

放射性廃棄物等の海面処分技術の現状と可能性

H26年5月

日本沿岸域学会
災害廃棄物等の海域処分に関する研究会

東日本大震災で発生した災害廃棄物や津波堆積物は、主に沿岸域に集積されて中間処理が進められた。現地では、再資源化や減容化が行われる一方で、選別不燃物・余剰汚泥・焼却残さ等の処分場不足が顕在化した。また、相当量の放射性の廃棄物等の発生が見込まれる福島県では、今後の処理推進を図るうえで処分場の確保は重要な課題である。

南海トラフ巨大地震や首都直下地震への備えを強化することが社会の関心事になっている。それらの地震では強い地震動や大きな津波によって膨大な量の災害廃棄物が発生することが予測されているため、それらを効果的かつ効率的に処分する方法を見出していくことは重要な課題である。

そうした状況を踏まえ、放射性を有する災害廃棄物等を海域で処分する技術の検討を行った。本報告書は、以下のメンバーによる検討と議論をもとに、研究グループの活動の一環として取りまとめたものである。

鈴木武	国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部
関本恒浩	五洋建設株式会社 技術研究所
山本敦	五洋建設株式会社 土木設計部
江口信也	五洋建設株式会社 技術研究所
西川正夫	東亜建設工業株式会社 エンジニアリング事業部
田谷全康	東亜建設工業株式会社 エンジニアリング事業部
藤原隆一	東洋建設株式会社 鳴尾研究所
山崎智弘	東洋建設株式会社 鳴尾研究所
木俣陽一	若築建設株式会社 技術設計部

※所属は研究会活動中のものである。

目次

1. はじめに	1
2. 放射性災害廃棄物等の海面処分の考え方	2
2.1 東日本大震災によって発生した廃棄物等の現況	2
(1) 災害廃棄物，津波堆積物	2
(2) 指定廃棄物・対策地域内廃棄物	2
(3) 除染による除染土壌・廃棄物	3
2.2 放射性廃棄物の処理の考え方	3
(1) 除去土壌等の中間貯蔵施設の案について	3
(2) 既設の管理型処分場を活用した最終処分	4
2.3 各種諸制度や補償への対応	4
(1) 環境影響評価（EIA）	4
(2) 公有水面埋立法	5
(3) 漁業補償	5
2.4 放射性廃棄物の影響	6
(1) 環境中の放射性物質の濃度	6
(2) 放射能濃度の経時変化	6
(3) 空間線量率と放射能濃度の関係 ^{1.9)}	7
(4) 海面処分場に貯蔵・処分する除染物	7
3. 海面処分場の耐震・耐津波設計と放射線曝露リスク評価	9
3.1 概説	9
3.2 海面処分場の設計方針	9
(1) 対象海域	9
(2) 設計の考え方	10
(3) 構造形式の設定	10
3.3 海面処分場の設計	11
(1) 検討フロー	11
(2) 設計条件	11
(3) 検討断面	12
3.4 海面処分場の構造安全性	12
(1) 安定性照査結果（永続状態・変動状態）	12
(2) 今後の検討内容	14
3.5 海面処分場の整備コスト	15
(1) 概算整備費用	15
(2) 陸上の管理型処分場との比較	16
3.6 海面処分場の放射線曝露リスク	16
(1) 放射線曝露リスクの評価シナリオ	16
(2) 海面処分における被ばく線量	18
(3) 既往検討（陸上事例）との比較	20
3.7 除去土壌等に対する海面処分場の基本適性	22

(1) 構造安全性と整備コストに関する適性	22
(2) 放射線曝露リスクに関する適性.....	23
3.8 まとめ	23
4. 海面処分場の構築技術.....	24
4.1 検討概要.....	24
4.2 基本条件.....	24
(1) 施設配置計画.....	24
(2) 自然条件	24
(3) 施設天端高	25
4.3 施設構造形式の選定	25
(1) 遮水工.....	25
(2) 埋立護岸	25
4.4 ケーソン式護岸の安定計算.....	26
(1) 計算方法	26
(2) 計算条件	26
(3) 計算結果	27
4.5 シート遮水工の安定計算	27
(1) 計算方法	27
(2) 計算条件	28
(3) シート遮水工の安定計算結果	29
(4) 原案（二重遮水シート）の構造断面	29
(5) 見直し案（一体型複合遮水シート）の構造断面	30
4.6 概算工費および工期.....	31
4.7 陸上施設との工費の比較	32
5. 海面処分場の維持・補修.....	33
5.1 管理型廃棄物海面処分場の維持管理計画	33
5.2 維持管理の目標	33
5.3 側面遮水工の主要部材と維持管理レベルの設定.....	34
(1) 基本的な考え方	34
(2) 主要部材	34
(3) 維持管理レベルの設定.....	35
5.4 維持管理計画の体系	35
5.5 点検診断の内容	35
(1) 判断基準	35
(2) 点検診断例	36
(3) 点検診断計画の修正および改定と記録の保存	37
5.6 モニタリング計画.....	37
(1) モニタリングの位置	37
(2) モニタリングにおける分析項目.....	38
5.7 損傷時の補修方法.....	39
(1) 遮水室内の変形追従性遮水材による損傷箇所の自己修復	40
(2) 裏込部における遮水機能の追加.....	41

5.8 まとめ	41
6. おわりに	42

1. はじめに

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震津波により福島第一原子力発電所が事故を起こし、それによって大量の放射性物質が環境中に放出された。放出された放射性物質が気流により輸送され広い範囲の土地に降下し、また降雨による流出等によって広い範囲の土地や建物や構築物に堆積・沈着した。放射性物質が堆積・沈着した地域では、当該地域で生活する人々の安全性を高めるために、それら地域の人々の生活周辺空間や農地などで除染が進められ、膨大な量の除染土壌・廃棄物が発生することとなった。

放射性物質の除染や震災廃棄物の除去に伴って発生した放射性廃棄物等を安全にかつ低コストで処分することが求められている。それら放射性廃棄物等の多くは重量や体積で見ると8000Bq/kg以下、あるいは10万Bq/kg以下の低レベルの放射能を持つものが大部分である。それらは、8000Bq/kg以下の放射性廃棄物等であれば管理型の廃棄物と同水準の処分場で処分できるとされている。10万Bq/kg以下の廃棄物等も遮蔽性を高めた上で管理型処分場で処分できるとされている。それらに対しては、これまで廃棄物の海面最終処分に使われてきた管理型の海面処分場技術を応用することで、放射性廃棄物等の安全で低コストな処分が可能になる可能性があると考えられる。

そのため、当研究会はこれまであまり注目されていなかった海面処分場技術に着目し、これまでに蓄積されてきた海面処分場の技術を応用した場合に、放射性廃棄物等を安全かつ低コストで処分できるかの見通しを得るため、以下の研究を行い、成果をとりまとめた。

研究会では、放射性災害廃棄物等の発生状況や政府の対応方針等を調べ、海面処分の対象とすることができる可能性のある放射性災害廃棄物等の種類・量や受け入れの考え方を整理した。また耐震性や耐津波性および遮蔽性を確保する技術を検討し、必要な水準の安全性、コストを確保できるかの分析を行った。そして、海面処分場を迅速にしかしコストが大きくならないように構築する技術について検討を行い、建設期間および建設費用について分析を行った。さらに、放射性廃棄物等の放射能が十分に減衰するまでの期間を適切に管理・維持補修していくことを考慮し、管理・維持の期間や現状の管理・維持補修についての調査・整理を行った。

本報告書は研究会で行われた調査・整理・分析の結果、得られた知見を取りまとめたものである。

2. 放射性災害廃棄物等の海面処分の考え方

2.1 東日本大震災によって発生した廃棄物等の現況

地震、津波や洪水などの自然災害では、建物の倒壊・破損によるガレキ、木くず、コンクリート塊などの多量の災害廃棄物が発生する。東日本大震災では、地震直後に発生した大津波による「津波堆積物」、福島第一原子力発電所事故による放射性物質を含んだ「指定廃棄物」や除染による「除染土壌・廃棄物」など通常の災害で発生しない廃棄物も膨大に量発生した。

災害廃棄物の処理責任は基本的に市町村にあるが、巨大災害時には市町村が機能を麻痺・喪失するあるいは対応能力を超える事態となる場合が予想されるため、他主体や他事業との連携も視野に入れた柔軟な対応が必要となる。

(1) 災害廃棄物、津波堆積物

2011年3月に発生した東日本大震災による廃棄物等の発生量は、災害廃棄物が13の道県で約1,940万t、津波堆積物が6県で約1,044万tと膨大な量であった。特に被害が大きかった岩手県、宮城県および福島県（以下、東北3県）だけで、13道県の災害廃棄物の85%、津波堆積物の99%以上の発生があった。震災発生から数ヶ月は、仮置き場や処理施設などの不足で処理が遅れたが、①広域処理（「可燃物・木くず」、「不燃混合物」や「漁具・漁網」）②再生利用（津波堆積物など）、③仮設焼却炉による焼却（最終火納め式：2014年1月）の採用で処理が軌道に乗った。

表 1.1 東北3県の災害廃棄物等の処理状況^{1.1)}

		推計量	搬入 済量	処理量			計
				再生	焼却	埋立	
災害廃棄物(万t)	岩手県	399.9	397.8 (99%)	323.4 (83%)	41.5 (11%)	23.4 (6%)	388.3 (97%)
	宮城県	1121.0	1111.7 (99%)	901.0 (81%)	170.5 (15%)	34.5 (3%)	1106.0 (99%)
	福島県	173.5	150.2 (87%)	97.6 (82%)	7.5 (6%)	13.6 (11%)	118.7 (68%)
津波堆積物(万t)	岩手県	156.0	156.0 (100%)	144.9 (100%)	0.0 (0%)	0.0 (0%)	144.9 (93%)
	宮城県	752.6	752.5 (100%)	730.0 (99%)	0.0 (0%)	9.0 (1%)	739.0 (98%)
	福島県	175.4	137.7 (79%)	76.3 (98%)	0.0 (0%)	1.2 (2%)	77.5 (44%)

※1 搬入済量と処理量(計)の下の()は推計量に対する割合。

※2 処理量の内訳の下の()は、処理量(計)に対する割合。

東北3県の災害廃棄物等の処理状況

(2014年1月)を表1.1に示す。福島県を除く2県では、災害廃棄物等の搬入済量は、ほぼ100%となっているが、福島県では79~87%と処理が遅れており、原子力発電所事故が影響していると推察できる。

表 1.2 放射性廃棄物の発生量^{1.2),1.3)}

		福島県	その他	計	
指定	焼却灰	一般	88,440.4	8,667.5	97,107.9
		産廃	2,268.9	1.6	2,270.5
	浄水発生土	上水	2,222.9	3,302.4	5,525.3
		工水	168.1	127.0	295.1
	下水汚泥	8,947.3	4,181.7	13,129.0	
	農林業系副産物	1,862.7	7,355.2	9,217.9	
	その他	12,349.5	948.2	13,297.7	
地域計	116,259.8 (83%)	24,583.6 (17%)	140,843.4		
対策	可燃	306,000	-	306,000	
	不燃	496,000	-	496,000	
	対策地域内計	802,000	-	802,000	

※地域計の下の()は、全量に占める割合。 2013/12現在の数量(t)

(2) 指定廃棄物・対策地域内廃棄物

2011年3月の福島第一原子力発電所事故では、大気中に放出された放射性物質が付着した指定廃棄物や対策地域内廃棄物などの多くの放射性廃棄物が発生した。指定廃棄物は、放射性物質が付着した稲わらやごみの焼却灰、下水汚泥、浄水発生土などの中で8,000Bq/kg超のもので、環境大臣が指定したもの、対策地域内廃棄物は、警戒区域および計画的避難区域などにある廃棄物をいう。これらの処理は、国が責任を持って行うこととなっている。

指定廃棄物および対策地域内廃棄物の発生量は表 1.2 に示すように福島県内には指定廃棄物が約 11.6 万 t (全体の 83%)，対策地域内廃棄物が約 80 万 t と両者で約 90 万 t (焼却による減量は除く) と多量の放射性廃棄物が存在する。

(3) 除染による除染土壌・廃棄物

除染に伴って生じる除去土壌などは、2011 年 10 月 29 日に環境省が発表した「東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による環境汚染の対処において必要な中間貯蔵施設等の基本的考え方について」において表 1.3 の発生量が示された。

福島県の除染土壌などを安全に貯蔵するには約 3km²～5km² (東京ドームの 12～23 倍の容量) の広域な用地が必要となる。

表 1.3 除染による除染土壌等の発生量^{1.4)}

発生量	福島県(万m ³)		その他地域(万m ³)	
	焼却前	焼却後	焼却前	焼却後
少ないcase ^{*1}	1,500	1,500	140	140
多いcase ^{*2}	3,100	2,800	1,300	1,300

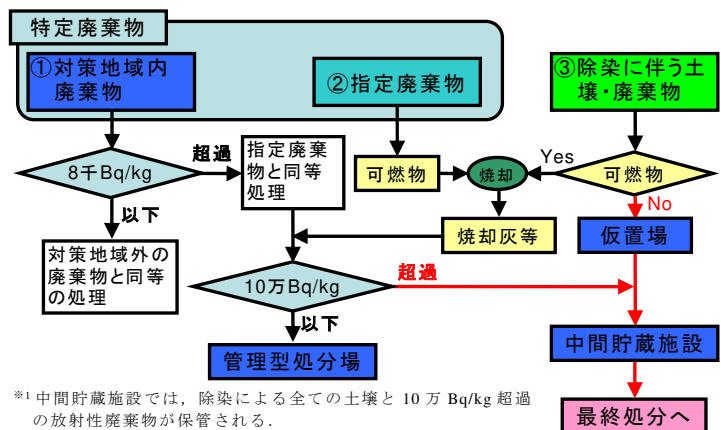
^{*1} 線量が高い地域での生活圏・生産圏の表土剥ぎ、道路側溝等の清掃および森林の除染、低い地域での局所的な除染と子供の生活環境の表土剥ぎを実施した場合。
^{*2} 少ないケースに加え、線量が 20mSv/y 以上の地域の非生活圏の森林除染を行い、線量が比較的低い地域で追加的な除染(土壌のはぎとり)をある程度行う場合。

2.2 放射性廃棄物の処理の考え方

2013 年 12 月に中間貯蔵施設等福島現地推進本部から提示された「除去土壌等の中間貯蔵施設の案について」では、図 1.1 に示す福島県内での放射性廃棄物の処分フローなどが示された。

この中には、10 万 Bq/kg を超える特定廃棄物と焼却等で減容化した全ての除染に伴う土壌・廃棄物(以下、除染物)を中間貯蔵施設に一時保管することが示されている。

また、環境省は、福島県の復興に放射性物質に汚染された特定廃棄物(8,000～10 万 Bq/kg)の処分問題の解決が必須なことより、他県と同様に既設の管理型処分場(フクシマエコテッククリーンセンター)を活用し最終処分する案を示した。



^{*1} 中間貯蔵施設では、除染による全ての土壌と 10 万 Bq/kg 超過の放射性廃棄物が保管される。
^{*2} 管理型処分場(主に既存施設)でのモニタリング等は国が実施。

図 1.1 福島県内での放射性廃棄物の処分フロー^{1.5)}

(1) 除去土壌等の中間貯蔵施設の案について

福島県内では除染の進捗に伴い、放射性物質を含む除染物の発生量が増加し、多くは仮置き場で一時保管されている。福島県の復興の推進には、除染物の問題の一刻も早い解消が急務であり、福島県外の最終処分場での保管の前段階として、福島県内で管理された状態で保管できる中間貯蔵施設の設置が必須となっている。

表 1.4 放射性廃棄物の発生量・貯蔵施設の特徴^{1.5)}

種類	発生量(万m ³)	貯蔵施設	
		構造	適用
土壌等	8,000Bq/kg 以下	約1,006	土壌貯蔵施設 I 型 ・低地部 ・底面・側面に排水層
	10万Bq/kg 以下	約1,035	土壌貯蔵施設 II 型 ・丘陵地、台地等 ・地下水面以浅 ・底面・側面に遮水工
	10万Bq/kg 超	約1	廃棄物貯蔵施設 ・丘陵地、台地等 ・地下水面以浅 ・遮蔽効果を有する建屋 ・貯蔵容器への封入
除染廃棄物の焼却灰	10万Bq/kg 以下	約155	管理型処分場 ・底面・側面に遮水工
	10万Bq/kg 超		廃棄物貯蔵施設 ・丘陵地、台地等 ・遮蔽効果を有する建屋 ・貯蔵容器への封入 ・地下水面以浅
対策地域内廃棄物等(焼却灰等)	10万Bq/kg 超	約2	廃棄物貯蔵施設 ・丘陵地、台地等 ・遮蔽効果を有する建屋 ・貯蔵容器への封入 ・地下水面以浅
合計	約2,200		

除染計画に基づく福島県内の除染物等の推計量は、表 1.4 に示すように約 2,200 万 m³ であるが推計困難な量を勘案して 2,800 万 m³ で中間貯蔵施設は検討されている。

中間貯蔵施設は、放射性セシウムの土壌からの溶出量が少ないことに着目して図 1.2 の構造（案）が示された。構造（案）では、放射能濃度が 8,000Bq/kg 以下は地下水との接触を防ぐ構造、8,000Bq/kg 超は遮水工（底部・側部）による浸出水の漏洩が防げる構造、10 万 Bq/kg 超は、貯蔵容器に入れて遮へい効果を有する建屋に貯蔵する構造となっている。

