

バックエンド週末基礎講座

低レベル廃棄物に相当する放射能汚染物の最終処分において安全確保をどう考えるか

大江俊昭^{*1}

1 処分方法の分類と事例

我が国では、放射性廃棄物を「低レベル廃棄物」と「高レベル廃棄物」の2つに大別し、処分方法として図1に示す3つのタイプが考えられている。そのうち、比較的浅い地中に処分する「浅地中処分」はすでに行われている。

1) 浅地中トレンチ処分

我が国最初の試験炉であるJPDRの解体・廃炉にともなって発生した、放射能レベルの非常に低い廃棄物の処分事例がある。コンクリートピットなどの人工構造物を設置せず、2m程度の浅い地中に埋設処分するもので、50年程度の管理期間を経たあとは、一般的な土地利用が可能なレベルにまで放射能が減衰する。50年という時間はそれほど長い時間ではないので、敢えて人工構造物による隔離をするまでもなく、監視することで安全性を確保できると考えられている。

2) 浅地中ピット処分

原子力発電所の運転により発生する低レベル廃棄物の処分事例としては、青森県六ヶ所村にある日本原燃㈱の低レベル放射性廃棄物埋設センターがある。この施設では、発電所において60-Co（半減期5.2年）や63-Ni（半減期100年）などを含む廃棄物をドラム缶にセメント等で固化したものを対象として、地表から10m程度掘削し整地した地面にコンクリートピットと呼ばれる構造物を作り、その中に廃棄物を収納して「埋設」する。前述のトレンチ処分と比べ放射能量が多いため、管理期間は300年と長くなり、セメント系材料で固化する操作が加えられる。

3) 余裕深度処分

燃料のチャンネルボックスなど、原子炉内での中性子による放射化によって放射能レベルが比較的高く、浅地中処分が許される濃度上限値を超える濃度を有するものは、より深い地中（50～100m）に埋設する方針が採られる。これを余裕深度処分と呼ぶ。名前の由来は、通常の人間活動（例えば、地下鉄、ビルなどの地下空間利用）よりも余裕をもったレベルの深度に処分することによって人間が容易に到達できることになり、ある程度の期間「隔離」性を持たせるという意味があるからである。通称として、L1（エル・ワン）廃棄物や高ベータ・ガンマ廃棄物などと呼ばれることもある。現在、日本原燃㈱が、当該廃棄物の処分を検討中であり、六ヶ所村の浅地中処分サイトの近傍で、試掘調査等を行なっている段階である。

なお、原子炉の解体によって排出される炉心構造物なども、この処分形態の廃棄物の範疇に入るため、東京電力福

How the safety is ensured for the final disposal of the radio-bearing waste of which activity is parallel to the low-level waste? by Toshiaki OHE (ohe@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp)

*1 東海大学 工学部 原子力工学科

School of Engineering, Nuclear Engineering Department, Tokai University
〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1

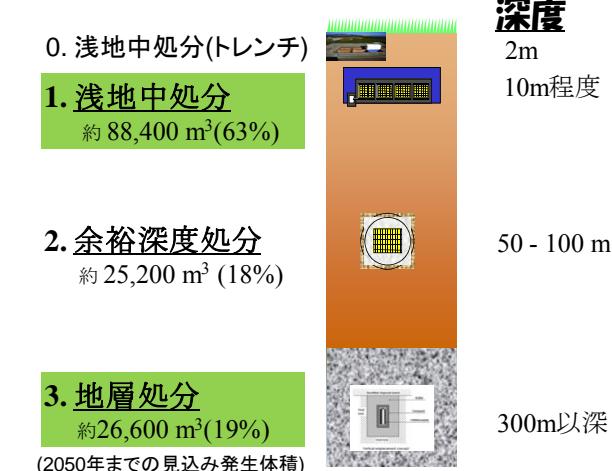


図1 我が国の放射性廃棄物処分法の3形態

島第一発電所の廃炉を受けて、余裕深度処分に相当する廃棄物の発生量はこれから増えるものと予想される。

4) 地層処分

我が国では、2000年に高レベル廃棄物の処分を行う実施主体として「原子力発電環境整備機構（NUMO）」が設立され、処分事業の推進に着手した。処分を行うには処分場候補地を選定する必要があるので、NUMOの方針としては、概要調査（文献調査が主体）、精密調査、処分建設地調査、の3段階のステップを踏んで適地の絞り込みを行うこととしている。現在、概要調査を行う候補地を公募により募集中であるが、2007年に高知県東洋町が応募したものの、反対運動のために取り下げを行なって以来、具体的な応募は無く、処分は進捗していない。

