

ISSN -2434-1088

KURNS-EKR-11

令和2年度
「放射性廃棄物処分に係わる
生活圏被ばく線量評価パラメータ」

**Parameters Used in Biospheric Dose Assessment Models
for Radioactive Waste Disposal**

令和2年12月17日 開催
(December, 17, 2020)

編集：高橋知之

Edited by : T. Takahashi

京都大学複合原子力科学研究所
Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University

はじめに

放射性廃棄物処分に係わる生活圏評価における被ばく線量評価では、多くの環境パラメータが用いられる。これらのパラメータを評価に使用する際は、その評価の目的等に応じ、パラメータ値の不確実性を考慮して適切に値を設定する必要がある。これらの環境パラメータのうち、元素の種類によって値が異なるパラメータ（元素依存パラメータ）は、環境条件によって大きく変動し、かつ、被ばく評価結果への影響が比較的大きい可能性がある。よって、元素依存パラメータは、評価対象地域の環境条件等を十分に考慮した上で、適切なパラメータ値を設定することが必要である。

生活圏評価における被ばく評価に用いられる元素依存パラメータとして、土壌中における固液分配係数、土壌からの農作物への移行係数、飼料から畜産物への移行係数、棲息水から水産物への濃縮係数などがあげられる。これらのパラメータ値の設定においては、一般に、国際機関によるテクニカルレポートや様々な学術研究の成果等が利用可能であり、これまでもこれらの文献値に基づく評価がなされてきた。一方で、近年の研究により、日本を始め多くの国や地域で、環境パラメータの取得が進められている。元素依存パラメータは、評価対象地域の環境条件に大きく影響されるため、環境条件とパラメータ値の関連性に着目することにより、より妥当性の高い被ばく評価が可能となると考えられる。

日本保健物理学会「放射性廃棄物処分に係わる生活圏被ばく評価に用いられるパラメータ調査専門研究会」では、このような元素依存パラメータに着目し、より妥当性の高い被ばく評価を可能とするための検討を、令和元年度～2年度の2年計画で検討を進めている。

本専門研究会は、この日本保健物理学会専門研究会におけるこれまでの検討結果に基づき、環境放射線・放射能、環境影響評価、放射性廃棄物処理処分等の研究者や実務者が、それぞれの専門分野の観点から、本テーマに関する最新の知見等を紹介して議論を行うことを目的として、令和2（2020）年12月17日に開催した。本報告書が、当分野の今後の研究や業務の進展の一助となれば幸いである。

令和3（2021）年3月

京都大学複合原子力科学研究所 高橋知之
京都大学複合原子力科学研究所 福谷 哲
(国研) 量子科学技術研究開発機構 内田滋夫

目 次

- 1) 放射性廃棄物処分に係わる生活圏被ばく線量評価モデル及びパラメータ…………… (1)
高橋知之¹⁾、内田滋夫^{2, 3)}
¹⁾京都大学複合原子力科学研究所、²⁾(国研)量子科学技術研究開発機構
³⁾日本エヌ・ユー・エス(株)
- 2) 日本の放射性廃棄物処分に係わる生活圏被ばく線量評価に用いられたパラメータ…………… (6)
深谷友紀子¹⁾、内田滋夫^{1, 2)}
¹⁾日本エヌ・ユー・エス(株)、²⁾(国研)量子科学技術研究開発機構
- 3) スウェーデンの短寿命放射性廃棄物処分場安全評価における
生活圏被ばく線量評価パラメータの考え方…………… (19)
加藤智子¹⁾
¹⁾(国研)日本原子力研究開発機構
- 4) フィンランド TURVA-2012 における生活圏被ばく線量評価パラメータの考え方…………… (29)
中林亮¹⁾
¹⁾(一財)電力中央研究所
- 5) 環境移行パラメータの追跡調査結果とデータ比較(1)(土壌-農作物移行係数)…………… (37)
深谷友紀子¹⁾、内田滋夫^{1, 2)}
¹⁾日本エヌ・ユー・エス(株)、²⁾(国研)量子科学技術研究開発機構
- 6) 環境移行パラメータの追跡調査結果とデータ比較(2)(表層土壌・農耕地土壌の分配係数)…………… (56)
孫思依^{1, 2)}、内田滋夫^{2, 3)}
¹⁾東京大学、²⁾日本エヌ・ユー・エス(株)、³⁾(国研)量子科学技術研究開発機構
- 7) 環境移行パラメータの追跡調査結果とデータ比較(3)(棲息水-魚類濃縮係数)…………… (64)
平山 誠¹⁾、田上恵子²⁾、内田滋夫^{1, 2)}
¹⁾日本エヌ・ユー・エス(株)、²⁾(国研)量子科学技術研究開発機構
- 8) 生活圏被ばく線量評価に用いられたパラメータと最新データとの比較検討
～Cs, I および Pu の海産生物濃縮係数～…………… (91)
田上恵子¹⁾、内田滋夫^{1, 2)}
¹⁾(国研)量子科学技術研究開発機構、²⁾日本エヌ・ユー・エス(株)
- 9) 総合討論 一環境移行パラメータのデータベース化と生活圏被ばく線量評価への活用…………… (97)
高橋知之¹⁾、内田滋夫^{2, 3)}、武田聖司⁴⁾、中居邦浩⁵⁾
¹⁾京都大学複合原子力科学研究所、²⁾(国研)量子科学技術研究開発機構
³⁾日本エヌ・ユー・エス(株)、⁴⁾(国研)日本原子力研究開発機構、⁵⁾日揮(株)

CONTENTS

- 1) Biospheric dose assessment model and parameters for radioactive waste disposal (1)
Tomoyuki TAKAHASHI¹⁾ and Shigeo UCHIDA^{2, 3)}
¹⁾Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University
²⁾National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology
³⁾Japan NUS Co., Ltd.
- 2) Effects of heat treatments on metastable iron carbide thin films produced by
pulsed laser deposition of iron in methane atmosphere (6)
Yukiko FUKAYA¹⁾ and Shigeo UCHIDA^{1, 2)}
¹⁾Japan NUS Co., Ltd.
²⁾National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology
- 3) Settings of biospheric dose assessment parameters in safety assessment
for final repository of short-lived radioactive waste in Sweden (19)
Tomoko KATO¹⁾
¹⁾Japan Atomic Energy Agency.
- 4) Review of procedure for setting biospheric parameters used for dose assessment
in TURVA-2012 of Finland (29)
Ryo NAKABAYASHI¹⁾
¹⁾Central Research Institute of Electric Power Industry
- 5) Parameter follow-up survey results and data comparison (1) (Soil-crop transfer coefficients) (37)
Yukiko FUKAYA¹⁾ and Shigeo UCHIDA^{1, 2)}
¹⁾Japan NUS Co., Ltd.
²⁾National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology
- 6) Parameter follow-up survey results and data comparison (2)
(Distribution coefficient in topsoil and farmland soil) (56)
Siyi SUN^{1, 2)} and Shigeo UCHIDA^{2, 3)}
¹⁾The University of Tokyo
²⁾Japan NUS Co., Ltd.
³⁾National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology
- 7) Parameter follow-up survey results and data comparison (3) (Water-fishery product concentration ratio) (64)
Makoto HIRAYAMA¹⁾, Keiko TAGAMI²⁾ and Shigeo UCHIDA^{1, 2)}
¹⁾Japan NUS Co., Ltd.
²⁾National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology
- 8) Comparison of parameter values used in biospheric dose assessment and newly observed
~concentration factors of Cs, I and Pu in marine biota~ (91)
Keiko TAGAMI¹⁾ and Shigeo UCHIDA^{1, 2)}
¹⁾National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology
²⁾Japan NUS Co., Ltd.

9) Discussion- Making databases of parameter values of radionuclide transfer in environment
and application for biospheric dose assessment - (97)
Tomoyuki TAKAHASHI¹⁾, Shigeo UCHIDA^{2, 3)}, Seiji TAKEDA⁴⁾ and Kunihiro NAKAI⁵⁾
¹⁾Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University
²⁾National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology
³⁾Japan NUS Co., Ltd.
⁴⁾Japan Atomic Energy Agency
⁵⁾JGC Japan Corporation

京都大学複合原子力科学研究所
「放射性廃棄物処分に係わる生活圏被ばく線量評価パラメータ」専門研究会
プログラム

主催：京都大学複合原子力科学研究所
共催：日本保健物理学会、日本原子力学会保健物理・環境科学部会

2020年12月17日 13:30-17:00

13:30-13:35 (5分)

開会の挨拶

内田滋夫 (量研機構)

13:35-13:45 (10分)

趣旨説明：放射性廃棄物処分に係わる生活圏被ばく線量評価モデル及びパラメータ

高橋知之 (京都大学)

13:45-14:05 (20分：15分+5分)

座長：内田滋夫 (量研機構)

日本の放射性廃棄物処分に係わる生活圏被ばく線量評価に用いられたパラメータ

深谷友紀子 (日本エヌ・ユー・エス (株))

14:05-14:45 (40分：一人15分+5分)

座長：福谷 哲 (京都大学)

スウェーデンの短寿命放射性廃棄物処分場安全評価における生活圏被ばく評価パラメータの考え方

加藤智子 (原子力機構)

フィンランド TURVA-2012 における生活圏被ばく線量評価パラメータの考え方

中林亮 (電中研)

14:45-15:00 休憩

15:00-15:45 (45分：一人10分+5分)

座長：田上恵子 (量研機構)

パラメータの追跡調査結果とデータ比較(1) (土壌-農作物移行係数)

深谷友紀子 (日本エヌ・ユー・エス (株))

パラメータの追跡調査結果とデータ比較(2) (耕作地土壌固液分配係数)

孫思依 (東京大学)

パラメータの追跡調査結果とデータ比較(3) (棲息水-水産物移行係数)

平山誠 (日本エヌ・ユー・エス (株))

15:45-16:05 (20 分 : 15 分+5 分)

座長 : 高橋知之 (京都大学)

生活圏被ばく線量評価に用いられたパラメータと最新データとの比較検討

田上恵子 (量研機構)

16:05-16:55 (50 分 : 15 分[指定発言者一人 5 分]+35 分)

総合討論

座長 : 高橋知之 (京都大学)

指定発言者 : 内田滋夫 (量研機構)、武田聖司 (原子力機構)、中居邦浩 (日揮 (株))

主な論点

- ・ 国際的なデータベースへの日本のデータの反映
- ・ 日本独自のデータベースを作る必要性
- ・ 線量評価におけるデータベースの使い方 (不確かさの考え方)
- ・ データアーカイブの重要性 (データの散逸防止を含む)

16:55-17:00 (5 分)

閉会の挨拶

福谷 哲 (京都大学)

放射性廃棄物処分に係る生活圏被ばく線量評価モデル 及びパラメータ

Biospheric dose assessment model and parameters for radioactive waste disposal

高橋知之^{1)*}、内田滋夫^{2,3)}

Tomoyuki TAKAHASHI^{1)*} and Shigeo UCHIDA^{2,3)}

- 1) 京都大学複合原子力科学研究所
- 2) (国研) 量子科学技術研究開発機構
- 3) 日本エヌ・ユー・エス (株)

- 1) Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University
- 2) National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology
- 3) Japan NUS Co., Ltd.

*Corresponding author, E-mail: takahashi.tomoyuki.7x@kyoto-u.ac.jp

KEYWORDS: parameter values of radionuclide transfer in environment, biospheric dose assessment, radioactive waste disposal.

I 放射性廃棄物処分における影響評価の概要

原子力や放射線の利用によって発生する放射性廃棄物の処分は、我が国における重要な課題である。放射性廃棄物はその発生源や放射能レベルにより、高レベル放射性廃棄物、低レベル放射性廃棄物、ウラン廃棄物、R I 廃棄物等に分類される。これらの廃棄物はいずれも最終的に地中に埋設処分することが想定されている。

放射性廃棄物埋設処分施設の影響評価における評価シナリオとして、処分施設から漏洩した放射性核種が地下水中を移行し、河川水や井戸水を経由して人の生活圏にもたらされ、被ばくが生じる経路が考えられる。このシナリオにおいて、生活圏に移行した放射性核種は、食品等を経由して人に被ばくをもたらす。

例として、放射能レベルが極めて低い放射性廃棄物を「放射性廃棄物でない廃棄物」として取り扱うクリアランスレベルの評価¹⁾において用いられた、埋設処分・地下水移行シナリオにおける生活圏移行経路の概念図を Fig.1 に示す。埋設処分された廃棄物から帯水層に漏洩した放射性核種は、下流側の井戸水利用によって生活圏にもたらされる。このシナリオでは、井戸水が、飲用水、農耕地灌漑水、家畜飼育水及び淡水産物の養殖水として用いられることを想定している。これらの利用

形態によって、放射性核種が食品中に移行し、人体に摂取されることにより、内部被ばくをもたらす。このような放射性核種の生活圏における移行挙動及び内部被ばく線量を評価するため、それぞれの経路に対応した生活圏被ばく線量評価モデルが用いられる。これらのモデルには、それぞれの放射性核種の移行挙動特性を反映した評価パラメータが用いられる。

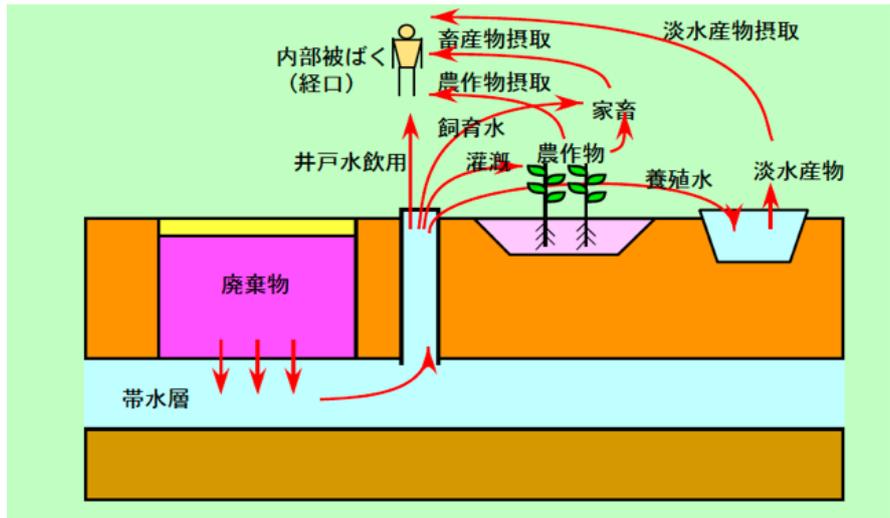


Fig. 1 クリアランスレベルの評価における主な被ばくシナリオ (埋設処分・地下水移行)

II 生活圏被ばく線量評価モデル及びパラメータ

本研究会では、生活圏被ばく線量評価モデルに用いられる環境パラメータのうち、元素の種類によって値が異なるパラメータ（以下、「元素依存パラメータ」という。）に着目する。元素依存パラメータは、環境条件によって値が大きく変動することから、その値の設定に当たっては、評価対象地域の環境条件等を十分に考慮した上で、適切なパラメータ値を設定することが必要である。ここでは、元素依存パラメータのうち、以下の3つのパラメータを取り上げる。

(1) 土壌-農作物移行係数

農耕地土壌に存在する放射性核種が、他の栄養素とともに根から吸収されて農作物内に蓄積する経路の移行評価に用いられる。この経路における評価では、一般に、収穫時の農作物可食部中放射性核種濃度が、当該土壌中核種濃度に比例すると仮定するモデルが用いられる。このモデルにおける比例係数が土壌-農作物移行係数である^{2,3)}。この移行係数に農耕地土壌中核種濃度を乗じることによって農作物可食部中核種濃度を推定する。土壌-農作物移行係数の単位は一般に((Bq/kg-農作物湿重量) または (Bq/kg-農作物乾重量) / (Bq/kg-土壌乾燥重量)) で与えられる。1970年代や1980年代では、農作物重量として湿重量を用いていた^{4,5)}が、水分含量が採取時の状態や保存状態に左右されるため、最近では、乾重量を用いるようになった^{6,7)}。なお、農作物の水分含量が求められていれば、湿重量で求められた移行係数でも乾重量で求められた移行係数でも相互に変換は可能である。

この移行係数を飼料作物中核種濃度の評価に用いる場合は、単位は一般に((Bq/kg-飼料作物乾燥重量) / (Bq/kg-土壌乾燥重量)) で与えられる。土壌-農作物移行係数は、元素の種類によって大きく異なるとともに、農作物の種類や農耕地土壌の性状等の環境条件によっても大きく異なることが知られている^{2,3)}。

(2) 土壌固液分配係数

農耕地土壌に存在する放射性核種は、雨水や灌漑水の浸透等によって一部が土壌系外に移行する。この浸透水等による移行は、土壌の間隙水中に溶存している放射性核種が土壌系外に流亡することによって発生するため、土壌系外への核種の移行量は、土壌中に存在する核種のうち間隙水中に溶存している割合に依存することとなる。放射性廃棄物埋設処分施設の影響評価において、河川水や井戸水による農耕地土壌への灌漑水の供給は、継続的な状態が想定される。よって、浸透等による農耕地土壌から系外への移行は、平衡状態における土壌固相と土壌液相への分配比である固液分配係数が一般に用いられる。固液分配係数の単位は $((\text{Bq/kg}\text{-土壌固相}) / (\text{Bq/m}^3\text{-土壌液相}))$ であるため、 (m^3/kg) と表される⁸⁾。

固液分配係数の値が大きい方が、土壌液相中の核種濃度が低くなるため、浸透等による土壌系外への核種の移行量は少なくなる。この結果、灌漑水の継続的な供給が想定される状態においては、固液分配係数の値が大きい方が、農耕地土壌中の核種濃度が高くなる。この結果、当該農耕地における農作物中濃度も高くなることが予想されるが、一方で土壌固相へ収着しやすい性質により、農作物への移行も少なくなることも考えられ、一概に農作物中濃度が高くなるとは言えない。

固液分配係数は農耕地土壌における移行挙動以外にも、不攪乱土壌（通気層）における移行評価⁹⁾や、河川水系、湖沼水系、海水系などの水系における液相と固相の分配の評価にも用いられる^{7,8,10)}。水系の評価においては、河川水、湖沼水、海水とそれらの底泥間の移行、あるいは河川水、湖沼水、海水中の溶存物質と懸濁物質との核種の分配の評価に用いられる。また、放射性廃棄物埋設処分施設における人工バリア中の移行評価や、処分施設と生活圏の間の帯水層（地下水）移行（天然バリア）における移行評価^{8,11)}にも用いられる。このように固液分配係数は様々な系における移行評価に用いられるが、固相と液相間の核種の移行挙動はさまざまな環境要因によって変動するため、「固液分配係数」としての意味合いは同じであっても、適切なパラメータ値は評価対象系によって異なることに留意する必要がある。

(3) 棲息水-魚類濃縮係数

魚類などの水産物が、その棲息水中の放射性核種を吸収、蓄積する経路の評価に用いられる。この経路における評価では、土壌-農作物移行係数と同様に、魚類の可食部中放射性核種濃度が、当該魚類の棲息水中核種濃度に比例すると仮定するモデルが用いられる。このモデルにおける比例係数が棲息水-魚類濃縮係数である。棲息水-魚類濃縮係数の単位は一般に $((\text{Bq/kg}\text{-魚類湿重量}) / (\text{Bq/L}\text{-棲息水}))$ で与えられる¹⁰⁾。

棲息水-魚類濃縮係数の特徴として、対象となる魚類の棲息域が広範囲にわたる場合があり、棲息水核種濃度の同定が困難な場合があること、当該棲息域の底泥や懸濁物質の影響を受ける可能性があることなどが挙げられる。すなわち、場合によっては棲息水と棲息水底泥間の核種移行挙動も考慮した上で、パラメータ値に関する検討を行う必要がある。

なお、このパラメータの我が国における名称は、歴史的に「濃縮係数(Concentration Factor)」が多く用いられてきたが、必ずしも濃縮するとは限らないことから、「濃度係数」「移行係数」等とする記載の方が望ましいと考えられる。

Ⅲ 環境移行パラメータ値の導出と設定

上述した元素依存パラメータは、室内実験やフィールド調査等によって取得される。室内実験においては、放射性核種を添加した実験により、制御された環境系でのパラメータ値の取得が可能であるが、得られた結果の実環境への適用性については十分に検討する必要がある。フィールド調査においては、グローバルフォールアウトの調査⁹⁾や原子力施設の事故によって放出された放射性核種の移行挙動調査等¹²⁾が含まれるが、対象となる核種が限られることから、安定元素によるアナログ研究も実施されている¹³⁾。フィールド調査は、実環境におけるパラメータ値を直接把握することが可能であるが、環境系が制御下にないため、様々な環境要因による影響を受ける。

これらの研究成果は、研究論文や技術資料等によって公開されている。IAEA等の国際機関は、このような文献を収集し、データベースの作成や、評価に用いるパラメータの推奨値の提案を行っている^{5-7,10,12,13)}。また、我が国においても、過去においてこれらの環境移行パラメータのとりまとめがなされた^{11,14-16)}。

放射性廃棄物処分の影響評価に用いるパラメータ値の設定においては、このような国際機関によるレポートや、様々な学術研究の成果等が利用可能である。我が国においても、これまでもこれらの文献値に基づく評価がなされてきた。しかしながら、これらのデータベースの数値や推奨値の設定根拠が明確に記載されていない場合がある。また、特に年代的にも古い引用文献や、他の学術研究の成果を引用している場合には、データの測定条件等が不明確であることが多い。

一方で、近年の研究により、日本を始め多くの国や地域で、環境パラメータの取得が進められている。これらのデータは、取得された環境条件等が明記されていることも多く、環境条件とパラメータ値の関連性についての検討も可能となると考えられる。

このような状況において、評価の信頼性を高めるため、パラメータ値の不確実性やその変動要因を考慮した上で、評価の目的に応じた適切なパラメータ値を設定する手法を明確にしていくことが求められる。そのためには、放射性核種の環境中移行挙動と、環境影響評価の両研究分野が連携して議論を重ねるとともに、将来の研究に向けて具体的な提案を行っていくことが必要不可欠である。

参考文献

- 1) 大越実、高橋知之、木村英雄、関武雄、坂井章浩、吉森道郎、山本英明：主な原子炉施設におけるクリアランスレベルの、算出方法について、保健物理, 34, 1999, pp. 187-197.
- 2) 内田滋夫、大桃洋一郎、鎌田 博、佐伯誠道：土壌から農作物への放射性核種の移行に関する計算モデル, 日本原子力学会誌, 26, 1984, pp. 935-941.
- 3) 内田滋夫、鎌田 博、横須賀節子、大桃洋一郎：移行係数(土壌-農作物)の変動について、保健物理, 22, 1987, pp. 511-522.
- 4) U.S. Nuclear Regulatory Commission: NRC Regulatory Guide 1.109, Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10 CFR PART 50, Appendix I, 1977, p. 3.
- 5) International Atomic Energy Agency: Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental

Transfer of Radionuclides from Routine Releases, Exposures of Critical groups, Safety Series No.57, 1982, pp. 62-64.

6) International Atomic Energy Agency: Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments, Technical Reports Series No. 364, 1994, p. 14.

7) International Atomic Energy Agency: Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, Technical Reports Series No. 472, 2010, p. 5.

8) 内田滋夫、保田浩志、馬原保典、佐々木規行、高橋知之、木村英雄、松鶴秀夫：分配係数の測定法及び利用法、JAERI-Review 95-009, 1995.

9) 森澤眞輔、井上頼輝、鎌田 博、内田滋夫：フォールアウト Sr-90 の成層通気層内移動とその分布の予測、日本原子力学会誌, 25, 1983, pp.1020-1034.

10) International Atomic Energy Agency: Sediment Distribution Coefficients and Concentration Factors for Biota in the Marine Environment, Technical Reports Series No. 422, 2004.

11) 原子力環境整備センター：土壌と土壌溶液間の放射性核種の分配係数、環境パラメータ・シリーズ2, RWMC-90-P-13, 1990.

12) International Atomic Energy Agency: Environmental Transfer of Radionuclides in Japan following the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA TECDOC-1927, 2020.

13) International Atomic Energy Agency: Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments, IAEA TECDOC-1616, 2009, pp. 605-610.

14) 原子力環境整備センター：土壌から農作物への放射性物質の移行係数、環境パラメータ・シリーズ1, RWMC-88-P-11, 1988.

15) 原子力環境整備センター：淡水から生物への放射性物質の移行、環境パラメータ・シリーズ3, RWMC-92-P-14, 1992.

16) 原子力環境整備センター：海洋生物への放射性物質の移行、環境パラメータ・シリーズ6, RWMC-96-P-18, 1996.

日本の放射性廃棄物処分に係わる生活圏被ばく線量評価 に用いられたパラメータ

Parameters used in biosphere dose assessment models for radioactive waste disposal in Japan

深谷友紀子^{1)*}、内田滋夫^{1,2)}
Yukiko FUKAYA¹⁾ and Shigeo UCHIDA^{1,2)}

- 1) 日本エヌ・ユー・エス (株)
- 2) (国研) 量子科学技術研究開発機構

1) Japan NUS Co., Ltd.

2) National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

*Corresponding author, E-mail: fukaya@janus.co.jp

KEYWORDS: radioactive waste disposal, biosphere model, dose assessment parameter.

I はじめに

放射性廃棄物処分に係わる生活圏評価における被ばく線量評価では、多くの環境パラメータが用いられる。これらのパラメータを評価に使用する際は、その評価の目的に応じ、パラメータ値の不確実性等を考慮して適切に値を設定する必要がある。これらの環境パラメータのうち、元素の種類によって値が異なるパラメータ（元素依存パラメータ）は、環境条件によって大きく変動することから、評価対象地域の環境条件等を十分に考慮した上で、適切なパラメータ値を設定することが必要である。

本稿では、下記に示す日本の放射性廃棄物処分に係わる安全評価を取りまとめた報告書（以下、安全評価書）に記載されている生活圏評価において使用されている種々のパラメータのうち、土壌の分配係数(表層土壌、農耕地)、土壌から農作物への移行係数、飼料から畜産物への移行係数、水産物への濃縮係数がどのように設定されているかを整理した結果を示す。

- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 (2005): TRU 廃棄物処分技術検討書－第2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02. ¹⁾ (以下、「TRU2」)
- 原子力安全委員会 (2007): 低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について.²⁾ (以下、「濃度上限値」)
- 原子力安全委員会 (2009): ウラン取扱施設におけるクリアランスレベルについて.³⁾ (以下、

「クリアランス」)

- 日本原子力学会 (2017): 日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法 : 2016, AESJ-SC-F026:2016.⁴⁾ (以下、「学会標準」)

II パラメータの設定状況

1. 土壌の分配係数

前述の日本の放射性廃棄物処分に係わる安全評価書に記載されている生活圏評価での土壌の分配係数の設定状況を Table 1 に示す。また、これら評価における土壌の分配係数の設定値を Fig. 1 に整理した。

Table 1 日本の放射性廃棄物処分に係わる安全評価書に記載されている生活圏評価における土壌の分配係数の設定方針

| 安全評価書 | 分類 | パラメータ設定方針 |
|--------|------|---|
| TRU2 | 表面土壌 | IAEA TRS No.364 ⁵⁾ (砂) を中心に、諸外国の文献より設定。 |
| 濃度上限値 | 農耕土壌 | IAEA TRS No.364 ⁵⁾ (有機土)、IAEA-TECDOC-401 ⁶⁾ 、ORNL-5786 ⁷⁾ に基づき選定 |
| クリアランス | 農耕土壌 | IAEA の文献に記載されている値より選定することを基本とし、以下に示す文献の順番で選定。 ① IAEA TRS No.364 ⁵⁾ (有機土の値を引用) ② IAEA SS No.57 ⁸⁾ ③ IAEA-TECDOC-401 ⁶⁾ ④ IAEA-TECDOC-1000 ⁹⁾ |
| 学会標準 | 農耕土壌 | 有機土の値 (IAEA TRS No.364 ⁵⁾ 、IAEA-TECDOC-401 ⁶⁾ 、IAEA-TECDOC-1000 ⁹⁾ 、ORNL-5786 ⁷⁾ を考慮して設定。 |

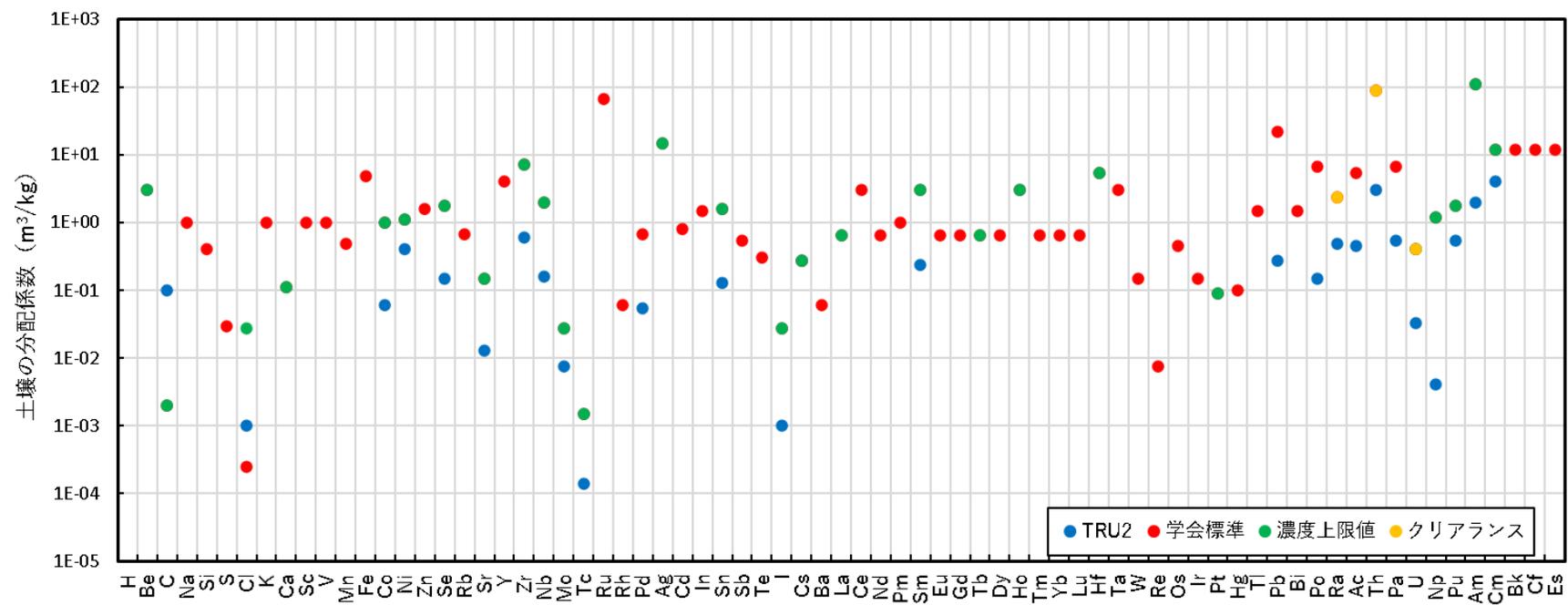


Fig. 1 各安全評価書に記載されている生活圏評価における土壌（表層土壌/農耕土壌）の分配係数

2. 土壌からの農作物への移行係数

前述の日本の放射性廃棄物処分に係わる安全評価書に記載されている生活圏評価における土壌から農作物への移行係数の設定状況を Table 2 に示す。また、これら評価における土壌から農作物への移行係数の設定値を Fig. 2 に整理した。

Table 2 日本の放射性廃棄物処分に係わる安全評価書に記載されている生活圏評価における土壌から農作物への移行係数の設定方針

| 安全評価書 | 分類 | パラメータ設定方針 |
|--------|---------------------------------|--|
| TRU2 | 米 根菜 葉菜 穀物 果物 牧草 | NRPB-M148 ¹⁰⁾ 等、諸外国の文献より設定。 米については、他の農作物や穀物に対する値と等しいと仮定。 |
| 濃度上限値 | 米 葉菜、非葉菜、果実※ | IAEA-TECDOC-1380 ¹¹⁾ における選定値を基本に設定。 |
| クリアランス | 米 葉菜、非葉菜、果実 | IAEA の文献に記載されている値より選定することを基本とし、以下に示す文献の順番で選定。 <ul style="list-style-type: none"> • 米 <ul style="list-style-type: none"> ① IAEA TRS No.364⁵⁾ ② IAEA SS No.57⁸⁾ ③ IAEA-TECDOC-401⁶⁾ ④ IAEA-TECDOC-1000⁹⁾ • 葉菜、非葉菜、果実 <ul style="list-style-type: none"> ① IAEA SRS No.44¹²⁾ ② IAEA TRS No.364⁵⁾ ③ IAEA SS No.57⁸⁾ ④ IAEA-TECDOC-401⁶⁾ ⑤ IAEA-TECDOC-1000⁹⁾ |
| 学会標準 | 米 米以外 | <ul style="list-style-type: none"> • 米 穀類として数値が示されている IAEA TRS No.364⁵⁾を基本とし、IAEA SRS No.19¹³⁾、IAEA SRS No.44¹²⁾、IAEA SS No.57⁸⁾、IAEA-TECDOC-401⁶⁾、IAEA-TECDOC-1000⁹⁾の順、これらにない場合は NUREG/CR-3585¹⁴⁾、ORNL-5786⁷⁾、NCRP-129¹⁵⁾の最大値を引用。 • 米以外 IAEA SRS No.19¹³⁾を基本とし、IAEA SRS No.44¹²⁾、IAEA SS No.57⁸⁾、IAEA-TECDOC-401⁶⁾、IAEA-TECDOC-1000⁹⁾の順、これらにない場合は NUREG/CR-3585¹⁴⁾、ORNL-5786⁷⁾、NCRP-129¹⁵⁾の最大値を引用。 |

※トレンチ処分及び余裕深度処分評価では、「米」、「葉菜、非葉菜、果実」と分類。ピット処分の農作物摂取量については、果実のみを想定。

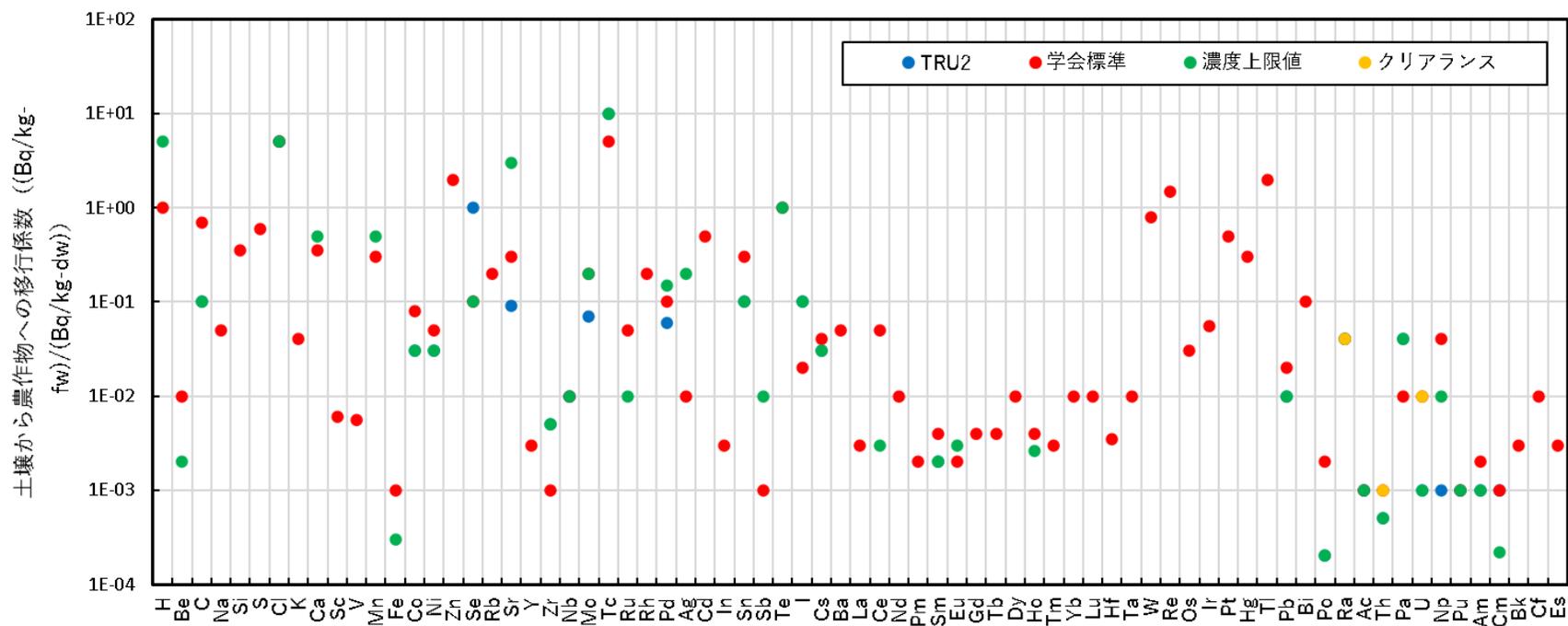


Fig. 2 各安全評価書に記載されている生活圈評価における土壌からの農作物への移行係数
 (TRU2 は根菜、濃度上限値は葉菜・非葉菜・果実、クリアランスは葉菜・非葉菜・果実、学会標準は米以外の移行係数)

3. 飼料から畜産物への移行係数

前述の日本の放射性廃棄物処分に係わる安全評価書に記載されている生活圏評価における飼料から畜産物への移行係数の設定状況を Table 3 に示す。また、これら評価における飼料から畜産物への移行係数の中で牛乳の設定値を Fig. 3 に整理した。

Table 3 日本の放射性廃棄物処分に係わる安全評価書に記載されている生活圏評価における飼料から畜産物への移行係数の設定方針

| 安全評価書 | 分類 | パラメータ設定方針 |
|-------|--|--|
| TRU2 | 牛肉 牛乳 豚肉 鶏肉 鶏卵 羊肉 牛レバー 鶏レバー | DOE/RW/88.083 ¹⁶⁾ 等、諸外国の文献より設定。 |
| 濃度上限値 | 牛肉 牛乳 豚肉 鶏肉 鶏卵 | 以下に示す文献に基づき選定。 <ul style="list-style-type: none"> • 牛肉、牛乳 <ol style="list-style-type: none"> ① IAEA-TECDOC-1380¹¹⁾ ② IAEA SS No.57⁸⁾ ③ IAEA-TECDOC-401⁶⁾ ④ NUREG/CR-3585¹⁴⁾ ⑤ NUREG/CR-2976¹⁷⁾ ⑥ PNL-3209¹⁸⁾ (NUREG/CR-3160¹⁹⁾) ⑦ IAEA TRS No.364⁵⁾ ⑧ IAEA-TECDOC-1000⁹⁾ ⑨ ORNL-5786⁷⁾ • 豚肉 <ol style="list-style-type: none"> ① IAEA SS No.57⁸⁾ ② IAEA-TECDOC-401⁶⁾ ③ NUREG/CR-3585¹⁴⁾ ④ NUREG/CR-2976¹⁷⁾ ⑤ PNL-3209¹⁸⁾ (NUREG/CR-3160¹⁹⁾) ⑥ IAEA TRS No.364⁵⁾ • 鶏肉 <ol style="list-style-type: none"> ① IAEA SS No.57⁸⁾ ② IAEA-TECDOC-401⁶⁾ ③ NUREG/CR-3585¹⁴⁾ ④ NUREG/CR-2976¹⁷⁾ ⑤ PNL-3209¹⁸⁾ (NUREG/CR-3160¹⁹⁾) |

| 安全評価書 | 分類 | パラメータ設定方針 |
|--------|----------------------------|--|
| | | ⑥ IAEA TRS No.364 ⁵⁾ • 鶏卵 ① NUREG/CR-2976 ¹⁷⁾ ② PNL-3209 ¹⁸⁾ (NUREG/CR-3160 ¹⁹⁾) ③ IAEA SM 237/54 ²⁰⁾ ④ IAEA TRS No.364 ⁵⁾ |
| クリアランス | 牛肉 牛乳 豚肉 鶏肉 鶏卵 | IAEA の文献に記載されている値より選定することを基本とし、以下に示す文献の順番で選定。 ① IAEA TRS No.364 ⁵⁾ ② IAEA SS No.57 ⁸⁾ ③ IAEA-TECDOC-401 ⁶⁾ ④ IAEA-TECDOC-1000 ⁹⁾ |
| 学会標準 | 牛肉 牛乳 豚肉 鶏肉 鶏卵 | IAEA SRS No.19 ¹³⁾ を基本とし、IAEA TRS No.364 ⁵⁾ 、IAEA SS No.57 ⁸⁾ 、IAEA-TECDOC-401 ⁶⁾ 、IAEA-TECDOC-1000 ⁶⁾ の順、これらにない場合は NUREG/CR-3585 ¹⁴⁾ 、ORNL-5786 ⁷⁾ 、NCRP-129 ¹⁵⁾ 、PNL-3209 ¹⁸⁾ (NUREG/CR-3160 ¹⁹⁾)、DOE/RW/88.083 ¹⁶⁾ の最大値を引用。 |

