



Photo Atsushi Koga

Index

迎春のごあいさつ	井上 任	1
原子力防災の概要		
－ 原子力災害時の初動対応 －	野島久美恵	2
密封線源の利用状況について	兼尾 昌二	7
[コラム] 85th Column		
【がんの県民性】	中川 恵一	12
電子スピン共鳴法を用いた放射線測定	山口 一郎／茂呂田孝一	13
[放射能・放射線単位・元素名の由来]		
第12回 アインスタニウム ₉₉ Es : einsteinium	高橋 正	18
[サービス部門からのご案内]		
払込取扱票がATMで使用できなかつたら…ご確認ください！	…	19

迎春の

ごあいさつ



株式会社千代田テクノル

代表取締役社長 井上 任

新年あけましておめでとうございます。

読者の皆様におかれましては、良い年を迎えることとお慶び申し上げます。

2025年は大阪・関西万博が大盛況を収め、読者の皆様の中にもご来場された方が多くおられたことと思います。1970年の大阪万博では、関西電力で初めて原子力で発電した電気が送電され「原子力の灯」と呼ばされました。そして今回の大阪・関西万博では、原子力発電により製造された水素を動力とする水素燃料電池船「まほろば」のクルーズがありました。CO₂を排出しないクリーンエネルギーのひとつとして挙げられる原子力ですが、別の脱炭素燃料である水素発電への間接的な貢献の拡大も今後期待されます。

また、弊社としましては、昨年秋に発覚、公表いたしました「放射線測定器の校正における不適切行為」に関するお詫びと関係者の皆様に、多大なるご心配とご迷惑をおかけしましたことを、改めて深くお詫び申し上げます。今後このようなことが起こらないよう、再発防止を徹底し、信頼回復に努めてまいります。

さて、2000年10月から提供しておりますガラスバッジの累計測定件数が間もなく1億件に達する予定です。これもひとえにガラスバッジをご利用いただいている皆様のご支援の賜物と、心より御礼申し上げます。今後も皆様の信用に応え、安心してご利用いただけるよう、より一層の品質保証とサービス向上に社員一同努めてまいります。

末筆となりましたが、皆様のご健勝と益々のご発展を心よりお祈りいたします。

本年もどうぞよろしくお願い申し上げます。

代表取締役会長	細田 敏和	取 締 役	鳥取 和孝
常務取締役	安川 弘則	取 締 役	小口 靖弘
常務取締役	赤座 太郎	取 締 役	中島 隆宏
取 締 役	小山 重成	監 査 役	新田 浩
取 締 役	尾崎 英樹		

原子力防災の概要

— 原子力災害時の初動対応 —

野島久美恵*

はじめに

内閣府に原子力発電所等が立地する地域等の原子力防災体制の充実・強化に係る業務を推進するとともに、関係省庁、関係自治体等との平時及び有事における原子力防災に係る総合調整を一元的に担う組織として「内閣府政策統括官原子力防災担当（以下、「内閣府原子力防災」という。）が平成26年10月に発足しました。

私は、この内閣府原子力防災が発足した当初から10年間在職しておりました。そこで、原子力立地道府県等に対して原子力防災計画や避難計画の作成支援、原子力防災に係る有用な知見を整理し発信する業務、国や自治体が行う原子力防災訓練等に携わった経験から、最近の国の原子力防災への取り組みについてご紹介します。

福島第一原子力発電所の事故のように、原子力発電所で大量の放射性物質が放出されるような大きな事故が発生したときに備えて、国は、平成24年10月に原子力災害対策指針（以

下「指針」という。）を制定して、原子力施設周辺の住民等に対する放射線の重篤な確定的影響を回避し又は最小化するため、及び確率的影響のリスクを低減するための防護対策を実施することにしました。

原子力災害対策重点区域

指針では、図1のように防災対策の重点区域として、発電用原子炉施設からおおむね半径30km圏内の区域を原子力災害対策重点区域と定め、この範囲の住民等に対する防護措置等の対応をすることにしました。この区域の中で、さらに原子力施設からおおむね半径5kmまでの地域を「予防的防護措置を準備する区域（Pre-cautionary Action Zone : PAZ）」、おおむね半径5kmから30kmの地域を「緊急防護措置を準備する区域（Urgent Protective action Planning Zone : UPZ）」として、その区域に在住等をしている住民等に対して、以下のような防護対策を行うことにしました。

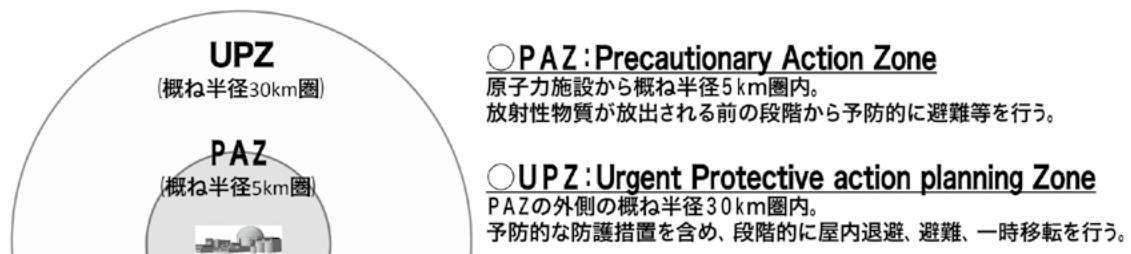


図1 原子力災害対策の重点区域

* Kumie NOJIMA 株式会社千代田テクノル 営業統括本部 アドバイザー

原子力災害対策指針が定める緊急事態の初期段階における防護措置

緊急事態の初期対応段階においては、放射性物質の放出前から、必要に応じた防護措置を講ずることとしています。

指針では、図2のように原子力施設の状況に応じて、緊急事態を3つに区分して、それぞれPAZ、UPZに在住又は立ち入りをしている住民等に対して、図2のように事象に応じた防護措置を行うこととしています。

具体的には、原子力発電所が立地している市町村において「震度6弱以上の地震が発生した場合」、「大津波警報が発表された場合」などの情報が通報された場合に、「警戒事態(AL)」として原子力規制委員会・内閣府原子力事故合同警戒本部(事故警戒本部)が設置され、現地原子力規制事務所には、事故現地警戒本部が設置されます。さらに原子力施設に警戒事態と判断するような故障が発生すると、事故警戒本部からPAZ内の施設敷地緊急事態要避難者(要配慮者・妊婦・授乳婦・乳幼児等・安定ヨウ素剤を服用できない者)の避難の準備や、健康リスクが高まるような要配慮者に対して、近隣の防護対策施設で屋内退避を行う準備をしていただくよう、関係自治体に要請が行われます。

原子力規制庁は、緊急時モニタリングセンターを立ち上げる準備をします。

原子力発電所内の故障等が進展し、原子力発電所の緊急事態が「施設敷地緊急事態(SE)」に進展した場合、原子力規制委員会・内閣府原子力事故合同対策本部(事故対策本部)が設置され、現地オフサイトセンターには、内閣府副大臣を本部長として、関係省庁、関係自治体等で構成する事故現地対策本部が設置されます。

そして、事故対策本部から関係自治体に、PAZ内の住民のうち施設敷地緊急事態要避難者に対して、避難等の防護措置を執るよう要請します。防護措置の内容は、「自治体が指定したUPZ外の避難先へ避難する」、あるいは、「避難を実施することにより健康リスクが高まると判断される住民は、放射線防護対策を講じた近隣の施設へ避難する」という2通りの方法があります。併せて、PAZ内的一般の住民は、避難の準備を、UPZ内の住民は、屋内退避の準備を行うよう要請します。自治体は、国からの要請を受けて、施設敷地緊急事態要避難者の避難、又はPAZ内の住民の避難準備、UPZ内の住民が屋内退避を行うために必要な支援をします。

