

Ⅱ. 分 担 研 究 報 告

緊急時検査法に関する検討

蜂須賀 暁子

令和元年度厚生労働科学研究補助金 食品の安全確保推進研究事業

食品中の放射性物質等検査システムの評価手法の開発に関する研究 分担研究報告書

緊急時検査法に関する検討

研究代表者 蜂須賀 暁子 国立医薬品食品衛生研究所生化学部第一室長

研究分担者 蜂須賀 暁子 国立医薬品食品衛生研究所生化学部第一室長

研究要旨：原子力施設の事故等により放射性核種による環境汚染が引き起こされた場合、食品からの内部被ばくを防止するために食品の規制が行われることから、当研究課題においては、食品中放射性物質の測定に関して検討する。平成 30 度は、測定対象核種について、我が国の原子力災害対策指針及び IAEA 等の国際文書について比較検討した。単純な比較はできないものの、原子力災害対策指針は測定対象核種数が少なく、実用性・実効性を重視した立場をとっていることが明確であった。令和元年度は、前年度に国際文書等により抽出された 200 余核種の測定法について、平成 30 年改訂の「緊急時におけるゲルマニウム半導体検出器による γ 線スペクトル解析法」を参考とし、核種の特性に基づき検討した。環境放射能汚染が引き起こされる原子力施設事故等においては、極めて多様な核種が放出されることが予想される。食品の汚染を考える上では、半減期が数時間以内の核種は影響力は低いと考えられるが、壊変系列をなし、親核種の濃度変動により経過時間に伴い上昇する核種もあるため注意が必要である。また、検査の効率面から γ 線スペクトル解析法が有用であるが、事故直後には多核種の存在による複数ピークの出現が予想されることから、核種同定及び定量には平常時とは異なる注意が必要である。

A. 研究目的

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災と直後の津波により、福島第一原子力発電所（1F）では放射性物質を漏出する重大事故が発生し、農作物等への汚染が生じたため、同年 3 月 17 日に食品の放射能規制が行われるに至った。これはその当時原子力安全委員会により示されていた指標値を暫

定規制値としたものである。指標値設定の考え方としては、原子力施設の事故の際に放出されるおそれのあるすべての核種に対し、それぞれ誘導介入レベルを定めることは実用的でないことから、放出される主要核種、飲食物への移行並びに人間に対する影響等を考慮して 4 つの核種群（放射性ヨウ素、放射性セシウム、ウラン、プル

トニウム及び超ウラン元素のアルファ核種)を選定し、各核種群について介入線量を実効線量 5 mSv/y、組織等価線量 50 mSv/y と設定して放射能濃度を算出している。現在もこれらの指標値は引き継がれているが、1F 事故後に国内のみならず国際的な検討が行われている。昨年度は、それらの情報を整理し、測定対象となりうる食品中放射性物質(核種)について検討した。本年度は、それらの測定対象核種の特徴を調べ、核種ごとの特性に基づいた測定法の検討を行う。

B. 研究方法

以下の資料を参考にした。

・放射能測定法シリーズ(文部科学省及び原子力規制庁)

・ IAEA nuclear data services (<https://www.nds.iaea.org/>)

ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File Search and Retrieval)

Live Chart of Nuclides (Interactive Chart of Nuclides)ほか

・ National Nuclear Data Center (<https://www.nndc.bnl.gov/>)

NuDat 2.8 ほか

・アイソトープ手帳 11 版、公益社団法人アイソトープ協会、2011

・ Guidelines for drinking-water quality, fourth edition: WHO, 2011. ISBN: 978 92 4 154815 1 飲料水水質ガイドライン(以下「WHO 飲料水 GL」)

・ Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International

Basic Safety Standards / General Safety Requirements No. GSR Part 3 (2014) 放射線防護と放射線源の安全 (GSR Part 3)

・ Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency / General Safety Guides No. GSG-2 (2011) 原子力または放射線緊急事態への備えと対応における使用基準(以下「GSG-2」)

・ 原子力災害事前対策の策定において参照すべき線量のめやすについて(平成 30 年 10 月 17 日原子力規制委員会)の(参考) Cs-137 100TBq 放出時の各核種放出量

C. 結果と考察

1. 核種の発生由来による分類

我が国における放射線/放射能の測定は、国(文部科学省及び原子力規制庁)により制定されている「放射能測定法シリーズ」が基準となっており、現在、34 冊が発行されている(表 1)。本研究にかかわりが深いものとしては、「7 ゲルマニウム半導体検出器による γ 線スペクトロメトリー」「13 ゲルマニウム半導体検出器等を用いる機器分析のための試料の前処理法」「23 液体シンチレーションカウンタによる放射性核種分析法」「24 緊急時における γ 線スペクトロメトリーのための試料前処理法」などがあり、特に平成 30 年に改訂された「29 緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法(以下、「緊急時 γ 線解析法」)は重

要である。

緊急時においては、 γ 線の高い透過性を利用するため前処理が簡易で迅速に測定ができる γ 線測定が有用であり、中でもエネルギー分解能が優れた核種分析が可能なゲルマニウム半導体検出器を用いた γ 線スペクトロメトリーが核種同定及び定量には有力である。「緊急時 γ 線解析法」は、緊急時におけるそのような測定系を想定してまとめられており、そこで提示されている核種情報を表2に示す。核種ライブラリとして平常時（表2 5A：32核種）のほか、原子炉施設等事故時として福島第一原発事故・チェルノブイリ事故（表2 5B：41核種）、JCO事故（表2 5C：25核種）において検出された人工放射性核種を例として挙げている。それら核種をその発生機序から、「D.1 核分裂生成核種、希ガス及び揮発性物質並びにこれらを経由して生成する核種（68核種）」「D.2 中性子等による反応で生成する核種（41核種）」「D.3 ウラン及びトリウムの壊変生成物並びにバックグラウンドとして存在する核種（29核種）」の分類でまとめ、計148核種を掲載している。実際の事故で検出された5B、5C関連核種の内訳は、「D.6 福島第一原発事故において検出が報告されている人工放射性核種（37核種）」「D.7 JCO事故において検出が報告されている人工放射性核種（25核種）」「D.8 チェルノブイリ事故において検出された人工放射性核種（21核種）」となっている。表2より、事故

の種類によって放出される核種に違いがあること、天然核種等のバックグラウンドスペクトルを与える核種が存在することが見て取れる。多種類の核種が環境に放出される緊急時の核種同定においては平常とは異なり測定が困難になることが想定されるが、その場合でも、事故の種類により核種を分類、推定し、既存の知識及び情報を活用することが、核種同定の精度を上げることに繋がると考えられる。

2 核種の存在時期による分類

表2の「D.1 核分裂生成核種、希ガス及び揮発性物質並びにこれらを経由して生成する核種（68核種）」は、核分裂後の経過時間により核種の存在度が変ることから、核分裂後の経過時間から核種の存在度を試算したものが「緊急時 γ 線解析法」付録1.3に記載されている。この核種の存在度は、U-235の核分裂で生成する核種について、核分裂収率、 γ 線放出率、半減期及びゲルマニウム半導体検出器の計数効率を用い、経過時間ごとに各核種からの γ 線計数率を算出して求められており、その算出原理は以下になる。まず、U-235の単位核分裂により生成する各核種の放射能は、核分裂収率と壊変定数より求めることができる。その核種から放出される γ 線の計数率は、 γ 線放出率とゲルマニウム半導体検出器の計数効率から求めることができる。この計数率は時間とともに減衰することから、ある経過時間における計数率は壊変定数から求めることができる。これらを核種ごとに壊

変系列上流からの流れ込みによる生成も含めて算出する。最後に核分裂からの経過時間ごとの注目核種の計数率を、その時間の最大の γ 線の計数率と比較し、1万分の1以下の計数率の γ 線は測定不可能と考え、最大計数率との比率がそれ以下となった場合は存在度を「X」（検出されない）と判定している。この核種の存在度を、存在時期により分類し、昨年度検討した核種と比較したものが表3である。昨年度リストアップしたWHO飲料水GL記載191核種及び原子力規制委員会の「(参考) Cs-137 100TBq 放出時の各核種放出量」記載核種(16核種)(詳細は昨年度の報告書参照)と比較し、検出されなくなる時期により①から⑥に分類した。

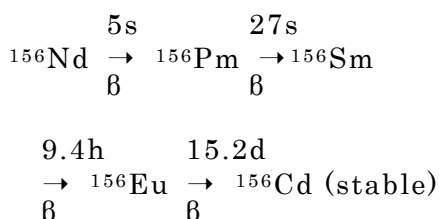
存在度試算を行った68核種のうち、表3の①1日以内に検出されなくなると試算された核種は15である。これらの核種の半減期はいずれも6時間以内であり、減衰の早い核種であることから、事故直後の環境汚染としては問題となっても、移行期間を考慮すると食品衛生上は大きな影響を与えないと考えられる。表3の②3日以内に検出されなくなると試算された核種は16であり、半減期はいずれも16時間以内である。①と②の31核種のうち、WHO飲料水GLに記載されている核種はTe-129のみである。Te-129は半減期が69.6分と短い、壊変系列をなし、親核種のSb-129は半減期が4.4hで核分裂収率が大きい、自身の半減期の短さ以上に影響の

