

平成 28 年度

廃棄物の限定再利用に関する検討

報 告 書

平成 29 年 3 月

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

目次

1. 序論.....	1-1
1.1 まえがき.....	1-1
1.2 実施内容.....	1-1
1.3 成果概要.....	1-3
1.3.1 敷地内がれきの保管状況の把握.....	1-3
1.3.2 限定再利用において考慮すべき核種のめやす濃度の試算.....	1-13
1.3.3 放射能濃度評価手法の検討.....	1-23
第1章の参考文献.....	1-50
2. 敷地内がれきの保管状況の把握.....	2-1
2.1 はじめに.....	2-1
2.2 東京電力の再利用に向けた検討状況.....	2-1
2.3 現在の屋外集積保管状況.....	2-3
2.4 屋外集積がれきの物量についての推移見通し.....	2-6
2.5 放射性核種濃度及び核種組成比.....	2-8
2.6 1F 敷地内線量率分布の変化.....	2-10
2.7 本年度の検討で対象とする再利用用途と核種.....	2-11
2.8 まとめと今後の課題.....	2-11
第2章の参考文献.....	2-12
3. 限定再利用において考慮すべき核種のめやす濃度の試算.....	3-1
3.1 はじめに.....	3-1
3.2 平成27年度の成果概要.....	3-1
3.3 めやす濃度の妥当性確認の考え方.....	3-3
3.4 コンクリートくずの道路材への再利用.....	3-4
3.4.1 粉塵吸入による内部被ばくに起因する「作業者の追加の年間被ばく線量」評価.....	3-4
3.4.2 「1F 敷地内の地下水への核種漏えいの影響」の評価.....	3-5
3.5 コンクリートくずの建設用コンクリートへの再利用.....	3-10
3.5.1 めやす濃度の試算.....	3-10
3.5.2 「作業者の追加の年間被ばく線量」の評価.....	3-14
3.5.3 「1F 敷地境界空間線量率への影響」の評価.....	3-15
3.5.4 「1F 敷地内の地下水への核種漏えいの影響」の評価.....	3-17
3.6 めやす濃度と表面線量率 $5\mu\text{Sv/h}$ 相当のがれき中核種濃度の関係.....	3-23

3.7 まとめ.....	3-25
第3章の参考文献.....	3-27
4. 放射能濃度評価手法の検討.....	4-1
4.1 はじめに.....	4-1
4.2 限定再利用に向けた汚染がれきの処理の流れと検認のタイミング	4-1
4.3 放射能濃度分布評価コードシステム	4-3
4.3.1 コードシステムの整備	4-4
4.3.2 逆解析手法.....	4-6
4.3.1 グリーン関数の正規化.....	4-10
4.3.2 逆解析プログラムを使用しての試解析	4-10
4.3.3 試解析のための条件.....	4-11
4.3.4 測定への適用に向けた検討.....	4-17
4.3.5 精度向上のための評価.....	4-25
4.4 資源化物を収納した容器外周の放射線測定及びグリーン関数の作成	4-34
4.4.1 PSF の特徴と仕様	4-34
4.4.2 PSF を用いた模擬資源化物測定	4-47
4.4.3 放射能分布の推定を行うためのグリーン関数の整備	4-60
4.5 放射線測定結果に基づく放射能分布の評価.....	4-77
4.5.1 放射線測定結果に基づく放射能分布評価の条件（設定）	4-77
4.5.2 放射能分布評価結果.....	4-78
4.5.3 放射能分布評価結果についてのまとめ	4-113
4.6 コンプトン散乱式ガンマカメラの試適用	4-115
4.6.1 コンプトン散乱型ガンマカメラの概要	4-115
4.6.2 測定条件.....	4-117
4.6.3 測定結果.....	4-119
4.6.4 考察.....	4-131
4.7 碎石を均質とみなせる範囲の検討.....	4-132
4.7.1 測定による検討.....	4-132
4.7.2 解析による検討.....	4-135
4.8 まとめ.....	4-139
第4章の参考文献.....	4-141

添付資料

Appendix-I 放射能濃度評価手法における予察的検討

I-A グリーン関数を正規化することによる優位性 App.I-1

I-B 逆解析手法の適用可能性の予察的検討..... App.I-3

Appendix-II 多様な逆解析条件のための濃度分布データ生成ツール

II-A 多様な逆解析条件のための濃度分布データ生成ツール App.II-1

Appendix-III 検討委員会委員名簿

III-A 平成 28 年度「廃棄物の限定再利用に関する検討」

検討委員会委員名簿 App.III-1

図目次

図 1.3-1	1F の屋外一時保管がれきの解消に向けた設備増設のイメージ図	1-4
図 1.3-2	屋外一時保管がれきの解消に向けた処理フロー図	1-4
図 1.3-3	減容処理設備の例	1-4
図 1.3-4	1F 敷地内のがれき等保管場所（平成 29 年 1 月時点）	1-6
図 1.3-5	がれき等保管量の推移見通し	1-9
図 1.3-6	建屋外（建屋周辺及び覆土槽）保管がれき中の核種組成比（Sr-90, Co-60）	1-10
図 1.3-7	建屋周辺がれき及び伐採木等中の核種組成比（H-3, C-14）	1-11
図 1.3-8	平成 29 年 1 月現在の構内サーベイマップと平成 27 年 11 月現在との比較	1-11
図 1.3-9	めやす濃度設定の考え方	1-13
図 1.3-10	路盤材へ再利用した際の地下水移行評価体系図	1-15
図 1.3-11	道路端からの距離及び再利用開始からの期間に対する地下水中核種濃度	1-17
図 1.3-12	固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟の断面図	1-17
図 1.3-13	基礎部への利用時の評価体系	1-18
図 1.3-14	敷地境界評価体系	1-19
図 1.3-15	基礎材へ再利用した際の地下水移行評価体系	1-20
図 1.3-16	貯蔵庫端距離及び再利用完了からの期間に対する地下水中核種濃度	1-21
図 1.3-17	表面線量率 $5\mu\text{Sv/h}$ 相当のがれき中核種濃度算出の評価体系	1-22
図 1.3-18	汚染がれき類の処理および検認フロー（想定）	1-24
図 1.3-19	逆解析による放射能濃度分布評価コードシステムの概要	1-25
図 1.3-20	測定値の有効数字桁数と平均濃度	1-26
図 1.3-21	測定点数と平均濃度	1-27
図 1.3-22	濃度分布（一様分布）	1-28
図 1.3-23	濃度分布（密集分布 1~4）	1-28
図 1.3-24	初期分布（左）と推定された分布の例（右・ML-EM 法）	1-30
図 1.3-25	アクリルボックスに砕石を敷き詰めた状態	1-31
図 1.3-26	設置の様子	1-32
図 1.3-27	グリーン関数作成フロー	1-32
図 1.3-28	測定値とグリーン関数の比較	1-33
図 1.3-29	測定値とグリーン関数の比較(低計数率時)	1-33
図 1.3-30	PSF(D-phod)のエネルギー特性	1-34
図 1.3-31	空気層 X4Y4Z1 ML-EM 法	1-35

図 1.3-32	碎石層 X1Y2Z4 ML-EM 法	1-36
図 1.3-33	模擬資源化物容器 (50cm×50cm×40cm) を対象とした検出器の配置	1-37
図 1.3-34	模擬資源化物容器とガンマキャッチャーの配置	1-38
図 1.3-35	2つの線源を配置した場合のガンマキャッチャーの撮像	1-39
図 1.3-36	空気層及び碎石層厚さに応じたガンマカメラ撮像	1-41
図 1.3-37	模擬資源化物容器 (50cm×50cm×40cm) を対象とした検出器の配置	1-42
図 1.3-38	空気層及び碎石層厚さに応じた γ 線総カウント数	1-43
図 1.3-39	空気層及び碎石層厚さに応じた 662keV γ 線のカウント数	1-43
図 1.3-40	空気層及び碎石層厚さに応じた γ 線選別率	1-43
図 1.3-41	空気層及び碎石層厚さに応じた γ 線エネルギースペクトル (全体エネルギー)	1-44
図 1.3-42	空気層及び碎石層厚さに応じたエネルギー分布	1-45
図 1.3-43	本年度対象とした測定容器に対するガンマキャッチャーによる測定例	1-46
図 1.3-44	碎石 6 号をアクリルボックスに詰めた状態及び粒子の拡大図	1-47
図 1.3-45	珪砂 6 号をアクリルボックスに詰めた状態及び粒子の拡大図	1-47
図 1.3-46	検出器と密封線源の位置関係	1-48
図 1.3-47	空気層、碎石 6 号、珪砂 6 号の各厚さに応じた線量率 (NaI サーベイメータ)	1-48
図 1.3-48	碎石 6 号を詰めたアクリルボックスに対する向きの違い 及び碎石の詰め方のばらつきによる影響 (NaI サーベイメータ)	1-49
図 2.2-1	1F の屋外一時保管がれきの解消に向けた設備増設のイメージ図	2-2
図 2.2-2	屋外一時保管がれきの解消に向けた処理フロー図	2-2
図 2.2-3	減容処理設備の例	2-2
図 2.2-4	固体廃棄物の発生～保管までの流れ	2-3
図 2.3-1	1F 敷地内のがれき等保管場所 (平成 29 年 1 月時点)	2-4
図 2.4-1	がれき等保管量の推移見通し	2-7
図 2.4-2	再利用対象保管エリア	2-8
図 2.5-1	建屋外 (建屋周辺及び覆土槽) 保管がれき中の核種組成比 (Sr-90, Co-60)	2-9
図 2.5-2	建屋周辺がれき及び伐採木等中の核種組成比 (H-3, C-14)	2-10
図 2.6-1	平成 29 年 1 月現在の構内サーベイマップと平成 27 年 11 月現在との比較	2-10
図 3.3-1	めやす濃度設定の考え方	3-3
図 3.4-1	路盤材へ再利用した際の地下水移行評価体系	3-6

図 3.4-2	道路端からの距離及び再利用開始からの期間に対する地下水中核種濃度	3-8
図 3.4-3	道路端からの距離及び再利用開始からの期間に対する地下水中核種濃度	3-9
図 3.5-1	固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟の断面図	3-11
図 3.5-2	固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟の断面図から想定した基礎部断面図	3-11
図 3.5-3	基礎部への利用時の評価体系	3-12
図 3.5-4	限定再利用における作業者	3-15
図 3.5-5	敷地境界評価体系	3-16
図 3.5-6	基礎材へ再利用した際の地下水移行評価体系	3-18
図 3.5-7	地下水流動解析の概念図	3-20
図 3.5-8	貯蔵庫端距離及び再利用開始からの期間に対する地下水中核種濃度	3-21
図 3.5-9	貯蔵庫端距離及び再利用開始からの期間に対する地下水中核種濃度	3-22
図 3.6-1	表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度算出の評価体系	3-24
図 4.2-1	汚染がれき類の処理および検認フロー（想定）	4-3
図 4.3-1	逆解析による放射能濃度分布評価コードシステムの概要	4-5
図 4.3-2	試解析に使用する資源化物収納容器モデル	4-12
図 4.3-3	濃度分布（一様分布）	4-14
図 4.3-4	濃度分布（密集分布 1~4）	4-14
図 4.3-5	測定点配置の例（容器上面）	4-15
図 4.3-6	測定点配置の例（容器側面）	4-15
図 4.3-7	線量率の有効数字桁数に対する各逆解析手法の平均濃度	4-20
図 4.3-8	線量率の有効数字桁数に対する各逆解析手法の推定誤差	4-21
図 4.3-9	測定点数に対する平均濃度	4-24
図 4.3-10	測定点数に対する推定誤差	4-25
図 4.3-11	ML-EM 法による分布推定結果（真の分布：密集分布 1、 $z=0$ 断面）	4-26
図 4.3-12	ML-EM 法による分布推定結果（真の分布：密集分布 2、 $z=0$ 断面）	4-26
図 4.3-13	ML-EM 法による分布推定結果（真の分布：密集分布 3、 $z=0$ 断面）	4-27
図 4.3-14	ML-EM 法による分布推定結果（真の分布：密集分布 4、 $z=20\text{cm}$ 断面）	4-27
図 4.3-15	SIRT 法の固有パラメータ（ β ）最適化	4-28
図 4.3-16	MAP-EM 法の固有パラメータ（ γ ）最適化	4-29
図 4.3-17	単純逆投影法による初期分布（ $z=0$ 断面）	4-30
図 4.3-18	一様分布の初期分布（ $z=0$ 断面）	4-30
図 4.3-19	中心密集分布の初期分布（ $z=0$ 断面）	4-31
図 4.3-20	外縁部分布の初期分布（ $z=0$ 断面）	4-31
図 4.3-21	MLEM 法の結果（初期分布：単純逆投影法）（ $z=0$ 断面）	4-33

図 4.3-22	ML-EM 法の結果（初期分布：一様分布）（ $z=0$ 断面）.....	4-33
図 4.3-23	ML-EM 法の結果（初期分布：中心密集分布）（ $z=0$ 断面）.....	4-33
図 4.3-24	ML-EM 法の結果（初期分布：外縁部分布）（ $z=0$ 断面）.....	4-33
図 4.4-1	PSF の測定原理.....	4-35
図 4.4-2	測定システム D-phod	4-35
図 4.4-3	特性試験の測定器配置イメージ.....	4-36
図 4.4-4	PSF 長さ 2m 地点－高さ 15cm に線源を配置した場合の測定結果	4-36
図 4.4-5	密封線源(鉛容器入り) 位置 2m－高さ 10cm による測定	4-36
図 4.4-6	鉛容器寸法.....	4-37
図 4.4-7	同線源強度による複合ピークの確認試験.....	4-37
図 4.4-8	同強度の線源を PSF 長さ 1.0m 及び 1.1m 地点に配置した場合の測定結果	4-38
図 4.4-9	同強度の線源を PSF 長さ 1.0m 及び 1.7m 地点に配置した場合の測定結果	4-38
図 4.4-10	同強度の線源を PSF 長さ 1.0m 及び 2.0m 地点に配置した場合の測定結 果.....	4-39
図 4.4-11	強度の異なる線源を近くに置いた場合の複合ピーク確認試験.....	4-39
図 4.4-12	強度の異なる線源による複合ピーク確認試験の結果（距離 70cm）	4-40
図 4.4-13	強度の異なる線源による複合ピーク確認試験の結果（距離 1m）	4-40
図 4.4-14	時間差による位置測定の原理.....	4-41
図 4.4-15	実験体系(右写真 8m 手前の段差).....	4-41
図 4.4-16	校正前の ch 確認試験の測定結果.....	4-42
図 4.4-17	校正後の ch 確認試験の測定結果.....	4-42
図 4.4-18	NaI 検出器による線量率測定試験.....	4-43
図 4.4-19	D-phod エネルギー特性	4-44
図 4.4-20	コリメータ容器を用いた単一線源解析体系.....	4-45
図 4.4-21	測定値と解析値の比較.....	4-45
図 4.4-22	GM 管式検出器による測定	4-46
図 4.4-23	GM 管式検出器の測定結果	4-46
図 4.4-24	シンチレーションファイバー内の光の散乱イメージ.....	4-47
図 4.4-25	アクリルボックスに碎石を敷き詰めた状態.....	4-47
図 4.4-26	設置の様子.....	4-48
図 4.4-27	ローラコンベアの仕様.....	4-49
図 4.4-28	回転台の仕様.....	4-50
図 4.4-29	座標取得のためのマーキング	4-51
図 4.4-30	取得した相対座標の位置.....	4-51

図 4.4-31	測定方法.....	4-53
図 4.4-32	測定データの編集イメージ.....	4-53
図 4.4-33	アクリルボックスの番号(X,Y,Z)と座標系(x,y,z).....	4-54
図 4.4-34	養生テープによる密封線源の固定.....	4-55
図 4.4-35	空気層 X1Y2Z4 に対する測定結果	4-55
図 4.4-36	空気層 X4Y4Z1 に対する測定結果	4-56
図 4.4-37	空気層 X3Y3Z2 に対する測定結果	4-56
図 4.4-38	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 に対する測定結果	4-57
図 4.4-39	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2 に対する測定結果	4-57
図 4.4-40	砕石層 X1Y2Z4 に対する測定結果	4-59
図 4.4-41	X3Y3Z1&X3Y3Z4 に対する測定結果	4-60
図 4.4-42	グリーン関数作成フロー.....	4-61
図 4.4-43	QAD 解析モデル	4-62
図 4.4-44	単一ピークにおけるガウス分布補正の結果.....	4-64
図 4.4-45	複合ピークによるサムアップ補正の結果.....	4-65
図 4.4-46	複合ピークによる両ピーク中間点重ね合わせ補正の結果.....	4-65
図 4.4-47	空気層 X1Y2Z4 測定 1 回目の結果より作成した検量線.....	4-66
図 4.4-48	砕石層 X1Y2Z4 測定 1 回目の結果より作成した検量線.....	4-66
図 4.4-49	空気層 X1Y2Z4 における測定とグリーン関数.....	4-68
図 4.4-50	空気層 X3Y3Z2 における測定とグリーン関数.....	4-69
図 4.4-51	空気層 X3Y3Z2 の QAD 解析値とガウス分布補正結果.....	4-70
図 4.4-52	砕石層 X1Y2Z4 における測定とグリーン関数.....	4-71
図 4.4-53	空気層 X1Y2Z4 における測定とグリーン関数の相対誤差.....	4-72
図 4.4-54	空気層 X1Y2Z4 に対する QAD 解析値.....	4-72
図 4.4-55	空気層 X3Y3Z2 に対する QAD 解析値.....	4-73
図 4.4-56	3 周目の-X 方向+Z 方向のサンプリング点.....	4-73
図 4.4-57	解析に用いた計測点と取得座標の誤差を模擬した疑似的な点.....	4-74
図 4.4-58	空気層 X1Y2Z4 における測定と疑似的な計測点によるグリーン関数.....	4-75
図 4.4-59	空気層 X4Y4Z1 に対して空気層 X1Y2Z4 にて作成した検量線の適応確認.....	4-76
図 4.4-60	空気層 X2Y2Z4 と空気層 X3Y2Z4 のグリーン関数の分布	4-76
図 4.5-1	空気層 X1Y2Z4 ART 法.....	4-80
図 4.5-2	空気層 X1Y2Z4 GVSPM 法.....	4-81
図 4.5-3	空気層 X1Y2Z4 ML-EM 法	4-82
図 4.5-4	空気層 X3Y3Z2 ART 法.....	4-85
図 4.5-5	空気層 X3Y3Z2 GVSPM 法.....	4-86

図 4.5-6	空気層 X3Y3Z2 ML-EM 法	4-87
図 4.5-7	空気層 X4Y4Z1 ART 法	4-90
図 4.5-8	空気層 X4Y4Z1 GVSPM 法	4-91
図 4.5-9	空気層 X4Y4Z1 ML-EM 法	4-92
図 4.5-10	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 ART 法	4-95
図 4.5-11	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 GVSPM 法	4-96
図 4.5-12	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 ML-EM 法	4-97
図 4.5-13	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2 ART 法	4-100
図 4.5-14	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2 GVSPM 法	4-101
図 4.5-15	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2 ML-EM 法	4-102
図 4.5-16	砕石層 X1Y2Z4 ART 法	4-105
図 4.5-17	砕石層 X1Y2Z4 GVSPM 法	4-106
図 4.5-18	砕石層 X1Y2Z4 ML-EM 法	4-107
図 4.5-19	砕石層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 ART 法	4-110
図 4.5-20	砕石層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 GVSPM 法	4-111
図 4.5-21	砕石層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 ML-EM 法	4-112
図 4.6-1	コンプトン散乱型ガンマカメラの測定原理	4-116
図 4.6-2	模擬資源化物容器 (50cm×50cm×40cm) を対象とした検出器の配置	4-118
図 4.6-3	模擬資源化物容器とガンマキャッチャーの配置	4-119
図 4.6-4	単一線源を配置した場合のガンマキャッチャーの撮像	4-121
図 4.6-5	2つの線源を配置した場合のガンマキャッチャーの撮像	4-122
図 4.6-6	空気層及び砕石層厚さに応じたガンマカメラ撮像	4-124
図 4.6-7	模擬資源化物容器 (50cm×50cm×40cm) を対象とした検出器の配置	4-125
図 4.6-8	空気層及び砕石層厚さに応じた γ 線総カウント数	4-126
図 4.6-9	空気層及び砕石層厚さに応じた 662keV γ 線のカウント数	4-126
図 4.6-10	空気層及び砕石層厚さに応じた γ 線選別率	4-126
図 4.6-11	空気層及び砕石層厚さに応じた γ 線全体エネルギースペクトル	4-127
図 4.6-12	空気層及び砕石層厚さに応じた γ 線散乱エネルギースペクトル	4-128
図 4.6-13	空気層及び砕石層厚さに応じた γ 線吸収エネルギースペクトル	4-129
図 4.6-14	空気層及び砕石層厚さに応じたエネルギー分布	4-130
図 4.6-15	本年度対象とした測定容器に対するガンマキャッチャーによる測定例 ..	4-131
図 4.7-1	砕石 6 号をアクリルボックスに詰めた状態及び粒子の拡大図	4-132
図 4.7-2	珪砂 6 号をアクリルボックスに詰めた状態及び粒子の拡大図	4-133
図 4.7-3	検出器と密封線源の位置関係	4-133
図 4.7-4	空気層、砕石 6 号、珪砂 6 号の各厚さに応じた線量率 (NaI サーベイメータ)	4-134

図 4.7-5	碎石 6 号を充填したアクリルボックスに対する向きの違い及び碎石の詰め方の ばらつきによる影響 (NaI サーベイメータ)	4-134
図 4.7-6	面心立方格子.....	4-135
図 4.7-7	解析モデル.....	4-136

表目次

表 1.3-1	がれき等の保管状況（平成 28 年 1 月 31 日時点）	1-7
表 1.3-2	平成 27 年度に設定した道路材のめやす濃度.....	1-14
表 1.3-3	粉塵吸入による内部被ばく線量 (mSv/y).....	1-14
表 1.3-4	基礎材への再利用における空間線量.....	1-19
表 1.3-5	表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度とめやす濃度	1-22
表 1.3-6	線量率の有効数字桁数と平均濃度.....	1-26
表 1.3-7	測定点数と平均濃度.....	1-27
表 1.3-8	真の分布と平均濃度.....	1-28
表 1.3-9	初期分布と平均濃度.....	1-29
表 1.3-10	5cm 厚さの珪砂と碎石の線量率測定結果.....	1-49
表 2.3-1	がれき等の保管状況（平成 28 年 1 月 31 日時点）	2-5
表 3.2-1	平成 27 年度の検討で試算しためやす濃度（1 μ Sv/h相当核種濃度）	3-2
表 3.4-1	舗装材中の核種濃度.....	3-5
表 3.4-2	吸入による内部被ばく線量.....	3-5
表 3.4-3	路盤材に再利用した際の地下水中核種濃度評価のパラメータ設定	3-7
表 3.5-1	コンクリート骨材比率.....	3-12
表 3.5-2	基礎材の評価パラメータ.....	3-12
表 3.5-3	基礎材への再利用における外部被ばく線量換算係数.....	3-14
表 3.5-4	基礎材への再利用における外部被ばく線量換算係数.....	3-17
表 3.5-5	基礎材への再利用における線量率.....	3-17
表 3.5-6	基礎材への再利用における空間線量.....	3-17
表 3.5-7	基礎材に再利用した際の地下水中核種濃度評価のパラメータ設定	3-19
表 3.5-8	地下水流動解析のパラメータ設定.....	3-20
表 3.6-1	がれきによる外部被ばく線量換算係数.....	3-24
表 3.6-2	表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度とめやす濃度	3-25
表 4.3-1	逆解析手法.....	4-5
表 4.3-2	一般化逆行列の成分.....	4-6
表 4.3-3	物質条件.....	4-12
表 4.3-4	試解析の解析条件.....	4-13
表 4.3-5	濃度分布.....	4-14
表 4.3-6	入力パラメータ	4-17

表 4.3-7	数値丸めの例（線量率 400 点に対し、4 点のみ）	4-18
表 4.3-8	許容誤差.....	4-18
表 4.3-9	線量率の有効数字桁数に対する各逆解析手法の解析誤差.....	4-19
表 4.3-10	線量率の有効数字桁数に対する各逆解析手法の平均濃度.....	4-19
表 4.3-11	線量率の有効数字桁数に対する各逆解析手法の推定誤差.....	4-20
表 4.3-12	X 方向の測定点配置.....	4-22
表 4.3-13	Y 方向の測定点配置.....	4-22
表 4.3-14	Z 方向の測定点配置	4-22
表 4.3-15	各測定点配置に応じた測定点数.....	4-23
表 4.3-16	測定点数に対する解析誤差.....	4-23
表 4.3-17	測定点数に対する平均濃度.....	4-24
表 4.3-18	測定点数に対する推定誤差.....	4-24
表 4.3-19	濃度分布の違いによる解析誤差.....	4-25
表 4.3-20	濃度分布の違いによる平均濃度.....	4-26
表 4.3-21	濃度分布の違いによる推定誤差.....	4-26
表 4.3-22	初期分布と解析誤差.....	4-32
表 4.3-23	初期分布と平均濃度.....	4-32
表 4.3-24	初期分布と推定誤差.....	4-32
表 4.4-1	適応可能な測定装置に必要な性能.....	4-34
表 4.4-2	D-phod の仕様	4-35
表 4.4-3	密封線源の仕様.....	4-43
表 4.4-4	γ 線エネルギーに応じた D-phod と NaI サーベイメータの測定結果と感度 比.....	4-44
表 4.4-5	組成密度.....	4-44
表 4.4-6	アクリル容器およびボックスの仕様.....	4-47
表 4.4-7	スチールラックの仕様.....	4-50
表 4.4-8	取得した相対座標.....	4-52
表 4.4-9	空気層における測定ケース一覧.....	4-55
表 4.4-10	1cm 線量当量換算係数を用いた理論結果.....	4-58
表 4.4-11	空気層 X3Y3Z2 の測定結果.....	4-58
表 4.4-12	碎石層における測定ケース一覧.....	4-59
表 4.4-13	組成条件 ⁷⁾	4-62
表 4.4-14	グリーン関数の条件.....	4-68
表 4.4-15	3 周目の-X 方向+Z 方向のサンプリング点.....	4-74
表 4.4-16	解析に用いた計測点と取得座標の誤差を模擬した疑似的な点.....	4-74
表 4.4-17	1cm 線量当量計算による検討結果.....	4-75

表 4.5-1	測定ケース一覧.....	4-78
表 4.5-2	測定結果を使用した分布推定に関わる入力パラメータ	4-78
表 4.5-3	空気層 X1Y2Z4 線源情報	4-78
表 4.5-4	空気層 X1Y2Z4 ART 法.....	4-79
表 4.5-5	空気層 X1Y2Z4 GVSPM 法.....	4-79
表 4.5-6	空気層 X1Y2Z4 ML-EM 法	4-79
表 4.5-7	空気層 X3Y3Z2 線源情報	4-83
表 4.5-8	空気層 X3Y3Z2 ART 法.....	4-84
表 4.5-9	空気層 X3Y3Z2 GVSPM 法.....	4-84
表 4.5-10	空気層 X3Y3Z2 ML-EM 法	4-84
表 4.5-11	空気層 X4Y4Z1 線源情報.....	4-88
表 4.5-12	空気層 X4Y4Z1 ART 法.....	4-89
表 4.5-13	空気層 X4Y4Z1 GVSPM 法.....	4-89
表 4.5-14	空気層 X4Y4Z1 ML-EM 法	4-89
表 4.5-15	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 線源情報	4-93
表 4.5-16	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 ART 法	4-94
表 4.5-17	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 GVSPM 法	4-94
表 4.5-18	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 ML-EM 法.....	4-94
表 4.5-19	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2 線源情報	4-98
表 4.5-20	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2 ART 法	4-99
表 4.5-21	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2 GVSPM 法	4-99
表 4.5-22	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2 ML-EM 法.....	4-99
表 4.5-23	碎石層 X1Y2Z4 線源情報	4-103
表 4.5-24	碎石層 X1Y2Z4 ART 法.....	4-104
表 4.5-25	碎石層 X1Y2Z4 GVSPM 法.....	4-104
表 4.5-26	碎石層 X1Y2Z4 ML-EM 法	4-104
表 4.5-27	碎石層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 線源情報	4-108
表 4.5-28	碎石層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 ART 法	4-109
表 4.5-29	碎石層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 GVSPM 法	4-109
表 4.5-30	碎石層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 ML-EM 法.....	4-109
表 4.6-1	測定に用いたガンマキャッチャーの仕様.....	4-117
表 4.7-1	珪砂 6 号（東北珪砂）の粒径分布.....	4-132
表 4.7-2	5cm 厚さの珪砂と碎石の線量率測定結果.....	4-135
表 4.7-3	組成条件.....	4-137
表 4.7-4	約 20cm 厚の碎石による非均質・均質の相対誤差.....	4-138
表 4.7-5	約 10cm 厚の碎石による非均質・均質の相対誤差.....	4-138

表 4.7-6	約 0cm 厚の碎石による非均質・均質の相対誤差.....	4-138
---------	-------------------------------	-------

1. 序論

1. 序論

1.1 まえがき

東京電力福島第一原子力発電所（以下「1F」という。）敷地内には、大量の汚染がれき（コンクリート、金属、木材等）が保管（一部は散乱）されており、今後は燃料デブリで汚染されたがれきの発生も考えられる。こうした 1F 敷地内の汚染したがれきの処理・処分に向けた作業の中で、物量が多く比較的核種濃度の低いがれきを、安全性を確保しつつ適切に再利用することによって、保管・散乱がれきに起因するリスクを低減できるとともに、1F 敷地内へ新たに搬入する資材量の抑制と相俟って将来の処分対象となる放射性廃棄物の物量を低減することが可能となる。環境省では「放射性物質汚染対処特別措置法」において、汚染した恐れのある災害廃棄物等の積極的な再利用を図るべきことを位置づけており、その基本方針のもと、管理された状態での災害廃棄物（コンクリートくず等）の道路路盤材への再利用に対し、被ばく線量評価結果を基に放射性セシウムの濃度基準 3,000Bq/kg を示している。

1F においても東京電力は低濃度のがれきについて、一部再利用を行う方針を示している。こうしたことから、1F 敷地内の汚染したがれきを再利用するにあたって、作業への追加被ばくを抑制しつつ管理された状態での用途を限定した再利用（以下「限定再利用」という。）を考えた場合、対象がれきの再利用を可能とする廃棄物量の範囲を拡大することができ、資源の有効活用ならびに環境への負荷とリスクの低減に貢献できると考えられる。

本事業では、1F 敷地内の汚染したがれきの限定的な再利用にあたり、比較的核種濃度の低い汚染がれきを対象に、対象がれきの汚染状況を踏まえつつ多様な限定再利用の用途を想定した被ばく線量評価を実施し、その基準濃度（以下、めやす濃度という）について試算し、1F 敷地内における限定再利用に向けた今後の技術的検討に資するものとした。

また、試算されためやす濃度に基づいて限定再利用を運用するためには、再利用に供する資材（資源化物）の放射能濃度がめやす濃度以下であることを測定・評価によって確認する必要がある。このとき、1F 事故により生じた汚染がれきは通常の原子力施設等で発生する廃棄物のように履歴が明確でなく、放射能濃度分布にも大きなばらつきがある可能性が考えられ、汚染がれきを処理した資源化物にもホットスポットが存在する可能性がある。そこで本事業では、1F 事故により発生し、保管されている汚染されたがれきや資源化処理を行ったがれき（資源化物）を対象に、放射線測定と逆解析手法を組み合わせた放射能濃度分布を把握したうえで平均放射能濃度を評価する手法について、実際の測定装置を用いて検討を行った。

1.2 実施内容

本事業では、1F 敷地内の汚染したがれきの限定再利用に向けて、以下に示す（１）（２）（３）の項目の調査を実施した。

（１）敷地内がれきの保管状況の把握

平成 27 年度に引き続き、「（２）限定再利用において考慮すべき核種の基準濃度の試算」及び「（３）放射能濃度評価手法の検討」のために、1F 敷地内のがれきの保管と記録情報の実態について調査した。調査対象とする情報は、がれき回収の場所と日時、保管状況（場所及び容器あり・なし）、がれきの材質及び重量、容器又はがれき表面の線量率、核種濃度、収納効率、かさ密度等であって、平成 27 年度事業の調査結果に含まれていないものとした。

また、東京電力は今後のがれき発生量の予測と表面線量率 5 μ Sv/h 以上のがれきの屋外保管の解消にむけた取り組み、および 5 μ Sv/h 以下のがれきの再利用方針を新たに発表しており、その

内容について調査した。

（２）限定再利用において考慮すべき核種の基準濃度の試算

「（３）放射能濃度評価手法の検討」及び平成 27 年度事業の追加被ばく線量に関する検討結果を踏まえて、限定再利用において考慮すべき核種について、基準濃度（以下、めやす濃度という）を検討した。考慮すべき核種としては平成 27 年度に評価した放射性セシウム（Cs-134 及び Cs-137）に加えて、Sr-90 を対象核種としてとりあげた。Sr-90 が β 線放出核種であること、水中への移行性が高いことなどから、地下水移行の経路を新たに加え、放射性セシウムとあわせて評価を行った。このとき算出しためやす濃度の妥当性を確認するため、平成 27 年度に整理した作業者の追加被ばく線量が 20mSv/y を十分に下回ること、および、1F 敷地境界の空間線量率がほかの線量寄与と合わせて 1mSv/y を下回るという確認事項に加えて、地下水移行経路の場合に、地下水の放射性核種濃度が東京電力が採用している運用目標値以下であることを確認することとした。なお、Sr-90 は平成 29 年 3 月現在公表されている建屋外のがれき中 Cs-137 の核種組成比 1%とし、放射性セシウムの各めやす濃度に応じて濃度を決定した。平成 27 年度に評価したコンクリート道路路盤材へ資源化物を利用する際の地下水移行経路について放射性セシウムと Sr-90 について評価し、運用目標値以下であることを確認した。

また、新たな再利用先として、将来建設される固体廃棄物貯蔵庫の基礎部を取り上げ、資源物を利用した基礎部近傍の地下 2 階の空間線量率が 1F 敷地内の現在のバックグラウンド空間線量率である 1 μ Sv/h を超えないように、放射性セシウムのめやす濃度を算出した。線量評価では再利用先及び再利用に伴う被ばくシナリオについて検討し、想定される作業形態に対する作業者の追加被ばく線量と、最終的な用途に対する利用者の追加被ばく線量を評価した。また、1F 敷地境界への線量寄与についても評価するとともに、地下水中の放射性セシウム濃度及び Sr-90 濃度を評価して、運用目標値を下回ることを確認し、限定再利用の正当性について確認した。

（３）放射能濃度評価手法の検討

資源化处理されたがれき（資源化物）が限定再利用される前に、規制当局はその平均放射能濃度がめやす濃度以下であること、及び、濃度分布に大きなばらつきがなく均一であることを確認することが想定される。そこで、資源化物を収納した容器の表面における放射線測定の結果から、収納容器内の資源化物の放射能濃度分布を把握し、その分布に基づき平均放射能濃度を評価する手法について検討した。

保管されている汚染がれきは通常の原子力発電所からのクリアランス物のように履歴が明確でなく、汚染分布にも偏りがある可能性が大きい。資源化处理を実施した後は濃度のばらつきは小さくなると想定されるが、限定再利用を行う前に均一化されたことを確認すると想定した。そこで、容器あるいは資源化物表面各位置における放射線計数率測定結果に対し、あらかじめ作成したグリーン関数を用いて逆解析手法を適用することにより、収納容器内の資源化物の放射能濃度分布を推定し、平均放射能濃度を評価する手法について検討した。また、逆解析手法と組み合わせて適用する放射線計数率測定の方法として、同時に多点数を測定可能な放射線検出器として選定したプラスチックシンチレーションファイバーを適用するため、密封線源を配置した模擬資源化物に対する測定実験を行った。さらに、測定体系に応じたグリーン関数を構築するとともに、測定結果から逆解析手法を用いて、模擬資源化物中の放射能分布及び平均放射能を算出した。このほか、平成 27 年度に多点数測定装置の一つとしてとりあげたコンプトン散乱型ガンマカメラについて、基本的特性試験を行い、模擬資源化物への適用性を検討した。

1.3 成果概要

1.3.1 敷地内がれきの保管状況の把握

廃棄物の限定再利用に関する検討のために、1F 敷地内のがれきの保管状況と記録情報の実態について調査した。調査結果は、限定再利用において考慮すべき核種のめやす濃度の試算および、放射能濃度評価手法の検討に活用することとした。そのため調査対象とする情報は、それらの検討に必要となる、1F 敷地内に存在するがれきの材質別・表面線量率別の重量およびかさ密度、放射性核種濃度などとした。

平成 27 年度⁽¹⁾は、平成 27 年度 2 月までに公表されたデータ及び文献を調査し、保管場所に存在するがれきの材質別・表面線量率別の重量およびかさ密度をまとめた。一方で、放射性核種濃度については、建屋内及び建屋周辺で採取されたがれき、敷地内の土壌などの採取試料の核種別濃度については情報を収集できたが、限定再利用の対象と考えられる比較的低濃度とされる表面線量率 0.1mSv/h 以下の屋外集積がれきについては分析されておらず、十分なデータが得られなかった。また、1F 敷地内に存在するがれきの情報や 1F 敷地内の空間線量率などのデータは、短期間で更新されうる情報であり、可能な限り最新の情報を反映することが望ましい。

それを受け、本検討では平成 29 年 2 月末までに公表されたデータを用いて、保管場所に存在するがれきの材質別・表面線量率別の重量およびかさ密度の情報や、1F 敷地内の空間線量率の情報を更新し、平成 27 年度末からの推移を確認した。また、平成 27 年度は十分なデータが得られなかった、放射性核種濃度についての調査を引き続き行った。

(1) 東京電力の再利用に向けた検討状況

平成 28 年 10 月に、屋外に一時保管されているがれき（容器収納のものを含む）の解消に向けて、実施方針と一部処理方法が示された⁽²⁾。図 1.3-1 に東京電力が示した設備及び施設設置のイメージ図を示す。固体廃棄物貯蔵庫の増設、および焼却処理設備の増設などが挙げられているが、その中で図 1.3-2 に示すように 5 μ Sv/h 以上 30mSv/h 以下のがれきについては、減容処理設備にて、体積を減少させて、今後増設される固体廃棄物貯蔵庫へ保管する方針が示された。減容処理設備については図 1.3-3 に示すように、コンクリートであればコンクリート破碎機、金属については切断機を適用して、50%程度の減容率を目標にしている。

一方、平成 29 年 2 月には再利用の方針の一部が明確に示された⁽³⁾。表面線量率 5 μ Sv/h 以下の屋外集積がれきについては、再利用することが示されている。コンクリートがれきについては路盤材などの需要があり、再利用する見通しがあることについて言及している。一方、金属については、鉄筋などはそのまま再使用することが難しく、何らかの処理が必要であり、利用先についてはまだ検討途上であることが言及された。以上のように、敷地内での限定的な再利用に関して、利用先、処理方法など決定されていない状況である。



図 1.3-1 1F の屋外一時保管がれきの解消に向けた設備増設のイメージ図
(参考文献(2)p.1 より)



図 1.3-2 屋外一時保管がれきの解消に向けた処理フロー図
(参考文献(2)p.4 より)



図 1.3-3 減容処理設備の例
(参考文献(2)p.8 より)

（２）現在の屋外集積保管状況

平成 29 年 1 月時点でのがれき等保管場所⁽⁴⁾を、図 1.3-4 に示す。平成 27 年度「廃棄物の限定再利用に関する検討」報告書⁽¹⁾の図 2.2-1 に示した平成 28 年 1 月 31 日時点での保管場所⁽⁵⁾と比較すると、以下の点に差異が見られる。

- がれき類保管エリア予定地であった、エリア B の利用開始
- 使用済保護衣等保管エリアの追加
- 固体廃棄物貯蔵庫 9 棟の建設



図 1.3-4 1F 敷地内のがれき等保管場所（平成 29 年 1 月時点）
（参考文献(4)より）

参考文献(4)に基づき、平成 28 年 1 月 31 日時点における各保管場所のがれき等の保管量および保管容量などの最新の情報を取得した。また、参考文献(4)の 1 年前の情報である、平成 27 年度報告書⁽¹⁾の表 2.2-1「がれき類・伐採木の保管状況」において示した同一エリアの保管量（平成 28 年 1 月 31 日）⁽²⁾と比較した。その結果を表 1.3-1 に示す。

保管エリアについて平成 27 年度と異なる点としては、保管場所 B が容器収納(線量区分 1~30mSv/h)として予定されていたものが、屋外集積(線量区分 0.1mSv/h 以下)として使用開始

されたことと、使用済保護衣の保管が開始されたことが挙げられる。

前年度と比較すると、がれき類は 22,700m³ の増加となっているが、そのうちの 20,900m³ は屋外集積がれきである。一方で、シート養生や容器収納がれきは増加がないことから、新たに発生したがれきは、線量区分 30mSv/h 以上の高線量率のがれきと、線量区分 0.1mSv/h 以下のごく低線量率の（屋外集積）がれきに二極化されている。

また各エリア境界の空間線量率は、（保管場所 E を除き）全体的に低減している。時間経過による減衰の結果と考えられるが、空間線量率の低下に伴い発生するがれきの表面線量率も低下していることは必ずであり、多くが屋外集積がれき（線量区分 0.1mSv/h 以下）に区分される傾向が続くことが想定される。

表 1.3-1 がれき等の保管状況（平成 28 年 1 月 31 日時点）
（参考文献(4)より）

分類				エリア境界空間 線量率(mSv/h)	保管量(m³)	前年度 増減(m³)	保管容量	
がれき類	線量区分(mSv/h)	保管場所	保管方法					
	0.1以下	B	屋外集積	0.02	2,800	2,800	5,300	
		C	屋外集積	0.01未満	52,900	-3,700	63,000	
		F	屋外集積	0.01未満	6,200	600	7,500	
		J	屋外集積	0.01	4,300	1,100	4,800	
		N	屋外集積	0.01未満	4,500	400	10,000	
		O	屋外集積	0.01未満	26,200	0	27,600	
		P	屋外集積	0.01	41,400	19,700	63,700	
		U	屋外集積	0.01未満	700	0	700	
		合計			139,000	20,900	181,200	
	0.1～1	D	シート養生	0.01未満	2,600	0	3,000	
		E	シート養生	0.03	12,000	4,900	16,000	
		P	シート養生	0.01	5,900	3,400	9,100	
		W	シート養生	0.05	12,700	-8,300	29,500	
		合計			33,200	0	57,300	
	1～30	L	覆土式一時保管施設	0.01未満	12,000	0	12,000	
		A	仮設保管設備	0.3	1,700	400	7,100	
		E	容器	0.02(増加)	300	0	1,600	
		F	容器	0.01未満	600	0	600	
		Q	容器	0.09	5,700	0	6,100	
		合計			20,300	400	27,700	
	30以上	固体廃棄物貯蔵庫			0.02	7,900	1,500	12,000
		合計				7,900	1,500	12,000
		合計				200,400	22,700	278,300
伐採木	区分	保管場所	保管方法			0		
	幹・根・枝・葉	H	屋外集積	0.01未満	14,700	0	19,900	
		I	屋外集積	0.01未満	0	-10,500	10,500	
		M	屋外集積	0.01未満	39,500	400	44,900	
		V	屋外集積	0.01	5,500	2,000	6,000	
		合計			59,700	-8,100	81,500	
	枝・葉	G	一時保管槽	0.01未満	8,500	1,200	13,100	
		T	一時保管槽	0.01未満	11,100	0	11,800	
		合計			19,600	1,200	24,900	
	合計				79,300	-6,900	105,700	
保護衣			容器	0.03	64,700	64,700	71,200	

(3) 屋外集積がれきの物量についての推移見通し

東京電力の示した、がれき等保管量の今後の推移見通しを、図 1.3-5 に示す。参考文献(3)では、表面線量率 $5\mu\text{Sv/h}$ 未満のがれき等を $5\mu\sim 0.1\text{mSv/h}$ のがれき等と区別して扱っており、表面線量率 $5\mu\text{Sv/h}$ 未満のがれきに対して再利用（または再使用）を行うことが明言されている。

また参考文献(3)には、がれき等に対して以下の手段による減容を行うことが示されている。これにより、がれき全体の保管量は平成 39 年までに大幅に減少する見通しである。

- 雑固体焼却設備にて、使用済保護衣等を焼却
- 伐採木・がれき類中の可燃物等を焼却
- 金属・コンクリートを減容

一方で上述した表面線量率 $5\mu\text{Sv/h}$ 未満のがれき等の分量は増えているように見えるが、これは現時点でより高表面線量率の区分に含まれていたがれきが $5\mu\text{Sv/h}$ 未満のがれきとして計上されるためで、実際の分量は減少する。時間経過に伴う放射性核種の減衰などを考慮して表面線量率の分類を見直すことで、最終的に全てのがれき等を表面線量率 $5\mu\text{Sv/h}$ として分類できる見通しを示している。



図 1.3-5 がれき等保管量の推移見通し
(参考文献(3)別添 1-1 より一部抜粋して合成)

限定再利用の対象となるがれき類の物量は、平成 39 年度末の時点で 177,000m³ となる見通しである。これらは可燃物を除去したのちの分量であるため、材質はコンクリートと金属であると推測されるが、その分量の比率は公表されていない。また、上記のがれきの再利用開始の時期および、再利用の用途については、具体的な計画はいまだに示されていない。

(4) 放射性核種濃度及び核種組成比

平成 28 年 4 月 28 日に、IRID が公表した建屋外（建屋周辺及び覆土槽保管）がれきの Cs-137 に対する Sr-90 及び Co-60 の組成比⁽⁶⁾を図 1.3-6 に示す。このとき覆土保管がれきの分析データが取得されたため、建屋周辺がれき（平成 26 年 1 月 30 日公表）と比較したグラフである。Sr-90 及び Co-60 とともに Cs-137 の濃度に増加するにつれて各核種の濃度が増加する傾向にあり、今後取得されるデータを追加してもこの傾向が変わらなければ核種組成比法による濃度算出が可能となる。なお、限定再利用対象の屋外集積がれきについては 5 μ Sv/h 以上のがれきを含めて未分析の状況が続いている。

これまでの分析結果を以下に整理する。建屋外がれきで検出下限を上回った核種は γ 線放出核種では Cs-137, Cs-134 及び Co-60 で、 β 線放出核種では Sr-90, H-3 及び C-14 である。このうち Sr-90 及び Co-60 は、図 1.3-6 に示すように Cs-137 濃度との相関があり、核種組成比法が適用できる可能性がある。一方、図 1.3-7 に示すように、H-3 及び C-14 については Cs-137 濃度との相関がないが、どの濃度レベルでもほぼ一定の値を示すことから平均放射能濃度法の適用が可能と見込まれる。その濃度は H-3 の最大値で 2Bq/g であり、現行のクリアランスレベル 100Bq/g と比べて十分に低い値となっている。C-14 については、最大値は 3Bq/g となっており、クリアランスレベル 1 Bq/g と比較して大きい値を示している。この値がただちに限定再利用において考慮すべき核種とする理由にはならないが、クリアランスレベルを算出した決定経路と限定再利用において評価すべき経路などを比較したうえで、C-14 が今後考慮すべき核種としてとりあげるべきかを引き続き検討する必要がある。

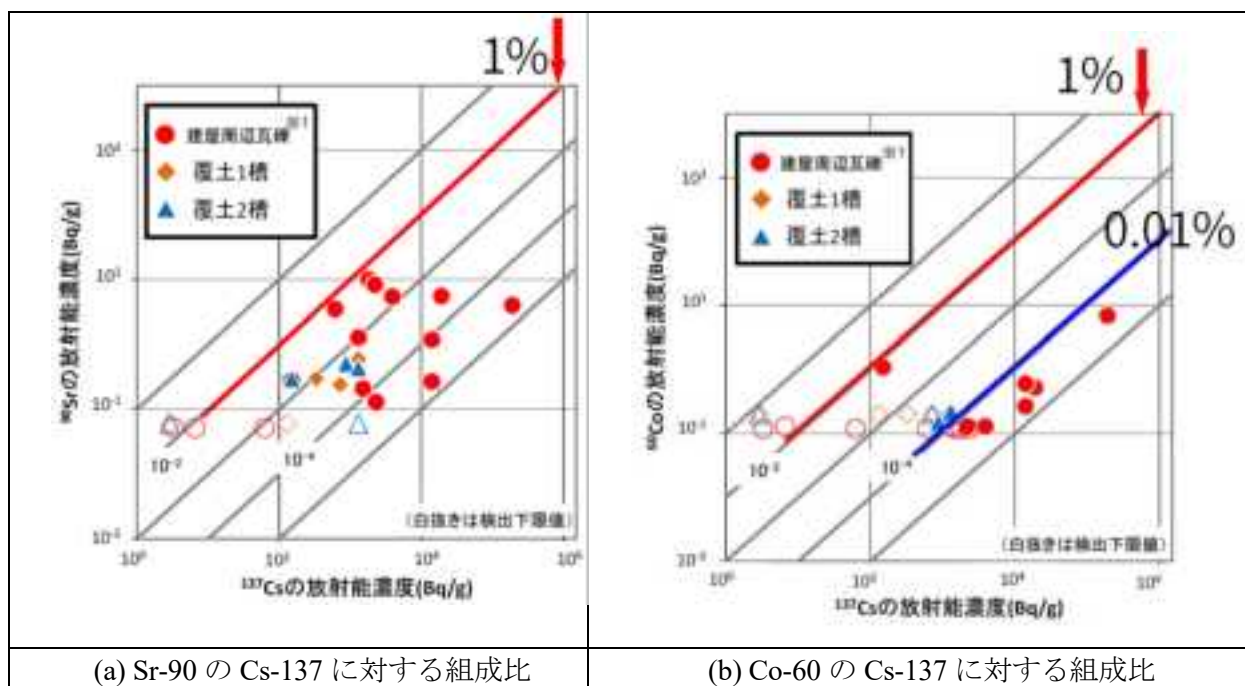


図 1.3-6 建屋外（建屋周辺及び覆土槽）保管がれき中の核種組成比（Sr-90, Co-60）

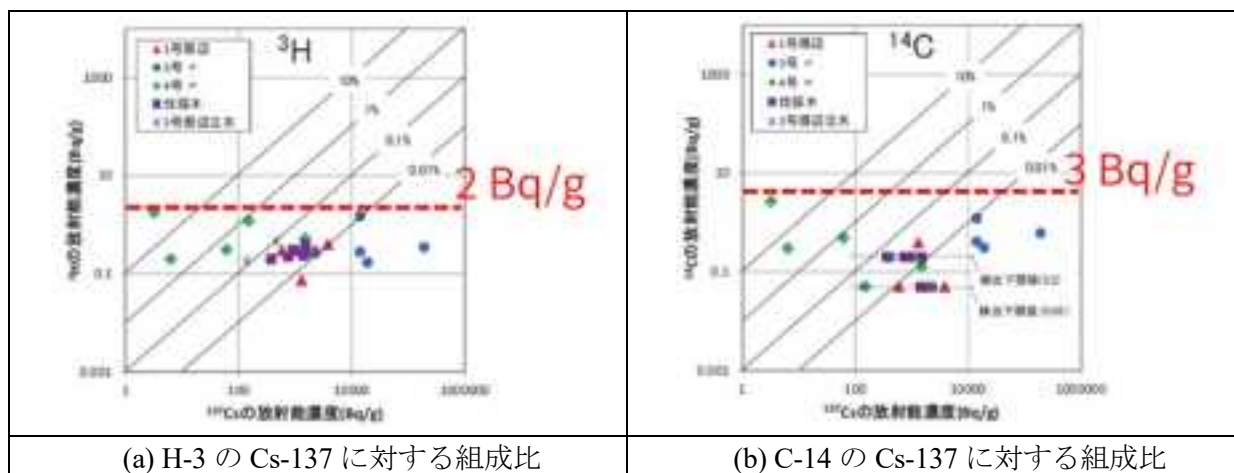


図 1.3-7 建屋周辺がれき及び伐採木等中の核種組成比 (H-3, C-14)

(5) 1F 敷地内線量率分布の変化

図 1.3-8 に平成 29 年 1 月 11,12 日測定分の 1F 構内のサーベイマップ⁽⁷⁾を示す。このなかで、代表的な測定点について、平成 27 年度報告書⁽¹⁾に掲載した平成 27 年 11 月 10, 11 日測定分⁽⁸⁾の値を比較して、その差異を加筆した。いくつかの測定点において上昇したが、9 割以上の点で変化なし、あるいは減少した。なお、本測定においては、電離箱サーベイメータが用いられており⁽⁹⁾、代表的な電離箱の線量率測定範囲が 1 μ Sv/h 以上であることから、サーベイマップ上で 1 μ Sv/h と示されている測定値が、1 μ Sv/h 以下である可能性がある。



図 1.3-8 平成 29 年 1 月現在の構内サーベイマップと平成 27 年 11 月現在との比較
(参考文献(7)を加工)

(6) 本年度の検討で対象とする再利用用途と核種

本年度の検討では、コンクリートくずを道路材（路盤材、舗装材）および建設用コンクリートに再利用した際のめやす濃度の試算を行い、再利用による Cs-134, Cs-137, Sr-90 からの被ばく線量を評価しめやす濃度の妥当性を評価する。

道路材への再利用については平成 27 年度の検討に追加する形でめやす濃度の妥当性評価を行う。

建設用コンクリートへの再利用については、東京電力により再利用用途として提示はされていないものの、一般的な産業界においてコンクリートくずを建設用コンクリートに再利用している実績があるため、1F 敷地内で想定されうる建設用コンクリートとしての再利用方法を提示し、めやす濃度の試算とその妥当性の評価を行うことで、建設用コンクリートを新たなコンクリートくずの再利用用途として提案する。

めやす濃度の妥当性評価は平成 27 年度の検討の中で対象とした Cs-134、Cs-137 のみではなく、Sr-90 も評価対象核種とする。これは、(4) で示した通り、建屋外がれき中に Sr-90 が検出下限を超えて存在し、Cs-137 との核種組成比が最大 1%となるデータが示されていることから、本年度考慮すべき核種として追加した。ただし Sr-90 は β 線放出核種であり、外部被ばくによる影響は小さいと考えられるので、作業員への外部被ばくの影響および敷地境界への影響の評価においては、Sr-90 による被ばく評価を行わない。

1.3.2 限定再利用において考慮すべき核種のめやす濃度の試算

本章では「平成 27 年度廃棄物の限定再利用に関する検討」でコンクリートくずの再利用用途と設定しめやす濃度の試算を行った道路材について、めやす濃度の妥当性の評価を行った。道路材のめやす濃度の妥当性評価では昨年度行った「作業者の追加の年間被ばく線量」と「1F 敷地境界空間線量率への影響」の評価に追加する形で、新たに「1F 敷地内の地下水への核種漏えいの影響」の評価を行った（図 1.3-9）。また、平成 27 年度評価を行った作業者への追加被ばく線量について、粉塵吸入による内部被ばくの寄与を追加した。上記 2 評価は、Cs-134、Cs-137 および Sr-90 を対象として行った。

コンクリートくずの新たな再利用用途として建設用コンクリートを設定し、めやす濃度の試算を行った。めやす濃度で再利用した際の「作業者の追加の年間被ばく線量」、「1F 敷地境界空間線量率への影響」、「1F 敷地内の地下水への核種漏えいの影響」を評価しめやす濃度の妥当性を確認した。

さらに、東京電力が示している再利用基準である表面線量率 $5 \mu\text{Sv/h}$ に相当するがれき中核種濃度を試算しめやす濃度との比較を行い、両者の関係を示した。

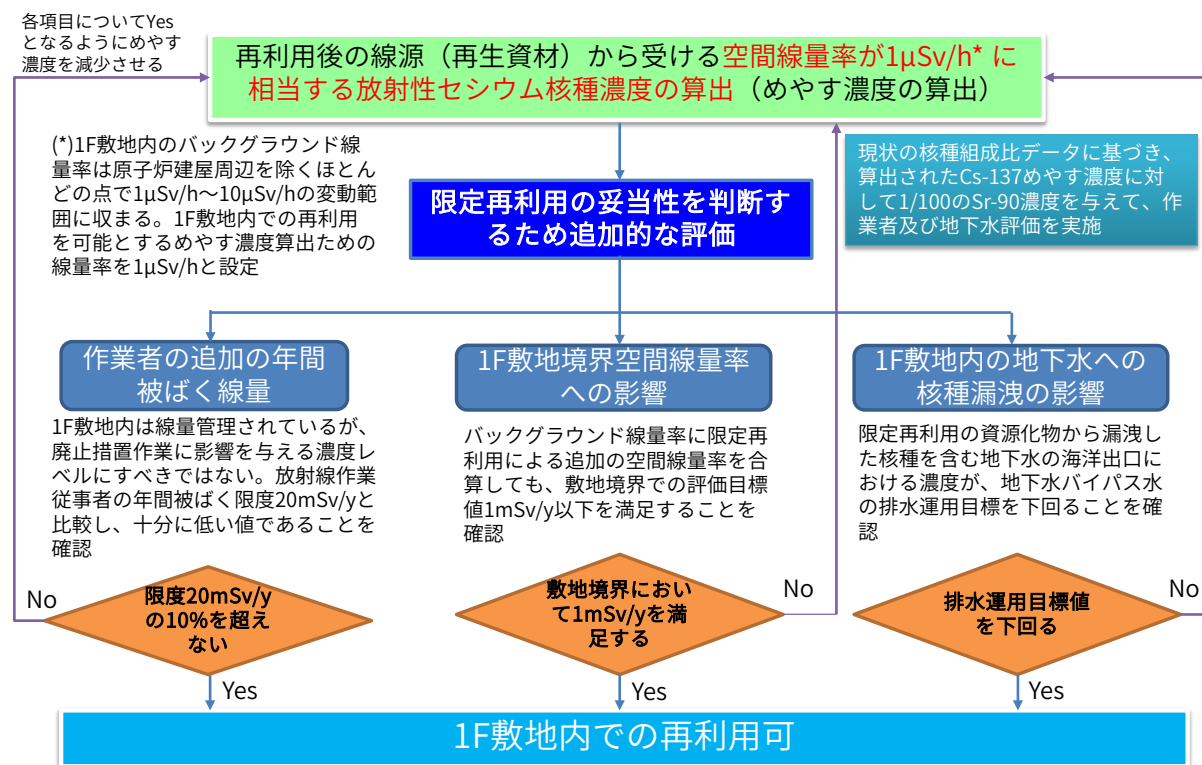


図 1.3-9 めやす濃度設定の考え方

（1）コンクリートくずの道路材への再利用

平成 27 年度の検討の中でコンクリートくずを道路材へ再利用した際のめやす濃度の試算を行った（表 1.3-2）。本検討は新たに、粉塵吸入による内部被ばくに起因する「作業者の追加の年間被ばく線量」の評価と「1F 敷地内の地下水への核種漏えいの影響」の評価を行いめやす濃度の妥当性の確認を行った。

表 1.3-2 平成 27 年度に設定した道路材のめやす濃度

材質	再利用用途	用途	めやす濃度 (1 μ Sv/h相当 核種濃度) (Bq/kg)	備考
コンクリート	アスファルト道路	路盤材 80cm 厚	13,000	舗装厚 5cm
		舗装材 20cm 厚	7,400	
	コンクリート道路	路盤材 80cm 厚	100,000	舗装厚 15cm
		舗装材 30cm 厚	8,100	

(a) 粉塵吸入による内部被ばくに起因する「作業者の追加の年間被ばく線量」

コンクリートくずを道路の舗装材に再利用した場合、道路上を車輛が通過することで舗装材が摩耗し、核種を含んだ粉塵が巻き上げられることが想定される。そこで平成 27 年度に設定しためやす濃度（表 1.3-2）で舗装材に再利用した際の粉塵吸入による内部被ばくの評価を行った。道路材への再利用で最もめやす濃度が高い用途はコンクリート道路の路盤材であるが、路盤材は舗装材の下に敷設される部材であり摩耗により粉塵が巻き上がることは起こらないので評価対象から外す。内部被ばく線量の評価を行う際の評価対象核種は、Cs-134、Cs-137 だけではなく、1F 敷地内で検出下限を超えて存在し、核種量として Cs-137 の核種濃度の 1%ほど存在することが確認されている Sr-90 も対象とした。作業空間の空气中ダスト濃度は、既往の研究⁽¹⁰⁾で示された道路付近の空气中アスファルト濃度の値を確認しつつ、保守的にそれよりも 1 桁濃度が高いクリアランスレベル評価⁽¹¹⁾で用いられている埋立作業時の空气中ダスト濃度の値を用いた。評価時期は保守的に道路完成直後(0 年目)とした。評価はアスファルト道路の舗装材およびコンクリート道路の舗装材に再利用した場合で行い、めやす濃度で再利用した際の 3 核種による内部被ばく線量の和はそれぞれ 8.4E-05 mSv/y、9.1 E-05 mSv/y となった（表 1.3-3）。この値と限定再利用による作業員への外部被ばく線量 1.3mSv/y を合算した数値は、放射線作業従事者の年間被ばく線量限度である 20mSv/y に対して十分に小さい値であることが確認できた。

表 1.3-3 粉塵吸入による内部被ばく線量 (mSv/y)

利用用途	Cs-134 からの 内部被ばく線 量(mSv/y)	Cs-137 からの 内部被ばく線 量(mSv/y)	Sr-90 からの 内部被ばく線 量(mSv/y)	全内部被ばく線量 (mSv/y)
アスファルト 道路の舗装材	1.6E-05	4.6E-05	2.2E-05	8.4E-05
コンクリート 道路の舗装材	1.7E-05	5.0E-05	2.4E-05	9.1E-05

(b) 「1F 敷地内の地下水への核種漏えいの影響」の評価

再利用物に降雨等が浸透し核種を含んだ浸透水が地下帯水層に移行する場合、1F 敷地内で定められた排水基準を超えた地下水が排出される可能性がある。1F 敷地内の地下水バイパスの排水においては、告示濃度限度に対して約 10%の裕度を持って設定された排水許容限度が示されている。さらに実際の排水にあたっては、漁業関係者等の意見を考慮して設定された運用目標

値⁽¹²⁾が用いられている。そこで、めやす濃度で限定再利用を行った際の海洋出口における地下水中核種濃度が運用目標以下となっていることをもって、めやす濃度の妥当性を確認することとした。評価対象核種はCs-134、Cs-137に加え、1F敷地内で検出下限を超えて存在し、核種量として最大でCs-137の核種濃度の1%ほど存在することが確認されているSr-90も加えた。ストロンチウムはセシウムより地下水中で移行しやすいことから地下水中の濃度評価が重要である。各核種の運用目標値はCs-134：1Bq/L、Cs-137：1Bq/L、Sr-90：5Bq/Lである。

道路材のめやす濃度は、コンクリート道路の路盤材に再利用した場合が最も高かったので(100,000Bq/kg)、その場合の地下水中核種濃度の評価を行いめやす濃度の妥当性を評価することで、他の道路材用途のめやす濃度の妥当性評価を代表することとした。評価は降雨浸透により核種が帯水層に移行することを想定し、道路端からの距離ごとの地下水中核種濃度を評価した(図 1.3-10)。評価は保守的に、実際のコンクリート舗装の代わりに降雨が浸透しやすい土壌への浸透水量を用いて行った。また、浸透水量を変えることで、実際の再利用環境により近い、コンクリートへの浸透を想定した評価も行った。土壌への浸透を想定した評価では、道路端から0mの地点で既にCs-134とSr-90は運用目標以下となった(図 1.3-11 (a),(c))。Cs-137は0mの地点では最大で10 Bq/Lを超える濃度となったが、道路端から10mの地点では運用目標以下となった(図 1.3-11 (b))。コンクリートへの浸透を想定した評価では全核種道路端から0mの地点で運用目標を大きく下回った。このことから、保守的な評価においても海岸から10m以上の離隔を持って道路が敷設された場合、運用目標以下となることが確認された。

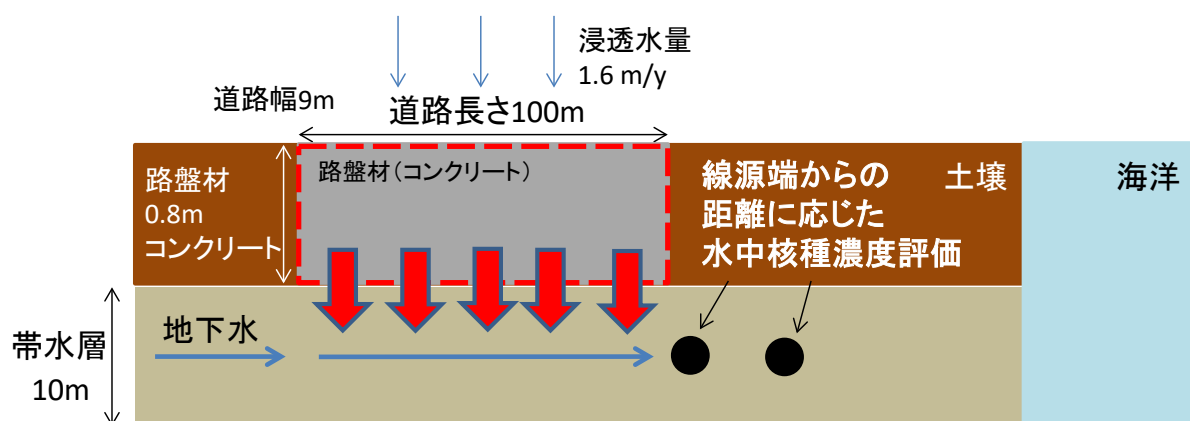
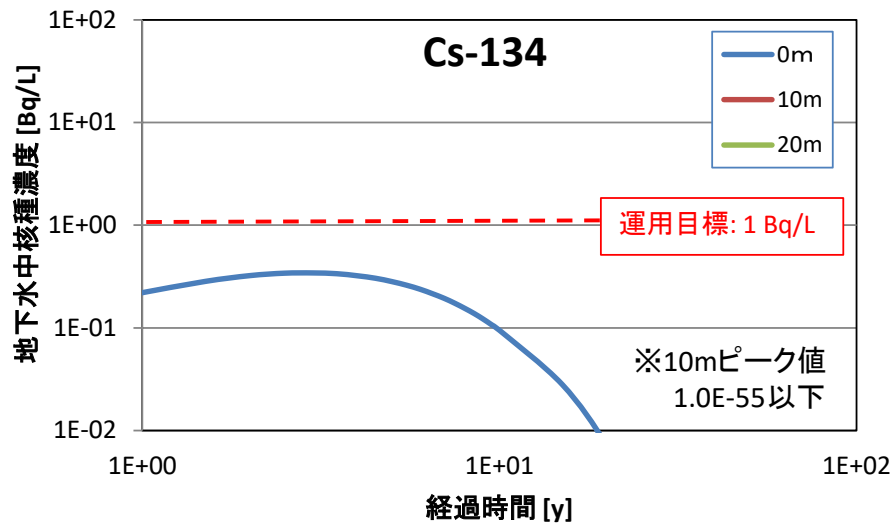
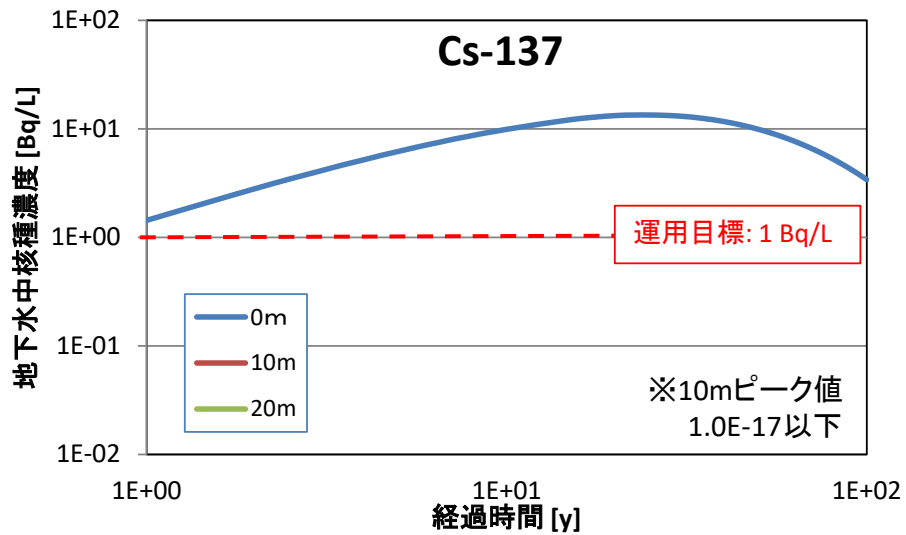


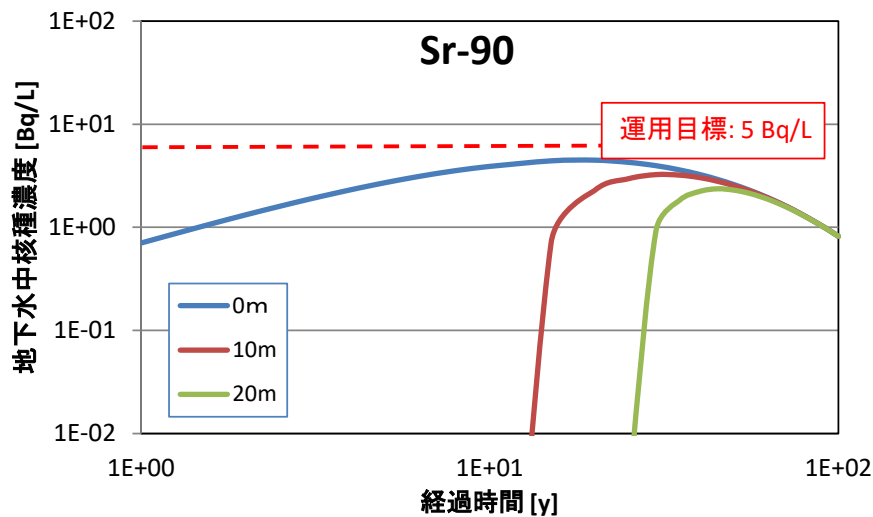
図 1.3-10 路盤材へ再利用した際の地下水移行評価体系図



(a) Cs-134 の地下水中核種濃度
(※10m, 20m 地点の地下水中核種濃度はグラフ範囲以下)



(b) Cs-137 の地下水中核種濃度
(※10m, 20m 地点の地下水中核種濃度はグラフ範囲以下)



(c) Sr-90 の地下水中核種濃度

図 1.3-11 道路端からの距離及び再利用開始からの期間に対する地下水中核種濃度
(凡例の 0m, 10m, 20m は道路端からの距離)

(2) コンクリートくずの建設用コンクリートへの再利用

本年度の検討では新たな限定再利用用途として、コンクリートくずの再利用実績⁽¹³⁾のある建設用コンクリートを設定した。コンクリートくずから取り出した骨材を建設用コンクリートに再利用することを想定する。再利用を想定する建造物として現在 1F 敷地内に建設中の固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟と同型の施設を設定した。建設用コンクリートの利用箇所は、1F 敷地内の限定再利用において造成可能な再生コンクリートの品質を考慮して、建造物の基礎部に利用することを想定した (図 1.3-12)。固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟と同型の施設の基礎部に再利用した際のめやす濃度の試算を行い、めやす濃度の妥当性の評価を行った。

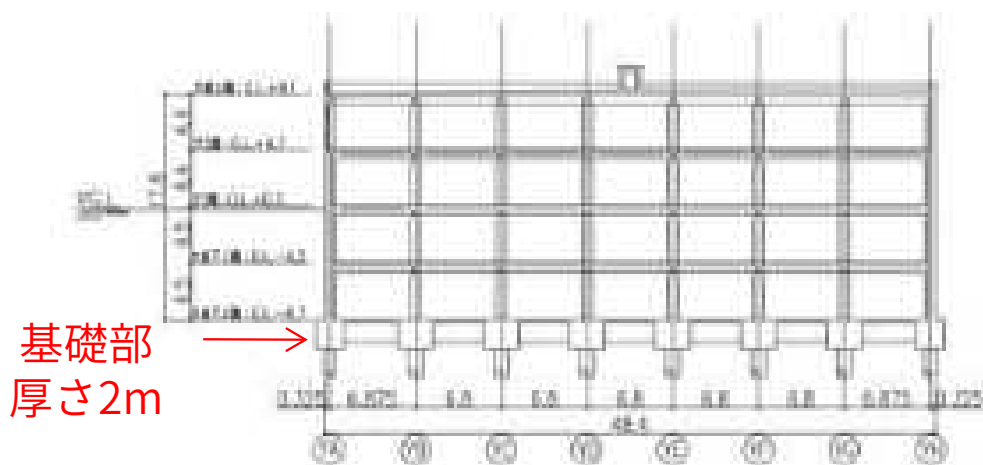


図 1.3-12 固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟の断面図

(a) めやす濃度の試算

めやす濃度の試算は、基礎材の上に非汚染コンクリートで造成された床スラブが 20cm の厚さで敷設された条件のもと、基礎部直上階（地下二階）の空間線量率の上昇が $1\mu\text{Sv/h}$ を超えない核種濃度をめやす濃度とした（図 1.3-13）。試算の結果、めやす濃度は $160,000 \text{ Bq/kg}$ であった。このめやす濃度は遮へいとして 20cm の床スラブを考慮した値であり、道路材への再利用において遮へいとして 15cm の舗装材を考慮した路盤材のめやす濃度 $100,000 \text{ Bq/kg}$ より高い値となった。

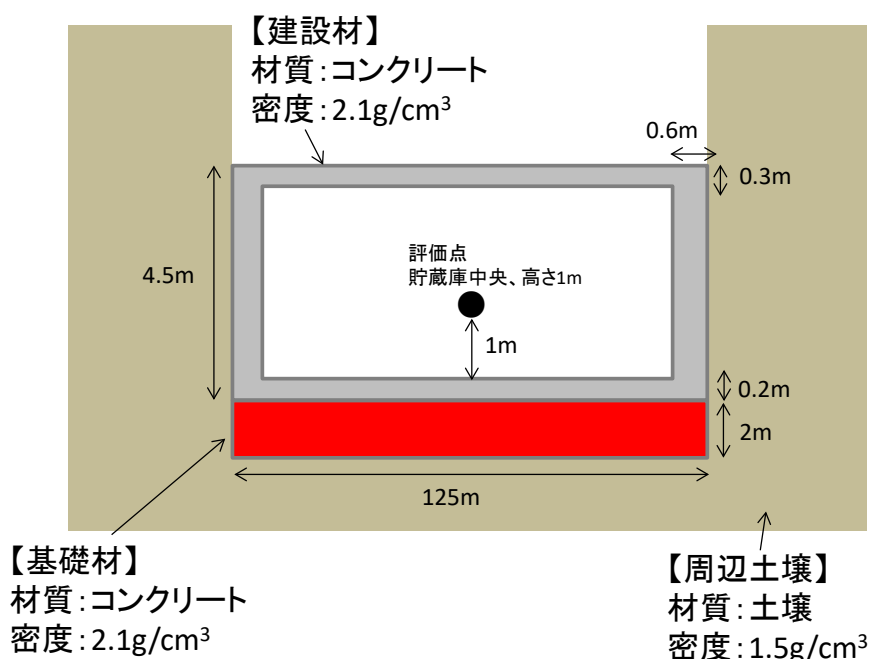


図 1.3-13 基礎部への利用時の評価体系

(b) 「作業者の追加の年間被ばく線量」の評価

めやす濃度で再利用した際の作業員への追加の被ばく線量は、再利用部が露出していないことから外部被ばくだけを考慮して行った。そのため内部被ばくに寄与する Sr-90 の評価は行わず対象核種は Cs-134 と Cs-137 とした。作業条件が道路作業員と同様であるとすると、作業員の追加の被ばく線量は 1.3mSv/y となり作業員の個人線量限度 20mSv/y に対して 7%未満であった。これは十分に低い値と見ることができ、空間線量率への寄与が $1\mu\text{Sv/h}$ を超えないように算出しためやす濃度により、作業員の年間追加被ばく線量も抑制されることが確認できた。

(c) 「1F 敷地境界空間線量率への影響」の評価

めやす濃度で再利用した場合の敷地境界における空間線量寄与を評価した。敷地境界においては、空間線量は他の寄与とあわせて 1 mSv/y 以内に抑えなければならない。評価には貯蔵庫からの距離に応じた評価点の外部被ばく線量換算係数を求め、その値から空間線量 (mSv/y) を導出した（図 1.3-14）。外部被ばく線量換算係数は、MCNP5 コードを用いて計算した。評価の結果、貯蔵庫からの距離が 1m の地点で既に空間線量寄与が $7.1\text{E-}04\text{mSv/y}$ となり（表 1.3-4）、敷地境界の空間線量目標の 1 mSv/y に対して十分小さい値であることが確認された。

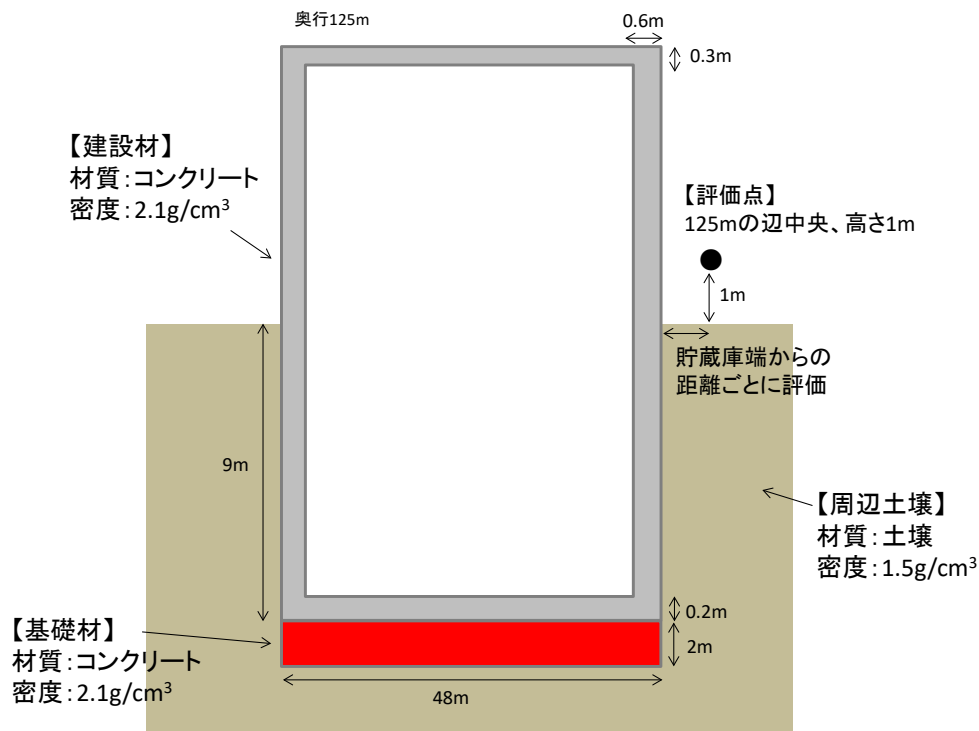


図 1.3-14 敷地境界評価体系

表 1.3-4 基礎材への再利用における空間線量

貯蔵庫端からの距離	空間線量 (mSv/y)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	3.0E-04	4.0E-04	7.1E-04

(d) 「1F 敷地内の地下水への核種漏えいの影響」の評価

めやす濃度で基礎材に再利用を行った際の地下水中核種濃度への影響を評価した。評価は基礎部が地下帯水層に浸かっていることを想定し、地下水が基礎部側面から浸透して基礎部の下流端から帯水層へ流出することを想定した(図 1.3-15)。対象核種は Cs-134, Cs-137, および Sr-90 とした。評価は保守的にひび割れがあるコンクリートへの地下水の浸透を想定して行った。また浸透水量を変えることで、実際の再利用条件により近い、ひび割れがないコンクリートへの地下水の浸透を想定した評価も行った。評価の結果、ひび割れがあるコンクリートを想定した評価においても、貯蔵庫端から 0m の地点で既に運用目標を大きく下回ることが確認できた(図 1.3-16)。

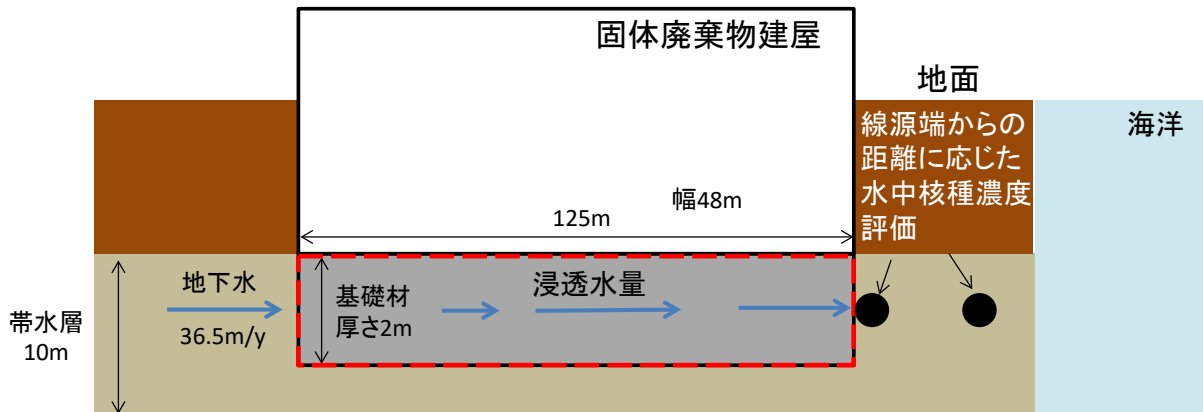
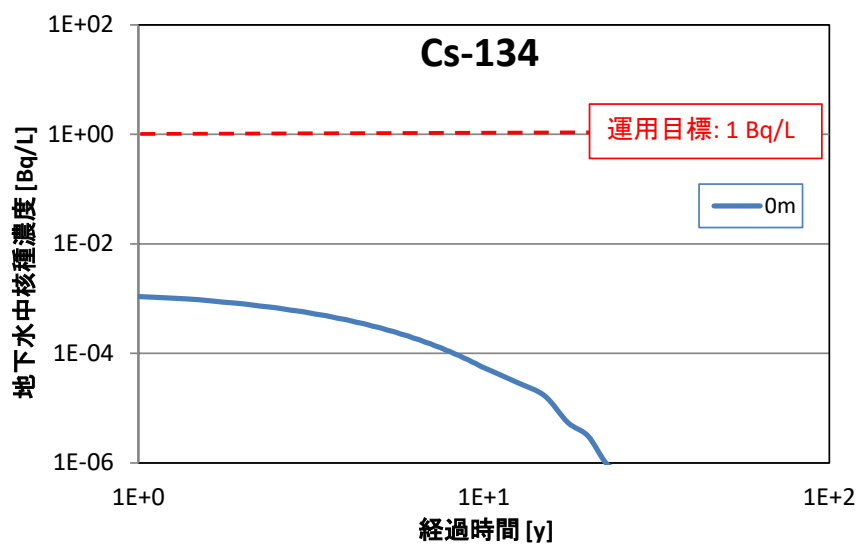
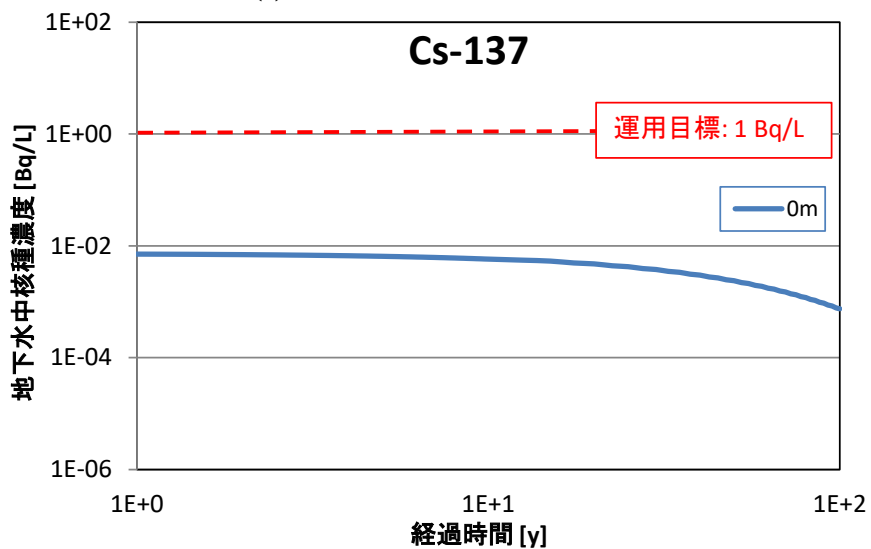


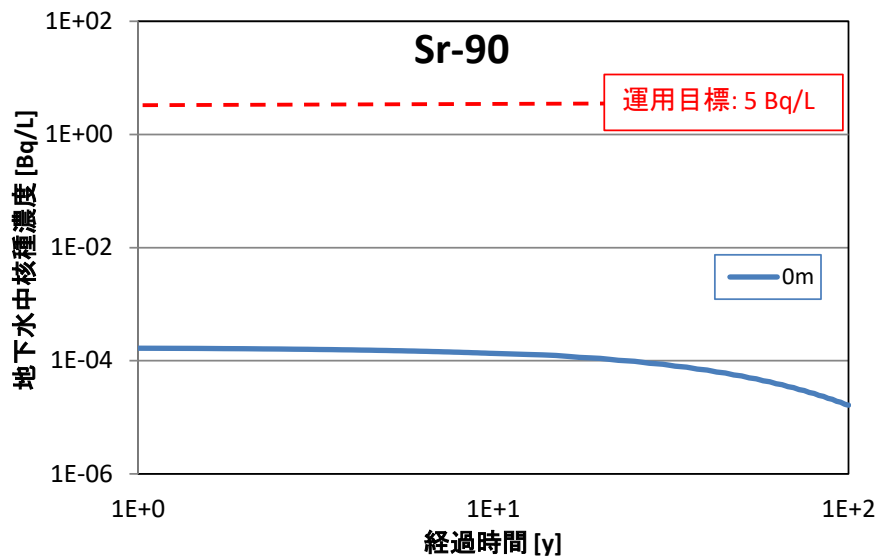
図 1.3-15 基礎材へ再利用した際の地下水移行評価体系



(a) Cs-134 の地下水中核種濃度



(b) Cs-137 の地下水中核種濃度



(c) Sr-90 の地下水中核種濃度

図 1.3-16 貯蔵庫端距離及び再利用完了からの期間に対する地下水中核種濃度
(基礎材としてひびのあるコンクリートを想定、軸は対数軸、
凡例の 0m は建造物端からの距離)

(3) めやす濃度と表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度の関係

東京電力によりがれきの再利用について表面線量率 5 μ Sv/h 未満の屋外集積がれきを再利用することが示されている。しかし、表面線量率の測定だけでは高濃度に汚染されたがれきが非汚染のがれきに埋もれている場合などに、その存在を感知することが出来ず、高濃度に汚染されたがれきを再利用してしまう可能性がある。そこで、表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度を試算し、その濃度とめやす濃度を比較することで、めやす濃度が東京電力により示された再利用対象とするがれき中濃度と比較してどの程度のものであるのかを予察的に確認する。

表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度を試算する際の評価体系を図 1.3-17 に示す。汚染されたがれきが表面に出ている場合と、非汚染がれきの中に埋もれている場合を想定し、遮蔽厚さを 0～30cm の範囲で設定した。

遮蔽厚さ毎の表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度を、コンクリートくずの各利用用途におけるめやす濃度とともに表 1.3-5 に示す。試算の結果より、汚染されたがれきが表面に露出している（遮蔽なし）場合は、表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度は全てのめやす濃度より低い値となった。一方で汚染がれきが非汚染がれきに埋もれている（遮蔽あり）場合は、めやす濃度以上の値を示すこともあり、表面線量率 5 μ Sv/h という基準が必ずしもめやす濃度を保証しているとは言えない。このことから、限定再利用を行う際は表面線量率だけではなく、がれき内部の汚染がれきの存在も含めて再利用可能性を評価することが重要であると言える。

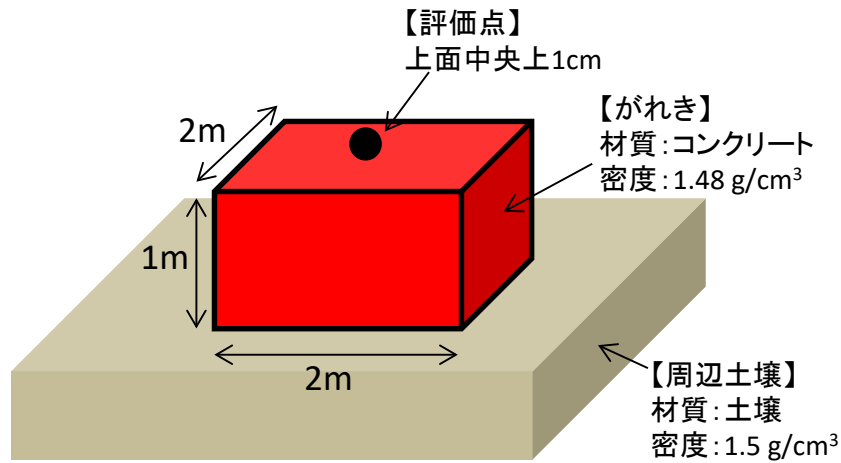


図 1.3-17 表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度算出の評価体系

表 1.3-5 表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度とめやす濃度

線源	遮蔽 (cm)	5 μ Sv/h 相当濃度 (Bq/kg)	めやす濃度(1 μ SV/h 相当濃度) (Bq/kg)
がれき	0	6,500	—
がれき	10	11,000	—
がれき	20	24,000	—
がれき	30	76,000	—
路盤材 (アスファルト)	5	—	13,000
舗装材 (アスファルト)	0	—	7,400
路盤材 (コンクリート)	15	—	100,000
舗装材 (コンクリート)	0	—	8,100
コンクリートブロック	0	—	11,000
基礎材	20	—	160,000

1.3.3 放射能濃度評価手法の検討

東京電力福島第一原子力発電所（以下、1F）事故で発生した大量の汚染がれきの中、放射能濃度が低いものを再利用するためには、再利用するために資源化处理されたがれき（以下資源化物という）の放射能濃度を明らかにして、1.3.2 で算出されためやす濃度以下であることを確認する必要がある。しかし、1F 事故で生じ、現在保管されているがれきについては、通常の原子力施設等で発生する廃棄物のように発生個所の履歴等が明確でなく、放射能濃度が現時点でほとんど把握されていない。特に、資源化处理を行う前のがれきには、放射能濃度分布に偏り、すなわち放射能濃度が高い箇所（ホットスポット）が存在する可能性がある。このホットスポットを見逃した場合、局所的に放射能濃度の高い再利用物が生成され、再利用後に事前の評価結果以上の線量を被ばくする可能性がある。

したがって、再利用を開始する前に資源化されたがれき（以下、資源化物という）の放射能濃度分布を効率的にかつ精度よく測定・評価する手法を開発する必要がある。

本検討では、1F 敷地内で実施されると考えられる限定再利用に向けた汚染がれきの資源化处理の流れを想定し、その中で放射線測定と逆解析手法を組み合わせ、資源化物内部の放射能濃度分布を評価する手法について検討を実施した。

（１）限定再利用に向けた汚染がれきの処理の流れと検認のタイミング

平成 27 年度においては、東京電力が金属及びコンクリートを対象とした減容処理設備を整備し、濃度に応じて再利用することを想定して、汚染がれきの処理の流れを検討した。汚染したがれき類を再利用する際には、がれき類を資源化处理したうえで、必要な材料として利用し、製品などにすることが想定される。1.3.1 に示したように平成 29 年 2 月に東京電力が示した再利用の対象は、0.1mSv/h 以下の屋外集積がれきのうち、5 μ Sv/h 以下の表面線量率を持つがれきとし、2028 年度時点の再利用対象物は 17.7 万 m³としている。しかし、再利用に供するための処理については言及がなく、現時点においては昨年度と同様の処理の考え方を踏襲した。5 μ Sv/h 以上 0.1mSv/h 以下のがれきについては減容処理を行って、固体廃棄物貯蔵庫へ一時保管することが明示されているが、再利用対象の 5 μ Sv/h 以下のがれきの再利用のための処理については、具体的には示されていない。したがって、再利用のための処理設備における工程を想定しながら、処理施設への汚染がれきの持込と処理施設からの持ち出しについて検討を行った。

図 1.3-18 に処理施設における汚染がれき類の持込から持ち出しまでの想定フローと規制が行うべき確認対象について示す。限定再利用の対象である屋外集積がれきは表面線量率が 5 μ Sv/h 以下であるが、大きな区画の表面線量率だけでがれきの区分が判断されているため、仮に大きな放射線線源（汚染）が内部に存在する場合にも、5 μ Sv/h 以下のがれきとして保管されている可能性がある。その放射能濃度については、濃度の高いがれきの分析が優先されているため、表面線量率の低いがれきについては平成 29 年 3 月現在、データが取得されておらず、放射能濃度のばらつきについても情報がない。このように、表面線量率 5 μ Sv/h のがれきは、放射能濃度のばらつきも大きく、ホットスポットが存在する可能性もある。したがって、処理施設へ汚染がれきを受け入れる際には、高濃度のがれきが混入しないように、受け入れレベル（放射能濃度や個々のがれきの表面線量率）などを設定し、許容を超えるホットスポットがないことを、放射線測定によって確認する必要がある（第一段階）。処理設備に受け入れられた汚染がれきは、コンクリートであれば、クラッシュやすりもみなどによって、骨材を取り出したり、金属であれば、切断や表面汚染の除去、または熔融などによって、資源化することが想定される。処理後は、資源化された骨材や金属製品が用途別に示されためやす濃度以下であることを放射線測定によって確認する必要がある。このとき、資源化处理の過程で放射能濃度のばらつ

きの大きい汚染がれきが十分に均一化されているかについても確認する必要がある(第二段階)。

安全規制については、製品として使われる資源化物(再生資材)の放射能濃度を確認する段階の測定に対して、検認を行うことが適切と考えられる。このとき、規制当局は測定記録の確認を行うとともに、一部については対象物を抜き取って放射線測定を実施し、平均放射能濃度及びその濃度分布を測定・評価して、めやす濃度以下であること、及び、放射能濃度の均一性が確保されているかを確認するものと想定される。このほか、規制当局は事業者が計画する一連のがれき処理、測定手法の妥当性を前もって確認するとともに、抜き取り測定・評価を行った再利用可能な資源化物が対象とした再利用用途及び場所に利用されているかを確認することが想定される。

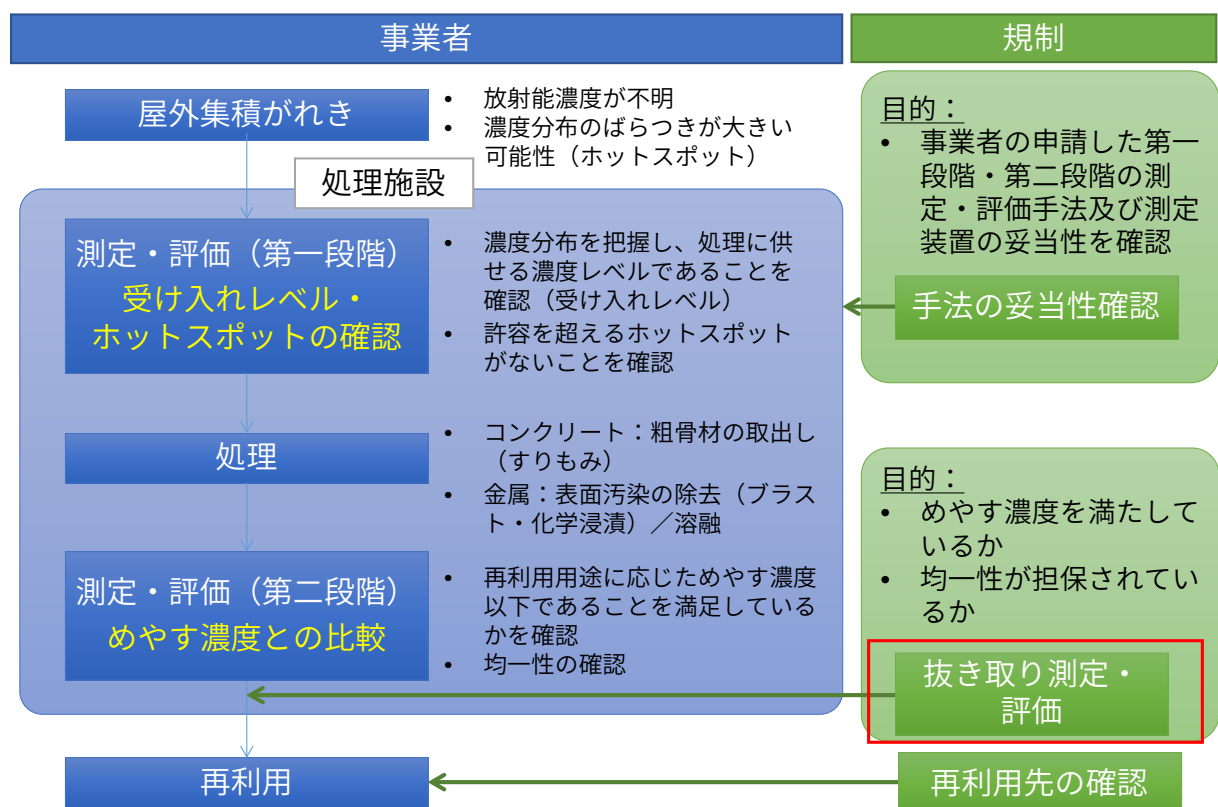


図 1.3-18 汚染がれき類の処理および検認フロー(想定)

(2) 放射能濃度分布評価コードシステム

平成 27 年度の検討結果をもとに、逆解析手法を用いた放射能濃度分布評価コードシステムを整備した。(図 1.3-19) このシステムは、線量率分布の測定結果に対して、放射能濃度分布の推定を行い、さらにはめやす濃度を満たすかどうかの判定までを自動的に行うものとする。放射能濃度分布の推定には、平成 27 年度に検討した逆解析手法を適用した逆解析プログラムを用いる。

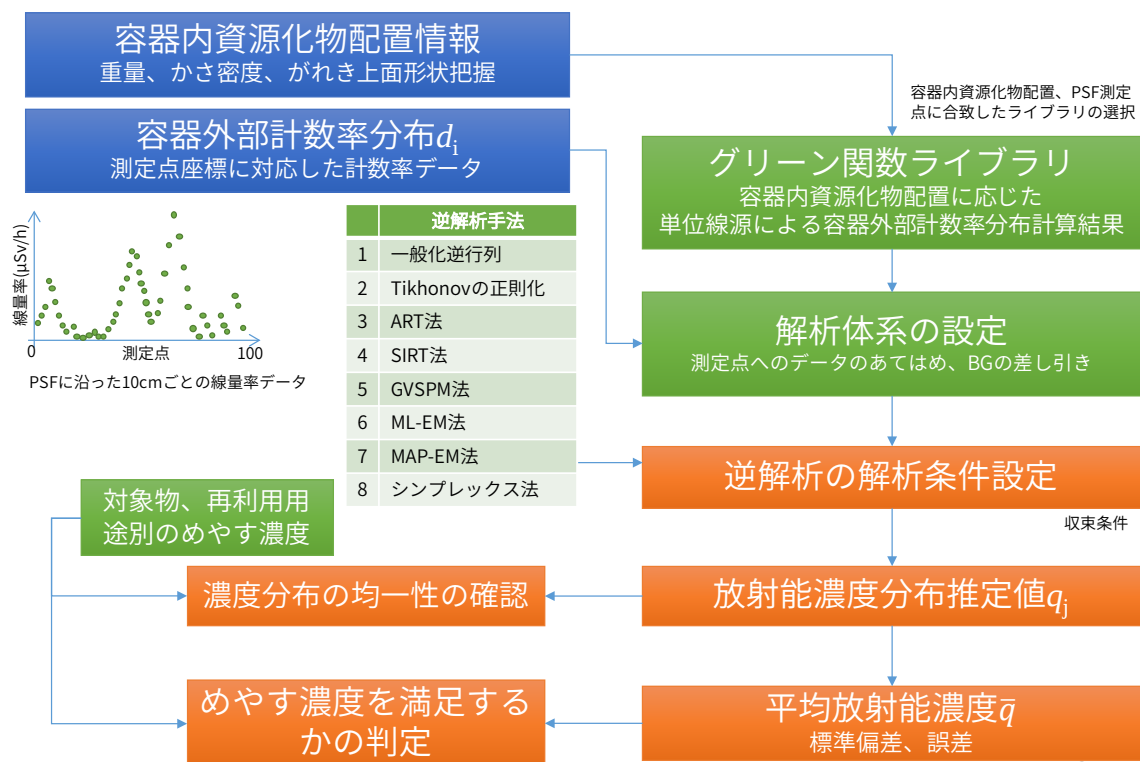


図 1.3-19 逆解析による放射能濃度分布評価コードシステムの概要

また本コードシステムを使用して、理想的な条件だけでなく、測定条件、誤差、及び測定環境などを考慮した検討を行い、実際の評価を行う上での課題を整理した。

まず実際の測定における状況、特に測定誤差という観点で、線量率の有効数字の桁数に関する検討を行った。理論値に対して数値丸めを行うことによって、測定値に似たデータ（少ない桁数の有効数字を持つ）を表現し、これに対して濃度の推定を行うことで、平均濃度を真の濃度に近づけるにはどの程度の測定精度が必要か確認した。

その結果を表 1.3-6 および図 1.3-20 に示す。有効数字 3 桁以下では解のばらつきが大きくなり、特に直接的手法は極端な負の平均濃度を示したため、以降の検討の対象外とした。また反復的手法では、有効数字 5 桁の理論値を用いても、有効数字 5 桁の解析精度に相当する許容誤差内で収束しなかった。

表 1.3-6 線量率の有効数字桁数と平均濃度

	線量率の有効数字 (桁)			
	2	3	4	5
一般化逆行列	-1.48E+01	2.27E+00	1.23E+00	1.25E+00
Tikhonov の正則化	-1.48E+01	2.27E+00	1.23E+00	1.25E+00
ART 法	1.00E+00	1.20E+00	1.28E+00	1.26E+00
SIRT 法	1.11E+00	1.31E+00	1.30E+00	1.29E+00
GVSPM 法	1.30E+00	1.29E+00	1.27E+00	1.26E+00
ML-EM 法	1.21E+00	1.33E+00	1.30E+00	1.30E+00
MAP-EM 法	1.19E+00	1.31E+00	1.28E+00	1.15E+00

(真の濃度を 1 として規格化)

