

## 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

厚生労働科学研究費補助金（食品の安全確保推進研究事業）

食品中の放射性物質検査システムの評価手法の開発に関する研究（20KA1010）

令和2年度～令和4年度 総合研究報告書

「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生化学部主任研究者

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、近年試料を前処理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範囲において測定を行うことが重要となる。本研究では、野生きのこ及び皮付きたけのこ実試料を用いて異なる機種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測定結果との比較検討を主に進めた。本研究では令和元年度～4年度に収集した野生きのこの検体数は560であった（内86検体について放射性セシウムは検出されず）。全数のうち10 Bq/kg 超は419検体、50 Bq/kg を超えるものは271検体であった。また、皮付きたけのこについてはねまがりたけ及び孟宗竹のたけのこそれぞれ30検体及び19検体を用いて測定値を比較した。さらにたけのこについては不可食部を含む試料の測定が可食部濃度の評価に及ぼす影響を検討した。

その結果、野生きのこについて Ge 検出器の測定結果と比較し、非破壊式装置による測定結果の多くで低めに評価される傾向が見られたものの、両者間で良好な相関が得られた。また、野生きのこの4種及びたけのこについて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、99%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評価した。その結果、機種及び品目によって異なるが、40 Bq/kg～70 Bq/kg 程度のスクリーニングレベルの設定が可能であることが分かった。また、たけのこについては本検討で用いた試料では可食部濃度と不可食部を含む試料全体の平均濃度の比はほぼ1であり、不可食部を含む試料の測定による可食部濃度の評価が可能であることが示唆された。

以上の成果により事務連絡「非破壊検査法による食品中の放射性セシウムスクリーニング法について」が厚生労働省医薬・生活衛生局食品監視安全課より発出され、野生きのこ4品目及び皮付きたけのこの非破壊式放射能測定装置を利用した検査が可能となった。

研究協力者

八戸 真弓 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 食品研究部門食品流通・安全研究領域 食品安全・信頼性グループ 主席研究員

## 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  $\gamma$  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、食品の試験法としては、「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  $\gamma$  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[6][7][8]。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形状変化や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。

平成 29 年度よりこのような非破壊式装置による測定の信頼性を評価することを目的に、非破壊式装置の測定室内における検出効率分布の評価及び実際に放射性セシウム濃度 50 Bq/kg 超の食品試料を用いて、破碎等の前処理をしない非破壊式装置について異なる機種別の装置による測定と Ge 検出器を用いた公定法による測定結果との比較検証を行ってきた。その結果、これまでの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[9]。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、このような手法の妥当性は、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など更なる詳細な検討により確保されることが望まれた。また、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げられることが期待できることが見込まれた。

平成29年度から3ヵ年の以上の研究成果を踏まえ、令和2年度より検査ニーズに基づき優先対象品目を選定しスクリーニング検査への非破壊式検査法の適用性について検討を進めることとした。

## 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、主に自家消費用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。

$\gamma$ 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 $\gamma$ 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 $\gamma$ 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、試料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幾何学的効率の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、検出器直上では線源と検出器との立体角は $2\pi$ 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 $\gamma$ 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—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ず

れやばらつきの要因となる。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高を推定し、試料の種別に決められた検出効率－試料高（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と推察される。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性測定アルゴリズムは原則として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指示値による評価を行った。

### C. 実験方法

形式の異なる複数の非破壊式装置ごとに、試料中の放射性セシウム分布などの特性を明らかにするとともに、その装置の検出効率への影響、及び形状依存の特徴を把握し、感度変化への影響の程度を評価する手法について検討する。なお、初年度はまつたけ1品目を選定して非破壊式装置3機種で検討し、2年目以降は初年度の成果を踏まえて品目数の拡大を図った。

