

北港処分地（夢洲 1 区）における広域処理災害廃棄物焼却灰埋立時の放射性セシウムの挙動に関する評価

－吸着能強化による放射性セシウムの挙動評価－

独立行政法人国立環境研究所
資源循環・廃棄物研究センター

1. 本評価の位置付け

本参考資料は、北港処分地（夢洲 1 区）へ東日本大震災により発生した災害廃棄物の広域処理廃棄物焼却灰を埋立てた際、受入予定区画直下の土壌層（第 2 覆土層）近傍での放射性セシウムの挙動について評価したものである。数値シミュレーションによって、災害廃棄物焼却飛灰の受入予定区画の底部にて放射性セシウムの吸着能を強化した際の封じ込め機能について予測した。

2. 吸着能強化シナリオの設定

沈下後の埋立標準断面（図 1）を用いて影響評価を行った際、残余水面部での到達地点で濃度限度を下回ることが確認されたが、更に保守的な考え方として、受入予定地下部における放射性セシウム吸着能を強化するため、既存の第 2 覆土層上部に吸着性の高いゼオライトを 20 cm 敷設するケースについて検討を行った。模式断面図を図 2 に示す。沈下後の受入予定区画底面は D.L.+2.00 であり、廃棄物層内の保有水水位と一致している。吸着能強化のためのゼオライトは、その上に 20 cm 敷設されることになる。報告書本文に示した内容と同様の手法によってシミュレーションを実施し、POC での濃度と第 2 覆土層直下（以下、覆土下とする）での濃度について評価した。図 3 にシミュレーションに使用した模式断面図を示す。