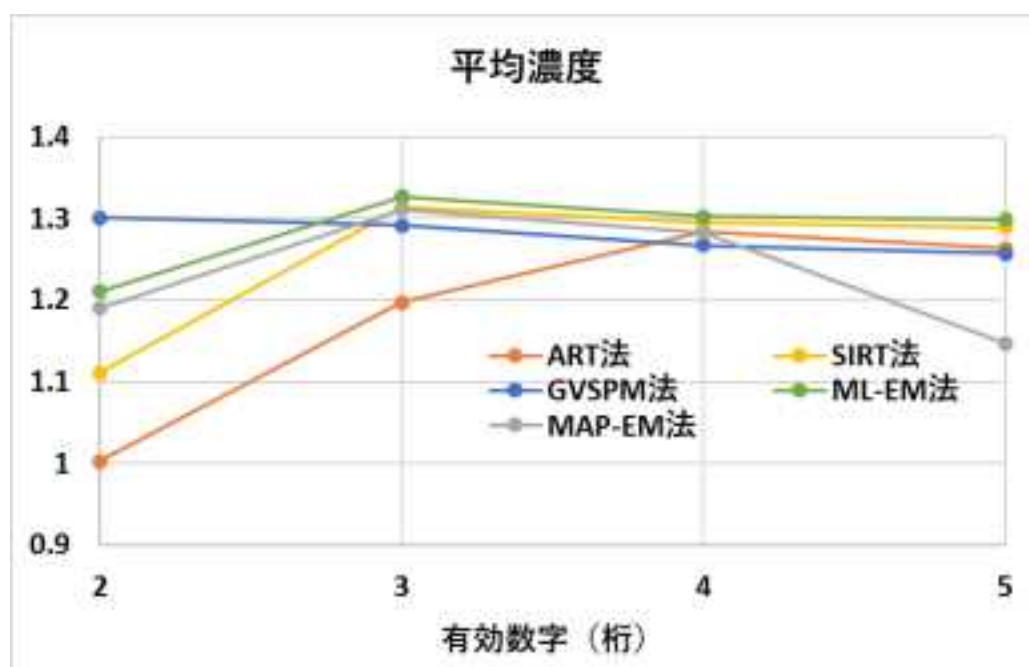


図 1.3-20 測定値の有効数字桁数と平均濃度

また測定のためのもう一つの検討として、推定点数と測定点数の関係についての検討を行った。濃度分布（一様分布）に対し、より多くの（または少ない）測定点数を取ったグリーン関数を作成して解析を行い、推定された平均濃度を比較する。その結果、それ以上測定点数を増やしても平均濃度が真値に近づかない限界の値があるのであれば、その数値が推定精度のよい解析を行える最小限度の測定点数であるということができる。

推定点数 $m=500$ に対し、測定点数を $n=90\sim 784$ の範囲で変化させて平均濃度の評価結果を比較した結果を、表 1.3-7 および図 1.3-21 に示す。比較したところ、反復的手法においては明確な測定点数依存性は見られなかった。そのため測定点数はいくらでも多く取ればよいわけではなく、適切な測定点数・配置について、さらに検討を要する。

表 1.3-7 測定点数と平均濃度

推定手法	測定点数						
	90	306	400	462	576	650	784
ART 法	1.41E+00	1.39E+00	1.31E+00	1.32E+00	1.32E+00	1.29E+00	1.30E+00
SIRT 法	1.41E+00	1.39E+00	1.36E+00	1.37E+00	1.38E+00	1.36E+00	1.37E+00
GVSPM 法	1.38E+00	1.36E+00	1.33E+00	1.34E+00	1.35E+00	1.33E+00	1.34E+00
ML-EM 法	1.40E+00	1.39E+00	1.36E+00	1.37E+00	1.38E+00	1.36E+00	1.37E+00
MAP-EM 法	1.40E+00	1.39E+00	1.36E+00	1.37E+00	1.38E+00	1.36E+00	1.37E+00

(真の濃度を 1 として規格化)

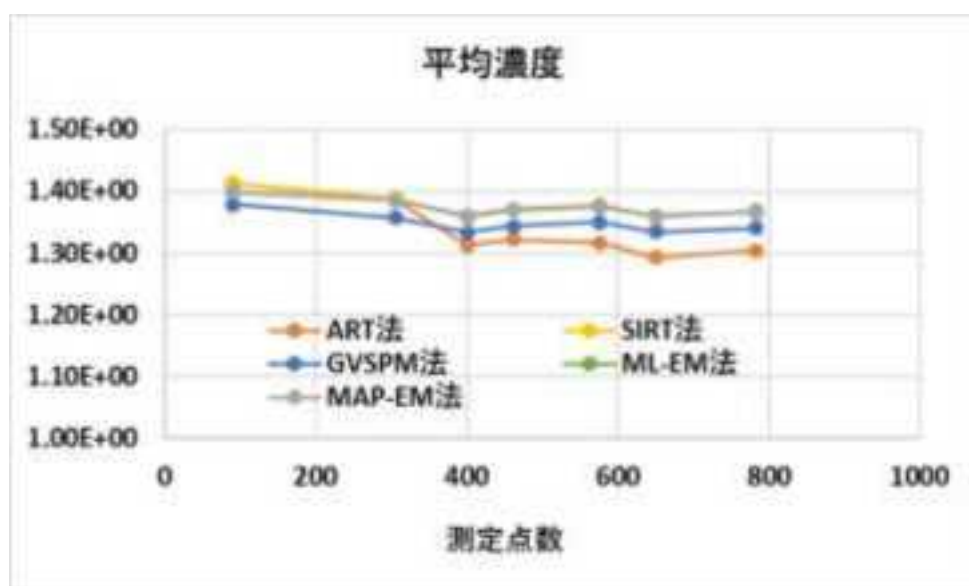


図 1.3-21 測定点数と平均濃度

(真の濃度を 1 として規格化)

次に、濃度分布の推定精度向上のための検討として、真の濃度分布の種類によって、濃度分布の推定に有利・不利があるかどうかを確認した。

各反復的手法の逆解析手法について、図 1.3-22 に示す一様分布では平均濃度が過大評価となる傾向があるのに対し、図 1.3-23 に示す密集分布では真の平均濃度を再現することが可能であった (表 1.3-8)。ただし、線源が中心付近にある場合は、平均濃度を過小評価する。また複数の分布に対して、SIRT 法と MAP-EM 法の固有パラメータの最適化を行ったが、分布によって最適値が異なることなど、限定再利用に関する検討において採用することが困難であることが判明したため、現状ではコードシステムに適用できない。よって今回の検討では、ART 法・GVSPM 法・ML-EM 法の 3 手法をコードシステムへ適用する。

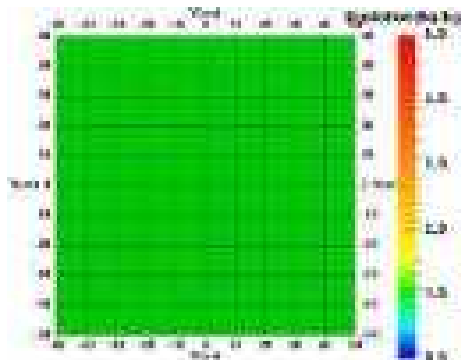


図 1.3-22 濃度分布（一様分布）

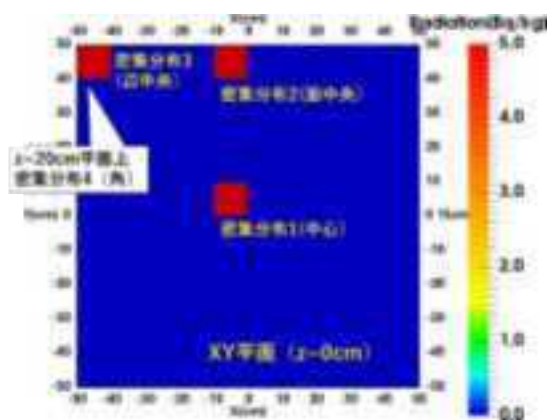


図 1.3-23 濃度分布（密集分布 1~4）
 (z=0 断面。密集分布 4 は、密集分布 3 から z 方向に+20cm した位置)

表 1.3-8 真の分布と平均濃度

推定手法	真の分布				
	一様分布	密集分布 1	密集分布 2	密集分布 3	密集分布 4
ART 法	1.31E+00	9.52E-01	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
SIRT 法	1.36E+00	7.33E-01	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
GVSPM 法	1.33E+00	8.66E-01	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
ML-EM 法	1.36E+00	8.91E-01	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
MAP-EM 法	1.36E+00	8.94E-01	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00

(真の濃度を 1 として規格化)

さらに一様分布に対する評価において、真値と異なる解へ収束することへの対処として、初期分布によって収束する解がどのように異なるかを調べた。推定された平均濃度を、表 1.3-9 に示し、与えた初期分布と推定された分布の対応関係の例（ML-EM 法の場合）を、図 1.3-24 に示す。

GVSPM 法においては収束する解が初期分布へ依存しなかったが、ART 法と ML-EM 法では初期分布に近い分布へと収束する傾向があった。このことから真の分布に対して何らかの予測が得られるのであれば、予測される分布を初期分布とすることでその予測に反する解へ収束しないようにすることは可能と考えられる。あるいは解が中心密集分布となるような初期分布を与えることにより、平均濃度を最大評価とすることができ、それをもって保守的な評価として説明する考え方もある。今回の検討では、中心付近の一部のセル以外の濃度を 0 とした分布を初期分布として与えることで中心密集分布に近い分布へ収束させようとしたが、平均濃度は最大評価とならず、保守的な評価として説明をするにはさらなる検討が必要である。

表 1.3-9 初期分布と平均濃度

推定手法	初期分布			
	単純逆投影	一様分布	中心密集分布	外縁部分布
ART 法	1.31E+00	1.00E+00	1.19E+00	8.73E-01
GVSPM 法	1.33E+00	1.35E+00	1.32E+00	1.31E+00
ML-EM 法	1.36E+00	1.00E+00	1.35E+00	7.88E-01

(真の濃度を 1 として規格化)

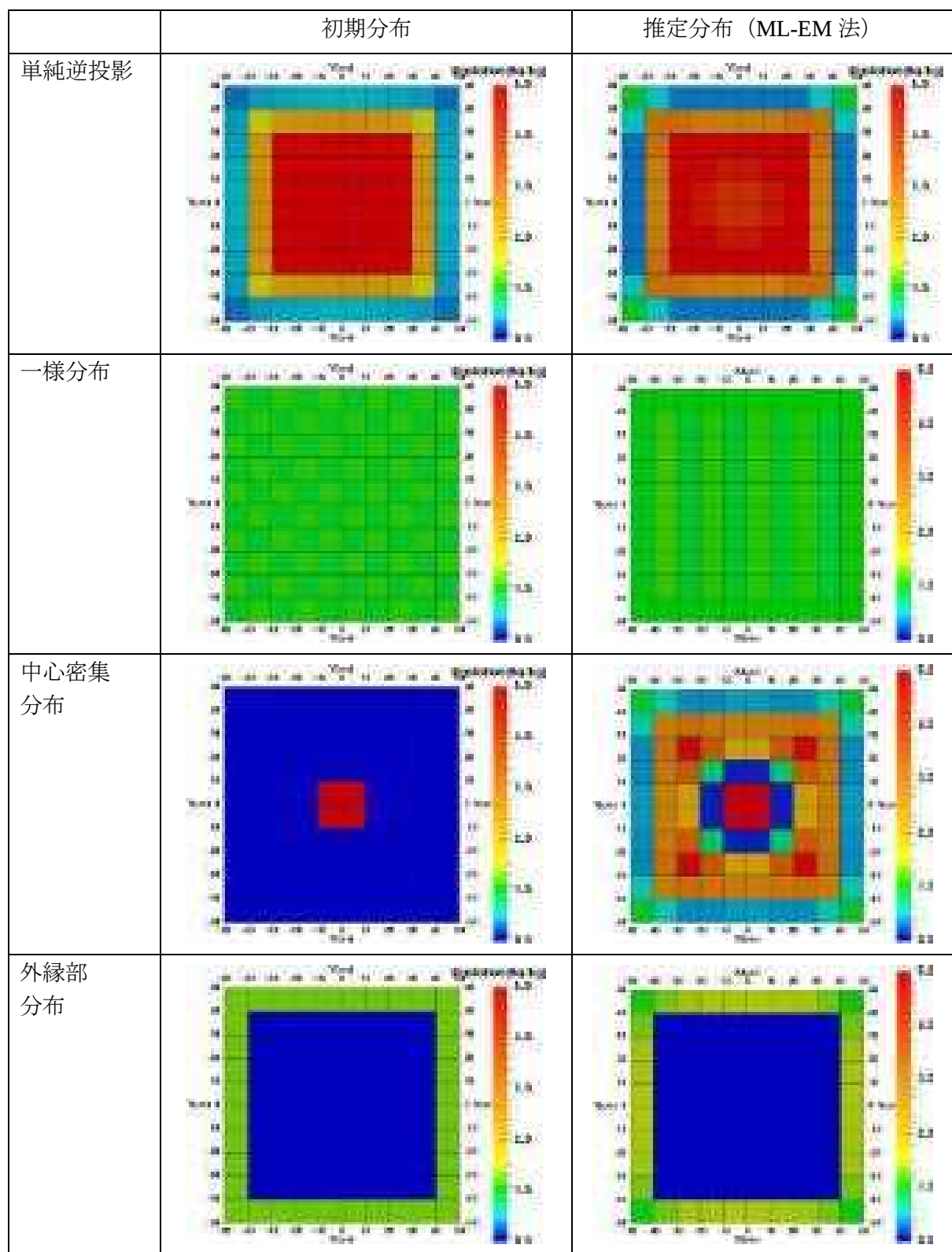


図 1.3-24 初期分布 (左) と推定された分布の例 (右・ML-EM 法)

(3) 資源化物を収納した容器外周の放射線測定及びグリーン関数の作成

1F 敷地内で発生した汚染がれきを敷地内で再利用するにあたって、資源化处理されたがれき(以下、資源化物)の放射能濃度を測定・評価し、めやす濃度を超えていないこと及び放射能濃度の均一性が担保されていることを確認する必要がある。事業者が行っためやす濃度に対して、規制庁側は抜き取り検査によって「めやす濃度を満たしているか・均一性が担保されているか」を評価することを想定している。具体的には資源化物を収納容器に入れ、容器外での放射線測定の結果から容器内部の資源化物の放射能濃度分布を評価することを想定している。放射能濃度分布は、測定データの放射線線量率分布と測定点における応答関数(グリーン関数)から、逆解析によって得る。

測定対象物となる資源化物を収納した容器外周に PSF(製品名 D-phod)を巻き付け表面の線量計数率の測定を行う。実験はアクリル容器の中にアクリルボックスを敷き詰め、空気層のみによる体系と碎石を敷き詰めた体系を用意した。アクリルボックスにおける碎石密度は $1.48\text{g}/\text{cm}^3$ となるように調整した。これはアクリルボックス体積 ($9.4\times 9.4\times 9.7\text{ cm}^3$) に碎石を敷き詰めた状態での重量を $1268\pm 1\text{g}$ とした値である(図 1.3-25)。

碎石を敷き詰めるとアクリル容器の重量は約 130kg にも及ぶ。重量物となる容器を可動させるためローラコンベアを設置した。ただしローラコンベアのローラは遮蔽物となってしまうため PSF を巻き付けた領域のみ取り外した。ただしこの状態での設置では4面の測定しか行えない。そこで回転台を設置することで容器を 90 度回転させ、2方向目の測定で1方向目では測定できなかった面の測定を行う。PSF の測定において重要となるのは位置座標の取得である。そこで半割のアクリルパイプを用意しケーブルのガイド的な役割と同時に座標の取得を可能とする治具の作製を行った(図 1.3-26)。

グリーン関数は誤差の少ない測定結果を再現できているものが理想的である。PSF から得られる情報は計数率(cps)であるため解析値($\text{photon}/\text{cm}^2/\text{s}$)は単位変換する必要がある。そのため計数率(cps)と解析値($\text{photon}/\text{cm}^2/\text{s}$)の相関より作成する検量線方式を検討した。加えて PSF は特性試験の結果より位置分解能の半値幅が約 90cm であることが分かったため解析値に空間的な広がりを与えるためガウス分布補正を行った(図 1.3-27)。点減衰核積分法による解析結果に上記補正を行った結果、ピークの位置はおおむね再現出来たがピーク高さに測定値との差異がみられた(図 1.3-28)。また低計数率に対してガウス分布補正を行うと波形がなだらかになってしまうため使い分けの工夫が必要である(図 1.3-29)。PSF にはエネルギー特性もあり、 γ 線エネルギー 59.5keV に対しては感度がないことが分かった(図 1.3-30)。そのため解析値にもエネルギー特性を考慮した補正が必要である。本年度は一連の処理を行うためのシステムを構築した。来年度は各処理についての要因分析を行い、より精度を高める予定である。



図 1.3-25 アクリルボックスに碎石を敷き詰めた状態

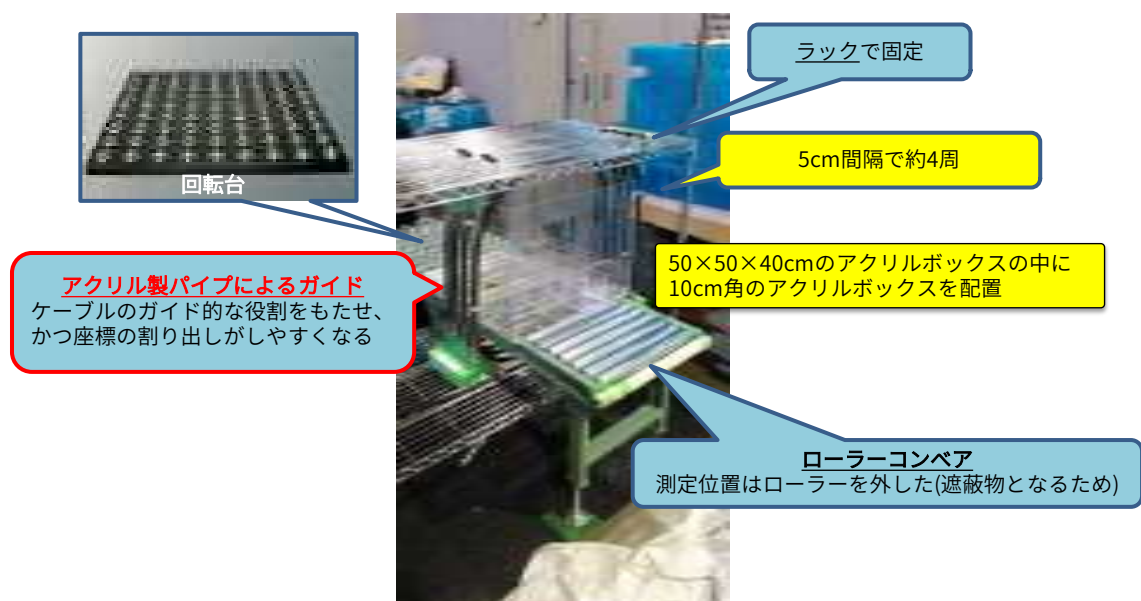


図 1.3-26 設置の様子

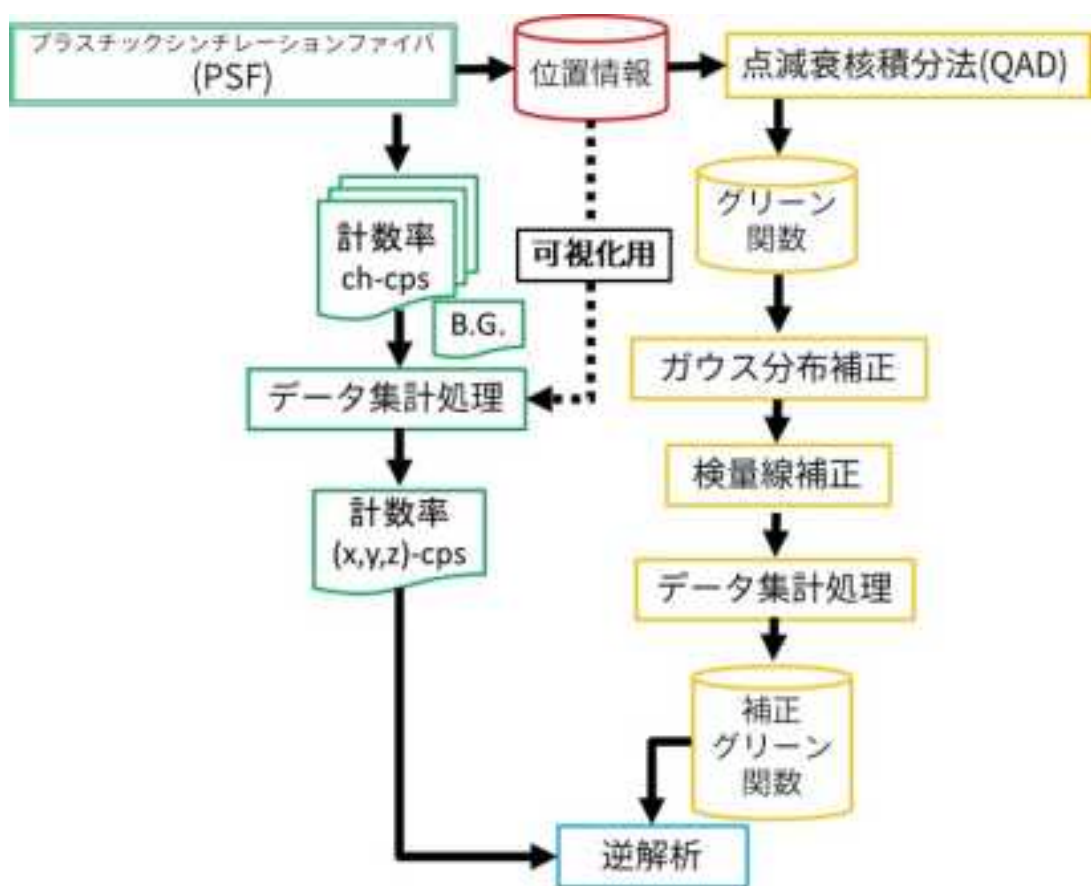


図 1.3-27 グリーン関数作成フロー

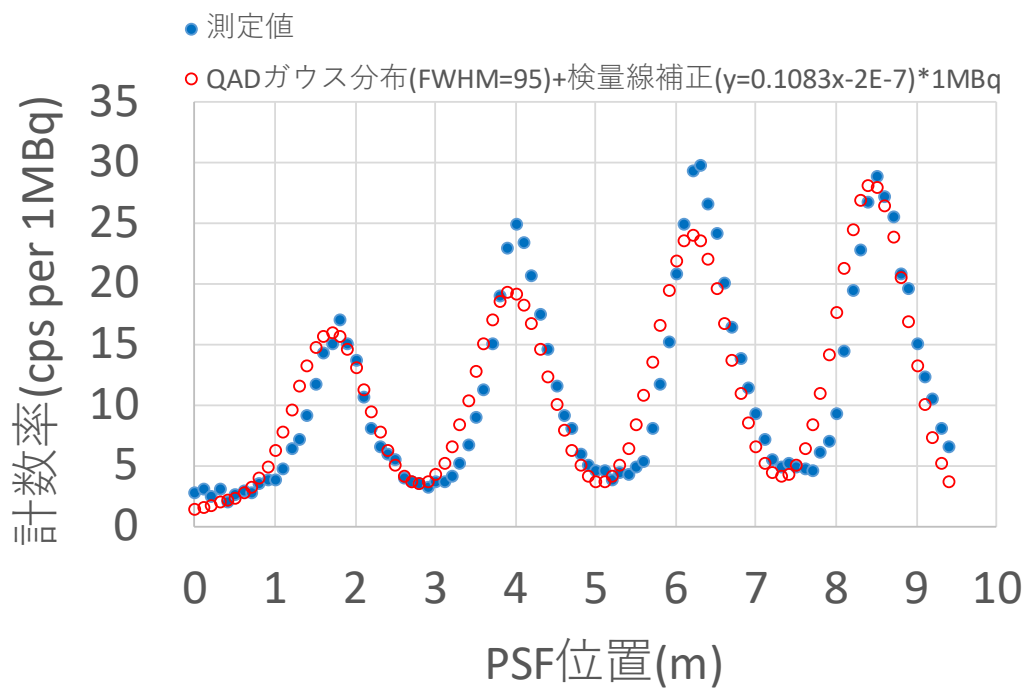


図 1.3-28 測定値とグリーン関数の比較

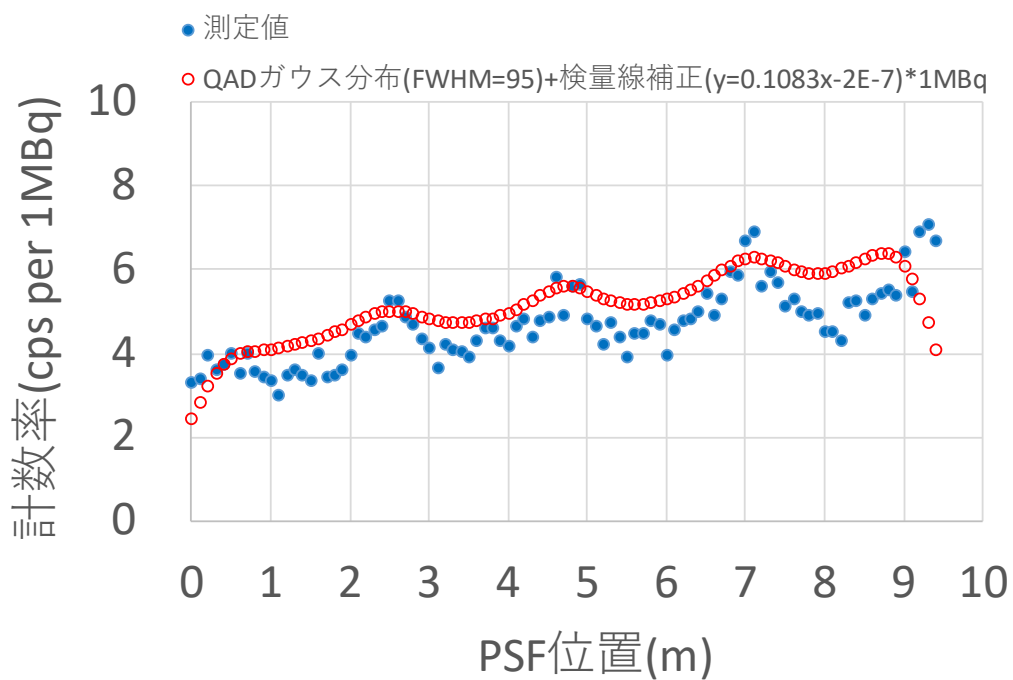


図 1.3-29 測定値とグリーン関数の比較(低計数率時)

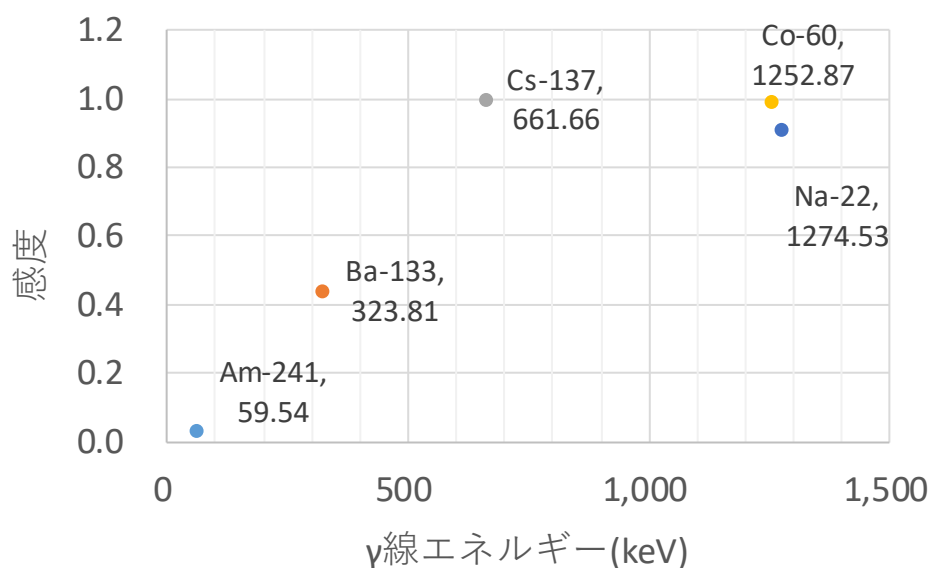


図 1.3-30 PSF(D-phod)のエネルギー特性

(4) 放射線測定結果に基づく放射能濃度分布の評価

模擬体に対してPSFを用いた測定実験により得られた計数率データとグリーン関数を用いて、整備した放射能濃度分布コードシステムによる分布の推定を行う。これによりコードシステムの一連の処理が支障なく実行可能であることを確認しつつ、測定および分布推定における現状の適用可能性と課題を整理する。空気層の測定データについては空気層の測定データで検量線補正を行ったグリーン関数ライブラリを、砕石層の測定データについては砕石層の測定データで検量線補正を行ったグリーン関数ライブラリを用いた。濃度分布の推定手法としては、(2)の検討からART法・GVSPM法・ML-EM法の3手法（グリーン関数を正規化したうえで計算）を用い、初期分布は単純逆投影法で与えた。

また、測定値に対する逆解析と並行して、線源を置いたアクリルボックスに相当するセルに1MBqの線源があるとした真の分布 q に対し、式 1.3-1 で導出した理論値 d に対して放射能分布推定を行う。

$$d = Gq \quad \text{式 1.3-1}$$

上記の通り、測定値と理論値に対して放射能分布推定を行い、その分布を可視化したものを、図 1.3-31（空気層）および図 1.3-32（砕石層）に示す。

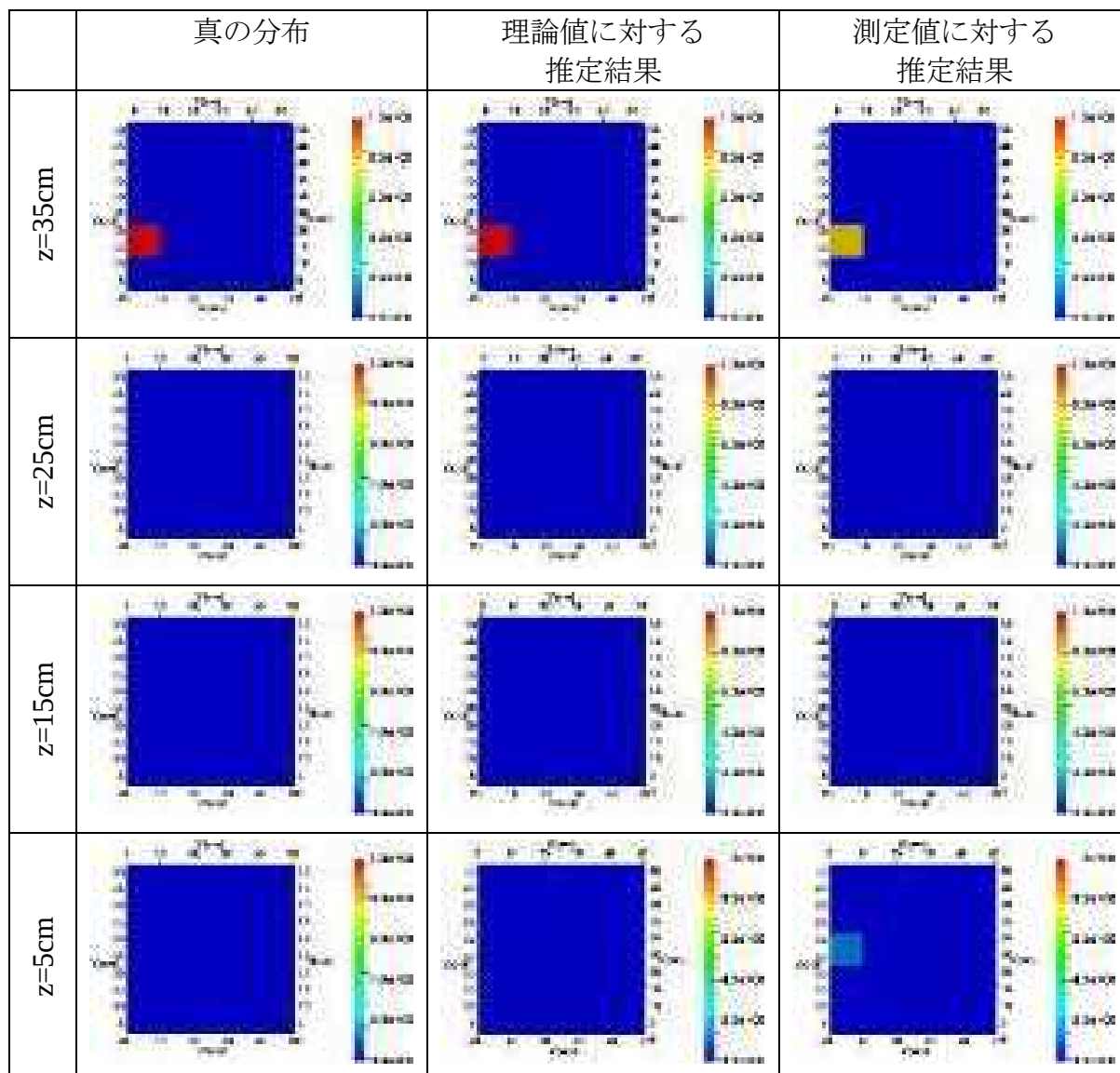


図 1.3-31 空気層 X4Y4Z1 ML-EM 法

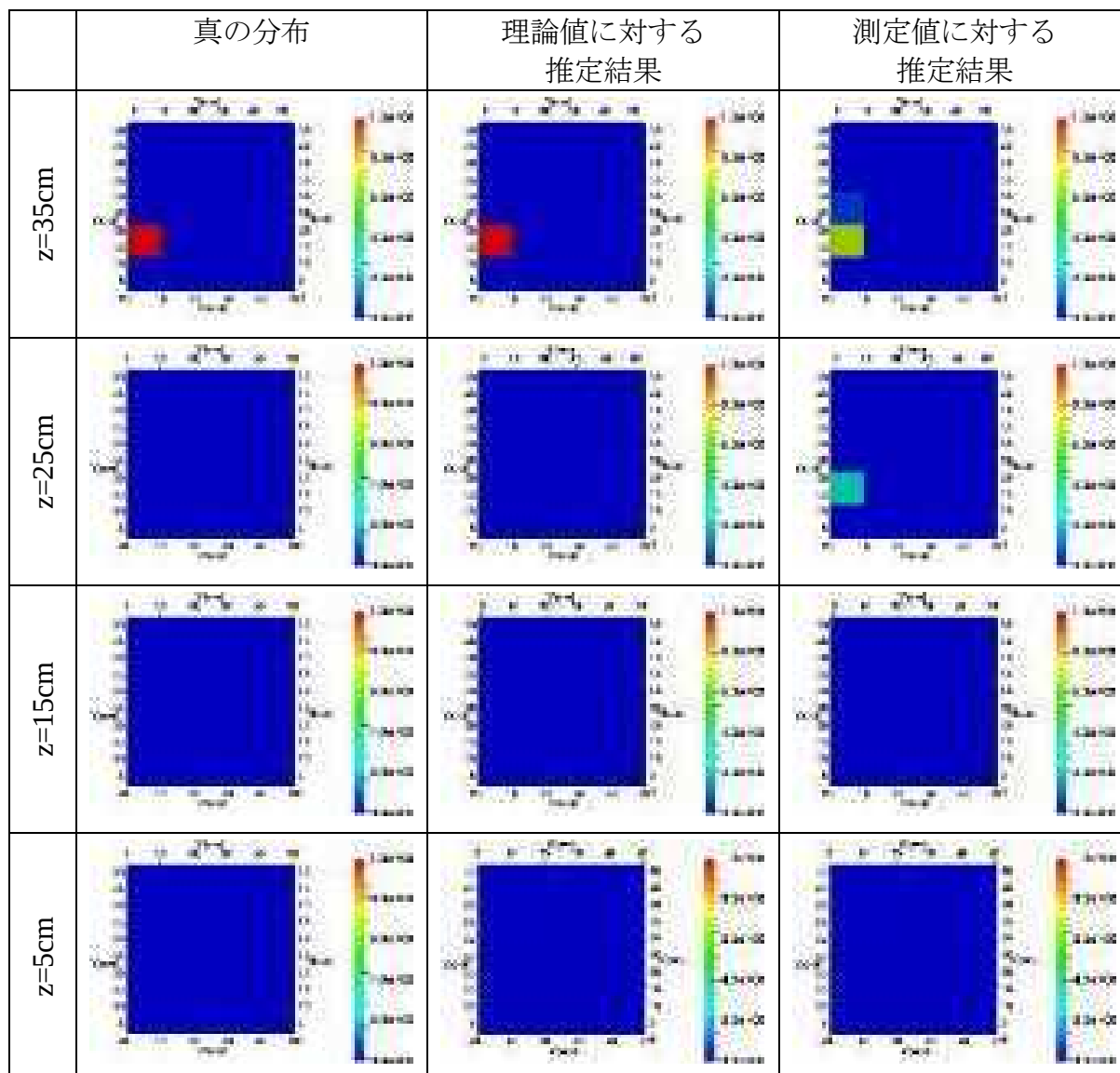


図 1.3-32 砕石層 X1Y2Z4 ML-EM 法

この検討では、いくつかのケースに対し分布の推定結果を取得し、整備したコードシステムが想定通りに運用可能であることは確認できた。しかし、測定値に対する放射能分布推定の精度には、多くの課題があることを示す結果となった。

画像による線源位置についての評価結果の整理をおこなうと、線源が容器の角付近にあるケースは線源の位置が鮮明に再現できているのに対し、容器の中心付近にあるケースは線源の像がぼやけたり、上下左右にずれて表れたりした。これは容器中心付近の放射能分布推定が困難であるとした（2）の検討結果に合致するものであったが、定量的に評価できていないため、線源位置の再現については妥当性の判断基準を整備する必要がある。また推定手法については、ケースごとに差異を分析したものの、全体としては手法間の適用可能性の優劣を結論づけるには至らなかった。

平均濃度は全体的に過小評価であり、容器中心付近に線源を置いた場合線源の位置も再現できなかった。どのケース・推定手法においても解析誤差は 10%を下回ることがなかった。理論値に対しては 0.05%の許容誤差に対して収束していることから、測定値が理論値に対してそれ

だけの誤差を持っていることになる。言い換えればグリーン関数を測定値に限りなく近付けることが出来れば理論値と同様の結果が期待できる。ただし理論値に対しても平均濃度はやや過小評価であったため、放射能濃度分布推定評価コードシステムとしても評価方法も含めてさらなる検討が必要である。

また、コンプトン散乱式ガンマカメラの基本特性を把握する測定を実施し、本年度測定・評価した体系において、適用可能である見通しが得られた。この測定結果は、逆解析の初期分布として利用できる可能性があり、今後引き続き検討を実施する必要がある。

(5) コンプトン散乱式ガンマカメラの試適用

平成 27 年度の検討において、多点数測定装置の一つとしてとりあげたコンプトン散乱式ガンマカメラであるガンマキャッチャー⁽¹⁴⁾を本測定体系へ試適用した。これにより、具体的にどのような測定結果が得られるかを吟味し、今後の適用可能性について検討した。なお、本試適用は空気層を主要な対象としつつ、碎石層についても単純な体系について測定を行った。

模擬資源化物を収納する容器は同様に 50cm×50cm×40cm であり、ガンマキャッチャーの視野角は 140° である。50cm の中央に配置する場合、視野角の範囲を有効に活用するためには、図 1.3-33 に示すように、容器側面と検出器前面との距離は 9cm 程度となる。

以上の検討から、図 1.3-34 に示すような検出器と容器の配置とした。この位置に固定した場合、中央に近い容器表面の 14° の対象範囲は 2.4cm で、反対側の表面の対象範囲は 14.8cm 程度となる。また、測定時間は 5 分間とした。

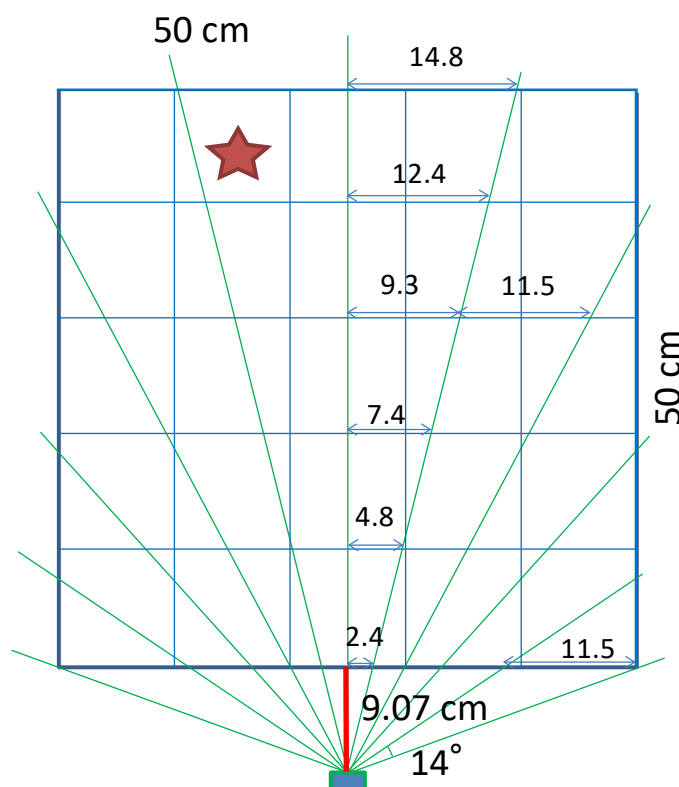


図 1.3-33 模擬資源化物容器 (50cm×50cm×40cm) を対象とした検出器の配置
(上方から見た平面方向の角度分解能 14°)

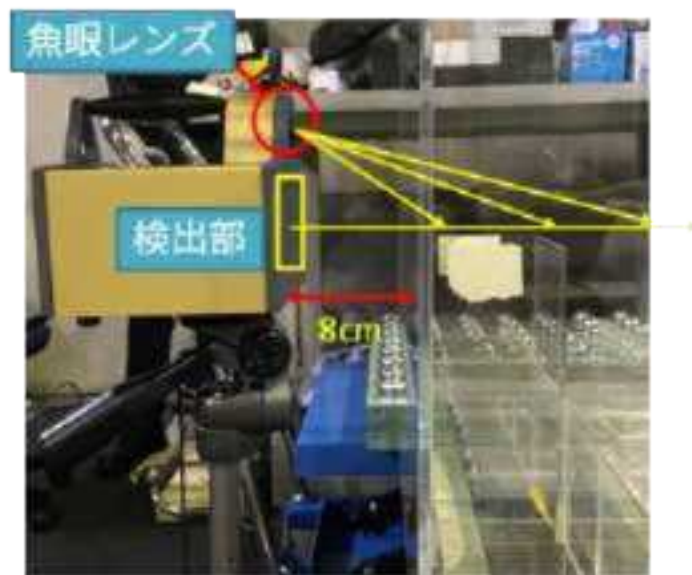
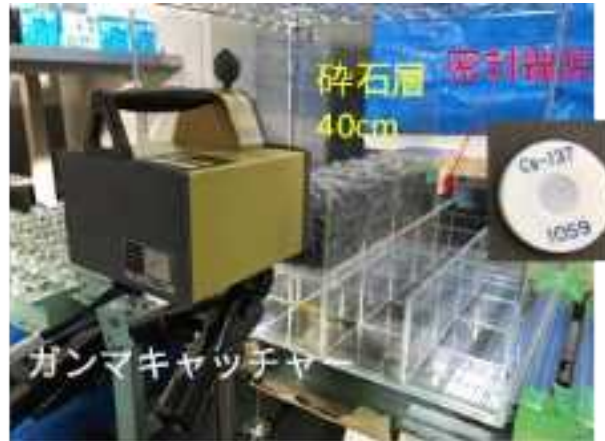


図 1.3-34 模擬資源化物容器とガンマキャッチャーの配置
(上：ガンマキャッチャー後方から容器方向、下：ガンマキャッチャー及び容器側面)

特徴的な測定結果について以下に記述する。

空気層における点線源 2 つの撮像

図 1.3-35 に点線源を 2 つ配置した場合の撮像を示す。①は容器の検出側の角部の上端（高さ 40cm）と下端（高さ 0cm）に線源を配置した場合で、撮像では検出範囲を示す白枠の線上に高い値を示す赤いコンターが表示された。検出範囲ぎりぎりの条件でも線源位置を十分に特定可能であった。次に②は検出器から見た奥行方向 3 列目（中央列）の左右両端に配置した場合で、ほぼ同じ高さを示す赤いコンターが明確に分離できているのが確認された。③は②と同様に奥行方向 3 列目向かって右側の端部とその隣接位置に 10cm の間隔で点線源配置した場合で、単一の撮像としてみると二つの線源に弁別できず、一つの線源としてとらえられるが、あらかじめ②のような撮像の情報をデータベースとして持っておけば、様々な撮像と比較して、単一の線源から得られる撮像と異なることを判断できる可能性がある。最後に、④は検出器側の前面側角部とその左側の隣接位置に 10cm 間隔で線源を配置した場合で、2 つの点線源が明確に分離されてコンター図に表示された。以上の結果から、空気層の条件では、検出器から 20cm 程度の近い側の位置分解能は高い一方、検出器からの距離が 30cm（+9cm）の条件では、コンター表示の目視による線源の弁別は容易ではないことがわかった。

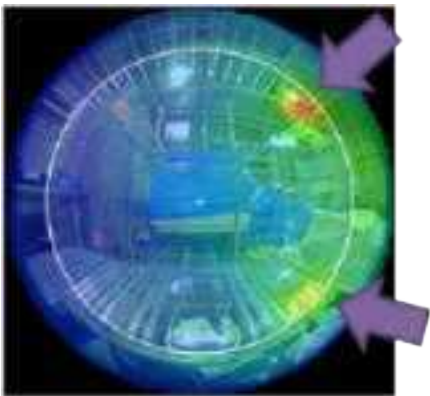
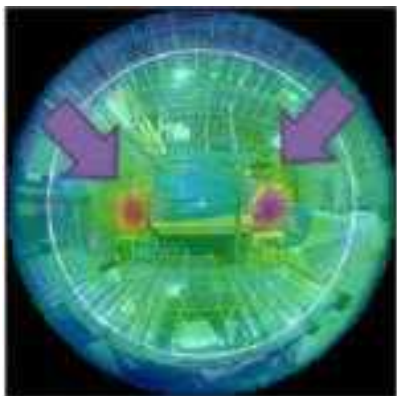
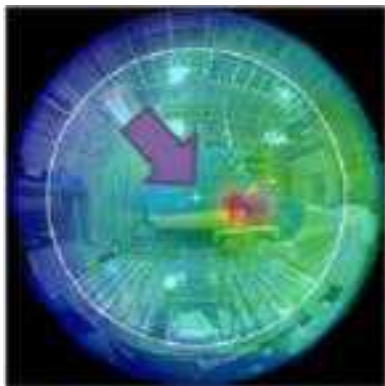
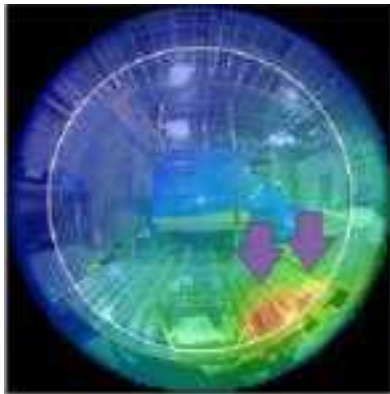
	線源の配置	ガンマカメラの撮像
①		
②		
③		
④		

図 1.3-35 2つの線源を配置した場合のガンマキャッチャーの撮像

空気層と碎石層の比較

図 1.3-36 に空気層及び碎石層厚さに応じたガンマカメラ撮像を示す。コンターはオートレンジによる表示のため、どの撮像にも最大表示の赤色で示されているが、コンプトンコーンの重ね合わせと単純逆投影法による画像再構成においては、ガンマキャッチャー固有の定量化された値が存在する。実際に適用する際には、その絶対値を比較することで、角度別のフラックスの大小を評価することが可能である。独自の定量化された値と線量率などの数値で校正することによって、一般的な測定値と比較可能な数値データとなる。

空気層で見ると、0cm の場合中心より下の位置にコンターの中心があるが、距離が長くなるにしたがって赤色のコンターが中心方向に近づいた。碎石層においても 20cm までは同様の傾向がみられる。これは図 1.3-37 に示すように、ガンマキャッチャーの検出部が高さ方向の中央に配置されたとき、今回の線源位置がその 5cm 下を平行して 10cm ずつ離して測定を行った。したがって、線源の角度方向の位置分解能は十分に高いことが確認された。

碎石層については、碎石厚さが 30cm を超えると Cs-137 1MBq の比較的強い放射線源でも撮像にコンプトンコーンが残るのが確認できる。碎石厚さ 20cm においても、画像外周部にコンプトンコーンがわずかに観測できる。

図 1.3-38 に空気層及び碎石層厚さに応じた γ 線総カウント数を、図 1.3-39 に空気層及び碎石層厚さに応じた 662keV γ 線のカウント数を示す。総カウント数は空気層では距離に応じて減少し、40cm 厚さでほぼ 1/10 となり、碎石層においても、40cm 厚さで 1/20 以下となるのに対し、662keV のカウント数は空気層において 40cm 厚さで 1/10 程度とほとんど総カウント数と変わらないのに対して、碎石層においては 1/100 と大きく減少した。これは碎石によって 662keV の γ 線が 40cm 厚さの碎石を通るうちにそのほとんどが非弾性散乱によってエネルギーを失ったためであり、40cm 厚さでは 5 分間の測定でわずか 10 カウントとなった。全カウントのうち撮像に利用されたコンプトン散乱 γ 線の選別率を図 1.3-40 に示す。空気層についてはほぼ変動がないのに対し、碎石層については厚さが増加するにしたがって大きく減少することが確認された。

図 1.3-41 に散乱層と吸収層の合計を示す全体における γ 線エネルギースペクトルを示す。空気層では 40cm 厚さでも 662keV にピークが観測できるが、碎石層では 30cm でわずかに確認できる程度となった。したがって、Cs-137 1MBq の線源に対して、散乱されないで直接検出器に到達する γ 線を検出するには碎石層厚さは 30cm 以下であることが求められる。

図 1.3-42 に空気層及び碎石層厚さに応じたエネルギー分布を示す。各光子に対して、散乱層での γ 線エネルギーと吸収層での γ 線エネルギーを対応付けたもので、その合計値が 662keV となる光子が Cs-137 からの直接 γ 線となる。資源化物は汚染している場合は Cs-137 がそのほとんどを占めており、低エネルギー側の γ 線だけが検出される場合は、Cs-137 の汚染が資源化物内に存在するが、そのほとんどが散乱した後の γ 線であり、20cm 以上深い位置にあることが推測される。放射能濃度と汚染位置の関係を定式化することによって、汚染深さを定量化できる可能性がある。

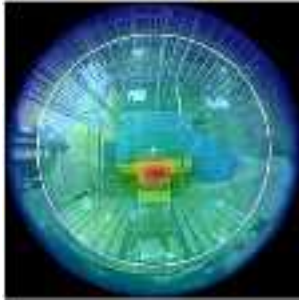
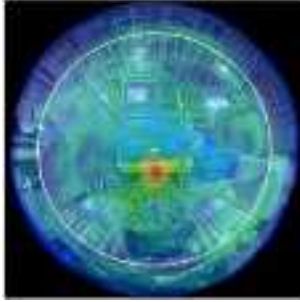
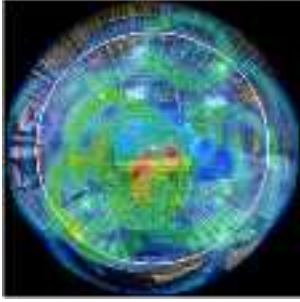
容器内厚さ	空気層	碎石層
0cm (+8cm 空気層)		
10cm (+8cm 空気層)		
20cm (+8cm 空気層)		
30cm (+8cm 空気層)		
40cm (+8cm 空気層)		

図 1.3-36 空気層及び碎石層厚さに応じたガンマカメラ撮像

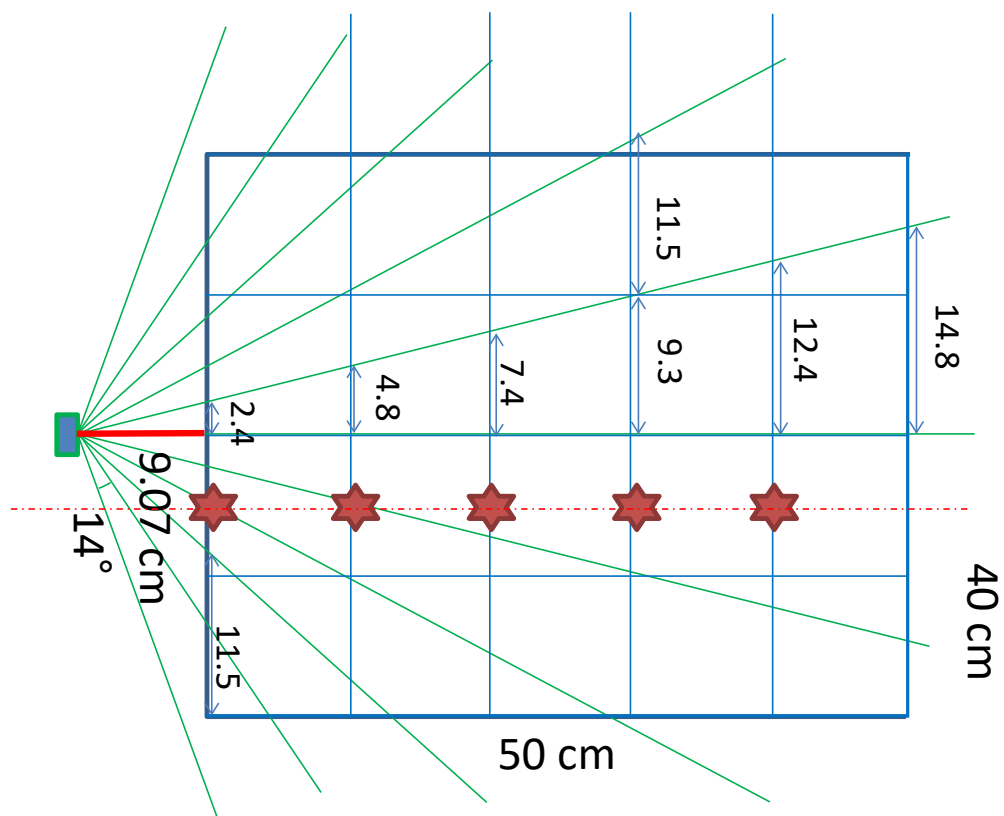


図 1.3-37 模擬資源化物容器（50cm×50cm×40cm）を対象とした検出器の配置
（側面から見た平面（y-z 面）方向の角度分解能と点線源位置の関係）

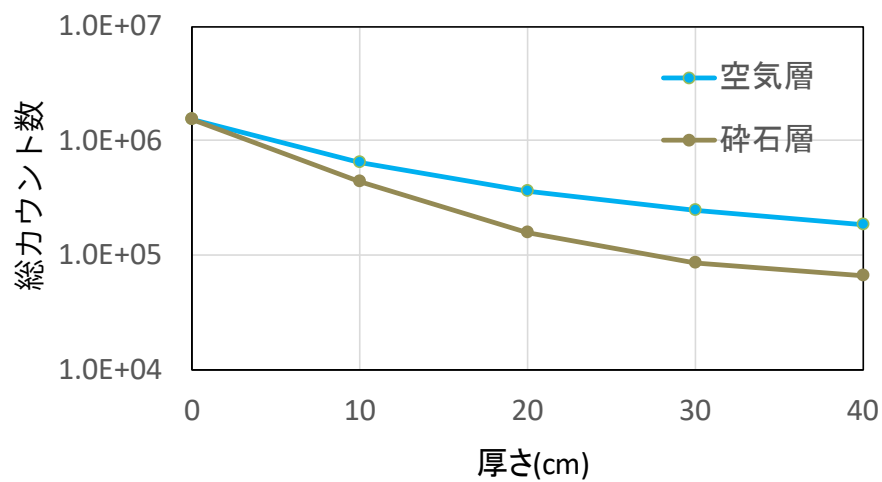


図 1.3-38 空気層及び砕石層厚さに応じた γ 線総カウント数

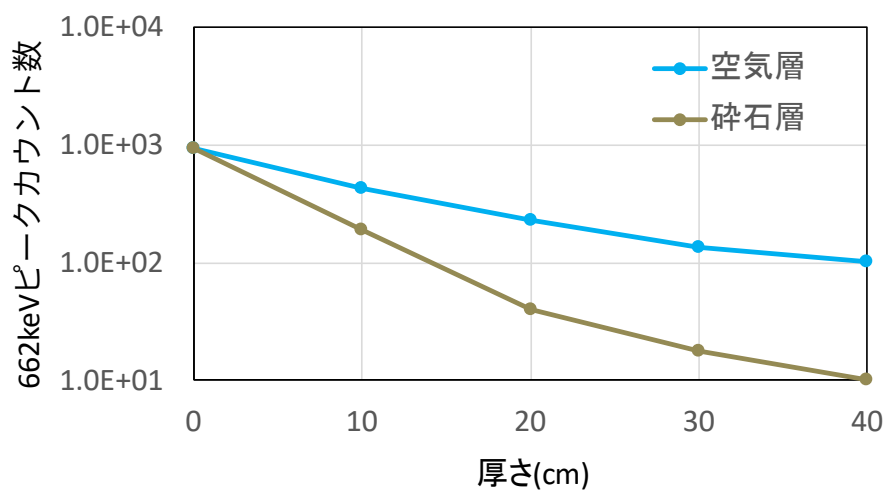


図 1.3-39 空気層及び砕石層厚さに応じた 662keV γ 線のカウント数

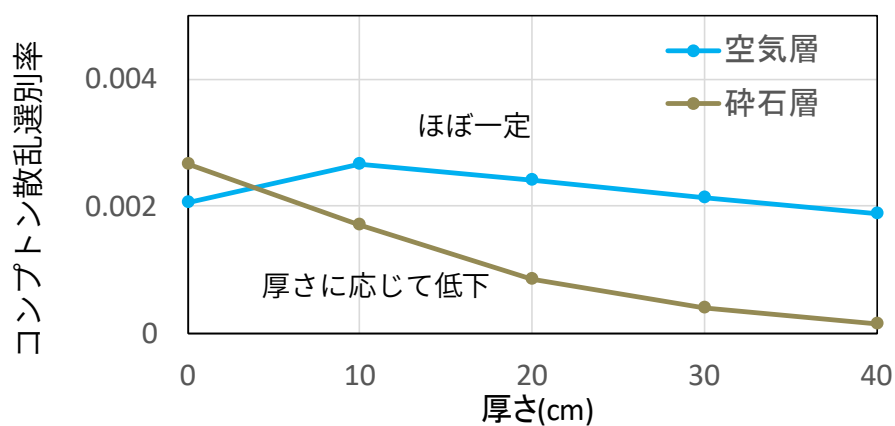


図 1.3-40 空気層及び砕石層厚さに応じた γ 線選別率

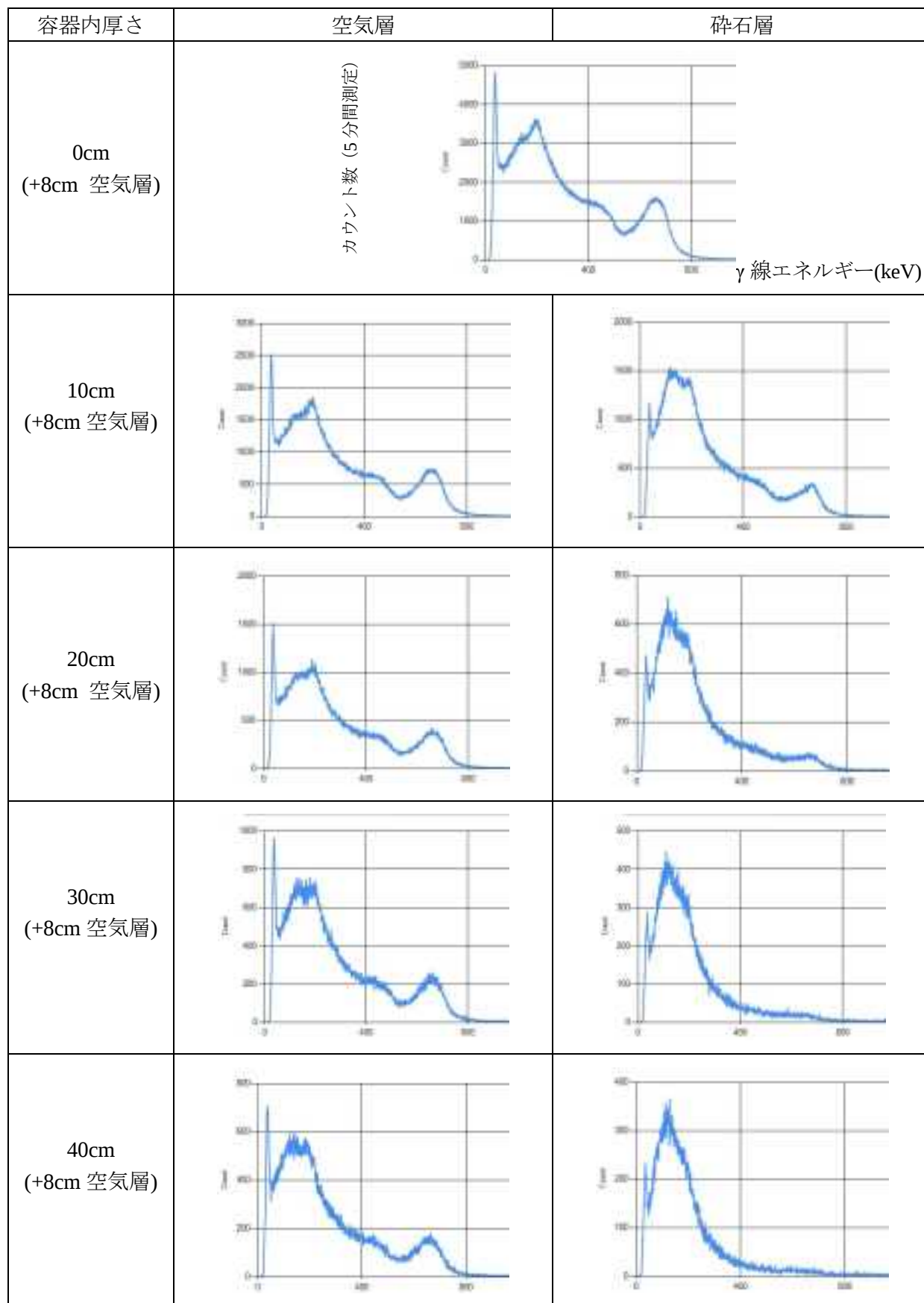


図 1.3-41 空気層及び碎石層厚さに応じた γ 線エネルギースペクトル (全体エネルギー)

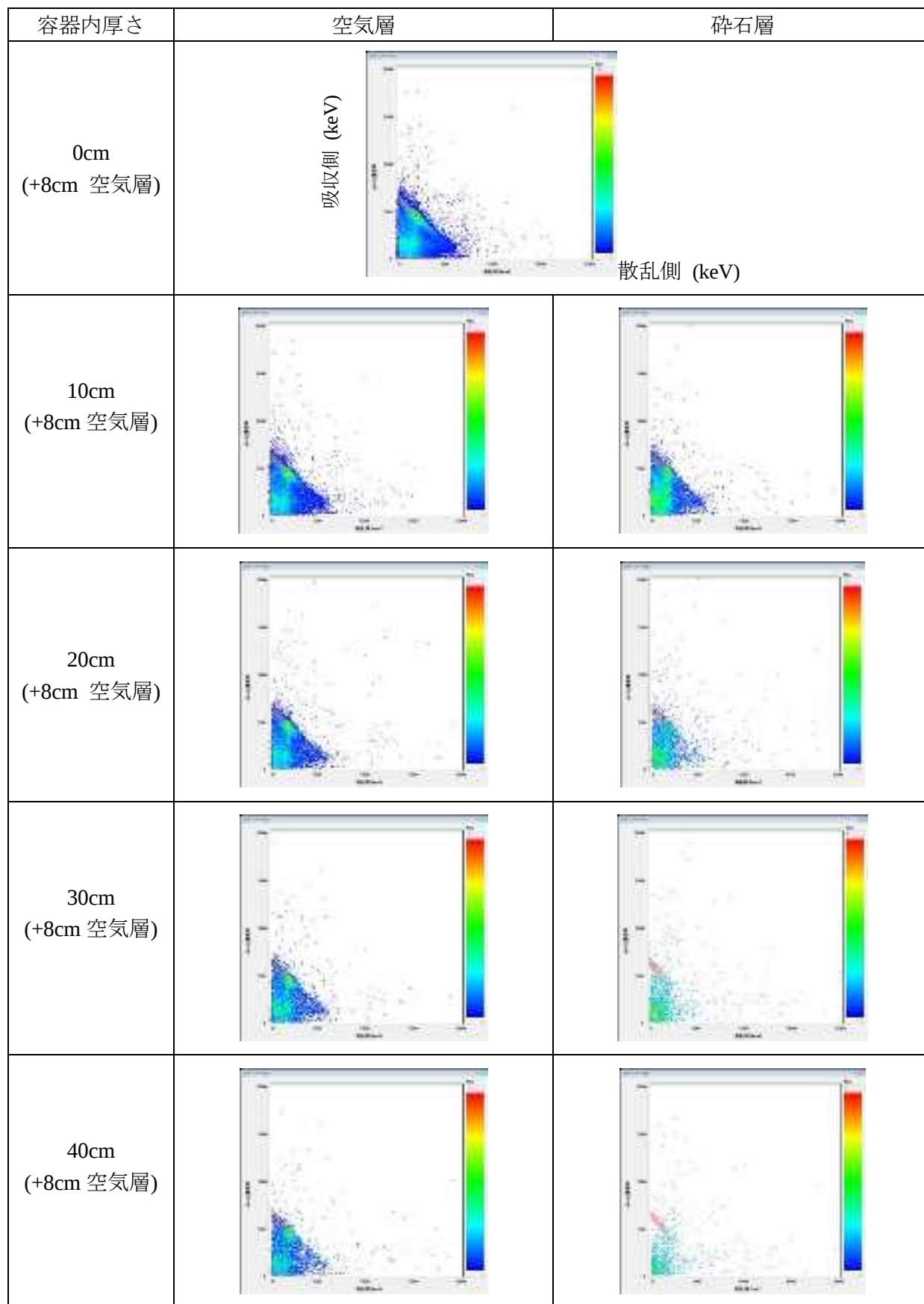


図 1.3-42 空気層及び碎石層厚さに応じたエネルギー分布

以上の測定結果から、ガンマキャッチャーを資源化物の放射能濃度分布を反映した平均放射能濃度の測定・評価に用いる場合の適用性について検討する。空気層の撮像結果からわかるように、検出器からの距離が 30cm 以下の範囲においては角度方向の位置分解能が高く、容器内の位置をほぼ特定できる見通しが得られた。一方、Cs-137 1MBq を用いた試験において、20cm 以上の碎石層厚さでは、662keV のピークカウントが十分に得られず、662keV による線源位置の特定は困難であることがわかった。したがって、図 1.3-43 に示すように、4 方向の側面、上面及び底面の計 6 面について測定を行うことにより、いずれかの測定で容器側面から 25cm 以内の距離ですべての資源化物を測定することが可能となる。

また、取得されるエネルギー分布から、直接線の 662keV が少ないのに対して、散乱成分が極端に多い場合には、線源から検出器に到達するまで碎石層を長く通っていることが想定され、各面からの測定結果を統合することにより、線源の位置を特定できる可能性が高まると考えられる。一部の逆解析手法においては、初期分布として与える濃度分布が真の濃度分布に近い場合に、真の濃度分布に近づくことから、ガンマキャッチャーの撮像及びエネルギー分布から得られる濃度分布を、逆解析の初期分布として与えることが想定できる。

また、ガンマキャッチャーでは撮像されるコンターが固有の数値であるが、これを測定可能なデータと校正することにより、ガンマキャッチャー単独で放射能分布推定を実施することも考えられる。撮像に用いられるコンプトンコーンに基づく画像再構成方法と、角度分解能などの特性を十分に把握したうえで、グリーン関数を新たに構築する必要がある。グリーン関数を構築するための解析手法、モデルなどについては、直ちに実行できるものではなく、多くの課題が残っているが、その可能性についても検討を継続する。

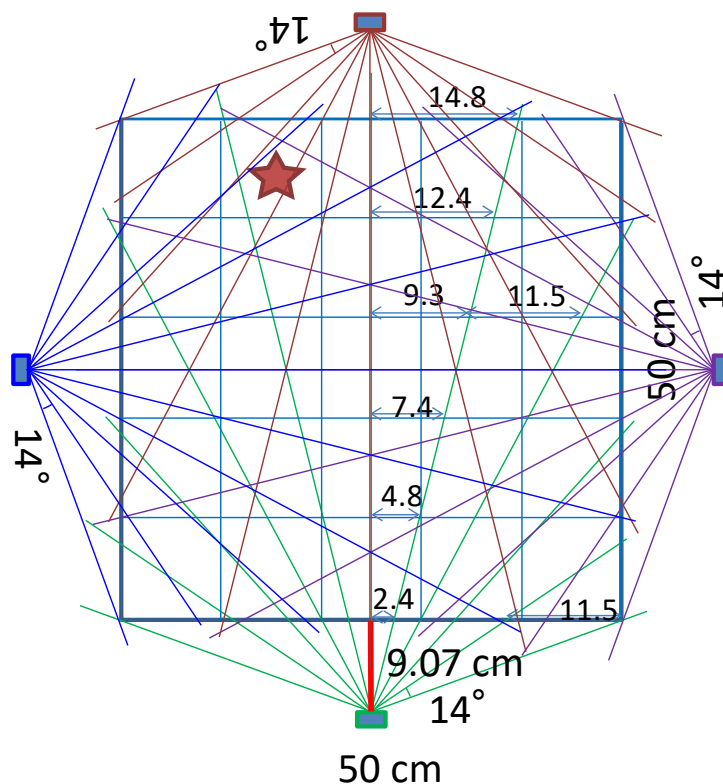


図 1.3-43 本年度対象とした測定容器に対するガンマキャッチャーによる測定例

(6) 碎石を均質とみなせる範囲の検討

今回用いた碎石 6 号はその粒子の直径が 5~13mm と規定されている。図 1.3-44 に示すように、大きさのばらつきも大きく、アクリルボックスに収納した場合にも、粒子同士の隙間である空間が多くみられる。容器全体としてみれば、碎石と空気の均質な混合層とみなすことができるが、局所的に見れば空気が連続する領域が存在する。したがって、碎石 6 号と空気の混合がどの厚さで均質とみなせるかについて測定試験による検討を行った。



図 1.3-44 碎石 6 号をアクリルボックスに詰めた状態及び粒子の拡大図

(1) 測定条件

測定による検討では、アクリルボックスに碎石 6 号と均質とみなせる小粒径の珪砂を敷き詰めて、点線源を所定の位置に配置して NaI サーベイメータによって線量率を測定した。また、比較のために空気層についても測定を行った。NaI の検出部であるシンチレータはプローブ部の先端に配置され、その大きさは直径 2.54cm 長さ 2.54cm の円柱形であり、この検出器体積に対する応答となる。

図 1.3-45 に珪砂 6 号をアクリルボックスに詰めた状態と粒子の拡大図を示す。粒子の約半分は 0.3mm のメッシュを通ったもので、1cm 程度の厚さであれば十分均質とみなせる。真密度はともに 2.6g/cm³ 程度であり、アクリルボックスに詰めた状態でいずれも内容物 1270g と見かけの密度は 1.48g/cm³ となった。

図 1.3-46 に検出器と密封線源の位置関係を示す。NaI サーベイメータの検出部の先端から 5cm から 50cm まで 5cm ずつ離して碎石、珪砂、空気の厚さを変えた。10cm 単位はアクリルボックスに各物質を詰めたものを利用し、5cm 単位は各物質を詰めたアクリルボックスの中心に密封線源を配置して 10cm 単位のアクリルボックスと組み合わせて配置した。



図 1.3-45 珪砂 6 号をアクリルボックスに詰めた状態及び粒子の拡大図



図 1.3-46 検出器と密封線源の位置関係

(2) 測定結果

図 1.3-47 に測定結果を示す。空気層については空気における減衰がほとんどないため、距離に応じた減衰カーブとなっている。一方、碎石 6 号及び珪砂 6 号では、10cm 以上では媒体による遮蔽効果が表れ、空気層よりも低い値で推移する。一方、5cm では空気層と碎石、珪砂がほぼ同一の値を示し、5cm 程度ではほとんど遮蔽効果がないことを示している。

次に碎石を充填したアクリルボックスを 5 つ作成し、10cm 厚の碎石層を通った線量率のばらつきを測定した。一つのアクリルボックスに対して、南北方向、東西方向の 2 回測定して、合計 10 回の測定を行い、そのばらつきを評価した。その測定結果を図 1.3-48 に示す。わずかなばらつきはあるが放射線に対する測定としては誤差の範囲に収まっており、均質とみなすことが可能と考えられる。

また、アクリルボックスの中心に線源を配置して 4 方向の側面で線量率を計測した。理想的に配置されていれば、どの方向からも 5cm 厚の珪砂あるいは碎石を通っていることになる。表 1.3-10 に測定結果を示す。珪砂についてはばらつきが小さく、5cm 厚でもほぼ均質とみなすことができるが、碎石の場合はばらつきが大きく、碎石を充填する際のばらつきによって、空気部を多く通ったり、碎石部を多く通ることで、線量率のばらつきが生じていると考えられる。なお、上述したように、線源配置のばらつきの影響についても今後配慮する必要がある。

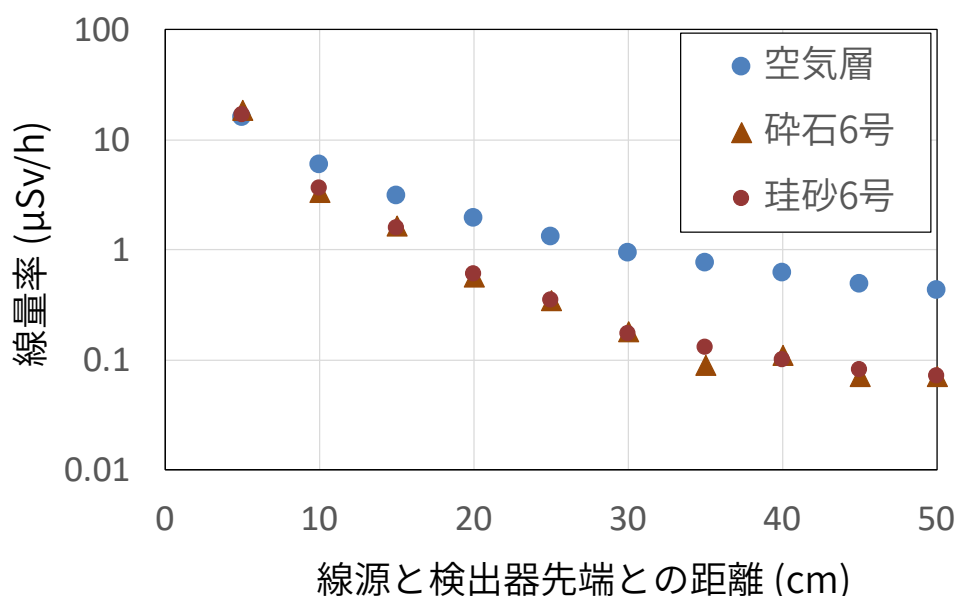


図 1.3-47 空気層、碎石 6 号、珪砂 6 号の各厚さに応じた線量率 (NaI サーベイメータ)

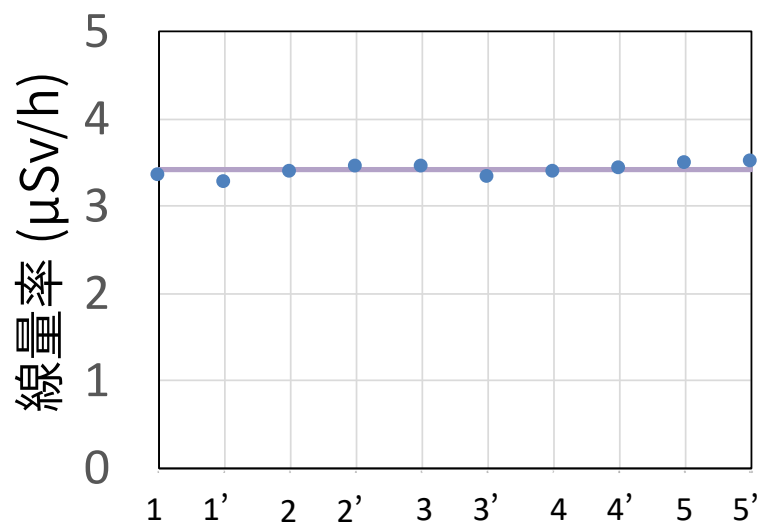


図 1.3-48 砕石 6 号を詰めたアクリルボックスに対する向きの違い
及び砕石の詰め方のばらつきによる影響 (NaI サーベイメータ)

表 1.3-10 5cm 厚さの珪砂と砕石の線量率測定結果

	珪砂	砕石 A	砕石 B
1	16.8	15.1	18.7
2	16.6	15.7	15.9
3	15.8	19.5	15.1
4	16.8	17.8	16.5
平均	16.5	17.025	16.55
σ	0.825	3.491	2.674

第1章の参考文献

- (1) JAEA 平成27年度「廃棄物の限定再利用に関する検討」報告書
- (2) 東京電力 特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会（第4回） 資料2「福島第一原子力発電所 廃棄物関連設備および施設の新・増設について」
<https://www.nsr.go.jp/data/000167362.pdf>
- (3) 東京電力 特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会（第5回） 資料1「福島第一原子力発電所 保管管理計画の概要と更新方法について」
https://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/youushikisya/tokutei_haiki/00000039.html
- (4) 経済産業省 廃炉・汚染水対策チーム会合事務局会議（第39回） 資料3-4「ガレキ・伐採木等の管理状況（2017.1.31時点）」
<http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2017/02/index.html>
- (5) 経済産業省 廃炉・汚染水対策チーム会合事務局会議（第27回） 資料3-4「ガレキ・伐採木の管理状況（2016.1.31時点）」
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2016/02/25_01.html
- (6) IRID および JAEA 「福島第一発電所構内で採取した建屋内瓦礫、立木、落葉及び土壌の放射能分析」
http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2015/03/20150326_2.pdf
- (7) 東京電力 福島第一原子力発電所サーベイマップ敷地全体（平成29年1月11,12日測定分）
<http://www.tepco.co.jp/decommision/news/data/sm/images/f1-sv2-20170125-j.pdf>
- (8) 東京電力 福島第一原子力発電所サーベイマップ敷地全体（平成27年11月10,11日測定分）
<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/surveymap/images/f1-sv2-20151126-j.pdf>
- (9) 東京電力 福島第一原子力発電所における作業環境の放射線計測と今後の課題、第7回放射線計測フォーラム福島、2016年12月13日
- (10) 谷中隆明、漆山佳雄、北島永一、福崎紀夫、田村良三、丸山隆雄. 「道路粉じんによる大気汚染」 1985. 全国公害研究誌. Vol. 10, No.1.
- (11) 原子力安全委員会 平成11年「主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて」
- (12) 東京電力 地下水バイパスの排水基準について
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2014/images/handouts_140203_04-j.pdf
- (13) 日本建設業連合会 「再生骨材コンクリートの普及促進に向けてー低炭素・循環型社会の構築への貢献ー」
<http://www.nikkenren.com/publication/pdf/182/saiseikotsuzaikonkuri-tonohukyuusokushinnimukete2.pdf>
- (14) 株式会社浜松ホトニクス ガンマ線撮像用コンプトンカメラ C12138-5653

2. 敷地内がれきの保管状況の把握

2. 敷地内がれきの保管状況の把握

2.1 はじめに

廃棄物の限定再利用に関する検討のために、東京電力福島第一原子力発電所（以下「1F」）敷地内のがれきの保管状況と記録情報の実態について調査した。調査結果は、限定再利用において考慮すべき核種のめやす濃度の試算および、放射能濃度評価手法の検討に活用することとした。そのため調査対象とする情報は、それらの検討に必要となる、1F 敷地内に存在するがれきの材質別・表面線量率別の重量およびかさ密度、放射性核種濃度とした。

平成 27 年度⁽¹⁾は、平成 27 年度末までに公表されたデータ及び文献を調査し、保管場所に存在するがれきの材質別・表面線量率別の重量およびかさ密度をまとめた。一方で、放射性核種濃度については、建屋内及び建屋周辺で採取されたがれき、敷地内の土壌などの採取試料の核種別濃度については情報を収集できたが、限定再利用の対象となる比較的低濃度とされる表面線量率 0.1mSv/h 以下の屋外集積がれきについては分析されておらず、十分なデータが得られなかった。また、1F 敷地内に存在するがれきの情報や 1F 敷地内の空間線量率などのデータは、短期間で更新されうる情報であり、可能な限り最新の情報を反映することが望ましい。

それを受け、本検討では平成 28 年度 2 月までに公表されたデータを用いて、保管場所に存在するがれきの材質別・表面線量率別の重量およびかさ密度の情報や、1F 敷地内の空間線量率の情報を更新し、平成 27 年度末からの推移を確認した。また、平成 27 年度は十分なデータが得られなかった、放射性核種濃度についての調査を引き続き行った。

2.2 東京電力の再利用に向けた検討状況

平成 28 年 10 月には、屋外に一時保管されているがれき（容器収納のものを含む）の解消に向けて、実施方針と一部処理方法が示された⁽²⁾。図 2.1-1 に東京電力が示した設備及び施設設置のイメージ図を示す。固体廃棄物貯蔵庫の増設、焼却処理設備の増設などが挙げられているが、その中で図 2.2-2 に示すように 5 μ Sv/h 以上 30mSv/h 以下のがれきについては、減容処理設備にて、体積を減少させて、今後増設される固体廃棄物貯蔵庫へ保管する方針が示された。減容処理設備については図 2.2-3 に示す設備例のように、コンクリートであればコンクリート破砕機、金属については切断機を適用して、50%程度の減容率を目標にしている。

一方、平成 29 年 2 月には再利用の方針の一部が明確に示された⁽³⁾。表面線量率 5 μ Sv/h 以下の屋外集積がれきについては、再利用することが示されている。コンクリートがれきについては路盤材などの需要があり、再利用する見通しがあることについて言及している。一方、金属については、鉄筋などはそのまま再使用することが難しく、何らかの処理が必要であり、利用先についてはまだ検討途上であることが言及された。以上のように、敷地内での限定的な再利用に関して、利用先、処理方法など決定されていない状況である。

なお、平成 27 年度時点において東京電力は、「がれき等」の内訳としてがれき類・伐採木の 2 つとしていた。平成 29 年 2 月時点においては、「がれき等」に使用済保護衣を加えて一時保管の対象としている⁽²⁾。ただし、図 2.2-4 に示すように、使用済保護衣は焼却処理の後、放射性固体廃棄物として容器収納されるため、再利用の対象とはならない。（図 2.2-4）



図 2.2-1 1F の屋外一時保管がれきの解消に向けた設備増設のイメージ図
(参考文献(2)p.1 より)



図 2.2-2 屋外一時保管がれきの解消に向けた処理フロー図
(参考文献(2)p.4 より)



図 2.2-3 減容処理設備の例
(参考文献(2)p.8 より)

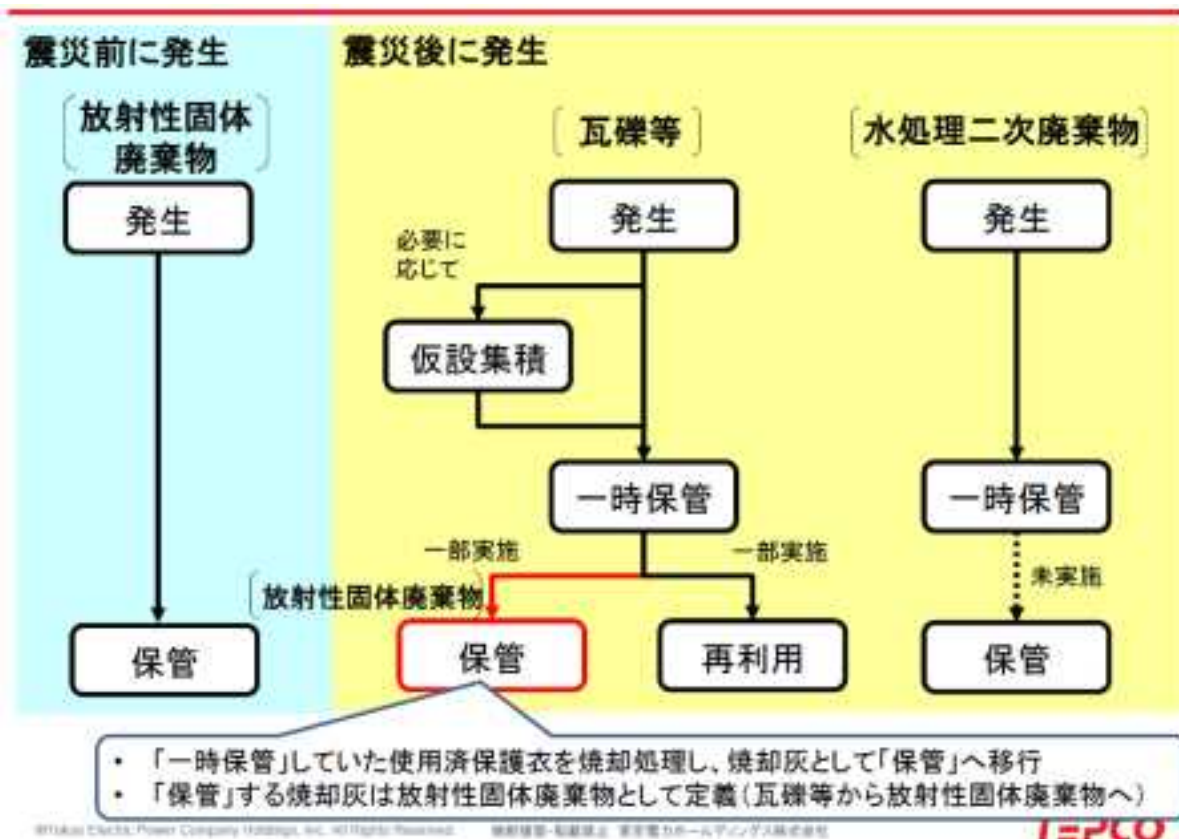


図 2.2-4 固体廃棄物の発生～保管までの流れ
(参考文献(3)p.2 より)

2.3 現在の屋外集積保管状況

平成 29 年 1 月時点でのがれき等保管場所⁽⁴⁾を、図 2.3-1 に示す。平成 27 年度「廃棄物の限定再利用に関する検討」報告書⁽¹⁾の図 2.2-1 に示した平成 28 年 1 月 31 日時点での保管場所⁽⁵⁾と比較すると、以下の点に差異が見られる。

- がれき類保管エリア予定地であった、エリア B の利用開始
- 使用済保護衣等保管エリアの追加
- 固体廃棄物貯蔵庫 9 棟の建設



図 2.3-1 1F 敷地内のがれき等保管場所（平成 29 年 1 月時点）
（参考文献(4)より）

参考文献(4)より、平成 28 年 1 月 31 日時点における各保管場所のがれき等の保管量および保管容量などの最新の情報を取得した。また、参考文献(4)の 1 年前の情報である、平成 27 年度報告書の表 2.2-1「がれき類・伐採木の保管状況」において示した同一エリアの保管量（平成 28 年 1 月 31 日）⁽⁵⁾と比較した。その結果を表 2.3-1 に示す。表 2.3-1 中で、エリア境界空間線量率および保管量は、前年度に対して更新があった場合のみ太字で表記している。

保管エリアについて平成 27 年度と異なる点としては、保管場所 B が容器収納(線量区分 1~30mSv/h)として予定されていたものが、屋外集積(線量区分 0.1mSv/h 以下)として使用開始

されたことと、使用済保護衣の保管が開始されたことが挙げられる。

前年度と比較すると、がれき類は 22,700m³ の増加となっているが、そのうちの 20,900m³ は屋外集積がれきである。一方で、シート養生や容器収納がれきは増加がないことから、新たに発生したがれきは、線量区分 30mSv/h 以上の高線量率のがれきと、線量区分 0.1mSv/h 以下のごく低線量率の（屋外集積）がれきに二極化されていることが言える。

また各エリア境界の空間線量率は、（保管場所 E を除き）全体的に低減している。時間経過による減衰の結果と考えられるが、空間線量率の低下に伴い発生するがれきの表面線量率も低下しているはずであり、多くが屋外集積がれき（線量区分 0.1mSv/h 以下）に区分される傾向が続くことが予想される。

表 2.3-1 がれき等の保管状況（平成 28 年 1 月 31 日時点）

分類				エリア境界空間 線量率(mSv/h)	保管量(m³)	前年度 増減(m³)	保管容量	
がれき類	線量区分(mSv/h)	保管場所	保管方法					
	0.1以下	B	屋外集積	0.02	2,800	2,800	5,300	
		C	屋外集積	0.01未満	52,900	-3,700	63,000	
		F	屋外集積	0.01未満	6,200	600	7,500	
		J	屋外集積	0.01	4,300	1,100	4,800	
		N	屋外集積	0.01未満	4,500	400	10,000	
		O	屋外集積	0.01未満	26,200	0	27,600	
		P	屋外集積	0.01	41,400	19,700	63,700	
		U	屋外集積	0.01未満	700	0	700	
		合計			139,000	20,900	181,200	
	0.1～1	D	シート養生	0.01未満	2,600	0	3,000	
		E	シート養生	0.03	12,000	4,900	16,000	
		P	シート養生	0.01	5,900	3,400	9,100	
		W	シート養生	0.05	12,700	-8,300	29,500	
		合計			33,200	0	57,300	
	1～30	L	覆土式一時保管施設	0.01未満	12,000	0	12,000	
		A	仮設保管設備	0.3	1,700	400	7,100	
		E	容器	0.02(増加)	300	0	1,600	
		F	容器	0.01未満	600	0	600	
		Q	容器	0.09	5,700	0	6,100	
		合計			20,300	400	27,700	
	30以上	固体廃棄物貯蔵庫			0.02	7,900	1,500	12,000
		合計				7,900	1,500	12,000
		合計				200,400	22,700	278,300
伐採木	区分	保管場所	保管方法			0		
	幹・根・枝・葉	H	屋外集積	0.01未満	14,700	0	19,900	
		I	屋外集積	0.01未満	0	-10,500	10,500	
		M	屋外集積	0.01未満	39,500	400	44,900	
		V	屋外集積	0.01	5,500	2,000	6,000	
		合計			59,700	-8,100	81,500	
	枝・葉	G	一時保管槽	0.01未満	8,500	1,200	13,100	
		T	一時保管槽	0.01未満	11,100	0	11,800	
		合計			19,600	1,200	24,900	
		合計				79,300	-6,900	105,700
保護衣			容器	0.03	64,700	64,700	71,200	

（保管量は参考文献(4)において、100m³を単位とし端数は四捨五入しているため、合計が一致しない場合がある。）

2.4 屋外集積がれきの物量についての推移見通し

東京電力の示した、がれき等保管量の今後の推移見通しを、図 2.4-1 に示す。参考文献(3)では、表面線量率 $5\mu\text{Sv/h}$ 未満のがれき等を $5\mu\sim 0.1\text{mSv/h}$ のがれき等と区別して扱っており、表面線量率 $5\mu\text{Sv/h}$ 未満のがれきに対して再利用（または再使用）を行うことが明言されている。

また参考文献(3)には、がれき等に対して以下の手段による減容を行うことが示されている。これにより、がれき全体の保管量は平成 39 年までに大幅に減少する見通しである。

- 雑固体焼却設備にて、使用済保護衣等を焼却
- 伐採木・がれき類中の可燃物等を焼却
- 金属・コンクリートを減容

一方で上述した表面線量率 $5\mu\text{Sv/h}$ 未満のがれき等の分量は増えているように見えるが、これは現時点でより高表面線量率の区分に含まれていたがれきが $5\mu\text{Sv/h}$ 未満のがれきとして計上されるためで、実際の分量は減少する。時間経過に伴う放射性核種の減衰などを考慮して表面線量率の分類を見直すことで、最終的に全てのがれき等を表面線量率 $5\mu\text{Sv/h}$ として分類できる見通しを示している。



図 2.4-1 がれき等保管量の推移見通し
(参考文献(3)別添 1-1 より一部抜粋して合成)

図 2.4-1 の平成 39 年度末の時点での表面線量率 $5\mu\text{Sv/h}$ 未満のがれきの保管量（計画）の詳細な数値については、参考文献(3)別添 1-2 に以下の記載がある。がれきの発生量は $199,000\text{m}^3$ であり、それらの一部は焼却され、 $1,000\text{m}^3$ の焼却灰として固体廃棄物貯蔵庫に保管される。残りは $177,000\text{m}^3$ であり（よって、焼却分は $13,000\text{m}^3$ ）、再利用対象として一時保管エリア C および P に保管されるというものである。

よって、限定再利用の対象となるがれき類の物量は、平成 39 年度末の時点で $177,000\text{m}^3$ となる見通しである。これらは可燃物を除去したのちの分量であるため、材質はコンクリートと金属であると推測されるが、その分量の比率は公表されていない。また、上記のがれきの再利用開始の時期および、再利用の用途については、具体的な計画はいまだに示されていない。

また、がれき等についての将来の保管の方針としては、図 2.4-2 に示すようにリスク低減のために固体廃棄物保管庫での保管へ移行し、図 2.3-1 に示したがれき等一時保管エリアは平成 40 年度を目途に解消するとのことである。ただし、がれき等一時保管エリア C および P のみ、再利用再使用対象保管エリアとして残存することが示されている。



図 2.4-2 再利用対象保管エリア
(参考文献(3)p.4 より)

2.5 放射性核種濃度及び核種組成比

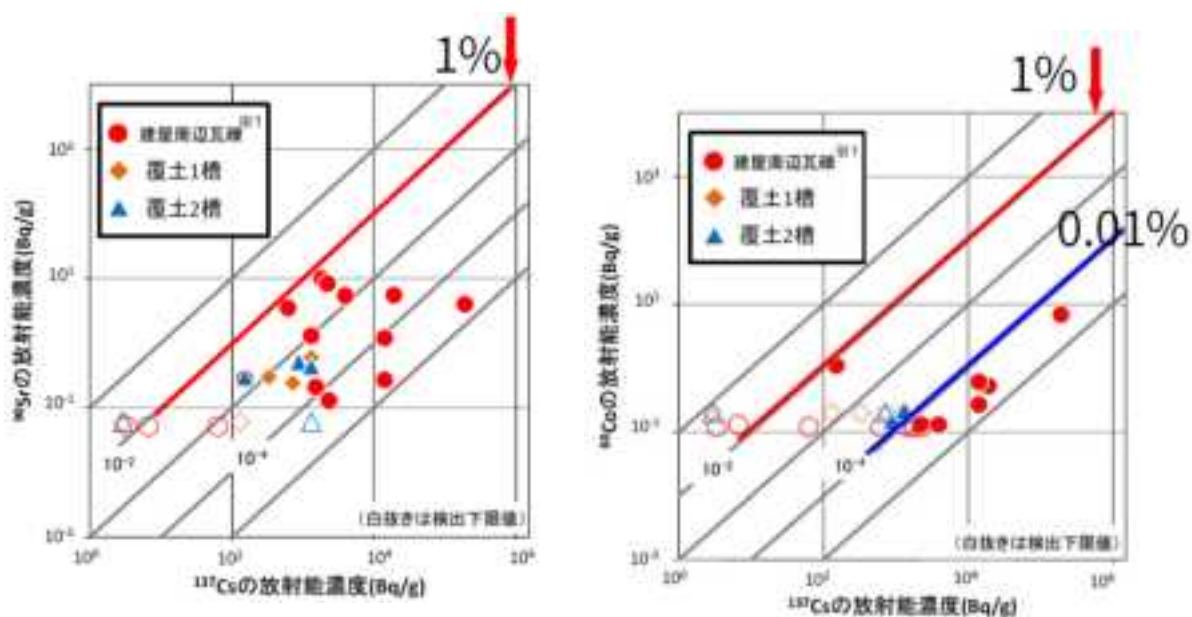
がれき中の放射性核種については、平成 27 年度の本報告書⁽¹⁾の 2.2.4 にて、1F 敷地内での既往の核種分析結果⁽⁶⁾から Cs-137 と他の放射性核種 (Sr-90, Co-60, H-3 など) の組成比を算出し、Cs-137 の濃度より他の放射性核種のがれき中濃度を見積もることを検討した。その結果得られた情報は、十分なものではなく、データの拡充が必要であることを記述した。これについては今年度も引き続き調査を行った。

平成 28 年 4 月 28 日に、IRID が公表した⁽⁶⁾建屋外 (建屋周辺及び覆土槽保管) がれきの Cs-137 に対する Sr-90 及び Co-60 の組成比を図 2.5-1 に示す。このとき覆土保管がれきの分析データが取得されたため、建屋周辺がれき (平成 26 年 1 月 30 日公表) と比較したグラフである。今回

取得された覆土がれきはこれまでに得られた核種組成比より小さな値となった。Sr-90 及び Co-60 とともに Cs-137 の濃度に増加するにつれて各核種の濃度が増加する傾向にあり、今後取得されるデータを追加してもこの傾向が変わらなければ核種組成比法による濃度算出が可能となる。なお、限定再利用対象の屋外集積がれきについては $5\mu\text{Sv/h}$ 以上のがれきを含めて未分析の状況が続いている。

これまでの分析結果を以下に整理する。建屋外がれきで検出下限を上回った核種は γ 線放出核種では Cs-137, Cs-134 及び Co-60 で、 β 線放出核種では Sr-90, H-3 及び C-14 である。このうち Sr-90 及び Co-60 は図 2.5-1 に示すように Cs-137 濃度との相関があり、核種組成比法が適用できる可能性がある。一方、図 2.5-2 に示すように、H-3 及び C-14 については Cs-137 濃度との相関がないが、どの濃度レベルでもほぼ一定の値を示すことから平均放射能濃度法の適用が可能と見込まれる。その濃度は H-3 の最大値で 2Bq/g であり、現行のクリアランスレベル 100Bq/g と比べて十分に低い値となっている。C-14 については、最大値は 3Bq/g となっており、クリアランスレベル 1Bq/g と比較して大きい値を示している。この値がただちに限定再利用において考慮すべき核種とする理由にはならないが、クリアランスレベルを算出した決定経路と限定再利用において評価すべき経路などを比較したうえで、C-14 が今後考慮すべき核種としてとりあげべきかを引き続き検討する必要がある。

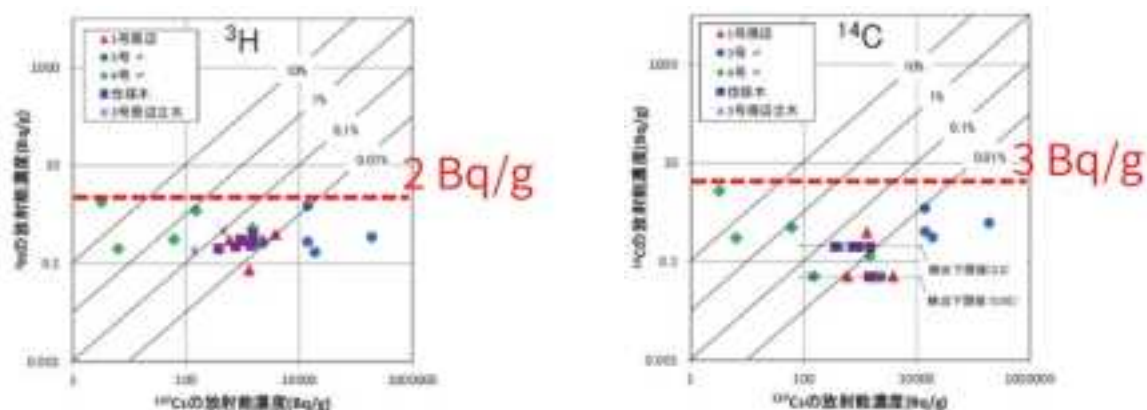
なお、参考文献(7)の p.11 にて、東京電力は上記と同様の分析結果に基づき核種組成比の相関性を導出することを試みているが、上記分析結果以上のデータは得られていないことが示されている。これについては、JAEA が東京電力と提携し、1F 敷地境界に建設中の放射性物質分析・研究施設⁽⁸⁾の運用により、データの拡充が見込まれる。



(a) Sr-90 の Cs-137 に対する組成比

(b) Co-60 の Cs-137 に対する組成比

図 2.5-1 建屋外（建屋周辺及び覆土槽）保管がれき中の核種組成比（Sr-90, Co-60）



(a) H-3 の Cs-137 に対する組成比

(b) C-14 の Cs-137 に対する組成比

図 2.5-2 建屋周辺がれき及び伐採木等中の核種組成比 (H-3, C-14)

2.6 1F 敷地内線量率分布の変化

図 2.6-1 に平成 29 年 1 月 11,12 日測定分の 1F 構内のサーベイマップ⁽⁹⁾を示す。このなかで、代表的な測定点について、平成 27 年度報告書に掲載した平成 27 年 11 月 10,11 日測定分⁽¹⁰⁾の値を比較して、その差異を加筆した。いくつかの測定点において上昇したが、9 割以上の点で変化なし、あるいは減少した。なお、本測定においては、電離箱サーベイメータが用いられており⁽¹¹⁾、代表的な電離箱の線量率測定範囲が $1\mu\text{Sv/h}$ 以上であることから、サーベイマップ上で $1\mu\text{Sv/h}$ と示されている測定値が、 $1\mu\text{Sv/h}$ 以下である可能性がある。



図 2.6-1 平成 29 年 1 月現在の構内サーベイマップと平成 27 年 11 月現在との比較
(参考文献(9)を加工)

2.7 本年度の検討で対象とする再利用用途と核種

本年度の検討では、コンクリートくずを道路材（路盤材、舗装材）および建設用コンクリートに再利用する際のめやす濃度の試算を行い、再利用による Cs-134, Cs-137, Sr-90 からの被ばく線量を評価しめやす濃度の妥当性を評価する。

道路材への再利用については、路盤材が東京電力により再利用用途として示されている。平成 27 年度の検討の中で、路盤材に加え舗装材についてもめやす濃度の試算と妥当性評価の一部が行われている。本年度は、平成 27 年度の検討に追加する形でめやす濃度の妥当性評価を行う。

