

研究グループ

「災害廃棄物等の海域処分に関する研究」

の一部成果

放射性廃棄物等への海面処分技術適用の可能性

(正) 鈴木 武 (国土技術政策総合研究所) (賛) 江口信也 (五洋建設 (株))
 (賛) 木俣陽一 (若築建設 (株)) (賛) 田谷全康 (東亜建設工業 (株))
 (賛) 山崎智弘 (東洋建設 (株)) (賛) 高橋栄悦 (五洋建設 (株))
 (賛) 古賀大三郎 (五洋建設 (株))

1. まえがき

除染廃棄物や除去土壌の貯蔵・処分については、様々な陸上の廃棄物処分技術が適用検討されている。一方、現時点で海面処分技術は適用の必要性が低いが、技術的見地からは、どの程度の適用性が見込めるか把握しておくことは重要といえる。

海面処分場には大規模、公衆離隔、移流拡散環境への設置、地震(津波)被災リスク等の特性がある。本報告は、これらの特性を放射性廃棄物等の処分適性の点から検証した、技術適用可能性調査である。検討では、レベル2地震動への耐性を考慮した200万m³級の管理型海面処分場を試設計し、整備コストと放射線曝露リスクを試算して陸上の検討事例と比較する。

2. 管理型海面処分場の試設計

2.1 設計方針 机上検討例として、北日本太平洋側の港湾における処分場整備を想定する(図-

1)。設計用の地盤・波浪条件は、国土交通省の現地公開情報等を使用する。処分場は、大規模処分容量の確保、整備期間の短縮、変動状態(レベル1地震動)での護岸安定と遮水性確保、偶発状態(レベル2地震動)での護岸変形の許容と遮水性確保、津波による埋立対象物の流出防止を考慮した設計とする。ただし、この検証(動的解析による護岸変形と遮水工仕様の検討、津波減勢工の構造検討)は今後の予定とし、ここではこの検証により概略断面を決定する。については、既設防波堤の処分場外周護岸への活用(新設護岸の整備延長短縮)を検討する。

2.2 設計断面 設計断面を図-2に示す。新設護岸は、既設防波堤と連続するようケーソン構造とする。護岸変形時の遮水性確保のため、堤体背後に緩衝帯を設けて遮水壁(鋼管矢板)を配置する。遮水工の基本構成は、矢板継手部へのモルタル注入(側面遮水工)と土質系遮水材(底面遮水工)を想定する。矢板背面を埋め立て後にタイ材を切断し、遮水壁は堤体と分離する。

緩衝帯施工完了時(埋立処分の開始前)の安定性照査によると、堤体幅14.5mの既設防波堤は沖側護岸として現状利用が可能で、港内側の新設堤体は幅10mとなる。鋼管矢板は杭径1,200mm、緩衝帯幅は19m程度が必要である(表-1)。処分場の概算処分面積は132,000m²、概算処分容量は175万m³となる。

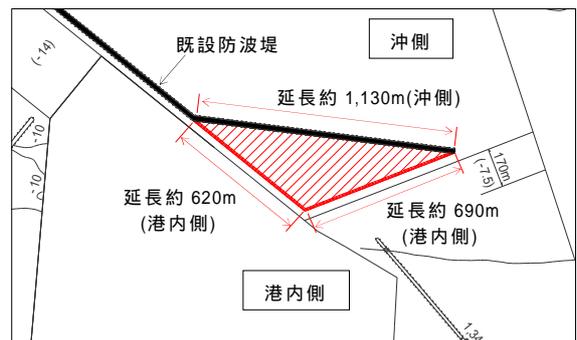


図-1 海面処分場の想定

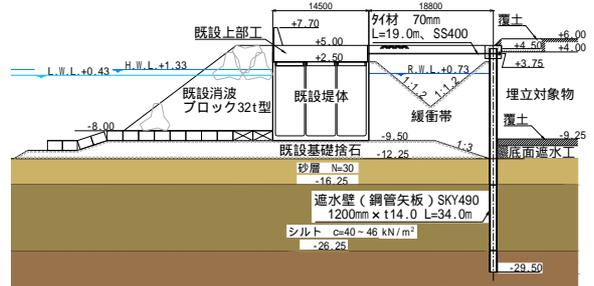


図-2(1) 沖側護岸(既設防波堤利用)