原子力規制庁は、緊急時モニタリングセンターを立ち上げ、緊急時モニタリング実施計画に基づいて緊急時モニタリングを実施します。

さらに事故が進展し、原子力施設において公衆に放射線による影響をもたらす可能性が高い事象が発生した場合、例えば、全ての給

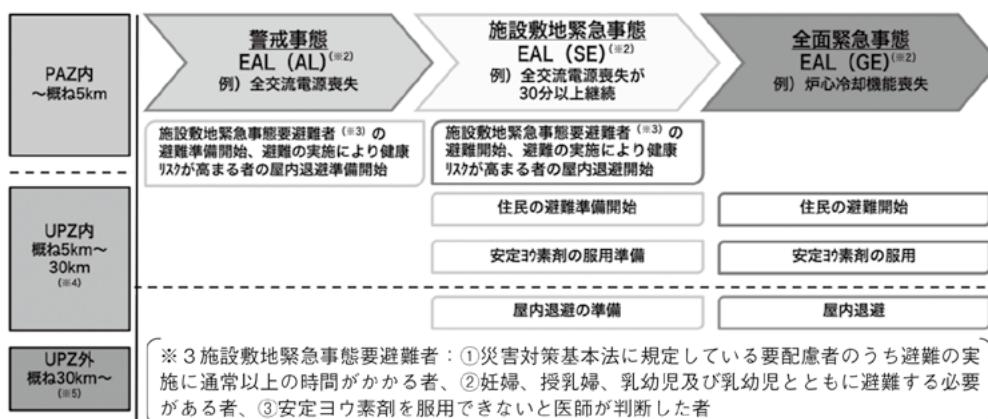


図2 原子力災害対策指針が定める緊急事態の防護措置(緊急時活動レベルEAL)

水機能が喪失し全ての非常用炉心冷却装置等による注水が直ちにできない等の場合は、「全面緊急事態（GE）」として、内閣総理大臣が緊急事態宣言を行います。そして、官邸に内閣総理大臣を本部長とする原子力災害対策本部が設置されます。現地オフサイトセンターでは、原子力災害現地対策本部が設置されます。原子力災害対策本部は、関係自治体に対して、原子力施設から放射性物質が放出される前に、PAZ内の住民には自治体の指定したUPZ外の避難所へ安定ヨウ素剤を服用して避難を実施するように、また、UPZの住民には屋内退避を行うように指示します。

関係自治体は、PAZの住民が避難を円滑に行えるよう車両の手配や住民の避難誘導を行います。また、UPZの住民に対して屋内退避を行うよう広報や支援を行います。

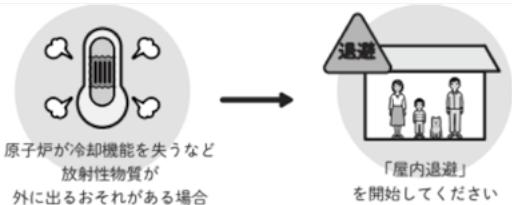
全面緊急事態（GE）は、原子力施設において公衆に放射線による影響をもたらす可能性が高い事象が発生した段階で発出されます。そのため、UPZの住民は、放射性物質からの被ばくを回避するために屋内退避を行うこととなります。

屋内退避

屋内退避とは、指針では、原子力災害時に住民等が比較的容易にとることができる対策としており、屋内に滞在することにより放射性物質の吸入抑制や放射線を遮蔽することができることから、主に放射性プルームからの被ばくの低減を図る防護措置として有効であるとしています。屋内退避は、UPZにおいて全面緊急事態に至った時点で、被ばくのリスクを低減するために実施するものです。また、PAZやUPZの一部の区域において、避難又は一時移転の実施が困難な場合の措置として行われることもあります。

屋内退避の方法について、図3のように内閣府のホームページでわかりやすく紹介しています。

○屋内退避の開始のタイミング：原子力発電所から放射性物質が漏れ出るおそれのある緊急事態時に「屋内退避」を開始することになります。屋内退避の開始の際には行政から指示があります。ただし、津波等の自然災害においては命を守る行動を優先してください。



○屋内退避をしたときには、ドアや窓を閉める、換気設備を止める、ペットを家の中に入れる、情報収集をするなどのことを行ってください。



図3 原子力発電所からおおむね5~30km圏内にお住いの皆様が行う屋内退避について
(内閣府原子力防災HPより抜粋)

特に、PAZやUPZの病院や介護施設においては健康状態等により避難よりも屋内退避を優先することが必要な場合があり、この場合は、一般的に遮蔽効果や建屋の気密性が比較的高いコンクリート建屋への屋内退避も有効であるとしています。

内閣府では、病院、要援護者施設及び災害時に避難先となり得るその他施設について、図4のように放射線を遮蔽できるコンクリート等の壁や屋根、高気密性の扉や窓がある建屋にHEPAや活性炭等のフィルターを装備した陽圧化装置を設置して建屋内部を陽圧化することにより、外部からの放射性物質の流入を防ぐ対策を講じるための施設整備の支援をしています。

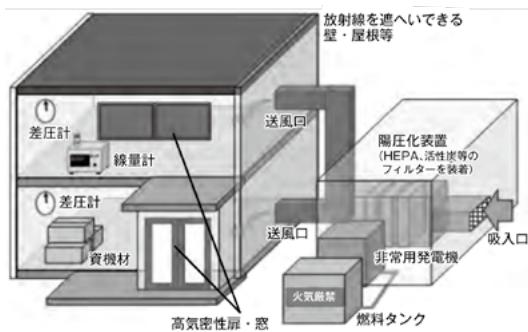


図4 放射線防護対策を講じた施設

また、図5では、それらの放射線防護対策を講じた施設について、原子力規制委員会が示している事故シナリオを基にシミュレーション計算を行い、放射線防護対策を講じた施設に屋内退避を行うことにより、約9割の被ばく線量（実効線量）の低減効果があることを示しています。

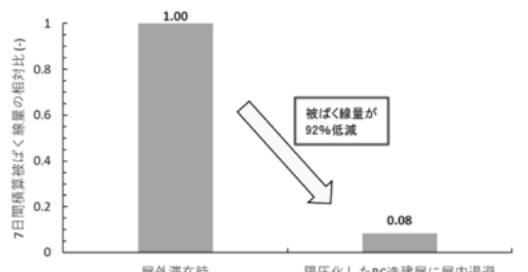


図5 放射線防護対策が講じられた建屋への屋内退避による被ばく線量低減効果
(放出源からの距離2.5km地点における、屋外滞在時と陽圧化した鉄筋コンクリート造の建屋での屋内退避時の被ばく線量(実効線量)を比較)

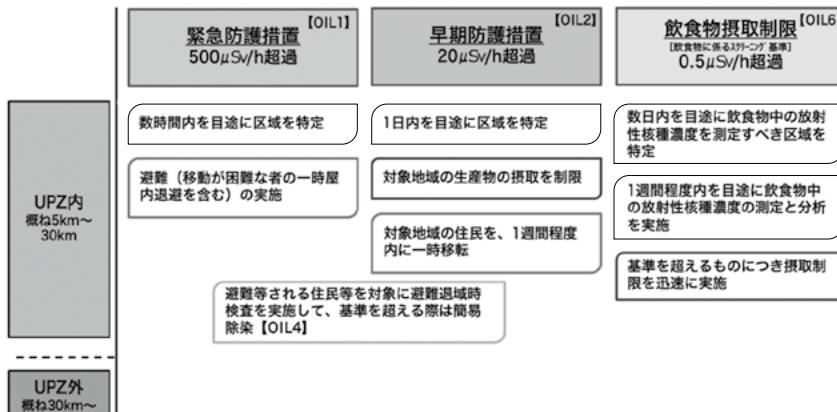


図6 放射性物質放出後の防護措置(OILに基づく防護措置)

放射性物質放出後の防護措置

原子力施設において、放射性物質が放出された場合は、空間放射線量や環境資料中の放射性物質の濃度等による運用上の介入レベル(Operational Intervention Level (OIL))により、図6のような防護措置を執ることになります。

具体的には、放射性物質の放出後、継続的に高い空間放射線量率が計測された地域において、地表面からの放射線等による被ばくの影響をできる限り低減する観点から、空間線量率が高い(500μSv/h超過)区域においては、数時間から1日以内に区域を特定し、住民等は避難を行います(OIL1)。

その後も継続的に緊急時モニタリングを行い、1日以内を目途に20μSv/hを超える区域を特定し、その区域の住民は1週間以内に一時移転を行います(OIL2)。

避難や一時移転等の防護措置の対象となつた住民等に対して、自治体は避難退域時検査を実施し、除染すべき基準を超える場合には簡易除染等を実施します(OIL4)。

また、空間線量率が0.5μSv/hを超える区域については、数日内を目途に飲食物中の放射性核種濃度を測定し、基準を超えるものについては摂取制限を実施します(OIL6)。

これらの避難及び一時移転等の指示は、原子力災害対策本部から関係自治体に対して発出され、関係自治体は住民の避難及び一時移

転の支援を行うとともに、避難退域時検査等を実施します。

地域防災計画・避難計画（緊急時対応）

PAZやUPZの住民の避難や一時移転先は、UPZ外の自治体が指定する避難所となります。そのため道府県やPAZ・UPZ内の市町村があらかじめ作成した避難計画の中で決められています。

