

厚生労働行政推進調査事業費補助金

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

平成29年度~令和元年度 総合研究報告書

研究代表者

国立医薬品食品衛生研究所 蜂須賀暁子

研究分担者

近畿大学 山田 崇裕

国立医薬品食品衛生研究所 鍋師 裕美

国立医薬品食品衛生研究所 曾我 慶介

国立医薬品食品衛生研究所 畝山智香子

国立医薬品食品衛生研究所 蜂須賀暁子

目 次

I. 総合研究報告

- 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
蜂須賀暁子・・・・・・・・・・ 1

II. 分担研究報告

1. 食品中の放射性物質等検査システムの評価手法の検討
山田 崇裕・・・・・・・・・・ 17
2. 食品中放射性物質濃度データ解析
蜂須賀暁子
鍋師 裕美・・・・・・・・・・ 29
3. 食品中放射性物質等有害物質濃度データ調査
曾我 慶介・・・・・・・・・・ 53
4. 消費者への食品検査及び安全性情報伝達方法に関する検討
畝山智香子・・・・・・・・・・ 69
5. 緊急時検査法に関する検討
蜂須賀暁子・・・・・・・・・・ 79

- III. 研究成果の刊行に関する一覧表・・・・・・・・・・ 95

I. 総 合 研 究 報 告

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

蜂須賀 暁子

平成29—令和元年度厚生労働行政推進調査事業費補助金
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
総合研究報告書

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室長

研究要旨

平成23年3月の東京電力福島第一原子力発電所事故により、放射性物質が環境に放出されて食品に移行したことは食品衛生上の大きな問題となっている。食品中の放射性物質検査は、原子力災害対策本部で決定したガイドラインに従い、地方自治体において検査計画に基づくモニタリング検査を実施しており、基準値を超過した食品については回収・廃棄等の対応を行っている。当該検査ガイドラインは、平成29年度に、自治体等の要望を受け、検査対象品目・自治体等の大幅な緩和を行ったことから、ガイドラインの改定による影響を、基準値超過率や超過品目の変動だけでなく、消費者意識等も含め総合的に評価し、安全確保体制が維持できていることの確認が必要となる。また、復興とともに変化する最新の状況を反映した社会的に合理的な検査体制を保つために、今後もガイドラインの改定が想定されることから、その改定に伴う影響の評価手法の開発も必要となっている。これらのことから、以下の研究を行った。

(1) 食品中放射性物質の検査体制の評価手法の検討

非破壊式放射能測定装置による測定は、設計上想定した試料の配置や放射性物質の分布のばらつき範囲において測定を行うことが重要となる。本研究では、検査のサンプリング精度の重要因子である濃度分布の評価手法として非破壊式装置を用いた方法を含めて検討した。実験方法としては、食品試料を用い、3機種非破壊式放射能測定装置による測定とGe検出器を用いた公定法による測定結果との比較検討を中心に行った。その結果、2つの方法による測定値は良好な相関関係を示すことが実測により明らかになり、装置の検出効率の形状依存の特徴を十分に把握し、変化の影響を受けにくい状況で測定を行えば、食品の汚染状況の大まかな把握には、非破壊式装置による測定は十分有効である可能性があることが示唆された。一方、非破壊測定では真度の低下傾向が観測され、さらに有意にばらつきが大きい試料や、Ge検出器による測定結果と大きなずれがあるものが見られた。前処理を想定した食品中の放射性セシウムスクリーニング法の、非破壊式装置による検査への適用に関する検討では、評価を行った3機種についていずれも適用条件であるスクリーニングレベル下限50 Bq/kgを満足したものの、本結果は暫定的にそれぞれ回帰直線の傾きを考慮して補正の上評価して得たものであり、このような評価手法の妥当性は、各装置の放射能濃度への換算係数の見積もり手法の信頼性検証に関する今後の更なる詳細な検討により確保されることが望まれた。

(2) 食品中放射性物質濃度データ解析

平成 29 年度から令和元年度の 3 年間に厚生労働省で公表された、非流通品牛肉を除く食品中の放射性セシウム濃度データを集計した。各年度の非流通品/流通品における基準値超過率は平成 29 年度 0.53/0.080%、平成 30 年度 0.97/0.095%、令和元年度 0.61/0.046%であり、基準値超過率および放射性セシウムの検出濃度はすべての年度で非流通品と比較して流通品で低い傾向が認められ、流通前の検査により高濃度に放射性セシウムを含む食品が効果的に流通から排除されていることが示唆された。基準値を超過した品目は、山菜、きのこ、淡水魚、野生鳥獣肉など山林に起源をもつ天然品が主体であり、栽培/飼養管理が困難な品目に該当する食品が多く含まれていた。基準値を超える食品を流通させないための監視において、山菜、きのこ、淡水魚、野生鳥獣肉のような栽培/飼養管理が困難な品目に該当する食品中の放射性セシウムの検査を維持していくことが重要と考えられる。非流通品の牛肉については各年度 24 万件以上が検査されているものの検出率も検出濃度も低いことから、リスクの大きさに適した検査体制を整えていくことが重要であると考えられる。

(3) 食品中放射性物質等有害物質調査

原子力施設事故等により環境汚染を引き起こす放射性物質に加え、今後内部被ばくにおいて考慮すべき核種等を探索することを目的とした。平成 29 年度は、文献調査により、天然放射性物質からの内部被ばくの影響が、福島原発事故等に起因する人工放射性物質からの影響に比して大きいことが認められた。特に日本におけるポロニウム 210 からの内部被ばく線量は世界的にも高い値であったが、データ数が少なく、線量範囲にも大きな開きが見られた。データ数が少ない原因の一つに分析法が煩雑なことが挙げられることから、より実用的な食品中ポロニウム 210 分析法の検討を行った。ポロニウムを金属板に沈着する方法として、化学分離後ステンレス板電着法、直接ステンレス板電着法と銀板自然析出法の 3 種類の方法を比較検証し、食品マトリクスに応じて各方法を適宜使い分けることで、分析時間と費用を抑えられることが可能と考えられた。平成 30 年度は、平成 29 年度に検討した分析法について添加回収実験を行った。その結果、全食品カテゴリーで良好な結果が得られ、本分析法は様々な食品試料に適用可能と考えられた。令和元年年度は、流通食品の測定を行った結果、全ての試料からポロニウム 210 が検出された。また、魚類の筋肉と内臓を分離して放射能を測定したところ、筋肉部位に比べて内臓部位では 10 倍以上の高い放射能が認められ、近年の諸外国の文献においても、同様の傾向が確認された。魚介類の内臓を偏って摂取した場合、内部被ばく線量が増加する可能性があるため注意が必要である。

(4) 消費者への食品検査及び安全性情報伝達方法に関する検討

福島第一原子力発電所事故から数年経ち、これまでのデータからは現在市場に流通している食品からはほとんど放射性物質は検出されていないことが示されていて、適切なリスク管理の視点から検査体制の見直しが検討課題となっている。しかし一般の消費者に食品検査の状況が周知されているとは言い難く、いまだに被災地への風評被害が問題となる場合がある。この課題ではこれまで「食品の基準値」に関する一般的認識を調査し、放射性物質の基準以前に

食品の基準値の意味が理解されていないことを明らかにしてきた。そして今回さらに放射性物質検査の内容についてもほとんど理解されていないことが明らかになった。食品の安全性確保と風評被害対策のためには広報やリスクコミュニケーションにより多くの資源を配分する必要があることを再確認した。

(5) 緊急時検査法に関する検討

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中放射性物質の規制が行われることから、食品中放射性物質の測定対象核種及び測定手法について検討した。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。令和元年度は、前年度に国際文書により抽出された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。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。事故等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。

研究分担者 山田 崇裕 近畿大学原子力研究所准教授
研究分担者 鍋師 裕美 国立医薬品食品衛生研究所食品部主任研究官
研究分担者 曾我 慶介 国立医薬品食品衛生研究所生化学部研究員
研究分担者 畝山智香子 国立医薬品食品衛生研究所安全情報部第一室長

A. 研究目的

平成23年3月の東京電力福島第一原子力発電所(1F)の事故により、食品の放射性物質による汚染が危惧されたため、食品衛生法上の暫定規制値が設定された。続いて、平成24年4月には放射性セシウムの基準値が全ての食品に設定された。食品中の放射性物質検査は、原子力災害対策本部で決定したガイドラインに従い、地方自治体において検査計画に基づくモニタリング検査を実施しており、基準値を超過した食品については回収・廃棄等の対応を行っている。当該検査ガイドラインは、平成29年度に、自治体等の要望

を受け、検査対象品目・自治体等の大幅な緩和を行ったことから、ガイドラインの改定による影響を、基準値超過率や超過品目の変動を注視するだけでなく、消費者意識等も含め総合的に評価し、安全確保体制が維持できていることの確認が必要となる。また、復興とともに変化する最新の状況を反映した社会的に合理的な検査体制を保つために、ガイドラインの改定は、今後も毎年度変更することが想定されることから、単に各年度の影響を評価するのみにとどまらず、影響評価手法の開発が必要である。

そこで、本研究では、震災に起因する

食品中の放射性物質等に関し、相互に関連する下記5課題について検討を行った。これらの研究課題を遂行することにより、検査ガイドラインの改定に伴う影響を評価することが可能となり、効果的な改定案提出に貢献し、結果として、適切な食品の流通を保証する監視体制が構築・維持され、食品の安全・安心が高まることが期待される。

(1) 食品中放射性物質の検査体制の評価手法の検討

食品中の放射性物質濃度分布の推定手法を示すことにより、効率的・効果的なモニタリング検査計画の提案が可能となることから、検査のサンプリング精度の重要因子である濃度分布の評価手法について、非破壊測定機器を用いた方法について検討した。

(2) 食品中放射性物質濃度データ解析

厚生労働省に報告される食品中の放射性セシウム検査データを年度ごとに解析し、放射性セシウム濃度の経時的変化、食品群間の放射性セシウム濃度の変動等についての情報を得た。基準値超過食品が流通していないことの確認は、検査と出荷制限の体制が適切に機能していることの根拠となる。また、今後の重大災害時における施策立案の基礎となる知見となる。

(3) 食品中放射性物質等有害物質調査
過去の放射性物質汚染データの集計及び解析を行い、新たに検討すべき核種等を探索する。平成29年度の調査により、日本は天然放射性核種であるポロニウム210の内部被ばく線量が、福島原発事故等に由来する

人工放射性核種からの影響に比して大きいことが認められたため、食品中ポロニウム210分析法の簡便化の検討を行い、食品中のポロニウム210の濃度について検討する。

(4) 消費者への食品検査及び安全性情報伝達方法に関する検討

国内流通する食品の検査結果からは基準値超過率が極めて低いことが確認されている。それにもかかわらず、依然として国内外に風評被害が存在し、消費者の食品検査についての理解と納得が得られていない。そのためこの研究課題では「震災に起因する食品中の放射性物質ならびに有害化学物質の実態に関する研究」で明らかにしてきた消費者への適切な情報提供の重要性を踏まえ、引き続き食品の安全性情報の伝え方と消費者意識調査を継続的に行い、安全から安心に繋げる方法の検討を行う。

(5) 緊急時検査法に関する検討

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。1F事故後に国内外で検討が行われていることから、それらの情報を踏まえ、測定対象核種の検討とそれらの測定法について検討する。

B. 方法

(1) 食品中放射性物質の検査体制の評価手法の検討

1) 非破壊式装置の検出効率分布の評価

非破壊式測定における試料中の放射性物質分布の影響を評価することを目的とし、市販の非破壊式装置3機種について、点状

の ^{137}Cs 密封標準線源を用いて、試料測定室内における検出効率分布について実測検証した。

2) 非破壊式測定装置と Ge 検出器を用いた測定の比較検討

試料：平成 29 年度は、非破壊式装置による測定結果が 50Bq/kg 以上のものを用いた。平成 30 年度、令和元年度は野生キノコ類を中心に試料を収集した。

非破壊式装置による測定：試料を混合、配置換えを行って 3-5 回測定した。令和元年度は同一の試料を異なる 3 機種で測定した。Ge 検出器を用いた測定：「厚生労働省、食品中の放射性物質の試験法について、食安発 0315 第 4 号 (2012)」に準拠して放射能分析を行った。

3) 試料固体中の放射性セシウム分布手法の検討

試料中の放射性セシウム不均一分布について、シイタケ試料中の分布状況をイメージングプレートにより検討した。

(2) 食品中放射性物質濃度データ解析

厚生労働省ホームページに公表された平成 29 年度から令和元年度の 3 年間までの食品中の放射性セシウムの検査データを、産地、食品分類別、栽培/飼養管理の能否別に集計し、放射性セシウムの検出率、濃度等を求めた。

集計は、公表されたデータから、まず屠畜場における牛肉の全頭検査データが主と思われる非流通品の牛肉のデータと、非流通品/牛肉を除いた食品の検査データに分けてから、それぞれについて解析した。

(3) 食品中放射性物質等有害物質調査

1) 文献調査

PubMed、Google Scholar 等の文献検索エンジンにより学術論文を探索し、UNSCEAR 等の報告書は各機関のホームページより入手した。

2) ポロニウム 210 の α 線分析

食品を 12 群に分類し、群ごとに混合・均一化した混合試料を用いた。食品試料 5~50 g をビーカーに測り取り、内部標準物質としてポロニウム 209 を添加後、硝酸と過酸化水素水によって 120°C で湿式分解し、さらに塩酸を加えて加熱濃縮し、ポロニウム塩化物フォームとした。化学分離を行う場合は、ポロニウム塩化物フォームをキレート抽出クロマトグラフィーにより分離精製した。

ステンレス板にポロニウムを電着する場合は、塩酸酸性下で 0.1A で 1~3 時間通電した。銀板を用いる場合は、ポロニウム塩化物フォームを 90°C で 2~16 時間攪拌し、ポロニウムを析出させた。ポロニウムを電着あるいは析出した測定試料をシリコン半導体検出器により 48 時間測定し、 α 線スペクトロメトリーを行った。

(4) 消費者への食品検査及び安全性情報伝達方法に関する検討

食品中放射能の検査ガイドラインの見直しに関連して、食品に設定されている各種汚染物質の「基準値」についての意識調査を行った。食品の安全に関する講義を行った際に食品中汚染物質の基準値について

アンケートを行った。対象にしたのは大学生や食品企業の社員、消費者団体関係者、生協組合員等である。講義内容は全く同じではないが、本研究での知見である、①食品への全体的不安は食品に関する専門知識があるほうが小さい、②放射線以外の食品のリスクについての情報を提供されることで放射線への不安やリスク受容の程度が変わる場合もある、ことを踏まえて、食品リスクを全体的に提示する内容である。放射線リスクや食品の放射性物質基準に特化した内容は含まれない。

(5) 緊急時検査法に関する検討

主に以下の資料を参考にした。

- ・原子力災害対策特別措置法
- ・原子力規制委員会、放射線審議会等資料
- ・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/>)
- ・ National Nuclear Data Center (<https://www.nndc.bnl.gov/>)
- ・世界保健機構 WHO／飲料水水質ガイドライン（WHO 飲料水 GL）
- ・国際原子力機関 IAEA／General Safety Guides No. GSG-2（GSG-2）

C. 結果・考察

(1) 食品中放射性物質の検査体制の評価手法の検討

1) 非破壊式装置の検出効率分布の評価

検出器が1台タイプの装置の測定室面における検出効率分布を¹³⁷Cs点線源によ

り得た。その結果、直行する水平方向（XY平面）において、すべての装置の検出効率は原点を中心としたガウス関数にほぼ近似でき、良好な対称性が確認できた。

2) 非破壊式測定装置と Ge 検出器を用いた測定の比較検討

平成 29 年度：

非破壊式装置による測定結果が 50Bq/kg を超えたキノコ類の試料において、非破壊式装置 2 機種による測定結果と Ge 検出器を用いた公定法による結果との比は、機種ごとに 0.98、0.92 と両者の結果は良く一致した。ただし、いずれの結果も外れ値を除いた結果である。ただし、非破壊測定器による 3 回測定のばらつきが、核種の壊変率（放射能）に起因する統計的ばらつきと比較して極端に大きいものや外れ値を含む大きく値がずれているものが確認された。このことは、試料の置き方により検出効率が大きく変化する、あるいは測定への影響が大きい試料中の放射能分布の偏在や不均質があること推定された。これらの試料を写真で確認したところ、共通した特徴の一つとして、試料中の個々のキノコの大きさが大きく異なることが確認できた。このことは試料の置き方により検出効率が大きく変化したり、試料中の放射能分布の偏在や不均質性の要因となったりしうることから、本結果の大きなずれやばらつきは試料の特徴に起因するものであることが示唆された。

平成 30 年度：

①山菜試料：前年度のキノコ類の結果と同様に非破壊式装置 2 機種と Ge 検出器の測定結果には良好な相関が見られた。ただし、

Ge 測定値との比が 0.7~1.3 を超えるもの及び濃度が 5000Bq/kg を超えるものは相関分析では外れ値として処理した。Ge 測定値との比が 0.7~1.3 を超えたものは、特定の種別の試料に見られた訳ではなく、原因究明及び傾向分析には試料の個別的な放射性セシウム分布の分析、さらに多くの試料の分析を要することが見込まれた。検査におけるこのような試料の取り扱い是非破壊式装置を用いた測定における共通的な課題であることが示唆された。

②キノコ試料：前年度に検討した機種とは異なる非破壊式装置 1 機種について、Ge 検出器との測定結果の比較を行ったところ、前年度と同様に良好な相関が得られた。また、100 Bq/kg 以下の試料によって食品衛生法に定められた基準値 100 Bq/kg に対するスクリーニング検査への適用性について回帰直線の予測区間による方法を用いて検討した。その結果、予測区間の上限値が 100 Bq/kg の場合の予想される試料の放射能濃度は 48 Bq/kg となり、現在の試料の前処理を想定した食品中の放射性セシウムスクリーニング法におけるスクリーニングレベル 50Bq/kg 以上の条件を下回るもののほぼ適用条件を満足する結果となった。ただし、本装置を用いた試験条件は指定の容器に充填した状態によるものであり、実運用において容器に充填しない場合には容器を用いず評価する必要があると考えられる。

令和元年度：

前年度までの試料の放射能濃度は様々で、Ge 検出器の測定によって検出限界以下のものも含まれていた。令和元年度の試料

で 10 Bq/kg を超えるものは、種別数で 39 種、総数 129 検体であった。各非破壊式装置と Ge 検出器による測定結果の比較した結果、前年度までに検討した 2 機種と別の 1 機種で今までの結果と同様に良好な相関関係を示すことが確認できた。一方で、これまでと同様に Ge 検出器による測定値との比較的大きなずれを示す測定結果も観測され、99%予測区間を超えるものも見られた。非破壊式装置における複数回測定のばらつきは放射能濃度にほぼ依存し、低濃度領域では濃度が上昇するに従いばらつきが小さくなり、そのばらつきの要因は放射性壊変の統計変動が支配的であることによることを示唆するものであった。一方で全範囲にわたってばらつきの大きい結果が散見された。このような場合にはこのばらつきは試料に起因する不確かさが支配的であることが見込まれ、観測された適合値とのずれの要因は試料の不定形性による検出効率の見積もりの誤差の他に、このような試料に起因する大きなばらつきもその要因の一つであると本結果から明らかになった。また、今回の結果では 3 機種それぞれの回帰直線の傾きは、いずれの非破壊式装置の結果も Ge 検出器の結果よりも低めの評価となる傾向が見られた。

100 Bq/kg 以下の試料のデータによって、食品衛生法に定められた基準値 100 Bq/kg に対するスクリーニング検査への適用性について回帰直線の予測区間による方法を用いた検討も進めた。評価に用いた試料種別数は 22、検体数は 53 であった。その結果、換算したスクリーニングレベル 50Bq/kg

に相当するスクリーニングレベルの 99% 予測区間の上限値は、非破壊式装置 3 機種に対して、90、98 及び 84Bq/kg といずれも 100Bq/kg を下回る結果となり、現在の試料の前処理を想定した食品中の放射性セシウムスクリーニング法におけるスクリーニングレベルの適用条件を満足する結果となった。また、試料毎の検証としてデータ数が 7 で最多であったマツタケについて解析した結果得られた 99% 予測区間上限の換算値は 89 Bq/kg で他の種別の試料を含めた結果とほぼ同じ結果が得られた。この 7 試料の検体質量は 248 g~800 g の範囲にあった。また、非破壊式測定 of 複数回測定における変動係数 (C.V.) は 0.10~0.23 であった。本結果は、このような条件が測定対象とする試料と合致するものであれば、スクリーニングレベルでの検査を、信頼性が確保された上で成立させることが出来ることが期待されることを見込まれるものであった。ただし、本研究での結果はすべて回帰関数によって非破壊装置の指示値を Ge 検出器相当値に換算したものであり、各装置の換算係数の正確性の確保については、今後のより詳細な検討が望まれた。

3) 試料固体中の放射性セシウム分布手法の検討

乾燥シイタケ内の放射能の分布は均一ではなく、シイタケの笠部の端により高く局在することが分かった。また、放射性セシウムの内部分布パターンが試料ごとに異なる可能性が示唆された。

(2) 食品中放射性物質濃度データ解析

1) 非流通品/牛肉以外のデータ 試料数、検出率、基準値超過率

総検査数は平成 29 年度 51,615/平成 30 年度 43,678/令和元年度 43,678 (以下、3 年間の数値を/で区切って表示する)であり、そのうち流通前の段階で収集された食品 (非流通品) が 35,488/30,987/26,188、流通段階で採取された食品 (流通品) が 16,127/12,691/10,870 であった。この 3 年間で検査数は減少しており、その減少率は前年度の約 85% であった。試料全体に対する流通品の割合はどの年度もおおよそ 30% でほぼ一定であった。

放射性セシウム濃度が 25 Bq/kg を超えた試料数を検出試料数、全体に対する検出試料数の割合を検出率とした。ただし、牛乳・乳児用食品は基準値の 1/5 である 10 Bq/kg、同様に飲料水も 2 Bq/kg を超えた場合を検出とした。

このように計算したときの全体の検出率は 2.7/4.0/3.0%、非流通品の検出率は 3.8/5.4/4.1%、流通品の検出率は 0.40/0.49/0.42% であった。

全体の基準値超過率は 0.39/0.72/0.45% となった。非流通品における基準値超過率は 0.54/0.97/0.61%、流通品では 0.056/0.095/0.046% であった。

食品分類別試料数、検出率、基準値超過率

食品を、農産物 (きのこ、山菜を除く。以下同じ。)、きのこ、山菜、畜産物、野生鳥獣肉、魚介類、くじら、海藻、加工食品、食事試料、ハチミツ、牛乳、乳児用食品、飲料水に分類した。全体での検査割合が高かった食品分類は、魚介類、農産物、きの

こ、加工食品、山菜であった。3年間で、農産物や海藻、乳児用食品、食事試料の検査割合は低下した一方で、栽培/飼養管理が困難な品目が多く含まれるきのこ、山菜、野生鳥獣肉は、全体、非流通品、流通品ともに増加した。検出率が高い食品分類は、非流通品で野生鳥獣肉、山菜、きのこ、流通品では、山菜、きのこであった。基準値を超過した食品分類は、非流通品では農産物、きのこ、山菜、野生鳥獣肉、魚介類であり、流通品ではきのこ、山菜、加工食品（平成30年度のみ）であった。

産地

検査対象自治体となっている17都県以外では検出されていなかった。

農産物において放射性セシウムが検出された試料の産地は限られた範囲であり、平成29年度は3県、平成30年度では2県、令和元年度では1県であった。基準値超過試料はすべての年度で福島県産のみであった。

きのこは、農産物より広域の14-15県で検出が認められた。基準値を超過した試料は平成29年度は11県、平成30年度および令和元年度は6県であった。

山菜、野生鳥獣肉では、きのこと同様に農産物より広範囲で検出が認められ、ともに9~11県で検出された。魚介類で検出された試料の産地は、6-7県であり、ほぼ福島近接県であった。

非流通品/牛肉を除外した試料において、検出率、基準値超過率共に、流通品が非流通品を大きく下回っていた。また、非流通品には高濃度の試料が見られたが、流通品

においては高濃度試料は少ないことから、緊急時モニタリングをはじめとする非流通品の検査により、高濃度の放射性セシウムを含む食品が、効果的に流通から排除されていると考えられた。

検出率には食品分類ごとに差が見られ、検出された食品は、きのこ、山菜、野生鳥獣が主であった。環境中の放射性セシウムの食品への影響と、基準値を超える食品の監視のためには、淡水魚、野生きのこ、山菜、野生鳥獣肉のような食品の測定を継続していくことが重要と考えられる。

平成29年度より「検査計画、出荷制限等の品目・区域の設定・解除の考え方」において、検査対象品目に「栽培/飼養管理が困難な品目群」「栽培/飼養管理が可能な品目群」の区分が示された。環境に放出された放射性物質は、新たな汚染が起こらない限り、核種ごとの物理的半減期を含めた環境的半減期によって減衰する。食品中放射性物質の検査では、これまでの測定データに基づき、品目、地域ごとにきめ細やかに濃度予測をし、そのリスクの大きさに適した規模の検査体制を整えて行くことが合理的かつ効率的に検査を進めていく上では重要と考えられる。

2) 非流通品/牛肉のデータ

非流通品の牛肉に分類されるデータは各年およそ25万件あり、流通品の牛肉として報告のあったモニタリング記載の試料を加えると、検査総数の83-87%に相当する。25 Bq/kg以上の検出は2017年度で10試料、2018年度で4試料、2019年度で19

試料あり、それらの放射性セシウム濃度は、いずれもスクリーニング検査による参考値ではあるものの、48 Bq/kg 以下であり基準値を超過した試料はなかった。食肉用の牛においては飼料管理が適切になされ、放射性セシウムの摂取が低い状態を維持し続けていることが示唆された。

(3) 食品中放射性物質等有害物質調査

1) 文献調査

人工核種：

UNSCEAR 報告書において核兵器施設及び非核兵器施設の計7件の事故について調べ、放出された放射性核種等について福島第一原子力発電所事故と比較した。

日本では平成24年4月に、半減期1年以上の8核種からの被ばくが年間1 mSv以下になるように、食品中放射性セシウム(Cs-134+Cs-137)の基準値が設定された。放射性セシウム以外の6核種はほとんど検出されないことから、食品中放射性セシウムによって原発事故により飛散した放射性物質の食品からの影響を評価することが可能と考えられる。福島原発事故以後の放射性セシウムのマーケットバスケット調査では、現行基準値の設定根拠である年間上限線量1 mSvの1%以下となっている。

天然核種：

天然放射性物質カリウム40はよる内部被ばくは、世界平均で0.17 mSv、国内の各地域で0.1~0.2 mSvと推定され、地域差はほとんど見られなかった。

同じく天然放射性物質のポロニウム210による内部被ばくは、世界平均は0.07 mSv、

日本の平均は0.053-0.81 mSvとされ、人工核種である放射性セシウム等よりも大きいと見積もられる。ポロニウム210は α 線を放出する放射性物質で、最も毒性の高い核種の1つと考えられており、経口摂取による成人の実効線量係数は0.0012 mSv/Bqとされ、放射性セシウムより約100倍高い。しかし、食品中ポロニウム210濃度は食品によって大きく異なることから、精度の良い摂取量推定のためには多数の試料による調査が必要と考えられた。

2) ポロニウム210分析法の検討

純アルファ線放出核種であるポロニウム210の実用的な食品分析法を検討した。

金属板への沈着法の検討：

ステンレス板電着法では2時間、銀板自然析出法では8時間でポロニウム回収率が約90%に達した。ステンレス板電着法は、再現性が高く、時間効率も良く、低コストの手法と考えられた。しかし、電解質を多く含む試料では、電着効率が悪く、化学分離を行う必要があることが示唆された。 α 線スペクトロメトリーによる測定では、精製度が悪い測定試料で自己吸収によりスペクトル形状が低エネルギー側へシフトする。

真度及び精度評価：

NIST 認証標準試料を用いて検証した。海洋甲殻類は直接ステンレス板電着法で、ミネラルが多く含まれると考えられる海藻は化学分離後ステンレス板電着法及び銀板自然析出法で、良好な結果が得られた。一般的な食品は、金属板にポロニウムを沈着させる際に主に直接ステンレス板電着法を

使用し、ミネラルが多く含まれる場合などには化学分離を追加する手法または銀板自然析出法を行うことが食品の分析法として実用的と考えられる。

ポロニウム210回収率は全食品カテゴリーで93~113%で、その併行精度は10%未満と良好な結果が得られた。また、 α 線スペクトルの半値幅と1/10値幅も良好な値であった。本分析法は様々な食品試料に適用可能と考えられる。

3) 流通食品中のポロニウム210濃度

流通している魚介類のポロニウム210放射能を測定したところ、分析したすべての試料で検出された。また、魚類（サンマ、マイワシ、マアジ、ニシン）の筋肉と内臓を分離し、それぞれのポロニウム210濃度を測定したところ、筋肉部位に比べて内臓部位では10倍以上の高い放射能濃度が認められ、魚介類では筋肉より内臓部位に多くのポロニウム210が蓄積されていることが示唆された。また、近年の食品に関連したポロニウム210に関する諸外国の文献を調べたところ、魚介類で同様の傾向が確認された。

(4) 消費者への食品検査及び安全性情報伝達方法に関する検討

1) 汚染物質の基準値について

全体としては現行基準または国際基準への支持が多い。回答者の属性から学生・主に食品関連業務の社会人・消費者に分けて集計すると、消費者が最も小さい数字を指向し、社会人は国際基準を支持する割合が高く、学生はその中間といった傾向が窺

える。放射性物質についてだけ特別な傾向があるというわけではなくカドミウムやヒ素でも同様である。この調査対象に含まれる消費者は消費者団体に属していたり生協の学習会に参加するような、食品安全に関心の高い人達であり、食品中汚染物質の基準は厳しい方が良いと考える傾向が一般の消費者より強いかもしれない。そういう人達と食品を供給したり食品の安全監視を業務としているような現場の人達との認識のギャップが大きいということがおそらくは最大の不幸であろう。学生の意見がニュートラルなものだとみなすと、そこから食品を提供する側になるか消費する側になるかで違う情報を受け取って意見が別れていくように見える。柔軟性の高い学生のうちに適切な教育を受けることが将来の分断を生まないために役立つ可能性がある。

2) 年次比較

3年間同じ大学の同じ専攻科の学年でアンケート調査ができたところについては経年変化があるかどうかを検討した。結果として特に一貫した傾向は認められなかった。福島第一原子力発電所事故があってから相当な時間が経過し、当時小中学生だった学生にとっては必ずしも関心が高くないことが示唆された。

若い人達については放射性物質についてだけ特別に何かを伝えるというより食品安全の全体的な理解を促すほうが良いだろうと考える。

3) 食品中放射能の検査について

食品中放射能の検査が行われていること自体は比較的良好に知られているがその具

体的中身についてはあまり知られていない。検査により安全性を確認しているということへの信頼はあるようなので、一般的な食品中汚染物質や残留農薬等の監視と同様に、より効果的で効率的な検査を実施して広報に努めることが望ましいと考えられる。

(5) 緊急時検査法に関する検討

1) 測定対象核種

我が国の原子力災害対策指針等、IAEAの全般的な安全指針 GSG-2、WHO 飲料水 GL、CODEX 一般規格に記載の核種を検討し、200 余核種を抽出した。それらの半減期、壊変形式、生成核種などの物理的特性や実効線量係数のほか、各種文書での運用上の介入レベル (Operational Intervention Level : OIL) やガイダンスレベルの比較をした。抽出した核種は、そのものが核燃料物質、あるいは核分裂で直接生成するものから、いくつかの核壊変を経て生成するものまで様々である。核種によっては、壊変系列を成し、核分裂直後よりも、経過時間に依存して増加するものもあり、その存在比は半減期のみでは予測できず生成過程も含めて考える必要がある。緊急時における汚染核種の存在比率は、汚染の原因となる事故等の状況だけでなく、気象条件等も加わって、複雑に変化するものと予想される。そのような中で、原子力規制委員会はいくつかの条件を設定して、Cs-137 100TBq 放出時の各核種放出量を試算している。これらの試算も活用し、IAEA の安全要件「原子力または放射線の緊急事態に対する準備と対応」に要求されているように、汚染核種および

その量を幅広く想定し、モニタリング手法を平常時に用意しておくことが重要と考えられる。

2) 測定法

緊急時においては、前処理が簡易で迅速に測定ができるガンマ線測定、中でもエネルギー分解能が優れ核種分析が可能なゲルマニウム半導体検出器を用いたガンマ線スペクトル測定が核種同定及び定量には有力であることから、抽出した核種について測定線種を γ 線、 β 線、 α 線の順に分類した。放出エネルギーが 100 keV 以上で、その放出率が 10% 以上のものは 108 核種であった。これらはその物理的特性から、 γ 線による測定の可能性があるものであるが、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る場合には、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。

D. 結論

(1) 食品中放射性物質の検査体制の評価手法の検討

本研究では、検査のサンプリング精度の重要因子である濃度分布の評価手法として非破壊式装置を用いた方法を中心に検討を進めた。平成 29 年度より 3 年間、福島県内の市町村測定所に設置されている非破壊式装置を用い、Ge 検出器による公定法による測定結果の比較検証を行い、両者の良好な相関を確認するとともに、前処理を行わずに測定を行う故の試料に起因するばらつきが増大と予期せぬずれが起りうることを明らかにした。これらの検討を踏まえ、

最終年度は3種の異なる機種の新破壊式放射能測定装置による測定とGe検出器を用いた公定法による比較検討を、対象試料を野生キノコ試料に限定し、試料数を増やして実施した。その結果、いずれの機種もGe検出器による測定結果と良好な相関が得られた。ただ、それぞれの回帰直線の傾きは、検討した新破壊式装置3機種とも、Ge検出器の結果よりも低めの評価となる傾向が見られた。試料の前処理を前提としたスクリーニング法においては、負のバイアスは回避する必要があり、本結果のように回帰曲線の傾きが1を下回することは許容されない。このことは放射能濃度への換算係数の適正化等の対処が必要であることを意味している。また、回帰式のy切片が負の値をとることも同様に負のバイアスを意味する。この影響は、放射能濃度が低いほど相対的に影響が大きくなることに注意しなければならない。本結果ではいずれの装置でもスクリーニング法の性能要件は満足する結果であったが、本法は適切な校正による換算係数が得られていることが前提条件となっており、今回行ったような得られた回帰直線による換算が同法で必ずしも許容されているわけではない。今後、本データなどを基に実際に各装置で評価されている換算係数が検証され適正化されることが望まれる。

従前の結果より、新破壊式の測定では、試料の不定形性、試料中の放射性セシウムの不均一分布に起因する比較的大きなずれやばらつきが観測され、本結果でも同様の傾向がみられる。検査の信頼性を確保するには、このような例について個別的な詳細

検討を行い、測定により起こりうるばらつきの範囲を評価する必要があると考えられる。そのためにより多くの試料の測定が求められる一方で、検証に適した多数の試料を取集するのは実際に容易ではない。実際の検査への適応にあたっては、対象試料の範囲を決め、実試料を実測することを基本としつつ、試料種別固有の放射性セシウム分布特性を本研究で示したイメージングプレートを用いた手法などにより把握し、大きさ、形状の違いの幅を決め、その想定する範囲が装置の検出効率に及ぼす影響を計算や放射能が既知のファントム試料によって評価するなどの手法を取り入れることで実試料測定データの不足を補い、検査で起こりうる測定のばらつき範囲を科学的に推定し、適用基準を決定することが有用と考えられた。

(2) 食品中放射性物質濃度データ解析

産地での出荷前検査が機能を果たし、流通食品での検出率は低く抑えられていると考えられるが、放射性セシウム濃度が高くなりやすい天然きのこ、山菜、野生鳥獣肉のような、いまだ検出率が高い食品、すなわち栽培/飼養管理が困難な品目に該当する食品を重点的に検査する体制を整備し、維持することが重要と考えられる。

(3) 食品中放射性物質等有害物質調査

文献調査を行ったところ、近年の食品の摂取量調査では、福島第一原発事故によって飛散した放射性核種よりも、天然放射性核種の内部被ばく寄与が一般的に大きいこ

とが報告されていた。中でもポロニウム 210 からの寄与は大きいことが推定されるが、分析に時間と費用がかかり、煩雑なため、食品分析結果が少ないのが現状であった。そこで、食品中ポロニウム分析法について、前処理を簡便化するための手法の検討を詳細に行った。その結果、化学分離を行わない直接ステンレス電着法によって、一般的な食品はポロニウムの分析が可能であることが示唆された。しかし、調味料類などミネラル分を多く含む食品では直接ステンレス電着法では分析が困難なため、Sr カラムなどの化学分離を行うか、または銀板直接自然析出法による試料調製が必要であると考えられた。

検討したポロニウム 210 分析法を用いて魚介類を測定したところ、イワシ、マアジ、アサリ、カキ、シラスでは比較的高い放射能 ($>10 \text{ Bq/kg}$) が認められた。特にイワシの内臓の分析値は極めて高く、 $1,000 \text{ Bq/kg}$ を超過した。諸外国の分析結果においても、魚介類の内臓にポロニウム 210 が蓄積していることが認められた。国内の一般的な食生活であれば、実効線量 1 mSv/年 を超過する可能性は低いが、内臓等の偏食等による内部被ばくには注意が必要である。

(4) 消費者への食品検査及び安全性情報伝達方法に関する検討

本課題ではこれまで「食品の基準値」に関する一般的認識を調査し、放射性物質の基準以前に食品の基準値の意味が理解されていないことを明らかにしてきた。そして今回さらに放射性物質検査の内容について

もほとんど知られていないことを再確認した。食品の安全性確保と風評被害対策のためには広報やリスクコミュニケーションにより多くの資源を配分する必要がある。

(5) 緊急時検査法に関する検討

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。事故等により環境汚染を引き起こす可能性のある核種は多く、国内外の文書により 200 余核種を抽出し、核種の特성에に基づきその測定法について検討した。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、ガンマ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。文書の目的や想定する状況が異なるため単純な比較はできないものの、我が国の原子力災害対策指針で具体的に取り上げられている核種数は検討した文書の中で最も少なく、緊急時における食品汚染の可能性が高いものに絞り込まれており、網羅的ではなく、より管理の実用性、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。実際に 1F 事故後に放射性セシウムを代表核種とする管理体制が敷かれたが、事故の特徴も影響し、効率的に作用していると考えられる。

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。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。事故等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。そのためには、平常時より汚染の可能性のある核種およびその量を幅広く想定し、モニタリング手法を用意しておくことが重要と考えられる。

E. 研究発表

1. 論文発表

- 1) T. Yamada, K. Soga, M. Hachinohe, A. Hachisuka: Performance evaluation of the equipment for measuring radioactivity in whole foodstuffs without destructive sample preparation developed after the Fukushima NPP accident. *Radiation Protection Dosimetry*, 184(3-4), 355-358 (2019)
- 2) 畝山智香子: 食品安全のためのリスクコミュニケーション, *食品衛生研究*, 68(1), 9-17(2018)
- 3) 畝山智香子: 安全な食品とは何か?—リスクのものさしで考える—, *調理食品と技術*, 23(4), 1-7 (2017)
- 4) 畝山智香子: 食品安全を確保するためのリスクコミュニケーション, *FFI ジャーナル*, 223(1), 36-43 (2018)
- 5) 畝山智香子: 食品安全のために全ての関係者に必要な情報を, *畜産コンサルタント*, vol 54 No647 pp34-37, 2018
- 6) 畝山智香子: 全頭検査という神話, *公研*, No.666, p14-15, 2019
- 7) 畝山智香子: 安全な食品とは何か—リスクのものさしで考える, *即席食品*, No. 355, 2019
- 8) 曾我慶介、亀井俊之、近藤一成、最上(西巻)知子、蜂須賀暁子: 食品中自由水のトリチウム汚染に対する実用的な簡便検査法の検討, *Isotope News* 751, (2017) 72-74

2. 学会発表

- 1) 山田崇裕, 蜂須賀暁子, 曾我慶介, 非破壊式食品放射能測定装置を食品中の放射性物質測定手法の評価 第 55 回アイソトープ・放射線研究発表会, (2018.7) 東京
- 2) T. Yamada, K. Soga, M. Hachinohe and A. Hachisuka: Performance evaluation of the equipment for measuring radioactivity in whole foodstuff without sample preparation techniques after the Fukushima Daiichi NPP accident. 9th International Conference on High Level Environmental Radiation Areas, (2018.9) Hirosaki, Japan
- 3) 山田崇裕, 蜂須賀暁子, 曾我慶介: 非破壊式食品放射能測定装置を用いた食品中の放射性物質測定手法の評価. 第 56 回アイソトープ・放射線研究発表会 (2019.7) 東京
- 4) T. Yamada, A. Hachisuka, K. Soga and Hachinohe: Adaptability evaluation of the food screening without destructive sample preparation to ISO 19581.