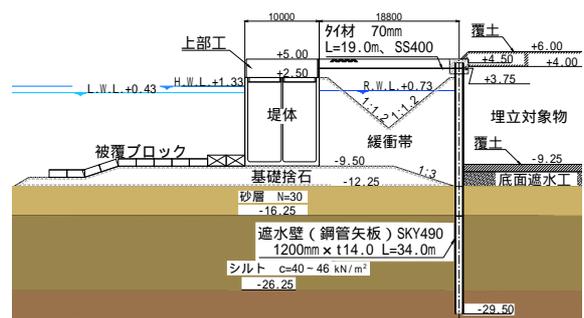


図-2(2) 港内側護岸(新設)

表 - 1 外周護岸と遮水壁の安定性照査

検討断面	状態	耐力作用比								部材	仕様	状態	発生応力度 (N/mm ²)	許容応力度 (N/mm ²)	応力比
		滑動		転倒		基礎支持力 (Bishop)		円弧すべり							
沖側断面 埋体幅 14.5m	永続状態	2.74	1.0 OK	8.62	1.0 OK	1.62	1.0 OK	1.11	1.0 OK	鋼管 矢板	φ1200×t14.0 (P-T)型, L=34.0m, SKY490	永続状態	185.9	315.0	0.59 OK
	変動状態 (Kh=0.10)	1.97	1.0 OK	3.52	1.0 OK	1.63	1.0 OK	-	-			変動状態 (Kh=0.10)	240.2	315.0	0.76 OK
港内側断面 埋体幅 10.0m	永続状態	1.88	1.0 OK	4.23	1.0 OK	1.23	1.0 OK	1.05	1.0 OK	腹起し	鋼矢板側: 2[200×90×8.0×13.5] 控え工側: 2[200×90×8.0×13.5]	永続状態	186.1	235.0	0.79 OK
	変動状態 (Kh=0.10)	1.60	1.0 OK	2.11	1.0 OK	1.19	1.0 OK	-	-			変動状態 (Kh=0.10)	157.2	235.0	0.67 OK

3. 管理型海面処分場の整備コスト

3.1 概算建設費用 海面処分場の建設費は直工で約300億円となり、処分容量1m³当たりでは1.71万円/m³となる(表-2)。

3.2 管理型陸上処分場との比較 2000年度以降の新設の管理型陸上処分場は、処分容量が最大42万m³、平均7万m³で、多くは10万m³以下である(オープン型、図-3)。陸上では10万m³級以上の処分場整備は様々な要因で実現が困難であり、100万m³を超える処分規模では施設の複数整備が必要である。

陸上で整備可能な管理型処分場を10万m³級とすると、海面処分場に相当する施設群の総建設費は300~390億円と予測される(表-3)。処分容量当たりでは平均1.91万円/m³となり、本検討の処分規模では、海面処分の方が陸上処分より施設整備費が10%程度安くなる。

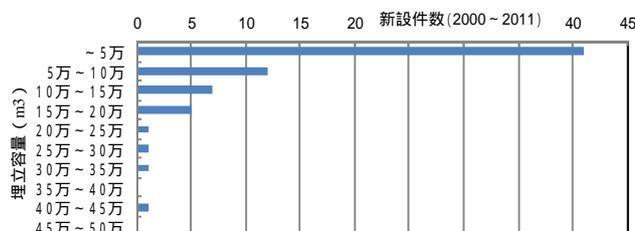
4. 海面処分場の放射線曝露リスク

4.1 放射線曝露リスクの評価シナリオ 既往の曝露リスク検討例a~dについて、各々の評価シナリオ群から埋立中と埋立完了後に関するシナリオを抽出して類型化する(表-4, 5)。これを参考に、海面処分の特性を反映した平常時・事故時の評価シナリオを設定する(表-6)。

シナリオ No.2 は陸上検討と同様の評価となるため、ここでは参考として、所定の曝露防止措置(作業合間の覆土等)を実施しない事例として検討する。No.3も同様に、覆土遮へいを考慮しない安全側の評価事例として検討する。No.4は覆土前の津波被災であり、十分保守的な事故規模の想定として、沖側護岸全長に渡る埋立対象物の主働崩壊・海域流出を検討する。No.5は濃縮汚染水の一時的な大量流出を、No.6は処分場保有水の定常漏出を検討する。表-6にないシナリオについては、概ね陸上検討の曝露リスクに準じると考えられる。