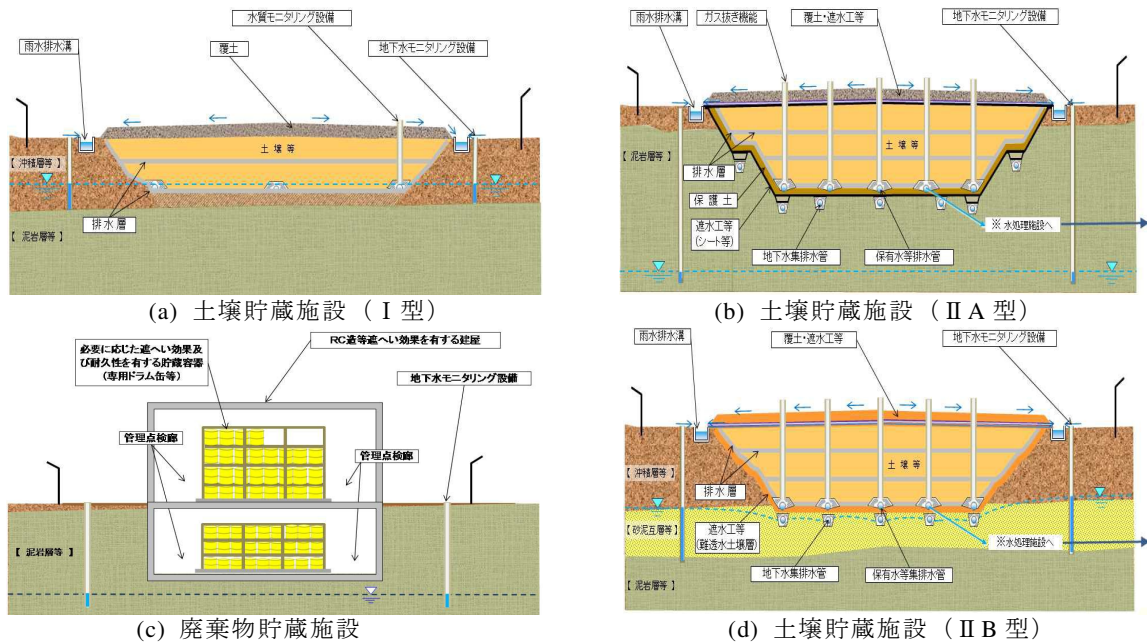


図 1.2 中間貯蔵施設の構造（案）^{1.5)}

(2) 既設の管理型処分場を活用した最終処分

特定廃棄物は、除染物に比べ放射性のセシウム溶出量が多い廃棄物を含むため、特定廃棄物の処分では、管理型処分場で特別な方法での処分が必要となる。既存の管理型処分場を活用した特定廃棄物の処分においては、放射性セシウムの溶出抑制のため、セメントで固化して「放射性物質汚染対処特措法」の基準（土壌層や不透水性土壌層を敷設しながら埋立）に従い埋立てる。なお、作業中の降雨に対しては、廃棄物の表面をシート等で覆い、雨水との接触を防ぎ、浸出水の発生やセシウムの溶出を低減する計画となっている。

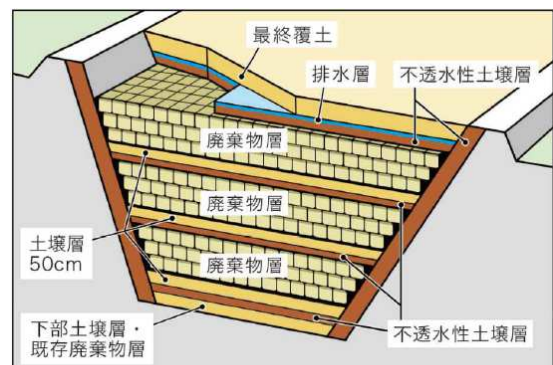


図 1.3 固化した廃棄物の埋立模式図^{1.6)}

2.3 各種諸制度や補償への対応

(1) 環境影響評価（EIA）

福島県の円滑な除染には、中間貯蔵施設の設置が必須なため、「中間貯蔵施設環境保全対策検討会」による検討が開始され、「環境影響評価法で規定する事業に該当しない」および「環境影響への配慮の必要性」という方向性が示された^{1.7)}。環境への影響は、事業の特殊性を踏まえ、環境影響評価法および福島県環境影響評価条例に基づき、廃棄物最終処分場、廃棄物焼却施設およびダム事業を参考に影響要因および環境要素が規定された。なお、特有な環境要素と

区域に対しては、漁業権が消滅している。しかし、港湾区域の改質を行う場合は、港湾区域外部へ影響や風評被害が発生する可能性があるため、近隣の漁業協同組合への真摯な説明と合意を得ることが通例となっている。

表 1.6 公有水面埋立法で求められる環境要素と影響要因の一例

環境要素の区分 影響要因の区分		環境の自然的構成要素の良好な状態の保持を旨として調査、予測及び評価されるべき環境要素					生物の多様性の確保及び自然環境の体系的保全を旨として調査、予測及び評価されるべき環境要素			人と自然との豊かな触れ合いの確保を旨として調査、予測及び評価されるべき環境要素		環境への負荷の量の程度により予測及び評価されるべき環境要素	
		大気環境			水環境		土壌に係る環境その他の環境	動物	植物	生態系	景観	人と自然との触れ合いの活動の場	廃棄物等
		大気質	騒音	振動	水質		地形及び地質						
		窒素酸化物	騒音	振動	水の汚れ	土砂による水の濁り	重要な地形及び地質	重要な種及び注目すべき生息地	重要な種及び群落	地域を特徴づける生態系	主要な眺望点及び景観資源並びに主要な眺望景観	主要な人と自然との触れ合いの活動の場	建設工事に伴う副産物
工事の実施	堤防及び護岸埋立の工事	○	○	○		○	○	○		○	○		
土地又は工作物の存在	埋立地又は干拓地の存在				○	○	○	○	○	○			
埋立地の供用	埋立地又は干拓地の供用					○			○				

2.4 放射性廃棄物の影響

(1) 環境中の放射性物質の濃度

原子力発電所事故により大気中に放出された放射性物質はセシウム (Cs)、ストロンチウム (Sr) やヨウ素 (I) などの 31 の核種に渡る^{1.7)}。事故から 3 年が経過した現在、環境中の放射能濃度に影響を与える核種は、表 1.7 に示す核種の中で半減期が長くかつ放出量が多かった Cs₁₃₄ と Cs₁₃₇ となる。Cs₁₃₇ と同様に半減期が長い Sr₉₀ は、体内に取り込まれると骨のカルシウム (Ca) と置換され、生物学的半減期が長くなる。しかし、放出量が Cs₁₃₇ の 1%未満と少ないため、長期的な影響は Cs₁₃₇ が卓越したものとなる。

表 1.7 放射性物質の環境中での残存量

核種	半減期	放射能(Bq)	
		放出量	残存量
キセノン	Xe ₁₃₃ 5.2d	1.1×10 ¹⁹	4.5×10 ⁴⁵
セシウム	Cs ₁₃₄ 2.1y	1.8×10 ¹⁶	6.7×10 ¹⁵
	Cs ₁₃₇ 30.0y	1.5×10 ¹⁶	1.4×10 ¹⁶
ストロンチウム	Sr ₉₀ 29.1y	1.4×10 ¹⁴	1.3×10 ¹⁴
ヨウ素	I ₁₃₁ 8.0d	1.6×10 ¹⁷	1.0×10 ²⁴
	I ₁₃₃ 20.8h	4.2×10 ¹⁷	-

* 放射能の残存量は、半減期と放出量より算出した。

(2) 放射能濃度の経時変化

環境中の放射能濃度は、放射性物質毎の半減期により自然に低下する。放射性セシウムの放出量の比 (Cs₁₃₄ : Cs₁₃₇ = 1.2 : 1.0) と半減期 (Cs₁₃₄ : 2.065 年, Cs₁₃₇ = 30.1 年) から算定した放射能残存率の変化を図 1.4 に示す。事故から 3 年を経過した現在 (2014 年 3 月) の放射能残存率は 62.3%と約 40%低減していると考えられる。しかし、今後は半減期が短い Cs₁₃₄ の影響が低下するため、放射能残存率の低下割合が小さくなるのがわかる。なお、放射能残存率は、放出直後 (2011 年 3 月) 放射能濃度を 100%として示した。

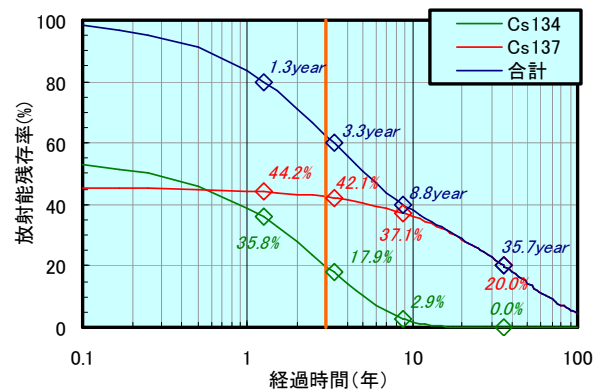


図 1.4 放射能残存率の変化

(3) 空間線量率と放射能濃度の関係^{1.9)}

土壌の放射性セシウムによる放射能濃度と空間線量率の間には、福島県内の土壌のモニタリング結果を用いた式 (1.1) の回帰式 (相関関係：r=0.77) が示されている。

$$\log(\mu\text{ Sv/h})=0.815 \times \log(\text{Bq/kg})-3.16 \quad (1.1)$$

人の健康への影響に対しては空間線量率から自然界の放射線量率を差し引いた1年間の追加被ばく線量による基準値、廃棄物の処理区分に対しては放射能濃度による基準値が用いられている。ここでは、これらの基準値間の相互関係を把握するために式 (1.1) で求めた値を表 1.8 に示している。

表中の青の網掛け部は、事故直後と3年後の追加被ばく線量が1.0mSv/年(空間線量率:0.230 μSv/h)となる箇所の放射能濃度の変化を示している。

黄色の網掛け部は事故後3年と5年後に8,000Bq/kg(土壌貯蔵施設I型へ貯蔵する除染物)の放射能濃度の汚染物が存在する地点の値を示している。中間貯蔵施設が完成するまでは、広範囲の仮置き場で保管されている。

また、桃色の網掛け部は事故後3年と5年後に10万Bq/kg(土壌貯蔵施設II型の上限値)の放射能濃度の汚染物が存在する地点の値を示している。この値は、避難指示基準の4倍強の放射能濃度であり、移住制限区域などからの除染物や焼却などで減容化された除染物が示す放射能濃度である。

表 1.8 放射能に関する基準値の相互関係

追加被ばく線量 直後 (mSv/年)	空間線量率 (μSv/h)		放射能濃度(Bq/kg)						
	直後	3年後	直後	3年後	5年後	10年後	30年後	100年後	
1.00	0.230	0.160	1,240	773	629	471	282	56	
1.53	0.331	0.230	1,940	1,210	983	737	442	88	
5.00	0.991	0.690	7,480	4,650	3,780	2,840	1,700	339	
7.91	1.540	1.070	12,800	8,000	6,490	4,880	2,920	582	
9.39	1.830	1.270	15,800	9,850	8,000	6,000	3,600	718	
20.00	3.850	2.680	38,400	24,800	20,000	15,000	8,980	1,780	
63.40	12.10	8.410	160,800	100,000	81,400	61,000	36,800	7,300	
75.00	14.310	9.970	197,400	123,100	100,000	75,000	45,000	8,970	

※ 年間被ばく量 1mSv/年 一般の人の年間積算線量の指標、20mSv/年：避難指示の基準
 追加被ばく線量=(空間線量率-自然放射線量率)×(8+16×0.4)×365
 放射能濃度 8,000Bq/kg 廃棄物を安全に処理するための基準
 100,000Bq/kg 土壌貯蔵施設II型に保管可能な上限値

(4) 海面処分場に貯蔵・処分する除染物

海面処分場での除染物の貯蔵・処分の検討は、陸上の土壌貯蔵施設(I型:8,000Bq/kg以下)での受け入れが困難になり管理型の施設を検討する場合や陸上の土壌貯蔵施設(II型:10万Bq/kg以下)での受け入れが地元感情や費用負担主体の難色等で困難になった場合など「新たな方向性」が必要となった時に行われると考えられる。ここでは、前述した必要性に対して表 1.9 に示す海面処分場の長所を活かすことで除染物からの被ばくリスクが低減できると考えられるため、除染物の貯蔵・処分手法のひとつとして海面処分場の活用について提案する。

中間貯蔵施設に貯蔵する除染物の処分に対しては、現段階では「中間貯蔵開始後30年以内に、福島県外で最終処分を完了する」という基本方針がある。この方針を遵守するには、貯蔵後の除染物を掘削等の手法で施設から除去できる構造の採択が必須となる。また、東北地方の港湾の海底地盤は砂層が多く、遮水性確保のための底面遮水層が不可欠である。底面遮水層は限られた厚さで遮水性を確保しており、遮水性を保持しながら貯蔵物を除去するには、十分な厚さの保護層が不可欠である。しかし、保護層厚の増加は、貯蔵容量の減少に繋がりB/Cを著しく低下させる。更に、海面処分場では廃棄物の全量除去の実績は無く、施工方法や底面遮水層への工夫により「除染物の全量除去」や「遮水層の損傷防止」を可能にする必要がある。

海域の管理型処分場に保管する除染物の放射能濃度は、10万Bq/kg以下の指定廃棄物が管理型処分場で埋立処分できることが環境省より示されている。この基準に準拠すると、海域に管理型処分場と同等の施設を整備する場合も10万Bq/kg以下の除染物が対象と考えることができる。なお、10万Bq/kg以上の除染物は、陸上の廃棄物貯蔵施設(遮断構造)で貯蔵する。

海域の管理型処分場では、表 1.9 の GS-2～4 の被ばくリスクの低減効果に加え、表 1.10 に示す設置施設や受け入れ除染物に制限を設けることも、更なる被ばくリスクの低減への一つの方策と考える。

表 1.9 海面処分場の特長

	項目	備考
GS-1	大型の施設整備が可能	
GS-2	漏洩による地下水汚染リスクが小	万一、漏洩しても飲用リスクは少ない
GS-3	隔離距離による被ばくリスク低減	港湾区域は、一般人の立入りが少ない
GS-4	水面下埋立による被ばくリスク低減	水面の干渉による空間線量率の低下

表 1.10 海域の管理型処分場への設置施設や受け入れ除染物に対する制限

	制限	理由
GJ-1	保管施設と管理施設のみの設置	減容化施設(焼却)の設置の環境要因の増加抑制 →別の中間貯蔵施設で分別された除染物を保管
GJ-2	除染物のうち土壌に限定	放射性セシウムの土壌吸着による溶出の抑制
GJ-3	搬入後の速やかな海面埋立	気中暴露量の制限による空間線量率の増加の抑制

参考文献

- 1.1) 環境省廃棄物・リサイクル対策部：災害廃棄物等処理の進捗状況（3 県沿岸市町村（避難区域を除く））2014 年 2 月 21 日。
- 1.2) 環境省：指定廃棄物の保管についての関連情報，<http://shiteihaiki.env.go.jp/02/02.html>，2015 年 3 月 13 日現在。
- 1.3) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部：対策地域内廃棄物処理計画の改定について，2013 年 12 月。
- 1.4) 環境省：東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による環境汚染の対処において必要な中間貯蔵施設等の基本的考え方について，2011 年 10 月 29 日。
- 1.5) 中間貯蔵施設等福島現地推進本部：除去土壌等の中間貯蔵施設の案について，2013 年 12 月。
- 1.6) 環境省：フクシマエコテッククリーンセンター埋立処分計画(案)，2013 年 12 月。
- 1.7) 環境省：中間貯蔵施設に係る環境への影響に関する配慮事項（案），中間貯蔵施設環境保全対策検討会（第 1 回）資料 5 および 6，2013 年 6 月。
- 1.8) 原子力安全・保安院：東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る 1 号機，2 号機及び 3 号機の炉心の状態に関する評価について，2011 年 6 月 6 日。
- 1.9) 原子力安全基盤機構 廃棄物燃料輸送安全部：災害廃棄物の放射能濃度の推定方法について，2011 年 6 月 19 日。

3. 海面処分場の耐震・耐津波設計と放射線曝露リスク評価

3.1 概説

福島第一原発事故による環境放射能汚染への対処として、国や自治体による除染が実施されている。除染等で生じる廃棄物については、放射能濃度に応じた処分方法がガイドライン^{3.1)}に示されている。8,000Bq/kg以下は既存の管理型処分場で処分可能であり、8,000Bq/kg超～10万Bq/kg以下も、放射性セシウムの流出防止策や跡地利用制限を含む長期管理の適用により、既存の管理型処分場で処分できる。除去土壌については、福島県内では放射能濃度に応じた中間貯蔵が検討されており、8,000Bq/kg以下は安定型処分場相当の貯蔵施設、8,000Bq/kg超～10万Bq/kg以下は管理型処分場相当の貯蔵施設が計画^{3.2)}されている。

既存の管理型海面処分場では、排水処理や内水濃度管理の指定要件のもと、8,000Bq/kg以下の特定一般廃棄物や特定産業廃棄物が処分可能^{3.3)}である。一方、8,000Bq/kg超～10万Bq/kg以下の廃棄物等は海面処分が具体検討されておらず、個別に対応を検討する状況^{3.4)}にある。

陸上処分場と比較すると、海面処分場は処分規模が大きい、公衆環境から離れている、移流拡散しやすい環境に設置する、地震（津波）被災リスクが大きい等の特徴が考えられる。

