

## 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

令和3年度 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）

研究分担報告書

「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、同一の実試料を用いて異なる機種種の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、令和2年3月に事務連絡「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、まつたけについて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。本研究では、この非破壊式装置による検査対象とする試料の適用拡大を検討すべく、野生キノコ全25種141検体、ネマガリタケ及びモウソウチクのタケノコそれぞれ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。

さらに野生キノコの4種及びタケノコについて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、機種及び品種によって異なるが、野生キノコ3種で30~70 Bq/kg、タケノコで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った。さらにタケノコ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、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。本研究成果によりネマガリタケ及びモウソウチクの皮付きタケノコが「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。

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試料5種(マツタケ、マイタケ、ナメコ、ムキタケ、ナラタケ)を選定し適用性について検討を進め、令和3年3月、この研究成果に基づき「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」が発出され、マツタケについて本手法による検査が可能となった。令和3年度は、この非破壊式装置による検査対象とする試料の適用拡大を検討すべく、野生キノコ全25種141検体、ネマガリタケ及びモウソウチクの皮付きタケノコそれぞれ30検体及び19検体を用いて測定値を比較した。また、タケノコは不可食

部を含む試料の測定によって可食部の放射性セシウム濃度を評価する手法によって検査が可能かを検討するため、可食部及び不可食部それぞれの濃度分布評価を行った。さらに、試料の形状変化が測定の不確かさに及ぼす影響の評価として計算による評価手法を含め検討を進めた。

## 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、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能測定のアлゴリズムは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

(1) 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

本研究においては、非破壊式装置の特徴や測定原理を念頭に、5 機種 of 非破壊式装置を用いて福島県及び宮城県内で採取された実試料を用いて、破碎等の前処理をしない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

を行った。

非破壊式装置を用いた研究では、野生キノコ全 25 種 141 検体、ネマガリタケ（福島県産）及びモウソウチク（宮城県産）のタケノコそれぞれ 30 検体及び 19 検体を用いて測定値を比較した。図 1 に本研究に用いたキノコ試料の種別と検体数を示す。表 1 に野生キノコ及びネマガリタケのタケノコの測定に用いた非破壊式装置（形式：FF1、AFT-NDA2 及び Hitz）及びモウソウチクのタケノコの測定に用いた装置（形式：A01 及び A01S）を示す。野生キノコ及びネマガリタケのタケノコは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。この制限によってネマガリタケは Hitz を除く 2 機種のみで測定した。モウソウチクのタケノコは宮城県内 2 か所に設置された表 1 に示すベルトコンベア式の連続個別非破壊放射能測定システム 2 機種（A01 及び A01S）を用いた。試料の測定時間は本方式の場合ベルトコンベア速度により決まる。本試験では、測定時間は A01 及び A01S それぞれで 34 秒及び 72 秒とした。試料の測定は各 4 回実施した。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 2 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・放射能計測協会又は株式会社理研分析センターに依頼し、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]に準じて実施することとした。

#### (2) 試料中の放射性セシウム濃度分布測定

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、イメージングプレート（IP）を用いた分布測定を行った。特にタケノコについては不可食部を含む試料全体を検体とするため、そのことによる可食部濃度の評価への影響が懸念される。本研究では、可食部濃度評価への影響を定量的に評価するため、IP を用いた分析に加え、タケノコの可食部及び不可食部それぞれの濃度測定を、Ge 検出器を用いて行った。

イメージングプレート（IP）を用いた分布測定では、タケノコ試料（モウソウチク、*Phyllostachys edulis*）を用いた。本研究ではタケノコを皮つきのまま縦半分に切断し、凍結乾燥（FD-20BU/SK02、NTS）させた後、切断面が IP 上（BAS-IP SR 2040、FUJIFILM）に接するように配置し露光させ、読み取り装置（FLA7000、FUJIFILM）で放射線画像を取得した。また、部位別（皮、可食部）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。

#### 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による比較検討

図 3-1 に図 1 に示した各試料の Ge 検出器による測定値（放射能濃度）の分布図を示

す。200 Bq/kg 以下の濃度範囲の拡大図(図 3-2)も併せて示した。前項で本検討に用いた試料の種類と検体数を示したが、図 3 の通り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 検出器の測定において検出限界以下の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。これら(非破壊式測定においては4回とも ND のデータ)は解析の対象外とした。各非破壊式装置と Ge 検出器による測定結果との差の Ge 測定値との比を図 4-1、-2 及び-3 に示す。ここでエラーバーは複数回測定(ND を除く)に基づく標準偏差を表す。データのばらつき傾向は令和 2 年度の結果とほぼ同様であった。ここでの標準偏差は個別の試料の重量と濃度に基づく放射能、すなわち放射性壊変による計数統計の不確かさと試料中の放射性セシウム分布と検出器の幾何学的条件の再現性に主に依存することが見込まれる。計数統計による不確かさは試料中の放射能に依存し、20Bq/kg 程度以下の範囲で相対的に標準偏差が比較的大きい要因は計数統計による不確かさが支配的であるためであることが見込まれる。この不確かさは放射能が高くなるにつれ小さくなり、本結果でもそのような傾向が確認できた。一方で、放射能が高くても標準偏差が大きいものも観測され、Ge 検出器との差についても濃度が高くなるにつれ必ずしも 0 に収束するわけではなく相対的に $\sim \pm 20\%$ 程度のばらつきが観測された。このような一定のばらつきの要因としては非破壊式装置で想定される試料中の放射性セシウム分布と検出器の幾何学的条件の再現性に基づく不確かさの影響であることが見込まれ、計数の統計による

不確かさが無視できるレベルであっても見込む必要がある不確かさであると考えられる。

図 5-1、-2 及び-3 に各非破壊式装置と Ge 検出器による測定結果の比較を示す。ここで非破壊式装置の結果は 4 回平均値とした。ただし、4 回の測定のうち、検出限界以下の結果であったものは除いて処理した。いずれの機種についても非破壊式装置の結果が Ge 検出器の結果と比較し、令和 2 年度の結果と同様に低めに評価される傾向であったが、良好な相関関係を示すことが確認できた。濃度評価が低めに評価される傾向は各装置が見込む試料の嵩を低めに評価し、実際よりも計数効率が高く見積もられていることに起因することが要因の一つとして考えられる。この点について、計算による評価を行った。試料には令和 2 年度のマツタケ試料の写真を用い測定試料の写真データを用い形状を近似評価し、計数効率を算出した。これにより得た放射能濃度は、非破壊装置で得た結果よりも改善する傾向が一部の試料で確認出来た[10]。令和 2 年度の写真を用いた嵩比重の検討で実際の比重が小さく評価されている可能性があることを示したが、本結果から実際にこのことにより、非破壊装置の想定する試料の形状と実際との違いが計数効率評価の違いに影響していることがわかった[11]。ただ、写真による評価と非破壊装置の評価の違いが見られなかったものも確認された。このことは単純な形状の違いだけでなく検出器付近の空隙の影響、形状の近似評価上の問題があると推察される。この検討結果の概要については、附属書 1 に示す。

図 6-1、-2 及び-3 に非破壊式装置におけ

る複数回測定の変動係数と試料の放射能 (●) /放射能濃度 (○) との関係を示す。放射性壊変のランダム性に伴うばらつきは放射能濃度ではなく個別の試料の重量と濃度から得られる放射能に依存するため、本来、濃度ではなく放射能に対する評価が望ましいが、ここでは試料重量の範囲が一定の範囲内にあることなどを前提に濃度との比較を○で示した。これらの図が示すように測定のみばらつきは図 4 でも示した通り放射能にほぼ依存し、低放射能領域では放射能が高くなるに従いばらつきが小さくなっていることは、そのばらつきの要因に対しては放射性壊変の統計変動が支配的であることを示唆するものであった。図 6-3 の Hitz の結果は他の 2 機種と比較し、低放射能領域のみばらつきが小さい傾向にあるが、この装置は試料の質量により一定の検出限界に達する又は 900 秒まで測定時間が最長延長される機能を有していることから、そのことにより計数統計によるばらつきが抑制されていると考えられる。一方で比較的濃度が高い範囲であっても変動係数はいずれも ~0.2 程度の範囲にあり、これ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た。すなわちこれによる不確かさは非破壊式測定における避けられない系統的な不確かさと考えられる。

### (3) スクリーニング検査への適用への検討

#### (a) 野生キノコ

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て検討した。

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

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

本研究では適用性について種別毎に検討するため、野生キノコとしてマツタケを除く優先対象 4 種のうち検体数の多かったムキタケ、ナメコ及びナラタケを対象とし、測定に用いた試料のうち検出限界超 ~220 Bq/kg 程度の範囲試料の測定結果を用いた。ムキタケ、ナラタケ及びナメコの検討結果を図 7、8 及び 9 に示す。各図中の鉛直の赤実線はスクリーニングレベル相当の濃度、水平赤実線はスクリーニングレベル相当の非破壊式装置指示値を示し、水平赤破線は予測区間上限 100 Bq/kg 相当の指示値を示す。予測区間は 99 % (片側 1 %) とした。予測区間 99 % 上限値が濃度 100 Bq/kg 相当の指示値を下回る各装置におけるスクリーニングレベル上限指示値とその濃度換算値を表 2 に示す。ここでは、先に示したとおりすべての試料の測定結果より得た回帰直線は、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。ここでは、非破壊式の指示値相当のスクリーニングレベルは、このこと



を考慮し非破壊式で得られる指示値を回帰式により Ge 検出器による測定値相当に換算して示した。その結果、換算したスクリーニングレベルは機種によってスクリーニング性能に差が見られたが、AFT-NDA2 によるムキタケの 27 Bq/kg を除き、40 Bq/kg を超えるスクリーニングレベルの設定が可能であった。

本試験で用いた試料の質量分布を図 10 に示す。ここで示したスクリーニングレベルを実際の検査で適用する場合には、本試験に用いた試料との同等と見なせる範囲のものが対象となりうる。実際の試料が適用できるかの判断は、ここに示した試料重量の範囲にあるかが一つの目安となると考えられる。非破壊式装置での測定の場合、試料に対する放射能濃度への換算係数は試料の嵩に依存する。重量と試料の種別のみで想定される嵩には個体の大きさ、形状によってばらつきがあると想定されるが、今回用いた試料の嵩密度の範囲であれば検査の信頼性は確保できることが見込まれる。実際の検査での個々の試料の検査への適用性の判断には試験に用いた試料写真は有用であると思われる。今回用いた試料の写真を後述のマニュアルに収載する。

#### (b) タケノコ (ネマガリタケ)

ネマガリタケのタケノコを用いて野生キノコと同様の試験を実施した。ただし、Hitz 装置については測定室のサイズが小さくネマガリタケを収納出来ないため試験の対象機器から除外した。試料は検出限界未満を除く 26 検体を用いた。検体の濃度分布及び質量分布を図 11 及び図 12 にそれぞれ示す。濃度は検出限界未満の 4 試料から検出限界程度の濃度～200Bq/kg 程度の範囲に分布し

ていた。試料の質量は平均約 1200g で 700～1300g 程度の範囲にあり、1 検体あたり測定に十分な試料量が確保された。図 13-1 及び図 13-2 に各非破壊式装置と Ge 検出器による測定結果との差の Ge 測定値との比を示す。図の通り、結果は 25Bq/kg 超の試料に対して FF1:+5 %/-40 %、AFT-NDA2 : +30 %/-10 %程度の範囲にあり、ばらつきの範囲幅は同程度であった。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方法を用いて検討した。結果を図 14-1 及び図 14-2 に示す。ここでは Ge 検出器による濃度は可食部の濃度で評価した。図のとおりスクリーニングレベルは FF1 : 45 Bq/kg (装置指示値 : 38Bq/kg)、AFT-NDA2 : 61 Bq/kg (装置指示値 : 72 Bq/kg) となった。

#### (c) タケノコ (モウソウチク)

モウソウチクのタケノコを用いて試験を実施した。ここでは表 1 に示すベルトコンベア式の連続個別非破壊放射能測定システム 2 機種 (A01 及び A01S) を用いた。

検体の濃度分布及び質量分布を図 15-1 及び図 15-2 及び図 16-1 及び図 16-2 にそれぞれ示す。濃度分布は、2 機種それぞれに用いた検体で異なり、A01S ではその多くが 25 Bq/kg 以下であった。検出限界未満の試料から検出限界程度の濃度～200 Bq/kg 程度の範囲に分布していた。試料の質量は平均約 1200 g で 700～1300 g 程度の範囲にあり、1 検体あたり測定に十分な試料量が確保された。図 17-1 及び図 17-2 に各非破壊式装置と Ge 検出器による測定結果との差の Ge 測定値との比を示す。図の通り、結果は 40 Bq/kg 超の試料に対して A01 では+60 %の一点を除き +10 %/-20 %、A01S : +30 %/-0 %程度の

範囲にあり、ばらつきの範囲幅は同程度であった。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方法を用いて検討した。結果を図 18-1 及び 2 に示す。ここでは Ge 検出器による濃度は可食部の濃度で評価した。図のとおりスクリーニングレベルは A01 において 55 Bq/kg (装置指示値：57 Bq/kg) であった。一方 A01S については見かけ上 A01S のスクリーニングレベルより高い 72 Bq/kg (装置指示値：84 Bq/kg) となった。濃度の低い検体が多いにもかかわらずこのような結果が得られたのは、A01S で測定した検体の質量は最も少ない質量で 820 g と A01 の検体と比較し大きい傾向にあったことによることが一因と推察される。

#### (4) 試料個体中の放射性セシウム濃度分布測定

##### (a) タケノコ (ネマガリタケ)

C. (1)の試験で用いた検体について、可食部と不可食部に分け、それぞれの質量と濃度を測定し、可食部の濃度と不可食部を含む試料全体の平均濃度との比を求めた。結果を図 19-1 及び 19-2 に示す。ここに示す通り、この比の平均は、外れ値の 1.65 を除き  $0.96 \pm 0.07$  であり、本試験の検体濃度の範囲において濃度に依存した変化は見られなかった。また、非破壊式測定での 1 単位試料について、先端、中間、下部及び皮の部位別濃度測定を実施した。この結果を図 20 に示す[12]。ここに示す通り、濃度は可食部の先端が最も高く、中間部の 2 倍以上の結果であった。この濃度勾配の傾向は令和 3 年度のイメージングプレートによる濃度測定結果とも整合する結果であった。ただし、

で濃度の高い先端部の質量は全体質量の 5% であり、試料全体の平均濃度に及ぼす影響は限定的であることが分かった。

##### (b) タケノコ (モウソウチク)

C. (1)の試験で用いた検体について、可食部と不可食部に分け、それぞれの質量と濃度を測定し、可食部の濃度と不可食部を含む試料全体の平均濃度との比を求めた。結果を図 21-1 及び 21-2 に示す。ここに示す通り、この比の平均は、 $1.01 \pm 0.21$  であり、本試験の検体濃度の範囲において濃度に依存した変化は見られなかった。また、タケノコ 1 試料について、図 22 のように皮 (内側・外側) と可食部 (先端・中央・下部) に分け、部位別濃度測定を実施した。この結果を図 23 に示す。ここに示す通り、濃度は可食部の先端が最も高く、中間部の 1.5 倍弱の結果であった。しかしながら、ネマガリタケのタケノコと同様に先端部の質量は全体の 4% 程度であった。一方で濃度が最も低い皮の外側の質量割合が約 55% であった。本実験での検体の各部位濃度及び質量から求めた全部位の平均濃度に対する可食部の濃度は 1.35 倍であり、図 21 に示した結果より極端に有意に高い結果となった。成長が進み極端に廃棄率が高い試料においては全部位の平均濃度は可食部濃度を過小評価する可能性があることが示唆された。

図 24 に IP で取得した画像を示す。ここに示す通り可食部の先端付近に集積傾向が確認され、先に示した Ge 検出器による濃度測定の結果とその傾向が一致した。

#### (5) 検査法の提案

以上の検討結果より、不可食部を含む皮付きタケノコについて非破壊検査法を規制

当局に提案し、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（令和4年3月25日 事務連絡 厚生労働省医薬・生活衛生局食品監視安全課）」に反映された。また、野生キノコについて令和2年度のマツタケに引き継ぎ、本年度はムキタケ、ナメコ及びナメコについて一定の成果が得られたことから、マツタケと同様の手法の検査手法が適用できることが見込まれる。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。

#### (6) マニュアルの提案

非破壊式放射能測定装置を用いた測定・検査では、試料の前処理を行う従来手法と比較し、自由度が高いことから検査従事者に委ねられるところが多い。装置の取扱説明書に従うことは最低限必要だが、利用可能な実証データが少なく、実績も少ないことから取扱説明書も想定される事項を必ずしも網羅しているわけではない。特に本研究成果で得られた実証データを検査に適用する場合、その制限（適用範囲）について検査者は理解しておく必要がある。そこで本研究では、これらの装置を検査に適用する場合に遵守すべき事項をこれまで得られた研究成果に基づきマニュアルとして示した。

#### E. 結論

本研究では、異なる機種の子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、野生キノコ試料、並びにネマガリタケ及びモウソウチク

のタケノコ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、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、いずれも野生キノコ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、野生キノコのうちムキタケ、ナメコ及びナラタケについて 30~70 Bq/kg 程度の範囲にあった。また、ネマガリタケのタケノコについて、FF1: 45 Bq/kg、AFT-NDA2: 61 Bq/kg の結果を得た。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いることが示された。また、モウソウチクのタケノコについては、ベルトコンベア式の子破壊式装置による試験を実施し、50 Bq/kg を超えるスクリーニングレベルが設定可能であることが確認できた。また、いずれのタケノコにおいても試料中の放射性セシウム濃度分布の測定結果から、不可食部を含む皮付きでの測定により評価される試料全体の平均濃度は、可食部の濃度とほぼ同程度であることが示された。このことから、皮つきタケノコについてもマツタケに適用されているスクリーニング法の適用が可能であることが見込まれた。

