

放射性廃棄物等の海面処分技術の実用可能性 Practicality of Sea Reclamation Technology as a Method of Disposing of Radioactive Waste and Soil

鈴木 武*・江口信也**・木俣陽一***・田谷全康****・山崎智弘*****
・高橋栄悦**・古賀大三郎**

Takeshi SUZUKI, Shinya EGUCHI, Yoichi KIMATA, Masayasu TATANI,
Tomohiro YAMASAKI, Eietsu TAKAHASHI and Daisaburo KOGA

要旨: 除染廃棄物や除去土壌の貯蔵・処分には様々な陸上処分技術の適用が検討されてきた。海面処分は海域拡散や地震津波被害等が懸念される一方で大規模処分や公衆隔離等の優れた点を持つが、放射性廃棄物等への適用に関する研究はほとんどない。そのため放射性廃棄物等を海面処分する技術の実用可能性の分析を行った。レベル2地震動への耐性を考慮した200万m³規模の管理型海面処分場を試設計し、整備費用と放射線曝露リスクを見積もり、陸上の検討事例と比較した。分析の結果、海面処分は必要な基準を満足できるとともに、比較した範囲では陸上と同等か優位の性能を持つことが分かった。

キーワード: 海面処分, 放射性廃棄物, 実用可能性, 耐津波設計, 曝露リスク評価

1. はじめに

福島第一原子力発電所事故によって引き起こされた放射能汚染に対処するため、国や自治体によって除染が行われている。除染等で生じる廃棄物は、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以下は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とされている¹⁾。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が、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されている²⁾。

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である³⁾。8,000Bq/kg超～10万Bq/kg以下の廃棄物等は海面処分が具体的に検討されておらず、個別に対応を検討していく状況にある。

放射性廃棄物や除去土壌の処分に関わる放射線曝露の安全性評価は、処分物の汚染濃度や処分規模等の前提条件のもと、被ばく経路と被ばく対象者を想定した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ことで行われている。環境省や原子

* 個人会員 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部, ** 賛助会員 五洋建設, ***賛助会員 若築建設, ****賛助会員 東亜建設工業, *****賛助会員 東洋建設

力研究開発機構では、災害廃棄物の処分⁴⁾、管理型処分場における指定廃棄物の処分⁵⁾、福島県内での中間貯蔵⁶⁾等について、陸上での処分や貯蔵を想定した安全性評価を実施している。

これに対して海面処分を対象とした評価事例は少ない。横浜市で汚泥焼却灰の埋め立てを検討した例⁷⁾では、現有施設の残余容量や埋立方法、受入基準等を反映した検討であり、海面処分の特徴を広範に反映した条件設定は行われていない。また相馬港での放射性廃棄物等の海面処分を評価した鈴木ら⁸⁾の研究があるが、海面処分場からの放射線の漏えい量の簡易な評価と通常の管理型処分場の構造での陸上処分場とのコスト比較を行ったものであり、限定的な評価にとどまっている。

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ある、地震・津波被災リスクが大きい等の特徴を持っている。

そのためそれらの特徴を踏まえて、海面処分が放射性廃棄物や除去土壌の処分方法としてどれだけの適性を持つかについて分析を行った。分析では200万m³規模の海面処分場を想定し、施設の地震・津波を含めた構造安全性、整備費用および放射線曝露リスクの見積・評価を行った。そして、得られた施設整備費用と放射線曝露リスクを陸上検討事例と比較した。

2. 管理型海面処分場の試設計

2.1 設計の概要

分析のための検討条件を設定するため、日本北部の太平洋側の港湾を想定し、そこでの自然条件や社会条件等を既存資料などをもとに設定し、それらを踏まえて海面処分場の整備を想定した(図-1)。設計のための地盤・波浪条件は、国土交通省の現地公開情報等を使用した。処分

場の設計においては、考慮すべき事項として①大規模処分容量の確保、②整備期間の短縮、③変動状態(レベル1地震動)での護岸安定と遮水性確保、④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、⑤津波による埋立物の流出防止を抽出した。①~⑤の事項を要件として検討を行い、概略断面を決定した。②については、新設する護岸の延長を短縮するため、既設防波堤を処分場の護岸の構造体の一部として活用することとした。