建設用コンクリートへの再利用については、東京電力により再利用用途として提示はされていないものの、一般的な産業界においてコンクリートくずを建設用コンクリートに再利用している実績はあり⁽¹²⁾、今後 1F 敷地内においても建設用コンクリートに再利用される可能性が考えられる。そこで、本検討では 1F 敷地内で想定されうる建設用コンクリートとしての再利用方法を提示し、めやす濃度の試算とその妥当性の評価を行うことで、建設用コンクリートを新たなコンクリートくずの再利用用途として提案する。

めやす濃度の妥当性評価は、平成 27 年度の検討の中で対象とした Cs-134、Cs-137 のみではなく、Sr-90 も評価対象核種とする。これは 2.5 で示した通り、建屋外がれき中に Sr-90 が検出下限を超えて存在し、Cs-137 との核種組成比が最大 1% となるデータが示されていることから、本年度考慮すべき核種として追加した。Sr-90 は β 線放出核種であり、内部被ばくによる影響を考慮する必要がある一方、外部被ばくによる影響は小さいと考えられる。既往のクリアランスレベル評価⁽¹³⁾ では、多くの評価経路において Sr-90 による外部被ばくは影響なし（クリアランスレベルである $10 \mu\text{Sv/h}$ 相当濃度が $1.0\text{E}+10 \text{ Bq/kg}$ 以上）となっており、外部被ばくが最大となる経路（埋立作業）においても内部被ばくによる寄与より 5 桁低い値であった。このことから、Sr-90 による外部被ばくへの影響および敷地境界への影響は十分に小さいものとみなし、これらの評価時には Sr-90 は評価対象核種から除外する。

2.8 まとめと今後の課題

敷地内がれきの保管状況について、平成 27 年度に引き続き調査を行い、最新情報について整理した。

東京電力は現在敷地内の屋外で一時保管しているがれきを解消するために、表面線量率 $5\mu\text{Sv/h}$ 以上のがれきについては減容処理を行ったうえで、増設される固体廃棄物貯蔵庫に保管する計画を示した。また、 $5\mu\text{Sv/h}$ 以下の屋外集積がれきについては、平成 39 年度末までの予測発生量を 17 万 7000m^3 と示すとともに、その全量を再利用する方針を示した。再利用するまでの期間についてはエリア C 及び P にて屋外での一時保管を継続することも示された。しかしながら、コンクリートがれきについては路盤材への適用が想定されとしたが、金属についてはそのまま再利用できず、再利用に向けた処理方法について引き続き検討を進めていくとした。

がれきの核種濃度及び組成比について調査した結果、覆土式保管がれきの分析結果が追加され、建屋外がれきのデータと合わせたグラフが提示された。これまでの Cs-137 に対する Sr-90 の組成比の最大値 1% を下回っており、これまでの設定値に現時点で問題ないことを確認した。また、H-3 及び C-14 について、改めて分析データについて検討したところ、C-14 の平均放射能濃度がクリアランスレベル 1Bq/g を超え、 3Bq/g であったことから、今後限定再利用において考慮すべき核種かを、クリアランスレベル算出における被ばく経路と限定再利用において対象とする被ばく経路を比較するなどして、引き続き検討する必要があることを示した。

また、めやす濃度算出の根拠の一つとなっている 1F 敷地内のバックグラウンド線量率のばらつきの範囲にどの程度の変動があるかについて、平成 27 年 11 月と平成 29 年 1 月のサーベイ

マップを比較して、全体的に線量率が低下傾向にあることを確認するとともに、バックグラウンド線量率のばらつきの範囲として 1 μ Sv/h に問題がないことを確認した。

第 2 章の参考文献

- (1) JAEA 平成 27 年度「廃棄物の限定再利用に関する検討」報告書
- (2) 東京電力 特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会（第 4 回） 資料 2「福島第一原子力発電所 廃棄物関連設備および施設の新・増設について」
<https://www.nsr.go.jp/data/000167362.pdf>
- (3) 東京電力 特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会（第 5 回） 資料 1「福島第一原子力発電所 保管管理計画の概要と更新方法について」
https://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/youshikisya/tokutei_haiki/00000039.html
- (4) 経済産業省 廃炉・汚染水対策チーム会合事務局会議（第 39 回） 資料 3-4「ガレキ・伐採木等の管理状況（2017.1.31 時点）」
<http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2017/02/index.html>
- (5) 経済産業省 廃炉・汚染水対策チーム会合事務局会議（第 27 回） 資料 3-4「ガレキ・伐採木の管理状況（2016.1.31 時点）」
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2016/02_25_01.html
- (6) IRID および JAEA 「福島第一発電所構内で採取した建屋内瓦礫、立木、落葉及び土壌の放射能分析」
http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2015/03/20150326_2.pdf
- (7) 特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会（第 3 回） 資料 2-1「廃棄物の保管のための計測及び処理・処分のための分析について」
https://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/youshikisya/tokutei_haiki/00000025.html
- (8) 東京電力 特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会（第 3 回） 資料 2-2「放射性物質の分析・研究施設の整備について」
https://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/youshikisya/tokutei_haiki/00000025.html
- (9) 東京電力 福島第一原子力発電所サーベイマップ敷地全体（平成 29 年 1 月 11,12 日測定分）
<http://www.tepco.co.jp/decommision/news/data/sm/images/f1-sv2-20170125-j.pdf>
- (10) 東京電力 福島第一原子力発電所サーベイマップ敷地全体（平成 27 年 11 月 10,11 日測定分）
<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/surveymap/images/f1-sv2-20151126-j.pdf>
- (11) 東京電力 福島第一原子力発電所における作業環境の放射線計測と今後の課題、第 7 回放射線計測フォーラム福島、2016 年 12 月 13 日
- (12) 日本建設業連合会 「再生骨材コンクリートの普及促進に向けてー低炭素・循環型社会の構築への貢献ー」
<http://www.nikkenren.com/publication/pdf/182/saiseikotsuzaikonkuri-tonohukyusokushinnimukete2.pdf>
- (13) 原子力安全委員会 平成 11 年「主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて」

3. 限定再利用において 考慮すべき核種のめやす濃度の試算

3. 限定再利用において考慮すべき核種のめやす濃度の試算

3.1 はじめに

本検討は、平成 27 年度「廃棄物の限定再利用に関する検討」報告書⁽¹⁾に示した限定再利用の考え方にに基づき、福島第一原子力発電所（以下 1F）敷地内で汚染したがれきを再利用した際の用途別のめやす濃度について放射性セシウム（Cs-134 及び Cs-137）を対象に試算し、その妥当性を評価するものである。

本検討で評価対象とする限定再利用用途は、平成 27 年度の検討で評価を行った道路材への利用と、本年度新たに設定した建設用コンクリートへの利用とする。各用途についてめやす濃度を試算し（道路材は平成 27 年度に試算済み）、めやす濃度の妥当性を評価する。めやす濃度の妥当性評価は Cs-134、Cs-137 のみではなく、評価内容によって Sr-90 も評価対象核種とする。これは、1F 敷地内の原子炉あるいはタービン建屋の外で採取されたがれきにおいて Sr-90 が検出下限を超えて存在し、Cs-137 との核種組成比が最大 1%となるデータが示されていることから、本年度考慮すべき核種としてとりあげたものである。ただし Sr-90 はβ線放出核種であり、外部被ばくによる影響は小さいと考えられるので、作業員への外部被ばくの影響および敷地境界への影響の評価においては、Sr-90 による被ばく評価を行わない。

めやす濃度の妥当性の評価は、平成 27 年度の検討の中で実施した「作業員の追加の年間被ばく線量」の評価と「1F 敷地境界空間線量率への影響」評価に加え、本年度新たに設定した「1F 敷地内の地下水への核種漏えいの影響」評価により行う。道路材への再利用を行った際のめやす濃度の妥当性評価は、平成 27 年度の検討において「作業員の追加の年間被ばく線量」の外部被ばく線量の評価と「1F 敷地境界空間線量率への影響」評価は行われているので、新たに「作業員の追加の年間被ばく線量」の吸入による内部被ばく線量の評価および「1F 敷地内の地下水への核種漏えいの影響」の評価を行う。建設用コンクリートへ再利用を行った際のめやす濃度の妥当性評価は、「作業員の追加の年間被ばく線量」の評価、「1F 敷地境界空間線量率への影響」評価および「1F 敷地内の地下水への核種漏えいの影響」の評価を行う。

3.2 平成 27 年度の成果概要

平成 27 年度の検討では、1F 敷地内という全ての作業員に対して線量管理がなされた環境下において、放射能汚染を有する資機材を再利用する際に利用可能なめやす濃度の設定の考え方について検討を行った。

既存の再利用評価として、放射線による障害防止のための措置を必要としないレベルである 10μSv/y の線量のめやす値から算出されたクリアランスレベル以下の資機材については、用途を限定しないクリアランスが行われている。一方、現存被ばく状況下にある 1F 敷地内に保管されている汚染がれきを放射線管理下において限定的に再利用する計画が東京電力より示されている。しかし、クリアランスレベルを超える資機材の再利用はこれまで前例がなく、ICRP、IAEA などの国際機関においても放射能汚染を有する資機材の限定的な再利用による被ばく線量に関して参考レベルなどの値は示されていない。そこで平成 27 年度の検討では、汚染がれきの 1F 敷地内限定再利用にあたり、めやすとなる放射能濃度の算出の考え方を検討した。

1F 敷地内はすべての作業員に対して被ばく線量が管理されており、限定再利用が行われても線量限度を超えるおそれはないが、限定再利用された汚染がれきにより受ける被ばく線量が大きければ、本来の廃止措置に向けた作業に充てられる作業時間が減少することになる。したがって、1F 敷地内での限定再利用による追加被ばく線量を一定程度抑制する必要がある。

汚染のない資機材を使用する場合と比べて、放射性物質を有するがれきを再利用することに

よって、敷地内の空間線量率が上昇する。この上昇する空間線量率に起因する被ばく線量が、バックグラウンドレベルが比較的低いエリアにおいて、バックグラウンドによる被ばく線量を超えないことを限定再利用の必要最低条件とする。平成 27 年度の検討を行った時点での 1F 敷地内サーベイマップ⁽²⁾では最小値である $1\mu\text{Sv/h}$ が敷地内に広く分布していたことから、汚染がれきの再利用に伴う、一般的な評価シナリオでの作業者の位置における空間線量率がバックグラウンド空間線量率 $1\mu\text{Sv/h}$ を超えないという条件を設定し、この条件を満足する再生資材中のめやす濃度を算出した。

さらに、放射線防護における 1F 敷地内での限定再利用の正当性の判断のために、めやす濃度で 1F 敷地内での再利用が実施された場合に対し、「作業者の追加の年間被ばく線量」の評価と「1F 敷地境界空間線量率への影響」評価の 2 つを評価した。前者は、限定再利用により受ける追加被ばく線量が作業者の個人線量限度 20mSv/y (5 年で 100mSv から設定)に対して十分に低い値であることを確認するものである。ここで対象とする作業者とは、再利用開始後、再利用物から被ばくをする可能性がある作業者である。再利用に関わる作業をする作業者は、廃止措置に係わる作業者とは別にしていると想定し、再利用作業により被ばくをしても廃止措置作業に支障はでないので再利用に関わる作業者は評価対象から除外した。後者は、1F 敷地内での再利用による敷地境界における年間線量が、敷地境界との離隔距離と限定再利用可能な物量の現実的な条件の範囲においてその目標値 1mSv/y を満足できることについて確認するものである。

平成 27 年度の検討の中では、上記の考え方に従いコンクリートくず及び金属くずを道路材（舗装材、路盤材）、遮蔽用コンクリートブロック、遮蔽用鉄板に再利用した場合のめやす濃度の試算を行った（表 3.2-1）。また、めやす濃度で再利用を行った際の「作業者の追加の年間被ばく線量」の評価と「1F 敷地境界空間線量率への影響」の評価からめやす濃度の妥当性の確認を行った。試算の結果、めやす濃度はコンクリート道路の路盤材に利用した場合最大で $100,000\text{Bq/kg}$ となった。各利用用途において、再利用により作業者がうける追加被ばく線量は 1.3mSv/y となり作業者の個人線量限度 20mSv/y に対して十分に低い値であることを確認した。また、敷地境界における年間線量については、道路材に利用した場合、めやす濃度が最も高かったコンクリート道路の路盤材でも敷地境界から 25m の離隔を持てば目標値 1mSv/y を下回ることが確認できた。遮蔽用コンクリートブロックに再利用した場合は、敷地境界から 50m の離隔を持てば目標値 1mSv/y を下回ることが確認できた。

表 3.2-1 平成 27 年度の検討で試算しためやす濃度（ $1\mu\text{Sv/h}$ 相当核種濃度）

材質	再利用用途	用途	めやす濃度 (Bq/kg)	備考
コンクリート	アスファルト道路	路盤材 80cm 厚	13,000	舗装厚 5cm
		舗装材 20cm 厚	7,400	
	コンクリート道路	路盤材 80cm 厚	100,000	舗装厚 15cm
		舗装材 30cm 厚	8,100	
	コンクリート ブロック	遮蔽用	11,000	倉庫保管時
金属	鉄板	遮蔽用	7,000	倉庫保管時

3.3 めやす濃度の妥当性確認の考え方

平成 27 年度の検討において、めやす濃度の妥当性評価手法として「作業員への追加被ばく線量の評価」と「1F 敷地境界へ与える線量率寄与評価」を示した。両評価では Cs-134 と Cs-137 を評価対象核種として評価を行っている。

本年度は平成 27 年度に設定した妥当性評価手法に追加する形で、「1F 敷地内の地下水への核種漏えいの影響」の評価を行う。1F 敷地内で限定再利用を行った場合、降雨などにより再生資材から漏えいした核種が帯水層へ流出し、核種を含んだ地下水が海洋へ放出されることが考えられる。限定再利用により地下水中の核種濃度が上昇し、既存の排水基準を超過する可能性がある。そこでめやす濃度で限定再利用を行った場合の地下水中の核種濃度を評価し、地下水核種濃度からめやす濃度の妥当性の評価を行う。めやす濃度を正当化する地下水中の核種濃度の基準として 1F 敷地内の排水に対して設定している運用目標値⁽³⁾を用いる。

また、平成 27 年度の検討においては「作業員への追加被ばく線量の評価」として外部被ばくのみを評価していたが本年度は内部被ばくについても評価を行う。廃止措置作業により摩耗するような再利用用途では、発生した放射性核種を含む粉塵を吸入することにより作業員が内部被ばくをする可能性がある。

両評価においては Cs-134、Cs-137 のみではなく Sr-90 も評価対象核種とする。Sr-90 は 1F 敷地内で検出下限を超えて存在し、核種量として Cs-137 の核種濃度の 1%ほど存在することが確認されている。地下水での移行率もセシウムより高く、めやす濃度の妥当性に評価を与える可能性がある。ただし Sr-90 はベータ線放出核種であるので、限定再利用により想定される作業員への追加被ばく形態が外部被ばくのみの場合は、Sr-90 による被ばく評価を行わない。

めやす濃度設定の考え方のフローを図 3.3-1 に示す。

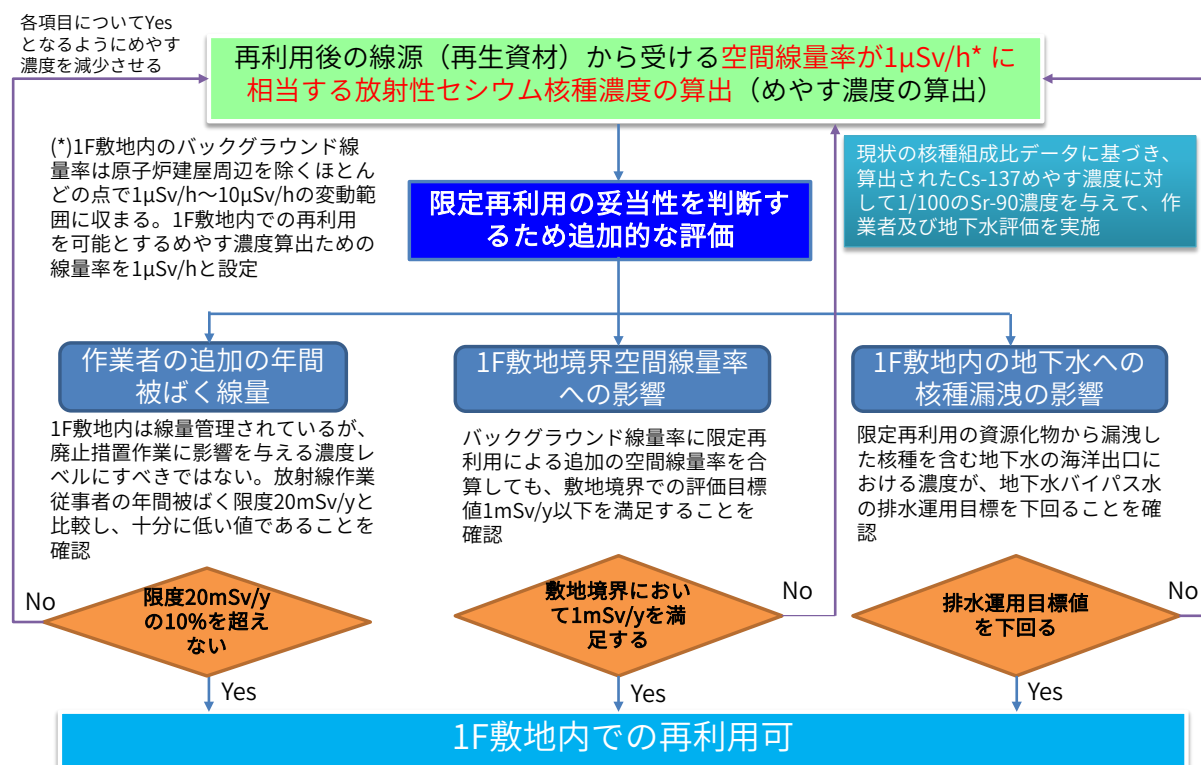


図 3.3-1 めやす濃度設定の考え方

3.4 コンクリートくずの道路材への再利用

平成 27 年度の検討の中でコンクリートくずを道路材へ再利用した際のめやす濃度の試算を行った。ここではめやす濃度の新たな妥当性評価として、粉塵吸入による内部被ばくに起因する「作業者の追加の年間被ばく線量」の評価と「1F 敷地内の地下水への核種漏えいの影響」の評価を行う。

3.4.1 粉塵吸入による内部被ばくに起因する「作業者の追加の年間被ばく線量」評価

コンクリートくずを道路表面の舗装材に再利用する場合、核種を含んだ舗装材が車輛の通行により摩耗し、核種を含んだ粉塵が舞い上がることが考えられる。その粉塵を作業者が吸入することにより内部被ばくをする可能性がある。そこでアスファルト道路の舗装材およびコンクリート道路の舗装材に再利用した際の、作業者の内部被ばく線量を評価する。道路材への再利用で最もめやす濃度が高い用途はコンクリート道路の路盤材であるが、路盤材は舗装材の下に敷設される部材であり摩耗により粉塵が巻き上がることは起こらないので評価対象から外す。対象核種は Cs-134, Cs-137 および β 線放出核種であり内部被ばくを考慮する必要がある Sr-90 とする。

(1) 計算条件

吸入による内部被ばく線量は、クリアランスレベル評価⁽⁴⁾に用いられた以下の式により算出する。

$$D_{inh,i}(t) = C_{w,i}(t) \cdot Cd_w \cdot Br_w \cdot t_w \cdot DF_{inh,i} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i t_i)}{\lambda_i t_i} \quad (3.3-1)$$

$D_{inh,i}(t)$	:	核種 i による吸入経路の内部被ばく線量(Sv/y)
$C_{w,i}(t)$	:	舗装材中の核種 i 濃度(Bq/kg)
Cd_w	:	作業時の空气中ダスト濃度(kg/m ³)
Br_w	:	作業者の呼吸量(m ³ /y)
t_w	:	年間作業時間(h/y)
$DF_{inh,i}$	:	核種 i の吸入経路による内部被ばく線量係数(Sv/Bq)
t_i	:	被ばく中の減衰期間(y)

作業時の空气中ダスト濃度は、既往の研究⁽⁵⁾より道路近傍の空气中アスファルト濃度 $2.8 \times 10^{-5} \text{ g/m}^3$ が示されているが、保守的にクリアランスレベル評価で用いられている埋立作業時のダスト濃度 $5 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3$ を採用した。

評価時期は、保守的に再利用開始直後(0 年目)とした。

舗装材中の核種濃度は表 3.2-1 で示した全セシウムのみやす濃度を基に設定する。セシウム存在比は平成 27 年度の検討と合わせ Cs-134:Cs-137 = 0.209:1 とし、この比から舗装材中の Cs-134, Cs-137 濃度を算出した。Sr-90 濃度は全セシウム濃度の 1/100 として算出した。舗装材中の核種濃度は表 3.4-1 に示す。

表 3.4-1 舗装材中の核種濃度

利用用途	Cs-134 (Bq/kg)	Cs-137 (Bq/kg)	Sr-90 (Bq/kg)
アスファルト道路の舗装材	1,300	6,100	74
コンクリート道路の舗装材	1,400	6,700	81

(2) 作業者の追加被ばく線量への影響

吸入による内部被ばく線量の計算結果を、平成 27 年度に求めた外部被ばく線量とともに表 3.4-2 に示す。内部被ばく線量は、各核種からの被ばく線量およびそれらを足し合わせた全内部被ばく線量を示す。全被ばく線量は、外部被ばく線量と内部被ばく線量を合計した、道路上作業者が 1 年間に受けると想定される線量である。

コンクリートくずをアスファルト道路の舗装材およびコンクリート道路の舗装材に再利用した際の、作業者の内部被ばく線量はそれぞれ 8.4E-05 mSv/y、9.1E-05 mSv/y であった。試算の結果より、再利用物からの作業者の追加の年間被ばく線量は、平成 27 年に評価した外部被ばく線量 (1.3 mSv/y) と内部被ばく線量の両方を考慮しても、放射線作業従事者の年間被ばく線量限度である 20mSv/y に対して十分に小さい値であることが確認された。

表 3.4-2 吸入による内部被ばく線量

利用用途	評価対象	内部被ばく線量(mSv/y)				外部被ばく 線量(mSv/y)	全被ばく 線量(mSv/y)
		Cs-134	Cs-137	Sr-90	3 核種合計		
アスファルト 道路の舗装材	道路上 作業者	1.6E-05	4.6E-05	2.2E-05	8.4E-05	1.3	1.3
コンクリート 道路の舗装材		1.7E-05	5.0E-05	2.4E-05	9.1E-05	1.3	1.3

3.4.2 「1F 敷地内の地下水への核種漏えいの影響」の評価

1F 敷地内で限定再利用を行った場合、降雨などにより再生資材から漏えいした核種が帯水層へ流出し、核種を含んだ地下水が海洋へ放出されることが考えられる。限定再利用により地下水中の核種濃度が上昇すると、既存の排水基準を超過する可能性がある。そこでめやす濃度で限定再利用を行った場合の地下水中の核種濃度を評価し、地下水中核種濃度からめやす濃度の妥当性の評価を行う。帯水層中の核種の移行は、分配平衡を仮定した 1 次元移行解析をクリアランスレベル評価コード PASCLR2^⑥を用いてを行う。路盤材からの核種流出の評価は、再生資材へのセシウム及びストロンチウムの収着を考慮した分配係数モデルを用いて行う。分配係数モデルでは、再生資材からのセシウム及びストロンチウムの溶出が分配平衡に基づいて起こると仮定し、漏えい率は以下の式により算出される。

$$\eta = \frac{P}{H_w \cdot (\varepsilon_w + \rho_w \cdot Kd_w)} \quad (3.3-2)$$

η : 路盤材からの漏えい率 (1/y)
 P : 路盤材への浸透水量 (m/y)

H_w	:	路盤材の長さ (m)
ε_w	:	路盤材の空隙率 (-)
ρ_w	:	路盤材のかさ密度 (g/cm ³)
Kd_w	:	再生資材の分配係数 (ml/g)

対象核種は Cs-134, Cs-137 およびベータ線放出核種で土壌中の移行性が高い Sr-90 とする。

めやす濃度を正当化する地下水中の核種濃度の基準として運用目標値⁽³⁾を用いる。運用目標値とは東京電力が 1F 敷地内の排水に対して設定している排水基準である。1F 敷地内の地下水バイパスの排水においては、告示濃度限度に対して約 10% の裕度を持って設定された排水許容限度が示されている。しかし実際の排水にあたっては、漁業関係者等の意見を考慮して設定された運用目標値が用いられている。1F 敷地内では核種濃度をモニタリングし、運用目標以下の場合のみ排水を行っている。各核種の運用目標値は Cs-134 : 1Bq/L, Cs-137 : 1Bq/L, Sr-90 : 5Bq/L である。めやす濃度で限定再利用を行った際の海洋出口における地下水中核種濃度が運用目標以下となっていることをもって、めやす濃度の妥当性を確認する。

(1) シナリオ

完成した道路に降雨が浸透しコンクリート道路の路盤材から核種が漏えいして帯水層に流入することを想定する。帯水層に流入した核種は、帯水層中を移行し海洋側へ移行していく。評価は平成 27 年度の検討でめやす濃度が最も高かったコンクリート道路の路盤材（表 3.2-1）に再利用した場合を評価することで、道路材への評価を代表する。

評価は保守的に降雨が浸透しやすい状態を想定し、土壌への浸透を想定して浸透水量を設定した。また、より実際の再利用環境に近い評価として、コンクリートへの浸透を想定して浸透水量を設定した場合の評価も行った。

(2) 評価体系

評価体系を図 3.4-1 に示す。また、パラメータ設定を表 3.4-3 に示す。道路は海に向かう方向に長さ 100m を設定し、1 次元移行解析において最も保守的になるようにしている。

評価では海洋へ放出される時点での地下水中核種濃度が運用目標以下となるための条件を探るため、路盤材下流端からの距離ごとの地下水中核種濃度を計算し、海岸からどれだけの離隔を持って再利用を行えば運用目標以下となるかを確認する。

実際の道路では路盤材の上に舗装材が敷設され、路盤材と帯水層の間には遮水性が高い層が存在するが、保守的にこれらを無視した設定とした。

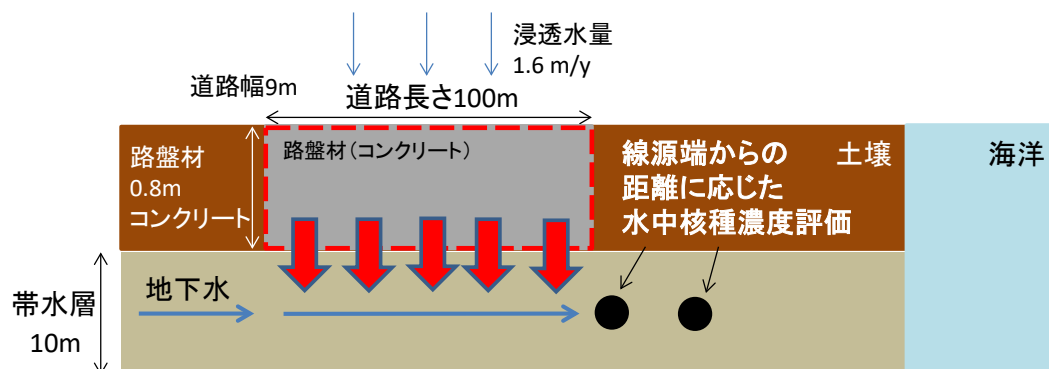


図 3.4-1 路盤材へ再利用した際の地下水移行評価体系

表 3.4-3 路盤材に再利用した際の地下水中核種濃度評価のパラメータ設定

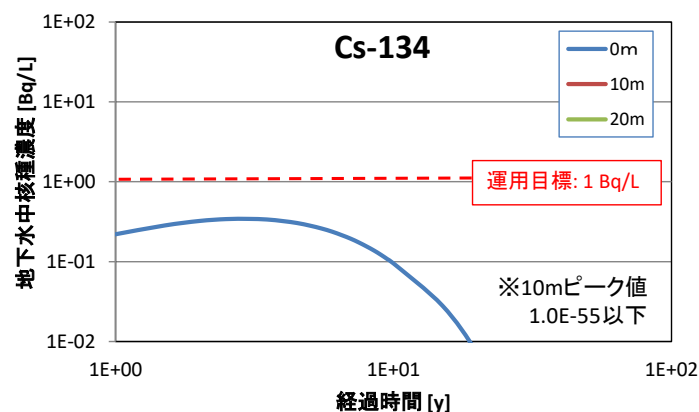
No	名称	単位	選定値	選定理由
1	路盤材中セシウム濃度 (Cs-134+Cs-137)	Bq/kg	100,000	平成 27 年度の検討の中で試算したコンクリートくずをコンクリート道路の路盤材に再利用した際のめやす濃度。
2	路盤材中 Sr-90 濃度	Bq/kg	1,000	1F 敷地内の屋外集積がれき中核種濃度測定により求めた、Cs-137 に対する Sr-90 の核種濃度率 1% にセシウムのめやす濃度をかけることで設定。
3	路盤材のかさ密度	g/cm ³	2.0	平成 27 年度の検討と同値
4	路盤材の間隙率	—	0.1	路盤材の空隙率を 10%、絶乾密度を 2.25g/cm ³ として算出した既往評価 ⁽⁷⁾ の値を設定
5	Cs のコンクリートに対する分配係数	ml/g	2.5	セメントモルタルに対する分配係数 ⁽⁸⁾
6	Sr のコンクリートに対する分配係数	ml/g	1.25	セメントモルタルに対する分配係数 ⁽⁸⁾
7	線源厚さ	m	0.8	平成 27 年度の検討と同値
8	浸透数量 (土壌への浸透)	m/y	0.4	福島県浜通りの地下水流出量 ⁽⁹⁾ である約 1mm/day を年換算して丸めた値
9	浸透数量 (コンクリートへの浸透)	m/y	7.2E-03	大気圧下におけるコンクリートへの透水実験 ⁽¹⁰⁾ より求めた透水係数の値を浸透水量として設定
10	帯水層土壌真密度	g/cm ³	2.6	「土質工学ハンドブック」(土質工学会編、1982 年)
11	帯水層土壌の間隙率	—	0.41	1F 敷地内の地下貯水槽から漏えいした汚染水の地下水移行評価 ⁽¹¹⁾ において設定されている値
12	Cs の帯水層土壌に対する分配係数	ml/g	270	IAEA TRS No.364 (砂)
13	Sr の帯水層土壌に対する分配係数	ml/g	13	IAEA TRS No.364 (砂)
14	地下水流速	m/y	36.5	「1F 敷地内の地下貯水槽から漏えいした汚染水の地下水移行評価 ⁽¹¹⁾ 」において、東京電量から入手した 1F 敷地内の地下水実流速として示された値約 0.1m/d から算出。
15	帯水層厚さ	m	10	「1F 敷地内の地下貯水槽から漏えいした汚染水の地下水移行評価 ⁽¹¹⁾ 」において、1F 敷地内の地下貯水槽付近の帯水層厚さとして示されている値を設定。

(3) 計算結果

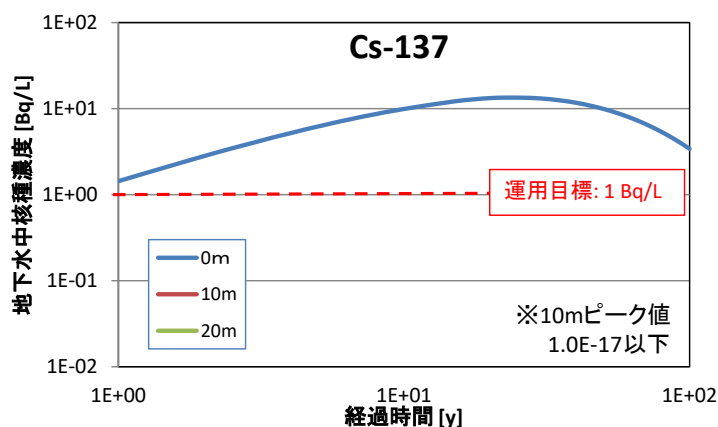
① 土壌への浸透を想定した場合

土壌への浸透を想定して地下水中核種濃度を評価した結果を図 3.4-2 に示す。

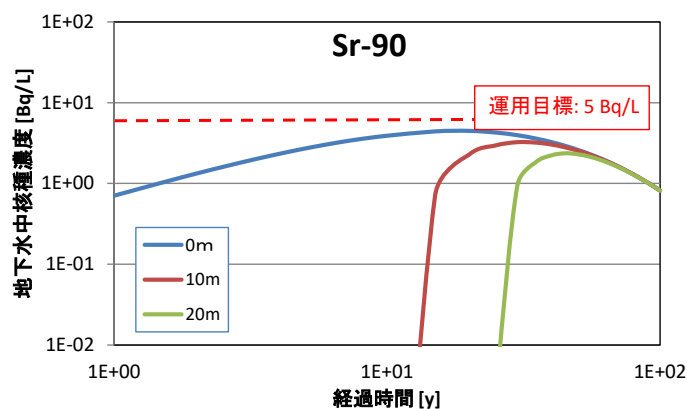
Cs-134、Sr-90 は路盤材端から 0m の位置ですでに運用目標以下の濃度となった。Cs-137 は路盤材端から 0m の位置では運用目標を超えたが、10m 離れた地点においては運用目標以下となった。



(a) Cs-134 の地下水中核種濃度 (※10m, 20m 地点の地下水中核種濃度はグラフ範囲以下)



(b) Cs-137 の地下水中核種濃度 (※10m, 20m 地点の地下水中核種濃度はグラフ範囲以下)

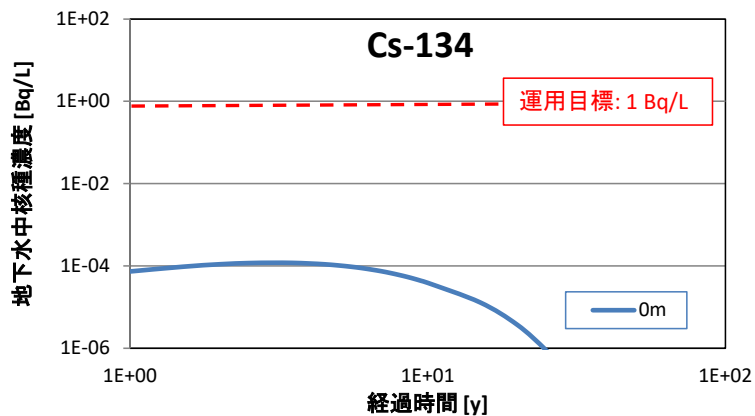


(c) Sr-90 の地下水中核種濃度

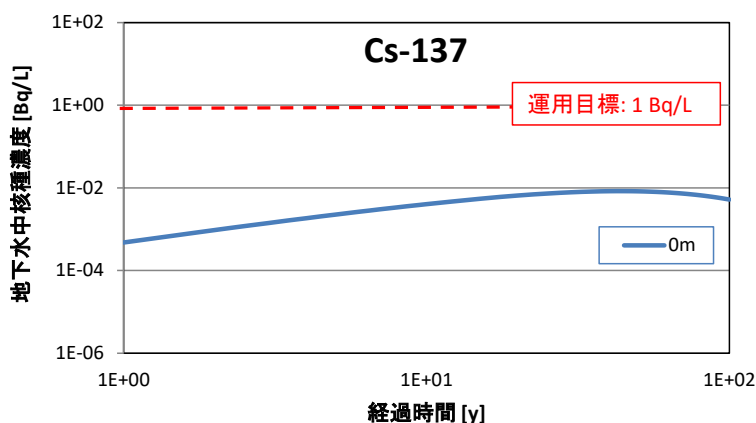
図 3.4-2 道路端からの距離及び再利用開始からの期間に対する地下水中核種濃度
(軸は対数軸、凡例の 0m, 10m, 20m は道路端からの距離)

②コンクリートへの浸透を想定した場合

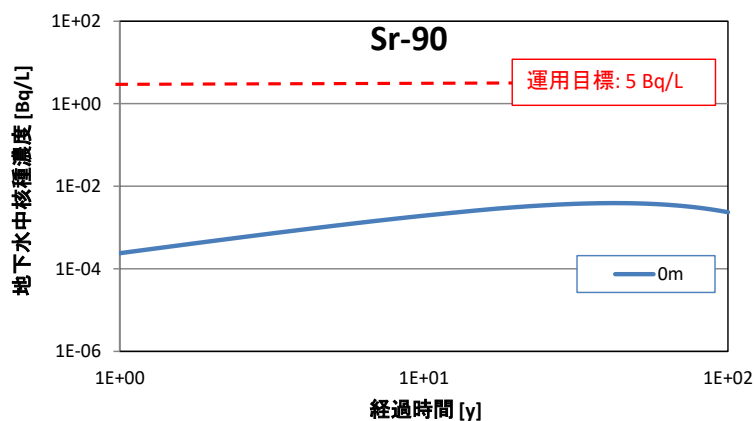
より実際の再利用環境に近い評価として、コンクリートへの浸透を想定して地下水中核種濃度を評価した結果を図 3.4-3 に示す。3 核種とも路盤材端から 0m の位置ですでに運用目標を大きく下回った。



(a) Cs-134 の地下水中核種濃度



(b) Cs-137 の地下水中核種濃度



(c) Sr-90 の地下水中核種濃度

図 3.4-3 道路端からの距離及び再利用開始からの期間に対する地下水中核種濃度
(軸は対数軸、凡例の 0m は道路端からの距離)

(4) 地下水への核種漏えいの影響

(3)の結果より、保守的な評価においても海岸から10m以上の離隔を持って道路を敷設すれば、海洋出口における地下水中核種濃度は運用目標以下となることが確認できた。なお本評価では、モニタリングを前提として設定された運用目標値をめやす濃度の妥当性評価の基準に用いている。本評価の地下水中核種濃度はあくまでも解析コードによる計算値なので、限定再利用による地下水中核種濃度の評価におけるモニタリングの位置づけについて今後検討が必要になる可能性がある。

3.5 コンクリートくずの建設用コンクリートへの再利用

本検討では、新たにコンクリートくずを建設用コンクリートに再利用することを想定する。現時点で東京電力が示すコンクリートくずの再利用用途として建設用コンクリートは示されていないが、一般的な産業界においてコンクリートくずを建設用コンクリートに再利用している実績はあり⁽¹²⁾、今後1F敷地内においても建設用コンクリートに再利用される可能性がある。そこで、本検討では1F敷地内で想定されうる建設用コンクリートとしての再利用方法を提示し、めやす濃度の試算を行うことで、建設用コンクリートを新たなコンクリートくずの再利用用途として提案する。

コンクリートくずから取り出した骨材を用いてコンクリートを作る場合、品質によりHクラス、Mクラス、Lクラスという3つのクラス分けが行われる⁽¹²⁾。最も品質が高いHクラスのコンクリートの作成には、高度な処理を要し、コスト的にも負担が大きくなる⁽¹²⁾。そこで、1F敷地内における再利用では、処理が比較的簡単で上部構造部以外であれば利用可能なMクラスのコンクリートを作成することを想定する。Mクラスのコンクリートは普通コンクリートに比べてやや品質が低下するが、建造物への再利用実績もあり建設用コンクリートとして利用可能である。Mクラスコンクリートは主に地下構造部への利用が行われており、具体的な再利用用途としては基礎梁、基礎スラブ、場所打ち杭等に用いられている⁽¹²⁾。

そこで本検討では、コンクリートくずを再利用して作られたMクラスの建設用コンクリートを建造物の基礎部へ再利用することを想定し、めやす濃度を試算する。めやす濃度の妥当性を「作業者の追加の年間被ばく線量」の評価と「1F敷地境界空間線量率への影響」評価に加え、本年度新たに設定した「1F敷地内の地下水への核種漏えいの影響」評価により行う。

3.5.1 めやす濃度の試算

(1) シナリオ

コンクリートくずを建造物の基礎部へ再利用することを想定する。建造物完成後に基礎部直上階の作業空間における空間線量率への寄与が $1\mu\text{Sv/h}$ を超えない核種濃度を試算する。

(2) 評価体系

基礎部の体系は、現在1F内に建設中の固体廃棄物貯蔵庫第9棟⁽¹³⁾の基礎部を参考に設定する。固体廃棄物貯蔵庫第9棟の断面図を図3.5-1に示す。建造物の基礎部にあたる構造は、基礎梁、基礎スラブ等複数あるがそれら全てに再生資材を利用したとする。固体廃棄物貯蔵庫第9棟の断面図から想定した基礎部の断面図を図3.5-2に示す。以後、基礎部に用いる再生資材を「基礎材」と呼ぶ。

固体廃棄物貯蔵庫第9棟を参考に設定した評価体系を図3.5-3に示す。実際の基礎部は複数の構造により構成されているが、保守的に基礎部が全て再生骨材由来の基礎材で建設されているものと仮定した。基礎部の上には床スラブを設定する。床スラブは床構造を作り、面に垂直

な荷重を支える板である。床スラブは基礎構造ではないので、再生コンクリートは用いない。倉庫のような大きな積載荷重がある場合、一般的に床スラブ厚さは 20～30cm を要する⁽¹⁴⁾。上部構造部の体系も固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟を参考にし、作業空間となる地下 2 階部を模した体系を設定した。実際の貯蔵庫内には柱や梁があるが、評価上これらは無視した。

基礎材に用いる再生コンクリートは、コンクリートくずから取り出した骨材を汚染されていないセメントに混ぜることで作られる。再利用の際の希釈効果を反映するため、線源中に含まれる再生資源使用率を計算結果に掛ける。基礎材中の使用比率は材質中に含まれる骨材（粗骨材・細骨材）比率である。M クラスのコンクリートでは粗骨材・細骨材ともに再生骨材を用いることが可能⁽¹⁵⁾なので、両骨材に再利用することを想定する。参考文献中⁽¹⁶⁾に示された空気・水・粗骨材・細骨材・セメントの容積比とそれぞれの密度から計算し、再生資源使用率を 80% とした（表 3.5-1）。

パラメータ設定を表 3.5-2 に示す。

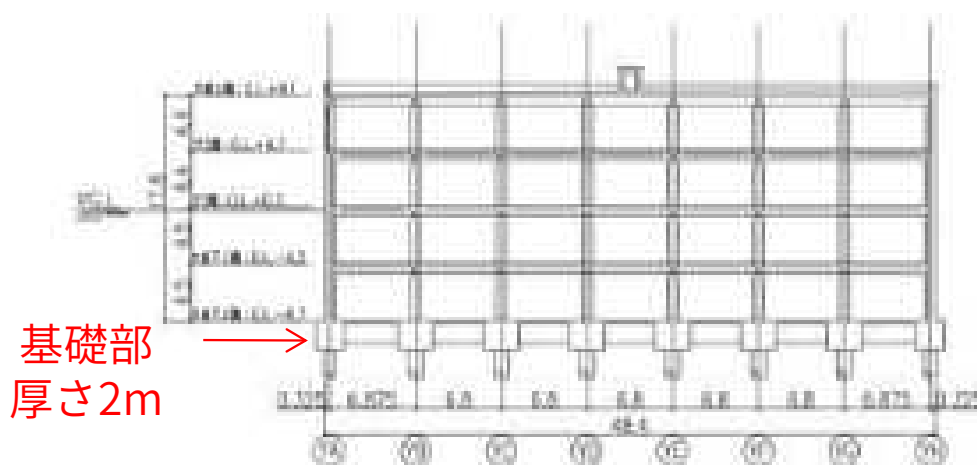


図 3.5-1 固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟の断面図

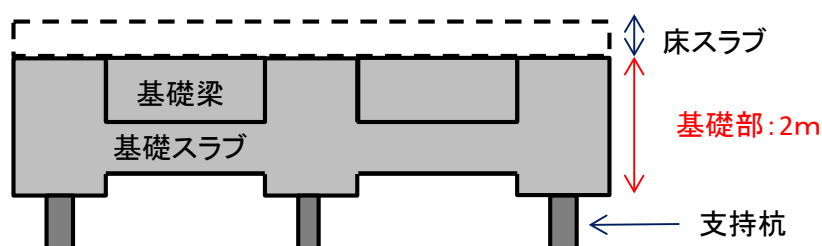


図 3.5-2 固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟の断面図から想定した基礎部断面図

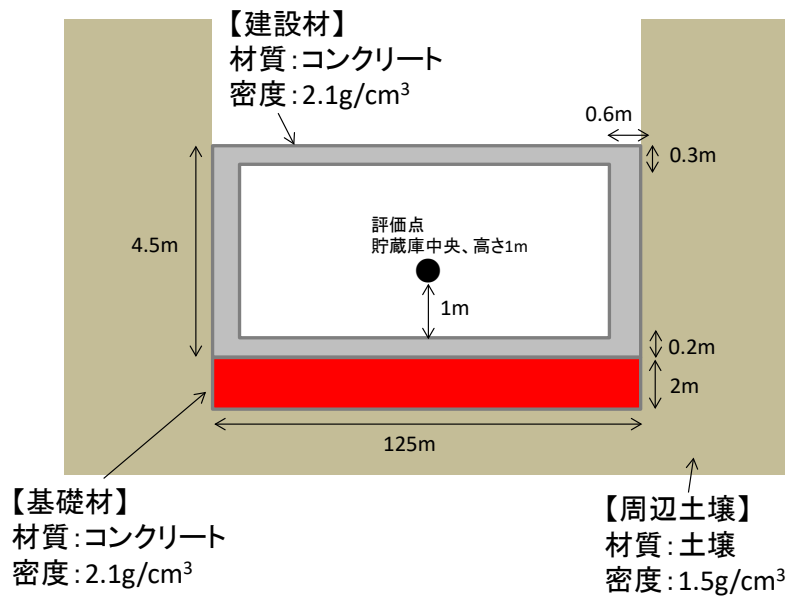


図 3.5-3 基礎部への利用時の評価体系

表 3.5-1 コンクリート骨材比率

	容積比(%)	密度(g/cm ³)	質量比(%)
空気	5	0.00	0
水	15	1.00	6
セメント	10	3.15	14
細骨材	30	2.55	33
粗骨材	40	2.70	47
骨材和	70		80
総和	100		100

表 3.5-2 基礎材の評価パラメータ

No	名称	単位	選定値	選定理由
1	線源長さ	m	125	固体廃棄物貯蔵庫第9棟 ⁽¹³⁾ の長さ
2	線源幅	m	48	固体廃棄物貯蔵庫第9棟 ⁽¹³⁾ の幅
3	線源厚さ	m	2	固体廃棄物貯蔵庫第9棟 ⁽¹³⁾ の断面図より推定
4	床スラブ厚さ	m	0.2	倉庫のような重い積載荷重が作用する床スラブの一般的な厚さ 0.2～0.3m ⁽¹⁴⁾ より保守的に選出
5	基礎材密度	g/cm ³	2.1	セメントモルタルの密度 ⁽⁸⁾ より設定
6	建設材密度	g/cm ³	2.1	セメントモルタルの密度 ⁽⁸⁾ より設定
7	基礎材中骨材比率	-	0.8	詳細は表 3.5-1 に示す
8	周辺土壌密度	g/cm ³	1.5	既往評価 ⁽⁷⁾ に合わせた
9	壁厚さ	m	0.3	固体廃棄物貯蔵庫第9棟 ⁽¹³⁾ の壁厚さ
10	天井厚さ	m	0.6	固体廃棄物貯蔵庫第9棟 ⁽¹³⁾ の壁厚さ

(3) めやす濃度

(a) 計算方法

めやす濃度の計算方法は平成 27 年度の検討において示したが再掲する。

放射性核種は Cs-134 および Cs-137 のみと仮定し、放出される γ 線を評価の対象とする。なお、Cs-137 は Ba-137m を経由した場合のみ γ 線を放出するが、その確率は 84.8%を用いる。

めやす濃度は、放射性 Cs の外部被ばく線量換算係数 (Cs-134 と Cs-137 が合わせて 1Bq/kg ある場合の実効線量) の逆数より算出する。建設用コンクリートへ再利用した際の外部被ばく線量換算係数は、モンテカルロ三次元輸送計算コード MCNP5⁽¹⁷⁾を用いて算出する。放射性 Cs の外部被ばく線量換算係数は、Cs-134 の外部被ばく線量換算係数 (Cs-134 が 1Bq/kg ある場合の実効線量) と、Cs-137 の外部被ばく線量換算係数 (Cs-137 が 1Bq/kg ある場合の実効線量) をそれぞれ算出し、以下の方法で換算する。

Cs-134 と Cs-137 の核種濃度比は、事故発生当時 (平成 23 年 3 月時点) でおおよそ 1:1 であったと仮定する。

$$C_{134}(0) = C_{137}(0) \quad (3.4-1)$$

$C_{134}(0)$: 事故直後の、Cs-134 の核種濃度

$C_{137}(0)$: 事故直後の、Cs-137 の核種濃度

事故発生から時間 t 経過後の核種濃度は以下で得られる。

$$C_{134}(t) = C_{134}(0) \times 2^{-t/T_{134}} \quad (3.4-2)$$

$$C_{137}(t) = C_{137}(0) \times 2^{-t/T_{137}} \quad (3.4-3)$$

$C_{134}(t)$: 事故発生から時間 t 経過後の、Cs-134 の核種濃度

$C_{137}(t)$: 事故発生から時間 t 経過後の、Cs-137 の核種濃度

T_{134} : Cs-134 の半減期(30.0yr)

T_{137} : Cs-137 の半減期(2.06yr)

本検討では平成 27 年度の検討に合わせて事故発生から 5 年後 (平成 28 年 3 月時点) を想定する。5 年間(5.0yr)経過時の核種濃度比は、以下の通り算出される。

$$C_{134}(5.0\text{yr}): C_{137}(5.0\text{yr}) = 0.186:0.891 = 0.209:1 \quad (3.4-4)$$

これを用いて、放射性 Cs の外部被ばく線量換算係数は、Cs-134 および Cs-137 の外部被ばく線量換算係数から、以下のように換算する。

$$\begin{aligned} D_{\text{Cs}} &= \frac{D_{134} \times C_{\text{Cs}}(5.0\text{yr}) + D_{137} \times C_{137}(5.0\text{yr})}{C_{134}(5.0\text{yr}) + C_{137}(5.0\text{yr})} \\ &= \frac{D_{134} \times 0.209 + D_{137} \times 1}{0.209 + 1} \end{aligned} \quad (3.4-5)$$

D_{Cs} : 放射性 Cs の外部被ばく線量換算係数
 D_{134} : Cs-134 の外部被ばく線量換算係数
 D_{137} : Cs-137 の外部被ばく線量換算係数

(b) 計算結果

(2) で示した条件に基づき、Cs-134 および Cs-137 について、外部被ばく線量換算係数を計算した。計算結果は Cs-134 のみの場合、Cs-137 のみの場合、Cs-134 と Cs-137 の合計の場合の外部被ばく線量換算係数を、表 3.5-3 に示す。

表 3.5-3 基礎材への再利用における外部被ばく線量換算係数

核種	外部被ばく線量換算係数 ($\mu\text{Sv/h per Bq/kg}$)
Cs-134	1.4E-05
Cs-137	4.5E-06
合計	6.1E-06

外部被ばく線量換算係数を用いて、基礎材への再利用におけるめやす濃度（空間線量率への寄与が $1\mu\text{Sv/h}$ を超えない核種濃度）を算出する。

$$\frac{1\mu\text{Sv/h}}{6.1 \times 10^{-6} \mu\text{Sv/h per Bq/kg}} = 1.6 \times 10^5 \text{ Bq/kg}$$

よってその数値は、160,000 Bq/kg である。

このめやす濃度は遮蔽として 20cm の床スラブを考慮した値であり、道路材への再利用において遮蔽として 15cm の舗装材を考慮した路盤材のめやす濃度である 100,000 Bq/kg より高い値となった。

3.5.2 「作業者の追加の年間被ばく線量」の評価

(1) 限定再利用における作業者

限定再利用における作業者の考え方は平成 27 年度の検討の中で示したが再掲する。

1F 敷地内はすべての作業者に対して被ばく線量が管理されており、限定再利用が行われても線量限度を超えるおそれはないが、限定再利用された汚染がれきにより受ける被ばく線量が大きければ、本来の廃止措置に向けた作業に充てられる作業時間が減少するため、1F 敷地内での限定再利用による追加被ばく線量を一定程度抑制する必要がある。

限定再利用による敷地内作業者の被ばくは、資源化作業による被ばく、再生資源の加工および設置作業による被ばく、廃止措置に向けた作業中に再生資源から受ける追加被ばくの 3 種類が想定される（図 3.5-4）。そのうち、資源化作業および再利用資源の設置・加工等の作業によって生じる被ばくは、限定再利用に関する作業に従事する作業者に限定されるため、廃止措置に向けた作業へ影響を与えることはない。よって評価対象となる作業者は、廃止措置に向けた作業に従事する作業者と、限定再利用が行われることにより追加被ばくを受ける作業者である。限定再利用時の作業者の被ばくシナリオは、廃止措置に向けた作業中に再生資源から受ける被ばくのうち、作業者が最も多くの被ばくを受けると考えられる状況に基づいて設定する。

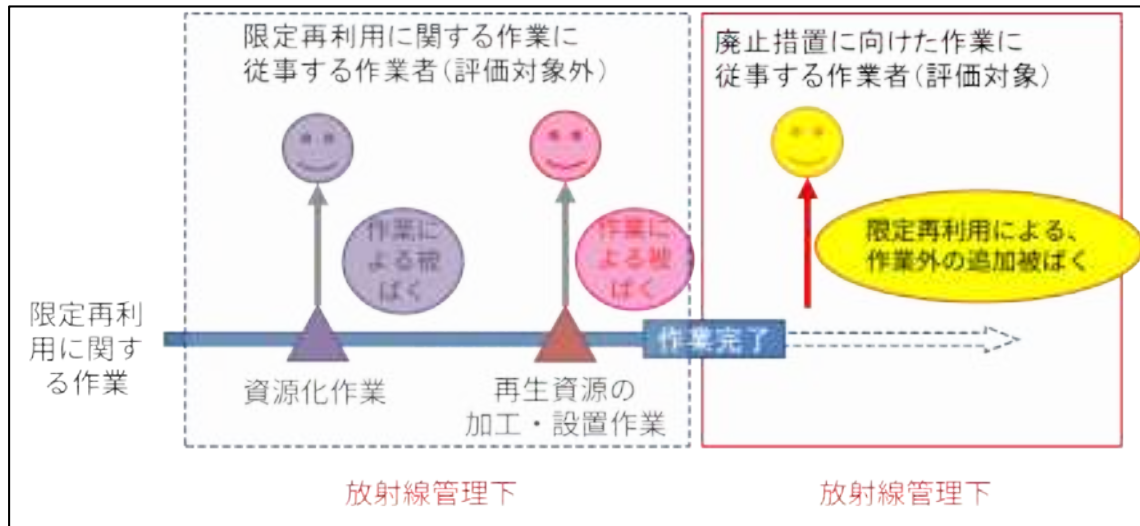


図 3.5-4 限定再利用における作業者

（２）基礎材に再利用した際の「作業者の追加の年間被ばく線量」

基礎材に再生コンクリートを利用した建造物の中で作業する作業者に対する、再利用による追加の年間被ばく線量を評価する。

対象とする作業者は、貯蔵庫完成後に基礎直上階である地下２階で作業をする作業者とする。作業者は再生コンクリートを利用した基礎部から外部被ばくを受ける。評価対象とする核種は、Cs-134 と Cs-137 とする。基礎部は作業空間に露出していないので、外部被ばくのみを評価することとし、内部被ばくに寄与する Sr-90 は評価の対象外とした。作業内容は、廃棄物の運搬・配置作業を想定する。評価点は図 3.5-3 と同様とし、遮蔽は考慮しない。年間作業時間は、1,430h/y とした。これは入退域管理に割かれる時間を考慮し、1F 敷地内作業者の１日当たりの作業時間を平均 5.5 時間、また、週 2 日の休業日を想定し 1 年あたりの勤務日数を 260 日とした設定に基づくものである。

上記条件のもと外部被ばくによる年間被ばく線量を算出する。本評価では基礎材の上に非汚染コンクリートで作られた床スラブが設置されるので、想定する作業内容において作業者は吸入および直接経口、皮膚への付着による被ばくは想定しえないとして評価しない。

年間被ばく線量の計算結果は、1.3 mSv/y となった。1.4 mSv/y を下回るのは、被ばく期間である 1 年間の放射性崩壊による放射能の減衰を考慮しているためである。

（３）作業者への追加被ばく線量の影響

（２）の結果より、コンクリートくずを固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟と同型施設の基礎材に使った場合の作業者への追加被ばく線量は 1.3 mSv/y であり、作業者の個人線量限度 20mSv/y に対して 7%未満であった。これは十分に低い値と見ることができ、空間線量率への寄与が 1μSv/h を超えないように算出しためやす濃度が、作業者の年間追加被ばく線量の観点でも抑制されていることが確認できた。

3.5.3 「1F 敷地境界空間線量率への影響」の評価

敷地境界における空間線量は 1 mSv/y（東京電力が設定した目標値）に抑える必要がある。

本検討では、平成 27 年度の検討で示された考え方に沿って、敷地境界上における空間線量を 0.6mSv/y と設定し、限定再利用による空間線量寄与が 0.4mSv/y 以下であれば、追加線量を考慮

しても敷地境界上の空間線量が目標値の 1mSv/y を超えず、めやす濃度は妥当であると判断する。

そこで、今後建設されると想定されるコンクリートくずを基礎材に再利用した建造物が敷地境界へ与える線量寄与を評価することとした。敷地境界においては、線源からの直接線の他にスカイシャイン線も考慮する必要があるため、3次元輸送計算コード MCNP5⁽¹⁷⁾により外部被ばく線量換算係数を算出した。

上記の評価から、空間線量を 1mSv/y 以内に抑えるために必要となる敷地境界との離隔距離の確認及び、めやす濃度の妥当性について確認を行う。

(1) 計算条件

評価体系を図 3.5-5 に示す。

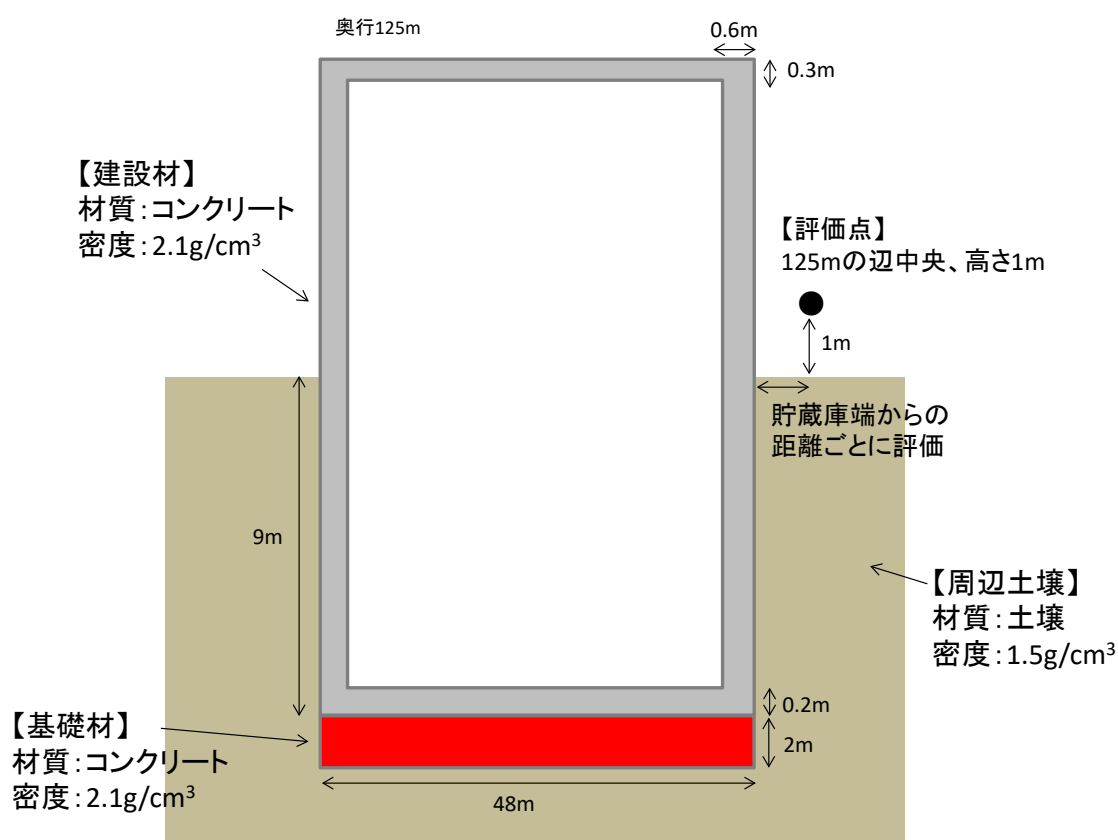


図 3.5-5 敷地境界評価体系

(a) シナリオ

敷地境界付近に基礎材に再生資材を利用した建造物が建てられることを想定する。基礎材中の骨材には、めやす濃度の放射性セシウムが含まれている。めやす濃度は3.4.1で行った試算結果から $160,000\text{Bq/kg}$ とする。

(b) 線源の体系

固体廃棄物貯蔵庫第9棟と同型施設を想定し基礎部は幅 48m ×長さ 125m ×厚さ 2m とした。上部構造部の体系も固体廃棄物貯蔵庫第9棟を模して作成した。建造物自身による遮蔽は、保守的に外壁のみとして設定した。

(c) 物質組成・再利用に伴う希釈効果

物質組成や骨材の比率は 3.5.1 で示した値を用いた。

(d) 評価点

長さ 125m の辺の中心線上、高さ 1m で建造物からの距離を振って評価する。

(2) 計算結果

(1) で示した条件に基づき、外部被ばく線量換算係数を計算した。外部被ばく線量換算係数を表 3.5-4 に示す。外部被ばく線量換算係数に基礎材中のセシウムのみやす濃度 (Cs-134、Cs-137) をかけて線量率($\mu\text{Sv/h}$)を求めた (表 3.5-5)。また、線量率に 8,760 時間 (=1 年間) をかけて空間線量 (mSv/y) を算出した (表 3.5-6)。

表 3.5-4 基礎材への再利用における外部被ばく線量換算係数

貯蔵庫端からの距離	外部被ばく線量換算係数 ($\mu\text{Sv/h per Bq/kg}$)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	1.2E-09	3.4E-10	4.9E-10

表 3.5-5 基礎材への再利用における線量率

貯蔵庫端からの距離	線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	3.5E-05	4.6E-05	8.1E-05

表 3.5-6 基礎材への再利用における空間線量

貯蔵庫端からの距離	空間線量 (mSv/y)		
	Cs-134	Cs-137	合計
1m	3.0E-04	4.0E-04	7.1E-04

(3) 敷地境界への影響

(2) の結果より、基礎材に再生資材を利用した建造物を建設する場合、建造物からの距離が 1m の地点であっても再利用による空間線量寄与は $7.1\text{E-}04\text{mSv/y}$ であり、限定再による空間線量率への寄与は 1mSv/y に対して十分に小さい値であることが確認された。

3.5.4 「1F 敷地内の地下水への核種漏えいの影響」の評価

コンクリートくずを基礎材に利用した際の地下水中核種濃度の評価を行う。3.5.1 で試算しためやす濃度 ($160,000\text{ Bq/kg}$) で基礎材へ再利用を行った際の地下水中核種濃度を評価する。評価は放射性セシウム(Cs-134, Cs-137)及び Sr-90 を対象として行う。

評価は、固体廃棄物貯蔵庫の基礎部に地下水が浸透し、基礎材中を通過した核種を含んだ浸透水が帯水層へ流入することを想定して行う。帯水層へ流入した核種は、地下水流により海洋側へと移行していく。帯水層中の核種の移行は、分配平衡を仮定した 1 次元移行解析をクリアランスレベル評価コード PASCLR2⁽⁶⁾を用いて行う。浸透水量に道路材と同じ降雨量を設定しな

いのは、基礎上には建造物があり、上から降雨が浸透することが現実的にあり得ないからである。

基礎材からの核種流出の評価は、再生資材へのセシウム及びストロンチウムの収着を考慮した分配係数モデルを用いて行う。分配係数モデルでは、再生資材からのセシウム及びストロンチウムの溶出が分配平衡に基づいて起こると仮定し、漏えい率は以下の式により算出される。

$$\eta = \frac{P}{H_w \cdot (\varepsilon_w + \rho_w \cdot Kd_w)} \quad (3.4-6)$$

η	:	基礎材からの漏えい率 (1/y)
P	:	基礎材への浸透水量 (m/y)
H_w	:	基礎材の長さ (m)
ε_w	:	基礎材の空隙率 (-)
ρ_w	:	基礎材のかさ密度 (g/cm ³)
Kd_w	:	再生資材の分配係数 (ml/g)

(1) シナリオ

貯蔵庫は地下水が流れていく方向に対して長辺方向（125m）を向いて建設されることを想定する。完成した固体廃棄物貯蔵庫の基礎部から核種が漏えいし地下水に流入することを想定する。帯水層に流入した核種は、帯水層中を移行し海洋側へ移行していく。

評価は保守的にコンクリートにひびがあり水を通しやすい状態を想定して行った。基礎材中の浸透水量は、ひびがあるコンクリート（基礎材）及び帯水層の透水係数と間隙率を用いて地下水流動解析を行い設定した。ひびがあるコンクリートへの浸透水量は、人為的に過剰にひびをいれた条件下での値であるので、より実際の再利用環境に近い評価として、ひびのないコンクリートへの浸透を想定して浸透水量を設定した場合の評価も行った。

(2) 評価体系

評価体系を図 3.5-6 に示す。また、パラメータ設定を表 3.5-7 に示す。貯蔵庫は海に向かう方向に長さ 125m を設定し、1 次元移行解析において最も保守的になるようにしている。

評価上、基礎部が帯水層に浸っている体系を設定し、帯水層を流れる地下水が基礎材中を浸透することを想定する。浸透水量設定のための地下水流動解析の評価概念図を図 3.5-7 に示す。また、地下水流動解析に用いたパラメータ設定を表 3.5-8 に示す。

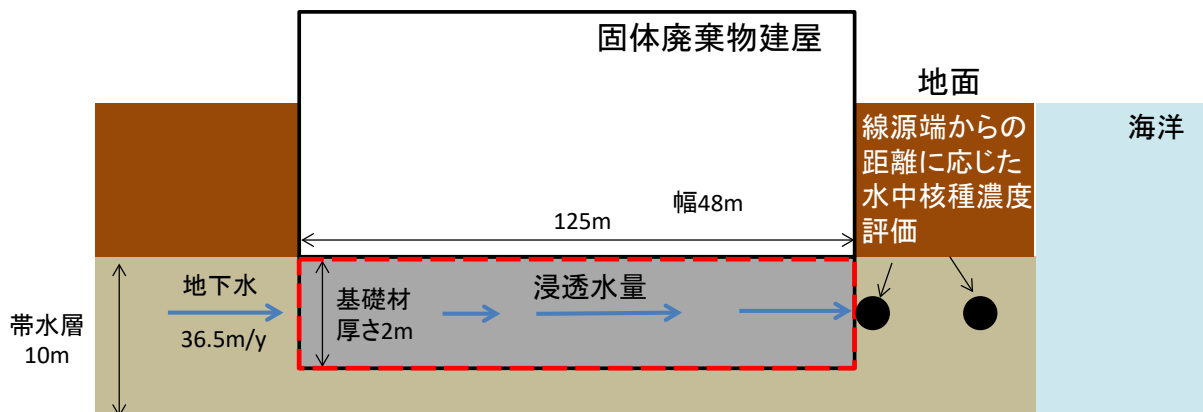


図 3.5-6 基礎材へ再利用した際の地下水移行評価体系

表 3.5-7 基礎材に再利用した際の地下水中核種濃度評価のパラメータ設定

No	名称	単位	選定値	選定理由
1	基礎材中セシウム濃度 (Cs-134 + Cs-137)	Bq/kg	160,000	基礎材への再利用時のめやす濃度
2	基礎材中 Sr-90 濃度	Bq/kg	1,600	1F 敷地内の屋外集積がれき中核種濃度測定により求めた、Cs-137 に対する Sr-90 の核種濃度比率 1%にセシウムのめやす濃度をかけることで設定
3	基礎材のかさ密度	g/cm ³	2.1	セメントモルタルのかさ密度 ⁽⁸⁾
4	基礎材の間隙率	—	0.19	セメントモルタルの間隙率 ⁽⁸⁾
5	Cs のコンクリートに対する分配係数	ml/g	2.5	セメントモルタルに対する分配係数 ⁽⁸⁾
6	Sr のコンクリートに対する分配係数	ml/g	1.25	セメントモルタルに対する分配係数 ⁽⁸⁾
7	線源長さ	m	125	固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟 ⁽¹³⁾ の長さ
8	浸透水量（ひびのあるコンクリートへの浸透）	m/y	3.65×10^{-2}	帯水層とひび割れのあるコンクリートの透水係数及び間隙率を用いた流動解析の結果より、コンクリート中の流速が帯水層中流速の 1/1000 ほどであると設定。地下水流速に 1/1000 をかけた値を浸透水量と設定。
9	浸透水量（ひびのないコンクリートへの浸透）	m/y	7.2E-03	大気圧下におけるコンクリートへの透水実験 ⁽⁸⁾ により求めた透水係数の値を浸透水量として設定
10	帯水層土壌真密度	g/cm ³	2.6	「土質工学ハンドブック」（土質工学会編、1982 年）
11	帯水層土壌の間隙率	—	0.41	1F 敷地内の地下貯水槽から漏えいした汚染水の地下水移行評価 ⁽¹¹⁾ において設定されている値
12	Cs の帯水層土壌に対する分配係数	ml/g	270	IAEA TRS No.364（砂）
13	Sr の帯水層土壌に対する分配係数	ml/g	13	IAEA TRS No.364（砂）
14	地下水流速	m/y	36.5	「1F 敷地内の地下貯水槽から漏えいした汚染水の地下水移行評価 ⁽¹¹⁾ 」において、東京電量から入手した 1F 敷地内の地下水実流速として示された値約 0.1m/d から算出。
15	帯水層厚さ	m	10	「1F 敷地内の地下貯水槽から漏えいした汚染水の地下水移行評価 ⁽¹¹⁾ 」において、1F 敷地内の地下貯水槽付近の帯水層厚さとして示されている値を設定。

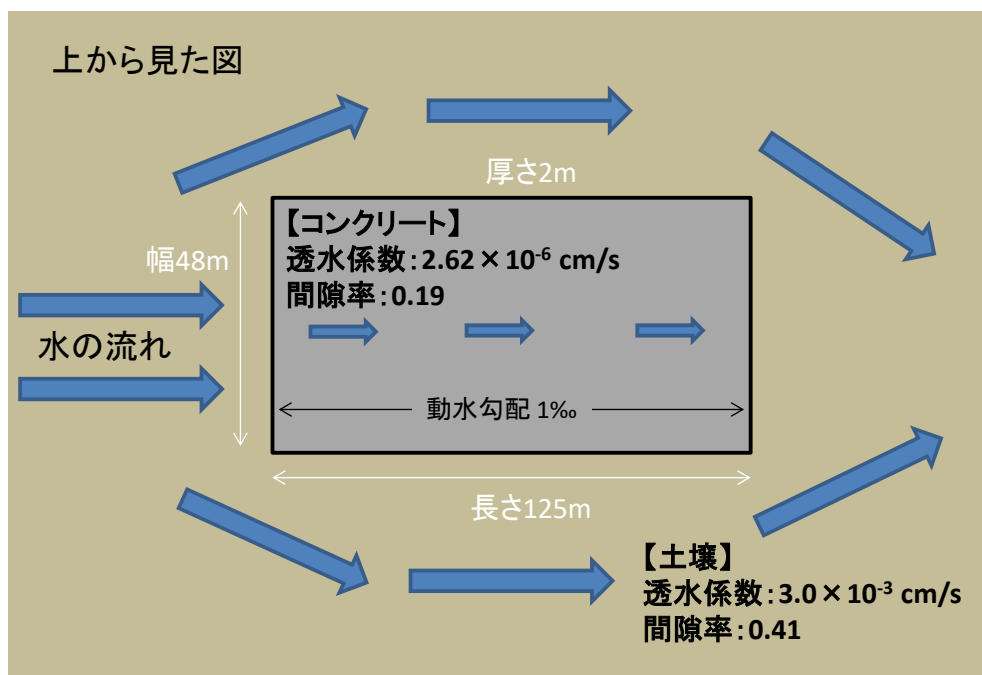


図 3.5-7 地下水流動解析の概念図

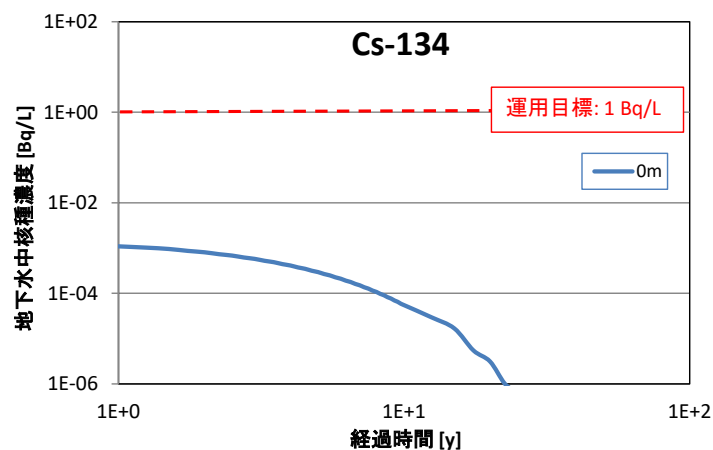
表 3.5-8 地下水流動解析のパラメータ設定

No	名称	単位	選定値	選定理由
1	基礎材の間隙率	—	0.19	セメントモルタルの間隙率 ⁽⁸⁾
2	ひび割れがある コンクリートの 透水係数	cm/s	2.62×10^{-6}	コンクリートに人為的にひびを入れ、透水係数を測定した実験結果より設定 ⁽¹⁸⁾ 。30cm 四方のコンクリートの立方体に幅 2mm、深さ 25cm のひび割れがある場合の透水係数を採用。
3	帯水層土壌の間隙率	—	0.41	「1F 敷地内の地下貯水槽から漏えいした汚染水の地下水移行評価 ⁽¹¹⁾ 」において設定されている値
4	帯水層の透水係数	cm/s	3.0×10^{-3}	「1F 敷地内の地下貯水槽から漏えいした汚染水の地下水移行評価 ⁽¹¹⁾ 」において設定されている値

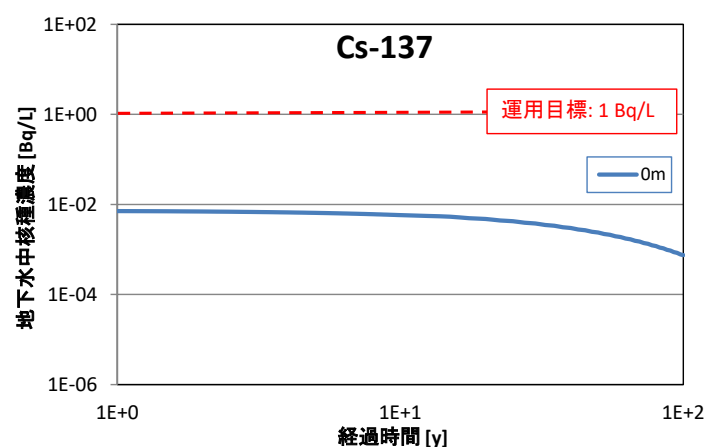
(3) 計算結果

①ひびのあるコンクリート（基礎材）への浸透を想定した場合

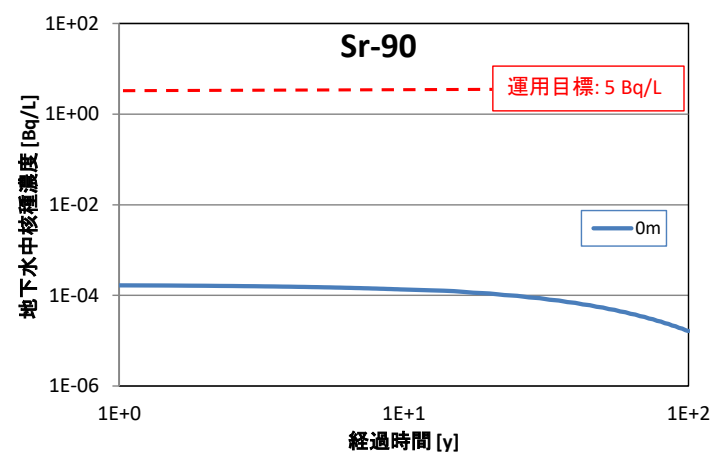
ひびのあるコンクリートへの浸透を想定して地下水中核種濃度を評価した結果を図 3.5-8 に示す。3 核種とも貯蔵庫端から 0m の位置ですでに運用目標を大きく下回った。



(a) Cs-134 の地下水中核種濃度



(b) Cs-137 の地下水中核種濃度

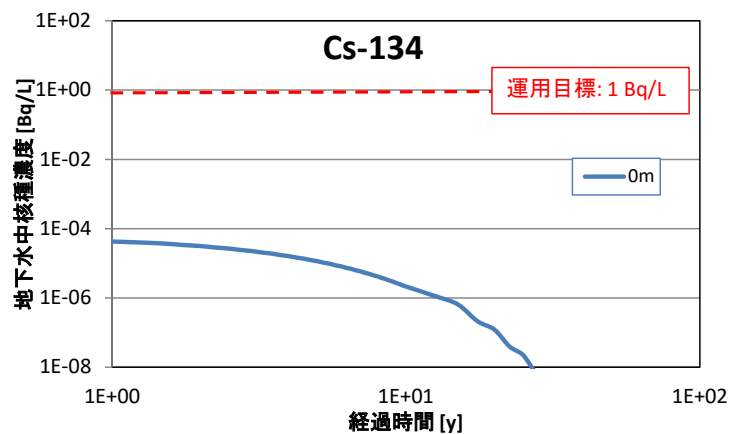


(c) Sr-90 の地下水中核種濃度

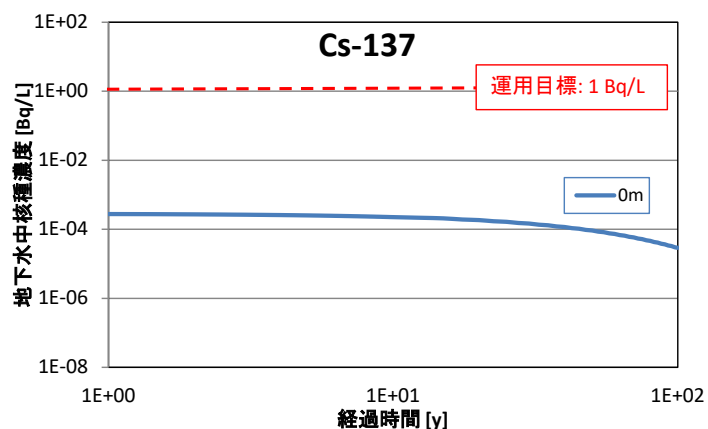
図 3.5-8 貯蔵庫端距離及び再利用開始からの期間に対する地下水中核種濃度
(基礎材としてひびのあるコンクリートを想定、軸は対数軸、
凡例の 0m は建造物端からの距離)

②ひびのないコンクリート（基礎材）への浸透を想定した場合

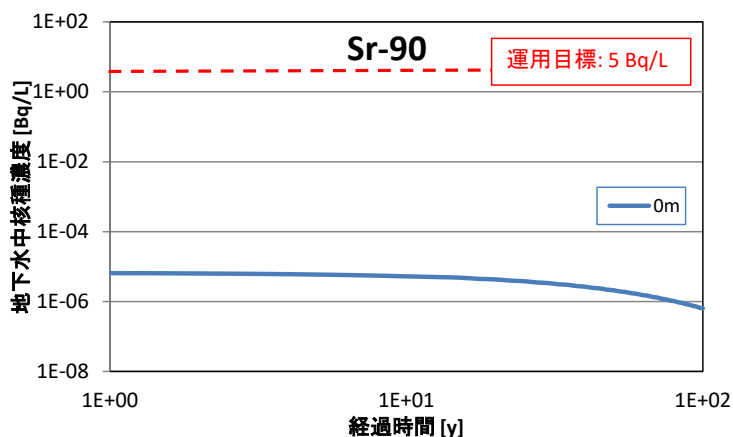
より実際の再利用環境に近い評価として、ひびのないコンクリートへの浸透を想定して地下水中核種濃度を評価した結果を図 3.5-9 に示す。3 核種とも貯蔵庫端から 0m の位置ですでに運用目標を大きく下回った。



(a) Cs-134 の地下水中核種濃度



(b) Cs-137 の地下水中核種濃度



(c) Sr-90 の地下水中核種濃度

図 3.5-9 貯蔵庫端距離及び再利用開始からの期間に対する地下水中核種濃度
（基礎材としてひびのないコンクリートを想定、軸は対数軸、
凡例の 0m は建造物端からの距離）

(4) 地下水への核種漏えいの影響

(3) の結果より、基礎材に再生資材を用いる場合、地下水中の核種濃度は建造物から隔離を設けなくても運用目標以下となることが確認された。なお本評価では、モニタリングを前提として設定された運用目標値をめやす濃度の妥当性評価の基準に用いている。本評価の地下水中核種濃度はあくまでも解析コードによる試算値なので、限定再利用による地下水中核種濃度の評価におけるモニタリングの位置づけについて今後検討が必要になる可能性がある。

3.6 めやす濃度と表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度の関係

本検討では、限定再利用により上昇する作業空間の空間線量率上昇分が 1 μ Sv/h に相当する資源化物中の濃度としてめやす濃度を試算した。一方、東京電力によりがれきの再利用について表面線量率 5 μ Sv/h 未満の屋外集積がれきを再利用することが示されている(詳細は 2.4 参照)。しかし、表面線量率の測定だけでは高濃度に汚染されたがれきが非汚染のがれきに埋もれている場合などに、その存在を感知することが出来ず、高濃度に汚染されたがれきを再利用してしまう可能性がある。

そこで本項では、表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度を試算し、その濃度とめやす濃度を比較することで、めやす濃度が東京電力により示された再利用対象とするがれき中濃度と比較してどの程度のものであるのかを予察的に確認する。

表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度の試算には、3 次元輸送計算コード MCNP5⁽¹⁷⁾を用いてがれき表面における外部被ばく線量換算係数を算出し、5 μ Sv/h を外部被ばく線量換算係数で割ることで表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度を算出する。

(1) 計算条件

評価体系を図 3.6-1 に示す。

(a) 線源の体系

がれきサイズは、単位サイズ(1 立方メートル)のがれきを水平方向に重ね合わせていき、上面の 1 辺が 1~5m の範囲で外部被ばく線量換算係数を試算し一定となったサイズを設定した。汚染されたがれきが表面に出ている場合と、非汚染がれきの中に埋もれている場合を想定し、遮蔽厚さを 0~30cm の範囲で設定した。

(b) 物質組成

がれきの組成としてコンクリートを設定した。がれきの密度として、平成 27 年度の検討(4.5.3)を参考に、1m³の容器に均質にコンクリートが満たされている際の密度を採用した。

(c) 評価点

評価点は、がれき上面中央の高さ 1cm とした。

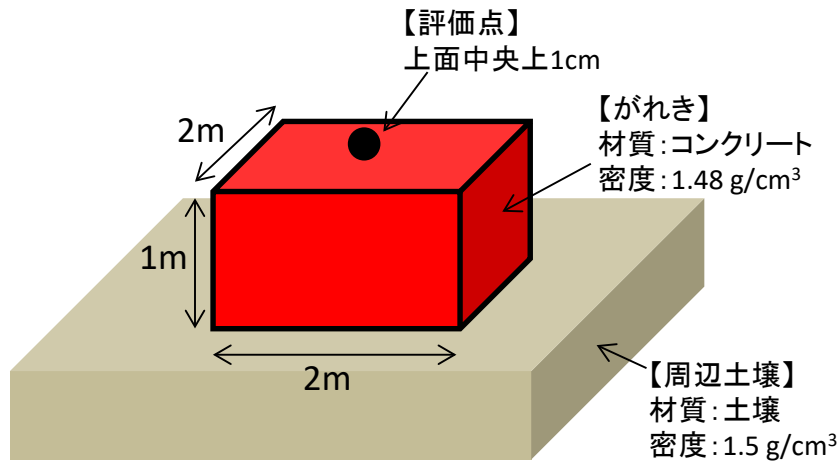


図 3.6-1 表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度算出の評価体系

(2) 計算結果

(1) で示した条件に基づき、Cs-134 および Cs-137 について、外部被ばく線量換算係数を計算した。計算結果は Cs-134 のみの場合、Cs-137 のみの場合、Cs-134 と Cs-137 の合計の場合の外部被ばく線量換算係数を、表 3.6-1 に示す。

表 3.6-1 がれきによる外部被ばく線量換算係数

遮蔽厚さ(cm)	外部被ばく線量換算係数 (μ Sv/h per Bq/kg)		
	Cs-134	Cs-137	合計
0	1.6E-03	5.9E-04	7.7E-04
10	9.9E-04	3.6E-04	4.7E-04
20	4.4E-04	1.6E-04	2.1E-04
30	1.4E-04	5.0E-05	6.6E-05

外部被ばく線量換算係数を用いて、表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度を算出する。以下は遮蔽厚さ 0cm の場合のめやす濃度である。

$$\frac{5\mu\text{Sv/h}}{7.7 \times 10^{-4} \mu\text{Sv/h per Bq/kg}} = 6.5 \times 10^3 \text{ Bq/kg}$$

遮蔽厚さ 0cm の場合のめやす濃度は、6,500 Bq/kg である。遮蔽がある場合についても同様にめやす濃度を計算した。

表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度と、コンクリートくずの各利用用途におけるめやす濃度を表 3.6-2 に示す。

表 3.6-2 表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度とめやす濃度

線源	遮蔽(cm)	5 μ Sv/h 相当濃度 (Bq/kg)	めやす濃度(1 μ SV/h 相当濃度) (Bq/kg)
がれき	0	6,500	—
がれき	10	11,000	—
がれき	20	24,000	—
がれき	30	76,000	—
路盤材 (アスファルト)	5	—	13,000
舗装材 (アスファルト)	0	—	7,400
路盤材 (コンクリート)	15	—	100,000
舗装材 (コンクリート)	0	—	8,100
コンクリートブロック	0	—	11,000
基礎材	20	—	160,000

(3) めやす濃度と表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度の関係

(2) の結果より、汚染されたがれきが表面に露出している（遮蔽なし）場合は、表面線量率 5 μ Sv/h 相当のがれき中核種濃度は全てのめやす濃度より低い値となった。一方で汚染がれきが非汚染がれきに埋もれている（遮蔽あり）場合は、めやす濃度以上の値を示すこともあり、表面線量率 5 μ Sv/h という基準が必ずしもめやす濃度を保証しているとは言えない。このことから、限定再利用を行う際は表面線量率だけではなく、がれき内部の汚染がれきの存在も含めて再利用可能性を評価することが重要であると言える。

3.7 まとめ

本章ではコンクリートくずの再利用用途として道路材と建設用コンクリートを設定し、めやす濃度の試算とめやす濃度の妥当性の評価を行った。

道路材に再利用した際のめやす濃度の妥当性の評価は、平成 27 年度に行った評価に追加する形で、粉塵吸入による内部被ばくに起因する「作業者の追加の年間被ばく線量」の評価と「1F 敷地内の地下水への核種漏えいの影響」の評価を行った。

コンクリートくずを道路の舗装材に再利用した場合、道路上を車輛が通過することで舗装材の摩耗が進み核種を含んだ粉塵が巻き上げられることが想定される。そこで平成 27 年度に設定しためやす濃度で舗装材に再利用した際の粉塵吸入による内部被ばくの評価を行った。内部被ばく線量の評価を行う際の評価対象核種は、Cs-134、Cs-137 だけではなく、1F 敷地内で検出下限を超えて存在し、核種量として Cs-137 の核種濃度の 1%ほど存在することが確認されている Sr-90 も対象とした。作業空間の空気中ダスト濃度は、既往の研究で示された道路付近の空気中アスファルト濃度の値を確認しつつ、保守的にそれよりも 1 桁濃度が高いクリアランス評価で用いられている埋立作業時の空気中ダスト濃度の値を用いた。評価時期は保守的に道路完成直後(0 年目)とした。評価はアスファルト道路の舗装材およびコンクリート道路の舗装材に再利用した場合で行い、めやす濃度で再利用した際の 3 核種による内部被ばく線量の和はそれぞれ 8.4E-05 mSv/y、9.1 E-05 mSv/y となった。このことから再利用物からの作業員への追加被ばく線量は、内部被ばく線量と外部被ばく線量 (1.3 mSv/y) の両方を考慮しても、放射線作業従事者の年間被ばく線量限度である 20mSv/y に対して十分に小さい値であることが確認できた。

続いて、「1F 敷地内の地下水への核種漏えいの影響」について本検討で設定した考え方を以

下に示す。再利用物に降雨等が浸透し核種を含んだ浸透水が地下帯水層に移行する場合、1F 敷地内で定められた排水基準を超えた地下水が排出される可能性がある。1F 敷地内の地下水バイパスの排水においては、告示濃度限度に対して約 10%の裕度を持って設定された排水許容限度が示されている。さらに実際の排水にあたっては、漁業関係者等の意見を考慮して設定された運用目標値が用いられている。そこで、めやす濃度で限定再利用を行った際の海洋出口における地下水中核種濃度が運用目標以下となっていることをもって、めやす濃度の妥当性を確認することとした。評価対象核種は Cs-134、Cs-137 に加え、1F 敷地内で検出下限を超えて存在し、核種濃度として Cs-137 の核種濃度の 1%ほど存在することが確認されている Sr-90 も加えた。ストロンチウムはセシウムより地下水中で移行しやすいことから地下水中の濃度評価が重要である。各核種の運用目標値は Cs-134 : 1Bq/L, Cs-137 : 1Bq/L, Sr-90 : 5Bq/L である。

道路材のめやす濃度は、コンクリート道路の路盤材に再利用した場合が最も高かったので (100,000Bq/kg)、その場合の地下水中核種濃度の評価を行いめやす濃度の妥当性を評価することで、他の道路材用途のめやす濃度の妥当性評価を代表した。評価は降雨浸透により核種が帯水層に移行することを想定し、道路端からの距離ごとの地下水中核種濃度を評価した。評価は保守的に、降雨が浸透しやすい土壌への浸透水量を用いて行った。また、浸透水量を変えることで、実際の再利用環境により近い、コンクリートへの浸透を想定した評価も行った。土壌への浸透を想定した評価では、道路端から 0m の地点で既に Cs-134 と Sr-90 は運用目標以下となった。Cs-137 は 0m の地点では最大で 10 Bq/L を超える濃度となったが、道路端から 10m の地点では運用目標以下となった。コンクリートへの浸透を想定した評価では全核種道路端から 0m の地点で運用目標を大きく下回った。このことから、保守的な評価においても海岸から 10m 以上の離隔を持って道路を敷設すれば、海洋出口における地下水中核種濃度は運用目標以下となることが確認できた。

コンクリートくずを建設用コンクリートに再利用する際は、1F 敷地内の限定再利用において現実的に造成可能な再生コンクリートの品質を考慮して、建造物の基礎部に利用することを想定した。再利用を想定する建造物として現在 1F 敷地内に建設中の固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟と同型の施設を設定した。固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟と同型の施設の基礎部に再利用した際のめやす濃度の試算を行い、めやす濃度の妥当性の評価を行った。

めやす濃度の試算は、基礎材の上に非汚染コンクリートで造成された床スラブが 20cm の厚さで敷設された条件のもと、基礎部直上階（地下二階）の空間線量率の上昇が $1\mu\text{Sv/h}$ を超えない核種濃度を導出した。試算の結果、めやす濃度は 160,000Bq/kg であった。

めやす濃度で再利用した際の作業員への追加の被ばく線量は、再利用部が露出していないことから外部被ばくだけを考慮して行った。対象核種は Cs-134 と Cs-137 とした。作業条件が道路作業員と同様であるとする、作業員の追加の被ばく線量は 1.3mSv/y となり作業員の個人線量限度 20mSv/y に対して 7%未満であった。これは十分に低い値と見ることができ、空間線量率への寄与が $1\mu\text{Sv/h}$ を超えないように算出しためやす濃度が、作業員の年間追加被ばく線量の観点でも抑制されていることが確認できた。

めやす濃度で再利用した場合の敷地境界における空間線量寄与を評価した。敷地境界においては、空間線量は 1mSv/y 以内に抑えなければならない。評価には貯蔵庫からの距離に応じた評価点の外部被ばく線量換算係数を求め、その値から空間線量 (mSv/y)を導出した。外部被ばく線量換算係数は、モンテカルロ三次元輸送計算コード MCNP5 を用いて計算した。評価の結果、貯蔵庫からの距離が 1m の地点で既に空間線量寄与が $7.1\text{E-}04\text{mSv/y}$ となり、敷地境界の空間線量目標の 1mSv/y に対して十分小さい値であることが確認された。

めやす濃度で基礎材に再利用を行った際の地下水中核種濃度への影響を評価した。評価は基

礎部が地下帯水層に浸かっていることを想定し、地下水が基礎部側面から浸透して基礎部の下流端から帯水層へ流出することを想定した。対象核種は Cs-134, Cs-137, および Sr-90 とした。評価は保守的にひび割れがあるコンクリートへの地下水の浸透を想定して行った。また浸透水量を変えることで、実際の再利用条件により近い、ひび割れがないコンクリートへの地下水の浸透を想定した評価も行った。評価の結果、ひび割れがあるコンクリートを想定した評価においても、貯蔵庫端から 0m の地点で既に運用目標を大きく下回ることが確認できた。

最後に、東京電力が示した再利用対象となる屋外集積がれきの表面線量率 $5\mu\text{Sv/h}$ 相当のがれき中濃度と、試算しためやす濃度の比較を行った。試算の結果、汚染されたがれきが表面に露出している（遮蔽なし）場合は、表面線量率 $5\mu\text{Sv/h}$ 相当のがれき中核種濃度は全てのめやす濃度より低い値となった。一方で汚染がれきが非汚染がれきに埋もれている（遮蔽あり）場合は、めやす濃度以上の値を示すこともあり、表面線量率 $5\mu\text{Sv/h}$ という基準が必ずしもめやす濃度を保証しているとは言えなかった。このことから、限定再利用を行う際は表面線量率だけではなく、がれき内部の汚染がれきの存在を含めて再利用可能性を評価することが重要であると言える。

第 3 章の参考文献

- (1) 日本原子力研究開発機構 平成 27 年度「廃棄物の限定再利用に関する検討」報告書
- (2) 東京電力 福島第一原子力発電所サーベイマップ
<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/surveyemap/images/f1-sv2-20151126-j.pdf>
- (3) 東京電力 地下水バイパスの排水基準について
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2014/images/handouts_140203_04-j.pdf
- (4) 原子力安全委員会 平成 11 年「主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて」
- (5) 谷中隆明、漆山佳雄、北島永一、福崎紀夫、田村良三、丸山隆雄 「道路粉じんによる大気汚染」 1985. 全国公害研究誌. Vol. 10, No.1.
- (6) 武田聖司、菅野光大、佐々木利久、水無瀬直史、木村英雄 「ウラン及び TRU 核種を含む放射性廃棄物に対するクリアランスレベル評価コードシステム PASCLR 第 2 版の開発」 JAEA-Data/Code2006-003(2006)
- (7) 澤口拓磨、武田聖司、木村英雄、田中忠夫 「放射性物質により汚染された災害廃棄物の道路への再利用に伴う被ばく線量評価」 Jpn.J.Health Phys.50(1),36~49(2015)
- (8) 日本原子力研究開発機構 「TRU 廃棄物処分技術検討書ー第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめー」 2005. JNC TY1400 2005-013.
- (9) (株)建設産業調査会 「地下水ハンドブック（地下水ハンドブック編集委員会編）」 1979
- (10) 岸本嘉彦、佐藤靖彦、中村麻里亜、銚井修一 「コンクリートの透水性が中性化の進行に及ぼす影響」 2007. コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1.
- (11) 日本原子力研究開発機構 環境影響評価研究グループ 「地下貯水槽から漏えいした汚染水に含まれる放射性核種の移行評価」 2013. 特定原子力施設監視・評価検討会（第 9 回）資料 1ー4. <http://www.nsr.go.jp/data/000050926.pdf>
- (12) 日本建設業連合会 「再生骨材コンクリートの普及促進に向けてー低炭素・循環型社会の構築への貢献ー」
<http://www.nikkenren.com/publication/pdf/182/saiseikotsuzaikonkuri-tonohukyuusokushinnimuket e2.pdf>
- (13) 原子力規制委員会 「東京電力株式会社 福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画」 2.10 放射性固体廃棄物等の管理施設. <https://www.nsr.go.jp/data/000163505.pdf>

- (14) 小森清司 「鉄筋コンクリート・プレストレストコンクリート設計計算入門 1/10 8.部材の設計計算（基本的な考え方）」 1974.コンクリートジャーナル Vol.12 No.4, April.
- (15) 日本工業標準調査会 「JISA5022 再生骨材 M を用いたコンクリート」 2007.
- (16) 一般社団法人 日本アスファルト協会 <http://www.askyo.jp/knowledge/06-3.html>
- (17) X-5 Monte Carlo Team, MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, LA-UR-03-1987
- (18) 遠藤孝夫、広永道彦、名倉健二、田辺忠顕 「非貫通ひび割れを有するコンクリートの水密性評価法の検討」 1999. コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, 21.

