

### 巻頭言

#### 1 2050 年カーボン・ニュートラルに向けて

豊田正和

### 時論

#### 2 太陽光発電導入の今後を憂う ～三重の苦にどう対応するのか～

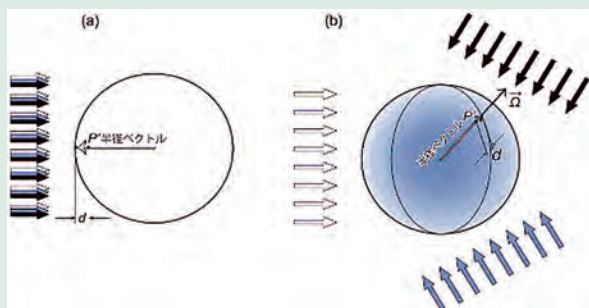
帆足興次

### 特集 外部被ばくの放射線防護における 線量概念の変遷と展望

岩井 敏ほか

#### 10 外部被ばくの放射線防護の線量体系

放射線防護に使用される線量概念には放射線健康リスクと関連する線量として防護量があり、線量限度は防護量に対して設定される。しかし、防護量は定義上測定することが困難であるため、外部被ばくモニタリング用の線量として実用量という線量概念が作られてきた。



実用量の定義 (a)は周辺線量当量, (b)は方向性線量当量。それぞれ, ICRU 球中の表面から深さ  $d$  の点  $P'$  の位置の線量当量

#### 15 防護量の変遷と今後の見通し

放射線防護のための線量限度として勧告される基本的な線量概念は、初期には照射線量のような物理的な量が使用された。しかし、対象と見なされる放射線健康影響の変遷に伴って防護量の線量概念も変遷し、進化してきた。

#### 20 実用量の変遷と今後の変更

1950 年頃までは防護量と実用量の線量概念の区別は明確でなく、場の照射線量で線量の制限が行われていた。1954 年以降、実用量の概念が明確化し、最大線量当量や線量当量指標を経て、現在の周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量となった。

### 解説

#### 24 福島復興に向けた除染のあゆみ —震災後 9 年を振り返る—

福島では大部分の避難指示解除準備区域、居住制限区域が解除され、残る帰還困難区域の解除に向けて検討が進んでいる。

中尾 淳, E. Olivier

#### 29 高放射線・狭隘環境での線量率分布の 遠隔測定を可能とする光ファイバ型 線量率計測技術

1F の格納容器底部に溶け落ちたデブリを取り出すためには、作業範囲の線量率分布データが必要である。これを実現するための光ファイバ型線量率計測技術を開発した。

上野克宜, 岡田 聡, 田所孝広

#### 34 ドローンを活用した送電線と樹木の 離隔の評価

送電設備の保守管理において、送電線と樹木の離隔を維持する業務を効率化するため、市販の小型ドローンによる空中測量を活用した離隔評価のワークフローを構築した。

中屋 耕



インドネシアでの適用例 (1 フライトで 2km 程の送電線を対象に点群を作製し、規定離隔モデルと離隔を計算)

良い話し合いとは 今中 咲幸  
 持続可能な社会を目指して2 野々山 康弘  
 組織的な教育が個人に与える影響を 服部 杏菜  
 考える  
 ポストコロナへの眼差し：科学教育 坂東 昌子  
 人間としての責任 松本 杏奈  
 予防原則と ALARP の共通点 山口 彰

## 解説シリーズ

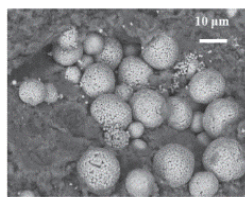
最先端の研究開発 日本原子力研究開発機構 (7)

## 39 廃止措置と廃棄物の処理処分を目指して (2)

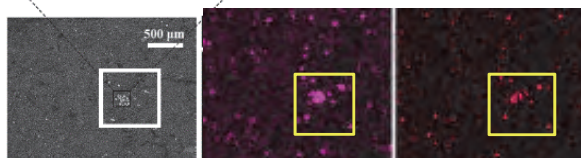
一地層処分に関する最新の研究開発の動向

原子力機構ではバックエンド関連の研究・技術開発として、原子力施設の廃止措置や低レベル放射性廃棄物の処理処分技術開発と、地層処分の基盤的研究開発を進めてきた。今回は前回に続いて、その最前線を紹介する。

棚井憲治ほか



黄鉄鉱の拡大図



電子像

鉄 (Fe)

硫黄 (S)

Fe と S の分布が類似  
 →黄鉄鉱 ( $\text{FeS}_2$ ) が溶解せず残っている

幌延の岩盤内部約 2cm に位置する  
 堆積岩の走査型電子顕微鏡による観察結果

## 報告

## 47 放射線防護関連学会の合同アンケート調査で明らかになった人材確保・育成の課題

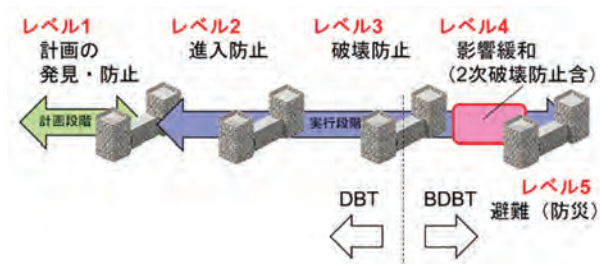
調査結果からは、40 歳未満の学会員の 3 割が診療放射線技師の資格をもっていることや、放射線実験生物学分野や放射線計測・線量評価分野の場合でも、会員の 4 割は学生時代に放射線研究歴がないことが明らかになった。

神田玲子ほか

## 53 原子力安全と核セキュリティ (SS) のインターフェイス

想定以上の核セキュリティ事象への対応を可能とするためには、安全とセキュリティとの十分な連携が必要となる。「深層防護」の視点から両者のインターフェイスを考える。

出町和之



核セキュリティにおける深層防護レベル

## FOCUS 原子力関連国際機関の最近の動向と日本からの期待 (3)

## 57 NEA における廃止措置と放射性廃棄物管理の諸課題

NEA では原子力施設の廃止措置や高レベル放射性廃棄物処分の実施を視野に入れた国際協力体制が形成され、日本の貢献も期待されている。

東原知広ほか

## 理事会だより

## 62 秋の大会オンライン開催実施報告

千葉 敏

## 4 News

- 63 会報 原子力関係会議案内、人事公募、2021・2022 年度代議員候補者推薦、2021 年度フェロー候補推薦募集、訃報、誤記訂正、英文論文誌 (Vol.57, No.12) 目次、和文論文誌 (Vol.19, No.4) 目次、主要会務、編集後記、編集関係者一覧  
 後付 総目次・著者索引 (Vol.62, Nos.1 ~ 12)

学会誌に関するご意見・ご要望は、学会誌ホームページの「目安箱」  
[https://www.aesj.net/publish/aesj\\_atomos/meyasu](https://www.aesj.net/publish/aesj_atomos/meyasu)  
 にお寄せください。

学会誌ホームページはこちら

[https://www.aesj.net/publish/aesj\\_atomos](https://www.aesj.net/publish/aesj_atomos)

# 2050 年カーボン・ニュートラルに向けて

## 巻頭言



日本エネルギー経済研究所理事長

**豊田 正和** (とよだ・まさかず)

東京都出身。東京大学法学部卒業。プリンストン MPA 修士。昭和 48 年通商産業省入省、平成 18 年通商政策局長、19 年経済産業審議官。

菅首相が、10 月末、臨時国会の冒頭に所信表明を行い、2050 年実質カーボン・ニュートラルの実現を目指すとの宣言を行った。EU、および主要欧州国は、すでに、昨年までに同様の宣言を行っている。さらに、菅首相の発言に前後して、中国の習近平主席、韓国の文在寅大統領も、夫々 2060 年、2050 年までの実質ゼロ宣言を行った。米国でも、バイデン大統領が誕生すれば、同様の宣言をするだろう。これらの主要国のゼロカーボン化が実現すれば、世界のエネルギー起源の CO<sub>2</sub> 排出量の約 6 割(2018 年ベース)が削減され、他の新興国の一定の努力を前提とすれば、2050 年 CO<sub>2</sub> 半減シナリオを上回ることが可能となる。

今や、課題は、こうした 2050 年カーボン・ニュートラルは可能かということに移行した。

次期エネルギー基本計画作成の議論を始めたばかりだが、日本は何をすべきなのか。4 つの柱があるだろう。

第一が、省エネルギーの更なる推進である。2015 年に策定したエネルギー・ミックスにおいては、約 20 年で、35 %のエネルギー原単位の改善(1973 年の石油危機以降の実績に相当)を掲げた。成長率等にもよるが、凡そ、10 %のエネルギー消費削減につながる。すでに、最もエネルギー効率の高い国の一つである日本として、簡単ではないが、2050 年までに更に 10 %のエネルギー消費削減を目指すべきだろう。

第二が、再生エネルギーの主力電源化である。100 %の再生エネルギーの導入が可能という勇ましい意見もあるが、夜間発電しない太陽光や、風の時に発電しない風力は、蓄電池等によるバックアップを必要とする。加えて、メガソーラー等には、立地制約がある。2030 年の電源ミックス目標の倍の 40~50 %程度とみるのが妥当だろう。

第三が、原子力だ。総理は、「再生可能エネルギーのみならず、原子力を含めて、あらゆる選択肢を追求する」とする一方で、「原発依存度を可能な限り、低減する」としている。最低、2030 年の電源ミックスにおける 20~22 %は、維持しないと、電源のゼロカーボン化は不可能に近い。

第四に、化石燃料の脱炭素化である。ここ数年で、スターに躍り出た、ゼロカーボン水素・アンモニアや、CO<sub>2</sub> を資源として活用するカーボンリサイクルがそれである。ここで、「不都合な真実」を共有しておきたい。電力セクターは、最終エネルギー消費の中で、現在(2018 年ベース)は、30 %弱にすぎず、2050 年において、電力化が進んだとしても、40 %弱でしかないと言われる。つまり、ゼロカーボンの再生エネルギーと原子力で 60~72 %確保できたとしても、一次エネルギーベースでは、25~30 %程度でしかないことだ。つまり、エネルギーの大層は、CCS(二酸化炭素回収・貯留)を最大限利用した化石燃料の脱炭素化、あるいは、カーボンリサイクルで対応するしかない。残りの電力部門に加えて輸送部門、産業部門、民生部門の非電力エネルギーの脱炭素化が不可避となる。

日本が、水素基本戦略を発表したのは 2017 年だ。加速的に進められる技術開発により、少なく見積もっても、コストを現在の 3~4 分の一に低減する必要がある、商業化が本格化するのは、2030 年を超えた頃だとされている。

三つの不確実性がある。一つは、太陽光・風力発電のコストダウンと立地制約。二つは、化石燃料の脱炭素化のコストダウン。三つ目が、原子力の信頼回復だ。原子力は、純国産エネルギーとしてエネルギー安全保障に優れ、最も安い電源であり、温暖化ガスの排出は、ほぼゼロだ。原子力利用の鍵となる安全性への信頼は、開放性、透明性のある情報開示と対話、そして 10 万炉年に一度かもしれないリスクに備えた避難計画の共有だろう。三つの不確実性への地道な官民の対応・協力が、互いに補い合いながら地球を救うことになる。

(2020 年 11 月 3 日 記)





## 太陽光発電導入の今後を憂う ～三重の苦にどう対応するのか～



帆足 興次 (ほあし・こうじ)

NPO 社会システム研究フォーラム理事  
九州大学大学院修了，工学博士。民間企業を  
経て，江戸川大学社会学部教授などを歴任。  
江戸川大学名誉教授。地方移住者の視点から  
地域の課題解決や活性化策の創出に努力中。

エネルギー，なかでも電力の安定供給方策は国家の長期にわたる安全保障の基盤をなす。1970年代初期での石油危機以降でのエネルギー白書等では必須の政策目標であるし，現在でもそれは変わらない。とはいえ，福島事故以降では原子力発電の今後の状況やCOP25での温暖化対策重視の動向を反映して，2030年度には再エネ導入の目標比率を二十数%とし，出力変動対応のための電源構成の在り方等が議論されている。再エネ，中でも太陽光発電はその技術や設置方策の簡便さに加え，設置促進策としての固定価格買取(FIT)制度の導入を背景として多種多様な事業者のみならず，金融商品として自らその投資場所さえも知らない個人が投資する電源として急速に発電比率を増大しつつある。本来ならば，その導入には国土の地勢や他国とは孤立した配送電網の状況，電力消費地の極端な偏在など，多種の因子に配慮すべきであったが，現実にはそれらへの配慮がなく，太陽光発電導入は善なる電源と受容されている。では，現実にはどのような問題があるのか。ここではそれらを「苦」として指摘している。

第一の「苦」は，自然や住環境を無視した乱立設置を加速させる要因となった関連諸制度である。2012年以降，現在までFITは減額しつつメガ施設でのそれは入札制度にはなったものの，現在稼働中の施設，なかでも10～50kWの施設は高い買取価格時に多くが設置されている。しかも当時での設置規制は適用技術水準や維持義務の遵守以外は，保守規定などの免除があり，多くの小規模施設(10～50kW)が全国各地に乱立設置された。2020年3月現在でその設置件数は59万件強，全設置総数62万件強の95%でありながら，その発電容量は地上設置型太陽光発電総容量(約44百万kW)の35%強でしかない。わが国の総発電容量は約2億6千万kWゆえ，10～50kWの設備(15百万kW)は6%弱でしかない(買取電力量は10kW以上で550億kWh，総発電量の7%強)。その買取価格もFIT適用以来累計で約8兆円強，2019年度での太陽光は約2兆5千億円，各世帯の負担は年間

一万円に近いものの，消費者やマスコミなどからの賛否の声は少ない。

なにゆえにこうした数値を示したかといえば，小規模太陽光発電施設(10～50kW)はFIT制度や技術基準の弱点をついた，まさしく金融商品として多くの事業者や個人投資家が参入した設備としか理解できないからである。しかも，この規模での諸規制の甘さを利用した「分割案件」が至る所に設置されている。例えば2,000kWの設備を50kWに分割し，40の個人を含む事業者に分割する。筆者が住む北杜市は日照時間が年間平均で約2,600時間；東京のそれが約1,800時間に比べれば設備稼働率が極めて高いため，事業者にとっては最高の条件である。自然環境や景観が素晴らしい地域でありながら，耕作放棄率がわが国のその最上位に近いことや中山間地域での民有林の後継者不足など，多くの地域社会が抱える課題が凝縮していることもあって，至る所に小規模設備が杜撰な形で設置されている。現状，稼働中が総数1,753件，内10～50kWが1,630件あり，その内，1,132件が設置規制の緩い分割施設である。平均すれば約5分割で220ヶ所もある。これらの施設の運営を約130の多様な事業者が，約200の個人が実施している。しかも，その多くが北杜市以外から進出している。

こうした事態にいたった背景には，国のFIT制度を含む促進策とそれに協調した地方自治体の関連条例とのギャップがある。北杜市の市政の目標は「人と自然と文化が躍動する環境創造都市」であるが，いかに環境を重視しても豊かな景観のみでの地域の発展は望みようもない。主たる産業としての農業振興を標榜しても，従事者の高齢化や後継者不足で，耕作放棄地や荒廃農地は至る所にある。しかも高齢化した農家が所有する農地を20年間，確実な収入源となる太陽光発電施設にしたり，事業者に貸与することは容易にできる。50kWで約300坪弱など，農家にとっては難なく提供できる広さである。自然や住環境への配慮などなく金融商品としか考えていない事業者や個人投資家が多いゆえに，住居の境界

線や、公道際に隣接設置するなどの事例が多々ある。こうした事態に北杜市当局は後手の動きしかできておらず、現状の杜撰な設置方法や土砂災害危険地域での設置を規制する条例を發布するも、すでに稼働中の施設への遡及適用はできず現状の推移を見守るのみである。

自然や住環境への影響は多々報告されてはいるものの、パネル表面からの反射光の影響等で、設置上部のみならず下部空間での温度上昇を指摘する米国での研究報告は注目すべきであろう。自宅境界線に近接して設置されたがゆえに、住居内外での気温変化を自ら測定した北杜市民のデータによれば、明らかにパネル表面近辺の気温上昇があり、局所的にはヒートアイランドとなっていると想定される。私的な測定ゆえに、いずれかの公的機関が検定・公開することが必要であろう。

第二の「苦」は電力の需給バランスや電気の質等への影響である。日射強度の変動が発電量の多寡に影響する太陽光発電設備では、電力への変換効率が最近向上しつつあるとはいえ、FIT 制度ゆえに急速に導入・設置された当時のそれは高々 15 % 程度で、年々それが低下していく。しかも、日負荷変動に合わせてのバックアップ電源の在り方が課題となりつつある。高効率で安定稼働が可能な電力貯蔵システムの技術進展とその実用化がなければ、逆に太陽光発電量の抑制が必要となる実態が起こりつつある。

一方では、高度な情報化技術が経済社会発展の基盤となりつつある今日、電気の質を確保しなければならない。周波数の変動は  $\pm 0.2$  Hz、需要と供給のバランスは 30 分以内、瞬時停電の最小化などがある。変動電源の太陽光発電が増大すればするほど、出力変動が大きくなるための対策が不可欠である。また、太陽光発電でのセルの変換効率、稼働時間などを含む設備利用率は現状、20 % を下回っているためにその設置には広大な面積を必要とし、それが自然や住環境に負の影響を与えている。資源エネ庁の HP には設備容量 100 万 kW で比較した場合、必要設置面積は原子力発電所では  $0.6 \text{ km}^2$ 、太陽光発電は  $58 \text{ km}^2$  (山手線内側の総面積相当) である。それゆえ、多くの中山間地域、中でも土砂災害地域近辺や耕作放棄地が設置対象として選択される。設置規制が殆どなかった全国に 60 万件弱ある 10~50 kW 設備の FIT 適用終了後での継続運転や、それを可とするメンテが数千にも及ぶと推定される多種多様な事業者と個人投資家で継続維持されるとは、現状からは想定できない。FIT 制度では廃棄などに関する積立計画や進捗状況を報告するとされているが、実態とは乖離があるとされる。しかも、北杜市の現実を見るに事業者の数度にわた

る他への転売などがあり、これまた追跡が難しいといえよう。

以上の「苦」に注目すれば、現在のエネルギー基本計画での太陽光発電の 2030 年度での目標値は地上設置の事業用として 5,500 万 kW とされるが、現状の 10~50 kW の杜撰な設備状況から見て、その達成には大きな壁がある。

第三は公益性とは何かを問う「苦」である。再エネ導入が加速された背景には電力の発電・小売事業の自由化がある。2020 年での登録発電・小売事業者数は 1,500 強であるが、利益優先の経営が設備投資等を抑制する可能性は否定できない。社会全体で何らかの利益・効果を生み出す事業を公益性のある事業と理解するならば、太陽光発電事業も安定な電力供給を維持する方策として、その一環を支えるべきである。しかし、これまでの「苦」で指摘したように、果たして公益事業であるか否かを検証すべきではなかろうか。娯楽事業者を含む多種多様な事業者に加え、投資目的の個人が参入している実態をどう理解するのか。しかも、FIT 制度の下で、その開発・設置費用を年々増大する電力料金の一部として持たざる者(消費者)が負担している。負担者の近辺に設備が設置され、住環境の激変や局所的ヒートアイランドに悩まされている住民は、それでも費用を負担せざるを得ない実態をどう考えるのか。

電力自由化以前での大型発電所の建設等では、長期にわたる地元との交渉の末に稼働後は発電量に応じて地域への交付金が支払われ、その善悪は別として関連地域での活性化に寄与していた。発電所のみならずゴミ処理施設や火葬場などの「迷惑施設」の建設では、近辺住民は NMBY (Not In My Backyard) として反対し、極論すれば何らかの形で補償で相殺するとの施策が一般的であった。それがゆえに、近辺以外の住民は施設の恩恵を受けることができる。しかし、太陽光発電施設、なかでも 10~50 kW の設置基準が甘いゆえの杜撰な施設は、自然や住環境、施設近接の住民に多々の物理的・精神的負担を負わせていながら、何らの補償もなく稼働している。なにゆえに施設近辺の住民や関連自治体は杜撰な設置等に反対ないしは規制しないのか。耕作放棄地や自宅の空地、荒廃する民有林などの所有者は自然や住環境への配慮以上に現金収入に直結する施設を優先している、としか考えにくい。過疎化が進む地方の市町村では、NIMBY ではなく OMBY (Own My Backyard) 的心境であろう。なお、より詳細に関しては江戸川大学紀要第三十号 (PDF) を参照いただければ幸甚である。

(2020 年 9 月 14 日 記)

## 特集

## 外部被ばくの放射線防護における線量概念の変遷と展望

## I. 外部被ばくの放射線防護の線量体系

原子力安全推進協会 岩井 敏ほか

放射線防護に使用される線量概念には放射線健康リスクと関連する線量として防護量があり、線量限度は防護量に対して設定される。しかし、防護量は定義上測定することが不可能または困難な量であるため、外部被ばくモニタリング用の線量として実用量という線量概念が作られてきた。現在、新しい実用量についてICRUとICRPが共同で検討してきた結果が近く刊行される予定である。一方、ICRPでは防護量の改定について検討中である。本稿では現在放射線防護に用いられている防護量、実用量、基本物理量の定義を解説する。

**KEYWORDS:** *protection quantities, operational quantities, external exposure, basic physical quantities, the ICRU sphere, expanded field, expanded and aligned field*

## I. 放射線の健康影響

放射線の有害な健康影響は、その発症の形態から、以下の二つに分類される。一つは確定的影響(または組織反応)であり、もう一つは確率的影响である。確定的影響は、あるしきい線量を超えた場合にのみ発症する。例えば生殖腺が被ばくしたときに生じる不妊、赤色骨髄等で生じる造血機能低下、皮膚の赤班・脱毛、眼の水晶体の白内障などがある。もっとも低い線量で発症する確定的影響としては精巣の一時不妊がある。これは100 mGyの急性被ばくをした場合、1%の確率で発症する。確定的影響はしきい線量を超える被ばくを受けた場合に発症するが、放射線防護上、確率的影响には発症のしきい値がないと仮定されており、発症と被ばく線量の関係を示すしきい値無し直線モデル(Linear Non-threshold Model: LNTモデル)が採用されている。確率的影响には固形がん、白血病、遺伝的影響が含まれる。

## II. 使用される分野により異なる線量概念

放射線被ばくの指標として用いられる線量概念は、目的により異なっている。例えば放射線治療や被ばく事故で受ける大きな線量では、放射線防護に使用する単位がシーベルト(Sv)で表される実効線量等は使用しない。それは対象とする人体の健康影響(または生物学的な影響)が異なるためである。放射線治療や大線量被ばくでは組織の細胞の一部の壊死(確定的影響(組織反応))を対象とする高い線量に適合した線量概念を使うのに対し

て、放射線防護では固形がん・白血病など確率的影响の発症抑制を目的とした低い線量での健康影響に関連する線量概念を使用する。

## III. 放射線防護のための線量体系

放射線防護に用いる線量概念として二種類の量が定義されている。一つは国際放射線防護委員会(International Commission on Radiological Protection: ICRP)が定義する防護量であり、もう一つは国際放射線単位測定委員会(International Commission on Radiation Units and Measurements: ICRU)が定義する実用量である。防護量と実用量は図1に示すように放射線の基本物理量であるフルエンス<sup>i</sup>、自由空気中の空気カーマ<sup>ii</sup>、そして組織吸収線量<sup>iii</sup>と関係付けられている。

## IV. 防護量

防護量は放射線健康リスクに関する被ばくの程度を定量化する放射線防護上の線量概念であり、実効線量、臓器・組織等価線量、臓器・組織吸収線量のことである。放射線防護上の線量限度は防護量に対して設定するものである。この点から考えると防護量は放射線防護上もつ

<sup>i</sup> ある球体に4 $\pi$ 方向から入射する全ての粒子数を球体の大円(最大の断面積となる円)の面積で割った商であり、単位はm<sup>-2</sup>である。

<sup>ii</sup> 光子や中性子のような非荷電電離放射線が空気内で反応を起こして生じる二次荷電粒子の初期運動エネルギーの和を、空気質量で割った量として定義される。放射線防護上は空気衝突カーマ(二次荷電粒子による衝突損失のみのカーマ)を用いている<sup>1)</sup>。自由空気とは散乱体の影響を受けない空気のことであり、カーマの単位はSI単位系ではJ/kgであるが通常Gyを用いる。

*The Evolution of Dose Concept on Radiological Protection for External Exposure*: Satoshi Iwai, Kenji Ishida, Shunji Takagi, Takafumi Igari, Kazuyuki Haraguchi, Tomo Muranoi.

