

# 放射線教育

付放射線教育フォーラム 2022 年度活動報告

2022

VOL. 26 NO. 1

放射線教育フォーラム Radiation Education Forum

# 放射線教育

Radiation Education

#### Vol. 26 No. 1

次 Ħ 【巻頭言】医療スタッフへの放射線教育に関する法整備 大野 和子 1 【解説】 核融合炉とトリチウム ~ 新エネルギーの利用に向けて~ 工藤博司 3 【資料】 健康と放射線 ―ドイツ・オーストリアにおけるラドン坑道療法の臨床研究動向― 大森 佐與子 13 【解説】 21世紀中葉に向けたエネルギー供給と原子力 石井正則 20 【資料】 エネルギー政策に対する学生の意見と背景について 若杉和彦 29 【意見】 医療における被ばくと放射線防護の考え方 酒井一夫 40 「放射線教育」投稿規定、原稿の書き方 編集後記 緒方 良至

発行: 2023 年 3 月 31 日, NPO 法人放射線教育フォーラム

〒110-0015 東京都台東区東上野 6-7-2 萬栄ビル 202 号室

Tel: 03-3843-1070 FAX: 03-3843-1080

E-mail: forum@ref.or.jp, HP: http://www.ref.or.jp

#### 【巻頭言】

# 医療スタッフへの放射線教育に関する法整備

大野 和子 京都医療科学大学



医療法施行規則の一部を改正する省令(平成31年厚生労働省令第21号)等により、放射線診療を行う医療機関では、放射線に係る安全管理体制を確保し、放射線の安全で有効な利用に努めることが求められるようになりました。

これは決してずさんな放射線利用をしていたとか、管理体制が不十分であったことによる改正ではありません。高齢化社会を迎えて、患者さんへの身体的負担の少ない診療としての需要が益々高まっている医療現場の状況を踏まえ、さらなる放射線診療の安全な発展を後押しするための環境整備です。

改正により「医療放射線安全管理責任者」を新たに設置 しています。医師または歯科医師の資格を持つ者が(放射線科専門医が務めることが望ま しいとされています)担当します。職務は1.放射線安全に関する施設の指針の取りまと め、2. 放射線診療に従事する医療スタッフへの研修の実施、3. 患者に用いた放射線量 や放射能量の記録とその結果の検討、4.過剰被ばく等の事故時の対応、です。画期的と 感じたことは、研修を放射線科医師や診療放射線技師だけでなく、患者さんに放射線検査 や治療を直接勧める内科や整形外科等の各診療科の医師、患者に放射線診療について具体 的な説明をする看護師も受講の義務があることです。研修項目は具体的に指定されていま す。放射線の物理的特性、放射線の生物学的影響、組織反応 (確定的影響)、確率的影 響等の基礎的事項と、放射線診療の正当化と医療被ばくの最適化への理解、放射線の過剰 被曝発生時の対応に関する研修、患者への情報提供のありかた、です。これら全てを一度 に学ぶのではなく、毎年項目を選んで行っていますが、全国の8,000を超える病院だけで なく診療所も併せた何万人という医療スタッフが放射線教育を毎年受ける状況が始まって います。日本医学放射線学会では各医療機関での研修サポートとして、e-ラーニング教材 を数多く用意して無償で提供しています(http://www.radiology.jp/for medical facility/2022 0628 01.html)。資料作成にあたっては、放射線について初めて学ぶ人でも理解できる教 材を目指しました。時間を1本15分程度、長くても30分までとし、ゆっくりと語りかける 音声入りにしました。利用者へのアンケートを取っていますから、ある程度の数がまとま り次第、機会をみて当教育フォーラムでもご案内したいと考えています。ここでの受け取 り方は教育用資料を作成する機会が多い皆様の役に立つ情報になると思います。

なお、この改正により大きく変化したことがもう一つあります。患者さんに検査を勧める時に、医師が放射線を用いることを明確に伝え承諾を得たことを記録することが求められています。当フォーラム会員の皆様は検査や治療のどれが放射線診療かは問題なく判

別できますが、一般の患者さんはそうではありません。私自身、MRI検査も電離放射線を用いると思っていたり、RI検査の放射性医薬品はCT検査で用いるヨード造影剤と類似の安定物質と思っている方に、何度となく遭遇しました。病院の検査や治療は好き好んで受けるものでありません。できれば受けたく無いと思いながら受けた検査が、後になって放射線診療だったことが判りショックを受ける方もいます。今後は放射線について基礎的な知識を持った医療スタッフが、それぞれの患者さんの理解度に合わせて、説明をすることを期待しています。ただ、会員の皆様のような専門知識のある方は、検査の説明時には放射線教育のプロとして暖かい目で見守ってください。ついつい高度で専門的な質問をして彼らを困らせないようにお願いいたします。

放射線診療を安全に発展させるための法令改正は、医療スタッフ大集団を対象とした放射線教育をスタートさせました。今後は放射線について"少しは知っている人"が数多く生まれることとなります。患者さんへの説明も全国で日々何万件と繰り返されていますから、放射線について伝える技術も年を経るごとに備わると思います。医療スタッフたちは患者さんへの安全な放射線診療を提供するために追加された行為と受け止めていますが、将来的にはこれらの経験を集めた大きな市民教育のデータベースの構築も可能かもしれないと期待を寄せています。

#### 【解説】

# 核融合炉とトリチウム ~ 新エネルギーの利用に向けて~

工藤博司

東北大学大学名誉教授 〒110-0015 東京都台東区東上野 6-7-2 放射線教育フォーラム

> E-mail: forum@ref.or.jp (2023 年 1 月 16 日受理)

#### 要旨

核融合炉は太陽と同じように水素の仲間 (同位体) の原子核同士の融合反応を地上に再現することから"地上の太陽"と呼ばれ、発生する大きなエネルギーを発電などに利用する二酸化炭素を出さないクリーンエネルギー源としてその実現が待たれる。ただ、水素 (H) が"燃えている"太陽と違い、重力が太陽に比べてはるかに小さい地上では重水素 (²H、D)とトリチウム (³H、T) を燃料として用いる。重水素は海水中に無尽蔵に存在するがトリチウムは自然界にはごくわずかしか存在しないので、燃料として利用するためには人為的につくって供給しなければならない。トリチウムは放射性核種であり、その利用にあたっては社会的に受容されるためにも取り扱いの安全確保は欠かせない。本稿では、新たなエネルギー利用の到来に備えて核融合炉開発の概要を紹介するとともに、トリチウムとは何かを知るための基礎知識を提供する。

#### 1. はじめに

昨年 (2022 年) 12 月 13 日、米国エネルギー省が「実験で核融合を起こすために投入した分を上回るエネルギーを取り出せた」と発表した。<sup>1)</sup> 得られたエネルギーは、やかん数杯分の湯を沸かす程度であり実用化にはまだ多くの課題が残されているが、エネルギー収支がプラスに転じたことを「歴史に残る画期的成果」と発表した。

わが国でも最近、核融合炉の開発に再び目が向けられている。昨年 8 月、岸田首相が原子力発電所の新増設や建て替え (リプレース) について検討するよう指示したことを受けて、経済産業省の原子力小委員会 (山口彰委員長) は再稼働への総力結集、既設原発の最大限の活用、次世代革新炉の開発・建設、使用済み核燃料の処分などバックエンドプロセスの加速の 4 点を検討対象に挙げた。次世代革新炉には革新軽水炉、小型(軽水)モジュール炉、高速炉、高温ガス炉に加え核融合炉が含まれる。核融合発電はまだ研究段階にあり実用化は 2050 年代以降とみられるが、核融合炉が検討対象とされたことに注目したい。

核融合炉は他の四つの原子力エネルギーの利用とは根本的に異なる。後者はいずれもウランやプルトニウムなどの重い元素の核分裂反応を用いる"原子炉"であるが、核融合炉は軽い元素(主に水素同位体)の核融合反応を利用する。核融合炉では太陽と同じ原子核反応を地上で再現することから"地上の太陽"と呼ばれ究極のエネルギー源と期待されている。理論上は1グラムの燃料から石油8トン分のエネルギーが得られる。

わが国の核融合研究はプラズマ科学を中心に 1970 年代初頭から積極的に続けられており、1985 年に大型トカマク装置 JT-60 を完成させ、プラズマ閉じ込めの研究で世界をリードしてき

た。現在、2025年の運転開始を目指して35カ国の協力で南フランスのサンポール・レ・デュラ ンスに建設中の国際熱核融合実験炉 ITER (イーターと発音、International Thermonuclear Experimental Reactor)でも主要国の一つとして計画完遂に向けて中心的役割を演じている。

最初に実現する核融合炉は、燃料として重水素(D)とトリチウム(T)を使用する D-T 炉になる と考えられる。重水素は海水中に無尽蔵に存在するが、トリチウムは天然にごくわずかしか存 在しない。そのため、トリチウムを燃料として使うためには人為的につくる必要がある。筆者 はかつて核融合炉燃料トリチウムの大量製造技術開発に携わったことがあり、2) 本稿では核融 合炉との関連でトリチウムの物理学的・化学的性質、存在、製造、安全取り扱いなどについて 解説する。「トリチウムとは何か」を知ることは、福島第一原子力発電所で発生する ALPS 処理 水の海洋放出の環境影響の理解にもつながる

#### 2. 核融合反応

太陽は"燃えている"と言っても化学的な燃焼ではない。太陽の中心部での核融合反応によ って大量のエネギーが発生し、表面(光球)から光として放出されている。太陽の核融合反応は陽 子 (水素 H の原子核: p) 同士の融合反応であり、ひとことでいうと次式のように 4 個の水素が融合し て1個のヘリウム (4He) ができる反応である。

$$4H \to {}^{4}He + 2(e^{+} + \nu + \gamma) + 24 \text{ MeV}$$
 (1)

(ここで $e^+$  は陽電子、 $\gamma$  はガンマ線、 $\nu$  はニュートリノ)

この反応は巨大な重力がかかる太陽では1700度(中心部の温度)で進行するが、太陽に比べて重力 が遥かに小さい地球上では10億度近くの超高温でなければ起きない。

地球上で実現可能な核融合反応として次のようなものがある。

$$D + T \rightarrow {}^{4}He + n + 17.57 \text{ MeV}$$
 (2)

$$D + D \rightarrow {}^{3}He + n + 3.27 \text{ MeV}$$
 (3)

$$D + D \rightarrow T + p + 4.03 \text{ MeV}$$
 (4)

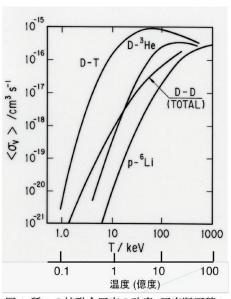
$$D + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + p + 18.35 \text{ MeV}$$
 (5)

$$H + {}^{6}Li \rightarrow {}^{4}He + {}^{3}He + 4.00 \text{ MeV}$$
 (6)

図1はこれらの反応確率 (縦軸:反応断面積、 の) を反 応エネルギー(横軸:電子ボルト[eV] および温度[K])に 対してして図示したものであるが、この中で最も低いエ ネルギー領域 (数億度) で起きるのは反応 (2)、すなわち 重水素 (D) とトリチウム (T) が融合して 17.6 MeV のエ ネルギーを出す D-T 反応である (中性子 n に 14.1 MeV、 <sup>4</sup>He に 3.5 MeV が与えられる)。この反応では、燃料とし て放射性のトリチウムを使う必要があるので取り扱いに は注意を要する。反応(2)から(4)は放射性燃料を使わな いが、より高いエネルギー領域(5億度以上)での反応で あり、まずは D-T 核融合炉の実現に向けて研究が進めら れている。

#### 3. 核融合炉開発

原子核を融合させるためには、原子核同士を 100 fm 図1種々の核融合反応の確率(反応断面積)



 $(10^{-13} \text{ m})$  ほどに接近させなければならない (ちなみに水素分子  $H_2$  の H-H間距離は 74 pm [ $7.4 \times 10^{-11} \text{ m}$ ])。陽電荷 (+1)をもつ陽子同士が接近するためには大きな電気的反発 (2 C (2 C )を乗り越えなければならない。

この障壁を乗り越えて核融合反応を誘起するた

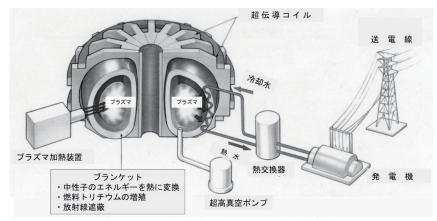


図2トカマク型核融合炉による発電の概念図

めには原子核同士を高いエネルギーで衝突させる。トリチウムに重陽子 (d) を衝突させて反応 (2) の D-T 核融合を誘起して早い中性子 (14 MeV) を発生する加速器 (コックロフト-ウォルトン 加速器) は既に実用化されているが、エネルギー発生を目的とする "炉" には向かない。D-T 核融合炉としては重水素 (D)とトリチウム (T) のプラズマ (イオンと電子がバラバラに存在する状態) を数億度に保持して反応 (2) を誘起させる熱核融合炉の実現が有力視されており、大別すると次の二つの方式がある。強力な磁場でプラズマを閉じ込める方式と気体燃料を封じた小球にレーザー光を照射して爆縮により高温のプラズマをつくる慣性核融合である。

ミュオン触媒核融合も研究されているが、3)基礎研究の域にとどまるので本稿は触れない。

#### 3.1 磁場閉じ込め方式

世界各国でプラズマ閉じ込め実験が進められている。磁場閉じ込め方式の中にはプラズマをドーナツ状の真空容器に閉じ込めるトカマク型や非軸対称性の空間に閉じ込めるヘリカル型などいくつかの形式が研究されている。世界的には JT-60 (日本)、JET (EU)、TFTR (米国) のようなトカマク型実験装置を中心に進められ、JT-60では 2006年に重水素イオン温度 5.2 億度、電子温度 3 億度のプラズマを 30 秒間閉じ込めることに成功した。<sup>4)</sup> その技術は ITER の設計に生かされている。JET では 1997年に世界で初めてトリチウムを装填した実験が行われ、核融合反応による 22 MJ のエネルギー発生を確認し、2021年には 59 MJ のエネルギー発生に成功した。<sup>5)</sup> そのトリチウム取扱技術は ITER の実験にも役立てられる。

国際熱核融合実験炉 ITER はトカマク型実験炉である(図 3)。 $^{6}$  1985 年 11 月のジュネーブでの 米ソ首脳会談 (レーガンとゴルバチョフ) をきかっけとして開始された国際共同研究であり、米

国、ロシア、EU、日本が分担して 1992 年 に開始した工学設計活動 (Engineering Design Activities; EDA) に始まり、2001年7 月に建設に必要な技術的準備が完了した。

その後、韓国、中国、インドが加わり、2005 年 6 月に南フランスのサンポール・レ・デュランスに実験炉の建設が決まった。現在 35 カ国の協力で D と T のプラズマを 1.5 億度に保ち核融合反応で発生するエネルギーを取り出すことを目指して建設が進め

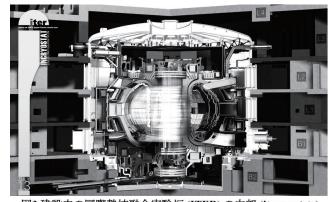


図3 建設中の国際熱核融合実験炉 (ITER) の内部 (iter.orgより)

られている (運転開始目標は 2025年)。

ヘリカル型の装置を用いるプラズマ閉じ込めの研究も各国で進められている。わが国では岐阜県土岐市にある自然科学研究機構核融合科学研究所で大型ヘリカル装置(Large Helical Device; LHD)を用いる研究が進行中であり、カ大学共同利用研究機関として大学院学生の教育にも使われている。

# 3.2 慣性閉じ込め方式

この方式にもいくつかの型があるが、その中心はレーザー光の照射による爆縮を利用して高温のプラズマをつくるものである(図4)。代表的な例は米国のローレンス・リバモア国立研究所(Lawrence Livermore National Laboratory; LLNL)の国立点火施設(National Ignition Facility; NIF)であり、本稿の冒頭で紹介した米国エネルギー省の発表はこの実験装置によって得られた成果である。「)この実験装置で

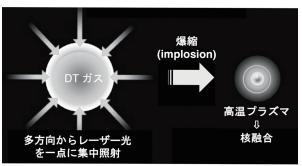


図4 レーザー核融合の概念図



図 5 米国の国立点火施設 (NIF) の内部:中央奥のカプセルに 192本のレーザー光を集中照射して核融合反応を誘起

は DT の氷 (膜厚約 60  $\mu$ m) でつくった直径 2  $\mu$ m の球状カプセルに燃料 DT ガスを装填し、192 本のレーザー光線を同時に照射する。エネルギーが一点に集中することによってカプセル内で 爆縮 (implosion) が起こり、燃料ガスが瞬時に圧縮されて高温のプラズマが発生し、熱核融合反 応が起きる (図 5)。  $\mu$ 0 10 11 12 月の実験では、2.05 MJ のエネルギーを供給して、3.15 MJ の出力が得られた。

#### 3.3 核融合炉の燃料 — 重水素とトリチウム

世界で最初に実現する核融合炉は重水素 (D) とトリチウム (T) を燃料とする DT 核融合炉と想定されているが、その燃料はどのように確保するのだろうか。重水素は天然存在比が 0.0115% と小さいものの、海水中に無尽蔵に存在するといってよく、その濃縮技術は既に確立されている。一方、トリチウムは天然にわずかに存在するがその原子数は水素 (H、軽水素ともいう) の 10 on 18 乗分の  $1 \text{ [1} \times 10^{-18}:$  これを 1 TU (トリチウム・ユニット) という ] 程度であり、燃料として使うためには人為的につくって供給する必要がある。ただし、核融合炉ではトリチウムの再生産 (増殖) が可能で、最初に必要量を装填すれば (初装荷)、稼働後は炉自身がトリチウムを製造し続けることになり (図 6)、理論的には燃料として補給するのは重水素だけでよいことになる。

