

2020年8月25日
関西電力株式会社

コメント回答資料（放射線測定装置の不確かさ及び性能確認等について）

コメント No.	日付	コメント内容
4	6/15	相対拡張不確かさを Co-60 のクリアランスレベルで除して算出しているが、その評価が過小評価になっていないことを説明すること。
5	6/15	相対誤差 r_2 を□としている理由について説明すること。
8	6/15	クリアランス審査基準（3.4(1)ロ）に該当する申請書の箇所について説明すること。
12	6/26	放射能濃度確認対象物の具体的な測定方法、測定データの計算過程、パラメータ、不確かさの値や処理の詳細を説明すること。
13	6/26	放射能測定装置以外の標準不確かさの具体的な値、それらを統合した拡張不確かさの算出過程の導出過程の詳細を説明すること。
14	6/26	相対拡張不確かさを算出する際に、放射能濃度設定値（クリアランスレベル）を使用しているが、その妥当性、理由を説明すること。
15	6/26	トレイ型専用測定装置の性能確認として、クリアランスレベル近傍のものを使用して測定した結果を示すこと。

【回答】

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

1. 放射能濃度確認対象物の放射能濃度決定方法について

1.1 放射能濃度測定に対する不確かさ

評価対象核種を Co-60 とし、評価対象核種の放射能濃度は測定装置を用いた放射線測定法によって決定する。評価対象核種の放射能濃度の評価値に対する不確かさを以下に示す。

(1) 標準不確かさの設定

a. 要因の抽出

評価対象核種の放射能濃度の評価値に対する不確かさについては、放射能濃度の評価値に影響する要因を分析・検討して抽出している。

各要因において、別の要因で考慮している不確かさおよび当該要因の不確かさが主要因の不確かさと比較して極めて小さい不確かさは定量的な評価の対象外と

している。

全要因を網羅した特性要因図を図 1 に、定量的な評価の対象とした不確かさの特性要因図を図 2 に示す。図 2 に示す通り、考慮する不確かさは測定装置の測定条件、測定効率及びデータ処理に起因する不確かさ（以下、「測定装置の測定条件等に関する不確かさ」という。）、並びに測定装置の放射線測定値に起因する不確かさとしている。

b. 標準不確かさの定量的な評価結果

a.項で選定した標準不確かさの定量的な評価結果を表 1 に示す。ここで、表 1 に示す不確かさの定量的な評価のうち、独立な要因とは、他の要因と相関が無い要因のことである。一方、独立でない要因とは、他の要因と相関がある要因のことである。また、不確かさの定量的な評価対象外の要因とは、別の不確かさの要因で包含して考慮している要因、及び当該要因の不確かさが主な要因の不確かさと比較して極めて小さい要因のことである。

図1 不確かさの特性要因図(全要因抽出)

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



図2 不確かさの特性要因図（考慮すべき不確かさ選定後）

表1 各標準不確かさの算定結果 (1/3) (配置パターンA)

--

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

表1 各標準不確かさの算定結果 (2/3) (配置パターンB)

--

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

表1 各標準不確かさの算定結果 (3/3) (配置パターンC)

--

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(2) 測定装置の測定条件等に関する不確かさ

測定装置の測定条件等に関する不確かさの評価方法は、「測定における不確かさの表現のガイド (GUM) ハンドブック」(一般財団法人 日本規格協会)に基づき実施する。1.1(1)項で設定した標準不確かさを、不確かさの伝播則により合成標準不確かさを算出した後、合成標準不確かさに包含係数を乗じて拡張不確かさを求め、拡張不確かさを Co-60 のクリアランスレベルで除して相対拡張不確かさに換算して算出する。