(2020年7月29日受理)



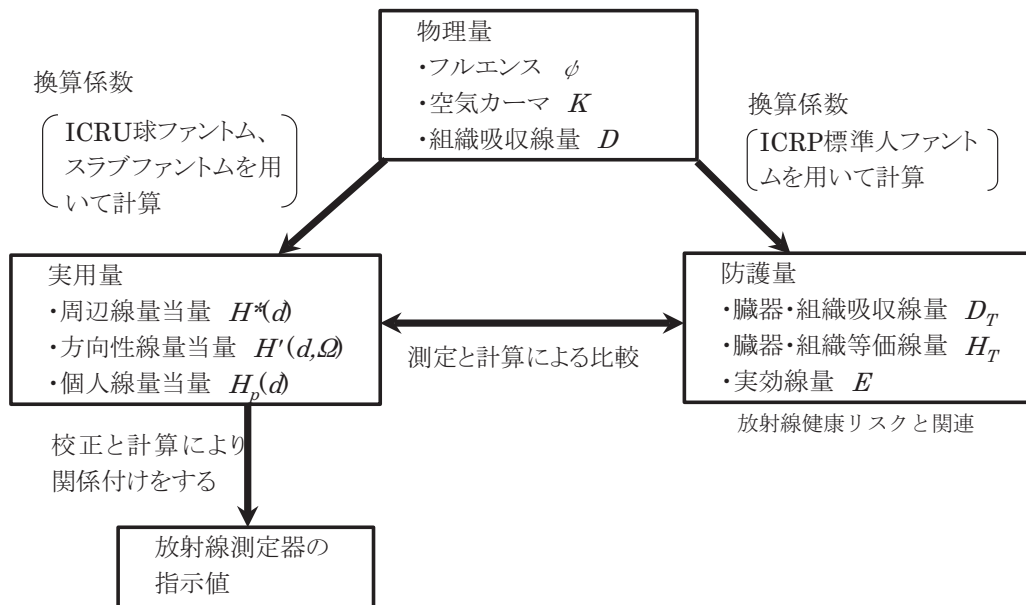


図1 放射線防護の線量体系  
(参考資料1のFig.1を参考にして作成)

とも基本的な量である。防護量の詳細とその歴史的変遷については別稿(連載2)に記載する。防護量は個々人の体格に合わせた値ではなく、ICRPの標準人<sup>2)iv</sup>ファントムに対する線量である。

## V. 実用量

### 1. 実用量導入の必要性

放射線防護上の外部放射線の測定(モニタリング)を実施する場合、サーバイメータや個人線量計などの測定器で検出できる量は入射する放射線で測定器の検出部に発生した電荷量や発光量であり、これらの検出量から放射線の基本物理量であるフルエンス、自由空気中の空気カーマ、または組織吸収線量が導出される。時間的にも空間的にも変化する照射条件と入射する放射線に係る詳細な情報があれば、得られた基本物理量からシミュレーション計算を用いて防護量を求めることは原理的には可能であるが、照射条件の詳細情報の入手は現実的ではない。そのためモニタリングに用いる測定器の指示値として防護量を使用することは非常に困難である。モニタリ

ングに用いる測定器は作業等者の放射線防護に使用されるため、作業等者が受ける被ばくによる防護量を常に下回らない近似値を示す必要がある。そしてその値は使用する測定器で検出できる量から導かれる基本物理量に一次的に対応している必要がある。そのために定義された線量概念が実用量である。放射線防護のために使用する測定器として、作業場の線量(率)評価のため空間線量(率)を測定するサーバイメータが使用され、個人線量評価のため体表面に装着した個人線量計が通常用いられる。これらの測定器の指示値は実用量を示すように値付けられている。

### 2. 実用量の定義

実用量の概念はICRUによって定義され、いくつかの変遷を経てICRU Report 51<sup>3)</sup>に示される定義となり、我国の現行法令に反映されている。初期の実用量の概念は防護量を下回らない値となるように定義されているだけであったが、現在使用されている実用量は放射線と測定器の特性を考慮して実際のモニタリングに対応した量として定義されている。実用量の歴史的変遷と詳細については別稿(連載3)に記載する。

本稿では現在使用されている実用量について解説する。ICRU Report 51では、場のモニタリングの実用量としては「周辺線量当量(ambient dose equivalent)」と「方向性線量当量(directional dose equivalent)」が定義され、個人モニタリングの実用量としては「個人線量当量(individual dose equivalent)」が定義された。

放射線はβ線や低エネルギーX線などの弱透過性放射線<sup>v</sup>とγ線や中性子などの強透過性放射線に分類される。放射線防護の観点から一般的に弱透過性放射線に対

<sup>iii</sup> 電離放射線によって組織に付与される平均エネルギーを組織の質量で割った商であり、単位はJ/kgであるが、通常はGyを用いる。測定器の校正に使用する基準移行のための物理量として、β線の場合は7mg/cm<sup>2</sup>の組織吸収線量を用いられ、光子の場合は空気カーマ、中性子の場合はフルエンスが用いられる。

<sup>iv</sup> 放射線防護のためにICRPが開発した「標準人ファントム」とは身長176cm、体重73kgの標準男性と、163cm、60kgの標準女性の模型に、ほぼ同じ体格の人の各臓器のCT画像を配置したものであり、両者の臓器・組織の受ける線量を平均化した線量を防護量としている。

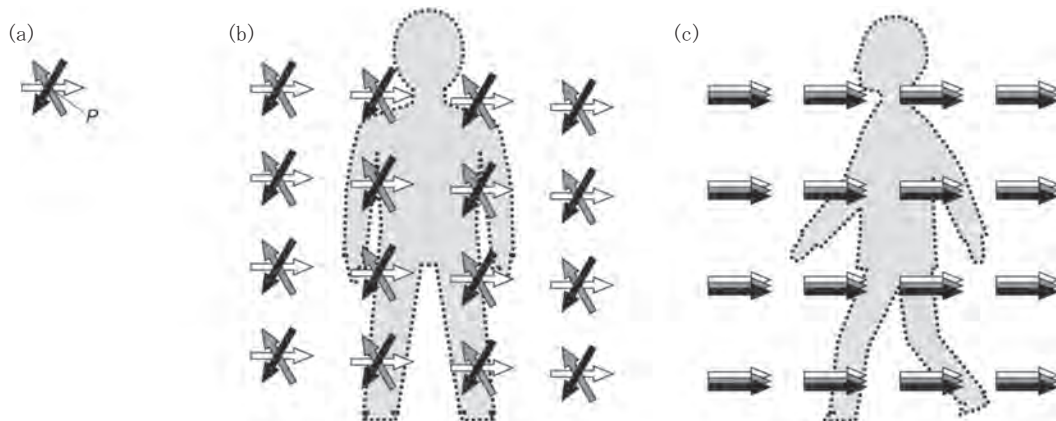


図2 拡張場と拡張・整列場  
(a)基準点Pの放射線場, (b)拡張場, (c)拡張・整列場

しては眼の水晶体と皮膚の等価線量が重要となり、強透過性放射線に対しては実効線量が重要となる。

#### (1) ICRU 球と拡張場、整列場の概念

実用量は人体を模擬したファントム中の1点の線量当量<sup>vi</sup>であり、基本的には防護量を下回らない近似値としてすべての種類の放射線に対して設定されている。実用量を定義するために、人体の組織等価物質から成る直径30 cmの球ファントムがICRUで考案された。この球ファントムはICRU球と呼ばれており、密度は1 g/cm<sup>3</sup>で、元素質量構成は酸素76.2%，炭素11.1%，水素10.1%，窒素2.6%である。密度ならびに元素構成は放射線防護を考慮して人体の軟組織を模擬したものであり、人体の微量元素は含まれない。ICRU球は入射放射線の後方散乱と減衰の観点から、人体を適切に模擬したファントムと考えられている。

場のモニタリングのために、ICRUは放射線場の「拡張(expanded)」と「整列(aligned)」という概念を導入した。「拡張場」とは、放射線のフルエンスとその入射角度分布、エネルギー分布が、例えば人体全体またはファントム全体などの着目する全領域にわたって、基準となる点と同じ値を持つ仮想的な場である。「拡張・整列場」とはフルエンスとエネルギー分布は拡張場と同じであるが、フルエンスの入射角度は単一方向に整列しているという条件が付いた仮想的な場である。拡張場と拡張・整列場

のイメージ図を図2に示す。

拡張・整列場は、無指向性(立体角4 $\pi$ 方向に同じ応答を持つ特性)の測定器を用いて作業環境の場の1点の線量を測定して、作業者の被ばく線量の予測を想定して考案された仮想的な放射線場と考えられる。すなわち無指向性の測定器の示す値は、すべての放射線が一方から入射する(整列化)と仮定した場合と同じ値を示す。そしてこの整列化された放射線場が作業者の全身を包む空間に均一に広がっている放射線場(拡張場)であると仮定することにより、放射線場で用いる無指向性の測定器で空間の1点を測定した値から作業者の被ばく線量予測値を評価することが可能となる。実際の現場で使用する通常のサーベイメータは検出部の他に電子回路部や電源部等があるため、例えば $\beta$ 線や低エネルギーX線などの弱透過性放射線に対しては電子回路部等による減衰、遮蔽効果が大きい無指向性とは言えない。したがって弱透過性放射線に対して整列場の概念は適用できず、拡張場の概念のみが適用される。なお、強透過性放射線に対しては近似的に無指向性で見なすことができるため、拡張・整列場の概念を適用できる。

#### (2) 周辺線量当量

「放射線場のある1点における周辺線量当量 $H^*(d)$ は、それに対応する拡張・整列場に置かれたICRU球中の整列場方向に対向する半径上の球表面から深さ $d$ の点の線量当量である。」とICRU Report 51では定義されている(図3(a)参照)。測定器を $H^*(d)$ に値付けしておけば、防護量を下回らない場のモニタリングが可能となる。強透過性放射線に対しては $d=10$  mmでさまざまな照射条件の実効線量を下回らない値となり(図4参照)、弱透過性放射線に対しては、皮膚では $d=0.07$  mm、眼の水晶体では $d=3$  mmでそれぞれ皮膚と眼の水晶体の等価線量を下回らない値を示すため、それらの深さが推奨されている。周辺線量当量 $H^*(d)$ の測定には拡張・整列場の概念があるため無指向性でかつ $H^*(d)$ のエネルギー応

<sup>v</sup> 平行ビームで皮膚に垂直に入射する放射線によって体表面から深さ0.07 mm皮膚の有感層の線量当量が実効線量の10倍より小さい放射線を強透過性放射線と見なし、それ以外を弱透過性放射線としている<sup>4)</sup>。中性子は強透過性放射線に分類され、2 MeV未満の $\beta$ 線、15 keV未満の光子は弱透過性放射線に分類される<sup>5)</sup>。

<sup>vi</sup> 組織中のある1点における吸収線量と線質係数の積である。線質係数は放射線の種類やエネルギーに確率的影響の違いを反映する放射線防護上定義された係数であり、実用量に使用する。防護量ではその代わりに放射線加重係数が使用される。



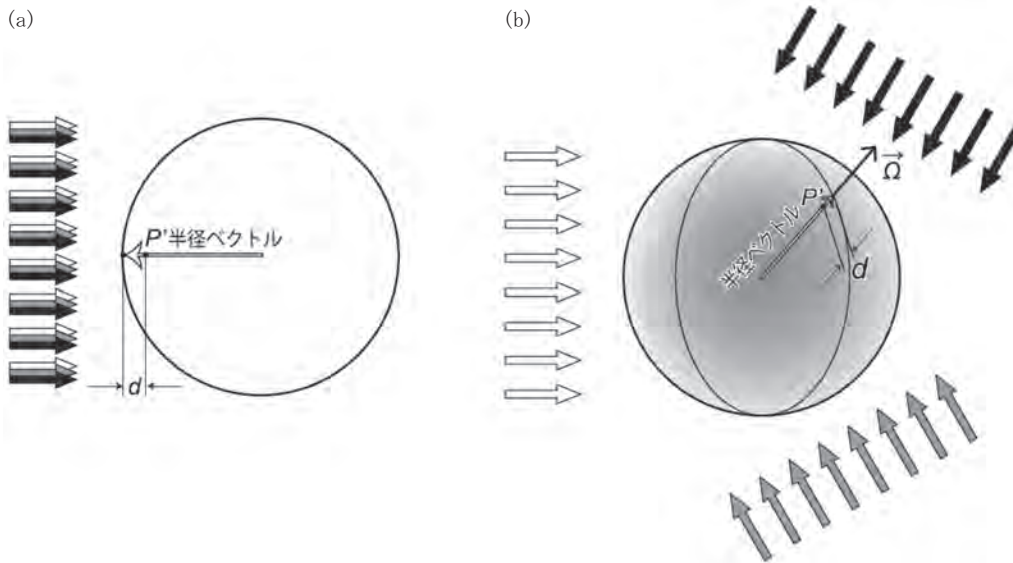


図3 実用量の定義

(a) 周辺線量当量, (b) 方向性線量当量

それぞれ, ICRU 球中の表面から深さ  $d$  の点  $P'$  の位置の線量当量である。

(参考資料 4 の Fig.4.2 を参考にして作成)

答を持つ放射線測定器が必要である。実際には, 測定する放射線場は測定器の検出部より大きい必要がある。

### (3) 方向性線量当量

「放射線場のある 1 点における方向性線量当量  $H'(d, \Omega)$  は, それに対応する拡張場に置かれた ICRU 球中のある指定された方向  $\Omega$  の半径上の球表面から深さ  $d$  の点の線量当量である。」と ICRU Report 51 では定義されている(図 3(b) 参照)。従来, 方向性線量当量は弱透過性放射線場で携帯用に使用される測定器が持つ方向特性と, その放射線場での作業者の被ばく線量との関連性を考慮して作られた実用量である。低エネルギー X 線や  $\beta$  線に対しては回路部や電源部の遮蔽・減衰効果が大きいので, すべての方向から入射する放射線を同じ感度で測定できる無指向性の測定器を製作することは現実的には困難であり, 現場で放射線管理に使用する低エネルギー X 線や  $\beta$  線の測定器は通常, 無指向性でなく明らかな方向依存性がある。弱透過放射線の被ばくが問題となる人体組織は皮膚と眼の水晶体であるため, これらの組織に後方から入射する放射線被ばくは人体の遮蔽効果のため無視することができる。したがって既存の測定器で対応可能である。ただし, 実際の作業場では全立体角方向で最大線量(率)となる方向の値を被ばく線量予測に使用することが放射線防護上望ましい。

弱透過性放射線に対しては, 皮膚では  $d=0.07 \text{ mm}$ , 眼の水晶体では  $d=3 \text{ mm}$  でそれぞれ皮膚と眼の水晶体の等価線量を下回らない値<sup>vii</sup>を示し, それらの深さが推奨されている。後に方向性線量当量は強透過性放射線に対しても適用されるようになり,  $d=10 \text{ mm}$  が推奨されている。

測定器の方向依存性を調べる場合など, 単一方向からの面平行ビームを用いる。このような場合, 放射線の入射方向に向かう ICRU 球の半径とある特定方向が成す角度  $\alpha$  と基準方向半径上の深さ  $d$  における方向性線量当量を  $H'(d, \alpha)$  と記述され, 測定器の方向依存性の妥当性評価の基準として用いられる。 $\alpha=0$  のとき  $H'(d, 0)$  または  $H'(d)$  と記載されるが, これは  $H^*(d)$  に等しい。

### (4) 個人線量当量

個人モニタリングに使用される個人線量当量  $H_p(d)$  は放射線場での作業者の被ばく線量とその作業者の人体表面に装着された個人線量計との関係を考慮して作られた実用量である。ICRU Report 51 には「身体上の特定された点の深さ  $d$  の点における軟組織中の線量当量である。」と定義されている。この定義から分かるように, 放射線場にいる個人の人体組織中の線量当量であるため, 放射線場の実用量を定義するために用いる ICRU 球を導入して線量当量を定義する必要はない。したがって, 個人線量当量の定義には, 1 点の放射線場の物理量を, 考慮する体積全体に拡張する拡張場の概念は不要となる。ただし, 1 個の個人線量計で被ばく管理をする場合, 人体が存在しないと仮定した空間全体の放射線場のフルエンス等の物理量は均一であることが必要であり, 均一でない場合は不均等被ばくとして複数の個人線量計の装着が必要となる。

<sup>vii</sup> 皮膚については ICRP Publ.74 の表 A.14 と表 A.23, および図 72, 眼の水晶体については ICRP Publ.116<sup>(6)</sup> の (243) ~ (246) 項参照。ただし, 高エネルギー放射線では実用量が防護量を下回る傾向にあるため, 実用量の定義の改訂が実施された(別稿(Ⅲ. 実用量の変遷と今後の変更)参照)。

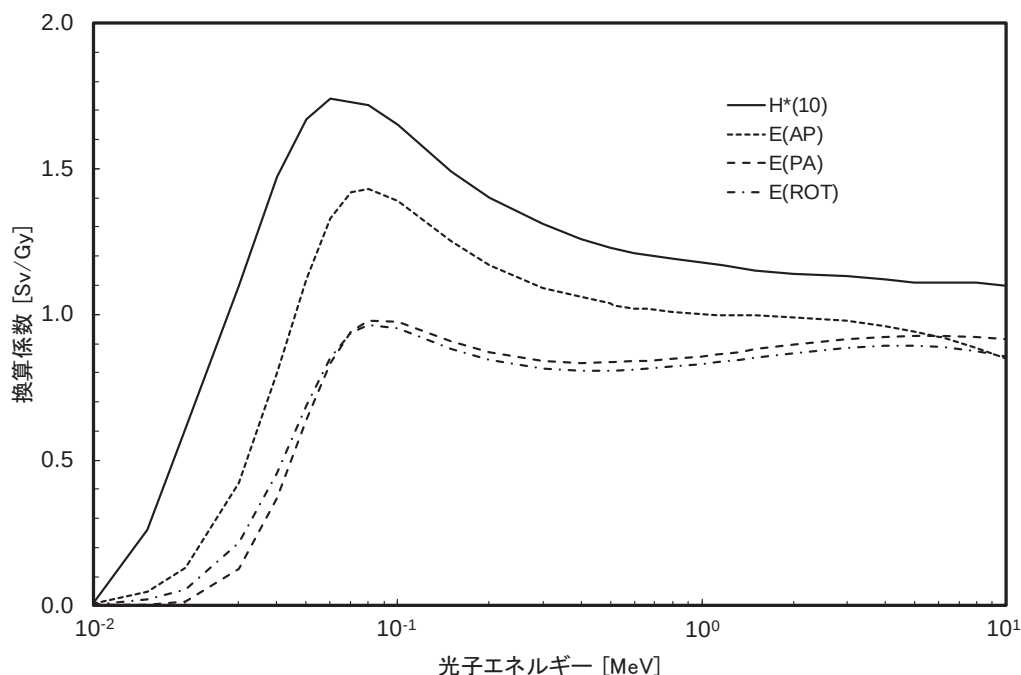


図4 周辺線量当量  $H^*(10)^{1)}$  と各照射条件の実効線量  $E$  (照射条件: AP(前方), PA(後方), ROT(回転))<sup>5)</sup>

個人線量当量として強透過性放射線に対しては  $d=10\text{ mm}$  が、弱透過性放射線に対しては、皮膚では  $d=0.07\text{ mm}$ 、眼の水晶体では  $d=3\text{ mm}$  における線量当量が推奨されている。個人線量当量は、周辺線量当量や方向性線量当量のように元素組成と大きさが定義されたファントム内で定義されているわけではない。個人線量当量は定義から分かるように各個人の間で、また同じ個人でも「身体上の特定された点」の位置で変わりうる値を示すため一つの値として決めることができない。しかし、個人の線量当量の計算または個人線量計の校正のためには統一された基準となる線量当量値が必要となる。そのためには標準となる人体ファントムが必要となる。個人線量計の校正に用いる物理ファントムとしてICRU球は元素組成と形状の観点から製造困難であるため、ICRUはReport 47で、 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 15\text{ cm}$  のPMMA(ポリメタクリル酸メチル樹脂)製スラブファントムを奨励し、校正に用いる線量当量としてこれと同じ幾何学的形状のICRU組織等価物質中の深さ  $d$  の線量当量を使用している。この形状のスラブファントムはICRU球に体積が近く、光子と中性子の後方散乱特性が人体に近いために、ICRUで奨励された。国際標準化機構(International Organization for Standardization; ISO)では同形状の水ファントム(ポリメタクリル酸メチル樹脂容器入り)を定義しており<sup>7)</sup>、我国のJIS規格<sup>8)</sup>はISO規格に準拠している。

## VI. 法令で使用される線量概念

上述のように、ICRUでは実用量は対応する防護量を

下回らない近似値になるように考案されている。しかし、現行法令の基になっている「外部被ばくおよび内部被ばくの評価法に係る技術的指針、平成11年4月、放射線審議会基本部会」によれば、法令上の防護量は実用量と同一の値と規定され、我国の現行法令上は告示等<sup>viii)</sup>に反映されている。したがって、放射線管理の実務に測定器でモニタリングされた実用量の値をそのまま線量限度と比較することが可能となる。

周辺線量当量  $H^*(10)$  と個人線量当量である  $H_p(10)$  は、我国の法令では1センチメートル線量当量という同じ用語が使用されている。しかし、前者は放射線場のモニタリング用の1センチメートル線量当量、後者は個人モニタリング用の1センチメートル線量当量として明確に区別されており、数値的にも異なるものであることに注意する必要がある。

## － 参考資料 －

- 1) ICRP Publication 74, Ann. ICRP 26(3-4) (1996).
- 2) ICRP Publication 89, Ann. ICRP 32(3-4) (2002).
- 3) ICRU Report 51 (1993).
- 4) ICRU Report 39 (1985).
- 5) PTB Report Dos-23e (1995).
- 6) ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5) (2002).
- 7) ISO 4037-3:1999 (1999).
- 8) JIS Z 4331:2005 (2005).

