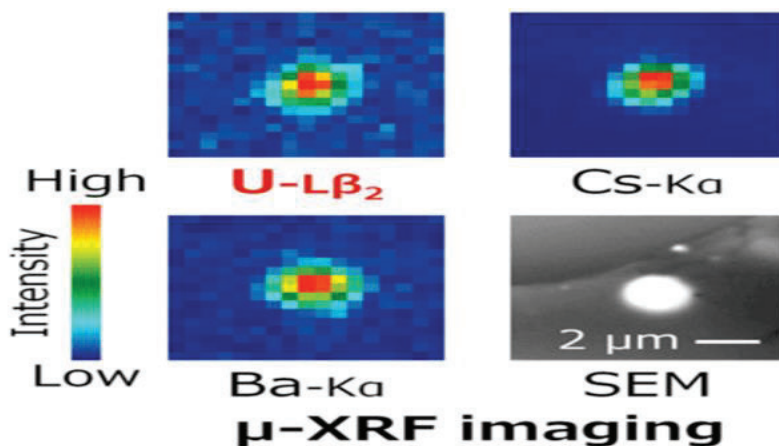


図2 マイクロX線蛍光分析法によるセシウムボール(右下:電顕写真)における
ウラン、セシウム、バリウムのイメージ画像
(参考:東京理科大学プレスリリース(2014年8月8日))

あなたに伝えたい放射線の話（1）

－福島第一原子力発電所事故から10年：放射線被ばくの影響は？－

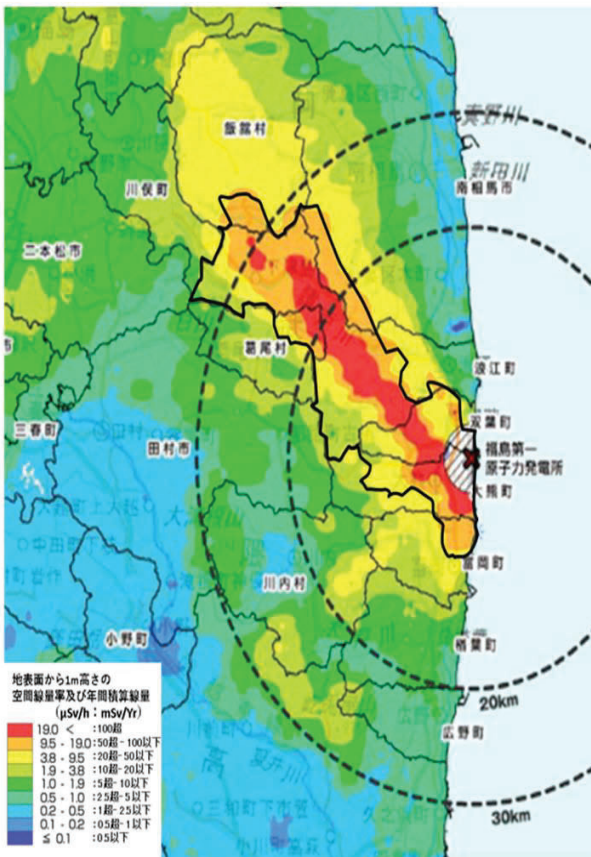
2011年の福島原子力事故により、多くの地域住民が避難を余儀なくされ、放射線被ばくによる健康影響が心配されてきました。事故から10年、国連機関から、「福島原子力事故による長期的な健康影響は小さい」という内容の、放射線被ばくによる健康影響を考える上で重要な報告書が2021年3月に公表されました。



- ◇放射線被ばくが直接の原因となるような健康への悪い影響は報告されていない。
- ◇被ばくした子供たちの甲状腺がんの検出数が大きく増加している原因は放射線被ばくではない。
- ◇今回公表された報告書は、事故から10年間、蓄積してきた知見・データに基づいている。

〔2011年11月時点の線量分布〕

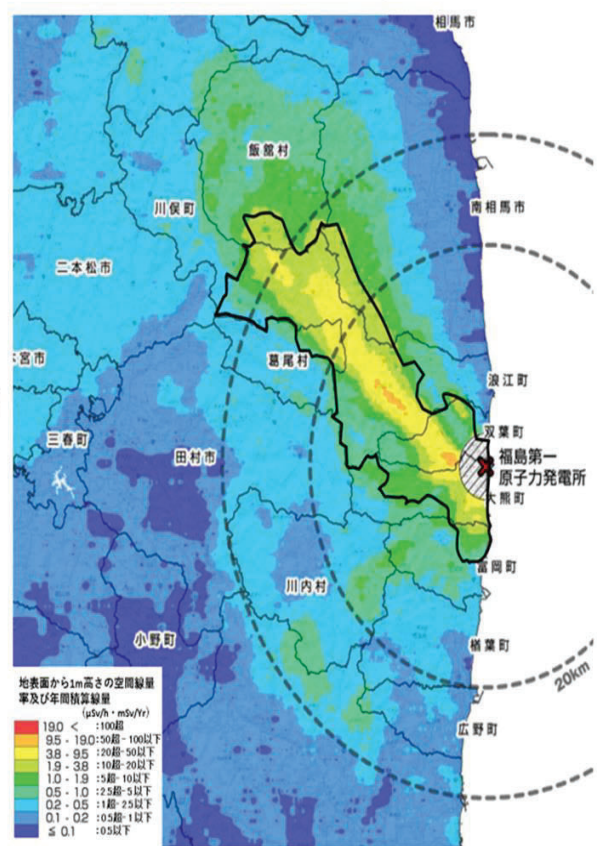
※黒枠囲いのエリアは帰還困難区域



（出典）平成23年12月16日文科科学省「文科科学省による第4次航空機モニタリングの測定結果について」に基づき原子力被災者生活支援チーム作成

〔2020年10月時点の線量分布〕

※黒枠囲いのエリアは帰還困難区域



（出典）令和3年2月15日原子力規制委員会「福島県及びその近隣県における航空機モニタリングの測定結果について」に基づき原子力被災者生活支援チーム作成

（引用：あれから10年、2021年の福島の「今」経済産業省）



リケジョさん：国連の報告書ってどういうものですか？



放射線博士：この報告書を作成し公表したのは、1955 年に国連総会で設立された「原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）」です。

UNSCEAR は、日米欧など 27 の加盟国によって任命された、主に放射線の環境への影響を調査・評価する科学分野の専門家で構成されています。1950 年代には大気圏内で核実験が頻繁に行われ、自然環境中に放射性物質が大量に放出されました。こうした放射性物質が環境や人の健康に及ぼす影響について、人々の不安と心配が膨らんできました。

そのため UNSCEAR は、科学的・中立的な立場から、放射線の人・環境等への影響を調査・評価し、毎年国連総会へ結果の概要を報告するという重要な役割を担うようになったのです。「科学に根ざし、政策を取り扱わない、独立かつ公平な立場」というのが UNSCEAR の大原則です。



リケジョさん：2021 年に公表された報告書（以下「2020 年報告書」という）の主な内容を教えてください。



放射線博士：2021 年 3 月 9 日に配信されたプレスリリースⁱを見てみましょう。「この 10 年間で、被ばく線量評価に関する新規知見が、相当数明らかとなった。この新規知見により、事故後の放射線被ばくレベルと健康について、改善されたより健全な評価を実施することが可能となった。追加の観測データと、日本での人々の実際の食生活と行動についてのより包括的な知見に基づき改善されたモデル計算を行った。その結果、公衆の被ばく線量は 2013 年に発表された報告書（以下『2013 年報告書』という）と比較して減少、または同程度であり、放射線被ばくが直接の原因となるような『将来的な健康影響は見られそうにない』と引き続き見なしている」、と述べています。

UNSCEAR 議長のギリアン・ハース博士ⁱⁱは、「2020 年報告書の刊行以降、福島県の県民に、事故による放射線被ばくが直接の原因となりうる健康への悪い影響は報告されていない」と、強調しています。



リケジョさん：私の一番の関心事は甲状腺がんです。2020 報告書では、甲状腺がんの影響を、どのように評価しているのですか？



放射線博士：UNSCEAR は、「放射線被ばくの推定値から、推測されうる甲状腺がんの発生を評価

して、いずれの年齢層の子供たち（お母さんの体内で被ばくした子供を含む）においても甲状腺がんの発生は見られそうにない」と、結論付けました。そして、「公表されているエビデンスを鑑みると、被ばくした子供たちの間で甲状腺がんの検出数が（予測と比較して）大きく増加している原因は、放射線被

ⁱ プレスリリース「東電福島事故後の 10 年：放射線関連のがん発生率上昇はみられないと予測される」(https://www.unscear.org/docs/publications/2020/PR_Japanese_PDF.pdf)

ⁱⁱ 豪州放射線防護・原子力安全庁（ARPANSA）の放射線保健サービス部長と副 CEO を兼務している。

ばくではないと判断している。むしろ、非常に感度が高いもしくは精度がいい（超音波を用いた甲状腺の）スクリーニング検査がもたらした結果であり、以前は検出されなかった、集団における甲状腺異常の罹患率ⁱⁱⁱを明らかにしたに過ぎない。さらに、一般公衆の間で、放射線被ばくが関係している先天性異常、死産、早産が過剰に発生したという確かなエビデンスはない」と、説明しました。