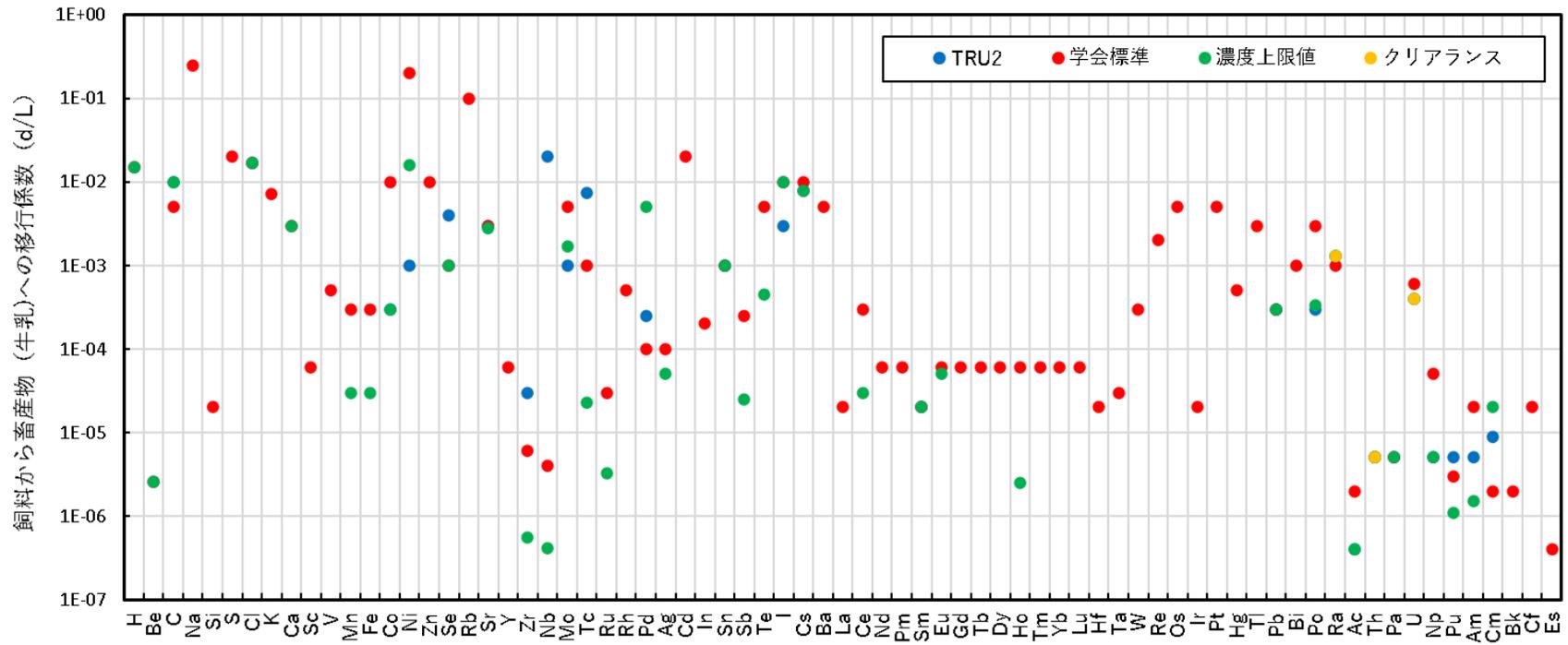


Fig. 3 各安全評価書に記載されている生活圏評価における飼料からの畜産物（牛乳）への移行係数

4. 水産物への濃縮係数

前述の日本の放射性廃棄物処分に係る安全評価書に記載されている生活圏評価における水産物の濃縮係数の設定状況を Table 4 に示す。また、濃度上限値およびクリアランスでは淡水魚類だけしか設定していないため、これら評価における淡水魚類の濃縮係数の設定値を Fig. 4 に整理した。

Table 4 日本の放射性廃棄物処分に係る安全評価書に記載されている生活圏評価における水産物の濃縮係数の設定方針

| 安全評価書 | 分類 | パラメータ設定方針 |
|--------|--|---|
| TRU2 | 淡水魚 淡水甲殻類 海水魚 海洋甲殻類 軟体動物 海藻 | 淡水産物については、諸外国の文献より設定。 海産物については、IAEA TRS No.247 ²¹⁾ 等、諸外国の文献より設定。 |
| 濃度上限値 | 淡水魚類 | 以下に示す文献に基づき選定。 ① IAEA-TECDOC-1380 ¹¹⁾ ② IAEA SS No.57 ⁸⁾ ③ IAEA-TECDOC-401 ⁶⁾ ④ NUREG/CR-3585 ¹⁴⁾ ⑤ UCRL-50564 Rev.1 ²²⁾ ⑥ IAEA TRS No.364 ⁵⁾ ⑦ IAEA-TECDOC-1000 ⁹⁾ |
| クリアランス | 淡水魚類 | IAEA の文献に記載されている値より選定することを基本とし、以下に示す文献の順番で選定。 ① IAEA TRS No.364 ⁵⁾ ② IAEA SS No.57 ⁸⁾ ③ IAEA-TECDOC-401 ⁶⁾ ④ IAEA-TECDOC-1000 ⁹⁾ |
| 学会標準 | 淡水魚類 淡水貝類 海水魚類 海水無脊椎動物 海藻類 | <ul style="list-style-type: none"> • 淡水産物 魚類については、IAEA SRS No.19¹³⁾を基本とし、IAEA SRS No.44¹²⁾、IAEA TRS No.364⁵⁾、IAEA SS No.57⁸⁾、IAEA-TECDOC-401⁶⁾、IAEA-TECDOC-1000⁹⁾、NCRP-123²³⁾の順に引用。 • 海産物 IAEA SRS No.19¹³⁾を基本とし、IAEA SS No.57⁸⁾、IAEA TRS No.422²⁴⁾、IAEA TRS No.247²¹⁾、NCRP-123²³⁾、UCRL-50564 Rev.1²²⁾の順に引用。 |

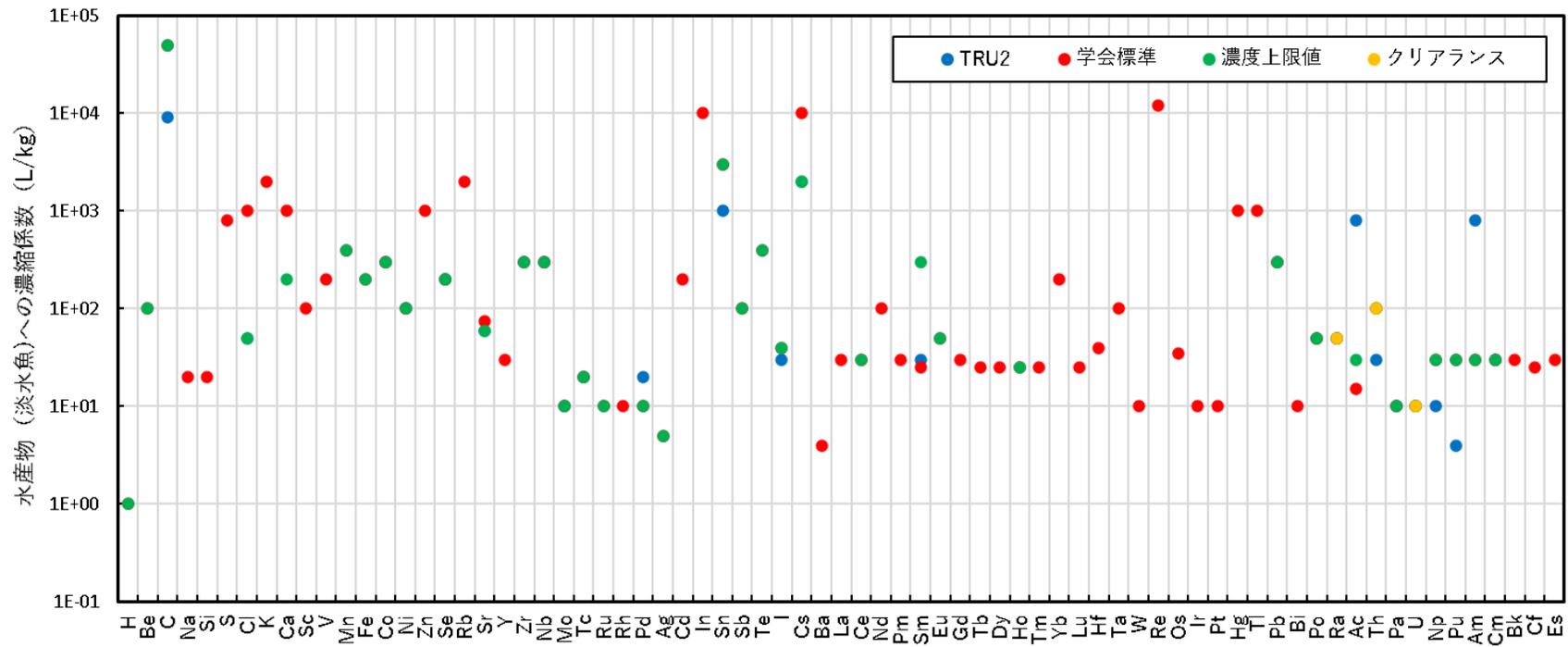


Fig. 4 各安全評価書に記載されている生活圈評価における水産物（淡水魚）への濃縮係数

III 結論

日本の放射性廃棄物処分に係る安全評価書に記載されている生活圏評価において使用されている種々のパラメータのうち、土壌の分配係数(表層土壌、農耕地)、土壌から農作物への移行係数、飼料から畜産物への移行係数、水産物への濃縮係数の設定方針を整理した。その結果、以下のよう
な結論が得られた。

- 土壌の分配係数については、いずれも IAEA TRS No.364⁵⁾を中心に設定している。ただし、TRU2 では砂の値を、濃度上限値、クリアランス、学会標準では有機土の値を参照している。
- 土壌から農作物への移行係数について、TRU2 では諸外国の種々文献から、パラメータ値を設定している。濃度上限値、クリアランス、学会標準については、IAEA レポートを基本として、パラメータ値を設定している。

TRU2 では、農作物を米・根菜・葉菜・穀物・果物と分類し、それぞれに対するパラメータ値を設定しているのに対して、濃度上限値、クリアランス、学会標準では米とそれ以外の農作物といった分類でパラメータ値を設定している。

- 飼料から畜産物への移行係数について、TRU2 では諸外国の種々文献から、パラメータ値を設定している。濃度上限値、クリアランス、学会標準については、IAEA レポートを基本として、パラメータ値を設定している。

調査対象とした日本の放射性廃棄物処分に係る安全評価における生活圏評価では、畜産物として牛肉・牛乳・豚肉・鶏肉・鶏卵を考慮している。TRU2 ではこれらに加えて羊肉や内臓類(牛レバー・鶏レバー)も考慮しており、各々に対してパラメータ値を設定している。

- 水産物への濃縮係数については、TRU2 では諸外国の種々文献から、パラメータ値を設定している。濃度上限値、クリアランス、学会標準については、IAEA レポートを基本として、パラメータ値を設定している。

濃度上限値及びクリアランスでは淡水魚類のみを評価対象としており、淡水魚の濃縮係数のみが提示されている。TRU2 や学会標準では、淡水魚類に加えて淡水貝類も評価対象となっており、さらには海産物についてもパラメータ値を設定している。

- IAEA レポートや参照している主だった文献は、いずれの生活圏評価においてもほとんど同じ文献である(例えば、IAEA TRS No.364⁵⁾、IAEA SS No.57⁸⁾、ORNL-5786⁷⁾、等)。

参考文献

- 1) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 (2005): TRU 廃棄物処分技術検討書ー第2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめー, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 556p.
- 2) 原子力安全委員会 (2007): 低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について.
- 3) 原子力安全委員会 (2009): ウラン取扱施設におけるクリアランスレベルについて, 248p.
- 4) ウラン取扱施設におけるクリアランスレベル日本原子力学会 (2017): 日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法 : 2016, AESJ-SC-F026:2016, 240p.

- 5) International Atomic Energy Agency/International Union of Radioecology (IAEA/IUR), Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments, Technical Reports Series No. 364, 1994, 74p.
- 6) International Atomic Energy Agency (IAEA), Exemption of Radiation Sources and Practices from Regulatory Control - INTERIM REPORT, IAEA-TECDOC-401, 1987, 139p.
- 7) Baes III C. F., Sharp R. D., Sjoreen A. L. and Shor R. W., A Review and Analysis of Parameters for Assessing Transport of Environmentally Released Radionuclides through Agriculture, ORNL-5786, 1984, 150p.
- 8) International Atomic Energy Agency (IAEA), Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases, Exposure of Critical Groups, IAEA Safety Series No.57, 1982, 96p.
- 9) International Atomic Energy Agency (IAEA), Clearance of materials resulting from the use of radionuclides in medicine, industry and research, IAEA-TECDOC-1000, 1998, 49p.
- 10) Smith, G. M., Fearn, H. S., Smith, K. R., Davis, J. P. and Klos, R., Assessment of the Radiological Impact of Disposal of Solid Radioactive Waste at Drigg, National Radiological Protection Board, NRPB-M148, 1988, 102p.
- 11) International Atomic Energy Agency (IAEA), Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities, IAEA-TECDOC- 1380, 2003, 144p.
- 12) International Atomic Energy Agency (IAEA), Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Report Series No.44, 2005, 131p.
- 13) International Atomic Energy Agency (IAEA), Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, IAEA Safety Report Series No.19, 2001, 216p.
- 14) O. I. Oztunali, G. W. Roles, De Minimis Waste Impacts Analysis Methodology, NUREG/CR-3585, 1984, pp.349-358.
- 15) National Council on Radiation Protection and Measurement (NCRP), Recommended Screening Limits for Contaminated Surface Soil and Review of Factors Relevant to Site-specific Studies, NCRP Report No.129, 1999, 362p.
- 16) Ashton, J. and Sumerling, T. J., Biosphere Database for Assessments of Radioactive Waste Disposals, UKDoE Report No. DoE/RW/88.083, 1988, 53p.
- 17) Ng, Y. C., Colsher, C. S. and Thompson, S. E., Transfer Coefficients for Assessing the Dose from Radionuclides in Meat and Eggs, NUREG/CR-2976, 1982, 108p.
- 18) Napier, B.A. et al., PABLM: a computer program to calculate accumulated radiation doses from radionuclides in the environment, PNL-3209, 1980, 205p.
- 19) M. Mills, D. Vogt and B. Mann, Parameters and Variables Appearing in Radiological Assessment Codes, NUREG/CR-3160, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1983.
- 20) IAEA SM 237, Y. C. Ng, C. S. Colsher and S. E. Thompson, Transfer Factors for Assessing the Dose from Radionuclides in Agricultural Products, 1979.

- 21) International Atomic Energy Agency (IAEA), Sediment Kds and Concentration Factors for Radionuclides in the Marine Environment, IAEA Tech. Rep. Series No. 247, 1985, 73p.
- 22) S. E. Thompson, C.A. Burton, D. J. Quinn and Y. C. Ng, Concentration Factors of Chemical Elements in Edible Aquatic Organisms, UCRL-50564 Rev.1, 1972, 77p.
- 23) National Council on Radiation Protection and Measurement (NCRP), Screening Models for Releases of Radionuclides to Atmosphere, Surface Water, and Ground, NCRP Report No.123, 1996, 205p.
- 24) International Atomic Energy Agency (IAEA), Sediment Distribution Coefficients and Concentration Factors for Biota in the Marine Environment, IAEA Technical Report Series No.422, 2004, 95p.

スウェーデンの短寿命放射性廃棄物処分場安全評価における 生活圏被ばく線量評価パラメータの考え方

Settings of biospheric dose assessment parameters in safety assessment for final repository of short-lived radioactive waste in Sweden

加藤 智子^{1)*}

Tomoko KATO^{1)*}

1) (国研) 日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 基盤技術研究開発部

1) Department of Geological Disposal Research, Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development, Japan Atomic Energy Agency

*Corresponding author, E-mail: kato.tomoko@jaea.go.jp

In order to extract the knowledge that will be helpful in setting the biospheric dose assessment parameters and their database for safety assessment of radioactive waste disposal in Japan, a methodology of setting the biospheric dose assessment parameters was surveyed in the safety assessment of the radioactive waste disposal in Sweden. In this study, the handling in the biospheric dose assessment in SR-PSU was specifically focused. SR-PSU was the project about the safety assessment for final repository of short-lived radioactive waste in Sweden, SFR.

KEYWORDS: biospheric dose assessment parameters, SFR, short-lived radioactive waste, final repository

I はじめに

放射性廃棄物処分の安全評価では、処分場の安全性を示すための指標として、処分に由来して受ける被ばく線量を用いており、これを定量的に算出するための手法を生活圏被ばく線量評価と位置づけている。生活圏被ばく線量評価では、多くの環境パラメータが用いられる。特に、元素の特性によって値が異なるパラメータ（以下、元素固有パラメータ）は、環境条件によって大きく変動するとともに、パラメータの種類によっては、被ばく評価結果への影響が比較的大きい可能性がある。また、元素固有パラメータは、元素やパラメータごとに設定されることから、それに資する数多くのデータを取り扱う必要が生じる。さらに、処分場サイトが特定された段階では、現地において取得されたデータ（以下、サイトデータ）に加えて、処分場サイトに類似した環境条件において取得された既存のデータ（以下、文献データ）が活用される可能性がある。数多くのデータの中から、評価の目的に適したパラメータを選択するためには、設定のための基本的な方針や手順が明確であるとともに、パラメータの設定根拠が追跡可能であることが望ましい。

そこで、我が国の生活圏被ばく線量評価パラメータ設定及びそれに資するデータベース作成にあたって参考となる知見を抽出するため、事業の段階にあるスウェーデンの放射性廃棄物処分安全評

価において、生活圏被ばく線量評価の元素固有パラメータをどのように設定しているかを調査した。本調査では、特に、スウェーデンにおける短寿命放射性廃棄物処分の安全評価に関するプロジェクト（以下、SR-PSU）の生活圏被ばく線量評価での取り扱いを対象とした。

II スウェーデンにおける放射性廃棄物の区分と放射性廃棄物処分の現況

スウェーデンにおける放射性廃棄物の分類と処分の現況を Table 1 に示す。原子力発電所や原子力施設、産業・研究開発・医療利用により発生した放射性廃棄物については、極低レベル放射性廃棄物、短寿命放射性廃棄物、長寿命中低レベル放射性廃棄物、原子力発電所から発生する使用済燃料に分類され、それぞれ適切な方法により処分される^{1),2)}。各放射性廃棄物の最終処分に関しては、実施主体であるスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（以下、SKB 社）が行うこととなっている。

短寿命放射性廃棄物については、ストックホルムの北約 150 km にあるフォルスマルクに処分される。短寿命放射性廃棄物処分場（以下、SFR）はフォルスマルク原子力発電所の沖合約 3 km の海底下、深さ 60 m の岩盤に建設されている。1988 年から操業を開始し、今後本格化する原子力発電所の廃止措置に伴う廃棄物に備えるために、2014 年に SFR の拡張計画の申請を行い、2023 年建設開始予定となっている³⁾。

III SR-PSU における生活圏被ばく線量評価

1. 地表環境における核種移行の概念と生活圏被ばく線量評価に用いられるパラメータ

SR-PSU では、2014 年に申請した拡張部分を含む SFR 全体の長期的な安全性を評価することを目的としている¹⁾。生活圏被ばく線量評価においては、被ばく線量算出に必要な地表環境での核種移行のモデル化及びパラメータ設定を行っている。概略を以下に説明する。

生活圏被ばく線量評価で対象とする領域として、大きく分けて、陸域環境と水域環境を考慮している（Fig. 1 参照）。海底下に建設されている SFR からの放射性核種が放出される可能性がある地表の領域には、淡水の湖や汽水湖が含まれるため、ここでの水域環境としては、淡水・海水の両方を考えている。地表環境での気体、水、固相の移行や核種の存在形態の変化、土壌間隙水中での拡散、植物の生長に伴う放射性核種の移行をモデル化し、処分場から地表環境への核種流入に伴う各環境媒体（土壌、水域、生物）における放射性核種の存在量を算出して、各媒体を利用した居住・生産活動等を行うことによる被ばく線量を算出する⁴⁾。

生活圏被ばく線量評価において用いられているパラメータは以下のとおりである。なお、SR-PSU では、処分に由来して人間が受ける被ばく線量評価のほか、環境への放射線影響評価の観点から人間以外の生物種への被ばく線量評価を行っている。

- ・ 放射性核種固有パラメータ
- ・ 地形の形状に係るパラメータ
- ・ 表土の特徴に係るパラメータ
- ・ 水文に係るパラメータ
- ・ 元素固有パラメータ

- ・ 水域生態系に係るパラメータ
- ・ 陸域生態系に係るパラメータ
- ・ 人間の生活習慣に係るパラメータ
- ・ 人間以外の生物種に係るパラメータ

Table 1 Classification of radioactive waste and current status of radioactive waste disposal in Sweden^{1),2)}

| Classification of radioactive waste | Source | Repository | Current status |
|-------------------------------------|---|--|---|
| Very low-level radioactive waste | Industry, research and medical care | On-site repository at Studsvik | In operation |
| | Nuclear power plant (operation) | On-site repository in nuclear power plant at Forsmark, Oskarshamn and Ringhals | |
| | Nuclear power plant (decommissioning) | Not decided | Not decided |
| Short-lived radioactive waste | Industry, research and medical care | Final repository SFR at Forsmark | <ul style="list-style-type: none"> - Operation started in 1988 - Licence application to expand SFR submitted in 2014 - Construction of extended facility started in 2023 (planned) |
| | Nuclear power plant (operation and decommissioning) | | |
| Long-lived radioactive waste | Industry, research and medical care | Final repository SFL | <ul style="list-style-type: none"> - Interim storage at each site of nuclear power plants, interim storage facility (CLAB) and Studsvik - Operation started in 2045 (planned) |
| | Nuclear power plant (operation and decommissioning) | | |
| Spent nuclear fuel | Nuclear power plant | Final repository at Forsmark | <ul style="list-style-type: none"> - Licence application submitted in 2011 - Trial operation started in 2030 (planned) |

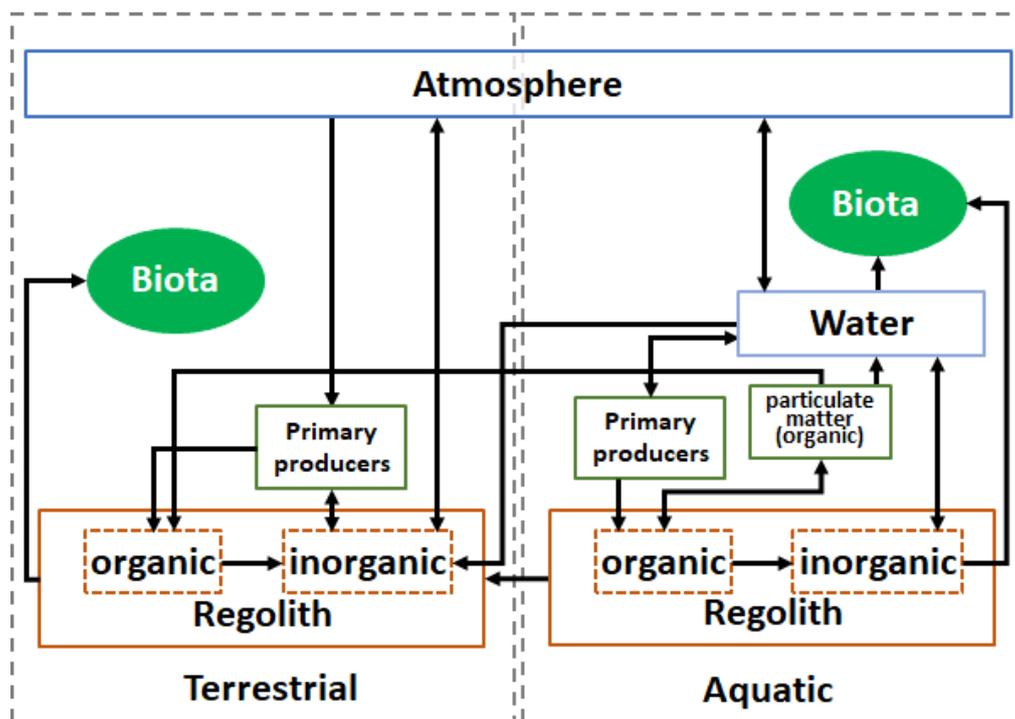


Fig.1 A schematic representation of the radionuclide transport model used in biospheric dose assessment of SR-PSU

2. 生活圏被ばく線量評価パラメータの設定の考え方

ここでは、SR-PSU 生活圏被ばく線量評価におけるレポート⁵⁾に示される、土壌の分配係数（以下、 K_d ）や植物／生物相への濃縮係数（以下、CR）といった元素固有パラメータの設定の考え方について述べる。Fig. 2 に、元素固有パラメータの設定プロセスの概略を示す。パラメータ設定は、大きく分けて以下の3つのステップに分けられる。

(1) ステップ1：データの選択（Data selection）

「データの選択」は、以下の2つのサブタスクに分けられる。

①ステップ1-1： K_d やCRデータのコンパイル（ K_d /CR data compilation）

サイトデータや文献調査により得られたデータの中から選択されたものが、被ばく線量評価で用いる各パラメータに割り当てられる。サイトデータは、SFRがあるフォルスマルクと、フォルスマルクに類似した環境のラクセマル - シンペバープで取得されている。文献データは、IAEAの Technical Reports Series や ICRP Publication 等さまざまなデータソースから抽出される。また、ここには、欧州原子力共同体プロジェクトである ERICA のデータベースも含まれる。ERICA では、欧米での環境生物へのリスク評価の関心の高まりを受けて、人間以外の生物種（Non-human biota）への放射線影響の評価手法が検討されており、植物や生物相に関するデータが収集されている。文献データのソースは、サイト環境への該当性が高い順にL1からL4までクラス分けされ、どのクラスにどの文献データのソースが当てはまるかは、パラメータごとに定義される。

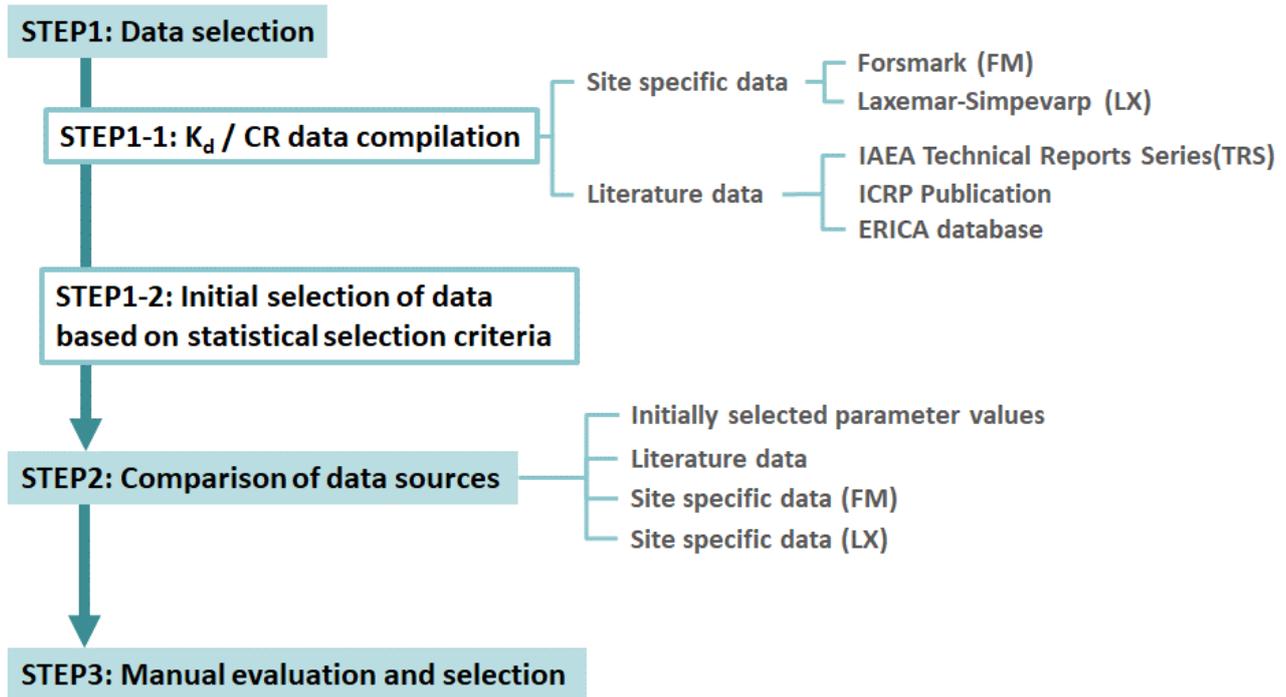


Fig. 2 Setting process for element-specific parameters in biospheric dose assessment

②ステップ 1-2: 統計的選択基準に基づく初期データの選択 (Initial selection of data based on statistical selection criteria)

このサブタスクを実行するにあたっては、サイトデータ及び文献データの全体から、好ましいデータの変動幅をあらかじめ整理しておく。そして、一つ目のサブタスクにおいて被ばく線量評価で用いる各パラメータに割り当てられたサイトデータや文献データのばらつきを、好ましいデータの変動幅と比較し、適切でない場合には調整を行う。好ましいデータの変動幅は、サイトデータもしくは文献データの数に応じて定義されており、フローチャートに沿って判断をすることで、適切に設定されることとなる。

(2) ステップ 2 : データソースの比較 (Comparison of data sources)

ステップ 1 で選択されたパラメータ値について、複数のデータソースとの比較により、その適切性をチェックする。比較の方法は、以下のとおりである。

- ・ 最初に選択されたパラメータ値と文献データの比較
- ・ サイトデータと文献データの比較
- ・ サイトデータ間 (フォルスマルクとラクセマル - シンペバープ) の比較
- ・ 異なるクラス (L1 から L4 まで) の文献データ間の比較
- ・ 他の元素で採用されているデータソースとの比較 (データソースが混在する際の一貫性の担保のため)

(3) ステップ3：最終的なパラメータ値の評価と選択 (Manual evaluation and selection)

ステップ1及び2で、クライテリアに応じて取捨選択された初期データに対して、最終的なパラメータ値の評価と選択がなされる。この評価と選択には、人間による判断が含まれることから、“Manual evaluation and selection”と呼ばれる。

設定されたパラメータ値が、サイトデータであるか、文献データであるか、それらと他のデータソースとの適合性かどうか、データがない場合、他の元素や他のパラメータのアナログが設定できるかなどを確認し、Table 2に示す11のカテゴリーにあてはめる。すべての評価対象元素のすべての元素固有パラメータに対して評価と選択を行い、パラメータの設定状況を整理する。

Table 2 The different classifications describing the relative confidence in parameter values based on the origin of data, results of sense checks and analogue assumptions

| Classification | Description |
|----------------|--|
| SO | Site data used, > 50% overlap with literature data |
| SV | Site data used, < 50% overlap with literature data |
| SX | Site data used, no comparisons with literature data possible |
| SM | Site data used, variation > GSDmax |
| EA | Element analogue is used |
| PA | Parameter analogue is used |
| EP | Element and parameter analogue is used |
| LO | Literature data are used, overlap with other literature data |
| LV | Literature data are used, no overlap with other literature data |
| LX | Literature data are used, no comparisons with other literature data possible |
| OV | Manual override |

3. 生活圏被ばく線量評価パラメータの設定状況

前述の手法に基づくパラメータの設定状況について、いくつかの例を示す。

(1) 表面土壌の分配係数 (K_d)

Fig. 4にセシウム (Cs)、ヨウ素 (I)、プルトニウム (Pu) について、土壌の種類ごとの K_d の幅を示す。グラフの横軸は土壌の種類を示しており、io/garden、drain が農耕土壌や庭土、ter が peat (泥炭) にあたる。Cs と I はフォルスマルクのサイトデータが採用されており、Table 2 に示すデータのカテゴリーとしては、SO (サイトデータが用いられており、文献データとの一致が 50% 超) や SV (サイトデータが用いられており、文献データとの一致が 50% 以下) に該当する。Pu に関しては、ウラン (U) がアナログとして用いられており、Table 2 に示すデータのカテゴリーとしては、EA となる。グラフの縦軸は K_d の変動幅を示しており、それぞれの元素、土壌の種類ごとに、1~3 桁程度の幅となっている。

(2)農作物への移行係数

Fig. 5 に Cs、I、Pu について、農作物の種類ごとの移行係数の幅を示す。グラフの横軸は野菜の種類を示しており、veg が葉菜、cereal が穀物、tuber がジャガイモ、タマネギ等である。veg と tuber に関してはフォルスマルクのサイトデータがないため、文献データを採用しており、Table 2 に示すデータのカテゴリーとしては、LO (文献データが用いられており、他の文献データと一致する) や LX (文献データが用いられており、比較可能な他の文献データがない) に該当する。cereal に関しては、Cs と I がフォルスマルクのサイトデータを採用しており、Table 2 に示すデータのカテゴリーとしては、SO (サイトデータが用いられており、文献データとの一致が 50%超) や SM (サイトデータが用いられておりデータの変動幅がステップ 1-2 で整理した好ましい変動幅を超える) に該当する。Pu は U をアナログとして用いており、Table 2 に示すデータのカテゴリーとしては、EA となる。I の tuber に関しては、IAEA Technical Reports Series (TRS)⁶⁾のデータを採用しているが、当該文献には、tuber の値がひとつしかなかったため、root vegetable の値で代用しており、“Manual evaluation & selection”に基づくエキスパートジャッジメントが入っていることから、Manual override (OV) というカテゴリーになっている。グラフの縦軸はそれぞれの種類の農作物への移行係数の変動幅を示しており、サイトデータや文献データが採用されている場合には、その変動幅は 2~3 桁程度である。一方、U のアナログデータが用いられている Pu の cereal に関しては、5 桁程度と他のデータと比較して変動幅が大きくなっている。U の cereal は、Table 2 に示すデータのカテゴリーで SM (サイトデータが用いられており、データの変動幅がステップ 1-2 で整理した好ましい変動幅を超える) に該当しており、Cs の cereal と同様、パラメータ値の変動幅が大きくなっている。

(3)水産物（魚類）への濃縮係数

Fig. 6 に Cs、I、Pu について、海水魚 (Sea_fish) と淡水魚 (Lake_fish) の移行係数の幅を示す。魚類に関して、Cs と I はフォルスマルクとラクセマル - シンペバープ双方のサイトデータが採用されており、Table 2 に示すデータのカテゴリーとしては、SO (サイトデータが用いられており、文献データとの一致が 50%超)、SV (サイトデータが用いられており、文献データとの一致が 50%以下)、SX (サイトデータが用いられており、比較可能な他の文献データがない) に該当する。Pu は ICRP Publication 114⁷⁾や IAEA TRS472⁶⁾の文献データが採用されており、Table 2 に示すデータのカテゴリーとしては、LO (文献データが用いられており、他の文献データと一致する)、LV (文献データが用いられており、他の文献データと一致しない) に該当する。

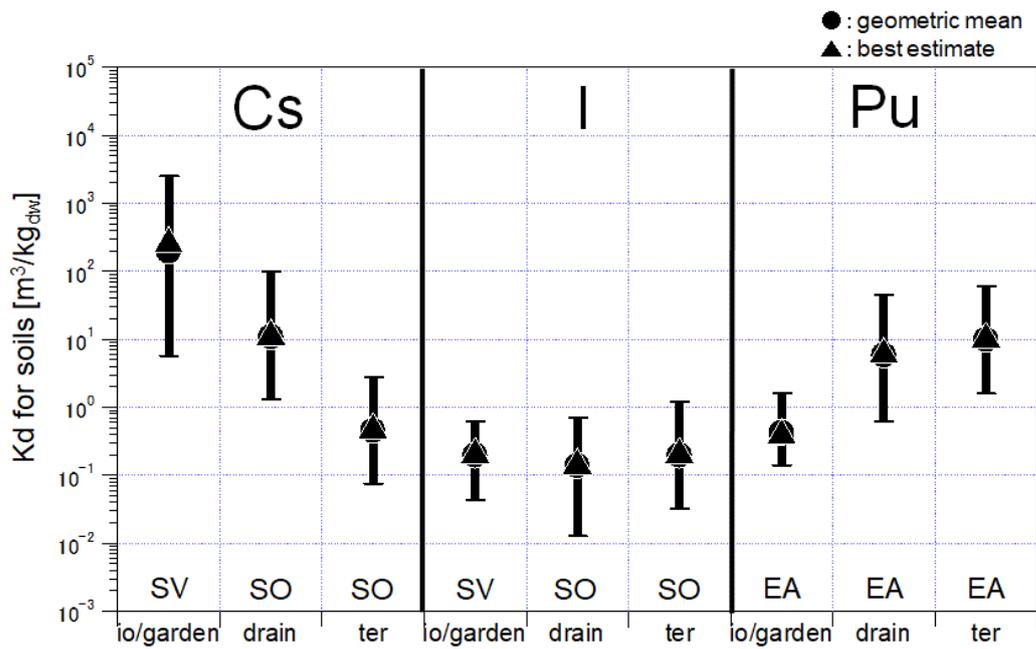


Fig. 4 K_d for several kinds of soils used in biospheric dose assessment of SR-PSU

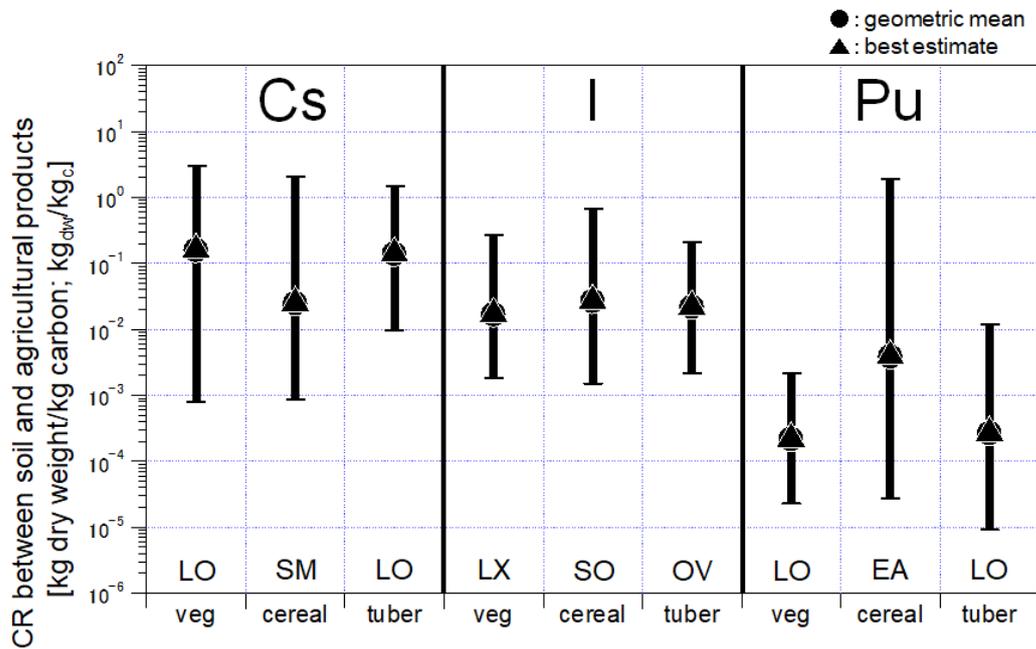


Fig. 5 CR between soil and several kinds of agricultural products used in biospheric dose assessment of SR-PSU

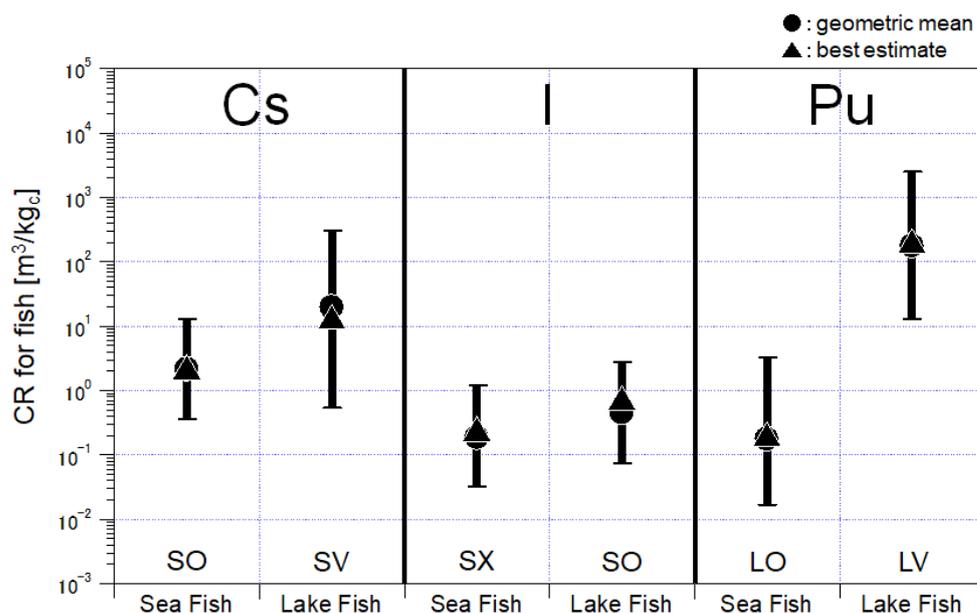


Fig. 6 CR for fish in lake/marine water used in biospheric dose assessment of SR-PSU

IV おわりに

SR-PSU 生活圏被ばく線量評価では、透明性かつ追跡性を有するパラメータ設定プロセスを採用し、 K_d 及びCR データで約 2,000 に及ぶサイトデータ及び文献データを吟味することで、評価に必要なパラメータセットを適切に設定した。特に K_d とCR は、サイト環境の影響を大きく受けるパラメータであり、サイトデータを活用してパラメータセットを設定することが重要である。また、設定したパラメータ値について、複数のデータソース（類似した複数のサイトで取得したデータや、複数の文献データ）による比較により、設定値の妥当性を議論することで信頼性を向上させた。

パラメータの信頼性は、結果として得られる安全評価結果に影響する。サイトデータを始めとした複数のデータソースの活用によるパラメータの不確実性低減は特に重要である。

我が国においても、生活圏被ばく線量評価パラメータ設定に資する国内のデータベースの整備が進められている⁸⁾。処分場サイトが特定された段階では、サイトデータに加えて、既存のデータベースの活用により、説明性の高いパラメータ値を設定することが求められる。また、パラメータ設定に際しては、プロセスの透明性及び追跡性が求められることから、本報に示したような手法を参考に、標準的なパラメータ設定手法を構築していく必要がある。

参考文献

- 1) SKB, "Safety analysis for SFR. Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU." TR-14-01, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2015.
- 2) https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_14-05-04-05.html, Accessed 21 December 2020.
- 3) <https://www.rwmc.or.jp/disposal/low-level/fr.html>, Accessed 21 December 2020.