以上の結果から、ネマガリタケ及びモウ

ソウチクの皮つきタケノコ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。さらに、また、野生キノコについて令和2年度のマツタケに引き継ぎ、本年度はムキタケ、ナメコ及びナメコについて一定の成果が得られたことから、マツタケと同様の手法の検査手法が適用できることが見込まれた。

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。これには今後、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[11]。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ばらつき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.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/Co  
ntributing\\_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

[10] 古高克昌 他 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

[11] 古高克昌 他 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

[12] 鳥野沙和、山田崇裕、戸真弓、蜂須賀暁子 ネマガリタケ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 2021/10/27

## F. 研究発表

### 1. 論文発表

なし

### 2. 学会発表

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

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

鳥野沙和、山田崇裕、戸真弓、蜂須賀暁子 ネマガリタケ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

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

## 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 非破壊式装置のスクリーニングレベル及び99%予測区間上限評価結果

	試料種別	FF1	AFT-NDA2	Hitz
スクリーニングレベル指示値 Bq/kg	ムキタケ	71	27	42
	ナメコ	70	43	66
	ナラタケ	64	44	60
スクリーニングレベル指示値 の濃度換算値 Bq/kg	ムキタケ	67	32	42
	ナメコ	60	58	62
	ナラタケ	66	62	75

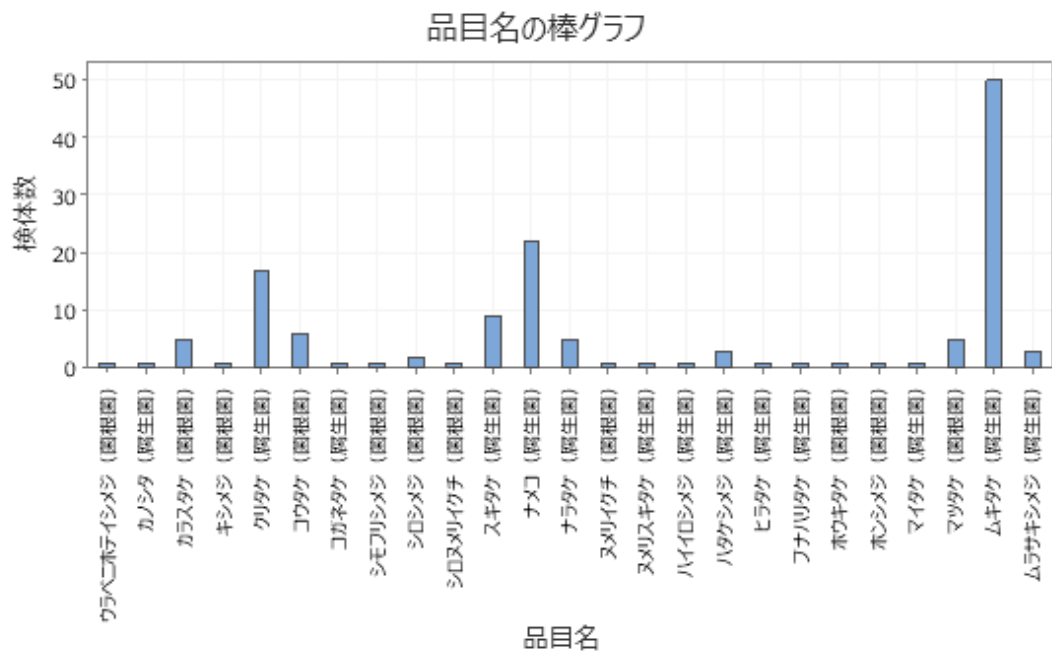


図1 測定に用いた野生キノコの種別と各検体数



図2 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))

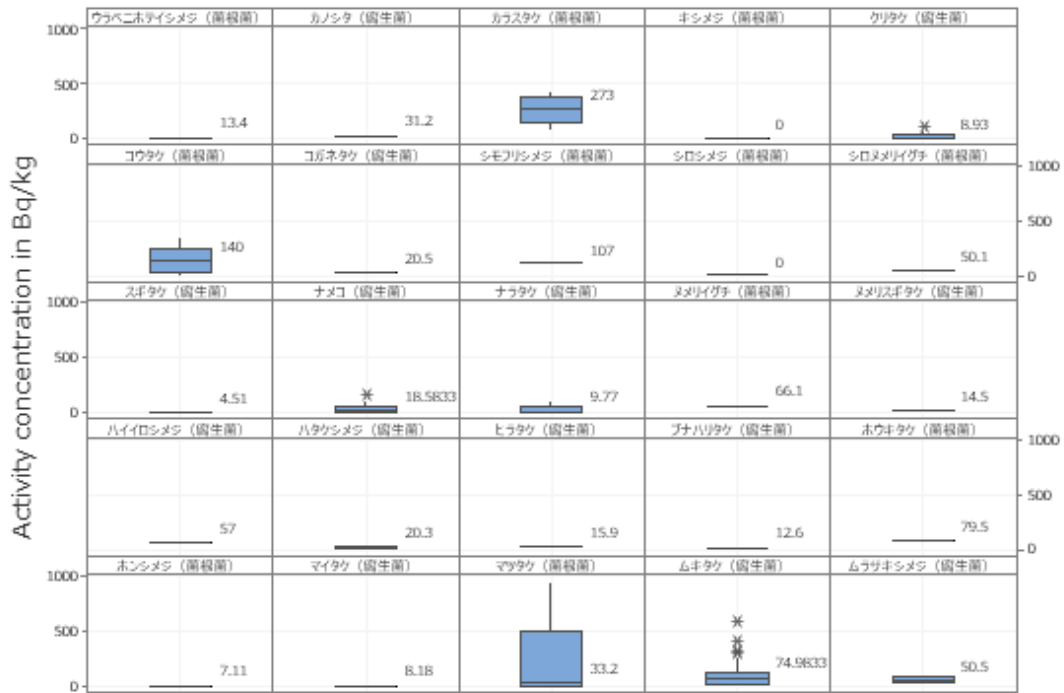


図 3-1 測定に用いたキノコの種別毎の濃度分布(個別値のプロット)  
数値は中央値

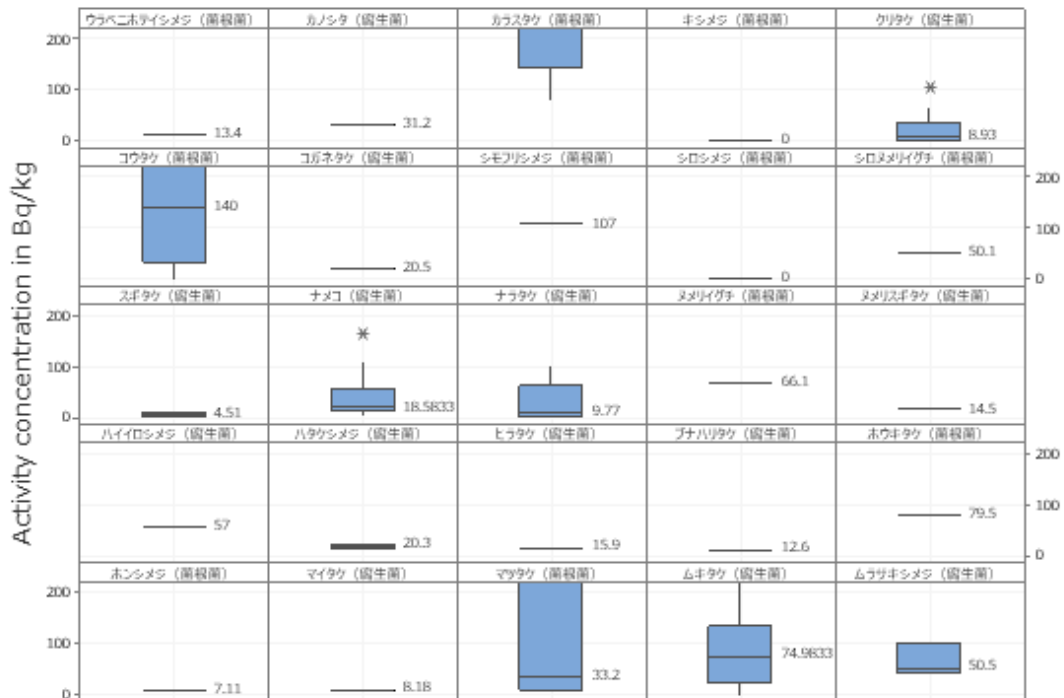


図 3-2 測定に用いたキノコの種別毎の濃度分布(個別値のプロット)  
数値は中央値、(濃度 < 200Bq/kg の拡大表示)