- ENVIRA 2019, (2019.9) Prague
- 5) M. Hachinohe, T. Yamada, A. Hachisuka, K. Soga, S. Horii, T. Miura: Localization of radioactivity in dried shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*). ENVIRA 2019, (2019.9) Prague
 - 6) 友岡弓乃, 山田崇裕, 山西弘城, 稲垣昌代: イメージングプレートを用いたきのこ中の放射性セシウム分布測定とその定量解析に関する検討. 日本保健物理学会第 52 回研究発表会、(2019.12) 仙台
 - 7) 曾我慶介, 松田りえ子, 鍋師裕美, 今村正隆, 堤智昭, 近藤一成, 蜂須賀暁子: 2017 年度公表の食品中放射能検査結果の解析. 第 55 回全国衛生化学技術協議会年会 (2018.11) 横浜
 - 8) 鍋師裕美, 松田りえ子, 今村正隆, 曾我慶介, 堤智昭, 穂山浩, 蜂須賀暁子: 2018 年度公表の食品中放射性物質濃度検査データの解析. 第 56 回全国衛生化学技術協議会年会 (2019.12) 広島
 - 9) Soga, K., Nishimaki-Mogami, T., Kondo, K., Hachisuka, A.: Practical improvement of tritium analysis in foods using a liquid scintillation counting after azeotropic distillation method. 2017 Health Physics Society, Radiation Safety Conference, (2017.7) Raleigh, North Carolina
 - 10) 曾我慶介, 蜂須賀暁子, 近藤一成「食品中の天然放射性核種ポロニウム分析法の簡便化に向けた検討」フォーラム 2018 衛生薬学・環境トキシコロジー (2018.9.10) 長崎
 - 11) 曾我慶介, 近藤一成, 蜂須賀暁子: 食品中の天然放射性核種ポロニウム 210 分析法の評価. フォーラム 2019 衛生薬学・環境トキシコロジー (2019.8.31) 京都
 - 12) 畝山智香子, 蜂須賀暁子, 登田美桜, 與那覇ひとみ: 福島第一原子力発電所事故後の食品中放射能についてのリスク認知は食品リスク情報の提供によって影響されるか. 日本薬学会第 140 年会、(2020.3.27) 京都
- 3. 単行本**
なし
- 4. その他**
(1) 講演
- 1) 鍋師裕美: 食品中の放射性物質の規制と現状. iTEX 講演会 (兼「レギュラトリーサイエンス講座」、「薬剤動態制御学特論」講義) (2019.12)
- G. 知的財産権の出願・登録状況**
1. 特許取得
なし.
 2. 実用新案登録
なし
 3. その他
なし

Ⅱ. 分 担 研 究 報 告

食品中の放射性物質等検査システムの評価手法の検討

山田 崇裕

平成 29-令和元年度厚生労働行政推進調査事業費補助金

(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

食品中の放射性物質等検査システムの評価手法の検討

研究代表者 蜂須賀暁子 国立医薬品食品衛生研究所代謝生化学部第一室長

研究分担者 山田崇裕 近畿大学原子力研究所准教授

研究要旨

福島第一原子力発電所事故の影響による食品中の放射性セシウム測定について、近年生産サイドによる出荷前自主検査や住民が自家消費を目的として自家栽培した作物や採取した野生の動植物の測定に試料を破壊せずそのまま測定する非破壊式放射能測定装置が開発され利用されている。このような装置による測定は、設計上想定した試料の配置や放射性物質の分布のばらつきの範囲において測定を行うことが重要となる。本研究では、検査のサンプリング精度の重要因子である濃度分布の評価手法として非破壊式装置を用いた方法を含めて検討を進めた。

平成 29 年度は、(1) 非破壊式放射能測定装置の性能試験として非破壊式放射能測定装置の測定室内における検出効率分布の評価、及び (2) 実際に放射性セシウムで汚染した食品試料を用い、福島県内の市町村測定所に設置された 3 機種 of 非破壊式放射能測定装置による測定と Ge 検出器を用いた公定法による測定結果との比較検討を行った。この測定は測定データ数を確保するため、以後 2 年間継続して実施した。平成 30 年度は、新たに福島県会津農林事務所に設置されている非破壊式装置 1 機種を追加し、(1) の検出効率分布の評価を行うとともに、(2) の比較検討を行った。また、本装置では放射能濃度 100 Bq/kg 以下の福島県内で採取された実試料を用い基準値に対するスクリーニング検査への適用性について回帰直線の予測区間による方法を用いて検討した。令和元年度は、これまで検討に用いた 4 機種 of 装置のうち 3 機種を同一の野生キノコ試料を用いて (2) の検討を行うとともに、放射能濃度 100 Bq/kg 以下の実試料を用い基準値に対するスクリーニング検査への適用性について回帰直線の予測区間による方法を用いて検討した。

本検討により各装置による測定結果と Ge 検出器を用いた公定法による測定結果は良好な相関関係を示すことが実測により明らかになり装置の検出効率の形状依存の特徴を十分に把握し、変化の影響を受けにくい状況で測定を行えば、食品の汚染状況の大まかな把握には、非破壊式装置による測定は十分有効である可能性があることが示唆された。一方、非破壊測定では真度の低下傾向が観測され、さらに有意にばらつきが大きい試料や、Ge 検出器による測定結果と大きなずれがあるものが見られた。前処理を想定した食品中の放射性セシウムスクリーニング法の、非破壊式装置による検査への適用に関する検討

では、評価を行った 3 機種についていずれも適用条件であるスクリーニングレベル下限 50 Bq/kg を満足したものの、本結果は暫定的にそれぞれ回帰直線の傾きを考慮して補正の上評価して得たものであり、このような評価手法の妥当性は、各装置の放射能濃度への換算係数の見積もり手法の信頼性検証に関する今後の更なる詳細な検討により確保されることが望まれた。スクリーニング法の準用にあたっては、検査の信頼性を確保する上で、換算係数（校正定数）にあたるこの傾きの適正評価にあたる真度に与える影響評価、試料中の放射性セシウム不均一分布が測定に及ぼす影響の評価を具体的に適用する試料種を選別し、試料の質量、ジオメトリ等の許容範囲の詳細な決定を行い、試料中の放射性セシウムの不均一度の影響に関し定量的評価を行うことで、試料種別、不均一度に応じた、より効率的なサンプリング手法を含む食品検査手法を本研究成果と今後のより詳細な検討によって科学的根拠に基づき確立することで、モニタリングの加速化につながれることが期待できることが見込まれた。

研究協力者 八戸真弓 農業・食品産業技術総合研究機構 食品研究部門食品安全研究領域
食品安全性解析ユニット長
熊田 淳 福島県林業研究所 副所長
山田寿彦 福島県林業研究所 主任研究員

A. 研究の背景と目的

食品中の放射性物質の測定は、従来 Ge 検出器を用いた γ 線スペクトロメトリーによる方法が一般に用いられている。環境中に存在する放射性核種を効率よく、そして正確に分離・定量するための方法として、環境試料等の放射能分析・測定方法の基準となる「放射能測定法シリーズ」[1]が国（文部科学省及び原子力規制庁）により制定され、公定法として我が国において広く用いられている。また、食品中の放射能試験法としては、「食品中の放射性物質の試験法について」[2]が発出され、ここには食品衛生法に基づく食品検査のための測定に関する要件が規定されている。いずれの公定法においても、従来の γ 線スペクトロメトリーによる方法においては、測定試料中の放射性物質が適切な前処理により均一化[3]されていることが、その正確性及び信頼性の確保のため

に重要となる。また、食品の測定では、可食部の放射能濃度を評価する必要がある。さらに、福島第一原子力発電所事故以降、食品検査の迅速化に対応するため、スクリーニング検査として必要とされる性能を規定した「食品中の放射性セシウムスクリーニング法の一部改正について」[4]が発出され、シンチレーション式スペクトロメータも検査に広く用いられるようになった。このスクリーニング法においても測定試料中において放射性物質が均一に分布していることが前提であり、その均一性の程度が測定に及ぼすばらつきを考慮した設計となっている。国際標準化機構が食品などに含まれる放射性物質の迅速スクリーニング法を定めた規格 ISO19581[5]も同様である。一方で、生産サイドによる自主検査においては、スクリーニングを目的に玄米のように比較的均質化を図りやすい特定の試料を対象とし

て、試料を破壊せずそのまま測定するための装置を用いた出荷前検査が行われるようになった。また、このような非破壊式放射能測定装置(以下、非破壊式装置という。)は、様々な試料の特性に応じた測定器が開発され利用されている。さらに、住民が自家消費を目的として自家栽培した作物や採取した野生の動植物の測定に対応した測定器も開発され、試料を破碎せずそのまま測定できることから広く利用されている。このような試料を破碎して均質化せずそのまま測定する場合には、検出器の複数化、大型化などにより試料の不均質性の影響の低減化が図られているものの、設計上想定した試料の配置や放射性物質の分布のばらつきの範囲において測定を行うことが重要となる。そこで本研究では、検査のサンプリング精度の重要因子である濃度分布の評価手法として非破壊式装置を用いた手法について、その測定の正確性の実態を実試料の実測により明らかにし、検査への適用に対する課題とその科学的な解決方法を明らかにすることでモニタリングの加速化に資することを目的に研究を進めた。

B. 非破壊式放射能測定装置の概要

本研究に用いた非破壊式装置は、自家消費の自家栽培作物や採取した野生の動植物の測定などに用いられている。この装置は、住民から持ち込まれるあらゆる種類の食品の種類、形状、量などを想定した設計であることが特徴である[6][7][8]。本装置では試料の前処理を行わず、比較的大量の試料を一度に測定できる、試料を出荷形態のまま測定できる、といった利点から、検査の効率化・合理化、出荷前の全数検査を目的と

した装置の利用も試みられている。

γ 線スペクトロメトリーにより食品中の放射能の測定を行うには測定対象となる核種の γ 線のエネルギーに対する検出効率を標準線源によって予め得る必要がある。検出効率は γ 線のエネルギーに依存する他、試料と検出器の幾何学的条件によっても変化する。即ち、検出効率は試料の形状や測定位置に依存するため、標準線源と同じ形状の容器に、標準線源と同じ容量の試料を充填し、標準線源で校正した位置と同じ位置で測定する必要がある。また、体積状の試料は、体積中の線源位置によって検出効率が異なり、体積状の標準線源によって得られる見かけの検出効率はいわば各点の検出効率の平均値であることから、体積中の放射能の分布は均一であることが前提となる。非破壊式装置であっても測定の基本原理に変わりはないが、一般に非破壊式装置では複数の検出器配置、大型化や複数検出器の利用による高効率化が図られている。このことは非破壊式装置による測定の信頼性を確保する上で極めて重要となる。つまり、測定試料に対して、検出器が十分に大きい場合、線源と検出器との立体角はほぼ 2π となり、線源の位置による検出効率の変化が少なくなる。先にも述べたように γ 線スペクトロメトリーによる放射能測定の場合は、標準線源と同じ形状の容器に同じ容量の試料を詰めて測定することで、標準線源により得た検出効率が適用でき、標準線源一検出器間の幾何学的条件と異なる測定条件になることが誤差となる。しかしながら、大型検出器を用いることで幾何学的効率を高め、線源位置による検出効率の変化を少なくすることが出来れば、試料の形状の違いや試

料中の放射性物質の不均質性による検出効率の変化は小さく出来、ある程度のばらつきの幅の範囲内での測定が可能になると考えられる。測定対象とする試料の種類は様々であり、たとえ試料の形状の違いや試料中の放射性物質の不均質性による検出効率の変化を小さく出来たととしても、測定試料の検出効率を如何に正確に決定できるかが測定の信頼性の上で重要となる。これを達成するために、様々な形状の標準試料によって検出効率を求める、試料の種類によって、試料質量から試料の嵩を推定し、試料の種別に決められた検出効率－試料嵩（質量）関数から近似的に検出効率を求める方法などがとられている。ただ、依然として試料中の放射性物質の不均質分布に対しては、その程度に幅はあるにせよ誤差を生む要因となる。例えば大きな誤差要因となりうる極端な放射性セシウムの偏在に対して、多数の検出器を組み合わせた装置により、そのうちの一つの検出器での計数率が他の検出器の倍以上計数があった場合に異常判定を出すように措置される装置もある[6]。

以上のように、非破壊式装置では、装置のハード面においては、検出器の大型化、複数検出器の使用による試料－検出器間の大立体角化によって幾何学的効率を高めることが装置の想定する試料形態及び形状と実際の試料形態及び形状の差に起因する測定誤差の軽減につながる。ソフト面では、解析手法は装置によって様々であるが、いずれの手法もいわば近似的に試料の検出効率を求めることとなり、如何に設計上想定する範囲内で実際の測定が行われるようにするか、ユーザインターフェースの設計も含めて重要となる。

なお、各装置に備わったこのような放射能測定のアлゴリズムはそれぞれ異なり、原則その詳細は公開されていないことから、本研究では各装置の取扱説明書に従った操作と得られる出力値による評価を行った。

C. 実験方法

以下の方法で実験を行った。

(1) 非破壊式装置の測定室内における検出効率分布の評価

非破壊式測定における試料中の放射性物質分布の影響を評価することを目的とし、平成 29 年度及び 30 年度に表 1 に示す装置のうち、市販の非破壊式装置「そのままはかる NDA」(形式：AFT-NDA2)、「レギュームライト」(形式：FD-08Cs1000-1) 及び「簡易検査装置」(形式：Hitz) を用いて、試料測定室内における検出器に対して水平方向(XY 平面)及び検出器に対して鉛直方向(Z 方向)における ^{137}Cs 検出効率分布について測定により検証した。Z 方向については、測定室底面及び鉛直方向に底面からの高さ 0, 30, 60, 90, 150mm における分布を取得した。Z 方向の線源位置決定及び線源配置には、測定室底面の大きさに一致した厚さ 30mm のスポンジ板(密度：約 0.02gcm^{-3}) を重ねて用いた。線源は点状の ^{137}Cs 密封標準線源(日本アイソトープ協会製 放射能ガンマ標準線源 線源コード：CS407, 10mm ϕ \times 6mm) を用いた。

(2) 非破壊式放射能測定装置による測定と Ge 検出器を用いた公定法による比較検討

平成 29 年度より継続して福島県内において自家消費野菜等の放射能検査を行っている市町村測定所に住民から持ち込まれた試料のうち、非破壊式装置による測定結果

が 50Bq/kg 以上であり、かつ持ち込んだ住民から本研究のための試料提供に同意が得られたものを用いた。本研究では、非破壊式装置は市町村測定所に配備されている表 1 の装置のうち Hitz を除く装置を用いた。測定は 3 回、その都度試料を混合、配置換えを行って実施した。配置等の影響について検討するため、測定の都度、試料の配置の様子を写真に記録した。非破壊式装置による測定を行った試料は、福島県内の専門分析機関に設置された校正済み Ge 検出器を用いて、文献[2]に準拠して放射能分析を行った。本研究においては、食品中の放射能測定のための試料前処理は、文献[3]に準じて実施した。

平成 30 年度は福島県会津農林事務所に設置された表 1 の Hitz 装置を用いた同様の比較検討も行った。試料は、測定ニーズの高い福島県内で採取された野生キノコ類 33 検体を検討対象とした。さらに本検討では濃度 100 Bq/kg 以下の試料測定データにより、基準値 100 Bq/kg に対するスクリーニング検査への適用性について回帰直線の予測区間による方法を用いて検討し、予測区間の上限値が 100 Bq/kg の場合の予想される試料の放射能濃度の評価を試みた。

令和元年度は、表 1 の装置のうち FD-08Cs1000-1 を除く 3 機種を林業研究所の一室に設置し、実際に検査の対象候補である野生キノコ類を中心に試料収集を進め、想定する実際の検査と同じ条件での測定の比較検証を行った。また、これまでは機器毎に評価に用いる試料が異なっていたが、比較性を考慮して、令和元年度は同一の試料を異なる 3 機種で測定を行った。測定に用いた検体数は FF1、AFT-NDA2 及び Hitz

それぞれについて 171、155 及び 162 であった。測定は各 5 回、その都度試料を混合、配置換えを行って実施した。ただし、この作業は通常の測定作業で起こりうる範囲で林業研究所の測定員が実施した。試料はその全体形状を把握するため写真に記録した。平成 30 年度は装置の測定室内に配置した様子を上面から撮影したが、この場合、検出器と水平な面における試料の広がりや高さの把握は困難であったため、今回は卓上で試料上面及び側面から撮影した。非破壊式装置による測定を行った試料は、福島県農業総合センターに依頼し、校正済みの Ge 検出器を用いて、文献[2]に準拠して放射能分析を行った。本研究においては、食品中の放射能測定のための試料前処理は、文献[3]に準じて実施した。さらに 100 Bq/kg に対するスクリーニング検査への適用性について回帰直線の予測区間による方法を用いて検討し、予測区間の上限値が 100 Bq/kg の場合の予想される試料の放射能濃度を 3 機種について評価した。

(3) 試料固体中の放射性セシウム分布の把のためのイメージングプレート (IP) を用いた手法の検討

平成 31 年度及び令和元年度に非破壊式装置を用いた測定に影響を及ぼすと考えられる試料中の放射性セシウム不均一分布について、試料固体中の分布状況を把握するためのイメージングプレート (IP) を用いた手法について検討した。本検討では福島県内で採取されたシイタケ 7 個を用いた。本研究では試料を乾燥させ個々の試料を、シイタケの笠表面から垂直に約 5~7.5 mm

の厚さにスライスし、試料を IP 上に配置し露光させ、読み取り装置で放射線画像を取得、画像解析ソフトにより放射性セシウム分布の定量化を試みた。

D. 実験結果及び考察

(1) 非破壊式装置の測定室内における検出効率分布の評価

非破壊式装置では、検出器の直上に測定試料を配置するための測定室が設けられている。AFT-NDA2、FD-08Cs1000-1 及び Hitz によって得られた検出器直上の測定室面における検出効率分布を ^{137}Cs 点線源により得た。その結果、直行する X 軸において、すべての装置の検出効率は原点を中心としたガウス関数にほぼ近似でき、良好な対称性が確認できた。3 機種の特徴を比較すると、検出器の種類及びサイズがほぼ同じ FD-08Cs1000-1 と Hitz 装置の特性は一致し、これら 2 機種よりも検出器サイズの大きい AFT-NDA2 は、検出器中心からの距離が大きくなるに従って検出効率が低下する傾向がより他の 2 機種と比較し緩和される上、より高い検出効率が得られることが明らかになった。また X 軸方向 r 、Y 軸方向 0 、高さ h における検出効率 $\eta(r, 0, h)$ については、X 軸上での原点からの正方向への変化が、高さ h が高くなるに従い、各 h における原点における効率に対して変化が緩やかになることが確認できた。FD-08Cs1000-1 及び Hitz のデータを AFT-NDA2 のデータと比較すると、FD-08Cs1000-1 及び Hitz の検出効率の X 方向への変化率はより大きい。このことは検出器サイズの違いによるものと考えられ、同一の試料を両者で測定した場合に、検出器

サイズが試料のサイズに対して小さいほど形状変化や放射性セシウムの不均一分布の影響を受けやすいことを裏付ける結果となった。

(2) 非破壊式装置による測定と Ge 検出器を用いた公定法による比較検討

平成 29 年度の検討において実験に用いた試料は、非破壊式装置による各測定所においてスクリーニングレベルの 50Bq/kg を超えたものを対象とし、用いた試料の延べ数は 91 試料となった。対象とした試料の種類内訳ではキノコ類がその約 65% を占めた。これは、本調査を 9 月～2 月にかけて実施したこと、キノコ類が比較的放射性セシウム濃度が高いと知られていることが要因と考えられた。比較検証の結果、非破壊式装置による測定結果と Ge 検出器を用いた公定法による結果との比は、キノコ類について FD-08Cs1000-1 で 0.98、AFT-NDA2 では 0.92 で両者の結果は良く一致した。ただし、いずれの結果も FD-08Cs1000-1 について 1 点、AFT-NDA2 について 3 点を外れ値として除いた結果である。FF1 については測定データが極めて少なく評価出来なかった。FD-08Cs1000-1 及び AFT-NDA2 の 2 種類の装置では良い相関が得られたが、詳細にデータを見ると、非破壊測定器による 3 回測定のばらつきが、核種の壊変率(放射能)に起因する統計的ばらつきと比較して極端に大きいものや外れ値を含む大きく値がずれているものが確認された。このことは、試料の置き方により検出効率が大きく変化する、あるいは測定への影響が大きい試料中の放射能分布の偏在や不均質があること推定された。これらの試料を写真で確認した

ところ、共通した特徴の一つとして、試料中の個々のキノコの大きさが大きく異なることが確認できた。このことは試料の置き方により検出効率が大きく変化したり、試料中の放射能分布の偏在や不均質性の要因となったりしうることから、本結果の大きなずれやばらつきは試料の特徴に起因するものであることが示唆された。

平成 30 年度は①山菜試料と②キノコ試料について以下のとおり検討した。

①山菜試料

本検討では FD-08Cs1000-1 及び AFT-NDA2 のそれぞれに 12 試料及び 13 試料を用いた。FF1 について得られたデータは 3 試料に留まった。平成 29 年度のキノコ類の結果と同様に FD-08Cs1000-1 及び AFT-NDA2 と Ge 検出器との両者の測定結果は良好な相関が得られ、それぞれの回帰直線 ($y=a+bx$) は、FD-08Cs1000-1 ($a=40.2 \pm 87.8, b=1.15 \pm 0.06$)、AFT-NDA2 ($a=-15.7 \pm 37.7, b=0.97 \pm 0.05$) であった。ただし、Ge 測定値との比が 0.7~1.3 を超えるもの及び濃度が 5000Bq/kg を超えるものは相関分析では外れ値として処理した。このような Ge 検出器の測定結果との大きな乖離は平成 29 年度のキノコ類の測定においても観測された。Ge 測定値との比が 0.7~1.3 を超えたものは、FD-08Cs1000-1 及び AFT-NDA2 のそれぞれで、6 試料及び 5 試料に及んだ。これらは特定の種別の試料に見られた訳ではなく、原因究明及び傾向分析には試料の個別的な放射性セシウム分布の分析、さらに多くの試料の分析を要することが見込まれた。検査におけるこのような試料の取り扱い是非破壊式装置を用いた測定における共通的な課題であることが示唆さ

れた。

②キノコ試料

平成 29 年度に FD-08Cs1000-1 及び AFT-NDA2 の測定に用いたキノコ類試料は、FD-08Cs1000-1 及び AFT-NDA2 それぞれに対して 9 件及び 17 件であった。平成 30 年度は新たに Hitz 装置についてキノコ試料 33 検体を用いて Ge 検出器との測定結果の比較を行った。Hitz 装置でも他の 2 機種と同様に良好な相関が得られ、回帰直線 ($y=a+bx$) は、($a=33.5 \pm 11.4, b=0.94 \pm 0.03$) であった。また、本検討に用いた試料の約半数の 16 検体の 100 Bq/kg 以下の試料によって食品衛生法に定められた基準値 100 Bq/kg に対するスクリーニング検査への適用性について回帰直線の予測区間による方法を用いて検討した。その結果、予測区間の上限値が 100 Bq/kg の場合の予想される試料の放射能濃度は 48 Bq/kg となり、現在の試料の前処理を想定した食品中の放射性セシウムスクリーニング法におけるスクリーニングレベル 50Bq/kg 以上の条件を下回るもののほぼ適用条件を満足する結果となった。ただし、本装置を用いた試験条件は指定の容器に充填した状態によるものであり、実運用において容器に充填しない場合には容器を用いず評価する必要があると考えられる。

令和元年度の検討に用いた試料の種類と検体数を前項で示したが、各試料の放射能濃度分布は様々でこれらの中には実際に Ge 検出器の測定によって検出限界以下となったものも含まれていた。また、検出されても非破壊式装置の検出限界を下回るものも見られた。今回用いた検体のうち、10 Bq/kg を超える試料の種別数は 39 種、総数

129 検体であった。各非破壊式装置と Ge 検出器による測定結果の比較した結果、AFT-NDA2 及び Hitz 装置については、平成 30 年度までに得られた結果と同様に Ge 検出器と非破壊式との結果は高い精度 ($R^2=97\sim 98\%$) で回帰直線が得られた。FF1 は昨年度までも検証対象の装置としていたが、検証のための十分な試料数が得られていなかった。今回の検証によって FF1 についても他の 2 機種と同様に良好な相関関係を示すことが確認できた。一方で、これまでと同様に Ge 検出器による測定値との比較的大きなずれを示す測定結果も観測され、99% 予測区間を超えるものも見られた。また、全体として濃度が 3000Bq/kg を超える比較的高い領域で相対的なずれのばらつきの程度が大きい傾向が見られた。これは試料全体中の各個体の濃度さがより大きいことが 1 つの要因と考えられる。しかしながら、本検討では個々の試料内の放射性セシウム分布は調査していないため、実際のずれの定量的な検証は困難である。非破壊式装置における複数回測定のはらつきは放射能濃度にほぼ依存し、低濃度領域では濃度が上昇するに従いはらつきが小さくなり、そのばらつきの要因は放射性壊変の統計変動が支配的であることによることを示唆するものであった。一方で全範囲にわたってばらつきの大きい結果が散見された。このような場合にはこのばらつきは試料に起因する不確かさが支配的であることが見込まれ、観測された適合値とのずれの要因は試料の不定形性による検出効率の見積もりの誤差の他に、このような試料に起因する大きなばらつきもその要因の一つであると本結果から明らかになった。また、今回の結果では 3 機

種それぞれの回帰直線の傾きは、FF1、AFT-NDA2 及び Hitz それぞれに対して、0.78、0.68 及び 0.76 といずれの非破壊式装置の結果も Ge 検出器の結果よりも低めの評価となる傾向が見られた。特に AFT-NDA2 は平成 30 年度までの測定で得られた結果 (傾き 0.92 [9]) と大きく異なる結果となった。それぞれの装置では、換算係数は試料の種別や形状の選択及びその質量から見積もられることとなる。従って、個々の測定データで検査者により選択された換算係数に関連するパラメータが適切、かつ各装置のパラメータ設定が適正であれば、本結果の傾きは試料の種別には依存せず一定となることが見込まれる。このような評価傾向の原因解明については、実際に各測定器で見積もられた換算係数及びその評価方法などのより詳細な情報が必要であると考えられる。

令和元年度は 100 Bq/kg 以下の試料のデータによって、食品衛生法に定められた基準値 100 Bq/kg に対するスクリーニング検査への適用性について回帰直線の予測区間による方法を用いた検討も進めた。評価に用いた試料種別数は 22、検体数は 53 であった。その結果、換算したスクリーニングレベル 50Bq/kg に相当するスクリーニングレベルの 99% 予測区間の上限値は、FF1、AFT-NDA2 及び Hitz に対して、90、98 及び 84Bq/kg といずれも 100Bq/kg を下回る結果となり、現在の試料の前処理を想定した食品中の放射性セシウムスクリーニング法におけるスクリーニングレベルの適用条件を満足する結果となった。また、試料毎の検証としてデータ数が 7 で最多であったマツタケについて解析した結果得られた 99% 予測区間上限の換算値は 89 Bq/kg で他の種

別の試料を含めた結果とほぼ同じ結果が得られた。この 7 試料の検体質量は 248 g～800 g の範囲にあった。また、非破壊式測定 of 複数回測定における変動係数 (C.V.) は 0.10～0.23 であった。本結果は、このような条件が測定対象とする試料と合致するものであれば、スクリーニングレベルでの検査を、信頼性が確保された上で成立させることが出来ることが期待されることが見込まれるものであった。

なお、本結果では、いずれの装置においても 100 Bq/kg 超の検体についてスクリーニングレベル以下となるケースは確認出来なかった。このような検証は今回の測定により得た条件での偽陰性の発生が十分に抑制されていることを示す重要なデータとなり、評価の手法として有効であると考えられる。ただし、本研究での結果はすべて回帰関数によって非破壊装置の指示値を Ge 検出器相当値に換算したものであり、各装置の換算係数の正確性の確保については、今後のより詳細な検討が望まれた。

(3) 試料固体中の放射性セシウム分布の把握のためのイメージングプレート (IP) を用いた手法の検討

本検討で得られた IP 画像より 7 つのサンプルすべてで、乾燥シイタケ内の放射能の分布は均一ではなかった。本結果ではシイタケの笠部の端により高く局在することが分かった。画像解析ソフト (ImageQuant TL、GE ヘルスケア) を用いて、放射能が多く局在している端と中央部の強度を分析した結果、個々の椎茸の端部と中央部の放射能差は約 2.8～27 倍の差が見られた。また、試料 1 (DM1) と 5 (DM5) の試料内全体の分布状況の解析結果は乾燥したシイタケ

のそれぞれの放射性セシウムの内部分布パターンが異なる可能性があること示唆するものであった。

E. 結論

本研究では、検査のサンプリング精度の重要因子である濃度分布の評価手法として非破壊式装置を用いた方法を中心に検討を進めた。平成 29 年度より 3 年間、福島県内の市町村測定所に設置されている非破壊式装置を用い、Ge 検出器による公定法による測定結果の比較検証を行い、両者の良好な相関を確認するとともに、前処理を行わずに測定を行う故の試料に起因するばらつきが増大と予期せぬずれが起こりうることを明らかにした。これらの検討を踏まえ、最終年度は 3 種の異なる機種 of 非破壊式放射能測定装置による測定と Ge 検出器を用いた公定法による比較検討を、対象試料を野生キノコ試料に限定し、試料数を増やして実施した。その結果、いずれの機種も Ge 検出器による測定結果と良好な相関が得られた。ただ、それぞれの回帰直線の傾きは、FF1、AFT-NDA2 及び Hitz それぞれに対して、いずれも非破壊式装置の結果が、Ge 検出器の結果よりも低めの評価となる傾向が見られた。試料の前処理を前提としたスクリーニング法においては、負のバイアスは回避する必要がある。従って本結果のように回帰曲線の傾きが 1 を下回ることは許容されない。このことは放射能濃度への換算係数の適正化等の対処が必要であることを意味している。また、回帰式の y 切片が負の値をとることも同様に負のバイアスを意味する。この影響は、放射能濃度が低いほど相対的に影響が大きくなることに注意しなければ

ばならない。本結果ではいずれの装置でもスクリーニング法の性能要件は満足する結果であったが、本法は適切な校正による換算係数が得られていることが前提条件となっており、今回行ったような得られた回帰直線による換算が同法で必ずしも許容されているわけではない。今後、本データなどを基に実際に各装置で評価されている換算係数が検証され適正化されることが望まれる。

従前の結果より、非破壊式の測定では、試料の不定形性、試料中の放射性セシウムの不均一分布に起因する比較的大きなずれやばらつきが観測され、本結果でも同様の傾向がみられる。検査の信頼性を確保するには、このような例について個別的な詳細検討を行い、測定により起こりうるばらつきの範囲を評価する必要があると考えられる。そのためにより多くの試料の測定が求められる一方で、種別毎に多数の試料を取集するのは実際に容易ではない。また、高い優先度で検査対象の候補とされることが想定される試料は、そもそも試料の放射能濃度が低い(検出限界以下を含む)ものが多い実態もあることがわかり、このことは十分な数の実測データ収集を阻害する要因となりうる。従って、実際の検査への適応にあたっては、対象試料の範囲を決め、実試料を実測することを基本としつつ、試料種別固有の放射性セシウム分布特性を本研究で示したイメージングプレートを用いた手法などにより把握し、大きさ、形状の違いの幅を決め、その想定する範囲が装置の検出効率に及ぼす影響を計算や放射能が既知のファントム試料によって評価するなどの手法を取り入れることで実試料測定データの不足を補い、検査で起こりうる測定のばらつき範囲を科

