

1. 検出限界値（検出下限値）について

・一般的な検出限界値の考え方

最初に、スペクトルデータにおけるセシウム 137 のピーク計数値について、その測定値がバックグラウンド^{注1}の計数に対して意味のある正味の計数値（バックグラウンドとは明らかに異なる計数値）であるかどうか考えます。

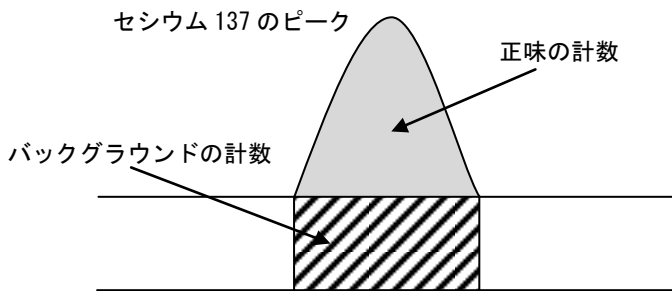


図 1

注 1 バックグラウンド

ここでのバックグラウンドの計数とは空の状態で測定したものではなく、試料測定のスเปクトルデータにおけるセシウム 137 領域のピーク（正味の計数）の下部部分のことです。（図 1 参照）

ある試料を測定したとき、セシウム 137 の計数値からバックグラウンドの計数値を差し引いた正味の計数値が少しだけプラスの値になったとします。ではこの試料にはセシウム 137 は存在するのでしょうか。このプラスの値はバックグラウンドとは明らかに異なる有意な値であるのか、またはバックグラウンドのゆらぎであるのかを判断する必要があります。

セシウム 137 を含まない試料を複数回測定したとき、その測定値からバックグラウンドを差し引いた計数は常に 0 になるわけではなく、0 を中心としたある幅をもった分布となります。この分布について、0 を中心にプラス側に信頼度 95% となるような幅をもたせたところを**棄却限界値**といいます。つまりこの幅に入るのであれば、95% の確率で「放射能はない」または「バックグラウンド値のゆらぎである」、もしくは「バックグラウンドに埋もれている」といえます。ただし 5% は「放射能がない」ものを「放射能がある」と判断してしまいます。

では次に棄却限界値のプラス側、つまり「放射能がある」とする分布について考えます。この分布について、検出したことを確信できる最小の計数値はいくつになるのでしょうか。信頼度 95% で検出される計数値を推測します。先程の棄却限界値からプラス側に 95% の信頼区間をもつ分布を推測し、その中央値が**検出限界値**となります。この値を超えたならば検出を確信しても良いでしょう。注意しなければならないのは検出限界値を超えなくても、棄却限界値を超えたのであれば「放射能がある」分布に属しているということです。（図 2 参照）

検出限界値は検出を確信できる最小の計数値を推測的に求めた値であって、通常は「ある」「なし」のしきい値として用いるものではありませんが、検出限界値を超えるならば、ほぼ間違いなく放射能は検出されます。ただし、計数値が棄却限界値よりも高いけれども検出限界値より低いならば、放射能を検出できるかもしれません。なお、測定値の計数値が棄却限界値以下であれば、ほとんど確実に放射能を検出できません。



