

東日本大震災で発生した災害廃棄物等の処理について ～放射性物質が含まれた焼却灰等の埋立処分について～

環境計画センター

技術士（衛生工学・建設・環境）・環境カウンセラー（事業者部門）

第一種放射線取扱主任者、甲種危険物取扱者など

専任理事 ^{かぎや} 鍵谷 ^{つかさ} 司

震災復興は、災害廃棄物及び汚染土壌の除去が行われて初めて本格的に開始される。いずれも放射性物質が付着しており、除去後に保管や最終処分しても放射能はなくなる。発生量が膨大であり、これを埋立処分するためには広大な最終処分場が必要である。付着した放射性セシウム（以下、Cs137）の半減期が30年とかなり長いことから百年以上にわたる管理が必要である。このようなリスクの大きな放射性物質が生活圏に存在すること自体が不安を助長するなど、埋立に対する住民の理解を得ることは至難である。なお、災害廃棄物は、事業活動に伴うものでないため、一般廃棄物に該当し、法律的には自治体に処理責任がある。

災害廃棄物のうち、木くず等は一サイクルに、その他の可燃物は焼却処理、不燃物は埋立などにより対応しているが、処理により減量化されるものの焼却灰等の不燃物は最終的に埋立が不可欠である。また、除染された土壌は、除染範囲や除去深度にもよるが災害廃棄物をはるかに超える膨大な残土が発生し、その処分も大きな課題になっている。

放射能が付着した廃棄物の処理のうち、焼却した場合には排ガス中、埋立した場合には放流水等に含まれる放射性物質が環境へ排出されることになる。ここでは、除染で発生する放射能を含む残土の処分も視野に入れて災害廃棄物の埋立処分について紹介する。すでに、国の方針が出されているものの、実際に埋

立処分場に搬入するためには、住民の理解・同意が欠かせない。埋立時及び埋立後の放射性物質の飛散は防止されるとしても放流水や地下水など環境への流出防止が必ずしも明らかにされていない。つまり、埋立後の放射性物質の挙動が明らかでないことや維持管理が異常に長いことが不安の要因であろう。

埋立処分方針は、埋立時及び埋立後における被ばく防止の観点から決められており、その方針並びに考え方などについて紹介し、解説する。

なお、災害廃棄物の仮置き場において自然発火による発煙や火災が頻発している。これまで自然発火に関する実験、発火理論、解析や火災事件にかかる保険金請求事件に係る裁判で多くの見解書や意見書を提出してきた。その経験に基づいて現場的な視点から、「緊急解説④東日本大震災で発生した災害廃棄物等の処理について～災害廃棄物の保管時における自然発火の原因と対応について～」を寄稿することにしたので、誌面の都合もあり、Q & Aの一部のみ紹介します。

（1）放射性物質（放射能）が付着した 災害廃棄物の処分に関する経緯について

原子力発電所の事故に伴って排出された放射性物質により汚染されたおそれのある福島県内の災害廃棄物については、平成23年6月23日に環境省より「福島県内における災害廃棄物の処理の方針」が公表された。ここで

は、災害廃棄物の焼却、発生した主灰及び飛灰の埋立及び再生利用にあたり安全な処理方針等について取扱いが示された。

その後、東京都の一般廃棄物焼却施設の飛灰から8,000Bq/kgを超える放射性セシウムが検出されたことから、6月28日に上記の方針を踏まえて「一般廃棄物焼却施設における焼却灰の測定及び当面の取り扱いについて」通知し、8,000Bq/kg以下の焼却灰については、管理型最終処分場で埋立処分し、これを超える焼却灰については、同処分場に一時保管するとの方針が示された。

7月28日には、「一般廃棄物焼却施設における焼却灰の等の一時保管について」事務連絡が行われ、「8,000Bq/kg超100,000Bq/kg以下」及び「100,000Bq/kg超」焼却灰の一時保管方法、近隣住民の被ばく防止の観点から一時保管等における居住地域等の敷地境界からの距離について示された。