時期が長くなる核種であり、この分類区分としては例外的にWHO飲料水GLに記載されていると考えられる。表3の③5日以内に検出されなくなると試算されたものは5核種であり、Pm-149以外の核種の半減期は11時間以内である。この半減期は新たな生成がなければ5日後には1/1000に減衰することを意味するため、食品への影響は小さい核種群と考えられる。実際、この核種群でWHO飲料水GLに記載されているのは、半減期が53時間のPm-149のみである。表3の④10日以内に検出されなくなると試算された7核種でも同様であり、半減期が35時間とこの群の中では長いRh-105のみがWHO飲料水GLに記載されている。

それに対し、表3の⑤30日以内に検出されなくなると試算された7核種では、WHO飲料水GLに記載されている核種は5核種となり、記載されていないPm-151もその子孫核種Sm-151が記載されていることから、食品影響を考慮すべき核種群となってきた。WHO飲料水GLに記載されていないもう一つのNb-97mは、生成経路としては核燃料物質の核分裂による直接の生成と壊変系列からの生成が考えられるが、半減期が58.7秒と非常に短いため、後者が重要である。系列をなす親核種Zr-97(半減期16.7時間)、子孫核種Nb-97(半減期72分)はいずれも③に分類されていることから、状況が安定している状態では測定対象とはならないが、特殊な状況で

は存在する可能性がある核種と位置付けられる。

表3の⑥30日後にも検出されると試算された18核種は、「D.1核分裂生成核種、希ガス及び揮発性物質並びにこれらを経由して生成する核種（68核種）」の中で、食品衛生上最も問題となる核種群である。18核種のうち、WHO飲料水GLに直接記載されているものが12核種であり、親あるいは子孫核種が記載されているものが5核種である。残りの1核種はEu-156であり、この核種の生成経路は、次のように考えられる。



親核種Sm-156(9.4時間)、その親Pm-156(27秒)、その親Nd-156(5秒)はいずれも短半減期であり、壊変系列をなすため、Eu-156は遅れて出現し、核分裂後30日以降にも検出されると試算されるものの、その存在は一過性のものと予想され、食品への影響は限定的と考えられる。このようにある核種の存在量及び存在時期について考察する場合は、核分裂の直接の生成だけでなく、壊変系列による流れ込みも考慮する必要がある。

⑥の核種群の半減期は30秒から30年と幅広いが、数時間以内の核種は、壊変系列中に数日の核種を含み、核分裂後30日以降においても検出される可能性があるものである。これら核種

の中で群を抜いて半減期の長いものがCs-137である。この表に関連する核種の中で、現在、我が国の食品の基準値に含まれているものはCs-137とRh-106の親核種であるRu-106であるが、測定対象はCs-137のみであり、核分裂収率が大きいことと合わせてCs-137の半減期に由来する特徴が見て取れる。なお、もう一つの測定対象であるCs-134は、「D.1核分裂生成核種、希ガス及び揮発性物質並びにこれらを経由して生成する核種」ではなく、「D.2中性子等による反応で生成する核種」のため、表3には掲載されていない。

「緊急時γ線解析法」には、148核種が掲載されており、昨年度抽出した207核種に含まれないものも57核種ある。しかしそれらは、食品衛生上影響が小さいと考えられる希ガス、あるいは半減期1日以下のものが多く、また、壊変系列の比較的長い半減期のものが抽出核種に含まれているものがほとんどであることから、緊急時に考慮すべき対象核種としては、昨年度抽出した核種で網羅できているものと考えられる。

3 核種の測定

3.1 γ線測定

昨年度抽出した207核種について、緊急時に測定上有用と考えられるγ線により分類を行った。測定エネルギー領域において妨害が多いと考えられる100 keV以下を避け、放出γ線エネルギーが100～2000 keVであり、

その放出率が 10%以上であるものを選択したところ、108 核種となった(表 4)。この分類は、個別放射線についての詳細な情報のほか、単位核壊変あたりの放射線タイプ別の総エネルギーもおおよそその目安となる。表 4 に記載した核種はその物理的特性から、 γ 線測定の可能性のあるものであるが、緊急時に多種類の核種による複数のピークがスペクトル上に観測された場合は、効果的に測定できるとは限らないことに注意が必要である。

F1 事故後に測定が行われた I-131、また、現在も測定対象となっている Cs-134 及び Cs-137 はいずれもこの表の中にあり、他核種の妨害がなければ γ 線スペクトロメトリーによる測定が可能な核種である。多核種による多数のピークが検出される状況での γ 線スペクトロメトリーでは、時間をおいて再測定することにより、短半減期核種の妨害を減らすだけでなく、半減期情報の取得により、核種同定の精度を上げることが期待できることもある。

次に放出 γ 線が 100keV 以下または放出率 10%以下の核種を、エネルギーと放出率から分類した(表 5)。 γ 線エネルギーは 100keV 以上であるが、放出率が 1-10%であるものが 18 核種、放出率が 0.1-1%であるものが 5 核種、エネルギーが 100keV 以下かつ放出率が 2%以上のものが 8 核種となった。これらは、他核種の存在条件によっては測定が可能であるが、表 4 の測定を妨害する可能性のある核種群とも見ることができる。1 原子壊変あたりの

放射線タイプ別の総エネルギーは、表 4 と比べて小さく、100 keV 以下となっている。

3. 2 β 線測定

核種の特長から効率的な γ 線測定が期待できず、 β 線による測定が考慮される 26 核種を表 6 に示す。これらは、単位核壊変あたりの放射線タイプ別の総エネルギーにおいて、 $\gamma \cdot X$ 線の値が小さく、 β 線の数値が大きいものである。

γ 線等を放出せずに β 線のみを放出する、いわゆる純 β 線核種において、測定信号として放射線を利用する場合は、 β 線測定を行うことになる。 γ 線は線スペクトルであることから、エネルギー弁別により核種同定を行えるのに対し、 β 線は連続スペクトルであることから、 γ 線のような核種同定が行えず、測定前に他核種との分離操作が必要となり、迅速な測定を行うことは一般に困難である。検出は、 β 線による電離作用を利用するほか、液体シンチレーションのように放射線を蛍光信号に変換して検出することもできる。また、放出 β 線が強い Y-90、P-32 などはチェレンコフ光による検出も可能である。

現在の Cs-134、Cs-137 の基準値に含まれている Sr-90 は、純 β 核種であり、 γ 線測定を行うことができず、核種の分離操作が必要となる。一般的な Sr-90 の分析法は、Sr-90 から子孫核種である Y-90 (これも純 β 核種) を分離精製し、その放射線の測定により

定量する。

水素-3 (H-3) やプルトニウム-241 (Pu-241) は、放出されるβ線のエネルギーが小さいため、低濃度のβ線測定を行う場合は低バックグラウンドの検出器が必要となる。

3. 3 α線測定

核種の特徴から効率的なγ線測定が期待できず、α線による測定が考慮される24核種を表7に示す。これらは、単位核壊変あたりの放射線タイプ別の総エネルギーにおいて、γ・X線の値が小さく、α線の数値が大きいものである。

α線はβ線と異なり線スペクトルであるが、ヘリウムの原子核の粒子線であるため透過性が極めて低く、自己吸収が大きい。自己吸収を避けるために測定前に核種の精製が必要であることから、迅速なα線スペクトロメトリーを行うことは困難である。α線スペクトロメトリーでは、通常、単離したα線核種を金属板上に薄く電着し、シリコン半導体検出器等で測定する方法が用いられる。スペクトロメトリー以外の放射線を利用した手法としては、α線核種を妨害物質から分離した後、液体シンチレーション検出器を用いて測定することも可能である。この場合は、自己吸収を考慮する必要はなくなる。

別の自己吸収を回避する手段として放射線以外の測定法の利用も考えられる。放射線測定は一般的な機器分析に比べ高感度であるが、長半減期の

核種では、測定領域濃度が放射線以外の機器分析でも可能なものもある。表4~8には、放射能濃度 Bq/L を半減期と質量数から質量濃度 g/L に変換した値も測定法を検討するための資料として記載している。例えば、表4に示すように、現在γ線スペクトロメトリーで測定されている半減期30年のCs-137及び半減期2年Cs-134の1 Bq/kg は各々310 fg/kg、21 fg/kgに相当し、一般に汎用されている機器分析では測定できない濃度レベルであり、放射線測定が選択される。一方、表7の半減期45億年のU-238の1 Bq/kg は0.42 mg/kgに相当し、この程度の濃度であれば、ウランの特性である蛍光を利用した測定法も利用可能である。長半減期の核種では、共存核種の条件によっては、誘導結合プラズマ質量分析 ICP-MS による多核種測定も可能である。