<sup>viii)</sup> 例えば、放射線を放出する同位元素の数量等を定める件(平成12年10月23日 科学技術庁告示第5号、最終修正 平成25年3月29日 文部科学省告示第58号)

# 外部被ばくの放射線防護における線量概念の変遷と展望

## Ⅱ. 防護量の変遷と今後の見通し

放射線防護のための線量限度として勧告される基本的な線量概念は、初期には照射線量のような物理的な量が使用された。しかし、対象と見なされる放射線健康影響の変遷に伴って防護量の線量概念も変遷し、進化してきた。本稿では防護量の線量概念の成立、変遷について説明し、現在使用されている防護量と今後の防護量の改定の見通しについて解説する。

**KEYWORDS:** erythema dose, exposure dose, absorbed dose, RBE dose, dose equivalent, effective dose equivalent, equivalent dose, effective dose, radiation weighting factor, tissue weighting factor

### I. 線量当量以前の防護量の概念

#### 1. 照射線量

1895年のW. C. RoentgenによるX線の発見以来、X線は骨折や体内異物の診断などの医療領域を中心に広く利用され始めた。しかし、X線の利用に伴ってX線装置取扱者の皮膚障害が頻発した。当初は皮膚に紅斑が発症する線量(erythema dose)が防護を論ずる目安と考えられていた。米国のMutshellerはerythema doseの1/100を安全な線量とした。この線量は耐容線量(tolerance dose)と名付けられ、X線装置取扱者の線量制限値として提案され、米国レントゲン線学会誌に1925年1月に掲載された<sup>1)</sup>。耐容線量は同年、ロンドンで開催された第1回国際放射線会議(International Congress of Radiology)で公式に提案された<sup>2)</sup>。しかし、当時は放射線の量を表すのに化学作用または物理作用に基づく複数の放射線強度指標が使用されているのが現状であり、国際的に統一された線量概念は確立していなかった。この時点では耐容線量は鉛遮蔽体の厚さで示された。

放射線防護のための定量的かつ国際的に統一された線量単位は1928年にストックホルムで開催された第2回国際放射線会議で、ICRUの前身となる委員会(International X-ray Unit Committee)で決定された。この単位の名称はレントゲンであり記号はrで表記された<sup>i)</sup>。定義では、「電離箱の壁の影響がない状態で、二次電子による電離がすべて取り入れられ、0℃、76 cmHgの空気1 ccあたり、飽和電流のもとで1 esu<sup>ii)</sup>の電荷を生じるX線の量」を1 レントゲンとした<sup>3)</sup>。レントゲンは1937年の国際放射線学会(International Society of Radiology)の第5回大会で、ラジウムのγ線にも拡大され、「1 レントゲンは0.001293 gの空気に放出された粒子線(二次電子の意味)によって作られたイオンが空気中で正または負1 esuの電荷を生成するようなX線または

γ線の量」として測定器に依存しない量として再定義された<sup>4)</sup>。

1930年代になるとエネルギーの高いX線の利用により、白血病等の原因となる骨髄障害も懸念されるようになり始め、皮膚だけでなく、体内の臓器・組織の線量を考慮する必要性が出てきた。第二次大戦終了後、加速器や原子炉等の利用に伴い、X線やγ線以外の放射線である中性子やβ線等の被ばくを考慮する必要が出始め、それまで放射線の唯一の線量単位であったレントゲンだけでは対応できなくなってきた。1948年にParkerは、X線、γ線以外にも使用できるrep(roentgen equivalent physical)という単位を定義した<sup>5)</sup>。その定義は「組織に83 erg/gのエネルギーを吸収させる放射線の単位<sup>iii)</sup>」としている。

1948年にはParkerによって、後の「線量当量」に相当する概念を表す単位rem(roentgen equivalent man)が規定され、混合放射線に対する耐容線量が表示された。1 remは1 レントゲンのX線、γ線に暴露されたヒト(または哺乳類)の線量に等価な効果を持つ電離放射線による被ばく線量の単位と定義された。remは放射線の物理的特性だけでなく、被ばくを受けるヒトや哺乳類の生物学的効果を考える最初の単位であった<sup>5)</sup>。

ただし、rep, remはすでに1945年の文献MDDC-1100<sup>6)</sup>にも見受けられるため、1948年のParkerの論文以前から使用されていたようである。repという単位は次第に使用されなくなっていったが、この線量の考え方は、後の物質の単位質量あたりのエネルギー吸収量を線量として定義する「吸収線量」の概念に繋がり、remは放射線の種類等の違いによる健康影響を考慮に含めた吸収線量である「線量当量」の概念に繋がっていった。しかし、この時点ではrepもremもレントゲンに基づく単位に過ぎなかった。しかし、後に「吸収線量」という線量概念が正式に定義されたため、1956年にレントゲンは照

<sup>i)</sup> レントゲンの単位記号は1962年にrからRに変更され、1980年にSI単位系の導入に伴って、C/kgとなった。

<sup>ii)</sup> 1 esu=3.335×10<sup>-10</sup> C(クーロン)

<sup>iii)</sup> 1 レントゲンのX線、γ線が水分を含む人体組織1 gに吸収されるエネルギーは93 ergであるため、後に1 repは93 erg/gに改訂された。



射線量(exposure dose)とされ、さらに1962年に刊行されたICRU Report 10(a)<sup>7)</sup>では、レントゲンはX線、 $\gamma$ 線による放射線場の強度を表すことに特化した指標であるとされ、被ばくの防護量としての線量概念から外された。

## 2. 吸収線量

利用する放射線種類とエネルギーが増大したため、体表面の皮膚の被ばくだけでなく、体内の臓器・組織(とくに赤色骨髄、生殖線など)にも関心が集まった。そのため、空気中の照射線量だけでは不十分であり、体内の臓器・組織の線量を表す線量概念が必要となった。1953年にコペンハーゲンで国際放射線単位・測定委員会(International Commission on Radiological Unit and Measurement: ICRU)の会議が開催され<sup>8)</sup>、放射線の単位に関する勧告が出された。この中で「吸収線量」(absorbed dose)の概念が「吸収線量とは放射線で照射された物質の対象となる場所(place)の単位質量あたりに付与されるエネルギーであり、単位はradで表記され、1 rad=100 erg/g」と定義された。この会議では「線量」(dose)という用語の定義に関する合意は成立しなかったが、吸収線量のみが詳細な定義を持つ唯一の線量(dose)概念として認められた。すなわち、この時点で、吸収線量のように臓器・組織に付与される放射線のエネルギーで表現される量をいわゆる防護量とする一方で、レントゲンは場の放射線強度を表す指標と位置付けられ、防護量の概念から区別されたと考えられる。

remはこの会議では公式には単位として取り上げられなかった。しかし、国際放射線防護委員会(International Commission on Radiological Protection: ICRP)の1954年勧告<sup>9)</sup>では、X線、 $\gamma$ 線以外の被ばくの線量の加算を考慮して、remという単位を用いた。ただし、この時点ではremはあくまでも単位であり、線量は $R.B.E^{iv}$ が掛かった吸収線量とされていた。

## II. 線量当量の概念の成立とその拡張

前章にも示したように混合被ばくの場合、種類の異なる放射線影響を考慮して加算できる線量概念はすでに存在し、「RBE線量」等の用語で容認されていた。しかし、ICRUではこの用語は公式には線量概念として認めてい

<sup>iv</sup>  $R.B.E.$ は生物学的効果比(relative biological effectiveness: RBE)を表す記号である。生物学的効果比とは、生物学的に同じ効果を与える異なる種類の放射線の単位組織あたりの吸収エネルギーの逆比の値を持つ係数である。生物の種類や対象となる影響により異なるが、当時は放射線生物学だけでなく、放射線防護にも使用されていた。この係数は放射線の種類の違いによる健康影響を表現する線質係数や放射線加重係数に繋がる放射線防護上重要な役割を果たす係数となった。

なかった。

生物学的効果比(relative biological effectiveness: RBE)の概念は、1931年にFilliaとHenshawが放射線生物学の分野で最初に使用した<sup>10)</sup>。1945年にCantrilとParkerが放射線防護の分野で、異なる種類の放射線からの害(harm)の程度を比較する生物学的相対係数(relative biological efficiency)を示した<sup>6)</sup>。ICRPは1950年の勧告で、基準放射線(0.5 mm厚白金で覆ったラジウムからの $\gamma$ 線)と同等な生物学的効果を起こす吸収線量の逆比として生物学的相対係数を定義し、1954年勧告で生物学的効果比という用語に変更した。RBEは放射線生物学と放射線防護では使用目的がやや異なっていた。放射線生物学では同じ生物影響を発生させる線質(放射線の種類やエネルギー)の異なる2種類の放射線量の比として扱われていた。放射線防護の分野では、RBEは異なる放射線の吸収線量に掛ける係数として扱われ、放射線防護上関心の対象となる範囲で、線質の異なる線量の加算と比較に使用されていた。

1959年にICRUはICRU Report 9でRBEは放射線生物学のみに使用する用語と限定し<sup>11)</sup>、1962年にICRU Report 10(a)では、種類の異なる放射線影響を加味するため吸収線量に掛ける係数に線質係数(quality factor)という名称と $QF$ という記号を勧告した。 $QF$ は線エネルギー付与(LET)に依存する放射線防護に使用する係数として定義され、放射線生物学的な測定値に依存するRBEとの完全な分離が行われた。その他、ICRUは分布係数(distribution factor) $DF$ を勧告した。これは体内に不均等に沈着分布した放射性物質の生物学的効果を補正する係数である。そして吸収線量(dose equivalent)を $D$ と表記し、線量当量(dose equivalent)を以下の式(1)のように定義した。

$$DE = D \times QF \times DF \quad (1)$$

線量当量の用語と概念は、国際放射線防護委員会の勧告でも1962年のICRP Publ.6<sup>12)</sup>から取り入れられた。この時点では、線量当量を定義する体積は具体的に記述されなかった。しかし、1971年のICRU Report 19<sup>13)</sup>では、線量当量の基本的要素である吸収線量を、「体積要素に放射線で沈着するエネルギーの平均値を、その体積要素の質量で割った商」と定義しており、この体積要素の質量は限りなくゼロに近づくとしている。これに対応して線量当量は1点で定義されている。このレポートでは線量当量は $H$ という記号で表記され、式(2)のように、吸収線量 $D$ 、線質係数 $Q$ 、およびその他の修正係数 $N$ の積で記述された。

$$H = D \times Q \times N \quad (2)$$

1977年に刊行されたICRP Publ.26<sup>14)</sup>の(17)項で、「放射線防護において、被ばくの重要な影響、とくに晩発性

の確率的影響によりよく結びつく量」として、式(2)で定義した線量当量を記載した<sup>v</sup>。そしてICRP Publ.26では1点で定義された線量当量を臓器・組織全体に拡張して、臓器・組織の平均線量当量とみなすという考えを示した<sup>vi</sup>。放射線防護の実務上、臓器・組織の1点でなく、臓器・組織の全体を論じる必要があるため、このような概念の拡張が必要になった。このような拡張はがん発症に関するLNTモデル、すなわち線量当量と発がんの関係には直線比例性があると仮定されているため、従来は点で定義されている線量当量を臓器・組織の平均の線量当量に拡張しても、発がんリスク評価に問題は生じないと考えられ、この時点で、線量当量の概念は臓器・組織のがん等の確率的影響の防護量として位置付けられた。このように確率的影響の防護量が確立する背景には、皮膚や赤色骨髄の確定的影響の防止に関心が置かれていた時代とは異なり、作業者の被ばく線量が管理されて低く保たれるようになってきたため、がんの抑制が放射線防護の最大に関心事となって来たという事実があった。

### Ⅲ. 実効線量当量の概念の導入

1977年にICRPは被ばくした個人の確率的影響に関する革新的な防護量の概念をICRP Publ.26で示した。これまでは個別の臓器、組織に対する線量制限(職業人は最大許容線量、公衆は線量限度)が設けられていたが、個人の被ばくによる確率的影響に関する線量制限をこの新しい概念の防護量に対してのみに設定した。この概念は1978年のストックホルム声明<sup>15)</sup>で実効線量当量(effective dose equivalent)と名付けられ、 $H_E$ と表記された。実効線量当量は以下の式(3)で定義された。実効線量当量は、不均等被ばくをそれと等価な全身均等被ばくで表すことが意図であり、内部被ばく線量評価のために考えられた概念であったが、外部被ばく線量評価にも適用できるとICRP Publ.74<sup>16)</sup>の(27)項に記載された。

$$H_E = \sum_T (w_T \times H_T) \quad (3)$$

ここで、 $H_T$ は臓器、組織の平均線量当量、 $w_T$ は荷重係数(weighting factor、後の組織加重係数 radiation weighting factor)であり、ICRP Publ.26の(104)項では、

<sup>v</sup> ICRP Publ.26の(18)項で、 $N$ はICRPが規定するその他のすべての修正係数であるとされており、吸収線量率や分割照射による効果が例示されている。しかし、それらの具体的な数値は示されておらず、修正係数 $N=1$ が使用されていた。なお、ICRP Publ.60以降の臓器・組織の防護量である等価線量の定義に修正係数 $N$ の項は含まれていない。

<sup>vi</sup> ICRP Publ.26の(32)項で、「確率的影響については、特定の組織または臓器の感受性が一律なすべての細胞にわたって、平均線量を考えることは正当である。」また脚注では、「とくに明記しない限り、線量当量という用語はある臓器全体または組織全体にわたる平均線量をさす。」と記載されている。

「全身が均等に照射されたときに、臓器・組織( $T$ )の確率的影響のリスク<sup>vii</sup>のリスク全体に対する割合」と記載されている。また、(106)項では「性差、年齢によって、被ばくした個人の被ばくに伴うリスクは変動するが、係数の値はどの作業者に対しても適切なものとして勧告される。」と記載されている。したがって荷重係数(後の組織加重係数)は、作業者(通常18~65歳)の各臓器・組織の放射性感受性を考慮した係数である。この係数は原爆被ばく者のがん死亡率等の疫学データを中心に作成された。

### Ⅳ. 等価線量、実効線量への変遷

1990年にICRPはICRP Publ.60を刊行し、防護量とそれに関わる係数を変更した。線質係数は放射線加重係数(radiation weighting factor)となり、荷重係数は組織加重係数(tissue weighting factor)となった。そして臓器・組織の平均線量当量は等価線量(equivalent dose)となり、実効線量当量は実効線量(effective dose)となった。これらの変更について以下に解説する。

#### 1. 放射線加重係数と線質係数

ICRP Publ.60では防護量に対して線質係数ではなく、放射線加重係数 $w_R$ を導入した。放射線加重係数は、外部被ばく、内部被ばくを問わず、低線量の確率的影響に関して線質の違いによる効果の違いを表すため、臓器・組織の平均吸収線量に掛けて等価線量の計算に用いる係数である。これは線質係数 $Q$ とほぼ同じ役割の概念であるが、水中の線エネルギー付与(linear energy transfer: LET、記号は $L$ )の関数とは切り離された点で大きく異なっている。ここで注意が必要なことは、LETの関数である線質係数 $Q(L)$ <sup>viii</sup>は、防護量では使用されないが、実用量の計算には引き続き使用される係数となったことである。かつて、線質の違いによる効果を表す係数はRBEであったが、放射線生物学の係数と区別されて、ICRU Report 10(a)で放射線防護に関する係数は線質係数となった。そしてICRP Publ.60で防護量には放射線加重係数、実用量には引き続き線質係数が適用されるように分離された。ただし、放射線加重係数の値が指定されていない場合は、線質係数を用いて近似算定計算を行うこととなり、線質係数との関連性が設定されている。

ICRP Publ.60ではICRP Publ.26まで使用されてきた線質係数 $Q(L)$ の関数が改定された。この改定の基となる関数はICRU Report 40<sup>17)</sup>で提示された線質係数

<sup>vii</sup> 固形がん、白血病、遺伝的影響に関する放射線被ばくの健康リスクのことである。

<sup>viii</sup> 線質係数はLETの関数であることを示すため $Q(L)$ と表記されることがある。



$Q(y)$ <sup>ix</sup>の関数であった。これは Zaider らがまとめたヒトのリンパ球の二動原体染色体異常<sup>x</sup>の  $RBE_M^{xi}$ のデータに基づいて ICRU と ICRP の合同作業部会によって導出されたものであった<sup>18)</sup>。この  $Q(y)$ を基に Keller らは2種類の  $Q(L)$ 関数を考案し<sup>19)</sup>、Dlexler らはその1つを選択し、一部を修正した  $Q(L)$ を提案した<sup>20)</sup>。この  $Q(L)$ が ICRP Publ.60 に採用され、現在まで引き続いて使用されている。

ICRP Publ.60 では放射線加重係数  $w_R$  は、生物学的実験から得られた RBE を反映して、値が一義的(中性子の場合はエネルギーの関数)に決められたと考えられ、必ずしも線質係数  $Q(L)$ との整合性は十分にとれていなかった。ICRP Publ.60 の定義によれば外部被ばくの放射線加重係数は入射放射線のみによって一義的に定められていた。例えば、熱中性子が人体に入射した場合、多くが二次  $\gamma$  線になるため、内部の臓器・組織の被ばくは  $\gamma$  線からの被ばく影響を強く受けるが、線質係数  $Q(L)$ を用いた線量当量の計算では発生した  $\gamma$  線が作る電子の  $Q(L)$ を吸収線量に加重する。しかし、放射線加重係数を用いる場合、人体に入射する中性子の放射線加重係数を吸収線量にそのまま加重することとなる。そのため同じ熱中性子被ばくをしても、放射線加重係数を使うか線質係数を使うかによって、同じ臓器・組織の等価線量と平均線量当量の値は一致しなかった。そのため、ICRP の次の主勧告である Publ.103<sup>21)</sup>では  $Q(L)$ との整合性が取れるように放射線加重係数を改定した。

## 2. 組織加重係数

ICRP Publ.26 で初めて使用された荷重係数(weighting factor)は、ICRP Publ.60 では組織加重係数という名称に変更となった。これは ICRP Publ.60 で放射線加重係数が新たに定義されたためである。組織加重係数は、原爆被ばく者のがん死亡率、罹患率、寿命短縮等の疫学データの更新に伴って、ICRP Publ.60 で改定され、ICRP Publ.103 では再度、疫学データの更新によって改定された。ICRP Publ.60 から ICRP Publ.103 への改定は以下の2点が特徴的であった。一つはヒトへの放射線誘発遺伝性疾患は実証されていないことが原子放射線影響に関する国連科学委員会(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR)の2000年レポート<sup>22)</sup>で

<sup>ix</sup> 線エネルギー  $y$  は、細胞や細胞核レベルの微小体積に吸収された電離放射線エネルギーをその微小体積を横切る平均飛程長で割った計測量であり、統計的な分布を持つ量である。

<sup>x</sup> 二つの染色体が同時に切断され、動原体(細胞分裂の際に染色体に紡錘糸が接着する部分)を含む断片同士が融合したものの。体細胞分裂・減数分裂のほか、放射線の被ばくにより生じる染色体異常としても知られる。

<sup>xi</sup> 確率的影响に關係するエンドポイント(臨床的または生物学的に意味のある効果を反映し客観的評価が可能な項目)に対する RBE の最大値。

結論づけられたことの影響である。原爆被ばく者の1世代の子孫に関する情報からは直接的証拠は見られないとされたが、ヒトの遺伝的影響の自然発生率ならびにマウス動物実験による放射線誘発遺伝的影響データ等を用いた慎重な解釈の結果、遺伝的影響の重みをゼロとはしなかったが、大幅に低減された。そのことは生殖腺の組織加重係数を大きく下げた<sup>xii</sup>。そしてもう一つは原爆被ばく者の更新された疫学データから乳房のがんリスクが上昇したため、乳房の組織加重係数が上昇したことであった。

## 3. 等価線量と実効線量

等価線量  $H_T$  は臓器・組織  $T$  の放射線  $R$  による平均吸収線量  $D_{T,R}$  を放射線加重係数  $w_R$  で加重したものであり、式(4)で表される。

$$H_T = \sum_R (w_R \times D_{T,R}) \quad (4)$$

$w_R$  はがんや遺伝的疾患など確率的影响に關する係数であるが、眼の水晶体の白内障、皮膚障害などの確定的影響(組織反応)を反映した係数ではない。しかし、組織反応の RBE は確率的影响の放射線加重係数よりも小さい値であるため、確定的影響(組織反応)に対する眼の水晶体と皮膚の線量限度は、放射線加重係数を用いた等価線量が使用されている。

全身の臓器・組織の等価線量  $H_T$  を組織加重係数  $w_T$  で加重して合計したものが、実効線量(effective dose)  $E$  であり、式(5)で表される。

$$E = \sum_T (w_T \times H_T) \quad (5)$$

実効線量は、実効線量当量と同様に、被ばくした個人の確率的影响を表す防護量である。ICRP Publ.60 では式(5)の定義のみであったが、男女性別標準人ファントム<sup>24)</sup>が確立したため、ICRP Publ.103 では男女の等価線量の平均値を使用することが明記された。そして、実効線量は放射線防護のための放射線健康リスク関連の量であり、特定の個人の線量推定値を示すものではなく、あくまでも放射線防護計画の最適化に使用する量であると ICRP は主張している。

## V. 最新の防護量の考え方

ICRP は今後刊行される「放射線防護としての実用量

<sup>xii</sup> Muller によるショウジョウバエの X 線照射実験から得られた突然変異誘発率と照射した線量にはしきい値のない比例性があるという結果<sup>23)</sup>から、放射線被ばくによるヒトの遺伝的疾患の過剰発生は懸念されており、その後のさまざまな生物実験結果を反映して生殖腺の荷重係数(ICRP Publ.26 の組織加重係数)は高めに設定されていたのではないかと考えられる。



の使用(The Use of Effective Dose as a Radiological Protection Quantity)」のドラフト<sup>25)</sup>で防護量の今後に関して以下のことを記載している。

- ・等価線量は実効線量を計算する中間のステップに過ぎないと見なし、防護量としては必要でない。
- ・眼の水晶体、皮膚および手足の組織反応(確定的影響)に関する線量限度は等価線量(Sv)ではなく、吸収線量(Gy)で定めることが適切である。
- ・実効線量は発生しうるリスクを近似しうる指標として使用することができる。

このドラフトでは眼の水晶体、皮膚、ならびに手足のように確定的影響(組織反応)を制限する臓器・組織に対して吸収線量を適用することが適切であるとしている。ただし中性子などの高 LET 放射線に対しては適切な RBE を考慮した吸収線量が必要である。なお、これらの臓器・組織に対する等価線量の使用は、次の主勧告まで継続される。

このドラフトでは等価線量、実効線量の定義は従来と同様であるが、等価線量を独立した防護量の概念から外すことは、使用する防護量の混乱を避けるためである。例えば  $^{131}\text{I}$  を摂取した場合、Sv で表わされた防護量が実効線量か甲状腺の等価線量かによって値は 20 倍以上異なる<sup>26)</sup>。そのため、甲状腺の線量は吸収線量(Gy)を用い、必要に応じて、低 LET と高 LET 成分を分けて表示する方法を用いることが提示された。

実効線量はリスクに関連する量からリスクを近似しうる指標と表現が明確になった。この場合のリスクとは低線量、低線量率被ばくによる確率的影響のリスクである。ただし、実効線量は不確かさを考慮して使用するリスク解析の代わりになるものではないことも述べている。

#### － 参考資料 －

- 1) Mutscheller, A., American Journal of Roentgenology, 13, 65-77(1925).
- 2) Taylor, L. S., Health Physics 41, 227-232(1981).
- 3) Spieras, F. S., Radiation units and theory of ionization dosimetry, p.7 in "Radiation Dosimetry", Academic Press, New York(1956).
- 4) ICRU Report 5, Radiology, 25, 634-636(1937).
- 5) Parker, H. M., in advances in Biological and Medical Physics, 1, 243, Academic Press(1948).
- 6) Cantril, S. T., Parker, H. M., MDDC-1100(1945).
- 7) ICRU Report 10(a), NBS handbook 84(1962).
- 8) ICRU Report 7, British Journal of Radiology, 27, 243-245(1954).
- 9) ICRP, British Journal of Radiology, Supplement No.6(1955).
- 10) Failla, G., Henshaw, P., Radiology, 17, 1-43(1931).
- 11) ICRU Report 9, NBS handbook 78(1961).
- 12) ICRP Publication 6, Pergamon Press(1964).
- 13) ICRU Report 19(1971).
- 14) ICRP Publication 26, Ann. ICRP 1(3)(1977).
- 15) ICRP Publication 27, Ann. ICRP 2(1)(1978).
- 16) ICRP Publication 74, Ann. ICRP 26(3-4)(1996).
- 17) ICRU Report 40(1971).
- 18) Zaider, M., Brenner, D. J., Radiation Research, 103, 302-316(1985).
- 19) Keller, A. M., Harn, R., Radiation Research, 114, 480-488(1988).
- 20) Drexler, G., Veit, R., Zankl, M., Radiation Protection Dosimetry, 32(2), 83-89(1990).
- 21) ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37(2-4)(2007).
- 22) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2000 Report, volume II: Effects., United Nations(2000).
- 23) Muller, H. J., Science, 66, 84-87(1927).
- 24) ICRP Publication 110, Ann. ICRP 39(2)(2009).
- 25) ICRP, The Use of Effective Dose as a Radiological Protection Quantity, ICRP 1XX, Ann. ICRP XX(X), 1-XX(20YY).
- 26) Gonzales, A. J., et.al., Journal of Radiological Protection 33, 497-571(2013).