算出した相対拡張不確かさについては、
モンテカルロ解析により得られる計数率、設定放射能濃度等から得られる放射能換算係数 (Bq/s^{-1}) に考慮して評価する。放射能換算係数の設定については、1.2 項に示す。

a. 合成標準不確かさ ($u(D)$) の算定

標準不確かさを「測定における不確かさの表現のガイド (GUM) ハンドブック」(一般財団法人 日本規格協会)に基づき、不確かさの伝播則により合成標準不確かさを算定した。合成標準不確かさの算出式を以下に示す。算出式の右辺の第 1 項から 10 項は独立した要因の標準不確かさの放射能濃度への寄与であり、第 11 項、第 12 項は独立でない要因の共分散の放射能濃度への寄与である。配置パターン毎に算出した合成標準不確かさを表 2 に示す。

【算出式】



b. 拡張不確かさ (U) の算定

a.項で算出した合成標準不確かさに、「測定における不確かさの表現のガイド (GUM) ハンドブック」(一般財団法人 日本規格協会)に基づき、信頼の水準を片側 95%とした時の包含係数 $k=1.645$ として、 $U = k \times u(D)$ で算定した。配置パターン毎に算出した拡張不確かさを表 2 に示す。

c. 相対拡張不確かさ (U') の算定

b.項で算出した拡張不確かさの単位は Bq/g であり、これを規格化して放射能換算係数に考慮するために、「測定における不確かさの表現のガイド (GUM) ハンドブック」(一般財団法人 日本規格協会)に基づき、Co-60 の放射能濃度設定値で除して相対拡張不確かさ (単位: %) を算出した。算出式を以下に示す。