学的に推定し、適用基準を決定することが有用と考えられた。

謝辞

本研究に際しては福島県消費生活課、同林業振興課及び福島県農業総合センターのご理解と多大なるご協力いただきました。一般社団法人福島県環境測定・放射能計測協会菊池美保子氏、朝倉由美子氏には福島県市町村測定所をはじめとする県内の調整・相談対応及び協会員の機器メーカーとの調整に多大なる労を取っていただきました。市町村測定所、林業研究所及び環境分析研究所の測定員の皆様には実作業において多大なるご協力を頂きました。また、多数の市町村住民の皆様から本研究の趣旨をご理解いただき、ご厚意で試料をご提供いただきました。本研究にご協力いただきました皆様にここに心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 文部科学省・原子力規制庁 放射能測定法シリーズ
<https://www.jcac.or.jp/site/library/series.html> (2020/3/31 現在)
- [2] 厚生労働省, 食品中の放射性物質の試験法について, 食安発 0315 第 4 号 (2012)
- [3] 文科省編放射能測定法シリーズ 24 緊急時におけるガンマ線スペクトロメトリのための試料前処理法
- [4] 厚生労働省, 「食品中の放射性セシウムスクリーニング法の一部改正について」 (2012)
- [5] International Organization for Standardization, ISO19581 : 2017, Measurement of radioactivity -- Gamma

emitting radionuclides -- Rapid screening method using scintillation detector gamma-ray spectrometry (2017)

[6] 石井慶造, 食品中の汚染検査のための放射能非破壊検査装置, *Isotope News* No.729, 21-27 (2015)

[7] アドフューテック株式会社, 「そのままはかるNDA」の特徴・性能について, http://www.adfutek.com/image/pdf/Catalog_160108-2_AFTNDA2.pdf

[8] 科学技術振興機構, 先端計測分析技術・機器開発プログラム 放射線計測領域成果集 2015, 複雑形状食品の放射能検査装置の開発, 4-5 (2015)

https://www.jst.go.jp/sentan/result/pdf/Contributing_through_Innovation_2015.pdf

[9] T. Yamada, Keisuke Soga, Mayumi Hachinohe and Akiko Hachisuka, PERFORMANCE EVALUATION OF THE EQUIPMENT FOR MEASURING RADIOACTIVITY IN WHOLE FOODSTUFFS WITHOUT DESTRUCTIVE SAMPLE PREPARATION DEVELOPED AFTER THE FUKUSHIMA NPP ACCIDENT. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 184, Issue 3-4, October 2019, Pages 355–358

F. 研究発表

1. 論文発表

[1] T. Yamada, Keisuke Soga, Mayumi Hachinohe and Akiko Hachisuka, PERFORMANCE EVALUATION OF THE EQUIPMENT FOR MEASURING RADIOACTIVITY IN WHOLE

FOODSTUFFS WITHOUT DESTRUCTIVE SAMPLE PREPARATION DEVELOPED AFTER THE FUKUSHIMA NPP ACCIDENT. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 184, Issue 3-4, October 2019, Pages 355–358

2. 学会発表

[1] 山田崇裕, 蜂須賀暁子, 曾我慶介, 非破壊式食品放射能測定装置を食品中の放射性物質測定手法の評価 第55回アイソトープ・放射線研究発表会, (2018.7) 東京

[2] T. Yamada, K. Soga, M. Hachinohe and A. Hachisuka: Performance evaluation of the equipment for measuring radioactivity in whole foodstuff without sample preparation techniques after the Fukushima Daiichi NPP accident. 9th International Conference on High Level Environmental Radiation Areas, (2018.9) Hirosaki, Japan

[3] 山田 崇裕, 蜂須賀 暁子, 曾我 慶介, 非破壊式食品放射能測定装置を食品中の放射性物質測定手法の評価 第56回アイソトープ・放射線研究発表会, 2019/7 東京

[4] T. Yamada, A. Hachisuka, K. Soga and Hachinohe, Adaptability evaluation of the food screening without destructive sample preparation to ISO 19581. 5th International Conference on Environmental Radioactivity, 2019/9

[5] M. Hachinohe, T. Yamada, A. Hachisuka, K. Soga, S. Horii, T. Miura Localization of radioactivity in dried shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*). 5th International Conference on

Environmental Radioactivity, 2019/9

[6] 友岡 弓乃, 山田 崇裕, 山西 弘
城, 稲垣 昌代, イメージングプレートを用いたきのこ中の放射性セシウム分布測定
とその定量解析に関する検討, 日本保健物理学会第 52 回研究発表会, 2019/12 仙台

G. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

表 1 本研究に用いた市販の非破壊式放射能測定装置

装置名	形式	検出器の種類 及びサイズ	しゃへ い体	製造元
非破壊式放射能 測定装置	FF1	NaI(Tl) ϕ 5.08x5.08cm 7 本	鉛 50mm	日栄工業(株)
レギューム ライト	FD-08 Cs1000-1	CsI(Tl) ϕ 11.0 x 2.5cm	鉛 50mm	(株)テクノエックス
そのままはかる NDA2	AFT- NDA2	NaI(Tl) ϕ 12.7x12.7cm	鉛 35~ 50mm	(株)アドフューテック
簡易検査装置	Hitz	CsI(Tl) ϕ 11.0 x 2.5cm	鉛 50mm	日立造船(株)

Ⅱ. 分 担 研 究 報 告

食品中放射性物質濃度データ解析

蜂須賀 暁子

鍋師 裕美

平成29-令和元年度厚生労働行政推進調査事業費補助金

(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

食品中放射性物質濃度データ解析

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室長
鍋師裕美 国立医薬品食品衛生研究所食品部主任研究官

研究要旨

2017年度から2019年度の3年間に厚生労働省ホームページに公表された食品中の放射性セシウム検査データを、年度ごとに非流通品の牛肉とそれ以外の食品を別々に集計・解析した。非流通品の牛肉以外の食品では放射性セシウム検出率、基準値超過率、濃度の統計量を求め、食品分類、産地別の集計を行った。検査総数は年々減少しているものの、栽培/飼養管理が困難な品目が主体であるきのこ・山菜・野生鳥獣肉の合計検査数が全体に占める割合は年々増加する傾向にあった。各年度の非流通品における基準値超過率は2017年度で0.53%、2018年度で0.97%、2019年度で0.61%、流通品では2017年度で0.080%、2018年度で0.095%、2019年度で0.046%であった。2018年度における基準値超過率の上昇は、放射性セシウムが検出されやすい食品分類の検査割合が顕著に増加したことに関連していると考えられた。また基準値超過率および放射性セシウムの検出濃度はすべての年度で非流通品と比較して流通品で低い傾向が認められ、流通前の検査により高濃度に放射性セシウムを含む食品が効果的に流通から排除されていることが示唆された。基準値を超過した品目は、山菜、きのこ、淡水魚、野生鳥獣肉など山林に起源をもつ天然品が主体であり、これらの食品が生育する山林では、事故により広がった放射性セシウムがそのまま存在する状態が継続していると考えられる。また、これらの食品分類には栽培/飼養管理が困難な品目に該当する食品が多く含まれており、そのような品目の検査の重要性が改めて示唆された。現在有効に機能している、基準値を超える食品を流通させないための監視において、山菜、きのこ、淡水魚、野生鳥獣肉のような栽培/飼養管理が困難な品目に該当する食品中の放射性セシウムの検査を維持していくことが重要と考えられる。非流通品の牛肉については各年度において24万件以上の検査が実施されているものの放射性セシウム検出率は最大でも0.008%以下と極めて低く、検出濃度も基準値の1/2以下であることから、現状の検査体制を見直し、リスクの大きさに適した規模の検査体制を整えていくことが重要であると考えられる。

研究協力者 松田りえ子 国立医薬品食品衛生研究所安全情報部客員研究員
研究協力者 曾我慶介 国立医薬品食品衛生研究所生化学部研究員

A. 研究目的

平成 23 年 3 月の東京電力福島第一原子力発電所の事故により、食品の放射性物質による汚染が危惧されたため、食品衛生法上の暫定規制値が設定された。続いて、平成 24 年 4 月には放射性セシウムの基準値が全ての食品に設定された。地方自治体は、原子力災害対策本部が定めたガイドラインに基づき、食品中放射性セシウムの検査計画を策定して検査を実施し、またガイドラインによらない自主的な検査も広く実施された。これらの検査結果は、厚生労働省に報告され、ホームページ上に公表されている。

平成 28 年度までの厚労科学研究「震災に起因する食品中の放射性物質ならびに有害化学物質の実態に関する研究」において、厚生労働省ホームページに公表された、平成 28 年度までの食品中放射性セシウム検査で得られたデータを解析し、試料となった食品、放射性セシウム濃度、検出される率の経年的変化、食品間での差等を見出すことにより、今後の放射性物質モニタリングを効率的に進める方法を検討した。平成 29 年度からの本事業では、平成 29 年度から令和元年度に厚生労働省ホームページに公表された食品中の放射性セシウム検査データを年度ごとに解析し、試料となった食品、放射性セシウム濃度、検出される率の経年的変化、食品間での差等を見出すことにより、今後の放射性物質モニタリングを効率的に進める方法を検討した。

B. 方法

厚生労働省ホームページに公表された

平成 29 年 4 月から令和 2 年 3 月までの食品中の放射性セシウムの検査データを、年度ごとに産地、食品分類別、栽培/飼養管理の能否別に集計し、放射性セシウムの検出率、濃度等を求めた。

食品分類は、厚生労働省が公表している食品カテゴリを基本として集計したが、きのこ、山菜については、農産物とは別の分類とした。水産物は魚介類と海藻に分けて分類し、くじら、ハチミツはそれぞれ単独の分類とした。また、厚生労働省が公表したデータではその他（加工品）となっているもののうち、単一の食品を乾燥・冷凍・水煮のような簡単な加工をした食品については、ここでは、原材料の分類（農産物、きのこ、山菜、水産物、畜産物）とした。最終的に食品分類は、農産物（きのこ、山菜を除く。以下同じ）、きのこ、山菜、畜産物、野生鳥獣肉、魚介類、くじら、海藻、加工食品、ハチミツ、牛乳、乳児用食品、飲料水とした。なお、基準値は、飲料水で 10 Bq/kg、牛乳および乳児用食品で 50 Bq/kg、それ以外の食品（一般食品）で 100 Bq/kg である。検出率などは母数に影響されるため、検出された件数、試料に比重をおいて解析した。また、きのこ、山菜、一部の農産物については、自生、天然、野生等の記述があるものを「管理不可」、菌床栽培、栽培等の記述があるものを「管理可能」、記述がないものを「管理不明」と区分し、栽培/飼養管理の能否と検出率、濃度等についても集計した。なお野生鳥獣肉についてはすべて「管理不可」に区分した。また原木きのこについては、栽培品ではあるものの、生産資材への放射性物質の影響

などの特別な配慮を必要とすることから、「管理不可」に含めた。

集計は、公表されたデータから、まず屠畜場における牛肉の全頭検査データが主と思われる非流通品の牛肉のデータと、非流通品の牛肉を除いた食品の検査データに分けてから、それぞれについて解析した。

C. 結果

1. 非流通品の牛肉以外のデータ

検査試料数、検出率、基準値超過率の推移

Table 1A-C に解析対象とした食品分類ごとの試料数と検査割合を年度ごとに示した。2017年度の総検査数は51,615であり、そのうち35,488が流通前の段階で収集された食品（非流通品）、16,127が流通段階で採取された食品（流通品）であった。2018年度は総試料数が43,678、そのうち非流通品が30,987、流通品が12,691であった。2019年度の総試料数は37,058であり、そのうち非流通品が26,188、流通品が10,870であった。この3年間で検査数は減少しており、その減少率は前年度の約85%であった。しかし、試料全体に対する流通品の割合はどの年度もおよそ30%でほぼ一定であった。

データを報告した検査機関ごとに検出下限は異なっており、測定下限が25 Bq/kgのスクリーニング法の結果と、検出下限が1 Bq/kg以下である、Ge半導体検出器による確定検査結果が混在しているため、単純に検出率を求めることによって食品間の放射性セシウム検出の状況を比較することはできない。スクリーニング法の測定下限は25 Bq/kg以下とされていることから、

放射性セシウム濃度が25 Bq/kg以上の試料数を検出試料数、全体に対する検出試料数の割合を検出率とした。ただし、牛乳、乳児用食品は基準値の1/5である10 Bq/kg、同様に飲料水も2 Bq/kgを超えた場合を検出とした。このように計算したときの検出率および基準値超過率をTable 2A-Cに年度ごとに示した。非流通品、流通品を総合した全体での検出率は2017年度で2.7%、2018年度で4.0%、2019年度で3.0%となった。非流通品における検出率は2017年度で3.8%、2018年度で5.4%、2019年度で4.1%、流通品の検出率は2017年度で0.40%、2018年度で0.49%、2019年度で0.42%であった。

全体における基準値超過率は2017年度で0.39%、2018年度で0.72%、2019年度で0.45%となった。非流通品における基準値超過率は2017年度で0.54%、2018年度で0.97%、2019年度で0.61%、流通品では2017年度で0.056%、2018年度で0.095%、2019年度で0.046%であった。

いずれの年度においても、検出率、基準値超過率ともに流通品が非流通品を大きく下回っており、非流通品の検査によって放射性セシウム濃度の高い食品の流通が防止されたと考えられる。

食品分類別検査割合、検出率、基準値超過率

Table 1 および 2 にまとめた食品分類別の試料数、検査率、検出率、基準値超過率を見ると、Table 1A に示すように、全体での検査割合が高かった食品分類は、魚介類34~35%、農産物23~28%、きのこ9.1~

10%、加工食品 8.2~10%、山菜 6.1~7.7%であった。検査数とその内訳、およびきのこ、山菜、野生鳥獣肉を合計した検査割合の年次変化を Fig. 1 に示した。2017 年度から 2019 年度の 3 年間で、農産物や海藻、乳児用食品、食事試料の検査割合は徐々に低下した一方で、野生鳥獣肉については年々全体に占める検査割合が増加した。きのこでは 2018 年度に検査割合が増加し、2019 年度は 2018 年度と同じ検査割合であった。山菜では、2018 年度の検査割合が最も高く、2019 年度は 2018 年度よりは低いものの、2017 年度と比較すると高い割合であった。栽培/飼養管理が困難な品目が多く含まれるきのこ、山菜、野生鳥獣肉を合計した検査割合の年次推移をみると、全体、非流通品、流通品ともに 2017 年度から 2019 年度でその割合が年々増加しており、全体では 19%から 23%に、非流通品では 25%から 30%に、流通品では 5.6%から 6.4%になった。これらの食品分類の検査割合の増加は、放射性セシウムの検出率が低い農産物等の栽培/飼養管理が可能な食品の検査を効率化し、より放射性セシウム検出の蓋然性の高い食品分類の検査を強化するというガイドライン改定を踏まえた検査計画の変化によるものと考えられた。

検出率の年次推移をみると、非流通品では野生鳥獣肉 (17~28%)、山菜 (8.5~13%)、きのこ (7.1~11%) が高い検出率を示した (Table 2B)。流通品では山菜 (6.4~9.3%)、きのこ (4.8~7.9%) が他の食品分類と比較して高い検出率を示した (Table 2C)。流通品における野生鳥獣肉の検出率は 2.6~5.9%と算出された。これらの食品分類にお

ける検出率は、流通品、非流通品ともに 2017 年度と比較して 2018 年度で高くなったが、これは、きのこ、山菜、野生鳥獣肉などの栽培/飼養管理が困難な品目の検査数が増加したことに起因しているものと考えられた。同じ食品分類に含まれる食品の中でも、どの品目を検査するかによって検出率は変動するため、データの扱いには注意が必要である。

基準値を超過した食品分類は、非流通品では農産物、きのこ、山菜、野生鳥獣肉、魚介類であった。2017、2018、2019 年度の基準値超過率はそれぞれ農産物で 0.060、0.093、0.039%、きのこで 0.38、0.65、0.78%、山菜で 1.0、3.2、2.5%、野生鳥獣肉で 7.7、7.7、3.3%、魚介類で 0.070、0.038、0.035%であった (Table 2B)。2017 年度から 2019 年度を通じて、流通品で基準値を超過した食品分類はきのこ、山菜のみで各年度の基準値超過率はそれぞれきのこで 0.75、0.90、0.50%、山菜で 1.5、2.4、1.1%であった。2018 年度では加工食品で基準値超過があり、その基準値超過率は 0.025%であった (Table 2C)。

畜産物、ハチミツ、くじら、海藻、牛乳、乳児用食品、飲料水、食事試料では 2017 年度から 2019 年度の検査において、放射性セシウムが検出された試料はなかった。これら検出されなかった食品分類の合計検査数は各年度の検査数全体の約 10%であった (Table 1A)。

放射性セシウム濃度統計量

Table 3 に、放射性セシウムが検出された試料の濃度の統計量を示した。全ての試

料を対象として解析すると、25 Bq/kg 以下となった試料の率が大きく、全体としての中央値、75 パーセンタイル値は 25 Bq/kg 以下あるいは 0 となってしまうために、濃度が 25 Bq/kg 以上の試料のみを対象とした統計量を示した。

全体でみると、各年度の平均値および中央値は、2017 年度で 97 および 41 Bq/kg、2018 年度で 101 および 44 Bq/kg、2019 年度で 87 および 40 Bq/kg とすべての年度で平均値が中央値の約 2 倍になっていた (Table 3A)。すなわち、放射性セシウムの濃度分布は非対称であり、低濃度側に偏った分布であることが読み取れた。また、すべての年度で検出された試料の半分が基準値の半分以下の濃度となっていた。各年度で比較すると、2018 年度の統計量は最大値を除くすべてにおいて、2017 年度および 2019 年度の統計量より高くなっており、2018 年度の検出試料中の放射性セシウム濃度は他の年度より全体的にやや高めに分布していたと考えられた。非流通品、流通品で比較すると、25 パーセンタイル値はほぼ同等の値であったが、2017 年度および 2018 年度においては、中央値、75 パーセンタイル値、90 パーセンタイル値、95 パーセンタイル値が非流通品より流通品で高かった。流通品では検出試料数が非流通品よりも少ないことから、比較的高濃度を示す試料が検出試料全体に占める割合が高くなったと考えられた。

検出された食品分類である、農産物、きのこ、山菜、野生鳥獣肉、魚介類の 5 分類の統計量の年次推移をまとめた (Table 3B)。年度ごとに中央値および 75 パーセンタイ

ル値で比較すると、各年度共通して、きのこ、魚介類が比較的 low 濃度であり、野生鳥獣肉、農産物、山菜が高濃度に分布している傾向がみられた。各食品分類における統計量の年次推移をみると、どの食品分類も中央値は大きく変動していなかったが、きのこ、山菜については、90、95 パーセンタイル値が徐々に高くなっていった。一方で 2019 年度の検出試料数は 2018 年度と比較して 1/2 程度に減少しており、検出試料数に占める高濃度試料の割合が増加したものと考えられた。農産物、野生鳥獣肉では、2018 年度の統計量が最も高く、2019 年度は 2017 年度よりも低くなっていった。2018 年度は他の年度と比較して検出試料の放射性セシウム濃度が高めに分布していたと考えられた。魚介類では、検出試料数は各年度で大きく変化していないが、各統計量は年々低下する傾向にあることから、25 Bq/kg という検出レベル以上の濃度の試料ではあるものの、検出濃度が徐々に低下してきている可能性が考えられた。最大値はいずれの年度においても野生鳥獣肉で圧倒的に高くなっており、他の食品分類の 10 倍以上の濃度であった。農産物、野生鳥獣肉、魚介類では 2017 年度から 2019 年度の間に最大値が徐々に低下する傾向があった。一方、山菜では 2018 年度の最大値が最も高く、きのこでは 2019 年度の最大値が最も高くなった。どちらも 2017 年度の最大値が最も低くなっており、この変化は栽培/飼養管理が困難な品目の検査が強化されたことに伴い、高濃度の試料の検出が増えたことに起因していると考えられた。

食品分類ごとの内訳

以下、食品分類ごとに、検出数、基準値超過数およびその内容を示す。農産物に関しては、検出率の高い食品群である、きのこ、山菜を独立分類とし、ここでは、きのこおよび山菜を除いた農作物について記載する。

【農産物】

各年度における検査総数は 2017 年度で 14,288 (28%)、2018 年度で 10,579 (24%)、2019 年度で 8,613 (23%) であり、徐々に検査割合が低下していた。Table 4 に農産物の小分類ごとの検出数および基準値超過数を、Fig. 2 に検出された試料の放射性セシウムの濃度分布を示す。各年度を通じて検出数が多く、検出濃度が高かったのは、干し柿およびあんぽ柿で、その他にカキやユズなどの果実、米（玄米）、クリやギンナンなどの種実での検出も見られた。基準値を超過した品目は、2017 年度のクリを除いてすべて干し柿あるいはあんぽ柿であった。すべての年度において流通品で基準値を超過した試料はなかった。全体的に流通品と比較して非流通品で検出濃度は高めに分布しており、流通前検査において高濃度の食品が排除されていると考えられた。また、干し柿やあんぽ柿の検出濃度は年々低下する傾向が認められた。農産物の検査割合は全体の約 25%と多くの品目が検査されているものの、検出率は年々低下してきており、2019 年度の検出率は 2017 年度の 1/2 程度であった。放射性セシウムが検出される品目は、果実、種実など一部の品目と、放射性セシウムの濃縮過程を経る乾燥品にほぼ限られてきている

ことから、これらの品目を重点的に検査することにより、より効率的な検査が実施できるものと考えられた。

【きのこ】

各年度における検査総数は 2017 年度で 4,716 (9.1%)、2018 年度で 4,434 (10%)、2019 年度で 3,747 (10%) であり、2017 年度より 2018 年度、2019 年度の検査割合は高かった。Table 5 にきのこの小分類ごとの検出数および基準値超過数を、Fig. 3 に検出された試料の放射性セシウムの濃度分布を示す。いずれの年度においても、非流通品、流通品ともに検出試料の 50%以上が乾シイタケを含むシイタケ類であった。これはきのこにおけるシイタケの検査割合が高いことに起因していると考えられた。また、放射性セシウムが検出されたシイタケの多くが原木シイタケあるいは乾シイタケであり、菌床栽培シイタケと比較すると、これらのシイタケで濃度が高いことが示唆された。しかし、シイタケ類の基準値超過数は少なく、検出濃度は低濃度側に分布していた。一方、基準値超過試料の多くが天然のきのこであり、シヨウゲンジ、ムキタケ、コウタケなどのきのこから高濃度の放射性セシウム濃度が検出された。これらの天然きのこは栽培/飼養管理が困難な品目に分類される食品であり、濃度の年次推移をみても減少傾向がみられないこと、きのこにおける放射性セシウムの検出率は 6.9~11%と高いことなどから、今後も注意して監視を続ける必要があると考えられた。また、一部のきのこ加工品（おもに乾燥品）についても基準値超過となる例があることから、生産者、販売者への注

意喚起等も必要であると考えられた。

【山菜】

各年度における検査総数は 2017 年度で 3,171 (6.1%)、2018 年度で 3,355 (7.7%)、2019 年度で 2,650 (7.2%) であり、2017 年度より 2018 年度、2019 年度の検査割合が高くなっていった。Table 6 に山菜の小分類ごとの検出数および基準値超過数を、Fig. 4 に検出された試料の放射性セシウムの濃度分布を示す。いずれの年度においても、非流通品、流通品ともにタケノコ、コシアブラ、タラノメの検出数および基準値超過数が多く、非流通品ではこれら 3 品目が検出試料の 65%以上、基準値超過数の 80%以上を占めており、流通品においても、検出試料数の 74%以上、基準値超過数の 86%以上を占めていた。タケノコは検査数が多いため、それに比例して検出件数も多くなっていると考えられるが、コシアブラは検査数に対する検出数の割合が他の山菜よりも高かった。また、タケノコおよびコシアブラは他の山菜よりも検出濃度分布の範囲が広く、高濃度の試料も多数検出されていたことから、特に注意が必要な食品であると考えられた。きのこと同様に山菜においても野生、自生または天然などの記載のある試料、すなわち栽培/飼養管理が困難な品目に該当する食品が多いこと、検出濃度の年次的な減少がみられないことなどから、今後も監視の継続が必要な食品分類であると考えられた。

【畜産物】

畜産物は、B. 方法でも述べたように、屠畜場における牛肉の検査データを除いて解析を行った。屠畜場の試料数は非常に

多く、放射性セシウムの検出が無いため、これを含めると他の食品分類との検出率比較が困難になるためである。また、野生鳥獣肉とハチミツも飼育制御状況が異なることから別分類とした。

畜産物には、肉、鶏卵などが含まれ、各年度における検査総数は 2017 年度で 1,609 (3.1%)、2018 年度で 1,212 (2.8%)、2019 年度で 1,095 (3.0%) であり、ほぼ一定の検査割合を保っていた。2017 年度および 2018 年度においては、非流通品で放射性セシウムが検出された試料が 3 および 2 試料あったが、その濃度は低く、基準値を超過する試料はなかった。2019 年度においては放射性セシウムが検出された試料はなかった。肉、卵、牛乳生産のために飼育されている野生ではない通常の家畜、家禽は飼料が適切に管理されており、放射性セシウムの摂取は低い状態にあることから、畜産物中の放射性セシウム濃度も低いと考えられる。

【野生鳥獣肉】

各年度における検査総数は 2017 年度で 1,719 (3.3%)、2018 年度で 2,177 (5.0%)、2019 年度で 2,136 (5.8%) であり、年々検査割合が増加していた。野生鳥獣肉では、非流通品の検査割合が高く、出荷制限や出荷自粛、全頭検査などを反映しているものと考えられた。Table 7 に野生鳥獣肉の小分類ごとの検出数および基準値超過数を、Fig. 5 に検出された試料の放射性セシウムの濃度分布を示す。いずれの年度においても、イノシシ肉の検出数、基準値超過数が多く、検出数の 68%以上、基準値超過数の 65%以上をイノシシ肉が占めていた。イノ

シシ肉の検査総数は、いずれの年度においても50%以上を占めており、検査数に比例して検出数も多くなっていると考えられた。一方で、検出濃度分布をみると、イノシシ肉の検出濃度範囲は他の野生鳥獣肉と比較して高くなっており、10,000 Bq/kgもの高濃度の放射性セシウムが検出された試料も認められている。野生鳥獣肉は、検出率、基準値超過率ともに通常の肉と比較して高いだけでなく、全食品分類中最も高い結果であった。検出濃度分布は年々低下している傾向が認められるものの、依然として非常に高い濃度範囲にある。一方、流通品での検出濃度や検出率は、非流通品と比較して低く抑えられており、基準値超過した試料はないことから、流通前の検査が適切に機能し、高濃度の試料が排除されていると考えられた。これらの結果を踏まえると、野生鳥獣肉については、引き続き、流通前の検査を重点的に実施する必要があると考えられる。

【ハチミツ】

各年度における検査総数は2017年度で71(0.14%)、2018年度で54(0.12%)、2019年度で61(0.17%)であり、全体における検査割合の大きな変化はなかった。また、いずれの年度においても放射性セシウムが検出された試料はなかった。

【魚介類】

海藻およびくじらを別分類とし、それ以外の海産物および淡水産物を魚介類とした。魚介類の各年度における検査総数は2017年度で17,773(34%)、2018年度で14,665(34%)、2019年度で12,830(35%)であり、ほぼ一定の検査割合であった。ま

た、きのこ、山菜、野生鳥獣肉などの栽培/飼養管理が困難な品目が多い食品区分と同様に非流通品の検査割合が高かった。Table 8に魚介類の小分類ごとの検出数および基準値超過数を、Fig. 6に検出された試料の放射性セシウムの濃度分布を示す。すべての年度において、検出試料の95%以上が淡水魚介類であり、海水魚介類ではスズキやカレイなどで検出が認められた。淡水魚介類であるイワナ、ヤマメ、アユの3品目で、検出数の44%以上を占めおり、基準値を超過した試料はすべて淡水魚介類であった。検出濃度分布は比較的低い濃度帯にまとまっており、濃度の年次変化は顕著ではないものの、顕著に高濃度を示す試料の検出は減少していた。放射性セシウムがより検出されやすい淡水魚介類については、今後も注視していく必要があると考えられた。

【くじら】

各年度における検査総数は2017年度で12(0.023%)、2018年度で2(0.0046%)、2019年度で10(0.027%)であり、2018年度の検査割合が非常に低かったが、2019年度には2017年度の検査割合に戻っていた。いずれの年度においても放射性セシウムが検出された試料はなかった。

【海藻】

各年度における検査総数は2017年度で581(1.1%)、2018年度で474(1.1%)、2019年度で303(0.82%)であり、2019年度の検査割合は2017、2018年度の検査割合より少なかった。いずれの年度においても放射性セシウムが検出された試料はなかった。

【牛乳】

牛乳には、低脂肪乳や加工乳など牛乳の基準値（50 Bq/kg）が適用される食品のみを含め、一般食品の基準値が適用される発酵乳やチーズなどの乳製品は加工食品に分類した。

各年度における検査総数は 2017 年度で 1887（3.7%）、2018 年度で 1586（3.6%）、2019 年度で 1520（4.1%）であり、2019 年度の検査割合はやや増加していた。前述のとおり、牛乳は基準値が一般食品の 1/2 の 50 Bq/kg であり、スクリーニングも認められていない。このため、測定を検出下限は 10 Bq/kg 以下に設定されている。このため、10 Bq/kg 以上を検出としたが、いずれの年度においても放射性セシウムが検出された試料はなかった。

【乳児用食品】

乳児用食品の表示がある食品を含むが、ベビー用の水、茶については、基準値が異なるため、飲料水に分類した。

各年度における検査総数は 2017 年度で 485（0.94%）、2018 年度で 350（0.80%）、2019 年度で 291（0.79%）と、徐々に検査割合が低下していた。牛乳と同様に 10 Bq/kg 以上を検出としたが、放射性セシウムが検出された試料はなかった。

【加工食品】

各年度における検査総数は 2017 年度で 4,258（8.2%）、2018 年度で 4,354（10%）、2019 年度で 3,419（9.2%）であった。加工食品の検出数が各年度 1 ずつであり、2017 年度は非流通品のトチモチ、2018 年度は流通品のトチモチ、2019 年度は流通品のシイタケうま煮から放射性セシウムが検

出された。2018 年度の流通品のトチモチについては基準値を超過した。トチモチはトチの実が練り込まれたモチであり、天然のトチの実に由来する放射性セシウムにより濃度が高くなった可能性が考えられた。加工食品の検出率は低いものの、きのこや山菜などの栽培/飼養管理が困難な品目を原材料に含む加工食品については、注意が必要と考えられた。

【飲料水】

飲料水には、飲料水の基準値（10 Bq/kg）の基準が適用される食品（水、緑茶）を含め、果汁飲料などの飲料については一般食品の基準値が適用されるため、加工食品に分類した。

飲料水の各年度における検査総数は 2017 年度で 734（1.4%）、2018 年度で 426（0.98%）、2019 年度で 383（1.0%）であった。基準値が一般食品の 1/10 の 10 Bq/kg であるため 2 Bq/kg を検出としたが、すべての年度において放射性セシウムが検出された試料はなかった。

【食事試料】

各年度における検査総数は 2017 年度で 331（0.60%）、2018 年度で 10（0.023%）と大幅に減少し、2019 年度では検査数 0（0%）となった。2017 年度、2018 年度ともに放射性セシウムが検出された試料はなかった。

産地

Table 9 にすべての年度で複数の放射性セシウムの検出があった食品分類である農産物（きのこ、山菜を除く）、きのこ、山菜、野生鳥獣肉、魚介類の産地別の全体に

における検出数、基準値超過数を示す。産地は、「栽培/飼養管理が困難な品目群および栽培/飼養管理が可能な品目群のうち原木きのこ類」の検査対象自治体となっている17都県のうち、放射性セシウムが検出された15県を記載している。いずれの年度においても、検査対象自治体となっていない道府県を含め、これら以外の地域の試料で放射性セシウムは検出されなかった。

農産物において放射性セシウムが検出された試料の産地は限られた範囲であり、2017年度では宮城県、福島県、栃木県産、2018年度では宮城県、福島県産、2019年度では福島県産の試料であった。基準値超過試料はすべての年度で福島県産のみであった。

きのこは、各年度とも広域で検出が認められており、2017年度、2018年度においては15地域で、2019年度では14地域で放射性セシウムの検出が認められ、青森県、山梨県、静岡県など福島原子力発電所から300km程度の距離がある地域産のものも含まれていた。基準値を超過した試料は2017年度では11地域、2018年度および2016年度ではそれぞれ6地域で検出され、新潟県や山梨県など比較的福島県から離れた地域産で基準値超過数が多かった。

山菜、野生鳥獣肉では、きのこと同様に広範囲で検出が認められ、ともに9～11地域で検出された。産地別の検査数が一定ではないため、一概には言えないが、山菜、野生鳥獣肉については、福島県、宮城県、茨城県、栃木県、群馬県など、福島県の近隣県での検出や基準値超過が多く、きのこのように福島県から比較的離れた地域で

の検出は少なかった。

魚介類で検出された試料の産地は、6～7県と狭い範囲であり、ほぼ福島近接県であった。基準値超過も福島県、栃木県、群馬県産のみであった。

検査法

食品中の放射性セシウムの検査には、スクリーニング法とゲルマニウム半導体検出器による確定法が使用可能である。2017年度から2019年度に使用されたスクリーニング機器は、NaIシンチレーションカウンターおよびCsIシンチレーションカウンターで、両者を合わせた検査割合は2017年度で15%、2018年度および2019年度でそれぞれ14%とほぼ一定の割合であった。Table 2に示したように野生鳥獣を除く一般食品の約90%以上において、放射性セシウム濃度が25 Bq/kg以下であるが、依然として検査の大半はゲルマニウム半導体検出器による確定法により行われていた。

2. 非流通品/牛肉のデータ

前節においては、全頭検査を含む非流通品の牛肉に分類される検査データを除外して集計した。ここでは、除外したデータについて解析する。

非流通品の牛肉に分類されるデータは2017年度で254,975件、2018年度で255,837件、2019年度で247,872件あり、流通品の牛肉として報告のあったモニタリング記載の試料を加えると、2017年度では検査総数の83%、2018年度では85%、2019年度では87%に相当する数であった。

これらの検査方法は、すべての年度において NaI シンチレーションカウンター、CsI シンチレーションカウンター、ゲルマニウム半導体検出器のスクリーニング機器としての使用によって検査されており、これらスクリーニング法によるものが96%以上であった。これは、前述したように非流通品/牛肉以外の検査においては15%程度しかスクリーニング法が行われていないことと大きく異なっていた。

検査の結果、25 Bq/kg 以上の検出は2017年度で10試料、2018年度で4試料、2019年度で19試料あり、検出率は最も高くなった2019年度で0.008%であった。各年度で検出された放射性セシウム濃度は、いずれもスクリーニング検査による参考値ではあるものの、検出濃度の最大値は48 Bq/kg であり基準値を超過した試料はなかった。また、各年度を通じて放射性セシウムの検出があった牛肉の産地は岩手県のみであり、その他、宮城県、群馬県、栃木県産の牛肉からも検出された。非流通品の牛肉の放射性セシウム検出率は、極めて低い水準にあり、食肉用の牛においては飼料管理が適切になされ、放射性セシウムの摂取が低い状態を維持し続けていることが示唆された。

D. 考察

非流通品の牛肉を除外した試料における放射性セシウムの検出率は非流通品、流通品を総合した全体での検出率は2017年度で2.7%、2018年度で4.0%、2019年度で3.0%となった。非流通品における検出率は2017年度で3.8%、2018年度で5.4%、2019