# 外部被ばくの放射線防護における線量概念の変遷と展望

## Ⅲ. 実用量の変遷と今後の変更

1950 年頃までは、皮膚や骨髄の放射線障害防止を放射線防護の対象としており、放射線健康リスクと関係する防護量やモニタリングのための実用量という線量概念の区別は無く、場の照射線量で線量の制限が行われていた。ICRP で決定臓器の概念が導入された 1954 年以降、人体内の吸収線量(および RBE 線量等)と放射線場で測定可能なモニタリング量を関連付ける必要が生じた。そのために考案された線量概念が実用量であり、最大線量当量(MADE)に始まり、線量当量指標を経て、現在の周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量となった。本稿では実用量の成立、変遷、今後の変更の見通しについて解説する。

**KEYWORDS:** operational quantity, MADE (maximum dose equivalent), dose equivalent index, ambient dose equivalent, directional dose equivalent, individual dose equivalent, strongly penetrating radiation, weekly penetrating radiation

### I. 最大線量当量(MADE)の概念の成立

ICRP で決定臓器<sup>i</sup>の概念が導入された 1954 年以降、人体内の臓器・組織の吸収線量(および RBE 線量等)と放射線場で測定可能なモニタリング量を関連付ける必要が生じた。1962 年に ICRU Report 10(a)<sup>1)</sup>で導入された線量当量に対応する実用量として、最大線量当量(Maximum Dose Equivalent: MADE)が非公式に知られるようになり、1971 年に ICRU Report 20<sup>2)</sup>で正式に採用された。MADE とは照射される人体組織中の最大となる線量当量値である。測定される物理量に対して MADE の値が放射線測定器(サーバイメータと個人線量計等)の指示値として値付け(校正)される<sup>ii</sup>。そして測定器の指示値による線量が線量制限値(最大許容線量または線量限度)を超えなければ適切な防護が行われたと判断できるシステムが成立した。

### Ⅱ. 線量当量指標の導入

1971 年 ICRU は ICRU Report 19<sup>3)</sup>で、MADE の概念を具現化するため人体の体幹部を模擬したファントムとして、直径 30 cm に組織等価球(いわゆる ICRU 球)を定義し、ICRU 球内の MADE を線量当量指標( $H_T$ )と名付けた。そして 1976 年に刊行された ICRU Report 25<sup>4)</sup>

で、ICRU 球の表面からの深さが 0.07 mm<sup>iii</sup>から 1 cm までの球殻領域を shell と名付け、深さ 1 cm 以降の球領域を core と名付けた。そして shell と core それぞれの MADE を表層部線量当量指標、深部線量当量指標<sup>iv</sup>と名付けた。各線量当量指標(dose equivalent index)は弱透過性放射線と強透過性放射線<sup>v</sup>に対応するものである。

ICRU Report 25 では、人体表面に装着する個人線量計は、直径 30 cm の組織等価球の表面に装着して、線量当量指標で校正しておけば、その測定値は人体中の MADE と見なすことができるとした。サーバイメータ等を用いた放射線場の測定の場合、測定器を線量当量指標で校正することで、その指示値はその放射線場にいる人の MADE と見なせるとしている。ただし、放射線の種類とエネルギーにより、MADE となる点は異なるため、線量当量指標は各領域の決まった 1 点の線量当量ではない。

### Ⅲ. 周辺線量当量、方向性線量当量、および個人線量当量の概念の成立

1977 年に防護量として実効線量当量が ICRP Publ.26<sup>5)</sup>で導入された。実効線量当量は原理的に測定することが不可能な量であった。ICRU はこの新たな防護量を下回らないで、なるべく近似値となる指標量の検討を開始した。1985 年の ICRU Report 39<sup>6)</sup>で実用量を場のモニタリングと個人モニタリングに分け、次にそれ

<sup>i</sup> 放射線被ばくを受けた場合、放射線感受性が大きく身体機能上重要なために本質的に最も重大な機能の損傷を起こす可能性が大きい臓器のこと。

<sup>ii</sup> 具体的には、実用量が値付けられた標準校正場で、目的の測定器を照射し、測定器の指示値とその場の実用量との関係を調べて、測定器を調整または指示値の補正を行う。ただし、個人線量計の場合は指定されたファントム表面に装着して照射する。

<sup>iii</sup> 皮膚で 0.07 mm より浅い部分は放射線影響が生じないともなされるため。

<sup>iv</sup> ICRU Report 33 で表層部線量当量指標、深部線量当量指標はそれぞれ  $H_{T,s}$ 、 $H_{T,d}$  という記号が付けられた。

<sup>v</sup> 「弱透過性放射線」と「強透過性放射線」の定義は別稿(連載 1)の脚注 v を参照。

らを、低エネルギーを除く光子や中性子等である強透過性放射線に対する量と、 $\beta$ 線や低エネルギー光子である弱透過性放射線に対する量の2つに分けた。場のモニタリングとして、方向依存性のない測定器に用いる実用量として周辺線量当量  $H^*(d)$ 、方向依存性のある測定器に対しては方向性線量当量  $H'(d)$  を定義した。前者は強透過性放射線に対する実用量であり、後者は弱透過性放射線に対する実用量であったが、ICRU Report 47<sup>7)</sup>で、光子、電子の放射線場の2つの実用量は強弱どちらの透過性放射線に対しても適用されるように拡張され、ICRU Report 51<sup>8)</sup>では全種類の放射線に拡張された。

個人モニタリングの実用量は、強透過性放射線に対しては透過性個人線量当量  $H_p$  が、弱透過性放射線に対しては表層部個人線量当量  $H_s$  が定義された。しかし、これらはICRU Report 51で統合され個人線量当量  $H_p(d)$  と表記された。

ICRU Report 43<sup>9)</sup>は実用量として放射線防護上望まれる特徴として以下の6条件を明記した。それらは①統一性があること、②防護量との関連付けがあること、③加算性があること、④空間の指定された1点のみで決まる量であること、⑤適切な人体またはファントムの選択との関連があること、⑥測定可能であること、である。例えば、①の条件は、光子は照射線量、 $\beta$ 線(電子線)は組織吸収線量、中性子は最大線量当量のような放射線によって異なった量でないことを述べており、従って線量当量以外の概念は除かれる。条件②は放射線防護上、線量制限を適用する基本量である防護量と関連性付けられている必要性を述べている。そして実用量による防護量の適度な過大評価は容認されるが、実質的な過小評価は容認されないとしている。条件③は混合放射線場では各種類の放射線による量を加算することが可能であることを述べているが、線量当量指標では条件④が満たされていないため加算性は成立しない。すなわち、条件④は指定された1点の放射線場で決まる量であるため、MADEに基づく線量当量指標のように放射線の種類やエネルギーによって位置が変わることは適切ではない。条件④が特定の1点の場の放射線のデータのみを用いて実際の人の防護と結びつけているため、「拡張場」と「整列場」の概念の導入が必要となる。条件⑤について、場のモニタリング量には人体を表す標準化された単純なファントムが必要である。ICRU球はその条件を満たす国際機関で定義された唯一のファントムであった。個人モニタリングに対しては、標準ファントムを使用すると個人に関する情報を失うこととなるため、個人の人体が使用される。条件⑥はこの量は計算によるだけでなく、とくに標準機関における測定で決めることが可能であるべきであるとしている。場のモニタリング用のサーベイメータは自由空気中で、個人線量計は人体に装着して測定すれば、それらの線量計の指示値が実用量をある精度の範囲

で示すように構成されている。ただし、実際にはICRU組織等価物質を製造することは現実的ではないため、現在では標準機関であっても、この定義どりの実用量の測定を実現することは無理であると考えられている。

#### IV. 最新の実用量の考え方

2017年ICRUとICRPは共同で新たな実用量を提案するためドラフト<sup>vi)</sup>を公開した。新たな実用量の換算係数はICRU球ファントムを用いた放射線場の線量当量や従来の個人線量当量の概念から導出された換算係数とは異なり、ICRP Publ.110の標準人ファントム等に基づく実効線量または眼の水晶体、皮膚の吸収線量への換算係数の全照射方向の最大値を基とするものである(図1参照)。

この改訂の基本的な考え方としては物理量(フルエンス、空気カーマ)から実用量への換算係数の値が変更されるだけであるため、測定器校正施設の基本的な改造は不要と考えられる。

現在使用されている実用量は、場のモニタリングに対してはICRU球内の1点、個人モニタリングに対しては人体組織内の1点の線量当量と定義をして、それが防護量をなるべく近似できて、防護量を下回らない値となるという線量概念である。そしてこのように定義された実用量は理想的条件が整えば、実測可能であるように考えられてきた。しかし、実際には実測は困難で、測定器の校正場の値付けは、実測できる物理量にシミュレーション計算で求めた実用量への換算係数を乗ずることによって行ってきた。このような経験から、実用量はICRU球内や人体内の指定された1点で定義された線量当量である必要はなく、物理量からシミュレーション計算で求められた防護量への換算係数でも良いのではないかとこの考え方が出てきた。ただし、防護量は照射条件により換算係数が異なるため、どのエネルギー領域でも全照射条件に対する最大値を採用すれば非安全側の値とはならないことは明白であった。なお、以前から指摘されていた問題であるが、現行の実用量は放射線の種類によっては通常のエネルギー範囲でも、防護量より小さくなることもある。その上、高エネルギー放射線に対しては、実用量が防護量を下回る。これは宇宙船、航空機、高エネルギー加速器における放射線防護で問題となる課題であった。

以上の2点は日本保健物理学会の放射線防護に用いる線量概念研究会で議論されたが<sup>13)</sup>、このような見解に近い新たな実用量がICRU/ICRPによって考案された。こ

<sup>vi)</sup> Operational Quantities for External Radiation Exposure : Final draft July 2017

このドラフトでは周辺線量当量(ambient dose equivalent)  $H^*$  (10)の概念を周辺線量(ambient dose),  $h^*$ と表記している。



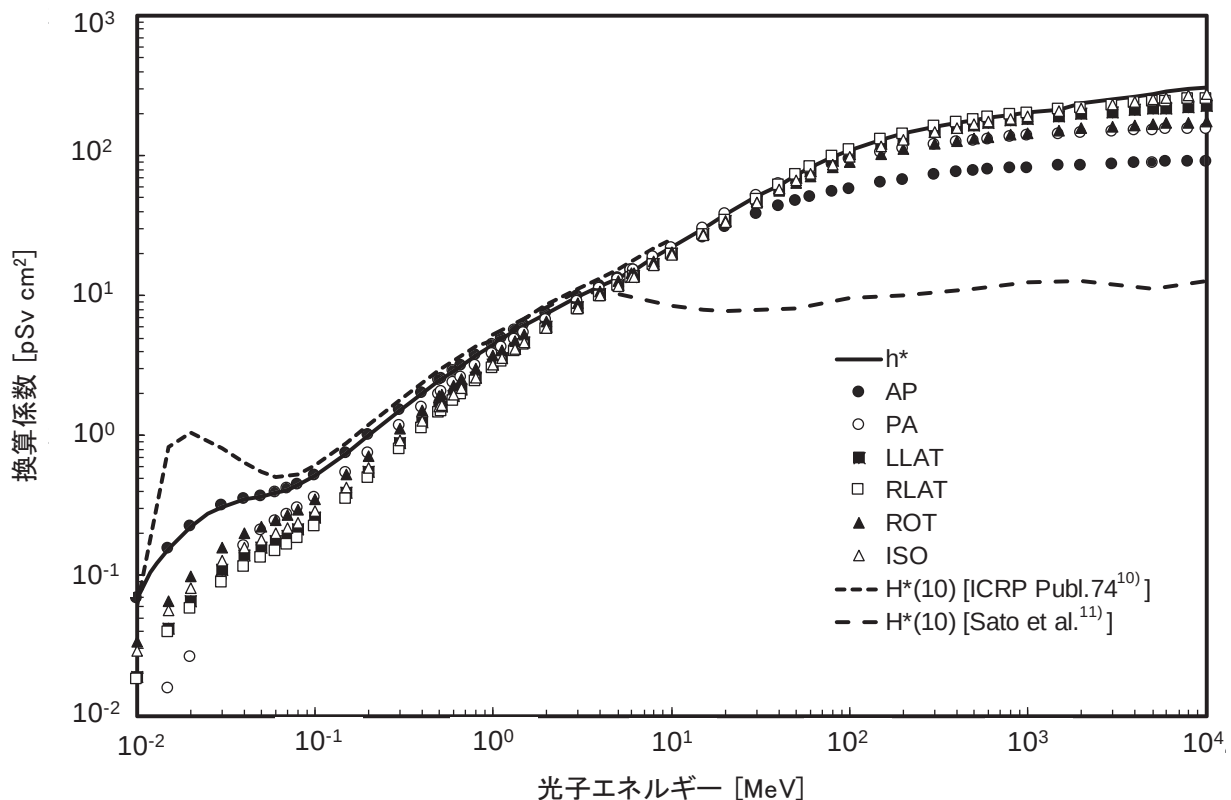


図1 光子の現行の周辺線量当量  $H^*(10)^{10, 11)}$  と最新の周辺線量  $h^*$  (脚注 v), ならびにさまざまな照射条件での実効線量 (照射条件: AP: 前方, PA: 後方, LLA: 左側方, RLAT: 右側方, ROT: 回転, ISO: 等方)<sup>12)</sup>

れによって、ICRU Reort 43 の 6 条件を満たすように作られていた実用量が、直接に防護量に基づいて定義されたこととなり、放射線防護の線量体系はより理解されやすくなったと考えられる。

新たに提案された実用量は、ICRU Report 43 の 6 条件、とくに⑥の「実用量は測定可能である」という条件を満たす線量概念からは離れて、常にどのような放射線のエネルギーや照射条件でも防護量を下回らない近似値に過ぎないと考えらるべきである。ただし、場のモニタリングと個人モニタリングという枠組みに対応した実用量の概念であることに変わりはなく、物理量から新たな実用量への ICRP 標準人ファントムに基づく換算係数が整備され、従来と同様な方法で測定器の校正に使用することができる。

## V. まとめ

実用量は測定可能であるということが ICRU Report 43 の実用量を満たす条件の一つにあることで、実用量の在り方を難しくしていたと考えられる。実際の測定器の校正は、校正場の物理量(フルエンス、空気カーマ等)に対して、物理量からの換算係数を用いて値付けられた実用量で、対象とする測定器の値付けをしており、実用量を直接実測している訳ではない。このような経験から、実用量は実測可能である必要性は無く、換算係数が重要

であるということが分かってきた。そして換算係数は実際には実測でなく、シミュレーション計算で求められている。

ICRU Report 39 で定義され、ICRU Report 43, 47, および 51 で確立されてきた ICRU 球等を用いた現在の実用量は、2017 年の ICRU と ICRP のドラフトで実際の防護量の換算係数の入射方向に関する最大値を用いた換算係数で新たに再定義したものに置き換えることが提案された。この経緯から、放射線防護の基本量は防護量であり、実用量はあくまでもモニタリングに使用するための防護量の代用量の位置づけであることが再認識できる。そして今後も必要に応じて実用量の定義が変更されていく可能性が考えられる。

## — 参考資料 —

- 1) ICRU Report 10(a), NBS handbook 84(1962).
- 2) ICRU Report 20(1971).
- 3) ICRU Report 19(1971).
- 4) ICRU Report 25(1976).
- 5) ICRP Publication 26, Ann. ICRP 1(3) (1977).
- 6) ICRU Report 39(1985).
- 7) ICRU Report 47(1992).
- 8) ICRU Report 51(1993).
- 9) ICRU Report 43(1988).
- 10) ICRP Publication 74, Ann. ICRP 26(3-4) (1996).
- 11) Sato, O., et al., Journal of Nuclear Science and Technology,

- 36(11), 977-985(1999).  
 12) ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5) (2010).  
 13) 小田啓二, 保健物理, 43(1), 36-40(2008).

### 著者紹介

岩井 敏 (いわい・さとし)  
 一般社団法人原子力安全推進協会  
 (専門分野/関心分野)放射線防護, 線量評価, 放射線リスク

石田健二 (いしだ・けんじ)  
 一般社団法人原子力安全推進協会  
 (専門分野/関心分野)保健物理, 低線量放射線影響, 幹細胞生物学

高木俊治 (たかぎ・しゅんじ)  
 株式会社三菱総合研究所  
 (専門分野/関心分野)放射線計測, 放射線防護

猪狩貴史 (いがり・たかふみ)  
 エム・アール・アイ リサーチアソシエーツ株式会社  
 (専門分野/関心分野)線量評価, 遮へい解析

原口和之 (はらぐち・かずゆき)  
 一般社団法人原子力安全推進協会  
 (専門分野/関心分野)放射線管理, 放射線防護

村野井友 (むらのい・とも)  
 エム・アール・アイ リサーチアソシエーツ株式会社  
 (専門分野/関心分野)放射化学, 放射線リスクコミュニケーション, 線量評価



## 書籍販売のご案内

### ■『原子力がひらく世紀(第3版)』

一般社団法人日本原子力学会編, 2004年発行, B5判 406ページ, 定価 2,000円(税込)

この世に存在するすべての物質に共通する, 微細で基本的な構造を解明しようとして, 科学者たちが18世紀以来根気よく続けてきた努力は, 今から約100年前にアンリ・ベクレルが自然放射線を発見するに及んで, 一層の現実感を伴って加速されることとなった。原子物理, または原子科学とよばれるこの分野は, 20世紀に入って驚くべき発展を遂げ, われわれの宇宙観を一新し, 広い可能性を開拓したのである。歴史的には原子爆弾という, 不幸な産物を経過したものの, 現在ではその応用は工業, 農学, 医学での放射線利用, およびエネルギー源としての原子力発電に及んでいる。これらの応用をまとめて原子力の平和利用と呼んで, これをやさしく, じっくり解説するのが, 本書の意図するところである。(「発刊の言葉」より抜粋)

ご購入は日本原子力学会ホームページより注文書をダウンロードのうえお申し込みください  
<http://aesj.net/hp/>

### ■『原子力のいまと明日』

丸善出版株式会社出版, B5判 329ページ, 定価 2,200円(税込)

日本原子力学会では, 原子力と放射線についてのわかりやすい解説書『原子力がひらく世紀』を20年前に刊行し, 好評のうちに現在「改訂3版」を発売中です。

その後, 東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえた新たな解説書を刊行すべく教育委員会を中心に検討が進められ, 2019年3月「原子力のいまと明日」を上梓いたしました。

本書は, 事故の推移と現状, 原子力利用状況の変化, 研究開発状況と廃炉への道のり, 放射線の人体, 生活, 産業, 経済への影響, あわせて福島県における風評被害の実態や原子力分野の人材育成について取り上げています。

『原子力のいまと明日』は, 丸善ネットストア, Amazon,  
 そのほかオンライン書店などでお買い求めいただけます。  
日本原子力学会事務局からの直販は行っておりませんので, ご注意ください。



# 福島復興に向けた除染のあゆみ

## —震災後9年を振り返る—

京都府立大学 中尾 淳,

フランス原子力・代替エネルギー庁 Evrard Olivier

東京電力福島第一原子力発電所の事故(福島原発事故)を受け、放射性物質による環境汚染が課題となった福島では、「除染なくして、福島の復興無し」をスローガンに、大規模な除染が進められてきた。大部分の避難指示解除準備区域、居住制限区域が解除され、残る帰還困難区域の解除に向けて検討が進んでいる。事故から9年が経過した現在、福島における除染と復興の関係性が見直されようとしている。

**KEYWORDS:** Decontamination, Intensive contamination survey areas (ICAs), Interim storage, Radiocesium, Soil recycling, Special decontamination zones (SDZs), The annual additional effective dose

### I. 福島の除染と復興

放射性核種は放射線を出した後で安定な別の元素に変わるため、人が手を加えずともいつかは環境から無くなるものである。ただし福島原発事故由来の主要排出核種であるセシウム137の半減期は約30年と長い。何もせずにおいたままでは、事故の影響を強く受けた地域で安全に暮らせるまでに非常に長い年月を要することから、一日も早い福島の復興・再生のためには除染が不可欠であった。

除染された居住区域や農地では、確かに放射線量が大幅に低下した。ただし、除染作業や除染廃棄物の輸送・管理に多大な労力と費用がかかったのも事実である。福島県でこれまでに発生した除去土壌・廃棄物量は約1,400万 $\text{m}^3$ であり、除染の総費用は少なくとも約4兆円と試算されている<sup>1, 2)</sup>。また、双葉町と大熊町に設置された中間貯蔵施設に貯蔵された除去土壌・廃棄物は、貯蔵から30年以内に福島県外に移設しなければならない。最終処分場をどれだけの規模でどこに設置するのか、また、未除染地域をどう扱うかによって、追加費用は大きく変わるだろう。その費用は誰が負担していくのか。

除染費用は国が一旦支払った後、東京電力に請求することになっているが、実際は原子力損害賠償支援機構を通じて国から東京電力への資金援助が行われている。ま

た、森林再生、地域産業再生などの費用の一部は国費で賄われている。つまり、国民1人1人が除染費用を負担している利害関係者である。特に、これから就労人口の中核を担う若者世代は、除染計画に応じた費用負担の変化の影響を強く受ける当事者であるため、福島の除染と復興に関する「最適解」を探すための議論の輪に加わっていくことが期待される。

しかし残念ながら、2018年に環境省が実施したWEBアンケート( $n=3,600$ )の調査結果<sup>3)</sup>では、福島県外に住む約8割の人が県外除去土壌等の県外最終処分が法律で定められていることを「聞いたことがなかった」あるいは「聞いたことはあるが、内容は全く知らなかった」と答えている。著者が学内外で行う福島原発事故に関連した講義でも「そもそも除染されていたこと自体知らなかった」という感想が年々増えてきている。福島関連のニュースが報道される機会も年々減少しており、福島の除染と復興は国民的議論からは程遠い場所に位置付けられているのが現状ではないだろうか。

そこで本解説では福島原発事故の発生から9年間の除染のあゆみを振り返り、震災10年目以降の福島復興に対する除染の役割について考えるための土台となる情報の提供を目的とした。この解説の骨子となったのは、共同執筆者であるエブラール氏とともに欧州地球科学連合が出版する学術誌“SOIL”に昨年発表した福島の除染に関するレビュー論文である<sup>4)</sup>。欧州には原子力発電を利用する国が多く、かつてチェルノブイリ原発事故による汚染影響を受けた経験もあることから、福島原発事故か

*The decontamination following the Fukushima nuclear accident*: Atsushi Nakao, Olivier Evrard.

(2020年8月19日受理)



らの復興に関心を持つ人が多い。しかし除染の全体像を記した英語の文献が限られていたことから、このレビューのとりまとめに至った次第である。また、本稿を執筆するにあたり、万福裕造氏(農研機構)、保高徹生氏(産総研)には貴重なコメントを頂いた。

## II. 除染体制の確立

大きな問題を解決するためには、状況を整理し、解決方法を見つけ、その方法を計画的に実行する必要がある。そもそも福島原発事故が起きた当時の日本では、原子力発電所から放射性物質が広域拡散し環境を汚染することが想定されていなかったため、その対処に関する法制度がなかった。そこで議員立法により「平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法(平成 23 年 8 月 30 日法律第 110 号)」(「放射性物質汚染対処特措法」以下「特措法」という)が制定され 2012 年 1 月 1 日に全面施行されたことで、国の管理下で統一した除染が行えるようになった<sup>5)</sup>。

特措法では、事故由来放射性物質による環境汚染が著しいと認められる地域を除染特別地域(SDZs)とし、この地域内での汚染状況の調査、除染等の措置、除去土壌等の保管等は国の責任によって実施されることが定められた。「著しい汚染」の基準は、事故後の積算線量が 20 mSv/年を超えるおそれがあるかどうかである。この基準は、国際放射線防護委員会(ICRP)の 2007 年勧告で定められた緊急被ばく状況における公衆被ばく線量限度範囲 20~100 mSv/年のもっとも安全側の値に基づいている。特措法基本方針では、除染の長期目標として追加被ばく線量を 1 mSv/年以下にすることが定められたが、追加被ばく線量が 20 mSv/年以上の地域については、段階的かつ迅速にその面積を縮小することが目標とされ、具体的な数値目標は据え置かれた。

除染特別地域に指定されたのは、福島原発から半径 20 km 圏内の「警戒区域」、または「計画的避難区域」と重なる、福島県内の 11 の市町村(楡葉町、富岡町、大熊町、双葉町、浪江町、葛尾村および飯館村の全域、ならびに田村市、南相馬市、川俣町および川内村の一部地域)であり、延べ面積は 1,117 km<sup>2</sup>であった。なお、この基準以下の汚染レベルであっても、現場測定での空間線量率が 0.23  $\mu$ Sv/hr 以上であり、追加被ばく線量が 1 mSv/年以上になり得ると試算された地域が福島県内外の 94 市町村、延べ面積 7,826 km<sup>2</sup>に広く分布した。これらの地域は汚染状況重点調査地域(ICAs)に定められ、市町村が中心となって除染を行うこととなった(図 1)。

除染特別地域の除染の方針(除染ロードマップ)が環境省から公表されたのは、2012 年 1 月 26 日である。このロードマップでは、積算線量が 50 mSv/年を超えるかど

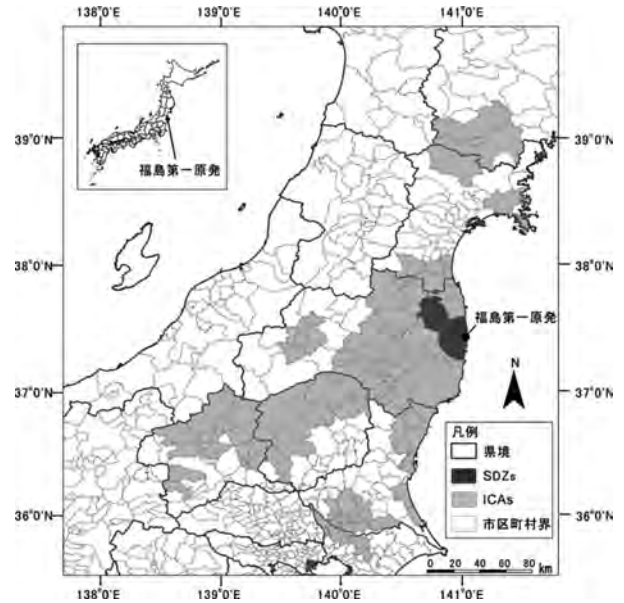


図 1 除染特別地域(SDZs)と汚染状況重点調査地域(ICAs)の分布図(Evrard et al., 2019 を参考に作成)