道府県や市町村が作成する地域防災計画や避難計画は、原子力発電所がある地域ごとに設置されている地域原子力防災協議会において、緊急時対応として取りまとめられます。その後、総理が議長であり全閣僚と原子力規制委員長等で構成されている原子力防災会議でそれらが原子力災害対策指針に照らして具体的かつ合理的であるとして了承されます。

緊急時対応には、緊急事態における対応体制、PAZ内の施設敷地緊急事態における対応、PAZ内の全面緊急事態における対応、UPZ内における対応、放射線防護資機材・物資・燃料の備蓄・供給体制、緊急時モニタリングの実施体制、原子力災害時の医療等の実施体制、実動組織の支援体制などが、地域ごとに120ページから190ページにまとめられて



図7 PAZ内住民の避難経路及び避難先
(島根地域の緊急時対応より)

おり、内閣府原子力防災のホームページから閲覧することができます。

例えば、特に住民の避難先や避難経路については、図7のように避難実施地区ごとに決められ緊急時対応に記載されており、住民には自治体がパンフレット等を配布して周知しています。

まとめ

このように内閣府原子力防災では、原子力災害対策指針等の関係法令に従って、原子力発電所立地地域等の原子力防災体制の充実・強化に係る業務を原子力規制庁とともに推進しています。また、万が一の原子力災害に備えて、毎年関係省庁、関係自治体等と研修や訓練を行うことにより、平時及び有事における原子力防災に係る人材の育成や総合調整を一元的に行っております。また、ホームページにより、屋内退避に関する情報の提供や原子力防災の解説動画、避難退域時検査等のマニュアル等、住民の防護対策に係る情報提供を行っております。

参考文献

内閣府原子力防災

https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/index.html
※図1～7出典：内閣府原子力防災ホームページの下記URLより、編集・加工し使用させていただきました。

- 図1 : https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/pdf/02_taisakupoint.pdf (1ページ)
- 図2 : https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/kyougikai/pdf/05_shimane_0103_1r.pdf (11ページ)
- 図3 : https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/shiryou/okunaitaihi.html
- 図4 : https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/shiryou/pdf/02_okunai_zantei_r5.pdf (9ページ 図2)
- 図5 : https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/shiryou/pdf/02_okunai_zantei_r5.pdf (3ページ)
- 図6 : https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/kyougikai/pdf/05_shimane_0103_1r.pdf (12ページ)
- 図7 : https://www8.cao.go.jp/genshiryoku_bousai/kyougikai/pdf/05_shimane_0103_2r.pdf (16ページ)

密封線源の利用状況について

株式会社千代田テクノル
アイソトープ・メディカル事業本部
線源営業課
兼尾 昌二

はじめに

放射性同位元素（以下「RI」という。）は、医療・研究・産業など多様な分野で幅広く利用されています。その中でも、RIを金属やプラスチックに封入した密封線源は、さまざまな用途で活用されており、私たちの生活に重要な役割を果たしています。

本稿では、密封線源の利用状況やその推移について概説するとともに、近年特に利用が増加している「表示付認証機器」に焦点を当てて紹介します。

1. 密封線源の利用

密封線源は、大きく二つの利用分野に区分されます。

一つは、医療分野でがん治療などに使用される線源やPET装置・ガンマカメラの校正に用いられる校正用線源です。

もう一つは、産業分野で分析に使用されるガスクロマトグラフの電子捕獲検出器（ECD）や、製鐵所や紙・パルプ工場で使用される厚さ計のよ

うに機器に装備して使用する線源です。

表1.1に医療分野で使用している主な密封線源を、表1.2に産業分野で機器に装備して使用する主な密封線源を示します。

表1.2の機器に装備して使用する密封線源は、放射線と物質の相互作用を利用しており、主な相

表1.2 産業分野で機器に装備して使用する主な密封線源

相互作用	機 器 名	代表的核種	数 量
放射線の物質による吸収・散乱を利用したもの	厚さ計	^{85}Kr (β)	0.37~37 GBq
		^{90}Sr (β)	~3.7 GBq
		^{137}Cs (γ)	37 GBq~1.11 TBq
		^{241}Am (γ)	3.7~185 GBq
	レベル計	^{60}Co (γ)	~74 GBq
		^{137}Cs (γ)	~74 GBq
	硫黄計	^{241}Am (γ)	~22.2 GBq
	非破壊検査装置	^{60}Co (γ)	~370 GBq, 1.85 TBq
		^{192}Ir (γ)	~370 GBq, 740 GBq, 1 TBq
	密度計	^{137}Cs (γ)	~18.5 GBq
	たばこ量目計	^{90}Sr (β)	~740 MBq
中性子の原子核との反応を利用したもの	水分計	$^{241}\text{Am}/\text{Be}(n)$	1.11~18.5 GBq
		$^{252}\text{Cf}(n)$	540 MBq
放射線の電離作用を利用したもの	ガスクロマトグラフ	^{63}Ni (β)	370 MBq, 555 MBq
		^{210}Po (α)	~5.55 GBq
	静電気除去装置	^{241}Am (α)	~3.7 MBq
		^{57}Co (γ)	370 MBq, 1.85 GBq
γ 線核共鳴を利用したもの	メスバウアー分光装置	^{57}Fe (γ)	370 MBq, 1.85 GBq
		^{119m}Sn (γ)	185 MBq, 370 MBq
		^{119}Sn (γ)	185 MBq, 370 MBq

表1.1 医療分野で使用している密封線源

種 類	代表的核種	数 量	備 考
治療用小線源	^{125}I (γ)	~約20 MBq	機器に装備していない密封線源
	^{198}Au (γ)	185 MBq	
	^{192}Ir (γ)	~740 MBq	
PET装置校正用線源	^{68}Ge (β^+)	~400 GBq	
ガンマカメラ校正用線源	^{57}Co (γ)	400 MBq	
アフターローディング用線源	^{192}Ir (γ)	~370 GBq	
血液照射装置用線源	^{137}Cs (γ)	~185 TBq	機器に装備している密封線源
ガンマナイフ用線源	^{60}Co (γ)	~185 TBq	

互作用として次のようなものがあります。

- ・放射線が物質を通過する際の吸収・散乱を利用したもの

放射線が物質に当たると、その方向・エネルギー・強度が変化します。この変化の度合いは、放射線の種類やエネルギー、さらには物質の種類や量によって異なります。したがって、この変化を測定することで、物質の種類や量に関する情報を得ることができます。この原理を応用した機器には、厚さ計、密度計、レベル計、硫黄計、非破壊検査装置などがあります。

装備機器に用いる密封線源は、測定方法や使用する核種・放射能・エネルギー、さらには使用環境に応じて適切に選択されます。

例えば、厚さ計では、測定対象の材質や厚さに応じて使用する核種が選択されます。紙やゴムの測定には⁸⁵Krのベータ線が、薄い金属には²⁴¹Amのガンマ線が、厚い金属であれば、よりエネルギーの高い¹³⁷Csのガンマ線が適しています。

- ・放射線による電離作用を利用したもの

放射線の電離作用を利用する装置は、荷電粒子が物質中で電離を起こす際に発生するイオン対を活用しています。 α 線や β 線は比電離が大きく、イオン発生源として適しており、ガスクロマトグラフの電子捕獲検出器 (ECD) には⁶³Niのベータ線が、静電気除去装置には²¹⁰Poや²⁴¹Am、煙感知器には²⁴¹Amのアルファ線が利用されます。

- ・中性子と原子核の相互作用を利用したもの

中性子の原子核との反応を利用する測定法の一つに、中性子水分計があります。水素の原子核は他の元素に比べて中性子を効率よく減速させる性質を持っています。この特性を利用し、速中性子が減速されて生じる熱中性子の量を測定することで、試料中に含まれる水素量、すなわち水分量を求めることができます。この方法で使用される密封線源には²⁴¹Am/Beや²⁵²Cfの中性子線が用いられています。

2. 密封線源の利用状況

密封線源の利用状況について、日本アイソotope協会のホームページに掲載されている「放射線利用統計 (2001年度から2019年度)」を基に紹介します。

なお、2020年度以降の集計はホームページに掲

載されていませんのでご了承ください。

密封線源の場合、その安定供給の問題、使用済み密封線源の廃棄の問題、そして経済的要因、さらには放射性同位元素等の規制に関する法律（以下「RI法」という。）をはじめとする規制の影響を受けて利用状況が変化しています。

国内で使用されている密封線源の多くは輸入品に依存していますが、原材料が安定的に調達できれば供給自体は比較的安定します。一方で、製紙工場等で使用している厚さ計用の¹⁴⁷Pm線源の原料が入手困難になり、代替えとして⁸⁵Kr線源へ移行した事例があります。

