

博士論文審査報告書

論文題目

極低レベル放射性廃棄物の盛土式処分施設
の構造安定性と底部排水層に関する研究

A Study on Structural Stability and
Drainage Layer Performance of Landfill
Type Disposal Facility for Very Low Level
Radioactive Waste

申請者

中房	悟
Satoru	NAKAFUSA

--

わが国の商業用原子力発電所（軽水炉 110 万 Kw 級）の廃止措置に伴い発生する極低レベル放射性廃棄物いわゆる L3 廃棄物は、建屋や構造物解体時のコンクリートガラ、コンクリートブロック、および配管、機器解体の金属廃棄物で、約 3,100～7,100 トンと推測されており、放射性廃棄物の中で一番物量が多い。

L3 廃棄物処分施設の構造形式に関する法規制（埋設規則，安全審査の指針）では、トレンチ処分方式のみが示されている。しかし、原子力発電所敷地は、基盤が亀裂性の硬岩で地下水位が高い（GL-2m～-3m）場合が多く、トレンチ処分方式では L3 廃棄物を地下水以下に埋設することになるため、放射線量の評価いわゆる安全評価のめやす値（基本シナリオで $10 \mu \text{Sv/年}$ 以下，変動シナリオでは $300 \mu \text{Sv/年}$ 以下）を満足することが困難となる。そこで、L3 廃棄物の新たな処分施設形式として、本研究では盛土式 L3 廃棄物処分施設を提案している。

本研究の目的は、この盛土式 L3 廃棄物処分施設を具体化するため、降雨と地震に対する構造の安定性、および底部排水層のキャピラリーバリア（以下、「CB」という。）に関する課題を、実験と数値解析により検討し、合理的で安全な盛土式 L3 廃棄物処分施設の構造形式を提案することにある。

第 1 章では、盛土式 L3 廃棄物処分施設が成立するための課題抽出を行っている。法規制から求められている技術的要件以外に、構造評価上の考慮すべき事項として、①盛土式 L3 廃棄物処分施設の排水機能の確認、および地震前の降雨による盛土内の飽和度の上昇に伴う盛土材料の強度低下を考慮した地震時安定性の検討評価、②盛土式 L3 廃棄物処分施設の盛土材料と L3 廃棄物の見かけの比重の違いによる慣性力の差ならびに剛性の違いを考慮した地震時安定性の検討評価、および盛土材料と L3 廃棄物の動的応答の差異により盛土に地震後貫通クラックが発生する可能性の検討が必要となる。これらの課題を通して、降雨浸透水が盛土内に停滞し L3 廃棄物と接触することにより放射線量が高くなるようにするため、さらに過剰間隙水圧が上昇し盛土の安定性に影響しないようにするために、L3 廃棄物の底部に設ける排水層が盛土式の成否にとって重要な要件になることを強調している。

盛土底部の排水層には L3 廃棄物処分施設の管理期間 50 年間を超える健全性と耐久性が求められている。メンテナンスが困難なことを考えると、CB を導入するにあたり解決すべき課題として、③CB の排水性能に対する盛土自重と L3 廃棄物による垂直応力の影響を把握しておくことが必要となる。CB は、これまでは廃棄物処分場のトップカバーとして、頂部の降雨浸透の防止や浸透量の低減に用いられてきているが、本研究のように盛土底部排水層としてこの CB を導入するためには、CB の性能が垂直応力（上載荷重）の影響を受けないことを確認しておく必要がある。CB の構造は、砂層とその下部に礫層を重ねた土層である。数十年に及ぶ長期の供用において、地震時の振動および雨水の降下浸透などにより、上部の砂が下部礫層の間隙に移

動・混入することが想定され、砂と礫が混合することでCBの性能が大きく低下する懸念がある。このため、検討すべき課題として、④性能低下が想定される場合には、砂混入防止対策が必要となる。盛土の構造規模を決定するには、CBが鉛直浸潤を効果的に遮断できる範囲、つまり限界長を精度よく求める必要がある。これに関連して、解決すべき課題として、⑤既往の限界長推定式の実規模CBにおける適用性、ならびに砂混入防止対策が必要な場合には、砂混入防止対策を行ったCBの限界長を大型土槽実験で確認する必要がある。以上、①～⑤の課題を本研究の検討対象として抽出している。

第2章では、L3廃棄物処分に関連する法規制を調査し、盛土式L3廃棄物処分施設に要求される法規制からの技術的要件を考察している。これらの技術的要件を満足する盛土の構造形状を設定するため、国内外のL3廃棄物処分方法を調査し、参考となる事例に基づき盛土式L3廃棄物処分施設の基本構造形状を設定している。

