連載講義

放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分について

第4回 最終処分過程における挙動と制御

JW SEMINAR

（独）国立環境研究所　資源循環・廃棄物研究センター
山田正人、遠藤和人、石森洋行、大迫政浩

《連載にあたって》

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故により、福島県を中心に東日本で広域な放射性物質汚染が生じています。日常の生活環境からの被ばくや食品を通じた被ばくなどが懸念される一方、放射性物質を含む廃棄物等の処理の問題が深刻化しています。この国難を克服するためには、放射能に汚染された環境の早期回復が試金石となり、放射性物質に汚染された廃棄物の安全かつ安心な処理処分の推進は、最も優先されるべき対処策の一つであると言えます。

本連載では、放射性物質汚染廃棄物の適正処理を行っていくうえで留意すべき技術的事項等を、（独）国立環境研究所が実施してきた調査研究の成果を中心に取り纏めた「放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分（技術資料）[1)]」の内容を紹介します。

なお、今回の原子力災害は、わが国において、また世界においても過去経験したことのない未曾有の事態であり、科学的な知見が十分でなく不確実性を含む事項があることを、予めお断りしておきます。

1. はじめに

現時点で、放射性物質に汚染された焼却灰などの廃棄物の埋立処分の方法は、最も影響が大きい埋立作業者の被曝線量率[2)]から求められた8,000Bq/kgという、廃棄物に含まれる放射性セシウムの放射能濃度によって規定されています[3)]。また、連載第3回[4)]で解説した焼却施設と同様に、最終処分場には公共水域の水中において濃度限度を超えない（Cs-134とCs-137のそれぞれの実測値をそれぞれの限度値である60Bq/Lと90Bq/Lで除した和が1を上回らない）という基準が排水（浸出水）に課せられています。これまで重金属やその他の有害物質を含む廃棄物の最終処分場への埋め立ては、浸出水経由での環境への放出防止という観点から、このような廃棄物中の濃度（固体濃度）ではなく、廃棄物からの水への溶出濃度で規制されてきました。今回の固体濃度による規制は、埋立作業員や地域住民に対する被曝線量を十分に小さくするという点で重要です。しかし、連載第2回[5)]で解説したように、放射性物質に汚染された廃棄物には、一般廃棄物の焼却飛灰などの放射性セシウムが水へ溶出しやすいものがあります。また、通常の水処理施設では浸出水に含まれる放射性セシウムを十分に除去できません[6)]。したがって、放射性物質に汚染された廃棄物を埋立処分する際には、被曝線量と同時に、濃度限度を順守できるように、浸出水経由での環境への放出を抑制する方法を考える必要があります。今回は、放射性物質に汚染された廃棄物の埋め立てにおいて考えなければならない共通事項や留意事項を示すとともに、放射性セシウムの廃棄物からの溶出量と浸出水中濃度の関係を評価した結果について述べます。

2. 放射性物質に汚染された廃棄物の埋め立ての方法

放射性物質汚染対処特措法施行規則[3)]では、放射性セシウムの固体濃度が10万Bq/kg以下の放射性物質に汚染された廃棄物は、特別な措置を施せば、既存の管理型最終処分場（または一般廃棄物最終処分場）に埋め立てることができます。これは、放射性セシウムが処分場内に封じ込められていれば、覆土等によって稼働中の作業員や地域住民への被曝線量が、また、跡地利用を制限することで稼働後の一般公衆への被曝線量が抑制できるためです。管理型最終処分場は底部に遮水工により汚水を場外へと漏洩させない封じ込め施設であり、場内の浸出水は集排水管によって集められ、処理後に公共用水域等へ放流する仕組みとなっています。連載第1回[7)]で解説したように、セシウムやその化合物は常温では極めて揮発しにくい物質であるため、最終処分場から環境へ漏出する可能性がある唯一の経路は浸出水です。現時点で放射性セシウムに対応した水処理技術の普及には時間がかかること、また、放射能が十分に減衰するまでの長い管理期間を考えると、浸出水として流出させないことが、放射線ではなく、放射性物質を最終処分場内に封じ込めるために必須の事項です。