3. 4 その他

核種の特徴から効率的な放射線測定が期待できない18核種を表8に示す。これらは、単位核壊変あたりの放射線タイプ別の総エネルギーにおいて、α線、β線、γ・X線で顕著な数値を与えないものである。放出される放射線が少ないことから、壊変系列を取らず、生体内挙動が特殊でなければ、直接の生体影響は小さい核種と考えられ、それを反映して基準値が高いものもある。核種の重要性や測定方法は様々である。半減期が非常に短いもの、あるいは逆に非常に長いものは、特殊

要件がなければ、食品衛生上は大きな問題になりにくいと考えられる。半減期が長いものは、放射線測定以外の測定法も考慮される。例えば、甲状腺に選択的に取り込まれるために注意が必要な I-129 は半減期が 57 億年であり、1 Bq は 150 ng に相当するが、その測定には加速器質量分析法が利用されている。短半減期の γ 線を利用した測定は、他の機器分析に比較して、操作性、感度から有利であるが、表 8 に分類された核種においては、放射線以外の測定法も含めた個別の対応が必要となる。

D. 結論

原子力施設の事故等により放射性核種による環境汚染が引き起こされた場合、食品からの内部被ばくを防止するために食品の規制が行われることから、測定対象核種及び測定法について検討した。前年度に国際文書等により抽出された 200 余核種の測定法について、核種の特性に基づき検討し、測定対象核種は昨年度抽出した核種で網羅できていることを確認した。食品の汚染を考えていく上では、半減期が数時間以内の核種は考慮する必要性は低いと考えられるが、壊変系列をなし、経過時間に伴い上昇する核種も存在するため、注意が必要である。測定法としては、前処理が簡易で迅速に測定ができる γ 線測定が有用であることから、 γ 線スペクトロメトリーによる手法を念頭に、 γ 線のエネルギーと放出率を中心に核種を分類した。

環境放射能汚染が引き起こされる原子力施設事故等においては、極めて多様な核種が放出されることが予想される。また、検査の効率面から γ 線スペクトル解析法が有用であるが、事故直後には多核種の存在による複数ピークの出現が予想されることから、核種同定には平常時とは異なる注意が必要である。その際に、事故の種類により存在する可能性のある核種を推定し、既存の知識及び情報を活用することが、核種同定の精度を上げることに繋がると考えられる。

E. 研究発表

なし

F. 知的財産権の出願・登録状況

なし

表1 刊行されている放射能測定法シリーズ

No.	書名	制定 (改訂)
1	全ベータ放射能測定法	昭和 51 年 (2 訂)
2	放射性ストロンチウム分析法	平成 15 年 (4 訂)
3	放射性セシウム分析法	昭和 51 年 (1 訂)
4	放射性ヨウ素分析法	平成 8 年 (2 訂)
5	放射性コバルト分析法	平成 2 年 (1 訂)
6	NaI (Tl) シンチレーションスペクトロメータ機器分析法	昭和 49 年
7	ゲルマニウム半導体検出器による γ 線スペクトロメトリー	令和 2 年 (4 訂)
8	放射性ジルコニウム分析法	昭和 51 年
9	トリチウム分析法	平成 14 年 (2 訂)
10	放射性ルテニウム分析法	平成 8 年 (1 訂)
11	放射性セリウム分析法	昭和 52 年
12	プルトニウム分析法	平成 2 年 (1 訂)
13	ゲルマニウム半導体検出器等を用いる機器分析のための試料の前処理法	昭和 57 年
14	ウラン分析法	平成 14 年 (2 訂)
15	緊急時における放射性ヨウ素測定法	平成 14 年 (1 訂)
16	環境試料採取法	昭和 58 年
17	連続モニタによる環境 γ 線測定法	平成 29 年 (2 訂)
18	熱ルミネセンス線量計を用いた環境 γ 線量測定法	平成 2 年 (1 訂)
19	ラジウム分析法	平成 2 年
20	空間 γ 線スペクトル測定法	平成 2 年
21	アメリシウム分析法	平成 2 年
22	プルトニウム・アメリシウム逐次分析法	平成 2 年
23	液体シンチレーションカウンタによる放射性核種分析法	平成 8 年 (1 訂)
24	緊急時における γ 線スペクトロメトリーのための試料前処理法	平成 31 年 (1 訂)
25	放射性炭素分析法	平成 5 年
26	ヨウ素-129 分析法	平成 8 年
27	蛍光ガラス線量計を用いた環境 γ 線量測定法	平成 14 年
28	環境試料中プルトニウム迅速分析法	平成 14 年
29	緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法	平成 30 年 (1 訂)
30	環境試料中アメリシウム 241、キュリウム迅速分析法	平成 16 年
31	環境試料中全アルファ放射能迅速分析法	平成 16 年
32	環境試料中ヨウ素 129 迅速分析法	平成 16 年
33	ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法	平成 29 年 (1 訂)

表2 放射能測定法シリーズ 29 緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法（以下、「緊急時
γ線解析法」）記載核種の分類

対応する「緊急時γ線解析法」掲載の表は以下の通り。

5A：表 5.1 原子炉施設等事故時に検出された人工放射性核種の分類と平常時汎用核データライブラリ
の平常時汎用核データ（A）

5B：同じく表 5.1 の福島第一原発事故、チェルノブイリ事故（B）

5C：同じく表 5.1 のJCO事故（C）

D1：表 D.1 核分裂生成核種、希ガス及び揮発性物質並びにこれらを経由して生成する核種

D2：表 D.2 中性子等による反応で生成する核種

D3：表 D.3 ウラン及びトリウムの壊変生成物並びにバックグラウンドとして存在する核種

D6：表 D.6 福島第一原発事故において検出が報告されている人工放射性核種

D7：表 D.7 JCO 事故において検出が報告されている人工放射性核種

D8：表 D.8 チェルノブイリ事故において検出された人工放射性核種

なお、半減期は、No.29 付表 2.1 の数値を比較しやすいように日で統一した。

No29	核種	半減期(d) (付表 2.1 より)	核分裂生成核種				中性子等による 生成核種			天然 核種 等	平常 時
			D1*	D6*	D8*	5B*	D2*	D7*	5C*		
1	Be-7	5.3E+01								D3	5A
2	Na-22	9.5E+02					D2				
3	Na-24	6.2E-01					D2	D7	5C'		
4	K-40	4.6E+11								D3	5A
5	Ar-41	7.6E-02					D2				
6	Sc-46	8.4E+01					D2	D7	5C'		
7	Cr-51	2.8E+01					D2	D7	5C		5A
8	Mn-54	3.1E+02					D2	D7	5C		5A
9	Mn-56	1.1E-01					D2	D7	5C'		
10	Co-56	7.7E+01					D2				
11	Co-57	2.7E+02					D2				
12	Co-58	7.1E+01		D6		5B	D2				5A
13	Fe-59	4.4E+01		D6		5B	D2	D7	5C		5A
14	Co-60	1.9E+03		D6	D8	5B	D2	D7	5C		5A
15	Zn-63	2.7E-02					D2				
16	Ni-65	1.0E-01					D2				
17	Zn-65	2.4E+02		D6		5B	D2	D7	5C		5A
18	Ga-74	5.6E-03								D3	
19	As-74	1.8E+01								D3	
20	Ge-75	5.7E-02								D3	
21	Ge-75m	5.5E-04								D3	
22	Se-75	1.2E+02					D2				
23	As-76	1.1E+00					D2				
24	Ge-77	4.7E-01	D1								
25	As-78	6.3E-02	D1								
26	Br-82	1.5E+00					D2	D7	5C'		
27	Br-84	2.2E-02	D1								

28	Kr-85	3.9E+03		D6		5B				
29	Kr-85m	1.9E-01	D1							
30	Rb-86	1.9E+01		D6		5B				
31	Kr-87	5.3E-02	D1							
32	Kr-88	1.2E-01	D1							
33	Rb-88	1.2E-02	D1							
34	Y-88	1.1E+02					D2			
35	Y-90m	1.3E-01	D1							
36	Sr-91	4.0E-01	D1	D6		5B	D7	5C		
37	Y-91	5.9E+01	D1	D6		5B				
38	Y-91m	3.5E-02	D1							
39	Sr-92	1.1E-01	D1							
40	Y-92	1.5E-01	D1							
41	Y-93	4.2E-01	D1							
42	Zr-95	6.4E+01	D1	D6	D8	5B	D7	5C		5A
43	Nb-95	3.5E+01	D1	D6	D8	5B	D7	5C		5A
44	Zr-97	7.0E-01	D1							
45	Nb-97	5.0E-02	D1							
46	Nb-97m	6.8E-04	D1							
47	Mo-99	2.7E+00	D1	D6	D8	5B				
48	Tc-99m	2.5E-01	D1	D6	D8	5B				
49	Ru-103	3.9E+01	D1	D6	D8	5B	D7	5C		5A
50	Ru-105	1.9E-01	D1							
51	Rh-105	1.5E+00	D1							
52	Rh-105m	4.6E-04	D1							
53	Rh-106	3.5E-04	D1							
53	Ru-106	3.7E+02		D6	D8	5B				5A
54	Ag-108m	1.6E+05					D2			5A'
55	Ag-110m	2.5E+02		D6	D8	5B	D2			5A'
56	Ag-113	2.2E-01	D1							
57	Sn-113	1.2E+02		D6		5B	D2			
58	In-114m	5.0E+01					D2			
59	Cd-115	2.2E+00					D2			
60	In-115m	1.9E-01	D1							
61	Cd-117	1.0E-01	D1							
62	Cd-117m	1.4E-01	D1							
63	Sb-122	2.7E+00					D7	5C'		
64	Sb-124	6.0E+01					D2	D7	5C	
65	Sn-125	9.6E+00	D1							
66	Sb-125	1.0E+03		D6	D8	5B	D2			5A
67	Sb-127	3.9E+00	D1							
68	Te-127	3.9E-01		D6		5B				