8月29日には、16都県において一般廃棄物焼却施設において発生した焼却灰の放射性セシウムの測定結果が報告されたことから「一般廃棄物処理施設における放射性物質に汚染されたおそれのある廃棄物の処理について」通知され、廃棄物処理における安全性の考え方、具体的な対応等について示された。

8月31日には、「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」課長通知があり、事前に通知された「8,000Bq/kgを超える焼却灰については、同処分場に一時保管するとの方針」について、一時保管後の安全な処分方法について明示された。その内容は、後述する。

ところが、一般廃棄物処分場（管理型処分場）でこれらの焼却灰を埋立処分したところ、一部ではあるが排水処理後の放流水中にモニタリングの目安（基準はない）を超す放射性セシウムが検出されたことから、その原因を精査した結果を踏まえて9月21日「廃棄物最終処分場における焼却灰等の埋立処分について（注意喚起）」事務連絡が行われた。

9月29日には「一般廃棄物焼却施設から排出された放射性セシウムを含む焼却灰の処理について（今後の方針）」が公表され、8,000Bq/kg以下の焼却灰の処理の現状、焼却灰の溶出抑制に関する知見をもとに今後の進め方が通知された。

放射性物質が付着したあるいは混在した災害廃棄物や焼却灰の埋立処分方法は、いずれは災害廃棄物を大きく上回ると想定される除染に伴う汚染土壌の処分においても踏襲されることになるので、以下に埋立処分方法の詳細を紹介したい。

（2）放射性物質（放射能）を含む焼却灰の処分方法について

「福島県内の災害廃棄物の処理の方針」（平成23年6月23日）において、焼却に伴って発生する焼却灰（主灰、飛灰）や不燃物の直接埋立について8,000Bq/kg以下のものは一般廃棄物最終処分場（管理型処分場）で埋立処分できるとし、これ以上で100,000Bq/kg以下のものは一時保管することが規定された。その後、8月31日「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」安全な処分方法が明示された。

つまり、放射能の強さにより埋立方法は次の3段階に区分されている。放射能の低い①については自治体の処理、やや高い②及びかなり高い③については国が処理することが最近決まっている。

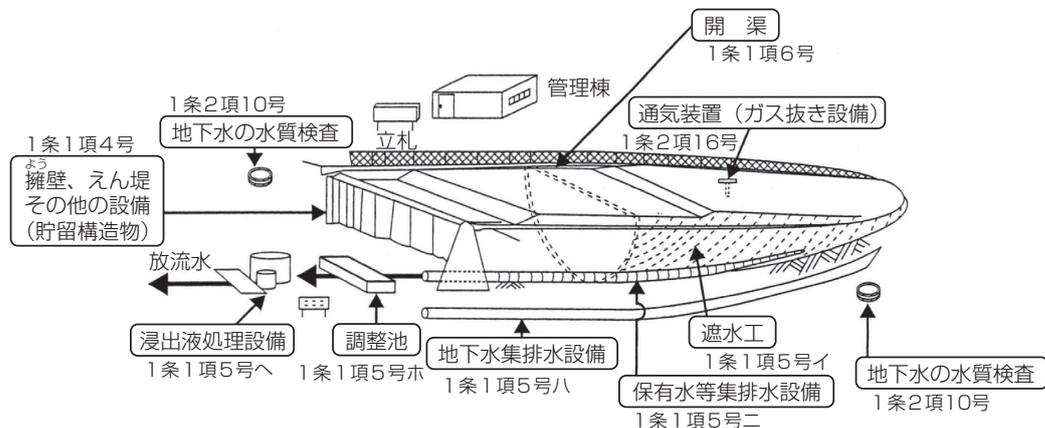
- ①8,000Bq/kg以下の焼却灰；一般廃棄物最終処分場（管理型処分場）で埋立処分
- ②8,000Bq/kg～100,000Bq/kgの焼却灰；一般廃棄物最終処分場（管理型処分場）において次の三つの方法による埋立
- ③100,000Bq/kg以上の焼却灰；適切に放射線を遮断できる施設、たとえば遮断型最終処分場での保管。適切な処分方法を検討中。