ここで、拡張不確かさと放射能濃度の関係を図 3 に、相対拡張不確かさの放射能濃度依存性を図 4 に示す。

相対拡張不確かさを算出する際に用いる放射能濃度設定値を、規則別表第 1 の第 2 欄の Co-60 の放射能濃度 (クリアランスレベル) とした。

配置パターン毎に算出した相対拡張不確かさを表 2 に示す。表 2 に示す通り、



【算出式】

$$\text{相対拡張不確かさ (\%)} = \frac{\text{拡張不確かさ (Bq/g)}}{\text{放射能濃度設定値 (Bq/g)}}$$

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

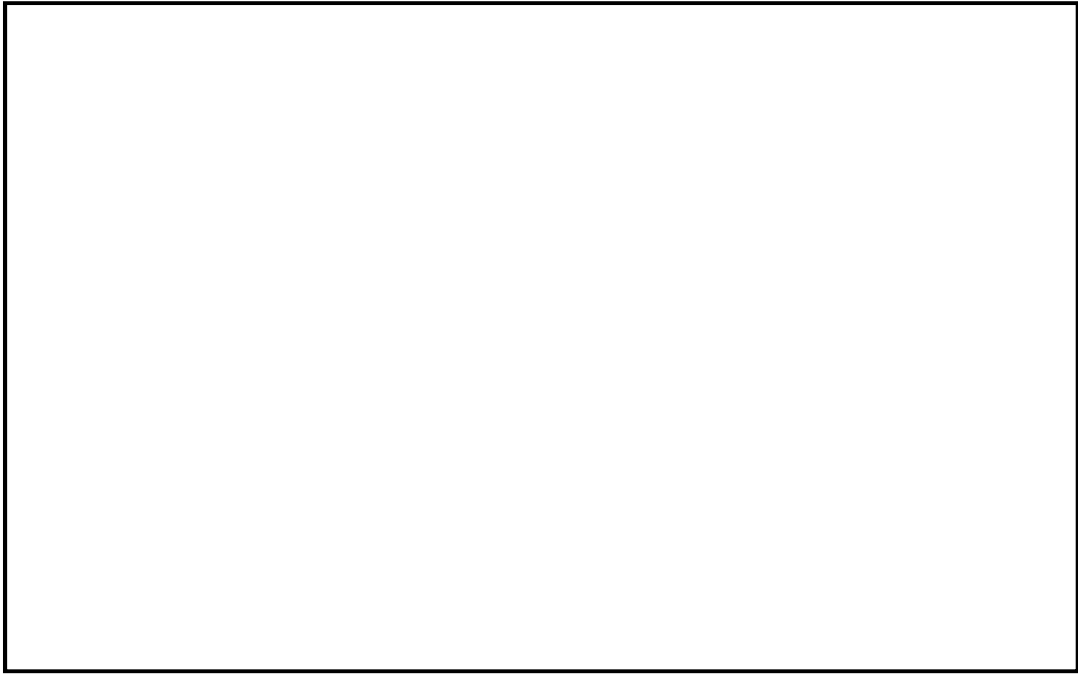


図 3 拡張不確かさの放射能濃度依存性

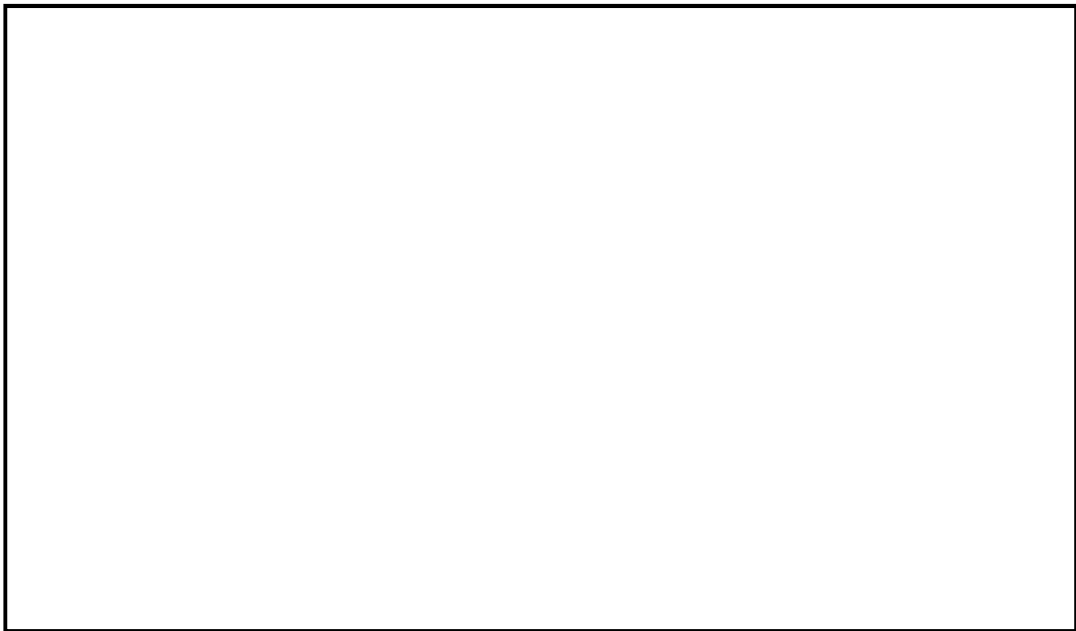


図 4 相対拡張不確かさの放射能濃度依存性

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

表 2 算出した配置パターン毎の各不確かさ

--

(3) 放射線測定値に関する不確かさ

γ線測定においては、核崩壊の揺らぎに起因して避けることが出来ない統計誤差があり、全γ線正味計数率の統計誤差は、確認対象物の放射能濃度に依存して変化することから、測定条件等に関する不確かさ評価とは独立して評価する。評価手法は測定における不確かさの表現のガイド (GUM) ハンドブック」(一般財団法人 日本規格協会) に基づき実施する。

a. 拡張不確かさの評価

放射線測定値に関する不確かさは、全γ線正味計数率の統計誤差を考慮することとし、以下の式により、統計誤差を考慮した全γ線正味計数率を算定する。ここで、包含係数 (k) は信頼の水準を片側 99.9%としたときの 3 とする。