使用済み密封線源のうち、比較的半減期が長いものは、海外の製造元に返却されています。

大量放射能の密封線源を海外返却する場合、例えば、血液照射装置に収納している¹³⁷Csは輸送規則で定められる「BU型輸送物」に区分されます。BU型輸送物を運搬する際には関係省庁への申請が必要となり、さらに、この基準を満たすために輸送容器の総重量が3トンを超えることがあります。そのため航空機で輸送することができず、船舶による輸送が行われています。しかし、放射性物質を取扱うことができる船会社は限られており、利用できる船便の数も少ないため、返却費用は非常に高額となっているのが現状です。

また、RI法により規制が強化されることで、密封線源の使用が困難になる場合があります。例えば、平成30年（2018年）9月1日に施行された特定放射性同位元素の防護措置では、「特定放射性同位元素の数量を定める告示」に定められた24種類の放射性同位元素について、一定の放射能以上の密封線源を使用する場合に、施設・設備・管理の追加措置を講じることが義務付けられました。

その結果、新しい規制に対応できず、施設を廃止した事業所もあります。

また、RI法の改正による表示付認証機器の採用で規制緩和となったものがあります。表示付認証機器については、「3. 表示付認証機器について」で紹介します。

放射線利用統計から、表2.1に医療用密封線源の推移を、表2.2に民間企業で使用している主な装備機器の推移を示します。

表2.1によると¹²⁵Iのシード線源と¹⁹²Irのアフターローディング線源以外は、減少傾向となっています。

表2.1の遠隔治療装置の数値は、テレコバルト

表2.1 医療用密封線源の推移

種類	年度 核種	半減期	2007	2011	2015	2019
治療用小線源	¹²⁵ I	59.407日	84	110	118	114
	¹⁹² Ir	73.830日	28	21	21	18
	¹⁹⁸ Au	2.6941日	48	36	31	29
アフターローディング用線源	¹⁹² Ir	73.830日	130	136	141	136
遠隔照射装置	⁶⁰ Co	5.2712年	91	70	55	56
血液照射装置	¹³⁷ Cs	30.08年	92	103	94	78

遠隔治療装置とガンマナイフを合計した値です。

テレコバルトの代わりにリニアックが使われるようになったため2015年頃にはテレコバルトが使われなくなりました。一方、ガンマナイフは、1989年頃から国内の病院に設置されるようになったので、表2.1の遠隔治療装置の2015年度・2019年度の数値は、ほぼガンマナイフの設置台数です。

血液照射装置には、¹³⁷Cs密封線源が使用されています。1989年頃から国内で導入が始まり、ピーク時は100台以上が全国の病院に設置されました。密封線源の成績書には「ワーキングライフ(推奨使用期間)」が記載されており、血液照射装置用¹³⁷Cs線源の場合、その期間が一般的に15年なので、導入から一定期間が経過した現在では、多くの医療機関で装置の廃棄が進められています。

ガンマナイフや血液照射装置には⁶⁰Coや¹³⁷Csを用いた密封線源が装備されています。

これらの放射能は100TBqを超えるものもあり、これらの使用済み密封線源の廃棄費用は非常に高価となっています。そのため、近年では、密封線源を用いない放射線発生装置や、RI法規制対象外となるX線装置へと移行する事業所が増えています。

表2.1で、治療用小線源については医療機関が申請した原子力規制委員会の使用許可・届出事業所数を、アフターローディング装置、遠隔治療装置、血液照射装置については原子力規制委員会の使用許可台数を、同様に表2.2は民間企業で主に利用される装備機器の使用許可・届出台数の推移を示しています。また、半減期については、「アイソトープ手帳(12版)」を参照しました。

工場で使用している装備機器には長半減期の密封線源が用いられることが多く、これは、線源交

表2.2 民間企業で使用している主な装備機器の推移
(機器の種類別、核種別)

種類	年度 核種	半減期	2007	2011	2015	2019
非破壊検査装置	⁶⁰ Co	5.2712年	133	137	128	131
	¹⁹² Ir	73.830日	669	706	718	745
厚さ計	⁸⁵ Kr	10.739年	1,337	1,326	1,282	1,197
	⁹⁰ Sr	28.79年	177	156	144	126
	¹³⁷ Cs	30.08年	74	84	272	276
	¹⁴⁷ Pm	2.6234年	260	218	205	189
	²⁴¹ Am	432.6年	620	627	587	546
レベル計	⁶⁰ Co	5.2712年	355	344	435	388
	¹³⁷ Cs	30.08年	759	1,287	1,390	847
密度計	¹³⁷ Cs	30.08年	144	137	107	92
水分計	²⁴¹ Am/ Be	432.6年	68	62	60	59
硫黄計	²⁴¹ Am	432.6年	140	116	92	65
たばこ量目計	⁹⁰ Sr	28.79年	187	22	0	0

(参考)

種類	年度 核種	半減期	2018	2019	2020	2021	2022
メスバーウアーリ装	⁵⁷ Co	271.74日	13	11	9	8	5
	^{119m} Sn	293.1日	1	2	1	3	1

換時に工場の生産ラインの停止時間を最小限に抑えるためと考えられます。

利用状況に関しては、非破壊検査装置がやや増加傾向にありますが、その他は概ね横這いか減少傾向です。

特に、⁹⁰Srを装備したたばこ量目計は、一時期、日本全国のたばこ工場等で広く使用されていましたが、現在では、RI法の規制対象外であるX線を利用したたばこ量目計へと移行しています。

3. 表示付認証機器について

平成17年6月1日に施行された改正RI法では、新たに核種ごとに「下限数量」が定めされました。この改正により、従来は規制対象外であった3.7MBq以下の校正用線源や密封線源を使用する装備機器の一部が、新たに規制の対象となりました。

表3.1に「放射線を放出する同位元素の数量等を定める件」の告示別表第一より、新たに設定された主な核種の下限数量を示します。

表3.2に、平成17年のRI法改正以前は、3.7MBq以下の密封線源は規制対象外でしたが、表3.1の

表3.1 放射線を放出する同位元素の数量及び濃度(抜粋)

第一欄		第二欄	第三欄
放射線を放出する同位元素の種類	核種	数量(Bq)	濃度(Bq/g)
	³ H	1×10^9	1×10^6
	¹⁴ C	1×10^7	1×10^4
	²² Na	1×10^6	1×10^1
	³⁶ Cl	1×10^6	1×10^4
	⁵⁷ Co	1×10^6	1×10^2
	⁶⁰ Co	1×10^5	1×10^1
	⁶³ Ni	1×10^8	1×10^5
	⁶⁸ Ge	放射平衡中の子孫核種を含む。	1×10^5
	⁹⁰ Sr	放射平衡中の子孫核種を含む。	1×10^4
	¹³³ Ba		1×10^6
	¹³⁷ Cs	放射平衡中の子孫核種を含む。	1×10^4
	¹⁴⁷ Pm		1×10^7
	²⁰⁴ Tl		1×10^4
	²⁴¹ Am		1×10^4
	²⁵² Cf		1×10^4

表3.2 下限数量の取り入れにより新たに規制対象となった主な密封線源と装備機器

装備機器名等	核種、放射能	下限数量
煙 感 知 器	²⁴¹ Am 18.5kBq~81.4kBq	²⁴¹ Am : 10kBq
エアロゾル中和器	²⁴¹ Am 3MBq	²⁴¹ Am : 10kBq
厚 さ 計	⁹⁰ Sr、 ²⁰⁴ Tl \leq 3.7MBq	⁹⁰ Sr + ²⁰⁴ Tl : 10kBq
液 面 計	⁶⁰ Co 3.7MBq	⁶⁰ Co : 100kBq
中性子水分密度計	⁶⁰ Co 2.59MBq + ²⁵² Cf 1.11MBq (計3.7MBq)	⁶⁰ Co : 100kBq ²⁵² Cf : 10kBq
校 正 用 線 源	各核種 \leq 3.7MBq	³⁶ Cl : 1MBq 他

校正用線源の場合、下限数量が取り入れられたことにより、⁹⁰Srは³⁶Clへ、¹³⁷Csは¹³³Baへと、より下限数量が大きく、かつ放出エネルギーが近く、半減期が短くない核種へ移行する傾向が見られます。

下限数量が取り入れられたことにより、新たに規制対象となった密封線源や装備機器を示します。

認証制度とは、装備機器を製造又は輸入しようとする者は、放射線障害防止のための機能を有する部分の設計及び設計に合致することの確認の方法並びに年間使用時間その他の使用・保管・運搬に関する条件（以下「認証の条件」という。）について、原子力規制委員会の認証を受けることができる制度です。この制度に基づき、設計認証を受け所定の表示が付された装備機器を「表示付認証機器」といいます。表示付認証機器の使用者には一般の放射性同位元素の使用者とは異なり、一定の範囲で規制が緩和されています。

