

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等検査システムの評価手法の開発に資する研究(23KA1006)

令和7年度分担研究報告書

「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 片岡 洋平

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 山田 崇裕

近畿大学原子力研究所 教授

福島第一原子力発電所事故の影響に伴う食品中の放射性セシウム測定については、近年、試料の前処理を行わずに測定可能な非破壊式放射能測定装置が開発され、実用化が進んでいる。このような装置による測定においては、装置設計上想定された試料配置や放射性物質の分布のばらつき の範囲内で測定が行われることが重要である。本研究では、同一実試料を用いて複数機種 の非破壊式測定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との比較検討を実施してきた。その成果に基づき、令和3年3月及び令和4年3月に厚生労働省より事務連絡「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」が発出され、マツタケ及び皮付きタケノコに対して非破壊式測定の適用が認められた。さらに、令和5年3月にはナメコ、ナラタケ及びムキタケ、令和6年7月にはクリタケ及びコシアブラ、令和7年8月にはシイタケ、マイタケ及びコシアブラが対象品目に追加され、適用範囲は段階的に拡大している。このような背景を踏まえ、本研究では非破壊式スクリーニング法の更なる適用拡大を目的として、令和7年度に野生キノコ27品目130検体を収集し、非破壊式測定装置及びGe検出器による比較測定を実施した。得られた測定結果について、回帰直線に基づく予測区間法を用い、99%予測区間の上限値が100 Bq/kgとなる条件における試料の放射能濃度を評価することで、スクリーニング検査への適用性を検討した。また、マイタケについては基準値(100 Bq/kg)を超過する濃度を有する原木栽培試料を用いた追加評価を行った。さらに、試料形状や配置のばらつきに起因する測定不確かさを評価するため、放射線輸送計算と物理シミュレーションを組み合わせた解析手法の検討を行うとともに、ファントム試料を用いた評価手法の開発を進めた。その結果、マイタケについては50 Bq/kg超のスクリーニングレベルが確認され、基準値超試料を含まない令和6年度の評価結果との同等性が示された。また、ヒラタケ、ハタケシメジ、カラストケ及びウラベニホテイシメジについては、既存の適用品目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示され、非破壊式スクリーニング法の適用拡大に資する知見が得られた。

研究協力者 蜂須賀 暁子 国立医薬品食品衛生研究所 有機化学部主任研究官

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には、従来、Ge 検出器を用いた γ 線スペクトロメトリーが広く用いられてきた。環境試料等の放射能分析については「放射能測定法シリーズ」[1]が、また食品については「食品中の放射性物質の試験法について」[2]が公定法として整備されており、いずれにおいても測定試料中の放射性物質が前処理により均一化されていることが、測定の正確性及び信頼性確保の前提とされている[3]。

福島第一原子力発電所事故以降、食品検査の迅速化を目的として、「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によるスクリーニング検査が導入された。この手法においても、試料中の放射性物質の均一分布が前提とされており、そのばらつきを考慮した設計がなされている。また、ISO19581[5]においても同様の考え方が採用されている。

一方、近年では試料を破砕せずそのまま測定可能な非破壊式放射能測定装置が開発され、生産者による出荷前検査や自家消費食品の測定などに広く利用されている[6-8]。これらの装置では、検出器の多検出器化や大型化により試料形状や不均質性の影響低減が図られているものの、測定結果の信頼性は、装置設計上想定された試料配置及び放射性物質分布の範囲内で測定が行われることに依存する。

このような背景のもと、本研究グループでは平成 29 年度以降、非破壊式装置の信頼性評価を目的として、検出効率分布の評価及び実試料(50 Bq/kg 超)を用いた非破壊式装置と Ge 検出器による測定結果の比較検証を実施してきた。その結果、両者の測定値には良好な相関関係が認められ、適切な条件下では非破壊式装置による測定が食品中放射性物質のスクリーニングに有効である

可能性が示された[9]。

しかしながら、非破壊測定では真度の低下や測定値のばらつきの増大、並びに一部試料において Ge 検出器測定値との有意な乖離が認められており、換算係数(校正定数)の設定方法や試料中の放射性物質の不均一分布が測定に与える影響について、更なる検討が必要である。また、スクリーニング法の適用にあたっては、試料種ごとに質量やジオメトリの許容範囲を科学的根拠に基づき明確化することが求められる。

これまでの研究成果に基づき、令和 3 年以降、非破壊式スクリーニング法の適用対象は段階的に拡大されてきた。すなわち、マツタケ及び皮付きタケノコに加え、ナメコ、ナラタケ、ムキタケ、クリタケ、シイタケ、マイタケ及びコシアブラへと適用が拡張されている[10]。さらに、2025 年に改訂された ISO19581[5]には、これまでの研究成果に基づき非破壊式測定の適用事例が Informative Annex として示された。

本年度はこれらの成果を踏まえ、野生キノコ類を中心とした未適用品目について、非破壊式スクリーニング法の適用性評価をさらに進め、適用範囲の拡大に資する科学的知見の取得を目的とした。

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放射能測定装置は、主に自家消費用の農作物や採取された野生動植物の放射性セシウム濃度測定を目的として開発された装置であり、試料の前処理を行わずにそのまま測定できることを特徴とする[6-8]。本装置は、食品の種類、形状、質量が多様である実使用環境を想定して設計されており、比較的大量の試料を出荷形態のまま測定可能であることから、検査の効率化や出荷前検査への応用が期待されている。

γ 線スペクトロメトリーによる放射能測

定では、対象核種の γ 線エネルギーに対する検出効率を標準線源により事前に校正する必要がある。検出効率は γ 線エネルギーに依存するだけでなく、試料と検出器の幾何学的条件、すなわち試料形状や配置に大きく依存する。このため、従来の公定法では、標準線源と同一形状・同一体積の容器に試料を充填し、同一条件で測定することが前提とされている。また、体積試料においては、試料中の放射能が均一に分布していることが仮定されており、体積標準線源により得られる検出効率は空間的に平均化された値として扱われる。

一方、非破壊式装置においても測定原理自体は同様であるが、複数検出器の配置や検出器の大型化により幾何学的効率を高め、試料形状や線源位置の違いによる検出効率の変動を低減する設計がなされている。このような構成により、検出器と試料との立体角が大きくなり、線源位置依存性が緩和されるため、一定のばらつきの範囲内で安定した測定が可能となる。

しかしながら、試料の種類や形状が多様であることから、個々の試料に対する検出効率をどの程度正確に評価できるかが、測定の信頼性を左右する重要な要因となる。このため、装置ごとに、複数の標準試料を用いた検出効率の補間や、試料質量から嵩(体積)を推定し、あらかじめ設定された検出効率－試料嵩関係に基づいて検出効率を近似的に算出する手法が採用されていると考えられる。

一方で、試料中の放射性物質の不均一分布は依然として不確かさの主要因であり、この影響は試料を破碎する従来手法においても完全には除去されないことが報告されている[11]。非破壊式装置においては、このような影響に対処するため、複数検出器の計数率の差異を利用した異常検知機構を備える装置も存在する[6]。

以上のように、非破壊式装置では、ハードウェア面では検出器の大型化及び多検出器化による幾何学的効率変動の低減化及びソフトウェア面では適切な検出効率推定アルゴリズムの適用がそれぞれ測定誤差の低減に寄与する。ただし、これらはいずれも近似的手法であり、実際の測定が装置設計時に想定された試料条件の範囲内で実施されることが、測定結果の妥当性確保の前提となる。

なお、各装置における放射能算出アルゴリズムの詳細は一般に公開されていないため、本研究では各装置の取扱説明書に従った操作条件の下で測定を実施し、得られた出力値に基づき評価を行った。

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

本研究では、非破壊式装置の測定特性を踏まえ、福島県等で採取された実試料を用いて、前処理を行わない非破壊式測定と、細切処理を含む Ge 検出器による公定法測定との比較検討を実施した。

対象試料は主として野生キノコ類及び山菜類とし、令和7年度は野生キノコ27品目、計130検体を収集した。非破壊式測定は福島県林業研究センターにおいて実施し、Ge検出器による測定は福島県農業総合センター及び福島県環境測定・放射能計測協会において、文献[2]に準拠して実施した。

非破壊式装置は、表1に示すFF1及びAFT-NDA2の2機種を用い、同一試料を複数装置で測定することにより比較性を確保した。測定は1試料当たり300秒とし、試料の配置を変更しながら4回の繰り返し測定を行った。また、試料の形状及び充填状態を把握するため、図1のとおり測定前に上面及び側面から写真撮影を行い、後述するばらつき評価の基礎データとした。

(2)スクリーニング法適用性評価

非破壊式測定結果と Ge 検出器測定結果の関係について、回帰分析を行い、スクリーニング法としての適用性評価を実施した。

評価には回帰直線に基づく予測区間法を用い、Ge 検出器による測定値に対する非破壊式測定値の 99%予測区間を以下により算出した。

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

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

具体的には、Ge 検出器による測定値が基準値である 100 Bq/kg に相当する場合において、回帰直線の 99%予測区間上限値が 100 Bq/kg 以下となる条件を満たすかを評価指標とし、そのときの非破壊式測定値をスクリーニングレベル(SL)として定義した。

解析は主として 10–260 Bq/kg の濃度範囲の試料を対象として実施し、統計的に有効な比較が可能なデータセットに基づいて評価を行った。

(3) 原木マイタケを用いた高濃度域評価

野生キノコ試料では高濃度試料の確保が困難であることから、基準値(100 Bq/kg)近傍及びそれを超える濃度域での評価を補完する目的で、原木栽培マイタケを用いた追

加検証を実施した。

試料は福島県森林・林業・緑化協会きのこ振興センターより提供を受けた。非破壊式測定は FF1 及び NDA2 を用い、測定条件は (1)と同様とした。Ge 検出器による測定は文献[2]に準拠して実施した。

本評価により、基準値超試料を含むデータに基づくスクリーニングレベルの妥当性検証を行った。

(4)試料形状及び配置に起因する不確かさ評価

非破壊式測定においては、試料形状及び配置のばらつきが検出効率に影響を及ぼし、測定結果の不確かさの要因となる。この影響を定量的に評価するため、本研究ではモンテカルロシミュレーションを用いた解析を行った。

対象試料としてシイタケを用い、3D スキャナ(EinScan-SE)により個体形状データを取得した。取得した形状モデルを物理シミュレーション環境に取り込み、重力及び衝突判定を考慮した計算により、袋詰め状態における試料配置を再現した。これにより、複数の試料配置パターンを生成し、それぞれについて Particle and Heavy Ion Transport code System(PHITS)[12]を用いた放射線輸送計算を実施した。

各配置において試料中の放射性セシウム(^{137}Cs)が均一に分布していると仮定し、検出器に対する検出効率を算出した。得られた複数の検出効率値の分布から、平均値及び相対標準偏差を指標として、試料配置の違いに起因する検出効率の統計的ばらつきを評価した。

さらに、試料形状が異なる場合の影響を検討するため、キジ肉についても同様に形状データに基づく評価を行った。キジ肉については、検出効率の最大値及び最小値を把握することを目的として、試料配置を手

動で設定し、極端な配置条件における検出効率の変動範囲を評価した。

(5)ファントム試料を用いた評価手法の検討
実試料の入手制約を補完するため、試料形状及び配置を制御可能なファントム試料を試作し、非破壊式測定における検出器応答評価を行った。試料は(4)で用いたキジ肉及びシイタケとした。

ファントムは3Dスキャナ及び3Dプリンタを用いて作製し、実試料の形状を模擬した。これを用いて試料個数及び配置条件を変化させた測定を行い、非破壊式測定におけるばらつき特性の評価を試みた。

D. 実験結果及び考察

(1)試料収集及びデータ蓄積状況

令和7年度は、野生キノコ27品目計130検体に加え、原木マイタケ6検体を収集し、非破壊式装置及びGe検出器による比較測定を実施した。収集試料の品目別内訳を図2に示す。これまでの累積試料数(2019～2025年度)は1241検体に達しており、広範な品目について比較データの蓄積が進んでいる(図3)。

このうち、放射性セシウム濃度が10 Bq/kgを超えた試料は863検体であり、さらにスクリーニング評価に有効な濃度範囲である10～260 Bq/kgに含まれる試料は670検体であった(図4)。19品目について10検体以上のデータが確保されており、統計的な比較評価に資するデータ基盤が整備されていると考えられる。

(2)非破壊式装置とGe検出器の比較結果

本検討に用いた試料の放射能濃度分布は広範であり、Ge検出器による測定において検出限界以下の試料、あるいはGe検出器では検出されたものの非破壊式装置では検出限界を下回る試料も含まれていた。これら

のうち、非破壊式測定において4回全てNDであったデータは解析対象から除外した。図5に主な品目(マイタケ、ヒラタケ、コウタケ、ウラベニホテイシメジ、カラストケ及びハタケシメジ)の濃度を示す。

各非破壊式装置とGe検出器による測定結果の差をGe検出器測定値との比として整理した結果を、図6(FF1)及び図7(NDA2)に示す。図中のエラーバーは、NDを除く複数回測定結果に基づく標準偏差を表す。この標準偏差は、試料の重量及び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に加え、試料中の放射性セシウム分布及び試料配置に対する検出器の幾何学的再現性に依存すると考えられる。

令和4年度に実施した不確かさ要因分析の結果から、20 Bq/kg程度以下の低濃度域で相対的に標準偏差が大きくなる主因は、計数統計による不確かさであることが示されている。本年度の結果でも同様に、低濃度域ではばらつきが比較的大きく、濃度の上昇に伴って相対的なばらつきが小さくなる傾向が確認された。

(3)スクリーニング検査への適用への検討

(a)原木マイタケ

原木マイタケについては、令和7年度に追加した試料を含めて評価を行った結果、50 Bq/kgを超えるスクリーニングレベル(SL)が確認された(図8-1)。また、基準値超試料を含まない令和6年度の評価結果と同等の傾向が得られ、既設定SLの妥当性が確認された。原木マイタケの追加により、これまで不足していた高濃度域のデータが補強され、マイタケのスクリーニング法への適用性に関する信頼性が高まった。

(b)優先品目(野生キノコ)

本研究では、品目ごとの適用性を評価するため、検出限界超から260 Bq/kg程度までの範囲の試料を用いて検討した。重点品目の

うち、チチタケ、シロシメジ及びアマタケについては今年度試験に供する濃度を有する新規試料の追加がなかったため、既存評価の継続とした。

ヒラタケについては、FF1 及び NDA2 の双方で整合的な結果が得られ、スクリーニングレベルはおおむね 50～60 Bq/kg の範囲に設定可能であることが示された(図 8-2)。試料数はなお限定的であるものの、評価に適した試料濃度分布を有し、適用候補として有望であると考えられた。

一方、コウタケについては非破壊式測定と Ge 検出器による測定結果の良好な比例が確認できるものの、高濃度試料が多数を占め、スクリーニングレベル設定に適した濃度帯の試料が不足していたため、適用性の評価には至らなかった(図 8-3)。本品目は高濃度汚染を示す例が多いことから、今後は低濃度域の試料確保が課題である。

(c)その他の候補品目

重点品目以外では、ウラベニホテイシメジ(図 8-4)、カラストタケ(図 8-5)及びハタケシメジ(図 8-6)について、既に非破壊式検査の対象となっている品目と同等レベルの性能でスクリーニング検査が可能であることを示す結果が得られた。特にウラベニホテイシメジは試料数がやや少ないものの、評価に用いた濃度帯及び質量分布はおおむね適切であり、適用候補として有望と考えられた。

オオイチョウタケについても良好な直線性の傾向が認められたが、試料数が限られていたことから、現時点では有望候補と位置付け、今後の継続的な検証を行うことが望まれる(図 8-7)。

また、クリタケについては追加データを含めた再評価により、令和 6 年度までに得られていたスクリーニングレベルの妥当性に問題がないことが確認された(図 8-8)。

(4)総括

以上より、令和 7 年度の検討では、原木マイタケにおいて 50 Bq/kg 超のスクリーニングレベルが再確認され、既往評価の妥当性が補強された。さらに、ヒラタケ、ウラベニホテイシメジ、カラストタケ及びハタケシメジについては、非破壊式スクリーニング法の新たな適用品目候補として有望であることが示された。一方、コウタケ及びオオイチョウタケでは、試料数又は濃度帯の偏りに起因して十分な評価に至らず、引き続きデータの蓄積が必要である。

(5)試料質量分布及び適用範囲の検討

本研究においてスクリーニング法への適用が見込まれたヒラタケ、ウラベニホテイシメジ、カラストタケ及びハタケシメジについて、試料質量分布を図 9～図 12 に示す。

非破壊式装置による測定では、放射能濃度への換算係数が試料の嵩(体積)に依存するため、試料質量及び形状の分布範囲はスクリーニングレベル適用の前提条件となる。本研究で用いた試料は、各品目において一定の範囲の質量分布を有しており、これらの範囲においては安定した測定が可能であることが確認された。

一方、同一質量であっても個体の形状や嵩密度の違いにより、実際の嵩にはばらつきが生じると考えられるが、本研究で用いた試料の範囲内では、既存適用品目と同等の測定精度が確保される可能性が示唆された。したがって、実際の検査においては、本研究で得られた試料質量及び形状の範囲を一つの目安として適用可否を判断することが有効であると考えられる。

(6)試料形状及び配置に起因する不確かさ評価

非破壊式測定においては、試料形状及び配置のばらつきが検出効率に影響を及ぼし、

測定結果の不確かさの主要因となる。本研究では、この影響を定量的に評価するとともに、実測を補完する評価手法の構築を目的として、モンテカルロシミュレーション、3D 形状データに基づく計算体系及びファントム試料を組み合わせた検討を行った。

(a)モンテカルロシミュレーションによる評価

本評価は(b)に示す 3D 形状データに基づく計算体系を用いて実施した。シイタケ試料について複数の配置パターンを生成し、各条件における検出効率を Particle and Heavy Ion Transport code System(PHITS)[12]を用いて算出した(図 13)。図 14に 100 の異なる試料配置パターンに対する検出効率の分布を示す。同図にはヒストリー数 0.1M 及び 1M それぞれで得られた分布を示した。図のとおり検出効率は統計的に分布した。この結果から、非破壊式測定におけるばらつきの主要因として、試料配置に起因する幾何学的効果が存在することが定量的に示された。また、ばらつきの内訳としては、ヒストリー数 1M の場合、モンテカルロ計算に起因する統計誤差(0.6 %)よりも、試料配置そのものに起因する変動が 3.4 %と支配的であることが確認された。

さらに、試料数を増加させた場合の影響を図 15 に示す。複数個体をまとめて測定することで検出効率のばらつきが低減する傾向が認められ、実測においても試料数の確保が測定安定性の向上に寄与することが示唆された。また、検出効率が最大、最小及び平均となる配置条件を図 16 に示す。検出効率が最小の試料配置では、検出効率の高い中心部に多くの空隙が見られ、このことが検出効率の低下を招いていることが確認できた。これによって、過大評価及び過小評価となる配置条件の可視化が可能となり、測定条件の適正化に資する知見が得られた。

さらに、試料形状の違いによる影響を評

価するため、キジ肉についても同様に形状データに基づく解析を実施した。キジ肉については、検出効率の最大値及び最小値を把握することを目的として、試料配置を手動で設定し、極端な配置条件における検出効率の変動範囲を評価した。その結果を図 17 に示す。図に示すとおり試料配置及び形状により検出効率変動し得ることが確認された。本評価では、①～⑥の実測で想定される試料の横置きパターンでの検出効率の最大・最小は③の 0.0412 と⑤の 0.0382 であり、その相対差は 7.8 %であった。⑦～⑨の縦置きでは、試料—検出間距離が長くなることから、総じて検出効率は低下し、検出効率が最も高い③と比較すると、最も効率の低い⑧の場合、相対差は-28 %に及んだ。以上のことから、容易に可能な試料配置の制御を行うことで非破壊式測定における不確かさを低減できることが定量的に示された。

(b)3D スキャンを用いた計算体系の構築

非破壊式測定における実試料評価の制約を補完するため、3D スキャン及び物理シミュレーションを組み合わせた計算体系を構築した。本手法では、実試料の形状データを取得し、物理シミュレーションにより袋詰め状態を再現した上で、放射線輸送計算により検出効率を評価する。

これにより、実試料の形状及び配置を反映した状態での検出効率評価が可能となり、従来の単純化したモデルでは困難であった実測条件に近い評価が実現された。

(c)ファントム試料による実験的検証

実試料の入手制約及び再現性の課題を補完するため、3D スキャナ及び 3D プリンタを用いて試料形状(キジ肉)を模擬したファントム試料を作製し、検出器応答の評価を行った。ここではレジンで 3D プリンタにより作成したファントム容器に、放射能濃度既知の放射性セシウム吸着アルミナを充

填し、放射能既知ファントム試料とした。測定時間は 6000 s とした。その結果、図 17 における⑦の配置に対する計数効率①の計数効率に対して約 25 %低下した。一方、計算では⑦は①に対して約 27 %低下しておりファントム測定における相対差とほぼ一致した。

ファントム試料を用いることで、試料個数及び配置条件を制御した測定が可能となり、非破壊式測定におけるばらつき特性の実験的評価が可能であることが示された。また、実試料測定との比較により、シミュレーション結果の妥当性検証にも活用できる可能性が示唆された。

(d)小括

以上の結果から、非破壊式測定における不確かさは主として試料配置に依存し、その影響は相対標準偏差で数%程度に収まることを示された。また、試料数の確保や測定条件の最適化により、このばらつきを低減可能であることが確認された。

さらに、3D 形状データに基づく計算手法及びファントム試料を組み合わせた評価により、実測では困難な条件における検出効率の変動を体系的に把握できる可能性が示され、非破壊式スクリーニング法の信頼性評価及び適用拡大に向けた補完的評価手法としての活用可能性が示唆された。

(7)検査法の提案

以上の検討結果より、既に適用されている品目に加え、非破壊式スクリーニング法の適用拡大に関して、以下のとおり提案する。

まず、マイタケについては、原木マイタケを含む追加試料による評価により、既設定のスクリーニングレベルの妥当性が確認されたことから、現行の検査条件での運用が可能であると考えられる。
次に、ヒラタケ、ウラベニホテイシメジ、カ

ラスタケ及びハタケシメジについては、既存の適用品目と同等レベルのスクリーニング性能が確保可能であることが示されたことから、検査ニーズ及び今後のデータ蓄積状況を踏まえ、対象品目への追加を検討することが適当であると考えられる。一方、コウタケ及びオオイチョウタケについては、試料数又は濃度範囲の偏りにより十分な評価に至っていないことから、引き続きデータの収集及び評価を行う必要がある。

さらに、試料形状及び配置に起因する不確かさ評価については、モンテカルロシミュレーション及びファントム試料を用いた検討により、補完的評価手法としての適用可能性が示された段階であり、今後の体系的な検証が必要である。

非破壊式検査法については、今後、検査条件の精査及び評価手法の高度化を進めることにより、検査の信頼性及び効率性の向上とともに、更なる適用範囲の拡大が期待される。

E. 結論

本研究では、食品中放射性セシウムの基準値 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を用いた方法により評価を行った。具体的には、99 %予測区間の上限値が 100 Bq/kg となる条件に基づき、非破壊式装置の指示値を Ge 検出器による測定値に対応付けることで、スクリーニングレベルの設定可能性を評価した。

その結果、マイタケについては、原木マイタケを用いた追加評価により、50 Bq/kg 超のスクリーニングレベルが確認され、基準値超試料を含まない令和 6 年度の評価結果と同等の結果が得られた。これにより、既設定スクリーニングレベルの妥当性が補強された。また、野生キノコ類については、ヒラタケ、ウラベニホテイシメジ、カラスタケ及

びハタケシメジにおいて、既存の適用品目と同等レベルのスクリーニング性能が確保可能であることが示され、適用候補として有望であることが確認された。一方、コウタケ及びオオイチョウタケについては、試料数又は濃度範囲の制約により十分な評価には至らず、引き続きデータの蓄積が必要である。

山菜類については、本年度新規データの追加が限定的であり、スクリーニング法への適用性評価に必要な試料数の確保が課題として残された。

以上の結果から、マイタケについては既設定条件の妥当性が確認されるとともに、ヒラタケ、ウラベニホテイシメジ、カラストケ及びハタケシメジについては、検査ニーズ及び今後のデータ蓄積状況を踏まえ、「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」の対象品目への追加を検討することが適当であると考えられる。

さらに、試料形状及び配置に起因する不確かさ評価について、モンテカルロシミュレーション及び 3D 形状データに基づく計算手法を用いた検討により、検出効率のばらつきが数%程度の範囲で生じることが定量的に示された。また、試料数の増加によりばらつきが低減する傾向が確認され、測定条件の設定に関する基礎的知見が得られた。

加えて、3D スキャン及び物理シミュレーションを組み合わせた計算体系により、実試料の形状を反映した評価が可能であること、並びにファントム試料を用いた検証により、試料配置条件を制御した実験的評価が可能であることが示された。これらの結果は、非破壊式測定における不確かさ評価手法の構築に向けた基礎的検討として位置付けられる。

また、本手法により、複数の不規則形状の物体が測定容器に詰め込まれる実際の試料状態を模擬した評価が可能となることが示

され、本研究の課題であるグルーピングによる評価への適用可能性が示唆された。

今後は、基準値相当濃度の試料データの更なる蓄積、特に山菜類における試料確保を進めるとともに、試料形状及び配置の影響評価について、実測との比較を含めた体系的検証を行うことにより、非破壊式スクリーニング法の信頼性向上及び適用範囲の拡大を図る必要がある。

F. 参考文献・資料

- [1] 文部科学省・原子力規制庁監視情報課 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 : 2025、Measurement of radioactivity -- Gamma emitting radionuclides -- Rapid screening method using scintillation detector gamma-ray spectrometry(2025)
- [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 N D A」の特徴・性能について、
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

なし

[9] Yamada,T., Soga,K., Hachinohe,M., and Hachisuka,A.:PERFORMANCE

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

なし

EVALUATION OF THE EQUIPMENT FOR MEASURING RADIOACTIVITY IN WHOLE FOODSTUFFS WITHOUT DESTRUCTIVE SAMPLE PREPARATION DEVELOPED AFTER THE FUKUSHIMA NPP ACCIDENT.

2. 実用新案登録

なし

Radiation Protection Dosimetry, Vol. **184**, Issue 3-4, October 2019, Pages 355–358.

3. その他

なし

[10] 厚生労働省 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, 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(令和 3 年 3 月 26 日付け厚生労働省医薬・生活衛生局食品監視安全課事務連絡)

[11] Yamada, T., Hachinohe, M., Hachisuka, A., Asakura, Y., Kanno, T., Kikuchi, M.:UNEXPECTED UNCERTAINTY IN THE USE OF SIMPLE SAMPLE MACHINING TECHNIQUE FOR GAMMA-SPECTROMETRY. *Radiation Protection Dosimetry*, **200**, 16-18, Nov. 2024, 1666–1670, DOI: 10.1093/rpd/nae076

[12] Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S., Kai, T., Matsuya, Y., Matsuda, N., Hirata, Y., Sekikawa, T., Yao, L., P.E. Tsai, H.N. Ratliff, Iwase, H., Sakaki, Y., Sugihara, K., Shigyo, N., Sihver, L., and Niita,K.: Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33. *J. Nucl. Sci. Technol.* **61**, 127-135 (2024)

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

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) φ5.08x5.08cm 7 本	鉛 50mm	日栄工業(株)
そのままはかる NDA2	AFT-NDA2	NaI(Tl) φ12.7x12.7cm	鉛 35～ 50mm	(株)アドフューテック



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))

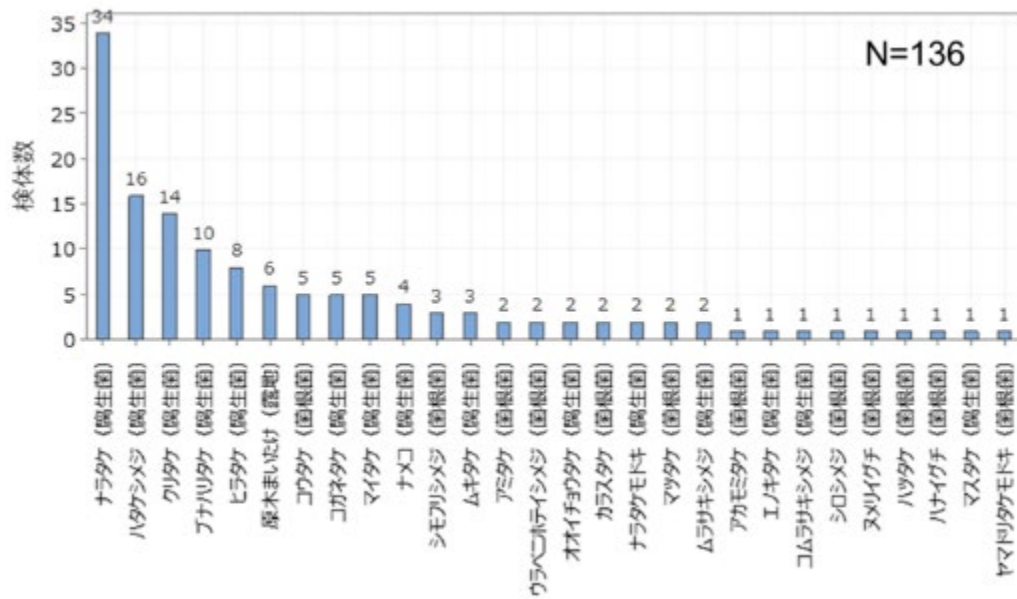


図2 測定に用いたキノコ類の品目と各検体数(2025年度)

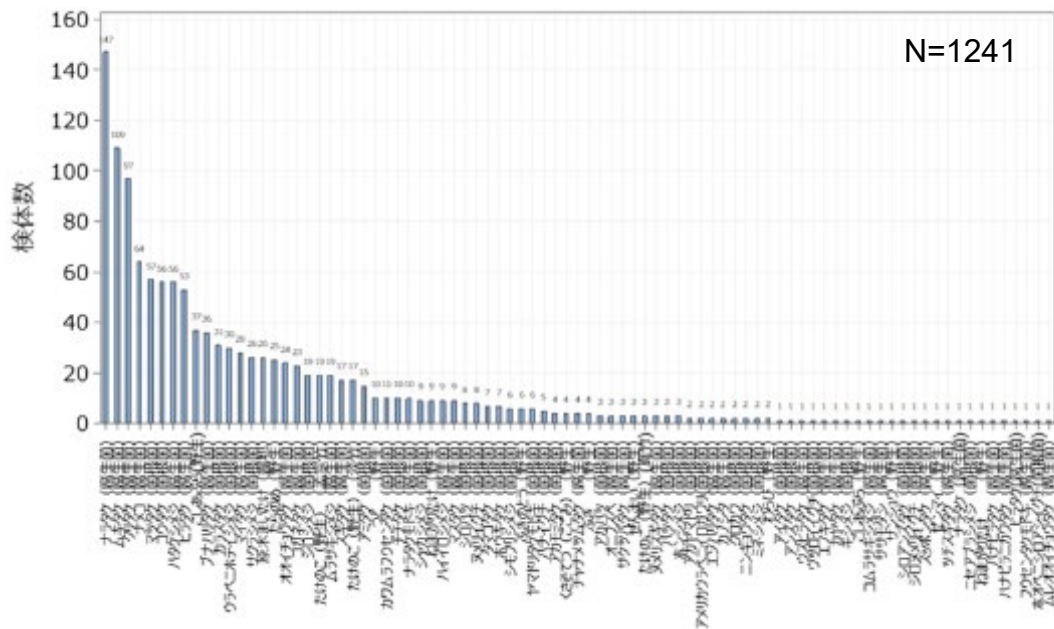


図3 測定に用いた品目と各検体数(2019～2025年度)

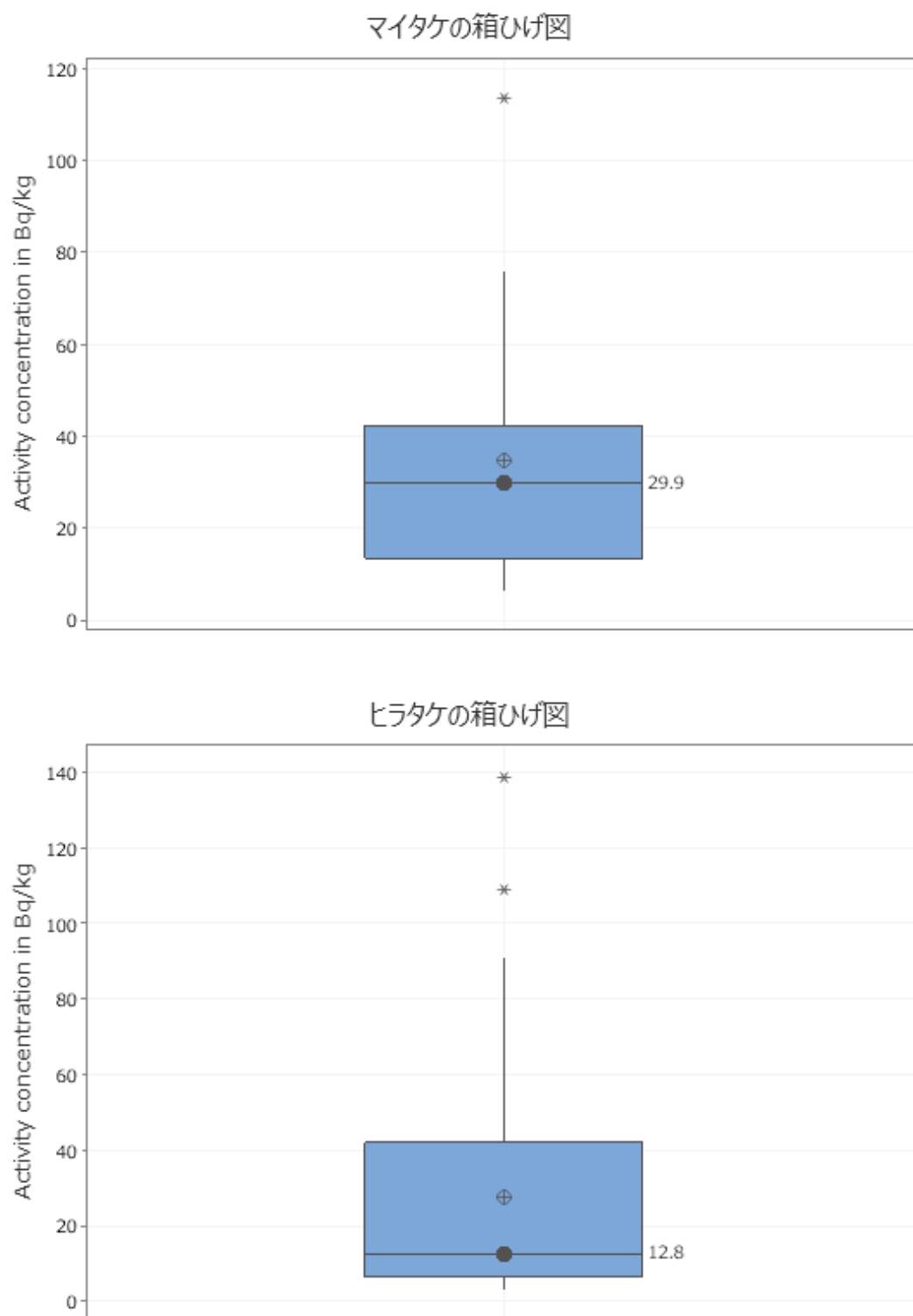


図5 測定に用いたキノコの品目毎の濃度分布(個別値のプロット)数値は中央値

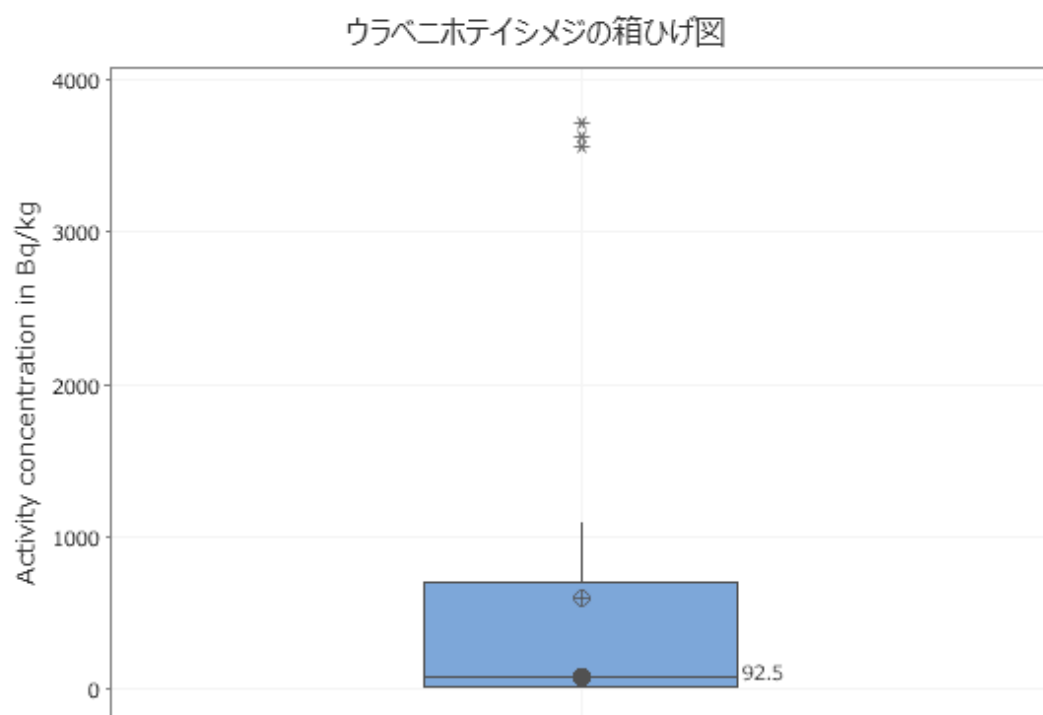
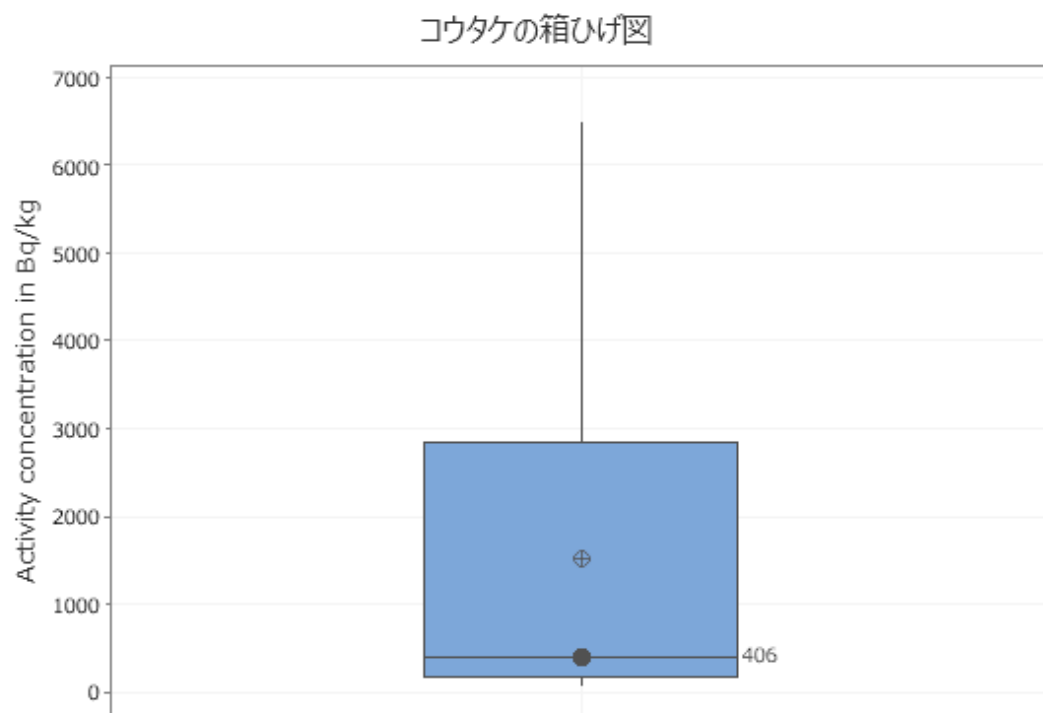


図 5 続き

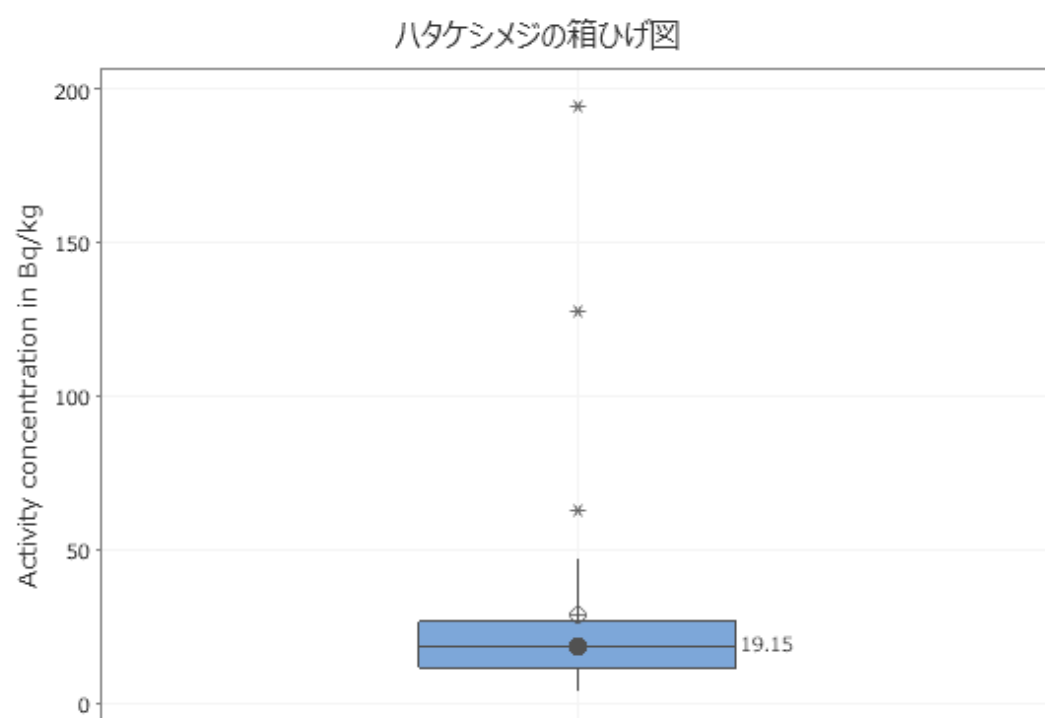
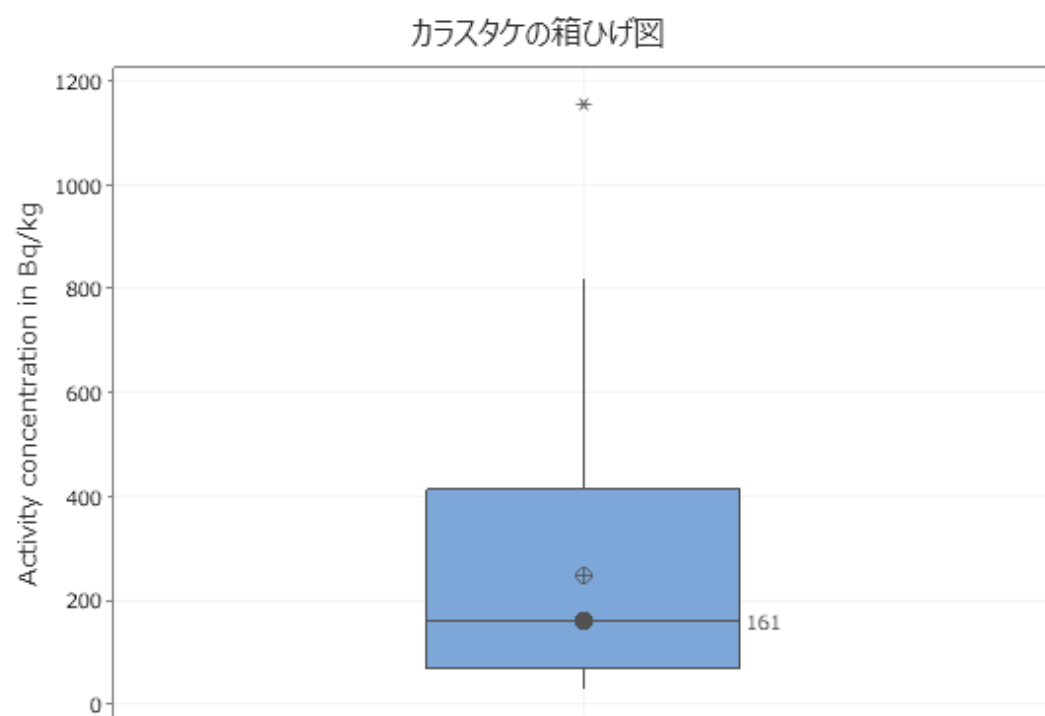


図 5 続き

野生キノコ類

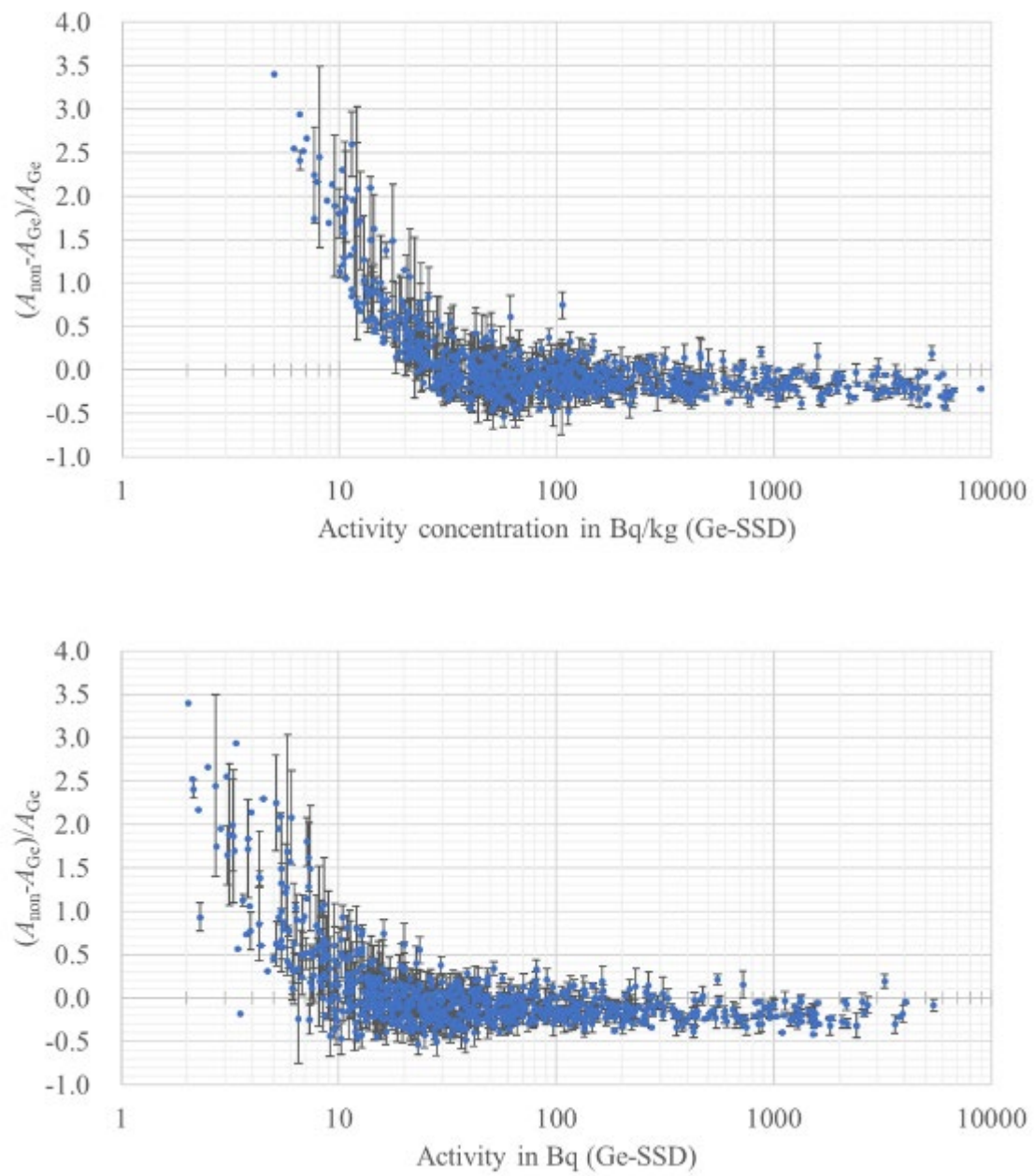


図6 非破壊式装置(FFI)による測定結果のGe検出器の結果
(上段：放射能濃度 下段：放射能)との差

アイタケ

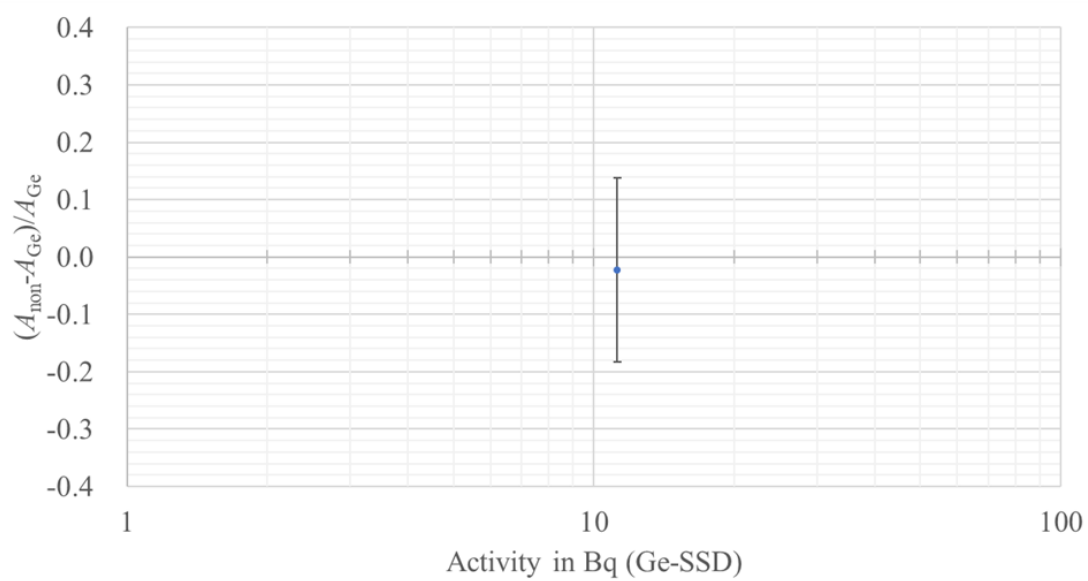
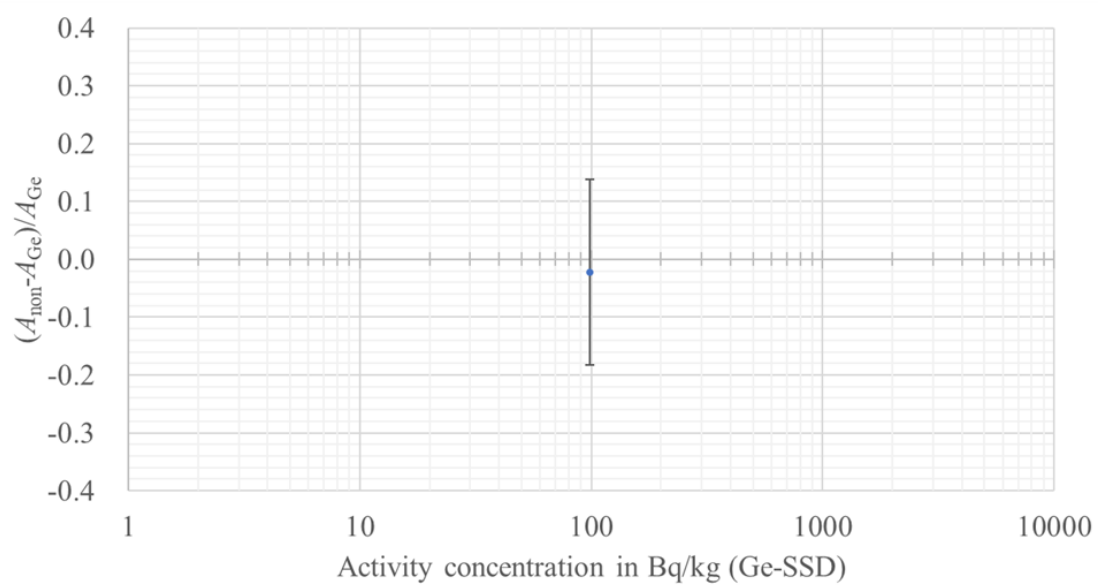


図 6 続き

アカモミタケ

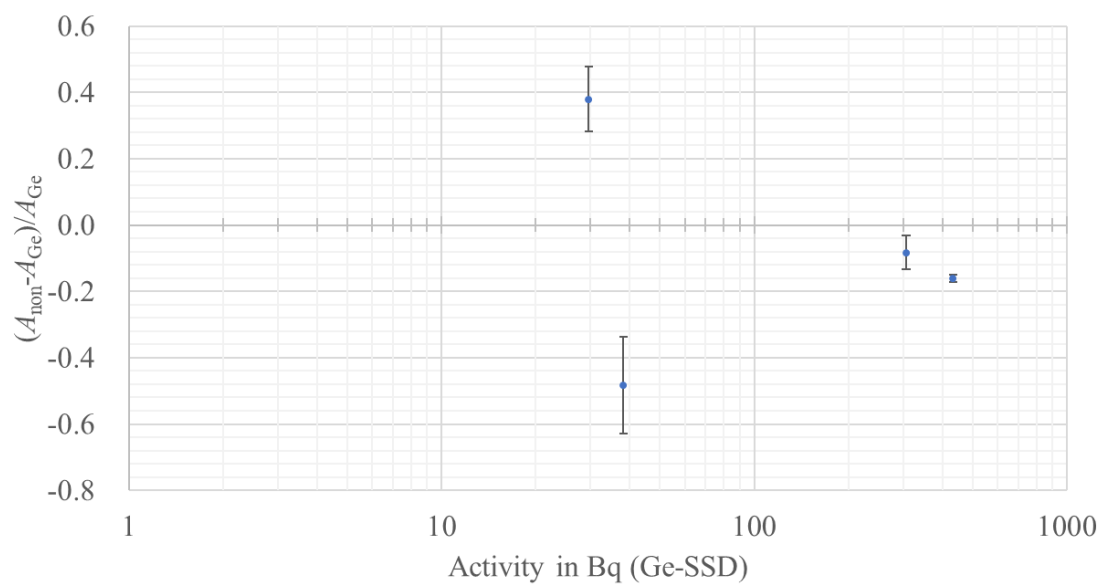
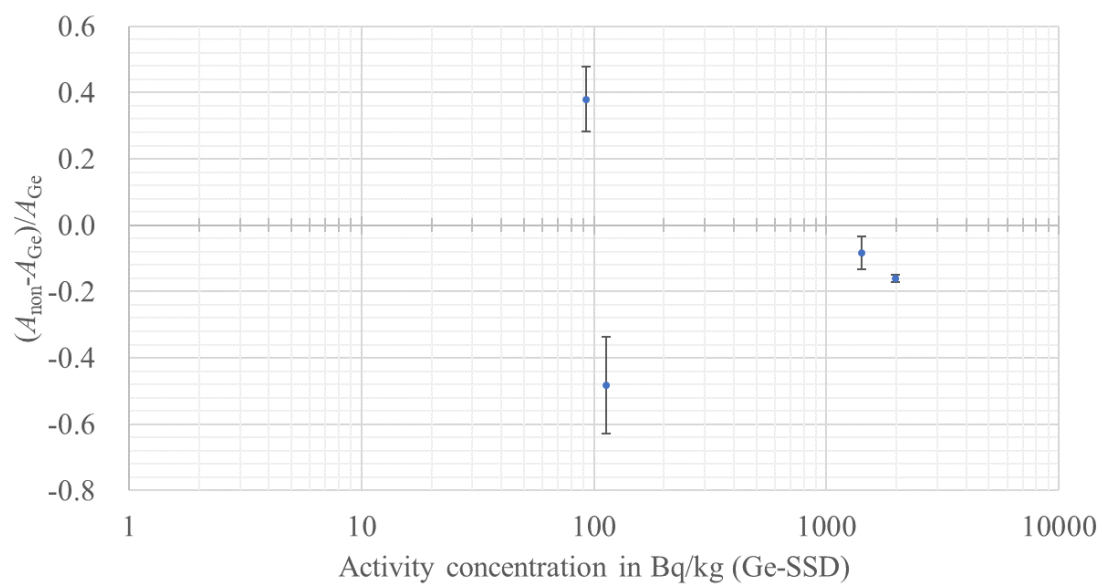


図 6 続き

アカヤマドリ

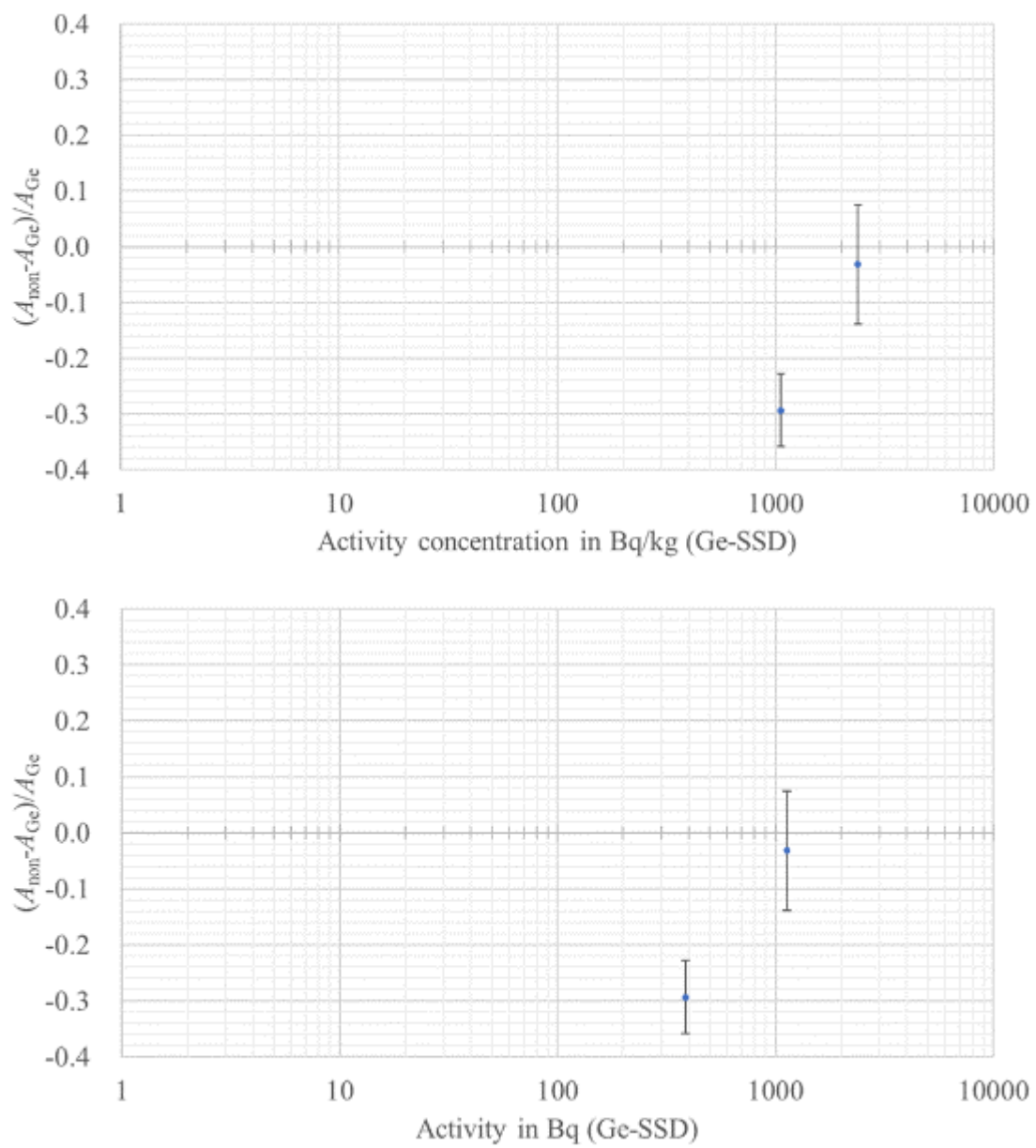


図 6 続き

アミタケ

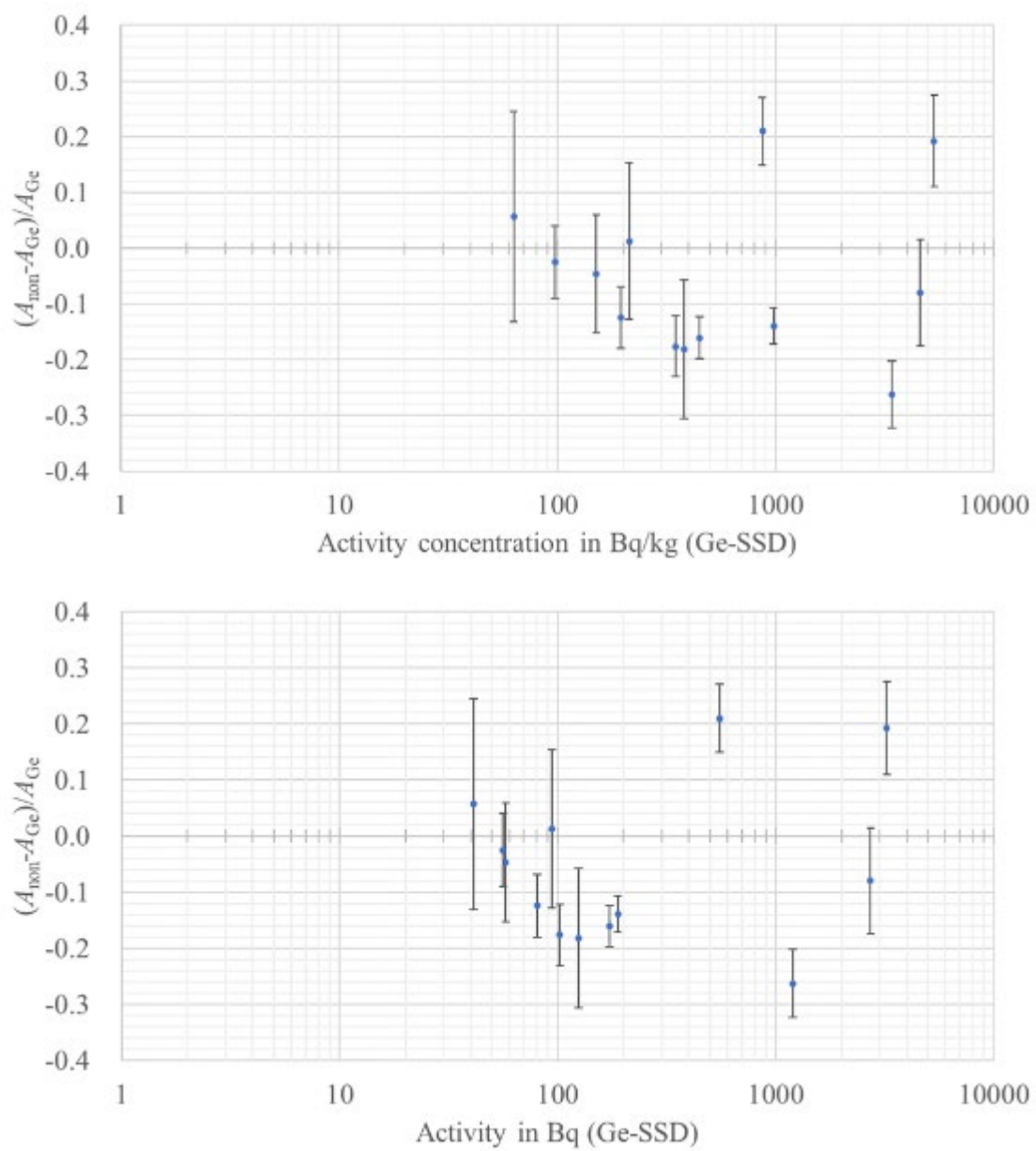


図 6 続き

アメリカウラベニイロガワリ

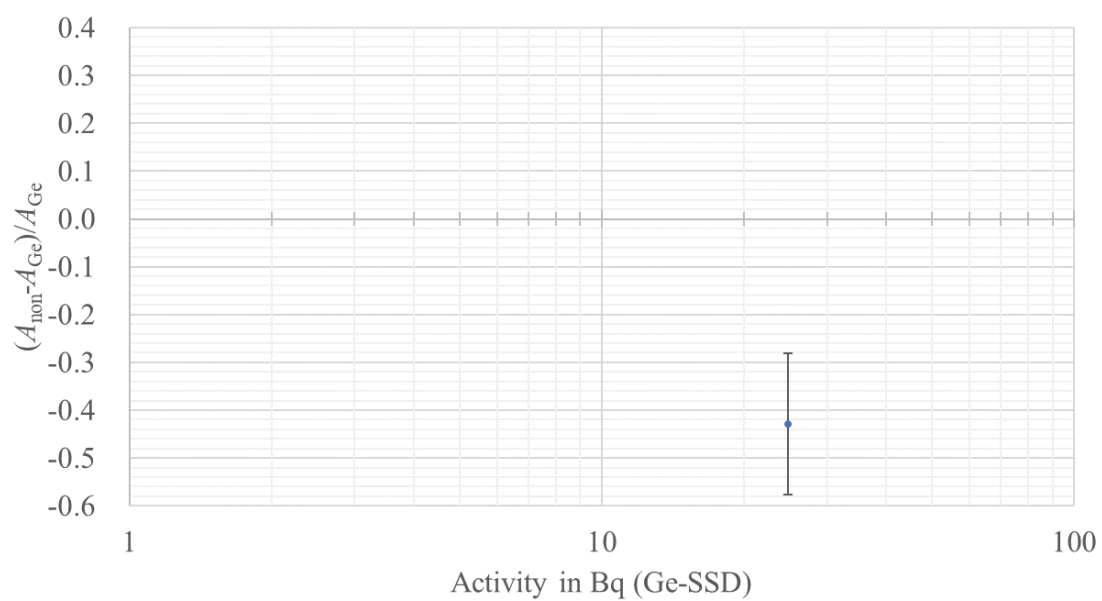
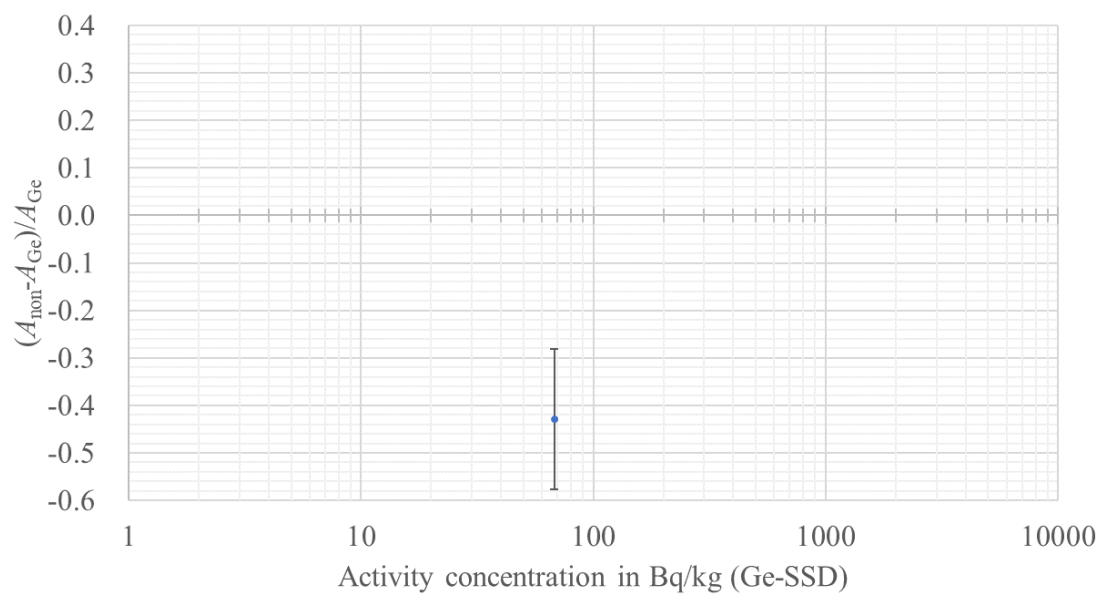


図 6 続き

アンズタケ

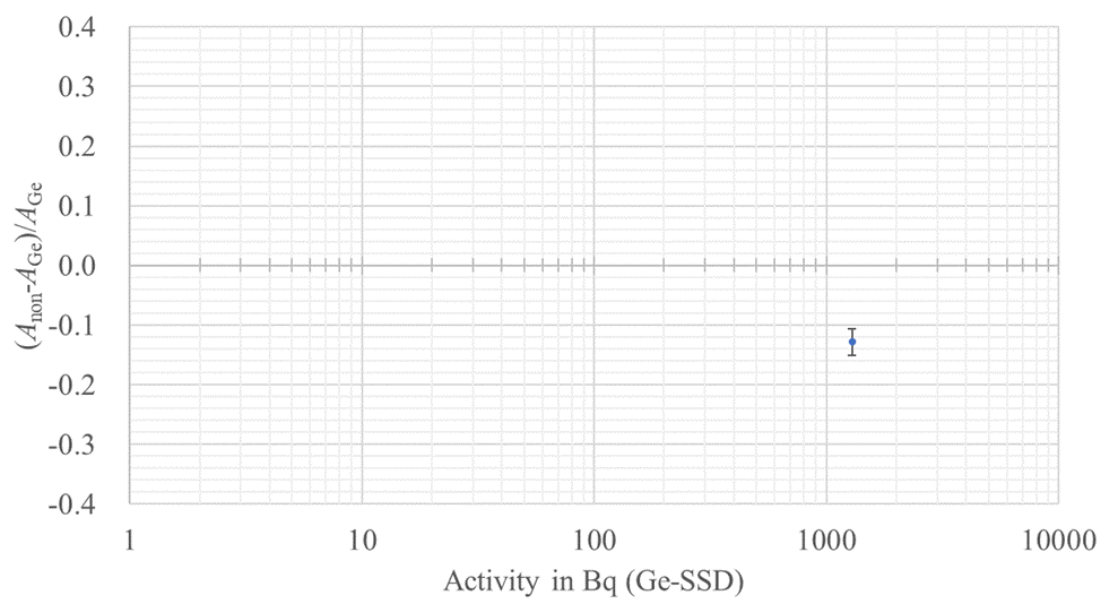
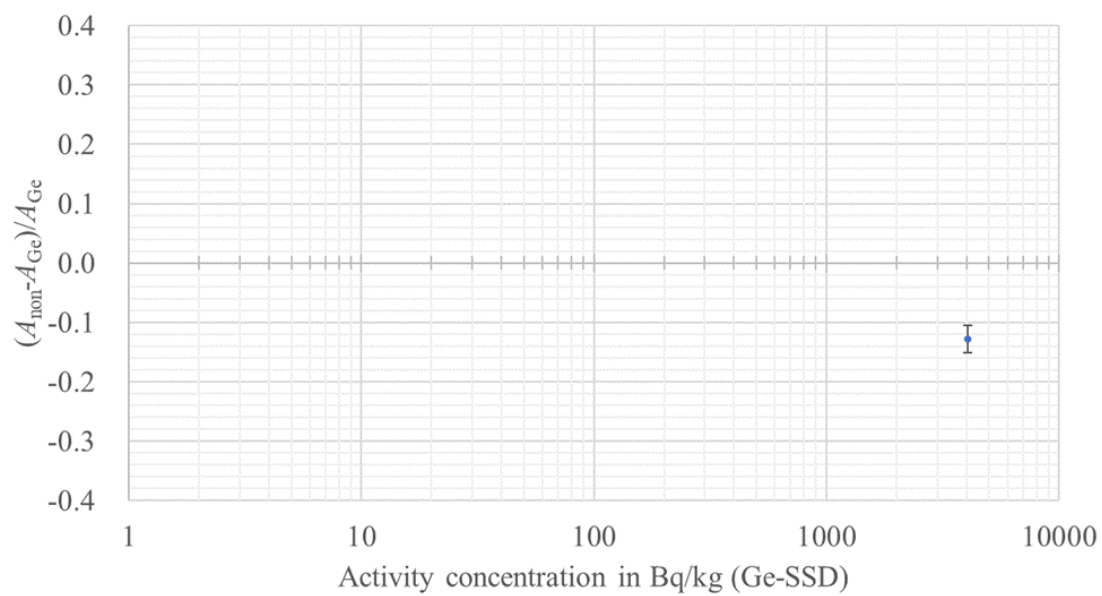


図 6 続き

ウスヒラタケ

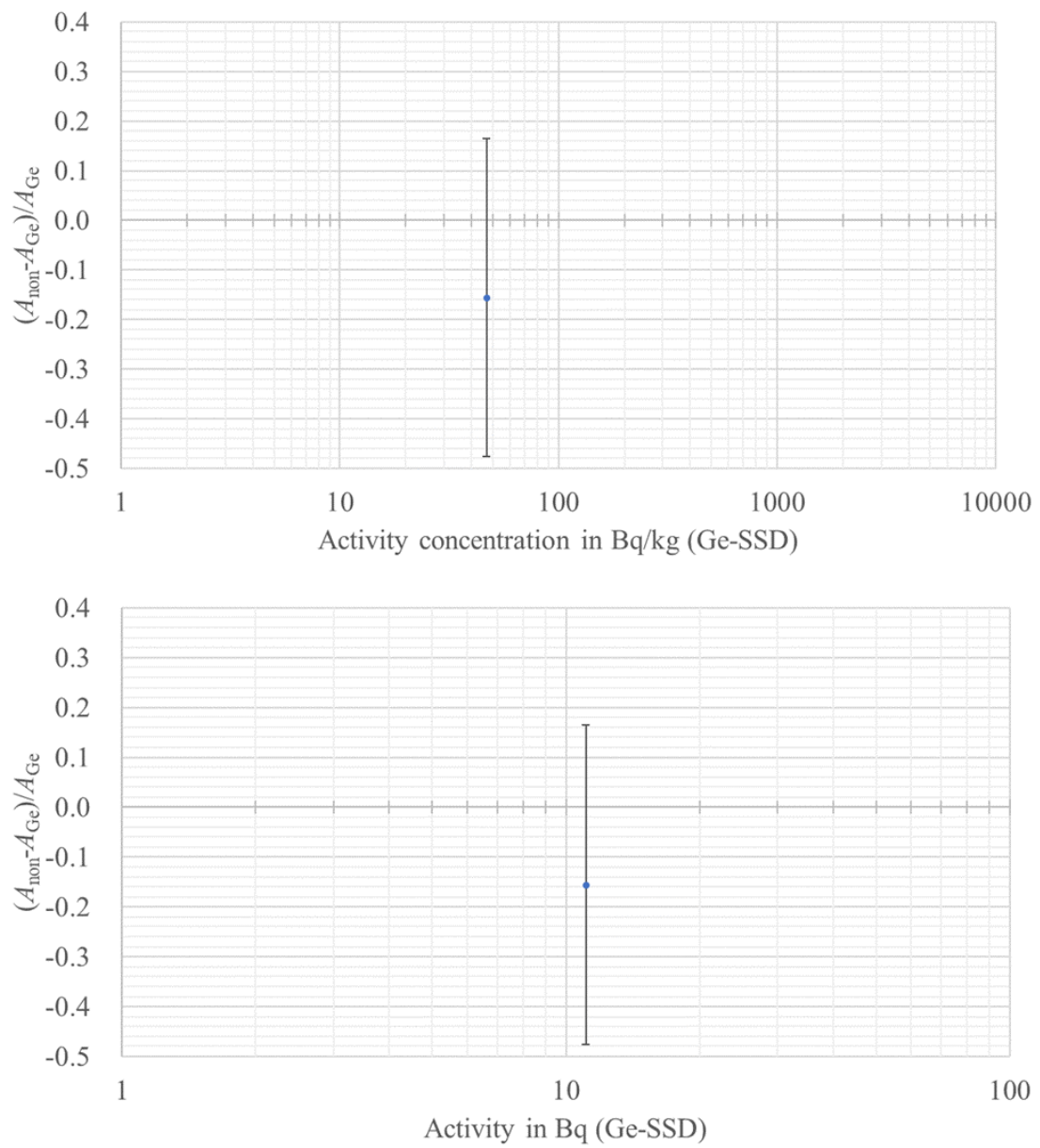


図 6 続き

ウツロイイグチ

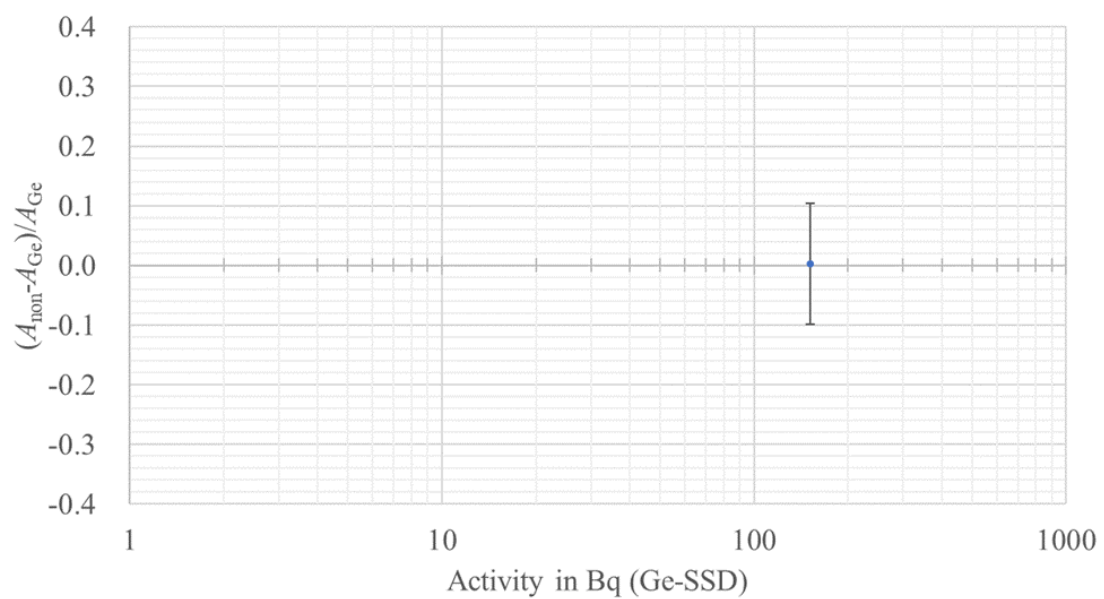
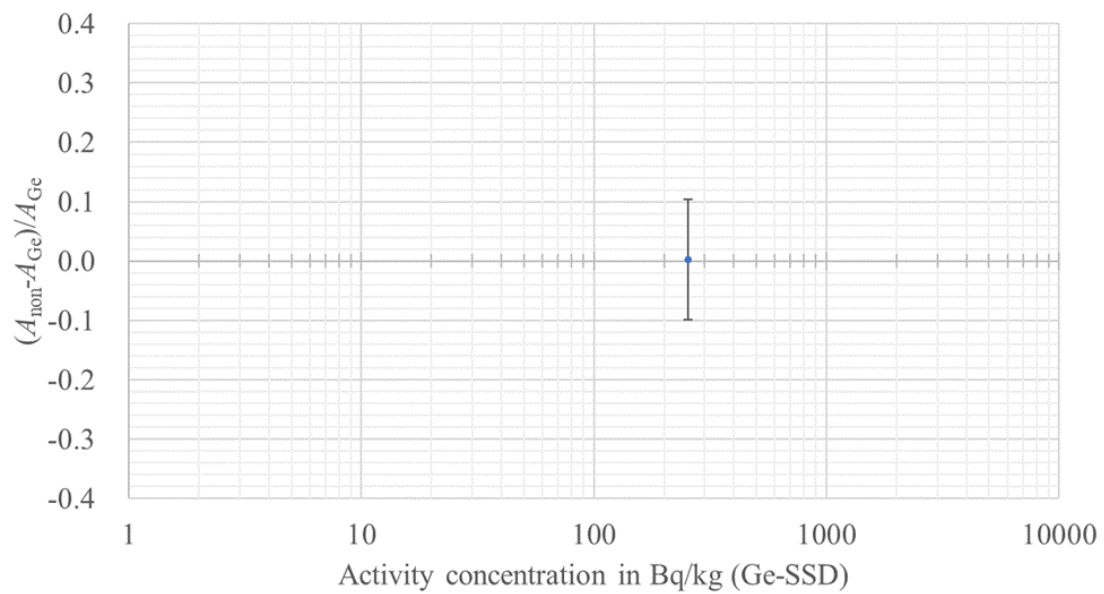


図 6 続き

うど

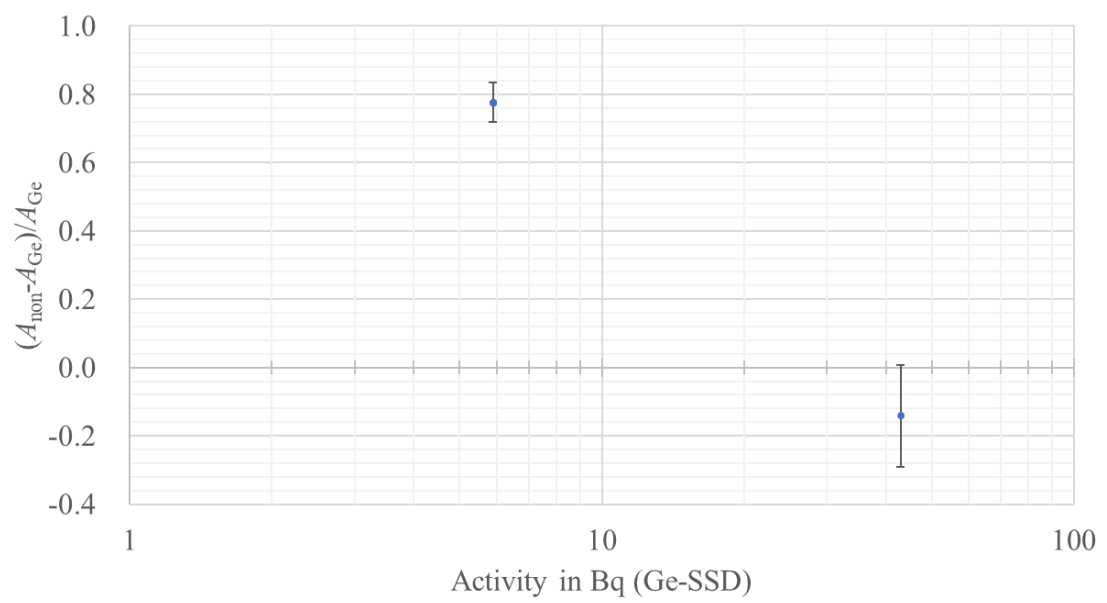
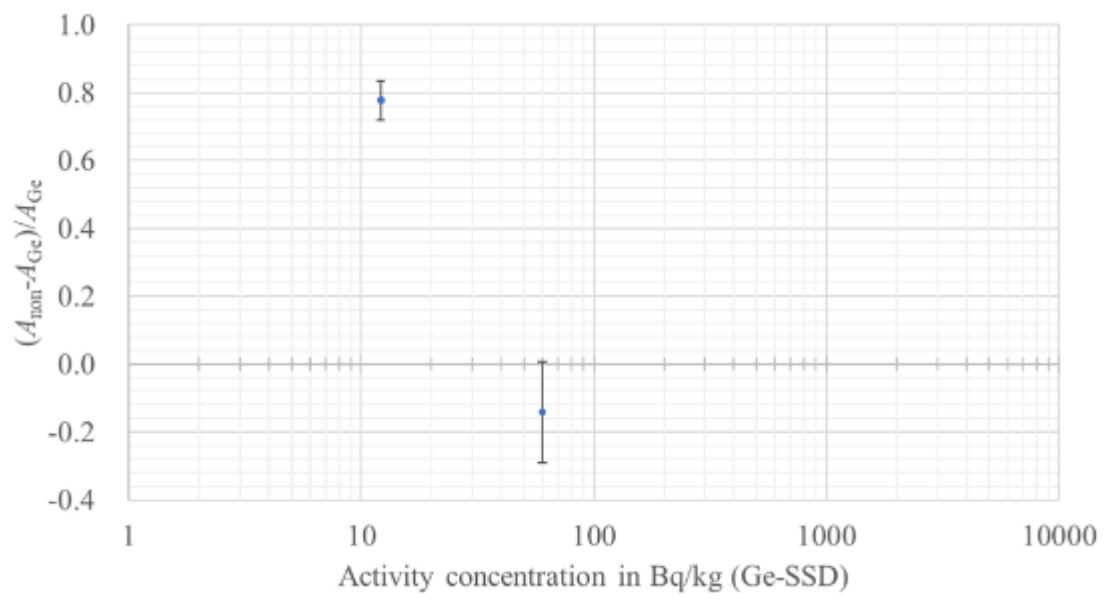