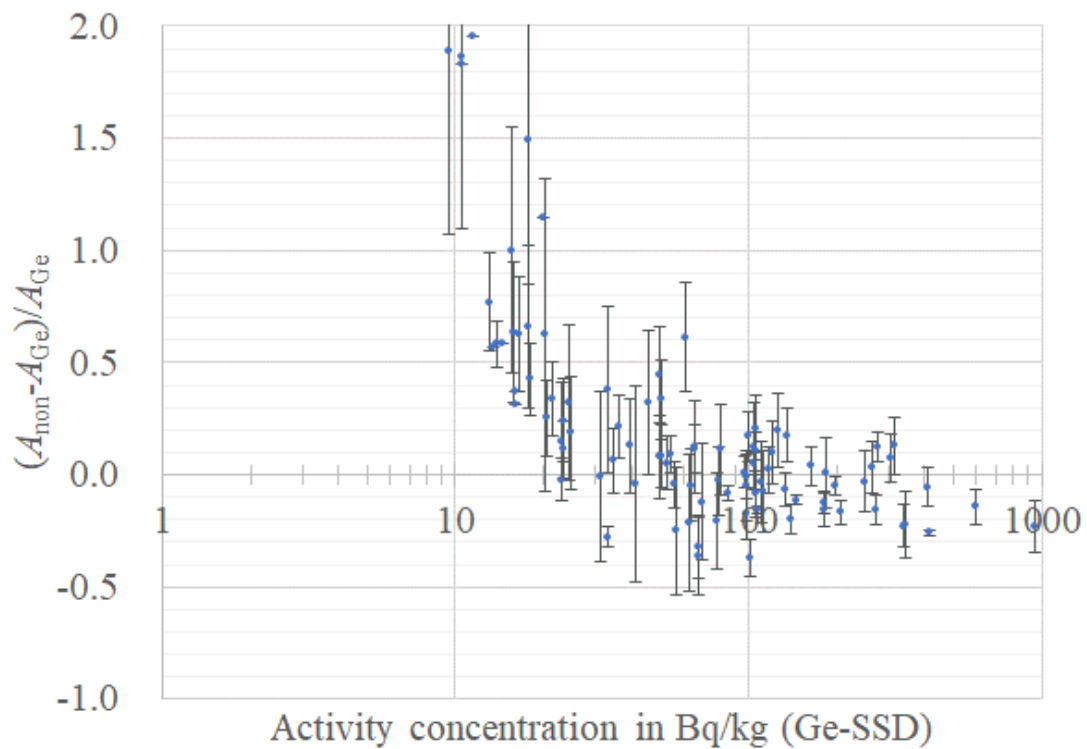


図 4-1 非破壊式装置（FF1）による測定結果の Ge 検出器の結果との差

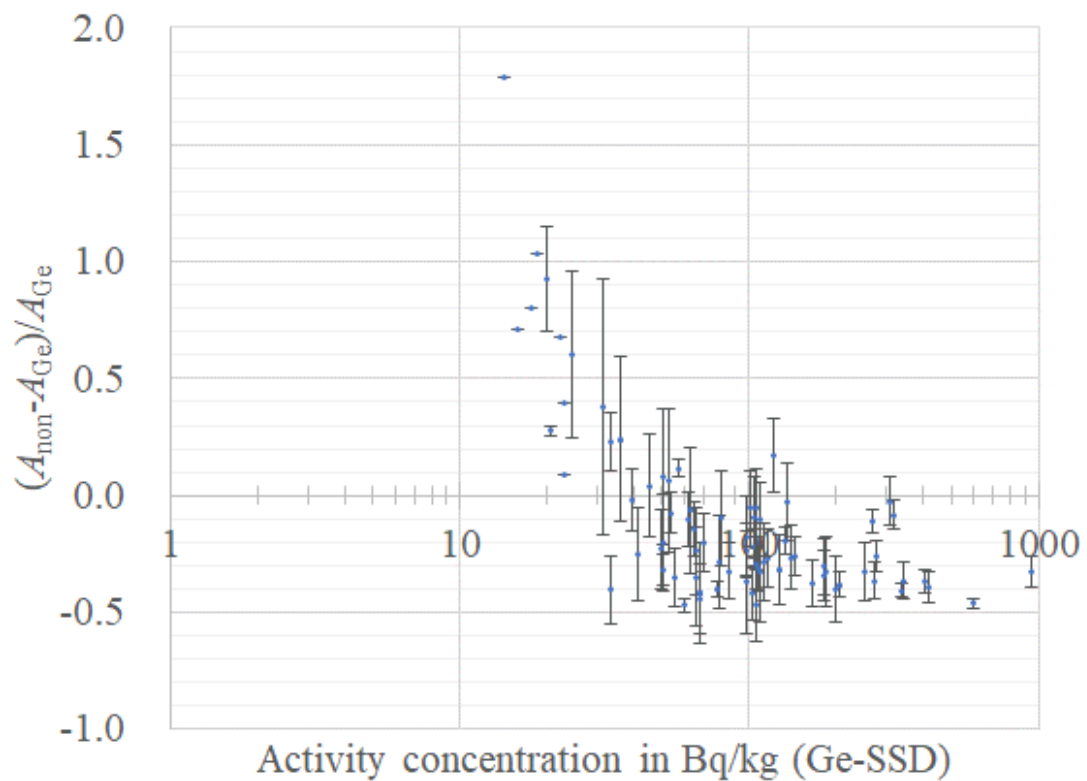


図 4-2 非破壊式装置（AFT-NDA2）による測定結果の Ge 検出器の結果との差

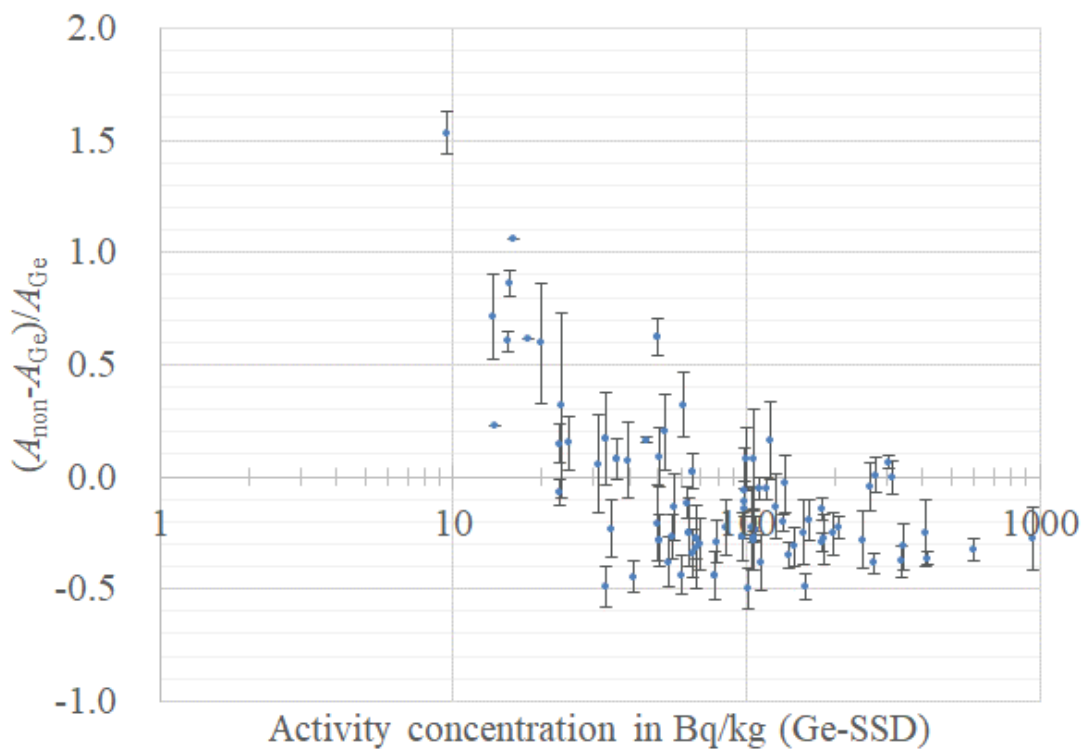


図 4-3 非破壊式装置（Hitz）による測定結果の Ge 検出器の結果との差

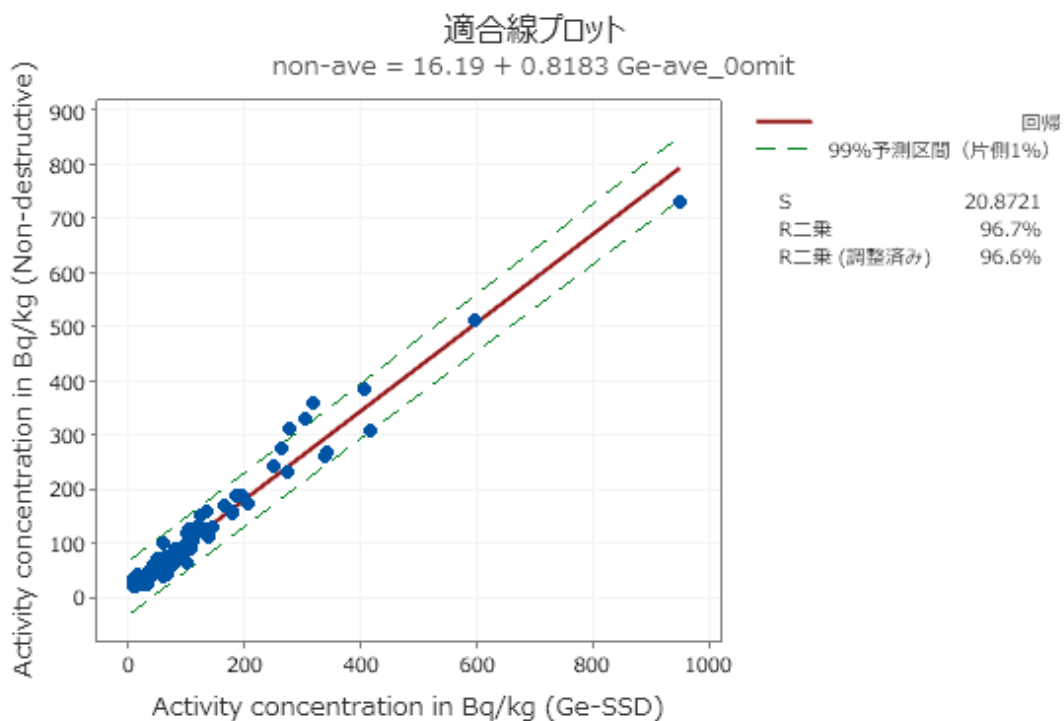


図 5-1 非破壊式装置（FF1）の Ge 検出器との測定結果比較（4 回測定 averages）

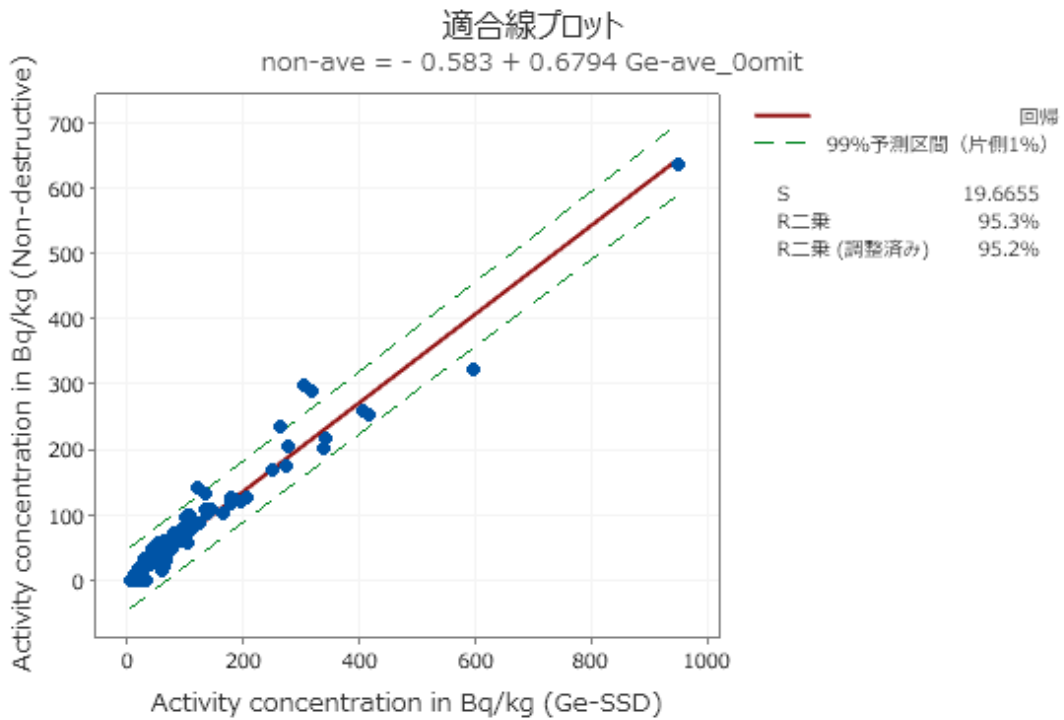


図 5-2 非破壊式装置 (AFT-NDA2) の Ge 検出器との測定結果比較 (4 回測定の平均)

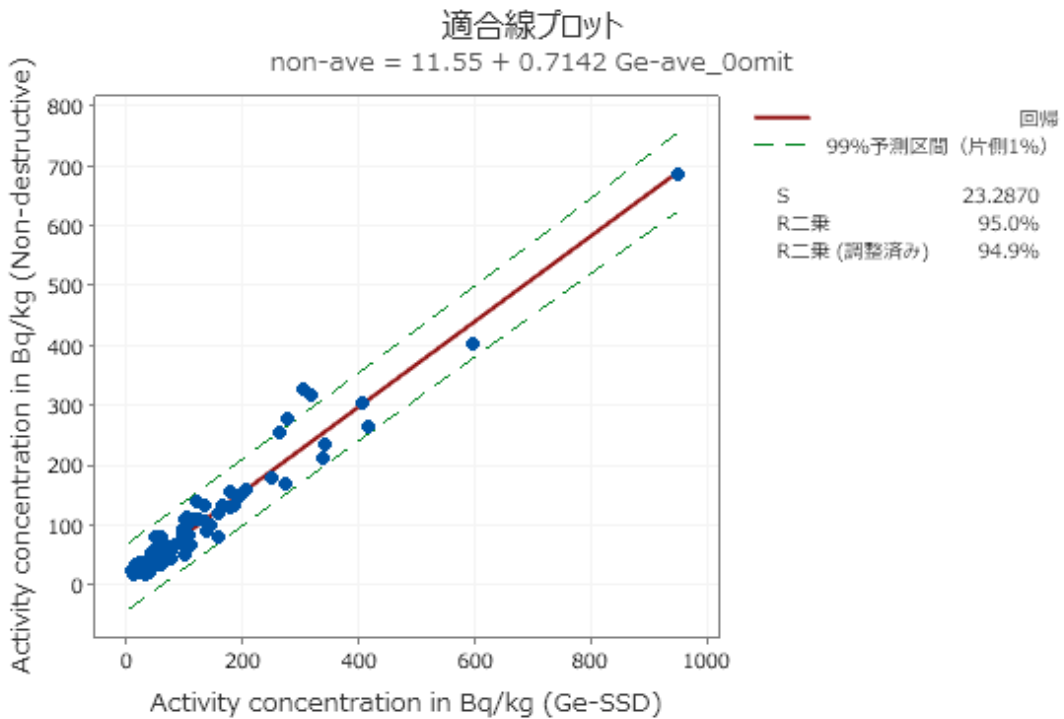


図 5-3 非破壊式装置 (Hitz) の Ge 検出器との測定結果比較 (4 回測定 of 平均)

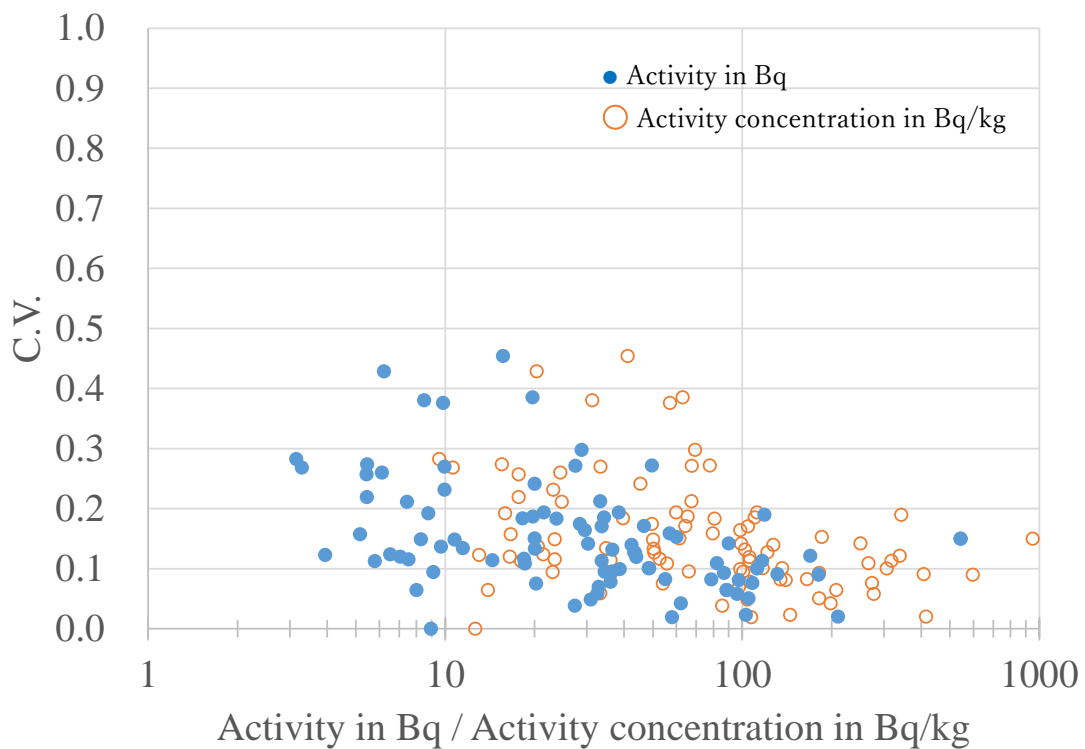


図 6-1 非破壊式装置（FF1）の複数回測定結果の変動係数（C.V.）

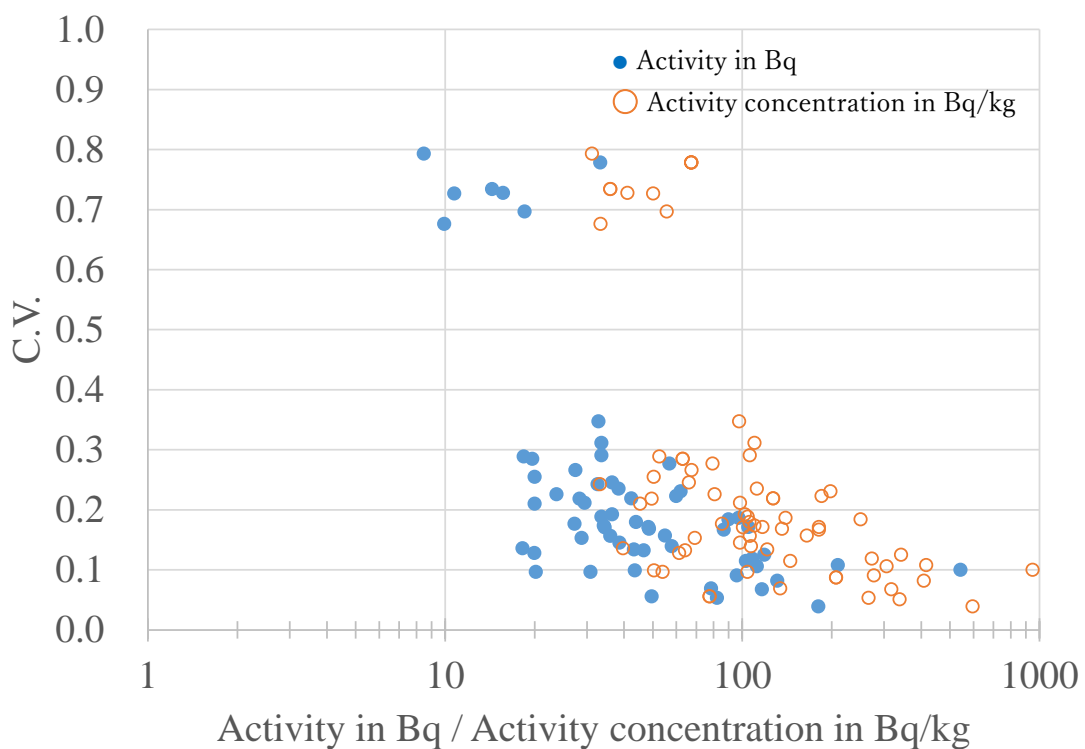


図 6-2 非破壊式装置（AFT-NDA2）の複数回測定結果の変動係数（C.V.）

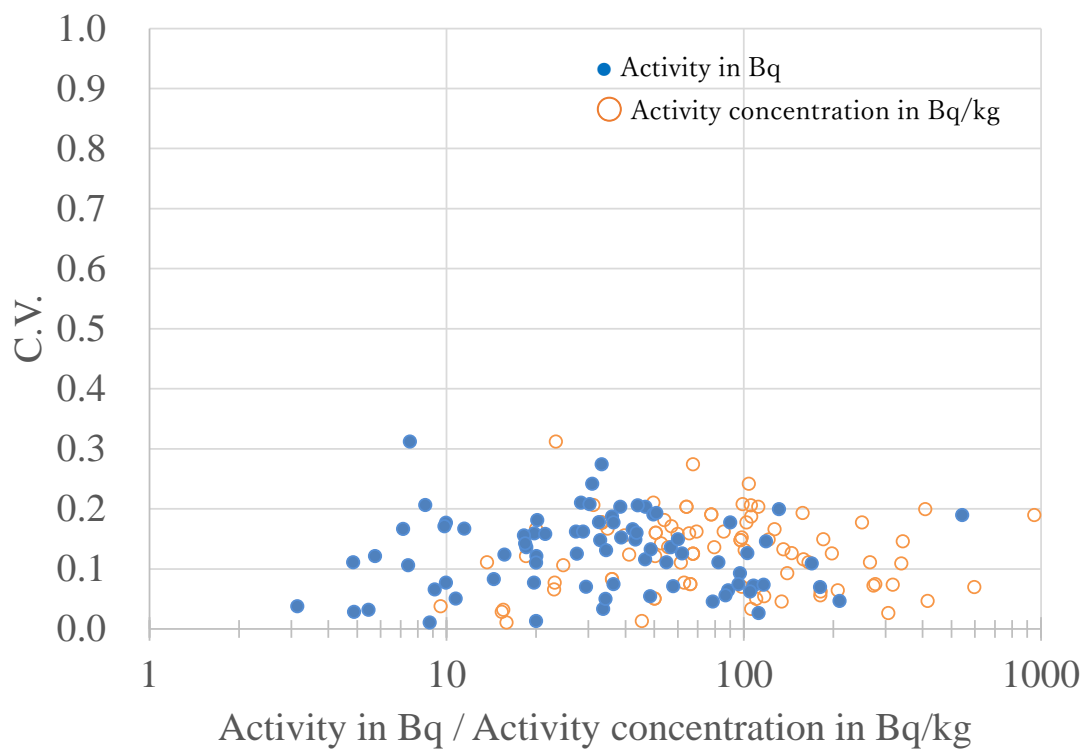


図 6-3 非破壊式装置 (Hitz) の複数回測定結果の変動係数 (C.V.)

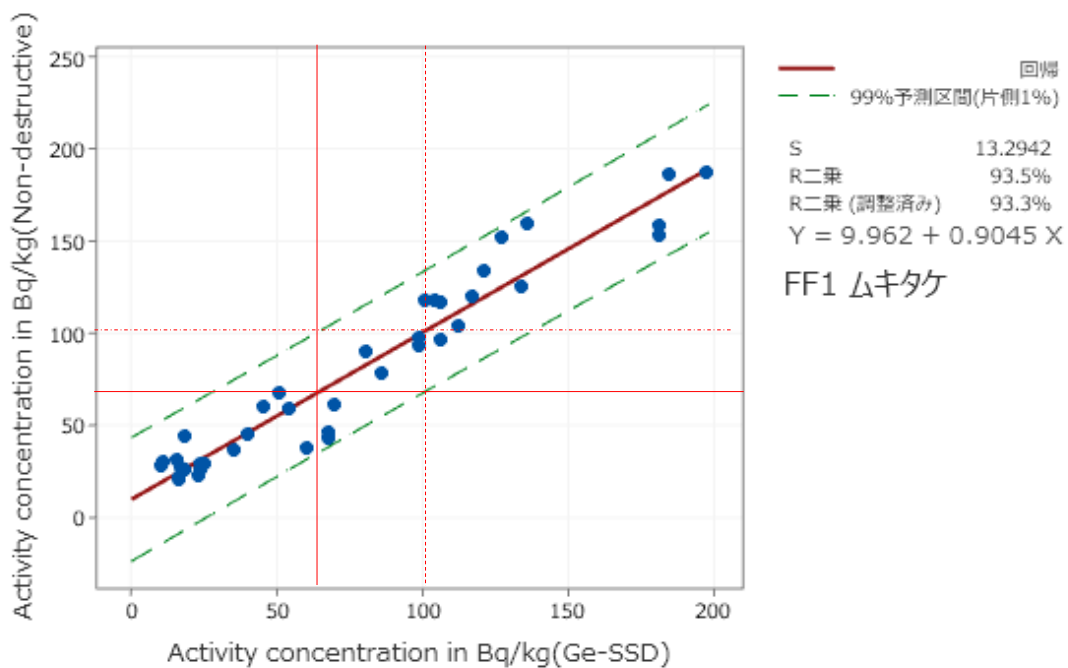


図 7-1 非破壊式装置 (FF1) と Ge 検出器の測定結果による品目別回帰直線 (Δキタケ)

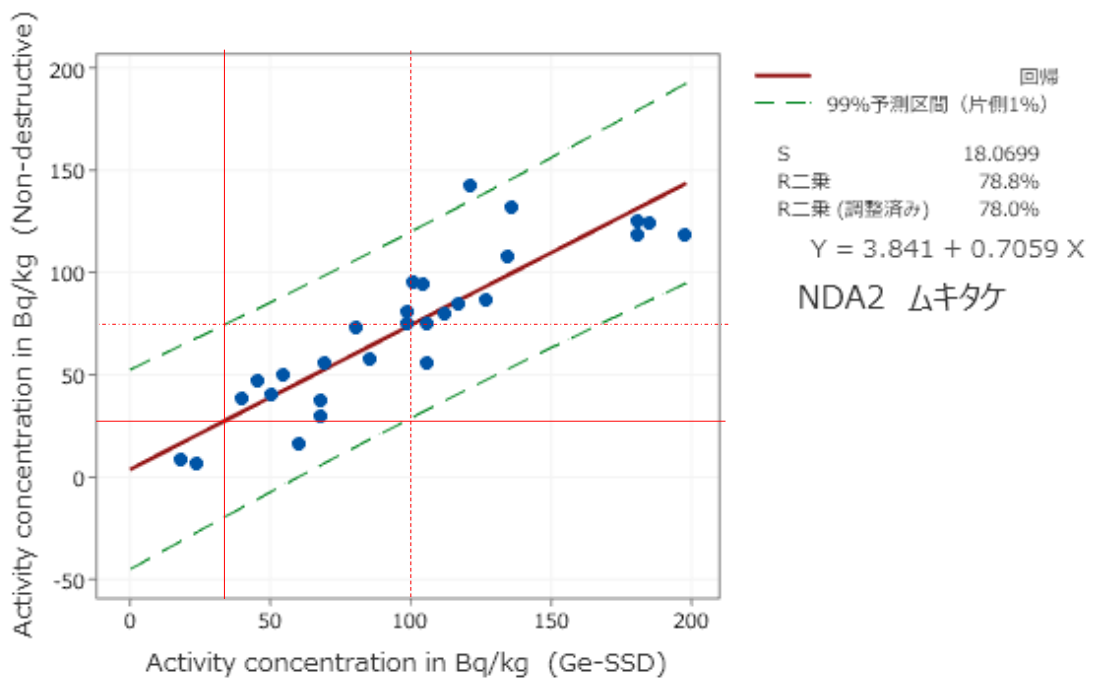


図 7-2 非破壊式装置 (AFT-NDA2) と Ge 検出器の測定結果による品目別回帰直線 (ムキタケ)

