



6

No.558
2024年6月発行

- トップコラム／京都大学 環境安全保健機構放射線管理部門
准教授 角山 雄一
- 日本におけるアイソトープ利用のあゆみ／
[その2] 現在、そして未来：私たちの生活を支えるRI
- 放射線のイロハ／[第3回] 放射線と放射能（放射能って何？）
- お願い／報告書の保管について
- お知らせ／第61回アイソトープ・放射線研究発表会
- ご案内／B-Web^{plus}サービス

ト
ッ
プ
コ
ラ
ム
270



角山 雄一

ゲノムレベルでの放射線影響の動的平衡

2023年東京で開催の第7回ICRP国際シンポジウムにおいて、東海大学の榎藤博士らが、遺伝性影響に関する極めて重要なデータを公表した。彼らは（公財）環境科学技術研究所の協力を得て、低線量率 γ 線（0.05、0.15、1.0、20.0 mGy/日）を照射しながら数百日間（3～4世代）もの長期にわたりマウスを交配し飼育し続けた。そして、照射前後における遺伝子レベルでの変化を全ゲノム解析により精査した。その結果、一塩基置換（SNV）については20.0 mGy/日で発生増加が見られるものの、1.0 mGy/日まではバックグラウンドとの有意差が検出されないことを見出した。

今回示されたこのSNVのデータは、放射線生体影響の研究分野において、エポックメイキングな極めて重大な発見と言えるのではないだろうか。この成果が得られた背景には、ゲノム解析技術の急速な進歩がある。従来の古典的な遺伝学手法では決して追求できなかったわずかな差異、すなわちこれまで誤差の範囲内として見逃してきた小さな変化についても今後は確かな実験的裏付けを基に明らかにされていく可能性が示されたのである。榎藤博士らは現在、SNV以外の他のタイプのゲノム上の変異についても順次解析を進めているとのことである。今後提示されるだろうデータについても大いに期待を寄せたいところである。

さて、このSNVのデータから、二つの極めて重要な放射線生体影響に関するトレンドが読み取れる。一つ目は、このデータが総線量に応じて影響を評価する従来型の仮説やモデル（LNT仮説やLQモデル等）とは合致しないこと。従来モデルが正しいのであれば、1.0 mGy/日未満であってもSNVは時間経過に応じて蓄積したはずである。しかし実際

はそうはならなかった。そして二つ目は、線量率が一定でかつ照射時間が十分に長ければ、どうやら影響は一定値で留まりつづけるらしいということ。

この二つのトレンドを生物学的な概念として説明することはさほど難しくない。影響の発生と同時に進行的に、生命が産まれながらに体内に備えているはずの影響を消去する仕組み（修復や除去、免疫等）も作用しつづけていると考えれば良い。このような影響消去系が生体内に潜在的に存在することは、例えば放射線がん治療や培養細胞への分割照射実験などにおいては当たり前のように考慮されてきた事実だ。ただ、かつてはこの影響の発生と消去のバランスを両立しながらうまく説明できるモデルが存在しなかった。

近年、筆者も参加する研究グループは、線量率応答モデル「Whack-a-mole（WAM）モデル」を提出している。このモデルは、影響の発生と消去のバランスが時間経過に伴って時々刻々と変化する様子を高精度に表現する。WAMモデルは、マウスを含む過去のさまざまな動植物における遺伝性影響に関する照射実験のデータを再現する数理モデルとしては、おそらく現在唯一のものだ。先のICRP2023において、WAMモデル研究グループの土岐博士と坂東博士らは、このモデルが今回の榎藤博士らのSNVのデータにも見事にフィットすることを示している。またこのモデル研究から、一定線量率での長期照射の場合、SNVは照射開始直後はその発生が消失を上回り増加するが、照射時間が十分経過すると発生と消失とが平衡に達し増えも減りもしなくなると推論された。確かにこの通りならば自然放射線から0.1m Gy/日までの線量率域でSNV発生頻度が一定値となることの説明もつく。

榎藤博士らのデータとWAMモデルによる推論を合わせて考察すると、どうやら放射線の生体影響にも、他のさまざまな生命現象と同様、“動的平衡状態”があると言えそうだ。こう考えれば、例えば高自然放射線地域の住民や、ISSに長期滞在する宇宙飛行士において放射線影響が見出されていないというヒトにおける観察事実についても、近い内に説明がつくようになるかもしれない。

.....