表示付認証機器を使用する場合は、「認証の条件」に従って使用しなければならず「認証の条件」に定められた範囲を超えて使用する場合には、密封線源の放射能に応じて許可又は届出が必要となります。

また、表示付認証機器を使用する場合は、使用開始後30日以内に原子力規制委員会への届出が義務付けられています。その後は、廃棄、廃止をする場合と緊急時の対応以外は求められていません。

なお、緊急時の対応とは、表示付認証機器の盗取又は所在不明などが発生した場合を指します。

表3.3に「表示付認証機器届出使用者」と「届出使用者」の規制体系の比較を示します。

「○」印は、その基準が適用することを示しています。

認証の申請については、装備する放射性同位元素の数量が、核種に応じた下限数量の1,000倍以下である場合は、原子力規制委員会又は原子力規制委員会の登録を受けた者（以下「登録認証機関」という。）の認証を受けることができます。

そのため、以前は、原子力規制委員会の許可及び届出を行った上で使用していた密封線源についても表示付認証機器として使用できるようになりました。例えば、⁶³Niを装備したECDやPET装置、ガンマカメラの校正用線源等も認証の条件を満たすものは表示付認証機器として使用することができます。

また、ほとんどの密封線源は、許可・届出の申請時に、管理区域などあらかじめ定められた場所で使用することが原則となっています。

一方、表示付認証機器の場合は使用場所の指定がないため、「認証の条件」の範囲内であれば事

表3.3 表示付認証機器届出使用者と届出使用者の規制体系の比較

規制の区分		表示付認証機器 届出使用者	届出使用者
申請時期		使用開始後30日以内に届出	使用前に届出
取扱いの基準の適用	使用の基準 (第15条)	—	○
	保管の基準等 (第16条)	—	○
	運搬の基準 (第17条)	—	○
	運搬に関する確認等 (第18条)	認証の条件に従った運搬	○
	廃棄の基準等 (第19条)	○	○
測定(第20条)		—	○
放射線障害予防規程 (第21条)		—	○
放射線障害の防止に関する教育訓練(第22条)		—	○
健康診断(第23条)		—	○
放射線障害を受けた者又は受けたおそれのある者に対する措置(第24条)		○	○
放射線障害の防止に関する記帳義務(第25条)		—	○
原子力規制委員会等への報告(第31条の2)		○	○
警察官等への届出状(第32条)		○	○
危険時の措置(第33条)		○	○
放射線取扱主任者(第34条)		—	○
許可届出使用者等の責務(第38条の4)		○	○
報告徴収(第42条)		○	○
立入検査(第43条の2)		○	○

業所外でも使用することができます。

表3.4に主な表示付認証機器の機関別使用届出台数の推移を示します。

表に示すレベル計はボンベ等に収納された液体の残量を測定するために用いられ、中性子水分密度計は土壤の密度や水分量の測定により高速道路等の現場における盛土の品質管理に利用されています。また、爆発物検知器は空港や港等での爆発物等の検出に使用されるなど、これらの機器はRI施設や事業所以外の場所で幅広く活用されて

表3.4 主な表示付認証機器の分野別使用届出台数の推移

表示付認証機器と 主な使用核種 機関	年度	2007	2011	2015	2019
		2007	2011	2015	2019
校正用線源 ⁶⁸ Ge, ⁵⁷ Co ¹³⁷ Cs, ¹³³ Ba 他	医療機関	0	18	130	353
	教育機関	0	104	231	355
	研究機関	0	90	265	328
	民間企業	0	697	1,344	1,656
	その他の機関	0	1,909	2,282	938
レベル計 ⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs	民間企業	41	525	1,018	1,320
	その他の機関	1	19	25	30
水分密度計 ⁶⁰ Co + ²⁵² Cf	民間企業	0	561	832	738
	教育機関	155	168	157	121
ガスクロマトグラフ ECD ⁶³ Ni	研究機関	273	308	301	292
	民間企業	1,084	1,324	3,366	3,516
	その他の機関	687	651	534	474
	爆発物・薬物検知器 ⁶³ Ni	3	103	736	786
その他 照準器(³ H)他	その他の機関	0	1,093	1,954	1,169
	民間企業	0	441	1,040	857

います。

校正用線源については、医療機関で使用されている表示付認証機器の大部分がPET装置の校正用の線源であり、その他は測定器の校正に使用される線源となっています。

なお、「その他の機関」とは、医療機関、教育機関、研究機関、民間企業以外の機関を指し、具体的には警察、消防、自衛隊、都道府県の衛生・公害研究所他が該当します。

4.まとめ

密封線源は、新たな代替技術が開発・普及しない限り、今後も多方面で使用されると考えられます。

特に医療分野でのがん治療やPET装置の校正用線源、民間企業では、各分野での工業計測には密封線源でしか対応できないものが多くあります。

今回は、密封線源の利用状況と、近年多く使用されるようになった表示付認証機器について紹介いたしました。

今後も、諸外国のサプライヤーと国内関係機関と連携し、私たちの生活に有用な密封線源の安定供給に努めてまいります。

がんの県民性

日本は、男性の3人に2人、女性の2人に1人が、がんに罹患する世界トップクラスの「がん大国」ですが、地域による「がん格差」も少なくありません。

国立がん研究センターのデータベースによると、2023年、47都道府県でがんによる死亡率が1番高いのが青森県で、18年連続でワースト1位。北海道、秋田、岩手、福岡が続きます。一方、1番低いのが長野県で、長くトップの座をキープしています。次いで、滋賀、山梨、奈良、福井の順。

東京は17位、大阪は34位ですが、人口10万人あたりの死亡数を単純に比べれば、青森が東京より高くなるのは当然です。がんは一種の老化ですから、高齢者が多い地方でがん死亡が多くなるからです。このため、がんの地域差は、人口構成を考慮した「年齢調整死亡率」で比較する必要があります。

青森県の年齢調整がん死亡率は人口10万対134人で、長野の人口10万対92人と比べて、約1.5倍と大きな差があります。青森県は喫煙、多量飲酒が多い他、運動不足や肥満といっ

た生活習慣上の問題が指摘されています。

一方、長野県は野沢菜などの漬物をよく食べるなど、塩分摂取量の多い地域です。それでもがんが減った理由が全世代向けのがん教育です。教育県としても知られる長野は、人口10万人当たりの保健師数で全国トップ。がんは、「知ることで克服できる病気」だと痛感します。

臓器別にも、がんの地域性は存在します。秋田県は胃がんの年齢調整死亡率が最も高い県です。胃がんの原因のほとんどはピロリ菌の感染で、これに塩分の過剰摂取が重なることで胃がんリスクが高くなります。ピロリ菌の感染に地域差はほとんどありませんが、秋田県は塩分摂取量が多く、男女ともに胃がん死亡率トップとなっています。

肝臓がんは、佐賀県をはじめとした九州地方に多いがんです。佐賀県は肝臓がんの主要な原因となるC型肝炎ウイルス（HCV）の感染率が最も高く、肝臓がんによる死亡率も全国トップクラス。HCVは佐賀県を含む東シナ海エリアの「風土病」だからです。

同様に、母乳から感染するウイルスが原因となり発症する「成人T細胞白血病」が多い九州・沖縄では、白血病の罹患率が高いことが知られています。

乳がんは東京都の罹患率が最も高いですが、背景には出生率の低さが関係します。乳がんは女性ホルモンの影響が大きく、妊娠・授乳で月経が止まると女性ホルモンの刺激が減り、乳がんの罹患リスクも低下します。出生率の低い都市部で乳がん罹患率が高くなっているのです。がんにも県民性があるのです。

都道府県別 年齢調整がん死亡率ランキング(3年後ごと)

	1999年	2002年	2005年	2008年	2011年	2014年	2017年	2020年	2023年
1位	大阪府	大阪府	大阪府	青森県	青森県	青森県	青森県	青森県	青森県
2位	福岡県	福岡県	青森県	大阪府	佐賀県	北海道	北海道	北海道	北海道
3位	青森県	青森県	佐賀県	長崎県	北海道	秋田県	秋田県	秋田県	秋田県
45位	熊本県	山梨県	大分県	熊本県	香川県	沖縄県	香川県	福井県	山梨県
46位	長野県	沖縄県	岡山県	岡山県	岡山県	三重県	沖縄県	山梨県	滋賀県
47位	沖縄県	長野県							

