

福島第一原子力発電所でのピンホール型 ガンマカメラによる汚染量と汚染密度の測定

林 克己*^{1,2} 平山 英夫*^{1,3} 岩永 宏平*¹
Hayashi Katsumi Hirayama Hideo Iwanaga Kohei

1. はじめに

福島第一原子力発電所（以下 1F）の廃炉に向けた作業計画立案や被ばく低減のために、汚染分布の測定評価は重要となる。また、機器・配管内に残っている汚染分布情報は事故進展評価に資するデータとなる。

このために、原子力規制庁では東京電力ホールディングスの協力を得てサイト内で種々の測定を行っており、これらの結果は「東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会」で逐次報告・公開すると共に、Web サイトに資料を公表している^{1,2)}。今回は、この中でガンマカメラによる汚染量と汚染密度の測定解析について紹介する。

2. ¹³⁷Cs 汚染量、汚染密度の評価法

1F サイト内では格納容器内デブリ等を除けば現在の場の線量に寄与する残存核種として ¹³⁷Cs が主になる。

使用したガンマカメラはピンホール型の Hitachi HGD E1500 である（図 1）。ピンホール型はシンプ

ルなため高線量率場での測定に強いというメリットがあるが、本体は約 30 kg と重い。

ガンマカメラは事故後の環境の除染作業前後の状況を確認するために使用されるのが一般的であった。原子力規制庁では HGD E1500 に ¹³⁷Cs の全エネルギー吸収ピーク計数率データを出力する機能があることに着目し、この全エネルギー吸収ピークは散乱を受けず線源から直接到達した γ 線であることから、これを使って ¹³⁷Cs の汚染量 (Bq) を求めるという使い方を始めた³⁾。

その後原子炉建屋の内壁の汚染分布 (Bq/cm²)、系統配管内の汚染分布 (Bq/cm²) を測定データから求めるという使い方に拡張させてきた。

2.1 全エネルギー吸収ピーク検出効率、汚染量の評価法

使用したガンマカメラの内部には図 2 左側に示したタングステン遮蔽に囲まれて図 2 右側に示した全体で 4 cm × 4 cm で 16 × 16 ピクセルからなる CdTe 検出器がある。その前面に検出器面から 5 cm 離れた位置にピンホールが開けられている。

CdTe 検出器の ¹³⁷Cs に対する全エネルギー吸収ピーク検出効率は電磁カスケードモンテカルロコー



図 1 ガンマカメラ外観

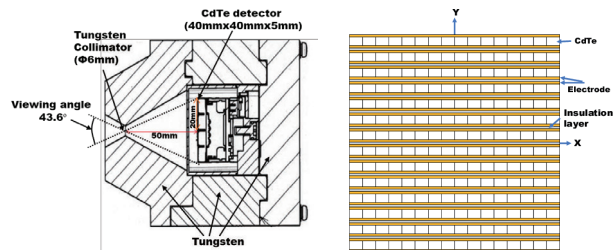


図 2 ガンマカメラの検出部とピンホール

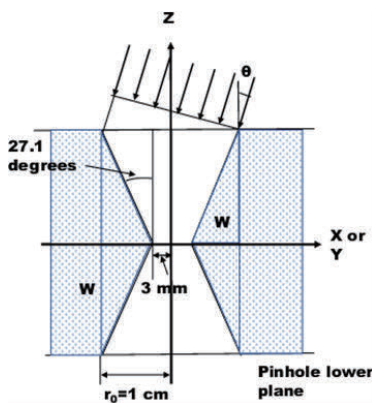


図3 ピンホール実効半径の計算モデル

ド EGS5⁴⁾ により計算した。入射した γ 線による電子は電極に移動する途中で一部がホールに捕獲されること、また素子には製造上のばらつきもあるため、これをテストしたデータをもとにピーク検出効率の補正値を決定した。

