

【解説】 表面汚染測定を用いたクリアランスの判断方法

本解説では、 α 線又は β 線サーベイメータを用いて表面汚染を測定することによって、クリアランス判断基準に用いる核種 i の放射能濃度 D_i (Bq/g) を求める一般的な方法について解説する。(個別の具体的な事例については【例題】を参照)

1. ガイドラインの背景

現行の原子炉クリアランスでは、専用測定装置を用いて、金属廃棄物の周辺から γ 線を測定している例がある。しかしながら、原子炉施設では、専用測定装置を用いた測定が困難なタービンロータ等の大型金属を抱えており、ウラン取扱施設では、 α 核種で汚染した機器や構造物等の金属を抱えている。このような対象物の中でクリアランスレベル以下のものについては、現状の物品搬出検査で実施されているようなサーベイメータを用いて、表面汚染からの α 線又は β 線を測定し、クリアランス判断を行うことも考えられる。

α 線又は β 線サーベイメータを用いて表面汚染を測定する場合に重要となるのが、「測定感度」の問題である。低感度ながらも測定が可能な表面については、計数率から放射能への換算係数を保守的に設定することで、クリアランス判断を行うことができる。しかし、測定条件が制限されて検出器が感度をもたないために測定が困難な表面については、労力をかけて切断して測定するか、クリアランスを断念するかを選択になる可能性がある。クリアランスは最適化の一形態である。非常に低いリスクレベルに対して労力をかけることは正当化されず、対象物をそのままの形状で再使用あるいは再利用することで正味の便益が増すこともある。

また、「測定感度」以外に重要となるのが、「測定点の選定」である。総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会「原子力施設におけるクリアランス制度の整備について(平成16年12月13日改訂)」(以下、制度化報告書)の23頁「4-3-6 測定点の選定」では、放射性核種濃度の測定は、原則として全数又は全表面を測定するとした上で、事前測定などにより測定結果のばらつきの程度が把握できる場合には、統計学的手法に基づいた対象物の放射性核種濃度を代表できる測定点で測定することで、全数又は全表面を測定しなくても良いことが述べられている。

本解説では、このような背景の中、現場の実用に供するため、 α 線又は β 線サーベイメータによる表面汚染測定を用いたクリアランスの判断方法を示すものである。

2. 表面汚染測定を用いたクリアランスの判断方法

対象物がクリアランスレベル以下であることは、 D_i/C_i の総和が1以下であることにより判断する(式1)。 D_i は核種 i の放射能濃度[Bq/g]、 C_i は核種 i のクリアランスレベル[Bq/g]を指す。

ただし、対象物に測定困難な表面がある場合、放射能濃度 D_i は、裕度のある補正係数を設定することにより、測定可能な表面の測定結果に基づいて求めることができる。

$$\sum D_i/C_i \leq 1 \quad (1)$$

放射能濃度 D_i は、評価単位中の放射エネルギー[Bq]を重量[g]で除することで求めることができる。放射エネルギー[Bq]は、 α 線又は β 線サーベイメータによる表面汚染測定が可能な表面については、直接測定によって求めることができる。一方、測定が困難な表面については、測定によって直接的に求めることはできないが、履歴、あるいは事前調査の結果等に基づけば、間接的に評価することができると考えられる。

ここでは、クリアランス対象物を、①全表面が測定可能な対象物（単純形状）」と、②測定が困難な表面を有する対象物（複雑形状）の2つに分類し、それぞれの場合についての放射能濃度 D_i の求め方について以下に示す。

① 全表面が測定可能な対象物（単純形状）

α 線又は β 線サーベイメータの窓面積を測定単位とする場合、測定単位中の放射エネルギー A (Bq) は、正味計数率 N (cps) を α 線又は β 線に対する機器効率 ε_i と線源効率 ε_s で除することで求めることができる（式2）。