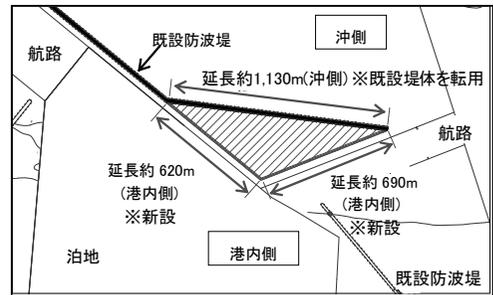


図-1 海面処分場の配置と規模の想定

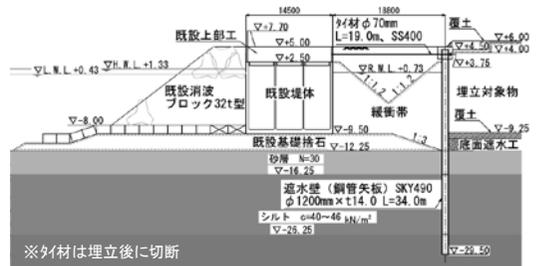


図-2 沖側護岸の構造

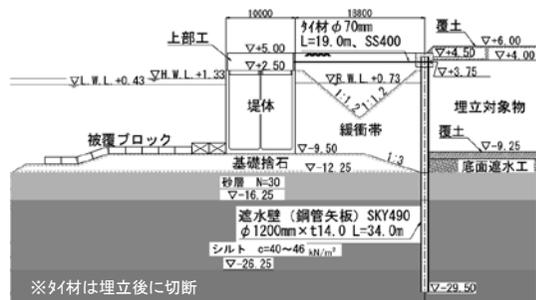


図-3 港内側護岸の構造

表-1 護岸堤体の安定性照査の結果

検討断面	状態	耐力作用比			
		滑動	転倒	基礎支持力(Bishop)	円弧すべり
沖側断面 堤体幅 14.5m	永続状態	2.74 ≥ 1.0	8.62 ≥ 1.0	1.62 ≥ 1.0	1.11 ≥ 1.0
	変動状態 (Kh=0.10)	1.97 ≥ 1.0	3.52 ≥ 1.0	1.63 ≥ 1.0	—
港内側断面 堤体幅 10.0m	永続状態	1.88 ≥ 1.0	4.23 ≥ 1.0	1.23 ≥ 1.0	1.05 ≥ 1.0
	変動状態 (Kh=0.10)	1.60 ≥ 1.0	2.11 ≥ 1.0	1.19 ≥ 1.0	—

表-2 護岸部材の安定性照査の結果

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×t14.0 (P-T)型 mm, 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	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

2.2 設計断面

海面処分場の護岸の構造断面を図-2～3 に示す。港内側に新設する海面処分場の護岸は、防波堤利用区間と構造的な性質の連続性を確保するためケーソン構造とした。処分場の外郭を形成する堤体に変形した場合の遮水性を確保するため、堤体内側に緩衝帯を設けるとともにその内側に土留工を兼ねて鋼管矢板による遮水壁を配置した。遮水工は、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）による遮水構造を想定した。矢板背面を廃棄物等によって埋め立てた後にタイ材を切断し、矢板遮水壁を堤体と分離し、堤体の変形による影響が矢板遮水壁に直接及ばないようにした。

処分場の護岸が完成し、埋立処分を行う前の状態で、重力式護岸の設計手法に基づき、永続状態および変動状態の護岸の安定性を照査した⁹⁾。その結果、堤体幅 14.5m の既設防波堤は沖

側護岸の一部として利用することが可能であるとともに、港内側に新設する護岸の堤体は幅 10m となることが分かった。鋼管矢板は管径 1,200mm、緩衝帯幅は 19m 程度が必要である（表-1～2）。処分場の処分容量は 175 万 m³、面積は 132,000m²である。

3. 管理型海面処分場の整備費用

想定した海面処分場について、港湾土木工事の積算基準¹⁰⁾をもとに建設費を見積もると、直接工事費で約 300 億円となり、処分容量 1m³あたり 1.71 万円/m³となった（表-3）。なお、遮水工の施工費については、既存の管理型海面処分場の実績を参考に算定した。