年度で4.1%、流通品の検出率は2017年度で0.40%、2018年度で0.49%、2019年度で0.42%であった。また、全体における基準値超過率は2017年度で0.39%、2018年度で0.72%、2019年度で0.45%となった。非流通品における基準値超過率は2017年度で0.54%、2018年度で0.97%、2019年度で0.61%、流通品では2017年度で0.056%、2018年度で0.095%、2019年度で0.046%であった。いずれの年度においても、検出率、基準値超過率ともに流通品が非流通品を大きく下回っており、非流通品の検査によって放射性セシウム濃度の高い食品の流通が防止されたと考えられる。

非流通品には主に野生鳥獣肉において高濃度の試料が見られたが、流通品には高濃度試料は少なく、緊急時モニタリングをはじめとする非流通品の検査により、高濃度の放射性セシウムを含む食品が、効果的に流通から排除されていると考えられた。

非流通品の牛肉を除いた検査数はFig. 1に示す通り、2017年度から2019年度において、年々減少しているが、栽培/飼養管理が困難な品目が主体であるきのこ、山菜、野生鳥獣肉の合計検査割合は、2017年度は19%であったが、2018年度では23%に増加した。また、検出率、基準値超過および検出試料の濃度統計量は2017年度に比べ、2018年度では高くなっており、これらの値の上昇は、放射性セシウムの検出の蓋然性の高い栽培/飼養管理が困難な品目の検査割合が増加したことによるものと考えられた。2019年度におけるきのこ、山菜、野生鳥獣肉を合わせた検査割合は2018年度の検査割合とほぼ同程度であったが、検

出率や基準値超過率は 2018 年度より低かった。また、検出された試料の濃度の統計量も、2018 年度で 2019 年度より高い傾向が認められる食品分類が多かった。これらの数字は検査対象の影響を受け、検査試料の選択が同じではないことから一概に比較することはできないが、濃度分布の状況も考慮すると、全体としての検出率および基準値超過率の減少は全体的な濃度減少傾向を反映していると考えられた。非流通品と比較して流通品の検出率、基準値超過率は著しく低いことから、出荷前検査が効率的に機能していると考えられるが、引き続き、放射性セシウムが検出される食品分類や品目、産地、濃度などを解析し、経年的に評価を続ける必要があると考えられた。

食品分類ごとの検出率には差が見られたが、すべての年度において、検出された食品は、きのこ、山菜、野生鳥獣が主であった。魚介類では、海水魚での検出は少なく、基準値超過したものはいずれも淡水魚であった。以前のデータでも示されているように、検出率が高い食品群である、山菜、野生きのこ、淡水魚、野生鳥獣肉は、山林にその起源をもつ天然品であることから、これらの食品の生産地である山林においては、事故により広がった放射性セシウムが未だ存在する状態が継続していると考えられる。そのような地域の生物を捕食していると思われる野生鳥獣は、検出率および基準値超過率が高くなり、高濃度汚染試料も生じやすいと考えられる。農作物では、一部の種実、果実類あるいは乾燥過程を含む食品など限られた食品であった。環境中

の放射性セシウムの食品への影響と、基準値を超える食品の監視のためには、淡水魚、野生きのこ、山菜、野生鳥獣肉のような食品の測定を継続していくことが重要と考えられる。また、流通前検査で見逃された違反を発見することを目的とするならば、流通品検査においては検出率・基準値超過率の高い地域を産地とするきのこ、山菜、野生鳥獣肉、淡水魚を重点的に検査すべきと考えられる。一方で、2019 年度には汚染した農機具から汚染したと考えられる玄米での検出事例や、水分量での濃度換算が適用されない乾燥品で基準値超過となった事例が見られたことから、生産側への情報提供等により、このような事例の発生を防止することも必要と考えられる。

平成 29 年度より「検査計画、出荷制限等の品目・区域の設定・解除の考え方」において、検査対象品目に「栽培/飼養管理が困難な品目群」「栽培/飼養管理が可能な品目群」の区分が示された。これは、原発事故後 6 年以上が経ち、「栽培/飼養管理が可能な品目群」の検出率が低くなってきていることによる。実際、2017 年度から 2019 年度における検査データにおいて、「栽培/飼養管理が可能な品目群」である農作物、畜産物、牛乳・乳製品においてはほとんど放射性セシウムが検出されていない。環境に放出された放射性物質は、新たな汚染が起らない限り、核種ごとの物理的半減期を含めた環境的半減期によって減衰する。食品中放射性物質の検査では、これまでの測定データに基づき、品目、地域ごとにきめ細やかに濃度予測をし、そのリスクの大きさに適した規模の検査体制を整えてい

くことが合理的かつ効率的に検査を進めていく上で重要と考えられる。また、非流通品の牛肉については、各年度において、24 万件以上の検査が実施されているが、検出率が極めて低いうえ、参考値ではあるが、最高検出濃度も基準値の 1/2 以下の濃度である。また、放射性セシウムが検出される非流通品の牛肉の産地も限られていることから、現状の検査体制を見直し、リスクの大きさに適した規模の検査体制を整えていくことが重要であると考えられる。

E. 結論

2017 年度から 2019 年度までの検査データ解析の結果、各年度とも産地での出荷前検査が機能を果たし、流通食品での検出率は低く抑えられていることが示唆された。2018 年度に放射性セシウム濃度が高くなりやすい天然きのこ、山菜、野生鳥獣肉のような、栽培/飼養管理が困難な品目に該当する食品の検査割合が増加し、検出率、基準値超過率の増加が認められた。今後、より効率的に放射性セシウム濃度の高い食品を検出し、流通から排除するためには、このような品目を重点的に検査する体制を整備し、維持することが重要と考えられる。

F. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

- 1) 曾我慶介、松田りえ子、鍋師裕美、今村正隆、堤智昭、近藤一成、蜂須賀暁

子:2017 年度公表の食品中放射能検査結果の解析. 第 55 回全国衛生化学技術協議会年会 (2018.11)

- 2) 鍋師裕美、松田りえ子、今村正隆、曾我慶介、堤智昭、穠山浩、蜂須賀暁子:2018 年度公表の食品中放射性物質濃度検査データの解析. 第 56 回全国衛生化学技術協議会年会 (2019.12)

3. 講演

- 1) 鍋師裕美: 食品中の放射性物質の規制と現状. iTEX 講演会 (兼「レギュラトリーサイエンス講座」、「薬剤動態制御学特論」講義) (2019.12)

G. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

Table 1 食品分類別の検査試料数・検査割合の年次推移

A.全体						
食品分類	検査数			検査割合 (%)		
	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度
農産物	14288	10579	8613	28	24	23
きのこ	4716	4434	3747	9.1	10	10
山菜	3171	3355	2650	6.1	7.7	7.2
畜産物	1609	1212	1095	3.1	2.8	3.0
野生鳥獣肉	1719	2177	2136	3.3	5.0	5.8
ハチミツ	71	54	61	0.14	0.12	0.16
くじら	12	2	10	0.023	0.0046	0.027
魚介類	17773	14665	12830	34	34	35
海藻	581	474	303	1.1	1.1	0.82
牛乳	1887	1586	1520	3.7	3.6	4.1
乳児用食品	485	350	291	0.94	0.80	0.79
加工食品	4258	4354	3419	8.2	10	9.2
飲料	734	426	383	1.4	0.98	1.0
食事試料	311	10	0	0.60	0.023	0
合計	51615	43678	37058	100	100	100
B.非流通品						
食品分類	検査数			検査割合 (%)		
	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度
農産物	8311	6467	5136	23	21	20
きのこ	4184	3989	3350	12	13	13
山菜	2844	3068	2382	8.0	9.9	9.1
畜産物	760	599	437	2.1	1.9	1.7
野生鳥獣肉	1680	2160	2105	4.7	7.0	8.0
ハチミツ	50	50	48	0.14	0.16	0.18
くじら	3	2	3	0.0085	0.0065	0.011
魚介類	15770	13231	11584	44	43	44
海藻	391	337	169	1.1	1.1	0.65
牛乳	867	657	531	2.4	2.1	2.0
乳児用食品	4	4	1	0.011	0.013	0.0038
加工食品	289	399	419	0.81	1.3	1.6
飲料	88	17	23	0.25	0.055	0.088
食事試料	247	7	0	0.70	0.023	0
合計	35488	30987	26188	100	100	100

C.流通品

食品分類	検査数			検査割合 (%)		
	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度
農産物	5977	4112	3477	37	32	32
きのこ	532	445	397	3.3	3.5	3.7
山菜	327	287	268	2.0	2.3	2.5
畜産物	849	613	658	5.3	4.8	6.1
野生鳥獣肉	39	17	31	0.24	0.13	0.29
ハチミツ	21	4	13	0.13	0.032	0.12
くじら	9	0	7	0.056	0	0.064
魚介類	2003	1434	1246	12	11	11
海藻	190	137	134	1.2	1.1	1.2
牛乳	1020	929	989	6.3	7.3	9.1
乳児用食品	481	346	290	3.0	2.7	2.7
加工食品	3969	3955	3000	25	31	28
飲料	646	409	360	4.0	3.2	3.3
食事試料	64	3	0	0.40	0.024	0
合計	16127	12691	10870	100	100	100

Table 2 食品分類ごとの検出率・基準値超過率の年次推移

A.全体

食品分類	検出率 (%)			基準値超過率 (%)		
	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度
農産物	0.39	0.24	0.17	0.035	0.057	0.023
きのこ	8.1	11	6.9	0.42	0.68	0.75
山菜	8.3	13	9.6	1.1	3.1	2.4
畜産物	0.19	0.17	0	0	0	0
野生鳥獣肉	28	28	17	7.6	7.6	3.2
ハチミツ	0	0	0	0	0	0
くじら	0	0	0	0	0	0
魚介類	1.2	1.5	1.8	0.062	0.034	0.031
海藻	0	0	0	0	0	0
牛乳	0	0	0	0	0	0
乳児用食品	0	0	0	0	0	0
加工食品	0.023	0.023	0.029	0	0.023	0
飲料	0	0	0	0	0	0
食事試料	0	0	0	0	0	0
合計	2.7	4.0	3.0	0.39	0.72	0.45

B.非流通品

食品分類	検出率 (%)			基準値超過率 (%)		
	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度
農産物	0.66	0.37	0.29	0.060	0.093	0.039
きのこ	8.2	11	7.1	0.38	0.65	0.78
山菜	8.5	13	9.6	1.0	3.2	2.5
畜産物	0.39	0.33	0	0	0	0
野生鳥獣肉	28	28	17	7.7	7.7	3.3
ハチミツ	0	0	0	0	0	0
くじら	0	0	0	0	0	0
魚介類	1.3	1.7	2.0	0.070	0.038	0.035
海藻	0	0	0	0	0	0
牛乳	0	0	0	0	0	0
乳児用食品	0	0	0	0	0	0
加工食品	0.35	0	0	0	0	0
飲料	0	0	0	0	0	0
食事試料	0	0	0	0	0	0
合計	3.8	5.4	4.1	0.54	0.97	0.61

C.流通品

食品分類	検出率 (%)			基準値超過率 (%)		
	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度
農産物	0.017	0.024	0	0	0	0
きのこ	7.3	7.9	4.8	0.75	0.90	0.50
山菜	6.4	8.0	9.3	1.5	2.4	1.1
畜産物	0	0	0	0	0	0
野生鳥獣肉	2.6	5.9	3.2	0	0	0
ハチミツ	0	0	0	0	0	0
くじら	0	0	0	0	0	0
魚介類	0.10	0.070	0	0	0	0
海藻	0	0	0	0	0	0
牛乳	0	0	0	0	0	0
乳児用食品	0	0	0	0	0	0
加工食品	0	0.025	0.033	0	0.025	0
飲料	0	0	0	0	0	0
食事試料	0	0	0	0	0	0
合計	0.40	0.49	0.42	0.056	0.095	0.046

Table 3 放射性セシウム検出試料の濃度の統計量の年次推移 (Bq/kg)

A.流通形態別

	全体			非流通品			流通品		
	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度
試料数	1396	1742	1124	1332	1680	1078	64	62	46
平均値	97	101	87	99	102	88	64	81	61
25%tile値	31	32	31	31	32	31	31	33	32
中央値	41	44	40	41	44	40	44	50	43
75%tile値	69	79	64	68	77	64	88	98	63
90%tile値	140	170	146	140	170	150	123	181	122
95%tile値	212	268	260	210	269	261	167	294	212
最大値	14000	10000	5200	14000	10000	5200	300	360	260

B.食品分類別

	農産物			きのこ			山菜		
	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度
試料数	56	25	15	382	466	258	262	423	254
平均値	64	79	61	46	52	70	65	87	95
25%tile値	28	31	35	29	29	29	31	36	34
中央値	40	43	48	35	37	35	41	53	52
75%tile値	77	120	83	45	49	47	69	100	100
90%tile値	95	210	114	64	85	120	130	200	210
95%tile値	274	231	133	110	140	380	189	260	327
最大値	410	240	140	470	630	670	450	780	630

	野生鳥獣肉			魚介類		
	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度
試料数	478	600	363	214	225	233
平均値	181	172	123	50	43	41
25%tile値	35	35	31	30	30	29
中央値	59	55	45	38	38	35
75%tile値	110	110	81	56	48	45
90%tile値	240	268	160	77	62	59
95%tile値	451	589	239	110	87	68
最大値	14000	10000	5200	480	220	230

Table 4 農産物の小分類ごとの検出数および基準値超過数の年次推移

	非流通品						流通品					
	検出数			基準値超過数			検出数			基準値超過数		
	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度
干し柿	21	9	4	2	3	2						
あんぼ柿	16	6	3	2	3							
カキ		3	2									
米(玄米)	1	2	3*									
その他	17	4	3	1			1	1				
計	55	24	12	5	6	2	1	1	0	0	0	0

*うち1件は農機具からの汚染と考えられる。

空欄は該当なしを示す。

Table 5 きこの小分類ごとの検出数および基準値超過数の年次推移

	非流通品						流通品					
	検出数			基準値超過数			検出数			基準値超過数		
	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度
シイタケ	229	227	140	1			29	21	10	3		1
ナメコ	22	34	17			1	1		1			
ムキタケ	17	42	21	1		2						
マツタケ	14	15	8		1			1				
コウタケ	8	14	4		3		2	3	3	1		1
その他	53	99	49	14	22	23	7	10	5		4	
計	343	431	239	16	26	26	39	35	19	4	4	2

空欄は該当なしを示す。

Table 6 山菜の小分類ごとの検出数および基準値超過数の年次推移

	非流通品						流通品					
	検出数			基準値超過数			検出数			基準値超過数		
	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度
タケノコ	98	127	87	17	30	27		1	3			
コシアブラ	35	73	61	8	37	25	15	13	19	5	5	3
タラノメ	39	66	28	1	13	3	3	3	1		1	
ワラビ	19	33	25		6	3	1	3	1		1	
ゼンマイ	6	9	10			2			1			
その他	44	92	18	3	12		2	3				
計	241	400	229	29	98	60	21	23	25	5	7	3

空欄は該当なしを示す。

Table 7 野生鳥獣肉の小分類ごとの検出数および基準値超過数の年次推移

	非流通品						流通品					
	検出数			基準値超過数			検出数			基準値超過数		
	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度
イノシシ肉	326	442	252	85	122	48		1	1			
クマ肉	75	86	68	17	30	16						
シカ肉	59	57	34	24	10	4	1					
鳥類	17	13	8	4	4	1						
ウサギ肉		1										
計	477	599	362	130	166	69	1	1	1			

空欄は該当なしを示す。

Table 8 魚介類の小分類ごとの検出数および基準値超過数の年次推移

	非流通品						流通品					
	検出数			基準値超過数			検出数			基準値超過数		
	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度
イワナ	79	85	52	4	2	2						
ヤマメ	36	47	33	5	3	2	2					
アユ	32	15	17									
その他	65	77	131	2				1				
計	212	224	233	11	5	4	2	1				

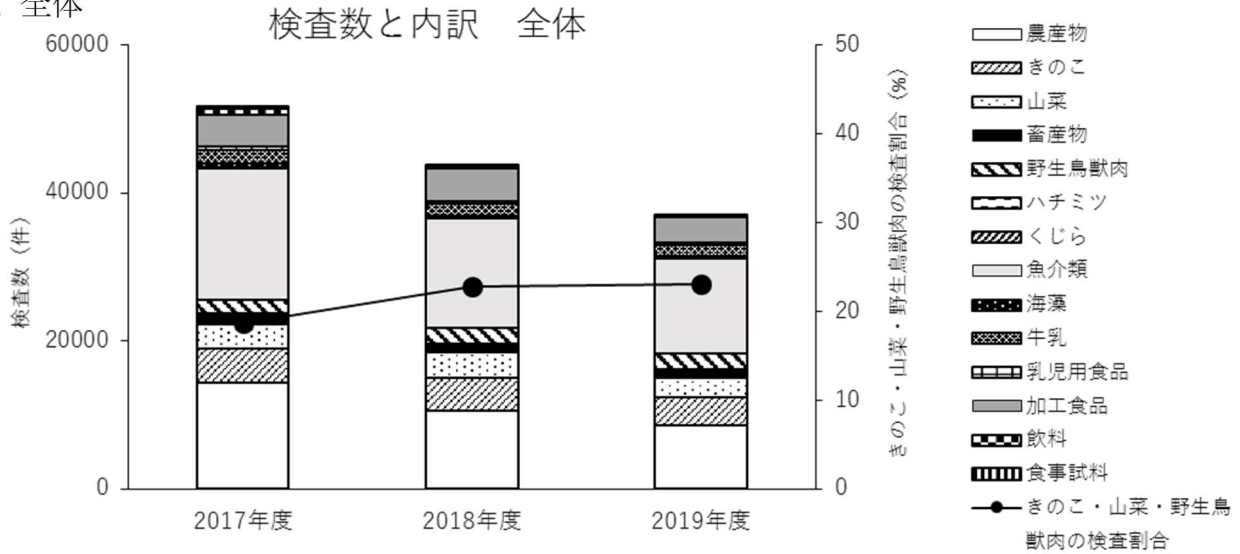
Table 9 産地・食品分類別の検出数と基準値超過数の年次推移

産地	農産物						きのこ						山菜					
	検出			基準値超過			検出			基準値超過			検出			基準値超過		
	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度
青森県							6	4	6									
岩手県							71	100	49	1		1	4	2	6	1		1
秋田県							1	1					3		8			
山形県							5	4	1	1	2		23	26	17	1	2	
宮城県	1	1					28	44	26	1	3	1	98	128	134	20	35	42
福島県	51	24	15	5	6	2	69	135	84	1	4	3	49	156	25	1	28	2
茨城県							41	38	3	1			23	22	10		2	8
栃木県	4						51	34	33				14	3	7			
群馬県							21	19	10	2	1		17	59	15	2	29	1
埼玉県							6	4	1	1								
千葉県							35	29	5	1			5	4	2			
新潟県							2	3	1	7		1	11	15	24	3	6	7
山梨県							27	37	30	1	16	21						
長野県							6	5	1	3			15	8	6	6	3	2
静岡県							13	9	8		4	1						
計	56	25	15	5	6	2	382	466	258	20	30	28	262	423	254	34	105	63

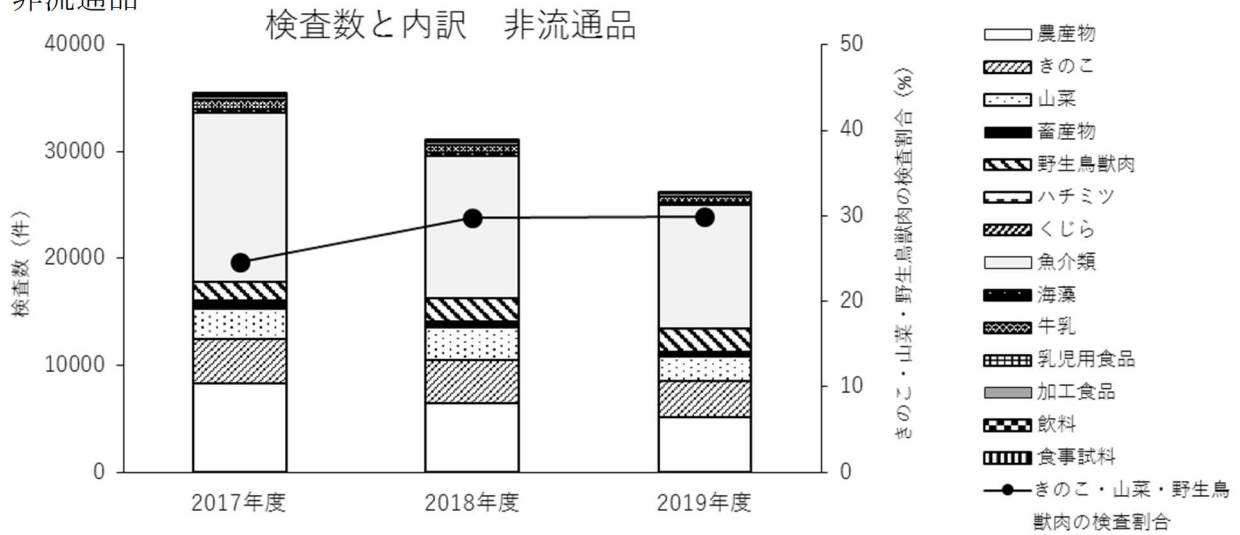
産地	野生鳥獣肉						魚介類					
	検出			基準値超過			検出			基準値超過		
	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度	2017年度	2018年度	2019年度
青森県												
岩手県	25	44	28	2	15	6	13	5				
秋田県												
山形県	4	6	10			3						
宮城県	83	87	50	28	17	1	23	16	9			
福島県	145	191	81	61	81	28	119	129	170	8	5	2
茨城県	15	13	12	1			17	34	9			
栃木県	101	172	124	6	30	22	11	8	9	2		
群馬県	83	51	33	31	22	9	15	13	9	1		2
埼玉県												
千葉県	18	26	20				16	20	27			
新潟県	1		2									
山梨県												
長野県	3	10	3	1	1							
静岡県												
計	478	600	363	130	166	69	214	225	233	11	5	4

空欄は該当なしを示す。

A. 全体



B. 非流通品



C. 流通品

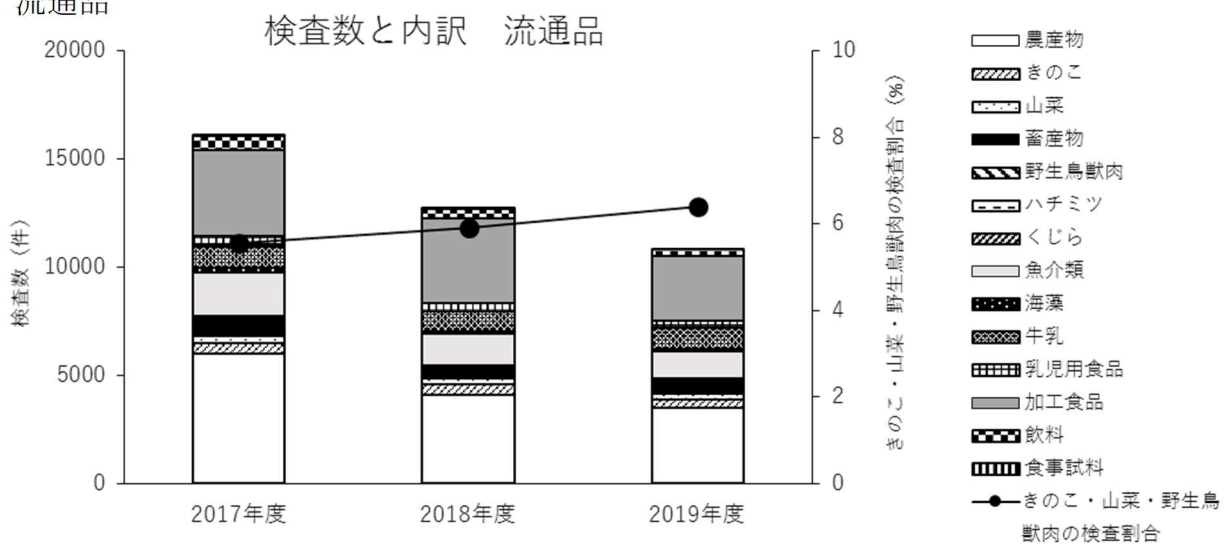


Fig. 1 食品分類別の検査数およびきのこ・山菜・野生鳥獣肉の全体に占める検査割合の年次推移

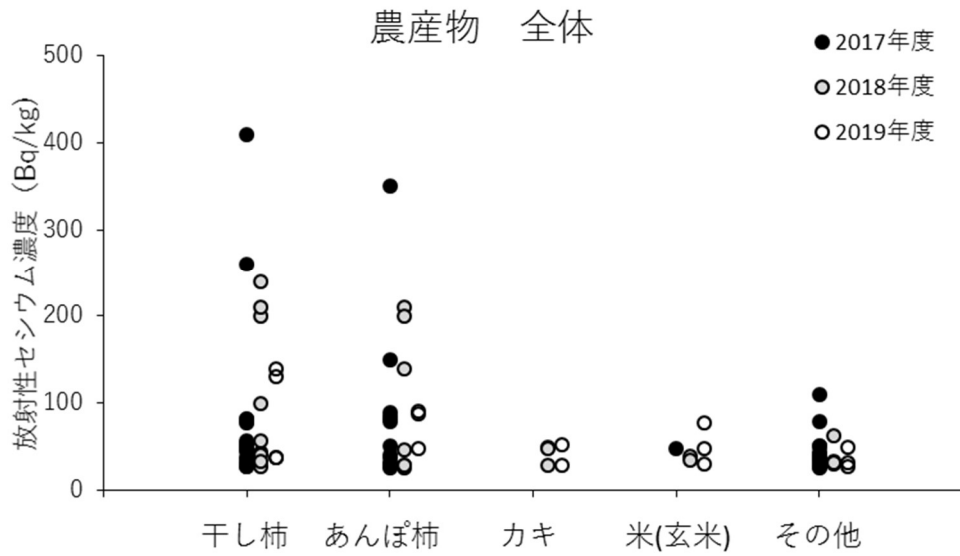


Fig. 2 放射性セシウムが検出された試料の濃度分布の年次推移（農作物）

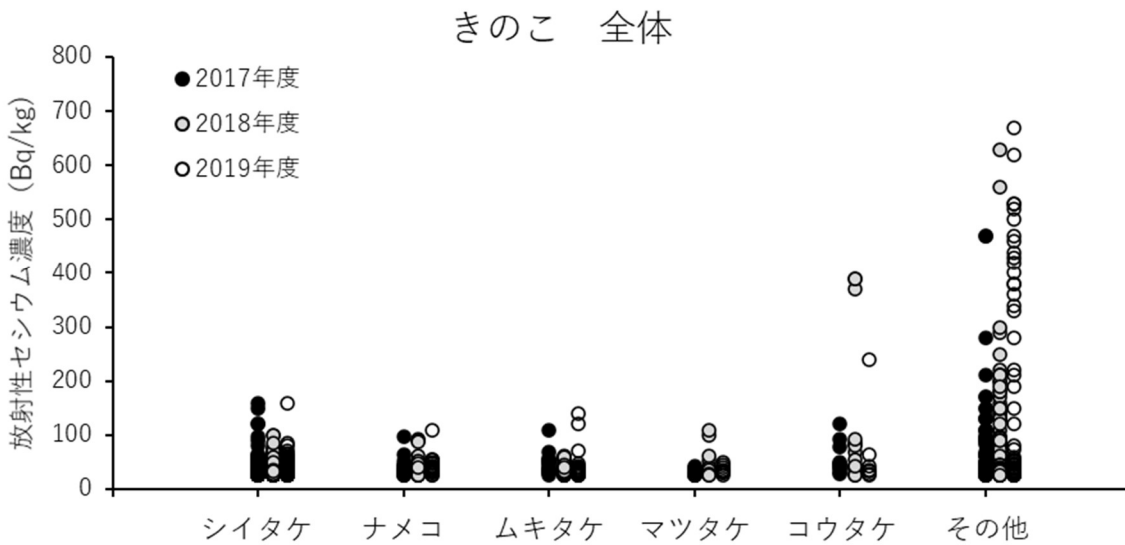


Fig. 3 放射性セシウムが検出された試料の濃度分布（きのこ）

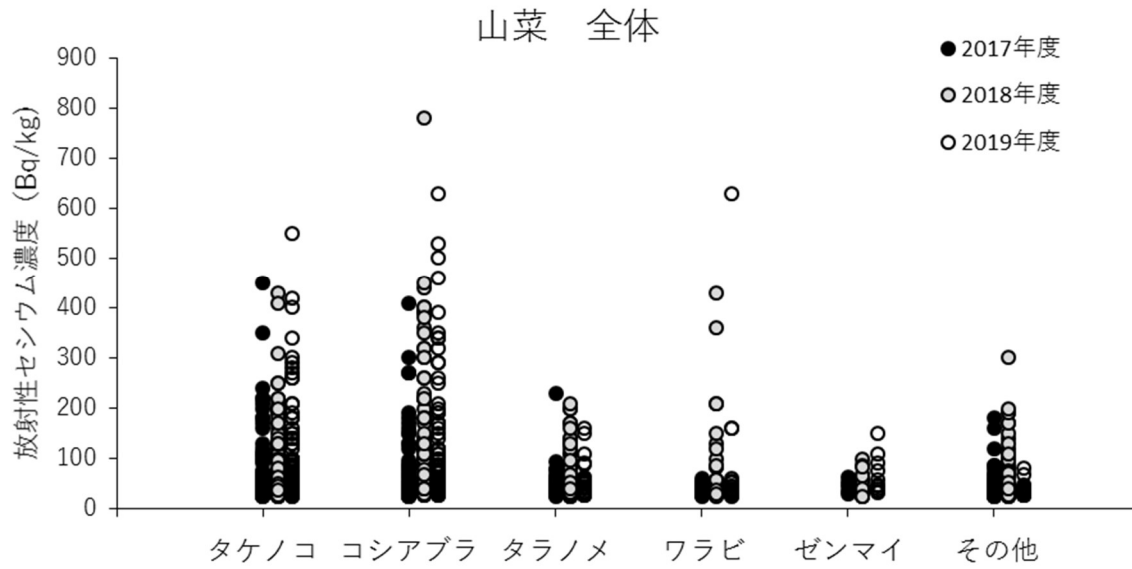


Fig. 4 放射性セシウムが検出された試料の濃度分布（山菜）

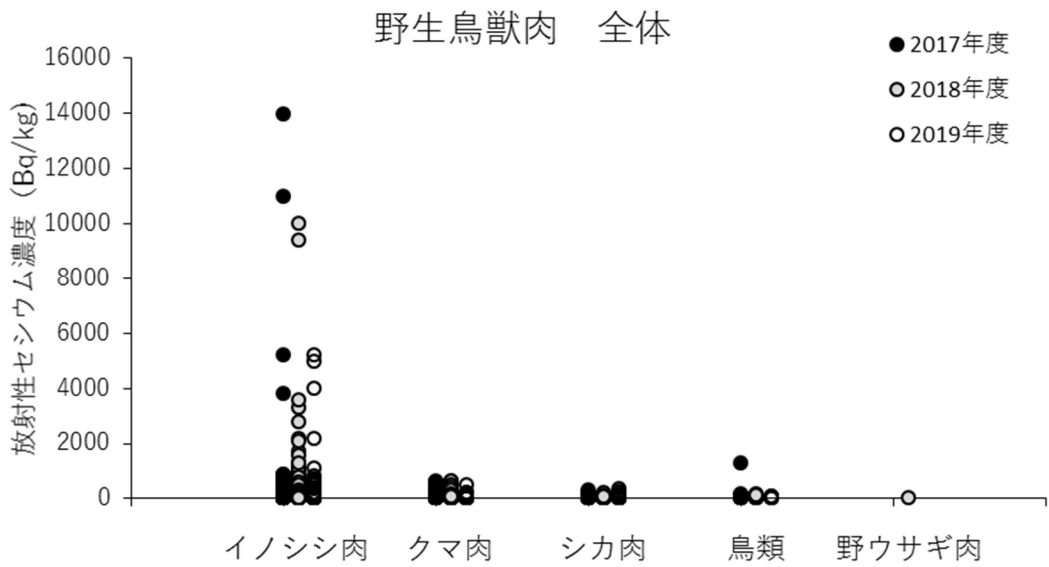


Fig. 5 放射性セシウムが検出された試料の濃度分布（野生鳥獣肉）

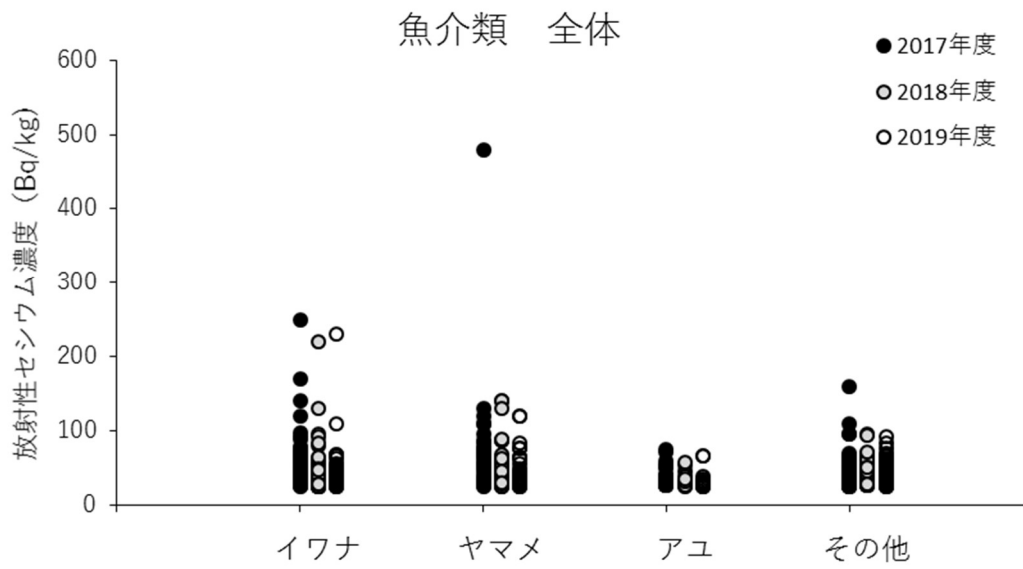


Fig. 6 放射性セシウムが検出された試料の濃度分布 魚介類

Ⅱ. 分 担 研 究 報 告

食品中放射性物質等有害物質濃度データ調査

曾我 慶介

平成 29-令和元年度厚生労働行政推進調査事業費補助金
(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

食品中放射性物質等有害物質濃度データ調査

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 曾我 慶介 国立医薬品食品衛生研究所生化学部研究員

研究要旨：東京電力福島第一原子力発電所事故により、放射性物質や化学物質が環境中に放出され、食品に移行したことは食品衛生上の大きな問題となった。一方で、食品にはもともと天然放射性物質等の有害物質が含まれている。本研究では事故等により環境汚染を引き起こす放射性物質に加え、今後内部被ばくにおいて新たに考慮すべき核種等を探索することを目的とした。

平成 29 年度は、過去の原子力災害情報や近年の食品摂取量調査について文献調査を行ったところ、天然放射性物質からの内部被ばくの影響が、福島原発事故等に起因する人工放射性物質からの影響に比して大きいことが認められた。特に、日本におけるポロニウム 210 からの内部被ばくの実効線量は世界的にも高い値であった。しかし、文献データは測定試料数に限りがあるため、線量範囲も大きな開きが見られた。測定試料数の少ない原因の一つに分析法が煩雑なことが挙げられる。そこで、本研究では食品に焦点をあて、より実用的なポロニウム 210 分析法の検討を行った。ポロニウムを金属板に沈着するステップにおいて、化学分離後ステンレス板電着法、直接ステンレス板電着法と銀板自然析出法の 3 種類の方法の利便性を検証し、食品マトリクスに応じて各方法を適宜使い分けることで、分析時間と費用を抑えられることが示唆された。

平成 30 年度は、平成 29 年度に検討した分析法を用いて、ポロニウム 210 添加回収試験により精度評価を行った。その結果、全食品カテゴリーでポロニウム 210 回収率 93~113%、併行精度も 10%未満と良好な結果が得られた。本分析法は様々な食品試料に適用可能と考えられた。