【算定式】

$$n_{\text{net}} = n'_{\text{net}} + k \times \sigma_n$$

$$n'_{\text{net}} = n_G - n_B$$

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{n'_{\text{net}}}{\alpha t} + n_B \times \left(\frac{1}{\alpha t} + \frac{1}{\alpha t_B} \right) + (r_1 \times n_B)^2}$$

n_{net} : 統計誤差を考慮した全γ線正味計数率

n'_{net} : 全γ線正味計数率

n_G : 全γ線グロス計数率

n_B : 全γ線BG計数率

k : 包含係数 (k = 3)

σ_n : 全γ線正味計数率の統計誤差

r_1 : BG補正の相対誤差 ($r_1 = \square$)

α : 測定パターンにおけるγ線検出器の数

t : 測定時間

t_B : BG測定時間

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

b. BG 変動に起因する相対誤差 r_1 の算定

放射能濃度確認対象物の遮蔽効果によるBG変動に起因する相対誤差 r_1 は以下により求める。

BG変動に起因する相対誤差 r_1 を、個々の対象物を測定したときの自己吸収補正誤差 r_B の平均値 \bar{r}_B 及び標準偏差 σ_1 により表される次式から求める。

【算定式】

$$k \times r_1 = \bar{r}_B + k \times \sigma_1$$

$$r_B = (n_{B0} - n_B) / n_B$$

- k : 包含係数(k=3)
 \bar{r}_B : r_B の平均値(%)
 σ_1 : r_B の標準偏差(%)
 r_B : 放射能濃度確認対象物のY線計数率を測定したときのBGの自己吸収補正誤差(-)
 n_B : 模擬対象物をトレイ型専用測定装置で測定したときのBG実測値(s⁻¹)
 n_{B0} : 模擬対象物をトレイ型専用測定装置で測定したときのBGの自己吸収による補正計算値 (s⁻¹)

図5に模擬対象物のBGの自己吸収補正誤差の測定結果を示す。図6に示す通り、 r_1 は測定結果に基づき と設定する。

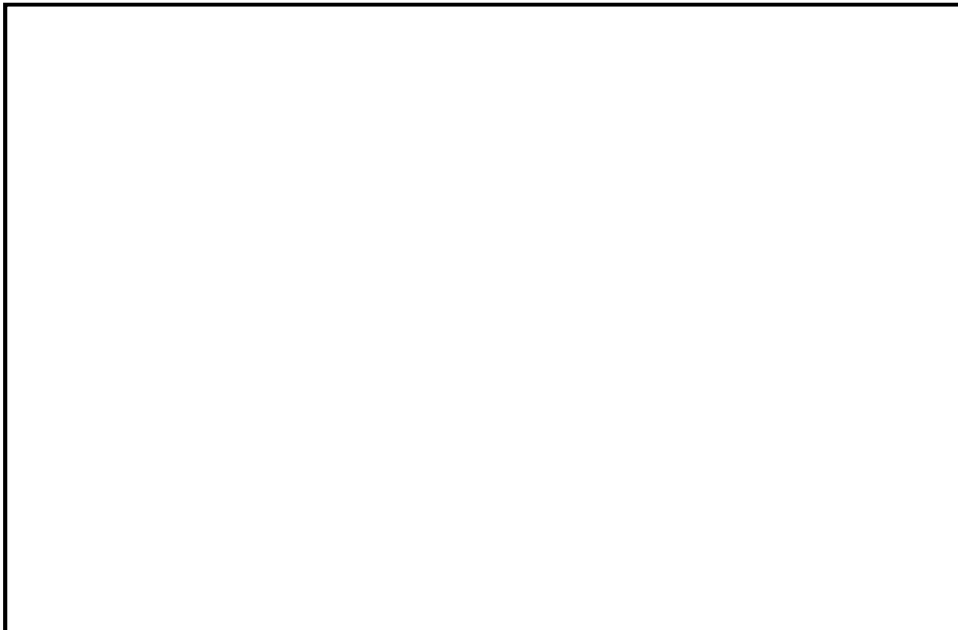


図5 BGの自己吸収補正誤差(r_B)の測定結果

1.2 不確かさを考慮した放射能濃度の決定方法

(1) 放射能換算係数及び安全率の設定モデル



配置パターン毎における放射能換算係数及び安全率の設定モデルを図 6 に示す。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