図 6 続き

ウラベニホテイシメジ

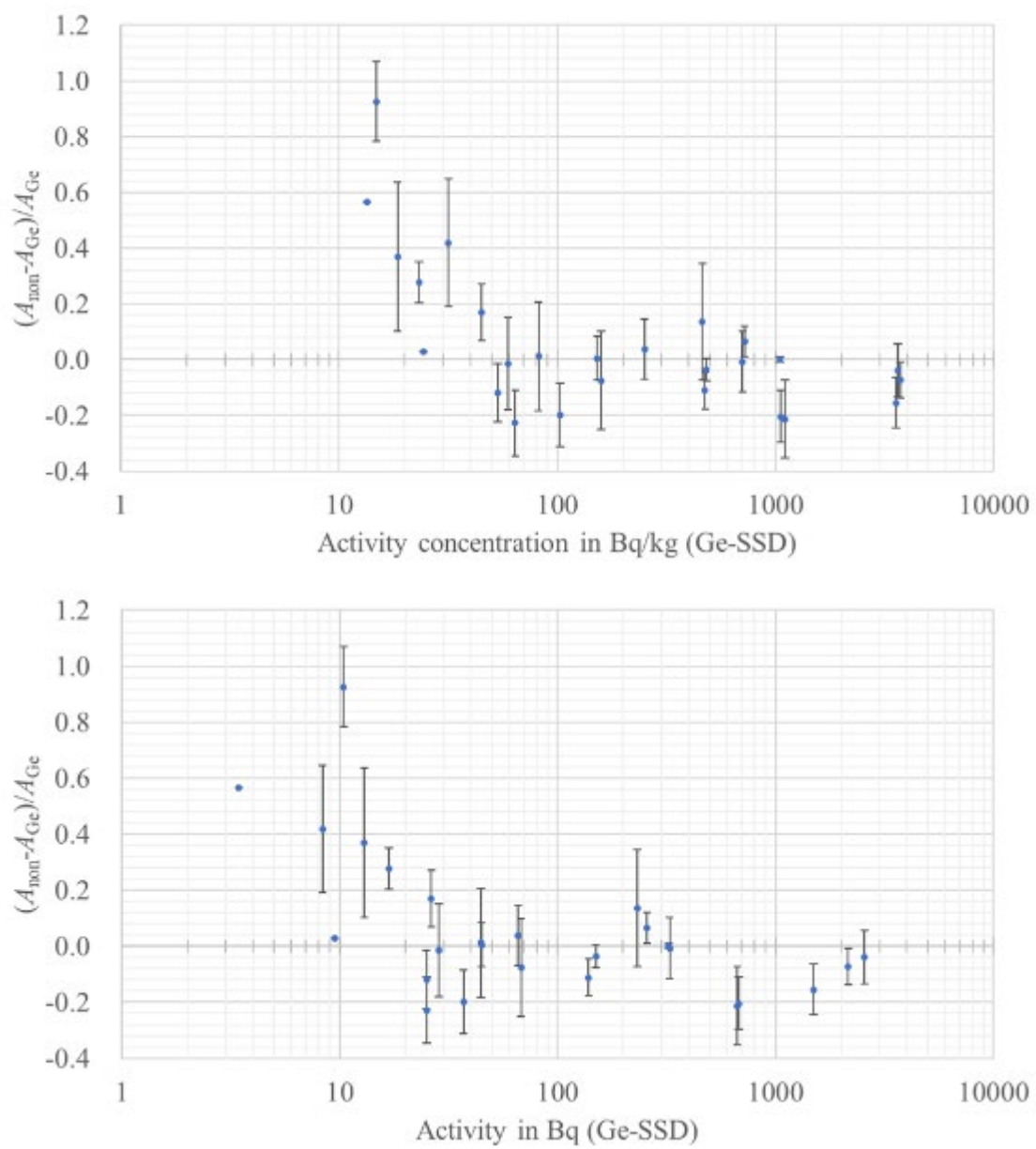


図 6 続き

エゾハリタケ

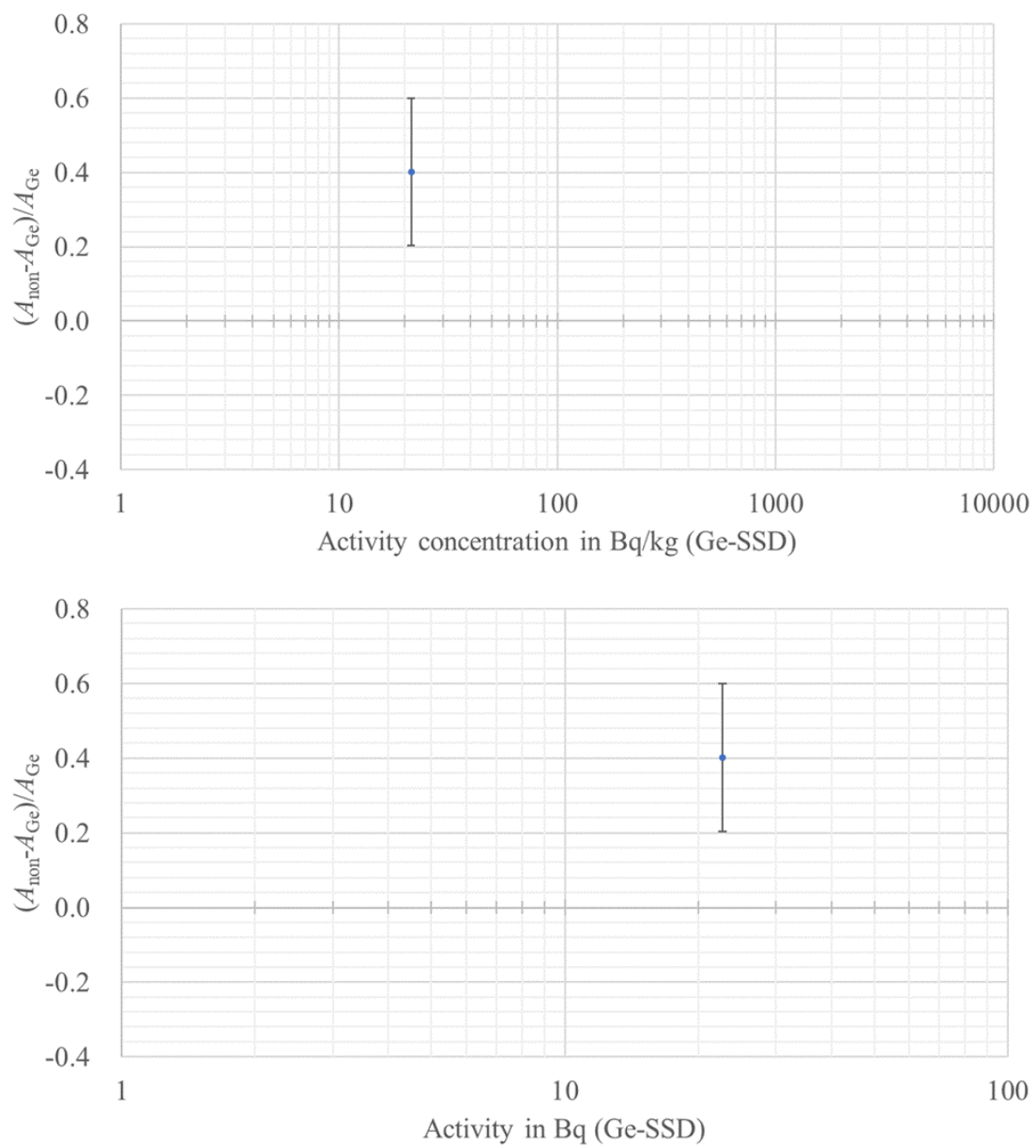


図 6 続き

オオイチョウタケ

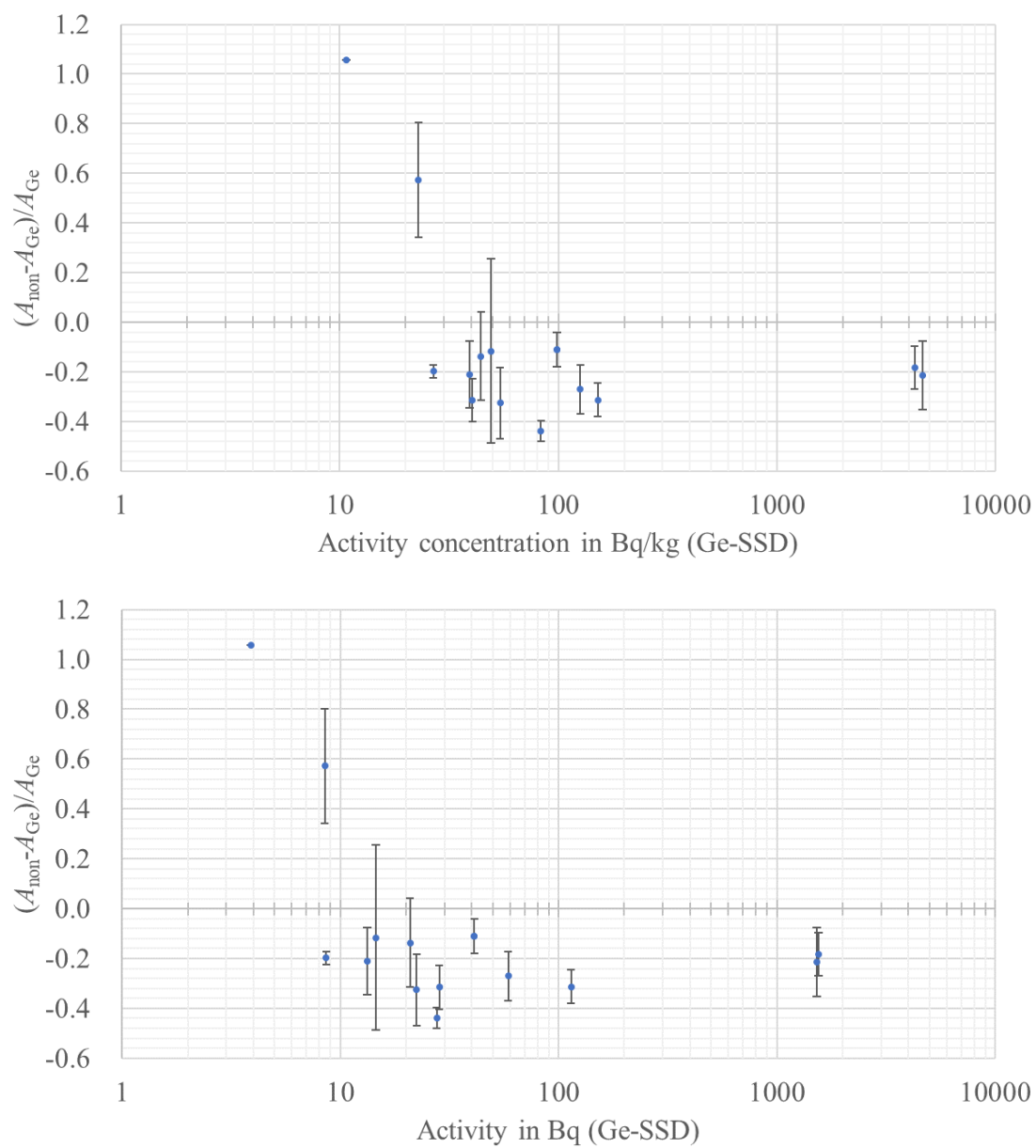


図 6 続き

カノシタ

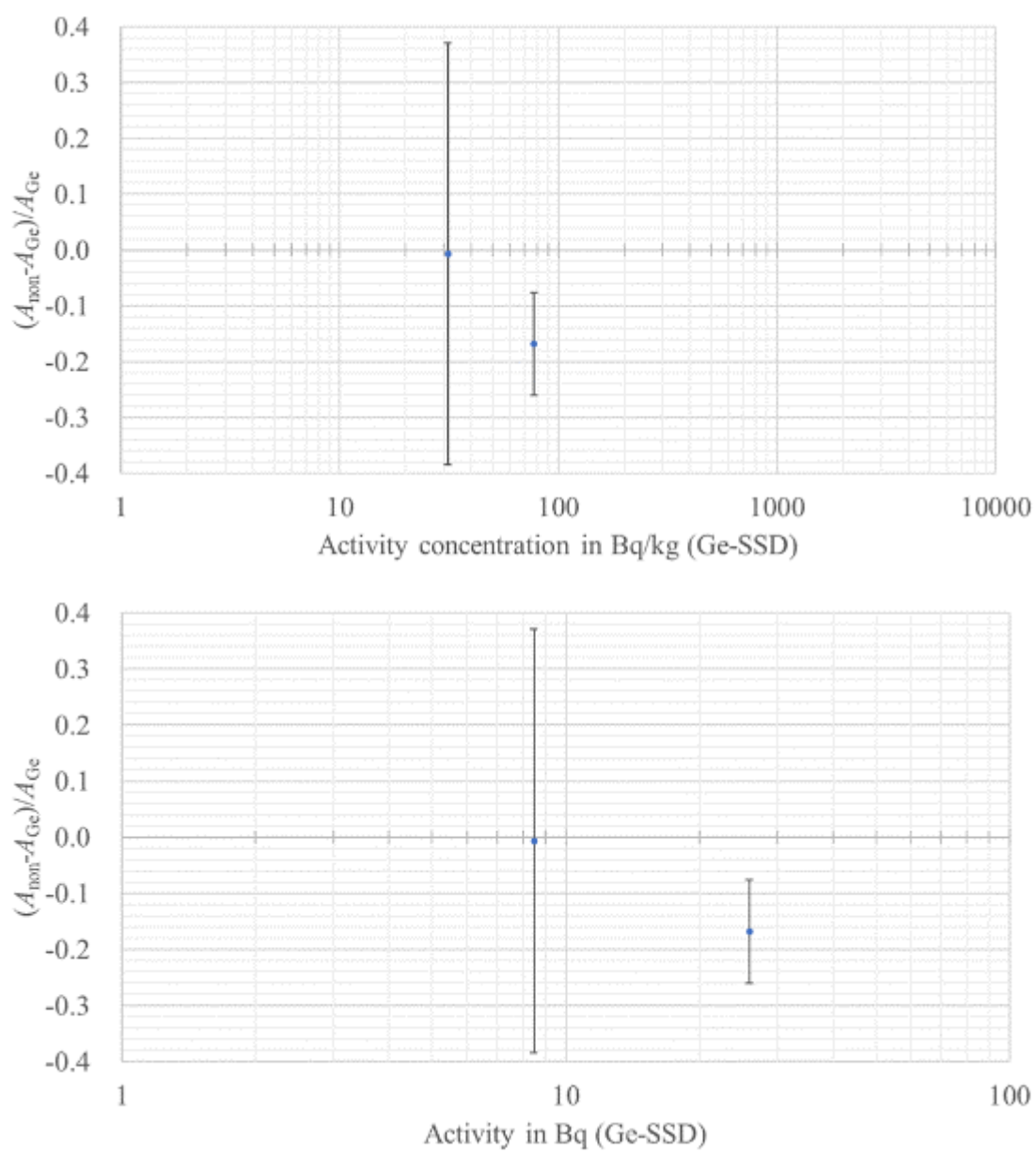


図 6 続き

カラストケ

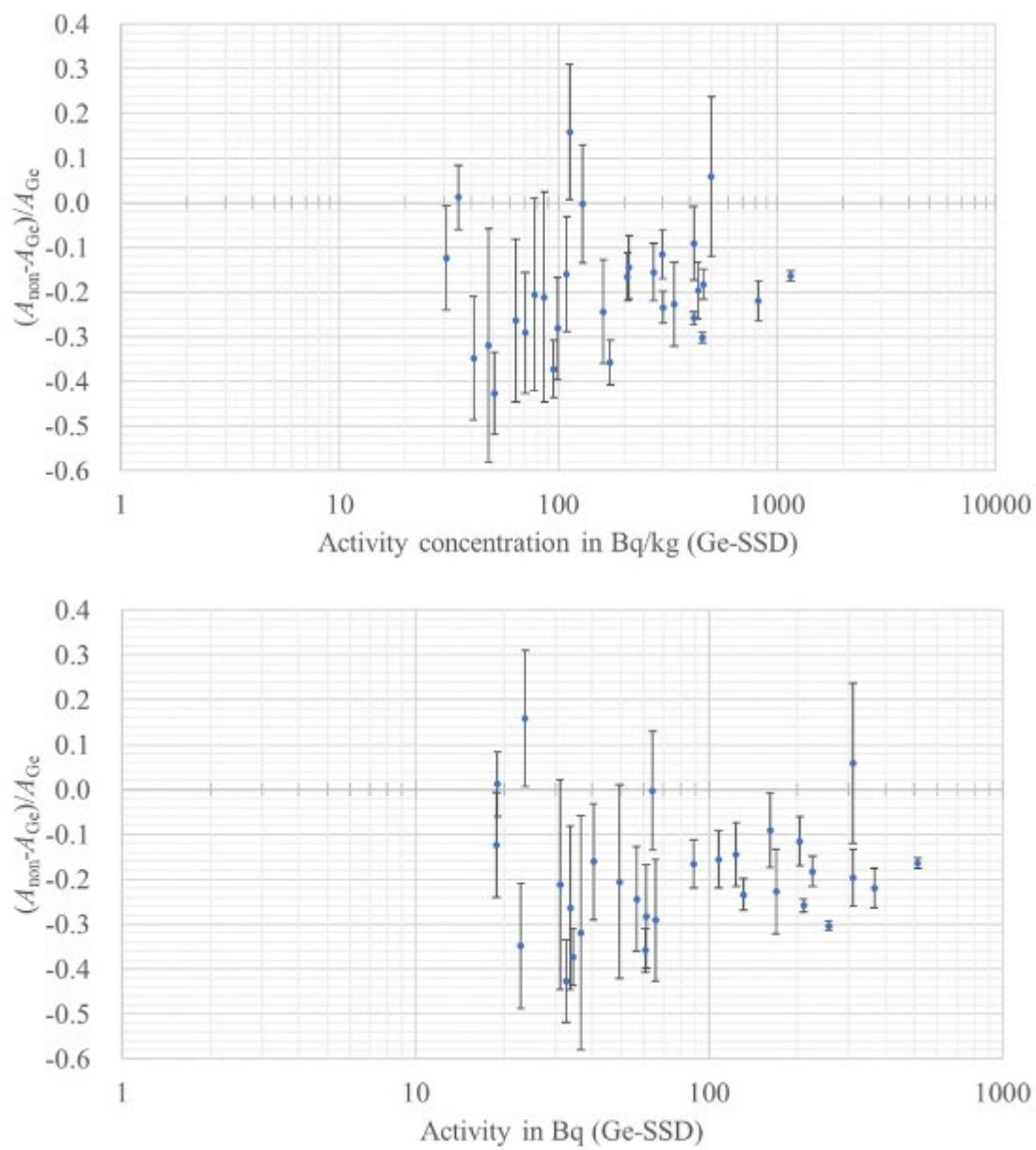


図 6 続き

カワムラフウセンタケ

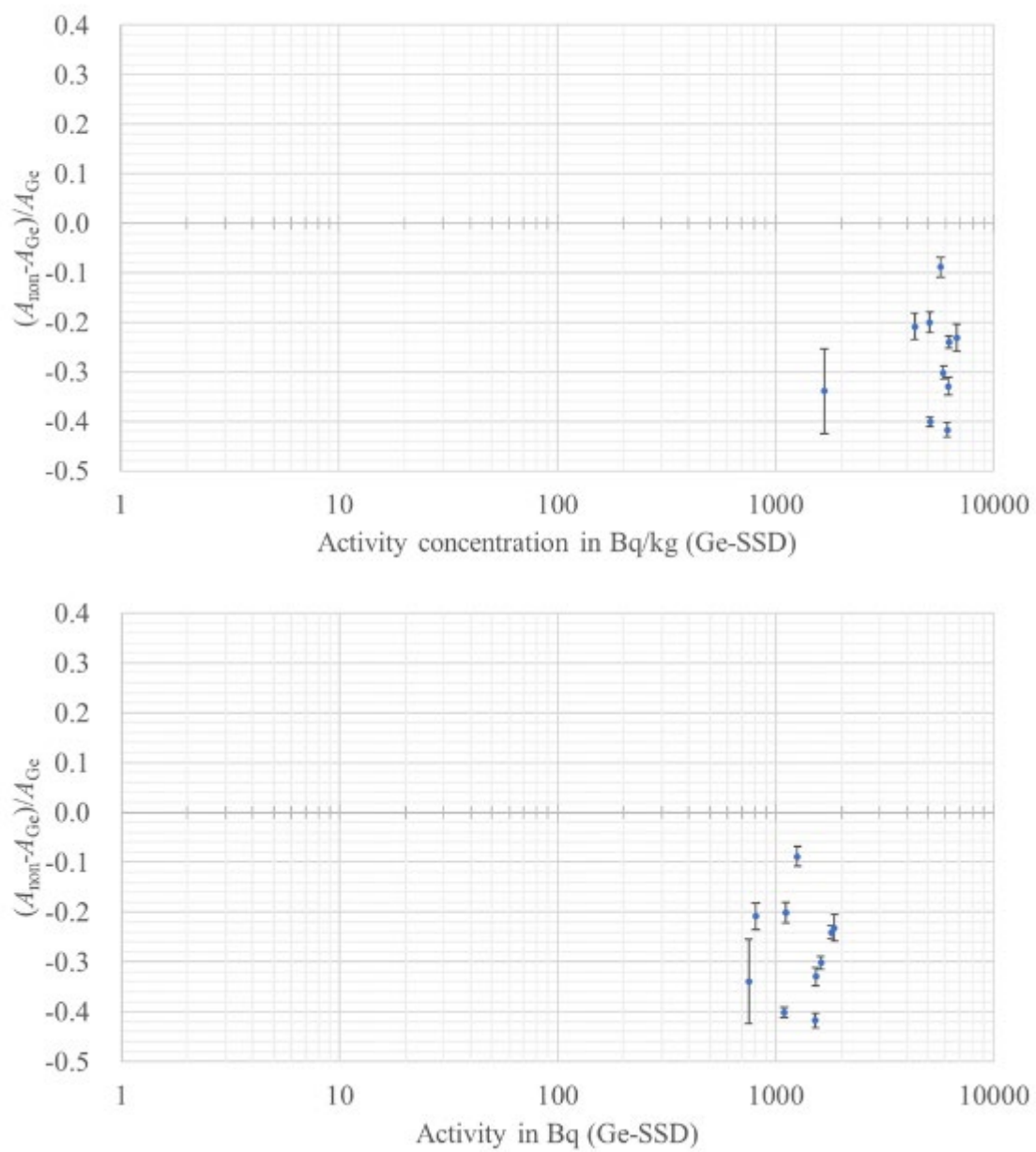


図 6 続き

クサソテツ

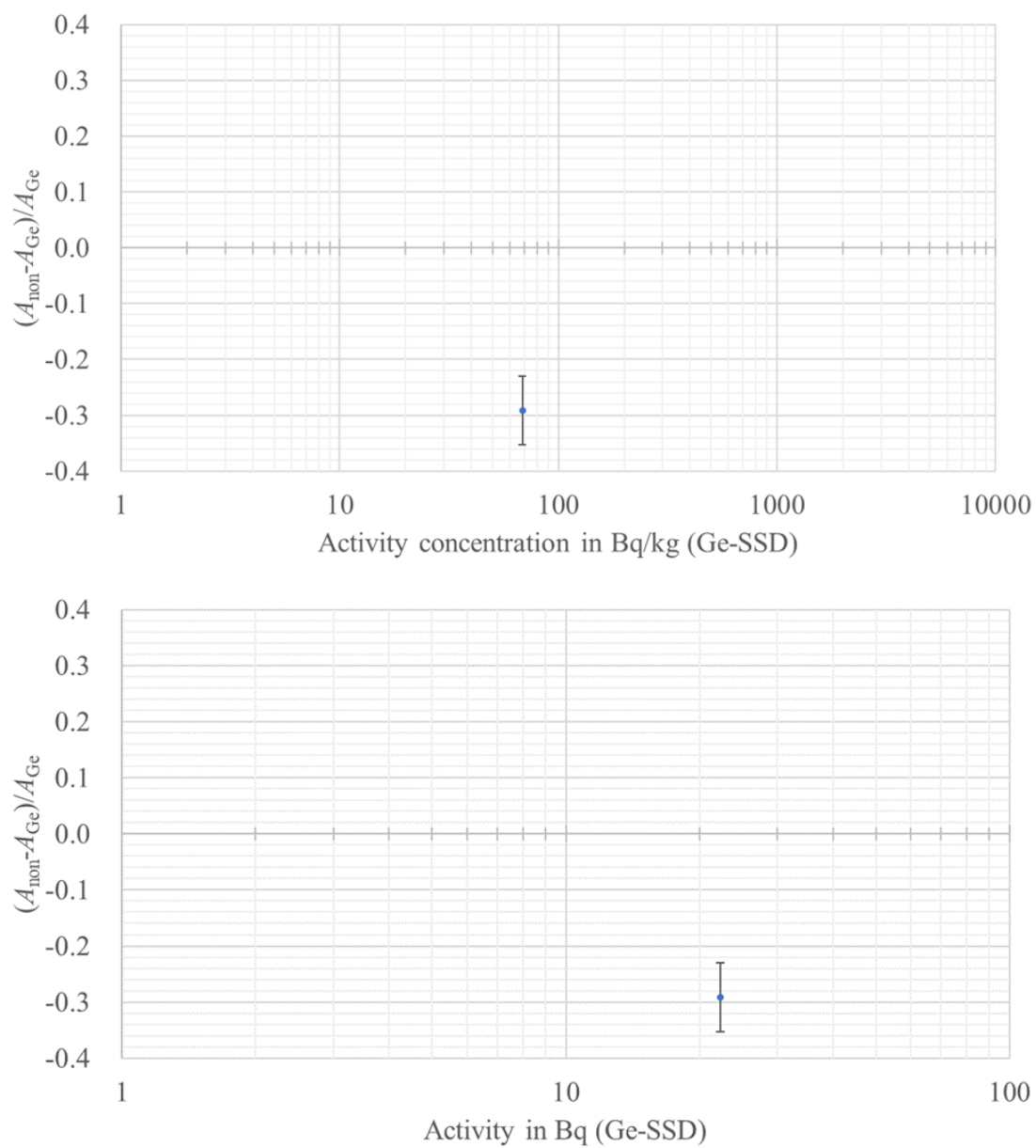


図 6 続き

クリタケ

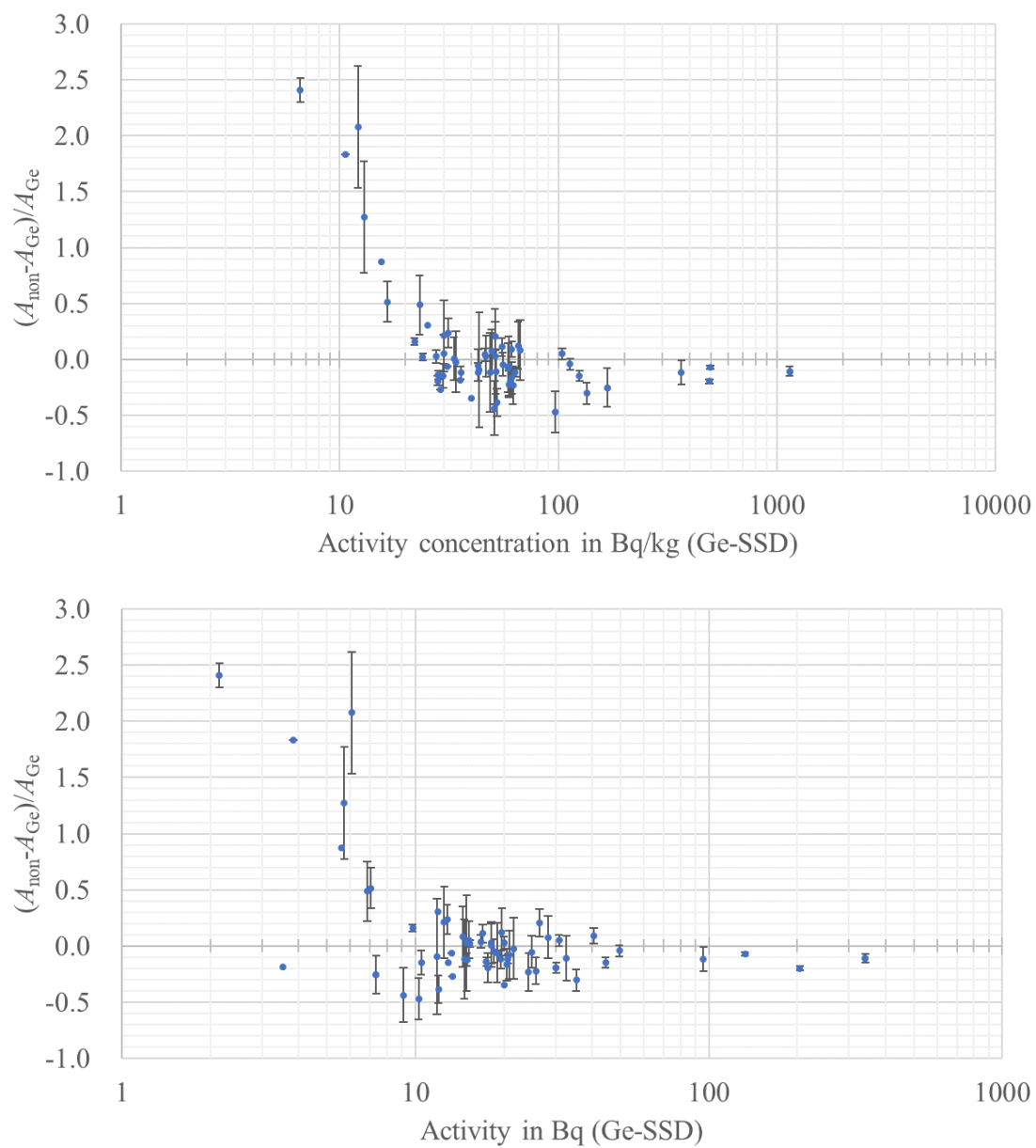


図 6 続き

クロカワ

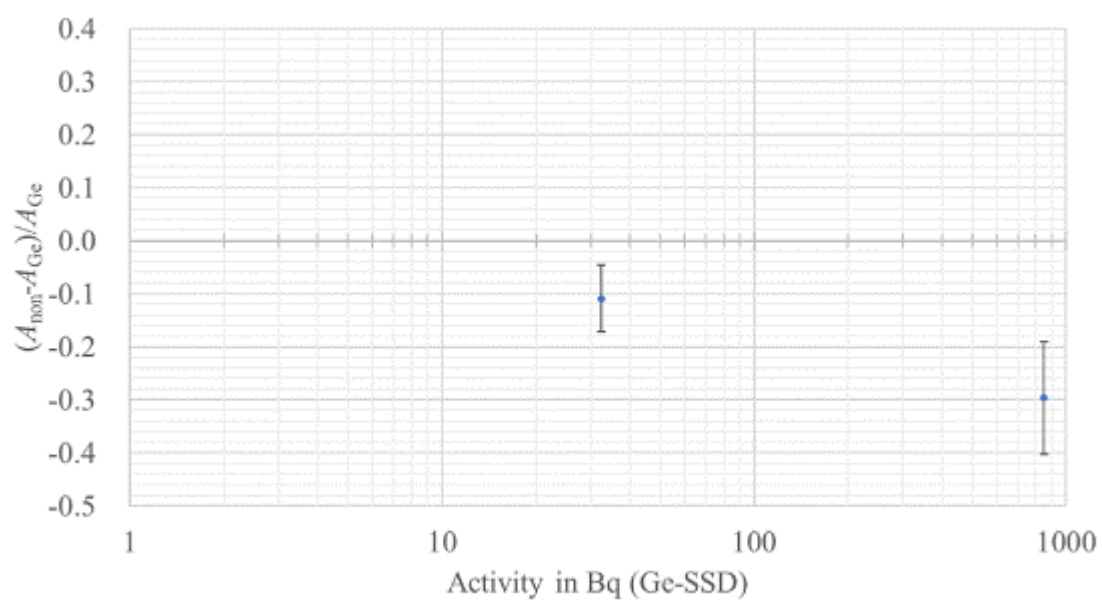
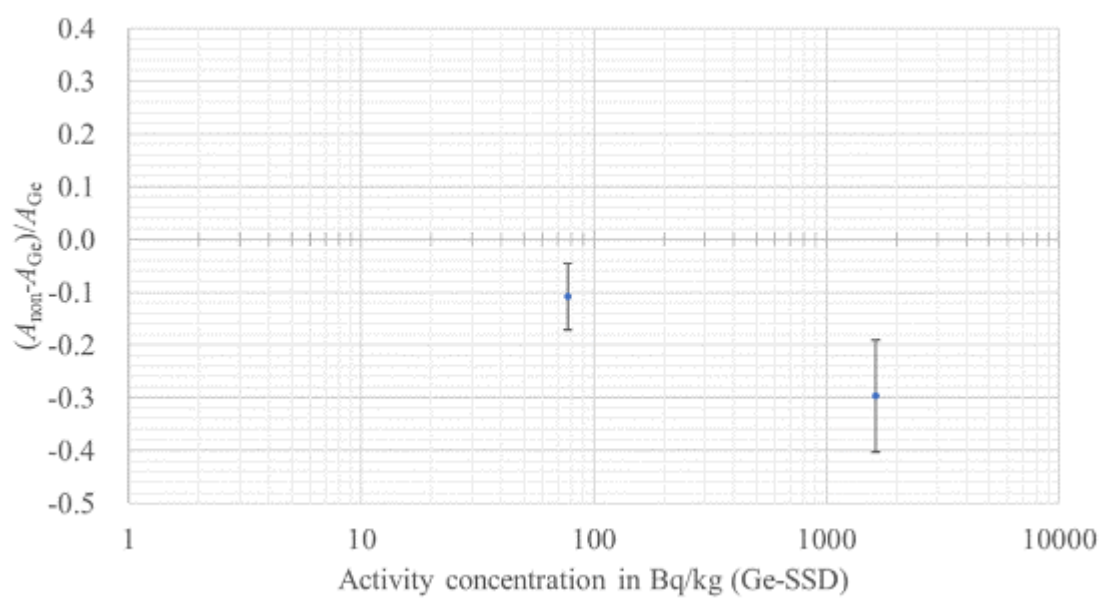


図 6 続き

原木マイタケ

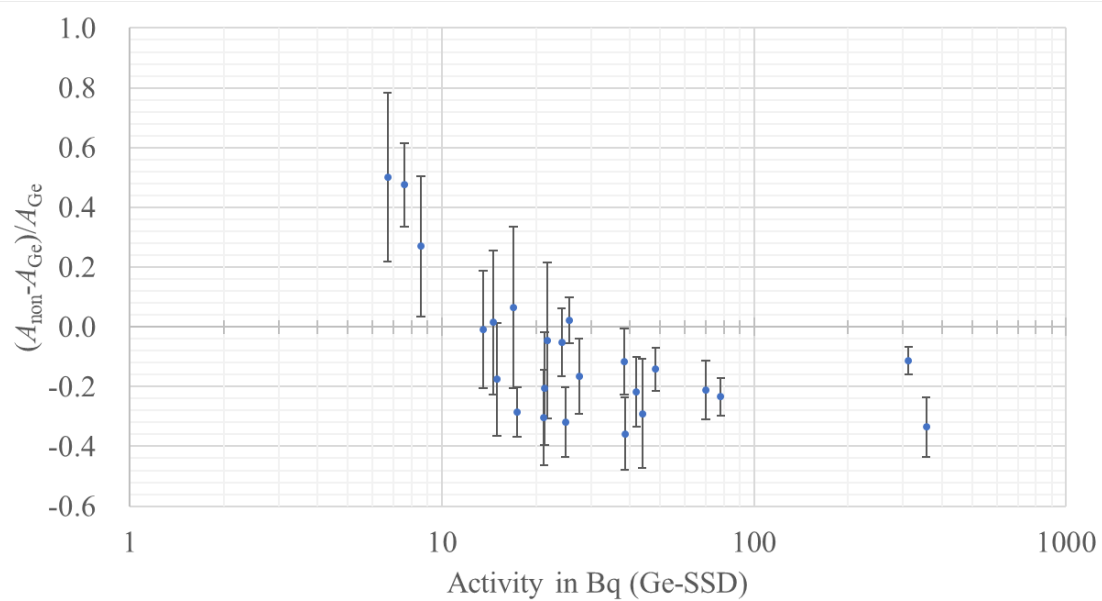
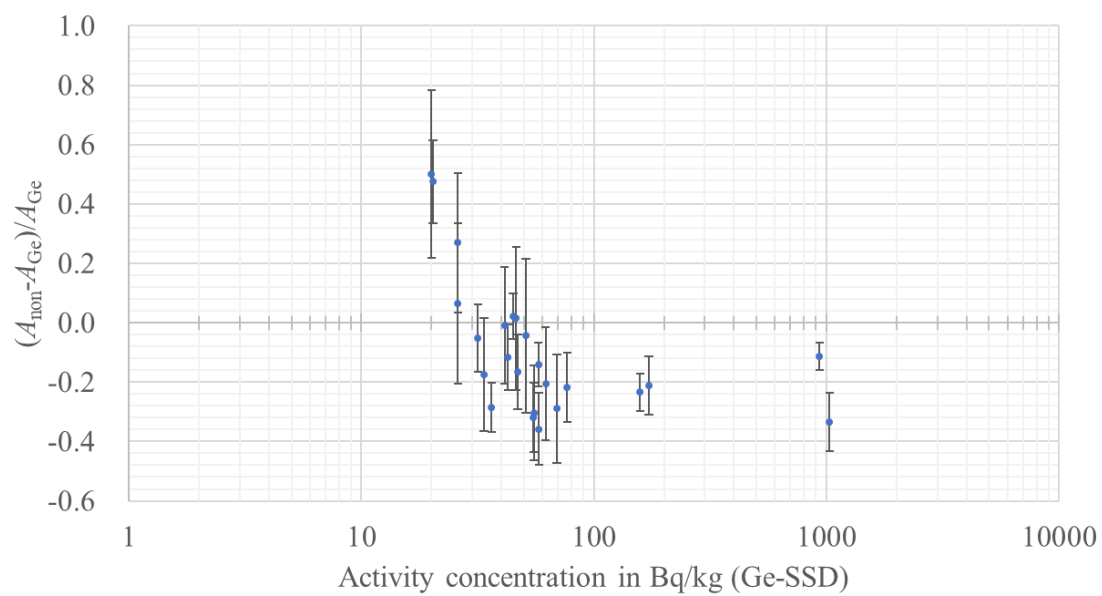


図 6 続き

コウタケ

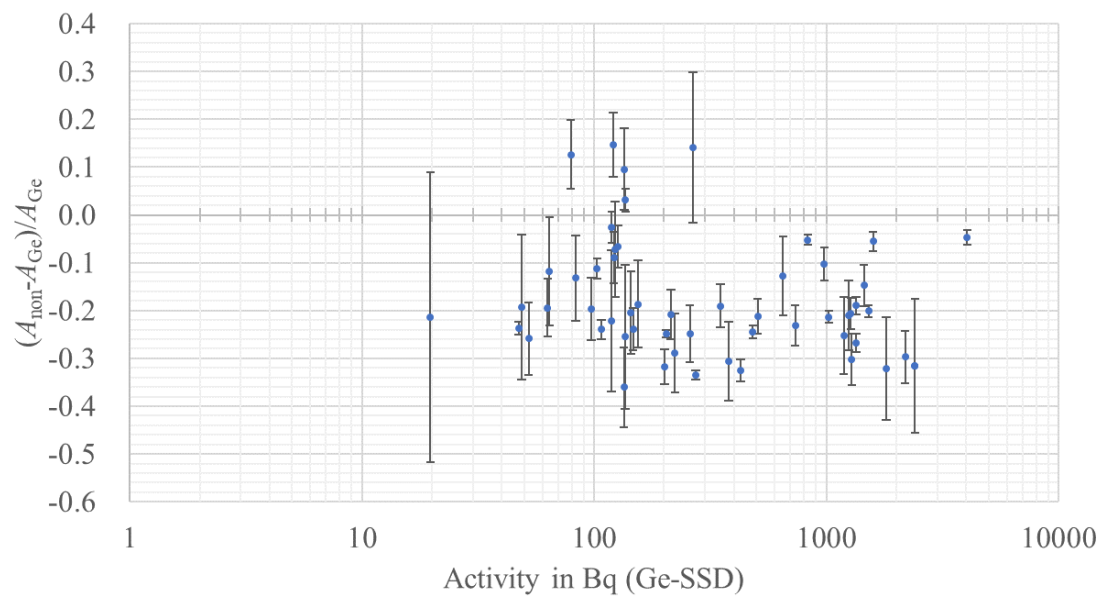
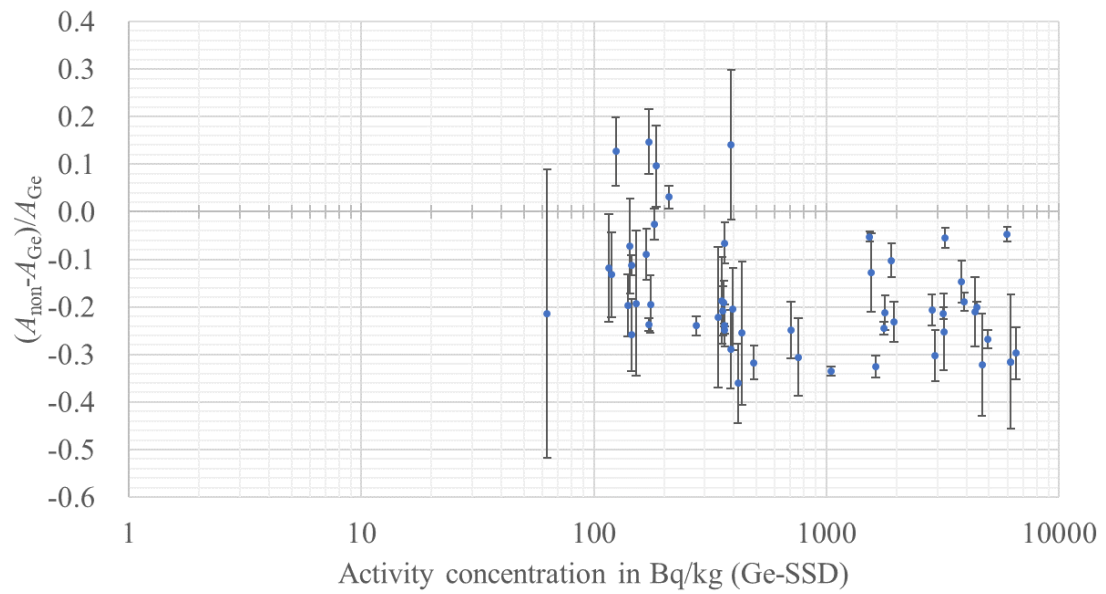


図 6 続き

コガネタケ

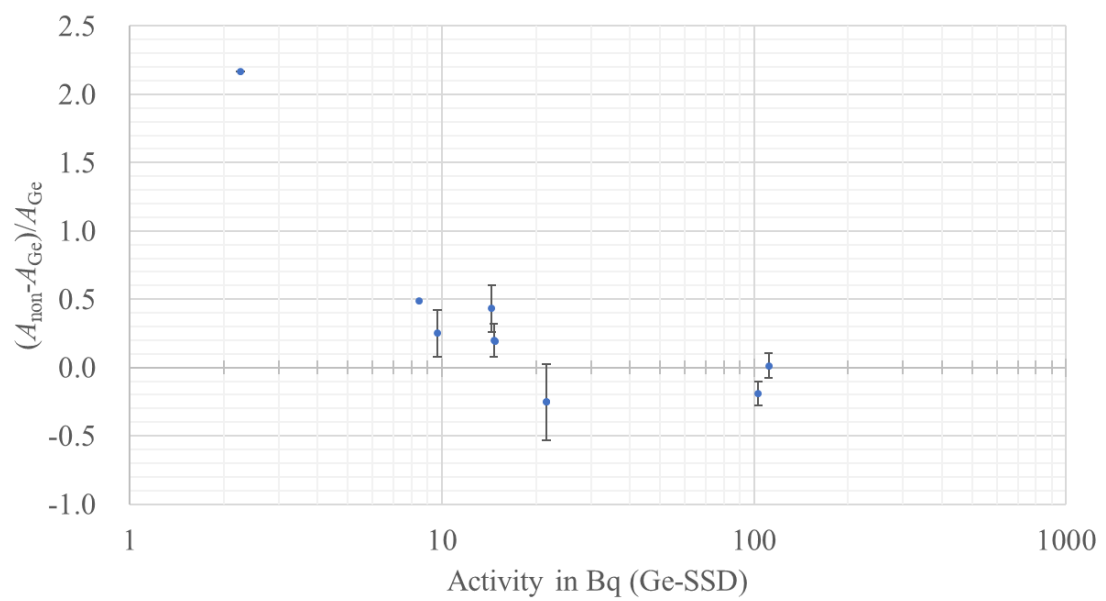
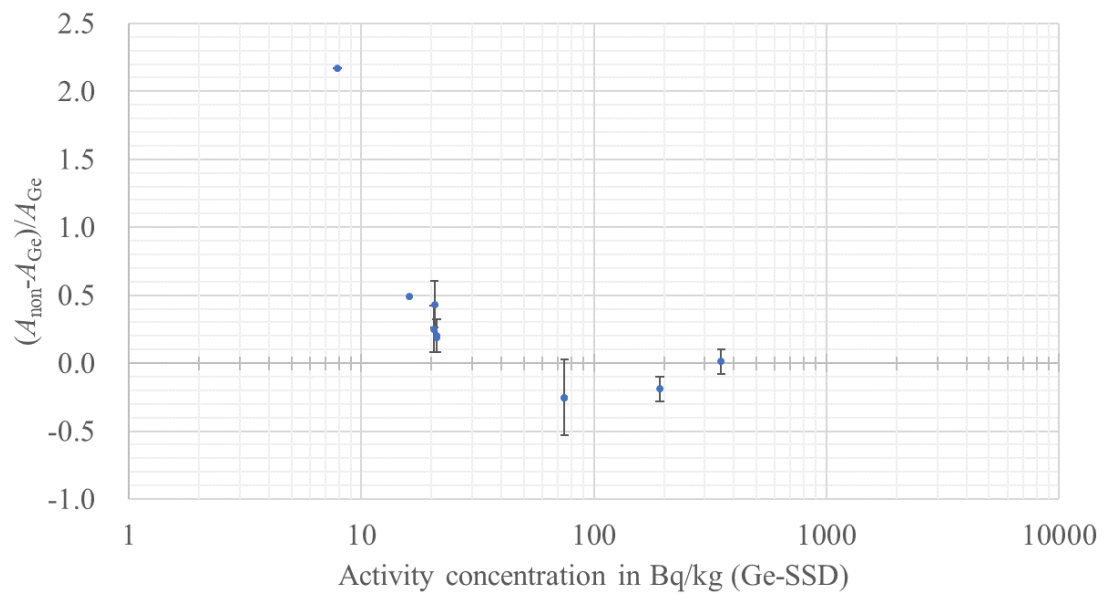


図 6 続き

コシアブラ

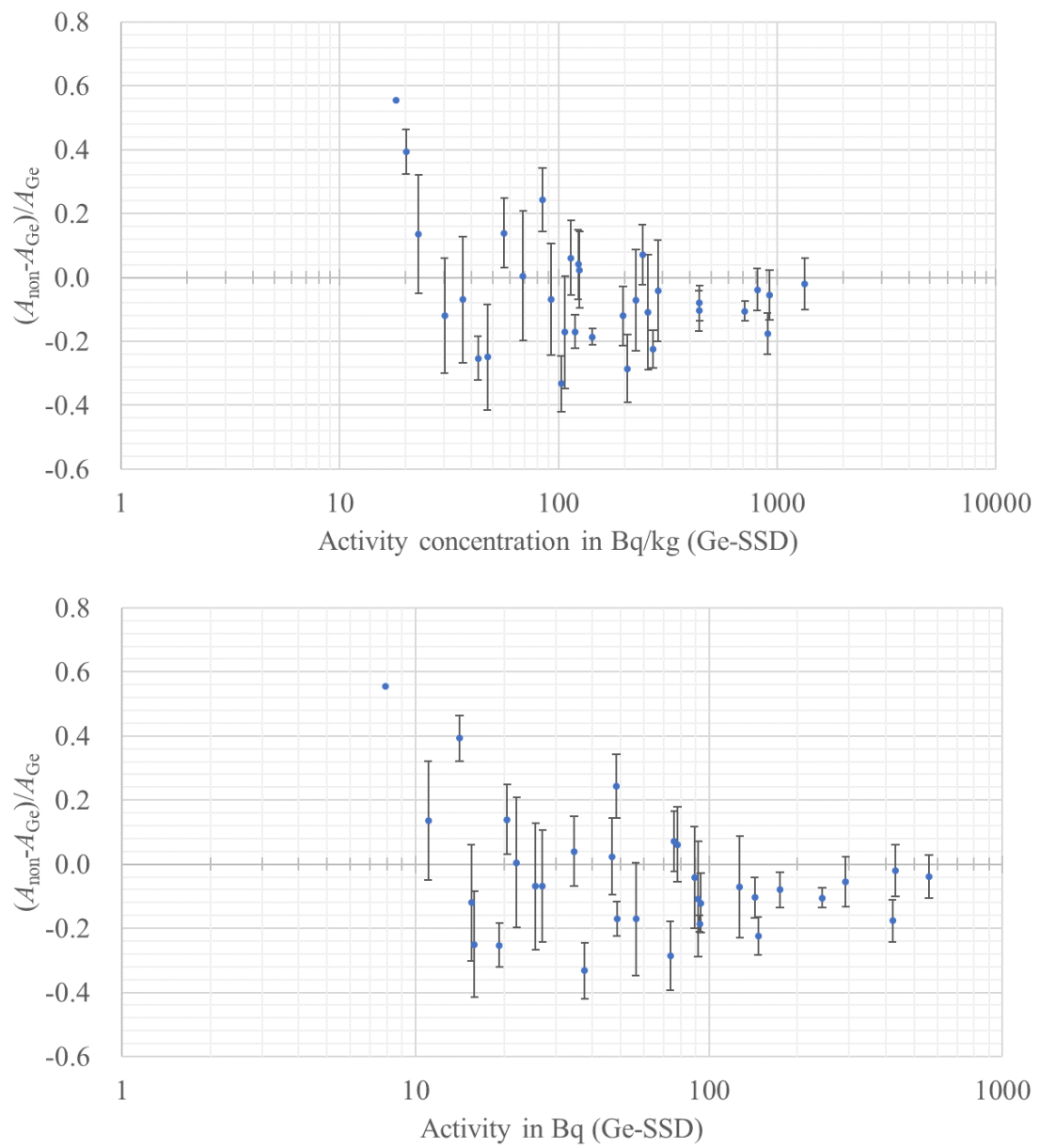


図 6 続き

コムラサキシメジ

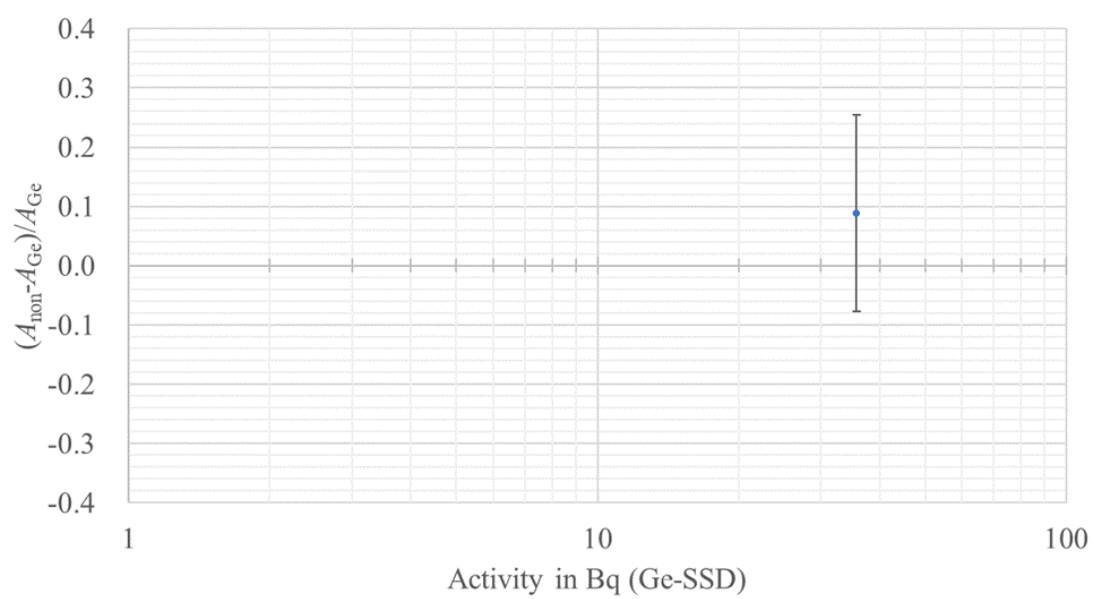
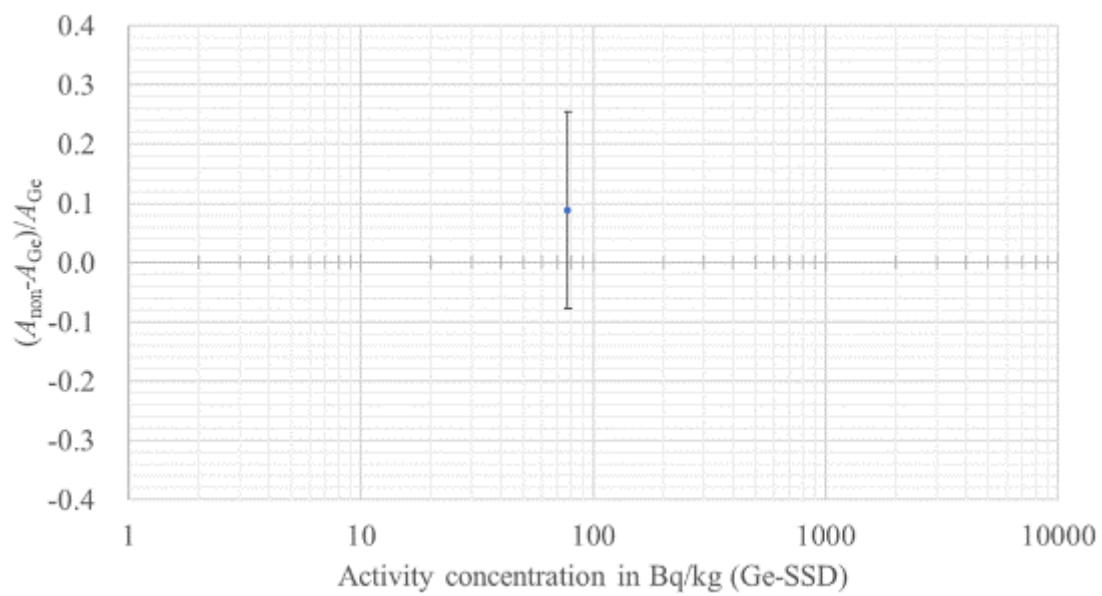


図 6 続き

サクラシメジ

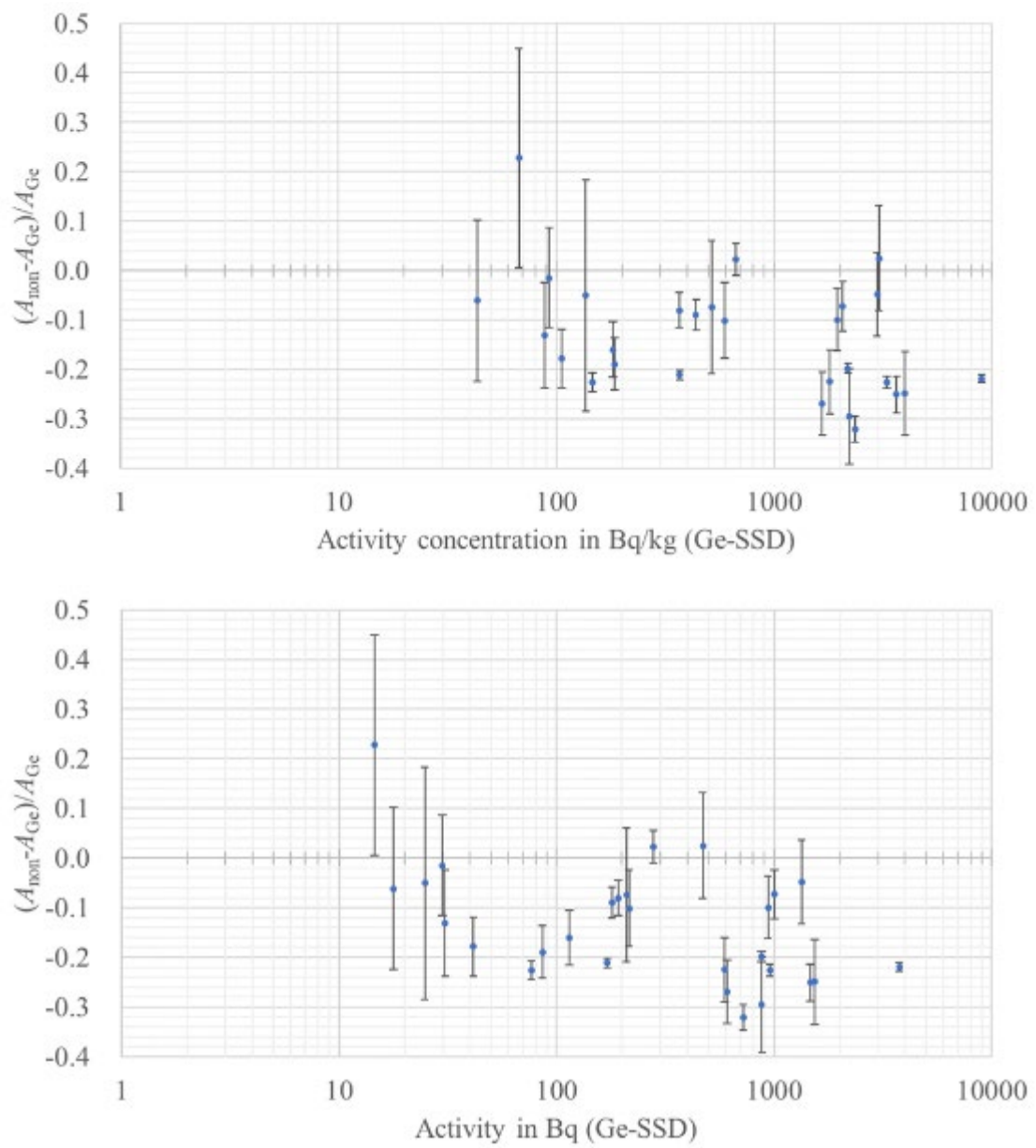


図 6 続き

サケツバタケ

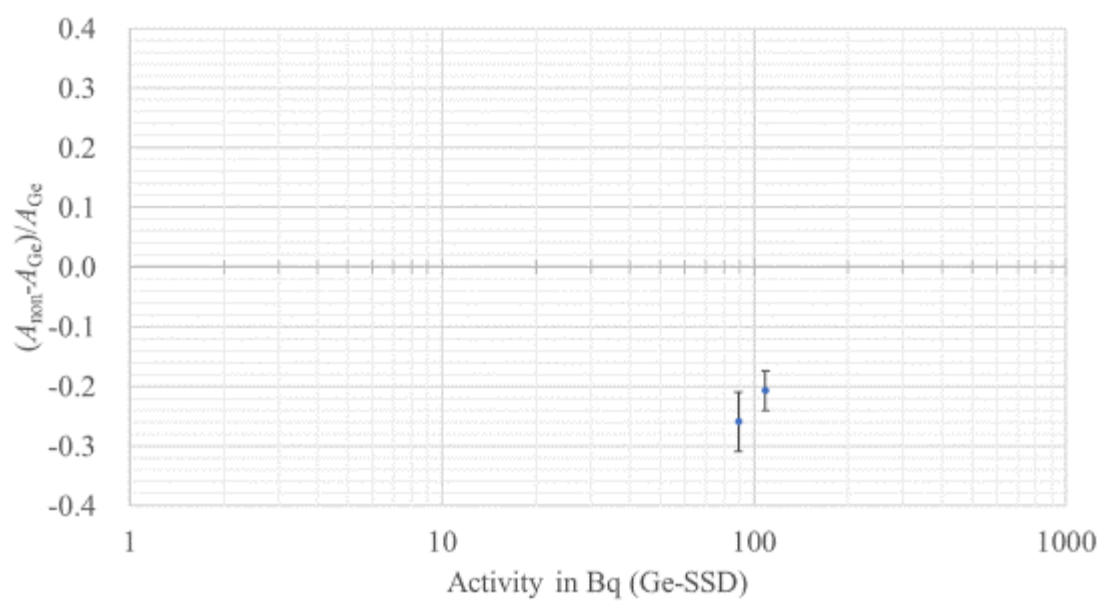
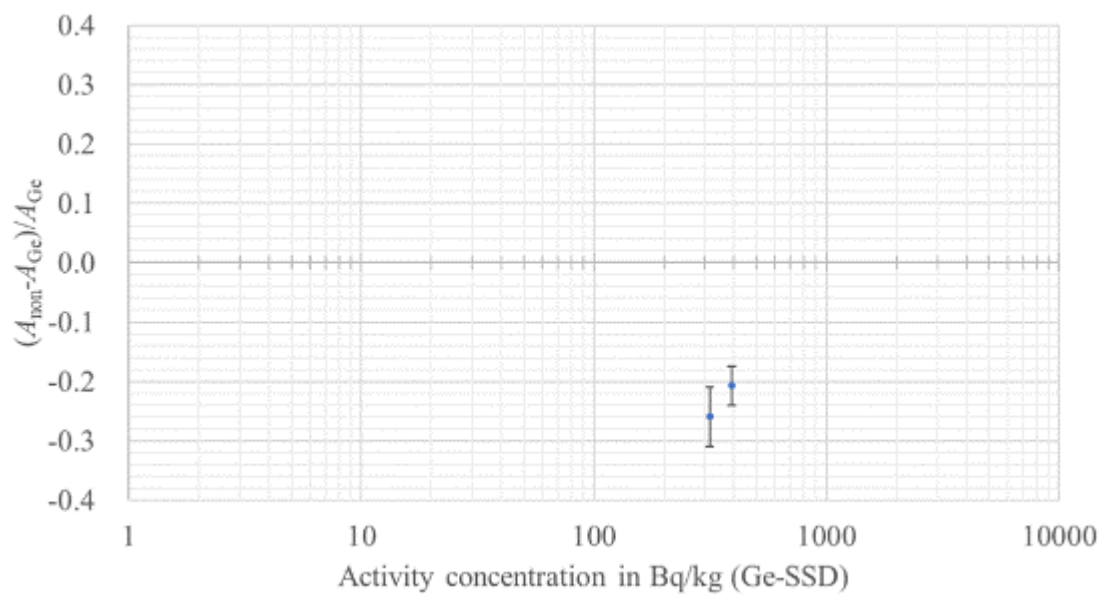


図 6 続き

シモフリシメジ

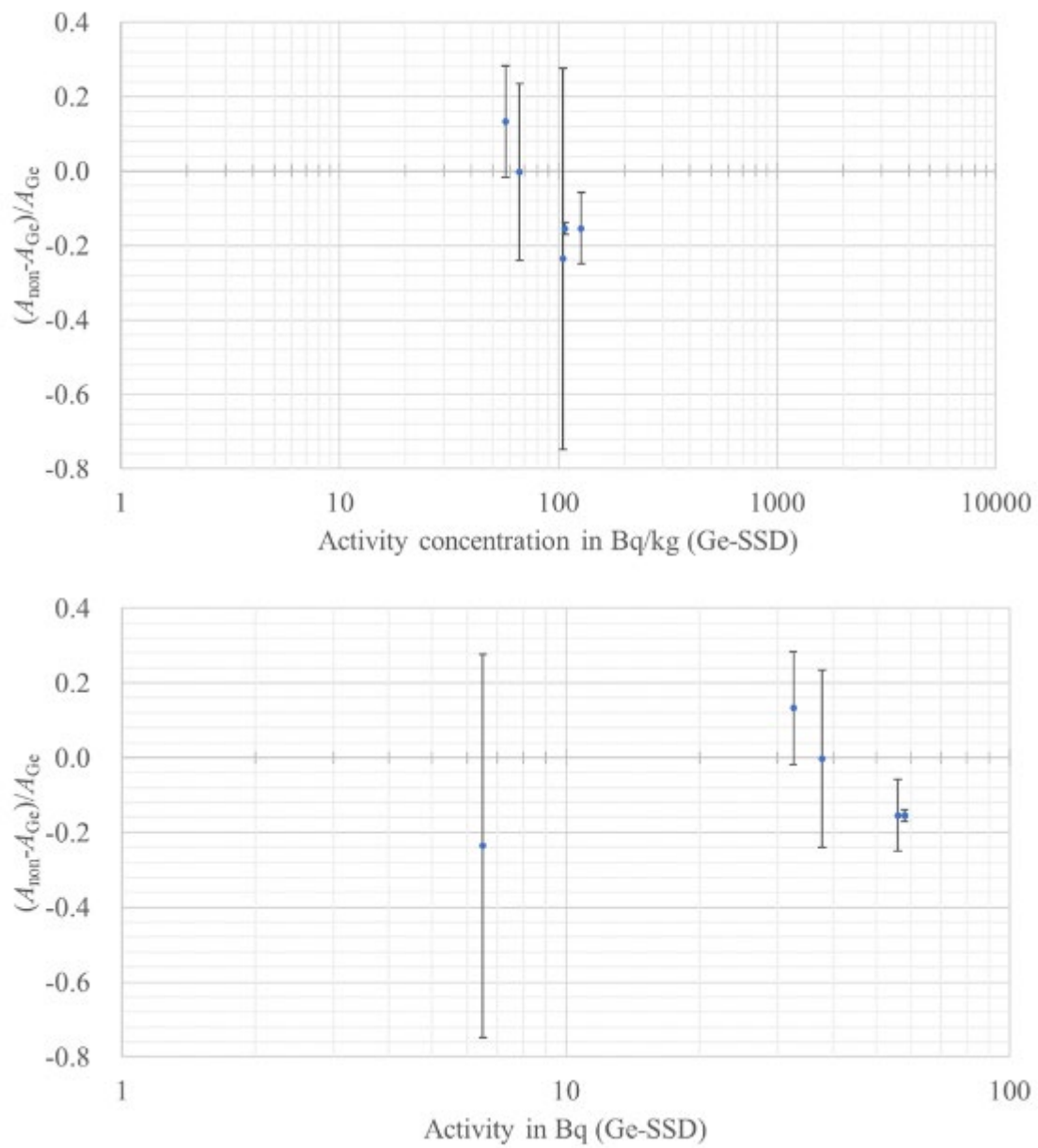


図 6 続き

シャカシメジ

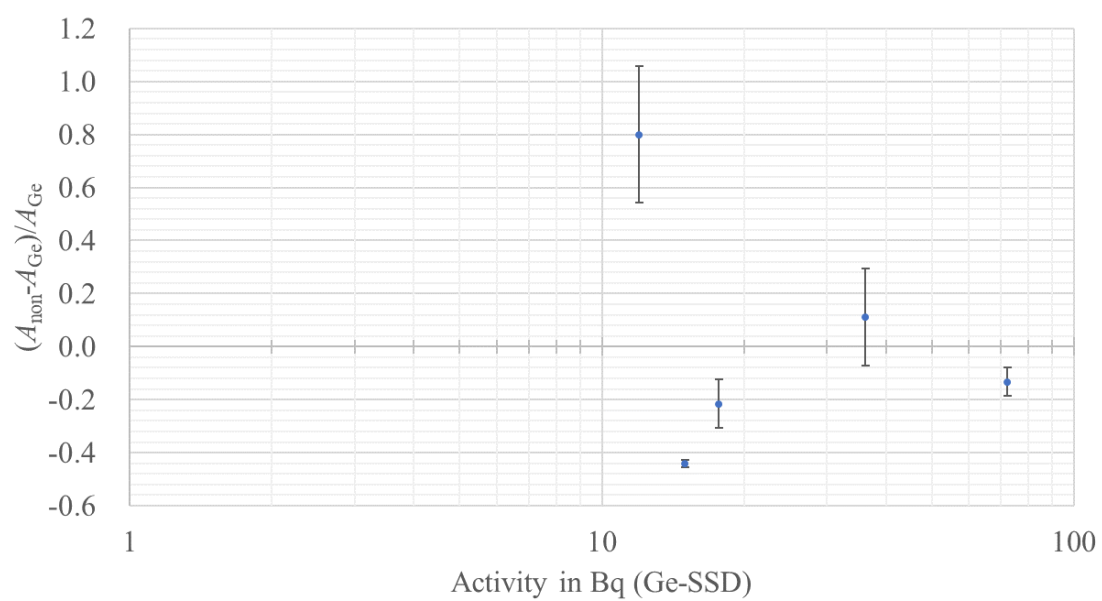
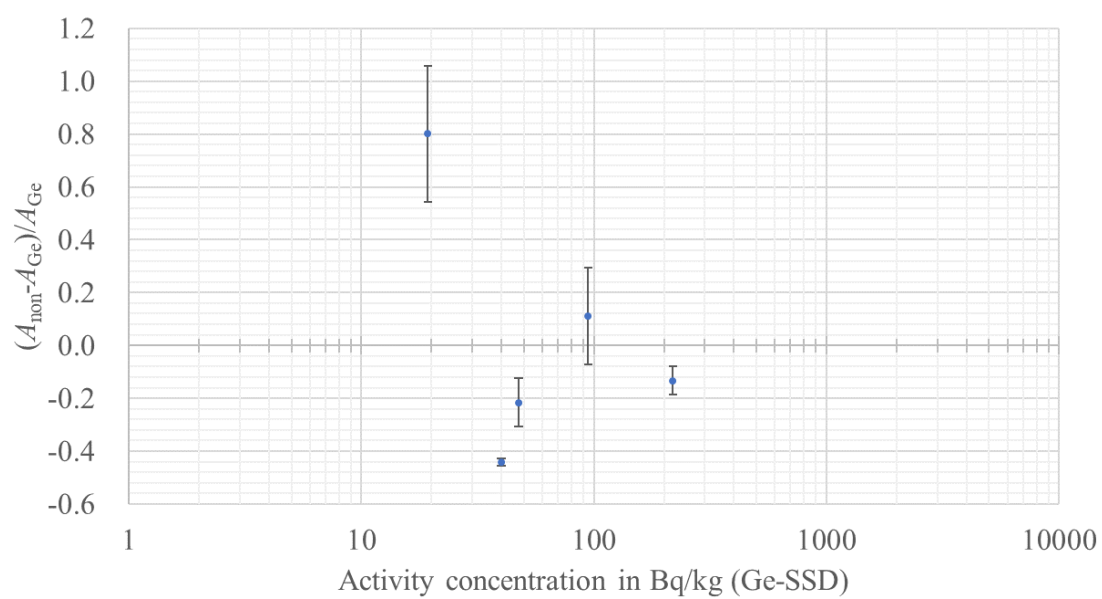


図 6 続き

シロアンズタケ

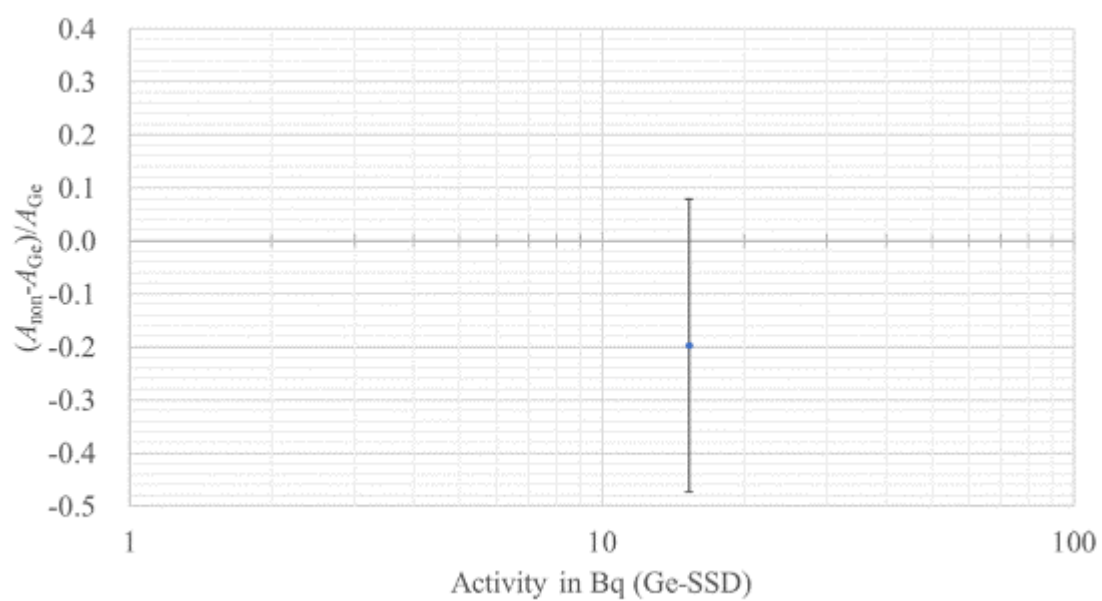
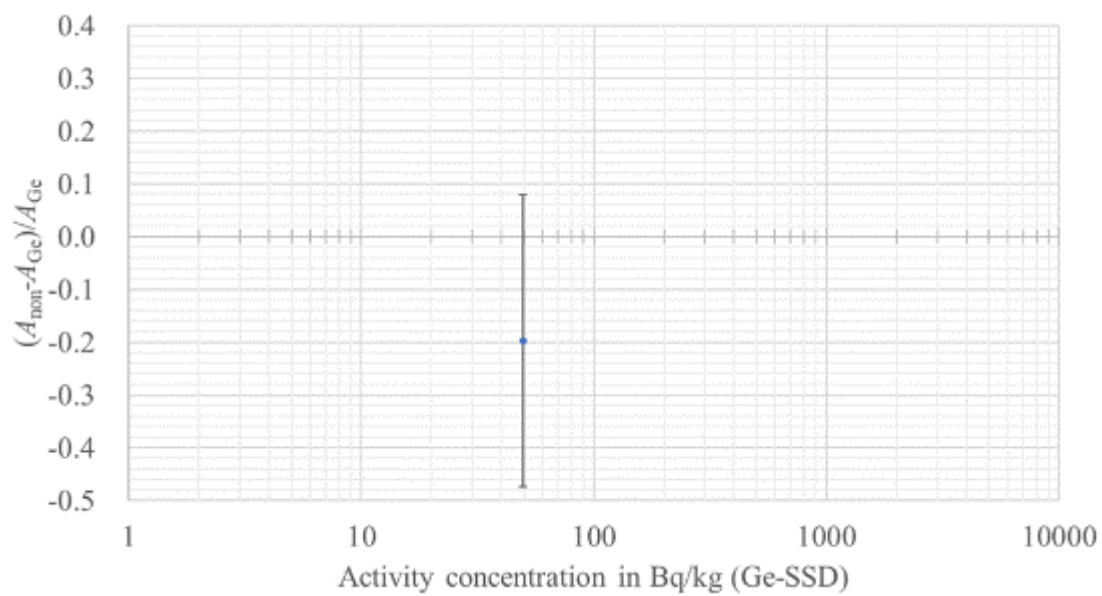