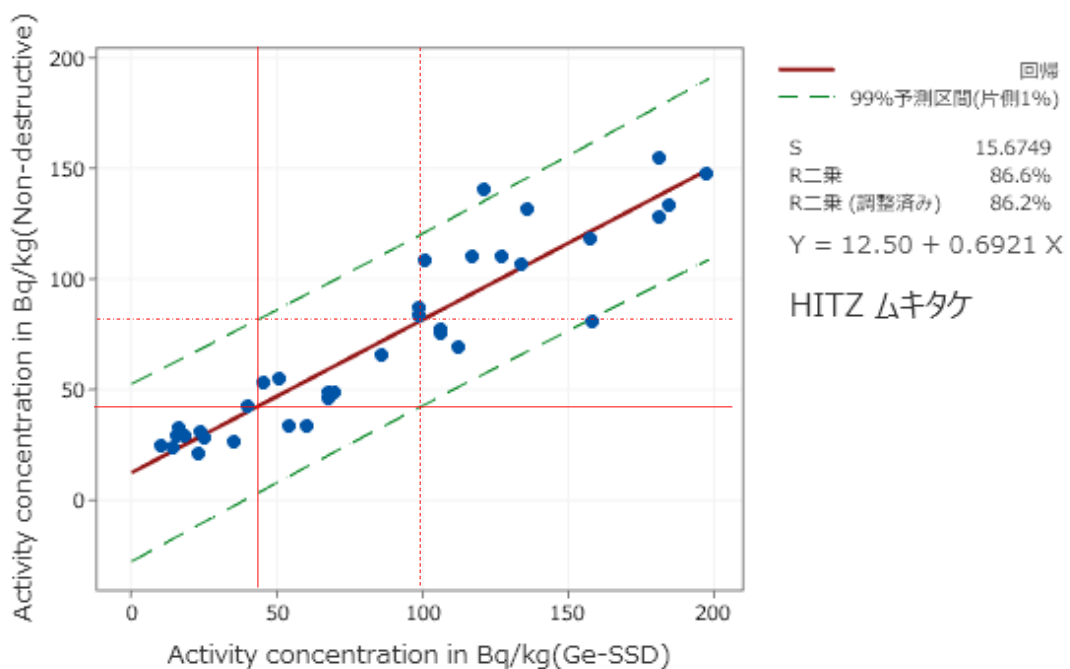


図 7-3 非破壊式装置 (Hitz) と Ge 検出器の測定結果による品目別回帰直線 (ムキタケ)

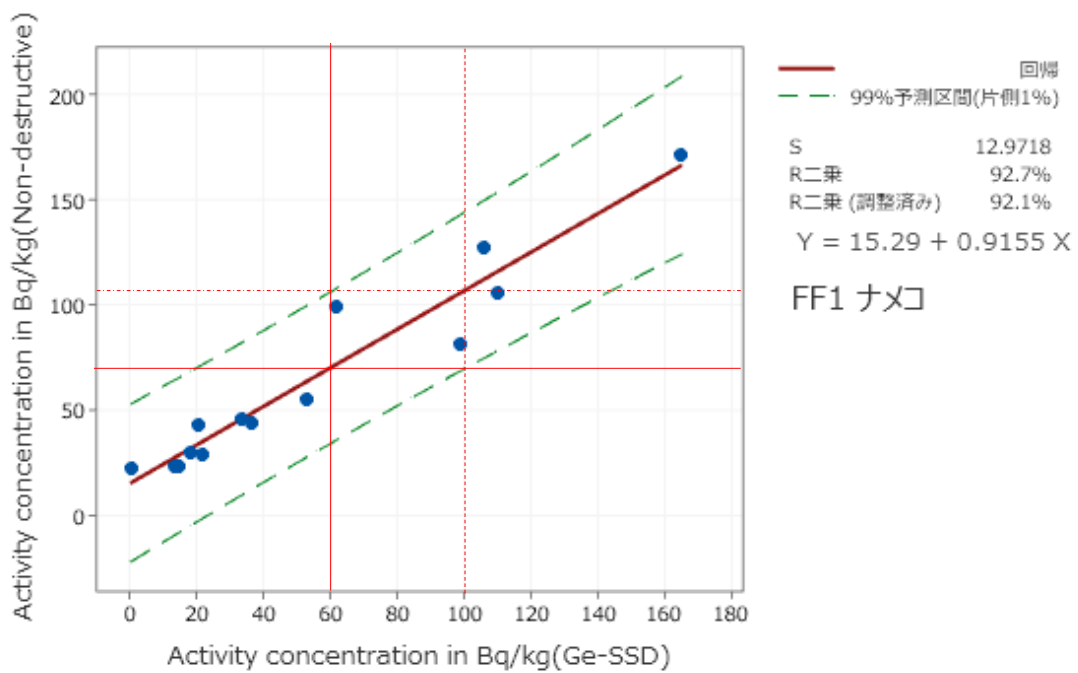


図 8-1 非破壊式装置 (FF1) と Ge 検出器の測定結果による品目別回帰直線 (ナメコ)

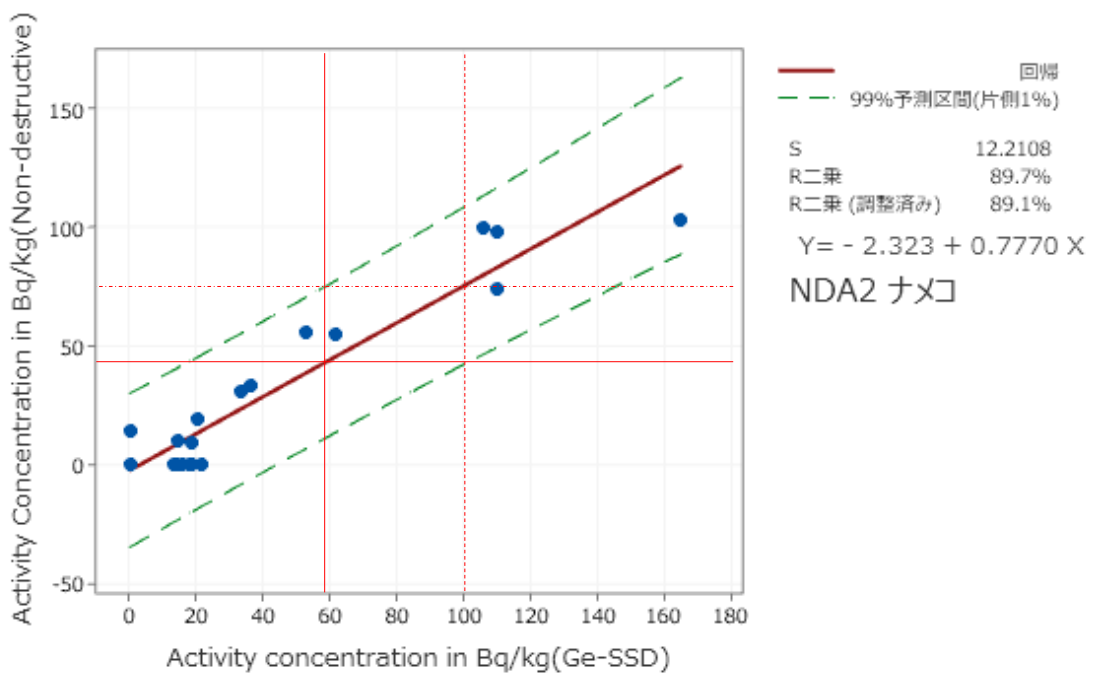


図 8-2 非破壊式装置 (AFT-NDA2) と Ge 検出器の測定結果による品目別回帰直線 (ナメコ)