4．放射能濃度評価手法の検討

4.放射能濃度評価手法の検討

4.1 はじめに

東京電力福島第一原子力発電所（以下、1F）事故で発生した大量の汚染がれきの中、放射能濃度が低いものを再利用するためには、収納容器内がれきの放射能濃度を明らかにし、めやす濃度以下であること、及び放射能濃度の偏りがないことの2つを確認することが必要となる。1F 事故で生じたがれきについては、通常の原子力施設等で発生する廃棄物のように発生個所の履歴等が明確でなく放射能濃度が十分に把握されていない。したがって、がれきの放射能濃度分布には偏り、すなわち放射能濃度が局所的に高い箇所（ホットスポット）が存在する可能性がある。このホットスポットを見逃した場合、局所的に放射能濃度の高い再利用物が生成され、再利用後に事前の評価結果以上の線量を被ばくする可能性がある。従って、収納容器内のがれきの放射能濃度分布を効率的にかつ精度よく評価して、平均放射能濃度を算出する手法を開発する必要がある。

本検討では、1F 敷地内で実施されると考えられる限定再利用に向けた汚染がれきの処理の流れを想定し、その中でプラスチックシンチレーションファイバー（PSF）による放射線測定と逆解析手法を組み合わせ、がれき内部の放射能濃度分布を評価する手法について検討を実施した。あらかじめ構築したグリーン関数とその場で得られる測定結果から逆解析手法により推定される放射能濃度分布から平均放射能濃度を算出して、めやす濃度以下であることを判定するコードシステムを構築するとともに、本コードを利用して、理想的な条件だけでなく、測定条件、誤差、および測定環境などを考慮した検討を行い、実際の評価を行う上での課題を整理した。また、PSF を用いた測定では、線状の検出器を容器外周に巻き付ける方法において、容器外の計数率分布を取得するとともに、グリーン関数を構築する際に、PSF の位置分解能を考慮して、ガウス分布補正を導入した。最終的に、構築したグリーン関数と PSF を用いて測定された結果から、放射能濃度分布の推定を実施して、想定した一連の測定・評価が行えることを確認した。

また、昨年度の検討で測定装置の候補としてとりあげたコンプトン散乱型ガンマカメラを一部条件において試適用し、その結果から今後の適用性について検討するとともに、大きさが20mm 程度の碎石が均質と取り扱える条件などについても検討した。

4.2 限定再利用に向けた汚染がれきの処理の流れと検認のタイミング

平成 27 年度において⁽¹⁾は、東京電力においては、金属及びコンクリートを対象とした減容処理設備を整備し、濃度に応じて再利用することを想定して、汚染がれきの処理の流れを検討した。汚染したがれき類を再利用する際には、がれき類を資源化处理したうえで、必要な材料として利用し、製品などにすることが想定される。2 章に示したように平成 29 年 2 月に東京電力が示した再利用の対象は、0.1mSv/h 以下の屋外集積がれきのうち、5μSv/h 以下の表面線量率を持つがれきとし、平成 39 年度末時点の再利用対象物は 17.7 万 m³としている。しかし、再利用に供するための処理については言及がなく、現時点においては昨年度と同様の処理の考え方を踏襲した。5μSv/h 以上 0.1mSv/h 以下のがれきについては減容処理を行って、固体廃棄物貯蔵庫へ一時保管することが明示されているが、再利用対象の 5μSv/h 以下のがれきの再利用のための処理については、具体的には示されていない。したがって、再利用のための処理設備における工程を想定しながら、処理施設への汚染がれきの持込と処理施設からの持ち出しについて検討を行った。

図 4.2-1 に処理施設における汚染がれき類の持込から持ち出しまでの想定フローと規制が行うべき確認対象について示す。限定再利用の対象である屋外集積がれきは表面線量率が 5 μ Sv/h 以下であるが、大きな区画の表面線量率だけでがれきの区分が判断されているため、仮に大きな放射線線源（汚染）が内部に存在する場合にも、5 μ Sv/h 以下のがれきとして保管されている可能性がある。その放射能濃度については、濃度の高いがれきの分析が優先されているため、表面線量率の低いがれきについては平成 29 年 3 月現在、データが取得されておらず、放射能濃度のばらつきについても情報がない。このように、表面線量率 5 μ Sv/h のがれきは、放射能濃度のばらつきも大きく、ホットスポットが存在する可能性もある。したがって、処理施設へ汚染がれきを受け入れる際には、高濃度のがれきが混入しないように、受け入れレベル（放射能濃度や個々のがれきの表面線量率）などを設定し、許容を超えるホットスポットがないことを、放射線測定によって確認する必要がある（第一段階）。処理設備に受け入れられた汚染がれきは、コンクリートであれば、クラッシュやすりもみなどによって、骨材を取り出したり、金属であれば、切断や表面汚染の除去、または熔融などによって、資源化することが想定される。処理後は、資源化された骨材や金属製品が用途別に示されためやす濃度以下であることを放射線測定によって確認する必要がある。このとき、資源化処理の過程で放射能濃度のばらつきの大きい汚染がれきが十分に均一化されているかについても確認する必要がある（第二段階）。

安全規制については、製品として使われる資源化物（再生資材）の放射能濃度を確認する段階の測定に対して、検認を行うことが適切と考えられる。このとき、規制当局は測定記録の確認を行うとともに、一部については対象物を抜き取って放射線測定を実施し、平均放射能濃度及びその濃度分布を評価して、めやす濃度以下であること、及び、放射能濃度の均一性が確保されているかを確認するものと想定される。このほか、規制当局は事業者が計画する一連のがれき処理、測定手法の妥当性を前もって確認するとともに、抜き取り測定・評価を行った再利用可能な資源化物が対象とした再利用用途及び場所に利用されているかを確認することが想定される。

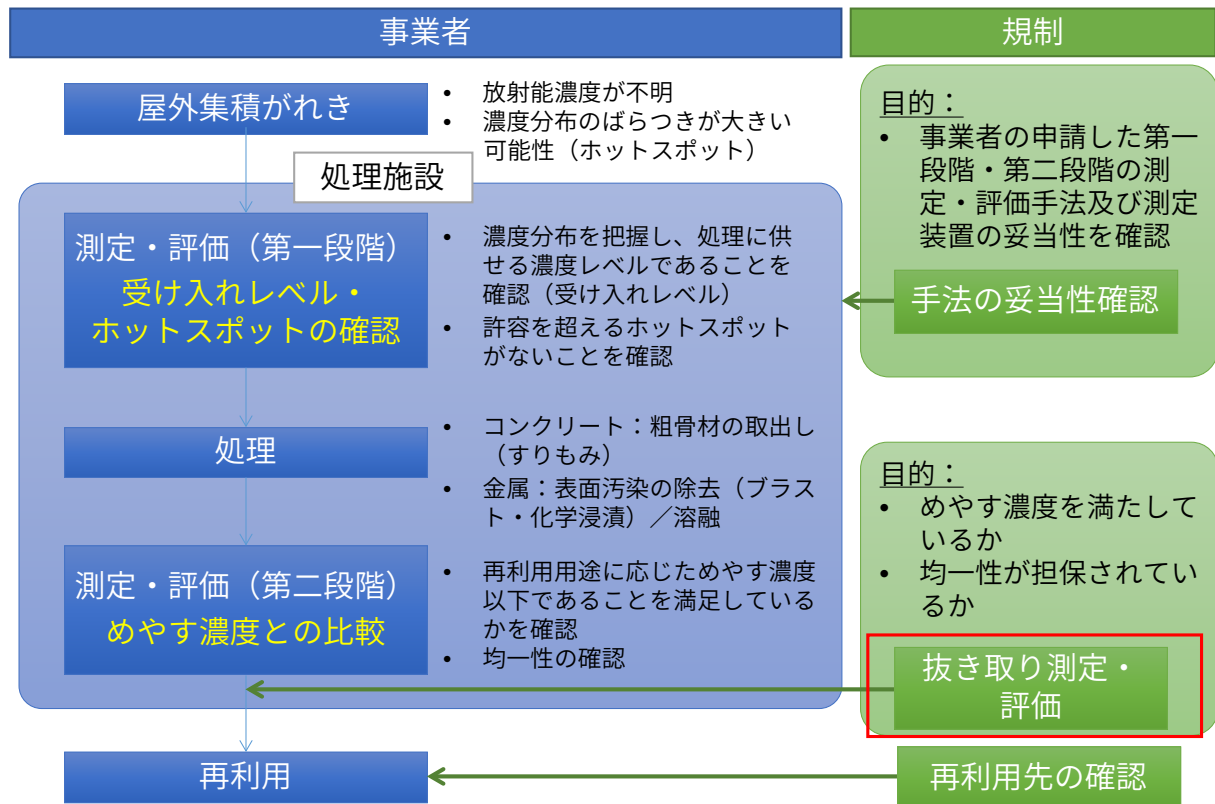


図 4.2-1 汚染がれき類の処理および検認フロー（想定）

4.3 放射能濃度分布評価コードシステム

資源化物を収納した容器の表面線量率分布から、資源化物の放射能濃度の空間分布を評価するため、以下で示す方法を用いる。

収納容器内資源化物をメッシュ状のセルに分割し、セル j （ $= 1, \dots, m$ ）における放射能濃度（Bq/kg）をベクトル $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_m)$ で表し、測定点 i （ $= 1, \dots, n$ ）における計数率（cps）をベクトル $\mathbf{d} = (d_1, \dots, d_n)$ と表せば、以下の連立一次方程式が成立する。

$$\mathbf{d} = \mathbf{G}\mathbf{q} \quad \text{式 4.3-1}$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} G_{11} & \cdots & G_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & \cdots & G_{nn} \end{pmatrix} \quad \text{式 4.3-2}$$

ここで、 G_{ij} はセル j にある単位線源（1Bq/kg）による、測定点 i における線量率への寄与である。この $\mathbf{G}$ を、グリーン関数とよぶ。グリーン関数 $\mathbf{G}$ は点減衰核積分コード QAD-CGGP2R⁽²⁾等の計算コードによって算出するとともに、表面線量率 $\mathbf{d}$ を測定によって取得することにより、式 4.3-1 より $\mathbf{q}$ の推定が可能となる。ただし式 4.3-1 は行列を含むため単純な式変形だけで $\mathbf{q}$ について解くことはできず、 $\mathbf{q}$ の数値を得るためには逆解析手法と呼ばれる計算手法が必要である。平成 27 年度「廃棄物の限定再利用における検討」報告書の 4 章「放射能濃度評価手法」では、公開資料に基づき既往の逆解析手法について調査し、適用した。

その成果を踏まえ、本検討では資源化物の放射能濃度分布を推定するための手順全体を、放射能濃度分布評価コードシステムとして整備する。放射能濃度分布評価コードシステムは、計数率 d のデータとグリーン関数 G を入力し、放射能濃度 q を出力データとする計算プログラム(逆解析プログラム)を内包する。この節では、放射能濃度分布評価コードシステムの構成および、逆解析プログラムの仕様を述べる。また平成 27 年度の検討に引き続き、作成した逆解析プログラムを用いて試解析を行い、放射能濃度分布評価コードシステムに適した逆解析手法の選定を行う。

4.3.1 コードシステムの整備

(1) システムの構成

1F 敷地内において、資源化物の放射能濃度がめやす濃度を満たしているかどうかの判定を行う評価の流れは、以下の(ア)～(カ)の通りとなる。

- (ア) 容器内における資源化物の配置情報(重量、かさ密度、がれき上面の形状)を取得し、事前に準備したグリーン関数ライブラリの中から、評価対象となる資源化物の配置情報に適したものを選択する。
- (イ) 容器外部からの放射線測定により計数率分布データ $d_i(i = 1, \dots, n)$ を取得する。分布データの測定点番号を、バックグラウンド計数率の差し引きを行いつつ、グリーン関数の測定点に一つ一つに対応させる。
- (ウ) 逆解析プログラム((2) 参照)による放射能濃度の推定を行うため、解析の条件を設定する。その場合、逆解析手法の選択および解析条件(収束条件、要求精度、初期分布、その他手法に固有のパラメータなど)をこの段階で決定する。
- (エ) (ア)で選択したグリーン関数、(イ)で取得した計数率データ、(ウ)で選択した手法および設定したパラメータを用いて、放射能濃度分布推定値 $q_j(j = 1, \dots, m)$ を算出する。また、平均放射能濃度 $\bar{q} \equiv \frac{\sum_{j=1}^m q_j}{m}$ を算出する。
- (オ) (エ)で得られた濃度分布推定値 q_j について、濃度分布の均一性が確保されていることを確認する。
- (カ) 平均放射能濃度 $\bar{q}$ をめやす濃度と比較する。

(ア)～(カ)の一連の処理を一まとめにした手順を、放射能濃度分布評価コードシステムとして定義する。



図 4.3-1 逆解析による放射能濃度分布評価コードシステムの概要

(2) 逆解析プログラム

放射能濃度分布評価コードシステムに使用するモジュールの1つとして、(1)の(エ)で示した、表面線量率とグリーン関数を使用し、濃度分布の推定を行うプログラムを作成した。濃度分布の推定アルゴリズムは、表 4.3-1 に示す逆解析手法の計算式を適用した。

No.1~8 は、公開資料に示された既往の逆解析手法である。このうちの No.1~7 は平成 27 年度「廃棄物の限定再利用に関する検討」において検討した、既往の逆解析手法である。それに加え、非線形最適化手法におけるシンプレックス法を導入した。しかしシンプレックス法については、予察的検討（Appendix- I -A に示す）の条件において収束性が悪く、計算時間も膨大であったことから、今回の検討に適さないと判断し、検討からは除外した。

表 4.3-1 逆解析手法

	No.	解析手法	略称	参考資料
直接的 手法	1	一般化逆行列		参考文献(3)
	2	Tikhonov の正則化		
反復的 手法	3	代数的再構成法	ART 法	参考文献(4)
	4	同時逐次再構成法	SIRT 法	
	5	一般化ベクトル型サンプリング・パターン・マッチング法	GVSPM 法	参考文献(5)
	6	最尤推定期待値最大化法	ML-EM 法	
	7	最大事後確率推定期待値最大化法	MAP-EM 法	参考文献(6)
	8	非線形最適化手法におけるシンプレックス法		

4.3.2 逆解析手法

表 4.3-1 に示した各逆解析手法について、逆解析プログラム内での計算に適用するための計算方法を（１）～（８）に示す。（１）～（２）は直接的な手法であり、（３）～（８）は反復的手法である。

反復的手法では、暫定解として濃度初期分布 $\mathbf{q}_0$ を仮定して、 $\mathbf{d}$ に対する $\mathbf{Gq}$ のずれを暫定解へ反映させる更新計算を繰り返すことで、 $\mathbf{Gq} \rightarrow \mathbf{d}$ を満たす分布へと $\mathbf{q}$ を近づけていく。更新計算は無限に繰り返すことができるため、計算を終えるには終了の条件を決める必要がある。その条件は解が十分に収束する、すなわち $|\mathbf{Gq}|$ が十分に $\mathbf{d}$ に近づくこととするが、その判断基準は4.3.3で述べる。

初期分布としては、一般的に単純逆投影法による解が使用されることが多く、その計算方法を（９）に示す。作成した逆解析プログラムにおいて、初期分布は解析パラメータの１つとして任意の分布を与えることができるが、デフォルトでは単純逆投影法で得られる分布を与えることとする。

（１）一般化逆行列

$\mathbf{d} = \mathbf{Gq}$ が成り立つとき、 $\mathbf{G}$ が正方行列かつ正則であれば逆行列 $\mathbf{G}^{-1}$ が存在する。逆行列が得られれば、式 4.3-18 により直接 $\mathbf{q}$ を求めることができる。

$$\mathbf{q} = \mathbf{G}^{-1}\mathbf{d} \quad \text{式 4.3-3}$$

今回の検討において、 $\mathbf{G}$ が正則行列であるとは限らないが、その場合でも以下のように特異値分解を使用することで、式 4.3-3 の $\mathbf{G}^{-1}$ の代わりとなる $n \times m$ 行列 $\mathbf{G}^{\dagger}$ を得ることができる。（参考文献(3)の式(14)）

特異値分解により、 $\mathbf{G}^{\dagger}$ は式 4.3-4 のように行列の積として定義される。 $\mathbf{G}^{\dagger}$ を構成する成分について、表 4.3-2 に示す。

$$\mathbf{G}^{\dagger} \equiv \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad \text{式 4.3-4}$$

逆解析プログラムでは、式 4.3-4 の特異値分解を既製の数値演算ライブラリ⁽⁷⁾を利用して行っている。

表 4.3-2 一般化逆行列の成分

	名称	備考・条件
$\mathbf{U} = (\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_n)$	左特異行列($n \times n$)	直交行列
$\mathbf{V} = (\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_m)$	右特異行列($m \times m$)	直交行列
$\mathbf{\Sigma} = \text{diag}[\sigma_1, \dots, \sigma_n]$	特異値行列($n \times m$)	$n < m$ の場合。 直交成分は $\sigma_1, \dots, \sigma_n$ 、他の成分は 0。
$\mathbf{\Sigma} = \text{diag}[\sigma_1, \dots, \sigma_m]$	特異値行列($n \times m$)	$n \geq m$ の場合。上と同様。
$\mathbf{u}_i = (\mathbf{u}_{i1}, \dots, \mathbf{u}_{in})$	左特異ベクトル	$\mathbf{u}_{ij} = \mathbf{u}_{ji}$
$\mathbf{u}_i = (\mathbf{u}_{j1}, \dots, \mathbf{u}_{jm})$	右特異ベクトル	$\mathbf{u}_{ij} = \mathbf{u}_{ji}$

(2) Tikhonov の正則化

上で説明した一般化逆行列に対し、正則化パラメータを用いる近似式を導入することで得られる解を安定化する手法が Tikhonov の正則化である。参考文献(3)の式(21)に標準的な手順が示されており、また Tikhonov の正則化と等価な解を与える特異値行列として、同文献の式(19)により単純な式が記述されている。一般化逆行列における式 4.3-4 における特異値行列 Σ を、式 4.3-5 の Σ_α に置き換える。

$\Sigma_\alpha = \text{diag}[\frac{\sigma_1^2 + \alpha^2}{\sigma_1}, \dots, \frac{\sigma_n^2 + \alpha^2}{\sigma_n}]$	($n < m$ の場合)	式 4.3-5
$\Sigma_\alpha = \text{diag}[\frac{\sigma_1^2 + \alpha^2}{\sigma_1}, \dots, \frac{\sigma_m^2 + \alpha^2}{\sigma_m}]$	($n \geq m$ の場合)	

(3) 代数的再構成法 (ART 法)

ART 法における解の更新は、参考文献(3)の式(37)より、式 4.3-6 にもとづいて行う。暫定解 $\mathbf{q}^{(k-1)}$ に対し、更新計算を 1 回行った新しい暫定解を $\mathbf{q}^{(k)}$ とおく。以降の反復的手法についても同様とする。

ART 法の特徴は、1 ステップで 1 つの測定値 d_i を用いて、濃度分布を修正していく点である。そのステップを $\mathbf{d}$ の要素数 n 回繰り返すことで、1 セット分の更新計算とする。式 4.3-6 では、 $k-1$ 回目の解から k 回目の解へ更新する際、ステップ 1 から n 回のステップを行い、ステップ n の結果を k 回目の反復計算における更新後の解とする。

$\mathbf{G}_i$ は、グリーン関数の i 行の要素を取り出したベクトル (行ベクトル) である。

ステップ 1	$\mathbf{q}^{(k,1)} = \mathbf{q}^{(k-1)} + \frac{(d_1 - \mathbf{G}_1 \mathbf{q}^{(k-1)})}{\mathbf{G}_1 \mathbf{G}_1^T} \cdot \mathbf{G}_1^T$	式 4.3-6
⋮	⋮	
ステップ i	$\mathbf{q}^{(k,i)} = \mathbf{q}^{(k,i-1)} + \frac{(d_i - \mathbf{G}_i \mathbf{q}^{(k,i-1)})}{\mathbf{G}_i \mathbf{G}_i^T} \cdot \mathbf{G}_i^T$	
⋮	⋮	
ステップ n	$\mathbf{q}^{(k)} = \mathbf{q}^{(k,n-1)} + \frac{(d_n - \mathbf{G}_n \mathbf{q}^{(k,n-1)})}{\mathbf{G}_n \mathbf{G}_n^T} \cdot \mathbf{G}_n^T$	

(4) 同時逐次再構成法 (SIRT 法)

SIRT 法における解の更新は、参考文献(1)の式(38)で示されており、本システムでは式 4.3 6 として適用した。SIRT 法は ART 法と同様の方法で解を更新するが、測定結果とのずれを測定結果 $\mathbf{d}$ 全体に対して確認するという点が異なる。

$$\mathbf{q}^{(k)} = \mathbf{q}^{(k-1)} + \beta \mathbf{G}^T \left[\frac{\mathbf{d} - \mathbf{G} \mathbf{q}^{(k-1)}}{\text{diag}(\mathbf{G} \mathbf{G}^T)} \right] \quad \text{式 4.3-7}$$

$\text{diag}(\mathbf{G} \mathbf{G}^T)$ は、 $\mathbf{G} \mathbf{G}^T$ の対角成分のみを抽出し要素とした n 次元ベクトルである。また [] で示す

分数表現は、 n 次元のベクトルであり、分子の対応する要素から分母の対応する要素（分子、分母ともに n 次元ベクトル）をそれぞれ除算することを意味する。

更新式には定数 β (relaxation factor)が含まれ、適切な値を入力しなければ、解が収束しない。

（５）一般化ベクトル型サンプルリング・パターン・マッチング法（GVSPM 法）

GVSPM 法における解の更新は、参考文献(4)の式(1)～(10)で示されており、式 4.3-8 として適用した。参考文献(4)においては、 $\mathbf{d}$ および $\mathbf{G}$ を正規化した上で計算する手法として紹介されている。

$$\mathbf{q}^{(k)} = \mathbf{q}^{(k-1)} + \mathbf{G}^T \left(\mathbf{d} - \frac{\mathbf{G}\mathbf{q}^{(k-1)}}{\|\mathbf{G}\mathbf{q}^{(k-1)}\|} \right) \quad \text{式 4.3-8}$$

（６）最尤推定期待値最大化法（ML-EM 法）

ML-EM 法は、期待値最大化法(EM)で確率モデルに含まれる隠れ変数を推定し、最尤推定(ML)法により濃度を推定する統計学的な推定手法である。ML-EM 法における解の更新方法は、参考文献(5)の式(7)で示されており、これを式 4.3-9 として適用した。

k 番目の更新計算は $\mathbf{q}^{(k)} = (q_1^{(k)}, \dots, q_m^{(k)})$ の要素 j ごとに行い、全要素に対する計算 (m 回) を 1 セット分の更新計算とする。 k 番目の更新計算において、 $\sum_{\ell} G_{i\ell} q_{\ell}^{(k-1)}$ は直前の $\mathbf{q}^{(k-1)}$ を用いて計算するため、 k 番目の計算が 1 セット分全て終了するまで、計算中の要素（例えば $q_2^{(k)}$ ）の更新を計算する際、同セット内における更新済みの要素に対する更新（例えば $q_1^{(k)}$ ）の影響は受けない。

$$q_j^{(k)} = \frac{q_j^{(k-1)}}{\sum_i G_{ij}} \sum_i \left\{ d_i G_{ij} \left(\sum_{\ell} G_{i\ell} q_{\ell}^{(k-1)} \right)^{-1} \right\} \quad \text{式 4.3-9}$$

（７）最大事後確率推定期待値最大化法（MAP-EM 法）

MAP-EM 法は ML-EM 法に改良を加えた手法で、ベイズ確率の考えに基づいて事前分布を導入した手法とする。参考文献(5)の式(13)で示された更新方法を、式 4.3-10 として適用した。

$$q_j^{(k)} = \frac{q_j^{(k-1)}}{\sum_i G_{ij} - \gamma \sum_{(j,h)} (q_j^{(k-1)} - q_h^{(k-1)})} \sum_i \left\{ d_i G_{ij} \left(\sum_{\ell} G_{i\ell} q_{\ell}^{(k-1)} \right)^{-1} \right\} \quad \text{式 4.3-10}$$

ML-EM 法の、要素 j ごとの更新式（式 4.3-9）に対し、 $\gamma \sum_{(j,k)} (q_j^{(k-1)} - q_k^{(k-1)})$ で与えられる補正項を加えていることが特徴である。ここで $\sum_{(j,h)}$ は、セル j に空間的に隣接する他のセル h に関して和をとる演算を表す。そのため、MAP-EM 法を使用する場合、各セルに対して座標 (x, y, z) を与える必要がある。また更新式には定数 γ （制御パラメータ）が含まれ、適切な値を入力しなければ解が収束しない。 $\gamma = 0$ では、ML-EM 法の更新式に一致する。なお γ は G/q の次元を持つため、 γ が一定の場合、解は測定値に比例しない。

式 4.3-10 では事前分布モデルを与える代わりに更新前の暫定解 $\mathbf{q}^{(k-1)}$ の情報を用いているが、参考文献(5)ではこれを事前分布と関連づける説明として、「一般的な画像の性質（一般的な画

像では、任意の画素に注目したとき、隣接する画素と近い画素値を取る場合が多い」としている。すなわち式 4.3-10 は、任意のセルの濃度と隣接するセルの濃度が近い値を取るような滑らかな分布を仮定し、そのような分布を事前分布のモデルとして与えていることになる。

(8) 非線形最適化手法におけるシンプレックス法

シンプレックス法は n 次元単体（シンプレックス）の端点における関数値を用いて、解を最小化する手法である。 n 次元単体とは、 $n+1$ 個の点で表された体積を持つ物体である（1 次元単体は線分、2 次元単体は三角形、3 次元単体は四面体、…）。

濃度分布の評価においては目的関数 $f(\mathbf{q}) = \|\mathbf{d} - \mathbf{G}\mathbf{q}\|^2$ を最小化する最適解 $\mathbf{q}$ をシンプレックス法によって求める。単体を構成する端点 $[q^1, q^2, \dots, q^{m+1}]$ が与えられており、このうち目的関数を最大化する点を q^h 、最小化する点を q^l とする。

シンプレックス法では反射、拡張、縮小、単体縮小のいずれかを繰り返し行うことで最適解へ収束させる。

シンプレックス法の具体的な計算手順を以下に示す。

ステップ 0：初期化

単体を構成する端点 $[q^1, q^2, \dots, q^{m+1}]$ を選ぶ。

ステップ 1： q^h, q^l の決定

q^h, q^l を決定する。

ステップ 2：反射

q^h を $q^c = \frac{1}{m} \sum_i q^i$ (q^h 以外の点の平均点) の反対側へ移した点を反射点と呼ぶ。反射点 q^{ref} は以下の式で求められる。

$$q^{ref} = 2q^c - q^h \quad \text{式 4.3-11}$$

$f(q^{ref}) \leq f(q^h)$ ならばステップ 3 へ進む。そうでなければステップ 4 へ進む。

ステップ 3：拡張

反射点をさらにその先に延ばした点を拡張点と呼ぶ。拡張点 q^{ex} は以下の式で求められる。

$$q^{ex} = 3q^c - 4q^h \quad \text{式 4.3-12}$$

$f(q^{ref}) \leq f(q^{ex})$ ならば q^h を q^{ref} で置き換えてステップ 1 へ進む。そうでなければ q^h を q^{ex} で置き換えてステップ 1 へ進む。

ステップ 4：縮小

q^{ref} と q^c の間にある点 (q^{ref} と q^c の中点とする) を縮小点と呼ぶ。縮小点 q^{con} は以下の式で求められる。

$$q^{con} = \frac{1}{2}(3q^c - q^{max}) \quad \text{式 4.3-13}$$

$f(q^{con}) \leq f(q^h)$ ならば q^h を q^{con} で置き換えてステップ 1 へ進む。そうでなければステップ

5 へ進む。

ステップ 5：単体縮小

すべての点 q^i を $(q^i + q^l)/2$ で置き換えてステップ 1 へ進む。

(9) 単純逆投影法 (LBP 法)

LBP 法では、 q_j に対する d_i の寄与率が G_{ji}^T であると仮定し、以下のように濃度分布を推定する。

$$\mathbf{q} = \frac{\|\mathbf{d}\|}{\|\mathbf{G}\mathbf{G}^T\mathbf{d}\|} \mathbf{G}^T \mathbf{d} \quad \text{式 4.3-14}$$

LBP 法による解は数学的に正しい解ではないものの、大まかな推定解を非常に単純に得ることができる。

4.3.1 グリーン関数の正規化

逆解析手法を用いて分布の推定を行う際、まず式 4.3-15 のように線量率 ($\mathbf{d} \rightarrow \mathbf{d}'$) を正規化する。またそれに合うよう、グリーン関数 ($\mathbf{G} \rightarrow \mathbf{G}'$) と放射能濃度 ($\mathbf{q} \rightarrow \mathbf{q}'$) を正規化する。このようにすることで、グリーン関数 $\mathbf{G}$ はより数値解析に適した形となるが、そのことは Appendix- I -A で示す。また、この変換による $\mathbf{d}'$, $\mathbf{G}'$, $\mathbf{q}'$ の関係を式 4.3-16 に示す。

線量率	$\mathbf{d}' = \frac{\mathbf{d}}{\ \mathbf{d}\ }$	式 4.3-15
グリーン関数 (j 列ベクトル)	$G'_{ij} = \frac{G_{ij}}{\ G_j\ }$	
放射能濃度 (要素 j)	$q'_j = q_j \frac{\ G_j\ }{\ \mathbf{d}\ }$	

$d'_i = \frac{d_i}{\ \mathbf{d}\ } = \frac{\sum G_{ij} q_j}{\ \mathbf{d}\ } = \sum_j \frac{G_{ij}}{\ G_j\ } \frac{\ G_j\ }{\ \mathbf{d}\ } q_j = \sum_j \frac{G_{ij}}{\ G_j\ } \frac{\ G_j\ }{\ \mathbf{d}\ } q_j = \sum G'_{ij} q'_j = \mathbf{G}' \mathbf{q}'$	式 4.3-16
$\mathbf{d}' = \mathbf{G}' \mathbf{q}'$	

なお正規化を行った場合、 $\mathbf{G}'$ および $\mathbf{q}'$ が無次元量となることから、MAP-EM 法 (式 4.3-10) による解は測定値に比例するようになる。

4.3.2 逆解析プログラムを使用しての試解析

放射能濃度分布評価コードシステムに適用する放射能濃度の推定手法について、さらなる最適化に向けての検討を行う。そのため平成 27 年度の検討に引き続き、試解析として、容器内に収納された資源化物を模擬した評価体系について、仮想的に算出した線量率分布に基づいた濃度分布推定を行う。試解析には、作成した逆解析プログラムを使用する。

仮想的なモデルとして、放射能濃度分布 q (Bq/kg) (m 次元ベクトル) を考える。このような仮定では、 q は一意的で、誤差を持たない。これを真の濃度分布と定義する。グリーン関数 G (n 行 m 列行列) を用いて、線量率分布 d (μ Sv/h) (n 次元ベクトル) を算出する。

$$d = Gq \quad \text{式 4.3-17}$$

d を入力して q の解を得る計算を逆解析と呼ぶのに対し、式 4.3-17 では q から d を算出するため順解析と呼ぶ。放射能濃度分布評価コードシステムにおいて、 d は測定により得られる数値であるのに対し、式 4.3-17 では計算により算出されるため理論値と呼ぶこととする。このようにして得られた理論値 d に対して逆解析手法を用いることで、測定値 d に対して逆解析手法を適用した場合と同様に、推定解 q が得られる。この推定解が真の濃度分布にどの程度一致するかを評価することで、推定手法そのものの適用可能性を検討することが、試解析の目的である。

平成 27 年度「廃棄物の限定再利用に関する検討」⁽⁴⁾の第 4 章では、いくつかの評価ケースを設定して試解析を行ったが、推定手法の最適化を検討するのに十分な結果は得られなかった。今回は、平成 27 年度とは異なる観点から条件を変えた複数のケースを設定してそれぞれ濃度分布の推定を行い、推定手法の最適化に向けた評価を行う。

- ① 放射能濃度分布の推定にあたり、測定データの点数が多いことと、精度が高いことが、濃度分布の推定において有利な条件であると推測される。しかし、コストや時間を考慮すると、要求する測定点数および測定精度は必要最小限度であることが望ましい。よって、濃度推定の性能を維持しつつ、どの程度まで測定点数および測定精度を抑えられるか検討する。
- ② 濃度分布の種類によって、濃度分布の推定に有利・不利があるかどうかを確認する。これまでの検討から、一様分布の濃度に対する解析では平均濃度が過大評価となること、中心付近に線源が存在する場合平均濃度が過小評価となる傾向があり、分布ごとの比較によってそれを確認する。また一様分布については、平均濃度を過大評価する原因が、解が一意でないことにあると考えられる。解が一意でない場合、初期分布に依存して収束する解が変化してしまうことが考えられるため、複数の初期分布を与えて収束する解が異なるかどうかを評価する。

4.3.3 試解析のための条件

(1) 評価体系と資源化物の物性データ

資源化物収納容器には埋設事業推進センターが荷重試験に用いた 1m^3 角型容器⁽⁸⁾を参考に、内寸 1m 立方、厚さ 6mm からなる鉄製容器モデルを作成し、内部がコンクリートで均質に満たされるモデル (図 4.3-2) を作成した。

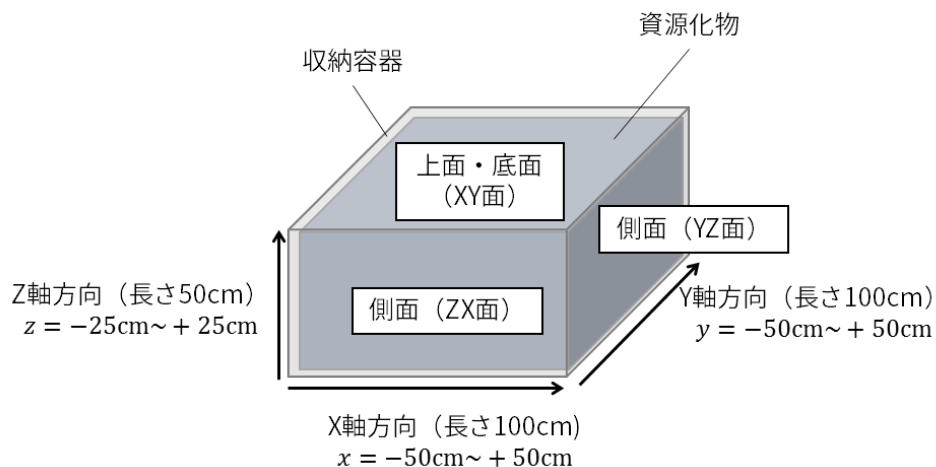


図 4.3-2 試解析に使用する資源化物収納容器モデル

資源化物収納容器の表面における線量率分布から内部の線源分布を逆解析により評価する際、事前に内部組成・線源情報を基に、収納されている資源化物（線源）をメッシュ状のセルに分割し、各メッシュに単位線源が存在するとし、それが測定点に与える線量率（グリーン関数）を用意する必要がある。そこで資源化物収納容器を対象に点減衰核積分コード QAD-CGGP2R⁽²⁾ を用いてグリーン関数ライブラリを構築した。容器表面と測定点の垂直距離は PSF の設置方法を考慮して 6cm とした。

またコンクリート・金属・空気の密度は表 4.3-3 に示す、放射線遮蔽ハンドブック⁽⁹⁾、及び産業廃棄物重量換算表（がれき類）に記載された物質の組成、密度のデータを用いて設定した。

表 4.3-3 物質条件

元素	密度g/cm3		
	コンクリート	鉄製容器	空気
H	6.73E-03		1.21E-08
C			1.48E-07
N			9.09E-04
O	7.14E-01		2.95E-04
Na	2.76E-02		
MG	1.28E-02		
Al	8.62E-02		
Si	4.35E-01		
S	1.35E-03		
K	3.84E-02		
Ca	1.15E-01		
Ti	6.06E-03		
Fe	3.70E-02	7.80E+00	
合計	1.48E+00	7.80E+00	1.20E-03

以上より、試解析の解析条件を表 4.3-4 に示す。

資源化物密度は、平成 27 年度「廃棄物の限定再利用に関する検討」⁽⁴⁾における試解析の条件と同じにした。資源化物寸法は平成 27 年度の試解析の条件（幅 1m×奥行き 1m×高さ 20～50cm）

の中で、最も不利な条件である容器高さ 50cm の場合とした（昨年度検討より、容器高さが大きくなると平均濃度を過小評価する傾向が得られたため）。

測定点は、平成 27 年度の試解析では容器底面を除いた 5 面に配置したが、下方の分布をうまく推定できないという課題があったため、今回は容器 6 面に対して一定間隔で取った。また測定点の配置間隔は、平成 27 年度の試解析では PSF での測定最短距離間隔である 10cm（測定点数 400 個）としたのに対し、今回は上記の 10cm を基本設定としつつ 20cm～7cm（測定点数 90～784 個）の範囲で可変とした。

濃度分布推定のためのセル分割数は 500 個とし、これは平成 27 年度の試解析における同寸法の容器における設定と同じであり、10cm 間隔で分割している。これは、測定点間隔よりも狭い間隔で分布を推定することは不可能と考えられるため、測定点間隔と同じ 10cm とした。

表 4.3-4 試解析の解析条件

資源化物密度	1.48g/cm ³ （均質と仮定）
資源化物寸法	幅 1m×奥行 1m×高さ 50cm
測定点	容器 6 面、一定間隔で測定
濃度分布推定のためのセル分割数(m)	500 個（10cm 間隔で分割）

（２）真の濃度分布

資源化物中に強い放射線源が含まれない場合、がれき全体の微弱な放射能が表層化することにより、濃度分布は全体として一様分布に近くなることが想定される。1F 敷地内限定再利用されるがれきは、ごく低表面線量率のがれきである。事業者側の意図としては、そのようながれきは放射能濃度も非常に低い場合がほとんどであると見なされる。それが事実であると仮定すれば、再利用されるがれきのほとんどはほぼ一様分布に近いと考えられる。

一方で、ごく低表面線量率のがれきでありながら高い放射能濃度を持っているがれきが存在する可能性も考えられ、それは放射能濃度が局所的に高い箇所（ホットスポット）が存在するような場合である。規制側としては、このような放射能が局所的に密集して存在しているようながれきの存在は十分に考慮する必要がある。

よって今回の検討では、事業者側の意図する均一な放射能濃度分布（一様分布）と、規制側が特に考慮すべき局所的な放射能濃度分布（密集分布）の両方を評価することとする。そのため、表 4.3-5 に示す、一様分布と 4 種類の密集分布を考える。密集分布は、一様分布における全セル分に相当する放射能が、特定の 1 セルに集中していることを想定し、他のセルの放射能濃度は 0 とする。放射能濃度が 0 でないセルはそれぞれ、容器中心付近（密集分布 1）、容器面中央付近（密集分布 2）、容器辺中央付近（密集分布 3）、容器角付近（密集分布 4）とする。

分布のイメージを、図 4.3-4 に示す。（スケールは一様分布に合わせて固定したため、5Bq/kg 以上の領域は常に赤で表示される。）

表 4.3-5 濃度分布

	線源の置かれたセルの中心座標			同セル番号	同放射能濃度
	x(cm)	y(cm)	z(cm)		
一様分布	全てのセル			1~500	1
密集分布 1	-5	5	0	255	500
密集分布 2	-5	45	0	295	500
密集分布 3	-45	45	0	291	500
密集分布 4	-45	45	20	491	500

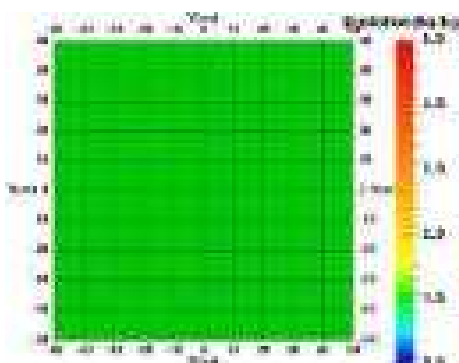


図 4.3-3 濃度分布（一様分布）

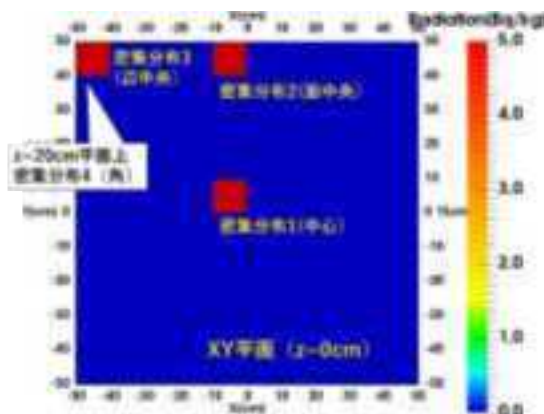


図 4.3-4 濃度分布（密集分布 1~4）

（ $z=0$ 断面。密集分布 4 は、密集分布 3 から z 方向に +20cm した位置）

（3）測定点

試解析において、測定点は x, y, z の各方向に一定間隔で取る。基本的には 10cm 間隔とし、この場合の試解析における測定点配置の例を、図 4.3-5 および図 4.3-6 に示す。各面の端は測定点間隔の半分(5cm)以上空けるものとし、上下と左右が対称となるよう測定点を配置する。

上面および底面の測定点数はそれぞれ $10 \times 10 = 100$ 、側面はそれぞれ $10 \times 5 = 50$ で、合計は 400 点である。

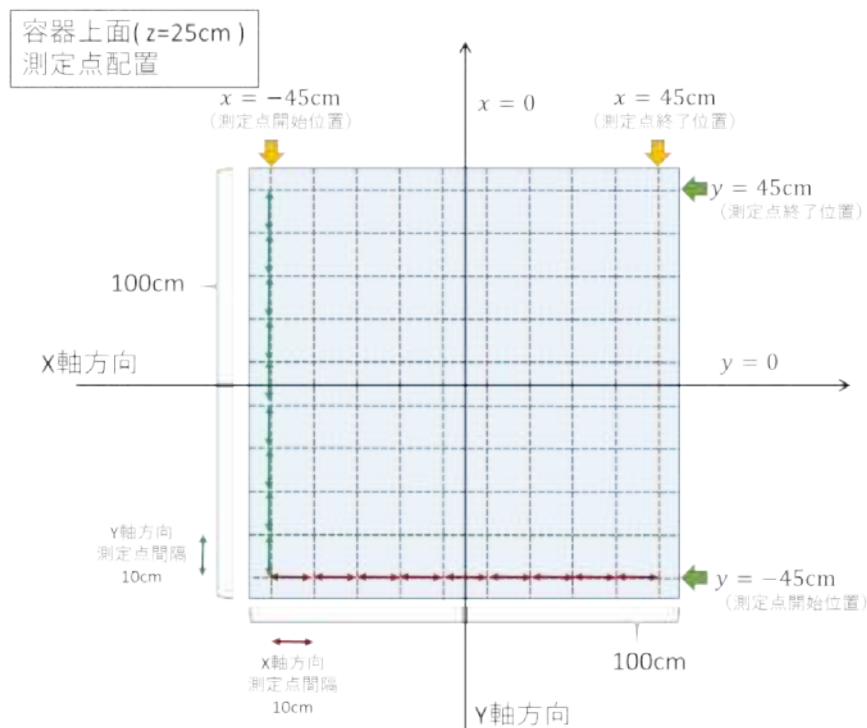


図 4.3-5 測定点配置の例 (容器上面)

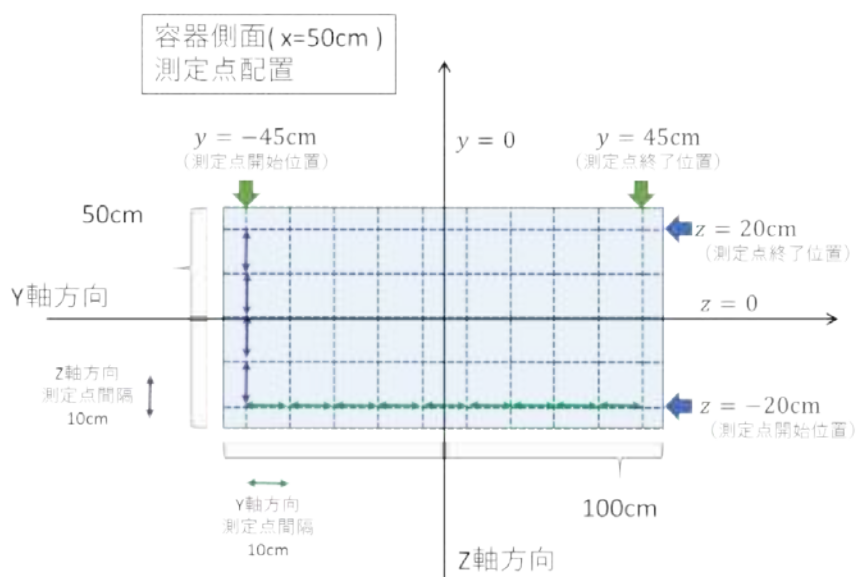


図 4.3-6 測定点配置の例 (容器側面)

(4) 放射能濃度分布推定結果の評価

放射能濃度分布の推定結果が得られた場合、それが妥当な結果かどうかを、定量的に判断する必要がある。逆解析プログラムにおいては、A)の評価値を計算し、反復的手法の終了条件に用いている。

A) 解析誤差

逆解析の結果は、式 4.3-18 で定義する解析誤差 Δ が 0 に近づくほど、数学的に正しい解である。

$$\Delta \equiv \frac{\|d - Gq\|}{\|d\|} \quad \text{式 4.3-18}$$

反復的手法は、解を更新する反復計算を一回行うごとに、式 4.3-18 で示した解析誤差 Δ が許容誤差以下であるかどうかを判定する。その結果、解析誤差が許容誤差を超えていれば解が収束するまで反復計算をくり返し、許容誤差以下になった時点で解が収束したものとして終了する。

解析誤差の要素 $|d_i - G_{ij}q_j|$ および、線量率 d_i が各測定点で同程度であると仮定すると、式 4.3-19 より、測定データには Δ 倍に相当する誤差が含まれる。

$$|d_i - G_{ij}q_j| \cong \Delta \frac{\|d\|}{\sqrt{n}} \cong \Delta \sqrt{\frac{nd_i^2}{n}} = \Delta \times d_i \quad \text{式 4.3-19}$$

例えば $\Delta = 1.0 \times 10^{-3}$ の場合、表 4.3-7 の $d_1 = 0.125897870944000$ は約 0.00013 の誤差を含むため、実際には $d_1 = 0.1259 \pm 0.0001$ であり、少数第 5 位以降の数値は有為ではない（有効数字 4 桁）。よって有効数字 c 桁の数値精度を表現するために必要な解析誤差の条件は、式 4.3-20 で表すことができ、この条件を満たすと同時に、有効数字 c 桁の測定値を与える必要がある。

$$\Delta < 1.0 \times 10^{-(c-1)} \quad \text{式 4.3-20}$$

式 4.3-18 は客観的に解を評価することが可能であるが、 $\Delta \rightarrow 0$ であっても、それが必ずしも真の解であるとは限らない。条件によっては、 $\Delta \rightarrow 0$ を満たす解が、無数に存在するためである。

試解析においては、逆解析によりどの程度真の濃度を再現できるかを調べることが目的であり、かつ真値が既知である。よって、真値との比較によって逆解析の妥当性を評価する。濃度分布の推定値 $\hat{q}$ と真値 q を比較する指標として、以下の B)と C)を用いる。

B) 平均濃度（真の濃度を 1 として規格化）

4.2 にも示した通り、平均放射能濃度は汚染がれきの検認においてめやす濃度との比較に用いられるため、重要な指標の 1 つである。

試解析においては真値が既知であるため、平均濃度を式 4.3-21 で評価する。分母に真値の平均濃度を用いて規格化しているため、1 に近づくほど真値に近く理想的な推定結果であると言え、 $q_{ave} > 1$ ならば過大評価、 $q_{ave} < 1$ ならば過小評価である。

解析誤差 Δ が小さい場合、分布が再現されていれば平均濃度も一致し、分布が変化（真値に対して広がったり、偏ったりなど）していれば一致しないため、推定結果がどの程度真値を再現しているか評価することができる。

ただし解析誤差 Δ が大きい場合など、セルごとの濃度に大きな誤差が含まれる場合、真の分

布を再現できていないにも関わらず、結果的に平均濃度が真値に近づく可能性がある。

$$q_{ave} = \frac{\sum_j^m \hat{q}_j}{\sum_j^m q_j} \quad \text{式 4.3-21}$$

C) 推定誤差

濃度分布の推定値と真値をセルごとに比較し、その差の二乗平均平方根をとったものとして、式 4.3-22 に示す推定誤差を定義する。この量が 0 に近いほど推定値は真値を再現するといえる。B)の平均濃度について、真の分布を再現していないにも関わらず平均濃度が真値に近い場合、真の分布を再現しているものに比べ推定誤差が高くなる可能性がある。

$$q_{err} \equiv \frac{\|q - \hat{q}\|}{\|q\|} = \sqrt{\frac{\sum (q_j - \hat{q}_j)^2}{\sum q_j^2}} \quad \text{式 4.3-22}$$

(5) 計算パラメータ

逆解析に使用するパラメータを、表 4.3-6 に示す。

許容誤差と最大反復回数は、各反復的手法（ART 法,SIRT 法,GVSPM 法,ML-EM 法,MAP-EM 法）について必要となる。許容誤差は式 4.3-19 の議論より、有効数字 3 桁程度の測定値を再現できる誤差の 1/20 として設定した。ただし、反復的手法は計算条件と許容誤差によっては解が収束しえないこともある。そのため最大反復回数 I_{max} を指定し、その回数で収束しない場合は収束の見込みがないと判断し、その時点での解を出力して更新を終了する。最大反復回数は 100 万回だが、それで収束しない場合は、500 万回に増やして再度実行し、結果が変化しない場合は収束の見込みがないと判断する。

Tikhonov の正則化、SIRT 法、MAP-EM 法に特有のパラメータは、図 4.3-4 の分布 4 に対して濃度分布の推定を行い、平均放射能濃度が真値に近い結果を得た時のパラメータを最適値として設定した。

表 4.3-6 入力パラメータ

対象となる手法	パラメータ名	表記	数値
各反復的手法	許容誤差		5E-4
各反復的手法	最大反復回数	I_{max}	1E+6
Tikhonov の正則化	正則化パラメータ	α	1E-5
SIRT 法	relaxation factor	β	1E-2
MAP-EM 法	制御パラメータ	γ	1E-4

4.3.4測定への適用に向けた検討

放射能濃度分布の推定にあたり、測定データの点数が多いことと、精度が高いことが、濃度

分布の推定において有利な条件であると推測される。しかし、コストや時間を考慮すると、要求する測定点数および測定精度は必要最小限度であることが望ましい。よって、濃度推定の性能を維持しつつ、どの程度まで測定点数および測定精度を抑えられるか検討する。

(1) 測定値の有効数字に関する検討

理論値である線量率分布 $d(\mu\text{Sv/h})$ の理論値は、誤差を含まない理想的な値である。実際に測定値として得られる線量率のデータは誤差を含み、有効数字は精々数桁程度であることが想定される。理論値に対して数値丸めを行うことによって、少ない桁数の有効数字を持つデータを表現し、これに対して濃度の推定を行うことで、濃度をよく推定するためにはどの程度の測定精度が必要か確認する。

一様分布の濃度分布に対して、線量率分布 $d(\mu\text{Sv/h})$ を、表 4.3-7 のように有効数字 2～5 桁に丸める。

表 4.3-7 数値丸めの例（線量率 400 点に対し、4 点のみ）

線量率 分布	元の数値	有効数字（桁）			
		5	4	3	2
d_1	0.125897870944000	0.12590E+00	0.1259E+00	0.126E+00	0.13E+00
d_2	0.162731469208000	0.16273E+00	0.1627E+00	0.163E+00	0.16E+00
d_3	0.180401162684000	0.18040E+00	0.1804E+00	0.180E+00	0.18E+00
d_4	0.188369482274000	0.18837E+00	0.1884E+00	0.188E+00	0.19E+00
...	...	...	...	...	...

許容誤差は式 4.3-19 の議論より、有効数字の各桁数の測定値を再現できる誤差の 1/20 として設定した。

表 4.3-8 許容誤差

有効数字（桁）	5	4	3	2
許容誤差(Δ)	5×10^{-6}	5×10^{-5}	5×10^{-4}	5×10^{-3}

表 4.3-7 のようにして得られた線量率分布に対して、表 4.3-8 の許容誤差で濃度分布の推定を行う。なお測定点間隔は、10cm（測定点数：400）とした。その結果として、解析誤差 Δ を表 4.3-9 に示す。また平均濃度を表 4.3-10 に、推定誤差を表 4.3-11 に示す。

一般化逆行列の場合、許容誤差を設けずに終了計算終了時に誤差を評価するため、解析誤差は非常に小さい。しかし平均放射能濃度としてみると、有効数字 2 桁で-14.84 と負値を示した。また、3 桁の場合にも、大きな過大評価となっている。

一般化逆行列による解は数学的に正しい解である。ただし、 $\mathbf{q}$ には $\mathbf{q} \geq 0$ という制約条件が課されないため、 $\mathbf{q}$ の成分が負となる可能性があり、物理的に正しい解が得られるとは限らない。実際に、500 セル中 224 セルが負値を取っている。

反復的手法については、有効数字 3～4 桁の場合は、100 万回の反復計算によって、多くの手法で解が許容誤差内に収束した。一方、有効数字 2 桁の場合は、100 万回の反復計算を行って

も収束せず、かつ500万回の反復計算を行っても100万回の場合と誤差が変化しなかったため、これ以上計算を繰り返しても収束の見込みはないと判断した。同様に有効数字5桁の場合、1000万回の反復計算を限度として収束の見込みはないと判断した。

反復的手法5つについて、平均濃度と推定誤差をグラフ化し、図 4.3-7 と図 4.3-8 に示す。平均濃度については、有効数字3桁以上では大きな差がないが、有効数字2桁ではGVSPM法を除いて濃度が他の結果に比べて小さくなる。GVSPM法では、有効数字2桁で平均濃度が最も真値に近づいているが、推定誤差は有効数字2桁で最大となっているため、有効数字に関係なく過大評価の傾向が元々あり、ばらつきの影響で結果的に真値に近づいたのだと推測され、有効数字の桁数減少に伴い精度は低下していると考えられる。

以上より、式 4.3-17 を用いた真の濃度分布より算出された理論値に対しては、有効数字の桁数が多ければ、非常に小さな解析誤差で解が得られるが、その場合でも真の分布には一致しない。これは、一様分布の場合解が一意でないためであり、結果として全体的に過大評価となっている。

また反復的手法の場合、有効数字5桁の精度を目標とした解析（許容誤差5E-6）では、5桁分の理論値でも収束せず、要求できる精度には限度があることが分かる。また、有効数字2桁に丸めた理論値では、有効数字2桁の精度を目標とした解析（許容誤差5E-6）でも収束せず、真の濃度分布の情報が失われてしまっている。

表 4.3-9 線量率の有効数字桁数に対する各逆解析手法の解析誤差

	線量率の有効数字（桁）			
	2	3	4	5
許容誤差	5E-3	5E-4	5E-5	5E-6
一般化逆行列	4.14E-12	4.70E-12	4.25E-12	4.69E-12
Tikhonov の正則化	3.98E-06	4.87E-07	2.54E-08	1.08E-08
ART 法	1.16E-02	5.00E-04	5.00E-05	5.00E-06
SIRT 法	7.39E-03	5.19E-04	5.00E-05	1.85E-05
GVSPM 法	1.02E-02	5.00E-04	5.00E-05	2.03E-05
ML-EM 法	7.26E-03	5.00E-04	5.00E-05	1.22E-05
MAP-EM 法	7.26E-03	5.00E-04	5.00E-05	2.08E-05

表 4.3-10 線量率の有効数字桁数に対する各逆解析手法の平均濃度

	線量率の有効数字（桁）			
	2	3	4	5
一般化逆行列	-1.48E+01	2.27E+00	1.23E+00	1.25E+00
Tikhonov の正則化	-1.48E+01	2.27E+00	1.23E+00	1.25E+00
ART 法	1.00E+00	1.20E+00	1.28E+00	1.26E+00
SIRT 法	1.11E+00	1.31E+00	1.30E+00	1.29E+00
GVSPM 法	1.30E+00	1.29E+00	1.27E+00	1.26E+00
ML-EM 法	1.21E+00	1.33E+00	1.30E+00	1.30E+00
MAP-EM 法	1.19E+00	1.31E+00	1.28E+00	1.15E+00

(真の濃度を1として規格化)

表 4.3-11 線量率の有効数字桁数に対する各逆解析手法の推定誤差

	線量率の有効数字 (桁)			
	2	3	4	5
一般化逆行列	2.54E+02	1.57E+01	1.63E+00	1.63E+00
Tikhonov の正則化	2.54E+02	1.56E+01	1.63E+00	1.63E+00
ART 法	2.48E+00	1.74E+00	1.15E+00	1.15E+00
SIRT 法	1.15E+00	1.20E+00	1.18E+00	1.18E+00
GVSPM 法	3.60E+00	1.08E+00	1.04E+00	1.04E+00
ML-EM 法	1.43E+00	1.24E+00	1.18E+00	1.18E+00
MAP-EM 法	1.15E+00	1.17E+00	1.11E+00	1.11E+00

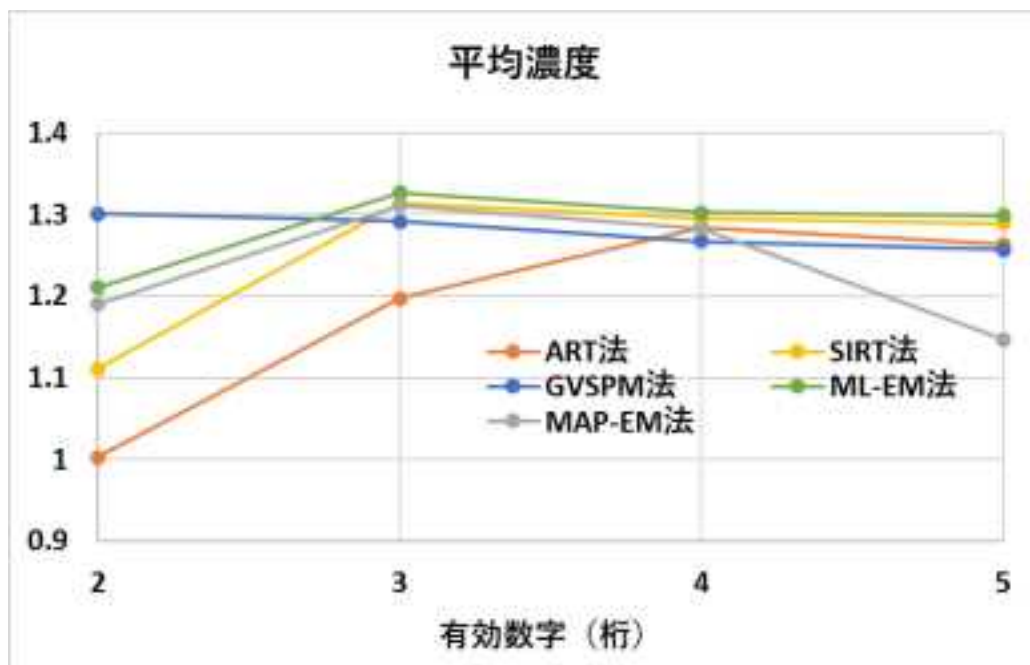


図 4.3-7 線量率の有効数字桁数に対する各逆解析手法の平均濃度

(真の濃度を 1 として規格化)

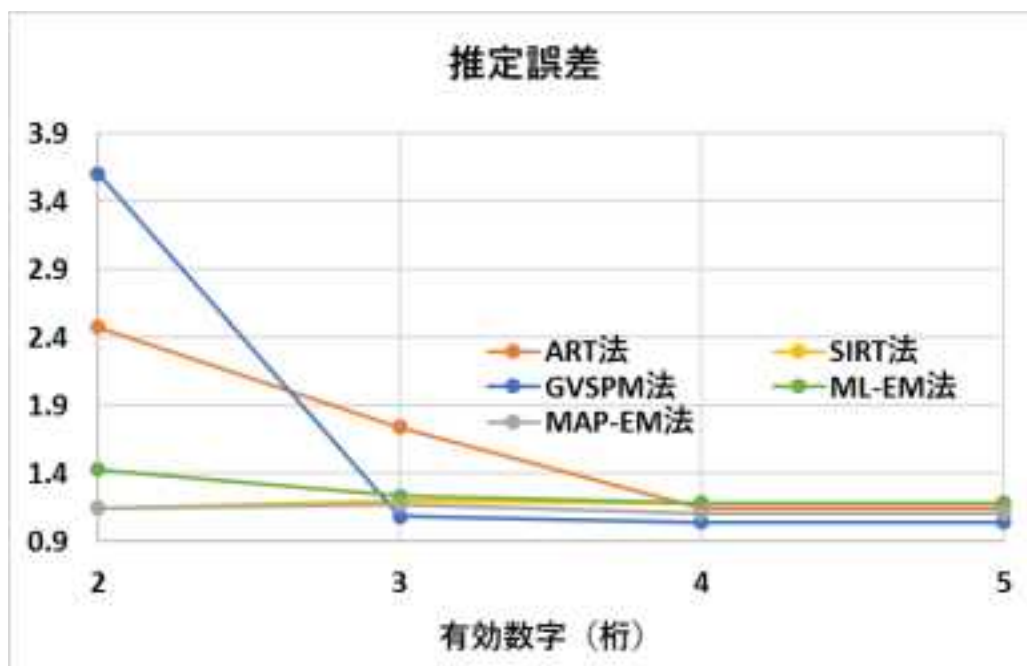


図 4.3-8 線量率の有効数字桁数に対する各逆解析手法の推定誤差

以上より、有効数字3桁以下では、一般化逆行列による解析は困難であると考えられる。実際には、有効数字4桁以上の測定データは現実的でなく、測定誤差によりさらに解は不安定となることが予想されるため、一般化逆行列による逆解析手法は、本検討では不適切と判断する。一方で、反復的手法の場合も、一般化逆行列に比べて影響は小さいものの、有効数字2桁以下では解が不安定になる傾向が見られた。

(2) 測定点数および線源分割数に関する検討

平均濃度の評価は、測定点数がより多い体系で解析することで、より真値に近づくことが推測される。しかし、測定点を多くすることでより多くの時間とコストがかかることから、測定点数は必要最小限度であることが望ましい。(1)の計算条件で使ったグリーン関数は測定点数を400取ったものであったが、同じ真の濃度分布(一様分布)に対し、より多く(または少なく)の測定点数を取ったグリーン関数を作成して解析を行い、推定された平均濃度を比較する。その結果、それ以上測定点数を増やしても平均濃度が真値に近づかない限界の値があるのであれば、その数値が推定精度のよい解析を行える最小限度の測定点数であるということが出来る。

また、セルの分割数(m)を500としているため、測定点 n が500の前後で推定解の平均放射能濃度がどのくらい変化するか調べる。式4.3-1は連立方程式の形で書くことができ、連立方程式は一般に式の数未知数以上の場合、一意に解くことができる。この場合、未知数は m 個であり、式は n 個分存在するため、 $n \geq m$ の場合、推定解が真値に大きく近づくような結果が得られるかもしれない。

測定点間隔を20cm～7cmの範囲で可変とし、測定点数を増減させる。測定点配置は、それぞれ一定の測定点間隔に対応するパターンNo.1～7を設定する。

表4.3-12は、測定点配置No.1～7の、X方向の配置情報を示す。容器のX方向長さ50cmを

測定点間隔で分割し、測定点と容器端が近づきすぎない（容器端から測定点までの距離が間隔の半分未満とならない）最大数を測定点数とする。開始点は、負側の端(x=-50cm)に最も近い測定点の X 座標を表す。終了点は、正側の端(x=50cm)に最も近い測定点の X 座標を表す。

同様に、Y 方向の配置情報を表 4.3-13 に、Z 方向の測定点配置を表 4.3-14 に示す。

表 4.3-12 X 方向の測定点配置

配置 No.	間隔(cm)	開始点(cm)	終了点(cm)	点数
1	20	-40	40	5
2	11	-44	44	9
3	10	-45	45	10
4	9	-45	45	11
5	8	-44	44	12
6	7.5	-45	45	13
7	7	-45.5	45.5	14

表 4.3-13 Y 方向の測定点配置

配置 No.	間隔(cm)	開始点(cm)	終了点(cm)	点数
1	20	-40	40	5
2	11	-44	44	9
3	10	-45	45	10
4	9	-45	45	11
5	8	-44	44	12
6	7.5	-45	45	13
7	7	-45.5	45.5	14

表 4.3-14 Z 方向の測定点配置

配置 No.	間隔(cm)	開始点(cm)	終了点(cm)	点数
1	20	-10	10	2
2	11	-16.5	16.5	4
3	10	-20	20	5
4	9	-18	18	5
5	8	-20	20	6
6	7.5	-18.75	18.75	6
7	7	-21	21	7

表 4.3-12～表 4.3-14 より、各測定点配置による容器 6 面の合計測定点数を算出すると、表 4.3-15 の通りとなる。

表 4.3-15 各測定点配置に応じた測定点数

配置 No.	X-Y 面		Y-Z 面		Z-X 面		合計
	z=-25cm	z=25cm	x=-50cm	x=50cm	y=-50cm	y=50cm	
1	25	25	10	10	10	10	90
2	81	81	36	36	36	36	306
3	100	100	50	50	50	50	400
4	121	121	55	55	55	55	462
5	144	144	72	72	72	72	576
6	169	169	78	78	78	78	650
7	196	196	98	98	98	98	784

同じ濃度分布（一様分布）に対し、各測定点配置に合ったグリーン関数を作成し、またそのグリーン関数を用いて線量率の理論値を算出した。その線量率分布に対し濃度分布の推定を行う。（1）の議論より、一般化逆行列と Tikhonov の正則化を除く逆解析手法 5 つ（反復的手法）を対象とする。

その結果として、解析誤差を表 4.3-16、平均濃度を表 4.3-17、推定誤差を表 4.3-18 に示す。また測定点数に対する、平均濃度の依存性をプロットしたグラフを図 4.3-7 に示す。同様に、測定点数に対する、推定誤差の依存性をプロットしたグラフを図 4.3-8 に示す。

これを見ると、反復的手法においては明確な測定点数依存性は見られなかった。また、 $n=m=500$ の前後の測定点数である $n=462$ と $n=576$ の間で、平均濃度や推定誤差が大きく変化するようなことは、どの反復的手法でも見られず、式 4.3-1 を連立方程式として解いた場合と異なり、反復的な逆解析手法では、未知数と式の数によって解が一意に得られるかどうかが決まるわけではないと考えられる。

表 4.3-16 測定点数に対する解析誤差

推定手法	測定点数						
	90	306	400	462	576	650	784
ART 法	4.57E-04	4.99E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04
SIRT 法	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04
GVSPM 法	4.83E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04
ML-EM 法	4.98E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04
MAP-EM 法	4.98E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04

表 4.3-17 測定点数に対する平均濃度

推定手法	測定点数						
	90	306	400	462	576	650	784
ART 法	1.41E+00	1.39E+00	1.31E+00	1.32E+00	1.32E+00	1.29E+00	1.30E+00
SIRT 法	1.41E+00	1.39E+00	1.36E+00	1.37E+00	1.38E+00	1.36E+00	1.37E+00
GVSPM 法	1.38E+00	1.36E+00	1.33E+00	1.34E+00	1.35E+00	1.33E+00	1.34E+00
ML-EM 法	1.40E+00	1.39E+00	1.36E+00	1.37E+00	1.38E+00	1.36E+00	1.37E+00
MAP-EM 法	1.40E+00	1.39E+00	1.36E+00	1.37E+00	1.38E+00	1.36E+00	1.37E+00

(真の濃度を 1 として規格化)

表 4.3-18 測定点数に対する推定誤差

推定手法	測定点数						
	90	306	400	462	576	650	784
ART 法	1.46E+00	1.40E+00	1.20E+00	1.22E+00	1.20E+00	1.15E+00	1.17E+00
SIRT 法	1.47E+00	1.40E+00	1.30E+00	1.34E+00	1.36E+00	1.30E+00	1.33E+00
GVSPM 法	1.33E+00	1.27E+00	1.18E+00	1.22E+00	1.24E+00	1.19E+00	1.21E+00
ML-EM 法	1.42E+00	1.39E+00	1.31E+00	1.34E+00	1.35E+00	1.30E+00	1.33E+00
MAP-EM 法	1.42E+00	1.39E+00	1.30E+00	1.34E+00	1.35E+00	1.30E+00	1.32E+00

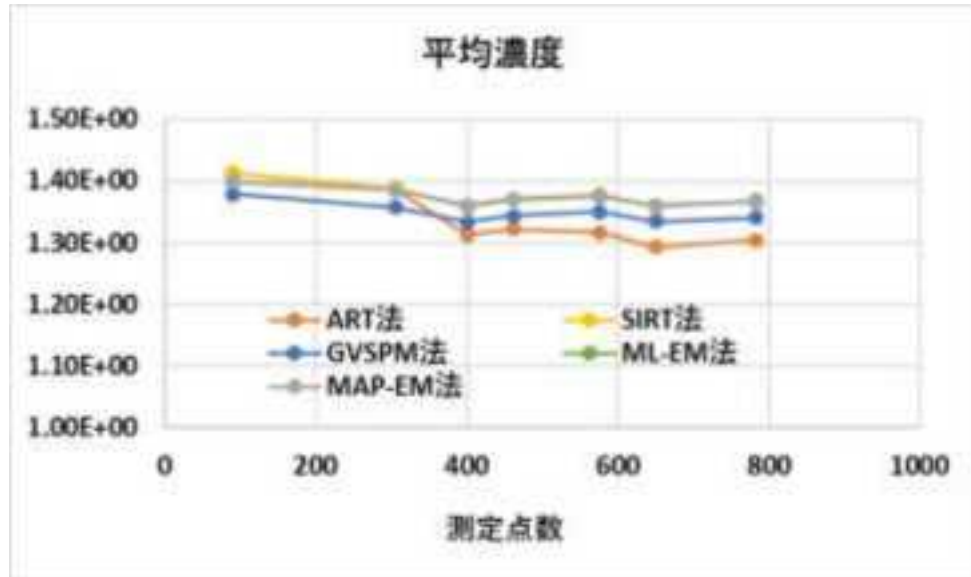


図 4.3-9 測定点数に対する平均濃度
(真の濃度を 1 として規格化)

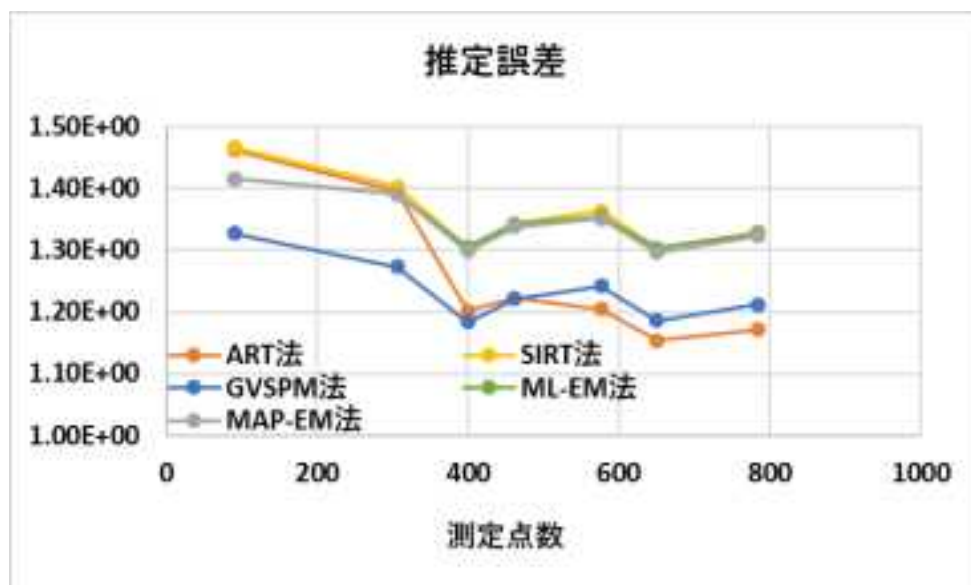


図 4.3-10 測定点数に対する推定誤差

4.3.5 精度向上のための評価

(1) 放射能濃度分布による影響評価

濃度分布の種類によって、濃度分布の推定に有利・不利があるかどうかを確認する。これまでの検討から、一様分布の濃度に対する解析では平均濃度が過大評価となること、中心付近に線源が存在する場合平均濃度が過小評価となる傾向があり、分布ごとの比較によってそれを確認する。4.3.3 (2) に示した一様分布および密集分布 1～4 に対し、測定点間隔を 10cm (測定点数 : 400) として各測定点での線量率理論値を算出し、それに対して各逆解析手法にて濃度分布の推定を行った。

一様分布および密集分布 1～4 に対する逆解析 (各反復的手法) の結果を、表 4.3-19～表 4.3-21 に示す。また、ML-EM 法の解析結果から作成した画像を、図 4.3-11～図 4.3-14 に示す。

表 4.3-19 濃度分布の違いによる解析誤差

推定手法	真の分布				
	一様分布	密集分布 1	密集分布 2	密集分布 3	密集分布 4
ART 法	5.00E-04	5.00E-04	4.88E-04	4.90E-04	4.47E-04
SIRT 法	5.00E-04	8.72E-04	5.00E-04	5.00E-04	4.99E-04
GVSPM 法	5.00E-04	5.00E-04	3.57E-04	2.97E-04	3.39E-04
ML-EM 法	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04
MAP-EM 法	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04

表 4.3-20 濃度分布の違いによる平均濃度

推定手法	真の分布				
	一様分布	密集分布 1	密集分布 2	密集分布 3	密集分布 4
ART 法	1.31E+00	9.52E-01	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
SIRT 法	1.36E+00	7.67E-01	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
GVSPM 法	1.33E+00	8.66E-01	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
ML-EM 法	1.36E+00	8.91E-01	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
MAP-EM 法	1.36E+00	8.94E-01	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00

(真の濃度を 1 として規格化)

表 4.3-21 濃度分布の違いによる推定誤差

推定手法	真の分布				
	一様分布	密集分布 1	密集分布 2	密集分布 3	密集分布 4
ART 法	1.20E+00	1.82E-01	1.71E-03	1.22E-03	4.98E-04
SIRT 法	1.30E+00	9.12E-01	2.16E-03	1.86E-03	1.41E-03
GVSPM 法	1.18E+00	5.51E-01	1.35E-03	1.05E-03	9.57E-04
ML-EM 法	1.31E+00	4.48E-01	1.91E-03	1.67E-03	1.35E-03
MAP-EM 法	1.30E+00	4.52E-01	1.89E-03	1.56E-03	1.29E-03

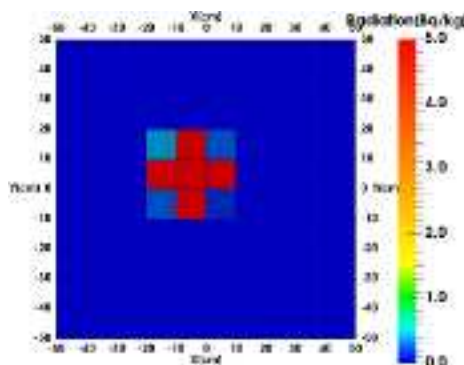


図 4.3-11 ML-EM 法による分布推定結果（真の分布：密集分布 1、 $z=0$ 断面）

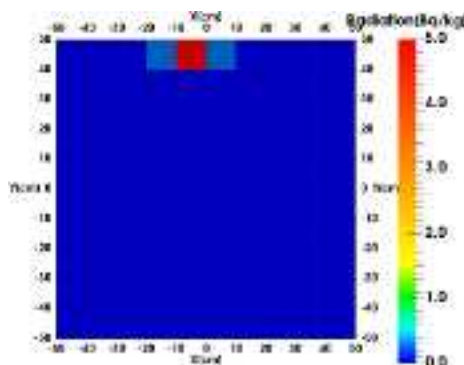


図 4.3-12 ML-EM 法による分布推定結果（真の分布：密集分布 2、 $z=0$ 断面）

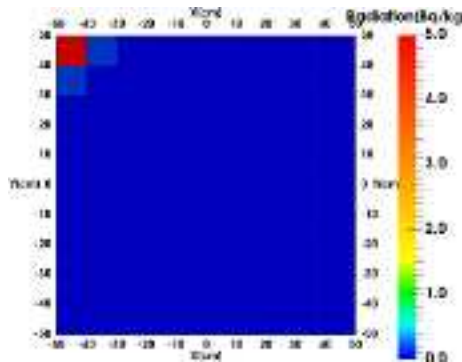


図 4.3-13 ML-EM 法による分布推定結果（真の分布：密集分布 3、z=0 断面）

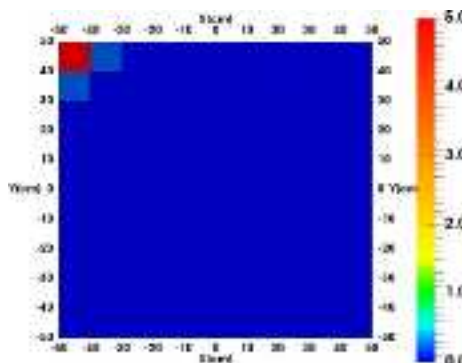


図 4.3-14 ML-EM 法による分布推定結果（真の分布：密集分布 4、z=20cm 断面）

検討の対象とした全ての逆解析手法（反復的手法）について、一様分布では平均濃度が過大評価となっている。また全ての反復的手法で、密集分布 2～4 では真の値に一致している。一方で密集分布 1 では過小評価となっている。

このことから、線源が特定のセルに集中しているような分布に対しての逆解析では、ほとんどの場合真の濃度を再現することができるが、線源が中心付近にあるような場合には、平均濃度が過小評価となる。この傾向は、各反復的手法に共通している。

また 4.3.5（1）での検討において、手法に固有のパラメータを含む SIRT 法については、他の手法に対する優位性が得られなかった。また MAP-EM 法は、類似する手法である ML-EM 法に対する有意な差が得られなかった。

表 4.3-6 で設定したパラメータは、密集分布 4 に対して平均濃度が最も真値に近づいた値を最適値として設定した。しかし、分布によって最適なパラメータが異なることも考えられる。そこで（2）に示した真の分布（一様分布および密集分布 1～4）全てに対して、以下の通りパラメータの最適化を試みた。

SIRT 法の固有パラメータ β および MAP-EM 法の固有パラメータ γ を 0～1 の範囲で変化させ（ $1, 10^{-1}, \dots, 10^{-9}$ ）それぞれの分布に対する平均濃度の応答を調べた。その結果を、図 4.3-15 と図 4.3-16 に示す。

SIRT 法の固有パラメータ β の最適化結果（図 4.3-15）を見ると、密集分布 2～4 では $\beta = 10^{-1} \sim 10^{-4}$ で平均濃度が最も真値に近づく。一方で密集分布 1 では、全体的に過小評価であるが、 $\beta = 10^{-8} \sim$ で平均濃度が最も真値に近づく。一様分布では、 $\beta = 1 \sim 10^{-1}$ で濃度が 0 となり、 $\beta = 10^{-2} \sim$ ではほぼ平坦となっている。このことから、SIRT 法の固有パラメータ β の最適値は、

分布によって異なる。この場合、真の分布が不明である実際の解析では、最適なパラメータをあらかじめ設定することができないこととなる。また密集分布 1 では、最も平均濃度が真値に近い 0.8166 ($\beta = 10^{-9}$) でも表 4.3-20 に示した他の手法よりも平均濃度を過小評価している。以上より、SIRT 法は限定再利用における今年度の検討には適用しないこととする。

また MAP-EM 法の固有パラメータ γ の最適化結果 (図 4.3-16) を見ると、密集分布 2~4 は γ によらず常に真値に近い値が得られている。密集分布 1 では全体的に過小評価だが、 $\gamma = 10^{-3} \sim$ では比較的真値に近づき、 $\gamma = 10^{-9}$ まではほぼ平坦である。一方の一樣分布では全体的に過大評価だが、 $\gamma = 1 \sim 10^{-1}$ で比較的真値に近づく。このことから、MAP-EM 法の固有パラメータ γ の最適値も分布によって異なると考えられる。また密集分布では $\gamma \rightarrow 0$ で最適値に近づき、これを式 4.3-10 に代入すると、式 4.3-9 に示す ML-EM 法に一致することから、MAP-EM 法は ML-EM 法に対し優位性を得られていないこととなる。以上より SIRT 法と同様に、MAP-EM 法は限定再利用における今年度の検討には適用しないこととする。

ただし MAP-EM 法については、真の分布が一樣分布であれば、 $\gamma = 1 \sim 10^{-1}$ で真値に近づく。よって今年度の検討では真の分布が事前分布が得られないことを前提としているため適用できないが、真の分布が一樣分布に近いことがあらかじめ分かっているような場合、MAP-EM 法は ML-EM 法よりも有利な逆解析手法となる可能性がある。

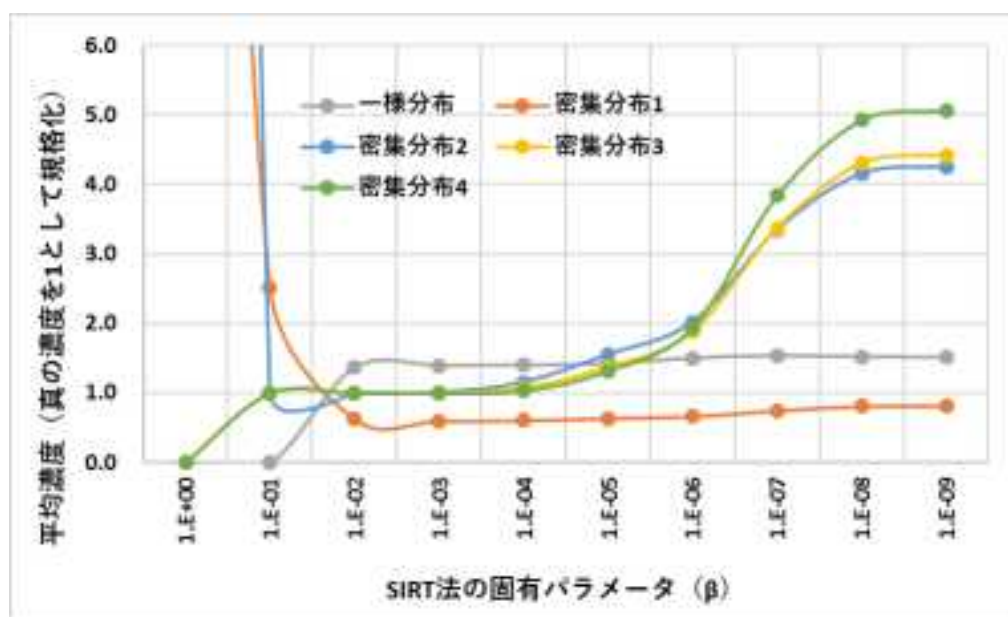


図 4.3-15 SIRT 法の固有パラメータ (β) 最適化

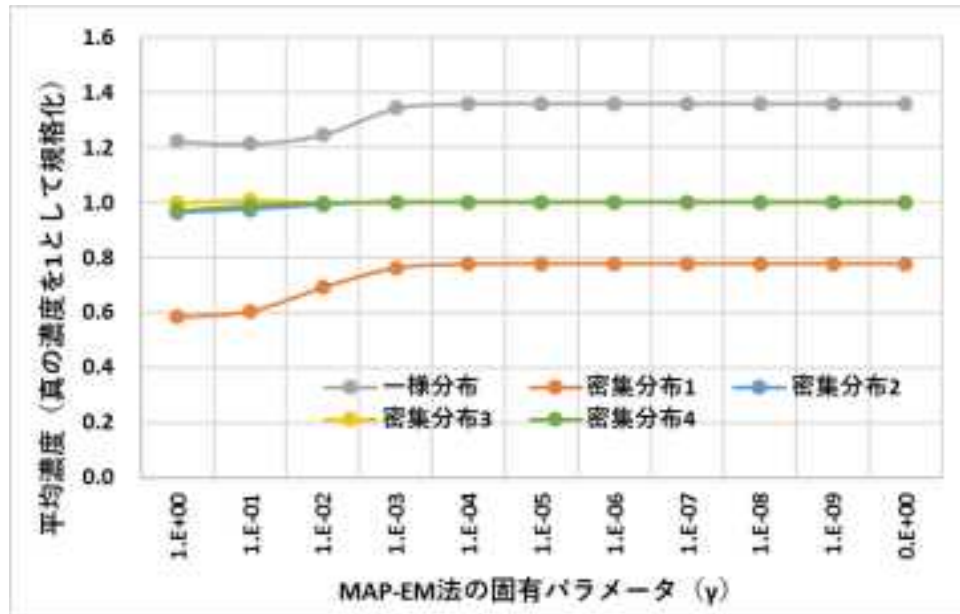


図 4.3-16 MAP-EM 法の固有パラメータ (γ) 最適化

(2) 初期分布による影響に対する評価

一様分布については、表 4.3-20 の結果から、平均濃度を過大評価する傾向が見られた。これは、解が一意でないということであると考えられる。解が一意でない場合、初期分布に依存して収束する解が変化してしまうことが考えられるため、複数の初期分布を与えて収束する解が異なるかどうかを評価する。

図 4.3-3 の一様分布に対し、以下の A)～D)の初期分布を与えた上で濃度分布の推定を行う。

(1) の検討結果から、ART 法・GVSPM 法・ML-EM 法の 3 種類の逆解析手法を用いる。なお測定点間隔は、10cm (測定点数：400) とした。

初期分布として与える分布は、その分布が真の分布であると仮定した場合に得られる線量率分布のノルムが、測定値の線量率分布のノルムと一致するよう規格化する必要がある。(濃度の初期分布を q_0 とおくと、 $\|d\| = \|Gq_0\|$) 想定する初期分布の m 次元単位ベクトルを e とおくと、初期分布は式 4.3-23 の通りに規格化される。

$$q_0 = \frac{\|d\|}{\|Ge\|} e \quad \text{式 4.3-23}$$

A) 単純逆投影法

単純逆投影法で得られる分布は、図 4.3-17 のようになる。

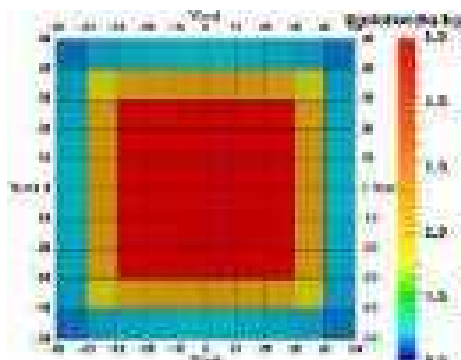


図 4.3-17 単純逆投影法による初期分布 ($z=0$ 断面)

B) 一様分布

一様分布の初期分布を、図 4.3-18 に示す。真の分布が一様分布（全てのセルで濃度 1Bq/kg ）であるため、完全に一致しないよう、各セルには 0.9 または 1.1 の単位ベクトルを与え、式 4.3-23 で規格化した。（隣接するセルは異なる濃度となるようにし、全セルの単位ベクトルの平均は 1 となるように与えた）

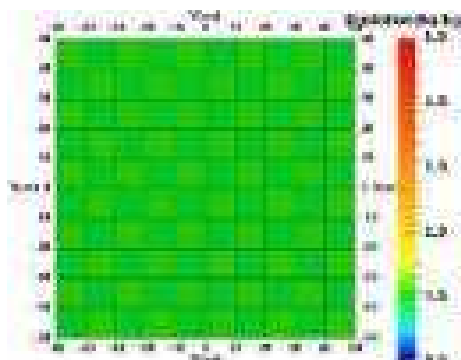


図 4.3-18 一様分布の初期分布 ($z=0$ 断面)

C) 中心密集分布

中心付近のみ放射能濃度が高いような分布を考える。単位ベクトル e は、対称的な配置とするため、 $z=0$ の中心付近4セルのみ1とし、他のセルは0とする。0でないセルのX方向およびY方向の中心座標は、 $(x, y) = (-5, -5), (5, -5), (-5, 5), (5, 5)$ である。この単位ベクトル e を、式 4.3-23 で規格化した。

このようにして得られる中心密集分布の初期分布を、図 4.3-19 に示す。

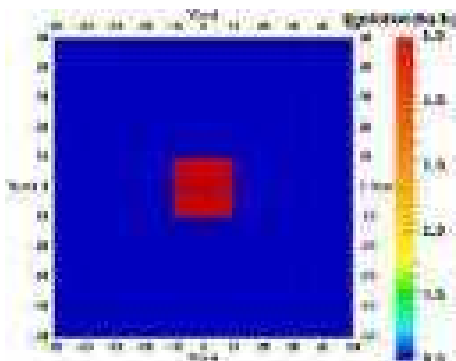


図 4.3-19 中心密集分布の初期分布($z=0$ 断面)

中心付近のセルは全ての測定点から遠く線量率への寄与が小さいため、中心密集分布の場合 $\frac{|Gq|}{|q|}$ が最小となる。よって同じノルムの線量率分布に対して中心密集分布が得られた場合、他の分布と比べて濃度の平均が最大となる。

D) 外縁部分布

次に、C)とは逆に、容器の表面のみ放射能濃度が高いような分布を考える。単位ベクトル e は、中心座標が $x = \pm 45\text{cm}, y = \pm 45\text{cm}, z = \pm 20\text{cm}$ のいずれかを満たすセル(合計 308 セル)を1、それ以外を0とし、式 4.3-23 で規格化した。

このようにして得られる外縁部分布の初期分布を、図 4.3-20 に示す。

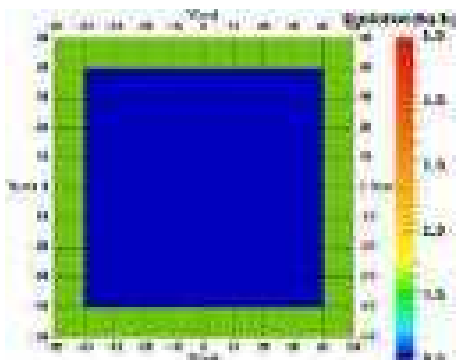


図 4.3-20 外縁部分布の初期分布($z=0$ 断面)

以上の A)~D)の各分布を初期分布とし、濃度分布の推定を行った結果を、表 4.3-22~表 4.3-24 にまとめて示す。また、ML-EM 法における結果の $z=0$ での断面図を、図 4.3-21~図 4.3-24 に示す。

ART 法と ML-EM 法では、推定解の分布は、初期分布に近づく傾向が得られた。(図 4.3-21～図 4.3-24) 一方、GVSPM 法の場合は初期分布によってほとんど違いが得られず、その分布は ART 法や ML-EM 法における単純逆投影法(図 4.3-21)の場合に近い。

ART 法と ML-EM 法において、解が初期分布に近い分布に収束することを仮定すれば、初期分布が中心密集分布ならば平均濃度が最大評価となり、外縁部分分布ならば最小評価となるはずである。実際に表 4.3-23 の結果から、初期分布が外縁部分分布ならば、ART 法と ML-EM 法で平均濃度が最も低くなる結果が得られた。一方で中心密集分布の場合は、初期分布が単純逆投影法の場合よりも、ART 法と ML-EM 法で平均濃度が低く、最大評価とはならなかった。実際、初期分布を中心密集分布として推定した結果(図 4.3-23)では、中心 4 セルに隣接するセルの濃度が低く、単純逆投影法で初期分布を与えた場合の結果(図 4.3-21)と比較しても、中心により密集した結果になっているとは言えない。このことから、図 4.3-19 は放射能濃度を中心付近に密集させ、平均濃度を最大評価できる分布へ収束させる初期分布としては不十分であり、さらなる検討の必要がある。

表 4.3-22 初期分布と解析誤差

推定手法	初期分布			
	単純逆投影	一様分布	中心密集分布	外縁部分分布
ART 法	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04
GVSPM 法	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04
ML-EM 法	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04

表 4.3-23 初期分布と平均濃度

推定手法	初期分布			
	単純逆投影	一様分布	中心密集分布	外縁部分分布
ART 法	1.31E+00	1.00E+00	1.19E+00	8.73E-01
GVSPM 法	1.33E+00	1.35E+00	1.32E+00	1.31E+00
ML-EM 法	1.36E+00	1.00E+00	1.35E+00	7.88E-01

(真の濃度を 1 として規格化)

表 4.3-24 初期分布と推定誤差

推定手法	初期分布			
	単純逆投影	一様分布	中心密集分布	外縁部分分布
ART 法	1.20E+00	6.05E-02	3.13E+00	4.72E-01
GVSPM 法	1.18E+00	1.27E+00	1.13E+00	1.09E+00
ML-EM 法	1.31E+00	6.41E-02	3.04E+00	6.65E-01

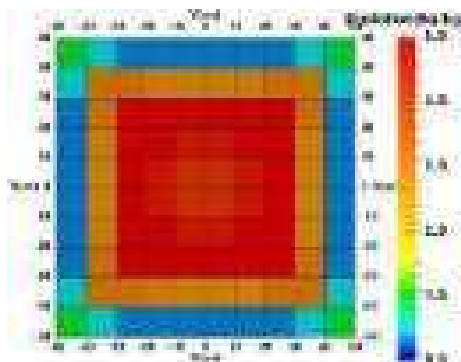


図 4.3-21 MLEM 法の結果（初期分布：単純逆投影法）($z=0$ 断面)

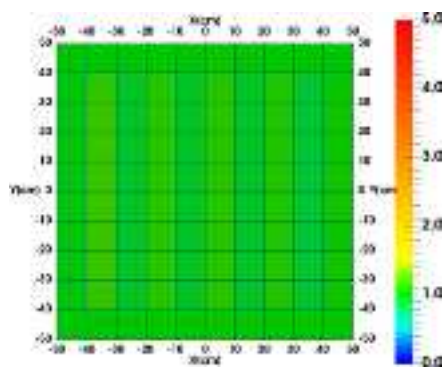


図 4.3-22 ML-EM 法の結果（初期分布：一様分布）($z=0$ 断面)

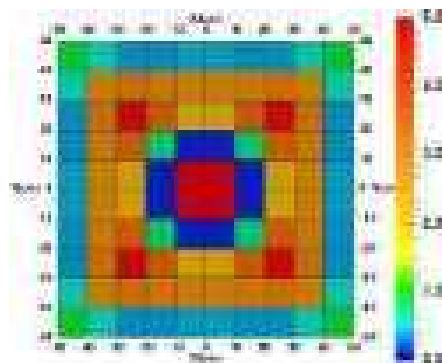


図 4.3-23 ML-EM 法の結果（初期分布：中心密集分布）($z=0$ 断面)

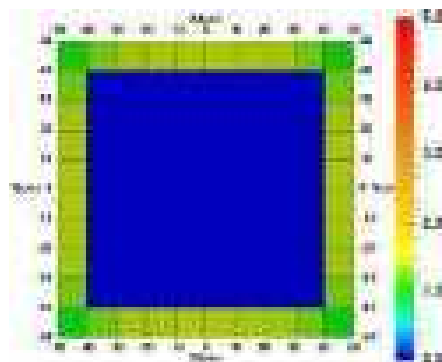


図 4.3-24 ML-EM 法の結果（初期分布：外縁部分布）($z=0$ 断面)

4.4 資源化物を収納した容器外周の放射線測定及びグリーン関数の作成

1F で発生した汚染がれきを敷地内で再利用するにあたって、資源化处理されたがれき（以下、資源化物）の放射能濃度を測定・評価し、めやす濃度を超えていないこと及び放射能濃度の均一性が担保されていることを確認する必要がある。事業者が行っためやす濃度に対して、規制庁側は抜き取り検査によって「めやす濃度を満たしているか・均一性が担保されているか」を評価することを想定している。具体的には資源化物を収納容器に入れ、容器外での放射線測定の結果から容器内部の資源化物の放射能濃度分布を評価することを想定している。放射能濃度分布は、測定データの放射線線量率分布と測定点における応答関数(グリーン関数)から、逆解析によって得る。

平成 27 年度の本受託研究では容器外周の放射線測定のために適応可能な検出器の検討を行い、プラスチックシンチレーションファイバ(PSF)方式とガンマカメラ方式を選定した(表 4.4-1)。平成 28 年度は主にプラスチックシンチレーションファイバによる検出器(以下、PSF)の測定結果及び、PSF に対応したグリーン関数の構築について述べ、ガンマカメラについては測定の結果のみ記載する。

表 4.4-1 適応可能な測定装置に必要な性能

項目	要求事項	理由
対象放射線	γ 線	線源が Cs-134, Cs-137
測定点数	同時多点数	多点数を同時に取得する必要
位置（方向）分解能	高い	濃度分布推定を行うには高い位置分解能で、多点数の測定データが必要
検出感度	高い	多量のがれきを対象とするため、測定時間を短縮する必要
エネルギー分解能	不要	線源が Cs-134, Cs-137 に限定されるため、エネルギー弁別の必要はない。ただし、散乱成分を利用する方法の場合は高いエネルギー分解能が必要
重量	軽量	収納容器周囲を様々な位置から測定するため取り扱い容易な大きさ、重量が必要
電源	内蔵型	屋外を含むさまざまな場所で測定を行うことがあるため、別途電源が不要であること

4.4.1 PSF の特徴と仕様

PSF は線状の放射線検出器で γ 線との相互作用により発生するシンチレーション光を両端で検出し、その時間差によって検出位置を特定する。一定間隔ごとに検出区間があり、その区間内における放射線検出計数を取得する仕組みとなっている。ファイバーを移動させることにより面的な線量率分布できることが特徴としてあげられる。(図 4.4-1)⁽¹⁾

本試験で使用した PSF は株式会社テクノエーピー社製⁽²⁾ D-phod のファイバーバンドル 7 本タイプの標準型(～約 20 μ Sv/h)を使用した(表 4.4-2、図 4.4-2)。次節より特性試験の結果を記載する。

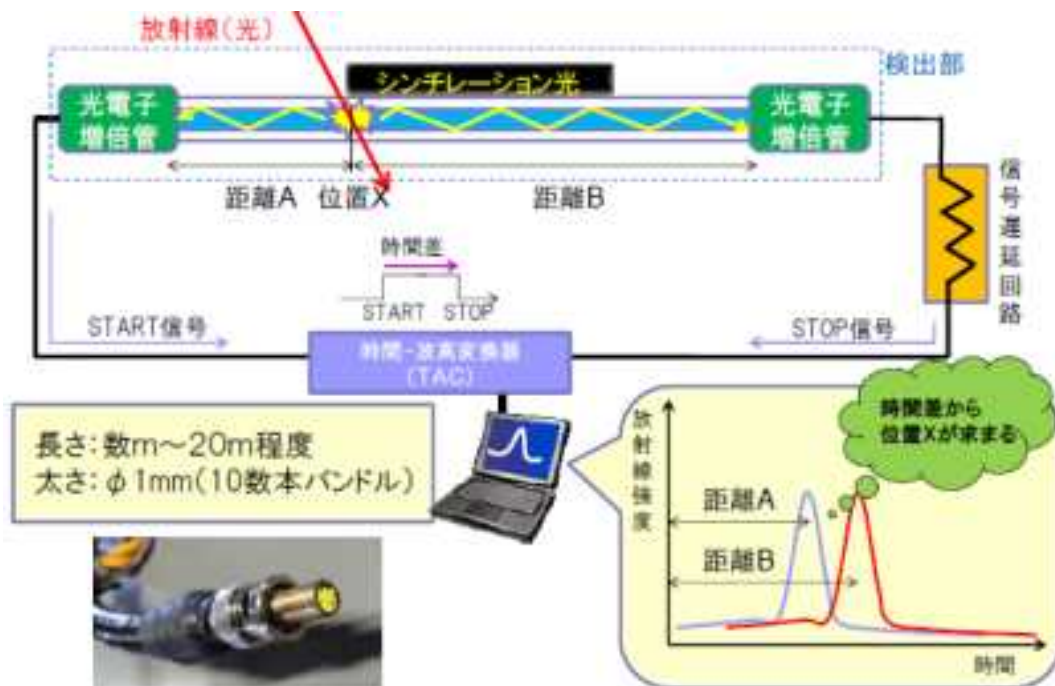


図 4.4-1 PSF の測定原理



図 4.4-2 測定システム D-phod

表 4.4-2 D-phod の仕様

製品名	長さ	バンドル数	測定範囲
D-phod	10m	7本(φ16.5mm)	～約 20 μ Sv/h

(1) 単一ピークによる位置分解能

PSF は 10cm 間隔で測定 ch が設定されている。位置分解能を把握するため、ケーブルを直線状に配置し、密封線源を用いて PSF の応答を確認する(図 4.4-3)。

測定は、まず密封線源(Cs-137 約 1MBq)を PSF 2m の位置、鉄ブロックによって高さ 15cm に配置し 1 分間の測定を行った(図 4.4-4)。次に鉛容器の底面に貼り付け、鉛容器の蓋は外した状態で鉄ブロック高さ 10cm の位置に配置し測定を行った(図 4.4-5)。鉛容器の寸法は図 4.4-6 に示す。図 4.4-5 の鉛容器コリメータによる測定結果にて PSF の位置分解能半値幅(FWHM)は約 80~90cm であることが分かった。

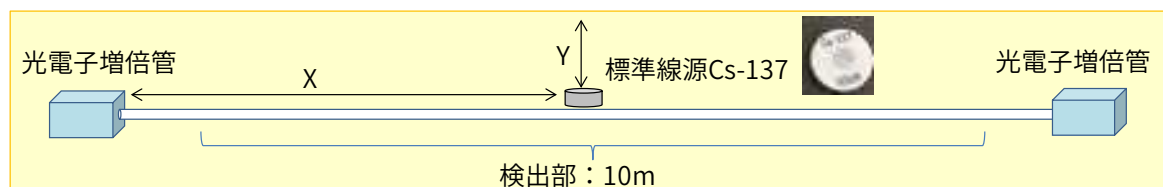


図 4.4-3 特性試験の測定器配置イメージ

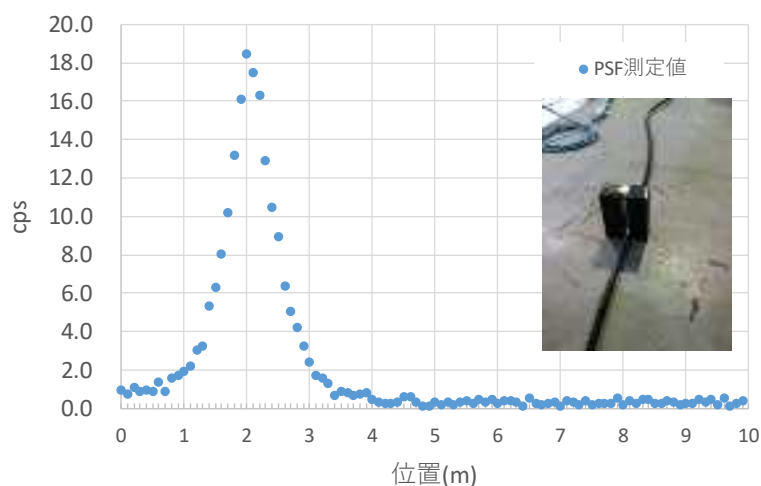


図 4.4-4 PSF 長さ 2m 地点一高さ 15cm に線源を配置した場合の測定結果

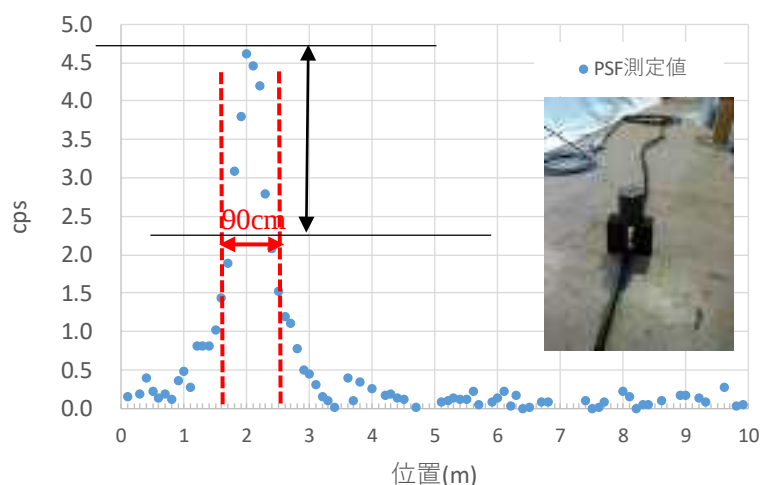


図 4.4-5 密封線源(鉛容器入り) 位置 2m一高さ 10cm による測定



鉛厚	20mm
寸法	66φ×95Hmm
内容積	26φ×55mm
重量	約 3.3kg

図 4.4-6 鉛容器寸法

(2) 複合ピークによる位置分解能

PSF による位置分解能性能試験として異なる位置に配置した 2 つの線源によるピークの重なるの確認を行った。

PSF は可能な限り直線性を保てるよう設置し、

- ① バックグラウンド(B.G.)の測定
- ② 1m の位置に線源 1 (Cs-137 約 1MBq) を設置し測定
- ③ 1.1～2.0m の位置に線源 2 (Cs-137 約 1MBq) を 0.1m 間隔でずらして設置し測定