放射性セシウムを最終処分場内に封じ込めるためには上部への隔離層の設置が重要です。上部隔離層に求められる機能は、遮水性、変形追従性、施工性、ならびに（放射線に対する）遮蔽性です。埋立地の表面から内部へと浸透する降雨量を涵養量といいます。この涵養量の大きさが廃棄物から浸出水への放射性セシウムの溶出量を左右します。したがって、上部隔離層には涵養量を抑える遮水性が必要となります。遮水性は、用いる資材の透水係数を小さくすることと、設置において排水勾配を設けることによって確保できます。周辺の廃棄物地盤よりも少なくとも2桁低い透水係数を与えること、また、不同沈下を考慮し、5%の排水勾配を与えることが必要と考えられます。変形追従性は、不同沈下対策として求められる機能であり、一般的には自己修復性を有する膨潤性粘土鉱物を用います。上部隔離層は、実際の埋め立て作業では、中間覆土の代替として設置され、数日から数週間に1度の施工となります。したがって、特殊な重機等ではなく、通常用いられるシャベルカー等を用いた工法を採用する必要があります。遮蔽性は、上部隔離層の充填密度（かさ密度）と厚みによって確保されます。これまでの通知[8)]では、通常の締固め土壌であれば30cmの厚みで40分の1程度の減衰が見込まれるとされています。なお、最終処分場の形状によって、雨水等が埋め立てた廃棄物の上部からだけでなく、側部から流入するおそれがある場合には、側面へ隔離層を設けることも必要となります。

放射性セシウムの固体濃度が8,000Bq/kgを超える廃棄物については、水との接触面積を減ずるため、セメントを混合して固型化します。固型化の方法としては、1 m^3当たり150kg以上のセメントを混合する、0.98MPaの一軸圧縮強度を必要とする等の規定があります[9)]。しかし、現時点で、より具体的な固型化の方法や放射性セシウムの溶出抑制の効果は示されていません。

廃棄物の下には、放射性セシウムが保有水に溶出してしまっても内部に留めるため、土壌層を敷設します。土壌層には吸着能と通水性の2つの機能が求められます。材料として、通水性という面では砂や礫が適していますが、セシウムの吸着能は小さいです。吸着能という面では、粘土質土壌が最も性能が良いですが、粘土分（75μm以下の粒径）が多いと通水性が悪くなり、浸透水が吸着層内に入り込まなくなります。よって、適切な土壌を探しだすか、通水性と吸着能を両立する材料を人為的に配合することが求められます。これまである物質を最終処分場内に留めようとして吸着層を設計した事例は少なく、どのような土壌であれば良いか、どのように敷設するのかというこれ以上具体的方法を示すことは難しいのが現状です。

したがって、放射性セシウムを物質として最終処分場内に封じ込める基本的な対策は、廃棄物の上部と側部に設置する隔離層であり、セメント固型化や下部の土壌層は、仮に水が入ってしまった場合のフェイルセーフ機能の一つと考えるべきものです。

3. 放射性物質の溶出量を考慮した浸出水への影響の評価

3.1 方法

それでは最終処分場にどのように上部隔離層や土壌層を敷設すれば、浸出水経由での放射性セシウムを制御できるのでしょうか。連載第2回[5)]で示した溶出試験（有姿撹拌試験）から求められる溶出率や吸着実験で求められた土壌との分配係数などを用いて、数値解析により、汚染廃棄物を埋め立てた最終処分場の浸出水における放射性セシウム濃度の時間変化を予測した例を紹介します。図1に予測計算に用いた汚染廃棄物の埋立断面を示します。

