

# 博士論文概要

## 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

2013年12月

わが国の商業用原子力発電所の解体に伴い発生する廃棄物は、一般的に110万kw級の軽水炉で約50～54万トンと言われており、総重量の9割以上は非放射性の通常の廃棄物で、残りの1万トン程度（総廃棄物重量の3%以下）が放射性廃棄物と呼ばれるものである。適切な処分が必要な放射性廃棄物の内、原子炉規制法により放射化・汚染の程度によって高い順にL1～L3廃棄物に区分されるが、本研究の対象となる極低レベル放射性廃棄物いわゆるL3廃棄物（トレンチ処分）は、約3,140～7,110トンと推測されている。

L3廃棄物は、解体にともなう放射性廃棄物の中で一番物量が多いが、その処分については原子力発電所を所有している各電力会社、売電会社が原子力発電所の敷地内や発電所周辺の所有地などから用地を確保し処分施設を建設する計画となっている。今後、運転後40年間以上経ち廃止措置に取りかかる原子力発電所も増加して行くことを考えると、多くのL3廃棄物処分施設が必要となってくる。L3廃棄物処分施設の建設にあたって、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、建設候補地点ごとに地盤条件・地下水条件などが異なることが予想され、トレンチ処分が困難な地盤条件・地下水条件の場所において、合理的で安全な新しいL3廃棄物処分施設が望まれている。なお、L3廃棄物の種類は、建屋解体に伴い発生するコンクリートガラ、コンクリートブロックおよび、配管、機器等の解体に伴い発生する金属廃棄物（金属を細かく切断して砂で充填した鉄箱）である。

本研究では、トレンチ処分が困難な地盤・地下水条件の内、原子力発電所敷地に比較的多い基盤が亀裂性の硬岩で地下水位が高い（GL-2m～-3m）場合を対象に、L3廃棄物の新たな処分施設形式として、盛土式L3廃棄物処分施設を提案する。

新しいL3廃棄物処分概念である盛土式L3廃棄物施設を成立させるために、法規制から要求される技術的要件を満足することの他に、構造評価上確認しておくことが必要な事項および、底部排水層にキャピラリーバリア（以下、「CB」という。）を用いるにあたって解決すべき課題について検討する。これらの研究成果に基づき、底部排水層にCBを用いた合理的で安全な盛土式L3廃棄物処分施設を具体化することが、本研究の目的である。

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の抽出を行った。法規制（埋設規則、安全審査の指針）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が地震時成立性に及ぼす影響についての検討評価、②盛土式L3廃棄物処分施設の盛土材料とL3廃棄物の剛性の違いが、盛土全体の地震時安定性に及ぼす影響の確認、ならびに地震時における盛土材料とL3廃棄物の応答差により、盛土に地震後貫通クラックが発生する可能性についての検討評価、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いようにするため、ならび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、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た。

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、③ CB 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。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。CB の規模、従って、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。このため、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CB の限界長を、大型土槽実験で確認する必要がある。

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整理した。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の構造形状を設定した。この盛土式処分施設構造に対して、法規制に従い盛土の円弧すべり安定計算を行い、常時・地震時に安定性が保持できる盛土形状・構造と盛土材料の単位体積重量、強度などを検討し、盛土L3 廃棄物処分施設の基本構造形状を提示した。

第3章では、第2章で提示した盛土の基本構造形式について、課題①に関して、2次元降雨浸透流解析を用いて検討した。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－上部遮水層の組み合わせが、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がわかった。また、底部排水層（CB）に流入する浸透水量は少なく、今回導入したCBでも排水可能であることを示した。次に課題②について、動的解析（レベルⅠ、レベルⅡ地震動）により検討した。ここでレベル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。また、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、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た。これらにより、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が得られ、構造成立性があることを示した。

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を検討した。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）を求められる垂直応力載荷型の保水性試験装置を用いた。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（ $D_c$ ）80%、85%、90%）CB用の砂（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示した。

第5章では、課題④を取り上げ、上部の砂が下部の礫の間に混入した場合のCBの限界長に与える影響を、水分特性曲線から検討した。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が明らかになった。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た。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以下とすることが有効であることを示した。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 $41^\circ$ 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た。これらの成果から、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た。

第6章では、CBの課題⑤について検討した。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、降雨装置を備えた長さ3mの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限界長推定式に適合するかを検討した。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た。また、限界長の推定には、破碎した貝殻を用いたCBおよび通常の礫材を用いたCBのいずれともSteenhuisらの提案式が適用できることを示した。

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た。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 中房 悟 印