リケジョさん：日本のマスコミは、2020 年報告書の内容を見てどのように感じたのでしょうか。



放射線博士：面白い質問ですね。その前に表 1 と表 2（下記）を見てください。私が、2013 年

報告書（最初に発表された総合報告書）と 2020 年報告書（2 回目に発表された総合報告書）を読んで、「日本に住む人（①福島県人、②近隣県人、③その他の県に住む人）が、外部放出された放射性物質から 1 年間にわたって受けたと推測される『実効線量^{iv}の地区別の平均値』、および『甲状腺被ばく線量の地区別の平均値』を分類・整理」した結果です。

この表を見てもらえば、2013 年報告書と 2020 年報告書で、「原子力発電所事故から 1 年が経過する間に受けた『追加被ばく線量の推定値』がどのように変わってきたか」、その概観をつかむことができるでしょう。



リケジョさん：新聞報道の記事として何か一つ紹介してくれませんか。



放射線博士：それでは一例として 2021 年 3 月 9 日に報道された朝日新聞デジタル記事^vを見

てみましょう。ここではわかりやすく、記事を次の通り 3 つの内容に分けて順番に紹介します。

記事 1：UNSCEAR は、「福島の 2013 年報告書では、データ不測のため、実際には流通していない汚染食品を食べたと仮定するなどして、県民らの被ばく線量を推計していた。今回は、事故後に流通した食品の放射能の実測値など、2019 年末までに入手できた新しいデータを取り込み、実態に近い推計をめざした。その結果、（2020 年報告書では、）事故後 1 年間の甲状腺への平均被ばく線量は、県全体の 1 歳で 2.2～30 ミリシーベルト、10 歳は 1～22 ミリシーベルトと、2013 年報告書の推計値の半分以下になった。（また）2013 年報告書では、80 ミリシーベルト近く被ばくした子が大勢いれば、がんの増加が確認される可能性がある」と評価していたが、今回は（2020 年報告書では）、「放射線による健康影響が確認される可能性は低い（表 1 及び表 2 参照）」と再評価しました。

ⁱⁱⁱ 罹患率は、一定期間にどれだけの甲状腺異常者が発生したかを示す指標であり、ある一時点においてどれだけの甲状腺がんが発症したかを示す指標ではないことに注意が必要である。

^{iv} 放射線被ばくによる個人の確率的影響のリスクの程度を表す線量概念である。各臓器の受けた放射線被ばく線量（等価線量という）に、その臓器の発がんリスク（組織荷重係数という）を掛けた値の総和量として定義される。

^v 医療サイト朝日新聞アピタル記事「福島県民がん増える可能性低い」被曝線量を下方修正
（<https://www.asahi.com/articles/ASP395JSWP37UGTB00H.html>）

記事 2 : UNSCEAR は、「福島県が 2011 年から続ける県民健康調査では、事故時 18 歳以下の子らを対象にした検査で（これまでに）251 人が甲状腺がんの疑いと診断された。（UNSCEAR は）2020 年報告書で、「（これは、）被ばくの影響ではなく、高感度の超音波検査によって、生涯発症しないがんを見つけた『過剰診断』の可能性はある」、と指摘しました。

記事 3 : UNSCEAR は、「（2020 年報告書では）全身への被ばく線量も下方修正され、県全体の成人で平均 5.5 ミリシーベルト以下となった。がんで亡くなる人が明らかに増えるとされる 100 ミリシーベルトを大きく下回り、県民の間で将来、健康影響が確認される可能性は低い（表 1 及び表 2 参照）」、と評価しました。

記事は最後に、「UNSCEAR のギリアン・ハース議長は、朝日新聞の取材に対して『報告書が、福島の人たちの安心につながることを強く願う』、と語った。（また）東京医療保健大学の明石真言教授（被ばく医療）は、『独立した国際組織が示した今回の報告書の内容を、福島だけでなく、日本中の人知ってもらいたい』、と話した」、と紹介して終わります。

これはあくまでも私個人としての印象ですが、福島事故からほぼ 10 年が経過した今、放射線に対する不安を軽減したいと願う記者の気持ちが感じられます。



リケジョさん：博士、ありがとうございました！

表 1 「UNSCEAR2013 年報告書」に記載されている
事故後 1 年間の地域別の平均実効線量および平均甲状腺被ばく線量の推定値

居住地		実効線量 (mSv)			甲状腺被ばく線量 (mSv)		
		成人	10 歳児	1 歳児	成人	10 歳児	1 歳児
福島県	予防的避難区域（双葉町、大熊町、富岡町、楢葉町、広野町、及び南相馬市、浪江町、田村市の一部、川内村、葛尾村の一部）	1.1～ 5.7	1.3～ 7.3	1.6～ 9.3	7.2～ 34	12～ 58	15～ 82
	計画的避難区域（飯館村、及び南相馬市、浪江町、川俣町、葛尾村の一部）	4.8～ 9.3	5.4～ 10	7.1～ 13	16～ 35	27～ 58	47～ 83
	避難区域外（避難をしていない地域）	1.0～ 4.3	1.2～ 5.9	2.0～ 7.5	7.8～ 17	15～ 31	33～ 52
その他の県	近隣県（宮城県、群馬県、栃木県、茨城県、千葉県、岩手県）	0.2～ 1.4	0.2～ 2.0	0.3～ 2.5	0.6～ 5.1	1.3～ 9.1	2.7～ 15
他県	（福島県、宮城県、群馬県、栃木県、茨城県、千葉県、岩手県）を除く 40 県	0.1～ 0.3	0.1～ 0.4	0.2～ 0.5	0.5～ 0.9	1.2～ 1.8	2.6～ 3.3

（出典：UNSCEAR2013 Report より）

表 2 「UNSCEAR2020 年報告書」に記載されている

事故後 1 年間の地域別の平均実効線量および平均甲状腺被ばく線量の推定値

居住地		実効線量 (mSv)			甲状腺被ばく線量 (mSv)		
		成人	10 歳児	1 歳児	成人	10 歳児	1 歳児
福島県	表 1 の「予防的避難区域」と「計画的避難区域」を合わせた地域	0.0046～ 5.5	0.10～ 6.5	0.15～ 7.8	0.79～ 15	1.6～ 22	2.2～ 30
	表 1 の避難区域外（避難をしていない地域）	0.079～ 3.8	0.10～ 4.5	0.12～ 5.3	0.48～ 11	1.0～ 17	1.2～ 21
その他の県	近隣県（茨城県、宮城県、栃木県、山形県）	0.10～ 0.92	0.13～ 1.1	0.15～ 1.3	0.31～ 3.3	0.52～ 5.2	0.62～ 6.3
他の県	（福島県、宮城県、栃木県、茨城県、山形県）を除く 42 県	0.004～ 0.36	0.005～ 0.43	0.005～ 0.51	0.034～ 0.48	0.073～ 0.63	0.087～ 0.74

（出典：UNSCEAR2020 Report より）

（原産協会：人材育成部）

第5章

社会とリスク認知



原子力
7ポイント

毒にもなるのですか？
タクさん 人は約六
十兆個の細胞からでき
ています。それぞれの
細胞に取り込まれた酸
素は、栄養分を分解し
て人が生きていくため
のエネルギーをつくり
出し、水(H₂O)に変
換(レール)に遺伝情報
を伝える四種類の塩基(ア
デニン、グアニン、シ
トシン、チミン)が規
則正しく並べられた
重らせん構造になっ
ています。DNAに
一本鎖切断、二本鎖切
断に分けられる時、
た酸素(活性酸素)は遺
伝情報を担う物質であ
るDNAを傷つけること
があります。この傷つ
いたDNAを元通りに直
すことができないと、
がんの原因になること
があります。

自然放射線より活性 酸素で細胞は傷つく

活性酸素と放射線
の両者は、細胞のDNA
を傷つけることがあ
ります。しかし、放射
線は細胞のDNAを直
すことができません。
活性酸素は細胞のDNA
を傷つけることがあ
ります。しかし、放射
線は細胞のDNAを直
すことができません。

放射線は、体の機械
の部品を壊すように
細胞のDNAを壊す
ことができます。放射
線は、体の機械の部
品を壊すように細胞
のDNAを壊すことが
できます。

Google「放射線の人体における影
その防護(松田尚樹)より図を一部追
加」

照射源	照射部位	照射量	照射時間	照射回数	照射条件
放射線	全身	100mSv	10分	1回	放射線照射装置
放射線	全身	100mSv	10分	1回	放射線照射装置
放射線	全身	100mSv	10分	1回	放射線照射装置
放射線	全身	100mSv	10分	1回	放射線照射装置
放射線	全身	100mSv	10分	1回	放射線照射装置
放射線	全身	100mSv	10分	1回	放射線照射装置
放射線	全身	100mSv	10分	1回	放射線照射装置
放射線	全身	100mSv	10分	1回	放射線照射装置
放射線	全身	100mSv	10分	1回	放射線照射装置
放射線	全身	100mSv	10分	1回	放射線照射装置