線源 1,2 とともに図 4.4-6 で示した鉛容器に入れコリメートし cps モードにて測定を行った(図 4.4-7)。

線源 2 の位置が 1.1m の時、線源が 1 つのみの場合に加えてピークが約 2 倍となっておりサムアップされたと判断できる(図 4.4-8)。

線源 2 の位置が 1.7m でピークの分離が確認できるが分布領域がサムアップされるため全体的に単一ピークよりも値が高い(図 4.4-9)。

線源 2 の位置が 2.0m でもまだ単一ピークと差はみられるものの単一ピークとほぼ同等の値を示した(図 4.4-10)。



図 4.4-7 同線源強度による複合ピークの確認試験

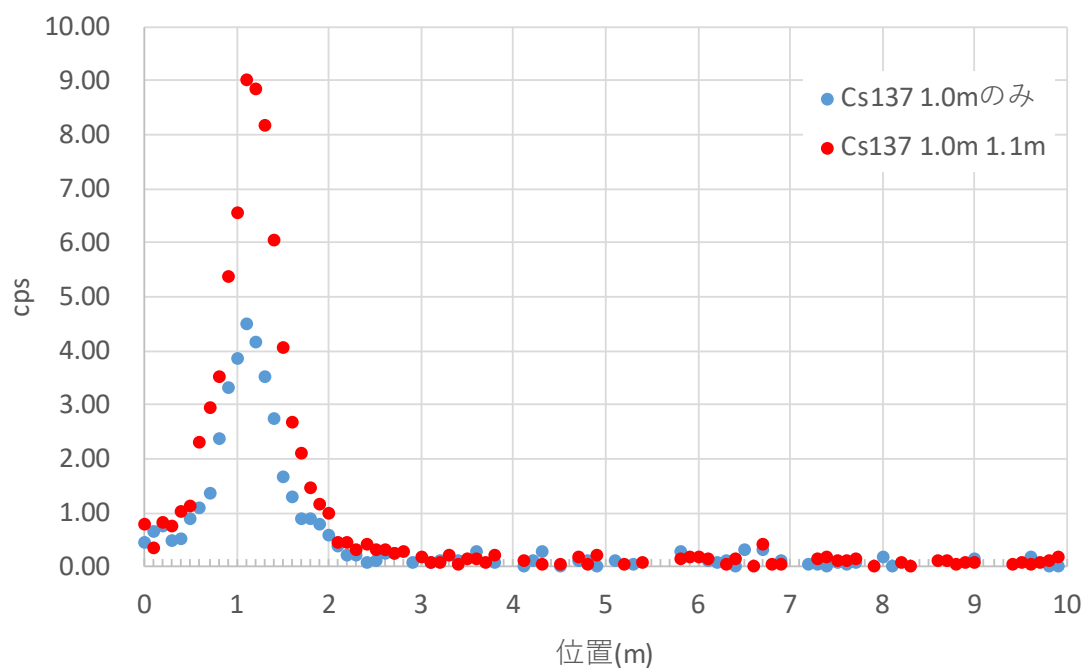


図 4.4-8 同強度の線源を PSF 長さ 1.0m 及び 1.1m 地点に配置した場合の測定結果

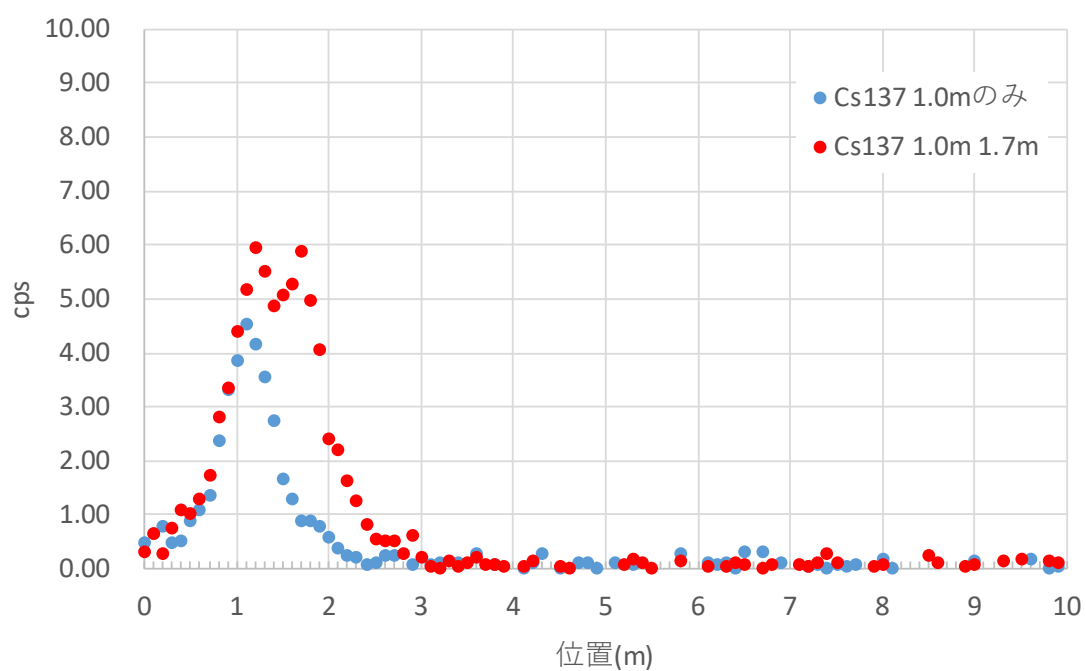


図 4.4-9 同強度の線源を PSF 長さ 1.0m 及び 1.7m 地点に配置した場合の測定結果

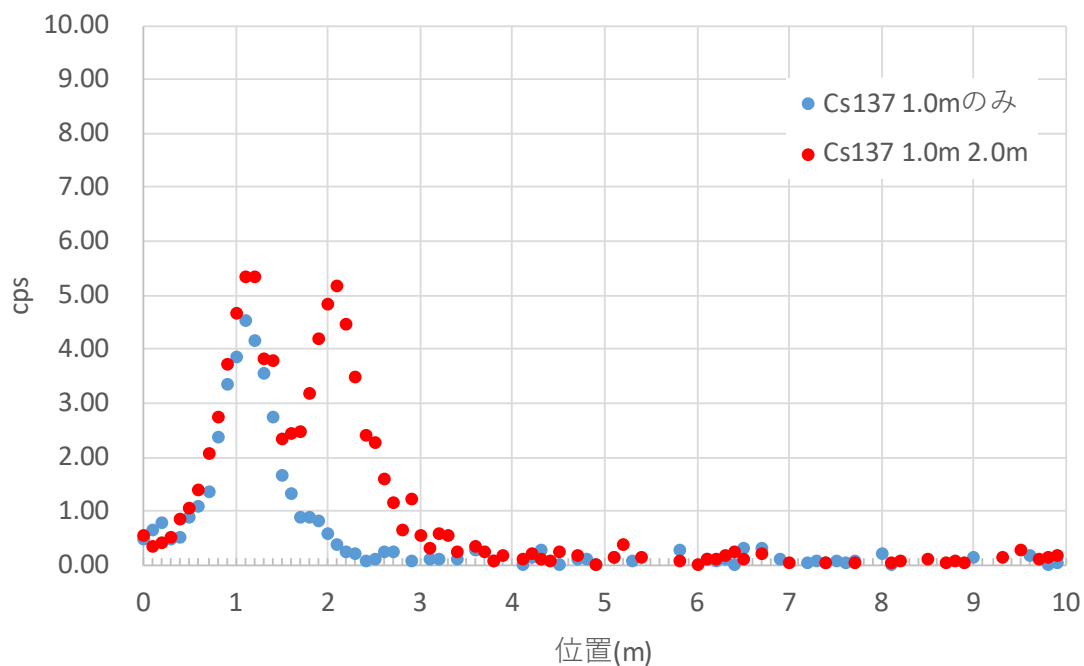


図 4.4-10 同強度の線源を PSF 長さ 1.0m 及び 2.0m 地点に配置した場合の測定結果

次に線源 2 を任意の高さによって線源強度を調整し同様の試験を行った。これは第 1 ピークに対して第 2 ピークの強度が低い場合に検出可能であることを目的に行った(図 4.4-11)。

同一の放射線強度であれば 2 つの線源間の距離が 70cm でもピークの検出は可能であったが約半分の強度では分布の広がりにより埋もれてしまい検出は困難である(図 4.4-12)。1m の距離であればピークの分離は確認できた(図 4.4-13)。単一ピークでの試験結果により位置分解能は 80～90cm であったため、この分解能が複合ピーク検出における性能の限界とも言える。



図 4.4-11 強度の異なる線源を近くに置いた場合の複合ピーク確認試験

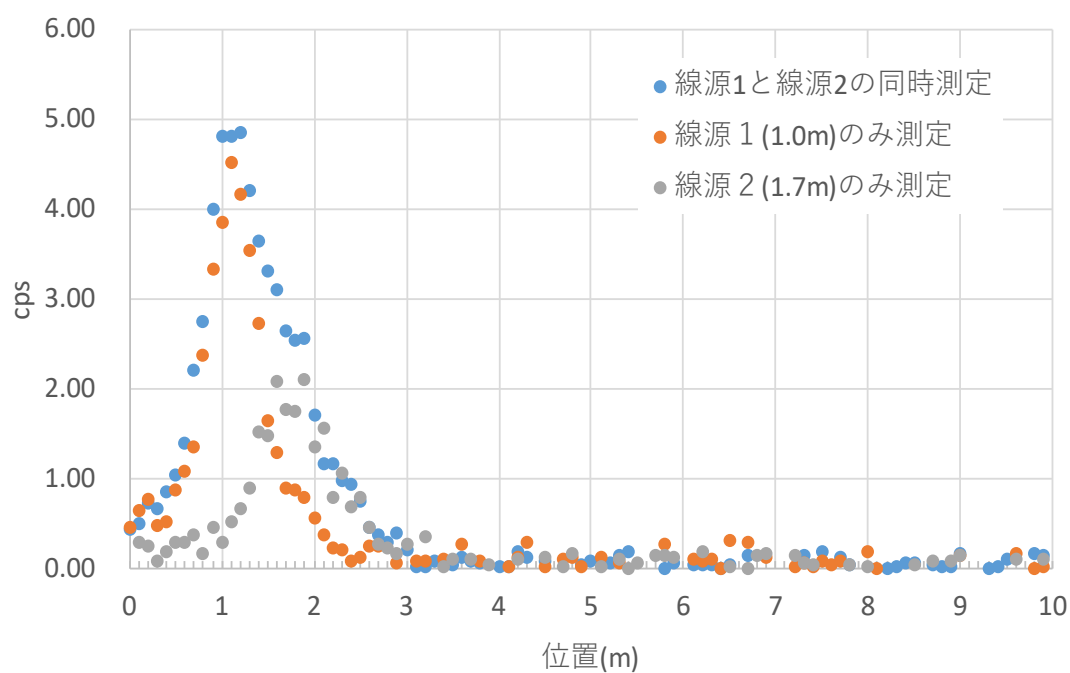


図 4.4-12 強度の異なる線源による複合ピーク確認試験の結果（距離 70cm）

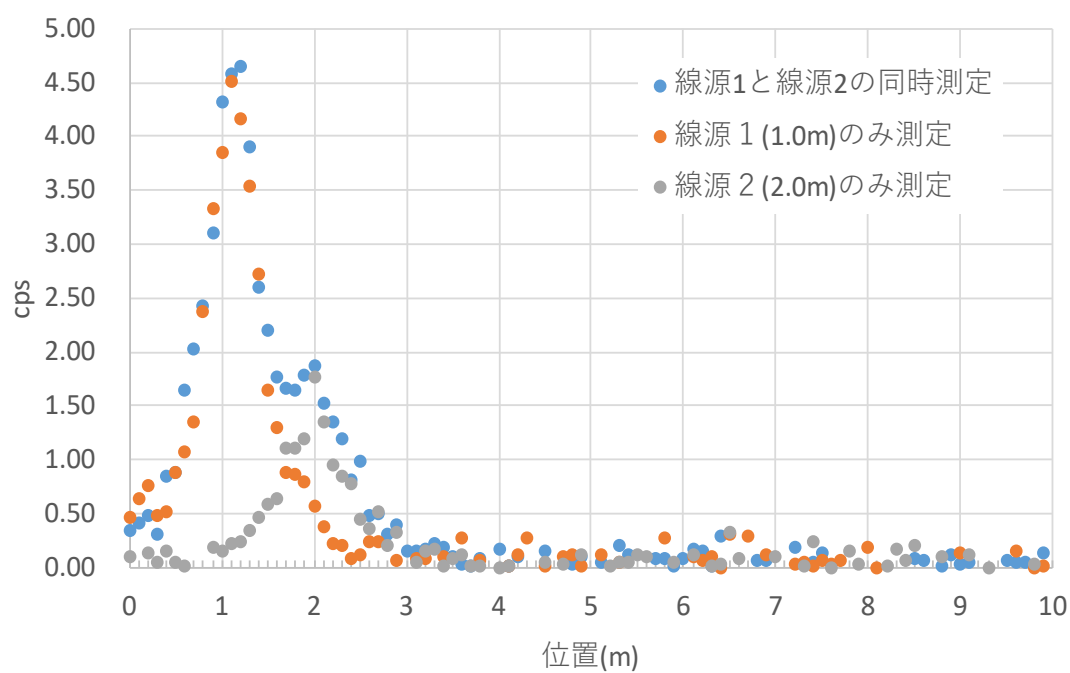


図 4.4-13 強度の異なる線源による複合ピーク確認試験の結果（距離 1m）

(3) ch 校正確認試験

PSF にマーキングされている位置のピーク中央値の確認試験を行う。PSF は両端の光電子増倍管に到達する発光の時間差によって位置検出をする仕組みとなっているため両端のどちらかで ch 調整してしまうともう一方が極端にずれてしまうため全体のバランスをみて調整が行われている(図 4.4-14)⁽⁴⁾。工場出荷品の ch 校正精度の確認と校正後の動作確認試験を行った。PSF の配置は上記試験と同様である。

- ① ch 設定は出荷時と END 側+1ch とする。
- ② B.G.を 5 分間で測定
- ③ 0.0～10.0mの位置に線源 Cs-137 1MBq を設置し 1.0m 間隔で 1 分間測定

線源は図 4.4-6 で示した鉛容器に入れコリメートし cps モードにて測定を行った(図 4.4-15)

結果、出荷品は 3/11ch (図 4.4-16)であったが END+1ch 校正で 9/11ch ピーク位置を一致させることができた(図 4.4-17)。ただしこの操作は ch を START 側又は END 側に ch をずらすだけであり全ての ch の補正できるわけではない。このずれの補正は別途校正定数を作成し規格化する必要が考えられる。

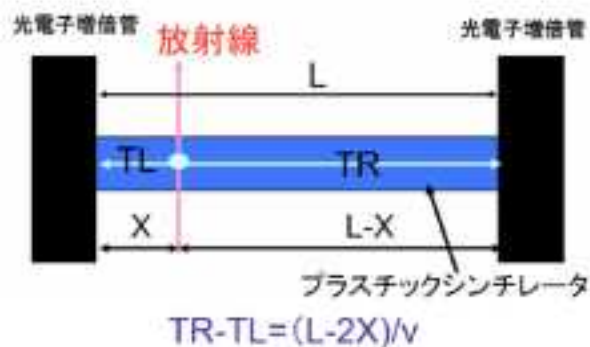


図 4.4-14 時間差による位置測定の実理



図 4.4-15 実験体系(右写真 8m 手前の段差)

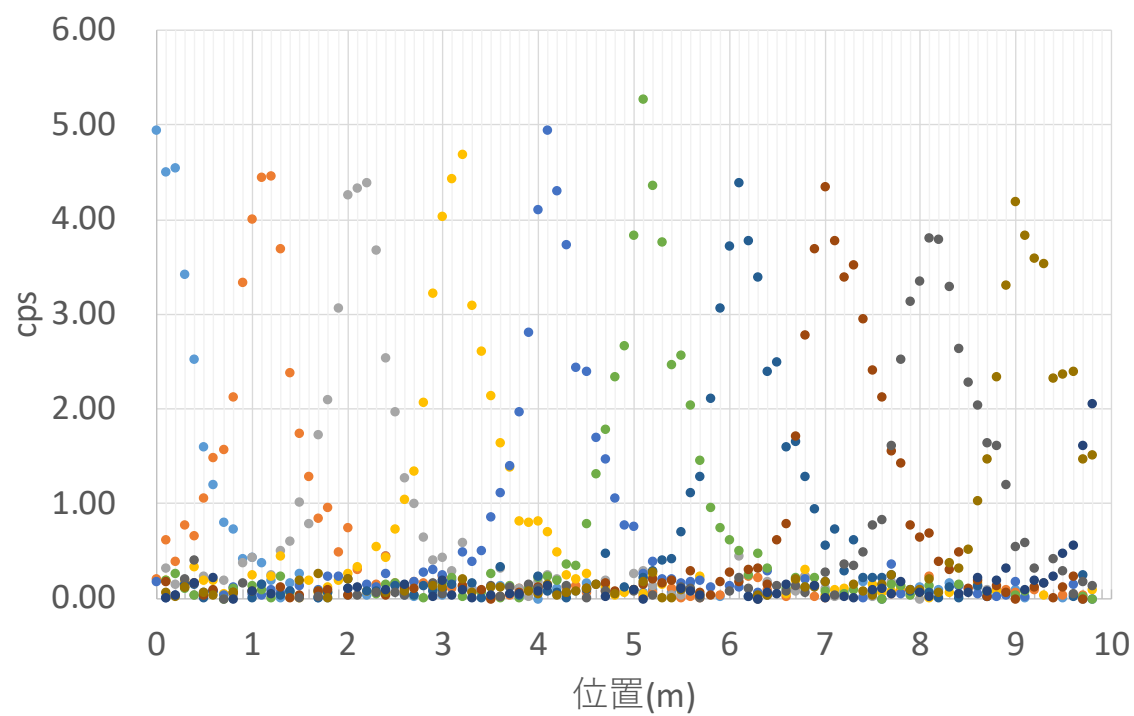


図 4.4-16 校正前の ch 確認試験の測定結果

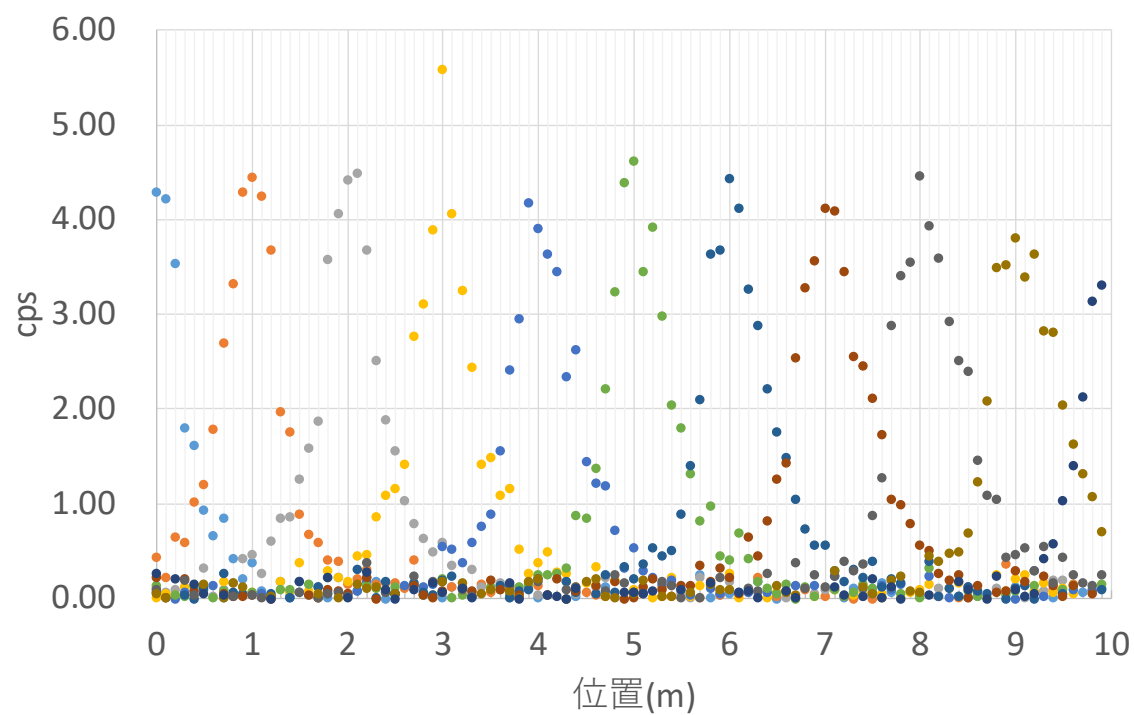


図 4.4-17 校正後の ch 確認試験の測定結果

(4) エネルギー特性試験

PSF のエネルギー特性を把握するため γ 線エネルギーの異なる校正線源を用いて各エネルギーに対する検出効率を測定した。各密封線源を 50keV $\sim$ 3MeV までのエネルギー補償型 NaI シンチレーション検出器の検出器窓に貼り付け(図 4.4-18)、時定数 30 秒のモードで線量率を測定し、PSF の任意の位置にも貼り付けて測定し規格化から検出効率を算出する。Ba-133 の γ 線エネルギーは放出割合で重み付けをし 323keV とした。使用した線源の一覧を表 4.4-3 に示す。

結果 Am-241 の 59.5keV に対して感度がないことが分かった(図 4.4-19、表 4.4-4)。想定される γ 線のエネルギーは散乱 γ 線が主となるため感度が低下する、又は検出されず数え落とされる確率が高くなることが予想される。

表 4.4-3 密封線源の仕様

核種名	半減期[d]	線源番号	製品番号	検定年月日	個数	登録量[Bq]	2016/12/1 における 放射能[Bq]
Cs-137	10972.11	A1	1059	2016/09/20	1	1.010E+06	1.0054E+06
Na-22	952.94	B2	DK125	1993/05/01	1	3.630E+05	6.8939E+02
Mn-54	312.10	B3	DK123	1993/05/01	1	4.040E+05	1.9813E-03
Co-60	1925.23	B4	DK122	1993/05/01	1	4.760E+05	2.1407E+04
Ba-133	3842.43	B5	DK119	1993/05/01	1	3.970E+05	8.3919E+04
Am-241	168818.55	B6	DK118	1993/05/01	1	4.010E+05	3.8706E+05



図 4.4-18 NaI 検出器による線量率測定試験

表 4.4-4 γ 線エネルギーに応じた D-phod と NaI サーベイメータの測定結果と感度比

	Am-241	Ba-133	Cs-137	Co-60	Na-22
NaI 線量率($\mu\text{Sv/h}$)	7.47	17.6	3.27	17.3	0.56
PSF ピークカウント(cps)	0.306	9.949	4.186	21.909	0.651
感度	0.032	0.442	1.000	0.989	0.909
γ 線エネルギー(keV)	59.54	323.81	661.66	1252.87	1274.53

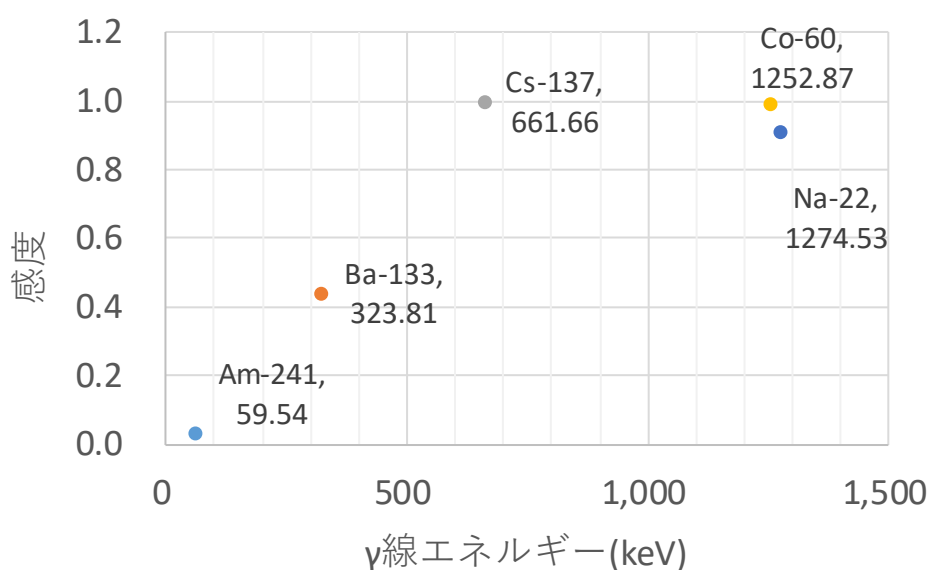


図 4.4-19 D-phod エネルギー特性

(5) 特性試験に関する考察

PSF の位置分解能について解析による検証を行った。

コリメータを用いた単一ピークによる測定をモンテカルロコード MCNP5⁽³⁾にて解析を行い比較した。入力体系図を図 4.4-20 に示す。PSF のケーブルは、コリメータ容器を用いない条件同様に形状だけ模擬したが、組成は空気層とし、床はコンクリートにして反射を考慮した。解析結果を図 4.4-21 に示す。鉛容器によるコリメートは解析値で確認することができ、やはり PSF は空間的な広がりが生じてしまうことが分かる。

光子ライブラリには mcplib84、電子ライブラリには el03 を使用した。ヒストリは nps 5.0e7 とした。解析に用いた各組成の密度を表 4.4-5 に示す。

表 4.4-5 組成密度

	鉛	空気	鉄	コンクリート
密度(g/cm^3)	10.8	1.19E-03	7.20	2.05

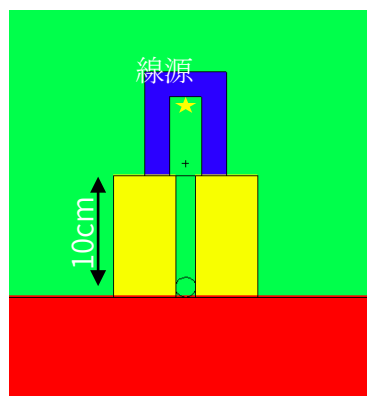


図 4.4-20 コリメータ容器を用いた単一線源解析体系

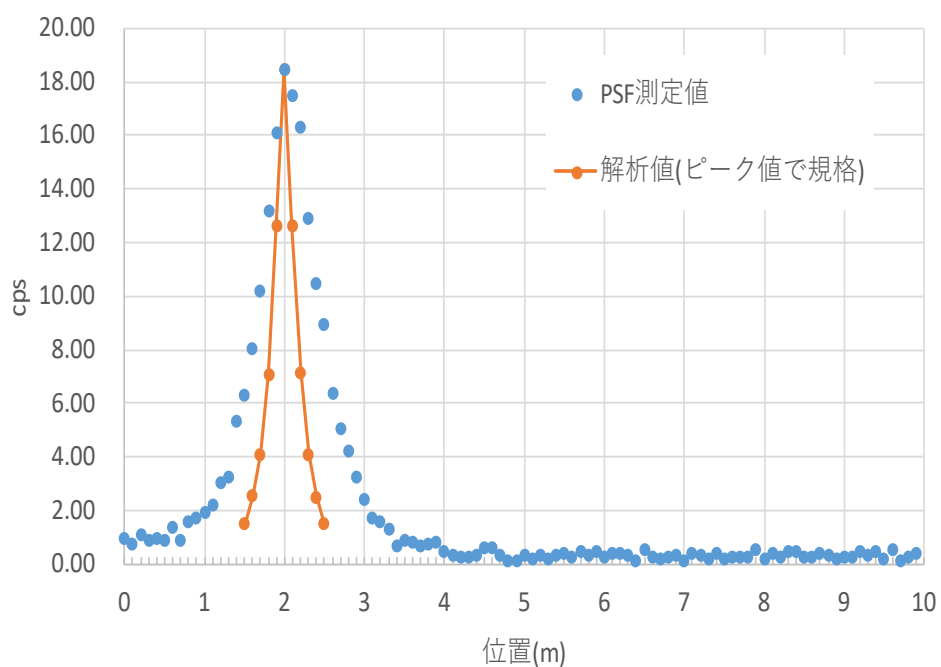


図 4.4-21 測定値と解析値の比較

次にGM管式検出器との比較を行った。GM管式検出器の位置を線源直下から水平方向に移動させて測定した(図 4.4-22)。図 4.4-23に示すようにコリメータによる照射範囲の外側では線量率の明らかな減衰が確認できる。



図 4.4-22 GM 管式検出器による測定

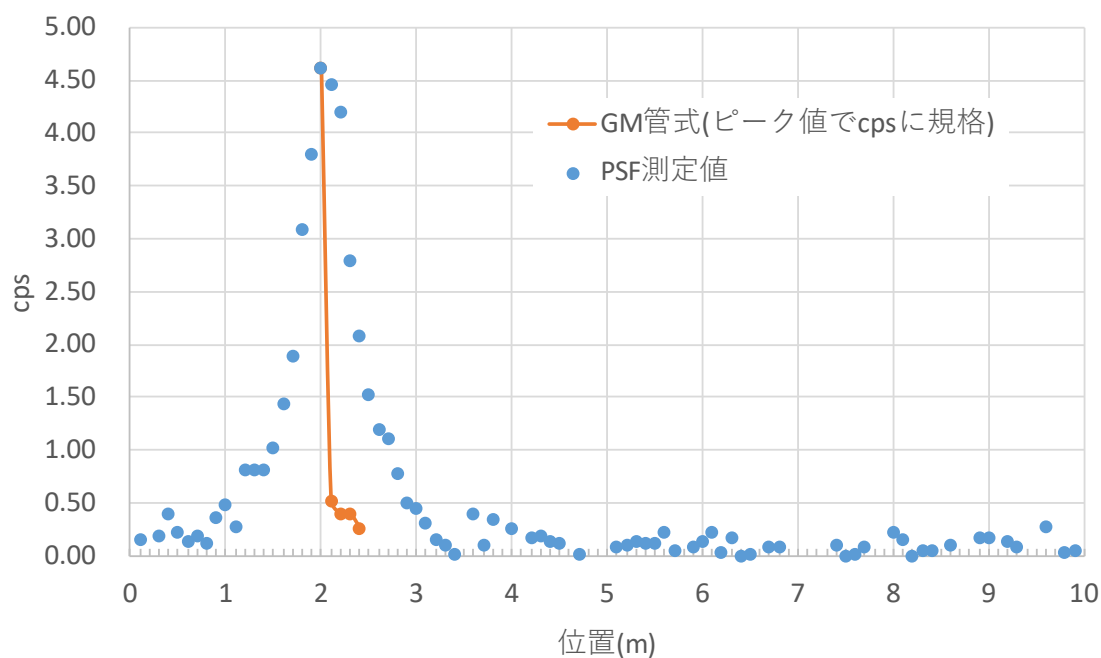


図 4.4-23 GM 管式検出器の測定結果

PSF の測定値には空間分布が生じてしまう理由は、 γ 線の入射によりケーブル内のファイバーで発生したシンチレーション光は、両端の光電子増倍管に到達するまでに、図 4.4-24 に示すようファイバー内を散乱して伝送するため、到達時間に遅れが生じ、結果的に発光検出位置に広がりをもってしまうのである。また PSF は一度に多数点の測定できることが特徴ではあるがファイバー長を長くするとより時間遅れが発生し、さらに位置分解能が悪くなることが予想される⁽⁴⁾。

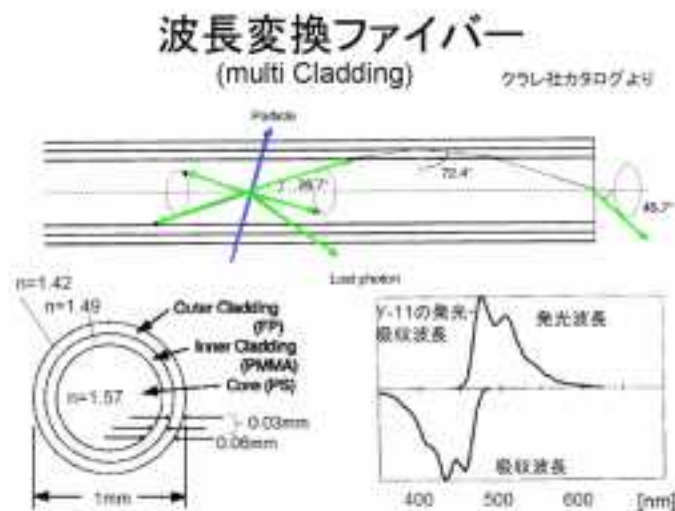


図 4.4-24 シンチレーションファイバー内の光の散乱イメージ

4.4.2 PSF を用いた模擬資源化物測定

測定対象物となる資源化物を収納した容器外周に PSF を巻き付け表面の線量計数率の測定を行う。実験はアクリル容器の中にアクリルボックスを敷き詰め、空気層のみによる体系と碎石を敷き詰めた体系を用意した(表 4.4-6)。アクリルボックスにおける碎石密度は $1.48\text{g}/\text{cm}^3$ となるように調整した。これはアクリルボックス体積 ($9.4\times 9.4\times 9.7\text{ cm}^3$) に碎石を敷き詰めた状態での重量を $1268\pm 1\text{g}$ とした値である。碎石は 6 号を用いた(図 4.4-25)。

表 4.4-6 アクリル容器およびボックスの仕様

	容器	ボックス
横幅 (内寸)[mm]	514(504)	100(94)
奥行 (内寸)[mm]	514(504)	100(94)
高さ (内寸)[mm]	105(100)	100(97)
板厚 (内寸)[mm]	5	3
個数	1	100



図 4.4-25 アクリルボックスに碎石を敷き詰めた状態

(1) 設置方法

PSF の設置方法について述べる(図 4.4-26)。碎石を敷き詰めるとアクリル容器の総重量は約 130kg にも及ぶ。重量物となる容器を可動させるためローラコンベアを設置した(図 4.4-27)。ただしローラコンベアのローラは遮蔽物となってしまいうため PSF を巻き付けた領域のみ取り外した。ただしこの状態での設置では 4 面の測定しか行えない。そこで回転台を設置することで容器を 90 度回転させ、2 方向目の測定で 1 方向目では測定できなかった面の測定を行う(図 4.4-28)。PSF の測定において重要となるのは位置座標の取得である。そこで半割のアクリルパイプを用意しケーブルのガイド的な役割と同時に座標の取得を可能とする治具の作製を行った(図 4.4-29)。治具の固定にはスチールラックを用いた(表 4.4-7)。座標取得のためケーブルには 10cm 間隔でマーキングを行った(図 4.4-29)。相対座標の測量は PSF の 0m(1ch)の位置を原点(0,0,0,)とし行った。上面と底面の測定は 2 回取得することになるが重複はしないため 2 回目も測定点とした。取得した相対座標を図 4.4-30 と表 4.4-8 に示す。グリーン関数作成時にはこの相対座標を元に解析モデルとの原点合わせや回転後の座標算出を行う。

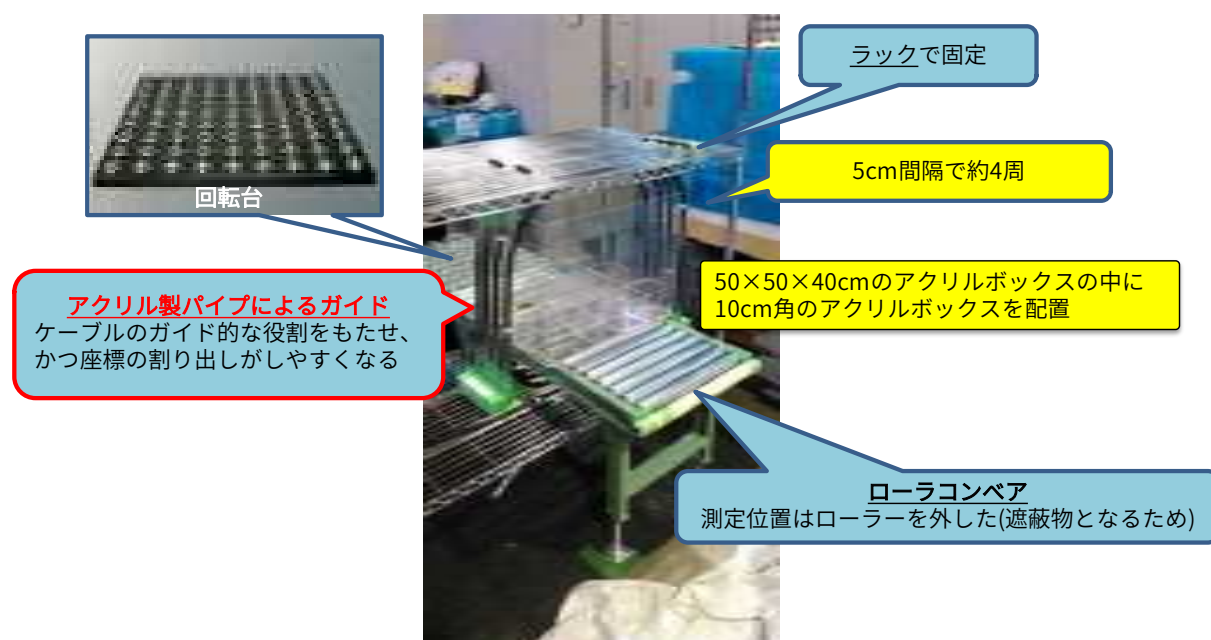
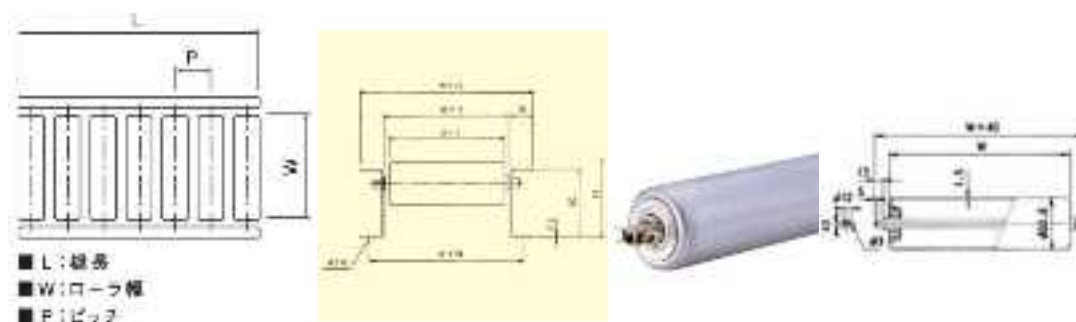
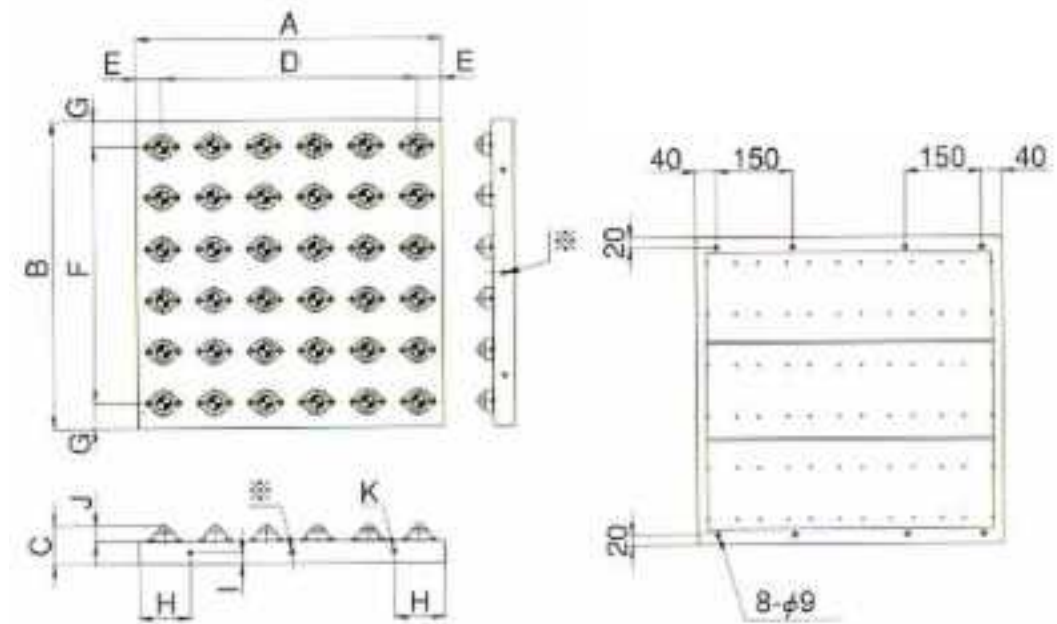


図 4.4-26 設置の様子



機長 L(mm)	1000
ローラ幅 W(mm)	400
ベアリング プレスベアリング材質(ローラ部)	スチール
軸の形状 半月 材質(ベアリング)	スチール
ローラ寸法(外径×肉厚×軸径)(mm)	38.1×1.2×12(メッキ付)
ローラ強度(kg)	80
コンベヤ質量目安(kg)	49.9(3000L の時)
ローラ間隔 P(mm)	50
フレーム寸法(I×K×t)(mm)	60×30×2.3
コンベア機高 H(mm)	67
ローラ・軸付質量目安(g)	600

図 4.4-27 ローラコンベアの仕様



品番	M257T-6F
積載重量	500kg
A	600
B	600
C	74
D	100 ピッチ×5=500
E	100 ピッチ×5=500
F	100 ピッチ×6=600
G	50
H	100
I	21.5
J	31
K	8-φ9

図 4.4-28 回転台の仕様

表 4.4-7 スチールラックの仕様

サイズ	幅約 120(cm)×奥行約 61(cm)×高さ約 151(cm)
耐荷重	棚板 1 枚あたり：約 125kg、全体：約 500kg
主要材質	棚板・ポール：スチール（クロームメッキ）



図 4.4-29 座標取得のためのマーキング

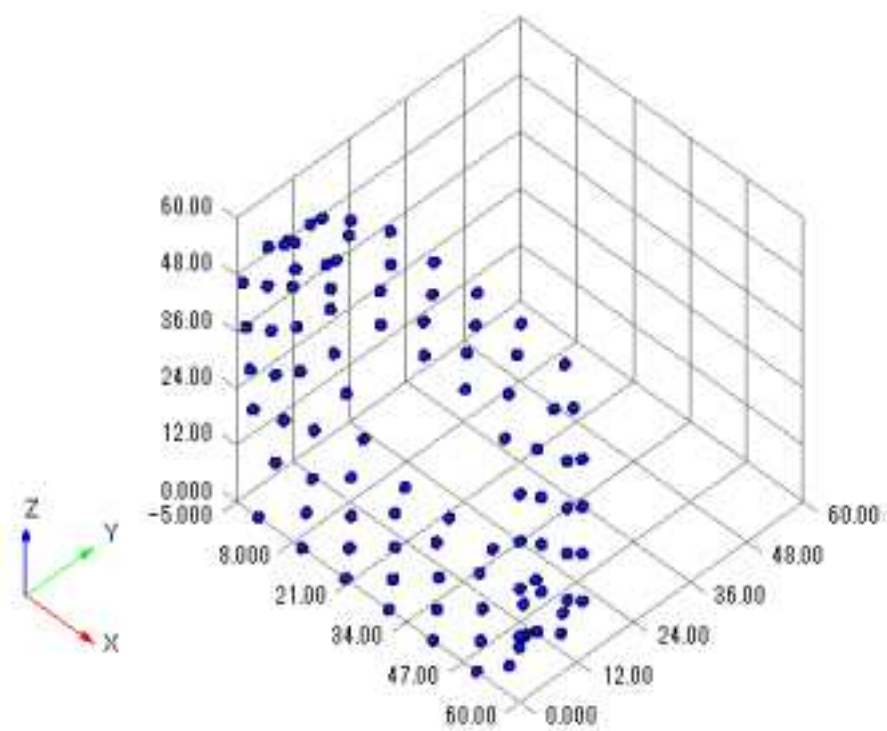


図 4.4-30 取得した相対座標の位置

表 4.4-8 取得した相対座標

ch	PSF位置(m)	x(cm)	y(cm)	z(cm)	ch	PSF位置(m)	x(cm)	y(cm)	z(cm)
1	0.0	0.00	0.00	0.00	51	5.0	50.50	10.00	1.00
2	0.1	10.00	0.00	0.00	52	5.1	58.50	10.00	6.50
3	0.2	20.00	0.00	0.00	53	5.2	60.00	10.00	14.50
4	0.3	30.00	0.00	0.00	54	5.3	60.00	10.00	24.50
5	0.4	40.00	0.00	0.00	55	5.4	60.00	10.00	34.00
6	0.5	50.00	0.00	0.00	56	5.5	60.00	10.00	44.00
7	0.6	57.50	0.00	6.00	57	5.6	57.00	10.00	53.00
8	0.7	60.00	0.00	14.00	58	5.7	48.50	10.00	59.00
9	0.8	60.00	0.00	24.00	59	5.8	39.00	10.00	59.00
10	0.9	60.00	0.00	34.00	60	5.9	29.00	10.00	59.00
11	1.0	60.00	0.00	44.00	61	6.0	19.50	10.00	59.00
12	1.1	56.50	0.00	53.50	62	6.1	10.00	10.00	59.00
13	1.2	47.50	0.00	58.00	63	6.2	1.00	10.00	55.50
14	1.3	38.00	0.00	59.00	64	6.3	-5.00	10.97	47.50
15	1.4	28.00	0.00	59.00	65	6.4	-5.00	11.86	37.00
16	1.5	16.50	0.00	59.00	66	6.5	-5.00	12.63	28.00
17	1.6	8.50	0.00	58.00	67	6.6	-5.00	13.47	18.00
18	1.7	0.50	5.00	54.50	68	6.7	-3.50	15.00	5.50
19	1.8	-5.00	1.14	45.50	69	6.8	5.00	15.00	1.00
20	1.9	-5.00	1.99	35.50	70	6.9	15.00	15.00	0.00
21	2.0	-5.00	2.80	26.00	71	7.0	24.50	15.00	0.00
22	2.1	-5.00	3.56	17.00	72	7.1	34.50	15.00	0.00
23	2.2	-1.50	5.00	7.00	73	7.2	44.50	15.00	0.00
24	2.3	5.50	5.00	1.00	74	7.3	53.50	15.00	4.00
25	2.4	15.50	5.00	0.00	75	7.4	58.00	15.00	9.50
26	2.5	25.50	5.00	0.00	76	7.5	58.00	15.00	19.50
27	2.6	35.50	5.00	0.00	77	7.6	58.00	15.00	29.50
28	2.7	45.50	5.00	0.00	78	7.7	58.00	15.00	39.50
29	2.8	54.50	5.00	4.50	79	7.8	56.00	15.00	49.00
30	2.9	58.50	5.00	10.50	80	7.9	54.00	15.00	57.00
31	3.0	59.50	5.00	19.50	81	8.0	44.00	15.00	59.00
32	3.1	59.50	5.00	29.50	82	8.1	34.00	15.00	59.00
33	3.2	59.50	5.00	39.50	83	8.2	24.00	15.00	59.00
34	3.3	58.50	5.00	49.00	84	8.3	14.00	15.00	59.00
35	3.4	52.00	5.00	56.50	85	8.4	5.00	15.00	55.50
36	3.5	42.50	5.00	59.00	86	8.5	-2.50	15.72	50.50
37	3.6	32.50	5.00	59.00	87	8.6	-2.50	16.61	40.00
38	3.7	22.50	5.00	59.00	88	8.7	-2.50	17.46	30.00
39	3.8	12.50	5.00	59.00	89	8.8	-2.50	18.31	20.00
40	3.9	3.00	5.00	56.50	90	8.9	-1.50	20.00	11.00
41	4.0	-4.00	5.72	50.50	91	9.0	2.50	20.00	4.00
42	4.1	-5.00	6.53	41.00	92	9.1	12.00	20.00	0.00
43	4.2	-5.00	7.37	31.00	93	9.2	22.00	20.00	0.00
44	4.3	-5.00	8.22	21.00	94	9.3	32.00	20.00	0.00
45	4.4	-4.00	9.03	11.50	95	9.4	42.00	20.00	0.00
46	4.5	1.50	10.00	2.00					
47	4.6	10.50	10.00	0.00					
48	4.7	20.50	10.00	0.00					
49	4.8	30.50	10.00	0.00					
50	4.9	40.50	10.00	0.00					

(2) 測定方法

ケーブル長 10m の PSF を容器に対して約 5cm 間隔のピッチで巻くと約 4 周となる。そのため容器表面すべての測定を行うためには、1 方向に対して 3 回測定、回転後 3 回測定の計 6 回測定必要となる。測定時間は各 1min(B.G.は 5min 測定)とした。上下方向は 2 回測定となり評価点の合計は 482ch となる(図 4.4-31)。

放射能濃度分布評価コードシステムには得られた 6 つの測定データの位置情報は必要とせずグリーン関数との通し番号の整合がとれていればよいことになるが、可視化のため位置情報を与える処理を行った(図 4.4-32)。

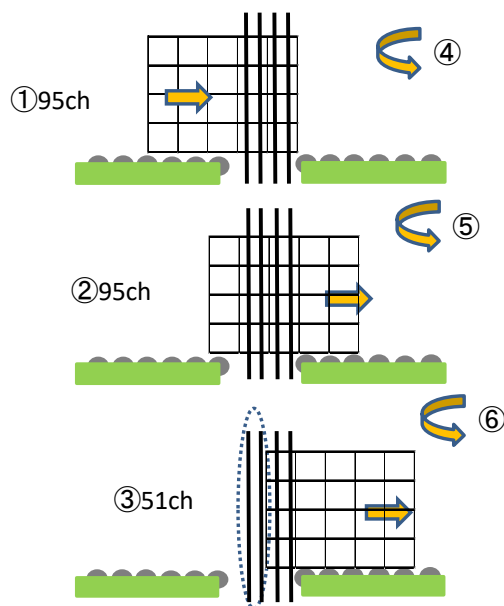


図 4.4-31 測定方法

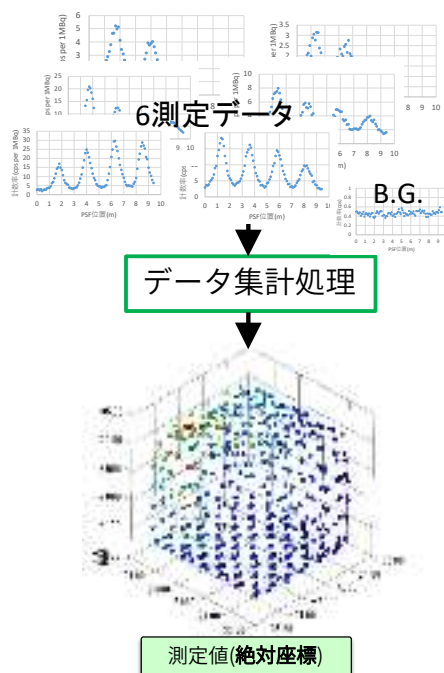


図 4.4-32 測定データの編集イメージ

容器を基準とした線源領域の座標系 (x, y, z) (cm)を、以下で定義する。容器内のアクリルボックスを各方向に並べ、各方向に対してそれぞれ X,Y,Z の番号を与える。

容器の一方の角を $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ と置き、セルの幅 10cm を用いて、 (X, Y, Z) の番号を持つアクリルボックスの中心座標を式 4.4-1 のように定義する。(図 4.4-33)

$x = (X - 0.5) \times 10\text{cm}$	式 4.4-1
$y = (Y - 0.5) \times 10\text{cm}$	
$z = (Z - 0.5) \times 10\text{cm}$	

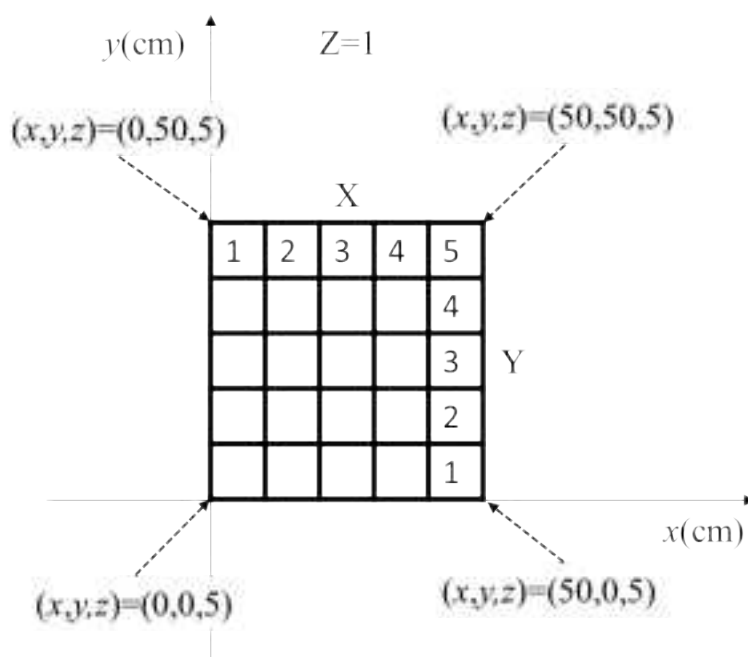


図 4.4-33 アクリルボックスの番号(X,Y,Z)と座標系 (x, y, z)
($z=5\text{cm}$ 断面)

(3) 収納容器を模擬した空気層に対する測定試験

空気層における測定試験結果を以下に示す。線源はアクリルボックスのほぼ中心になるように養生テープで固定した(図 4.4-34)。-X 方向上部線源配置による測定結果では周辺の計数率が高くなっていることが図 4.4-35 によって確認することができる。一方+X 方向底面に配置した場合(図 4.4-36)は周辺に比べて計数率が高くなっていることが確認はできるが上部に比べて値が低い。これは底面の距離はローラコンベア設置のため容器から約 12cm 離れてしまっているからと判断できる。ちなみに上面と側面は容器から約 5cm の距離に設置している。線源を中央の 1 段目と 4 段目に置いた試験でも側面の減衰は顕著に確認することができる(図 4.4-37)。線源を中央 2 段目に置いた結果では全体的に計数率が低い結果となった(図 4.4-38)。中央 1 段目と 2 段目を置いた結果では底面に計数率の高い箇所を確認することができたが側面に出ていない結果は線源中央 2 段目の結果と同様である(図 4.4-39)。容器は高さが約 40cm に対して縦横は約 50cm であるため距離の減衰によるためのものと考えられる。

空気層における測定ケースについて、ケース名の表記と、容器を基準に定義した座標系における線源の中心座標(x,y,z)を表 4.4-9 に示す。



図 4.4-34 養生テープによる密封線源の固定

表 4.4-9 空気層における測定ケース一覧

No.	ケース名	線源 1 中心座標(cm)			線源 2 中心座標(cm)		
		x	y	z	x	y	z
1	空気層 X1Y2Z4	5	15	35	-	-	-
2	空気層 X3Y3Z2	25	25	15	-	-	-
3	空気層 X4Y4Z1	35	35	5	-	-	-
4	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4	25	25	5	25	25	35
5	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2	25	25	5	25	25	15

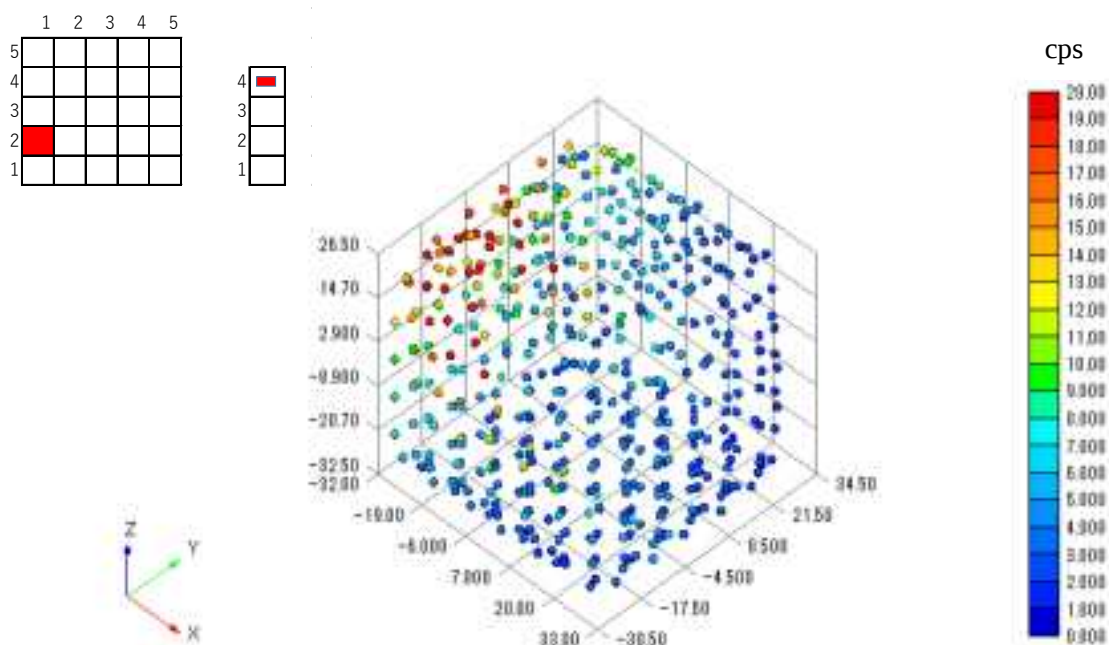


図 4.4-35 空気層 X1Y2Z4 に対する測定結果

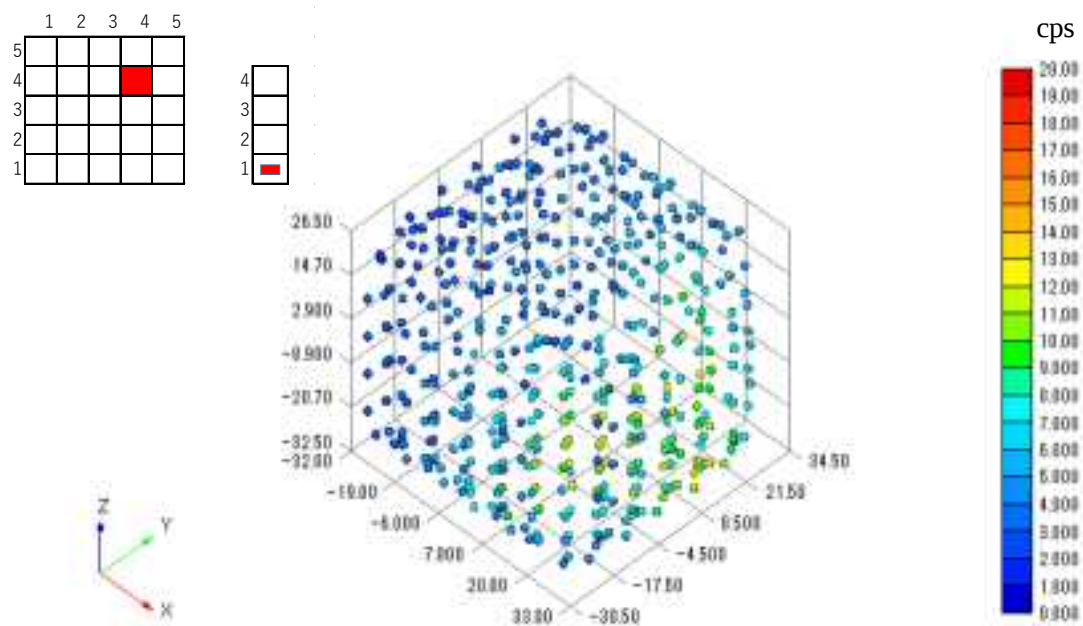


図 4.4-36 空気層 X4Y4Z1 に対する測定結果

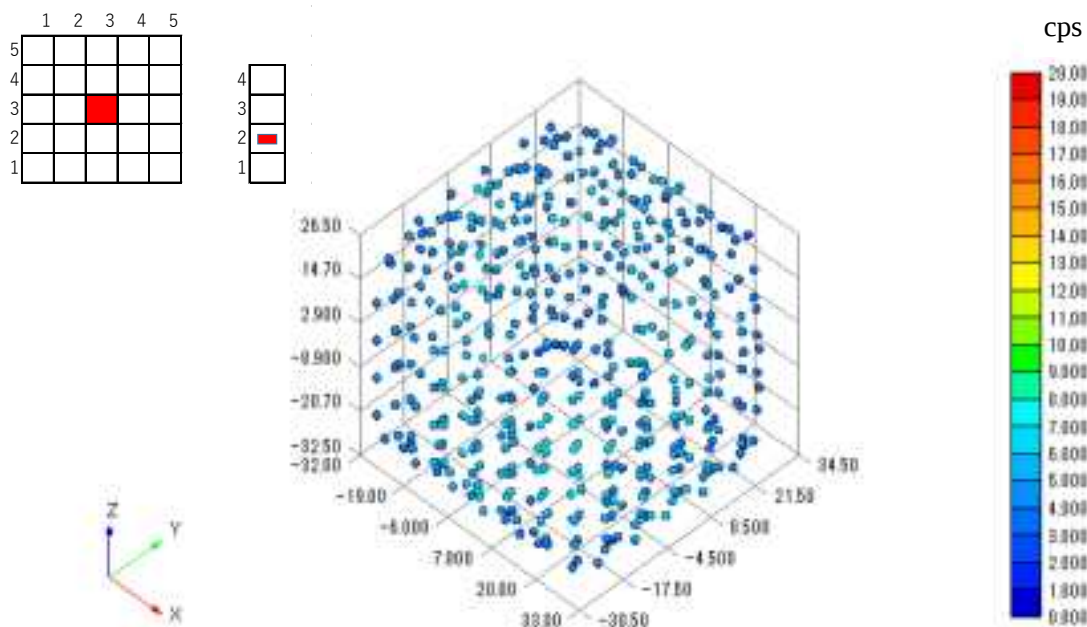


図 4.4-37 空気層 X3Y3Z2 に対する測定結果

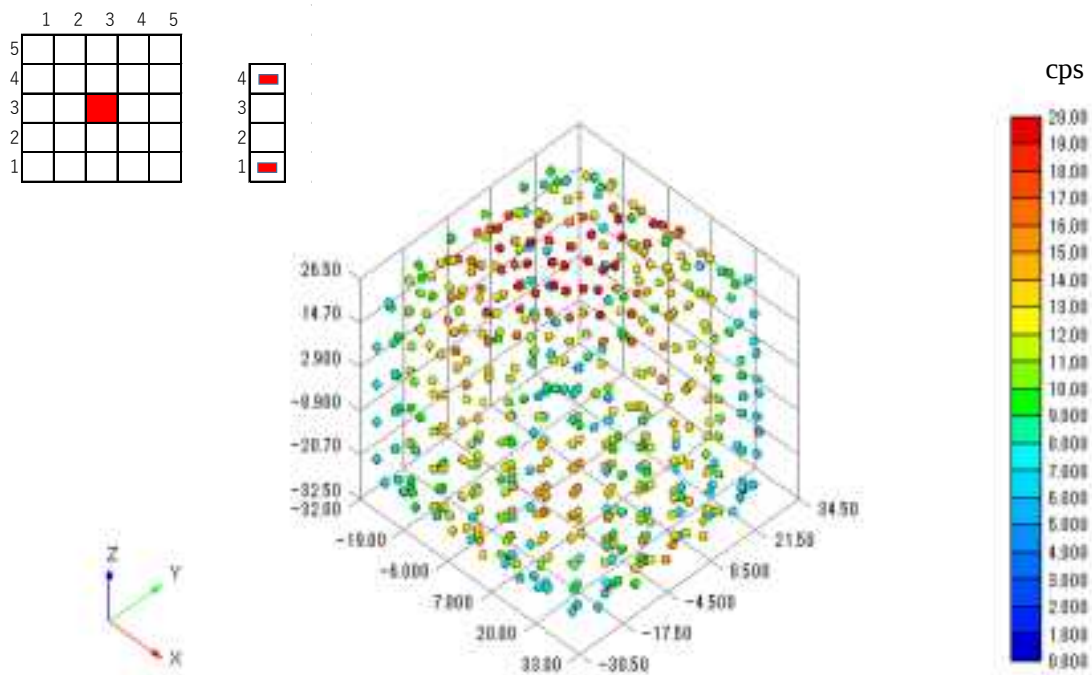


図 4.4-38 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 に対する測定結果

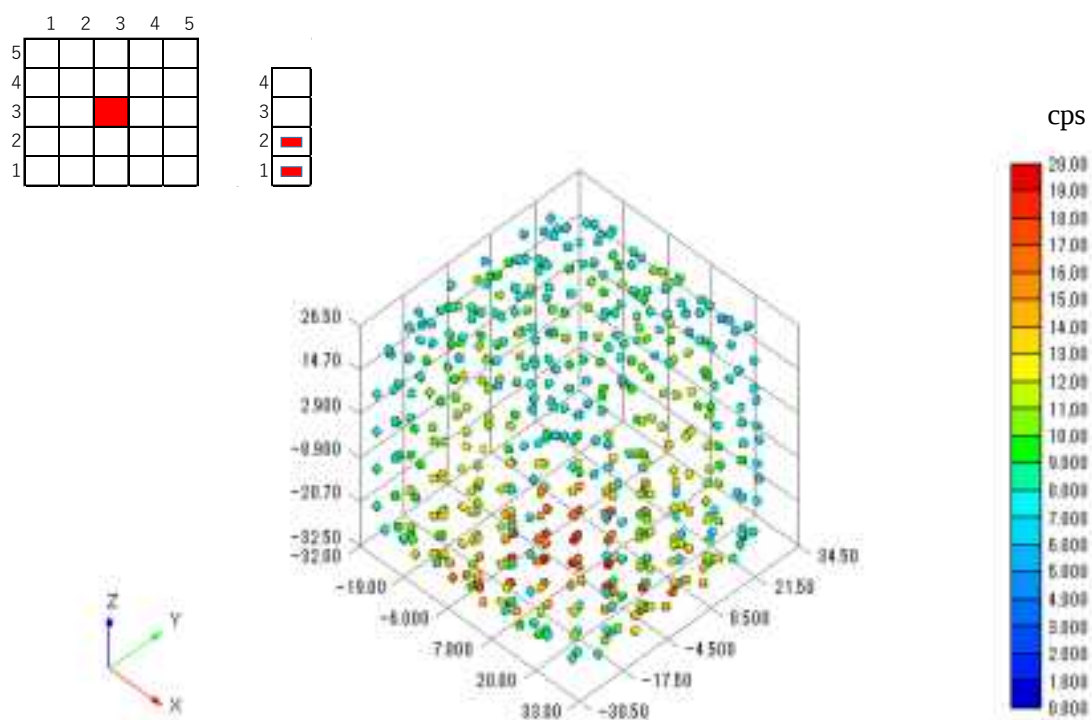


図 4.4-39 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2 に対する測定結果

中央 2 段目の場合底面までの距離は約 27cm に対して側面は約 32cm 離れていることになる。
1cm 線量当量換算係数を用いた理論式(式 4.4-1)より減衰率は 28%であり(表 4.4-10)、表に示す
座標の減衰率は約 11%であったが側面側の距離による減衰は確認できる(表 4.4-11)。

$$N = \frac{S \times \varepsilon_{\gamma}}{r^2} \times \alpha \quad \text{-(4.4-1)}$$

N : 線量率 ($\mu\text{Sv/hr}$)

S : 放射能 (MBq)

ε_{γ} : γ 線放出割合

α : 1cm 線量当量換算係数 ($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1}\text{h}^{-1}$)

r : 距離(m)

表 4.4-10 1cm 線量当量換算係数を用いた理論結果

距離(m)	線量率($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)
0.27	1.083E+00
0.32	7.713E-01

表 4.4-11 空気層 X3Y3Z2 の測定結果

座標	cps
中央底面 (3.00, -2.50,-32.50)	6.596427970
中央右側面(32.50, 2.50, -3.00)	5.868336506

(4) 資源化物を収納した碎石層に対する測定試験

碎石層における測定では空気層と同様に-X方向上部に配置しても遮蔽効果によって計数率が減っていることが確認できる(図 4.4-40)。中心上下の場合においても底面の計数率は低くなっていることが確認できる(図 4.4-41)。中央 3 列目は空気層における測定で示したよう側面の計数率は距離の減衰効果によって低くなってしまい中央から左右どちらかにずれていればもう一方の側面はほとんど観測できないことになる。

碎石層において以降で行う測定のケースについて、各ケース名の表記と、容器に対して定義した座標系における線源の中心座標(x,y,z)を表 4.4-12 に示す。

表 4.4-12 碎石層における測定ケース一覧

No.	ケース名	線源 1 中心座標(cm)			線源 2 中心座標(cm)		
		x	y	z	x	y	z
1	碎石層 X1Y2Z4	5	15	35	-	-	-
2	碎石層 X3Y3Z1&X3Y3Z4	25	25	5	25	25	35

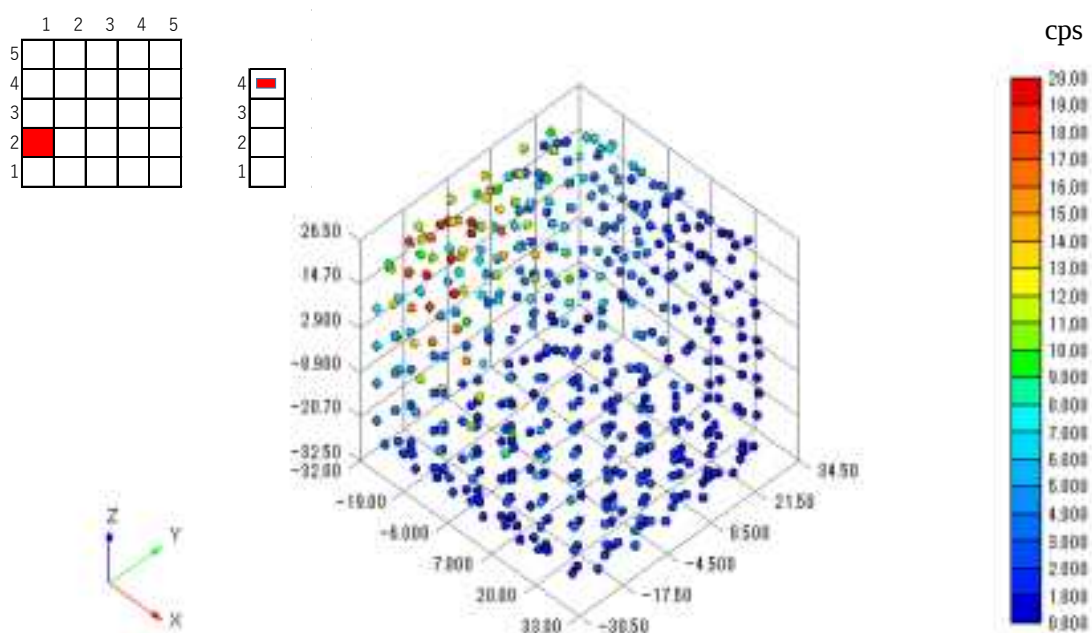


図 4.4-40 碎石層 X1Y2Z4 に対する測定結果

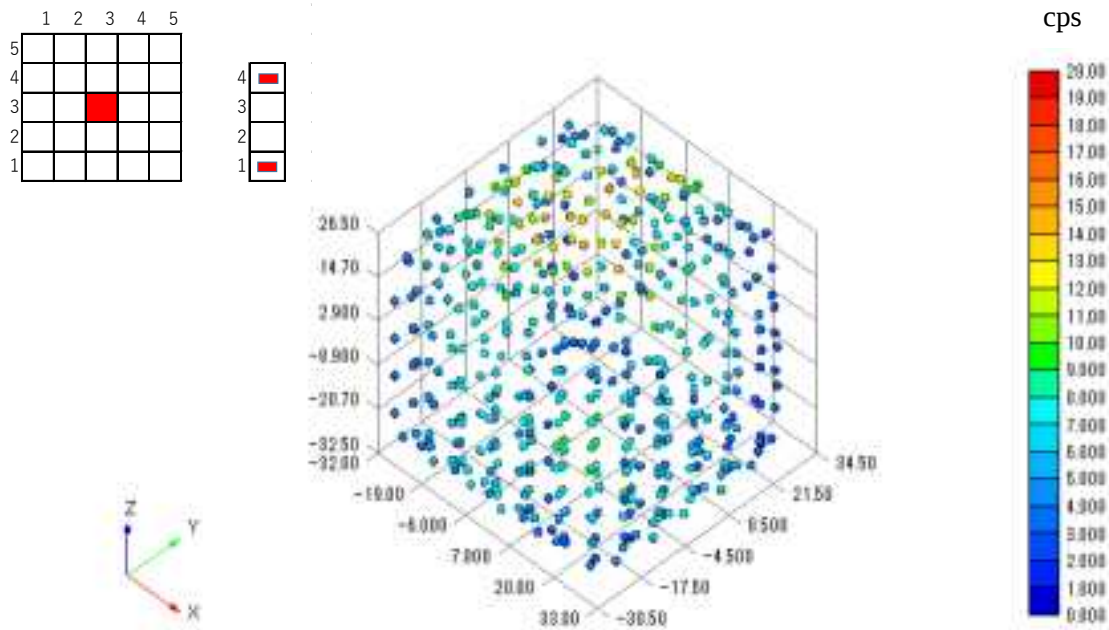


図 4.4-41 X3Y3Z1&X3Y3Z4 に対する測定結果

4.4.3 放射能分布の推定を行うためのグリーン関数の整備

1Fの事故によって生じた砕石等の資源化物を限定再利用するために、収納容器内線源分布の評価を逆解析手法によって行う。逆解析手法とは、容器内資源化物配置情報(重量、かさ密度、砕石上面形状把握)及び容器外部線量率分布の測定によって得られる測定値と、容器内資源化物配置に応じた単位線源(又は体積線源)による容器外部線量率分布計算結果によって作成されるグリーン関数ライブラリによって収納容器内線源分布の評価を行うことができる手法である。

グリーン関数は点減衰核積分法による QAD⁽⁵⁾とモンテカルロ法に基づく MCNP による光子輸送計算コードを用いた作成を検討している。モンテカルロ法は高精度な結果を得ることができるが、十分な統計精度を得るまでに計算時間を要するデメリットが生じる。そのため試計算においてはマシンタイムを考慮し本年度は QAD による作成を行うこととした。

グリーン関数の作成には容器内の線源領域の分割、並びに容器表面測定点の入力が必要となる。本年度作成したグリーン関数作成フローを図 4.4-42 に示す。各処理の詳細は次節より説明する。

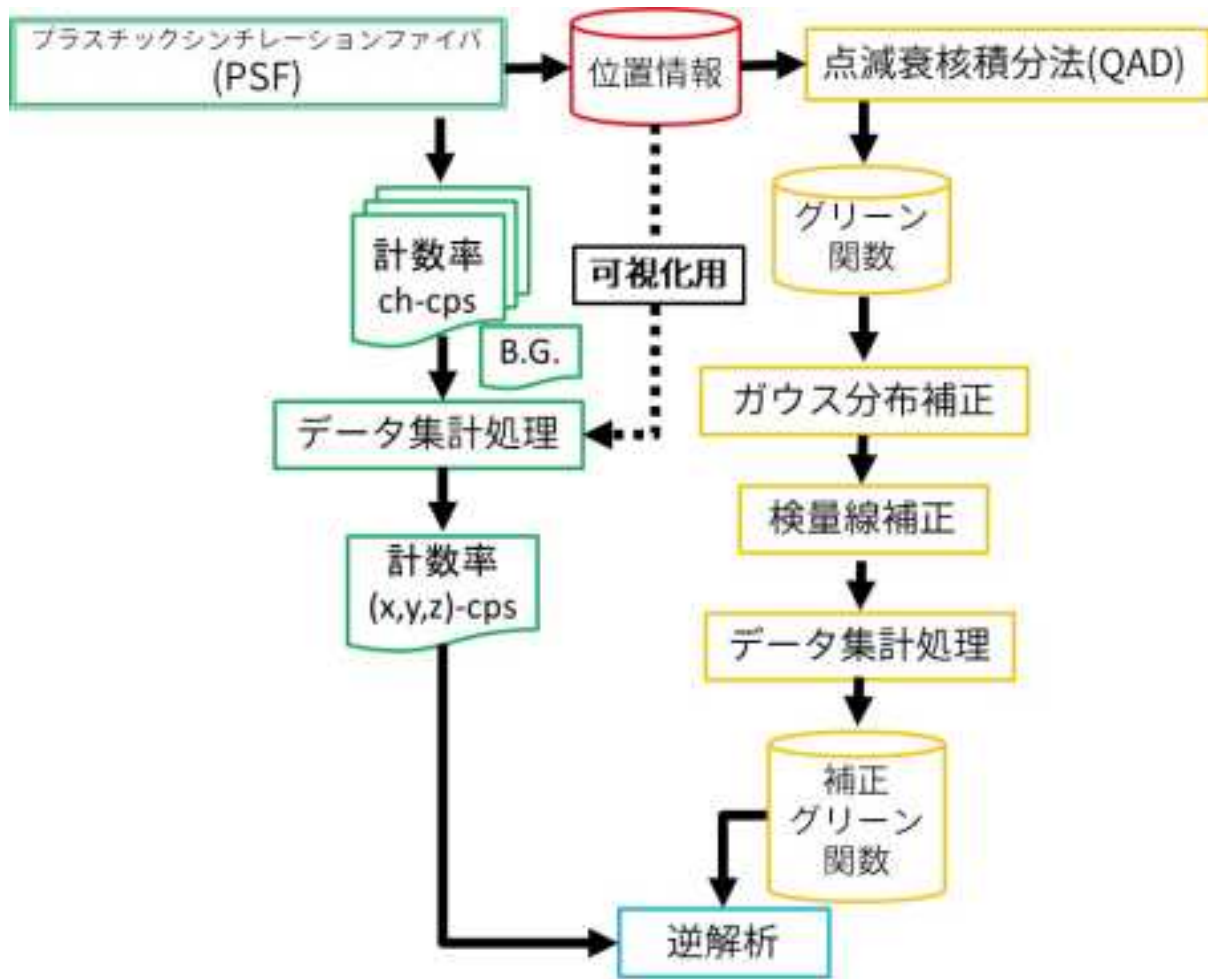


図 4.4-42 グリーン関数作成フロー

(1) 点減衰核積分法による解析

点減衰核を用いて非散乱線を計算し、ビルドアップ係数を乗ずることにより評価点における γ 線線量を評価する手法が点減衰核法である。ここで点減衰核とは点状線源からの非散乱 γ 線の減衰を記述する式であり、距離の逆二乗則による項と指数関数減衰による項の積として以下の式 4.4-2 で与えられる。

$$\phi(r) = \frac{S}{4\pi r^2} \exp(-\mu r) \quad \text{-(式 4.4-2)}$$

通常、線源 S 項はエネルギー(E)及び位置(r)の関数として与えられる。そこで評価点における γ 線線量 $D(r)$ は式による点減衰核にビルドアップ係数 $B(E, r)$ と線量換算係数 $R(E)$ を乗じたものをエネルギー及び空間に関して積分して計算することができる(式 4.4-3)。

$$D(r) = \int_0^\infty dE \int_0^\infty dr' \frac{S(r', E) \cdot R(E) \cdot B(E, r')}{4\pi r'^2} \exp(-\mu r') \quad \text{-(式 4.4-3)}$$

QAD のビルドアップ係数は単層体系に対して評価されたもので多重層遮蔽体に対応していない。ここに本手法の誤差要因が存在することになる⁽⁶⁾。

解析モデルは、容器内のアクリルボックスは模擬せずアクリル容器内の領域は均質としている(図 4.4-43、表 4.4-13)。ローラコンベアは固定台のみ考慮しローラはない状態とした。容器はローラの取り外した領域に移動させながら測定するためである。厳密にはローラが測定領域外に存在することになるが、そこからの反射の影響はないと仮定した。評価点には取得座標の情報を用いる。線源領域の分割数は $10 \times 10 \times 10 \text{cm}$ 体積による中心からの点線源とし 100 領域とした。計算ケース数は後述するガウス分布補正を行うため測定ケース数毎に行い

$$\text{計算ケース数}(600) = \text{線源領域数}(100) \times \text{測定ケース数}(6)$$

となる。

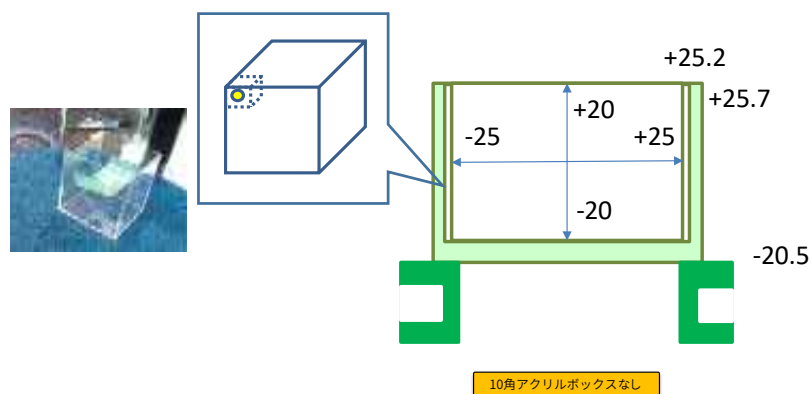


図 4.4-43 QAD 解析モデル

表 4.4-13 組成条件⁽⁷⁾

		コンクリート	アクリル
密度(g/cm^3)		1.44(*砕石相当)	1.19
wt%	H	0.416%	6.94%
	O	50.74%	41.34%
	Mg	0.115%	
	Al	0.446%	
	Si	38.61%	
	S	0.07%	
	Ca	6.869%	
	Fe	2.738%	
	C		51.72%

(2) ガウス分布補正

特性試験の測定結果で示したよう PSF には信号の広がりが生じてしまうため解析によって作成するグリーン関数と整合させるためには解析値になんらかの補正が必要となる。空間補正として体積 Tally を取得する方法も考えられるが、補正なしでの整合はやはり困難が予想され、かつケーブル形状を模擬した数百点に及ぶ測定点の入力作成作業が必要となり汎用性に欠ける。数百点に及ぶ測定点の作成には、点減衰核積分法やモンテカルロ法における点検出器法で容易に作成ができるが補正なしでは適応不可であることが予想される。そこで、解析結果の中で観測されるピークに対して広がりを与えることにより、測定結果を模擬できると考えられる。解析結果で得られる flux 又は線量率のピークにガウス分布 (式 4.4-4) を与えるプログラムを作成した。プログラムは、単一ピークだけでなく複数ピークの重ね合わせも可能なものとする必要がある。ガウス関数 $f(N)$ は

$$f(N) = \frac{S}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(N-N_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad \text{-(式 4.4-4)}$$

ここで、

S : ピーク面積

σ : ピーク分散

N_0 : ch の flux 又は線量率

である。

ピークの分散は、統計的分布としては標準偏差に対応し、ピークの半値幅 FWHM と以下の関係にあたる (式 4.4-5)。

$$\sigma = \frac{FWHM}{\sqrt{8\ln 2}} \quad \text{-(式 4.4-5)}$$

解析結果にガウス分布を与える処置として“核分裂生成物の γ 線スペクトル計算プログラム FPGAM”⁽⁸⁾のサブルーチン GAUSS を引用し解析値を補正するプログラムを作成した。FPGAM は γ 線の単一ピークを NaI 検出器等で検出する際のシミュレーションとして、ガウス分布等を与えることができるプログラムである。本来は、マルチチャンネルアナライザによる信号を模擬するために開発が行われたコードであるが、PSF による信号補正にも適応は可能と考えられる。

今、PSF のスペクトルの k 番目のチャンネルが N_{k-1} から N_k までに対応すると考える k 番目のチャンネルにおけるピーク成分は、

$$\begin{aligned} W_k &= \int_{N_{k-1}}^{N_k} f(N) dN \\ &= S \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{N_k} \exp\left(-\frac{(N-N_0)^2}{2\sigma^2}\right) dN - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{N_{k-1}} \exp\left(-\frac{(N-N_0)^2}{2\sigma^2}\right) dN \right] \\ &= S \cdot \left[\operatorname{erf}\left(-\frac{(N_k-N_0)^2}{2\sigma^2}\right) - \operatorname{erf}\left(-\frac{(N_{k-1}-N_0)^2}{2\sigma^2}\right) \right] \quad \text{-(式 4.4-6)} \end{aligned}$$

と表される。ここで $\operatorname{erf}(x)$ は誤差関数であり、

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-z^2) dz \quad \text{-(式 4.4-7)}$$

と定義される。

特性試験の検証同様に MCNP5 によって得られた解析値に対してガウス分布補正を行った。単一ピーク及び複合ピークの結果に対してもガウス分布補正を行うことでPSFの測定値を想定した値に補正することができた(図 4.4-44、図 4.4-45、図 4.4-46)。

点検出器法は入力作成作業を軽減でき、かつ汎用性の高いものに出来る。また本手法は点減衰核積分法の結果にも適応可能である。絶対値の規格化等の課題はまだ残ってはいるが、本手法の実用性を示せる結果が得られた。

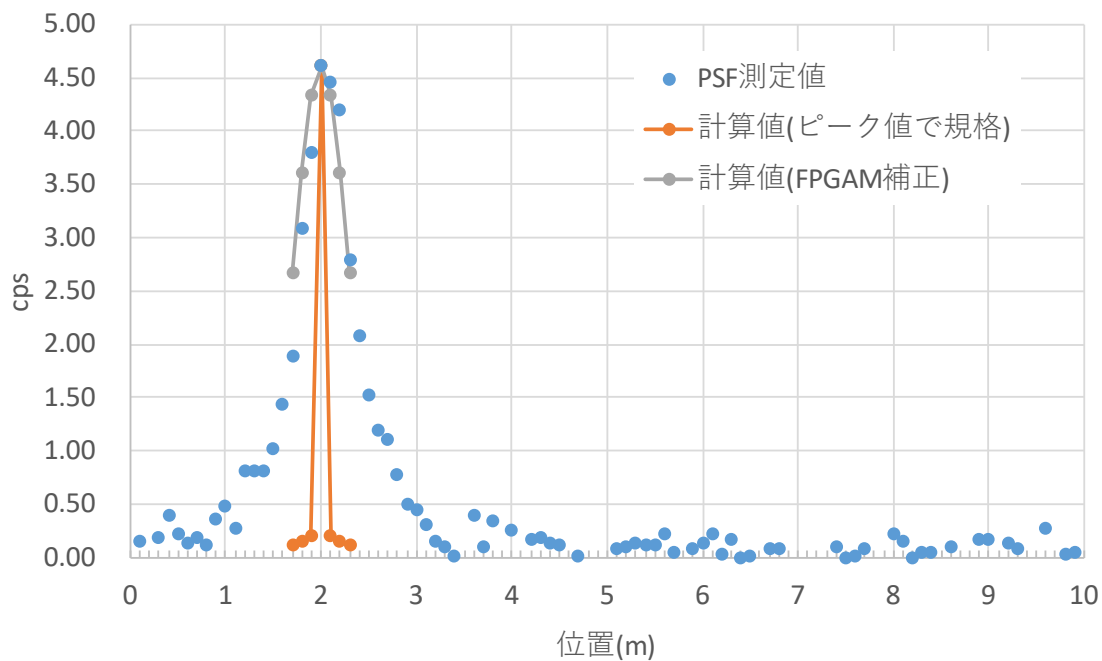


図 4.4-44 単一ピークにおけるガウス分布補正の結果

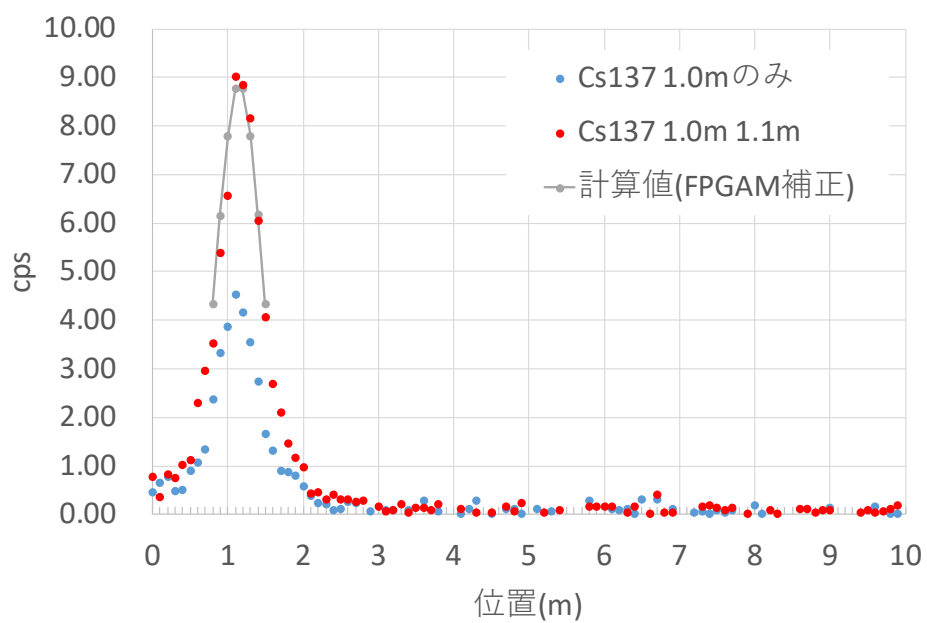


図 4.4-45 複合ピークによるサムアップ補正の結果

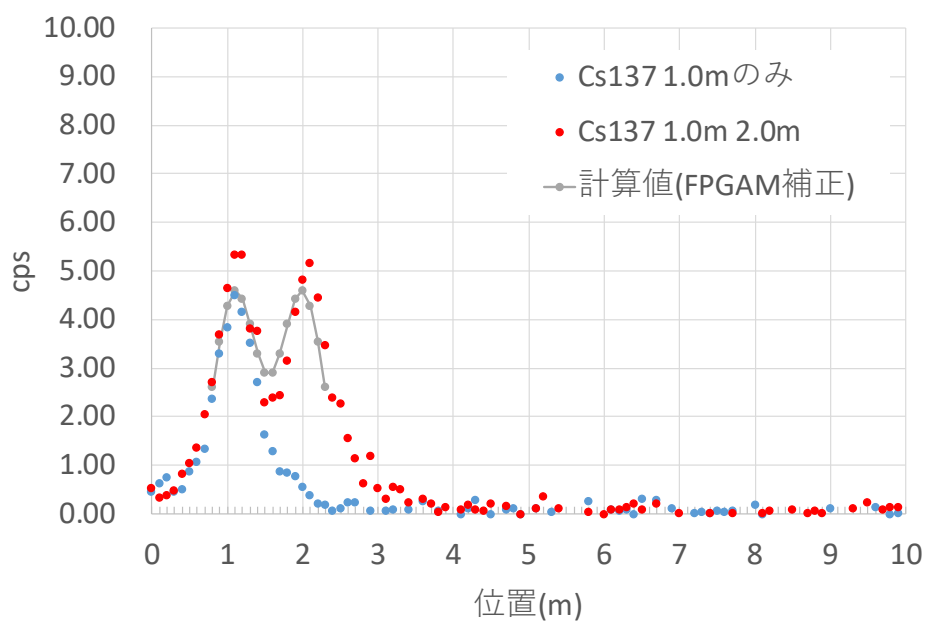


図 4.4-46 複合ピークによる両ピーク中間点重ね合わせ補正の結果

(3) 検量線補正

PSF で取得した測定値は計数率(cps)であるためシミュレーションコードによって得られる解析値(photon/cm²/s)の単位を cps に変換させる必要がある。

そこで放射線検出器の線量換算で一般的な、例えば電離箱であれば電流値を線量率に換算する係数、即ち検量線の考え方を導入した。

規格化因子は測定値の cps が比較的幅広く得られた値を用いて cps-解析値単位との検量線を作成し線形近似式より規格化を行う。

今年度は PSF の測定点に対応する測定値と解析値との相関から検量線近似式を得た(図 4.4-47)

検量線方式は碎石密度毎必要となる。ただ実際には碎石密度によるグリーン関数をいくつか用意することになるため、その際の単位変換に検量線は碎石密度毎に用意するため手間としては同じである。碎石密度は重量測定により得られる値であり、その時点でグリーン関数を選択することを想定している(図 4.4-48)。

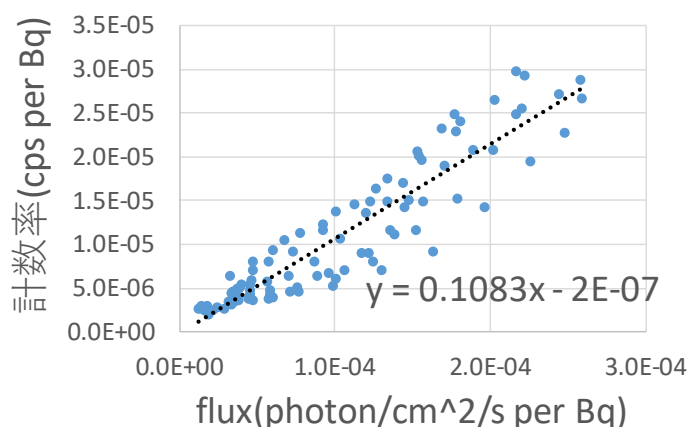


図 4.4-47 空気層 X1Y2Z4 測定 1 回目の結果より作成した検量線

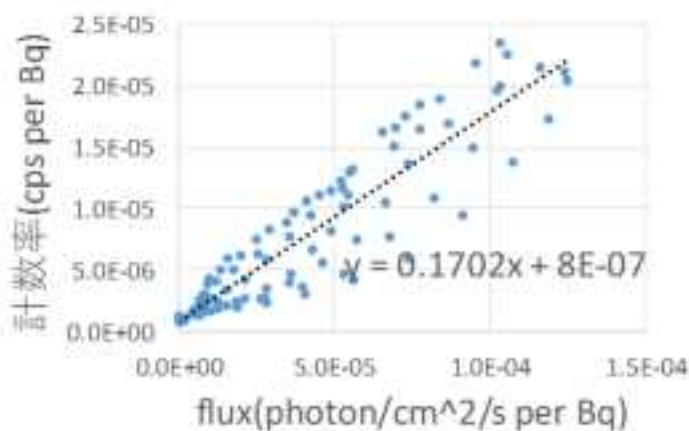


図 4.4-48 碎石層 X1Y2Z4 測定 1 回目の結果より作成した検量線

(4) グリーン関数の検証

作成したグリーン関数の条件を表 4.4-14 に示す。検証のため空気層 X1Y2Z4 の 6 回の測定ケースとの比較を行った結果を図 4.4-49 に示す。ピーク中央値及び分布の広がりとはほぼ再現できていることが確認できるがピークの高さの再現性は必ずしも良い結果とはならなかった。空気層 X3Y3Z2 における線源配置が中央のケースにおける解析値はピークの観測が出来ていない(図 4.4-50)。補正前の解析値では観測は確認(図 4.4-51)できておりガウス分布補正によってほぼフラットになってしまったためである。改善案としては計数率が低い場合において等、線源位置によってガウス分布補正方法を使い分ける必要も考えられる。ピークの山なりに解析値との違いがみられるのはファイバー内における光量の減衰による影響も考えられる。

碎石層 X1Y2Z4 における測定結果は空気層 X1Y2Z4 に比べて碎石遮蔽効果による総計数率の減衰が確認できる(図 4.4-52)。ただエネルギー特性試験の結果より散乱 γ 線の数え落としが懸念されたが解析値の方が値は低い傾向を示した。要因について分析が必要である。

空気層 X1Y2Z4 測定値とグリーン関数の相対誤差を評価すると左側面と底面に相対誤差が大きくみられる傾向があったため、PSF の座標取得だけでなく、ローラコンベアによる容器位置の再現性の検討など位置情報の取得から見直し原因を調査していく必要がある(図 4.4-53)。

ガウス分布補正を行う前の QAD 解析値を 3 次元プロットし結果の確認を行ったが測定試験同様側面の距離による減衰がみられる傾向が確認できた(図 4.4-54、図 4.4-55)。

検量線の作成方法についてはサンプリング点の重みは均一による線形近似としているため、測定誤差を取り除くため相関の重み考慮や、エネルギー特性を考慮した近似線を作成する必要があると考えられる。

取得座標の誤差について、空気層 X1Y2Z4 の測定値と解析値を比較した結果、3 周目の信号の高さに大きな差異がみられる。取得座標の誤差を検討するために以下 2 項目の追加調査を行った。

- ① サンプリングポイントを補間して解析を行い最大ピークが別箇所是否存在するか調査
- ② 輪状に巻いているケーブルの内径を疑似的に狭めた時の影響調査

3 周目ケーブルのサンプリングポイント X-Z 座標を図 4.4-56 に示す。コーナに位置するサンプリング点とは異なる座標を補間式によって算出し取得した座標(表 4.4-15)によって QAD による解析を行った。最大線束は 4 番となり 4,5 間に位置するサンプリング点の線束は $6.3680\text{E-}04(\text{photon}/\text{cm}^2/\text{sec})$ であり大きな差はない。

次にサンプリング点の座標を計測時よりも図 4.4-57 に示すように X-Z 平面として考え線源との 2 点間の距離を 10.0cm であった点を 8.6cm に、もう 1 点を X 方向に +2cm 近付けた。線源に近づけた位置を条件にグリーン関数を作成し比較した結果を図 4.4-58 表 4.4-16 に示す。計測点よりも線源間距離が狭まったため測定値との誤差は改善されている。1cm 線量当量計算でも 1.4cm の差で 26%減衰することが確認できる(表 4.4-17)。測定値を真とすれば座標の測量に誤りがあったと判断できる。グリーン関数の解析精度を検証するためには PSF の座標点の精度要求は高いことが言える。本年度は自作による治具であったため来年度は製作発注を検討する。

検量線方式について作成に使用した測定とは別の線源配置による測定にも適応可能であるのか確認を行った。空気層 X1Y2Z4 の測定結果にて作成した検量線を空気層 X4Y4Z1 の解析値に適応した結果を図 4.4-58 に示す。空気層問題においては適応が可能であることが確認できる。碎石層問題については上記の通りエネルギー特性問題もあるため本年度の検証は保留とする。

グリーン関数にはガウス分布補正を行ったため空間分解能が悪くなっている。線源配置が近隣の場合に優位な差が得られているのか確認を行った。空気層 X2Y2Z4 と空気層 X3Y2Z4 のグ

リーン関数の分布を図 4.4-60 に示す。空気層 X2Y2Z4 は一か所コーナ部で距離が近くなる箇所の線束が高くなっているが上面に結果は直上が高くなっていることがどちらの結果からも確認することができる。よってガウス分布による補正を行っても 10cm 間隔のメッシュならば優位な差を示している。ただしこの結果が逆解析において優位な差であるかは検討が必要である。