つ の や ま ゆ う い ち

京都大学 環境安全保健機構放射線管理部門 准教授

プロフィール●1992年東北大学理学部卒業、1997年京都大学大学院人間・環境学研究科博士課程修了 博士（人間・環境学）、1999年より京都大学RIセンター（現：環境安全保健機構）に勤務し全学の放射線安全管理を支援。主な研究テーマは、①長期放射線被ばく影響についての数理解析研究、②Po-210微小線源を用いた α 線細胞照射影響観察システム構築、③初学者向け学習教材開発。2023年より大阪大学核物理研究センター招へい准教授を兼務。

日本におけるアイソトープ利用のあゆみ

(その2) 現在、そして未来：私たちの生活を支えるRI

元日本アイソトープ協会常務理事 アルファ・タウ・メディカル株式会社RSO 放射線障害防止中央協議会事務局長 ニツ川 章二



4. RI利用の成長期

RI法施行以来、RI使用事業所数は増加し続けたが1998年をピークに減少している(図1)。成長期におけるRI利用を紹介する。

4.1 インビトロ利用

利用が拡大したのは、医療分野である。1970年代にインビトロ利用が急激に拡大し1992年の検査件数は約6,000万件を超えた。しかし、non RIA法が開発されると規制の厳しさ等から急激に減少、2022年の検査件数は約300万件である。

4.2 標識化合物と遺伝子研究解析

C-14に始まった標識化合物は、1980年代にI-125標識のホルモン及び酵素の利用が増大し、1990年代には遺伝子の研究解析にP-32、S-35標識スクレオチド製品の利用が増大した。P-32の利用は1996年に約970 GBqであったが、RIを利用しない技術の普及に伴い減少、2022年は約11 GBqである。

4.3 放射線照射

Co-60大量線源が、医療機器滅菌、ジャガイモ食品照射、害虫駆除等に利用されたが、ジャガイモ食品照射は保存方法の進歩により利用が終了した。また医療分野でがん治療に利用されたが、加速装置の開発により利用が終了した。

4.4 3.7 MBq以下の密封RI利用

2005年以前、3.7 MBq以下の密封線源は規制対象外であった。夜光時計、イオン化式煙感知器等の日用品に、液面計、水分・密度計等の工業製品にPm-147、H-3、Am-241、Co-60、Cf-252等のRIが利用された。夜光時計はRIを使用しない夜光塗料が開発されPm-147の使用は終了した。

5. RI利用の現状

5.1 密封RIの利用

2019年、放射性同位元素装備機器は約31,000台、表示付認証機器は約14,000台使用されている。

非破壊検査は、Ir-192、Co-60、Cs-137等を用いて様々な対象物を検査できる。アクセスの難しい場所で検査でき化学プラント等で多く利用されている。フィルム、紙等の厚さ計にKr-85が使用されている。H-3が照準器、表示灯等の蛍光に使用されている。

劣悪な環境での製品管理に様々な装備機器が使用されている。Co-60、Cs-137等が鋼板の厚さ測定に使用されている。また、コークス中の水分量の連続測定にCf-252の中性子水分計が使用されている。

Co-60大量線源が医療機器の滅菌に利用されている。再汚染の恐れがない等プロセス管理が容易である。実験動物の飼料及び食品の梱包資材の滅菌、ウリミバエ等の害虫駆除、放射線育種等幅広く放射線照射が行われている。

がんの治療等に医療機器が使用されている。遠隔操作で線源を病巣部へ送り込むリモートアフターローディング装置が、病巣部にγ線を集中し開頭せずに治療するガンマナイフ装置が使用されている。密封小線源は、舌がん等の治療に一時留

置Ir-192線源が、前立腺がんの治療に永久挿入I-125線源が使用されている。

表示付認証機器は、ガスクロマトグラフ、校正用線源、爆発物・薬物検知器、レベル計、水分密度計等が使用されている。

5.2 非密封RIの利用

トレーサとして利用されている。H-3、C-14等の利用が多い。また、Mo-99、Tc-99 mを使用して放射性医薬品関係の研究開発が行われている。トレーサ利用は、感度が高く、化合物組成に影響を与えない等の特長がある。しかし、RIを使用しない測定方法の技術が進歩、非密封RIは減少傾向が続いている。

5.3 放射性医薬品の利用

インビトロ利用は急激に減少した。一方、インビボ利用は高度な診断技術として安定的に継続している。Tc-99 mが供給量の50%以上を占める。短半減期で、高度な診断ができるF-18等のポジトロン核種の利用が増えている。

病巣部に集積しがんと治療する内用療法としてRa-223の利用が開始された。内用療法には高LET核種が使用されている。

6 RI利用の将来展望

6.1 RIの国産化

大部分が海外から輸入されている。Tc-99 mの原料であるMo-99はしばしば供給不足が生じる。原子力委員会が国産化を推進している。国産化は安定供給だけではなく、短半減期核種等新たな核種の利用を可能とする。