- 4) S. Grolander, “Biosphere parameters used in radionuclide transport modelling and dose calculations in SR-PSU.” R-13-18, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2013.
- 5) M. Tröjbom, S. Grolander, V. Rensfeldt and S. Nordén, “ K_d and CR used for transport calculations in the biosphere in SR-PSU.” R-13-01, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2013.
- 6) IAEA, “Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments.” IAEA Technical Reports Series No. 472, 2010.
- 7) ICRP, “Environmental protection: Transfer parameters for reference animals and plants.” Annals of the ICRP 39(6), ICRP Publication 114, 2009.
- 8) 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所；放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性核種生物圏移行評価高度化開発 5年間（平成25年度～平成29年度）のまとめ 平成30年3月.

フィンランド TURVA-2012 における 生活圏被ばく線量評価パラメータの考え方

Review of procedure for setting biospheric parameters used for dose assessment in TURVA-2012 of Finland

中林亮^{1)*}

Ryo NAKABAYASHI^{1)*}

1) (一財) 電力中央研究所 原子力技術研究所 放射線安全研究センター

1) Radiation Safety Research Center, Nuclear Technology Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry

*Corresponding author, E-mail: r-naka@criepi.denken.or.jp

The procedure for setting the biosphere parameters, that is, distribution coefficients (K_d) to soils, concentration ratios from soil to edible crops, concentration ratios from freshwater to fish and concentration ratios from seawater to fish, used in the dose assessment for humans in the biosphere assessment of the Safety Case Report (TURVA-2012) of Finland was reviewed. As a result, it became clear that the geometric mean and geometric standard deviation of the biosphere parameters should be set as the input of the dose assessment. In addition, for each biosphere parameter, the geometric mean and geometric standard deviation were set using site-specific data obtained around Olkiluoto and the literature data that correspond to the site conditions of Olkiluoto. Regarding K_d to soils, it is presumed that the K_d setting is made in consideration of changes in the soil characteristics during the biosphere dose assessment time window of 10000 years.

KEYWORDS: TURVA-2012, radioactive waste disposal, biosphere assessment, distribution coefficients for soils, concentration ratios for edibles.

I はじめに

放射性廃棄物処分に係わる生活圏での被ばく線量評価では、多くの環境パラメータが用いられる。これらのパラメータの入力値は評価の目的等に応じ、その不確実性を考慮して適切に設定する必要があるが、元素の種類によって値が異なるパラメータ（元素依存パラメータ）は、特に環境条件によって大きく変動し、かつ、被ばく評価結果への影響が比較的大きい可能性がある。よって、元素依存パラメータは、評価対象地域の環境条件を十分に考慮した上で、適切なパラメータ値を設定することが必要である。わが国では、高レベル放射性廃棄物の処分地選定に向け調査が進められてい

る段階だが、処分地が決まればその地域の環境条件を踏まえてパラメータを設定することになるだろう。しかしながら、パラメータの設定の考え方については評価者間での十分な共通認識に至っていない。そこで本報では、わが国の放射性廃棄物処分に係わる生活圏での被ばく線量評価の一助とすべく、高レベル放射性廃棄物の処分地選定を終え、処分場の建設と操業に向けて事業が進んでいるフィンランドの事例に着目し、特定の処分地を対象（サイトスペシフィック）とした場合における生活圏の被ばく線量評価で用いられる環境パラメータの設定の考え方を調査・整理することを目的とする。

II 調査内容

フィンランドではオルキオ島の地下約 400m の結晶質岩中に使用済み燃料を直接処分する計画である。処分実施主体である Posiva 社は 2012 年に建設許可申請書の政府への提出にあわせてセーフティケースに関する報告書（TURVA-2012）を規制機関に提出した。2015 年に建設許可が発給されており、2021 年現在建設中である。セーフティケースとは様々な証拠、解析、論拠等に基づいて処分システムが長期的に安全であることを体系的に示すものである。TURVA-2012 は 14 の報告書群から構成されており、本報では「生活圏評価 BSA-2012 のデータベース (Data Basis for the Biosphere Assessment BSA-2012) ¹⁾」に着目し、土壌の分配係数、農作物の濃度比、水産物の濃度比のパラメータの設定方法の考え方について調査した。

II 調査結果

1. 土壌の分配係数の設定

土壌の分配係数 (K_d) は「バッチ収着試験のデータ」、「in-situ 試験のデータ」、「文献データ」の 3 つに基づき設定している。ここで特徴的な点は、バッチ収着試験と in-situ 試験では性質の異なる土壌を用いたことである。バッチ収着試験ではオルキオ島の young soil（古くても数千年程度の土壌）を用い、in-situ 試験ではオルキオ島を含む広範なリファレンスエリアの old soil（湖沼や湿原の土壌）を用いている。オルキオ島は今から 2500-3000 年前に海底の隆起によって出現し、現在も 1 年間当り 5-10mm の速さで隆起が進んでいる。old soil は現在のオルキオ島ではほとんど存在しないが、将来の隆起作用等による環境変化によって生じ得るものと考えられている。報告書 ¹⁾には、「オルキオ島の大半は young soil だが、長期の安全評価期間 (10,000 年) を踏まえると土地の隆起に伴う環境変化を考える必要がある。old soil に関するデータは、オルキオ島の将来の土壌のアナログデータとして用いることができる。」との記載がある。以下に、バッチ収着試験データと in-situ 試験データ、文献データの取得方法、評価に用いる K_d の設定方法について概説する。

(1) バッチ収着試験

放射性トレーサーとオルキオ島の young soil サンプルを用いてバッチ収着試験を実施した。サンプルは前処理等をせずに用いるものと、乾燥処理後に様々な粒径に分画したものを用意した。実験環境は好気性と嫌気性でそれぞれ実施し、収着試験には土壌間隙水を模擬した溶液を用いている。バッチ収着試験の詳細は Söderlund *et al.* ²⁾を参照されたい。Table 1 に一例として、humus（腐植土）

を用いた、I-125 のバッチ収着試験データを示す。「Realistic K_d value」は取得した I-125 の K_d の幾何平均である。なお、幾何標準偏差については、両報告書^{1),2)}ともに記載はなかった。

Table 1 Range of distribution coefficient (K_d ; m^3/kg) determined for I-125 on Olkiluoto soil samples in the sorption tests and recommended minimum and realistic K_d values to be used in the biosphere dose assessment of spent fuel. This table was created on the basis of Table 15-18 in Ref.¹⁾.

| Soil type | K_d range [m^3/kg] | Minimum K_d value [m^3/kg] | Realistic K_d value [m^3/kg] |
|-----------|--------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Humus | 0.01–4.368 | 0.01 | 0.46 |

(2). in-situ 試験

50 ml 容器に採取した old soil サンプルをミリ Q 水で飽和させて室温で 1 週間インキュベートした。インキュベート後、サンプルを 5000 rpm で 15 分間遠心分離し、抽出した間隙水をシリンジで採取し、 $0.45 \mu m$ フィルターでろ過して溶液分析に供した。in-situ 試験の方法はスウェーデンの SKB の報告書 (Sheppard *et al.*³⁾) に記載されたものに類似している。Table 2 に一例として、腐植土を用いた I-125 の in-situ 試験データを示す。これらのデータを統計処理すると、幾何平均 $0.030 m^3/kg$ と幾何標準偏差 $1.6 m^3/kg$ が求まる。

Table 2 Site data on distribution coefficient (K_d ; $(mg/kg)/(mg/m^3)$, dry weight) for soil samples from Olkiluoto and Reference Area. This table was created on the basis of Table 15-21 in Ref.¹⁾.

| Soil type | Sampling location | K_d $(mg/kg)/(mg/m^3)$ |
|-----------|-------------------|--------------------------|
| Humus | Plot OL-MRK1 (#1) | 0.017 |
| | Plot OL-MRK1 (#2) | 0.017 |
| | Plot OL-MRK3 | 0.034 |
| | Plot OL-MRK5 | 0.027 |
| | Plot OL-MRK8 | 0.039 |
| | Cranberry plot | 0.060 |

(3). 文献データ

文献で示される K_d の選択にはいくつかの点に留意して抽出する必要があるとしている。具体的には、データ取得条件が不明なもの、データがフィッティングや推論によって取得されたもの、データの取得条件が異なるもの（短寿命同位体や、滅菌サンプル、フィンランドと異なる気候地域など）は除外して設定する必要があるとしている。

(4). 評価に用いる分配係数の設定

上述した 3 つのデータのうち、「バッチ収着試験データ」と「in-situ 試験データ」を優先的に採用して K_d を設定する。なお、バッチ収着試験データと in-situ 試験データがない場合は「文献データ」を参照して設定する。設定した K_d の一例（腐植土）を Table 3 に示す。Ag の場合は、バッチ収着

試験データが存在しないため、in-situ 試験データ（サンプル数 6）から統計処理によって算出した幾何平均と幾何標準偏差を K_d として用いている。I の場合は、バッチ収着試験データと in-situ 試験データの両方が利用可能である。バッチ収着試験データが示す変動幅は in-situ 試験データの変動幅を包含しており、バッチ収着試験データの「Realistic K_d value」を幾何平均として採用している。なお、幾何標準偏差としては、in-situ 試験データの幾何標準偏差を評価に用いている。

評価に用いる幾何標準偏差として in-situ 試験データを採用する理由については今回の調査からは明らかにできていないが、young soil と old soil の両方のデータ (K_d) が参照可能な場合、互いのデータの変動性を比較している点特徴的と言える。すなわち、現時点のオルキルオトの土壤が 1,000 年程度という young soil である一方で、安全評価期間は 10,000 年と長期間に亘ることを踏まえ、将来の土壤特性の変化のアナログとなり得る old soil のデータと比較することで、長期の時間変動（土壤特性の変化）を考慮した K_d 設定になるもの推測される。

Table 3 Derived values for distribution coefficients (K_d), (Bq/kg)/(Bq/m³) in dry weight, to humus for the dose assessment for humans in the biosphere assessment BSA-2012. GM, geometric mean; GSD, geometric standard deviation. This table was created on the basis of Table 15-24 in Ref. ¹⁾.

| | Ag | Cl | I | Mo | Nb | Se |
|-----|-----|-------|------|------|------|------|
| GM | 2.3 | 0.008 | 0.46 | 0.95 | 0.87 | 0.24 |
| GSD | 1.5 | 1.3 | 1.6 | 1.7 | 2.3 | 2.2 |

2. 農作物の濃度比

農作物の濃度比は、オルキルオトの農場や商業庭園から採取した実サンプルのデータと文献データに基づき設定している。実サンプルのデータについては、オルキルオトの農場や商業庭園の穀物、人参、レタス、アカスグリ、クロスグリ、ズッキーニが対象とされている。採取した植物サンプルは 50°C で乾燥後、硝酸/フッ化水素溶液で全溶解した後に ICP-SFMS にて元素分析が実施され、同様に採取した土壤サンプルは酢酸アンモニウム溶液によって生物摂取可能な (bioavailable) 元素濃度を分析するとともに、メタホウ酸リチウム融剤や硝酸/フッ化水素溶液で全溶解した元素濃度を分析して各農作物の濃度比を算出している。詳細については Helin *et al.*⁴⁾ を参照されたい。

文献データとしては IAEA のデータ (Sanzharova *et al.*⁵⁾) を始めとした複数の文献を対象としている。文献データを集約するにあたって、いくつかのデータは除外される。ヨウ素を例にすると、短寿命核種 (I-125 と I-131) のデータは除外され、また、青森県全域の 150 の農場から取得されたデータはフィンランドとの環境条件の違いから除外される。さらに、データの起源が不明なものは除外される。

設定された濃度比の一例 (穀物) を Table 4 に示す。ヨウ素については、IAEA のデータ⁵⁾ や、カナダのデータ (Sheppard *et al.*⁶⁾)、スウェーデンのデータ (Sheppard *et al.*⁷⁾) に記載された値から選定しており、最終的には茎を除いた「可食部」に着目したデータを選定し、リファレンスデータを含めた統計処理によって幾何平均と幾何標準偏差を算出している。具体的には、サンプル数 (N) が示す回数分、幾何平均の値をリストして、値を対数スケール (自然対数 Ln) に変換して、算術

平均 (AM) と標準偏差 (std) を算出する。その後、 e^{AM} と e^{std} を算出して、それらを線形スケールに戻すことによって幾何平均と幾何標準偏差を算出している。なお、サンプル数について記載がない場合は、単一サンプル (N=1) として計算している。また、最大値と最小値については評価の保守性を考慮して、bioavailable なデータを含めて設定している。

Table 4 Derived values for concentration ratios from soil to edible parts of cereals, ($\mu\text{g}/\text{kg}$)/($\mu\text{g}/\text{kg}$) of dry weight of soil, for the dose assessment for humans in the biosphere assessment BSA-2012. GM, geometric mean; GSD, geometric standard deviation; N, number of samples. This table was created on the basis of Table 19-88 in Ref. ¹⁾.

| Element | Nominal | GM | GSD | Min. | Max | N |
|---------|---------|--------|-----|---------|--------|----|
| Ag | 0.11 | 0.11 | 2.2 | 0.016 | 0.39 | 6 |
| Cl | 6.8 | 6.8 | 1.8 | 6.7 | 19 | 6 |
| I | 0.0014 | 0.0014 | 3.4 | 0.00063 | 0.15 | 19 |
| Mo | 0.72 | 0.72 | 4.8 | 0.63 | 34 | 7 |
| Nb | 0.0014 | 0.0014 | 6.0 | 0.00082 | 0.0037 | 6 |
| Se | 0.031 | 0.031 | 3.4 | 0.0031 | 0.35 | 4 |

3. 水産物の濃度比

(1). 水産物の濃度比 (淡水魚類)

オルキルトの淡水魚類サンプルは取得済みであるものの、分析が完了していないため掲載しないと報告書¹⁾に記載があった。そのため、水産物の濃度比 (淡水魚類) については文献データから設定している。文献データとしては IAEA のデータ (Sanzharova *et al.*⁵⁾) を始めとした複数の文献を対象としている。文献データを集約するにあたって、いくつかのデータは除外される。ヨウ素を例にとると、短寿命核種 (I-125 と I-131) のデータは除外される。また、フィンランドの魚種と異なるデータや、データの追跡性が乏しいものは除外される。

設定された濃度比を Table 5 に示す。設定については、多くの元素で IAEA のデータ⁸⁾ およびカナダのデータ (Sheppard *et al.*⁹⁻¹¹⁾; Nordén *et al.*¹²⁾) に記載された値から選定している。例えば、ヨウ素については IAEA のデータ⁸⁾ とカナダのデータ⁹⁻¹¹⁾を対象とすること最も合理的な選択肢としている。これは、サンプル数が多く、データの変動性をカバーできるものと判断したためである。これらのデータの中で、IAEA のデータはカナダのデータよりも値が大きく保守的な評価につながると考え、幾何平均と幾何標準偏差ともに IAEA のデータから設定している。最小値と最大値は参照した文献データ (除外した文献のデータは除く) から設定している。

Table 5 Derived values of concentration ratios from fresh water to edible parts of fish, ($\mu\text{g}/\text{kg}$)/($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of fresh weight, for the dose assessment for humans in the biosphere assessment BSA-2012. GM, geometric mean; GSD, geometric standard deviation. This table was created on the basis of Table 19-93 in Ref. ¹⁾.

| Element | Fish group | Nominal | GM | GSD | Min. | Max. |
|---------|------------|---------|----|-----|------|------|
|---------|------------|---------|----|-----|------|------|

| | | | | | | |
|----|-------------|-------|-------|-----|---------|-------|
| Ag | all | 0.11 | 0.11 | 1.5 | 0.0004 | 0.21 |
| Cl | all | 0.11 | 0.11 | 1.3 | 0.0089 | 0.12 |
| I | forage fish | 0.29 | 0.29 | 2.5 | 0.033 | 0.16 |
| | benthic | 0.055 | 0.055 | 1.9 | 0.20 | 0.40 |
| | piscivorous | 0.024 | 0.024 | 1.4 | 0.011 | 0.32 |
| | other fish | 0.030 | 0.030 | 9.1 | 0.00011 | 0.40 |
| Mo | all | 0.009 | 0.009 | 3.9 | 4.0E-6 | 0.020 |
| Nb | all | 0.03 | 0.03 | 2.7 | 0.0068 | 0.03 |
| Se | all | 1.6 | 1.6 | 3.7 | 0.010 | 9.4 |

(2). 水産物の濃度比（汽水魚類）

バルト海（汽水域）の魚類の可食部の濃度比については、オルキルト周辺でのデータ（Kangasniemi and Helin¹³⁾）と文献データから設定している。なお、文献については海水域の魚類のデータ等が除外され、結果としてSKBのデータ（Torudd¹⁴⁾）のみが対象とされた。

設定された濃度比をTable 6に示す。設定については、濃度比の設定については元素ごとに設定され、ヨウ素の場合はオルキルト周辺のニシンの可食部（muscle）における濃度比が、他の魚類や文献に示された値よりも大きく保守的な評価につながると考え、幾何平均をオルキルト周辺のデータ¹³⁾から設定している。幾何標準偏差も同様な考えで、文献に示された最も高い値から設定されている。最小値と最大値はオルキルト周辺でのデータと参照した文献データ（除外した文献のデータは除く）から設定している。

Table 6 Derived values for concentration ratios from seawater to edible parts of fish, ($\mu\text{g}/\text{kg}$)/($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of fresh weight, for the dose assessment for humans in the biosphere assessment BSA-2012. GM, geometric mean; GSD, geometric standard deviation. This table was created on the basis of Table 19-107 in Ref. ¹⁾.

| Element | Fish group | Nominal | GM | GSD | Min. | Max. |
|---------|------------|---------|--------|-----|---------|--------|
| Ag | all | 0.5 | 0.5 | 4.2 | — | — |
| Cl | all | 0.0013 | 0.0013 | 1.7 | 0.00007 | 0.0018 |
| I | all | 0.14 | 0.14 | 2.1 | 0.0099 | 0.21 |
| Mo | all | 0.017 | 0.017 | 1.8 | 0.0016 | 0.026 |
| Nb | all | 0.014 | 0.014 | 1.6 | 0.011 | 0.016 |
| Se | all | 14 | 14 | 1.6 | 2.8 | 20 |

III 調査結果のまとめ

本報ではフィンランドのセーフティケースに関する報告書（TURVA-2012）における、生活圈評価で用いられた環境パラメータ（土壌の K_d 、農作物の濃度比、水産物の濃度比）の設定の考え方について調査した。その結果、TURVA-2012の環境パラメータは幾何平均や幾何標準偏差が評価の入

力として設定されていることが明らかになった。また、いずれの環境パラメータも処分地であるオルキルオト周辺のデータやオルキルオトの環境と合致する文献データから幾何平均や幾何標準偏差が設定されていた。土壌の K_d については、オルキルオトの土壌が 1,000 年程度という young soil であり、安全評価期間は 10000 年と長期間に亘ることを踏まえ、将来の土壌特性の変化のアナログとなり得る old soil のデータと比較することで、長期の時間変動（土壌特性の変化）を考慮した K_d 設定がなされているものと推測される。わが国への適用を考えた場合、長期の時間変動を考慮すべきか否かを処分形態（トレンチ処分・ピット処分・中深度処分・地層処分）に応じて合理的に判断することが肝要と思われる。

参考文献

- 1) Posiva Oy, "Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Data Basis for the Biosphere Assessment BSA-2012", POSIVA 2012-28, Posiva Oy, (2014).
- 2) M. Söderlund, M. Lusa, S. Virtanen, I. Välimaa, M. Hakanen and J. Lehto, "Distribution Coefficients of Caesium, Chlorine, Iodine, Niobium, Selenium and Technetium on Olkiluoto Soils", Working Report 2013-69, Posiva Oy, (2014).
- 3) S. Sheppard, J. Long, B. Sanipelli and G. Sohlenius, "Solid/liquid partition coefficients (K_d) for selected soils and sediments at Forsmark and Laxemar-Simpevarp", Report R-09-27, SKB, (2009).
- 4) J. Helin, A.T.K. Ikonen and T. Salo, "Crops and garden products near Olkiluoto repository site", Radioprotection. 46[6], pp. 35–41, (2011).
- 5) N. Sanzharova, O. Shubina, H. Vandenhove, G. Olyslaegers, S. Fesenko, S.R. Shang, E. Reed and H. Velasco, "Root uptake: temperate environment. In: Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments", IAEA-TECDOC-1616. IAEA, (2009).
- 6) S.C. Sheppard, J. Long and B. Sanipelli, "Field measurements of the transfer factors for iodine and other trace elements", Report TR-2009-35. NWMO, (2009).
- 7) S. Sheppard, G. Sohlenius, L-G. Omberg, M. Borgiel, S. Grolander and S. Nordén, "Solid/liquid partition coefficients (K_d) and plant/soil concentration ratios (CR) for selected soils, tills and sediments at Forsmark", Report R-11-24. SKB, (2011).
- 8) T. Yankovich, "Transfers to freshwater biota. In: Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments", IAEA-TECDOC-1616. IAEA, (2009).
- 9) S.C. Sheppard, M.I. Sheppard, J.C. Tait and B.L. Sanipelli, "Revision and meta-analysis of selected biosphere parameter values for chlorine, iodine, neptunium, radium, radon and uranium", Journal of Environmental Radioactivity, 89[2], pp.115–137, (2006).
- 10) S.C. Sheppard, J. Long and B. Sanipelli, "Field measurements of the transfer factors for iodine and other trace elements", Report TR-2009-35, NWMO, (2009).
- 11) S.C. Sheppard, J.M. Long and B. Sanipelli, "Measured elemental transfer factors for boreal hunter/gatherer scenarios: fish, game and berries", Journal of Environmental Radioactivity, 101[11], pp. 902–909, (2010).

- 12) S. Nordén, R. Avila, I. de la Cruz, K. Stenberg and S. Grolander, "Element-specific and constant parameters used for dose calculations in SR-Site", Technical Report TR-10-07, SKB, (2010).
- 13) V. Kangasniemi, J. Helin, "Studies on the aquatic environment at Olkiluoto and Reference Area: 1. Olkiluoto, reference lakes and Eurajoki and Lapijoki Rivers in 2009-2010", Working Report 2013-65, Posiva Oy, (2014).
- 14) J.Torudd, "Long term radiological effects on plants and animals of a deep geological repository. SR-Site Biosphere", Technical Report TR-10-08, SKB, (2010).

環境移行パラメータの追跡調査結果とデータ比較 (1)

(土壌-農作物移行係数)

Parameter follow-up survey results and data comparison (1) (Soil-crop transfer coefficients)

深谷友紀子^{1)*}、内田滋夫^{1,2)}

Yukiko FUKAYA¹⁾ and Shigeo UCHIDA^{1,2)}

1) 日本エヌ・ユー・エス (株)

2) (国研) 量子科学技術研究開発機構

1) Japan NUS Co., Ltd.

2) National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

*Corresponding author, E-mail: fukaya@janus.co.jp

KEYWORDS: transfer coefficient; soil-to-crop transfer; environmental dose assessment.

I はじめに

生活圏被ばく評価で使用する環境移行パラメータの一つである土壌から農作物への移行係数は、元素の特性、土壌・作物の種類、土壌の性質等に依存するため、評価対象サイトの環境条件に応じた設定が必要である。これらパラメータについては、国際機関によるテクニカルレポートや様々な学術研究の成果等が利用可能であるが、全ての元素・核種に対するデータがそろっているわけではない。なお、数値の根拠として引用されている文献においては、数値の設定根拠が記載されていないことがある。また、特に年代的にも古い引用文献や、他の学術研究の成果を引用している場合、データの測定条件等が不明確であることが多い。一方で、近年の研究により、日本を始め多くの国や地域で、環境パラメータの取得が進められている。

そこで、土壌から農作物への移行係数（野菜）について、ヨウ素、セシウム、プルトニウムを調査対象元素とし、日本の放射性廃棄物処分に係わる安全評価における生活圏評価での設定値の出典追跡調査を行った。さらに、既往の評価でのパラメータ設定値と最新データの文献調査結果（国内外）の比較を実施した。

II 生活圏被ばく評価に用いられる環境移行パラメータの出典追跡調査

出典追跡調査の対象とする資料（一次資料）は、下記の3つのレポートとする。

- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 (2005): TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU

廃棄物処分研究開発取りまとめー, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02. ¹⁾ (以下、「TRU2」)

- 原子力安全委員会 (2007): 低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について.²⁾ (以下、「濃度上限値」)
- 日本原子力学会 (2017): 日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法 : 2016, AESJ-SC-F026:2016. ³⁾ (以下、「学会標準」)

1. ヨウ素について

Fig. 1 に TRU2 における農作物（根菜）への移行係数の出典追跡結果を、Fig. 2 に学会標準・濃度上限値における農作物（野菜）への移行係数の出典追跡結果を示す。

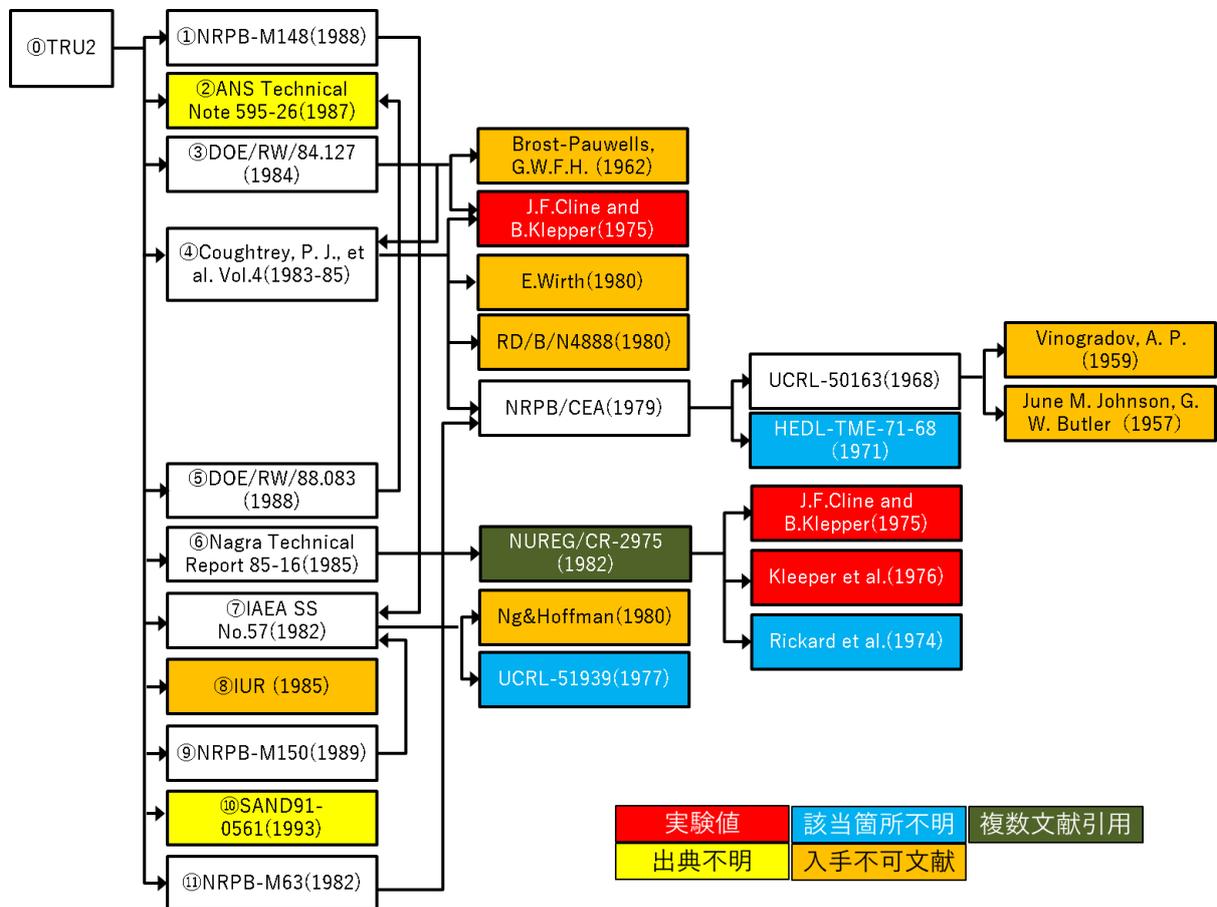


Fig. 1. TRU2 における農作物（根菜）への移行係数の出典追跡結果（ヨウ素）

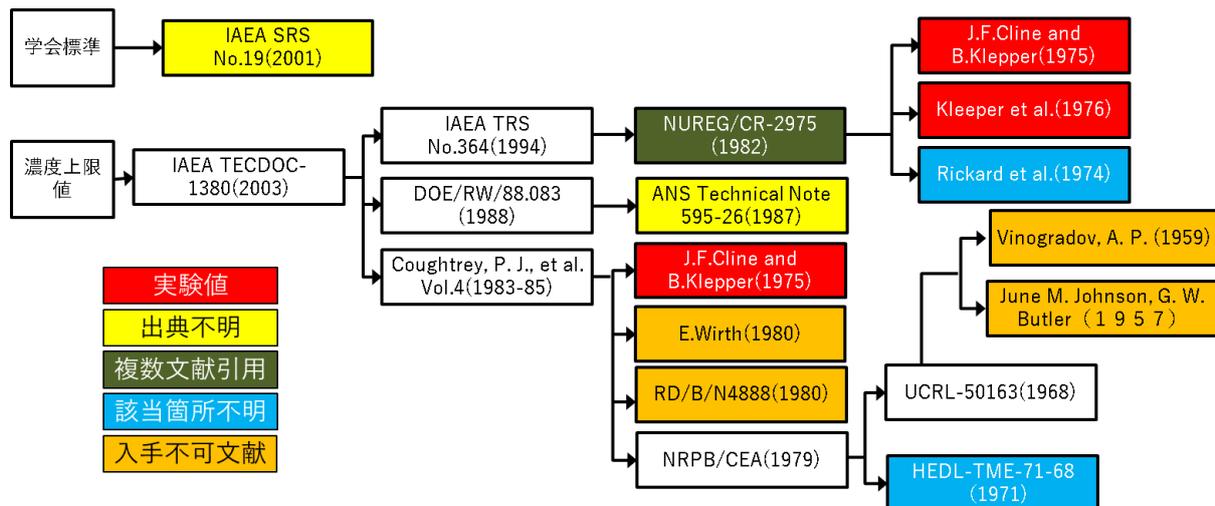


Fig. 2 学会標準・濃度上限値における農作物（野菜）への移行係数の出典追跡結果（ヨウ素）

TRU2 では、Fig. 1 に示した複数の文献（①～⑪）における値の範囲の平均的な値を採用している。TRU2 での設定値及び TRU2 で参照している複数の文献での設定値を Fig. 3 に示す。TRU2 で参照している文献での設定値には、2桁程度の範囲（0.0056～0.7）があった。

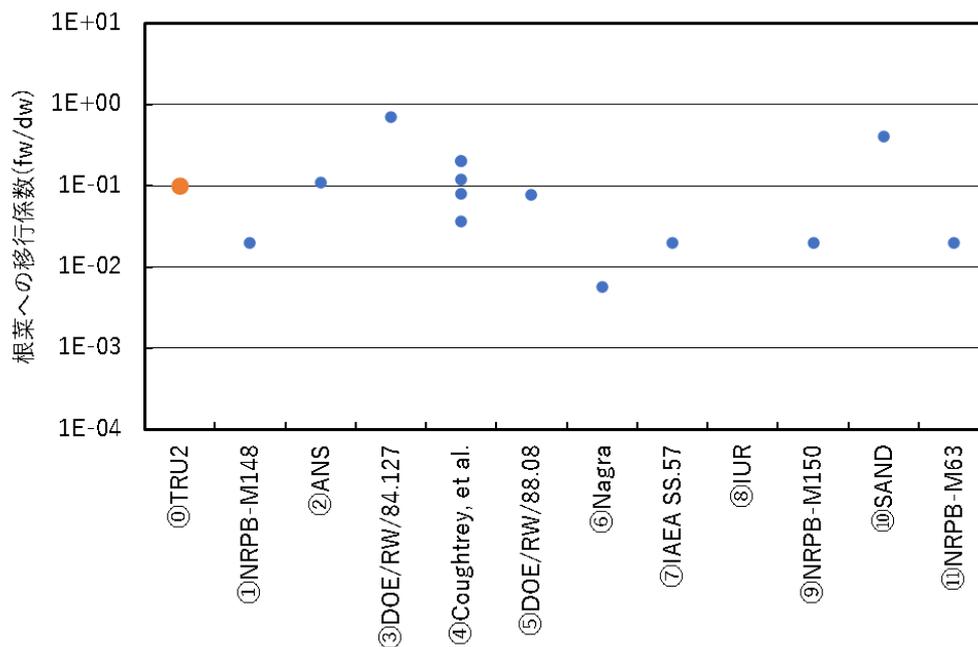


Fig. 3 TRU2 での設定値及び TRU2 で第 1 引用として参照している文献での値（ヨウ素）

また学会標準では、野菜（米以外）への移行係数は、IAEA SRS No.19⁴⁾を基本として設定しているが、その他の複数の文献も参照している。これら文献値での設定値を Fig. 4 に示す。IAEA レポートでは同じ値（0.02）となっているが、その他のレポートでの設定値は、0.0045～0.15 の範囲にあった。

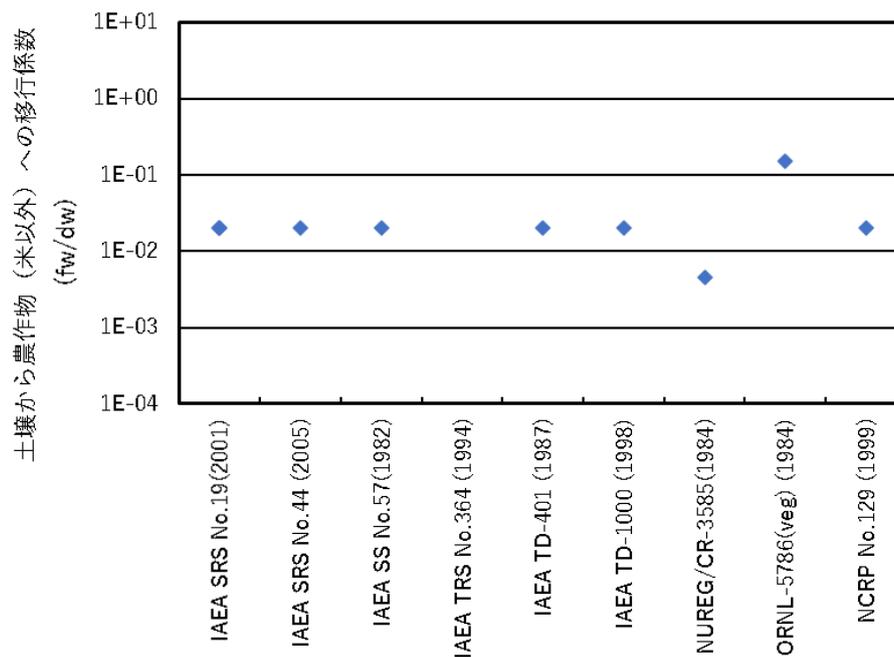


Fig. 4 学会標準で参照している文献での値 (ヨウ素)