また、ピンホールは図3に示すように半径3 mm であるが、ピンホールの薄い部分を散乱を受けず透過する γ 線もあるので、実効的なピンホール半径は入射角をパラメータとして EGS5 で求め、ピクセルごとに補正した。

これで求められたピーク検出効率と、線源までの距離、線源とガンマカメラの間に存在する遮蔽物による減衰を考え合わせ、各ピクセルに対応する¹³⁷Cs の線源強度 (Bq) を求めた。これらの詳細は参考文献3) をご覧いただきたい。

2.2 汚染面の汚染密度の評価法

ガンマカメラの各ピクセルに入射する¹³⁷Cs γ 線が、汚染面のどの範囲から来ているかを対応付けるために、逆に CdTe 検出器の 16×16 のピクセルがピンホールを通じて汚染面にどのように投影されるかを求める。壁等の平面の場合、図4の模式図に示すような四辺形の投影となり、ガンマカメラに近い壁は面積が小さく、遠ければ大きくなる。これを計算して各ピクセルの対応範囲と面積及びガンマカメラとの距離を求め、汚染密度 (Bq/cm²) を求めた。

2.3 配管内面汚染密度の評価法

配管内面に付着している¹³⁷Cs の汚染密度は配管の鉄厚さによる遮蔽効果を考慮する必要がある。また各ピクセルに対応する配管内面積を求める必要がある。直径30 cm の配管を水平に置き配管から1 m 離れた位置から配管径方向と軸方向の2次元汚染分

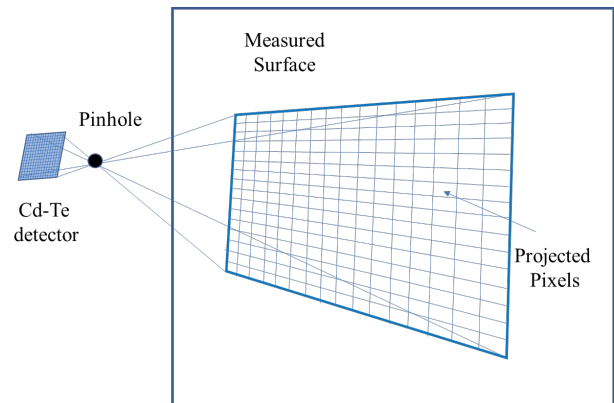


図4 CdTe 検出器の各ピクセルと測定範囲の対応

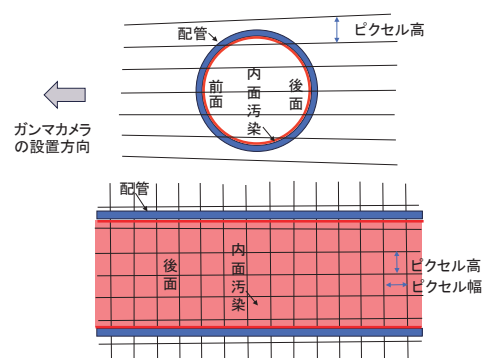


図5 CdTe ピクセルと配管内面の対応

布を測定する場合を例として説明する。図5に配管内面汚染とガンマカメラのピクセル対応範囲の模式図を示す。ガンマカメラ側からみて配管内面前側と後側のどちらから γ 線が到達したかは測定上区別がつかないが、どちらも同じ厚さの鉄を透過してくる。各ピクセルに対応する配管内面の面積とガンマカメラまでの距離を求め、また乱数を使って求めたその範囲内での鉄透過厚さの平均を使って汚染密度 (Bq/cm²) を算出した。

3. ガンマカメラでの測定例

¹³⁷Cs 汚染密度の測定例を以下に2種類紹介する。

3.1 2号機オペレーションフロアの汚染密度測定⁵⁾

2号機原子炉建屋のオペレーションフロアの壁面、天井、床は主に¹³⁷Cs で汚染され室内は高線量率であった。スミア法での汚染密度測定もロボットを使用して行われたが、壁も高く広い空間の全体の汚染密度分布が測定できなかった。そこで、部屋入口からガンマカメラで測定を実施し、壁、天井、床