放射線は、体の機械
の部品を壊すように
細胞のDNAを壊す
ことができます。放射
線は、体の機械の部
品を壊すように細胞
のDNAを壊すことが
できます。

放射線は、体の機械
の部品を壊すように
細胞のDNAを壊す
ことができます。放射
線は、体の機械の部
品を壊すように細胞
のDNAを壊すことが
できます。

放射線は、体の機械
の部品を壊すように
細胞のDNAを壊す
ことができます。放射
線は、体の機械の部
品を壊すように細胞
のDNAを壊すことが
できます。

放射線は、体の機械
の部品を壊すように
細胞のDNAを壊す
ことができます。放射
線は、体の機械の部
品を壊すように細胞
のDNAを壊すことが
できます。

原子力 ワンポイント

日本の放射線・放射能基準 ——福島第一原発事故（番外編23）



いう（放射線に敏感で大事だけれど小さな一つの臓器のみへの被ばくの影響を表しています。それに對して、日常生活で受ける被ばく線量は、それを對して、日常生活で受ける被ばく線量は、全身への被ばくに関わる量ですから、話が全然ちがうのです。

ゲンくん つい最近、

新聞（五月二十八日付）で「福島第一原発事故によって、避難区域内の当時一歳だった子が、事故後一年間に受けた甲状腺の最大被ばく線量は、八十二ミリシーベルト（mSv）」と書かれた記事を読んだよ。ぼくたち日本人が日常生活で受ける被ばく線量は、約二・一mSv（一年間）と言われているから、これより約四十倍も大きな量の被ばくを受けていたなん

カワさん その記事を読んだ多くの人は、ゲンくんと同じようにびっくりするでしょうね。新聞記事に掲載された線量と日常生活で受ける線量が、同じ単位

カワさん それは、臓器によって放射線の影響を受ける程度が違うということなんです。この違いを考慮して、国際放射線防護委員会（ICRP）が、「甲状腺等価線量」を「実効線量」に換算するための係数（組織加重係数（標準人）」

被ばく線量の表し方は二種類あるので注意

「損害の大きさ」を表すものとなっています。基本的に甲状腺がんのようにめったに死なないがんでも「生活の質」が下がるので、そういう場合でも「損害」を考慮しておくというのです。

組織・臓器	組織加重係数		
	ICRP103 (2007年)	ICRP60 (1990年)	ICRP23 (1977年)
生殖腺	0.08	0.2	0.25
赤色骨髄、肺	各0.12	各0.12	各0.12
結腸、胃	各0.12	各0.12	項目なし
乳房	0.12	0.05	0.15
甲状腺	0.04	0.05	0.03
肝臓、食道、膀胱	各0.04	各0.05	項目なし
骨表面	0.01	0.01	0.03
皮膚	0.01	0.01	項目なし
唾液腺、脳	各0.01	項目なし	項目なし
残りの組織・臓器	0.12	0.05	0.3

「内部被ばく」を議論する際には、通常「甲状腺等価線量」が使われます。一方、がんリスクに基づいて放射線防護基準を論ずる時には、「実効線量」が使われます。これまでの新聞報道を見ると、二つを区別して報道された例は極めて少なく、人々に無用な誤解や不安を生じさせているようです。

（mSv）が使われていたから、単純に割り算をして影響が大きいとか小さいとか言ってしまうんですよ。でも実際はそれほど単純ではないのです。新聞に書かれていた被ばく線量は、甲状腺と

器によって放射線の影響を受ける程度が違うということなんです。この違いを考慮して、国際放射線防護委員会（ICRP）が、「甲状腺等価線量」を「実効線量」に換算するための係数（組織加重係数（標準人）」

「損害の大きさ」を表すものとなっています。基本的に甲状腺がんのようにめったに死なないがんでも「生活の質」が下がるので、そういう場合でも「損害」を考慮しておくというのです。

と、新聞に載っていた甲状腺等価線量で八十二mSvは、実効線量ではどのくらいの数値になるのか。カワさん 繰り返しますが、実効線量は、甲状腺等価線量にICRPが勧告した「組織加重係数」をかけることによって換算（厳密に言いますと、実効線量は、生殖腺や肺など他の臓器についても同じように等価線量を求めて、その後足し合わせたものと定義されるのですが、放射性ヨウ素は甲状腺に溜まる性質があるので、他の臓器の影響は無視）できます。ICRPの最新の勧告（二〇〇七年）によれば、甲状腺に対する組織加重係数は、〇・〇四となっている。そうすると、甲状腺等価線量で八十二mSvという数値は、実効線量で三・二八（＝八十二×〇・〇四）mSvという数値に書き換えることができるのです。（原産協会・政策推進部）

原子力 ワンポイント

日本の放射線・放射能基準 ——福島第一原発事故（番外編②）



テツにい

テツにい 注意して
いるのではなく、食べ
るようにお母さんから
注意されているのでは
ないですか。冗談はさて
おき、放射性セシウムが
注目される前から、カリ
ウム（K）40はいろいろ
内部被ばくしますが、体

値より厳しくなった放
射性セシウム新基準値
が適用されるように
なったので、以前は輸入
が認められていた百五
十〜二百ベクレル（Bq
／kgのセシウムを含む
ブルーベリーが廃棄さ
れました。

新基準値は危険値で なく「管理基準値」

新しい食品基準は
危険値ではなく、管理
基準値と考えるべき
で、この値を超えた
ら、念のために管理
（出荷停止等の対応）
しますよ、という消費
者の安心をより高め
る改定と考えられま
す。

ゲンくん 四月一日

から新しい食品基準が
使われることになった
ね。

テツにい 暫定規制

があるよ。

テツにい 何をして
いるの。

ゲンくん ほうれん
草を食べないようにし

も四百Bq／kgのK40が
あります。

ゲンくん え、ポテ

トチップスを食べたら
被ばくしちゃうの。だけ
ど、ポテトチップスを食
べてガンになったなん
て聞いたことないよ。

テツにい そうだね、

聞いたことないね。確か
に、ポテトチップスでも
内部被ばくしますが、体

な食品に含まれていた
ことを忘れてはいけま
せん。代表的なのが旧
SOD（スーパー・オキ
サイド・デイスタム
ターゼ）酵素で除去され
るので、心配する必要は
ありません。

ゲンくん K40が良

きなポテトチップスに
くて、放射性セシウムが

含有量が多いもので、干
し昆布の二千Bq／kgが

あります。ゲンくんの好
きなポテトチップスに

規制されるのはどうし
てなの。

テツにい 理由は良

くわかりません。自然に
あるK40が良くて、放射
性セシウムは体に悪い
という区別は科学的に

はなく、どちらも原子が
崩壊して放射線を出す
ので、人体に影響はあり
ます。但し、放射性セシ
ウムはK40の約二倍強
よく摂取することを妨
げることにもなると思
います。

ゲンくん それでは、
新基準値はどう考えれ
ばいいの。

テツにい 新基準値
は危険値ではなく管理
基準値と考えるべきで、
「この値を超えたら念
のために管理（出荷停止
等の対応）しますよ」と

いう管理を始める値を
下げた、消費者の安心を
より高める改定と考え
てよいと思います。安全

というところでは、暫定規
制値も新基準値も同じ
です。

（原産協会・政策推進部）

表 放射性セシウム規制とカリウム40含有量の比較

食品群	放射性セシウム (ベクレル/kg)		カリウム40含有量 (ベクレル/kg) 《新基準値以上の食品例》
	暫定規制値	新基準値	
一般食品	500	100	干し昆布;2000、干しいたけ;700、ポテトチップス;400、生わかめ;200、ほうれん草;200、魚;100、肉;100
乳児用食品	—	50	—
牛乳	200 (乳製品含む)	50	牛乳;50
飲料水	200	10	—

注記)放射性ストロンチウム、プルトニウムなどを含めて新基準値を設定

40では放射
性セシウム
の数値を二
倍に緩めた
規制値を考
えるべきで
しょう。しか
し、干し昆
布、干しい
たけ、ポテ
トチップス、生
わかめ、ほう
れん草など
は二百Bq／
kgを超える
K40が含ま
れていて、今
まで食べて
（原産協会・政策推進部）

原子力 ワンポイント



広く利用されている放射線 38

放射線の様々な「リスク情報」を利用する際には、「リスクがあるか・ないか」ではなく「どの程度のリスクなのか」という視点で考えることが大事です。しかしこの時、「リスクの単位（分母）をそろえて比較」すること

を忘れると「リスクを過大に評価」する怖れがあります。

の単位（分母）をそろえて比較」って何ですか。

タクさん 日本リスク研究学会は「市民のためのリスク・コミュニケーション・ガイド」で

「同じひとりの被害者が出る場合でも、①被害者が千人のうちのひとりであるか、②十万人にひとりであるか、によつてリスクの大きさは全然違つ。被害者の数だけに注目するのはなく、その分母となっている人数にも目を向けて、同

じく勘違いされたケースを紹介し、なぜそのよう

な勘違いが起こったのかわかりやすく説明しています。先ず諸葛教授が作成した表1を見てください。注目するのは

「死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

す。死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

す。死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

す。死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

す。死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

す。死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

す。死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

す。死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

す。死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

す。死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

す。死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

す。死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

す。死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

す。死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

す。死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

す。死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

す。死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

す。死亡率」と「生涯致死率」という言葉です。死亡率とは「個人が一年間に死亡する確率」で

リスクの分母をそろえて 正確な比較を

に教えて下さい。

タクさん 諸葛宗男 東大特任教授は、科学技術振興機構のウェブサ

イト（サイエンスポータル）で、放射線被ばくの

リスクが交通事故のリスクよりも約百倍も大

ん「死亡する確率がこれ

のは、交通事故のリスク

「死亡率（約〇・〇〇六

％）」と放射線のリスク

を「生涯致死率（〇・五

％）」を単純に比較し、

百mSvの放射線被ばく

のリスクは、交通事故死

のリスクより約百倍（

〇・五÷〇・〇〇六）高

いと勘違いして「だから

百mSvの放射線被ばく

はとても許容できない。

表1 2008年のわが国の死者数と死因

死因	死亡率		生涯致死率
	死者数 (10万人当り)	% (10万人当り)	
交通事故	5.9人	0.0059%	0.66%
100mSvの被ばくによるがん死者の増加	4.5人	0.0045%	0.5%