さらに追跡調査の結果から、数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値を Fig. 5 に整理した。Fig. 5 では、◆は独自データ (実験データやモデルからの導出、等)、◇解釈データ (種々文献をレビューし、当該レポートの著者等による解釈により設定、等)、●一次資料のデータを表す。一次資料での設定値 (TRU2 : 0.1、濃度上限値 : 0.1、学会標準 : 0.02) は、数値が掲載されている最終文献での値の範囲内 (0.0014~0.4) であった。

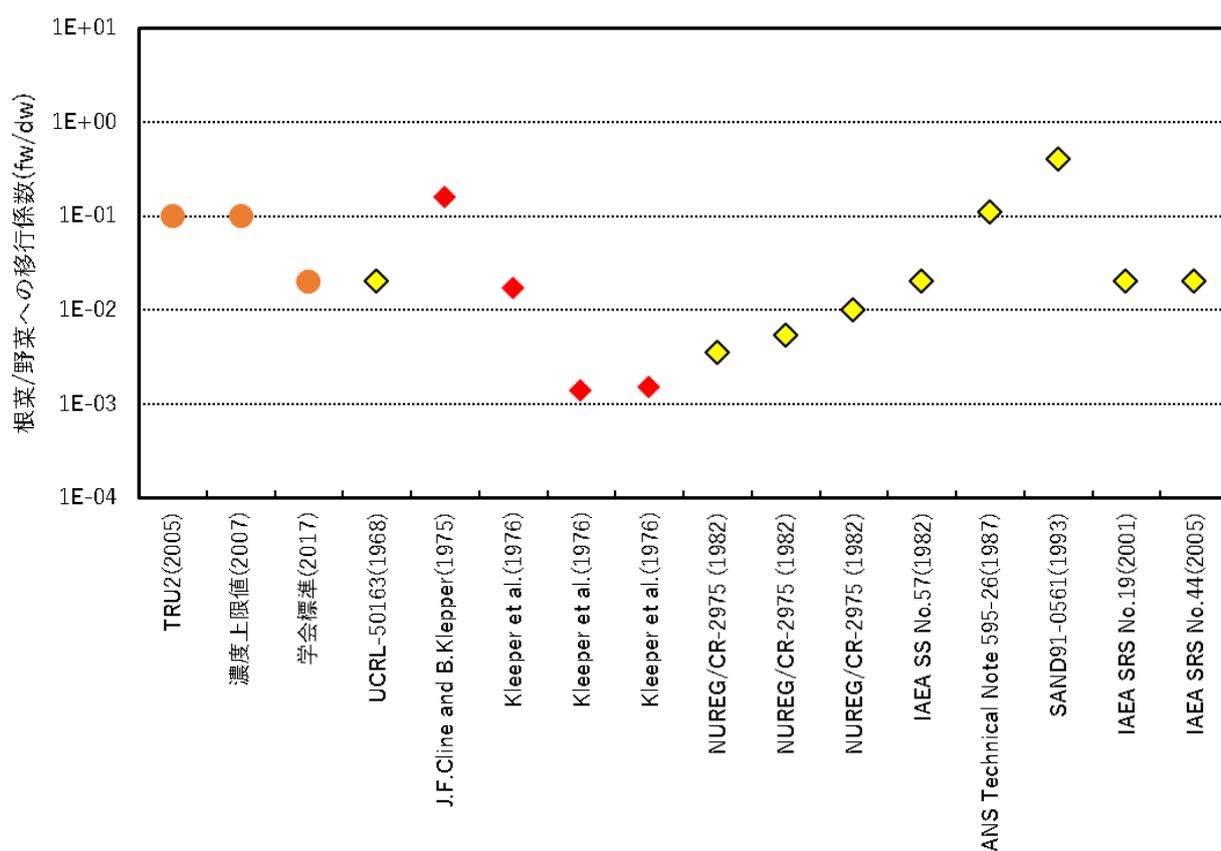


Fig. 5 数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値（ヨウ素）

2. セシウムについて

Fig. 6 に TRU2 における農作物（根菜）への移行係数の出典追跡結果を、Fig. 7 に学会標準・濃度上限値における農作物（野菜）への移行係数の出典追跡結果を示す。

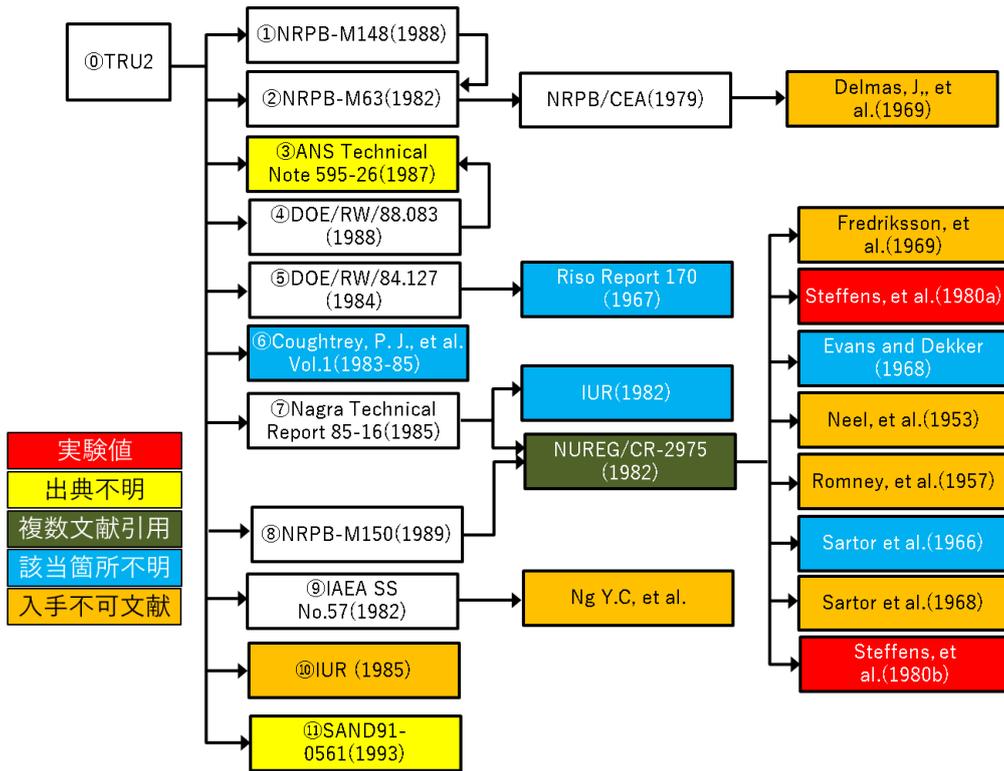


Fig. 6. TRU2 における農作物（根菜）への移行係数の出典追跡結果（セシウム）

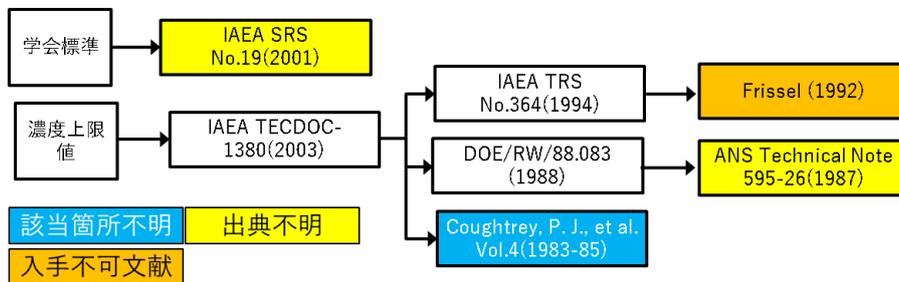


Fig. 7 学会標準・濃度上限値における農作物（野菜）への移行係数の出典追跡結果（セシウム）

ヨウ素と同様にセシウムについても、TRU2 では、Fig 6.に示した複数の文献（①～⑪）における値の範囲の平均的な値を採用している。TRU2 での設定値及び TRU2 で参照している複数の文献での設定値を Fig. 8 に示す。TRU2 で参照している複数の文献では、0.005～0.5 の範囲の値が設定されていた。

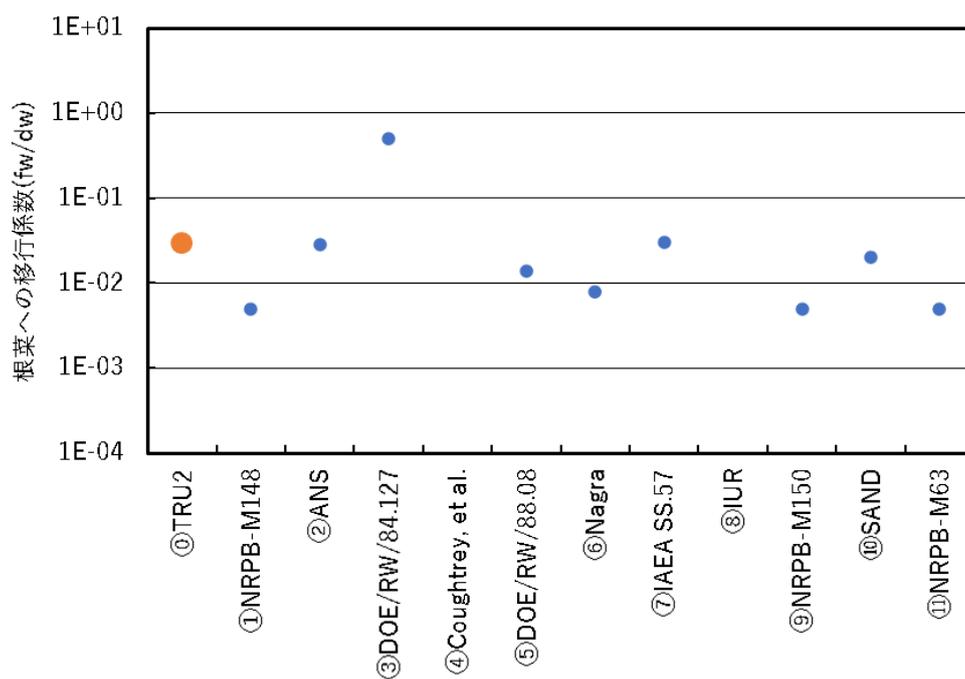


Fig. 8 TRU2 で第 1 引用として参照している文献での値 (セシウム)

また、学会標準では野菜(米以外)への移行係数は、ヨウ素と同様にセシウムについても IAEA SRS No.19⁴⁾を基本として設定しているが、その他の複数の文献も参照している。これら文献値での設定値を Fig. 9 に示す。IAEA レポート及び NUREG レポートを除くレポートでは、 10^{-2} オーダーの値が設定されている。

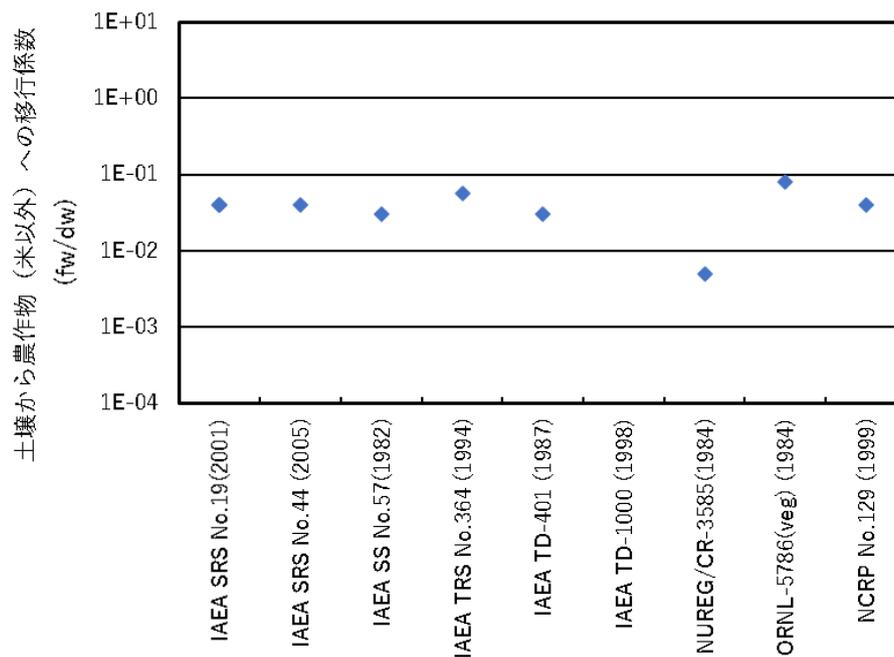


Fig. 9 学会標準で参照している文献での値（セシウム）

さらに追跡調査の結果から、数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値を Fig. 10 に整理した。Fig. 10 では、◆は独自データ（実験データやモデルからの導出、等）、◆解釈データ、●一次資料のデータを表す。一次資料での設定値はいずれも近い値を設定していた（TRU2：0.03、濃度上限値：0.03、学会標準：0.04）。一次資料での設定値は、数値が掲載されている最終文献での値の範囲内（0.0004～0.5）であり、多くの文献でも近似した数値が掲載されていた。

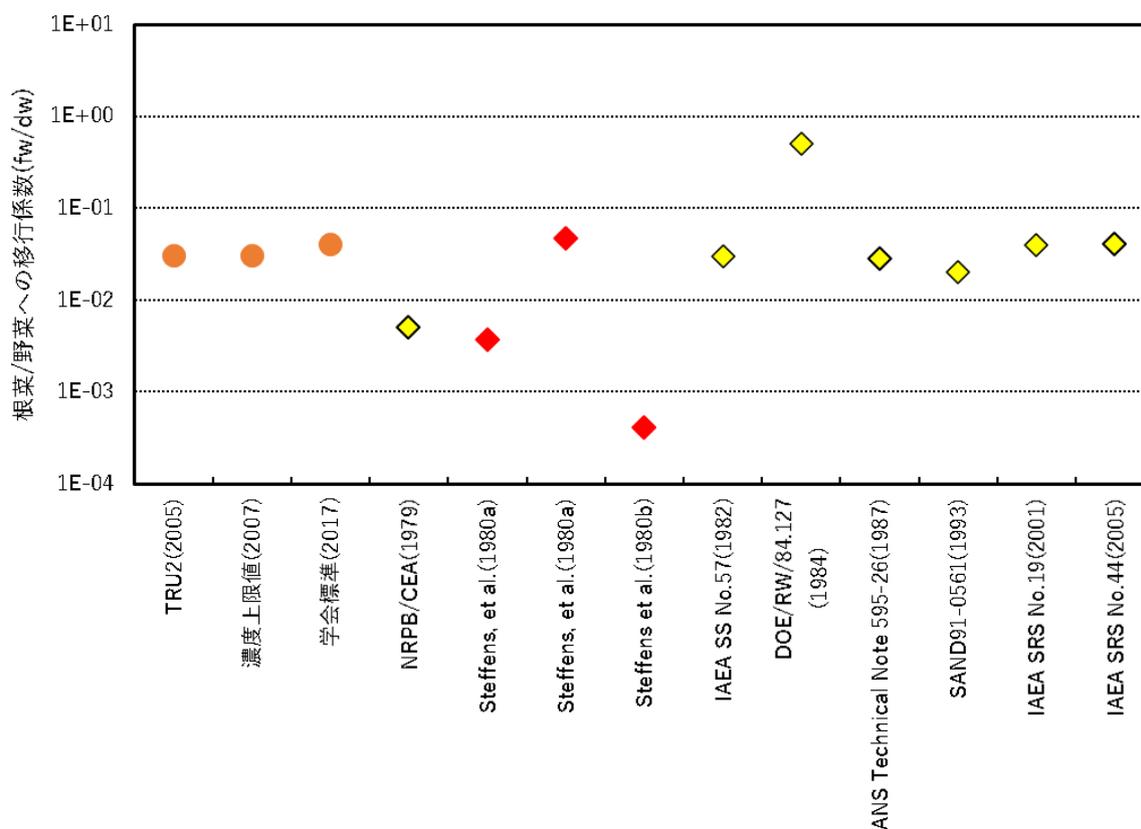


Fig. 10 数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値（セシウム）

3. プルトニウムについて

Fig. 11 に TRU2 における農作物（根菜）への移行係数の出典追跡結果を、Fig. 12 に学会標準・濃度上限値における農作物（野菜）への移行係数の出典追跡結果を示す。

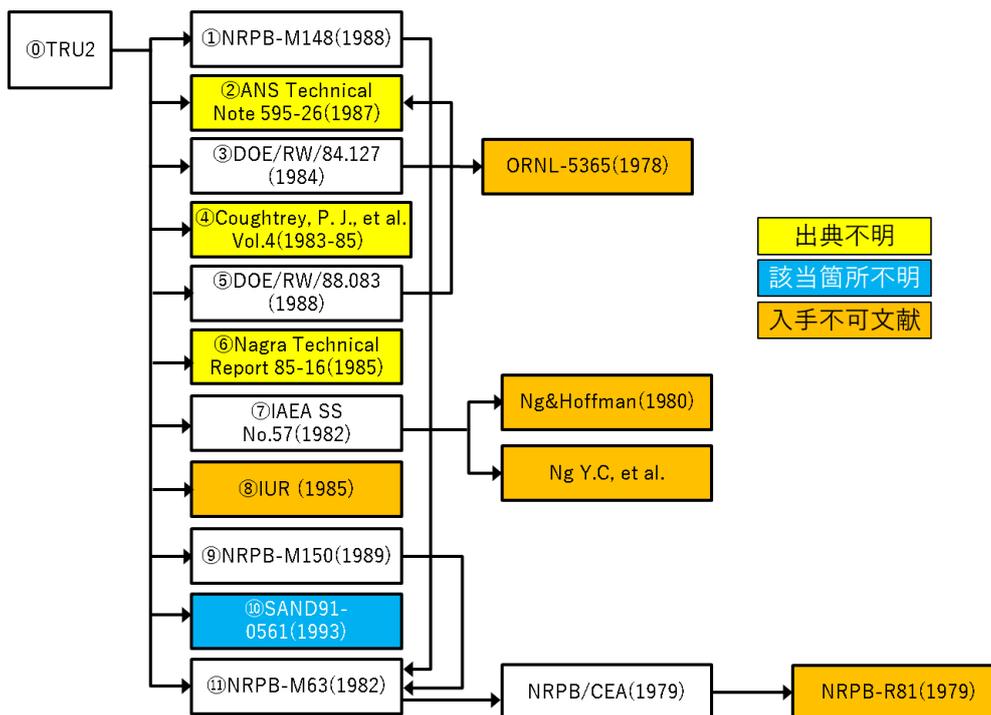


Fig. 11. TRU2 における農作物（根菜）への移行係数の出典追跡結果（プルトニウム）

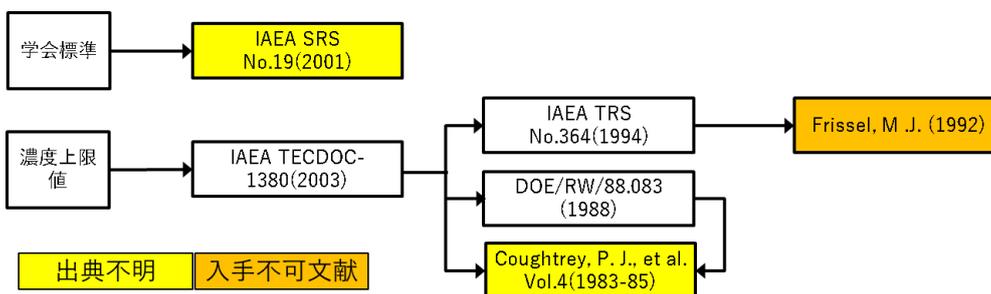


Fig. 12 学会標準・濃度上限値における農作物（野菜）への移行係数の出典追跡結果（プルトニウム）

ヨウ素やセシウムと同様にプルトニウムについても、TRU2 では、Fig 11.に示した複数の文献 (①～⑪) における値の範囲の平均的な値を採用している。TRU2 での設定値及び TRU2 で参照している複数の文献での設定値を Fig. 13 に示す。ほとんどのレポートで 10^{-3} オーダーの値が設定されているが、DOE レポートのみ非常に大きい値 (10) が設定されていた。ただし、この値は単位不明である。

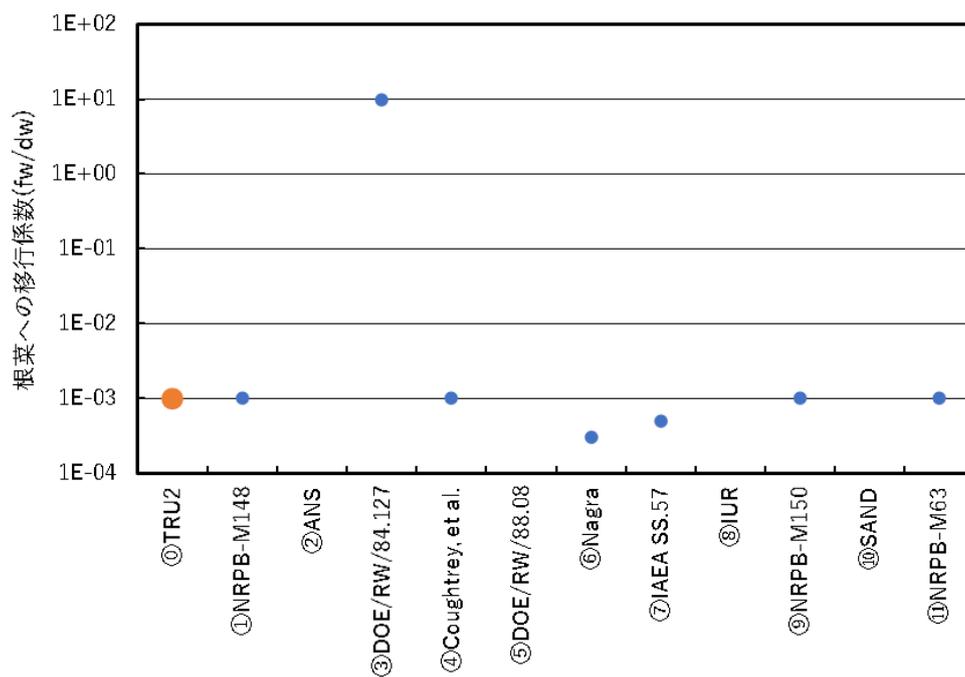


Fig. 13 TRU2 で第 1 引用として参照している文献での値 (プルトニウム)

また、学会標準では野菜（米以外）への移行係数は、ヨウ素やセシウムと同様にプルトニウムについても IAEA SRS No.19⁴⁾を基本として設定しているが、その他の複数の文献も参照している。これら文献値での設定値を Fig. 14 に示す。学会標準で参照しているいずれのレポートでも、プルトニウムの移行係数は 10^{-3} オーダーの値が設定されていた。

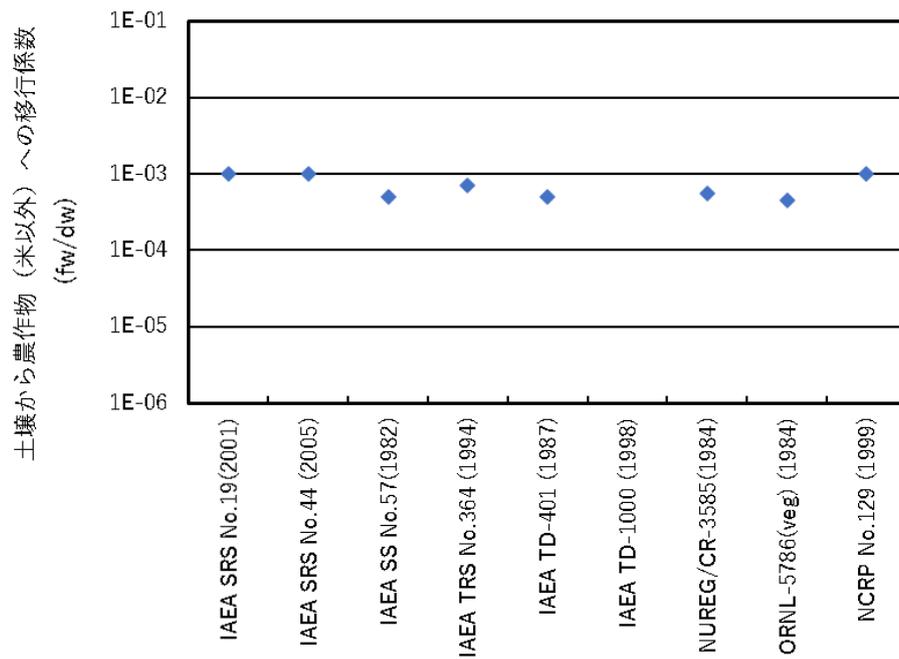


Fig. 14 学会標準で参照している文献での値 (プルトニウム)

さらに追跡調査の結果から、数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値を Fig. 15 に整理した。Fig. 15 では、◆は独自データ（実験データやモデルからの導出、等）、◆解釈データ、●一次資料のデータを表す。一次資料での設定値はいずれも同じ値を設定していた（0.001）。数値が掲載されている最終文献では、DOE レポート⁵⁾のみ他の文献より大きい値が設定されていたが、その他の文献は全て 0.001 前後の値が提示されていた。

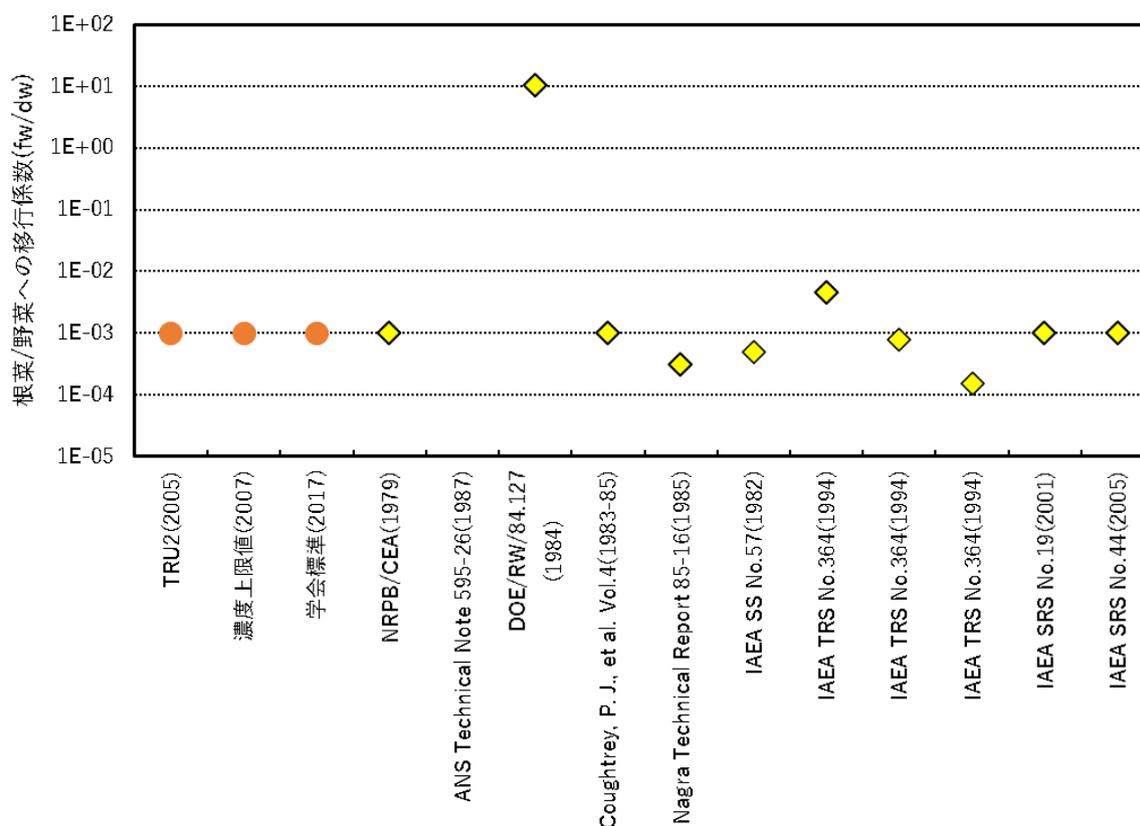


Fig. 15 数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値（プルトニウム）

Ⅲ 既往の評価でのパラメータ設定値と最新データの文献調査結果（国内外）の比較

1. 最新データとの比較方法

対象元素はⅡの追跡調査と同様、ヨウ素、セシウム、そしてプルトニウムの3元素とし、土壌から農作物への放射性物質の移行係数について、下記の方法で文献収集を行った。

文献の収集範囲は国内・国外で下記の通りとした。

- 国内：RWMCのパラメータシリーズ⁶⁾以降を対象とする。ただし、Csに関しては、2010年まで（福島事故前まで）を対象とする。
- 国外：IAEA TRS No.472(2010)⁷⁾以降

文献検索は、Google Scholar 及び J-STAGE により、以下のキーワードを用いて検索を行った。

- 核種（英名・和名）
- transfer factor / transfer coefficient / concentration factor / concentration coefficient / concentration ratio / 移行係数
- crop / vegetable / soil & plant / 作物 / 野菜

比較の対象とした既往の評価は、Ⅱの追跡調査で一次資料とした日本の放射性廃棄物処分に係わる生活圏被ばく評価のうち、調査対象元素が記載されている、濃度上限値、TRU2、学会標準とした。

最新データとの比較を行うにあたっては、農作物の種類が多様であることと、農作物への移行係数の単位が異なる場合があることから、次のように扱うこととした。

○ 農作物の分類

総務省 日本標準商品分類（平成2年6月改定）⁸⁾にしたがい、果菜・穀物・根菜・葉茎菜に分類することとした。

○ 水分含有量

単位は dry base とする。wet base で表記されているものは、水分含有量データを基に、dry base に換算した。換算に使用したデータは、IAEA -TECDOC-1927⁹⁾に記載のものとする。

2. 最新データとの比較結果（ヨウ素）

文献検索により得られた最新データは、安定ヨウ素を用いて移行係数を求めている論文もあったので、安定ヨウ素から得られた移行係数と放射性ヨウ素から求められた移行係数についての比較を行った。例として、葉菜の結果を Fig. 16 に、根菜の結果を Fig. 17 に示す。葉菜の場合、幾何平均値が安定ヨウ素は 0.094、放射性ヨウ素は 0.018 であった。また、根菜の場合は、幾何平均値が安定ヨウ素は 0.032、放射性ヨウ素は 0.010 であった。葉菜と根菜の結果からは、安定ヨウ素と放射性ヨウ素の移行係数には、ほとんど相違はみられなかった。

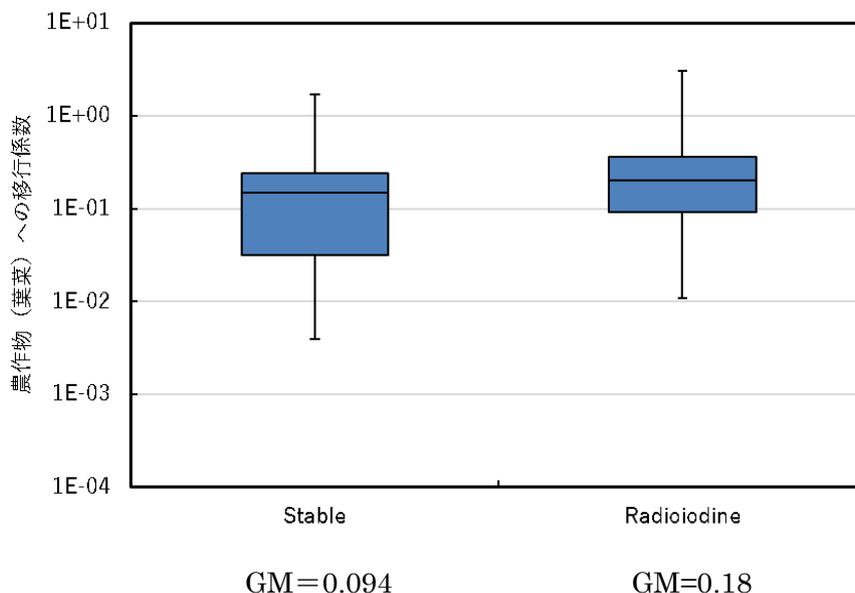


Fig. 16 農作物（葉菜）への移行係数：安定同位体と放射性ヨウ素

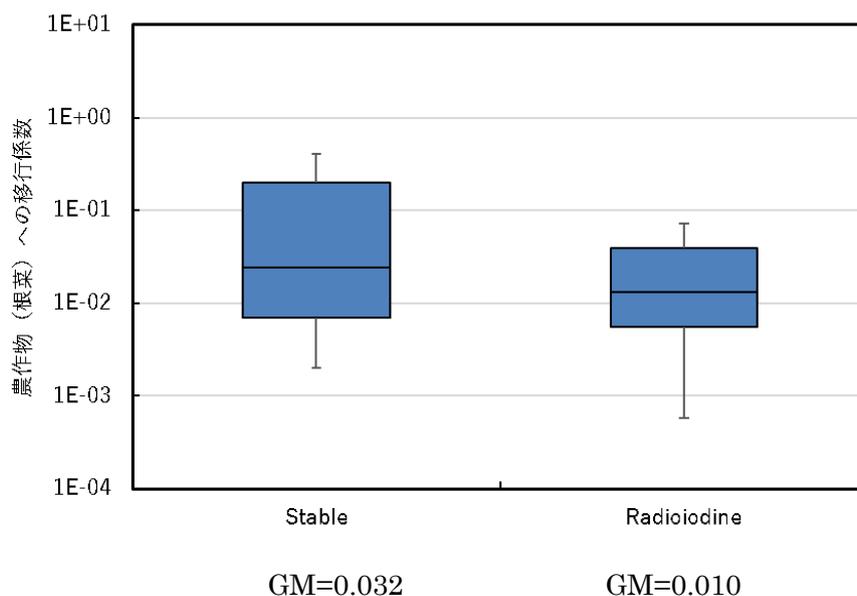


Fig. 17 農作物（根菜）への移行係数：安定同位体と放射性ヨウ素

続いて、ヨウ素についての最新データと既往の評価における設定値との比較結果を Fig. 18、Fig. 19 に示す。Fig. 18 には果菜類への移行係数を、Fig. 19 には根菜類への移行係数を示した。果菜類への移行係数の文献データは、0.0013~0.54 であり、幾何平均値は 0.023 (N 数 10) であった。根菜類への移行係数の文献データは、0.00057~0.41 であり、幾何平均値は 0.017 (N 数 29) であった。

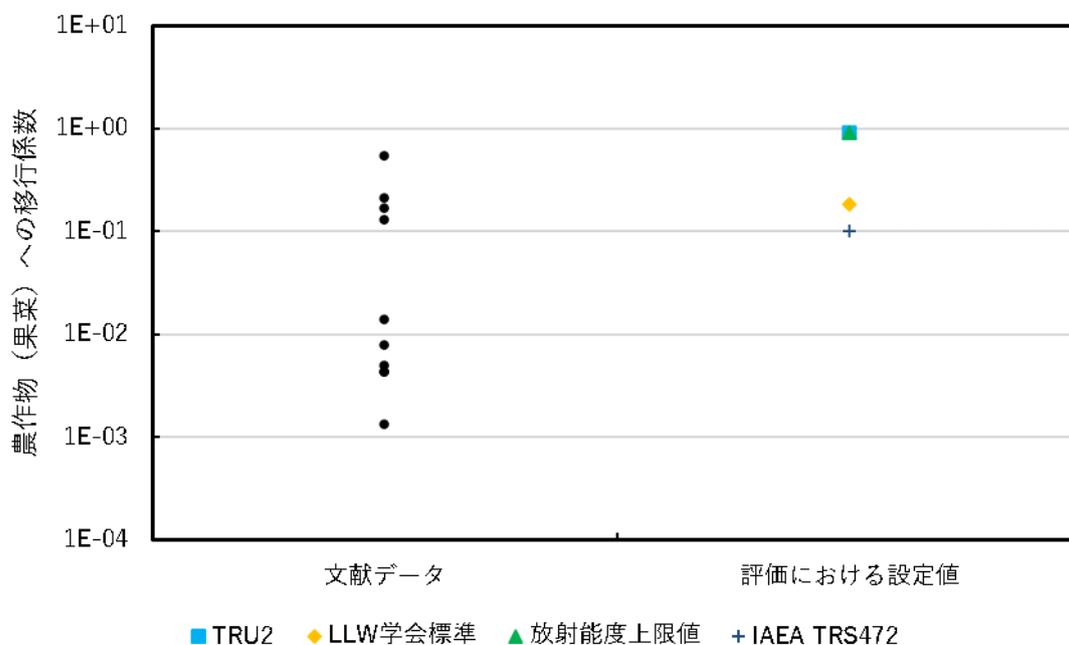


Fig. 18 文献データ及び各評価における農作物（果菜）への移行係数（ヨウ素）

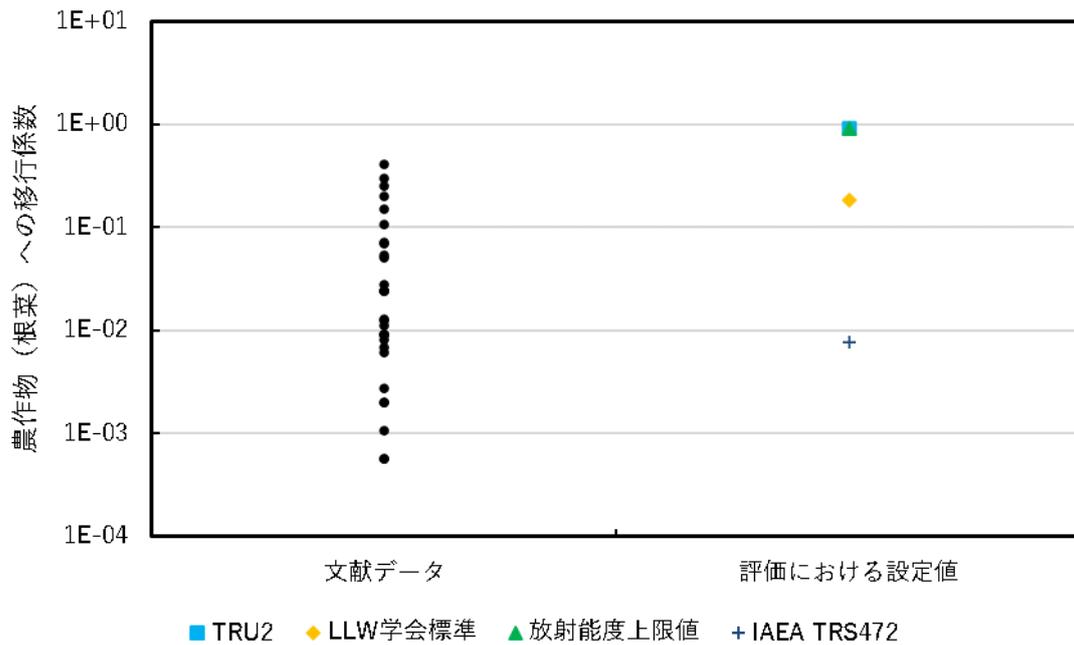


Fig. 19 文献データ及び各評価における農作物（根菜）への移行係数（ヨウ素）

比較の結果、わが国の既往の評価における設定値は、図には示していないが、穀物の設定値はそれ程最新データと比べて高くないが、果菜及び根菜では、わが国の既往の評価における設定値は最新のデータと比べて高いことが示された。また、IAEA TRS No.472⁷⁾のデータは、果菜を除き、最新のデータの中の低い方にあたるということがわかった。