ところで、廃棄物処理法の最終処分基準省令で、最終処分場には管理型、遮断型、安定型処分場に分類され、それぞれの処分場に埋

め立てることができる廃棄物の種類並びに構造基準及び維持管理基準が規定されている。おおまかにまとめると次のとおりである。

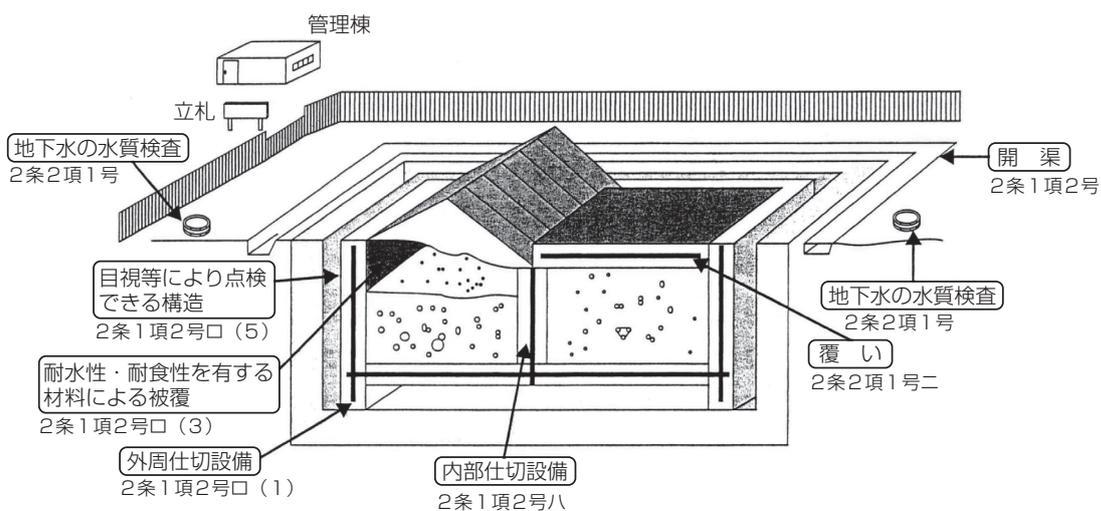
①管理型最終処分場（図-1）：擁壁、遮水設備、汚水集排水設備、排水処理設備等を備えており、主に有機物や無害な重金属類が含まれた廃棄物の埋立処分場。遮水工は、何らかの要因で破損した場合があっても安全に漏水防止ができるように二重遮水工が多い。表面遮水工には、埋立地底部を不透水性の粘土やシートなどを敷設する工法があり、粘土とシートの組み合わせや二重にシートを敷設するなどの工法が主流である。

一方、排水処理設備は、廃棄物が浸透した雨水が接触して汚水になるので、放流基準値以下に処理する設備である。基準値は、有機物、重金属類などについて規定されているが、放射能についての規定はない。通常、生物処理、凝集沈殿、砂ろ過や活性炭吸着の組み合わせが多いが、最近では、汚染物質と水をろ過分離できる膜処理が多くなっている。汚水中に放射性セシウムが含まれている場合の除去効果はまだ明らかにされていない。平成21年度における全国の設置数は、一般廃棄物処分場（管理型処分場）が1,800か所（残余容量：約1億1,600万 m^3 ）、



出典：最終処分基準省令を基に作成

図-1 管理型最終処分場



出典：最終処分基準省令を基に作成

図-2 遮断型最終処分場

平成20年度産業廃棄物管理型処分場が841か所（残余容量：約1億 m^3 ）設置されている。

②遮断型最終処分場（図-2）；所定の強度、水密性を有するコンクリートで一定の大きさの屋根付きピットであり、排水処理設備は不要。主に有害な廃棄物を保管する埋立処分場である。設備としては、ここに埋め立てた廃棄物は水が入らないので、溶解することも流出することもないので、永久に保管しなければならない。全国の設置数は32か所（残余容量：16,000 m^3 ）で少ない。放射能を含んだ廃棄物を保管した場合には、100年以上の維持管理が必要である。コンクリートの耐用年数が数十年程度であり、固化等の溶出防止対策を講じたとしても別途対策が必要であろう。

