

From “The Risks of Radioactive Wastewater Release” Smith, J.T.; Marks, N.A.; Irwin T. Published in Science October 6th 2023. Reprinted with permission from AAAS. This translation is not an official translation by AAAS staff. In crucial matters, please refer to the official English-language version originally published by AAAS

# 「放射性排水放出のリスク」

福島第一原発からの排水放出が人と海洋に与える影響は無視できる程度であると予想される。

By Jim Smith, Nigel Marks, Tony Irwin

2011年、日本の東岸は地震と津波に襲われ、福島第一原発の3つの原子炉にメルトダウンをもたらした。これにより周辺地域や太平洋に大量の放射性物質が制御不能な状態で放出されることになった。10年以上が経ち、福島原発から太平洋への放射性排水の新たな放出が始まっている。過去の福島原発からの海洋汚染には、半減期が長い放射性セシウム-137が含まれたため、新たな排水放出を巡る懸念が広がっている。しかし、今回の放出は事故による汚染に比べ、人や水界生態系への放射線量ははるかに低い(1-3)。更に、チェルノブイリの事故現場周辺を含む水界生態系は放射線に極めて強いことが示されている(4-7)。故に、新たな福島の放出は水産物消費者や海洋生態系に大きな影響を与えないと予想される。

福島の排水で最も放射性の高い汚染物質はトリチウム水(HTO)の形状をしているトリチウム( $^3\text{H}$ )である。この分子は科学的挙動が非放射性水のそれと同じであるため、排水から分離できない。崩壊時に高エネルギーの $\gamma$ 線や $\beta$ 粒子を放出する他の放射性核種(天然放射性核種の炭素-14( $^{14}\text{C}$ )や人工放射性核種の $^{137}\text{Cs}$ 等)と同様、トリチウムは有機体に生物学的影響、とりわけ、DNA損傷を与える可能性がある(8)。しかし、トリチウムの経口摂取による放射性毒性は $\beta$ 線放出が非常に弱いため、他の放射性核種のそれに比べて非常に低く、体内での滞留時間が比較的短い。故に、世界中の原子力施設でHTOを含む排水を海洋放出するのが一般的な慣行である(グラフ参照)。

フランスのラ・アーク原子力施設は年間最大10,000テラベクレル(1TBq= $10^{12}$ Bq;ベクレルとは1秒間に1回の崩壊を引き起こす放射性元素の量)のHTOをイギリス海峡に放出しており、1996年から2016年の間の年間放出量は8,000-12,000テラベクレルであった(9)。ラ・アークからのHTO放出による人への放射線量(シーベルトで、異なる放射線タイプに対する人類生物学の反応を考慮した、組織に付与されるエネルギー量)は低く(原子力施設の放出による一般人への年間推奨限度1000 $\mu$ シーベルトとの比較において、年間0.01マイクロシーベルト未満( $\mu\text{Sv}/\text{年}$ )(9))、環境への影響は見つかっていない、又は予想されていない。例えば、カナダの原子力施設付近の川で(ラ・アーク付近の海水の1リットル当たり50ベクレル未満と比較し)1リットル当たり7,700-21,900ベクレルのHTO値に晒された魚(ファットヘッド・ミノー)を研究したところ、(コメット解析により測定されるように)DNA損傷を誘発する可能性が示されたが、魚の生存や健康の様々な指標には影響が観察されなかった(10)。

福島では年間22テラベクレルのHTOが放出される予定であり(1,2)、これはラ・アーク

の年間放出量の 450 分の 1 未満である。計画されている福島の間放出限度は同施設が発電用沸騰水型原子炉 (BWR) を稼働していた時と同じである。BWR のトリチウム排出量は他の原子炉タイプより少ないため、制限値は一部の他の原子炉タイプと比べ元々低く設定されていた。福島の排水に対する非常に低い放出限度は地元漁業への風評被害等の社会的懸念により日本政府が設定した。そのため、計画される放出は現在の放射線防護勧告によれば、30 年と長期に及ぶ。