#### 3.3.1 トリチウム生成反応

天然に存在するトリチウムは、大気上層で宇宙線 〔高エネルギー中性子 (n)、陽子 (p)、重陽子 (d) など〕と空気中の窒素や重水素との下記核反応によって生成する。

$$^{14}N + n \rightarrow T + ^{12}C$$
 (7.1)

$$D + d \rightarrow T + H \tag{7.3}$$

生成したトリチウム (T) は大気中の水蒸気分子 (H2O) の H との交換反応によりトリチウム水 (HTO) となり、降雨によって地表に降下する。その自然界での存在比は元々4 TU (トリチウム・ユニット) ほどだったが、1950 年代の大気中核実験のため一時最大 250 TU まで増加した。1963年に締結された部分的核実験禁止条約(Partial Test Ban Treaty; PTBT)で大気中核実験が禁止されて以来その量は減少し、今では  $5\sim10$  TU になっている。

なお現在でも、原子力事象にともなって反応 (8) や (9) によってトリチウムが発生し、世界中の原子力施設 (各地の原子力発電所と英・仏の核燃料再処理施設) から放出されており、その総量は1年あたり  $0.01~{\rm TU}$  と見積もられる。  $^{12}$ 

$$D + n \rightarrow T + \gamma \tag{9}$$

反応 (8) はウラン ( $^{235}$ U) の三体核分裂であり、軽水炉 ( $^{8}$ BWR、 $^{8}$ PWR)ではこの反応により燃料棒の中にトリチウムが生成する。重水 ( $^{8}$ D2O) を減速材と冷却水の両方に使う重水炉 (カナダ製CANDU 炉など) では、反応 (8) に加えて反応 (9) によって冷却水中にも多量のトリチウムが発生する。その他にトリチウムを生成する反応として次のようなものがある。

$$^{6}\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + {}^{4}\text{He} (\alpha)$$
 (10)

$$^{7}\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + n' + {}^{4}\text{He} (\alpha)$$
 (11)

$$^{3}\text{He} + n \rightarrow T + p$$
 (12)

意図的に大量のトリチウムを製造する際には反応 (10) を用いる。実験室で使う微量のトリチウムの製造には反応 (12) もよく使われる。ヘリウム-3 ( $^{3}$ He) ガスを石英アンプルに充填し、研究用原子炉で熱中性子を照射すると容易に得られるが、大量製造には向かない。ちなみに、物理実験などで使う市販の  $^{3}$ He は、大量に製造した T の壊変生成物として得られる (地球上の  $^{3}$ He の存在比は 0.0001%程度と非常に小さいが、月には大量に存在することが知られている)。なお、反応 (8)、(9)、(10) および(12) はエネルギーが低い熱中性子 (0.025 eV) によって誘起され、反応 (11) はエネルギーが高い中性子 (速中性子) によって起きる。

DT 核融合炉では運転開始時に  $5\sim10~kg$  のトリチウム (放射能に換算すると数エクサ・ベクレル [EBq= $10^{18}$  Bq]) を装填するが、運転開始後はトリチウムを増殖し続けるというシステムを基本とする。ITER のようなトカマク型の炉では、真空容器 (トーラス) の外周に配置されるブラケットがその役割を担う (図 2)。ブランケット内にリチウム含有物質 (天然同位体比:  $^6$ Li,  $^7$ Ci,  $^7$ Ci との反応 (11) によって  $^7$ Ci との反応 (12) ならびに中性子  $^7$ Ci (入射した中性

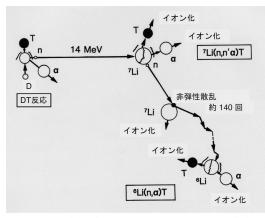


図 6 核融合炉ブランケットでのトリチウム増殖

子とエネルギーが異なるので n'と記す)を生成する。この n' はブランケット内に存在する  ${}^7$ Li と 140回ほど衝突を繰り返すうちにエネルギーを失って熱中性子になるので、今度は  ${}^6$ Li との反応 (10)によってさらにもう 1 個の Tを生ずる。理論上は、DT 反応によって Tを 1 個消費しても反応 (11)によって 1 個、続いて反応 (10)によってもう 1 個と計 2 個の Tが生成するので、DT 反応の度に T が増えていくことになる。実際の核融合炉では複雑な条件が絡み合うため増殖率を 1 以上に保つことは必ずしも容易ではなく、工学上のさまざまな工夫が必要になる。

ちなみに、将来の核融合炉では大量のトリチウム (1基当 たり 5~10 kg) を燃料として用いる。その量は地球上の現在 のトリチウム存在比 (5~10 TU) と同程度であり、万が一に も炉外に放出されることがないよう、取り扱いには細心の 注意を払わなければならない。

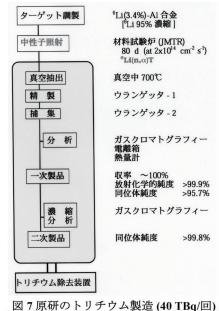
#### 3.3.2 核融合炉燃料トリチウムの製造と貯蔵

ITERの運転開始時に必要とされる初装荷トリチウム (3~5 kg) は CANDU 炉から回収したトリチウムを大量に保管して いるカナダから供給される予定であるが、一般的には反応 (10) によって製造する。その一例として、1980 年代に日本 原子力研究所 (原研) で開発した核融合燃料トリチウムの製 造法を簡単に紹介する(図 7)。2,13)

リチウム含有物質(ターゲット)を原子炉で照射するが、 反応 (10) は発熱反応であり照射中に高温になるため、ター ゲットの健全性が保たれる物質として熱除去の容易なリチ

ウム-アルミニウム (<sup>6</sup>Li-Al) 合金を 用いた。6Li の天然存在比は 7.6% であるが、製造効率を上げるため <sup>6</sup>Li を 95%にまで濃縮したリチウム を用いて <sup>6</sup>Li-Al 合金の板状ターゲ ット (2 mm × 50 mm × 20 mm) を調 製した。

そのターゲットを大洗研究所の 材料試験炉 (JMTR) の冷却水に浸 けた状態で80日間照射した後東海



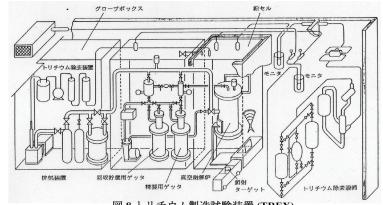


図8トリチウム製造試験装置(TREX)

研究所に移送し、アイソトープ製造棟に設置したトリチウム製造装置 (Tritium Extraction System; TREX、図8) の真空電気炉に装填して約700℃にまで加熱して合金中に生成した気体状 のトリチウム  $T_2$  とヘリウム  $^4$ He 〔反応 (10) で T と同時に生成]〕を抽出した。ウランゲッタ-1(精製用)に導いて T<sub>2</sub>と <sup>4</sup>He を分離した後にウランゲッタ-2 に捕集し、貯蔵する。

ウランゲッター容器 (ステンレス鋼製) には粉末化したウラン金属 (数 g) が充填されていて、 容器内のトリチウムガス T<sub>2</sub>(g) は 反応 (13) によって金属ウランと結合して固体のトリチウム化 ウラン  $UT_3(s)$  になる。

$$3T_2(g) + 2U(s) \leftrightarrows 2UT_3(s) \tag{13}$$

反応 (13) は可逆反応であり室温で平衡は右辺に傾くが、400℃以上に加熱すると UT<sub>3</sub>(s) は解 離して(右辺から左辺への反応)トリチウムは T2(g)として気相に遊離する(トリチウムガスの平 衡蒸気圧は 20℃で 1 千万分の 1 気圧、400℃でほぼ 1 気圧)。したがって、ゲッター容器の温度 を調節 することにより容易にトリチウムガスを出し入れすることができる (粉末ウランは空気 に触れると自然発火するので取り扱いには注意が必要)。

なお、図8の左端のグローブボックス内に設置されているトリチウム除去装置とは、TREXか らトリチウムガスが鉛セル内に漏洩した場合にセル内の空気からトリチウムガスを取り除く装 置である。鉛セル内の空気を常時循環し、トリチウムガス T2を酸化触媒でトリチウム水 T2O に 変換して液体窒素で冷却したモレキュラーシーブに吸着させる。<sup>14)</sup>

最終的には、放射化学純度 99.9%以上、同位 体純度 95.7%以上の  $T_2$ を 1 回当たり 36 TBq (常 温で 380 mL) の試験製造に成功し、将来の核融 合燃料製造の道を開いた。 $^{2,15)}$ 

#### 4. トリチウムの物理、化学、安全取り扱い

前節でトリチウムの自然界での存在、核融合燃料としての役割などについて述べたが、本節ではトリチウムの緒性質と安全取り扱いについて述べる。<sup>16-18)</sup>

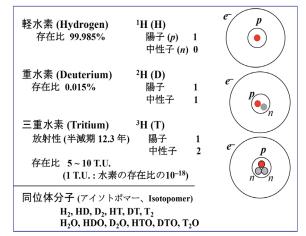


図9水素の同位体

#### 4.1 物理学的性質

トリチウム ( ${}^{3}$ H、T とも記す) は 重水素 ( ${}^{2}$ H、D とも記す) とともに原子番号 1 の水素 (H) の同位体であり、原子核に 1 個の陽子 (p) をもつ (**図 9**)。違いは原子核中の中性子 (n) の数にあり、D は 1 個、T は 2 個の n をもつ (H は全ての元素の中で唯一 n をもたない)。

水素と重水素は安定同位体であるが、トリチウムの原子核は中性子を 2 個有するため不安定であり、中性子の一つが電子  $(e^-)$  を放出して p になろうとする。これが反応 (14)であり、この結果生ずる元素では p が 1 個増えるので原子番号 2 のヘリウムになる。

$$T \rightarrow {}^{3}\text{He} + e^{-} + \overline{\nu} \tag{14}$$

その際、原子核から放出される電子がベータ線  $(\beta^-)$  である。トリチウムから放出される $\beta^-$  線はゼロから最大  $18.6\,\mathrm{keV}$  の連続するエネルギー分布をもち、その平均値は  $5.7\,\mathrm{keV}$  である。トリチウム原子 (T) および分子  $(T_2)$  の主な物理学的性質を**表 1** に示す。 $^{16,17)}$ 

#### 4.2 化学的性質

トリチウム (T) の化学的性質は、同位体である水素 (H) や重水素 (D) とほとんど変りなりないので全く同じような化合物をつくる。しかし、T の質量 (3.016 u [原子質量単位、 $^{12}$ C 原子 1 個の質量を 12.0 u と定義]) が H (1.008 u) の 3 倍、 D (2.014 u) の 1.5 倍と大きいため化学反応速度や平衡定数に比較的大きな違いが現れる。また、水素分子にはこれらの三つの同位体の組み合わせによって 6 種類の同位体分子 ( $H_2$ 、HD、 $D_2$ 、HT、DT、 $T_2$ ) が存在する。同じ分子でありなが

ら同位体の組み合わせが異なる分子のことをアイソトポマー (isotopmer) という。水素分子のアイソトポマーの熱力学的性質を表2に示す。

比較的大きな"同位体効果"がみられるので、それを利用すると同位体の相互の分離や濃縮が可能になる。例えば、通常の水  $(H_2O)$  にトリチウム水 (HTO) が含まれていて、そこから HTO を除去したい場合、その水  $(H_2O + HTO)$  を電気分解すれば発生する  $H_2$  と HT  $(T_2)$ 

表1トリチウムの物理学的性質

質量	3.0160493 u (u: 原子質量単位)
核スピン	1/2
磁気モーメント	1.5046 x 10 <sup>-26</sup> Am <sup>2</sup>
イオン化エネルギー	13.55 eV $(T \rightarrow T^+ + e^-)$
解離エネルギー(T2)	$4.59 \text{ eV } (T_2 \rightarrow T + T)$
ベータ線放射核種	$T \rightarrow {}^{3}\text{He} + e^{-} + \overline{\nu}$ ( $\beta^{-}$ 線のみ放射)
β-線エネルギー(連続)	最大值 18.6 keV, 平均值 5.7 keV
半減期	12.3 年
放射熱	911 aW/Bq (= 911 $\times$ 10 <sup>-18</sup> W/Bq)
比放射能 (T <sub>2</sub> )	$355 \text{ TBq/g} (= 355 \times 10^{12} \text{ Bq/g})$
比容積 (T <sub>2</sub> ,標準状態)	10.3 fL/Bq (= 10.3 $\times$ 10 <sup>-15</sup> L/Bq )

表 2 水素分子	司位体 (アイ)	ソトポマー)	の熱力学的性質
----------	----------	--------	---------

	$H_2$	HD	$\mathbf{D}_2$	HT	DT	T <sub>2</sub>
分子量 (u)	2.0158	3.0220	4.0282	4.0239	5.0301	6.0321
臨界温度 (K)	32.99	35.41	38.96	37.13	39.42	40.35
臨界体積 (m³/mol)	65.5	62.3	60.3	62.4	57.8	57.1
臨界圧力 (MPa)	1.30	1.48	1.65	1.57	1.77	1.91
三重点温度 (K)	13.96	16.60	18.73	17.62	19/71	20.50
三重点圧力 (kPa)	7.20	12.37	17.14	14.66	19.42	20.98
沸点 (K)	20.39	22.13	23.67	22.92	24.38	24.91
解離エネルギー (eV)	4.476	-	4.533	-	-	4.59
イオン化エネルギー (eV)	15.42	-	15.46	-	-	1555

を分離することは原理的 (科学的) に可能である。ただし、福島第一原子力発電所の大量の処理水からトリチウム (主に HTO) を分離しようとすると莫大なエネルギーを費やさなければならず必ずしも現実的ではない。

トリチウム (T) が水素 (H) や重水素 (D) と大きく異なるのは、T が放射性核種であることにある。トリ

チウムは半減期 12.3 年で低エネルギーのベータ線を出す (表 1)。この放射線を追跡子 (トレーサー) して利用すると、水素化物や有機化合物など様々な物質の反応の様子 (速度や反応機構) あるいは物質の構造を調べることができるので化学実験や創薬研究などで広く利用されている。  $^{18)}$  分子中の狙った位置の  $^{18}$  Hを  $^{18}$  T で置き換えた化合物 (標識化合物、labeled compound) をつくり、化学反応と  $^{18}$  T から出る放射線 ( $^{18}$ )の検出 (液体シンチレーション検出器などを利用) を組み合わせることによって反応の様子を解析する。

トリチウム標識化合物は分子自身が出す放射線 ( $\beta$ -線) にさらされるので、トリチウム濃度 (比放射能) が高い試料は長い間に分解し、放射線分解生生物 (ラジカルやイオン種など) を生成するので、トレーサー利用にあたっては注意を要する。また、トリチウムは $\beta$ -線を出すと化学的に不活性なヘリウム ( $^3$ He) に変化するので、分子内で T が結合していた位置の水素が失われる。その結果、分子内で構成原子の再配列が起き別の分子になることがある。例えば、DNA の構成要素であるアミノ酸をトリチウムで標識したとき、トリチウム標識シトシン (cytocine-5-T) が $\beta$ -壊変後にウラシル (uracil) に変化する反応 (15) が知られており、核変換効果 (transmutation effect) と呼ばれる。  $^{18}$ 

このような反応が DNA で起きると、遺伝情報が書き換えられる恐れがある。

#### 4.3 生物影響と環境動態

トリチウムはベータ線 ( $\beta$ -) のみを出す放射性核種であるが、 $\beta$ -線の平均エネルギーは 5.7 keV (最大 18.6 keV) と低く外部被ばくの影響はほとんどない (この $\beta$ -線が皮膚を透過する距離は最大 6  $\mu$ m)。ただし、トリチウムを含む物質を呼吸や摂食、あるいは身体に付いた HTO が皮膚から 浸透して体内に移行すると内部被ばくの影響は避けられない。とはいえ、特定の位置 (細胞) に 固定される割合は小さく、通常の水 (H2O) や有機物と同様に代謝によって比較的短時間で体外 に排出される。表 3 に示すようにヒト (成人) の生物学的半減期 (biological half-life:  $T_b$ ) は 10~12 日と物理学的半減期 ( $T_{1/2}$ : 12.3 年) に比べてかなり短い。誤ってトリチウムを含む水 (HTO) を飲み込んだ場合には、水あるいは利尿効果の高いスポーツドリンクやビールを摂取すれば  $T_b$  はさ

らに短くなる。

#### 表 3 トリチウムの放射線生物学的性質 (挙動)

トリチウムガス (HT) を呼吸によって吸い込んだ場合、大部分 (95%以上) は呼気に排出される。体内に残留した HT は HTO に変化して血液中に移行し、20分ほどで尿中に出てくる。このようにトリチウムガスは体内に留まる時間が短いので、HT による内部被ばく線量は同じ量の HTO の 1500 分の1 と見積もられる。国が定めた排気中の濃度限度は、トリチウムガス (HT) については 20.000 Bg/cm³

10~12日 (成人)

※ Tbは水分の摂取量の増加とともに短縮

- ◇人体への取り込み経路と化学形
  - 呼吸器系
  - 消火器系
  - 皮膚
  - ・最も危険性の高い化学形

HTO、T<sub>2</sub>、、揮発性物質 HTO、吸収性物質 主にHTO、ある種の有機化合物

HTO

 $H [mSv] = 27 \times T_b \times B (B: kBq/L_{\overline{k}})$ 

- ◇トリチウムガス (HT) の挙動
  - ・呼吸によって取り込まれたトリチウムガスの大部分は呼気中に排出 (0.1~5%が体内に残留しHTOに変化)
  - ・取り込み後20分ほどで尿中に検出される
  - ・HTOと同程度の内部被曝線量を与えるためには1500倍のHTが必要
- ◇トリチウム水 (HTO) の挙動
  - ・水蒸気として呼吸器系から取り込まれたトリチウムの99%は10分以内に 血液中に移行
  - ・皮膚から吸収されたHTOは呼吸器系からの取込と同様の挙動

と水蒸気 (HTO) の 0.005 Bg/cm<sup>3</sup> に比べて 18,000 倍ほど緩く設定されている。

核融合炉で発生する高レベル放射性廃棄物の量は核分裂炉 (原子炉) に比べると格段に少ないが、大量のトリチウム (数 kg) を燃料として使用するので、その取り扱いには細心の注意が必要である。