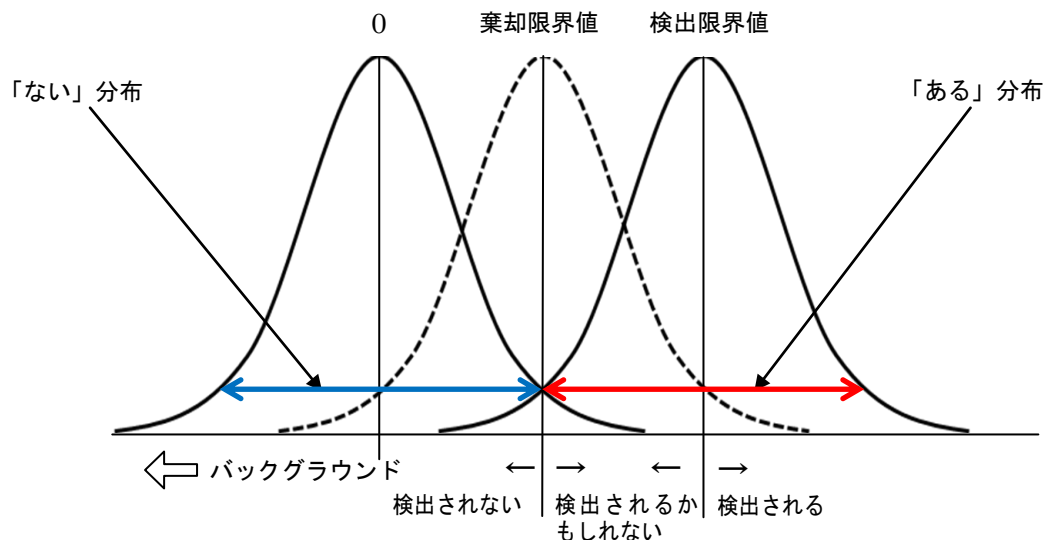


図2 検出限界値のイメージ

・ AT1320A/C で出力される検出限界値

通常、検出限界値の算出には試料を測定したときの計数値を使用しますが、AT1320A/C で出力される検出限界値では、容器に水をいれて測定するオペレーションバックグラウンドの計数値を使用しています。この算出法の出典は「IAEA SAFETY STANDARDS SERIES」の「Assessment of Occupational Exposure Due to Intakes of Radionuclides Safety Guide Series No. RS-G- 1.2, published Tuesday November 02, 1999」です。詳細につきましては納品時に配布しております「AT1320A/C の不確かさについて」または「ATOMTEX 社 AT1320A/C をお使いになる時のご注意とお願い」を参照下さい。

では、試料の計数値を使用したときと、オペレーションバックグラウンドの計数値を使用したときとは、どう違うのでしょうか？

検出限界値の基本的な考え方は同じですが、計算に使用する計数値が異なるため当然得られる値も異なります。試料とオペレーションバックグラウンドを同じ時間測定した場合、試料中に放射性物質が含まれていないならば、それぞれの計数値に差がないため、検出限界値はほぼ同じ値になります。しかし試料中に放射性物質が含まれている場合は同じ値にはなりません。例えば、カリウム 40 が多く含まれた試料におけるセシウム 137 の検出限界値について考えてみましょう。カリウム 40 が存在すれば スペクトルデータ中に 1461keV のガンマ線を観測することができますが、そのガンマ線のコンプトン効果^{注2}の影響で 1461keV 以下の領域の計数値が増加（図3参照）します。セシウム 137 の検出限界値の算出には 662keV を中心とした領域の計数値を使用しますが、その領域はカリウム 40 のコンプトン効果の影響で計数値が増加しています。もしセシウム 137 が存在するのであればその増加した計数値の上にセシウム 137 の正味の計数（図1参照）が乗ることになります。検出限界値の算出にはその増加した計数値を用いますが、増加した分、オペレーションバックグラウンドの同領域の計数値から求めた AT1320A/C の検出限界値より大きな値となります。

注2 コンプトン効果

ガンマ線が軌道電子と衝突して一部のエネルギーを電子に与え高速電子を生成し、元のガンマ線は電子に与えたエネルギーだけ減少したエネルギーをもって散乱される。この現象をコンプトン効果という。散乱されたガンマ線が検出器外に飛び出した場合、スペクトル中では本来の位置より低い位置にカウントされる。