図 6 続き

シロシメジ

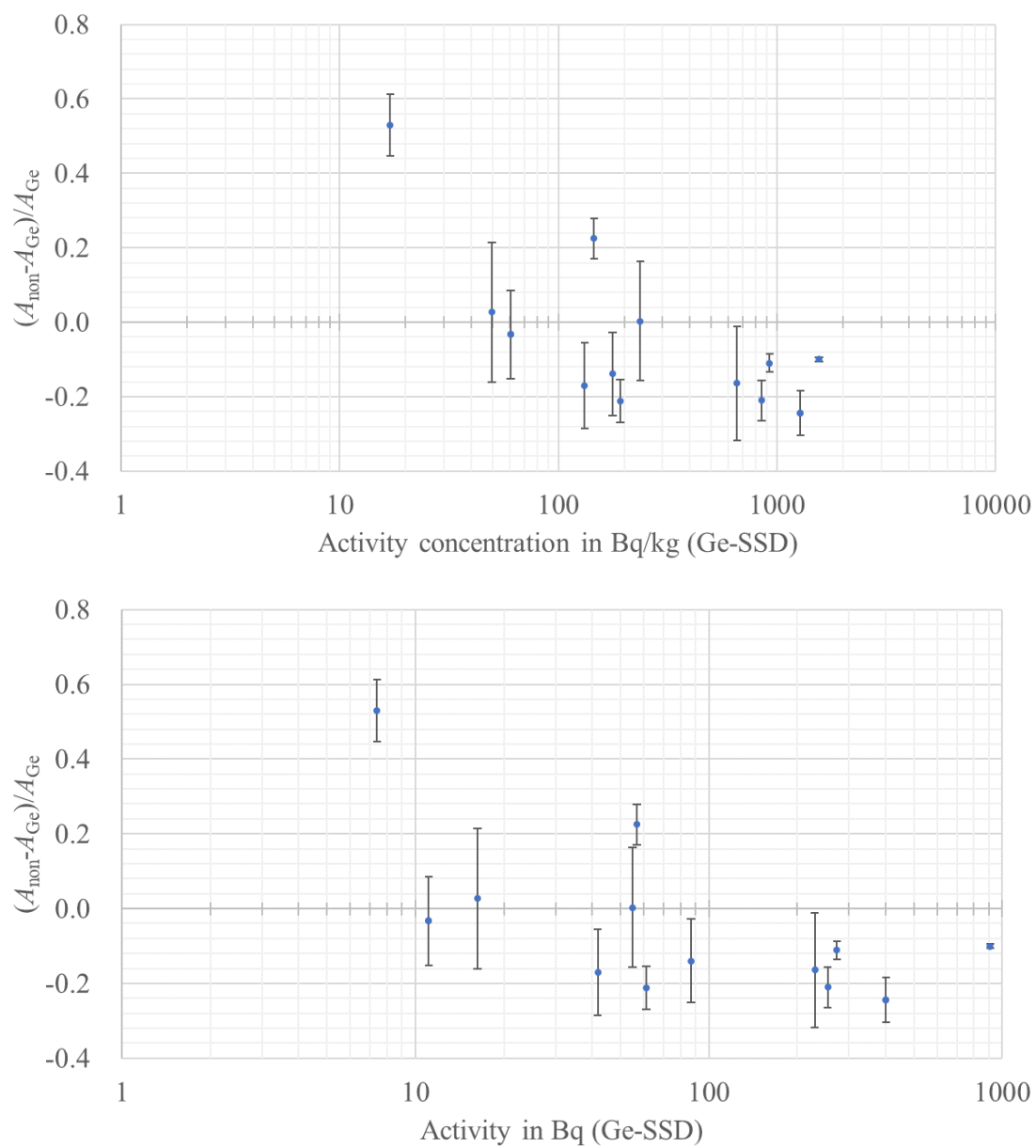


図 6 続き

シロヌメリイグチ

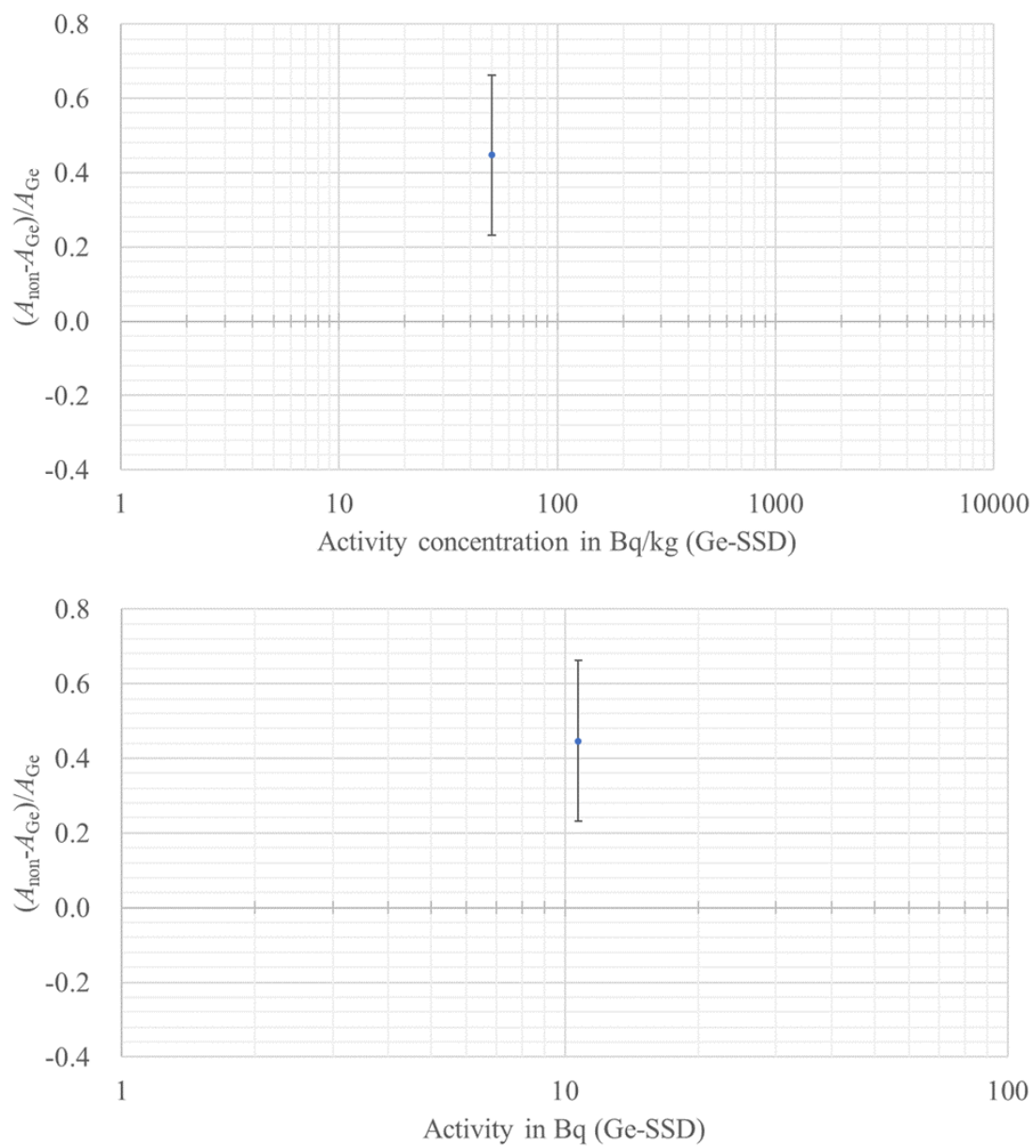


図 6 続き

シロハツ

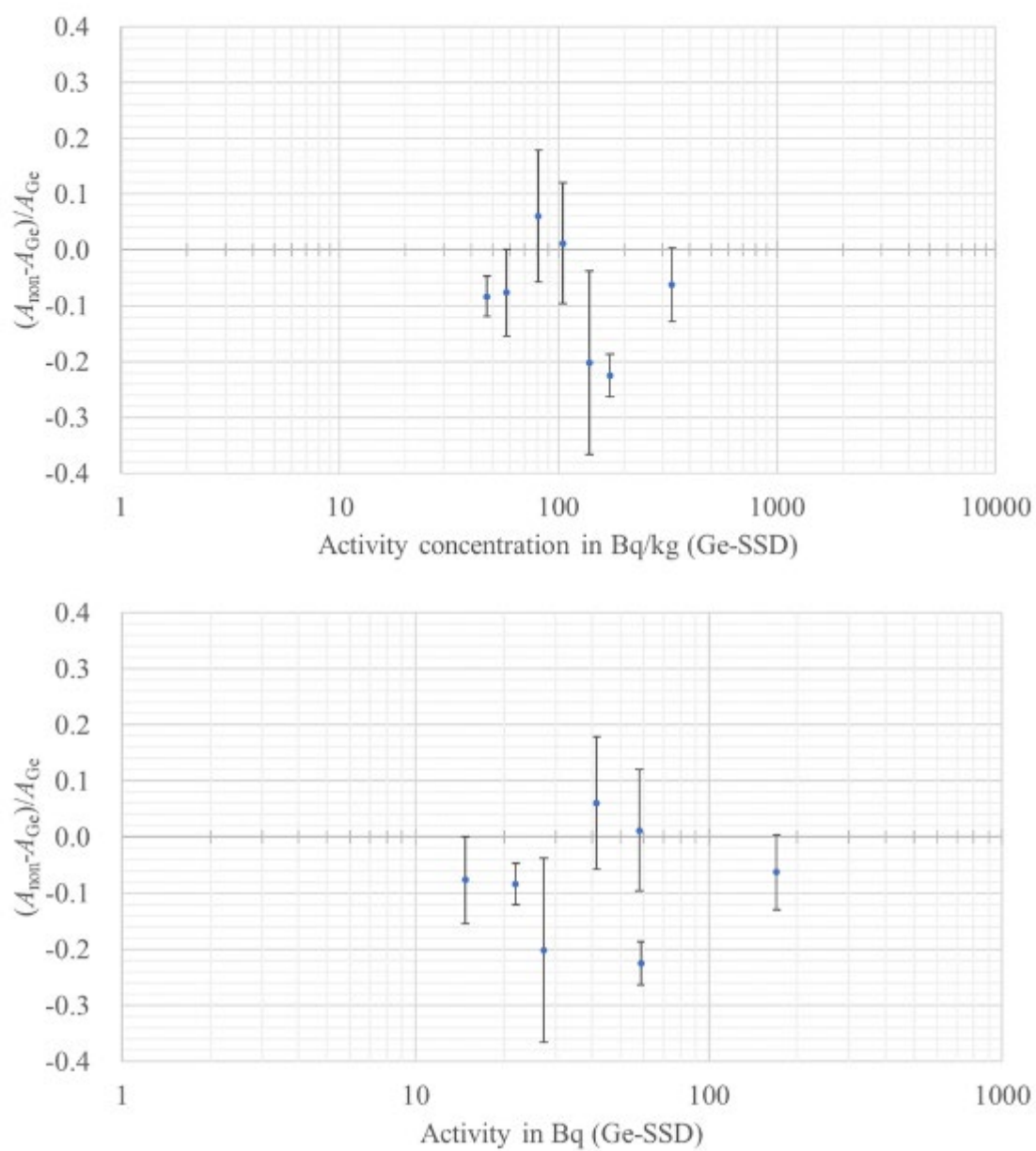


図 6 続き

スギタケ

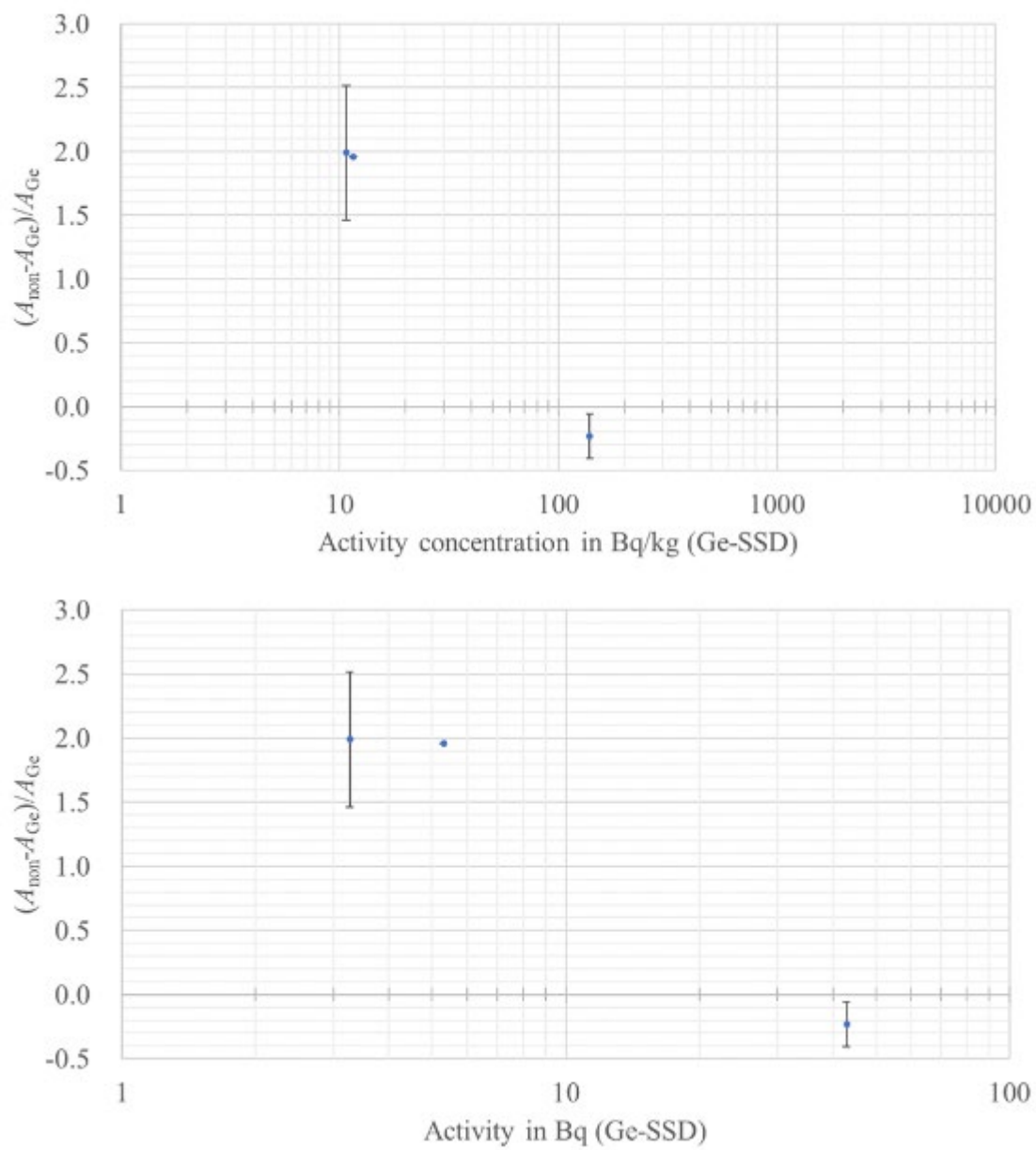


図 6 続き

タケノコ淡竹

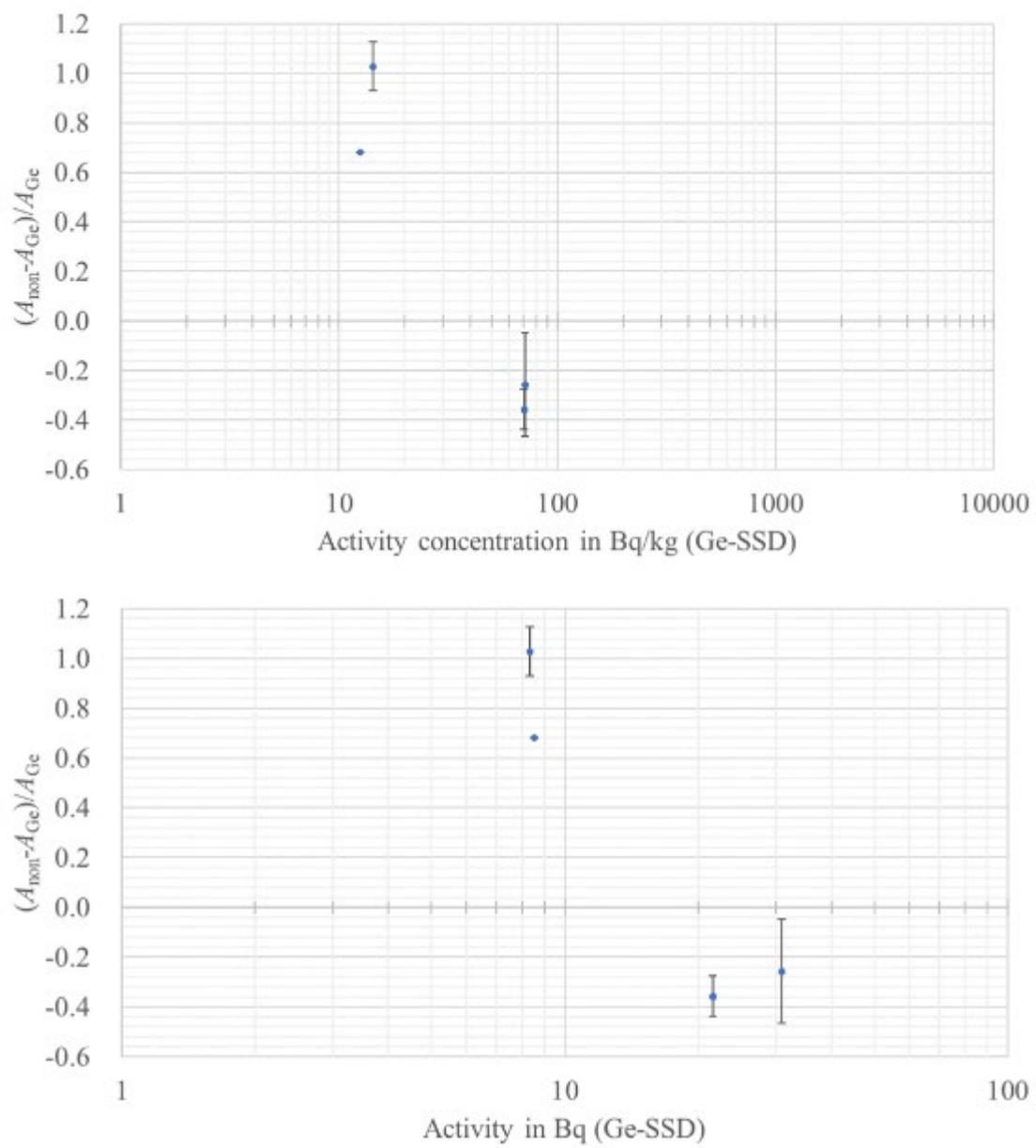


図 6 続き

タケノコ孟宗竹

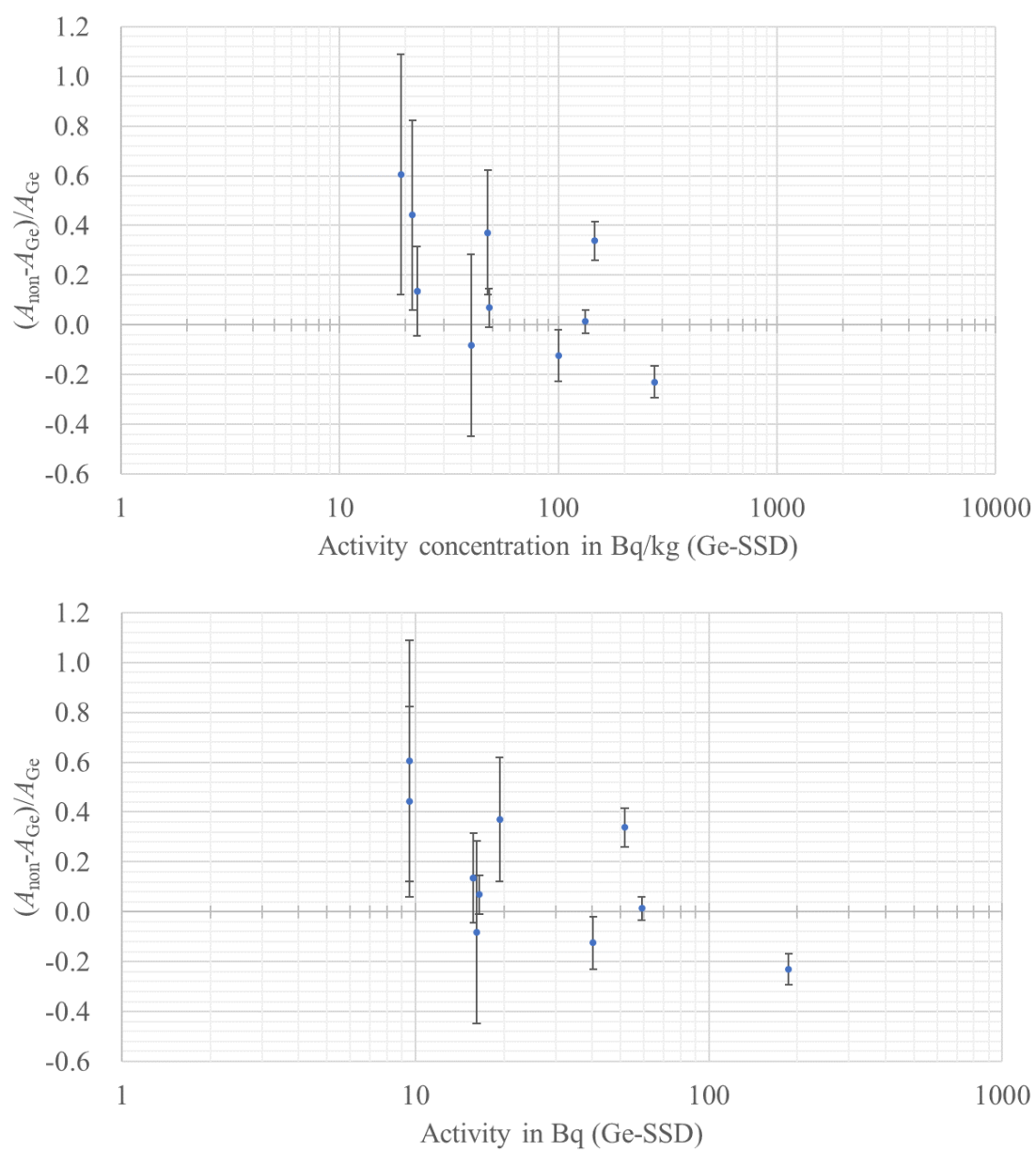


図 6 続き

タマゴタケ

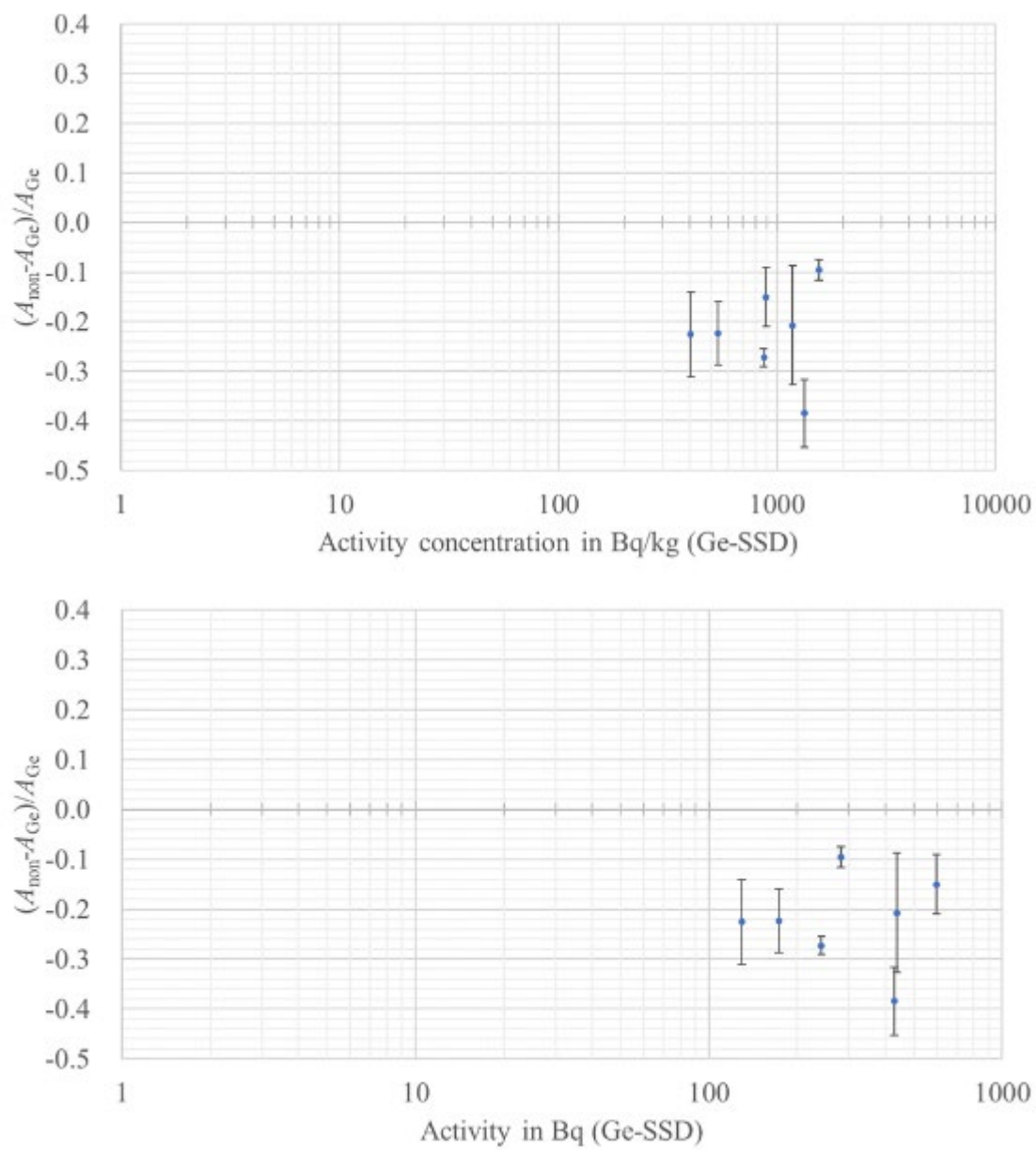


図 6 続き

タラノメ

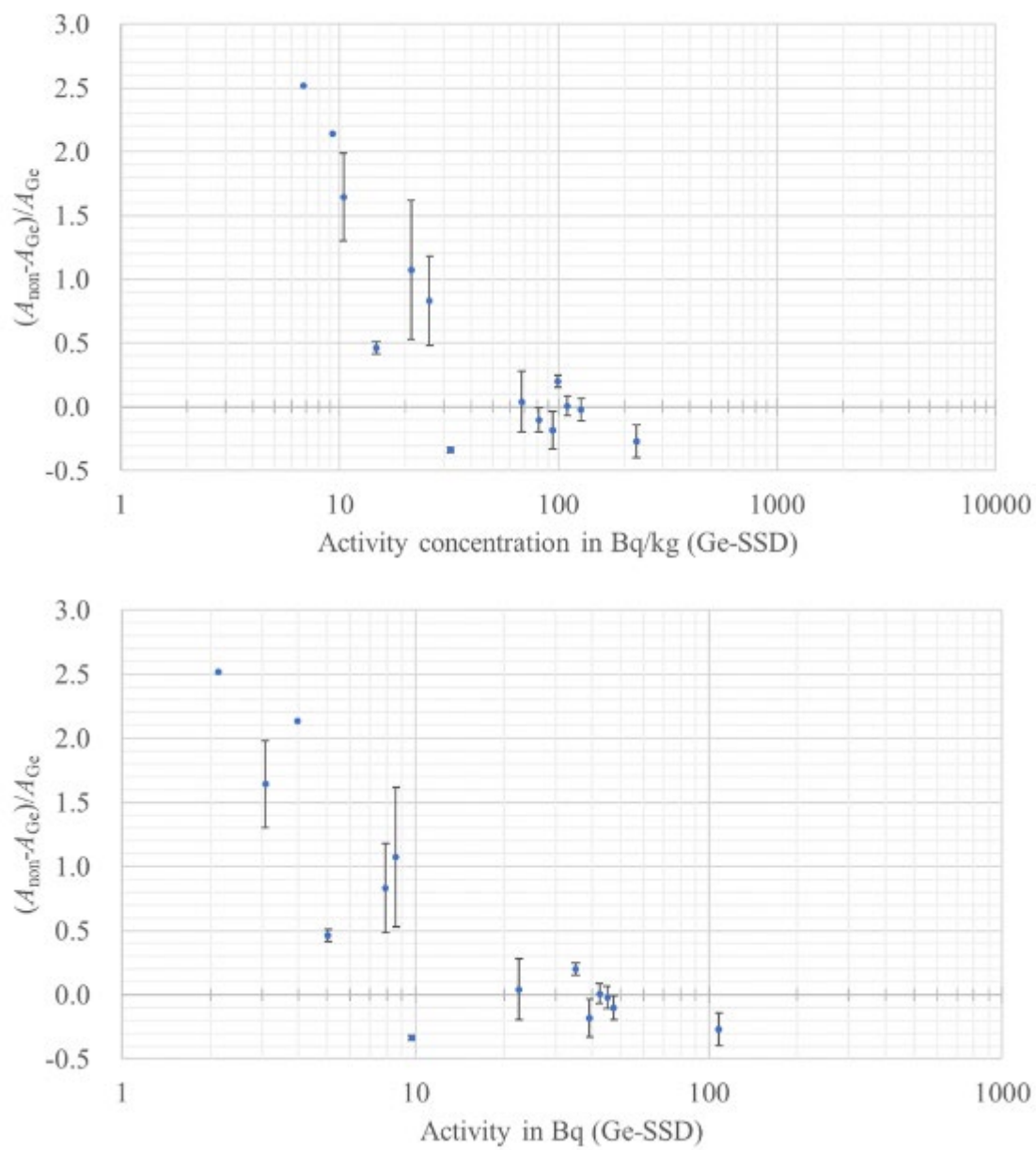


図 6 続き

チチアワタケ

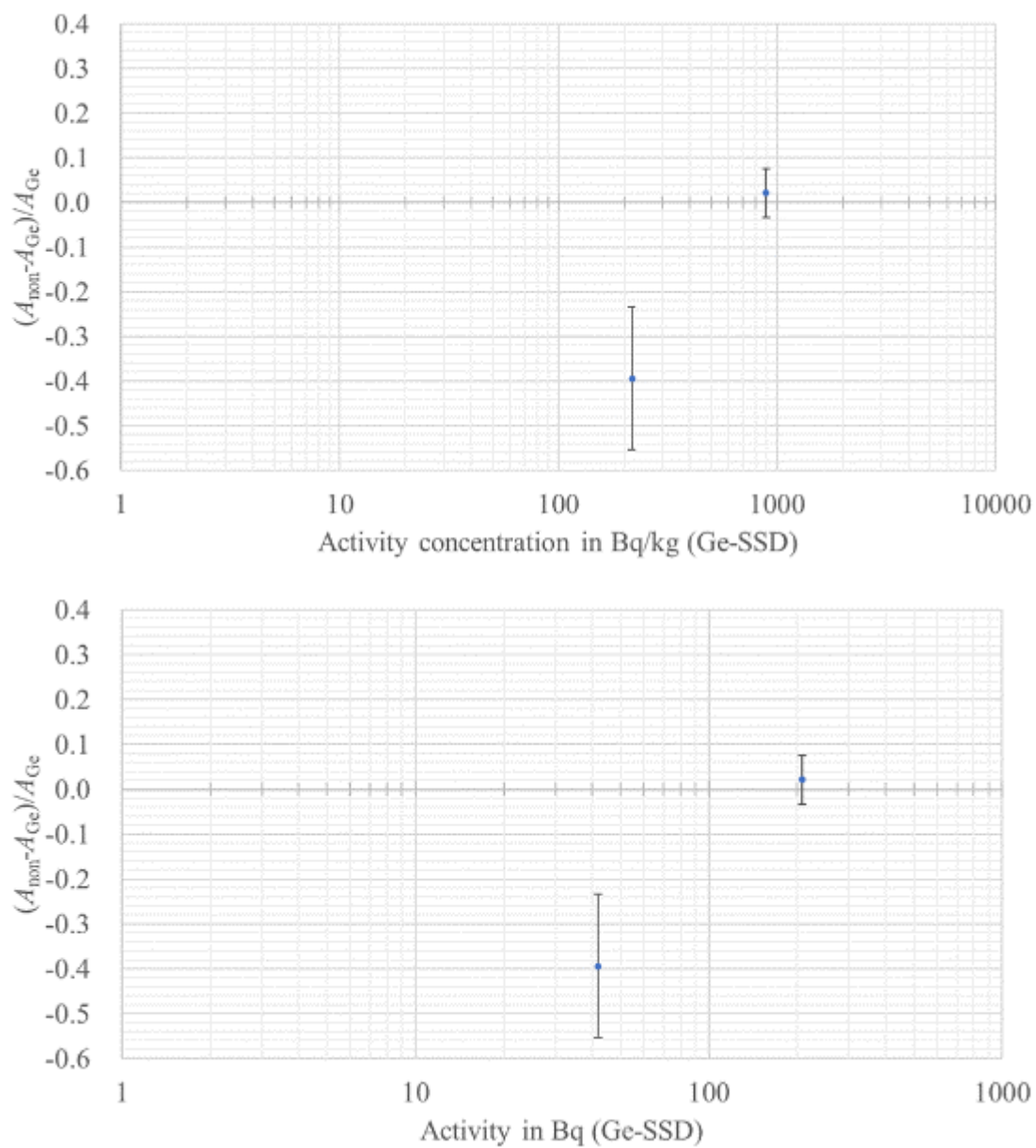


図 6 続き

チチタケ

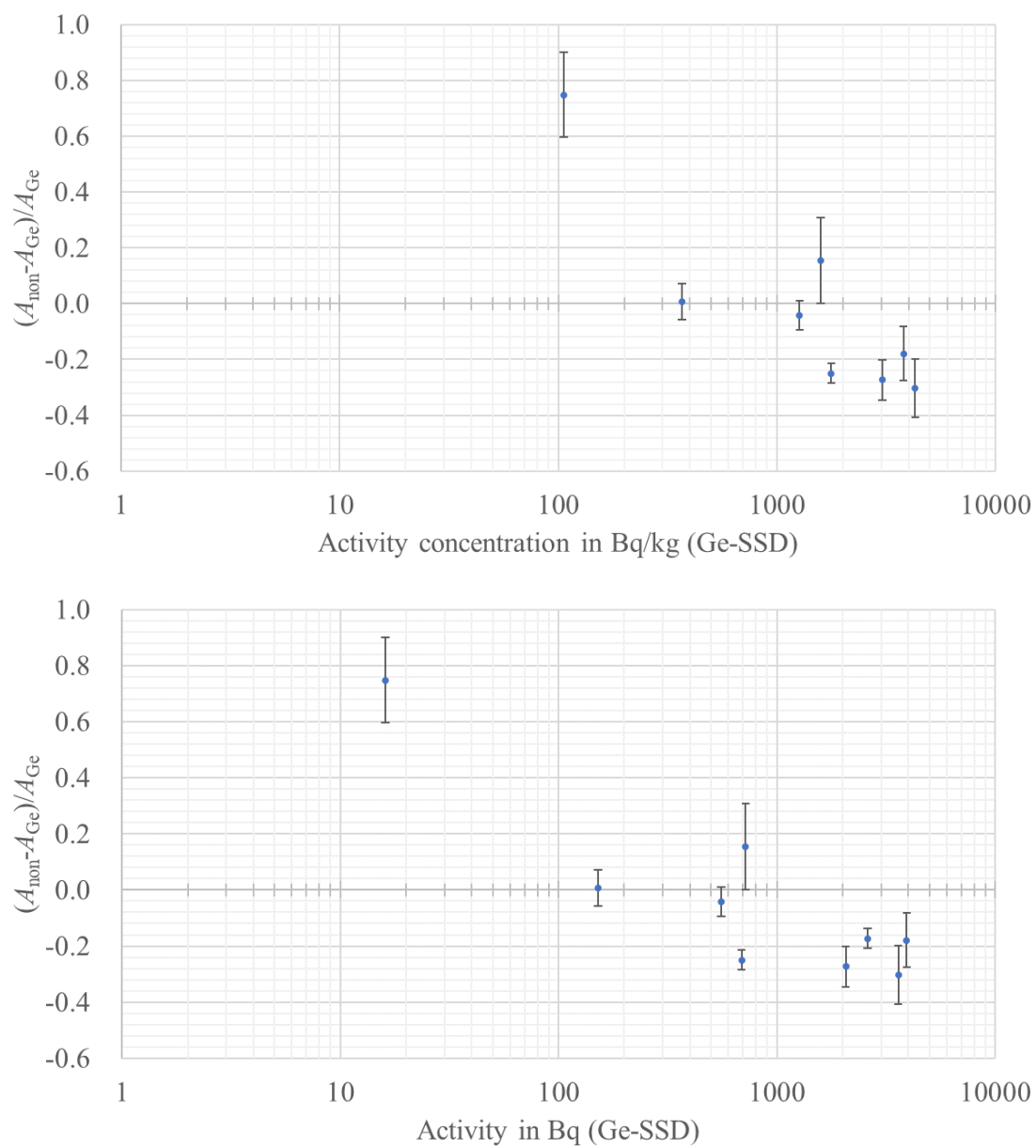


図 6 続き

チャナメツムタケ

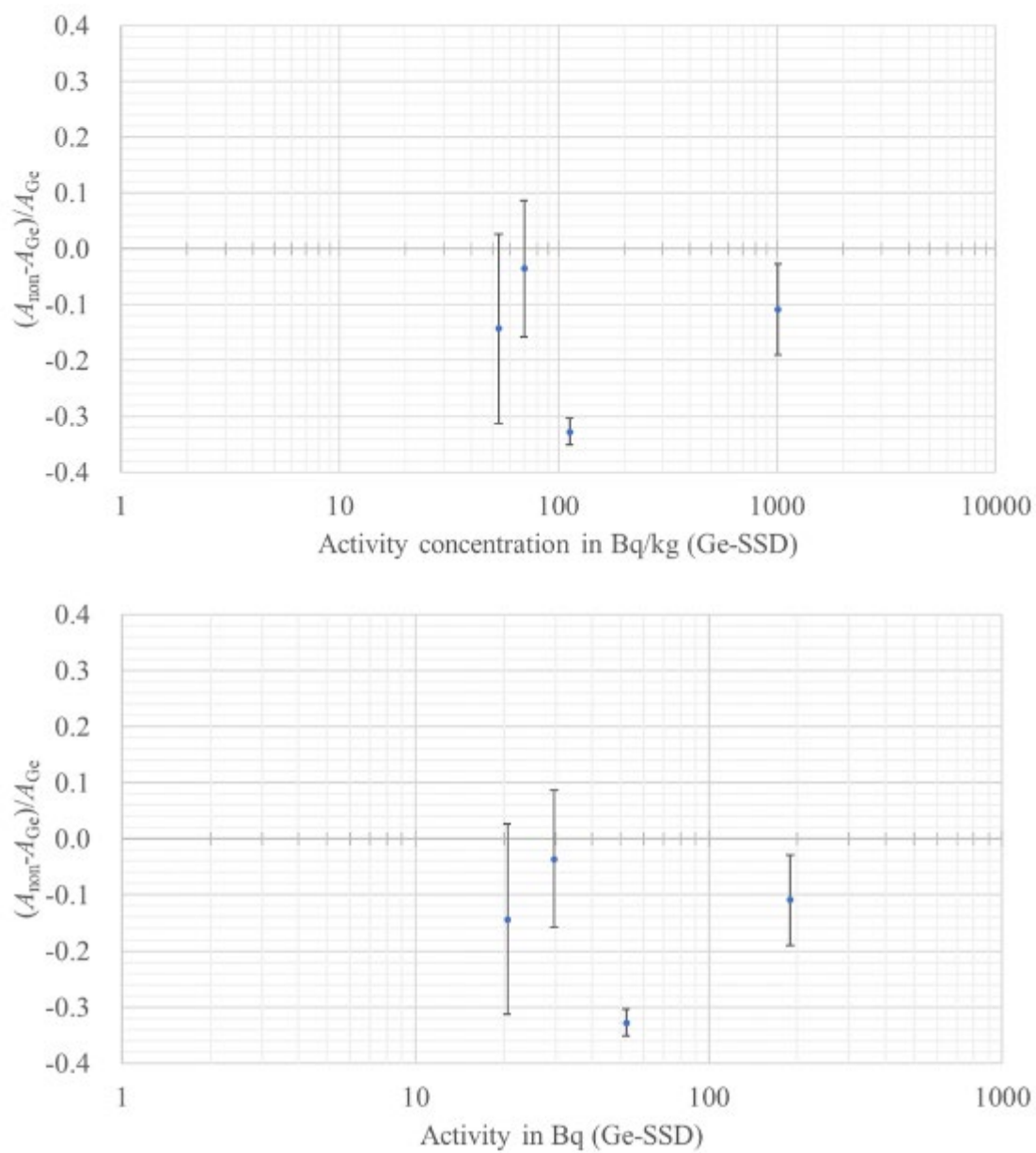


図 6 続き

ナメコ

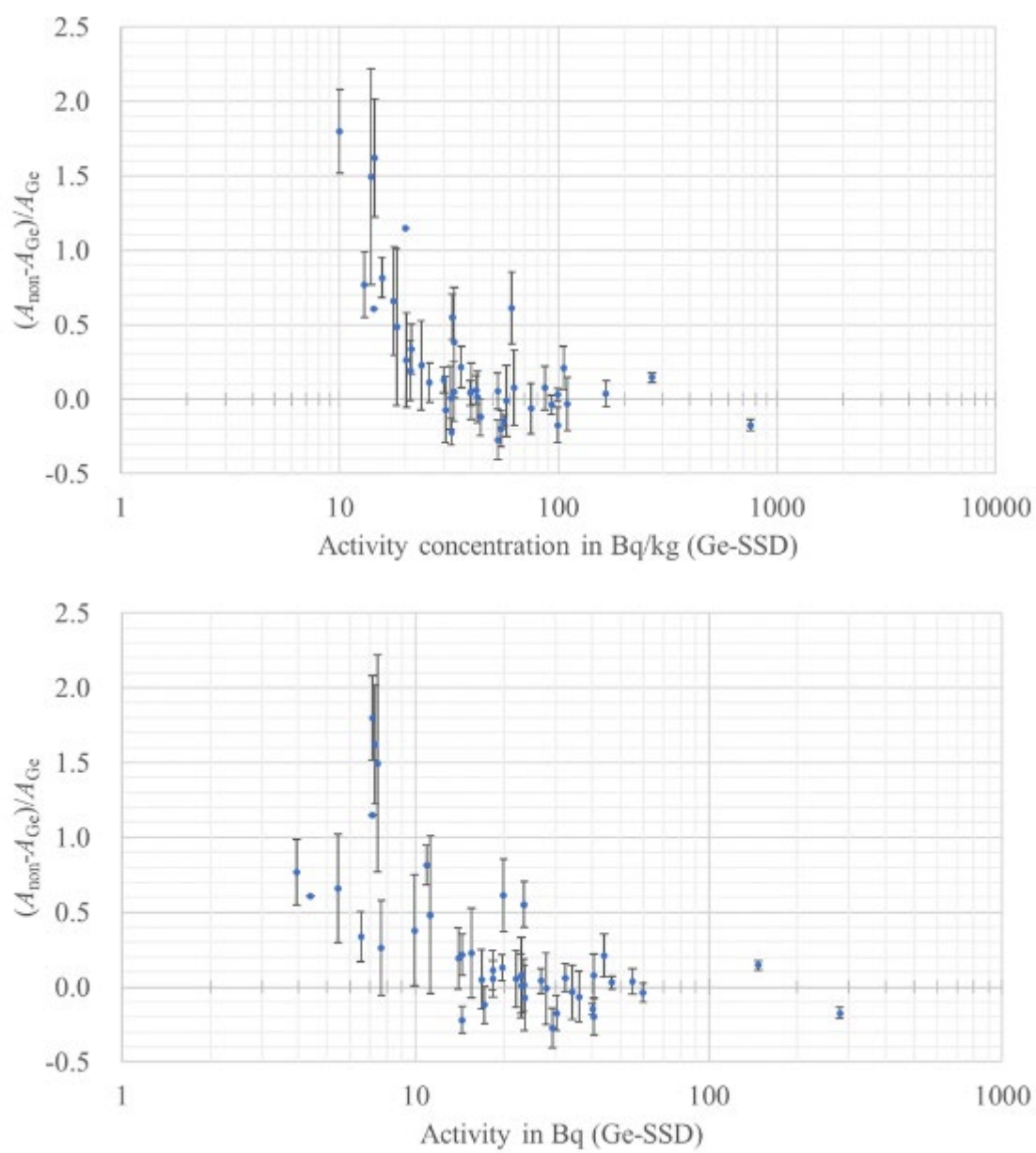


図 6 続き

ナラタケ

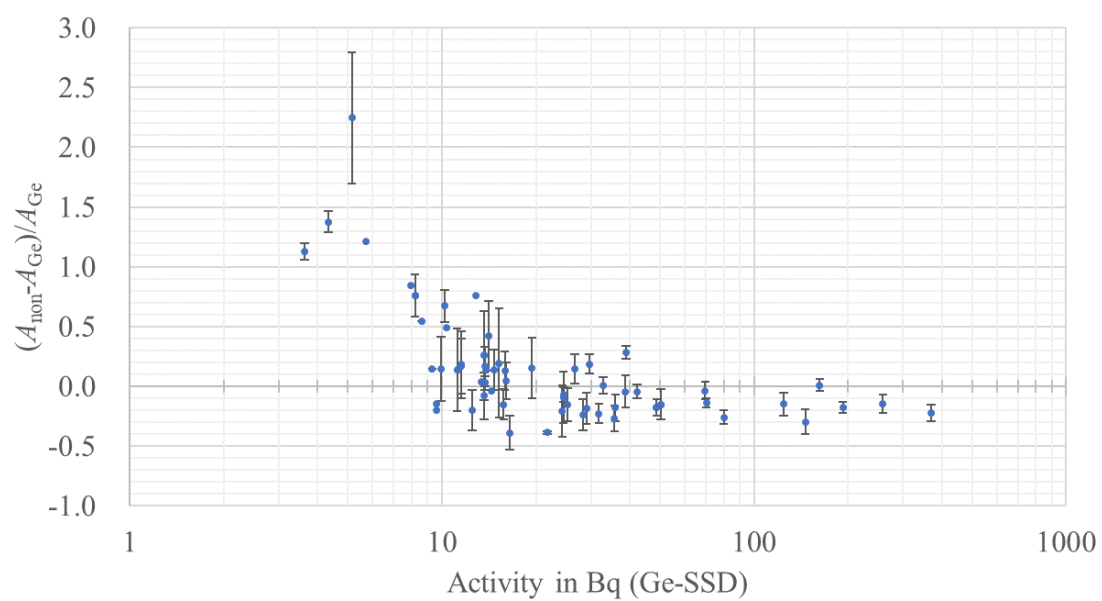
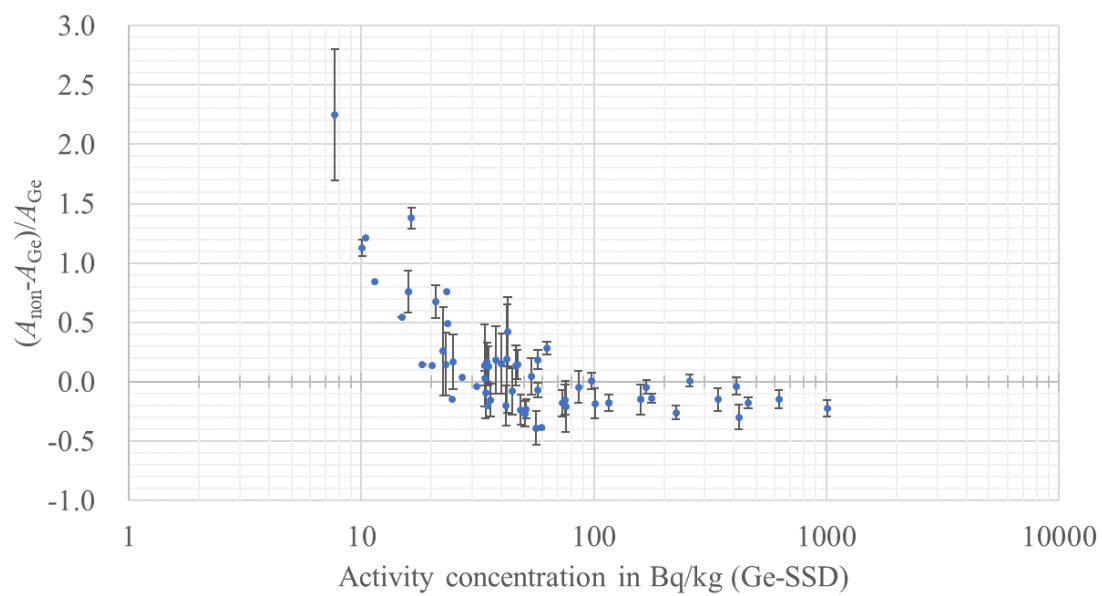


図 6 続き

ナラタケモドキ

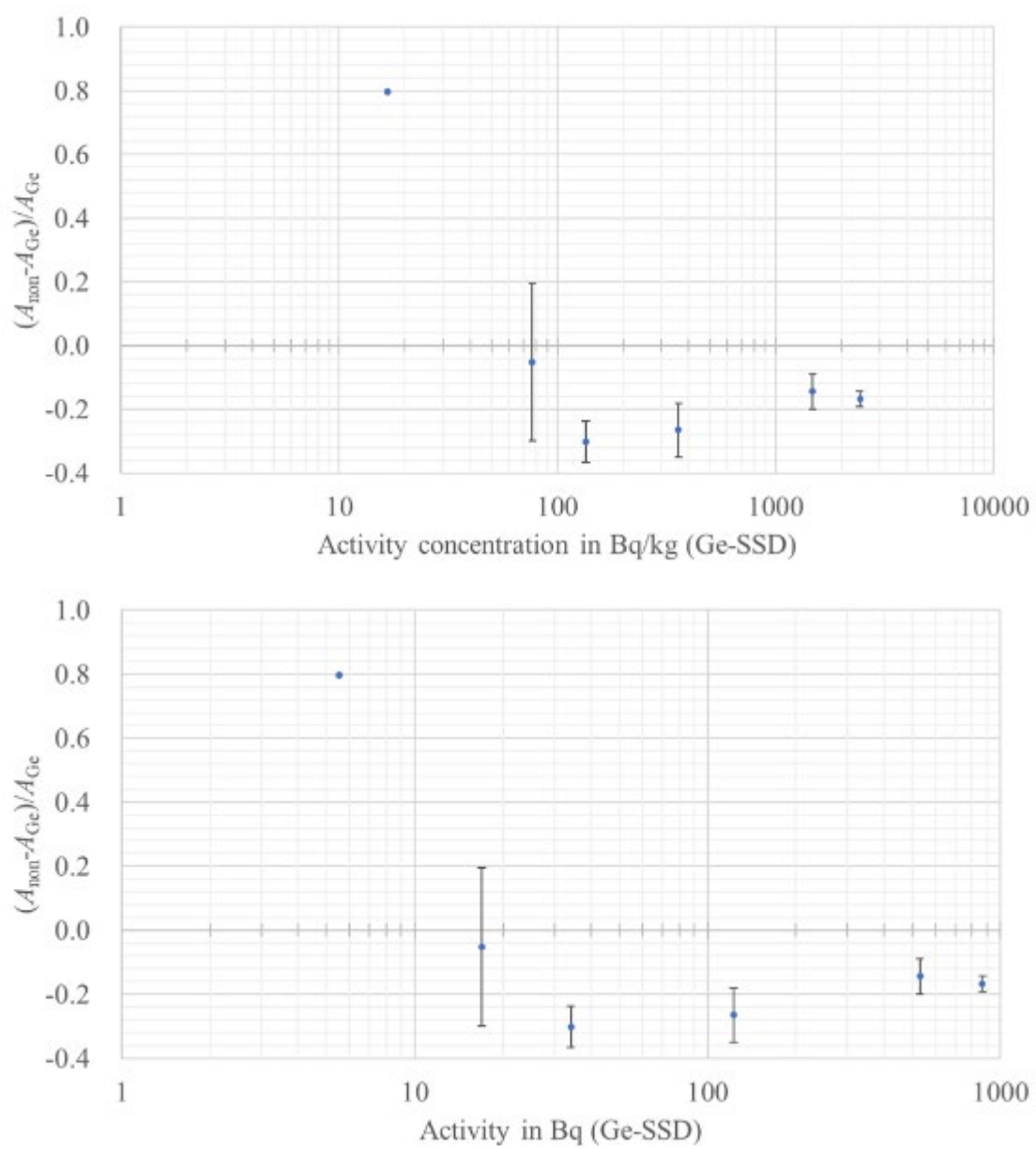


図 6 続き

ニセアブラシメジ

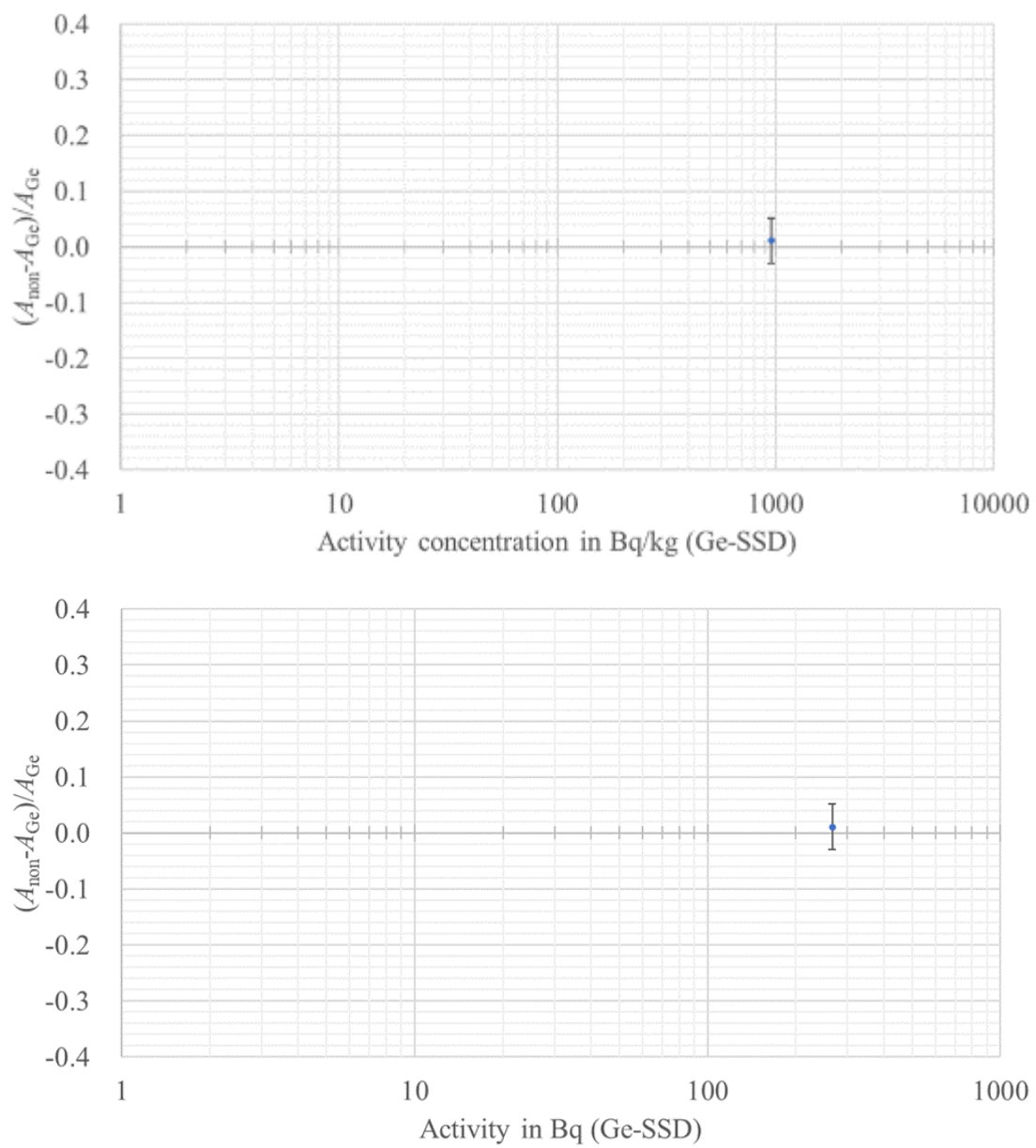


図 6 続き

ニンギョウタケ

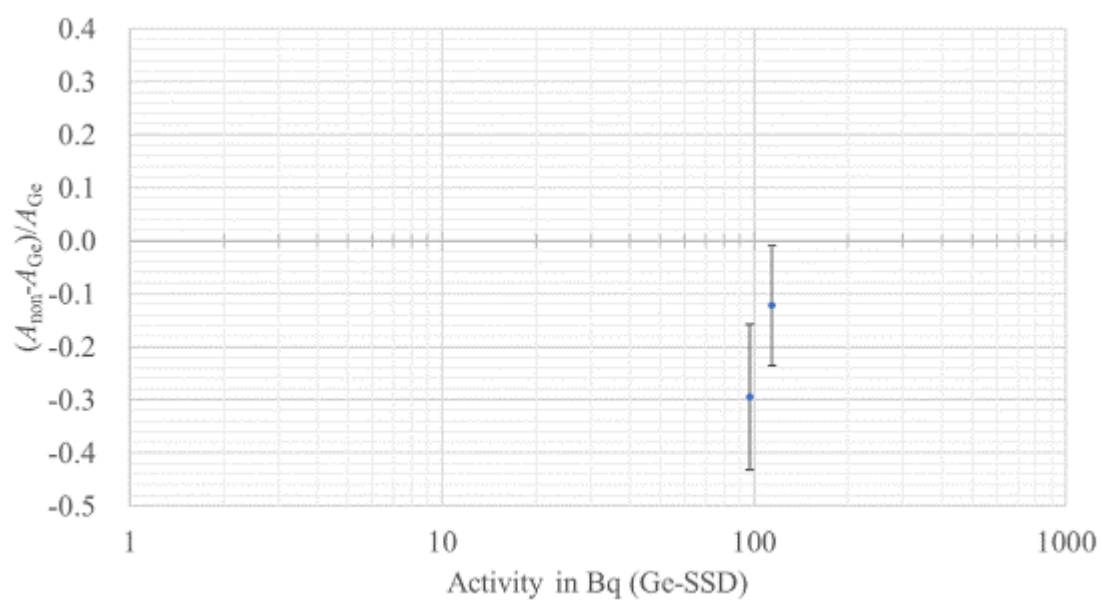
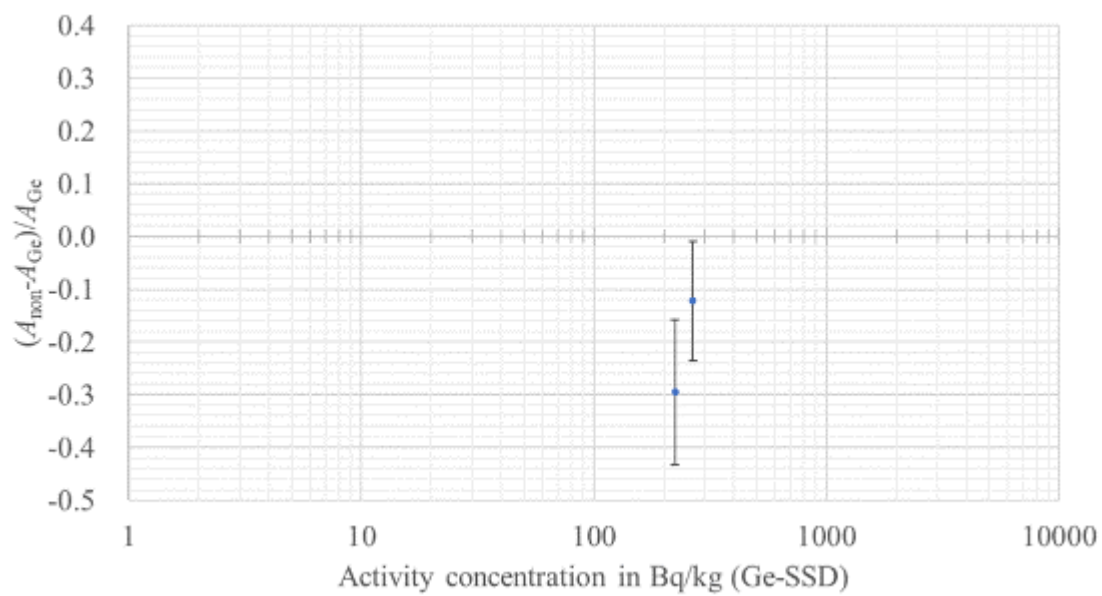


図 6 続き

ヌメリイグチ

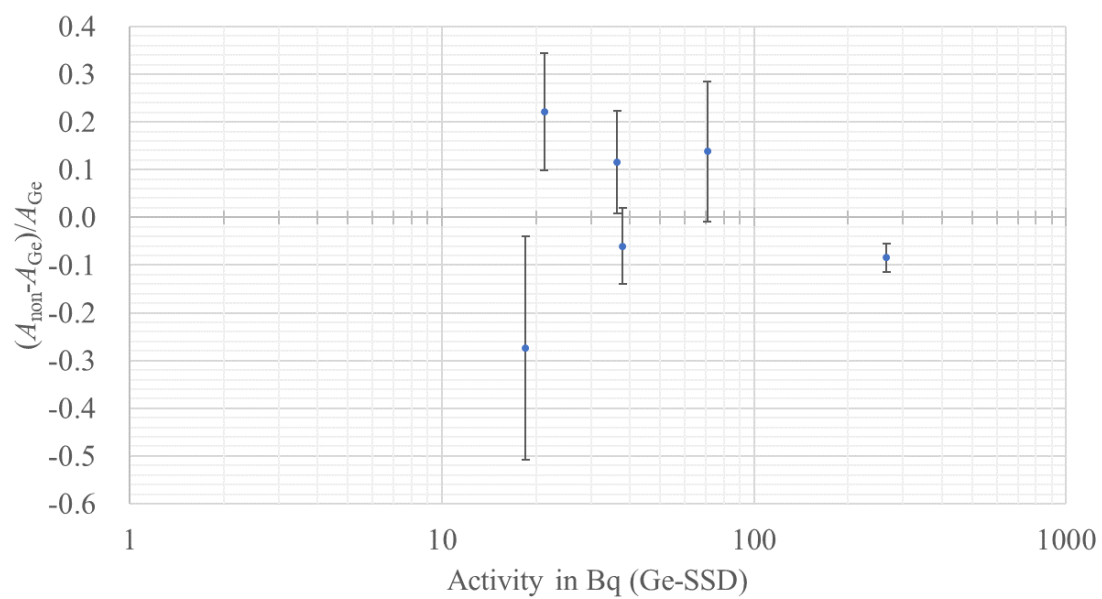
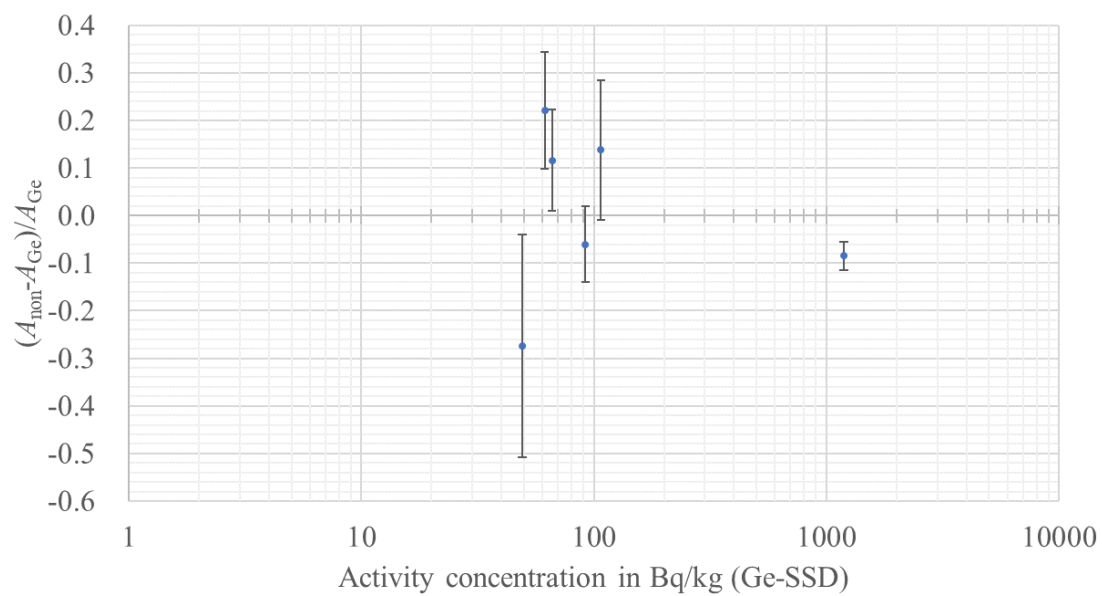


図 6 続き

ネマガリタケ

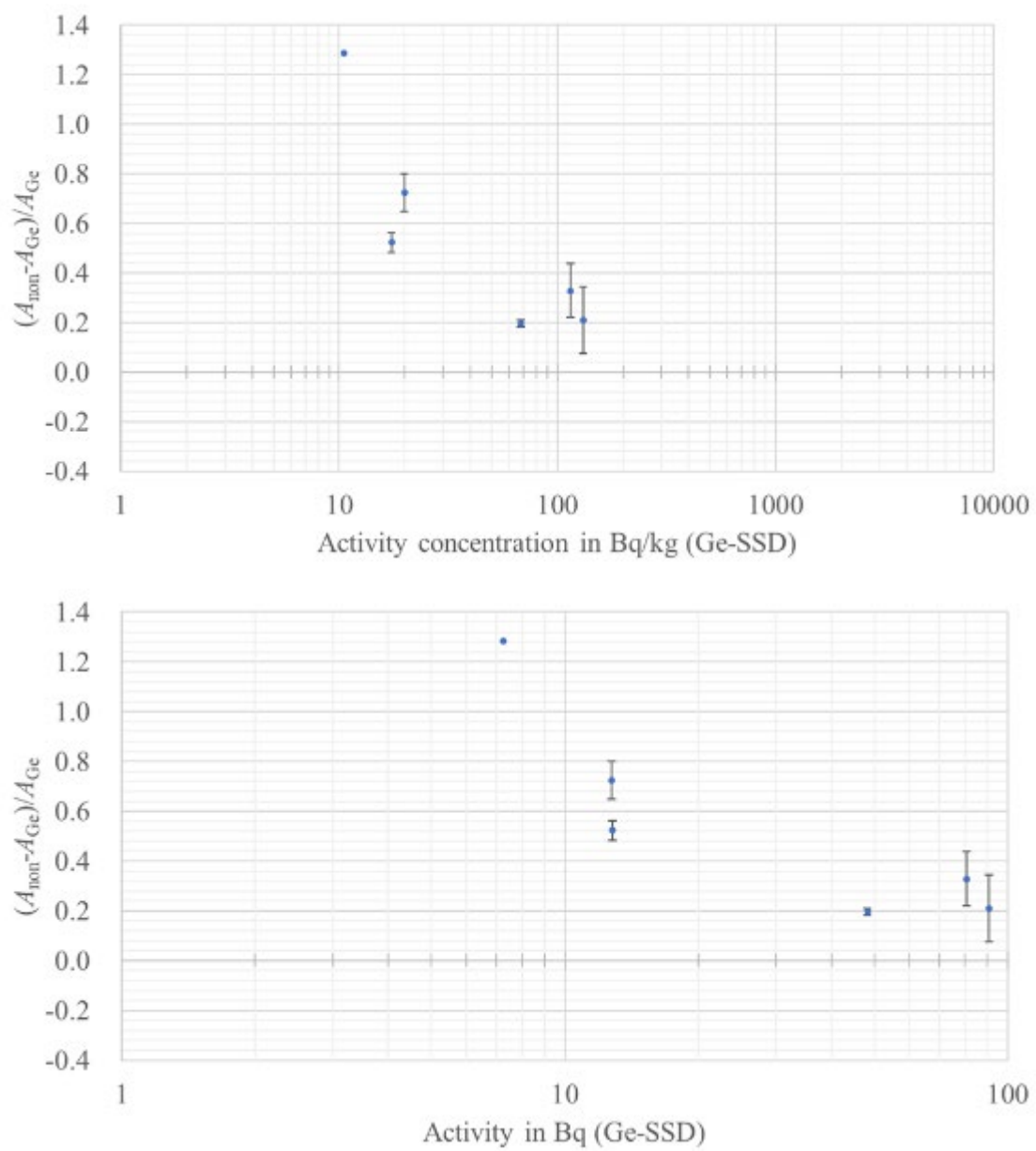


図 6 続き

ハイイロシメジ

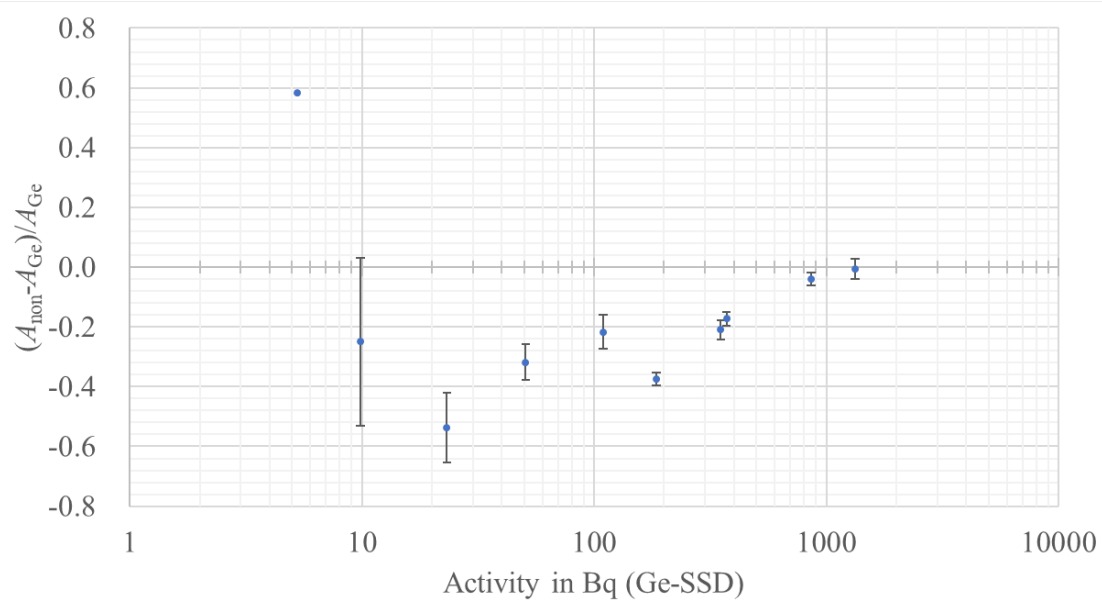
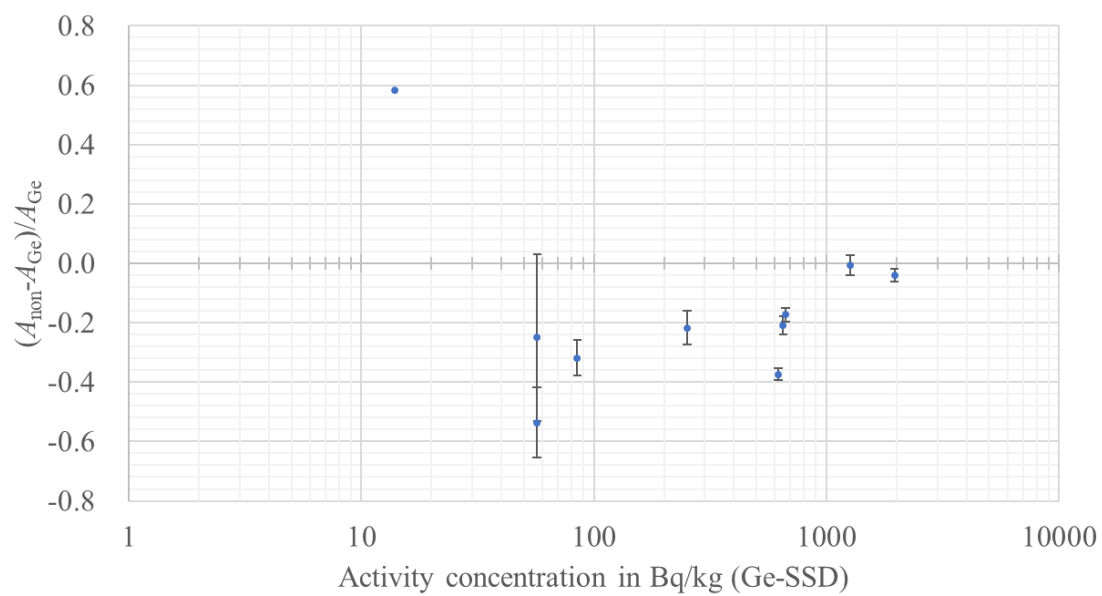


図 6 続き

ハタケシメジ

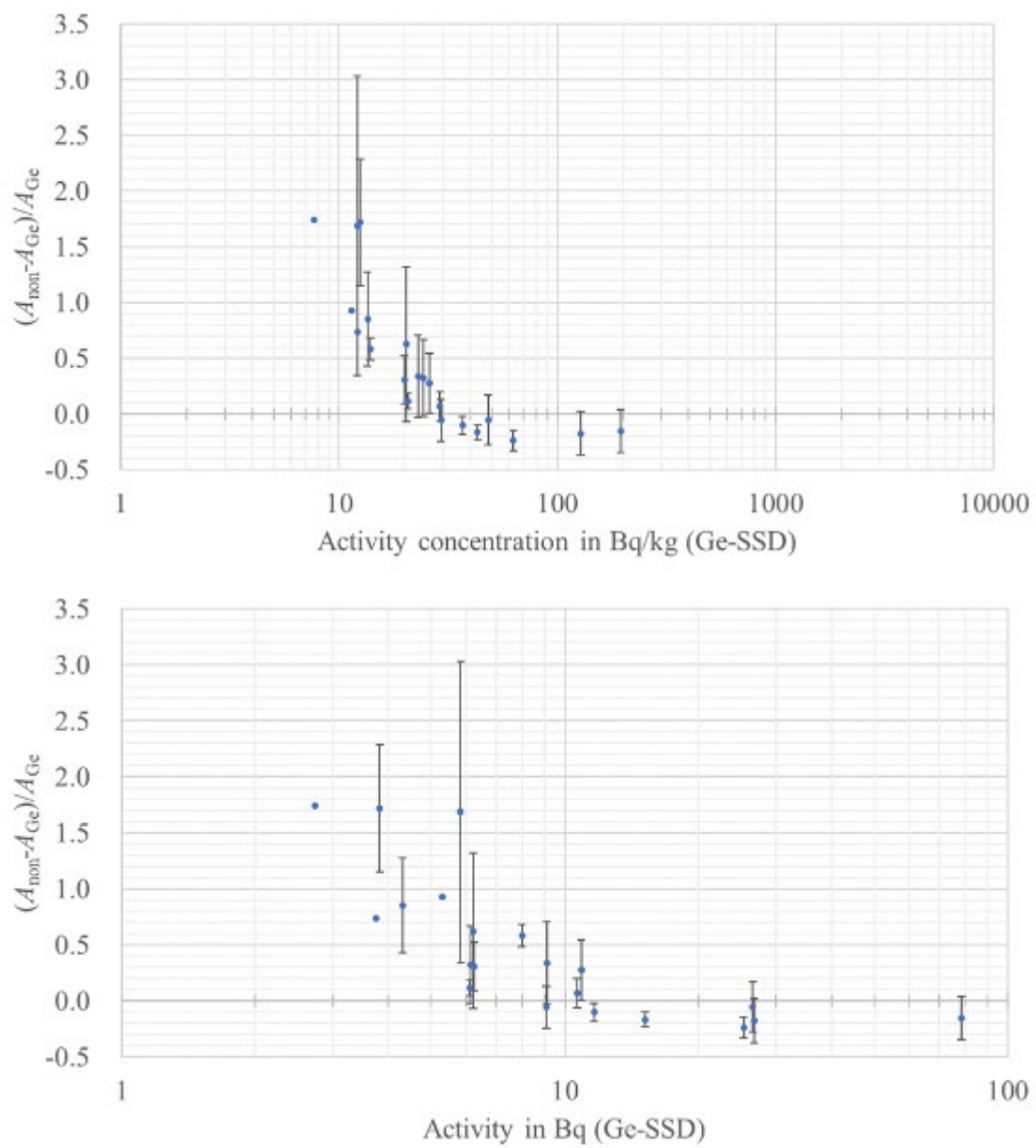


図 6 続き

ハツタケ

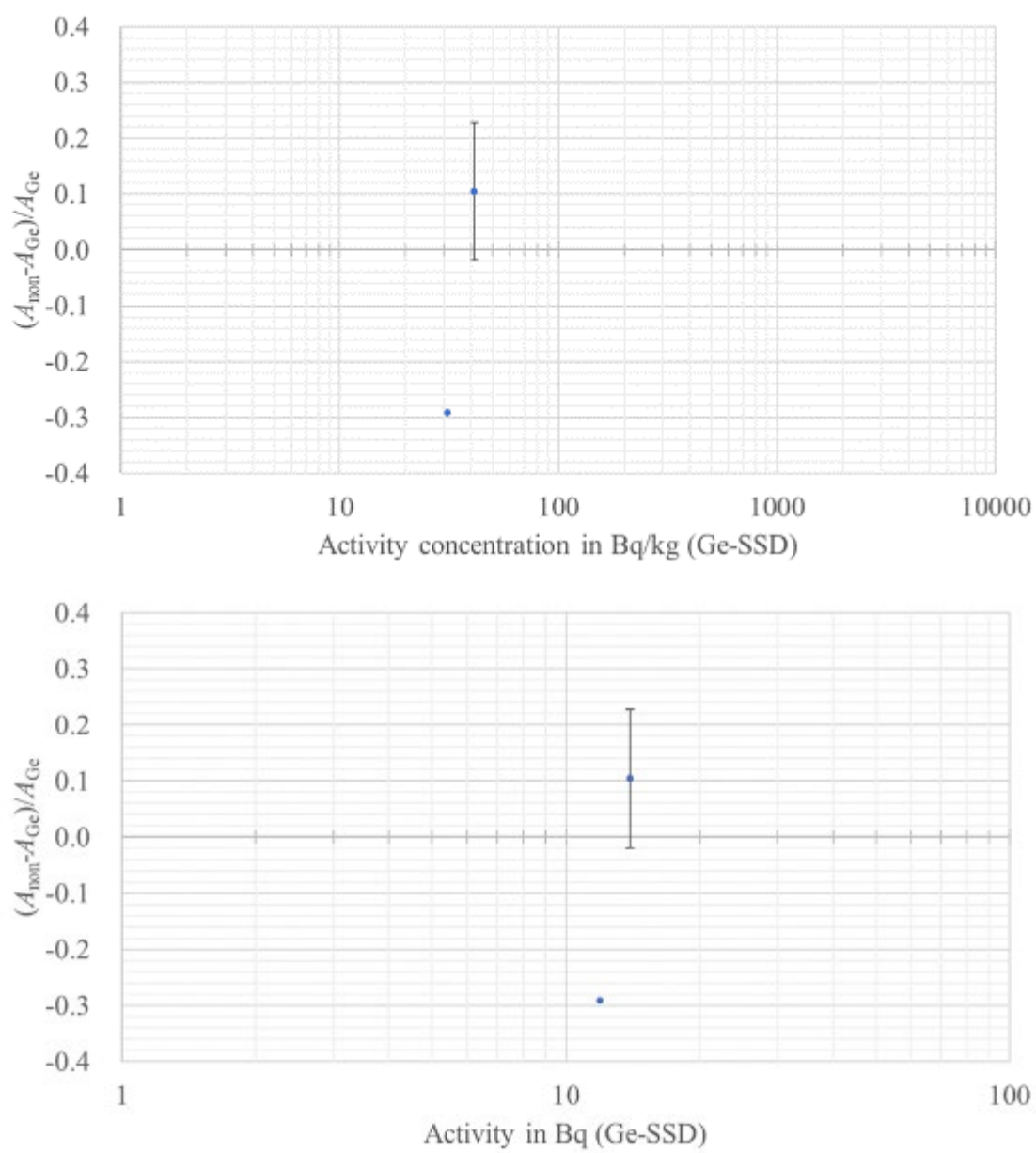


図 6 続き

ハナイグチ

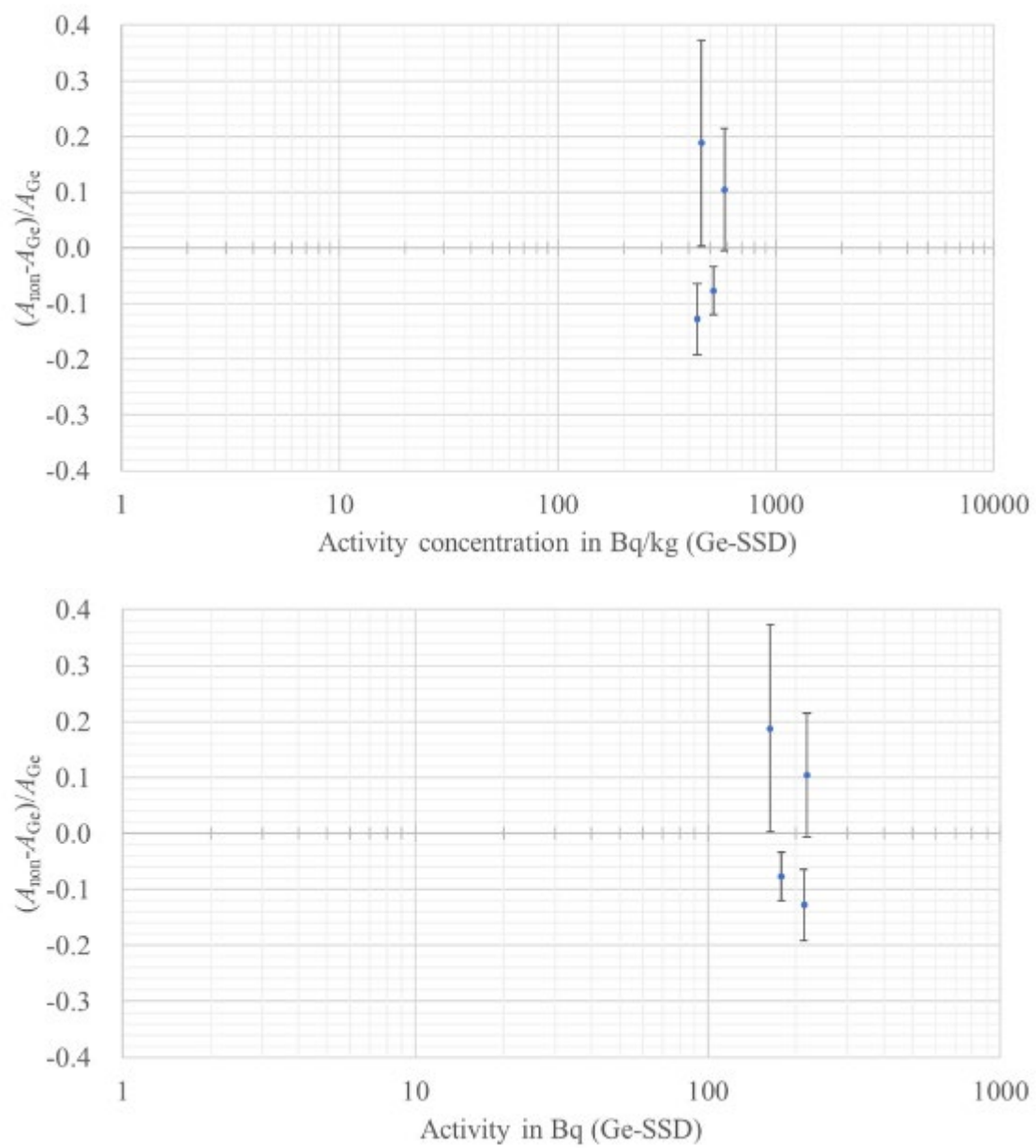


図 6 続き

ヒラタケ

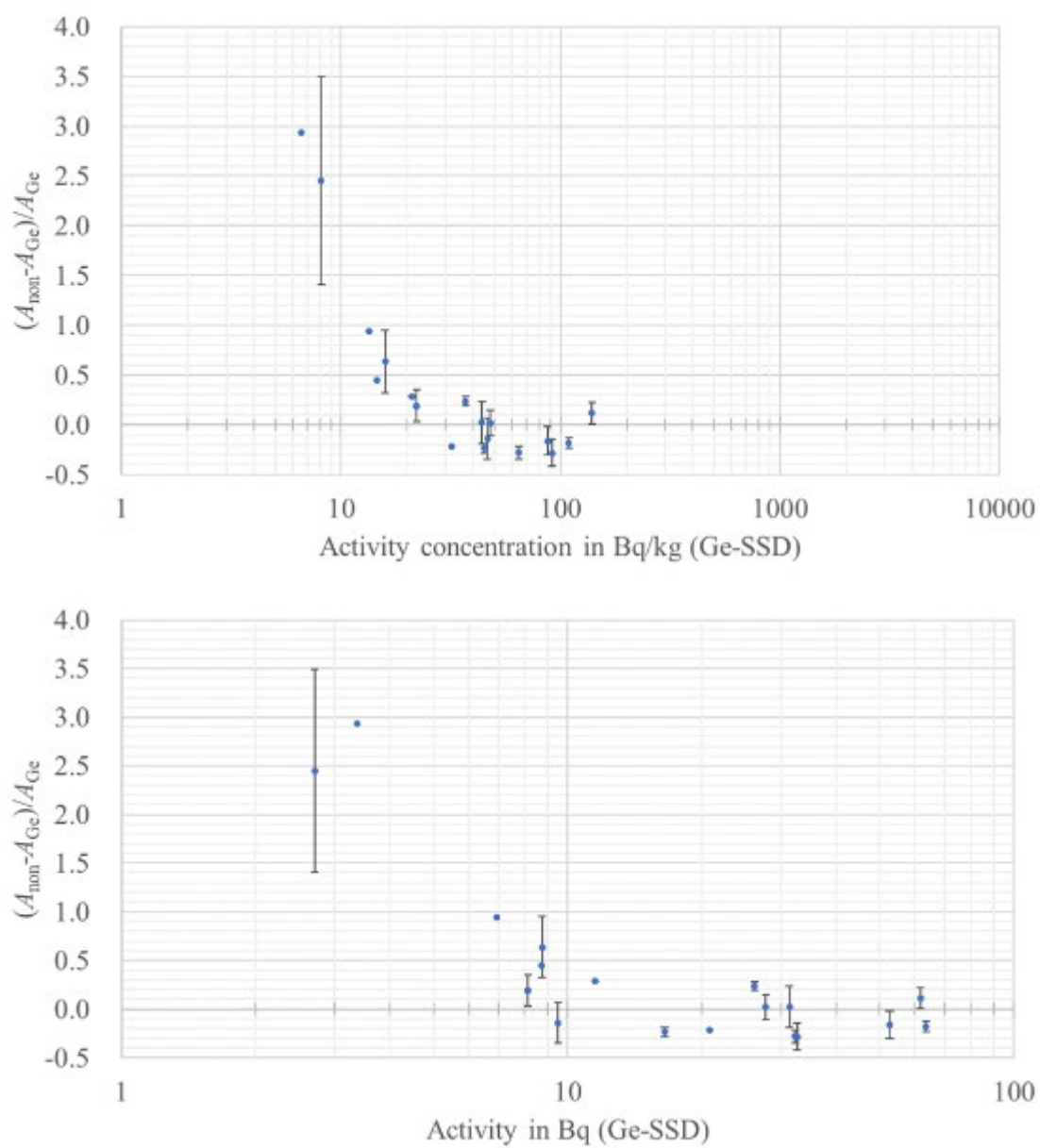


図 6 続き

フウセンタケモドキ

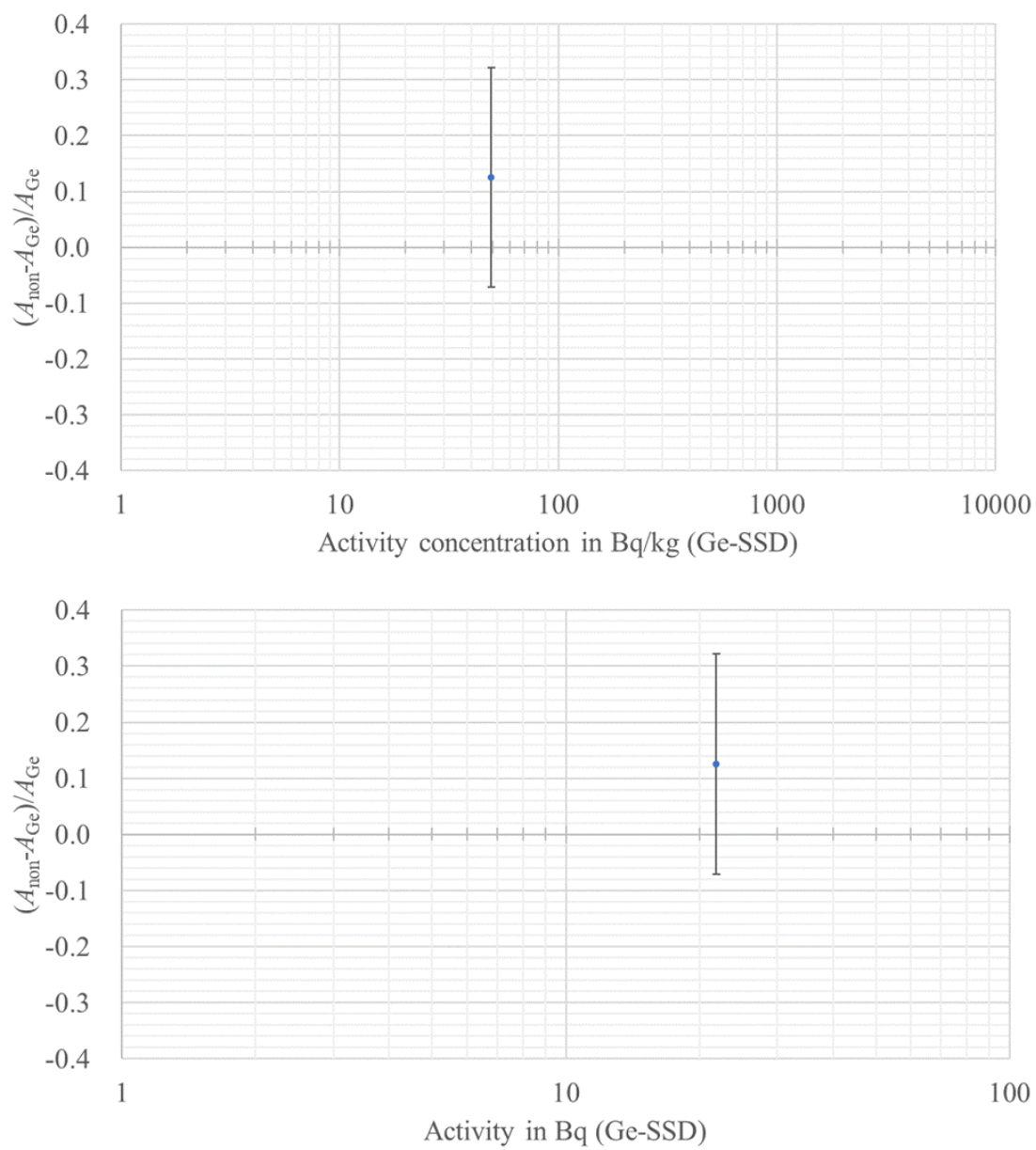


図 6 続き

フキ

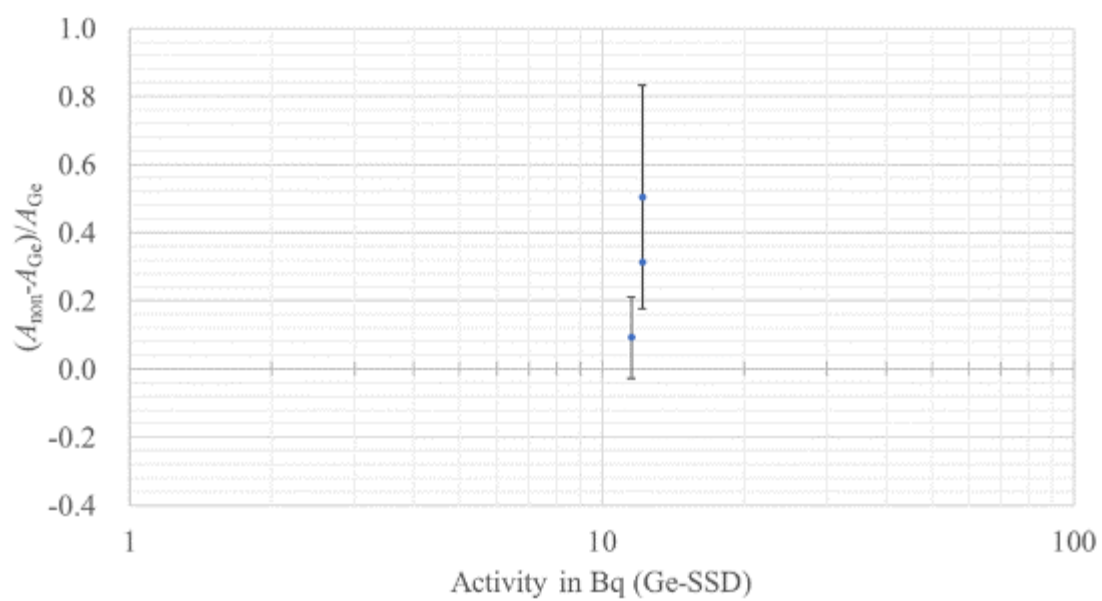
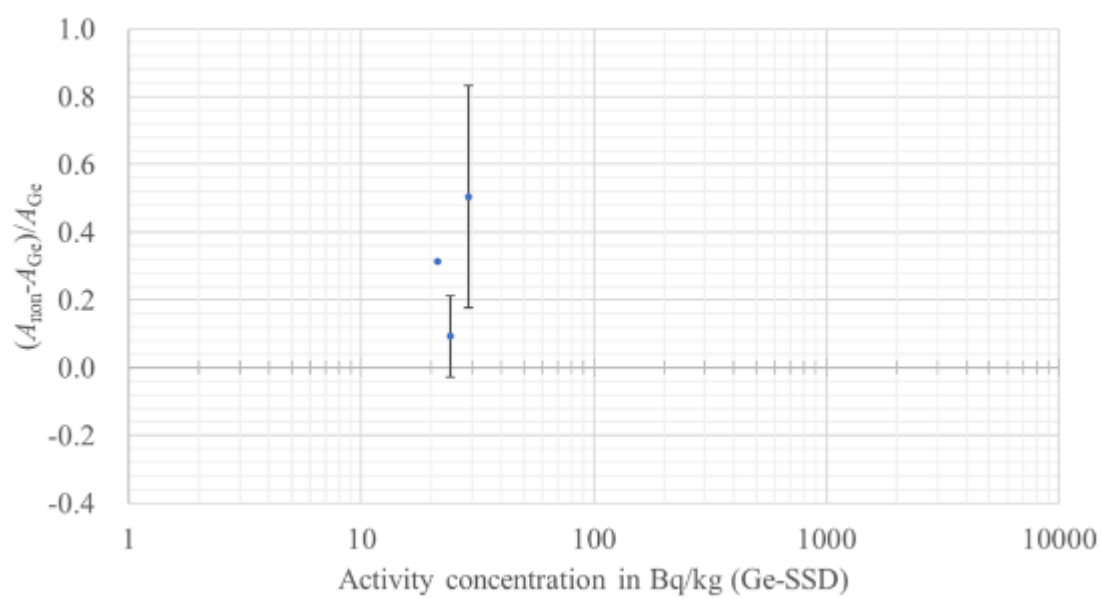