うかで除染特別地域が大きく 2 つに分けられ、それぞれ異なる除染工程が適用された。積算線量が 50 mSv/年以下の区域(「避難指示準備区域」あるいは「居住制限区域」)では、早ければ 2012 年内に、遅くとも 2015 年には本格的な除染が開始され、2017 年 3 月末までに計画された全ての除染が完了している。一方、積算線量が 50 mSv/年を超え、事故後 6 年経過しても 20 mSv/年を下回らないおそれのある区域、すなわち帰還困難区域は当面除染事業の対象外となり、除染効果の把握を目的としたモデル実証事業のみが実施されてきた。ただし、2017 年 5 月の法改正によって帰還困難区域内に居住可能区域(「特定復興再生拠点区域」以下「拠点区域」)を定めることが可能となったため、これを受けて、帰還困難区域を持つ 6 つの市町村(双葉町、大熊町、浪江町、富岡町、飯館村、葛尾村)では拠点区域の除染が進められている。2023 年の春頃までには拠点区域の全域での避難指示が解除される予定である。

このように、除染特別地域の除染は段階的に進められてきたが、実際に除染されたのは人の健康保護の観点から除染の優先順位が高いと判断された居住区域や農用地、生活圏周辺(家屋から 20 m 以内)の森林等の限られた空間のみである。土地面積の 7~8 割を占める森林については、ほとんど手付かずのまま残されている。

## III. 除染の方法とその効果

### 1. 除染関係ガイドライン

除染開始までに 1 年以上要したのは法整備だけが理由ではない。放射性物質によって汚染された環境の大規模除染は世界的にも例が無いため、チェルノブイリ原発事故後に実施された線量低減の試験等を参考に、福島に適用可能な除染技術を確立するためのさまざまな除

表1 除染特別地域および汚染状況重点調査地域における除染効果と除染費用(Yasutaka and Naito 2016 より抜粋)

| 土地利用 | 除染方法                | 空間線量低減率   | 単価<br>(千円/ha) | 発生するフレコンバック<br>の数 (/ha) | 対象地域                |
|------|---------------------|-----------|---------------|-------------------------|---------------------|
| 農地   | 除草, 表土5 cm除去, 覆土    | 0.34-0.80 | 9500          | 815                     | 除染特別地域              |
|      | 除草, 表土5 cm除去, 覆土なし  | 0.34-0.80 | 6250          | 815                     | 除染特別地域              |
|      | 反転耕, ゼオライト&カリウム資材施用 | 0.34-0.80 | 3100          | 0                       | 除染特別地域および汚染状況重点調査地域 |
|      | 深耕, ゼオライト&カリウム資材施用  | 0.21-0.50 | 330           | 0                       | 除染特別地域および汚染状況重点調査地域 |

染モデル実証事業が展開された。それらの成果を踏まえ、環境省が除染等の措置の基準などを具体的に示した除染関係ガイドラインを公表したのは2011年12月14日であった(2013年に改訂)。

このガイドラインでは除染対象が、工作物および道路、土壌、草木、その他の4項目に分けられ、対象ごとに除染方法が細かく設定されている。どの項目でも共通しているのは、セシウム137が付着した物質をその場から取り除く、いわば物理除染のアプローチが取られていることである。一方で、物理除染に伴い発生する廃棄物の量を可能な限り減らしつつ、空間線量を下げる工夫がなされている。例えば農地土壌の場合、表土の放射セシウム濃度が5,000 Bq/kg以下であれば深耕や反転耕(表土と下層土の入れ替え)を行うことで廃土の持ち出しを避け、それ以上の汚染濃度であった場合のみ、5cm程度の厚さを基準に表土を物理的に剥ぎ取り、同じ厚さの非汚染土壌(近隣の山から採取した真砂土など)を客土することが推奨された。Yasutaka and Naito (2016)<sup>6)</sup>は、農地を対象に表土除去を行った場合発生する除染費用は、行わなかった場合と比べて倍以上となることを試算している(表1)。もし、除染特別地域の約7倍の面積をもつ汚染状況重点調査地域の農地に対しても、物理除染を行っていた場合、除去土壌の量および除染にかかる費用は何倍にも膨れ上がっていたかもしれない。

## 2. 物理除染以外の検討について

本格除染の実施に先立って行われた実証事業の中で、薬剤を利用した化学除染や植物の吸収を利用した生物除染(ファイトレメディエーション)など、放射性廃土を出さない除染方法も試されたが、現実的に折り合いのつく方法はなかった。

非加熱の酸または塩溶液で土壌を化学処理しても、取り除かれるセシウム137はせいぜい10~20%程度である。一方、100℃またはそれ以上高温の酸または塩溶液で化学処理すれば、土壌から大半のセシウム137を取り除くことは可能だが、その方法を広域的に実施するには、土壌を剥ぎ取り、専用的大型処理施設に持ち運ばなくてはならない。さらに、化学処理を経た土壌は構造が破碎され、酸や塩で汚染されるため、生態系サービスの基盤物質としての機能を完全に失ってしまう。いわば土壌の残骸となった物質を元の場所に戻すメリットは無いため、結局は廃土として処分しなくてはならない。

ヒマワリを用いたファイトレメディエーションは環境負荷が小さく特別な施設や資材が無くても実行できる浄化技術としてテレビ番組等でも紹介され、その実証試験が大学や政府系研究機関だけでなく民間団体によっても大々的に展開された。しかし実際はほとんど効果が無く、福島県農業総合センターおよび独立行政法人・食品産業技術総合研究機構東北農業研究センター福島拠点が実施した研究によると、同手法による土壌からの放射性セシウムの除去率は最大でわずか0.058%であった<sup>7)</sup>。2011年当時、著者はヒマワリ戦略の大規模展開に至った経緯を知ることができる立場になかったが、その根拠となった論文がヒマワリの水耕栽培試験だったことは衝撃と共に記憶している。

水耕と土耕栽培で何が違うのか簡単に説明する。放射性セシウムが安定核種かによらず、セシウムというアルカリ金属元素は陽イオンとして水によく溶ける。水に溶けたセシウムが根から植物に吸収されるには、同じアルカリ金属元素であるカリウムの膜輸送体を通る必要があるため、カリウムはセシウムの吸収に対して高い阻害効果を持っている<sup>8)</sup>。裏を返せば、カリウムをほとんど含まない培養液で水耕栽培すれば、培養液中のセシウムの大部分は植物によって吸収されてしまう。ところが、その培養液を土壌と混ぜて土耕栽培すると、植物のセシウム吸収量は劇的に減少する。土壌にはセシウムを吸着して溶液に戻りにくくする機能と、カリウムを放出してセシウム吸収阻害を高める機能が備わっているためである<sup>9)</sup>。

土壌がセシウム137の移動性を著しく低下させる性質を持っていたことから、化学的あるいは生物学的なアプローチによるセシウム137の除去技術の広域的な適用は現実的ではなかった。つまり、除染を行うと決めた以上、物理除染以外の選択肢はなかったことは、ここで改めて強調しておきたい。

## 3. 物理除染の効果について

除染特別地域における除染の効果については、空間線量率の推移という形で環境省の除染情報サイト(<http://josen.env.go.jp/>)で確認することが出来る。除染特別地域のある全市町村で主に2017年に実施された事後モニタリングによると、空間線量率が追加被ばく線量1 mSv/年に相当する0.23 μSv/hr以下まで低下しているエリアが大きく拡大していることが分かる。空間線量率の低下だけでなく、旧避難指示区域に帰還した住民の



被ばく線量が非常に低いことも最新の研究で明らかになってきている<sup>10)</sup>。

また著者らの研究グループは2016年11月に、富岡町からの受託調査として同町内全域(帰還困難区域を除く)に分布する除染済み農耕地地約200地点を対象に、空間線量率と表層土壌セシウム137濃度の分析調査を実施した。その結果、空間線量率と表層土壌セシウム137濃度ともに、除染前と比べるとおよそ2割程度まで低下していることが確認できた<sup>11)</sup>。これは実証モデル事業で見込まれていた除去効率の上限に近い高い値であった。余談だが、この受託調査を通じて200地点近くの除染直後の農地を1つ1つ見て回る中で実感したのが、除染作業の丁寧さである。役場の近くの大通りに面した大規模農地であろうと、中山間部の人目に付きにくい小規模農地であろうと、表土掘削と客土材の投入および下層土との混合が徹底して行われていたことは、当時の現地の様子を知る第三者としてここに記しておきたい。

#### IV. 除去土壌等の減容化と再利用

##### 1. 可燃性廃棄物の焼却と焼却灰の処分

除染により発生した有機廃棄物(森林リター、雑草、木材、または木の枝など)は、概ね市町村ごとに設置された仮焼却施設で焼却され、大幅に減容化される。焼却後に残る灰(焼却灰)は中間貯蔵施設に設置された仮設灰処理施設での熔融処理によりさらに減容化される。除去土壌の土嚢袋に含まれる有機廃棄物についても、受入・分別施設での篩別処理によって土壌から分離され、焼却・灰処理により大幅に減容化される。

放射性廃棄物の焼却炉で使用される温度は、都市廃棄物を処理するプラントで使用される温度と同じ800～950℃程度である。焼却の際に炉の底に集められるボトムアッシュと呼ばれる重い粒子と比べてバグフィルターで捕捉されるフライアッシュと呼ばれる、軽い粒子に含まれるセシウム137は溶出率が高い。そのため、焼却・灰処理によって減容化された焼却灰は専用コンテナに封入した状態で中間貯蔵施設の廃棄物貯蔵施設で管理される。

##### 2. 除去土壌の再生利用について

除染により発生した除去土壌は、中間貯蔵施設内の受入・分級施設で有機廃棄物等を取り除いた後に、土壌貯蔵施設に保管される。土壌貯蔵施設では、底面に遮水シートを敷き、外部への漏水を防ぐとともに、貯蔵土に接した水は全て水処理施設で放射線計測を行った後に放流するように設計されている。土壌貯蔵施設には最大で2,200万m<sup>3</sup>の除去土壌が貯蔵されることが見込まれている。この除去土壌全量を県外の最終処分場に移設することは、必要な規模の最終処分場の確保等の観点から容易ではないため、環境省では、最終処分対象となる除去

土壌をできる限り減らすために、一部を安全性を確保しつつ公共事業等で再利用することが検討されている。

2019年3月に環境省から公表された再利用の手引き(案)<sup>12)</sup>では、放射能濃度が4,000～8,000Bq/kg以下の除去土壌について、厚さ10～100cm以上の非汚染土やコンクリートで覆い追加被ばく線量の低減を図ることで、主に公共事業における再生利用を可能とする案が提案された。現在、8,000Bq/kg以下の除去土壌は、約1,000万m<sup>3</sup>と推定されており、全除去土壌量の半分に相当する。分級処理などの減容技術を併用することで、将来さらに多くの除去土壌が再利用可能になる可能性がある。

一方で、再生利用を検討する上では、当該地域のベネフィット、関係するステークホルダーの社会受容性や持続的な公正性を担保した合意形成が重要である<sup>3)</sup>。

#### V. 今後の課題と次世代人材育成の重要性

これまで述べてきたように、福島を除染は法整備や除染効果の実証試験等を踏まえて慎重かつすみやかにすめられ、計画された除染作業はすべて完了した。ただし計画除染が完了しても残された課題は多く、福島の復興は道半ばである。まず、除染が行われた農地ではセシウム137濃度が大きく減少した一方で、肥沃度の低下や耕耘機の阻害となる石礫の混入、生育ムラの発生など、営農再開にあたりさまざまな障害が見つまっているため、これらの改善が急務である。除染により中間貯蔵施設に運ばれた土壌については、減容化とともに福島県内での再生利用の道が模索されているが、利用の用途は立っていない。未除染エリアの取り扱いについても、意見が分かれており、いずれの課題についても、理解醸成を含めたコミュニケーションや合意形成に関する議論を続けていく必要がある。

そのために重要な取り組みの1つが、地域住民に説明する自治体担当者、若手技術者など次世代を担う人材の育成である。例えば、2018年度よりJESCO「除去土壌等の減容等技術実証事業」において、次世代を担う人材への除去土壌等の管理・減容化・再生利用等の理解醸成を目的としたプロジェクト<sup>13)</sup>が開始されている。このプロジェクトでは、除染等の技術的内容への理解促進のみならず、除染等に関わるステークホルダーの多面性、価値観の多様性を理解し、総合的な視座を養うことを目的に実施されている。

福島の復興に対する国際的な関心は高い。復興のカギである除染問題を理解し、将来の道筋を提案し、取り組んだ成果を国内外に発信する若きリーダーたちが育っていくことを強く願っている。



－ 参 考 資 料 －

- 1) 環境省, 福島県全体の除去土壌の輸送量・割合, 中間貯蔵施設情報サイト,  
<http://josen.env.go.jp/chukanchozou/transportation/>
- 2) 環境省環境再生・資源循環局, 除染の現状について,  
[https://www.env.go.jp/jishin/rmp/conf/law-jokyo06/lj06\\_mat02.pdf](https://www.env.go.jp/jishin/rmp/conf/law-jokyo06/lj06_mat02.pdf)
- 3) 保高徹生, 除去土壌の限定再生利用・県外最終処分に関する認知と合意に向けた課題, 第30巻第1号, 廃棄物資源循環学会誌, 2019年.
- 4) Evrard, O., Laceby, J.P., Nakao, A. Effectiveness of landscape decontamination following the Fukushima nuclear accident: a review, 5, 333-350. SOIL, 2019.
- 5) 岡山信夫, 農地除染の経緯と課題, 第70巻第3号, 農林金融, 2017年.
- 6) Yasutaka, T., Naito, W. Assessing cost and effectiveness of radiation decontamination in Fukushima Prefecture, Japan, J. Environ. Radioactiv., 151, 512-520, 2016.
- 7) 佐藤睦人, ファイトレメディエーションによる放射性セシウム除去効果の検証, 第85巻第2号, 日本土壤肥科学雑誌, 2014年.
- 8) 頼泰樹, 河端美玖, 土壌, そして植物への放射性セシウムの動態-新たに解明されたイネのセシウムの吸収機構, 第58巻第6号, 化学と生物, 2020年.
- 9) 中尾淳, 高橋嘉夫, 化学から見た放射性核種の環境動態と長期予測-土壌吸着による放射性セシウムの不動態はどのように評価すればよいか?- 第69巻第2号, Radioisotopes, 2019年.
- 10) Nomura, S., Murakami, M., Naito, W., Yasutaka, T., Sawano, T., Tsubokura, M. Low dose of external exposure among returnees to former evacuation areas: a cross-sectional all-municipality joint study following the 2011 Fukushima Daiichi nuclear power plant incident, J. Radiol. Prot., 40, 1-18, 2019.
- 11) Kurokawa, K., Nakao, A., Tsukada, H., Mampuku, Y., Yanai, J. Exchangeability of  $^{137}\text{Cs}$  in soils of agricultural fields after decontamination in the eastern coastal area of Fukushima. Soil Sci. Plant Nutr., 65, 401-408, 2019.
- 12) 環境省, 福島県内における除染等の措置に伴い生じた土壌の再壊死利用の手引き 参考資料(案), 中間貯蔵施設情報サイト,  
[http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative\\_commission/pdf/investigative\\_commission\\_guidance\\_ref\\_1903.pdf](http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/effort/investigative_commission/pdf/investigative_commission_guidance_ref_1903.pdf)
- 13) 万福裕造, 保高徹生, 鈴木伸一, 大迫政浩, 武田宜人, 菊間由隆, 次世代を担う人材への除去土壌等の管理・減容化・再生利用等の理解情勢人材育成プログラム, 第8回環境放射能除染学会発表資料, 2019.

著 者 紹 介



中尾 淳 (なかお・あつし)

京都府立大学生命環境科学研究科  
(専門分野/関心分野) 土壌学, 地球化学,  
粘土鉱物学, セシウムの土壌吸着, 土壌機  
能解析



Evrard Olivier (エブラール・オリビエ)

フランス原子力・代替エネルギー庁  
(専門分野/関心分野) 堆積学, 同位体ト  
レーサー研究, 土壌侵食, 放射性物質の環  
境動態解析

# 高放射線・狭隘環境での線量率分布の遠隔測定を可能とする光ファイバ型線量率計測技術

日立 GE ニュークリア・エナジー 上野 克宜, 岡田 聡,  
日立製作所 田所 孝広

福島第一原子力発電所の廃止措置において、原子炉格納容器(PCV)底部に溶け落ちた燃料デブリ等を安全かつ合理的に取り出す計画を立案するには、取り出し作業範囲の線量率分布データが必要不可欠である。1号機 PCV 内部地下階調査における線量率分布測定を実現するために、高い放射線環境下での安定動作と線量率計小型化によるアクセス性向上を実現する光ファイバ型線量率計測技術を開発した。開発した線量率計を調査ロボット PMORPH<sup>®</sup> に搭載し、1号機 PCV 内の 2~10 Gy/h の環境下で 5 日間の線量率分布測定を完了した。

**KEYWORDS:** Dosimeter, Nd:YAG, Optical fiber, Dose rate, Gamma ray, PMORPH, Primary containment vessel, Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station

## I. はじめに

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃止措置を進めるには、核燃料と炉内構造物が溶けて混ざり合った燃料デブリを取り出す必要がある。この取り出し作業を安全かつ合理的に実行するためには、原子炉格納容器 (Primary Containment Vessel: PCV) 内の線量率や放射性核種に関する情報が必要不可欠である。しかし、PCV 内部は高い放射線環境であり、作業員による線量率分布測定は困難である。この環境下で情報を収集するために、さまざまな機関が高放射線環境下で動作可能な調査ロボットを開発し、実証を進めている<sup>1,2)</sup>。(株)日立製作所および日立 GE ニュークリア・エナジー(株)では調査ロボットの一つとして PMORPH<sup>®</sup> を開発し、2015 年に 1 号機 PCV 内部 1 階グレーチング上での調査に適用した<sup>1)</sup>。

1 階グレーチング上での調査の次ステップとして地下階の調査が計画され、図 1 に地下階調査方法の概念図を示す。線量率計とカメラ、LED を備えたセンサユニットを PMORPH<sup>®</sup> に搭載し、1 階グレーチングの隙間 (25 mm×90 mm) からセンサユニットを通過させて、3.5 m 下の地下階調査位置に降下させる。

本方法では地下階の線量率分布を遠隔でリアルタイム

に測定する。東日本大震災以降、さまざまな研究者によって高放射線環境に対応可能な放射線計測装置が開発されている<sup>3,4)</sup>。しかし、これらの装置はサイズが大きく、グレーチングの隙間を通過できない。小型化が期待できるシリコン半導体検出器は耐放射線性の観点で適用が難しい。そこで、光ファイバの先端に近赤外光を発する蛍光体を備えた線量率計測手法に着目した。これまでに筆者らは、近赤外帯域の蛍光であれば石英光ファイバの光透過率が $\gamma$ 線照射前後でほぼ変動しないことを示した<sup>5)</sup>。この特性に着目した小型センサを PMORPH<sup>®</sup> に搭載すれば、地下階調査へ適用できる可能性がある。

本稿では、高放射線・狭隘環境での線量率分布の遠隔測定を可能とする光ファイバ型線量率計測技術と、本技術を搭載した線量率計の性能評価結果、さらに 1 号機 PCV 内部地下階における線量率分布測定結果を解説する。

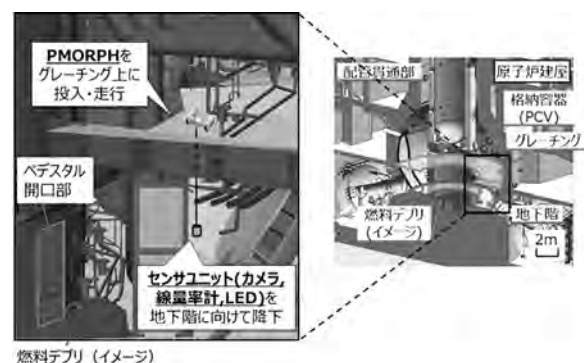


図 1 1号機 PCV 内部地下階の調査方法の概念図

*Fiber optic-type dosimetry for remote measurement of dose rate distribution in high radiation and narrow environment :*  
Katsunori Ueno, Satoshi Okada, Takahiro Tadokoro.

(2020 年 7 月 31 日 受理)

## Ⅱ. 近赤外光を利用した光ファイバ型線量率計測技術

### 1. 線量率計の開発課題

地下階調査ではグレーチングの隙間を通過して線量率計を降下させることから、線量率計の小型化が課題である。センサユニットの外寸は、グレーチングの隙間サイズとPMORPH<sup>®</sup> 搭載性から、直径 20 mm、長さ 40 mm とした。この内部に線量率計とカメラ、LED を搭載するには、線量率計の外寸を数 mm 程度に小型化する必要がある。また、地下階底部には燃料デブリなどの未知の線源が存在し、過去の調査<sup>1)</sup>で測定された線量率(約 10 Gy/h)よりも高くなる可能性がある。未知環境に対応するには、0.1~1,000 Gy/h の測定レンジが必要と考えた。さらに、地下階は水中であり、散乱した $\gamma$ 線の影響を考慮する必要がある。

### 2. 蛍光体と光子測定手法

#### (1) 蛍光体

ネオジム添加 YAG ( $\text{Y}_3\text{Al}_2\text{O}_3$ ) はレーザ結晶としてよく知られている。波長 808 nm の光子の照射によって励起した Nd:YAG 内の電子が基底状態に遷移する過程で、1,064 nm の蛍光を発する。この Photo Luminescence と同様に、放射線照射によって電子が励起し、1,064 nm の蛍光を発する。本開発では、石英光ファイバの光透過率の累積線量依存性を考慮して、Nd:YAG をセンサに適用した。発光減衰時間は 0.23 ms であり、従来のシンチレータが有する発光減衰時間と比較して 3 桁程度長い。従来の放射線計測では、長い発光減衰時間を有する蛍光を利用した線量率計測に対応しておらず、その手法を確立する必要がある。

#### (2) 光子測定手法

長い発光減衰時間を有する蛍光による光子を計数し、線量率を算出可能なフォトンカウンティング法を考案した。図 2 にフォトンカウンティング法と従来法の比較を示す。従来シンチレータでは、その発光減衰時間が非常に短いことから、1つの $\gamma$ 線が入射すると多数の光子が

発生し、それらが重なり合って 1つのパルスを形成する。後段の回路系では、このパルスを 1つ1つ計数することで、 $\gamma$ 線の計数率を取得する。また、パルス波高値を取得することで、波高値スペクトル上で核種分析を実施する。一方でフォトンカウンティング法では、長い発光減衰時間の間に飛び飛びで生じる光子を 1つ1つ計数し、光子の計数率を取得する。1つ1つの光子のパルス時間幅は数 ns と非常に短く、多数の光子で形成されるパルスよりも波高値が小さい。このため、回路系には高ゲインかつ高速出力を備える光検出器を備える必要がある。

### 3. 光ファイバ型線量率計の構成

#### (1) 光子測定装置の構成

図 3 に測定装置の構成図を示す。石英光ファイバとバンドパス機能を有する光学フィルタを介して、Nd:YAG で発生した近赤外光を高ゲイン・高速出力可能な光電子増倍管 (Photomultiplier Tube: PMT) に伝送する。PMT で電気信号に変換し、プリアンプを介して信号処理系で光子計数率と波高値スペクトルを演算する。後段の PC を用いて信号処理系の制御とデータ収録を実施する。

#### (2) 調査装置の構成

図 4 に調査ロボット PMORPH<sup>®</sup> に搭載した線量率計を示す。PMORPH<sup>®</sup> 内部にはセンサユニットと回転ドラム機構、光ロータリジョイントを備える。センサユニットの内部に直径 2 mm の Nd:YAG を搭載し、その外表面に散乱線の影響を低減するための薄い遮蔽体を備

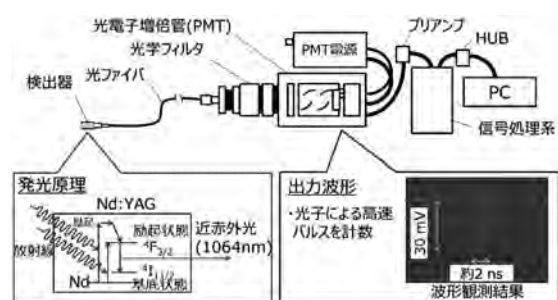


図 3 光子測定装置の構成図

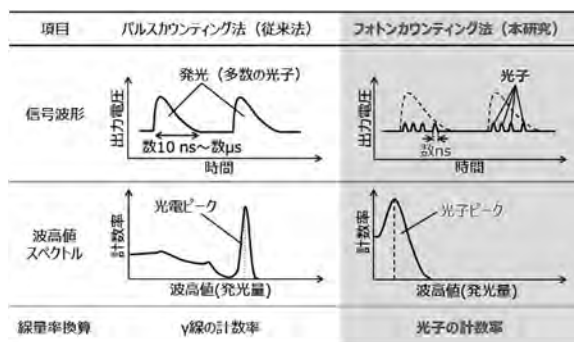


図 2 フォトンカウンティング法と従来法の比較

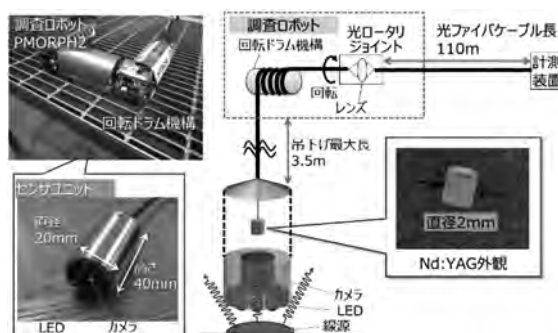


図 4 調査ロボット PMORPH<sup>®</sup> に搭載した線量率計



えた。ドラム機構を利用して、センサユニットを1階グレーチングから地下階まで昇降可能とした。光ロータリジョイントを利用して回転ドラム機構による光ファイバの捻じれを抑制した。PMTは原子炉建屋内に設置することから、光ロータリジョイントからPMTまで110 m長の光ファイバケーブルで接続した。