出典：国立がん研究センター「がん情報サービス」データベースより

沖縄の凋落と大阪の挽回が印象的

電子スピン共鳴法を用いた放射線測定

山口 一郎^{*1}／茂呂田孝一^{*2}

放射線とラジカル

放射線は、ラジカルを生成して生体に影響を与える。このためラジカルを測ることができれば放射線の量が推定できる。ラジカルは、不対電子を持つので電子スピン共鳴法 (EPR: Electron paramagnetic resonance、電子常磁性共鳴分光) を用いて測ることができる。電子スピン共鳴は、文字通り電子スピンと関係している。電子スピンは磁気モーメントと関係しているが、電子が磁気モーメントを持っていていることは、シュテルンとゲルラッハの実験 (1922年) で確認された。この実験では、過熱して真空中に放出した銀の原子 (電荷を持たない) をビームとして絞って放出させ、銀の飛行方向に垂直な方向に磁場勾配をかけることでビームが2本に分かれることが示された (図1)。これにより銀が磁気モーメントを持つ

ことが示されたが、その正体が電子の磁気モーメントであることが判明している。

電子スピン共鳴法

不対電子は、磁場におかれると磁場強度の大きさに従い、そのエネルギー準位が分裂 (ゼーマン分裂) する。分裂したエネルギー準位の幅に相当するエネルギーを持つ電磁波を照射すると、不対電子はそのエネルギーを吸収し、分裂が回復する。この現象を利用し、照射する電磁波の周波数を一定にして磁場強度を変動させると、電磁波エネルギー吸収のスペクトルが観察できる。このスペクトルの高さより被ばく線量を計測する手法が、EPR (電子スピン共鳴) 線量計測法である。

生体内に保持されるラジカル

生体内のラジカルは、放射線照射で生成された後すぐに消失してしまう。従って、何らかの方法でラジカルを保持しないと放射線の影響として測定できない。ここで着目されたのが歯である。歯は強固であり容易に風化しない。つまり放射線照射により生成されたラジカルが保持される。特に、歯のエナメル質で放射線照射により生成された炭酸ラジカルは、ハイドロキシアパタイト結晶格子内部で安定に保持される。この性質を用いて、放

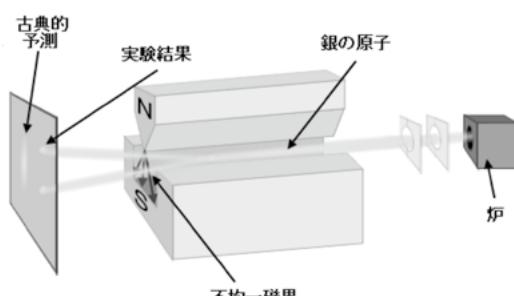


図1 シュテルン=ゲルラッハの実験の模式図(Tatoute)
真空中で銀が入った炉を高温にして、銀原子ビームを不均一磁界に入射している。銀原子は、スピンに応じて上下に偏向した。

*¹ Ichiro YAMAGUCHI 国立保健医療科学院 生活環境研究部 特任研究官／特定非営利活動法人 放射線安全フォーラム 理事
*² Koichi MOROTA 国立保健医療科学院 生活環境研究部 主任研究官

射線量の推定や放射線量の推定に基づく年代測定がなされてきた。

この他、爪でも放射線照射による信号が確認でき、実用化に向けた研究がなされている¹⁾。

なお、電子スピン共鳴法を用いた放射線量の測定では生体試料だけでなく、砂糖やスマートフォンの素材なども用いられている。放射線照射で生成されるラジカルが安定に保持されるのであれば計測候補となる。

生体試料を用いた放射線測定

生体試料を用いた放射線測定では、歴史のある生物学的な線量評価が標準である。FBNewsでは第579号（2025年3月）で「被ばく医療における細胞遺伝学的線量評価」として解説されている。この記事では、EPRBioDose2024の報告もなされている。この学会は生体試料を用い



図2 EPRBioDose2024におけるEPRのトレーニング・コース(講義)



図3 EPRBioDose2024におけるEPRのトレーニング・コース(実習)

た線量測定が扱われている。学会の名称が示すように、この研究集会では細胞遺伝学的な手法も含む様々な生物学的な線量評価とともに電子スピン共鳴法も扱われた。EPRBioDose2024で開催されたEPRのトレーニング・コースの写真を示す(図2、図3)。このトレーニング・コースでは、EPRの測定の原理から、様々な測定法、得られた信号の解析と一連の流れが説明された。

歯を用いた電子スピン共鳴法による線量測定の研究

歯を用いるEPR(電子常磁性共鳴分光)線量計測は、放射線照射により歯に生成されたラジカルが長期に保持されることを利用していている。これまで抜去歯を用い広島・長崎の原爆被爆者の線量評価にも応用されてきており、緊急被ばくの利用としては、チリで2005年12月に発生した事例への適用例がある。2006年の6月から8月にアフリカのセネガルとコートジボアールで発生した事例では、フランスのPercyの軍の訓練病院に搬送された患者で、歯だけではなく骨も利用した線量が推計されている²⁾。2011年の東京電力福島第一原子力発電所の事故では、動物の歯を用いた研究がなされた³⁾。1999年9月に発生した国内での臨界事故でも事後的に利用されていた⁴⁾。このように様々な利用があることから、IAEAのTECDOC⁵⁾や国際標準化機構(ISO 13304-2:2020)による標準化⁶⁾も進められている。

生体での口腔内の歯を用いた測定

従来のEPR法は、抜歯後にエナメル質を剥離し、試料管内でXバンド・マイクロ波を照射して測定する。しかし、この方法では抜歯などによる歯の確保が不可欠であり、被災者や第一対応者のスクリーニングには不適切である。口腔内の歯を測る装置として米国ダ

トマス大学で、口腔内の歯に対して生体内での吸収がなされにくいLバンド・マイクロ波を照射して計測するEPR機器が開発された。この研究は、同大学に留学していた香川大学の三宅実教授が初期の開発に携わっている。歯が不均一であることの影響⁷⁾や太陽紫外線の影響⁸⁾も確認されている。この研究は国際的に推進され、現在、韓国でも改良が進められている。

日本では、当時の国立保健医療科学院の鈴木元生活環境部長が2006年度より4年計画で原子力試験研究費を獲得し、Swartz教授らと連携し、2008年度にプロトタイプの改良型を科学院に導入した。2014年度には装置を改良させモバイル化した(図4)。その間に、北海道大学の平田拓教授らにより、リゾネー



図4 口腔内の歯を用いた測定

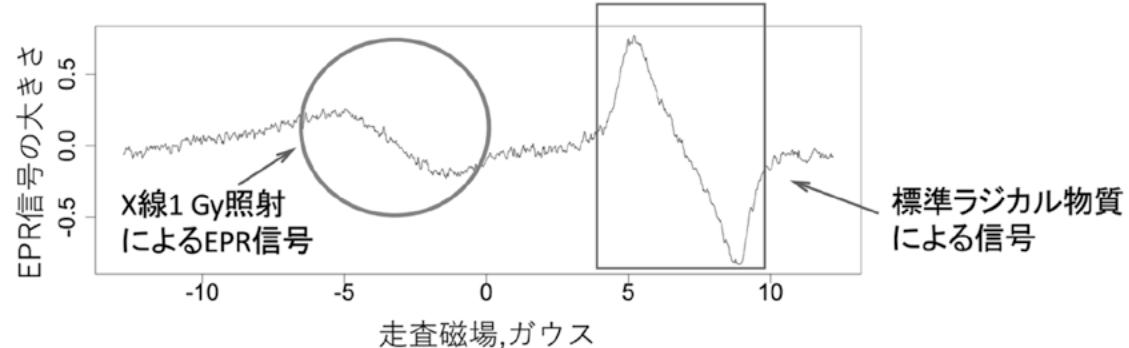


図5 150kVの管電圧で1 Gy照射した歯で得られた信号

150kVのX線で1 Gy照射した歯牙の3秒スキャンを20回繰り返して得た信号を示す。Al 0.5 mmとCu 0.1 mmのフィルタを組み合わせて低エネルギーの光子をカットしている。使用横軸はスキャン中に変化させている磁場(25 mT)を示し、縦軸はEPR信号強度(微分された電圧の単位を持つ量を相対化している)を示している。右側の信号は標準ラジカル物質のPDT (perdeuterated Tempone)による。

タの改良が加えられている。150kVの管電圧で1 Gy照射した歯を用いて、この装置で得られた信号を示す(図5)。現場に装置を持ち込んで測定する検証もなされた⁹⁾。

これまで、ヒトでは放射線治療を受けた患者¹⁰⁾や繰り返し歯科放射線診療を受けた患者だけでなく、透視下の業務に従事していた看護師や整形外科医師でも信号検出に成功している¹¹⁾。

