我が国の最先端原子力研究開発

シリーズ解説 第20回

合理的なクリアランス測定を目指して

形状計測とモンテカルロ計算を活用した全自動放射能評価手法の開発

(財)電力中央研究所 佐々木 道也, 服部 隆利

原子力施設の解体等において発生した金属およびコンクリート等の固体状物質は、その放射能濃度がクリアランスレベル以下である場合には、一般的な金属およびコンクリート等と同等の取扱いが可能になり、再利用、再使用ができる。電力中央研究所では、測定対象の放射能濃度がクリアランスレベル以下であることの判断に加え、表面汚染基準以下であることも同時に確認可能な微量放射能の評価手法を開発し、発電所現場における適用に向けて取り組んでいる。

I. はじめに

1. クリアランスとは？

原子力発電所の運転、解体等においては、様々な廃棄物が発生する。その中には、放射能濃度レベルの高いものから低いもの、あるいは不燃物、可燃物、廃液など、種類も性質も放射能濃度も様々である。放射能濃度が高い廃棄物は、適切な方法によって処分される必要があるが、放射能濃度レベルが極めて低く、人の健康への影響が無視できる場合には、「放射性物質として扱う必要がない物」とすること、すなわち、規制対象から外すことが可能である。

この考え方が「クリアランス」であり、それができる放射能濃度レベルは「クリアランスレベル」と呼ばれている。現在、クリアランスの考え方は、金属およびコンクリート等の固体状物質に限り、適用されている¹⁾。

2. 具体的なクリアランスレベル

第1表に、主な放射性核種に対するクリアランスレベルを示す。クリアランスレベルは放射性核種ごとに放射能濃度(Bq/g)の単位で設定されており、我が国では、

Development and Practical Application of Clearance Measurement Technique : Michiya SASAKI, Takatoshi HATTORI.

(2010年 2月26日 受理)

国際原子力機関 IAEA の安全指針 RS-G-1.7²⁾で示された値が適用されている。なお、我が国では原子力安全委員会が主体となり、日本独自のクリアランスレベルの試算が行われてきたが、IAEA の安全指針を受け、それまで検討されてきたクリアランスレベルとの差が小さいことや、国際的な整合性を考慮し、RS-G-1.7を適用した経緯がある。同表に示されるように、例えば、⁶⁰Co のクリアランスレベルは0.1 Bq/gであるが、通常、発電所発生物に対するクリアランス判断では、単一核種ではなく、複数の放射性核種について考慮しなくてはならない。この場合には、それぞれの放射性核種 i の放射能濃度 D_i を、対応するクリアランスレベル C_i で除した値の総和が1以下であること、すなわち $\sum (D_i/C_i) \leq 1$ であることが、クリアランスの判断基準となる¹⁾。

第1表 主な放射性核種のクリアランスレベル

放射性核種	クリアランスレベル (Bq/g)
³ H	100
⁵⁴ Mn	0.1
⁶⁰ Co	0.1
⁹⁰ Sr	1
¹³⁴ Cs	0.1
¹³⁷ Cs	0.1
¹⁵² Eu	0.1
¹⁵⁴ Eu	0.1
²³⁹ Pu, ²⁴¹ Am	0.1

3. 物品持出し基準

クリアランスレベルは、2005年の関連法令の改定によって制度化された。原子力施設におけるクリアランス制度の適用第1号として、現在、廃止措置が進行中の日本原子力発電所東海発電所において金属に対するクリアランス測定(放射線測定による、クリアランスレベル以下であることの判断)が実施されている。

さて、クリアランスレベル以下であることを満足さえすれば再利用可能かと問われれば、「否」というのが答えになる。クリアランス制度化以前から、放射線管理区域外に物品を持ち出す際には、同区域内の表面汚染密度限度の1/10である、いわゆる「物品持出し基準」が適用されてきた。物品持出し基準は、クリアランスレベルのように放射性核種ごとではなく、放出する放射線種類ごとに定められており、例えば、 ^{60}Co の場合は 4 Bq/cm^2 が判断基準となる。クリアランス判断の際には、クリアランスレベルに加えて物品持出し基準も適用¹⁾されるため、2つの基準値以下であることを確認する必要がある。

II. 微量放射能の評価手法と装置の開発

上述のような2つの基準値の評価を放射線測定によって行う場合、一度の測定で確認できることが合理的であることから、当所では、レーザー形状計測、モンテカルロ計算およびガンマ線計測を活用した微量な放射能レベルの評価手法と装置を開発した(第1図)。