2000 年度以降に供用された管理型処分場は、一般廃棄物処分場を対象とした環境省の統計¹¹⁾や民間の処分場調査結果¹²⁾および個別の処分場公表情報^{13)~17)}によれば、海面での処分容量は平均で 457 万 m³、特に大きい 1,000 万 m³以上の処分場を除いた平均で 169 万 m³である（図-4）。これを踏まえて検討の処分容量を 175 万 m³と設定した。一方、陸上での処分容量は環境省の統計では最大で 42 万 m³、平均で 7 万 m³であり、多くは 10 万 m³以下である（図-5）。近年、陸上における 10 万 m³規模以上の処分場整備は、様々な要因で実現が困難になる場合が多く、100 万 m³を超えるような処分規模の場合には一般に小規模施設を複数整備する必要がある。陸上で整備可能な管理型処分場を 10 万 m³規模とし、それを複数整備するものとして、日本環境衛生センター¹⁸⁾が示している以下の 2 つの建設費用推定式で建設費を推定した。

$$Y = 507.5X^{0.257} \quad (1)$$

$$Y = 12.74X + 872.7 \quad (2)$$

ここで、 Y は建設費(百万円)、 X は処分容量(千 m^3)である。

今回想定した海面処分場の処分容量に相当する180万 m^3 の陸上処分場群の建設費は300～390億円と推定された(表-4)。処分容量あたりでは平均で1.91万円/ m^3 となり、その値との比較においては海面処分の建設費が陸上処分と概

表-3 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	函	87	2,737
上部工(ケーソン)	港内側h2.5m,沖側パラベット	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	$\phi 1200mm, t14mm, L=34m$	本	1,490	6,025
上部工(鋼管矢板)	断面2m \times 2.5m	m^3	10,280	620
諸経費				8,077
工事価格				29,885
処分容量1 m^3 当たり 17,100円/ m^3				

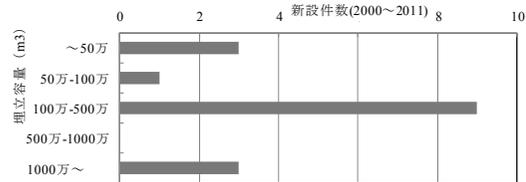


図-4 管理型海面処分場の規模別の建設数

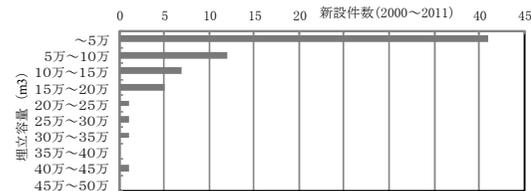


図-5 陸上管理型処分場の規模別の建設数

表-4 陸上管理型処分場の概算建設費

式	1施設あたり建設費用	施設数	建設費	処分容量あたり建設費用
(1)	1,658百万円	18施設	298.4億円	1.66万円/ m^3
(2)	2,147百万円	18施設	386.5億円	2.15万円/ m^3

ね同等である。ただし実際に比較をする場合には、施設規模、用地取得費用、輸送費用等を考慮する必要がある。

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⁴⁾⁻⁷⁾を調べ、各検討例の検討内容、対象物、放射能濃度、処分等の形式、規模を表-5のとおりa～dに整理した。そして、得られた事例の評価シナリオ群から埋立中と埋立完了後についてのシナリオを抽出し、類型化した(表-6)。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表-7のとおり設定した。

海面処分場の評価シナリオ2は陸上検討と同

表-5 既往検討での曝露リスクの計算条件

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-6 既往検討の評価シナリオの類型

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
	進出処理水の放出	経口	公衆
埋立中 事故時	内水の貯留	外部	作業者
	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
埋立後 平常時	地震・火災等での遮へい喪失	外部	周辺公衆
	地震等での汚染防止機能喪失	経口	周辺公衆
		外部	周辺公衆
埋立後 事故時	処分場跡地の利用	外部・経口・吸入	作業者
	浸出水の放出	外部・吸入	事業所利用者
	場内地下水の利用	経口	公衆
埋立後 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
埋立後 事故時	地震等での汚染防止機能喪失	経口	周辺公衆