非破壊測定としての利点

この測定法は試料を破壊することなくそのまま扱える。また、測定による試料への侵襲も無視できる。このため貴重な試料も測定できる¹²⁾。測定例として、福島県大熊町の黒毛和牛牧場で飼育されていたオスの牛(個体識別番号: 08597-98646)での例を示す。出生は2011年12月3日と推定されている。2024年11月3日に死亡し解剖された。北里大学の夏堀雅宏教授より下顎の提供を受け公益財団法人ルイ・パストゥール医学研究センターの井上一彦研究員(移行)により歯が取り出された。このうち切歯3本と臼歯2本を対象にして追加照射法により本院のL band EPR装置を用いて非破壊的に線量を推計した。追加照射は広

島大学原爆放射線医科学研究所のCs-137線源を用い、口腔内の歯を想定し、2mm厚のタフウォーターファントムで挟んで照射した。測定例を図6に示す。推定された放射線量の範囲は0.6-3.8Gyであった。想定される線量よりも高い範囲となっており、さらに線量推計の質を改善させる必要がある。なお、このように被災地の牛は研究に活用されている(図7)。

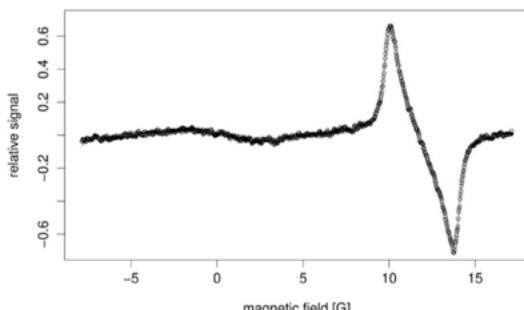


図6 大熊町の牧場で生育した牛での測定例
-1から3ガウスの範囲で信号が確認できる。右側の信号は標準物質による。



図7 福島県の避難指示区域で生育した牛
頸部に個体別の線量計を装着して線量をモニタリングしている。

個人の生涯線量計としての歯の検討

歯に生成されたラジカルは長期に保持されるので、過去のばく露の確認に有益であると考えられる。1987年度～1990年度にかけて、奥羽大学・歯学部の島野達也教授により個人の生涯線量計としての歯の検討(研究課題番号: 62440078)と題する研究が実施された。

この研究では、生涯線量計としての歯がテーマとなっており、一本の抜去歯から被ばく線量を評価する方法の確立が目指されていた。

この研究が契機となった計測例を紹介したい。2000年1月にIsotope newsに、尾内能夫先生が自身の抜けた歯を保存しており、それを用いた線量推計を望んでおられることを書かれた。それを読まれた岩崎みどり先生がEPR測定法で線量を推計した。尾内能夫先生は、医学物理分野で仕事をされ、相当量の放射線を受けられていることを記録に残していた。この自身の推計値とEPR測定法との比較を望まれたのである。比較の結果、両者は一致していた。

in Vivo測定の対象者と安全性(研究に貢献したいですか?)

本研究は、医療従事者での放射線ばく露実態を調べることを目的として、現在でも実施している(研究倫理審査での承認番号: NIPH-IBRA#25011)。静止した体位を数分間保つことができない方や口腔内粘膜が脆弱になっている方は対象としていない。また、MRI検査と同様に妊婦も対象とせず、磁性体で作られた医療機器を埋め込まれている方なども除外している。

測定は切歯を露出した状態で(上の唇を持ち上げて計測する)、3秒間のスキャンを20回繰り返す。これを5セット繰り返す。測定中にはばく露されるのは、静電磁界、超低周波電磁界、中間周波電磁界および高周波電磁界である。それらのばく露による健康影響は以下のとおりである。

- (1) 静電磁界は42mTと日本工業規格がJIS Z 4951で定める立入制限区域(磁束密度が0.5mT)を上回るもの、International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP: 国際非電離放射線

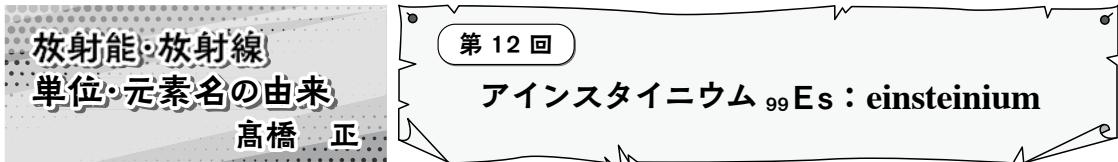
- 防護委員会)が推奨する時間加重平均での作業日あたり200mTや最大許容値を2Tとして基準を下回り、同じくICNIRPが一般公衆に対する持続的ばく露の基準としている40mTと同程度でばく露時間が短い。
- (2) 走査中に変化させる磁場の大きさは0.25mT/3sである。超低周波磁界の健康影響は明確ではないが、0.3~0.4μTを越えるばく露が長期間であった場合に小児白血病のリスクが倍増するかもしれないことが疫学研究で示されている。また、ICNIRPは、周波数50Hzで100μT、60Hzで83μTとの磁界ばく露制限値を勧告している。ただし0.3Hzの磁場変動への短期間ばく露の健康影響は明確ではない。
- (3) 20kHzの中間周波電磁界のばく露の磁束密度は最大0.4mTであり、ICNIRPの防護規準(6.25μT)を上回るがばく露時間が短時間である。
- (4) 1.2GHzの高周波電磁界のばく露は、出力が最大40mWと、市販されている携帯電話の出力よりも小さく、ばく露時間が短時間であることからリスクは小さいと考えている。

謝 辞

研究に協力下さった方々、福島の黒毛和牛農家の方々に感謝申し上げます。また、本研究を支えてくださった方々にも感謝申し上げます。

参考文献

- Yasuda, H.; Azariasl, S.; Trompier, F. Preliminary Analysis of the Integrated EPR Signals of Fingernails to Validate the Dosimetry Method Based on Peak-to-Peak Amplitudes. *Int J Radiat Biol.* 2025, 1–8. <https://doi.org/10.1080/09553002.2025.2561815>.
- Trompier, F.; Battaglini, P.; Bey, E. EPR Dosimetry in Recent Radiation Accident Cases. *Radioprotection*, 2008, 43 (5). <https://doi.org/10.1051/radiopro:2008728>.
- Harshman, A.; Toyoda, S.; Johnson, T. Suitability of Japanese Wild Boar Tooth Enamel for Use as an Electron Spin Resonance Dosimeter. *Radiat Meas.* 2018, 116, 46–50. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2018.07.001>.
- 放射線医学総合研究所. *JCO ウラン加工工場臨界事故患者の線量推定最終報告書*; 2002.
- IAEA. *IAEA-TECDOC-1331: Use of Electron Paramagnetic Resonance Dosimetry with Tooth Enamel for Retrospective Dose Assessment*; 2002.
- Wilkins, R.; Ainsbury, E. A.; Alsbeih, G. A.; Balajee, A.; Blakely, W. F.; Deminge, M.; Endesfelder, D.; Fenech, M.; Gregoire, E.; Herrold, J.; et al. Activities of ISO Working Group 18: Biological and Physical Retrospective Dosimetry. *Disaster Med Public Health Prep.* 2025, 19, e251. <https://doi.org/10.1017/dmp.2025.10095>.
- Umakoshi, M.; Yamaguchi, I.; Hirata, H.; Kunugita, N.; Williams, B. B.; Swartz, H. M.; Miyake, M. In Vivo Electron Paramagnetic Resonance Tooth Dosimetry. *Health Phys.* 2017, 113 (4), 262–270. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000698>.
- Nakai, Y.; Yamaguchi, I.; Hirata, H.; Swartz, H. M.; Flood, A. B.; Williams, B. B.; Schreiber, W.; Miyake, M. Effects of Ultraviolet Rays on L-Band In Vivo EPR Dosimetry Using Tooth Enamel. *Appl Magn Reson.* 2021. <https://doi.org/10.1007/s00723-021-01340-3>.
- Miyake, M.; Liu, K. J.; Walczak, T. M.; Swartz, H. M. In Vivo EPR Dosimetry of Accidental Exposures to Radiation: Experimental Results Indicating the Feasibility of Practical Use in Human Subjects. *Applied Radiation and Isotopes.* 2000, 52 (5), 1031–1038. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(00\)00053-1](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(00)00053-1).
- Draeger, E.; Roberts, K.; Decker, R. D.; Bahar, N.; Wilson, L. D.; Contessa, J.; Husain, Z.; Williams, B. B.; Flood, A. B.; Swartz, H. M.; et al. In Vivo Verification of Electron Paramagnetic Resonance Biodosimetry Using Patients Undergoing Radiation Therapy Treatment. *International Journal of Radiation Oncology*Biology*Physics.* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2023.11.029>.
- YAMAGUCHI, I.; NAKAI, Y.; MIYAKE, M. Can Non-Destructive EPR Tooth Dosimetry Be Used for Posterior Assessment of Radiation Exposure in Medicine and Dentistry? . *Radiation Protection and Environment - Theme 4. Radiation Dosimetry (External, Internal and Biological)*, 2023, 46 (5), S226–S227.
- Yamaguchi, I.; Inoue, K.; Natsuhori, M.; Gonzales, C. A. B.; Yasuda, H.; Nakai, Y.; Miyake, M.; Swartz, H. M. L-Band Electron Paramagnetic Resonance Tooth Dosimetry Applied to Affected Cattle Teeth in Fukushima. *Applied Sciences*, 2021, 11 (3), 1187. <https://doi.org/10.3390/app11031187>.



