



Photo Masaki Abe

Index

加速器ベースBNCTにおける中性子ビームのリアルタイム モニタリングシステムの開発……………	高田 真志	1
地層処分における安全確保の考え方について…	上野 吹佳・石田 圭輔	6
[コラム] 62th Column 【カロリー制限で長寿】……………	中川 恵一	11
一般社団法人日本電気協会規格 「放射線モニタリング指針 (JEAG4606)」の改定について ……………	松永 光正・西村 僚太	12
[放射能・放射線単位の由来] 第5回 シーベルトsievert : Sv……………	高橋 正	17
返信用封筒の確実な封にご協力をお願いします……………		18
[サービス部門からのお願い] 「ご使用者変更連絡票」の「処理区分」をご記入ください!! ……		19

加速器ベースBNCTにおける 中性子ビームのリアルタイム モニタリングシステムの開発



高田 真志*

1. 序 論

現在、日本国民の半数が罹患すると言われているがんは、外科治療、化学療法、放射線治療、免疫療法によって治療できる。そして第5のがん治療として薬剤と放射線を組合せたホウ素中性子捕捉療法、通称BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) が試みられている。このBNCTは、ホウ素を含有した薬剤を投与した後、大強度の中性子を照射する治療法である。これにより、がん細胞に取り込まれたホウ素10原子核と中性子が原子核反応を起こし、生成されたアルファ線とリチウム7原子核ががん細胞のみ殺傷する。治療に必要な大強度中性子源を得るために研究用原子炉で行われていたBNCTは、直線加速器などを用いた加速器ベースの大強度中性子源に更新されたことで病院内でも実施できるようになった¹⁾。

安全なBNCT治療には、照射中性子量の評価も重要である。エックス線治療のように照射量をリアルタイムにモニタリングできるのが理想的であるが、中性子ビームのリアルタイムモニタリングを実現できていない現状、治療前後に金線を中性子線放射化させ、その放射化量から熱中性子量を後で導出している。治療中の中性子ビームの変動は、中性子発生ターゲットに照射する陽子ビームの電流を計測することで、間接的にモニタリングされている。すなわち治療中に発生する中性

子量を直接モニタリングできていない。これまで対電離箱方式、核分裂比例計数管、BF₃ガス比例計数管、小型シンチレーション検出器など様々な中性子検出器が開発されてきたが、中性子ビームのリアルタイムな直接モニタリングには至っていない。もちろん、医療関係者はエックス線治療と同様なリアルタイム中性子ビームモニタリングの実現を望んでおり、研究開発も行われている。中性子照射中、安定して中性子が発生しているのか、どの程度変動しているのか、これらを陽子ビーム電流値から推定しており照射が完了するまで不安である。この不安を解消するために本研究が開始された。

BNCTビームモニタリング実現には様々な条件を満足しなければならない。BNCT治療中に中性子エネルギースペクトルや空間分布など中性子ビームの特性に何も影響を与えないこと。患者自身で散乱された中性子によりモニター値が影響を受けないこと。大強度な中性子ビームを大線量率ガンマ線からリアルタイムに識別して計測できること。この放射線場で中性子センサーを安定して利用できる耐放射線性があること。

リアルタイムビームモニタリング手法として、BNCT中性子ビームのコリメーター内部に2種類の小型測定器を挿入してモニタリングすることが提案されている¹⁾。1台目の放射線測定器は中性子とガンマ線の両方に感度

* Masashi TAKADA 防衛大学校 応用物理学科 放射線科学 教授

を有し、2台目は中性子に不感でガンマ線のみに感度を有している。この両者の感度差を利用して、1台目の測定結果から2台目の測定結果を差し引くことで中性子のみを計測する。もちろん、単独の中性子測定器を用いて中性子とガンマ線を識別しながらリアルタイムに中性子ビームをモニタリングできる方が好ましい。

今回、国立がん研究センターと富士電機株式会社の協力のもと、国立がん研究センターに設置された加速器ベースBNCT中性子源のリアルタイムビームモニタリングに成功した。このBNCT中性子源に利用されている固体リチウムターゲットは照射陽子ビームで損耗するため、発生中性子量も減少することが報告されている²⁾。この中性子発生量の変動をリアルタイムにモニタリングすることが望まれている。

2. リアルタイム中性子測定器

このBNCT中性子ビームを計測するためにリアルタイム中性子測定器の開発と特性評価を実施してきた³⁾。我々が開発したリアルタイム中性子測定器の写真を図1に示す。この中性子測定器は厚さ40ミクロンの反転薄型シリコンpinダイオードとサブミクロンの極薄フッ化リチウム膜を組合せたものである。中性子は、フッ化リチウム薄膜中のリチウム6

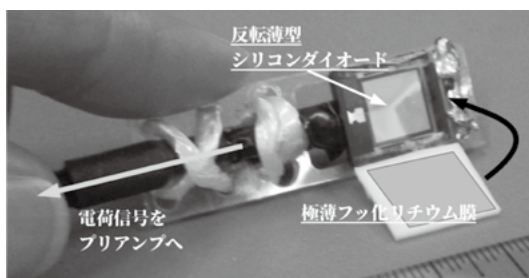


図1 リアルタイム中性子検出器の概要。反転薄型シリコンダイオードと極薄フッ化リチウム膜を組合せた構造である。文献3)を一部改変。

原子核と ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 原子核反応により生成された3重陽子(トリトン)とヘリウム4粒子(アルファ線)を検出することで計測される。フッ化リチウム薄膜を極薄にしたことで、大強度の中性子ビームをリアルタイムに計測できるようになった。さらにシリコンダイオードと中性子コンバーターを別構造にすることで中性子コンバーターを簡単に交換できるようになり、中性子の検出効率を容易に調整できるようになった。この特徴を活かして、あらゆるBNCT中性子ビーム強度に最適なビームモニターを提供できるようになった。

富士電機株式会社が開発した反転薄型シリコンダイオード⁴⁾を放射線計測に利用できるようになったおかげで、数100mGy/h以上のガンマ線が混在する放射線環境でも中性子事象を識別して計測できるようになった。この反転薄型シリコンダイオードはシリコンバルクを40ミクロンまで薄くし、表裏を反転させて不感層を1ミクロン以下にしたことで、エネルギー損失を最小にした2次粒子のエネルギー計測ができるようになった。

本中性子測定器の熱中性子に対する応答関数を実験とシミュレーションにより評価した⁵⁾。産業技術総合研究所に設置された黒鉛パイル熱中性子標準場で照射実験を行い、PHITSモンテカルロコードを用いてシミュレーションも実施した。得られた結果を図2に示す。熱中性子とリチウムとの原子核反応 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ により生成されたトリトンとアルファ線をガンマ線検出事象から明瞭に識別して計測できていることが分かる。また空気中の窒素による中性子捕獲反応 ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$ から生成された陽子事象も検出できていることが分かる。実測した応答関数はモンテカルロシミュレーションにより $\pm 3\%$ という高精度で再現できている。国家標準場で校正された中性子検出器を用いることで、BNCT放射線場の中性子フルエンス率を高精度に計測評価できるようになった。