69	Sb-128	3.8E-01	D1							
70	Sb-129	1.8E-01	D1							
71	Te-129	4.8E-02	D1	D6		5B				
72	Te-129m	3.4E+01		D6	D8	5B				
73	I-129	5.7E+09								
74	Sb-130	2.7E-02	D1							
75	I-130	5.2E-01		D6		5B				
76	Sb-131	1.6E-02	D1							
77	Te-131m	1.4E+00	D1	D6		5B				
78	I-131	8.0E+00	D1	D6	D8	5B	D7	5C		5A
79	Xe-131m	1.2E+01		D6		5B				
80	Te-132	3.2E+00	D1	D6	D8	5B				
81	I-132	9.6E-02	D1	D6		5B				
82	Te-133m	3.8E-02	D1							
83	I-133	8.7E-01	D1	D6		5B	D7	5C		
84	Xe-133	5.2E+00		D6		5B				
85	Xe-133m	2.2E+00	D1	D6		5B				
86	Ba-133	3.9E+03					D2			
87	Te-134	2.9E-02	D1							
88	I-134	3.6E-02	D1							
89	Cs-134	7.5E+02		D6	D8	5B	D2	D7	5C	5A
90	I-135	2.7E-01	D1				D7	5C'		
91	Xe-135	3.8E-01	D1	D6		5B				
92	Xe-135m	1.1E-02	D1							
93	Cs-136	1.3E+01		D6	D8	5B	D2			
94	Cs-137	1.1E+04	D1	D6	D8	5B	D7	5C		5A
95	Cs-138	2.3E-02	D1				D7	5C'		
96	Ba-139	5.8E-02	D1							
97	Ce-139	1.4E+02					D2			
98	Ba-140	1.3E+01	D1	D6	D8	5B	D7	5C		5A
99	La-140	1.7E+00	D1	D6	D8	5B	D7	5C		5A
100	La-141	1.6E-01	D1							
101	Ce-141	3.3E+01	D1		D8	5B				5A'
102	La-142	6.3E-02	D1							
103	Ce-143	1.4E+00	D1							
104	Ce-144	2.8E+02	D1		D8	5B				5A
105	Pr-144	1.2E-02	D1							
106	Pr-145	2.5E-01	D1							
107	Nd-147	1.1E+01	D1		D8	5B				
108	Nd-149	7.2E-02	D1							
109	Pm-149	2.2E+00	D1							
110	Pm-151	1.2E+00	D1							

111	Eu-152	4.9E+03			D8	5B	D2				5A'
112	Sm-153	1.9E+00	D1					D7	5C'		
113	Eu-154	3.1E+03					D2				5A'
114	Eu-156	1.5E+01	D1								
115	Eu-157	6.3E-01	D1								
116	Hf-181	4.2E+01					D2				
117	Ta-182	1.1E+02					D2				
118	W-187	1.0E+00					D2				
119	Ir-192	7.4E+01					D2				
120	Au-198	2.7E+00					D2	D7	5C'		
121	Hg-203	4.7E+01					D2				
122	Pb-203	2.2E+00		D6		5B					
123	Tl-206	2.9E-03								D3	
124	Bi-207	1.2E+04								D3	
125	Tl-208	2.1E-03								D3	5A
126	Pb-210	8.1E+03								D3	
127	Po-210	1.4E+02								D3	
128	Pb-211	2.5E-02								D3	
129	Bi-211	1.5E-03								D3	
130	Pb-212	4.4E-01								D3	5A'
131	Bi-212	4.2E-02								D3	5A'
132	Pb-214	1.9E-02								D3	5A'
133	Bi-214	1.4E-02								D3	5A
134	Rn-219	4.6E-05								D3	
135	Ra-223	1.1E+01								D3	
136	Ra-224	3.7E+00								D3	
137	Ra-226	5.8E+05								D3	5A'
138	Th-227	1.9E+01								D3	
139	Ac-228	2.6E-01								D3	5A
140	Th-228	7.0E+02								D3	
141	Th-231	1.1E+00								D3	
142	Pa-231	1.2E+07								D3	
143	Th-234	2.4E+01								D3	
144	Pa-234m	8.0E-04								D3	5A
145	U-235	2.6E+11								D3	
146	U-237	6.8E+00					D2				
147	Np-239	2.4E+00		D6		5B	D2				
148	Am-241	1.6E+05					D2				

表3 「放射能測定法シリーズ 29 緊急時におけるガンマ線スペクトル解析法」において核分裂後の存在時期を基にした分類（表2のD1：68核種についての分類）

*1 WHO 記載：Guidelines for drinking-water quality, fourth edition: WHO, 2011. 飲料水水質ガイドライン（WHO 飲料水 GL）への記載（昨年度の報告書 表8参照）

*2 NRA 記載：「原子力災害事前対策の策定において参照すべき線量のめやすについて、平成30年10月17日原子力規制委員会」の「(参考) Cs-137 100TBq 放出時の各核種放出量」への記載（昨年度の報告書 表8参照）

*3 核種情報の核種のカッコ内は半減期

定量核種	半減期	γ線(keV)	WHO 記載*1の有無/核種情報	
①1日以内に検出されなくなると試算された核種				
As-78	90.7分	613.8	無	
Br-84	31.76分	881.6	無	
Kr-87	76.3分	402.6	無	希ガス
Ag-113	5.37時間	298.6	無	
Cd-117	2.49時間	1303.3	無	
Cd-117m	3.36時間	1066.0	無	子孫 Cd-117、本表①
Sb-129	4.37時間	813.0	無	子孫 Te-129WHO 記載*1有、本表②
Sb-130	39.5分	793.4	無	
Sb-131	23.03分	943.4	無	子孫 Te-131m 本表⑤
Te-133m	55.4分	912.7	無	子孫 I-133 本表④
Te-134	41.8分	767.2	無	子孫 I-134 本表①
I-134	52.5分	847.0	無	親 T-134、本表①
Cs-138	33.41分	1435.9	無	
Ba-139	82.93分	165.9	無	
Nd-149	1.73時間	211.3	無	子孫 Pm-149 WHO 記載有、本表③
②3日以内に検出されなくなると試算された核種				
Ge-77	11.21時間	215.5	無	子孫 As-77 (39h)は WHO 記載有
Kr-85m	4.48時間	151.2	無	希ガス
Kr-88	2.83時間	196.3	無	希ガス、子孫 Rb-88 本表②
Rb-88	17.77分	1836.0	無	親 Kr-88 は希ガス、本表②
Y-90m	3.19時間	202.5	無	親 Sr-90 (29y)は WHO 記載有
Sr-92	2.61時間	1383.9	無	子孫 Y-92、本表②

Y-92	3.54 時間	934.5	無	親 Sr-92、本表②
Ru-105	4.44 時間	724.3	無	子孫 Rh-105 は WHO 記載有、本表④
Rh-105m	40 秒	129.6	無	子孫 105Rh は WHO 記載有、本表④
Sb-128	9.05 時間	754.0	無	
Te-129	69.6 分	459.6	有	親 Sb-129、本表①
Xe-133m	2.20 日	233.2	無	希ガス. 子孫 Xe-133 は NRA 記載*2 有. 親 I-133、本表④
La-141	3.92 時間	1354.5	無	子孫 Ce-141 は WHO 記載有、本表⑥
La-142	91.1 分	641.3	無	
Pr-145	5.98 時間	979.0	無	
Eu-157	15.18 時間	370.5	無	
③5 日以内に検出されなくなると試算された核種				
Y-93	10.18 時間	266.9	無	子孫 Zr-93 (1611000y)は WHO 記載有
In-115m	4.49 時間	336.2	無	親 Cd-115 (53h)は WHO 記載有
I-135	6.58 時間	1260.4	無	子孫 Cs-135 (2300000y)は WHO 記載有. 子孫 Xe-135、本表④
Xe-135m	15.29 分	526.6	無	希ガス. 子孫 Cs-135 (2300000y)は WHO 記載有. 親 I-135 本表③
Pm-149	53.08 時間	286.0	有	親 Nd-149、本表①
④10 日以内に検出されなくなると試算された核種				
Sr-91	9.65 時間	1024.3	無	子孫 Y-91 は WHO 記載有、本表⑥
Y-91m	49.71 分	555.6	無	子孫 Y-91 は WHO 記載有、本表⑥
Zr-97	16.75 時間	1148.0	無	NRA 記載有. 子孫 Nb-97、本表④
Nb-97	72.1 分	657.9	無	親 Zr-97、本表④
Rh-105	35.36 時間	318.9	有	親 Ru-105、本表②
I-133	20.83 時間	529.9	無	NRA 記載有. 子孫 Xe-133m、本表②. 親 Te-133m、本表①
Xe-135	9.14 時間	249.8	無	希ガス. 親 I-135、本表③
⑤30 日以内に検出されなくなると試算された核種				
Nb-97m	58.7 秒	743.4	無	親 Zr-97 は GSG-2 に記載有、本表④. 子孫 Nb-97、本表④
Sn-125	9.64 日	1067.1	有	
Te-131m	33.25 時間	852.2	有	子孫 I-131、本表⑥