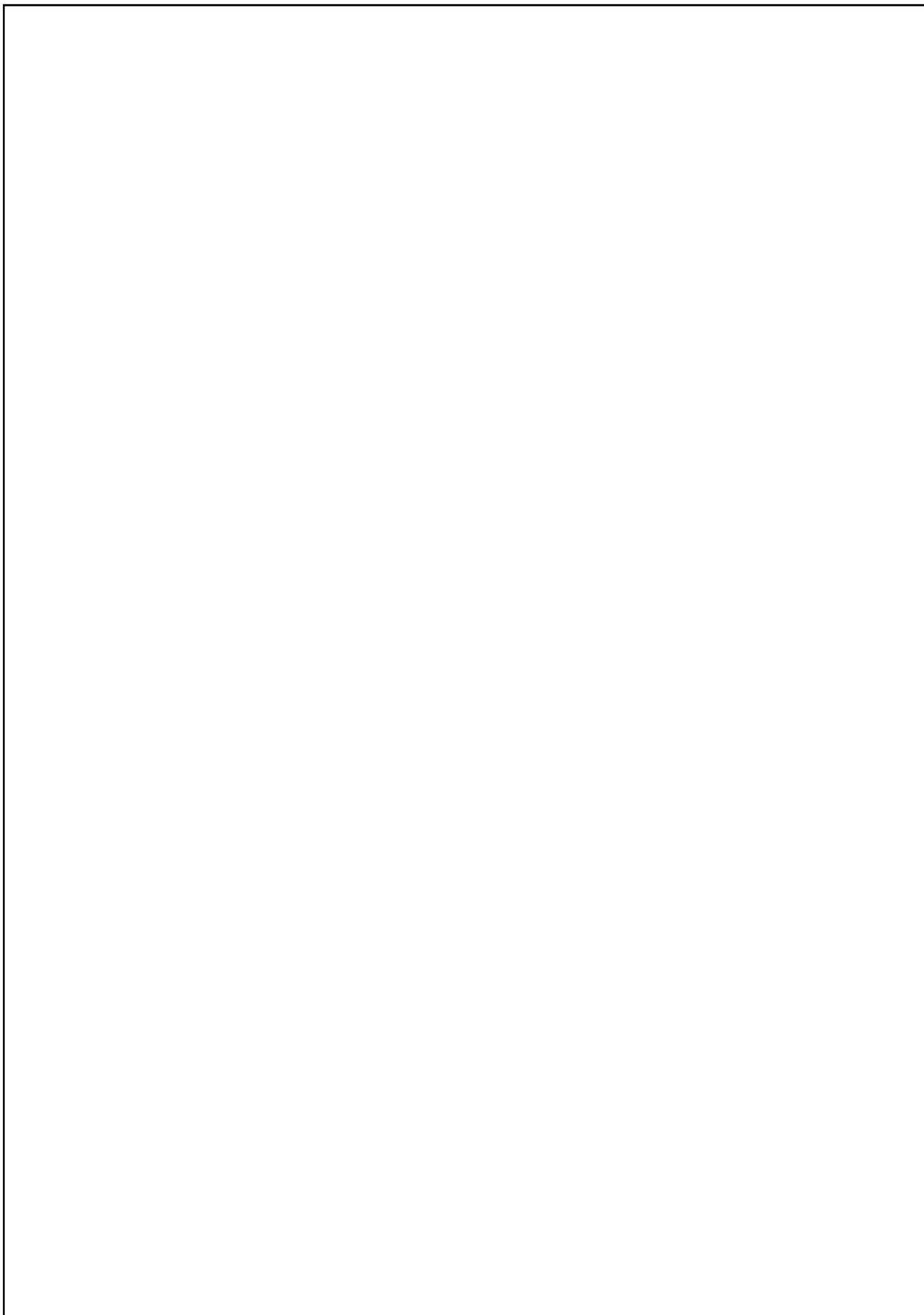


図6 放射能換算係数及び安全率の設定モデル

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

(2) 放射能換算係数における不確かさ

放射能換算係数は、1.1(2)項で設定した相対拡張不確かさを考慮する。不確かさを考慮した放射能換算係数の算定式を以下に示す。

【算定式】

$$CF = (1 + U') \times CF'$$

$$CF' = D_0 \times W_0 / n_0$$

CF : 不確かさを考慮した放射能換算係数(Bq/s⁻¹)

U' : 測定装置の測定条件等に関する不確かさ

CF' : 放射能換算係数(Bq/s⁻¹)

D₀ : モデル計算の設定濃度(Bq/g)

W₀ : モデル計算の設定重量(g)

n₀ : モデル計算により得られる計数率(s⁻¹)

放射能換算係数は、放射能濃度確認対象物の測定条件（ ）に依存するため、あらかじめ解析評価して設定した値から、測定の都度、測定評価された条件に合わせて選定する。配置パターン毎の放射能換算係数を表 3 に示す。

(3) 安全率の設定方法

安全率の算定式を以下に示す。

【算定式】

安全率は、放射能濃度確認対象物の測定条件（ ）に依存するため、あらかじめ解析評価して設定した値から、測定の都度、測定評価された条件に合わせて選定する。配置パターン毎の安全率を表 3 に示す。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

表 3 放射能換算係数及び安全率の設定値

--

(4) 測定単位及び評価単位における放射能濃度の決定方法

放射能濃度確認対象物の放射能濃度は、測定装置で測定された γ 線計数率が全て評価対象核種である Co-60 から放出された γ 線によるものとして、以下に示す算定式の通り、Co-60 放射能換算係数及び安全率を乗じて重量で除することにより、Co-60 の放射能濃度を算出する。

