

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} Hayashi Katsumi

Hirayama Hideo

英夫*1,3

平山

岩永 宏平^{*1} 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



図1 ガンマカメラ外観

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4cm×4cm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5cm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3mm 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¹³⁷Csγ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



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⁹⁰

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 30 cm の SGTS 配管が 1 号機原子炉建屋か ら屋外に出る位置で 2.8 m 立ち上り 90° 屈曲した後 12.6 m の水平部分と,それに続く 11.6 m 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。



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 11 SGTS 配管(1 m位置)での詳 細撮影

図 12	配管内面の1	³⁷ Cs 汚染密度	(MBq/cm ²)
【配管内	内面を平面に	展開して表示】	

汚染密度は一様ではなく約5m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12m付 近について,配管からの距離1m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 IF 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

- 「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)
- 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)