Te-132	3.20 日	228.2	有	子孫 I-132、本表⑥
Ce-143	33.04 時間	293.3	有	
Pm-151	28.40 時間	340.1	無	子孫 Sm-151 (90y)は WHO 記載有
Sm-153	46.50 時間	103.2	有	
⑥30 日後にも検出されると試算された核種				
Y-91	58.51 日	1204.8	有	親 Sr-91、本表④
Zr-95	64.03 日	756.7	有	子孫 Nb-95、本表⑥
Nb-95	34.99 日	765.8	有	親 Zr-95、本表⑥
Mo-99	65.92 時間	739.5	有	子孫 Tc-99m、本表⑥
Tc-99m	6.01 時間	140.5	無	親 Mo-99 は WHO 記載有、本表⑤
Ru-103	39.25 日	497.1	有	
Rh-106	30.07 秒	621.9	無	親 Ru-106 (374d)は WHO 記載有
Sb-127	3.85 日	685.7	無	子孫 Te-127 (9.4h)は WHO 記載有
I-131	8.03 日	364.5	有	親 Te-131m、本表⑤
I-132	2.30 時間	667.7	無	親 Te-132 は WHO 記載有、本表⑤
Cs-137	30.08 年	661.7	有	
Ba-140	12.75 日	537.3	有	子孫 La-140、本表⑥
La-140	1.68 日	1596.2	有	親 Ba-140、本表⑥
Ce-141	32.51 日	145.4	有	親 La-141、本表①
Ce-144	284.91 日	133.5	有	子孫 Pr-141、本表⑥
Pr-144	17.28 分	696.5	無	親 Ce-144 は WHO 記載有、本表⑥
Nd-147	10.98 日	439.9	有	
Eu-156	15.19 日	1230.7	無	親 Sm-156 (9.4h)、その親 Pm-156 (27s)、その親 Nd-156 (5s) はいずれも短半減期であり、Eu-156 は遅れて出現するものの一過性の存在と予想される。

表4 放出γ線のエネルギーが100keV以上、かつ放出率10%以上の核種

核種	WHO飲料水GL		半減期 (日)	壊変形式 (%)	1壊変あたりの線種別の 総エネルギー(keV)			γ線のエネルギーと放出率							
	番号 (Bq/kg)	(g/kg)			α	β	γ & X	γ 1		γ 2		γ 3			
								(keV)	%	(keV)	%	(keV)	%		
Be-7	2	10000	7.7E-13	5.3E+01	ec	100			477.6	10.4					
Na-22	4	100	4.3E-13	9.5E+02	ec β+	100	0.0	195.2	2197.7	1274.5	99.9				
Ca-47	10	100	4.4E-15	4.5E+00	β-	100	0.0	398.7	948.6	1297.1	67.0	807.9	5.9	489.2	5.9
Sc-46	11	100	8.0E-14	8.4E+01	β-	100	0.0	111.8	2009.6	1120.5	100.0	889.3	100.0		
Sc-47	12	100	3.3E-15	3.3E+00	β-	100				159.4	68.3				
Sc-48	13	100	1.8E-15	1.8E+00	β-	100	0.0	220.4	3353.0	1312.1	100.1	983.5	100.1	1037.5	97.6
V-48	14	100	1.6E-14	1.6E+01	ec β+	100				983.5	100.0	1312.1	98.2		
Mn-52	16	100	6.0E-15	5.6E+00	ec β+	100				1434.1	100.0	935.5	94.5	744.2	90.0
Mn-54	18	100	3.5E-13	3.1E+02	ec β+	100				834.8	100.0				
Fe-59	20	100	5.4E-14	4.4E+01	β-	100	0.0	117.5	1188.6	1099.2	56.5	1291.6	43.2	192.3	3.1
Co-56	21	100	8.9E-14	7.7E+01	ec β+	100				846.8	99.9	1238.3	66.5	1771.4	15.4
Co-57	22	1000	3.2E-12	2.7E+02	ec	100	0.0	0.0	125.4	122.1	85.6	136.5	10.7		
Co-58	23	100	8.5E-14	7.1E+01	ec β+	100				810.8	99.5				
Co-60	24	100	2.4E-12	1.9E+03	β-	100	0.0	96.4	2503.9	1332.5	100.0	1173.2	99.9		
Ni-57	25	1000	1.7E-14	1.5E+00	ec β+	100	0.0	154.5	1940.0	1377.6	81.7	127.2	16.7	1919.5	12.3
Zn-65	27	100	3.3E-13	2.4E+02	ec β+	100				1115.5	50.0				
As-74	30	100	2.7E-14	1.8E+01	ec β+	66				595.8	59.0				
As-74	30		0.0E+00	1.8E+01	β-	34	0.0	136.1	97.9	634.8	15.4				
As-76	31	100	1.7E-15	1.1E+00	β-	100	0.0	1064.6	418.9	559.1	45.0	657.1	6.2		
Se-75	33	100	1.9E-13	1.2E+02	ec	100	0.0	0.0	389.4	264.7	58.9	136.0	58.5	279.5	25.0
Br-82	34	100	2.5E-15	1.5E+00	β-	100				776.5	83.6	554.4	71.7	619.1	43.7
Sr-85	36	100	1.1E-13	6.5E+01	ec	100	0.0	0.0	500.2	514.0	96.0				
Zr-95	42	100	1.3E-13	6.4E+01	β-	100	0.0	117.0	732.9	756.7	54.4	724.2	44.3		
Nb-94	44	100	1.4E-08	7.4E+06	β-	100	0.0	145.8	1573.8	871.1	99.9	702.7	99.8		
Nb-95	45	100	6.9E-14	3.5E+01	β-	100	0.0	43.4	764.5	765.8	99.8				
Mo-99	47	100	5.6E-15	2.7E+00	β-	100	0.0	389.6	143.5	739.5	12.2	181.1	6.1	777.9	4.3
Tc-96	48	100	8.5E-15	4.3E+00	ec β+	100				778.2	99.8	849.9	98.0	1126.9	15.2
Ru-97	52	1000	5.7E-14	2.8E+00	ec β+	100				215.7	85.6	324.5	10.8		
Ru-103	53	100	8.4E-14	3.9E+01	β-	100	0.0	63.6	497.6	497.1	91.0	610.3	5.8		
Ru-106	54	10	8.2E-14	3.7E+02	β-	100	0.0	10.0	0.0						
Rh-106(Ru-106)					β-	100	0.0	1410.0	210.0	511.9	20.4	621.9	9.9		
Rh-105	55	1000	3.2E-14	1.5E+00	β-	100	0.0	152.2	77.4	318.9	19.1	306.1	5.1		
Ag-105	57	100	9.0E-14	4.1E+01	ec β+	100				344.5	41.4	280.4	30.2	644.6	11.1
Ag-110m	58	100	5.7E-13	2.5E+02	β-	98.7	0.0	67.0	2798.4	657.8	95.6	884.7	75.0	937.5	35.0
Cd-115	61	100	5.3E-15	2.2E+00	β-	100	0.0	317.2	195.5	527.9	27.4	492.4	8.0	260.9	1.9
In-111	63	1000	6.4E-14	2.8E+00	ec	100	0.0	0.0	405.9	245.4	94.1	171.3	90.6		
In-114m	64	100	1.2E-13	5.0E+01	IT	96.8	0.0	0.0	38.2	190.3	15.6				
Sn-113	65	100	2.7E-13	1.2E+02	ec β+	100				391.7	65.0	255.1	2.1		
Sn-125	66	100	2.5E-14	9.6E+00	β-	100	0.0	801.7	335.3	1067.1	10.0	1089.2	4.6	915.6	4.1
Sb-122	67	100	6.9E-15	2.7E+00	β-	97.6	0.0	562.0	437.0	564.2	70.7	692.7	3.9		
Sb-124	68	100	1.5E-13	6.0E+01	β-	100				602.7	97.8	1691.0	47.6	722.8	10.8
Sb-125	69	100	2.6E-12	1.0E+03	β-	100	0.0	86.6	433.4	427.9	29.6	600.6	17.7	636.0	11.2
Te-123m	70	100	3.0E-13	1.2E+02	IT	100	0.0	0.0	148.3	159.0	84.0				
Te-131	75	1000	4.7E-16	1.7E-02	β-	100	0.0	690.0	420.8	149.7	68.8	452.3	18.2	1147.0	5.0
Te-131m	76	100	3.8E-15	1.4E+00	β-	74.1	0.0	102.4	1366.8	773.7	36.8	852.2	19.9	793.8	13.4
Te-132	77	100	8.7E-15	3.2E+00	β-	100	0.0	59.8	234.0	228.2	88.0	49.7	15.0	116.3	2.0
I-126	79	10	3.4E-15	1.3E+01	ec β+	52.7				666.3	32.9	753.8	4.2		
I-126	79			1.3E+01	β-	47.3	0.0	149.4	159.2	388.6	35.6	491.2	2.9		
I-131	81	10	2.2E-15	8.0E+00	β-	100	0.0	181.9	382.0	364.5	81.5	637.0	7.2	284.3	6.1
Cs-129	82	1000	3.6E-14	1.3E+00	ec β+	100				371.9	30.6	411.5	22.3	548.9	3.4
Cs-132	84	100	1.8E-14	6.5E+00	ec β+	98.1				667.7	97.6	630.2	1.0		
Cs-134	85	10	2.1E-13	7.5E+02	β-	100	0.0	157.3	1554.5	604.7	97.6	795.9	85.5	802.0	8.7
Cs-136	87	100	3.7E-14	1.3E+01	β-	100	0.0	105.5	2162.2	818.5	99.7	1048.1	80.0	340.5	46.8
Cs-137	88	10	3.1E-12	1.1E+04	β-	100	0.0	187.1	565.5	661.7	85.1				
Ba-131	89	1000	3.1E-13	1.2E+01	ec β+	100				496.3	48.0	123.8	29.8	216.1	20.4
Ba-140	90	100	3.7E-14	1.3E+01	β-	100				537.3	24.4	162.7	6.2	304.8	4.3
La-140	91	100	4.9E-15	1.7E+00	β-	100	0.0	526.4	2309.1	1596.2	95.4	487.0	45.5	815.8	23.3
Ce-139	92	1000	4.0E-12	1.4E+02	ec	100	0.0	0.0	160.2	165.9	79.9				
Ce-141	93	100	9.5E-14	3.3E+01	β-	100	0.0	145.2	76.9	145.4	48.4				
Ce-143	94	100	4.1E-15	1.4E+00	β-	100	0.0	401.5	279.1	293.3	42.8	57.4	11.7	664.6	5.7
Ce-144	95	10	8.5E-14	2.8E+02	β-	100	0.0	82.1	19.5	133.5	11.1	80.1	1.4		
Pr-144(Ce-144)	95.1				β-	100	0.0	1208.5	32.0	696.5	1.3	1489.2	0.3		
Nd-147	97	100	3.3E-14	1.1E+01	β-	100	0.0	232.0	144.4	531.0	13.4	91.1	28.1	319.4	2.1