〇・五÷〇・〇〇六）高いと勘違いして「だから百mSvの放射線被ばくはとても許容できない。少なくとも交通事故死のリスクと同程度でなければ許容できない」と思ってしまったのです。

ゆりちゃん 最初「分母に気をつけて」と言いましたよね？

タクさん そつです。警察庁が公表する交通事故による死亡事故統計では「十万人当たり何人死亡という死亡率」で表すとお話ししましたね。諸葛教授は、これを放射線リスクで使われる「生涯致死率」に換算して比較しなければならぬと言っておられるのです。「死亡率」を

「生涯致死率」に換算するためには、日本人について「何歳で何が原因で死亡するか」という情報がないと正確には評価できませんが、教授はこれを行い、表1の交通事故による生涯致死率の欄に示す通り「〇・六六％」という数値を与えました。もう既にわかったと思いますが、生涯致死率（分母が同じ）同士で比較すれば、約百倍も異なると思われた交通事故と放射線のリスクも「ほぼ同じ」になるのです。このように、リスク同士を比較するためには「分母をそろえて比較」することがとても大事なことです。

（原産協会・人材育成部）

原子力
ワンポイント

「放射線被曝によりがんが増える」と言いますが、その大きなさを「 $\uparrow$ がんで死亡する確率が何%上乗せされる（絶対リスク）、 $\uparrow$ 何倍増える（相対リスク）」のどちらで説明するかによって、リスクに対する印象が大きく変わります。相対リスクで説明すると「リスクを必要以上に大きく印象づけろ」と言われつづま。



広く利用されている放射線 39

ゆりちゃん「相対リスクの方が「リスクを大きく印象づける」ってどういふことですか。

タクさん マックス・
 プランク人間発達研究所
 ゲルト・ギーゲレンツァ
 適応行動・認知学セン
 ター所長は、著書「数字
 に弱いあなたの驚くほど
 危険な生活」の中で、コ
 レステロール値が危険な
 ほど高い千人を対象に
 した「冠動脈疾患の新
 薬、グラバスタチン」の
 臨床試験結果を

ら「三十二人」に減少したことがわかります。こ

例にして、効能を二人を絶対リスでは、千通りの方、すなわち①絶対リスクの減少率（治療なしで死んだ人の数から、治療を受けて死んだ人の数を「差し引いて」出す）、および②相対リスク減少率（絶対リスクを「絶対リス」少し」と評価します。

絶対リスクに比べ大きく見える相対リスク

で死んだ人数で割って出す。その結果を表1に示します。表から、 χ^2 テストを投与された千人の五年後の死亡人数は、投与しない場合の、四十一人かかっているのです。

表1. コレステロール値を下げる薬による死亡率の低下

治療	死亡者(1,000人あたり)
プラバスタチン(コレステロール値低下薬)	32人
偽薬(プラシーボ)	41人

(From Skolbekken, 1998)

[illegible]

原子力 ワンポイント



広く利用されている放射線 40

「正常細胞の遺伝子上に『五個』程度の傷ができて初めてがん細胞になる」と説明しています。そして、これがとても大事なのですが、「帰還基準線量（二十ミリシーベルト／年）以下の低線量で放射線の影響は少ない」と言い、専門家の大半も「安心してよい」と説明しました。逆に「いつかはがんになるのでは」と不安になった人もいました。丹羽京大名教授は、「生活習慣を変えることによって、放射線の影響がかわる」と述べています。

福島第一原発事故時、政府は「直ちに放射線の影響はない」と言い、専門家

の大半も「安心してよい」と説明しました。逆に「いつかはがんになるのでは」と不安になった人もいました。丹羽京大名教授は、「生活習慣を変えることによって、放射線の影響がかわる」と述べています。

生活習慣の変化で放射線リスクも変わる

中西準子著「原発事故と放射線リスク学（二〇一四年三月発行）」の中で、対談という形で取り上げられています。体の中の正常細胞は、周囲の状況に応じて増えたり、減えたりを繰り返しています。がん細胞は、周囲の状況を無視して増え続けます。丹羽先生は

量域では、放射線が与える突然変異は高々「一つ」である。がん細胞になるにはあと「四つ」の突然変異が必要だが、これらはその他の生活習慣に依存する要因（表1）によるものである。これは、放射線が正常細胞に二つの突然変異を与えたあと、さらに四つの突然変異が蓄積されるまでの期間と考えると、そうなることができます。その長い潜伏期間で、他の要因による突然変異を受けるにすぎず、放射線の影響は少ないとすれば、

放射線によるがんの発症は抑えられることになり。被ばくの影響を心配する人は、その時点でまだ、がんにならずに生きていく過程で、残り「四つ」の突然変異を生じるかどうかということ、つまりこれから将来にかけての未知の部分があるということです。過去の被ばくによって少しがんになる進み具合（ペース）を早めた分だけ、これから人生で他の要因の影響を減らすことができれば、単純な足し算と引き算により、被ばくの影響をなかつたことになり、一助となるでしょう。

放射線によるがんの発症は抑えられることになり。被ばくの影響を心配する人は、その時点でまだ、がんにならずに生きていく過程で、残り「四つ」の突然変異を生じるかどうかということ、つまりこれから将来にかけての未知の部分があるということです。過去の被ばくによって少しがんになる進み具合（ペース）を早めた分だけ、これから人生で他の要因の影響を減らすことができれば、単純な足し算と引き算により、被ばくの影響をなかつたことになり、一助となるでしょう。

放射線によるがんの発症は抑えられることになり。被ばくの影響を心配する人は、その時点でまだ、がんにならずに生きていく過程で、残り「四つ」の突然変異を生じるかどうかということ、つまりこれから将来にかけての未知の部分があるということです。過去の被ばくによって少しがんになる進み具合（ペース）を早めた分だけ、これから人生で他の要因の影響を減らすことができれば、単純な足し算と引き算により、被ばくの影響をなかつたことになり、一助となるでしょう。

放射線によるがんの発症は抑えられることになり。被ばくの影響を心配する人は、その時点でまだ、がんにならずに生きていく過程で、残り「四つ」の突然変異を生じるかどうかということ、つまりこれから将来にかけての未知の部分があるということです。過去の被ばくによって少しがんになる進み具合（ペース）を早めた分だけ、これから人生で他の要因の影響を減らすことができれば、単純な足し算と引き算により、被ばくの影響をなかつたことになり、一助となるでしょう。

表1 がんリスクの比較（放射線と生活習慣）

放射線（mSv）	生活習慣に依存する要因
2000-500	喫煙 大量飲酒 やせすぎ
500-200	肥満 運動不足 塩分の取りすぎ
200-100	野菜不足

出典：国立がんセンター

放射線によるがんの発症は抑えられることになり。被ばくの影響を心配する人は、その時点でまだ、がんにならずに生きていく過程で、残り「四つ」の突然変異を生じるかどうかということ、つまりこれから将来にかけての未知の部分があるということです。過去の被ばくによって少しがんになる進み具合（ペース）を早めた分だけ、これから人生で他の要因の影響を減らすことができれば、単純な足し算と引き算により、被ばくの影響をなかつたことになり、一助となるでしょう。

放射線によるがんの発症は抑えられることになり。被ばくの影響を心配する人は、その時点でまだ、がんにならずに生きていく過程で、残り「四つ」の突然変異を生じるかどうかということ、つまりこれから将来にかけての未知の部分があるということです。過去の被ばくによって少しがんになる進み具合（ペース）を早めた分だけ、これから人生で他の要因の影響を減らすことができれば、単純な足し算と引き算により、被ばくの影響をなかつたことになり、一助となるでしょう。

（原産協会・人材育成部）

原子力 7nポイント



広く利用されている放射線 41

するのですか。

タクさん これはと

住み慣れた地域に
帰還したいという思
いと、放射線による
健康被害を受けると
ころには戻りたくな
いという思いとの間
で葛藤している福島
県住民の方々から
は、特に、避難指示
解除の要件「年間二
十ミリシーベルト以
下の低線量」が妥当
なのかどうか、わか
りやすい説明が求め
られています。

ゆりちゃん 低線量
というのはどれくらい
の線量なのですか。
タクさん 国際放射
線防護委員会（ICRP）
では「10ミリシーベ
ルト（mSv）以下を「低線
量」と定義しています。
この線量域では、原爆被
爆生存者の約五十年間
にわたる寿命調査（LS
S）において、発がんリ
スクの上昇は認められ
ていません。ICRP
は、放射線防護の立場か
ら「100mSv以下の低線量
でも、被ばく線量と影響
（リスク）の間にはき
い値がないという仮説
（LNTモデル）」を採
用しています。しかし、
「このLNTモデルは、
放射線管理の目的のた
め」に用いられるべきで
ある。低線量放射線のリ
スク評価に用いるのは
適切でない」とも述べて
います。