【算定式】

$$D = n_{\text{net}} \times CF \times SF / W$$

- D : Co-60 の放射能濃度(Bq/g)
n_{net} : 統計誤差を考慮した全 γ 線正味計数率(s⁻¹)
CF : 不確かさを考慮した放射能換算係数(Bq/s⁻¹)
SF : Co-60 に対する安全率(-)
W : 放射能濃度確認対象物の重量(g)

(5) 検出限界放射能濃度の設定方法

a. 検出限界放射エネルギーの算定

Co-60 の検出限界放射エネルギーは、クリアランスの判断方法（日本原子力学会標準 2005 年 7 月）に基づき、BG 計数率、BG 変動率に起因する相対誤差及び放射能換算係数の相対誤差等から以下の式により算定する。

【算定式】

$$A_{LD} = CF \times SF \times \frac{\frac{k^2}{\alpha \times t_T} + \sqrt{\left(\frac{k^2}{\alpha \times t_T}\right)^2 + 4 \times (1 - k^2 \times r_2^2) \times k^2 \times \left\{n_B \times \left(\frac{1}{\alpha \times t_T} + \frac{1}{\alpha \times t_B}\right) + r_1^2 \times n_B^2\right\}}}{2 \times (1 - k^2 \times r_2^2)}$$

A_{LD}	:	検出限界放射エネルギー(Bq)
CF	:	不確かさを考慮した放射能換算係数(Bq/s ⁻¹)
SF	:	安全率
k	:	包含係数(k=3)
α	:	各測定パターンにおける γ 線検出器の数
t_T	:	放射能濃度確認対象物の測定時間(s)
n_B	:	BG 計数率(s ⁻¹)
t_B	:	BG 測定時間(s)
r_1	:	BG 変動に起因する相対誤差 (1.1(3)b.項参照)
r_2	:	放射能換算係数の相対誤差