個々の対象物に含まれる放射エネルギー B (Bq) は、測定単位ごとの放射エネルギー A (Bq) を対象物全体で加算することで求めることができる（式3）。

評価単位中の放射能濃度 D_i (Bq/g) は、個々の対象物に含まれる放射エネルギー B (Bq) を評価単位全体で加算することで求められる放射エネルギー (Bq) を評価単位の重量 E (g) で除することで求めることができる（式4）。

$$A = \frac{N}{\varepsilon_i \times \varepsilon_s} \quad (2)$$

$$B = \sum_m A_m \quad (3)$$

$$D_i = \sum_n B_n / E \quad (4)$$

② 測定が困難な表面を有する対象物（複雑形状）

測定可能な表面に存在する放射エネルギーは、単純形状の場合と同様の測定手法によって求めることができる。一方、測定が困難な表面に存在する放射エネルギーは、測定条件が制限されて検出器が感度をもたないことから、測定によって求めることは困難となる。しかし、測定可能な表面と測定が困難な表面の汚染の履歴等に関連があり、そのことが事前調査等で明らかになっている場合には、測定が困難な表面に存在する放射エネルギーを含む対象物全体に存在する放射エネルギーを、適切な補正係数を設定することにより、測定可能な表面に存在する放射エネルギーから求めることで、この問題を解決することができる。

以下に、測定が困難な表面も含めた対象物全体に存在する放射エネルギーの求め方を示す。

個々の対象物に存在する放射エネルギー B (Bq) は、測定可能な表面に存在する放射エネルギー X (Bq) に、測定が困難な表面に存在すると推定される放射エネルギー Y (Bq) を加算した、放

射エネルギー $X+Y$ (Bq) として求めることができる。ここで、測定可能な表面に存在する放射エネルギー X (Bq) に対する対象物に存在する放射エネルギー $X+Y$ (Bq) の比、すなわち、 $(1+Y/X)$ 倍の補正係数を設定することにより、測定可能な表面に存在する放射エネルギー X (Bq) から、測定が困難な表面も含めた個々の対象物に存在する放射エネルギー B (Bq) を求めることができる (式5)。評価単位中の放射能濃度 D_i (Bq/g) は、単純形状の場合と同様、式4によって求めることができる。

$$B = \sum_m A_m \times \left(1 + \frac{Y}{X}\right) \quad (5) \quad (D_i \text{ の見積りは式4と同様})$$

本アプローチは、例えば、配管の外表面と内表面のような、測定可能な表面と測定が困難な表面の汚染の履歴等に関連性がない場合については、適用することは原則として不可能であることに注意が必要である。ただし、測定が困難な表面に汚染がないことが履歴等から明らかであれば、定量的な議論を必要としない、異なるアプローチを適用することができる。

すなわち、測定が困難な表面を有する対象物に対する補正係数の設定に当たっては、次の2通りの場合が考えられる。(個別の具体的な事例については【例題】を参照)

(1) 汚染がないことの履歴に基づいて設定できる場合

測定が困難な表面に汚染がないことが履歴から明らかな場合、定量的な議論を必要とせずに、 $Y=0$ と判断できるため、補正係数は1となる (式6)。

$$1 + \frac{Y}{X} = 1, (Y = 0) \quad (6)$$

(2) 事前調査のデータに基づいて設定できる場合

測定が困難な表面に汚染がないことが履歴から明らかではない場合、事前調査による代表サンプリング測定を行い、測定が困難な表面に存在する放射エネルギーのばらつきをデータとして把握することで、統計学的手法に基づいて、裕度のある補正係数を定量的に設定することができる。

事前調査を行うサンプルデータ番号と代表サンプリング測定結果について、概念図を図1に示す。M と σ は、正規分布を仮定した場合には算術平均と標準偏差、対数正規分布を仮定した場合には幾何平均と幾何標準偏差をそれぞれ示す。事前調査のデータの正規分布性や対数正規分布性については、確率プロットにより直線関係が認められる、等の方法で確認することができる。

事前調査のデータに基づいて設定できる補正係数は、表1のとおり整理することができる。

測定が困難な表面に対する
事前調査での測定値 (Bq)