6.2 測定器の進化による利用拡大

少量RIを検出できれば、トレーサ利用は下限数量以下で一般試薬と同様に使用することができる。短半減期核種を使用すれば廃棄物の環境負荷が低減できる。

6.3 高度ながん放射線治療

RIをがん細胞のみに確実に到達させれば、高LET核種で他の

正常細胞を傷つけることなくがんを治療することができる。また、治療と診断を同時に行うセラノスティックスの進歩により高度な治療が可能となる。

6.4 インフラ・製品管理の利用拡大

RIはどのような環境でも放射線を出し続ける。自然災害が増加し環境監視の必要性が求められている。接近できなく、動力が確保できない環境でのインフラの監視、製品管理に利用拡大が期待できる。

7. おわりに

放射線は検出感度が良く、RIはどのような環境下でも放射線を放出するエコな資源でもある。RIを将来にわたって有効に活用していきたいものである。

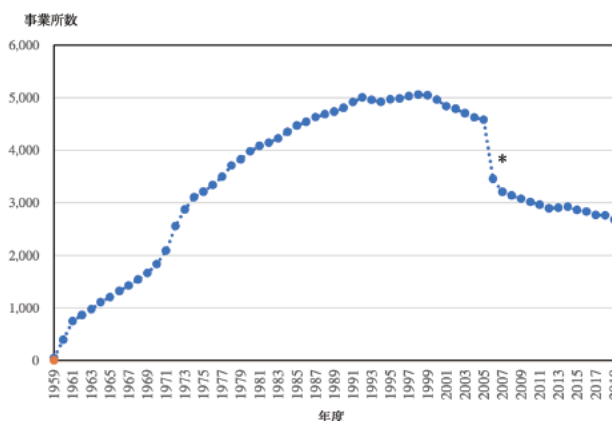


図1 RI法における許可届出使用事業所数の推移
(表示付認証機器を除く)

*2005年：表示付認証機器制度開始

*参考図書

- 1) アイソトープ10年の歩み(1963)
- 2) 日本アイソトープ協会50年史(2001)
- 3) 放射線利用統計, RI協会
- 4) やさしい放射線とアイソトープ, RI協会
- 5) アイソトープ流通統計, RI協会
- 6) 初期のラジウム利用の歴史、放射線医学物理第18巻第2号、1998、稲本一夫
- 7) 原子力委員会、医療用等ラジオアイソトープ製造・利用推進アクションプラン

放射線のイロハ

(第3回)

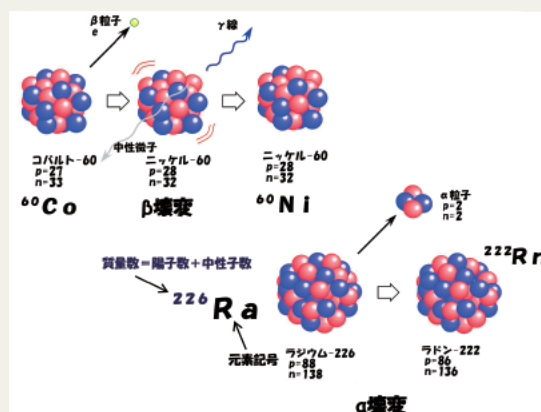
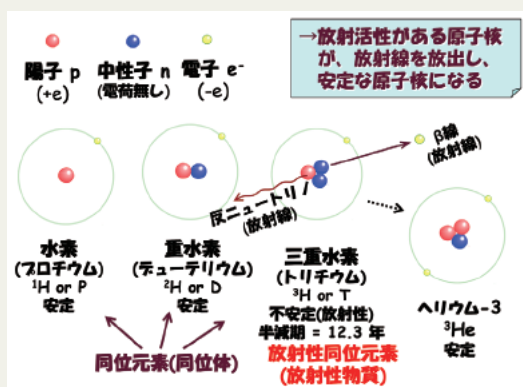
放射線と放射能〈放射能って何?〉