③このほかに安定型処分場があり、主に有害物や有機物が付着していない廃プラ、ゴムくず、金属類、ガラス・陶磁器・コンクリートくず、がれき類の埋立処分場であるが、擁壁以外の設備がないので、放射性物質の浸透や流出を防止できないので、埋立ては不適である。全国には、産業廃棄物の安定型埋立処分場が約1,326か所（残余容量：7,500万 m^3 ）設置されているが、利用できない。

ところで、廃棄物処理法第2条（定義）において「放射性物質およびこれに汚染されたものを除く」と明記されており、法律で想定されていない事態になっていることになる。これに関連して2005年（平成17年）5月の通常国会で「原子炉等規制法」が改正された。その中で、クリアランス制度（放射性廃棄物として取り扱う必要のないものを区分）が規定された。クリアランスレベル以下の廃棄物は、普通の廃棄物として安全上同じ扱いができ、再生利用や処分が可能になることを意味する。クリアランスレベルは、様々な事例を想定した計算結果から、原発の廃止時に発生する極低レベルの放射線で汚染されたコンク

リートや金属がどのように再利用あるいは埋め立てられても、それらに起因する放射線からの人体への影響は無視できるレベルとして、それに起因する身体への影響が1年間当り0.01ミリシーベルト（10 μSv ）以下と規定されている。

以下には除染に伴い発生する放射能を含んだ残土が膨大に発生すると予測されていることから問題になりそうな8,000Bq/kg～100,000Bq/kgの焼却灰の埋立処分方法について概要を紹介する。なお、水田の土壤汚染の暫定基準は5,000Bq/kg以下であり、これ以下であれば作付けが出来るとされている。

基本的には、廃棄物の埋立作業に伴う作業者及び埋立跡地の利用を制限することによる一般公衆の被ばく対策ならびに埋め立てられた廃棄物に含まれた放射性物質が外部に流出しない方策について規定している。埋立処分場から放射性物質の流出は、放流水中に含まれて流出及び水に溶解して地下水へ浸透することにより起こるので、その防止が主たる対策となる。具体的には次のとおりである。