1. 装置概要と放射能評価フロー

この装置は、重量計、4台のレーザースキャナおよび

8台の放射線検出器(NE 102 A 検出器)から構成される。検出器は $80 \text{ cm} \times 80 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 高さの測定領域の上下面に配置されており、さらに 5 cm 厚さの鉛遮蔽体によって測定領域全体が覆われている。

以下では、本手法の放射能評価フローを、第1図の括弧内の番号順に説明する。

(1) 重量計測

本手法では、初めに測定対象物の重量を計測する。重量データは、後述するモンテカルロ計算での測定対象物の見かけ密度の算出と、放射能濃度の計算に用いられる。

(2) レーザー形状計測と BG 計数率測定

重量計測後、速やかにレーザーによる形状計測が開始され、同時に雰囲気中の自然放射線に起因するバックグラウンド(BG)計数率測定も開始される。本装置で用いているレーザースキャナ1台の走査時間は約15秒であり、4台連続して実行するため、1回の形状計測は1分程度で完了する。形状計測が完了すると、測定対象物は自動コンベヤによって測定領域まで移動し、ガンマ線測定が開始される。

おのおののスクアナにより4方向から取り込まれた形状の点群データは、合成後、ノイズ除去等を経て1辺が 2 cm のボクセル(立方体)のデータに変換される(第2図(a)~(c))。なお、レーザー形状計測では測定対象の表面形状のみが取得されるため、本手法では、認識された表面形状部分から下方に向かって形状を投影し、底面まで満たされているようなボクセルの集合体として、測定対象全体の形状を近似的に認識させている(第2図(c))。

以上の処理によって取得された測定対象物の形状データは、連続エネルギーモンテカルロ計算コード MCNP

第1図 当所で開発したクリアランスレベル測定装置の写真および内部構造(左)と放射能評価フロー(右)

第2図 レーザースキャナによる測定対象物の自動形状認識の流れ

の記述形式へ自動的に変換される。

(3) モンテカルロ計算

モンテカルロ計算(モンテカルロ法を用いた放射線の発生・輸送のシミュレーション計算)により、校正定数とBG計数率の補正係数が算出される。コンクリートのように、測定対象物が天然放射能を含む場合には、第1図破線で囲まれたフローが追加され、天然放射能起因のBG計数率を推定するための計数効率も算出される。

(3)-1 校正定数

校正定数は、正味計数率から放射能を評価する際に用いられる換算係数であり、計数効率に核種の放出率を考慮して導出できる。計数効率は、使用履歴等の情報から、ユーザーが2次汚染(線源が1箇所に集中している状態)と放射化汚染(線源が全体にわたって存在している状態)の2種類の汚染形態のいずれかを設定し、モンテカルロ計算によって求められる。

2次汚染の場合は、ガンマ線に対する装置の検出効率の分布データを参考に、測定対象物の表面上で最も感度の低い位置を自動選定し、線源は点線源が仮定される。一方、放射化汚染の場合は、ボクセル表現した測定対象物全体が線源になり、等方線源が仮定される。

評価対象核種が ^{60}Co の場合は、同核種から放出されるガンマ線の平均エネルギーである1.25 MeVのガンマ線を発生させて計算させる。モンテカルロ計算では、測定対象物の情報が含まれているため、その遮蔽効果を考慮した計数効率が求められる。

(3)-2 BG補正係数の計算

測定物が金属の場合、ガンマ線測定によって得られる総計数率は、雰囲気BG放射線に起因するものと、汚染、放射化等の放射性核種に起因するものの合算値として得られる。雰囲気BG計数率は、前述(2)のように、ガンマ線測定直前の値を適用することで自然変動の影響を抑制しているものの、多量の金属等を測定する場合には、測定物自身がBG放射線を遮る効果(自己遮蔽効果)により、測定中のBG計数率が低減する。このような効果が適切に評価されない場合、BG計数率の低減に汚染起因の計数率が埋もれてしまい、放射能濃度を過小評価する

可能性もある⁴⁾。

モンテカルロ計算では、測定領域を覆った鉛遮蔽体内面に雰囲気BG放射線を模擬した面線源を設定して内向きにガンマ線を発生させ、測定対象物が存在する場合と、存在しない場合の計数効率の比から測定対象物による自己遮蔽効果の影響を推定している。測定中のBG計数率は、この計算によって評価される低減割合に直前の雰囲気BG計数率を乗じることで得られる。