#### 1) 非破壊式装置による測定とGe検出器を用いた公定法の比較検証

これまでのデータ及び検査ニーズに基づき野生きのこ等の適用試料種を選別し、種別の検討を行った。令和2年度は野生きのこを対象とし、まつたけ、まいたけ、なめこ、むきたけ及びならたけ、並びに皮付きねまがりたけを優先品目として検討した。令和3年度は、令和2年度に選定した品目に加え、ベルトコンベア式の非破壊式装置を対象機器とし、皮付きたけのこ（孟宗竹）について検討した。令和4年度は、しろしめじ、ひらたけ、あみたけ、こうたけ、ちちたけを対象に加え、過去4年間（令和元年～4年）のデータを用いて回帰直線の予測区

間による方法を用いて検討し、99%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評価した。

表1に測定に用いた非破壊式装置を示す。比較性を確保するために同一試料を福島県林業研究センターに設置した3機種の装置で測定した。ただし、測定室の大きさの制限により測定出来ないものは測定可能な装置でのみ測定した。ただし、令和4年度は、形式Hitz(日立造船)は評価対象外とした。試料の測定は、1試料につき4回の繰り返し測定を行った。この際、試料は測定の都度置き換えを行った。測定の実務は各施設の検査員により行われた。

試料はその全体形状を把握するため写真に記録した。撮影は卓上で試料上面及び側面からカメラを用いて図1のように撮影した。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、(一社)福島県環境測定・放射能計測協会に依頼し、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]に準じて実施することとした。

## 2) 試料中の放射性セシウムの分布把握・評価手法の検討

これまでの研究において、試料中の放射性セシウムの分布が試料の種類によって異なり、非破壊式測定におけるばらつき、大きなずれの要因となりうることが示唆されている。本研究では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、令和2年度にまつたけ及びねまがりたけについてイ

メージングプレート(IP)を用いた分布測定を行った。試料は凍結乾燥させ個々の試料を、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した。また部位別の濃度についてGe検出器による測定を行い、濃度分布の定量的把握を試みた。また、令和3年度は孟宗竹の皮付きたけのこを対象とし、不可食部が可食部濃度の評価に与える影響について検討した。

## 3) 非破壊式測定における放射性セシウムの分布特性、形状特性の物理的評価の検討

野生きのこは、種別依存以上に個々の試料依存の分布偏在や形状による測定結果への影響が大きいと予想される。このため多数の試料について1)の実測検討が重要であるが、統計的に十分な試料数を種別毎に集めるのは容易ではない。そこで非破壊式装置の検出効率に対する試料中の放射性セシウムの分布及び試料形状の影響評価について以下の物理的手法を試みた。

### i) ファントムの試作実験

2)の分布特性結果及びこれまでの試料データ(写真・重量等)から対象試料ファントムの作成を検討した。活性アルミナに放射能濃度既知の溶液を添加し、乾燥させ、放射能濃度既知のアルミナを作成した。

### ii) 計算シミュレーション等による評価の検討

非破壊式測定システムの計数効率の計算による評価を試みた。試料の形状は試料の写真データから近似的に得る方法について検討した。

## D. 実験結果及び考察

### 1) 非破壊式装置による測定と Ge 検出器を用いた公定法の比較検証

図 2 に本研究において過去 4 年間（令和元年度～4 年度）に収集した野生きのこの種別と検体数を示す。検体数は 560 であり、そのうち 86 検体について放射性セシウムは検出されなかった（ND）。図 3 に試料種別ごとの濃度分布を示す。全数のうち 10 Bq/kg 超は 419 検体、50 Bq/kg を超えるものは 271 検体であった。さらに 260Bq/kg 未満の検体数の種別分布を図 4 に示す。令和 3 年度の重点対象品目のうちまつたけ、まいたけを除くむきたけ、ならたけ及びなめこについて 20 検体を超える試料が 4 年間で確保できた。

令和 2 年度は野生きのこ全 28 種 132 体及びねまがりたけ 25 検体を用いて測定値を比較した。いずれの機種についても Ge 検出器の測定結果と比較し、非破壊式装置による測定結果の多くで低めに評価される傾向が見られたが、両者間で良好な相関が得られた。また、約 20 Bq/kg を超える濃度範囲では、いずれの機種でも非破壊式と Ge 検出器の結果との差は+30/-50%程度の範囲にあった。