図6 北向き測定のガンマカメラ画面

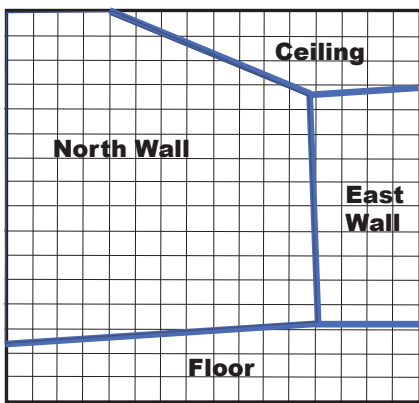


図7 北向き測定のガンマカメラピクセル対応

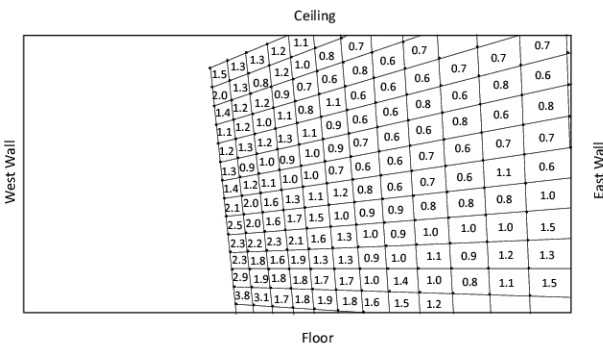


図8 北壁面の¹³⁷Cs汚染密度 (MBq/cm²)

の汚染密度を得た。

図6に2020年1月に撮影したもののうち北向き測定のガンマカメラ画面の例を示す。計測時間は1分である。

図6で北壁、東壁、天井、床の一部が写っておりこれをピクセル対応させると図7のようになる。北壁ではカメラに近い部分は高さ方向に13ピクセル程度割り当てられているが、遠くでは9ピクセル程度になる。

全エネルギー吸収ピーク計数率データをもとに、2.2で示した方法で北壁部分の汚染密度 (MBq/cm²)

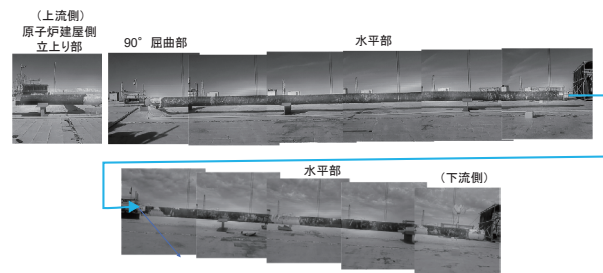


図9 SGTS配管測定のガンマカメラ撮影

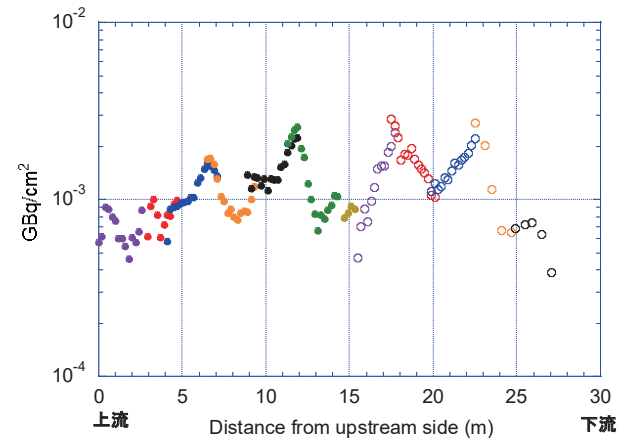


図10 配管内面の¹³⁷Cs汚染密度 (GBq/cm²)