図 6 続き

フキノトウ

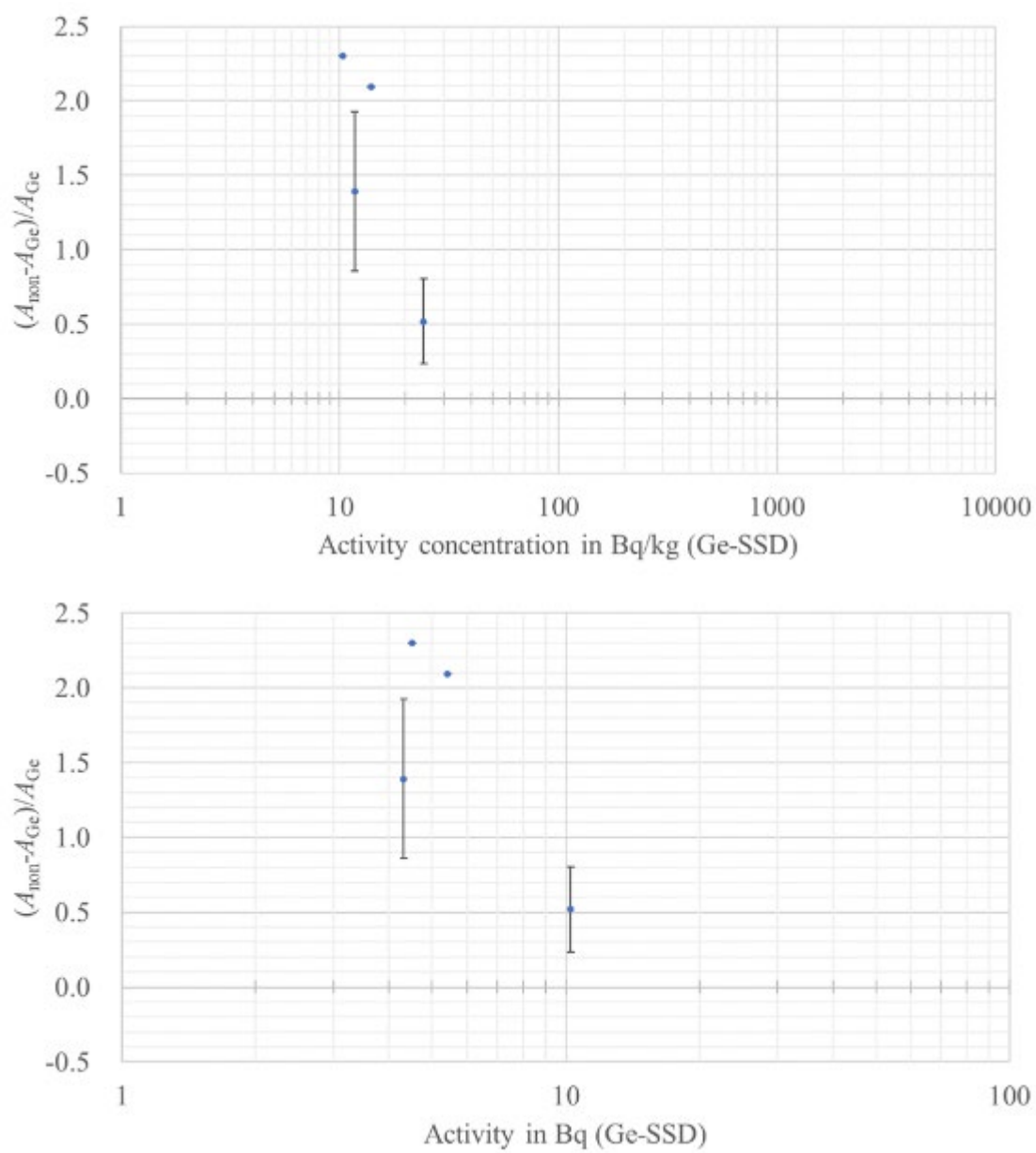


図 6 続き

ブナハリタケ

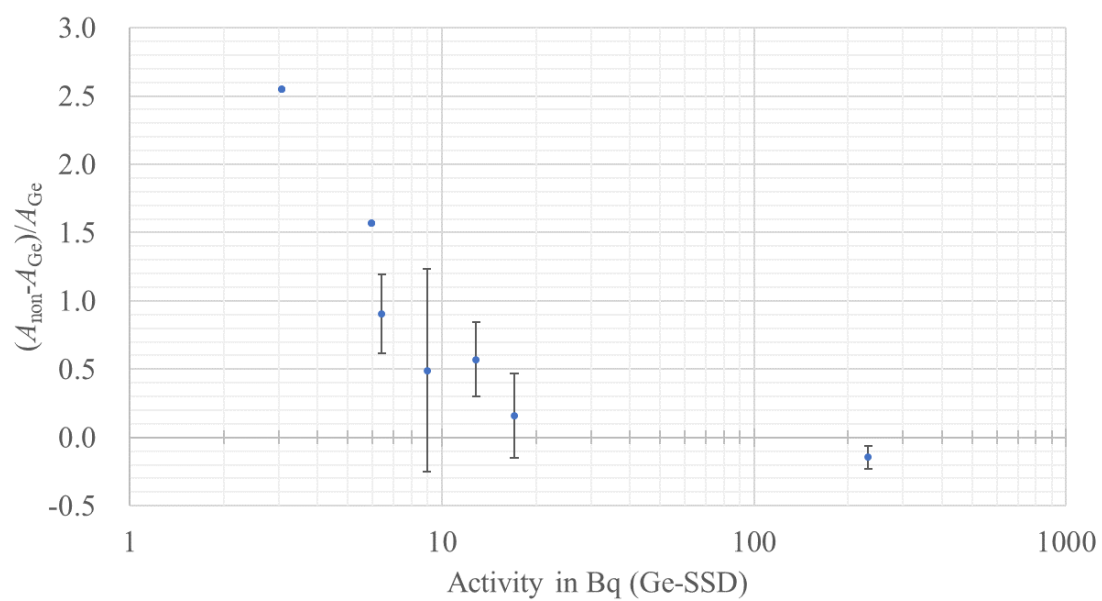
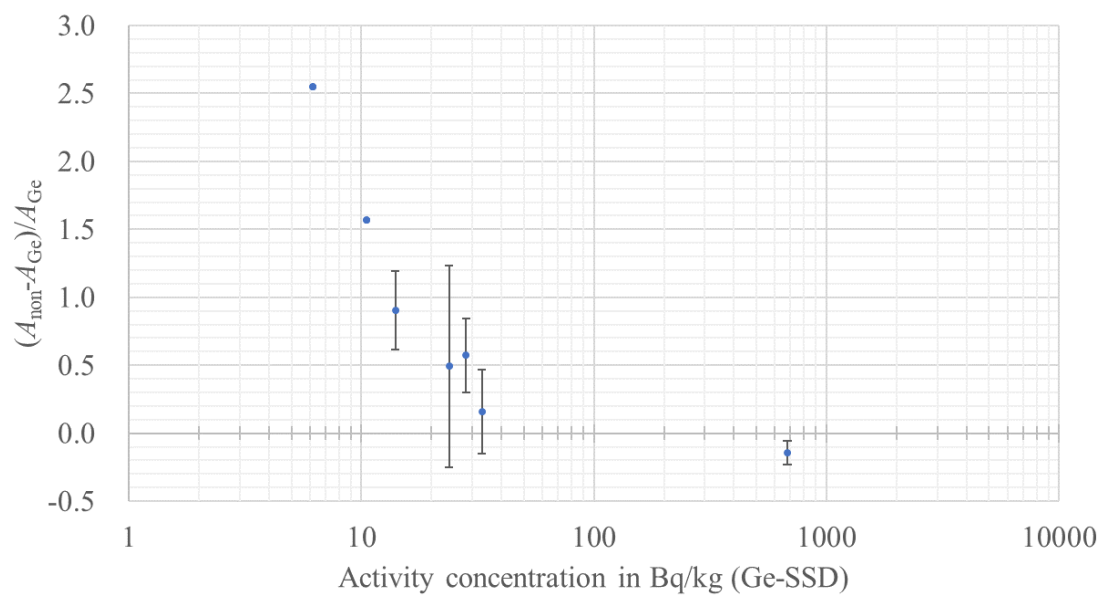


図 6 続き

ホウキタケ

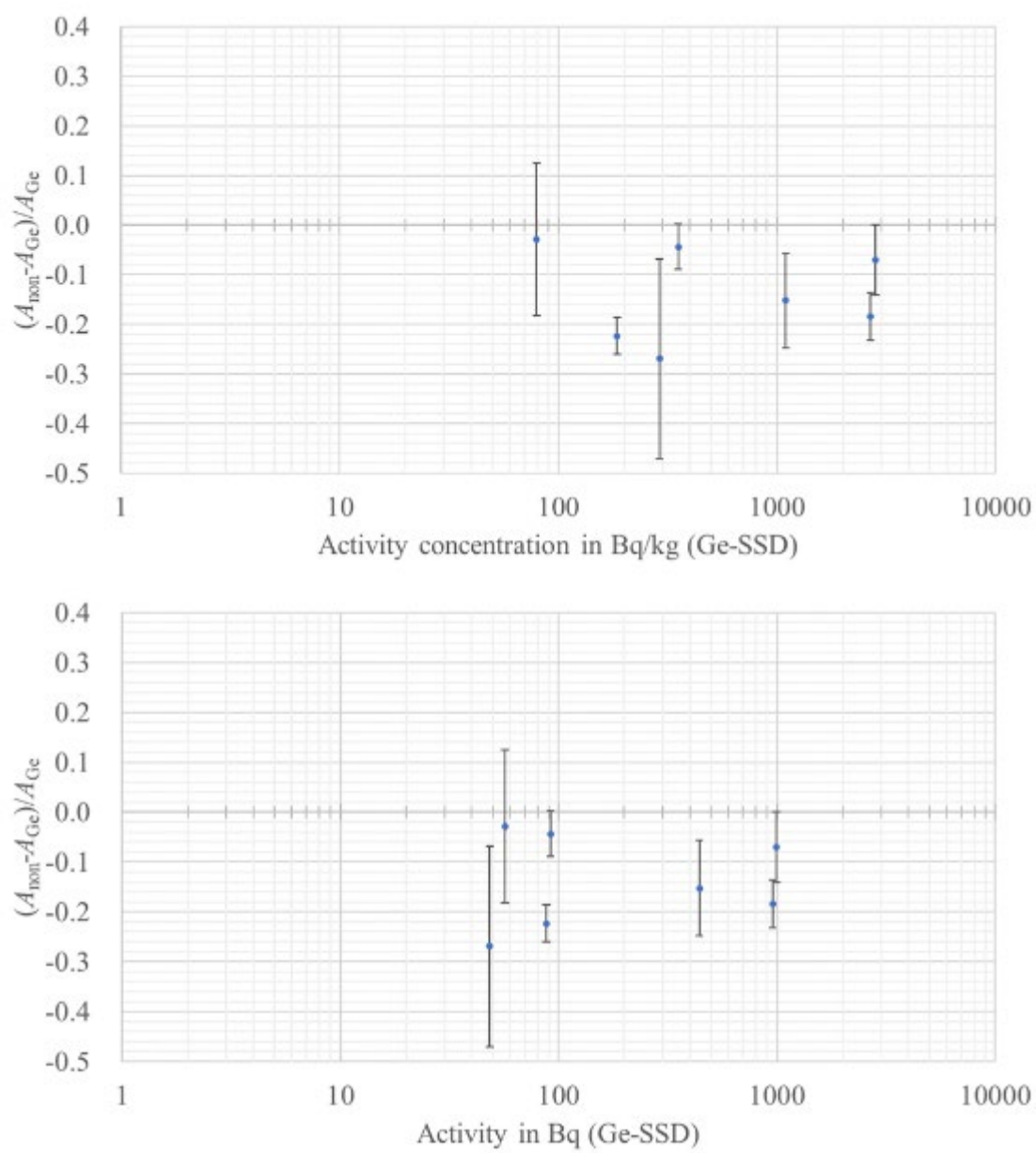


図 6 続き

ホオベニシロアシグチ

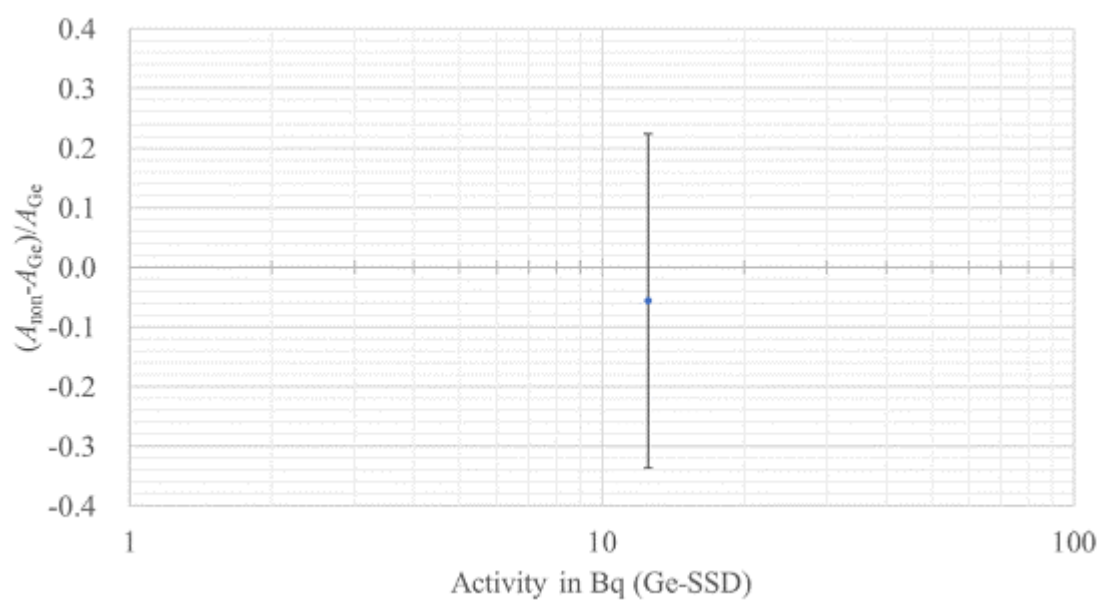
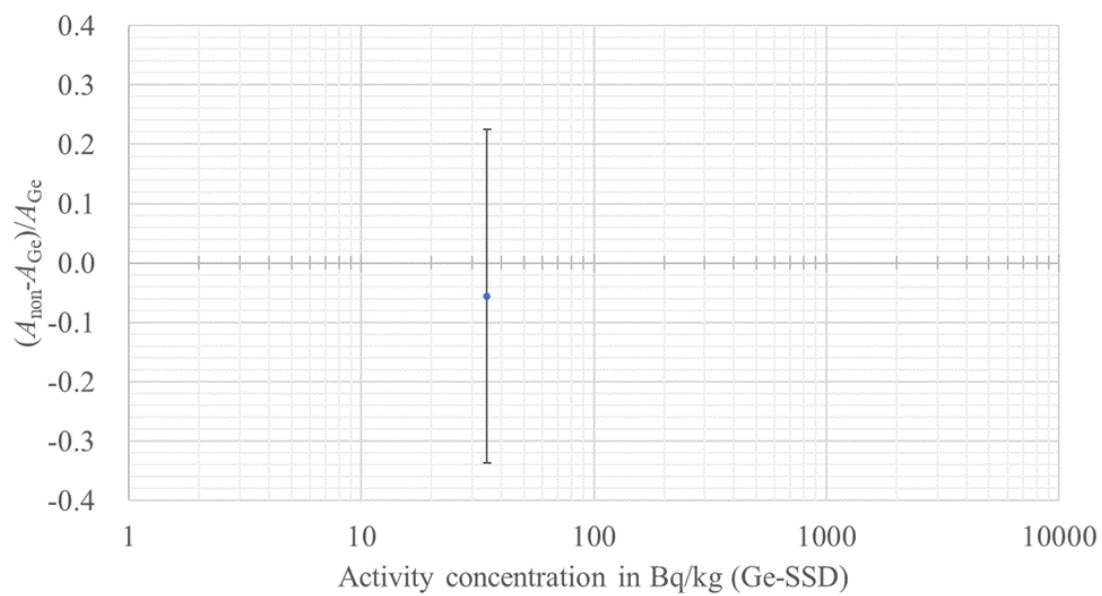


図 6 続き

ホンシメジ

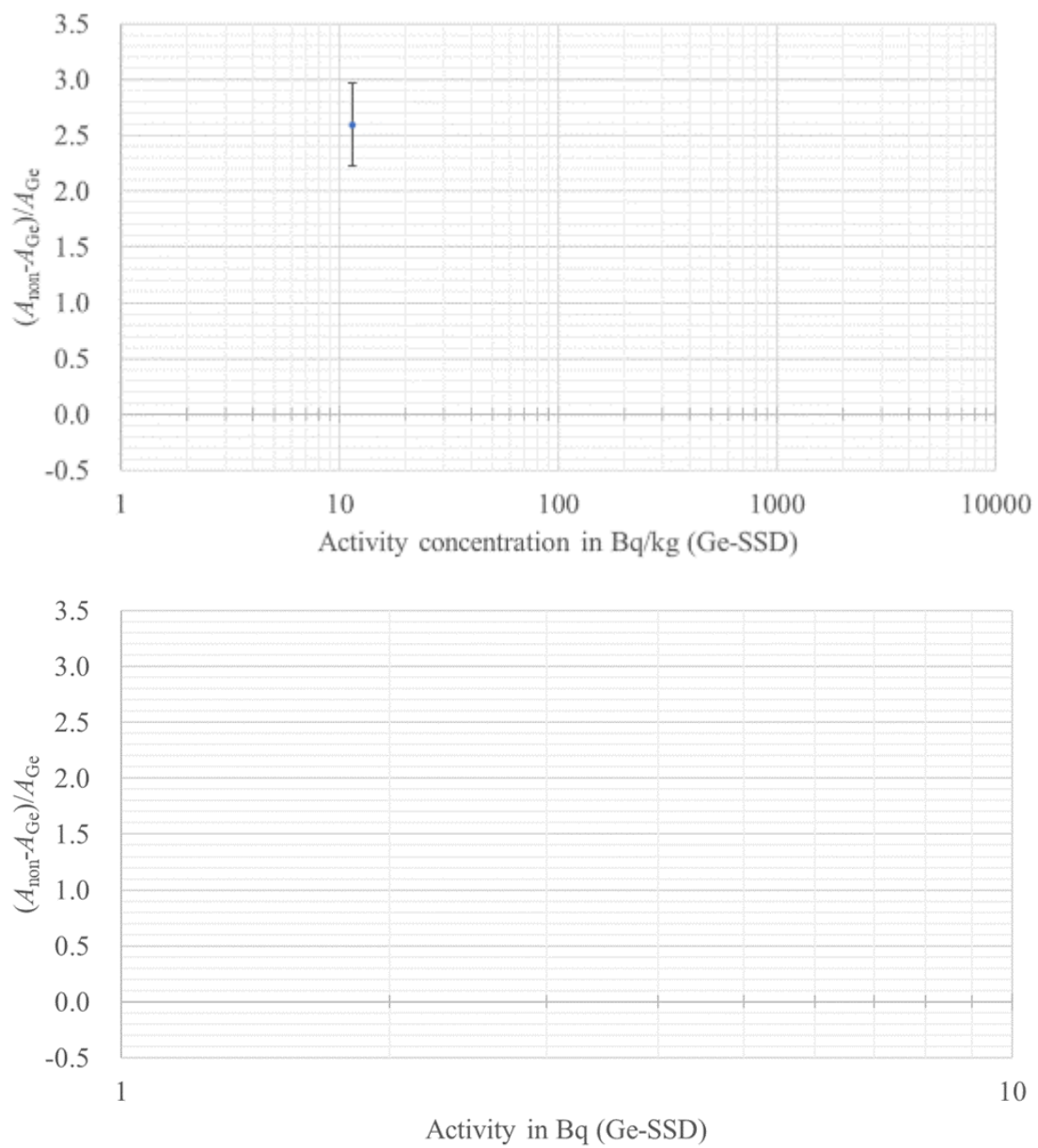


図 6 続き

マイタケ

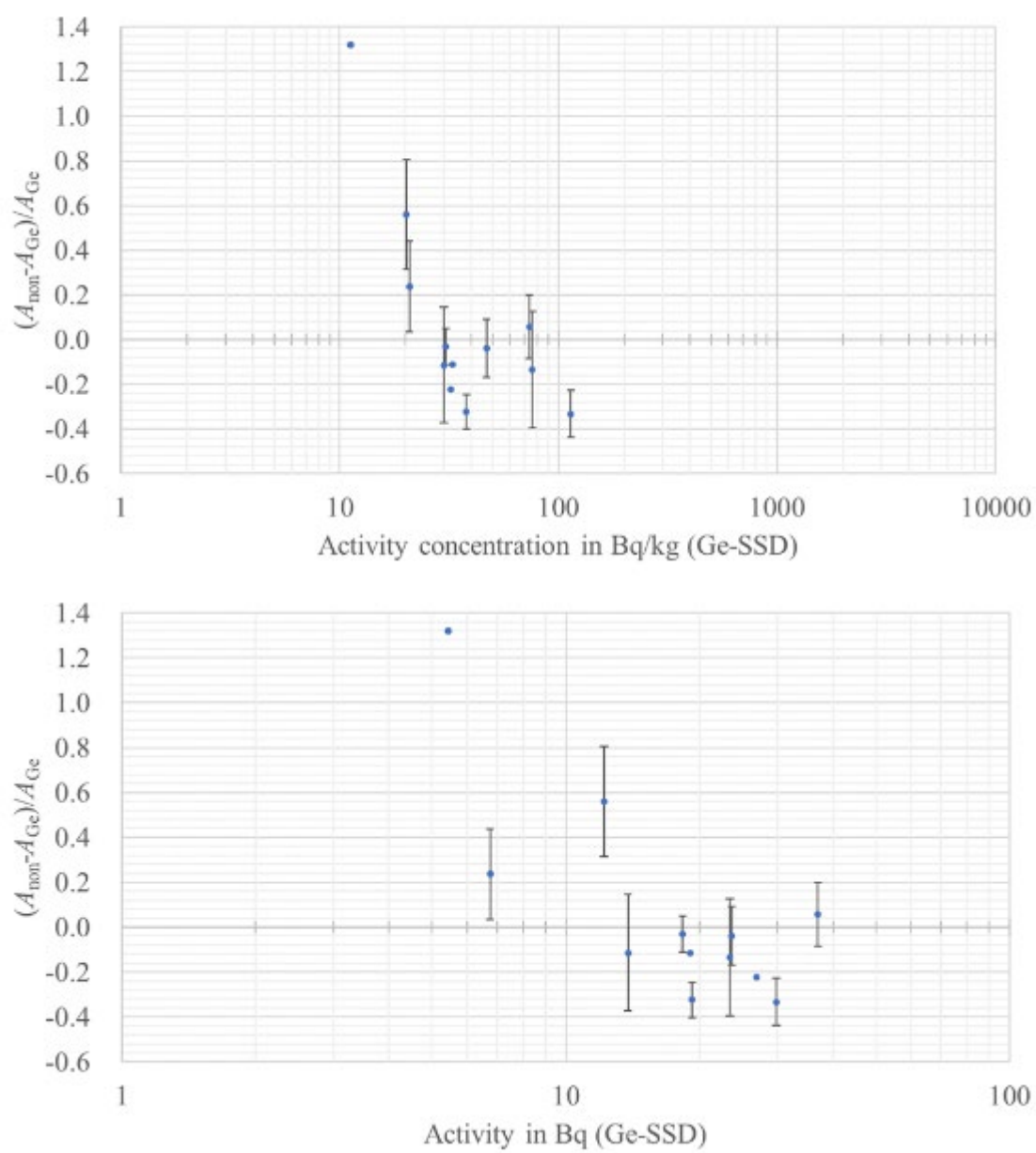


図 6 続き

マスタケ

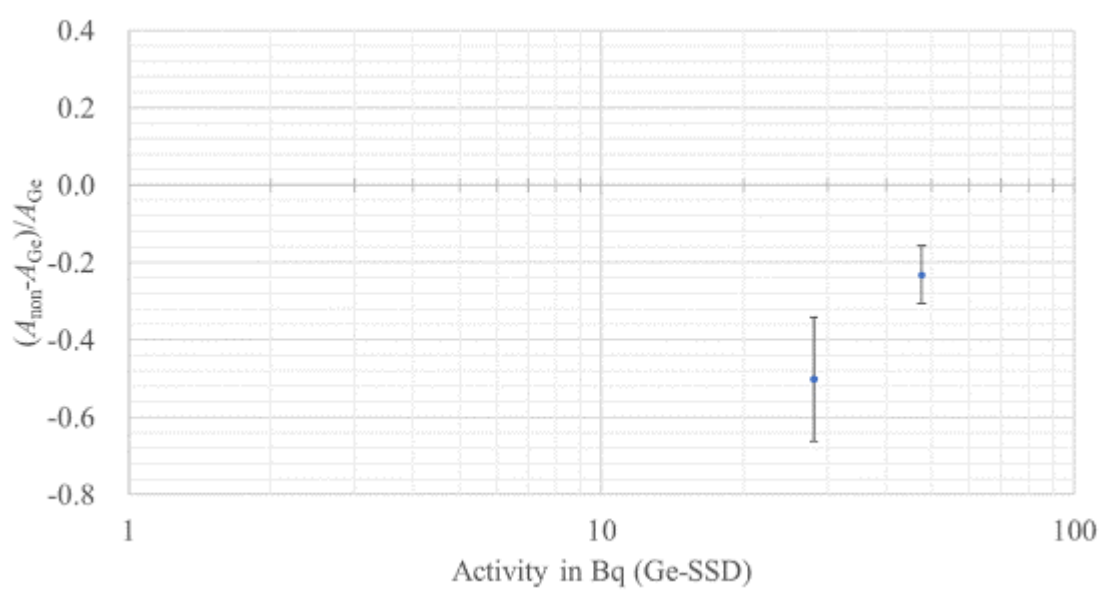
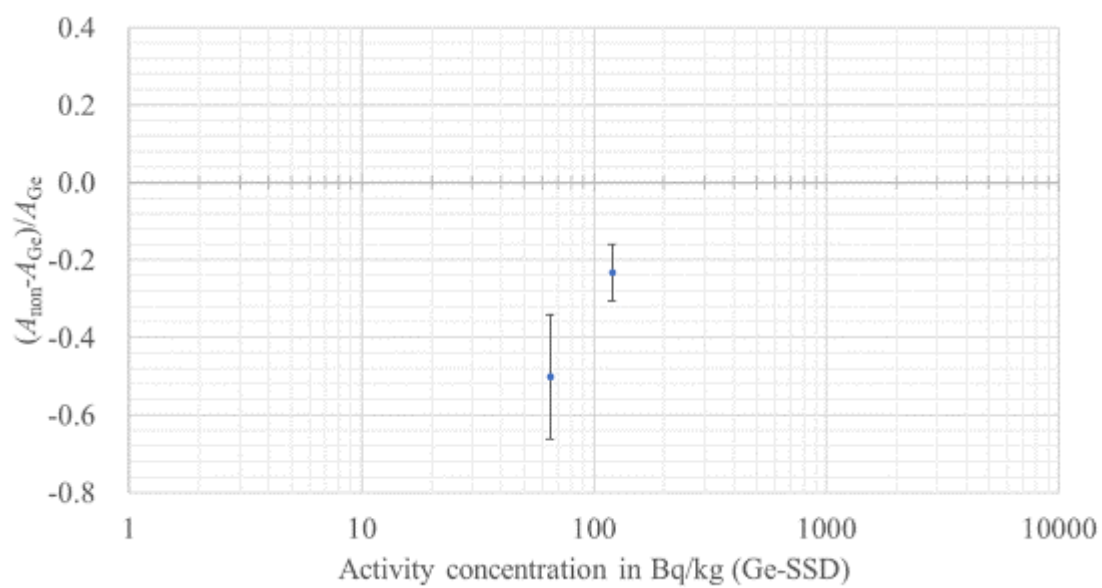


図 6 続き

マツタケ

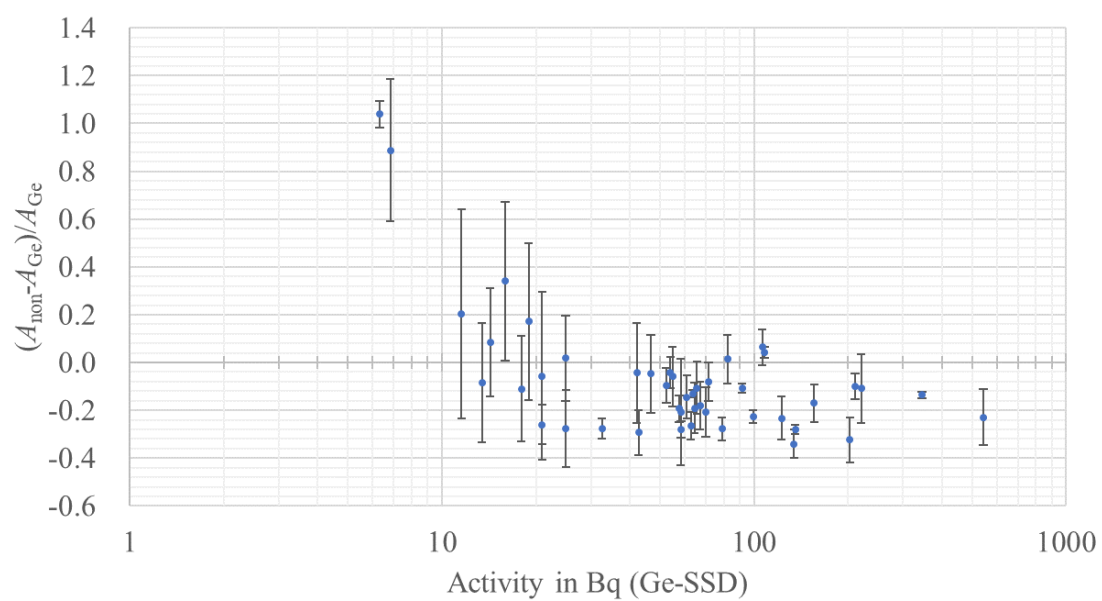
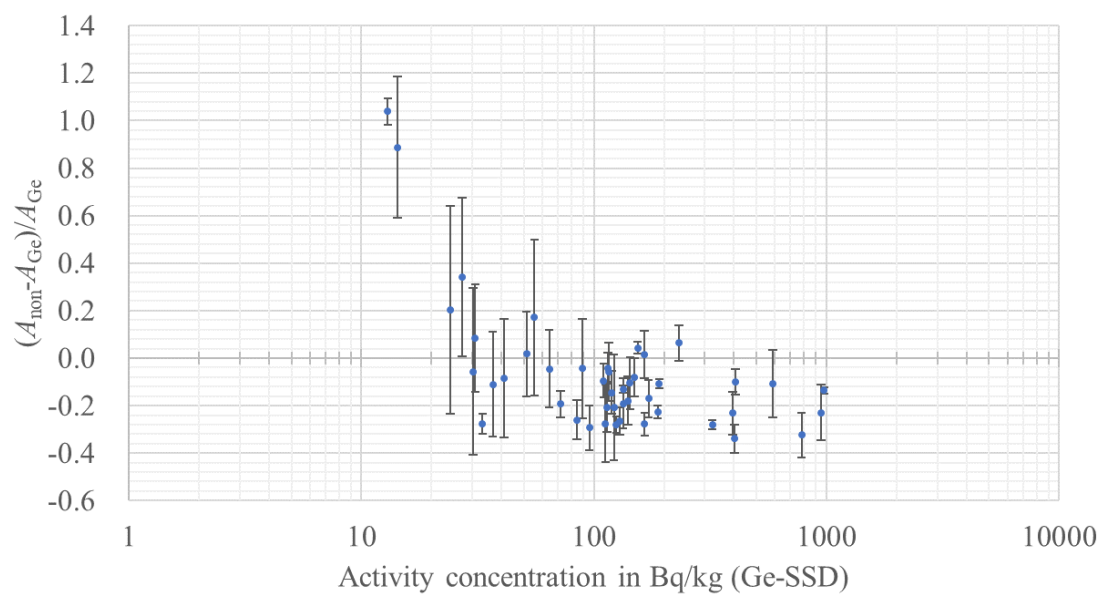


図 6 続き

ミネシメジ

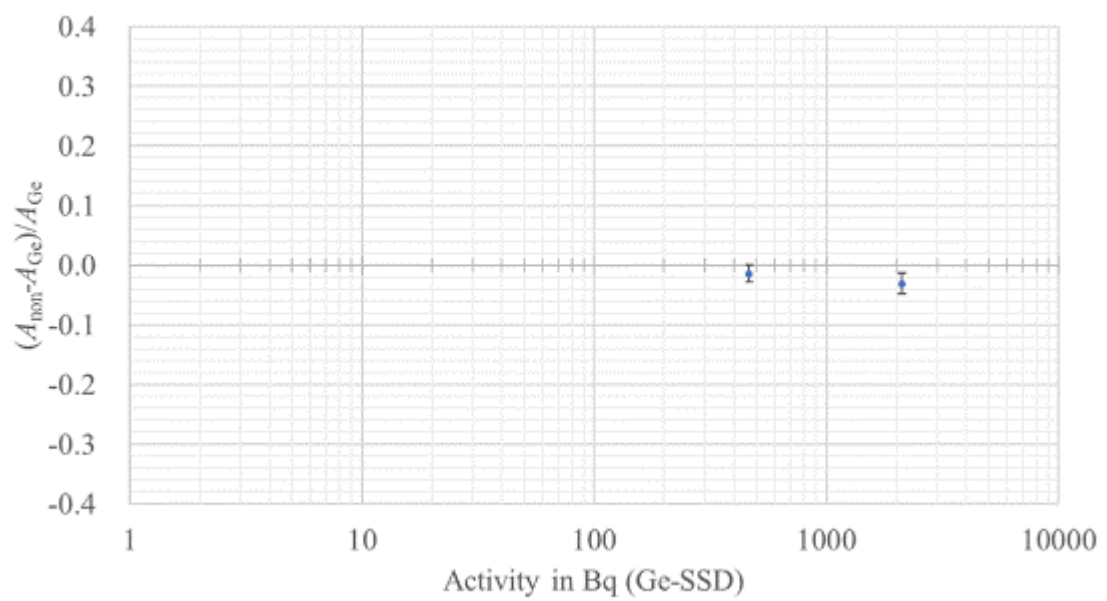
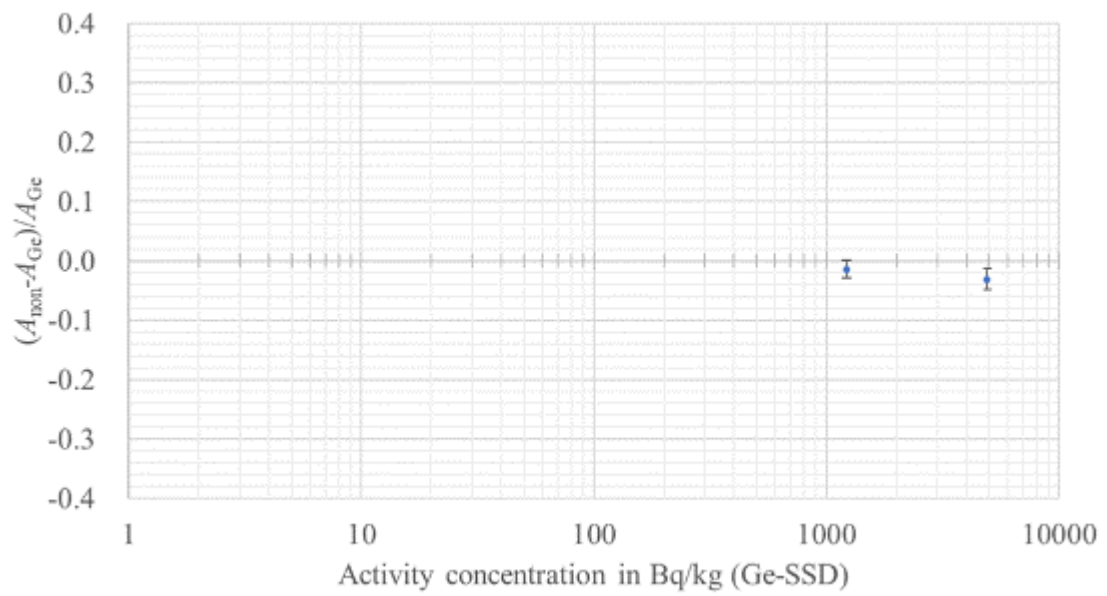


図 6 続き

ムキタケ

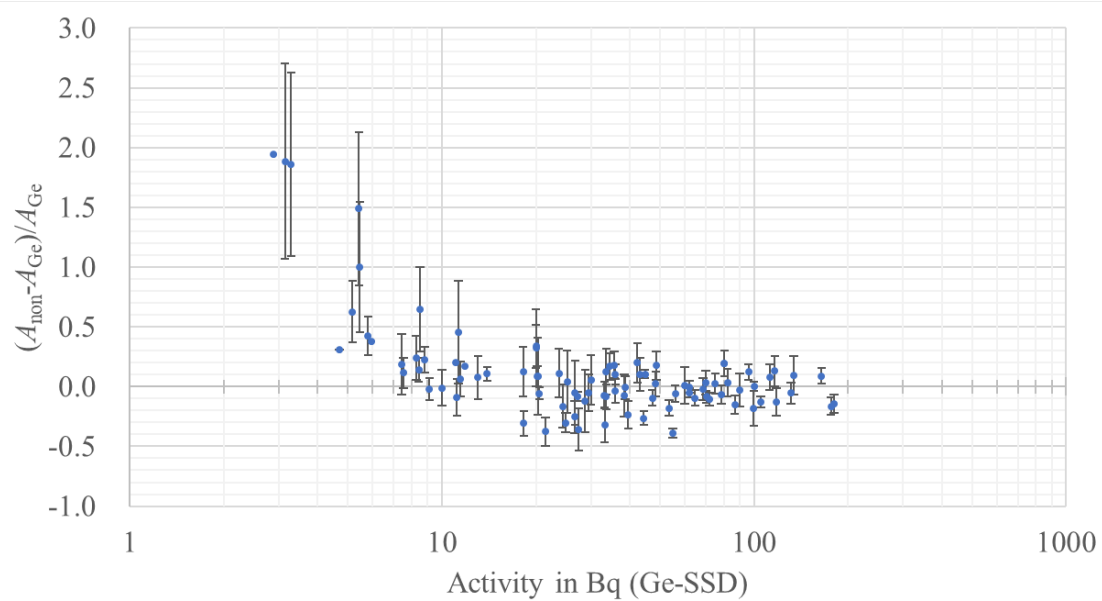
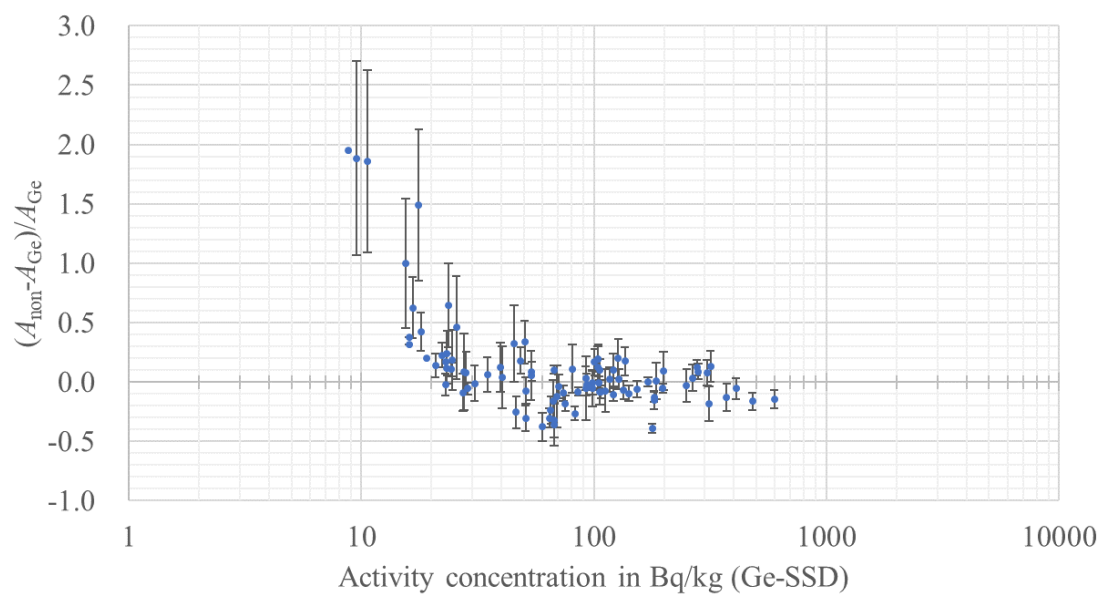


図 6 続き

ムラサキシメジ

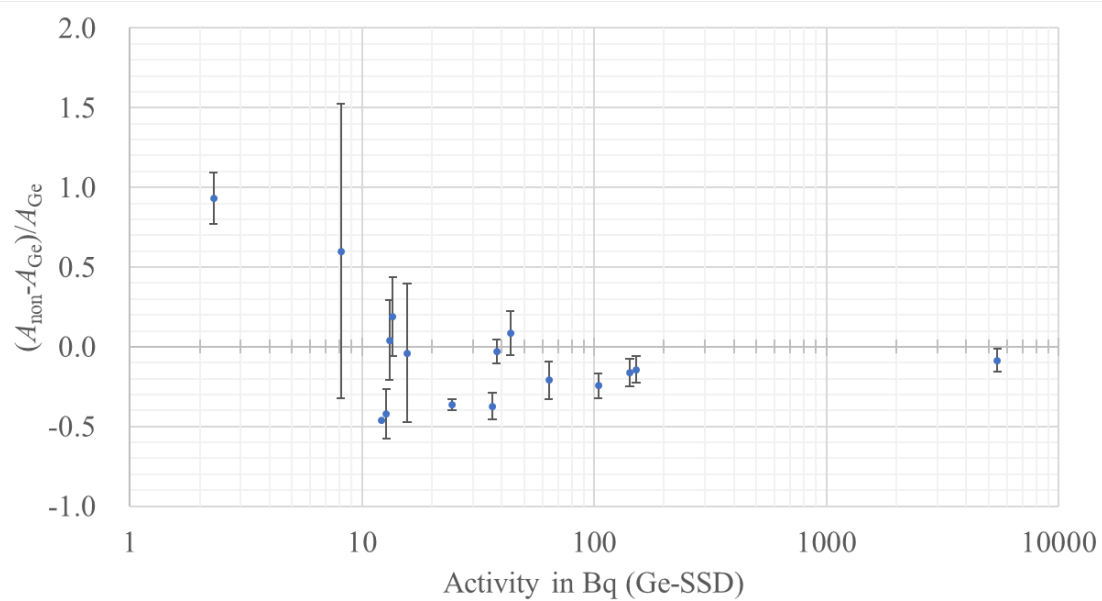
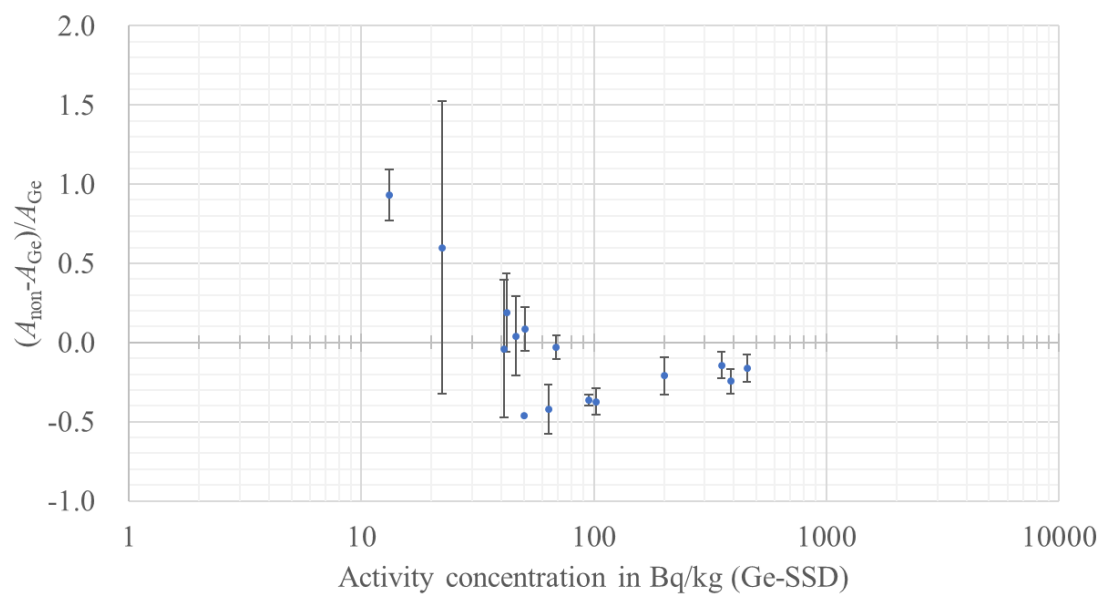


図 6 続き

ヤマドリタケモドキ

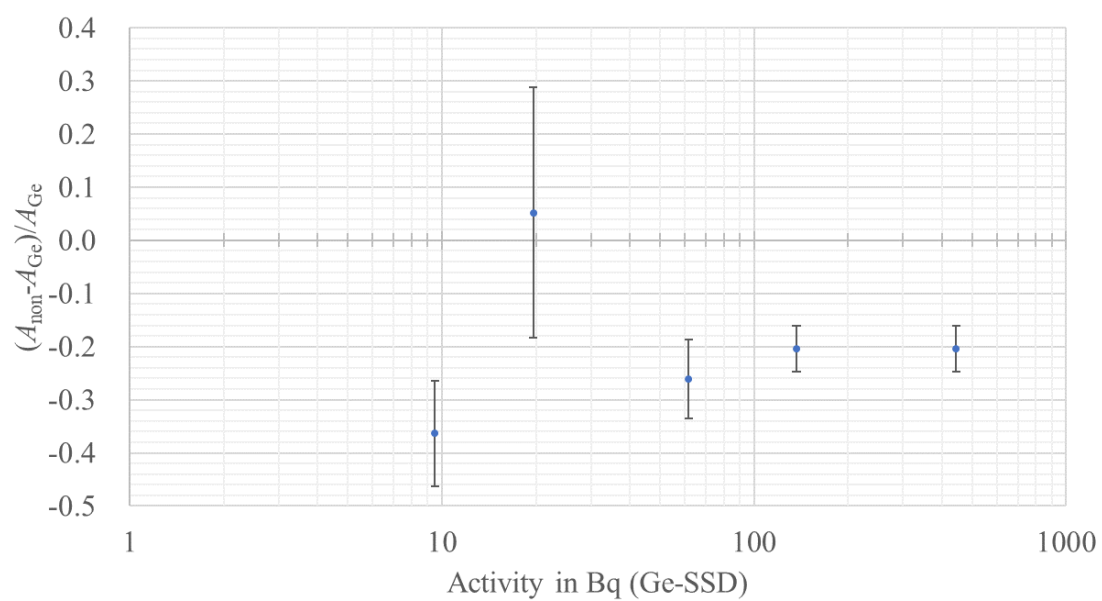
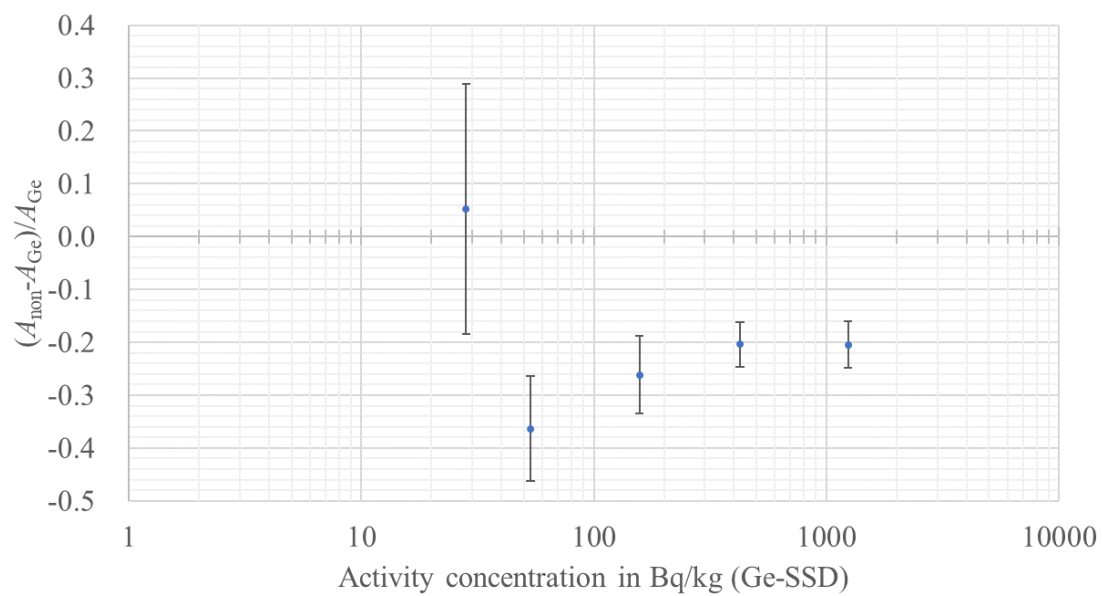


図 6 続き

野生キノコ類

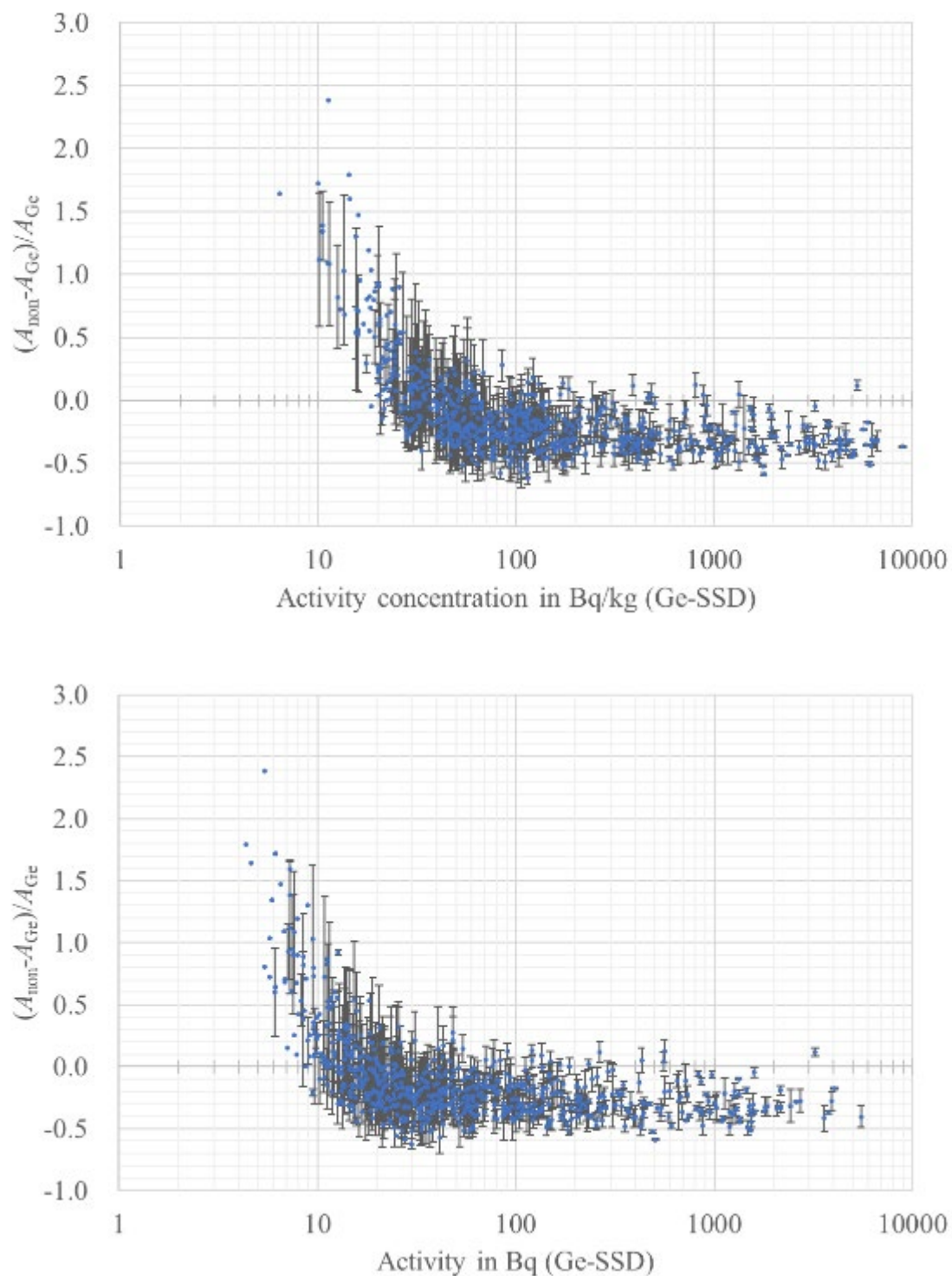


図7 非破壊式装置(NDA2)による測定結果の Ge 検出器の結果
(上段：放射能濃度 下段：放射能)との差

アイタケ

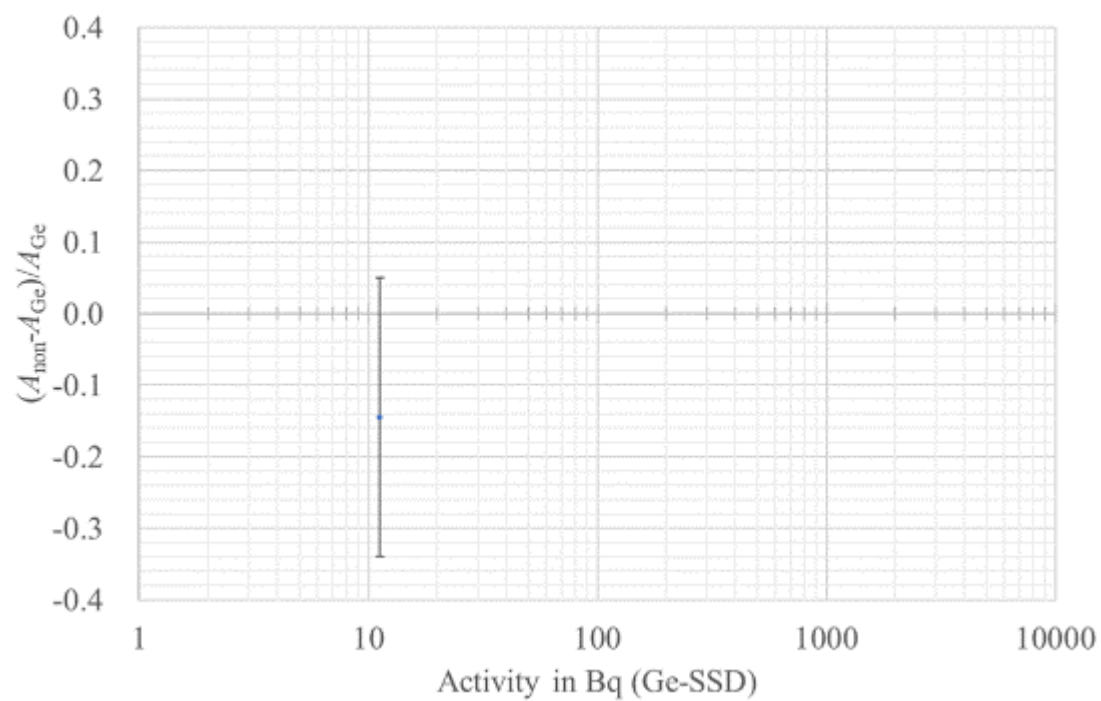
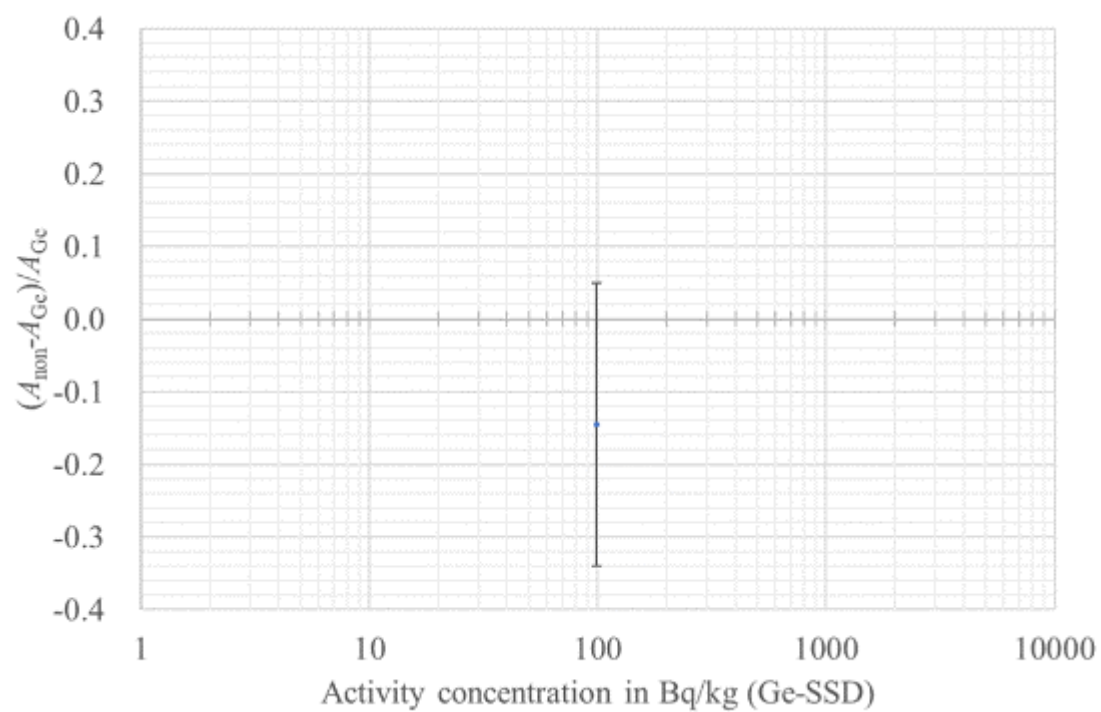


図 7 続き

アカモミタケ

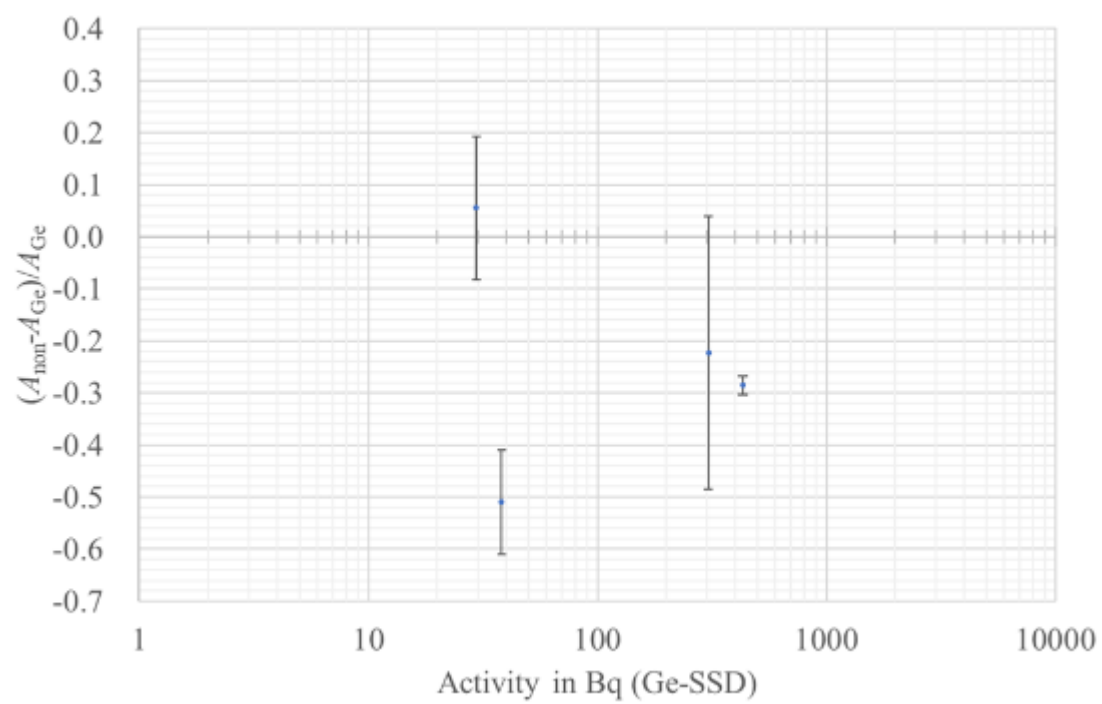
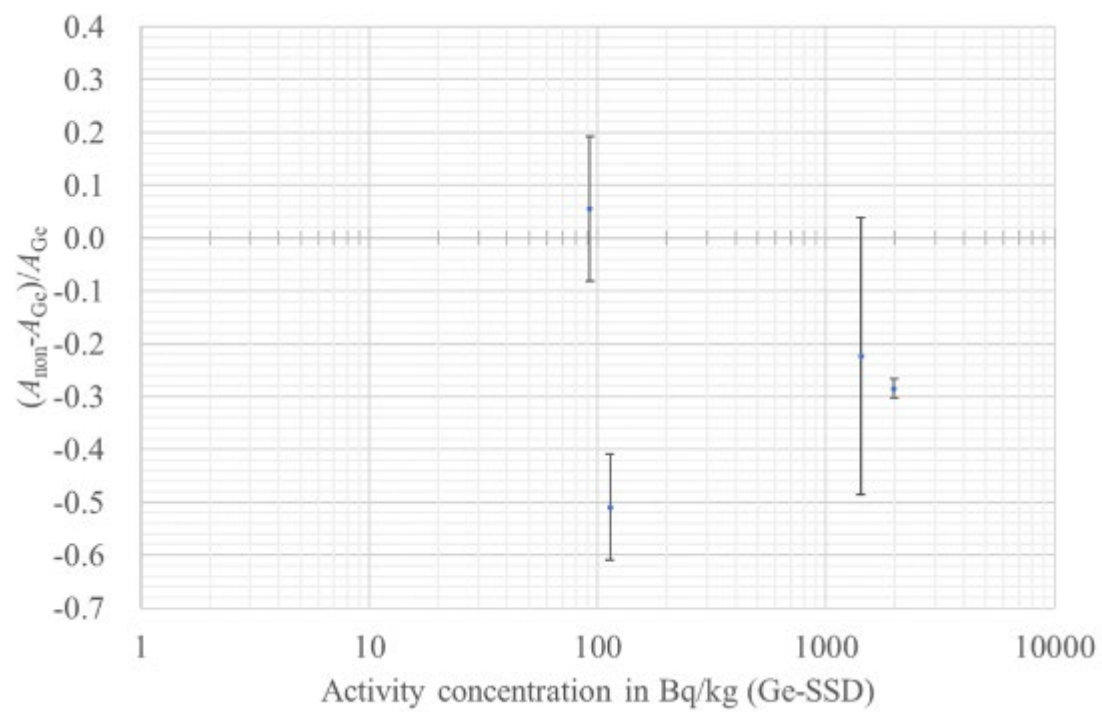


図 7 続き

アカヤマドリ

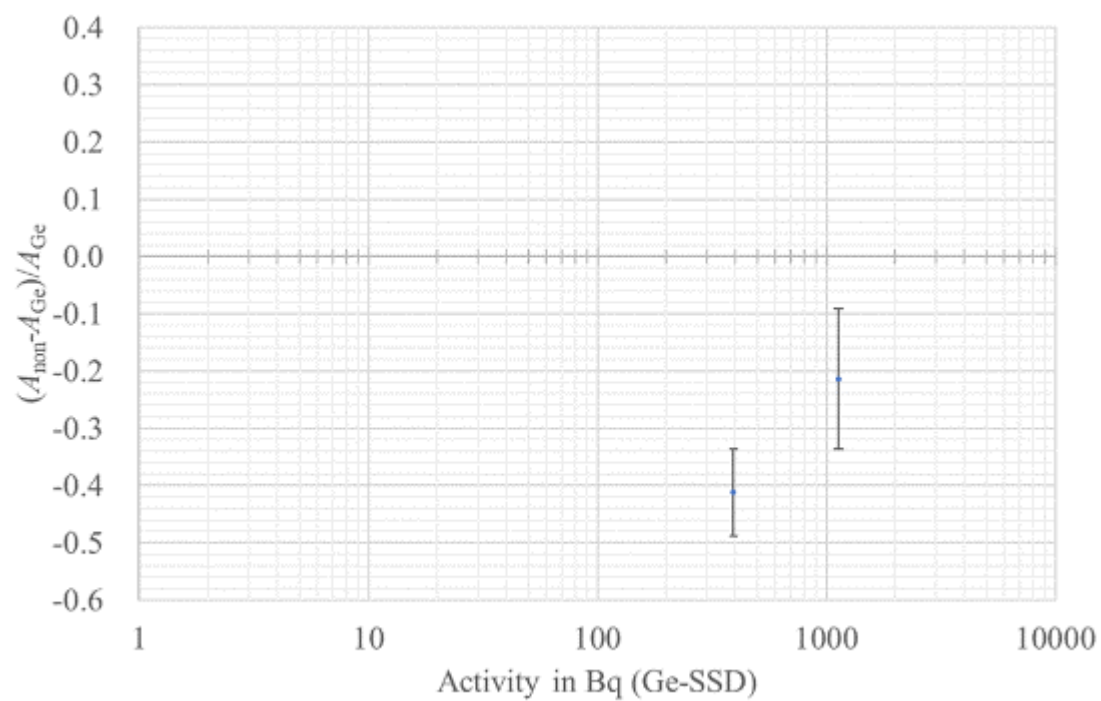
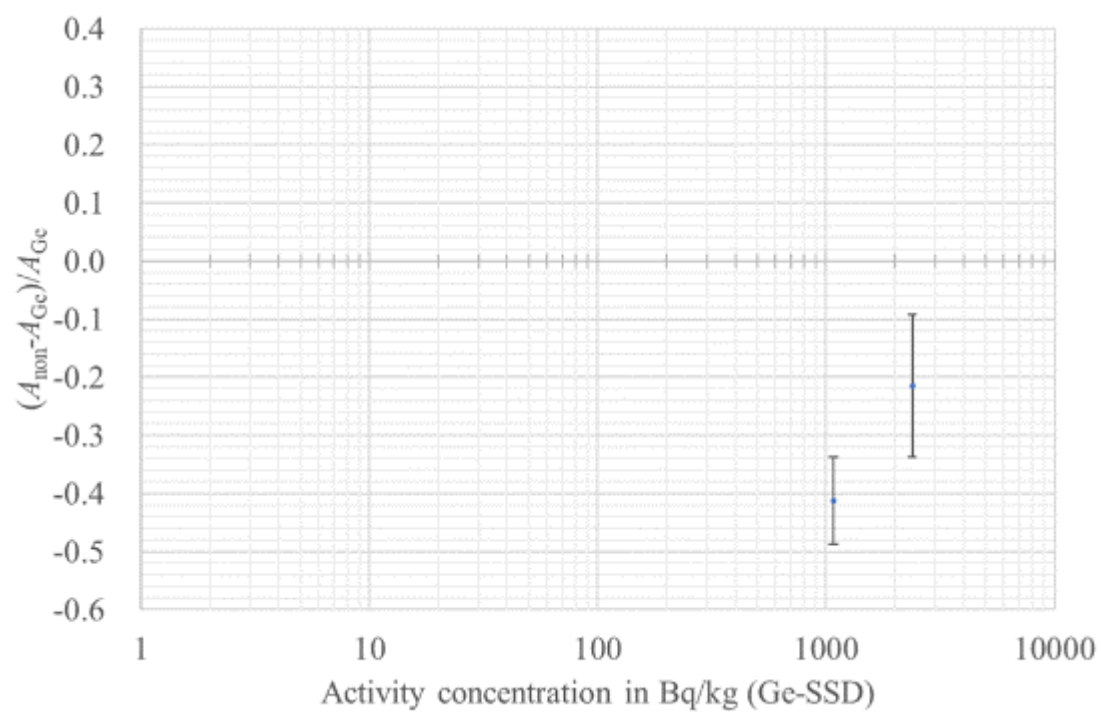


図 7 続き

アミタケ

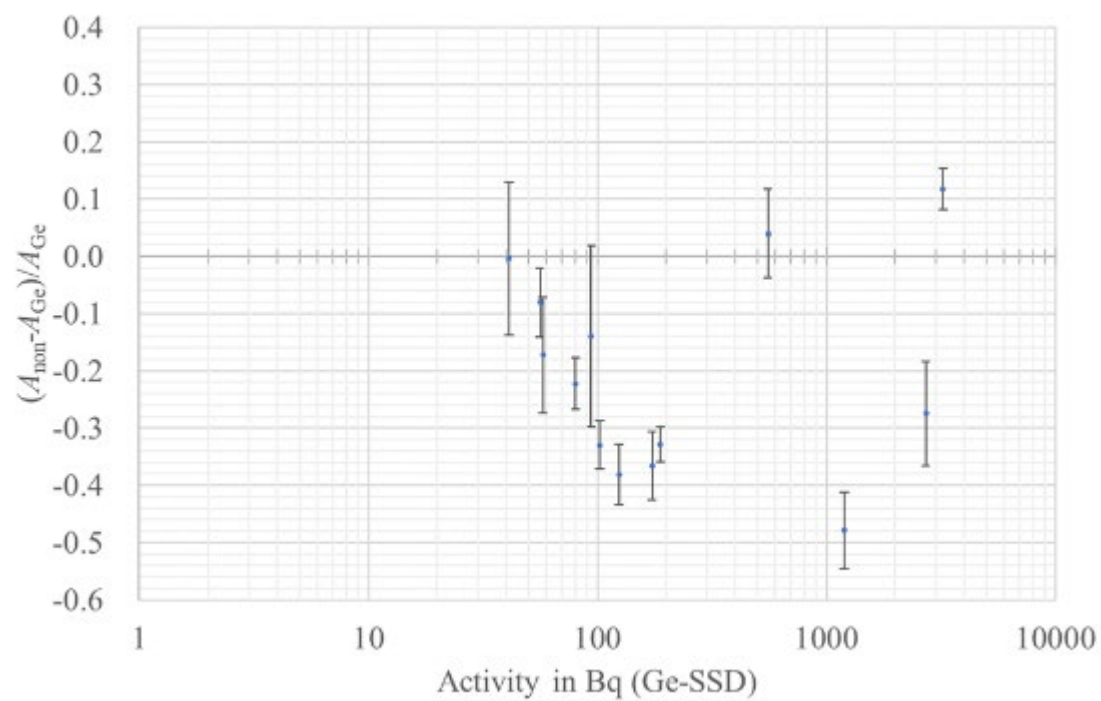
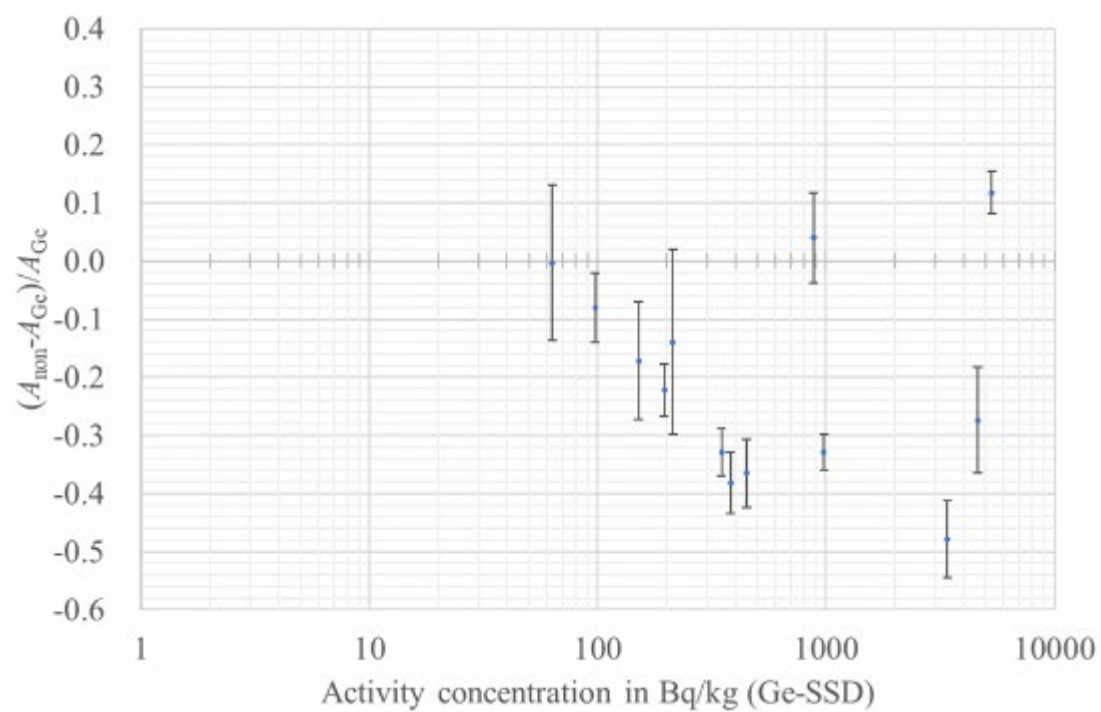


図 7 続き

アメリカラベニイロガワリ

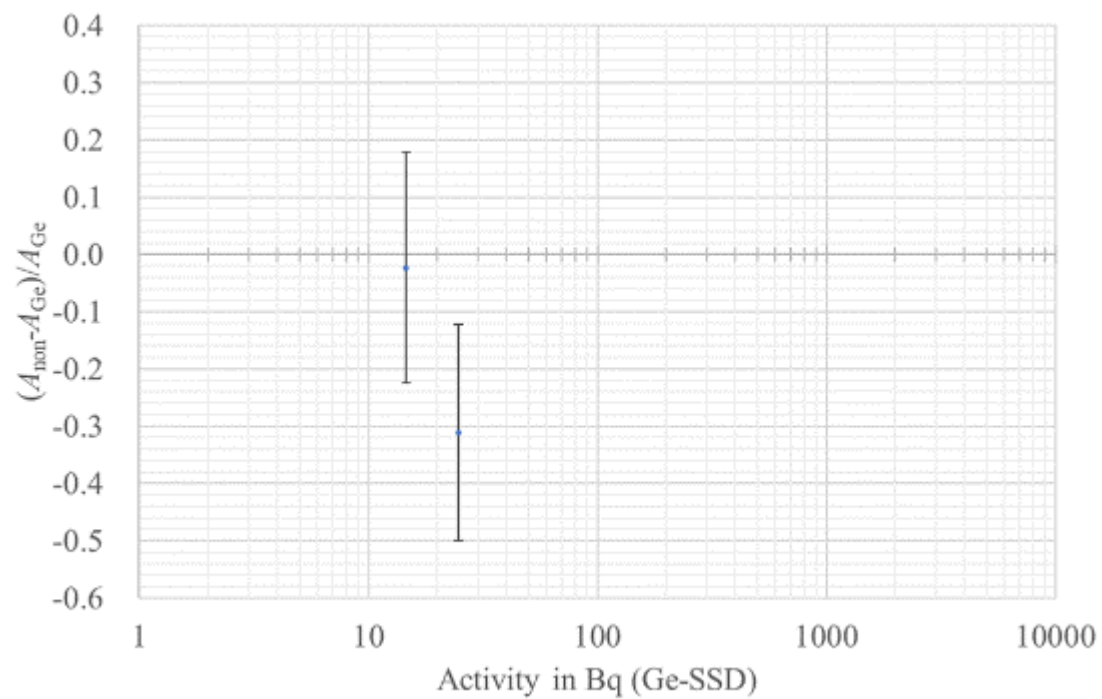
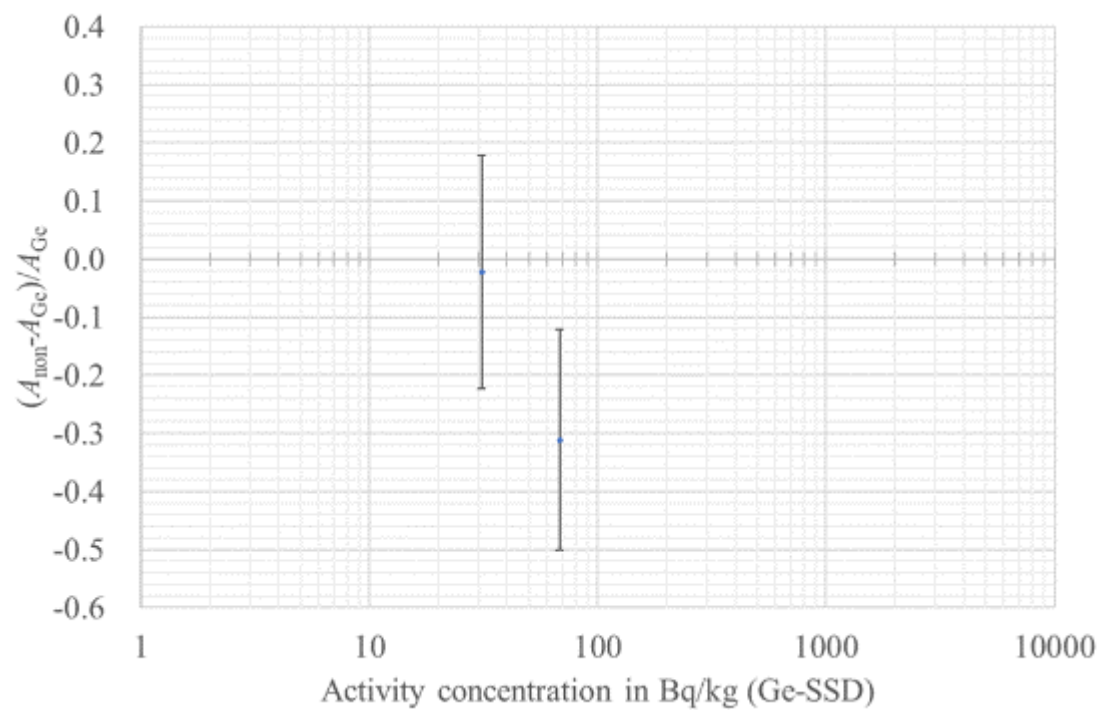


図 7 続き

アンズタケ

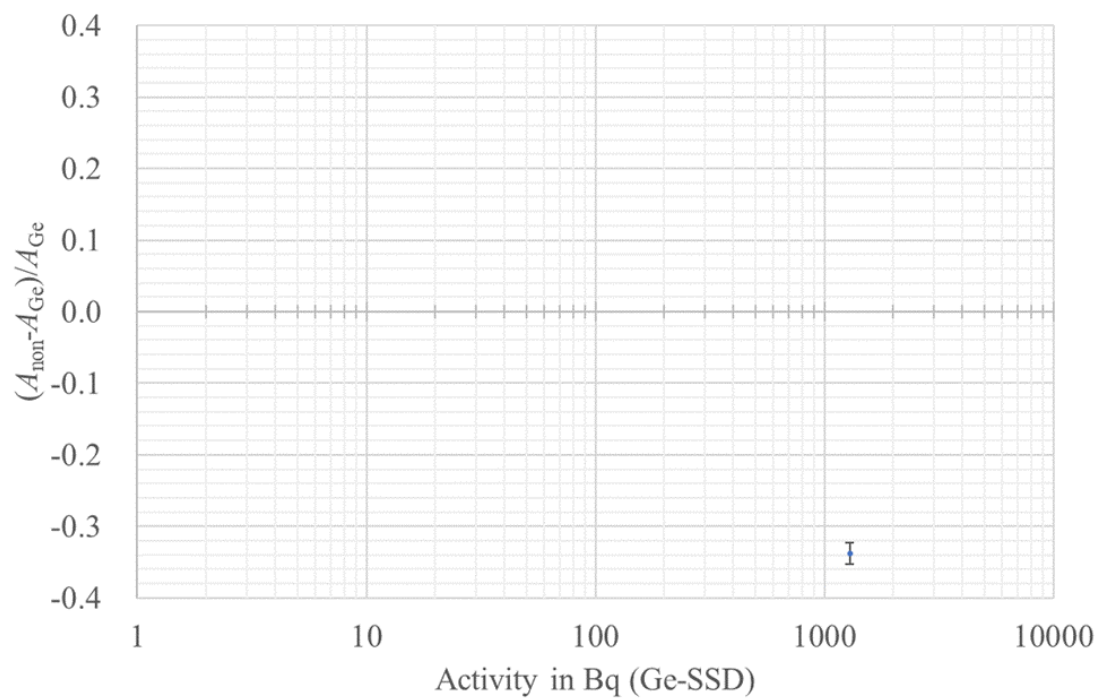
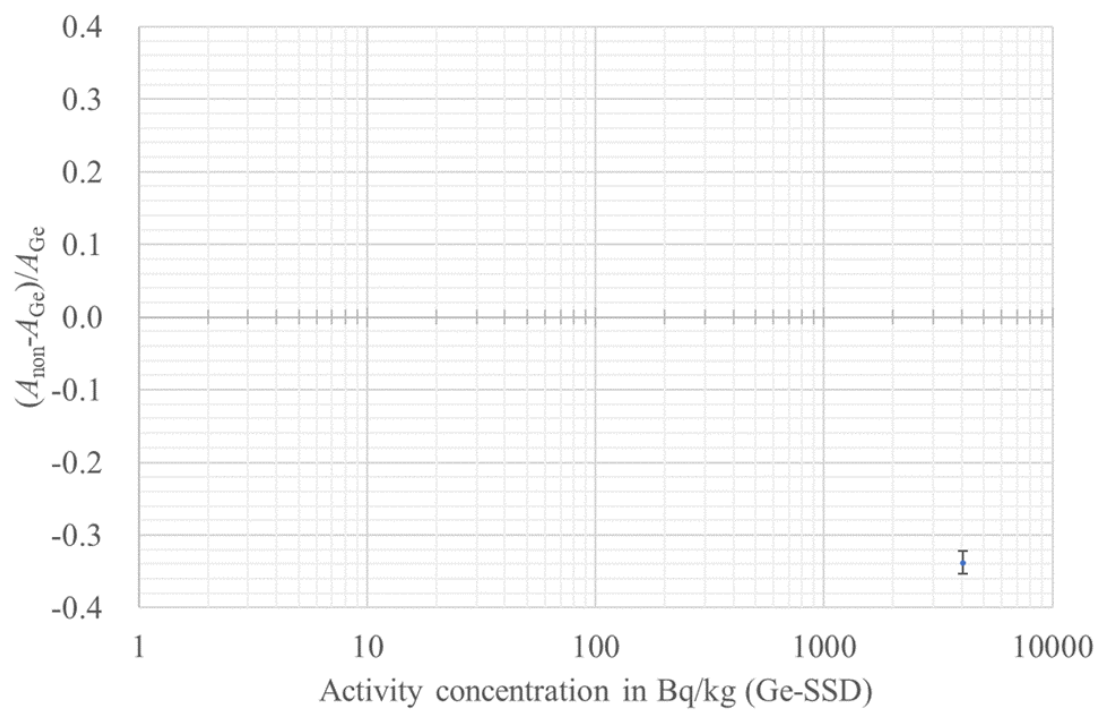