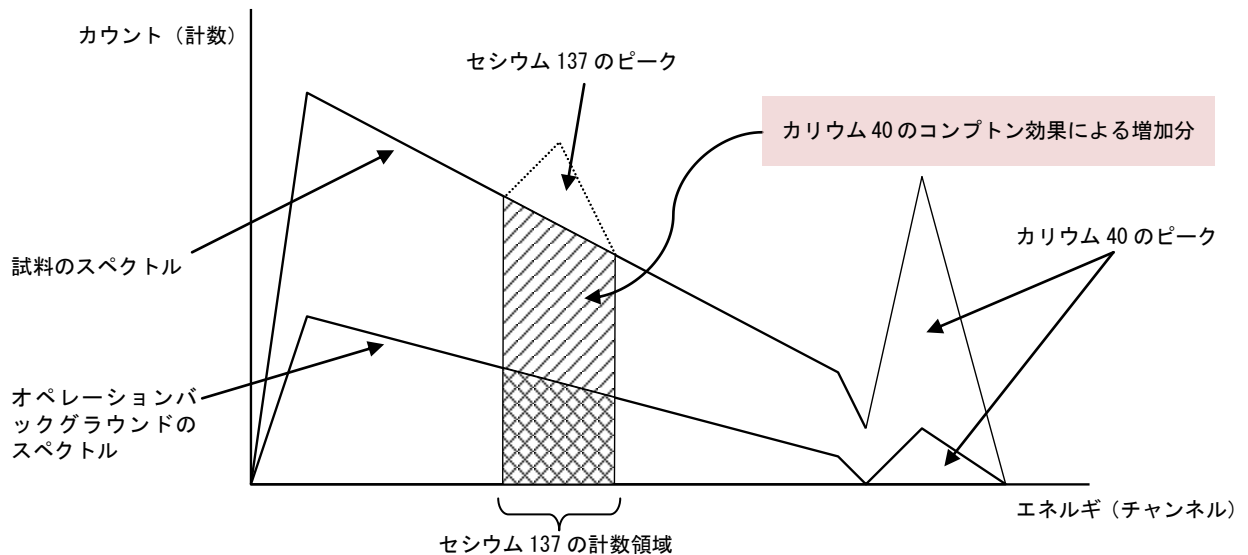


図3 試料とオペレーションバックグラウンドのスペクトルイメージ

実際、AT1320A/C の検出限界値算出に用いる計数は、通常3時間測定したオペレーションバックグラウンドの計数値を試料の測定時間に換算したものを使用します。例えば試料の測定時間が1時間だった場合、3時間測定したオペレーションバックグラウンドのスペクトルにおける各チャンネルの計数を3分の1にします。その計数値と試料の重量を用いて検出限界放射能濃度(Bq/kg)を求めています。よって異なる試料を測定しても、試料の重量および測定時間が同じであれば、得られる検出限界値放射能濃度は常に同じ値となります。

検出限界値は放射能の「ある」「なし」のしきい値として用いるものではないということは前述しましたが、AT1320A/C の場合は特に、試料測定の計数値を用いているのではなく、オペレーションバックグラウンド測定の計数値を用いているため、試料測定時の放射能濃度と直接比較することはできません。

AT1320A/C の検出限界値については、「もし、測定試料中に放射性物質が全く含まれていない（またはオペレーションバックグラウンドと同等）ならば、そのときの一つの核種（他の核種が存在せず、セシウム 137 だけが存在すると仮定した場合など）について、検出したことを確信できる最小の放射能はいくつか」という意味の値であり、装置の性能評価値を推測した値であると考えて下さい。

2. 検出、不検出の判断について

試料を測定すると放射能測定値として結果が得られますが、その測定値から放射能が検出されたのか不検出であったのかどのように判断すれば良いでしょうか。

一般的には、得られた放射能測定値が測定の不確かさ^{注3}の2倍または3倍より大きい値であれば検出とします。測定値は 100 ± 20 Bq/kg のように表現され、100 が測定値で、20 が測定の不確かさです。通常、不確かさを σ （シグマ）と表現し、 2σ より大きい、 2σ より大きいと表します。例えば測定値として 100 ± 40 Bq/kg という値が得られたとき、 2σ より大きな値で検出と判断するのであれば、測定値が不確かさの2倍より大きい ($100 > 80$) ため「検出」となります。しかし、 2σ より大きい値のとき検出と判断するのであれば、測定値が不確かさの3倍未満 ($100 < 120$) であるため「不検出」となります。