本章では、このような特徴を有する海面処分場が、放射性廃棄物や除去土壌の処分方法としてどの程度の適性を有しているかを検討する。検討では200万m³級の海面処分場を試設計して、施設の構造安全性、整備コストおよび処分に関する放射線曝露リスクを試算する。構造安全性については地震と津波への耐性を評価し、整備コストと放射線曝露リスクは陸上検討事例との比較を試みる。

3.2 海面処分場の設計方針

(1) 対象海域

机上検討例として、太平洋岸の重要港湾をイメージし、そのイメージした港湾内に海面処分場の整備海域を設定する。処分場は沖防波堤の内側への配置を想定し、設計用の地盤条件や波浪条件は、沖防波堤近傍における国土交通省の公開情報等^{3.5)}を使用する。

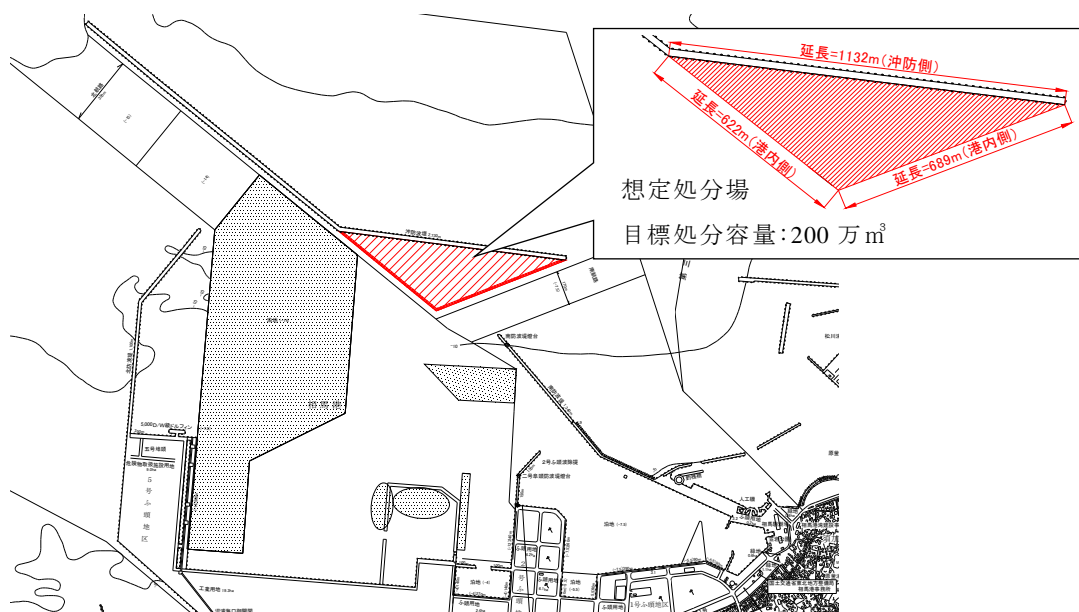


図 3.1 対象海域（イメージ港湾）の全体平面図

(2) 設計の考え方

放射性廃棄物や除去土壌等の処分を目的とした海面処分場検討として、以下のように考える。

- ① 対象海域において、できるだけ大きな処分容量が確保可能な構造断面とする。
- ② 沖防波堤を外周護岸の一部に利用し、新設する港内側の外周護岸は沖防波堤との連続性を確保する。
- ③ 通常的作用外力（以下、永続状態とする）および変動状態（レベル1地震動）（以下、変動状態とする）に対して、外周護岸の安定性と処分場の遮水性が確保される構造とする。
- ④ 偶発状態（レベル2地震動）（以下、偶発状態とする）に対して、護岸自体は変形しても処分物や保有水が外部に流出しない構造とする。

(3) 構造形式の設定

(a) 護岸構造形式の検討

既設のケーソン式沖防波堤との連続性を考慮し、新設護岸はケーソン構造とする。埋立処分開始前（裏埋完了時）における永続状態および変動状態での安定性照査により、既設護岸の安定性を確認し、新設護岸の堤体仕様を決定する。各状態の作用外力に対する照査項目を表 3.1 に示す。

表 3.1 作用外力に対する照査項目（重力式護岸として設計）

	状態	作用外力	照査項目	照査による決定項目
外周護岸	永続	自重・水圧・上載荷重	地盤の円弧すべり	完成断面の安定 (基礎捨石含)
		土圧・残留水圧・上載荷重	壁体の滑動・転倒・基礎地盤の支持力	堤体幅
	変動	地震時土圧・残留水圧・慣性力・動水圧・上載荷重	壁体の滑動・転倒・基礎地盤の支持力	堤体幅

(b) 側面遮水工の検討

外周護岸の変形が遮水機能に直接影響しない構造として、鋼管矢板による遮水壁を堤体の背面に配置する。鋼管矢板の仕様は、(a)と同様の安定性照査により決定する。鋼管矢板と堤体の離隔は、海底面から引いた矢板の主働崩壊面と堤体下端側から引いた受働崩壊面がタイ材取付高さより下で交わらないように設定する。また、堤体の変位で鋼管矢板が変形しないように、埋立完了後はタイ材の切断を想定する。各状態の作用外力に対する照査項目を表 3.2 に示す。

表 3.2 作用外力に対する照査項目（控え矢板式護岸として設計）

	状態	作用外力	照査項目	照査による決定項目
側面遮水工	永続	自重・水圧・上載荷重	地盤の円弧すべり	完成断面の安定
		土圧・残留水圧・上載荷重	必要根入長・矢板の降伏 タイ材の降伏・腹起しの降伏	矢板長の仕様 タイ材・腹起しの仕様
	変動	地震時土圧・残留水圧・慣性力・動水圧・上載荷重	必要根入長・矢板の降伏 タイ材の降伏・腹起しの降伏	矢板長および タイ材・腹起しの仕様

(c) 底面遮水工の検討

対象海域の地盤条件として、均一な不透水性地層の確保が困難と予想される。本検討では、土質系遮水材による底面遮水工を想定する。

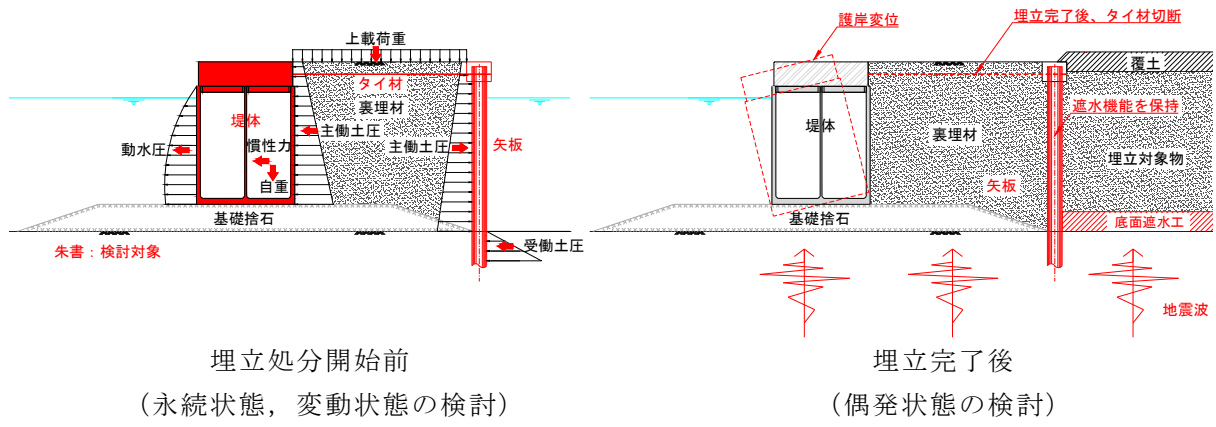


図 3.2 安定性照査における護岸状態

3.3 海面処分場の設計

(1) 検討フロー

構造設計の検討フローを図 3.3 に示す。検討は、港湾および廃棄物埋立護岸に関する基準等 3.6), 3.7) に準拠する。本章では、埋立処分開始前における永続状態と変動状態の検討について報告し、偶発状態の検討および底面・側面遮水工の詳細検討は今後実施予定とする。

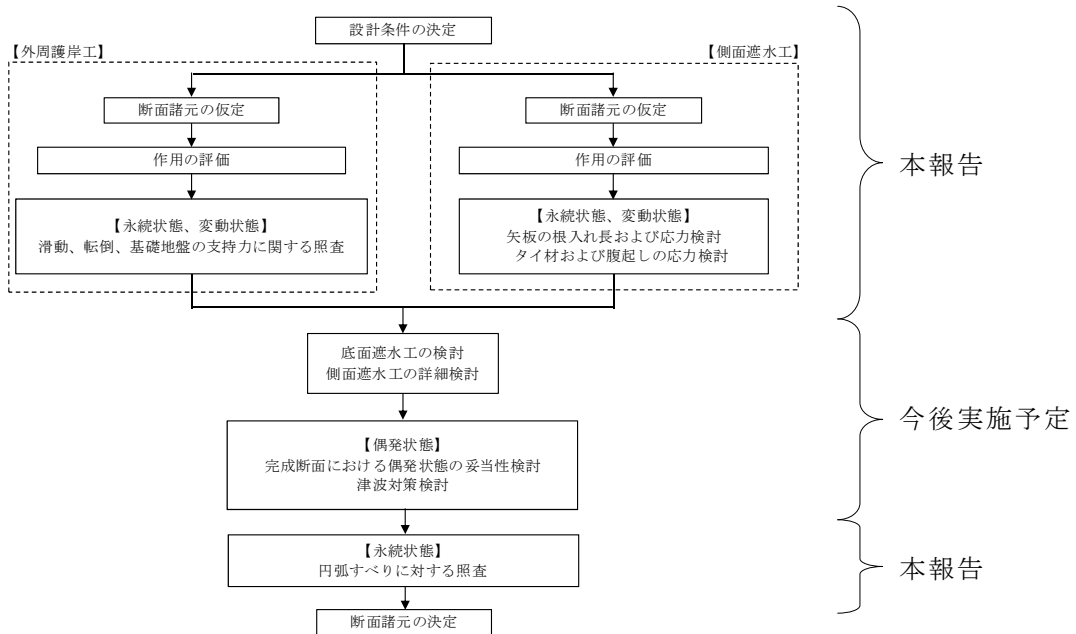


図 3.3 検討フロー

(2) 設計条件

設計条件を表 3.3 と表 3.4 に示す。

表 3.3 設計条件

	項目	単位	数値	備考
自然条件	朔望平均満潮位 (H.W.L)	m	+1.33	既設沖防波堤設計潮位
	朔望平均干潮位 (L.W.L)	m	+0.43	〃
	残留水位 (R.W.L)	m	+0.73	港湾の施設の技術上の基準・同解説 (2007) p959
	管理水位	m	+0.88	H.W.LとL.W.Lの平均値
	設計震度kh (LI地震動)		0.10	地震動：国総研 港湾施設研究室HP
利用条件	上載荷重 (永続状態)	kN/m ²	10.00	港湾の施設の技術上の基準・同解説 (2007) p416
	〃 (変動状態)	kN/m ²	5.00	〃
	護岸天端高	m	+5.00	既設沖防波堤準拠
	海底地盤高	m	-12.25	国交省「KuniJiban」データより沖防波堤付近水深を引用
	基礎捨石天高	m	-9.50	既設沖防波堤準拠
腐食	腐食速度 (廃棄物中)	mm/年	0.06	管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアルp28
	〃 (保有水等の中)	mm/年	0.03	〃

表 3.4 使用材料の物性値

項目	せん断抵抗角 (°)	飽和重量 (kN/m ³)	湿潤重量 (kN/m ³)	水中重量 (kN/m ³)	備考
基礎捨石	40	20	18	10	港湾の施設の技術上の基準・同解説 (2007) p415,458
裏込材	40	20	18	10	〃
埋立対象物	30	20	18	10	一般的な“砂材”と仮定
中詰材(砂)	30	20	18	10	せん断抵抗角は一般的に用いられている値を採用

(3) 検討断面

検討断面を図 3.4 に示す。沖防波堤側は既設堤体をそのまま護岸に利用することとし、防波堤の標準断面を安定性照査の対象とする。

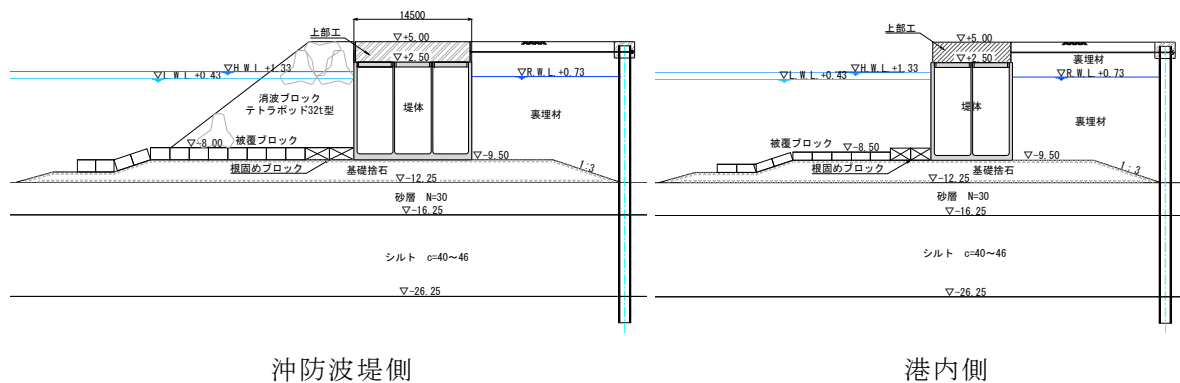


図 3.4 検討断面

3.4 海面処分場の構造安全性

(1) 安定性照査結果 (永続状態・変動状態)

永続状態と変動状態に対して堤体の滑動・転倒・基礎の支持力照査をおこない、永続状態に対して円弧すべりを検討する。照査の結果、沖防波堤は既存利用が可能である。港内側の新設堤体は、堤体幅を 10m とすることで、作用外力および円弧すべりに対する安定性が確保される。

表 3.5 外周護岸の安定性照査結果

検討断面	状態	耐力作用比			
		滑動	転倒	基礎の支持力(ピシヨップ)	円弧すべり
沖防側断面 堤体幅=14.5m	永続状態	2.744 ≧ 1.00 ...O.K.	8.618 ≧ 1.00 ...O.K.	1.624 ≧ 1.00 ...O.K.	1.108 ≧ 1.00 ...O.K.
	変動状態 (kh=0.10)	1.972 ≧ 1.00 ...O.K.	3.519 ≧ 1.00 ...O.K.	1.634 ≧ 1.00 ...O.K.	—
港内側断面 堤体幅=10.0m	永続状態	1.884 ≧ 1.00 ...O.K.	4.228 ≧ 1.00 ...O.K.	1.226 ≧ 1.00 ...O.K.	1.052 ≧ 1.00 ...O.K.
	変動状態 (kh=0.10)	1.598 ≧ 1.00 ...O.K.	2.114 ≧ 1.00 ...O.K.	1.192 ≧ 1.00 ...O.K.	—

永続状態と変動状態に対して、鋼管矢板・タイ材・腹起しの安定性照査をおこなう。照査の結果、鋼管矢板は杭径 1,200mm、厚さ 14mm で作用外力に対する安定性が確保される。また、鋼管矢板と堤体との離隔は 18.8m となる。

表 3.6 鋼管矢板の安定性照査結果

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
鋼管矢板	φ1200× t 14.0 (P-T) 型、 L=34.0m、SKY490	永続状態	185.9	315.0	0.59
		変動状態 (kh=0.10)	240.2	315.0	0.76
タイ材 (タイロッド)	φ70mm、L=19.0m、SS400	永続状態	108.7	139.8	0.78
		変動状態 (kh=0.10)	191.6	215.0	0.89
腹起し	鋼矢板側：2[200×90×8.0×13.5	永続状態	186.1	235.0	0.79
		変動状態 (kh=0.10)	157.2	235.0	0.67
	控え工側：2[200×90×8.0×13.5	永続状態	186.1	235.0	0.79
		変動状態 (kh=0.10)	157.2	235.0	0.67