線量率が下がると発 がんリスクも下がる

線量率での照射では「発
がんリスクが下がる効
果」が確かめられていま
す。低線量率の定義もい
ろいろありますが、国連
科学委員会（UNSCE
AR）は「三・六mSv／
時間以下」を低線量率と
しています。福島第一原
子力発電所から二十km
以上離れた現在の
放射線レベルは、UNS
CEARの示す数値よ
りもさらに千分の一以
上低く、明らかに低線量
率の環境です。低線量率
で発がんリスクの下が
る理由は「細胞、および
DNAの傷の良好な修
復にある」と考えられて
います。低線量であるこ
とや、低線量率による低
減効果を合わせれば、避
難先からの帰還基準（二
十mSv／年）は妥当な判
断といえるでしょう。も
ちろん将来的には「二m
Sv／年を目指す」ことを
忘れてはなりません。
ゆりちゃん 二十m
Sv／年について実験し
た例はありませんか。
タクさん 財団法人
「環境科学技術研究所」
が、寿命に及ぼす影響を
指標として、マウスを
使った大規模な低線量・
低線量率影響研究を行
（原産協会・人材育成部）

表1. 寿命に関する実験結果のまとめ
照射条件

線量率	総線量 (400日間)	寿命の長さ	
		オスマウス	メスマウス
0.06mSv/日	20mSv	変わらず	変わらず
1mSv/日	400mSv	変わらず	有意な短縮 (約20日)
20mSv/日	8,000mSv	有意な短縮 (約100日)	有意な短縮 (約120日)

出典：環境科学技術研究所

で発がんリスクの下が
る理由は「細胞、および
DNAの傷の良好な修
復にある」と考えられて
います。低線量であるこ
とや、低線量率による低
減効果を合わせれば、避
難先からの帰還基準（二
十mSv／年）は妥当な判
断といえるでしょう。も
ちろん将来的には「二m
Sv／年を目指す」ことを
忘れてはなりません。
ゆりちゃん 二十m
Sv／年について実験し
た例はありませんか。
タクさん 財団法人
「環境科学技術研究所」
が、寿命に及ぼす影響を
指標として、マウスを
使った大規模な低線量・
低線量率影響研究を行
（原産協会・人材育成部）

原子力
2ポイント



広く利用されている放射線 47

日經新聞電子版
(二〇一五年二月二

日掲載)に興味深い記事「低線量被ばく
の健康影響に新説
」もぐらたたきモデ
ル」が掲載されまし
た。こういうものか
探ってみましょう。

ゆりちゃん「低線量被ばくの健康影響に『新説』って何ですか？」

に少なくとも受けた“総線量に比例”して発がん

のリスクが高まる」と思っていますか。専門家はこれを「しきい値のない直線(LNT)モデル」と呼びます。このLNTモデルに対して関西の物理学者グループ

助教、和田隆宏関西大学
教授、坂東昌子愛知大学
名誉教授）は、「総線量
が同じでも、線量率（単
位時間当たりの線量）”

宇宙から飛来する放射線など、かなり高いレベル

の違ひによつて放射線のリスクは大きく異なる。低線量放射線（数百ミリシーベルト以下）の領域であれば放射線を受け続けても、影響は蓄積しない」という新しい説を

提案し、これを「もぐらたたきモデル」と呼ぶこ

放射線影響蓄積しな
いとする新仮説も

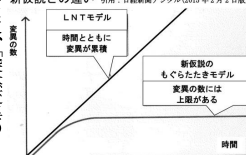
とにしたのです。

ゆりちゃん 今までの線量率効果とどこが違うのですか、もう少し詳しく教えて下さい。

タクさん ヒトは常に大地からの放射線、宇

ん。真鍋らは、この生体防御機能を数値化して、「放射線が細胞に与える突然変異の発生頻度がどのように時間変化していくのか」、理論解析してみました。興味深

低線量放射線影響に関する従来の考え方と新仮説との違い 引田・日経新聞版23頁4/2015 年2月5日版



鍋からはこの新しい考
え方を、「もくらたた
きモデル」と命名し
ました。

ゆりちゃん この
モデルは理論的なも
ので、実証されたわ
けではないのです
ね。

度が、照射時の経過と
ともに変化する様子
とにわたりました。得
られたグラフを見て驚
いたのですが、小発
生細胞の真鍋らの結
果と同様、時間が経
過するにつれて上
限値と飽和

た。そこでは、馬背純
主席研究員（当時産業
創造研究所）が線量率
の異なる変えて「 γ -コ
ンクリート」細胞に放
射線を照射する実験を
行った。染色体は異常が生
じたと現れる「小さな細
小核形成」といふ現象
が得られていたのです。
この、モデルの証明に
は、生物実験の実証とい
う難関が待っていました
が、期待通りの研究分
野であることに間違ひ
はありません。

（原産協会 人材育成部）

【原子力ワンポイント】 広く利用されている放射線 (125)社会的受容性（その 1）

今回は、前回の本コラムで予告しましたように、トリチウム水の処分に係る「社会的受容性」について探ってみましょう。

ゆりちゃん：前回の本コラムに戻ってしまいましたが、「社会的受容性」に注目したのは、どんな方だったのですか？

タクさん：技術に精通するだけでなく高い課題解決能力を持った技術士ⁱを対象とした「第 131 回教育講座：2016 年 3 月」において、大西有三京都大学名誉教授が、「汚染水の問題とその対策の状況を理解する」と題して、講演されました。同講座を企画した一人である大橋正雄技術士（原子力・放射線/機械/総合技術管理部門）は、IPEJ Journal（月間「技術士」）Vol. 28 No. 9 で、講演内容から汚染水対策の解説を行い、所感の中で、「トリチウム（³H）水タスクフォース『以下タスクフォースという』の検討は、技術的な検討のみで社会的受容性を評価項目に含めていないことから、11 ケースの³H 水の処分に係る選択肢、を実現していくことは難しいように感じた」と記述しています。

ゆりちゃん：「社会的受容性」で、どんな意味ですか？

タクさん：松岡俊二早稲田大学教授は、2016 年環境経済・政策学会全国大会において、「都市環境イノベーションと社会受容性」と題して講演しています。その中で、「社会的受容性とは、そもそも 1990 年代の原子力発電技術をめぐる研究の中で、技術の合理性と社会における受け入れ可能性をめぐって議論されたものである。従来の社会的受容性論は、原子力発電所であれ、風力発電であれ、地域社会への受け入れを可能にする要因や条件として議論する、言うなれば『受け身の（passive）受容性論』と説明されていました。しかし、福島事故など、最近の環境問題の多くは、様々な利害関係者（ステークホルダー）がお互いに意見をぶつけ合って妥協点を模索する、言うなれば「能動的な（active）な受容性論」へと、姿を変えつつあるようですね。

ゆりちゃん：どういうことですか？もう少し具体的に教えて下さい。

タクさん：原子力委員会は 2004 年 10 月 7 日、第 9 回新計画策定会議での配付資料第 9 号「社会的受容性について（改訂版）」の中で、「社会的受容性を考察するに際しては、国際社会、国民、事業者、地域社会という 4 つの主体を考慮する必要がある」と言います。少し話は変わりますが、福島県いわき市で 2016 年 4 月、「第 1 回福島第一廃炉国際フォーラム」が開催されました。その席上で、英国セラフィールドで廃炉を経験した自治体の代表者が「（社会的受容性を得るためには）地方自治体にはよいことのみならず悪いことも含めて情報を伝え、正直で透明な対話を行うことが重要。また、地方自治体との対話に基づく、地元自治体の意思決定への参加や協力が重要」とコメントしました。また、福島でコミュニケーションに取り組まれている方々は、「国からの一方的な情報の提供だけでなく、地域社会において、住民自らが情報を知るための機会を設けるとともに、発信された情報を噛み砕いて、分かりやすく伝える取組みも併せて進めるなど、双方向のコミュニケーションによって理解を広く共有していくことが重要」とコメントしました。

ⁱ 科学技術分野での最高位の国家資格であり、高度な技術力を持った技術者の称号となっている。科学技術全般を網羅する 20 の技術部門から構成されており、原子力・技術部門は 2003 年に設置された。

ゆりちゃん：これまでに、原子力の社会的重要性を調べた例って、何かあるのですか？

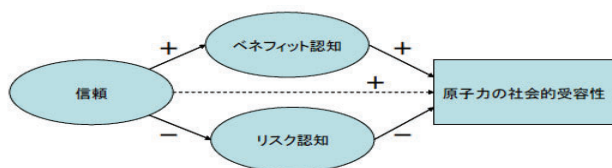
タクさん：図1を見て下さい。日本原子力文化財団は、原子力の普及活動を行う上で、人々の意識を把握することが重要であると考えて2006年度から、「原子力に関する世論調査」を実施しています。同図は、2017年度（11回目）の調査結果（要約版）から引用したものです。当財団では、原子力の知識普及活動などに携わる様々なステークホルダーの方々に、広く情報を発信するため、心理的な要因を「原子力のベネフィット（認知）」、「リスク（認知）」、「信頼」の3つに分けて、人々が抱いている不安や怖れなどの事例をあらかじめ抽出し、それに基づいて質問表をつくり、世論調査を行っています。

