

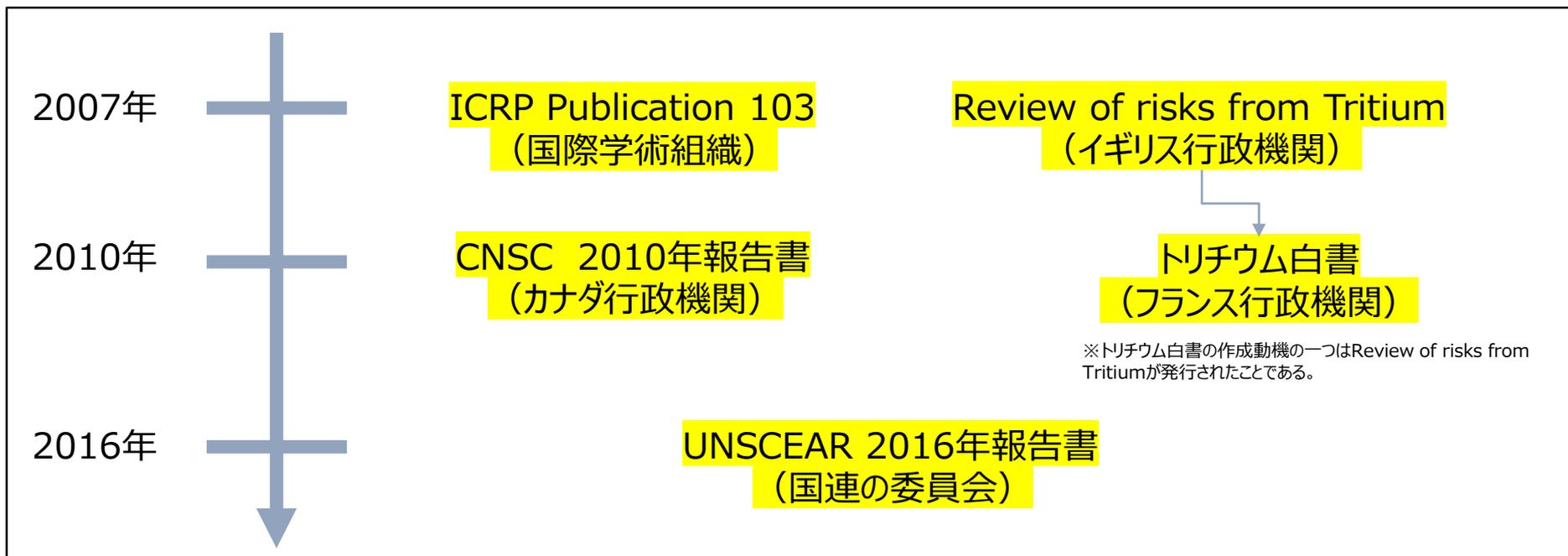
トリチウムの生体影響に関する報告書について

2018年11月30日

多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会 事務局

目次

1. UNSCEAR 2016年報告書
2. カナダCNSC 2010年報告書
3. 仏ASN トリチウム白書
4. 英HPA Review of risks from Tritium
5. ICRP Publication 103
6. 用語集
7. UNSCEAR 2016報告書（関係部分概要）



1 UNSCEAR 2016年報告書

①原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）

- 原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）は、電離放射線による被ばくのレベルと影響を評価し、報告することを目的として国際連合内に設置された委員会である。

②2016年報告書の目的

- UNSCEARのまとめた科学的知見により放射線リスク評価と国際的な放射線防護基準を下支えすることが目的とされている。

③記述内容

- UNSCEAR 2016年報告書では、トリチウムの生体影響に関して、体内動態挙動モデルや確率的影響、確定的影響、核変換効果、疫学研究、等について記載されている。

2 カナダCNSC 2010年報告書

①カナダ原子力安全委員会（CNSC）

- カナダ原子力安全規制委員会（CNSC）は、カナダの原子力安全・放射線防護に責任を有する独立規制機関である。

②2010年報告書の目的

- 報告書の目的は、科学的文献について独立したレビューを行い、トリチウム被ばくによる作業員・公衆の健康リスクを評価すること、トリチウム摂取に対するカナダ及び国際的な線量測定を評価すること、トリチウム被ばくを制限するためのアプローチをレビューすることにあるとされている。

③記述内容

- CNSC 2010年報告書では、トリチウムの生体影響に関して、体内動態挙動モデルや確率的影響、確定的影響、核変換効果、疫学研究、等について記載されている。

3 仏ASN トリチウム白書 (2018年改訂版)