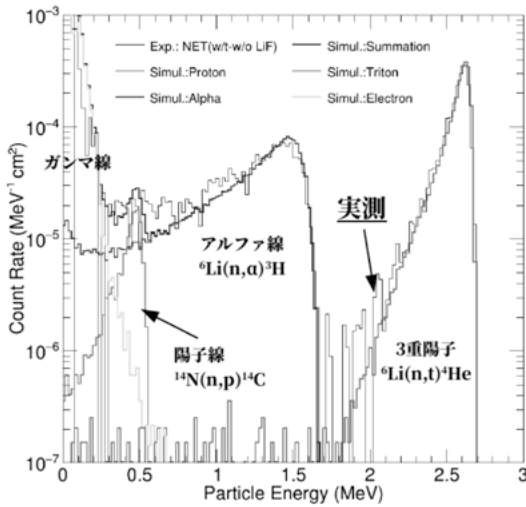


図2 リアルタイム中性子測定器の熱中性子に対する応答関数。黒細線が実測値、その他の実線はシミュレーションにより得られた2次粒子の成分である。文献5)を一部改変。

3. モニター設置場所

大強度中性子ビームを大線量率ガンマ線からリアルタイムに識別可能な中性子検出器を用いて、国立がん研究センターに整備された加速器ベースBNCT中性子源のリアルタイムビームモニタリングを試みた。リアルタイム中性子モニターの設置位置を図3に示す。まずBNCT治療中に、中性子ビームをリアルタイムに直接計測可能なモニター設置場所の候補として、図3中にバツ印を付した中性子コリメーター表面やコリメーター内部、患者ベッド上などが検討された。しかし、これらの位置に中性子センサーを設置した場合、中性子ビームの分布を乱すおそれがあり、患者により散乱された中性子を検出することで中性子モニターの計数率が影響を受けるおそれもある。また、コリメーター表面は信号ケーブルなどが治療の邪魔になり、コリメーター内部は追加工事が必要になる。治療の邪魔にならない位置として患者ベッド下や照射室壁の表面、コリメーターの側面なども検討されたが、これらの位置でのビー

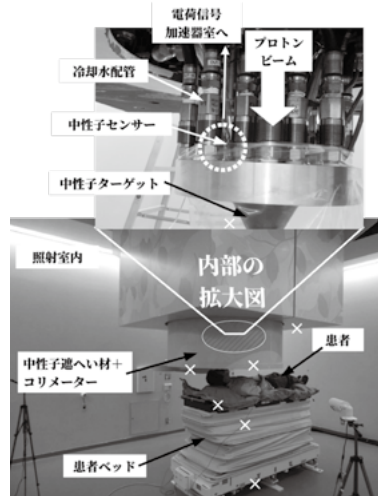


図3 国立がん研究センターに整備された加速器ベースBNCT中性子源用リアルタイム中性子ビームモニターを設置位置。設置候補から除外された場所をバツ印で、最終的にビームモニターを設置した場所を上段に丸印で示してある。

ムモニタリングも患者により散乱された中性子を検出してしまい、照射ごとに計数率が影響を受けてしまう。室内の状況によりモニター値が変動してしまい、中性子の有無が分かるのみで継続的な中性子発生ターゲットの変動をモニターすることはできない。全ての場所が不適切であるという結論に至った。適切な設置場所を見い出せず、リアルタイムなビームモニタリングは実現できない状況に陥った。

その後、様々な検討を重ねた結果、図3に丸印を付した遮へい体内部の中性子発生ターゲット上部しかないという結論に至った。この場所にリアルタイムモニターを設置すれば、ターゲットから発生した中性子を直接計測でき、患者による散乱の影響も受けなため、リアルタイム中性子モニターの設置場所として最適である。しかし、ターゲット上部に中性子センサーを設置した報告はこれまでなく、実現性は未知数である。ここしか設置場所の候補がないため、実現させるためにはトライするしかなかった。そこで、リアルタイム中性子センサー単体を遮へい体すき間からターゲット上部へ挿入し、低

ノイズ同軸ケーブルを介して電荷信号を加速器室まで伝送した。その後、前段増幅器と波形処理装置で信号処理し、波高分布を取得した。これにより前段増幅器などの電子回路を中性子損傷から保護した計測が可能になった。

4. BNCT中性子ビームの計測

中性子発生ターゲット上部にセットしたリアルタイム中性子センサーから出力された電荷信号を積分することで波高分布が得られ、中性子反応により生成された3重陽子による明瞭なピークを確認でき、ガンマ線検出事象から識別もできた。中性子発生から終了まで1秒毎に波高分布の計測を行い、得られた中性子とガンマ線の検出事象数の時間変化を図4にプロットした。中性子線とガンマ線の時間変化を丸付き実線でそれぞれプロットしてある⁶⁾。同時に中性子ターゲットに照射した陽子ビーム電流の時間変化も比較のために細実線でプロットした。短時間ならば、ターゲット損耗は無視できるため、陽子ビーム電流値はターゲットから発生した中性子量や患者に照射さ

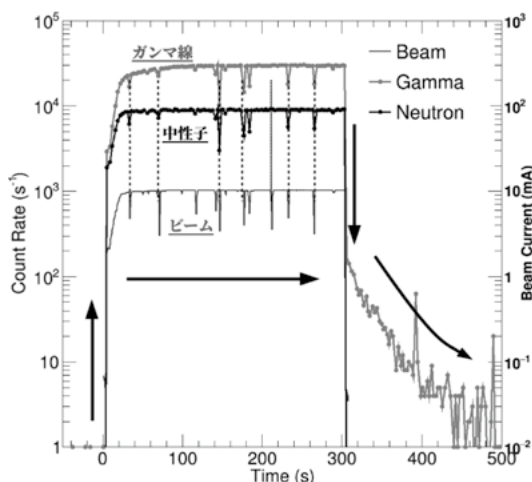


図4 ビームモニターの時間応答特性。中性子とガンマ線の計数率の変化、照射陽子ビーム電流を示してある。上向き矢印でビーム照射が開始し、下向き矢印でビーム照射が終了した。文献6)を一部改変。

れる中性子フルエンスと比例関係にある。すなわち照射陽子ビーム電流値の時間変化は照射中性子ビームの時間変化とみなせる。

陽子ビームが照射開始されると同時にビーム電流値は上昇し、20秒ほどかけて一定値に近づいていく。その後、280秒間一定値を維持した後、ビーム照射は終了した。計5分間の中性子照射である。中性子計数率の時間変化は、ビーム照射開始と同時に上昇しはじめ、ほぼ20秒後に約8,000/sの一定値となり、ビーム照射停止と同時に中性子計数率もゼロとなっている。中性子計数率の上昇と減少は、ビーム照射開始と終了のタイミングと良く一致している。さらに、点線で示された時間に、陽子ビームが瞬間的に減少している。陽子ビームが減少すれば中性子ビームも減少するため、その瞬間的な中性子発生量の減少も中性子モニターはきちんと捉えられていることが分かる。このように、我々が開発したリアルタイム中性子モニタリングはBNCT中性子ビームの発生量を正確に捉えていることが分かる。

次に、検出器が計測したガンマ線の時間変化も調べた。ガンマ線発生量も陽子ビームと同時に急激に上昇し、一定値に近づいていく。その後、陽子ビームと中性子量は一定値を示しているのに対し、ガンマ線は徐々に増加していき、120秒経過後に一定値になっていることが分かる。中性子発生ターゲットやターゲット構造材が陽子ビームや発生中性子により放射化し、その生成された放射性物質から発生したガンマ線も中性子センサーは検出している。生成放射性物質の量が飽和放射能に達した時点で一定となるため、ガンマ線の計数率は中性子計数率と異なる時間変化を示した。さらに、陽子ビーム照射終了後、半減期による放射性物質の減少をガンマ線計数率の減少として検出できている。

このように、本検出器を用いることでBNCT治療中に中性子ビームをリアルタイムに直接計測できていることが分かる。すでに患者位



図5 ビームモニタリングの画面。リアルタイムに中性子発生量の変化をグラフで捉えることができる。

置での照射中性子量との相関、長期安定性に関するデータの取得は完了している。

このリアルタイム中性子モニターから得られた中性子の計数率を表示できるアプリケーションを自作した。そのアプリケーションの画面を図5に示す。計測している3重陽子の計数率に校正定数を乗じて中性子フルエンス率、積算中性子フルエンス、平均中性子フルエンス率をリアルタイムに数値とグラフで表示できるようになっている。積算量の変化を示すグラフから中性子照射量の目標値への到達度をモニタリングでき、中性子量の変化を表すグラフから中性子ビームの変動も同時にモニタリングできるようになっている。表示された残り時間から、このまま中性子照射を続けると残りどれだけの時間照射すれば目標中性子照射量に達するのか視覚的に分かるようになっている。このアプリケーションを使うことで、BNCT医師や医学物理士、加速器オペレーターなどの関係者が中性子ビームの安定性や照射量をリアルタイムにモニタリングできる。