最終処分場は陸上の施設、また、汚染廃棄物は8,000Bq/kg以下の特定一般廃棄物である焼却飛灰を想定しました。図1の左側に示すように、既に1段、300cmの深さで事故以前の汚染されていない廃棄物が埋め立てられている場所の上に、50cmの土壌層を敷設し、そこに300cmの汚染廃棄物を埋め立てた後に、50cmの上部隔離層を敷設するとしました。このような現場で、水が雨水として上からのみもたらされ、最終処分場の内部を下に向かってだけ流れるとすると、数値解析では、図1の右側に示すように一次元移流分散を計算場として考えればよいことになります。

計算では、上部隔離層を通過し、汚染廃棄物層を流れる水の流量を涵養量として一定値（10 ～ 200mm/

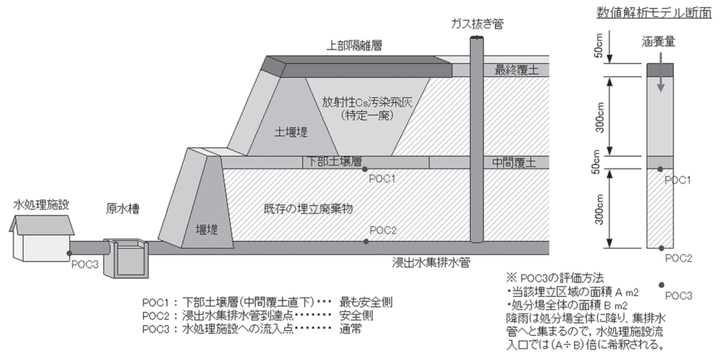


図1　予測計算に用いた汚染廃棄物の埋立断面

year）を与えました。この涵養量がそのまま廃棄物層や土壌層を飽和して流れるものとしました。汚染廃棄物の放射性セシウム（Cs-134とCs-137の合計）の固体濃度は100 ～ 4,000Bq/kgを与え、Cs-134とCs-137の比は1：1、溶出率は100%としました。また、汚染廃棄物から放射性セシウムは瞬時に全て水に溶出すると仮定しました。溶出濃度は図2に示すように設定しました。ある汚染廃棄物に含まれる放射性セシウムの溶出率が100%の場合、固体濃度が100Ba/kgの時には、液固比10で行われる溶出試験で得られる溶出濃度は10Bq/Lとなります。しかし、埋め立てられた廃棄物において間隙率（水が入り込める隙間の割合）を40%とすると、液固比は0.267となるため、同じ汚染廃棄物で間隙水の放射性セシウム濃度は375Bq/Lとしました。汚染廃棄物層では分配係数が小さいものとして0.5mL/g、土壌層では、バッチ吸着試験[5]の結果を参考にして分配係数10 ～ 100mL/gとしました。

以上のような設定で、上部隔離層から涵養量でもたらされた水が汚染廃棄物層を通過する際に放射性セシウムを溶かしこみ、土壌層を通過する際に吸着され、これらの移動に要する時間の間に崩壊した浸出水中の放射性セシウムの濃度を、図1で示した下部土壌層の直下（POC1）、さらに既存廃棄物層を通過した後の浸出水集水管への到達点（POC2）で評価しました。汚染廃棄物が最終処分場の一部に埋め立てられる場合には、図1にPOC3として示したように、埋立地から流出する浸出水の放射性セシウム濃度は他の領域を通過した浸出水に希釈されることになりますが、今後埋め立てられる汚染廃棄物（または放射性セシウム）の総量を決めることができない時点では、それを期待することはできないと考え、今回の評価から省きました。