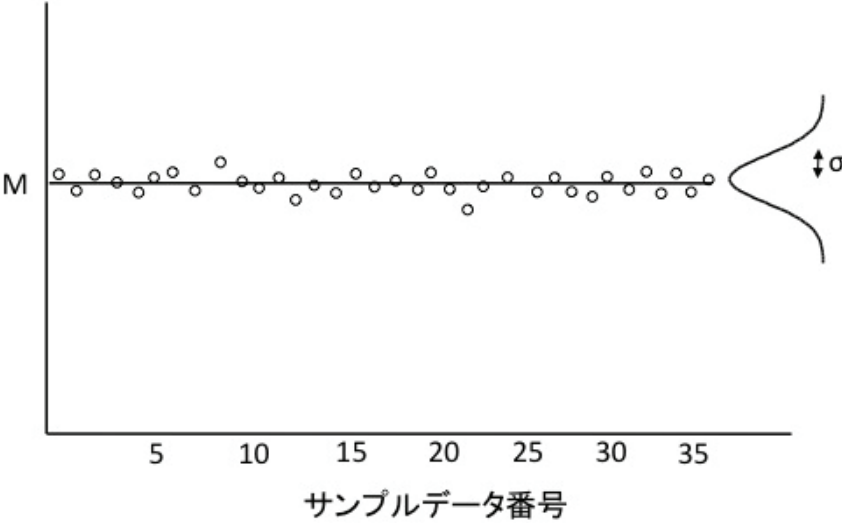


図1 測定が困難な表面に対する事前調査での
サンプルデータ番号と測定値の概念図

表1 測定が困難な表面に存在する放射能分布の種類と補正係数の設定方法

分布の種類	補正係数
正規分布	$1 + \frac{Y}{X} = 1 + \frac{M + 1.645\sigma}{X}$ (7)
対数正規分布	$1 + \frac{Y}{X} = 1 + \frac{M \times \sigma^{1.645}}{X}$ (8)

事前測定におけるサンプルデータ数について（原子炉クリアランス先行例）

先行して行われている原子炉クリアランスにおいては、予め設定した放射性核種組成比を用いて、主要核種の放射能濃度に基づいて他の核種の放射能濃度を計算する方法が採用されている。日本原子力発電株式会社のクリアランス認可申請では、Sr-90の放射能濃度がCs-137の放射能濃度から放射性核種組成比を用いて計算されており、Cs-137に対するSr-90のサンプルデータ数は、金属については38、コンクリートについては25がそれぞれ採用されている。

3. クリアランス判断の裕度の設定方法

クリアランス判断の裕度は、主要核種の測定や主要核種に対する核種組成比及び平均放射能濃度の誤差や不確実性を考慮して設定されるものであり、その考え方は、「日本原子力学会標準 クリアランスの判断方法：2005」に示されている。

α 線又は β 線サーベイメータを用いた表面汚染測定によるクリアランス判断方法においても、測定可能な表面については、主要核種の測定や主要核種に対する核種組成比の誤差や不確実性が含まれていることから、保守側だけでなく非保守側も含めた確率分布を求め、クリアランス判断の裕度設定の有無を精緻に判断することになる。

一方、測定が困難な表面については、複雑形状に対する表面汚染測定を用いたクリアランス判断方法の考え方で述べたように、常に $(1+Y/X)$ 倍の補正係数を保守側に設定することになる。これらの考え方の違いから、クリアランス判断の裕度と測定が困難な箇所を考慮した $(1+Y/X)$ 倍の補正係数は、独立して設定の有無が判断されるものであることが分かる。

このため、クリアランス判断の裕度の要・不要は、次の(1)及び(2)に従って判断することができる。

- (1) 測定誤差や核種組成比及び平均放射能濃度の不確実性に基づく $\Sigma D_i/C_i$ の確率分布を求め、その95%片側信頼区間上限値^(註)が、幾何平均値を用いて計算した $\Sigma D_i/C_i$ の10倍を超える場合には、(95%片側信頼区間下限値÷10)倍のクリアランス判断の裕度を設定する。
- (2) 測定誤差や核種組成比及び平均放射能濃度の不確実性に基づく $\Sigma D_i/C_i$ の確率分布を求め、その95%片側信頼区間上限値が、幾何平均値を用いて計算した $\Sigma D_i/C_i$ の10倍を超えない場合には、クリアランス判断の裕度の設定は不要である。