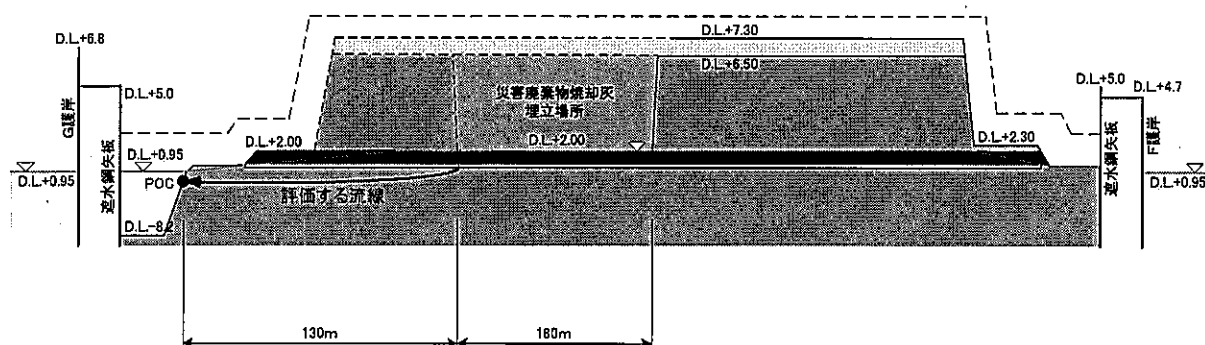


図 1 沈下後の標準的な評価シナリオ断面図

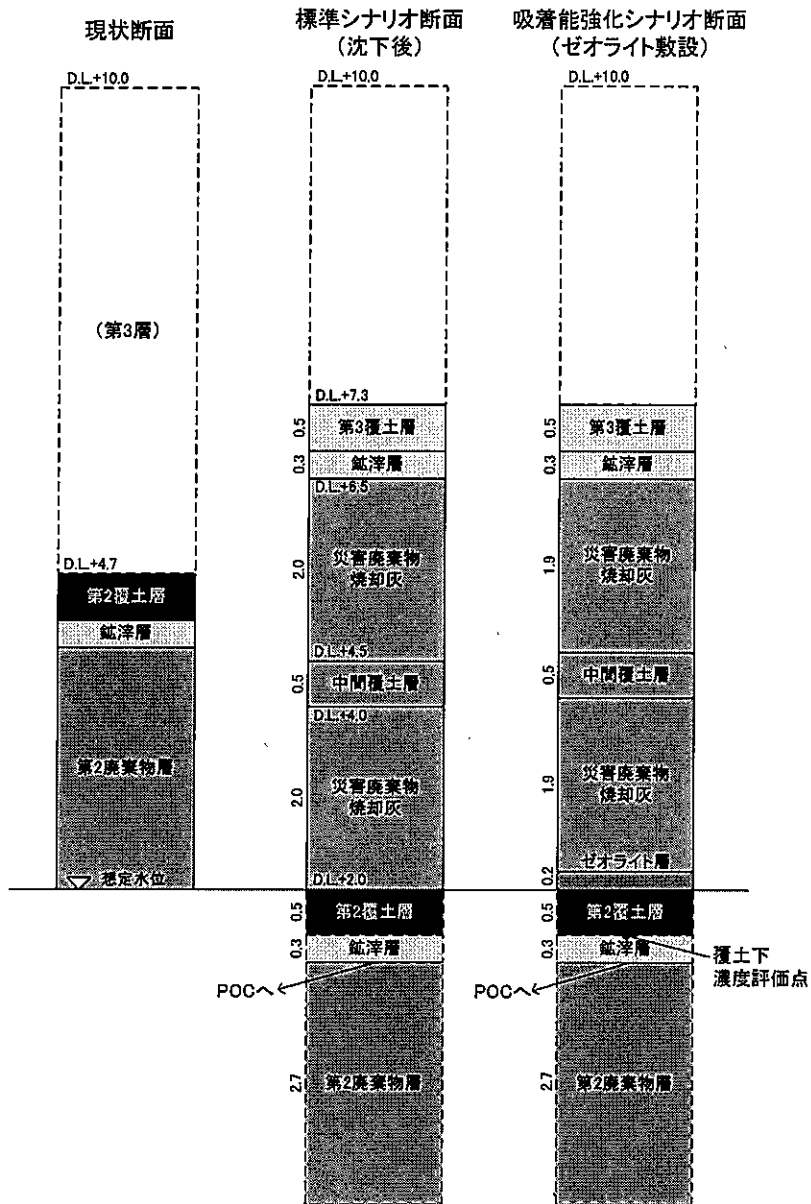


図2 ゼオライト敷設シナリオの詳細断面図

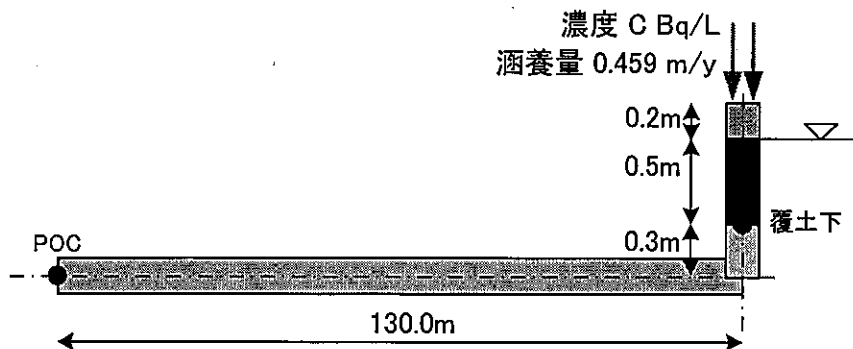


図3 ゼオライト敷設シナリオの解析模式図

4. ゼオライトの材料パラメーター

ゼオライトには A 型、X 型、モルデナイト、チャパサイト等、いくつもの種類があり、セシウムに対する吸着能もそれぞれ異なる。また、ゼオライトはストロンチウム吸着型とセシウム吸着型に分類される。モルデナイトはセシウム吸着型といわれており、国立環境研究所にて、関東地方の一般廃棄物飛灰溶出液を用いて実施したバッチ吸着試験では、顆粒ゼオライト（モルデナイト：陽イオン交換容量（CEC）=140 cmol/kg）の ^{134}Cs に対する分配係数は 420 mL/g、 ^{137}Cs では 530 mL/g であった^a。飛灰溶出液と天然海水との組成について表 1 に示す。このバッチ吸着試験に用いた供与液は、表 1 の飛灰溶出液 2 に相当する溶液であり、その導電率は 2,100 mS/m であった。ゼオライトの吸着能が導電率に依存する訳ではないが、飛灰溶出液を供与液として用いた場合、導電率が上昇すると分配係数が小さくなる（吸着能が低下する）傾向が確認されている（正確には陽イオンの組成によると考えられる）。同じ顆粒ゼオライト（モルデナイト）を用いて、飛灰溶出液 1（導電率 5,000 mS/m）を供与液としてバッチ吸着試験を実施すると、 ^{137}Cs に対する分配係数は 280 mL/g となった。日本原子力学会バックエンド部会の基礎データ^bでは、海水 100% に対するゼオライト（モルデナイト）の吸着データが公表されており、その値をまとめると図 4 のようになる。