5. まとめ

反転薄型シリコンダイオードと極薄フッ化リチウム中性子コンバーターを組合せた中性子検出器を用いることで、これまで不可能と言われ

ていたリアルタイムBNCT中性子ビームモニタリングを実現させることができた。我々は、これまで全く分からなかった日々の中性子発生量の変化をリアルタイムに計測できるようになった。すなわちターゲットの変化を見る眼を手に入れた。このモニタリング手法を用いれば中性子発生ターゲットの異常を事前に検知でき、中性子発生ターゲットの不具合による治療中断を未然に防ぐことができる。今後のリアルタイム中性子ビームモニタリングの

進歩に注目していきたい。

最後に、BNCT中性子ビームモニタリングの開発研究に多大な支援をしていただいた国立がん研究センターの伊丹純先生（現 新松戸中央総合病院）、井垣浩先生、中村哲志先生、CICSの関係者各位、反転薄型シリコンダイオードを提供していただいた富士電機株式会社の青山敬氏、成田政隆氏ら関係者各位に深く感謝いたします。みなさんのご協力により、誰も実現できなかったBNCT中性子ビームのリアルタイム直接モニタリングを実現させることができました。

参考文献

- 1) IAEA, "ADVANCES IN BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY", (2023).
- 2) S.Nakamura, Phys. Medica, 58, 121-130 (2019).
- 3) M.Takada, Appl. Radiat. Isot., 176, 109856 (2021).
- 4) Y.Abe, Nucl. Instrum. Meth. A1034, 166838 (2022).
- 5) M.Takada, IEEE Trans. Nucl. Sci., 70 (4), 737-745 (2023).
- 6) 高田真志, 放射線, 46 (2), 67-71 (2021).

著者プロフィール

1995年東北大学工学部原子核工学科修士課程修了、1996年より放射線医学総合研究所 宇宙放射線防護プロジェクト、研究基盤技術部、緊急被ばく医療研究センターで主任研究員、Royal Military College of Canadaで客員研究員などを経て、2014年より防衛大学校教授、2022年より応用物理学科長、自衛隊中央病院技師養成所非常勤講師。専門は放射線防護、放射線計測。現在、BNCT中性子ビームのリアルタイムモニターの開発と中性子ビーム空間分布の評価に取組む。

地層処分における 安全確保の考え方について

上野 吹佳*1・石田 圭輔*2

1. はじめに

地層処分は、地下深くの岩盤が持っている「物質を閉じ込める機能」を利用し、閉じ込めをより確実にするための人工バリアを設けて、特定放射性廃棄物（高レベル放射性廃棄物と地層処分相当低レベル放射性廃棄物）を地下深部の安定した岩盤に埋設します。これにより、人間の生活環境に影響を与えず、長期間にわたって安全に隔離・閉じ込めができます。国際機関や諸外国における議論では、現時点で最も安全に実現可能な処分方法は地層処分であるとされており、その実現は原子力を利用する全ての国の共通の課題です。世界で唯一処分場の建設を開始しているフィンランドでは、国民理解・地域理解に弛まぬ努力を重ね、地層処分の実施を政府として決定した後に30年以上の歳月をかけて現在に至っています。また、スウェーデンやフランスでは、サイト（調査の対象となる区域や処分場の建設地として選定される区域）として8件および10件の関心地域がそれぞれあり、段階的な調査を経て地域の絞り込みが順次行われています。

日本では、2020年11月から、原子力発電環境整備機構（以下、機構という）が北海道の寿都町と神恵内村で、法律に基づく調査のうち最初に行う文献調査を実施させていただ

ています。機構は引き続き、全国のできるだけ多くの地域で、地層処分手業に関心を持ち文献調査を受け入れていただけるよう、対話型全国説明会などの様々な取り組みを行います。これまでコミュニケーションの場では、地層処分の安全性について、「火山や断層活動が多い日本で地層処分できるのか」、「数万年以上の安全性をどうやって確認するのか」等、多くのご質問を受けます。

本報では、地層処分について理解を深めていただく観点から、この場をお借りして、安全性を確保するための考え方について紹介します。

2. 地層処分のリスクと対策

サイトは、地質環境の調査・評価によって閉鎖後の処分場の長期安全性を確保するうえで好ましい特性を有するように選定します。そして選定したサイトの条件に基づき、必要な安全機能を備えるように設計した処分場の仕様に対して安全評価を行います。これにより、処分場の建設・操業時、または閉鎖後の数万年を見据えた長期間において、安全機能に影響を与える可能性のある様々なリスクが発生することを想定しても、その影響が規制基準に照らして許容できる程度に収まること

*1 Fuga UENO 原子力発電環境整備機構 技術部

*2 Keisuke ISHIDA



図1 地層処分におけるリスクとその対策の考え方²⁾

を確認します。地層処分の安全性に影響するリスクとその対策の考え方を図1に示します。事業を進める中で考えられる多数のリスク要因を抽出し、抽出したリスクに関して立地による対応、設計による対応、安全性の確認という一連の作業を通じて対処していきます。また事業を進めていく過程でこうしたリスクに応じた対策の確認を繰り返し実施することで、処分場の安全性に関する信頼性をより確かなものとします。

機構ではこうしたリスク要因の抽出やリスクへの具体的な対策、及びその実現性などを、地層処分の安全性を支える論拠や根拠として体系的にまとめ包括的技術報告書¹⁾として公表しています。

以下では、立地による対応、設計による対応、安全性の確認の観点から、どのようなリスクを考慮し、対応するのかについて例示します。

3. 立地による対応

処分場を建設する際には、処分場の立地により生じるリスク要因への対策を考慮する必要

があります。リスク要因としてはマグマの貫入などにより処分施設を破壊する可能性のある火山活動や処分場の安全機能の低下につながる地下水の流量が多い岩盤などが考えられます。さらに将来的に処分場近くで探査・採掘が行われ、生活環境から隔離した特定放射性廃棄物に人が接近してしまう、といったリスクが存在する地下資源の存在もリスク要因として挙げられます。こうしたリスク要因への対策として、調査の段階で火山、活断層が近く、地層の著しい変動が起きる箇所など自然現象のリスクが高い領域、鉱物資源が存在し人間の侵入の可能性が高い領域を避けます。例えば図2に示すように、火山活動が起きる地域は特定の地域に偏っており、その傾向は数百万年の間ほとんど変化しておりません。10万年程度の期間もこの傾向はほとんど変化しないと考えられます。また、断層活動も特定の地域に偏り、数十万年にわたり同じ場所で繰り返し起きており、10万年程度の期間は同様と考えられます。このような火山活動や断層活動が繰り返し生じている場所を避けて立地することで火山及び断層活動のリスクに対応します。

火山活動が起きる地域は過去数百万年の間ほとんど変化していません。

(注) ここでは一例として、**現在を含む地質学的な時代である第四紀**をその中の時代区分で概ね二分
(①約260万～80万年前と②約80万年前以降)