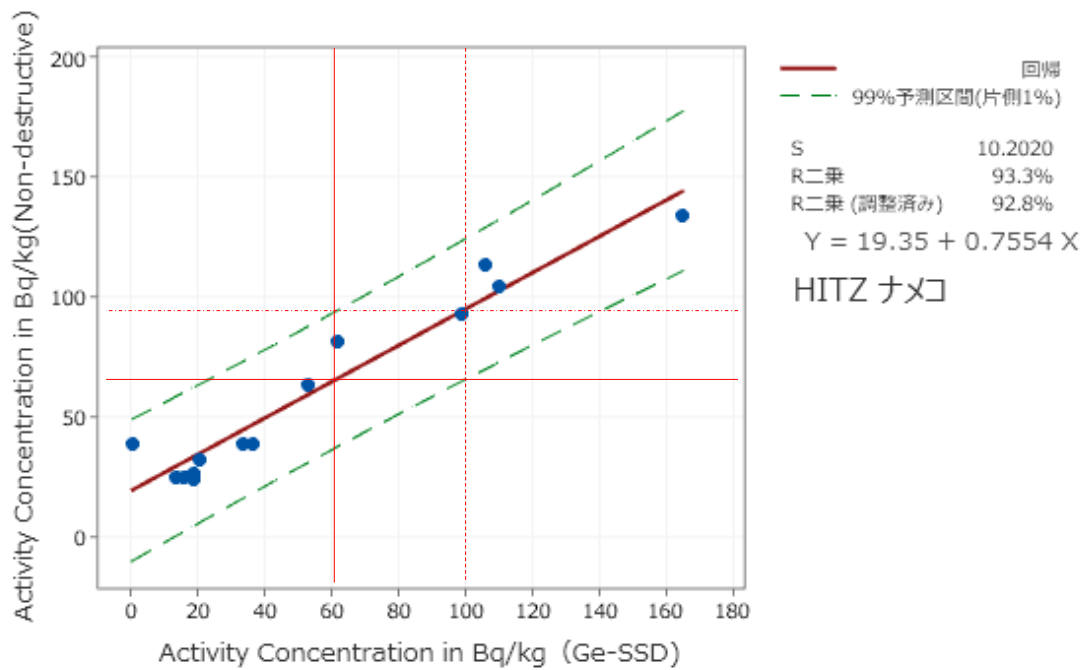


図 8-3 非破壊式装置（Hitz）と Ge 検出器の測定結果による品目別回帰直線（ナメコ）

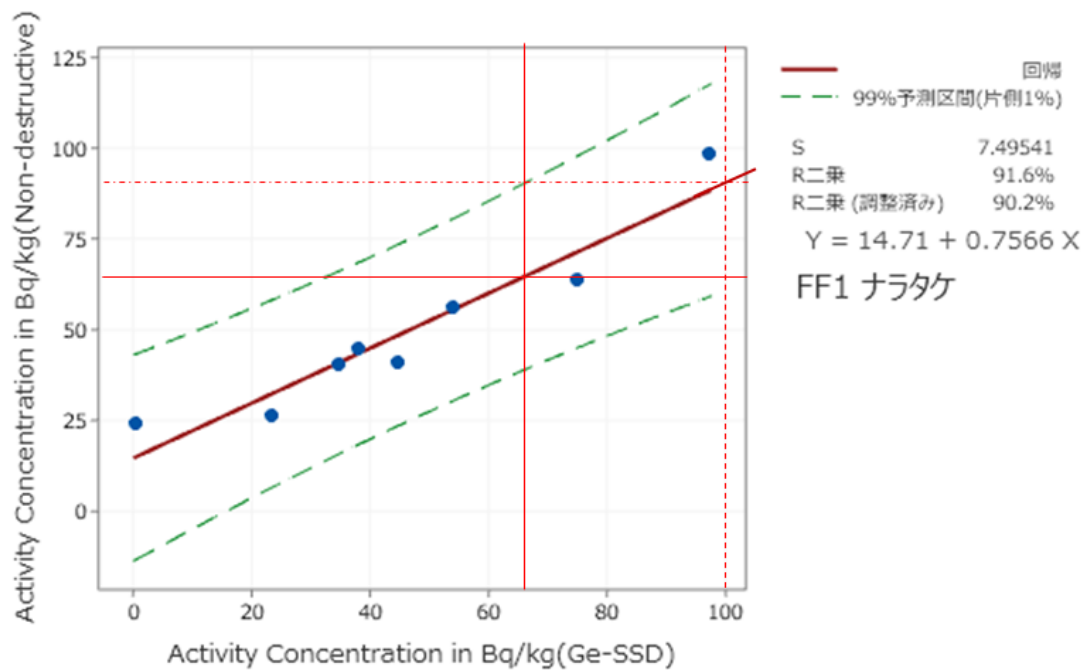


図 9-1 非破壊式装置（FF1）と Ge 検出器の測定結果による品目別回帰直線（ナラタケ）



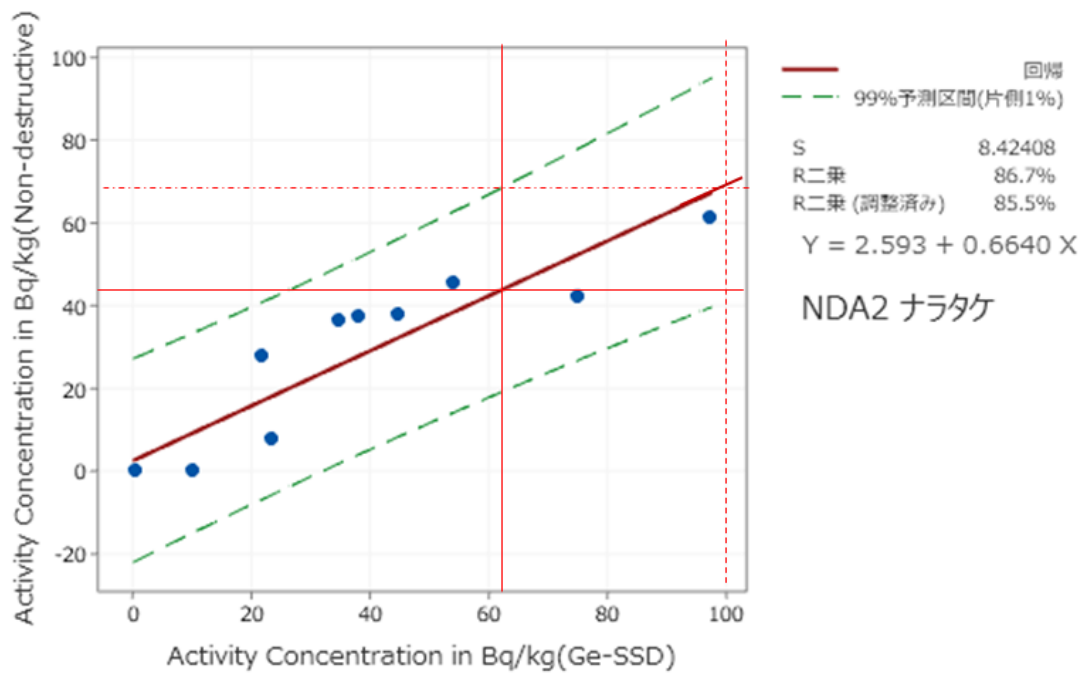


図 9-2 非破壊式装置（AFT-NDA2）と Ge 検出器の測定結果による品目別回帰直線（ナラタケ）

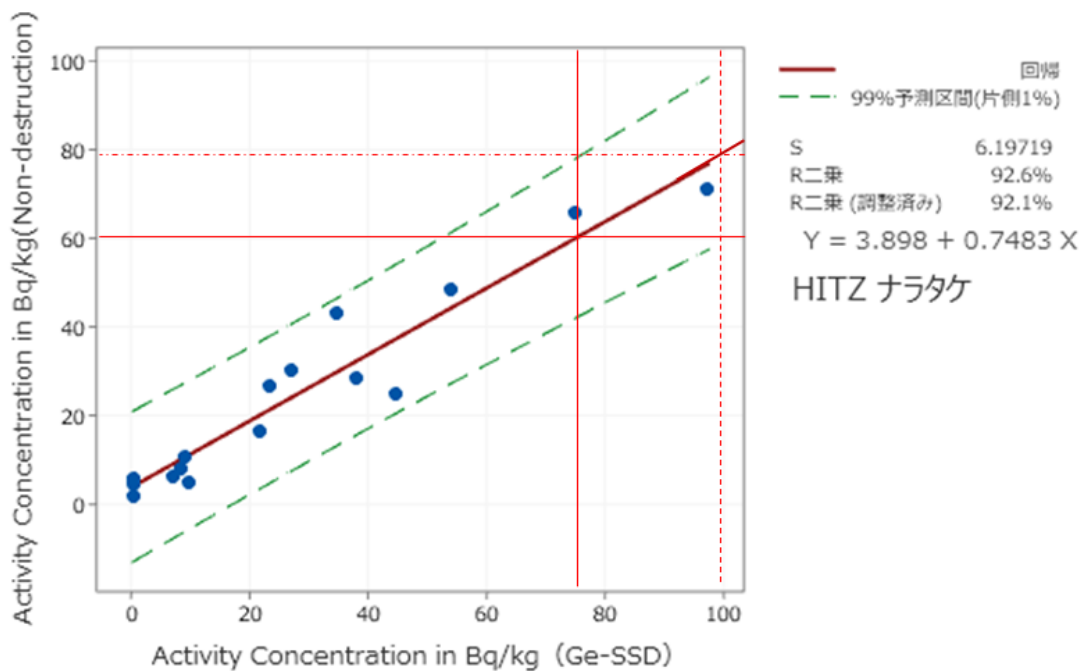


図 9-3 非破壊式装置（Hitz）と Ge 検出器の測定結果による品目別回帰直線（ナラタケ）

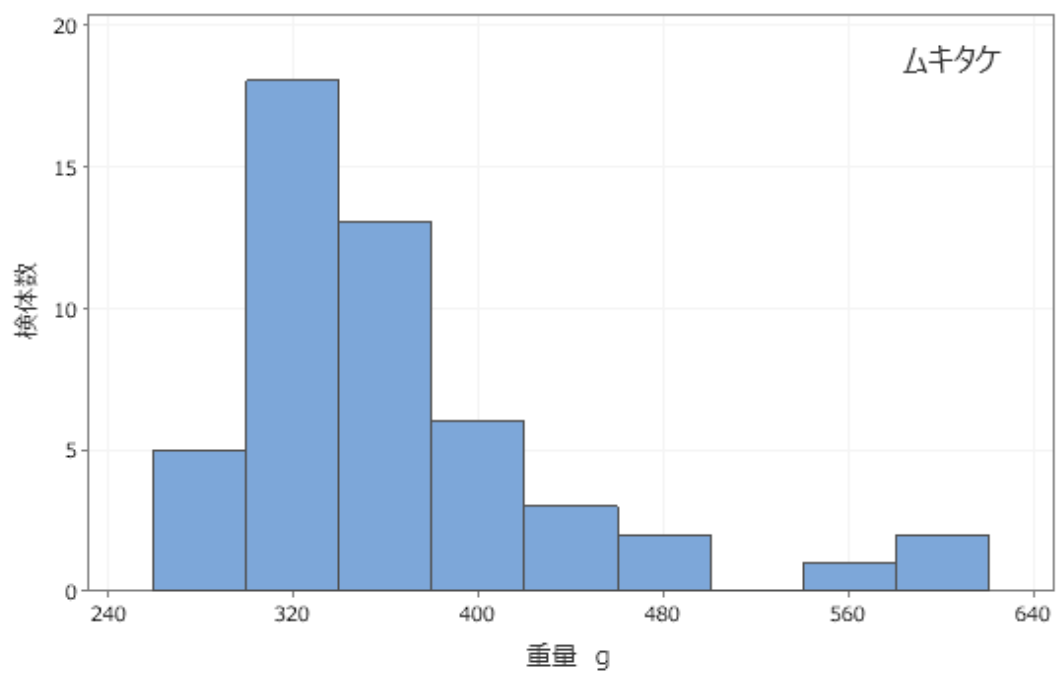


図 10-1 測定に用いたムキタケの重量分布

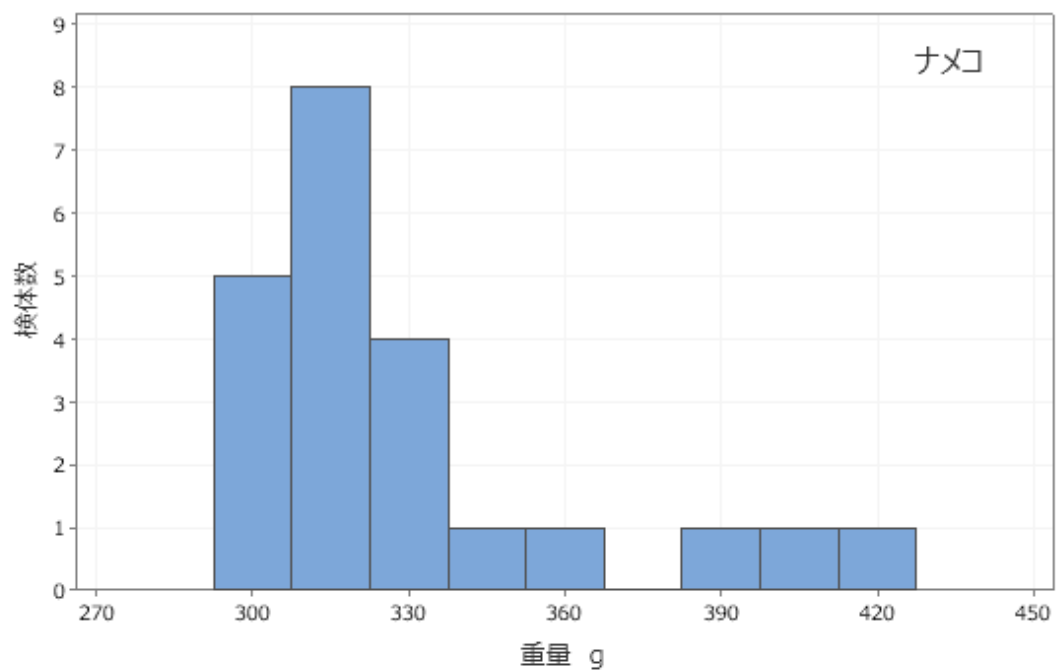


図 10-2 測定に用いたナメコの濃度分布

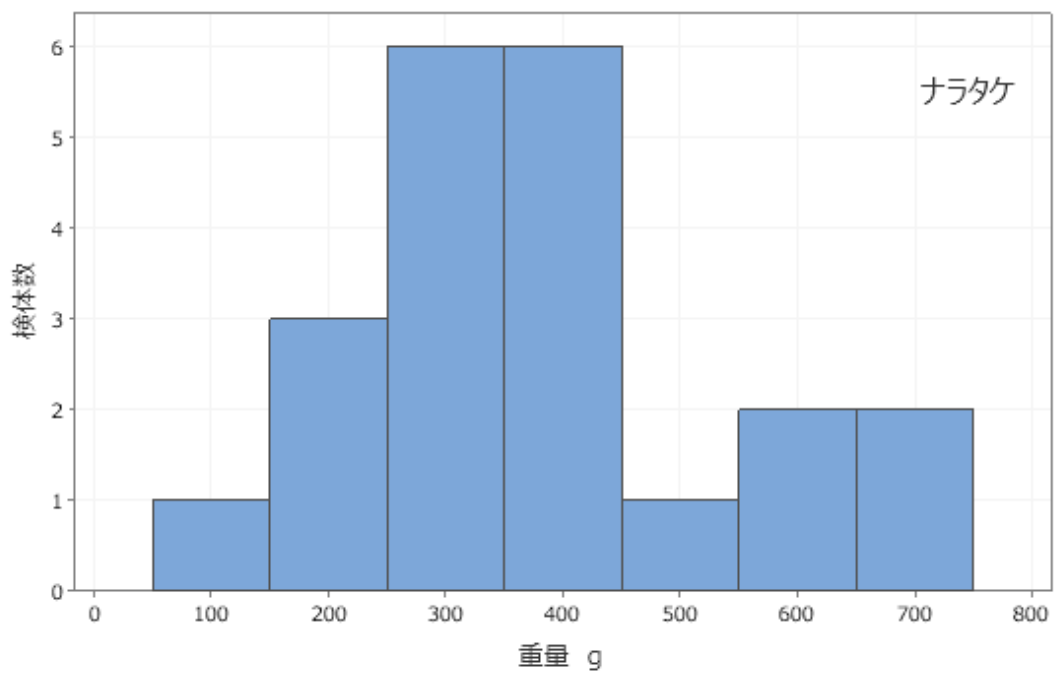


図 10-3 測定に用いたナラタケの濃度分布

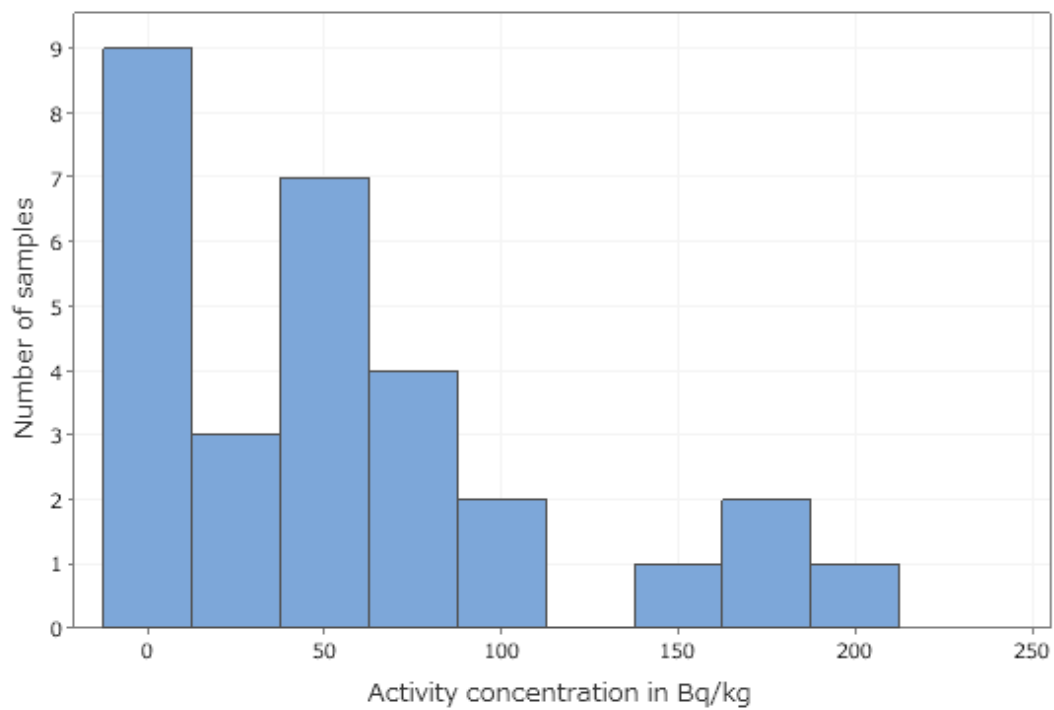


図 11 測定に用いたネマガリタケの濃度分布

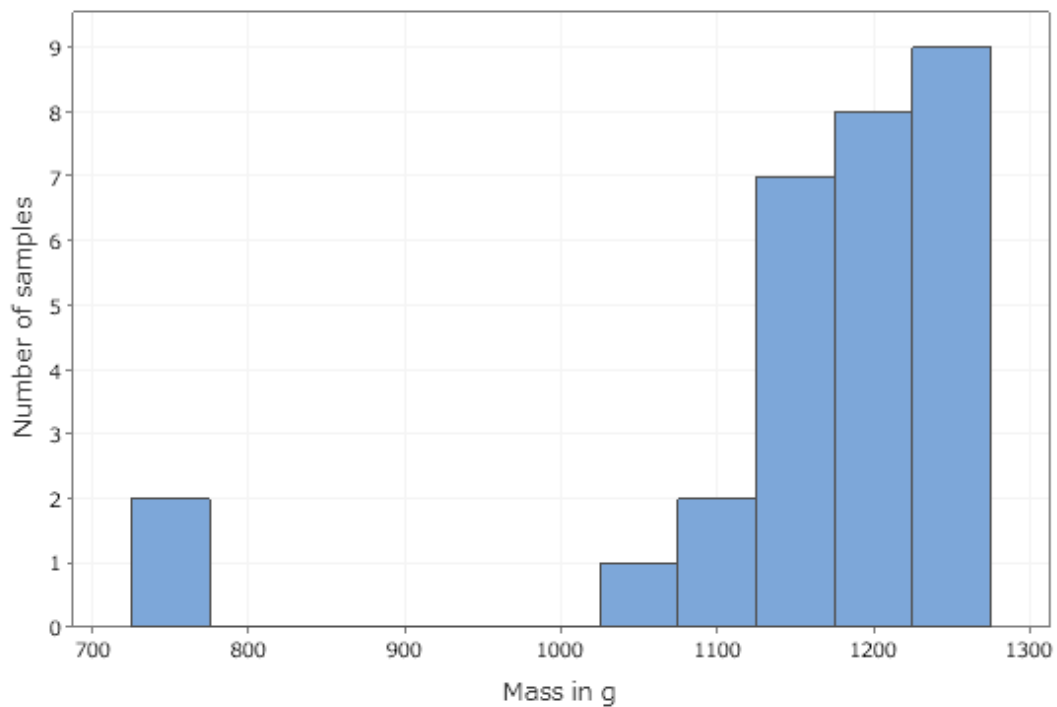


図 12 測定に用いたネマガリタケの質量分布

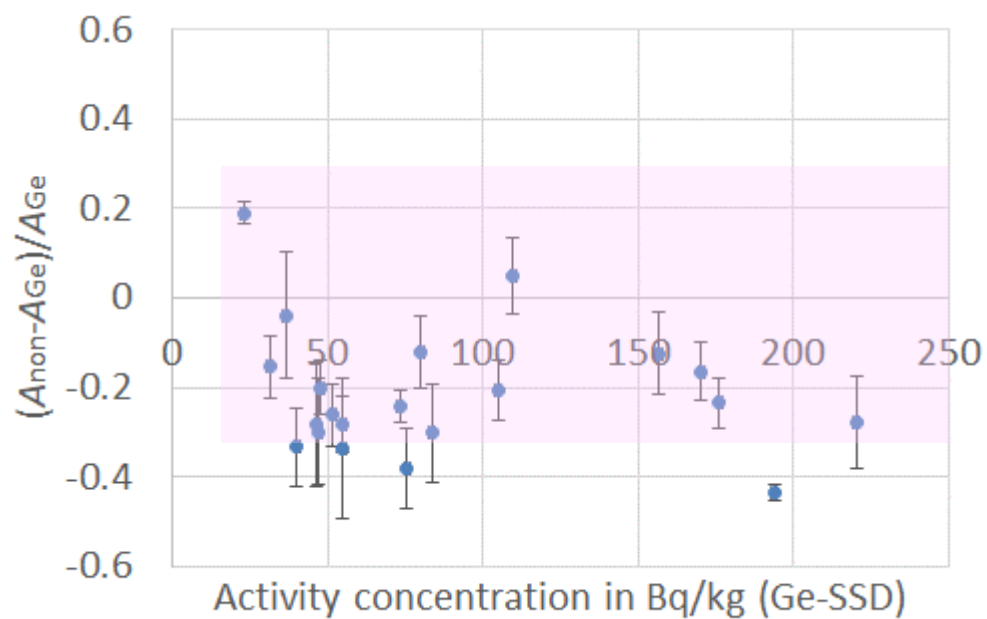


図 13-1 非破壊式装置 (FF1) による測定結果の Ge 検出器の結果との差 (ネマガリタケ) 濃度は不可食部を含む平均濃度を表す。

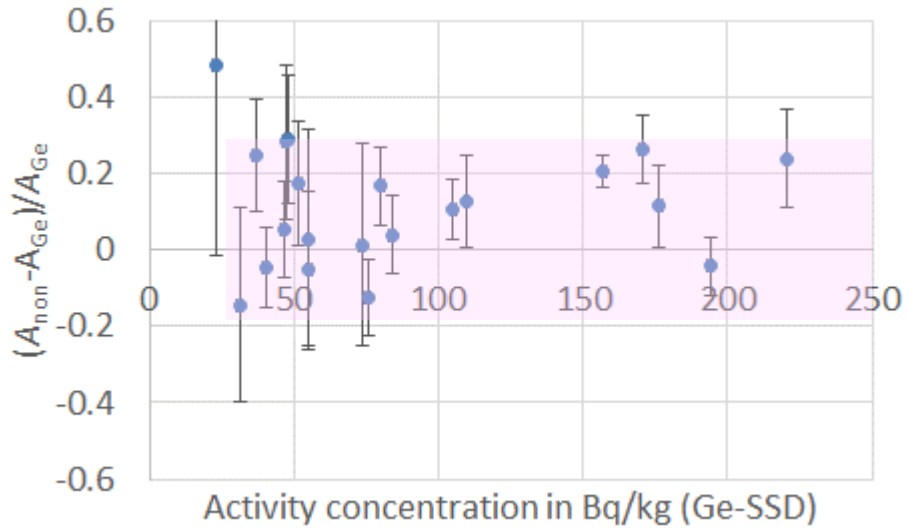


図 13-2 非破壊式装置（AFT-NDA2）による測定結果の Ge 検出器の結果との差（ネマガリタケ）濃度は不可食部を含む平均濃度を表す。

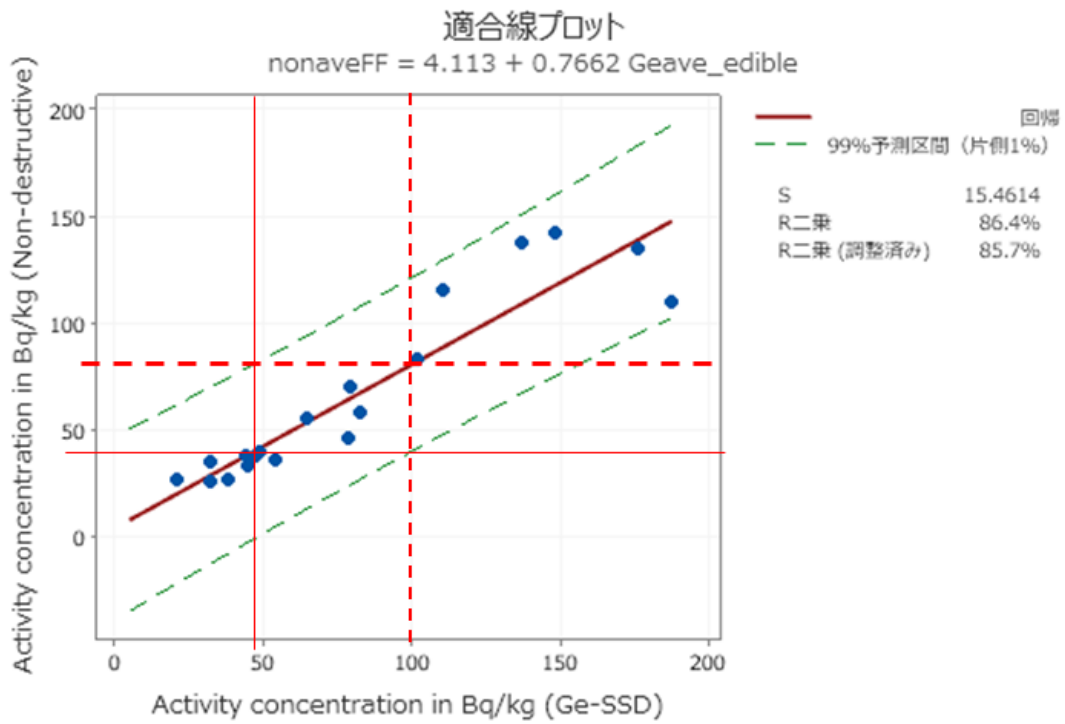


図 14-1 非破壊式装置（FF1）と Ge 検出器の測定結果による 99%予測区間（ネマガリタケ）

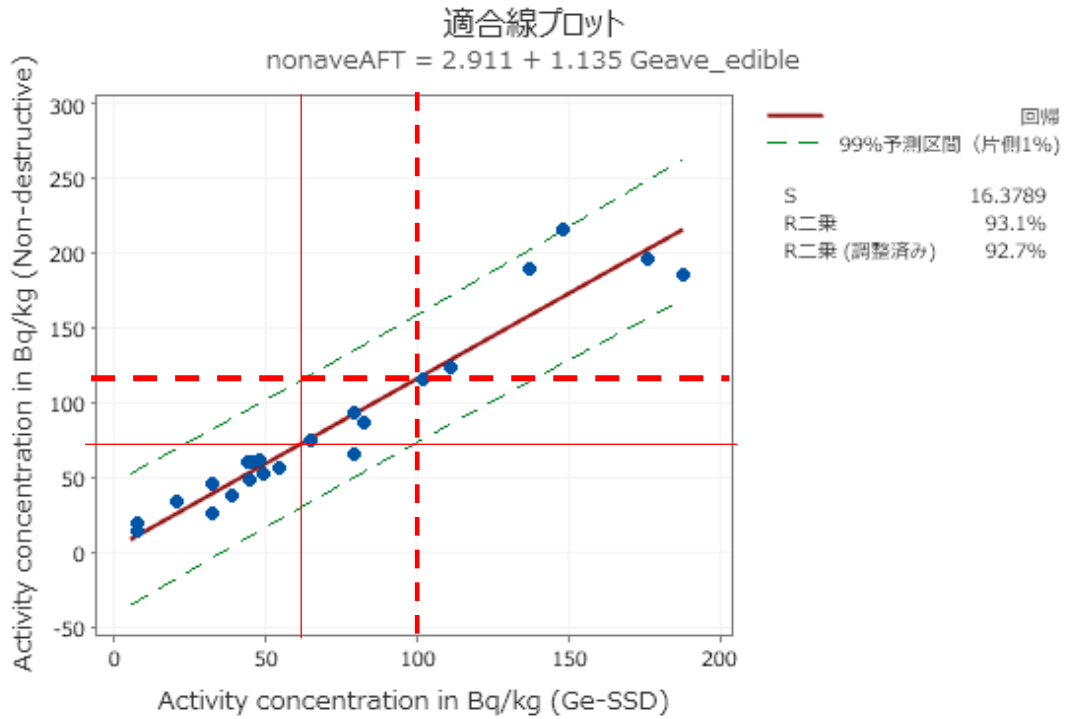


図 14-2 非破壊式装置 (AFT-NDA2) と Ge 検出器の測定結果による 99%予測区間 (ネマガリタケ)