天然海水 100% を供与液として用いたバッチ吸着試験より求められた安定セシウムに対する分配係数は 300~500 mL/g が最も多く、500mL/g 以上のモルデナイトも存在する。ただし、海水と飛灰溶出液は組成が異なり、特にカリウム濃度が大きくことなることから、海水と同様の性能が発揮すると断定することはできない。

表 1 飛灰溶出液（液固比 10）2 種と天然海水の組成

	単位	飛灰溶出液 1	飛灰溶出液 2	海水 ¹⁾
pH		12.5	12.1	8.0
導電率	mS/m	5,000	2,100	4,640
合計 Cs 濃度	Bq/L	670	763	< 21.8
^{134}Cs 濃度	Bq/L	305	356	< 11.5
^{137}Cs 濃度	Bq/L	365	407	< 10.3
Na 濃度	mg/L	4,220	1,520	8,850
K 濃度	mg/L	4,800	2,750	324
Mg 濃度	mg/L	< 0.05	< 0.5	1,130
Ca 濃度	mg/L	2,640	1,250	343
安定 Cs 濃度	mg/L	0.26	0.15	< 0.001
Cl 濃度	mg/L	13,900	—	17,100

¹⁾ 東京湾の海水を国立環境研究所で分析した値

^a 独立行政法人国立環境研究所（2012）：放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分（技術資料 第二版），http://www.nies.go.jp/shinsai/techrepo_r2_120326.pdf

^b 日本原子力学会バックエンド部会（2011）：福島第一原子力発電所内汚染水処理技術のための基礎データ収集，<http://www.nuce-aesj.org/doku.php?id=projects:clwt:start>