① ASN(l'Autorité de sûreté nucléaire)

- ❑ 原子力安全局(ASN)は、労働者・公衆・環境の保護を目的とし原子力安全対策及び放射線防護対策を行っているフランスの独立行政機関である。

② トリチウム白書の目的

- ❑ 2007年末、英国環境・保健衛生関係省刊「RIFE11(Radioactivity In Food and the Environment)」と英国保健保護局(HPA)刊「AGIR(Advisory Group on Ionising Radiation) 報告書」の公開により、トリチウムの環境動態およびトリチウムが人体に及ぼす生物学的影響に関する評価方法について、疑問が喚起されることとなった。このような状況下で、当職(原子力安全局局長 ジャン=クリストフ・ニール)は、このテーマに関する知見の詳細分析を行うことを切望し、2008年初頭に多元的に考察を行う2グループの設置を決定した。本白書は、2008年5月～2010年4月の期間に、2つのワーキンググループが実施した作業を総括したものである。

③ 記述内容

- ❑ トリチウム白書では、トリチウムの生体影響に関して、体内動態挙動や生物濃縮、放射線加重係数、胎内被ばく影響、等について記載されている。

4 英HPA Review of risks from Tritium

① Health Protection Agency(HPA)

- ❑ Health Protection Agency(HPA)は、公営医療サービス・地方当局・関連機関・厚生省などに、一般公衆の健康管理に関する総合的な情報を提供している英国の独立行政機関である。
- ❑ Advisory Group on Ionizing Radiation (AGIR) は、電離放射線の生物学的・医学的影響について提言を行うHPA内の特別諮問委員会である。

②“Review of risks from Tritium”の目的

- ❑ AGIRはトリチウムによる内部被ばく線量及びリスクの科学的総意の提供と幅広い見解の考慮を目的としたグループを立ち上げ、このレポートはトリチウムの内部被ばく線量についてのグループにおける見解を示しているとされている。

③記述内容

- ❑ Review of risks from Tritiumでは、トリチウムの生体影響に関して、体内動態挙動モデルや放射線影響、放射線以外の影響、疫学研究、等について記載されている。

5 ICRP Publication 103 (国際放射線防護委員会の2007年勧告)

① International Commission on Radiological Protection (ICRP)

- 国際放射線防護委員会。
- ICRPは、「原子放射線の影響に関する国連科学委員会」の報告等を参考にし、科学的知見に加え放射線防護上の価値判断を下した勧告並びに技術報告を出している。これらは各国の法令策定や防護の実務に活用されている。

② “ICRP Publication 103”の目的

- 放射線被ばくに関する生物学と物理学の最新の科学的情報に基づいて、等価線量と実効線量における放射線加重係数及び組織加重係数を更新し、また放射線損害を更新している。

③ 記述内容

- ICRP Publication 103では、「放射線防護の生物学的側面」、「放射線防護に用いられる諸量」、「人の放射線防護体系」、「委員会勧告の履行」、「患者、介助者と介護者、生物医学研究志願者の医療被ばく」、「環境の防護」等について記載されている。
- なお、トリチウムの生体影響に関しては、放射線加重係数、等について記載されている。

6. 用語集

原子力百科事典ATOMICAより
<http://www.rist.or.jp/atomica/index.html>

用語集 1/3

□ 遺伝的影響

- 放射線影響のうち、被ばくした人の子孫に現れる影響を遺伝的影響 (hereditary effects) という。一方、子孫に伝えられるか否かにかかわらず、体細胞と生殖細胞を問わず遺伝子突然変異あるいは染色体異常が生じることを遺伝学的影響 (genetic effects) といい、区別して用いられる。遺伝的影響は生殖細胞に生じた非致死的な損傷が子孫に引き継がれる可能性があるため、しきい線量は存在しないと考えられており、その発生は動・植物実験によって明らかにされているが、遺伝子を構成しているDNAは人も実験動物も同じであるので、人にも放射線被ばくによる遺伝的影響が発生する可能性を仮定して、放射線防護の基準等が設定されている。人にもしきい線量なしに生じる可能性があると言われてきたが、最近、その見直しが行われている。

□ 確定的影響

- deterministic effects. 放射線の被ばく量があるしきい値を超えた場合に発生する影響をいう。しきい値より小さい被ばく線量では影響は現れない。しきい値を超えて被ばく線量が増加するとともに影響の発生確率が急速に増加し、また、影響の程度すなわち重篤度も増大する。ある被ばく線量に達すると被ばくしたすべての人に影響が現れる。がんおよび遺伝的影響以外の影響はすべてこれに区分され、例えば、皮膚障害、白内障、組織障害、個体死等がある。これを防止するためには、被ばく線量をしきい値以下に管理する必要がある。