上記式における相対誤差 r_1 の算定方法は 1.1(3)b.項に示す通り。一方、放射能換算係数の相対誤差 r_2 は、測定される計数率より放射能に換算する際の相対誤差である。相対誤差 r_2 を算出するためには放射能が既知の標準線源を用い、模擬対象物を用いた専用測定器による測定を行い、個々の測定の相対誤差 r_{CF} の変動係数を次式により求め、相対誤差 r_2 を求めることが可能である。

【算定式】

$$r_{CF} = (A_E - A_C) / A_E$$

r_{CF}	:	トレイ型専用測定装置による個々の測定の放射能換算係数の相対誤差
A_E	:	標準線源を用いた模擬対象物の放射能の設定値(Bq)
A_C	:	トレイ型専用測定装置による放射能の評価値(Bq)

ここで、トレイ型専用測定装置により算出される放射能濃度は、

測定装置による Co-60 放射エネルギーの測定結果（測定値）と、模擬廃棄物と標準線源から設定した Co-60 放射エネルギー（設定値）の比を図 7 に示す。図 7 に示す通り、Co-60 放射エネルギーの設定値と測定値の比は全て 1.0 以上となっており、測定値が大きめに評価するように設定されていることから、 r_2 は

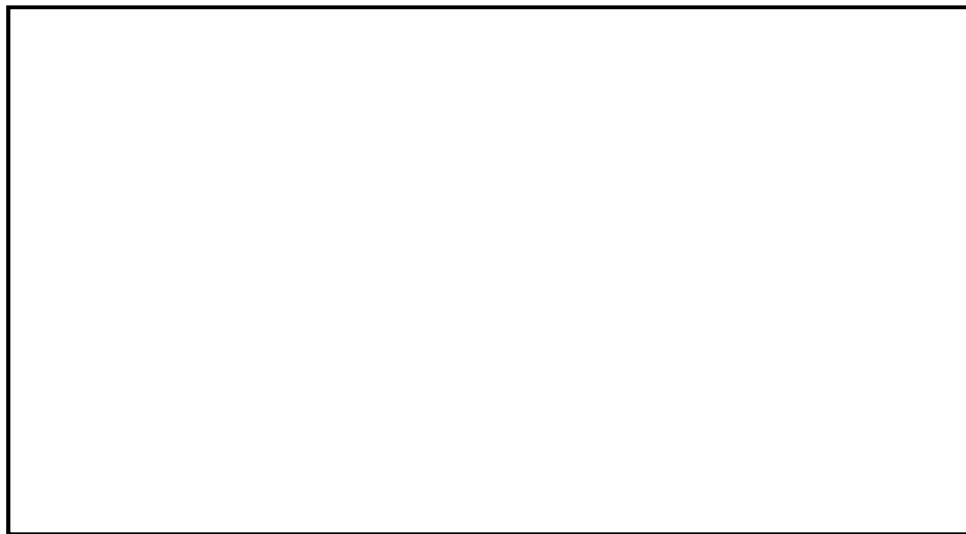


図 7 Co-60 放射エネルギーの設定値と測定値の比

b. 検出限界放射能濃度の算定

前項で算出する検出限界放射エネルギーを放射能濃度確認対象物重量で除したものが検出限界放射能濃度となる。

設定した測定条件における Co-60 の検出限界放射能濃度は、測定装置のトレイ上の配置パターンによって異なるが、の範囲となり、規則別表第 1 第 2 欄の放射能濃度以下（Co-60 : 0.1 Bq/g）であることを確認することが可能である。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

2. 測定装置の性能確認

クリアランス審査基準 3.4(1)ロ項の要求事項「汎用測定装置以外の測定装置を使用する場合には、放射能濃度確認対象物の形状、汚染状況を適切に設定した模擬線源を用いてクリアランスレベル近傍の放射能を実測する等の方法により、当該測定装置が申請書に記載されている性能を有していることが確認されていること。この場合において、模擬線源を用いて実測するときには、放射能濃度測定値が最小となるような模擬線源の配置を含んでいること」に対して、模擬廃棄物を用いて、測定装置の性能を確認した。測定結果を図 8 に示す。