外周護岸の平面配置および標準断面を図 3.5～図 3.7 に示す。

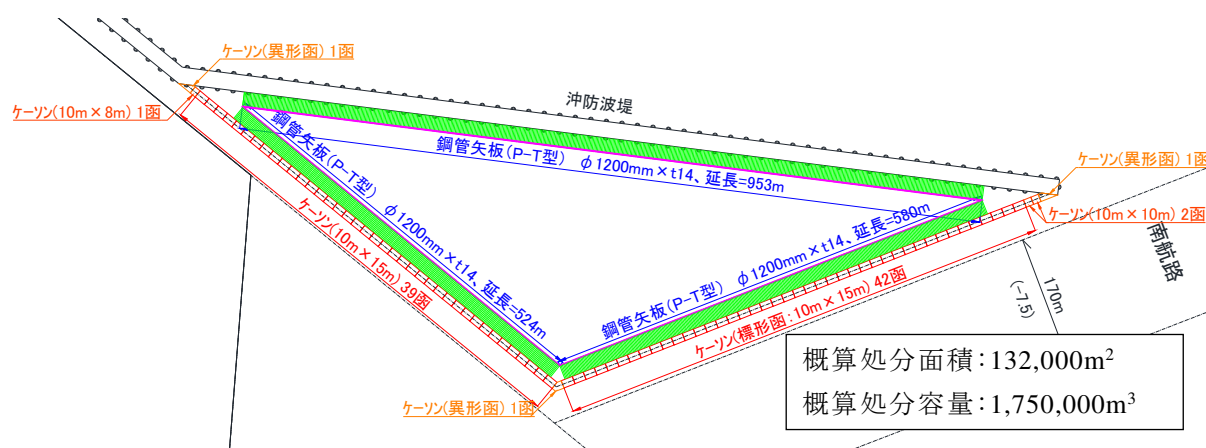


図 3.5 全体平面図

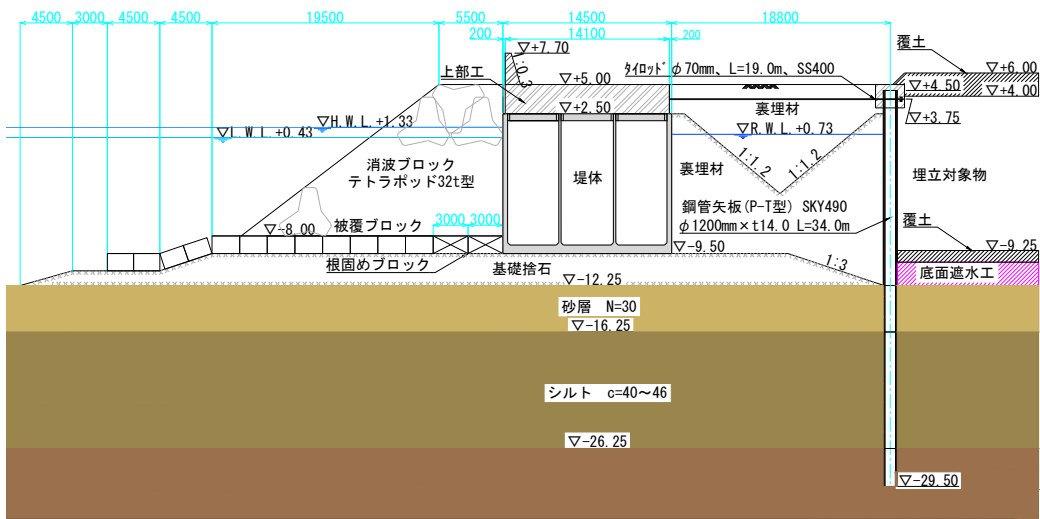


図 3.6 沖防波堤側の標準断面図

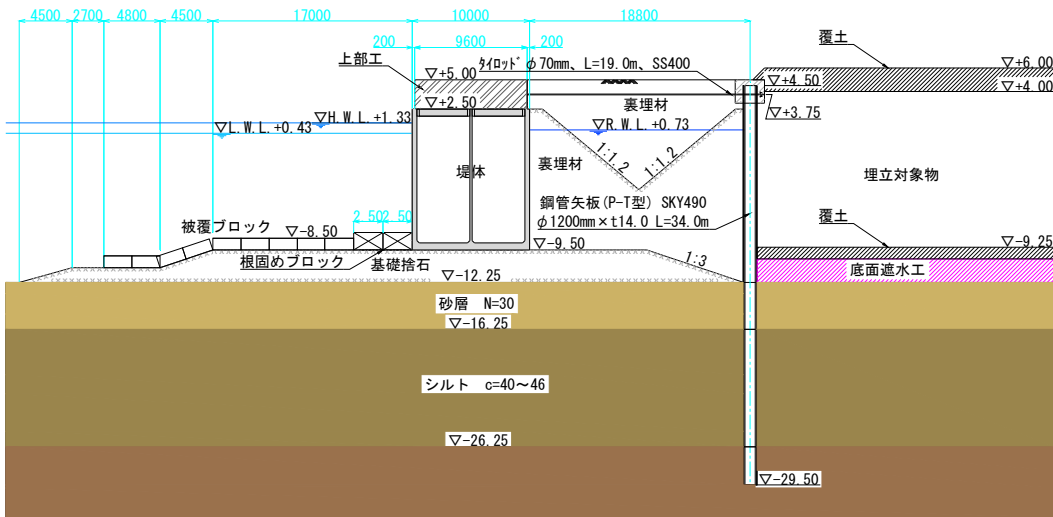


図 3.7 港内側の標準断面

(2) 今後の検討内容

(a) 底面・側面遮水工の詳細検討

本検討では、側面遮水工に鋼管矢板+モルタルジャケットを、底面遮水工に土質系遮水材の使用を想定している。下記(b)-1の実施により、より合理的な遮水工の検討が可能である。

(b) 偶発状態での検討（耐震・耐津波検討）

本検討の標準断面は、永続状態および変動状態で決定したものであり、偶発状態での検討が必要である。検討項目は以下の2点である。

(b)-1 耐震検討

偶発状態で堤体の変位した際、タイ材を介した鋼管矢板の変形（遮水機能の損傷）を防止するため、本検討では埋立完了後のタイ材切断を想定している。また、鋼管矢板と堤体の離隔が適切であれば、堤体が大きく変位する場合も矢板には影響が及びにくいと考えられる(図3.8)。

上記について、偶発状態での鋼管矢板の挙動を動的解析で把握し、護岸変形時の矢板の健全性を評価することで、遮水機能が維持されることを確認する。

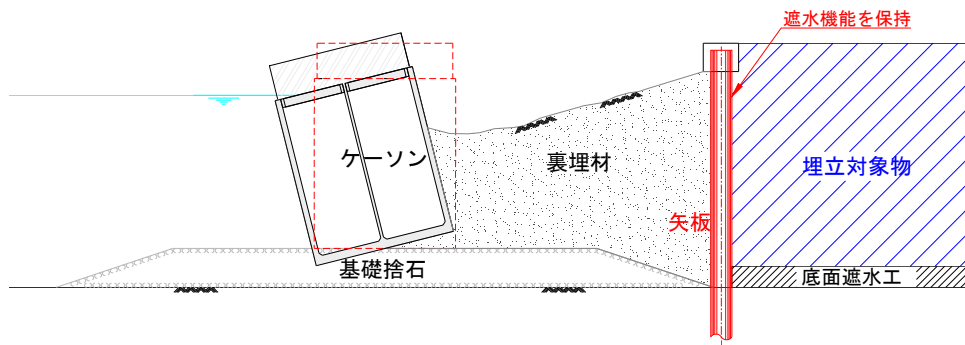


図 3.8 偶発状態における推定被災断面

(b)-2 耐津波検討

偶発状態で想定される津波の越流に対して、埋立対象物の流出対策を検討する。護岸背面に設置する津波減勢工の仕様を検討し、埋立天端上での流速低減と洗掘防止の効果を確認する。

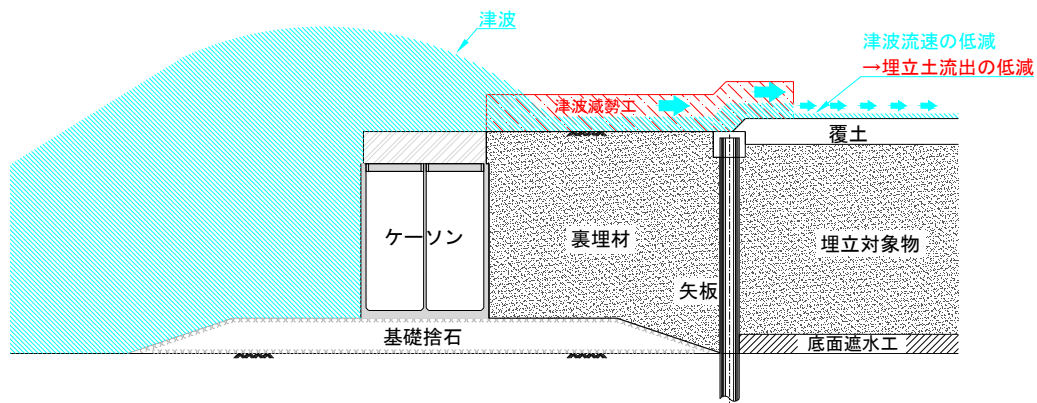


図 3.9 津波減勢工の設置イメージ

3.5 海面処分場の整備コスト

(1) 概算整備費用

海面処分場の建設に係る費用を表 3.7 に示す。工事全体の価格は約 300 億円となり、処分容

表 3.7 概算工事費

項目	細目	規格	単位	数量	金額
直接工事費					21,808,000,000
	基礎工		m ³	170,074	1,900,000,000
	本体工	標準タイプ：84函、異形タイプ：3函	函	87	2,737,000,000
	上部工（ケーソン）	港内側：h=2.5m、沖防側：パラペット	m ³	33,447	999,000,000
	被覆・根固め工		m ³	39,189	581,000,000
	裏込・裏埋工		m ³	612,189	2,999,000,000
	底面遮水工	土質系遮水材	m ²	132,154	5,947,000,000
	側面遮水工	φ1200mm、t 14mm、L=34m	本	1,490	6,025,000,000
	上部工（鋼管矢板）	断面：2m×2.5m	m ³	10,280	620,000,000
諸経費					8,077,000,000
工事価格					29,885,000,000
				処分容量1m ³ あたり	17,100円/m ³

量 1m³あたりに換算すると、1.71 万円/m³となる。

(2) 陸上の管理型処分場との比較

環境省廃棄物処理技術情報^{3.8)}によると、構造基準が強化された 2000 年度以降では、新設の管理型陸上処分場（オープン型）の埋立容量は最大 42 万 m³、平均 7 万 m³である。埋立容量別の建設数を図 3.10 に示す。陸上処分場の多くは埋立容量が 10 万 m³以下であり、大規模な埋立容量を陸上に確保することは困難と言える。

本検討では、建設可能な陸上処分場の埋立容量を 10 万 m³とし、過去の建設実績を参考にした建設費予測式^{3.9)}を用いて、合計 200 万 m³の処分場を建設するための整備コストを算出する。

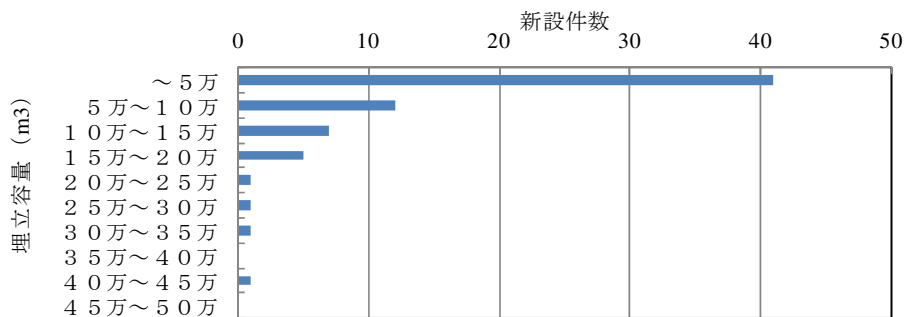


図 3.10 埋立容量別の建設数 (2000~2011)

建設費予測式は、線形近似と累乗近似の 2 種類が設定されている。

$$Y=507.5X^{0.257} \quad (3.1)$$

$$Y=12.74X+872.7 \quad (3.2)$$

ここで、Y：建設費（百万円）、X：埋立容量（千 m³）

各々の予測式に基づくと、200 万 m³規模の処分を行なうためには、表 3.8 に示す整備コストが必要となる。

表 3.8 陸上処分場の概算整備コスト

予測式	建設費用	施設数	総建設費	埋立容量あたり
(3.1式)	1,658百万円/施設	20施設	331.6億円	1.66万円/m ³
(3.2式)	2,147百万円/施設	20施設	429.4億円	2.15万円/m ³

陸上処分場の整備コストは埋立容量あたり平均 1.91 万円/m³となり、海面処分場の方が 10%程度低コストとなる。

3.6 海面処分場の放射線曝露リスク

(1) 放射線曝露リスクの評価シナリオ

(a) 陸上処分に関する評価シナリオ

放射線曝露リスクの検討では、被ばく経路と被ばく対象者を想定した複数の評価シナリオを設定し、シナリオ毎に被ばく線量を算出して安全評価基準と比較する。

陸上処分等に関する既往の曝露リスク検討例を表 3.9 に示す^{3.10),3.11),3.12),3.13)}。表中の a は汎用検討、b, c, d は地形等を考慮した固有施設の検討である。これらの評価シナリオ群から、埋立中と埋立完了後に関するものを類型化して表 3.10 に示す。曝露リスクは主に外部被ばくと経口被ばくによるものに分類される。

表 3.9 既往の放射線曝露リスク検討

検討の内容	対象物	検討濃度 (Bq/kg)	処分等形式	処分等規模 (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	34万
c. 指定廃棄物の埋立処分	廃棄物	10万	既設陸上	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	1,000万, 20万

表 3.10 既往検討の評価シナリオの類型化 (埋立中, 埋立完了後)

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	周辺公衆	
			外部・経口・吸入	作業者	
		浸出処理水の放出	経口	公衆	
			外部	作業者	
	事故時	輸送事故による運搬物の散乱	外部・吸入	周辺公衆	
			外部・経口	周辺公衆	
外部			周辺公衆		
経口			周辺公衆		
埋立後	平常時	処分場跡地の利用	外部	周辺公衆	
			外部・経口・吸入	作業者	
		浸出処理水の放出	外部・吸入	事業所利用者	
			経口	公衆	
	事故時	場内地下水の利用	経口	公衆	
			外部	作業者	
			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
			地震等での汚染防止機能喪失	経口	周辺公衆

(b) 海面処分の評価シナリオの設定

海面処分の評価シナリオには、陸上処分と同様の検討内容になるものも多い。本検討では、海面処分特有の条件を反映した代表的なシナリオを選定する。表 3.11 に評価シナリオを示す。

表 3.11 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 気中埋立作業	外部	場内作業者	処分場全域で覆土なし 年間1,000時間
3			外部	海水面活動者 (周辺漁船等)	護岸離隔100mで漁業操業 年間120日間
4	事故時	津波で埋立対象物が 海域流出	経口	公衆	埋立対象物が10万m ³ 流出 Cs溶出率1%(除去土)が海水濃度上昇に寄与
5	埋立後	調整池が損傷し貯 留水が海域流出	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 保有水が海域漏出	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

No.2 は陸上処分と同作業であり、実施工時には所定の曝露防止措置(埋立層厚 3m 毎に 50cm の中間覆土, 作業終了時の速やかな覆土等)が必要である。その場合、既往検討と同様の評価

内容になるため、ここでは参考として、覆土を施工せずに対象物の埋立が完了する事例を検討する。同様に、No.3も安全側評価として覆土遮へいを考慮しない。

No.4は覆土前の津波被災であり、事故規模を十分保守的に想定する必要がある。ここでは、埋立対象物が沖側護岸全長に渡り、法勾配1.5で完全流出する事例を検討する。これは、東日本大震災において重力式護岸が被災して埋立土砂が流出した事例の、数百～数千倍程度の規模と考えられる。

(2) 海面処分における被ばく線量

(a) 埋立対象物の設定

各評価シナリオを除去土壌で検討し、一部は廃棄物（焼却灰固化物）でも検討する。 ^{134}Cs と ^{137}Cs の存在比は1:3（2015年1月時点の組成に相当）とし、放射能濃度は共通とする。

(b) 外部被ばく線量の算出方法

放射線源は埋立対象物による造成地盤を想定し、地盤からの直接線と大気中での散乱線を検討する。計算式は以下による。

$$D_{p,ext}(i) = C_{wa}(i) \cdot S_p \cdot t_p \cdot DF_{p,ext}(i) \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda(i) \cdot t_2)}{\lambda(i) \cdot t_2} \quad (3.3)$$

ここで、

$D_{p,ext}(i)$: 放射性核種*i*の外部被ばく線量 ($\mu\text{Sv/y}$) $DF_{p,ext}$: 放射性核種*i*の外部被ばく線量換算係数

$C_{wa}(i)$: 対象物中の放射性核種*i*の濃度 (Bq/g) ($\mu\text{Sv/y per Bq/g}$)

S_p : 外部被ばくに対する遮へい係数 (-) $\lambda(i)$: 放射性核種*i*の崩壊定数 ($1/y$)

t_p : 滞在時間 (h/y) t_2 : 被ばく中の減衰期間 (y)

主なパラメータを表3.12に示す。処分場を3次元放射線輸送解析コード(MCNP)でモデル化し、評価位置における線量換算係数を求める。海上投入作業の検討は、水の実効線量透過率を乗じた概略計算とする。

表 3.12 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)	$\mu\text{Sv/h per Bq/g}$	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×φ400m 護岸天端:+5.0 埋立天端:+3.5 海面天端:+1.0 空気層厚:1km