表 - 2 海面処分場の概算建設費

項目	規格	単位	数量	金額(百万円)
直接工事費	基礎工	m ³	170,074	1,900
	本体工	標準84函, 異形3函	87	2,737
上部工(ケーソン)	港内側h2.5m, 沖側h4.0m	m ³	33,447	999
被覆・根固め工		m ³	39,189	581
裏込・裏埋工		m ³	612,189	2,999
底面遮水工	土質系遮水材	m ²	132,154	5,947
側面遮水工	1200mm, t14mm, L=34m	本	1,490	6,025
上部工(鋼管矢板)	断面2m×2.5m	m ³	10,280	620
諸経費				8,077
工事価格				29,885
処分容量1m ³ 当たり 17,100円/m ³				



データ出典: 環境省廃棄物処理技術情報

図 - 3 管理型陸上処分場の建設数

表 - 3 陸上処分場の概算建設費

予測式	建設費用	施設数	総建設費	埋立容量当たり
式	1,658百万円/施設	18施設	298.4億円	1.66万円/m ³
式	2,147百万円/施設	18施設	386.5億円	2.15万円/m ³
				(合計180万m ³)
式: Y = 507.5X ^{0.257}				
式: Y = 12.74X + 872.7				Y: 建設費(百万円), X: 埋立容量(千m ³)
出典: 「廃棄物処理のここが知りたい」-維持管理のポイント、(財)日本環境衛生センター-西日本支局				

表 - 4 既往検討での曝露リスク解析条件

No.	検討の内容	対象物	濃度(Bq/kg)	処分等形式	規模(m ³)
a	災害廃棄物の処理・処分	混合土壌 廃棄物	-	陸上	40万
b	汚泥焼却灰等の処分	廃棄物	2,000	既設海面 (追加処分)	34万
c	指定廃棄物の埋立処分	廃棄物	10万	既設陸上 (追加処分)	44万
d	除染物等の中間貯蔵	土壌 廃棄物	8千~10万 200万	陸上 屋内	1000万 20万

表 - 5 既往検討の評価シナリオの類型化

段階	想定状況	被ばく経路	被ばく対象者	
埋立中	平常時	輸送作業・埋立作業	外部・吸入 外部・経口・吸入	周辺公衆 作業員
		浸出処理水の放出	経口	公衆
		内水の貯留	外部	作業員
	事故時	輸送事故による運搬物の散乱	外部・吸入	周辺公衆
		津波・豪雨等での処分物流出	外部・経口	周辺公衆
		地震・火災等での遮へい喪失	外部	周辺公衆
埋立後	平常時	処分場跡地の利用	外部・経口・吸入	作業員
		浸出処理水の放出	外部・吸入	事業所利用者
		場内地下水の利用	経口	公衆
	事故時	津波・豪雨等での処分物流出	外部・経口	周辺公衆
		地震・火災等での遮へい喪失	外部	周辺公衆
		地震・火災等での粉じん等飛散	外部・吸入	周辺公衆

4.2 被ばく線量の算出 主に除去土壌を対象として各シナリオの被ばく線量を算出する。¹³⁴Csと¹³⁷Csの存在比は1:3とする。

(1) 外部被ばく線量 造成地盤を線源とした直接線と大気散乱線を検討する(表-7,8)。評価位置における線量換算係数は、3次元放射線輸送解析コード(MCNP,図-4)で処分場をモデル化して求める。海上投入作業の検討は、気中検討に水の実効線量透過率を乗じた概略計算とする。

(2) 経口被ばく線量 汚染が濃縮した海産物の摂取による内部被ばくについて検討する(表-7,9)。海域への汚染移行量は、既往検討を参考に埋立対象物の溶出率、貯留水の排水基準濃度倍率、処分場内での対象物からの漏出率を設定して算出する。海水の汚染濃度は、汚染の拡散範囲と交換水量を設定した概略計算とする。

単位濃度当たりと、代表濃度(除去土壌の場合)での被ばく線量を表-10に示す。

シナリオ No.2 以外は、10万 Bq/kg 以下の処分において安全評価基準を満足する。曝露防止措置なしの気中埋立を仮定した No.2 では、13,000Bq/kg 以上の処分で基準超過となる。