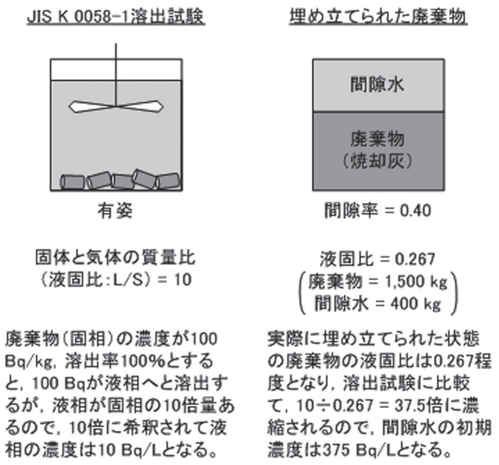


図2　溶出率と溶出濃度の考え方

3.2　計算結果

図3に、固体濃度が1,000Bq/kgの汚染廃棄物を埋め立て、土壌層の分配係数が10mL/gである場合に、上部隔離層からの涵養量を10 ～ 200mm/yearに設定した浸出水での放射性セシウム濃度の経時変化を、濃度限度比で示します。なお、濃度限度比は次式で求められ、この値が1を超えると法令上の基準を超過していることになります。

このケースでは、涵養量が200mm/yearでは数十年後にPOC1およびPOC2共に、浸出水中の放射性セシウム濃度は濃度限度値が1を上回ることになり、上部隔離層には降水の涵養量を100mm/year程度に抑制する性能が必要であることがわかります。なお、涵養量を100mm/yearにすることは技術的に困難ではなく、さらに低い涵養量で上部隔離層を設計することも十分に可能です。

図4に、固体濃度が1,000Bq/kgの汚染廃棄物を埋め立て、上部隔離層からの涵養量を100mm/yearとし、土壌層の分配係数を5～ 100mL/gに設定した浸出水での放射性セシウム濃度の経時変化を、濃度限度比で示します。このケースで分配係数が5mL/gと10mL/gの場合にPOC1で、5mL/gの場合にPOC2で濃度限度比を数十年後に超過し、土壌層には10mg/L以上の分配係数が必要であることを示しています。なお、この分配係数10mL/gは、連載第2回[5]で示したように、最終処分場浸出水で見られるように塩類を多く含む水を用いた吸着試験を実施して確かめる必要があり、塩類を含まない水で求められた分配係数の1/10 ～ 1/100になると考えられます。

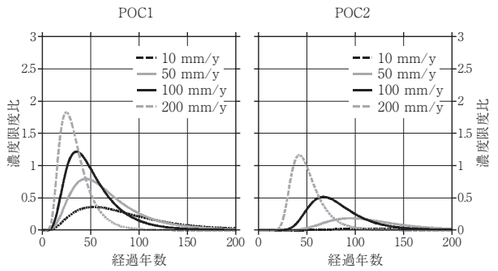


図3　涵養量の影響

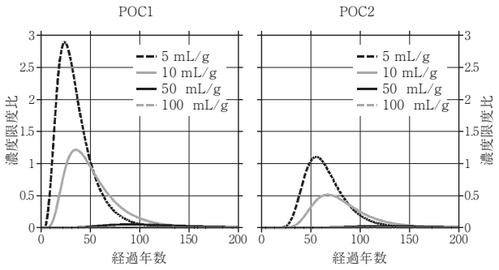


図4　分配係数の影響

図5には固体濃度が100 ～ 4,000Bq/kgの汚染廃棄物を埋め立て、上部隔離層からの涵養量を100mm/yearとし、土壌層の分配係数を10mL/gとした浸出水での放射性セシウム濃度の経時変化を、濃度限度比で示します。このケースでは、POC1で1,000Bq/kg以上、POC2で4,000Bq/kgで数十年後に濃度限度を超過することが示されています。すなわち、同じ特定一般廃棄物であっても、放射性セシウムの固体濃度によって、埋め立てた後の浸出水濃度が異なります。そのため、放射性セシウムを封じ込める適切な対策をとるためには、8,000Bq/kg以下であったとしても、埋め立てている廃棄物の放射性セシウム濃度と、その溶出率を把握しておくことが必須です。