表-7 海面処分場の評価シナリオ

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	場内作業員	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	場内作業員	処分場全域で覆土なし 年間1,000時間
3		陸域化した場所での海中埋立作業	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)が海水濃度に寄与
5		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

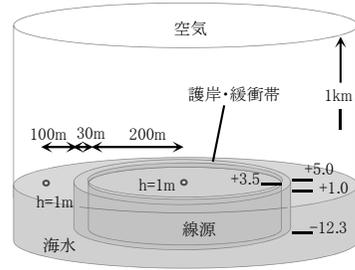


図-6 MCNP解析のための空間構成

表-8 外部被ばくに関する諸量

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)	μ 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

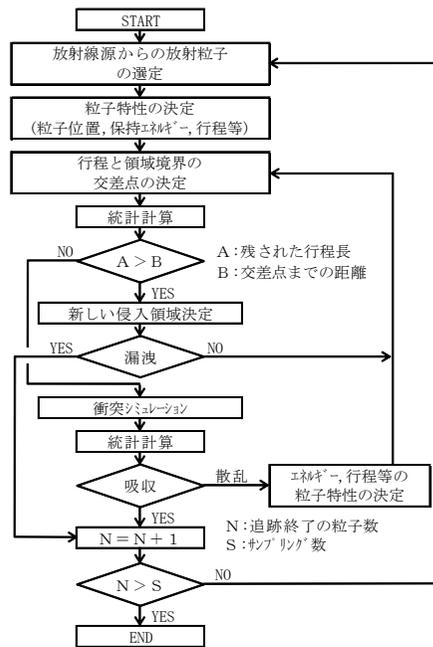


図-7 MCNPの計算フロー²¹⁾

様の評価になるため、ここでは参考として、作業合間の覆土等を行うという曝露防止措置を実施しない場合を想定した。シナリオ3も同様に、覆土遮へいを考慮しない危険側の状態を想定した。シナリオ4は覆土前の津波被災である。十分に保守的な事故規模の想定として、沖側護岸全長にわたって埋立物が主働崩壊し、海域に流出する場合を想定した。シナリオ5は濃縮汚染

水の一時的な大量流出を、シナリオ6は処分場保有水の定常漏出を想定した。その他の評価シナリオについては、検討内容が陸上処分場とほぼ同じになり、結果もほぼ同じになると考えられるため、本研究では設定しなかった。

4.2 被ばく線量の算出

各シナリオの被ばく線量を主に除去土壌を対象に計算した。計算においては¹³⁴Csと¹³⁷Csの

存在比を1:3とした。

外部被ばく線量は、埋立物、護岸・緩衝帯、周辺海域、上空大気等を模式化（表-8、図-6）し、評価位置を設定し、それらをもとに埋立物からの直接線と大気中での散乱線による被ばく線量換算係数を計算した。評価位置はNo.1が処分場中央の内水面上1m、No.2が処分場中央の地盤面上1m、No.3が護岸外100mの海面上1mである（図-6の丸印位置）。計算には米国ロスアラモス研究所が開発したモンテカルロ法による放射線輸送解析コード(MCNP: General Monte Carlo N-Particle Transport Code)のVersion 5^{19),20)}を使用した。それは、放射線粒子の位置、エネルギー、行程長等と物質中の吸収や散乱等を確率分布に従って選定し、粒子が解析領域外に出るか、エネルギーが消失するまで被ばくに寄与するエネルギーを計算する。それを数千～数万以上の粒子に対して行い、外部被ばく線量換算係数を求めるものである（図-7）。海上投入作業については、処分場内に海水がないときの外部被ばく線量換算係数を求め、水の実効線量透過率を乗じて求めた。

外部被ばく線量は既往事例^{4)~7)}に従い以下の計算式を使用し、表-8を使って算出した。

$$D_{i,p,ext} = C_{i,wa} \cdot S_p \cdot t_p \cdot DF_{i,p,ext} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot t_2)}{\lambda_i \cdot t_2} \quad (3)$$