を求め、北壁面を正面から見たときの分布として表すと図8のようになり、東壁に比べて低めの値であった。

3.2 1号機SGTS屋外配管の汚染密度測定⁶⁾

非常用ガス処理系 (SGTS) の屋外配管はベント操作等により汚染され線量が高い。隣接建屋の作業環境を整備するために撤去作業が行われているが、配管を細断し保管する前に、事故時の配管内のガスの流れの状況等の検討に役立つ可能性を考え細断前に内面汚染分布を測定した。

内径約30cmのSGTS配管が1号機原子炉建屋から屋外に出る位置で2.8m立ち上り90°屈曲した後12.6mの水平部分と、それに続く11.6mの水平部分について、ガンマカメラで測定し内面の汚染密度を評価した。

配管軸に沿った分布については配管から4mの距離で撮影した。図9に示すように全体で12撮影(各1分間測定)を行い汚染密度分布を求めた。

図10に、測定された全エネルギー吸収ピーク計数率データをもとに、2.3で示した方法で得られた上流側から下流側の配管内面汚染密度分布を示す。



図 11 SGTS 配管（1 m位置）での詳細撮影

内側 上端	2.0	2.0	2.6	2.7	2.8	3.6	3.3	2.5	3.1	2.7	2.7	2.4	2.6	3.0	3.6	3.7
	1.8	2.2	2.2	2.2	2.4	2.6	2.1	2.3	1.6	1.9	1.7	1.6	1.6	1.7	1.7	2.4
内側 前面	2.2	2.1	2.2	2.2	2.2	2.1	1.9	1.9	2.0	1.4	1.4	1.4	1.6	1.7	1.7	1.5
	2.1	2.2	2.0	1.8	1.8	1.8	1.5	1.4	1.2	1.4	1.4	1.4	1.5	1.3	1.8	1.5
	1.8	1.8	1.5	1.6	1.3	1.5	1.2	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.5	1.4	1.9
内側 下端	2.8	2.3	2.1	1.8	2.0	1.9	1.7	1.8	1.5	1.6	1.6	1.8	1.6	1.5	2.1	2.1

図 12 配管内面の¹³⁷Cs 汚染密度（MBq/cm²）
【配管内面を平面に展開して表示】

汚染密度は一様ではなく約 5 m ごとに汚染密度が高くなっていることが分かる。

また、配管軸方向で汚染密度が高かった 12 m 付近について、配管からの距離 1 m の位置から詳細分布を撮影した。図 11 に撮影範囲、図 12 に得られた内部汚染密度分布を、配管内面前部を平面に展開して示した。

4. まとめと今後に向けて

ピンホール型ガンマカメラの利点を生かした 1F サイト内の高線量率場での汚染密度測定評価については解析法を改良しつつ今後も続けられるが、重さが問題である。

ガンマカメラには今回使用したピンホール型の他に、コーデッドマスク型、コンプトン型等軽量なものが開発されている。高線量率場での不自然な線源点表示等の問題が解決されたものが早く開発されることを切に願っている。

参考文献

- 1) 「東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ ～2019年9月から2021年3月までの検討～」(2021.3.5) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会
<https://www.nra.go.jp/data/000345595.pdf>
- 2) 「東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ(2023年版)」(2023.3.7) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会
<https://www.nra.go.jp/data/000425218.pdf> [1/2]
<https://www.nra.go.jp/data/000425219.pdf> [2/2]
- 3) 平山英夫, 他, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.19, No.3, 152-162 (2020)
- 4) H. Hirayama, et al., *The EGS5 Code System* (2005)
- 5) Katsumi Hayashi, et al., *Nuclear Science and Engineering* "Estimation of ¹³⁷Cs Contamination Density of Wall, Ceiling, and Floor at Unit 2 Operation Floor in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Using Pinhole Gamma Camera" (2023)
- 6) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会第41回会合(2023.12.25) 資料4-2「1号機SGTS配管に対する測定状況」

(*¹ 原子力規制庁, *² 技術士事務所 RAD, *³ 高エネルギー加速器研究機構)