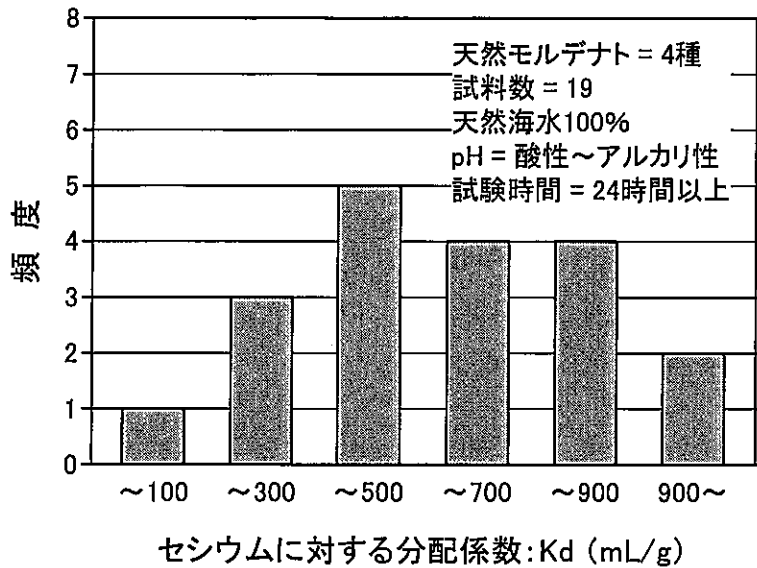


図4 天然海水 100%を用いた安定セシウムの分配係数頻度分布

これまで得られてきた知見より、飛灰溶出液を対象とした場合であっても放射性セシウムに対して 300 mL/g 以上の分配係数は期待できると考えられることから、本シミュレーションでは放射性セシウムに対するゼオライトの分配係数を 300 mL/g として設定した。また、ゼオライト層厚は 20 cm としていることから、分散長の値には 0.01 m を与えた（分散長の設定に関する詳細は報告書本文に記載）。

5. 評価ケース（焼却飛灰濃度）

大阪府の指針^aによれば、焼却前の災害廃棄物受入基準は最大で 100 Bq/kg と定められている。受け入れた災害廃棄物を大阪市の既存の焼却炉で混焼することを想定し、10%混焼する場合、20%混焼する場合の2ケースについて放射性セシウム濃度の算定を行った。

焼却された災害廃棄物に含まれる放射性セシウムの全てが飛灰に移行すると仮定した。大阪府の飛灰発生率は、焼却前の一般廃棄物の質量に対して 2.86% と計算されていることから、焼却前の放射性セシウム濃度に対して、飛灰の濃度は 35.0 倍の濃度になる。表 2 に飛灰の放射性セシウム濃度の計算結果を示す。これより、10%混焼時の飛灰中の放射性セシウムの最大濃度（受入災害廃棄物が全て 100 Bq/kg とした計算）は 350 Bq/kg、20%混焼時の最大濃度は 700 Bq/kg と計算される。また、大阪府の指針^aでは、埋立作業時の被曝限度から計算される埋立廃棄物の最大許容濃度が示されており、その値は 2,000 Bq/kg である。混焼率から考慮すると、飛灰濃度が 2,000 Bq/kg に到達することは考えにくい。混焼時の評価と併せて、被曝限度から示される最大許容濃度である 2,000 Bq/kg の飛灰埋立についても本評価の対象とした。

^a 大阪府域における東日本大震災の災害廃棄物処理に関する指針（平成 23 年 12 月 27 日）

飛灰からの放射性セシウムの溶出率は大きいことから、飛灰に含有する全ての放射性セシウムが水へと溶解するとし、溶出率 100% を想定した。飛灰層の見かけ密度（乾燥密度）を $1,500 \text{ kg/m}^3$ 、飽和時の体積含水率（間隙率）を 0.40 と設定しているため、単位容積の廃棄物層を考えると、固相である飛灰が $1,500 \text{ kg}$ あり、間隙水が 400 kg (0.4 m^3) あることになる。100% 溶出が瞬時に生じることを仮定して、間隙水中の放射性セシウム濃度 (^{134}Cs と ^{137}Cs の合計) を計算すると表 3 になる。10% 混焼時の間隙水最大濃度は $1,313 \text{ Bq/L}$ 、20% では $2,625 \text{ Bq/L}$ 、 $2,000 \text{ Bq/kg}$ の飛灰を想定した場合は $7,500 \text{ Bq/L}$ となり、この 3 ケースについて評価した。

表 2 災害廃棄物を一般廃棄物と混焼した時の飛灰中放射性 Cs 濃度

受入時の災害廃棄物の最大 Cs 濃度 ① (Bq/kg)	一般廃棄物との混焼率 ② (%)	混焼時廃棄物の最大 Cs 濃度 ③ = ①×② (Bq/kg)	焼却飛灰への濃縮率 ④ (倍)	飛灰中の最大 Cs 濃度 ⑤ = ③×④ (Bq/kg)
100	10	10	35.0	350
	20	20	35.0	700
被曝限度から計算される最大許容濃度				2,000