ゆりちゃん：³H汚染の処分方法についても、同じように、3つの心理的要因に基づく分析・評価を行えばよいのですか？

タクさん：この質問に即答するのは難しいですね。なぜかという、この場合の欠かせないステークホルダーは、原子力災害からの復興を最も強く願っている「福島県民」の方々と言えるでしょう。福島の人々は、放射性ヨウ素やセシウムという言葉はよく知っているのですが、「トリチウムって何？」と疑問に思っている人が多いようです。表1を見て下さい。同表は、第2回タスクフォース（2014年1月15日）において、コープふくしま「野中俊吉氏」から提出された資料「社会的視点からの評価項目や留意点『福島県民目線で感じること』」から引用したものです。福島県民の方々が抱く複雑な感情が強く感じられます。このように、³H汚染の処分方法について、「社会的受容性」を論じることは、かなり困難が予想されます。タスクフォースはこの事実を理解していたのだと思います。そのため国は、タスクフォースに課せられた役割がひと段落ついた2016年9月、新たに「多核種除去設備等処理水の取り扱いに関する小委員会」を立上げ、風評被害など社会的な観点等も含めて、総合的な検討を開始しました。次回に詳しく紹介します。（原産協会・人材育成部）

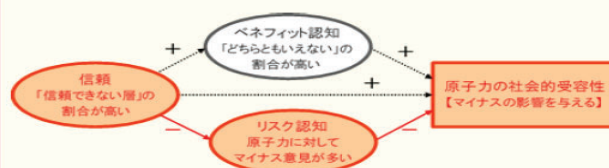
図1 原子力の社会的受容性

原子力の社会的受容性に関する調査研究を整理し、近年の我が国における原子力に関する定量的社会調査を縦覧することによって、原子力の社会的受容性に関する意思決定に影響を与える普遍的な心理的要因は、「ベネフィット認知」、「リスク認知」、「信頼」であることを示した。（報告書「第2章 原子力の社会調査の文献調査に基づく調査モデルの構築」参照）



図「原子力の社会的受容性に関して見られる共通的な心理モデル」

原子力のベネフィット認知、リスク認知、信頼の回答の傾向を左図の「心理モデル」に当てはめ、三つの心理的要因が原子力の社会的受容性にどのような影響を与えるかを検証した結果、【マイナスの影響】を与えていると推察される。



図「心理モデルに心理的要因の回答傾向を当てはめた結果」

これらの心理的要因と社会的受容性の関係性について、「ベネフィット認知」と「信頼」は受容性を高めるように働き、「リスク認知」は受容性を下げるように働くと考えられることから、「ベネフィット認知」、「リスク認知」、「信頼」に関する調査結果を整理する。

原子力の「ベネフィット認知」を測定する項目	信頼を測定する項目	原子力の「リスク認知」を測定する質問
- 原子力発電は役に立つ - 原子力発電がなくても、日本は経済的に発展できる - 原子力発電がないと、電気料金が上がる - 原子力発電は発電の際に二酸化炭素を出さないで、地球温暖化防止に有効である - 核燃料サイクル、プルサーマルは役に立つ	- 原子力の専門家に対する信頼 - 原子力の事業者に対する信頼 - 国に対する信頼 - 自治体に対する信頼	- 今後、原子力発電の安全を確保することは可能であると思う - わが国のような地震国に原子力発電所は危険である - 原子力発電所の周辺地域の防災体制は整備されていると思う
中庸意見の割合が高い	信頼を得られていない	マイナス意見に傾いている

「出典：日本原子力文化財団 2017年度原子力に関する世論調査結果のお知らせ（要約版）」

-https://www.jaero.or.jp/data/01jigyoku/pdf/tyousakenkyu29/r2017_youyaku.pdf（10頁）-

表 1. 福島第一原発に関する住民（県民）の気持ち

- ① 住民（県民）にとって、トリチウムはセシウムと比べて知識（「なじみ」）が薄いと思います。
- ② 住民（県民）にとって、トリチウムは新たな（謎の）放射能（放射性物質）として映っています。
- ③ 住民（県民）にとって、事故後２年以上経過してトリチウムが取りざたされることは、“またしても隠されていた” “二年間いったい何をしてきたんだ” という不信感を大きくしていると思います。
- ④ 住民（県民）にとって、トリチウム汚染水問題が今になって持ち出されることは、一号機から三号機への不安（不信感）を増大させていると思います。
- ⑤ 漁協組合長の声（漁業関係者としては、苦肉の策で、復興のため地下水バイパスにも協力しようとしている）。
- ⑥ 住民（県民）は、第一原発からはすべての核種の放射性物質が海に流れていると思っていますが、口に出せない人も大勢いると感じています。辛くて話題にしたくない人も大勢いると思う。
- ⑦ トリチウム汚染水を海に放出するということは、東京電力も国も放射能をコントロールする能力がないという評価になってしまうと思います。
- ⑧ 住民（県民）は、『もうこれ以上福島県民に原発事故の犠牲を押し付けないでほしい』と考えています。

（出典：第２回トリチウム水タスクフォース資料５「社会的な視点からの評価項目や留意事項」）

－http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140115/140115_01g.pdf－

【原子力ワンプoint】 広く利用されている放射線

(128) 社会的受容性(その 4)

「多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会ⁱ（第7回）」において、復興庁増田参事官より「風評払拭・リスクコミュニケーション強化戦略」、また東京電力松本福島第一廃炉推進カンパニー廃炉推進室長より「風評被害に対する行動計画」について紹介がありました。今回は、「風評払拭・リスクコミュニケーション強化戦略」に的を絞って内容を探ってみましょう。

ゆりちゃん：「風評払拭・リスクコミュニケーション強化戦略」って、誰が決めたのですか？

タクさん：多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会で、復興庁増田参事官が、「原子力災害による風評被害を含む影響への対策タスクフォースが2017年12月12日、『風評払拭・リスクコミュニケーション強化戦略』を決定した」と述べました。「これまで、被災者に対する福島を中心とするリスクコミュニケーションは、かなり頑張ってきたという自負はあるが、それに加えて、『広く国民一般に対して情報発信すること、これがまだまだ足りなかった、ここにも重点を置くべきではないか』という認識に至った。そのため、より具体的な情報発信の方法なども含めて検討し、政府全体が1つの戦略の下に連携して統一的に取組みを実施しようということで決定した」と説明しました。さらに、「強化戦略の中身は、まずⅠ『知ってもらう』、Ⅱ『食べてもらう』、Ⅲ『来てもらう』という3つの視点を設定、それぞれで、『伝えるべき対象』は誰なのか、『伝えるべき内容』は何が大事なのか、『発信の工夫』としてどういうことが考えられるのか、といった点について、なるべくシンプルかつ大事なものの順に並べて示していく。各府省庁では、これらを基に情報発信していく考えである」と報告しました。

ゆりちゃん：「風評被害を含む影響への対策タスクフォース」って、どのような位置付けのタスクフォースなのか？

タクさん：表1を見てください。本タスクフォースは、復興大臣以下、関係府省庁局長クラスから構成されています。「風評被害対策事業の進捗管理、及び課題を洗い出し、今後の方向性を定め、各事業の推進を図る」役割を担った特別チームです。

ゆりちゃん：このタスクフォースが決めた強化戦略（行動計画）の内容を、わかりやすく教えて下さい。

タクさん：表2を見てください。強化戦略のための視点が3つ書かれていますね。今回は、特に、Ⅰ「知ってもらう」に的を絞って内容を整理してみましょう。増田参事官の説明から引用します。「これにつきましては、まず、広く国民一般が伝えるべき対象としてあるわけですが、その中で特に児童生徒あるいは先生方、教育関係者を1番に挙げて、2番目でお父さんお母さん、特に妊産婦を含めてこちらが大事ではないかという形で順位付けをしています。」そして、「伝えるべき内容ですが、1つ目は『放射線の基本的事項及び健康影響』、2つ目は『食品及び飲料水の安全性』、そして3つ目が『復興が進展している被災地の姿』、こういったものを発信することが大事と明示しています」と説明されました。

ゆりちゃん：伝えるべき3つの内容について、もう少し具体的に教えて下さい。

タクさん：増田参事官の説明から引用します。「（放射線の基本的事項及び健康影響で）重要なものとして、『例えば人の身の回りには日常的に放射線が存在し、日常生活において放射線被ばくをゼロにすることはできない』であるとか、『うつらない』であるとか、『子供への遺伝性影響がでることはない』であるとか、『放射線による健康影

ⁱ多核種除去設備等処理水の取扱いについて、風評被害など社会的な観点等も含めて総合的な検討を行う為に、国が2016年9月に立ち上げた委員会。

響は、放射線の“有無”ではなく“量”が問題となる』といった内容が、8項目にまとめられています。一方、食品及び飲料水の安全性という点では、『世界で最も厳しい水準の放射性物質に関する基準の設定や検査の徹底により、安全が確保されている』といった内容が、3項目で書かれていますⁱⁱ。加えて、『福島が（確実に）復興していること』が、伝えるべき3つの内容です」と説明されました。

ゆりちゃん：タスクフォースは、広く国民一般に対して情報発信するためにどのような工夫をしているのですか？

タクさん：再び増田参事官の説明から引用します。「発信の工夫、これはいくつか例で挙げておりますが、『受信者目線で印象に残るような表現の工夫をする』、あるいは単なる資料配布にとどまらないで『いろいろなメディアをミックスして発信』していく。あるいは放射線の健康影響は『量が大事だ』ということですので、『放射線量を視覚的、感覚的にスケール感がわかりやすい形で発信』していったほうがいいのではないかなどが盛り込まれております」と解説されました。次回は東京電力が考えている「風評被害に対する行動計画」を調べてみましょう。