図 8 に示す通り、Co-60 のクリアランスレベル近傍の測定は可能であり、また、

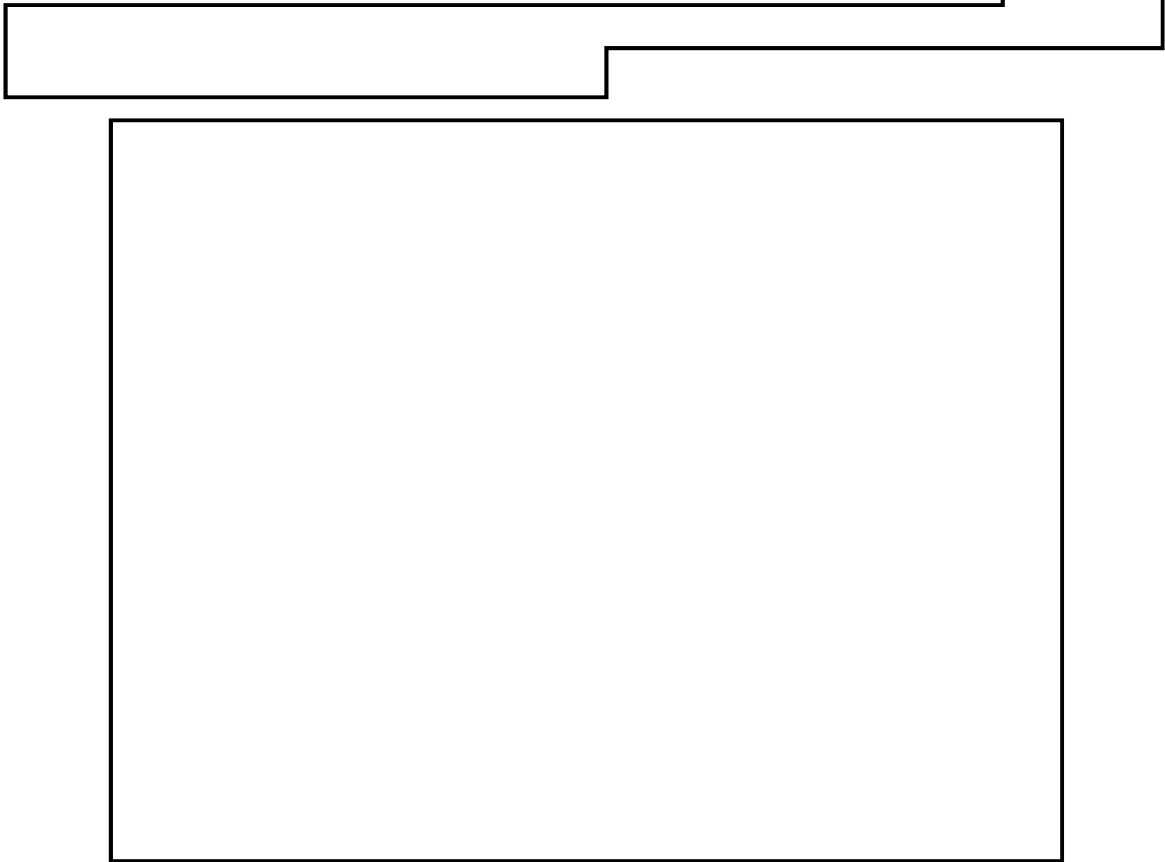


図 8 放射能濃度設定値と測定値の比較

3. 測定装置の点検・校正について

日常点検（使用中において 1 回/日）では、BG 測定、Co-60 標準線源を用いた検出効率の確認等を行う。

また、定期点検（使用中において 1 回/年）では、 γ 線検出器の点検・校正を行うとともに、重量測定器、寸法測定器についても点検・校正を行う。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。