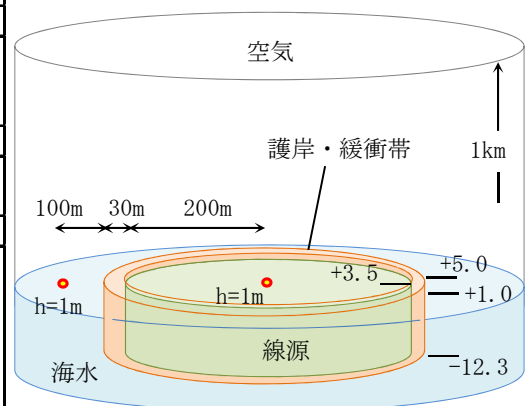


図 3.11 MCNP 解析モデル

(c) 経口被ばく線量の算出方法

事故による海域への埋立対象物の流出，濃縮貯留水の流出，保有水の漏出を想定する．海水の放射能濃度上昇を想定し，放射性物質が濃縮した海産物の摂取による内部被ばくを検討する．対象物流出では対象物の溶出率を，貯留水流出では排水基準に対する濃度倍率を設定する．保有水漏出では埋立対象物からの漏出率を考慮する．海産物は魚類・無脊椎動物・海藻類を想定する．計算式は以下による．

$$D_{ing}(i) = \sum_j (C_{SW}(i) \cdot CF_S(i, j) \cdot M_S(j) \cdot G_S(j) \cdot DF_{ing}(i)) \quad (3.4)$$

$$C_{SW}(i) = \frac{R_{SW}(i)}{Q_{SW}} \quad (3.5)$$

$$R_{SW}(i) = W_S \cdot C_A(i) \quad (3.6)$$

ここで，

- $D_{ing}(i)$: 放射性核種 i の水産物経口被ばく線量 (μ Sv/y) Q_{SW} : 水域における希釈水量 (m^3)
 $C_{SW}(i)$: 放射性核種 i の水域中の濃度 (Bq/m^3) $CF_S(i, j)$: 放射性核種 i の水産物 j への濃縮係数
 $R_{SW}(i)$: 放射性核種 i の水域への放出量 (Bq) (m^3/kg)
 W_S : 津波等で水域に移行する除去土壌等の量 (kg) $M_S(j)$: 水産物 j の年間摂取量 (kg/y)
 $C_A(i)$: 除去土壌等の放射性核種 i の濃度 (Bq/kg) $G_S(j)$: 水産物 j の市場希釈係数 (-)
 $DF_{ing}(i)$: 放射性核種 i の経口摂取による内部被ばく線量換算係数 (μ Sv/y per Bq/g)

また，

$$C_i^s = \frac{M \cdot c_i \cdot L_i}{U^s} \quad (3.7)$$

$$L_i = \frac{I}{\theta^{cz} \cdot z^{cz} \cdot R_i^{cz}} \quad (3.8)$$

$$R_i^{cz} = 1 + \frac{\rho^{cz} \cdot K_{d,i}^c}{\theta^{cz}} \quad (3.9)$$

ここで，

- C_i^s : 汚染層浸出水中の放射性核種 i の濃度 (Bq/m^3) U^s : 汚染層を通る浸出水の量 (m^3/y)
 L_i : 放射性核種 i の線源からの漏出率 (1/y) I : 浸透率 (m/y)
 R_i^{cz} : 放射性核種 i の遅延係数 (-) θ^{cz} : 汚染層の水分含有率 (-)
 M : 汚染物質の全重量 (g) z^{cz} : 汚染層の厚さ (m)
 c_i : 汚染物質中の放射性核種 i の比放射能 (Bq/g) ρ^{cz} : 汚染層の密度 (g/cm^3)
 $K_{d,i}^c$: 汚染層における放射性核種 i の分配係数 (cm^3/g)

主なパラメータを表 3.13 に示す．海域における希釈水量は，想定海域の潮汐条件等から概略計算で求める．

表 3.13 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	「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針について」の海水における濃縮係数
		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	「平成8年版国民栄養の現状」における平成6年の1人当たりの摂取量
		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	対象海域産の魚介類のみ摂取として設定 (希釈は考慮しない)
		無脊椎動物	1	
		海藻類	1	
線量換算係数 (成人)	μ Sv/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Ⅱ(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の数値として設定
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		
降雨浸透水量	m/y	0.4		土壌貯蔵施設Ⅱ(既往検討d)と同設定

(d) 被ばく線量

表 3.14 に単位濃度当たりの被ばく線量と、除去土壌での線量例 (8,000, 10 万 Bq/kg) を示す。No.2 以外は、10 万 Bq/kg 以下の処分については安全評価基準^{3.14), 3.15)}を満足する。覆土なしでの気中埋立を仮定した No.2 では、13,000Bq/kg 以上の処分では基準超過となる。

表 3.14 各評価シナリオの被ばく線量

No.	段階	想定状況		被ばく対象者	単位濃度当たりの被ばく線量 μ Sv/年or事故 per Bq/g		被ばく線量 (除去土壌) μ Sv/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	埋立後	事故	対象物流出	公衆	9.6E-03	-	7.7E-02	9.6E-01	5E+03
5			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	

(3) 既往検討 (陸上事例) との比較

(a) 比較における課題

既往検討は具体施設に特化した設定が多く、被ばく対象者の条件も様々である。また、埋立条件、放射性物質の動態に関する係数、事故の想定規模等での計算条件の違いも多岐に渡る。比較では線源規模や放射能濃度の違いに加え、これらの違いに留意する必要がある。

(b) 評価シナリオ毎の比較

評価シナリオ毎に対応する既往検討の評価事例を選び、個別に比較する。主に除去土壌の検討ケースについて比較する。

(b)-1 埋立中の作業者の外部被ばく

表 3.15 に、造成地盤から埋立作業者が受ける外部被ばく線量を示す。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。

処分量の 70%程度が海上投入のため、平均的な放射線曝露リスクは検討 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といえる。

表 3.15 埋立中作業者の線量評価比較（造成地盤(覆土遮へい無し)からの被ばく）

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

※1, 2 散乱線は考慮していない
 ※2 設定濃度で割戻して算出

(b)-2 埋立中の周辺公衆の外部被ばく

表 3.16 に、造成地盤から周辺公衆が受ける外部被ばく線量を示す。海面処分では護岸天端より低位置の海水面活動者が対象であり、直接線の影響を受けにくい。保守的な想定（全面陸域化・覆土なし）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。

検討 d は公衆離隔が大きく、検討 c は作業域以外を覆土遮へいする想定である。気中埋立において、陸域化とともに順次覆土する場合は、陸上処分と同等以下の放射線曝露リスクになると考えられる。

表 3.16 埋立中の周辺公衆の線量評価比較（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 $\mu\text{Sv/年 per Bq/g}$			(参考例) 10万Bq/kgでの被ばく線量 $\mu\text{Sv/年}$			安全 評価基準
	本検討 No. 3	検討 c	検討 d	本検討 No. 3	検討 c	検討 d	
除去土壌	4.9E-01	4.4E-02 ^{※1} (焼却灰)	3.9E-01 ^{※2}	50	4	40	1,000

※1 公衆離隔156m, 作業域100m²のみ露出
 ※2 公衆離隔500m, 処分域40,000m²が露出
 ※1, 2 設定濃度で割戻して算出

(b)-3 埋立中の放射性物質流出事故による経口被ばく

表 3.17 に、埋立中の事故が原因の汚染食物による経口被ばく線量を示す。検討 d では、遮水不全による保有水の河川流出と、河川水産物の汚染を想定している。本検討では、津波による処分物の港内流出と海産物の汚染を想定する。10万 Bq/kg の除去土壌が対象でも、経口被ばく線量は安全評価基準の 1/1000 未満と十分小さいが、検討 d よりは 3 オーダー高くなる。

検討 d より No.4 の被ばく線量が高い要因として、検討 d では事故流出量が少ない（降雨浸透分のみ）、水域到達までの放射性物質の土壌吸着を考慮する、産物摂取量が少ない（海産物比 1/30）等を想定していることが挙げられる。海面処分物の被災流出規模の設定は難しいが、処分中の流出軽減措置を検討することが望ましい。

表 3.17 埋立中の事故による経口被ばくの線量評価比較

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 $\mu\text{Sv}/\text{事故(年)}$ per Bq/g		(参考例) 10万Bq/kgでの被ばく線量 $\mu\text{Sv}/\text{事故(年)}$		
	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 $1\text{m}^3/\text{kg}$)
 ※ 設定濃度で割戻して算出

(b)-4 埋立完了後の放射性物質流出事故による経口被ばく

表 3.18 に、埋立完了後の事故が原因の汚染食物による経口被ばく線量を示す。検討 a では、遮水不全による保有水の定常地下水移行と、地下水利用による農水畜産物の汚染を想定している。本検討では、貯留浸出水の港内流出や保有水の定常移行による、海産物の汚染を想定する。経口被ばく線量は、検討 a の農畜産物より 2 オーダー、淡水産物より 1 オーダー低くなる。

海面処分では、貯留水の大量流出より保有水の定常漏出の方が、放射線曝露リスクに与える影響は大きい。放射線曝露リスクは、陸上処分と同等以下になると考えられる。

表 3.18 埋立完了後の事故による経口被ばくの線量評価比較

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 $\mu\text{Sv}/\text{事故(年)}$ per Bq/g			(参考例) 10万Bq/kgでの被ばく線量 $\mu\text{Sv}/\text{事故(年)}$		
	本検討		検討 a	本検討 No. 5, 6	検討 a	安全 評価基準
	No. 5	No. 6				
除去土壌	1.2E-07	2.9E-03	2.2E-01 (農作物) 2.1E-01 (畜産物) 5.4E-02 (淡水産物)	<1	20 20 5	300

(c) 比較に関する考察

本検討では、海面処分の放射線曝露リスクは概ね陸上処分と同程度以下である。既往検討では評価シナリオを網羅的に設定しており、最も高い曝露リスクは埋立作業員の外部被ばくによるものである。したがって、海上投入が主体の海面処分は、埋立処分全体の曝露リスクが抑制されると考えられる。

一方、陸上処分と異なり、海面処分では津波被災の想定が必要である。津波被災では、放射性物質の大規模流出の想定が成立する。具体的な被災軽減対策を検討のうえ、適切に評価に反映して曝露リスクを低減することが重要である。なお、ここで検討対象としていない評価シナリオについては、概ね陸上処分の曝露リスクに準じるものと考えられる。

3.7 除去土壌等に対する海面処分場の基本適性

(1) 構造安全性と整備コストに関する適性

永続状態および変動状態の照査では、護岸機能と遮水機能を分離した構造により、処分適性を有する海面処分場の構築が可能と考えられる。偶発状態での遮水機能保全については、引き続き確認する必要がある。整備コストに関しては、陸上処分場に対して単位埋立容量あたり10%程度のコストダウンが期待できる。これより、構造安全性と整備コストについて、海面処分場は陸上処分場と同等以上の処分適性を有すると考えられる。

(2) 放射線曝露リスクに関する適性

10万 Bq/kg以下の埋立対象物について、平常時・事故時ともに安全評価基準に適合した埋立処分が可能と考えられる。気中埋立時には陸上処分と同様の曝露防止措置が必要だが、全体としては、陸上処分と比較して放射線曝露リスクの抑制が期待できる。したがって、曝露リスクに関しても、陸上処分場と同等以上の処分適性を有すると考えられる。

3.8 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から、海面処分場には、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。今後は構造安全性を詳細検討し、処分工程と施工方法の検討に基づく適性評価の確認が必要である。

参考文献

- 3.1) 環境省：「廃棄物関係ガイドライン第2版」，2013年3月。
- 3.2) 中間貯蔵施設等福島現地推進本部：「除去土壌等の中間貯蔵施設の案について」，2013年12月。
- 3.3) 環境省：「特定一般廃棄物又は特定産業廃棄物の埋立処分を行なう水面埋立地の指定について（通知）」，2012年3月。
- 3.4) 環境省：「8,000Bq/kgを超え、100,000Bq/kg以下の焼却灰等の処分方法に関する方針について」，2011年8月。
- 3.5) 国土交通省：「国土情報検索サイト KuniJiban」，<http://www.kuinjiban.pwri.go.jp/jp/>，2014アクセス。
- 3.6) (社)日本港湾協会，「港湾の施設の技術上の基準・同解説」，2007。
- 3.7) (財)港湾空間高度化環境研究センター：「管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル（改訂版）」，2008。
- 3.8) 環境省：「環境省廃棄物処理技術情報」，http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/。
- 3.9) (財)日本環境衛生センター西日本支局：「廃棄物処理のここが知りたい・維持管理のポイント」，2006。
- 3.10) 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」，2011年6月。
- 3.11) 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」，2011年9月。
- 3.12) 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」，2013年3月。
- 3.13) 環境省：「中間貯蔵施設の概略安全評価について」，2013年9月。
- 3.14) 経済産業省：「放射性物質が検出された上下水処理等副次産物の当面の取り扱いに関する考え方」，2011年6月。
- 3.15) 原子力安全委員会：「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」，平2010年8月。

4. 海面処分場の構築技術

4.1 検討概要

本章では、イメージ港湾の沖防波堤の港内側に管理型海面処分場を建設する場合の構築技術について検討する。

4.2 基本条件

施設構造を検討するための基本的な条件を以下に示す。

(1) 施設配置計画

処分場の平面配置は、港湾計画上の航路・泊地に干渉しないよう、図 4.1 に示すとおり計画する。

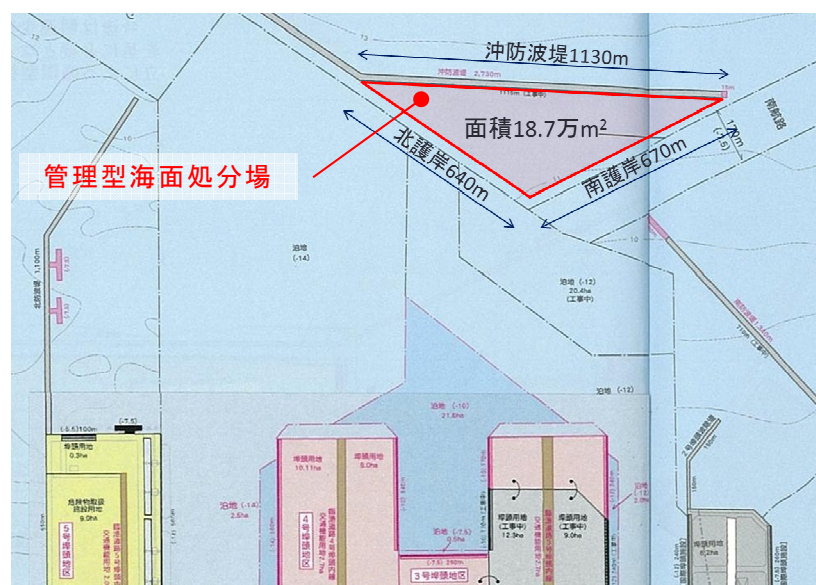


図 4.1 管理型海面処分場配置計画（イメージ港湾）

(2) 自然条件

・潮位

さく望平均満潮位 H.W.L.+1.5m

さく望平均干潮位 L.W.L.±0.0m

・場内平均地盤高

-12.5m（港湾計画図による平均水深-12mに、震災以降の沈下分として0.5m加算）

・地盤の概況

計画地点の海底面付近は密な砂質土（N=20～50超）となっており、「不透水性層」（透水係数 $k \leq 1.0 \times 10^5$ で厚さ 5m 以上の連続した粘土等の層）と見なせるような土層は分布していない。

(3) 施設天端高

震災前における近傍の護岸・岸壁の天端高は+3.5m～+4.0mであることから、護岸天端高および埋立天端高を次のとおりとする。

- ・護岸天端高 +4.0m
- ・廃棄物埋立天端高 +2.5m（覆土および防護コンクリート分の厚さ 1.5m を控除）

4.3 施設構造形式の選定

(1) 遮水工

前述のとおり、計画地点には不透水性層と見なせるような土層はないため、処分場底面にはシート遮水工か人工の不透水性層を敷設する必要がある。しかし、イメージ港湾の近傍には土質系不透水性材料の原料となる軟弱粘性土がないため、底面遮水はシート遮水工を想定する。

また、施工性や底面遮水工との連続性確保などを考慮すると、側面（護岸背面）の遮水についてもシート遮水工が適しているものと判断できる。

本章では、原案として「二重遮水シート」を、その見直し案として「一体型複合遮水シート」を用いた遮水工について検討する。

一体型複合遮水シートとは、二重の遮水シート間に中間保護材として二液常温硬化型ポリウレタンを注入した三重の遮水構造であり、①シートの敷設手間が1回で済む、②中間保護層が不要となり処分容量が増加する、③漏水リスクが低減するなどのメリットを有する工法である。

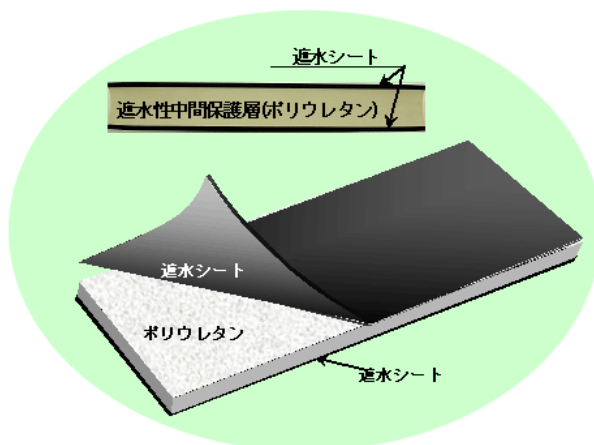


図 4.2 一体型複合遮水シートの構造概念

写真 4.1 一体型複合遮水シート

(2) 埋立護岸

計画地点付近は地盤改良を行わなくとも十分な支持力が得られる、重力式構造に適した地盤条件となっている。一方、矢板等の根入れ式構造は、現地作業が多く、密な砂質地盤への打ち込みに補助工法が必要となって重力式と比較して工程面で不利になると見込まれる。

また、不透水性地層がある場合には、根入れ式護岸に止水処理を施して側面の遮水工を兼用することができるが、前項に述べたとおり、当施設の遮水工は底面および側面ともシートを用いるとしたことから、護岸を根入れ式とする特段のメリットはない。