（原産協会・人材育成部）

**表1.「原子力災害による風評被害を含む影響への対策タスクフォース」
構成員**

復興大臣
復興副大臣
復興庁 事務次官、統括官、審議官、統括官付参事官
内閣府大臣官房政府広報室 室長
内閣府食品安全委員会事務局 事務局長
内閣府原子力被災者生活支援チーム事務局長補佐
消費者庁 次長
外務省 経済局長
文部科学省 大臣官房総括審議官
厚生労働省 生活衛生・食品安全審議官
農林水産省 消費・安全局長、食料安全局長
経済産業省 地域経済審議官
国土交通省
環境省
原子力規制庁 核物質・放射線総括審議官
防衛省 防衛装備庁プロジェクト管理部長

「http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/takakusyu/pdf/007_02_00.pdf」

ⁱⁱ 放射線の基本的事項及び健康影響で重要なものとして決められた8項目、および3項目は「多核種除去設備等処理水の取り扱いに関する小委員会（第7回）配布資料2-3『風評払拭リスクコミュニケーション強化戦略（本文）—http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/takakusyu/pdf/007_04_00.pdf（3～6頁）』」に記載されている。

表2. 風評払拭・リスクコミュニケーション強化戦略のポイント

- 今なお残る科学的根拠に基づかない風評の払拭やいわれのない偏見・差別の解消に向け、**風評払拭・リスクコミュニケーション強化戦略**に基づき、関係府省庁が連携して広く国民に対して情報発信を実施。

風評払拭・リスクコミュニケーション強化戦略(平成29年12月12日策定)

I「知ってもらう」、II「食べてもらう」、III「来ってもらう」の3つの視点から、「伝えるべき対象」、「伝えるべき内容」等について、シンプルかつ重要な事項順に明示。

⇒ 今後、本戦略の具体化に向け、関係府省庁において工夫を凝らした情報発信等を実施。
また、関係府省庁の取組を継続的にフォローアップする体制を整備し、点検を実施。

	I「知ってもらう」	II「食べてもらう」	III「来ってもらう」
対象	①児童生徒及び教育関係者 ②妊産婦並びに乳幼児及び児童生徒の保護者 ③広く国民一般	①小売・流通事業者 ②消費者 ③在京大使館、外国記者及び外国プレス ④在留外国人及び海外からの観光客	①教師、PTA関係者、旅行業者 ②海外からの観光客、外国プレス及び在留外国人 ③県外からの観光客
内容	①放射線の基本的事項及び健康影響（日常生活で被ばくをゼロにできない、放射線はうつらない等） ②食品及び飲料水の安全性 ③復興が進んでいる被災地の姿 等	①福島県産品の「魅力」や「美味しさ」 ②食品及び飲料水の安全を守る仕組みと放射性物質の基準 ③生産段階での管理体制 等	①福島県の旅行先としての「魅力」 ②福島県における空間線量率や食品等の安全 ③教育旅行への支援策 等
工夫の発信	受信者目線で印象に残るような表現の工夫や、単なる資料配布に止まらないためのメディアミックスの活用 等	「魅力」や「美味しさ」のみならず、安全性も理解してもらえ工夫、福島県を相対化した情報発信 等	「ホープツーリズム」に関する発信、モニターツアー・被災者の生の声の発信 等

戦略に基づく今後の対応（例）

- ・様々な媒体を活用した放射線リスクに関する情報発信（復興庁）
- ・全国の小中高生を対象とした放射線副読本の改訂・普及（文部科学省）
- ・福島県産農林水産物の販路拡大・販売促進等の取組への支援（農林水産省）
- ・教育旅行を含めた福島県の国内観光振興への支援（国土交通省）

「復興庁資料：http://www.reconstruction.go.jp/topics/main-cat1/sub-cat1-4/20180218_kyougikai_1-shiryo1.pdf(8頁)」



「原子力ワンポイント」

あなたに伝えたい放射線の話（2）

福島第一原子力発電所事故から10年：原子力への見方はどう変わったのか？

日本原子力文化財団は2021年3月、「原子力に関する2020年度の世論調査結果」をとりまとめ、「5年間（2016～2020）で、原子力に対する否定的な意見に減少傾向が見られた」と発表しました。



- ◇5年間（2016～2020）で、原子力に関する否定的な意見の減少傾向が見られた。
- ◇今後の原子力発電の利用について、若い世代や原子力についてあまり知らない人は、はっきりした意見を持っていない割合が高い。
- ◇若い世代については「学校」を通じた情報提供が重要である。

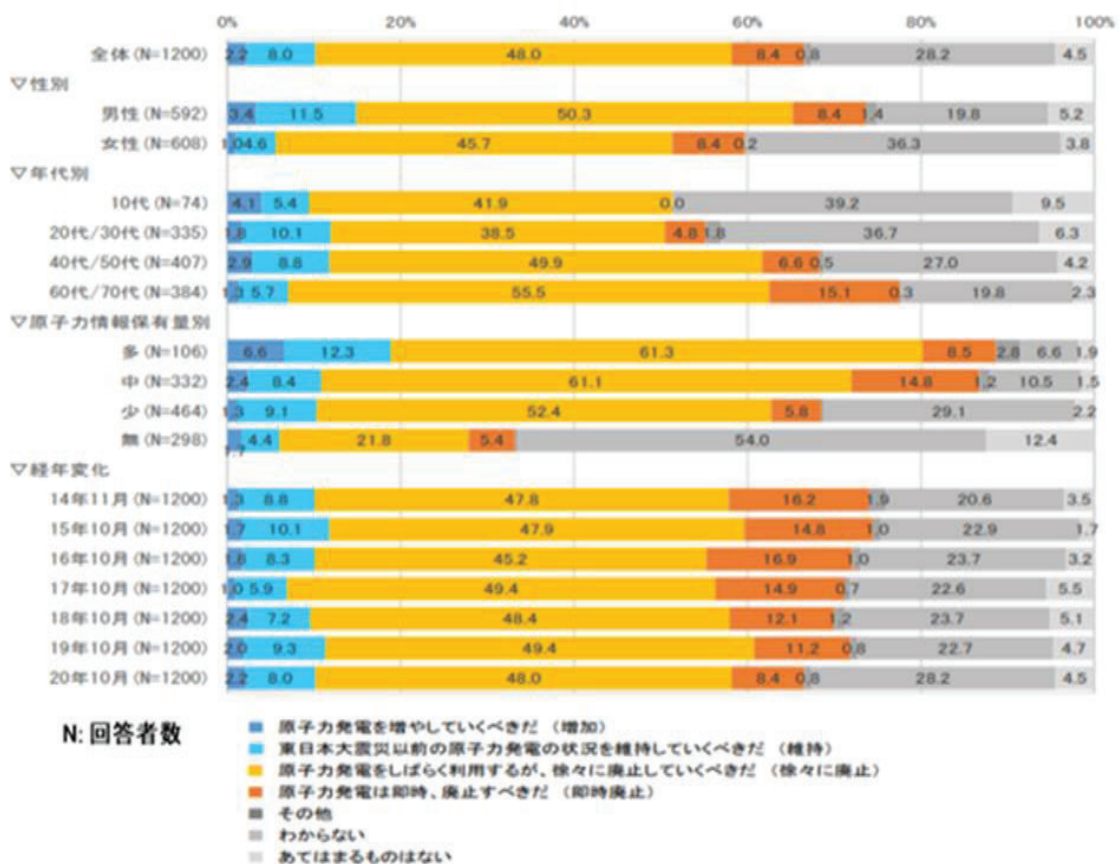


図1. 今後日本は、原子力発電をどのように利用していけばよいと思いますか？

「原子力文化財団・原子力に関する世論調査(2020年度)p109図を参考に作成」



リケジョさん：そもそも、原子力文化財団（JAERO）は何のために（毎年）「原子力に関する世論調査」を行っているのですか？



放射線博士：JAERO は、「原子力に関する世論は、事故や災害などの出来事があるごとに大きく変動する傾向がある。そのため、本調査では、全国規模で世論調査を「経年的」、「定点的」に実施し、原子力に関する世論の動向、および情報の受け手の意識を正確に把握する」と説明しています。



リケジョさん：世論調査の方法について、その概要を教えてください。



放射線博士：世論調査を実施するに当たっては、全国から代表的な調査対象地域を 200 地点選定した上で、住宅地図データベースより世帯を抽出し、個人を割り当て、専門調査員が対象者の自宅を訪問して調査を依頼、後日、調査票を回収するために再訪問する「個別訪問留置（とめおき）調査」が行われました。回収サンプル数は合計で 1,200 人（全国 15～79 歳の男女個人、性別では男性が 49%、女性が 51%）とし、調査は 2020 年 10 月 2 日（金）～10 月 14 日（水）に実施されました。



リケジョさん：事故から 10 年経過した今、原子力に関する世論の動向は変化したのでしょうか？



放射線博士：本論に入る前に、原子力基本法の第 3 条で、「原子力とは、原子核変換の過程において、原子核から放出されるすべての種類のエネルギーをいう」、と述べてます。ここでは、「エネルギー」という言葉に注目し、原子力を「原子力発電」と読み直します。図 1 を見て下さい。「今後日本は原子力発電をどのように利用していけばよいと思いますか？」という質問への回答状況です。