表 3 飛灰濃度から求められる間隙水の放射性セシウム濃度

	飛灰濃度 (Bq/kg) ①	単位容積の間隙水量 (m^3) ②	単位容積の飛灰量 (kg) ③	間隙水濃度 (Bq/L) ①×③÷②
10% 混焼時 最大濃度	350	0.400	1,500	1,313
20% 混焼時 最大濃度	700			2,625
2,000 Bq/kg 想定時	2,000			7,500

6. 吸着能強化時のシミュレーション結果

受入予定地のうち、最も残余水面（放流水側）に近い位置に、飛灰のみが高さ 4 m で埋め立てられた場合に、最も濃度が高くなると推定される流線をシミュレーション評価の対象（図 1）として、一次元移流分散反応方程式を COMSOL ver4.2a を用いてシミュレーションした。濃度の時系列変化は、第 2 覆土層の直下である覆土下と、残余水面部の POC の 2 地点に着目して結果を整理した。

覆土下における計算結果を図 5 に示し、覆土下と POC におけるピーク濃度について表 4 にまとめた。表 4 にはゼオライト敷設を行わない場合の計算結果（本文中の標準シナリオ計算結果）についても併記して比較した。図 6 に標準シナリオにおける POC と覆土下の

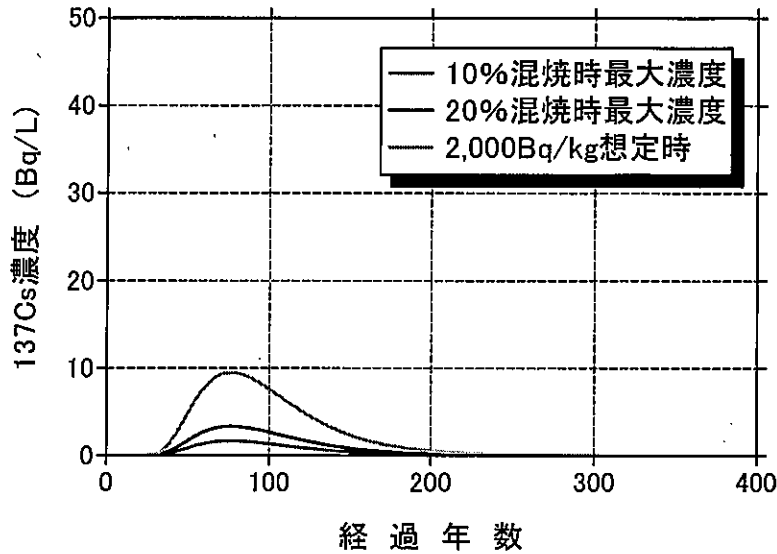


図5 覆土下における濃度変化 (Kd=300 ゼオライト 20cm 敷設時)

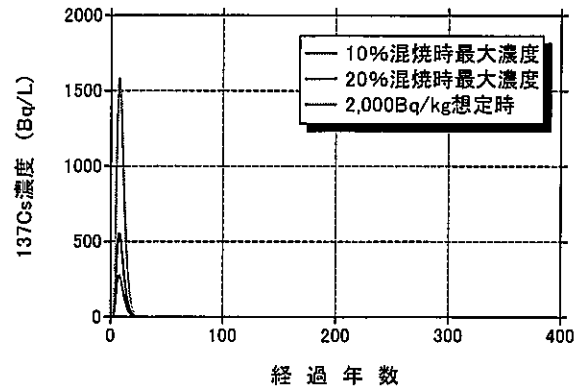
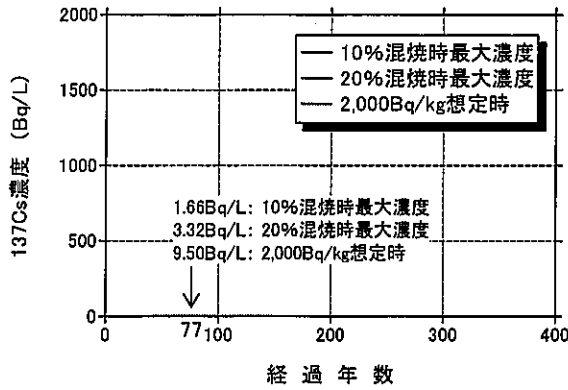
表4 ゼオライト (Kd=300mL/g) 敷設時の覆土下と POC のピーク濃度