□ 確率的影響

- stochastic effects. 放射線による影響の起こる確率が線量の関数となっていて、しきい線量が存在しないと仮定されている影響である。確率的影響としては、がんと遺伝的影響がある。これを防ぐには、個人に対しては適切な線量当量限度を超えないこと、期間に対しては、正当であるとされる被曝を、経済的および社会的要因を考慮に入れながら合理的に達成可能な限り低く保つ (ALARA) ことが必要とされている。確率的影響については、放射線防護上は、低い被曝線量の範囲内では線量と影響の起こる確率の間に比例関係が存在すると仮定している。

□ 過剰相対リスク (ERR)

- 放射線の影響はリスクという概念によって評価されている。放射線被ばくの影響を評価する際、健康への影響がどれだけ過剰にあるかを表す指標が過剰リスクである。過剰リスクには絶対リスクと相対リスクがある。過剰絶対リスクは、例えばがんの場合、被ばく群と対照群のがん死亡率 (あるいはがん罹患率) の差、あるいは人・年・グレイ当たりの過剰症例数をいう。一万人当たり、1Gy当たりの絶対リスクをリスク係数ということがある。相対リスクは被ばく群と対照群のがん死亡率の比をいう。相対リスクから1を引いたものが、過剰相対リスクである。過剰相対リスクを集団の平均総線量 (Gy) で割ったものが1Gy当たりの過剰相対リスクとなる。

用語集 2/3

□ 生物学的効果比 (RBE)

- 放射線に被曝した場合に同じ吸収線量であっても、放射線の種類、エネルギーの違いにより生物に及ぼす効果に量的な差がある。その違いを比で表したものが生物学的効果比 (RBE) である。通常、対象とする放射線と基準放射線とが生体に等しい変化を与えるときに、前者の吸収線量を後者の吸収線量で割って得られる値であらわす。基準の放射線としてはX線またはγ線が用いられる。線量当量 (放射線の生物学的な影響を計算するための量) の算出に用いられる線質係数は、確率的影響に対するRBEにほぼ等しい。この場合のRBEはx、γ、β線は1、エネルギー2 MeV以上の陽子は5、α線は20、中性子はエネルギーにより5~20とされている。

□ 生物学的半減期

- 生体中または特定の組織、器官に存在する特定の物質 (放射性核種でもよい) の量が、代謝、排泄などの生物学的過程によって初めの量の1/2にまで減少する時間をいう。この減少は、指数関数的またはそれに近い割合で起こる。したがって、放射性核種が摂取された場合の体内または組織、器官内存在量は、放射性壊変と生物学的過程とにより減少する。この二つの過程により初めの放射性核種の量が1/2にまで減少する時間を実効半減期といい、次式で示される。 $1/T = 1/T_r + 1/T_b$ ただし、T: 実効半減期、 T_r : 物理学的半減期、 T_b : 生物学的半減期である。トリチウム水の生物学的半減期は約10日である。

□ チミジン

- 化合物名であって、分子式は $C_{10}H_{14}O_5N_2$ 、構造式は、3-β-D-デオキシリボフラノシルチミンにあたる。ピリミジンヌクレオシドの一つである。デオキシリボ核酸 (DNA) の成分として含まれる。融点は186°C。水に良く溶け、吸収極大波長は267 nm。チミジンのリン酸エステルをチミジル酸と称し、アデノシン三リン酸 (ATP) からリン酸を受取り、チミジン二リン酸 (TDP) となる。TDP-糖化合物はバクテリア中にみられ、糖の異性体 (エピマー) の相互変化に重要な役割を果たしている。

□ 低LET放射線

- 電離性放射線が物質中を通過する際、飛程の単位長さ当りに平均して失うエネルギーを線エネルギー付与 (LET: Linear Energy Transfer) といい、物質に与えたエネルギーを $J \cdot m^{-1}$ で示す。(LET) が低い放射線を低LET放射線という。各種の放射線の内、X線、γ線はLETが小さいので低LET放射線といい、α線、中性子線、その他重荷電粒子、核分裂破片のLETは大きいので高LET放射線という。物質のLETが同じであっても放射線効果に差があることがある。

用語集 3/3

□ 放射線荷重係数 (w_R)