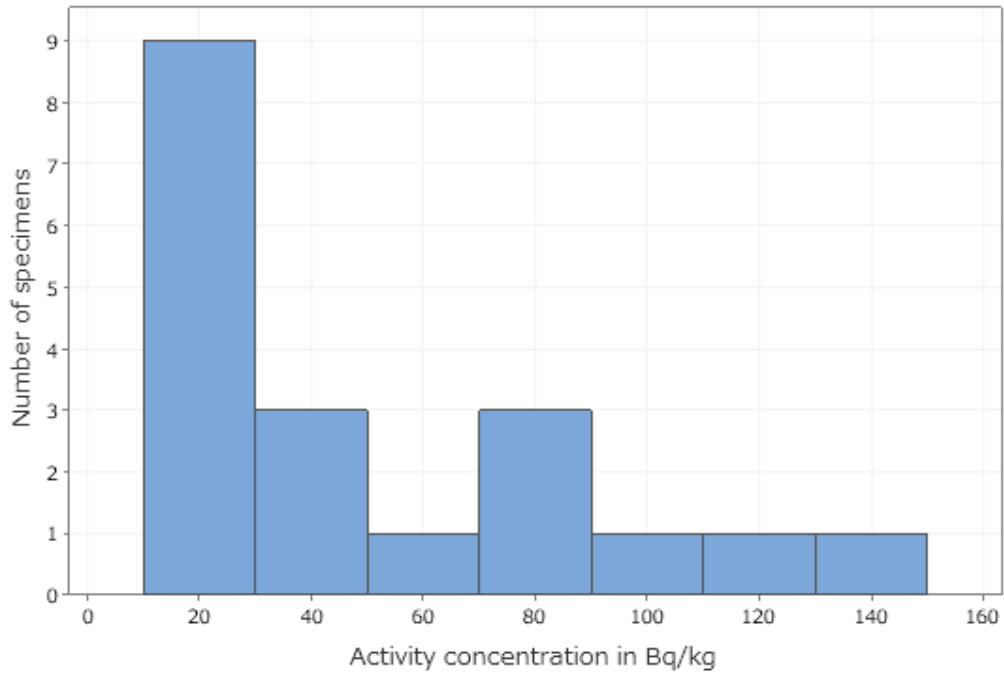


図 15-1 測定に用いたタケノコ（モウソウチク）の質量分布（A01）

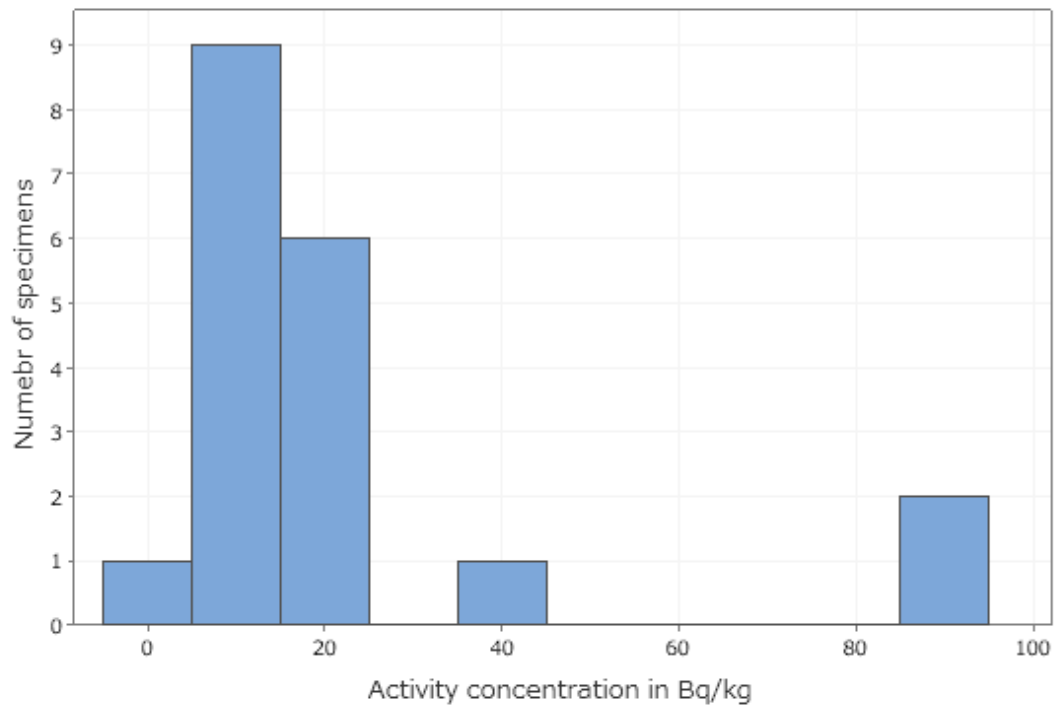


図 15-2 測定に用いたタケノコ（モウソウチク）の質量分布（A01S）

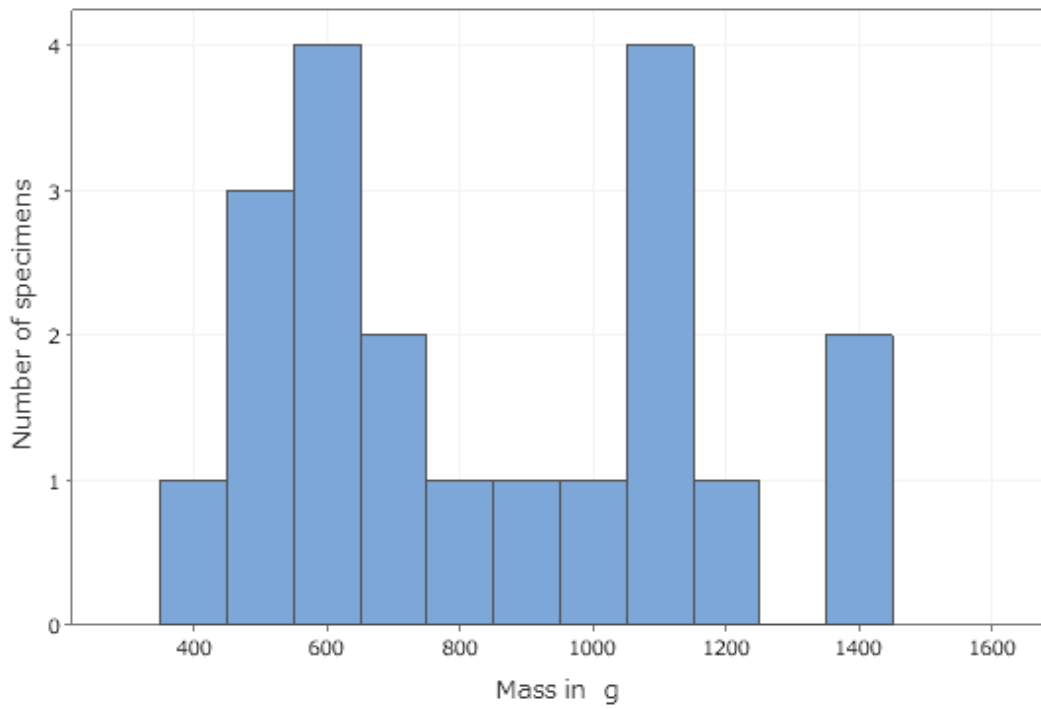


図 16-1 測定に用いたタケノコ（モウソウチク）の濃度分布（A01）

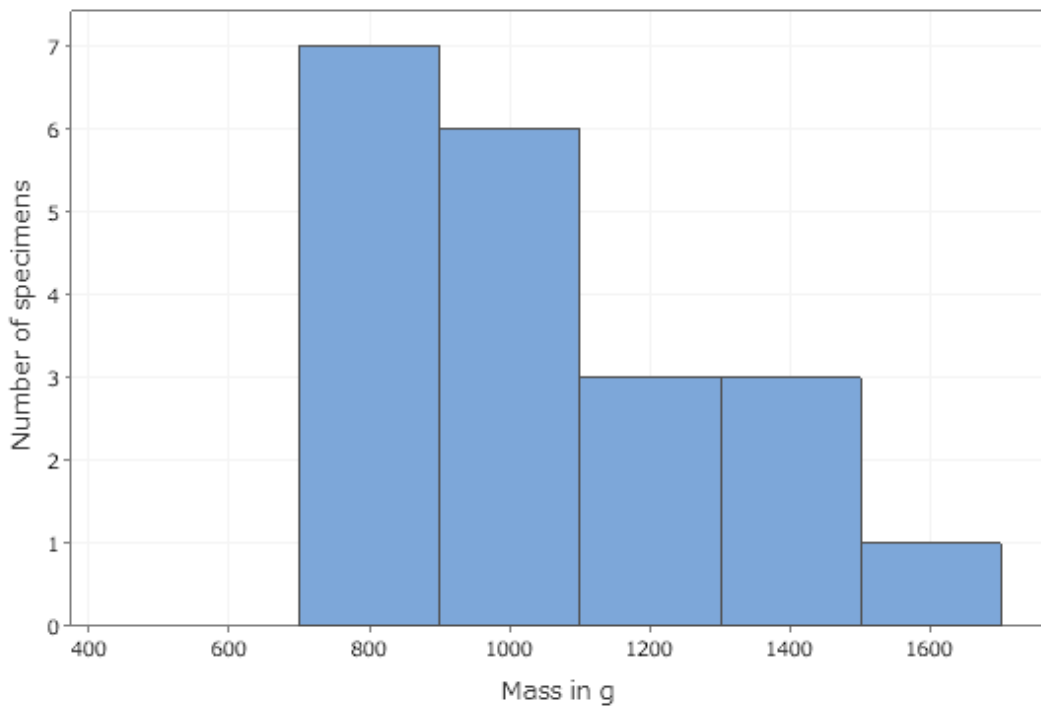


図 16-2 測定に用いたタケノコ（モウソウチク）の濃度分布（A01S）



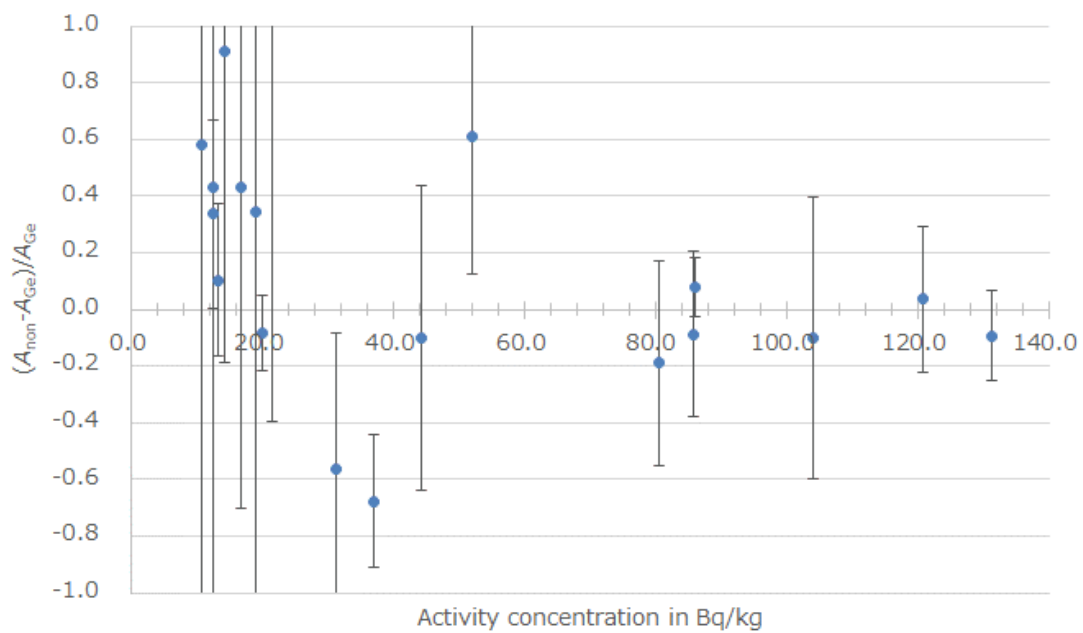


図 17-1 非破壊式装置 (A01) による測定結果の Ge 検出器の結果との差 (モウソウチク) 濃度は不可食部を含む平均濃度を表す。

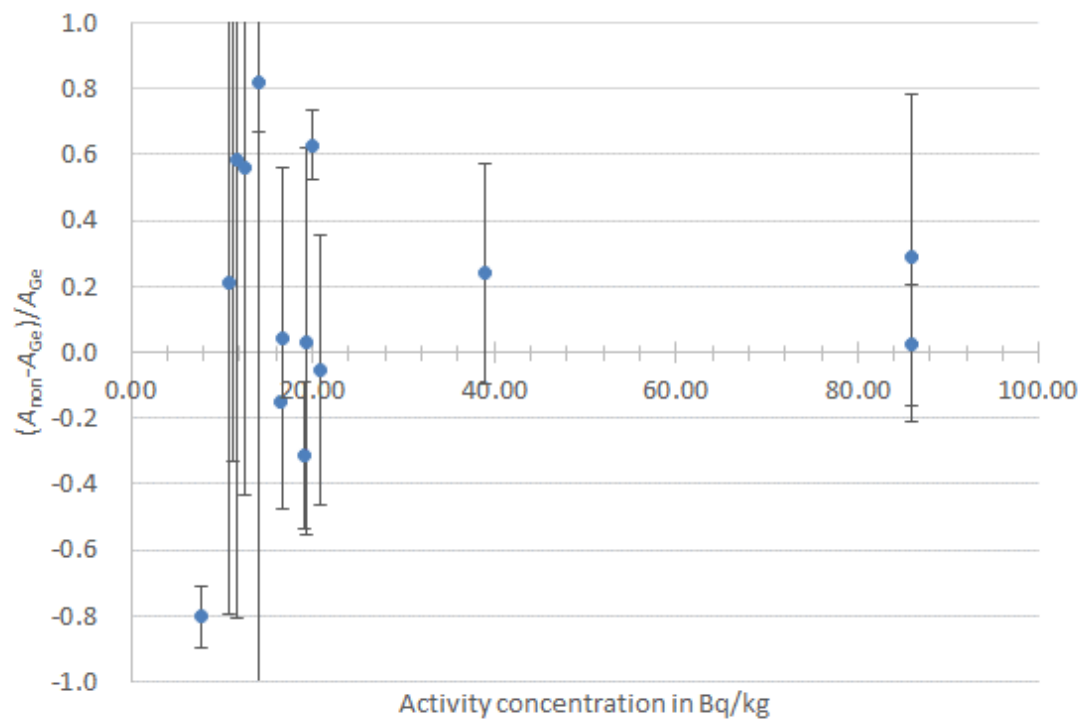


図 17-2 非破壊式装置 (A01S) による測定結果の Ge 検出器の結果との差 (モウソウチク) 濃度は不可食部を含む平均濃度を表す。

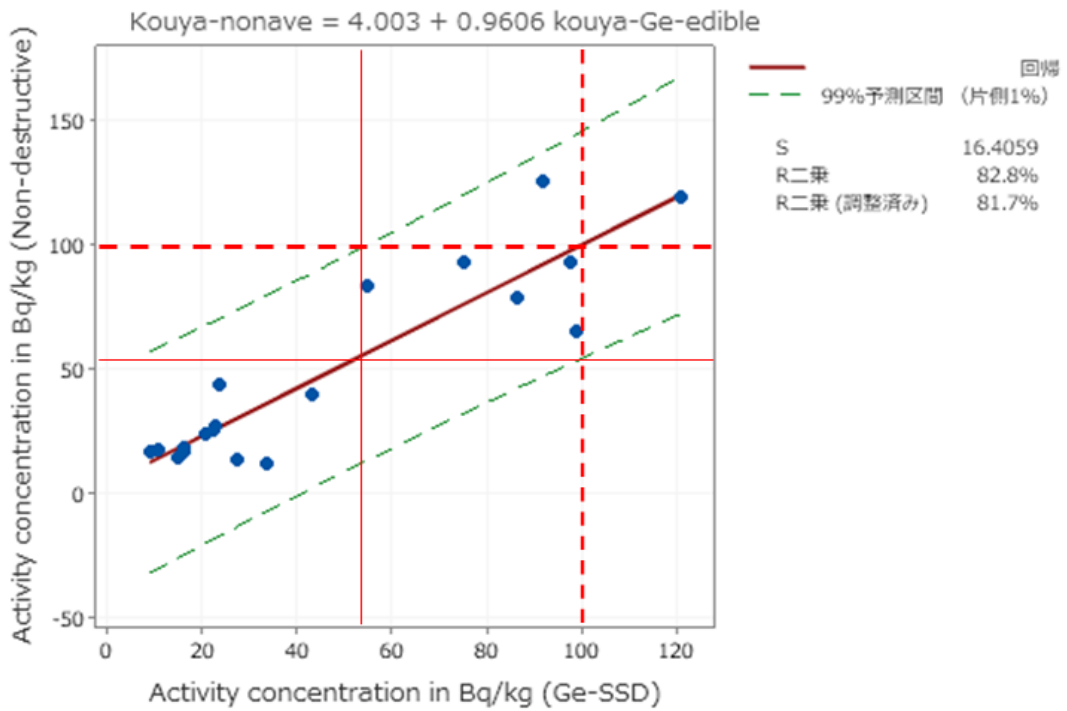