(3)-3 天然放射能からのガンマ線の効率

測定対象がコンクリートの場合、天然放射性核種は対象物中に一様に分布している線源として考えられる。また、天然放射能からのガンマ線エネルギーと放出割合は、 ^{40}K および ^{238}U 、 ^{232}Th とそれらの壊変核種等の放射能濃度と測定物重量に依存し、天然放射能濃度は、セメント、細骨材、粗骨材等の種類、産地によって異なることが知られている。

本手法では、Ge半導体検出器等による代表サンプルの測定結果に基づいて天然放射能濃度を事前評価し、さらに、計数効率をモンテカルロ計算によって推定することで、天然放射能に起因するBG計数率を評価できる。

(4) 放射能評価とクリアランス判断

総計数率から、自己遮蔽効果補正後の雰囲気BG計数率と、天然放射能に起因するBG計数率を差し引いて正味計数率を求め、校正定数を乗じることで放射能が評価できる。

放射能濃度は、実測された重量で除することにより導出され、クリアランスレベルとの比較に用いることができる。一方、表面汚染密度を導出する際に必要となる評価面積は、対象物の重量にかかわらず100 cm²の一定値を採用している。これはJIS基準⁵⁾に準拠した値であり、対象物から放出されるすべてのガンマ線を合算して評価する本手法では、一般的なGMサーベイメータと比べて大きめの汚染密度として算出される。しかしながら、測定物表面上のいかなる100 cm²で平均した場合であっても、物品持出し基準を超えないことの確認が全自動で可能となる。なお、第1図のフローにおいて、重量測定の際には1 kg以上であることを測定の条件としている

が、これは、1 kg 以上の金属塊であれば、最も表面積の小さい球体系であっても、表面汚染密度の評価面積以上の面積を有することから、その要件を満たしていることの確認のためにやっている。

2. 放射能評価の精度

クリアランス対象となるものは、解体等に伴って発生するため、形状、サイズも様々になることが予測される。そこで、汚染のない平板、配管(径の異なるもの、切断したもの等)、バルブ、コンクリート(ブロック、ガラ)等、様々な形状、種類の測定対象物を用意し、その表面に、 ^{60}Co あるいは ^{137}Cs 標準線源を貼付して2次汚染を模擬した物品を作成し、放射能の評価精度試験を行った。なお、放射化の条件では、一様に放射化された測定物の入手が困難であることから、計算による評価を行った⁶⁾。

第3図に、試験で用いた配管、バルブ等の写真を、第4図に2次汚染に対する本手法の校正の評価精度を示す。第4図は、上述の様々な形状の模擬金属クリアランス物について、測定物量、トレー上の位置を変えて設定した268ケースの評価結果である。同図にて示されるよ

第3図 模擬的な金属クリアランス物

第4図 金属に対する校正の精度

第5図 雰囲気BG計数率の低減評価の精度

うに、 ^{60}Co に対しては $\pm 20\%$ 以内で、 ^{137}Cs に対しては $\pm 30\%$ 程度以内で校正定数を精度よく推定できることが確認された⁶⁾。

また、第5図には、測定物が雰囲気中のBG放射線を遮蔽する効果によるBG計数率の低減割合の再現性を示す。これらは上述の268ケースの中で比較的重量が大きく、この効果の影響が高いと推定された50ケースについて評価した結果である。同図にて示されるように、 $\pm 2\%$ 程度以内で高精度に評価可能であった。

なお、コンクリートについても同様の評価試験がすでに実施済みであり、校正の精度に加え、天然放射能によるBG計数率の増加分と自己遮蔽効果による低減分の両者を考慮することで、測定中のBG計数率が精度よく評価できることが確認されている⁷⁾。

3. 検出限界の評価

通常の放射線計測における検出限界の評価では、BG計数率は、測定中も変動しないものとして取り扱われている。しかし、多量の金属を測定する場合には、上述のように自己遮蔽効果による変動が発生するため、その補正に伴って誤差が生じることになる。

クリアランス判断に関連する日本原子力学会標準³⁾では、このような誤差を「BG変動に起因する誤差」として取り扱っている。同標準で示されている評価式に基づいて評価した、 ^{60}Co に対する検出限界放射能を第6図に示す。横軸は、BG計数率およびガンマ線測定時間であり、校正定数は、第4図の校正の精度評価試験で求められた計数効率の平均値を適用した。