- radiation weighting factor. 同一の吸収線量でも放射線の種類とエネルギーによって被曝影響の大きさが異なるため、これを補正するために吸収線量に掛け合わせる係数。ICRPの1990年勧告が刊行されるまでは線質係数と呼ばれていた。主な放射線の荷重係数は次のとおり。光子と電子（ともにすべてのエネルギー）は1。中性子はエネルギーが10keV未満は5、10keV以上100keVまでは10、100Kevを超え2MeVまでは20。アルファ粒子、核分裂片、重原子核は20。これらの係数で加重された吸収線量の合計を等価線量（equivalent dose）という。等価線量の単位はキログラム当たりのジュールであり、その固有名称はシーベルト（Sv）である。

□ 有機結合トリチウム（OBT）

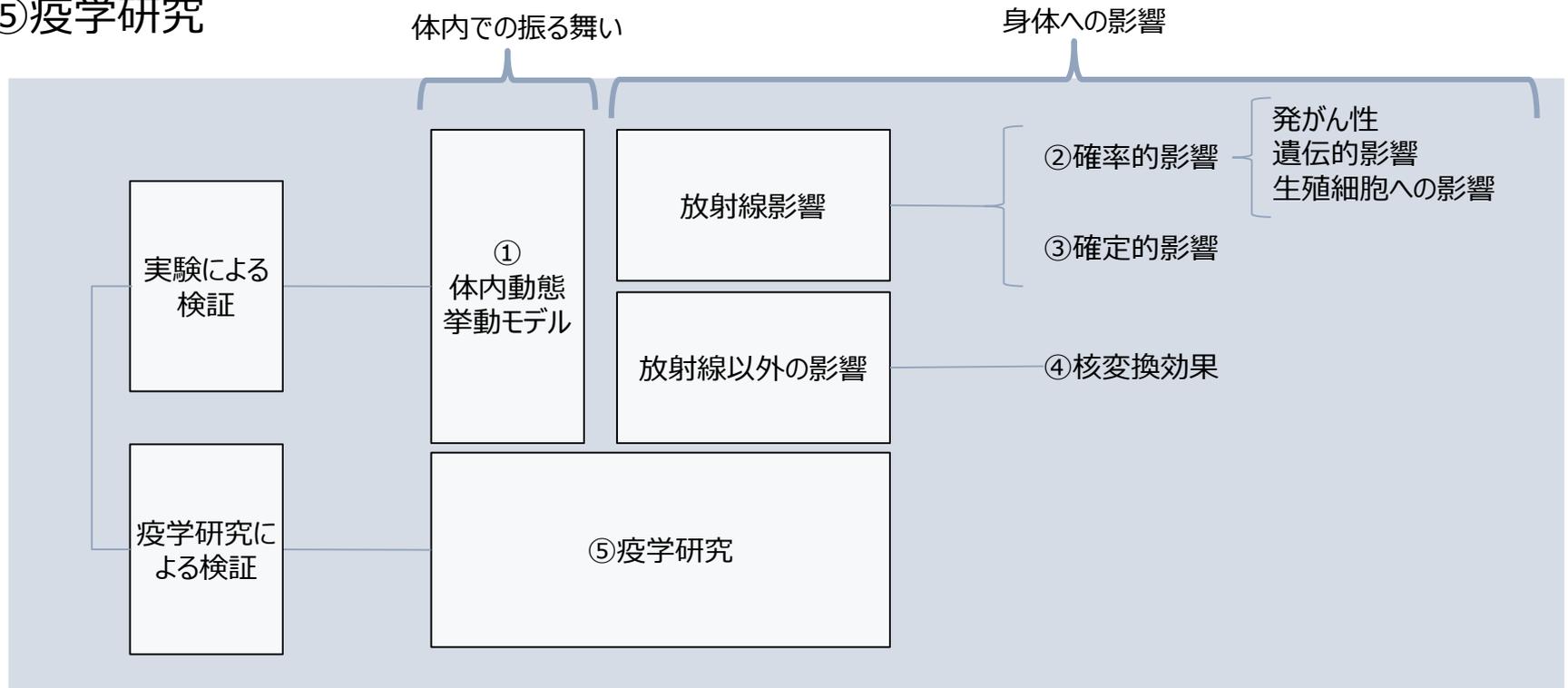
- Organically Bound Tritium、OBT 植物中に取り込まれたトリチウム水は、光合成により有機化されると、葉、実および根などに蓄積される。このように組織と結合したトリチウムは有機結合型トリチウムと呼ばれる。光合成による有機結合型トリチウムの生成は、植物の種類や成長の段階によって異なる。有機結合型トリチウムには、組織内に存在する自由水（組織自由水）と容易に交換可能な交換型トリチウムと有機物の炭素と強く結合している非交換型トリチウムの2種類がある。国際放射線防護委員会（ICRP）が提示しているトリチウムの化学形別の線量係数（Sv/Bq）、すなわち単位摂取放射能当たりの実効線量では、吸入および経口摂取のいずれの場合もトリチウム水（HTO）の線量係数は、トリチウムガス（HT）の10000倍となっている。植物等の組織と結合した有機結合型トリチウム（OBT）の線量係数はトリチウム水（HTO）のさらに約2.3倍である。環境中でトリチウム移行に関与するさまざまなプロセスには、拡散、沈着、再放出、HTのHTOへの変換、HTOの有機形トリチウム（OBT）への変換などがある。