表4 放出γ線のエネルギーが100keV以上、かつ放出率10%以上の核種(続き)

核種	WHO飲料水GL		半減期 (日)	壊変形式		1壊変あたりの線種別の 総エネルギー(keV)			γ線のエネルギー(keV)と放出率(%)						
	番号 (Bq/kg)	(g/kg)		(%)	α	β	γ & X	γ 1		γ 2		γ 3			
								(keV)	%	(keV)	%	(keV)	%		
Sm-153	101	100	6.1E-15	1.9E+00	β-	100	0.0	223.9	62.2	103.2	29.3	69.7	4.7		
Eu-152	102	100	1.6E-11	4.9E+03	ec β+	72.1				121.8	28.5	1408.0	20.9	964.1	14.5
Eu-152	102			4.9E+03	β-	27.9	0.0	83.1	259.9	344.3	26.6	778.9	12.9	411.1	2.2
Eu-154	103	100	1.0E-11	3.1E+03	β-	99.98	0.0	221.3	1243.1	123.1	40.4	1274.4	34.8	723.3	20.1
Eu-155	104	1000	5.6E-11	1.7E+03	β-	100	0.0	46.9	61.3	105.3	21.1	86.5	30.7		
Gd-153	105	1000	7.6E-12	2.4E+02	ec	100	0.0	0.0	105.2	103.2	21.1	97.4	29.0	69.7	2.4
Tb-160	106	100	2.4E-13	7.2E+01	β-	100	0.0	210.3	1126.6	879.4	30.1	298.6	26.1	966.2	25.1
Yb-175	109	1000	1.5E-13	4.2E+00	β-	100	0.0	112.7	79.9	396.3	13.1	282.5	6.1	113.8	3.9
Ta-182	110	100	4.3E-13	1.1E+02	β-	100	0.0	127.8	1306.1	1121.3	35.2	67.7	42.9	1221.4	27.2
Os-185	114	100	3.6E-13	9.4E+01	ec	100	0.0	0.0	689.2	646.1	78.0	874.8	6.3	880.5	5.2
Os-191	115	100	6.1E-14	1.5E+01	β-	100				129.4	26.5				
Ir-190	117	100	4.6E-14	1.2E+01	ec β+	100				186.7	52.0	605.1	39.9	518.6	34.0
Ir-192	118	1000	2.9E-13	7.4E+01	β-	95.2	0.0	170.2	785.1	316.5	82.9	468.1	47.8	308.5	29.7
Pt-191	119	1000	1.1E-13	2.8E+00	ec	100	0.0	0.0	321.3	538.9	15.9	409.4	8.8	359.9	6.4
Au-198	121	100	1.1E-14	2.7E+00	β-	100	0.0	312.5	403.4	411.8	95.6				
Au-199	122	1000	1.3E-13	3.1E+00	β-	100	0.0	82.3	95.2	158.4	40.0	208.2	8.7		
Hg-203	124	100	2.0E-13	4.7E+01	β-	100	0.0	57.9	237.9	279.2	81.6				
Tl-200	125	1000	4.5E-14	1.1E+00	ec β+	100				367.9	87.0	1205.8	30.0	579.3	13.7
Tl-201	126	1000	1.3E-13	3.0E+00	ec	100	0.0	0.0	79.2	167.4	10.0	135.3	2.6		
Tl-202	127	1000	5.1E-13	1.2E+01	ec β+	100				439.5	91.5	520.3	0.6		
Pb-203	129	1000	9.1E-14	2.2E+00	ec	100	0.0	0.0	313.6	279.2	80.9	401.3	3.4		
Pb-206	131	100	2.7E-14	6.2E+00	ec β+	100				803.1	99.0	881.0	66.2	516.2	40.8
Bi-207	132	100	4.9E-11	1.2E+04	ec β+	100				569.7	97.8	1063.7	74.5	1770.2	6.9
Ra-223	135	1	5.3E-16	1.1E+01	α	100	5665.3	0.0	136.4	269.5	13.9	154.2	5.7	323.9	4.0
Rn-219 (Ra-223)	135			4.6E-05	α	100	6753.8	0.0	58.2	271.2	10.8	401.8	6.6		
Bi-211 (Ra-223)	135			1.5E-03	α	99.724	6548.9	0.0	45.7	351.1	13.0				
Pb-212 (Ra-224)	136			4.4E-01	β-	100	0.0	100.2	144.5	238.6	43.6	300.1	3.3		
Tl-208 (Ra-224)	136			2.1E-03	β-	100	0.0	559.5	3381.4	2614.5	99.8	583.2	85.0	510.8	22.6
Bi-213 (Ra-225)	137			3.2E-02	β-	97.8	0.0	424.0	126.3	440.5	25.9	292.8	0.4	807.4	0.3
Pb-214 (Ra-226)	138			1.9E-02	β-	100	0.0	224.7	239.8	351.9	35.6	295.2	18.4	242.0	7.3
Bi-214 (Ra-226)	138			1.4E-02	β-	99.979	0.0	640.0	1476.5	609.3	45.5	1764.5	15.3	1120.3	14.9
Ac-228 (Ra-228)	139			2.6E-01	β-	100				969.0	15.8	338.3	11.3		
Th-227	140	10	8.8E-15	1.9E+01	α	100	5901.1	0.0	119.7	236.0	12.9	50.1	8.4	256.2	7.0
Pa-234 (Th-234)	140			2.9E+01	β-	100				131.3	18.9	946.0	14.0	883.2	10.0
Pa-230	147	100	8.3E-14	1.7E+01	ec β+	92.2				951.9	30.0	918.5	8.3	454.9	6.8
Pa-233	149	100	1.3E-13	2.7E+01	β-	100	0.0	66.5	218.7	311.9	38.5	300.1	6.6	340.5	4.5
U-235	155	1	1.3E-05	2.6E+11	α	100	4463.9	0.0	175.2	185.7	57.0	143.8	11.0	163.4	5.1
U-237	157	100	3.3E-14	6.8E+00	β-	100	0.0	67.9	139.2	208.0	21.2	59.5	34.5	164.61	1.9
Np-239	160	100	1.2E-14	2.4E+00	β-	100	0.0	147.7	169.8	106.1	25.3	277.6	14.5	228.2	10.7
Np-240(Pu244)	168			4.3E-02	β-	100	0.0	353.3	1131.2	566.3	27.6	973.9	25.9		
Cm-243	174	1	5.3E-13	1.1E+04	α	99.7	5830.9	0.0	124.8	277.6	14.0	228.2	10.6	209.8	3.3
Cm-247	178	1	2.9E-07	5.7E+09	α	100	4948.7	0.0	313.4	402.4	72.0	278.0	3.4	287.5	2.0
Cf-249	183	1	6.6E-12	1.3E+05	α	100	5819.7	0.0	326.6	388.2	66.0	333.4	15.0	252.8	2.6
Cf-251	185	1	1.7E-11	3.3E+05	α	≈ 100	5786.4	0.0	109.0	177.5	17.3	227.4	6.8	285.4	1.1
Es-254	190	10	1.4E-13	2.8E+02	α	≈ 100	6400.3	0.0	57.0	316.0	0.2	63.0	2.0		
Bk-250(Es-254)	191	100	8.6E-15	1.6E+00	β-	98	0.0	192.0	474.7	648.7	29.0	693.7	24.8	688.5	12.5
Es-254m	191	100	8.6E-15	1.6E+00	β-	98	0.0	192.0	474.7	648.7	29.0	693.7	24.8	688.5	12.5
Kr-85m	202			1.9E-01	β-	78.8	0.0	228.7	114.7	151.2	75.2	129.8	0.3		
Kr-85m	202			1.9E-01	IT	21.2	0.0	0.0	43.3	304.9	14.0				
Kr-87	203			5.3E-02	β-	100	0.0	1330.9	793.0	402.6	50.0	2554.8	9.2	845.4	7.3
Kr-88	204			1.2E-01	β-	100	0.0	365.3	1950.5	2392.1	34.6	196.3	26.0	166.0	3.1
Rb-88(Kr-88)	204			1.2E-02	β-	100		2051.4	684.2	1836.0	22.8	898.0	14.4	2677.9	2.1
Xe-135	206			3.8E-01	β-	100	0.0	304.7	248.5	249.8	90.0	608.2	2.9		
I-132	207			9.6E-02	β-	100	0.0	485.7	2256.3	667.7	98.7	772.6	75.6	954.6	17.6
I-133	208			8.7E-01	β-	100	0.0	405.0	613.2	529.9	87.0	875.3	4.5	1298.2	2.4
I-134	209			3.6E-02	β-	100	0.0	626.3	2532.2	847.0	96.0	884.1	65.1	1072.6	14.9
I-135	210			2.7E-01	β-	100	0.0	336.2	1578.4	1260.4	28.7	1131.5	22.6	1678.0	9.6
Sb-127	211			3.9E+00	β-	100	0.0	308.7	692.4	685.7	36.8	473.0	25.8	783.7	15.1
Sb-129	212			1.8E-01	β-	100	0.0	278.2	1536.8	813.0	48.2	915.0	23.3	966.8	9.0
Sr-91	213			4.0E-01	β-	100	0.0	643.5	708.4	1024.3	33.5	749.8	23.7	652.9	8.0
Tc-99m	214			2.5E-01	IT	99.9963	0.0	0.0	126.5	140.5	89.0				
Ru-105	215			1.9E-01	β-	100	0.0	410.6	748.3	724.3	47.3	469.4	17.5	676.4	15.7
Zr-97	216			7.0E-01	β-	100	0.0	704.9	852.6	743.4	93.1	507.6	5.0	1148.0	2.6
Nb-97(Zr-97)	216			5.0E-02	β-	100	0.0	467.5	664.8	657.9	98.2	1024.4	1.1		