事故等で大量のトリチウムガス (T2) が大気中に放出されると、空気より軽いトリチウムガスは大気上空 (成層圏) に拡散するので、直接生態系に影響を及ぼすことはない。しかし、上空での光化学反応などによってトリチウムガスの多くは水蒸気 (HTO) やメタン (CH3T) に変換され、HTO は降雨によって地表に戻る。トリチウム水 (HTO) は河川水や地下水として一時的に陸域に保持されるが、やがて海へ移動する。HTO は植物の根から取り込まれ、植物体中では含有水トリチウム (Tissue Free Water Tritium; TFWT) と組織結合トリチウム (Organically Bound Tritium; OBT) として存在する。植物中の TFWT の半減期は短く、環境水のトリチウムレベルの変動に対応してその濃度は素早く変化する。一方、OBT は植物体が HTO を取り込んだ時点の濃度を反映するので、樹木の年輪ごとのトリチウム濃度を調べることにより過去に遡って環境中のトリチウム濃度を追跡することができる。12)

海洋に移行した HTO は莫大な量の海水で希釈されるので生態系への影響は限定的と考えられるが、局所的に高い濃度のままの場所 (入江や港湾など) が存在する可能性はある。その場合でも、食物連鎖により魚介類に濃縮されることはなく、生態系に与える影響は原子力発電所の事故で放出されたセシウム-137 [137Cs: 物理学的半減期 30 年、ヒト(成人)の生物学的半減期 70~90日〕のような核分裂生成核種に比較するとそれほど大きくない。セシウムは生体に取り込まれると骨や筋肉に蓄積されるので、食物連鎖により濃縮されることがある。それに対し、トリチウムは代謝により比較的短時間で生体外に排出されるので生体内に蓄積することはなく、食物連鎖による濃縮の可能性は低い。

#### 5. おわりに

核融合発電は究極のエネルギー源と期待されるが、実現までにはまだ多くの工学的課題を乗り越えなければならない。実用化は 2050 年以降とみられるが、昨年末に米国のレーザー核融合実験 (NIF) で大きな進展がみられ、わが国が幹事国の一つとして南フランスに建設中の国際熱核融合実験炉 (ITER) の完成も近い (運転開始目標 2025年)。また、欧米や日本のスタートアップ

企業が核融合炉開発への投資と技術開発に力を入れ始めた。19)

最初に実現する核融合炉では大量のトリチウム (5~10 kg) が燃料として用いられる。トリチウムが放射性核種であることを考えると、核融合発電が究極のエネルギー源として社会に受け入れられるためにはトリチウムの安全取扱技術の確立に加えて、トリチウムの使用についての市民の理解が欠かせない。まだ先のこととは言え、今のうちから多くの人が「トリチウムとは何か」を知り、理解を深めておくことが望まれる。本稿がその一助になれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) Clery, A., With historic explosion, a long sought fusion breakthrough: National Ignition Facility achieves net energy "gain" with laser-powered approach, *Science* (News Online on 13 Dec. 2022).
- 2) Tanase, K. *et al.*, Test Production of Tritium in 3 TBq Level from Neutron-Irradiated <sup>6</sup>Li-Al Alloy Target *J. Nucl. Sci. Technol.*, **22**, 147-152 (1985).
- 3) Nagamine. K., "Introductory Muon Science", Oxford University Press, Oxford (2003).
- 4) QST NEWSLETTER No. 13, 量子科学研究機構 (2020).
- 5) Banks, M., Fusion energy record smashed by Joint European Torus facility, *Nucl. Fusion News* (9 Feb. 2022).
- 6) Gibney, E., Fuel for world's largest fusion reactor ITER is set for test run: Nuclear fusion experiments with deuterium and tritium at the Joint European Torus are a crucial dress rehearsal for the mega-experiment, *Nature* (News online on 22 Feb. 2021).
- 7) Kenmochi, N. *et al.*, Preceding propagation of turbulence pulses at avalanche events in a magnetically confined plasma *Sci. Rep.* **12**, 6979 (2022): www.natutre.com/scientificreports.
- 8) Woolsey, N., Self-heating plasmas offer hope for energy from fusion, *Nature* **601**, 514-515 (2022).
- 9) Zylstra, A. B. et al., Burning plasma achieved in inertial fusion, Nature 601, 542-548 (2022).
- 10) Berkowitz, R., Magnetic Field Heats Up Fusion, *Physics* 15, 169 (2022).
- 11) Moody, J. D. *et al.*, Increased ion temperature and neutron yield observed in magnetized indirectly driven D<sub>2</sub>-filled capsule implosions on the National Ignition Facility, *Phys. Rev. Lett.* **129**, 195002 (2022).
- 12) 百島則幸、「トリチウムの環境動態」、富山大学水素同位体科学研究センター研究報告 **20**, 1-10 (2000).
- 13) 工藤博司、「核融合炉燃料トリチウムの製造と化学」、 Radioisotopes, 34, 432-441 (1985).
- 14) Yamagicji, K., *et al.*, Detritiation of Glovebox Atmosphere by Using Compact Tritium Removal Equipment, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **19**, 948-962 (1982).
- 15) 工藤博司、「トリチウムの製造と安全取扱」、放射線、12,77-85 (1986).
- 16) 工藤博司、「トリチウムの物理化学的性質と同位体効果」、"トリチウムの化学—基礎から応用まで"、日本原子力学会トリチウム化学研究専門委員会編、26-32 (1982).
- 17) IUPAC, "Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry", 1st Ed., Blackwell Scientific Publ., Oxford (1988).
- 18) Evans, E. A., "Tritium and its Compounds", 2nd Ed., Butterworth, London (1974).
- 19) Clery, A., With 'smoke ring' technology, fusion startup marks steady progress, *Science* (News Online on 8 Apr. 2021).

### 【資料】

# 健康と放射線

# ードイツ・オーストリアにおけるラドン坑道療法の臨床研

# 究動向一

大森佐與子 NPO 法人放射線教育フォーラム E-mail: shohmori@outlook.jp (2023 年 1 月 25 日受理)

#### はじめに

原子エネルギーは、放射線という形で、われわれの生活のごく身近な医学、薬学、農学、工学、化学など様々な分野で利用されており、健康生活を維持するには不可欠なものとなっている。その安全性は、法律に基づいて規制されており、放射線防護委員会(ICRP)の報告を基にして決められている。この ICRP は、放射線防護の観点から、放射線リスクは「閾値なしの直線仮説」が基本的には現在も支持されている。一方、ミズリー大学の T. D. Luckey 博士らをはじめ岡山大の山岡聖典博士らはこの直線モデルをもとに、低線量放射線域での生体影響に矛盾が生じる研究が報告されている 1,2,3)

今回、阿岸裕幸先生(北大名誉教授、温泉学専門)とドイツ・オーストリア温泉保養地の旅9日間(2018.10)に同行した。ラドン坑道療法の臨床研究現場を視察・体験したことを報告する。このラドン坑道療法を通して低線量放射線の有害性を考えたい。

#### 放射能、ラジウム Ra、ラドン Rn、放射能泉

放射能とは、物質が自ら放射線を放出する性質を言う。放射線は宇宙から、また地表鉱物からウラン系列のラドンやトリウム系列のトロンの崩壊生成物が出ており両者を考慮しなければならないが、ラジウムのみを対象とする。放射能泉に含まれるラドンは、ガス性で、ラジウムが $\alpha$ 線(ヘリウム原子核)を放出し、崩壊(壊変という)するときにできる元素である。ラドンはラジウムの子核種で、ラジウムが、 $\alpha$ 線を出して壊変しその量が半分になる時間(半減期)は 1600 年で、そのラドンの半減期は 3.8235 日である。

空気中のラドン濃度は、地表面近いところで 0.74~11.1 Bq ml-1 (20~300 ×10-13 Ci ml-1)である。ラドン濃度は、高度が増すにつれて減少し、陸地から遠ざかるほど減少する。 従って空気中のラドン濃度は、地表面より放散したものである。地下水である自然界の湧水、井戸水、温泉などには常にラドンが含まれている。地下に含まれているラジウムが壊変し、地下にしみ込んだ雨水や地下水にラドンが溶け込み、その水が地表に出てくる。地中のラドンはラジウムより水に溶けやすく、水中のラドン濃度は、水中に含まれているラジウムから生じた量より多い。

放射能泉の成分であるラドン Rn 含有量の単位は、Bq (ベクレル)、Ci (キュリー)、ME (マッヘ) などの放射能単位で表わされている。ベクレル Bq は、発見した自分の名前

Becquerel A. H. にちなんでつけられた。

 $1 \text{ Bq} = 0.027 \times 10^{-10} \text{ Ci} = 0.074 \text{ ME}$  の関係にある

放射能泉は、温泉法や改訂鉱泉分析法から、泉温は、源泉から採取されるとき 25℃以上であり、ラドン含有量は、74 Bq I<sup>-1</sup>以上ある。また療養泉では 111 Bq I<sup>-1</sup> あるとされる。放射能泉は、泉温、放射能の強さと塩類泉との混在の程度から 3 種類と 5 分類される。まず単純放射能冷鉱泉で分類は、単純弱放射能冷鉱泉と単純放射能冷鉱泉、次に単純放射能温泉で分類は単純弱放射能温泉と単純放射能温泉、そしてラドンを療養泉定義の限界値を含む放射能含塩類泉がある。医療や健康づくりを目的とした放射能泉の利用法には、温泉入浴、吸入、飲泉、直接照射、坑道療法および岩盤浴がある。

#### 放射線の生体作用

放射線の生物への影響は、主に原爆による被ばくなどの事例をもとに高線量放射線による研究、特に発がんに関するものが大勢を占めていた。高線量域での影響を低線量域に外挿し、"放射線はたとえ低線量でも生体に害を及ぼすリスクがある"との考え方が現在も表現は若干異なるが、根底にある意向は受け入れられていると考えられる。すなわち放射線に被ばくすると生体内でフリーラジカルが生じ、遺伝子や生体膜に傷をつけ、発がん、動脈硬化、ホルモン異常や老化促進を生じさせる。そして放射線被ばくにより誘発される発がんは、線量に比例して被ばく後、長い年月の潜伏期を経て現れるとされる。しかし、低線量放射線の生物への影響は、有益な効果が挙げられてきた。発育の促進、成長年の増加、生殖能力の向上、疾病への抵抗力の増加、外傷への抵抗力の増加、放射線への耐性の増加、寿命の延長などである。

#### ラドンの体内挙動

ラドンは希ガス類に属し、化学的に不活性な気体で、どの身体構成成分とも反応しない。皮膚吸収、飲水および肺の呼吸から血液に溶解し、血流によって全身の各組織や臓器に到達する。そして各部位でラドンから放出される $\alpha$ 線 (5.49 MeV) が体内組織を刺激して、様々な生体反応が生じるとされている。ラドンの物理学的半減期は 3.8235 日である。また、ラドンの生物学的半減期は 数分~30 分前後とされる。生物学的半減期の保証される明確なデータが示されないのは、個人の活動レベル(血液量や呼吸量)などの違いにより影響することが明らかにされていることによる $^{4}$ )。

体内に入ったラドンは、約60%が肺から排出され、皮膚からは40%、腎臓から0.1~1.0%排出される。体内に入ったラドン量のおよそ0.5%は組織内で崩壊する。出浴後20分でラドンは、ほぼ完全に体内から排出される。ラドンは汗の中に排出される。ラドンとその崩壊産物は、皮膚表面に増加して皮膚への作用が強まる可能性がある。また呼吸器と皮膚からのラドン摂取により新陳代謝が促進され、細胞のDNA修復能力は活性化され、免疫システムの強化と安定化が期待できるとされる。ラドン療法は、入浴でも吸入でも特に関節・筋・神経などの鎮痛効果に優れているとされる。

ガスタインハイルストレンにて天然ラドン坑道療法治療―阿岸先生と同行した温泉―

ドイツの医療の基本は、「薬で治す」ではなく、「自然治癒を引き出す」のであり、医療はそれをサポートするとされる。基準を満たした転地療法がおこなわれ、中でも、温泉にめぐまれたドイツでは、、医師指導の下、放射線温泉療法は、保険診療で長期間転地療法を、になり、とがって、家庭の世気で治療が行われており、その一つを紹介する。

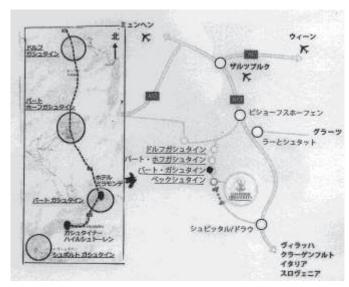


図1 温泉のある地域図

同行した地域(図1)は、ガス

タイン渓谷にある温泉保養地でドルフガスタイン、バードホフガスタイン、バートガスタイン、シュポルツガスタインの4つの地区に分かれており全部で 17 の源泉を有していることを示す。その中でもバートガスタインには、世界的に珍しいラドン坑道における吸入治療とラドン温泉入浴治療が行われている。ガスタイン渓谷の南に位置するこの地域では、古くから金鉱が行われており 16 世紀が最盛期。戦時中の 1940 年、この坑道で金の採掘がおこなわれた際に、この坑道で働く労働者たちの疲労回復や怪我の治癒が早いなどの現象がみられた。その要因の一つが坑道内のラドンであることが判明し、特異な坑道療法に発展した。1946 年から医学的研究の対象となり、ガスタイン研究所とザルツブルグ大学やインスブルグ大学医学部は、単独あるいは共同でラドン濃度と治療効果との関連性について学術調査を開始した。1950 年代に多くの臨床試験データを収集し、1960 年代に新たな治療法として確立された。当時確立されたデータは正確で、現在のデータとほぼ同様の結果と

なっている。現在も、現行および将来的なラドンセラピーによる健康 プログラムの有効性の学術的な根拠づけについて引き続き調査が行われている。

ガスタイナーハイルストレン健康センター(図2)は、世界でも類例のない坑道内の治療効果のある環境の中、特別な医師とセラピストのチームにより生み出されたトータルなセラピーのコンセプトにより、クオリテイー・オブ・ライフを向上させている。

治療は、疾患の範囲と程度に応じて2~3週間で合計8~12回坑



図2 ガスタイナーハイルストレン健康センター

道治療を実施し、良好な結果が得られている。なお効能持続期間を長く続けたい場合、引き続き年に1回、坑道療法治療に訪れる。坑道療法の期間中は、物理療法やカウンセリングが行なわれ、運動も重要であり行なわれている。治療の多くは健康保険が適用される。

セラピーの結果が明確に証明された 事象一長期的な鎮痛作用(平均9か月)、 炎症抑制作用、医薬品投与の削減および 免疫力の安定化である。鎮痛作用の軽減 の科学的根拠は、十分でなかったが、疼 痛行動の軽減が、みとめられたことが報 告されている 5.60。

主な適応症— ①運動器官系疾患(強 直性脊椎炎、慢性多発性関節炎、関節炎、 慢性痛風、骨粗鬆症、神経痛等)。 ②呼 吸器系疾患(慢性気管支炎、気管支喘息、 アレルギー性鼻炎等)。 ③皮膚疾患、 ④硬化症更年期障害や ⑤全般的疾病 予防にも有効で、⑥免疫機能の安定化に も効果があり、 ⑦花粉症やアトピー症 状の患者も治療に訪れている。

治療方法― ①受付後、患者は、坑道



図3 患者入坑トロッコ



図4 ラドン坑道治療室

の入り口にあるガスタイナーハイルストレン附属病院(図2)で医師の診断を受ける。②道内に入る準備を行う。スイームウエアに着替え、バスローブをつけ、サンダルをはいて用意し、坑道に入る日は、入坑の 30 分前までに通常 500 ml 余分に水分を摂取する。約  $2 \, \mathrm{km}$  の坑道をトロッコで治療室に運ばれる(図3)。普通1日に2回、1 回に 100 人ほど乗り込む。③治療室(図4)は、坑道を広げて作った空間でベッドに1時間ほど横臥している。この間、医師と看護師が各患者を診て回る。治療室は全る。この間、医師と看護師が各患者を診て回る。治療室は全のうドン濃度は  $140 \sim 160$  Bq  $\Gamma^1$ 、室温  $37 \sim 41$   $\mathbb C$  、湿度  $70 \sim 100$ %である。それぞれの治療室は温度と湿度の条件が異なる。2 回目以降の入坑の際、体調を申告し、医師による助言に応じて、段階を踏み、より高い温度や湿度の次のステーションに切り替えることができる。

④入坑のあと、健康センターには入坑後引き続き 30 分間の事後安静にする。そのためのスペースが用意されている。

一般に3週間滞在し、原則として隔日に坑道療法を受けることで計 10~15 回、延べ 10~15 時間ラドンに曝されることになる。バートガスタイン坑道療法は、付属の病院にかかりながら受けている。多くは強直性脊椎炎で、年間 3000 人の患者が訪れる。

#### ラドン坑道療法による臨床研究例

その1;病院で普通のリ ハビリをおこなった群に比 べ、リハビリにラドン坑道 療法を加えた群のほうが、 日常生活の基本動作 (ADL) の改善が明らかに見られ た。その結果を表1に示し た。すなわち、坑道療法のラ ドンガス吸入と温熱療法が 同時に行われ、リウマチ性 疾患や強直性脊椎炎患者の 鎮痛効果は、3~5週間の 坑道療法後、数か月続くこ とが検証されている。また、 ある検証例では、強直性脊 椎炎患者52人がガスタイン 坑道治療を6回行った結 果、関節の痛みが軽減し、可 動性が増進するのは、多く の患者において療法が終わ ってから 1~2 か月後までを 最も良かったと言っている

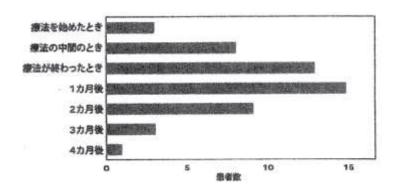


図5 痛みが最も軽くなったとき

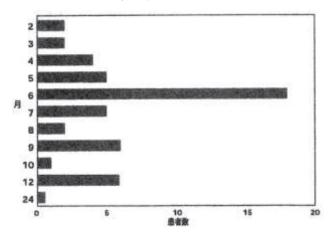


図6 鎮痛効果はどのくらい続いたか

(図 5)。その後の痛みの軽減は、 $6\sim9$  か月続くことが VAS (アンケートによる評価法で、可視的アナログスケールを用いる) 法やマルギル McGiII 疼痛評価法 (※1) で検証された (図 6)。ラドン療法は入浴でも吸入でも特に関節・筋・神経などの鎮痛効果に優れていることが明確とな