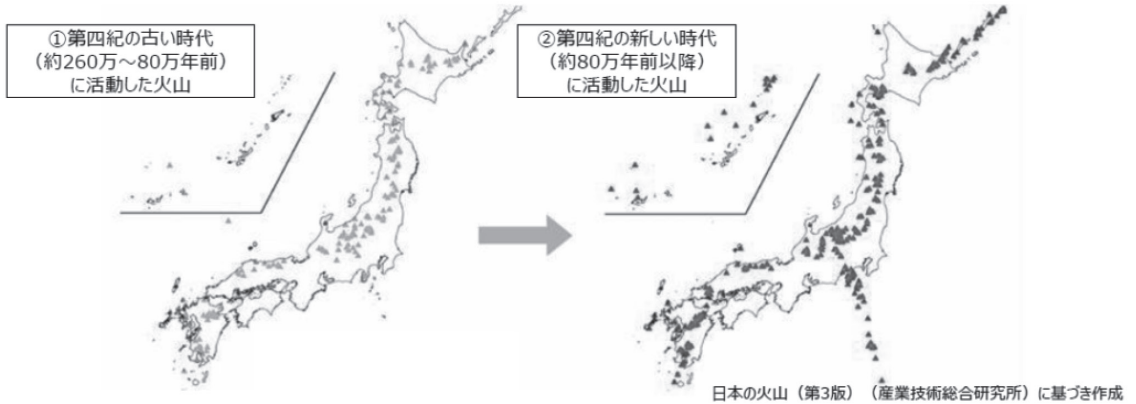
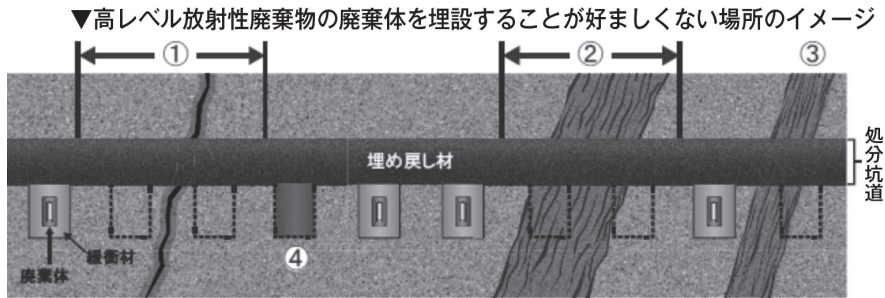


図2 日本における火山活動の発生地域²⁾



- ①小規模な地下水を通しやすい断層
- ②割れ目帯など
- ③割れ目帯などからの顕著な湧水箇所
- ④掘削不良(過大な凹凸、孔壁崩壊など)の処分孔

図3 廃棄物配置の検討例³⁾

包括的技術報告書では、幅広いサイト条件に対して地層処分への適合性を判断するための考え方や適用する調査・評価技術を整理しています。

4. 設計による対応

設計による対応では、処分場の安全機能についてのリスク対策を行います。

処分場の設計においては、要求されている安全機能が適切に発揮、維持されていくこと

が重要となります。そのため地下坑道掘削時の湧水や地震、津波など、建設・操業段階に影響が生じる可能性のある自然現象や卓越した岩盤の割れ目や速い流れの地下水の存在など、処分場閉鎖後数万年以上将来を見据えた際に天然バリアと人工バリアの閉じ込め機能に影響を与える地質環境特性などがリスク要因として挙げられます(図3)。包括的技術報告書ではこうしたリスク要因や処分場に求められる様々な要件を全国の地質環境情報や最新の技術開発成果などにに基づき総合的に考

慮しながら設計を最適化することを目的として、処分場の構成要素それぞれに対する設計要件を具体化します。そのうえで、設計要件を満たす人工バリア、地下施設および地上施設の設計を行うことで様々なリスク要因に対して柔軟に設計します。なお、包括的技術報告書では特定のサイトを対象としないことから、サイト条件に大きく依存する環境保全とモニタリングを除いています。

5. 安全性の確認

安全性の確認では、処分場への廃棄物の埋設が終了し、処分場を閉鎖した後数万年以上先まで長期の安全性に対して評価を行います。数万年以上先までの閉鎖後長期の安全性は実験などによって直接確認することは困難です。このため、処分場の状態が時間的にどのように変化し、これに伴って廃棄物から放射性物質が人間の生活環境まで移動する挙動をシナリオとして記述します。そして各シナリオに基づいた核種移行解析モデルとデータセットを整備し、シミュレーションを行うことで、人間の生活環境に影響する線量を算出し、基準値と比較することで安全性の確認を行います。

ます。

安全性において想定するシナリオの例である、地下水により核種が地表まで運ばれるイメージを図4に示します。包括的技術報告書においては、サイトを特定していないため、設定する前提条件や人工バリアの寿命などの安全機能を示すデータについて、より安全側（結果が厳しくなる側）となるよう見積もる保守的な評価を行っています。例えば、人工バリアであるオーバーパックが持つ閉じ込め機能は17,000年維持されると考えられていますが、地質環境の不均一性や製造時の品質などに応じた予測に対する不確実性を考慮して、解析上では4万本のガラス固化体をそれぞれ包んでいるオーバーパックが設計上の保証期間である1,000年で一斉に閉じ込め機能を失う、という設定をあえて設けています。こうした安全評価の例として、実際に深成岩を対象として行った線量評価の解析結果を図5に示します。解析結果から、ガラス固化体の処分において、保守的な評価であっても最大線量は各国の安全規制などを元に機構が「めやす」として仮設定した目標値を下回ります。なお、安全性の確認では新規の火山の発生や、処分場まで断層が伸展した場合など、発生する確率が極

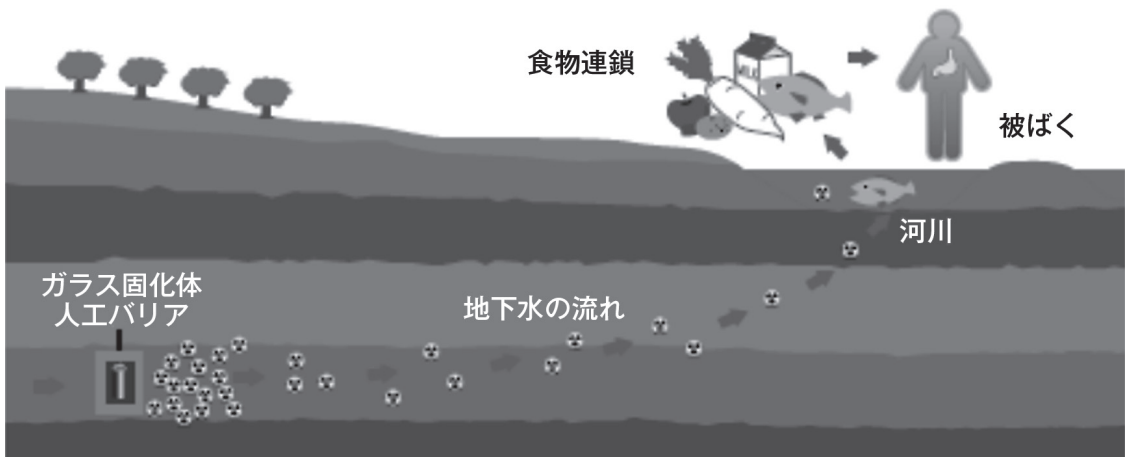


図4 安全評価において想定する地下水により核種が運ばれるシナリオのイメージ³⁾

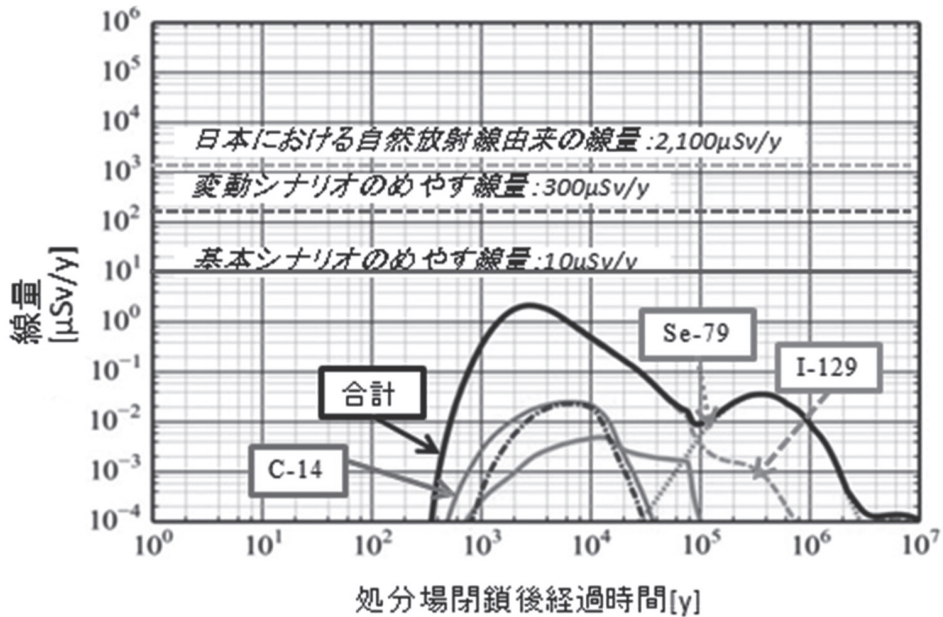


図5 解析による線量評価の結果例⁴⁾

めて小さいと考えられるものの安全性に影響
 が大きい事象についても、あえて評価してい
 ます。

6. おわりに

以上、地層処分における安全確保の考え方
 をご紹介させていただきました。包括的技術
 報告書については、経済協力開発機構／原子
 力機関による国際レビューの結果、「機構が
 国際的な慣行と整合した取りまとめ報告書
 を開発するための能力と成熟度を有している」、
 「日本の地質環境を考慮して地層処分の実現
 可能性を示す要素が実証されている」と評価
 を受けました⁵⁾。地層処分や機構の活動にご
 興味を持たれましたら、機構のホームページ
 をお訪ねいただければ幸いに存じます。