表 4.4-14 グリーン関数の条件

線源領域数	100 (縦 5×横 5×高さ 4)
測定点	482 (95+95+51+95+95+51)
単位	cps per Bq

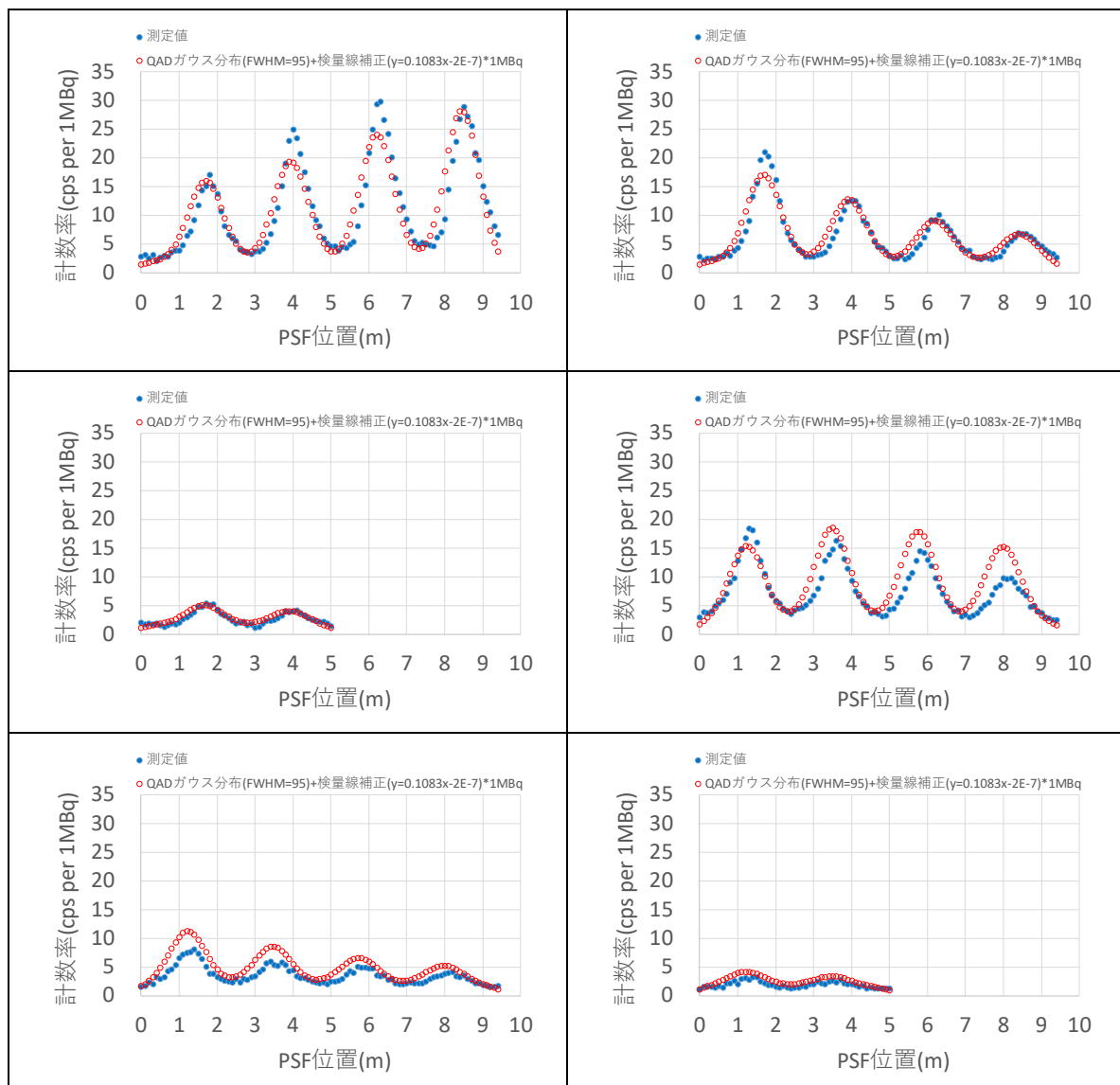


図 4.4-49 空気層 X1Y2Z4 における測定とグリーン関数

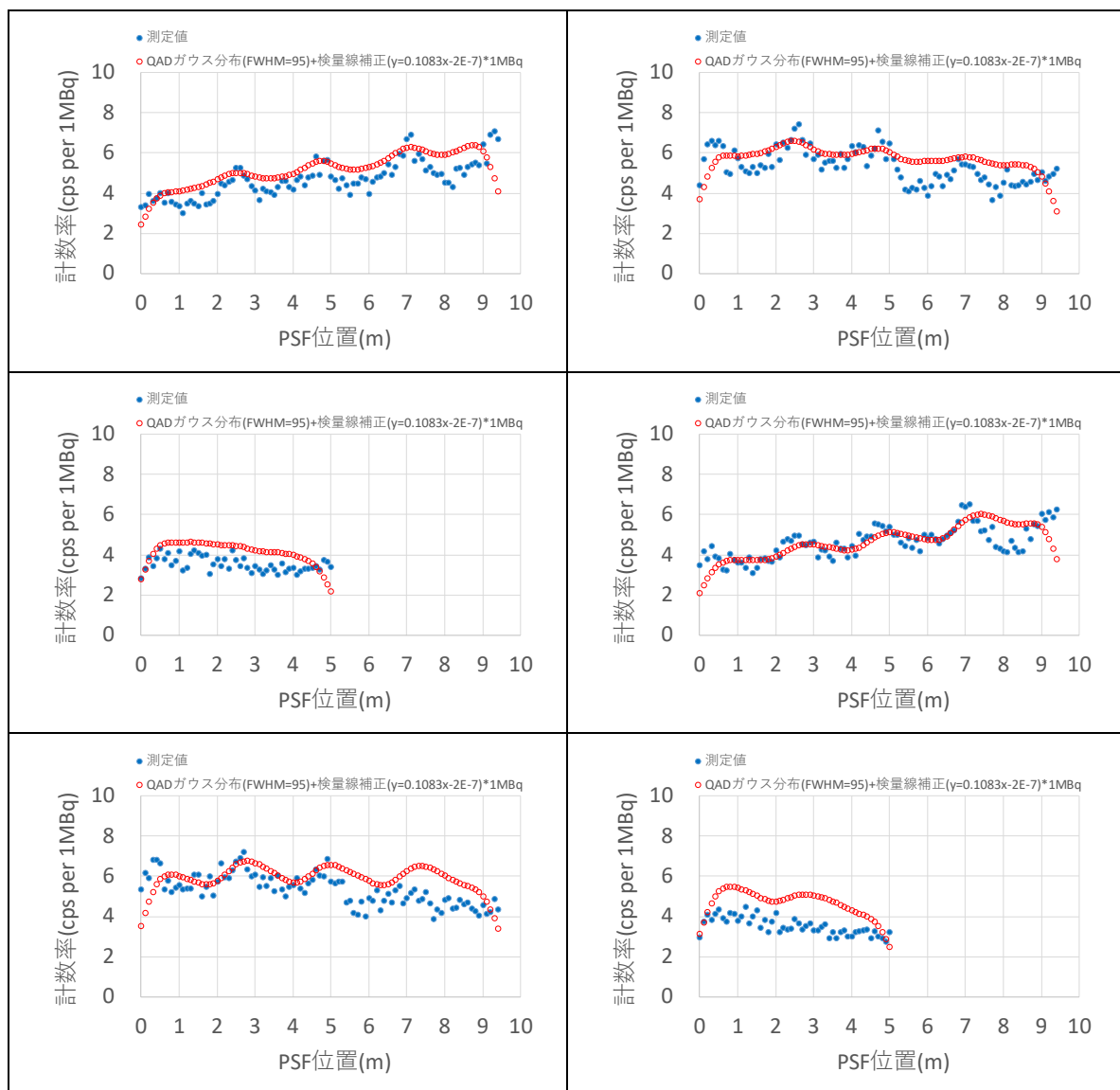


図 4.4-50 空気層 X3Y3Z2 における測定とグリーン関数

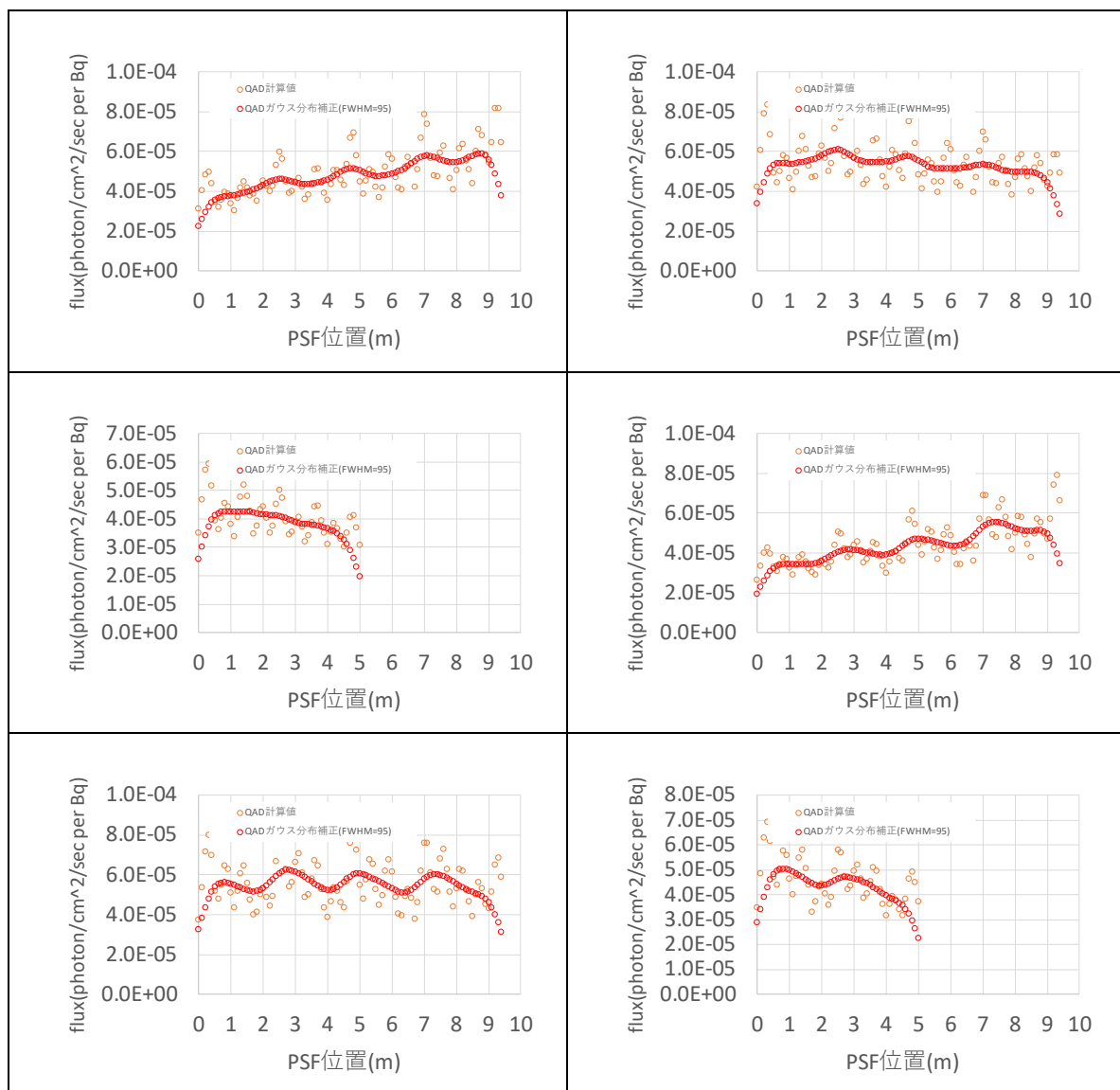


図 4.4-51 空気層 X3Y3Z2 の QAD 解析値とガウス分布補正結果

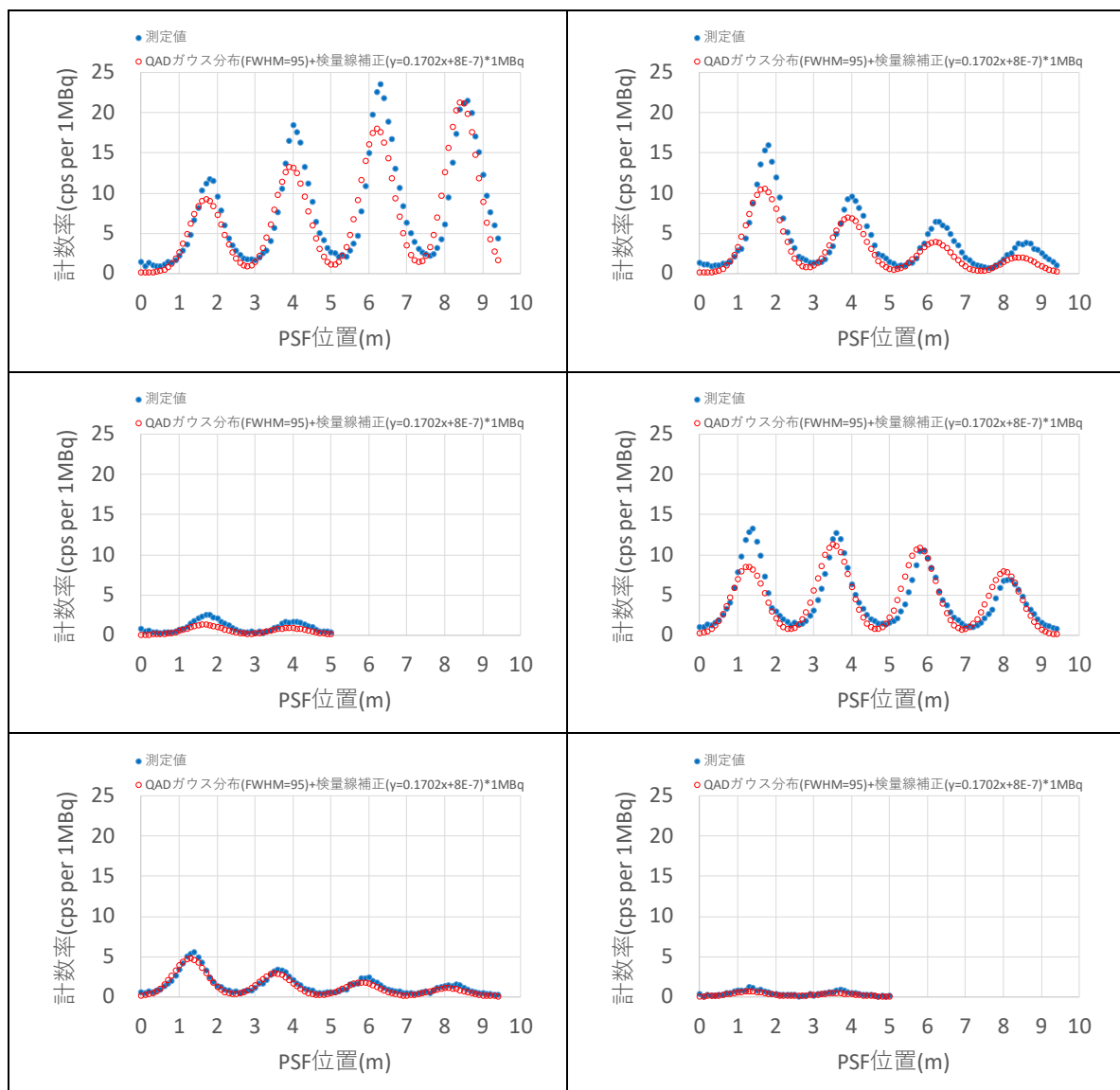


図 4.4-52 碎石層 X1Y2Z4 における測定とグリーン関数

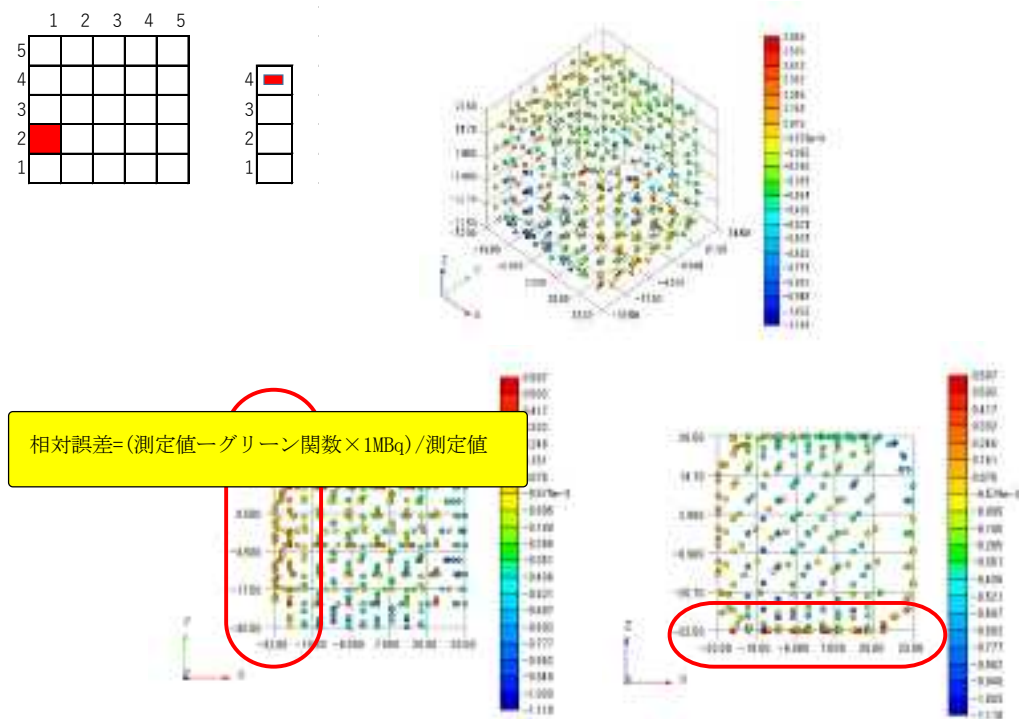


図 4.4-53 空気層 X1Y2Z4 における測定とグリーン関数の相対誤差

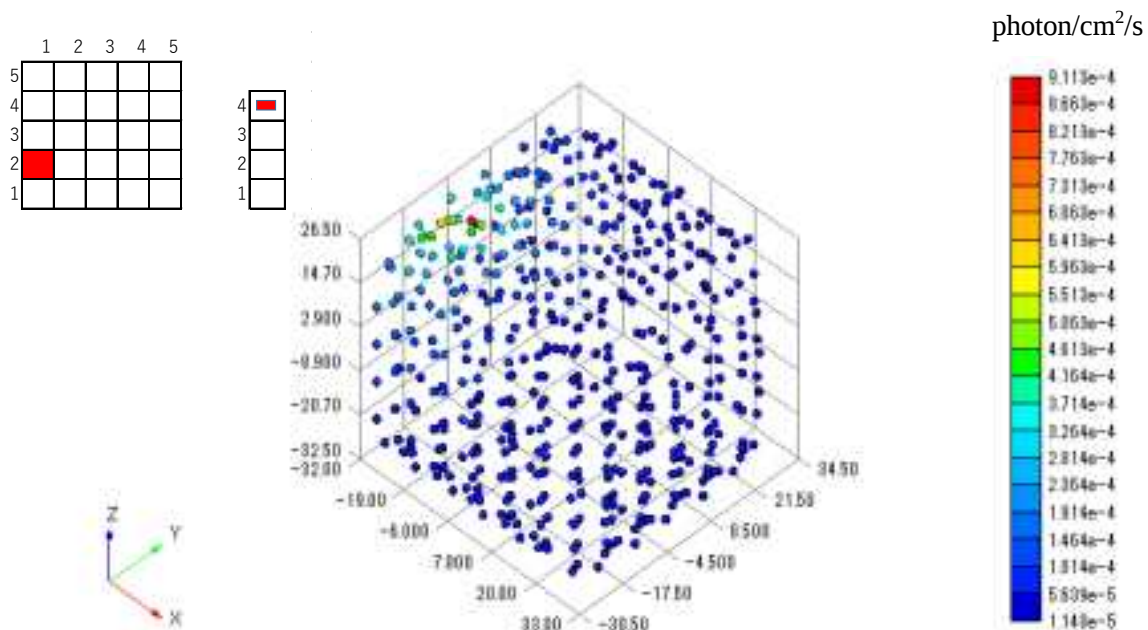


図 4.4-54 空気層 X1Y2Z4 に対する QAD 解析値

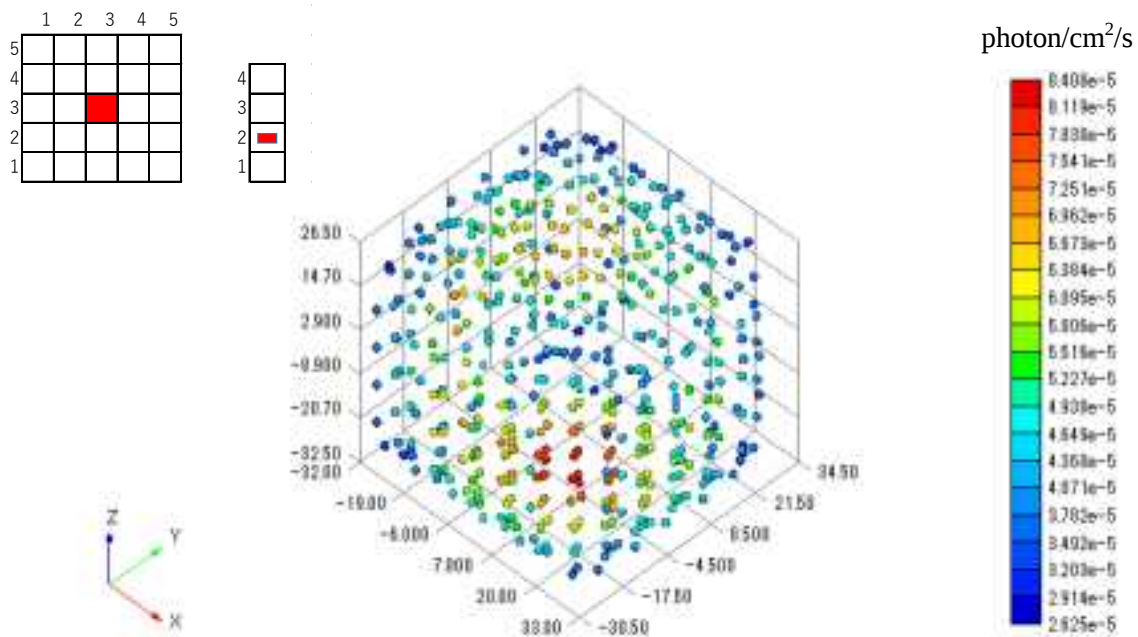


図 4.4-55 空気層 X3Y3Z2 に対する QAD 解析値

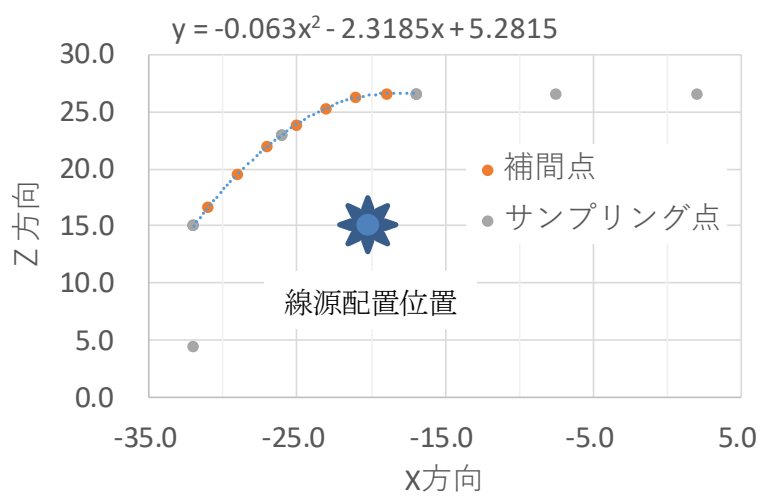


図 4.4-56 3 周目の -X 方向+Z 方向のサンプリング点

表 4.4-15 3 周目の-X 方向+Z 方向のサンプリング点

補間点番号	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	flux(photon/cm ² /s)
1	-19.00	-12.51	26.59	4.776E-04
2	-21.00	-12.47	26.19	5.113E-04
3	-23.00	-12.40	25.28	5.617E-04
4	-25.00	-12.28	23.87	6.214E-04
5	-27.00	-12.12	21.95	6.646E-04
6	-29.00	-11.91	19.54	6.079E-04
7	-31.00	-11.66	16.61	5.093E-04
4-5 間	-26.00	-12.50	23.00	6.3680E-04

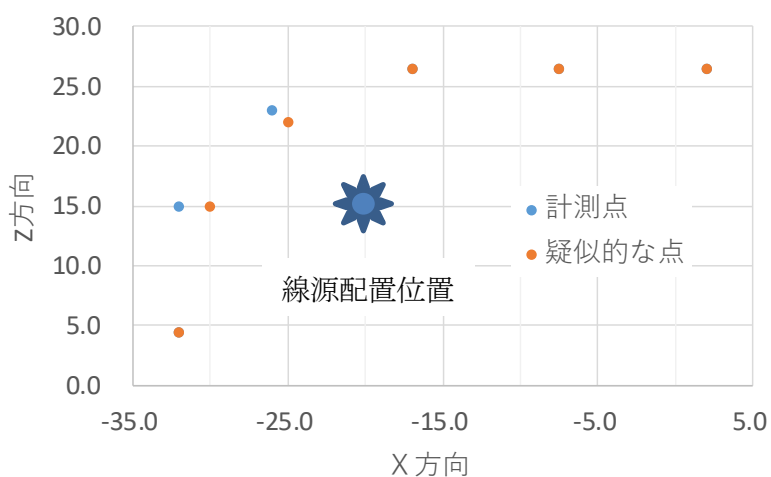


図 4.4-57 解析に用いた計測点と取得座標の誤差を模擬した疑似的な点

表 4.4-16 解析に用いた計測点と取得座標の誤差を模擬した疑似的な点

測量時の座標		疑似的に作成した座標	
x	z	x	z
2.00E+00	2.65E+01	2.00E+00	2.65E+01
-7.50E+00	2.65E+01	-7.50E+00	2.65E+01
-1.70E+01	2.65E+01	-1.70E+01	2.65E+01
-2.60E+01	2.30E+01	-2.50E+01	2.20E+01
-3.20E+01	1.50E+01	-3.00E+01	1.50E+01
-3.20E+01	4.50E+00	-3.20E+01	4.50E+00

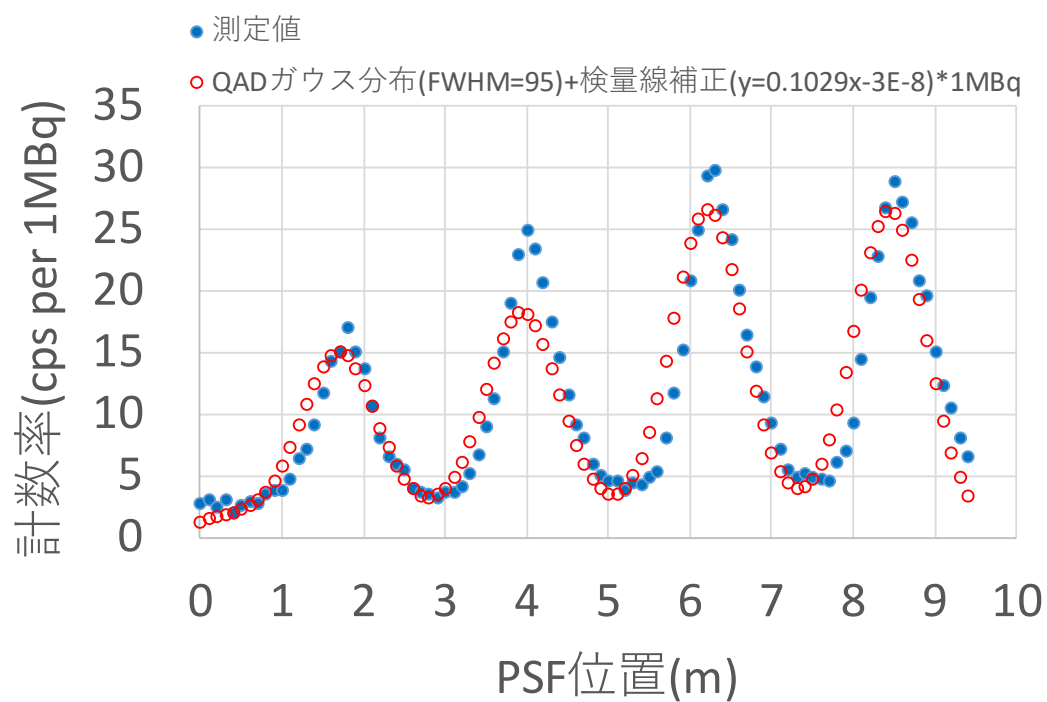


図 4.4-58 空気層 X1Y2Z4 における測定と疑似的な計測点によるグリーン関数

表 4.4-17 1cm 線量当量計算による検討結果

距離(m)	線量率($\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)
0.086	1068E+01
0.10	7.898E+00

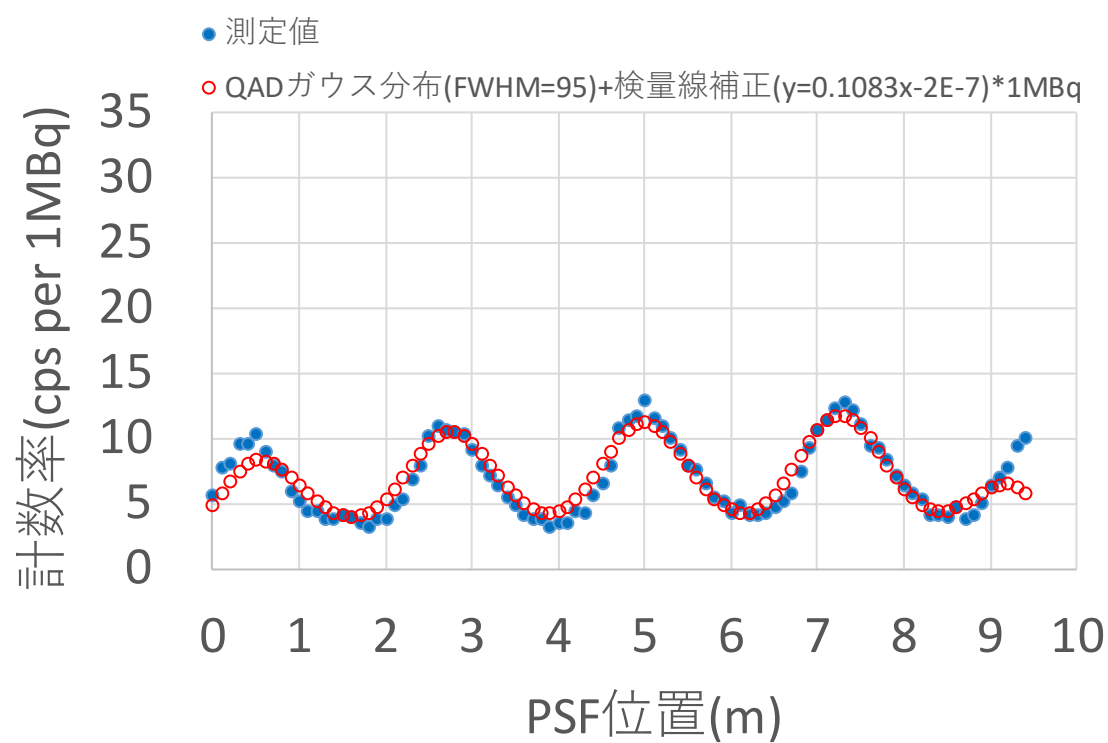


図 4.4-59 空気層 X4Y4Z1 に対して空気層 X1Y2Z4 にて作成した検量線の適応確認

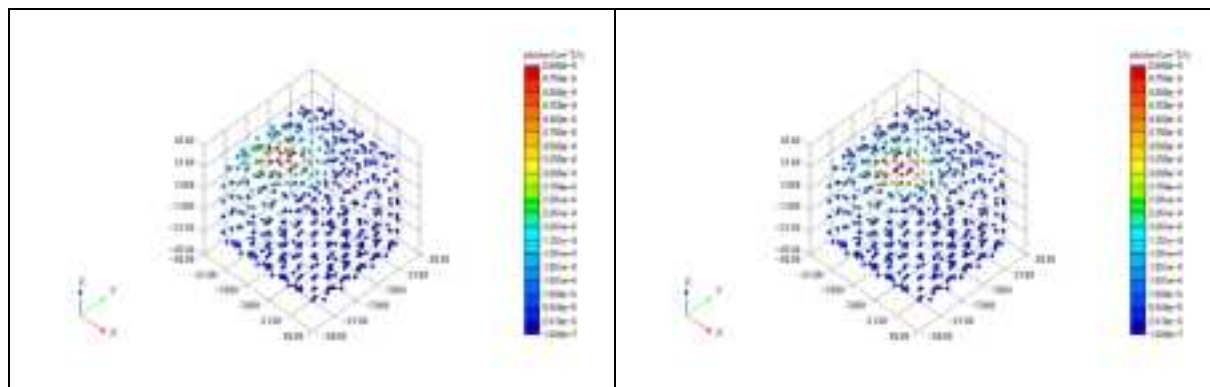


図 4.4-60 空気層 X2Y2Z4 と空気層 X3Y2Z4 のグリーン関数の分布

4.5 放射線測定結果に基づく放射能分布の評価

4.4.2 で示した模擬体に対して PSF を用いた測定により得られた計数率データと、4.4.3 で整備したグリーン関数を用いて、4.3.1 で整備した放射能濃度分布コードシステムによる放射能分布の推定を行う。これによりコードシステムの一連の処理が支障なく実行可能であることを確認しつつ、測定および分布推定における現状の適用可能性と課題を整理する。

4.5.1 放射線測定結果に基づく放射能分布評価の条件（設定）

4.4 の測定実験ではアクリルボックスに対し体積が十分に小さい線源を用いているため、分布推定の対象となる値(式 4.3-1 のベクトル $\mathbf{q}$)は、放射能濃度(Bq/kg)ではなく放射能(Bq)とする。また図 4.4-26 より、濃度分布推定のためのセル分割数(m)は、アクリル容器内のアクリルボックスの個数である 100 個である。

一方、測定点数(n)は、4.4.2 (2) の記述より 482 であり、 $n > m$ である。

(1) グリーン関数

4.4.3 で整備したグリーン関数を、放射能濃度分布コードシステムにおける逆解析プログラムの入力ファイルである、グリーン関数ライブラリとして適用する。これは、式 4.3-1 に示したグリーン関数行列 $\mathbf{G}$ である。空気層 X1Y2Z4 の測定データで検量線補正を行ったグリーン関数(図 4.4-49)を空気層グリーン関数ライブラリとして、碎石層の測定データについては空気層 X1Y2Z4 の測定データで検量線補正を行ったグリーン関数(図 4.4-52)を碎石層グリーン関数ライブラリとして適用した。

(2) 計数率（測定値および理論値）

4.4.2 で取得した計数率データを、放射能濃度分布コードシステムにおける逆解析プログラムの入力ファイルである、線量率データファイルとして適用する。これは、式 4.3-1 に示した計数率ベクトル $\mathbf{d}(\text{cps})$ である。これと(1)のグリーン関数 $\mathbf{G}$ を用いて、逆解析プログラムにより測定値に対する分布推定を行う。

また、測定値に対する分布推定との比較のため、線源を置いたアクリルボックスに相当するセルに 1MBq の線源があるとした真の分布 $\mathbf{q}$ に対し、式 4.5-1 で理論値としての計数率ベクトル $\mathbf{d}(\text{cps})$ を算出する。

$$\mathbf{d} = \mathbf{G}\mathbf{q} \quad \text{式 4.5-1}$$

この理論値に対する分布推定結果を、測定値に対する分布推定結果と比較することで、測定に起因する影響を確認する。

(3) 解析ケースおよび座標系

座標系は 4.4 同様、容器の一方の角を $(x,y,z)=(0,0,0)$ と置いた座標系を用いる。

ケース名は 4.4 と同様、線源を置いたセルの X,Y,Z 各方向の番号 ($X = 1, \dots, 5$ 、 $Y = 1, \dots, 5$ 、 $Z = 1, \dots, 4$) で表記する。なお、Z は高さの方向である。

解析は、表 4.4-9 および表 4.4-12 に示された空気層と碎石層に対する測定（合計 7 ケース）に対して行い、ケース名の表記と中心座標を表 4.5-1 に示す。

表 4.5-1 測定ケース一覧

No.	ケース名	内容物	線源 1 中心座標(cm)			線源 2 中心座標(cm)		
			x	y	z	x	y	z
1	空気層 X1Y2Z4	空気層	5	15	35	-	-	-
2	空気層 X3Y3Z2	空気層	25	25	15	-	-	-
3	空気層 X4Y4Z1	空気層	35	35	5	-	-	-
4	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4	空気層	25	25	5	25	25	35
5	空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2	空気層	25	25	5	25	25	15
6	碎石層 X1Y2Z4	碎石層	5	15	35	-	-	-
7	碎石層 X3Y3Z1&X3Y3Z4	碎石層	25	25	5	25	25	35

(4) 推定手法

4.3 の検討結果から、濃度分布の推定には ART 法・GVSPM 法・ML-EM 法の 3 種類の逆解析手法を用い、グリーン関数は式 4.3-15 で正規化した上で解析する。また、初期分布は単純逆投影法で与える。

推定結果は総放射エネルギーと、4.3.3 で定義した解析誤差 (式 4.3-18) および推定誤差 (式 4.3-22) を用いて評価する。

(5) 計算パラメータ

計算パラメータは、試解析で用いたもの (表 4.5-2) と同様とする。ただし Tikhonov の正則化、SIRT 法、MAP-EM 法に固有のパラメータについては、今回使用しないため除外した。

表 4.5-2 測定結果を使用した分布推定に関わる入力パラメータ

パラメータ名	表記	数値
許容誤差	TOL	5E-4
最大反復回数	$I_{\max}$	1E+6

4.5.2 放射能分布評価結果

(1) 空気層 X1Y2Z4

表 4.5-3 の条件で線源を配置したケース (空気層 X1Y2Z4) における、理論値と測定値に対し、放射能分布推定を行った。

表 4.5-3 空気層 X1Y2Z4 線源情報

内容物	空気層
線源の中心位置(x, y, z)(cm)	5,15,35
線源強度(Cs-137)	1MBq

(a) 結果

表 4.5-4～表 4.5-6 および図 4.5-1～図 4.5-3 に示す。

理論値に対する分布推定では、各手法で解析誤差が許容誤差 5×10^{-4} を満たした。

測定値に対する分布推定では、各手法で解析誤差が許容誤差 5×10^{-4} を満たしておらず、終了状態は以下の通りである。ART 法と ML-EM 法は解の更新値が 1×10^{-15} を下回ったため、計算機でカウント不可能となって反復計算を終了した。GVSPM 法では、最大反復回数 100 万を終えても解が収束せず、500 万回に対して行っても収束しなかったため、収束の見込みがないと判断し 500 万回の結果を記載した。

(b) 考察

線源が角の付近にあり、4.3.5 における検討からすれば、分布を推定する上で有利な条件と考えられる。

測定値に対する分布推定では、総放射エネルギーが各手法で真値 1MBq の 5~8%の過小評価となった。線源の位置は、各手法ではっきりと特定できるが、GVSPM 法では隣のセルに広がってしまっている。ART 法では線源位置の放射能が約 0.65MBq であり、他の全セルにも $10^{-3} \sim 0.01\text{MBq}$ 程度の放射能があるという推定結果になった。ML-EM 法は線源位置が 0.78MBq と比較的高く評価しているが、線源位置から大きく外れた $z=5\text{cm}$ に約 0.14MBq の放射能があると推定してしまっている。

表 4.5-4 空気層 X1Y2Z4 ART 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	1.000E+06		
推定結果 (理論値)	9.997E+05	4.967E-04	1.837E-03
推定結果 (測定値)	9.246E+05	3.276E-01	3.563E-01

表 4.5-5 空気層 X1Y2Z4 GVSPM 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	1.000E+06		
推定結果 (理論値)	1.001E+06	4.722E-04	3.654E-03
推定結果 (測定値)	9.513E+05	2.570E-01	1.443E-01

表 4.5-6 空気層 X1Y2Z4 ML-EM 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	1.000E+06		
推定結果 (理論値)	1.000E+06	5.000E-04	3.151E-03
推定結果 (測定値)	9.250E+05	2.380E-01	2.617E-01

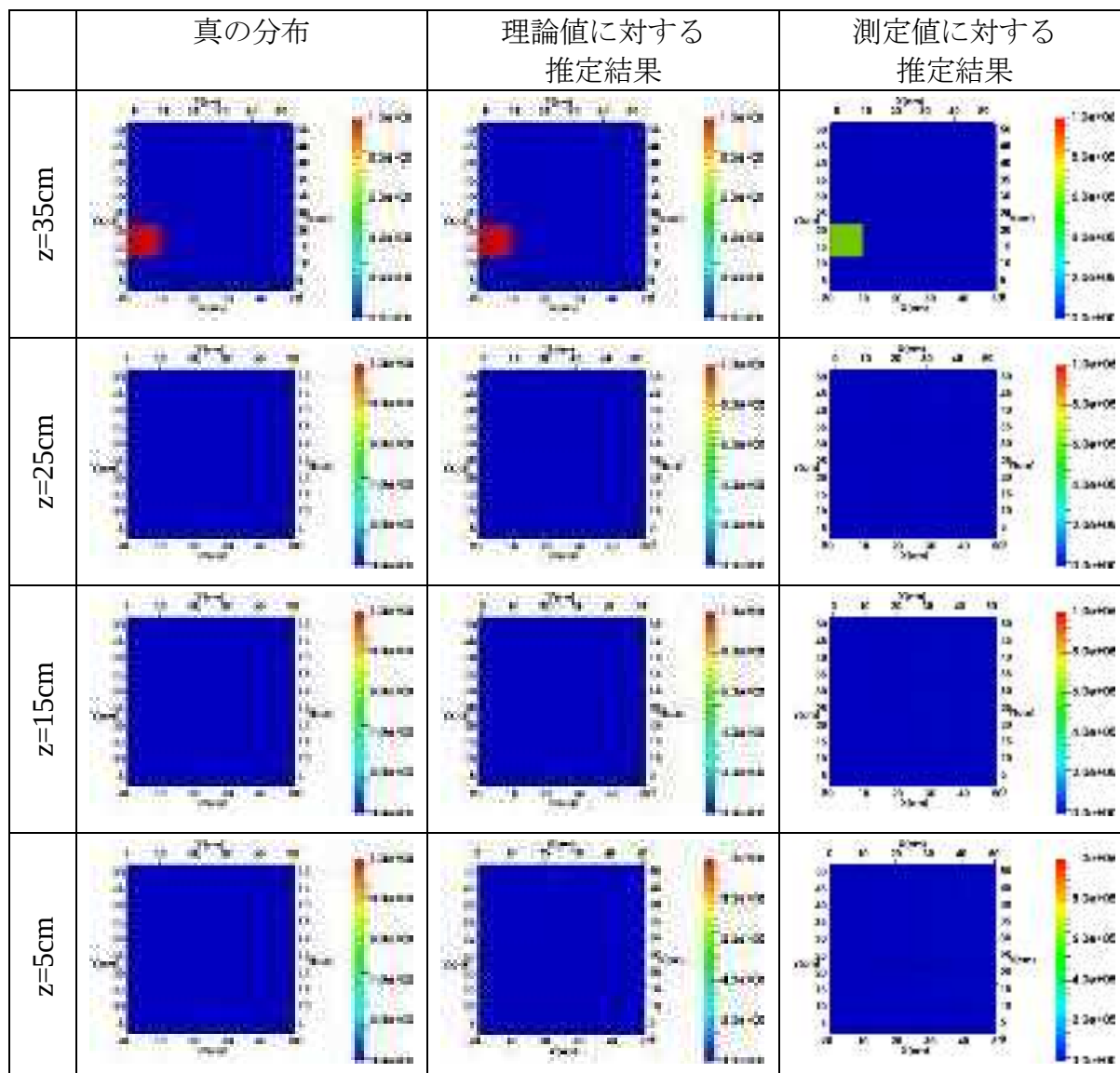


図 4.5-1 空気層 X1Y2Z4 ART 法

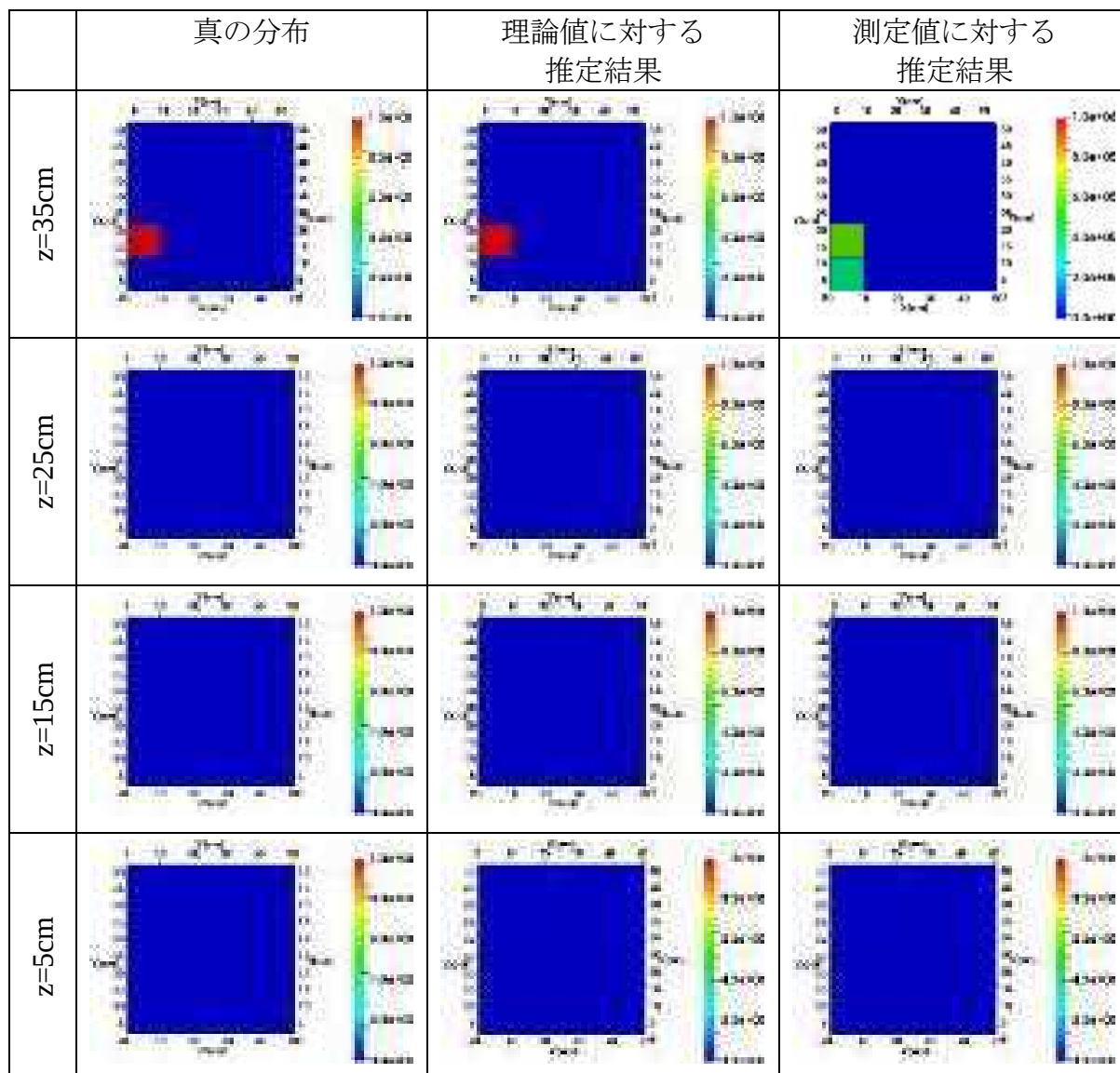


図 4.5-2 空気層 X1Y2Z4 GVSPM 法

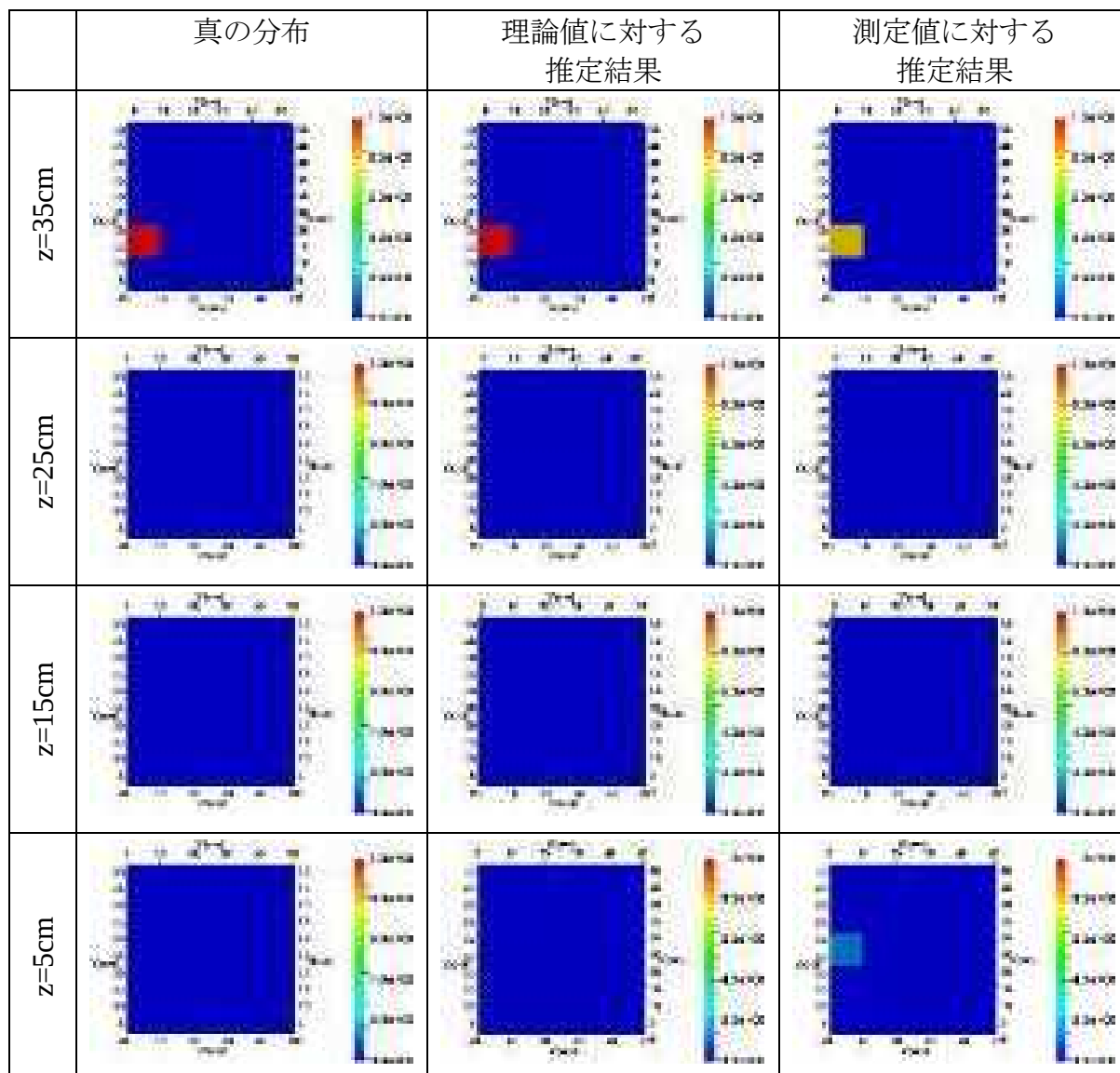


図 4.5-3 空気層 X1Y2Z4 ML-EM 法

(2) 空気層 X3Y3Z2

表 4.5-7 の条件で線源を配置したケース（空気層 X3Y3Z2）における、理論値と測定値に対し、推定を行った。

表 4.5-7 空気層 X3Y3Z2 線源情報

内容物	空気層
線源の中心位置(x, y, z)(cm)	25,25,15
線源強度(Cs-137)	1MBq

(a) 結果

表 4.5-8～表 4.5-10 および図 4.5-4～図 4.5-6 に示す。

理論値に対する推定では、各手法で解析誤差が許容誤差 5×10^{-4} を満たした。

測定値に対する推定では、各手法で解析誤差が許容誤差 5×10^{-4} を満たしておらず、終了状態は以下の通りである。ART 法は解の更新値が 1×10^{-15} を下回ったため、計算機でカウント不可能となって反復計算を終了した。GVSPM 法と ML-EM 法では、最大反復回数 100 万を終えても解が収束せず、500 万回に対して行っても収束しなかったため、収束の見込みがないと判断し 500 万回の結果を記載した。

(b) 考察

線源が角の付近にあり、4.3.5 における検討からすれば、分布を推定する上で不利な条件と考えられる。

ART 法による測定値に対する分布推定では、総放射エネルギーが真値 1MBq の 108%と過大評価であった。線源の位置は全く再現できておらず、線源位置からは下方である $z=5\text{cm}$ にまばらに大きく広がっている。一方、全セルに最小でも 10^{-3}MBq 程度の放射能が表れており、これらの寄与が過大評価の要因となっている。

GVSPM 法と ML-EM 法による測定値に対する分布推定では、総放射エネルギーが真値 1MBq の 83%程度の過小評価である。線源の位置は再現できず、線源の直下の X3Y3Z2 のセルに最も高い放射能が表れている。下方向に比べると数値が小さいが、最上段の X3Y3Z4 付近にも放射能が表れており、中心付近の線源が上下(Z 方向)に広がっていることが推測される。ART 法の場合とは異なり、推定された放射能が 0 になっているセルも多数存在する。

理論値に対する分布推定では、各手法で線源の位置は再現できているが、周囲のセルに広がった分布の推定結果となった。また分布が外側に広がった影響と考えられるが、総放射エネルギーがわずかに過小評価となった。このことから、この条件は分布を推定する上で不利な条件と考えられ、4.3.5 における検討と合致する。

表 4.5-8 空気層 X3Y3Z2 ART 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	1.000E+06		
推定結果 (理論値)	9.836E+05	5.017E-04	3.271E-01
推定結果 (測定値)	1.077E+06	3.025E-01	1.022E+00

表 4.5-9 空気層 X3Y3Z2 GVSPM 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	1.000E+06		
推定結果 (理論値)	9.762E+05	5.000E-04	7.228E-01
推定結果 (測定値)	8.477E+05	1.603E-01	1.040E+00

表 4.5-10 空気層 X3Y3Z2 ML-EM 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	1.000E+06		
推定結果 (理論値)	9.755E+05	5.000E-04	6.324E-01
推定結果 (測定値)	8.268E+05	1.080E-01	1.070E+00

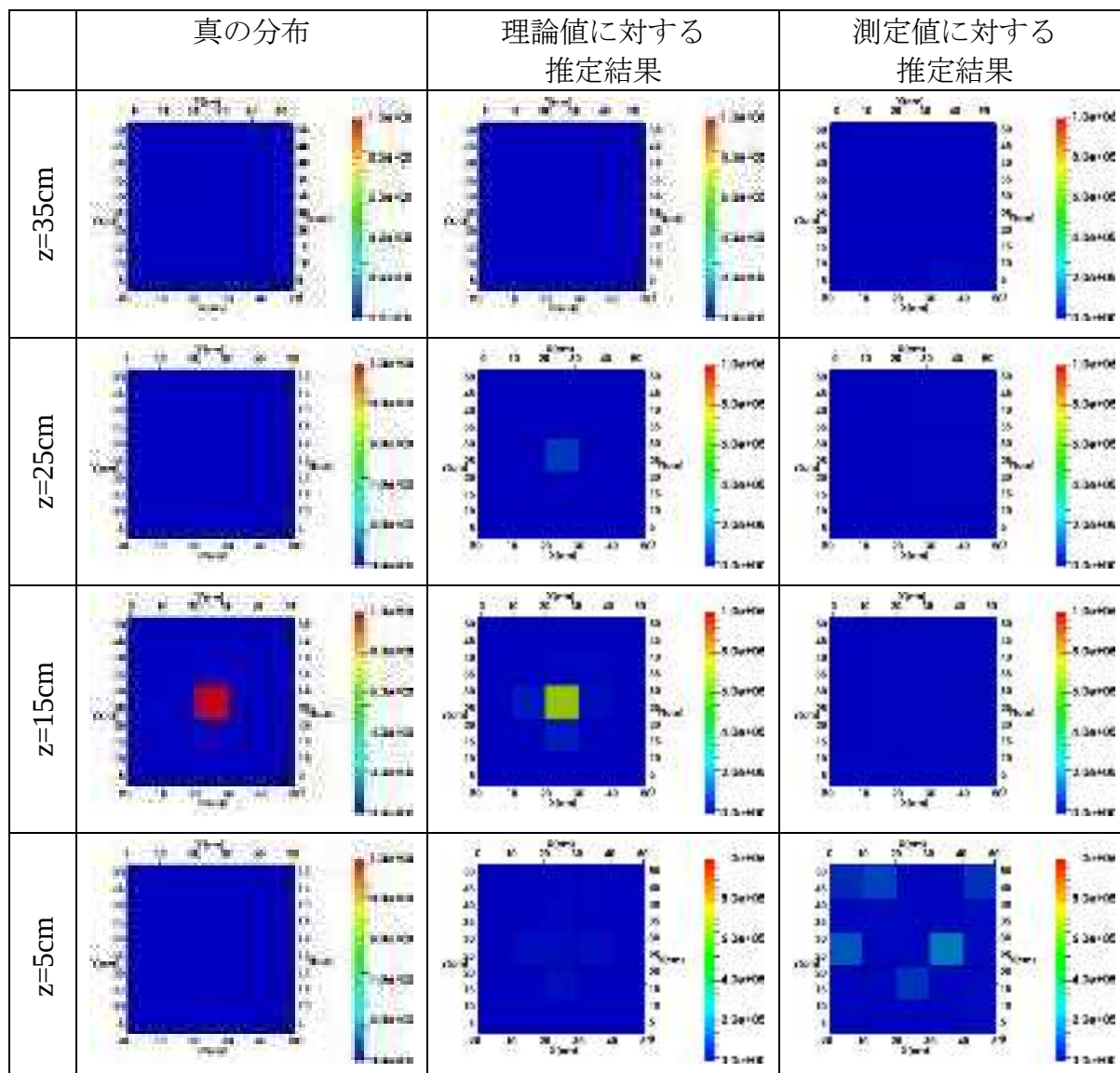


図 4.5-4 空気層 X3Y3Z2 ART 法

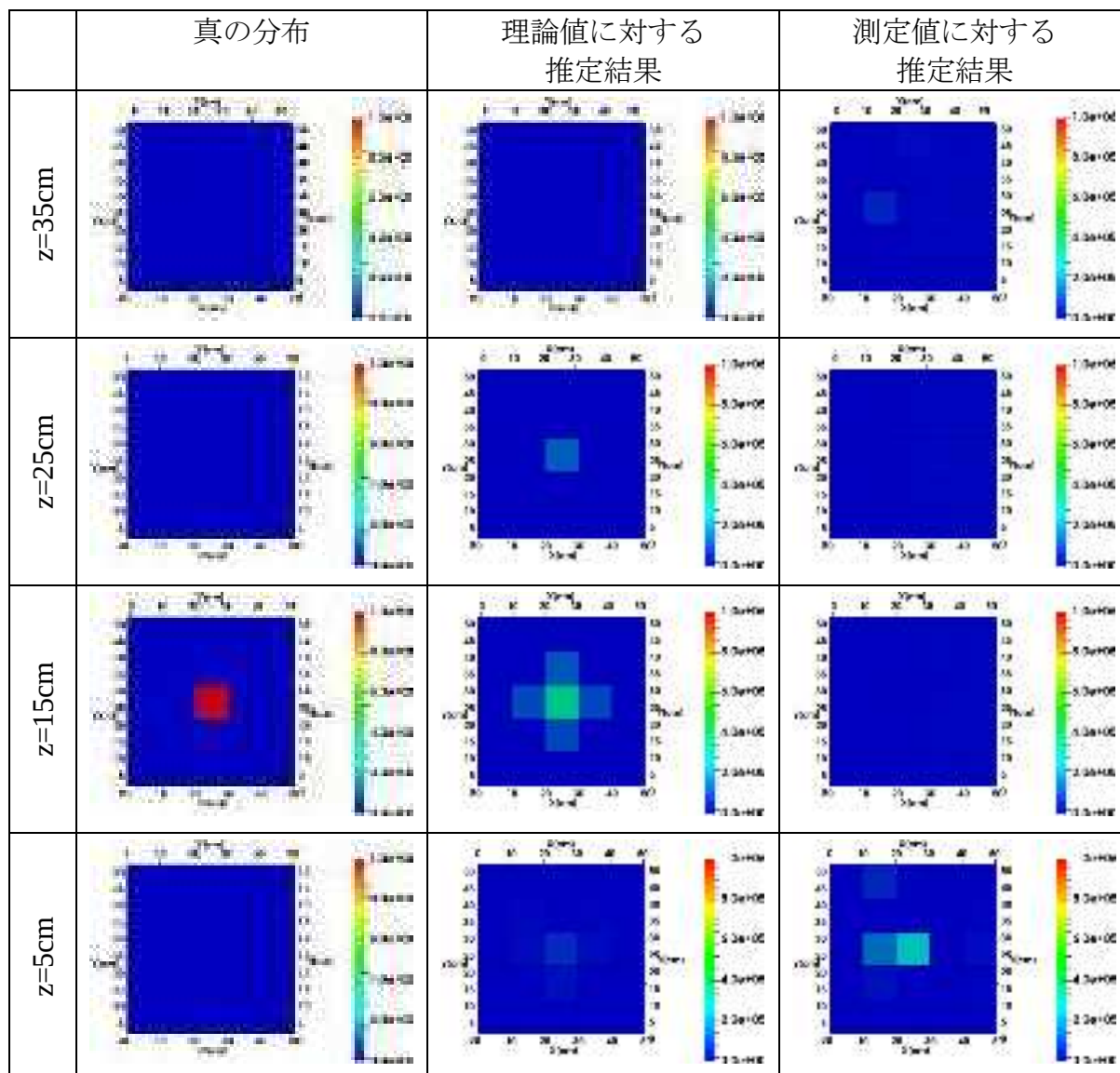


図 4.5-5 空気層 X3Y3Z2 GVSPM 法

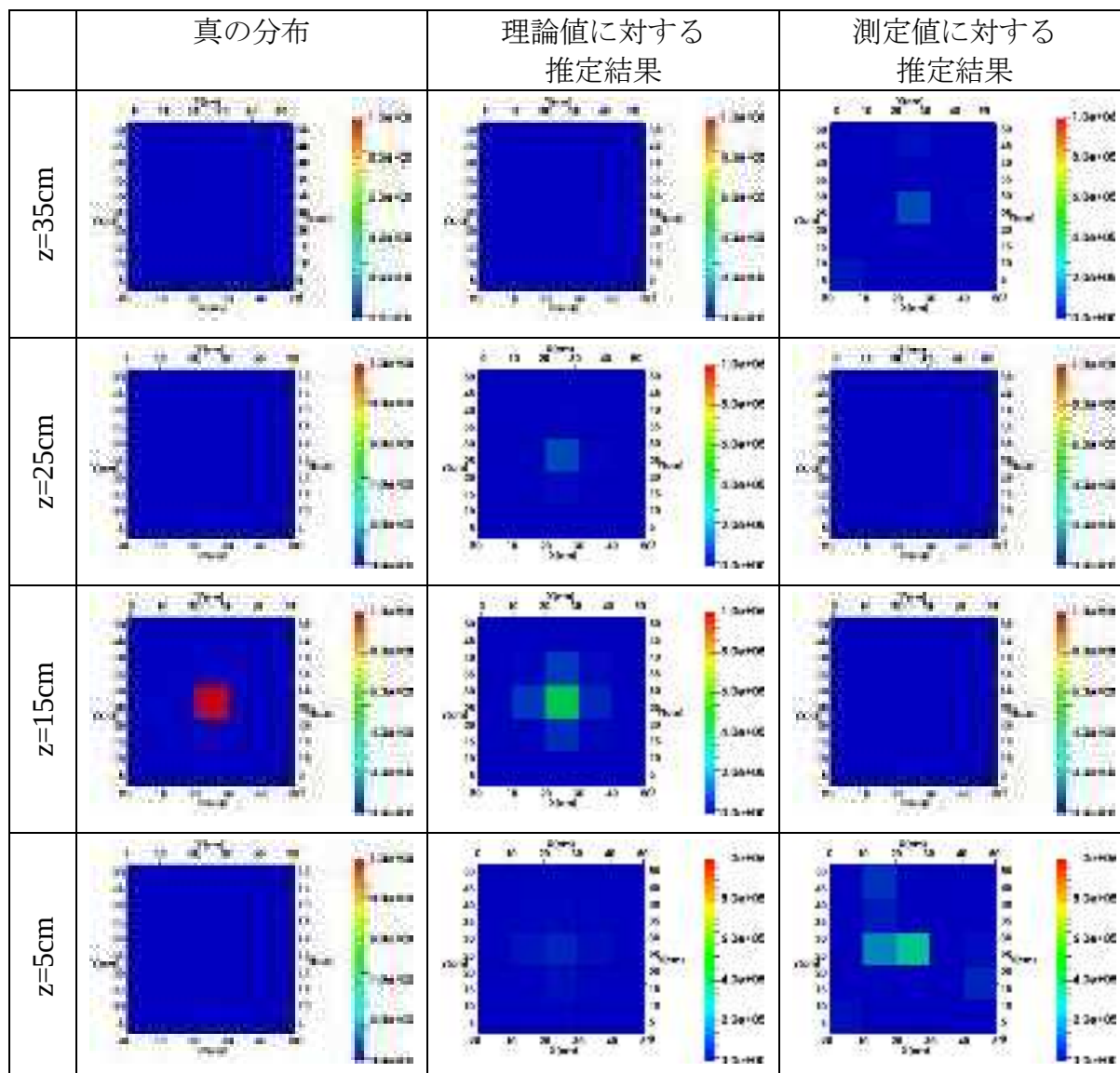


図 4.5-6 空気層 X3Y3Z2 ML-EM 法

(3) 空気層 X4Y4Z1

表 4.5-11 の条件で線源を配置したケース（空気層 X4Y4Z1）における、理論値と測定値に対し、放射能分布の推定を行った。

表 4.5-11 空気層 X4Y4Z1 線源情報

内容物	空気層
線源の中心位置(x, y, z)(cm)	35,35,5
線源強度(Cs-137)	1MBq

(a) 結果

表 4.5-12～表 4.5-14 および図 4.5-7～図 4.5-9 に示す。

理論値に対する推定では、各手法で解析誤差が許容誤差 5×10^{-4} を満たした。測定値に対する推定では、各手法で解析誤差が許容誤差 5×10^{-4} を満たしていないが、これは次の要因である。ART 法は解の更新値が 1×10^{-15} を下回ったため、計算機でカウント不可能となって反復計算を終了した。GVSPM 法と ML-EM 法では、最大反復回数 100 万を終えても解が収束せず、500 万回に対して行っても収束しなかったため、収束の見込みがないと判断し 500 万回の結果を記載した。

(b) 考察

線源位置は容器の角付近のセルで、条件は空気層 X1Y2Z4 に近い。

測定値に対する濃度推定では、ART 法では総放射エネルギーが真値 1MBq の 152%と過大評価であった一方、GVSPM 法と ML-EM 法では 109%と 101%と、過大評価ではあるが比較的眞値に近い結果となった。分布としては、各手法とも線源位置のセル (X4Y4Z1) の近傍のセルに高い放射能の数値が表れているが、数セル分に広がってしまっている。傾向としては、容器の内側ではなく外側に向かって広がっている。ART 法では、全セルに最小でも 10^{-3} MBq 程度の放射能が表れており、これらの寄与が過大評価の要因となっている。

表 4.5-12 空気層 X4Y4Z1 ART 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	1.000E+06		
推定結果 (理論値)	1.000E+06	4.996E-04	4.517E-03
推定結果 (測定値)	1.517E+06	5.240E-01	1.091E+00

表 4.5-13 空気層 X4Y4Z1 GVSPM 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	1.000E+06		
推定結果 (理論値)	1.000E+06	4.989E-04	1.936E-02
推定結果 (測定値)	1.091E+06	2.972E-01	8.971E-01

表 4.5-14 空気層 X4Y4Z1 ML-EM 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	1.000E+06		
推定結果 (理論値)	9.999E+05	5.000E-04	1.911E-02
推定結果 (測定値)	1.014E+06	1.816E-01	6.253E-01

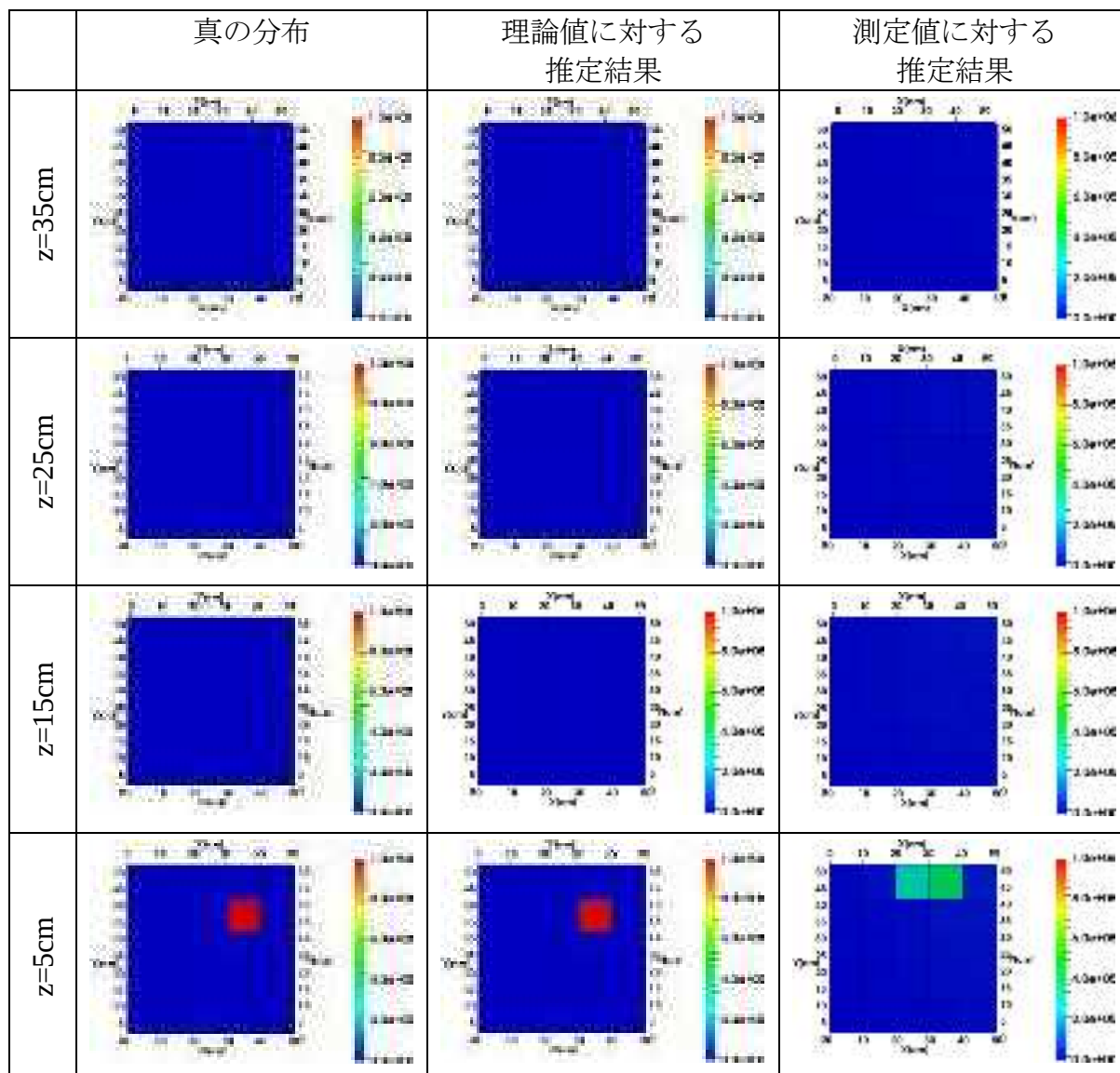


図 4.5-7 空気層 X4Y4Z1 ART 法

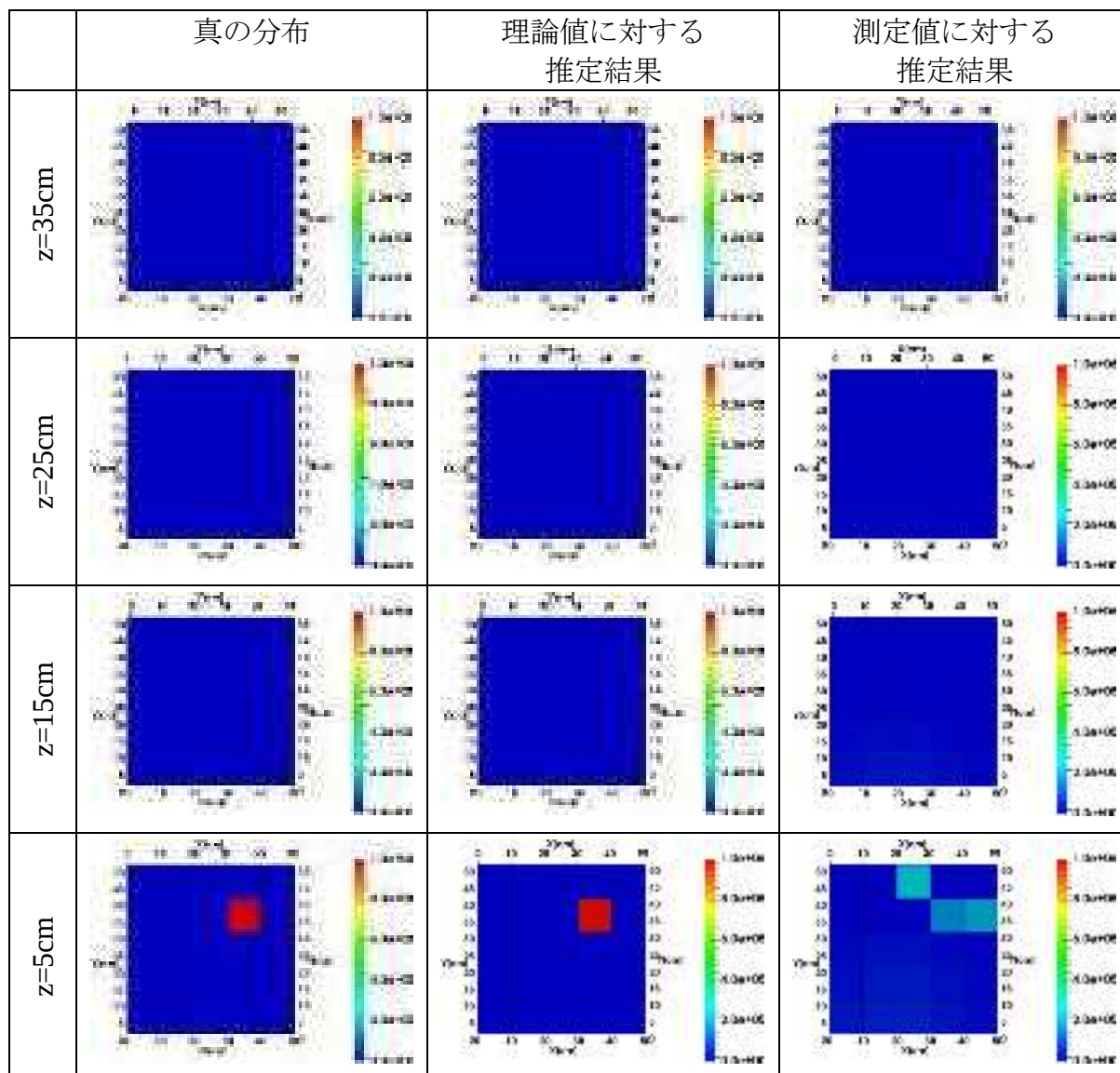


図 4.5-8 空気層 X4Y4Z1 GVSPM 法

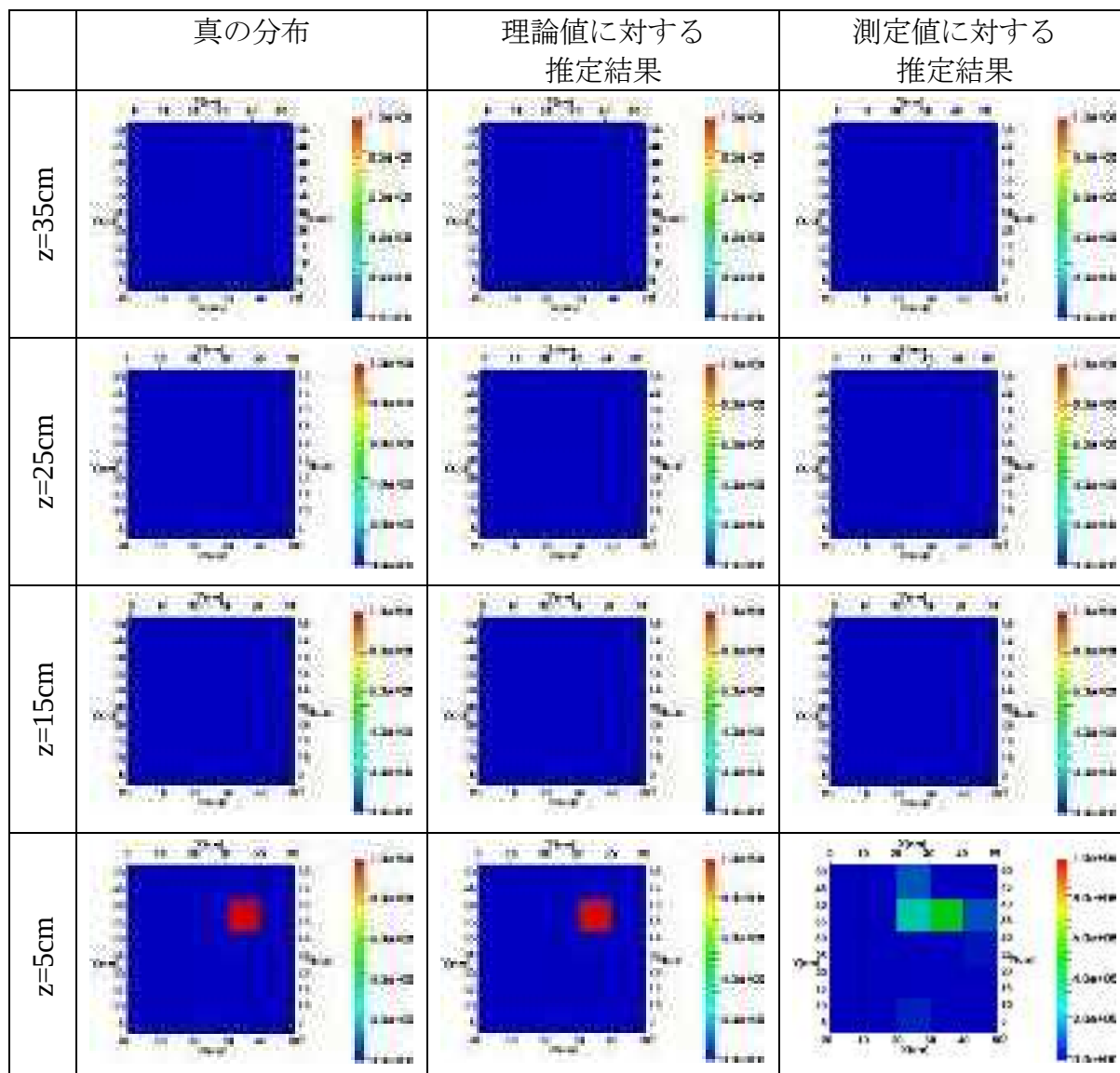


図 4.5-9 空気層 X4Y4Z1 ML-EM 法

(4) 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4

表 4.5-15 の条件で線源を配置したケース (空気層 X3Y3(Z1+Z4)) における、理論値と測定値に対し、放射能分布の推定を行った。

表 4.5-15 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 線源情報

内容物	空気層		
	線源 1	線源 2	合計
線源の中心位置(x, y, z)(cm)	25,25,5	25,25,35	
線源強度(Cs-137)	1MBq	1MBq	2MBq

(a) 結果

表 4.5-16～表 4.5-18 および図 4.5-10～図 4.5-12 に示す。

理論値に対する推定では、各手法で解析誤差が許容誤差 5×10^{-4} を満たした。測定値に対する推定では、各手法で解析誤差が許容誤差 5×10^{-4} を満たしておらず、終了状態は以下の通りである。ART 法と ML-EM 法は解の更新値が 1×10^{-15} を下回ったため、計算機でカウント不可能となって反復計算を終了した。GVSPM 法では、最大反復回数 100 万を終えても解が収束せず、500 万回に対して行ったところ解析誤差がより大きくなったため、収束の見込みがないと判断し 100 万回の結果を記載した。

(b) 考察

距離が離れた位置に 2 つの線源があるため、それぞれの寄与によって得られる放射能分布が、ある程度区別できる形で表れることが期待される。

ART 法による測定値に対する濃度推定では、総放射エネルギーが真値 2MBq の 125%と過大評価であった。分布としては、線源の存在する $z=5\text{cm}$ と $z=35\text{cm}$ に放射能が集中しているが、XY 方向の位置と放射エネルギーはまばらである。また、全セルに最小でも 10^{-3}MBq 程度の放射能が表れており、これらが過大評価の要因と考えられる。総じて、分布を正確に再現できているとは言えないが、少なくとも線源が複数であることは読み取ることができる。

GVSPM 法と ML-EM 法による測定値に対する濃度推定では、総放射エネルギーが真値 2MBq のそれぞれ 103%と 99%であった。分布の特徴は GVSPM 法と ML-EM 法で互いに似ており、線源 1(X3Y3Z1)と線源 2(X3Y3Z4)の位置に高い放射能が表れているが、それぞれその左隣のセル (X2Y3Z1 と X2Y3Z4)にも高めの放射能が表れてしまっている。(ただし、全体的に X の負方向に偏っているとは断定できない)

表 4.5-16 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 ART 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	2.000E+06		
推定結果 (理論値)	2.001E+06	4.999E-04	8.277E-03
推定結果 (測定値)	2.503E+06	2.895E-01	1.053E+00

表 4.5-17 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 GVSPM 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	1.000E+06		
推定結果 (理論値)	2.003E+06	4.998E-04	2.771E-02
推定結果 (測定値)	2.058E+06	1.611E-01	5.936E-01

表 4.5-18 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 ML-EM 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	1.000E+06		
推定結果 (理論値)	2.002E+06	5.000E-04	2.261E-02
推定結果 (測定値)	1.985E+06	1.224E-01	4.449E-01

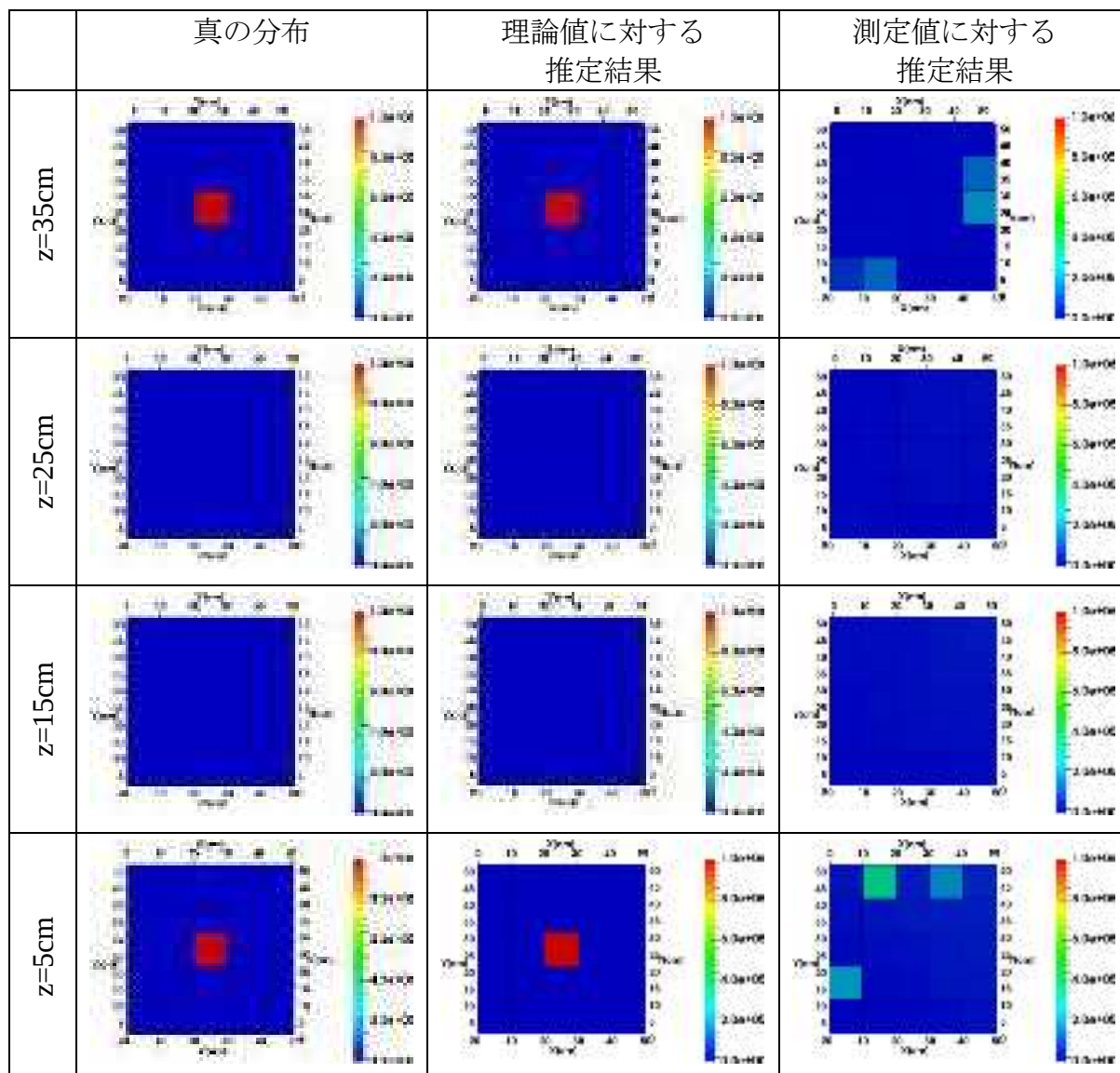


図 4.5-10 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 ART 法

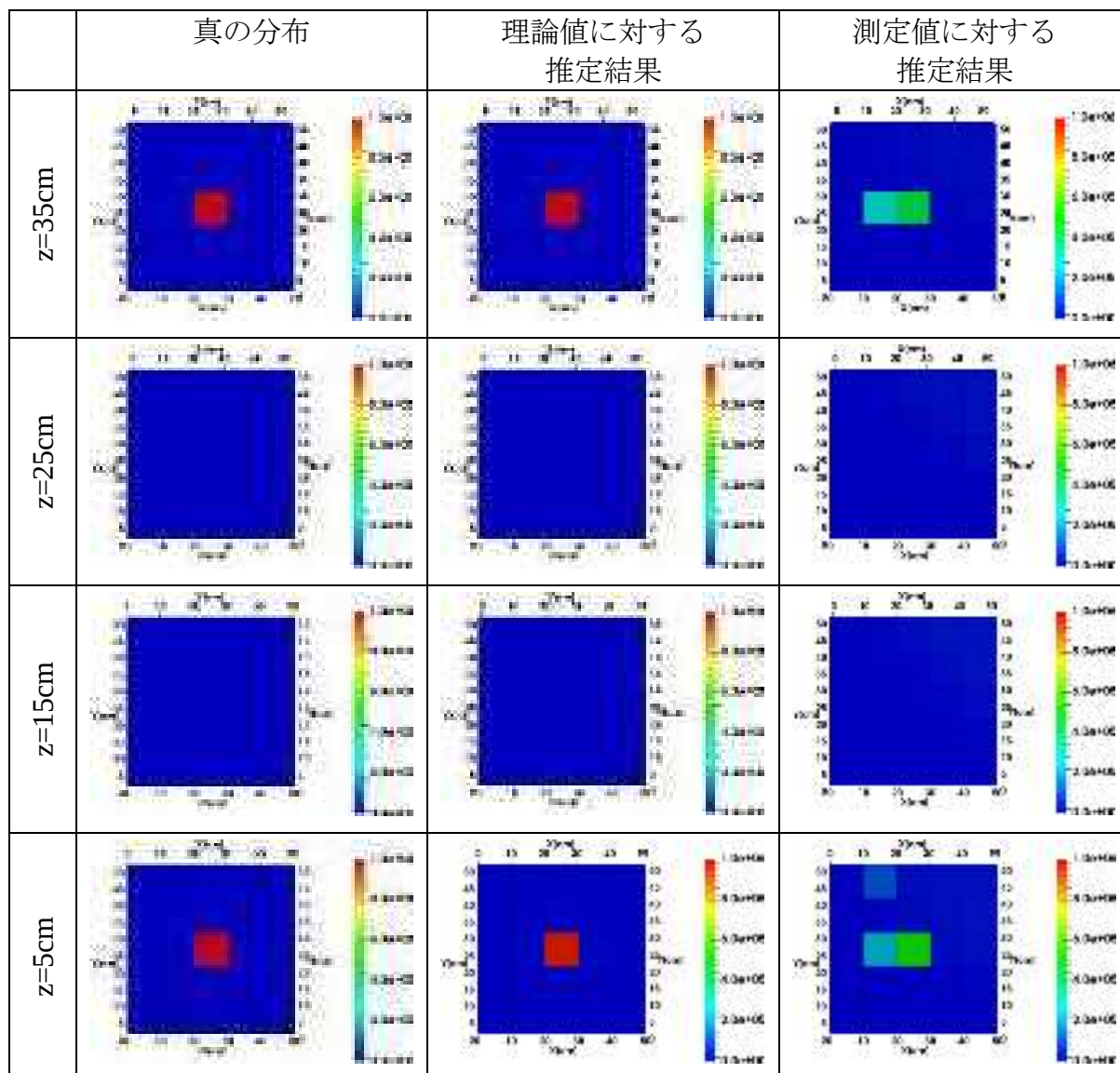


図 4.5-11 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 GVSPM 法

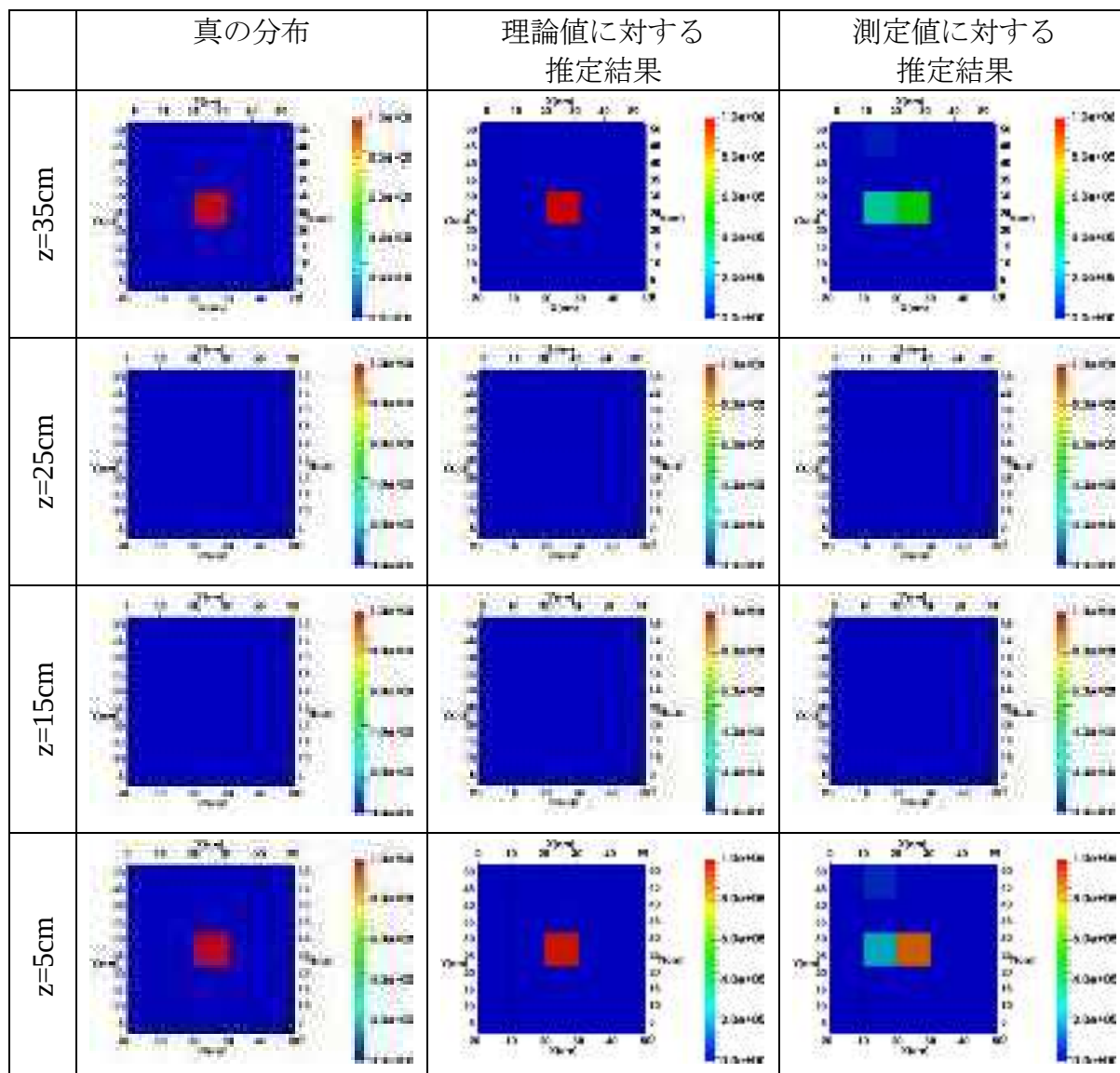


図 4.5-12 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 ML-EM 法

(5) 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2

表 4.5-19 の条件で線源を配置したケース (空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2) における、理論値と測定値に対し、放射能分布の推定を行った。

表 4.5-19 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2 線源情報

内容物	空気層		
	線源 1	線源 2	合計
線源の中心位置(x,y,z)(cm)	25,25,5	25,25,15	
線源強度(Cs-137)	1MBq	1MBq	2MBq

(a) 結果

表 4.5-20～表 4.5-22 および図 4.5-13～図 4.5-15 に示す。

理論値に対する推定では、各手法で解析誤差が許容誤差 5×10^{-4} を満たした (GVSPM 法は最大反復回数 100 万回以内で収束したが、ART 法と ML-EM 法は最大反復回数 500 万回を必要とした)。測定値に対する推定では、各手法で解析誤差が許容誤差 5×10^{-4} を満たしておらず、終了状態は以下の通りである。ART 法と ML-EM 法は解の更新値が 1×10^{-15} を下回ったため、計算機でカウント不可能となって反復計算を終了した。GVSPM 法では、最大反復回数 100 万を終えても解が収束せず、500 万回に対して行っても収束しなかったため、収束の見込みがないと判断し 500 万回の結果を記載した。

(b) 考察

距離の近い位置に 2 つの線源があるため、空気層 X3Y3(Z1+Z4)のケースに比べて、それぞれの寄与によって得られる放射能分布を区別することが難しくなると予想される。

実際、測定値に対する濃度推定では、各手法で線源の位置をほとんど再現できておらず、総放射エネルギーも大幅に過小評価となった。

一方の理論値に対する濃度推定でも、X3Y3Z2 すなわち $z=15\text{cm}$ に置いた線源の再現性は悪く、距離の近い位置に 2 つの線源があるケースは、濃度推定が困難な条件であると考えられる。また、線源の配置は X 方向で対称的であるにも関わらず、 $z=15\text{cm}$ では各手法で中心セルの左側のセル(X2Y3Z2)において右側のセル(X4Y3Z2)に比べて推定値がやや高いという傾向があり、測定点が対称的でないことによる影響が出ていると推測される。

表 4.5-20 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2 ART 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	2.000E+06		
推定結果 (理論値)	1.965E+06	5.000E-04	4.883E-01
推定結果 (測定値)	5.788E+05	2.666E-01	9.987E-01

表 4.5-21 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2 GVSPM 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	2.000E+06		
推定結果 (理論値)	1.949E+06	5.000E-04	6.865E-01
推定結果 (測定値)	4.711E+05	1.204E-01	9.465E-01

表 4.5-22 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2 ML-EM 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	2.000E+06		
推定結果 (理論値)	1.951E+06	5.000E-04	6.409E-01
推定結果 (測定値)	4.594E+05	1.128E-01	9.292E-01

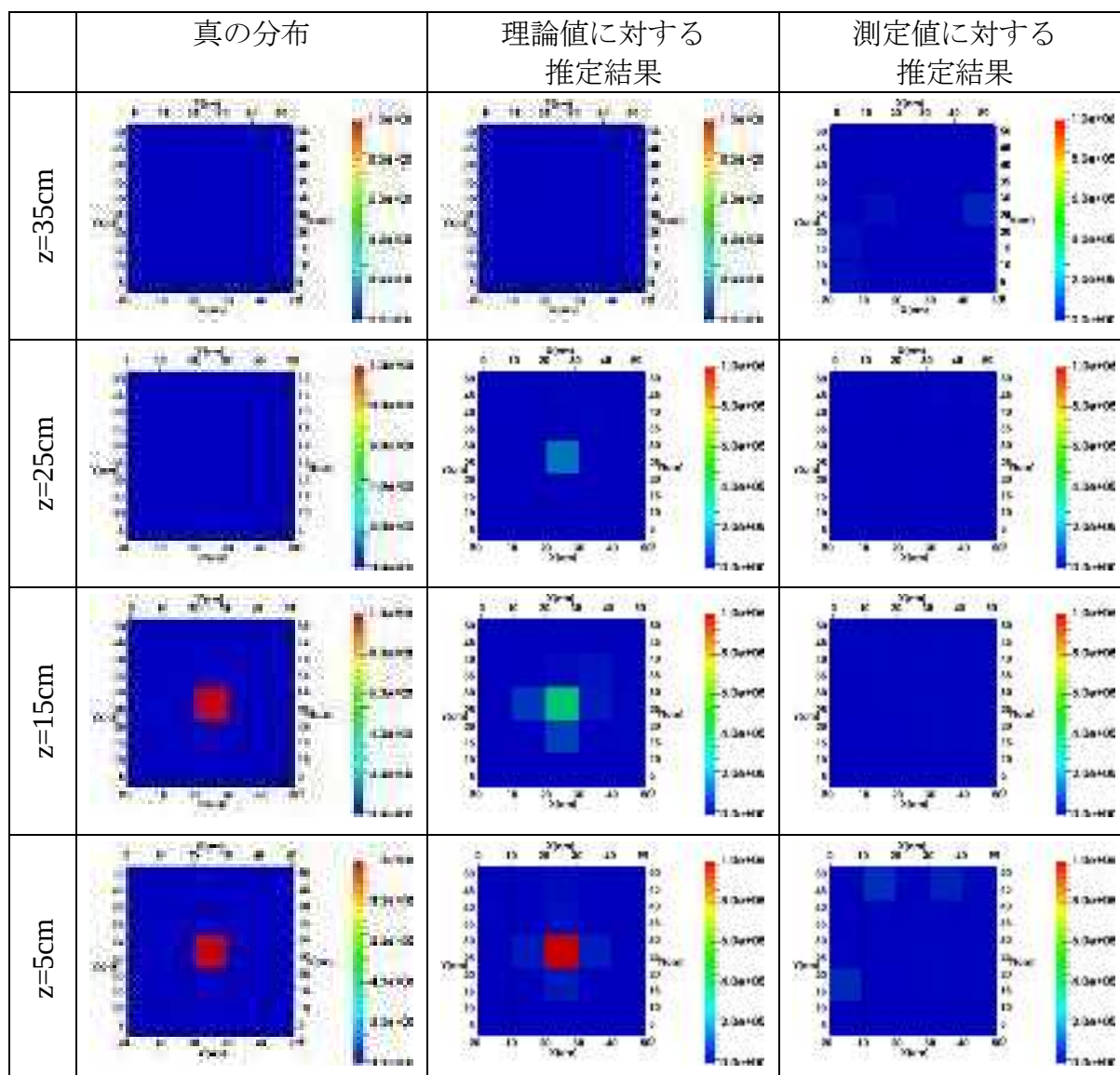


図 4.5-13 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2 ART 法

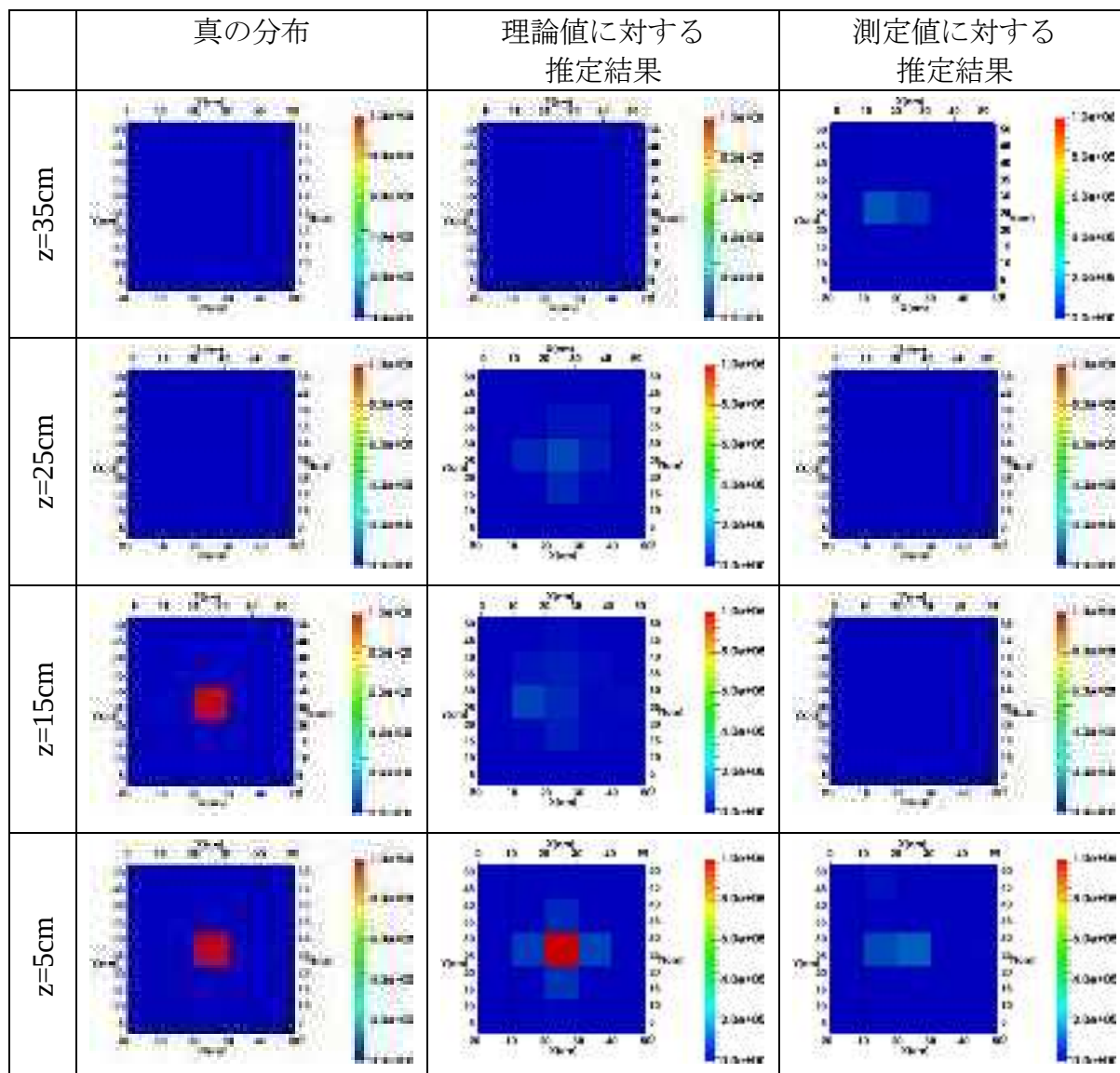


図 4.5-14 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2 GVSPM 法

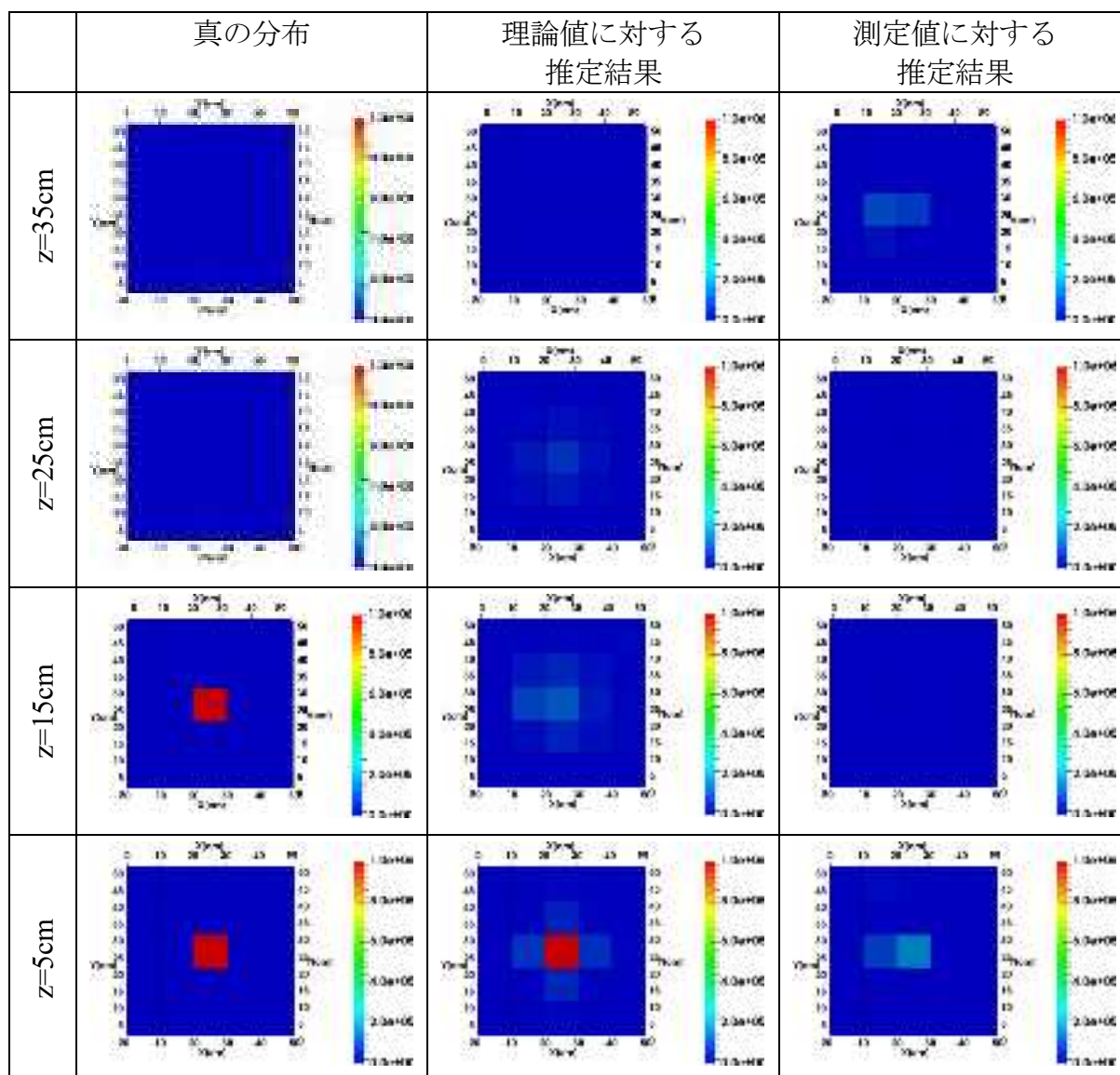


図 4.5-15 空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z2 ML-EM 法

(6) 砕石層 X1Y2Z4

表 4.5-23 の条件で線源を配置したケース（砕石層 X1Y2Z4）における、理論値と測定値に対し、放射能分布の推定を行った。

表 4.5-23 砕石層 X1Y2Z4 線源情報

内容物	砕石層
線源の中心位置(x, y, z)(cm)	5,15,35
線源強度(Cs-137)	1MBq

(a) 結果

表 4.5-24～表 4.5-26 および図 4.5-16～図 4.5-18 に示す。

理論値に対する分布推定では、各手法で解析誤差が許容誤差 5×10^{-4} を満たした。

測定値に対する分布推定では、全ての手法で解析誤差が許容誤差 5×10^{-4} を満たしておらず、終了状態は以下の通りである。ART 法と ML-EM 法は解の更新値が 1×10^{-15} を下回ったため、計算機でカウント不可能となって反復計算を終了した。GVSPM 法では、最大反復回数 100 万を終えても解が収束せず、500 万回に対して行っても収束しなかったため、収束の見込みがないと判断し 500 万回の結果を記載した。