(3) 8,000Bq/kg～100,000Bq/kgの焼却灰の処分方法について

処分方法は、埋立地からの放射性セシウムによる水環境汚染の防止と埋立跡地利用の制限による被ばく防止の観点から構成されている。（図-3、表-1）

1. 放射性セシウムによる公共用水域や地下水の汚染の防止。

埋立方法には3つの方法があり、いずれの場合も共通事項の遵守が求められる。

1) 埋立に当たって共通事項について

- 水との接触の防止または低減化
- 土壌層の上に埋め立てる
- モニタリング及び排水処理
- その他の管理；

2) 個別の埋立方法

以下の①～③のいずれかの方法により安全に処分する。一般廃棄物最終処分場（管理型最

【一般廃棄物最終処分場（管理型最終処分場）での処理イメージ】
以下の1)～3)のいずれかによる。

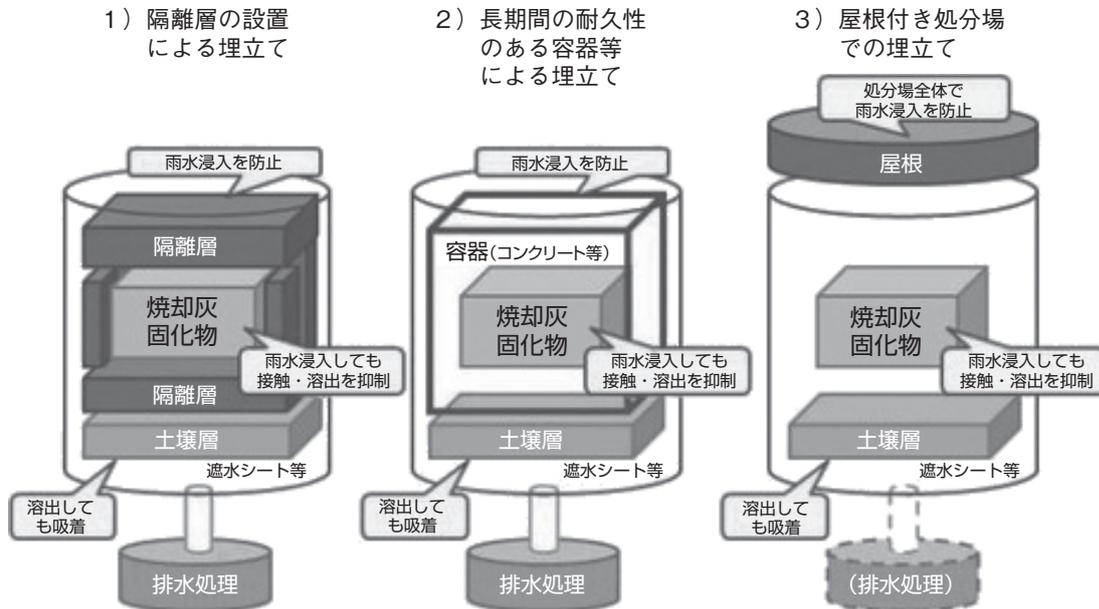


図-3 8,000Bq/kg～100,000Bq/kgの焼却灰の処分方法について

表-1 焼却灰の処分基準

放射性セシウム基準値	対応
100,000Bq/kgを超えた場合	適切に放射線を遮へいできる施設で保管
8,000～100,000Bq/kg	管理型最終処分場に場所を決めて埋立（隔離層設置、長期間の耐久性のある容器等、屋根付き処分場）。他の廃棄物と区分、即日覆土 ※空間線量率、排水のモニタリング ※1万Bq/kgを超えた場合は電離則の規定を遵守
8,000Bq/kg以下	管理型最終処分場で埋立（主灰と飛灰を分離、特定場所で埋立）

放射性セシウム基準値	対応
参考 5,000Bq/kg	稲の作付けが可能となる土壌中濃度の上限值
500Bq/kg	穀類・野菜・肉・卵・魚の暫定指標値
200Bq/ℓ	飲料水・牛乳・乳製品の暫定指標値
100Bq/kg	※廃棄物の再生利用が可能 ※クリアランスレベル；10μSv/年以下

※平成23年6月23日の環境省通知「福島県内の災害廃棄物の処理の方針」に基づく基準

※平成23年8月31日の環境省通知「8,000Bq/kgを超え10,000Bq/kg以下の焼却灰等の処分方法に関する方針について」

終処分場)で埋立処分を行うに当たっては、放射性セシウムによる公共用水域や地下水の汚染を防止するため、以下の対策を講じる。

○焼却灰から放射性セシウムが仮に溶出しても土壌に吸着されやすいことを考慮し、土壌の層の上に埋め立てる。

○焼却灰と水がなるべく接触しないように対策を講じる。具体的には、焼却灰をセメント等で固化したうえで、以下のいずれかの方法による。

①埋立区画の上下側面に隔離層(透水性の低い土壌の層)を設置して埋立て

②長期間の耐久性のある容器に入れて埋立て

③屋根付き処分場で埋立て。また、処分場への雨水が流入しない遮断型最終処分場で埋立処分を行うことも可能。

○排水及び周辺地下水についてモニタリングを行う。

2. 跡地の利用制限を含めた長期的な管理

埋立終了後においても、廃棄物処理法に基づく管理を基本として、以下の1)~3)のとおり、放射性物質に関する長期的な管理を行う。

1) 覆土が適切に行われたことの確認

2) 土地改変及び跡地利用用途の制限(居住等の用途に供しないこと)

3) モニタリング、排水管理の継続

このため、民間業者が設置する処分場については、国、委託者である市町村等、施設の指導監督権限を有する県又は政令市が必要な指導を行う。また、埋め立てられた廃棄物の情報を公的に管理することが必要。

(4) 放射性物質を含む埋立てに関するQ & A

放射性物質が付着した廃棄物の処理等に関する安全確保の当面の考え方は、処理等に伴い周辺住民が受ける線量が1 mSv/年を超えないようにするとともに、埋立終了後に受ける線量を10 μSv/年以下とすることとされている。放射線による被ばくは、放射能の強さ