■ 機構ホームページ

<https://www.numo.or.jp/>



■ 参考文献

- 1) 原子力発電環境整備機構. 包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－, https://www.numo.or.jp/technology/technical_report/tr180203.html (閲覧日2023年12月15日)
- 2) 原子力発電環境整備機構. 高レベル放射性廃棄物の最終処分に関する対話型全国説明会 説明資料, 原子力発電環境整備機構 HP <https://www.numo.or.jp/setsumeikai/>, p.14-15 (閲覧日2023年12月15日)
- 3) 原子力発電環境整備機構. 地層処分 安全確保の考え方, https://www.numo.or.jp/topics/NUMO_anzen_A3.pdf, p.24-28 (閲覧日2023年12月15日)
- 4) 原子力発電環境整備機構. 包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－ 6章, <https://sct.numo.or.jp/GeoCom2/faces/content/content10004173/content.xhtml>, p.134 (閲覧日2023年12月15日)
- 5) 経済協力開発機構／原子力機関：原子力発電環境整備機構（NUMO）による「地質環境モデルに基づくサイト選定の前段階におけるセーフティケース」NUMOセーフティケースの国際ピアレビュー, https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_82280/-numo, (閲覧日2023年12月15日)



中川 恵一

東京大学医学部附属病院

カロリー制限で長寿

私は昼食を食べません。余計なカロリーを摂りたくないというのも理由の一つです。

低栄養にならない範囲でカロリーを制限すると寿命が長くなることは、酵母のような単細胞生物からマウスなどの実験動物まで広く認められています。

酵母の場合、餌に含まれる糖分の濃度を通常の2%から4分の1に減らすと、普通は20回分裂して死んでしまうのが、26回分裂できるようになります。つまり、寿命が3割延びるわけです。

マウスでもヒトと同じく、がんが死因のトップですが、カロリー摂取量を減らすことで、発症率も低下します。

カロリー制限で、がんが減り、寿命が延びる理由の一つが代謝活動の低下です。

質量保存則を発見した18世紀のフランス人化学者、ラボアジエは「呼吸はゆっくりとした燃焼である」と述べています。

生物は細胞内で酸素を使って栄養をゆっくりと燃やしながら、ATP（アデノシン3リン酸）としてエネルギーを蓄えます。

この燃焼活動に伴って、どうしても副産物が発生します。その一つが活性酸素で、これが遺伝子やたんぱく質を酸化させ、老化や発がんにつながります。カロリー制限はこの活性酸素の発生を減らしますので、寿命の延長につながると考えられます。

人間でもカロリー制限が長寿をもたらすかどうか、興味のあるところですが、ヒトとDNAの93%が共通するアカゲザルを使った実験が行われました。

このサルはニホンザルに近い外来種の霊長

類で、平均寿命は約26歳、最長寿命は約40歳です。

アカゲザルに与える餌のカロリーを3割制限して、健康影響を前向きに調べる研究が、1980年代にアメリカの2施設で始まりました。ただし、ビタミン、ミネラルは十分に与えています。

この結果は驚くべきものでした。カロリー制限によって、アカゲザルの寿命は大きく延びました。がんや心血管系の病気の発症率も減少し、健康寿命も延長しました。

なかには43歳まで生きるサルも現れ、アカゲザルの最長寿記録を樹立しました。43歳はヒトでは129歳に相当します。

さて、青森県にある環境科学技術研究所では、4千匹の同じ系統のマウスを同じ環境、同じ餌で飼育して、低線量被ばくの影響を観察しています。

4百日で8千^mSvを照射した場合、オス、メスとも寿命が短くなっていましたが、4百^mSvでは、メスはわずかに短命化したものの、オスには影響は見られませんでした。

さらに、オスのマウスに8千^mSvを照射した際のカロリー制限の効果を確認する実験も行われました。

4百日で8千^mSvを照射した群と非照射群を、通常のカロリーを与えた場合とカロリー制限を行った場合に分け、計4群で寿命を比べました。

一番長生きしたのは非照射のカロリー制限群で、もっとも短命だったのは照射を受けた通常カロリー群でした。2番目に長生きだったのは照射を受けたカロリー制限群で、照射を受けない通常カロリー群より長生きでした。

8千^mSvといった大量の放射線の影響も、カロリー制限で克服可能だということです。腹8分目の健康効果は絶大です。

一般社団法人日本電気協会規格 「放射線モニタリング指針(JEAG4606)」の 改定について

松永 光正*1・西村 僚太*2

1. はじめに

2023年12月、一般社団法人日本電気協会(以下、「電気協会」という。)が発行している電気技術指針のうち、JEAG 4606 放射線モニタリング指針(以下、「本指針」という。)が改定され、発刊された。

本指針は、原子力発電所及び使用済燃料の再処理施設(以下、「原子力発電所等」という。)での放射線モニタリングの考え方及び方法を示すものである。今回の改定では、原子力規制庁環境放射線モニタリング技術検討チームの検討結果並びに新規規制基準対応の適合性審査において得られた知見を取り入れたほか、関連法令、関連規格、引用規格等について最新版を反映し、原子力発電所等の放射線管理の実状に合わせた記載内容の見直し、語句の適正化などの変更を行った。

2. JEAC及びJEAG

電気協会「原子力規格委員会」は、原子力

施設の安全性と信頼性を確保する観点からその設計・建設・運転等において実現することが適切と考えられる技術及び技術的活動の仕様について定める電気技術規程(Japan Electric Association Code: JEAC)、及び電気技術指針(Japan Electric Association Guide: JEAG)を制定するとともに、新たに得られた知見を踏まえて、その改定を行っている。原子力規制委員会が技術的な妥当性を評価したうえで、JEAC及びJEAGを法規制に活用している例もある。

図1に原子力規格委員会の検討会活動の構成を示す。

本指針は放射線管理分科会(分科会長 日本アイソトープ協会 上叢義朋)のもと、放射線モニタリング指針検討会(以下、「本検討会」という。)が、原案を作成し、放射線管理分科会及び原子力規格委員会での審議及び承認のうえ、公衆審査を経て、発刊された。なお、放射線管理分科会では本指針のほか、原子力発電所の遮蔽設計の方法及び考え方を示した「JEAC 4615-2020 原子力発電所放射線遮蔽設計規程」及び原子力発電所等における個人被ばく管理の方法などを示した「JEAG