福島の放出にはトリチウム以外の放射性核種も含まれる。排水はイオン交換化学反応により含まれる放射性元素のほとんどが取り除かれる一連の配管を通して処理されている。仮に放射能レベルが放出制限を上回れば放出前に再び処理される。しかし、処理後も  $^{14}\text{C}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、Pu 同位体を含む他の 30 種の放射性核種がごくわずかに残る (1,2)。この点で福島の放出は世界中の他の原子力施設からの定期的な放出と変わりはない。例えば、2019 年に英国のセラフィールド原発からは福島の年間放出計画の 19 倍の HTO、1,600 倍の  $^{14}\text{C}$ 、320 倍の  $^{60}\text{Co}$ 、180 倍の  $^{129}\text{I}$ 、1,000 倍以上の  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、Pu 同位体 (1,11) が放出された。2019 年、セラフィールド付近の水産物消費者の放射線量の上昇は低く、主にウランが豊富なリン鉱石を使用してリン酸を製造する近隣の非原発施設からの自然放射能の歴史的な排出によるものであり、原発施設はリン酸製造者の線量の約 3 分の 1 に寄与している (11)。

放出時、福島の排水は 100 倍に希釈されるため、トリチウム濃度は日本政府の規制値の 2.5% になり、他の 30 種の関連する放射性核種の合計は規制値の 1% 未満になる。計画される放出水のトリチウム濃度の最大値は 1 リットル当たり 1,500 ベクレルであり、世界保健機関がトリチウムの飲料水基準に規定する 1 リットル当たり 10,000 ベクレルの 14% 以下である (12)。

福島の放出による放射能レベルが規制値を下回ることを確実にするためモニタリングが行われる (1,2)。これには、トリチウム、あらゆる  $\alpha$  線及び  $\beta$  線放出核種、 $\gamma$  線放出核種のエネルギー・スペクトル等、放射性核種全 30 種の存在の分析が含まれる。この過程は国際原子力機関 (IAEA) による独立した検証であり、30 年に及ぶ放出期間を通して長さ 1 キロの沖合の放出配管付近の排水、海水、水界生物が測定される (2)。2023 年 8 月 24 日の最初の放出以降、東京電力 (TEPCO)、IAEA、日本の農林水産省から公開されている情報によれば、トリチウム値は敷地 3 キロ以内で無視できる程度であることが分かった。9 月 13 日までに福島原発から 3 キロ以内の 10 か所で採取された 251 の海水サンプルを測定したところ、検出限界値 8 ベクレルを上回ったのはわずか 1 つ (1 リットル当たり 10 ベクレル) である。放出地点の南北 4-5 キロの 2 か所で獲った魚 25 匹からはトリチウムは検出されていない (検出限界値は 1 キロ当たり 8 ベクレル)。トリチウムはより感度が高い方法で、第一回の放出 (トリチウム 1 リットル当たり 200 ベクレル以下) のそれを上回る際に検出される可能性が高い。

トリチウムによる生物濃縮及び海洋生物への潜在的に有害な影響について懸念が表明さ

れているが、これらの懸念はリスクを正しく反映していない。仮に、計画通り、トリチウムが HTO の形状で放出されれば、その生物学的摂取と分布は生物濃縮を生じない大量の水(13)のそれに従うため生物濃縮することはない。このように生物蓄積が生じないのは HTO と H<sub>2</sub>O の科学的類似性によるものであり、<sup>3</sup>H:<sup>1</sup>H の比率が化学と生物学の過程で本質的に変化しないままであることを意味する(13)。実際、これが正に福島の水処理で HTO を普通の水から分離できない理由である。トリチウムは HTO が水界生物により消化されると有機結合トリチウム(OBT)として有機分子(故に生物内)に長く保持され得るが、長い被ばく時間を想定したとしても、放射線量率は皆無なほど小さい。

処理された福島の排水に含まれるトリチウムと他の 30 種の放射性核種の放射線量は独立した研究者(3)や IAEA(2)により、水中での拡散、生物濃縮、異なる放射性毒性、生物内でのより長い滞留時間を含むモデルを用いて計算されてきた。これらの計算の結果放出されたあらゆる放射性核種から生物への放射線量率(組織に付与されるエネルギーで測定される、Gy)は非常に低くなった:<0.005μGy/時(3)および<0.0001μGy/時(2)。これらの水準は動植物組織への損傷による生態系への影響が生じない閾値とされる 40μGy/時の線量率を下回っている(14)。

水界生態系は、生物の成長と繁殖に悪影響を与えるために必要となる線量が比較的高いため、放射能汚染に対して驚くほど強い。チェルノーベリと福島付近の湖で行われた研究では、水生無脊椎動物の個体数と多様性(7)、或いは成長や遺伝的指標(4,5)への放射線影響は見られなかった。パーチ(ヨーロピアンパーチ)には雌の生殖腺の成熟にわずかな遅れがあり、これはチェルノーベリの湖の放射線レベルと関連していたが、ローチには影響は見られず、魚の状態指標は汚染された湖のそれらと変わりなかった(6)。更に、最も汚染された湖の魚の生息数は多様である(6)。チェルノーベリの水域における放射線量率は福島の放出から予想される数字の 1,000 倍を上回る(3,6)。