7. UNSCEAR 2016年報告書 關係部分概要

7-1 まとめ項目の構成

項目構成

- ①体内動態挙動モデル
- ②確率的影響
- ③確定的影響
- ④核変換効果
- ⑤疫学研究



図：まとめ項目間の関係性

7-2 トリチウムの生物影響まとめ (UNSCEAR 2016年報告書) 1/5

①体内動態挙動モデル

- ❑ ICRPのHTO体内動態挙動モデルでは、HTOが6時間の生物学的半減期で血液から移され、体全体に均一に広がると仮定している。摂取されたHTOのうち約97%がHTOとして残り、約3%がOBTに変換される。成人におけるHTO、OBTの生物学的半減期はそれぞれ10日、40日と計算されている。(図1)
- ❑ OBT体内動態挙動モデルでは、摂取されたOBTは一旦すべて血中に移行した後、生物学的半減期6時間で各組織に移行する。その際約50%はOBTとして組織に保持され、残りがHTOに変換される。本来各組織におけるOBTの移行・残留は、それぞれの組織の代謝及びOBTの化学形態に依存する。しかしながら、ICRPのモデルでは各組織に均一にOBTが分布することを仮定している。一方、代謝が大きければOBTの取り込みと排出が迅速になることを仮定している。(図2)
- ❑ トリチウムチミンなどのトリチウム化されたDNAの前駆体を摂取した際には、ICRPのモデルから求められたOBTの線量係数を用いるべきではない。

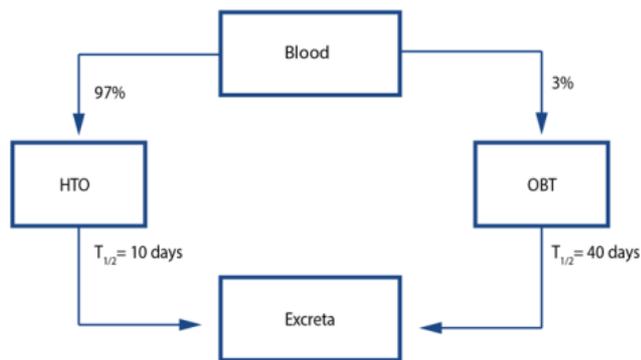


図1 ICRPのHTO体内動態挙動モデル

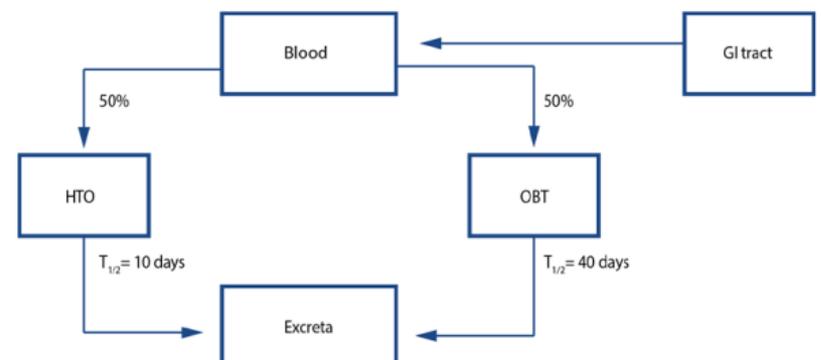


図2 ICRPのOBT体内動態挙動モデル

7-2 トリチウムの生物影響まとめ (UNSCEAR 2016年報告書) 2/5

①体内動態挙動モデル (続き)