*1 Mitsumasa MATSUNAGA 中部電力株式会社 原子力本部 原子力部 運営グループ 副長

*2 Ryota NISHIMURA 東北電力株式会社 原子力本部 原子力部 放射線管理

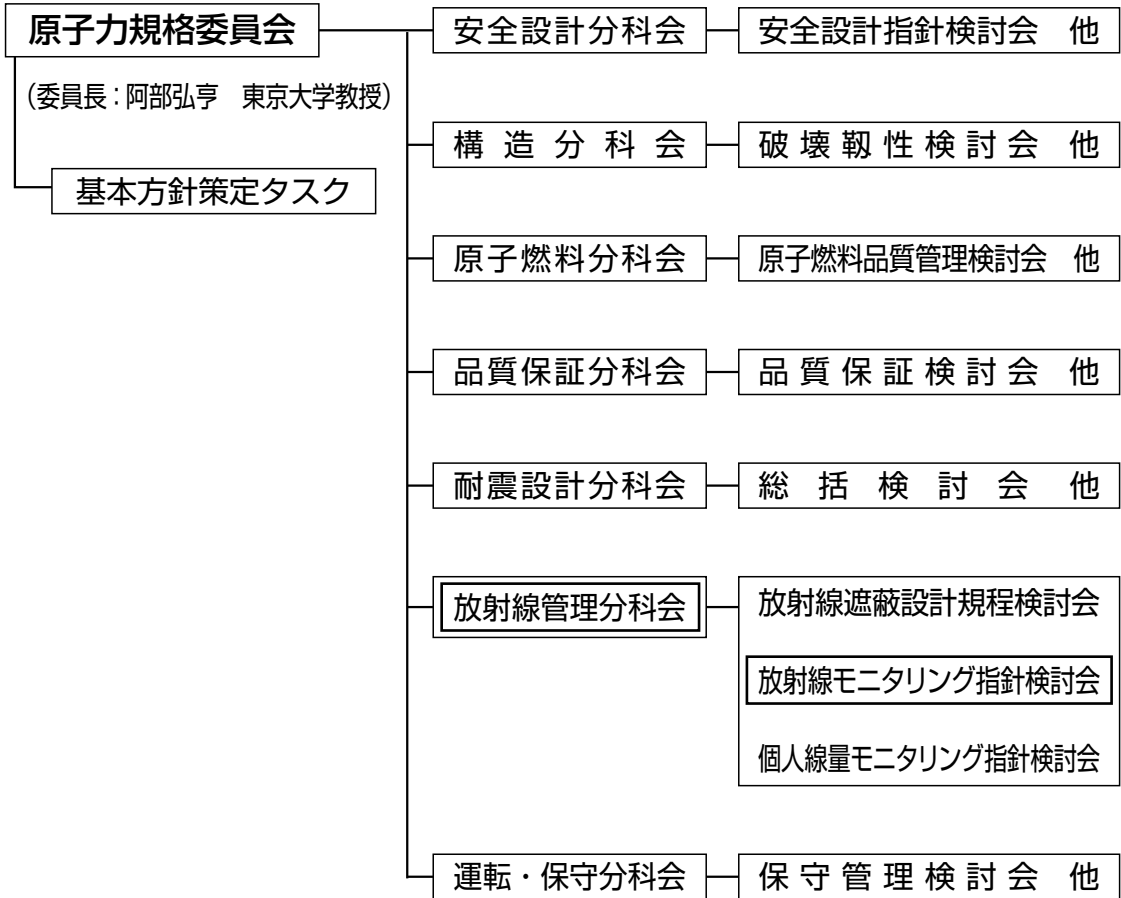


図1 原子力規格委員会 検討会活動の構成

4610-2021「個人線量モニタリング指針」を所管している。

.....

3. JEAG 4606の制定・改定の経緯

.....

(1) 本改定までの変遷

日本の原子力発電所における放射線計測に関する技術指針は、1965年に「発電用原子力設備に関する技術基準」（昭和40年通商産業省令第62号）として定められたが、放射線モニタリングについて具体的に言及がされてい

なかったことから、1975年11月に本指針が制定され、これまで、本改定を含めて6回の改定が行われた。本指針の制定から本改定までの変遷を表1に示す。

本改定の主なポイントは以下である。

- ①原子力災害対策指針補足参考資料として、平常時モニタリングと緊急時モニタリングが整備されたのを受け、関連する章の内容を全面的に見直した。
- ②平常時モニタリングにおける放射性物質の濃度の測定に使用する計測器の保守、点

表 1 JEAG 4606の制定から本改定までの変遷

改定	発行年月	改定概要
-	1976年1月	制定
第1回	1987年11月	国の指針が順次整備され、技術の進歩、運転経験の蓄積に対応した見直し
第2回	1990年5月	平成元年4月に施行された改正法令及びこれに基づく関連指針の改定の内容を反映した
第3回	1996年10月	国内の全てのPWRにおいて高感度型主蒸気管モニタ(N-16モニタ)が設置運用されていることを反映した
第4回	2003年5月	国際放射線防護委員会1990年勧告(ICRP Publication 60)の法令取入れや原子力災害対策特別措置法の制定などを考慮して改定した
第5回	2017年3月	指針名称の変更、適用範囲に使用済燃料の再処理施設を追加した
第6回	2023年12月	規格・基準の反映、環境放射線モニタリングの記載内容を見直した

検及び校正に、ISO/IEC 17025の考え方に沿った品質を保証することが推奨されている旨を記載した。

③新規制基準対応の適合性審査で得られた知見に基づき、再処理施設の排気モニタの耐震設計の内容を見直した。

.....

4. 本改定の主な内容

.....

本指針は、プロセス放射線モニタリング(発電所)、エリア放射線モニタリング(発電所)、放出管理モニタリング(再処理施設)、管理区域内放射線モニタリング(再処理施設)、周辺監視区域境界近傍放射線モニタリング、

環境放射線モニタリング、校正及び点検の主に7つの章で構成されており、それぞれの内容の変更内容について以下に示す。

(1) プロセス放射線モニタリング(発電所)

PWRのプロセス放射線モニタを設置し測定する系統として「重大事故等時に格納容器内ガスを格納容器外に排出する系統」(図2)を追記した。

(2) エリア放射線モニタリング(発電所)

大きな内容の変更はなし。

(3) 放出管理モニタリング(再処理施設)