#### 4. 性能評価試験

##### (1) 波高値スペクトル測定

センサユニットにCo-60由来 $\gamma$ 線を照射し、その波高値スペクトルを測定した。線量率は0.4, 1.7, 17 Gy/h、測定時間は60秒である。図5に $\gamma$ 線照射による波高値スペクトルを示す。想定していたプロファイルを有し、線量率に応じて計数値が変動することを確認した。また、約20チャンネルより低い波高値で、線量率に依存しない計数値を確認した。これはPMT起因のノイズと考えられる。以降の光子計数率測定では、波高値弁別機能で低チャンネルの計数値を除去した。

##### (2) 光子計数率の線量率依存性

波高値スペクトル測定と同様に、センサユニットにCo-60由来 $\gamma$ 線を照射し、その光子計数率を測定した。本測定では、産業技術総合研究所(AIST)および量子科学技術研究開発機構(QST)が所有するCo-60照射設備を利用した。線量率は0.01~196 Gy/h(AIST)と438~8,760 Gy/h(QST)、測定時間は60秒である。なおQSTでの測定では減光フィルタを利用することで、パルス重畳による数え落としを低減した。評価に利用した光子計数率には、減光フィルタによる光減衰率を補正した。図6に光子計数率の線量率依存性を示す。線量率に応じて光子計数率が単調増加することを確認した。ここで得られた線形性曲線を利用して、光子計数率から線量率に変換した。

##### (3) エネルギー特性

センサユニットに既知エネルギーおよび線量率のX線と $\gamma$ 線を照射し、その光子計数率を測定した。本測定では、AISTが所有するX線および $\gamma$ 線照射設備を利用した。照射エネルギーは80~1,250 keVである。各照射エネルギーで得られた光子計数率を比較するために、光子計数率を線量率で規格化し、662 keV照射で得られた光子計数率に対する相対値を算出した。図7に光子計数率のエネルギー特性を示す。Nd:YAGを覆った金属の影響で、80, 100 keV照射時には感度が無く、160~1,250 keVで光子計数率が12~4%の範囲で推移した。Cs-137由来 $\gamma$ 線(662 keV)による水中での散乱線エネルギー分布は約40 keVをピークとして、幅広な分布を形成する。この線量率計は散乱線影響をほぼ除去できることを示している。

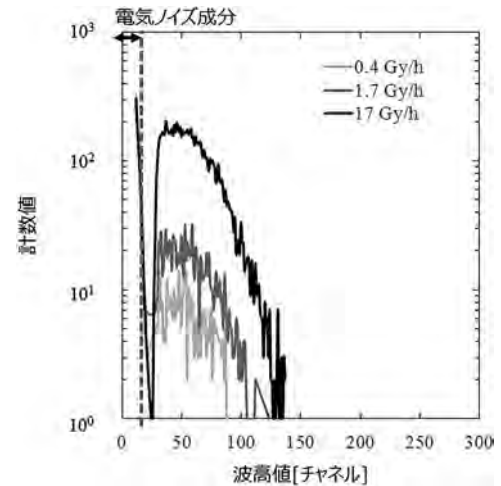


図5  $\gamma$ 線照射による波高値スペクトル<sup>6)</sup>

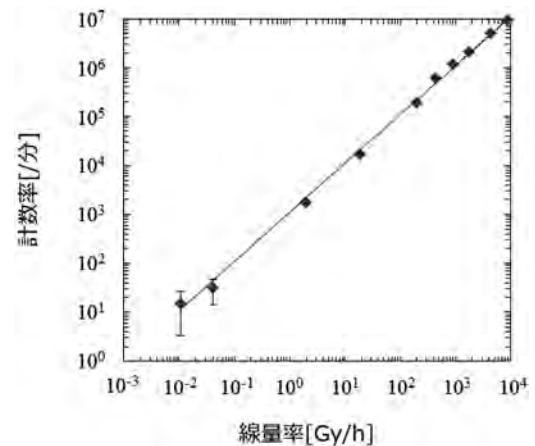


図6 光子計数率の線量率依存性<sup>6)</sup>

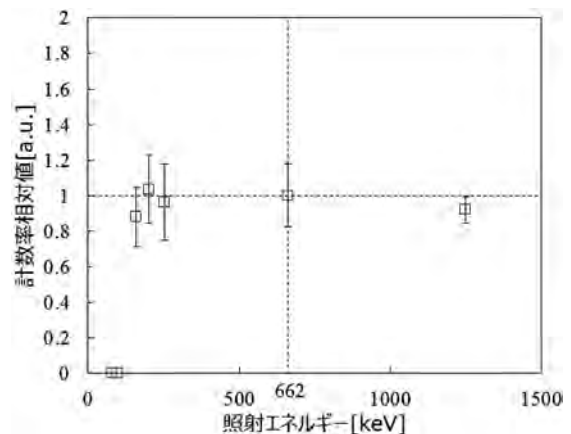


図7 光子計数率のエネルギー特性<sup>6)</sup>

### Ⅲ. 1号機原子炉格納容器内部地下階における線量率分布測定<sup>7, 8)</sup>

#### 1. PCV内部地下階での測定

開発した線量率計を搭載したPMORPH<sup>®</sup>を使用して、2017年3月に5日間にわたって1号機PCV内部地

下階調査を実施した。図8に調査エリアおよび各測定ポイントの最下点での線量率と地下階床面からの高さを示す。PMORPH<sup>®</sup>はPCV貫通部から内部にエントリし、10の測定ポイントで測定を実施した。測定ポイントでセンサユニットを最も降下させた位置(最下点)における線量率測定値は1.5~11 Gy/hであった。また、最下点での地下階床面からの高さは0.3~1.6 mであった。測定ポイント D0(1)(2)では床面にドレンサンプリングシステムのバルブを撮影した。ペDESTAL開口部に近い測定ポイント D2(2)(3)では床面から高さ0.9 mの位置に堆積物が存在することが明らかになった。

図9に各測定ポイントにおける線量率分布データを示す。1階グレーチングにおける線量率は2~10 Gy/hであった。各測定ポイントでの水中での線量率分布から、地下階の堆積物に近づくと線量率が上昇する傾向を確認した。この挙動は堆積物中に存在する $\gamma$ 線源によって生じたと考えられる。

## 2. 堆積物表面の主線源推定

測定ポイント D0(3)と D2(3)で取得した線量率分布と解析値を比較し、堆積物表面の主線源を推定した。推定にあたり、取得した映像データから堆積物がペDESTAL外に広がっていると想定されることと、同時期に配管貫通部直下で取得した堆積物中の主線源がCs-137<sup>9)</sup>であったことを考慮した。

本推定では、 $\gamma$ 線と水との相互作用で線量率が水の厚さに依存して減衰し、その減衰率が主要 $\gamma$ 線エネルギーと相関を有する特性を利用した。比較対象とする解析データはモンテカルロ計算コードPHITS<sup>10)</sup>を利用して、堆積物表面由来の水中での線量率を算出した。本推定では2種類の線源を設定した。一方を解析で想定した燃料デブリとし、事故時に燃料が炉内構造物を熔融させ、炉内構造物中に存在するCo-60と混ざりあったものと仮定した。もう一方にはCs-137を設定した。堆積物をコンクリート組成で模擬し、線源を堆積物表面から深さ

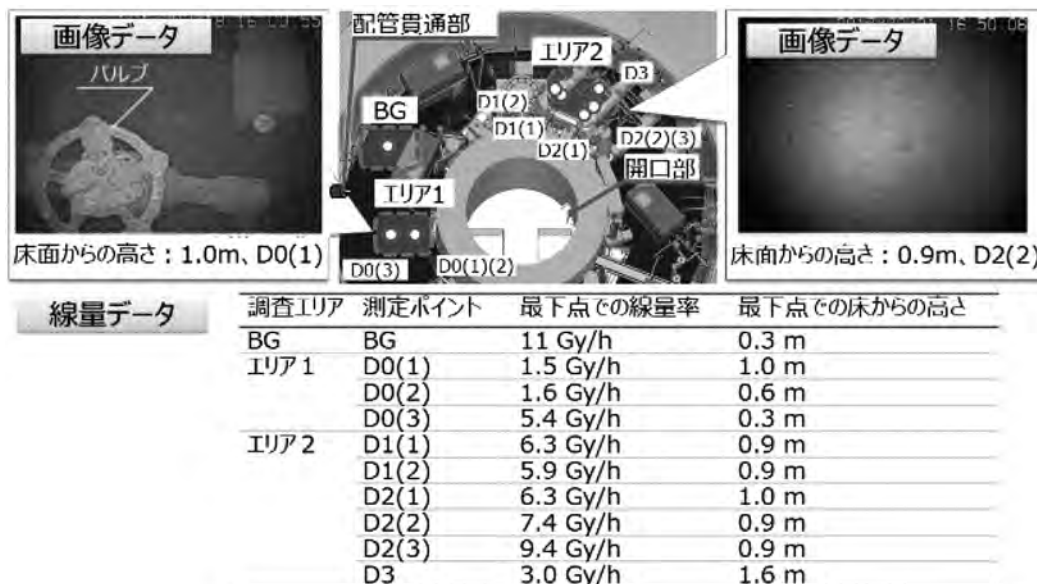


図8 調査エリアおよび各測定ポイントの最下点での線量率と床からの堆積物高さ<sup>7)</sup>

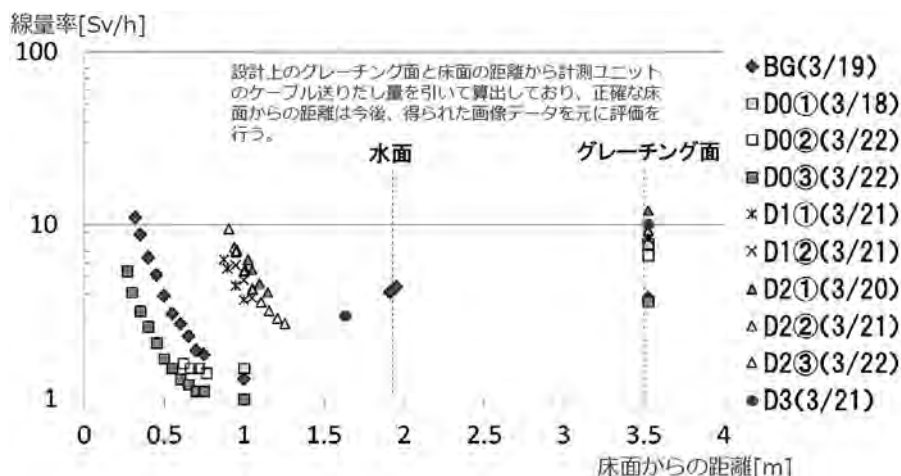


図9 各測定ポイントにおける線量率分布データ<sup>7)</sup>

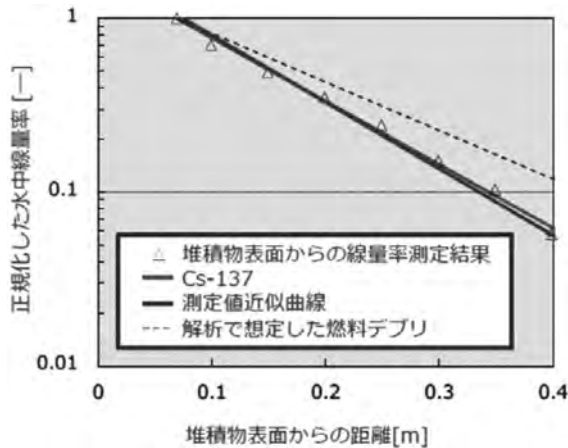


図 10 D0(3)における線量率分布と解析値<sup>8)</sup>

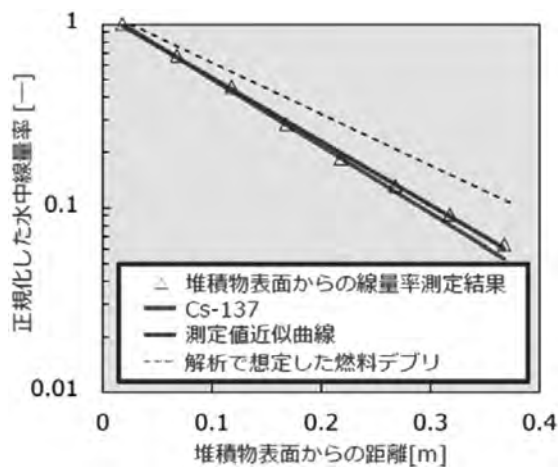


図 11 D2(3)における線量率分布と解析値<sup>8)</sup>

10 mm の範囲に設定した。表面に最も近接した位置で取得した線量率で測定値を規格化し解析値と比較した。図 10 に D0(3) で得られた線量率分布と解析値の比較結果、図 11 に D2(3) で得られた線量率分布と解析値の比較結果を示す。いずれの測定ポイントにおいても、測定した線量率分布の減衰率が Cs-137 由来  $\gamma$  線の減衰率とほぼ一致することがわかった。これら比較結果から、D0(3) および D2(3) における堆積物表面の主線源を Cs-137 と推定した。

#### IV. おわりに

放射線照射によって Nd:YAG が発する 1,064 nm の近赤外光と、近赤外領域における石英光ファイバの光透過率の放射線耐性、さらにフォトンカウンティング法で得られた光子計数率から線量率を算出する方式を特徴とする光ファイバ型線量率計測技術を開発し、1 号機 PCV 内部地下階調査における線量率分布測定を実現した。線量率計の小型化を実現したことで、狭隘部へのアクセシ性が向上し、線量率分布の把握に有用であることを示し

た。今後も関係機関の協力を得ながらデータ取得を進め、福島廃止措置に貢献する。

今回開発した技術は、放射線治療に使用される高エネルギー X 線や陽子線による照射線量をリアルタイムに測定することにも適用できる<sup>11)</sup>。放射線治療による患者の Quality of Life 向上への貢献も合わせて進めていく。

Nd:YAG を用いた光ファイバ型線量率計のコンセプトの実証は、日立製作所および日立 GE ニュークリア・エナジーにて実施したものである。PMORPH<sup>®</sup> に搭載した小型線量率計の開発ならびに 1 号機 PCV 内部調査は、経済産業省/廃炉・汚染水対策事業費補助金にて技術研究組合 国際廃炉研究開発機構の業務として実施されたものである。

#### — 参考資料 —

- 1) S. Okada, IEEJ Journal, 138, 8 (2018).
- 2) H. Adachi et al, The Robotics Society of Japan, 36, 6 (2018).
- 3) K. Okada et al, J. Nucl. Sci. Technol., 4 (2014).
- 4) Y. Sato et al, J. Nucl. Sci. Technol., 55, 1 (2018).
- 5) 田所孝広他, 日本原子力学会 2015 年春の年会, I17.
- 6) K. Ueno et al, J. Nucl. Sci. Technol., 56, 9-10 (2019).
- 7) 東京電力ホールディングス(株), 1 号機原子炉格納容器内部調査について (2017).
- 8) 東京電力ホールディングス(株), 1 号機原子炉格納容器内部調査について～映像データおよび線量データの分析結果～ (2017).
- 9) 東京電力ホールディングス(株), 1 号機原子炉格納容器内部調査について～堆積物の分析結果～ (2017).
- 10) T. Sato et al, J. Nucl. Sci. Technol. 55, (2018).
- 11) K. Ueno et al, Proc. of 110<sup>th</sup> Japan Society of Medical Physics, O-036 (2015).

#### 著者紹介



上野克宜 (うえの・かつり)  
日立 GE ニュークリア・エナジー(株)  
原子力生産本部  
(専門分野/関心分野) 量子線物理計測/  
核燃料計測, 遠隔作業ロボット技術



岡田 聡 (おかだ・さとし)  
日立 GE ニュークリア・エナジー(株)  
原子力生産本部  
(専門分野/関心分野) フィールドロボット  
設計開発/産業ロボット, 計測技術



田所孝広 (たどころ・たかひろ)  
(株)日立製作所 研究開発グループ  
(専門分野/関心分野) 放射線計測・応用,  
核物理/中性子利用技術, 核医学



# ドローンを活用した送電線と樹木の離隔の評価

電力中央研究所 中屋 耕

送電設備の保守管理では、送電線と樹木の離隔を適切に保つために多大な労力が払われている。離隔の維持に関わる業務効率化に貢献するため、市販の小型ドローンによる空中測量を活用した離隔評価のワークフローを構築した。空中写真から生成した三次元の点群による測量に着目し、送電設備を対象とした効率的な点群取得の指針を得るとともに、ドローンの運用から離隔評価までワンストップでの実施を支援する離隔評価ツールを開発した。

**KEYWORDS:** Drone, Power-line, Separation, Vegetation, Point cloud, Structure from Motion

## I. はじめに

さまざまな場所で目にする特別高圧架空送電線(送電線)の総延長は 87,929 km に亘り(2018 年度 10 社合計、電気事業連合会統計情報)、国土に電力を行き渡らせている。山林の多い日本では、送電設備周辺に樹木が生育している箇所も多く、安全確保のために送電線と樹木等の間には 2 m 以上の距離(離隔)を確保することが定められている。樹木の成長に伴って枝葉が送電線に接近するため、送電線―樹木間の距離(離隔)を監視し、状況に応じた伐採等が行われている。本稿では、送電線と樹木の離隔を評価する技術における課題と、労力低減に向けて、当所が取り組む小型の無人航空機(ドローン, UAV: Unmanned aerial vehicle 等と呼ばれる)を活用した技術開発および今後の展望について紹介する。

## II. 現状と課題

### 1. 離隔評価技術の現状

送電線と周辺樹木との離隔を評価するためには、主に航空機によるレーザー測量が用いられている。これは、ヘリコプター等に搭載した LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) を用いて地表をレーザーで走査し、樹木や送電線から反射されるレーザーパルスを三次元の位置情報を持つ点の集まり(点群)として精密に計測するリモートセンシングで、送電線と樹木の離隔を広範囲かつ高精度(センチメートル精度)で把握することができる。

しかしながら、設備の地上高が低い箇所や、成長の早

い樹種が生育している箇所等では頻繁な離隔評価を必要とする場合も多く、費用の制約や即時対応の必要性から航空機レーザー測量の利用が難しいことがある。こうした条件の離隔評価は、作業員による目測が主体となるが、山間部では地上からの見通しが悪いために鉄塔に登って確認する必要がある、また、目測では計測結果にばらつきが生じる傾向にあるため、省力化と精度向上が課題となっている。こうしたことから、昇塔せずにオンサイトで離隔を確認できる手法が求められており、航空機レーザー測量を補間する技術として、ドローンによって点群を取得する手法が検討されている。

### 2. ドローン活用技術の動向

#### (1) ドローンの種類

ドローンは、自律飛行や遠隔操作が可能であることが特徴で、プロペラで飛行する回転翼式と、滑空する有翼式に大別される。特に、マルチ回転翼式ドローンは垂直離着陸やホバリングが容易で、滑走路や高度な操縦技能を要しないことから多様な場面で運用でき、高性能化と小型化が進んでいる。一般に市販されているドローンでも、カメラの方向を 3 軸で制御するジンバルを備えることで機体の動揺を吸収して安定した撮影が可能な高解像カメラを備え、衛星測位システム(GNSS)に対応したプログラミング航行機能を基本仕様として備えたものが多く存在する。このため、航空撮影を安定して実施することができる。

#### (2) ドローンによる点群の取得

ドローンによる点群の取得には、小型 LiDAR を搭載して点群を直接取得する方法と、相互に撮影範囲を重複(オーバーラップ)させるために移動中に撮影された複数の写真画像から点群を構成する SfM/MVS (Structure

*Utilization of Small Drone for Separation Assessment of Overhead Power-line* : Ko Nakaya.

(2020 年 8 月 14 日 受理)

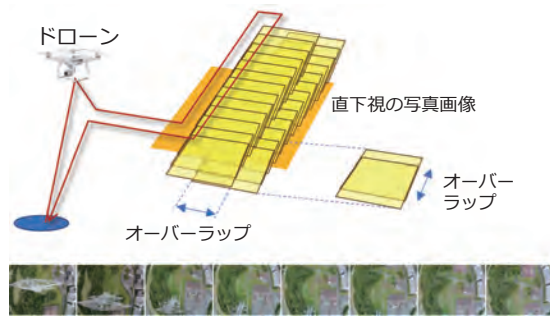


図1 ドローンによる SfM のための空撮の様子  
下図は飛行中にインターバル撮影された画像

from Motion/Multi-view stereo, 以降 SfM)がある(図1)。SfMは、民生用の小型ドローンに標準装備されたデジタルカメラで実施できるため、導入コストの低さや運用の容易さが特徴である。SfMによって取得した点群(SfM点群)の精度については、写真画像が撮影された位置およびカメラの向きをGNSS(Global Navigation Satellite System)等により精密に特定したり、検証点で校正したりすることで高めることができ、公共測量の要求精度を満たすことも可能である<sup>1)</sup>。

具体的な SfM 点群の位置精度としては、高度 50 m より撮影された写真画像から生成した結果において、水平方向 0.41 m、垂直方向 0.44 m の精度であるとの報告がある<sup>2)</sup>。しかし、それらは地表に配置した検証点での成果であり、高さ方向に幅のある送電線と樹木とを対象として精度検証を行った例は無く、離隔評価への適用性は不明であった。

### Ⅲ. 離隔評価技術の開発

#### 1. 離隔評価のための点群取得方法

ドローンによる空撮では、速度や高度によって画像のオーバーラップや解像度が変化するため、飛行条件によって点群の位置精度や再現性が影響を受けると考えられる。さらに、樹木や送電設備は地上高の幅があるという特徴がある。そこで、離隔評価に適した点群を得るための指針となる条件を明らかにする検討を行った。

##### (1) 点群の生成確認

2015 年 7 月に、電力会社が保有する訓練用送電設備(塔高約 60 m)を対象に小型ドローンによる空撮画像から点群の取得を試みた<sup>3)</sup>。送電線径間を、往路と復路で軌道を変えて往復するコの字型の航路でカメラを下に向けた直下視画像をインターバル撮影した。SfM 点群の作製は、商用のパッケージソフト Pix4D mapper(Pix4D 社)を用いた。ドローンの進行方向および側方に相当する画像重複率(オーバーラップ率)など一定の条件を満たせば樹木や空中にある送電線を点群として再現でき、送電線位置や樹高を地上からの測量結果との比較を通して離隔距離を航空機レーザー測量と同等の精度で評価できることを確認した。この際使用したドローンは、DJI 社

製の Phantom2 vision+ というマルチローター機で、14 百万画素の魚眼タイプのカメラ(4384×3288 画素)を搭載している。GPS を用いたプログラミング航行は、オプションアンテナを追加することで実現したが、ドローンが目視できる距離でもしばしば通信が途切れるなど不安定なものだった。同社のドローンは、その後カメラの 4 K 化や通信・測位性能の向上、プログラミング航行の標準装備など短期間に進歩し、世界的に広く使われるようになった。

##### (2) 点群の位置精度と撮影条件

ドローンによって樹木および送電線の SfM 点群が取得できる見通しが立ったことから、離隔評価に必要な点群取得のための撮影条件を検討した。一般に、樹高計測の精度は、地上および航測において 0.1 m 程度とされる。

2017 年 10 月に、塔高約 30 m の訓練用送電設備 1 径間(約 130 m、標高差 10 m の傾斜地)を対象に、小型ドローン(DJI 製 Phantom4 pro)を、4 高度、6 速度でインターバル撮影することで(図2、3)、オーバーラップ率および、被写体位置での画素の大きさを変化させ、Pix4D mapper を用いて点群を生成した。さらに、地上に設置した 9 点の検証点について、トータルステーションによる測位結果と比較し、撮影条件と位置精度の関係を調べた。検証点のうち 4 箇所を地上参照点として用い、地理的な位置合わせを行った。今回の使用機は前出の機体か