ここで、 $D_{i,p,ext}$ は放射性核種*i*の外部被ばく線量($\mu\text{Sv/y}$)、 $C_{i,wa}$ は放射性核種*i*の対象物中の濃度(Bq/m^3)、 S_p は外部被ばくに対する遮へい係数、 t_p は滞在時間(h/y)、 $DF_{i,p,ext}$ は放射性核種*i*の外部被ばく線量換算係数($\mu\text{Sv/y per Bq/g}$)、 λ_i は放射性核種*i*の崩壊定数($1/\text{y}$)、 t_2 は被ばく中の減衰期間(y)である。

経口被ばく線量については、事故による海域への埋立物の流出、濃縮貯留水の流出、保有水

の漏出を検討対象とした。対象としたイベントによって海水中の放射性物質の濃度が上昇し、それらが海産物に移行し、濃縮される。そうした海産物を摂取することによって生じる内部被ばくを計算の対象とした。海域への放射性物質の移行量は、埋立物流出では埋立物からの溶出率を、貯留水流出では排水基準に対する濃度倍率を、保有水漏出では埋立物からの漏出率を想定して算出した。海水中の放射性物質の濃度は、対象物質の拡散範囲と交換水量を設定し、それらにより求めた。海産物は魚類・無脊椎動物・海藻類を対象とした。経口被ばく線量の計算式は以下のとおりである。

$$D_{i,ing} = \sum_j (C_{i,SW} \cdot CF_{i,j,S} \cdot M_{j,S} \cdot G_{j,S} \cdot DF_{i,ing}) \quad (4a)$$

$$C_{i,SW} = \frac{R_{i,SW}}{Q_{SW}} \quad (4b)$$

$$R_{i,SW} = W_S \cdot C_{i,A} \quad (4b)$$

ここで、 $D_{i,ing}$ は放射性核種*i*の水産物による経口被ばく線量($\mu\text{Sv/y}$)、 $C_{i,SW}$ は放射性核種*i*の水中の濃度(Bq/m^3)、 $CF_{i,j,S}$ は放射性核種*i*の水産物*j*への濃縮係数(m^3/kg)、 $M_{j,S}$ は水産物*j*の年間摂取量(kg/y)、 $G_{j,S}$ は市場希釈係数、 $DF_{i,ing}$ は放射性核種*i*の経口摂取による内部被ばく線量換算係数($\mu\text{Sv/y per Bq/g}$)、 $R_{i,SW}$ は放射性核種*i*の水域への放出量(Bq)、 Q_{SW} は水域における希釈水量(m^3)、 W_S は津波等で水域に移行する除去土壌等の量(kg)、 $C_{i,A}$ は除去土壌等の放射性核種*i*の濃度(Bq/kg)である。

計算に用いた経口被ばくに関する諸量は表-9のとおりである。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た。

求めた単位濃度あたりの被ばく線量と代表濃度(除去土壌の場合)での被ばく線量は表-10

のとおりである。シナリオ2以外は、10万 Bq/kg以下の除去土壌等の処分において安全評価基準を満足している。曝露防止措置なしの気中埋立を仮定したシナリオ2では、13,000Bq/kg以上の処分で基準超過となる。

4.3 既往の陸上処分検討との比較

被ばく形態と対象者で分けて海面処分の被ばく線量を陸上処分の検討例と比較し、海面処分の放射線曝露リスクを評価した。

埋立中の工事作業者の外部被ばく（シナリオ

表-9 経口被ばくに関する諸量

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)	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 ³ /y	0.4		土壌貯蔵施設Ⅱ(既往検討d)と同設定

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	場内作業者	1.2E-02	1.2E-02	9.6E-02	1.2E+00	1E+03
2			気中埋立	場内作業者	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	5E+03
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 埋立中の遮蔽なし造成地盤からの作業者の外部被ばく線量

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 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		本検討		検討		安全 評価基準
	No.1	No.2	a	b	No.1	No.2	a	b	
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

1 および 2) は、海上投入時の被ばく線量が気中埋立時の 1/1000 程度となり、陸域化後が陸上処分を検討例 a および 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、海面処分の場合の平均曝露リスクは検討例 a および b よりも低くなる。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。