3. 最新データとの比較結果（セシウム）

セシウムについての最新データと既往の評価における設定値との比較結果を Fig. 20、Fig. 21 に示す。Fig. 20 には根菜類への移行係数を、Fig. 21 には葉菜類への移行係数を示した。根菜類への移行係数の文献データは、0.00039～4.0 であり、幾何平均値は 0.053（N 数 70）であった。葉菜類への移行係数の文献データは、0.00010～1.5 であり、幾何平均値は 0.070（N 数 126）であった。

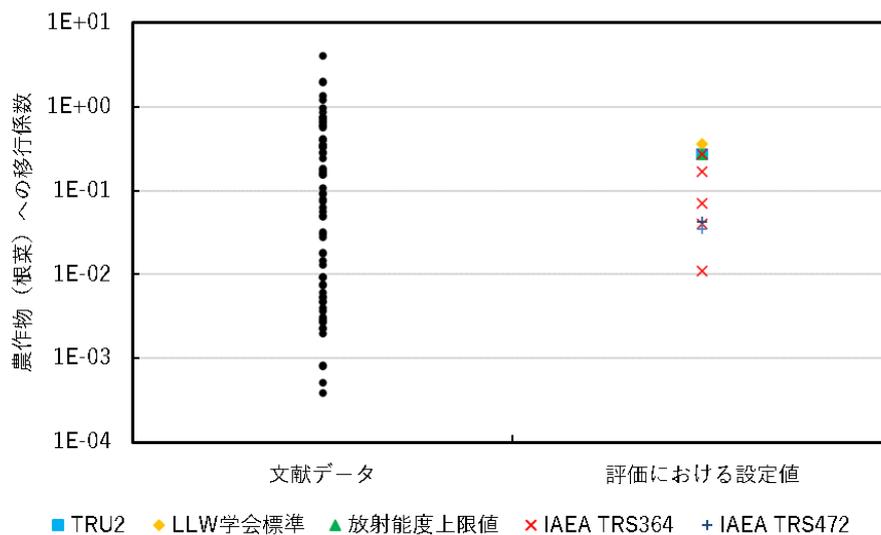


Fig. 20 文献データ及び各評価における農作物（根菜）への移行係数（セシウム）

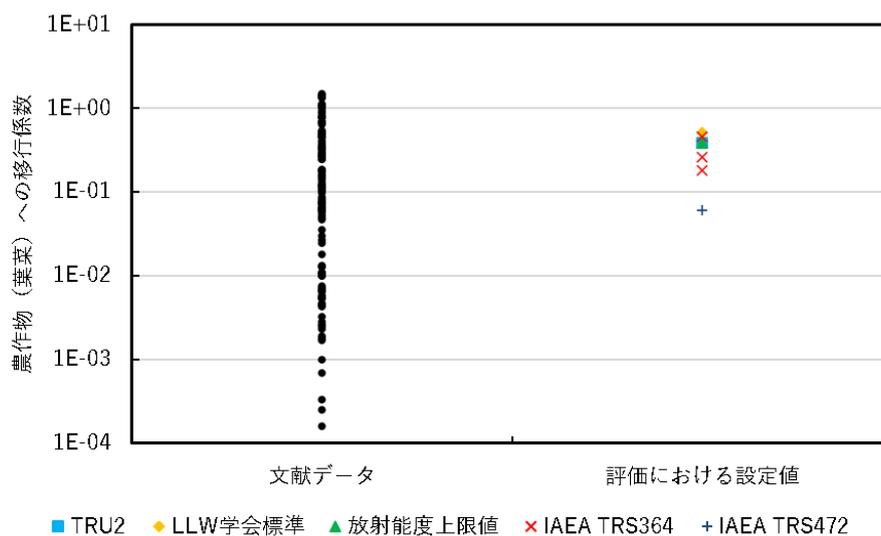


Fig. 21 文献データ及び各評価における農作物（葉菜）への移行係数（セシウム）

いずれの作物も、移行係数値の範囲は幅広かった。実験条件、土壤中における平衡・非平衡の違い（分析対象が安定元素か、または、あるいは放射性セシウムか）による影響が考えられる。なお、RI 添加実験により得られた移行係数は、グローバルフォールアウトから得られた移行係数よりも高い傾向にあった（Fig. 22）。また、放射性セシウムの移行係数は、安定セシウムの移行係数よりも高い傾向にあった。

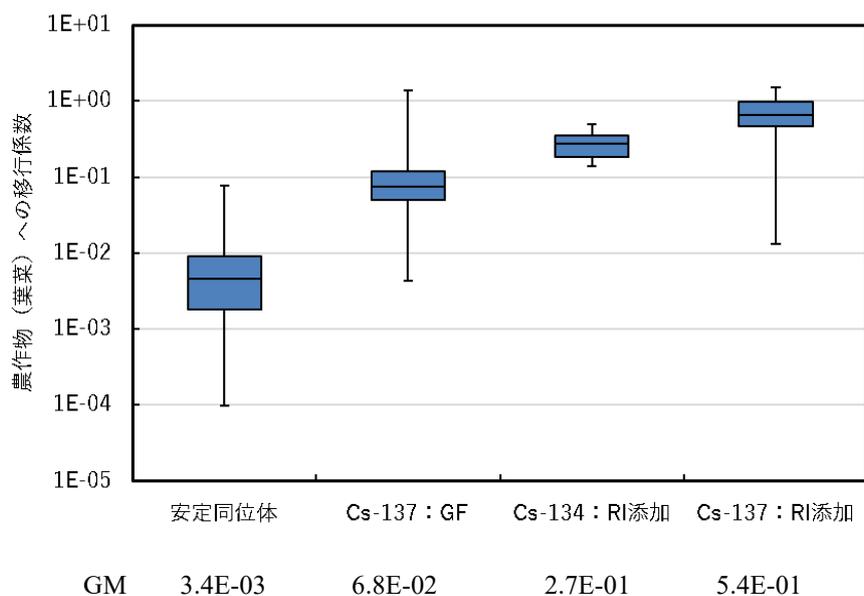


Fig. 22 農作物（葉菜）への移行係数：安定同位体と Cs-137

4. 最新データとの比較結果（プルトニウム）

プルトニウムについての最新データと既往の評価における設定値との比較結果を Fig. 23 に示す。Fig. 23 には葉菜類への移行係数を示した。葉菜類への移行係数の文献データは、0.0011~0.056 であり、幾何平均値は 0.0086 (N 数 13) であった。なお、Pu の移行係数に関する新しい文献は 1 報 (Semipalatinsk Test Site での実験) のみであった。

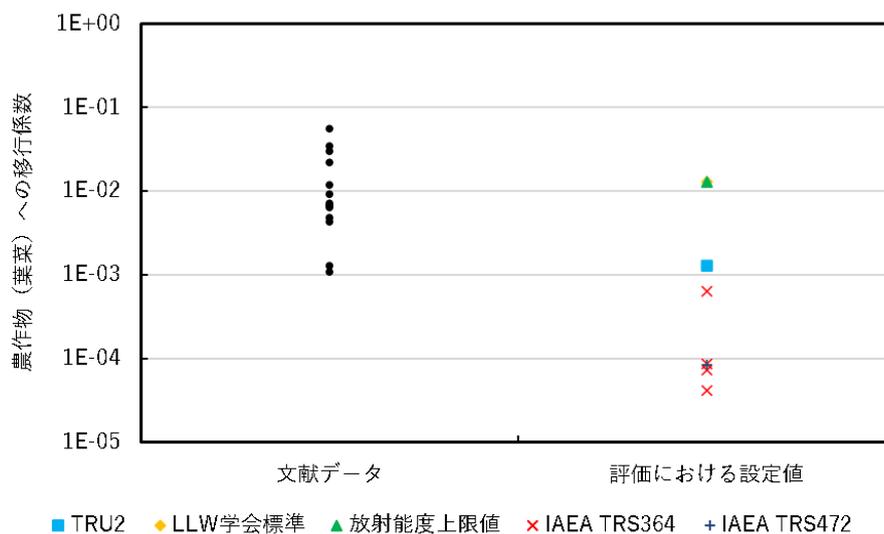


Fig 23 文献データ及び各評価における農作物（葉菜）への移行係数（プルトニウム）

IV 結論

土壌から農作物への移行係数（野菜）について、ヨウ素、セシウム、プルトニウムを調査対象元

素とし、日本の放射性廃棄物処分に係わる安全評価における生活圏評価における設定値の出典追跡調査を行った。その結果、いずれの評価においても様々なレポートを参照しているが、参照している主たるレポートは同様であった。また、文献を遡っていく過程で、引用しているレポートに掲載されている値と異なる値を参照している場合があったり、文献は入手できたものの数値の判別が不可能である場合があったりした。さらに、最終的に実験データにたどり着いた場合もあったが、1970年代と非常に古かったり、データの測定条件等が不明確であることもあった。なお、一次資料での設定値は、今回対象とした元素では、数値が掲載されている最終文献での値の範囲内であり、多くの文献でも近似した数値が掲載されていた。

さらに、既往の評価でのパラメータ設定値と最新データの文献調査結果(国内外)の比較を実施した。ヨウ素については、わが国の評価における設定値は、特に果菜及び根菜に関しては、最新のデータと比べて値が高い傾向がみられた。IAEA TRS No.472⁷⁾のデータは、果菜を除き、最新のデータの中の低い方にあたることがわかった。セシウムについては新しいデータ数も多く、移行係数値の範囲は幅広かった。実験条件や環境条件の違いによる影響と考えられる。プルトニウムの移行係数に関する最新の文献は1報のみであり、わが国における報告はみられなかった。

参考文献

- 1) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 (2005): TRU 廃棄物処分技術検討書—第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 556p.
- 2) 原子力安全委員会 (2007): 低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について.
- 3) 日本原子力学会 (2017): 日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法 : 2016, AESJ-SC-F026:2016, 240p.
- 4) International Atomic Energy Agency (IAEA), Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, IAEA Safety Report Series No.19, 2001, 216p.
- 5) Jackson, D., Derivation and Ranges of Aquatic Organism and Terrestrial Plant Data for Use with the Biosphere Code ECOS, UKDOE Report No. DOE/RW/84.127, 1984, 264p.
- 6) 原子力環境整備センター : 土壌から農作物への放射性物質の移行係数、環境パラメータ・シリーズ 1, RWMC-88-P-11, 1988.
- 7) International Atomic Energy Agency (IAEA), Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, Technical Reports Series No. 472, 2010, 208p.
- 8) 総務省 日本標準商品分類 (平成2年6月改定) , https://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/index/seido/syohuin/2/index.htm
- 9) International Atomic Energy Agency (IAEA), Environmental Transfer of Radionuclides in Japan following the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA-TECDOC- 1927, 2020, 345p.

環境移行パラメータの追跡調査結果とデータ比較(2)

(表層土壌・農耕地土壌の分配係数)

Parameter follow-up survey results and data comparison (2) (Distribution coefficient in topsoil and farmland soil)

孫思依^{1,2)*}、内田滋夫^{2,3)}
Siyi SUN^{1,2)} and Shigeo UCHIDA^{2,3)}

- 1) 東京大学
- 2) 日本エヌ・ユー・エス (株)
- 3) (国研) 量子科学技術研究開発機構

- 1) The University of Tokyo
- 2) Japan NUS Co., Ltd.
- 3) National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

*Corresponding author, E-mail: sun-sy@janus.co.jp

KEYWORDS: partition coefficient, distribution coefficient, Kd, soil solution concentration, sorption behavior, topsoil, farmland soil.

I はじめに

土壌の分配係数は、元素の種類、土壌の性質等によって大きく変動するため、評価対象サイトの環境条件に応じた設定が必要となる。現在日本で使用している分配係数の設定値は主に国際機関によるテクニカルレポートや学術研究の成果等を引用している。それらは 1970 年代頃の引用文献データが多く、設定条件や根拠についても不明な場合が多い。また、多くの引用文献データはヨーロッパやアメリカの環境下で得られたデータに基づいて設定されたものである。

そこで本研究では、被ばく評価上重要と考えられる分配係数について、現況の評価（例えば、日本原子力研究開発機構や原子力安全委員会による分配係数の設定値）の設定値の出典追跡調査を実施するとともに、文献検索から得られた最新知見を整理し、現況の評価との比較を行った。

II 調査方法

1. 出典追跡調査

被ばく評価上の重要核種である Cs、I、Pu の 3 元素を対象に、分配係数の出典追跡調査を実施した。

出典追跡調査の対象とした資料（一次資料）は以下の3つである。

- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 (2005): TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 556p. (以下、「TRU2」)
- 原子力安全委員会 (2007): 低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について. (以下、「濃度上限値」)
- 日本原子力学会 (2017): 日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法：2016, AESJ-SC-F026:2016, 240p. (以下、「学会標準」)

2. 最新データの収集

Cs、I、Pu を対象に、土壌の分配係数（表層土壌、農耕地土壌）について、下記の方法で最新知見の文献収集を行った。

- 国内：原子力環境整備センター（RWMC）[現原子力環境整備促進・資金管理センター]のパラメータシリーズ以降を対象とする。ただし、Cs に関しては、2010年まで（福島事故前まで）を対象とする。
 - 環境パラメータ・シリーズ2 土壌と土壌溶液間の放射性核種の分配係数, RWMC-90-P-13, (1990).
- 国外：IAEA TRS No.472(2010)以降

表 1 パラメータの調査範囲

| | | 国内 | 国外 |
|------|------|-----------|-----------|
| 分配係数 | I、Pu | 1990-2019 | 2010-2019 |
| | Cs | 1990-2010 | 2010-2019 |

文献の検索は、Google Scholar、J-STAGE を使用し、以下のキーワードを用いた。

- 核種（英名・和名）
- partition coefficients, distribution coefficient, radioactivity, Kd, soils, soil solution concentration, sorption behavior, 分配係数, 土壌, 土壌溶液, 吸着挙動

III 調査結果

1. 出典追跡の結果

図 1~3 に、各調査対象資料における土壌の分配係数の第二出典までの追跡結果を示す。TRU2 と学会標準等は同じ文献（IAEA TRS No.364、Sheppard et al.1990）を引用していることが分かったが、異なる土壌種類の値を引用したため、分配係数の設定値に 3 倍差（Pu）、27 倍差（I）が生じている。



図 1 I についての出典追跡結果

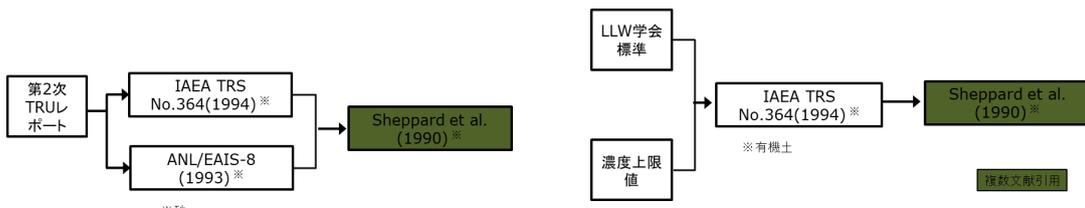


図 2 Cs についての出典追跡結果

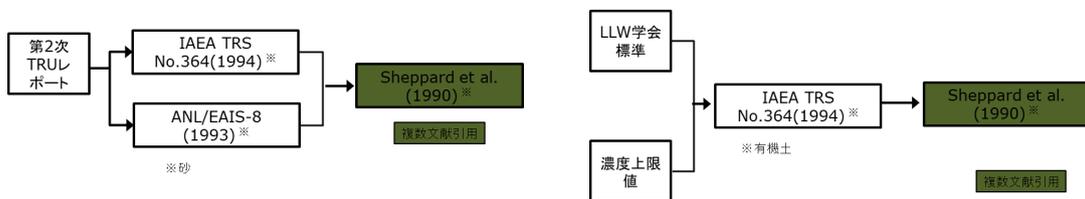


図 3 Pu についての出典追跡結果

また、図 4~6 に、TRU2 の土壌の分配係数の出典追跡でたどり着いた最終文献の結果を示す。引用文献に入手困難なものが多かった（特に 1980 年代以前の文献）。また、引用文献にフィンランド語の文献や、プライベートコミュニケーション、単位不明、範囲値のみの文献も混在している。最終的に入手できた実験値が少なかった上に、設定値より 2~50 倍高くなっている。

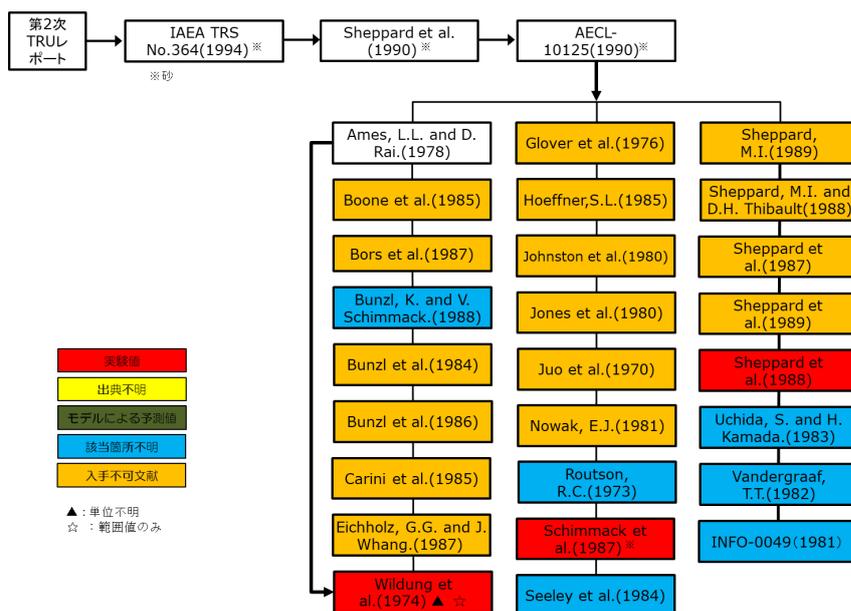


図 4 TRU2 の引用レポートからの追跡結果 (I)

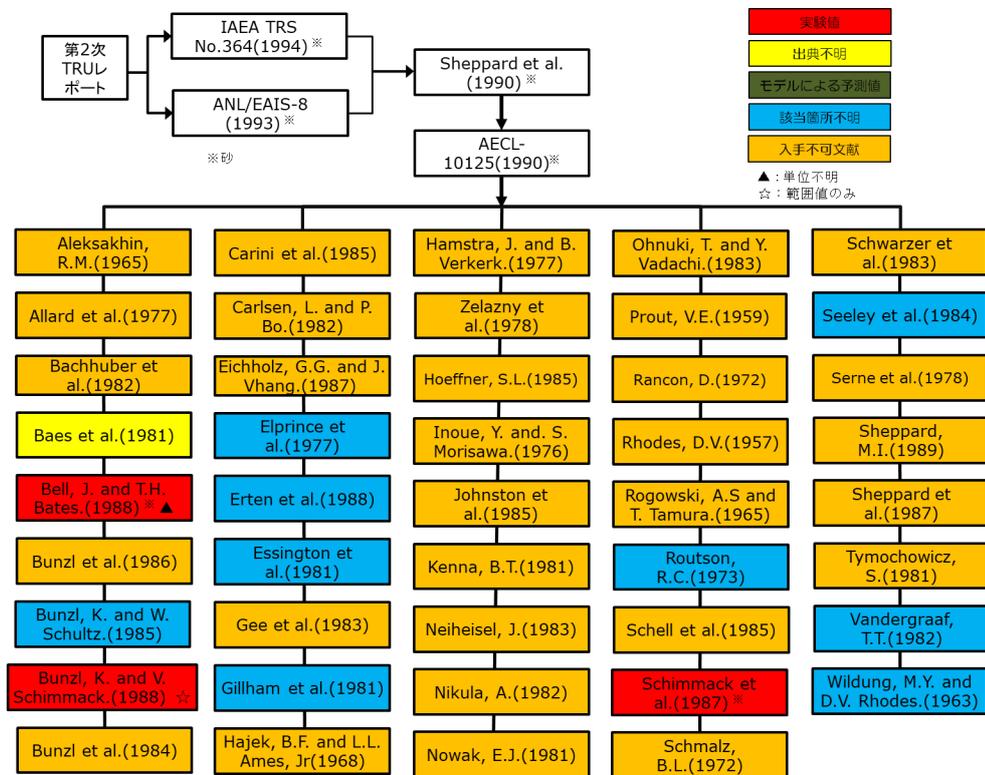


図 5 TRU2 の引用レポートからの追跡結果 (Cs)

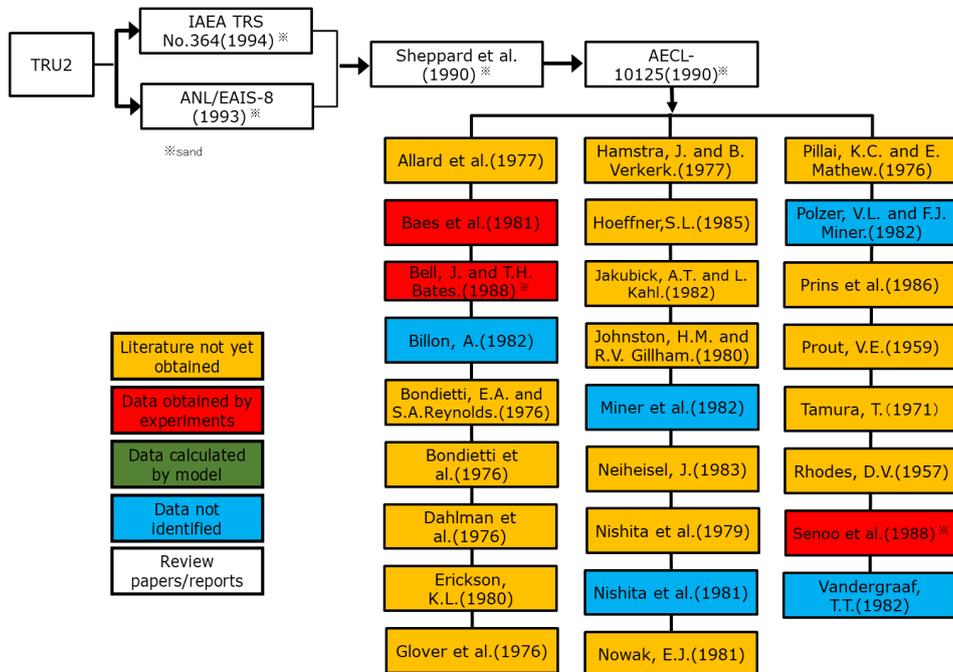


図 6 TRU2 の引用レポートからの追跡結果 (Pu)

2. 最新データとの比較結果

前述した文献検索の調査範囲に該当する分配係数（表層土壌、農耕地土壌）のデータが記載されている文献（N=50）のデータをまとめた。ただし、文献は調査範囲内であっても引用されているデータが調査範囲外のもの、およびグラフのみの文献を除いたため、実際に使用した総文献数はN=19である。

日本の放射性廃棄物処分に係わる生活圏被ばく評価において使用された分配係数の引用先であるIAEA TRS No.364と比較するため、IAEA TRS No.364における土壌分類条件を参考にして、収集された分配係数のデータを分類することとした。設定した土壌分類条件を表2に示す。

表2 土壌分類条件（IAEA TRS364等を参考）

| Soil Group | | Clay content in the mineral matter fraction | Organic Matter Content |
|------------|------|---|------------------------|
| Organic | | - | ≥ 20% |
| mineral | Sand | < 18% | < 20% |
| | Loam | 18%-35% | |
| | Clay | ≥ 35% | |

収集された分配係数のデータを分類する際に、下記の問題点があった。

- 土壌サンプルの特性についての情報が曖昧なデータの扱いが困難である。例えば、“OM-rich”かつ“Clay≥35%”のデータ、今回の調査では有機土としてカウントされているが、今後データベースを作成する際に、より明確な分類方法を決める必要がある。
- 土壌サンプルの特性についての情報が不足しており、データの分類に誤りが発生する可能性がある。例えば、粘土含有量の情報しかないデータ。
- IAEA TRS No.364とその引用先であるAECL-10125の土壌分類条件が異なること。
 - ① Organic, IAEA TRS No.364: OM >20% , AECL-10125 : OM > 30% ;
 - ② Sand, IAEA TRS No.364: mineral < 18% , AECL-10125 : sand >70% ;

土壌種類で分類された分配係数のデータ数を表3にまとめた。IやCsに関しては多くのデータが収集できたが、Puに関しては最新データが少なかった（特に日本国内のデータは0であった）。前述の追跡調査で、TRU2（砂）と学会標準（有機土）等は同じ文献の異なる土壌種類の値を引用したため、分配係数の設定値に差が生じたことが分かったが、国内の最新表層土壌データでは、有機土のデータが明らかに多かったが、これは日本の環境評価をする際に、日本の多くの研究者が砂より有機土がより代表的だとみなしていることを示していると考えられる

表 3 分配係数のデータ数

| Soil Group | I | | Cs | | Pu | |
|-------------|----|----|----|----|----|----|
| | 国内 | 海外 | 国内 | 海外 | 国内 | 海外 |
| Organic | 88 | 7 | 74 | 8 | 0 | 1 |
| Sand | 2 | 19 | 12 | 17 | 0 | 1 |
| Loam | 0 | 4 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Clay | 0 | 6 | 0 | 16 | 0 | 2 |
| Unspecified | 4 | 4 | 6 | 9 | 0 | 4 |
| Total | 94 | 40 | 92 | 51 | 0 | 8 |

最新データとの比較結果として、Iについては、IAEA TRS No.364 sand の設定値が日本及び海外の最新データより低いことが分かった（図 7）。Csについては、調査範囲を福島事故前に設定しているが、日本の有機土の最新データが IAEA の設定値より 1 桁～3 桁高い結果が得られた（図 8）。一方、日本の砂の最新データが IAEA の設定値及び海外の砂より低いことが分かった。Pu については、ロシアの核技術施設近くの新データであり、ほとんど IAEA の設定値より高いことが分かった（図 9）。

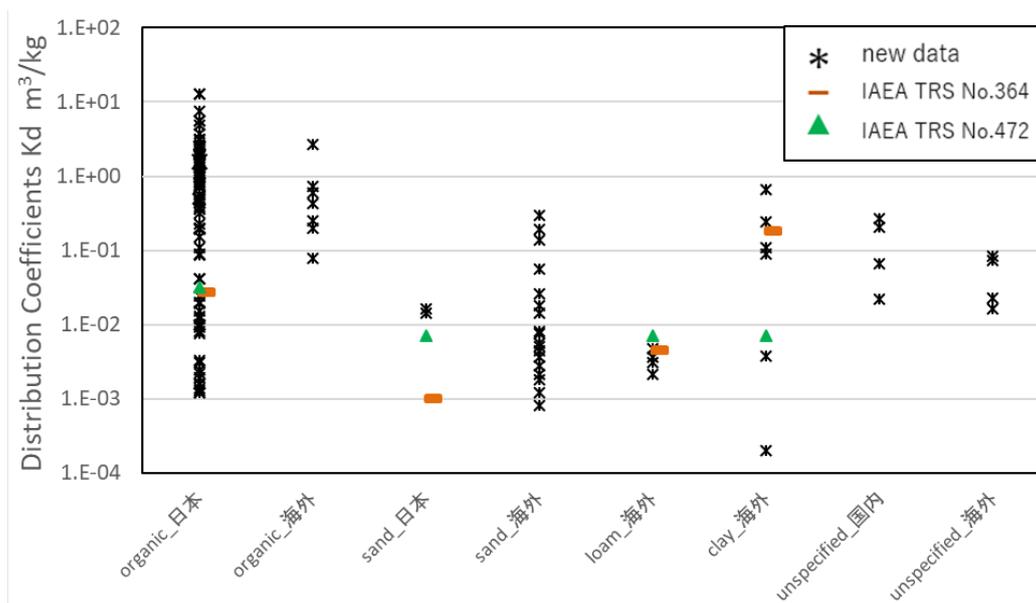


図 7 ヨウ素の分配係数の比較（日本と海外）

ョン、単位不明、範囲値のみの文献もあった。

最新データと設定値との比較を行うため、文献検索を実施した。得られた文献 (N=50) のデータを精査した結果、文献は調査範囲内であっても引用されているデータが調査範囲外のもの、およびグラフのみの文献を除いたため、実際に使用した総文献数はN=19であった。IやCsに関しては多くのデータが収集できたが、Puに関しては最新データが少なかった。特に、国内のデータはゼロであった。

参考文献

- 1) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 (2005): TRU 廃棄物処分技術検討書—第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 556p.
- 2) 原子力安全委員会 (2007): 低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について.
- 3) 日本原子力学会 (2017): 日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法 : 2016, AESJ-SC-F026: 2016, 240p.
- 4) International Atomic Energy Agency; Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments, TRS-364, IAEA, Vienna (1994).
- 5) International Atomic Energy Agency; Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, Technical Reports Series No. 472, IAEA, Vienna (2010).

環境移行パラメータの追跡調査結果とデータ比較(3)

(棲息水-魚類濃縮係数)

Parameter follow-up survey results and data comparison (3) (Water-fishery product concentration ratio)

平山 誠^{1)*}、田上恵子²⁾、内田滋夫^{1,2)}

Makoto HIRAYAMA¹⁾, Keiko TAGAMI²⁾ and Shigeo UCHIDA^{1,2)}

1) 日本エヌ・ユー・エス (株)

2) (国研) 量子科学技術研究開発機構

1) Japan NUS Co., Ltd.

2) National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

*Corresponding author, E-mail: hirayama-mkt@janus.co.jp

KEYWORDS: water-to-fish concentration ratio, environmental dose assessment, parameter values, data tracing, IAEA documents

I はじめに

放射性廃棄物処分場から放出される放射性核種の影響を評価する際、重要な移行経路のひとつとして食品の摂取がある。生活圈被ばく評価では、環境媒体から食品への放射性核種の濃度比等、種々の環境移行パラメータが用いられており、実験室でのトレーサー実験や現地調査の結果から得られるものが信頼性の高いパラメータである。IAEAの報告書 (TRS 364¹⁾, 422²⁾, 479³⁾など) では、推奨されるパラメータ値がオリジナルのデータソースから得られており、これらの報告書に記載されている値は信頼性が高く、多くの国の線量評価モデルで使用されている。しかし、これらの推奨されているパラメータの値は、古い文献の値で構成されていることに注意が必要である。

我が国の生活圈被ばく評価においては、IAEAの報告書にまとめられたパラメータ値が利用されてきた (例えば、JAEA TRU 2⁴⁾や日本原子力学会レビュー報告書⁵⁾など)。しかし、日本の場合、世界でも有数の魚介類消費国であるため、魚介類の摂取経路が重要となる⁶⁾ため、我が国における生活圈被ばく評価では、棲息水と魚類の濃縮係数を整備する事が重要な課題である。そこで、本稿では、Cs、I、Puに着目し、我が国で用いられてきた JAEA TRU 2⁴⁾や日本原子力学会レビュー報告書⁵⁾などに採用されている棲息水と魚類の濃縮係数に関して、その出典調査を行うと共に、文献検索により最新データを収集し、これまで用いられてきた値と比較した。

II 生活圏被ばく評価に用いられるパラメータの出典追跡調査

出典追跡調査の対象とする資料(一次資料)は、下記の3つのレポートとする。

- 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 (2005): TRU 廃棄物処分技術検討書—第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02.⁴⁾ (以下、「TRU2」)
- 原子力安全委員会 (2007): 低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について.⁷⁾ (以下、「濃度上限値」)
- 日本原子力学会 (2017): 日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法 : 2016, AESJ-SC-F026:2016.⁸⁾ (以下、「学会標準」)

これらに記載されている引用文献を遡ってデータを確認することとした。

1. Iについて

Fig. 1 に TRU2⁴⁾における海水魚類への濃縮係数の出典追跡結果を、Fig. 2 に学会標準⁸⁾における海水魚類への濃縮係数の出典追跡結果を示す。

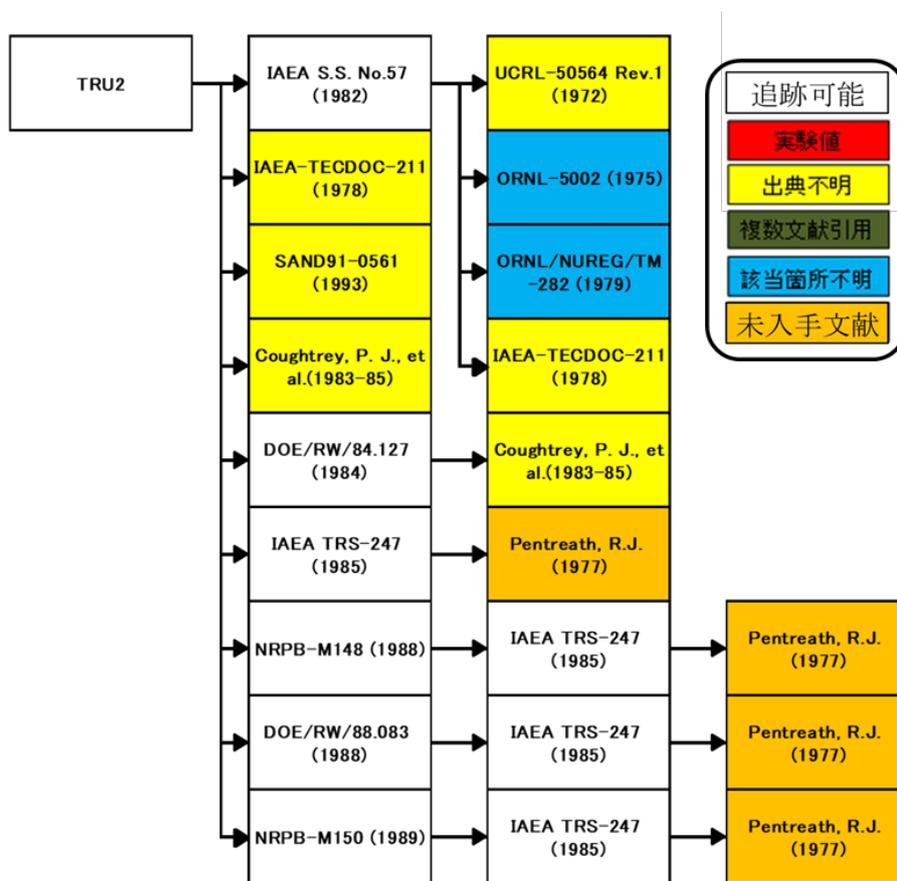


Fig. 1 TRU2⁴⁾における海水魚類への濃縮係数の出典追跡結果 (I)

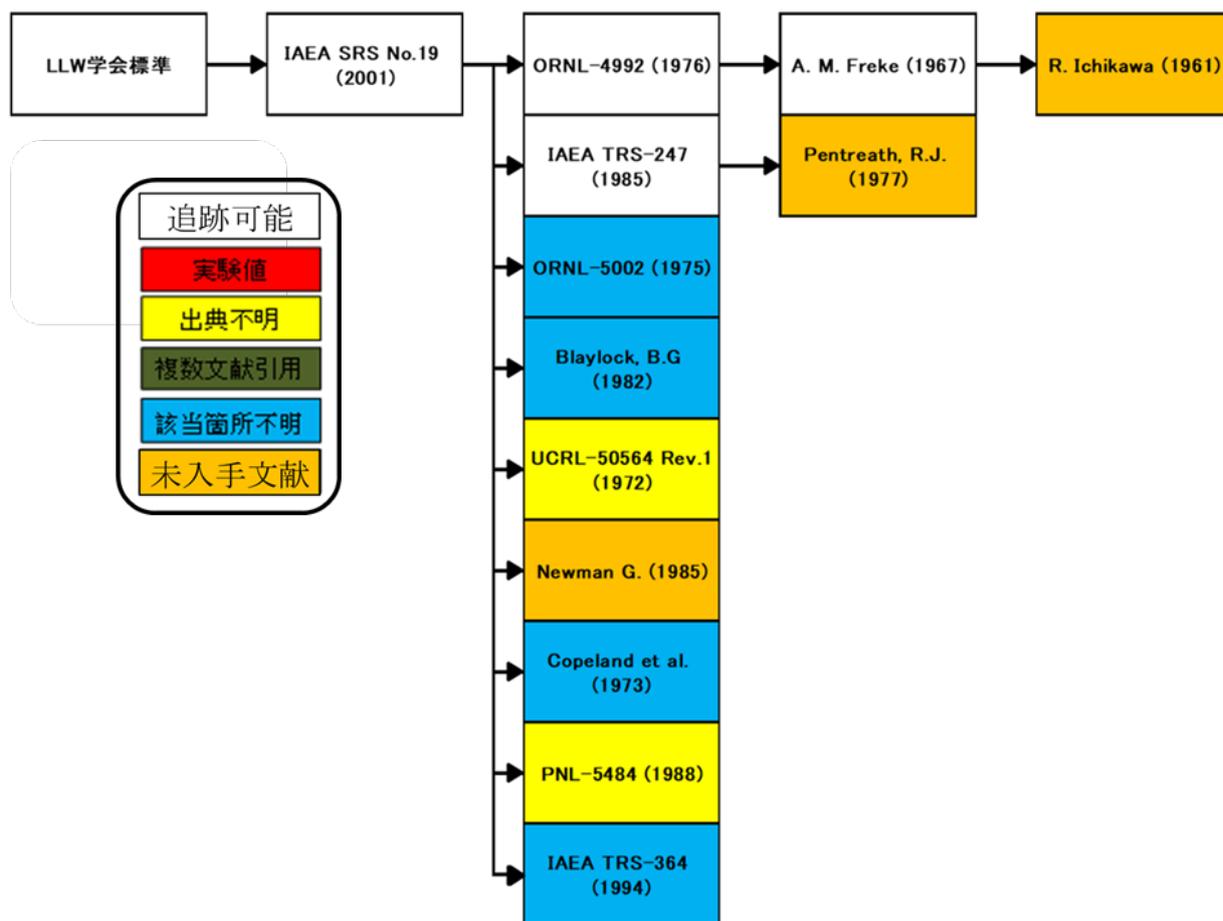


Fig. 2 学会標準⁸⁾における海水魚類への濃縮係数の出典追跡結果 (I)

追跡調査の結果から、数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値を Fig. 3 に整理した。Fig. 3 では、◆解釈データ(文献等を利用したデータ、専門家ジャッジ、等)、●一次資料のデータ、線は最小値から最大値の範囲を表す。Fig. 3 では、数値が掲載されている各文献の結果が、1972 年から変化していない結果となっていることから、TRU2⁴⁾と学会標準⁸⁾ はどちらも 2000 年代の報告書であるが、1972 年のデータと同じ値が使われ続けていることがわかる。