- ❑ ICRPでは放射性関連労働者の摂取量に焦点を当て、生理学的実態を加えた改訂モデルを策定した。一般公衆の摂取については今後検討される。
- ❑ HTOのモデルには血液、血管外の水分、体内でOBTに変換された2つのトリチウム成分の区画が含まれる。血液中から排泄されるまでの移動係数は、初期の半減期が10日となるように設定されている。(図1の) OBT-1、OBT-2から血管外のHTOに戻る移動係数は、それぞれ40日、1年の半減期となっている。この二つの区画における正味の保持半減期は再活性により40日、1年よりわずかに長い。(図1)
- ❑ OBTのモデルでは、特定の情報を得ることができないトリチウムの“生体有機化合物”への適用が想定されている。初期に血液中に入ったトリチウムは50%がOBT-1の区画に移動し、残り50%が血液区画内で直ちにHTOに変換されると仮定している。その後OBT-1の区画及び血液中に入ったトリチウムは図1のHTOモデルに従う。

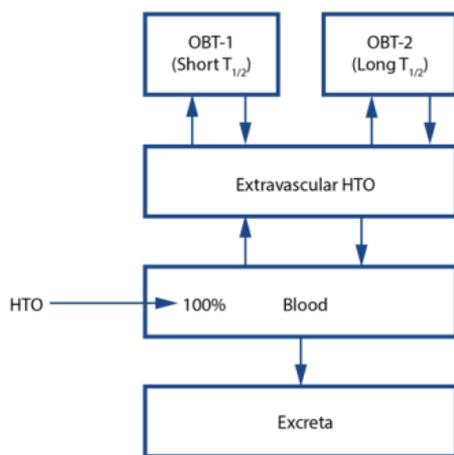


図1 ICRPの改訂HTO体内動態挙動モデル

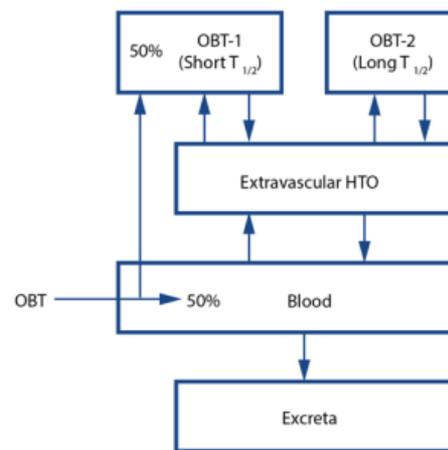


図2 ICRPの改訂OBT体内動態挙動モデル

7-2 トリチウムの生物影響まとめ（UNSCEAR 2016年報告書） 3/5

②確率的影響

- ❑ 発がん性について、ラットを用いた実験から3.3~6.6Gyでは乳腺線維腺腫の発生率の増加が確認されたが、それ以下では確認できなかった。
- ❑ 遺伝性の影響についてマウスを用いた実験から、ベータ線及びガンマ線による被ばく量が2Gy以下では、染色体相互転座頻度の変化はなかった。一方、3~4Gy以上では相互転座頻度の増加が観測された。
- ❑ 研究結果からHTOによる生殖細胞の内部被ばくにより、幅広い範囲の被ばく量で細胞の遺伝的に優勢致死となる突然変異が引き起こされることが確認された。RBE（生物学的効果比）は1.6~2.6となり、トリチウムのベータ線による影響はガンマ線より大きいことが分かった。
- ❑ 確率的な影響に関して、マウスやラットを用いた実験により、がんや遺伝的影響の誘発についての研究はなされているが、ヒトの健康に対するトリチウム被ばくの確率的影響に関する疫学的証拠は存在しない。
- ❑ ICRPは低LET放射線のRBE値が有意に変化する証拠（例えば光子エネルギーが減少するについてRBEが増加するなど）があることを認識していたが、放射線防護の目的において詳細に区分けするのは正当ではないと示している。そのため、実用的な理由からトリチウムからのベータ粒子を含むすべての電子・光子に対して w_R の値を1に選んでいる。

7-2 トリチウムの生物影響まとめ（UNSCEAR 2016年報告書） 4/5

③ 確定的影響

- ❑ 動物実験から、HTOの長期摂取により被ばく量が約0.4~0.6Gyのときに胚・胎児への影響が観察された。
- ❑ 動物実験から、比較的高線量（1~8.7Gy）となるHTOによる長時間被ばくは、線量によっては回復可能な程度の免疫機能の低下をもたらすことが示された。
- ❑ ヒト（女性）の生殖系は未熟な生殖細胞は成熟卵細胞よりも放射線感受性がある。2.5~6Gyの線量を被ばくと、卵母細胞の死滅により永続的な不妊となる。

④ 核変換効果（壊変によるDNA変異効果）

- ❑ 細胞内のトリチウムによる影響は、細胞核のベータ線被ばくによるものが圧倒的であり、壊変によるDNA変換効果はほとんどの条件下で測定可能なレベルの効果はもたらさないと考えるのが妥当である。