つラ希呼らラ有刺ラししす質た。シス器収ン細しカ治炎神をおり、ためり、の激ジ、、るををは胞、ル癒症経性にか。固を一ら進制物す

表1 ガスタイン坑道療法を受けた強直性脊椎炎患者と 受けない患者の症状改善の比較

改善した症状	ラドンガス吸入+温熱 療法を含むリハビリ群	普通のリハビリ テーション群	р
	患者 (%)	)	-
可動性	92	62	< 0.05
朝のこわばり	86	44	< 0.05
薬の使用	75	35	< 0.05
疲労感	89	44	< 0.05
病感の軽減	81	32	< 0.05

強直性脊椎炎患者を対象として、ガスタイン坑道療法(ラドンガス吸入+温熱療法)群とラドン療法をしない病院でのリハビリテーションを行った群での症状改善率の比較

る。さらに自身が持つ治癒力を高めるハイルストレン内の環境による穏やかな過程がラドンの効果をサポートし、痛みは、長期間にわたり低減されることが分かった。

※1;マルギル大学の Melzak らにより発表された疼痛の評価法で、疼痛質問票は 4項目にわけられている。

その2;バートガスタインのラドン坑道療法とフインランド式乾式高温サウナ浴の効果を比較検討した。リハビリのために3週間入院した強直性脊椎炎の患者を対象として、マッサージや運動療法などの基礎的リハビリに加えて、計10時間ラドン坑道療法を行った群と、フインランド式乾式高温サウナ療法のみを行った群について検討した。その結果、ラドン療法群は有意に痛みが軽くなり、薬の使用が少なくなり、療法後の痛みの少ない時期が明らかに長く持続した。

その3;自覚症状と鎮痛剤の消費量の研究

強直性脊椎炎の患者 262 例。まず総合的なリハビリを行う。その後 144 例をラドン吸入群として無作為に抽出し、ラドン室(75 k Bq m<sup>-3</sup>)で 40 分/日、9 日間の治療を行う。その結果、自覚症状として 4 週間の研究治療期間が終了した時点では、プラセボ群と共に強直性脊椎炎の痛みは緩和していた。しかし、3 か月後、ラドン吸入群のみの痛みの緩和が良好であり、その状況は 12 か月後まで持続した。また、強直性脊椎炎の患者に、鎮痛剤として使用される非ステロイド系抗リウマチ剤の使用量は減少したが、ラドン吸入群では、その使用量の減少が 12 か月も持続した。鎮痛剤は、時には重篤な副作用を招くことがあるが、ラドン療法による副作用は報告されていない。重篤なリュウマチ疾患におけるラドン療法を施すことは価値の高い臨床的手段であるといえる。

#### おわりに

ラドン坑道療法は、関節・筋・神経などの鎮痛効果に優れており、副作用は認められず、薬の減量にも効果があるなど、低線量放射線は、有益な効果のあることが明らかとなった。ラドン坑道の放射線量は  $44 \, k \, Bq \, m^{-3}$  (大気) である。日常生活におけるラドンの年間被ばく量は、 $2.4 \, mSv$  である。今回の坑道治療における  $3 \, J$  週間の治療による被ばく量は、 $1.8 \, mSv$  である。WHO(世界保健機構)と ICRP は、一年間に  $10 \, mSv$  に相当する  $300 \, Bq \, m^{-3}$  を屋内ラドンに対する参考レベルとして提示している。

一般的に、喫煙によるがんリスクを見ると、受動喫煙は、放射線を100 mSv まで浴びるより固形がんのリスクは高い。100 mSv とは、避難基準下限地域で、およそ5年間居住あるいは <sup>137</sup>Cs の規制値の2倍のタケノコを、1日100gを3か月間食べ続けるときの値に相当する。また喫煙者は、1000 mSv を浴びるより固形がんの発症リスクは高い。1000 mSv とは、福島第一原発の圧力制御室に1.5時間待機するのと同レベルである。これらの数値を参考にして比較すると、ラドン坑道治療によるがんリスクは全く無く、明らかに症状の軽減、薬物の減量が認められるなど、低線量放射線域に有害性はないといえる。従って、低線量放射線については風評被害に惑わされることなく正しい知識をもって正しく怖がることが望ましい。

(元大妻女子大学社会情報学部社会情報学科社会環境情報学専攻健康科学室教授)

#### 参考文献

- 1) T. D. Luckey, 松平寛通(監修) 放射線ホルミシス、ソフトサイエンス社(1993)
- 2) T. D. Luckey, Health Physics) 45 (1982)
- 3) 三友紀男編「放射能泉の安全に関するガイドブック」ヤングビーナス (2014) 山岡聖典 第2章放射能泉の安全と健康 (2014)
- 4) J. H. Harley, E. S. Jelter, N. Nelson, "Elimination of radon from the body," Environ. Int., 20, 573-584(1994)
- 5) Z. Q. Wang, F. Poareca, S. Cuzzocrea, et al., "A newly identified role for superoxide in flammatory plan," J. Pharmacol. Exp. Ther., 309[3], 869-878(2004)
- 7) Z. Khalil, T. Liu, R. D. Heime, "Free radicals contribute to the reduction in peripheral vascular responses and the maintenance of thermal hyperalgesia in rats with chronic constriction injury." Pain,79[1] 31-37(1999)

#### 【解説】

# 21世紀中葉に向けたエネルギー供給と原子力

石井正則 原子力学会シニアネットワーク連絡会会員 〒176-0023 東京都練馬区中村北 1-20-4 (2023 年 1 月 30 日受理)

#### 1. はじめに

地球温暖化抑制のため、2050年までにエネルギー起源の二酸化炭素( $CO_2$ )排出量を実質ゼロとするカーボンニュートラル (CN)が今後のエネルギー資源の活用に際して求められている。その一方、近年は電力需要の高い冬と夏に予備率が少なくなり節電要請や、自然災害による停電も発生している。さらにロシアのウクライナ侵攻では、天然ガスなどエネルギー資源確保の重要性が喚起されており、我が国のみならず資源小国では供給途絶の危機も生じている。エネルギー供給はこのような様々な事情に対処しながら、2050年にはエネルギー起源の  $CO_2$ 排出量をゼロとすることが求められている。

我が国では 2050 年の CN 達成に向けてスタートしたグリーン・トランスフォーメーション (GX) 実行会議で、岸田総理は原子力発電は CN 達成に不可欠として再稼働促進と新増設の着手を指示した。筆者は脱原発に引きずられがちななかでの総理の決断を高く評価している。

原子力発電の利用には核燃料サイクル、放射性廃棄物の処理・処分を含めた発電に加え、放射線利用や影響、医療用線源の製造など幅広い分野があるが、ここでは原子力発電分野に焦点を当て、21世紀を俯瞰しながら、2030~2050年のエネルギー供給における原子力の役割を考察した。

#### 2. エネルギー・原子力を取り巻く世界の情勢と日本の政策

#### 2.1. 世界のエネルギー情勢・地球温暖化問題とエネルギー安全保障

地球温暖化抑制に向け、産業革命期からの温度上昇を 21 世紀末に 2℃以内 (努力目標 1.5℃) に抑制するため、2015 年の第 21 回国連気候変動枠組条約締結国会議 (COP21) で制定されたパリ協定と 2021 年の第 26 回締結国会議 (COP26) におけるグラスゴー合意を経て、2050 年における温室効果ガス排出量をゼロとする取組みを世界各国が共有するに至った。我が国も 2030 年の 46%排出量削減と 2050 年に CN とする「日本の NDC (国の貢献)」を COP 事務局に届け出ており、CN 政策は国際公約となっている。

温暖化抑制は世界が一致して取り組まねばならない課題であるが、一部の排出国は CN 達成を 2060 年以降とするなど、足並みがそろっているわけではく、また途上国にとっては 先進国との不公平感も拭えないようだ。各国の実現に向けた努力が待たれる。

そのような中で、近年我が国のみならず世界各地で異常気象などに加え、ロシアのウクライナ侵攻に起因した電力供給危機に遭遇している。平和を享受してきた国々にとって、改めてエネルギー資源確保の重要さを認識させられた。

#### 2.2. 日本のエネルギー政策・S+3E の視点

我が国は第 6 次エネルギー基本計画(2021年10月22日閣議決定)で、2030年の $CO_2$ 削減率を2013年比26%から46%に引き上げ、2050年には実質排出量をゼロ(CN)とする方針を定めた。

資源小国の我が国のエネルギー政策は、**表1**に示すように安全 (Safety) を前提に安定供給 (Energy Security)、経済効率 (Economic Efficiency)と環境適合 (Environment)を実現する S+3E を基本原則としている。現下の

表 1 安全性を前提としたエネルギー選択の基準 S+3E

	自給性:国産・準国産資源、国内生産
安定供給性	調達先多様化、国内技術活用
Energy Security	効率性高:高出力密度
	レジリエンス機能:備蓄・分散立地
経済効率性	TT 校 整 在 上 宁
Economic	価格競争力高:低料金
Efficiency	価格変動吸収:国際間調整・国内備蓄
環境適合性	地球泪噁似体,co Ht山县体
Environment	地球温暖化低:CO <sub>2</sub> 排出量低

世界情勢をみると、短期的には自然災害等、中長期的には国の安全保障の面からエネルギーの途絶を回避するために、安定供給の重要度が高まった。<sup>1)</sup>

岸田総理は GX 実行委員会で再生可能エネルギーの大量導入とともに、原子力発電所再稼働への総力結集、運転期間延長、次世代革新炉開発と建設、再処理・最終処分の加速を指示した。再生可能エネルギーについては、変動再生可能エネルギー(太陽光と風力)の最大限導入、原子力発電についても必要な規模を活用、火力発電については CO<sub>2</sub> の分離回収・利用・隔離 (CCUS、CCS)と、水素やアンモニア燃料を活用するとしている。エネルギー政策ではこれら三分野の配分(エネルギーミックス)を具体化することが求められている。

#### 3. 福島事故の反省と新規制基準

東京電力福島第一原子力発電所が放射性物質放出に至った事故の検証を通じて得られた教訓を反映し、新規制基準が策定された。新規制基準は**図1**に示すように設計基準を強化するとともに、放射性物質の拡散を抑制するなどのシビアアクシデント対策と意図的な

緊急時対応(テいる。 2) が含まれ準ににている。 2) 新規制基準電所は 図2に示すように、 対策、防潮堤な策(大人とフィーの が変事が、 が変事が、 が変事が、 が変事が、 が変い、 が変い、 が変い、 が変い、 が変い、 が変い、 が変い、 が変い、 が変い、 がでいる。 ででいる。 でいる。 

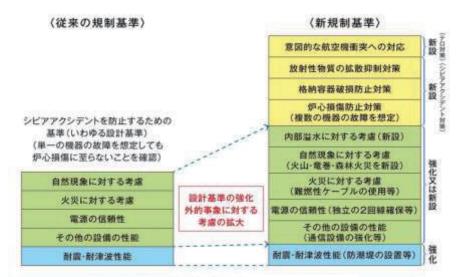


図1 原子力発電所の新規制規準 2)

設置や航空機侵入対策などが施されている。3)

なお、意図的な緊急時対 応は特定重大事故等対処施 設(特重施設)として新規制 審査の対象としているが、 筆者は手段が急速に高度化 する国際紛争への対応は国 が非公開で対応すべきもの と考えている。

# 4. 第 6 次エネルギー基本 計画における原子力の 役割

第6次エネルギー基本計画では2030年度のCO<sub>2</sub>削



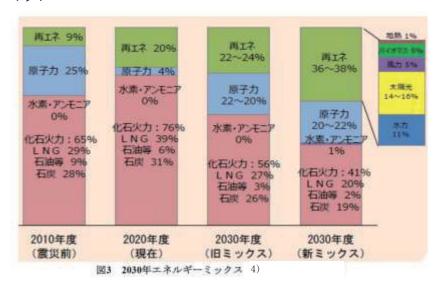
図2 基準適合例 3)

減を46%とし、その実現に向けてエネルギーミックス計画を改定した。

2050年の CN 実現に向けては再生可能エネルギーと実用段階にある脱炭素電源である原子力の活用に加え、火力発電では水素・アンモニア発電や CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) と、カーボンリサイクルによる炭素再利用や貯蔵技術の開発と活用を進めるとしている。

#### 4.1. 2030年のエネルギーミックス

図3に示すように2030年の発電分野の目標では、CO<sub>2</sub>の46%削減のため、原子力は20~22%とし化石燃料を42%に縮小、再生可能エネルギーを36~38%に増強することとした。4)再生可能エネルギーの増強は太陽光14~16%、風力5%とすることによった。なお、2030年の総発電量は省エネルギー増強等により9400億



kWh と推定している(旧エネルギーミックス計画では1兆650億kWh)。

#### 4.2. 2050 年エネルギーミックスと 21 世紀中葉以降の S+3E 政策の考察

CO<sub>2</sub> の実質排出量ゼロは極めてドラスティックな目標である。このためのエネルギーミックス計画は明示されていないが、再生可能エネルギーは"主力電源として最大限に活用する"として発電比率 50~60%程度、その大半を太陽光と風力に期待している。原子力については"国民からの信頼確保に努め、安全性の確保を前提に必要な規模を持続的に活用す

る一方、火力では"水素・CCUSの社会実装を進める"としている。

それぞれの資源に求められる具体的な発電量については提示されていないが、筆者は以下のように考える。

主力電源と期待される太陽光と風力の発電量は、日照、気象条件、季節変動などに依存するため蓄電貯蔵やバックアップ電源を必要とする。しかしながら蓄電による対応は、蓄放電頻度の多い昼夜間や数日の気象変動に限定されよう。週を超える変動はもとより、夏冬の季節変動のような蓄放電頻度の低い蓄電池利用では1回の蓄放電コストが高額となり設備投資回収が困難である。さらに、希薄さと変動性(設備利用率は太陽光12%、風力20%程度)により設置面積が広大になることによる制約もある。食料自給率の低さ(カロリーベースで40%程度)を考えるとむやみに耕地の転用もできまい。過大な変動再生可能エネルギーの導入は経済合理性と国土面積面の制約を考えると、40~50%が上限ではないかと考える。

原子力は新規制基準により安全性が格段に強化された。技術的にも確立されており、リプレース・新増設により現在の基数を維持できれば30%台は可能であろう。

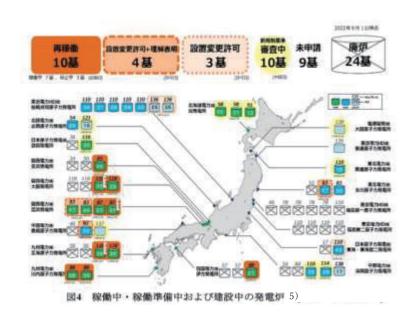
火力は水素やアンモニアなど脱炭素燃料への転換と、排出 CO<sub>2</sub>の回収、再利用、地層中への処分などの技術革新により、変動再生可能エネルギーのバックアップも含めて20~30%を期待したい。化石燃料をそのまま燃やす在来火力ではなく、"革新火力"と呼んでもよかろう。

さらに  $CO_2$  の排出が避けられない分野は森林吸収の他、革新技術を導入して DACCS (Direct Air Capture with Carbon Storage)や BECCS (Bio Energy with Carbon dioxide Capture and Storage)を実現・活用するとしている。しかしながら、長い期間をかけて現在の大気を生み出してきた地球史を考えると、短期間に人工的に大気中の  $CO_2$  を除去・削減することは生やさしい事ではなかろう。画に描いた餅とならないことを祈る。

#### 5. 我が国の原子力発電の現状

#### 5.1. 福島第一原子力発電所事故以降の状況

我が国では 1966 年に東海原子に 70~71年に 7



-23-

表 2 新規制基準審査の現状

区分	再棕條	中	稼働準備	60	審査中	ii .	未申請	
	美浜3	83	高浜1	83	泊1	58	女川 3	83
	大飯 3	119	高浜 2	83	泊 2	58	志賀1	54
原子炉号機	大飯 4	118	胎报 3	82	泊 3	91	拍崎刈羽 1	110
٤	高浜3	87	女川 2	83	東北東通	110	柏崎刈羽2	110
発電容量	高浜4	87	柏崎刈羽	6 136	志賀 2	121	柏崎刈羽3	110
(35 kW)	伊方3	89	柏崎刈羽	7 136	数翼 2	116	柏崎刈羽 4	110
	玄海 3	118	東海第2	110	海河 2	110	柏崎刈羽 5	110
	玄海 4	118			*大問	139	浜岡 5	138
	川内 1	89			∗島根3	137	*東電東通	13
	川内 2	89			(*建設	中)	(*建設中	1)
基数	10 3	Ç	7 基	1	10 基		9 基	
発電容量	996 万	kW	713 万	kW	1053 万	kW	964 万 k	V
総発電容量				Visit Control of	: 27 基、276			

までに稼働すれば、2030年の供用可能な原子炉は36基となる。5,6)

#### 5.2. 2030年以降の考察

2030年に稼働可能な原子炉は現在建設中の3基を加え36基であるが、運転期間を最大可能な60年間としても図5に示すように2030年以降段階的に基数と発電容量が減少する。7 表3は10年毎の基数と発電容量、年間総発電量の推移である。6

2030 年に 36 基が稼働すれば、エネルギーミックの 20~22%は達成できるかもしれない

が、新規制基準適

合性審査を申請 した 27 基では難 しかろう。

2050 年は電化 率が高くなり、電 力需要が増大す ると想定される。 必要とされる原

表 3 運転可能な原子力発電推移

	2030年	2040年	2050年	2060年	2070年
基数	36	32	23	8	3
発電容量 万 kW	3722	3365	2317	956	414
年間発電量 億kWh	2609	2358	1624	677	290
発電比率%	約 26	約 24	約 16	約 6	約3

注 現在建設中原子炉は 2030 年に稼働、年間発電量は稼働率 80%、 発電比率は年間総発電量 1 兆 kWh として算定

子力発電の規模を 30%台とすると、新増設炉 1 基当たりの容量を従前炉より大きくし、120~150万 kW 程度にする必要があろう。このためには後述の革新軽水炉が必要になる。 増設炉建設に 20 年間程度の期間が必要なので、2020 年代から計画を進めなければ間に合わない。

#### 5.3. GX 実行計画における原子力発電

このような中で、2050年のCN実現に向けたGX実行計画では、原子力発電について次の事項が示されている。

▶ 足元 2~3 年の対応:稼働済 10 基と設置許可済 7 基を稼働(合計 17 基)