平成 31 (令和元年) 年度は、流通している魚介類のポロニウム 210 放射能を測定したところ、全ての試料でポロニウム 210 は検出され、イワシ、マアジ、アサリ、カキ (牡蠣)、シラスでは比較的高い放射能 (>10 Bq/kg) が認められた。また、魚類の筋肉と内臓を分離して放射能を測定したところ、筋肉部位に比べて内臓部位では 10 倍以上の高い放射能が認められた。魚介類では筋肉より内臓部位に多くのポロニウム 210 が蓄積されていることが示唆された。近年の諸外国の文献を調

査したところ、魚介類では同様の傾向が確認された。魚介類の内臓を偏って摂取した場合、内部被ばくによる実効線量を大きく増加させる可能性があるため注意が必要である。

A. 研究目的

平成 23 年 3 月 11 日の東京電力福島第一原子力発電所事故により、放射性物質や化学物質が環境中に放出され、食品に移行したことで、食品衛生面で大きな問題となった。一方で、食品にはもともと天然の放射性物質等の人体に有害な化学物質がいくらか含まれているのも事実である。

そこで本研究では、原子力災害による汚染データおよび近年の食品に含まれる放射性物質に関する文献調査を行い、人体に影響が大きい放射性物質として今後新たに検討すべき核種等を探索することを目的とした。その結果、その放射性核種の分析法が必要であれば、その開発に着手する。

平成 29 年度は、学術論文、国連科学委員会 (UNSCEAR) 報告書を中心に、過去の原子力災害情報や人工または天然放射性物質に関連した近年の食品摂取量調査について文献調査を行った。また、食品からの内部被ばく影響の大きい天然放射性物質としてポロニウム 210 (α 線放出核種) を取り上げ、その分析法の検討を行った。平成 30 年度は食品中のポロニウム 210 分析法の精度、真度について評価し、分析時の注意点や問題点を抽出した。平成 31 (令和元) 年度は検討したポロニウム 210 分析法を用いて実際の魚介類の放射能を測定した。また海外のポロニウム 210 に関する調査結果と比較し、内部被ばくへの影響について考察した。

B. 研究方法

1. 文献調査

PubMed、Google Scholar といった文献検索エンジンを使用して関連する学術論文を探索した。UNSCEAR などの報告書は各機関のホームページより入手した。

2. ポロニウム 210 の α 線分析

・食品試料と放射能標準溶液

食品を 12 群 (米、米以外の穀、菓子、豆、果物、緑黄色野菜、その他野菜、魚、肉、嗜好飲料、乳製品、調味料類) に分類し、群ごとに混合・均一化した混合試料を用いた。食品認証標準試料として NIST-4358 (海洋甲殻類) と NIST-4359 (海藻) を米国国立標準技術研究所 (NIST) から購入した。一般流通品はスーパーマーケットで購入した。ポロニウム 209 (半減期: 102 年) 標準硝酸溶液 (拡張不確かさ [k=2]: 3.0%) および鉛 210 (半減期: 22.2 年) 標準硝酸溶液 (拡張不確かさ [k=2]: 11.0%) は Eckert & Ziegler 社から日本アイソトープ協会を通じて購入した。ポロニウム 210 (半減期: 138.4 日) の溶液を調製するために、鉛 210 標準硝酸溶液からポロニウム 210 を化学分離した。鉛 210 硝酸溶液 (100 Bq) を 120°C で加熱し乾固後、4M 塩酸を加え、加熱して塩化物フォームとし、後述する「化学分離」項に従い分離した。分離した溶液中の放射能を定量し、ポロニウム 210 溶液とした。

・湿式分解

食品試料は生試料 5~50 g を、80°C で一晚乾燥させた。1L ビーカーに上記乾燥試料を加え、内部標準物質ポロニウム 209 硝酸溶液を 0.04 Bq 添加後、硝酸と過酸化水素水を用いて 120°C で湿式分解を行った。分解終了点は分解反応時に褐色のガスの発生がなくなる時点とした。湿式分解液を乾固直前まで加熱濃縮し、6M 塩酸 10 mL を加えさらに乾固直前まで加熱濃縮した（ポロニウム塩化物フォーム）。

・化学分離

化学分離を行う場合は、キレート抽出クロマトグラフィーにより行った。ポロニウム塩化物フォームの乾固直前の試料に 4M 塩酸 20 mL を加え加熱し、0.45 nm のメンブレンフィルターでろ過した。カラムは Sr/Spec Resin 50-100 μm (Cartridges-2 ml) (Eichrom Technologies 社) を使用し、4M 塩酸 20 mL で予めコンディショニング後、ろ過液を添加した。4M 塩酸 20 mL、続いて 6M 硝酸 4 mL を負荷してカラムを洗浄後、6M 硝酸 20 mL を負荷してその溶出液をポロニウム溶液として回収した。金属板沈着前に硝酸を乾固直前まで加熱濃縮し、6M 塩酸 10 mL を加え、乾固直前手前まで加熱濃縮し（ポロニウム塩化物フォーム）、次の沈着ステップへと進んだ。

・ステンレス板電着法

ステンレス板 ($\Phi 24.5$ mm, 薄さ 1.0 mm) (東京光電社) にポロニウムを沈着させるために、テフロン製容器底にステンレス板（陰極）を固定し、ポロニウム塩化物フォーム乾固直前試料に 0.5M 塩酸 10 ml およびアスコルビン酸を加え、白金電極（陽極）を浸し、電解分析装置 ANA-2 (東京光電社) を用いて 0.1A で 1~3 時間通電した（以

下、電着と表記）。電極間距離は 5 mm とした。電着後はテフロン製容器からステンレス板を取り出し、洗浄後、自然乾燥させて測定試料とした。

・銀板自然析出法

銀板（純度 99.99%、 $\Phi 25.0$ mm、薄さ 1.0 mm）（メジャーワークス社）にポロニウムを析出するため、ビーカーにポロニウム塩化物フォームの試料を移し、アスコルビン酸を加え、0.5M HCl で 200 mL とした。テフロン製ディスクホルダー（Tracerlab GmbH）に銀板を取り付け、塩化物フォームの溶液に浸け、攪拌しながら 90°C で 2~16 時間析出させた。その後、銀板を取り出し、洗浄後、自然乾燥させて測定試料とした。

・ α 線測定

測定試料を、450 mm² シリコン半導体検出器 PIPS（ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ社）によって真空下で 160,000 秒間測定し、 α 線スペクトロメトリーを行った。データ解析には Genie 2000 spectroscopy system software（ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ社）を使用した。 α 線スペクトロメトリーのエネルギー校正は Eckert & Ziegler 社から購入したガドリニウム 148 (3.18 MeV)、アメリカシウム 241 (5.49 MeV)、キュリウム 244 (5.79 MeV) の 3 点の円盤標準線源を用いて行った。ポロニウム 209 (4.88 MeV) およびポロニウム 210 (5.30 MeV) のエネルギー領域における、バックグラウンド計測は 160,000 秒間測定して 0 または 1 カウントであった。この場合の検出限界値は、ISO 11929-7 に基づき、試料量 5~50 g、計数効率 21%、ポロニウム回収率 75%、 $k=1.625$

として、0.004~0.04 Bq/kg と算出された。

放射能計数値からポロニウム 210 放射能濃度及びその不確かさを以下の式を用いて算出した。 A_{Po} ：ポロニウム 210 放射能 (Bq/kg)、 u ：不確かさ、 n_{Po} ：ポロニウム 210 の正味計数率 (cps)、 D ：添加したポロニウム 209 の放射能 (Bq/kg)、 n_{add} ：ポロニウム 209 の正味計数率 (cps)、 W ：試料重量 (g) とする。

$$A_{Po} \pm u(A_{Po}) = n_{Po} \cdot \frac{D}{n_{add}} \cdot \frac{1000}{W} \pm A_{Po} \sqrt{\left(\frac{\sqrt{n_{Po}}}{n_{Po}}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{n_{add}}}{n_{add}}\right)^2 + \left(\frac{u(D)}{D}\right)^2}$$

放射能濃度は、認証標準試料の場合は認証日に、添加回収試験では添加日に、一般流通品の場合は購入日に減衰補正を行った。

・ポロニウム 209 回収率算出

ポロニウム 209 回収率を求めるために、シリコン半導体検出器における計数効率を求めた。使用する金属板によって、試料形状と半導体検出器のジオメトリーの関係が異なるため、ステンレス板と銀板では別々に計数効率を求めた。計数効率を求めるために、ポロニウム 209 を電着あるいは自然析出させた α 線源を用いた。低バックグラウンド 2π ガスフロー計測器 (LBC-4302B、日立製作所) によって金属板上のポロニウム 209 放射能を定量した。次に、その線源をシリコン半導体検出器において測定し、その正味計数率を放射能定量値で除することで計数効率を求めた。ポロニウム回収率は以下に示す式で算出した。 R_{Po} ：ポロニウム回収率、 n_{add} ：ポロニウム 209 の正味計数率 (cps)、 ε ：計数効率、 D ：添加したポロニウム 209 の放射能 (Bq)

$$R_{Po}(\%) = \frac{n_{add}}{\varepsilon \cdot D}$$

・ポロニウム 210 添加回収試験

食品モデル試料にポロニウム 210 溶液 1 mL (起算日で 0.91 Bq 相当) を添加し、分析を行った。12 種類の食品モデル試料は、各カテゴリーにつき 3 試料 (n=3) で試験した。ポロニウム 210 無添加のコントロールとして、ポロニウム 210 を添加しない試料 (1 試料) も分析した。なお、調味料類は「化学分離」後に「ステンレス板電着法」で、他の分類は全て直接「ステンレス板電着法」で分析を行った。測定日のポロニウム 210 添加試料の放射能から無添加試料の放射能を差し引き、ポロニウム 210 溶液の分離 0 日目に減衰補正した値を添加分の放射能 (分離 0 日めの値) で除することでポロニウム 210 回収率とした。

・ステンレス板上への鉛 210 の電着量評価

ポロニウム 210 と放射平衡にある鉛 210 の標準硝酸溶液を、ポロニウム 210 分析と同様に塩化物フォームに転換後、直接ステンレス板電着法により電着し、電着直後および一定期間経過後のステンレス板上のポロニウム 210 放射能を測定することでステンレス板上に電着した鉛 210 の放射能を算出した。

C. 結果と考察

1. 文献調査

・過去の原子力施設事故と福島第一原発事故の比較

UNSCEAR 報告書によると、核兵器施設関連では、ソ連 (現ロシア) のマヤーク核技術施設 [国際原子力事象評価尺度 (INES) : 5]、英国のウィンズケール原子炉 (INES : 5)、米国のウラン燃料加工工場、ロシアのシベリア化学コンビナート

(INES : 4) の 4 件、非核兵器施設では米国のスリーマイル島原発 (INES : 5)、ソ連のチェルノブイリ原発 (INES : 7)、日本の東海村核燃料加工施設 (INES : 4) の 3 件の計 7 件の事故が、大きな環境汚染をもたらしたとして示されている。この中でも特に重篤な被害をもたらしたのがチェルノブイリ原発事故とされる。そこで、福島第一原発事故とチェルノブイリ原発事故によって放出された放射性核種の比較を行うと、福島第一原発事故で飛散した放射性核種の放射能は、チェルノブイリ原発事故の約 1/10 であった。性質ごとに見てみると、希ガスの放出量は福島第一原発事故の方が多く、揮発性元素はチェルノブイリ原発事故の方が同程度から 10 倍以上多かった。一方で、福島第一原発事故では非揮発性核種の放出量は比較的少なく、対して、チェルノブイリ原発事故では半揮発性・難揮発性物質も多く放出しており、100 km 離れた地域までそれらを沈着させた。この原因として、福島原発の事故の際には、地震により緊急停止措置が取られ、環境放出時臨界状態にはなく、多くの非揮発性核種が大気中には飛散しなかったと考察されている。原子炉施設事故による放射性核種の放出パターンは、事故時の温度、圧力などの状況によって、揮発性または非揮発性など核種に違いが出ると考えられる。

また、セシウム 134/セシウム 137 の比率は、福島第一原発事故の際は約 1 であったが、チェルノブイリ原発事故では約 0.5 であった。これは原子炉の形式とその燃料の違いによって説明されうる。チェルノブイリ原発は当時ソ連が独自で開発した黒鉛減速沸騰軽水圧力管型原子炉 (RBMK)

を採用しており、東京電力の採用する沸騰水型原子炉 (BWR) とでは用いる燃料のウランの濃縮程度が異なるためと推測される (RBMK では約 2%、BWR では 3-4%)。ウラン濃縮程度が高いと、セシウム 137 量に対して、安定同位体セシウム 133 の中性子捕獲により生成するセシウム 134 量が多くなるため、結果的に放出割合もそれに起因して大きくなると考えられた。

食品の放射性物質による汚染を考える場合、原子力施設からの各核種の放出割合のほか、その核種の食品への移行のしやすさも影響する。福島原発事故が発生した 3 月 11 日は日本では主な作物の栽培前であったことから、作物の栽培が始まっていたチェルノブイリ原発事故の 4 月 26 日と比べて直接汚染された作物の量は少ないと推測される。

福島第一原発事故では核分裂により生じた希ガス・揮発性物質である放射性キセノン、ヨウ素、セシウム、テルルが主に環境中に放出され、次いで揮発性の低い放射性ストロンチウム、プルトニウムなどが放出されている。UNSCEAR の委員会では、キセノンは放出量が多いものの、半減期および化学的性質から放射線影響の点では無視できるとされた。半減期が一年未満の放射性ヨウ素、テルル等は現在の食品放射性物質の基準値に含まれていないが、減衰速度が速いため、食品に残留することによる長期的影響は少ないとされる。大気と陸域環境において、地表に沈着したストロンチウムのレベルは、セシウムのそれより大幅に低いいため、UNSCEAR の委員会は評価に含めていない。また、地表に沈着したプルト

ニウムのレベルは非常に低く、ほとんどが検出限界値以下であった。

日本では平成 24 年 4 月に、半減期一年以上の 8 核種（セシウム 134、セシウム 137、ストロンチウム 90、プルトニウム 238、プルトニウム 239、プルトニウム 240、プルトニウム 241、ルテニウム 106）からの被ばくが年間 1 mSv 以下になるように、食品中放射性セシウム（セシウム 134 および 137）の基準値が設定された。放射性セシウム以外の 6 核種はほとんど検出されないことから、食品中放射性セシウム濃度によって原発事故により飛散した放射性物質の食品からの影響を評価することが可能である。福島原発事故以後のセシウムの摂取量調査では、いずれの報告でもセシウムの影響は「1 mSv/年」を大きく下回っており、食品検査に基づく出荷制限等の流通規制の施策が効果的に機能していることが示唆された。

・天然放射性物質の調査

天然放射性物質の中でも、特に内部被ばく寄与の大きかったポロニウム 210 に関する国内の摂取量調査と UNSCEAR の公表する実効線量データを表 1 に示した。世界平均は 0.07 mSv であったが、日本国民の平均は 0.053-0.81 mSv と見積もられ、人工核種である放射性セシウム等と比較しても被ばく寄与の大きい核種であることが示唆された。一方、天然放射性物質カリウム 40 は UNSCEAR によると世界平均で 0.17 mSv、Sugiyama らによると国内の各地域で 0.1~0.2 mSv と推定され、地域差はほとんど見られなかった。ポロニウム 210

は α 線を放出する放射性物質で、最も毒性の高い核種の 1 つと考えられており、国際放射線防護委員会 (ICRP) によると、経口摂取による成人の実効線量係数は 0.0012 mSv/Bq とされ、放射性セシウムより約 100 倍高い。しかし、摂取量調査による食品中ポロニウム 210 濃度は食品種や地域によって大きく偏りが見られることから、精度の良い摂取量推定のためには今後さらに多数の試料を用いた調査が必要と考えられた。

2. ポロニウム 210 分析法の検討

ポロニウム 210 は純アルファ線放出核種で測定が困難なことが問題として挙げられる。例えば、近年の食品中ポロニウム 210 分析法は土壌や生物試料など環境試料を標的とした手法が主に利用されているが、操作は煩雑でコストのかかるものが多い。本研究ではこれまでの報告等を参考に、高精度でかつ実用的な食品中ポロニウム 210 分析法を検討した。

・ポロニウムの金属板への沈着法の検討

ステンレス板にポロニウムを電着する方法（ステンレス板電着法）と、銀板にポロニウムを自然析出させる方法（銀板自然析出法）の 2 種類の手法について標準硝酸溶液で検討した。ステンレス板電着法では開始 2 時間で、銀板自然析出法では 8 時間でポロニウム回収率が約 90%に達した。ステンレス板電着法は、再現性が高く、時間効率も良い手法と考えられた。よって、ステンレス板電着法は銀板自然析出法よりも迅速でかつ金属板の価格コストが低く、有用と考えられた。

・食品群別混合試料を用いた検討

食品群別に、50 g の生試料を分解する時間を調べると、米、果実、野菜類は短く、約 2 日間で分解が終了した。一方で、菓子、豆、魚、肉、乳製品、調味料類はさらに長い時間を要した。分解に要する時間は、試料に含まれる脂分の量に依存していると考えられる。

次にポロニウムを金属板へ沈着させる方法を内部標準物質として用いたポロニウム 209 の回収率により評価した。各食品群について、ステンレス板電着法を用いて検討したところ、米、穀、菓子、果実、野菜、乳製品類は 70% 以上、豆、魚、肉類は 50-70% の回収率であった。一方で、しょう油や味噌を含む調味料類ではポロニウムを全く検出することができなかった。調味料類に多く含まれるナトリウムなどの電解質は、電着中にポロニウムがステンレス板に沈着するのを大きく阻害すると考えられる。そこで、調味料類に限り、他のミネラル等からポロニウムを化学分離した後に電着を行うと回収率は約 80% に向上した。よって、電解質を多く含む試料の場合は、化学分離を行う必要があることが示唆された。

α 線は試料の精製度が悪い場合には自己吸収によって α 線スペクトロメトリーにおけるスペクトルが低エネルギー側へのシフトする。国際原子力機関 (IAEA) の刊行物によると、他核種との分離精度を保つために、 α 線スペクトル半値幅は 30~60 keV が推奨されている。ポロニウム 209 の半値幅は、検討に用いた食品郡のうち豆類が半値幅 66.9~88.3 keV、1/10 値幅 127.0~187.4 keV と高値であったことから核種エネルギー分別の解釈には注意が必

要である。

・ 認証標準試料を用いたポロニウム 210 分析法の真度評価

NIST 認証標準試料を用いて直接ステンレス板電着法により分析を行った(表 2)。海洋甲殻類である NIST-4358 は 7.6 ± 0.4 Bq/kg [真度 110% (103-116%)、併行精度 5%] と良好な結果が得られたが、海藻の NIST-4359 は内部標準物質を含めたポロニウムの放射能を全く検出できなかった。海藻もミネラルが多く含まれると考えられるため、化学分離を行い、ステンレス板電着法で試料調製して分析を行ったところ、NIST-4358 は 6.9 ± 0.4 Bq/kg [真度 100% (91-107%)、併行精度 6%]、NIST-4359 は 22.3 ± 1.8 Bq/kg [真度 108% (100-120%)、併行精度 8%] と良好な結果が得られた(表 2)。また、銀板自然析出法によって、直接ステンレス板電着法で分析できなかった NIST-4359 の分析を行ったところ、 23.6 ± 0.7 Bq/kg [真度 115% (112-117%)、併行精度 3%] と良好な結果が得られた。以上、真度 91-120% と良好な結果が得られた(表 2)。化学分離無しで行う直接ステンレス板電着法では分析不可能な試料においても、銀板自然析出法では化学分離無しで分析可能であった。銀板自然析出法は銀板のコストおよび沈着に時間がかかるが、化学分離で使用する Sr カラムも高価で化学分離の時間を必要とするので、化学分離無しで行う直接銀板自然析出法もミネラルを多く含む食品を標的とした場合は有用な方法と考えられた。一般的な食品には、金属板にポロニウムを沈着させる際に、主に直接ステンレス板電着法を使

用し、場合によって化学分離を追加する手法または銀板自然析出法を行うことが食品の分析法として実用的と考えられる。食品中ポロニウム 210 分析方のフローチャートを図 1 に示した。

・食品モデル試料を用いたポロニウム 210 分析の精度評価

様々な食品カテゴリー別の分析精度を評価するため、ポロニウム 210 添加回収試験を行った（表 3）。ポロニウム 210 回収率は全食品カテゴリーで 93~113%で、その併行精度は 10%未満と良好な結果が得られた。また、 α 線スペクトルの半値幅と 1/10 値幅も良好な値であった。本分析法は様々な食品試料に適用可能と考えられる。

・鉛 210 の電着への影響

ポロニウム 210 の親核種であるビスマス 210 と鉛 210 もウラン系列の天然放射性物質として食品に含まれる。これら核種はポロニウム 210 より実効線量係数が小さく、また鉛 210 は食品中存在量が少ないため、被ばく線量はポロニウム 210 より小さいとされている。ビスマス 210 は半減期が 5.012 日と短半減期核種であるが、鉛 210 は 22.20 年と長く、物質の移動が無い場合は試料内に残留し、やがて壊変によってポロニウム 210 を生成する。そこで、鉛 210 も試料中に存在した場合、直接ステンレス板電着法でステンレス板上に析出する鉛 210 量について調べた。ポロニウム 210 と放射平衡にある鉛 210 標準試料を用いて検証したところ、硝酸溶液中の鉛は添加量の約 60%がステンレス板上に電着していると推定された。

直接ステンレス板電着法によって、鉛 210 を多く含む試料を一回測定で全てポ

ロニウム 210 放射能として算出する場合、時間が経過するにつれて鉛 210 から新たに生成されるポロニウム 210 により過大評価になる可能性が示唆された。よって、鉛 210 を分離してその放射能を測定しない場合、サンプリング、試料調製後は即座にポロニウム 210 放射能を測定することが望ましい。

実際の食品試料中の鉛 210 とポロニウム 210 は放射平衡に無いことが多い。よって、鉛 210 の初期量がポロニウム 210 よりはるかに多い場合や、サンプリングから化学分離まで、あるいは化学分離なしで測定までの期間が長くなった場合は、鉛 210 の壊変によって生じるポロニウム 210 と、ポロニウム 210 自体の壊変の影響でポロニウム 210 の測定値は初期値と大きく異なると考えられる。その場合、正確なポロニウム 210 放射能を知るには、2 時点以上でポロニウム 210 放射能測定を行い、鉛 210 の放射エネルギーを求め、その寄与分を除外する等の必要がある。本研究で検討した方法は、市場の食品を迅速に測定する際の簡便な分析法として適用されることを想定している。

3. 流通食品中のポロニウム 210 放射能分析

本研究では、流通食品の中でも魚介類に注目し、その実態を調査した結果を表 4 に示した。魚介類は 0.24~1048.3 Bq/kg と広範囲の値を示した。一方で、陸生のブタは 0.15 Bq/kg、海藻類は 0.28~0.73 Bq/kg と魚介類より低濃度域であった。サンマ、マアジ、ニシン、マイワシに関しては、筋肉と内臓を切り分けて分析を行ったところ、

筋肉部位 (0.60~44.54 Bq/kg) に対して内臓部位 (14.2~1048.3 Bq/kg) は 10 倍以上の高い放射能濃度が認められた。全体が食用に相当するカキ、シラス、アサリ、ホタテ等では 4.5~41.4 Bq/kg の高い濃度で検出された。以上より、国内で流通している魚介類の中でも特に内臓を含む食品において、ポロニウム 210 量が多いことが認められた。サンプリング時期によって、シラス、マアジ、マイワシの筋肉部位の放射能濃度は差がみられた。同じ魚種でも産地やサンプリング時期が違えば含有量が大きく異なることが示唆された。マイワシに限っては、内臓中の放射能が kg 単位あたり 1,000 Bq という極めて高い濃度を示したのもあった。日本食では、刺し身や寿司、焼き魚など筋肉部を主とする料理の他に、イワシのように丸干し、煮干し等の内臓を含む形態で食すこともあるため、ポロニウム 210 摂取量調査時は何をサンプリングするかによって結果が大きく変動すると考えられる。依然として測定試料数が少ないため、今後食材の種類に加え、地域、季節にも着目したサンプリングを行い、ポロニウム 210 の存在傾向を調べるのが重要と考えられる。

4. ポロニウム 210 に関する文献調査

海外のチームが発表した食品および環境試料中のポロニウム 210 放射能に関する科学論文で、直近 10 年分 60 報を調査した。日本においても、過去に報告は数本あるが(表 1)、諸外国からはポーランド、イタリア、スペイン、フランス、スロベニア、トルコ、ポルトガル等のヨーロッパに加え、ベトナム、インド、クウェート、中

国、韓国といったアジア国からもいくらか報告がなされている。試料では、海産物(35 報) が最も多く、特に二枚貝については頻繁に報告されている。ヨーロッパではムール貝は食用に頻繁に用いられており、内部被ばくが懸念されていることが報告数が多い主な要因と考えられる。その他に陸生動物(18 報)、プランクトン等の水生微生物(6 報)、河川、海洋等の環境水(11 報) などの報告がみられた。

海産物の調査では、ほとんどの報告で 1 Bq/kg を超過しているが、その濃度範囲は広く、高い値では数千~数万 Bq/kg まで見られる。食品として摂取する可能性のある生物で放射能濃度が 100 Bq/kg を越えた試料は、主に二枚貝、エスカルゴ、エビ、アンチョビ、アワビ、マサバ、マアジ、イワシ等であった。多くの報告で算出されたポロニウム 210 推定摂取量は年間実効線量で 1 mSv を下回っており、大きな問題はないとしているが、場合によっては 1 mSv に匹敵または超過する可能性があるという警告を鳴らす報告もあった。

イワシ、マサバ、マアジ、メバチなどの魚類、アワビ、ロブスター、海生哺乳動物であるイルカやアザラシ、ウミガラスでは、筋肉に比して腎臓や肝臓等の内臓に高い放射能が認められている。これらの傾向は本研究で行った分析結果と一致している。今回調査した文献の中では、イワシの腸において 28,000 Bq/kg、深海の小エビの腸から 33,500 Bq/kg と極めて高い値も含まれていた。陸上動物でも、オオカミの腎臓中に最大 942 Bq/kg と報告された。陸生植物では、キノコ、苔類、木の葉(オーク、コショウボク) で比較的高い放射能(100

Bq/kg 超過) が見られた。

河川、湖、海水中のポロニウム 210 に関する複数の報告では、0.3~16,600 mBq/L と広範囲の濃度を示すが、高い値を示すのは帯水層の地下水等の一部試料で、海水では約 1 mBq/L であったことから季節や地域差は小さいようである。地下水や井戸水等でみられる高濃度のポロニウム 210 は地殻に長期間存在するウラン系列の核種から影響が大きいと考えられる。それ以前の報告においても、海水中ポロニウム 210 濃度は 0.3~3.08 mBq/L の範囲に留まっていた。

主に地殻に存在するウラン 238 は崩壊系列を成し、トリウム 230、ラジウム 226 等を経由した後、ラドン 222 (気体) となり一部は大気中に放出され、やがてその娘核種である鉛 210 とポロニウム 210 は地表および海水に降下し、海面では浮遊微生物であるプランクトン等に移行すると考えられている。また、土壌に残留しているウラン系列の核種からの壊変生成物としても生じる。その他に、ウラン精錬、化学肥料や石油産業等施設も発生源として挙げられる。

同じウラン系列に属する核種にも関わらず、ポロニウム 210 と鉛 210 の比率は試料の種類によって異なる。魚介類ではほとんどの場合でポロニウム 210/鉛 210 比が 1 を越えており、貝類や一部魚類では 100 以上を示すものも存在した。一方で、キノコ類や海水では低く、海水では 1 以下になることもしばしば見られた。上記 2 核種は海水には溶けにくく、粒子として海水から除かれやすいが、それらの化学形と海洋と淡水の特性によって、分解、錯体生成、吸着、脱着、共沈などにおいて異なる性質

を示す。ポロニウム 210 は鉛 210 と比べて有機物に高い親和性を示すことが知られており、生物の細胞質のタンパク質に結合し、食物連鎖を通じて各海洋生物の臓器に濃縮される。その結果、海洋生物では鉛 210 よりポロニウム 210 の放射能が高くなると考えられている。天然に存在するポロニウム 210 に加えて、その親核種鉛 210 を評価することは実効線量の正確な評価を行うために有用である。しかし、同じ試料から鉛 210 を分析する場合は、ポロニウム 210 と鉛 210 を化学分離し、数日後に鉛 210 から生成したポロニウム 210 の放射能を測定するなどの作業が必要であるため、大いに時間がかかる。魚介類からの線量評価を行う場合、ポロニウム 210 を優先して分析することは時間効率と線量寄与率を考慮すると実用的と考えられる。その他に、二枚貝のポロニウム 210 の傾向はポリ塩化ビフェニルと似ていることや、水生植物において、銅濃度と関連があるとも報告されている。

季節に関しては、降雨量の違いやモンスーンの時期、プランクトン発生時期でポロニウム 210 濃度差が見られた。貝類は春の植物性プランクトンの増加に伴う放射能濃度増加がみられた。また、モンスーンの季節では、貝の放射能濃度は低い傾向であった。軟体動物は pH、温度、食環境の変化に敏感であるため、活性が落ちるものと考察されている。インド産の貝の大きさ別での放射能は、小さい個体ほど放射能濃度が高い傾向であった。この理由に若い個体の方が、代謝が活発であると考察されている。一方で、スロベニアのトリエステ湾産の貝では大きい個体の方が高い放射能を

示すとする報告もあり、貝の種類、地域差も関係している可能性がある。ブラジルで分析された捕食性の海洋魚である *Cynoscion microlepidotus* とキングクリップの比較では、キングクリップの方が放射能が小さいことが報告された。これには、*Cynoscion microlepidotus* が表層から水深 30 m の生息域なのに対し、キングクリップが深海の 200 m で生息していることから餌となる生物相が異なることが理由の一つに挙げられている。

海洋生物相のポロニウム 210 濃度は、生物種、地理的要因、個体重量と大きさ、食形態（肉食性、草食性、雑食性）、代謝活性、水温など様々な環境要因に依存すると考えられ、一様に解釈することは困難であるが、捕食生物の臓器に高濃度で濃縮されることは本研究での分析結果と一致していた。魚介類の摂取量の多い日本食文化だが、主な摂取部位は筋肉部位でそこに含まれるポロニウム 210 は比較的少ないと考えられるが、貝類など全体を可食部とみなす食品の場合は試料重量あたりの放射能が高いので過剰摂取による被ばくには注意が必要である。

近年、魚やエビの調理の影響について調べ、グリル、ボイルや背わた除去等の処理を組み合わせることでのポロニウム 210 の放射能が最大 84%減少することが報告された。また、キノコを油で炒めることで放射能が低下することを示された。ポロニウムは揮発性が高いため、分析において高温による前処理は避けられるが、被ばく線量低減化のためには、加熱処理は有効であることが示唆された。また、貝をプロテアーゼ処理することで、ポロニウム 210 が溶

液中に抽出され、食用の貝中の放射能が低下するという報告もみられた。今後、被ばくの低減化という観点では、上記に挙げられた方法も有効かもしれないが、食品への適用性についてはより詳細な検証が必要である。

D. 結論

UNSCEAR の報告書および学術論文を参考に、特に大きな被害をもたらしたチェルノブイリ原発事故と福島原発事故の放出核種と汚染状況を比較調査した。事故時の原子炉の状態（温度や圧力など）や燃料の種類によって、放出核種の性質や種類が異なり、また事故の時期によって食品への移行が異なると考えられた。近年の食品の摂取量調査では、福島第一原発事故によって飛散した放射性核種よりも、天然放射性核種の内部被ばく寄与が一般的に大きいことが報告されていた。中でもポロニウム 210 からの寄与は大きいことが推定されるが、分析に時間とコストがかかり、煩雑なため、食品分析結果が少ないのが現状であった。そこで、食品中ポロニウム分析法について、前処理を簡便化するための手法の検討を詳細に行った。その結果、化学分離を行わない直接ステンレス電着法によって、米、穀、菓子、果物、野菜、肉、魚、乳製品等の一般的な食品はポロニウムの分析が可能であることが示唆された。しかし、調味料類などミネラル分を多く含む食品では直接ステンレス電着法では分析が困難なため、Sr カラムなどの化学分離を行うか、または銀板直接自然析出法による試料調製が必要である。

ポロニウム 210 分析法の精度評価を行

ったところ、化学分離を行わない直接ステンレス板電着法または化学分離後ステンレス板電着法の一般食品のポロニウム 210 回収率は 93~113%、併行精度は 10% 未満と良好であることが確認された。分析感度が必要な状況では、試料量を増やす選択肢も考えられるが、豆類等のようにマトリクスにミネラルを比較的多く含む食品では夾雑金属の共析出やポロニウム電着阻害などの影響が大きくなり、結果的に低回収率と α 線のエネルギー損失によるスペクトル形状変化の可能性があるため、注意が必要である。

上記ポロニウム 210 分析法を用いた魚介類の放射能分析を行ったところ、イワシ、マアジ、アサリ、カキ、シラスでは比較的高い放射能 (>10 Bq/kg) が認められた。特にイワシの内臓の分析値は極めて高く、1,000 Bq/kg を超過した。本研究で得られた分析結果と近年の諸外国の分析結果とを比較したところ、共通して魚介類の内臓にポロニウム 210 が蓄積していることが認められた。国内の一般的な食生活であれば、実効線量 1 mSv/年を超過する可能性は低い、内臓等の偏食等による過度な内部被ばくには注意が必要である。

E. 参考文献または資料

以下にアルファベット順で示した。

- ・ ISO 11929-7 (2005) Determination of the detection limit and decision threshold for ionizing radiation measurements-Part 7: Fundamentals and general applications.
- ・ Ohtsuka Y, Kakiuchi H, Akata N, Takaku Y, Hisamatsu S. (2013) Daily Radionuclide Ingestion and Internal Radiation Doses in

Aomori Prefecture, Japan. *Health Phys.* 105:340-350

・ Ota T, Sanada T, Kashiwara Y, Morimoto T, Sato K. (2009) Evaluation for committed effective dose due to dietary foods by the intake for Japanese adults. *Jpn J Health Phys.* 44:80-88

・ Sugiyama H, Terada H, Isomura K, Iijima I, Kobayashi J, Kitamura K. (2009) Internal exposure to ^{210}Po and ^{40}K from ingestion of cooked daily foodstuffs for adults in Japanese cities. *J Toxicol Sci.* 34:417-425

・ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). (2000) Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Sources and Effects and of Ionizing Radiation, United Nations, New York

・ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). (2008) Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Sources and Effects and of Ionizing Radiation, United Nations, New York

・ Yamamoto M, Sakaguchi A, Tomita J, Imanaka T, Shiraishi K. (2009) Measurements of ^{210}Po and ^{210}Pb in total diet samples: Estimate of dietary intakes of ^{210}Po and ^{210}Pb for Japanese. *J Radioanal Nucl Chem.* 279:93-103

F. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

1) SOGA, K., NISHIMAKI-MOGAMI, T., KONDO, K., HACHISUKA, A. : Practical improvement of tritium analysis in foods using a liquid scintillation counting

after azeotropic distillation method. 2017
Health Physics Society, Radiation Safety
Conference, Raleigh, North Carolina, July
2017

2) 曾我慶介, 蜂須賀暁子, 近藤一成「食品
中の天然放射性核種ポロニウム分析法の簡
便化に向けた検討」フォーラム 2018 衛生薬
学・環境トキシコロジー、長崎、2018 年 9 月
10 日

3) 曾我慶介, 近藤一成, 蜂須賀暁子
「食品中の天然放射性核種ポロニウム210
分析法の評価」フォーラム2019衛生薬学・
環境トキシコロジー、京都、2019年8月31
日

3. その他

1) 曾我慶介、亀井俊之、近藤一成、最
上（西巻）知子、蜂須賀暁子
「食品中自由水のトリチウム汚染に対す
る実用的な簡便検査法の検討」 *Isotope
News* 751, (2017) 72-74

G. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

表1 ポロニウム 210 の摂取量調査

国	Po-210 実効線量 (mSv/年)	調査方法	調査期間	備考	参考文献
日本	0.73	137 種類の食品	1989-2005		Ota T et al. (2009) . Jpn J Health Phys 44:80-88
日本	0.15-0.81	153-174 種類の 食品を用いたトータル ダイエットスタ ディ	2007-2008	調査地域 :札幌、仙台、 新潟、横浜、大 阪、高知、福岡	Sugiyama H et al.(2009) J Toxicol Sci 34:417-425
日本	0.053	陰膳 240 試料	1990-1992	調査地域 :石川	Yamamoto M et al. (2009) J Radioanal Nucl Chem 279:93-103
日本	0.23-0.57	陰膳 80 試料	2006-2010	調査地域 :青森	Ohtsuka Y et al.(2013) Health Phys 105:340-350
世界	0.07	UNSCEAR 報告 書データより抜粋		世界レンジ: 0.02-0.26 mSv	UNSCEAR2000

表2 認証試料分析結果

認証試料	認証値* (Bq/kg)	ステンレス板電着法 (Bq/kg)		化学分離後 ステンレス板電着法 (Bq/kg)		銀板自然析出法 (Bq/kg)	
		分析値**	平均値***	分析値	平均値	分析値	平均値
NIST-4358 海洋甲殻類	6.9±1.1****	7.6±0.5	7.6±0.4	7.0±1.0	6.9±0.4	N/A	-
		8.0±1.3		6.3±0.5			
		7.6±0.5		6.9±0.5			
		7.1±0.5		7.4±0.5			
NIST-4359 海藻	20.6±1.5	N.D.	-	24.8±1.6	22.3±1.8	24.1±1.3	23.6±0.7
		N.D.		22.3±1.5		23.1±1.3	
				21.7±2.5			
				20.5±1.2			

*95%信頼区間

**分析値±不確かさ

***平均値±標準偏差

****ポロニウム 210 と放射平衡にある鉛 210 の認証値から推定

表3 食品カテゴリー別のポロニウム 210 分析データ

食品カテゴリー	試料 供与量 (g)	²¹⁰ Po回収率* (%)	²⁰⁹ Po回収率** (%)	²¹⁰ Po		²⁰⁹ Po	
				半値幅* (keV)	1/10値幅* (keV)	半値幅** (keV)	1/10値幅** (keV)
米類	20	93.1±6.7	102.0±9.8	21.6±1.0	43.5±2.4	21.1±1.2	44.9±3.8
穀類	20	107.8±1.3	94.5±2.5	23.0±2.5	47.3±5.8	23.6±1.6	51.6±3.9
菓子類	25	103.2±2.1	91.9±6.3	21.0±1.0	43.6±2.5	22.3±1.9	44.3±4.9
豆類	25	113.0±6.3	75.0±9.2	31.6±1.2	68.1±2.9	33.2±3.3	76.2±5.3
果実類	25	103.1±3.0	91.9±2.8	24.6±5.7	54.7±19.6	23.3±5.3	52.7±16.5
緑黄色野菜類	25	104.1±3.6	91.5±5.6	20.7±1.2	41.6±1.5	20.4±0.6	43.8±1.8
その他野菜類	25	108.0±7.9	91.1±6.8	21.2±1.4	43.5±3.7	23.3±3.0	47.0±5.0
嗜好飲料類	25	103.0±5.0	92.1±3.8	21.2±2.1	43.9±5.0	21.9±2.2	41.8±6.0
魚類	10	103.6±2.3	83.4±9.9	23.5±1.1	50.9±2.2	23.3±2.5	50.9±5.5
肉類	10	99.7±3.7	85.0±9.9	24.9±2.9	52.8±5.3	24.3±4.1	54.6±4.2
乳製品	25	104.1±3.6	94.0±1.7	22.9±3.3	46.7±8.7	21.7±2.4	49.0±10.1
調味料類***	25	107.0±5.3	78.8±10.0	21.5±1.5	51.0±12.2	21.4±2.0	47.9±7.8

*ポロニウム210添加試料における平均±標準偏差 (n=3)

** ポロニウム210添加試料と非添加試料の平均±標準偏差 (n=4)

***湿式分解後にSrカラムでポロニウムを精製後に分析した

表4 流通食品中のポロニウム 210 放射能分析結果*

食品名	サンプリング日	商品名	産地情報	前処理備考	試料供与量 (g)	放射能濃度 (Bq/kg)	不確かさ (Bq/kg)
さんま	2020/2/2	さんま解凍	北海道青森県 太平洋産	一匹から筋肉と内臓を分離	筋肉5.9	1.00	0.12
					内臓11.4	14.20	0.75
まあじ	2020/2/2	まあじ(中)	長崎県産	一匹から筋肉と内臓を分離	筋肉10.7	14.86	0.80
					内臓8.5	166.53	8.30
にしん	2020/2/2	生にしん	北海道沖 日本海産	一匹から筋肉と内臓を分離	筋肉11.0	0.60	0.07
					内臓14.5	77.40	3.84
まいわし	2020/2/9	まいわし	日立・鹿島沖産	一匹から筋肉と内臓を分離	筋肉13.0	44.54	2.26
					内臓12.3	1048.30	49.32
かき (牡蠣)	2020/2/16	加熱調理用かき	広島県産	一匹全体	15.0	17.16	0.85
しらす	2020/2/16	しらす干し	徳島県産	複数匹	11.2	9.90	0.56
あさり	2020/2/16	あさり (少量)	熊本県産	貝殻を除く (6匹)	10.4	41.36	2.08
ししゃも	2020/2/16	子持ちからふとししゃも	カナダ産	一匹全体	18.7	1.50	0.10
まあじ	2016/2/12	真あじ	長崎県産	一匹の筋肉の一部	34.1	4.85	0.26
まいわし	2016/2/12	真いわし	静岡県産	筋肉の一部(二匹分)	32.1	15.96	0.82
えび	2016/2/12	有頭ボイルエビ	タイ産	頭部と外殻を除く部位 (複数匹)	31.1	0.24	0.03
ほたて	2016/2/12	ボイルほたて貝 (加熱用)	北海道産	一匹全体	29.7	4.58	0.25
まだら	2016/4/18	真たら皮なし	宮城県産	一匹の筋肉の一部	22.9	0.40	0.13
しらす	2016/4/18	舞阪産しらす	静岡県産	複数匹	15.9	24.76	1.28
ひじき	2017/1/13	もどしひじき	大分県産		23.1	0.73	0.04
わかめ	2017/1/13	鳴門わかめ	徳島県産	試料中に大量の塩が見られた ため、銀板自然析出法により 調製	28.0	0.28	0.03
ぶた(豚)	2017/1/13	豚肉レバーライス	国産		33.0	0.15	0.02

*一部過去の分析データを掲載

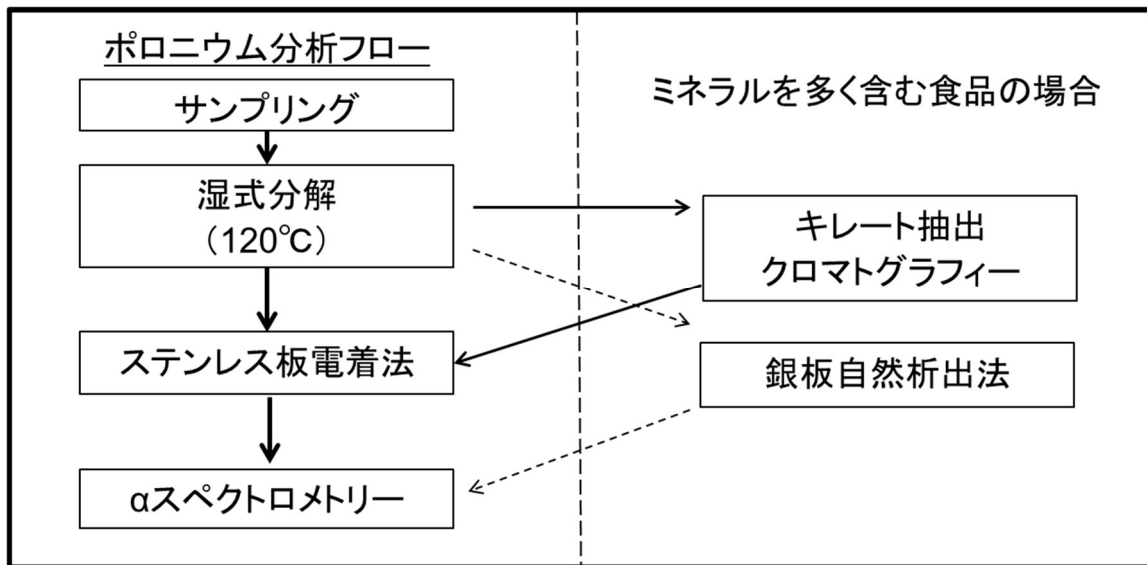


図1 食品中ポロニウム 210 分析フロー

Ⅱ. 分 担 研 究 報 告

消費者への食品検査及び安全性情報伝達方法に関する検討

畝山 智香子

平成29-令和元年度厚生労働行政推進調査事業費補助金

(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

消費者への食品検査及び安全性情報伝達方法に関する検討

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 畝山智香子

国立医薬品食品衛生研究所安全情報部

要旨 平成23年3月の東京電力福島第一原子力発電所事故により、放射性物質が環境に放出されて食品にも移行した。その後食品中の放射性物質に関して新たに基準が設定され、国内外で検査が行われ、膨大な数の検査データが得られている。事故から数年経ち、これまでのデータからは現在市場に流通している食品からはほとんど放射性物質は検出されていないことが示されていて、適切なリスク管理の視点から検査体制の見直しが検討課題となっている。しかし一般の消費者に食品検査の状況が周知されているとは言い難く、いまだに被災地への風評被害が問題となっている。この課題ではこれまで「食品の基準値」に関する一般的認識を調査し、放射性物質の基準以前に食品の基準値の意味が理解されていないことを明らかにしてきた。そして今回さらに放射性物質検査の内容についてもほとんど理解されていないことが明らかになった。食品の安全性確保と風評被害対策のためには広報やリスクコミュニケーションにより多くの資源を配分する必要があることを再確認した。

研究協力者 登田美桜

国立医薬品食品衛生研究所安全情報部第三室

與那覇ひとみ

国立医薬品食品衛生研究所安全情報部第三室

A. 研究目的

平成23年3月の東京電力福島第一原子力発電所事故により、放射性物質が環境に放出されて食品に移行したことは食品衛生上の大きな問題となった。現在、原子力災害対策本部で決定したガイドラインに従って地方自治体が検査計画を作成し、それに基づいた監視体制が取られているが、当該検査ガイドラインは、汚染状況の変化を受けて今後も毎年度変更することが想定されており、ガイドライン改定による影響の評価だけでなく、その評価手法の開発も必要となっている。一方国内流通する食品の検査結果からは基準値超過率が極めて低いことが確認されている。それにもかかわらず、依然として国内外に風評被害が存在し、消費者の食

品検査についての理解と納得が得られていない。そのためこの研究課題では「震災に起因する食品中の放射性物質ならびに有害化学物質の実態に関する研究」で明らかにしてきた消費者への適切な情報提供の重要性を踏まえ、引き続き食品の安全性情報の伝え方と消費者意識調査を継続的に行い、安全から安心に繋げる方法の検討を行う。

B. 研究方法

食品中放射能の検査ガイドラインの見直しに関連して、食品に設定されている各種汚染物質の「基準値」についての意識調査を行った。食品の安全に関する講義を行った際に食品中汚染物質の基準値についてアンケートを行っ

た。対象にしたのは大学生や食品企業の社員、消費者団体関係者、生協組合員等である。講義内容は全く同じではないが、「震災に起因する食品中の放射性物質ならびに有害化学物質の実態に関する研究」での知見である、①食品への全体的不安は食品に関する専門知識があるほうが小さい、②放射線以外の食品のリスクについての情報を提供されることで放射線への不安やリスク受容の程度が変わる場合もある、ことを踏まえて、食品リスクを全体的に提示する内容である。放射線リスクや食品の放射性物質基準に特化した内容は、特に説明して欲しいという希望が無かったので含まれない。この期間中に最も要望が多く関心が高かった話題は「健康食品」であり、放射能への関心は地域に関わらず基本的に薄い。

C. 研究結果

三年分のアンケートのまとめを資料に示す。

協力頂いたのは私立および国公立の共学および女子大学、地方公共団体、消費者団体、食品企業等である。

D. 考察

1. 汚染物質の基準値について

全体としては現行基準または国際基準への支持が多い。回答者の属性から学生・主に食品関連業務の社会人・消費者に分けて集計すると、消費者が最も小さい数字を指向し、社会人は国際基準を支持する割合が高く、学生はその中間といった傾向が窺える。放射性物質についてだけ特別な傾向があるというわけではなくカドミウムやヒ素でも同様である。この調査対象に含まれる消費者は消費者団体に属していたり生協の学習会に参加するような、食品安全に関心の高い人達であり、食品中汚染物質の基準は厳しい方が良いと考える傾向が一般の消費者より強いかもしれない。そういう人達と食品を供給したり食品の安全監視を業務としているような現場の人達との認識のギャップが大きいということがおそらくは最大の不幸である

う。学生の意見がニュートラルなものだとみならずと、そこから食品を提供する側になるか消費する側になるかで違う情報を受け取って意見が別れていくように見える。柔軟性の高い学生のうちに適切な教育を受けることが将来の分断を生まないために役立つ可能性がある。

2. 年次比較

3年間同じ大学の同じ専攻科の学年でアンケート調査ができたところについては経年変化があるかどうかを検討した。結果として特に一貫した傾向は認められなかった。福島第一原子力発電所事故があつてから相当な時間が経過し、当時小中学生だった学生にとっては必ずしも関心が高くないことが示唆された。

若い人達については放射性物質についてだけ特別に何かを伝えるというより食品安全の全体的な理解を促すほうが良いだろうと考える。

3. 食品中放射能の検査について

食品中放射能の検査が行われていること自体は比較的良好に知られているがその具体的中身についてはあまり知られていない。検査により安全性を確認しているということへの信頼はあるようなので、一般的な食品中汚染物質や残留農薬等の監視と同様に、より効果的で効率的な検査を実施して広報に努めることが望ましいと考えられる。

F. 研究発表

1. 論文発表

1) 畝山智香子 食品安全のためのリスクコミュニケーション, 食品衛生研究, 68(1), 9-17(2018)

2) 畝山智香子 安全な食品とは何か?—リスクのものさしで考える—, 調理食品と技術, 23(4), 1-7 (2017)

3) 畝山智香子, 食品安全を確保するためのリスクコミュニケーション, FFI ジャーナル, 223(1),36-43 (2018)

4) 畝山智香子 食品安全のために全ての関係者に必要な情報を, 畜産コンサルタント, vol 54 No647 pp34-37, 2018

5) 畝山智香子 全頭検査という神話 公研,
No.666, p14-15, 2019

6) 畝山智香子, 安全な食品とは何かーリスク
のものさしで考える, 即席食品, No. 355, 2019

ひとみ、福島第一原子力発電所事故後の食品中
放射能についてのリスク認知は食品リスク情
報の提供によって影響されるか、日本薬学会第
140 年会、令和 2 年 3 月 27 日（金）、京都、

2. 学会発表

畝山智香子、蜂須賀暁子、登田美桜、與那覇

資料1 アンケートの結果

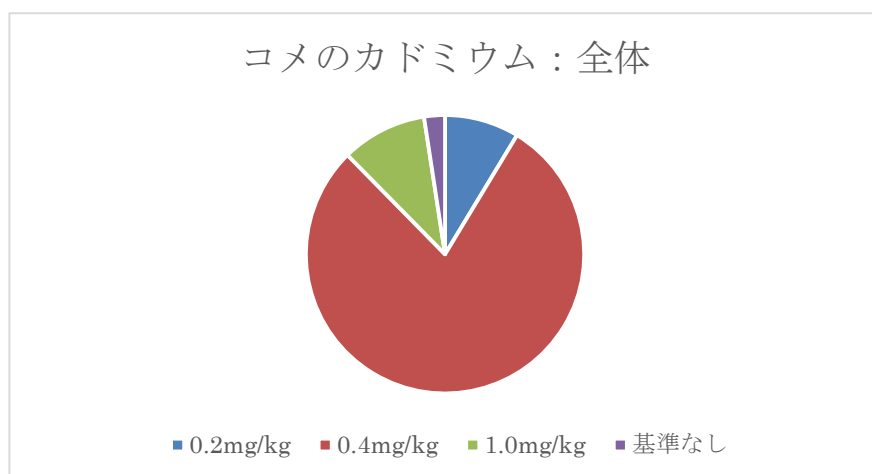
全体

	コメのカドミウム				コメのヒ素		
	0.2mg/kg	0.4mg/kg	1.0mg/kg	基準なし	0.1mg/kg	0.2mg/kg	基準なし
数	155	1413	178	43	293	949	542
%	9%	79%	10%	2%	16%	53%	30%

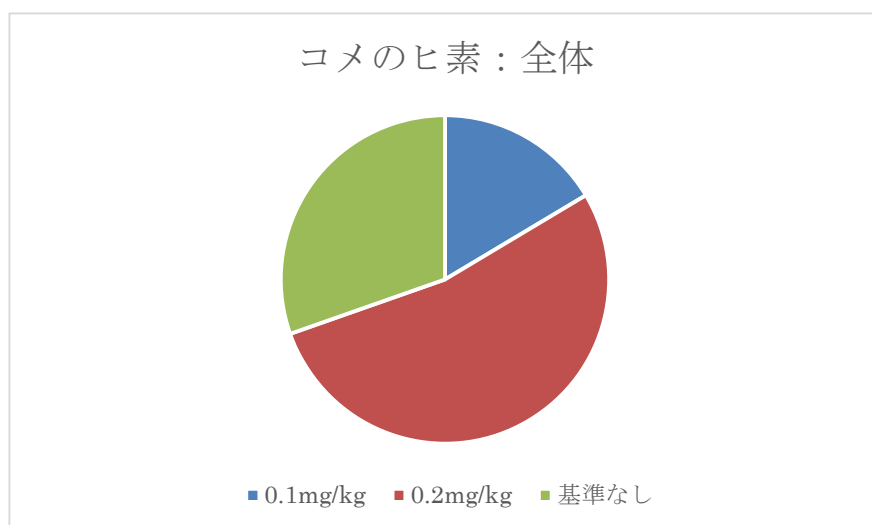
食品中の放射性セシウム					
検出限界未満	100Bq/kg以下	370Bq/kg以下	500Bq/kg以下	1000Bq/kg以下	基準なし
92	1023	147	158	314	30
5%	58%	8%	9%	18%	5%

全体として回収した解答用紙は 1905 枚である。全ての項目に回答があるわけではないので項目により合計数が異なる。割合も合計 100%にはならない場合がある。

コメのカドミウム

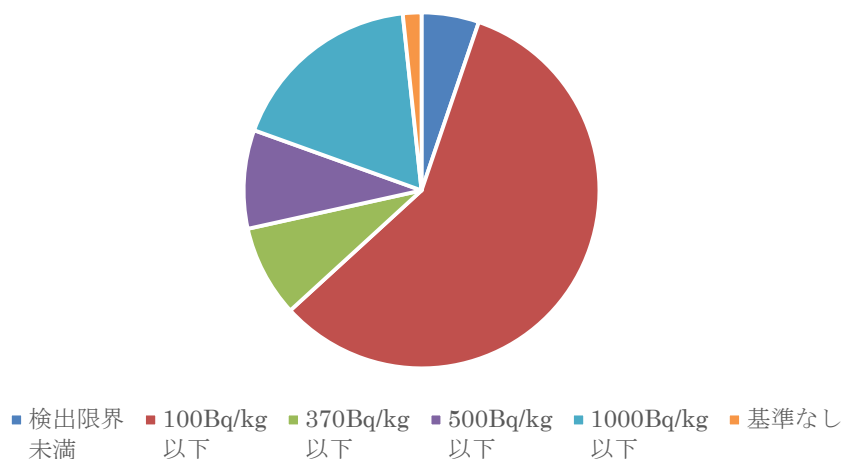


コメのヒ素



食品中の放射性セシウム

セシウム：全体



学生

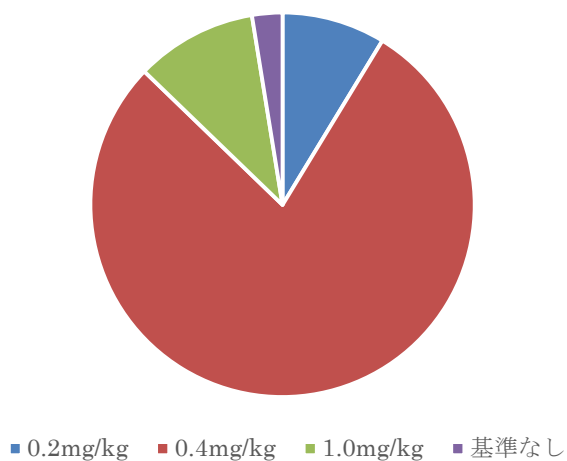
	コメのカドミウム				コメのヒ素		
	0.2mg/kg以下	0.4mg/kg以下	1.0mg/kg以下	基準なし	0.1mg/kg以下	0.2mg/kg以下	基準なし
数	102	920	120	30	199	585	391
%	9%	78%	10%	3%	17%	50%	33%

食品中の放射性セシウム					
検出限界未満	100Bq/kg以下	370Bq/kg以下	500Bq/kg以下	1000Bq/kg以下	基準なし
53	744	102	112	132	22
5%	64%	9%	10%	11%	2%

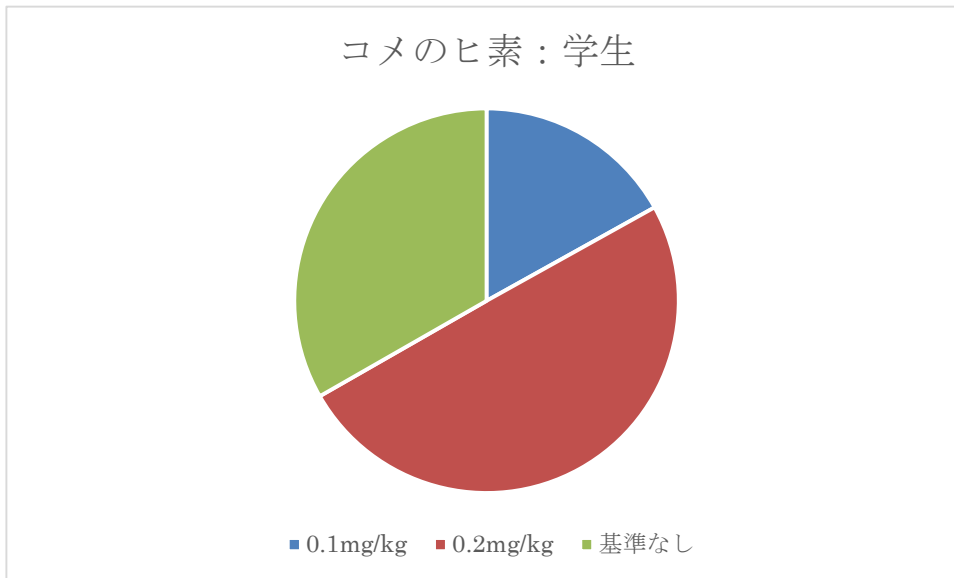
全体として回収した解答用紙は 1241 枚である。

コメのカドミウム

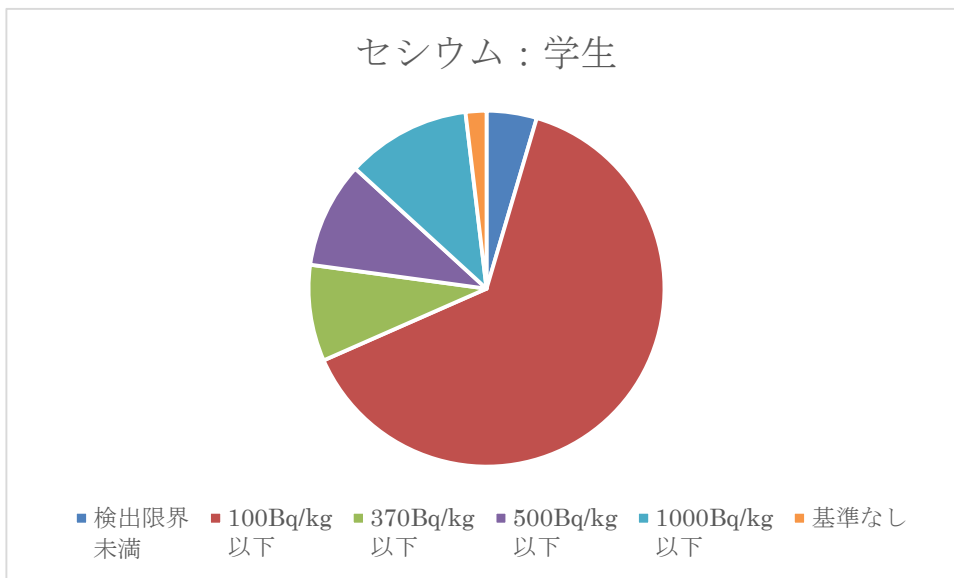
コメのカドミウム：学生



コメのヒ素



食品中の放射性セシウム



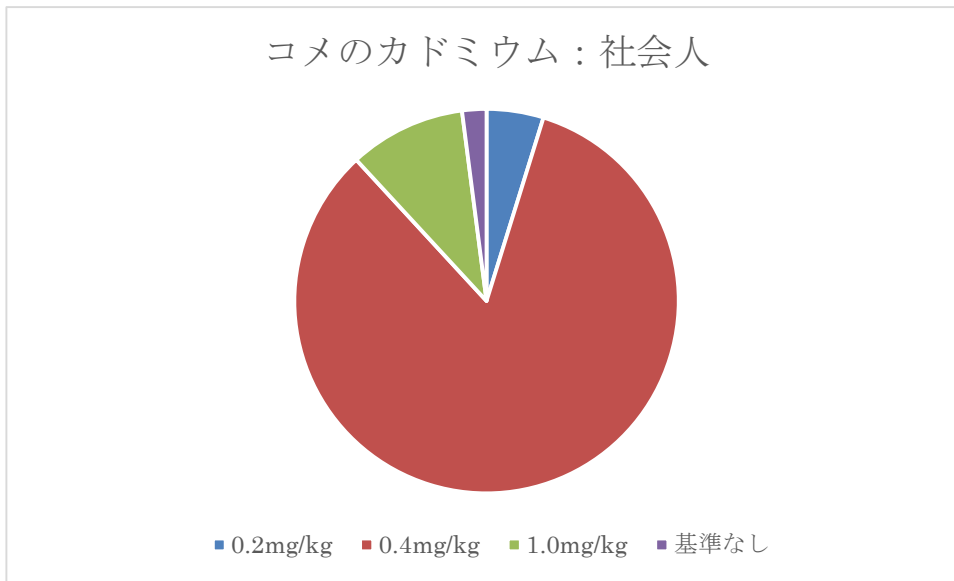
社会人

	コメのカドミウム				コメのヒ素		
	0.2mg/kg	0.4mg/kg	1.0mg/kg	基準なし	0.1mg/kg	0.2mg/kg	基準なし
数	21	365	43	9	49	265	119
%	5%	83%	10%	2%	11%	61%	27%

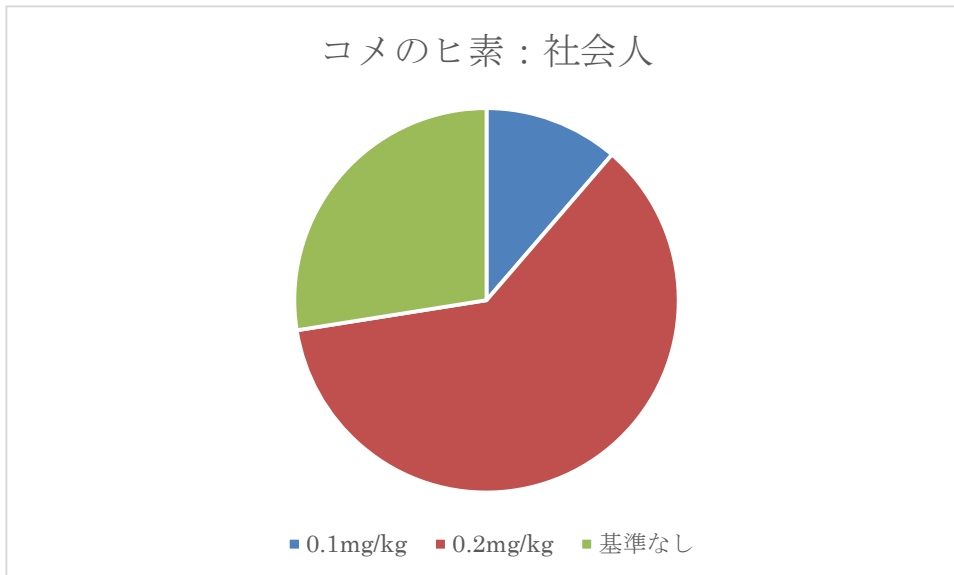
食品中の放射性セシウム					
検出限界未満	100Bq/kg以下	370Bq/kg以下	500Bq/kg以下	1000Bq/kg以下	基準なし
19	167	37	35	169	4
4%	39%	9%	8%	39%	1%

全体として回収した解答用紙は 455 枚である。

コメのカドミウム

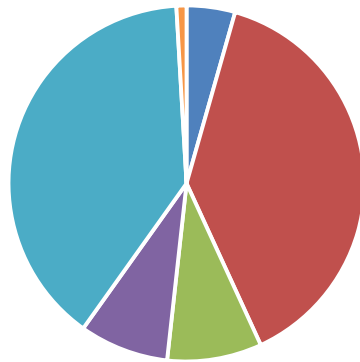


コメのヒ素



食品中の放射性セシウム

セシウム：社会人



■ 検出限界未満 ■ 100Bq/kg以下 ■ 370Bq/kg以下 ■ 500Bq/kg以下 ■ 1000Bq/kg以下 ■ 基準なし

消費者

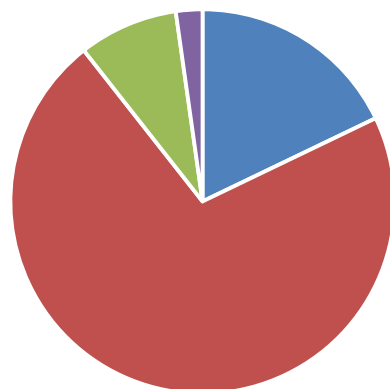
	コメのカドミウム				コメのヒ素		
	0.2mg/kg	0.4mg/kg	1.0mg/kg	基準なし	0.1mg/kg	0.2mg/kg	基準なし
数	32	128	15	4	45	99	32
%	18%	72%	8%	2%	26%	56%	18%

食品中の放射性セシウム					
検出限界未満	100Bq/kg以下	370Bq/kg以下	500Bq/kg以下	1000Bq/kg以下	基準なし
20	112	8	11	13	4
12%	67%	5%	7%	8%	2%

全体として回収した解答用紙は 209 枚である。

コメのカドミウム

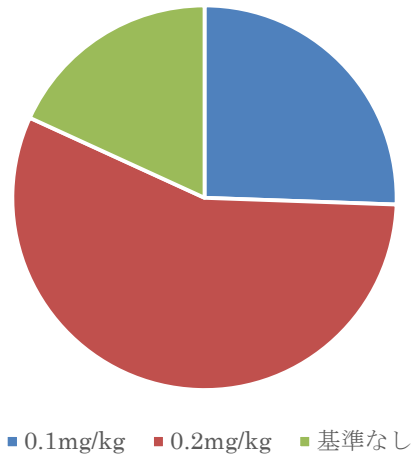
コメのカドミウム：消費者



■ 0.2mg/kg ■ 0.4mg/kg ■ 1.0mg/kg ■ 基準なし

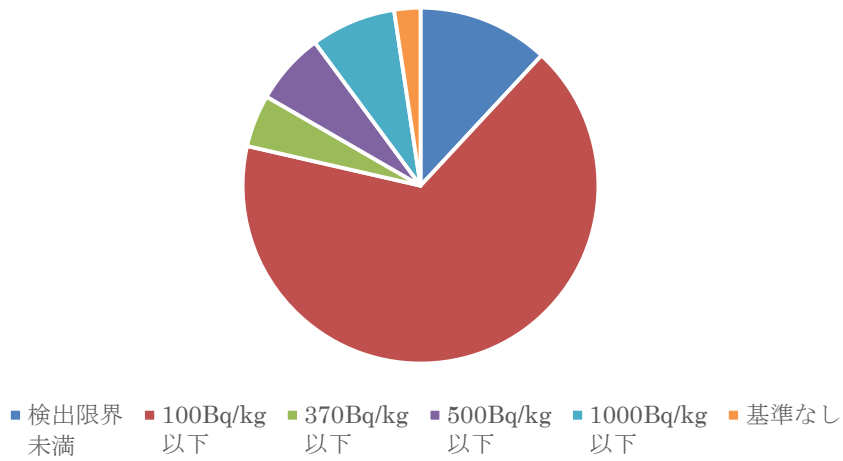
コメのヒ素

コメのヒ素：消費者



食品中の放射性セシウム

セシウム：消費者



年次比較

学校	年度	コメのカドミウム				コメのヒ素		
		0.2mg/kg	0.4mg/kg	1.0mg/kg	基準なし	0.1mg/kg	0.2mg/kg	基準なし
A大	29	7%	76%	15%	2%	12%	47%	41%
	30	8%	78%	13%	1%	15%	49%	35%
	31	14%	70%	14%	2%	20%	54%	26%
B大	29	3%	87%	5%	5%	6%	39%	55%
	30	11%	74%	13%	1%	18%	59%	23%
	31	6%	87%	4%	3%	10%	53%	37%
C大	29	7%	83%	7%	2%	7%	69%	24%
	30	3%	83%	11%	3%	19%	69%	13%
	31	7%	75%	15%	3%	27%	48%	25%

食品中の放射線セシウム					
検出限界 未満	100Bq/kg 以下	370Bq/kg 以下	500Bq/kg 以下	1000Bq/kg 以下	基準なし
3%	60%	7%	12%	12%	5%
4%	60%	8%	14%	9%	4%
5%	61%	13%	8%	11%	2%
0%	68%	8%	10%	13%	2%
2%	60%	10%	7%	20%	1%
1%	67%	9%	9%	14%	0%
2%	64%	5%	19%	10%	0%
0%	59%	9%	13%	16%	3%
11%	56%	14%	8%	7%	3%

放射能検査について

	食品は放射能検査されていることを知っている	検査の多くが牛肉であることを知っている	検査を見直すべき
全体	71%	5%	22%

Ⅱ. 分 担 研 究 報 告

緊急時検査法に関する検討

蜂須賀 暁子

平成29-令和元年度厚生労働行政推進調査事業費補助金

(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、当食品中放射性物質の測定に関して検討する。平成30度は、我が国の原子力災害対策指針、IAEAの安全基準に基づく全般的な安全指針、WHOの飲料水水質ガイドライン、CODEXの一般規格において規制対象とされる放射性物質を比較し検討した。事故等により環境汚染を引き起こす可能性のある核種は多く、IAEAの文書では357核種について評価されている。文書の目的や想定する状況が異なるため単純な比較はできないものの、原子力災害対策指針で具体的に挙げられている核種数は検討した文書の中で最も少なく、緊急時における食品汚染の可能性が高いものに絞られており、網羅的ではなく、より管理の実用性、実効性を重視した立場をとっている。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、核種の特性にに基づき検討した。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、短半減期の核種による影響は小さいと考えられるが、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。事故等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。そのためには、平常時より汚染の可能性のある核種およびその量を幅広く想定し、モニタリング手法を用意しておくことが重要と考えられる。

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。本課題では、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)の検討、並びにそれら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。

1) 国内

- ・原子力災害対策特別措置法
- ・原子力災害対策指針(平成30年10月1日改正)(平成29年12月22日原子力規制委員会告示第14号)
- ・原子力規制委員会、放射線審議会等資料

平成30年10月17日原子力規制委員会、資料: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、(参考)Cs-137 100TBq

放出時の各核種放出量

- ・放射能測定法シリーズ(文部科学省及び原子力規制庁)