(ベクレル;Bq)、放射能からの距離(距離の2乗に反比例)、被ばく時間、遮蔽の有無等により決まる。このような放射線の特徴を考慮して埋立作業中及び埋立後跡地における被ばく量が基準(目安)を満たす条件を規定したものである。

これについては次回に解説することとし、今回は誌面の都合上、埋立処分した場合の放射能の強さによる区分の根拠及び処維持管理期間についてのみ紹介します。

Q-1 埋立を放射能の強さで(8,000Bq/kg以下、100,000Bq/kg以下及び以上)で区分しているが、その根拠はなにか?

ベクレル(Bq)は馴染みのない単位であるが、切りの良い10,000Bqではなく、8,000Bqは何を意味するでしょう。

電離性放射線障害防止規則(以下、電離則という。)によると、焼却灰等が放射性物質に該当する場合(10,000Bq/kgを超える)、作業者の安全を確保するために電離則を遵守し、それ以外の場合においても下限値近傍(下限値のおおよそ8割以上、この場合はおおよそ8,000Bq/kg)では、空間線量率の測定等が規定されている。つまり、放射能の強さがこれ以下であれば、埋立中における作業員の被ばく量は1 mSv/年以下であり、安全に埋立作業ができるレベルとして規定されている。

埋立作業中(1 mSv/年以下)及び跡地利用(10 μSv/年以下)における被ばく計算については次回に紹介します。

管理型処分場では、排水処理施設が設置されており、放流水が発生する。排水の放射能濃度に関する基準値はないが、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度を定める告示」において濃度限度が示されている。排水中の放射能が経口摂取されたとして年間被ばく量が1 mSv/年以下の値として3カ月間の平均濃度はCs137が90Bq/l、Cs134が60Bq/lが目安とされている。

具体的には、放射性廃棄物の廃棄に当たり、排水については排水口等において、次の濃度限度を超えない（3ヶ月間の平均値）ようにすることとされている。

周辺監視区域外の水中の濃度限度

$$\frac{\text{Cs134の濃度(Bq/ℓ)}}{60(\text{Bq/ℓ})} + \frac{\text{Cs137の濃度(Bq/ℓ)}}{90(\text{Bq/ℓ})} \leq 1$$

なお、飲料水の放射性セシウムの暫定基準は200Bq/ℓ以下であり、一般的に放流された場合にはその1/10以下に希釈されるとの設定で環境基準等が決められていることを考えると、十分に低濃度といえる。

当初、原子炉の廃炉を検討された際に、被ばく線量が基準値1mSv(1,000μSv)の100分の1に相当する10μSv/年以下はリスクがほぼゼロに近いので、このような極低レベルの廃棄物は、放射能による影響を考慮する必要はないとし、廃棄物処理法の範疇で処理できるとされた。これ以上の低レベルから高レベル廃棄物は原子炉等規制法のなかで取扱われることとされている。

Q-2 放射性セシウムを埋立処分した場合、いつまで維持管理することになるか？

放射性セシウムを含む焼却灰等を埋立処分した場合には、かなり長い年月にわたって処分場の維持管理が必要になる。処分場の構造物は、粘土層を利用した遮水工以外は人工物であり、耐用年数は長くても数十年であろう。

放射性セシウムの放射能は、核反応以外のどのような手段を講じても消滅することがないので、ただひたすらに自然崩壊により非放射性セシウムに崩壊することを待つ以外に方法はない。今、問題になっている放射性セシウムには、重さの異なるCs134とCs137があり、それぞれの半減期（放射能が半分になる期間）は2年と30年である。時間経過とともに放射能の強さ、つまり放射線は低くなるが、安全なレベルまで減衰するためには長期間を要する。半減期の短いCs134であれば、比較的短い期間内で自然に減衰するが、Cs137は数世代にわたって管理しなければならない。つまり、それぞれの放射性セシウムは重さがわずかに違うだけで、その化学的、物理的な性質は同じである。含まれている量により維持管理に必要な期間が大きくことなる。