▶ 2020 年代半ば以降:申請済 10 基+未申請 9 基を稼働(総合計 36 基)

➤ 2050 年 CN・GX 対応:中長期安定供給に向け運転期間の延長による既設炉の最大限 活用と革新軽水炉開発・建設、ならびにバックエンドへの取組など



図5 原子力発電設備容量の推移見通し7)

既設原子炉の 60 年を超える運転を可能とする運転期間の延長は新増設推進のペースを 緩和する効果が期待できるが、延長にも限度がある。新増設の着手遅れは技術力の低下を きたす懸念があるので、運転期間延長と同時並行で新増設の着手も進めるべきと考える。 原子力先進国である米仏の新設炉導入が、建設期間の長期化を招いている現状を他山の 石とすべきことを付記しておく。

#### 6. 次世代型原子炉

#### 6.1. 革新軽水炉

図 6 は経済産業省・革新炉ワーキンググループに提示された革新軽水炉の概念を示した ものである。 $^{8)}$ 

新増設炉に必要となる革新軽水炉は受動安全性、テロ対策やデジタル技術の導入などにより安全性を強化したものである。この図は PWR の計画例で、炉心溶融対策としてのコアキャッチャー、受動安全性を組み込んだ冷却設備、放射性物質放出防止設備、航空機衝突対策、サイバーセキュリティー機能、耐震安全性、自然災害対策などの強化と、再生可能エネルギーのバックアップを可能とする出力調整機能などを装備している。BWR でも同様な機能を具備したものが計画されていると思われる。

#### 6.2. 次世代革新炉:小型モジュール炉、ナトリウム冷却高速炉、高温ガス炉

世界を俯瞰すると、中小規模で熱供給や水素製造など多様な用途に供することができる高温ガス炉、核燃料の有効利用を実現する高速炉などの原子力利用が計画されている。次世代革新炉の開発ではロシアと中国が先行しているが、米国でも 2020 年代後半の稼働を目指している。我が国の高温ガス炉や 21 世紀中葉には核燃料サイクルの一貫として商業運転が期待されている高速炉技術も次世代革新炉の先行例と言える。表 4 に代表的な次世代革新炉を示す。7~9)

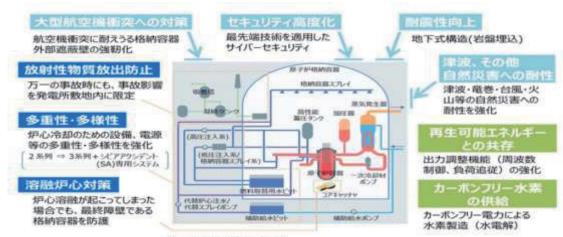


図6 革新型軽水炉の事例 8)

GX 実行計画でも原子力技術の国際貢献、原子力産業の維持などから次世代革新炉への取り組みを支援しており、産業界の期待も大きい。 $\mathbf{Z}$  7 は我が国の産業界が取り組みを表明している代表的な事例である。 $^{7\sim 9)}$ 

タイプ	*	概要と開発体制	導入計画など
小型炉 SMR (Small Modular	BWRX- 300	GE-日立が開発する30万kW 級 BWR、自然循環、受動的 冷却システム装備	カナダ・オンタリオ電力が導入決定、2028 年までに運転開始を目指す
Reactor)	NuScale	米 NuScale 社が開発する PWR タイプ炉、圧力容器・ 蒸気発生器 1 体型モジュー ル、5~7.7万 kW、日揮、IHI が出資・参画、JBIC が出資	2029 年に初号機運転開始(アイダホ国立 研究所) モジュール、メンテナンス機器実証に経 産省が日揮、IHI を支援
Na冷却高速炉	Natrium	米テラバワー社が開発する 小型 Na 冷却高速炉(34.5 万 kW)、JAEA、MHI、MFBR が 協力覚書締結	2020 年代に実証炉建設
高温ガス炉	HTGR	JAEA が試験炉 (HTTR) 運転	ポーランドの実験炉計画に JAEA 支援、

表 4 代表的な次世代革新炉

#### ◇小型モジュール炉 (SMR)

電気出力 30 kW 以下の小型モジュールで構成される原子炉で、自然循環冷却による高い 安全性や、短工期で初期投資を抑制できるなどの利点を有する。

英国とも情報交換覚書調印

中、多用途に対応可

#### ◇ナトリウム冷却高速炉

高速中性子による核分裂を利用する原子炉で、資源の有効利用ができるうえ安全性も高く、高温(500℃)・低温(200℃)の熱利用にも供することができる。化学的に活性なナトリウムの取り扱いが課題。

#### ◇高温ガス炉

冷却材にヘリウムを 用い、900℃程度の熱を 取り出し利用できる。 炉心溶融などに高い水 全性を有し、発電、水素 製造、地域暖房など親 目的に利用可能。 鉄鋼 産業でも関心がもたれ ている。

我が国には SMR の主 要サプライヤーとして 参画や高速炉や高温ガ ス炉でこれまでに培っ

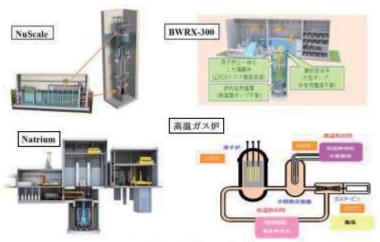


図7 代表的次世代革新炉の概要図 7-9)

てきた先行技術の貢献が期待されている。

#### 7. まとめ

2020年に COP21 で締結したパリ協定を離脱した米国が、バイデン政権になり 2021年の COP27 (第 27 回気候変動枠組条約締結国会議) に復帰し、世界は 2050年に  $CO_2$ 排出量ゼロとする取組みへのカジを切った。我が国は菅前総理が 2030年の排出量削減と 2050年排出量ゼロを表明、これを柱に第 6 次エネルギー基本計画が策定された。その後 2022年のロシアのウクライナ侵攻により、CNとともにエネルギー安全保障の重要性が高まった。これらの事情を踏まえて決定した GX 実行計画では 2030年には太陽光と風力の増強、

2050年には再生可能エネルギーを大量導入し50~60%とする案もあるが、希薄なうえ変動幅が大きい太陽光と風力発電は、設置面積などの制約からせいぜい30~40%ではなかろうか。

原子力の比率はそのままとし、化石燃料を削減するエネルギーミックスを変更した。

原子力発電では運転期間が終了する原子炉の安全性を強化した革新軽水炉に置き換えることにより、発電比率を30%台とすることがCN実現に必要と考える。

火力発電では燃料を水素やアンモニアに転換することと CCUS などを活用する指針が示されている。エネルギーミックスとしては 20~30%程度ではなかろうか。

21世紀中葉以降は再生可能エネルギー、原子力、革新火力を適度に組み合わせた強靱なエネルギーミックスが必要と考える。エネルギーは国民生活と経済を支える基盤である。 高速増殖炉の商業化、核融合炉の実用化に向けた取組みを含めて、22世紀を見据えて国家 100年の計として取り組んでもらいたいというのが筆者の思いである。

#### 参考資料

- 1) 原子力政策の課題と対応について、資源エネルギー調査会原子力分科会資料、資源エネルギー庁(2021/2/25)
- 2) 新規制基準の特徴、発電用軽水型原子炉の新規制規準の骨子、原子力規制委員会ホームページ

- 3) 原子力発電所の安全対策、国内の原子力発電所の再構築に向けた対応状況、電気事業連合会ホームページ (http://www.fepc.or.jp/)
- 4) 今後の原子力政策について、原子力小委員会資料、資源エネルギー庁(2022/2/24)
- 5) エネルギー安定供給の確保、資源エネルギー庁 (2022/12/16)
- 6) 新規制基準適合性審査の進捗状況について (発電用原子炉関係)、原子力規制委員会 (2023/1/11)
- 7) 2050年カーボンニュートラルに向けた検討、資源エネルギー庁(2021/1/27)
- 8) エネルギーを巡る社会動向を踏まえた新型炉開発の価値、資源エネルギー庁(2022/4/20)
- 9) エネルギーを巡る社会動向と原子力の技術開発、資源エネルギー庁(2022/3/28)

#### 【資料】

## エネルギー政策に対する学生の意見と背景について

若杉 和彦 日本原子力学会シニアネットワーク連絡会会員 〒249-0004 神奈川県逗子市沼間 5-20-28 kwakasugi@cap.ocn.ne.jp (2023 年 1 月 30 日受理)

#### 1 まえがき

ロシアのウクライナ侵攻のためエネルギー価格が世界各国で上昇している。日本のエネルギー自給率は12%しかないので、石炭・石油・LNGのほとんどを海外から買わないと生活できない。ウクライナ支援の立場からロシアからの輸入を抑制しているため、日本のエネルギー供給は今正念場を迎えている。政府はこれまで脱炭素化政策として再エネの最大限活用と原発の再稼働を柱としてきたが、再稼働の促進と新増設着手の重要性が格段に増大した。しかし、2011年の東電福島原発事故の影響を受けて国内にはなお嫌原発、放射線を怖がる空気が残っている。エネルギーを長期にわたってリーズナブルな価格で確保する"エネルギー安全保障"のため、原発はなくてはならない重要な役割を担うことになるだろう。将来を担う今の大学生達はこのことをどう思っているのか、またその背景としてどのような原子力・放射線の教育を受けてきたのだろうか。

私たちの SNW (日本原子力学会シニアネットワーク連絡会)では、全国の大学・高専の学生達とエネルギー・原子力・放射線について「学生とシニアの対話会」を毎年 20 回程度開催しており、対話会後にアンケートを収集して学生の意見を集計・分析している。ここではアンケートに示された日本のエネルギー政策や放射線に対する学生の意見について最近の傾向を見ていきたい。また、その意見の形成に大きく影響したであろう高校の教科書には原子力・放射線がどのように書かれているかについても触れ、まとめとしてそのリテラシーを高めるための課題について私見を述べたい。

#### 2 ロシアのウクライナ侵攻の日本エネルギー安全保障への影響について

「原発を動かさなくてもいま電気は足りている」と思っている人が多い。自然のエネルギーは無限にあるから、それを再エネとして使えば足らなくなるはずはないと考えているのだろう。だが問題は、必要な電気や熱に変換するためにどれだけのお金がかかるかである。 今は政府が省エネを要請したり古い火力発電所を再稼働させたりして、なんとか電力危機を乗り切ろうとしているが、問題はこれからである。

その理由は3つある。まず、ウクライナで起こっている戦争のため、日本がロシアから輸入してきた石炭・石油・LNGの輸入先を他に探さなければならない。このことは日本だけ

でなくロシアに依存し ながら脱原発を進めているドイツを始め EU 諸国でも深刻であり、 資源獲得競争と電気代 急上昇を招いてる。 図1に先進各国のエネルギー自給率の推移を 示すとおり、日本の自 給率は先進国中最低の 11%(2021 年現在)し かない。エネルギーの



図1 先進各国のエネルギー自給率の推移

89%を毎年海外から買わなければ国が立ち行かないのである。ロシアからは、石油を全石油輸入量の4%、同様にLNGを9%、石炭を11%輸入(2020年の実績)しており、これらを合わせると全電力の7%を賄う化石燃料をロシアに依存してきたのである。

二つ目は、再エネに頼っても北海道でブラックアウトが実際に発生したように、天候依存型の太陽光や風力を頼みにすることはできない。仮に大容量の蓄電設備が実装されていれば問題は解決するだろうが、今の技術では難しいし、コストが莫大にかかる。過去の実績から、寒冷地の冬には1,2週間程度天候不順が続くことがある。仮に再エネの年間発電量の1週間分をリチウムイオン電池に溜めるためには、技術革新によって電池の値段が将来下がったとしても、数百兆円のコストがかかる。日本の太陽光パネルの設置量は既に米国、中国に次いで世界第3位の膨大な量になっているのに、実際は肝心な時に頼りにならない。図2に日本機械学会エネルギーシステム研究会が報告しているリチウム電池の現在のコストと将来の技術開発によるコスト削減幅を示す。三つ目は構造的な理由である。夜や雨の時は太陽光が働かず、風の吹かない時は風力が働かないので、原発が動かなければバックアップの火力がどうしても必要になる。

「必要な時にだけ火力を稼働させてくれ」のような虫のいい話はダメで、火力発電所をいつでも動かせるように人員を配置して常時管理していなければならない。これには金がかかる。また、電力自由化の政策が採られたために、競争激化の中で新規火力発電への投資が減少し、しかも原発の稼働が遅れているの

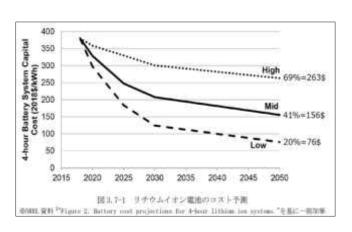


図2 リチウムイオン蓄電池のコスト予測

で電力不足が既に深刻になっているのが現状だ。

日本の電気料金は図 3 に示すとおり米国の約 2 倍であり、先進国中最も高い。2021 年 8 月から2022 年 8 月までの 1 年間に産業向け電気料金が約 4 割、家庭向けが約 2 割さらに高くなった。また、日本のレギュラーガソリンは、今1 リットル当たり 170 円前

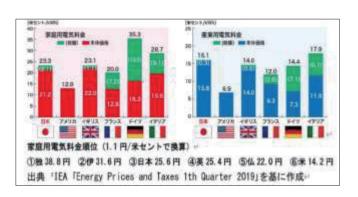


図3 電気料金の各国比較

後で急激な値上がりは少ないが、その理由は政府が値上がりを相殺する補助金(2022 年度では3兆円)を出しているからだ。しかし、結局は国民が税金で負担することになる。このままで良いのだろうか。日本が世界の中で生き抜くには、エネルギーの大切さを国民が理解し、対策を考えていかなければならない。

近年地球温暖化対策として脱炭素が世界的な傾向であり、CO<sub>2</sub>を排出しない再生可能エネルギーと原子力が注目されている。特に最近原子力発電に対する政府の姿勢に変化が表れているものの、東電福島原発事故の大きな影響が国民感情から消えていない。そこで、国のエネルギー・原子力・放射線について、学校教育ではどのように教えられてきたのか、学生はどのような認識なのかを知り、今後の課題を摘出することは大変意味のあることと考える。その視点から、大学・高専学生の日本のエネルギー政策に対する認識と傾向について以下の章で見ていきたい。

#### 3 日本のエネルギー政策に対する学生の意見

#### (1) SNW の「学生とシニアの対話会」活動について

SNW (日本原子力学会シニアネットワーク連絡会) は2006年に設立され、原子力の学会・官界・産業界で活躍したOBが中心になり、原発事故等で低下した原子力の信頼回復を目指している。一方「学生とシニアの対話会」は、既に2005年から活動をスタートしていたが、SNW設立と同時にその主要事業として進めており、世代間の対話を通して次世代を担う若者にシニアの気概・経験・知識を伝え、原子力を正しく理解してもらうことを目的にしている。対



図4 「学生とシニアの対話会」開催校等

話の対象は、当初大学生や高専生を中心としていたが、活動が進むにつれて要請が増え、小中高校の教員や一部市民にも広げている。図 4 に示すとおり、2020 年度までに対話会を開催した全国の大学・高専・自治体は合計 47 か所(赤字は教育系大学)になり、2021 年度までに合計約7,000 人の学生が対話会に参加した(表 1 参照)。

「学生とシニアの対話会」全体の標準的な流れを図5に示す。最初に学校側の担当教員や学生からの要請を受けて、対話で採りあげるテーマを決める。その後テーマに関する質問と回答を学生とシニアがやり取りする(往復書簡)。最近では、対話会で採りあげるテーマについてシニアが事前に講演(1時間程度)を行い、その数週間後に対話会を開催するケースが増えた。なお、従来は直接対面

年度。	學生	研修教具	指導教員	シニア	オブザー	合計
2005-	129-	4	45	38.	32+	1835
2006	569	-	42-	113	24-	B4B-
2007.	660	U.	71.	248	47-	1026
2008.	1012	-	130-	383	117-	1645
2009.	1360.		182.	515	108:	2105
2010-	1807.	-	230-	601.	154-	2885
2011-	2255-		293.	H47.	173	3566
2012	2581	4	338	952-	177-	4048.
2013-	3077	-	362-	1005-	391-	4745
2014	3641-	-	424	1214-	203	5482
2015-	4067	-	460-	1324	211-	6052
2016-	4578-	18-	496.	1486	238-	6817
2017-	53125-	27	520-	1664-	245	7561
2018	5800-	28	856	1798	273	8.090
2019 -	6356-	97.	388	1936-	294-	9265
2020	6609	.97	606.	2096	304	9672
3921	6969-	97-	636	22003-	309-	10214

表 1 対話会参加者数

方式が通例であったが、コロナ感染拡大の影響を受けて 2021 年度から Zoom 等を活用した Web 方式を採用することが多くなった。

シニアの事前講演の内容は、エネルギー・原子力・放射線の理解を深めることを目的にしているが、最近は脱炭素やロシアのウクライナ侵攻の影響等、対話会開催時点で話題になっ

ている問題にも触れることが多くなった。

「地球に優しい持続可能なエネルギー社 会環境の構築に向けて」

「高レベル放射性廃棄物対策~NIMBY と 風評問題を低減するための対策~」

「原子力発電の基礎と安全確保について」 「放射線利用、放射線分析と原子力発電・ エネルギーミックス」

「次世代炉として期待される高温ガス炉 について」

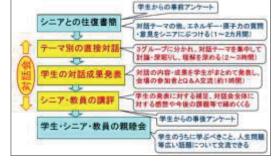


図5「シニアと学生の対話会」の流れ

「原子力エネルギーと核融合開発」

「カーボンニュートラル (CN)とエネルギー危機」

対話会では、参加学生の人数に応じて3グループ程度に分け、シニアは1,2名ずつ分かれてそれぞれのグループに対応する。対話の後に学生が対話の結果又は成果を発表し、最後にシニアと担当教官の講評で締めくくる。学生自身が口頭発表することは、対話内容の理解を深めるとともに、考えをまとめて発表する訓練にもなる。終了後に学生はアンケートを提出し、シニアはその結果を集計・分析して対話会の成果を評価する。対話会の所要時間は3