図 7 続き

ウツロイイグチ

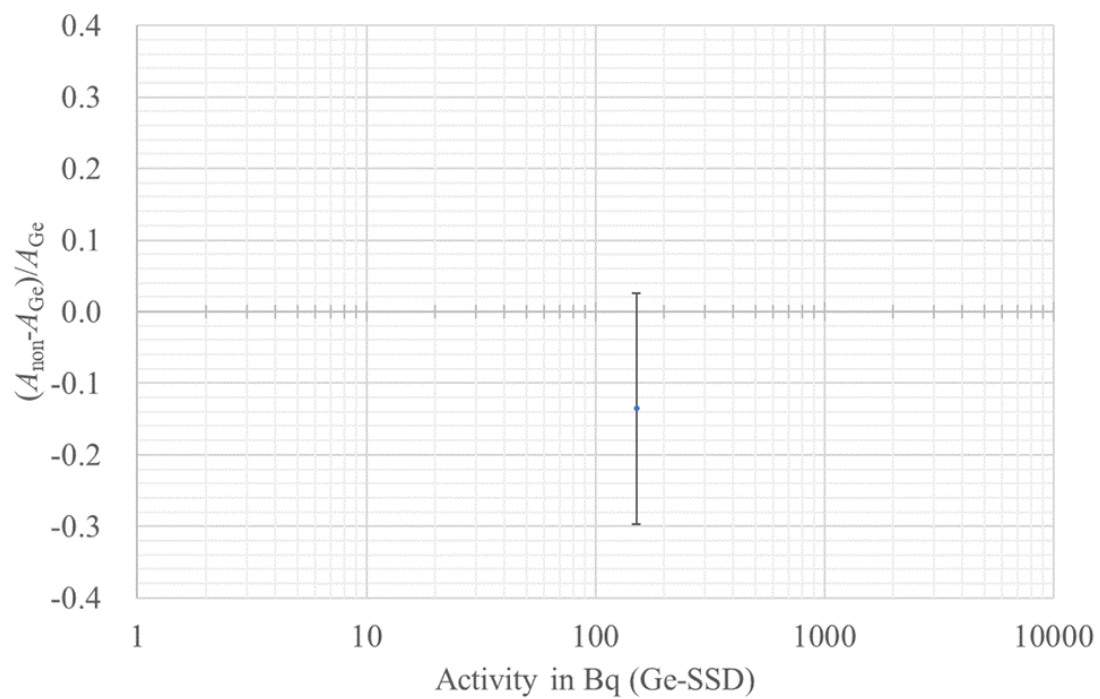
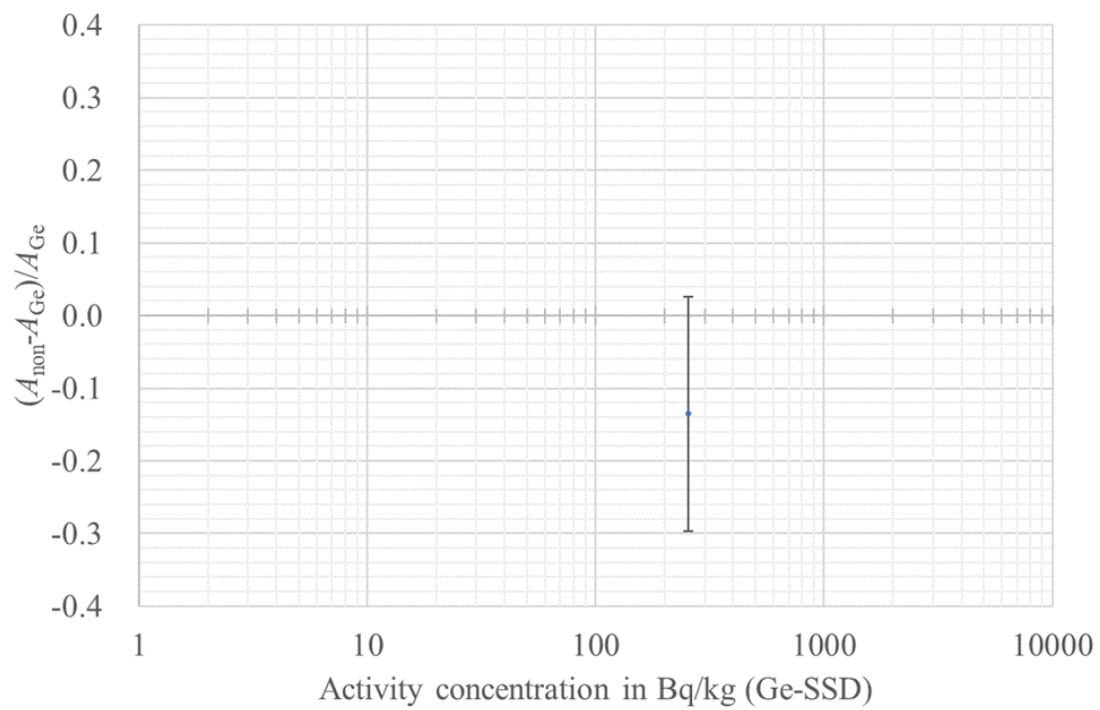


図 7 続き

うど

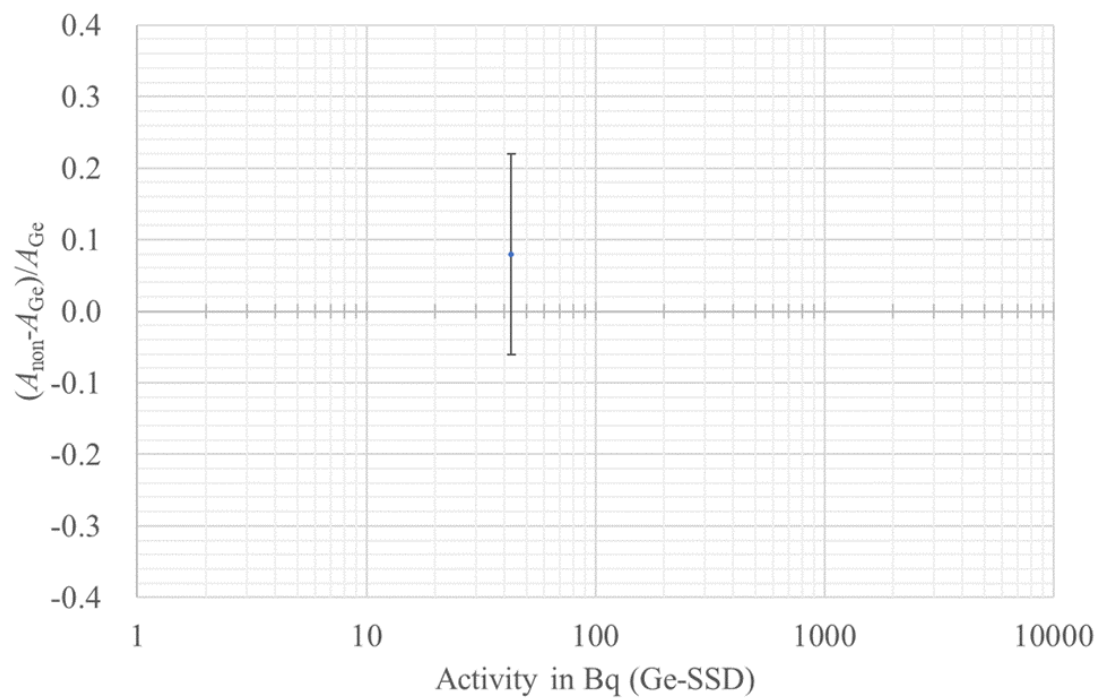
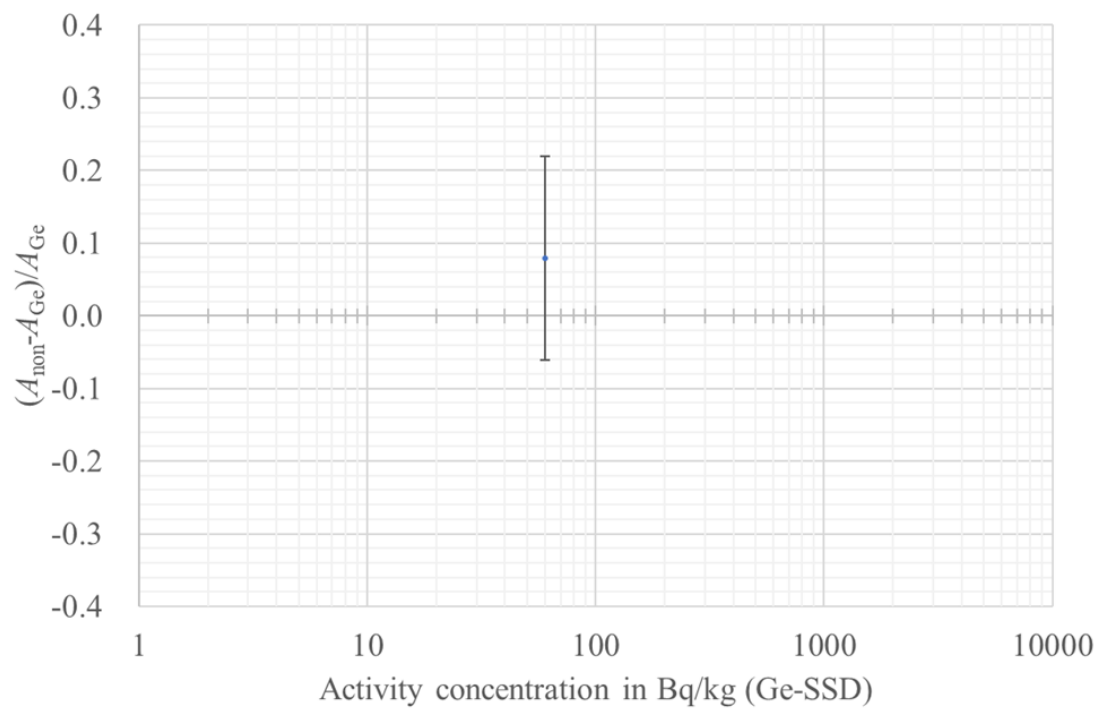


図 7 続き

ウラベニホテイシメジ

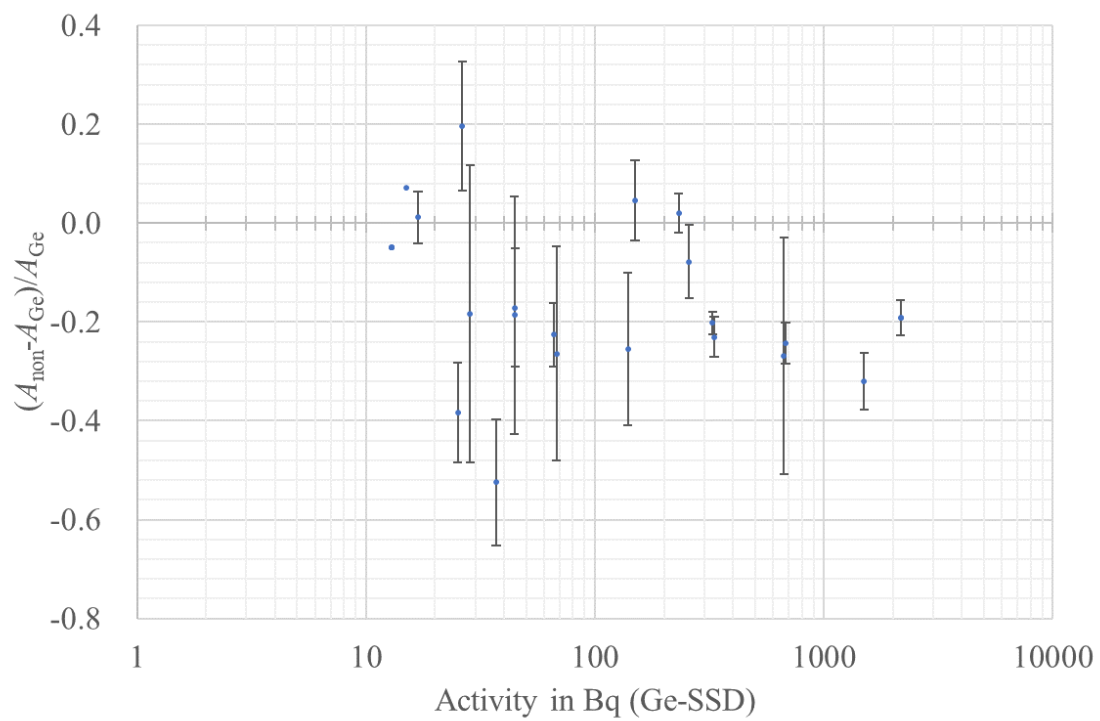
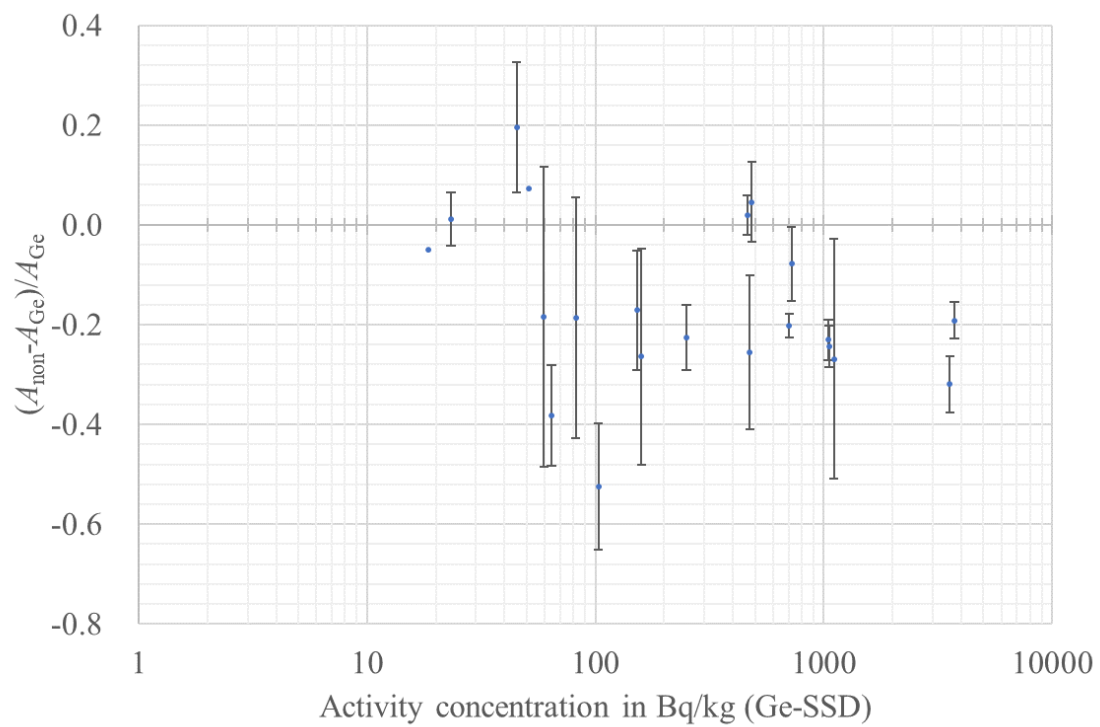


図 7 続き

エゾハリタケ

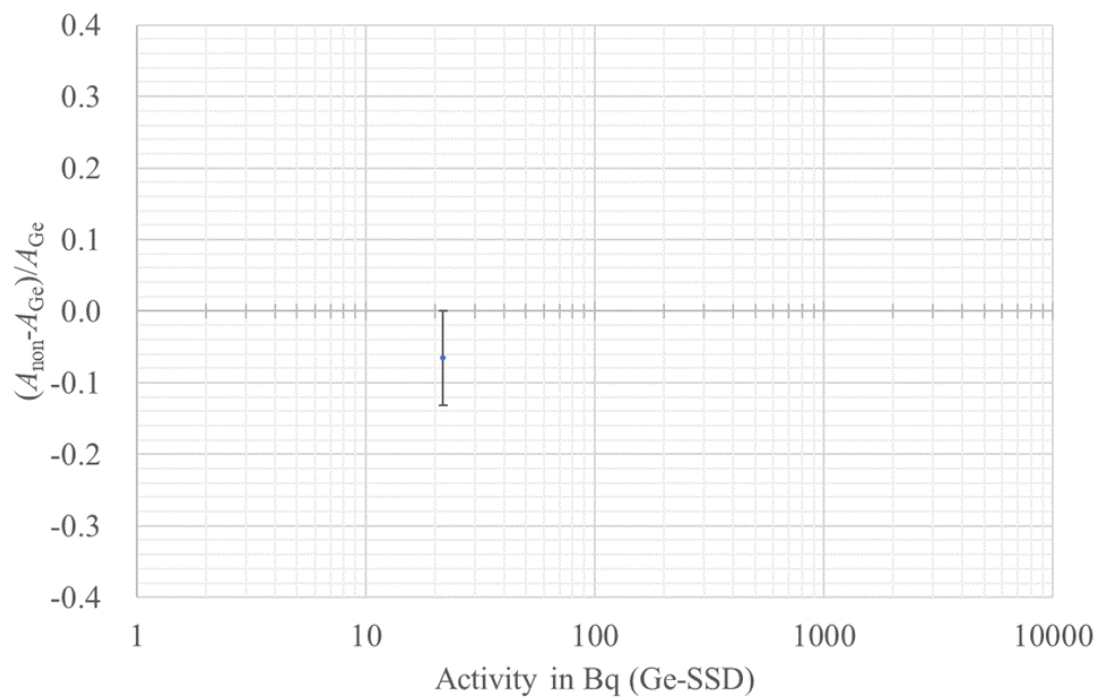
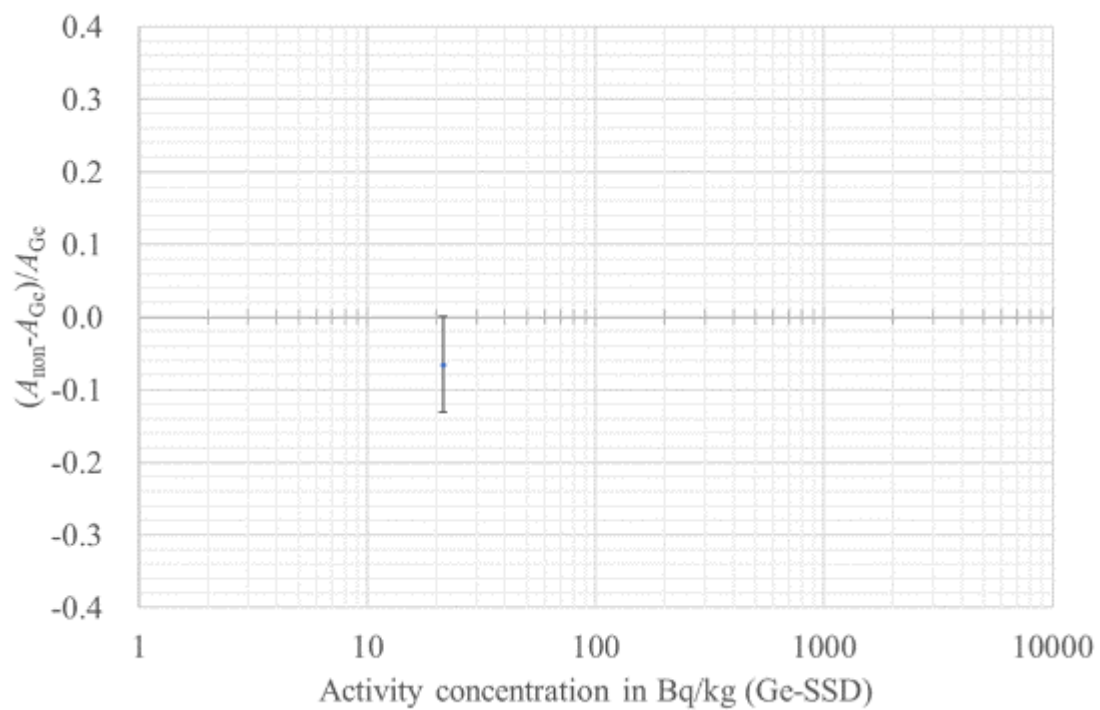


図 7 続き

オオイチョウタケ

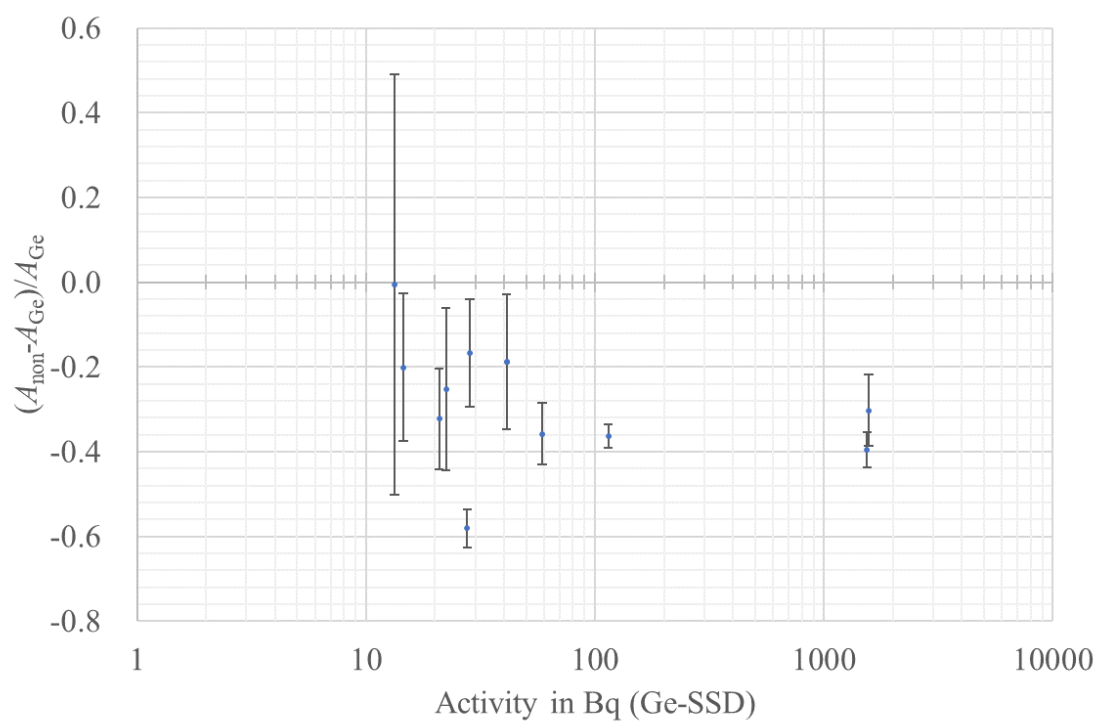
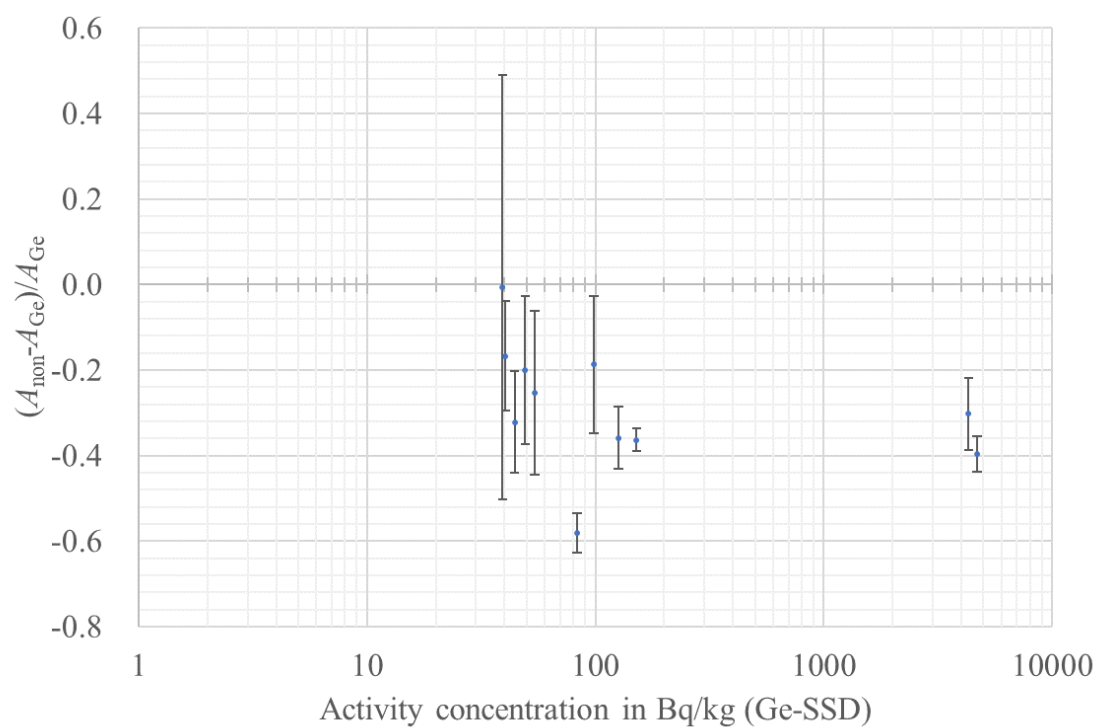


図 7 続き

カノシタ

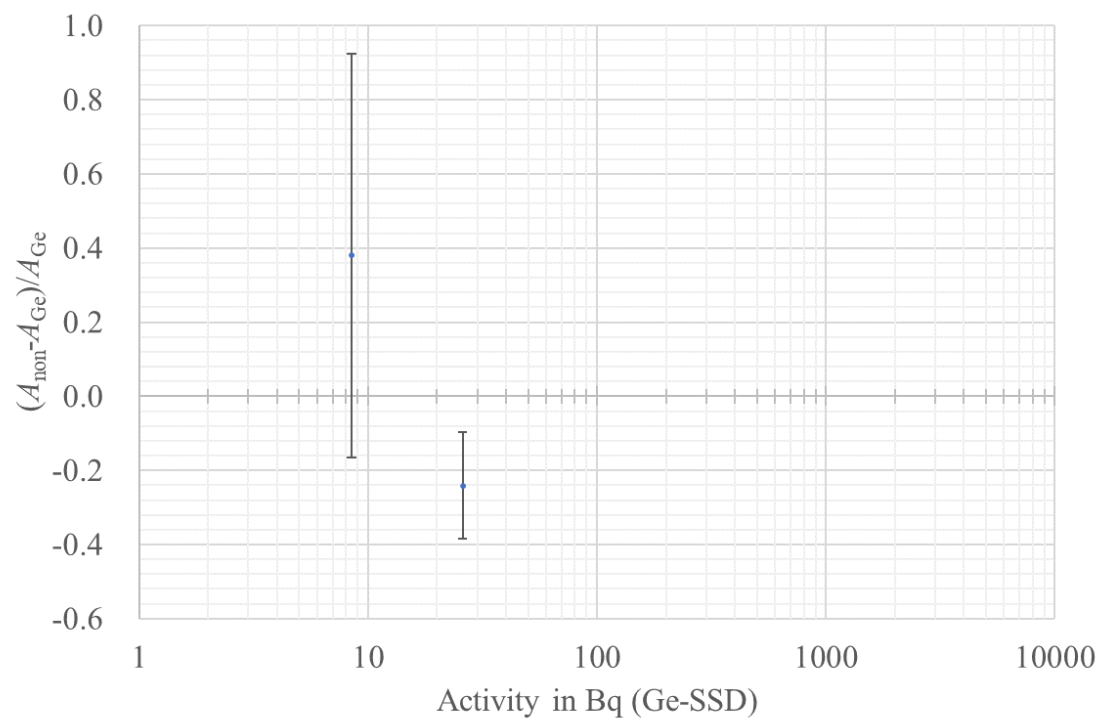
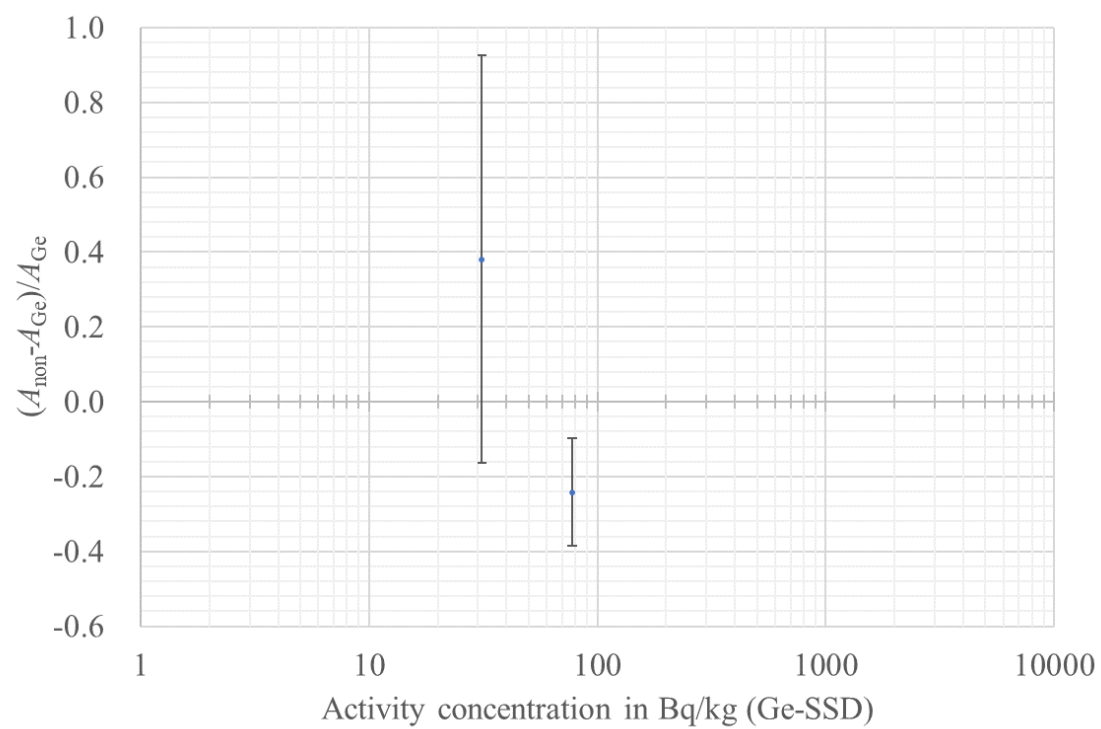


図 7 続き

カラストケ

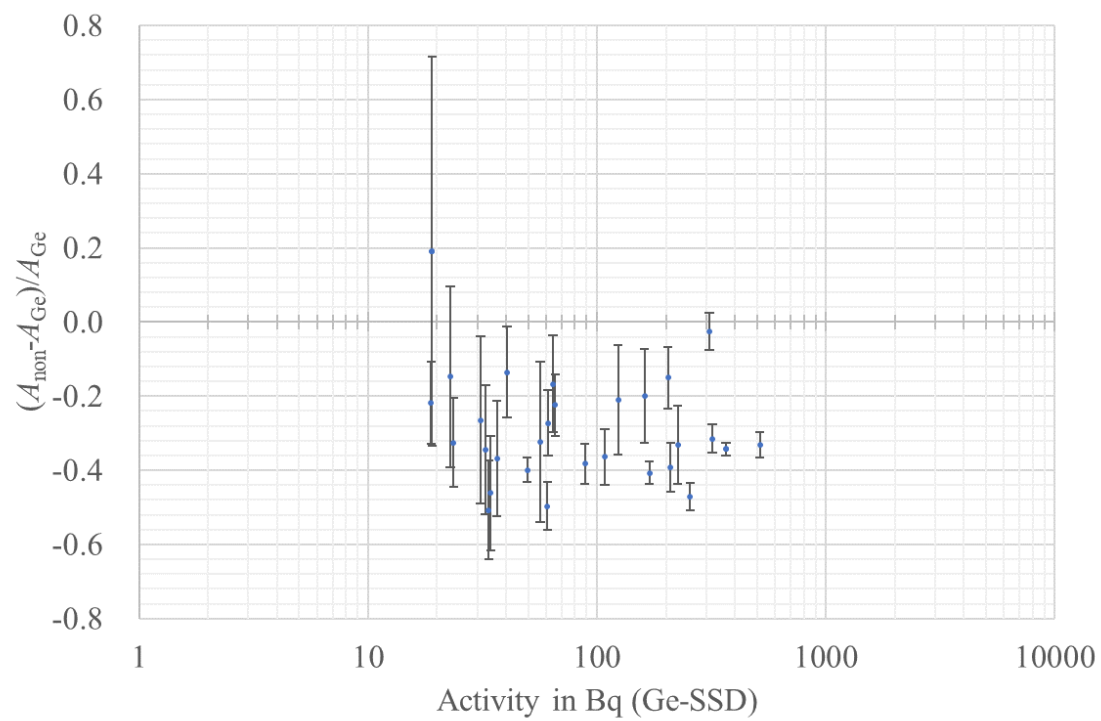
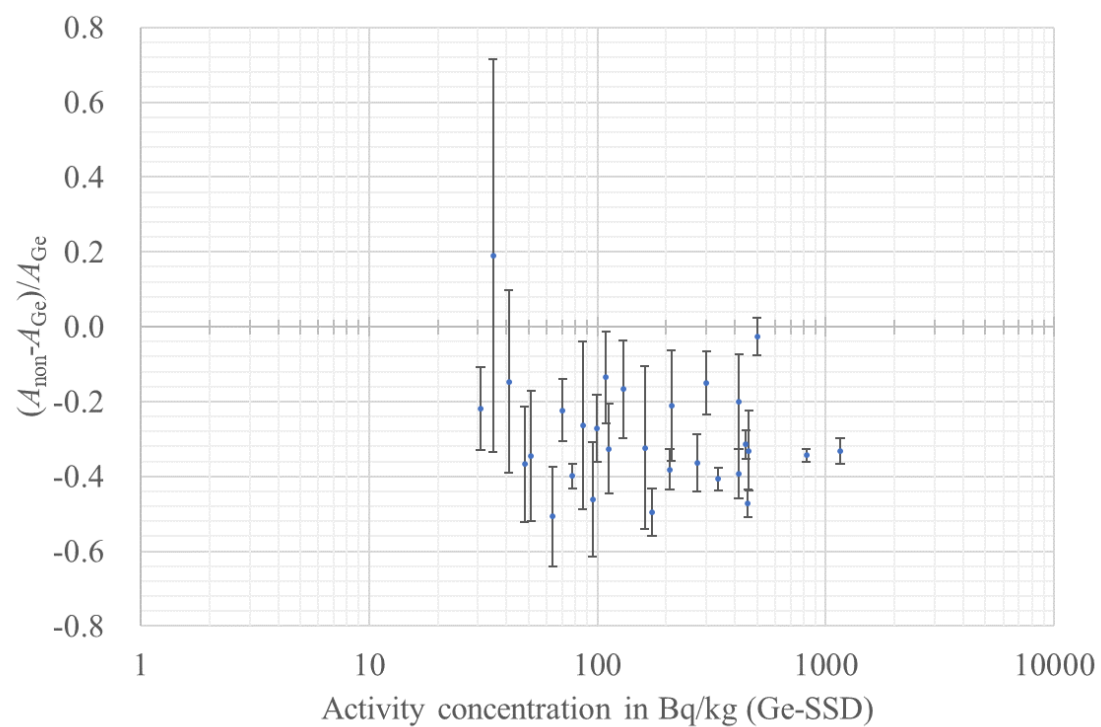


図 7 続き

カワムラフウセンタケ

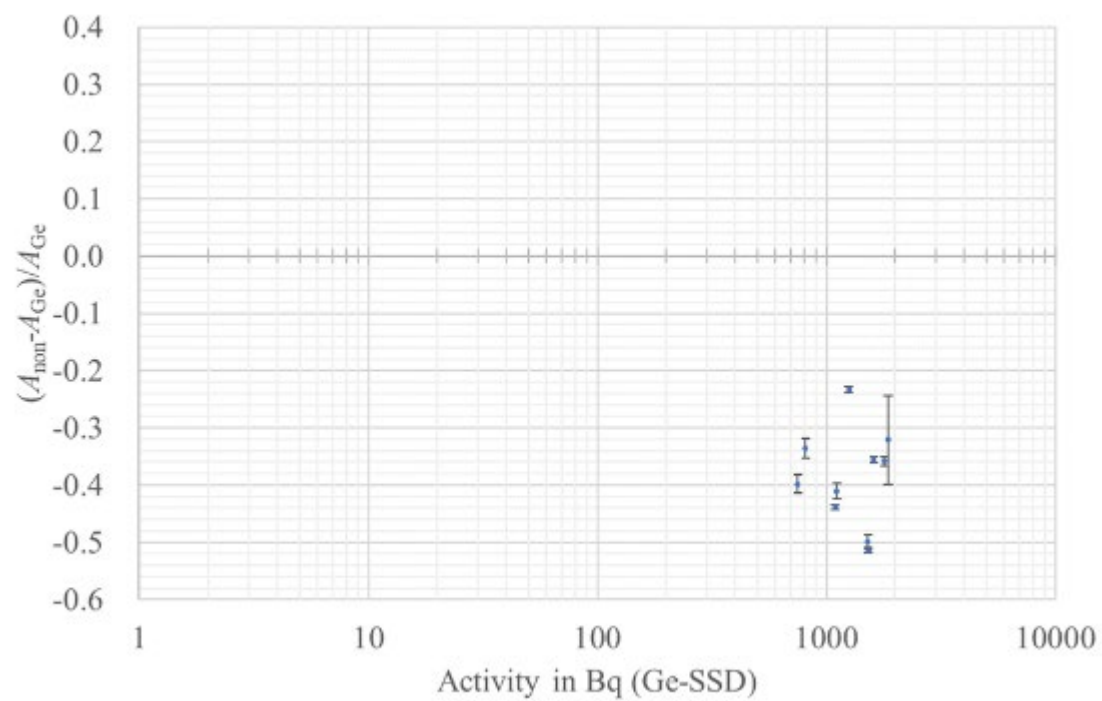
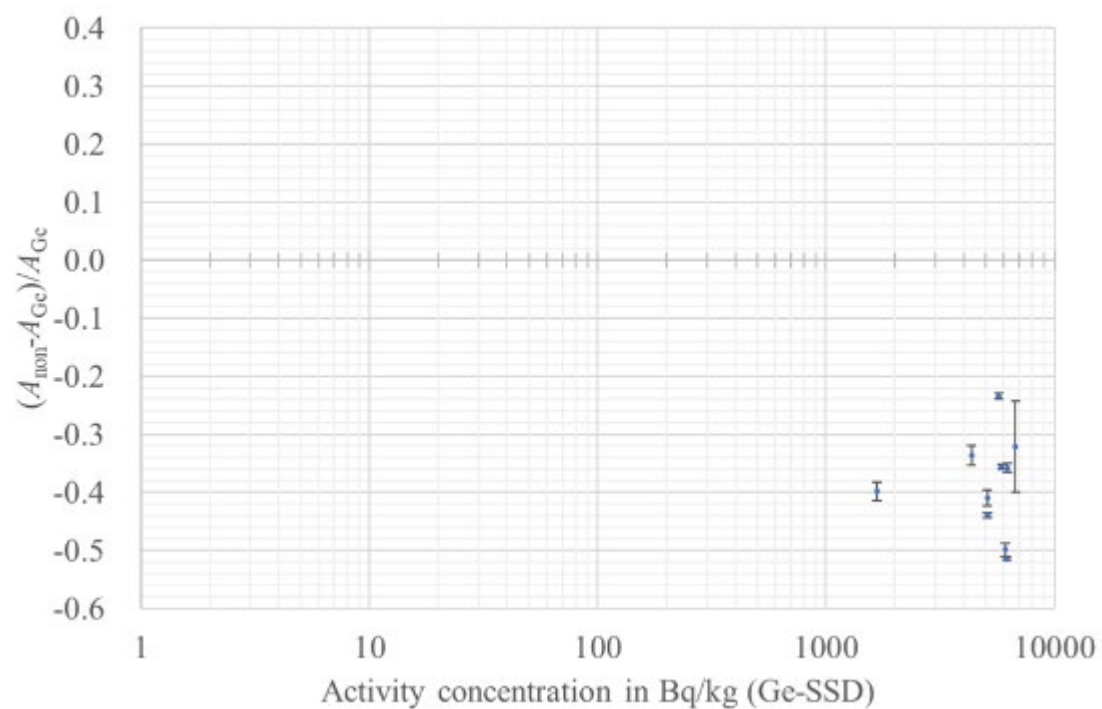


図 7 続き

クサソテツ

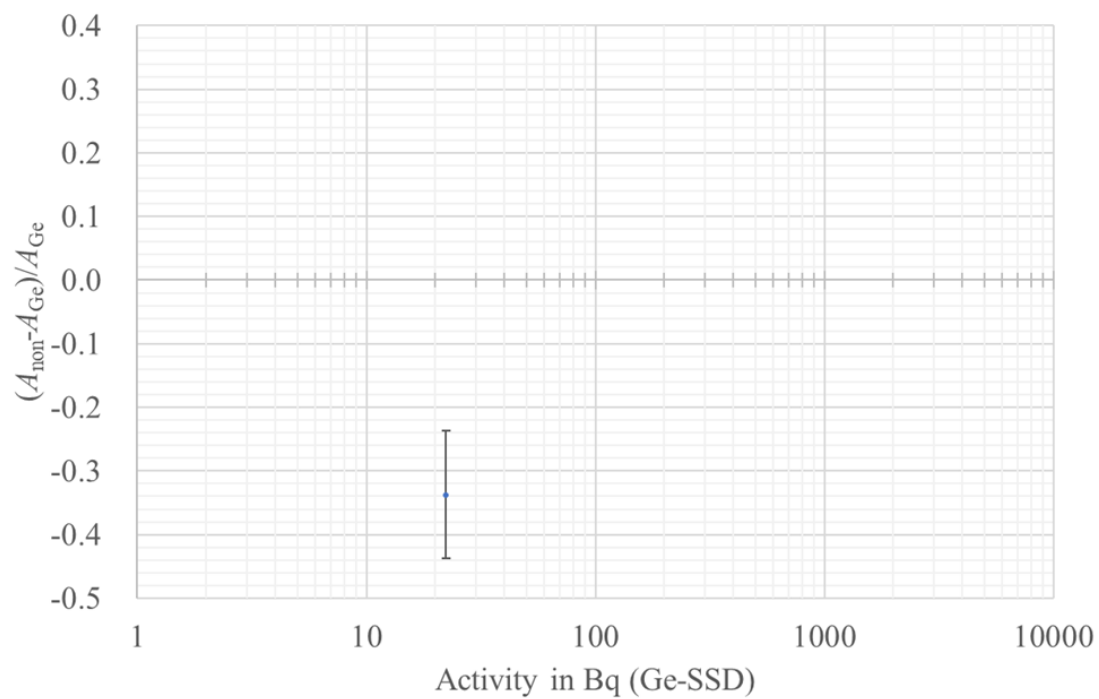
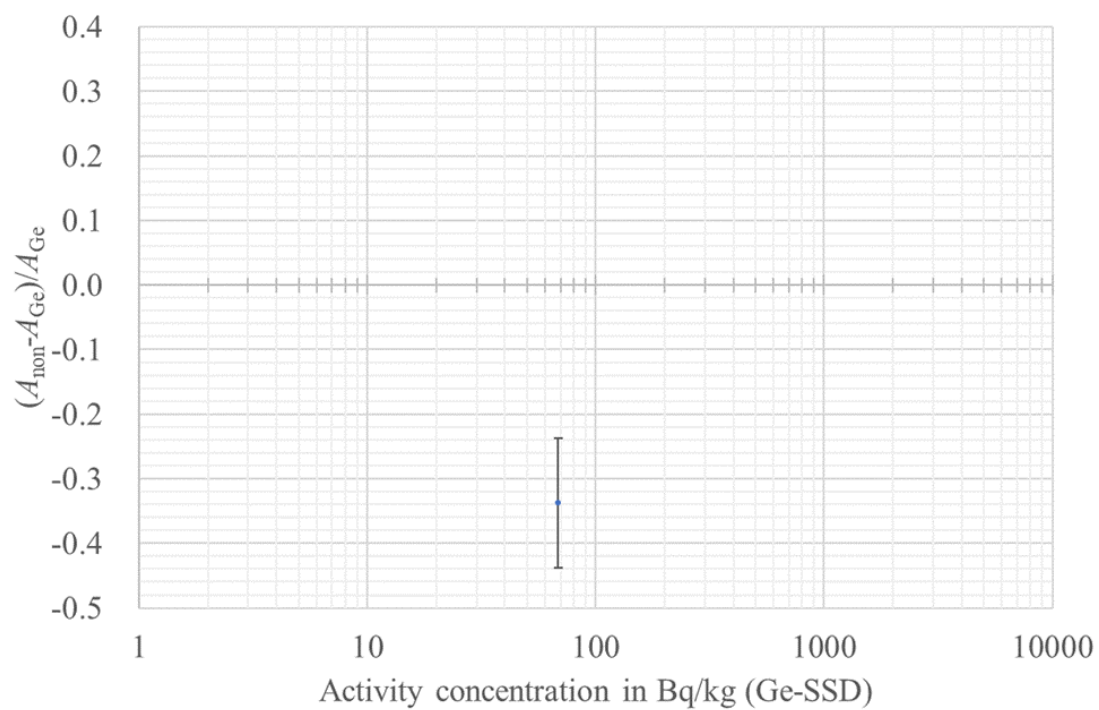


図 7 続き

クリタケ

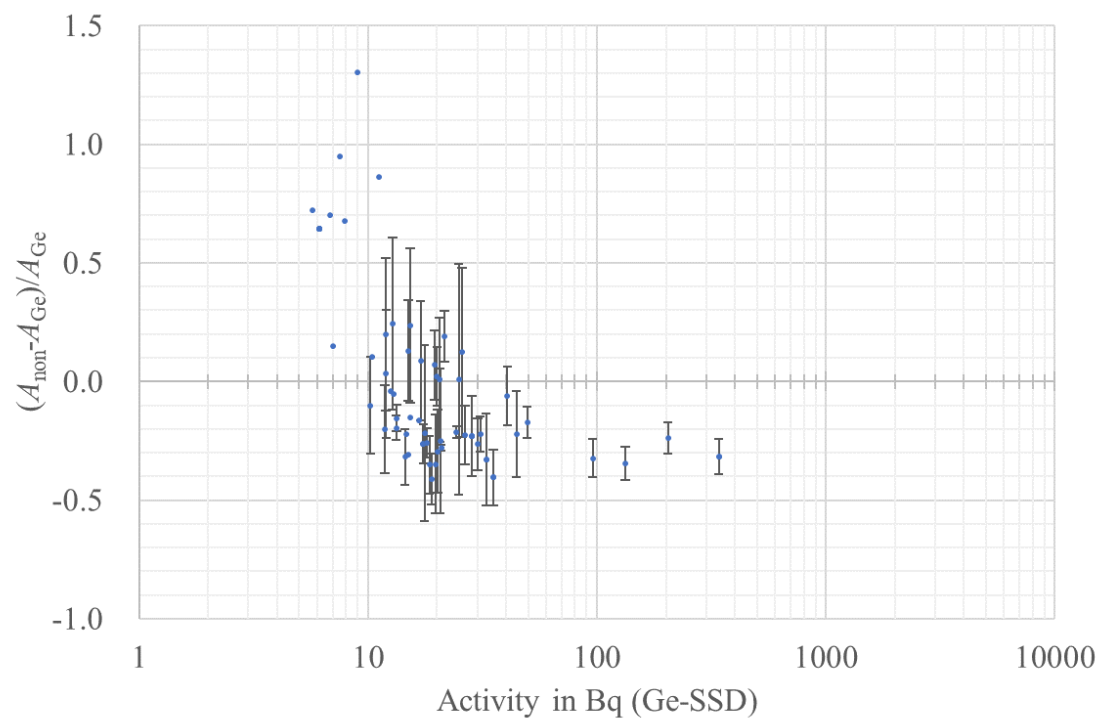
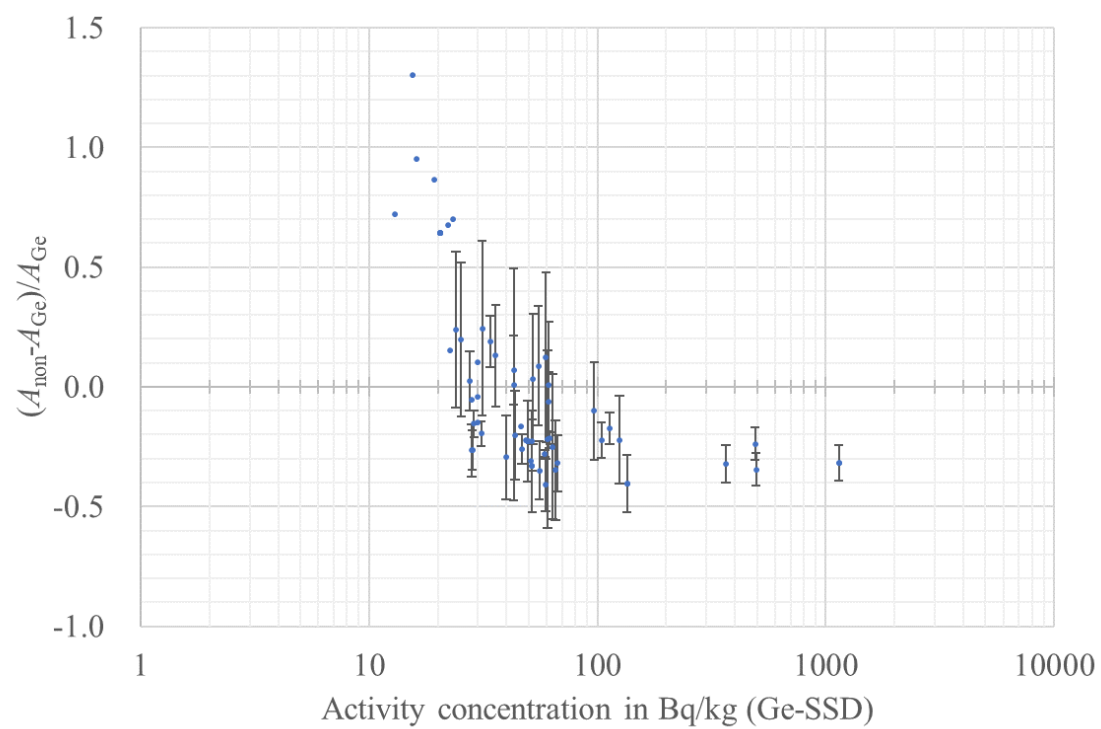


図 7 続き

クロカワ

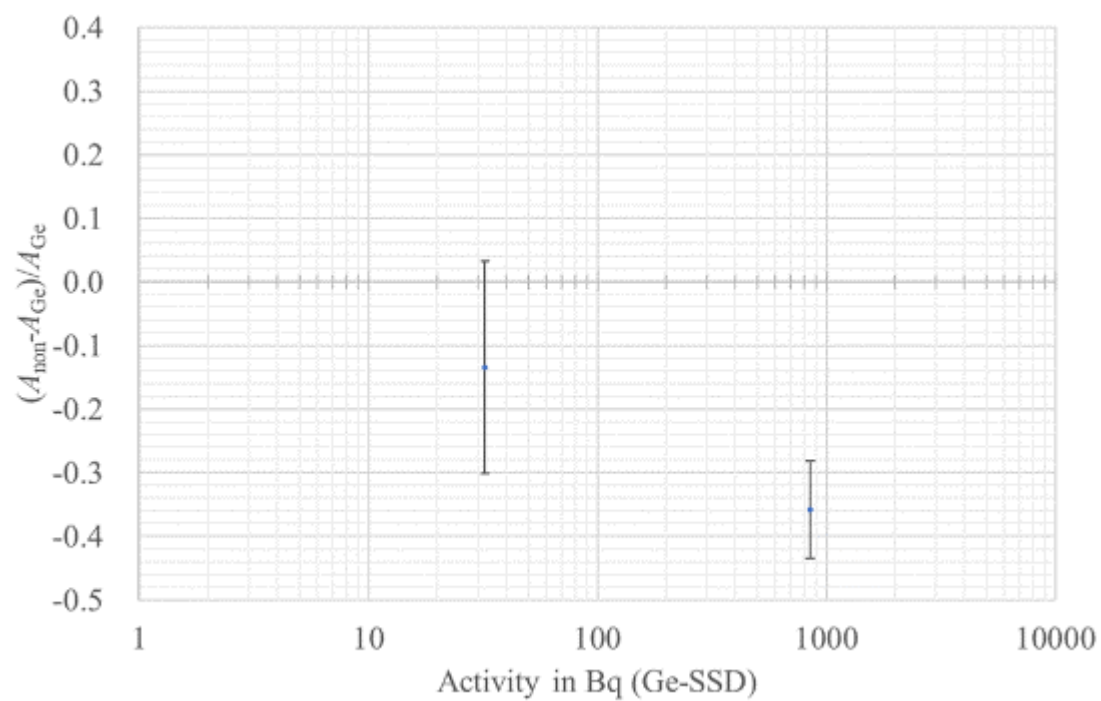
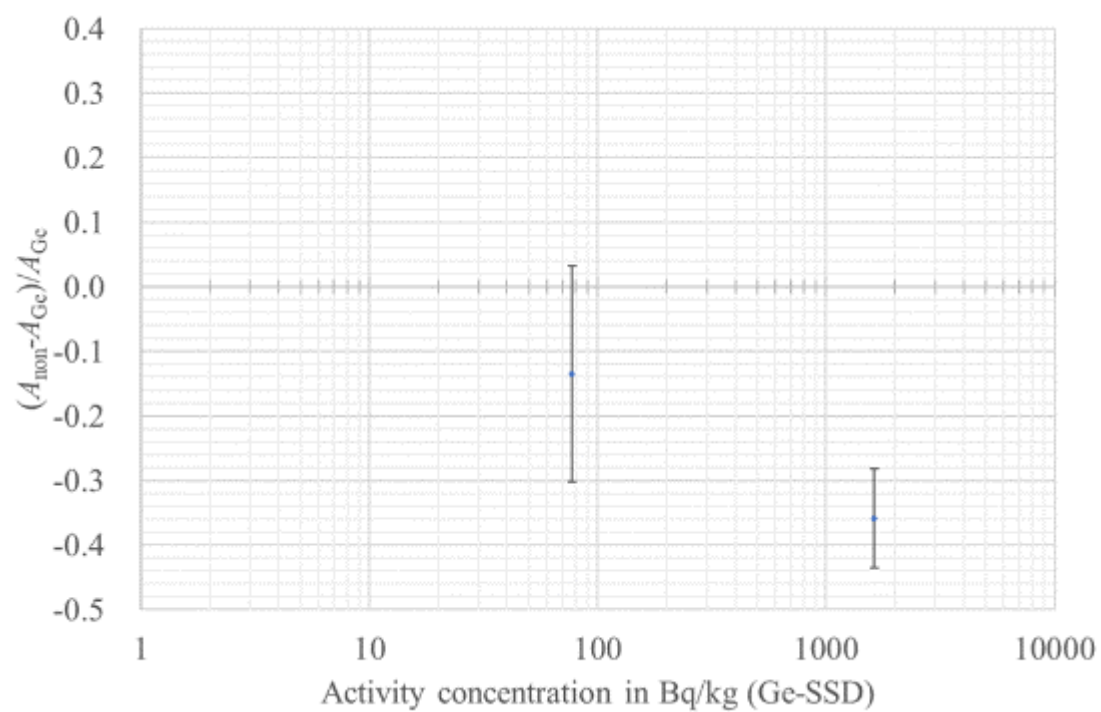


図 7 続き

原木マイタケ

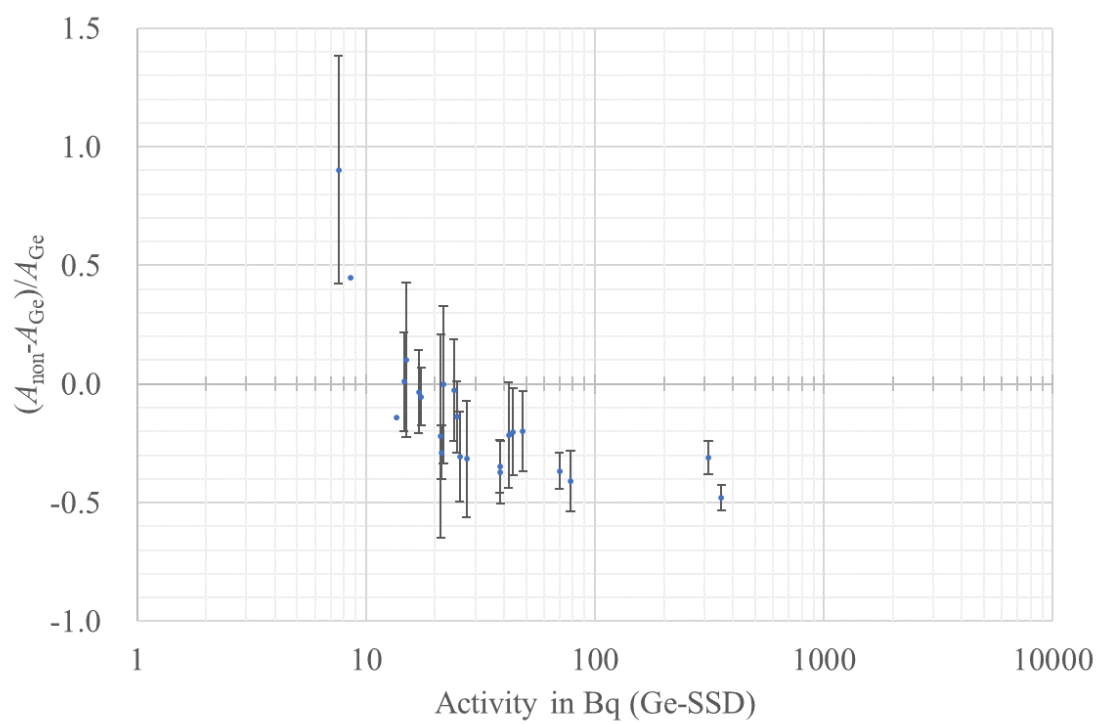
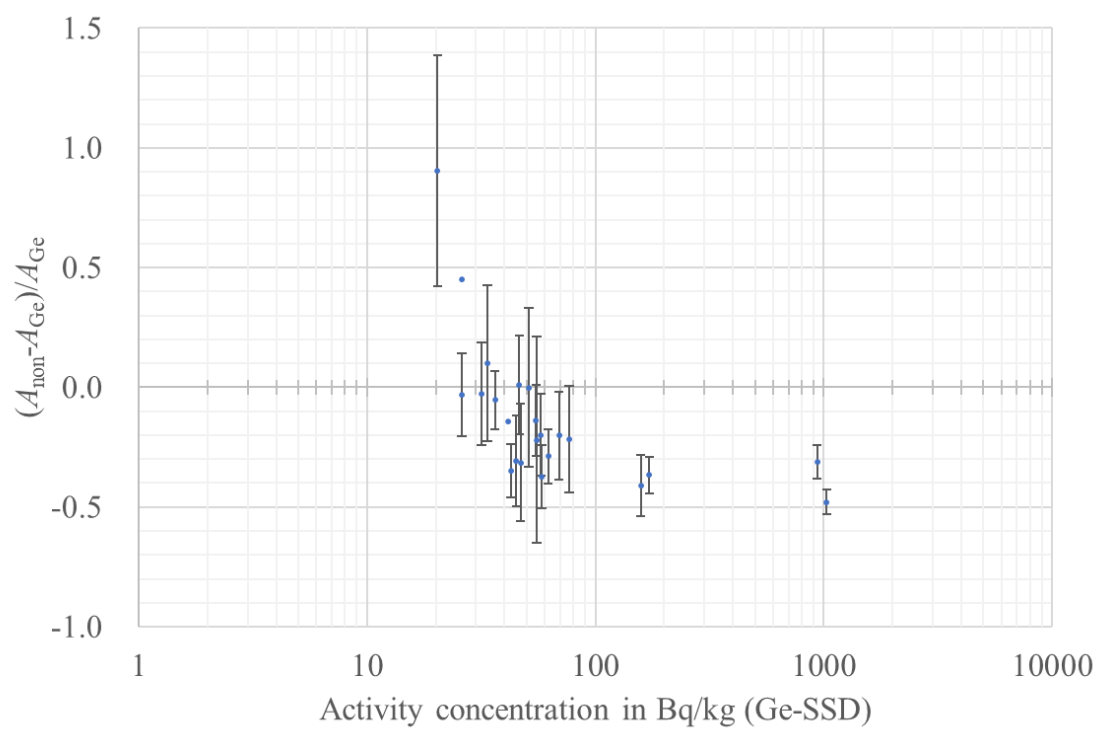


図 7 続き

コウタケ

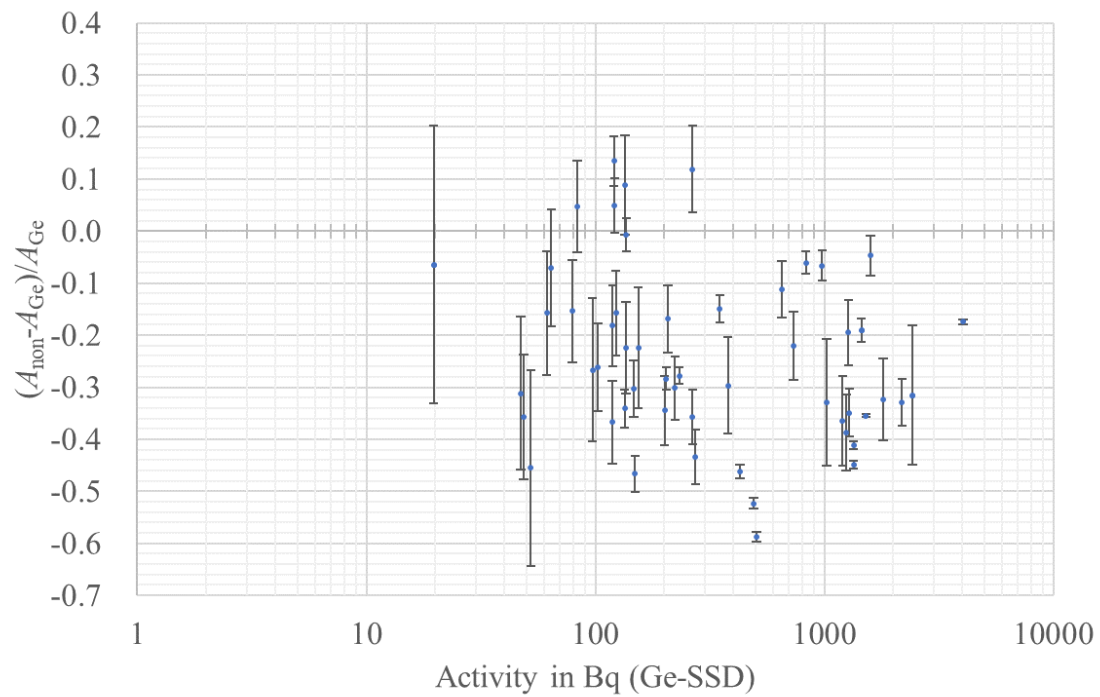
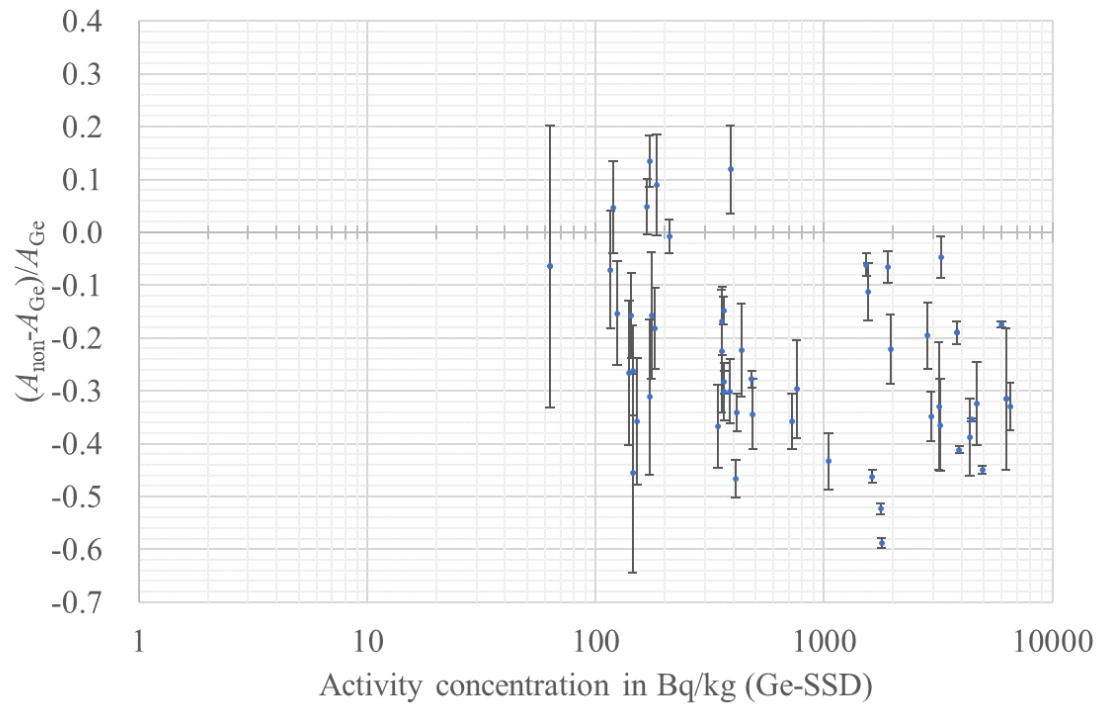


図 7 続き

コガネタケ

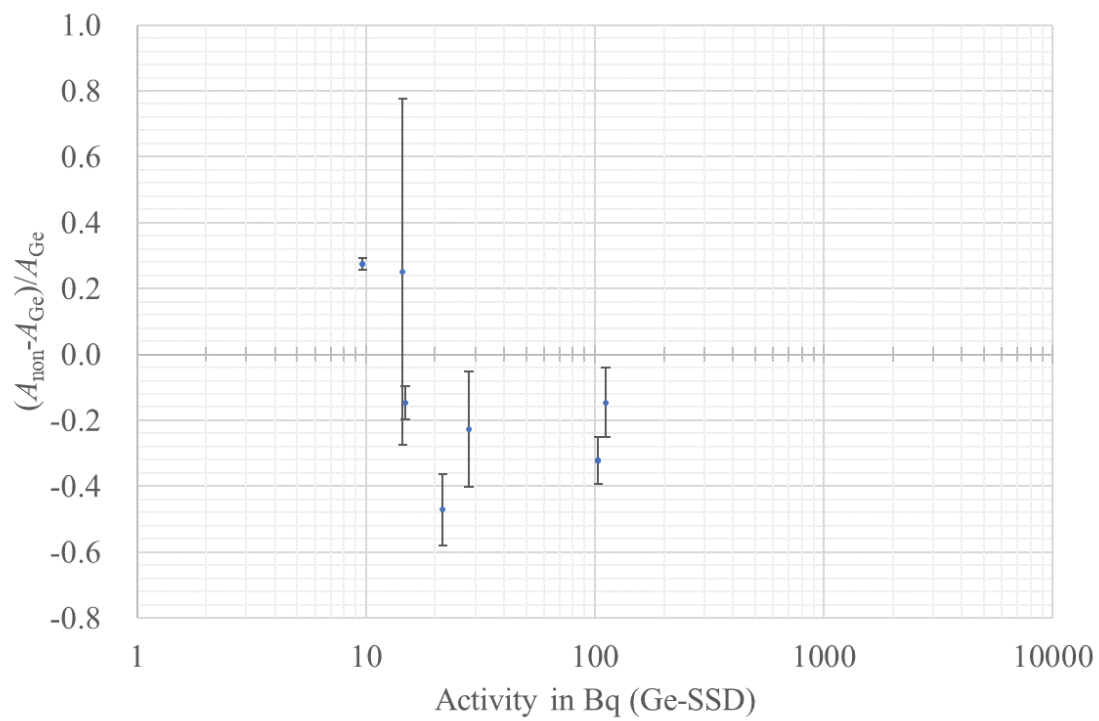
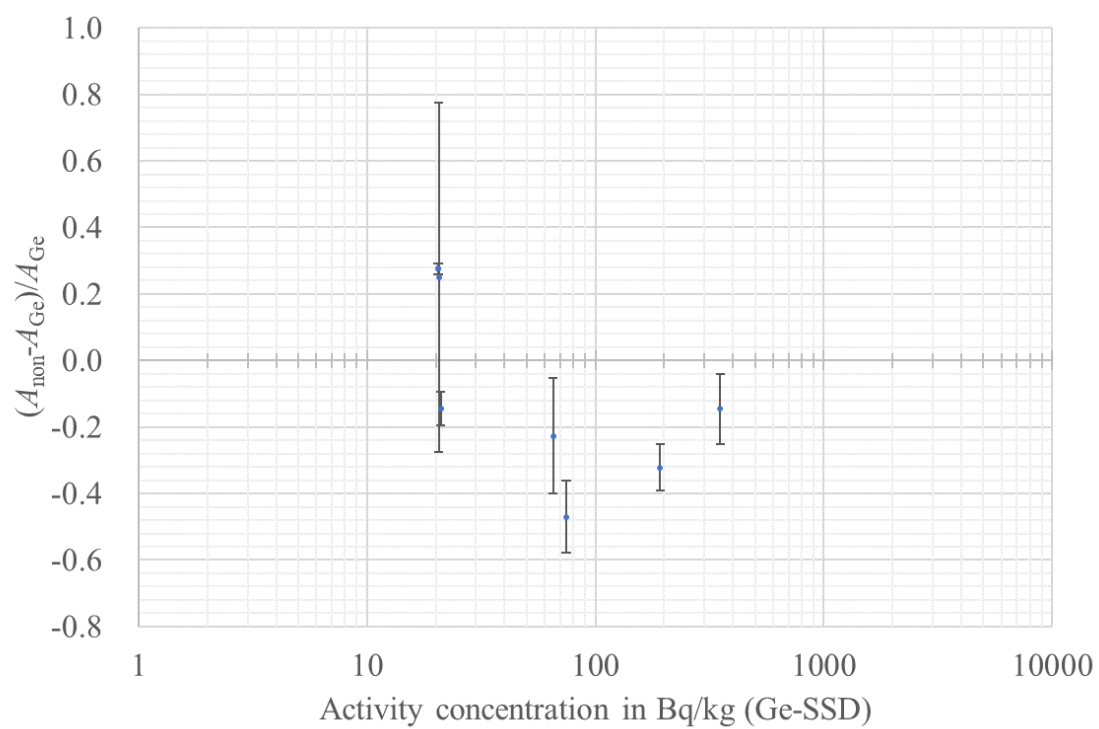


図 7 続き

コシアブラ

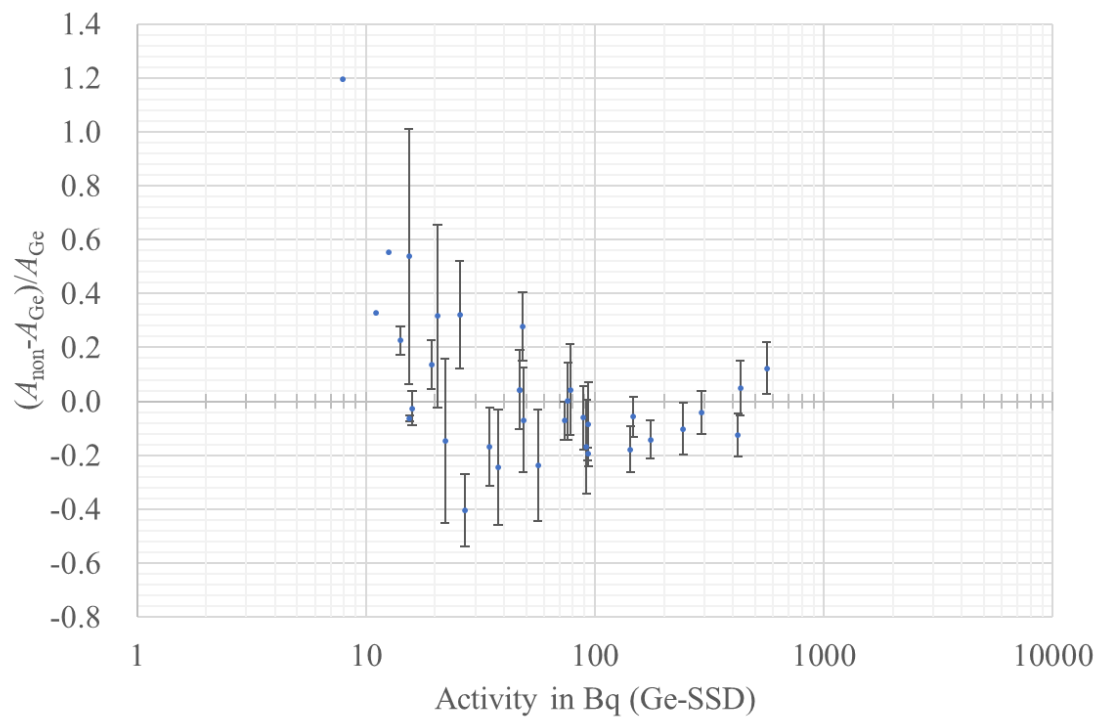
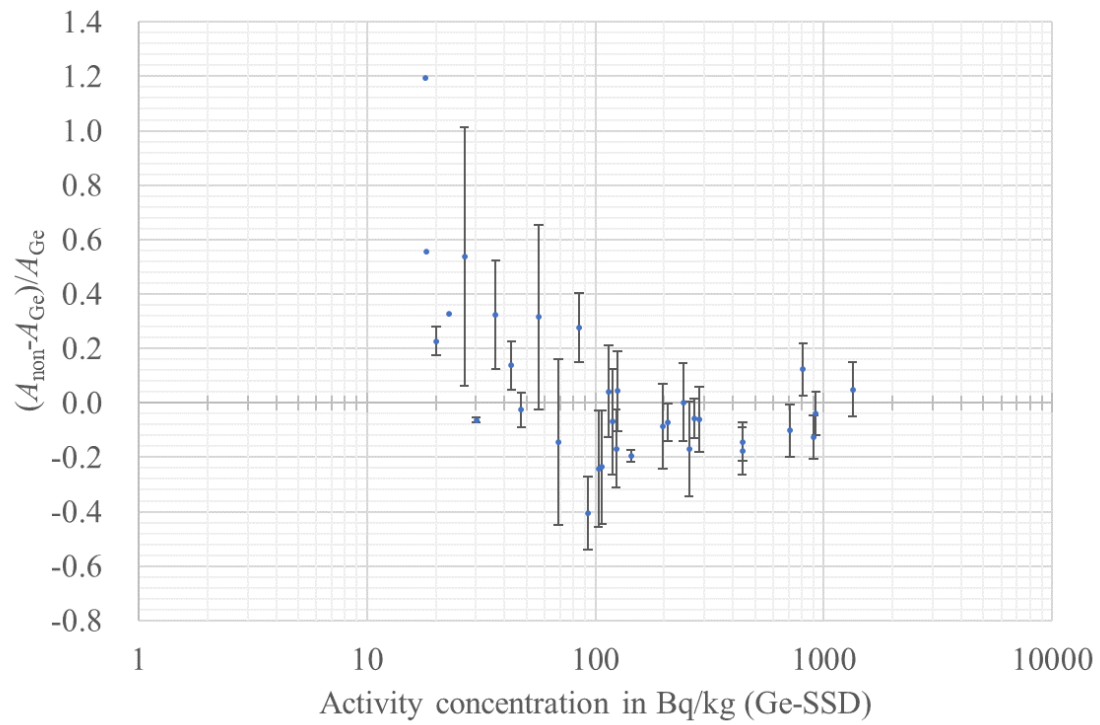


図 7 続き

コムラサキシメジ

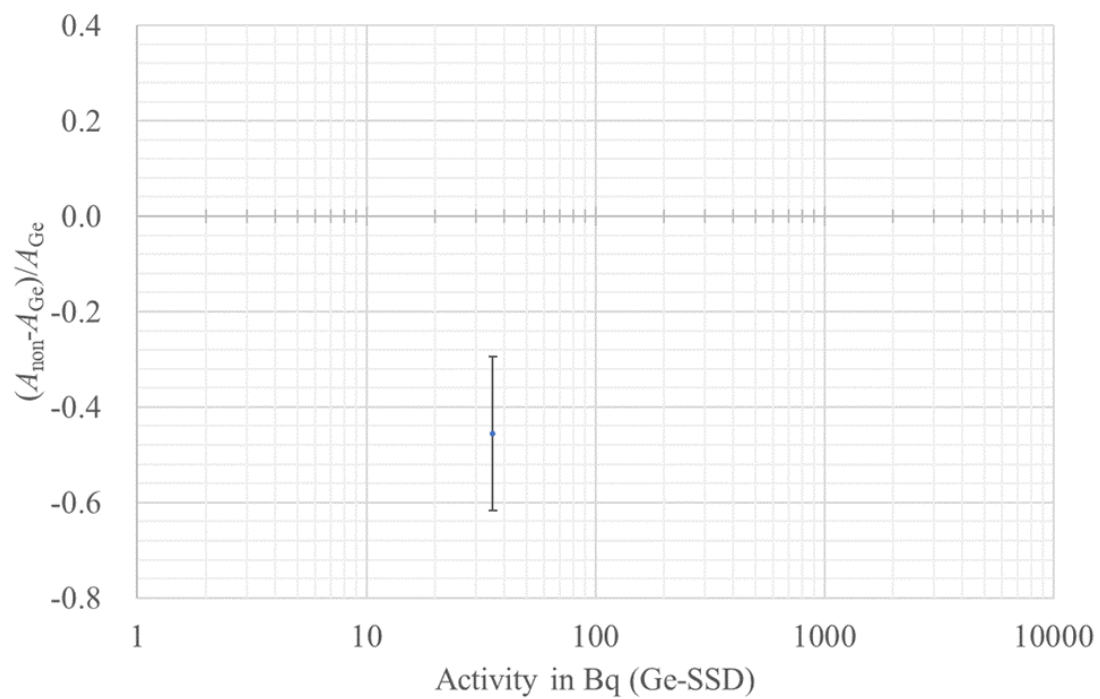
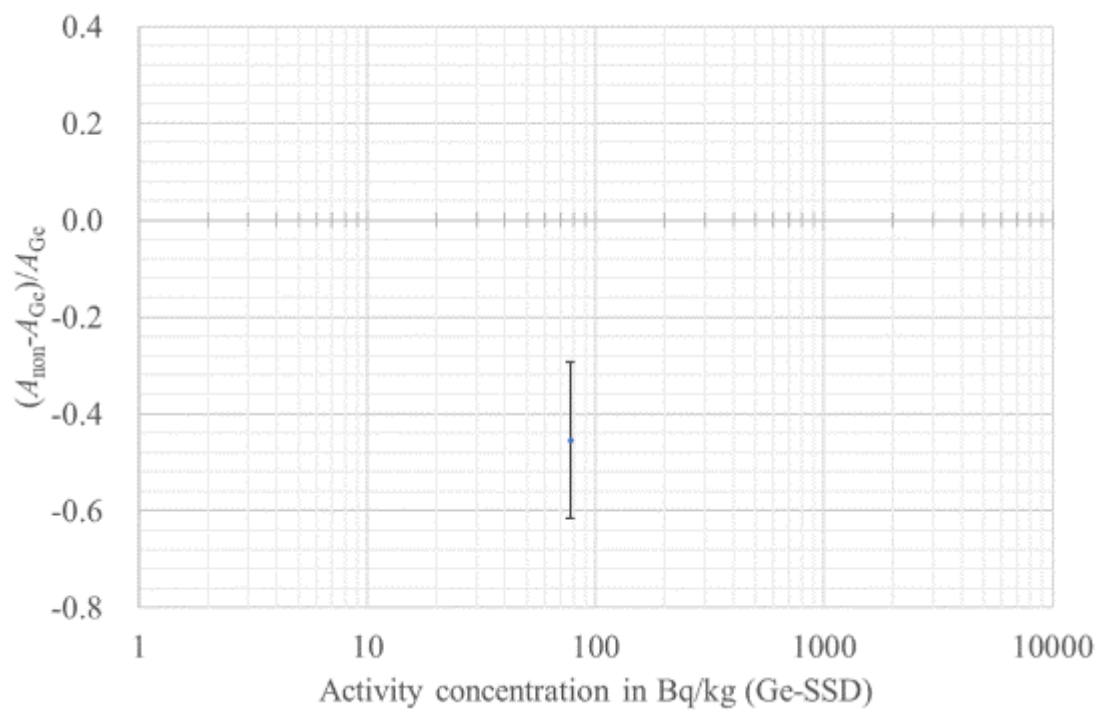


図 7 続き

サクラシメジ

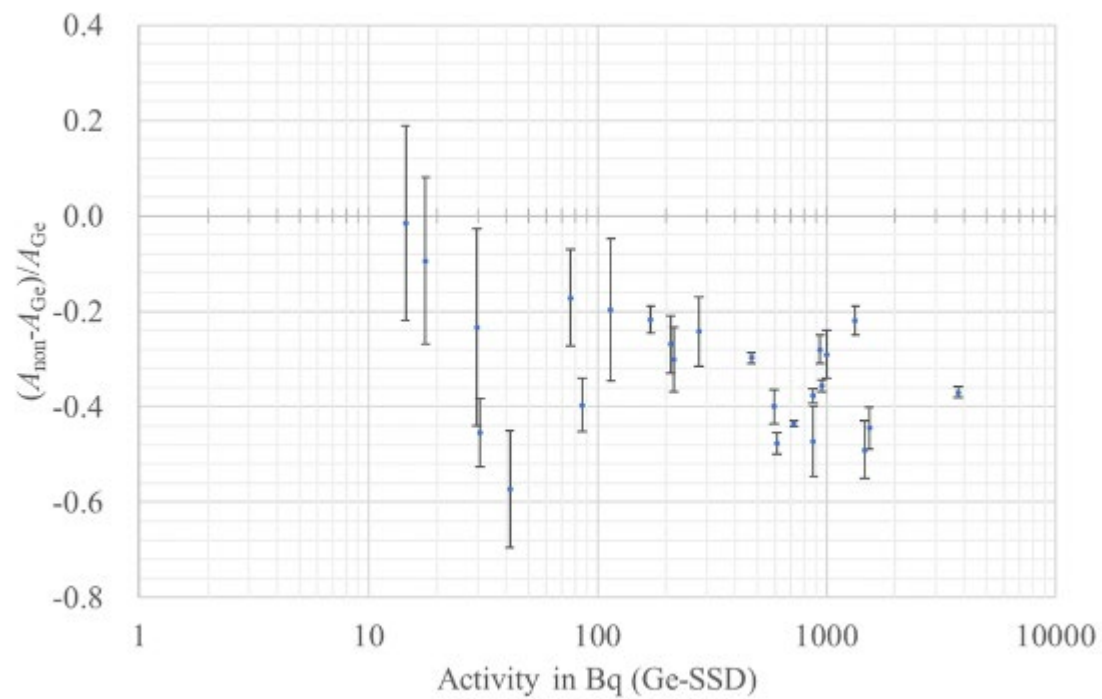
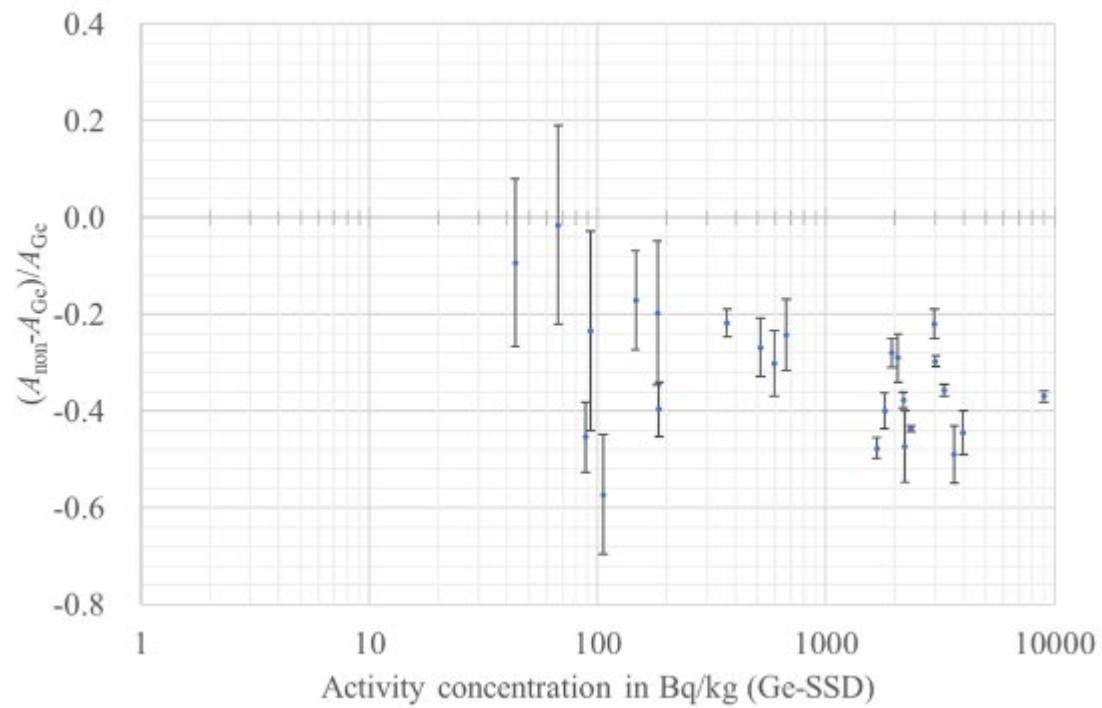