さらに、まつたけ試料について 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、99%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評価した。本研究では、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も回帰直線の予測区間による次の方法を用いた。

$$m_{UL} = m + \sqrt{V_e \left\{ 1 + \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{S_{xx}} \right\}} \times t_{n-2, 0.01}$$

ここに、

- $m_{UL}$ : 回帰直線の予測区間の 99%上限
- $m$ : 回帰直線から予想される濃度  $x$  における測定値
- $V_e$ : 回帰直線の誤差分散
- $n$ : 回帰に使用したデータの数
- $x$ : 放射性セシウム濃度
- $\bar{x}$ : 回帰に用いた放射性セシウム濃度の平均
- $S_{xx}$ : 回帰に用いた放射性セシウム濃度の平方和

適用性について種別毎に検討するため、測定に用いた試料のうち検出限界超～260 Bq/kg 程度の範囲試料の測定結果を用いた。

その結果、スクリーニングレベルは機種によって異なり、35～50 Bq/kg 程度の範囲にあった。いずれの機種でも Ge 検出器の結果との相関は良く、ばらつきも一定範囲に抑制されており、今回試験に用いた試料と測定条件がほぼ同等の範囲にある試料に対してはこれらの装置で試料の前処理を伴う従来のスクリーニング検査とほぼ同等の性能での検査が可能であると考えられた。これらの研究成果は「非破壊検査法による食品中の放射性セシウムスクリーニング法」に反映された。

令和 3 年度は野生きのこ全 25 種 141 検体、ねまがりたけ及び孟宗竹の皮付きたけのそれぞれ 30 検体及び 19 検体を用いて測定値を比較した。いずれの機種についても Ge 検出器の測定結果と比較し、非破壊式装置による測定結果の多くで低めに評価される傾向が見られたが、両者間で良好な相関が得られた。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、99%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評価した。その結果、機種及び品種によって異なるが、野生きのこ3種（なめこ、むきたけ及びならたけ）で30~70 Bq/kg、皮付きたけのこで50 Bq/kgを超えるスクリーニングレベルの設定が可能であることがわかった。

令和4年度は、野生きのこ全24種84検体を比較測定した。これら野生きのこの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、本年度を含む過去4年間（令和元年~4年）のデータを用いて回帰直線の予測区間による方法を用いて検討し、99%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評価した。その結果、機種及び品種によって異なるが、むきたけ、なめこ、ならたけについて、すでに非破壊式検査の適用種となっているまつたけと同等レベルのスクリーニングレベルが確保可能であることが分かった。

3か年の本研究により得られた非破壊式装置のスクリーニングレベル評価結果を表2-1（野生きのこ）及び2-2（皮付きたけのこ）に示した。本研究結果によりまつたけ、皮付きたけのこ、むきたけ、なめこ、ならたけが「非破壊検査法による食品中の放射性セシウムスクリーニング法」の適用試料種に追加された。

## 2) 試料中の放射性セシウムの分布把握・評価手法の検討

令和2年度はイメージングプレートを用いたまつたけ及びねまがりたけの測定を行った。まつたけ試料は、液体窒素で凍結処理した後、凍結乾燥処理した。乾燥試料を

5~10mm厚にスライスし測定した。この結果、試料内の放射能の不均一分布が観測された。IPデータでは試料の笠部により高く局在することが分かった。この結果より、まつたけ試料を菌傘と菌柄を分けてGe検出器で各濃度の分析を行ったところ、濃度差は約1.1~1.8の範囲にあった。したがって、きのこ菌傘を検出器側に向けると過大評価、逆に向けると過小評価されることが懸念された。このことから非破壊式測定においては、試料の攪拌等により試料がランダムに配置する必要があると考えられた。