表5 放出γ線のエネルギーが100keV以下または放出率が10%以下の核種

核種	WHO飲料水GL		半減期 (日)	壊変形式 (%)	1壊変あたりの線種別の 総エネルギー(keV)			γ線のエネルギー(keV)と放出率(%)							
	番号 (Bq/kg)	(g/kg)			α	β	γ & X	γ 1		γ 2		γ 3			
			(keV)	%				(keV)	%	(keV)	%				
エネルギー100keV以上、放出率1~10%															
Cr-51	15	10000	2.9E-12	2.8E+01	ec	100	0.0	0.0	33.0	320.1	9.9				
As-77	32	1000	2.6E-14	1.6E+00	β-	100	0.0	225.5	8.5	239.0	1.6				
Rb-86	35	100	3.3E-14	1.9E+01	β-	99.99	0.0	668.9	94.2	1077.0	8.6				
Ag-111	59	100	1.7E-14	7.5E+00	β-	100	0.0	350.3	26.6	342.1	6.7	245.4	1.2		
Cd-115m	62	100	1.1E-13	4.5E+01	β-	100	0.0	604.4	33.9	933.8	2.0	1290.6	0.9		
Te-127	71	1000	1.0E-14	3.9E-01	β-	100	0.0	226.0	5.0	417.9	1.0	360.3	0.1		
Te-129	73	1000	1.3E-15	4.8E-02	β-	100	0.0	524.0	63.1	459.6	7.7	27.8	16.3	487.4	1.4
Te-129m	74	100	9.0E-14	3.4E+01	IT	64	0.0	0.0	8.1	729.6	0.7	105.5	0.1		
Te-129m	74		3.4E+01	β-	36	0.0	206.5	29.0	695.9	3.0	729.6	0.7			
Pm-149	99	100	6.8E-15	2.2E+00	β-	100	0.0	363.1	12.3	286.0	3.1	859.5	0.1		
Re-186	113	100	1.4E-14	3.7E+00	β-	92.5	0.0	321.0	16.6	137.2	9.5				
Os-193	116	100	5.0E-15	1.2E+00	β-	100	0.0	354.1	64.6	460.5	3.9	138.9	3.8	73.0	3.1
Hg-197	123	1000	1.1E-13	2.7E+00	ec	100	0.0	0.0	99.2	191.4	0.6	77.4	18.7	268.7	0.0
Ra-224	136	1	1.7E-16	3.6E+00	α	100	5673.2	0.0	10.4	241.0	4.1	10.1	0.371		
Ra-226	138	1	2.7E-11	5.8E+05	α	100	4773.4	0.0	7.5	186.2	3.6	10.1	0.8		
Th-229	142	0.1	1.4E-11	2.9E+06	α	100	4919.5	0.0	93.6	193.5	4.4	11.1	12.3	210.9	2.8
Pa-231	148	0.1	5.7E-11	1.2E+07	α	100				300.1	2.4	27.4	10.5	302.667	92.3
Am-242	170	1000	3.3E-14	6.7E-01	β-	82.7	0.0	159.1	2.8	42.1	0.0	12.7	17.9		
Am-242	170		6.7E-01	ec	17.3	0.0	0.0	0.0	14.5	103.7	5.7	12.1	11.0	44.5	0.0
Cm-245	176	1	1.6E-10	3.1E+06	α	100	5386.4	0.0	97.4	175.0	9.9	133.1	2.8	190.0	0.2
エネルギー100keV以上、放出率0.1~1%															
Y-91	40	100	1.1E-13	5.9E+01	β-	100	0.0	603.0	4.1	1204.8	0.3				
Tc-97m	50	100	1.8E-13	9.1E+01	IT	96.1	0.0	0.0	9.6	96.5	0.3	18.4	26.9		
Pt-193m	120	1000	1.7E-13	4.3E+00	IT	100				135.5	0.1	12.6	0.7		
Th-228	141	1	3.3E-14	7.0E+02	α	100	5403.5	0.0	3.0	216.0	0.2	84.4	1.2		
Kr-85			3.9E+03	β-	100	0.0	250.7	2.4	514.0	0.4					
エネルギー100keV以下、放出率2%以上															
Cd-109	60	100	1E-12	4.6E+02	ec	100	0.0	0.0	26.6	88.0	3.6	22.2	55.1		
Th-231	144	1000	5.1E-14	1.1E+00	β-	100	0.0	77.9	22.9	84.2	6.6	25.6	14.1	90.0	1.0
Th-234	146	100	1.2E-13	2.4E+01	β-	100	0.0	47.8	7.5	92.4	2.1	92.8	2.1	63.3	3.7
U-231	151	1000	2E-13	4.2E+00	ec	100	0.0	0.0	84.8	84.2	7.3	102.3	1.3	25.7	14.6
Np-237	159	1	3.8E-08	7.8E+08	α	100	4788.9	0.0	31.3	86.5	12.4	29.4	14.1	94.6	0.6
Am-241	169	1	7.9E-12	1.6E+05	α	100	5490.0	0.0	27.2	59.5	35.9	26.3	2.3	33.2	0.1
Am-243	172	1	1.4E-10	2.7E+06	α	100	5271.3	0.0	56.6	74.7	67.2	43.5	5.9	117.6	0.6
Xe-133			5.2E+00	β-	100	0.0	100.2	45.9	81.0	36.9	79.6	0.4			