時間程度であるが、学校側の制約から短縮又は延長する場合もある。さらに対話会終了後に 学生・教員・シニアを交えた懇親会を学食等で開催し、対話テーマ以外の社会問題や人生問 題等についても学生達と交流する機会も多々あった。

#### (2) アンケート結果に示された学生の意見

アンケートの設問は、学生が対話会で何を得たのか、対話会開催の必要性、放射線やエネルギー政策への意見等である。ここでは下記設問1と2に示すとおり、日本のエネルギー政策と放射線に関する学生の意見を採り上げ、2017年~2022年前半に開催した対話会について集計・分析した。近年国内外で揺れ動くエネルギー事情や電力危機等の情勢変化に対する学生の捉え方やその判断に影響すると考えられる放射線に対する感じ方の傾向を見ていく。設問1:日本のエネルギー政策に関する設問:原子力発電に対して伺います。

「国は、原子力については、安全性の確保を大前提に必要な規模を持続的に活用していくと しつつ、可能な限り原発依存度を低減するとしています。本日の対話も踏まえあなたの認識 は次のどれですか? 理由は?」(該当するものをチェック)

- ①原子力発電の必要性を強く認識した。削減又は撤退すべきでない。
- ②原子力発電の必要性は分かっていたので、削減又は撤退すべきでない。
- ③原子力発電の必要性は分かるが、やはり危ないから早期に削減又は撤退すべきだ。
- ④原子力発電を止め、再生可能エネルギーを最大限使えばよい。
- ⑤どうすればいいかよく分からない。
- 設問2:放射線に対する設問:放射線、放射能に対して伺います。(複数回答可)
- ⑦放射線、放射能はやはり怖い。
- ①一定のレベルまでは恐れる必要はないと以前から知っていた。
- ⑦一定のレベルまでは恐れる必要がないことを対話から理解できた。
- 国放射線、放射能は生活に有用であることを前から知っていた。

設問1に対するアンケート集計結果を表2に示す。便宜上、表中の"推進"は設問中の①と②をチェックした学生の人数(%)、"反対"は③と④をチェックした人数(%)をそれぞれ示す。また、設問2に対する集計結果を表3に示し、表中の"怖い"は設問⑦をチェックした学生の人数(%)、"いいえ"は⑦、⑤、②をチェックした人数(%)をそれぞれ示す。なお、表中の"学校名"のA~Zの26校は次の大学又は高専であり、参加学生が理系の場合は(理)、文系の場合は(文)、高専を(高)で区別した。検討対象期間(2017年から約5年半)に参加した学生の総数は2,433名である。参加学生が全てアンケートに回答しているのではないが、おおよその意見の傾向を捉えることができよう。

北大、北海道教育大、八戸工大、山形大、長岡技科大、東北大、宮城教育大、関東複数大 (2020年度から全国複数大)、静岡大、福井工大、三重大、近畿大、京都女子大、九工大、九大、長崎大、大分大、佐賀大、宮崎大、福島高専、富山高専、広島高専、徳山高専、宇部高専、北九州高専、有明高専 (合計 26 校)

表 2 エネルギー政策に関する集計結果 表 3 放射線に関する集計結果

学校名			3年度 2019		年度 2020		年度 2021				2年度	
于汉石	推進	反対	推進	反対	推進	反対	推進	反対	推進	反対	推進	反対
A(理)	-	-	-	-	100	0	-	-	-	-	-	-
B(文)	-	-	-	-	80	5	81	4	-	-	69	1:
C(理)	94	0	91	0	94	0	-	-	95	0	-	-
D(理)	91	3	100	0	-	-	-	-	-	-	-	-
E(理)	76	24	79	- 11	62	7	^	-	-	-	-	-
F(理)	-	-	90	5	100	0	-	-	100	0	100	
G(文)	78	22	-	-	60	40	73	27	-	-	82	1
H(高)	88	6	85	11	84	16	90	10	61	26	-	-
I(理)	64	2	89	0	70	18	64	22	100	0	63	
J(文)	-	-	-	-	-	-	-	-	90	0	71	1
K(高)	-	-	-	-	-	-	92	8	88	10	-	-
L(理)	97	1	88	7	94	4	85	12	100	0	-	-
M(文)	-	-	-	-	44	39	88	0	83	0	82	
N(理)	-	-	100	0	-	-	-	-	-	-	-	-
0(文)	78	21	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P(高)	89	4	85	15	95	0	-	-	-	-	-	-
Q(高)	-	-	80	10	75	8	72	17	-	-	-	-
R(高)	-	-	1	-	-	-	100	0	75	25	80	
S(高)	96	4	100	0	96	0	94	6	90	7	-	-
T(高)	-	-	83	10	-	-	-	-	-	-	-	-
U(理)	94	0	89	8	92	4	100	0	92	6	-	-
V(理)	-		95	0	94	0	-	-	85	0	-	-
W(理)	-		90	0	-	-	83	17	93	0	-	-
X(文)	-	-			60	20	-	-		-	-	-
Y(理)	-				95	0	-	-	92	0	-	
Z(文)	-	-	78	19	-	-	-	-	-	-	-	-
加学生数	54	17	64	14	47	79	25	59	3	60	1	44

学校名	2017年度		2018	2018年度		2019年度		2020年度		2021年度		2022年度	
子权在	怖い	いいえ	怖い	いいえ	怖い	いいえ	怖い	いいえ	怖い	いいえ	怖い	いいえ	
A(理)	-	-	-	-	4	96	-	-	-	-	-	-	
B(文)	-	-	-	-	4	96	9	91	-	-	18	82	
C(理)	3	97	9	91	-	-	-	-	11	89	-	-	
D(理)	20	80	12	88	-	-	-	-	-	-	-	-	
E(理)	33	67	11	89	18	82	^	-	-	-	-	-	
F(理)	-	-	0	100	-	-	-	-	0	100	9	91	
G(文)	19	81	-	-	17	83	10	90	-	-	7	9;	
H(高)	4	96	14	86	-	-	12	88	6	94	-	-	
I(理)	10	90	0	100	15	85	8	92	6	94	7	9;	
J(文)	-	-	-	-	-	-	-	-	16	84	0	100	
K(高)	-	-	-	-	-	-	8	92	10	90	-	-	
L(理)	0	199	8	92	-	-	16	84	0	100	-	-	
M(文)	-	-	-	-	31	69	27	73	28	72	27	7:	
N(理)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0(文)	0	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
P(高)	11	89	8	92	13	87	-	-	-	-	-	-	
Q(高)	-	-	8	92	17	83	29	71	-	-	-	-	
R(高)	-	-	-	-	-	-	0	100	0	100	7	93	
S(高)	11	89	5	95	-	-	10	90	13	87	-	-	
T(高)	-	-	24	76	-	-	-	-	-	-	-	-	
U(理)	9	91	18	82	13	87	12	88	8	92	-	-	
V(理)	-	-	7	93	-	-	-	-	0	100	-	-	
W(理)	-	-	0	100	-	-	0	92	10	90	-	-	
X(文)	-	-	-	-	0	100	-	-	-	-	-	-	
Y(理)	-	-	-	-	11	89	-	-	6	94	-	-	
Z(文)	-	-	24	76	-	-	-	-	-	-	-	-	
加学生数	5	47	64	44	4	79	2	59	3	60	1	44	

上記表の結果を整理して下図に示す。図6 (原発の必要性を認識・分かっていた/原発推 進意見)及び図7(原発の早期撤退・再エネ利用/原発反対意見)は、理系大学生の日本のエ ネルギー政策の中の原発利用に対する"推進"と"反対"の意見の割合(%)をそれぞれ示し、 図8と図9は、同様に文系大学生の"推進"と"反対"の意見の割合(%)をそれぞれ示す。ま た、図10及び図11は、放射線について"やはり怖い"と意見した理系大学生と文系大学生 の割合(%)をそれぞれ示す。

アンケート結果を分析すると、学生の意見には以下の傾向が表れていると考えられる。

#### 日本のエネルギー政策については、

・大学生は理系も文系もともに、大多数が「原発の必要性を強く認識・分かっていた」とし



図6 エネ政策に対する"推進"意見(理系)



図7 エネ政策に対する"反対"意見(理系)

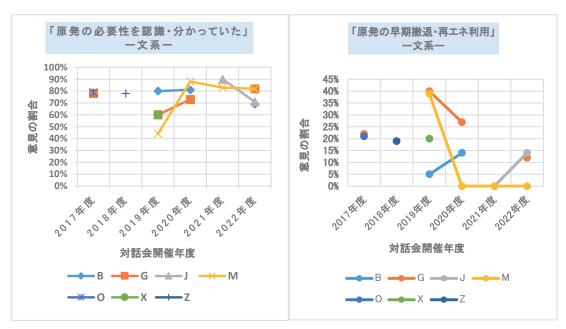


図8 エネ政策に対する文系学生意見(1/2)

図9 エネ政策に対する文系学生意見(2/2)

た。ただし両者を比較すると、理系が85%~100%であるのに対して、文系では80%を中心に50%から90%までばらついており、理系の方が原発推進により肯定的であった。また、この傾向は2017年度から2022年度前半までの間に大きな変化は認められなかった。

- ・「原発の早期撤退・再エネ利用」の意見の学生は、理系では 0~25%、文系では 0~40%の 範囲にばらついているが、両者ともに年度が下るにしたがって低い割合になっている。この 傾向は理系の方がよりはっきり表れている。
- ・高専学生については理系大学生とほぼ同様の傾向にあることが示された。

#### 放射線については、

- ・大学生は理系も文系もともに、「やはり怖い」とした意見が 0~35%の範囲でばらついている。理系では年度が下るにしたがって 10%以下に減少しているものの、文系では年度に関係なくばらついており、なかなか零には近づいていない。
- ・逆に「いいえ」の意見は理系、文系ともに多く、前者が80%以上、後者が70%以上であった。ほとんどの学生が"放射線は一定のレベルまで恐れる必要はない"又は"生活に有用であることを知っていた"ことを示している。
- ・高専学生についても、表から同様の傾向にあることが読み取れた。
- ・アンケートの設問では、"(複数回答可)"と追記してあるため、⑦の"やはり怖い"をチェックした学生の中には①や⑤や⑤のどれかにもチェックしたケースが多々あった。これらの学生は、放射線に対する理解はあるものの、やはり放射線は怖いものだとの感覚を持っていると考えられる。

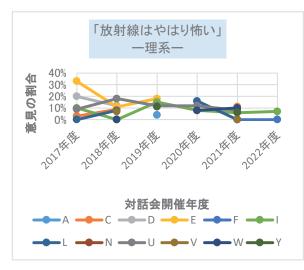


図 10 放射線に対する理系学生意見

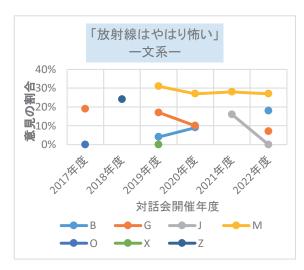


図 11 放射線に対する文系学生意見

#### 2022 年度前半のアンケート結果について

2022 年度の対話会はロシアのウクライナ侵攻開始の 2022 年 2 月以降に開催されており、本資料をまとめるまでに7校(理系2校、文系4校、高専1校)の報告書しか完成していないが、他の年度(2017~2021年度)と比較して以下のような特徴が認められた。

- ・日本のエネルギー政策については、「原発の早期撤退・再エネ利用」意見の割合は非常に 少なく、理系は 0%、文系は最大 14%、高専 0%であった。
- ・放射線については、「やはり怖い」意見の割合が理系と高専で、ともに他の年度と比較して最も低く最大9%であったが零にはならなかった。また、文系では他の年度と同様0~27%程度のばらつきが認められた。

#### 4 高校の教科書に放射線や原子力はどのように書かれているか

#### (1) 日本原子力学会教育委員会による教科書調査活動について

この活動は、小中高校で使われる教科書にエネルギー・原子力・放射線関連の記述がより 正確で公正な内容となることを目標に、1996年から開始されており、毎年提言を報告書に まとめて公表している。報告書の提出・公表先は、文科省、教科書協会、マスメディア等で あり、2022年には次の調査報告書を公表した。

「新学習指導要領に基づく高等学校教科書のエネルギー・環境・原子力・放射線関連記述に関する調査と提言―地理歴史、公民、理科、保健体育、家庭および工業の調査―」、日本原子力学会教育委員会、2022 年 7 月

(2) 教科書のエネルギー・原子力・放射線関連記述のうち修正又は改善を要した事例 エネルギー・原子力・放射線に関する記述は近年多くなり、内容も豊富になる傾向にある。 しかし、中身を見ると曖昧な書き方、過大な表現、事実と異なる内容等も散見された。中に は原子力開発そのものの否定や再生可能エネルギーを一方的に礼賛する記述も見られた。 これらには、2011年に発生した東電福島原発事故の影響が反映しているように感じられる。 ここでは特に不適切と思われた記述例を以下に示す。調査報告書ではそれぞれに対し、理由 を付けて改善又は修正案を提言してきた。しかし、学生が教科書で学ぶ時期と教科書の記述 が改善されたとしてもその時期との間には数年間の間隔があるので、不適切な記述の教科 書が学生に与える影響は大きいと言わざるを得ない。

#### ①チェルノブイリ等の原子力事故について

- ・いったん事故が起こると、放射能の及ぼす影響は大きく、放射性物質によって地球上はおおわれてしまう。 「高等学校 政治・経済」、第一学習社、p101(1996年調査)
- ・1979 年のアメリカのスリーマイル島の原子力発電所の事故でも、周辺地域に多大な放射 能被害をもたらした。 「高等学校 現代社会」、数研出版、p25 (1996 年調査)
- ・チェルノブイリ事故は、・・食物を汚染したばかりでなく、事故後5年以上たっても白血病や甲状腺ガンなど深刻な後遺症に苦しむ人々を増加させ・・その後の放射線被ばくなどによる死者は7,000人とする報告もある。 「現代社会」、三省堂、p76(1996年調査)
- ・チェルノブイリ事故では・・甲状腺やリンパ腺の異常、白血病や各種のガンが多発している。「地理 B」、東京書籍、p 1 3 4 (1996 年調査)
- ・チェルノブイリ原発事故を・・1990年代以降のヨーロッパでは脱原発と環境政策、つまり放射能と地球温暖化の不安のないエネルギーへの転換が始まりました。

「日本史 A」、実教出版、p 1 9 9 (2015年調査)

#### ②放射線について

- ・・核分裂により生ずる「死の灰」の処理など、安全性をめぐる問題が他の代替エネルギーとは異なる点であり・・・ 「新高校現代社会」、一橋出版、p11 (1996 年調査)
- ・潜伏期間を経てがんや白内障が現れる・・、さらに放射線を受けた人の子孫に影響を及ぼす・・。 新興出版社 啓林館 「物理基礎」、p221、(2013年調査)
- ・原子力エネルギーは、原子核に操作を加え、生活圏の外部にあるエネルギーを取り出す点で他のエネルギーとは全く異質であり、放射性物質を無害にすることは不可能である。

「現代倫理」、清水書院、p190(2015年調査)

#### ③その他不適切な記述例

- ・使用済み核燃料の廃棄物が年々増加し、ヨーロッパでは、地下の岩塩鉱山跡や大西洋の深 海底への投棄が実施されている。 「地理 B]、教出出版、p115 (1996 年調査)
- ・放射性廃棄物の処理や管理の問題もある。原子力エネルギーを取り出せば出すほど危険な 放射性廃棄物は蓄積されていく。その放射能が危険レベル以下になるまでに数万年かか るといわれている。 「倫理」、第一学習社、p187、(2015年調査)
- ・脚注 5 原発開発を推進した政治家、官僚、企業、一部の学者、マスコミなどが一体となって原発の安全性を喧伝し、批判的意見を封じ込めてきたことが明らかになった。

「日本史B」、実教出版、p359 (2015年調査)

・原発は国の財政援助が大きく、危険なために大都市以外の僻地に「立地交付金」などの「迷惑料」を出して開発を進めた・・コストは安くない。・・今回の原発事故によって、・・脱原発をすべきだとする国民の声が広く聞かれるようになった。温暖化対策を考え、太陽光・・再生可能エネルギーへの転換を進め、省電力経済を作るべきであろう。

「政治・経済」、実教出版、p 1 6 4 (2015年調査)

#### 5 まとめと考察

昨年2月に始まったロシアのウクライナ侵攻と既に数年前から議論されている地球温暖化の脱炭素化対策は、日本のエネルギー安全保障に大きな影響を与えており、政府は最近原発の再稼働・新規建設へ方向転換した。この中で将来を担う学生が日本のエネルギー政策をどのように考えているかについて、2017年~2022年前半(5年半)に開催されたSNW「学生とシニアの対話会」の事後アンケートを調査・分析した。また、学生の意見形成に影響したであろう高校教科書の放射線関連の記述についても考察した。これらの結果から、大多数の学生は原発活用の日本のエネルギー政策に肯定的であること、特に理系学生にその傾向が強いことが示された。放射線については、その有用性を理性では理解しているものの、「やはり怖い」意見の学生が理系にも文系も少なからずいることが分かった。これには高校時代に学んだ教科書の放射線関連記述等が影響しているのではないかと考えられる。

エネルギーは食料と同じで、両方とも生活になくてはならない。特に、食料自給率 38%に 比較してエネルギー自給率は 12%しかないのに、後者への関心度が低いことに危機感を感 じる。将来を背負う学生にはエネルギーのこと、その中でも大切な原子力に関するリテラシ ーを高めてほしい。その趣旨から今後の課題や期待について私見を述べたい。

・中学校での放射線教育が昭和55年から平成20年まで約30年間なくなった。2011年の東電福島原発事故以来これは復活しているが、今の多くの中高年の先生方は放射線に関する義務教育を受けなかった。理系教育を受けるか自主的に勉強しなければ、教育現場での課題が多いのではないか。

その意味で、放射線教育フォーラムのさらなる活動を期待したい。

・原子力のリテラシーを高めるには、それが社会にどのように関わり、役割を果たしているかを知ることが基本になる。特に原発は、安全性とともに社会での役割を総合的な視点で