同図で示されるように、ガンマ線およびBGの測定時間を30秒とした場合、検出限界放射能は約100 Bqと推定される⁶⁾。仮に、評価核種を ^{60}Co 、1回の測定物量を20 kgとすると、クリアランスレベルに対しては、2,000 Bqの放射能の有無を確認する必要がある。一方、物品持出し基準に対しては、評価面積を100 cm²に固定していることから、400 Bqの有無が判断基準になる。

このように、クリアランス判断に必要とされる2つの

第6図 ^{60}Co に対する検出限界放射能

基準値に対しては、物品持出し基準のほうが比較的低めの検出限界を有する測定方法が必要とされる。しかしながら、30秒程度の短い測定時間であっても、十分に低い検出限界が確保できることから、本装置は、クリアランスレベルのみならず、物品持出し基準に対しても判断可能であることが明らかになった。

Ⅲ. 表面汚染検査への適用

模擬クリアランス物を用いた実験から、当所で開発した装置および手法は、クリアランスレベルの確認のみならず、物品持出し基準の確認にも適用可能であることが示された。しかし、発電所現場では、本装置のようにガンマ線測定ではなく、GM サーベイメータ等のベータ線測定に基づいて物品持出し基準が確認されている。

そこで本装置が表面汚染検査にも適用できることを実証するために、実際に原子力発電所から発生した物品を用いて表面汚染密度の評価試験を行った。

1. 発電所発生物を用いた実証試験

試験は、東京電力柏崎刈羽原子力発電所にて実施し、固体廃棄物集積場所等から様々な形状および汚染レベルの測定試料を採取した。測定試料は、形状と、GM サーベイメータの測定による表面汚染密度レベルに基づき、次のように区分した。

(1) 表面汚染密度

汚染なし(検出限界値未満:LTD), 4 Bq/cm²未満, 4 Bq/cm²以上の3区分

(2) 形状区分

(a) 線状の物

ワイヤ, ケーブル, チェーンなど

(b) 内面のない物

鉄板, アルミ板, 足場材の板, H 鋼など

(c) 内面のある物

パイプ, エルボ, ダクト, 弁など

(d) 装置(計器)

時計, ファン, 圧力計など

なお、対象物の選定においては、装置の測定トレーサイズである80 cm×80 cm上に搭載可能なサイズのものに限定した。これらを本装置と GM サーベイメータによって測定し、結果を比較した。

2. GM サーベイメータの測定結果との比較

本装置と GM サーベイによる測定結果を第2表に示す。同表は、発電所発生物の表面汚染密度評価値が、おのおのの装置においてどのレベルに区分されたかについて、測定試料の数で示しており、例えば、GM サーベイメータが LTD と判断した物は、51 + 8 + 3 = 62個であり、そのうち、51個は本装置でも LTD と判断され、8個は400 Bq 未満、3個は400 Bq 以上と評価されたことを示している。

同表で示されるように、本装置の評価結果は、GM サーベイメータの測定結果と比べて、比較的大きめの値を与える。これは、GM サーベイメータが走査測定によって最も計数率の高い箇所のみを選定して表面汚染密度を評価することに対し、本装置では、前述のように全汚染が寄与した計数率から放射能を評価(全ガンマ測定と呼ばれている)し、表面汚染を算出していることと、校正定数を求める際のモンテカルロ計算において、仮想的な線源位置を安全側に設定していること等が理由である。

発電所現場では、物品持出し基準である 4 Bq/cm²ではなく、それ以下の検出限界を有する装置による測定結果が「検出限界値未満」であることを判断基準とした運用がなされている。同表では、太字の35ケースが管理区域外に持ち出せない物として判断されるものである。これらの測定物に対しては、本装置でも検出限界値以上で汚染があると判断されていることから、本装置は、GM サーベイメータと同等の表面汚染検出能力を有し、物品持出し基準の確認にも適用できるといえる⁸⁾。

3. 他の表面汚染検査装置との性能比較

原子力発電所において物品持出し基準の確認に使用さ

第2表 本装置と GM サーベイメータの測定結果の比較

GM サーベイ	本装置		
	検出限界 値未満 (LTD)	全 γ 測定 で400 Bq 未満 ^{a)}	全 γ 測定 で400 Bq 以上 ^{a)}
LTD	51	8 ^{b)}	3 ^{b)}
4 Bq/cm ² 未満	0	3^{c)}	12^{c)}
4 Bq/cm ² 以上	0	0	20^{c)}