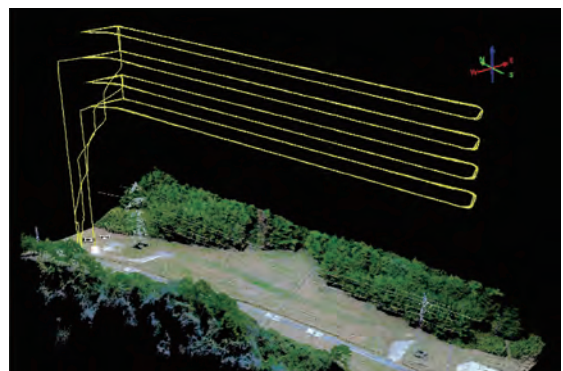


図2 SfM 点群と繰り返し飛行させたドローンの飛行軌跡



図3 ドローンによる撮影の様子

ら2世代進化しており、4Kカメラを搭載し、航続時間は30分に延伸し、何より通信の安定化が図られており、現場で運用可能な信頼性であると感じられた。

飛行時間は2~6分程度で、点群から得られた検証点および実測値の差の平方和(RMSE)について、水平(x, y)方向、および垂直(z)方向の分布を調べたところ、オーバーラップ率0.70以上の撮影条件であれば、水平方向、垂直方向それぞれで、0.03 m, 0.12 m以下の誤差で計測できることがわかった。つまり、地上位置精度に関しては、オーバーラップ率を0.70以上となるよう、ドローンの飛行速度や高度および撮影インターバルを決定すると良く、要件を満たすのは容易であることが分かった。

### (3) 送電線の再現性

点群によって地面や樹木はよく再現されるが、空中の送電線がSfM点群として再現されないケースが報告されている<sup>3)</sup>。送電線は、画像内では線分として表示されるため特徴点が見出しにくいことが、点群が計算されないことの一因と考えられる。樹木と送電線の離隔という観点では、最大負荷時の設計たわみ深さ(弛度)に基づいた離隔評価が重要で、必ずしも送電線が再現される必要はないが、設備の現況確認という点では送電線が再現されていることが望ましい。そこで、上記のデータを用い、送電線の再現性におよぼす影響を検証した<sup>4)</sup>。

送電線は重力方向に垂れ下がるカテナリー曲線を描くため、観測された点群は主に鉛直方向に平面的に分布すると考えられる。このため、便宜的に二次元平面でのカテナリー曲線への当てはまりを判定する。具体的には、送電線の点群を抽出し、全ての点群からの距離の残差が最小となる最小二乗平面を求め、平面に対して点群の平行投影を行い、非線形最小二乗法によりカテナリー曲線を非線形フィッティングにより当てはめた(図4、特願2018-029598)。送電線の形状は、カテナリー(懸垂)曲線と呼ばれる双曲線関数を用いて次のように表される。

$$z(x) = C \left( \cosh \frac{x}{C} \right) - 1 \quad (1)$$

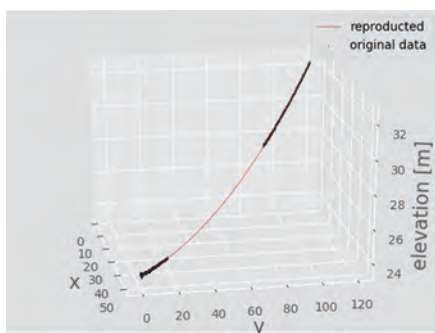


図4 送電線点群およびあてはめたカテナリー曲線点群として再現されていない区間が曲線で補間されている

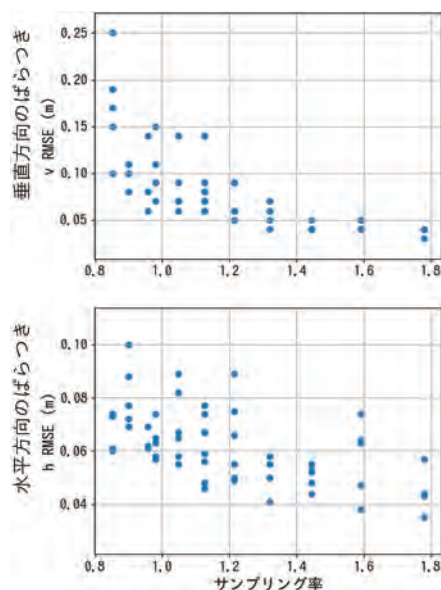


図5 サンプルング率と近似曲線からの点群のばらつき

ここで、 $C$ :カテナリー数( $C=T/W$ ),  $W$ :電線長さあたりの自重(kgw/m),  $T$ :電線の水平張力(kgf)で、送電線の形状はカテナリー数で一意に決まる。

平行投影による移動距離のRMSEを水平方向の誤差、投影平面でのカテナリー曲線と投影点群のRMSEを鉛直方向の誤差とした。また、径間方向に点群が再現されている区間を求め、点群が存在する区間の径間に対する割合を電線再現率とした。

送電線位置でのオーバーラップ率が0.75未満では送電線は再現されなかった。送電線が再現されない場合、点群が疎に分布するのではなく、送電線の一部区間がまとめて欠損し、点群の存在する区間が偏在した。送電線直径を解像度で除した値をサンプルング率とすると、サンプルング率が高いほど、水平および垂直方向の点群の誤差は小さくなり、送電線位置に収束する傾向が見られた(図5)。送電線の高さでのオーバーラップ率が大きくかつ電線直径程度の解像度があれば、関数当てはめの際の水平方向および垂直方向のばらつきが収束し、関数当てはめによって、再現されていない区間の電線形状を補うために十分な点群が得られることがわかった。

### (4) 点群生成のための処理時間

SfM点群生成に要する処理時間は、PCの処理能力に左右される。結果が得られるまでに長時間を要すると、離隔計測後に現地で対策を行う際の妨げになる。処理時間は画像の枚数に応じて増加するため、離隔評価のための情報が十分に得られ、かつ必要最小の画像枚数とすることが理想である。一径間を対象としたSfM処理にかかる時間と、画像の数との関係を、電源に接続したラップトップPC(X1 Extreme, CPU:Corei7-8850H, RAM:32MB, GPU:GTX-1050Ti, Lenovo社)およびPix4D mapperを用いて上記で取得した画像について調べた。その結果、オーバーラップ率が高いほどより処理時間が



かかる非線形の関係が見られた。オーバーラップ率を高めるほど、時間的な効率は低下するため適切なオーバーラップ率を選択する必要がある。例えば、上記の径間ではオーバーラップ率 85 % 付近に相当する画像数約 50 で 11 分以内に点群が得られ、巡視時の作業時間としては許容可能な範囲と考えられる。

## 2. 離隔評価ワークフローの構築

離隔評価では、ドローンを運用して点群を取得した後、送電線と樹木の離隔評価までを現地で行うワンストップの作業工程を構成する必要がある。このため、ドローンを用いて取得した点群を入力し、樹木との離隔を確認するための一連の計算と出力を行うプログラムを離隔評価ツールとして開発した<sup>5)</sup>。

### (1) 仮想送電線の生成

点群の中で送電線と下方の樹木等との離隔を評価するためには、まず送電線位置を特定し、その送電線位置における樹木との距離を計算する。送電線位置としては、空撮によって得られた点群から評価する現況の送電線位置と、電力が最大に流れて高温膨張した際の電線弛度等を想定した設計値がある。現況の送電線位置は、送電線の支持点 2 箇所の位置と径間上の任意点から算出する。また、設計値としては、送電線の支持点 2 箇所の位置と最低地上高等を与える。それぞれ(1)式に基づいてパラメータを決定し、送電線位置とした(図 6)。

### (2) 規定離隔モデルの生成

より安全に配慮するため、風による送電線の動揺(横振れ)も考慮に入れる。実際の送電線は、風荷重によってカタナリー曲線からの変形を伴って動的に振動する。雪や氷が付着した状態で強風が吹き寄せる際には、激しく振動するギャロッピング現象が起こることもあるが、ここでは、支持点を中心とする単振動の横振れを想定する。横振れは 2 つの支持点を結ぶ直線を中心として、径間上の任意位置  $x$  における弛度  $d$  を半径とした振り子運動である。さらに、弛度  $d$  に、「電気設備の技術基準の解釈(平成 9 年通商産業省令第 52 号に基づく)」に定める規定離隔を加えた弛度 + 規定離隔( $d'$ )を用いることで、規定離隔を反映した送電線の存在しうる範囲を表す規定離隔モデルとなる(図 7)。

### (3) 離隔情報の参照

仮想送電線と下方に分布する樹冠等を表す点群との最短距離が離隔となる。元の点群のうち、標高( $z$  座標)が規定離隔より大きい点を除去することで、規定離隔モデルより上方にある送電線等の点群を除き(図 6)、規定離隔モデルとの離隔を計算することで離隔を表す点群(離隔点群)を求めることが出来る。送電線モデルや離隔点群は、三次元および二次元にマッピングできる。三次元マッピングは、ヒートマップとして離隔を彩色表現することで樹木と送電線の位置関係が立体的に確認できた

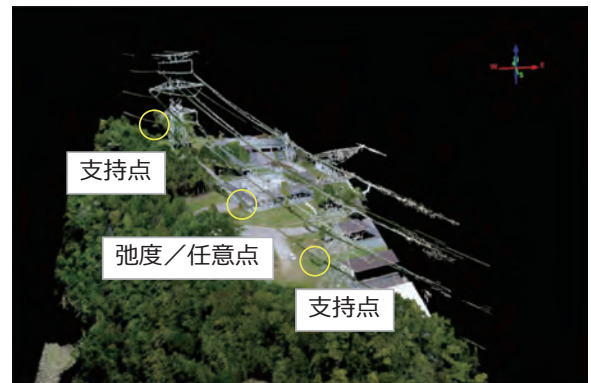


図 6 仮想送電線生成のために必要な座標点

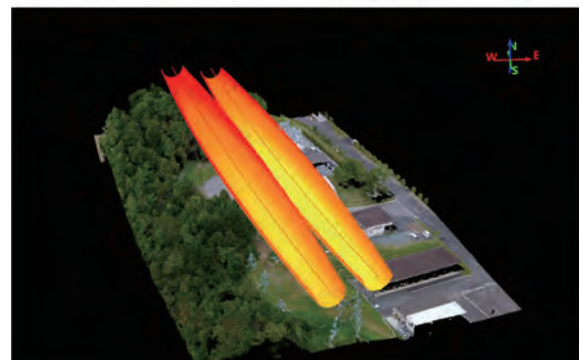
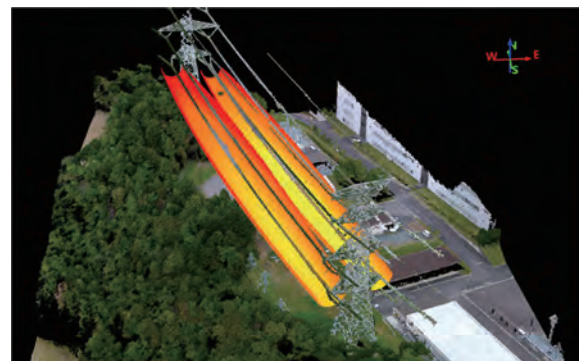


図 7 仮想送電線と規定離隔モデル  
下図は規定離隔モデルより上方の点群を除いた表示



図 8 SfM 点群上に表示した離隔ヒートマップ

め、現況の理解や、離隔の定量評価に有効である(図 8)。二次元マッピング(図 9)は、タブレットに格納することで、離隔データを現場に携行することができるため、伐採木の確認に有効である(特願 2016-164391)。



図9 離隔評価ワークフローと離隔点群生成ワークフロー(左)および離隔ヒートマップの表示例(右)

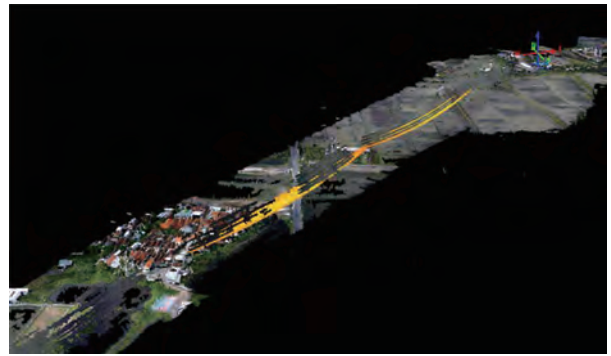


図10 インドネシアでの適用例

1フライトで2km程の送電線を対象に点群を作製。  
2径間(800mm)の規定離隔モデルおよび離隔を計算した。

## IV. 今後の展望

仮想送電線や規定離隔モデルおよび離隔点群を生成する離隔評価ツールは、国内での適用を念頭に開発しており、測地系・投影座標系には、世界測地系の平面直角座標系(JGD2011 直角座標系)等を用いている。これは、航空機レーザー測量などの他の測量成果との比較を容易とするためであるが、UTM 直角座標系を用いることで海外でも適用可能である。これまでに、台湾、インドネシアおよびロシアで取得された点群を対象に離隔評価を行った(テラドローン株式会社との共同研究)。国外の事例では、高速で飛行する有翼式ドローンで取得したデータを用い、一度の飛行で複数径間の画像を取得することで、広範囲の送電線にも適用可能であることを確認した(図10)。今後は、航続距離の長い有翼式ドローンを用いた遠隔地の多径間の評価や、小型・低価格化が進むLiDARの活用などによるハードウェア面での進展が予測される。カメラ初期値として設定する撮影位置やカメラの方向が正確であるほど、SfM点群の位置精度が正確になるため、高精度測位RTK(Real Time Kinematic)を実装したドローンにより、測量精度が格段に向上することが確認されており、普及が進むと考えられる。またソフトウェア面では、SfM点群に基づく伐採対象木の特定技術開発などが進むことで、接近木対策の労力低減への貢献が期待できる。

## — 参考資料 —

- 1) 国土交通省国土地理院, UAVによる公共測量マニュアル(案), 2017改定.
- 2) A. Lucieer, D. Turner, D. H. King, S. A. Robinson, Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to capture micro-topography of Antarctic moss beds, Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 2014, 27, 53-62.
- 3) 中屋耕, 大石祐嗣, 鈴木準平, 送電線と樹木の離隔計測への小型無人飛行機の適用性評価, 電力中央研究所報告, V15004, 2015.
- 4) 中屋耕, 橋田慎之介, 架空送電線の樹木離隔評価のためのSfM点群の精度評価, 平成30年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2018, 9-5-19,20.
- 5) 中屋耕, 橋田慎之介, 林文博, 小型ドローンを用いた送電線離隔評価ワークフローの構築, 令和2年電気学会全国大会, 2020, 209.

## 著者紹介



中屋 耕 (なかや・こう)

電力中央研究所 環境科学研究所  
(専門分野/関心分野) 農業気象学, 森林水文学/リモートセンシング, 植物機能モデリング

## 最先端の研究開発 日本原子力研究開発機構

## 第7回 廃止措置と廃棄物の処理処分を目指して(2)

## 地層処分に関する最新の研究開発の動向

棚井 憲治ほか

日本原子力研究開発機構ではバックエンド関連の研究・技術開発として、実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認、地層処分システムの長期挙動の理解を目標に地層処分の基盤的研究開発を進めてきており、ここではこれらに関する研究・技術開発の最前線を紹介する。

**KEYWORDS:** *Radioactive waste, Geological disposal, Underground environment, Geosphere stability*

## I. はじめに

高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発では、地下深部の地質環境の特性や長期安定性に関する研究、処分技術の信頼性向上や安全評価に必要な技術開発などに取り組んでおり、令和元年度末には幌延および瑞浪での深地層の研究施設計画における成果のとりまとめを行い、令和2年度以降の計画を策定した。

本稿では地層処分に関する研究開発の最前線として、令和元年度にプレス発表を行った研究成果等を中心に紹介する。

## II. 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する研究開発の取り組み

わが国においては、原子力発電に伴って発生する高レベル放射性廃棄物を、物理的・化学的に安定なガラス固化体とし、冷却のために30年から50年程度貯蔵した後に、地下300m以深の地層中に処分(地層処分)することが法律で定められている。

地層処分は、地下深くの安定した地質環境に人工の障壁(人工バリア)と天然の地層(天然バリア)からなる多重バリアシステムを構築することにより、地下深く高レベル放射性廃棄物を埋設するものであり、現時点で最も有望な方法との国際認識の下、各国において地層処分に向けた取り組みが進められている<sup>1)</sup>。

地層処分における安全確保の基本的アプローチは、①地層処分にとって適切な安定した地質環境を選定すること(サイト選定)、②その環境に対し人工バリアや処分施設を適切に設計・施工すること(工学的対策)、③構築された地層処分システムの安全性を確認すること(安全評価)である。原子力機構では、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」等<sup>2, 3)</sup>に基づき、国、関係機関等との適切な役割分担の下、地層処分の安全確保の基本的アプローチを支える技術基盤を整備し信頼性を高めていくため、実際の地質環境を対象とした調査技術や評価手法の開発、地下施設を建設・維持・管理するための工学技術の開発および地質環境の長期安定性に関する研究を行っている。また、処分技術の信頼性向上として、人工バリア等の地下環境での長期複合挙動の理解、地層処分システムの設計に用いる設計手法や計算コードの開発およびデータベースの整備を行っている。さらに、安全評価手法の高度化として、処分場閉鎖後の数万年以上にわたる地層処分システムの性能を予測解析により評価するための方法論やモデル、データベースの開発を行っている。

これらの研究開発については、北海道(幌延町)、岐阜県(瑞浪市・土岐市)および茨城県(東海村)の3つの研究開発拠点において行っている。北海道幌延町の幌延深地層研究センターでは、堆積岩を対象とし、一方、岐阜県の東濃地科学センターでは、瑞浪市の瑞浪超深地層研究所において花崗岩を対象とした研究開発を行ってきた。また、土岐市の土岐地球年代学研究所において地質環境の長期安定性に関する研究を進めている。茨城県東海村の核燃料サイクル工学研究所では、幌延深地層研究セン

*Frontline of R & D for decommissioning and waste disposal (2) :*  
Kenji Tanai, Akihito Mochizuki, Takahiro Hanamuro, Mayuko Shimizu, Morihiro Mihara.

(2020年8月26日 受理)



ターや東濃地科学センターで得られる情報なども活用して、地層処分システムの設計や安全評価に必要な技術開発を進めている。

### Ⅲ. 深地層の研究施設計画

幌延深地層研究計画および超深地層研究所計画の2つの深地層の研究施設計画については、平成26年度の原子力機構改革を契機に研究開発の合理化を図り、重点的に取り組んでいくべき必須の課題を抽出した<sup>4)</sup>。すなわち、幌延では①実際の地質環境における人工バリアの適用性確認、②処分概念オプションの実証および③地殻変動における堆積岩の緩衝能力の検証を、瑞浪では①地下坑道における工学的対策技術の開発、②物質移動モデル化技術の開発および③坑道埋め戻し技術の開発を重点的に進めてきた。具体的には、幌延において深度350m調査坑道を活用した模擬の人工バリアを用いた試験やオーバーパック腐食試験、人工バリアの定置・品質確認などに関する実証試験、地震等の地殻変動に対する堆積岩の力学的・水理学的な緩衝能力の検証などを進めてきた。一方の瑞浪では、大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術や地下水管理技術の開発、亀裂ネットワーク中の地下水流動・物質移動に関する試験およびモデル化技術の開発、坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術や長期モニタリング技術の開発などを進めてきた。これら深地層の研究施設計画における必須の課題については、令和元年度末に、これまでに得られた成果を報告書として取りまとめ<sup>5,6)</sup>、大深度の水平地下空間を安全に掘削し維持する技術や地下空間を活用しながら大深度の地質環境を調査評価する技術が確立できたことを示した。これにより、ここまでを当初の研究開発目標としていた超深地層研究所計画については、その目標を達成したため、令和元年度をもって研究開発を終了し坑道の埋め戻しに着手した<sup>7)</sup>。一方、幌延深地層研究計画については、必須の課題に引き続き取り組んでいる<sup>8)</sup>。

以下に2つの深地層の研究施設計画における最新の研究成果を紹介する。

#### 1. 坑道周辺の岩盤が掘削後も還元状態にあるメカニズムを解明

高レベル放射性廃棄物の地層処分場などの地下空間を建設する際には、坑道壁面周辺の応力再分配に起因して、岩盤の力学的・水理学的・化学的特性が変化する領域が坑道周辺に生じる。このうち、新たな亀裂の発生や既存の亀裂の開口などの変化が生じ、透水性の上昇や物質移行特性の変化が生じる領域を、掘削損傷領域(Excavation Damaged Zone, EDZ)という。地層処分場に生じたEDZは、建設や操業の安全性に影響を与えるとともに、廃棄体の埋設後には放射性核種の主要な移行経路となる可能性がある。そのため、深地層の研究施設

を活用してEDZの特性を評価し、地層処分の安全評価に資するためのデータを整備していくことが重要である。

EDZの化学的特性に関して、一般的には、掘削に伴い生じた亀裂を通じて大気が岩盤内に侵入し、坑道周辺の岩盤内に酸化的な環境が形成されると考えられている。国外の堆積岩地域では、酸化的な環境の形成を示唆する現象として、EDZの地下水中で硫酸イオン( $\text{SO}_4^{2-}$ )濃度の増加や硫酸カルシウム鉱物( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ など)の生成等が報告<sup>9)</sup>されており、これらは岩石中に含まれる黄鉄鉱( $\text{FeS}_2$ )の酸化溶解により硫酸イオンが生成したことによるものと考えられる。地層処分場において、仮に坑道周辺の酸化的な環境が処分場の閉鎖後に還元環境に回復しなかった場合、オーバーパックの腐食速度や放射性核種の移動に影響を与える可能性がある。地層処分の安全評価において坑道閉鎖後の地質環境を予測・評価する際には、その初期条件となる坑道掘削後の坑道周辺の酸化還元状態を理解する必要がある。また、たとえば実際の地質環境における人工バリアの適用性確認など、地下施設の坑道を活用した試験の実施にあたっては、坑道周辺の地球化学環境やその形成メカニズムが重要な基礎データとなる。このため、坑道周辺の岩盤内における酸化還元状態の変化やその支配要因の理解が重要である。

以上を踏まえ幌延深地層研究センターにおいては、地下施設の坑道周辺の地下水および岩石を分析することにより、坑道周辺の酸化還元状態を評価するための研究開発を行った。その結果、坑道周辺の岩盤中に存在する地下水の酸化還元電位(Eh)は、坑道掘削後約5年が経過した時点でも-200 mV前後の還元的な値を示すことが確認された。また、地下水の化学成分濃度や岩盤中の鉱物組成の分析結果からも、国外の堆積岩で観測されるような酸化的な環境の兆候は認められなかった(図1)。

さらに、坑道周辺のボーリング孔に含まれるガスを分析したところ、メタンと二酸化炭素からなることが明ら

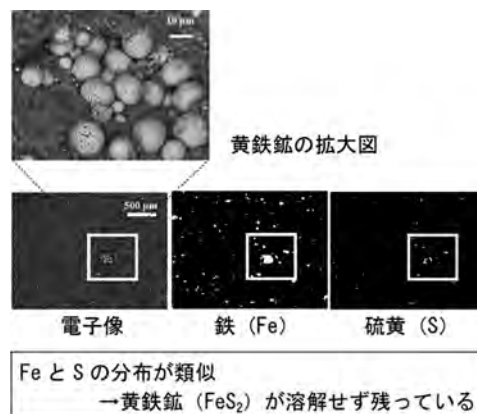


図1 幌延の岩盤内部約2cmに位置する堆積岩の走査型電子顕微鏡による観察結果<sup>10)</sup>  
坑道のごく近傍の岩盤中においても、黄鉄鉱( $\text{FeS}_2$ )が溶解せず残っていることが示された。

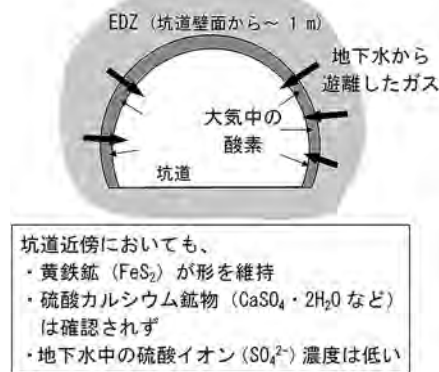


図2 幌延の地下施設における坑道周辺の酸化還元状態の概念図<sup>10)</sup>

掘削に伴う坑道周辺の酸化が抑制されるメカニズムを概念的に示した。

かとなった。これらのことから、地下水の酸化を抑制する重要なプロセスとして、地下水に溶解していたメタン等のガスが地下水から遊離し、坑道周辺の岩盤内部の亀裂を満たしたり岩盤から坑道側へ移動したりすることで、岩盤内部への大気の侵入が抑制されていたことが明らかになった(図2)<sup>10)</sup>。