4.3 既往検討(陸上事例)との比較 被ばく線量を被

ばくの対象者と形態毎にまとめ、陸上検討の評価例と比較して、海面処分場の放射線曝露リスクを評価する。

(1) 埋立中の作業者の外部被ばく 海上投入時の被ばく

線量は気中埋立時の 1 / 1000 程度で、陸域化後は検討 a, b と同程度となる(表-11)。処分量の 70%程度が海上投入のため、平均の曝露リスクは a, b より低くなる。気中埋立時には、覆土未施工区域を減らす施工手順等が重要である。

(2) 埋立中の周辺公衆の外部被ばく 海面処分では護岸天端より低位置の海水面活動

表-6 本検討の評価シナリオ

No.	段階	想定状況	被ばく経路	被ばく対象者	検討条件
1	埋立中	海上投入作業	外部	場内作業者	処分場内の水深150cm 年間1,000時間
2		陸域化した場所での	外部	場内作業者	処分場全域で覆土なし 年間1,000時間
3		気中埋立作業	外部	水面活動者(周辺漁船)	護岸離隔100mで漁業操業 年間120日間
4	埋立後	津波で埋立対象物が	経口	公衆	埋立対象物が10万m3流出 Cs溶出率1%(除去土)が海水濃度に寄与
5		調整池が損傷し貯留水が	経口	公衆	貯留水(降雨浸透量5年分)が全量流出 排水基準の100倍濃度
6		遮水機能が喪失し保有水が	経口	公衆	降雨浸透分が常時漏出 埋立総量に対する平衡濃度

表-7 被ばく線量の計算式

外部被ばく線量	$D_{p,ext}(i) = C_{wd}(i) \cdot S_p \cdot t_p \cdot DF_{p,ext}(i) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda(i) \cdot t_2)}{\lambda(i) \cdot t_2}$	
$D_{p,ext}(i)$: 放射性核種 <i>i</i> の外部被ばく線量(μSv/y) $C_{wd}(i)$: 対象物中の放射性核種 <i>i</i> の濃度(Bq/g) S_p : 外部被ばくに対する遮へい係数(-) t_p : 滞在時間(h/y)	$DF_{p,ext}$: 放射性核種 <i>i</i> の外部被ばく線量換算係数(μSv per Bq/g) $\lambda(i)$: 放射性核種 <i>i</i> の崩壊定数(1/y) t_2 : 被ばく中の減衰期間(y)	
経口被ばく線量	$D_{ing}(i) = \sum_j (C_{sw}(i) \cdot CF_s(i, j) \cdot M_s(j) \cdot G_s(j) \cdot DF_{ing}(i))$	
	$C_{sw}(i) = \frac{R_{sw}(i)}{Q_{sw}}$	$R_{sw}(i) = W_s \cdot C_A(i)$
$D_{ing}(i)$: 放射性核種 <i>i</i> の水産物経口被ばく線量(μSv/y) $C_{sw}(i)$: 放射性核種 <i>i</i> の水域中の濃度(Bq/m ³) $R_{sw}(i)$: 放射性核種 <i>i</i> の水域への放出量(Bq) W_s : 津波等で水域に移行する除去土壌等の量(kg) $C_A(i)$: 除去土壌等の放射性核種 <i>i</i> の濃度(Bq/kg) $DF_{ing}(i)$: 放射性核種 <i>i</i> の経口摂取による内部被ばく線量換算係数(μSv per Bq/g)	Q_{sw} : 水域における希釈水量(m ³) $CF_s(i, j)$: 放射性核種 <i>i</i> の水産物 <i>j</i> への濃縮係数(m ³ /kg) $M_s(j)$: 水産物 <i>j</i> の年間摂取量(kg/y) $G_s(j)$: 水産物 <i>j</i> の市場希釈係数(-)	