第3章では、前章で提示した盛土の基本構造形式について、課題①では、2次元降雨浸透流解析を用いて検討を行っている。その結果、盛土に設けた植生層－フィルタ層－上部排水層－フィルタ層－上部遮水層の組合せが、盛土内部への降雨浸透を抑制する上で有効に機能することを明らかにしている。底部排水層（CB）に流入する浸透水量は少なく、本研究で導入したCBでも排水可能であることを示している。次に課題②について、レベルⅠ、レベルⅡ地震動を用いて検討している。レベルⅠ地震動は、L3廃棄物処分施設が供用期間（約50年間）中に1～2回程度遭遇する地震動で、地震前の降雨による飽和度の上昇に起因する盛土材料の強度低下を考慮している。供用期間の発生確率は低いが最大級の強さとなるレベルⅡ地震動に対しては、事象が同時に重なることが極めてまれであるため、地震前の降雨による飽和度の上昇に起因する盛土材料の強度低下を考慮していない。レベルⅠ地震動とレベルⅡ地震動に対する盛土式L3廃棄物処分施設の要求性能と目標性能を明確にした上で、2次元動的解析を用いて盛土の耐震性能を照査している。レベルⅠ、レベルⅡ地震動においても盛土は要求性能を満足するとの結果を得て、構造安定性が確保されていることを明らかにしている。

第4章では、盛土式L3廃棄物処分施設の底部排水層にCBを導入するにあたっての課題③を検討している。この検討には、垂直応力を作用させながら土（砂と礫）の水分特性曲線（体積含水率と負の圧力水頭の関係）を求めることができる垂直応力載荷型の保水性測定試験装置を用いている。実験結果から、盛土の安定性を確保するために締固めた（締固め度(Dc)80%, 85%, 90%)CBの砂（珪砂6号）では、盛土の高さ10m程度までにおいて、CBの排水機能に及ぼす垂直応力の影響は無視し得ることを明らかにしている。

第5章では、課題④を取り上げ、上部の砂が下部の礫の間隙に混入した場合のCBの限界長に与える影響を、水分特性曲線から検討している。その結果、混入した場合はCBの限界長が短くなる可能性が高く、何らかの砂混入

防止対策が必要になることを明らかにした。この砂混入防止対策として、破碎した貝殻（種類はホタテ貝）をCB構成材である礫材の代わりに用いることを提案している。破碎した貝殻を用いた降雨浸透実験、小型振動実験から、砂混入防止のため、破碎した貝殻の最小粒径を0.85mm以下にすることが有効であることを示している。また、透水試験とせん断強度試験から、破碎した貝殻の透水係数は 10^{-1} cm/sオーダー、内部摩擦角は 40° 程度となり、礫材とほぼ同様の値を示すこと、ならびに盛土による鉛直荷重（約10m程度）を想定した圧縮試験からは、繰り返しの鉛直応力を受けても貝殻の粒子破碎がほとんど発生しないことを示している。これらの実験・試験結果から、破碎した貝殻を盛土式L3廃棄物処分施設の底部排水層のCBとして用いることが、十分に現実的であることを明らかにしている。

第6章では、CBの課題⑤について検討している。砂混入防止対策のために礫材の代替材として破碎した貝殻を用いたCBについて、降雨装置を備えた大型土槽実験で排水性能と限界長を求めるとともに、既往のCB限界長推定式との適合性を検討している。その結果、破碎貝殻を利用したCBの性能・限界長が、一般的な礫材で構成されるCBとほぼ同様になることを明らかにしている。

第7章では、研究成果を取りまとめ、底部排水層にCBを用いた合理的で安全な盛土式L3廃棄物処分施設が成立することを結論として述べている。

以上、要するに、本論文は極低レベル放射性廃棄物の盛土形式による処分を実現するため、降雨および地震に対する安全性を模型実験、室内材料試験および数値解析によって検証したものである。さらに盛土処分施設底部の排水用キャピラリーバリアに粉碎された貝殻を用いることを新たに提案し、排水機能の長期有効性を実験的に示した。本論文は、今後、原子炉解体等によって大量に発生するとされる極低レベル放射性廃棄物の具体的な処分方法を示したもので、その価値は大きく地盤工学の発展にも寄与するものであり、博士（工学）の学位を授与するにふさわしいと判断する。

2014年2月

審査員	主査	早稲田大学教授	工学博士（東京大学）	濱田政則
	副査	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	赤木寛一
		一般財団法人電力中央研究所副所長		
			工学博士（早稲田大学）	大友敬三
		新潟大学教授	博士（農学）（京都大学）	森井俊廣