令和2年度及び3年度は皮付きたけのこについて検討した。たけのこは縦半分に切断後、液体窒素で凍結処理した後凍結乾燥機にて7日間乾燥処理した。乾燥後IPにて測定した。この結果可食部先端の濃度が高い傾向が確認された。しかしながら、高濃度の先端部が全体の質量に占める割合は5%程度であり、その結果、可食部濃度と不可食部を含む試料全体の平均濃度の比はねまがりたけのたけのこが $0.96 \pm 0.07$ 、孟宗竹のたけのこが $1.01 \pm 0.21$ であった。このことから不可食部を含む試料の測定による可食部濃度の評価が可能であることが示唆された。1) 及びこの研究成果により「非破壊検査法による食品中の放射性セシウムスクリーニング法」の対象品目に皮付きたけのこが追加された。

## 3) 非破壊式測定における放射性セシウムの分布特性、形状特性の物理的評価の検討

### i) ファントムの試作

放射性セシウムを吸着させる媒体として活性アルミナを採用した。アルミナに吸着させる放射性セシウムは福島県内で採取し



た放射性降下物が付着した杉の葉から抽出した溶液を用いた。溶液の放射能濃度測定には校正済みの Ge 検出器を用いた。次に濃度が決定された溶液と同量の活性アルミナ約 90 g を磁器皿に入れ混合し、ヒーターで含水率<1%となるまで攪拌しながら加熱した。同様の手順を繰り返し合計約 1 kg の放射性セシウムアルミナを作成した。放射性吸着アルミナの濃度は  $^{137}\text{Cs}$  及び  $^{134}\text{Cs}$  それぞれ 2596 Bq/kg 及び 95 Bq/kg となり、放射性セシウム合計の吸着率は 92 % と高い吸着率で放射性セシウムを吸着させることが出来た。この放射性セシウムアルミナを約 3 倍希釈し、希釈後のアルミナを分注して、濃度を測定したところ、濃度の相対標準偏差は 5.3 % であり良好な均一性が得られた。これを試料にみたてた容器に径の異なるプラスチック球体容器等に充填することで嵩密度の異なる放射能既知のファントム試料を作成することが可能となった。

## ii) 半実験的計算手法による不定形状体積試料に対するレスポンス評価の検討

非破壊式放射能測定装置では、通常、試料の種類と質量より推定される嵩から検出器のレスポンスが近似的に決定されているが、試料は不定形状のため、形状の変化がレスポンスにどの程度の不確かさを及ぼし得るかが把握されていなければ、測定の信頼性を確保しがたい。本研究では、このような測定において試料の形状に対応した検出器レスポンスを評価するため、検出器上の点線源に対する計数効率の空間分布マップを作成し、体積試料に対するレスポンスの評価を行った。

不定形状体積状の試料を微小ボクセルの

集合とすると、各 $(x,y,z)$ のボクセルにおける $\gamma$ 線エネルギー $E$ の計数効率 $\varepsilon_p(E,x,y,z)$ に対して、試料に対する計数効率 $\varepsilon_V$ は式(1)で評価できる。

$$\varepsilon_V(E) = \iiint \varepsilon_p(E, x, y, z) dx dy dz / V \cdot F_s \quad (1)$$

ここで $V$ は体積、 $F_s$ は自己吸収の補正係数を表す。本研究では、様々な形状の試料に対応した $5''\phi \times 5''\text{NaI(Tl)}$ シンチレーション検出器に対する $^{137}\text{Cs}$ のレスポンスを得るため、 $\varepsilon_p(E,x,y,z)$  ( $E=662$  keV)の空間分布を取得することとした。点状の $^{137}\text{Cs}$ 標準線源を用い、各測定点で得られた計数効率をボクセルサイズ $10 \times 10 \times 10$  ( $\text{mm}^3$ )における計数効率とみなすこととした。検出器から高さ $z$  ( $z=0,30,60,90,120,150$  mm)の面における $\varepsilon_p(E,x,y,z)$ の分布は同心円状となる想定で、 $X$ 軸正方向のみの各高さ $z$ の面において10 mm刻みで測定を行った。実験データより、各面における検出器中心からの距離と計数効率の関数を求め、各ボクセルの計数効率を計算し、計数効率の空間分布プロファイルを得た。