注3 不確かさ

よく「誤差」という表現が用いられますが、本来誤差とは真値と測定値の差を表すものとして定義されます。しかし、放射線計測では決して真値は得られません。一般的に放射線計測は同じ放射性核種を測定しても確定した値は得られず、測定毎に値は異なります。これは放射性核種の崩壊が確率的な現象で、さらに放射線計測自体が確率的な現象を測定の基礎とするためです。測定は測定結果が色々な値を取り得る母集団からの任意抽出と捉え、その母集団が標準正規分布（ガウス分布）と仮定します。測定値をその母集団を代表する値（ガウス分布の中央値）、母集団の広がり（ガウス分布の標準偏差）を不確かさとします。詳細につきましては納品時に配布しております「AT1320A/Cの不確かさについて」を参照下さい。

Ge半導体検出器の場合、上記条件に加え、スペクトル中のピークの存在を「検出」の条件とすることもあります。NaIシンチレーション検出器の場合は、Ge半導体検出器と比べ、スペクトル中のピークの幅が広いため、放射能が弱いときなどはピークを見つけることができません。よってピークの存在を「検出」の条件^{注4}にしない方が良いです。

注4

AT1320A/Cの測定解析プログラムと一緒にインストールされているAT1320A/Cアシスタントプログラムでは、スペクトル解析にてピークの有無を確認しています。（ピーク確認核種：I-131, Cs-134, Cs-137, K-40, Bi-214, Pb-214, Ac-228）アシスタントプログラムの初期バージョンではピークの有無を検出の判定に使うことが出来るようになっておりましたが、現行バージョンではピークの有無を検出判定に使うことはできません。これは放射能が弱い試料を測定した際、ピークを見つけることが出来ず、不検出となってしまう可能性があるためです。スペクトル解析におけるピーク有無につきましては、参考データとして運用下さい。



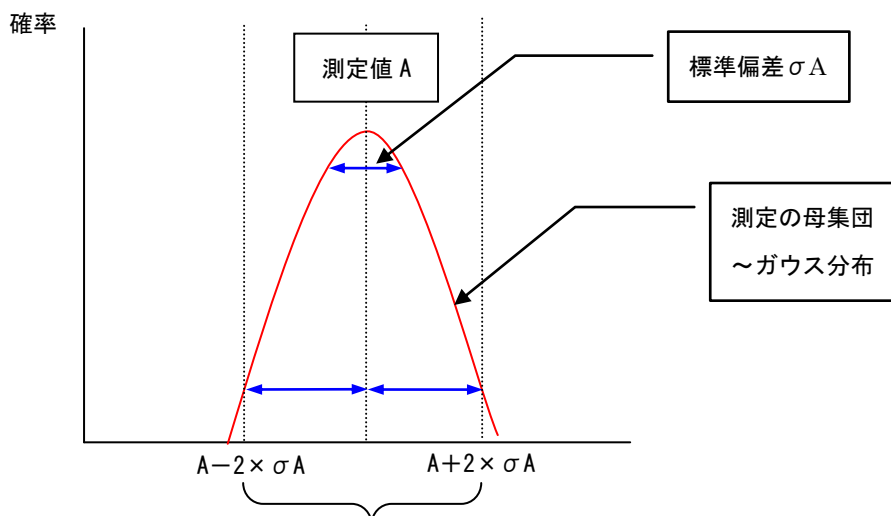
AT1320A/C の場合、結果として得られる測定値の不確かさは「絶対誤差^{注5}」および「統計誤差^{注5}」として表示（出力）されます。「測定値と誤差の信頼水準 P=0.95」が設定されている場合、誤差には予め 2σ の値が表示（出力）されます。「測定値と誤差の信頼水準 P=0.997」が設定されている場合、誤差には予め 3σ の値が表示（出力）されます。初期値は「測定値と誤差の信頼水準 P=0.95」で設定を変更しない限り、 2σ の値が表示（出力）されます。