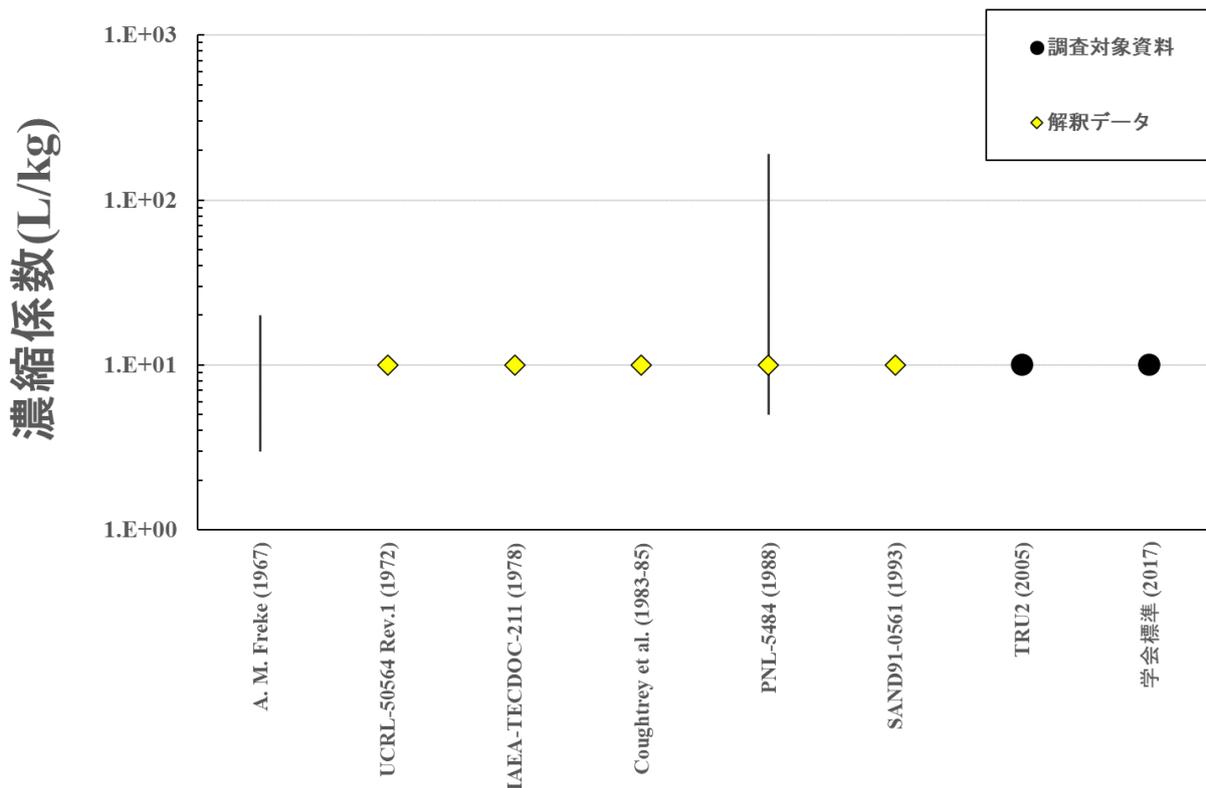


Fig. 3 数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値 (I : 海水魚類)

次に、Fig. 4に TRU2⁴⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果を、Fig. 5に学会標準⁸⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果を、Fig. 6に濃度上限値⁷⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果を示す。また、引用の多い ORNL/NUREG/TM-282 (1979)、ORNL-5002 (1975)、UCRL-50564 Rev.1 (1972)に関しては、Fig. 7、Fig. 8にまとめた。

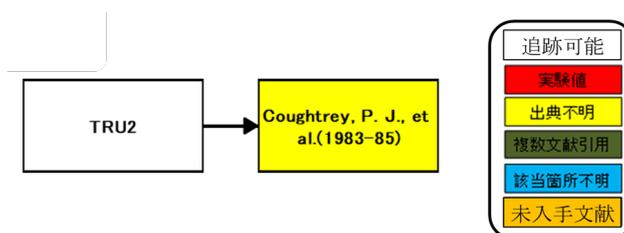


Fig. 4 TRU2⁴⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果 (I)

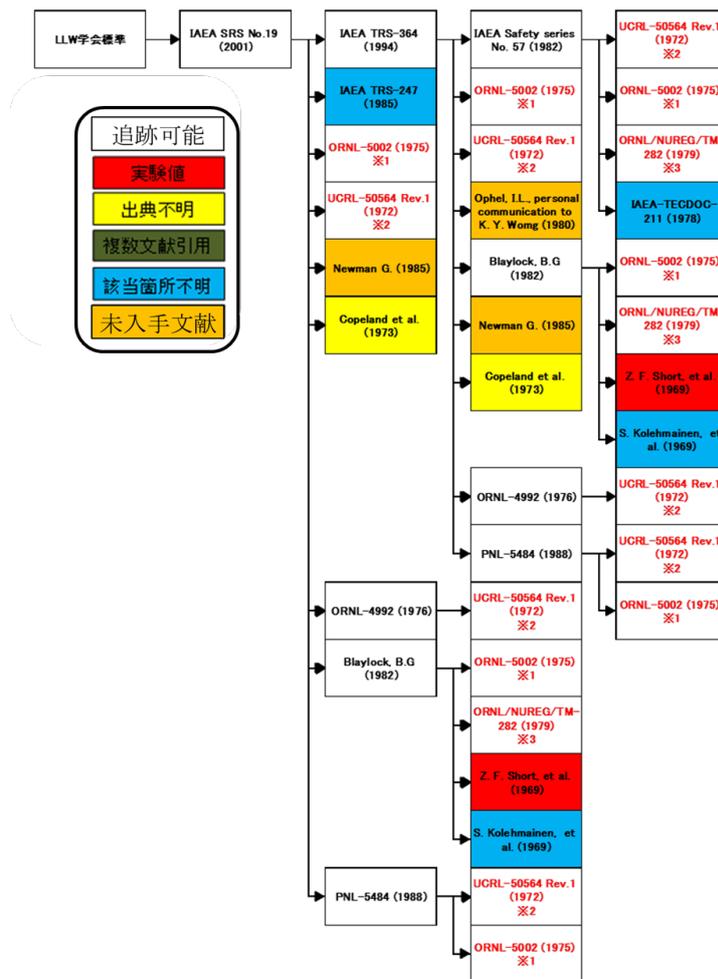


Fig. 5 学会標準⁸⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果 (I).
 ※1-3 についてはさらに Fig. 7、Fig. 8 で遡った結果を表示。

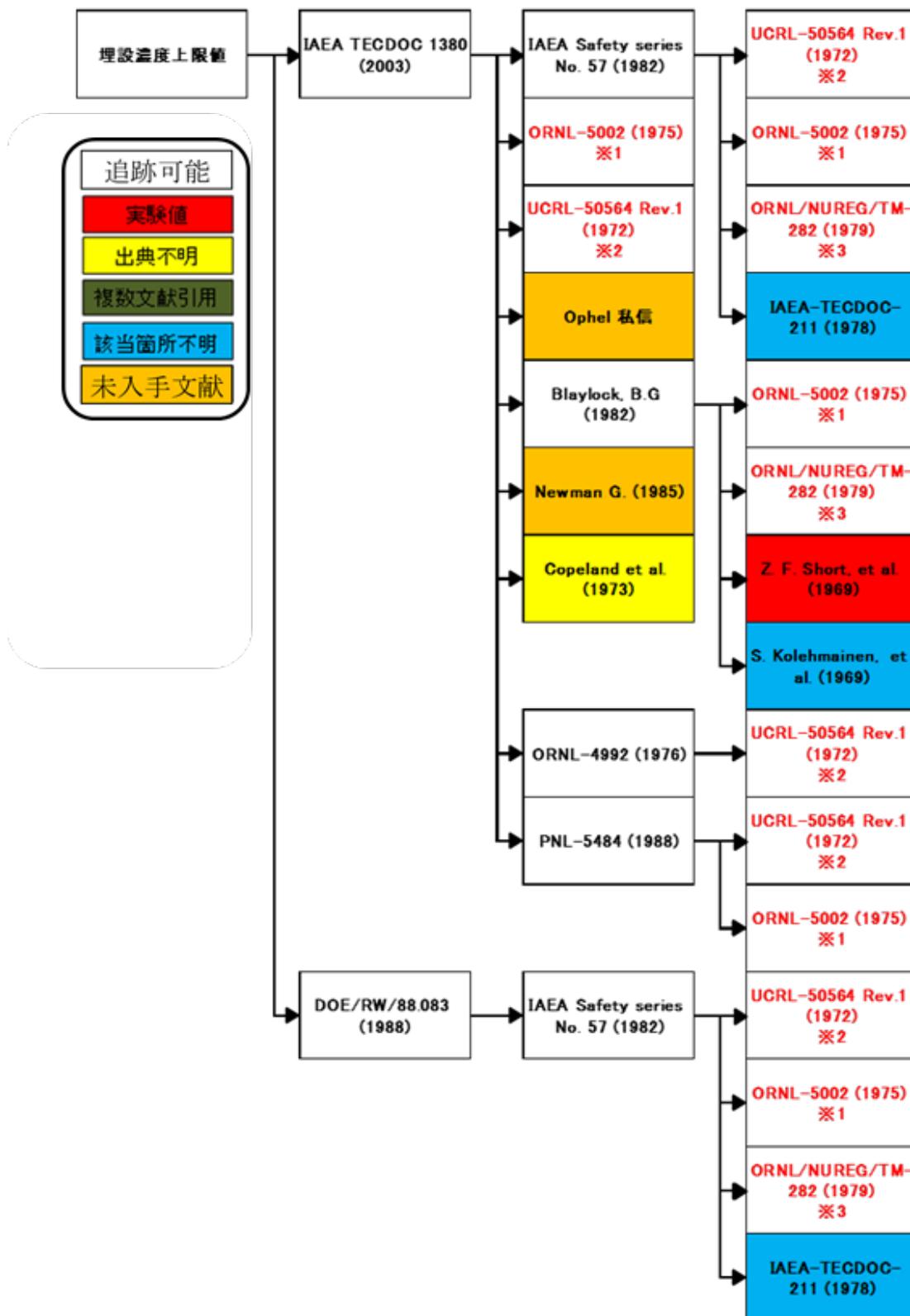


Fig. 6 学会標準⁸⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果 (I)。

※1-3 についてはさらに Fig. 7、Fig. 8 で遡った結果を表示。

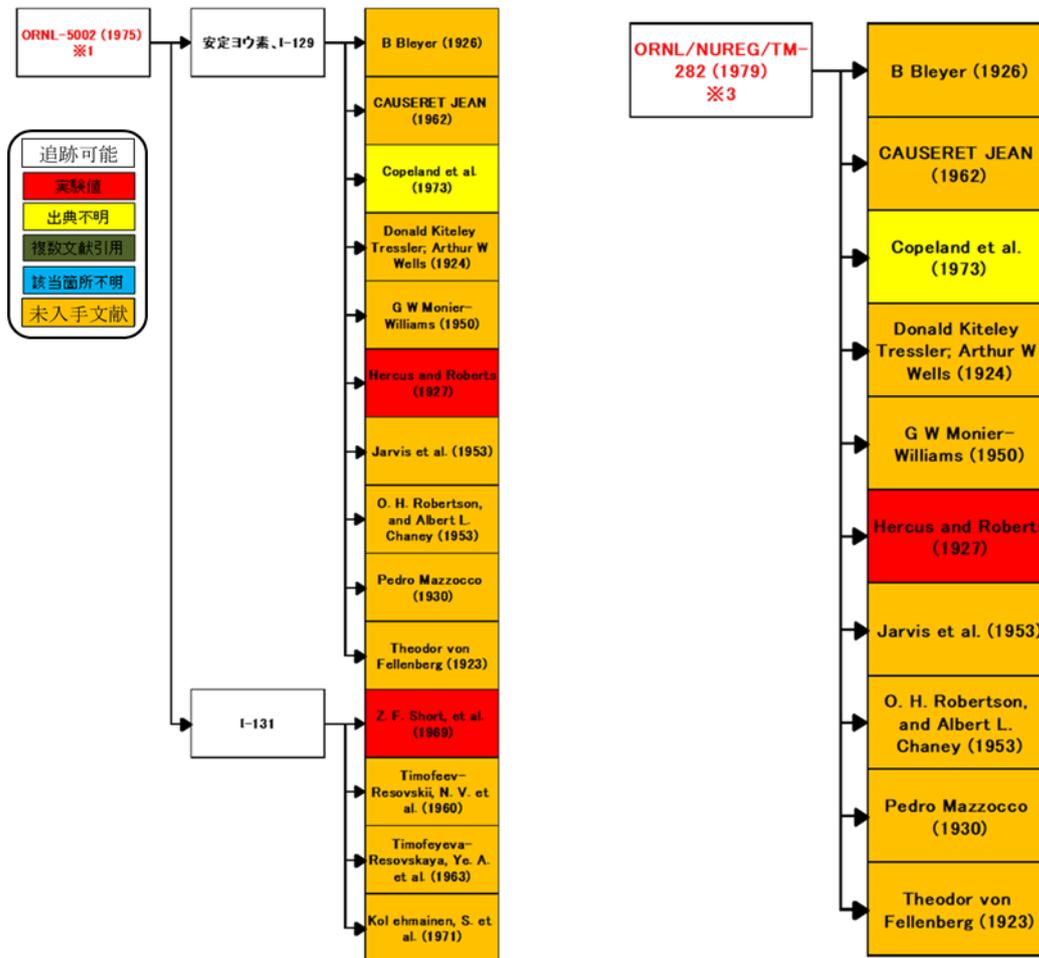


Fig. 7 淡水魚類の濃縮係数の出典追跡結果 (I)
 (※1 : ORNL-5002 (1975)、※3 : ORNL/NUREG/TM-282 (1979))

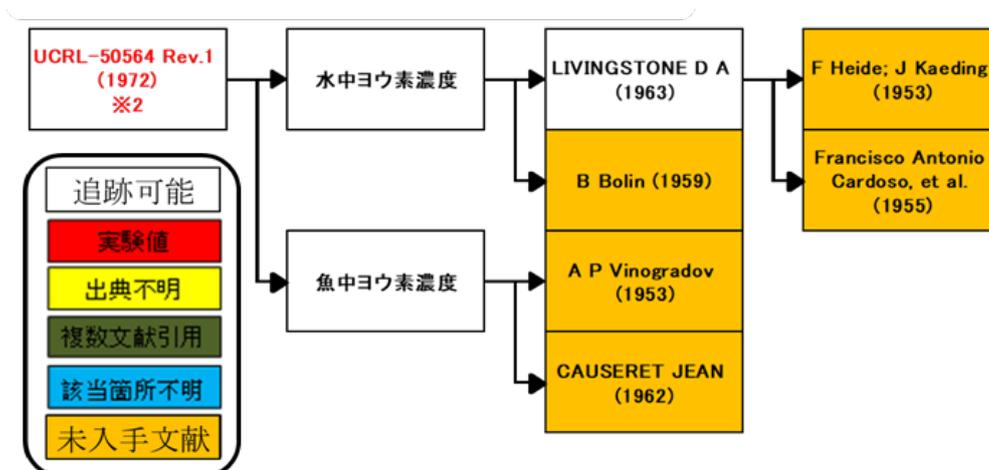


Fig. 8 淡水魚類の濃縮係数の出典追跡結果 (I)
 (※2 : UCRL-50564 Rev.1 (1972))

追跡調査の結果から、数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値を Fig. 9 に整理した。Fig. 9 では、◆は独自データ（実験データやモデルからの導出、等）、◇解釈データ、●一次資料のデータ、線は最小値から最大値の範囲を表す。淡水の結果では、海水の結果と異なり、掲載されている値は一定ではなく、古い文献ほど低い値が掲載されている傾向があり、一部の文献 (Copeland, R. A., et al. (1973)) では一桁ほど高い値の範囲であった。

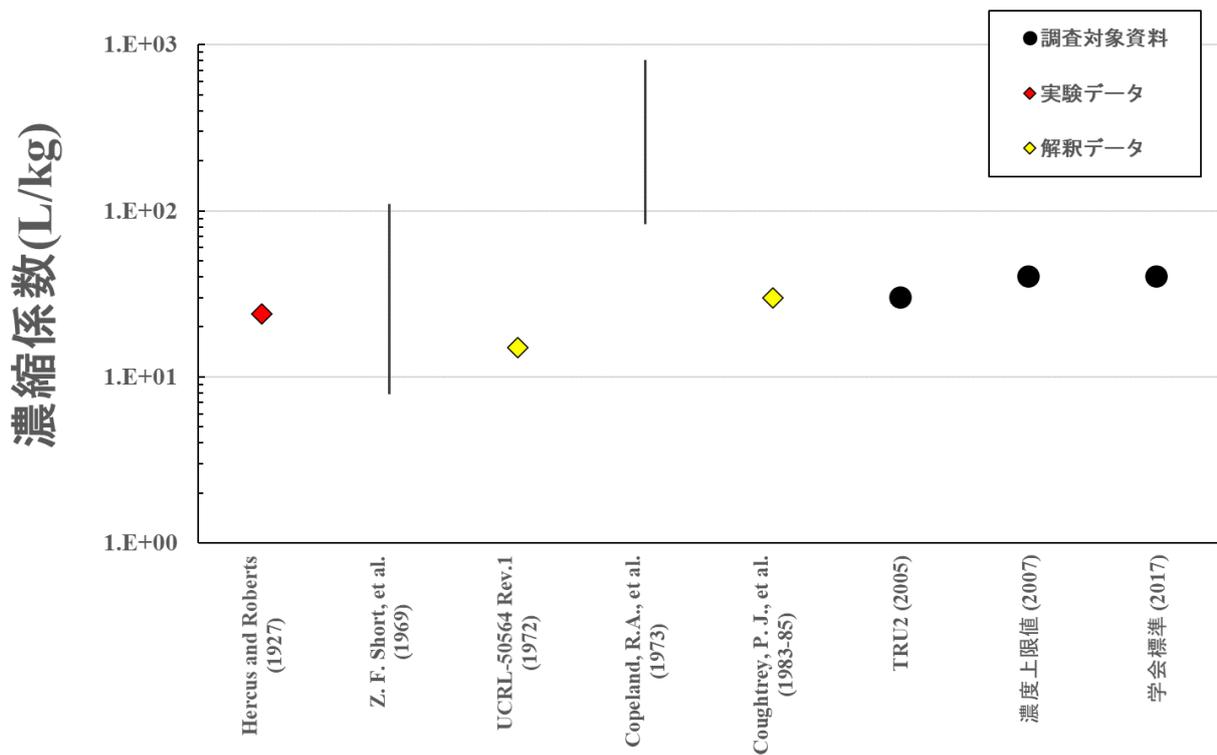


Fig. 9 数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値 (I : 淡水魚類)

2. Cs について

Fig. 10 に学会標準⁸⁾における海水魚類への濃縮係数の出典追跡結果を示す。あわせて TRU2⁴⁾における海水魚類への濃縮係数の出典追跡も実施した (IRPA、投稿中⁹⁾)。なお、濃度上限値⁷⁾では海水魚類への Cs の濃縮係数は扱っていない。

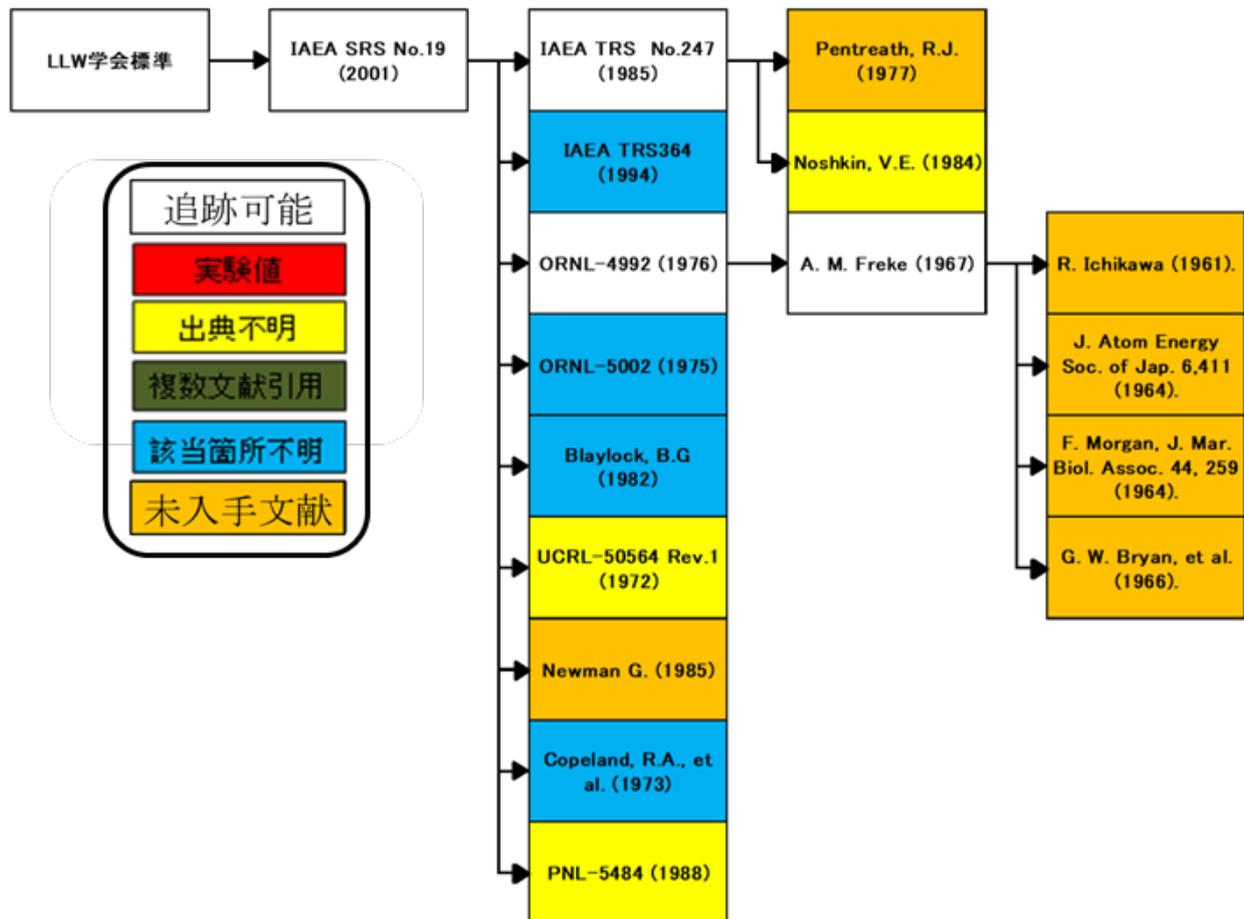


Fig. 10 学会標準⁸⁾における海水魚類への濃縮係数の出典追跡結果 (Cs)

追跡調査の結果から、数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値を Fig. 11 に整理した。Fig. 11 では、◆解釈データ、●一次資料のデータ、線は最小値から最大値の範囲を表す。最終文献では、幅が広い値が掲載されている文献が多く、1970年代前の文献では、一次資料より比較的低い値が報告されていた。

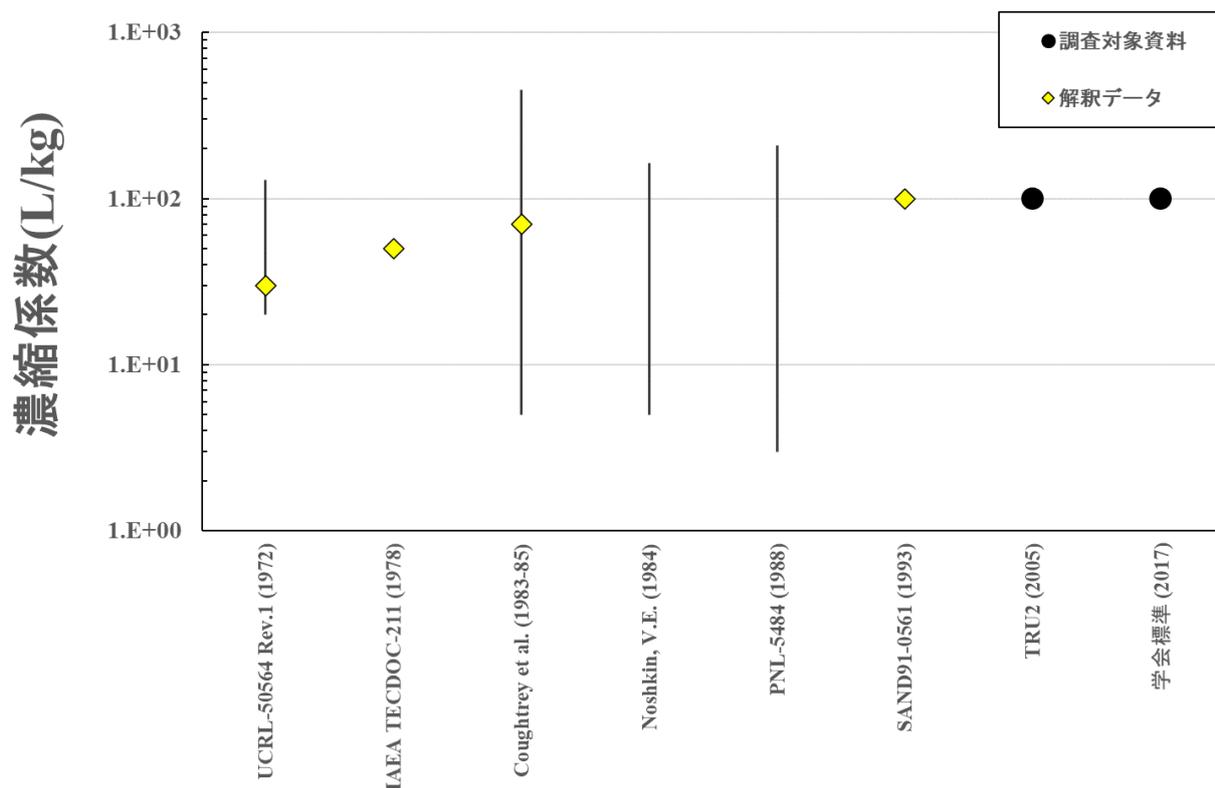


Fig. 11 数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値 (Cs : 海水魚類)

次に、Fig. 12 に TRU2⁴⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果を、Fig. 13 に学会標準⁸⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果を、Fig. 14 に濃度上限値⁷⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果を示す。また、引用の多い ORNL-5002 (1975)、Blaylock (1982)、UCRL-50564 Rev.1 (1972)、ORNL/NUREG/TM-282 (1979)に関しては、Fig. 15、Fig. 16 にまとめた。

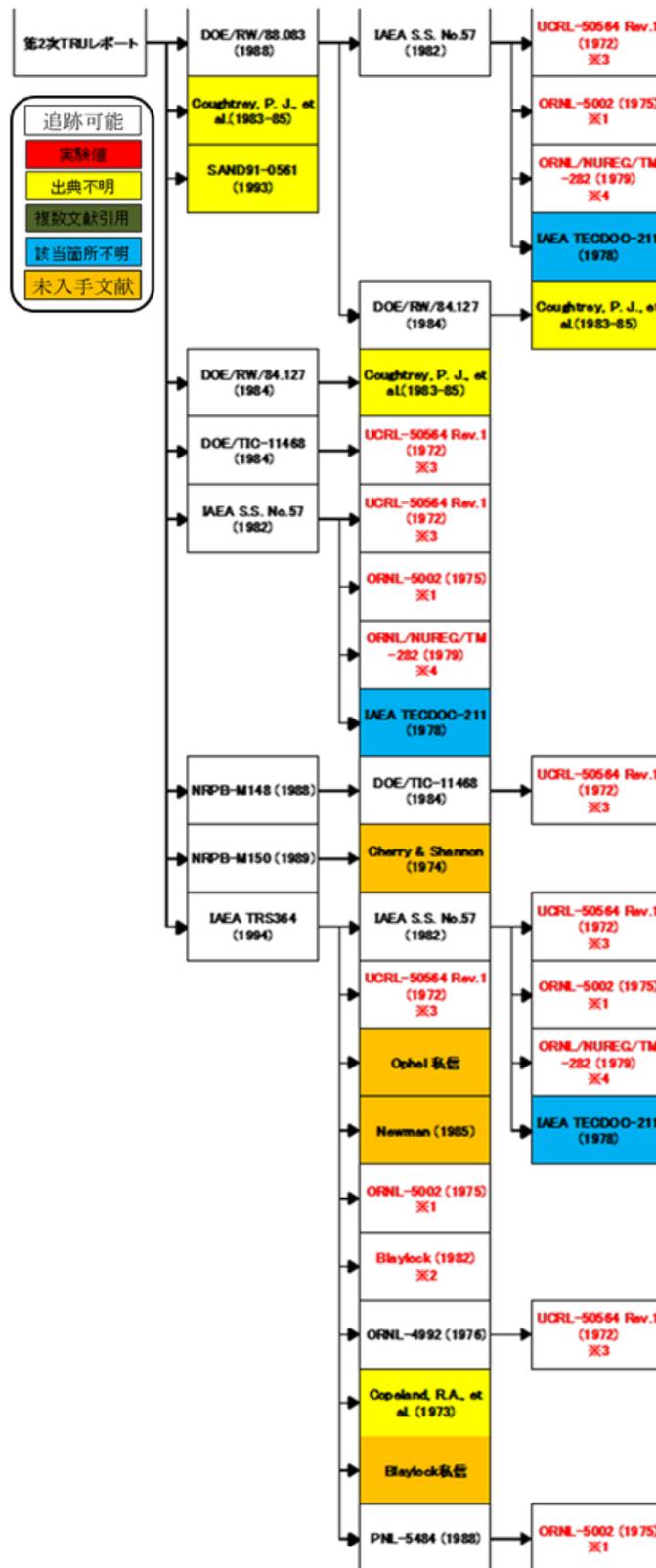


Fig. 12 TRU2⁴⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果 (Cs)。

※1-4 についてはさらに Fig. 15、Fig. 16 で遡った結果を表示。

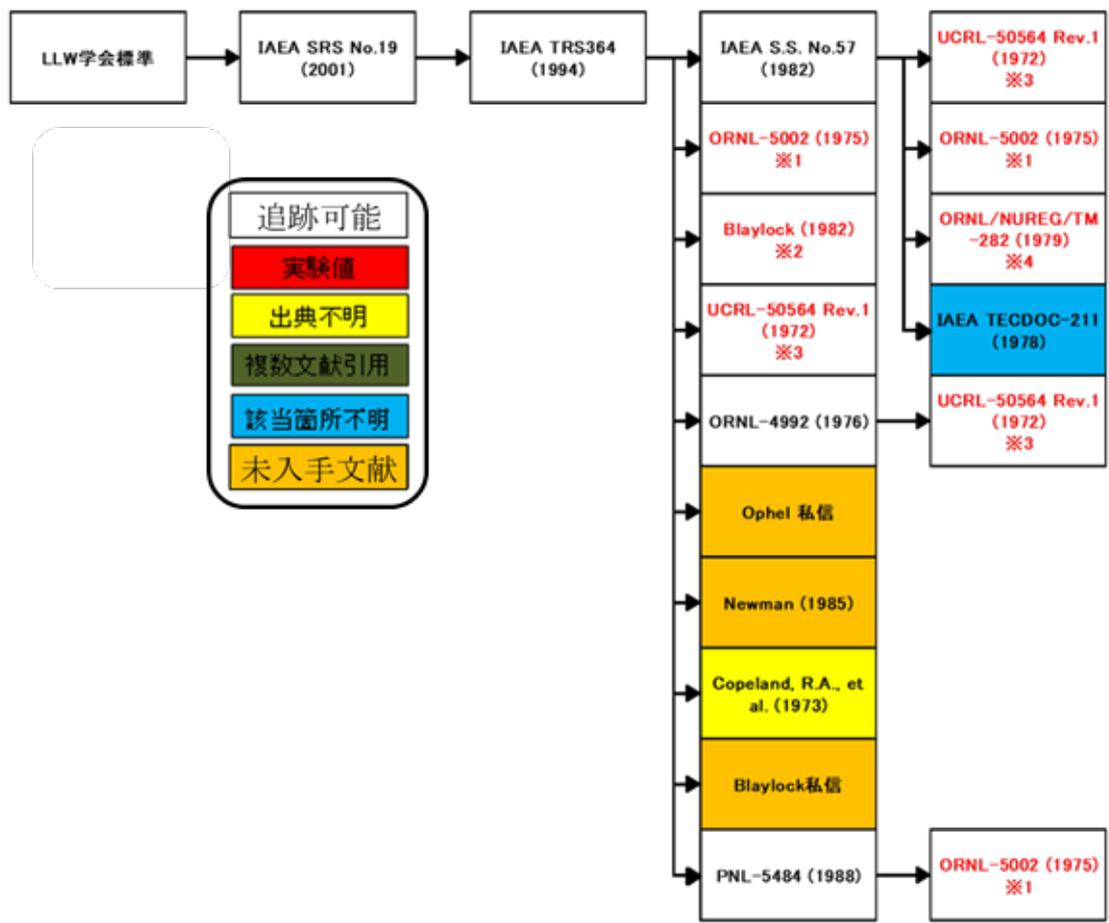


Fig. 13 学会標準⁸⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果 (Cs)。

※1-4 についてはさらに Fig. 15、Fig. 16 で遡った結果を表示。

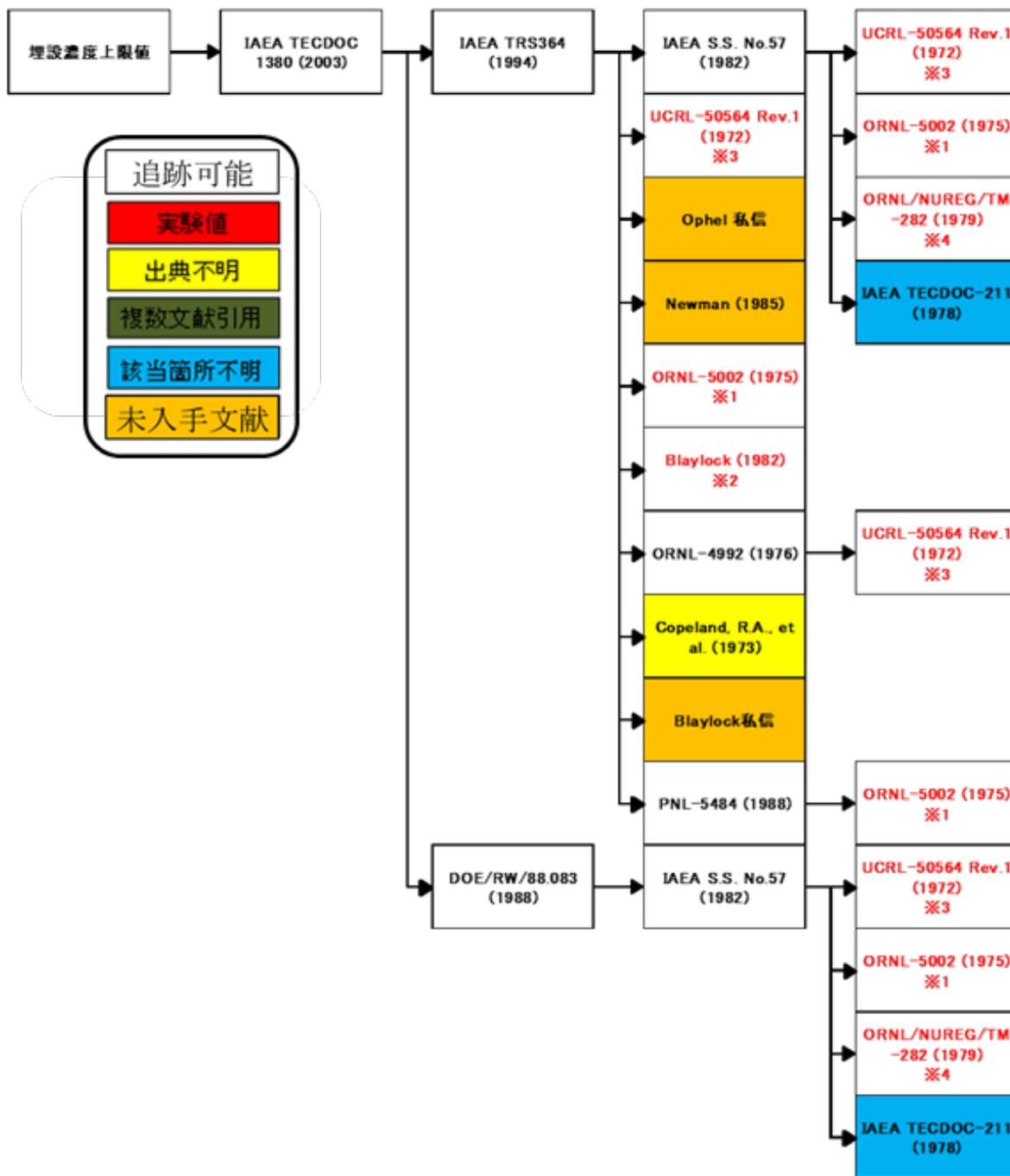


Fig. 14 濃度上限値⁷⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果 (Cs)。

※1-4 についてはさらに Fig. 15、Fig. 16 で遡った結果を表示。

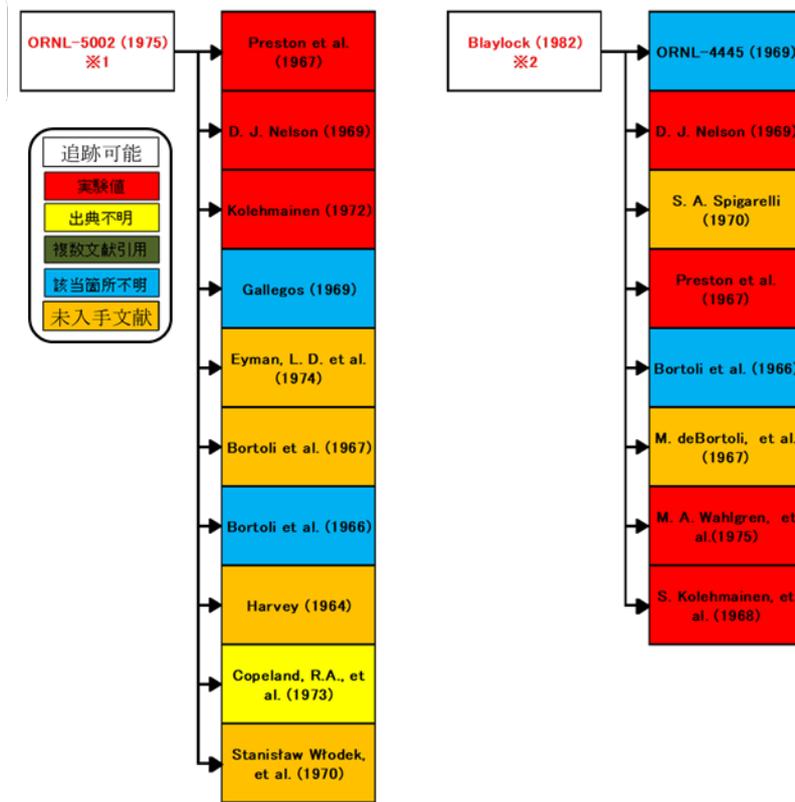


Fig. 15 淡水魚類の濃縮係数の出典追跡結果 (Cs)
 (※1 : ORNL-5002 (1975)、※2 : Blaylock (1982))