メディアなどが実施している多くの世論調査では、原子力発電の利用に関して、賛成（増加または維持）または反対（即時廃止）、のどちらかを選択させる質問が多く、結果として日本では「反対」と分析、報道されています。

しかし JAERO は、「原子力発電の利用に関する意見には、『賛成と反対』の間を揺れ動く『中間的な考え』も存在すると考え、政府の方針でもある『徐々に廃止』という項目を追加しました。それでは、図 1 の最下段「経年変化（2014～2020 年）」を見て下さい。毎年 50% 近くの人が、「原子力発電をしばらく利用するが、徐々に廃止していくべき『徐々に廃止』」という「中間的な項目」に○印をつけていることがわかります。

興味深いことに、「原発は即時、廃止すべき」という「反対の項目」を見てみると、2016 年度には「16.9%」あったポイントが、2020 年度には「8.4%」まで減少していることがわかります。この差は統計学的に意味のある数値です。従って、「この 5 年間（2016～2020）で、福島第一原子力発電所事故後に強まった『原子力に対する反対意見』に、有意な減少傾向が見られるようになった」と評価することができ、「原子力に反対してきた世論の動向に変化が見られつつある」と言ってもいいでしょう。



リケジョさん：図 1 の「性別」、「年代別」、「原子力情報保有量別」についても説明して下さい。



放射線博士： まず注意してほしいことは、前述の「経年変化」だけは、7年間（2014～2020）

の調査結果を相互比較したのですが、「性別」、「年代別」および「原子力情報保有量別」はいずれも2020年度の調査結果、ということです。

▽性別のグラフですが、「わからない」と回答した割合は、男性が19.8%、女性が36.3%であり、女性の方が10ポイント以上高くなっています。

▽年代別のグラフですが、「わからない」と回答した割合が最も高いのは、10代（39.2%、全体よりも10ポイント以上）であり、「年代が上がるにつれてポイントが減少」する傾向が見られます。しかし、原子力に反対を意味する「即時廃止」の割合を見ると、逆に、「年代が上がるにつれてポイントが増加する」傾向が見られます。

私が興味を引かれたのは▽原子力情報保有量別のグラフです。表1を見て下さい。

表1. 「原子力」に関する情報

・原子力発電はウランの核分裂で発生した熱で水蒸気を作り、タービン発電機を回して発電
・原子力発電は少量の燃料で大量の電気を得ることができる
・原子力発電を利用すると、放射能を持った廃棄物が発生
・福島第一原発事故の教訓などを踏まえ、原子力発電所や核燃料施設等の新たな規制基準が策定
・ドイツやスイスは、今後、国内の原子力発電を段階的に配する方針
・フランスやイギリス、アメリカは、原子力発電を主要な電源として利用する方針
・中国やインド、ロシアは、今後、国内の原子力発電を増やす方針
・原子力発電の使用済燃料から回収したプルトニウムは、再び原子力発電の燃料として利用
・使用済燃料のウランとプルトニウムを取り出し、再処理する過程で高レベル放射性廃棄物が発生
・原子力発電所で発生する高レベル放射性廃棄物は、まだ処分地が決定していない
・2017年7月に高レベル放射線廃棄物処分地を選ぶ際に考慮される「科学的特性マップ」が公表

「原子力文化財団・原子力に関する世論調査（2020年度）p54の表を参考に作成」

JAEROは、上記の「表1」に記載の、「原子力に関する11個の情報」を調査対象者に提示して、聞いたことがあるものに「○」をつけてもらい、その合計が9～11個の場合を「多：情報保有量が多い層」、4～8個の場合を「中：情報保有量が中程度の層」、1～3個の場合を「少：情報保有量が少ない層」、あてはまるものがない場合を「無：情報保有量が無い層」と区分けしました。そして、「情報保有量」と「わからない」と回答した人数との関係を調べました。その結果、聞いたことがある情報の数が、1～3個の場合、わからない、と答えた人の割合が約30%、0個（あてはまるものがない）の場合、50%を超えており、原子力に関する情報保有量が少ないと、「原子力発電を今後、どのように利用していけばよいか？」という命題に対して「こうあるべきだ」と、「自分では判断しにくい状況が生まれる可能性」が示唆されました。

これまで述べてきた内容につきましては、原子力規制委員会の伴信彦委員も関心を示し、第22回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会（2021年3月22日開催）に提出された意見書ⁱの中で「図1」を引用し、「前回の議論の振り返りでは、原子力文化財団の世論調査結果が示

ⁱ 経済産業省「第22回総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会」資料12「第22回原子力小委員会への意見書」（伴委員提出資料）

されていますが、同財団の2020年調査結果のうち、以下の資料も注目しておく必要があると考えます。若い世代ほど、情報保有量の少ないほど、また調査年数が最近に近づくほど、「わからない」と回答した割合が多く、興味深い結果です」と紹介しています。



リケジョさん：私は、「今後の原子力発電の利用」については、「原子力の情報だけで判断することはできない」と思うのですが如何ですか？特に「放射線の情報」に興味があります。



放射線博士：面白い質問ですね。実はJAEROも同様に考えているようです。2020年度調査報告書の中で、『今後の原子力発電の利用』については、原子力の情報だけで判断するわけではないため、『エネルギー・環境』、『原子力』、『放射線』に関する情報保有量との関係性を確認する必要があります」と述べています。下記の表2を見て下さい。「放射線」に関する11個の情報です。

表2. 「放射線」に関する情報

・私たちは宇宙や大地、大気や食物から常に自然の放射線を受けている（自然放射線の存在）
・世界には、世界平均の倍以上の自然放射線を受けている地域がある（自然放射線のばらつき）
・放射線には、アルファ線やベータ線、ガンマ線、中性子線などの種類があり、放射線の存在は、人間の五感で認識することができない（放射線の種類等）
・放射能は、時間がたつにつれて弱まる性質がある（放射線の性質）
・放射線には、物質を通り抜ける性質や物質を変質させる性質がある（放射線の性質）
・放射線は医療・工業・農業等さまざまな分野で利用されている（放射線利用）
・放射性物質から離れる、被ばくする時間を短くする、放射線をさえぎる（放射線防護）
・放射性物質の量や放射能の強さは、ベクレルという単位で表される（放射能の単位）
・私たちの体への放射線の影響は、シーベルトという単位で表される（放射線影響の単位）
・被ばく（放射線を受けること）には、体外から放射線を受ける外部被ばくと、呼吸や食事などで体内に取り入れた放射性物質から放射線を受ける内部被ばくがある（外部被ばく・内部被ばく）
・食品中の放射性物質の摂取量が規制されている（被ばくのリスク低減）

「原子力文化財団・原子力に関する世論調査（2020年度）p55の表を参考に作成」

「原子力情報」については前記の通り、情報保有量が「3個以上」になると、「わからない」の情報が「20%以下」になりました。JAEROは、「放射線の情報保有量が『5個以上』になると、『わからない』と回答する割合が『20%以下』になる」と報告していますⁱⁱ。



リケジョさん：「放射線」に関する情報保有量にも経年変化はあるのですか？



放射線博士：JAEROは、4年間（2017～2020）の調査データを分析しています。その結果、
「放射線の情報保有量には減少傾向がみられる。11個の情報ごとに経年変化を調べてみたら、『放射線影響の単位（私たちの体への放射線の影響は、シーベルトという単位で表される）』、『外部・内部被ばく

ⁱⁱ 参考までに、「エネルギー・環境」では、情報保有量が「7個以上」になると「20%以下」になることが確認されています。

く（被ばくには、体外から放射線を受ける外部被ばくと、呼吸や食事などで体内に取り入れた放射性物質から放射線を受ける内部被ばくがある）』、『被ばくのリスク低減（被ばくのリスクを低減させるため、食品中の放射性物質の摂取量が規制されている）』、という3種類の情報に対して、統計学的に有意な減少傾向が見られた」と発表し、「これらの情報は、福島第一原子力発電所の事故以降、ニュースで取り上げられた内容であるが、最近、事故からの時間の経過とともにニュースなどでは取りあげられなくなったため、放射線に関する情報保有量が減少したのだろう」と所見を述べています。



リケジョさん：放射線の情報保有量が少ない層、特に10代の若い人たちにはどのような情報発信の方法が有効ですか？



放射線博士：JAEROでは、幅広い観点からエネルギー・原子力の受け止め方や情報発信方法に関する助言を得るため、原子力の有識者や事業者の広報担当、報道関係者、教育関係者、次世代層（大学生）などに対してインタビューを行っています。その中に、「若年層、特に10代に対する情報獲得について、『10代の情報源で（学校）が高くなっているのは、教育の力だろう』。『子供が接する人たちは、家族、友人、先生だ。これらが頑張れば、子どもたちには伝わる。その情報に対する信頼をどう高めるのが大切』」との意見がありました。

これはあくまでも私個人としての印象ですが、『『今は、わからない』と回答された方たちに、原子力に対する理解を深めてもらうためには、原子力に関する世論の動向や情報の受け手の意識を正確に把握して、受け手が求める情報を確実に伝える方法について検討する』ことがこれからの重要な課題となるのではないのでしょうか。



リケジョさん：博士、ありがとうございました！

（原産協会：人材育成部）



一般社団法人 日本原子力産業協会
〒102-0084 東京都千代田区二番町11-19 興和二番町ビル5階
TEL 03-6256-9315
<http://www.jaif.or.jp/>

2025年7月第1版発行