2) 国際原子力機関 IAEA

- ・Fundamental Safety Principles / IAEA Safety Standards Series No. SF-1 (2006) 基本安全原則 (SF-1)
- ・Leadership and Management for Safety / General Safety Requirements No. GSR Part 2 (2006) 安全のためのリーダーシップとマネジメント (GSR Part 2)
- ・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)
- ・Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency / General Safety Requirements No. GSR Part 7 (2015) 緊急時の準備と対応 (GSR Part 7)

- ・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 (GSG-2)

3) 世界保健機構 WHO

- ・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 (WHO 飲料水 GL)

4) 国際食品規格委員会 CODEX

- ・General standard for

contaminants and toxins in food and feed/ CODEX STAN 193-1995, Adopted in 1995 Revised in 2015 食品及び飼料中の汚染物質及び毒素に関するコーデックス一般規格

(CODEX一般規格)

5) 核データ

・ 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

C. 結果と考察

1) 測定対象核種

表 1 に検討した測定対象核種をまとめた。一番左側の列の通し番号は、今回検討した核種を原子番号順に番号付けしたもので、後述する WHO 飲料水 GL 記載核種を 1-191 に、防災指針の OIL6 記載核種を 201-216 とした。枝番は、対象核種が 2 つ以上の壊変経路を取る場合、割合の少ない方を 2 とした。ただし、1%以下の壊変経路は省略した。また、対象核種の測定において子孫核種が用いられる場合に 11 を、対象核種が壊変系列をなす場合の子孫核種に 21 以降の数字を割り付けた。*1 列は検討対象とした核種

を示し、元素記号-質量数で表記した。

*2 列は WHO 飲料水 GL の記載核種を元素番号順に 1-191 に番号付けしたもので、核種ごとのガイダンスレベル(放射能濃度 Bq/L)と、その値を半減期と質量数を用いて物質濃度(g/L)に換算した数値を併記した。このガイダンスレベルは、緊急時ではなく平常時に核種ごとに適用される数値で、1日に2Lを摂取する条件下で個人線量基準を0.1 mSv/年とした場合の飲料水中の放射能濃度であり、複数核種存在する場合は核種ごとのガイダンスレベルとの比率の和が1以下となるか否かで判定されるものである。

*3 列は IAEA の全般的な安全指針 GSG-2 OIL6 記載核種を元素番号順に番号付けしたものである。GSG-2 の目的は、防護措置に関する意思決定に必要な運用レベル及び緊急時対応の目的を達成するために必要なその他の対応措置を開発するための基礎を形成する、一貫した一連の一般的な基準を提示することである。その中で、運用上の介入レベル(Operational Intervention Level: OIL)が複数提示されており、OIL6 は年間実効線量を 10 mSv 未満とするために消費制限を考慮する必要がある、食品、牛乳、または水中の濃度値である。GSG-2 には 357 核種の放射能濃度が示されているが、表 1 には、そのうち、WHO 飲料水 GL と後述の試算提示核種(*6 列)に該当するもののみを記載している。

*4 列は CODEX 一般規格に例示記

載されている核種を4つのグループごとに番号付けし(10、20、30、40番代ごと)、乳児用食品の食品指針値 GL (A) と乳児用食品以外の食品の指針値 GL (B) を A/B として記載した。CODEX 一般規格は、食品及び飼料中の汚染物質と毒素の取り扱いに関してコーデックス委員会が推奨する主要な原則が書かれており、国際的に貿易される個別食品に適用するために国際食品規格委員会が推奨する食品及び飼料中の汚染物質及び天然毒素に関する最大基準値と関連のサンプリング計画が示されている。放射性核種に関しては、最大基準値 Codex maximum level (ML)ではなく、指針値 Codex guideline level (GL) が与えられている。

*5 列は、我が国の防災指針の OIL6 記載核種を示した。

*6 列は、「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」の「(参考) Cs-137 100TBq 放出時の各核種放出量」に記載されている核種を示す。

*7 列は GSG-2 の OIL6 と WHO 飲料水 GL の放射能濃度比である。これは緊急時と平常時の値の違いを示している。

*8 列は核種の半減期であり、単位は日に統一し、1 日未満または 1000 年以上を斜体で示した。*9 列は壊変形式とその比率であり、1%未満の経路は省略した。壊変形式は、 α : α 壊変、 β^- : β^- 壊変、 β^+ : β^+ 壊変、ec: 軌道電子捕獲、IT: 核異性体転移、SF: 自発

核分裂を示す。*10 列は生成核種を示し、生成核種に放射性がない場合は“-”、放射性がある場合はその壊変形式とその割合(%)を記載した。*11 列は、SGS-2 OIL6 において評価対象核種に放射平衡核種がある場合は、その子孫核種を記した。なお、丸カッコ内は壊変割合であり、角カッコ内はその核種の半減期を示す。

*12 列は、1 壊変あたりの放出放射線種 (α 線、 β 線、及び γ +X 線) ごとの総エネルギー (keV) を示す。*13 は、測定対象の候補となる線種であり、 γ 線、 β 線、 α 線の優先順とした。

*14 は「放射能測定法シリーズ 29 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(原子力規制庁)」記載核種に○を付した。

*15 は*13 で γ に分類された核種について放出される γ 線のエネルギー (keV) と放出率 (%) を、測定に有用と思われる 100-2000 keV で放出率の高いものを優先して記載した。*16 は*13 で β に分類された核種について放出される β 線のエネルギー (keV) と放出率 (%) である。*17 は*13 で α に分類された核種について放出される α 線のエネルギー (keV) と放出率 (%) である。

*18 は、経口摂取における年齢別の実効線量係数であり、ICRP Publication 119 及び ICRP Publication 60 より転載した。

表 1 に示した核種は、そのものが核

燃料物質、あるいは核分裂で直接生成するものから、いくつかの核壊変を経て生成するものまで様々である。核種によっては、壊変系列を成し、核分裂直後よりも、経過時間に依存して増加するものもあり、その存在度は半減期のみでは予測できず生成過程も含めて考える必要がある。緊急時における汚染核種の存在比率は、汚染の原因となる事故等の状況だけでなく、気象条件等も加わって、複雑に変化すると予想される。そのような中で、原子力規制委員会はいくつかの条件を設定して「セシウム 137 が 100 テラベクレル、その他核種がセシウム 137 と同じ割合で換算された量、さらに希ガス類が全量、環境中に放出されるような仮想的な事故を想定」し、Cs-137 100TBq 放出時の各核種放出量を試算している（表 1 の列*6）。これらの試算も活用し、IAEA の安全要件「原子力または放射線の緊急事態に対する準備と対応」に要求されているように、汚染核種およびその量を幅広く想定し、モニタリング手法を平常時に用意しておくことが重要と考えられる。

2) 測定法

緊急時においては、前処理が簡易で迅速に測定ができるガンマ線測定、中でもエネルギー分解能が優れ核種分析が可能なゲルマニウム半導体検出器を用いたガンマ線スペクトル測定が核種同定及び定量には有力であることから、表 1 に示した 207 核種について γ 線による分類を行った（表 1 の

列*12~15)。測定エネルギー領域として妨害が多いと考えられる 100 keV 以下を避け、放出エネルギーが 100 ~2000 keV であり、その放出率が 10%以上である 108 核種を選別した。これらはその物理的特性から、 γ 線による測定の可能性があるものであるが、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る場合には、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、現在も検査対象となっている Cs-134 及び Cs-137 はいずれもこの分類であり、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、時間に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 31 核種を選別した。これらは、他核種の存在条件や測定濃度によっては γ 線による測定の可能性があるが、一方で、他の γ 線核種の測定の妨害になる可能性もあるものである。

次いで、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 核種を分類した。 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が行えるのに対し、 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。

γ 線及び β 線測定が期待できず、 α 線による測定が考慮されるものは24核種であった。 α 線は、線スペクトルではあるものの透過性が極めて低く、自己吸収を避けるために測定前の核種の精製が必要であることから、迅速に測定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に、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。

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、放射線以外の機器分析でも可能なものもある。表1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、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。共存核種の条件等によっては、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。

測定に有効な放射線が乏しく、効率的な放射線測定が期待できないものは18核種であった。これらの核種は、そもそも放出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、放射線の生体影響は小さいと考えられる。また、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。半減期が長い核種の測定法は、放射線測定以外の個別の対応が考慮される。例えば、半減期が57億年の $I-129$ は加速器質量分析法などが用いられる。

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。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、緊急時には共存核種の影響により、平常とは異なる注意が必要である。その際、測定環境の汚染に注意を払い、事故の種類や経過時間等により存在する可能性のある核種を推定し、必要に応じて再測定も考慮し、既存の知識及び情報を活用することが、誤認率を下げ、核種同定の精度を上げることに繋がると考えられる。

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。事故等により環境汚染を引き起こす可能性のある核種は多く、国内外の文書により 200 余核種を抽出し、核種の特性に基つきその測定法について検討した。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。

文書の目的や想定する状況が異なるため単純な比較はできないものの、我が国の原子力災害対策指針で具体的にに取り上げられている核種数は検討した文書の中で最も少なく、緊急時における食品汚染の可能性が高いものに絞り込まれており、網羅的ではなく、より管理の実用性、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。実際に 1F 事故後に放射性セシウムを代表核種とする管理体制が敷かれたが、事故の特徴も影響し、効率的に作用していると考えられる。

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。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。事故等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。そのためには、平常時より汚染の可能性のある核種およびその量を幅広く想定し、モニタリング手法を用意しておくことが重要と考えられる。

E. 研究発表

なし

F. 知的財産権の出願・登録状況

なし

表1 検討核種一覧 (1/4)

通し 番号	核種	*1		*2		*3		*4		*5 日本 OIL6	*6 参考 資料	*7 SGS-2 OIL6 /WHO	*8 半減期 (日)	*9 壊変形式 (%)	*10 生成核種と その壊変形式	*11 放射平衡系列 (割合%) [半減期]	*12			*13 測定対象 核種	*14 No29 記載			
		WHO飲料水GL			GSG-2 OIL6			CODEX一般規格									1核あたりの放射線種ごとの 総エネルギー (keV)							
		番号	Bq/L	g/L	番号	Bq/kg	番号	Bq/kg	α								β	γ&X						
1	H-3	1	10000	2.8E-11	1	200000	41	1000/10000				20	4.5E+03	β-	100	He-3	-	0.0	5.7	0.0	β	○		
2	Be-7	2	10000	7.7E-13	2	700000						70	5.3E+01	ec	100	Li-7	-					γ	○	
3	C-14	3	100	6.0E-10	5	10000	42	1000/10000				100	2.1E+06	β-	100	N-14	-	0.0	49.5	0.0	β	○		
4	Na-22	4	100	4.3E-13	7	2000						20	9.5E+02	ec β+	100	Ne-22	-	0.0	195.2	2197.7	γ	○		
5	P-32	5	100	9.4E-15	13	20000						200	1.4E+01	β-	100	S-32	-	0.0	695.0	1.2	β	○		
6	P-33	6	1000	1.7E-13	14	100000						100	2.5E+01	β-	100	S-33	-	0.0	76.4	0.0	β	○		
7	S-35	7	100	6.3E-14	15	10000	31	1000/1000				100	8.7E+01	β-	100	Cl-35	-	0.0	48.8	0.0	β	○		
8	Cl-36	8	100	8.2E-08	16	3000						30	1.1E+08	β-	98	Ar-36	-					β	○	
8		8											1.1E+08	ec β+	1.9	S-36	-							
9	Ca-45	9	100	1.5E-13	22	8000						80	1.6E+02	β-	100	Sc-45	-	0.0	76.9	0.0	β	○		
10	Ca-47	10	100	4.4E-15	23	50000						500	4.5E+00	β-	100	Sc-47 β-100%	Sc-47 (3.8)[3.3d]	0.0	398.7	948.6	γ	○		
11	Sc-46	11	100	8.0E-14	25	8000						80	8.4E+01	β-	100	Ti-46	-	0.0	111.8	2009.6	γ	○		
12	Sc-47	12	100	3.3E-15	26	40000						4000	3.3E+00	β-	100	Ti-47	-					γ	○	
13	Sc-48	13	100	1.8E-15	27	300000						3000	1.8E+00	β-	100	Ti-48	-	0.0	220.4	3353.0	γ	○		
14	V-48	14	100	1.6E-14	29	30000						300	1.6E+01	ec β+	100	Ti-48	-					γ	○	
15	Cr-51	15	10000	2.9E-12	31	800000						80	2.8E+01	ec	100	V-51	-	0.0	0.0	33.0	γ'	○		
16	Mn-52	16	100	6.0E-15	32	100000						1000	5.6E+00	ec β+	100	Cr-52	-					γ	○	
17	Mn-53	17	10000	1.5E-04	33	90000						9	1.4E+09	ec	100	Cr-53	-	0.0	0.0	1.5	-	γ	○	
18	Mn-54	18	100	3.5E-13	34	9000						90	3.1E+02	ec β+	100	Cr-54	-					γ	○	
19	Fe-55	19	1000	1.1E-11	37	10000						10	1.0E+03	ec	100	Mn-55	-	0.0	0.0	1.7	-	γ	○	
20	Fe-59	20	100	5.4E-14	38	9000						90	4.4E+01	β-	100	Co-59	-	0.0	117.5	1188.6	γ	○		
21	Co-56	21	100	8.9E-14	41	4000						40	7.7E+01	ec β+	100	Fe-56	-					γ	○	
22	Co-57	22	1000	3.2E-12	42	20000						20	2.7E+02	ec	100	Fe-57	-	0.0	0.0	125.4	γ	○		
23	Co-58	23	100	8.5E-14	43	20000						51	200	7.1E+01	ec β+	100	Fe-58	-					γ	○
24	Co-60	24	100	2.4E-12	45	800	32	1000/1000				52	8	1.9E+03	β-	100	Ni-60	-	0.0	96.4	2503.9	γ	○	
25	Ni-57	25	1000	1.7E-14	46	60000						60	1.5E+00	ec β+	100	Co-57	ec 100%	0.0	154.5	1940.0	γ	○		
26	Ni-63	26	1000	4.8E-10	47	20000						20	3.7E+04	β-	100	Cu-63	-	0.0	17.4	0.0	β	○		
27	Zn-65	27	100	3.3E-13	51	2000						20	2.4E+02	ec β+	100	Cu-65	-					γ	○	
28	Ge-71	28	10000	1.7E-12	58	5000000						500	1.1E+01	ec	100	Ga-71	-	0.0	0.0	4.3	-	γ	○	
29	As-73	29	1000	1.2E-12	61	30000						30	8.0E+01	ec	100	Ge-73	-	0.0	0.0	18.0	-	γ	○	
30	As-74	30	100	2.7E-14	62	30000						300	1.8E+01	ec β+	66	Ge-74	-					γ	○	
30	As-74	30		0.0E+00									1.8E+01	β-	34	Se-74	-	0.0	136.1	97.9	γ	○		
31	As-76	31	100	1.7E-15	63	400000						4000	1.1E+00	β-	100	Se-76	-	0.0	1064.6	418.9	γ	○		
32	As-77	32	1000	2.6E-14	64	1000000						1000	1.6E+00	β-	100	Se-77	-	0.0	225.5	8.5	γ'	○		
33	Se-75	33	100	1.9E-13	65	4000						40	1.2E+02	ec	100	As-75	-	0.0	0.0	389.4	γ	○		
34	Br-82	34	100	2.5E-15	69	1000000						10000	1.5E+00	β-	100	Kr-82	-					γ	○	
35	Rb-86	35	100	3.3E-14	73	10000						31	100	1.9E+01	β-	99.99	Sr-86	-	0.0	668.9	94.2	γ'	○	
36	Sr-85	36	100	1.1E-13	76	30000						300	6.5E+01	ec	100	Rb-85	-	0.0	0.0	500.2	γ	○		
37	Sr-89	37	100	9.3E-14	79	6000	33	1000/1000	23	41	60	5.1E+01	β-	100	Y-89	-	0.0	587.1	1.0	β	○			
38	Sr-90	38	10	2.0E-12	80	200	21	100/100	24	42	20	1.1E+00	β-	100	Y-90 β-100%	Y-90 [2.7d]	0.0	195.8	0.1	β	○			
39	Y-90	39	100	5.0E-15	85	90000						61	900	2.7E+00	β-	100	Zr-90	-	0.0	933.6	2.0	β	○	
40	Y-91	40	100	1.1E-13	86	5000						62	50	5.9E+01	β-	100	Zr-91	-	0.0	603.0	4.1	γ'	○	
41	Zr-93	41	100	1.1E-06	91	20000						200	5.9E+08	β-	100	Nb-93	-					β	○	
42	Zr-95	42	100	1.3E-13	92	6000						63	60	6.4E+01	β-	100	Nb-95 β-100%	Nb-95 (2.2)[35d]	0.0	117.0	732.9	γ	○	
43	Nb-93m	43	1000	1.1E-10	94	20000						20	5.9E+03	IT	100	Nb-93	-	0.0	0.0	2.0	-	γ	○	
44	Nb-94	44	100	1.4E-08	95	2000						20	7.4E+06	β-	100	Mo-94	-	0.0	145.8	1573.8	γ	○		
45	Nb-95	45	100	6.9E-14	96	50000						65	500	3.5E+01	β-	100	Mo-95	-	0.0	43.4	764.5	γ	○	
46	Mo-93	46	100	2.8E-09	98	3000						30	1.5E+06	ec	100	Nb-93	-	0.0	0.0	12.6	-	γ	○	
47	Mo-99	47	100	5.6E-15	99	500000						53	5000	2.7E+00	β-	100	Tc-99 β-100%	Tc-99m (0.96)[0.25d]	0.0	389.6	143.5	γ	○	
48	Tc-96	48	100	8.5E-15	101	200000						2000	4.3E+00	ec β+	100	Mo-96	-					γ	○	
49	Tc-97	49	1000	3.1E-05	103	40000						40	1.5E+09	ec	100	Mo-97	-	0.0	0.0	11.8	-	γ	○	
50	Tc-97m	50	100	1.8E-13	104	20000						200	9.1E+01	IT	96.1	Tc-97	ec 100%	0.0	0.0	9.6	γ	○		
50		50											9.1E+01	ec	3.94	Mo-97	-	0.0	0.0	0.5	-	γ	○	
51	Tc-99	51	100	1.6E-07	106	4000	43	1000/10000				40	7.7E+07	β-	100	Ru-99	-	0.0	84.6	0.0	β	○		
52	Ru-97	52	1000	5.7E-14	108	2000000						2000	2.8E+00	ec β+	100	Tc-97	ec 100%					γ	○	
53	Ru-103	53	100	8.4E-14	109	30000	34	1000/1000				55	300	3.9E+01	β-	100	Rh-103	-	0.0	63.6	497.6	γ	○	
54	Ru-106	54	10	8.2E-14	111	600	22	100/100				57	60	3.7E+02	β-	100	Rh-106 β-100%	Rh-106 [36a]	0.0	10.0	0.0	γ'	○	
54	Rh-106													3.4E-04	β-	100	Pd-106	-	0.0	1410.0	210.0	γ	○	
55	Rh-105	55	1000	3.2E-14	117	100000						58	1000	1.5E+00	β-	100	Pd-105	-	0.0	152.2	77.4	γ	○	
56	Pd-103	56	1000	3.6E-13	118	20000						200	1.7E+01	ec	100	Rh-103	-	0.0	0.0	18.3	-	γ	○	
57	Ag-105	57	100	9.0E-14	121	50000						500	4.1E+01	ec β+	100	Pd-105	-					γ	○	
58	Ag-110m	58	100	5.7E-13	123	2000						20	2.5E+02	β-	98.7	Cd-110	-	0.0	67.0	2798.4	γ	○		
58		58												2.5E+02	IT	1.3	Ag-110 β-99.70%							
59	Ag-111	59	100	1.7E-14	124	70000						700	7.5E+00	β-	100	Cd-111	-	0.0	350.3	26.6	γ'	○		
60	Cd-109	60	100	1.0E-12	125	3000						30	4.6E+02	ec	100	Ag-109	-	0.0	0.0	26.6	γ'	○		
61	Cd-115	61	100	5.3E-15	127	200000						2000	2.2E+00	β-	100	In-115 β-100%	In-115m (1.1)[4.5h]	0.0	317.2	195.5	γ	○		
62	Cd-115m	62	100	1.1E-13	128	6000						60	4.5E+01	β-	100	In-115 β-100%	[4.41x10 ¹⁴ y]	0.0	604.4	33.9	γ'	○		
63	In-111	63	1000	6.4E-14	129	1000000						1000	2.8E+00	ec	100	Cd-111	-	0.0	0.0	405.9	γ	○		
64	In-114m	64	100	1.2E-13	131	3000						30	5.0E+01	IT	96.8</									

表1 検討核種一覧 (2/4)

通し 番号	核種	WHO飲料水GL			GSG-2 OIL6		CODEX一般規格		日本 OIL6	参考 資料	SGS-2 /WHO	半減期 (日)	核変形式 (%)	生成核種と その核変形式	放射平衡系列 (割合%)【半減期】	1歳あたりの放射線量ごとの 総エネルギー (keV)			測定対象 核種	No.29 記載の 有無				
		番号	Bq/L	g/L	番号	Bq/kg	番号	Bq/kg								α	β	γ & X						
73	1 Te-129	73	1000	1.3E-15	150	200000000				25	200000	4.8E-02	β-	100	1-129	β-100% [1.57 x 10 ¹¹ y]	0.0	524.0	63.1	γ'	○			
74	1 Te-129m	74	100	9.0E-14	151	6000				26	60	3.4E+01	IT	64	Te-129	β-100%	0.0	0.0	8.1	γ'	○			
74	2 Te-129m	74	100	0.0E+00								3.4E+01	β-	36	1-129	β-100% [1.6 x 10 ¹¹ y]	0.0	206.5	29.0	γ'	○			
75	1 Te-131	75	1000	4.7E-16	152	400000000					400000	1.7E-02	β-	100	1-131	β-100%	0.0	690.0	420.8	γ				
76	1 Te-131m	76	100	3.8E-15	153	300000				27	3000	1.4E+00	β-	74.1	1-131	β-100%	0.0	102.4	1366.8	γ	○			
76	2											1.4E+00	IT	25.9	Te-131	β-100%								
77	1 Te-132	77	100	8.7E-15	154	50000			16	28	500	3.2E+00	β-	100	1-132	β-100%	0.0	59.8	234.0	γ	○			
78	1 Te-125	78	10	1.5E-14	157	1000						5.9E+01	ec	100	Te-125	-	0.0	0.0	41.8	-				
79	1 Te-126	79	10	3.4E-15	158	2000						200	1.3E+01	ec β+	52.7	Te-126	-				γ			
79	2 Te-126	79	100	0.0E+00								1.3E+01	β-	47.3	Xe-126	-	0.0	149.4	159.2	γ				
80	1 Te-129	80	1	1.5E-07	159	-	23	100/100				5.7E+00	β-	100	Xe-129	-	0.0	40.0	24.1	-				
81	1 Te-131	81	10	2.2E-15	160	3000	24	100/100	11	11	300	8.0E+00	β-	100	Xe-131	-	0.0	181.9	382.0	γ	○			
82	1 Cs-129	82	1000	3.6E-14	165	10000000						10000	1.3E+00	ec β+	100	Xe-129	-				γ			
83	1 Cs-131	83	1000	2.6E-13	166	2000000						2000	9.7E+00	ec	100	Xe-131	-	0.0	0.0	22.9	-			
84	1 Cs-132	84	100	1.8E-14	167	400000						4000	6.5E+00	ec β+	98.1	Xe-132	-				γ			
84	2											6.5E+00	β-	1.87	Ba-132	-								
85	1 Cs-134	85	10	2.1E-13	168	1000	35	1000/1000	21	32	100	7.5E+02	β-	100	Ba-134	-	0.0	157.3	1554.5	γ	○			
86	1 Cs-135	86	100	2.3E-06	170	9000						90	8.4E+00	β-	100	Ba-135	-	0.0	75.7	0.0	β			
87	1 Cs-136	87	100	3.7E-14	171	40000						33	1.3E+01	β-	100	Ba-136	-	0.0	195.5	2162.2	γ	○		
88	1 Cs-137	88	10	3.1E-12	172	2000	36	1000/1000	22	34	200	1.1E+04	β-	100	Ba-137	-	0.0	187.1	565.5	γ	○			
89	1 Ba-131	89	1000	3.1E-13	173	1000000						100	1.2E+01	ec β+	100	Cs-131	ec 100%				γ			
90	1 Ba-140	90	100	3.7E-14	176	10000						44	1.3E+01	β-	100	La-140	β-100%				γ	○		
91	1 La-140	91	100	4.9E-15	178	200000						66	2.000	1.7E+00	β-	100	Ce-140	-	0.0	526.4	2309.1	γ	○	
92	1 Ce-139	92	1000	4.0E-12	179	30000						30	1.4E+02	ec	100	La-139	-	0.0	0.0	160.2	γ	○		
93	1 Ce-141	93	100	9.5E-14	180	30000						67	3.3E+01	β-	100	Pr-141	-	0.0	145.2	76.9	γ	○		
94	1 Ce-143	94	100	4.1E-15	181	500000						68	5.000	1.4E+00	β-	100	Pr-143	β-100%	0.0	401.5	279.1	γ	○	
95	1 Ce-144	95	10	8.5E-14	182	800	37	1000/1000				69	8.0	2.8E+02	β-	100	Pr-144	β-100%		82.1	19.5	γ	○	
95	11 Pr-144												1.2E-02	β-	100	Nd-144	β-100%	0.0	1208.483	31.98	γ'			
96	1 Pr-143	96	100	4.0E-14	184	40000						70	4.00	1.4E+01	β-	100	Nd-143	-	0.0	315.1	0.3	β		
97	1 Nd-147	97	100	3.3E-14	185	60000						71	6.00	1.1E+01	β-	100	Pm-147	β-100%	0.0	232.0	144.4	γ	○	
98	1 Pm-147	98	1000	2.9E-11	190	10000						10	9.6E+02	β-	100	Sm-147	α 100%	0.0	61.9	0.0	β			
99	1 Pm-149	99	100	6.8E-15	192	300000						3000	2.2E+00	β-	100	Sm-149	-	0.0	363.1	12.3	γ'	○		
100	1 Sm-151	100	1000	1.0E-09	196	30000						30	3.3E+04	β-	100	Eu-151	-	0.0	19.6	0.0	β			
101	1 Sm-153	101	100	6.1E-15	197	500000						5000	1.9E+00	β-	100	Eu-153	-	0.0	223.9	62.2	γ	○		
102	1 Eu-152	102	100	1.6E-11	203	3000						30	4.9E+03	ec β+	72.1	Sm-152	-				γ	○		
102	2 Eu-152	102		0.0E+00									4.9E+03	β-	27.9	Gd-152	α 100%	0.0	83.1	259.9	γ	○		
103	1 Eu-154	103	100	1.0E-11	205	2000						20	3.1E+03	β-	99.98	Gd-154	-	0.0	221.3	1243.1	γ	○		
104	1 Eu-155	104	1000	5.6E-11	206	10000						10	1.7E+03	β-	100	Gd-155	-	0.0	46.9	61.3	γ	○		
105	1 Gd-153	105	1000	7.6E-12	210	20000						20	2.4E+02	ec	100	Eu-153	-	0.0	0.0	105.2	γ			
106	1 Tb-160	106	100	2.4E-13	214	7000						70	7.2E+01	β-	100	Dy-160	-	0.0	210.3	1126.6	γ			
107	1 Er-169	107	1000	3.3E-13	220	200000						200	9.4E+00	β-	100	Tm-169	-	0.0	99.8	0.1	β			
108	1 Tm-171	108	1000	2.5E-11	224	30000						30	7.0E+02	β-	100	Yb-171	-	0.0	24.8	0.6	β			
109	1 Yb-175	109	1000	1.5E-13	226	400000						400	4.2E+00	β-	100	Lu-175	-	0.0	112.7	79.9	γ			
110	1 Ta-182	110	100	4.3E-13	238	5000						50	1.1E+02	β-	100	W-182	-	0.0	127.8	1306.1	γ	○		
111	1 W-181	111	1000	4.5E-12	240	100000						100	1.2E+02	ec	100	Ta-181	-	0.0	0.0	40.3	-			
112	1 W-185	112	1000	2.9E-12	241	20000						20	7.5E+01	β-	100	Re-185	-	0.0	126.5	0.1	β			
113	1 Re-186	113	100	1.4E-14	246	100000						1000	3.7E+00	β-	92.5	Os-186	α 100%	0.0	321.0	16.6	γ'			
113	2												3.7E+00	ec	7.5	W-186	-	0.0	0.0	4.5	-			
114	1 Os-185	114	100	3.6E-13	250	20000						200	9.4E+01	ec	100	Re-185	-	0.0	0.0	689.2	γ			
115	1 Os-191	115	100	6.1E-14	251	80000						800	1.5E+01	β-	100	Ir-191	-				γ			
116	1 Os-193	116	100	5.0E-15	253	700000						7000	1.2E+00	β-	100	Ir-193	-	0.0	354.1	64.6	γ'			
117	1 Ir-190	117	100	4.6E-14	256	60000						600	1.2E+01	ec β+	100	Os-190	-				γ			
118	1 Ir-192	118	100	2.9E-13	257	8000	38	1000/1000				80	7.4E+01	β-	95.2	Pt-192	-	0.0	170.2	785.1	γ	○		
118	2												7.4E+01	ec	4.8	Os-192	-	0.0	0.0	32.1	-			
119	1 Pt-191	119	1000	1.1E-13	260	900000						900	2.8E+00	ec	100	Ir-191	-	0.0	0.0	321.3	γ			
120	1 Pt-193m	120	1000	1.7E-13	262	300000						300	4.3E+00	IT	100	Pt-193	ec 100%				γ'			
121	1 Au-198	121	100	1.1E-14	269	300000						3000	2.7E+00	β-	100	Hg-198	-	0.0	312.5	403.4	γ	○		
122	1 Au-199	122	1000	1.3E-13	270	500000						500	3.1E+00	β-	100	Hg-199	-	0.0	82.3	95.2	γ			
123	1 Hg-197	123	1000	1.1E-13	274	1000000						1000	2.7E+00	ec	100	Au-197	-	0.0	0.0	99.2	γ'			
124	1 Hg-203	124	100	2.0E-13	276	10000						100	4.7E+01	β-	100	Tl-203	-	0.0	57.9	237.9	γ	○		
125	1 Tl-200	125	1000	4.5E-14	277	5000000						5000	1.1E+00	ec β+	100	Hg-200	-				γ			
126	1 Tl-201	126	1000	1.3E-13	278	3000000						3000	3.0E+00	ec	100	Hg-201	-	0.0	0.0	79.2	γ			
127	1 Tl-202	127	1000	5.1E-13	279	200000						200	1.2E+01	ec β+	100	Hg-202	-				γ			
128	1 Tl-204	128	100	5.8E-12	280	3000						30	1.4E+03	β-	97.1	Pb-204	-	0.0	236.9	0.2	β			
128	2												1.4E+03	ec β+	2.9	Hg-204	-							
129	1 Pb-203	129	1000	9.1E-14	283	2000000						2000	2.2E+00	ec	100	Tl-203	-	0.0	0.0	313.6	γ			
130	1 Pb-210	130	0.1	3.5E-14	285	2						20	8.1E+03	β-	100	Bi-210	β-100%	Bi-210, Po-210	U系列12	0.0	6.1	4.4	-	△
130	21 Po-210												1.4E+02	α	100	Pb-206	-		5304.4	0.0	0.0	α		