## 2. 花崗岩内の物質移動経路に関する新知見

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価においては、放射性物質が地下水によって処分施設から人間環境に運ばれることを想定しており、その評価においては地下水流動や物質移動の経路の把握、数万年にわたる地下水の水質の変遷の解明が重要となる。そのためには対象となる岩盤や地下水の不均質性や多様な現象の影響、相互作用などを考慮しつつ、事例研究を積み重ねることで普遍的なメカニズムを把握する必要がある。時間スケールとしては、地層処分の安全評価を念頭に、数万年～数十万年程度における地下水流動や水質の変遷が対象となる。以上を踏まえ、瑞浪超深地層研究所においては、地層中での地下水および放射性核種の移動特性を把握するための事例研究として、花崗岩中に多く含まれる斜長石の熱水変質現象に着目し、光学顕微鏡や電子顕微鏡を用いた詳細な観察を行った(図3)。一般的に地表で採取された岩石試料は風化の影響を受けているが、今回使用し

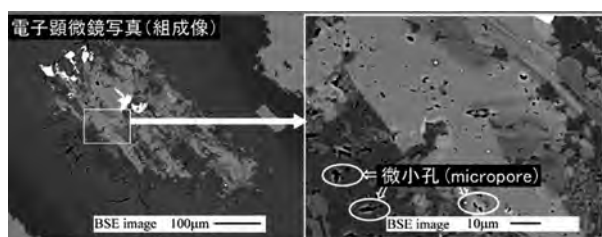


図3 土岐花崗岩体の岩石写真、斜長石中の変質を示す電子顕微鏡写真<sup>11)</sup>

電子顕微鏡写真の数μm程度の黒色領域が微小孔。

た岩石試料は深度500mから採取しているため、風化の影響が少なく、花崗岩冷却時の初期的な変質現象のみを評価することができる。

岩石試料の詳細な観察の結果、変質でできた鉱物の領域(変質領域)と、変質領域中に分布する数μm程度の微小孔の間には正の相関があることが分かった。このことは、熱水変質現象によって生じた斜長石中の微小孔同士がお互いに連結することでネットワーク構造を形成し、このネットワーク構造が物質移動の経路となることで、斜長石内部の変質が促進されたことを示していると考えられる。また、熱水変質現象をもたらす物質の移動速度を検討した結果、非常に遅いことが分かった( $3.8 \times 10^{-11}$ ～ $6.8 \times 10^{-11}$  m/年：斜長石中の微小孔が連結し、物質移動が生じた長さを変質が生じる期間で割った値)。この微小孔に伴う物質の移動速度は、土岐花崗岩中の割れ目を経路とする平均的な物質移動速度よりも一千億分の一程度の低い速度である。この結果は、変質領域にできた鉱物は、物質を化学的に捕まえる機能が強く、斜長石中に形成された微小孔が物質の移動を遅らせる機能があることを示すものである<sup>11)</sup>。本研究成果を物質移動モデルへ適切に反映し、必要な初期データを与えることができれば、実際の地質環境を対象とした安全評価の信頼性向上につながる。

## IV. 地質環境の長期安定性に関する研究

地質環境の長期安定性に関する研究では、地震や断層活動、火山や地熱活動、隆起・侵食/気候・海水準変動などの自然現象についての特徴を明らかにするとともに、それらが地質環境に及ぼす影響を解明するための調査技術および評価手法の開発を進めている。日本列島は安定した大陸に比べて地殻変動や火成活動が活発であることから、地層処分を行うためにはこれらの影響が小さい安定な地域や岩盤を選定したうえで、適切な多重バリアシステムを構築することが重要となる。また、その地質環境が将来どのように変化するかを予測する手法を整備することも重要である。そのため、土岐地球年代学研究所においては、地層処分事業における概要調査や国の安全規制における安全審査基本指針等の検討・策定に研究成果を反映できるよう、①自然現象に関する過去の記録や現在の状況を調査するための体系的な技術の整備(調査技術の開発・体系化)、②将来の自然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価するための手法の整備(長期予測・影響評価モデルの開発)、③最先端の分析装置等を用いた放射年代測定や鍵層の高分解能同定法等による編年技術の高度化(年代測定技術の開発)を進めている。以下に、最新の研究成果を紹介する。

### 1. 山地形成過程の解明に新たなアプローチ

地層処分の安全評価において対象となる、数万年を超



える時間スケールの中では、将来的に地下水の流れなどの地下の環境を変化させる山地の形成などの地形変化も起こり得る。そのため、山地の形成に関する情報を得ることは地層処分システムの長期的な安定性の評価において重要であり、そのような情報を得るための手法を開発する必要がある。

山地を構成する岩石は風化などによって岩石片や鉱物粒子になり、それらが河川により運搬され集積することにより堆積物が形成される。このような堆積物は元の岩石の情報を保持している場合が多く、堆積物の供給源とその変化を推定する後背地解析により、山地の形成過程を解明できる可能性がある。後背地解析では、堆積物とその供給源である岩石とを何らかの物質を指標として対比し、供給源の岩石を推定することが基本となる。ところが、一般的に行われている鉱物を指標とした後背地解析では、鉱物鑑定の特長知識や経験が必要であり、また多大な時間を要するという課題があった。

このような課題を解決するため、土岐地球年代学研究所では、専門的な知識や経験が無くても鉱物種の判定が可能となる手法を開発した。具体的には、堆積物に含まれる鉱物を1粒子ずつ電子プローブマイクロアナライザで分析し、得られた化学組成データを既存の化学組成データと機械的に照らし合わせることで測定した鉱物粒子の種類を判定できるようにした。

開発した手法の有用性を確認するため、岐阜県東濃地域に分布する堆積物(東海層群土岐砂礫層)にこの手法を適用したところ、過去に別の研究手法で推定されたこの地域の地形・地質分布の変化と整合的な結果が得られたことから、本手法の有用性を確認することができた。この新たな手法は機械的な判定であるため、客観的かつ迅速に堆積物やその供給源候補の岩石に含まれる鉱物の種類や存在比の情報を得ることができる。本手法は地層処分の分野のみならず、地球科学分野の研究の発展に寄与することが期待される<sup>12)</sup>。なお、本研究の一部は、経済産業省からの委託事業である「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(地質環境長期安定性評価確証技術開発)」(平成25年度～平成29年度)の成果である。

## V. 高レベル放射性廃棄物等の地層処分研究開発

核燃料サイクル工学研究所では、地層処分基盤研究施設と地層処分放射化学研究施設という2つの研究施設を活用し、地下深い地層中での環境(温度、水の移動、圧力、化学反応)を模擬したさまざまな工学規模の試験を行い、得られた成果を集約・可視化し、安全評価に必要なモデルの開発やデータベースの整備など、地層処分システムの設計や安全評価に必要な技術の開発を進めている。地層処分の安全評価の研究は、天然の地質環境

という広域な空間スケールおよび数万年以上の長い時間スケールを対象にしている。これは、従来の工学的アプローチの範疇を超えるものである。評価モデルの開発は、対象とする現象の理解、概念モデルの開発、数学的定式化、計算モデルの開発、検証、確証といった手順で進められる。モデルの検証とは、対象とする現象を表す数学モデルが適切な数学的定式化によって作成されているか、数学的定式化に基づく計算モデルは正しくプログラミングされ解法されているかを確認することである。モデルの確証は安全評価に用いる計算モデルが、評価の目的に沿って対象とする現象を適切に表現していることを実験などの観察事実との比較により確認することである。

以下では、高レベル放射性廃棄物と併置処分が検討されている TRU 廃棄物に含まれる硝酸塩の地層処分システムへの影響を評価するためのモデル開発において、天然で生じた事例を活用してモデルの確証を行った成果を紹介する。

### 1. 硝酸イオンの化学的変遷挙動評価モデルの確証

再処理施設から発生する TRU 廃棄物には、酸化性の化学種である硝酸イオンが易溶性の塩として含まれる廃棄物が存在する。地下深部にこのような廃棄物を処分すると、時間の経過に伴い、やがては地下水中に溶けだした硝酸イオンが処分場周辺の酸化還元状態を変化させる。さらに、硝酸イオンおよびその還元生成物であるアンモニアが放射性元素と錯体を形成する。このような現象は、処分場とその周辺の地下環境が本来有する放射性物質の移行遅延性能に影響を与える可能性がある。さらに、高レベル放射性廃棄物との併置処分を考慮した場合には、この硝酸イオンとその変遷物質の影響を回避できるように、処分施設間の距離を確保するなどの対処が必要となる。このため、深部地下環境における硝酸イオンの化学形態の長期的な変遷とその広がりを評価するモデルの開発が重要である。

核燃料サイクル工学研究所では、処分施設内の硝酸イオンについて、金属との反応、微生物との反応、および地層中に存在する還元性鉱物との反応に着目し、硝酸イオンの化学的な変遷挙動を評価するための解析モデルを室内試験結果との比較により開発してきた。しかし、地層処分の安全性の評価では、前述したように、天然の地質環境という広域な空間スケールを対象とすることから、室内規模を超える空間スケールに対する解析モデルの確証が必要である。そこで、農業分野において、施肥由来による地下水の硝酸性窒素汚染の調査事例が報告されていることに着目し、解析モデルによる再現計算を行った。硝酸性窒素汚染の事例としては、解析モデルの条件設定に必要な地質構造や地下水組成のデータが取得されている広島県尾道市の生口島での調査報告を選



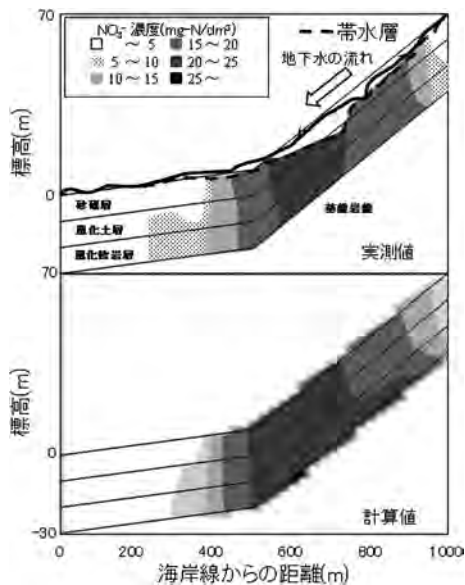


図4 硝酸性窒素濃度の分布の実測値と計算値

広島県尾道市生口島における地下水の硝酸性窒素の実測値に基づく濃度分布(上図)と硝酸イオン化学的変遷モデルにより計算された硝酸性窒素の濃度分布(下図)を示す。本図は文献13に掲載されている図を一部改変して作成したものである。

定した。生口島は、柑橘類の栽培が盛んであり、島の南側の斜面においては、施肥により数百メートルの領域にわたって、地下水が硝酸性窒素により汚染されており、海岸線に近づくにともないその濃度が減衰している。この事例では、地質構造はもとより硝酸イオン以外の地下水の溶存酸素濃度や有機物濃度などの解析モデルに必要なデータが取得されている。硝酸性窒素が微生物の反応により変遷するとしてモデルを設定して再現計算を行なった結果、数百メートル規模を対象として、モデルを用いて計算された硝酸イオンおよびその変遷で生じるアンモニウムイオンの濃度分布は、おおむね調査事例の実測値を再現しており(図4)、広域的な体系に対する解析モデルの検証を行うことができた<sup>13)</sup>。なお、本研究の一部は、経済産業省からの委託事業である「地層処分技術調査等事業(処分システム評価検証技術開発)」(平成26年度～平成29年度)および「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(TRU廃棄物処理・処分に関する技術開発)」(平成31年度)の成果である。

#### — 参考文献 —

- 1) <https://www.meti.go.jp/press/2018/07/20180703001/20180703001.html>
- 2) 総合資源エネルギー調査会原子力部会(2001): 原子力の技術基盤の確保について。
- 3) 閣議決定(2015): 特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本

方針。

- 4) 独立行政法人日本原子力研究開発機構(2014): 日本原子力研究開発機構の改革計画に基づく「地層処分技術に関する研究開発」報告書—今後の研究課題について—。
- 5) 中山雅, 雑賀敦, 木村駿, 望月陽人, 青柳和平, 大野宏和, 宮川和也, 武田匡樹, 早野明, 松岡稔幸, 櫻井彰孝, 宮良信勝, 石井英一, 杉田裕, 笹本広, 棚井憲治, 佐藤稔紀, 大澤英昭, 北山彩水, 谷口直樹(2019): 幌延深地層研究計画における地下施設での調査研究段階(第3段階: 必須の課題2015～2019年度)研究成果報告書, JAEA-Research 2019-013.
- 6) 松岡稔幸, 濱克宏(2019): 超深地層研究所計画における調査研究—必須の課題に関する研究成果報告書—, JAEA-Research 2019-012.
- 7) <https://www.jaea.go.jp/02/press2019/p20012701/>
- 8) [https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/press/31/press\\_0129.html](https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/press/31/press_0129.html)
- 9) De Craen, M. et al. (2008): Extent of oxidation in Boom Clay as a result of excavation and ventilation of the HADES URF: Experimental and modelling assessments, *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, pp. S350-S362.
- 10) Mochizuki, A. et al. (2020): Mudstone redox conditions at the Horonobe Underground Research Laboratory, Hokkaido, Japan: Effects of drift excavation, *Engineering Geology*, 267, 105496.
- 11) Yuguchi, T. et al. (2019): Role of micropores, mass transfer, and reaction rate in the hydrothermal alteration process of plagioclase in a granitic pluton, *American Mineralogist*, 104 (4), pp.536-556.
- 12) [https://rdreview.jaea.go.jp/review\\_jp/2019/j2019\\_8\\_8.html](https://rdreview.jaea.go.jp/review_jp/2019/j2019_8_8.html)
- 13) <https://nuce.aesj.or.jp/jnuce/In-Press/Jnuce-In-Press-200323.pdf>

#### 著者紹介

所属は、すべて日本原子力研究開発機構

棚井憲治 (たない・けんじ)

専門分野・関心分野 土木

望月陽人 (もちづき・あきひと)

専門分野・関心分野 地球環境化学

花室孝広 (はなむろ・たかひろ)

専門分野・関心分野 岩石学, 熱年代学

清水麻由子 (しみず・まゆこ)

専門分野・関心分野 構造地質学

三原守弘 (みはら・もりひろ)

専門分野・関心分野 TRU廃棄物処分, 地層処分の安全評価

## 良い話し合いとは

京都教育大学附属高等学校 1 年生 今中 咲幸

私は中学生の頃から放射性廃棄物の処理問題について話し合ってきた。ある時は大人数で、またある時は少人数で。幅広い年齢の人と話す機会も増えた。大人数の利点は、多種多様な意見が聞け、広く意見共有ができるところだ。しかし、緊張して自分の意見をうまく主張できない人、他人や場の雰囲気に合わせて遠慮して言いたいことが言えない人が出る欠点もある。実際に大人数よりも少人数の方がより活発な話し合いになったこともある。一方で少人数の欠点は話し合う意見の幅が狭まってしまうということだ。

いま、私は話し合いに関連して、北海道の寿都町の決断に注目している。「高レベル放射性廃棄物の最終処分場の候補地調査に手を上げるかを将来の町の財政を見据え、住民の意見を反映して設置するか否か判断する」と町長が述べている記事を目にしたからだ。住民へは説明会が開かれるようだが、そこで意見が言える人は一体、何人いるのか。意見交流会の内容を公表しない理由はなぜか。話し合いの規模や世代の違いで議論は大きく異なるだろう。大切なことは、皆で核のゴミ処分についての知識を共有し、まず、処分地について理解することだと考える。正しい理解がないと正しい判断ができないからだ。

では、良い話し合いとは何だろう？発言する人や意見の内容が一方的に偏ることなく、多くの人が意見交換を通して相互理解を深め、少しでも前向きに問題解決に近づけるような話し合いができることが望ましいのではないか。そのために何が必要か？私は放射性廃棄物処理問題の活動を通して、事前に話し合いの土台となる誰もが共通して持たなければならない正しい知識、情報の発信を継続していききたい。

## Column

### 持続可能な社会を目指して 2 ～教育現場の実情～

京都教育大学附属京都小中学校教諭 野ヶ山 康弘

日本には四季折々の「旬の食材」があり、その食材を通して四季を感じることができる。

この旬の食材と同様に、教育には「旬の教材」というものがあるように感じる。そして、教育はその旬を常に求める傾向があるようにも感じる。

例えば、コロナ禍の現在においてはオンライン授業の指導法・教材開発や環境整備、地震や洪水など大きな自然災害が起これば防災や減災、全国学力状況調査で思考力に課題が示されれば思考力育成といった具合に、常に社会の要求や社会の変化に敏感に反応している。しかし、これはあくまでも持続的に行われるのではなく、数年単位の一過性になってしまうことが多い。

私がこれまで経験した中でとても印象的だったことがある。

ある研修会で「福島県の震災復興」をテーマにした取り組みを紹介したとき、「東日本大震災や福島原発事故のことはもう旬ではないから、やる意味がない」という声が聞こえてきたことである。確かに、震災直後、全国的に放射線教育や防災教育が盛んにおこなわれていたが、現在はというと、教科書等に放射線や防災が明記されるようになったものの、教育実践でいえば震災以前に戻ってしまったような状況である。

旬でなくなったとしても「東日本大震災や福島原発事故」は、日本のエネルギー政策に大きな影響を与えている出来事であり、今の旬としてさまざまな実践が進められている「SDGs」の原点となることがこの出来事には多く含まれているように感じる。例えば、なぜ日本に原子力発電によるエネルギー供給が必要になったのか、なぜ日本の原子力発電所は海岸沿いに建設されているのか、なぜ原子力発電所が地方に多いのか、そこには日本のエネルギー需要やエネルギー政策が深くかかわっていることに気づかされることになる。

それゆえに、旬であるかどうかということだけではなく、その出来事の根本をしっかりと見極め、そこにある大切なことを子どもたちに伝え、考えさせていくことが教育現場では必要ではないだろうか。

## 組織的な教育が個人に与える影響を考える

福島県立安達高等学校 3年 服部 杏菜

進路に思い悩むこの頃、私は何に興味を持ち、何を指針として生きてきたのかを探し出そうと過去の活動を振り返ることがある。最近では高校1年次の夏休み2週間を使って参加したドイツ研修の時のメモを見返していた。掘り下げたいことがたくさん書いてあったが、中でも「ドイツでは半年間にわたって放射線についての授業をする学校もある」というメモに衝撃を受けた。当時はきっと「まあそういうところもあるだろうね」くらいの印象であり気に留めていなかったのだ。ドイツの授業といえば、大学進学を目標とする高校で演劇の授業があったり、政治・経済の授業は教科書を使わず討論が主だったりしたことを思い出した。成績の付け方や進学に関わる制度も違う。またホストファミリーにお世話になる初日に、パソコンの画面に福島県の地図を出しながら、あなたが住んでいる地域は原発から何キロ離れているのか、安全なのか、怖くないのかというような質問をされた記憶がある。ドイツでは福島原発事故を機に脱原発の世論が形成された。遠い国で起こったことに市民が反応し、考え、声を上げるという姿勢を支えるものは、あるいは教育もその一端を担っているのかもしれないとふと思った。どのような教育制度がベストかなどわからないし、日本のそれに改善の余地があるとも一概には言えないが、振り返ってみると、当たり前といえば当たり前ののだが、私の人格形成においてこの学校教育のシステムはかなり影響が強かったように思う。

## Column

### ポストコロナへの眼差し：科学教育

NPO あいんしゅたいん 坂東 昌子

コロナ災禍のなか、「子供が休校で親子理科実験教室を心待ちにしています」という声が届いた。新学期からの恒例の「親子理科実験教室」(物理学会京都支部との共催)も、結局中止せざるを得なかった。思案した挙句、オンライン実験教室を7月から始めた。8月までは、「光と色の不思議」「磁石が電気を起こす」「身の回りの放射線・地上から」「放射線宇宙から」の4回。対面の受講生3人を除いては遠隔授業。コミュニケーションの取り方が一番の課題。特に実験を伴う教室は初めてで、毎回、新しい問題が出てくる。色合いが画像で微妙に違う、細かい作業は見えにくい、早すぎる動作などを含む教材は不向きだな、と試行錯誤が続いている。遠隔打ち合わせも移動の手間は省けるが、雑談から生まれる新しいアイデアが出にくい。しかし逆に、学校の遠隔事業では、「不登校の子供たちが出席し質問する」という経験も聞いた。大学授業では、「意外にも出席率が上がり成績も全体に上がった」(京大のN教授談)という。どこでも出席でき、復習が容易ということで、学生たちはオンライン授業を評価しているらしい。逆に飛び抜けてできる学生が減少した感じがするという。私自身、オンライン講演や研究会に気軽に参加する機会が増えた。市民にとって生涯学習が気楽に受けられる機会が増えただろう。授業評価も、閉じた教室からいきなり公開の場で可能となり、授業が淘汰されるだろう。まさにコロナ禍による行動変容がもたらした社会構造変革、文化変革が始まった。14世紀猛威を振るったペストは、世界人口の2割を失わせ、古い農奴制度からルネッサンスへの歴史的構造変化につながった。今、ポストコロナ変革への創意工夫が求められている。



## 人間としての責任

徳島文理高等学校 3 年 松本 杏奈

昨年度、中国の汕頭市にて参加した Asian Science Camp というプログラムにおいて、各国混成のグループに分かれポスターを作成し発表する機会があった。そこでのテーマのうちの 1 つに「化学で持続可能な開発に寄与する方法」というものがあった。多くのグループはエネルギーと環境について発表していた。

私が生まれ育ったのは、工場の煙突から黒煙が立ち上る光景のような環境汚染の発生源とは無縁の地域だった。慣れ親しんだ無人島に大量のプラスチックごみが漂着していたことや、カヌーを漕いでいた際にクラゲだと思った物体が、実はビニール袋であったこと。どれも余所者の仕業、「他人事」として捉えていたのだ。

中国での話に戻ろう。各国を代表する理系頭脳達が自国の環境汚染の状況を語っているのを聞いた時、市中で黒色の車が一つも存在しない光景を目にした。車体が本当は黒色なのに、大気汚染で真っ白になっていたのだ。その時、私はようやく環境汚染の深刻さを実感した。「どこか知らぬ国の名も知らぬ大人達が勝手にやっている」では済まされない、この星に住む住人の一人として深刻に受け止め、そして科学に従事する人間として科学を適切に扱い、世界を変えなければならないと確信した。

科学を適切に扱うことは、人類にとっては永遠の難題だろう。全ての事象には良い面と悪い面が存在している。誰一人傷つけることなく、環境を汚染することなく、科学技術のさらなる発展を目指さなければならない。われわれの世代は、果たして先人から学び、そして後世へ頭を下げずに済むことが出来るのだろうか。可不可に関わらず、不断の努力を積み重ねばならぬことは言うまでもない。

## Column

### 予防原則と ALARP の共通点

東京大学 山口 彰

予防原則のもっとも強い表現のひとつは、1998 年米国ウィスコンシン州で開催された環境保護主義者の会議におけるウィングスプレッド宣言である。「ある活動が人間の健康や環境に対する危害の脅威をもたらすときは、たとえ因果関係が科学的に確証されていないとしても、予防的対策がとられるべきである」。国際原子力機関の基本安全原則は、「原子力安全の目的、有害な放射線影響から公衆と環境を防護することを達成するにあたり、放射線影響をもたらす活動を不当に制限してはならない」と述べる。両者は相矛盾しているように見えるが曖昧さという共通点がある。前者は、「確証」という言葉に、後者は「不当」という言葉に曖昧さが残る。

原則と言え、疑う余地のない、誰もが合意できる命題と思われがちである。曖昧さを残す原則をどう解釈すればよいのだろうか。実は、曖昧さを残しているからこそ、どこまでエビデンスを揃えれば「確証」と言えるのか、どのような要求は「不当」なのか、これを考え続ける必要がある。これは、ALARP(合理的に実現性がある範囲でリスクを低く)と似ている。「合理的」とか「実現性」もまた曖昧な言葉である。どのようなリスク低減ならば「合理的」で「実現性」があるのかを考え続けることを言外に求めている。

継続的安全向上は、リスクを低減し続けることではない。さらなるリスク低減の要求は、不当なのか、合理的か、実現性はあるのかを考え続けることであると思う。予防原則も ALARP もいずれも尊重すべき原則である。しかし、否応なしにリスク回避・低減を求めるわけではない。熟慮ないリスク回避は、新たなリスクをもたらすものである。「曖昧さ」を残しているからこそ、普遍的な原則となるのではない。