注5 AT1230A/C の絶対誤差と統計誤差

絶対誤差は測定で得られた計数（カウント値）に依存する誤差に、測定に依存しない測定機器固有の誤差を加味した値です。単位は測定値と同じ Bq/kg で表現されます。統計誤差は測定で得られた計数に依存する誤差を、測定値に対して相対的に % 単位で表現した値です。

統計誤差が 50% より大きい場合は絶対誤差と統計誤差は同等な値となり（統計誤差は %、絶対誤差は Bq/kg で表現される）、統計誤差が 5% より小さい場合は測定値の 20% となる値が絶対誤差となります。測定時間を長くしても絶対誤差は測定値の 20% 以下の値になることはありません。統計誤差を小さくしても、機器固有の誤差が 20% はあるということです。詳細につきましては納品時に配布しております「AT1320A/C の不確かさについて」および「ATOMTEX 社 AT1320A/C をお使いになる時のご注意とお願い」を参照下さい。

前述の不確かさのところでも述べましたが、放射能の測定値は標準正規分布（ガウス分布）と仮定します。その分布を代表する値（ガウス分布の中央値）を測定値とし、分布の広がり（ガウス分布の標準偏差）を不確かさとします。真の値はある確率^{注6}で、この広がりの中に存在することになります。この広がりを信頼区間といい、真の値が存在する範囲が推測できるため、放射能が実際に有るか無いかを確率的に表現できます。（図4参照）



信頼区間：この間を積分すれば分布全体の 95.5%（ $-\infty \sim +\infty$ で 100% とする）

図4 信頼区間（ 2σ の場合）

注 6

真の値が σ 、 2σ 、 3σ の各範囲に属する確率は、68.3%、95.5%、99.7% となります。また、不確かさが σ 、 2σ 、 3σ の値で示されている場合は、それぞれ $P=0.68$ 、 $P=0.95$ 、 $P=0.997$ または $K=1$ 、 $K=2$ 、 $K=3$ 等の添え字が付けられます。

例) 100 ± 20 $P=0.68$ 100 ± 40 $P=0.95$ 100 ± 60 $P=0.997$

では、放射能が実際に有るか無いか、「検出」「不検出」はどのように考えればよいでしょうか。AT1320Aにより、次のような測定結果が得られたとします。(図5参照)