図 12 18 歳若者の国や社会に対する意識

学生が理解するのはたやすくない。学校教育においては放射線や原子力の物理だけでなく、 社会科系の教科の中でその役割を分かり易く解説されることを望みたい。

・日本財団が 2019 年に 18 歳の若者に対して行った"国や社会に対する意識"調査結果を図 12 に示す。これによると、「自分で国や社会を変えられると思う」、「自分の国に解決したい 社会議題がある」等が米、英、インドなど 9 か国の中で日本は最低となっている。今後国際 情勢の変化を受けてエネルギーとともに防衛力の議論が活発になると思われる。特に学校の先生方には、迫りくるリスクに対して感情的でなく、科学的知識に基づく合理的な判断が下せるように若者を育成していただくことを期待したい。

#### 参考資料・出典

- ・「学生・教員・市民とシニアの対話会」、シニアネットワーク連絡会 (aesj.or.jp)
- ・「新学習指導要領に基づく中学校教科書のエネルギー・環境・原子力・放射線関連記述に関する調査と提言」、日本原子力学会教育委員会、2021 年 7 月
- ・石井正則 ほか:「世代間対話を通した原子力技術と文化の伝承 学生・教員とシニアとの 対話活動」、日本原子力学会誌、Vol.62, No.11 (2020)
- ・「原子力・再生可能エネルギー調和型 エネルギーシステム研究会 報告書」、日本機械学会 2021 年 7 月
- ・「国や社会に対する意識」(9 カ国調査)、日本財団「18 歳意識調査」第 20 回 テーマ、2019 年 11 月 30 日

### 【意見】

### 医療における被ばくと放射線防護の考え方

#### 酒井 一夫

〒110-0015 東京都台東区東上野 6-7-2 放射線教育フォーラム E-mail: kazsakai0224@outlook.jp (2023 年 1月 31 日受理)

医療の場で人々は様々な形で放射線とかかわっている。ここでは、医療の場における被ばくについて概観することとしたい。

#### 1. 放射線と医療

放射線は、その発見の直後から医療(診断や治療)に用いられた。放射線の人体への影響に関する知識が乏しかった初期においては、様々な障害が引き起こされた。これが、放射線を利用することの恩恵は維持しつつ、人体への有害な影響を抑えようという、放射線防護の考え方につながることとなった。いわば、医療の場は放射線防護誕生の地といえよう。

#### 2. 被ばくの種類と線量限度

医療の場で人々は様々な形で放射線と関り、様々な被ばくが見られる。現在の放射線防護の枠組みでは、被ばくは3つのカテゴリーに分類されている。(1)職業被ばく、(2)公衆被ばく、そして(3)医療被ばくである。

#### (1) 職業被ばく

放射線業務従事者の、放射線業務の実施に伴う被ばく。医療に従事し、放射線源を扱う、 あるいはそのような場に立ち会う人々(医師、看護師、診療放射線技師など)の被ばく。

放射線を利用することのベネフィット(便益)と被ばくによる健康リスクを勘案して「5年間で100ミリシーベルト。ただしどの1年間においても50ミリシーベルトを超えないこと」という「線量限度」が設定されている。

#### (2)公衆被ばく

放射線医療は受けない、見舞客や他の業務などでたまたまその場に居合わせた一般の 人々の被ばく。線量限度は年間1ミリシーベルトと設定されている。

#### (3) 医療被ばく

医療被ばくはさらに3種類に分類される。

- 1)診断、IVR(X線透視を行いながら治療措置を行う手法)、あるいは、放射線治療に伴って個人が受ける被ばく。後述のように、線量限度は設定されていない。
- 2) 核医学医療を受けている患者の介護者・介助者の被ばく

検査や治療のために放射性医薬品を投与された患者は、患者自身が「線源」となる。このような患者に近くで接しつつ介護・介助を行うことにより被ばくすることになる。家族や親しい友人などが病院や家庭で、このような被ばくを承知の上で介護・介助を行う場合の被ばくがここに分類される。

一連の検査・治療の間に5ミリシーベルトという、公衆被ばくの線量限度よりも高い目

安線量が設定されている。家族・友人等の「世話をしたい」という「情状」を「酌量」した形である。

3) 医学生物学研究の志願者(ボランティア)の被ばく

医療における新薬開発や新たな治療法の研究・開発を行う過程で放射性医薬品を被検者 に投与する研究が行われる場合がある。

本人には直接の便益はないものの疾病の診断や治療に貢献する医学・生物学的研究に自 ら志願して参加する志願者の被ばくがここに分類される。

該当する研究の社会的意義の大きさに応じて目安線量が設定されており、社会的意義の大きな研究の場合には10ミリシーベルト超の目安線量が提案されている。

#### 3. 医療被ばくと線量限度

ICRPの勧告の中に次の一節がある。

「… (線量限度等は)診断や治療の効果を減少させてしまうことにより便益よりも害が勝る可能性があるので、個々の患者に対する線量限度等は勧告しない。」

すなわち、線量限度を設定することによって線量を制限すると、診療の便益を損なうお それがあるので線量限度は設定しない、との配慮である。便益とリスクのバランスを考え て、便益に重きを置いた判断と言えよう。

4. 診断参考レベル―線量限度が設定されていない状況で過剰な被ばくを抑える工夫

診断情報が得られるという大きなベネフィットがあるとはいえ、線量は無制限というわけにはいかない。合理的に達成できる限り、また診断の品質を維持できる範囲で被ばくを抑える努力は必要である。どの程度に抑えるかについての目安が必要であり、このために「診断参考レベル」が設定されている。

特定の部位の、特定の手技(例えば頭部の CT 検査)についての経験が積み重なると、どれほ どの被ばく線量で臨床的に有用な画像が得られ るかについての情報が蓄積する。調査によって 得られる「線量分布」を分析し、75パーセン タイルに相当する線量(同様の検査を実施して いる医療施設の4分の3がこの線量よりも低い 線量で検査を行っている線量)を算定して「診断 参考レベル」を定義する。

#### 検査ごとの被ばくレベルの調査に 基づいた診断参考レベルの決定

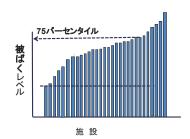


図 診断参考レベルの設定 ある特定の種類の検査において各施 設で実施されている検査とそれに伴 う被ばく線量の分布(模式図)

ある施設において、ある検査に伴う被ばくが診断参考レベルを超えていたとすると、多くの施設よりも患者に与える線量が高い事になる。機器の問題か、あるいは検査担当者の問題か、いずれにせよ線量が高い原因が存在しているはずで、線量低減方策を検討するきっかけになり得る。このようにして被ばく線量を比較することによりその検査自体の線量の低減につなげることができる。

#### 5. おわりに

医療の場における被ばくを概観すると、診断や治療に係る医療被ばくに関して線量限度

が設定されていないという放射線防護の観点からは極めて特殊な特徴があきらかとなった。 放射線医療のベネフィットが大きいが故の特殊性である。とはいえ、被ばく線量を低減す る工夫も見られる。診断参考レベルの導入と利用である。放射線医療の進展には目を見張 るものがある。今後も新たな診断法、治療法が開発・導入されるに違いない。それらに伴 う線量をきちんと評価し、必要に応じて線量の低減を検討することが、より合理的な放射 線医療の展開につながるものと思われる。

## 「放射線教育」の投稿規定

NPO 法人放射線教育フォーラム編集委員会

NPO 法人放射線教育フォーラム発行の論文集「放射線教育」では、広く放射線教育に有益と考えられる内容の原稿の投稿を募集している。

#### 1. 投稿資格

本誌への投稿資格は原則として NPO 法人放射線教育フォーラム会員 (個人正会員、学生会員、団体正会員、賛助会員)とする。「放射線教育」の内容及び体裁に合えば、会員は誰でも投稿できるものとする。ただし、編集委員会が認めた場合にはその限りではない。

#### 2. 掲載する論文について

内容としては、放射線教育、エネルギー・環境教育の進展に寄与すると思われるもので、長さ、新規性により研究報告、ノート、総説、解説、資料、意見、諸報に分かれる。詳細については別紙に定める。原則として未発表のものとするが編集委員会の判断によっては転載を認める。原稿の書き方は別に定める。

#### 3. 原稿の審査

編集委員会は、論文の審査を複数の専門家に依頼する。その結果、内容・体裁に問題があると判断した場合にはその旨を著者に伝え、修正を求める。受理できないと判断した場合は、理由を明記して、報文を著者に返送する。

#### 4. 論文の版権

掲載された論文の版権は放射線教育フォーラムに属するが、論文内容についての責任 は著者にあるものとする

#### 5. 原稿の送付

原稿は放射線教育フォーラム編集委員会に E-mail で、または CD あるいは DVD に記録し、下記に送付する。

(送付先) E-mail: forum@ref.or.jp

〒110-0015 東京都台東区東上野 6-7-2 萬栄ビル 202 号室 放射線教育フォーラム編集委員会

## 論文の分類

#### NPO 法人放射線教育フォーラム編集委員会

#### 研究報告(10ページ以下)

結果と考察を含み、十分な意義があるもの

- a) 放射線教育、エネルギー・環境教育の進展に寄与すると思われる、独創性のある研究論文。実験、調査、比較研究なども含む、
- b) 放射線教育、エネルギー・環境教育の進展に寄与すると思われる教育実践の報告
- c) 新規に開発した教材・実験方法・器具の報告

#### ノート (1~2ページ)

- a) 放射線の理論や現象に関する新規の解釈
- b) 新規性の高い教材・実験方法・器具の報告
- c) 新規な実験データ及び考察
- d) 新規に考案した指導法、授業展開法、評価法など
- e) 放射線教育、エネルギー・環境教育に関する授業実践、イベント実践の報告

#### 総説 (10ページ程度)

原則として編集委員会の依頼によるものとする。

各専門分野の研究について、その方面の進歩の状況、現状、将来への展望などを放射線教育若しくはエネルギー環境問題、放射線及び原子力問題に関連させてまとめたもの。

#### 解説(10ページ程度)

射線教育、エネルギー・環境、放射線及び原子力などに関する解説。

#### 資料 (10ページ程度)

実験ならびに調査の結果または統計などをまとめたもので放射線教育、エネルギー・環境教育に利用できるもの(含む科学史研究)

#### 意見 (1~2ページ)

放射線教育、エネルギー・環境教育、放射線に関する制度、教育制度などに関する種々の提案・意見など

#### 諸報 (1~2 ページ)

- a) 会議報告 (放射線、エネルギー・環境教育に関連する会議に参加した報告で、教育 的価値が高いもの)
- b) 訪問記 (放射線、エネルギー・環境教育に関連する施設に訪問若しくはイベントに 参加した報告で、教育的価値が高いもの)
- c) ニュース (放射線、エネルギー・環境教育、理科教育に関連するニュースの紹介)
- d) 書評 (放射線教育、エネルギー・環境教育、理科教育に資する書籍の紹介)
- e) 製品紹介 (放射線教育、エネルギー・環境教育、理科教育に資する製品の紹介)
- f) サイト紹介 (放射線教育、エネルギー・環境教育に資するホームページの紹介)

## 「放射線教育」原稿の書き方

NPO 法人放射線教育フォーラム編集委員会

#### 1. 使用言語

使用言語は日本語とする。

#### 2. 使用ソフト及び保存ファイル

原稿はそのまま印刷できるように MS-Word (Microsoft) で作成する。他のソフトを利用した際は、doc ファイルで保存する。それができない場合は、文章を text ファイルで、図を JPEG 若しくは GIF で保存する。

#### 3. 用紙

#### 3.1 用紙の設定

用紙は A4 を用い, 1ページに 40 字 40 行, 上下それぞれ 30 mm, 左右それぞれ 25 mm 以上を空ける。意見, 諸報は二段組にし, 1 段に 17 字入れる。

#### 3.2 枚数制限

研究報告,総説,資料は原則として 10 ページ以内にまとめる。ノート,意見,諸報は 2 ページ以内とする。別刷り作成に便利なように諸報以外は偶数ページの原稿となること が望ましい。

#### 4. フォント

日本語のフォントは明朝体, 英語は Times を用い, 研究報告, 総説, 資料の場合, 大きさは表題のみ 16 ポイント太字, その他は 10.5 ポイントとし, 見出しは太字, 本文は標準とする。意見, 諸報は表題のみ 12 ポイント太字, その他は 10.5 ポイントとする。

#### 5. 図表

図表のタイトルは太字とする。図は、図 1、図 2 と、表は表 1、表 2 と番号を振る。図 表は上下左右のいずれかの欄に沿う状態で体裁を整える。図のタイトルは図の下に置き、 表のタイトルは表の上に置く。表は縦線がない方が望ましい。

表1 図表の書き方

		PT - MPT : M C/T	
	番号の振り方	タイトルの位置	Word に入らない時の
			保存形式
表	表 1,表 2	表の上	表を送付し、TEXT あるいは
			DOC
図	図 1, 図 2	図の下	JPEG あるいは、GIF

#### 6. 表題、要約及び見出し

研究報告,総説,資料の場合,1ページ目の第1行目に表題,2行目を空けて,3行目に氏名,4行目に所属,5行目に住所を書く。ここまでは各行の中央にそれぞれ記載する。6行目,7行目を空けて,8行目から[要約](50~200字程度)をつける。所属が複数になる場合,右肩にアルファベットを上付で付け,アルファベット毎に所属と住所をつける。本文の大見出し,中見出し,小見出しは point system とし,1.,1.1,1.1.1 等のように書く。意見,諸報の場合は,要約を書く必要がない。

#### 7. 数値, 単位, 核種の表記

数値は、桁数が多くなる場合はなるべく10の乗数を用いる。

例:370000 Bq →3.7×10<sup>5</sup> Bq

単位は SI 単位を使用する。古い文献を引用するため、SI 単位以外の単位を用いなければならないときは、その単位を使用した後に、SI 単位に換算した値を示す。

例:検出された放射能は1nCi (=37 Bq)であった。

核種の質量数は 60Co, 131I のように元素記号左肩に上付きで表記する。

#### 8. 引用文献

引用文献は番号に片かっこを付して本文の右肩につける。

引用文献は下の形式で原稿の最後に一括すること。ただし, 文献のタイトル記載については, 著者の判断に任せる。雑誌のタイトルは省略形を用いても構わない。

[雑誌] 著者名,タイトル,雑誌名,巻数,ページ(西暦発行年)

日本語の論文の場合、著者は全員の名前を書くようにする。英語の論文の場合、名前はファミリーネームとイニシャルを用いる。ページは最初のページと最後のページをハイフンで結ぶ。

例) 坂内忠明,霧箱の歴史,放射線教育,4,4-17 (2000)

Ban-nai, T., Muramatsu, Y. and Yoshida, S. Concentration of <sup>137</sup>Cs and <sup>40</sup>K in edible mushroom collected in Japan and radiation dose due to their consumption. Health physics, **72**, 384-389 (1996)

[単行本] 著者名,タイトル,編者名,「書名」,ページ,発行所,発行地(西暦発行年)タイトルと編者名はある場合のみ。

例) 松浦辰男,「放射性元素物語」, 154p, 研成社, 東京 (1992) 渡利一夫, 放射性セシウム, 青木芳朗, 渡利一夫編, 「人体内放射能の除 去技術: 挙動と除染のメカニズム」, 7-10, 講談社, 東京 (1996)

#### 9. その他の注意

- 1) 用語はなるべく各学会制定の用語を用い、翻訳不能の学術語、日本語化しない固有名詞に限り原語(活字体)のまま用いる。数字はアラビア数字を用いること。
- 2) 文献でない備考, 注などは、\*、\*\*を右肩につけ、説明を脚注とし、その原稿用紙の下部に書くこと。

#### 【編集後記】

新型コロナ(コロナ 2019)は、未だ、多数の感染者と死亡者を出しながらも、ようやく終息が見えてきた。5月8日には季節性インフルエンザと同じ5類感染症になる。今後は、ウィズコロナとして、平常の社会活動を続けながら、それなりに気をつけて過ごすことになる。一方、ロシアのウクライナへの侵攻は、1年を超え、この文を書いている現在(2023 年 3 月)も続いている。常軌を逸した指導者の下、「敵」に銃を向け、ミサイルを飛ばす兵士、必死で国を守る兵士。どの兵士にも、愛する人がいて、愛する子供がいるだろう。何のために「殺し合う」必要があるのか?人を人と思わない指導者は一刻も早く権力の座から去って欲しい。

さて、放射線フォーラム教育誌は、本号も盛りだくさんの内容となった。核融合炉の未来、海外におけるラドン温泉治療、近未来のエネルギー供給、エネルギー教育に対する学生の意見、医療被ばくの考え方など、どの内容も充実したデータを元に書かれた力作である。

当フォーラムの勉強会は、今年度もオンラインのみとなったが、2023年6月の第1回勉強会は、 久々に対面での勉強会を計画している。オンラインとのハイブリッドも視野に入れる予定である。 ハイブリッドでの開催では、経験のある会員のご協力が得られれば幸いである。

最後に、本巻に載せた解説・資料が教育現場の教員ばかりでなく、放射線教育に関心を持つ 人に少しでも資することができれば幸甚である。「放射線教育」、「ニュースレター」の充実には会 員各位のご協力が不可欠である。会員各位の積極的な投稿を切に願う。

(緒方良至)

## 放射線教育 Vol. 26, No. 1 (2026)

発行日: 2023年3月31日

発行者: NPO法人放射線教育フォーラム

URL: http://www.ref.or.jp

編集者: 緒方良至(委員長)、柴田誠一(副委員長)、大森佐與子、畠山正恒

細渕安弘、田中隆一、皆川喜満

事務局: 〒110-0015 東京都台東区東上野 6-7-2 萬栄ビル 202 号室

NPO 法人放射線教育フォーラム

Tel: 03-3843-1070 FAX: 03-3843-1080

E-mail: forum@ref.or.jp

# 放射線教育フォーラム 2022 年度活動報告

	頁
1. NPO 法人放射線教育フォーラムの活動概要	1
2. NPO 法人放射線教育フォーラムの 2022・2023 年度名簿	2
3. 通常総会、理事会、勉強会等の開催記録	3
4. 放射線教育誌及びニュースレターの発行	5
5 2022 年度中学理科教科書検討ワーキンググループ活動記録	7

## 1. NPO 法人放射線教育フォーラムの活動概要

NPO 法人放射線教育フォーラムは、放射線、放射性物質、原子力の専門家および学校教員の有志により構成されるボランタリー組織である。1994年に設立し、2000年にNPO 法人の認証を受け、今年で29年目を迎えた。2024年には創立30周年を迎えるので、創立記念事業をしたいと考えている。