^{a)} ^{60}Co 換算の Bq 数。JIS に準拠した評価面積である 100 cm²で除することで表面汚染密度として算出できる。

^{b)} 全ガンマ測定による計数率の使用、保守的な校正定数の設定等の理由で、GM サーベイメータより比較的大きな値として評価される。

^{c)} GM サーベイメータにより検出限界値以上の汚染が検知された35サンプルについては、すべて汚染が検知されている。

れている放射線測定装置は、GM サーベイメータ以外にも Ge 半導体検出器、小物物品搬出モニタ、大型物品搬出モニタ等がある。

Ge 半導体検出器は、高いエネルギー分解能により核種分析には優れているが、大量、あるいは大型物品の測定には不向きである。また、小物物品搬出モニタは作業者の携行品の測定等により適用可能であり、用途が限定されている。

比較的大きな物品の測定には、大型物品搬出モニタが使用されるが、小物モニタと同様、測定可能な物品が限定されており、単純形状のみが対象となっている。また、物品搬出モニタは、基本的にベータ線測定に基づく装置であるため、配管のように内面のある物を検査する際には、ろ紙によるふき取り測定であるスミア法等による測定が、別途必要とされる場合もある。

一方、当所で開発した装置は、透過力のあるガンマ線を測定対象としており、これまで述べたように、自動形状認識とモンテカルロ計算を用いることで、遮蔽効果等の補正が高精度に行われ、複雑な形状に対しても放射能評価が可能である。また、測定領域も Ge 半導体検出器、あるいは小物物品搬出モニタと比べて比較的大きいという利点も備えていることから、表面汚染検査装置としても有用であろう。

Ⅳ. おわりに

現在、我が国初の商用炉である日本原子力発電(株)東海発電所において原子炉施設の廃止措置が行われており、同じく我が国初のクリアランス制度適用がなされている。現在は金属のみがクリアランス対象となっているが、今後、解体工事の進展に伴ってコンクリート等もクリアランス対象となる。さらに、中部電力(株)浜岡原子力発電所 1 号機および 2 号機は、平成 21 年 1 月に運転終了となり、廃止措置に移ることが決定した。我が国の原子力発電所の建設時期、供用期間を考慮すると、軽水炉におけるクリアランスが今後、本格化するものと考えられる。

一方、運転中の原子力発電所においても、高経年化対策に伴う改良工事等の増加により、金属およびコンクリート廃棄物の発生量増加が考えられることから、クリアランス制度の適用が想定される。さらには、原子力発電所のみならず、加速器施設、RI 施設等にもクリアランス制度が展開されつつある。このように、今後、クリ

アランス測定のニーズはますます高まり、かつ、多様化していくものと予測される。

電中研式クリアランスレベル測定装置は、レーザー形状計測、モンテカルロ計算から放射能評価に至るまで、すべて自動化されているため、作業者の負担低減に加え、汚染の見落とし回避にも効果的である。また、原子炉の定期検査、あるいは施設の改良工事等に伴って大量の搬出物を表面汚染検査する必要がある場合には、内部汚染の可能性のある機器の測定に適用することもできる。

本稿で紹介した技術により、合理的な放射線管理の実現に加え、資源を有効利用する循環型社会に貢献できれば幸甚である。

— 参 考 資 料 —

- 1) 原子力安全委員会 原子力安全基準専門部会、原子炉施設におけるクリアランスレベル検認のあり方について、平成 13 年 7 月。
- 2) IAEA Safety Guide, RS-G-1.7, IAEA, (2004)。
- 3) 日本原子力学会標準, AESJ-SC-F 005:2005。
- 4) ISO 11932:1996(E)。
- 5) JIS Z 4337:1997。
- 6) 電力中央研究所総合報告, L 01, (2005)。
- 7) 電力中央研究所報告, L 07010, (2007)。
- 8) 電力中央研究所報告, L 08007, (2009)。

電力中央研究所報告および総合報告は、下記ホームページからダウンロード可能である。

http://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/cgi-bin/report_reference.cgi

著 者 紹 介

佐々木道也(ささき・みちや)

(財)電力中央研究所 原子力技術研究所
放射線安全研究センター
(専門分野/関心分野)放射線計測, 放射線防護

服部隆利(はっとり・たかとし)

(財)電力中央研究所 原子力技術研究所
放射線安全研究センター
(専門分野/関心分野)放射線計測, 放射線防護, 線量評価