セシウム 137 放射能濃度 = 50 ± 50 (Bq/kg) $P=0.95$ 信頼区間として 95.5%の値を採用
統計誤差は 100%

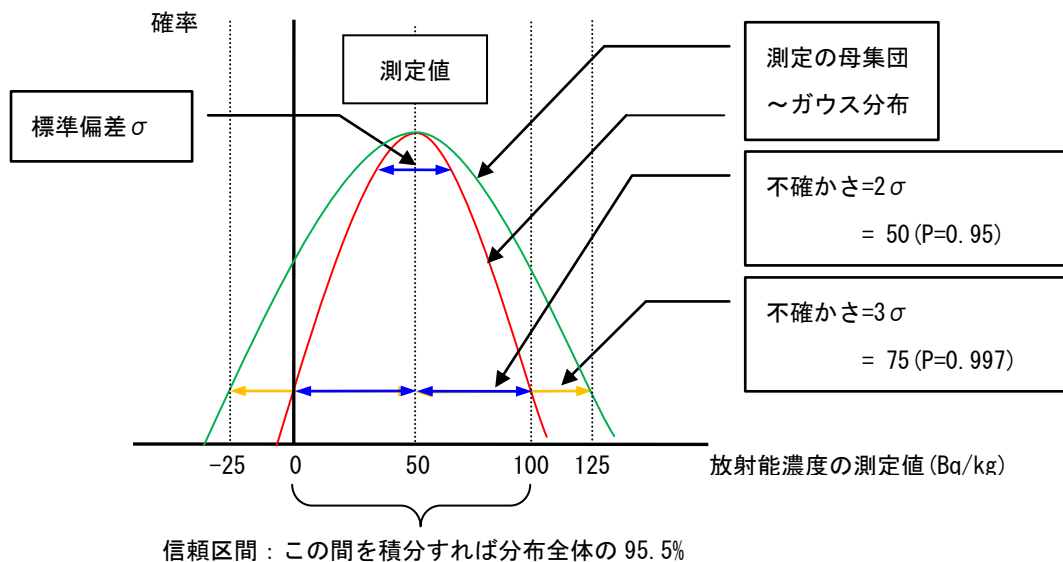


図5 50 ± 50 (Bq/kg) $P=0.95$ のガウス分布を用いたイメージ

図5から分かるように 50 ± 50 (Bq/kg) $P=0.95$ 統計誤差 100% は $0 \sim 100$ Bq/kg の範囲となり、真値は 95.5% の確率でこの範囲内に有ることになります。ここで“測定値が 2σ より大きいときに「検出」と判断”するということは、**真の値の取り得る範囲における下限値が 0 より大きいときに「検出」とすることになります。** 50 ± 50 (Bq/kg) $P=0.95$ は 0 を含みますので「検出」とはなりません。つまり、測定値が 2σ より大きいときに「検出」とするのであれば、統計誤差が 100% 未満のとき「検出」と判断するということです。もし、 50 ± 49.5 (Bq/kg) $P=0.95$ であれば、統計誤差は 99%となり「検出」となります。また、“ 3σ より大きいときに「検出」と判断”するのであれば、真の値の範囲は 0 以下の値を含みますので、「不検出」となります。

放射線計測では「検出」「不検出」を 2σ 、 3σ の条件により確率的に判断することになります。また、「検出」「不検出」の結果は任意の条件によるものです。よって条件の違いで異なる判定結果が得られる可能性があることには注意が必要です。

3. AT1320A/C での長時間測定について

放射線計測ではときに数万秒という長時間の測定を行うことがあります。長い時間測定を行うことで、どのような効果が得られるのでしょうか。また、そのときに注意しなければいけないことについて考えてみましょう。

一般的に測定時間を長くして得られる効果は、放射能がある場合には測定値に対する不確かさの割合が小さくなることです。このことは、ある確率で真の値の存在する広がり（分散）が狭まることを意味し、より精度良く測定値を求めることとなります。例えばある時間経過したときの測定値が 100 ± 50 (Bq/kg) $P=0.95$ だとすると時間の経過とともに 100 ± 45 (Bq/kg) $P=0.95$ 、 100 ± 30 (Bq/kg) $P=0.95$ と不確かさ（AT1320A/C の場合は絶対誤差）は小さな値に変化します。ただし、AT1320A/C では絶対誤差に測定機器固有の誤差成分が含まれるため、測定値の 20% の値が最小となります。100Bq/kg であれば絶対誤差は 20Bq/kg $P=0.95$ が最小の値となります。統計誤差の値は測定時間経過とともに小さくなっていきますが、0 になるのではなく、有る程度の測定時間になるとその変化があまり見られなくなります。

検出限界値についても測定時間を長くすると、次第に小さな値となってきます。測定時間を長くすることで計数は増加し、計数の増加に伴い測定の精度は相対的に高くなるため、検出したことを確信できる値は次第に小さな数値になります。