ここで、現状の焼却灰等にCs134とCs137が同じ量が含まれているとして、経過年数と放射能について計算してみた。埋立初期における放射能の強さとどの程度まで放射能が減衰するかにより期間は異なる。埋立区分に応じて以下の放射能の強さを想定し、減衰後の基準値を次の5ケースに設定して計算した。

放射性セシウムの放射能を次のように設定した。

- A：合計8,000Bq/kgの場合（Cs134が4,000Bq/kg、Cs137が4,000Bq/kg）
- B：合計20,000Bq/kgの場合（Cs134が10,000Bq/kg、Cs137が10,000Bq/kg）
- C：合計50,000Bq/kgの場合（Cs134が

表-2 放射能の強さと所定レベルまでの減衰期間

所定レベル各種暫定基準	A:8,000Bq/kg	B:20,000Bq/kg	C:50,000Bq/kg	D:100,000Bq/kg
①埋立(8,000Bq/kg)	0年	11年	50年	80年
②水田(5,000Bq/kg)	3.3年	30年	70年	100年
③米(500Bq/kg)	90年	130年	170年	200年
④飲料水(200Bq/ℓ)	130年	170年	210年	240年
⑤廃棄物利用(100Bq/kg)	160年	200年	240年	271年

- 25,000Bq/kg、Cs137が25,000Bq/kg)
D：合計100,000Bq/kgの場合（Cs134が
50,000Bq/kg、Cs137が50,000Bq/kg)
また、それぞれの放射能の合計が次のレベルまで減衰するまでに必要な期間を算定した。
- ①埋立に問題ないレベル（8,000Bq/kg）まで減衰する期間
 - ②水田の暫定基準（5,000Bq/kg）まで減衰する期間
 - ③米の暫定基準（500Bq/kg）まで減衰する期間
 - ④飲料水の暫定基準（200Bq/ℓ）まで減衰する期間
 - ⑤廃棄物の利用基準（100Bq/kg）まで減衰する期間
- 半減期の短いCs134は20年経過後には1/1000程度に減衰するが、半減期の長いCs137は300年を要する。同じセシウムでもそれぞれの含まれる割合により維持管理期間が大きく違うことに留意していただきたい。

おわりにあたって

放射能が含まれる焼却灰を管理型処分場に埋め立てた事例で、排水処理後の放流水の放射能濃度が目安を越えた事例が報告されている。既存の排水処理方法では確実に除去できないことが示された。とくに、焼却灰のうちの飛灰の放射能の溶出率が高いことが明らかにされており、溶解性の塩化セシウムが多いことを示唆する。また、ゼオライトや粘土（I型層状ケイ酸塩）などがセシウムを強力に吸着する事も明らかにされている。

上記で紹介した埋立方法はあくまでも災害廃

棄物の処理物である焼却灰等の埋立を想定したものである。放射能を含む土壌、たぶん水溶解性の高いセシウムは流出しているの、土壌に吸着した形態で埋立てられることになるので、安全埋立の方法は異なると考えている。

基本的には水に出来る限り接触させないとの考え方に基づいて埋め立て方法が規定されているが、これでは100年以上にわたり雨水浸入を防止する維持管理が求められる。むしろ、セシウムのイオン化特性を考慮し、溶解性のセシウムを出来る限り水に溶かして流出させ、汚水処理で不溶化して再埋立したほうが、長期的にみて安全な埋立方法ではないだろうか。検討中！

今回は、埋立作業員等の被ばく量の計算の考え方、覆土の遮蔽効果や放射性セシウムは既存の排水処理施設での除去等に関するデータを整理して紹介したい。

追記

すでに述べたように埋立作業や跡地利用については被ばく基準が設定されている。当然、放射能が強いなど被ばく量は多くなるが、放射能からの距離、遮蔽の有無並びに被ばくする時間により大きく変動する。つまり、被ばく基準はこれらの設定した条件下での作業や跡地利用した場合の数値である。当然条件が変われば被ばく量も変動することになるので、この条件を十分に理解した上で、作業等を行うべきである。次回にその詳細等を解説します。