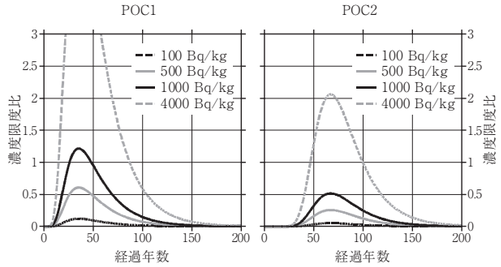


図5　放射性セシウムの固体濃度の影響

3.3　まとめ

以上の計算結果、放射性セシウムを物質として長期に渡って最終処分場内に封じ込めるためには、埋め立てる汚染廃棄物の放射性セシウムの固体濃度や溶出率を把握した上で、十分に涵養量を絞り込むことができる上部隔離層を設計し、施工し、また長い間維持管理してゆくことが重要。放射性物質汚染対処特別措置法における施行規則でも、8,000Bq/kg以下の特定一般廃棄物／産業廃棄物であるばいじんについては、溶出率が高いため、最上部に隔離層を設けることが義務付けられていますが、管理者は適正な運用を徹底する必要があります。

全体的には、浸出水中の放射性セシウム濃度のピークは埋立直後ではなく数十年後に現れること、また、POC1よりもPOC2でピーク濃度が小さくなるように通過する層が長くなると、崩壊の効果が現れることを示しています。すなわち、浸出水中の放射性セシウム濃度のモニタリングは、現時点で問題がなくとも、埋立後数十年間、場合によっては100年以上の長期にわたって続け、浸出水処理による対応を準備しておく必要があること、また、汚染廃棄物は埋立地から浸出水が流出する端部からなるべく離して埋め立てる必要があります。

それぞれの最終処分場で、埋め立てられる廃棄物の汚染レベル、溶出特性や量、埋め立てることのできる場内のスペース、また、上部隔離層や土壌層として入手できる資材の性質が異なります。したがって、ここのような評価を個別の事例に合わせて行い、より確実な封じ込めを行うことが重要だと考えます。

4. おわりに

今回をもって連載は終了します。連載で取り上げた事柄は、放射能汚染廃棄物問題を理解するための知識のごく一部であり、また、研究は現在も着々と進んでいます。本連載の原典とした「放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分（技術資料）」[1]には、連載で取り上げなかった事柄も掲載されており、また順次アップデートされていますので、今後も注視していただき、ご意見いただければ、私達としても研究の励みとなります。よろしくお願い致します。

参考文献（URLは2012年12月現在）
1) (独) 国立環境研究所 (2011) 放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分 (技術資料)
http://www.nies.go.jp/shinsai/techrepo_r2_120326s.pdf
2) 環境省 (2011) 第9回災害廃棄物安全評価検討会資料11-1および11-2
http://www.env.go.jp/jishin/attach/haikihyouka_kentokai/09-mat_4.pdf
3) 平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法施行規則 (平成23年12月14日環境省令第33号)
http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/mo_h23-33a.pdf
4) 山田正人，倉持秀敏，大迫政浩 (2012) 連載講義　放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分について　第３回　焼却処理過程における挙動と制御，日廃振センター情報，秋号：12-15
5) 山田正人，遠藤和人，肴倉宏史，石森洋行，大迫政浩 (2012) 連載講義　放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分について　第２回　焼却灰等からの放射性セシウムの溶出と吸着，日廃振センター情報，夏号：12-15
6) 高野剛彦，田村行信，西崎吉彦，泉谷宏一，熊谷直和，遠藤和人，山田正人，大迫政浩 (2012) ゼオライトを用いた一般廃棄物最終処分場浸出水に含まれる事故由来放射性セシウムの分離除去について，都市清掃，65 (306)：218-222
7) 山田正人，滝上英孝，倉持秀敏，大迫政浩 (2012) 連載講義　放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分について　第１回　放射性物質の基礎知識，日廃振センター情報，春号：12-15
8) 環境省 (2011) 福島県内の災害廃棄物の処理における一時保管 (平成23年7月28日)
http://www.env.go.jp/jishin/attach/fukushima_hokan110728.pdf
9) 特定廃棄物の固型化の方法等 (平成二十四年二月二十四日　環境省告示第十四号)
http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/an24_014.pdf