以上から、本章では重力式（ケーソン式）護岸について検討する。

4.4 ケーソン式護岸の安定計算

(1) 計算方法

ケーソン式護岸の安定計算は、港湾の施設の技術上の基準・同解説（以下、「技術基準」という）に記載された部分係数法^{4.1)}により行う。

(2) 計算条件

- ・マウンド天端高

マウンド天端高は既設沖防波堤と同様、 -9.5m とする。

- ・地盤条件

近傍の地盤条件を参考に、設計に用いる地盤条件は表 4.1 のとおりとする。

表 4.1 設計地盤条件

No.	区分	標高 (m)		層厚 (m)	γ or γ' (kN/m ³)	N 値 (回)	ϕ (°)	Cu (kN/m ²)
		上側	下側					
1	ガレキ(気中)	+4.00	+1.00	3.00	18.00	5	30.00	
2	ガレキ(水中)	+1.00	-12.50	13.50	10.00	5	30.00	
3	砂質土(上部)	-12.50	-18.50	5.00	10.00	10~50	35.00	
4	砂質土(下部)	-12.50	-22.50	10.00	10.00	10~20	30.00	
5	砂質シルト	-18.50	-29.50	11.00	6.90			98.00
6	基盤層	-22.50	-	-	10.00			

- ・荷重条件

処分場内の上載荷重は次のとおりとする。

永続状態 10kN/m^2 変動状態 5kN/m^2

- ・照査用震度

1次元地震応答解析によって求められる照査用震度を表 4.2 に示す。

イメージ港湾におけるレベル 1 地震波形は 9110 (1号埠頭) と 9120 (2, 3号埠頭) にゾーニングされており、施設計画地点に近い 9120 を用いて算定した照査用震度の方がやや大きい値を与える結果となった。

表 4.2 照査用震度

	レベル 1 地震波形	最大加速度 a_{max} (Gal)	許容変位量 D_a (cm)	照査用震度 kh
ケーソン式	9110 (1号埠頭)	165	10	0.09
	9120 (2, 3号埠頭)	118	10	0.10

しかし、当施設は管理型処分場であり、技術基準で「レベル 2 地震動の作用により、廃棄物等が海域に流出しないような構造を有することが望ましい」^{4.2)}としていることを考慮すると、0.10 という震度はやや過小と考えられる。そこで本検討では、便宜的に(4.1)式による設計震度 (kh)^{4.3)}を用いた静的安定計算から護岸断面を決定する。

$$k_h = 0.13 \text{ (B 地区)} \times 1.2 \text{ (第三種地盤)} \times 1.5 \text{ (特定)} = 0.23 \quad (4.1)$$

(3) 計算結果

所定の安定性が得られるケーソンの形状寸法を表 4.3 に、安定計算結果一覧を表 4.4 に示す。シート遮水工を含む護岸の標準断面については次節 4.5 に示す。

表 4.3 ケーソンの形状寸法

ケーソン天端高	+2.500 (m)
ケーソン長 (法線方向)	20.000 (m)
ケーソン幅	17.000 (m)
ケーソン高	12.000 (m)
法線方向隔室数	4 (室)
断面方向隔室数	4 (室)
側壁厚	0.400 (m)
隔壁厚	0.200 (m)
底版厚	0.600 (m)
ハンチ幅	0.200 (m)
フーチング	なし
蓋コンクリート厚	0.500 (m)

表 4.4 安定計算結果一覧

項 目			永続状態		レベル1地震動に関する 変動状態	
			載荷重なし	載荷重あり	載荷重なし	載荷重あり
滑 動	耐 力	$f_d \cdot V_d$ (kN/m)	1,009.39	1,065.49	1,899.38	1,950.38
	作 用	$\gamma_a \cdot H_d$ (kN/m)	408.05	408.05	1,862.01	1,881.56
	耐力作用比		2.47	2.61	1.02	1.04
	判 定		安 定	安 定	安 定	安 定
転 倒	耐 力	$V_d \cdot x$ (kN・m/m)	25,182.13	26,627.13	27,991.86	28,714.36
	作 用	$\gamma_a \cdot H_d \cdot y$ (kN・m/m)	2,430.37	2,430.37	12,082.80	12,373.13
	耐力作用比		10.36	10.96	2.32	2.32
	判 定		安 定	安 定	安 定	安 定

4.5 シート遮水工の安定計算

(1) 計算方法

シート遮水工の安定計算は、管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル（改訂版）^{4.4)}に準じて、潮汐や波浪等による内外水位差に対して行う。シートに作用する圧力の概念図を図 4.3～図 4.4 に示す。

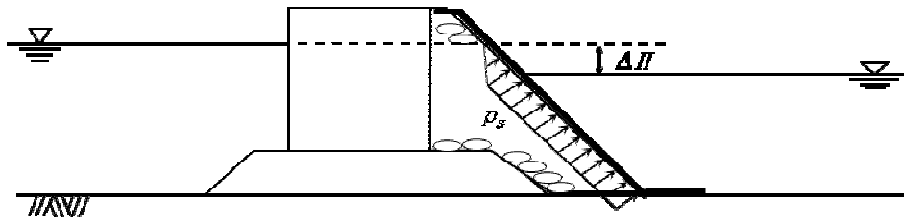


図 4.3 処分場内外の水位差により生じる静水圧の概念図 4.4)

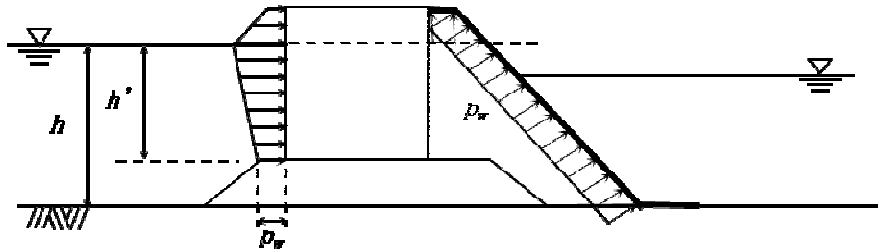


図 4.4 波浪により遮水シートに作用する圧力の概念図 4.4)

なお、本検討では圧抜き口を設けるものとして（図 4.5 参照），波浪による圧力の低減率を 0.50 とした。

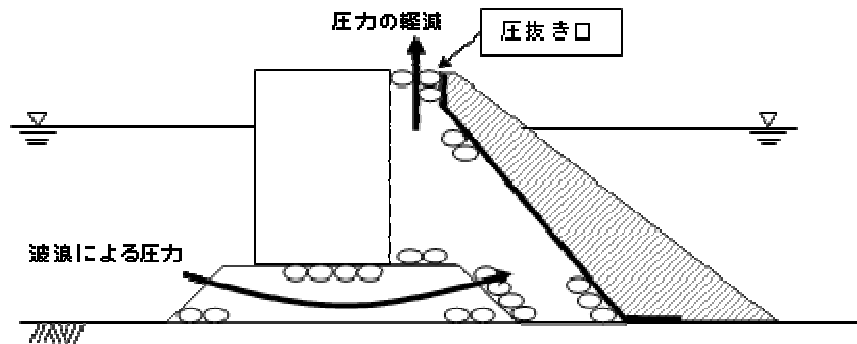


図 4.5 圧抜き口の配置による波力軽減のイメージ 4.4)

(2) 計算条件

- ・被覆層および中間保護層に用いる土砂の物性値

被覆層および中間保護層に用いる土砂の物性値は次のとおりとする。

内部摩擦角 $\varphi=40^\circ$ 単位体積重量 $\gamma=18\text{kN/m}^3$ （気中）， $\gamma'=10\text{kN/m}^3$ （水中）

- ・波浪条件

シート遮水工の安定計算に用いる波浪条件は、沖防波堤の設計条件などを参考に設定した。護岸完成時（上部被覆層の安定計算用）と施工時（中間保護層の安定計算用）の波浪条件を表 4.5 に示す。

表 4.5 シート遮水工の安定計算に用いる波浪条件

施設区分	波浪条件	完成時 (上部被覆層)	施工時 (中間保護層)
沖防波堤	設計波高： H_D (m)	8.6	3.6
	周 期： T (s)	14.0	12.0
	入 射 角： β (°)	0.0	0.0
南護岸	設計波高： H_D (m)	8.8	3.6
	周 期： T (s)	14.0	12.0
	入 射 角： β (°)	60.0	60.0
北護岸	設計波高： H_D (m)	1.1	0.7
	周 期： T (s)	14.0	12.0
	入 射 角： β (°)	0.0	0.0

(3) シート遮水工の安定計算結果

シート遮水工の安定計算結果を表 4.6 に示す。

表 4.6 シート遮水工の安定計算結果

		完成時 (上部被覆層)	施工時 (中間保護層)
沖防波堤	作用 (kN/m)	1,229.22	674.21
	層厚 (m)	6.50	3.50
	耐力 (kN/m)	1,307.18	703.86
	耐力作用比	1.06	1.04
	判 定	安 定	安 定
南護岸	作用 (kN/m)	924.65	525.64
	層厚 (m)	5.00	3.00
	耐力 (kN/m)	962.25	577.35
	耐力作用比	1.04	1.10
	判 定	安 定	安 定
北護岸	作用 (kN/m)	332.80	272.62
	層厚 (m)	2.00	1.50
	耐力 (kN/m)	384.90	288.67
	耐力作用比	1.16	1.06
	判 定	安 定	安 定

(4) 原案（二重遮水シート）の構造断面

二重遮水シートを用いる場合の管理型廃棄物埋立護岸の構造断面を図 4.6～図 4.8 に示す。

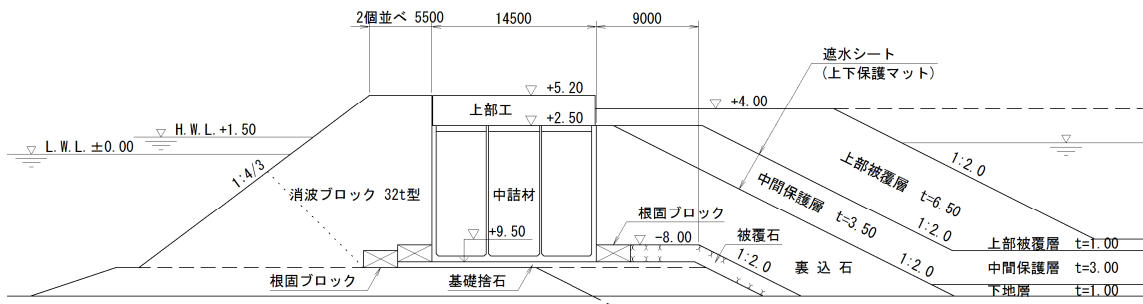


図 4.6 沖防波堤構造断面原案（二重遮水シート）

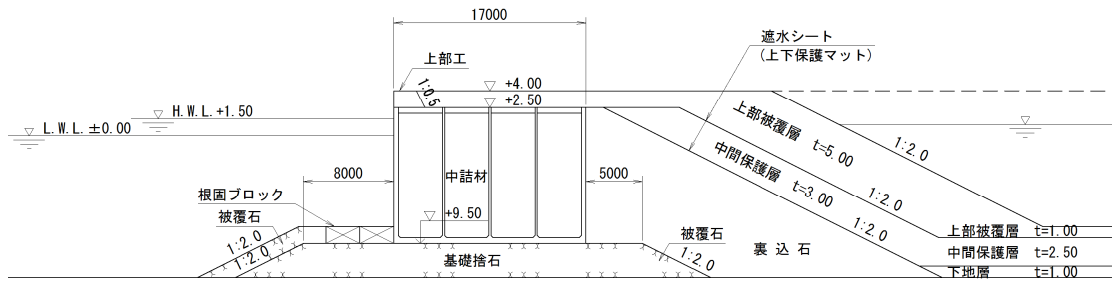


図 4.7 南護岸構造断面原案（二重遮水シート）

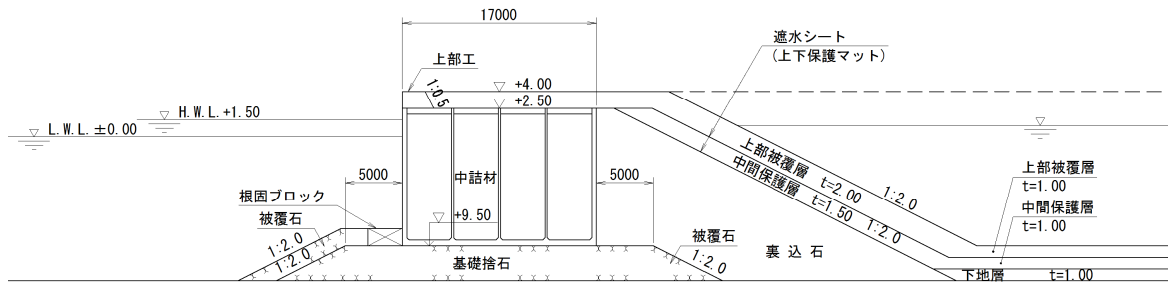


図 4.8 北護岸構造断面原案（二重遮水シート）

(5) 見直し案（一体型複合遮水シート）の構造断面

一体型複合遮水シートを用いる場合の管理型廃棄物埋立護岸の構造断面を図 4.9～図 4.11 に示す。

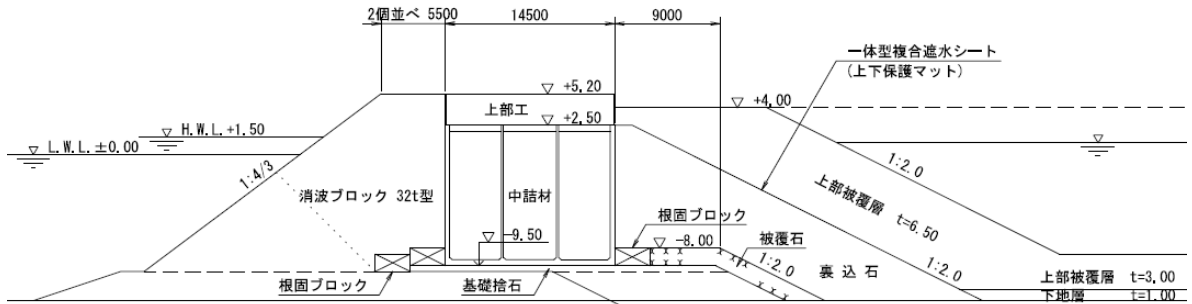


図 4.9 沖防波堤構造断面見直し案（一体型複合遮水シート）

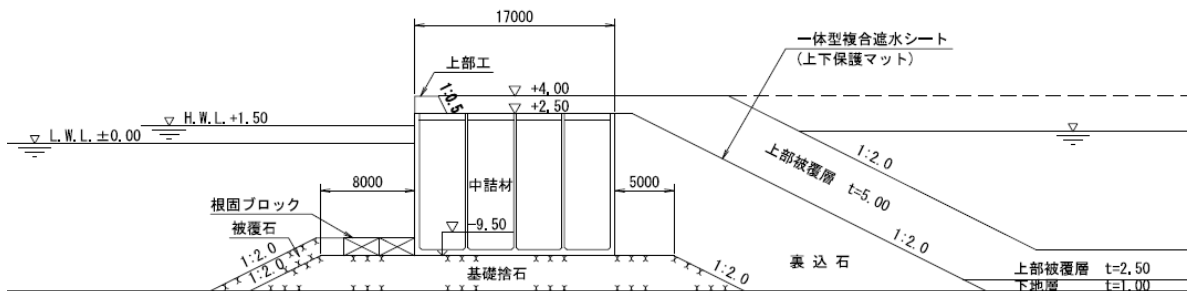


図 4.10 南護岸構造断面見直し案（一体型複合遮水シート）

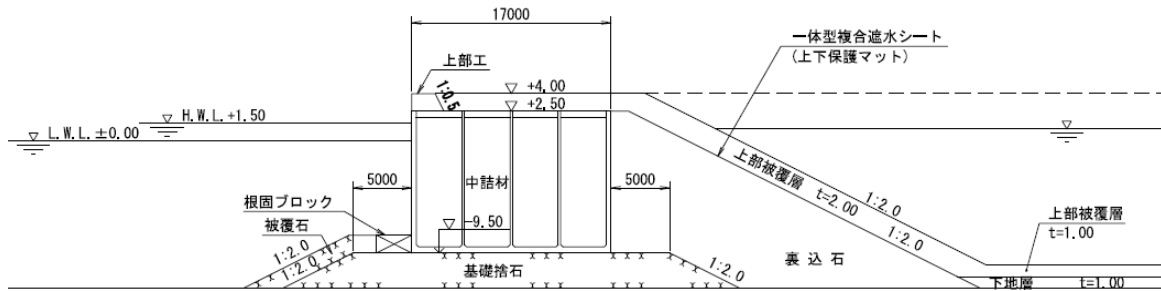


図 4.11 北護岸構造断面見直し案（一体型複合遮水シート）

4.6 概算工費および工期

前節に示した構造断面から算定した概算工費および工期の比較を表 4.7 に示す。

概算工費および工期を算定する上での主な条件は次のとおりである。

- ・ 工事費算定の範囲は護岸築造から遮水工築造までとする
- ・ 近傍に、ケーソンを 6 函同時製作可能な陸上ヤード 2 面が確保できる（ケーソンの長距離曳航やフローティングドック使用は想定せず）
- ・ 護岸築造、遮水工築造ともに、2～3 船団での同時施工とする