7-2 トリチウムの生物影響まとめ（UNSCEAR 2016年報告書） 5/5

⑤疫学研究

- 放射線関連の労働者に対する疫学研究について、一つの国のトリチウムに関わる労働者数が少なく、かつそのような労働者のほとんどが被ばくしていないことから、個々の原子力施設・国の疫学研究ではモデルから予測されるリスクを検討するのに十分な、統計的に意味のある例数があるとは言えない。
- 環境中のトリチウムに関する疫学研究では、身体各組織がトリチウムによって特異的に高線量被ばくを起こす可能性が低いため、有意なリスク推定は困難である。

7 – 3 UNSCEAR 2016 Report 1/5

① Biokinetic model for HTO & OBT

- ❑ The ICRP model further assumes that HTO is transferred from blood with a biological half-time of six hours and distributed uniformly throughout the body. It is also assumed that 97% remains as HTO, while 3% is instantly converted to OBT. In adults, HTO is assumed to be retained with a biological half-time of 10 days, and OBT with the biological half-time of carbon, calculated as 40 days. (Figure 1)
- ❑ It is assumed that OBT, once taken into the body, is translocated to blood completely and instantaneously, and is transferred from blood to tissue with a biological half-time of six hours, with 50% retained in tissue as OBT and 50% transformed into HTO. The uptake and retention of tritium in various tissues depends on the metabolic activity of the individual tissues and the constituent chemical forms of OBT. However, the ICRP model assumes uniform distribution of doses from OBT to all soft tissue in the body while a greater metabolic activity leads to greater uptake and more rapid loss. (Figure 2)
- ❑ The ICRP dose coefficients for OBT should not be directly applied to intake of tritiated DNA precursors.

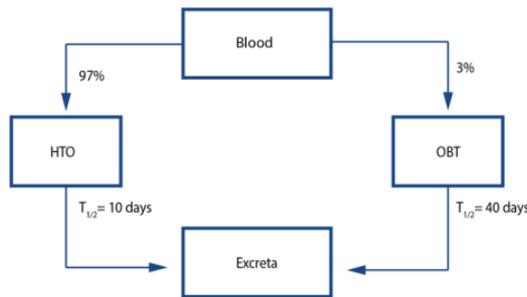


Figure 1 ICRP model for biokinetics of HTO

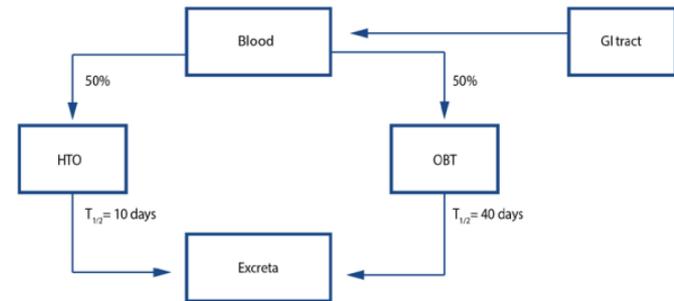


Figure 2 ICRP model for biokinetics of OBT

7 – 3 UNSCEAR 2016 Report 2/5

① Biokinetic model for HTO & OBT

- ❑ ICRP has developed revised models with improved physiological realism focussing on occupational intakes of radionuclides. Intakes by members of the public will be considered by ICRP at a later stage.
- ❑ The HTO systemic model includes compartments representing blood, extravascular body water that exchanges rapidly with blood, and two components of retention of tritium converted in vivo to OBT. The transfer coefficient from blood to excreta is set to yield an initial removal half-time from the body of 10 days. The transfer coefficients from compartments OBT-1 and OBT-2 back to extravascular HTO correspond to half-times of 40 days and one year, respectively; the net retention half-times in these compartments are slightly longer than 40 days and one year due to recycling of activity. (Figure 1)
- ❑ (About OBT) In relation to occupational exposures, this model is assumed to apply to “biogenic organic compounds” of tritium for which specific information is not available. It is assumed that 50% of tritium initially entering blood transfers immediately to compartment OBT-1 and 50% is converted immediately to HTO within the blood compartment. Tritium entering OBT-1 or blood subsequently follows the HTO model defined in figure 1. (Figure 2)