得られた効率プロファイルから不定形状試料に対しての適用の検討として、同形式の $5''\phi \times 5''\text{NaI(Tl)}$ シンチレーション検出器(非破壊式放射能測定装置)で測定したまっただけ試料の写真から形状を把握し、同様にマップからレスポンスを計算した。形状は楕円錐台に近似し、形状の決定に必要な各寸法を決定した。これらから式(1)により $\varepsilon_V(E)$ を得た。この手法により得た $\varepsilon_V(E)$ 5試料の放射能濃度は、2試料についてはGe検出器による結果との差が少なかったものの、

3 試料については 30 %程度低い結果となった。いずれも低めに評価される傾向は、非破壊式装置による指示値も同様である。このことは形状の想定が異なることだけではなく、写真画像からは検出器直上の試料—検出器間の空隙による影響も懸念され、さらなる検討が望まれる。

#### 4) 検査法の提案

以上の検討結果より、まつたけ、むきたけ、ならたけ、なめこ及び皮付きたけのこについて非破壊式検査法の対象品目とすることを提案し、その提案内容は「非破壊検査法に食品中の放射性セシウムスクリーニング法について」に反映された。非破壊検査法は、今後、検査条件の精査及び手法の改良の検討を行うことにより、さらなる信頼性、検査効率性の改善並びに適用拡大の可能性があると考えられる。

#### E. 結論

本研究では、異なる機種の子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、野生きのこ試料を用いて行った。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。ただし、品目や装置の種類によって差はあるものの、多くの野生きのこに対して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。本研究では、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、99 %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回帰曲線によって非破壊式装置指示値を Ge 検出器

測定値相当に換算して評価した。その結果、スクリーニングレベルは機種によって異なるが、まつたけ、むきたけ、ならたけ、なめこ及び皮付きたけのこについて 40～70 Bq/kg 程度の範囲にあった。

以上の結果から、まつたけ、むきたけ、ならたけ、なめこ及び皮付きたけのこについては一定の成果が得られたことから、検討内容に基づく検査法を提案し、「非破壊検査法による食品中の放射性セシウムスクリーニング法」に反映された。

今回用いた回帰直線の予測区間による方法はより適切な濃度範囲の試料によって Ge 検出器を用いた測定結果との比較によりスクリーニング性能の評価を可能とするが、一方で、試料数の確保が困難、低濃度の試料しか採取できないなどの状況も想定される。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)ものが多いことも考えられる。非破壊式装置による測定原理を考慮すると試料に対する感度(計数効率)は、嵩に依存するため、嵩密度がほぼ同等の範囲にあると見込まれるものを同一のグループとして評価することも考えられる。本結果に示した品目別の非破壊式装置による結果の Ge 検出器による結果との差の傾向は、それが可能であることを示唆するものといえる。これには今後、さらに試料数が不足する品目については試料数を増やし評価に足る統計精度を確保する、加えて、実試料の嵩密度の調査を進め物理的に同等と扱える範囲を明らかにすることが必要であると考えられる。実際の検査への適応性評価にあたっては、対象試料の範囲を決め、実試料の実測を基本とし

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も考えられる。これについて令和2年度より検討を進め、令和3及び4年度は写真データにより得た形状データから計数効率を半実験的計算手法で評価する手法を検討した。このような計算も含めた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間隔範囲を評価する手法も検討の余地があると考えられる。このような手法が確立できれば、実試料の形状等の特徴を把握することで計数効率の妥当性評価に用いることも考えられる。

#### 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] 文部科学省・原子力規制庁 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ー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.adfutech.com/image/pdf/Catalog\\_160108-2\\_AFTNDA2.pdf](http://www.adfutech.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](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

Takahiro Yamada, Katsumasa Furutaka, Mayumi Hachinohe, Akiko Hachisuka  
Applicability of non-destructive equipment for radioactivity

measurement to screening radio-  
cesium in foods

*Applied Radiation and Isotopes* 194  
110671-110671 2023 年 1 月

2. 学会発表  
(国際会議)