表 4.7 概算工費および工期の比較

	原案 二重遮水シート	見直し案 一体型複合遮水シート
埋立容量 (m ³)	1,170,000 (1.00)	1,410,000 (1.21)
概算工費 (百万円)	37,347 (1.00)	37,082 (0.99)
直接工事費	26,676	26,487
護岸築造工	10,972	10,972
防波堤裏込工	1,876	1,876
側面遮水工 (南護岸)	2,158	1,960
" (北護岸)	1,517	1,523
" (防波堤)	4,091	3,627
底面遮水工	6,063	6,529
諸経費等	10,671	10,595
単位処分量当り工費 (万/m ³)	3.2 (1.00)	2.6 (0.82)
工期 (年)	5.0 (1.00)	4.0 (0.80)
護岸築造 (概成まで)	2.5	2.5
遮水工築造	2.5	1.5

原案に比べて見直し案の概算工費は 1%安価となった。ただし、見直し案では処分量が 21% 増加しており、単位処分量当たりの工費で比較すると 18%低減している。また、全体工期についても 20% (1 年) の短縮に繋がった。

4.7 陸上施設との工費の比較

陸上施設である一般廃棄物処分場の建設事例について、平成11年から平成16年に竣工した18事例について、その埋立容量(m³)と埋立容量当たりの事業費単価(千円/m³)の関係を図4.12に示す。これらの事例の平均は、埋立容量：77,111m³、事業費単価26.4千円/m³となった。

4.6で検討した一体型複合遮水シートによる海面処分場の概算工事費においては、この平均単価より若干安価である。

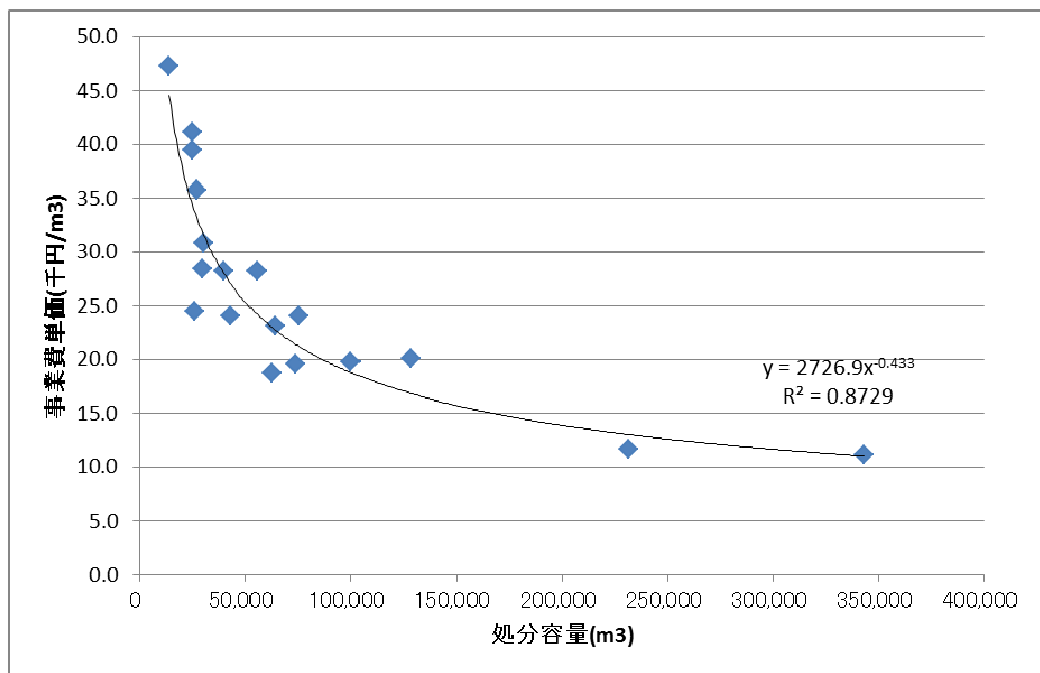


図 4.12 陸上施設(一般廃棄物処分場)の事業費単価の事例

参考文献

- 4.1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp.948～980，2007.
- 4.2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，p.1371，2007.
- 4.3) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp.262～264，1999.
- 4.4) 港湾空間高度化環境研究センター：管理型廃棄物埋立護岸 設計・施工・管理マニュアル，pp.47～48，pp.83～98，2008.

5. 海面処分場の維持・補修

5.1 管理型廃棄物海面処分場の維持管理計画

港湾施設のひとつとなる管理型廃棄物海面処分場の維持管理計画は、『廃棄物の処理及び清掃に関する法律（廃掃法）』と『港湾法』の双方に準拠して立案する必要がある。

維持管理計画を立案する際の具体的な方法は「港湾の施設の維持管理技術マニュアル」^{5.1)}、「港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き（増補改訂版）」^{5.2)}にまとめられており、指針となっている。

ここでは「港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き（増補改訂版）」に則り、特に重要となる遮水工を中心に、維持管理計画の立案例を示す。

5.2 維持管理の目標

イメージ港湾の防波堤部を利用した管理型廃棄物海面処分場（計画水深約-13m, 延長約2km, 処分容量約200万 m^3 ）を想定し、設計供用期間を受入開始時から埋立土が安定化するまでの期間として100年を設定し、その間を適切に維持管理することを目標とする。このために、対象施設の構造上の変状に対する計画的かつ適切な点検診断・維持補修を実施し、設計供用期間のいずれにおいても要求性能を十分確保するための方策を検討する。

また、埋立土は放射性廃棄物等を対象とすることから、特に遮水機能の健全性を維持することが重要となり、これに留意する。

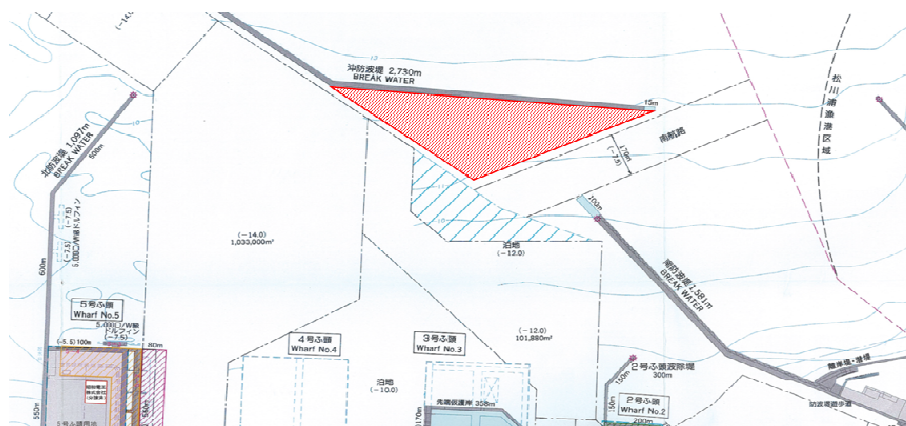


図 5.1 仮想定 of 処分場設置位置（イメージ港湾沖防波堤）

想定する管理型廃棄物海面処分場の護岸構造特性を以下に示す。

構造形式：控え矢板式護岸（遮水鋼管矢板と控えケーソン）

構造概要：側面遮水の機能は鋼管矢板に付与する（図 5.3 参照）。控え工として堤外側に配置した重力式ケーソン（消波構造体としての機能を併設）を用い、タイ材で結合する。鋼管矢板とケーソンの間は裏込石で埋める。

ここに、裏込材に土質系遮水材等を採用することもできる。この場合、本構造の遮水機能は、①鋼管矢板の継手部（モルタル）、②鋼管矢板の遮水室部（変形追随性遮水材：例えばアスファルトマスチック）、③裏込部の土質系遮水材の3ラインとなり、通常 of 管理型廃棄物海面処分場より1ライン多くできる。

また現地盤に遮水層が必要厚存在しない場合には、底面遮水工として遮水シートや土質系遮水材を設置する。

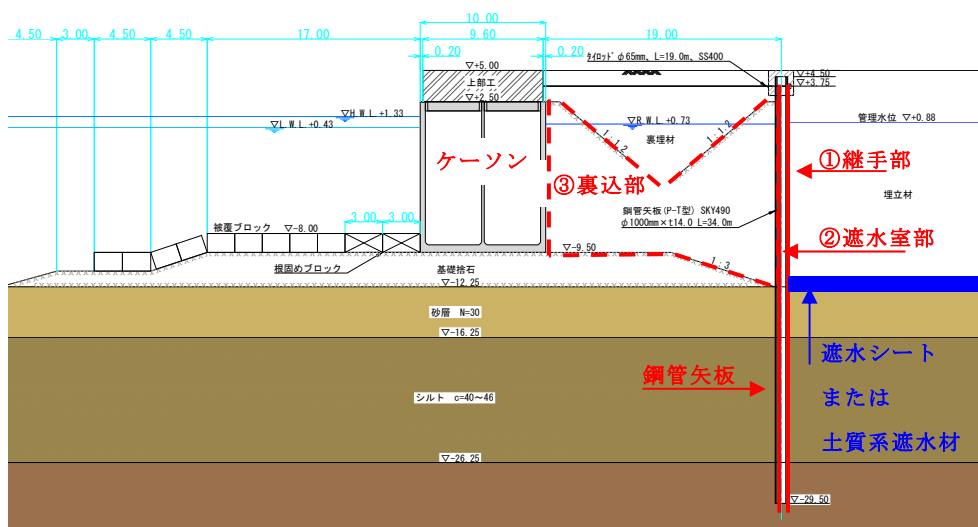


図 5.2 想定 of 護岸断面

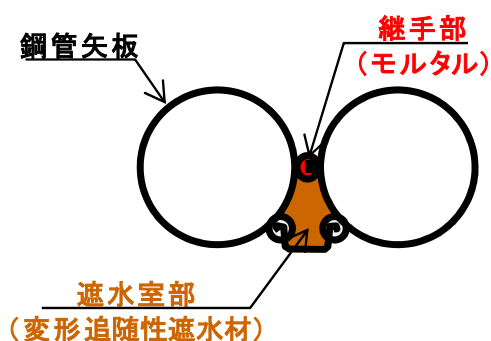


図 5.3 鋼管矢板部の遮水構造

5.3 側面遮水工の主要部材と維持管理レベルの設定

(1) 基本的な考え方

対象施設の維持管理にあたり、損傷劣化が軽微な段階で、小規模な対策を頻繁に行うことにより、施設の利用に及ぼす影響を極力小さくし、供用期間中に要求性能を満たさなくなることがないように、性能低下を予防することとする。

この維持管理の基本的な考え方に基づいて、対象施設を構成する部材を「主要部材」と「その他の部材」に区分して、部材ごとに適切な維持管理レベルを設定する。

(2) 主要部材

ここでは、側面遮水構造を対象とし、下記の主要部材を対象として記載する。

- 鋼管矢板
- 継手部内のモルタル
- 遮水室内の変形追随性遮水材

(3) 維持管理レベルの設定

維持管理レベルには、「事前対策型」「予防保全型」「事後保全型」がある。

- I 事前対策型：遮水性能に影響を及ぼす可能性のある変状に対して、早期に対策を行う。
- II 予防保全型：発生した変状が軽微で、小規模な対策により、処分場の運用に影響を及ぼさないように、現況以上の性能低下を予防する対策を行う。
- III 事後保全型：変状が遮水機能や処分場の運営に影響を及ぼさない状態で、要求性能が満足されなくなるまで経過観察し、事後保全的な対策を行う。

表 5.1 主要部材の維持管理レベルと考え方

主要部材	維持管理レベル	考え方
鋼管矢板	II 予防保全型	腐食対策として電気防食を設置する。電気防食の耐用年数が設計供用年数より短い。そのため電極の劣化や被覆防食の点検診断計画を策定する。
継手部内のモルタル	I 事前対策型	矢板の変位等によりモルタル部が損傷し遮水機能が低下する可能性がある。そのため矢板（またはその上部工）の変位量等の点検診断計画を策定する。
遮水室内の変形追随性遮水材	II 予防保全型	部材間に発生した隙間に沈み込むように変形して充填する挙動となる。そのため遮水材の天端高の点検診断計画を策定する。

5.4 維持管理計画の体系

維持管理は、通常時と異常時に大別して計画する。

通常時においては、建設工事竣工時に実施される初回点検（測量等）の後、毎日実施する日常点検（目視等）および一定期間に一度の頻度を実施する定期点検（測量等）を繰り返す。

地震・津波・高潮・暴風などの異常時には、発生直後に実施する緊急点検（目視等）の後、数日後以内に臨時点検（測量等）を実施する。

これらの点検において、補修が必要と判断された場合には、詳細点検を実施し、補修方法を検討し、補修を実施する。

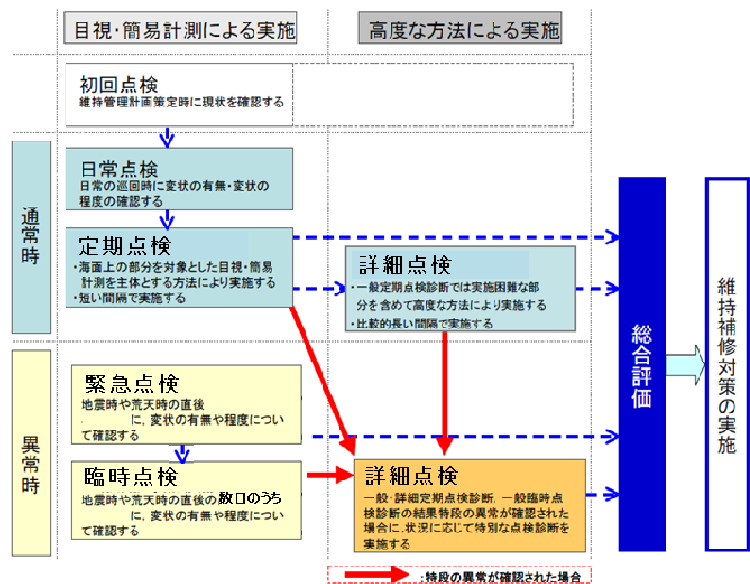


図 5.4 点検診断の種類と位置づけ
 （「港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き（増補改訂版）」の図面を加工）

5.5 点検診断の内容

(1) 判断基準

判定においては、部材性能の「維持管理上の限界値」と「要求性能上の限界値」を設定する。

維持管理上の限界値: 設計上の安全率を考慮した上で、施設の機能上の問題が発生する値。

要求性能上の限界値：変状の進行における時間的余裕度を考慮した要求性能の限界値。
 各施設の部材は、時間経過とともに、「初期値」から「維持管理上の限界値」にむけて劣化し、対策を施さなければ「要求性能上の限界値」に近づくこととなる。

このような変状を一般的には4段階とするが、ここでは3段階の判定基準を用いて管理する。

- a判定（要対策）：速やかに補修が必要であり、検討を実施する。
- b判定（重点監視）：速やかに補修を実施する必要はないが、検討を実施する。
- c判定（重点点検）：設定しない。c判定の事象をb判定としてより厳しく管理することによりすみやかな補修を計画する。
- d判定（問題なし）：変状がないため、これまでと同様の点検を実施する。

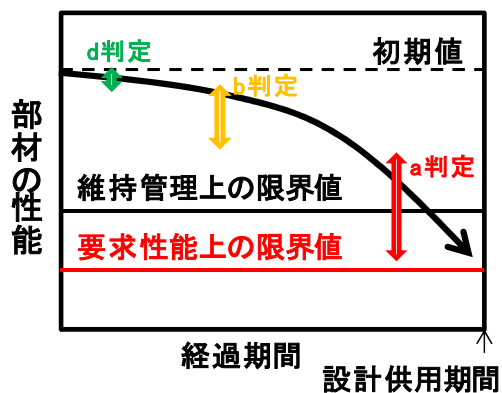


図 5.5 部材の劣化と判断基準

(2) 点検診断例

土中部分の部材は、海中および海面上より変位量が小さく、また劣化速度も遅い。そのため土中部分の部材については点検対象とせず、海中および海面上の部材を対象とする。ここでは側面遮水工の点検診断例を示す。

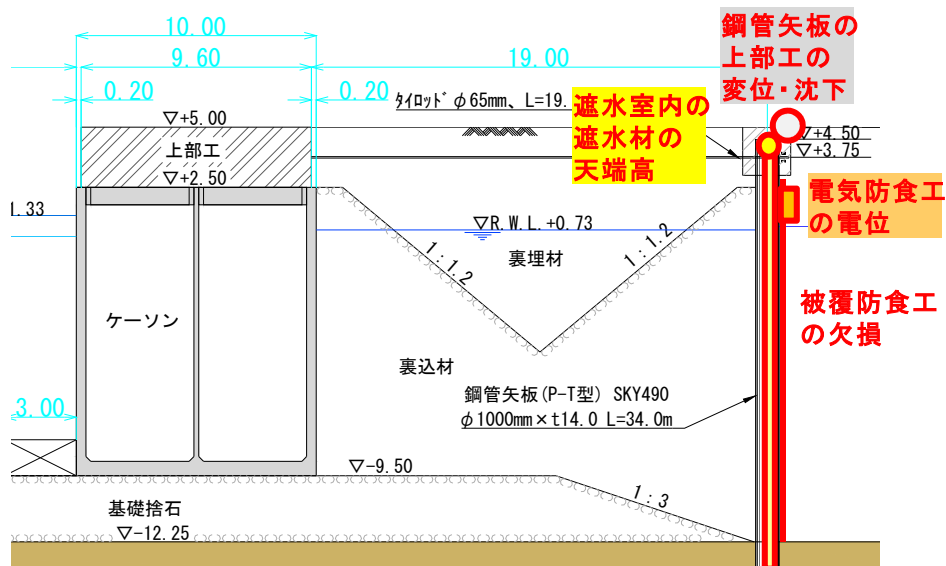


図 5.6 主要部材の点検診断位置

(a) 鋼管矢板

表 5.2 防食工の点検診断例

点検項目		点検方法	判断基準
電気防食工		電位測定（電極ごとの防食管理電位）	a. 防食管理電位が維持されていない。 b. 防食電位の低下が確認でき、数年以内に遮水に必要な電位が確保されなくなる状態である。 d. 防食管理電位が維持されていて、健全な状態である。
被覆防食工	有機被覆	目視（錆、塗膜のふくれ、割れ、はがれなど）	a. はがれや欠陥が著しく、鋼材が露出し、錆が発生している。 b. 一部に鋼材まで達していないすり傷、あて傷、はがれが点在している。 d. 初期状態とほとんど変化がなく、健全な状態である。