評価地点		覆土下		POC		
ゼオライト有無		20cm	なし	20cm	なし	
10% 混焼時 最大濃度	¹³⁷ Cs ピーク濃度	Bq/L	1.66	276	0.0302	0.944
	ピーク出現年数	年	77	8	243	166
	濃度限度比	—	—	—	0.0003	0.0105
20% 混焼時 最大濃度	¹³⁷ Cs ピーク濃度	Bq/L	3.32	552	0.0604	1.89
	ピーク出現年数	年	77	8	243	166
	濃度限度比	—	—	—	0.0007	0.0210
2,000 Bq/kg 想定時	¹³⁷ Cs ピーク濃度	Bq/L	9.50	1,578	0.172	5.39
	ピーク出現年数	年	77	8	243	166
	濃度限度比	—	—	—	0.0002	0.0599

¹³⁷Cs 濃度の経時変化を示し、図7にゼオライト敷設時の経時変化を示す。

10% 混焼時に想定される最大濃度にて埋立てが行われた場合、覆土下のピーク濃度は 1.66 Bq/L と計算され、ピーク出現年数は 77 年後であった。ゼオライトを敷設しないケースと比較すると、69 年間の違いがあり、分配係数 300 mL/g のゼオライトを敷設することで、時間遅れが生じ、その間の減衰効果もあり、濃度が低下したと考えられる。また、ゼオライト敷設時には、2,000 Bq/kg の埋立てを想定した場合であっても、覆土下のピーク濃度は 10 Bq/L を下回る結果となり、既存の第 2 覆土層までの 70 cm の距離で封じ込め効果が発揮されているといえる。POC での濃度も大きく減少し、20% 混焼時の最大濃度で飛灰の埋立てが行われた場合でも POC のピーク濃度は 0.0604 Bq/L となり、ゼオライト敷設な

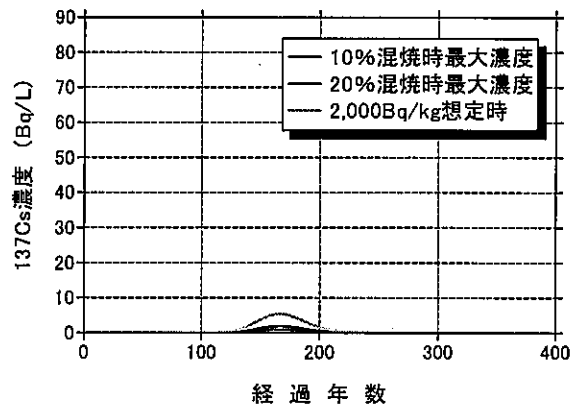
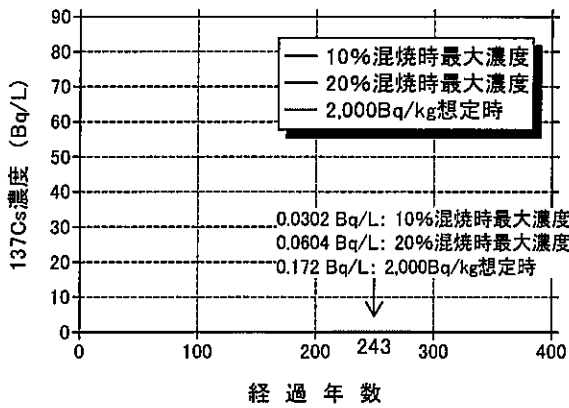
しのケースに比較して 3/100 程度の濃度まで減少させることが可能である。



(a) ゼオライト敷設時の覆土下

(b) 標準シナリオの覆土下

図 6 ゼオライト敷設時と標準シナリオの覆土下における濃度変化
(ゼオライト敷設時の覆土下の図は図 5 の再掲)