愛知医科大学医学部 化学教室 客員研究員 緒方 良至



前回、放射線について述べた。では、放射能とは何か。放射能とは「放射活性がある原子核が放射線を放出し、他の元素に壊変する性質」をいう。放出される放射線の主なものは、アルファ線、ベータ線、 γ -X線と中性子線である。ここで、原子番号1の水素を取り上げる(図1)。水素原子は、陽子が1個のもの(軽水素)が99.985%であるが、中性子が1個ついた重水素が0.015%含まれる。そして自然界には中性子が2個ついた三重水素(トリチウム)というものがある。トリチウムはコップ1杯の水(180 ml)中に1億個、体重60 kgのヒトの体内に約300億個存在する。トリチウムは、半減期12.3年で β 線と反ニュートリノを放出してヘリウムになる。地球年代と比べ短い半減期のトリチウムが自然界に存在するのは、宇宙線による大気物質の核破砕反応によって常時生成され、供給されているからである。軽水素、重水素、トリチウムは全て水素であり、これらを水素の同位体(Isotope)という。トリチウムは、放射性壊変(崩壊)をするため放射性同位元素(Radioisotope, RI)とよばれる。一方、軽水素や重水素

捕獲するため、よりエネルギーの高い位置にある電子が下方遷移することによりX線が放出される。 ^{40}K は、89.2%の割合で β 壊変を起こし ^{40}Ca となり、10.8%の割合でEC壊変を起こし ^{40}Ar となる。

図2 β 壊変と α 壊変図1 水素の同位体と β 壊変

のように壊変をしない同位体を安定同位体(Stable Isotope)と呼ぶ。軽水素、重水素、三重水素を区別するときそれぞれを「核種」という。トリチウムのような放射性同位元素には放射線を放出する性質、即ち「放射能」がある。

トリチウムは、電子を β 線として放出し、ヘリウムとなる。この過程を β 壊変と言う。トリチウムは β 線を放出して安定なヘリウムになるが、多くの β 壊変では、原子核は β 線を放出するのみでは、まだ、励起状態であり、更に γ 線を放出することにより安定な原子となる。例えば、 ^{60}Co は、半減期5.27年で β 壊変し ^{60}Ni となるが、壊変後に励起状態にある ^{60}Ni から2本の γ 線を放出し、やっと安定な ^{60}Ni となる(図2)。

ウランやトリウムなどの重い元素は、陽子と中性子各2個からなるヘリウム原子核(アルファ線)を放出する。この過程を α 壊変という(図2)。ヘリウム原子核は、非常に安定しており、親核から仲良く駆け落ちするようなイメージである。

このほかに軌道電子捕獲(Electron capture; EC)という壊変過程がある。読んで字のごとく、原子核が軌道電子を捕獲する。ヨウ素125(^{125}I)は、EC壊変で原子番号が1つ減り ^{125}Te となる。この場合、原子核に近い軌道の電子を

さらに、自発核分裂(Spontaneous Fission; SF)という過程がある。半減期2.46年の ^{252}Cf (カリフォルニウム)は、96.9%の割合で α 壊変し、3.1%の割合で自発核分裂する。 ^{252}Cf は、自発核分裂時に中性子を放出するため、原子炉の起動用中性子源や中性子ラジオグラフィの線源などに用いられている。

「放射能」という用語は、放射性物質の量の単位でもある。単位は「ベクレル(Bq)」で、1秒間に1回壊変が起きる場合放射能は1 Bqである。ヨウ素-131(^{131}I)は、半減期8日で β 壊変し、キセノン-131(^{131}Xe)になる。1 Bqの ^{131}I には、約100万個のヨウ素-131原子が存在する。これは 1.7×10^{-18} molに相当し、 2.2×10^{-16} gである。この量のヨウ素を精密天秤などの測定器で測定することは著しく困難であるが、放出される γ 線を比較的簡単な放射線測定器で測定することができる。このような測定方法は、ホルモンなど微量の物質を測定することに応用されている。

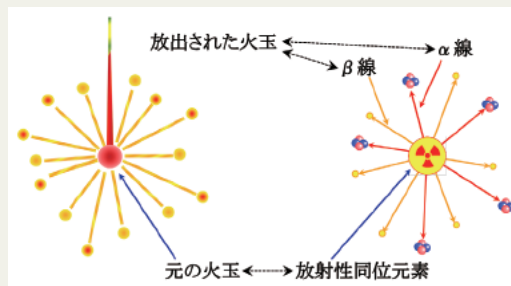


図3 線香花火と放射性同位元素

RIが放射線を放出する様子は、線香花火に例えられる。 α 線と β 線は、中心の火玉から放出される小さな火玉に、 γ -X線は、放出される光に例えることができよう(図3)。