(b) 継手部内のモルタル

表 5.3 鋼管矢板の点検診断例

点検項目		点検方法	判断基準
鋼管矢板の上部工	変位量, 沈下量	移動距離測定, 水準測量, 傾斜計による測量など	a. 隣接する上部工との間に 20cm 以上の凹凸がある。 b. 隣接する上部工との間に 10cm 未満の凹凸がある。 d. 変状なし。

※測量・測定データを記録し、鋼管矢板の変位・沈下が評価できる形式で整理する。変位量によりモルタル部材に作用する応力を算定し、モルタルの許容応力度と比較する。

3) 遮水室内の変形追随性遮水材

表 5.4 変形追随性遮水材の点検診断例

点検項目		点検方法	判断基準
変形追随性遮水材	天端高	レッドやスタッフ等を上部工に設けた点検孔より差し込み測量する など	a. 遮水に必要な天端高が確保されていない。 b. 天端高の沈下が確認でき、数年以内に遮水に必要な天端高が確保されなくなる状態である。 d. 遮水に必要な天端高が確保されていて、健全な状態である。

(3) 点検診断計画の修正および改定と記録の保存

第一回目の定期点検の結果により、部材の損傷・劣化の傾向を把握することができる。この定期診断結果を踏まえ、点検診断計画の修正および見直し改定を予定する。

点検結果は適切なフォーマットに記録し、当該施設の供用期間中および処分場として廃止されるまで保存する。

5.6 モニタリング計画

(1) モニタリングの位置

処分場内の水位は、廃棄物の受入や降水により上昇し、蒸発により低下する。処分場内の水位が護岸設計における許容水位以上となる場合は、水処理をしたうえで堤外に放流する。また、周辺海域の水質や底質を汚染していないことを確認するための調査を実施する。さらに、処分場内の底面から浸出していないことを確認するために地下水位の調査を実施する。なお、悪臭に関するモニタリングも既往処分場では実施されていることがある。

以上より、設計供用期間中のモニタリングは以下の位置および頻度で実施する。放流水は、放水口より採水する。水質および底質については、護岸法線より 100～150m 離れた位置にて試料採取する。地下水は、地下水の流向調査を実施し、下流側に観測井戸を設置して採水する。悪臭は敷地境界にて測定する。なお、埋立完了後の通常時のモニタリングについては、埋立中の分析結果が設定した基準値以下であれば、頻度を下げて運用することも検討できる。

放流水：1 回以上/月 水質：4 回以上/年 底質：1 回以上/年

地下水：2回以上/年 悪臭：1回以上/年

さらに、ケーソンの目地部にモニタリングパイプ（有孔管）を設置しておくことにより、堤内水の浸出が疑われる場合に、海水試料を採取できるようにする。

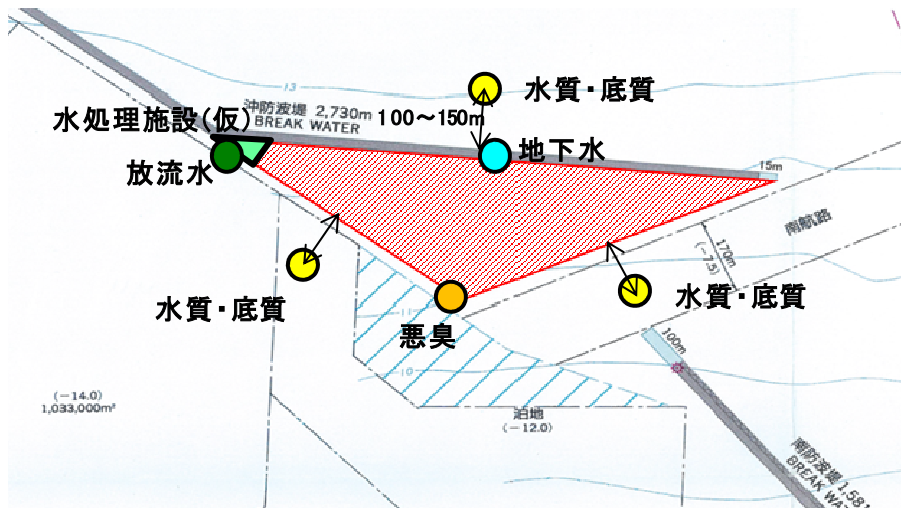


図 5.7 モニタリングの位置（例）

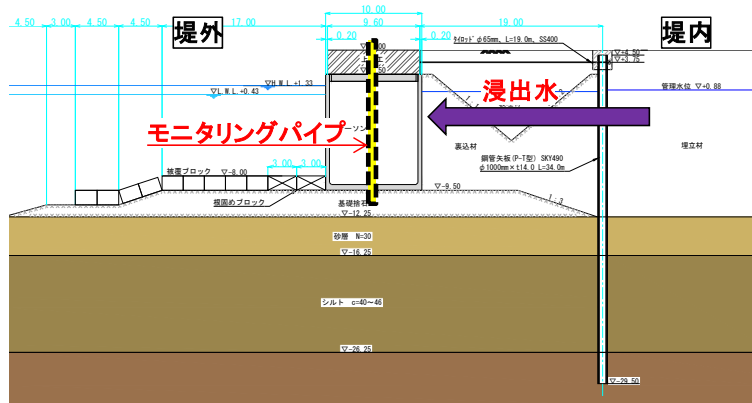


図 5.8 モニタリングパイプの設置位置

(2) モニタリングにおける分析項目

採取した試料の分析項目の一例を下表に示す。

表 5.5 モニタリングにおける分析項目例（左：放流水，右上：水質，右下：底質）

項目	単位
アルキル水銀化合物	mg/L
水銀及びアルキル水銀その他の水銀化合物	mg/L
カドミウム及びその化合物	mg/L
鉛及びその化合物	mg/L
有機燐化合物	mg/L
六価クロム化合物	mg/L
砒素及びその化合物	mg/L
シアン化合物	mg/L
ポリ塩化ビフェニル	mg/L
トリクロロエチレン	mg/L
テトラクロロエチレン	mg/L
ジクロロメタン	mg/L
四塩化炭素	mg/L
1,2-ジクロロエタン	mg/L
1,1-ジクロロエチレン	mg/L
シス-1,2-ジクロロエチレン	mg/L
1,1,1-トリクロロエタン	mg/L
1,1,2-トリクロロエタン	mg/L
1,3-ジクロロプロペン	mg/L
チウラム	mg/L
シマジン	mg/L
チオベンカルブ	mg/L
ベンゼン	mg/L
セレン及びその化合物	mg/L
1,4-ジオキサン	mg/L
ほう素及びその化合物	mg/L
ふっ素及びその化合物	mg/L
アンモニア、アンモニウム化合物、亜硝酸化合物及び硝酸化合物	mg/L
水素イオン濃度	-
化学的酸素要求量	mg/L
浮遊物質	mg/L
ノルマルヘキサン抽出物質含有量	mg/L
フェノール類含有量	mg/L
銅含有量	mg/L
亜鉛含有量	mg/L
溶解性鉄含有量	mg/L
溶解性マンガン含有量	mg/L
クロム含有量	mg/L
大腸菌群数(計数法)	個/cm ³
窒素含有量	mg/L
炭含有量	mg/L
ダイオキシン類	pg-TEQ/L

項目	単位
アルキル水銀	mg/L
総水銀	mg/L
カドミウム	mg/L
鉛	mg/L
六価クロム	mg/L
砒素	mg/L
全シアン	mg/L
ポリ塩化ビフェニル	mg/L
トリクロロエチレン	mg/L
テトラクロロエチレン	mg/L
ジクロロメタン	mg/L
四塩化炭素	mg/L
1,2-ジクロロエタン	mg/L
1,1-ジクロロエチレン	mg/L
1,2-ジクロロエチレン ^(B2)	mg/L
1,1,1-トリクロロエタン	mg/L
1,1,2-トリクロロエタン	mg/L
1,3-ジクロロプロペン	mg/L
チウラム	mg/L
シマジン	mg/L
チオベンカルブ	mg/L
ベンゼン	mg/L
セレン	mg/L
1,4-ジオキサン	mg/L
塩化ビニルモノマー	mg/L
水素イオン濃度	-
化学的酸素要求量	mg/L
大腸菌群数(最確法)	MPN/100ml
ノルマルヘキサン抽出物質含有量	mg/L
窒素含有量	mg/L
炭含有量	mg/L

項目	単位
アルキル水銀	mg/kg
総水銀	mg/kg
カドミウム	mg/kg
鉛	mg/kg
六価クロム	mg/kg
砒素	mg/kg
全シアン	mg/kg
ポリ塩化ビフェニル	mg/kg
ダイオキシン類	pg-TEQ/g

本計画では、放射性廃棄物を受け入れて埋め立てることより、上表の項目に加え、放射性物質の分析を実施する。放射性物質の測定は、上記位置に加え、以下の地点でも測定することが望ましい。

敷地境界：1回以上/月 処分場内：1回以上/月 堤内水：1回以上/月

5.7 損傷時の補修方法

遮水工が損傷した場合の補修方法について記載する。想定する損傷事象として、地震時に鋼管矢板とケーソンが大変形し遮水工およびタイロッドが破損したとする。この時、堤内水は破損箇所から裏込材およびケーソンの目地またはケーソン下の捨石マウンド部を經由して堤外へ漏出することとなる。補修方法として以下の方法が考えられる。

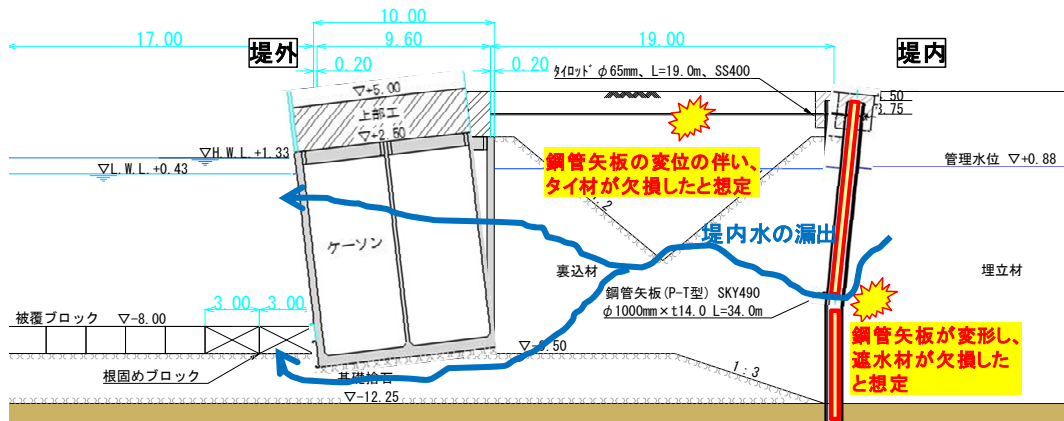


図 5.9 損傷事例 (想定)

処分場内の埋立が進捗し、鋼管矢板に十分な受働土圧が作用する段階においては、タイ材を切断する。これにより、ケーソンが変位した場合においても、タイ材を通じて鋼管矢板が変位することを防止できる。

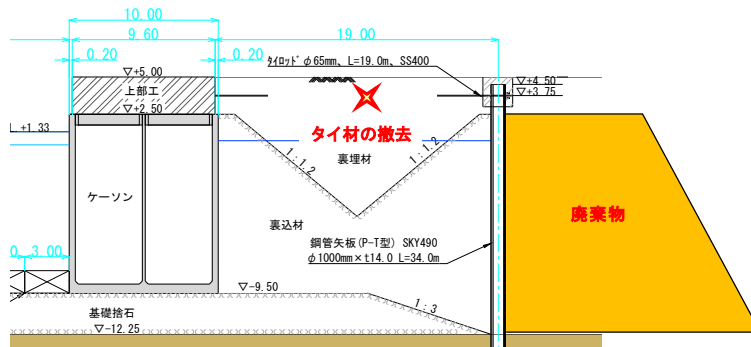


図 5.10 タイ材の撤去

(1) 遮水室内の変形追随性遮水材による損傷箇所の自己修復

遮水室内の変形追随性遮水材にはアスファルトマスチックを採用する。アスファルトマスチックは発生した下部空隙に自重変形して充填する特性がある。この特性は、高温となる条件ほど速やかに挙動する。

したがって、以下の配慮を実施することで、遮水室内の遮水機能を回復させる。

- ・変形追随性遮水材としてのアスファルトマスチックを採用し、遮水室内に伝熱棒を設置しておく。
- ・補修時に伝熱棒の天端部を熱することにより、アスファルトマスチックを温めて流動性を向上させる。

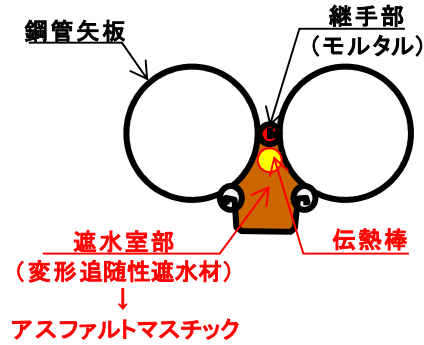


図 5.11 遮水室内での補修方法（案）

(2) 裏込部における遮水機能の追加

裏込部における補修方法として以下の 2 案の手順について記載する。

(案 1) 新規遮水矢板の打設

- ・タイ材が残っている場合は撤去する。
- ・裏込材（石材）をオーガ掘削により法線延長方向に削孔し、山砂等に置換する。
- ・置換した箇所に遮水矢板（例えば、溝付き鋼矢板：J ポケットパイル）を打設する。

(案 2) 土質系遮水材の充填

- ・タイ材が残っている場合は撤去し、裏込材（石材）を現地盤面まで全て除去する。
- ・裏込部に土質系遮水材を充填する。

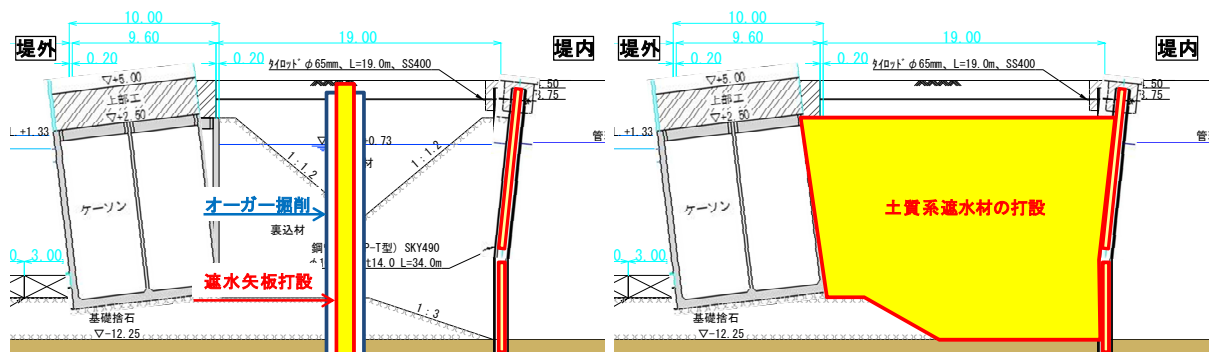


図 5.12 裏込部での補修方法（左：案 1，右：案 2）

5.8 まとめ

上記のように側面遮水工の主要部材を対象とした維持管理方法について一例を記載した。同様に底面遮水工を対象とした計画も必要となる。底面遮水工の健全性については地下水モニタリング等により管理・評価することとなるが、より一層のモニタリング技術の開発が望まれる。

参考文献

- 5.1) 財団法人沿岸技術研究センター：港湾の施設の維持管理技術マニュアル，沿岸技術ライブラリーNo.26，2007年10月。
- 5.2) 財団法人港湾空間建設技術サービスセンター：港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き（増補改訂版），2008年12月。

6. おわりに

放射性物質の除染や震災廃棄物の除去に伴って発生した 8000Bq/kg 以下あるいは 10 万 Bq/kg 以下の低レベルの放射性廃棄物等を海面処分場で処分することができるかの見通しを得るため、放射性災害廃棄物等の発生状況や政府の対応方針等を調べ、海面処分の対象とすべき放射性災害廃棄物等の種類・量や受け入れの考え方を整理するとともに、これまでに蓄積されてきた海面処分場の技術を応用した海面処分技術を構想し、それらの技術によって放射性廃棄物等を安全かつ費用を抑えて処分できるかを分析した。

研究の成果を総合的にみるならば、海面処分場を構築して放射性廃棄物等を処分する場合、本研究会で検討した範囲においては、必要な諸基準を満足することができるとともに、陸上処分場と比較して安全性および建設費用の面で同等もしくは優位にあるとの知見を得たといえる。困難な社会問題である放射性廃棄物等の処分を進めていくために、海面処分の技術が放射性廃棄物等の解決のための有効な選択肢の一つとして社会に受け止められていくことを期待したい。関係各位の理解と尽力に期待する。