表6 主な放出放射線がβ線の核種

核種	WHO飲料水GL		半減期 (日)	壊変形式		1壊変あたりの線種別の 総エネルギー(keV)			ベータ線の平均エネルギー (keV) と放出率 (%)		
	番号	(Bq/kg)		(g/kg)	(%)	α	β	γ & X	(keV)	%	
H-3	1	10000	2.8E-11	4.5E+03	β-	100	0.0	5.7	0.0	5.7	100
C-14	3	100	6.0E-10	2.1E+06	β-	100	0.0	49.5	0.0	49.5	100
P-32	5	100	9.4E-15	1.4E+01	β-	100	0.0	695.0	1.2	695.0	100
P-33	6	1000	1.7E-13	2.5E+01	β-	100	0.0	76.4	0.0	76.4	100
S-35	7	100	6.3E-14	8.7E+01	β-	100	0.0	48.8	0.0	48.8	100
Cl-36	8	100	8.2E-08	1.1E+08	β-	98				251.3	98
Ca-45	9	100	1.5E-13	1.6E+02	β-	100	0.0	76.9	0.0	76.9	100
Ni-63	26	1000	4.8E-10	3.7E+04	β-	100	0.0	17.4	0.0	17.4	100
Sr-89	37	100	9.3E-14	5.1E+01	β-	100	0.0	587.1	1.0	587.1	100
Sr-90	38	10	2.0E-12	1.1E+04	β-	100	0.0	195.8	0.1	195.8	100
Y-90	39	100	5.0E-15	2.7E+00	β-	100	0.0	933.6	2.0	933.7	100
Zr-93	41	100	1.1E-06	5.9E+08	β-	100				18.9	73
Tc-99	51	100	1.6E-07	7.7E+07	β-	100	0.0	84.6	0.0	84.6	100
Cs-135	86	100	2.3E-06	8.4E+08	β-	100	0.0	75.7	0.0	75.7	100
Pr-143	96	100	4.0E-14	1.4E+01	β-	100	0.0	315.1	0.3	315.1	100
Pm-147	98	1000	2.9E-11	9.6E+02	β-	100	0.0	61.9	0.0	61.9	100
Sm-151	100	1000	1.0E-09	3.3E+04	β-	100	0.0	19.6	0.0	19.7	99
Er-169	107	1000	3.3E-13	9.4E+00	β-	100	0.0	99.8	0.1	101.0	55
Tm-171	108	1000	2.5E-11	7.0E+02	β-	100	0.0	24.8	0.6	25.2	98
W-185	112	1000	2.9E-12	7.5E+01	β-	100	0.0	126.9	0.1	126.9	100
Tl-204	128	100	5.8E-12	1.4E+03	β-	97.1	0.0	236.9	0.2	244.1	97
Bi-210	133	100	2.2E-14	5.0E+00	β-	100	0.0	389.0	0.5	389.0	100
Ra-225	137	1	6.9E-16	1.5E+01	β-	99.97				93	70
Pu-241	166	10	2.6E-12	5.2E+03	β-	99.998	0.0	5.2	0.0	5.227	99.998
Bk-249	180	100	1.7E-12	3.3E+02	β-	99.999	0.0	32.4	0.0	32.4	100
Cf-253	187	100	9.3E-14	1.8E+01	β-	99.7	0.0	72.0	0.0	65.2	≈ 50

表7 主な放出放射線がα線の核種

核種	WHO飲料水GL			半減期 (日)	壊変形式 (%)		1壊変あたりの線種別の 総エネルギー(keV)			α線のエネルギーと放出率			
	番号 (Bq/kg)	(g/kg)	α				β	γ & X	α1		α2		
									(keV)	%	(keV)	%	
Po-210	134	0.1	6E-16	1.4E+02	α	100	5304.4	0.0	0.0	5304.3	100.0		
Th-230	143	1	1.3E-09	2.8E+07	α	100	4664.1	0.0	1.3	4687.0	76.3	4620.5	23.4
Th-232	145	1	2.5E-04	5.1E+12	α	100	3996.8	0.0	1.1	4012.3	78.2	3947.2	21.7
U-230	150	1	9.6E-16	2.0E+01	α	100	5867.4	0.0	2.5	5888.4	67.4	5817.5	32.0
U-232	152	1	1.2E-12	2.5E+04	α	100	5302.0	0.0	1.7	5320.1	68.2	5263.4	31.6
U-233	153	1	2.8E-09	5.8E+07	α	100	4805.8	0.0	0.9	4824.2	84.3	4783.5	13.2
U-234	154	1	4.3E-09	9.0E+07	α	100	4759.4	0.0	1.4	4774.6	71.4	4722.4	28.4
U-236	156	1	4.2E-07	8.6E+09	α	100	4474.3	0.0	1.2	4494.0	73.8	4445.0	25.9
U-238	158	10	8.0E-04	1.6E+12	α	100	4187.1	0.0	1.0	4198.0	79.0	4151.0	20.9
Pu-236	161	1	5.1E-14	1.0E+03	α	100	5760.4	0.0	1.6	5767.5	69.1	5720.9	30.8
Pu-238	163	1	1.6E-12	3.2E+04	α	100	5486.4	0.0	1.4	5499.0	70.9	5456.3	29.0
Pu-239	164	1	4.4E-10	8.8E+06	α	100	5150.9	0.0	0.7	5156.6	70.8	5144.3	17.1
Pu-240	165	1	1.2E-10	2.4E+06	α	100	5155.2	0.0	1.3	5168.2	72.8	5123.7	27.1
Pu-242	167	1	6.9E-09	1.4E+08	α	100	4888.6	0.0	1.2	4902.3	76.5	4858.2	23.4
Pu-244	168	1	1.5E-06	3.0E+10	α	99.88	4575.1	0.0	0.8	4589.0	80.5	4546.0	19.4
Cm-242	173	10	8.2E-14	1.6E+02	α	100	6103.9	0.0	1.4	6112.7	74.1	6069.4	25.9
Cm-244	175	1	3.3E-13	6.6E+03	α	100	5796.4	0.0	1.3	5804.8	76.9	5762.6	23.1
Cm-246	177	1	8.7E-11	1.7E+06	α	99.97	5377.4	0.0	0.0	5386.5	82.2	5343.5	17.8
Cm-248	179	0.1	6.5E-10	1.3E+08	α	91.6	4645.1	0.0	0.0	5078.4	75.0	5034.9	16.5
Cf-246	181	100	7.6E-15	1.5E+00	α	100	6745.6	0.0	1.0	6750.0	79.3	6708.2	20.6
Cf-248	182	10	1.7E-13	3.3E+02	α	99.997	6249.2	0.0	1.2	6258.0	80.0	6217.0	19.6
Cf-250	184	1	2.5E-13	4.8E+03	α	99.92	6021.3	0.0	0.0	6030.2	82.6	5989.9	17.1
Cf-252	186	1	5.0E-14	9.7E+02	α	96.9	5884.0	0.0	0.0	6118.1	81.5	6075.6	14.5
Es-253	189	10	1.1E-14	2.0E+01	α	100				6633.0	89.9	6590.5	6.6

表8 検出に有効な放射線を放出しない核種

核種	WHO飲料水GL			半減期 (日)	壊変形式 (%)		1壊変あたりの線種別の 総エネルギー(keV)		
	番号 (Bq/kg)	(g/kg)	α				β	γ & X	
									(keV)
Mn-53	17	10000	1.5E-04	1.4E+09	ec	100	0.0	0.0	1.5
Fe-55	19	1000	1.1E-11	1.0E+03	ec	100	0.0	0.0	1.7
Ge-71	28	10000	1.7E-12	1.1E+01	ec	100	0.0	0.0	4.3
As-73	29	1000	1.2E-12	8.0E+01	ec	100	0.0	0.0	16.0
Nb-93m	43	1000	1.1E-10	5.9E+03	IT	100	0.0	0.0	2.0
Mo-93	46	100	2.8E-09	1.5E+06	ec	100	0.0	0.0	12.6
Tc-97	49	1000	3.1E-05	1.5E+09	ec	100	0.0	0.0	11.8
Pd-103	56	1000	3.6E-13	1.7E+01	ec	100	0.0	0.0	16.3
Te-127m	72	100	2.8E-13	1.1E+02	IT	97.6	0.0	0.0	10.3
I-125	78	10	1.5E-14	5.9E+01	ec	100	0.0	0.0	41.8
I-129	80	1	1.5E-07	5.7E+09	β-	100	0.0	40.0	24.1
Cs-131	83	1000	2.6E-13	9.7E+00	ec	100	0.0	0.0	22.9
W-181	111	1000	4.5E-12	1.2E+02	ec	100	0.0	0.0	40.3
Pb-210	130	0.1	3.5E-14	8.1E+03	β-	100	0.0	6.1	4.4
Pu-237	162	1000	2.2E-12	4.6E+01	ec	99.996	0.0	0.0	53.1
Am-242m	171	1	2.6E-12	5.2E+04	IT	99.6			
Cf-254	188	1	3.2E-15	6.1E+01	SF		18.1	0.0	0.0
Ra-228	139	0.1	9.9E-15	2.1E+03	β-	100	0.0	7.2	0.3