通し 番号	核種	γ線のエネルギーと放出率						β線の平均エネルギーと放出率		α線のエネルギーと放出率				摂取実効線量係数 Sv/Bq						核種
		γ 1		γ 2		γ 3		エネルギーと放出率		α 1		α 2		乳児	1歳	5歳	10歳	15歳	成人	
		keV	%	keV	%	keV	%	keV	%	keV	%	keV	%							
73	Te-129	459.6	7.7	27.8	16.3	487.4	1.4	546.6	89.0				1.5E-10	4.4E-10	2.1E-10	1.2E-10	8.0E-11	6.3E-11	Te-129	
74	Te-129m	729.6	0.7	105.5	0.1								4.4E-08	2.4E-08	1.2E-08	6.6E-09	3.9E-09	3.0E-09	Te-129m	
74	Te-129m	695.9	3.0	729.6	0.7			609.0	32.0				4.4E-08	2.4E-08	1.2E-08	6.6E-09	3.9E-09	3.0E-09	Te-129m	
75	Te-131	149.7	68.8	452.3	18.2	1147.0	5.0	818.2	59.3				1.0E-10	6.6E-10	3.5E-10	1.9E-10	1.2E-10	8.7E-11	Te-131	
76	Te-131m	773.7	36.8	852.2	19.5	793.8	13.4	159.8	11.9				1.0E-08	1.4E-08	7.8E-09	4.3E-09	2.7E-09	1.9E-09	Te-131m	
76	Te-131m												1.0E-08	1.4E-08	7.8E-09	4.3E-09	2.7E-09	1.9E-09	Te-131m	
77	Te-132	228.2	88.0	49.7	15.0	116.3	2.0	59.8	100.0				3.8E-08	3.0E-08	1.6E-08	8.3E-09	5.3E-09	3.8E-09	Te-132	
78	I-125	35.5	8.7	27.5	73.4								1.2E-08	5.7E-08	4.1E-08	3.1E-08	2.2E-08	1.5E-08	I-125	
79	I-126	666.3	32.9	753.8	4.2								5.1E-07	2.1E-07	1.3E-07	6.8E-08	4.5E-08	2.9E-08	I-126	
79	I-126	388.6	35.6	491.2	2.9			292.5	33.4				5.1E-07	2.1E-07	1.3E-07	6.8E-08	4.5E-08	2.9E-08	I-126	
80	I-129	39.6	7.5					40.0	100.0				2.8E-07	2.2E-07	1.7E-07	1.9E-07	1.4E-07	1.1E-07	I-129	
81	I-131	364.5	81.5	637.0	7.2	284.3	6.1	191.6	89.6				4.8E-07	1.8E-07	1.0E-07	5.2E-08	3.4E-08	2.2E-08	I-131	
82	Cs-129	371.9	30.6	411.5	22.3	548.9	3.4						4.4E-10	3.0E-10	1.7E-10	1.1E-10	7.2E-11	6.0E-11	Cs-129	
83	Cs-131	29.8	39.0										4.6E-10	2.9E-10	1.6E-10	1.0E-10	6.9E-11	5.8E-11	Cs-131	
84	Cs-132	667.7	97.6	630.2	1.0								2.7E-09	1.8E-09	1.1E-09	7.7E-10	5.7E-10	5.0E-10	Cs-132	
84	Cs-132												2.7E-09	1.8E-09	1.1E-09	7.7E-10	5.7E-10	5.0E-10	Cs-132	
85	Cs-134	604.7	97.6	795.9	85.5	802.0	8.7	210.2	70.2				2.6E-08	1.6E-08	1.3E-08	1.4E-08	1.9E-08	1.9E-08	Cs-134	
86	Cs-135							75.7	100.0				3.1E-09	2.3E-09	1.7E-09	1.7E-09	2.0E-09	2.0E-09	Cs-135	
87	Cs-136	818.5	99.7	1048.1	80.0	340.5	46.8	98.8	80.8				1.5E-08	9.5E-09	6.1E-09	4.4E-09	3.4E-09	3.0E-09	Cs-136	
88	Cs-137	661.7	85.1					174.3	94.7				1.1E-08	1.2E-08	9.6E-09	1.0E-08	1.3E-08	1.3E-08	Cs-137	
89	Ba-131	496.3	48.0	123.8	29.8	216.1	20.4						2.2E-09	2.6E-09	1.4E-09	9.4E-10	6.2E-10	4.5E-10	Ba-131	
90	Ba-140	537.3	24.4	162.7	6.2	304.8	4.3	344.6	40.0				8.2E-08	1.8E-08	9.2E-09	5.8E-09	3.7E-09	2.6E-09	Ba-140	
91	La-140	1596.2	95.4	487.0	45.5	815.8	23.3	487.4	43.9				9.0E-08	1.3E-08	6.8E-09	4.2E-09	2.5E-09	2.0E-09	La-140	
92	Ce-139	165.9	(79.9)										2.6E-09	1.6E-09	8.6E-10	5.4E-10	3.3E-10	2.6E-10	Ce-139	
93	Ce-141	145.4	48.4					129.7	69.7				7.1E-09	5.1E-09	2.6E-09	1.5E-09	8.8E-10	7.1E-10	Ce-141	
94	Ce-143	293.3	42.8	57.4	11.7	664.8	5.7	387.4	48.2				1.2E-08	8.0E-09	4.1E-09	2.4E-09	1.4E-09	1.1E-09	Ce-143	
95	Ce-144	133.5	11.1	80.1	1.4			91.1	76.5				9.6E-08	3.9E-08	1.9E-08	1.1E-08	6.5E-09	5.2E-09	Ce-144	
95	Pr-144	696.510	1.3	1489.2	0.3			1222.0	97.9										Pr-144	
96	Pr-143	742.1	0.0					315.1	100.0				1.4E-08	8.7E-09	4.3E-09	2.6E-09	1.5E-09	1.2E-09	Pr-143	
97	Nd-147	531.0	13.4	91.1	28.1	319.4	2.1	264.1	80.2				9.2E-08	7.8E-09	3.9E-09	2.3E-09	1.3E-09	1.1E-09	Nd-147	
98	Pm-147	121.2	0.0	40.1	0.0	40.1	0.0	61.9	100.0				2.6E-09	1.9E-09	9.6E-10	5.7E-10	3.2E-10	2.6E-10	Pm-147	
99	Pm-149	286.0	3.1	859.5	0.1			369.1	95.9				6.2E-08	7.4E-09	3.7E-09	2.2E-09	1.2E-09	9.5E-10	Pm-149	
100	Sm-151	21.5	0.0					19.7	99.1				1.5E-09	6.4E-10	3.3E-10	2.0E-10	1.2E-10	9.8E-11	Sm-151	
101	Sm-153	103.2	29.3	69.7	4.7			225.3	49.4				3.4E-09	5.4E-09	2.7E-09	1.6E-09	9.2E-10	7.4E-10	Sm-153	
102	Eu-152	121.8	28.5	1408.0	20.9	964.1	14.5						6.6E-08	7.4E-09	4.1E-09	2.6E-09	1.7E-09	1.4E-09	Eu-152	
102	Eu-152	344.3	26.6	778.9	12.9	411.1	2.2	221.7	13.7				6.6E-08	7.4E-09	4.1E-09	2.6E-09	1.7E-09	1.4E-09	Eu-152	
103	Eu-154	123.1	40.4	1274.4	34.8	723.3	20.1	176.4	36.3				5.5E-08	1.2E-08	6.5E-09	4.1E-09	2.5E-09	2.0E-09	Eu-154	
104	Eu-155	105.3	21.1	86.5	30.7			39.2	47.0				2.3E-09	2.2E-09	1.1E-09	6.8E-10	4.0E-10	3.2E-10	Eu-155	
105	Gd-153	103.2	21.1	97.4	29.0	68.7	2.4						1.9E-09	1.8E-09	9.4E-10	5.8E-10	3.4E-10	2.7E-10	Gd-153	
106	Tb-160	879.4	30.1	298.8	26.1	968.2	25.1	175.7	45.4				9.6E-08	1.0E-08	5.4E-09	3.3E-09	2.0E-09	1.6E-09	Tb-160	
107	Tb-169	8.4	0.2	50.7	0.0	50.7	0.0	101.0	55.0				2.4E-09	2.8E-09	1.4E-09	8.2E-10	4.7E-10	3.7E-10	Tb-169	
108	Tm-171	66.7	0.1					25.2	98.0				1.5E-09	7.8E-10	3.9E-10	2.3E-10	1.3E-10	1.1E-10	Tm-171	
109	Yb-175	396.3	13.1	282.5	6.1	113.8	3.9	139.9	72.9				2.0E-09	3.2E-09	1.6E-09	9.5E-10	5.4E-10	4.4E-10	Yb-175	
110	Ta-182	1121.3	35.2	87.7	42.9	1221.4	27.2	198.3	43.2				1.4E-08	9.4E-09	5.0E-09	3.1E-09	1.9E-09	1.5E-09	Ta-182	
111	W-181	6.2	1.0	57.5	33.0								1.3E-10	4.7E-10	2.5E-10	1.6E-10	9.5E-11	7.6E-11	W-181	
112	W-185	125.4	0.0	61.1	0.0	61.1	0.0	126.9	99.9				6.4E-09	3.3E-09	1.6E-09	9.7E-10	5.5E-10	4.4E-10	W-185	
113	Re-186	137.2	9.5					359.2	71.0				1.9E-08	1.1E-08	5.5E-09	3.0E-09	1.9E-09	1.5E-09	Re-186	
113	Re-186												1.9E-08	1.1E-08	5.5E-09	3.0E-09	1.9E-09	1.5E-09	Re-186	
114	Os-185	646.1	78.0	874.8	6.3	880.5	5.2						1.8E-09	2.6E-09	1.5E-09	9.8E-10	6.5E-10	5.1E-10	Os-185	
115	Os-191	129.4	26.5					37.5	100.0				1.3E-09	4.1E-09	2.1E-09	1.2E-09	7.0E-10	5.1E-10	Os-191	
116	Os-193	460.5	3.9	138.9	3.8	73.0	3.1	387.0	59.0				4.3E-09	6.0E-09	3.0E-09	1.8E-09	1.0E-09	8.1E-10	Os-193	
117	Ir-190	186.7	52.0	805.1	39.9	518.6	34.0						1.0E-08	7.1E-09	3.9E-09	2.5E-09	1.6E-09	1.2E-09	Ir-190	
118	Ir-192	316.5	82.9	468.1	47.8	308.5	29.7	208.0	48.0				1.3E-08	8.7E-09	4.6E-09	2.8E-09	1.7E-09	1.4E-09	Ir-192	
118	Ir-192												1.3E-08	8.7E-09	4.6E-09	2.8E-09	1.7E-09	1.4E-09	Ir-192	
119	Pt-191	538.9	15.9	409.4	8.8	359.9	6.4						1.1E-09	2.1E-09	1.1E-09	6.9E-10	4.2E-10	3.4E-10	Pt-191	
120	Pt-193m	135.5	0.1	12.6	0.7								4.2E-09	3.4E-09	1.7E-09	9.9E-10	5.6E-10	4.5E-10	Pt-193m	
121	Au-198	411.8	95.6					314.8	99.0				5.0E-08	7.2E-09	3.7E-09	2.2E-09	1.3E-09	1.0E-09	Au-198	
122	Au-199	158.4	40.0	208.2	8.7			82.3	72.0				2.5E-09	3.1E-09	1.6E-09	9.5E-10	5.5E-10	4.4E-10	Au-199	
123	Hg-197	191.4	0.6	77.4	18.7	268.7	0.0						6.5E-09	1.6E-09	8.3E-10	5.0E-10	2.9E-10	2.3E-10	Hg-197	
124	Hg-203	278.2	81.6					57.9	100.0				1.5E-08	1.1E-08	5.7E-09	3.6E-09	2.3E-09	1.9E-09	Hg-203	
125	Tl-200	367.9	87.0	1205.8	30.0	579.3	13.7						1.3E-09	9.1E-10	5.3E-10	3.5E-10	2.4E-10	2.0E-10	Tl-200	
126	Tl-201	167.4	10.0	135.3	2.6								5.4E-10	5.5E-10	2.9E-10	1.8E-10	1.2E-10	9.5E-11	Tl-201	
127	Tl-202	436.5	91.5	920.3	0.6								2.9E-09	2.1E-09	1.2E-09	7.9E-10	5.4E-10	4.5E-10	Tl-202	
128	Tl-204							244.1	97.1				7.3E-08	8.5E-09	4.2E-09	2.5E-09	1.5E-09	1.2E-09	Tl-204	
128	Tl-204												7.3E-08	8.5E-09	4.2E-09	2.5E-09	1.5E-09	1.2E-09	Tl-204	
129	Pb-203	279.2	80.9	401.3	3.4								5.6E-09	1.3E-09	6.8E-10	4.3E-10	2.7E-10	2.4E-10	Pb-203	
130	Pb-210	46.5	4.3					4.2	84.0				2.4E-06	3.6E-06	2.2E-06	1.9E-06	1.9E-06	6.9E-07	Pb-210	
130	Po-210	803.1	0.0							5304.3	100.0								Po-210	
131	Bi-206	803.1	99.0	881.0	66.2	516.2	40.8													

通し 番号	核種	γ線のエネルギーと放出率						β線の平均エネルギーと放出率		α線のエネルギーと放出率				摂取実効線量係数 Sv/Bq					核種	
		γ 1		γ 2		γ 3		keV	%	α 1		α 2		乳児	1歳	5歳	10歳	15歳		成人
		keV	%	keV	%	keV	%			keV	%	keV	%							
136	Ra-224	241.0	4.1	10.1	0.371					5685.4	94.9	5448.6	5.1	2.7E-06	6.6E-07	3.5E-07	2.6E-07	2.0E-07	6.5E-08	Ra-224
136	Rn-220																			Rn-220
136	Po-216																			Po-216
136	Pb-212	288.6	43.6	300.1	3.3															Pb-212
136	Bi-212	727.3	6.7	1620.5	1.5															Bi-212
136	Bi-212	389	1.1	453.0	0.4															Bi-212
136	Po-212 (0.65)																			Po-212 (0.65)
136	Tl-208 (0.3)	2614.5	99.8	583.2	85.0	510.8	22.6													Tl-208 (0.3)
137	Ra-225	40.0	30.0					830	69.5					2.1E-06	1.2E-06	6.1E-07	5.0E-07	4.4E-07	9.9E-08	Ra-225
137	Ac-225																			Ac-225
137	Fr-221																			Fr-221
137	At-217																			At-217
137	Bi-213	440.5	25.9	292.8	0.4	807.4	0.3													Bi-213
137	Bi-213																			Bi-213
137	Po-213 (0.57917)																			Po-213 (0.57917)
137	Tl-209 (0.6)	660.0	97.0	355.4	0.7															Tl-209 (0.6)
137	Pb-209																			Pb-209
137	Bi-209																			Bi-209
138	Ra-226	186.2	3.6	10.1	0.8					4784.3	93.8	4601.0	6.2	5.7E-06	9.6E-07	6.2E-07	8.0E-07	1.5E-06	2.8E-07	Ra-226
138	Rn-222																			Rn-222
138	Po-218																			Po-218
138	Pb-214	351.9	35.6	295.2	18.4	242.0	7.3													Pb-214
138	Bi-214	609.3	45.5	1764.5	15.3	1120.3	14.9													Bi-214
138	Po-214																			Po-214
139	Ra-228	13.5	1.600					9.9	4.0					3.0E-05	5.7E-06	3.4E-06	3.9E-06	5.3E-06	6.9E-07	Ra-228
139	Ac-228	969.0	15.8	338.3	11.3															Ac-228
140	Th-227	236.0	12.9	50.1	8.4	256.2	7.0			6038.0	24.2	5977.7	23.5	1.0E-07	7.0E-08	3.6E-08	2.3E-08	1.5E-08	8.8E-09	Th-227
141	Th-228	216.0	0.2	84.4	1.2					5423.2	73.4	5340.4	26.0	3.7E-06	3.7E-07	2.2E-07	1.4E-07	9.4E-08	7.2E-08	Th-228
142	Th-229	193.5	4.4	11.1	12.3	210.9	2.8			4845.3	56.2	4901.0	10.2	2.1E-05	1.0E-06	7.8E-07	6.2E-07	5.3E-07	4.9E-07	Th-229
143	Th-230	67.7	0.4	143.9	0.0					4687.0	76.3	4620.5	23.4	4.1E-06	4.1E-07	3.1E-07	2.4E-07	2.2E-07	2.1E-07	Th-230
144	Th-231	84.2	6.6	25.6	14.1	89.95.2	1.00.6	80.1	40.0					7.9E-09	2.5E-09	1.2E-09	7.4E-10	4.2E-10	3.4E-10	Th-231
145	Th-232	63.8	0.3	140.9	0.0					4012.3	78.2	3947.2	21.7	1.6E-06	4.5E-07	3.5E-07	2.9E-07	2.5E-07	2.3E-07	Th-232
146	Th-234	92.4	2.1	92.8	2.1	63.29.2	3.7.4	53.6	78.0					6.0E-08	2.5E-08	1.3E-08	7.4E-09	4.2E-09	3.4E-09	Th-234
146	Pa-234m	1001.0	0.8	765.4	0.3	742.8	0.1													Pa-234m
146	Pa-234	131.3	18.9	946.0	14.0	883.2	10.0													Pa-234
147	Pa-230	851.9	30.0	918.5	8.3	454.9	6.8							4.6E-08	5.7E-09	3.1E-09	1.9E-09	1.1E-09	9.2E-10	Pa-230
147														4.6E-08	5.7E-09	3.1E-09	1.9E-09	1.1E-09	9.2E-10	
148	Pa-231	300.1	2.4	27.4	10.5	302.667.9	2.3.3			5013.8	25.4	4951.3	22.8	1.3E-05	1.3E-06	1.1E-06	9.2E-07	8.0E-07	7.1E-07	Pa-231
149	Pa-233	311.9	38.5	300.1	6.6	340.5	4.5	40.9	28.7					1.7E-09	6.2E-09	3.2E-09	1.9E-09	1.1E-09	8.7E-10	Pa-233
150	U-230	72.2	0.6	154.2	0.1	230.37.5				5888.4	67.4	5817.5	32.0	9.9E-07	3.0E-07	1.5E-07	1.0E-07	6.6E-08	5.6E-08	U-230
150	Th-226																			Th-226
150	Ra-222																			Ra-222
150	Rn-218																			Rn-218
150	Po-214																			Po-214
151	U-231	84.2	7.3	102.3	1.3	25.7	14.6							5.1E-09	2.0E-09	1.0E-09	6.1E-10	3.6E-10	2.8E-10	U-231
152	U-232	57.8	0.2	11.1	10.9					5320.1	68.2	5263.4	31.6	7.5E-06	8.2E-07	5.8E-07	5.7E-07	6.4E-07	3.3E-07	U-232
153	U-233	42.4	0.1	97.1	0.0					4824.2	84.3	4783.5	13.2	1.8E-07	1.4E-07	9.2E-08	7.8E-08	7.8E-08	5.1E-08	U-233
154	U-234	53.2	0.1	455.0	0.0					4774.6	71.4	4722.4	28.4	1.7E-07	1.3E-07	8.8E-08	7.4E-08	7.4E-08	4.9E-08	U-234
155	U-235	185.7	57.0	143.8	11.0	163.4	5.1			4395.4	57.7	4364.3	18.9	1.5E-07	1.3E-07	8.5E-08	7.1E-08	7.0E-08	4.7E-08	U-235
156	U-236	49.5	0.1	112.8	0.0					4494.0	73.8	4445.0	25.9	1.5E-07	1.3E-07	8.4E-08	7.0E-08	7.0E-08	4.7E-08	U-236
157	U-237	208.0	21.2	59.5	34.5	164.61.2	1.9	64.5	51.0					1.3E-09	5.4E-09	2.8E-09	1.6E-09	9.5E-10	7.6E-10	U-237
158	U-238	49.6	0.1	113.5	0.0					4198.0	79.0	4151.0	20.9	1.4E-07	1.2E-07	8.0E-08	6.8E-08	6.7E-08	4.5E-08	U-238
159	Np-237	86.5	12.4	29.4	14.1	94.64.5	0.615.2.3			4788.0	47.6	4771.4	23.2	2.0E-06	2.1E-07	1.4E-07	1.1E-07	1.1E-07	1.1E-07	Np-237
160	Np-239	106.1	25.3	277.6	14.5	228.2	10.7	125.6	45.0					8.9E-09	5.7E-09	2.9E-09	1.7E-09	1.0E-09	8.0E-10	Np-239
161	Pu-236	166.1	0.0	643.9	0.0					5767.5	69.1	5720.9	30.8	2.1E-06	2.2E-07	1.4E-07	1.0E-07	8.5E-08	8.7E-08	Pu-236
162	Pu-237	59.5	3.3	26.3	0.2									4.1E-09	6.9E-10	3.6E-10	2.2E-10	1.3E-10	1.0E-10	Pu-237
163	Pu-238	43.5	0.0	11.6	10.2					5499.0	70.9	5456.3	29.0	5.0E-06	4.0E-07	3.1E-07	2.4E-07	2.2E-07	2.3E-07	Pu-238
164	Pu-239	13.0	0.0	51.6	0.0					5156.6	70.8	5144.3	17.1	5.2E-06	4.2E-07	3.3E-07	2.7E-07	2.4E-07	2.5E-07	Pu-239
165	Pu-240	160.3	0.0	212.5	0.0					5168.2	72.8	5123.7	27.1	5.2E-06	4.2E-07	3.3E-07	2.7E-07	2.4E-07	2.5E-07	Pu-240
166	Pu-241							5.2	100.0					8.6E-08	5.7E-09	5.5E-09	5.1E-09	4.8E-09	4.8E-09	Pu-241
167	Pu-242	44.9	0.0	103.5	0.0					4902.3	76.5	4858.2	23.4	5.0E-06	4.0E-07	3.2E-07	2.6E-07	2.3E-07	2.4E-07	Pu-242
168	Pu-244	44.0	0.0	11.6	5.7					4589.0	80.5	4546.0	19.4	5.0E-06	4.1E-07	3.2E-07	2.6E-07	2.3E-07	2.4E-07	Pu-244
168	U-240	44.1	1.1	189.7	0.2			94.1	≈ 25											U-240
168	Np-240	566.3	27.6	973.9	25.9															Np-240
168	Np-240m	554.6	20.9	597.4	11.7															Np-240m

表1 検討核種一覧 (4/4)

通し 番号	核種	WHO飲料水GL		GSG-2 OIL6		CODEX一般規格		日本 OIL6 資料	参考 資料 /WHO	SGS-2 OIL6	半減期 (日)	壊変形式 (%)	生成核種と その壊変形式	放射平衡系列 (割合%) [半減期]	1壊変あたりの放射線種ごとの 総エネルギー (keV)			測定対象 線種	No.29 記載の 有無			
		番号	Bq/L	g/L	番号	Bq/kg	番号								Bq/kg	α	β			γ & X		
169	1Am-241	169	1	7.9E-12	333	50	14	1/10		50	1.6E+05	α	100	Np-237	α 100%	5490.0	0.0	27.2	γ'	○		
170	1Am-242	170	1000	3.3E-14						0	6.7E-01	β-	82.7	Cm-242	α 100%	0.0	159.1	2.8	γ'			
170	2Am-242	170		0.0E+00							6.7E-01	ec	17.3	Pu-242	α 100%	0.0	0.0	14.5	γ'			
171	1Am-242m	171	1	2.6E-12	334	50				50	5.2E+04	IT	99.6	Am-242	β- 82.7%ed	Am-242, Cm-242 (0.83)			-			
172	1Am-243	172	1	1.4E-10	335	50				50	2.7E+06	α	100	Np-239	β- 100%	Np-239	5271.3	0.0	56.6	γ'		
173	1Cm-242	173	10	8.2E-14	340	500			46	78	50	1.6E+02	α	100	Pu-238	α 100%	6103.9	0.0	1.4	α		
174	1Cm-243	174	1	5.3E-13	341	60			47	77	60	1.1E+04	α	99.7	Pu-239	α 100%	5830.9	0.0	124.8	γ		
175	1Cm-244	175	1	3.3E-13	342	70			48	79	70	6.6E+03	α	100	Pu-240	α 100%	5796.4	0.0	1.3	α		
176	1Cm-245	176	1	1.6E-10	343	50				50	3.1E+06	α	100	Pu-241	β- 99.998%		5386.4	0.0	97.4	γ'		
177	1Cm-246	177	1	8.7E-11	344	50				50	1.7E+06	α	99.97	Pu-242	α 100%		5377.4	0.0	0.0	α		
178	1Cm-247	178	1	2.9E-07	345	60				60	5.7E+09	α	100	Pu-243	β- 100%		4948.7	0.0	313.4	γ		
178	21Pu-243	178									2.1E-01	β-	100	Am-243			0.0	160.6	27.1	γ'		
179	1Cm-248	179	0.1	6.5E-10	346	10				100	1.3E+06	α	91.6	Pu-244	α 99.88%		4645.1	0.0	0.0	α		
180	1Bk-249	180	100	1.7E-12	348	10000				100	3.3E+02	β-	99.999	Cf-249	α 100%	0.0	32.4	0.0	β			
181	1Cf-246	181	100	7.6E-15						0	1.5E+00	α	100	Cm-242	α 100%		6745.6	0.0	1.0	α		
182	1Cf-248	182	10	1.7E-13	349	200				20	3.3E+02	α	99.997	Cm-244	α 100%		6249.2	0.0	1.2	α		
183	1Cf-249	183	1	6.6E-12	350	20				20	1.3E+05	α	100	Cm-245	α 100%		5819.7	0.0	326.6	γ		
184	1Cf-250	184	1	2.5E-13	351	40				40	4.8E+03	α	99.92	Cm-246	α 99.97%		6021.3	0.0	0.0	α		
185	1Cf-251	185	1	1.7E-11	352	20				20	3.3E+06	α	≈ 100	Cm-247	α 100%		5786.4	0.0	109.0	γ		
186	1Cf-252	186	1	5.0E-14	353	40				40	9.7E+02	α	96.9	Cm-248	α 91.61%		5884.0	0.0	0.0	α		
187	1Cf-253	187	100	9.3E-14	354	30000				300	1.8E+01	β-	99.7	Es-253	α 100%		0.0	72.0	0.0	β		
188	1Cf-254	188	1	3.2E-15	355	30				30	6.1E+01	SF		Cm-250	-		18.1	0.0	0.0	-		
189	1Es-253	189	10	1.1E-14	356	5000				500	2.0E+01	α	100	Bk-249	β- 99.999%					α		
190	1Es-254	190	10	1.4E-13						0	2.8E+02	α	≈ 100	Bk-250	β- 100%		6400.3	0.0	57.0	γ'		
190	11Bk-250										1.3E-01	β-	100	Cf-250	β- 100%		0.0	263.0	896.9	γ		
191	1Es-254m	191	100	8.6E-15						0	1.6E+00	β-	98	Fm-254	α 99.94%		0.0	192.0	474.7	γ		
201	1Kr-85								1		3.9E+03	β-	100	Rb-85	-		0.0	250.7	2.4	γ'	○	
202	1Kr-85m								2		1.9E-01	β-	78.8	Rb-85	-		0.0	228.7	114.7	γ	○	
202	2Kr-85m										1.9E-01	IT	21.2	Kr-85	β- 100%		0.0	0.0	43.3	γ		
203	1Kr-87								3		5.3E-02	β-	100	Rb-87	β- 100%		0.0	1330.9	793.0	γ	○	
204	1Kr-88								4		1.2E-01	β-	100	Rb-88	β- 100%		0.0	365.3	1950.5	γ	○	
204	21Rb-88										1.2E-02	β-	100	Sr-88	-		205.14	684.2				
205	1Xe-133								5		5.2E+00	β-	100	Cs-133	-		0.0	100.2	45.9	γ'	○	
206	1Xe-135								6		3.8E-01	β-	100	Cs-135	β- 100%		0.0	304.7	248.5	γ	○	
207	1I-132				161	20000000			12	12		9.6E-02	β-	100	Xe-132	-		0.0	485.7	2256.3	γ	○
208	1I-133				162	1000000			13	13		8.7E-01	β-	100	Xe-133	β- 100%		0.0	405.0	613.2	γ	○
209	1I-134				163	200000000			14	14		3.6E-02	β-	100	Xe-134	-		0.0	626.3	2532.2	γ	○
210	1I-135				164	20000000			15	15		2.7E-01	β-	100	Xe-135	β- 100%		0.0	336.2	1578.4	γ	○
211	1Sb-127								21		3.9E+00	β-	100	Te-127	β- 100%		0.0	308.7	692.4	γ	○	
212	1Sb-129								22		1.8E-01	β-	100	Te-129	β- 100%		0.0	278.2	1536.8	γ	○	
213	1Sr-91				81	30000000			43		4.0E-01	β-	100	Y-91	β- 100%		0.0	643.5	708.4	γ	○	
214	1Tc-99m				107	200000000			54		2.5E-01	IT	99.996	Tc-99	β- 100%		0.0	0.0	126.5	γ	○	
215	1Ru-105				110	20000000			56		1.9E-01	β-	100	Rh-105	β- 100%		0.0	410.6	748.3	γ	○	
216	1Zr-97				93	500000			64		7.0E-01	β-	100	Nb-97	β- 100%	Nb-97m (0.95), Nb-97 [72m]	0.0	704.9	852.8	γ	○	
216	11Nb-97										5.0E-02	β-	100	Mo-97	-		0.0	467.5	664.8	γ		

- *1) 検討対象とした核種で、元素記号-質量数で表記した。
- *2) WHO 飲料水 GL 記載核種を元素番号順に 1-191 に番号付けし、核種ごとのガイダンスレベル (放射能濃度 Bq/L) とそれを換算した物質濃度 (g/L) を併せて示す。
- *3) IAEA の GSG-2 OIL6 記載核種
- *4) CODEX 一般規格の例示記載核種
- *5) 防災指針の OIL6 記載核種
- *6) 「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」記載核種
- *7) SG-2 OIL6 と WHO 飲料水 GL の放射能濃度比
- *8) 半減期 (日) (1 日未満または 1000 年以上は斜体)
- *9) 壊変形式とその比率で、1%未満は省略した。α: α壊変、β-: β-壊変、β+: β+壊変、ec: 軌道電子捕獲、IT: 核異性体転移、SF: 自発核分裂を示す。
- *10) 生成核種を示し、生成核種に放射性がない場合は"-", 放射性がある場合はその壊変形式とその割合 (%) を記載した。
- *11) SGS-2 OIL6 において放射平衡核種がある場合はその子孫核種を記した。なお、丸カッコ内は壊変割合であり、角カッコ内はその核種の半減期を示す。
- *12) 1壊変あたりの放出放射線種 (α線、β線、及びγ+X線) ごとの総エネルギー (keV)
- *13) 測定対象の線種であり、γ線、β線、α線の優先順位とした。
- *14) 「放射能測定法シリーズ 29 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 (原子力規制庁)」記載核種に○を付した。

通し 番号	核種	γ線のエネルギーと放出率						β線の平均エネルギーと放出率		α線のエネルギーと放出率				摂取実効線量係数 Sv/Bq					核種	
		γ 1		γ 2		γ 3		keV	%	α 1		α 2		乳児	1歳	5歳	10歳	15歳		成人
		keV	%	keV	%	keV	%			keV	%	keV	%							
169	Am-241	59.5	35.9	25.3	2.3	33196.1	0.1263			5485.6	84.8	5442.8	13.1	4.7E-06	3.7E-07	2.7E-07	2.2E-07	2.0E-07	2.0E-07	Am-241
170	Am-242	42.1	0.0	127	17.9			186.0	45.0					6.0E-09	2.2E-09	1.1E-09	6.4E-10	3.7E-10	3.0E-10	Am-242
170	Am-242	103.7	8.7	121	11.0	44.5	0.0							6.0E-09	2.2E-09	1.1E-09	6.4E-10	3.7E-10	3.0E-10	Am-242
171	Am-242m	48.6	0.0					-	-					4.1E-06	3.0E-07	2.3E-07	2.0E-07	1.9E-07	1.9E-07	Am-242m
172	Am-243	74.7	67.2	43.5	5.9	117.6	0.6			5275.3	86.7	5233.3	11.5	4.6E-06	3.7E-07	2.7E-07	2.2E-07	2.0E-07	2.0E-07	Am-243
173	Cm-242	561.0	0.0	605.0	0.0					6112.7	74.1	6069.4	25.5	1.9E-07	7.6E-08	3.9E-08	2.4E-08	1.5E-08	1.2E-08	Cm-242
174	Cm-243	277.6	14.0	228.2	10.6	209.8	3.3	-	-	5785.2	73.0	5742.1	11.5	2.2E-06	3.3E-07	2.2E-07	1.6E-07	1.4E-07	1.5E-07	Cm-243
175	Cm-244	42.8	0.0	12.1	0.8					5804.8	76.9	5762.6	23.1	2.9E-06	2.9E-07	1.9E-07	1.4E-07	1.2E-07	1.2E-07	Cm-244
176	Cm-245	175.0	9.9	133.1	2.8	190.0	0.2			5361.1	93.2	5304.3	5.0	4.7E-06	3.7E-07	2.8E-07	2.3E-07	2.1E-07	2.1E-07	Cm-245
177	Cm-246									5386.5	82.2	5343.5	17.8	4.7E-06	3.7E-07	2.8E-07	2.2E-07	2.1E-07	2.1E-07	Cm-246
178	Cm-247	402.4	72.0	278.0	3.4	287.5	2.0	-	-	4870.0	71.0	5267.0	13.8	4.4E-06	3.5E-07	2.6E-07	2.1E-07	1.9E-07	1.9E-07	Cm-247
178	Pu-243	84.0	0.2300	381.6	0.575															Pu-243
179	Cm-248									5078.4	75.0	5034.9	16.5	1.4E-05	1.4E-06	1.0E-06	8.4E-07	7.7E-07	7.7E-07	Cm-248
180	Bk-249							32.4	100.0					1.2E-08	2.9E-09	1.9E-09	1.4E-09	1.1E-09	9.7E-10	Bk-249
181	Cf-246	42.0	0.0	96.0	0.0					6750.0	79.3	6708.2	20.6	4.0E-08	2.4E-08	1.2E-08	7.3E-09	4.1E-09	3.3E-09	Cf-246
182	Cf-248	99.4	0.0	99.4	0.0					6258.0	80.0	6217.0	19.6	5.5E-06	1.6E-07	9.9E-08	6.0E-08	3.3E-08	2.8E-08	Cf-248
183	Cf-249	388.2	66.0	333.4	16.0	252.8	2.6	-	-	5813.3	82.2	5759.5	4.7	5.0E-06	8.7E-07	6.4E-07	4.7E-07	3.8E-07	3.5E-07	Cf-249
184	Cf-250	42.9	0.0							6030.2	82.6	5989.9	17.1	1.7E-06	5.5E-07	3.7E-07	2.3E-07	1.7E-07	1.6E-07	Cf-250
185	Cf-251	177.5	17.3	227.4	6.8	285.4	1.1	-	-	5679.3	35.4	5854.0	27.6	2.1E-06	8.8E-07	6.5E-07	4.7E-07	3.9E-07	3.6E-07	Cf-251
186	Cf-252	43.4	0.0	100.2	0.0					6118.1	81.5	6075.6	14.5	2.0E-06	5.1E-07	3.2E-07	1.9E-07	1.0E-07	9.0E-08	Cf-252
187	Cf-253							65.2	0.50					1.0E-07	1.1E-08	6.0E-09	3.7E-09	1.8E-09	1.4E-09	Cf-253
188	Cf-254									5833.0	0.3			2.1E-05	2.6E-06	1.4E-06	8.4E-07	5.0E-07	4.0E-07	Cf-254
189	Es-253	41.8	0.1							6633.0	89.9	6590.5	6.6	5.7E-07	4.5E-08	2.3E-08	1.4E-08	7.6E-09	6.1E-09	Es-253
190	Es-254	316.0	0.2	63.0	2.0					6428.6	93.1	6358.4	2.6	1.4E-06	1.6E-07	9.8E-08	6.0E-08	3.3E-08	2.8E-08	Es-254
190	Bk-250	989.1	45.0	1031.9	35.6	1028.7	4.9													Bk-250
191	Es-254m	648.7	29.0	693.7	24.8	688.5	12.5	137.7	56.0					6.7E-08	3.0E-08	1.5E-08	9.1E-09	5.2E-09	4.2E-09	Es-254m
201	Kr-85	514.0	0.4					251.6	99.6											Kr-85
202	Kr-85m	151.2	75.2	129.8	0.3															Kr-85m
202	Kr-85m	304.9	14.0																	Kr-85m
203	Kr-87	402.6	50.0	2554.8	9.2	845.4	7.9	1501.7	41.0											Kr-87
204	Kr-88	2392.1	34.6	196.3	26.0	166.0	3.1	167.3	67.0											Kr-88
204	Rb-88	1836.0	22.8	898.0	14.4	2677.9	2.1													Rb-88
205	Xe-133	81.0	38.9	79.6	0.4			100.6	98.5											Xe-133
206	Xe-135	249.8	90.0	608.2	2.9			310.2	96.0											Xe-135
207	I-132	667.7	98.7	772.6	75.6	954.6	17.6	841.8	19.0					2.0E-09	2.4E-09	1.3E-09	6.2E-10	4.1E-10	2.9E-10	I-132
208	I-133	529.9	87.0	875.3	4.5	1298.2	2.4	439.4	83.4					3.9E-08	4.4E-08	2.3E-08	1.0E-08	6.8E-09	4.3E-09	I-133
209	I-134	847.0	96.0	884.1	65.1	1072.6	14.9	473.5	30.4					1.1E-09	7.5E-10	3.9E-10	2.1E-10	1.4E-10	1.1E-10	I-134
210	I-135	1260.4	28.7	1131.5	22.6	1678.0	9.6	498.8	23.6					3.0E-08	8.9E-09	4.7E-09	2.2E-09	1.4E-09	9.3E-10	I-135
211	Sb-127	685.7	36.8	473.0	25.8	783.7	15.1	303.9	35.8					8.7E-08	1.2E-08	5.9E-09	3.6E-09	2.1E-09	1.7E-09	Sb-127
212	Sb-129	813.0	48.2	915.0	23.3	966.8	9.0	207.3	29.9					2.3E-09	2.8E-09	1.5E-09	8.8E-10	5.3E-10	4.2E-10	Sb-129
213	Sr-91	1024.3	33.5	749.8	23.7	652.9	8.0	405.3	34.8					4.2E-09	4.0E-09	2.1E-09	1.2E-09	7.4E-10	6.5E-10	Sr-91
214	Tc-99m	140.5	89.0											3.0E-10	1.3E-10	7.2E-11	4.3E-11	2.8E-11	2.2E-11	Tc-99m
215	Ru-105	724.3	47.3	469.4	17.5	676.4	15.7	432.2	47.8					1.7E-09	1.8E-09	9.1E-10	5.5E-10	3.3E-10	2.6E-10	Ru-105
216	Zr-97	743.4	93.1	507.6	5.0	1148.0	2.6	757.3	87.8					4.2E-08	1.4E-08	7.3E-09	4.4E-09	2.6E-09	2.1E-09	Zr-97
216	Nb-97	657.9	98.2	1024.4	1.1			470.7	98.4											Nb-97

- *15) *13 で γ に分類された核種について放出される γ 線のエネルギー (keV) と放出率 (%) を、測定に有用と思われる 100keV 以上のもので放出率の高いものを優先して記載した。
- *16) *13 で β に分類された核種の、放出される β 線のエネルギー (keV) と放出率 (%)
- *17) *13 で α に分類された核種の、放出される α 線のエネルギー (keV) と放出率 (%)
- *18) 経口摂取における実効線量係数であり、ICRP Publication 119 及び ICRP Publication 60 より転載した。

Ⅲ. 研究成果の刊行に関する一覧表

研究成果の刊行に関する一覧表

書籍 なし

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
T.Yamada, K.Soga, M.Hachinohe and A.Hachisuka	Performance evaluation of the equipment for measuring radioactivity in whole foodstuffs without destructive sample preparation developed after the Fukushima NPP accident.	Radiation Protection Dosimetry	184 (3-4)	355-358	2019
畝山智香子	食品安全のために全ての関係者に必要な情報	畜産コンサルタント	54 (647)	34-37	2018
畝山智香子	全頭検査という神話	公研	666	14-15	2019
畝山智香子	安全な食品とは何かーリスクのものさしで考える	即席食品	355		2019
畝山智香子	食品安全のためのリスクコミュニケーション	食品衛生研究	68(1)	9-17	2018
畝山智香子	安全な食品とは何か？ーリスクのものさしで考えるー、	調理食品と技術	23(4)	1-7	2017
畝山智香子	食品安全を確保するためのリスクコミュニケーション	FFIジャーナル	223 (1)	36-43	2018