福島で計画される放出の放射性同位体から人への放射線量は、魚介類消費や入浴を含むあらゆる潜在的経路を通じて、年間 1μシーベルト未満と計算される(2,3)。これは自然放射線による世界平均の年間放射線量 2,400μシーベルトの 2,000 分の 1 ほどである。自然放射線によるリスクは、α線とβ線による

内部被ばくか、体内もしくは体外からのγ線によって DNA が損傷を受けることが主である。故に、自然界で発生する放射線の作用様式は、福島の放射能のそれと比較することができる。自然界の放射線量は様々であり、世界中の数百万人が年間 10,000μシーベルト以上を受けている。現在の放射線防護モデルは全ての電離放射線が DNA を損傷する可能性があるため、それ以上の線量はガンを発症する可能性があるとして見なしている。しかし、福島の放出での年間 1μシーベルト未満の放射線量であれば、例えば自然放射線との比較で公衆衛生上の影響はないと思われる。

福島の放出が太平洋に与える影響も自然環境の放射能を考慮することにより理解され得る。福島の貯蔵タンクには最大 860 テラベクレルのトリチウムがあり、太平洋に毎年 22 テ

ラベクレルが放出される。現在、太平洋には自然のトリチウム 500,000 テラベクレル、人為起源のトリチウム 2,500,000 テラベクレルが含まれており、後者はほとんど過去の大気圏における核兵器実験によるものである。更に、全てのトリチウムは太平洋の 80 億テラベクレルのわずか 0.04%であり、ほとんどの放射能は自然発生するカリウム-40 (91%) とルビジウム 87 (8.6%) によるものである。特筆すべきは、海水中の放射能についてはかなり以前から認識されていたが、健康被害とは考えられてきてはいなかったことである。

放射線の恐怖は 2011 年の事故により漁業禁止や風評被害から今も立ち直りつつある福島の漁業社会の暮らしを損なう可能性が高い。可能な限り最善の方法で海洋環境を守るために、資金と関心を気候変動、乱獲、プラスチック汚染等の主要なストレス要因に集中させるべきだ。放射線保護の科学は、計画通りに実行されれば、福島排水放出は太平洋の生物や福島の水産物消費に真の脅威とならないことを明らかにしている。放出計画からの大きな逸脱はモニタリングによってすぐに気付かれるだろう。他国の政府や研究者らも放出中の放射能を注意深く監視すると思われる。福島で計画されている放出は最も注意深く監視される原発からの排水の放出になる可能性が高い。

#### REFERENCES AND NOTES

1. Tokyo Electric Power Company, *Radiological Impact Assessment Report* (2021).
2. IAEA, *Comprehensive Report on the Safety Review of ALPS-Treated Water at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station* (IAEA, 2023).
3. R. Bezhenar *et al.*, *Mar. Pollut. Bull.* **173**, 112969 (2021).
4. N. Fuller *et al.*, *Environ. Pollut.* **292**, 118479 (2022).
5. J. Goodman *et al.*, *Ecol. Evol.* **9**, 2640 (2019).
6. A. I. Lerebours *et al.*, *Environ. Sci. Technol.* **52**, 9442 (2018).
7. J. Murphy *et al.*, *J. Environ. Radioact.* **102**, 688 (2011).
8. UNSCEAR, "United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2016 report: Report to the general assembly, with scientific annexes" (United Nations, 2017).
9. Institut de Surete et de Radioprotection Nucleaire, "Radiological report of the French environment from 2015 to 2017." IRSN DG/2018-00006 (2019).
10. B. Gagnaire *et al.*, *Sci. Total Environ.* **599**, 597 (2017).
11. Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture, "Radioactivity in Food and the Environment, 2019 25th Edition" (2020).
12. World Health Organization, *Guidelines for Drinking-Water Quality* (WHO, 2022).
13. B. Fiévet *et al.*, *Environ. Sci. Technol.* **47**, 6696 (2013).
14. C. Larsson, *Ann. ICRP* **45**, 41 (2016).
15. K. Eckerman *et al.*, *Ann. ICRP* **41**, 1 (2012).

#### ACKNOWLEDGMENTS

T.I. is the technical director of SMR Nuclear Technology Pty Ltd and chair of the Engineers Australia Sydney Nuclear Engineering Panel.