(a) ゼオライト敷設時のPOC

(b) 標準シナリオのPOC

図 7 ゼオライト敷設時と標準シナリオのPOCにおける濃度変化

7. ゼオライトの吸着能や敷設厚さの影響

ゼオライト敷設シナリオでは、放射性セシウムに対する分配係数を 300 mL/g、敷設厚さ 20 cm に固定して評価したが、ここでは、敷設厚さが 20 cm であり、分配係数が 200、400 mL/g であった場合と、分配係数が 300 mL/g で敷設厚さを 10、30cm に変えた場合について評価した。飛灰濃度には最も高い想定である 2,000 Bq/kg の値を用いた。計算結果を図 8、9 に示す。

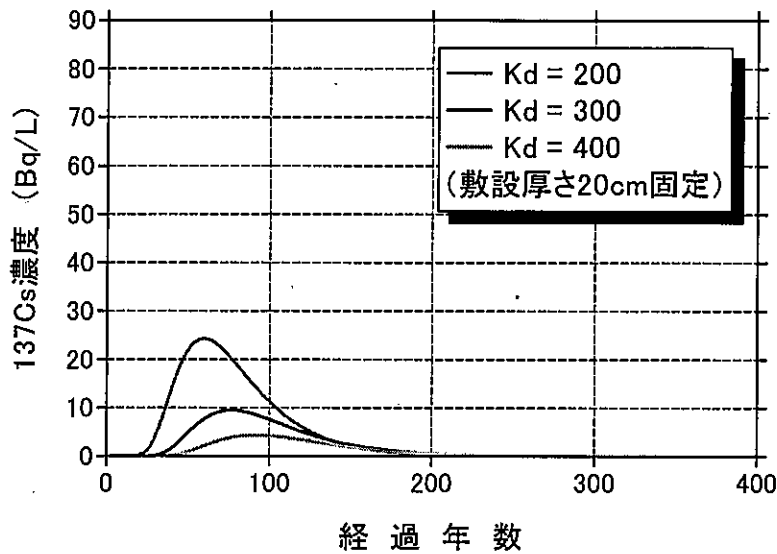


図 8 覆土下の濃度に及ぼす分配係数の影響（層厚 20cm 敷設時）

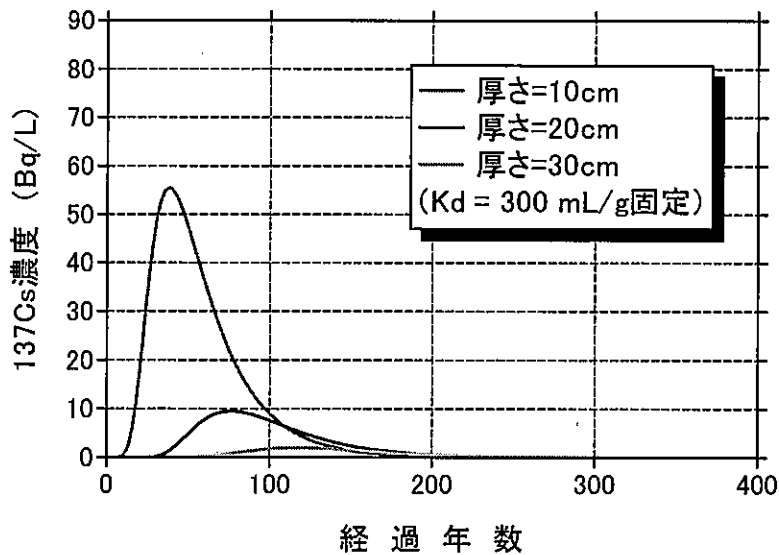
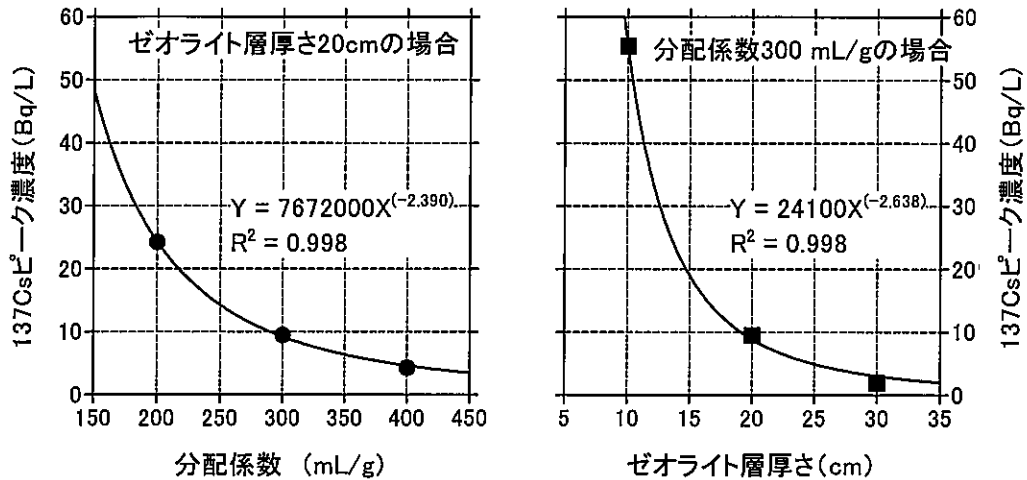