新規制基準対応の適合性審査で得られた知見に基づき、設計上考慮すべき事項について、排気筒モニタの耐震設計の内容を追記した。

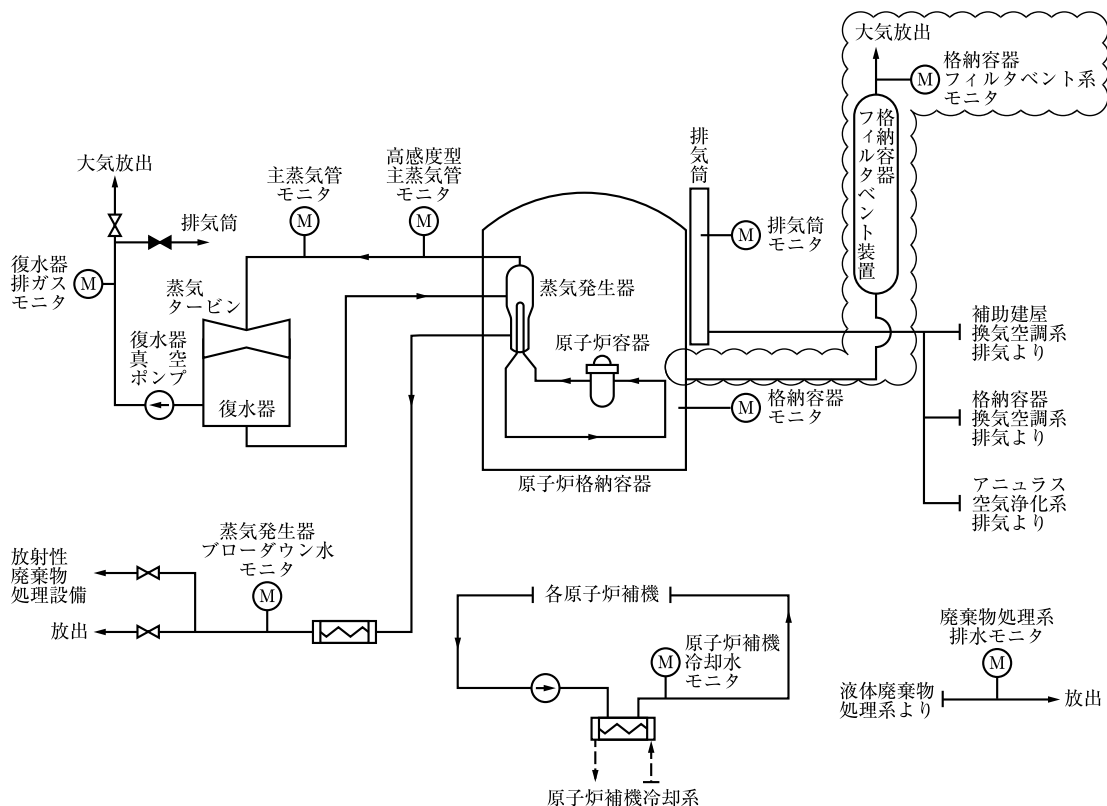


図2 PWRプロセス放射線モニタ説明図の例

表2 環境放射線モニタリングの章の目次比較

(変更前)	(変更後)
<p>8. 環境放射線モニタリング</p> <p>8.1 目的</p> <p>8.2 環境放射線平常時モニタリング計画</p> <p>8.3 計画の策定</p> <p>(1) 代表的なモニタリングの調査内容等</p> <p>(2) 操業前調査において留意すべき事項</p>	<p>8. 環境放射線モニタリング</p> <p>8.1 目的</p> <p>8.2 環境放射線モニタリングの区分</p> <p>8.3 平常時モニタリング</p> <p>a) 目的</p> <p>b) 実施体制</p> <p>c) 計画</p> <p>d) 平常時モニタリングの実施範囲及び実施項目</p> <p>8.4 緊急時モニタリング</p> <p>a) 目的</p> <p>b) 実施体制</p> <p>c) 計画</p> <p>d) 緊急時モニタリングの実施項目</p>

(4) 管理区域内放射線モニタリング(再処理施設)

大きな内容の変更はなし。

(5) 周辺監視区域境界近傍放射線モニタリング

「放射能測定法シリーズ：連続モニタによる環境γ線測定法」の内容を反映した。具体的には、モニタリングポストの設計上考慮すべき事項として、耐震設計、校正及び点検、設置場所周辺、落雷対策を追加した。

(6) 環境放射線モニタリング

従来は、環境放射線モニタリング指針を参照し、環境放射線モニタリング計画及び計画の策定を記載していたが、本改定では、原子力災害対策指針¹⁾、原子力災害対策指針補足参考資料^{2, 3)}を参照し、平常時モニタリングと緊急時モニタリングに分別し、平常時及び緊急時モニタリングの目的、実施体制、計画及び実施項目を記載した。表2に改訂前後の目次比較を示す。

(7) 校正及び点検

放射性同位元素等の規制に関する法律 規則第20条に係る「測定の信頼性確保」での要求事項⁴⁾、最新のJIS⁵⁾を参照し、校正方法や点検方法を見直した。また、実運用に合わせて、校正とは異なるが校正結果が継続して有効であることを確認できる方法である「機能確認」を記載した。

5. おわりに

5年毎の定期見直しに伴い、2021年5月から本検討会を開催し、合計6回の検討会及び

適宜メールによる意見交換等により、改定作業を行った。原子力発電所等の放射線モニタリング担当は、今後、本指針を傍らに業務を行い、更なる改善を図り、次回改定時によりよいものができるように努めたい。

電気協会では、原子力規格委員会のホームページにおいて、本検討会の開催状況や議事録を参照できるように透明性を図っており、読者の皆様からのご意見を頂戴できれば幸甚である。



原子力企画
委員会
ホームページ

謝 辞

コロナ禍で開催した本検討会は、全てWEB会議で行い、対面での会議ができず、当初、戸惑った部分もあったが、関係者の協力により、非常に短い期間で改定作業、発刊を行うことができた。本指針の改定に関係した、日本電気協会の事務局、原子力規格委員会、放射線管理分科会及び放射線モニタリング指針検討会の関係各位に深く感謝の意を表します。



日本電気協会
ホームページ

参考文献

- 1) 原子力災害対策指針, 原子力規制委員会, 令和元年7月
- 2) 平常時モニタリングについて(原子力災害対策指針補足参考資料), 原子力規制庁監視情報課, 令和3年12月
- 3) 緊急時モニタリングについて(原子力災害対策指針補足参考資料), 原子力規制庁監視情報課, 令和3年12月
- 4) 放射線障害予防規程に定めるべき事項に関するガイド, 原子力規制委員会, 令和4年3月
- 5) JIS Z 4511:2018 X線及びγ線用線量(率)測定器の校正方法

放射能・放射線
単位の由来
 高橋 正

第 5 回
 シーベルト sievert : Sv

★放射線に関する分野の大きな功績を称え、その名前が単位等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企画★

シーベルトは被ばく線量を表す単位である。被ばく線量には防護量としての等価線量や実効線量、実用量としての周辺線量当量や個人線量当量があり、いずれの線量も単位としてシーベルトを用いる。かつては線量当量の単位としてレム (rem : röntgen equivalent in man) が使われていた。1977年の国際放射線防護委員会 (ICRP) 勧告で線量当量のSI組立単位の名称としてシーベルトが提唱され、1979年に国際度量衡委員会によって採択された。1 Sv = 1 J kg⁻¹ = 100 remである。

単位の名称シーベルトは、放射線防護の研究と国際的な活動で大きな貢献をしたロルフ・マキシミリアン・シーベルト (Rolf Maximilian Sievert ; 1896 - 1966) によっている。シーベルトは1896年にスウェーデンのストックホルムに生まれた。父はドイツ東部ドレスデン近郊出身の実業家で、電話ケーブル事業で大成功を納めた人だった。裕福な家庭に育ったシーベルトは若くして莫大な遺産を相続し、生涯にわたって何不自由ない生活を送ることができた。

シーベルトはウプサラ大学で物理学を学んで1919年に卒業し、1932年にX線やラジウムの放射線の測定と物理・医学への応用に関する研究で学位を得た。同年、ストックホルム大学医学物理学の准教授となった。

シーベルトが放射線の研究を本格的に始めるきっかけとなったのは、1920年に放射線物理学研究の視察に訪れたアメリカでフォセル (G. Forssell) と出会ったことだった。フォセルはストックホルムに放射線医療の研究所ラジウムヘメットを創設したばかりだった。シーベルトはラジウムヘメットに実験施設を寄贈し、医用放射線測定や放射線防護の研究をスタートさせた。ラジウム線源からの放射線の空間分布の測定を行ない、放射線の強度を計算する式 (Sievert理論) を導き、ポータブル線量計を携帯して地方の病院に出かけて皮膚紅斑量の標準化を行なった。シーベルトは線量計を多数開発しているが、なかでもSievert chamberとよばれる直径

数ミリメートルの小型で軽量の蓄電式線量計は有名だった。この線量計は体腔内にセットしてそのまま照射位置で測定できたし、ファントムを使った線量分布の測定に使うことができた。これにより治療者の被ばくが軽減され、放射線治療技術も向上した。

1937年、ラジウムヘメットのシーベルトの研究室は世界的な医科大学として有名なカロリンスカ研究所の管理下に入り、放射線物理学部門となった。シーベルトはここで1941年から1965年まで放射線物理学教授を勤めた。

シーベルトは1930年代になると、放射線の生物学的影響、特に放射線科医師の業務被ばくの影響やその比較のための自然放射線の影響の研究を進めた。第二次大戦後には、⁴⁰Kが人体における放射線の主な発生源であることを実証し、建物内のラドンの測定と肺への影響を調べる先駆的な研究を行なっている。1950年代には自然γ線の連続測定装置を製作し、車に搭載してスウェーデン全土の放射線分布を調べた。時代背景もあり、シーベルトはスウェーデンの放射線観測網の設立を推進した。これは後日、チェルノブイリの事故を最初に見つけることになった。

シーベルトは組織の運営や資金獲得にも長けており、放射線防護の取り組みでは国際的にもリーダーシップを発揮した。1928年にストックホルムでICRPの前身の国際X線ラジウム防護委員会が設立され、開催国を代表してシーベルトがその委員長となった。その後も委員を務め、戦後のICRPにおいて1956年から1962年まで再び委員長に選出された。この間ICRPの組織を現在に近い体制とし、財政を安定化させた。シーベルトはまた1958年から60年まで国連科学委員会 (UNSCEAR) の委員長を務めたので、同時に放射線に関する二つの重要な委員会の要職を併任したことになる。