図 7 続き

サケツバタケ

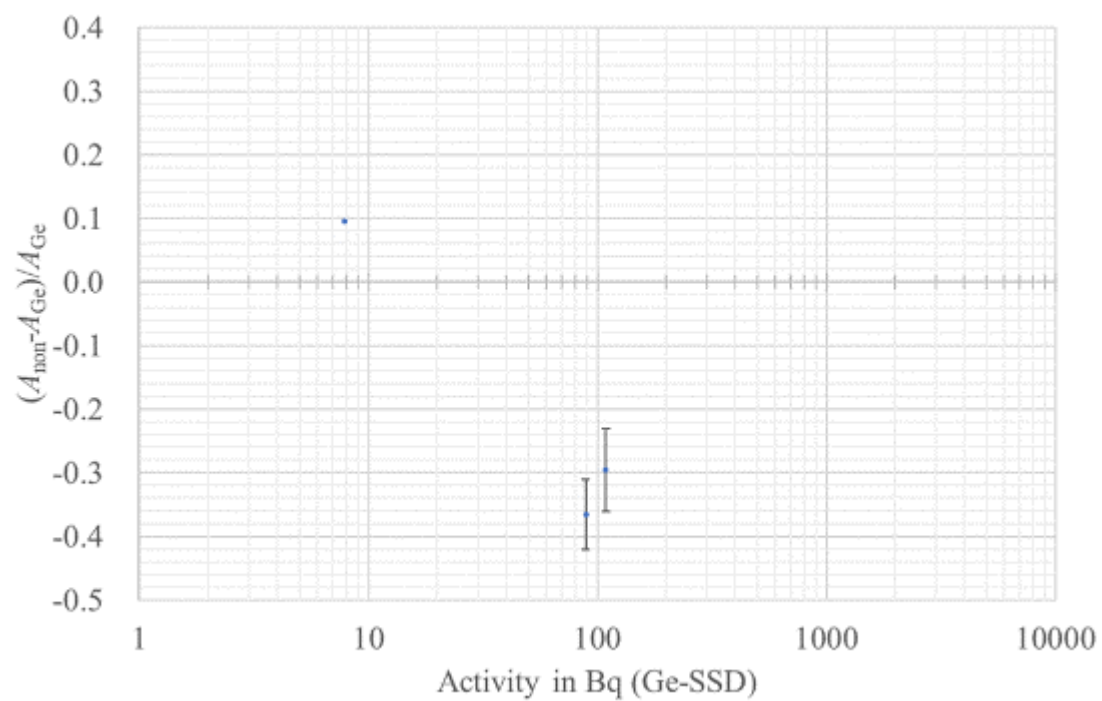
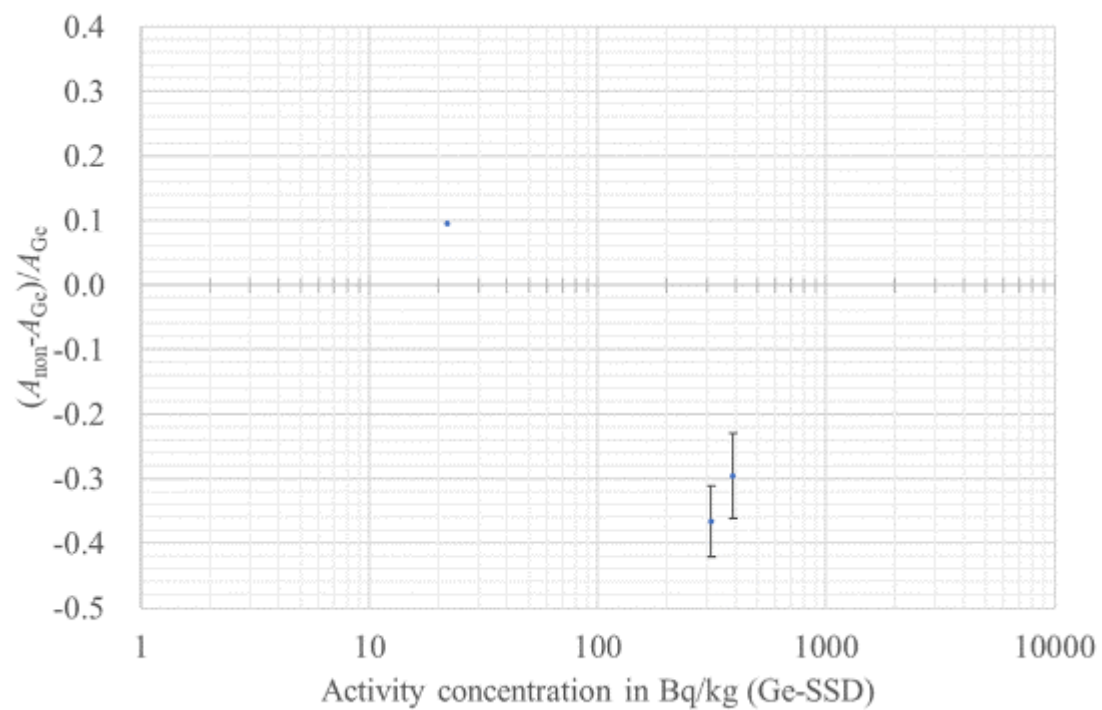


図 7 続き

シモフリシメジ

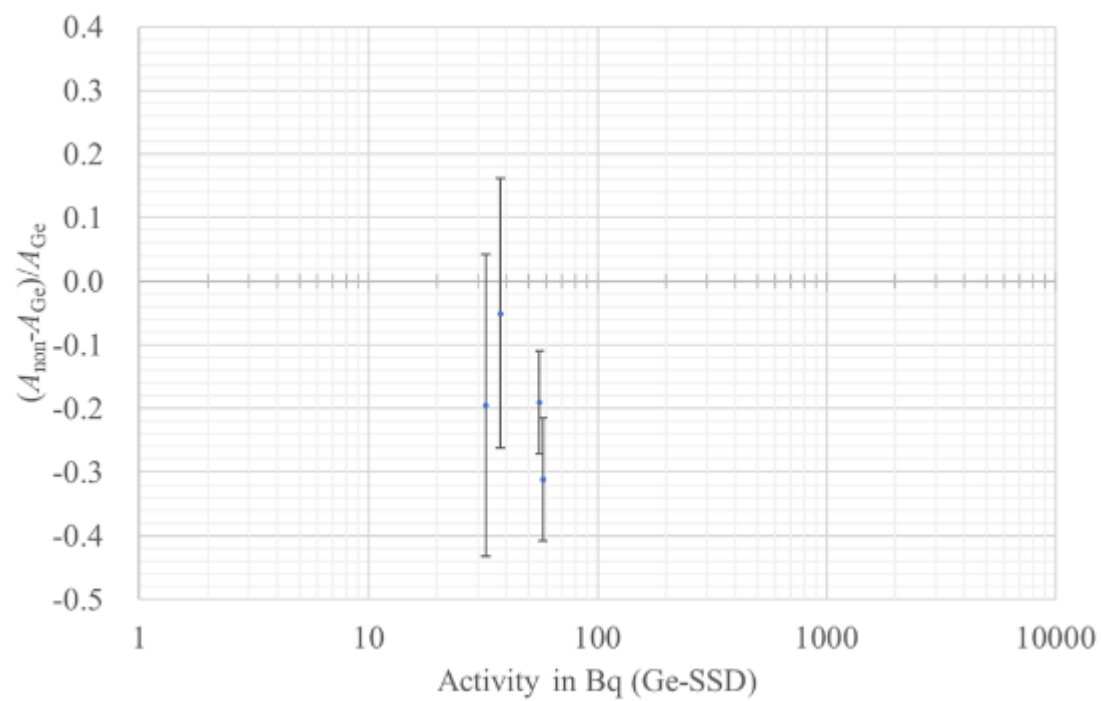
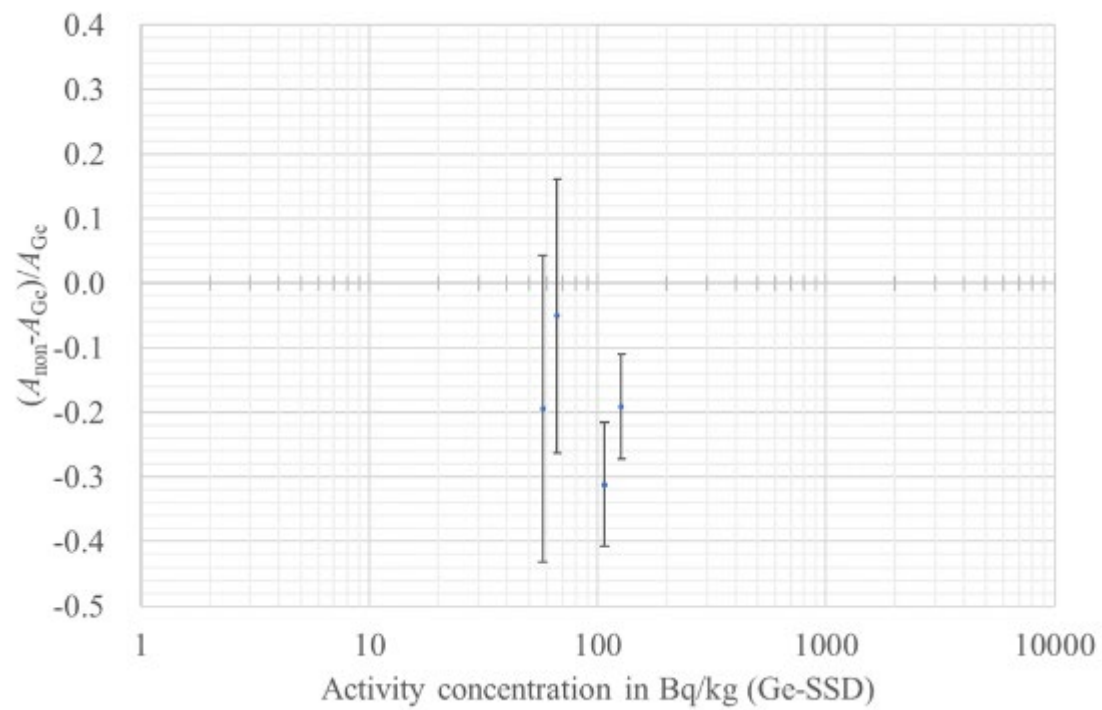


図 7 続き

シャカシメジ

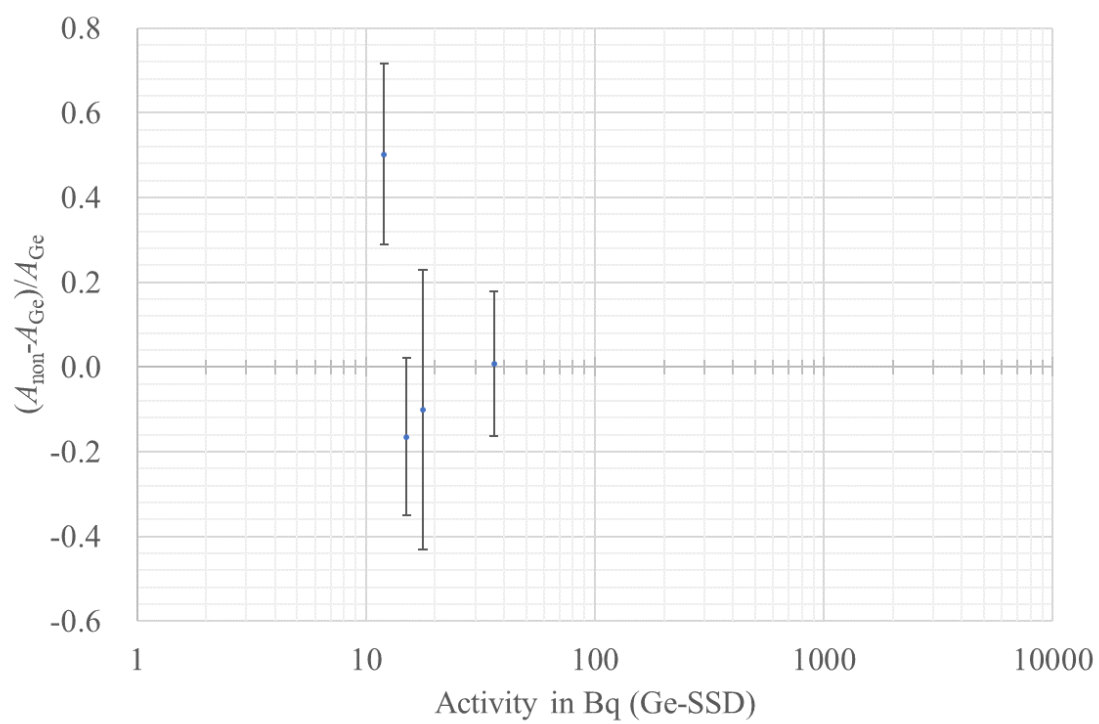
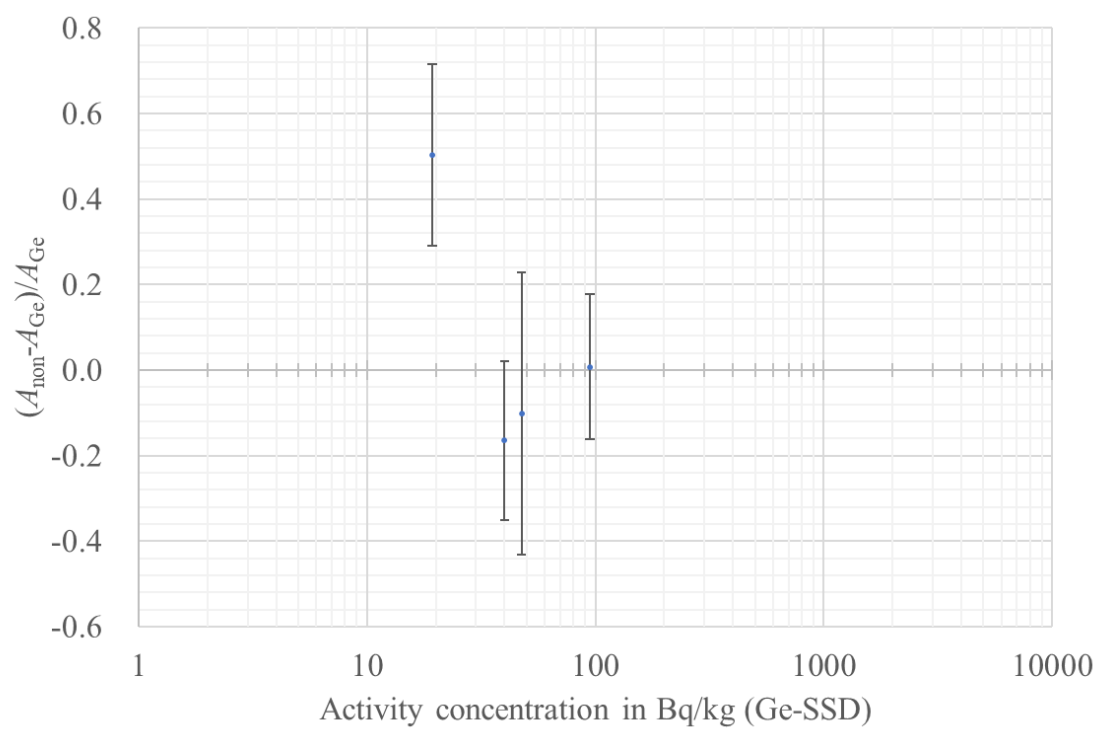


図 7 続き

シロアンズタケ

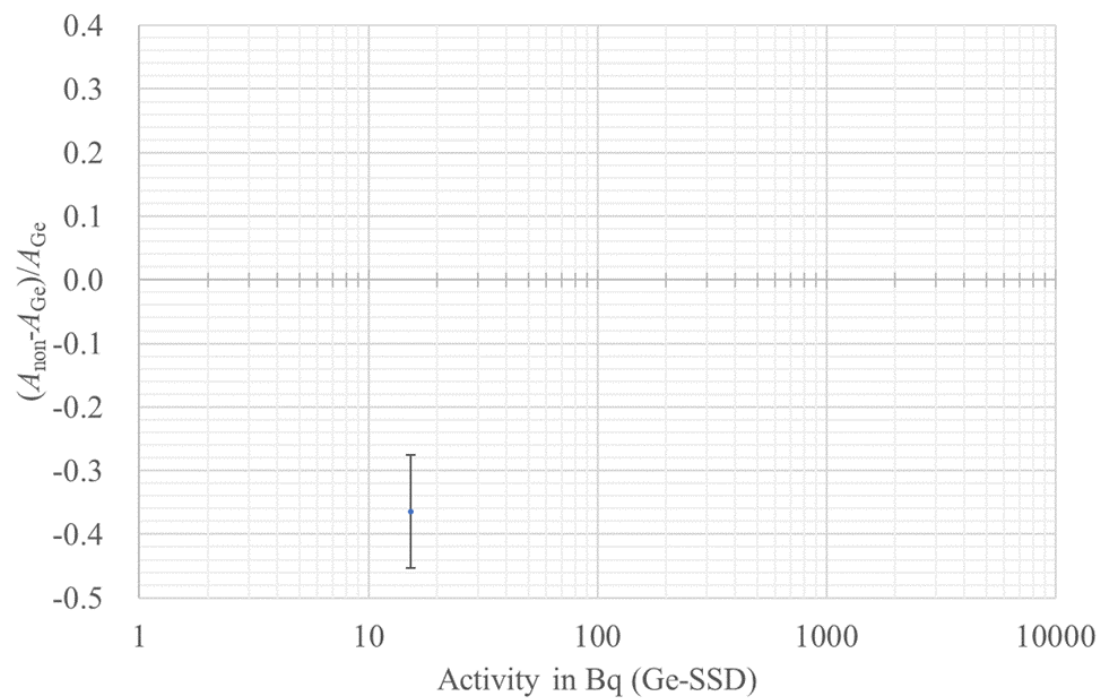
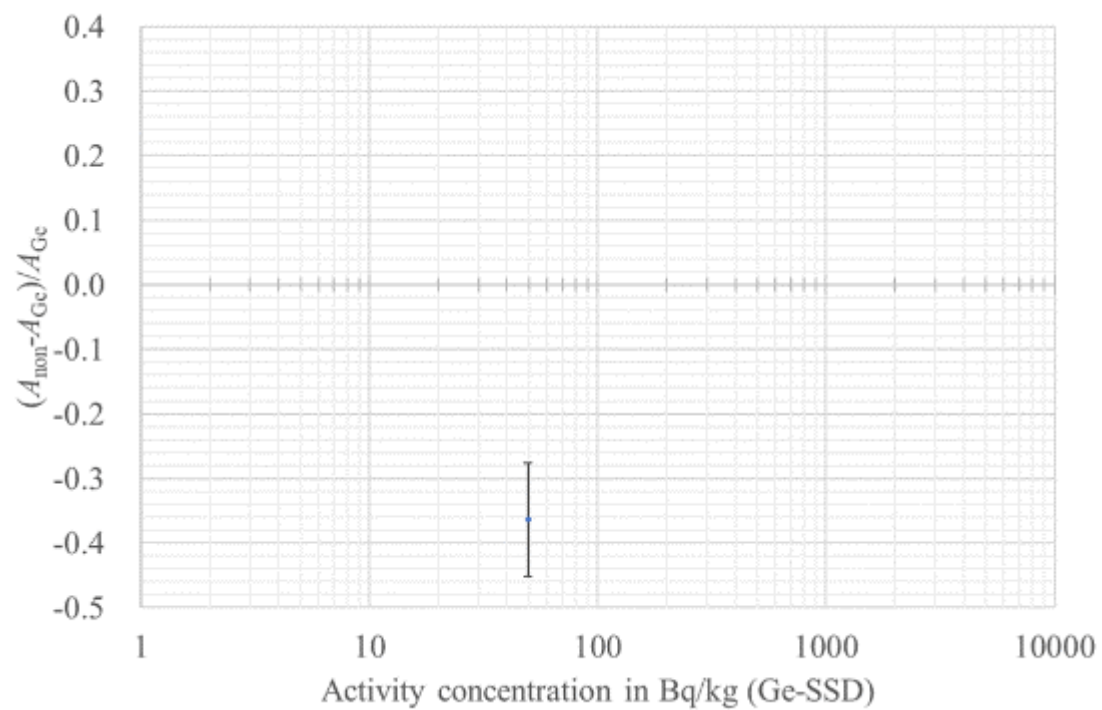


図 7 続き

シロシメジ

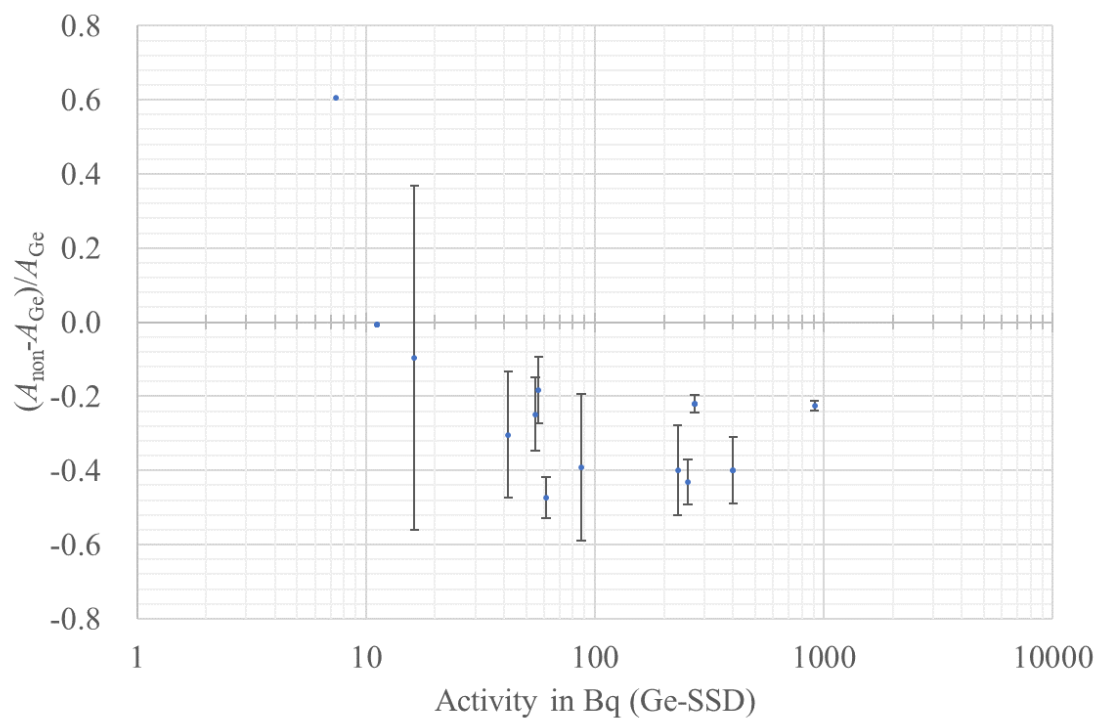
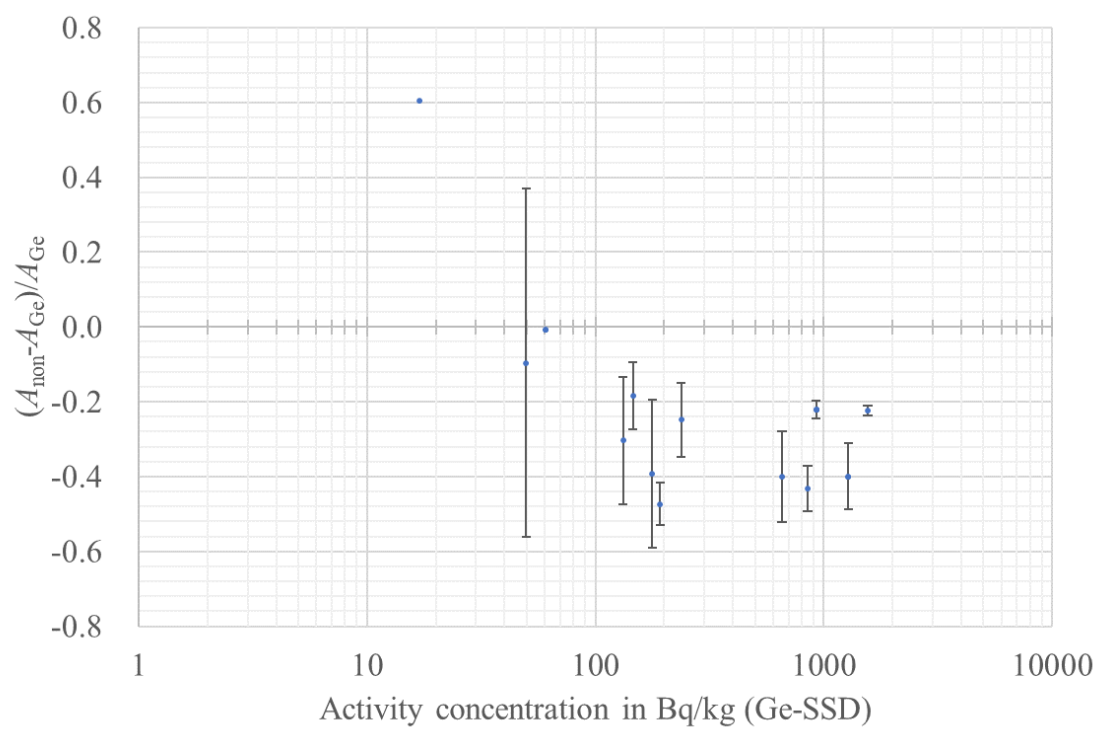


図 7 続き

シロヌメリイグチ

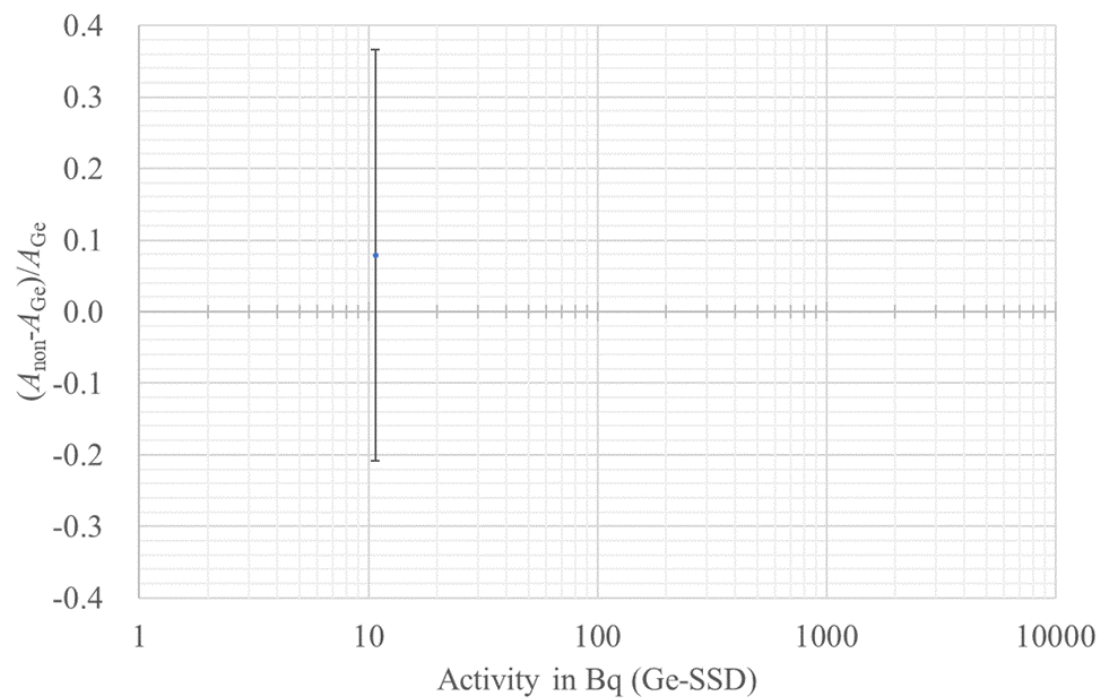
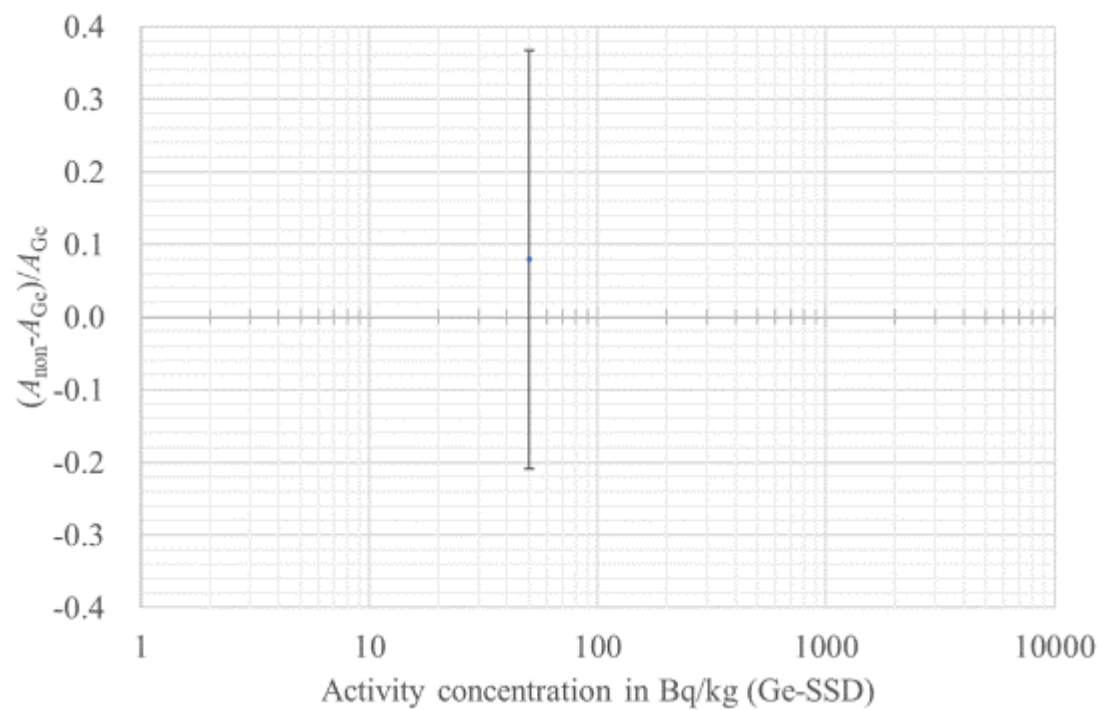


図 7 続き

シロハツ

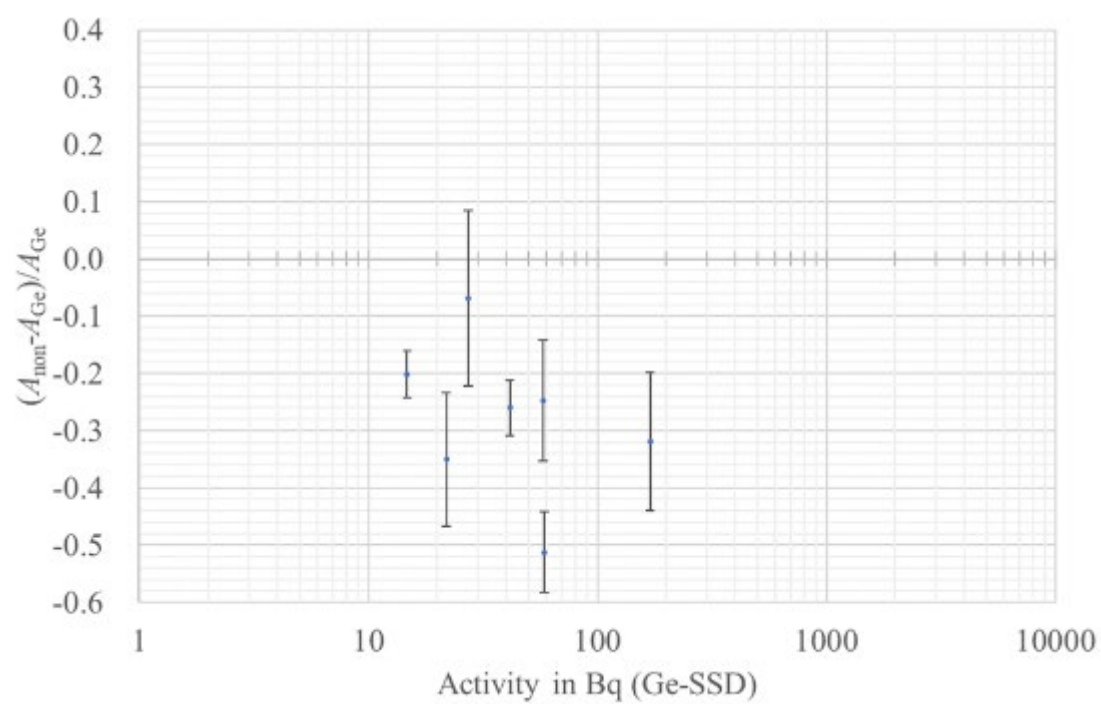
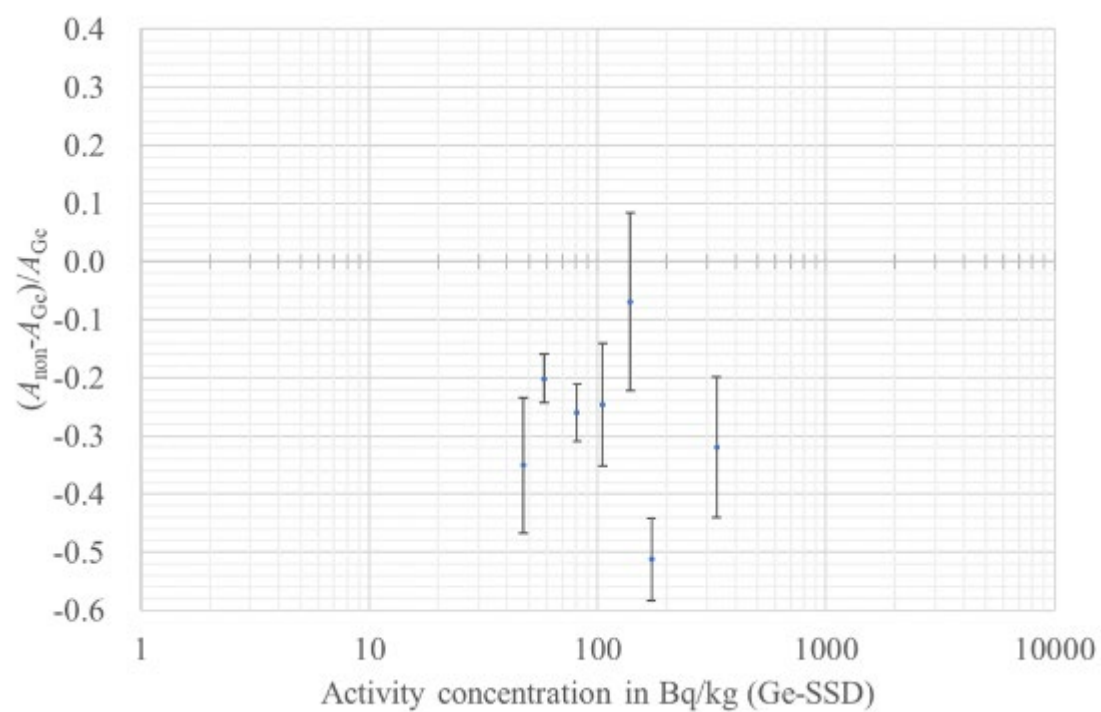


図 7 続き

スギタケ

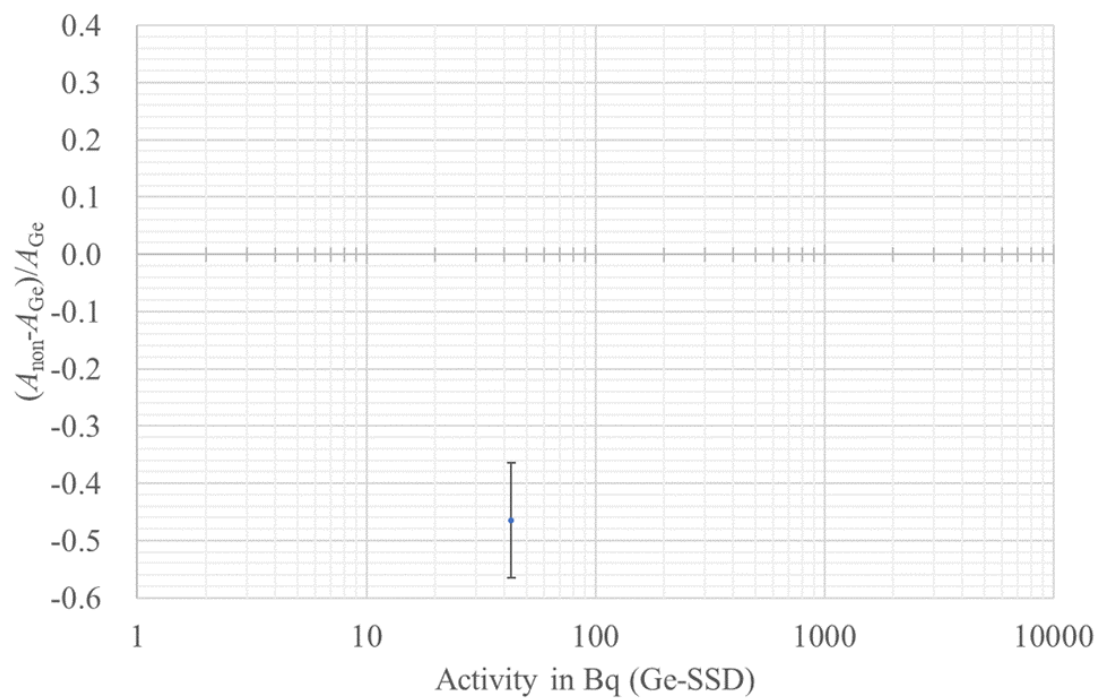
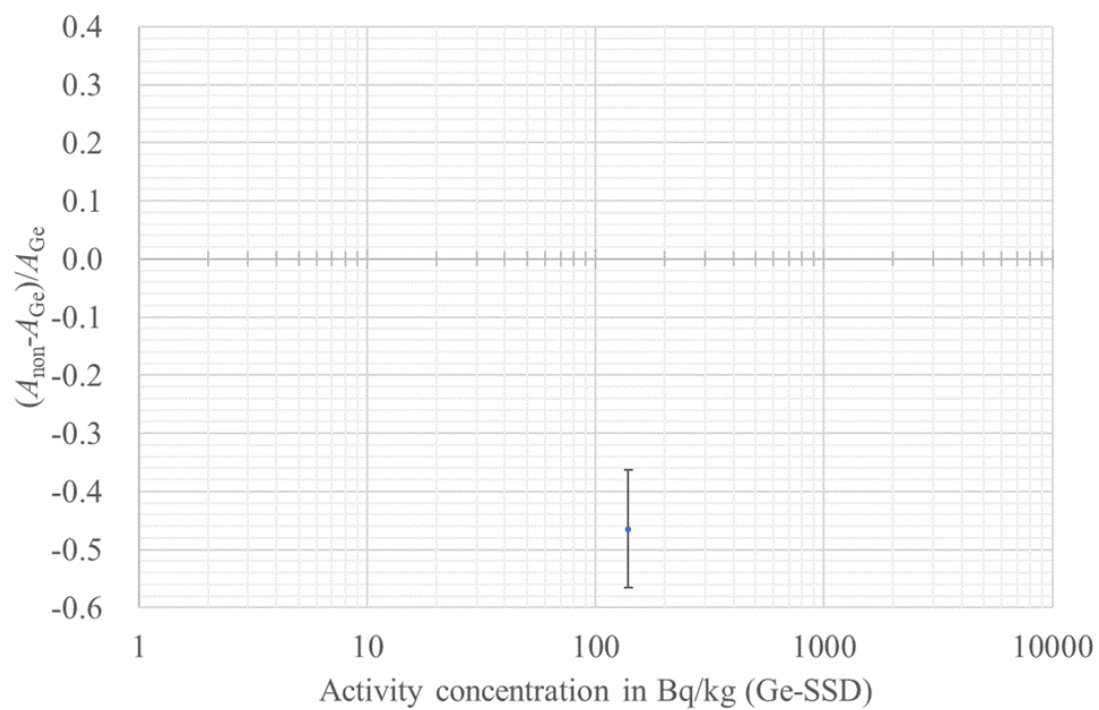


図 7 続き

タケノコ淡竹

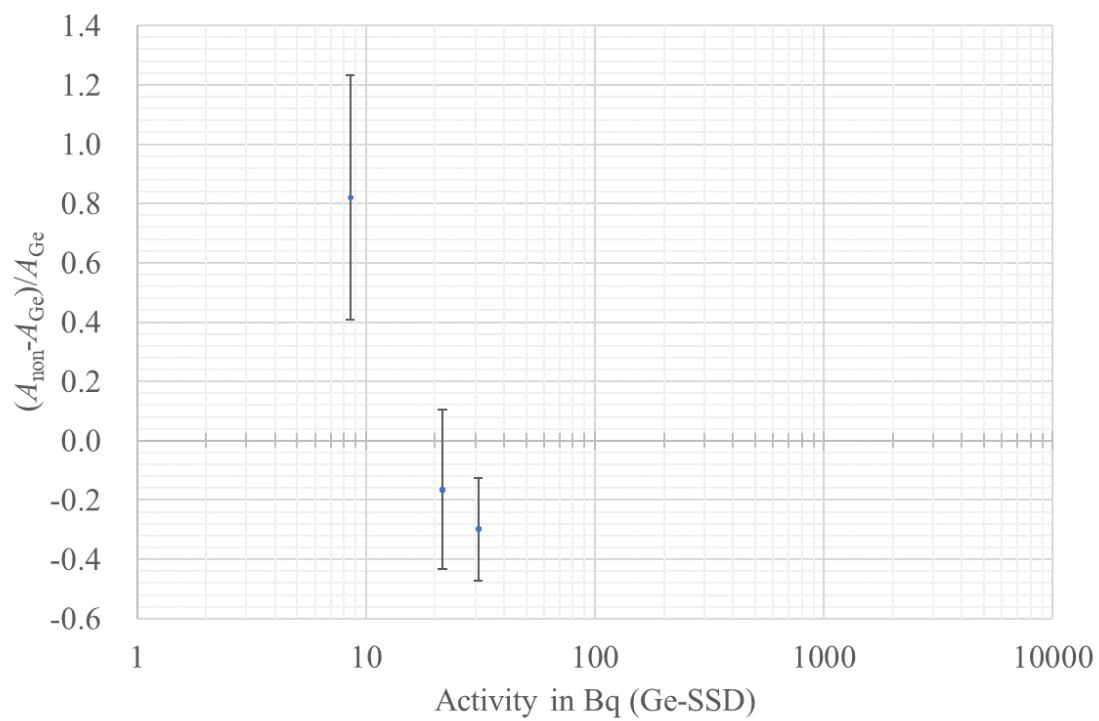
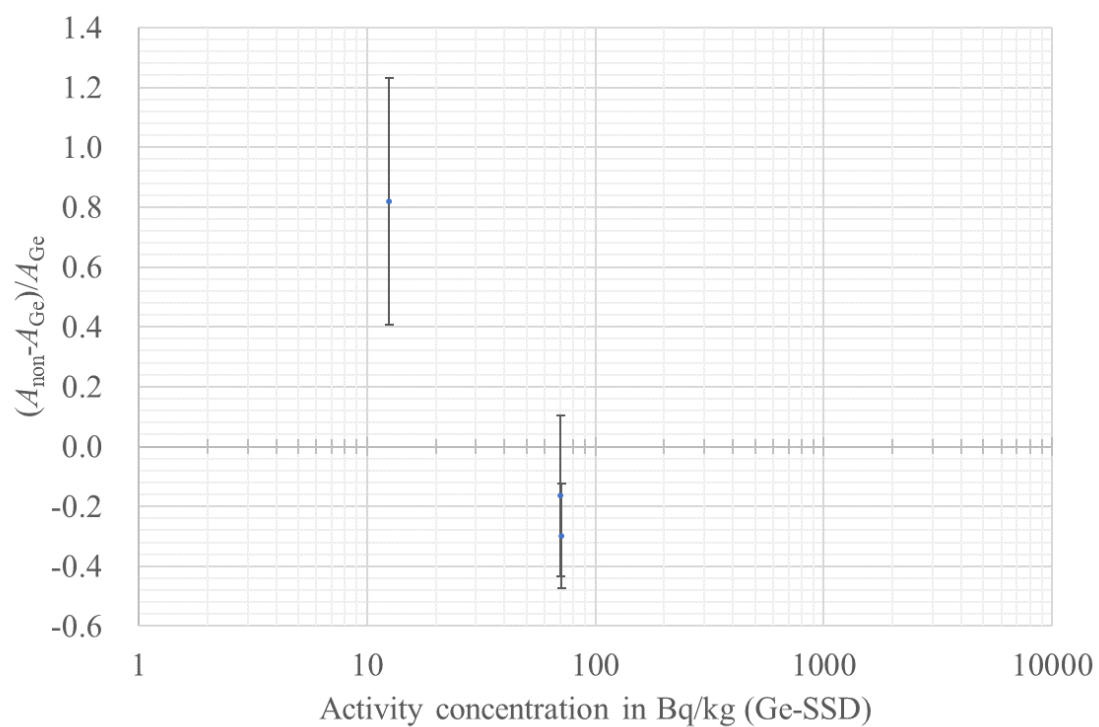


図 7 続き

タケノコ孟宗竹

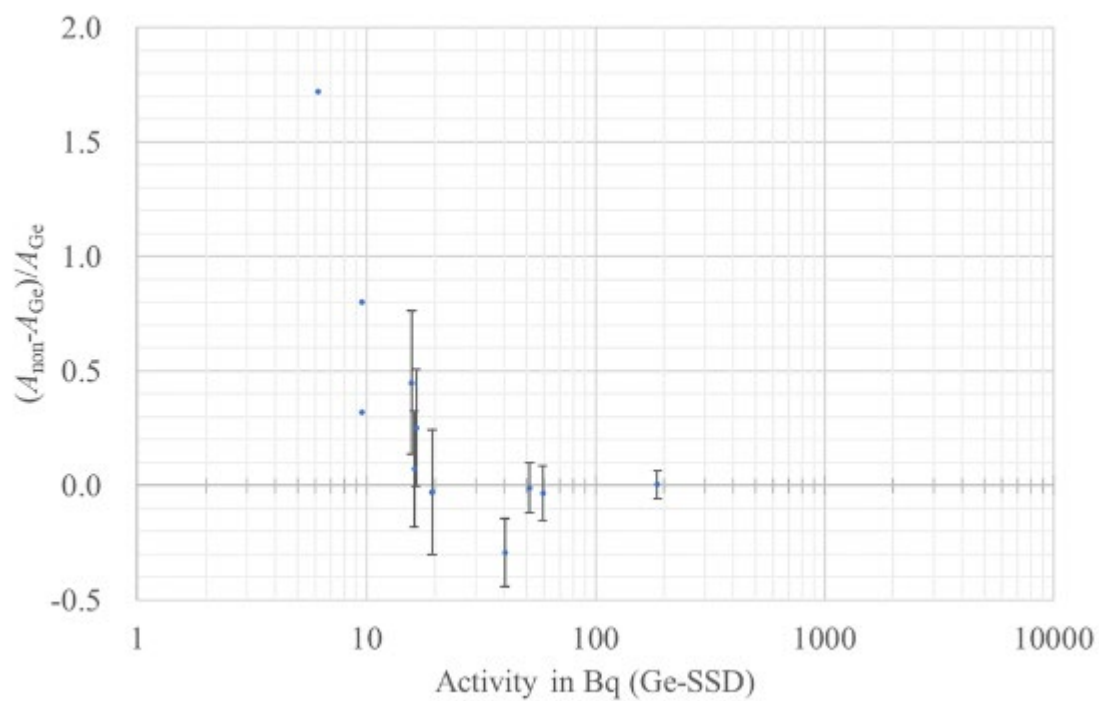
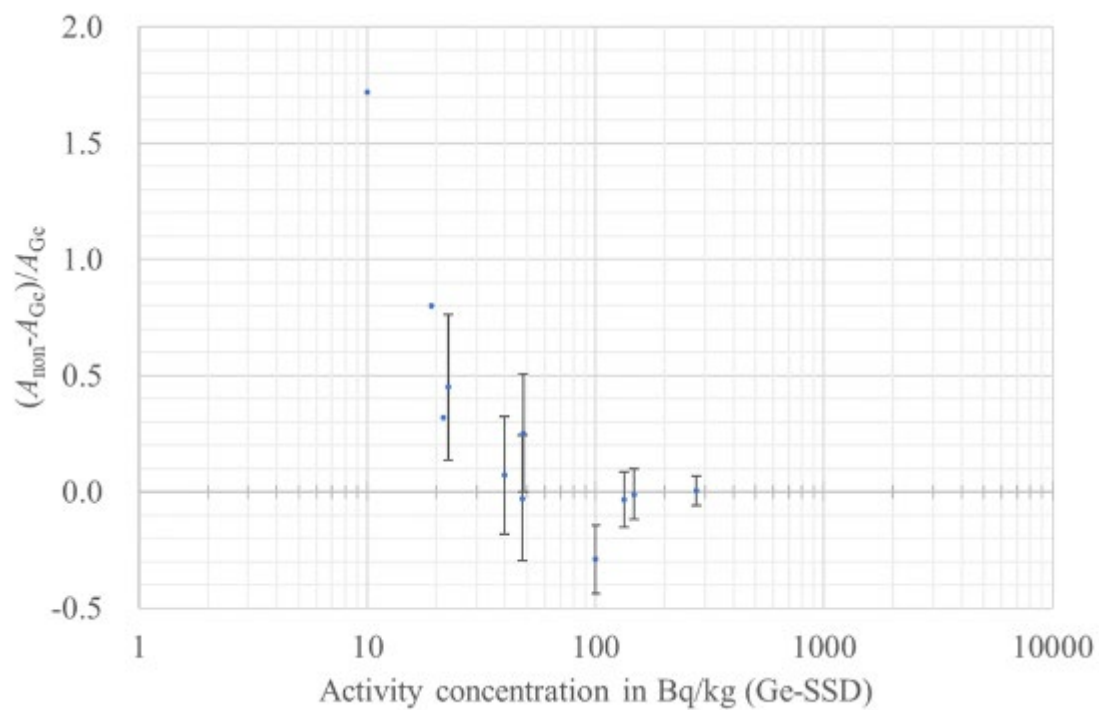


図 7 続き

タマゴタケ

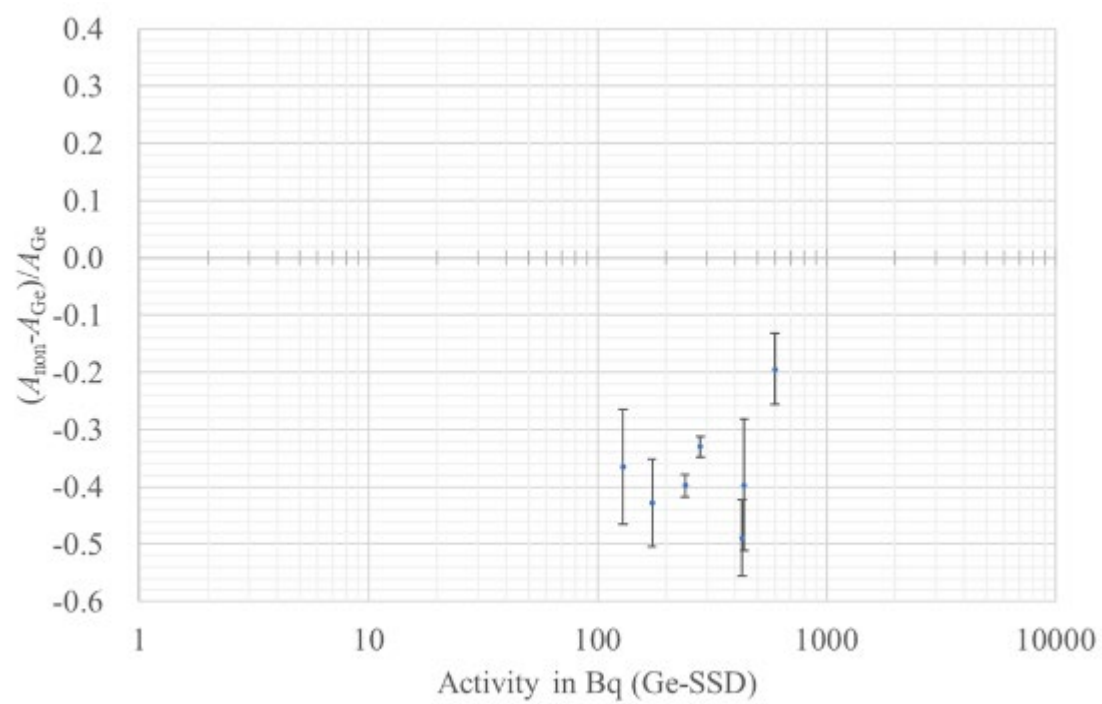
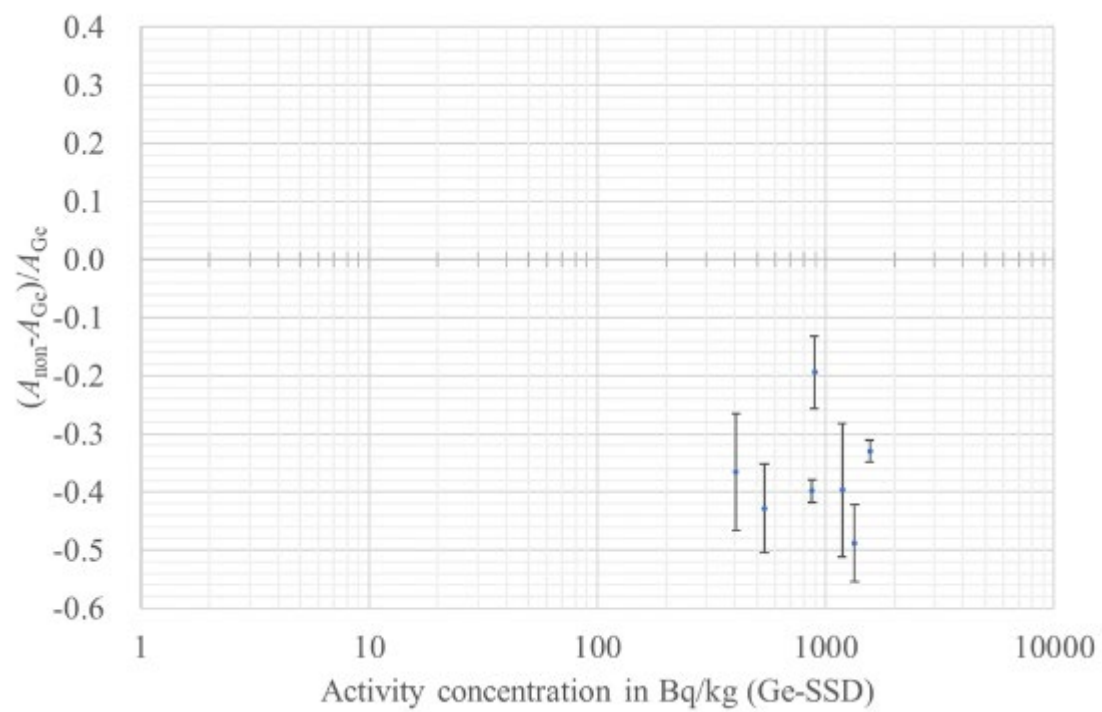


図 7 続き

タラノメ

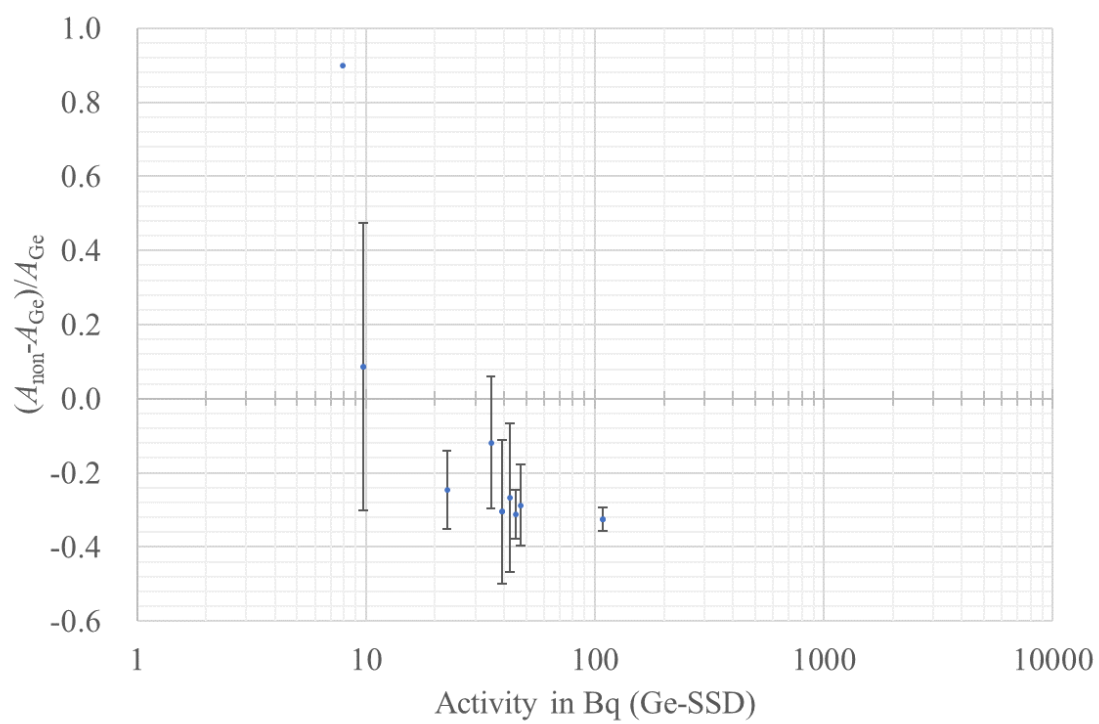
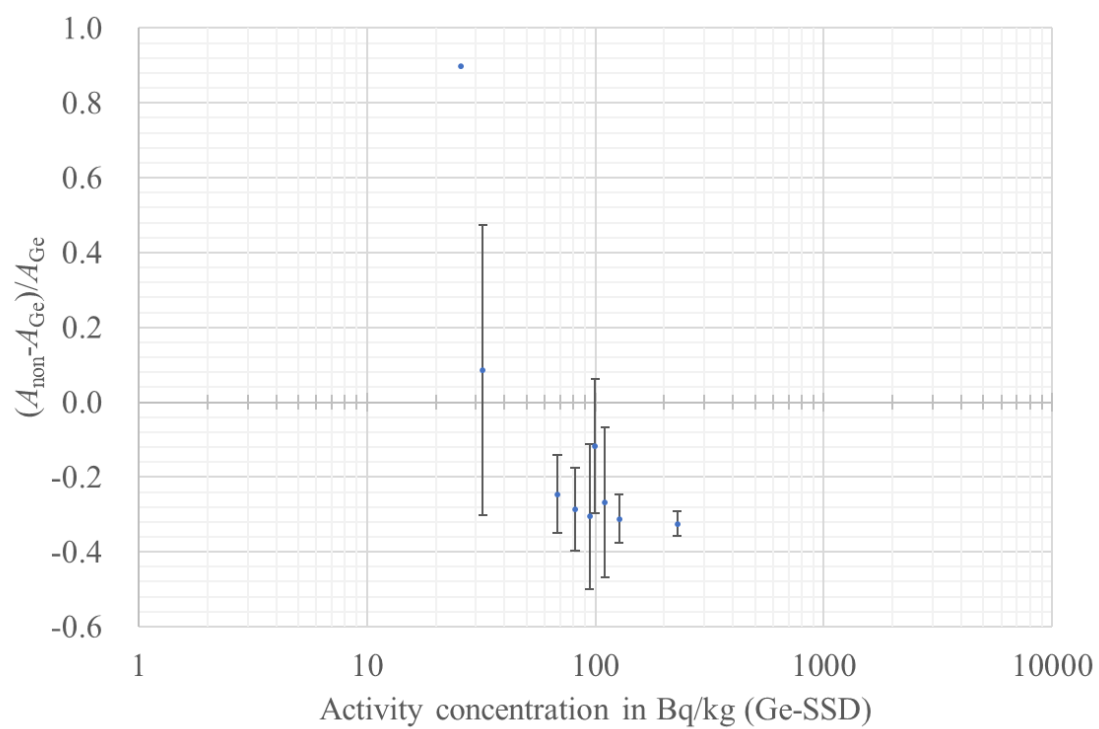


図 7 続き

チチタケ

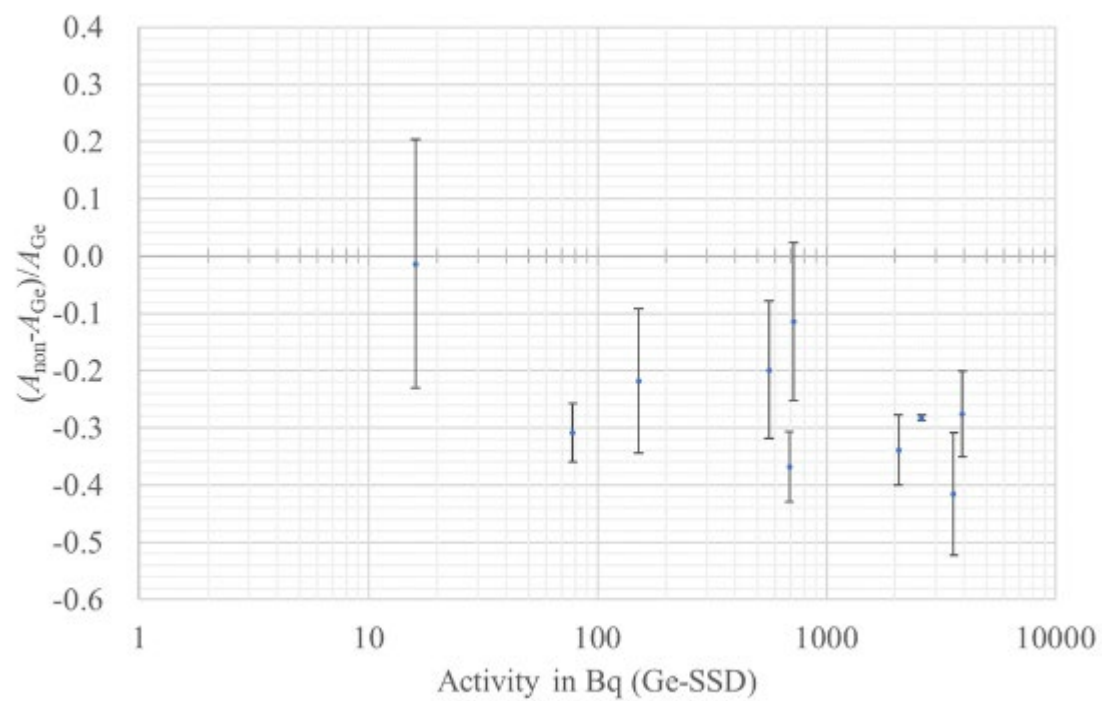
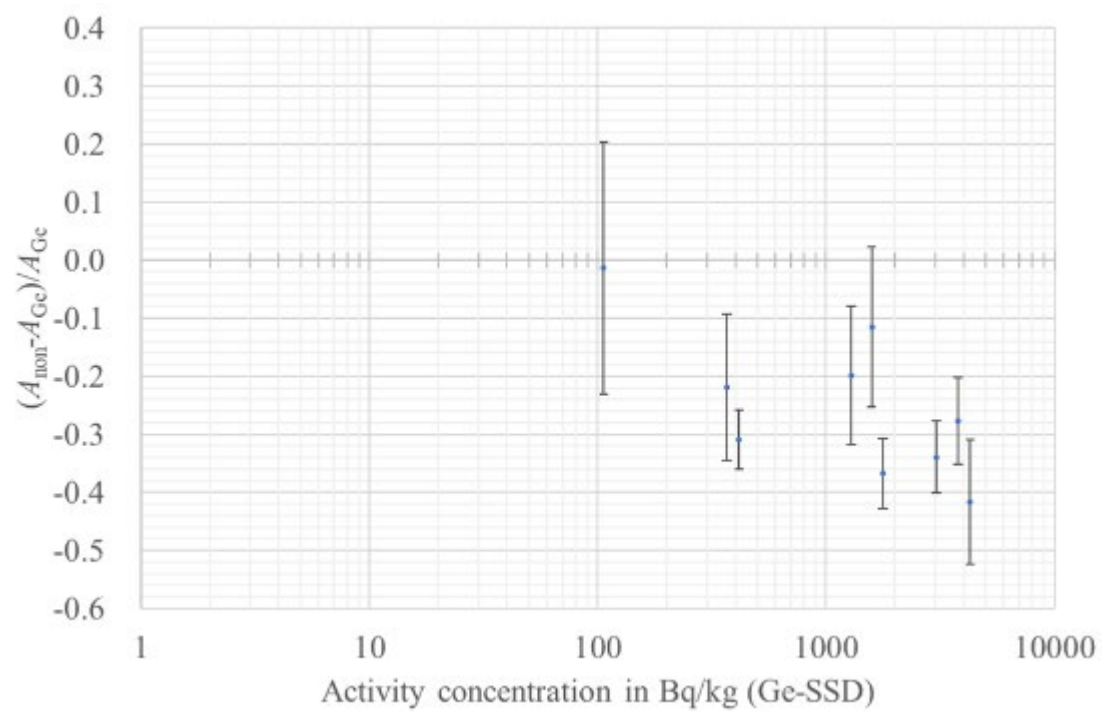


図 7 続き

チャナメツムタケ

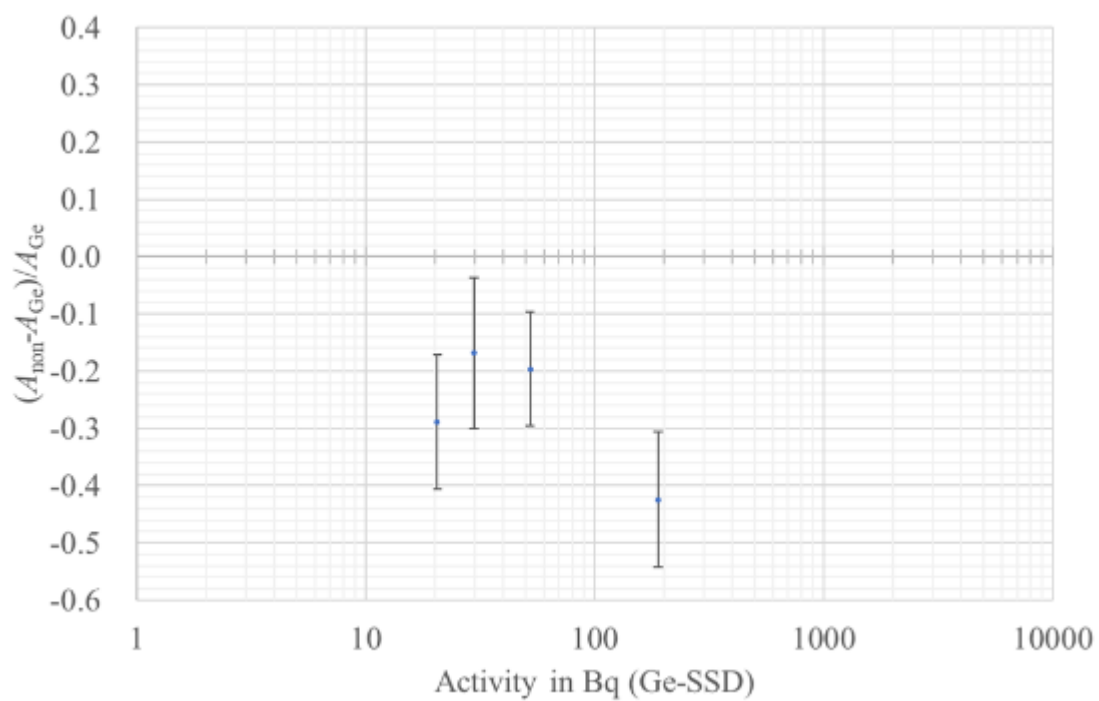
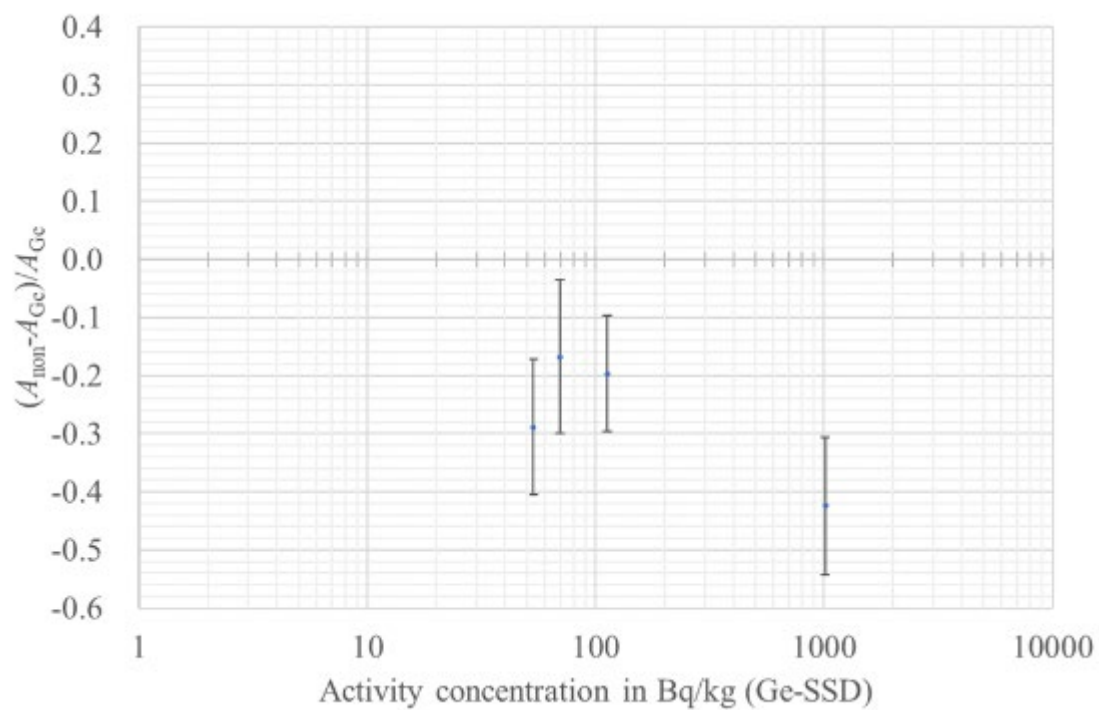


図 7 続き

ナメコ

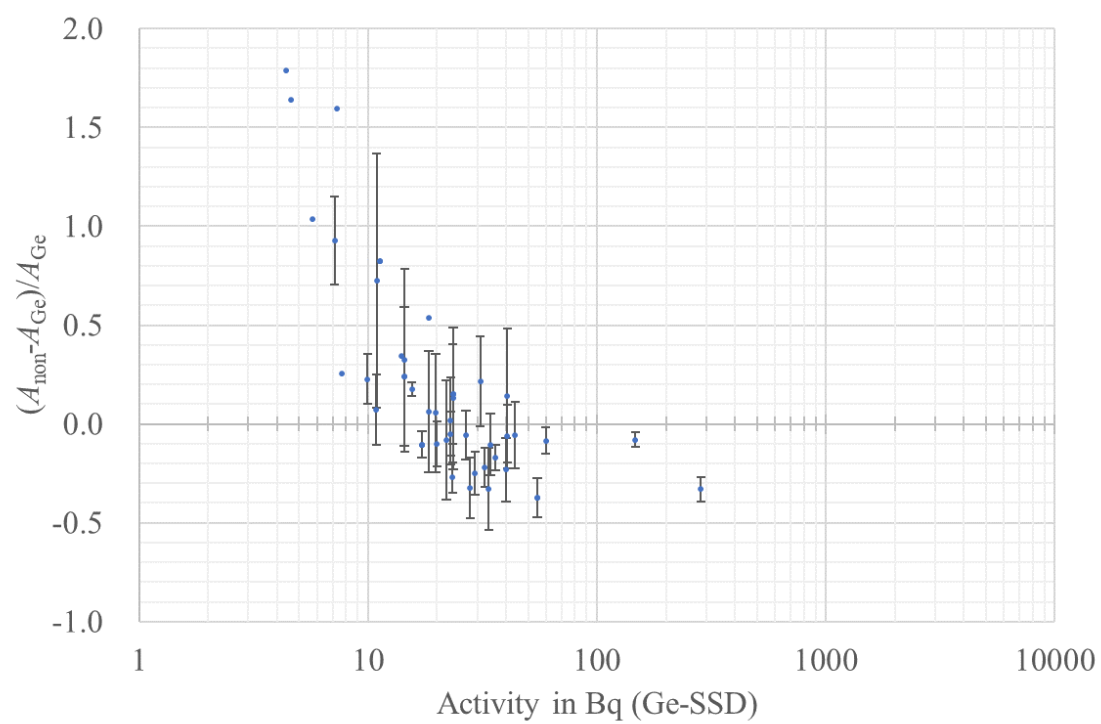
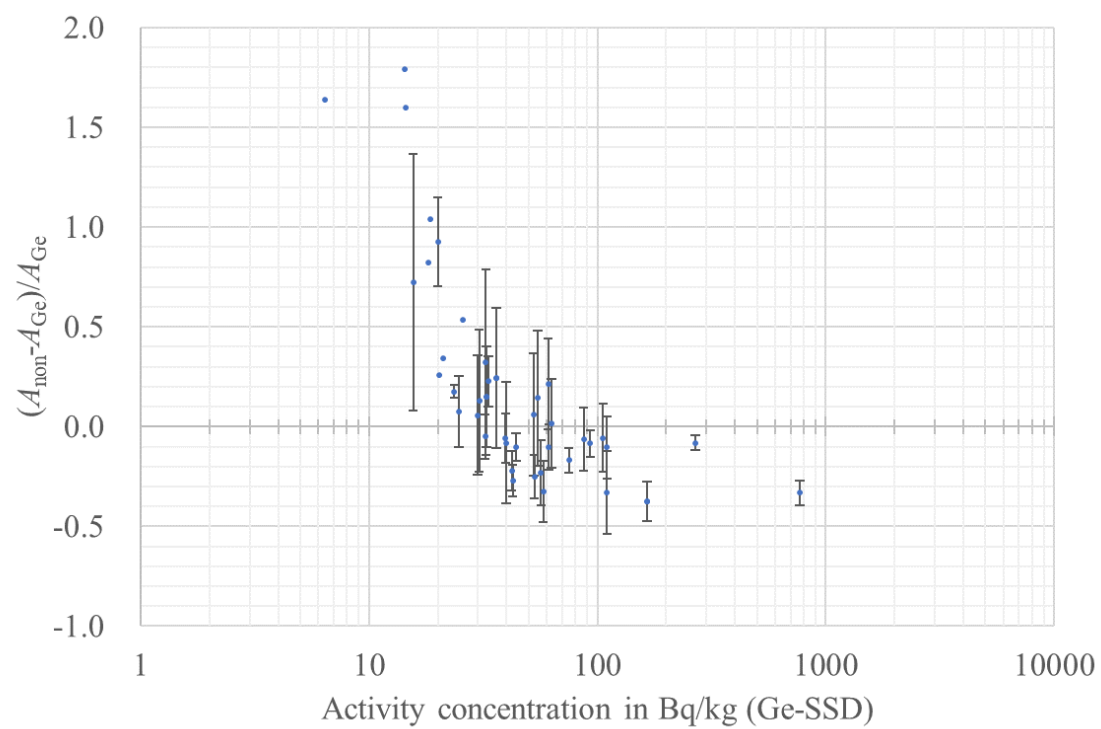


図 7 続き

ナラタケ

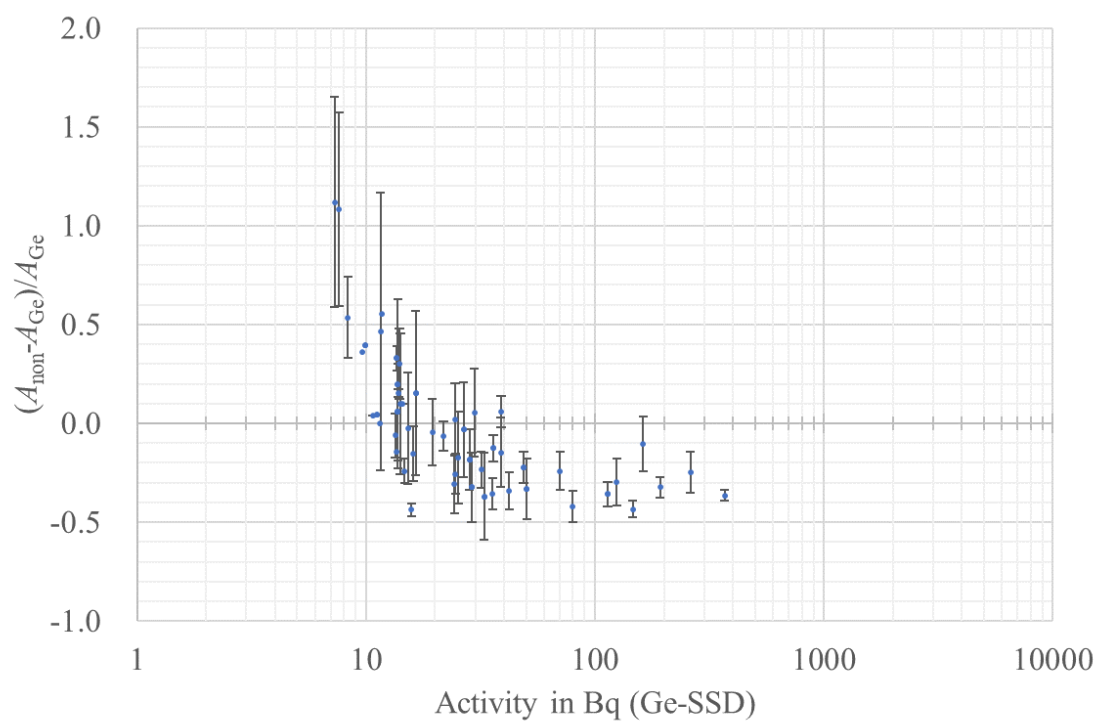
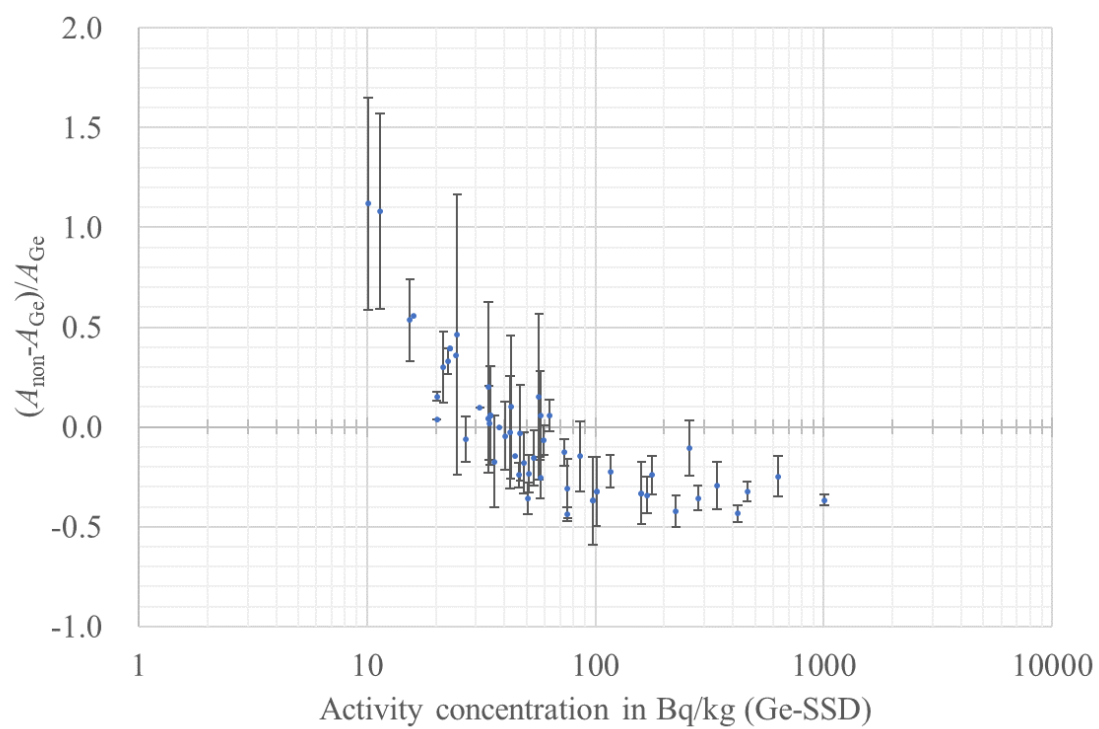


図 7 続き

ナラタケモドキ

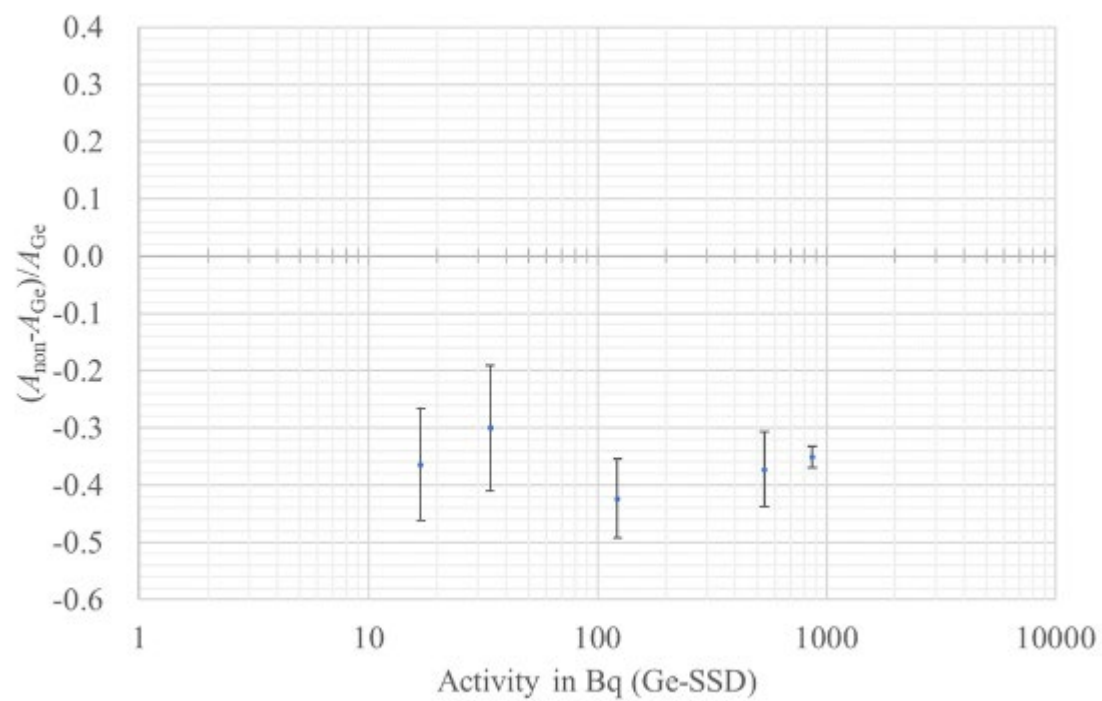
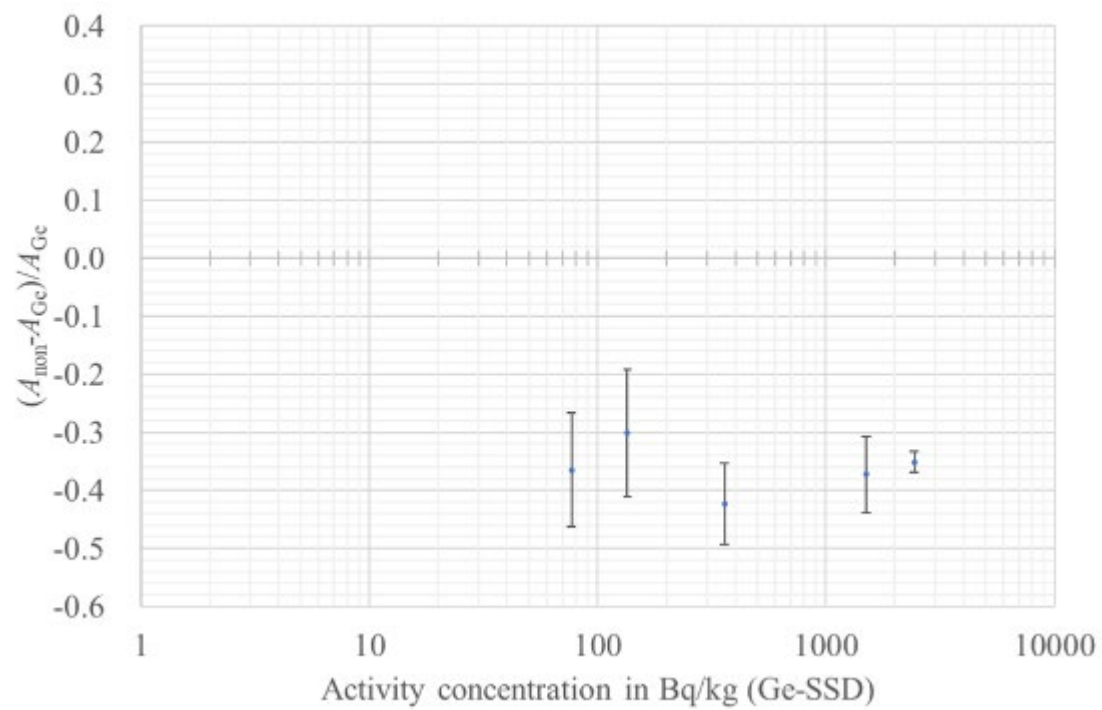