図 18-1 非破壊式装置 (A01) と Ge 検出器の測定結果による 99%予測区間 (モウソウチク)

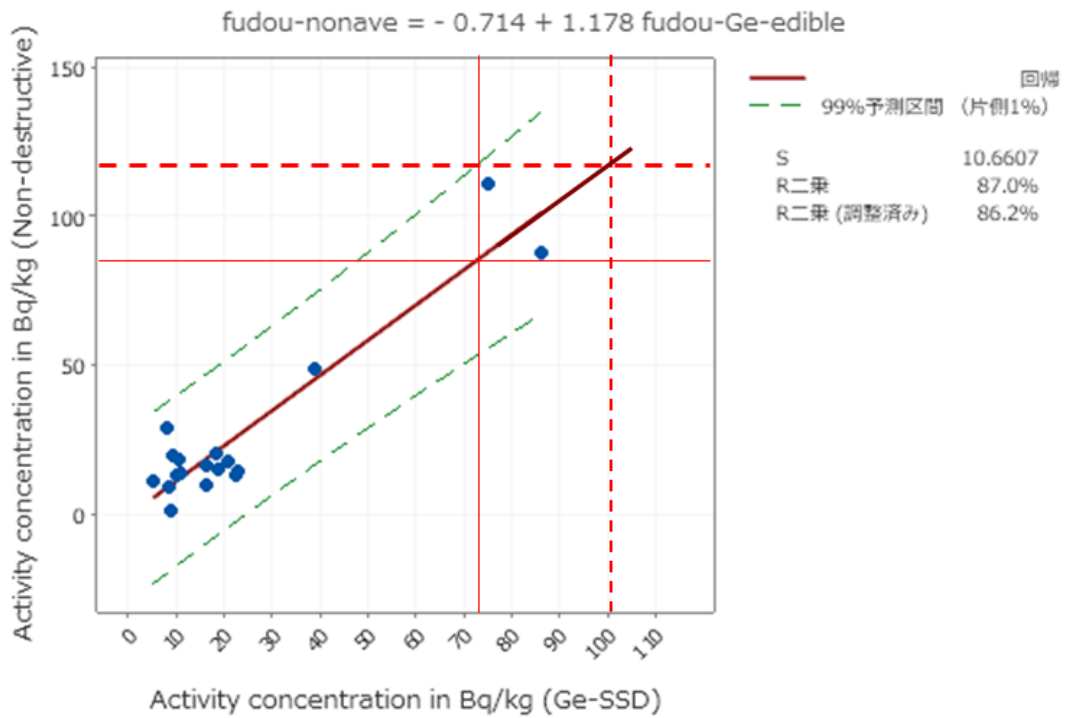


図 18-2 非破壊式装置 (A01S) と Ge 検出器の測定結果による 99%予測区間 (モウソウチク)

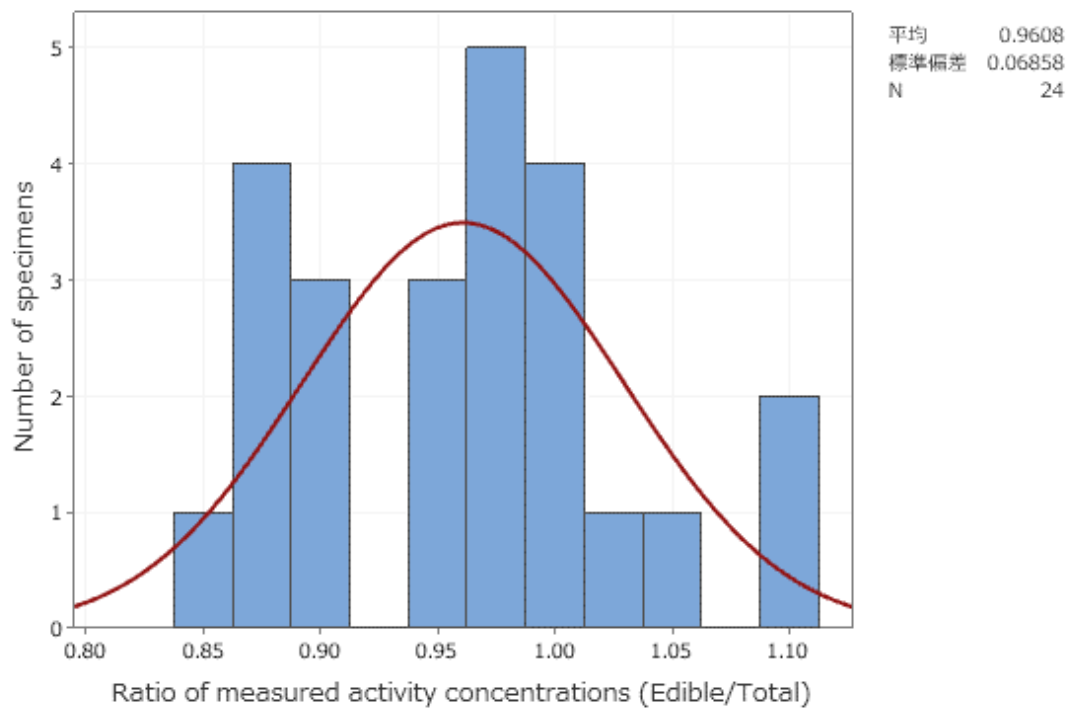


図 19-1 タケノコの可食部濃度の不可食部を含む試料全体の平均濃度に対する比の分布 (ネマガリタケ)

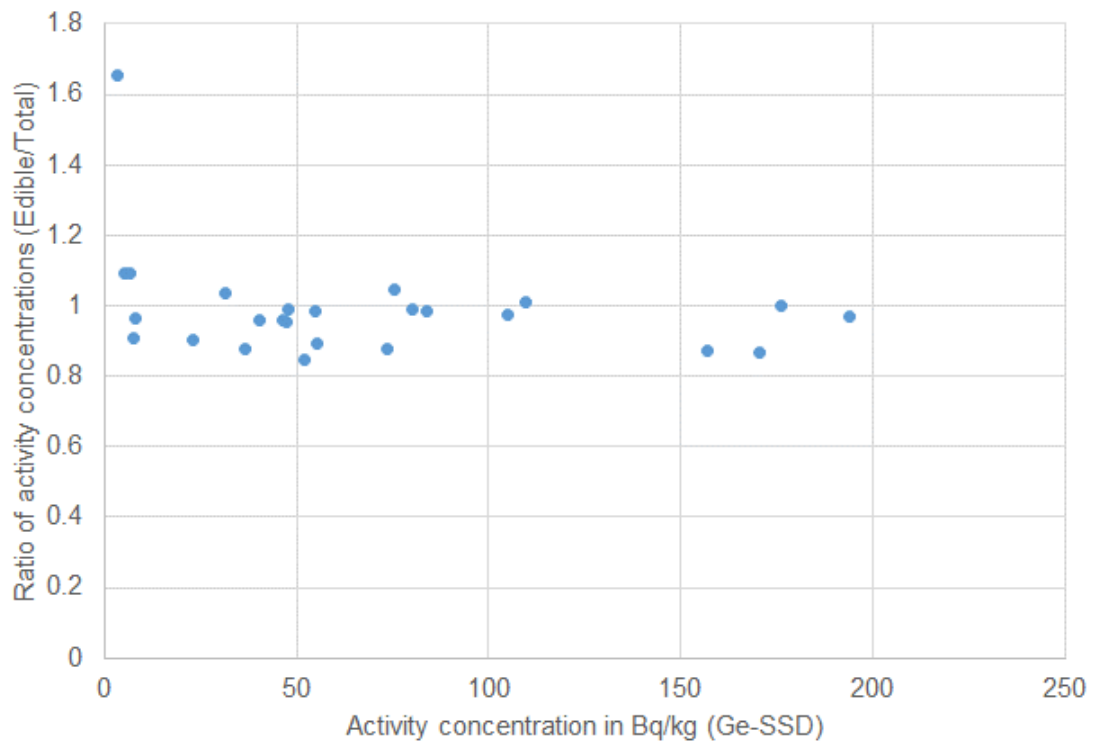


図 19-2 タケノコの可食部濃度の不可食部を含む試料全体の平均濃度に対する比の分布 (ネマガリタケ)

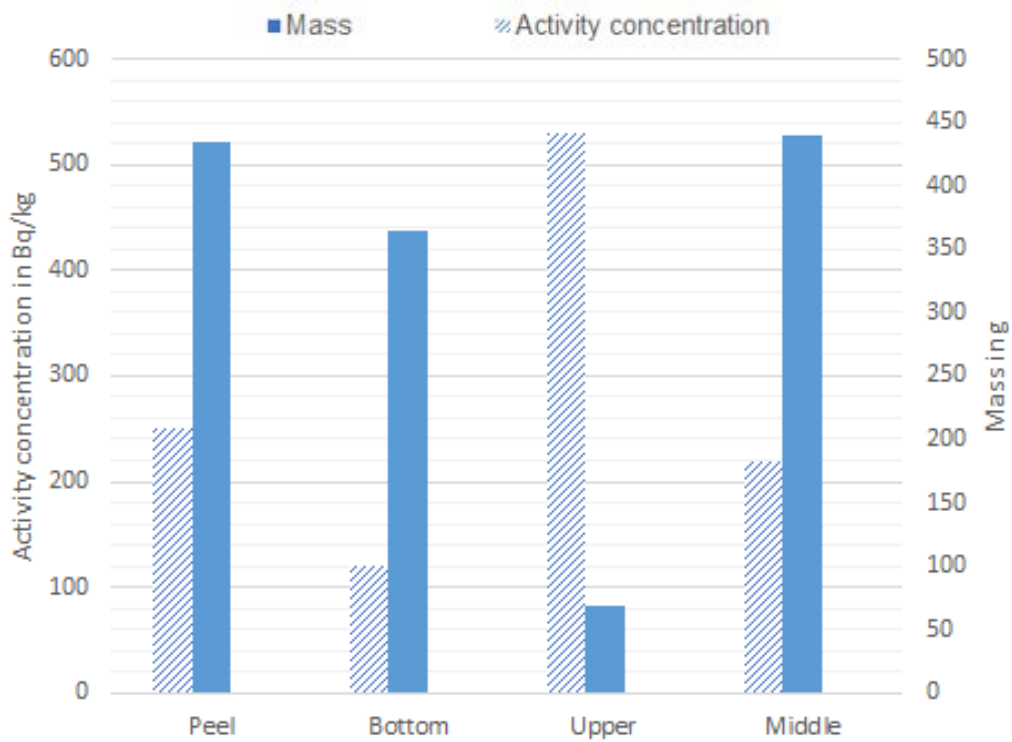


図 20 タケノコ（ネマガリタケ）部位別濃度分布（左）及び重量分布（右）

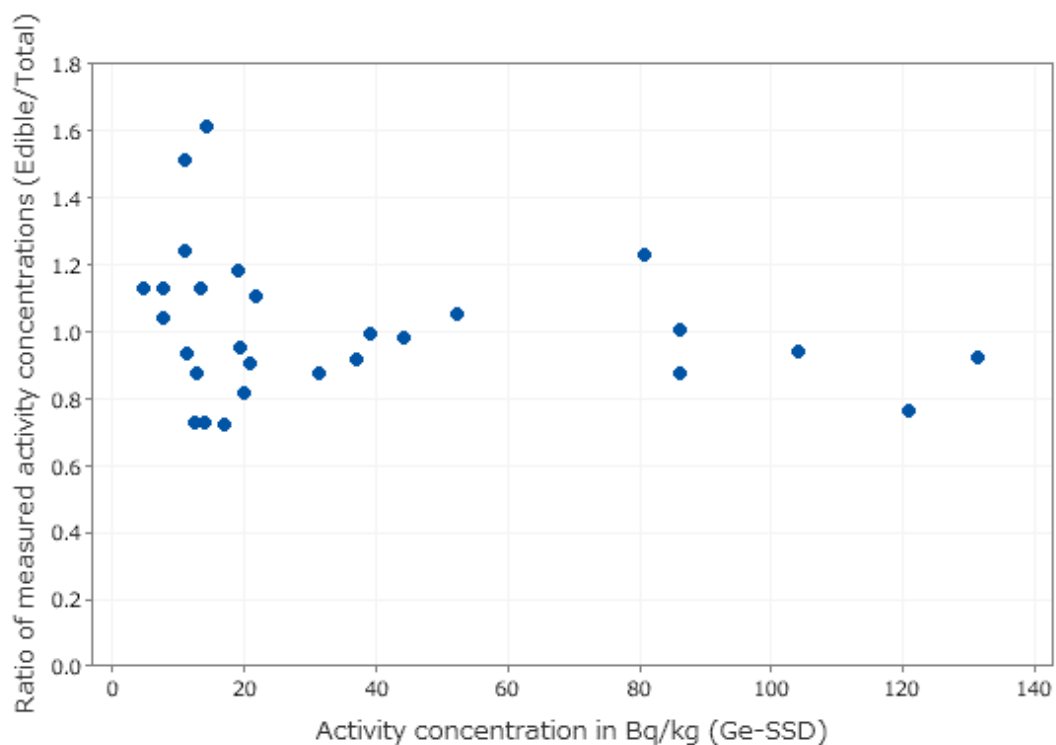


図 21-1 タケノコの可食部濃度の不可食部を含む試料全体の平均濃度に対する比の分布 (モウソウチク)

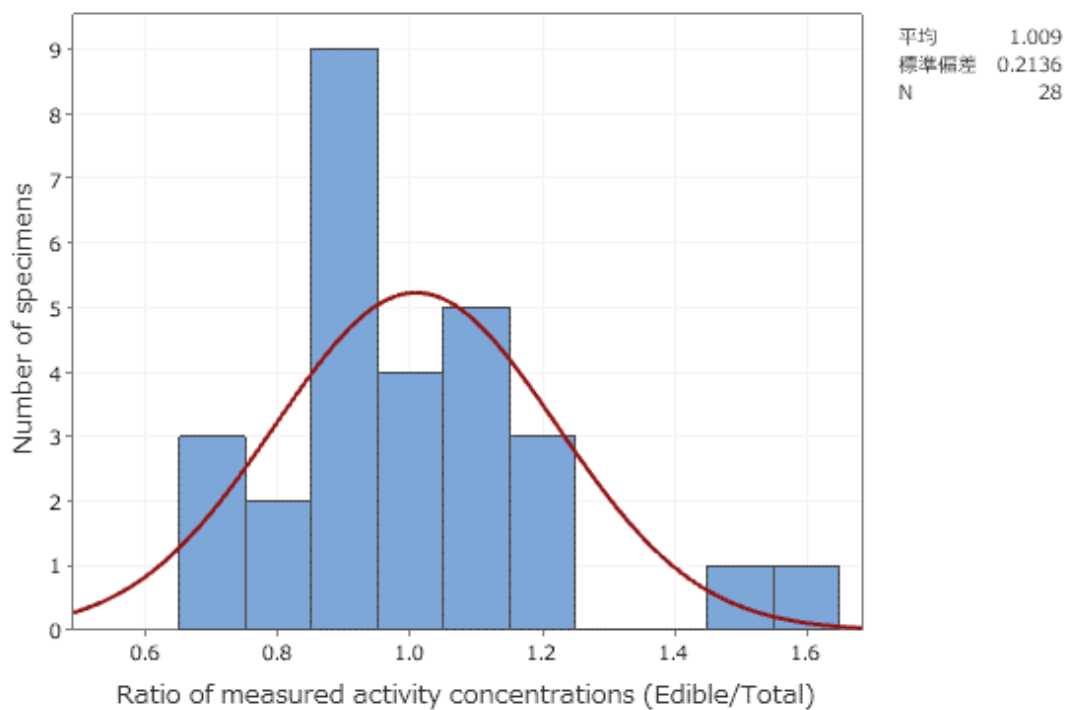


図 21-2 タケノコの可食部濃度の不可食部を含む試料全体の平均濃度に対する比の分布 (モウソウチク)