表-8 外部被ばくの主なパラメータ

名称	単位	設定値	設定根拠
埋立対象物のかさ密度	kg/m ³	除去土壌:1,600 固化物:2,000	災害廃棄物評価での使用値
埋立時水深	m	1.5	施工最浅値で設定
水の実効線量透過率	-	2.0E-04	「放射線施設のしゃへい計算マニュアル」を参照し設定
評価高さ	m	界面より1m	作業高さとして設定
埋立作業時間	h/y	1,000	災害廃棄物処理(既往検討a)と同設定
漁業操業日数	d/y	120	原子炉評価指針より
線量換算係数(除去土壌)	μSv/h per Bq/g	処分場中央 ¹³⁴ Cs:3.53E-01 ¹³⁷ Cs:1.54E-01 護岸離隔100m ¹³⁴ Cs:3.93E-03 ¹³⁷ Cs:1.64E-03	全域埋立と覆土なしを想定しMCNP解析線源:h15.8 x 400m 護岸天端:+5.0 埋立天端:+3.5 海面天端:+1.0 空気層厚:1km

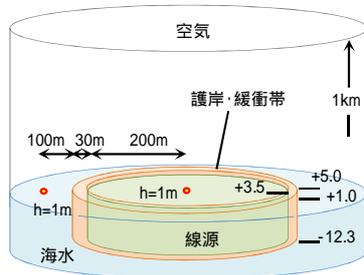


図-4 MCNP解析モデル(外部被ばく線量換算係数)

表-9 経口被ばくの主なパラメータ

名称	単位	設定値	設定根拠
海域での希釈水量	m ³ /y	1.64E+09	想定海域の防波堤包囲域560haと平均潮位差80cmより算出
魚介類への濃縮係数(Cs)	m ³ /kg	魚類	0.03
		無脊椎動物	0.02
		海藻類	0.02
魚介類の年間摂取量(成人)	kg/y	魚類	15.8
		無脊椎動物	8.1
		海藻類	2.2
魚介類摂取の市場希釈係数	-	魚類	1
		無脊椎動物	1
		海藻類	1
線量換算係数(成人)	μSv/Bq	¹³⁴ Cs:1.9E-02 ¹³⁷ Cs:1.3E-02	ICRP Pub1.72における一般公衆成人の換算係数
緩衝帯(ケーソン~矢板間)の吸着分配係数	m ³ /kg	0	保守的に吸着しないとして設定
流出後の溶出率	%	1.0(除去土)	土壌貯蔵施設(既往検討d)と同設定
貯留水濃度倍率	倍	100	排水基準に対する保守的数値として設定
空隙率	-	除去土壌0.4, 固化物0.19	「TRU廃棄物処分技術検討書」における設定値
処分場内での分配係数	m ³ /kg	除去土壌0.01, 固化物0.0025	値
降雨浸透水量	m/y	0.4	土壌貯蔵施設(既往検討d)と同設定

者が対象であり、直接線の影響が小さい。全面陸域化・覆土なしの想定で、被ばく線量は検討cより1オーダー高く、検討dと同程度となる(表-12)。dは公衆隔離が大きく、cは作業域以外を覆土していることから、

気中埋立時に順次覆土する場合は、陸上処分と同程度以下の曝露リスクになると考えられる。
 (3)埋立中の汚染流出による公衆の経口被ばく 10万Bq/kgの埋立対象物が大量流出しても、被ばく線量は基準の1/1000未満である。しかし、検討d(保有水の河川流出と河川水産物汚染)との比較では、3オーダー高い線量となる(表-13)。線量の違いは、想定内容が3つの点で大きく異なる(dでは、流出量が降雨浸透量と同量、水域到達までの汚染の土壌吸着を考慮、産物摂取量が海産物比1/30)ためと考えられる。

(4)埋立完了後の汚染流出による公衆の経口被ばく 本検討では、汚染の一時的な大量流出より定常漏出の方が被ばく線量は大きい(表-14)。定常漏出時と検討a(保有水の定常漏出と地下水利用での農水畜産物汚染)を比較すると、海産物による被ばく線量は農畜産物より2オーダー、淡水産物より1オーダー低く、曝露リスクは陸上処分と同程度以下になると考えられる。

4.4 比較の考察 既往検討では埋立処分全体をシナリオ評価しており、埋立作業員の外部被ばくが最も曝露リスクが高い。したがって、海上投入主体の海面処分は曝露リスク抑制の点で有利といえる。一方、海面処分では津波による大規模汚染流出が想定可能である。汚染拡散防止の点から被災軽減策を検討し、シナリオ評価に適切に反映して曝露リスクを低減することが重要である。