[1] Takahiro Yamada, Katsumasa  
Furutaka, Mayumi Hachinohe, Akiko  
Hachisuka

UNCERTAINTY DETERMINATION  
FOR SCREENING OF  
RADIOCESIUM IN FOODS  
WITHOUT SAMPLE PREPARATION  
PROCEDURE

the ICRM-LLRMT 2022, the 8th  
international conference on radionuclide  
metrology - low level radioactivity  
measurement techniques 2022 年 5 月 4 日

[2] Takahiro Yamada, Katsumasa  
Furutaka, Naoto Yamashita, Mayumi  
Hachinohe, Akiko Hachisuka

RESEARCH PROJECT ON THE  
DEVELOPMENT OF EVALUATION  
METHODS FOR INSPECTION  
SYSTEMS OF RADIOACTIVE  
MATERIALS IN FOODS

the ICRM-LLRMT 2022, the 8th  
international conference on radionuclide  
metrology - low level radioactivity  
measurement techniques 2022 年 5 月 4 日

(国内会議)

[1] 山田 崇裕、八戸 真弓、蜂須賀 暁子  
非破壊式放射能測定装置のまつたけ試料ス  
クリーニング検査への適用 第 58 回アイ  
ソトープ・放射線研究発表会 2021/7/7

[2] 古高克昌、山田 崇裕、三島 大輝 非  
破壊式放射能測定装置を用いた放射性セシ  
ウム測定における不確かさの検討 第 58  
回アイソトープ・放射線研究発表会  
2021/7/7

[3] 烏野沙和、山田崇裕、戸真弓、蜂須賀  
暁子ねまがりたけ中の放射性セシウム分布  
評価の検討 日本食品衛生学会第 117 回学  
術講演会 2021/10/27

[4] 古高克昌 三島 大輝、山田 純平、  
山田 崇裕 不定形状試料に対する大口徑  
 $\gamma$  線検出器の計数効率評価手法の検討 第  
3 回日本放射線安全管理学会・日本保健物  
理学会合同大会 2021/12/1

[5] 古高 克昌, 山田 崇裕 食品中の非破  
壊式放射能測定における計数効率の不確か  
さに関する検討 第 59 回アイソトープ・  
放射線研究発表会 2022/7/6

[6] 古高克昌, 崎山翔弥斗, 山田崇裕  
非破壊式放射能測定装置による野生きのこ  
測定における不確かさの要因分析  
第 4 回日本保健物理学会日本放射線安全  
管理学会合同大会 2022/11/25

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)
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)
連続個別非破壊 放射能測定 システム	A01	NaI(Tl) φ 5.08x5.08cm 120本	鉛 50mm	千葉鉄工所(株)
連続個別非破壊 放射能測定 システム	A01S	NaI(Tl) φ 5.08x5.08cm 45ユニット1列	鉛 50mm	千葉鉄工所(株)

表2-1 非破壊式装置のスクリーニングレベル評価結果（野生きのこ）

	試料種別	FF1	AFT-NDA2
スクリーニングレベル指示値 Bq/kg	むきたけ	65	34
	なめこ	68	47
	ならたけ	64	46
スクリーニングレベル指示値 の濃度換算値 Bq/kg	むきたけ	66	44
	なめこ	63	53
	ならたけ	71	60

表2-2 非破壊式装置のスクリーニングレベル評価結果（皮付きたけのこ）

	試料種別	A01	A01S	FF1	AFT-NDA2
スクリーニングレベル 指示値 Bq/kg	ねまがりたけ	-	-	38	61
	孟宗竹	57	84	-	-
スクリーニングレベル 指示値の濃度換算値 Bq/kg	ねまがりたけ	-	-	45	72
	孟宗竹	55	72	-	-