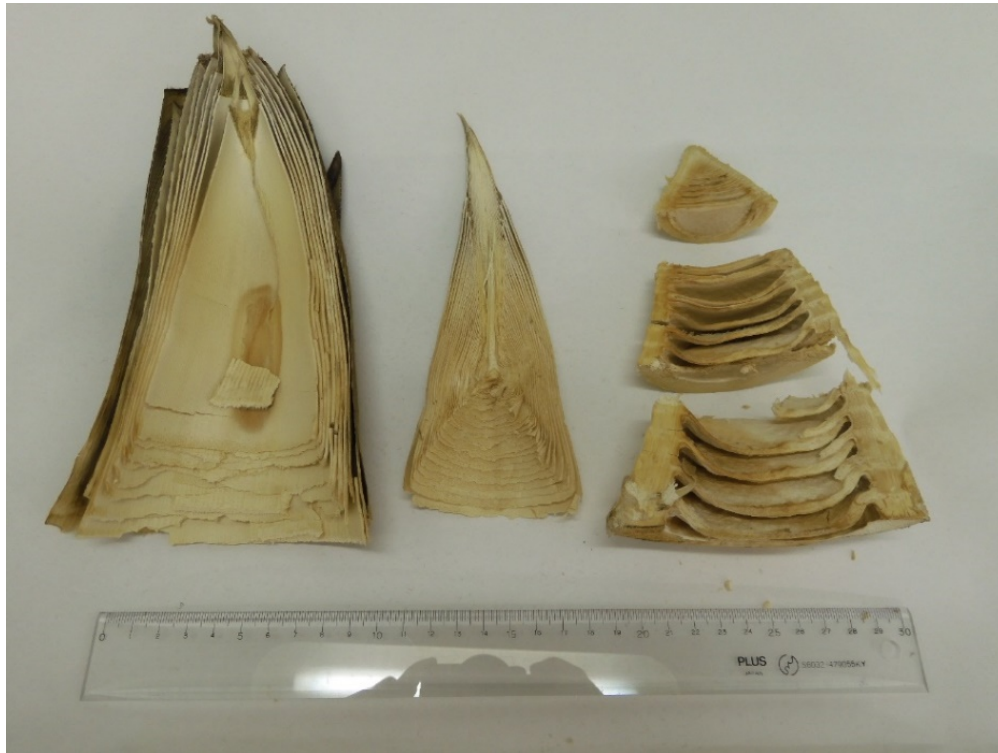


図 22 部位別の濃度測定に用いたタケノコ（モウソウチク）試料

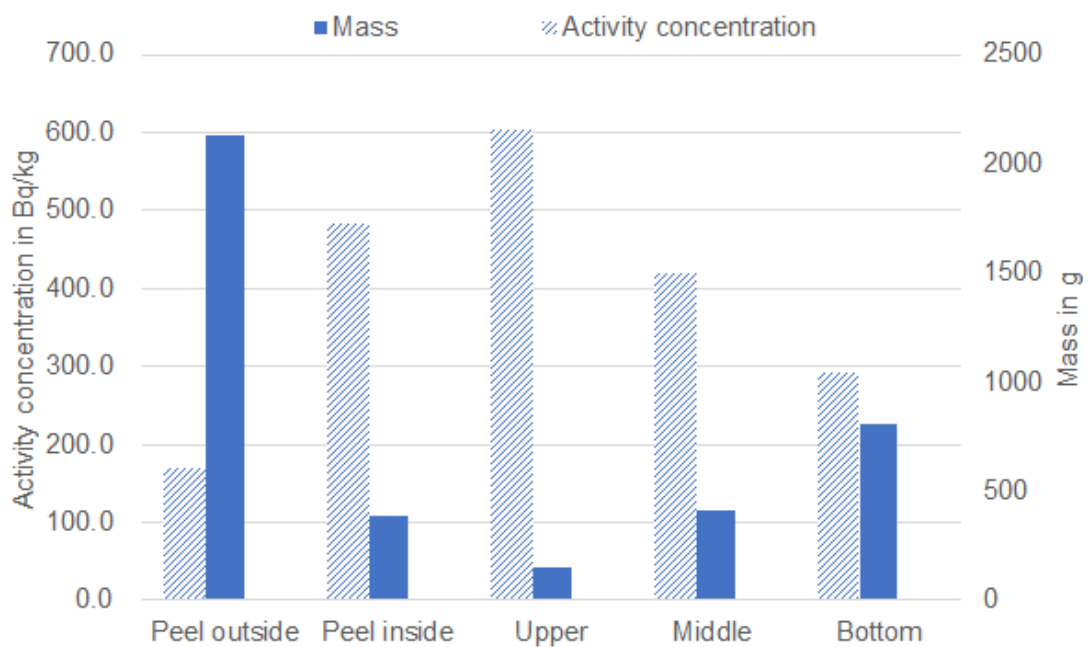


図 23 タケノコ（モウソウチク）部位別濃度分布（左）及び重量分布（右）

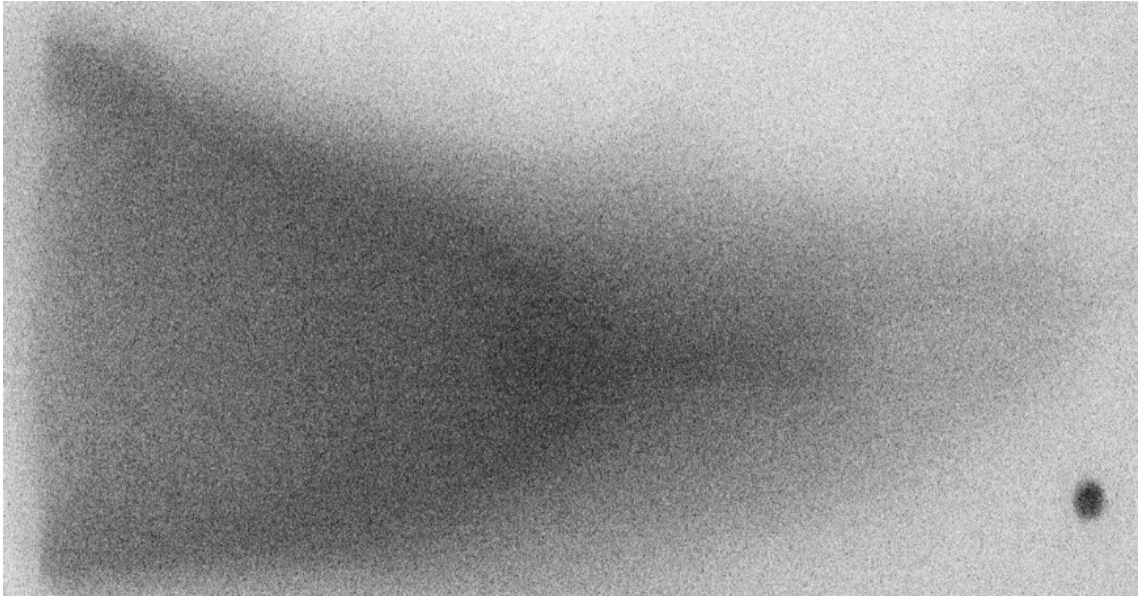


図 24 タケノコ（モウソウチク）の IP 画像

## 付属書 1 不定形状試料に対する大口径 $\gamma$ 線検出器の計数効率評価手法の検討

食品中の放射性物質測定に前処理をせずそのまま測る大口径 NaI(Tl)検出器を用いた装置が一部の自主検査などで利用されている。このような装置では、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。

### 【方法】

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"φ×5"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。線源は図 s1 ①を用い、各測定点で得られた計数効率をボクセルサイズ 10×10×10 (mm<sup>3</sup>)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  $z$  の面において図 1①のように 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、図 s1 に示す各ボクセルの計数効率を計算し、空間分布マップを作成した。次に、Ge 検出器で濃度を求めた  $^{137}\text{Cs}$  を含む溶液を円柱ポリ容器に詰めて実試料に代わるファントムとした。溶液の充填量 200 g~2000 g に対してレスポンスを求めた。また、このファントムに対するレスポンスを得られた計数効率の空間分布により式(1)から求め、ファントムの測定で得たレスポンスと比較した。さらに、本法の不定形状試料に対しての適用の検討として、同形式の 5"φ×5"NaI(Tl)シンチレーション検出器 (非破壊式放射能測定装置) で測定したマツタケ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。図 s2 に試料写真の例を示す。この写真から形状を楕円錐台に近似し、各寸法を決定した。近似により得た寸法を用い、式(1)のとおり  $\varepsilon_v(E)$  を得た。

### 【結果】

ファントム試料の溶液の各充填量に対する得られたマップデータに基づき計算で求めたレスポンスと実測で得たレスポンスのそれぞれの逆数を図 s3 に示す。図の通り充填量が多くなるにつれその差が大きくなる結果となったが、その差は 10 %以内で一致した。一方、マツタケ試料の結果を図 s4 に示す。また、用いた 5 試料の写真を図 s5 ここでは計算で得られたレスポンスと試料の測定により得たスペクトルからマツタケ中の放射性セシウム濃度



を求めた。その結果は、試料①④では Ge 検出器との差が少なく、②③⑤は 30%以上低い結果となった。これは①④の試料形状が楕円錐台に近い形状であったのに対し、②③⑤は楕円錐台近似が適切でなかったことによると考えられる。また、いずれも低めに評価される傾向は、非破壊式装置の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た。

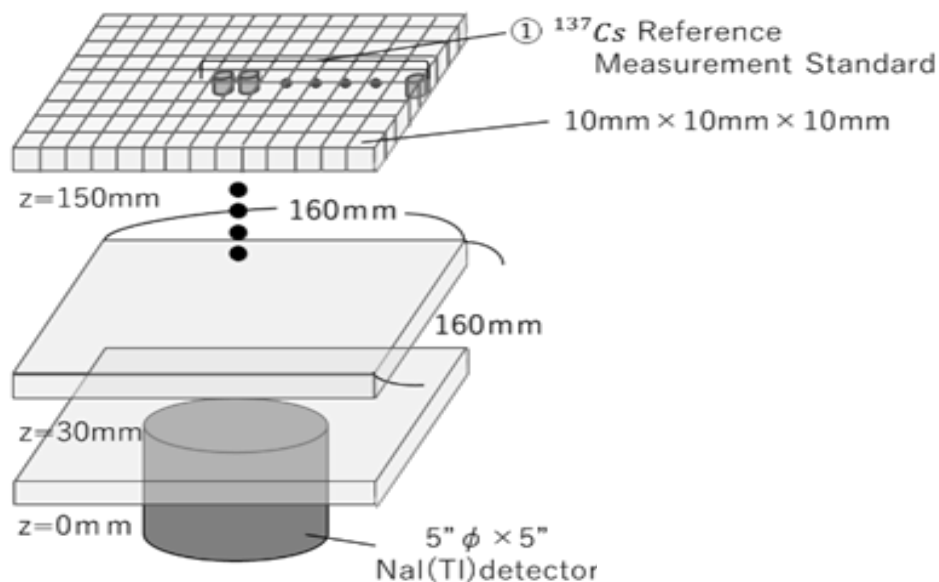


図 s1  $\epsilon_p(E,x,y,z)$ の空間分布取得測定

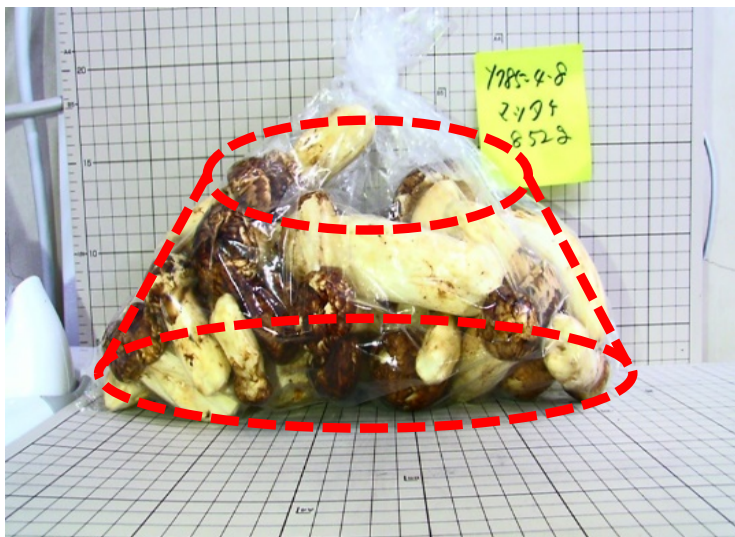


図 s2 解析に用いたマツタケ試料の写真の例

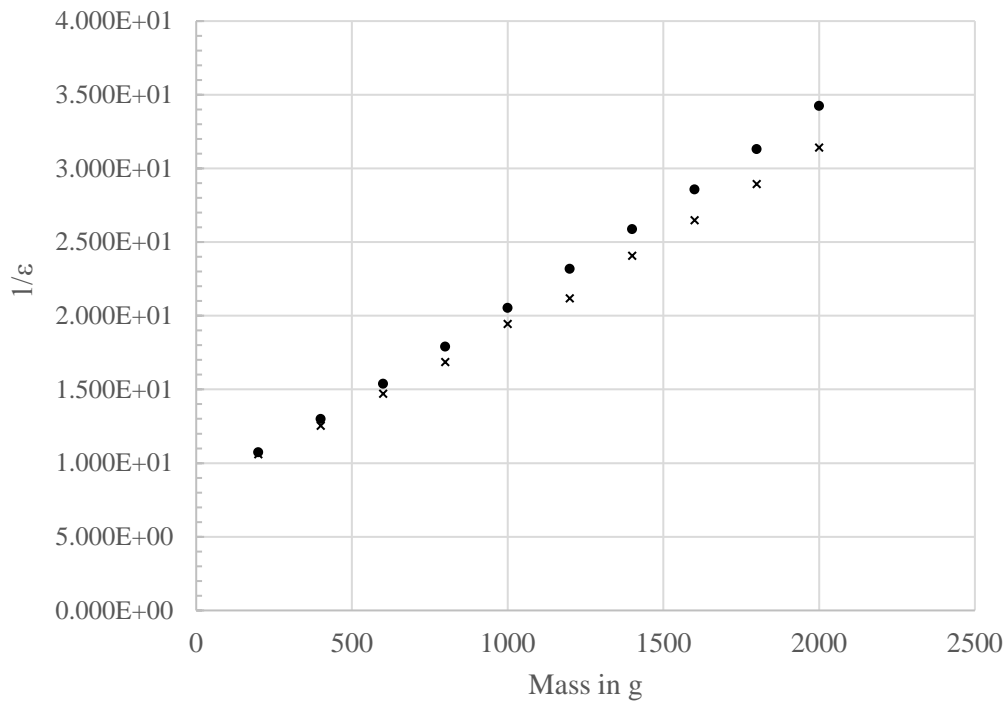


図 s3 計算及び実測による  $1/\varepsilon$  の比較 ●実測値 ×計算値

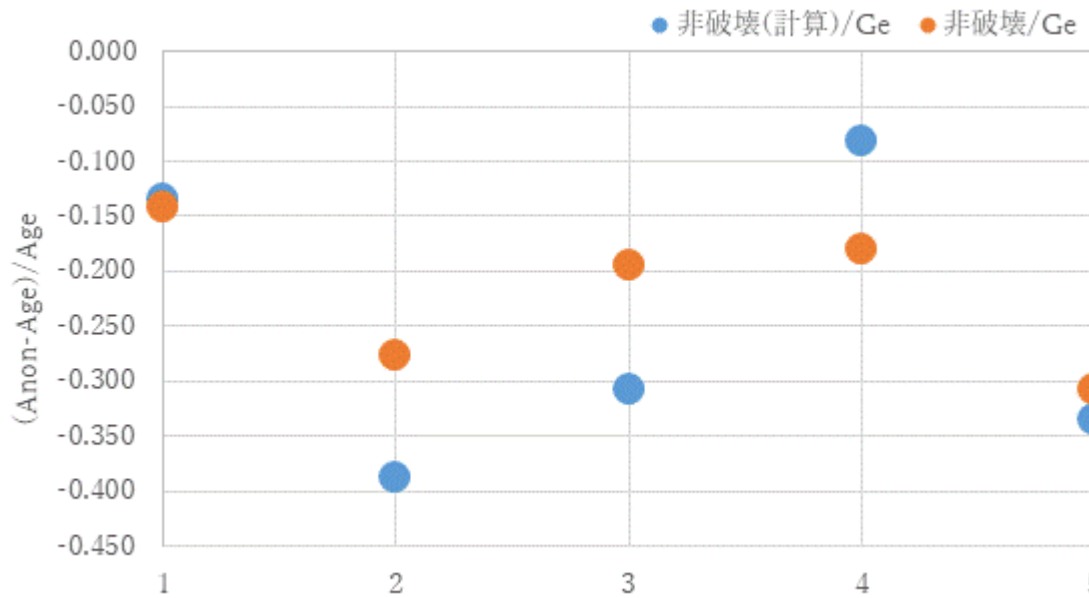


図 s4 Ge 検出器による測定値との比較 ●は計算により得たレスポンスを用いた結果 ●は非破壊式装置で得られた指示値



図 s5 解析に用いたマツタケ試料写真