5.まとめ 200万m³級の海面処分場を想定し、施設の構造安全性、整備コスト、放射線曝露リスクを概略検討した。陸上処分検討との比較より、海面処分技術には、除去土壌等の処分に対する基本的な適性が有ることが示された。

(参考文献)

- 1) 日本原子力研究開発機構,「福島県の浜通り及び中通り地方(避難区域及び計画的避難区域を除く)の災害廃棄物の処理・処分における放射性物質による影響の評価について」,平成23年6月
- 2) 横浜市,「放射性物質を含む汚泥焼却灰等の処分に関する安全評価検討書」,平成23年9月
- 3) 日本原子力研究開発機構,「管理型最終処分場への10万Bq/kg以下の指定廃棄物の埋立処分に係る線量評価について」,平成25年3月
- 4) 環境省,「中間貯蔵施設の概略安全評価について」,平成25年9月

表-10 各評価シナリオの被ばく線量

シナリオ No.	段階	想定状況	被ばく対象者	単位濃度当たり μSv/年or事故 per Bq/g		被ばく線量(除去土壌) μSv/年or事故			
				除去土壌	固化物	8千 Bq/kg	10万 Bq/kg	安全 評価基準	
1	埋立中	平常	海上投入	場内作業員	1.2E-02	1.2E-02	9.6E-02	1.2E+00	1E+03
2			気中埋立	場内作業員	7.6E+01	7.5E+01	6.1E+02	7.6E+03	
3		周辺漁業者	4.9E-01	-	3.9E+00	4.9E+01			
4		事故	対象物流出	公衆	9.6E-03	-	7.7E-02	9.6E-01	
5	埋立後	事故	貯留水流出	公衆	1.2E-07	-	9.6E-07	1.2E-05	3E+02
6			保有水漏出	公衆	2.9E-03	1.2E-02	2.3E-02	2.9E-01	

表-11 埋立中の作業員の外部被ばく線量評価
(覆土遮へい無しの造成地盤からの被ばく)

埋立中 作業員の 外部被ばく	単位濃度当たりの被ばく線量 μSv/年 per Bq/g				(参考例) 8,000Bq/kgでの被ばく線量 μSv/年				
	本検討		検討 a	検討 b	本検討		検討 a	検討 b	安全 評価基準
	No.1	No.2			No.1	No.2			
除去土壌	1.2E-02	7.6E+01	5.8E+01 (焼却灰)	1.1E+02 (焼却灰)	<0.1	610	460	880	1,000
固化物	1.2E-02	7.5E+01	9.7E+01 (コンクリート)	-	<0.1	600	780	-	

散乱線は考慮していない

表-12 埋立中の周辺公衆の外部被ばく線量評価
(造成地盤からの被ばく)

埋立中 周辺公衆の 外部被ばく	単位濃度当たりの被ばく線量 μSv/年 per Bq/g			(参考例) 10万Bq/kgでの被ばく線量 μSv/年			
	本検討 No.3	検討 c	検討 d	本検討 No.3	検討 c	検討 d	安全 評価基準
	除去土壌	4.9E-01	4.4E-02 ¹	3.9E-01 ²	50	4	

1 公衆隔離156m,作業域100m²のみ露出
2 公衆隔離500m,処分域40,000m²が露出

表-13 埋立中事故での経口被ばく線量評価

埋立中 事故による 経口被ばく	単位濃度当たりの被ばく線量 μSv/事故(年) per Bq/g		(参考例) 10万Bq/kgでの被ばく線量 μSv/事故(年)		
	本検討 No.4	検討 d	本検討 No.4	検討 d	安全 評価基準
除去土壌	9.6E-03	2.1E-06	<1	<0.001	5,000

周辺土壌の吸着を考慮(吸着分配係数1m³/kg)

表-14 埋立完了後事故での経口被ばく線量評価

埋立完了後 事故による 経口被ばく	単位濃度当たりの被ばく線量 μSv/事故(年) per Bq/g			(参考例) 10万Bq/kgでの被ばく線量 μSv/事故(年)		
	本検討		検討 a	本検討	検討 a	安全 評価基準
	No.5	No.6		No.5, 6		
除去土壌	1.2E-07	2.9E-03	2.2E-01 (農作物)	<1	20	300