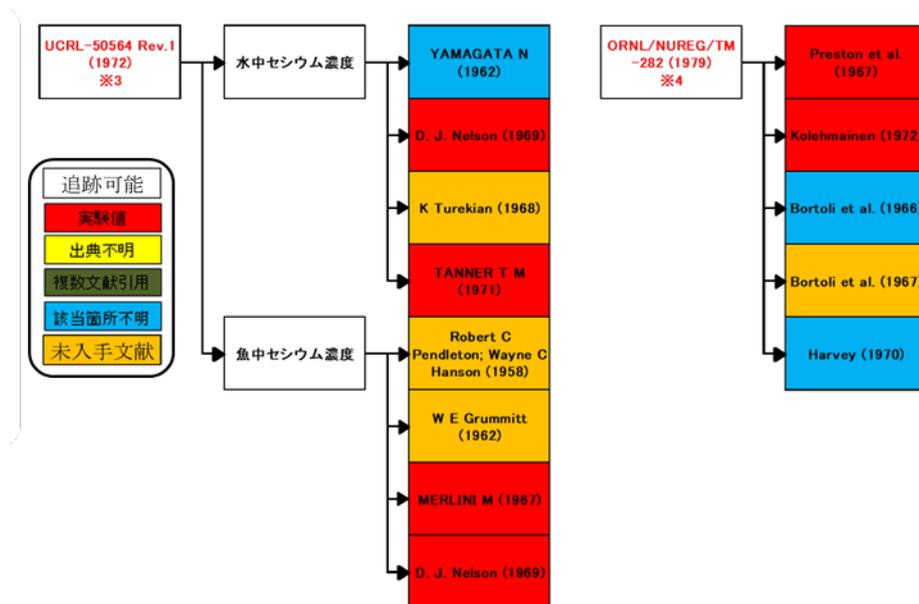


Fig. 16 淡水魚類の濃縮係数の出典追跡結果 (Cs)
 (※3 : UCRL-50564 Rev.1 (1972)、※4 : ORNL/NUREG/TM-282 (1979))

追跡調査の結果から、数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値を Fig. 17 に整理した。Fig. 17 では、◆は独自データ、◆解釈データ、●一次資料のデータ、線は最小値から最大値の範囲を表す。最終文献では、幅が広い値が掲載されている文献が多く、年代の古い文献ほど、一次資料より比較的低い傾向があった。また、海水の結果と比較すると、最終文献に実験結果が記載されているケースが多い傾向があった。

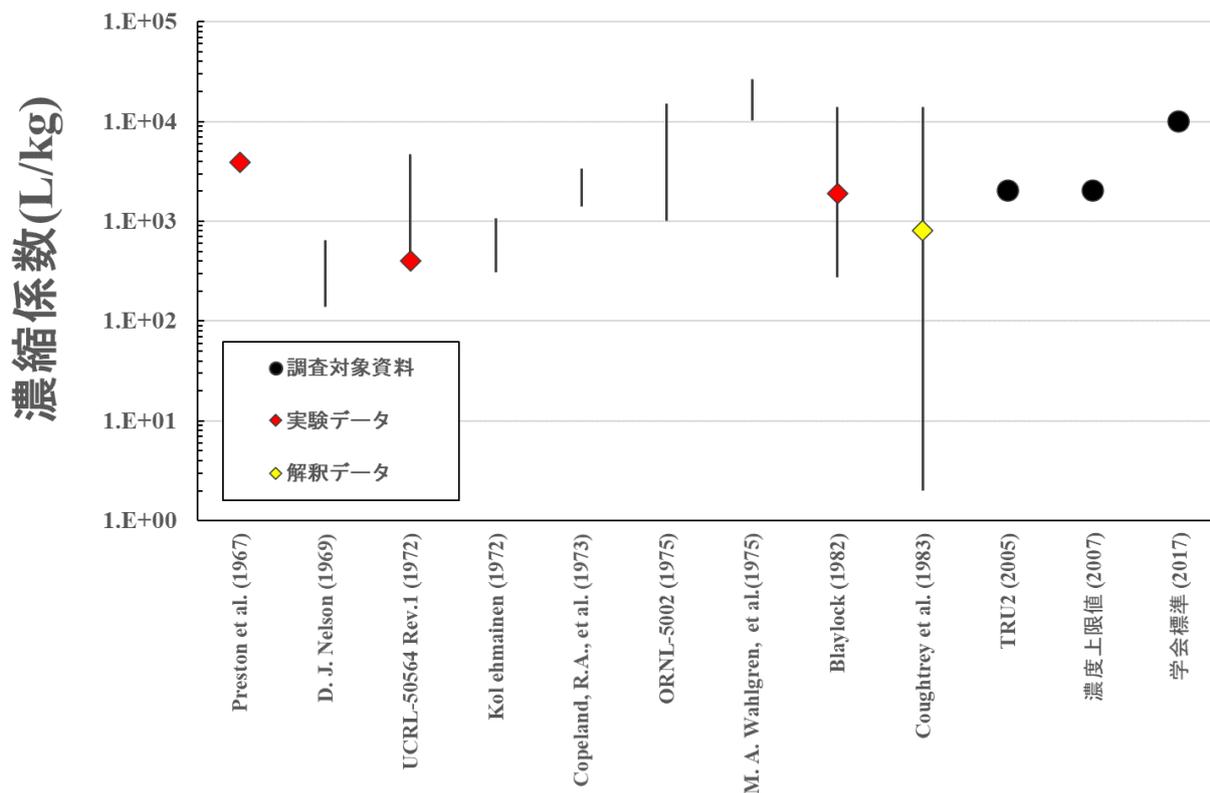


Fig. 17 数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値 (Cs : 淡水魚類)

3. Pu について

Fig. 18 に TRU2⁴⁾に海水魚類への濃縮係数の出典追跡結果を、Fig. 19 に学会標準⁸⁾における海水魚類への濃縮係数の出典追跡結果を示す。なお、濃度上限値⁷⁾では海水魚類へのPuの濃縮係数は扱っていない。

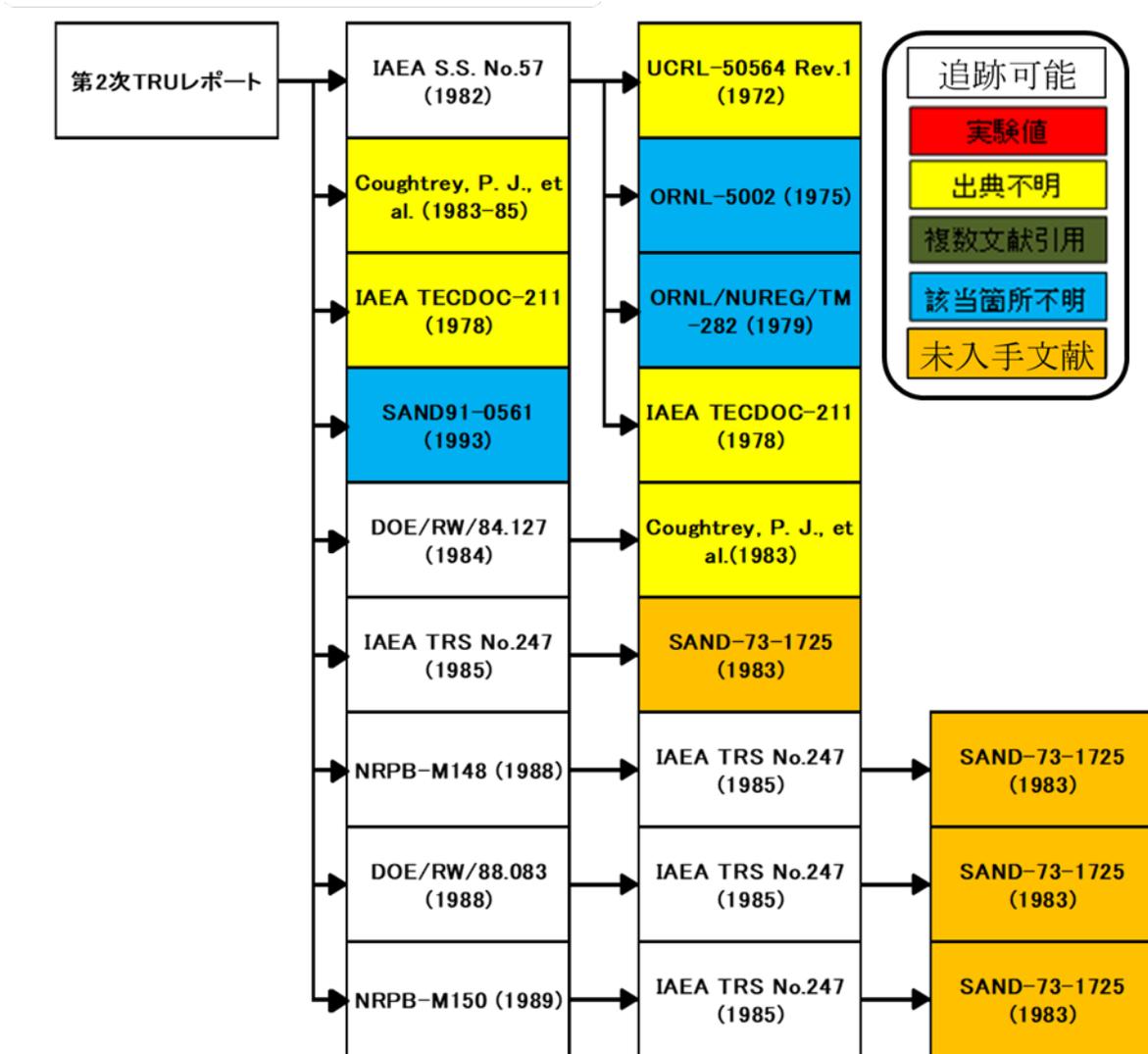


Fig. 18 TRU2⁴⁾における海水魚類への濃縮係数の出典追跡結果 (Pu)

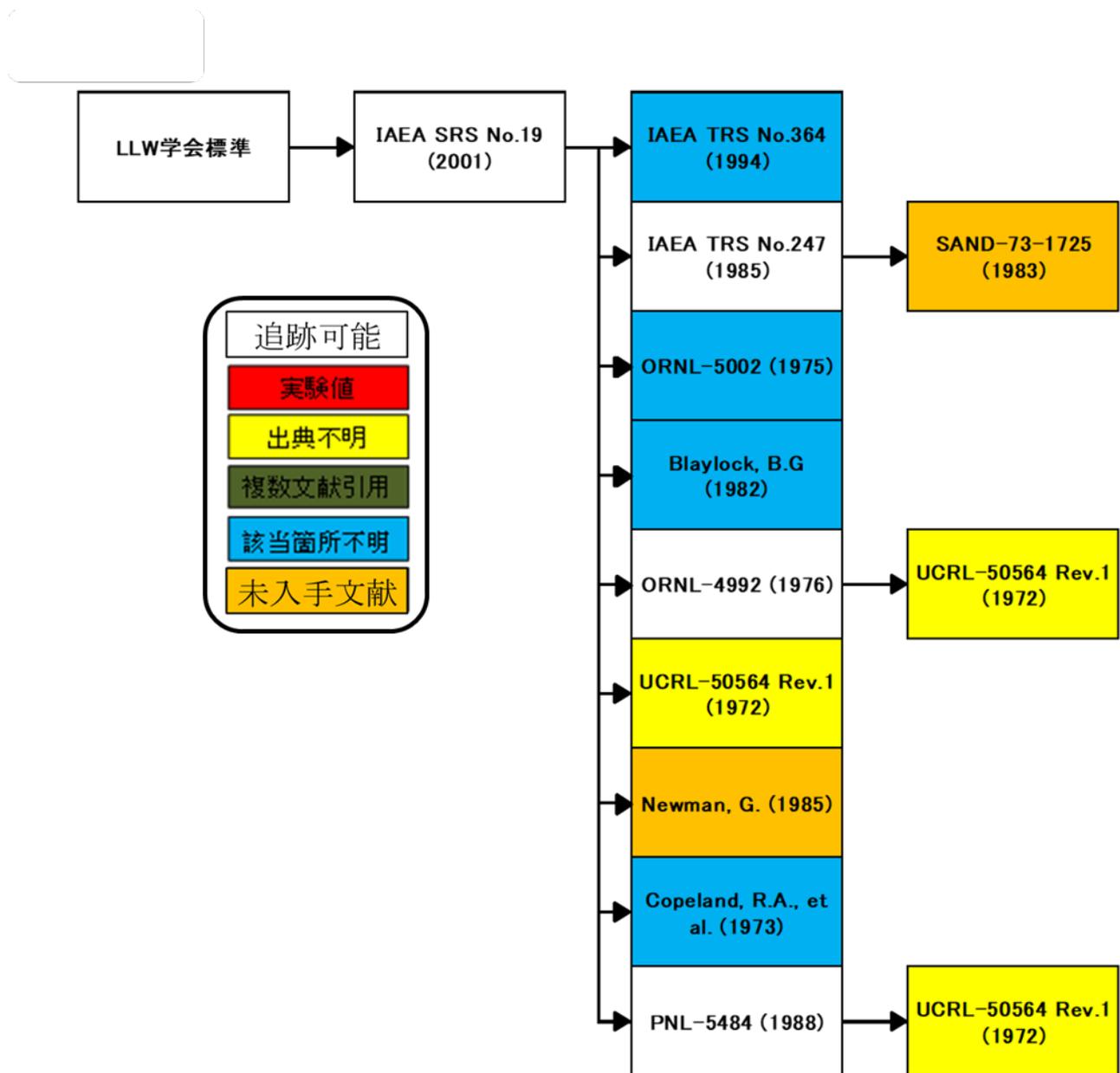


Fig. 19 学会標準⁸⁾における海水魚類への濃縮係数の出典追跡結果 (Pu)

追跡調査の結果から、数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値を Fig. 20 に整理した。Fig. 20 では、◆は独自データ、◇解釈データ、●一次資料のデータ、線は最小値から最大値の範囲を表す。最終文献は、年代が古い文献ほど、一次資料より比較的低い値が報告されている傾向が確認できた。また、Coughtrey (1983-85)が示した濃縮係数値の範囲は広い結果となっているが、トレーサー実験の文献や安定元素を用いた文献等、様々な文献をまとめたものであるため範囲が広い。

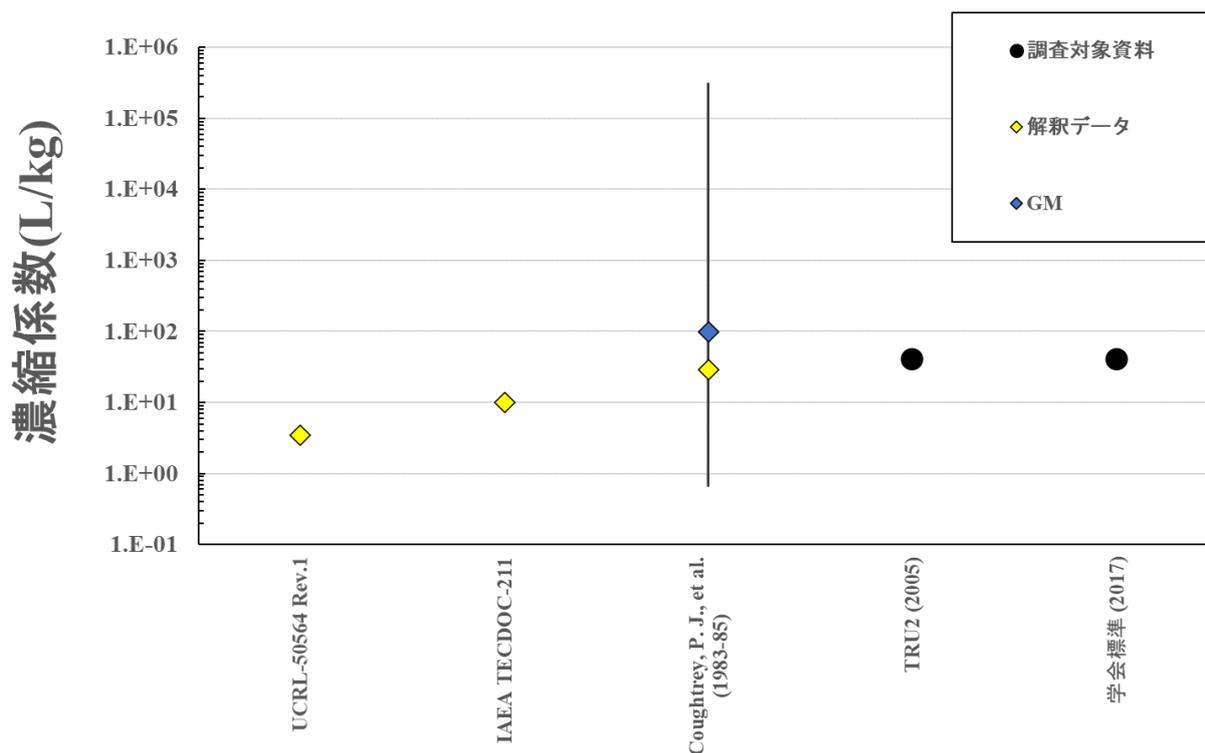


Fig. 20 数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値 (Pu : 海水魚類)

次に、Fig. 21 に TRU2⁴⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果を、Fig. 22 に学会標準⁸⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果を、Fig. 23 に濃度上限値⁷⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果を示す。また、引用の多い Blaylock, B.G (1982)、IAEA SS No.57 (1982)に関しては、Fig. 24 にまとめた。

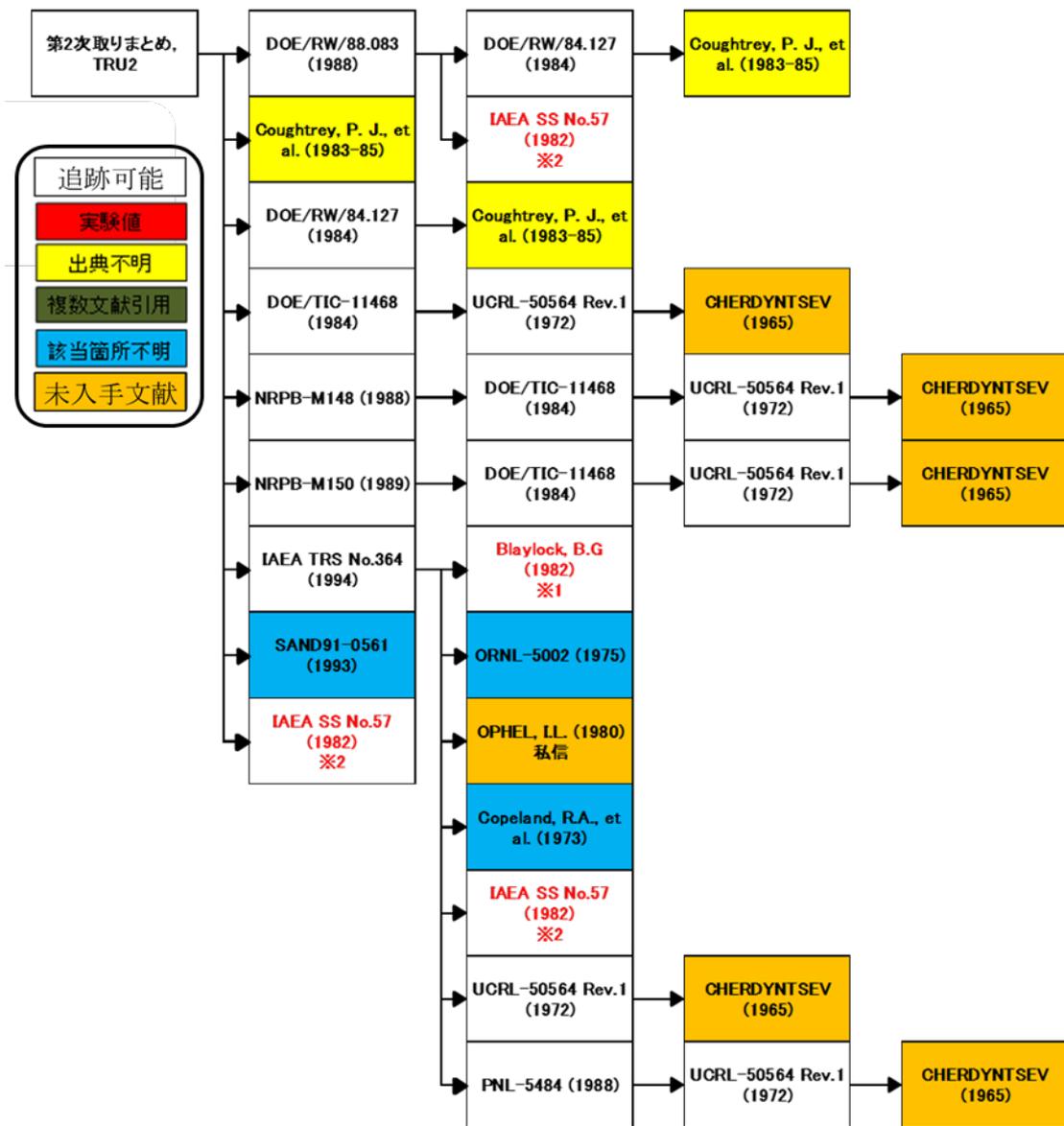


Fig. 21 TRU2⁴⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果 (Pu)。

※1-2 についてはさらに Fig. 24 で遡った結果を表示。

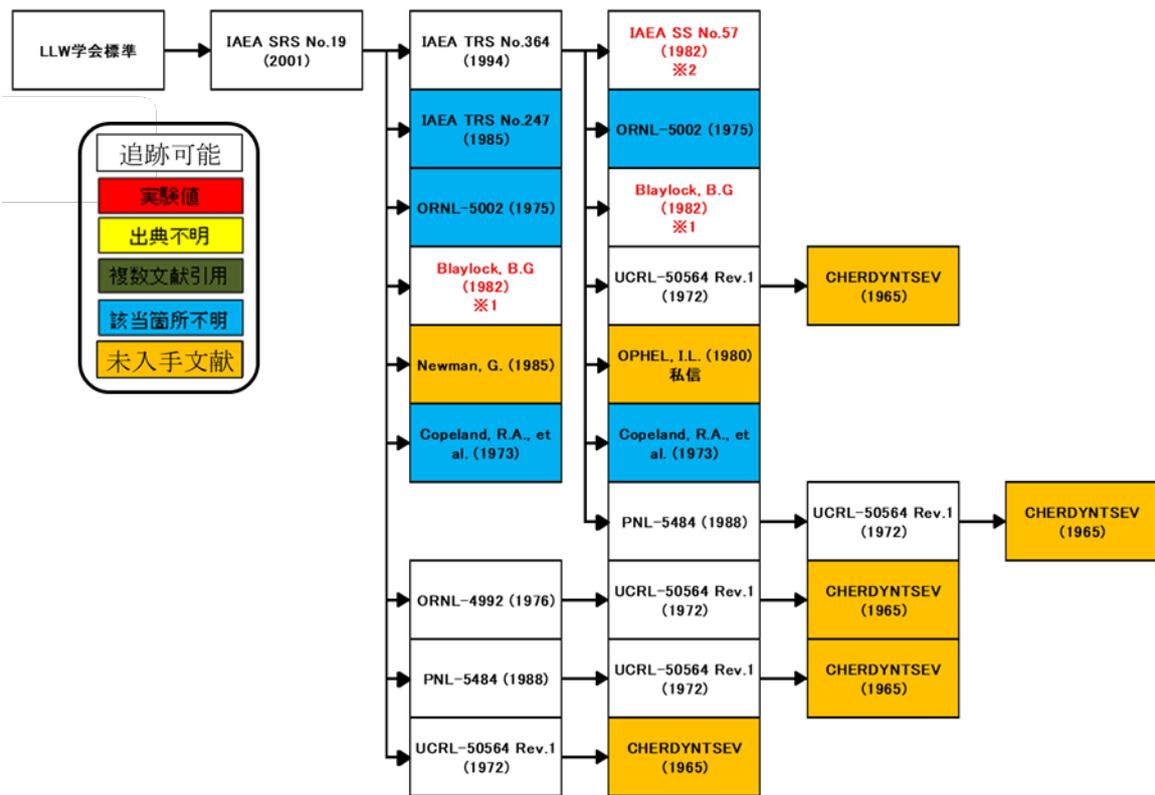


Fig. 22 学会標準⁸⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果 (Pu)。

※1-2 についてはさらに Fig. 24 で遡った結果を表示。

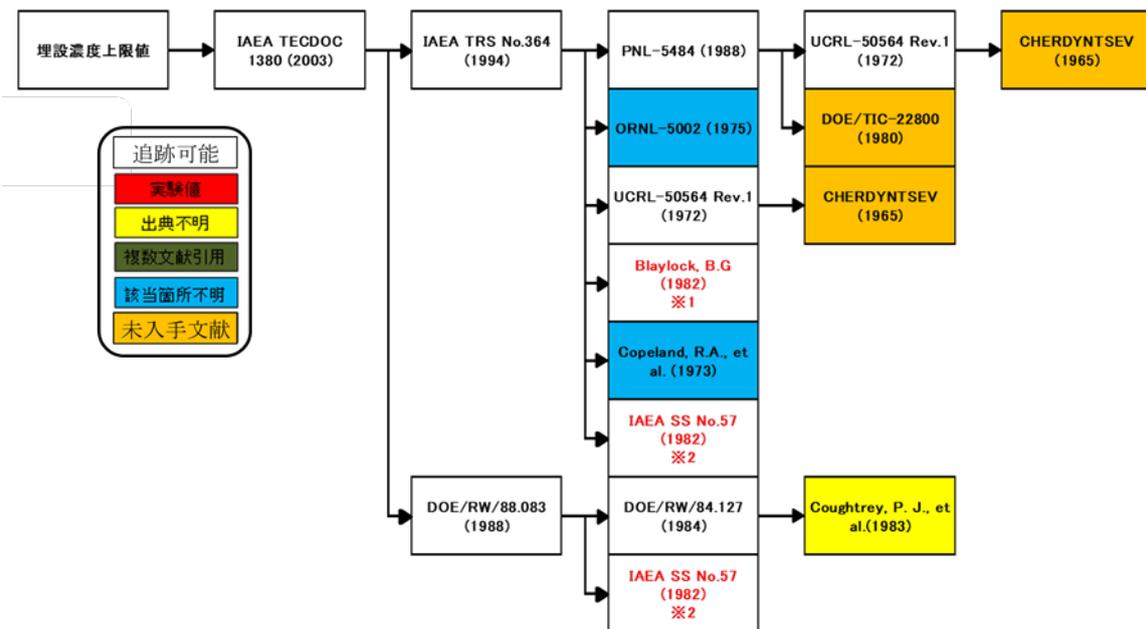


Fig. 23 濃度上限値⁷⁾における淡水魚類への濃縮係数の出典追跡結果 (Pu)。

※1-2 についてはさらに Fig. 24 で遡った結果を表示。

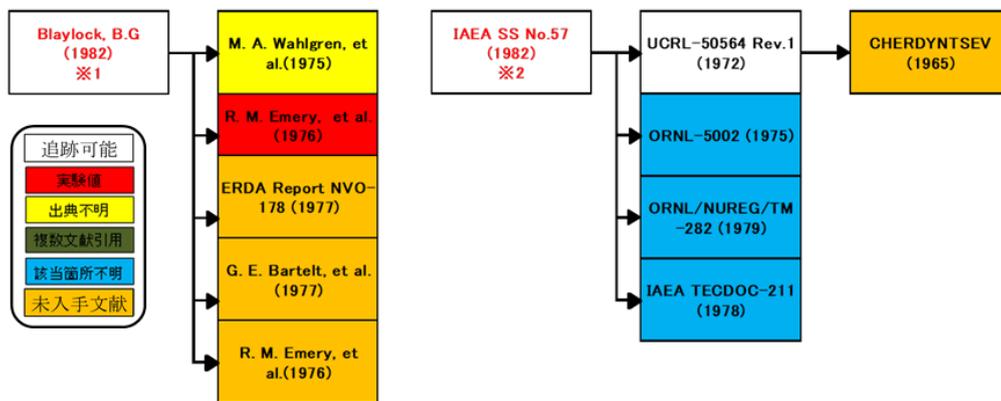


Fig. 24 淡水魚類の濃縮係数の出典追跡結果 (Pu)
 (※1 : Blaylock, B.G (1982)、※2 : IAEA SS No.57 (1982))

追跡調査の結果から、数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値を Fig. 25 に整理した。Fig. 25 では、◆は独自データ、◇解釈データ、●一次資料のデータ、線は最小値から最大値の範囲を表す。最終文献は、海水と異なり、年代との関係は確認できなかった。また、Coughtrey (1983-85)が示した濃縮係数値の範囲が広い結果となっているのは、海水で述べた理由と同様である。

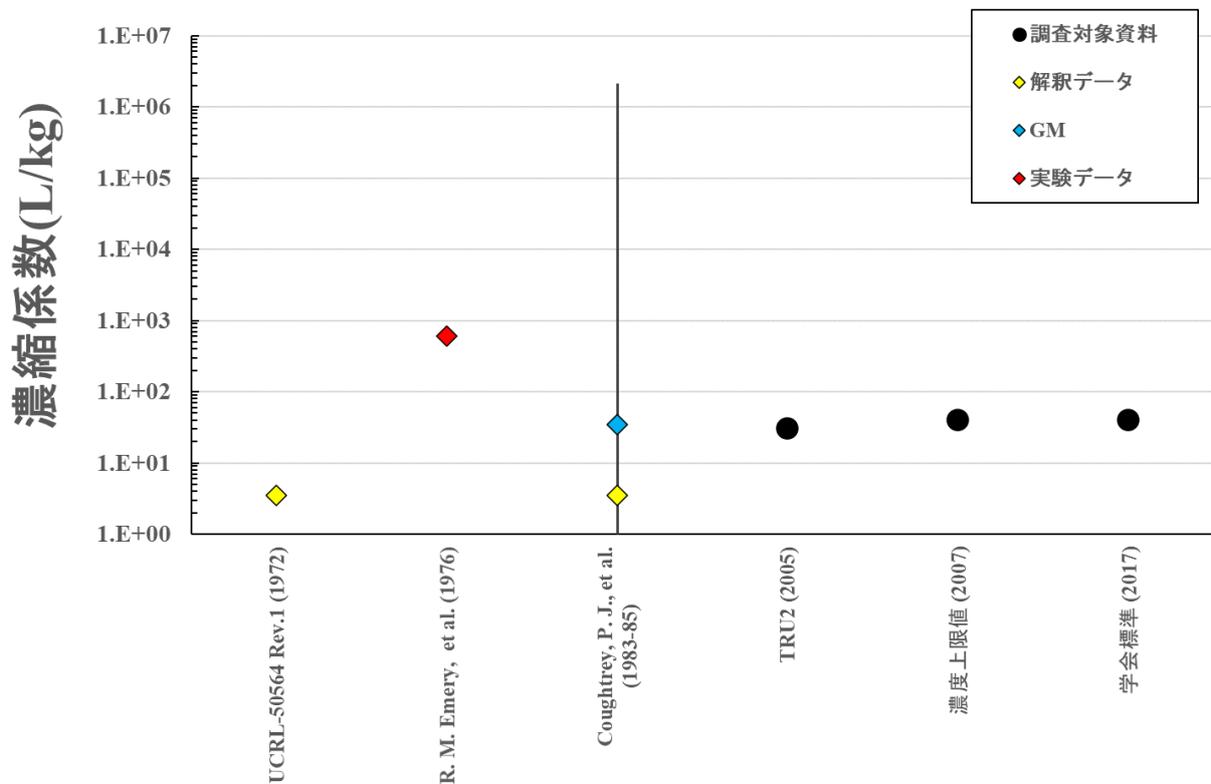


Fig. 25 数値が掲載されている最終文献での値と一次資料での設定値 (Pu : 淡水魚類)

III 既往の評価でのパラメータ設定値と最新データの文献調査結果(国内外)の比較

1. 最新データとの比較方法

対象元素はIIの追跡調査と同様とし、棲息水から水産物(魚類)への放射性物質の濃縮係数について、下記の方法で文献収集を行った。

文献の収集範囲は国内・国外で下記の通りとした。

- 国内：RWMCのパラメータシリーズ以降を対象とする。ただし、Csに関しては、2010年まで(福島事故前まで)を対象とする。
環境パラメータシリーズ3 淡水から生物への放射性物質の移動, RWMC-92-P-14, (1992).¹⁰⁾
環境パラメータシリーズ6 海洋生物への放射性物質の移行, RWMC-96-P-18, (1996).¹¹⁾
- 国外：IAEA TRS No.422(2004)²⁾、IAEA TRS No.472(2010)¹²⁾以降

文献検索は、Google Scholar 及び J-STAGE により、以下のキーワードを用いて検索を行った。

- 核種(英名・和名)
- concentration factor / concentration ratio / radioactivity(英名・和名)
- fish / freshwater, river, lake, marine, or sea(英名・和名)

比較の対象とした既往の評価は、IIの追跡調査で一次資料とした日本の放射性廃棄物処分に係わる生活圏被ばく評価(濃度上限値⁷⁾、TRU2⁴⁾、学会標準⁸⁾)とした。

2. 最新データとの比較結果 (I)

I についての最新データと既往の評価における設定値との比較結果を Fig. 26、Fig. 27 に示す。

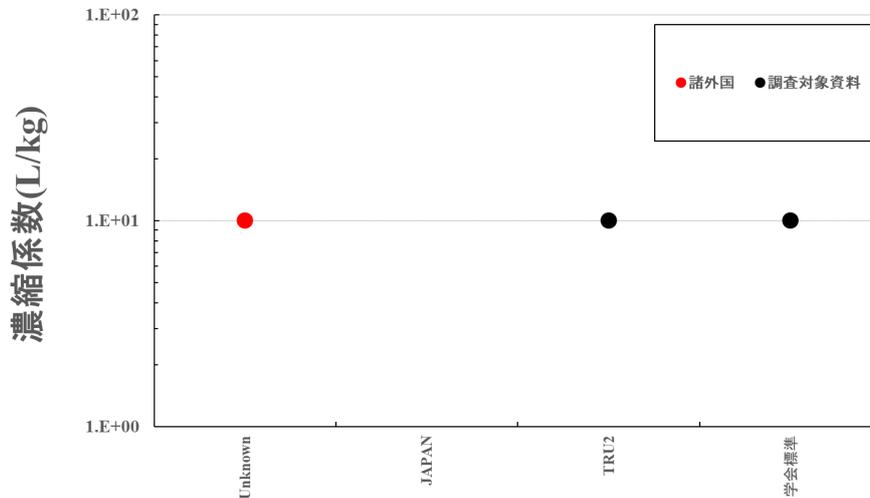


Fig. 26 文献データ及び各評価における水産物（魚類）への濃縮係数（海水）

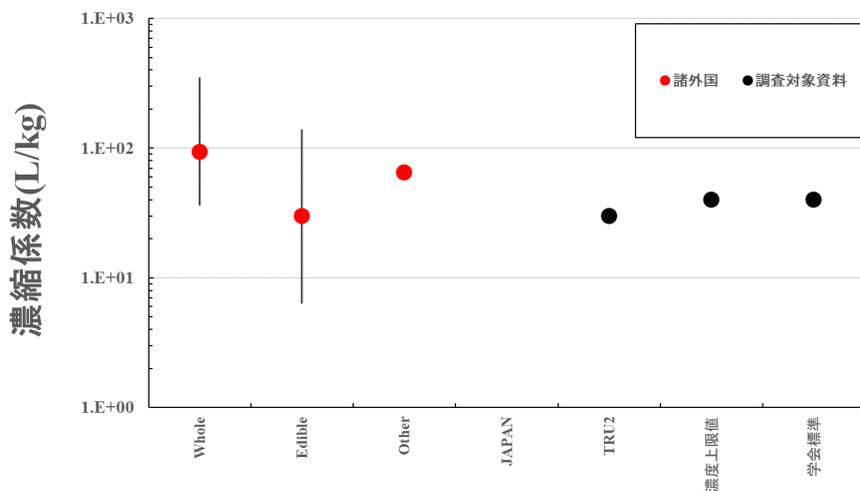


Fig. 27 文献データ及び各評価における水産物（魚類）への濃縮係数（淡水）

I の文献は、淡水系 1 報（内使用データ数:49）、海水系 1 報（内使用データ:1）であり、日本の文献はなかった。評価核種においては、淡水系では安定 I を評価しており、海水系では I-129 を評価していた。評価対象の部位においては、海水のデータは不明であり、淡水では全身、可食部、その他に分類されていた。比較の結果、わが国の既往の評価における設定値は、最新のデータと比べて海水のデータは一致しており、淡水のデータでは可食部が一致、全身とその他の値が高いことが分かった。

3. 最新データとの比較結果 (Cs)

Cs についての最新データと既往の評価における設定値との比較結果を Fig. 28、Fig. 29 に示す。

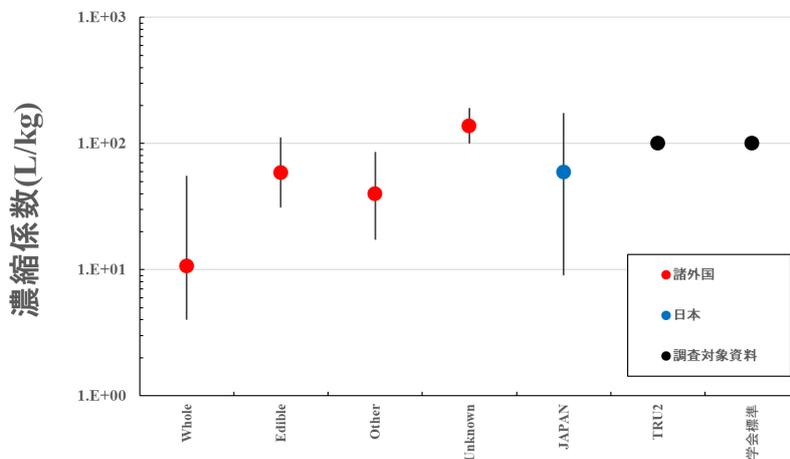


Fig. 28 文献データ及び各評価における水産物（魚類）への濃縮係数（海水）

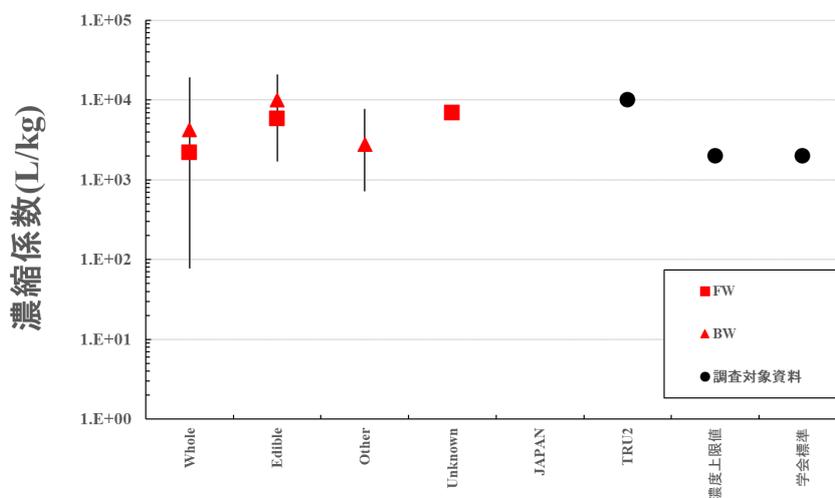


Fig. 29 文献データ及び各評価における水産物（魚類）への濃縮係数（淡水・汽水）

Cs の文献は、淡水系 7 報（内使用データ数:130）、汽水系 1 報（内使用データ 18）、海水系 8 報（内使用データ:57）であり、日本の文献は 4 報（海水、可食部のみ）。評価対象部位は、海水・淡水ともに全身、可食部、その他、対象部位不明の 4 種の結果が報告されていた。比較した結果、海水では一次資料よりも低い傾向があり、淡水汽水では一次資料と同程度のデータが報告されていた。また、いずれのデータも、濃縮係数値の範囲は幅広かった。これは対象としている魚種の違いやサンプル数による影響が考えられる。