図 7 続き

ニセアブラシメジ

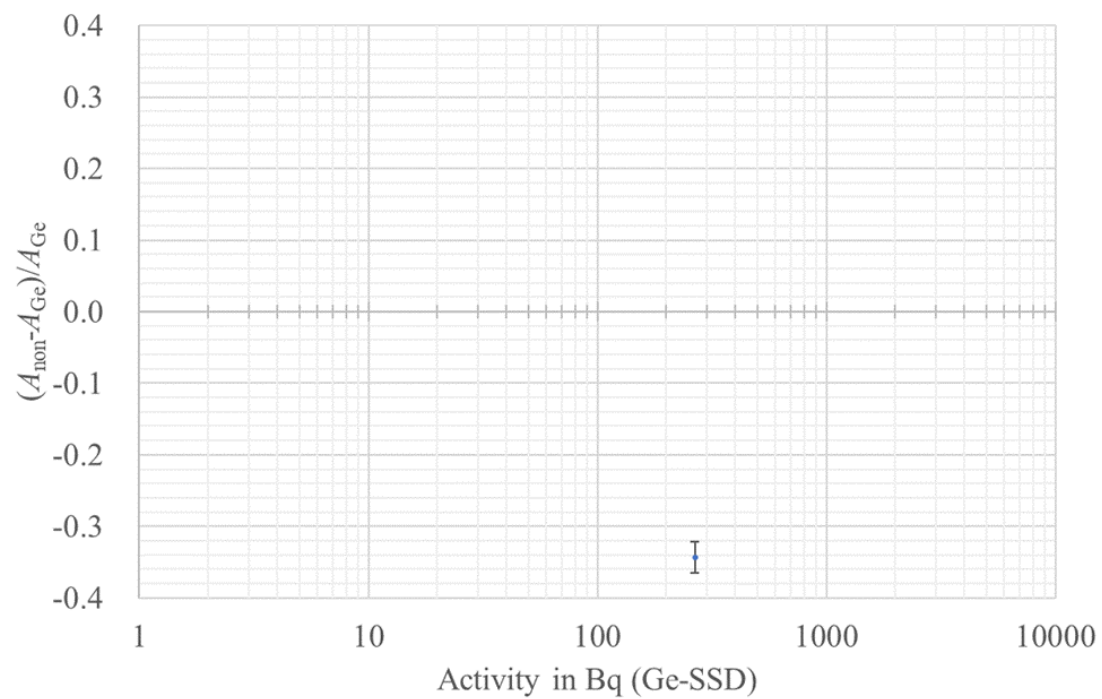
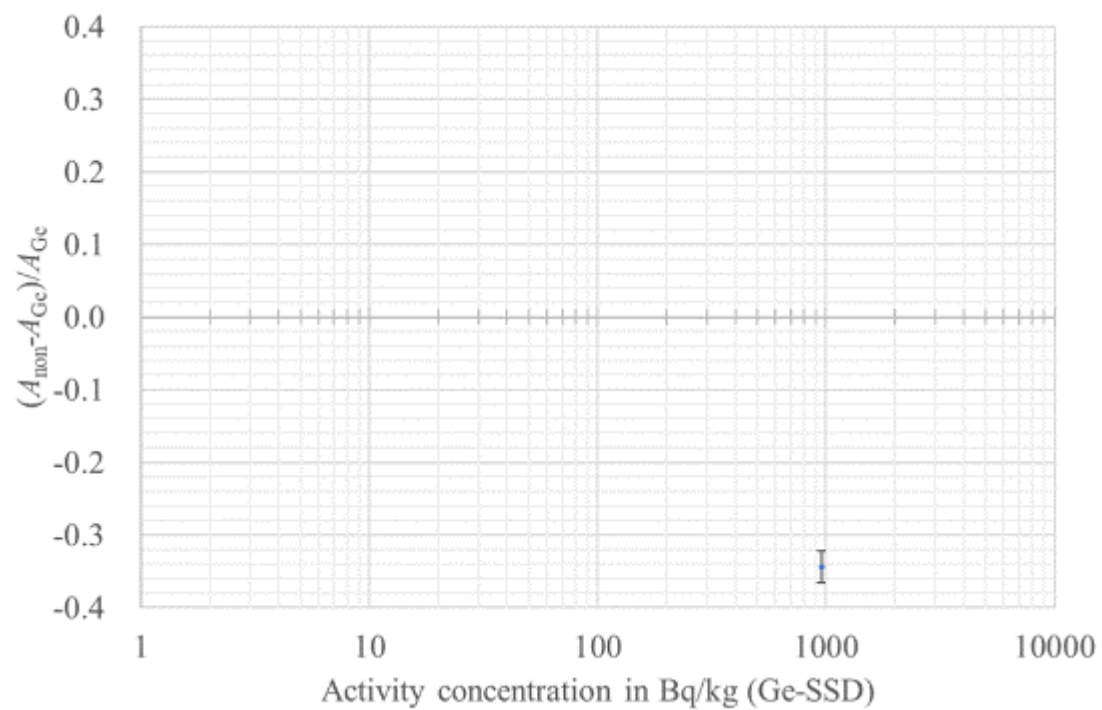


図 7 続き

ニンギョウタケ

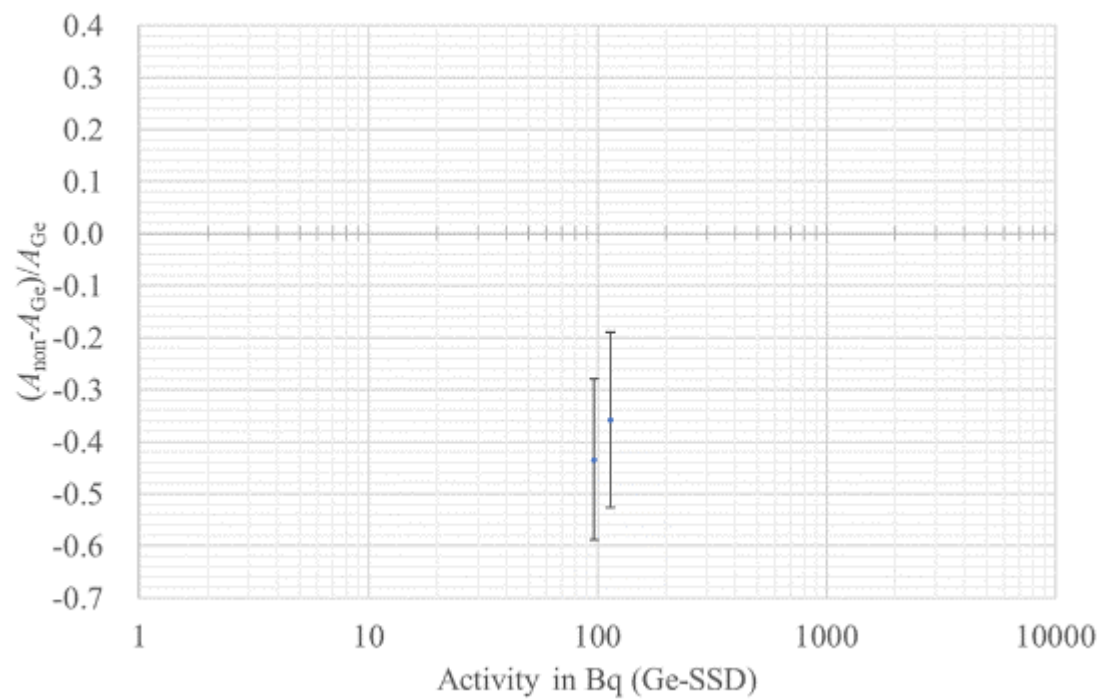
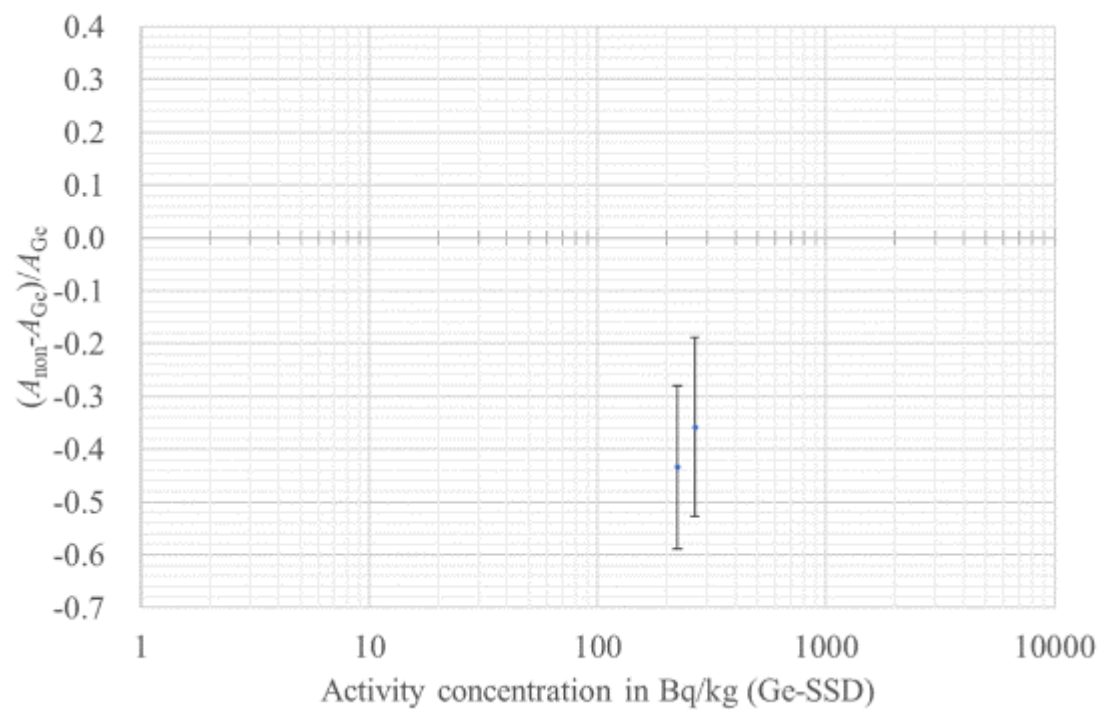


図 7 続き

ヌメリイグチ

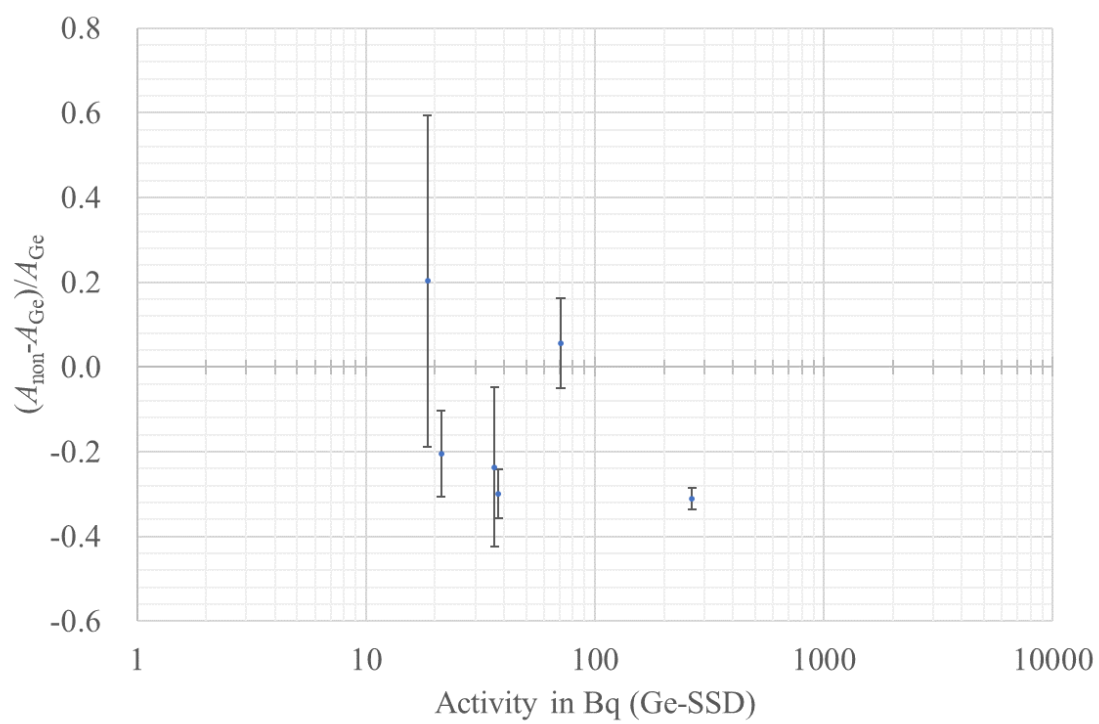
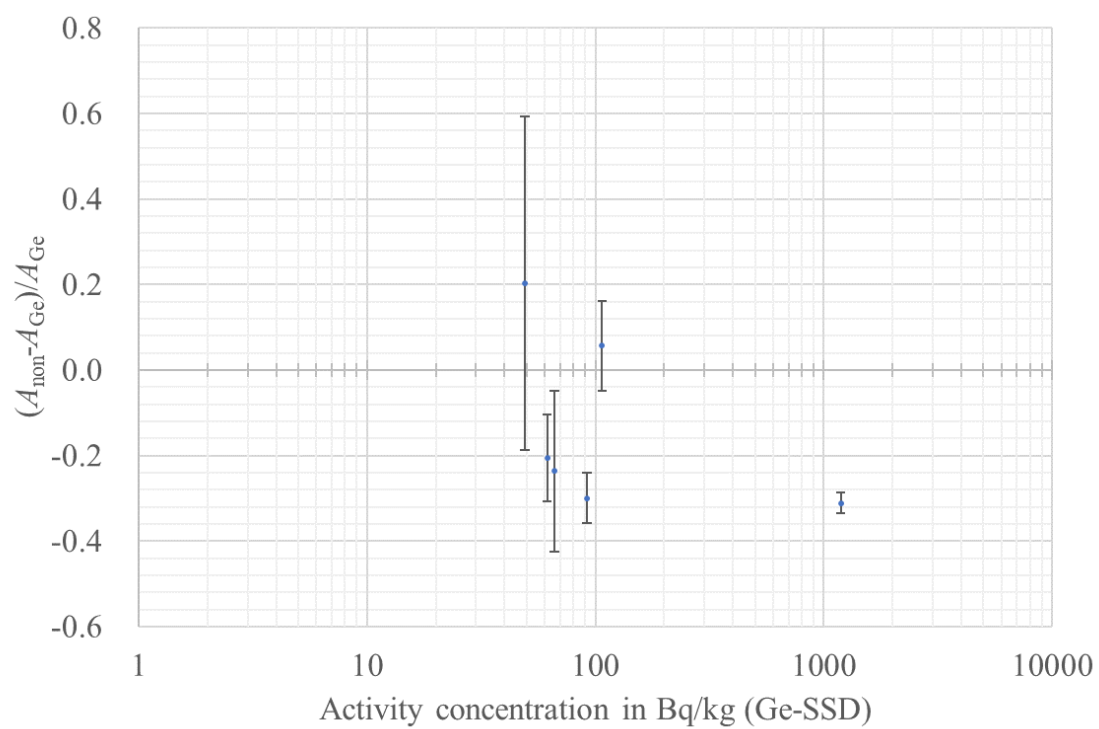


図 7 続き

ネマガリタケ

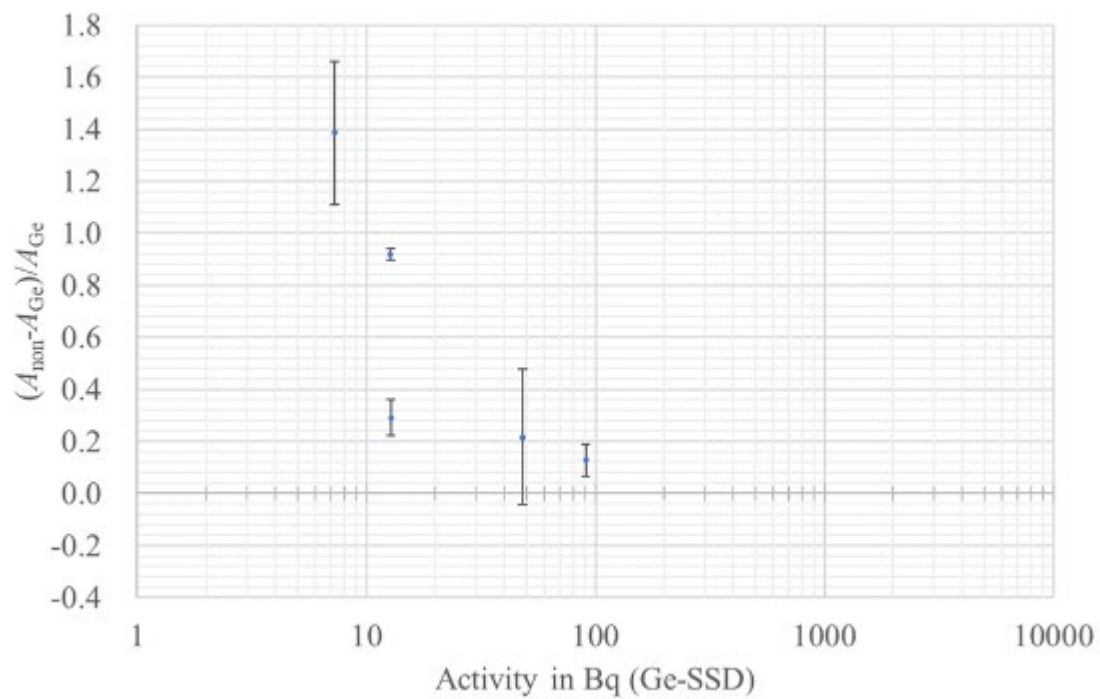
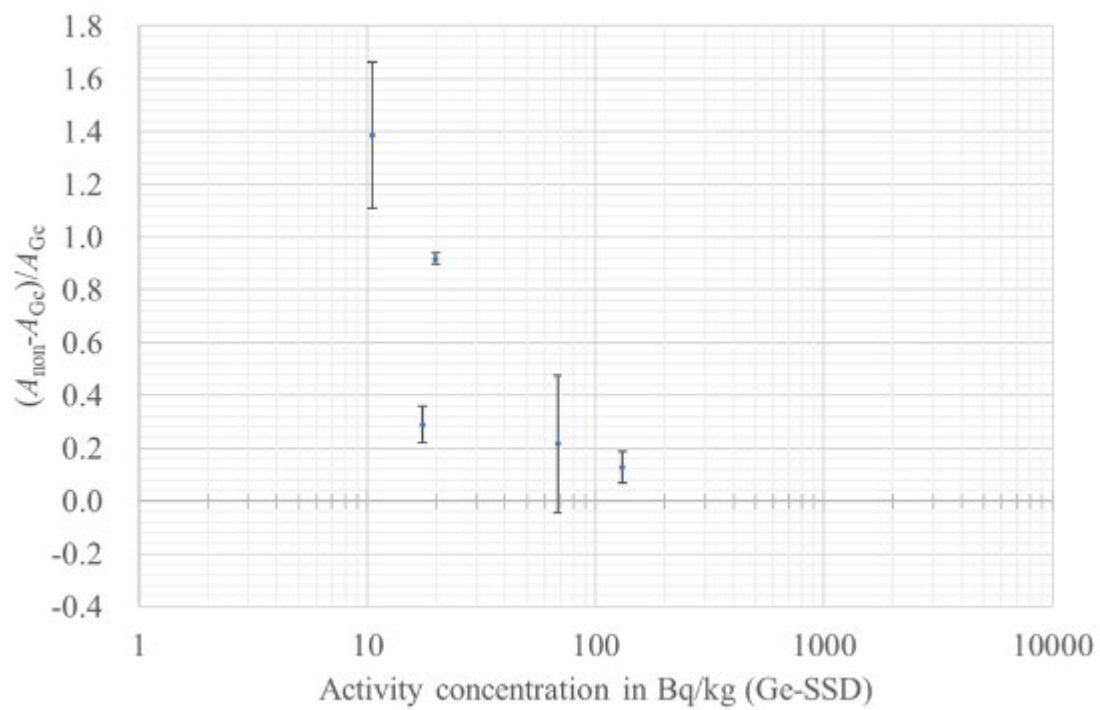


図 7 続き

ハイイロシメジ

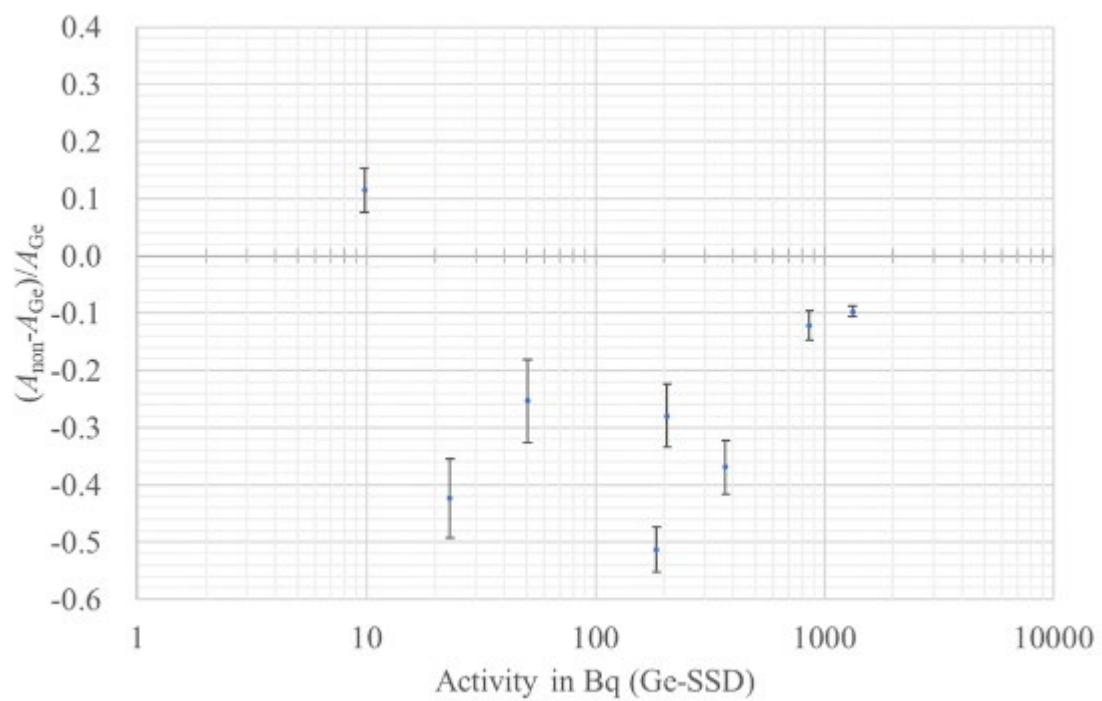
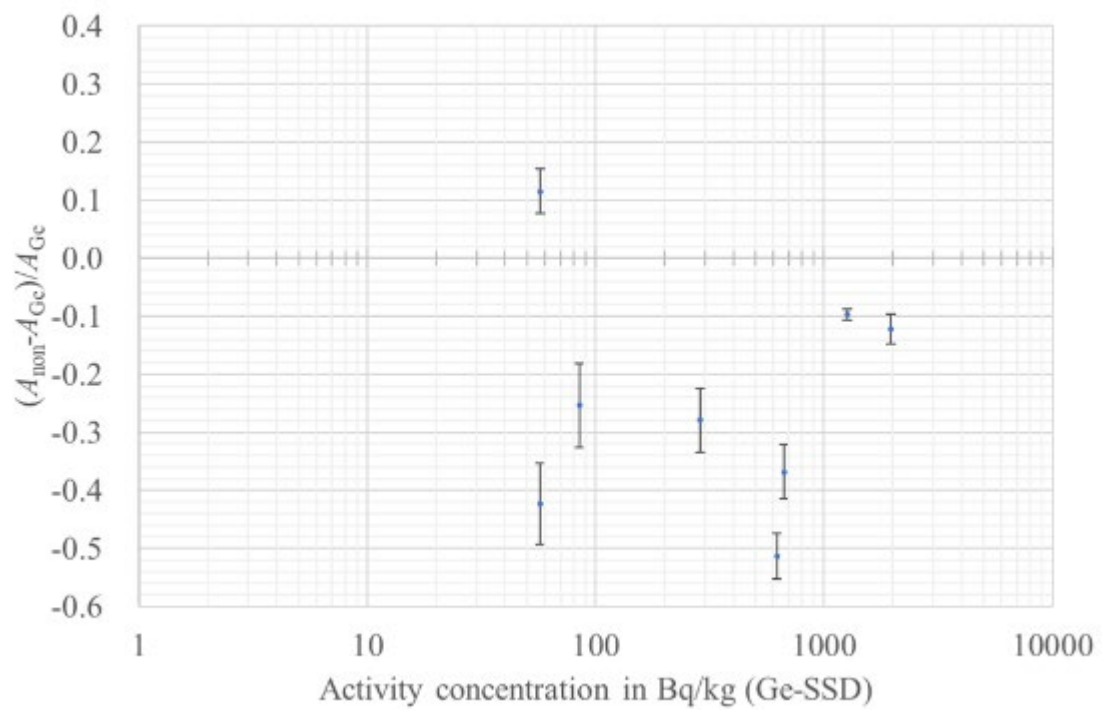


図 7 続き

ハタケシメジ

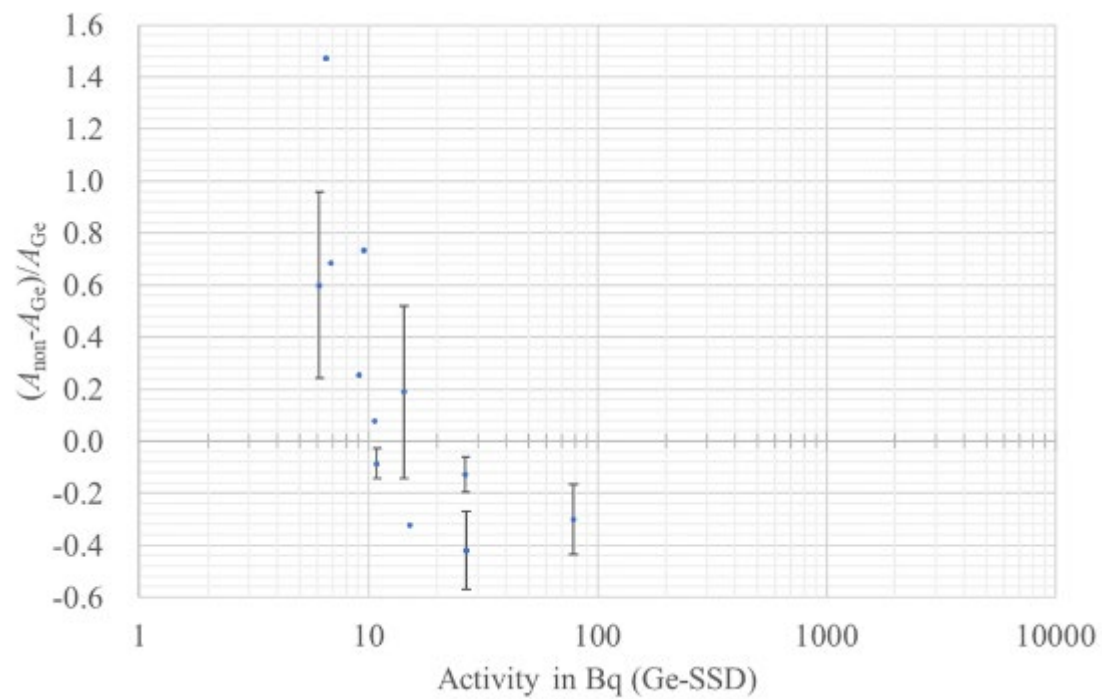
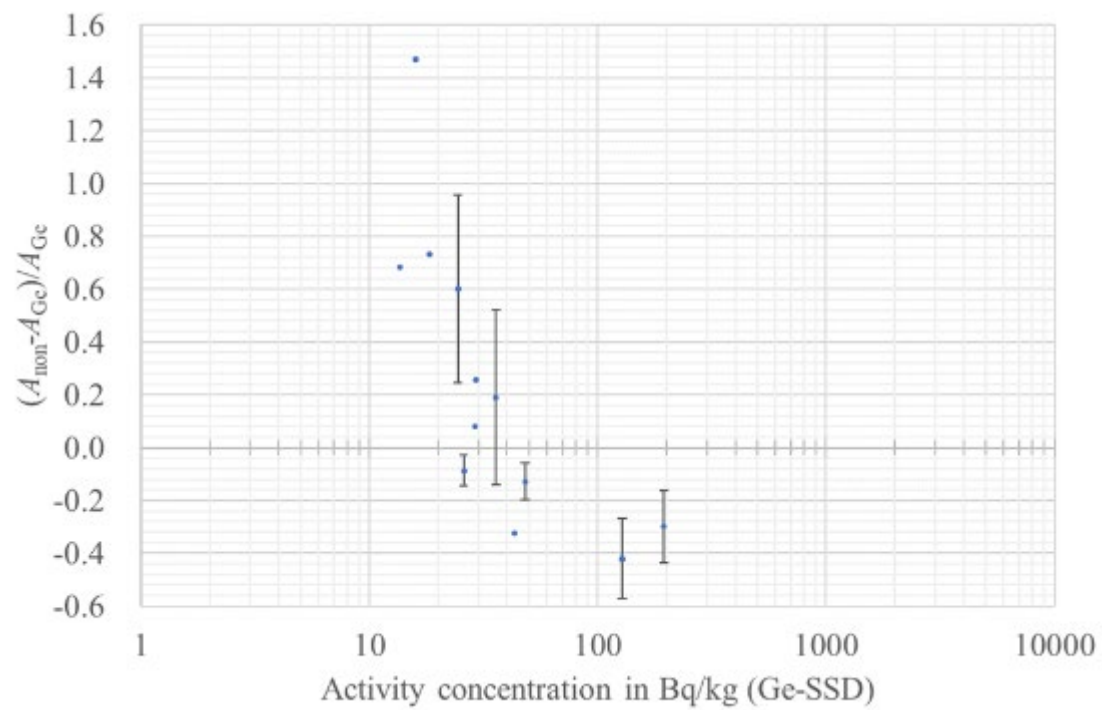


図 7 続き

ハツタケ

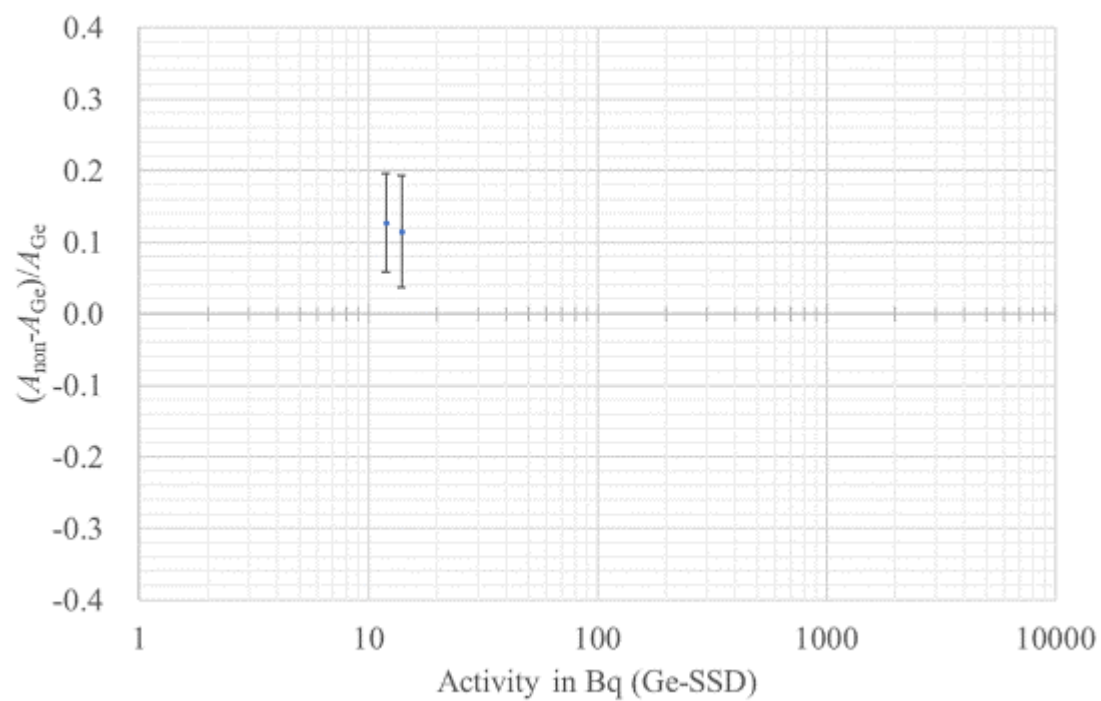
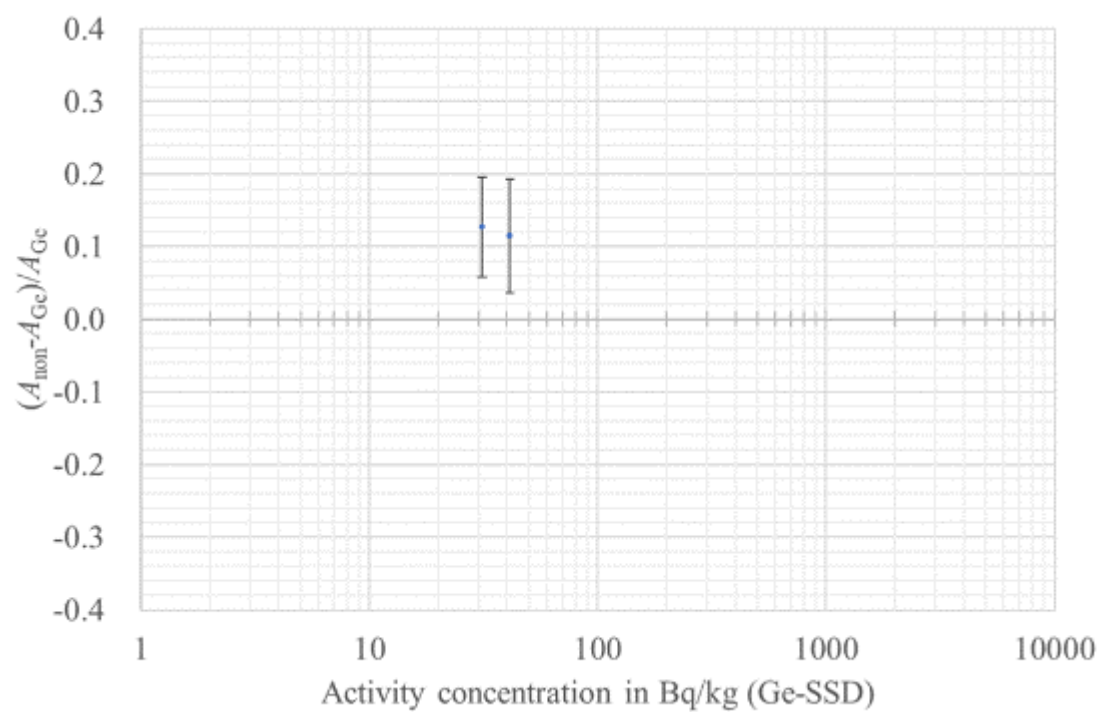
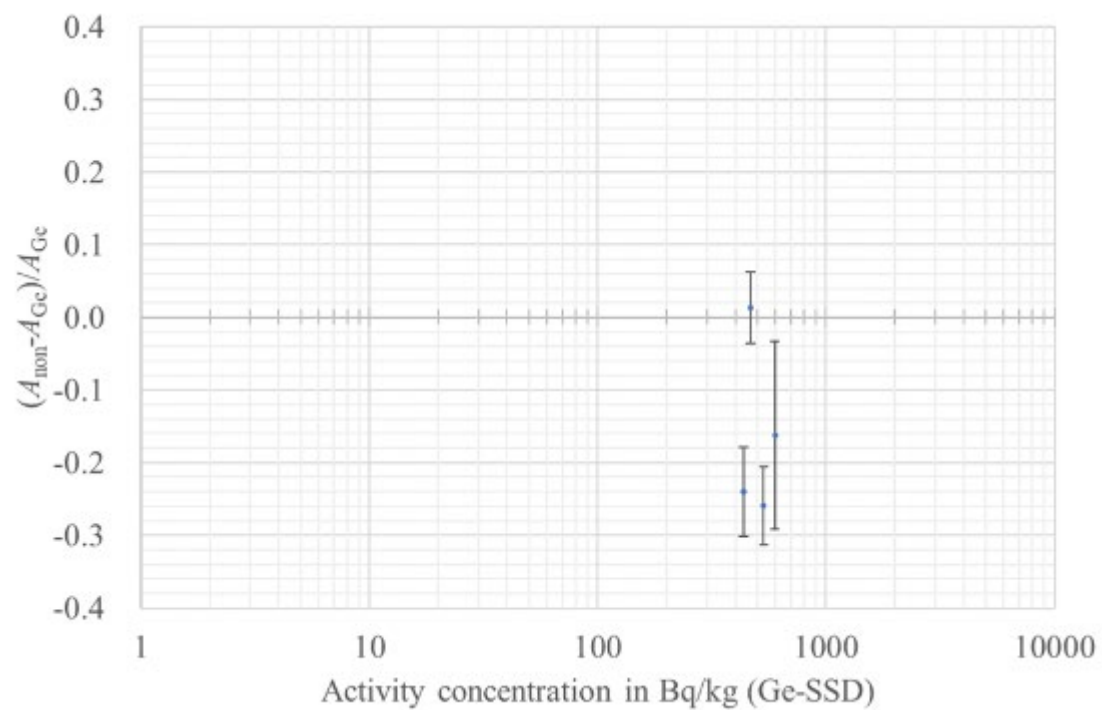


図 7 続き

ハナイグチ



ヒラタケ

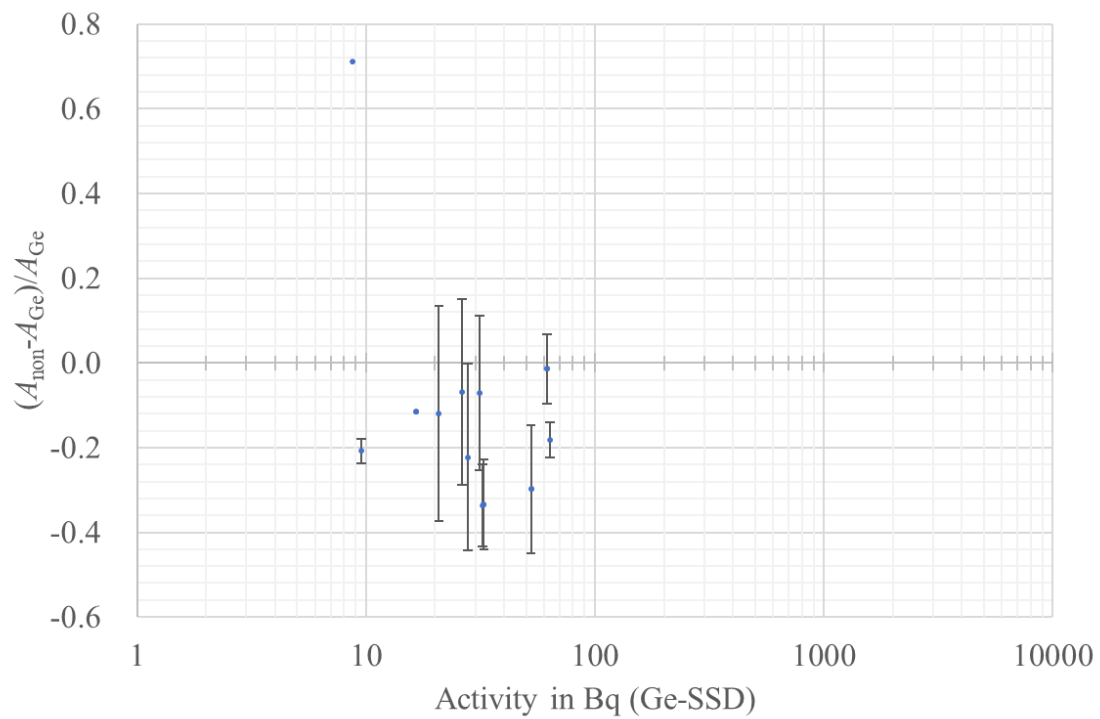
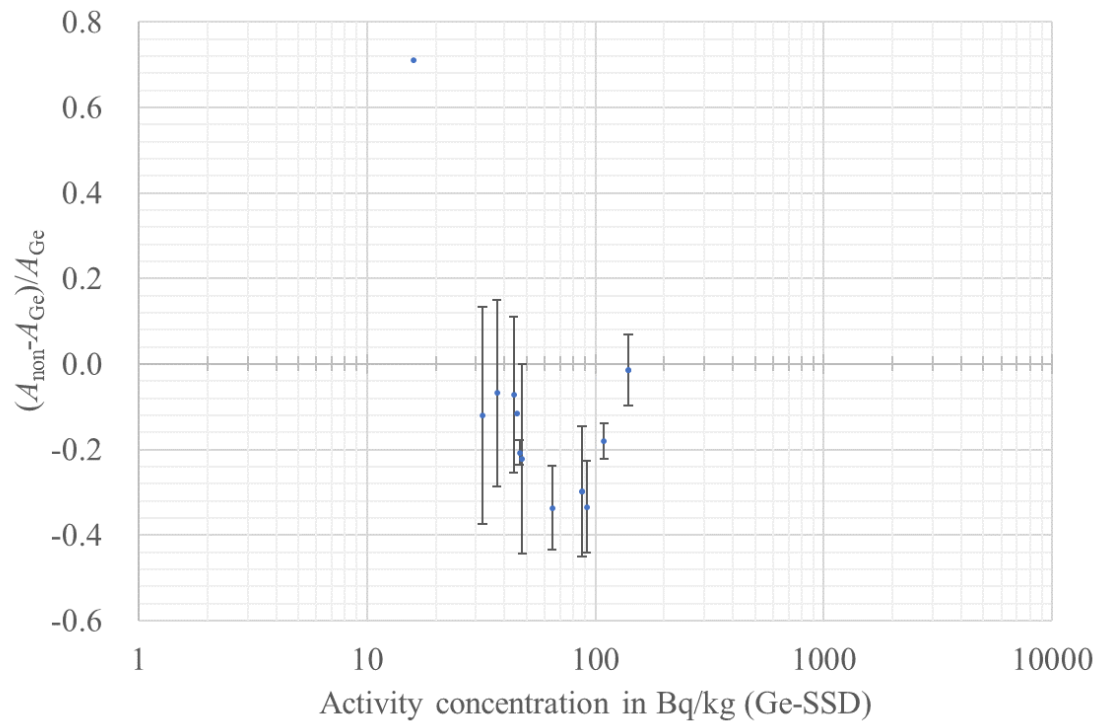


図 7 続き

フウセンタケモドキ

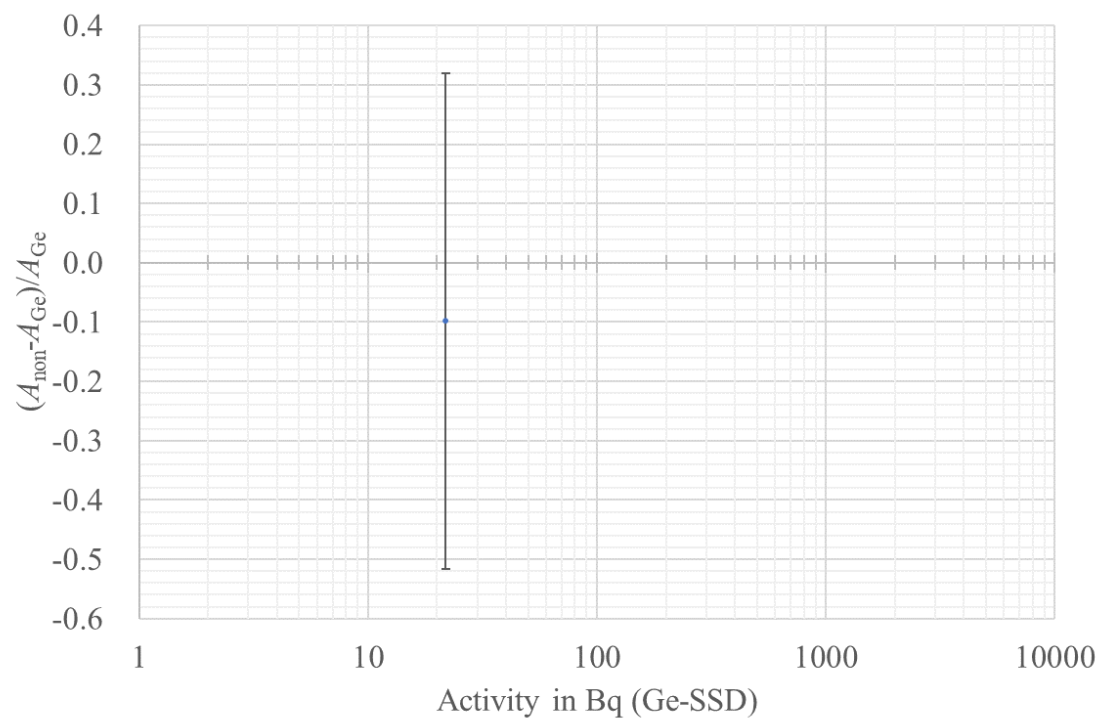
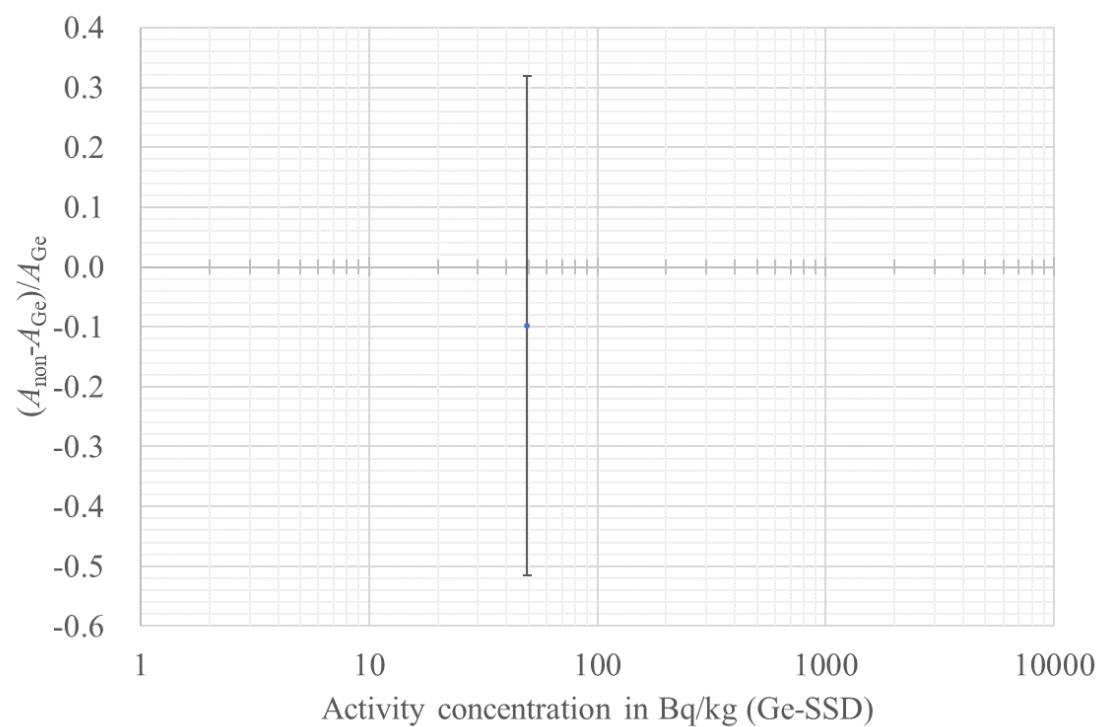


図 7 続き

フキ

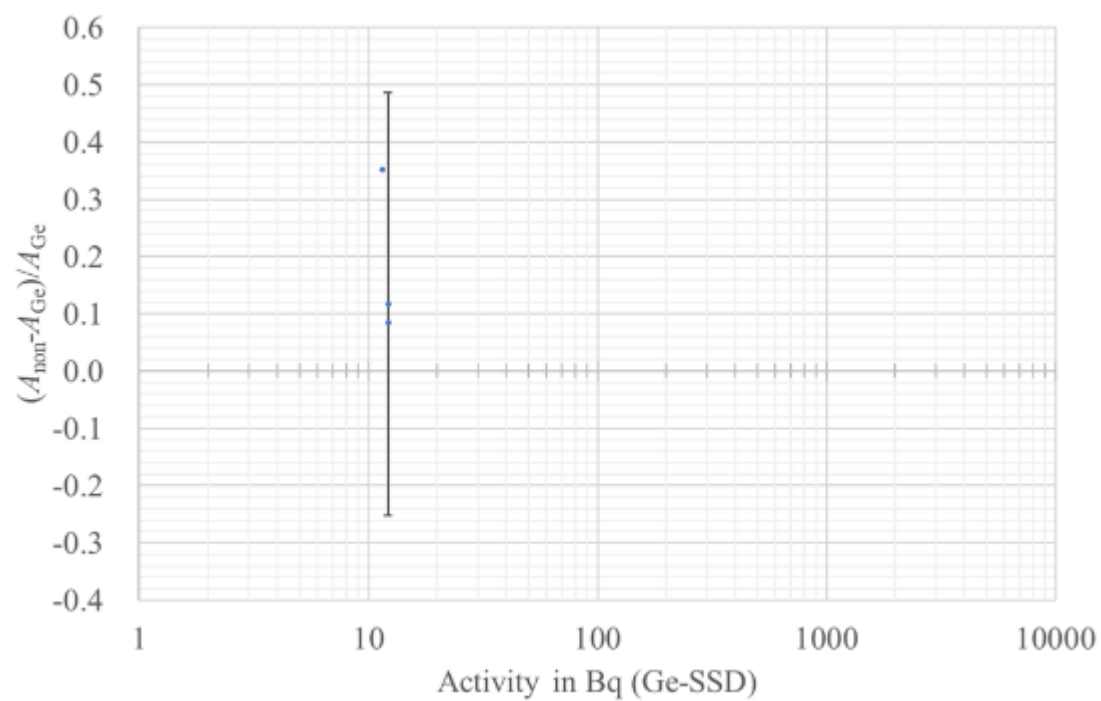
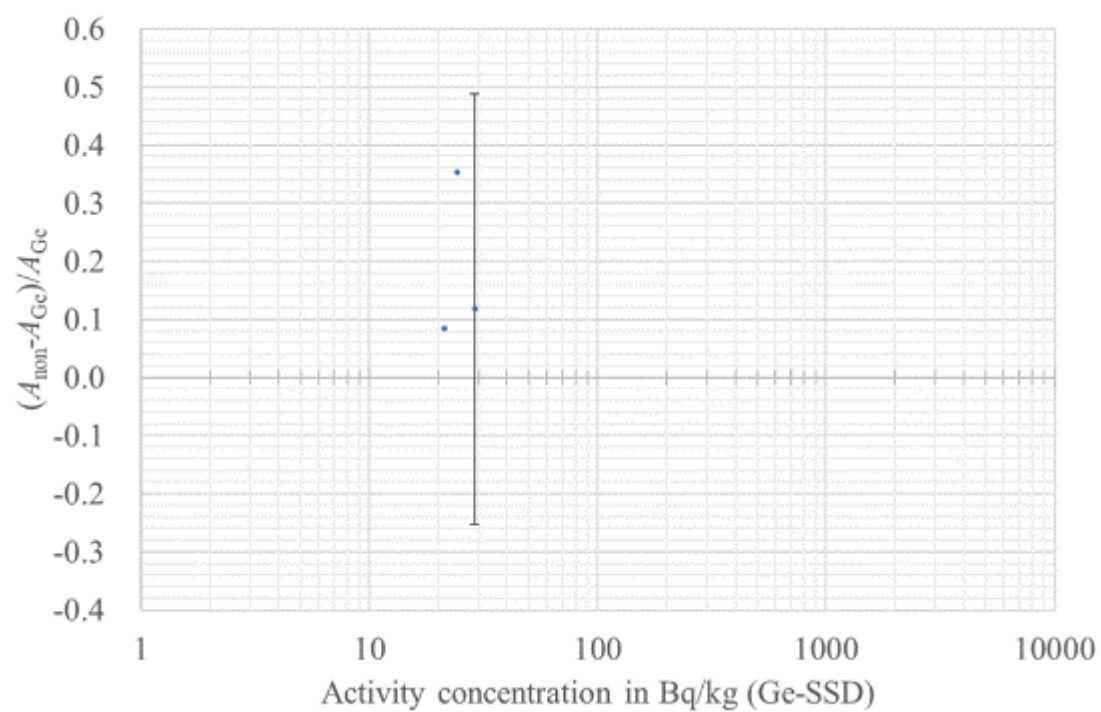


図 7 続き

ブナハリタケ

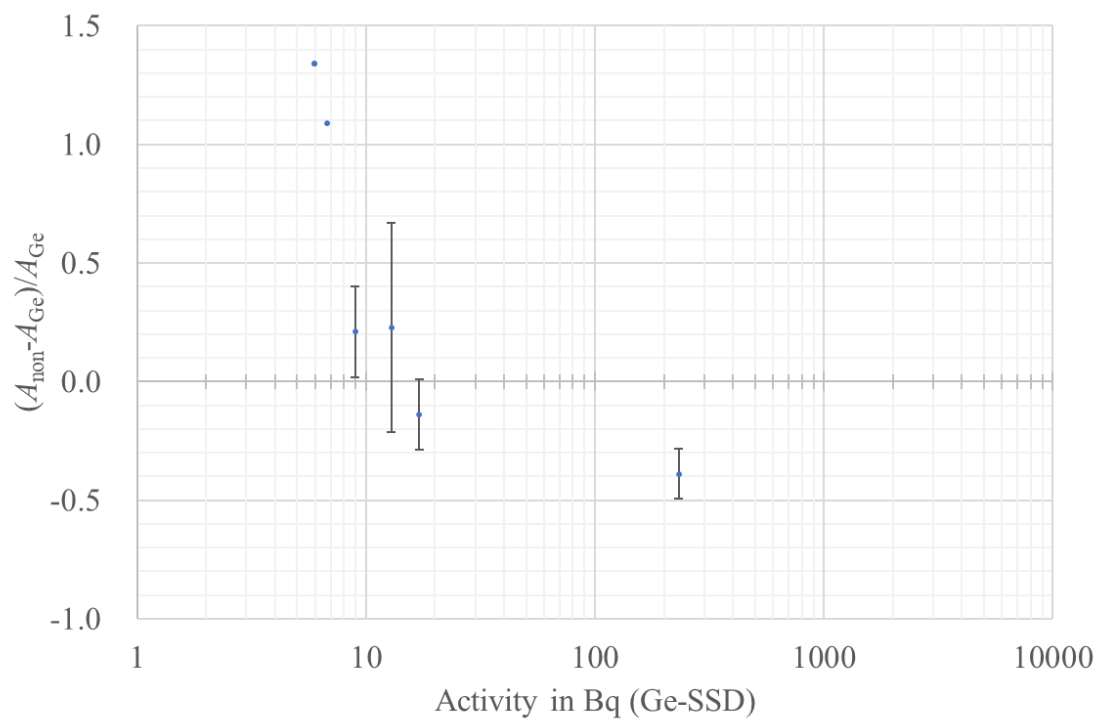
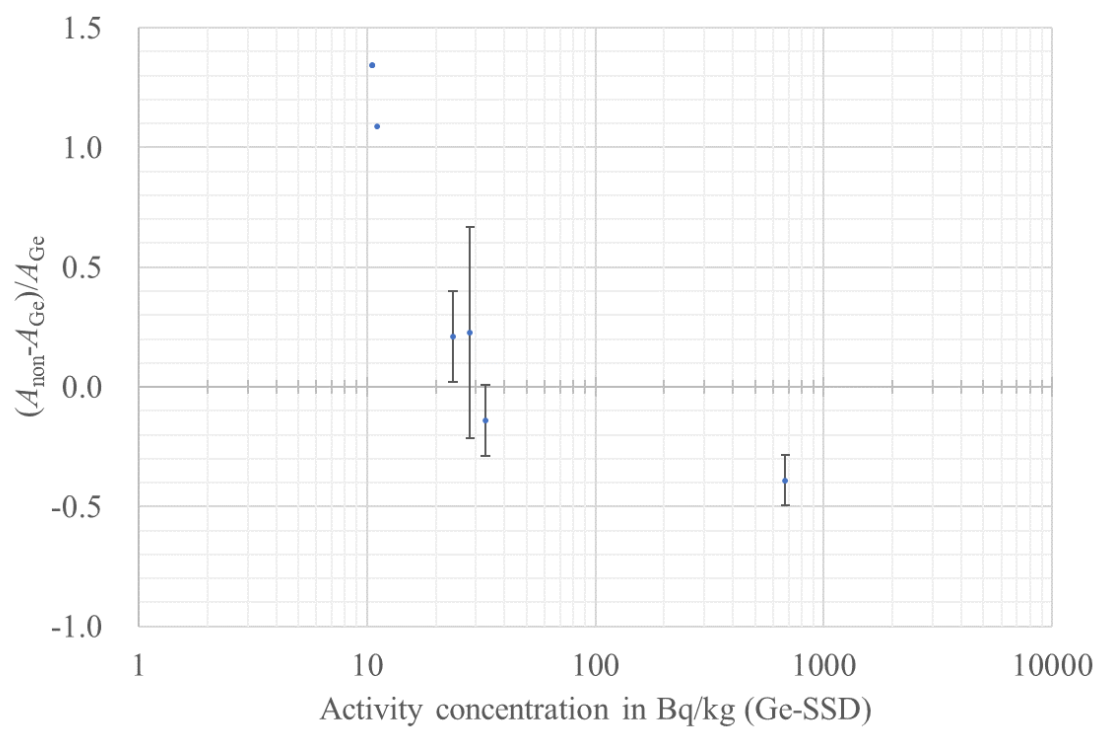


図 7 続き

ホウキタケ

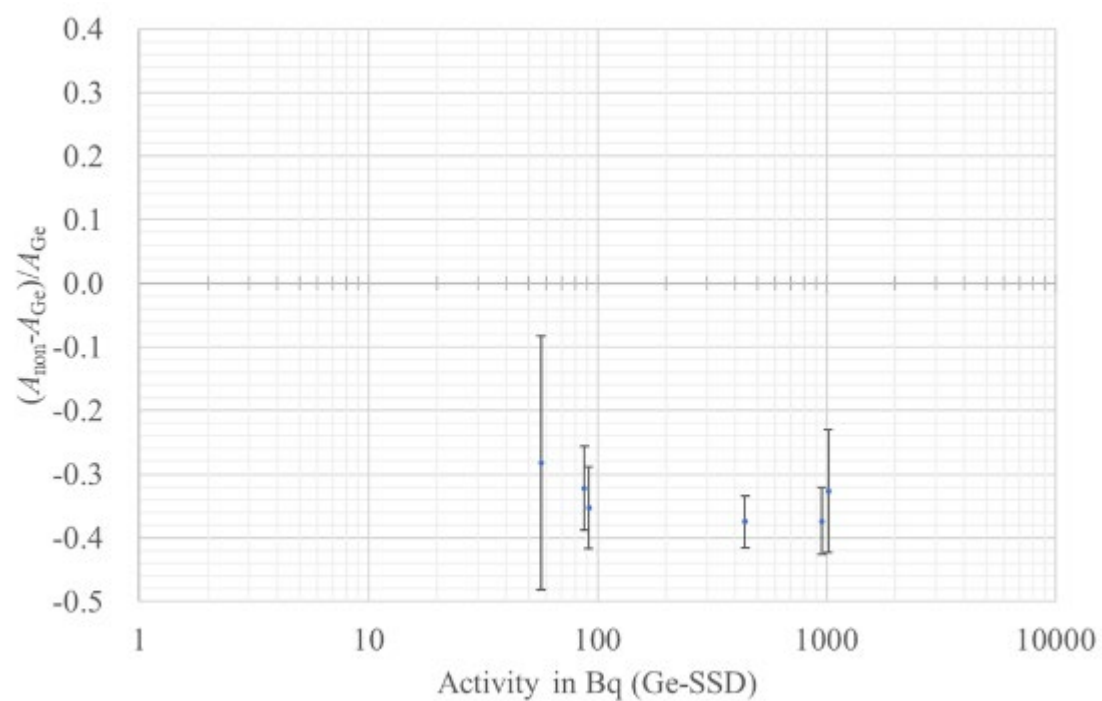
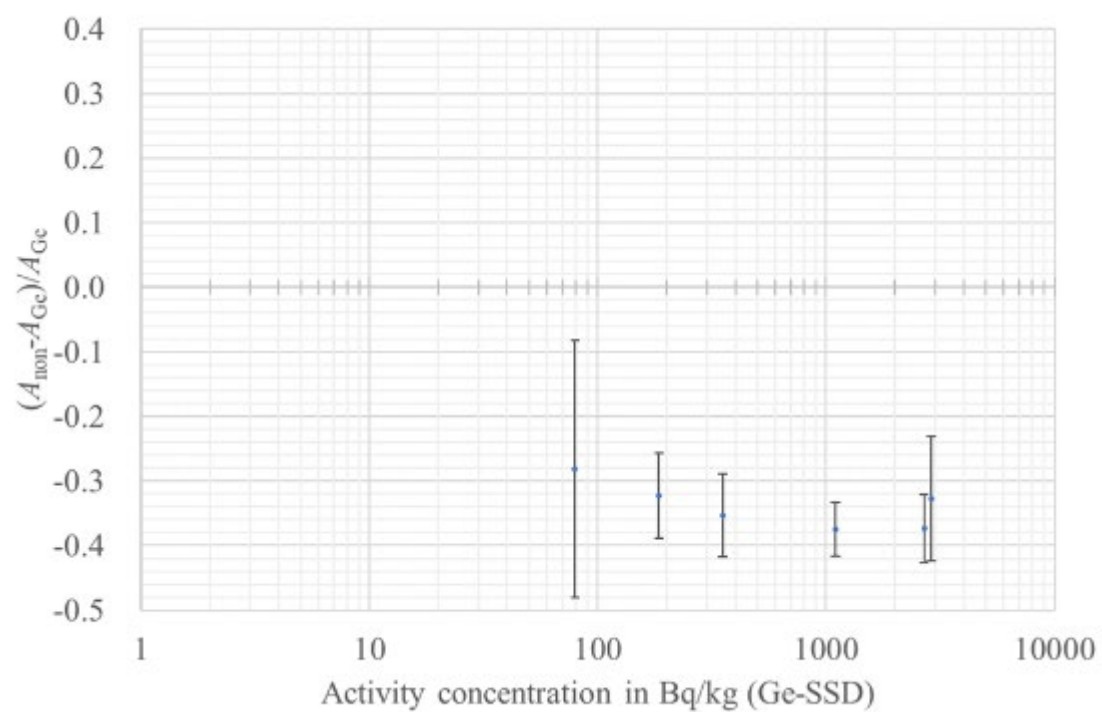


図 7 続き

ホオベニシロアシイグチ

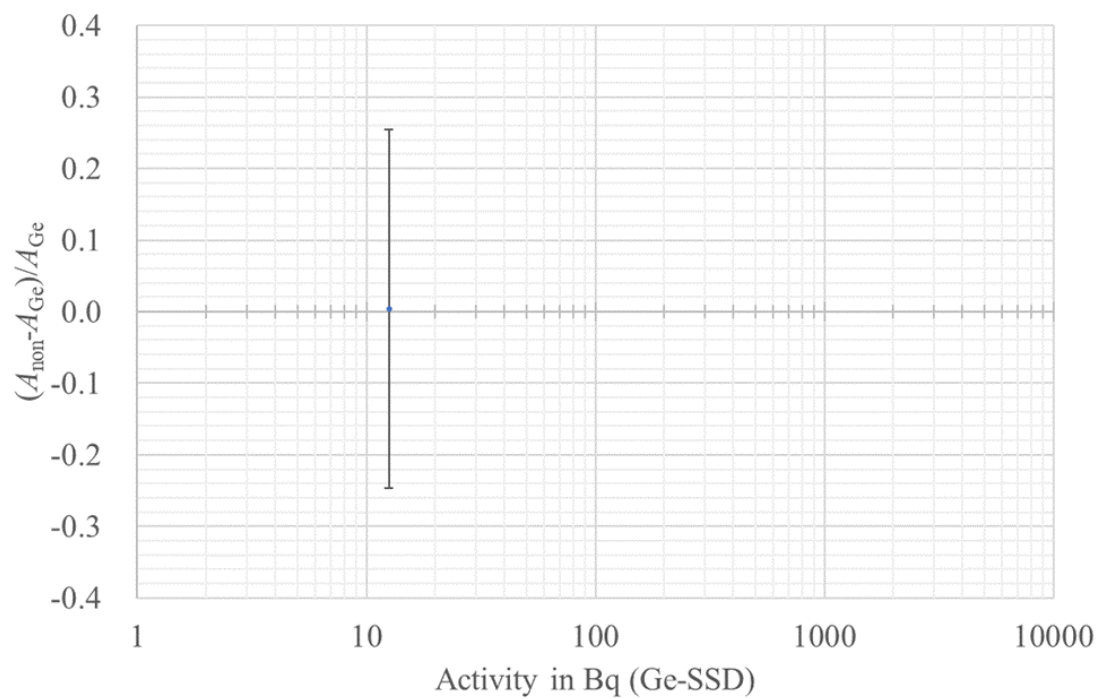
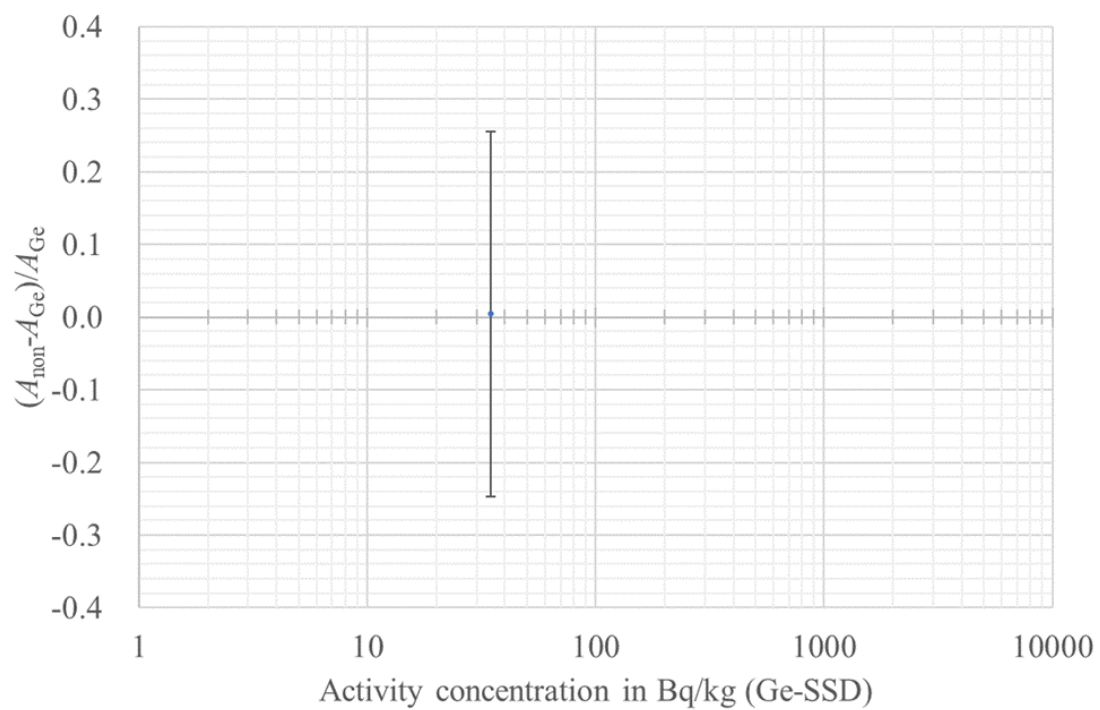


図 7 続き

マイタケ

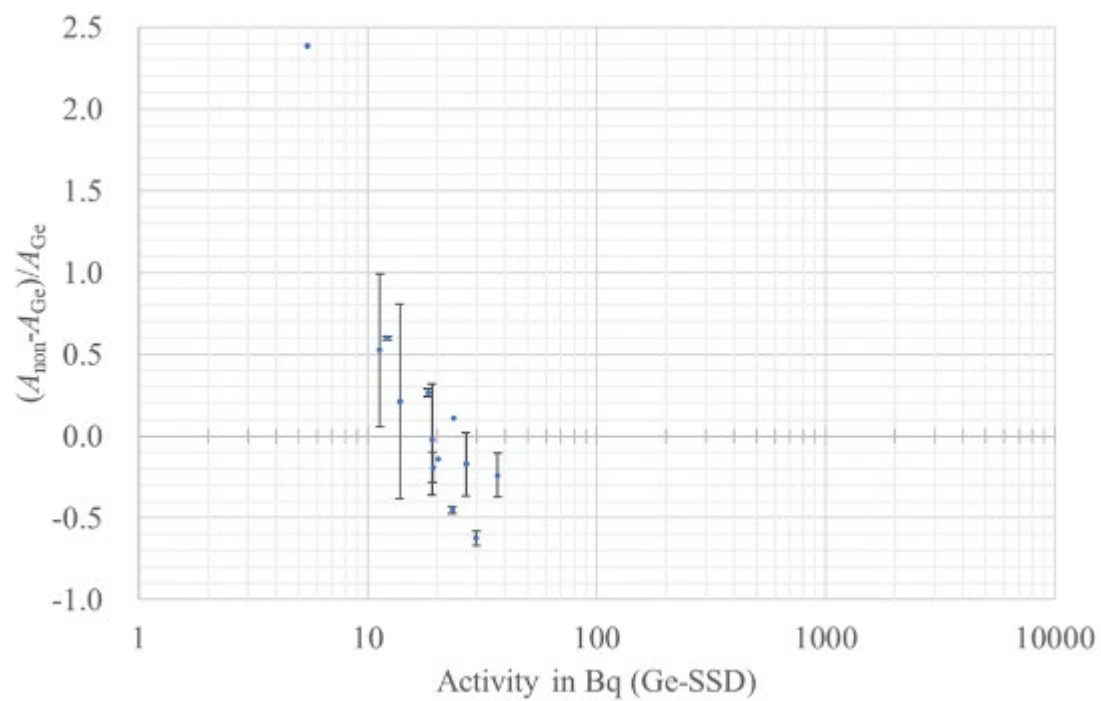
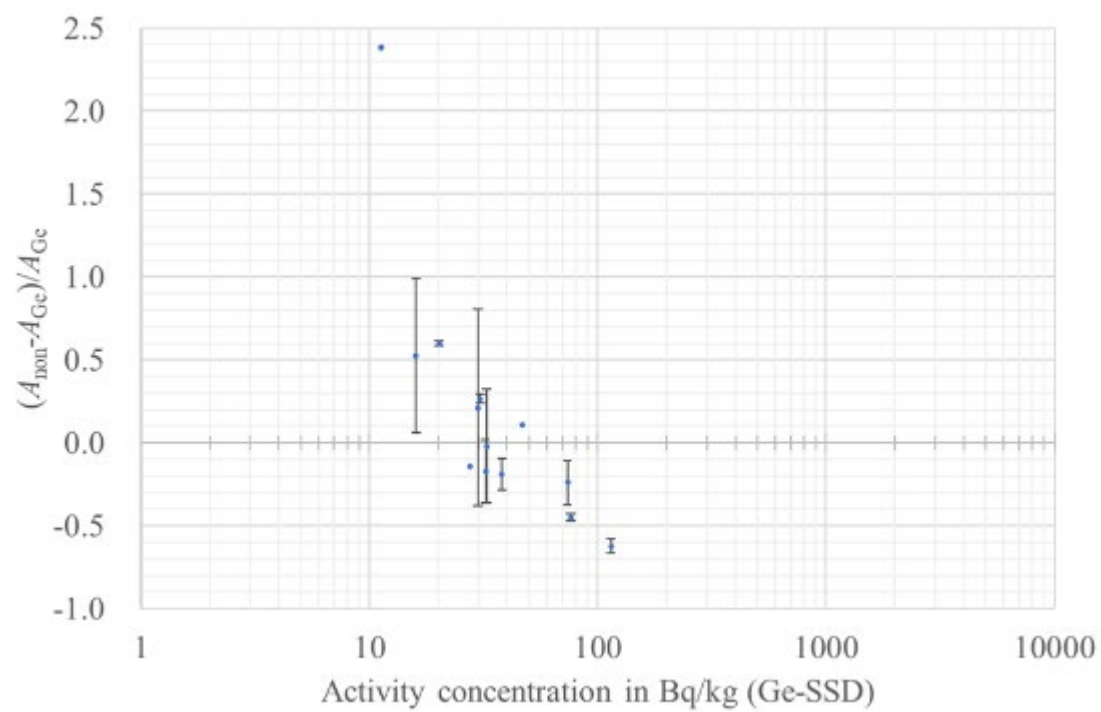


図 7 続き

マスタケ

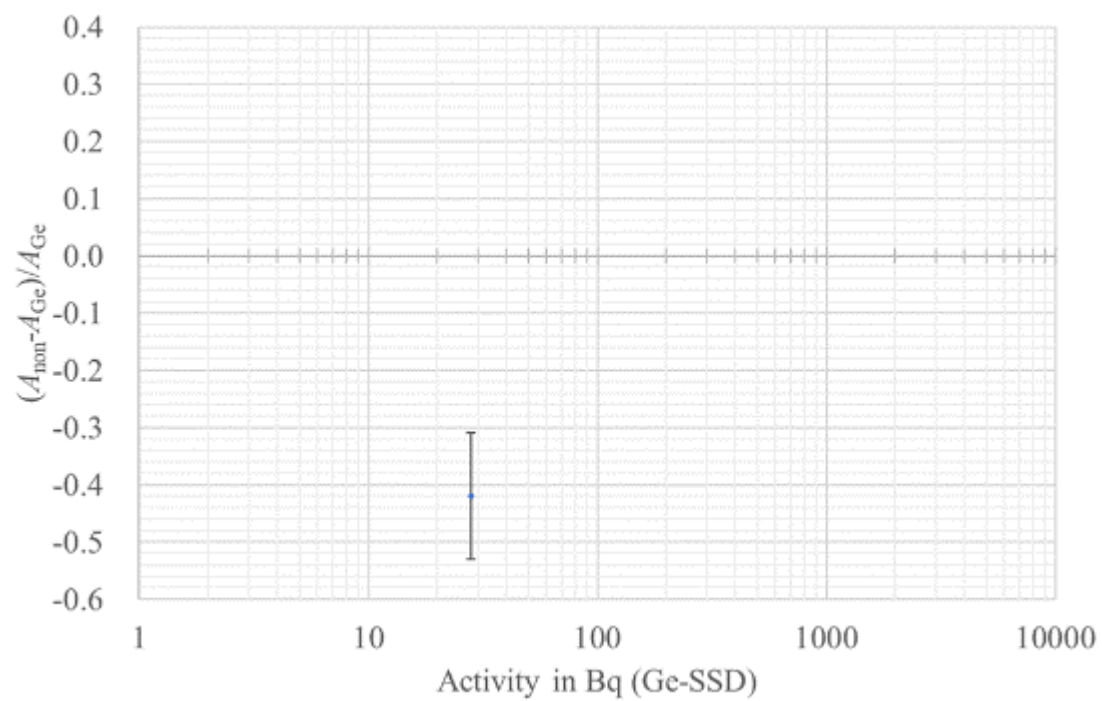
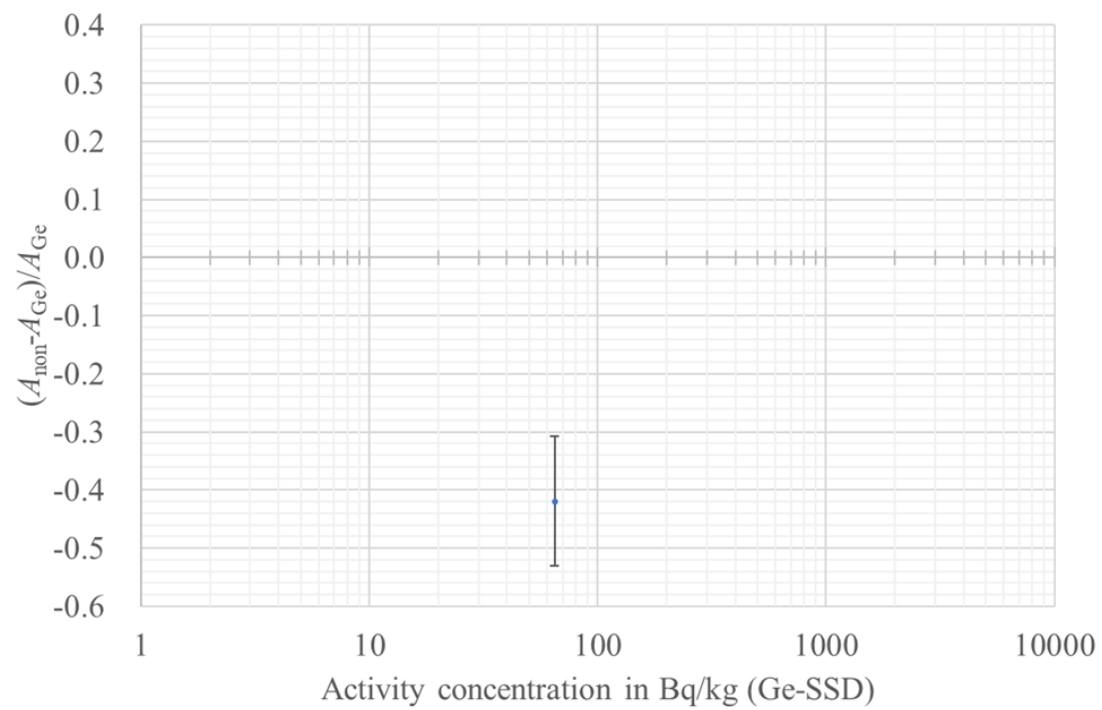


図 7 続き

マツタケ

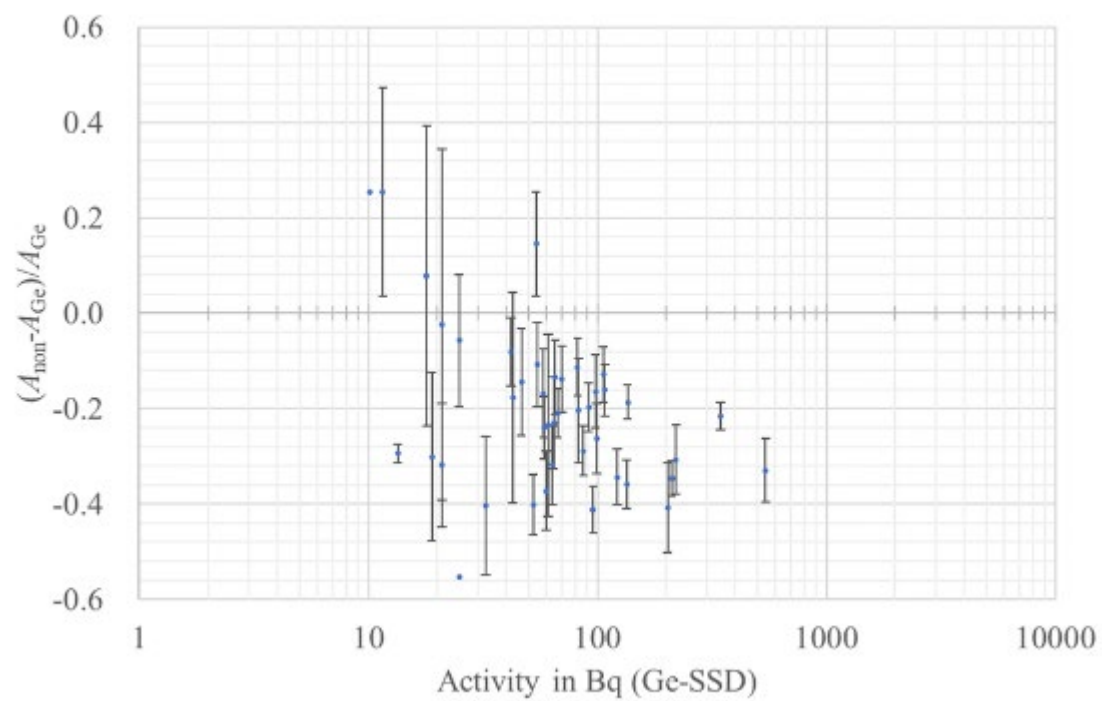
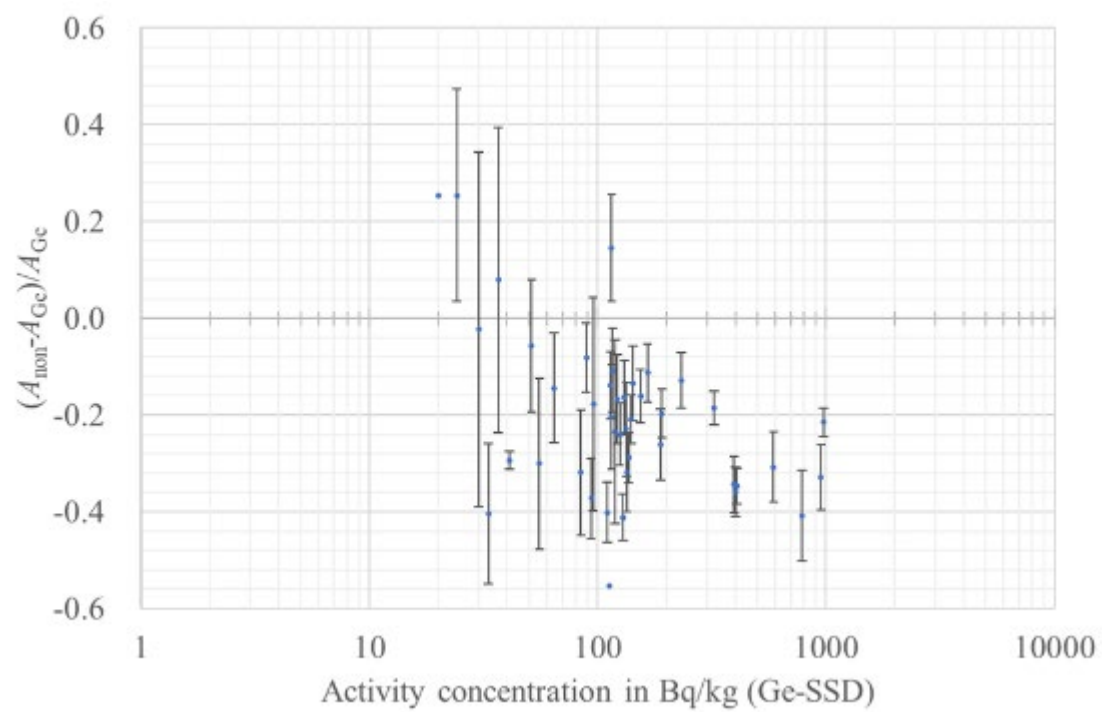


図 7 続き

ミネシメジ

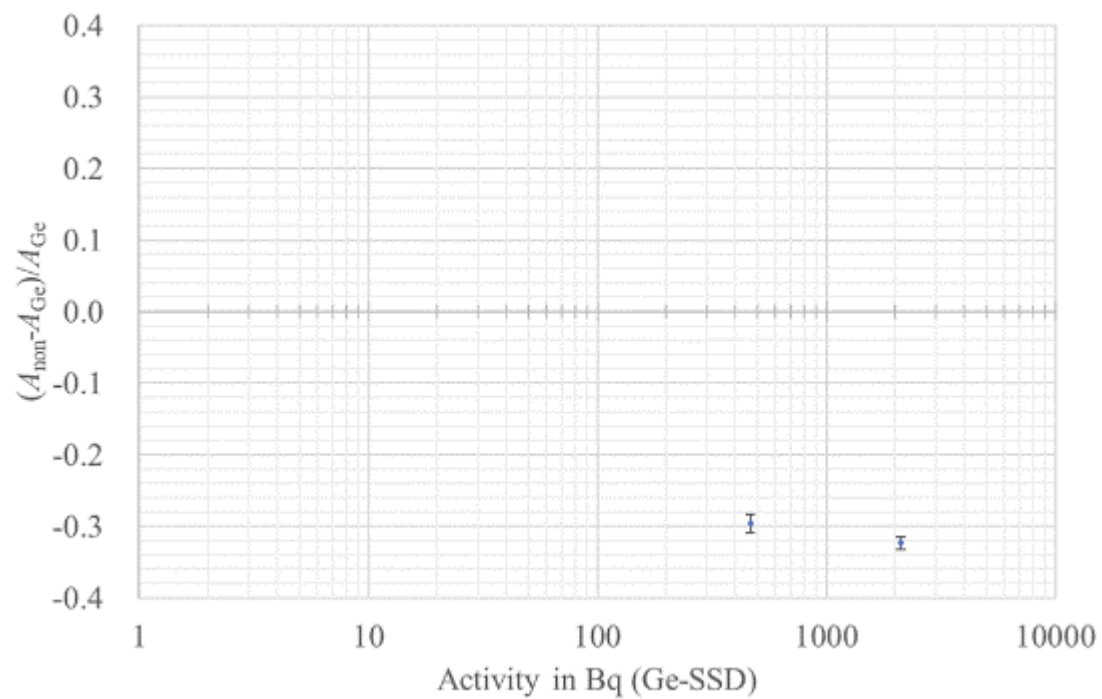
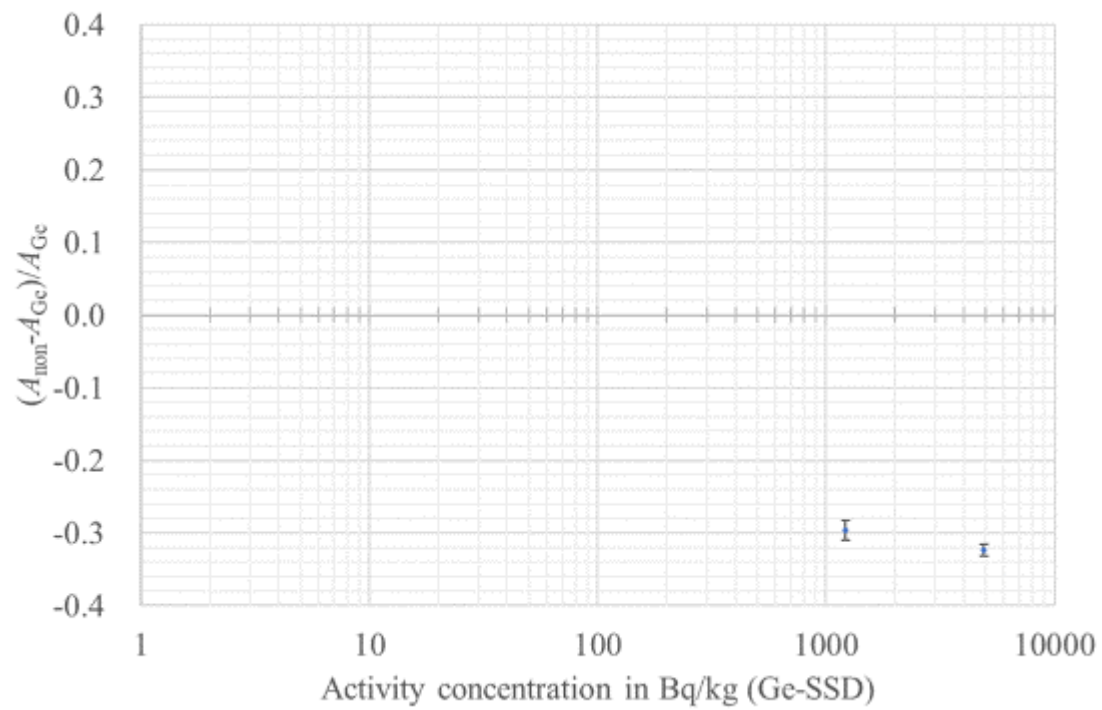