(2013年12月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○論文	キャピラリーバリアを利用した盛土式廃棄物処分施設における底部集排水砂層の垂直応力下での排水に関する性能評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.2, pp.197-207, 2013. <u>中房悟</u> , 小林薫, 松元和伸, 森井俊広
○論文	貝殻を再利用したキャピラリーバリア地盤の大型土槽実験による限界長の評価, 土木学会論文集C (地圏工学), Vol.69, No.1, pp.126-139, 2013. <u>中房悟</u> , 小林薫, 松元和伸, 森井俊広
○論文	水産系副産物（貝殻）を用いた砂混入防止型キャピラリーバリア地盤に関する検討, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.68, No.2, pp. I_462- I_467, 2012. <u>中房悟</u> , 小林薫, 森井俊広, 松元和伸
○論文	Estimation of water diversion provided by capillary barrier of soils, 5th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, Thailand, pp.773-777, 2012. <u>S.Nakafusa</u> , K.Kobayashi, T. Morii, Y. Takeshita
○論文	PRACTICAL APPLICATION OF CAPILLARY BARRIER OF SOIL INTO A SHALLOW LAND WASTE REPOSITORY, 5th China-Japan Geotechnical Symposium, pp.379-385, 2012. TOSHIHIRO MORII, KAORU KOBAYASHI, KAZUNOBU MATSUMOTO, TETSUYA SUZUKI, TAKAYUKI KAWAI and <u>SATORU NAKAFUSA</u>
○論文	Alternative Employment of Crushed Shell Particles in Capillary Barrier of Soil, Int. J. of GEOMATE, Vol.1, No.1, pp.50-55, 2011. <u>Nakafusa S.</u> , Kobayashi K., Morii T. and Nishimura T.
○論文	水産系副産物（貝殻）の保水性に着目した土質代替材への利用に向けた基礎的研究, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.67, No.2, pp. I_382- I_387, 2011. 小林 薫, <u>中房悟</u> , 西村友良, 森井俊広
○報告	ホタテ貝殻の強度特性と粒子破碎に関する基礎的研究, とびしま技報, No.62, pp.75-76, 2013. 小林薫, <u>中房悟</u> , 松元和伸, 小林延房, 森井俊広, 阪絵梨子

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○報告	貝殻の再利用に関する基礎的研究 ―貝殻の保水性に着目した実験的アプローチ―， とびしま技報，No. 60， pp. 67-72， 2011. 小林薫， <u>中房悟</u> ， 森井俊広， 西村友良， 松元和伸， 松田浩朗
○講演	ESTIMATION AND EXPERIMENTAL STUDY ON DIVERSION LENGTH OF CAPILLARY BARRIER USING CRUSHED SHELL PARTICLES， GEOMAT2013， pp.1-6， 2013. Kazunobu Matsumoto， Kaoru Kobayashi， <u>Satoru Nakafusa</u> and Toshihiro Morii
○講演	極低レベル放射性廃棄物処分のための盛土形式の成立性検討， 日本原子力学会，平成25年秋の大会，放射性廃棄物処分と環境報告集，No. 023， 2013. 山下亮， <u>中房悟</u> ， 木村誠， 石濱祐幸
○講演	扁平な破碎貝殻を用いたキャピラリーバリアに関する限界長の評価， 第48回地盤工学研究発表会， pp. 1057-1058， 2013. 小林薫， 松元和伸， 森井俊広， 井上光弘， <u>中房悟</u>
○講演	通気・遮水性に富むキャピラリーバリアシステムを用いた廃棄物・汚染土の中間貯蔵， 第2回環境放射能除染研究発表会要旨集，環境放射能除染学会， p. 63， 2013. 森井俊広， 小林薫， 松元和伸， <u>中房悟</u>
○講演	破碎した貝殻を用いたキャピラリーバリア地盤の砂混入防止効果， 土木学会第67回年次学術講演会概要集， pp. 221-222， 2012. <u>中房悟</u> ， 小林薫， 松元和伸， 森井俊広
○講演	破碎した貝殻の水分特性曲線に及ぼす破碎時微粒子の影響， 第47回地盤工学研究発表会， pp. 687-688， 2012. 小林薫， <u>中房悟</u> ， 森井俊広， 松元和伸
○講演	Alternative Employment of Crushed Shell Particles in Capillary Barrier of Soil， GEOMAT2011， pp. 305-310， 2011. <u>Nakafusa S.</u> ， Kobayashi K.， Morii T. and Nishimura T
○講演	砂礫混合土の水分特性曲線について， 2011年秋季講演会講演要旨，日本地下水学会， pp. 138-141， 2011. <u>中房悟</u> ， 西村友良， 小林薫， 森井俊広

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○講演	破碎した貝殻の水分特性曲線に及ぼす拘束圧の影響， 土木学会第 66 回年次学術講演会概要集， pp. 789-790， 2011. 小林薫， 西村友良， 森井俊広， <u>中房悟</u>
○講演	加圧膜法を用いた破碎した貝殻の水分特性曲線， 第 46 回地盤工学研究発表会， pp. 1027-1028， 2011. 小林薫， <u>中房悟</u> ， 西村友良， 森井俊広
○総説	水産系副産物（貝殻）のキャピラリーバリアへの有効活用に関する基礎的研究 —破碎した貝殻の保水性について—， 地盤工学会誌， Vol. 59， No. 7， pp. 14-17， 2011. 小林薫， 西村友良， 森井俊広， <u>中房悟</u>