図1 検体の写真撮影（上段：書画カメラ（ELMO・L-12W）と撮影スタジオ  
下段：試料正面写真（左）、同上面写真（右））

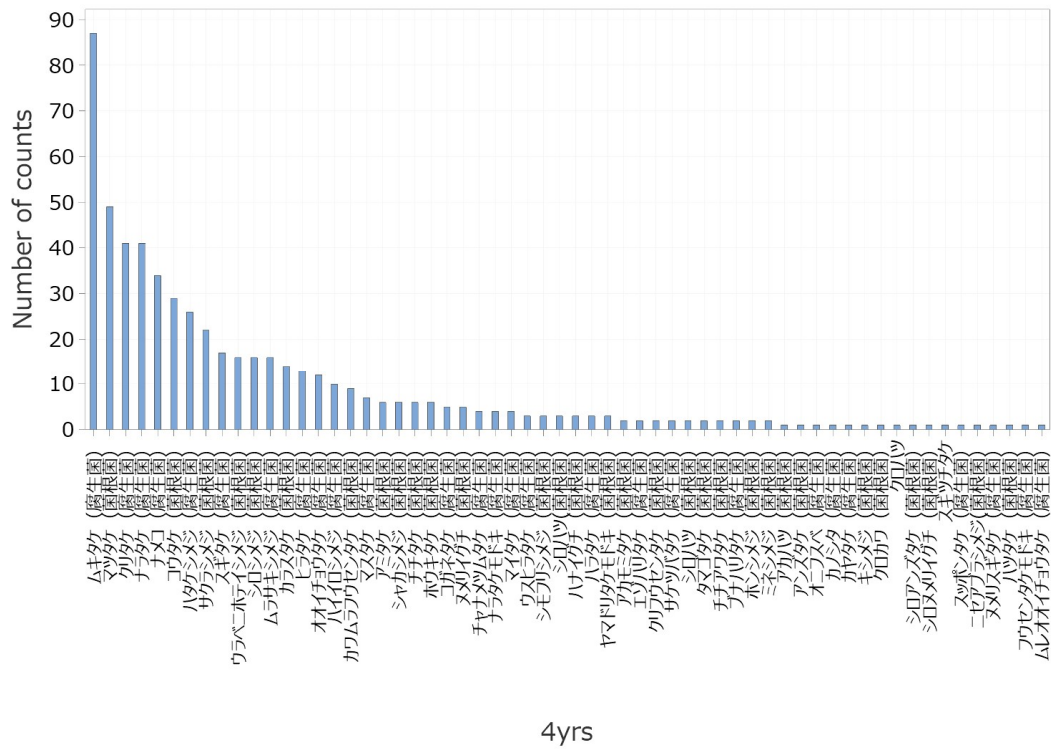
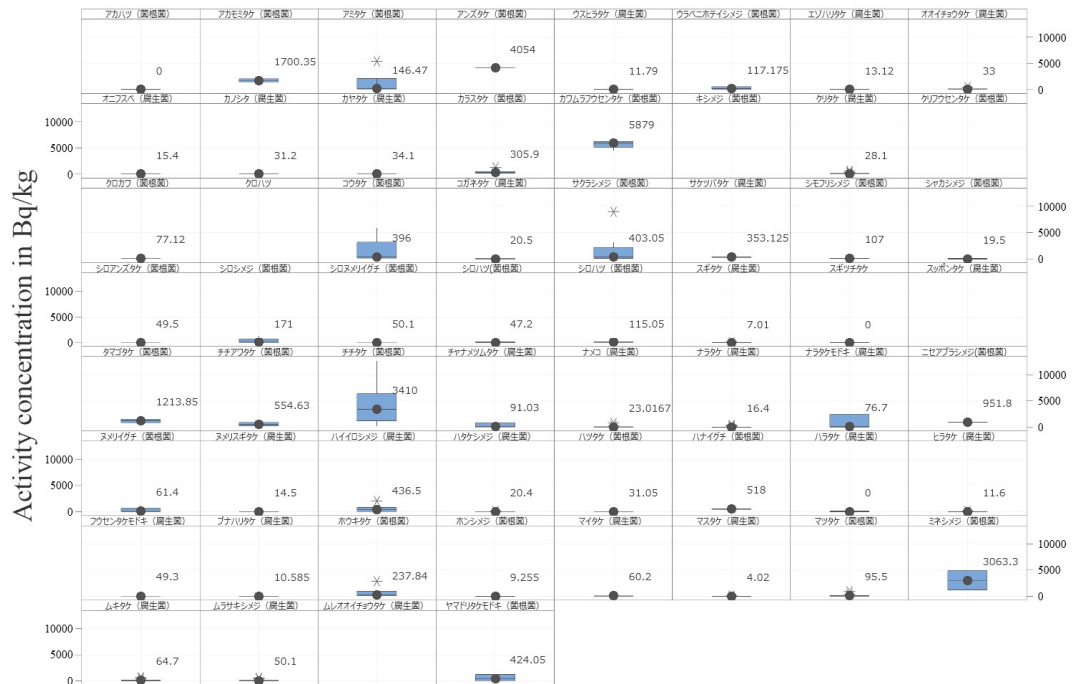