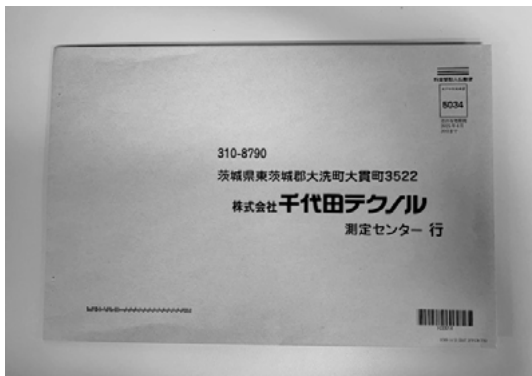
1965年すべての職を辞して引退後の生活を楽しもうとしていたが、1966年12月の胃がん手術のあとに肺血栓閉栓症を併発し、突然帰らぬ人となった。70歳だった。

返信用封筒の確実な封にご協力をお願いします

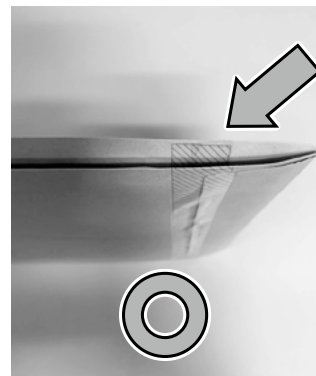
平素はガラスバッジサービスをご利用くださりまして、誠にありがとうございます。

線量計の測定依頼をいただく際、返信用封筒で投函されるお客様は、セロハンテープで確実に封をしてくださいますようお願いいたします。

テープのりやホチキスを使用しますと確実に封ができない場合がございますので使用はお控えくださいますようお願いいたします。



返信用封筒

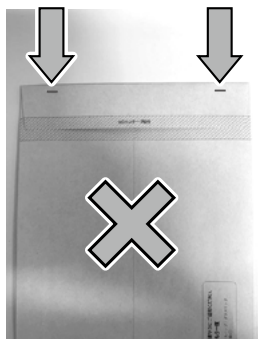


セロハンテープOK例

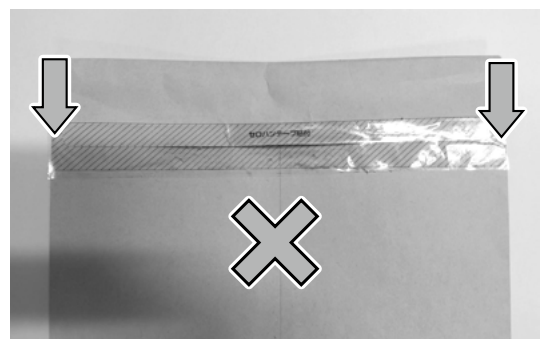
セロハンテープ貼付と書かれたマチの部分まで、確実に貼り付けてください。



テープのりNG例



ホチキスNG例



セロハンテープNG例

テープのりやホチキスは輸送中に剥がれたり、完全に封ができません。

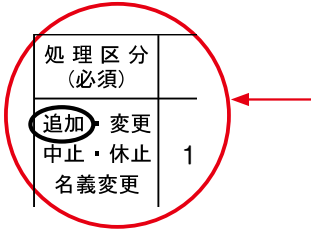
マチの部分までしっかり貼り付けていないと輸送中に剥がれます。

お客様からお送りいただいた線量計を確実にお預かりするため、ご理解とご協力をよろしくお願い申し上げます。

サービス部門からのお願い

「ご使用者変更連絡票」の「処理区分」をご記入ください！！

平素より弊社のガラスバッジサービスをご利用くださりまして誠にありがとうございます。
「ご使用者変更連絡票」をご記入の際は、「処理区分」のいずれかの項目に○印をつけてください。「ご使用者変更連絡票」と一緒に記入例、**処理区分早見表**をダウンロードしていただけますので、ご参照のうえ、ご記入をよろしくお願いたします。



株式会社千代田テクニル 行

フリーダイヤル (FAX番号)
0120-995-204

ご使用者の変更を次のとおり依頼します。

ご記入ください
 ・ご本人の印
 ・氏名変更名、千代田テクノリ総務所
 ・姓 名、 姓別欄
 ・ご担当者名、千代田 太郎 電話番号、03-3816-5210

ご使用者印

※お客様コードは必ずご記入ください

処理区分 (必須)	登録コード	登録番号	個人コード	ご使用者名	性別	生年月日(西暦)	職種	業種	放射線取扱	変更年月日(西暦)	備考 (印・名義変更)
追加・変更	123-567-890			千代田 太郎	男	1960年 11月 10日	医師	FS	既・新	2024年 2月 1日	○
中止・休止	123-567-890				男				既・新	20 年 月 日	
名義変更					男				既・新	20 年 月 日	
追加・変更					男				既・新	20 年 月 日	
中止・休止					男				既・新	20 年 月 日	
名義変更					男				既・新	20 年 月 日	
追加・変更					男				既・新	20 年 月 日	
中止・休止					男				既・新	20 年 月 日	
名義変更					男				既・新	20 年 月 日	

*「ご使用者変更連絡票」は弊社ホームページからダウンロードできます。

<https://www.c-technol.co.jp/pdf/glass-badge/ご使用者変更連絡票.pdf>



*「ご使用者変更連絡票」はこちらまで…測定センター フリーダイヤルFAX: **0120-995-204**

編集後記

- 2月号はまず巻頭にBNCTの中性子線計測というテーマで、防衛大学校の高田真志先生から寄稿いただきました。外科、化学、放射線、免疫につづく第五のがん治療として試みられている薬剤と放射線を組み合わせたホウ素中性子捕捉療法(通称BNCT)は、治療に必要な大強度中性子線源を加速器で得ることが可能となり、病院内でも実施できるようになっています。安全なBNCT治療には、照射中性子量の評価が重要であり、今回の発表は本治療の普及に大いに貢献する可能性を秘めていると期待します。
- NUMO技術部上野吹佳様、石田圭輔様からは、地層処分における安全確保の考え方について寄稿いただきました。地層処分に適した地質環境の選定、処分場の設計と工学技術、閉鎖後長期の安全性の確保など、あらゆる角度から検討され進められることを再認識いたしました。この事業の重要性などが、読者の皆様の関心と理解促進につながればと期待します。
- 東大病院の中川恵一先生のコラムでは、今回カロリー制限

で寿命が大いに延びることについて言及いただきました。マウスの実験では8,000mSvの放射線照射の影響も、カロリー制限で克服可能という結果が出ているということ。驚きです。変な薬に頼ることなく、適度な運動を伴ったダイエットを心がけようと思つた次第です。

- 中部電力松永光正様、東北電力西村僚太様からは、日本電気協会規格の放射線モニタリング指針 (JEAG4606) の改定について寄稿いただきました。本指針は原子力発電所等での放射線モニタリングの考え方及び方法を示す、重要な内容ですが、コロナ禍ということもあり、すべて検討をWEB会議で行ったとのこと。関係者のご尽力に敬服いたします。
- 東邦大学名誉教授の高橋正先生からは連載物として、放射能・放射線単位の名称の由来についてご紹介いただきました。今回はシーベルトさんですが、そのファミリーストーリーや研究経緯を改めて知ることとなり、非常に感激しております。この連載、これからは是非楽しみにしていきたいと思つています。(T.F)

FBNews No.566

発行日/2024年2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 古田悦子 青山伸 福田達也 藤森昭彦
篠崎和佳子 高橋英典 東元周平 廣田盛一 丸山百合子 山口義樹

発行所/株式会社千代田テクニル

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/03-3252-2390 FAX/03-5297-3887

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

印刷/株式会社テクニルサポートシステム

—禁無断転載— 定価400円(本体364円)