(b) 考察

(1) の空気層 X1Y2Z4 と同様の位置だが、砕石層のため遮蔽の影響が考えられる。ただし、X の負の方向や Z の正の方向では、砕石層を通過する光路長が 5cm と非常に短いため、計数率は十分に得られているはずである。

ART 法による測定値に対する分布推定では、総放射エネルギーが真値 1MBq の 66%と大幅な過小評価であった。セルごとの数値を見ると、線源のあるセルに総放射エネルギーに相当する 0.66MBq の放射能が全て存在しており、他のセルは全て 0 であった。これは空気層の同条件で、全てのセルに $10^{-3} \sim 0.01$ MBq 程度の放射能が推定されたこととは、大きく異なる結果である。

一方、GVSPM 法による測定値に対する分布推定では、総放射エネルギーが真値 1MBq の 129%と大幅な過大評価となった。これは、線源位置 X1Y2Z4 の 0.70MBq に加えて、その直下の X1Y2Z3 のセルに 0.59MBq の放射能が表れたためである。ML-EM 法では総放射エネルギーが 104%で真値に比較的近いが、GVSPM 法と同様の現象が見られ、線源位置 X1Y2Z4 で 0.69MBq に対し、X1Y2Z3 で 0.28MBq であった。

表 4.5-24 碎石層 X1Y2Z4 ART 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	1.000E+06		
推定結果 (理論値)	9.998E+05	4.909E-04	1.082E-03
推定結果 (測定値)	6.557E+05	4.171E-01	3.443E-01

表 4.5-25 碎石層 X1Y2Z4 GVSPM 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	1.000E+06		
推定結果 (理論値)	1.001E+06	4.692E-04	3.237E-03
推定結果 (測定値)	1.289E+06	2.392E-01	9.671E-01

表 4.5-26 碎石層 X1Y2Z4 ML-EM 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	1.000E+06		
推定結果 (理論値)	1.001E+06	5.000E-04	2.543E-03
推定結果 (測定値)	1.040E+06	2.616E-01	4.275E-01

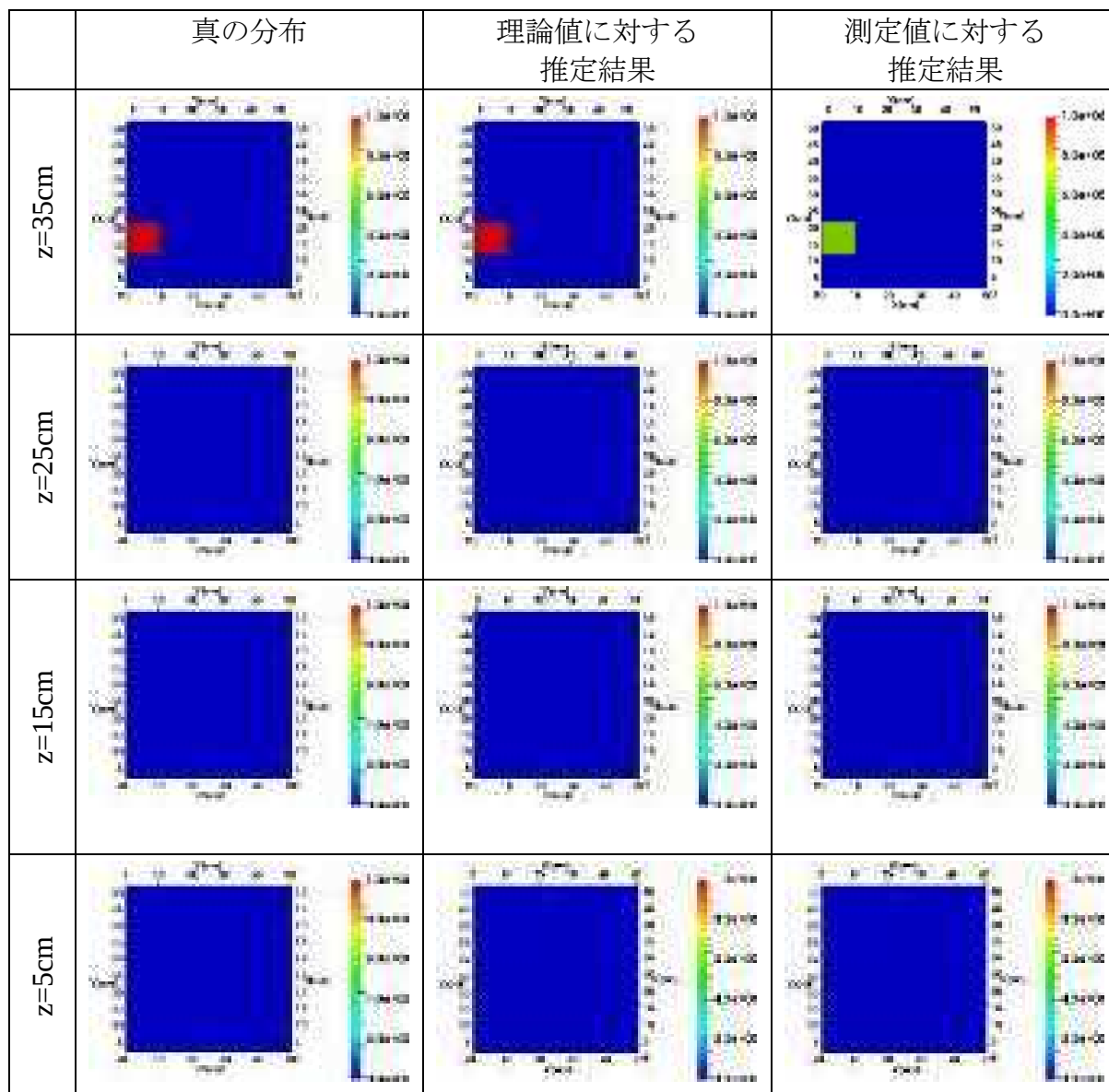


図 4.5-16 碎石層 X1Y2Z4 ART 法

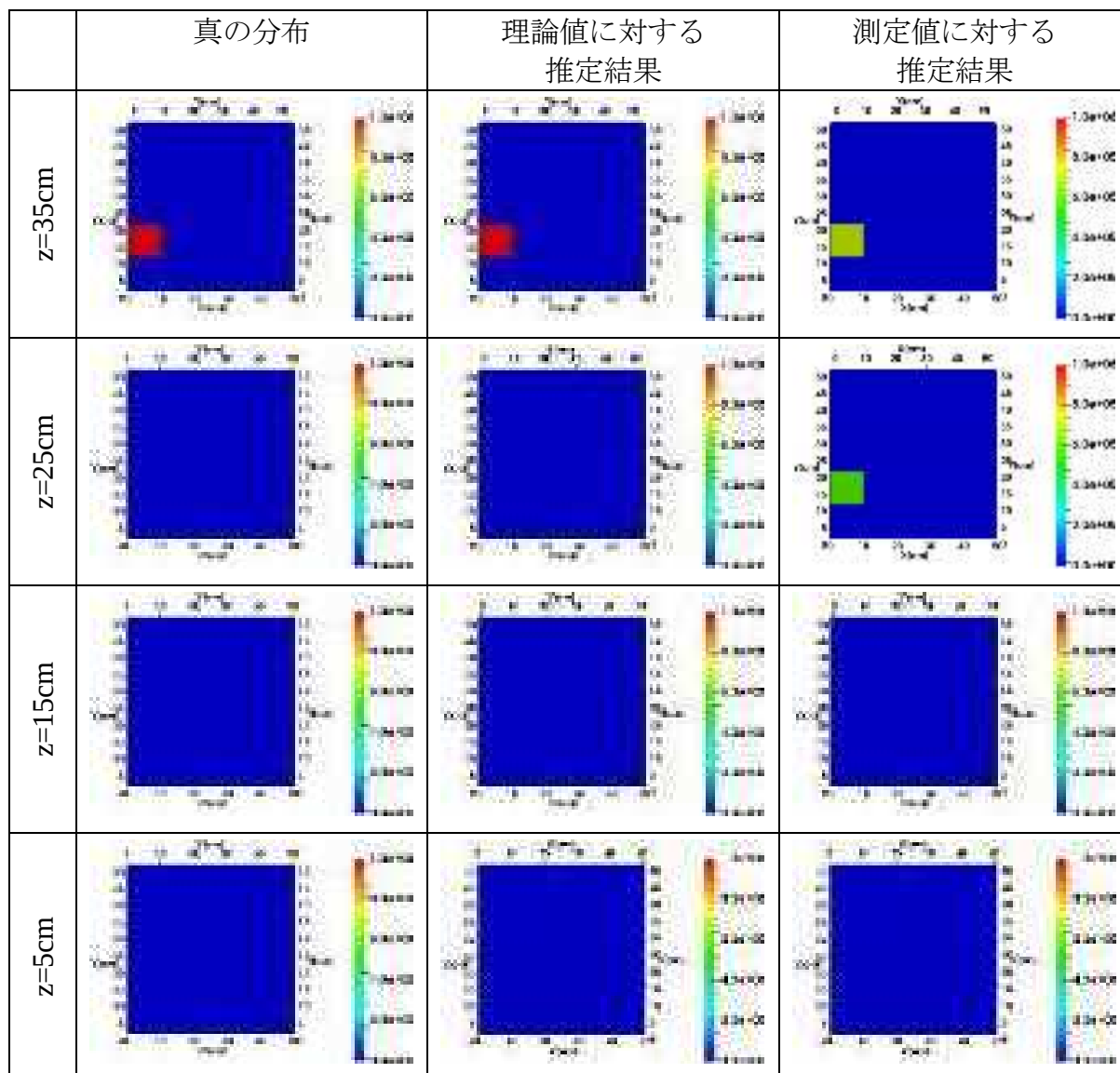


図 4.5-17 碎石層 X1Y2Z4 GVSPM 法

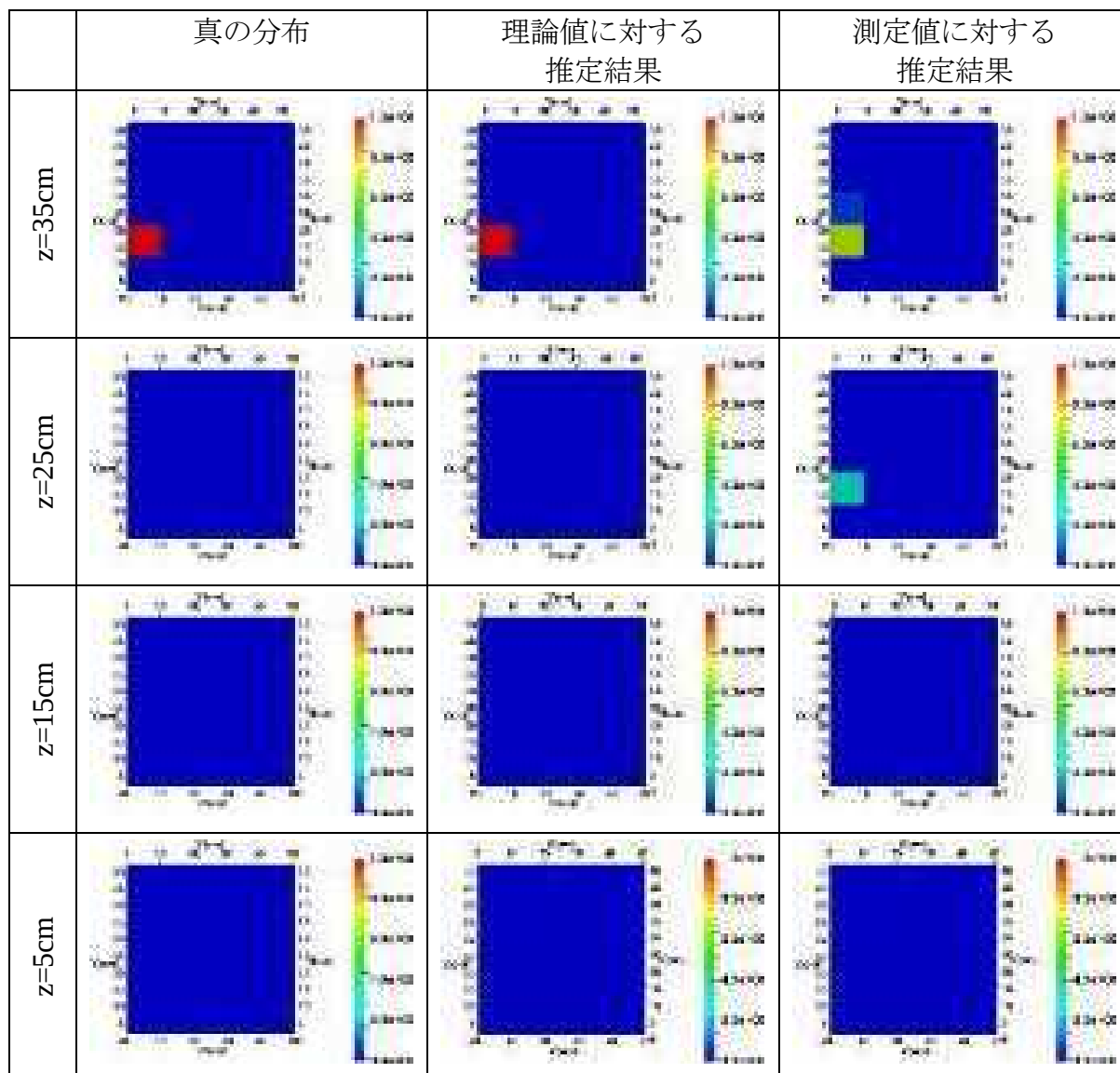


図 4.5-18 碎石層 X1Y2Z4 ML-EM 法

(7) 碎石層 X3Y3Z1&X3Y3Z4

表 4.5-15 の条件で線源を配置したケース（碎石層 X3Y3(Z1+Z4)）における、理論値と測定値に対し、放射能分布の推定を行った。

表 4.5-27 碎石層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 線源情報

内容物	碎石層		
	線源 1	線源 2	合計
線源の中心位置(x, y, z)(cm)	25,25,5	25,25,35	
線源強度(Cs-137)	1MBq	1MBq	2MBq

(a) 結果

表 4.5-28～表 4.5-30 および図 4.5-19～図 4.5-21 に示す。

理論値に対する推定では、各手法で解析誤差が許容誤差 5×10^{-4} を満たした。測定値に対する推定では、全ての手法で解析誤差が許容誤差 5×10^{-4} を満たしておらず、終了状態は以下の通りである。ART 法と ML-EM 法は解の更新値が 1×10^{-15} を下回ったため、計算機でカウント不可能となって反復計算を終了した。GVSPM 法では、最大反復回数 100 万を終えても解が収束せず、500 万回に対して行っても収束しなかったため、収束の見込みがないと判断し 500 万回の結果を記載した。

(b) 考察

(4) の空気層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 と同様の線源位置だが、碎石層のため遮蔽の影響が考えられる。

測定値に対する濃度推定では、ART 法において総放射エネルギーが真値の 87%と過小評価であった。一方、GVSPM 法においては総放射エネルギーが真値の 112%と過大評価であったが、ML-EM 法においては 98%と比較的真値に近い値が得られた。総放射エネルギーとしては、空気層の同じ線源位置のケースに比べて真値から遠ざかる結果となった。

一方、図 4.5-19 より線源位置を読み取ると、ART 法において空気層の場合（図 4.5-10）よりも明瞭に線源位置が表れている。これは、碎石層の遮蔽により大部分の測定点における計数率が空気層に比べて低くなっており、その結果として線源 1 直下および線源 2 直上の測定点（碎石層を通過する光路長が 5cm と、比較的短い）における計数率が相対的に高く得られたためと考えられる。ただし各手法とも、推定された線源位置が真の線源位置の左隣のセル（X2Y3Z1 と X2Y3Z4）にずれてしまっている。

表 4.5-28 碎石層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 ART 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	2.000E+06		
推定結果 (理論値)	2.001E+06	4.997E-04	4.666E-03
推定結果 (測定値)	1.746E+06	2.460E-01	9.299E-01

表 4.5-29 碎石層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 GVSPM 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	2.000E+06		
推定結果 (理論値)	2.000E+06	4.982E-04	1.380E-02
推定結果 (測定値)	2.234E+06	2.280E-01	9.067E-01

表 4.5-30 碎石層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 ML-EM 法

	総放射能(Bq)	解析誤差	推定誤差
真の分布	2.000E+06		
推定結果 (理論値)	2.000E+06	5.000E-04	1.188E-02
推定結果 (測定値)	1.951E+06	1.488E-01	7.325E-01

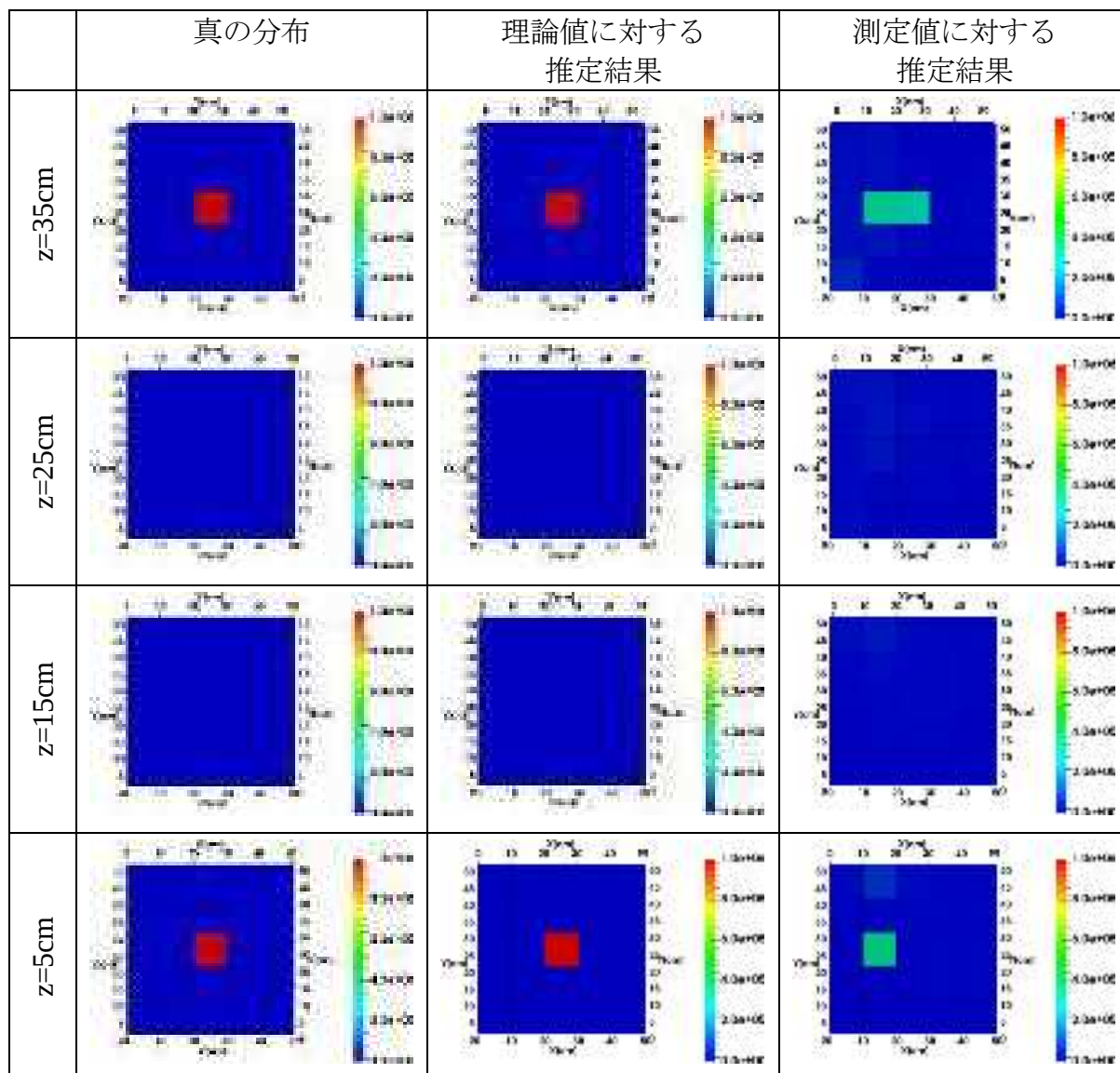


図 4.5-19 碎石層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 ART 法

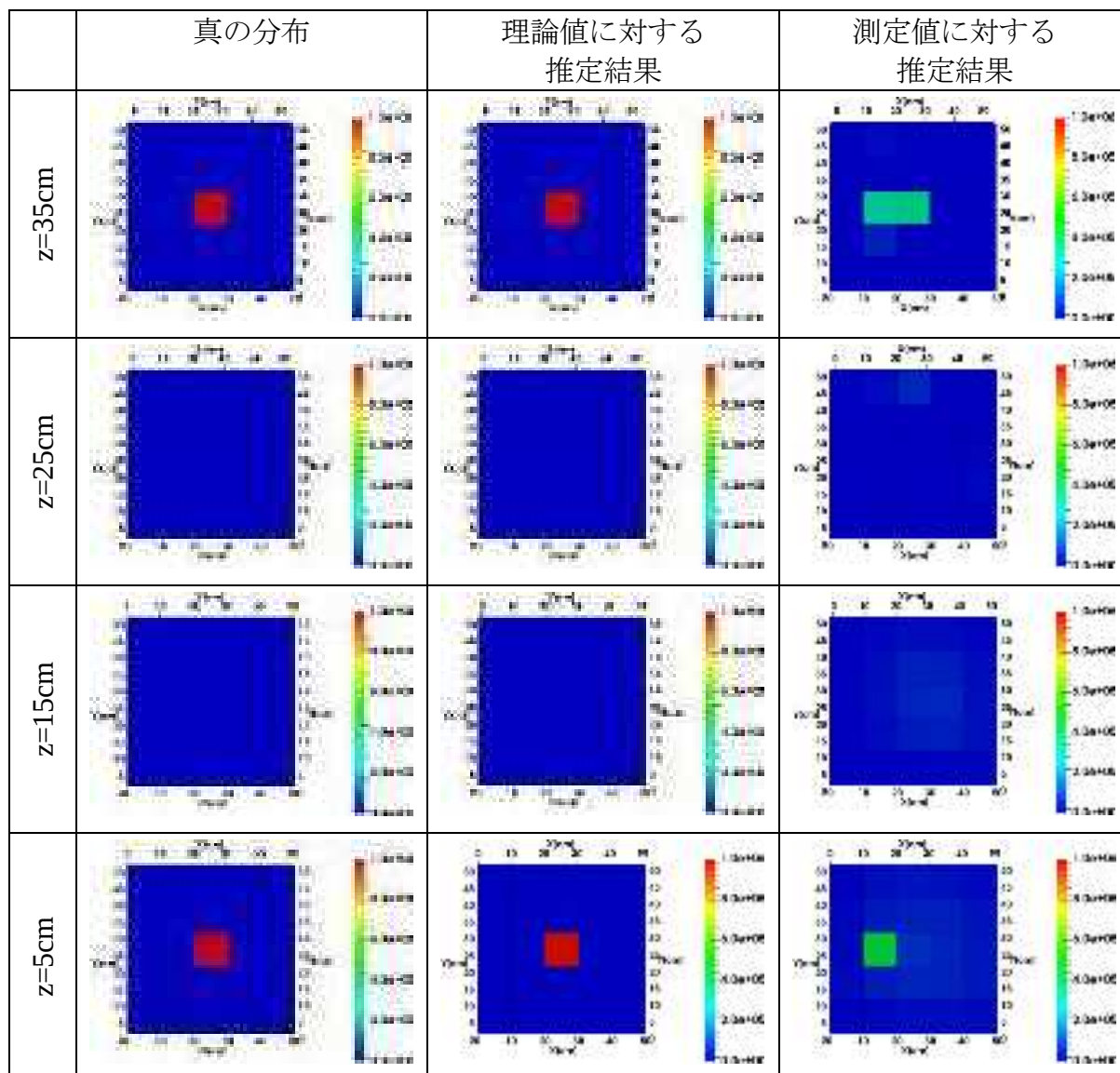


図 4.5-20 碎石層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 GVSPM 法

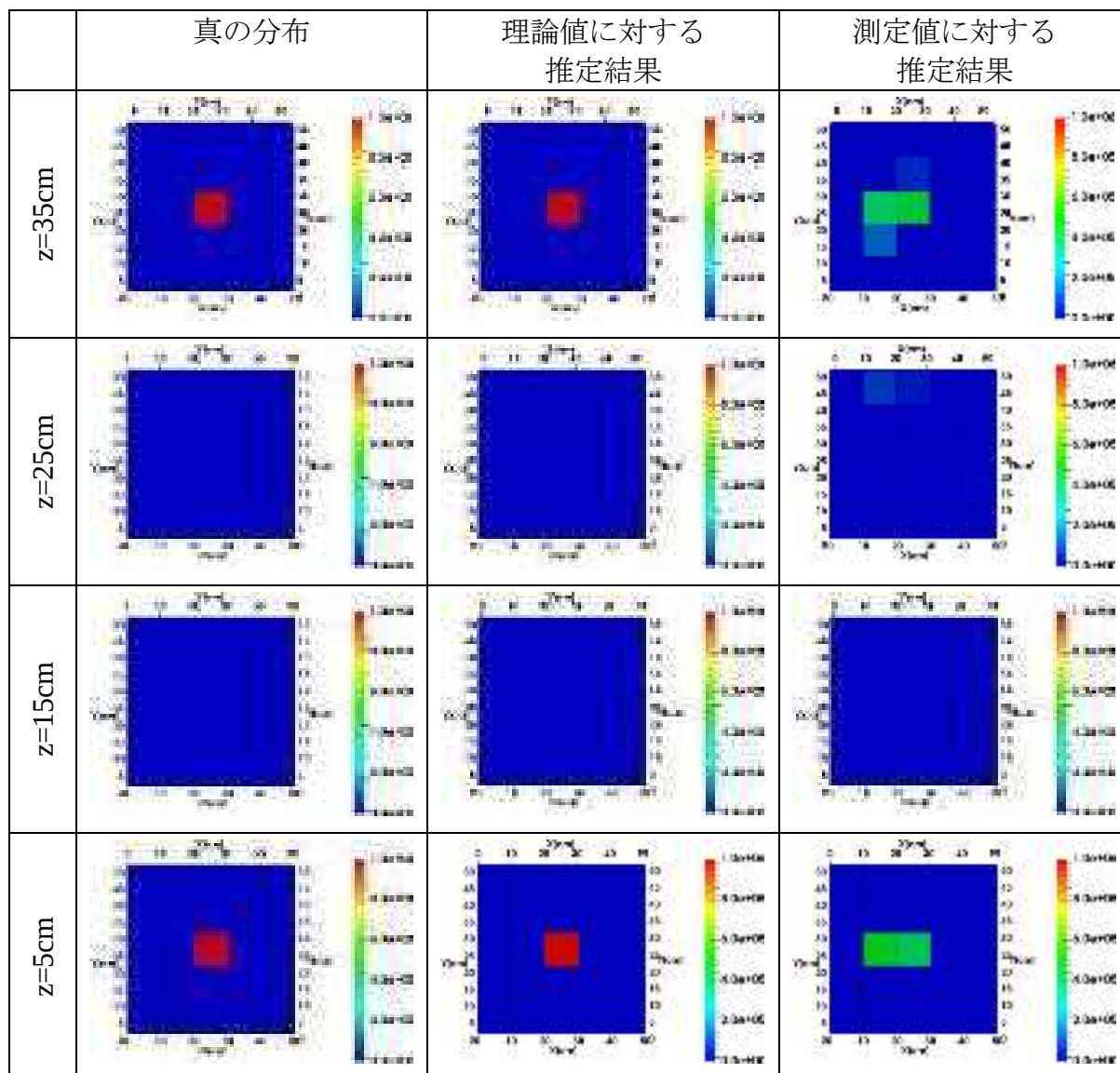


図 4.5-21 碎石層 X3Y3Z1&X3Y3Z4 ML-EM 法

4.5.3 放射能分布評価結果についてのまとめ

(1) 線源位置や推定手法に対する整理

4.5.2 の各ケースに対し放射能分布評価を行った結果について、下記の観点で整理する。

- 線源位置
- 推定手法（ART 法、GVSPM 法、ML-EM 法）

線源位置については、容器の角付近にあるケース（空気層 X1Y2Z4 など）では、線源の位置が鮮明に再現できていると考えられる。一方で線源が容器の中心付近にあるケース（空気層 X3Y3Z2 など）では、線源の像がぼやけたり、上下左右にずれて表れたりした。これは、線源が中心付近にある場合は平均濃度を過小評価するとした、4.3.5（1）での議論と合致する。しかし、位置が再現できたかどうかは画像からのみ判断しており、この傾向からだけでは放射能分布評価の定量性を評価することはできない。

また推定手法については、全ケースで共通するような傾向は得られなかったため、この結果の分析だけで手法間の適用可能性の優劣を示すことはできない。例えば ART 法は、空気層 X4Y4Z1 では総放射エネルギーが真値の 150%と過大評価であった一方、碎石層 X1Y2Z4 では 66%と過小評価であった。GVSPM 法は、碎石層 X1Y2Z4 で総放射エネルギーが真値の 129%と過大評価であった他、ART 法・ML-EM 法に比べて比較的総放射エネルギーを高く推定したケースが多いが、空気層 X3Y3Z2 では 85%と過小評価であった。ML-EM 法では、ART 法・GVSPM 法に比べて総放射エネルギーを大きく過大評価・過小評価したケースはないが、全てのケースで真値に最も近づいたわけではないため、最も信頼性が高いと明言することはできない。

ただ、ART 法では以下の傾向が見られた。空気層の濃度推定結果では、全てのケースにおいて、線源位置のセル以外の全セルにも $10^{-3}\sim 0.01\text{MBq}$ 程度の放射能があるという推定結果になった。一方碎石層では、碎石層 X1Y2Z4 で、線源位置のセル以外は全て 0 になった。この要因については明白でないが、碎石層 X1Y2Z4 の条件ではほとんどの測定点において遮蔽により計数率が低下するのに対し、線源に近い測定点では遮蔽の影響が小さく距離も近いので、計数率に大きなピークが発生する（図 4.4-52）。ART 法のアルゴリズム（式 4.3-6）では、このようなピークのある計数率に対して、局所的な分布推定が行われる特徴があるのではないかと考えられる。

(2) 総放射エネルギーの評価

測定値に対する濃度推定では、どのケース・推定手法においても解析誤差は 10%を下回るものがなかった。理論値に対しては 0.05%の許容誤差に対して収束していることから、測定値が理論値に対してそれだけの誤差を持っていることになる。言い換えればグリーン関数を測定値に限りなく近づけることが出来れば理論値と同様の結果が期待できる。

各ケース・各推定手法に対して、総放射エネルギーが過小評価となる推定結果よりも過小評価となる推定結果の方が多かった。これは、真の分布が密集分布の場合、一般的に推定解はそれよりも広がった分布となるため、総放射エネルギーが過小評価となることは想定できる結果である。一方、過小評価とならなかった推定結果のほとんどは線源の位置を再現できていない。（特に ART 法の空気層の場合、線源位置のセル以外の全セルにも $10^{-3}\sim 0.01\text{MBq}$ の放射能が表れているため、それを差し引いた場合より過小評価となる。）このことから、解析誤差が大きな測定値に対しては、総放射エネルギーが一致していても分布を再現したことにはならず、位置の再現性を評価するためには他の評価方法を検討する必要がある。

(3) 今後の課題

測定値（実際に PSF を用いて取得した測定データ）に対する濃度分布推定は大きな解析誤差を含み、特に容器内部に線源が存在する場合には総放射エネルギーが真値に一致せず線源位置も再現できなかった。一方で理論値に対する濃度分布推定では、測定値に比べて理想的な解が得られるケースが多かったことから、測定における誤差要因を検討し対処することで、濃度分布推定精度を大幅に改善できる見込みがある。

一方で、測定誤差を完全に取り除くことは不可能であることから、誤差を含めて濃度分布の推定結果を評価する手法を整備することは不可欠である。今回、ART 法・GVSPM 法・ML-EM 法の 3 種類の逆解析手法を適用したが、どの手法においても現状では誤差を評価することは考慮されておらず、誤差を評価できるよう上記の推定手法を改良するか、あるいは新規の推定手法を開発する必要がある。今回整備した放射能濃度分布評価コードシステムでは、濃度分布がどのようなものであっても最大限の精度で濃度推定を行えるような汎用的な性能を目標として検討しているといえるが、限定再利用という特定の事業に対して適用する評価方法であることを考慮し、それに特化したシステムを整備することも考えられる。その例としては、測定において除去できない誤差をあらかじめ考慮して評価を行うようなシステムの整備も考えられるが、多くの誤差要因に対する方策が明確にならなければ、どのような誤差要因を考慮してシステムを構築すべきか判断できないため、前述のとおり測定における誤差要因の検討を重点的に行う必要がある。

4.6 コンプトン散乱式ガンマカメラの試適用

平成 27 年度の検討において、多点数測定装置の一つとしてとりあげたコンプトン散乱式ガンマカメラを本測定体系へ試適用した。これにより、具体的にどのような測定結果が得られるかを吟味し、今後の適用可能性について検討した。なお、本試適用は空気層を主要な対象としつつ、碎石層についても単純な体系について測定を行い、実際の体系に適用する際の課題などを抽出した。

4.6.1 コンプトン散乱型ガンマカメラの概要

はじめにガンマカメラとは、放射性物質が放射する γ 線の計数結果と、カメラで撮影した映像を重ね合わせ、放射線量の高低を色分けして表示することにより、目視で線量を確認できるようにした画像化装置である。ガンマカメラにはいくつかのタイプが存在するが、一般的にピンホール型とコンプトン散乱型の 2 つに分類される。平成 27 年度の検討結果から、コンプトン散乱型ガンマカメラであるガンマキャッチャー⁽¹⁾を本測定体系に適用して、いくつかの測定を実施した。

コンプトン散乱型は、図 4.6-1 に示すように散乱層と吸収層の 2 つの検出器を平行に配置し、散乱層に入射してコンプトン散乱を生じた散乱 γ 線を吸収層でも検出して、その入射方向を決定するものである。まず、散乱層と吸収層で検知した各位置を結ぶ中心軸を決定し、散乱層でのエネルギーと吸収層でのエネルギーからコンプトン散乱による散乱角 θ を求め、中心軸に対する立体散乱角で構成される円環（コンプトンコーン）を特定する。以上のように、コンプトン散乱型では 1 回の検出では入射方向は 1 点に限定できないが、これを多数検出するとコンプトンコーンがいくつも形成され、それが重なる点が入射方向であることが特定できるものである。散乱層と吸収層を結ぶ範囲が検出可能な視野であるため、視野角が 140° まで得られること、ピンホールを配置する必要がないため検出部の重量を軽量化できること、視野角の範囲外からの放射線は検出から排除されるため、バックグラウンド放射線の影響を受けにくいといった利点がある。

表にガンマキャッチャーの仕様を示す。本製品には小型で光電子増倍管と同等の高感度性を持つ半導体光検出素子 MPPC（マルチ・ピクセル・フォトン・カウンタ）と良好な特性を持つシンチレータ（放射線エネルギーを吸収して蛍光を発する物質）として、Ce:GAGG（Ce/ガドリニウム アルミニウム ガリウム ガーネット（Ce:Gd₃Al₂Ga₃O₁₂））が採用されている。本 Ce:GAGG は散乱体、吸収体ともに 30 個×30 個（15 個×15 個×4 セグメント）で構成されている。また、1 個のシンチレータの大きさは散乱体：1.5×1.5×5mm、吸収体：1.5×1.5×10mm であり、散乱体 - 吸収体の距離は 23.5mm となっている。

MPPC は高感度かつ低ノイズであることから、画像化に有効な 100 keV 程度から 10 keV までの低エネルギーのコンプトン散乱現象を確実に検出できるとされている。また、約 10% のエネルギー分解能を有し、Cs-137 由来の 662keV γ 線と、Cs-134 由来の 605keV、796keV γ 線の識別が可能となっている。さらに、計測に必要な信号処理回路などをすべて内蔵し、パソコンに USB 接続するだけで電源供給され、 γ 線の分布については、コンプトンコーンを単純逆投影法により画像化できるようになっている。（昨年度の報告書においては ML-EM 法による画像再構成も行われると記述したが、本機能は開発段階に限定されており、現在販売されているガンマキャッチャーには搭載されていない。ここに訂正する。）

視野角が 140° あるため、その範囲を有効に活用し、かつ距離による放射線の減衰を抑制す

るためには、図 4.6-1 に示すように、容器表面の中央部から 9.1cm の位置に検出器を固定することによって、容器全体を測定することが可能となる。それ以内であれば容器内の一部しか測定対象とならず、以上であれば、視野角及びその角度分解能を有効に活用できないこととなる。また容器検出器側端部の検出器側対象範囲は 11.5cm と広がるが、対象物のごく一部だけしか測定対象範囲にかからないということになる。

また、ガンマカメラによる測定は、PSF と異なり、容器表面の線量率分布を取得するものではなく、ガンマカメラの検出部における角度分解能内からの γ 線フラックスを取得し、分布を表しているため、表面線量率との関連は低下している。したがって、逆解析手法によって内部の放射能分布を推定する場合には、ガンマカメラ検出位置における各メッシュの単位線源からの応答（グリーン関数）を再構築する必要がある。

このほか、視野角外のバックグラウンド放射線については排除可能であることは上述したが、検出器に対し対象容器の奥側（遠い側）からの放射線については排除できないため、その領域からのバックグラウンド放射線については、奥側を遮へいする、区画を設けるなどの対策を行うことが望ましい。

なお、通常販売されているガンマキャッチャーは数値データの出力ができず、撮像図、エネルギースペクトルなどほとんどの情報が画像データとして出力される装置となっている。本測定もそのようなデータとして出力されたものを読み取り、数値化している。今後、購入する際には数値データの出力が可能となるような改造が対応可能とのことである。

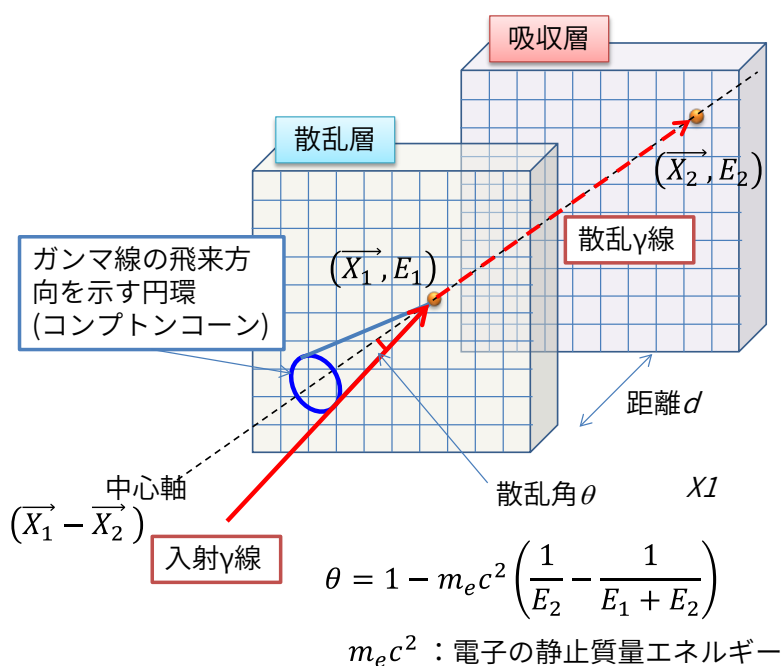


図 4.6-1 コンプトン散乱型ガンマカメラの測定原理

表 4.6-1 測定に用いたガンマキャッチャーの仕様

項目	
検出素子	MPPC
シンチレータ	Ce: GAGG
対象線種	γ 線
エネルギー分解能	10% Cs-137(FWHM) 662keV
視野角	140°
角度分解能	14° Cs-137(FWHM) 662keV
電源	USB バスパワー3.5h (PC バッテリ)
動作温度範囲	0~40℃
外形寸法	15×15×13.5 cm
装置重量	1.9kg (カメラ本体のみ)

4.6.2 測定条件

模擬資源化物を収納する容器は同様に 50cm×50cm×40cm であり、ガンマキャッチャーの視野角は 140° である。50cm の中央に配置する場合、視野角の範囲を有効に活用するためには、図 4.6-2 に示すように、容器側面と検出器前面との距離は 9cm 程度となる。

以上の検討から、図 4.6-3 に示すような検出器と容器の配置とした。この位置に固定した場合、中央に近い容器表面の 14° の対象範囲は 2.4cm で、反対側の表面の対象範囲は 14.8cm 程度となる。

測定ケースは以下の 3 つとした。

- (a) 空気層における単一点線源の測定
 - (b) 空気層における点線源 2 つを対象とした測定
 - (c) 空気層と砕石層の比較を行うための測定
- (a)及び(b)ではそれぞれ 4 つの線源配置について測定し、その撮像状況を確認した。また、(c)では空気層あるいは砕石の厚さに応じた撮像、 γ 線の計数、取得される γ 線エネルギースペクトルなどを比較した。

また、測定時間は 5 分間とした。

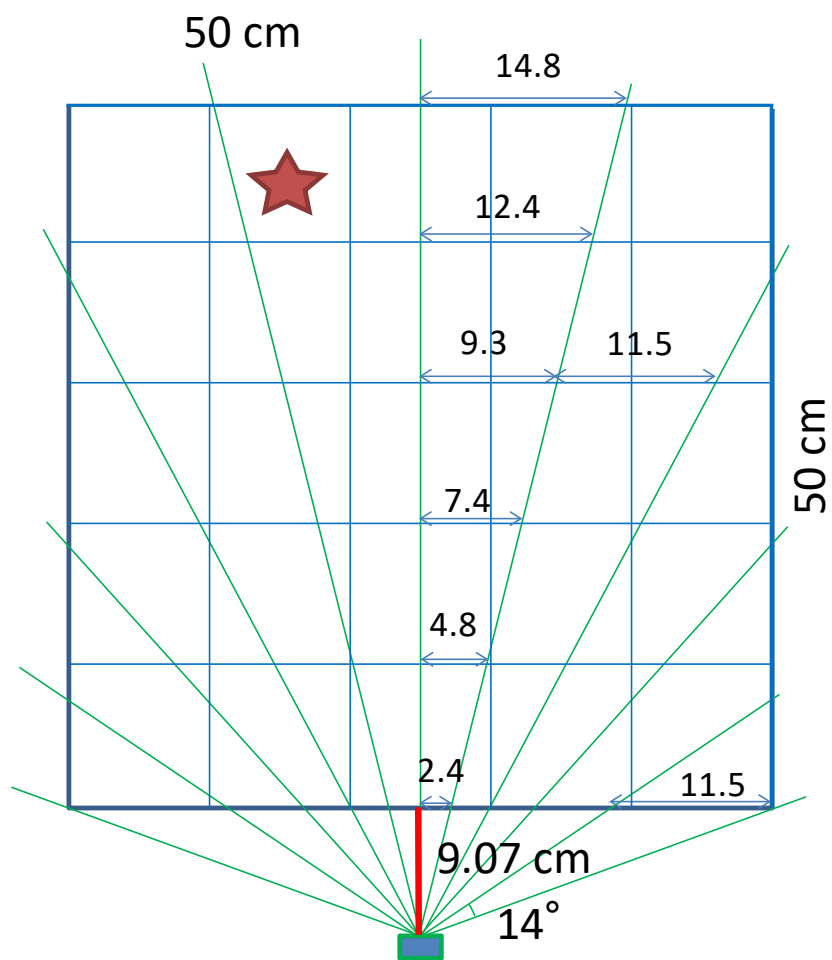


図 4.6-2 模擬資源化物容器（50cm×50cm×40cm）を対象とした検出器の配置
（上方から見た平面方向の角度分解能 14° ）

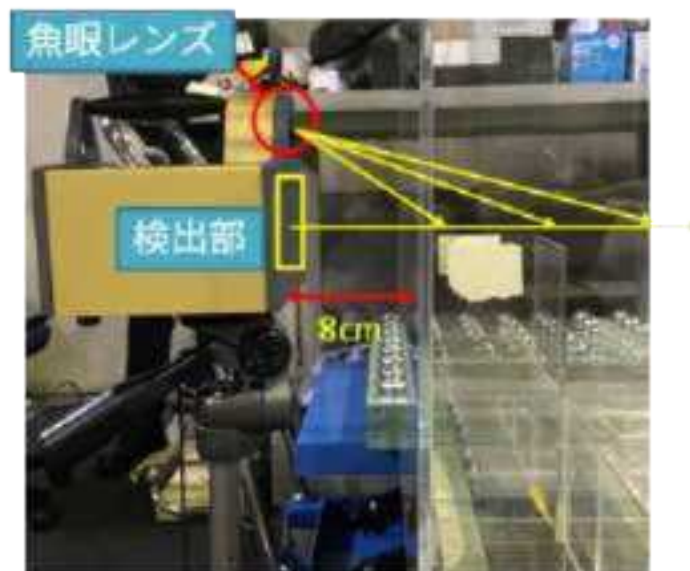
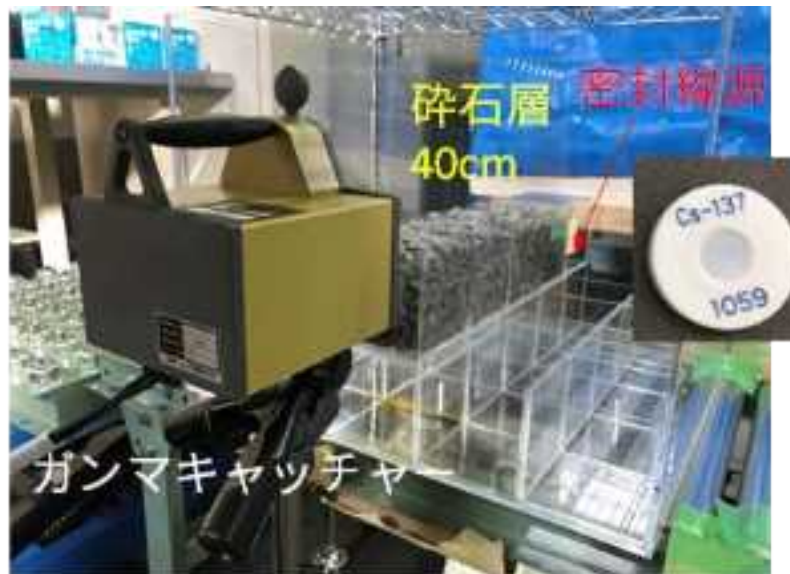


図 4.6-3 模擬資源化物容器とガンマキャッチャーの配置
 (上：ガンマキャッチャー後方から容器方向)
 (下：ガンマキャッチャー及び容器側面)

4.6.3 測定結果

(a) 空気層における単一点線源の撮像

図 4.6-4 に点線源を 1 つ配置した場合の撮像を示す。①は容器の検出側の角部の上端（高さ 40cm）と下端（高さ 0cm）に線源を配置した場合で、撮像では検出範囲を示す白枠の線上に高い値を示す赤いコンターが表示された。

(b) 空気層における点線源 2 つの撮像

図 4.6-5 に点線源を 2 つ配置した場合の撮像を示す。①は容器の検出側の角部の上端（高さ 40cm）と下端（高さ 0cm）に線源を配置した場合で、撮像では検出範囲を示す白枠の線上に高い値を示す赤いコンターが表示された。検出範囲ぎりぎりの条件でも線源位置を十分に特定可能であった。次に②は検出器から見た奥行方向 3 列目（中央列）の左右両端に配置した場合で、ほぼ同じ高さを示す赤いコンターが明確に分離できているのが確認された。③は②と同様に奥行方向 3 列目向かって右側の端部とその隣接位置に 10cm の間隔で点線源配置した場合で、単一の撮像としてみると二つの線源に弁別できず、一つの線源としてとらえられるが、あらかじめ②のような撮像の情報をデータベースとして持っておけば、様々な撮像と比較して、単一の線源から得られる撮像と異なることを判断できる可能性がある。最後に、④は検出器側の前面側角部とその左側の隣接位置に 10cm 間隔で線源を配置した場合で、2 つの点線源が明確に分離されてコンター図に表示された。以上の結果から、空気層の条件では、検出器から 20cm 程度の近い側の位置分解能は高い一方、検出器からの距離が 30cm（+9cm）の条件では、コンター表示の目視による線源の弁別は容易ではないことがわかった。

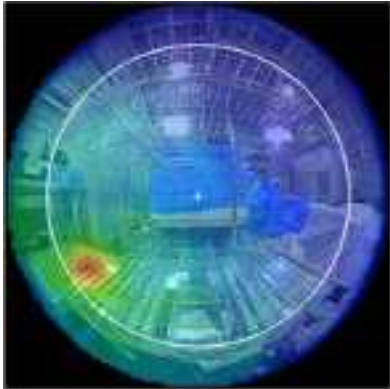
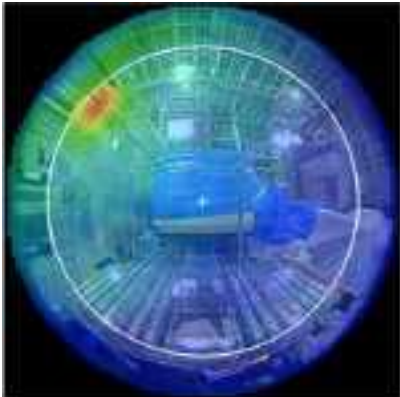
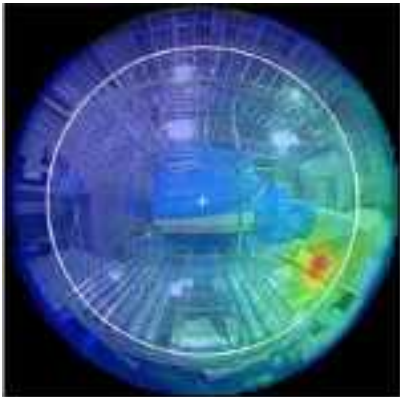
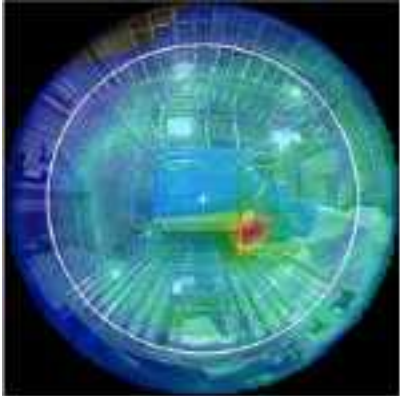
	ガンマカメラの撮像
①	
②	
③	
④	

図 4.6-4 単一線源を配置した場合のガンマキャッチャーの撮像

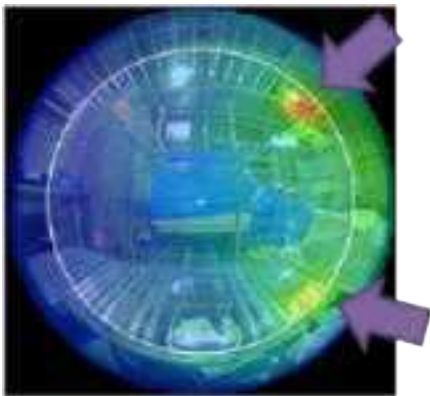
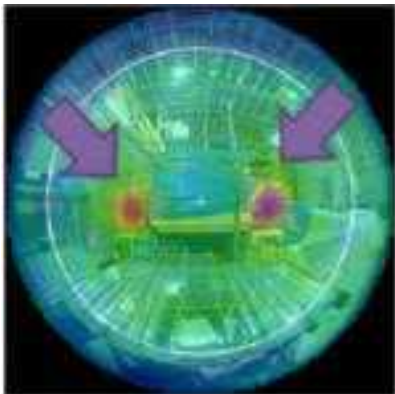
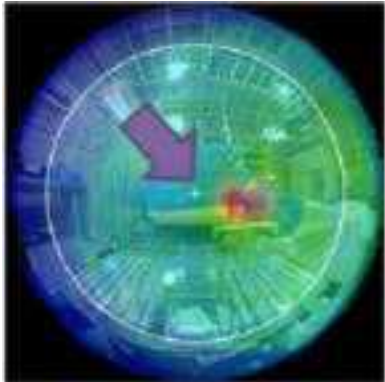
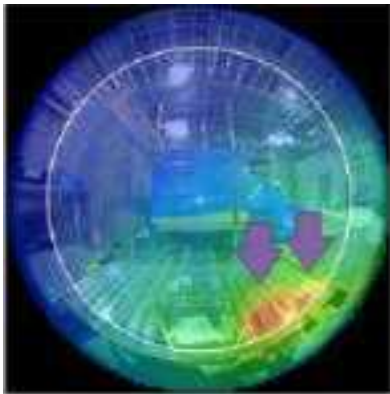
	線源の配置	ガンマカメラの撮像
①		
②		
③		
④		

図 4.6-5 2つの線源を配置した場合のガンマキャッチャーの撮像

(c) 空気層と碎石層の比較

図 4.6-6 に空気層及び碎石層厚さに応じたガンマカメラ撮像を示す。コンターはオートレンジによる表示のため、どの撮像にも最大表示の赤色で示されているが、コンプトンコーンの重ね合わせと単純逆投影法による画像再構成においては、ガンマキャッチャー固有の定量化された値が存在する。実際に適用する際には、その絶対値を比較することで、角度別のフラックスの大小を評価することが可能である。独自の定量化された値と線量率などの数値で校正することによって、一般的な測定値と比較可能な数値データとなる。

空気層で見ると、0cm の場合中心より下の位置にコンターの中心があるが、距離が長くなるにしたがって赤色のコンターが中心方向に近づいた。碎石層においても 20cm までは同様の傾向がみられる。これは図 4.6-7 に示すように、ガンマキャッチャーの検出部が高さ方向の中央に配置されたとき、今回の線源位置がその 5cm 下を平行して 10cm ずつ離して測定を行った。したがって、線源の角度方向の位置分解能は十分に高いことが確認された。

碎石層については、碎石厚さが 30cm を超えると Cs-137 1MBq の比較的強い放射線源でも撮像にコンプトンコーンが残るのが確認できる。碎石厚さ 20cm においても、画像外周部にコンプトンコーンがわずかに観測できる。

図 4.6-8 に空気層及び碎石層厚さに応じた γ 線総カウント数を、図 4.6-9 に空気層及び碎石層厚さに応じた 662keV γ 線のカウント数を、示す。総カウント数は空気層では距離応じて減少し、40cm 厚さでほぼ 1/10 となり、碎石層においても、40cm 厚さで 1/20 以下となるのに対し、662keV のカウント数は空気層において 40cm 厚さで 1/10 程度とほとんど総カウント数と変わらないのに対して、碎石層においては 1/100 と大きく減少した。これは碎石によって 662keV の γ 線が 40cm 厚さの碎石を通るうちにそのほとんどが非弾性散乱によってエネルギーを失ったためであり、40cm 厚さでは 5 分間の測定でわずか 10 カウントとなった。全カウントのうち撮像に利用されたコンプトン散乱 γ 線の選別率を図 4.6-10 に示す。空気層についてはほぼ変動がないのに対し、碎石層については厚さが増加するにしたがって大きく減少することが確認された。

図 4.6-11 から図 4.6-13 に γ 線エネルギースペクトルを示す。図 4.6-11 は散乱層と吸収層の合計を示す全体エネルギーを、図 4.6-12 は散乱層におけるエネルギーを、図 4.6-13 は吸収層におけるエネルギーを示している。全体エネルギーで見ると空気層では 40cm 厚さでも 662keV にピークが観測できるが、碎石層では 30cm でわずかに確認できるか程度となった。したがって、Cs-137 1MBq の線源に対して、散乱されないで直接検出器に到達する γ 線を検出するには碎石層厚さは 30cm 以下であることが求められる。

図 4.6-14 に空気層及び碎石層厚さに応じたエネルギー分布を示す。各光子に対して、散乱層での γ 線エネルギーと吸収層での γ 線エネルギーを対応付けたもので、その合計値が 662keV となる光子が Cs-137 からの直接 γ 線となる。

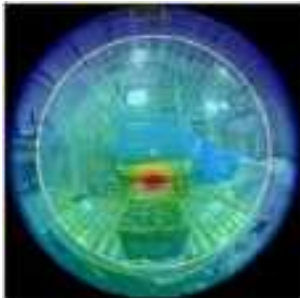
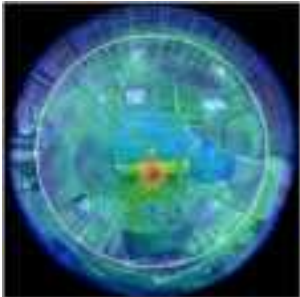
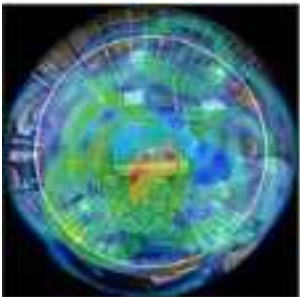
容器内厚さ	空気層	碎石層
0cm (+8cm 空気層)		
10cm (+8cm 空気層)		
20cm (+8cm 空気層)		
30cm (+8cm 空気層)		
40cm (+8cm 空気層)		

図 4.6-6 空気層及び碎石層厚さに応じたガンマカメラ撮像

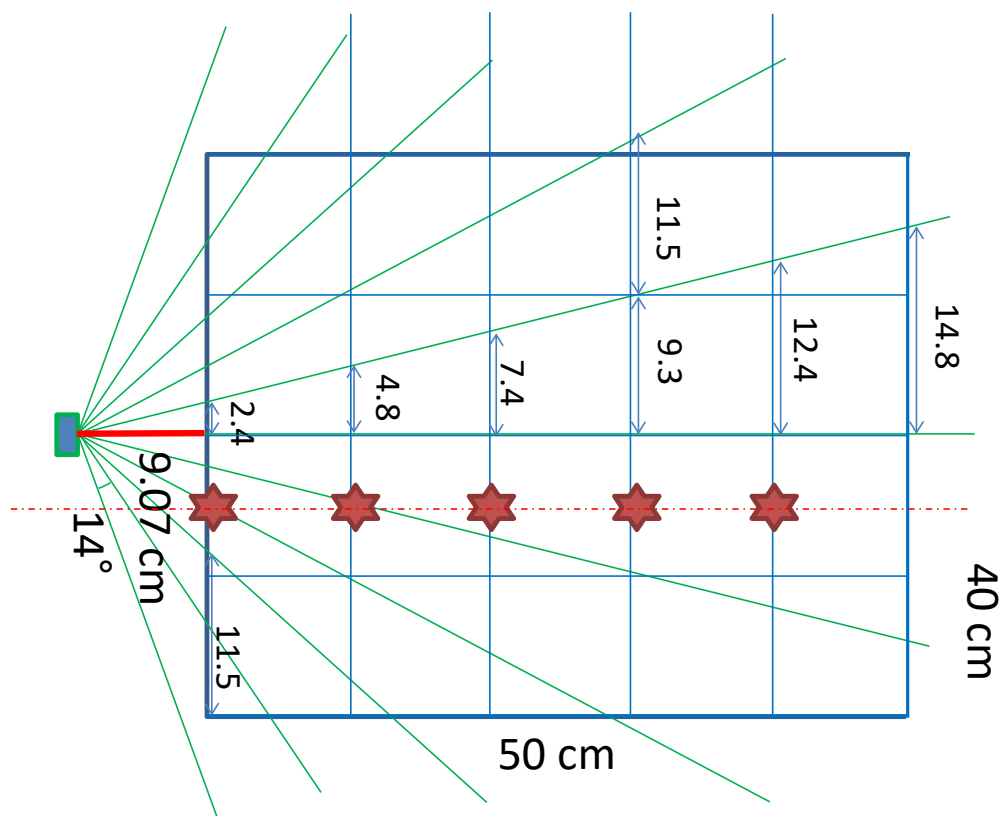


図 4.6-7 模擬資源化物容器（50cm×50cm×40cm）を対象とした検出器の配置
（側面から見た平面（y-z 面）方向の角度分解能と点線源位置の関係）

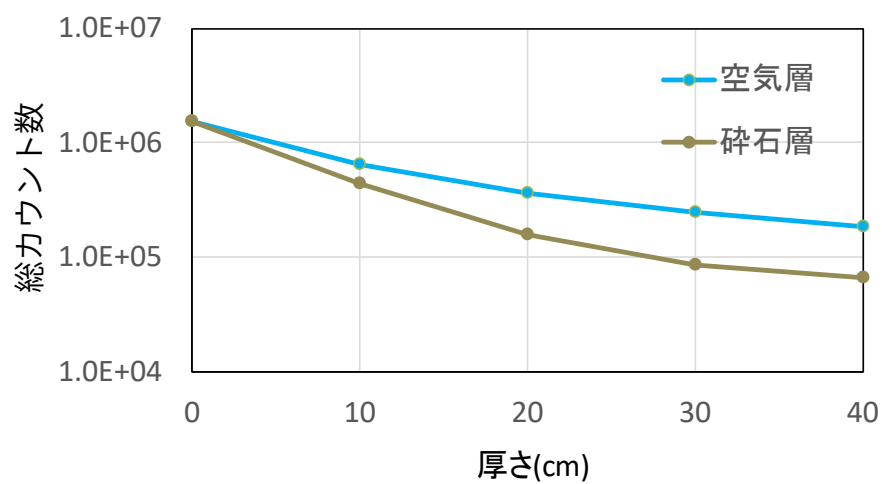


図 4.6-8 空気層及び砕石層厚さに応じた γ 線総カウント数

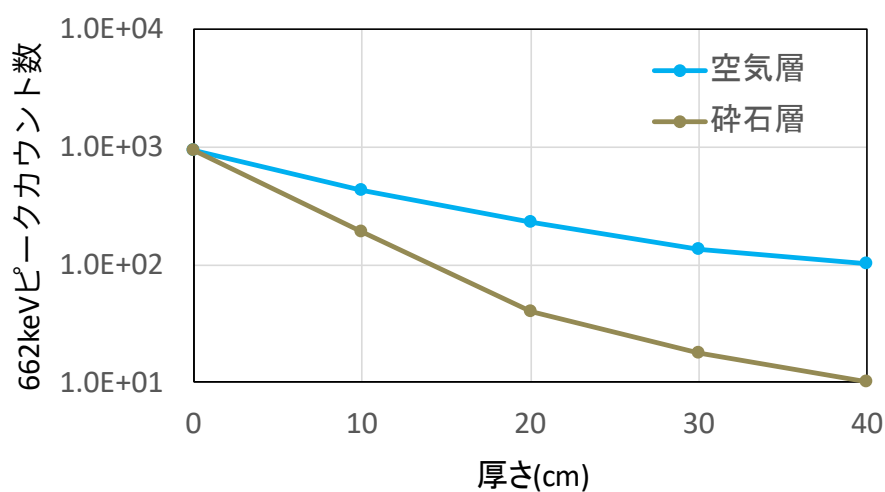


図 4.6-9 空気層及び砕石層厚さに応じた 662keV γ 線のカウント数

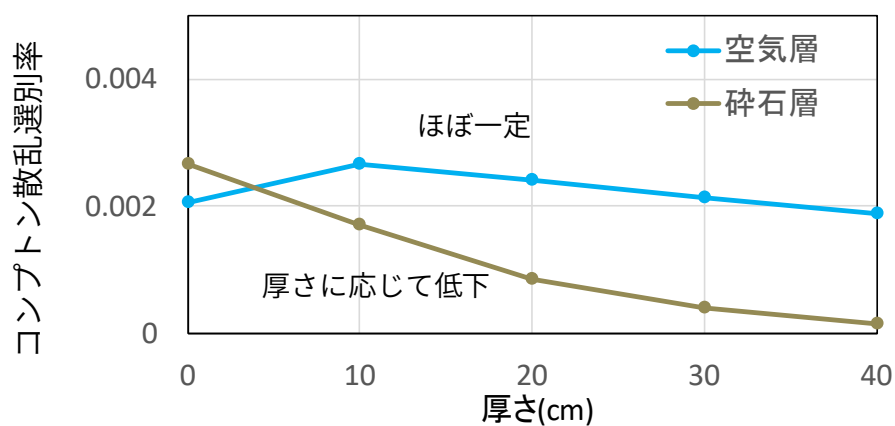


図 4.6-10 空気層及び砕石層厚さに応じた γ 線選別率

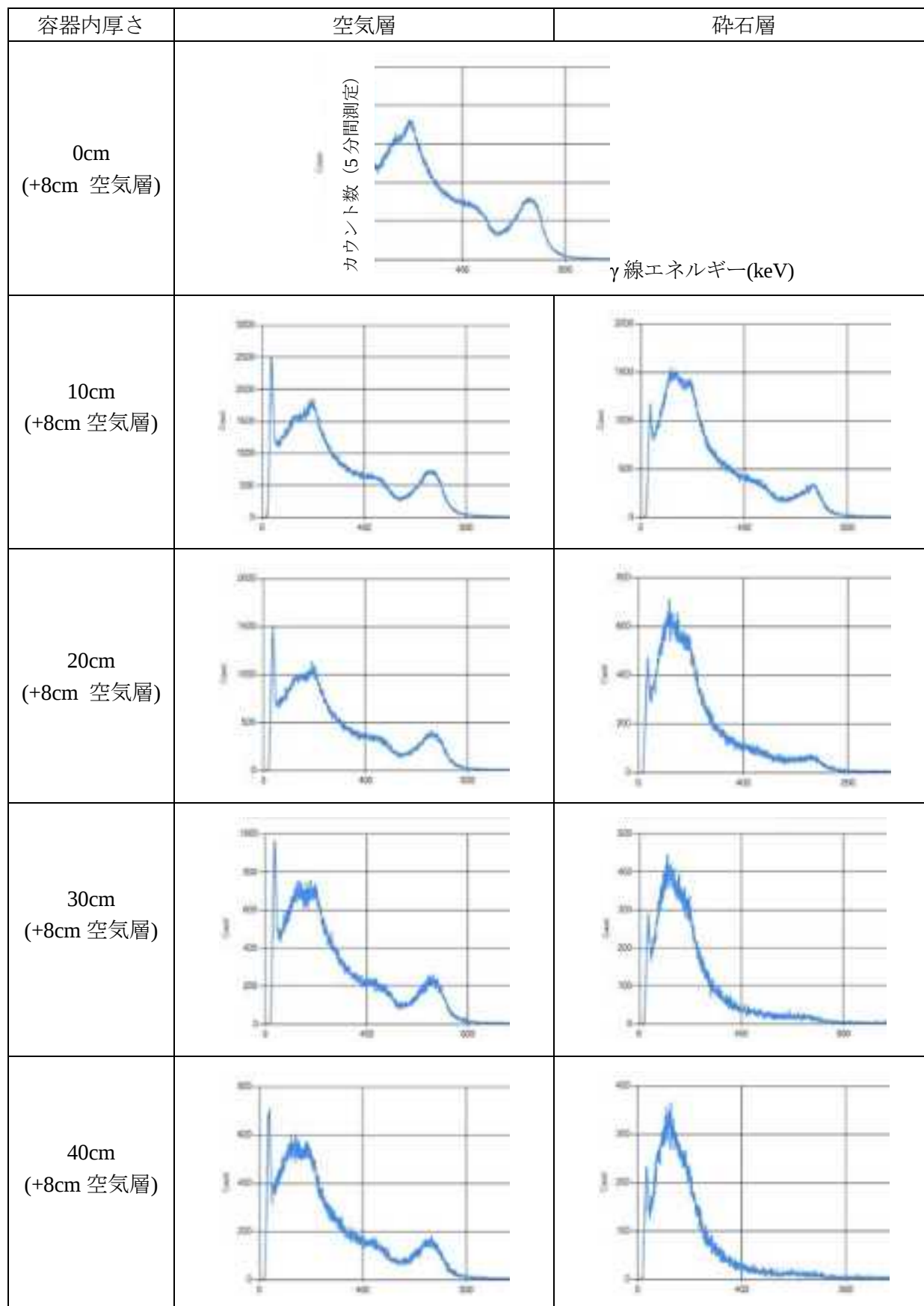


図 4.6-11 空気層及び碎石層厚さに応じた γ 線全体エネルギースペクトル

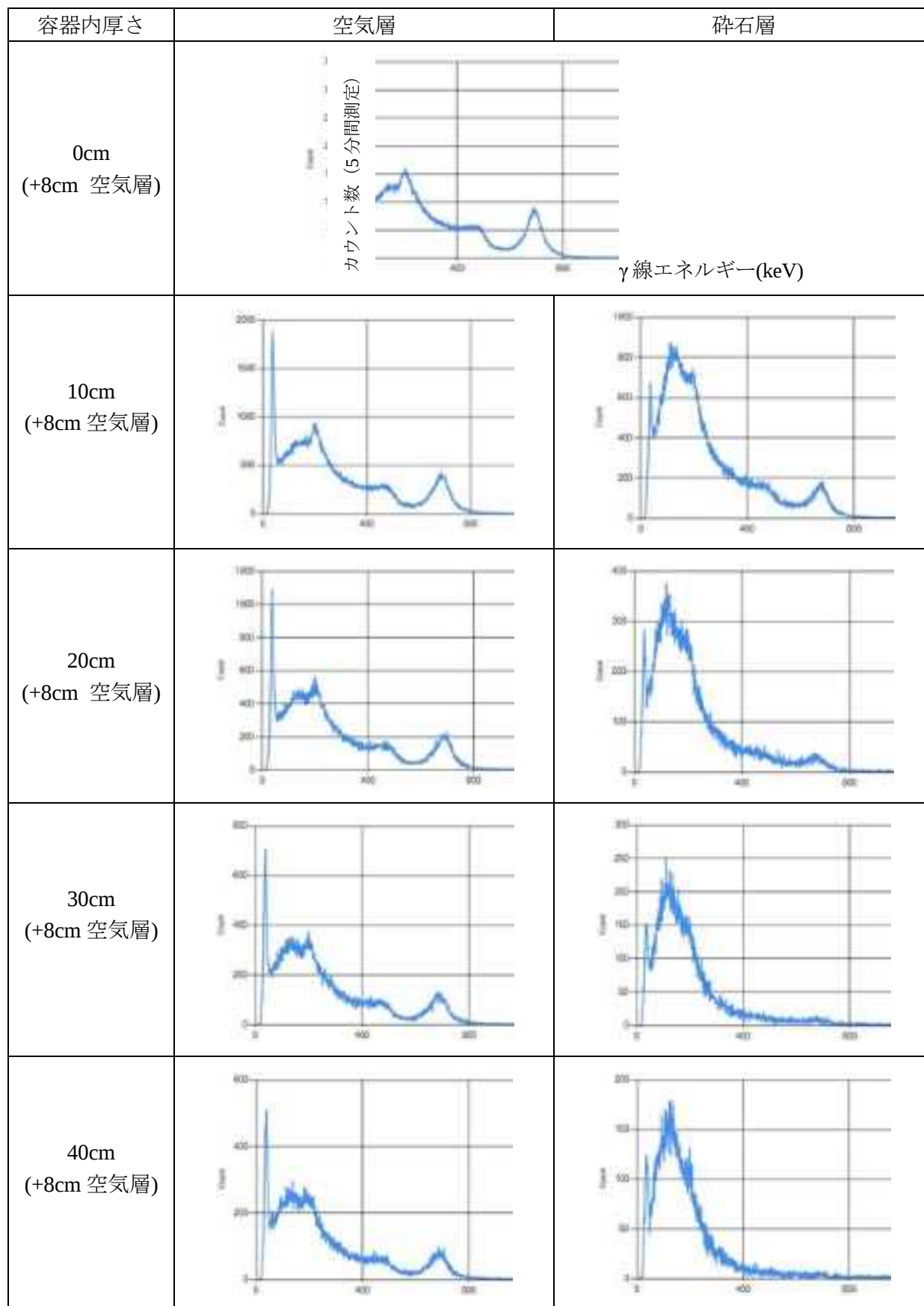


図 4.6-12 空気層及び碎石層厚さに応じた γ 線散乱エネルギースペクトル

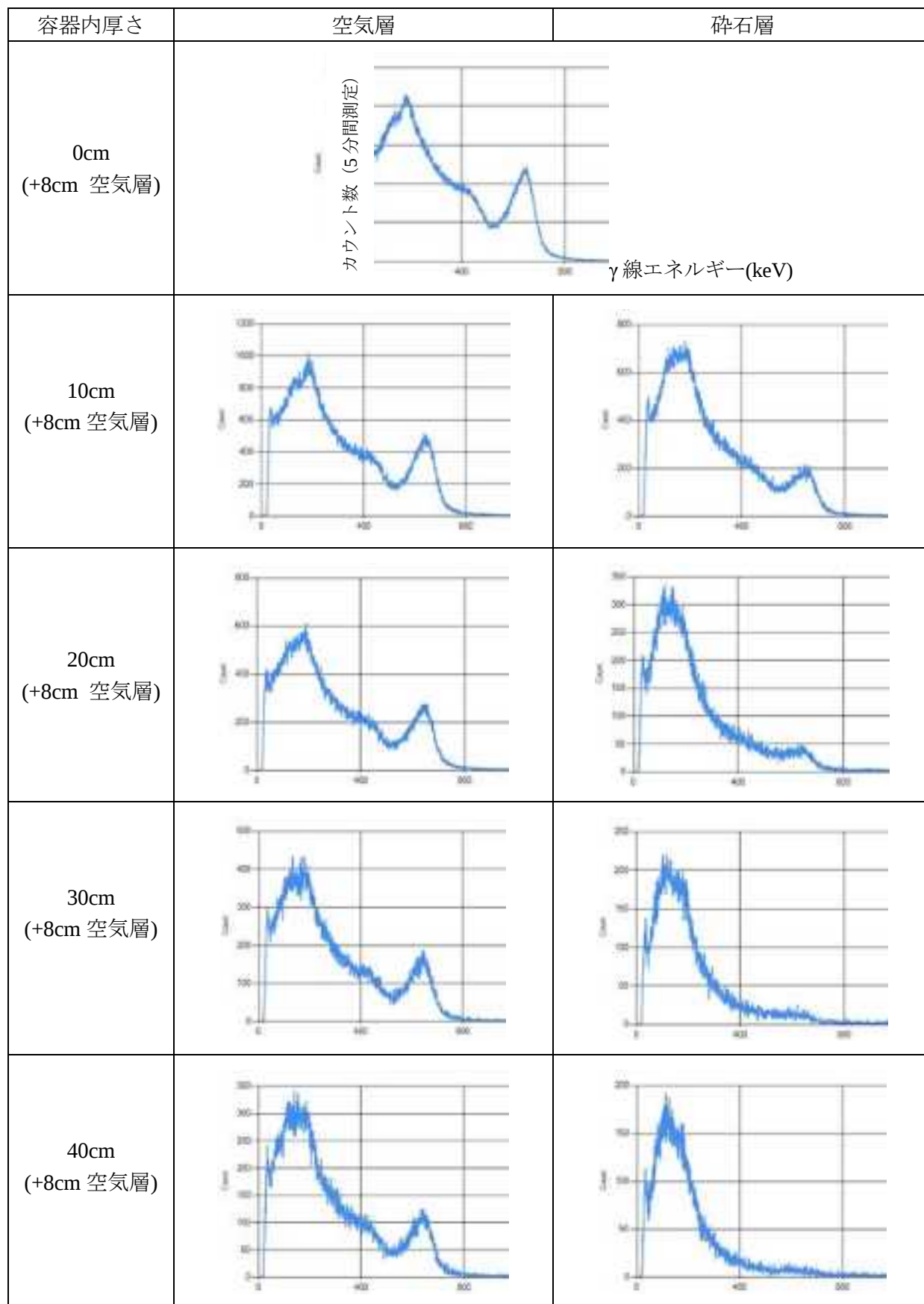


図 4.6-13 空気層及び碎石層厚さに応じた γ 線吸収エネルギースペクトル

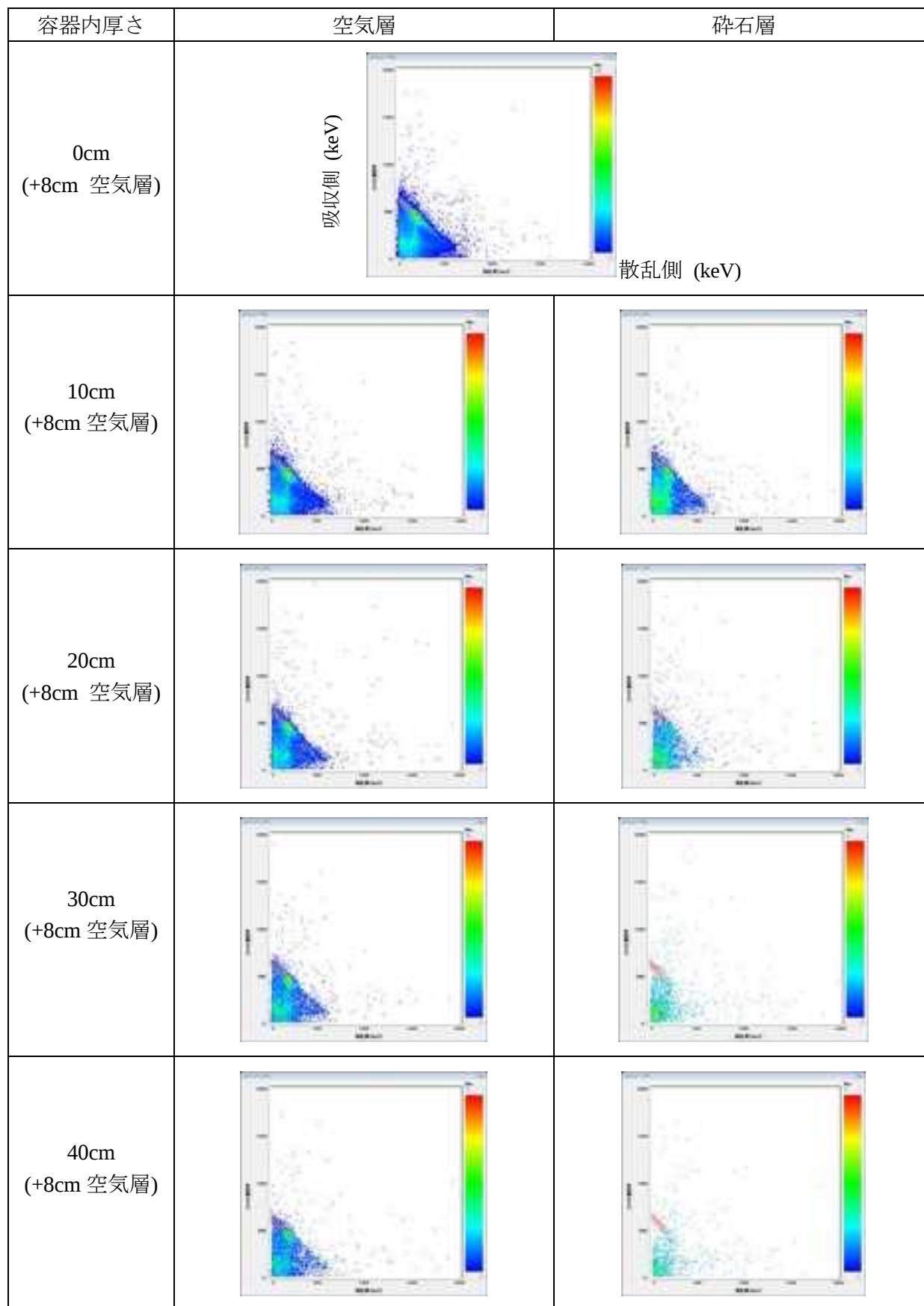


図 4.6-14 空気層及び碎石層厚さに応じたエネルギー分布

4.6.4 考察

以上の測定結果から、ガンマキャッチャーを資源化物の放射能濃度分布を反映した平均放射能濃度の測定・評価に用いる場合の適用性について、検討する。空気層の撮像結果からわかるように、検出器からの距離が 30cm 以下の範囲においては角度方向の位置分解能が高く、容器内の位置をほぼ特定できる見通しが得られた。一方、Cs-137 1MBq を用いた試験において、20cm 以上の碎石層厚さでは、662keV のピークカウントが十分に得られず、662keV による線源位置の特定は困難であることがわかった。したがって、図 4.6-15 に示すように、4 方向の側面、上面及び底面の計 6 面について測定を行うことにより、いずれかの測定で容器側面から 25cm 以内の距離ですべての資源化物を測定することが可能となる。

また、取得されるエネルギー分布から、直接線の 662keV が少ないのに対して、散乱成分が極端に多い場合には、線源から検出器に到達するまで碎石層を長く通っていることが想定され、各面からの測定結果を統合することにより、線源の位置を特定できる可能性が高まると考えられる。4.3.5 の (2) より、ART 法や ML-EM 法においては、初期分布として与える濃度分布が真の濃度分布に近い場合に、真の濃度分布に近づくことから、ガンマキャッチャーの撮像及びエネルギー分布から得られる濃度分布を、逆解析の初期分布として与えることが想定できる。

また、ガンマキャッチャーでは撮像されるコンターが固有の数値であるが、これを測定可能なデータと校正することにより、ガンマキャッチャー単独で放射能分布の推定を実施することも考えられる。撮像に用いられるコンプトンコーンに基づく画像再構成方法と、角度分解能などの特性を十分に把握したうえで、グリーン関数を新たに構築する必要がある。グリーン関数を構築するための解析手法、モデルなどについては、直ちに実行できるものではなく、多くの課題が残っているが、その可能性についても検討を継続する。

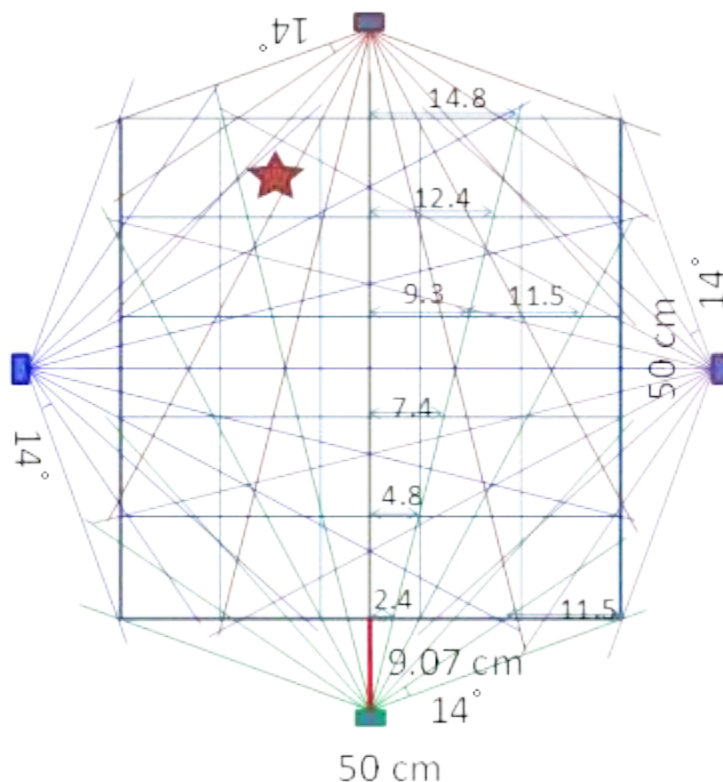


図 4.6-15 本年度対象とした測定容器に対するガンマキャッチャーによる測定例

4.7 碎石を均質とみなせる範囲の検討

今回用いた碎石 6 号はその粒子の直径が 5～13mm と規定されている。図 4.7-1 に示すように、大きさのばらつきも大きく、アクリルボックスに収納した場合にも、粒子同士の隙間である空間が多くみられる。容器全体としてみれば、碎石と空気の均質な混合層とみなすことができるが、局所的に見れば空気が連続する領域が存在する。したがって、碎石 6 号と空気の混合がどの厚さで均質とみなせるかについて、測定と解析の両面から検討を行った。



図 4.7-1 碎石 6 号をアクリルボックスに詰めた状態及び粒子の拡大図

4.7.1 測定による検討

(1) 測定条件

測定による検討では、アクリルボックスに碎石 5 号と均質とみなせる小粒径の珪砂を敷き詰めて、点線源を所定の位置に配置して NaI サーベイメータによって線量率を測定した。また、比較のために空気層についても測定を行った。NaI の検出部であるシンチレータはプローブ部の先端に配置され、その大きさは直径 2.54cm 長さ 2.54cm の円柱形であり、この検出器体積に対する応答となる。

表 4.7-1 に用いた東北珪砂 6 号の粒径分布を示す。また図 4.7-2 に珪砂をアクリルボックスに詰めた状態と粒子の拡大図を示す。粒子の約半分は 0.3mm のメッシュを通ったもので、1cm 程度の厚さであれば十分均質とみなせる。真密度はともに 2.6g/cm^3 程度であり、アクリルボックスに詰めた状態でいずれも内容物 1270g と見かけの密度は 1.48g/cm^3 となった。

図 4.7-3 に検出器と密封線源の位置関係を示す。NaI サーベイメータの検出部の先端から 5cm から 50cm まで 5cm ずつ離して碎石、珪砂、空気の厚さを変えた。10cm 単位はアクリルボックスに各物質を詰めたものを利用し、5cm 単位は各物質を詰めたアクリルボックスの中心に密封線源を配置して 10cm 単位のアクリルボックスと組み合わせて配置した。

表 4.7-1 珪砂 6 号（東北珪砂）の粒径分布

Mesh (mm)	26 (0.60)	36 (0.425)	50 (0.30)	70 (0.212)	100 (0.15)	140 (0.106)	200 (0.075)	281 (0.053)	合計
6 号	0.0	17.4	46.7	26.4	8.0	1.3	0.2	0.0	100



図 4.7-2 珪砂 6 号をアクリルボックスに詰めた状態及び粒子の拡大図



図 4.7-3 検出器と密封線源の位置関係

(2) 測定結果

図 4.7-4 に測定結果を示す。空気層については空気における減衰がほとんどないため、距離に応じた減衰カーブとなっている。一方、碎石 6 号及び珪砂 6 号では、10cm 以上では媒体による遮蔽効果が表れ、空気層よりも低い値で推移する。一方、5cm では空気層と碎石、珪砂がほぼ同一の値を示した。5cm 程度ではほとんど遮蔽効果がないことを示している。なお、本 NaI サーベイメータはエネルギー補償型であり、散乱成分の補償が大きく見積もられたことも考えられる。また、35cm 及び 45cm と十分な遮蔽厚さがあるにもかかわらず。碎石と珪砂の線量率に差が生じている。アクリルボックスの中心に線源を配置する場合、角型定規などを用いて、できるだけ中心に配置するようにしているが、その不確かさや線源を配置した後に碎石を再び敷き詰める際に線源が移動する可能性は排除できず、線源の固定については今後課題が残っている。

碎石を充填したアクリルボックスを 5 つ作成し、10cm 厚の碎石層を通った線量率のばらつきを測定した。一つのアクリルボックスに対して、南北方向、東西方向の 2 回測定して、合計 10 回の測定を行い、そのばらつきを評価した。その測定結果を図 4.7-5 に示す。わずかなばらつきはあるが放射線に対する測定としては誤差の範囲に収まっており、均質とみなすことが可能と考えられる。

次に、アクリルボックスの中心に線源を配置して 4 方向の側面で線量率を計測した。理想的に配置されていれば、どの方向からも 5cm 厚の珪砂あるいは碎石を通っていることになる。表 4.7-2 に測定結果を示す。珪砂についてはばらつきが小さく、5cm 厚でもほぼ均質とみなすことができるが、碎石の場合はばらつきが大きく、碎石を充填する際のばらつきによって、空気部を多く通ったり、碎石部を多く通ることで、線量率のばらつきが生じていると考えられる。なお、上述したように、線源配置のばらつきの影響についても今後配慮する必要がある。

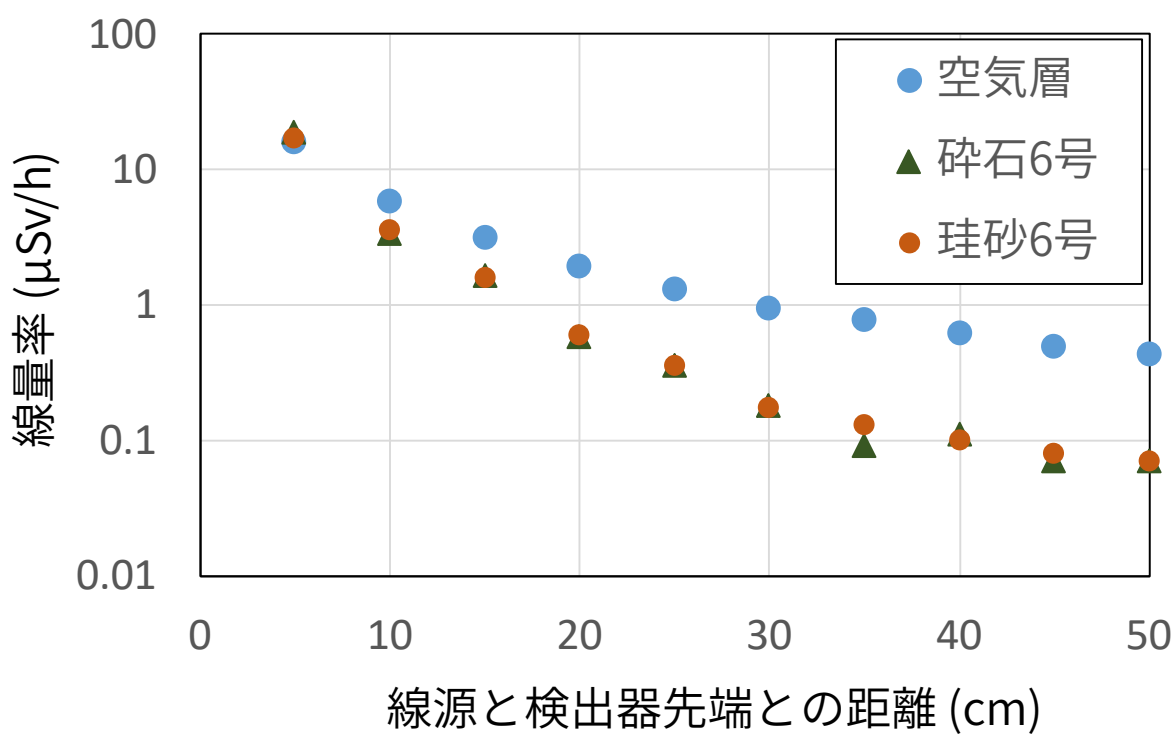


図 4.7-4 空気層、碎石 6 号、珪砂 6 号の各厚さに応じた線量率 (NaI サーベイメータ)

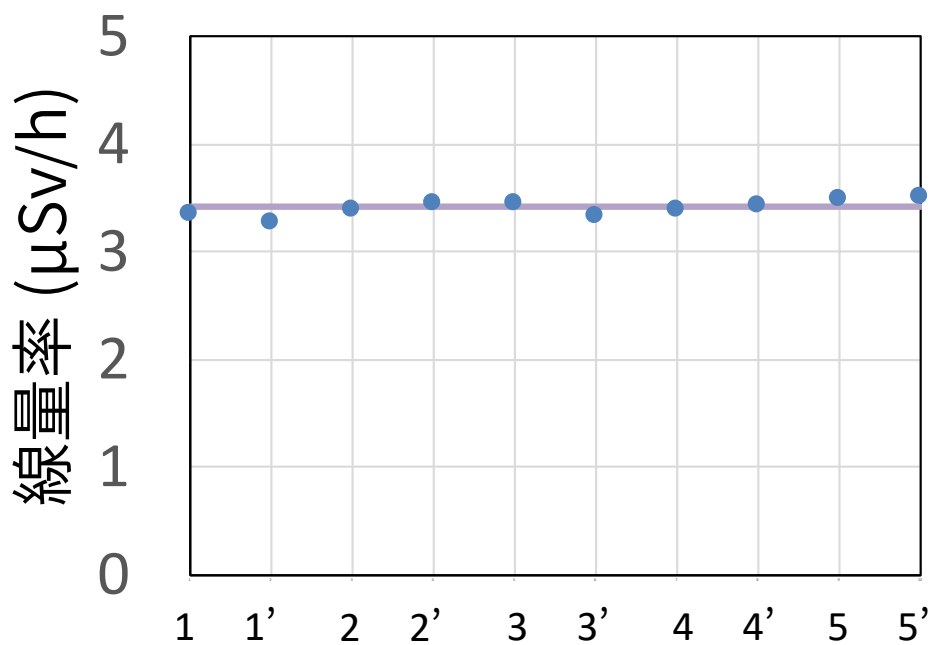


図 4.7-5 碎石 6 号を充填したアクリルボックスに対する向きの違い及び碎石の詰め方のばらつきによる影響 (NaI サーベイメータ)

表 4.7-2 5cm 厚さの珪砂と碎石の線量率測定結果

	珪砂	碎石 A	碎石 B
1	16.8	15.1	18.7
2	16.6	15.7	15.9
3	15.8	19.5	15.1
4	16.8	17.8	16.5
平均	16.5	17.025	16.55
標準偏差 σ	0.825	3.491	2.674

4.7.2 解析による検討

測定においては直径 2.54cm 高さ 2.54cm の円柱検出器に対する応答として評価してきた。本年度検討した PSF は直径を持つ線状の体積検出器であり、PSF からみた碎石層が均質であるかは、別途検討が必要となる。ここでは、3 次元モンテカルロシミュレーション MCNP5 により、碎石厚さに応じて、PSF の体積検出器を通る γ 線フラックスを評価することによって、均質とみなせるかについて検討した。

図 4.7-6 に示すように、面心立方格子形状(充填率 74%)により、コンクリートの密度を調整した均質・非均質モデルの解析を行う。均質体系と非均質体系の密度は以下の条件とする。

(均質) $1.4813 \text{ [g/cm}^3\text{]}$

$= (\text{非均質}) \text{ コンクリート } 2.00 \times (0.7405) \text{ [g/cm}^3\text{]} + \text{空気 } 0.00119 \text{ [g/cm}^3\text{]} \times (0.2595)$

図 4.7-7 に解析モデルを示す。示す面心立方格子形状の 1 辺は 2.5cm として内寸 $50 \times 50 \times 40 \text{ cm}$ のアクリル容器に充填されているとし、10cm 角の体積線源から容器側面側に設置した飛行長検出器によって観測した値の相対誤差 $[(\text{非均質} - \text{均質}) / \text{非均質}]$ によって評価する。線源領域は X 方向に 10cm 毎ずらし 3 ケースの解析を行った。コンクリートとアクリルの組成を表 4.7-3 に示す。光子ライブラリには mcplib84、電子ライブラリには el03 を使用した。ヒストリは nps 5.0×10^7 とした

解析結果を表 4.7-4～表 4.7-6 に示す。線源領域が容器中心に比べ側面側だと均質・非均質の差異はほとんどみられない。中心からはやや非均質体系の方が線束が増える傾向がみられたが +4% 以内の差であった。

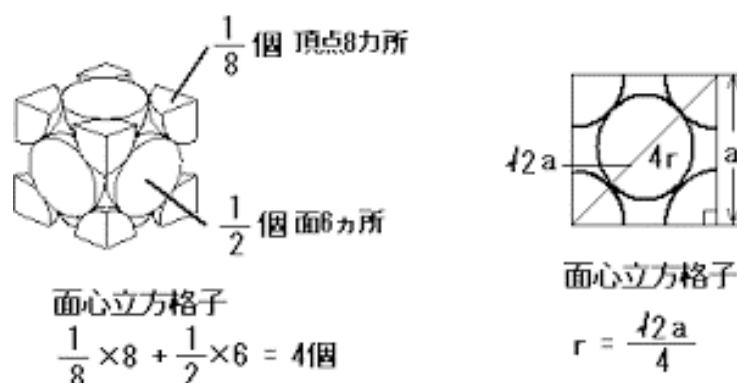


図 4.7-6 面心立方格子

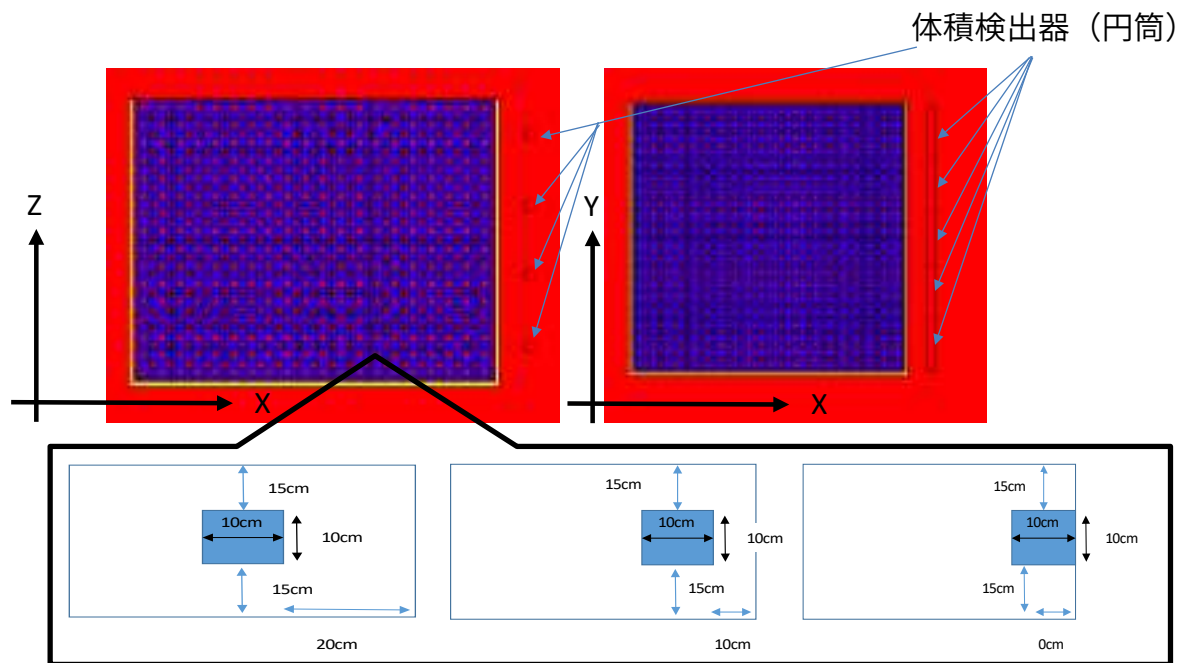


図 4.7-7 解析モデル

表 4.7-3 組成条件

		コンクリート	空気(*Ar 除く)	アクリル
密度(g/cm³)		2.00/148	1.19E-03	1.19
wt%	H	0.416%	0.001%	6.94%
	O	50.74%	23.538%	41.34%
	Mg	0.115%		
	Al	0.446%		
	Si	38.61%		
	S	0.07%		
	Ca	6.869%		
	Fe	2.738%		
	C		0.01272%	51.72%
	N		76.45%	

表 4.7-4 約 20cm 厚の砕石による非均質・均質の相対誤差

	Y(-25~-15)	Y(-15~-5)	Y(-5~5)	Y(5~15)	Y(15~25)
Z(15 φ16.5mm)	2.30%	0.73%	1.26%	1.61%	3.37%
Z(5 φ16.5mm)	0.64%	-0.80%	0.90%	0.29%	2.60%
Z(-5 φ16.5mm)	1.12%	0.11%	0.39%	1.56%	1.39%
Z(-15φ16.5mm)	-0.80%	2.34%	-0.02%	1.34%	1.14%

表 4.7-5 約 10cm 厚の砕石による非均質・均質の相対誤差

	Y(-25~-15)	Y(-15~-5)	Y(-5~5)	Y(5~15)	Y(15~25)
Z(15 φ16.5mm)	1.48%	-0.49%	1.19%	0.71%	1.55%
Z(5 φ16.5mm)	1.50%	1.08%	0.02%	-0.18%	0.94%
Z(-5 φ16.5mm)	1.48%	1.33%	0.62%	0.17%	1.60%
Z(-15φ16.5mm)	-0.16%	-0.79%	0.54%	0.69%	0.42%

表 4.7-6 約 0cm 厚の砕石による非均質・均質の相対誤差

	Y(-25~-15)	Y(-15~-5)	Y(-5~5)	Y(5~15)	Y(15~25)
Z(15 φ16.5mm)	0.33%	0.78%	0.11%	0.27%	0.35%
Z(5 φ16.5mm)	-0.53%	0.15%	-0.09%	0.03%	-0.09%
Z(-5 φ16.5mm)	0.57%	-0.36%	-0.29%	0.10%	0.02%
Z(-15φ16.5mm)	0.03%	-0.29%	0.32%	0.49%	0.02%

[(非均質-均質)/ 非均質]%

4.8 まとめ

(1) 逆解析手法を用いた放射能濃度分布評価

あらかじめ構築したグリーン関数とその場で得られる測定結果から逆解析手法を用いて、推定される放射能濃度分布から平均放射能度を算出して、めやす濃度以下であることを判定するコードシステムを構築した。このシステムは、線量率分布の測定結果に対して、放射能濃度分布の推定を行い、さらにはめやす濃度を満たすかどうかの判定までを自動的に行うことができる。放射能分布の推定には、公開資料から調査した既往の逆解析手法をアルゴリズムとして実装している。

また本コードシステムを使用して、理想的な条件だけでなく、測定条件、誤差、及びおよび測定環境などを考慮した検討を行い、実際の評価を行う上での課題を整理した。まず測定のための検討として、濃度推定の性能を維持するために、測定値の有効数字の桁数と測定点数がどの程度必要か評価した。その結果、有効数字3桁以下では解のばらつきが大きくなり、特に直接的手法は極端な負の平均濃度を示したため、検討の対象外とした。また測定点数を $n=90\sim 784$ の範囲で変化させて平均濃度の評価結果を比較したが、反復的手法においては明確な測定点数依存性は見られなかった。そのため測定点数はいくらでも多く取ればよいわけではなく、適切な測定点数・配置について、さらに検討を要する。

また精度向上のための検討として、濃度分布の推定に有利・不利があるかどうかを確認するため、濃度分布による影響を評価した。各反復的手法の逆解析手法について、一様分布では平均濃度が過大評価となる傾向があるのに対し、密集分布では真の平均濃度を再現することが可能であった。ただし、線源が中心付近にある場合は、平均濃度を過小評価する。また複数の分布に対して、SIRT 法と MAP-EM 法の固有パラメータの最適化を行ったが、分布によって最適値が異なるため、現状ではコードシステムに適用できない。よって今回の検討では、ART 法・GVSPM 法・ML-EM 法の3手法をコードシステムへ適用する。

さらに一様分布に対する評価において、真値と異なる解へ収束することへの対処として、初期分布によって収束する解がどのように異なるかを調べた。GVSPM 法においては収束する解が初期分布へ依存性しなかったが、ART 法と ML-EM 法では初期分布に近い分布へと収束する傾向があった。このことから真の分布に対して何らかの予測が得られるのであれば、予測される分布を初期分布とすることでその予測に反する解へ収束しないようにすることは可能と考えられる。