4. 最新データとの比較結果 (Pu)

Pu についての最新データと既往の評価における設定値との比較結果を Fig. 30 に示す。Pu の濃縮係数が記載されている文献は、海水系 2 報 (内使用データ数:6) であり、淡水系の文献、日本の文献はなかった。また、これら 2 報の文献には、評価対象に関して明記されておらず、評価対象部位が不明であった。さらに、諸外国のデータでは 1 桁近く高い海水魚への濃縮係数が報告されていたがその原因については不明である。

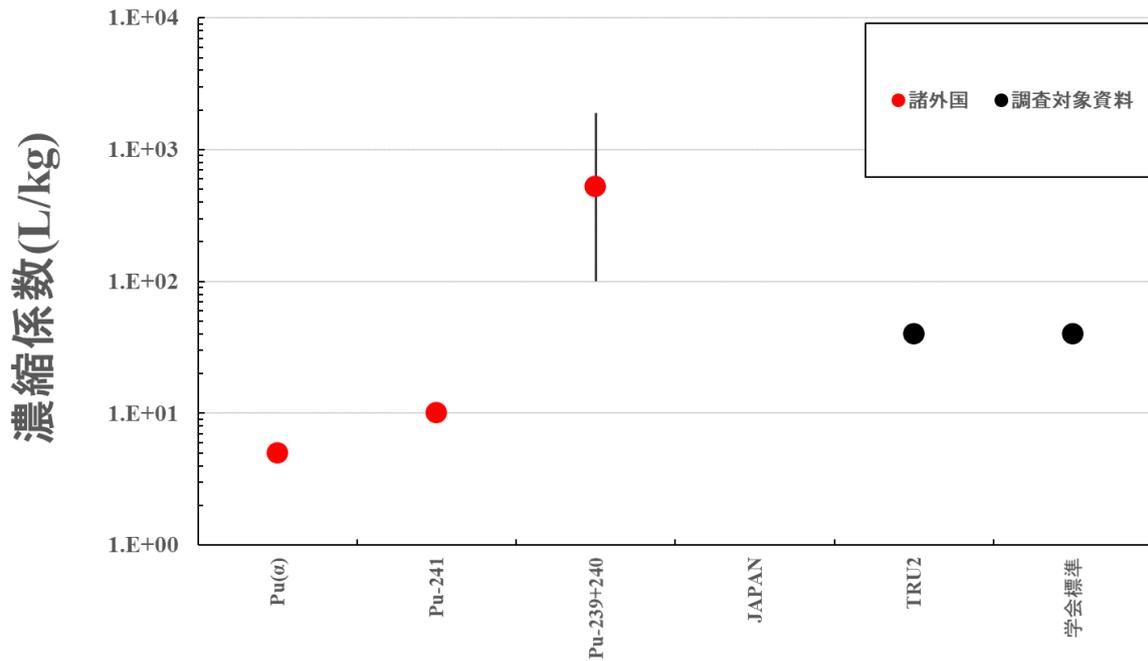


Fig. 30 文献データ及び各評価における水産物 (魚類) への濃縮係数 (海水)

IV 結論

棲息水から水産物（魚類）への濃縮係数について、I、Cs、Pu を調査対象元素とし、日本の放射性廃棄物処分に係わる安全評価における生活圏評価における設定値の出典追跡調査を行った。その結果、我が国の推奨値は、淡水魚、海産魚ともに 1960 年代、1970 年代の値からあまり変化がないことがわかった。また、どの一次資料も複数の文献を引用しているが、たどり着く文献の多くは 1960 年代から 1970 年代に取得されたものであり、デジタル化されていないため、オリジナルのデータを確認することができなかつたものも多かつた。更に、データの出典が不明であったり、報告書の中で引用したデータが不明であったり、専門家の判断として値が与えられている場合があつた。また、これらの中に日本の文献は含まれていないことが分かつた。

次に既往の評価でのパラメータ設定値と最新データの文献調査結果（国内外）の比較を実施した。I については、わが国の既往の評価における濃縮係数設定値は、最新のデータと比べて海水魚のデータは一致しており、淡水魚のデータでは可食部が一致、全身とその他の値が高いことが示された。Cs については、海水魚では一次資料よりも低い傾向があり、淡水魚及び汽水魚では一次資料と同程度のデータが報告されていた。Pu に関しては、評価対象部位が不明であり、評価核種も異なり比較が難しい結果となつた。文献に関しては、I・Pu は文献数、データ数ともに少なく、Cs が最も多く報告されており、日本のデータに関しても、Cs の海水系の 4 報のみであつた。データは現在も少ないことから、さらなるデータの蓄積が必要であろう。

参考文献

- 1) International Atomic Energy Agency: Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments, Technical Reports Series No. 364, Vienna, 1994.
- 2) International Atomic Energy Agency: Sediment Distribution Coefficients and Concentration factors for Biota in the Marine Environment, Technical Reports Series No. 422, Vienna, 2004.
- 3) International Atomic Energy Agency: Handbook of Parameter Values for the Prediction of radionuclide Transfer to Wildlife, Technical Reports Series No. 479, Vienna, 2014.
- 4) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構: TRU 廃棄物処分技術検討書－第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005, 556p.
- 5) Atomic Energy Society of Japan (AESJ), 2014, AESJ Standard Method for Safety Assessment of Disposal of Low Level Nuclear Waste in Near Surface Trench: 2013, AESJ-SC-F024.
- 6) Food and Agriculture Organization: (2020) New Food Balances.
<http://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS> (accessed on 8 December 2020).
- 7) 原子力安全委員会 (2007): 低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について.
- 8) ウラン取扱施設におけるクリアランスレベル日本原子力学会: 日本原子力学会標準 浅地中処分の安全評価手法 : 2016, AESJ-SC-F026:2016, 240p, 2017.
- 9) International Radiation Protection Association: Proceedings of the 15th International Congress of the International Radiation Protection Association. Seoul, Korea. 18-19 January 2021 (in press).
- 10) 原子力環境整備センター: 環境パラメータシリーズ 3 淡水から生物への放射性物質の移動, RWMC-92-P-14, 1992.
- 11) 原子力環境整備センター: 環境パラメータシリーズ 6 海洋生物への放射性物質の移行, RWMC-96-P-18, 1996.
- 12) International Atomic Energy Agency: Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, Technical Reports Series No. 472, Vienna, 2010.

生活圏被ばく線量評価に用いられたパラメータと最新データとの 比較検討 ~Cs, I および Pu の海産生物濃縮係数~

Comparison of parameter values used in biospheric dose assessment and newly observed ~concentration factors of Cs, I and Pu in marine biota~

田上恵子^{1)*}、内田滋夫^{1,2)}
Keiko TAGAMI¹⁾ and Shigeo UCHIDA^{1,2)}

- 1) (国研) 量子科学技術研究開発機構
- 2) 日本エヌ・ユー・エス (株)

- 1) National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology
- 2) Japan NUS Co., Ltd.

*Corresponding author, E-mail: tagami.keiko@qst.go.jp

Since Japanese consume many edible marine species, it is necessary to confirm that the water-to-marine biota concentration ratios (CRs) provided in IAEA documents are set high enough for environmental dose assessment. By using open data sources for I and Pu in seawater and marine biota, we calculated the CR data. We also carried out literature review of CR values obtained in Japan for Cs, I and Pu and summarized the CR data. The GM-CR values provided in this study for all three elements were similar to previous findings as provided in IAEA documents.

KEYWORDS: concentration ratio, radiocaesium, radioiodine, plutonium, marine biota

I はじめに

生活圏安全評価に使われる環境移行パラメータは IAEA で収集されたものが広く使われている。陸域データについては、IAEA が Technical Report Series No. 364 (TRS364)¹⁾ の後、チェルノブイリデータを含む形のアップデートとして TRS472²⁾ が発行されている。どちらの TRS とも、データベースが公表されているわけではなく、各担当研究者が収集したデータのとりまとめ結果が掲載されている。引用文献はリストアップされているが、ハードコピーしか残っていない古い文献や、ロシア語の文献などは、アクセス困難というものが多くある状況にある。福島事故関連の移行パラメータについては、事故直後のデータとして Tecdoc 1927³⁾ が 2020 年 10 月末に発行された。近年の IAEA の出版物は、引用文献の言語が英語でなくても、すべて IAEA の方で文献をストックされている点で、将来レビューをする際に有効である。データが取得された情報も含む文献を電子媒体でストックしていく方法を共通の手法として今後採用する必要があるだろう。

海洋データについては、TRS422⁴⁾が発行され、安全側に設定されている。海底堆積物-海水分配係数 K_d は、安定元素を用いており、堆積物と海水それぞれの平均的な濃度を使って求められていることから、ほとんどの元素について網羅的に提供されている。また、安定元素のない放射性核種については、アイリッシュ海等で測定されたデータが用いられている。海水から魚介類への濃縮係数 (Concentration Ratio, CR [L/kg FM]) は魚介類中の濃度 (Bq/kg FM) / 海水中濃度 (Bq/L) により求められる (FM は Fresh Mass の略)。CR データについては、TRS 422 の一部で日本のデータが使われているものの、多くは欧米のデータである。また、海産物を多く摂取する我が国の状況を反映したパラメータ設定にはなっていない。つまり、魚は種類別での報告はなく、貝類、甲殻類、頭足類といった群での評価になっている。海藻も食べるという観点はないため、緑藻類や紅藻類よりも元素がよく濃縮される傾向にある褐藻類 (ただし食用かどうかは考慮されていない) が掲載されている。また、推奨値には範囲が示されておらず、執筆者らのエキスパートジャッジメントに拠って設定されている。つまりデータは示されているが、それが日本人の食文化に適したデータ設定になっているか、検討されていない。

例えば TRS 472²⁾ では陸域対象であるが、家畜は哺乳類と鳥類 (主にニワトリ) というわけ方ではなく、哺乳類のうち、胃からの吸収能の違いを考慮して反芻動物と単胃動物に分け、さらに反芻動物もウシ、ヤギ、ヒツジといった種類ごとに分けて報告している。もちろんデータの有無、さらには解析した結果分けた方が良いと判断され、掲載されているのだが、データが多いということは、すなわち欧米ではよく利用されている食材であるという点も分類が細かい理由であろう。これを考えると、改めて TRS 422 に記載されているデータは、この TRS が欧米出身の 5 人の専門家により取りまとめられたことに気づく。日本での線量評価方法について、検討する余地は十分あろう。

本研究では Cs, I 及び Pu について、我が国の海産物 CR データとしてどのような値が得られるのか検討した。近年 Cs については、上述の Tecdoc 1927³⁾ に、我が国の ^{137}Cs のモニタリングデータを使った魚種毎の CR 値が報告されている。そこで同様に環境モニタリングのために収集された海水および海産物の I や Pu データから、CR 値の導出を試みた。これらのデータと我が国で得られた文献データを集約し、TRS422 に報告されている Cs, I 及び Pu の CR 値が十分安全側に設定されているのか確認することを目的とした。

II データの収集について

1. セシウム

福島第一原発事故による海洋中放射性 Cs 濃度上昇の影響を受けて、2011 年以降は濃縮係数に影響が出ていることが知られている^{5,6)}。Takata et al.⁵⁾ および Tagami and Uchida⁷⁾ にはグローバルフォールアウトを主とする海洋水中および海産物中の ^{137}Cs 濃度データを使って導出した Cs の濃縮係数が報告されていることから、これらを参照した。

2. ヨウ素

海産物の安定ヨウ素測定データが ICP-MS や ICP-OES の普及により増加した。例えば、食品成分データベース⁸⁾ には水産物可食部中のヨウ素濃度が記載されるようになった。これと Zheng

ら⁹⁾が測定した沿岸海水中の安定ヨウ素濃度を用いて CR を導出することができる。また、環境放射線データベース¹⁰⁾には、海水中および海産生物の¹²⁹Iが報告されている。海水中濃度は¹²⁹Iが長半減期核種であること、また安定ヨウ素がほぼ均一分布していることから、幾何平均値を使って CR を導出した。

3. プルトニウム

環境放射線データベース¹⁰⁾には、海水中および海産生物の²³⁹⁺²⁴⁰Puが報告されている。海水中濃度は¹²⁹Iとは異なり、Puが沈降粒子と結合しやすいことを考慮し、海産生物が採取された直近のデータを使用して、CRを導出した。

III 結果および考察

1. セシウム海産物 CR の比較

セシウム海産物への CR を比較した結果を Table 1 に示す。IAEA SS 57¹¹⁾はすでに使われなくなったデータ集であるとの注意がなされているが、過去にはよく引用されていた文献であることから、比較のために記載した。本調査で得られた CR に対しては Geometric mean (GM) を示したが、これは以前我々が報告した海産生物の CR⁷⁾の分布は対数正規分布だったことに依る。SS 57 に比べて TRS 422 では Cs の CR が高めに設定されている。今回我々が比較した文献の結果を見ると、TRS 422 と GM を比べると近い値であることがわかったが、個別に見ると範囲を超えるものもあった。Takata et al.⁵⁾は生物種毎の CR を報告している。魚種毎に見ると、アイナメ (Greenling) のように比較的幅の広い値を示す場合もあるが、どの種も平均で 30% の誤差程度であり、種間差が 45% だったことに比べると小さい。すなわち、魚種を限定することで、CR による誤差を減少させることができることがわかった。なお、Takata et al.⁵⁾は、スズキやスケトウダラでは平均の CR が TRS 422 の設定している 100 を超えていることを報告している。しかし、その違いは 2 倍以内であり、TRS 422 は十分安全側の設定ではないものの、大きな差はなかったと言える。

Table 1. Comparison of concentration ratio (L/kg FM) of radiocaesium in marine biota.

| Biota group | Tissue | Recommended values | | Newly obtained data | | | |
|-------------|---------|-----------------------|----------------------|---------------------|----------------|-----------|------|
| | | TRS 422 ⁴⁾ | SS 57 ¹¹⁾ | N | Geometric mean | Range | Ref. |
| Fish | Muscles | 100 | 50 | - | 64 | 15- 175 | 5 |
| Fish | Whole | - | - | 57 | 30-33 | 4.4 - 69 | 7 |
| Crustaceans | Muscles | - | - | - | 28 | 10-46 | 5 |
| Crustaceans | Whole | 50 | - | 14 | 36 | 14 - 73 | 7 |
| Macroalgae | Whole | 50 | 10 | 116 | 41 | 4.8 - 150 | 7 |
| Molluscs | Whole | 60 | 30 | - | - | - | - |
| Cephalopods | Muscles | - | - | - | 17 | 9-30 | 5 |
| Cephalopods | Whole | 9 | - | 4 | 14 | 5.3 - 30 | 7 |

なお、福島第一原発事故後の状況であるが、食品中の放射性物質の基準値である放射性セシウム量として 100 Bq/kg を超える魚は、同原発港湾内以外では検出されておらず、ほとんど検出下限値の状況が続いている。また、海水中の濃度は概ね事故以前のレベルになっている。そこで、放射性 Cs が検出できたものについて CR を求めると、今だに事故以前の値には戻っていないことが示されている⁹⁾。生態学的半減期が長い¹²⁾ ことも念頭に入れつつ、さらなるデータ収集を行って、高い CR が続いているメカニズムを解明する必要がある。

2. ヨウ素の海産物 CR の比較

上述したように、I の CR については、安定元素も用いて導出した。結果を Table 2 に示す。特に藻類のうち I 濃縮が知られている褐藻類については多くのデータが得られた (N=130)。データを記載していないが、緑藻類 (N=16) では GM=47 L/kg FW、紅藻類 (N=19) では GM=650 L/kg FW が得られており、褐藻類の GM=1800 L/kg FW と比べるとそれぞれ有意 ($p<0.05$) に低かった。他の生物群も含め、TRS 422 の推奨値を大きく超えることはなかった。なお、魚については浮魚と底生魚という分類で分けた結果を我々は報告しており、その結果、浮魚の CR は GM=4.2 L/kg FW が得られた。底生魚は N=11 と小さいので比較しにくいだが、I の CR は 2 倍ほど高かった¹³⁾。

これまでデータがなかった頭足類のデータを新たに加えることができたが、詳細にデータを見ると、過去のデータ¹⁴⁾ で高い値が報告されていた。残念ながら当該文献中の引用番号が間違っており、元文献に遡れないことがわかった。データの確からしさを確認するためにも、さらなるデータの蓄積が必要である。

現在、安定ヨウ素の分析は我が国だけではなく多くの国でも行われていることから、今後さらに CR データが得られると期待される。

Table 2. Comparison of concentration ratio (L/kg FM) of iodine in marine biota.

| Biota group | Tissue | Recommended values | | Newly obtained data | | |
|--------------------|---------|-----------------------|----------------------|---------------------|----------------|------------|
| | | TRS 422 ⁴⁾ | SS 57 ¹¹⁾ | N | Geometric mean | Range |
| Fish | Muscles | 9 | 10 | 48 | 5.0 | 0.9 - 60 |
| Crustaceans | Muscles | 3 | - | 22 | 4.9 | 1.3 - 41 |
| Macroalgae (brown) | Whole | 10000 | 1000 | 130 | 1800 | 27 - 22500 |
| Molluscs | Muscles | 10 | 100 | 42 | 9 | 0.3 - 40 |
| Cephalopods | Muscles | - | - | 10 | 2.6 | 0.7 - 99 |

3. Pu の海産物 CR の比較

Pu について、我が国のモニタリングデータから導出した結果と文献値¹⁴⁾をまとめた結果を Table 3 に示す。本調査で得られた頭足類の GM 値が TRS 422 の値の 2 倍近くになっているが、他の生物群では本調査の CR 値は TRS 422 の値と同程度か十分高い値の設定であることがわかった。魚について、筋肉部では GM=13 L/kg FM であった。Table 中には示していないが、全魚体 (N=16) で

は GM=120 L/kg FM が得られており、筋肉部以外の部分に Pu が蓄積される傾向があると考えられた。我々はこれまでに魚を浮魚と底生魚に分けて比較した¹³⁾。その結果、ヨウ素とは逆に浮魚の方が Pu の CR (GM=18 L/kg FW) が底生魚よりも 2 倍程度高かった。核種により濃縮パターンが異なるので、核種毎に詳細な調査が必要である。

また、Table 3 では藻類としてまとめて示しているが、藻類の CR を細かく見ると、III.2 で示したヨウ素の結果と異なり、Pu では褐藻類と紅藻類で差は見られなかった。

Table 3. Comparison of concentration ratio (L/kg FM) of plutonium in marine biota.

| Biota group | Tissue | Recommended values | | Newly obtained data | | |
|-------------|---------|-----------------------|----------------------|---------------------|----------------|------------|
| | | TRS 422 ⁴⁾ | SS 57 ¹¹⁾ | N | Geometric mean | Range |
| Fish | Muscles | 100 | 1 | 25 | 13 | 1 - 400 |
| Crustaceans | Muscles | 200 | - | 7 | 210 | 80 - 900 |
| Macroalgae | Whole | 4000 | 1000 | 108 | 920 | 130 - 9510 |
| Molluscs | Muscles | 3000 | 1000 | 50 | 900 | 100 - 8540 |
| Cephalopods | Muscles | 50 | - | 11 | 94 | 32 - 200 |

IV 結語

放射性廃棄物処分に関わる環境安全評価において重要な核種として挙げられる Cs, I 及び Pu について、我が国の食文化を考える際に欠かせない海産物 CR の設定の妥当性を確認することを目的として研究を行なった。そのために、Cs についてはグローバルフォールアウトを主体とした最近の CR データの論文、また、I や Pu についてはそれぞれ安定元素や環境モニタリングのデータを用いて CR を新たに導出し、TRS422 と比較を行なった。その結果、GM はほとんどの場合同程度か十分安全側に設定されていることがわかった。

今回の研究では十分なデータ数が得られなかったため、種毎の比較をおこなっていないが、Takata et al.⁵⁾ は Cs について、種毎に CR データをまとめることにより、誤差が小さくなることを示している。また、元素は異なるが、放射性 Sr に関する CR をまとめた最近のデータ¹⁵⁾ でも、種毎にまとめることによって CR の幅が、生物の群ごとで評価するよりも小さくなった。これらのことから、日本人が使う頻度の高い魚介類については、種毎のデータを提示することができれば、より評価結果の不確実性を減らせることが期待できるだろう。

参考文献

- 1) International Atomic Energy Agency, "Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments," Technical Report Series No. 364, IAEA, Vienna, 1994.

- 2) International Atomic Energy Agency, "Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments," Technical Report Series No. 472, IAEA, Vienna, 2010.
- 3) International Atomic Energy Agency, "Environmental Transfer of Radionuclides in Japan following the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant," TECDOC Series No.1927, IAEA, Vienna, 2020.
- 4) International Atomic Energy Agency, "Sediment Distribution Coefficients and Concentration Factors for Biota in the Marine Environment," Technical Report Series No. 422, IAEA, Vienna, 2004.
- 5) H. Takata, H., M.P. Johansen, M. Kusakabe, T. Ikenoue, M. Yokota, H. Takaku, "A 30-year Record Reveals Re-equilibration Rates of ¹³⁷Cs in Marine Biota after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident: Concentration Ratios in Pre-and Post-event Conditions," *Sci. Total Environ.* 675 (2019) 694-704.
- 6) 田上恵子、石井伸昌、内田滋夫；文献データを利用した魚以外の食用水生生物への ¹³⁷Cs 濃縮係数の導出 -福島第一原発事故前後の比較-、*放射化学* 40 (2019) 3-13.
- 7) K. Tagami, S. Uchida, Marine and Freshwater Concentration Ratios (CR_{wo-water}): Review of Japanese data. *J. Environ. Radioactiv.* 126 (2013) 420-426.
- 8) 文部科学省；"食品成分データベース"、<https://fooddb.mext.go.jp/>, Accessed 9 February 2021.
- 9) J. Zheng, H. Takata, K. Tagami, et al., "Rapid Determination of Total Iodine in Japanese Coastal Seawater using SF-ICPMS", *Microchem. J.* 100 (2012) 42-47.
- 10) 原子力規制庁,"環境放射線データベース"、<https://search.kankyo-hoshano.go.jp/servlet/search.top>, Accessed 9 February 2021.
- 11) IAEA, "Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases", Safety Series No. 57, IAEA, Vienna, 1982.
- 12) K. Tagami, S. Uchida, "Consideration on the Long Ecological Half-life Component of ¹³⁷Cs in Demersal Fish based on Field Observation Results Obtained after the Fukushima Accident", *Environ. Sci. Technol.* 50 (2016) 1804-1811.
- 13) K. Tagami, M. Hirayama, Y. Fukaya, S. Uchida, "A Review of Transfer Parameters of I, Cs and Pu (3) -Concentration Ratios of I and Pu in Marine Biota-", IRPA 15, Korea (online poster presentation), 18-27 January 2021.
- 14) 原子力環境整備センター；"海洋生物への放射性物質の移行"、環境パラメータ・シリーズ 6、RWMC-96-P-18、原子力環境整備センター、東京、1996.
- 15) K. Tagami, Y. Fukaya, M. Hirayama, S. Uchida, "Collation of Strontium Concentration Ratios from Water to Aquatic Biota Species in Freshwater and Marine Environments and Factors Affecting the Ratios", *Environ. Sci. Technol.* 55 (2021) 1637-1649.

総合討論

—環境移行パラメータのデータベース化と生活圏被ばく線量評価への活用—

Discussion

- Making databases of parameter values of radionuclide transfer in environment and application for biospheric dose assessment -

高橋知之^{1)*}、内田滋夫^{2,3)}、武田聖司⁴⁾、中居邦浩⁵⁾

Tomoyuki TAKAHASHI¹⁾, Shigeo UCHIDA^{2,3)}, Seiji TAKEDA⁴⁾ and Kunihiro NAKAI⁵⁾

- 1) 京都大学複合原子力科学研究所
- 2) (国研) 量子科学技術研究開発機構
- 3) 日本エヌ・ユー・エス (株)
- 4) (国研) 日本原子力研究開発機構
- 5) 日揮 (株)

- 1) Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University
- 2) National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology
- 3) Japan NUS Co., Ltd.
- 4) Japan Atomic Energy Agency
- 5) JGC Japan Corporation

*Corresponding author, E-mail: takahashi.tomoyuki.7x@kyoto-u.ac.jp

KEYWORDS: parameter values of radionuclide transfer in environment, database, biospheric dose assessment, uncertainty, radioactive waste disposal.

I 総合討論の概要

前述の6件の講演を受けて、放射性廃棄物の生活圏被ばく線量評価における環境移行パラメータについて、データベース化や線量評価への活用の観点から総合討論を実施した。総合討論は、高橋知之(京大)が座長を務め、指定発言者である内田滋夫(量研機構)、武田聖司(原子力機構)、中居邦浩(日揮(株))から発言があった後、参加者からの質問やコメントを受けて討論を行った。

II 指定発言

1. 内田滋夫(量研機構)

これまで、国際原子力機関(IAEA)による、生活圏環境移行パラメータの収集に関わってきた。

Table 1 生活圏環境移行パラメータが収集された IAEA レポート

| | |
|-------------------|--|
| TRS364 (1994): | Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments |
| TRS422(2004): | Sediment Distribution Coefficients and Concentration Factors for Biota in the Marine Environment [TRS247 (1985)の改訂版] |
| TRS472 (2010): | Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments [元になったデータは Tecdoc1616 (2009)に収録] |
| TRS479(2014): | Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer to Wildlife |
| Tecdoc1927(2020): | Environmental Transfer of Radionuclides in Japan following the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant |

IAEA による環境移行パラメータの収集状況を Table 1 に示す。TRS-364 はチェルノブイリ事故の後にまとめられた。最初は、「Temperate」という言葉はついていなかったが、集められたデータは主にヨーロッパ・北米のデータであり、全ての地域で適用可能ではないというコメントがついたため、このタイトルになったという経緯がある。IAEA のデータハンドブックとしては、最初のものと思われる。TRS-422 は海洋環境関連の移行パラメータであり、1985 年にまとめられた TRS-247 の改訂版である。多くの元素の移行パラメータ値が記載されているが、データの範囲が書かれているものはほとんど無く、その意味ではここで紹介している他の報告書とは少し異なるものである。TRS-472 は、TRS-364 の改訂版であり、非常にたくさんのデータが収集された。TRS-479 は野生動植物への移行パラメータ集である。なお、「grass (牧草)」への移行係数や、甲殻類・海藻等の移行係数が含まれている。Tecdoc-1927 はできたばかりのテクニカルドキュメントであり、福島第一原子力発電所事故後に収集された環境移行パラメータである。

これらのデータベースへの日本のデータの反映状況を Table 2 に示す。TRS-364 (1994)や TRS-422 (2004)には、幾つかの日本の論文が引用されているが、個々の実験データが採用されている状況である。TRS-472 (2010)、TRS-479 (2014)では、日本の多くのデータが採用されており、日本の環境移行パラメータも 2000 年頃から精力的に収集されていることがわかる。Tecdoc-1927(2020)は、東京電力福島第 1 原子力発電所事故後に日本で得られた環境移行パラメータを収集したものであり、平衡時のパラメータ値ではないが、事故前の日本のパラメータ値や事故後のパラメータ値の経時変化等が示されており、有用な情報も掲載されている。

環境移行パラメータに関する今後の課題として、日本の全域をカバーするデータベースが必要と考える。ちなみに、IAEA の MODARIA II (2016-2019)では、温帯地域以外の土壌-農作物移行係数を収集している。また、MODARIA II の次期プログラムでも、様々な地域における環境移行パラメータを収集すること提案している。

Table 2 IAEA のデータベースへの日本のデータの反映 (引用論文数)

| |
|---|
| TRS-364 (1994): 4 報+5 報 (Kd のデータベースに引用) |
| TRS-422(2004): 10 報 |
| TRS-472 (2010): 6 報 <ul style="list-style-type: none"> ・ 5.4. Radionuclide transfer to rice はほとんど日本のデータである。 ・ Kd の Part (4.2) でも、日本のデータがかなり入っている。特に、ヨウ素, Se, Sb, (Sn) のデータは日本のデータがほとんどである。 |
| TRS-479 (2014): 5 報 <ul style="list-style-type: none"> ・ 日本沿岸域の海藻, 貝類, 甲殻類の CR がデータとして採用。 ・ 日本の Grass の TF が採用。 |

また、パラメータ値の不確実性が検討出来るようなデータベースが必要である。このためには、パラメータ取得時の様々な情報（例えば、土壌では、CEC、粘土含量など、溶液：pH、EC 等の情報）を併せてデータベース化することが重要である。このような情報に基づいて、評価に用いる環境移行パラメータ値を選択する手法の整備も必要である。

このようなパラメータ値に関する研究を、放射性核種による網羅的な実験によって行うことは、予算、人員等の面から困難である。また、トレーサ実験で取得できない核種もある。このため、安定元素によるパラメータ値の取得と活用も重要な課題である。これまで、海外でも日本でも安定元素のパラメータ収集・データベースが報告されており、その活用方法についても検討する必要がある。

2. 武田聖司 (原子力機構)

IAEA 等の国際機関の主導のもと、専門家による議論及び各国のレビューを経て環境移行パラメータのデータベースが取りまとめられている。このような国際的なデータベースは、これまで、わが国の放射性廃棄物管理に関係のある規制基準（クリアランスレベル、LLW 濃度上限値など）の策定、HLW 地層処分や TRU 廃棄物処分の技術開発に対し、サイトを特定しない被ばく線量評価において活用され、その役割を果たしてきた。また、そのデータベースに日本のデータが含まれることは、国際的な貢献の観点のみならず、地域特性や生物種の対象のバリエーションによる影響理解の観点で重要と考えられる。また、今後あるサイトにおける中深度処分や HLW 地層処分への環境移行パラメータの活用を考えた場合、日本の地域特性を踏まえたデータベースの有用性は高くなると考えられる。

このような観点から、日本独自のデータベースを作ることが望まれる。その際、データベースの活用を見越した整理がまず必要である。日本独自のデータベースの活用目的として、以下が考えられる。

- ① 国際的なデータベースへの取り込み
- ② 今後の中深度処分や HLW 地層処分における線量評価

③ 様々な環境媒体における物質移行挙動に係る基盤研究の発展

①～③では、それぞれデータベースの性格や目標が異なり、また、それぞれの活用においては、様々な分野の専門家間との協力体制が必要となる。

ここで、「②今後の中深度処分や HLW 地層処分における線量評価」としての活用を考えた場合に、データベースの活用方法について検討する。②を目的としたデータベース構築の場合、その前提として、

- ・サイト特性とはどのような項目を、どこまで考える必要があるのか。
- ・具体的な埋設地が分からない状況において、日本国内でも環境条件等は様々であるため、日本のサイト特性としてどのように考えるか。
- ・具体的な埋設地が分かった状況では、そのサイトでデータを収集することが必要となり、最終的にそのサイトに適した線量評価のためのパラメータ値を用いることを考えた場合、事前にデータベースとして構築しておくべき情報とは何か。

といったことを考えておく必要がある。

また、具体的な埋設地における線量評価を考えた場合、現在の生活圏でサイト条件を設定する際に不確かさが存在し、それに応じた生物種への移行係数、濃縮係数等のデータの不確かさも考慮される必要がある。さらに、被ばくが発生するのは遠い将来であっても、現在の生活圏でのサイト条件による線量評価が基本であるため、時間の経過に起因するその条件に対する環境移行パラメータの不確かさについても考慮する必要がある。しかしながら、将来の気候変動などの影響による生活圏の変遷の不確かさを考えるかどうかは、現在のサイト条件に対する確度で長期的に推定することは困難であることから、ある様式化の判断による評価になると考えられる。

以上のことから、線量評価へのデータベースの活用を考えた場合、重要視するのは、生活圏でのサイト条件と生物種への移行係数、濃縮係数の関連性であり、不確かさ評価の信頼性向上のためにもその理論的解釈とそれを裏付ける科学的知見の充実が必要であると考えられる。これは、前述の①や③の目的としたデータベースにも共通しているものと考えられる。

データベースの運用を考えた場合、放射性廃棄物処分事業はこれからも長期的な実施が見込まれるため、データベースの継続的な活用を目指して、適正なデータアーカイブは重要と考えられる。また、放射性廃棄物処分以外の将来の多くの研究者に利用してもらうことも目指し、その時代におけるニーズに対応したコンテンツの見直しなどは定期的に行われることが望ましい。

3. 中居邦浩（日揮（株））

放射性廃棄物処分施設の安全評価の構成要素は「人工バリア」、「天然バリア」、「生活圏」である。これらの各構成要素におけるパラメータの特徴について Fig.3 に示す。「生活圏」の評価におけるサイト特性として、表面水系、水利用、農水産活動などが挙げられる。これらの特性に対して、立地場所という選択の余地があるが、通常はあまり考慮されない。

生活圏評価に用いられるパラメータは、元素に依存するパラメータと依存しないパラメータに分けられる。元素に依存するパラメータは動物、植物、水産物への移行係数、濃縮係数、農耕土壌の分配係数など多種多様である。また、線量などの評価結果に対するこれらのパラメータの感度は、

- 構成要素は人工バリア、天然バリア、生活圏
- 人工バリア：選択可能(材料、構造など)
 - 廃棄物からの浸出、収着、浸透水量抑制、拡散抑制
 - 感度は線形または指数関数的
- 天然バリア：選択の余地(立地場所、深さ)
 - 地下水流速、距離、収着
 - 感度は指数関数的
- 生活圏：選択の余地(立地場所)
 - 表面水系、水利用、農水産活動などあるが、通常、立地ではあまり考慮されない。
 - 動物、植物、水産物への移行係数、濃縮係数、農耕土壌の分配係数など多種多様で、元素にも依存。
 - 感度は多くの場合、線形
=>場合によっては生活圏パラメータで決まる。

Fig.3 各構成要素におけるパラメータの特徴

の環境や食品があり、このような特徴は国際的なデータベースでカバーできない可能性がある。よって、国際的なデータベースへの日本のデータの反映と並行して、日本独自のデータベースの作成が重要となる。

放射性廃棄物処分の安全評価においては、対象核種についても網羅性を要求されるので、幅広くデータを整備する必要がある。また、データベースの構築の際には、パラメータの使用方法も踏まえ、また、データを整備する人と線量評価を実施する人の相互の検討を踏まえて、推奨できるデータベースを構築することが重要である。

環境移行パラメータに用いられるデータは、不確かさが存在する。このため、決定論的解析においては、基本的にデータベースの算術平均値または幾何平均値が用いられる。しかしながら、データのばらつきが大きい場合には、その選定に注意する必要がある。また、保守性を考慮する場合においては、平均値の偏差の95パーセンタイル値、 2σ 値、 3σ 値など、あるいは元データの95パーセンタイル値、 2σ 値、 3σ 値などが用いられる。データの分布特性を考慮し、どのような考え方でパラメータ値を設定するかについて検討するとともに、その情報を残しておく必要がある。特に、専門家判断による推奨値の設定を行う場合は、その考え方を記録に残しておくことが必要である。

データの散逸を防止するため、データアーカイブは重要である。原文献を電子情報で保管することや、国立国会図書館を活用することも考えられる。また、データベースは定期的なメンテナンスが必要であり、日本保健物理学会や日本原子力学会などでデータ保管やメンテナンスを行うことも考えられる。その際には、データアーカイブやメンテナンスのための予算化が重要な課題である。

前述した対象核種の網羅性の観点から、多様な動植物と多様な元素(100位)のマトリクスとなる膨大なデータベースをどのように整備すべきかが課題となる。よって、データベースの整備においては、元素のアナログも必要となるであろう。しかしながら、動植物の多様性が関係して、分配係数などよりもさらに複雑なメカニズムが関係すると考えられる移行係数、濃縮係数などのパラメータにおいて、元素のアナログは成立するかどうかについて十分に検討する必要がある。

多くの場合線形関係にある。また、場合によっては生活圏の環境移行パラメータ値の設定が、評価結果に大きな影響を与える。

国際的なデータベースに日本のデータが取り込まれることは重要である。日本の農水産業、日本人の生活様式、食生活などに即したデータが、国際的なデータに取り込まれることにより、日本の特性を考慮した、よりもっともらしい評価につながることを期待できる。しかしながら、土壌や農水産物等、日本固有

III 討論

指定発言の後、参加者からの質問やコメントを受けて討論がなされた。主な討論内容は以下の通りである。

- ・高レベル放射性廃棄物の処分施設等の安全評価においては、環境移行パラメータの長期的な変動に起因する不確かさについても考慮する必要がある。この不確かさは、期間が長期になるに伴って大きくなり、サイト条件に起因する空間的不確かさの取り扱いとは異なる難しさがある。よって、評価を様式化することや、保守的なパラメータ値を用いることによって、評価の信頼性を担保せざるを得ないのではないか。また、長期的な変動に起因する不確かさについては、環境関連以外の専門家とも連携する必要があると考えられる。
- ・高レベル放射性廃棄物処分施設の立地において、原則として地震等の影響が生じないサイトが選定される。しかしながら、地震等によってバリア機能が失われたケースにおいても評価が実施されており、その際の生活圏の評価は標準ケースと同様に行われる。
- ・国際的なデータベースにはサマリーのみが記載されており、そのサマリーの元となる膨大なデータはそのデータベースからは確認することができない。国際的なデータベースに日本のデータを反映していくことは重要であるが、そのような観点からも、日本独自のデータベースを作成することは重要である。そのためには、データベース構築のための戦略が必要である。
- ・今回明らかになったように過去のデータは原論文の入手が難しいものが多い。またデータに付随した情報がないものも多く、データベースに取り込むには問題がある。データベースの構築に当たっては、どのような情報を取り込むかを十分に検討する必要がある。
- ・線量評価においてパラメータ値を設定する際に、サイト条件やサイト特性とパラメータ値との関連性の観点が重要である。このような関連性が明らかになることによって、どのようなサイト条件を把握する必要があるか等の検討ができる。また、このような観点のデータベースにより、国際的にも評価されるのではないか。そのためには、データベースの考え方を明確にするとともに、多くの分野の専門家が集まって検討する必要がある。

IV まとめ

生活圏環境移行パラメータについて、国際的なデータベースに日本のデータを反映していくことと並行して、日本独自のデータベースを構築する必要があること、そして、そのデータベースにはサイト条件やサイト特性とパラメータ値との関連性が明確となるような十分な情報が必要であり、そのためには多くの分野の専門家が集まって検討する必要があること等が議論された。

我が国においては60年以上にわたり放射性核種の生活圏における移行挙動に関する研究がなされてきた。しかしながら、これまでのデータを取りまとめ、また不足しているデータを新たに取得して、必要な付随情報も含まれる網羅的な生活圏環境移行パラメータのデータベースを構築するためには、多くの予算や人員等が必要と考えられる。よって、効率的にデータベース構築を進めるためには、線量評価におけるニーズを十分に確認した上で、戦略を立てることが必要不可欠である。

KURNS REPORT OF
INSTITUTE FOR INTEGRATED
RADIATION AND NUCLEAR SCIENCE,
KYOTO UNIVERSITY

発行所 京都大学複合原子力科学研究所
発行日 令和 3 年 3 月
住所 大阪府泉南郡熊取町朝代西 2 丁目
TEL (072) 451- 2300