図 7 続き

ムキタケ

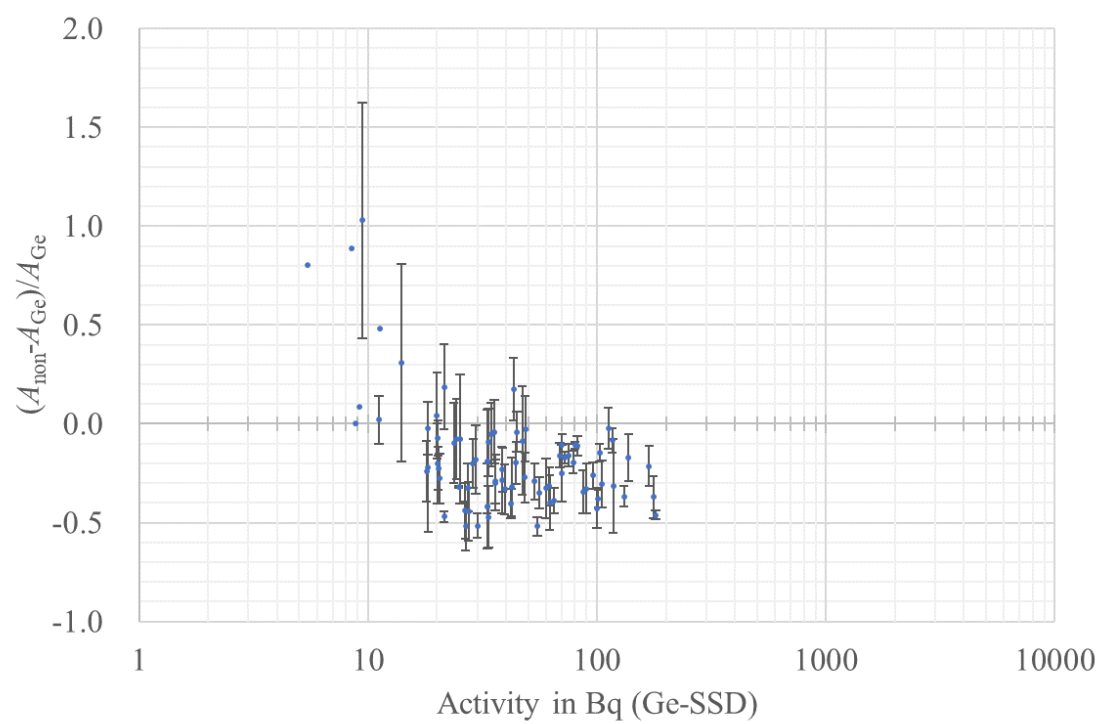
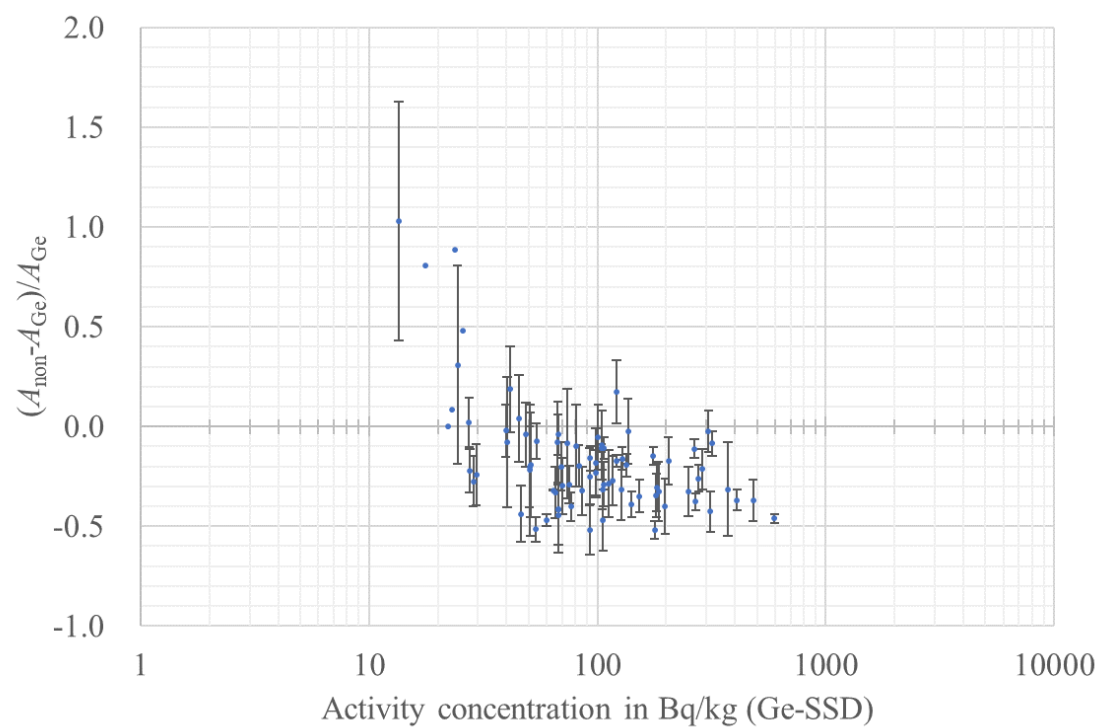


図 7 続き

ムラサキシメジ

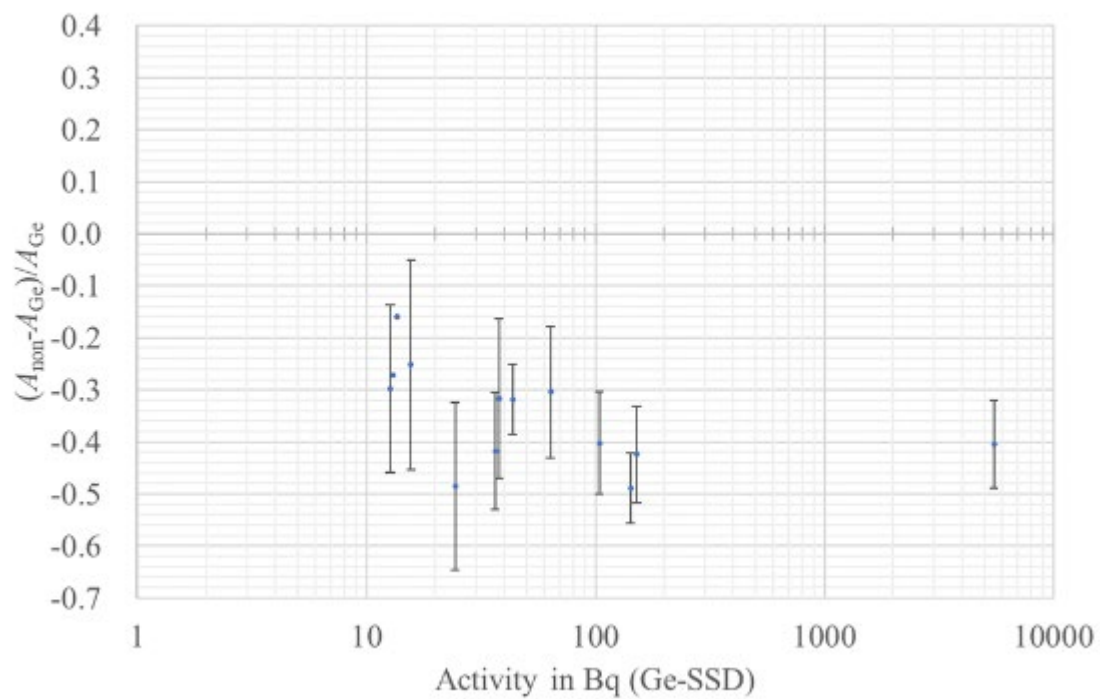
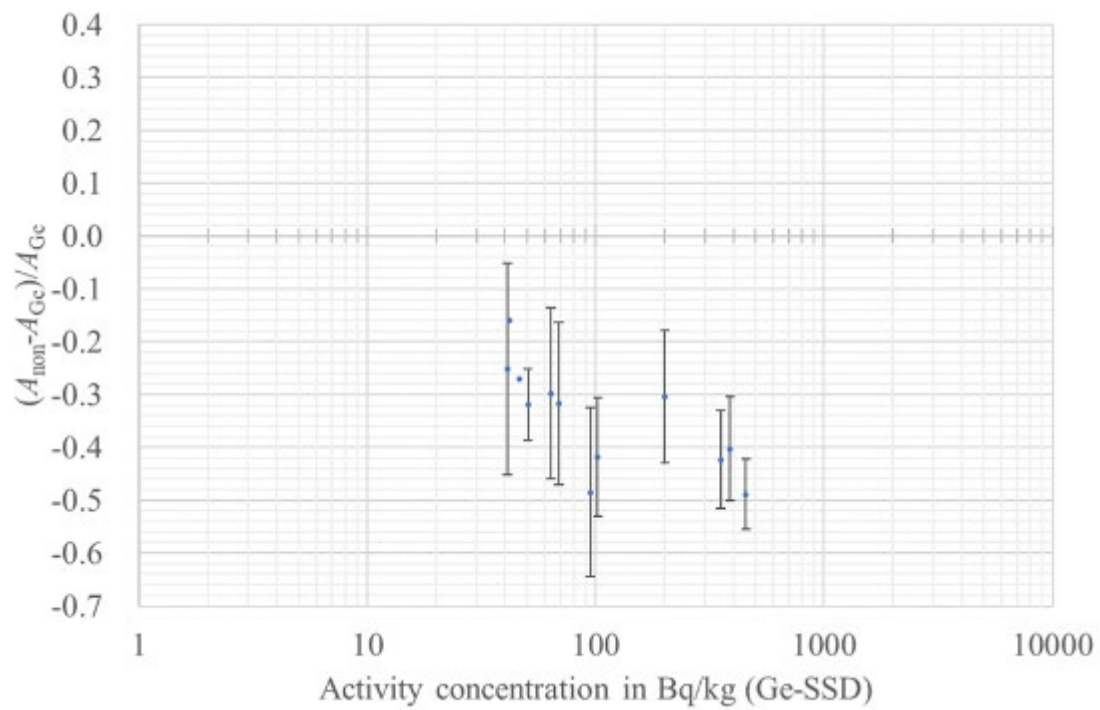


図 7 続き

ヤマドリタケモドキ

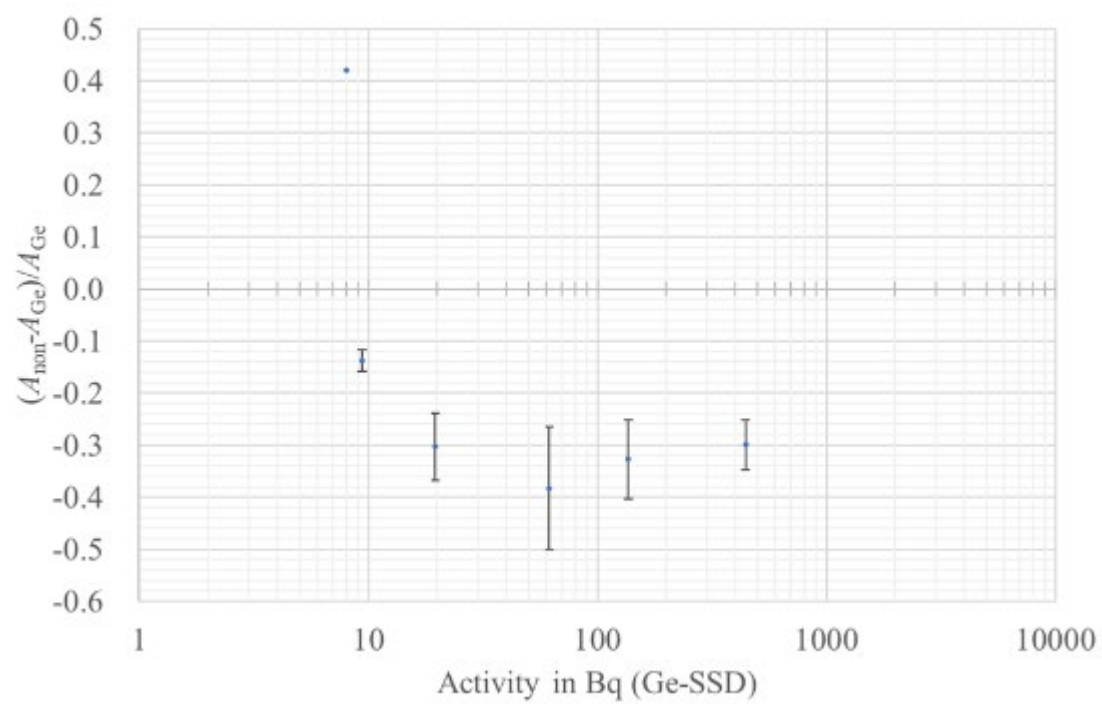
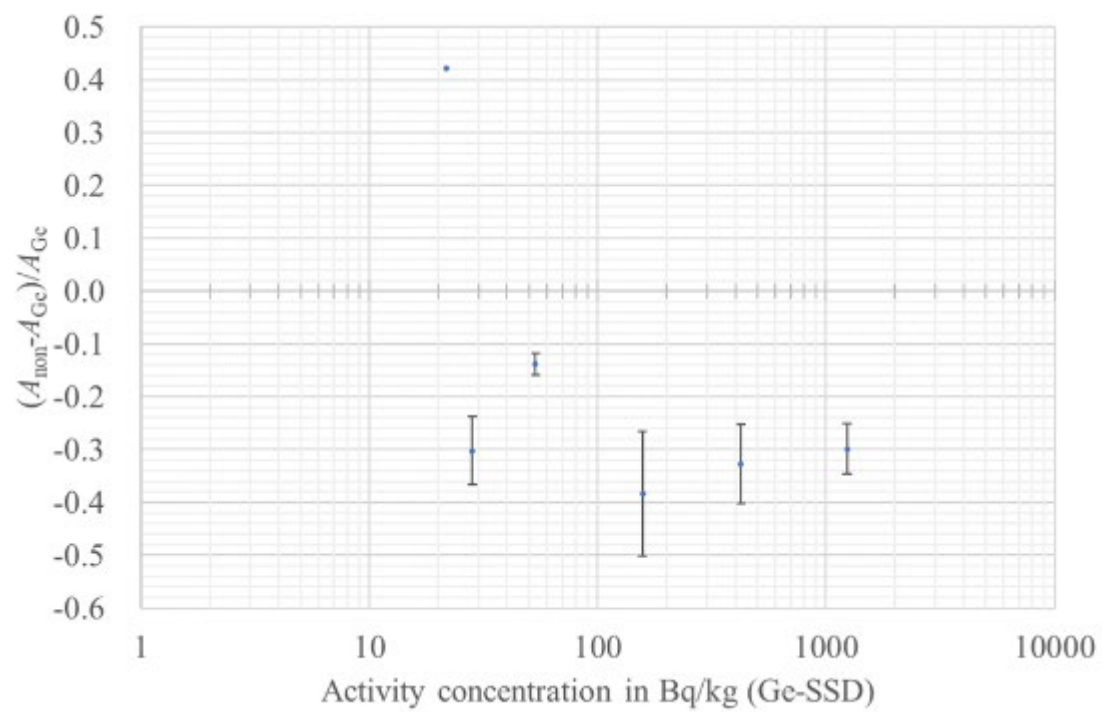


図 7 続き

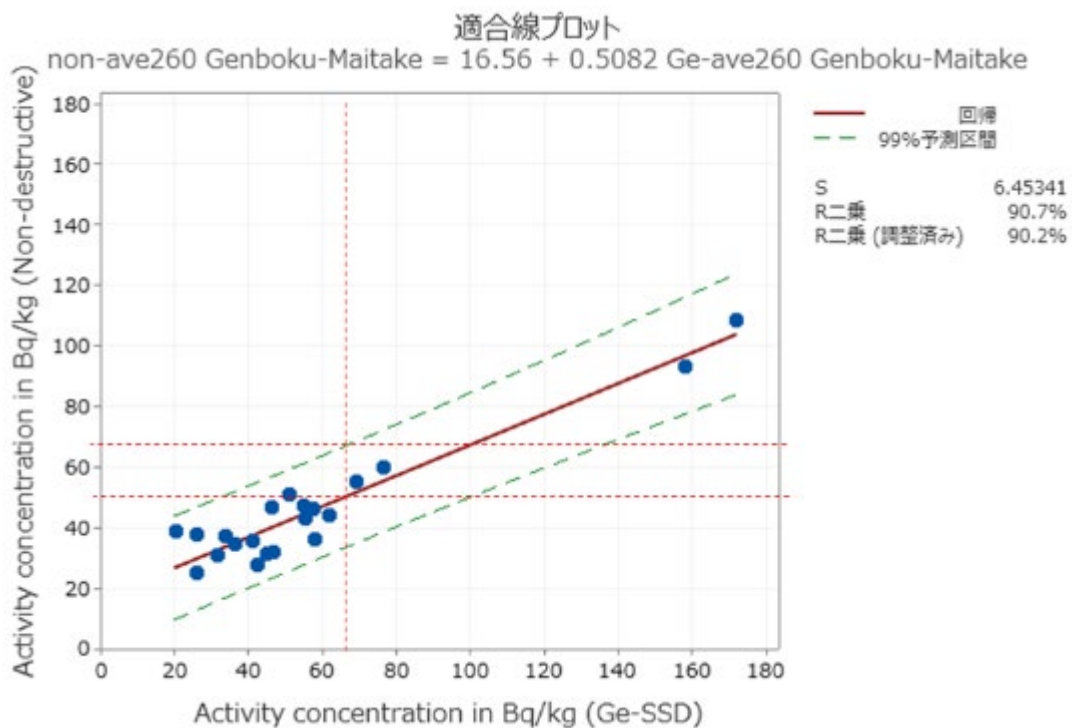
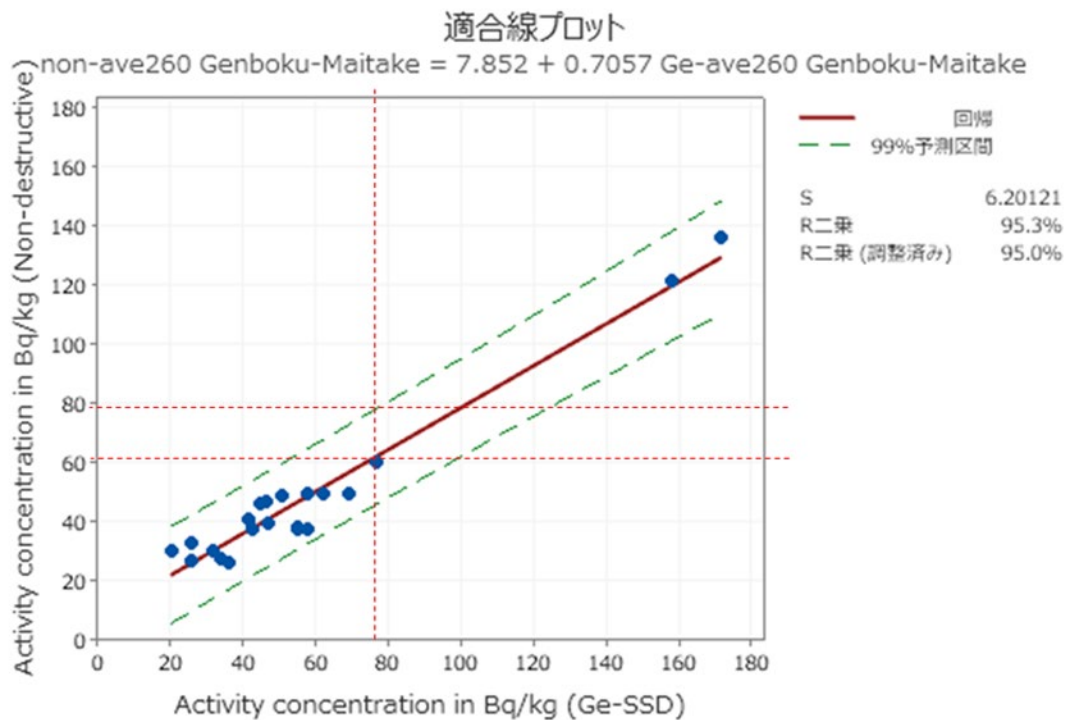


図 8-1 非破壊式装置(上段：FF1 下段：NDA2)と Ge 検出器の測定結果による
品目別回帰直線(マイタケ)

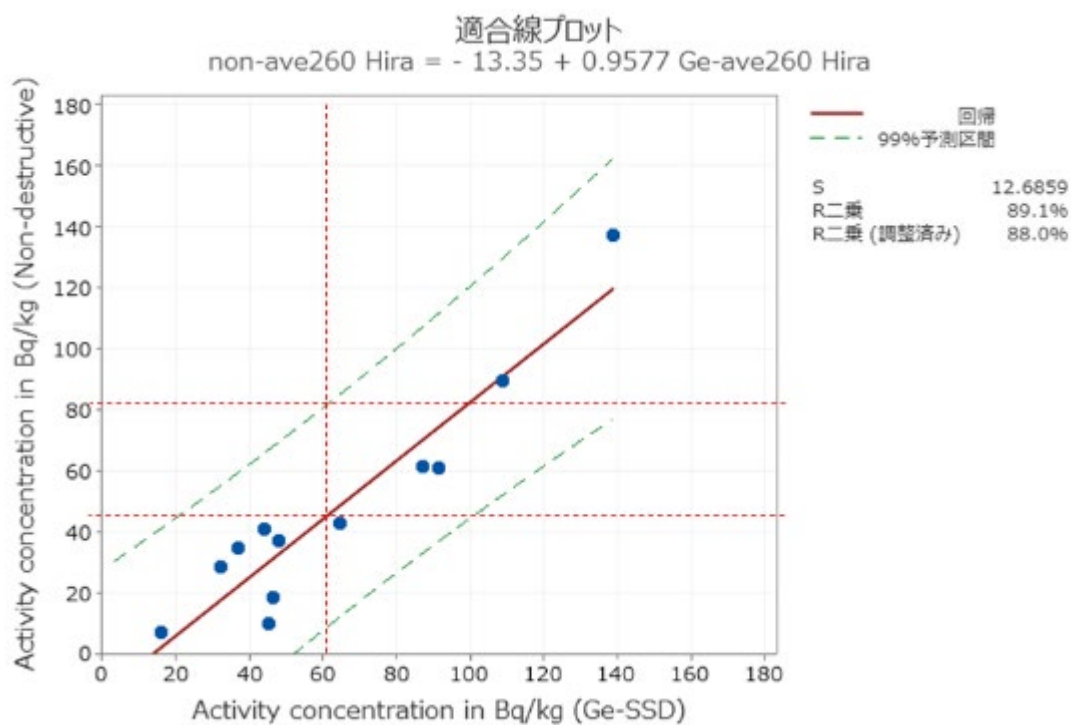
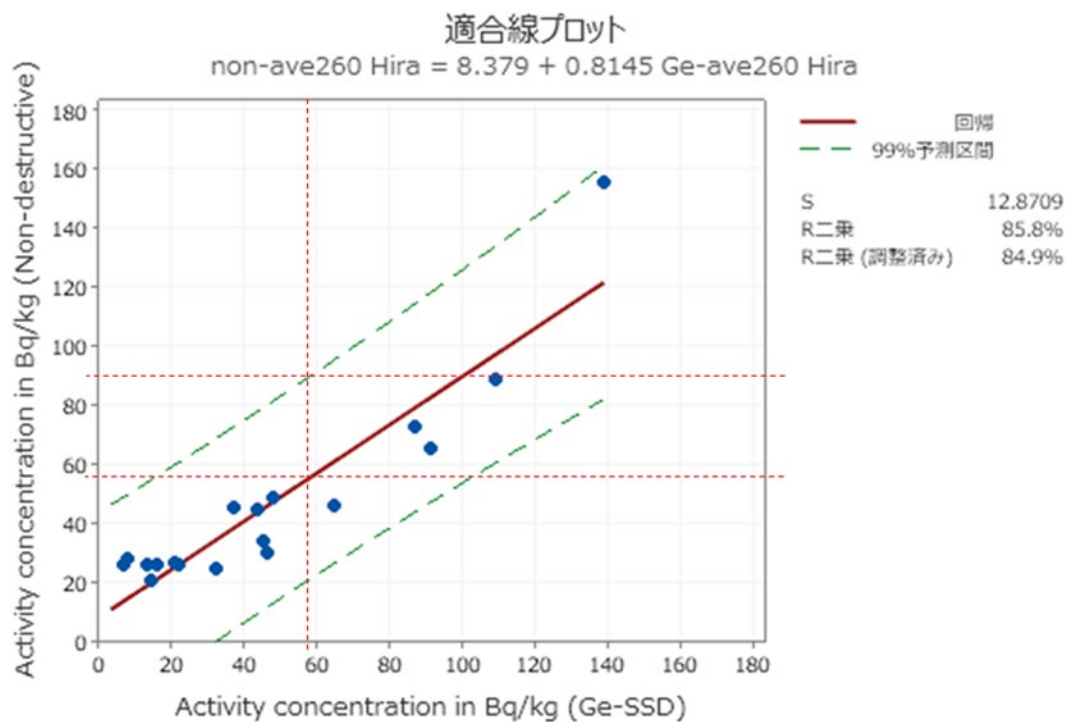


図 8-2 非破壊式装置(上段：FF1 下段：NDA2)と Ge 検出器の測定結果による
品目別回帰直線(ヒラタケ)

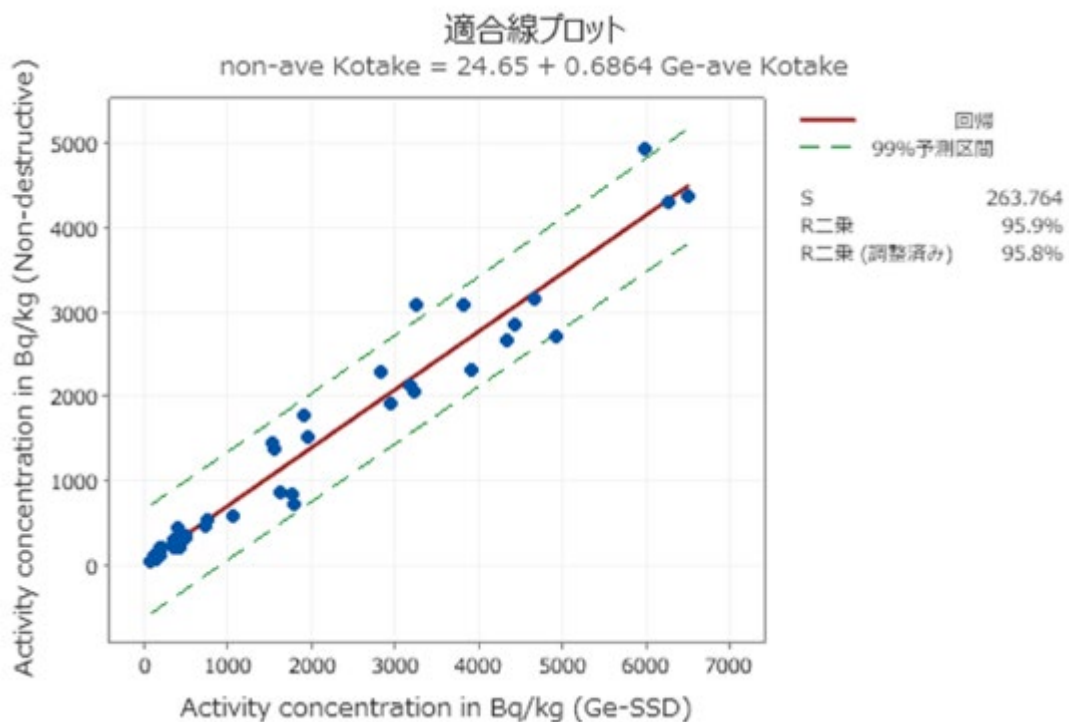
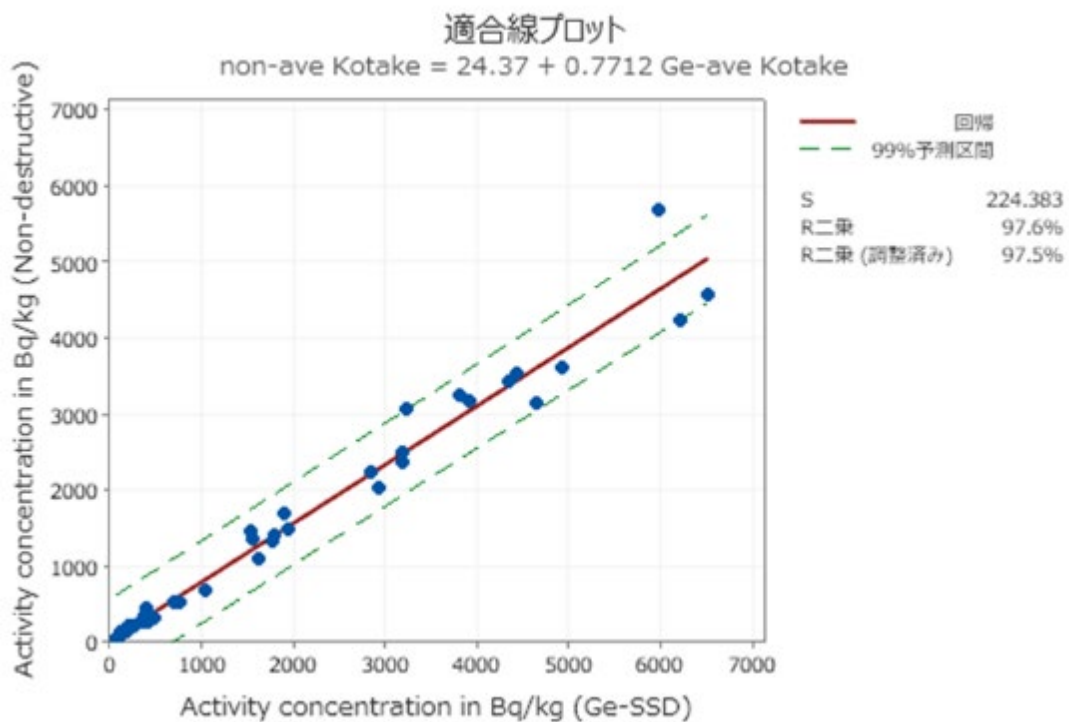


図 8-3 非破壊式装置(上段：FF1 下段：NDA2)と Ge 検出器の測定結果による
品目別回帰直線(コウタケ)

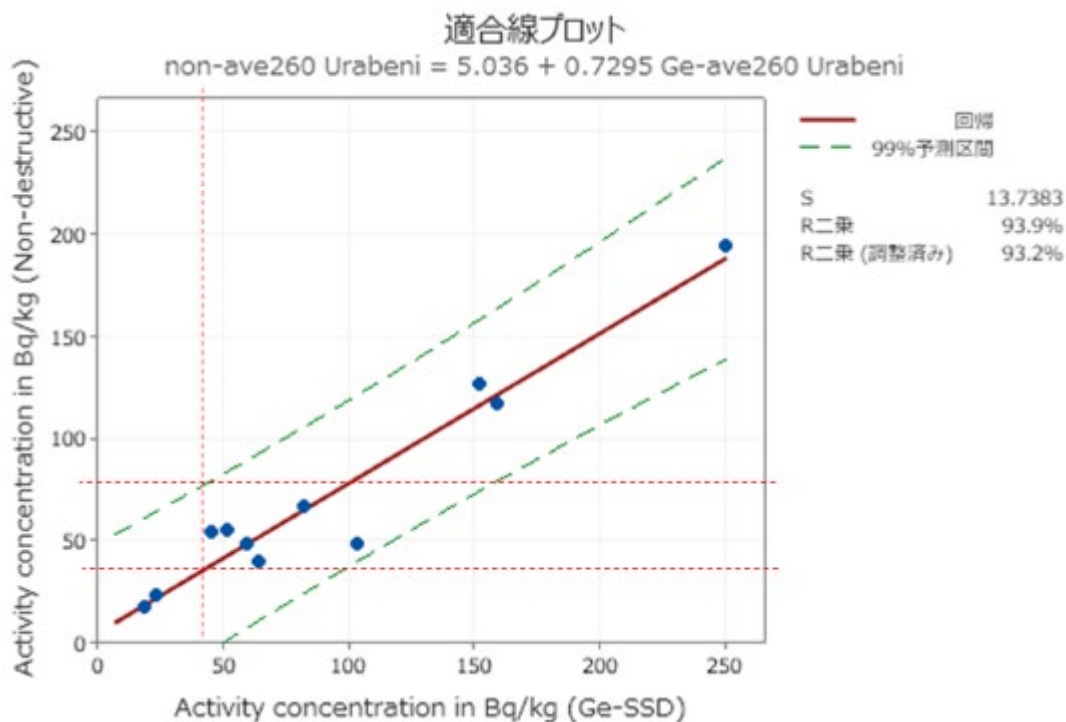
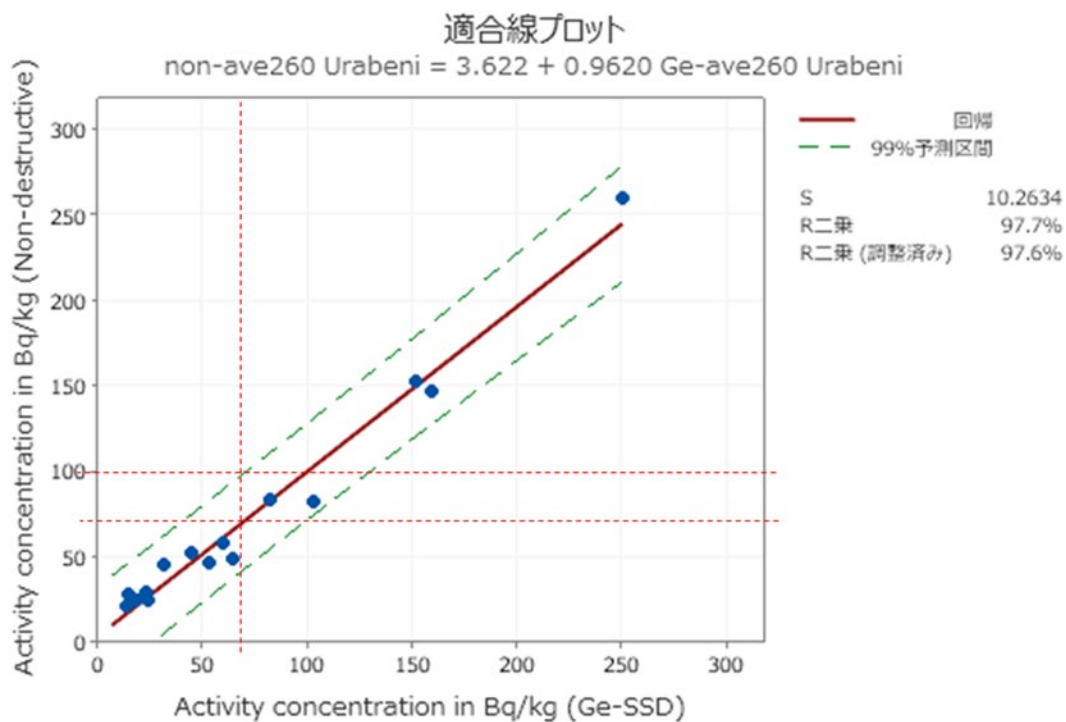


図 8-4 非破壊式装置(上段：FF1 下段：NDA2)と Ge 検出器の測定結果による
品目別回帰直線(ウラベニホテイシメジ)

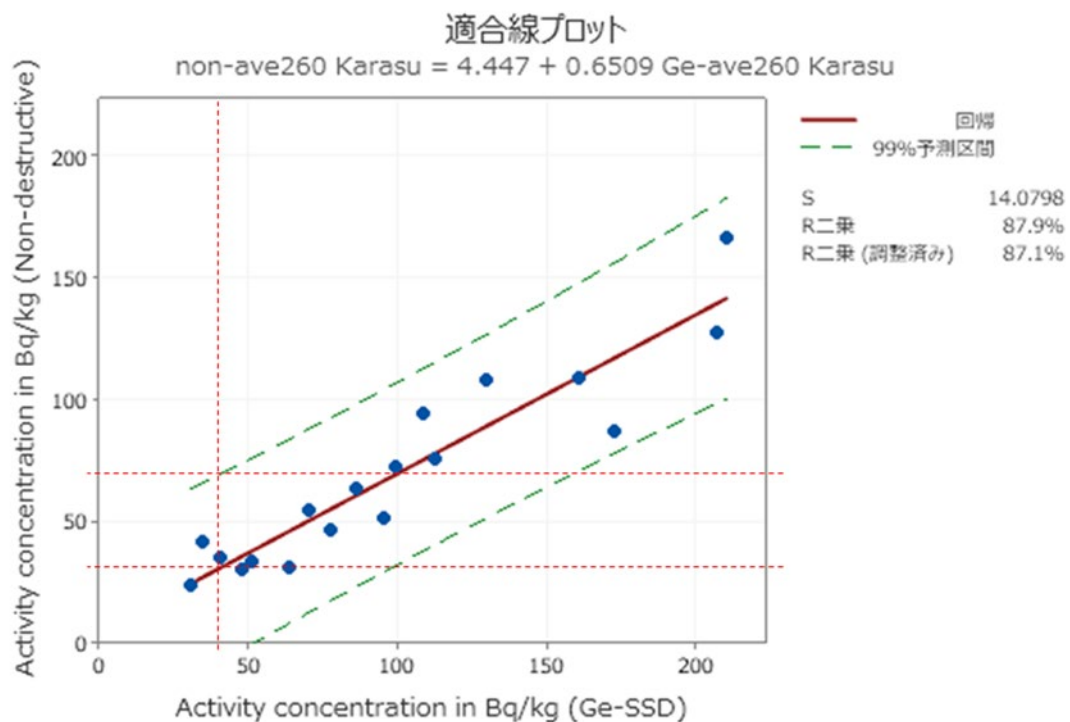
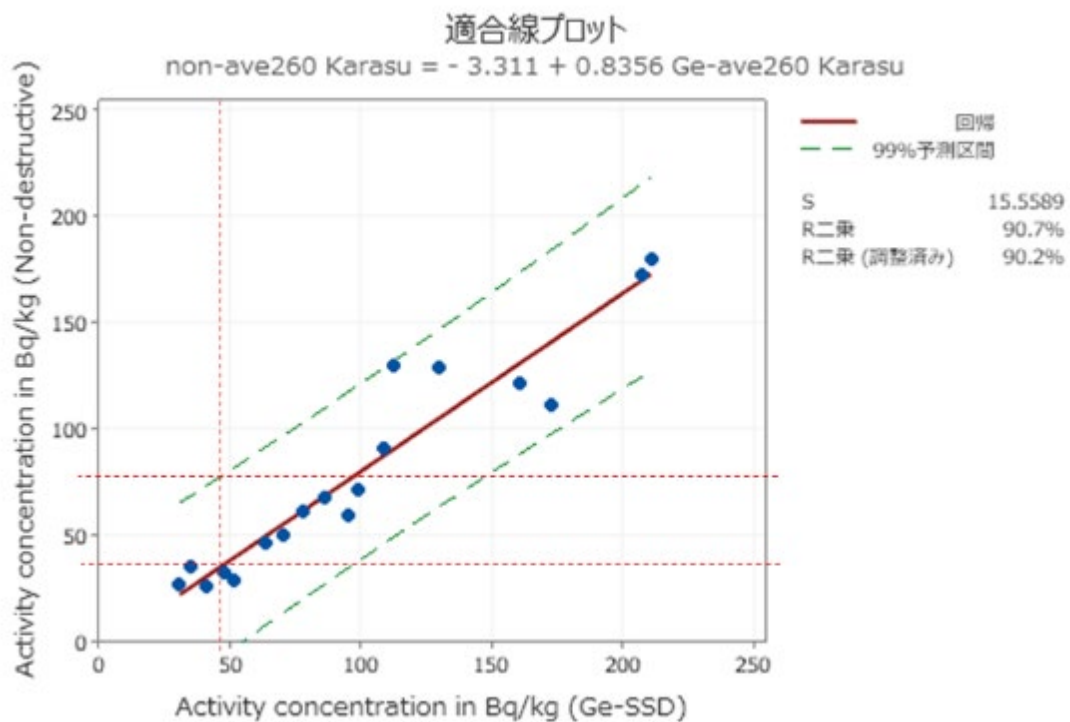


図 8-5 非破壊式装置(上段：FF1 下段：NDA2)と Ge 検出器の測定結果による
品目別回帰直線(カラストケ)

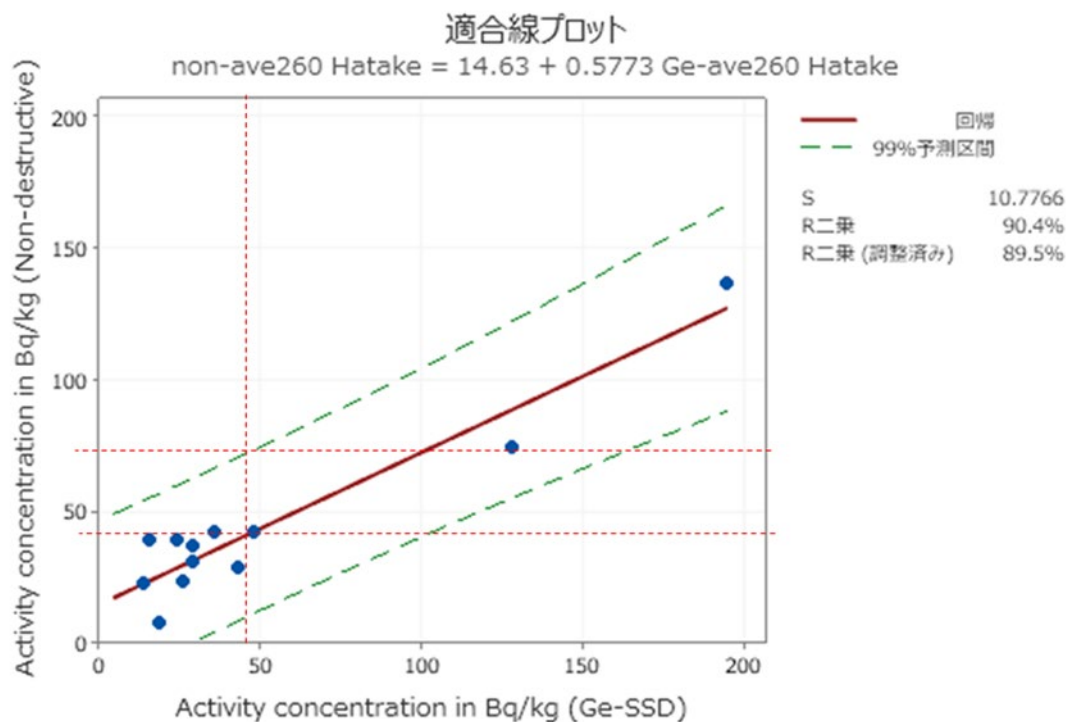
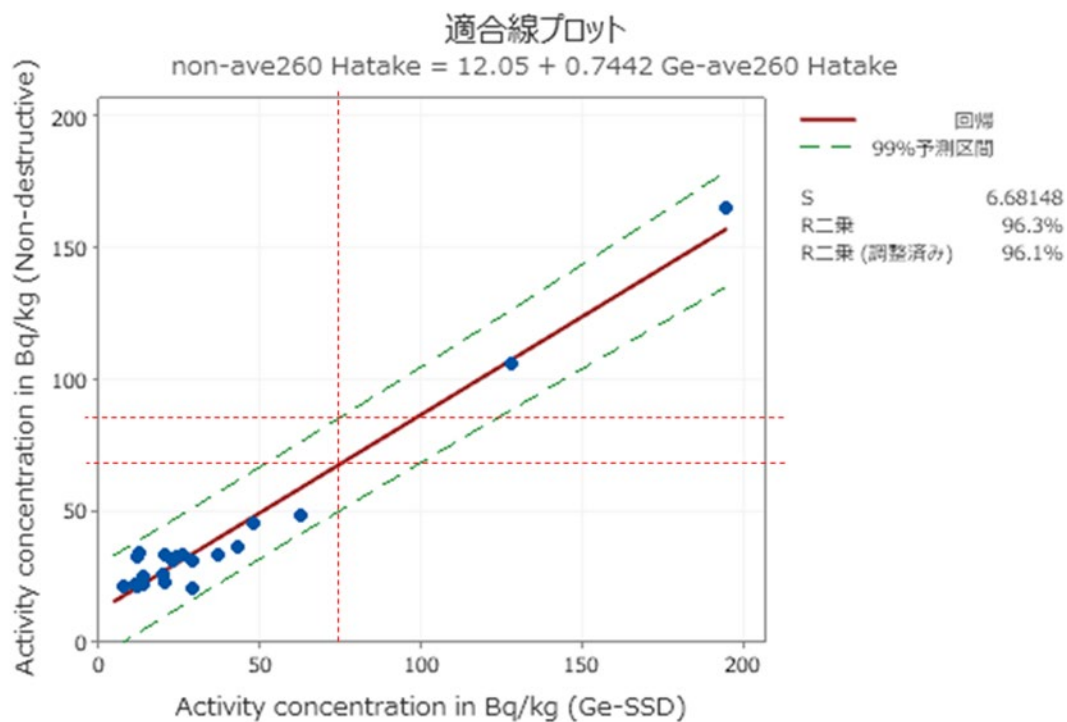


図 8-6 非破壊式装置(上段：FF1 下段：NDA2)と Ge 検出器の測定結果による
品目別回帰直線(ハタケシメジ)

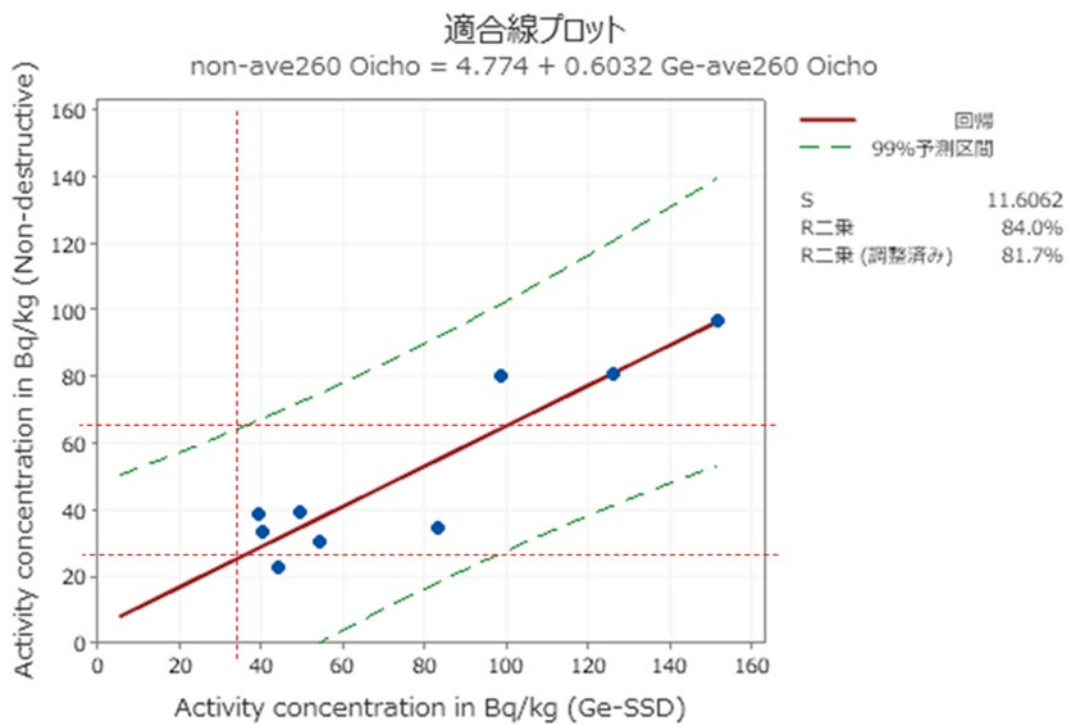
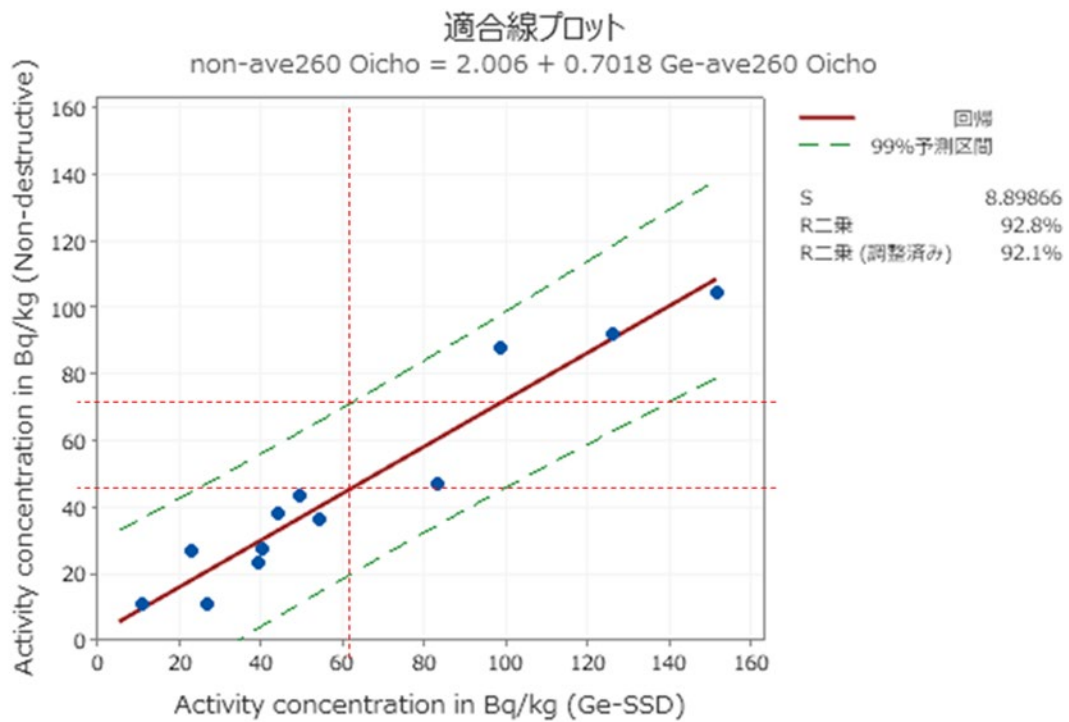


図 8-7 非破壊式装置(上段：FF1 下段：NDA2)と Ge 検出器の測定結果による
品目別回帰直線(オオイチョウタケ)

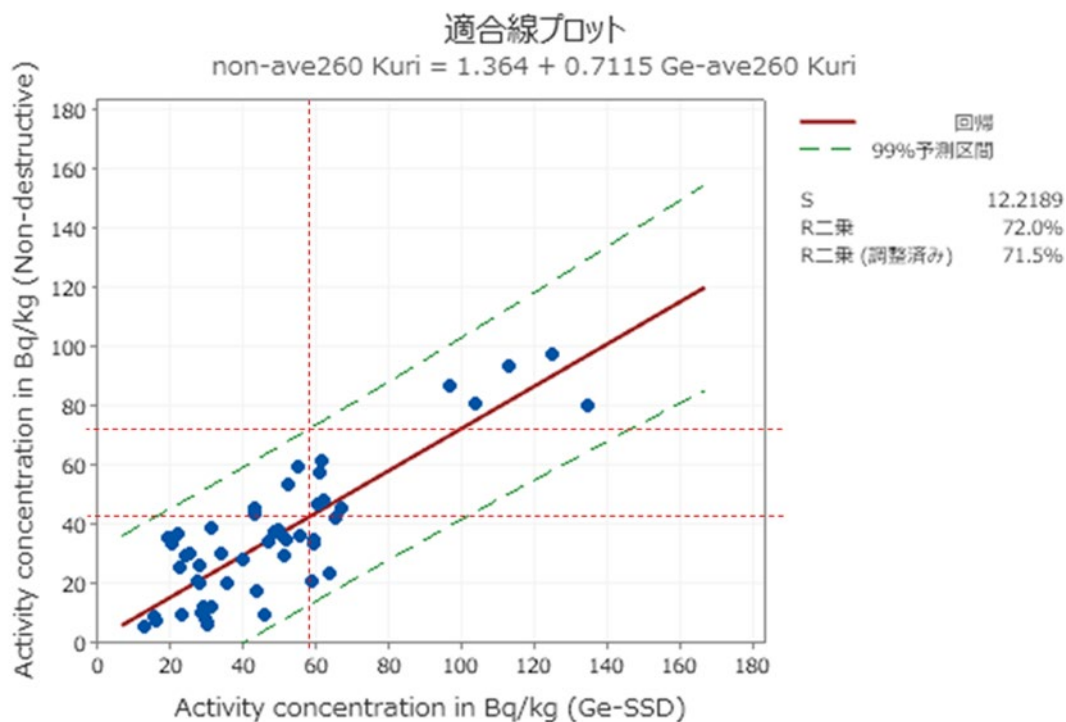
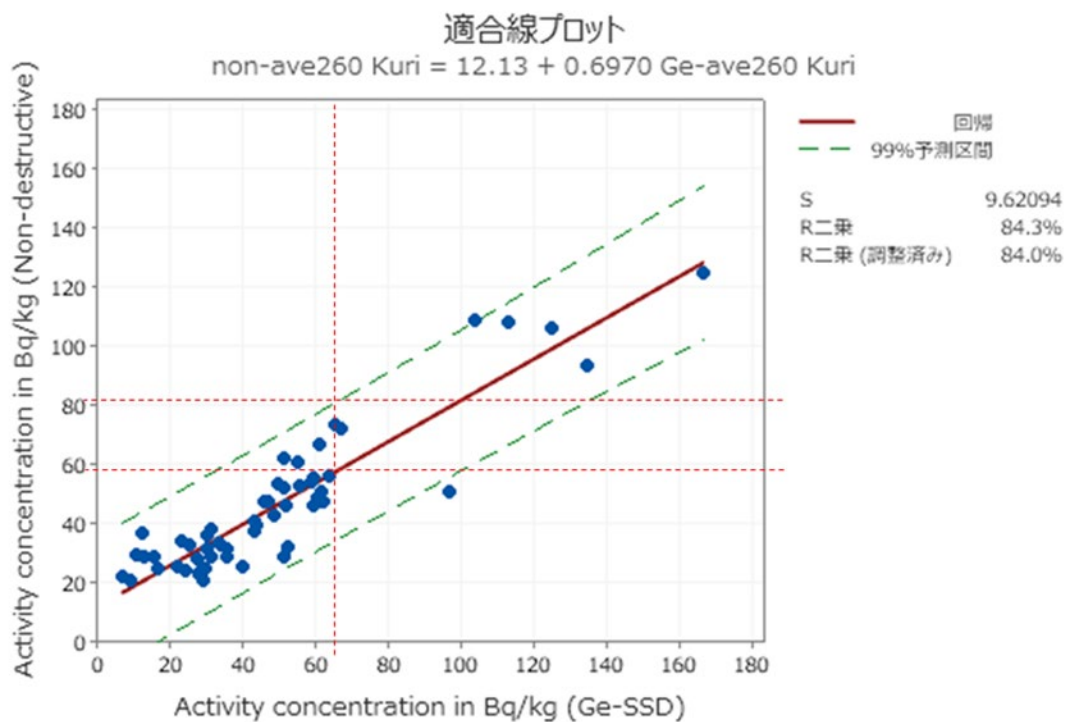


図 8-8 非破壊式装置(上段：FF1 下段：NDA2)と Ge 検出器の測定結果による
品目別回帰直線(クリタケ)

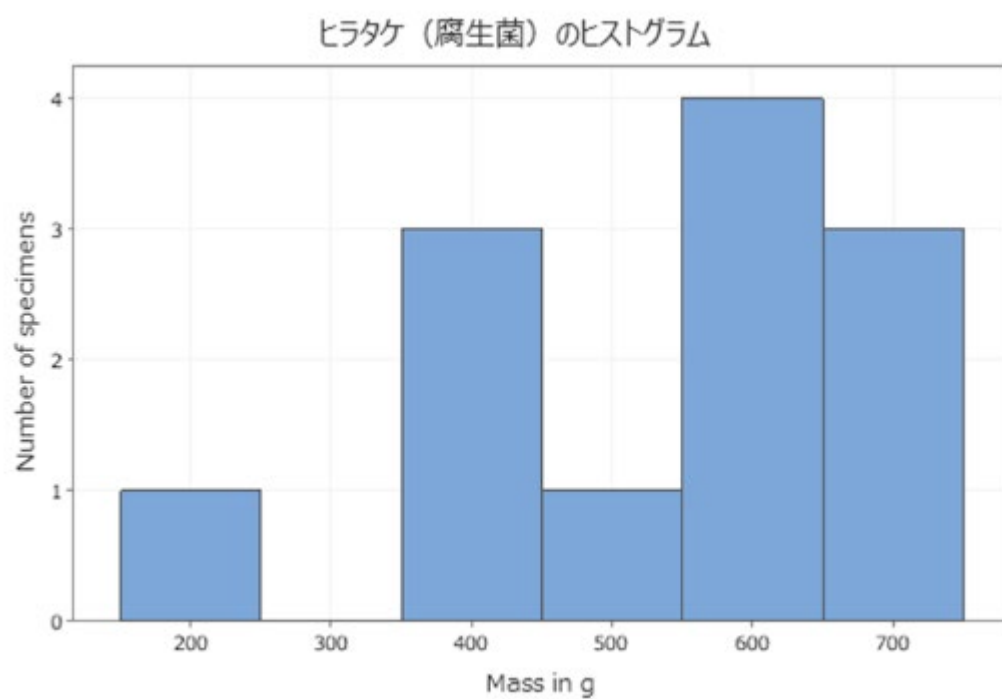
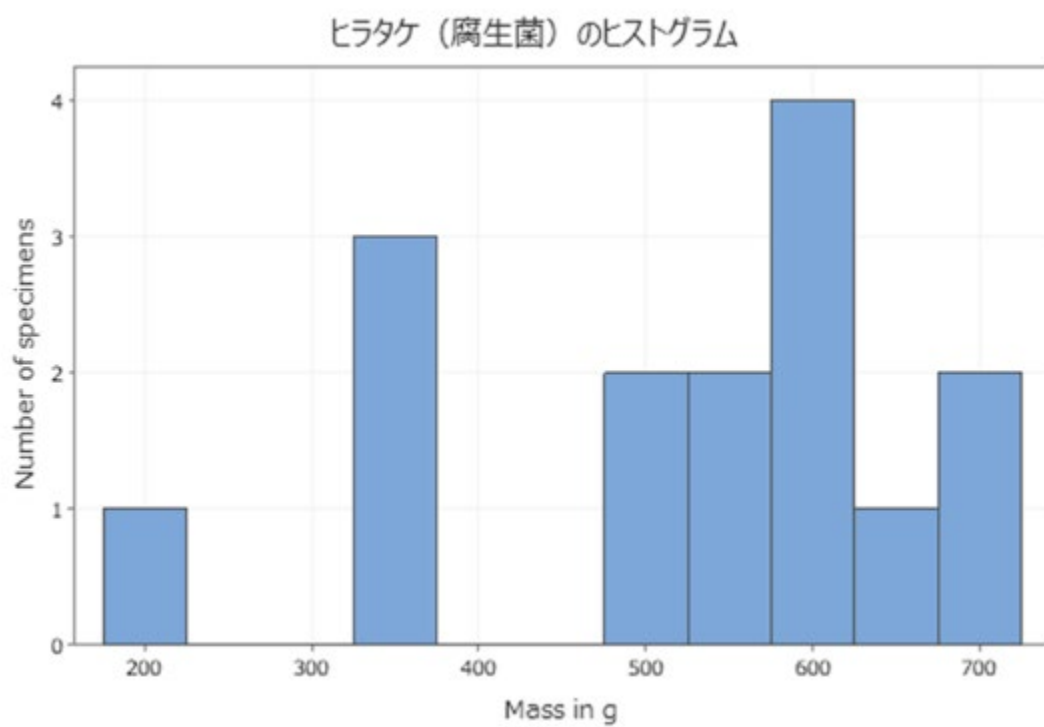


図9 測定に用いたヒラタケの質量分布(上段：FF1 下段：NDA2)

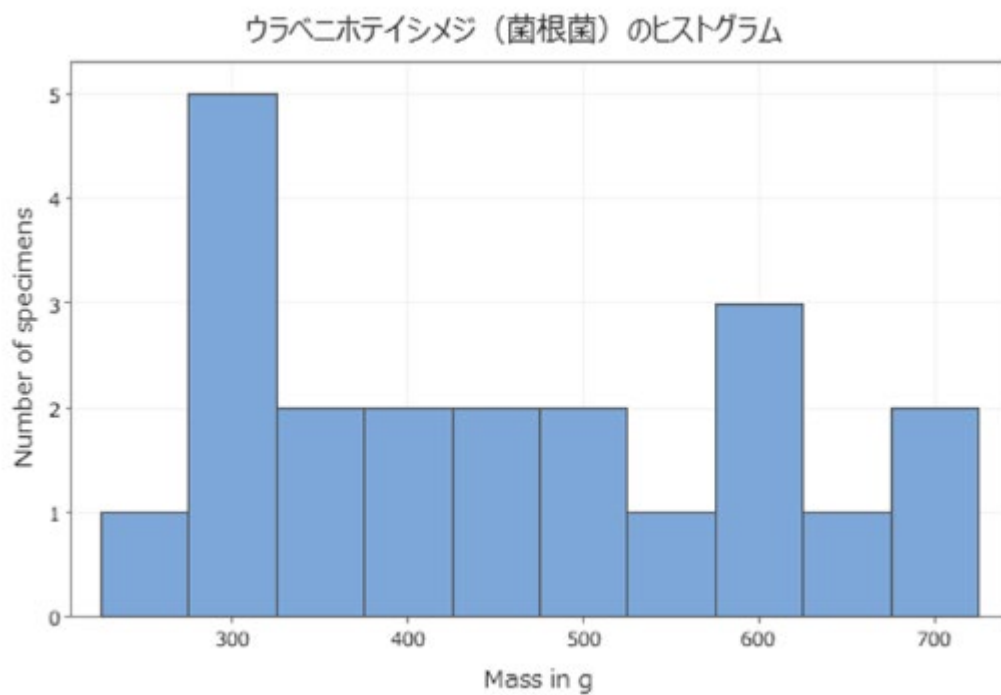
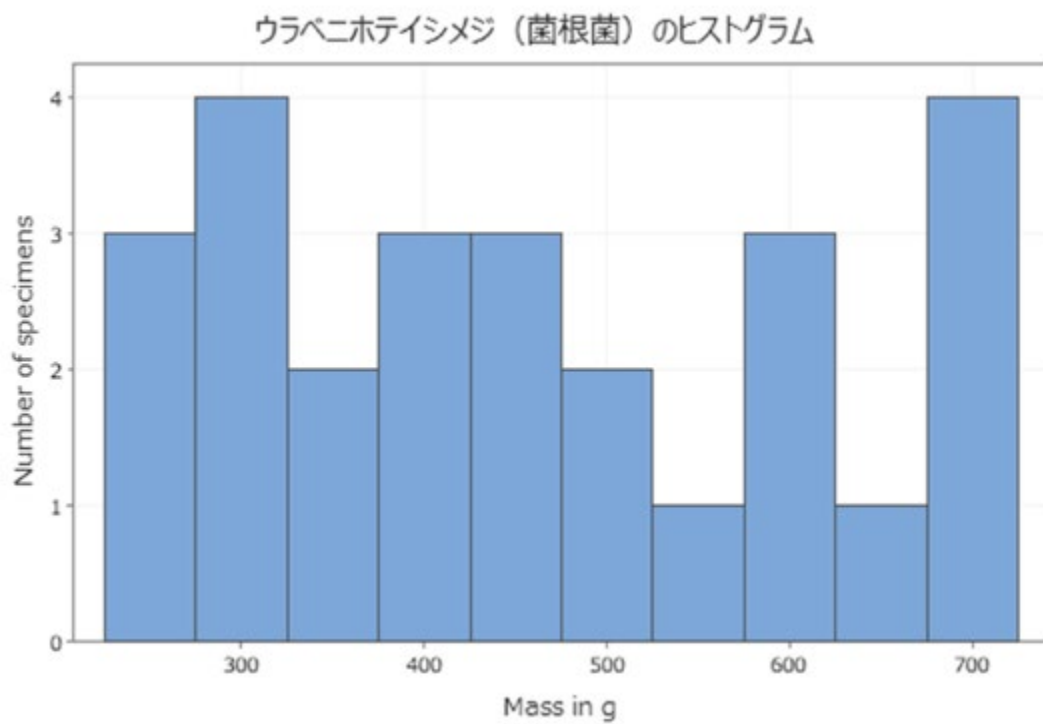


図 10 測定に用いたウラベニホテイシメジの質量分布(上段：FF1 下段：NDA2)

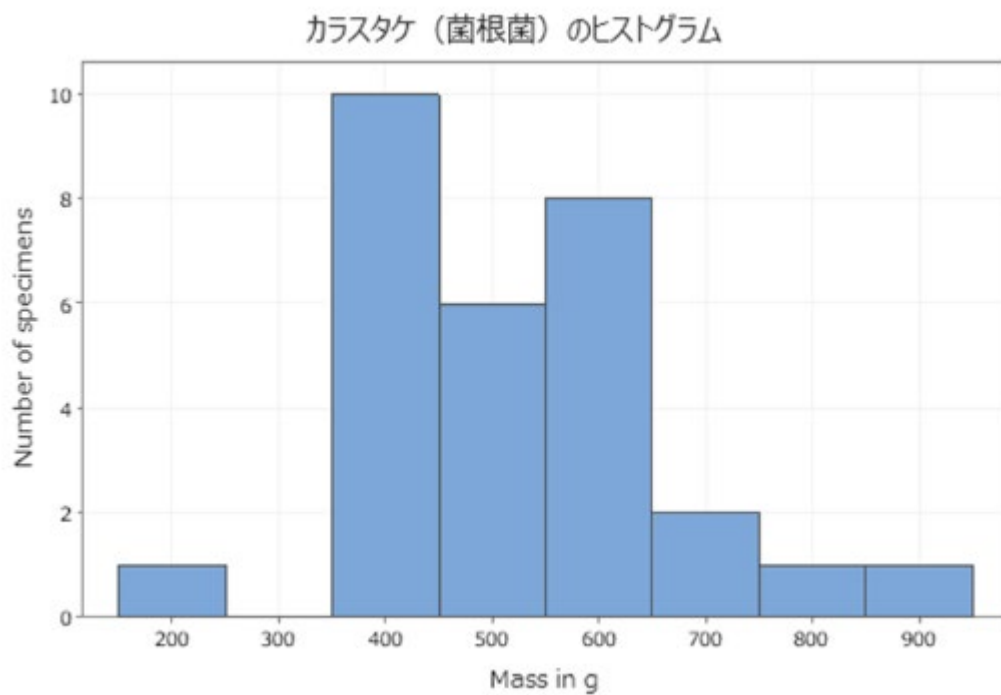
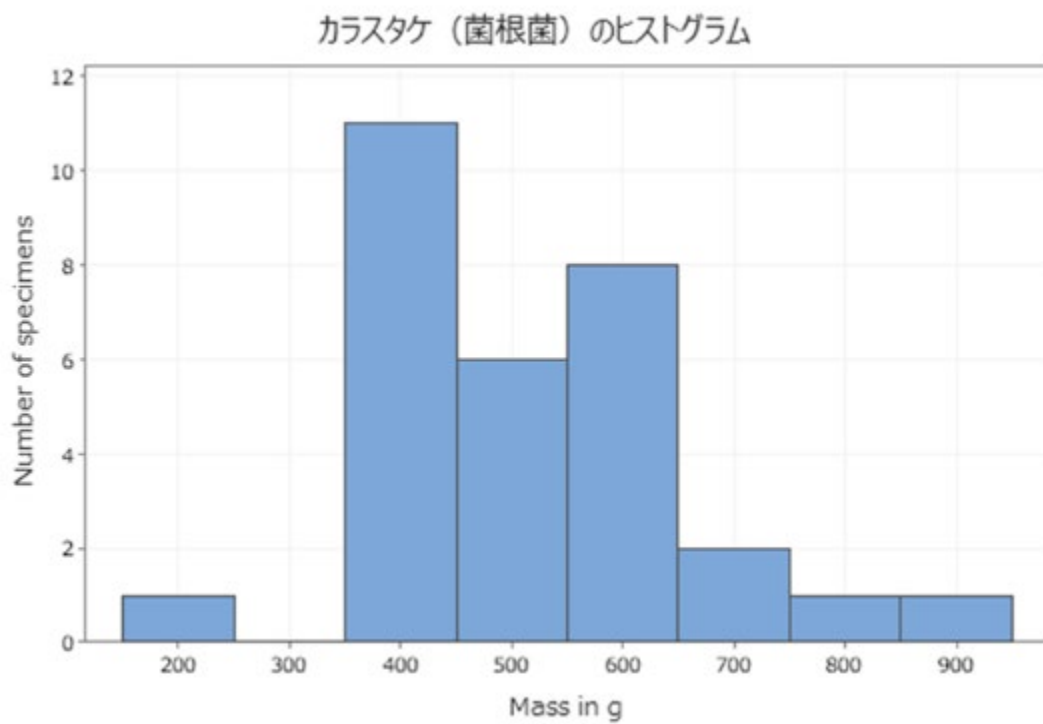


図 11 測定に用いたカラストケの質量分布(上段：FF1 下段：NDA2)

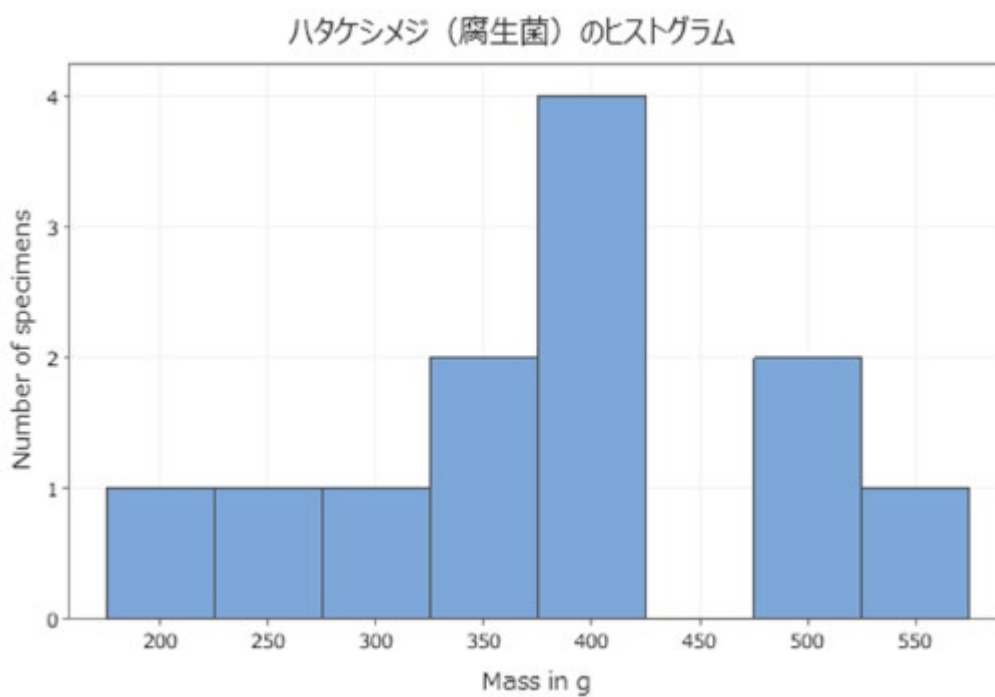
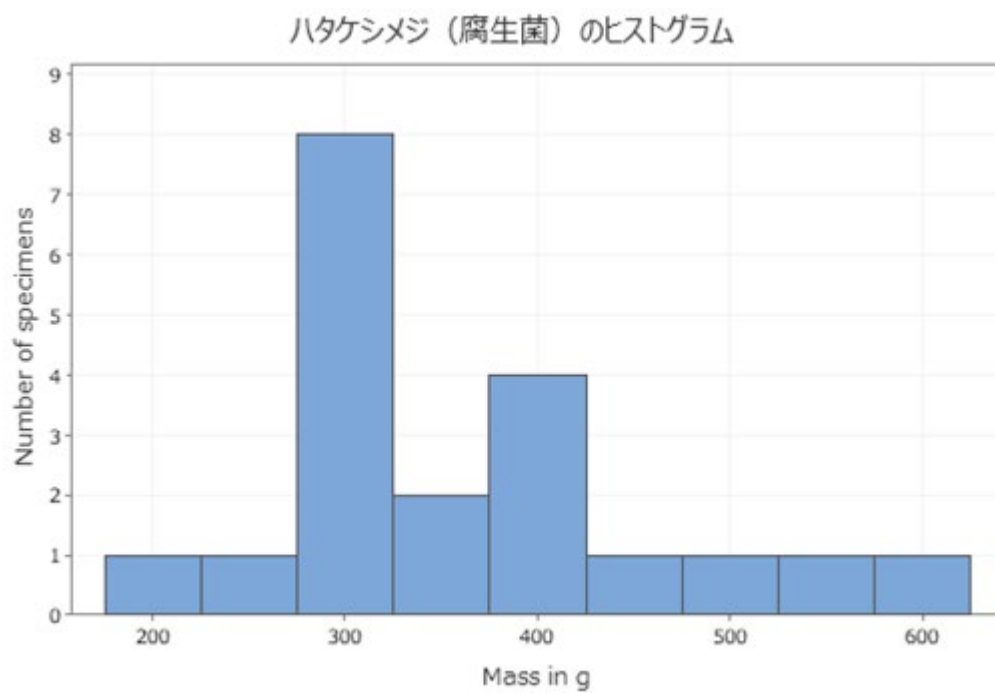


図 12 測定に用いたハタケシメジの質量分布(上段：FF1 下段：NDA2)

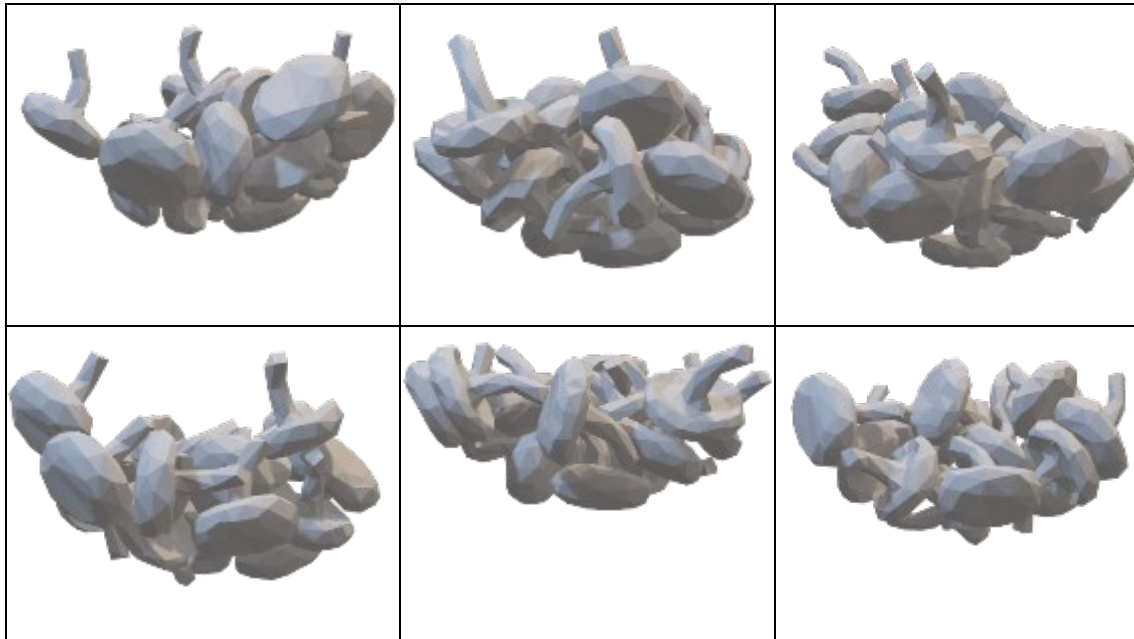


図 13 シミュレーションに用いた計算モデルの例(試料配置パターン例)

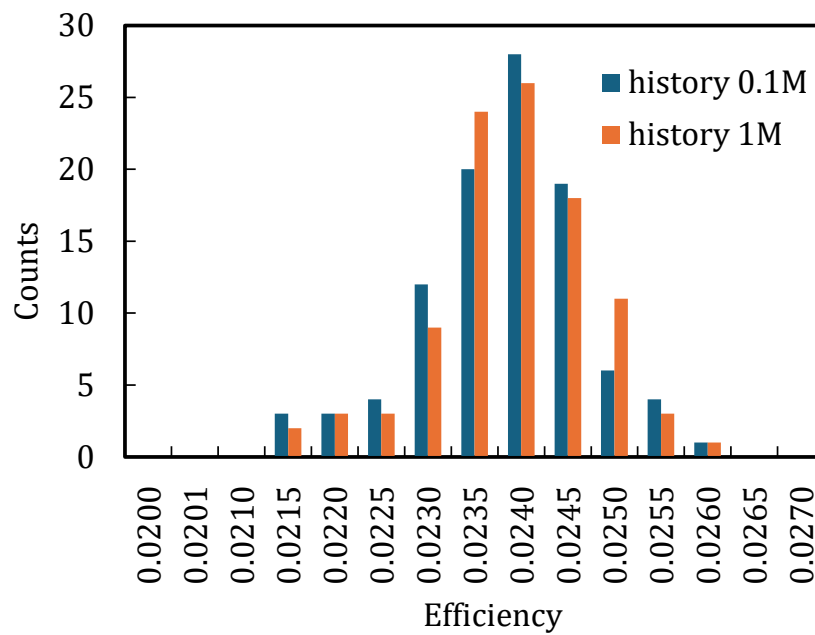


図 14 シミュレーションによる 100 通りの異なる試料配置パターンでの検出効率分布

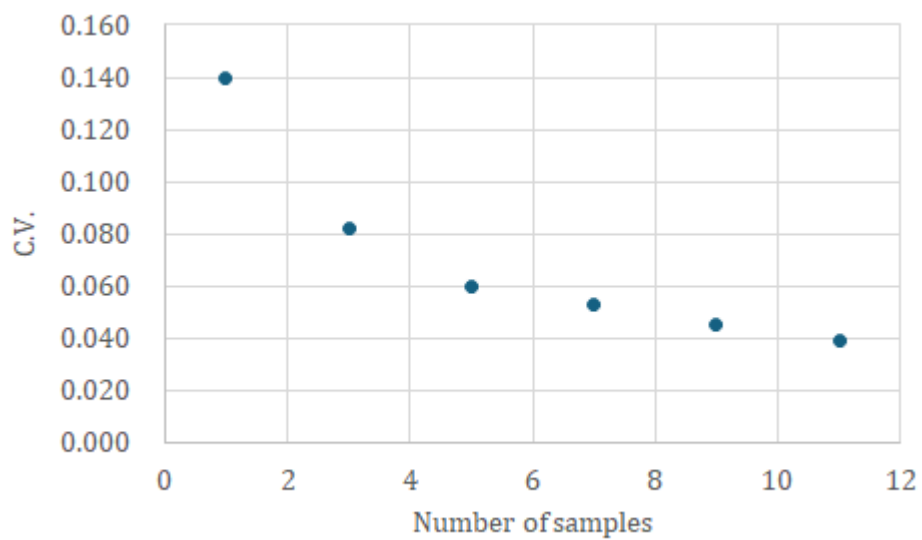
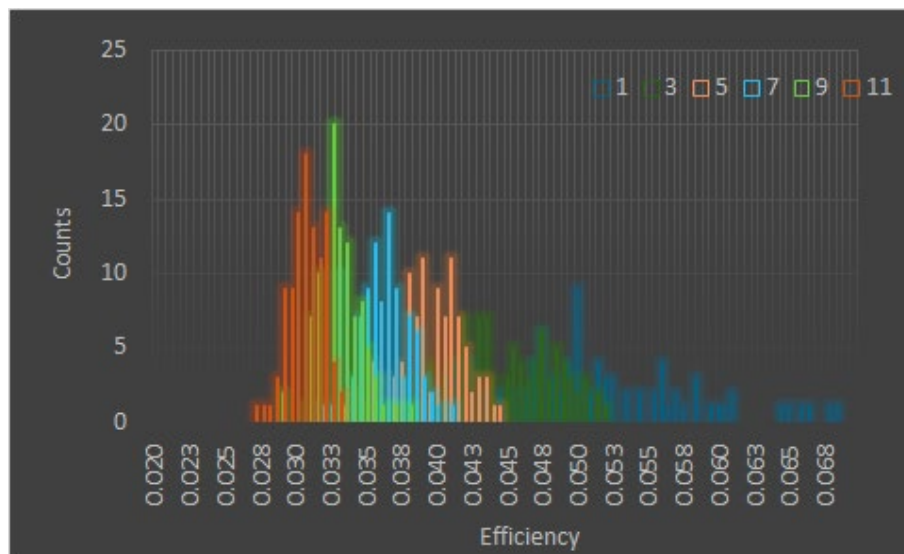


図 15 シミュレーションによる試料数の異なる試料配置パターンでの検出効率変化
(上段：各試料数での効率分布 下段：検出効率の試料数依存性)

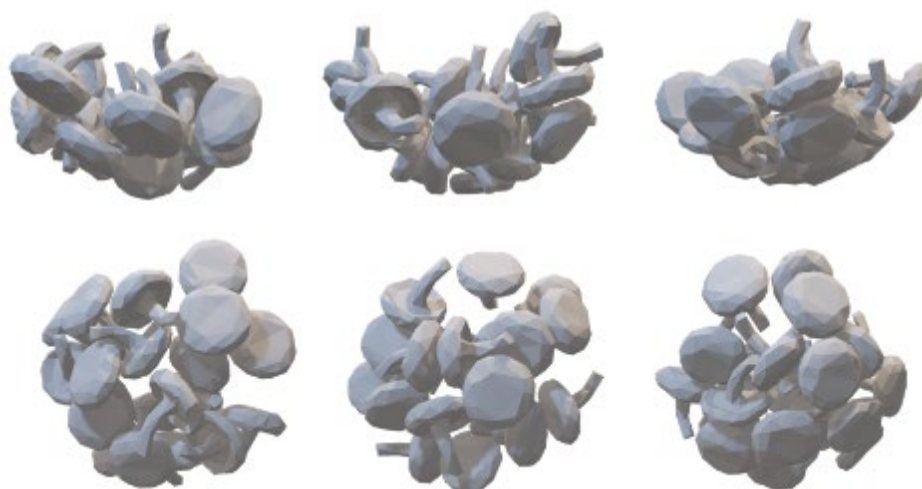


図 16 検出効率が最小(左)・平均(中央)・最大(右)の試料配置パターン例
上段：正面 下段 底面

① 0.0406	② 0.0404	③ 0.0412
④ 0.0383	⑤ 0.0382	⑥ 0.0388
⑦ 0.0296	⑧ 0.0295	⑨ 0.0299

図 17 キジファントムの配置パターン及び計数効率(表中の値)