しかし、長時間測定は良いことだけではありません。確かに測定値の精度を高める効果はありますが、一つの試料に対して測定機器の占有時間が長くなり、測定できる試料の数が限られます。また、仮に天然核種が微量に存在する場合には、短い時間の測定ではセシウム等の測定値に与える影響がなかったものが、長時間測定により測定値に影響を与えてしまう可能性も考えられます。例えば 1800 秒の測定ではセシウム 137 の統計誤差は 100% 以上であり不検出と判断するところ、数時間の長い測定でセシウム 137 のピーク領域に含まれるビスマス 214^{注7} などの影響で統計誤差が 100% 未満となり数ベクレルの非常に少ない測定値についてセシウム 137 が検出と判断されてしまうことがあります。この場合の測定値については、セシウム 137 だけの成分によるものか、それ以外の天然核種の成分によるものであるのか、またはそれを含んだ結果であるのかは分かりません。AT1320A/C は NaI シンチレーション検出器を使用しております。NaI シンチレーション検出器は Ge 半導体検出器に比べエネルギー分解能が悪いため、スペクトル中におけるピークの分別が困難で、核種の同定が出来ない場合があります。よって長時間測定で得られた小さな測定値の判断についてはセシウム以外の影響も考慮して判断する必要があると考えます。詳細については納品時に配布しております「ATOMTEX 社 AT1320A/C をお使いになる時のご注意とお願い」を参照下さい。

注7 ビスマス 214 (²¹⁴Bi)

ビスマス 214 は 鉛 214 (²¹⁴Pb) とともにウラン系列の天然核種で自然界に多く存在します。その半減期は短いので、それらの核種だけが試料中に含まれる場合には数時間から数日で無くなってしまいますが、半減期が非常に長い親核種のラジウム 226 を含む場合、ビスマス 214、鉛 214 が存在し続けることとなります。また、試料中に含まれない場合でも、長時間測定すると遮へい体の外に存在するものを観測してしまう場合もあります。



4. AT1320A/C での測定時間について

AT1320A/C は 天然の核種の影響を受けない測定環境下においては、数万秒といった長時間測定をしなくても 10Bq/kg 程度のセシウム 137 をかなり良い精度で測定することが出来ます。

納品時にお渡ししております、「Estimated time of sample measuring, second」の表を参照下さい。この表は各核種について、ある精度（統計誤差）で、ある測定値（Bq/kg）を得るための測定時間が記載されています。この表からは 1 L マリネリ容器にて 800 秒測定すると 10Bq/kg のセシウム 137 を 50% の統計誤差で測定できることが分かります。セシウム 134 は 500 秒の測定で 10Bq/kg を統計誤差 50% で測定できます。この測定時間はあくまで目安としてお使い下さい。

表 1 マリネリ 1L セシウム 137 測定時間の推定値

統計誤差 P=0.95 Bq/kg	50%	45%	40%	30%	20%	10%
3.7	8,600 秒	13,000 秒	-	-	-	-
5	3,600 秒	4,700 秒	6,700 秒	-	-	-
10	800 秒	1,000 秒	1,300 秒	2,400 秒	7,000 秒	-
60	30 秒	40 秒	50 秒	90 秒	200 秒	800 秒

表 2 マリネリ 1L セシウム 134 測定時間の推定値

統計誤差 P=0.95 Bq/kg	50%	45%	40%	30%	20%	10%
3	8,200 秒	12,100 秒	-	-	-	-
5	2,100 秒	2,700 秒	3,600 秒	8400 秒	-	-
10	500 秒	600 秒	800 秒	1500 秒	3,900 秒	-
60	25 秒	28 秒	40 秒	70 秒	150 秒	600 秒

表はマリネリ 1L 容器について、密度が $1\text{g}/\text{cm}^3$ の試料を、3 時間のオペレーションバックグラウンド測定を実施したときのデータです。可能であれば、この表の測定時間を目安として、予め含まれる放射能濃度が分かっている試料を用意し実測定により実験的に測定時間を決定して下さい。放射能濃度が分かっている試料を用意できない場合は、表から少し安全側に考えて時間を決定されると良いです。

測定結果には常に誤差（不確かさ）が伴います。10 ± 5 Bq/kg 統計誤差 50% P=0.95 という結果が得られたときは 真の値は 95% の確率で 5 ~ 15 Bq/kg の範囲に入ることを意味します。測定時間を長くすると統計誤差が小さくなり、値の通り得る範囲が狭まることとなります。ただし、放射能が無いときには測定時間を長くしても、多くの場合、統計誤差は 100% 未満の値にはなりません。