片側信頼区間上限値を97.5%から95%に変更した理由について

片側信頼区間上限値を95パーセンタイル値とする考え方は、米国における産業衛生分野で一般的に用いられてきたものである⁽¹⁾。「日本原子力学会標準 クリアランスの判断方法：2005」では、片側信頼区間上限値として97.5パーセンタイル値が採用されている。しかし、その翌年、国際放射線防護委員会(ICRP)は、ICRP勧告Publication101⁽²⁾において、代表的個人の設定方法と線量拘束値の遵守方法に関する考え方を勧告し、確率論的評価に用いる片側信頼区間上限値として、95パーセンタイル値を採用している。

近年では、ICRPが勧告した代表的個人の設定と線量拘束値の遵守方法に基づいて、規制免除やクリアランスの線量規準は、国際的なコンセンサスのある0.01 mSv/yだけでなく、発生確率が低い被ばくシナリオに対しては1 mSv/yを採用していることから、最適化を要する線量拘束値の下限は、0.01 mSv/yの線量規準よりも1桁高い0.1 mSv/yが適当であることが報告されている⁽³⁾。クリアランス・免除の線量規準とクリアランス判断規準の関係を整理したものを図に示す。

95 パーセンタイル値と 97.5 パーセンタイル値の選定の違いが確率論的評価に与える影響は小さいことが、表面汚染免除レベルの確率論的評価による導出を例に報告されている⁽⁴⁾。95 パーセンタイル値の考え方を採用することで、ICRP が勧告する代表的個人の設定方法や線量拘束値の遵守方法とバランスの取れた放射線防護体系を構築することができると思われる。

以上のことを勘案して、本ガイドラインでは 95 パーセンタイル値を片側信頼区間上限値として採用した。

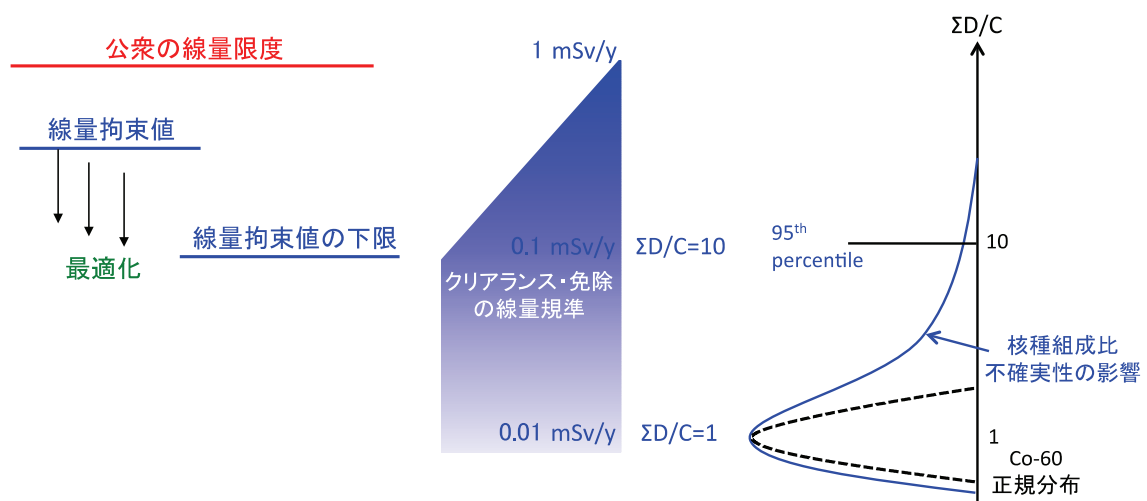


図 クリアランス・免除の線量規準とクリアランス判断規準について

参考文献

1. American Industrial Hygiene Association (AIHA), A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures, Third Edition, Fairfax, Virginia, AIHA Press (2006).
2. International Commission on Radiological Protection (ICRP), Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public, Publication 101, Part I (2006).
3. T. Hattori, Reconsideration of the Minimum Dose Constraint for Public Exposures in Radiological Protection, Radiat. Prot. Dosim., 131, 340–345 (2008).
4. H. Ogino and T. Hattori, Verification of Validity of Isotope-Specific Exemption Levels for Surface Contamination Using Monte Carlo Calculation, Jpn. J. Health Phys., 44, 400–407 (2009).