放射線関連分野での大きな功績を称え、その名前が単位や元素名に用いられている科学者の人物像や功績を紹介するシリーズ

誰もが知る20世紀の偉大な物理学者の名を冠したこの元素は、カルフォルニア大学のギオソー(A. Ghiorso)やシーボルグ(G. T. Seaborg)らにより発見された。1952年11月に行なわれたアメリカの熱核爆発実験(水爆実験)で生じた破片(灰)の中から、フェルミウム(^{255}Fm)とともに ^{253}Es (半減期20.47 d, α 壊変)が見つかった。しかし軍事機密のために1955年まで秘匿され、その間の1954年に、ギオソーらは原子炉内の多重中性子捕獲で ^{239}Pu から ^{253}Es が生成することを報告した。この元素には放射性だが、比較的長半減期のものが4核種ある。単体は立方最密充填構造で融点860°C、反応性に富み、化合物は3価が安定だが、2価も取る。

インシュタイン(Albert Einstein, 1879–1955)は南ドイツのウルムで生まれ、ミュンヘンで育った。学校でのインシュタインは、暗記中心で軍隊的な教育には馴染めなかつたが、数学と物理は独学で学校の課程をはるかに追い越していた。1896年秋にチューリッヒ工科大に入学し、1900年に卒業した。学友で後に一般相対性理論で協力したグロスマン(M. Grossmann)の父親の縁で1902年にスイスの特許局に就職した。

特許局時代(1902–1909)は至福の時代で、湧き上がってくる着想に取り組むことができた。実際に1905年は、インシュタインが*Annalen der Physik*誌(物理学年報)に重要な論文を立て続けに発表した充実した年だった。軌跡の年(*annus mirabilis*)といわれている。

黒体放射は19世紀末の物理学の難問だった。プランク(M. Planck)は、1900年の黒体放射の式で振動子のエネルギーの量子化を取り入れていたが、その物理的な理解が難しかつた。後にインシュタイン自ら革命的と評した光量子説の論文を3月に投稿した。黒体放射の統計力学的な考察から、光の粒子的な性質を明らかにした。その上で光の粒子性によって、発光のストークスの法則、光電効果、紫外線によるイオン化などの物質と光の相互作用が説明できることを指摘した。翌年にはプランクの式が光量子説を暗黙のうちに使っていることを明らかにした。同じ1906年に

は固体の振動子の量子化にも応用し、固体の比熱を見事に説明した。これにより光量子説が受け入れられるようになり、1922年に光電効果の理論により1921年度のノーベル物理学賞を受賞した。

インシュタインは、熱力学を原子や分子の力学で関係づけることに興味をもつていた。1902–1903年にギブズ(J. W. Gibbs)とほとんど同じ統計力学の理論を独自に展開している。5月の論文では、懸濁した微粒子の不規則な運動(ブラウン運動)が熱運動する液体分子の衝突で引き起こされることを、統計力学によって明らかにした。これは熱の分子運動研究の金字塔で、非平衡系の統計力学の先駆けである。20世紀初頭はオストヴァルト(W. F. Ostwald)のようにまだ分子の存在に懐疑的な研究者がいたが、ペラン(J. B. Perrin)が精密な実験で理論を実証し、分子の存在は揺るぎないものになった。

インシュタインは16歳のころ、光の波は光速で進む人にはどう見えるだろうかと自問した。その解ともなる最初の相対性理論の論文「運動物体の電気力学」を6月末に投稿し、光速 c は不变だが空間や時間はもはや不变ではないことを示した。9月には、物体が E だけのエネルギーを放出するとき、その質量が E/c^2 だけ減少することを補足し、これの検出にラジウムの放射壊変が使えるだろうと結んだ。質量とエネルギーの等価性を示す有名な $E=mc^2$ の式は、2年後の1907年に発表している。

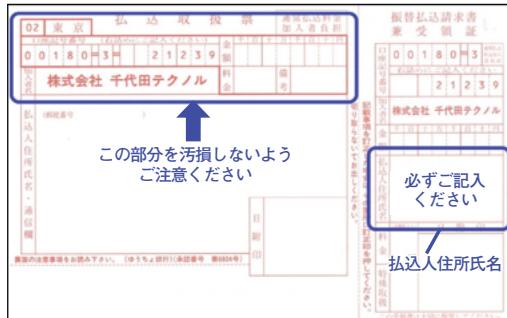
一般相対性理論には1907年から取り組んだ。重力場の取込みには苦労したが、1915年に重力場の方程式を発表し、水星の近日点移動を説明した。1919年5月の皆既日食のとき、イギリスの天文学者エディントン(A. S. Eddington)らの観測隊が、太陽をかすめる恒星の光がインシュタインの理論の予想通り屈曲することを観測した。この結果は新聞で取り上げられ、一躍有名人となった。この時にはベルリン大学の教授となっていたが、極端な反ユダヤ主義者による排斥運動の標的となつた。ナチスが政権をとると状況は極まった。1933年10月アメリカに亡命し、爾後22年をプリンストンで過ごした。

サービス部門からのご案内

払込取扱票がATMで使用できなかつたら…ご確認ください！

平素より弊社のガラスバッジサービスをご利用いただきまして、誠にありがとうございます。郵便局のATMで払込取扱票が受け付けられないときは、次のような原因が考えられます。

- ・払込取扱票の赤太枠に汚損、破損、折り曲げなどがある
(ATMは赤太枠の情報を読み取ります)
- ・払込取扱票を裏返し、または斜めに投入した
- ・振替払込請求書兼受領書に払込人住所氏名の記入がない
- ・静電気など、ATM自体の一時的な問題が発生している



折り曲げはまっすぐに伸ばし、再度ATMに投入してください。

汚損や破損につきましては、窓口での振込を行うか、**ガラスバッジ専用フリーダイヤル 0120-506-997**にて払込取扱票の再発行をご依頼ください。

記事に関するご意見や掲載希望の記事案については、こちらまでお送りください ctc-fbnews@c-technol.co.jp

編集後記

本号も最後までお読みいただき、心より感謝申し上げます。日々の業務や新しい話題について、読者の皆さんに少しでも有益な情報をお届けできたら幸いです。また、取材・執筆にご協力くださいました関係者の皆さんにも、この場を借りて深く御礼申し上げます。

これからも皆さまからのご意見やご要望を大切にし、より親しみやすく、読みやすい情報誌を目指して努力してまいります。今後ともご愛読のほど、よろしくお願い申し上げます。

さて、去る10月31日に令和7年度放射線安全管

理功労受賞者が発表され、編集委員の福士政広先生が選出されましたことをご報告いたします。先生のご受賞、心よりお祝い申し上げます。

最後に、2025年に発生した放射線測定器等に関する不適切行為により、多大なご迷惑とご心配をおかけしたことを、改めて深くお詫び申し上げます。なお、ガラスバッジを利用した個人放射線被ばく線量測定サービスには、今回の事案との関係は一切ございません。皆さまの信頼を失う結果となったことを真摯に受け止め、基本に立ち返り、一から信用回復に努めてまいります。 (小山)

FBNews No.589

発行日／2026年1月1日

発行人／井上任

編集委員／小山重成 小口靖弘 中村尚司 野村貴美 福士政広 青山伸 野島久美恵 藤森昭彦 川端方子 篠崎和佳子 高橋英典 田谷玲子 東元周平 堀口亜由美 松本和樹 丸山百合子 牟田雄一

発行所／株式会社千代田テクノル

所在地／〒113-8681 東京都文京区湯島1-7-12 千代田御茶の水ビル

電話／03-3518-5665 FAX／03-3518-5026

<https://www.c-technol.co.jp/>

印刷／株式会社テクノルサポートシステム

—禁無断転載— 定価400円 (本体364円)