図 9 覆土下の濃度に及ぼすゼオライト層厚の影響（分配係数 300 mL/g）

分配係数の増加に伴い、ピーク濃度が減少し、ピーク出現年数も長くなっていることが確認できる。分配係数が 400 mL/g 以上になれば、層厚 20 cm 敷設によって、覆土下（埋立層から 70 cm）のピーク出現年数を 100 年以上に遅延させることが可能となる。ゼオライト敷設厚さの影響をみた場合、20 cm から 30 cm の変化に比較して、10 cm の場合の濃度が高く、その差が大きい。ゼオライトの分配係数や設置層厚さに関するピーク濃度の変化を図 10 にまとめた。近似曲線も同時に描いたが、この近似式には適用範囲があると考えられ、図中のプロットの範囲では、ある程度予測可能と思われる。



(a) 分配係数の影響

(b)ゼオライト層厚の影響

図 10 覆土下のピーク濃度に対する分配係数と層厚の影響

8. まとめ

広域処理された災害廃棄物焼却灰を夢洲 1 区に埋立てる際、埋立層下部の吸着能を強化する目的でゼオライトを敷設した場合について、既に設置されている第 2 覆土層下端のピーク濃度に着目した評価を行った。受け入れる災害廃棄物の全てが受入可能な最大濃度である 100 Bq/kg である場合を想定し、大阪市的一般廃棄物に対して災害廃棄物を 10% 混焼する場合、20% 混焼する場合について評価した。併せて、埋立作業時の被曝限度より求めた 2,000 Bq/kg の焼却灰を埋立てた場合についても評価した。焼却灰は、主灰と飛灰があるが、溶出率の高い飛灰のみが、縦方向に 4 m 積み上げられる場合を想定した。その結果、災害廃棄物焼却灰の下部（第 2 覆土層の上）に、分配係数 300 mL/g のゼオライトを厚さ 20 cm で敷設することによって、第 2 覆土層下端でピーク濃度が 10 Bq/L 以下となることが確認された。これより、分配係数 300 mL/g 以上のゼオライトを 20 cm 厚さで敷設することの有効性が示された。分配係数の違いに比較して敷設厚さの方が、放射性セシウムのピーク濃度に与える影響が大きいと観察されることから、薄層にてゼオライトを敷設する場合、設計時の層厚を確実に確保できるような施工品質管理が求められる。また、飛灰の組成は焼却工場によって異なることから、混焼する予定の工場の飛灰の特性を把握しておき、土壌やゼオライトに対する吸着能試験を実施することが望ましい。