図2 測定に用いた野生きのこの種別と各検体数 (2019~2022 年度)

Distribution of activity concentration (2019-2022)



パネル変数: 4yrs

図3 測定に用いたきのこの種別毎の濃度分布(個別値のプロット) 数値は中央値

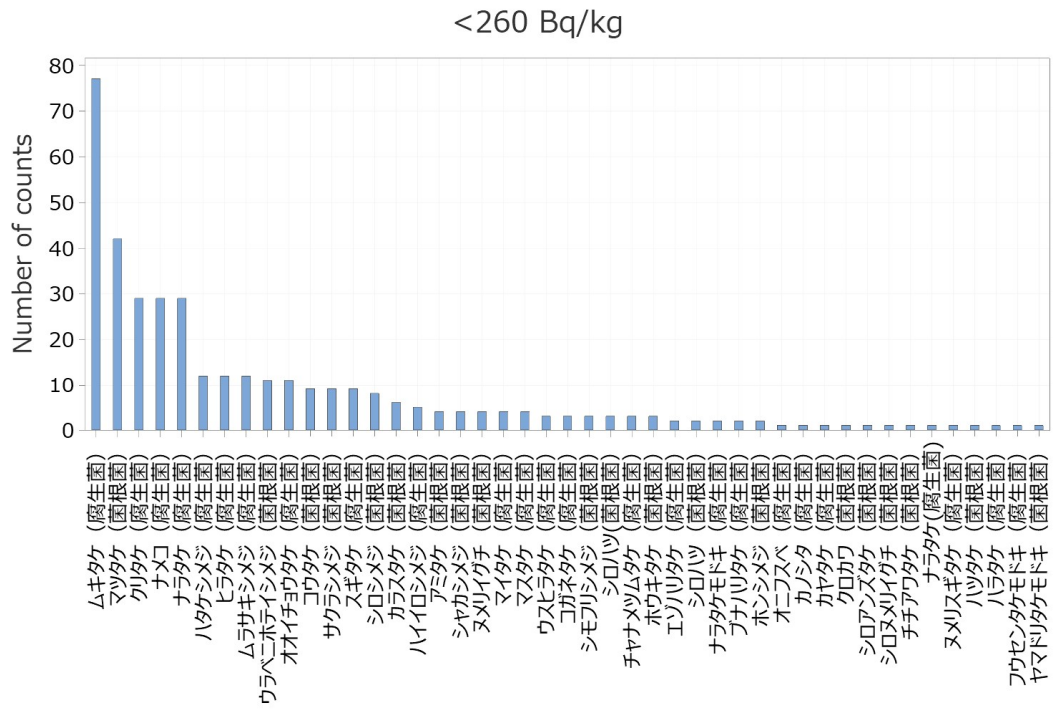


図4 測定に用いた 260Bq/kg 未満の野生きのこの種別検体数 (2019~2022 年度)