当フォーラムは、小・中・高等学校における放射線教育を改善するため、学習指導要領などの教育政策や教科書について調査し、提言を行っている。また、放射線教育に意欲のある教員の支援に重点を置いて、勉強会や国際シンポジウムなどを企画・開催している。勉強会では、放射線利用や放射線影響などに関する最新の研究成果や放射線教育の実践報告を専門家や教育関係者に講演してもらっている。

専門委員会活動として、中学理科教科書検討ワーキンググループは、学習指導要領改訂により令和3年度から使用されている中学校2年生用教科書のうち5社の教科書について分析した。

2022 年度~2023 年度放射線教育フォーラム役員選挙が 4 月に行われ、当選した理事・ 監事は 6 月 12 日の総会で承認された。新役員は活動報告書の 2 ページに記載されてい る。大野和子理事と林 壮一理事が新たに加わり、柴田誠一理事が副理事長に、吉澤幸夫 理事が事務局長に就任した。

フォーラムの会員数は、2023 年 2 月現在で個人正会員 82 名、団体正会員 23 社で、緩やかな減少傾向にある。会員の退職・高齢化による退会が続き、若手会員の勧誘が急務である。会費収入が減少したことを受けて、経費削減に努める一方で、新たな資金の獲得のために勉強会への寄付金をお願いして、一定の成果を得ている。新型コロナウイルス感染症対策として理事会や勉強会をオンラインで行っていることも、旅費の削減による財務状況の改善をもたらしている。

理事会に事務局メンバーも加わった拡大理事会をオンラインで9回開催した。夏休みを除き、ほぼ毎月理事会を行うことで機動性に富む運営が可能になった

今年度実施した勉強会は3回ともオンライン開催となった。オンラインでの勉強会は3年目となり、会員のみならず非会員にも定着したと思われ、北海道から九州まで参加者が広がっている。一方、アンケートの回答には、質疑応答や講演会後の懇親会など対面ならではの良さを指摘する声もあった。来年度からは対面での開催、あるいはハイブリッドでの開催を計画している。

定期印刷物として、当フォーラムの機関紙である「放射線教育」 2022 Vol.26,No.1 を 3 月に発行し、2022 年度活動報告を後付けとした。ニュースレターは例年 3 回発行しており、今年度は No.82 を 6 月、No.83 を 12 月、No.84 を 2 月に発行した。

当フォーラムの活動はホームページ(http://www.ref.or.jp)で公開している。「放射線教育 先生の広場」では現場の教員から提供を受けた放射線授業の実践事例を紹介し、「放射線 学習支援資料」では授業に使用できるパワーポイントや PDF の学習支援ファイルを提供 している。「活動報告」では勉強会の動画やスライドファイル、「出版物」では放射線教育 誌やニュースレターのバックナンバーを提供している。今後は、放射線教育に関係してい る様々な組織のサイトへのリンクを充実させていく予定である。

## 2. NPO 法人放射線教育フォーラムの 2022・2023 年度役員名簿

理事: (理事長) 工藤博司 (東北大学名誉教授)

(副理事長) 田中隆一(元日本原子力研究所高崎研究所長)

(副理事長) 柴田誠一(京都大学名誉教授)

(事務局長) 吉澤幸夫 (元慈恵会医科大学講師)

#### (以下五十音順)

朝倉 正 (東京慈恵会医科大学教授)

大森佐與子 (元大妻女子大学教授)

大野和子(京都医療科学大学教授)

緒方良至(愛知医科大学 客員研究員)

酒井一夫 (東京医療保健大学教授)

畠山正恒(聖光学院中学校・高等学校教諭)

林 壮一(福岡大学理学部物理科学科准教授)

細渕安弘 (元東京都立保健科学大学助教授)

渡部智博(立教新座中学校·高等学校教諭)

監事:小高正敬 (元東京工業大学助教授)

幹 事: 石井正則、大津浩一、菊池文誠、岸川俊明、小林泰彦、下道国、鶴田隆雄、

坂内忠明、広井禎、古田雅一、宮川俊晴、若杉和彦

顧 問: 荒谷美智、大野新一、金子正人、黄金旺、森千鶴夫、山寺秀雄

## 3. 通常総会、理事会、勉強会等の開催記録

#### 2022年

- 4月24日(日)第1回理事会(オンライン、11名)
- 5月15日(日)第2回理事会(オンライン、13名)
- 5月15日(日)第1回編集委員会(オンライン、9名)
- 6月12日(日)通常総会(書面表決、委任状含む出席者67名)
- 6月12日(日)第1回勉強会(オンライン、52名)

(勉強会プログラム)

講演 1. 東日本大震災からの復興と風評払拭に向けた取り組み

中見大志 (復興庁 原子力災害復興班)

講演 2. 研究用原子炉を用いた中性子放射化分析

三浦勉(国立研究開発法人産業技術総合研究所 物質計測標準研究部門)

講演 3. 立教新座中学校における放射線教育 島野誠大(立教新座中学校・高等学校)

- 6月26日(日)第3回理事会(オンライン、11名)
- 9月18日(日)第4回理事会(オンライン、12名)
- 9月18日(日)第2回編集委員会(オンライン、8名)
- 10月16日(日)第5回理事会(オンライン、12名)
- 10月16日(日)第3回編集委員会(オンライン、11名)
- 11月20日(日)第2回勉強会(オンライン、49名)

(勉強会プログラム)

講演 1. 何故、令和の教育改革なのか? 何故 GIGA スクール構想なのか? ~学校改革の今と関係者への期待~ 武藤久慶(文部科学省初等中等教育局学校デジタル化 プロジェクトチームリーダー)

講演 2. ラドンと地震

安岡由美(神戸薬科大学)

講演 3. アプローチを変えることによる生徒の考え方の変化 ~エネルギー資源のベストミックスを考える活動をとおして~ 島田雅人(栃木県小山市立豊田中学校)

- 12月4日(日)第6回理事会(オンライン、12名)
- 12月4日(日)第4回編集委員会(オンライン、8名)

#### 2023年

- 1月15日(日)第7回理事会(オンライン、12名)
- 2月19日(日)第8回理事会(オンライン、12名)
- 2月19日(日)第5回編集委員会(オンライン、8名)

2月26日(日)第3回勉強会(オンライン、75名) (勉強会プログラム)

> 講演 1. 京都大学研究用原子炉の現状と今後 中島 健(京都大学複合原子力科学研究所)

> 講演 2. 福島県立医科大学先端臨床研究センターの歩み

ーアスタチンと抗がん剤ー

城寶大輝(福島県立医科大学 ふくしま国際医療科学センター 先端臨床研究センター)

講演 3. 中学 3 年間の放射線教育の授業事例と放射線教育を行う上での問題点、 要望・希望

奈良 大 (愛知教育大学附属名古屋中学校)

3月19日(日)第9回理事会(オンライン)

#### 「放射線教育誌」およびニュースレターの発行 4.

#### 4.1 「放射線教育誌」2022 Vol.26, No.1

巻頭言 医療スタッフへの放射線教育に関する法整備

大野和子 (京都医療科学大学)

【解説】 核融合炉とトリチウム ~ 新エネルギーの利用に向けて ~

工藤博司 (放射線教育フォーラム)

【資料】 健康と放射線 ―ドイツ・オーストリアにおけるラドン坑道療法の臨床研究動向―

大森佐與子 (放射線教育フォーラム)

【解説】 21 世紀中葉に向けたエネルギー供給と原子力

石井正則 (日本原子力学会シニアネットワーク連絡会会員)

【資料】 エネルギー政策に対する学生の意見と背景について

若杉和彦 (日本原子力学会シニアネットワーク連絡会会員)

【意見】 医療における被ばくと放射線防護の考え方 酒井一夫 (放射線教育フォーラ

L)

「放射線教育」投稿規定、原稿の書き方

編集後記

緒方良至 (放射線教育フォーラム)

#### 4.2 ニュースレター

#### ニュースレター No.82 2022.6

巻頭言 「放射線」に出会ったのはいつですか

林 壮一(福岡大学)

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) -がん細胞選択的放射線療法の魅力と展望そして課題を語る-

小野公二 (大阪医科薬科大学)

デジタル社会を支える超微細加工への放射線利用

山本洋揮 (量子科学研究開発機構)

放射線・エネルギー資源に関する 中学校理科教科書 (5社) の記述の比較

- 平成24 年度版からの変遷も踏まえて-

羽澄大介 (名古屋市立西前田小学校)

放射線教育フォーラム令和4年度第1回勉強会

柴田誠一 (放射線教育フォーラム)

2022年7月~2024年6月期 役員一覧

放射線教育フォーラム

会員の声 ロシアの侵攻とカーボンニュートラルは日本のエネルギー安全保障を危うくする

若杉和彦 (日本原子力学会シニアネットワーク)

会務報告

原稿募集案内 (ニュースレター、放射線教育)

編集後記

緒方良至 (放射線教育フォーラム)

#### ニュースレター No.83 2022.11

巻頭言 放射線・放射能の正しい理解に資するために 東日本大震災からの復興と風評払拭に向けた取組み 研究用原子炉を用いた中性子放射化分析 立教新座中学校における放射線教育 放射線教育フォーラム令和4年度第2回勉強会 第69回全国中学校理科教育研究会三重大会出展報告 令和4年総会報告(資料) 会員の声 近畿大学原子力研究所の研修会に参加して

柴田誠一 (放射線教育フォーラム) 中見大志 (復興庁 原子力災害復興班) 三浦 勉 (産業技術総合研究所) 島野誠大 (立教新座中学校・高等学校) 柴田誠一(放射線教育フォーラム) 田中隆一 (放射線教育フォーラム) 放射線教育フォーラム

奈良 大 (愛知教育大学附属名古屋中学校)

会務報告

原稿募集案内 (ニュースレター、放射線教育)

編集後記

畠山正恒 (放射線教育フォーラム)

ニュースレター No.84 2023.2

巻頭言 放射線利用秘話

ラドンと地震

田中隆一 (放射線教育フォーラム) 安岡由美 (神戸薬科大

学)

アプローチを変えることによる生徒の考え方の変化

~エネルギー資源のベストミックスを考える活動をとおして~ 島田雅人 (豊田中学

校)

令和4年度第3回勉強会案内

柴田誠一 (放射線教育フォーラム)

放射線教育コンテスト

田中隆一 (放射線教育フォーラム)

会務報告

原稿募集案内 (ニュースレター、放射線教育)

編集後記

細渕安弘 (放射線教育フォーラム)

### 5.2022 年度中学理科教科書検討ワーキンググループ活動記録

#### **TWG (Text Review Working Group)**

#### 目的

教科書調査研究ワーキンググループ (TWG) は、教育課程検討委員会の後を受けて 2020 年に 設置された。中学校の教育現場で活用される以下の成果物を作成するために活動している。

- 1. 授業で活用できる教科書の解説的な資料を作成する
- 2. 授業をサポートする授業計画例とその補足資料を作成する
- 3. 将来の高校入試を考慮した理解度確認の問題を作成する

2022 年度は、2021 年度より使用されている新教科書から、中学校 2 年生で教える「電流」の 単元で取り上げられている放射線に関する記述について分析し、今後の中学 2 年生での放射線教 育の在り方を提言することを目的とする。また、引き続き 3 年生の新教科書の分析を行い、3 年 生の授業についても、提言することを予定している。

#### 調査方法

中学校2年生理科教科書から、東京書籍、大日本図書、啓林館、学校図書、教育出版の5社を選択した。放射線に関する部分を1)導入、2)進展、3)発展・応用、4)まとめと振り返りの4段階で分析した。結果のまとめとしては、5社の教科書に共通的な内容を標準として整理し、各社が独自に記述して部分に関しては各社の特徴とした。

#### 調査結果

現在、東京書籍と大日本図書の教科書について 1) 導入、2) 進展、3) 発展・応用まで終了している。これらの分析結果について、さらに現場の教員との討議が必要であると考えている。

#### 1) 導入

#### 1-1 標準的な記述

エックス線は 1895 年にクルックス管の真空放電の実験をしていたドイツの物理学者、レントゲンが発見した。発見した当時は、「目に見えない未知なるものとして X 線と名付けました。」と解説されている。

放射線の性質としては、「物質を通り抜けることから、利用として骨折や病気の検査など、私 たちのくらしのさまざまな場面で利用されている」と解説されている。

#### 1-2 各社の特徴

#### 1-2-1. 東京書籍

放射線の導入の前に、静電気や雷現象から放電を学び、真空放電、陰極線や電子から電流の正体を学ぶ流れとなっている。クルックス管の電極にはプラス極とマイナス極があり、電子がマイナスイオンをもつ物質であることを解説している。クルックス管の実験は、電磁波の発生から目に見えない何かを印象付け、エックス線の理解から放射線を認識する有効な記述と言える。

#### 1-2-2. 大日本図書

ネオン管や蛍光灯と言う身近に存在するものの中を流れる電流から、その正体を探る記述の流れとなっている。

陰極線に上下方向に電圧を加えるとプラス極側に陰極線が曲がることから陰極線はマイナスの 電荷を持つことを解説し、電子の流れであるとしている。(イギリスの物理化学者 J. J. トムソ ンの紹介の記事)

真空放電の実験に関して、「注意:実験をするときは実験装置から離れて観察する。」が明示されている。真空放電実験における微量なX線の発生に関する注意が記されている。

#### 2) 進展

#### 2-1. 標準的な記述

放射線の性質と利用に関しての記述になっている。

#### 2-2-1. 東京書籍

冒頭に、放射線、放射性物質の用語を定義している。続いて、放射線の種類として、X線、 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線を記述している。放射線の性質として、「透過性」と「物質を変質させる性質」の 2 つの内容が記述されているが、電離作用は表現されていない。

人工放射線の利用方法として医学、農業、工業が例示されている。

放射線影響に関して、細胞の損傷、死滅、継続的に受ける放射線による人体影響の可能性、不要な被ばくの回避と放射線管理や測定への注意を指摘している。

#### 2-2-2. 大日本図書

健康診断などで使われるX線から書き出し、放射線、放射性物質、放射能の用語を記述している。放射線の性質に関して、光のなかまとしてのX線、高速粒子のなかまとしての $\alpha$ 線、 $\beta$ 線の種類を記している。図を用いて、光のなかまとしての電磁波の周波数分布と利用例、そして物質に対する透過性の差を表示している。放射線には、物質を通り抜ける透過性や原子の構造を変える性質があるとしている。電離作用の解説を「原子の構造を変える性質」と表現している特徴がある

自然放射線は今も昔も、そして体内にも存在し、被ばくしていることを解説している。人体への影響として、「100 mSv 以上の放射線を受けるとガンになる危険性が高くなることや更に大量に受けると死に至る場合があることが知られている。そのため、不要な放射線を受けないための注意が必要」としている。図で、被ばく低減の距離、時間、しゃへいの三原則が解説されている。

放射線利用に関して、医療、工業、農業の事例が示され、がんの放射線治療は大量の放射線が 細胞を死滅することを利用し、安全に利用するために十分な注意が払われていることを示してい る。

#### 3) 発展・応用

#### 3-1-1. 東京書籍

学びを活かして考える内容として、「放射線の性質と利用に関して自分の考えをまとめようと」記述している。また、ノートに書いてほかの人と比べる事を記述している。そのためにインターネットや新聞による調べ学習を推奨し、放射性物質の崩壊について解説している。

#### 3-1-2. 大日本図書

霧箱の実験が記述されている。

以上、理事会での TWG からの報告を元に吉澤がまとめた。理事会では、 $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$  線の違いの記載が望ましい、霧箱を活用することはできないのか、「人工放射線・自然放射線」は不適切な用語である等の意見が出された。

# 放射線やエネルギー・原子力を学ぶなら

# 放射線を学ぶ



目に見えないからこそ 正しく理解し、 そのリスクを考えましょう。

特設コンテンツ「放射線とは」 (https://www.fepc.or.jp/sp/ housyasen/)





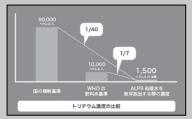
身の廻りの放射線



ALPS処理水のトリチウム



放射線と放射能



トリチウム濃度の比較

電気事業連合会では、放射線をアニメーションにて解説する特設コンテンツ「放射線とは」を 2022年12月にリニューアルしました。トリチウムやALPS処理水についても紹介しています。

## エネルギー・原子力を学ぶ



小学校から高校まで授業で活用できる映像やワーク シートなどの教材を, 無償で公開しています。



原子力発電の仕組みから使用済燃料を有効利用する 原子燃料サイクルまで,幅広く紹介しています。

電気事業連合会や電力各社ホームページには, 学校教育や課外活動で,役立つ情報がいっぱいです。

## 電気事業連合会

(https://www.fepc.or.jp)







放射線は危険な性質を持っている反面、

有効に利用すれば人類に大きなメリットを与えてくれる無限の可能性をそなえています。

千代田テクノルは、医療・原子力・産業・放射線測定などの各分野において、

放射線を安全に有効利用するための機器やサービスをトータルに提供。

放射線の「利用」と「防護」の双方において、お客様のあらゆるニーズにきめ細かく対応しています。

## 株式会社千代田テクノル

URL: http://www.c-technol.co.jp e-mail: ctc-master@c-technol.co.jp







## ★三菱重工

三菱重工業株式会社 原子力セグメント

〒100-8332 東京都千代田区丸の内 3-2-3 TEL. 03-6275-6200 www.mhi.com/jp

MOVE THE WORLD FORW>RD MITSUBISHI

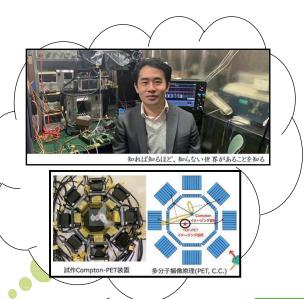
MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES GROUP

# 最前線のアイソトープ・放射線研究紹介

- 私が研究者になるまでー

これから進学先や専門分野を選ぶ高校生や大学生に向けて、放射線や放射性同位体(RI)を利用している研究者を当協会ホームページにて紹介しています。

研究の面白さやどのような紆余曲 折を経て研究者になったのかなど のメッセージもぜひご覧ください。







https://www.jrias.or.jp/report/cat1/219.html