埋立中の周辺公衆の外部被ばく(シナリオ 3) は、海面処分では護岸天端より低い位置の海水面活動者が対象であり、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、検討例 c よりも 1 オーダー高く、検討例 d と同程度となる(表-12)。検討例 d は公衆隔離が大きく、検討例 c は作業範囲以外を覆土する条件であるため、海面処分において気中埋立時に順

次覆土する場合は海面処分の被ばく線量が陸上処分と同等かそれ以下になると考えられる。

埋立中に事故により埋立物が海域に流出した場合の公衆への経口被ばく(シナリオ 4)については、地震や津波に対して非常に高い安全性を確保した施設としており、埋立物が流出することは基本的に考えられないが、危険な状態を評価するため、あえて護岸が大規模に被災し 10 万 Bq/kg の埋立物が流出した場合を想定した。被ばく線量はその場合においても基準の 1/1000 未満であった。それでも検討例 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ためである。検討例 d では①流出量が降雨浸透量と同量、②

表-12 埋立中の造成地盤からの周辺公衆の外部被ばく線量

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 $\mu\text{Sv}/\text{年 per Bq/g}$			(参考例) 10万Bq/kgでの被ばく線量 $\mu\text{Sv}/\text{年}$			
	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	40	1,000

※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 埋立中の事故での経口被ばく線量

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1m³/kg)

表-14 埋立完了後の事故での経口被ばく線量

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)	<1	20	300

水域到達までの土壌吸着を考慮，③産物摂取量が海産物比 1/30 であるためと考えられる。

埋立完了後の事故による貯留水流出（シナリオ 5）や保有水漏出（シナリオ 6）による公衆の経口被ばくは，本検討の場合，前者の汚染の一時的な大量流出よりも後者の定常漏出の方が被ばく線量が大きい（表-14）。定常漏出時と検討例 a の保有水の定常漏出と地下水利用による農水畜産物汚染の条件を比較すると，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 オーダー低くなっている。

以上を総合すると，既往の陸上処分の検討では埋立処分に関する評価シナリオを網羅的に検討しており，その中では埋立作業者の外部被ばくが最も線量が高いという結果になっている。埋立作業者の外部被ばくという点では，海面処分では埋立作業の主体が海上投入となるため曝露リスク抑制の面では有利となる。一方，海面処分では津波による埋立物流出が検討の視野に入ってくるが，ここでの計算では，大規模な埋立物流出が起こったとしても被ばく線量は平常時の安全評価基準を数オーダー下回る水準となった。いずれにせよ放射性廃棄物等の処分を進めていくためには，効果的な被ばく線量低減の工夫やロバストで的確な被ばく線量の見積・評価に努めていくことが重要であろう。

5. まとめ

200 万 m³ 規模の海面処分場を想定し，施設の構造安全性，整備費用および放射線曝露リスクを分析した。構造安全性については地震と津波に対する安定性の計算をした。施設の整備費用は試設計をもとに建設費を見積もった。放射線曝露リスクは被ばくシナリオを想定し，処分場および周辺空間をモデル化して被ばく線量を計

算した。それらの結果を基準値と比較するとともに，建設費用と放射線曝露リスクについて陸上検討事例と比較した。

今回の分析の範囲では，放射性廃棄物や除去土壌を海面処分場で処分する場合，海面処分は必要な基準を満足できるとともに，放射性廃棄物や除去土壌の処分方法として陸上処分に比して同等もしくは優位の性能を持つことが分かった。

今回比較した項目以外に，海面処分には陸上処分と比べて，大規模な処分容量を確保できる，個人の土地所有がない，感情的な忌諱感が小さい，海上輸送が有効に使えれば膨大な数の陸上輸送を低減できるとともに輸送段階の被ばくリスクを低く抑えることができるといった特徴がある。そのため海面処分を適用する場合は，そうした特徴が処分の円滑化に貢献する可能性がある。