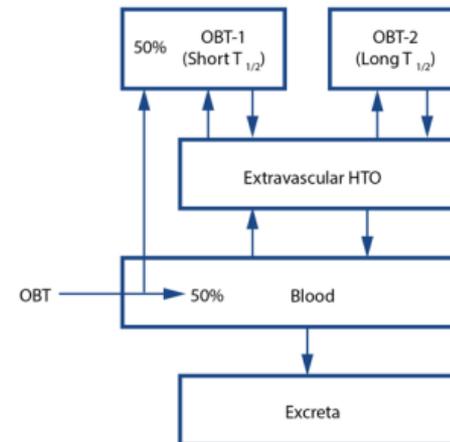
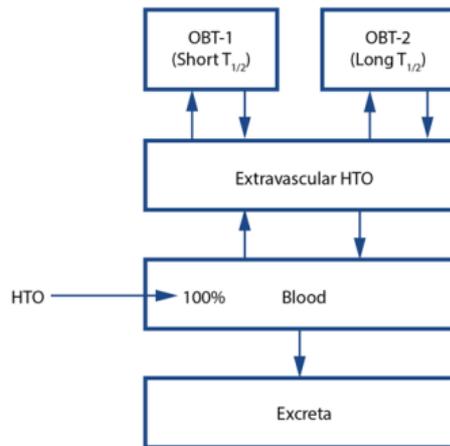


Figure 1 Revised ICRP systemic model for HTO Figure 2 Revised ICRP systemic model for OBT

7 – 3 UNSCEAR 2016 Report 3/5

② Stochastic effects

- ❑ In their first study, increased incidence of mammary fibroadenomas was detected in dams exposed at 3.3 Gy and 6.6 Gy, but not at lower doses.
- ❑ The groups of animals exposed to beta and gamma radiation at a dose of 2 Gy were also studied over two–eight months and reciprocal translocation frequency did not significantly change during this period. The increase of reciprocal translocation frequency with increasing dose was observed over the entire dose range up to 3–4 Gy.
- ❑ In summary, the studies presented here demonstrated that internal exposure of mammal germ cells to HTO can induce DLMs of the progeny at a wide range of radiation doses. RBE estimation showed tritium beta radiation to be more effective than gamma rays for this biological end point by factors of 1.6 to 2.6.
- ❑ However, to date, there is no epidemiological evidence of stochastic health effects being induced by tritium exposure in humans.
- ❑ Although ICRP recognized that there was evidence for a significant variation in RBE values for low-LET radiation (e.g. increasing RBE with decreasing photon energy), it was argued that a more detailed distinction was not warranted for the purposes of radiological protection. Thus, a value for w_R of 1 was chosen for practical reasons to apply to all electrons and photons, including beta particles from tritium

7 – 3 UNSCEAR 2016 Report 4/5

③ Deterministic effects

- ❑ Embryo–fetal effects in animal studies are observed at doses of about 0.4–0.6 Gy from chronic intake of HTO.
- ❑ In summary, experimental studies carried out in animals indicate that prolonged exposure of animals to HTO associated with relatively high radiation doses (in the range of 1–8.7 Gy) resulted in some diminution in the immune response in animals which, depending on the dose, could be reversed.
- ❑ For humans (female), the reproductive system is radiosensitive to a dose of 2.5–6 Gy given in a single fraction. Exposure to doses within that range will cause permanent ovarian failure due to the killing of oocytes, and will be accompanied by features associated with menopause.

④ Transmutation(Non-radiological effects)

- ❑ Carsten discussed the possibility that such effects would be manifest in humans after ingesting HTO or OBT as food. He suggested that the risk was small enough to pose no significant hazard, primarily because only 2% of the hydrogen atoms in DNA were located at the 5-position of the cytosine ring and damage would be minimal.
- ❑ Feinendegen and Bond reached the same conclusion—that “the effects of intracellular tritium are overwhelmingly due to beta irradiation of the nucleus” and “transmutation effects do not produce a measurably increased effect under most conditions.”
- ❑ If DNA damage in mammals did occur from transmutation, it is unlikely that it could be distinguished from radiation-induced damage and thus would be already accounted for in measured RBE values.

7 – 3 UNSCEAR 2016 Report 5/5

⑤ Epidemiological studies

- ❑ Owing to the limited numbers of tritium workers in particular countries, and limited exposure of most of these workers, it is unlikely that epidemiological studies of individual nuclear facilities, or indeed individual countries, will have sufficient statistical power to have a reasonable prospect of detecting the risks predicted by standard models, or of risks not far removed from those predicted.
- ❑ It is unlikely that epidemiological studies of environmental exposure to tritium will produce meaningful tritium-specific risk estimates because such exposure is, in general, unlikely to produce tritium-specific tissue/organ doses that are not low or very low.