※元素記号

核種を記述するとき元素記号の左肩に質量数を記述する。例えばトリチウムは元素記号で ^3H と書く。トリチウムの場合は、特別にTと書くこともある(図1, 2)。

お 願 い

報告書の保管について

〔お問い合わせ：お客様サポートセンター〕
Tel.029-839-3322 Fax.029-836-8440

個人被ばく線量の測定値・算定値の保存期間は、電離放射線障害防止規則において**30年間**、放射性同位元素等規制法においては**永久保存**と定められています。(5年経過後の一部特例を除く)

報告書が届きましたら、線量をご確認いただき、着用を中止された方、退職された方の分も含め、「外部被ばく線量測定算定報告書」はそれぞれの事業所で大切に保存してください。また、報

告書の紛失等により再発行が必要な場合は弊社までご連絡ください。但し、再発行につきましては別途発行手数料が発生しますので、何卒ご了承くださいますようお願いいたします。

〔再発行手数料〕

基本料金2,000円＋報告数(バッジ毎)×10円

※別途消費税

お知らせ

第61回アイソトープ・放射線研究発表会

【会 期】2024年7月3日(水)～5日(金)

【会 場】日本科学未来館 7階未来館ホールほか
(東京・お台場)

【参加費・登録期間】

- 一 般：①前期登録7,000円(税込)
4月8日(月)～6月14日(金)12時
②後期登録9,000円(税込)
6月24日(月)～7月5日(金)

学 生：無料

主 催：(公社)日本アイソトープ協会

◆一般発表(口頭およびポスター)

◆特別講演・パネル討論

◆招待講演 ◆機器展示 他



詳しくは、大会 Webサイトをご覧ください。

<https://confit.atlas.jp/guide/event/jrias2024/top>

【問合せ先】

アイソトープ・放射線研究発表会 事務局

(日本アイソトープ協会内 学術振興部学術課)

TEL. 03-5395-8081

E-mail happyokai@jrias.or.jp

皆様のご参加をお待ちしています。

*企画内容は予告なく変更になる場合がございます。

ご案内

B-Web^{plus} サービス

B-Web^{plus}サービスは、バッジの追加・変更等の登録といった従来の機能に加え、電子報告書の作成完了や線量アラート発生の際のメール配信、法定帳票作成支援など新たな機能を搭載。ますます便利になりました。

弊社バッジサービスをご利用のお客様は無料でご使用いただけますので、是非お申し込みください。

主な機能・サービス

- ★登録機能：着用者情報の管理がより便利に！個人ごとの登録変更に加え、複数名の一括登録変更も可能です。
- ★帳票関連機能：着用者ごとの年度被ばく履歴の集計、印刷が可能。また、外部被ばく線量測定算定報告書のPDF版をいつでもダウンロードできます。
- ★法定帳票作成支援機能：電離放射線健康診断関連のデータ集計、帳票作成の支援機能も充実。
- ★線量アラート通知機能：線量超過対象者が出た場合、いち早くメールでお知らせ。Web上ですぐ確認できます。
- ★教育訓練管理機能：講習会情報を簡単登録。受講証明書もスムーズに発行できます。

対応OS及びブラウザ

Windows 10/Microsoft Edge

注)Microsoft社は既にWindows7の製品サポートを終了しております。これに伴い、弊社でもWindows7でのサポートを終了しました。

お問い合わせは営業部まで Tel. 029-839-3322

編集後記



糸のように細く静かに降る音が聞こえ、止まぬ雨に晴れ間を待ちわびるそんな梅雨の時期。雨は恵みでもあり、災害の原因にもなります。自然とともに暮らしてきた日本人だからこそ、違いを認識する感覚が高い故、名付けをすることで曖昧なモノに形を与え、親しみ敬い慈しみを表しているのだらうと思える程、雨を表す言

葉は400種類、雨に纏わる言葉は1200種類にも及ぶとか。梅雨だけでも、栗花落、五月雨、戻り梅雨と様々。人は身近で密接なモノコトに対して、多彩な言葉を有するのだと感慨に耽ります。

ところで日本でも渇水対策に人工降雨の研究が進んでいるようで、天候を操るなど神の領域ではと畏怖を覚えつつも、慈雨が包む優しい世界の実現が叶うことを夢想します。(K.O.)

長瀬ランダウア(株)ホームページ・Eメール

<https://www.nagase-landauer.co.jp>
E-mail: mail@nagase-landauer.co.jp

■弊社へのお問い合わせ、ご連絡は

本社 Tel.029-839-3322 Fax.029-836-8440
大阪 Tel.06-6535-2675 Fax.06-6541-0931

NLだより No.558 2024年(6月号)

毎月1日発行 発行部数：42,200部

発行 長瀬ランダウア株式会社
〒300-2686
茨城県つくば市諏訪C22街区1
浅川 哲也