本成果は，日本沿岸域学会の研究グループ 28 「災害廃棄物等の海域処分に関する研究」における活動の成果をとりまとめたものである。

引用・参考文献

- 1) 環境省：廃棄物関係ガイドライン第 2 版，2013。
- 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。
- 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う水面埋立地の指定について（通知），2012。
- 4) 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。
- 5) 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.
- 6) 環境省: 中間貯蔵施設の概略安全評価について, 2013.
 - 7) 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.
 - 8) 鈴木武・林友弥・菅野甚活: 東北地方太平洋沖地震津波で発生したガレキの港湾における処分の可能性, 土木学会論文集 B3, Vol.68, No.2, pp.I_108-113, 2012.
 - 9) (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
 - 10) (社)日本港湾協会: 港湾土木請負工事積算基準, 2013.
 - 11) 環境省: 環境省廃棄物処理技術情報, http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/, 2014.
 - 12) (財)日本環境衛生センター: 海面最終処分場閉鎖・廃止基準適用検討調査報告書 アンケート調査編, 2005.
 - 13) (公財)岡山県環境保全事業団: <http://www.kankyo.or.jp/jigyo/gaiyou/>, 2014.
 - 14) 宇部港東見初広域最終処分場: <http://www.env-uic.jp/index.html>, 2014.
 - 15) 四国中央市建設課: <http://sct.shikokuchuo.jp/~kns/Pdf/PDF/H2103kensetu.pdf>, 2014.
 - 16) (一財)徳島県環境整備公社: http://eco.or.jp/profit_01.php, 2014.
 - 17) (公財)愛知臨海環境整備センター: <http://www.asec.or.jp/works/kinuura.html>, 2014.
 - 18) (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ー維持管理のポイント, 2006.
 - 19) Los Alamos National Laboratory, X-5 Monte

- Carlo Team: MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, 2003.
- 20) 独立行政法人原子力安全基盤機構: モンテカルロコード MCNP5 の並列性能評価及び MOX 燃料の臨界解析に関する報告書, 2007.
 - 21) 日本原子力研究所: 粒子輸送モンテカルロコード MCNP の並列処理, 1996.

著者紹介

鈴木武 (個人会員)

国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部 (神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1), 部長, 博士 (工学).
E-mail: suzuki-t92y3@ysk.nilim.go.jp

江口信也 (賛助会員)

五洋建設株式会社 技術研究所 (栃木県那須塩原市四区町 1534-1), 担当部長

木俣陽一 (賛助会員)

若築建設株式会社 建設事業部門 技術設計部 (東京都目黒区下目黒 2-23-18), 次長

田谷全康 (賛助会員)

東亜建設工業株式会社 エンジニアリング事業部環境事業室 (東京都新宿区西新宿 3-7-1), 室長

山崎智弘 (賛助会員)

東洋建設株式会社 土木事業本部土木技術部 (東京都江東区青海 2-4-24), 課長, 博士 (環境学)

高橋栄悦 (賛助会員)

五洋建設株式会社 土木設計部 (東京都文京区後楽 2-2-8), 主任

古賀大三郎 (賛助会員)

五洋建設株式会社 環境事業部 (東京都文京区後楽 2-2-8), 担当部長, 博士 (工学)

Practicality of Sea Reclamation Technology as a Method of Disposing of Radioactive Waste and Soil

Takeshi SUZUKI, Shinya EGUCHI, Yoichi KIMATA, Masayasu TATANI,
Tomohiro YAMASAKI, Eietsu TAKAHASI and Daisaburo KOGA

ABSTRACT: Studies of the application of a variety of land disposal technologies to the storage and disposal of radioactive waste and soil have been carried out. It is feared that disposal of these materials at sea could result in marine diffusion and seismic and tsunami damage, but the advantages of sea disposal are its large capacity and isolation from the public. However, little research on sea disposal of radioactive waste and soil has been done. We studied the practicality of sea disposal technology as a way to dispose of radioactive waste and soil. For the study, we designed controlled substances sea disposal facilities with 2 Mm³ capacity and Level 2 earthquake resistance. We estimated both the cost of constructing the sea disposal facilities and the risk of exposure to radiation from the waste and soil in the facilities. The estimates were compared with the results of case studies of land disposal. The results showed that sea disposal meets necessary standards and ensures performance equivalent or superior to that of land disposal.

KEYWORDS: *sea disposal, radioactive waste, practicality, tsunami-resistant design, exposure risk assessment*