あるいは解が中心密集分布となるような初期分布を与えることにより、平均濃度を最大評価とすることができ、それをもって保守的な評価として説明する考え方もある。今回の検討では、中心付近の一部のセル以外の濃度を0とした分布を初期分布として与えることで中心密集分布に近い分布へ収束させようとしたが、平均濃度は最大評価とならず、さらなる検討が必要である。

(2) 資源化物を収納した容器外周の放射線測定及びグリーン関数の作成

測定対象物となる資源化物を収納した容器外周に PSF を巻き付け表面の線量計数率の測定を行う。実験はアクリル容器の中にアクリルボックスを敷き詰め、空気層のみによる体系と砕石を敷き詰めた体系を用意した。アクリルボックスにおける砕石密度は 1.44g/cm^3 となるように調整した。これはアクリルボックス体積 ($9.4\times 9.4\times 9.7\text{ cm}^3$) に砕石を敷き詰めた状態での重量を $1234\pm 1\text{g}$ とした値である。

砕石を敷き詰めるとアクリル容器の重量は約 130kg にも及ぶ。重量物となる容器を可動させ

るためローラコンベアを設置した。ただしローラコンベアのローラは遮蔽物となってしまうため PSF を巻き付けた領域のみ取り外した。ただしこの状態での設置では4面の測定しか行えない。そこで回転台を設置することで容器を 90 度回転させ、2 方向目の測定で 1 方向目では測定できなかった面の測定を行う。PSF の測定において重要となるのは位置座標の取得である。そこで半割の亚克力パイプを用意しケーブルのガイド的な役割と同時に座標の取得を可能とする治具の作製を行った。治具の固定にはスチールラックを用いた。

グリーン関数は誤差の少ない測定結果を再現できているものが理想的である。PSF から得られる情報は計数率(cps)であるため解析値(photon/cm²/s)は単位変換する必要がある。そのため計数率(cps)と解析値(photon/cm²/s)の相関より作成する検量線方式を検討した。加えて PSF は特性試験の結果より位置分解能の半値幅が約 90cm であることが分かったため解析値に空間的な広がりを与えるためガウス分布補正を行った。点減衰核積分法による解析結果に上記補正を行った結果、ピークの位置はおおむね再現出来たがピーク高さに測定値との差異がみられた。また低計数率に対してガウス分布補正を行うと波形がなだらかになってしまうため使い分けの工夫が必要である。本年度の測定では想定より誤差が大きくその要因について分析した。いかに今後の課題として整理しておく。

- ・測定体系と解析体系の相違

PSF は体積検出器であり、G 関数を評価するポイントタリーとは、体系が異なる。容器を取り囲む PSF には角部に R があり、線源との距離が解析で考慮した点よりも近く、解析値よりも高い計数率が得られている可能性がある。こうして作成された検量線を用いて放射能分布の推定を行うと線源強度を過小評価する場合があるのではないかな。

- ・PSF のエネルギー特性

プラスチックシンチレーション検出器には低エネルギー側で検出効率が低下するエネルギー特性があるが、PSF では通常のプラスチックシンチレーションよりもさらに低下し、約 60keV で検出効率が 0 となる実験結果が得られた。QAD を用いた解析においては線源から放出された光子がポイントタリーを通過する光子フラックスをエネルギーによらずすべて計数している。このとき、コンクリートのビルドアップ係数を用いて散乱線を考慮している。一方、PSF では 100keV 以下の光子を検出していないとすれば、散乱線の計数を過小評価している。

- ・均質と非均質

容器外周部に線源を配置した場合、NaI サーベイメータの測定では 5cm 厚の碎石層に対してはフラックスにはばらつきが生じた。碎石の容器内での配置のばらつきによって生じたものと考えられる。一方、PSF は長さ 10cm、直径 1cm 程度の体積検出器であり、上記のばらつきの影響を比較的受けにくいと考えられるが、PSF で検証する必要がある。

- ・計数誤差

PSF においては測定時間を 60 秒とした (BG 測定は 300 秒)。線源から近い検出部では十分な計数が得られ測定誤差は小さいと考えられるが、遠い部分で計数が少ないところについては測定誤差が大きいと考えられる。この計数が少ない部分での誤差が測定全体に与える影響を検討する必要がある。

(3) 放射線測定結果に基づく放射能濃度分布の評価

(2) で模擬体に対して PSF を用いた測定により得られた計数率データとグリーン関数を用いて、整備した放射能濃度分布コードシステムによる放射能分布の推定を行った。空気層の測定データについては空気層の測定データで検量線補正を行ったグリーン関数ライブラリを、碎石層の測定データについては空気層の測定データで検量線補正を行ったグリーン関数ライブラ

リを用いた。なお濃度分布の推定手法としては、(1)の検討から ART 法・GVSPM 法・ML-EM 法の 3 手法（グリーン関数を正規化したうえで計算）を用い、初期分布は単純逆投影法で与えた。

濃度分布の推定データを得ることができ、整備したコードシステムが想定通りに運用可能であることは確認できたものの、濃度分布推定の精度には、多くの課題があることを示す結果となった。

画像による線源位置についての評価結果の整理をおこなうと、線源が容器の中心付近にあるケースは線源の位置が鮮明に再現できているのに対し、容器の角付近にあるケースは線源の像がぼやけたり、上下左右にずれて表れたりした。これは容器中心付近の放射能分布推定が困難であるとした(1)の検討結果に合致するものであったが、定量的に評価できていないため、線源位置の再現については妥当性の判断基準を整備する必要がある。また推定手法については、ケースごとに差異を分析したものの、全体としては手法間の適用可能性の優劣を結論づけるには至らなかった。

測定値に対する濃度推定では、平均濃度は全体的に過小評価であり、容器中心付近に線源を置いた場合線源の位置も再現できなかった。どのケース・推定手法においても解析誤差は 10% を下回ることがなかった。理論値に対しては 0.05% の許容誤差に対して収束していることから、測定値が理論値に対してそれだけの誤差を持っていることになる。言い換えればグリーン関数を測定値に限りなく近付けることが出来れば理論値と同様の結果が期待できる。ただし理論値に対しても平均濃度はやや過小評価であったため、放射能濃度分布推定評価コードシステムとしても評価方法も含めてさらなる検討が必要である。

また、コンプトン散乱式ガンマカメラの基本特性を把握する測定を実施し、本年度測定・評価した体系において、適用可能である見通しが得られた。この測定結果は、逆解析の初期分布として利用できる可能性があり、今後引き続き検討を実施する必要がある。

第 4 章の参考文献

4.3 の参考文献

- (1) JAEA 平成 27 年度「廃棄物の限定再利用に関する検討」報告書
- (2) Yukio SAKAMOTO and Shun-ichi TANAKA. “QAD-CGGP2 and G33-GP2: Revised Versions of QAD-CGGP AND G33-GP”. JAERI-M90-110(1990)
- (3) W Q Yang and Lihui Peng, Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography, Meas. Sci. Technol. 14, 2003.
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/14/1/201/pdf>
- (4) 武居周,早野誠治,斎藤兆古,“逆問題解析手法による放射線源探査,”
http://www.media.hosei.ac.jp/bulletin_archives/vol12_10.pdf
- (5) 山本翔, 庄野逸, ベイズアプローチに基づいた断層画像の再構成, IPSJ SIG Technical Report, Vol.2009-MPS-76 No.36、Vol.2009-BIO-19 No.36, 2009.
- (6) 京都大学 山下信雄 数理計画法講義資料 6.2 「直接探索法」
<http://www-optima.amp.i.kyoto-u.ac.jp/~nobuo/Ryukoku/2002/course6.pdf>
- (7) インテル マス・カーネル・ライブラリー リファレンスマニュアル
http://www2.kobe-u.ac.jp/~lerl2/mklman90_j.pdf
- (8) 仲田久和, 天澤弘也, 坂井章浩, 山本正幸, 坂本義昭, 研究施設等廃棄物浅地中埋設処分対象廃棄物に係る荷重変形特性の検討, JAEA-technology 2001-036, 2012.
- (9) 日本原子力学会 「放射線遮蔽ハンドブックー基礎編」

4.4 の参考文献

- (1) 日本原子力研究開発機構 福島技術本部, 「プラスチックシンチレーションファイバを用いた線量測定器の実用化（商品化）に向けて」
- (2) 株式会社テクノエーピー, 「ガンマ線空間線量当量率測定システム D-Phod」
- (3) Los Alamos National Laboratory, X-5 Monte Carlo Team, "MCNP - A General N-Particle Transport Code, Version 5"
- (4) 入江祥和, 「プラスチックシンチレータによる放射線の位置の測定」
- (5) K.A. Litwin, I.C. Gauld, G.R. Penner: Improvements to the Point Kernel Code QAD-CGGP: A Code Validation and User's Manual
- (6) 小佐古敏荘・笹本亘雄, 「放射線遮蔽」, オーム社
- (7) 小山謹二、奥村芳弘、吉田公人、宮坂駿一, 「遮蔽材料の群定数」, JAERI-M6928
- (8) 田坂完二, FPGAM, 「核分裂生成物の γ 線スペクトル計算プログラム」, JAERI-M 6898

4.6 の参考文献

- (1) 株式会社浜松ホトニクス ガンマ線撮像用コンプトンカメラ C12138-5653

Appendix-I

放射能濃度評価手法における予察的検討

I -A グリーン関数を正規化することによる優位性

I -B 逆解析手法の適用可能性の予察的検討

I. 放射能濃度評価手法における予察的検討

本文中にて述べた下記 2 点について、本文の検討内容に先立って行った放射能濃度評価手法に関する予察的な検討結果を提示し、補足説明とする。

- A) 本文第 4 章において、放射能濃度分布評価コードシステムを用いた放射能濃度分布・放射能分布の推定を行う際、グリーン関数を正規化してから計算を行うことを述べた。これを行うことにより、分布推定を行う上で有利となることを、I-A に示す。
- B) 本文 4.3 にて、放射能分布推定手法として挙げた逆解析手法のうち、非線形最適化手法におけるシンプレックス法については、検討対象外とした。この理由を説明するため、さまざまな計算ケースに対して各逆解析手法を用いて解析した予察的検討の条件と結果について I-B で示す。その結果のまとめにおいて、シンプレックス法が現状で適用できないことを述べた。

I-A グリーン関数を正規化することによる優位性

GVSPM 法は、式 I-A-1 に従って正規化を行った後に、解析を行う手法である。この正規化は以下で示すように問題を解きやすくすることが期待できるため、GVSPM 法以外の手法に対しても、式 I-A-1 より正規化を適用できるようにすることとした。

線量率	$d' = \frac{d}{\ d\ }$	式 I-A-1
グリーン関数 (j 列ベクトル)	$G'_j = \frac{G_j}{\ G_j\ }$	
放射能濃度 (要素 j)	$q'_j = q_j \frac{\ G_j\ }{\ d\ }$	

$d'_i = \frac{d_i}{\ d\ } = \frac{\sum G_{ij} q_j}{\ d\ } = \sum_j \frac{G_{ij}}{\ G_j\ } \frac{\ G_j\ }{\ d\ } q_j = \sum_j \frac{G_{ij}}{\ G_j\ } \frac{\ G_j\ }{\ d\ } q_j = \sum G'_{ij} q'_j = G'_i q'$	式 I-A-2
$d' = G' q'$	

条件数は、問題（連立 1 次方程式）のコンピュータでの数値解析のしやすさの尺度であり、その問題がどれだけ数値解析に適しているかを表す。条件数が小さい問題は良条件（well-conditioned）であり、条件数が大きい問題は悪条件（ill-conditioned）である。

グリーン関数 G の条件数は式 I-A-3 で定義される。

$$\kappa(G) = \|G^{-1}\| \cdot \|G\| \quad \text{式 I-A-3}$$

この定義はノルムの選択に依存しており、 $\|\cdot\|$ が l_2 ノルムならば、条件式は式 I-A-4 で表される。このとき、一般化逆行列の算出と同じ方法（本文中、式 4.3-4 で示した）でグリーン関数 $\mathbf{G}$ を特異値分解し、特異値行列 $\Sigma = \text{diag}[\sigma_1, \dots, \sigma_n]$ を得て、この Σ の要素のうち最大値 $\sigma_{\max}$ と最小値 $\sigma_{\min}$ を用いる。

$$\kappa(G) = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad \text{式 I-A-4}$$

$\sigma_{\max}$: 特異値の最大値

$\sigma_{\min}$: 特異値の最小値

正規化が有効であることを示すため、平成 27 年度「廃棄物の限定再利用に関する検討」⁽¹⁾ の 4.5.3 において作成したグリーン関数を例として、容器高さ 20cm～100cm の条件で、正規化の前後で条件数を比較した（図 I-A-1）。正規化を行うことにより、全ての容器高さの条件において条件数が減少し、数値解析がしやすくなったことが示された。

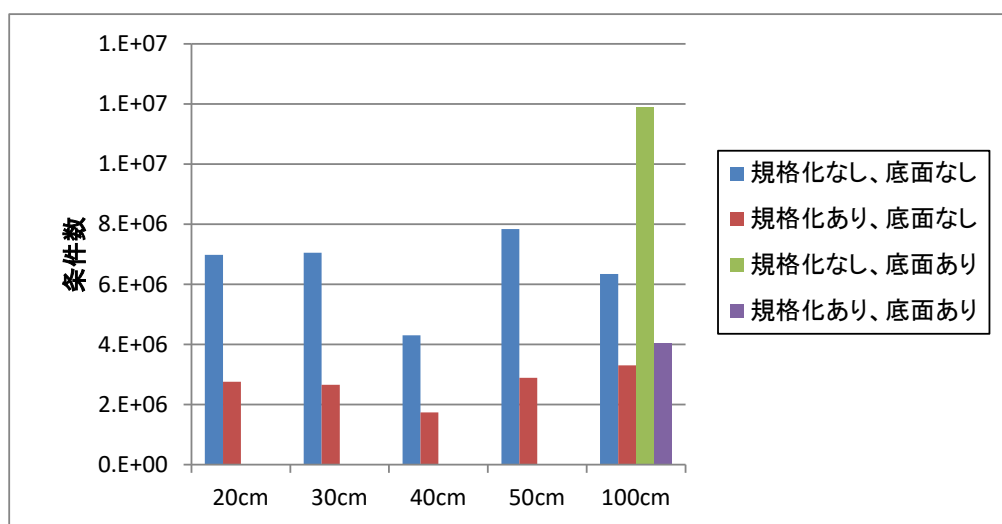


図 I-A-1 条件数の比較

I-B 逆解析手法の適用可能性の予察的検討

I-B-1 検証計算用のグリーン関数を用いた検討

逆解析による放射能濃度分布の算出サブルーチンが正しく実装されているかを検証するため、 m （資源化物メッシュの数）および n （測定点の数）が 2～3 の関数に対して逆解析を行い、数値を確認する。

検証計算のためにグリーン関数と放射能濃度分布を仮想的に定める（ここで定めた値を放射能濃度の真値とする）。線量率はグリーン関数と放射能濃度から算出する。このようにして定めた検証計算に使用する数値を表 I-B-1 に示す。また、解析パラメータの設定値を表 I-B-2 に示す。ここでは表 I-B-1 で示した放射能濃度分布を真値としているが、 $n < m$ のケースや $n = m$ でグリーン関数が正則ではないケースでは、この値が唯一の解ではないため、逆解析によって推定した放射能濃度分布が真値と一致しない可能性があることに注意する必要がある。この場合、推定した放射能濃度分布が数学的に正しい別の解であることを確認するため、推定した放射能濃度分布に対して線量率を計算し、真値に対する線量率と比較する。

ケース 4 はグリーン関数の第 3 列が全て 0 である。このようにグリーン関数のある列が全て 0 である場合、ML-EM 法の式の分母に現れる $\sum_i G_{ij}$ および正規化の式 I-A-1 の分母に現れる $\|G_j\|$ が 0 になり、ゼロ除算が発生してしまう。これらの項が 0 になったとき、値を 1 に修正して計算を行うこととした。なお、グリーン関数の第 j 列が全て 0 であるとき q_j はどのような値をとっても線量率に影響を与えないため、値を定めることはできない。反復的手法では q_j を変化させても結果は改善されないため、初期値がそのまま解析結果として使用される。

表 I-B-1 検証計算に使用する数値

物理量	グリーン関数	放射能濃度分布	線量率	備考
記号	G	q	d	
ケース 0	$\begin{pmatrix} 4 & 1 \\ 2 & 5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 6 \\ 7 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 31 \\ 47 \end{pmatrix}$	$n=m$ であり、正則である
ケース 1	$\begin{pmatrix} 4 & 1 \\ 2 & 5 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 6 \\ 7 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 31 \\ 47 \\ 6 \end{pmatrix}$	$n>m$ であり、グリーン関数に 0 を含む
ケース 2	$\begin{pmatrix} 4 & 1 \\ 2 & 5 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 6 \\ 7 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 31 \\ 47 \\ 7 \end{pmatrix}$	$n>m$ であり、ケース 1 の、3 行目の要素を入れ替えたもの
ケース 3	$\begin{pmatrix} 4 & 1 & 1 \\ 2 & 5 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 6 \\ 7 \\ 5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 36 \\ 52 \end{pmatrix}$	$n<m$ であり、グリーン関数は全て正の値
ケース 4	$\begin{pmatrix} 4 & 1 & 0 \\ 2 & 5 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 6 \\ 7 \\ 5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 31 \\ 47 \end{pmatrix}$	$n<m$ であり、グリーン関数の第 3 列が全て 0
ケース 5	$\begin{pmatrix} 4 & 1 & 1 \\ 2 & 5 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 6 \\ 7 \\ 5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 36 \\ 52 \\ 18 \end{pmatrix}$	$n=m$ であり、正則である

ケース 6	$\begin{pmatrix} 4 & 1 & 1 \\ 2 & 5 & 1 \\ 2 & 5 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 6 \\ 7 \\ 5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 36 \\ 52 \\ 52 \end{pmatrix}$	n=m であり、正則ではない
-------	---	---	--	----------------

表 I-B-2 検証計算の解析パラメータ

正則化パラメータ	1×10^{-7}
SIRT 法の relaxation factor	ケース 0, 4 : 1 ケース 1, 2, 3 : 0.8 ケース 5, 6 : 0.7
MAP-EM 法の制御パラメータ	1×10^{-5}
反復的手法の許容誤差	1×10^{-5}

放射能濃度の解析結果を表 I-B-3～表 I-B-9 に示す。ケース 0～2 では $\mathbf{q} = (q_1, q_2)$ 、ケース 3～6 では $\mathbf{q} = (q_1, q_2, q_3)$ である。ケース 0,1,2,5 では真の放射能濃度分布に一致する結果が得られた。ケース 3,4,6 では推定した放射能濃度分布は真の放射能濃度分布と一致しなかった。

表 I-B-3 ケース 0 の解析結果

	正規化なし		正規化あり	
	q1	q2	q1	q2
一般化逆行列	6.00	7.00	6.00	7.00
Tikhonov の正則化	6.00	7.00	6.00	7.00
ART 法	6.00	7.00	6.00	7.00
SIRT 法	6.00	7.00	6.00	7.00
GVSPM 法	適応外		6.00	7.00
ML-EM 法	6.00	7.00	6.00	7.00
MAP-EM 法	6.00	7.00	6.00	7.00
シンプレックス法	6.00	7.00	6.00	7.00
真値	6	7	6	7

表 I-B-4 ケース 1 の解析結果

	正規化なし		正規化あり	
	q1	q2	q1	q2
一般化逆行列	6.00	7.00	6.00	7.00
Tikhonov の正則化	6.00	7.00	6.00	7.00
ART 法	6.00	7.00	6.00	7.00
SIRT 法	6.00	7.00	6.00	7.00
GVSPM 法	適応外		6.00	7.00
ML-EM 法	6.00	7.00	6.00	7.00
MAP-EM 法	6.00	7.00	6.00	7.00
シンプレックス法	6.00	7.00	6.00	7.00
真値	6	7	6	7

表 I-B-5 ケース 2 の解析結果

	正規化なし		正規化あり	
	q1	q2	q1	q2
一般化逆行列	6.00	7.00	6.00	7.00
Tikhonov の正則化	6.00	7.00	6.00	7.00
ART 法	6.00	7.00	6.00	7.00
SIRT 法	6.00	7.00	6.00	7.00
GVSPM 法	適応外		6.00	7.00
ML-EM 法	6.00	7.00	6.00	7.00
MAP-EM 法	6.00	7.00	6.00	7.00
シンプレックス法	6.00	7.00	6.00	7.00
真値	6	7	6	7

表 I-B-6 ケース 3 の解析結果

	正規化なし			正規化あり		
	q1	q2	q3	q1	q2	q3
一般化逆行列	6.60	7.30	2.28	3.52	5.76	16.15
Tikhonov の正則化	6.60	7.30	2.28	3.52	5.76	16.15
ART 法	6.60	7.30	2.28	3.52	5.76	16.15
SIRT 法	6.60	7.30	2.28	3.52	5.76	16.15
GVSPM 法	適応外			3.52	5.76	16.15
ML-EM 法	6.60	7.30	2.28	3.64	5.82	15.60
MAP-EM 法	6.60	7.30	2.29	3.64	5.82	15.60
シンプレックス法	6.74	7.37	1.67	-0.23	3.89	33.02
真値	6	7	5	6	7	5

表 I-B-7 ケース 4 の解析結果

	正規化なし			正規化あり		
	q1	q2	q3	q1	q2	q3
一般化逆行列	6.00	7.00	0.00	6.00	7.00	0.00
Tikhonov の正則化	6.00	7.00	0.00	6.00	7.00	0.00
ART 法	6.00	7.00	0.00	6.00	7.00	0.00
SIRT 法	6.00	7.00	0.00	6.00	7.00	0.00
GVSPM 法	適応外			6.00	7.00	0.00
ML-EM 法	6.00	7.00	0.00	6.00	7.00	0.00
MAP-EM 法	6.00	7.00	0.00	6.00	7.00	0.00
シンプレックス法	6.00	7.00	0.00	6.00	7.00	0.00
真値	6	7	5	6	7	5

表 I-B-8 ケース 5 の解析結果

	正規化なし			正規化あり		
	q1	q2	q3	q1	q2	q3
一般化逆行列	6.00	7.00	5.00	6.00	7.00	5.00
Tikhonov の正則化	6.00	7.00	5.00	6.00	7.00	5.00
ART 法	6.00	7.00	5.00	6.00	7.00	5.00
SIRT 法	6.00	7.00	5.00	6.00	7.00	5.00
GVSPM 法	適応外			6.00	7.00	5.00
ML-EM 法	6.00	7.00	5.00	6.00	7.00	5.00
MAP-EM 法	6.00	7.00	5.00	6.00	7.00	5.00
シンプレックス法	6.00	7.00	5.00	6.00	7.00	5.00
真値	6	7	5	6	7	5

表 I-B-9 ケース 6 の解析結果

	正規化なし			正規化あり		
	q1	q2	q3	q1	q2	q3
一般化逆行列	6.60	7.30	2.28	3.38	5.69	16.77
Tikhonov の正則化	6.60	7.30	2.28	3.38	5.69	16.77
ART 法	6.60	7.30	2.28	3.38	5.69	16.77
SIRT 法	6.60	7.30	2.28	3.38	5.69	16.77
GVSPM 法	適応外			3.38	5.69	16.77
ML-EM 法	6.61	7.30	2.28	3.60	5.80	15.79
MAP-EM 法	6.60	7.30	2.28	3.60	5.80	15.79
シンプレックス法	7.07	7.54	0.18	4.06	6.03	13.73
真値	6	7	5	6	7	5

これらの問題は $n < m$ のケースまたは $n = m$ でグリーン関数が正則ではないケースであり、解が一意に定まらない。真の放射能濃度分布とは異なるが、推定した放射能濃度分布も同じ線量率の値が得られる数学的に正しい解のひとつである。

このことを示すため、推定した放射能濃度分布に対して線量率を計算し、真値に対する線量率と比較する。その結果を表 I-B-10～表 I-B-12 に示す。ケース 3,4 は $\mathbf{d} = (d_1, d_2)$ 、ケース 6 は $\mathbf{d} = (d_1, d_2, d_3)$ である。

表 I-B-10 ケース 3 の推定解に対する線量率

	正規化なし		正規化あり	
	d1	d2	d1	d2
一般化逆行列	36.0	52.0	36.0	52.0
Tikhonov の正則化	36.0	52.0	36.0	52.0
ART 法	36.0	52.0	36.0	52.0
SIRT 法	36.0	52.0	36.0	52.0
GVSPM 法	適応外		36.0	52.0
ML-EM 法	36.0	52.0	36.0	52.0
MAP-EM 法	36.0	52.0	36.0	52.0
シンプレックス法	36.0	52.0	36.0	52.0
真値に対する 線量率	36	52	36	52

表 I-B-11 ケース 4 の推定解に対する線量率

	正規化なし		正規化あり	
	d1	d2	d1	d2
一般化逆行列	31.0	47.0	31.0	47.0
Tikhonov の正則化	31.0	47.0	31.0	47.0
ART 法	31.0	47.0	31.0	47.0
SIRT 法	31.0	47.0	31.0	47.0
GVSPM 法	適応外		31.0	47.0
ML-EM 法	31.0	47.0	31.0	47.0
MAP-EM 法	31.0	47.0	31.0	47.0
シンプレックス法	31.0	47.0	31.0	47.0
真値に対する 線量率	31	47	31	47

表 I-B-12 ケース 6 の推定解に対する線量率

	正規化なし			正規化あり		
	d1	d2	d3	d1	d2	d3
一般化逆行列	36.0	52.0	52.0	36.0	52.0	52.0
Tikhonov の正則化	36.0	52.0	52.0	36.0	52.0	52.0
ART 法	36.0	52.0	52.0	36.0	52.0	52.0
SIRT 法	36.0	52.0	52.0	36.0	52.0	52.0
GVSPM 法	適応外			36.0	52.0	52.0
ML-EM 法	36.0	52.0	52.0	36.0	52.0	52.0
MAP-EM 法	36.0	52.0	52.0	36.0	52.0	52.0
シンプレックス法	36.0	52.0	52.0	36.0	52.0	52.0
真値に対する 線量率	36	52	52	36	52	52

I-B-2 資源化物を模した濃度分布に対する検討

仮想的な濃度分布を設定し、それに対応するグリーン関数・線量率を使用し、逆解析により濃度分布が再現できるかどうかを確認する。ここで解く問題は、いずれも $n < m$ であり解が一意には定まらないことに注意する必要がある。

計算結果は可視化した放射能濃度分布および、式 I-B-1 で得られる q_{err} および平均放射能濃度（真の放射能濃度で正規化）で示す。平均放射能濃度（真の放射能濃度で正規化）が 1 に近いとき、また q_{err} が小さいときに再現性が高いといえる。

$$q_{err} = \sqrt{\frac{\sum_j^m (q_j - q_j^{true})^2}{\sum_j^m (q_j^{true})^2}} \quad \text{式 I-B-1}$$

q_j^{true} : 真の濃度分布
 q_j : 推定した濃度分布

以下の 3 つの仮想的な濃度分布が再現できるかどうかを確認した。

- (1) 幅 1m×奥行き 1m×高さ 0.2m の資源化物の容器中心にホットスポットがあるケース
- (2) 線源を幅 1m×奥行き 1m×高さ 0.5m の資源化物の容器の角に配置したケース
- (3) 幅 1m×奥行き 1m×高さ 0.5m の資源化物の容器全体に一様に分布しているケース

I-B-2.1. 容器中心にホットスポットがあるケース

容器中心にホットスポットがあるケースの解析条件を表 I-B-13 に示す。

仮想的な濃度分布[Bq/kg]は、以下の式 I-B-2 により設定した。設定した濃度分布を図 I-B-1 に示す。

$$f(r) = 100 \times \exp\left(-\frac{(r - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) + 1 \quad \text{式 I-B-2}$$

ここで、 r は (x, y, z) 空間内の位置座標、 μ は原点 $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ を意味し、 $\sigma = 10[\text{cm}]$ を用いた。

グリーン関数は線源と測定点の距離による減衰のみ考慮して以下の式で設定した。

$$G_{ij} = \frac{1}{4\pi r_{ij}^2} \quad \text{式 I-B-3}$$

線量率データは、濃度およびグリーン関数を用いて導出した。

$$d = Gq \quad \text{式 I-B-4}$$

解析に要した時間および反復回数を表 I-B-14 に示す。全ての反復的手法による解析は、収

束条件を満たして終了した。シンプレックス法は他の手法に比べて多くの反復回数、解析時間を要している。

逆解析により推定された濃度分布を図 I-B-2～図 I-B-5、平均放射能濃度を表 I-B-15 に、 q_{err} を表 I-B-16 に示す。

表 I-B-13 容器中心にホットスポットがあるケースの解析条件

資源化物寸法	幅 1m×奥行き 1m×高さ 0.2m
測定点	容器上面および側面（計 5 面）、10 cm 間隔 容器表面からの距離 6cm $10 \times 10 + 10 \times 2 \times 4 = 180$ 点
濃度分布メッシュ	10cm 間隔で分割 $10 \times 10 \times 2 = 200$ メッシュ
入力データ	式 I-B-2～式 I-B-4 によって設定
正則化パラメータ	1×10^{-7}
SIRT 法の relaxation factor	1×10^{-2}
MAP-EM 法の制御パラメータ	1×10^{-5}
反復的手法の許容誤差	5×10^{-4}

表 I-B-14 容器中心にホットスポットがあるケースの解析時間および反復回数

	解析時間[s]		反復回数	
	正規化なし	正規化あり	正規化なし	正規化あり
一般化逆行列	4.30E-02	4.30E-02	-	-
Tikhonov の正則化	4.10E-02	3.80E-02	-	-
ART 法	2.26E-01	4.65E-01	2,375	5,028
SIRT 法	5.13E+00	9.42E+00	70,865	128,744
GVSPM 法	適用外	9.20E-02	適用外	1,406
ML-EM 法	4.35E+00	2.62E-01	26,767	1,615
MAP-EM 法	4.10E+00	2.67E-01	24,661	1,616
シンプレックス法	7.42E+04	1.36E+04	769,493,142	140,146,986

表 I-B-15 容器中心にホットスポットがあるケースの平均放射能濃度
(真の放射能濃度で正規化)

	正規化なし	正規化あり
一般化逆行列	1.00	1.01
Tikhonov の正則化	1.00	1.01
ART 法	0.97	1.02
SIRT 法	0.96	1.04
GVSPM 法	適用外	1.04
ML-EM 法	0.95	1.02
MAP-EM 法	0.95	1.02
シンプレックス法	0.95	1.17

表 I-B-16 容器中心にホットスポットがあるケースの q_{err}

	正規化なし	正規化あり
一般化逆行列	0.41	0.68
Tikhonov の正則化	0.41	0.68
ART 法	0.48	0.44
SIRT 法	0.48	0.50
GVSPM 法	適用外	0.45
ML-EM 法	0.47	0.17
MAP-EM 法	0.44	0.17
シンプレックス法	2.61	4.09

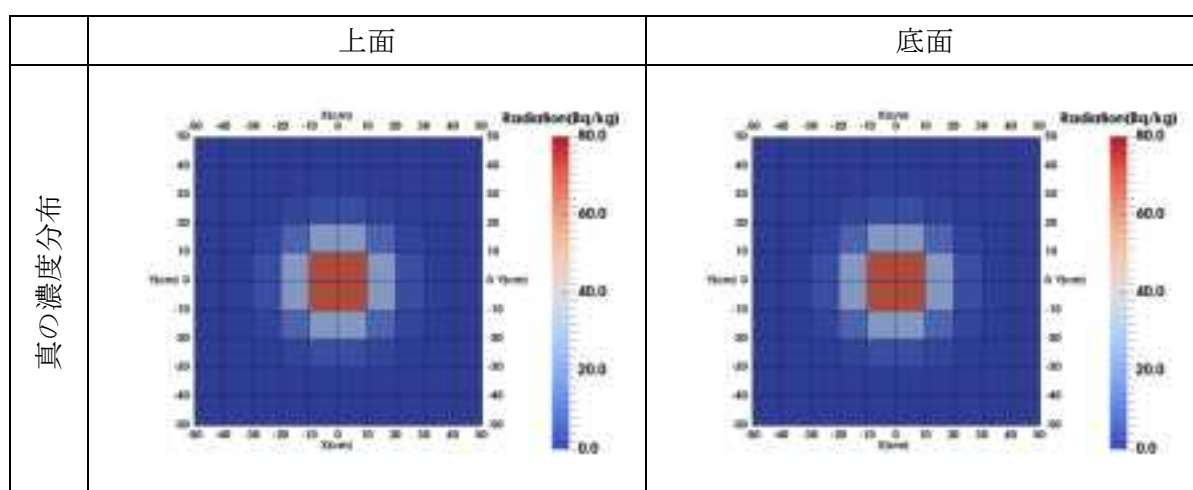


図 I-B-1 容器中心にホットスポットがあるケースの真の濃度分布

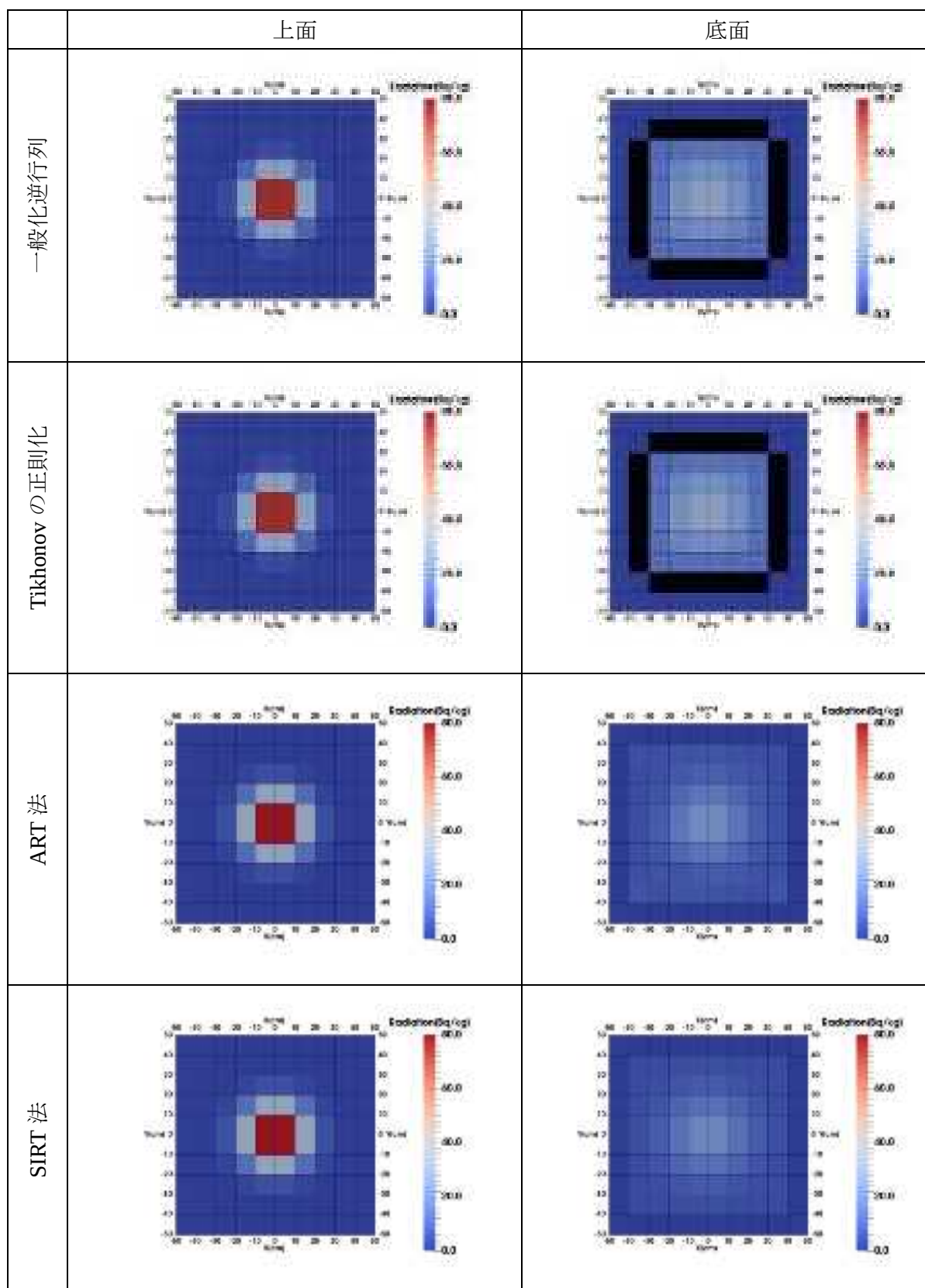


図 I-B-2 正規化なしで推定した濃度分布(1/2)

※黒色のメッシュは負の値

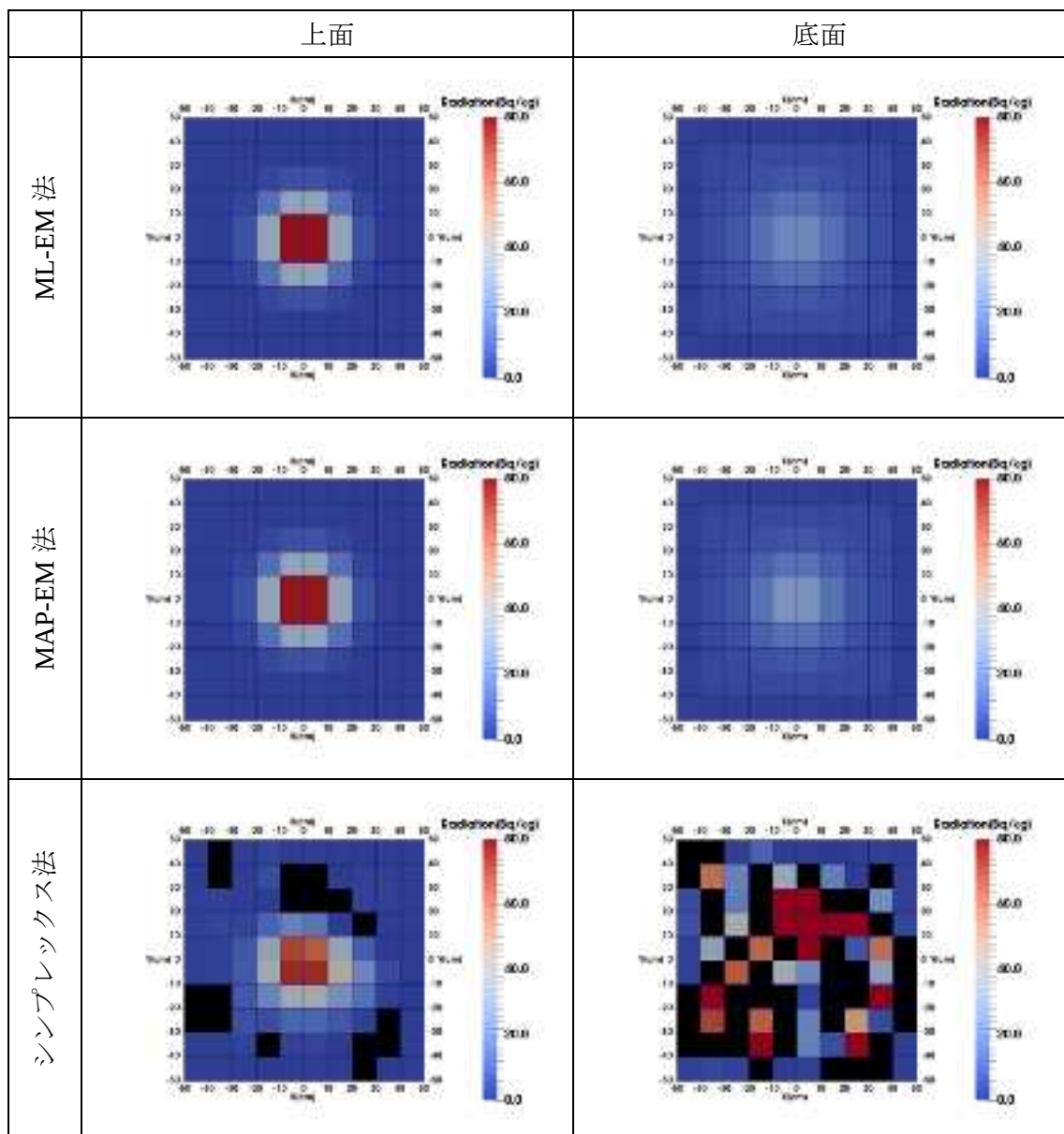


図 I-B-3 正規化なしで推定した濃度分布(2/2)

※黒色のメッシュは負の値

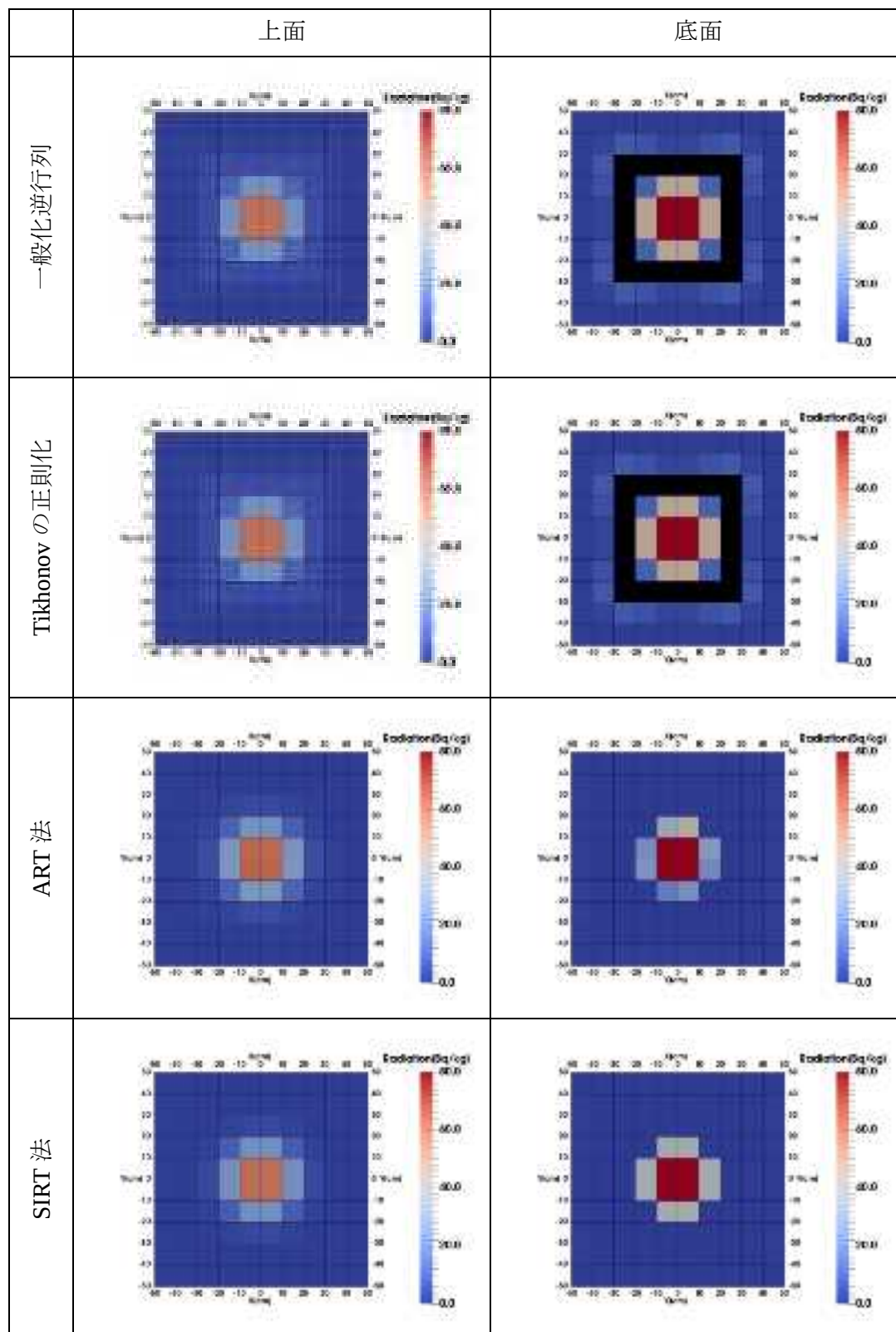


図 I-B-4 正規化ありで推定した濃度分布(1/2)

※黒色のメッシュは負の値

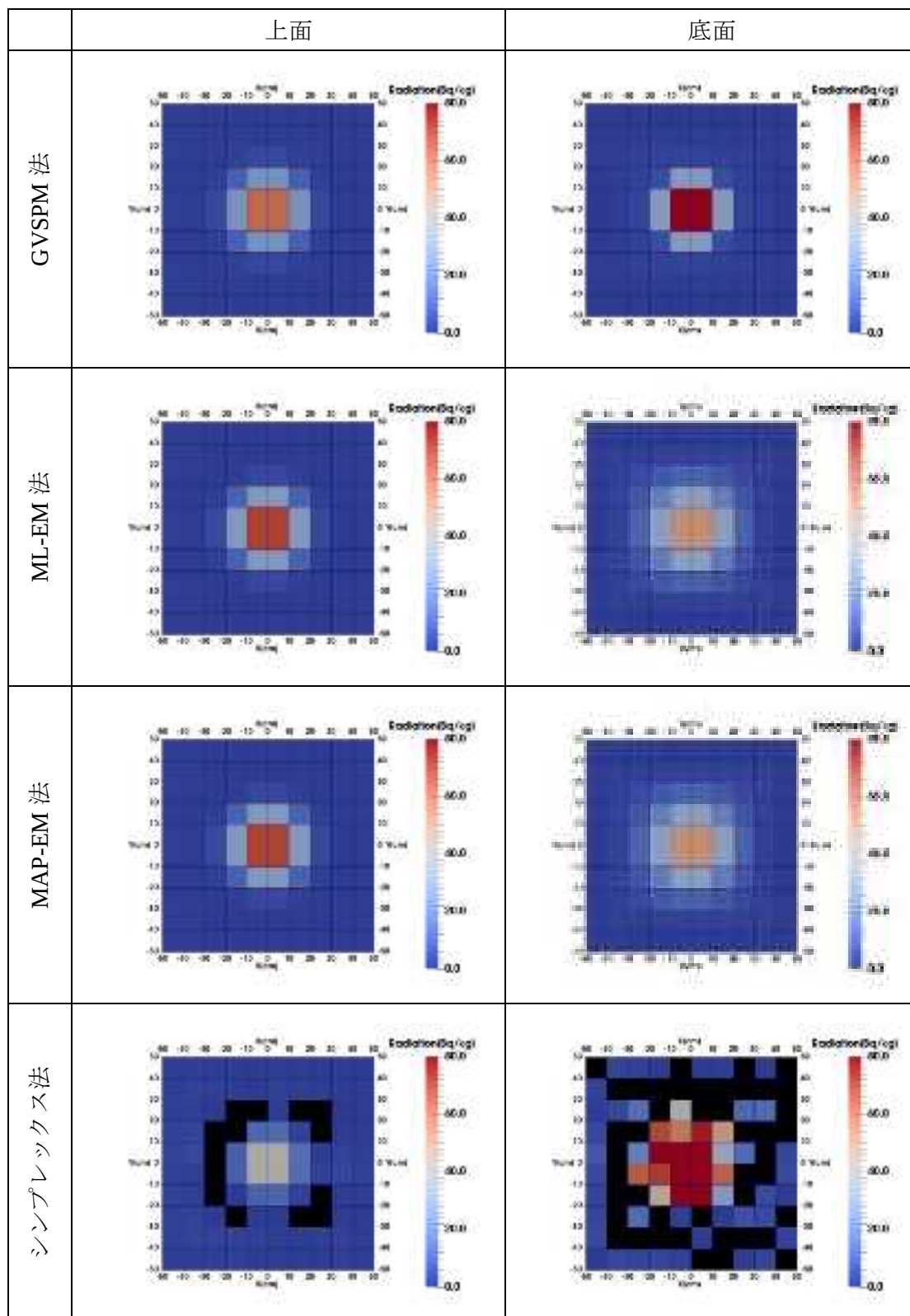


図 I-B-5 正規化ありで推定した濃度分布(2/2)

※黒色のメッシュは負の値

I-B-2.2. 線源を容器の角に配置したケース

線源を容器の角に配置したケースの解析条件を表 I-B-17 に示す。

仮想的な濃度分布[Bq/kg]は、以下の式 I-B-5 の通り設定した。設定した濃度分布を図 I-B-6 に示す。 $j = 489$ は図 I-B-6 において、1 か所だけ濃度が高くなっていることが示されているメッシュに対応する番号である。

$$q_j = \begin{cases} 1.660389521 \times 10^3 & (j = 489) \\ 0 & (j \neq 489) \end{cases} \quad \text{式 I-B-5}$$

解析に要した時間および反復回数を表 I-B-18 に示す。MAP-EM 法は正規化なしのとき、ステップ間の更新が小さくなって終了した。シンプレックス法は正規化なしのとき、2 億回 (31 時間) 反復計算しても収束に至らなかった。その他の反復的手法による解析は、収束条件を満たして終了した。シンプレックス法は他の手法に比べて多くの反復回数、解析時間を要している。逆解析により推定された濃度分布を図 I-B-7～図 I-B-8、平均放射能濃度を表 I-B-19 に、 q_{err} を表 I-B-20 に示す。

表 I-B-17 線源を容器の角に配置したケースの解析条件

資源化物寸法	幅 1m×奥行き 1m×高さ 0.5m
測定点	容器上面、底面および側面 (計 6 面)、10 cm 間隔 容器表面からの距離 6cm $10 \times 10 \times 2 + 10 \times 5 \times 4 = 400$ 点
濃度分布メッシュ	10cm 間隔で分割 $10 \times 10 \times 5 = 500$ メッシュ
入力データ	グリーン関数：QAD の計算結果 真の濃度分布：式 I-B-5 によって設定 (図 I-B-6) 測定値：グリーン関数、濃度分布から算出
正則化パラメータ	1×10^{-7}
SIRT 法の relaxation factor	1×10^{-2}
MAP-EM 法の制御パラメータ	1×10^{-5}
反復的手法の許容誤差	5×10^{-4}

表 I-B-18 線源を容器の角に配置したケースの解析時間および反復回数

	解析時間[s]		反復回数	
	正規化なし	正規化あり	正規化なし	正規化あり
一般化逆行列	2.49E-01	2.11E-01	-	-
Tikhonov の正則化	2.01E-01	2.03E-01	-	-
ART 法	8.10E-02	1.04E-01	100	129
SIRT 法	4.89E+00	5.99E+00	9,755	12,089
GVSPM 法	適用外	8.00E-03	適用外	17
ML-EM 法	8.45E+00	8.48E+00	9,548	9,506
MAP-EM 法	4.83E+00	9.16E+00	5,323	10,224
シンプレックス法	収束せず	9.34E+03	収束せず	16,938,134

表 I-B-19 線源を容器の角に配置したケースの平均放射能濃度（真の放射能濃度で正規化）

	正規化なし	正規化あり
一般化逆行列	1.08	1.35
Tikhonov の正則化	1.09	1.35
ART 法	1.00	1.00
SIRT 法	1.00	1.00
GVSPM 法	適用外	1.00
ML-EM 法	1.00	1.00
MAP-EM 法	0.94	1.00
シンプレックス法	収束せず	0.74

表 I-B-20 線源を容器の角に配置したケースの q_{err}

	正規化なし	正規化あり
一般化逆行列	6.12E-02	3.72E-01
Tikhonov の正則化	6.23E-02	3.72E-01
ART 法	1.47E-03	1.61E-03
SIRT 法	2.02E-03	2.01E-03
GVSPM 法	適用外	1.83E-03
ML-EM 法	1.79E-03	1.79E-03
MAP-EM 法	7.54E-01	1.78E-03
シンプレックス法	収束せず	8.66E-01

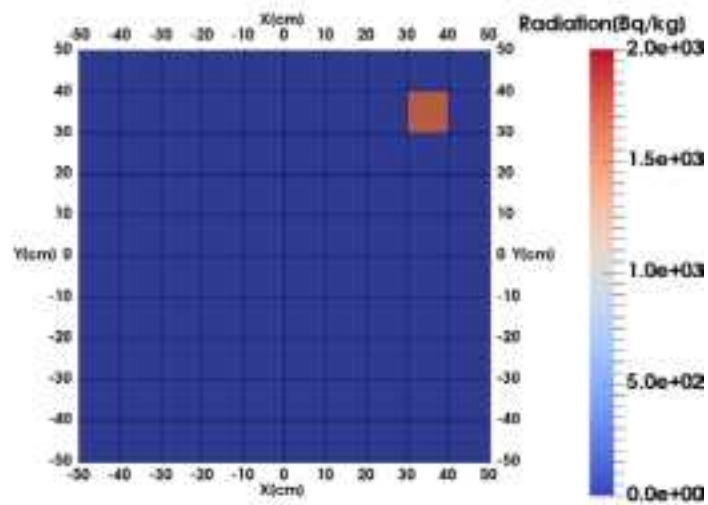


図 I-B-6 線源を容器の角に配置したケースで真の濃度分布($z=25$)

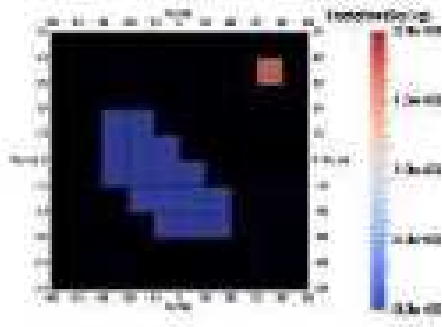
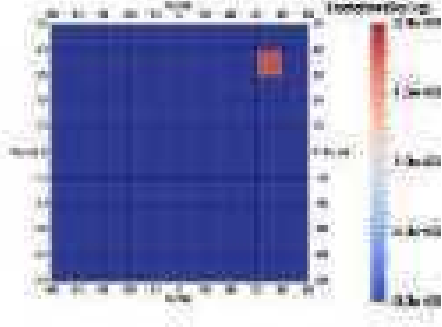
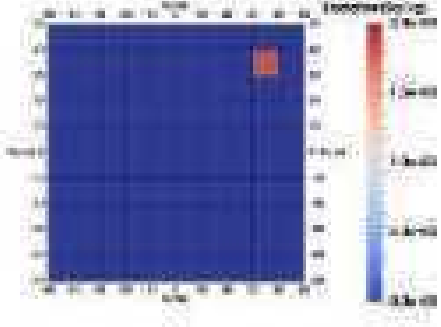
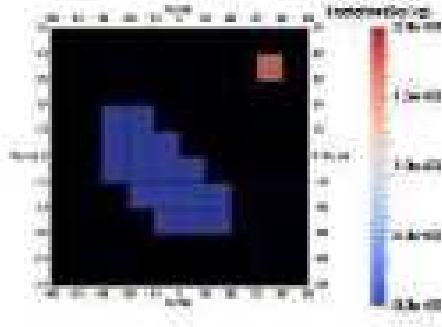
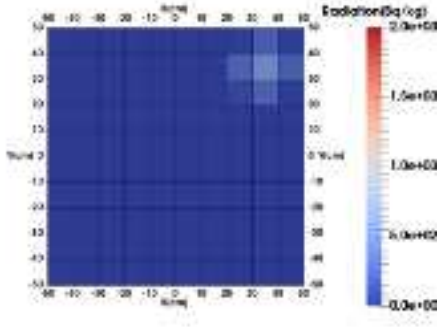
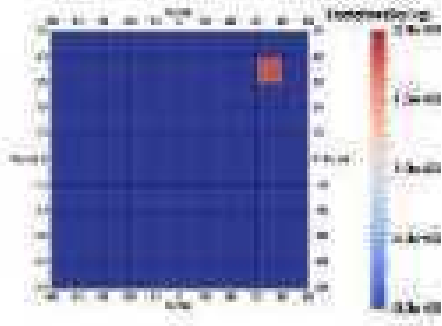
一般化逆行列		GVSPM 法	正規化が前提の手法のため、適用外
Tikhonov の正則化		ML-EM 法	
ART 法		MAP-EM 法	
SIRT 法		シンプレックス法	収束せず

図 I-B-7 正規化なしで推定した濃度分布(z=25)
※黒色のメッシュは負の値

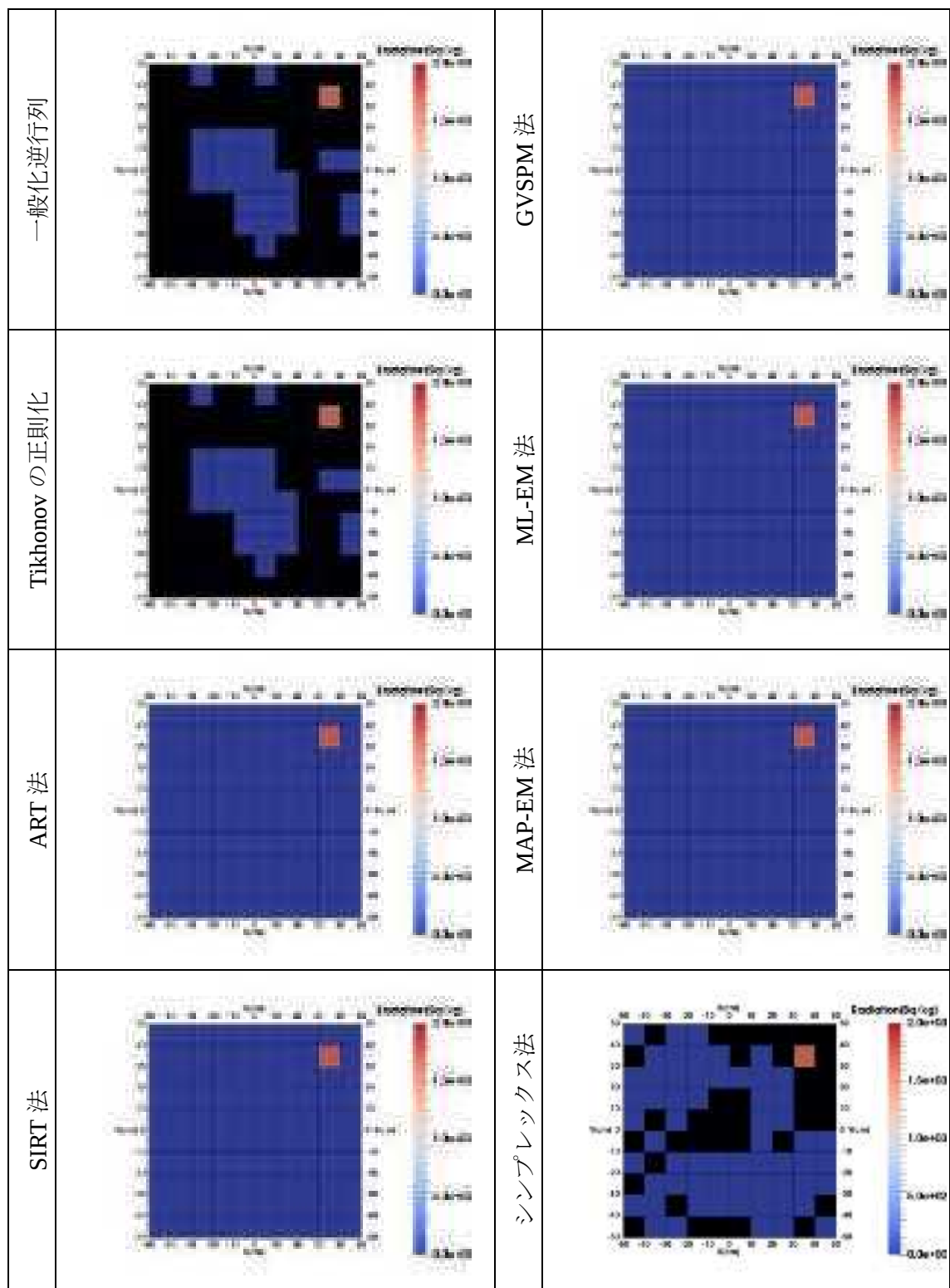


図 I-B-8 正規化ありで推定した濃度分布(z=25)
※黒色のメッシュは負の値

I-B-2.3. 線源が容器全体に一様に分布しているケース

線源が容器全体に一様に分布しているケースの解析条件を表 I-B-21 に示す。

仮想的な濃度分布[Bq/kg]は、以下の式 I-B-6 の通り設定した。設定した濃度分布を図 I-B-9 に示す。

$$q_j = 3.14993 \quad (j = 1 \sim 500) \quad \text{式 I-B-6}$$

解析に要した時間および反復回数を表 I-B-22 に示す。全ての反復的手法による解析は、収束条件を満たして終了した。シンプレックス法は他の手法に比べて多くの反復回数、解析時間を要している。

逆解析により推定された濃度分布を図 I-B-10～図 I-B-11、平均放射能濃度を表 I-B-23 に、 q_{err} を表 I-B-24 に示す。シンプレックス法の結果は、負の値を含んでおり、物理的には正しい分布ではない。特にシンプレックス法は負の値を含むことにより、他の手法に比べて、濃度分布の再現性が低くなった。これを改善するためには拘束条件付き最適化が可能な手法を用いる必要がある。正規化なしの場合、濃度を過小評価し、正規化ありの場合濃度を過大評価する傾向があった。

表 I-B-21 線源が容器全体に一様に分布しているケースの解析条件

資源化物寸法	幅 1m×奥行き 1m×高さ 0.5m
測定点	容器上面、底面および側面（計 6 面）、10 cm 間隔 容器表面からの距離 6cm $10 \times 10 \times 2 + 10 \times 5 \times 4 = 400$ 点
濃度分布メッシュ	10cm 間隔で分割 $10 \times 10 \times 5 = 500$ メッシュ
入力データ	グリーン関数：QAD の計算結果 真の濃度分布：式 I-B-6 によって設定（図 I-B-9） 測定値：グリーン関数、濃度分布から算出
正則化パラメータ	1×10^{-7}
SIRT 法の relaxation factor	1×10^{-2}
MAP-EM 法の制御パラメータ	1×10^{-5}
反復的手法の許容誤差	5×10^{-4}

表 I-B-22 線源が容器全体に一樣分布しているケースの解析時間および反復回数

	解析時間[s]		反復回数	
	正規化なし	正規化あり	正規化なし	正規化あり
一般化逆行列	2.19E-01	2.55E-01	-	-
Tikhonov の正則化	2.00E-01	2.01E-01	-	-
ART 法	3.75E+00	2.36E+00	4,656	2,898
SIRT 法	7.61E-01	4.52E+01	1,523	93,487
GVSPM 法	適用外	6.03E+00	適用外	16,902
ML-EM 法	5.18E-01	5.71E+01	568	65,096
MAP-EM 法	4.36E-01	5.77E+01	483	65,134
シンプレックス法	5.38E+04	2.83E+04	97,799,604	51,780,185

表 I-B-23 線源が容器全体に一樣分布しているケースの平均放射能濃度
(真の放射能濃度で正規化)

	正規化なし	正規化あり
一般化逆行列	0.95	1.22
Tikhonov の正則化	0.94	1.22
ART 法	0.91	1.31
SIRT 法	0.89	1.36
GVSPM 法	適用外	1.33
ML-EM 法	0.89	1.36
MAP-EM 法	0.91	1.36
シンプレックス法	0.72	2.23

表 I-B-24 線源が容器全体に一樣分布しているケースの q_{err}

	正規化なし	正規化あり
一般化逆行列	2.33E-01	1.02E+00
Tikhonov の正則化	2.35E-01	1.02E+00
ART 法	2.97E-01	1.20E+00
SIRT 法	3.24E-01	1.31E+00
GVSPM 法	適用外	1.19E+00
ML-EM 法	3.24E-01	1.31E+00
MAP-EM 法	2.80E-01	1.31E+00
シンプレックス法	9.03E-01	7.61E+00

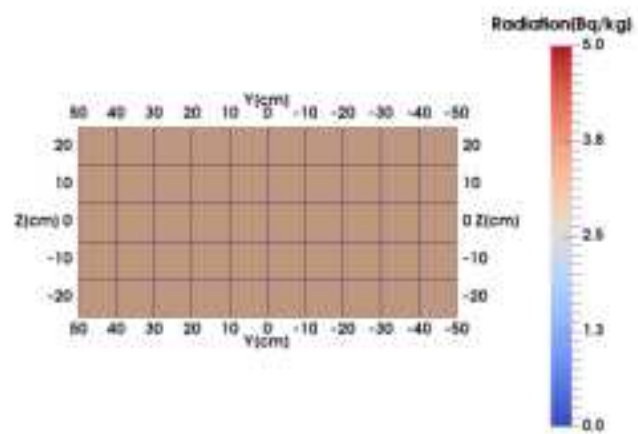


図 I-B-9 線源が容器全体に一様分布しているケースの真の濃度分布($x=0$)

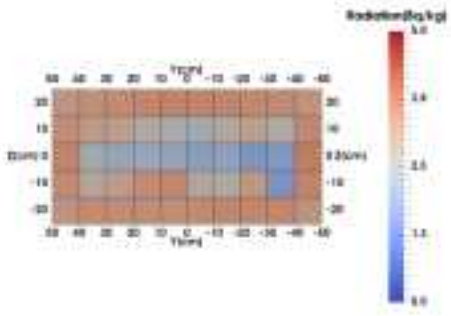
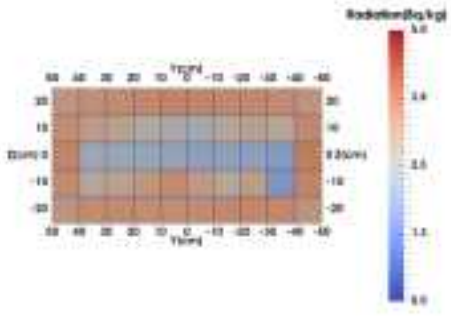
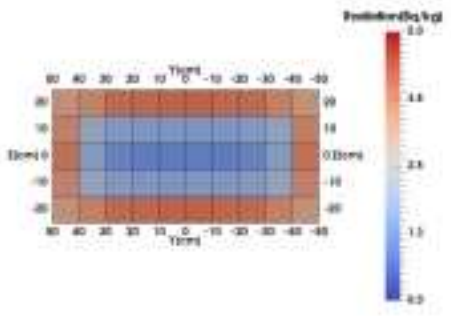
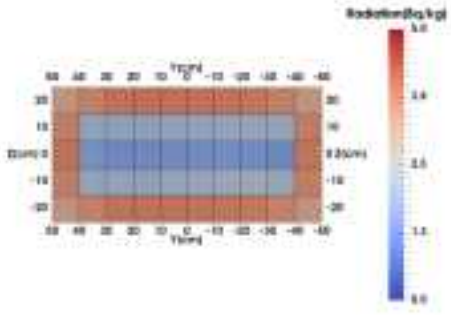
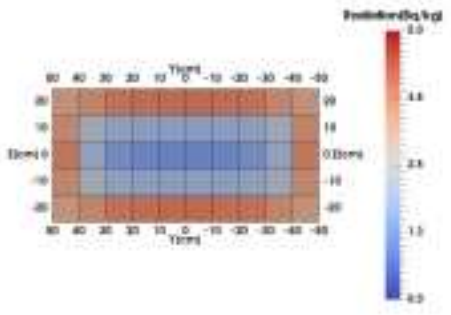
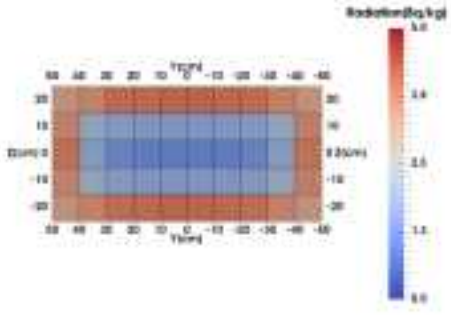
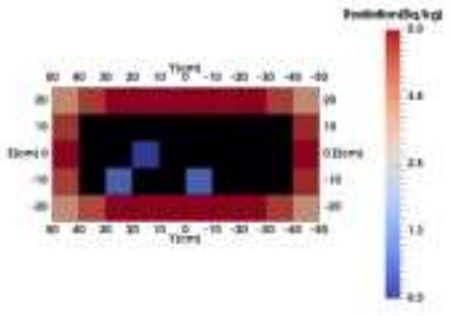
一般化逆行列		GVSPM 法	正規化が前提の手法のため、適用外
Tikhonov の正則化		ML-EM 法	
ART 法		MAP-EM 法	
SIRT 法		シンプレックス法	

図 I-B-10 正規化なしで推定した濃度分布(x=0)

※黒色のメッシュは負の値

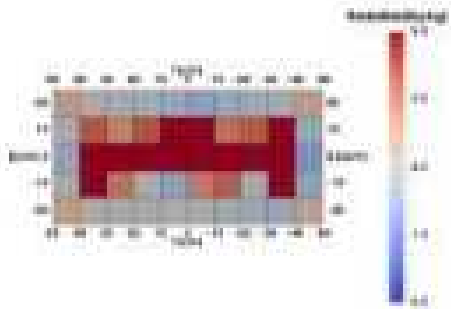
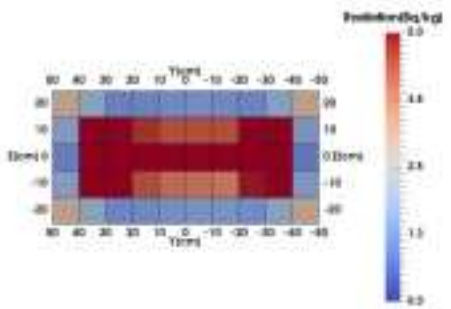
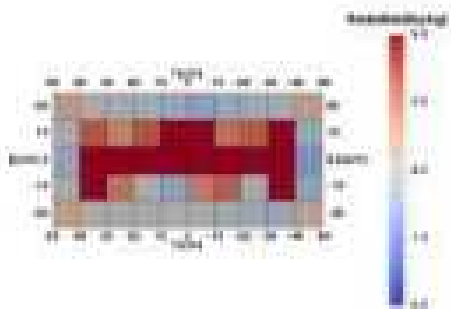
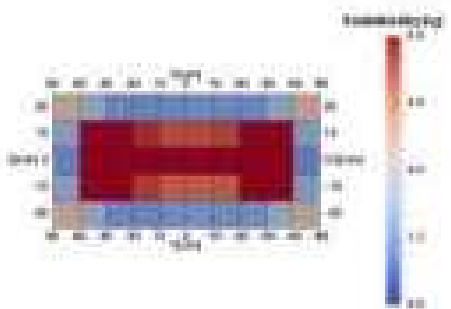
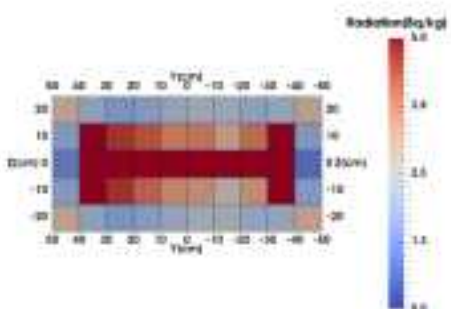
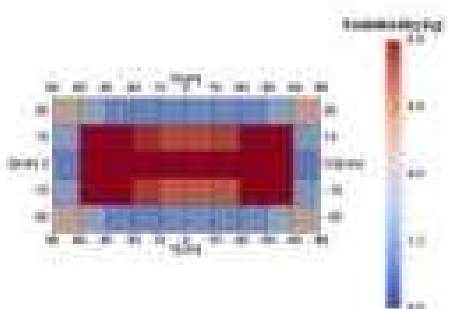
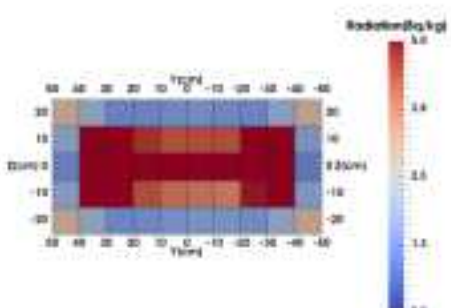
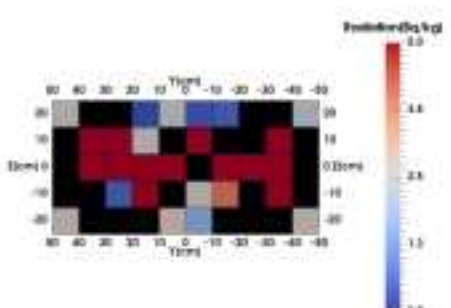
一般化逆行列		GVSPM 法	
Tikhonov の正則化		ML-EM 法	
ART 法		MAP-EM 法	
SIRT 法		シンプレックス法	

図 I-B-11 正規化ありで推定した濃度分布(x=0)

※黒色のメッシュは負の値

I-B-3 まとめ

(1) 逆解析手法の検証

I-B-1 では、 m および n の小さな関数に対して逆解析を行い、数値を確認した。解が一意に定まるような問題設定の場合、真の濃度分布と一致する解が得られた。解が一意に定まらないような問題設定の場合、真の濃度分布とは異なる濃度分布が推定された。この場合も推定された濃度分布から導かれる線量率は、真の濃度分布に対する線量率と一致しており、数学的には正しい解のひとつが得られていることを確認した。

(2) 仮想的な濃度分布の再現

I-B-2 では、以下の 3 つの仮想的な濃度分布が再現できるかどうかを確認した。

(1) 幅 1m×奥行き 1m×高さ 0.2m の資源化物の容器中心にホットスポットがあるケース

(2) 線源を幅 1m×奥行き 1m×高さ 0.5m の資源化物の容器の角に配置したケース

(3) 幅 1m×奥行き 1m×高さ 0.5m の資源化物の容器全体に一様に分布しているケース

計算結果は可視化した放射能濃度分布および、 q_{err} および平均放射能濃度（真の放射能濃度で正規化）で示した。平均放射能濃度（真の放射能濃度で正規化）が 1 に近いとき、また q_{err} が小さいときに再現性が高いといえる。本計算の結果で最も再現性が高いのは(2)の分布で（平均放射能濃度は 0.74～1.35、 q_{err} は 10^{-3} ～ 10^{-1} ）、最も再現性が低いのは(3)の分布を正規化ありで計算した場合（平均放射能濃度は 1.22～2.23、 q_{err} は 1.02～7.61）であった。

I-B-1 と I-B-2 の検証計算において、シンプレックス法では収束に至らないケースがあり、収束した場合でも他の手法に比べて多くの解析時間、反復回数が必要であった。シンプレックス法は、他の手法に比べて収束性の悪い手法であることが分かった。

参考文献

(1) JAEA 平成 27 年度「廃棄物の限定再利用に関する検討」報告書

Appendix- II

多様な逆解析条件のための濃度分布データ生成ツール

II-A 多様な逆解析条件のための濃度分布データ生成ツール

II-A-1 目的

反復的手法の逆解析によって放射能濃度分布を推定する場合、初期値として放射能濃度分布を与える必要があり、どのような初期値を与えるかによって収束する解が異なる場合がある。本文の4章においては、図 II-A-1 に示す4種類の分布を初期値として与えて分布の推定を行い、初期値が解の収束のしかたにどのように影響するかを調べた。しかし、図 II-A-1 は種類が少なく、かつ恣意的な選択を含んでおり、第4章で示した考察も、ごく限られた条件において得られたものでしかない。来年度は、発生しうるあらゆる濃度分布のパターンを網羅し、それを初期値として用いた分布推定により、初期値の影響を整理する予定である。そのためには、互いに異なる多数の濃度分布を生成し、なおかつ恣意性を取り除いたランダムな分布とするような手段が必要である。

そのため来年度の検討に向けた準備として、異なる放射能濃度のパターンを多数かつ無作為に生成するため、ラテン超方格法 (Latin hypercube sampling) によるデータセット生成コード LHS⁽¹⁾を用いたツールを開発し、それによりどのような分布を作成できるか確認した。

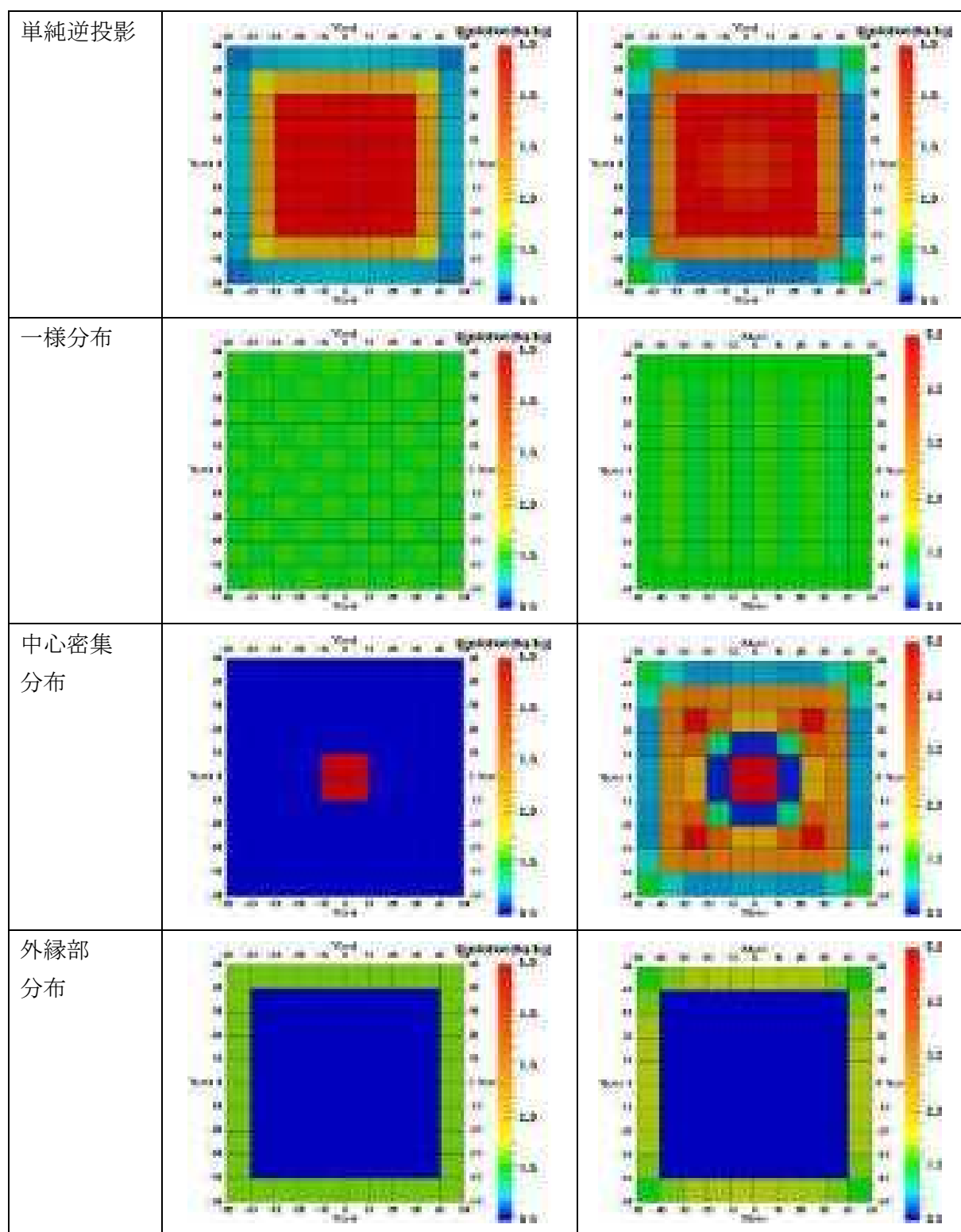


図 II-A-1 初期分布（左）と推定された分布の例（右・ML-EM 法）

II-A-2 ラテン超方格法を用いた濃度分布の生成方法

II-A-2.1. ラテン超方格法

ラテン超方格法 (Latin hypercube sampling) を用いたデータセット生成コード LHS を使用して異なる放射能濃度のパターンを多数かつ無作為に生成する。ラテン超方格法とは、サンプリング分布の偏りが無い層状サンプリングの一種である。2 つのパラメータでサンプリングした場合の例を図 II-A-2 に示す。両パラメータの値の分布をサンプリング数で等分する。この例では正規分布、一様分布の面積が等分された各 5 ブロックができる。5 回サンプリングが行われる各回で、両パラメータから 1 ブロックが無作為に選ばれ、同じブロックは 2 回選ばれない。1 ブロック内から無作為に一つの値が選ばれる。両パラメータのブロック分けで行列を作った場合は、同じ行、同じ列でサンプリングが重なることがない。このように偏りのないデータセットを生成する。N 個のパラメータでサンプリングする場合は N 次の行列となる。

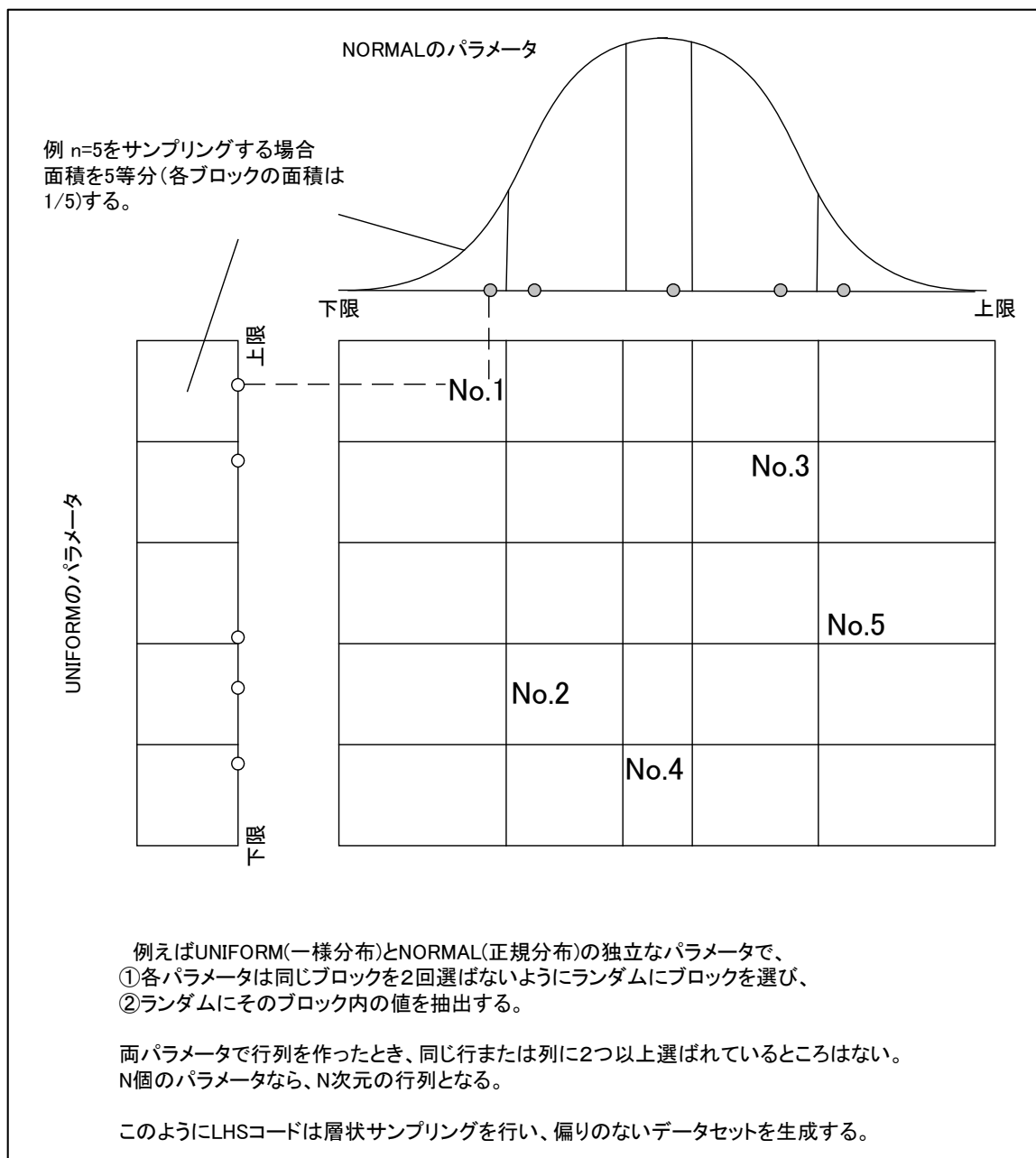


図 II-A-2 ラテン超方格の層状サンプリングの例

II-A-2.2. 濃度分布モデル

座標系(x, y, z)に対し、線源をメッシュ状のセルに分割し、各セルに通し番号jを割り当てる。x、y、z 方向のセル数をそれぞれ m_x 、 m_y 、 m_z 、セル幅をそれぞれ d_x 、 d_y 、 d_z 、原点の座標を (x_0, y_0, z_0) とすると、j 番目 ($j=0,1,2,\dots, m_x \times m_y \times m_z - 1$) の濃度分布の数値の座標 (x, y, z) は式 II-A-1 で表される。

$$\begin{aligned} n_z &= \text{int}\left(\frac{j}{m_x m_y}\right), z = n_z \times d_z + z_0 \\ n_y &= \text{int}\left(\frac{j - m_x m_y n_z}{m_x}\right), y = n_y \times d_y + y_0 \\ n_x &= \text{int}(j - m_x m_y - m_x n_y), x = n_x \times d_x + x_0 \end{aligned} \quad \text{式 II-A-1}$$

生成する濃度分布 $q(x, y, z)$ のモデルとして、式 II-A-2 式で表される Gauss 関数の重ね合わせを用いる。式 II-A-2 に使用されているパラメータを表 II-A-1 に示す。

$$q(x, y, z) = \delta q + \sum_k^P \frac{f_k}{\sqrt{2\pi}^3 \sigma_k^3} \exp\left[-\frac{\{(x - \bar{x}_k)^2 + (y - \bar{y}_k)^2 + (z - \bar{z}_k)^2\}}{2\sigma_k^2}\right] \quad \text{式 II-A-2}$$

P はガウス関数の混合数であり、P 個のガウス関数の重ね合わせで分布が表現されることを意味する。

表 II-A-1 のパラメータは、LHS 法による変動値を発生させて与えることで、互いに異なる複数のデータセットを作成する。なお、LHS により生成する変動値の形式は一様分布とする。

表 II-A-1 濃度分布モデルのパラメータ

No.	パラメータ	説明	単位	型
1	δq	Gauss 関数からの嵩上げ	Bq/kg	実数
3	f_k	Gauss 関数 k の高さ係数	Bq · cm ³ /kg	正の実数
4	$\bar{x}_k, \bar{y}_k, \bar{z}_k$	Gauss 関数 k の中心座標(x,y,z 方向)	cm	実数
5	σ_k	Gauss 関数 k の偏差	cm	正の実数

II-A-3 放射能濃度分布生成の確認

II-A-2 で整備した方法を用いて、想定通りの初期分布が生成できるか確認した。

II-A-3.3. 条件

表 II-A-2 に示すような範囲で LHS を用いて濃度分布のパラメータをサンプリングし、濃度分布データを生成した。ガウス関数の混合数 P は 1、2 および 3 とした。

δq 、 f_k 、 $\bar{x}_k$ 、 $\bar{y}_k$ 、 $\bar{z}_k$ はそれぞれの中央値を基準に下限値を中央値の 0.1 倍、上限値を中央値の 10 倍とした。なお、 σ_k は下限値を中央値の 0.7 倍、上限値を中央値の 1.3 倍とした。

濃度 q の下限値および上限値は、式 II-A-2（1 つのガウス関数）に表 II-A-2 の中央値を代入した式（式 II-A-3）の下限値および上限値として設定した。（これによって、複数のガウス関数同士が重なり合っても、1 つのガウス関数の最大値を超えることがないようにしている。）

$$q(x, y, z) = \delta q + \sum_k^P \frac{f_k}{\sqrt{2\pi}^3 \sigma_k^3} \exp \left[-\frac{\{(x - \bar{x}_k)^2 + (y - \bar{y}_k)^2 + (z - \bar{z}_k)^2\}}{2\sigma_k^2} \right] \quad \text{式 II-A-3}$$

$$\rightarrow 1 + 100 \times \exp \left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{2 \cdot 10^2} \right)$$

表 II-A-2 濃度分布生成確認用のパラメータ

パラメータ	中央値	下限値	上限値
q	—	0	101
δq	1	0.1	10
f_k	154960 ($f_k = 100 \times \sqrt{2\pi}^3 \cdot 10^3$)	15496	1549600
$\bar{x}_k$	0	-50	50
$\bar{y}_k$	0	-50	50
$\bar{z}_k$	0	-10	10
σ_k	10	7	13

LHS によるサンプリング数 N は、P=1 が 100、P=2 が 100、P=3 が 100 の合計 300 とした。

II-A-3.4. 生成された濃度分布のデモンストレーション

II-A-3.3 の条件で得られた 300 個のサンプリング結果により、300 個の濃度分布を生成した。その一部を可視化する。生成した濃度分布のうち一部を抽出し、 $z=0$ の XY 断面として可視化して、図 II-A-3～図 II-A-5 に示す。

分布番号ごとにガウス関数の混合数が異なり、分布番号 1～100 はガウス関数の混合数 1 (図 II-A-3)、101～200 は混合数 2 (図 II-A-4)、201～300 は混合数 3 (図 II-A-5) の分布である。各画像の直上の数字は、分布番号である。

図 II-A-3～図 II-A-5 のそれぞれで、分布番号より一定間隔で抽出した分布 10 個を並べて示す。さらにそれ以外の分布のうち、特徴的と考えられるものを 2 つ選定し、最下段の第 2・第 3 列に示す。

図 II-A-3～図 II-A-5 には、図 II-A-1 には含まれなかった無作為的な分布が多数含まれており、それらの取得が可能であることが確認できた。

たとえばガウス関数の混合数 1 (図 II-A-3) の分布において、線源の大きさは多種存在し、分布番号 51 や 81 のように容器のかかなりの体積を占めるものから、15 のような点線源に近いものまで生成できた。また混合数 2 (図 II-A-4) や混合数 3 (図 II-A-5) では、分布番号 111 や 261 のように数か所に線源が分散しているものも含まれた。また 200 や 285 のように、複数の線源が混ざりあって非対称的な線源の形となっているものも含まれた。

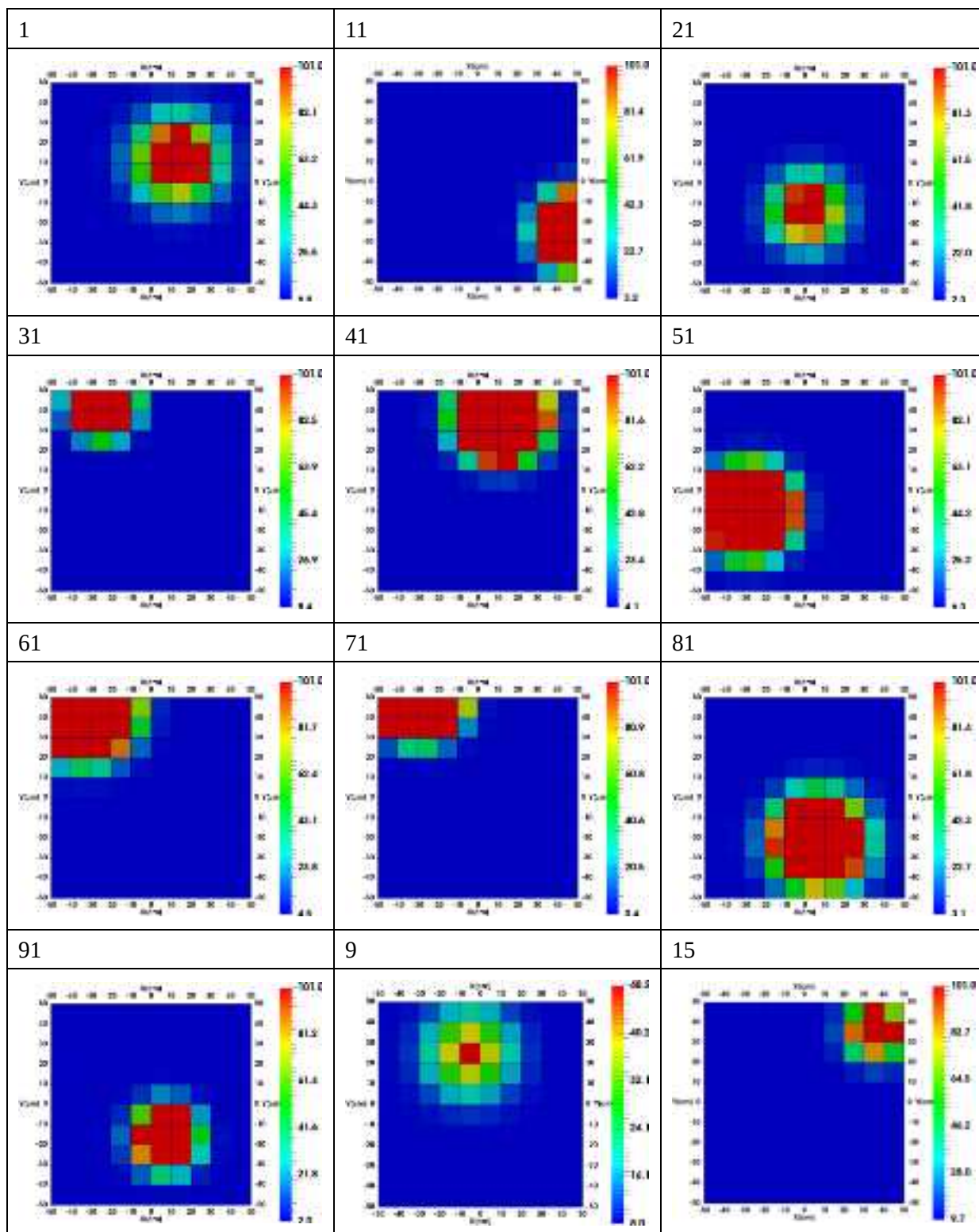


図 II-A-3 生成された濃度分布の例（ガウス関数混合数 1）

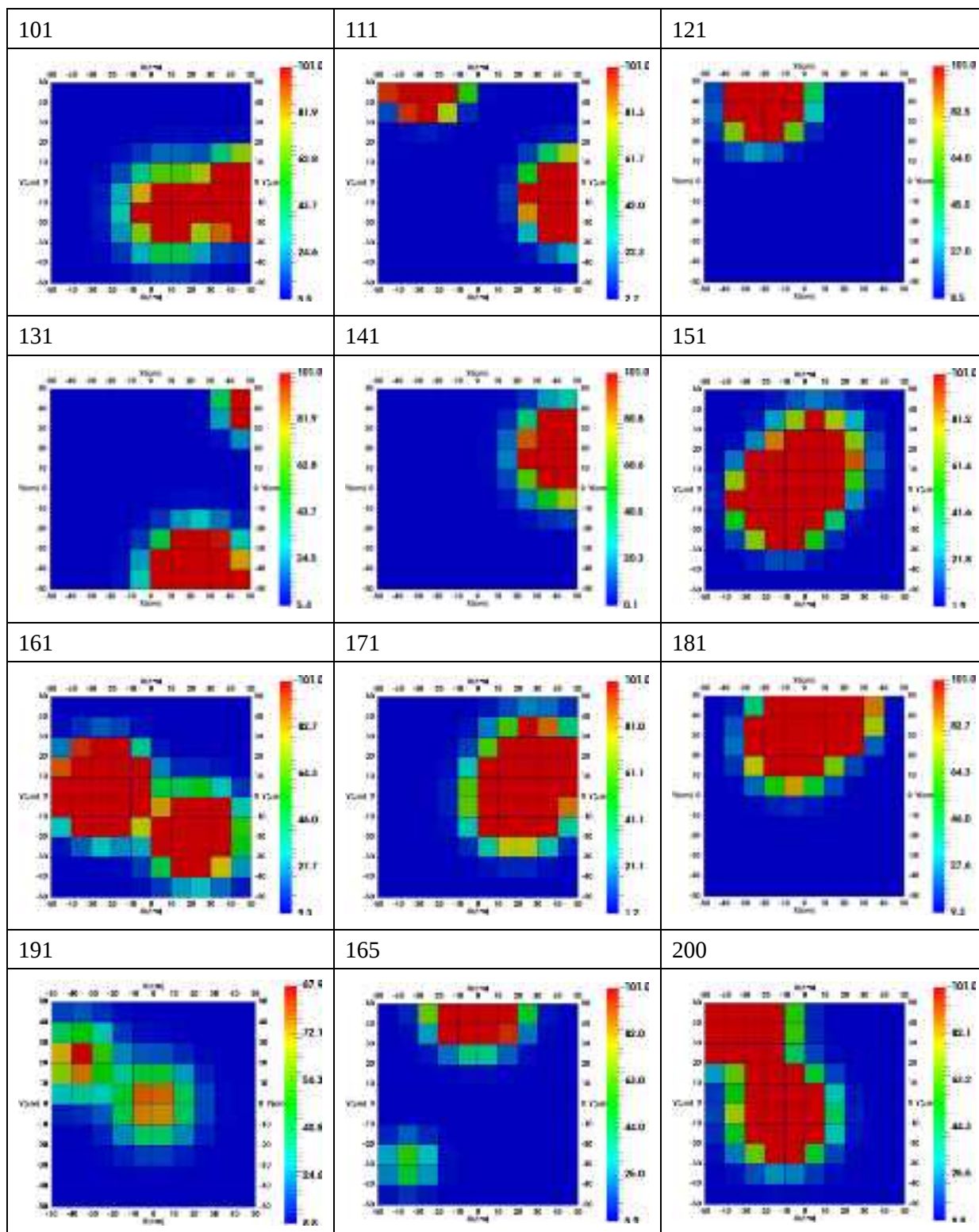


図 II-A-4 生成された濃度分布の例（ガウス関数混合数 2）

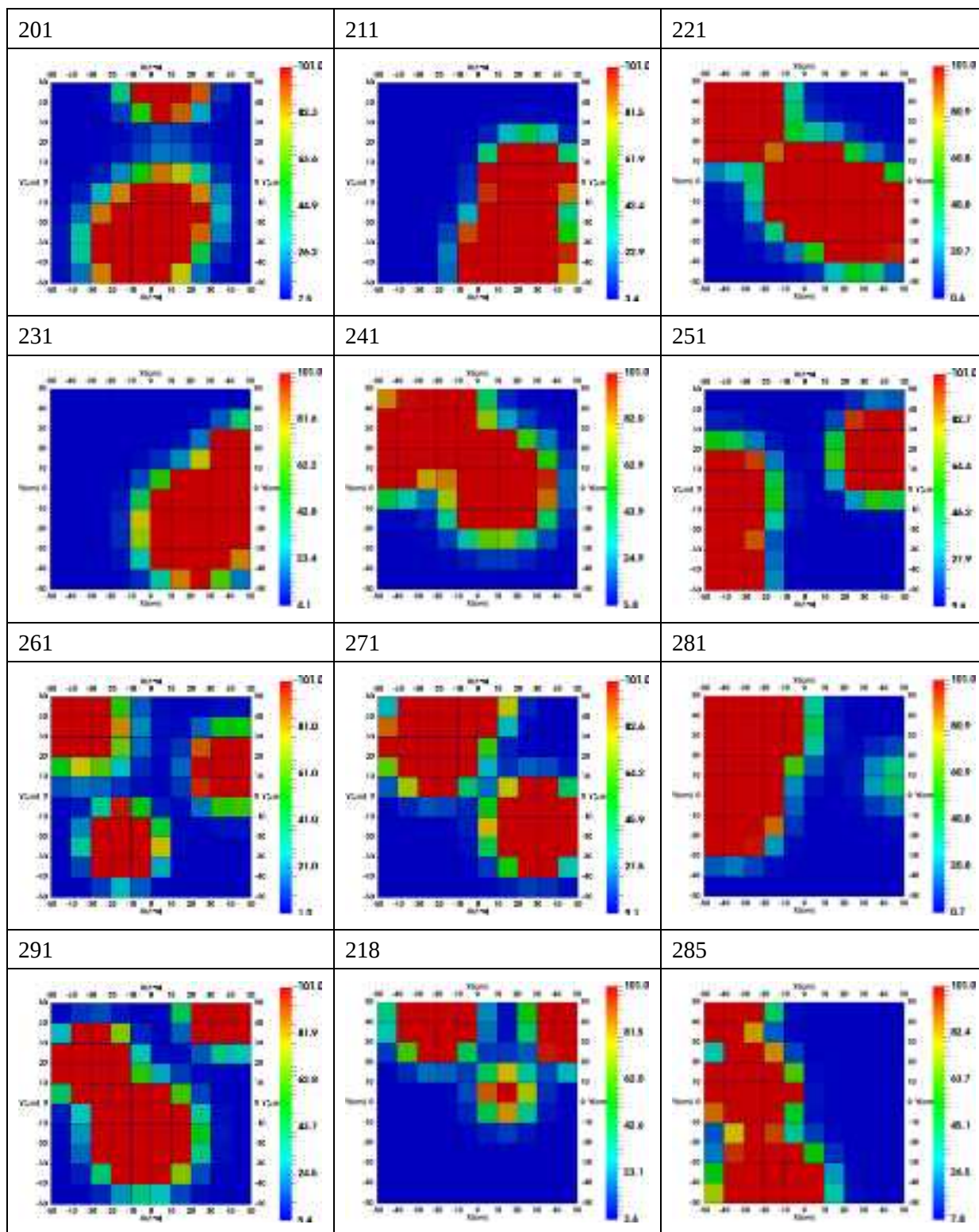


図 II-A-5 生成された濃度分布の例（ガウス関数混合数 3）

II-A-4 まとめと今後の活用方針

ラテン超方格法 (Latin hypercube sampling) によるデータセット生成コード LHS を用い、異なる放射能濃度のパターンを多数かつ無作為に生成することができることを確認した。来年度はパラメータを吟味し、適切な濃度分布生成の条件を検討した上で、逆解析による放射能濃度分布推定に適用し、初期値の影響を整理する。

また今回使用した濃度分布の生成方法は、初期分布以外にも、真の放射能濃度分布を生成するためにも活用可能であり、そちらについても議論を深めていく方針である。

参考文献

- (1) Ronald L. Iman, Michael J. Shortencarier,
A FORTRAN 77 Program and User's Guide for the Generation of Latin Hypercube
and Random Samples for Use With Computer Models,
NUREG/CR-3624, SAND83-2365, 1984

Appendix-III

検討委員会委員名簿

平成 28 年度

「廃棄物の限定再利用に関する検討」

検討委員会

委員名簿

III-A 平成 28 年度「廃棄物の限定再利用に関する検討」検討委員会

委員名簿

	氏 名	所属・職位
委員長	井口 哲夫	名古屋大学大学院 工学研究科 量子工学専攻 教授
委員	飯本 武志	東京大学 環境安全本部 准教授
〃	高橋 知之	京都大学原子炉実験所 准教授
〃	新堀 雄一	東北大学大学院 工学研究科 教授

検討委員会開催日

第 1 回 平成 28 年 8 月 2 日

第 2 回 平成 28 年 12 月 22 日

第 3 回 平成 29 年 2 月 24 日