5) 「管理型」と「隔離型」の処分形態

「低レベル廃棄物」は「高レベル廃棄物」に比べ、相対的に半減期の短い核種が多く含まれる（若干の例外はある）ため、処分の方策として「管理型」と称する処分形態をとる。一方、「高レベル廃棄物」は「隔離型」という処分形態をとる。「管理型」の処分は、文字通り、地下施設に埋設しながら一定期間にわたって制度的に管理を行い、その間に放射性物質の減衰を待つ方法で、半減期が短い核種が多いためにできることである。管理を終えた段階では放射能は減衰しているため、管理終了後に何らかの核種の漏洩があったとしても、人間に対して過度な影響を及ぼさない程度の放射能レベルにあるはずである。その影響の程度としては被ばく線量として10μSv/年が目安線量となっている。

一方の「隔離型」は半減期の長い核種が多く含まれるため、管理によって放射能の減衰を待つことができない。そのため、人間環境への漏洩を防ぐための対策を厳重に行ない、できるだけ放射能を「隔離」する方法が採られる。例

えば、高レベル廃液をガラス固化することや、固化したガラスを金属製の容器に収納すること、などの「人工バリア」対策や、もともと地層が放射性核種を封じ込める能力を持っていることを利用する「天然バリア」概念、などの「多重バリア」の考え方がそれにあたる。その構成は、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材、周辺の母岩というのが代表的な例であり、これらは、天然のウラン鉱床と構造がほぼ同じである。ウラン鉱床は自然界において放射性物質を長い期間にわたって保持していた物証そのものと言え、これを手本に処分システムを考えることは自然なことであろう。

2 防護と処分の重要なパラメータ

1) 処分パラメータ

放射能に対する防護の基本原則は、「遮へい(する)」、「距離(を長く)」、「時間(を短く)」の3つである。同じように、処分による影響を極力小さくする原則について考えてみる。「地層」にわざわざ処分するのであるから「地層」に何らかの安全確保上の性能を期待していることになる。そこで、放射性核種(以降、核種と略す)が廃棄物から地下水に溶け出し、地中を移動して、ついには人間環境に到達し被害を及ぼす状況を考え、地層と言う媒体の特質を浮き出させるために、廃棄物からの核種の漏えいは、単純な3つの場合、瞬時全量放出、定濃度勾配放出、定濃度放出、を想定する。ここを複雑に考えると、本質が見えにくくなるからである。地下水中の核種の移動は移流・拡散方程式を解くことで得られるが、最も気になるのは、処分場から距離 L だけ離れた地点における最大の濃度である。1次元の解では、これは $\lambda \cdot R_f \cdot L / U_p$ というパラメータ群で特徴づけられ、図2のような結果が得られる。ここで、 λ は核種の壊変定数、 U_p は地下水の実流速、 L は移行距離、そして、 R_f は遅延係数で地中の岩石や土壤、砂等が核種を吸着する度合いを表わす因子である。

図を見ると、処分パラメータが大きいほど核種の最大濃度は低くなるから、影響緩和のために以下の選択肢が現れることが判る。

- ・なるべく長い移行距離 L をとる → 深地層への処分
 - ・なるべく地下水流速 U_p の遅い媒体を選ぶ → 深部地下ほど地下水流速は遅くなる
 - ・遅延係数 R_f を大きくする → 吸着性 K_d の高い媒体とする
- 同様に、
- ・半減期を短く(壊変定数 λ を大きく)する
 - ・インベントリを小さくする

という選択肢もあり、これは核種分離・核変換処理の立場といえる。ただし、半減期を短くすることと、吸着性の大きな媒体を選ぶこと、あるいは処分深度を深くすることは、核種移行の物理的意味合いだけからみれば同じであることは、「処分パラメータ」を見れば判るであろう。また、難溶性の核種の場合には、溶解度が小さくなる条件を選ぶことも効果的な方法であり、これは溶存酸素の少ない還元性の地下水環境を選ぶことで達成できる。一般に、難溶性核種の属する元素の場合には、酸素の多量に溶け込んだ酸化性地下水よりも、還元性地下水に対する溶解度の方が桁違いに小さい場合が多い。

ところで、核種の濃度を計算するときに、暗黙の前提があったことに気付く。それは地下水流速や核種の吸着性等は時間によって変化しないということである。直感的には地下の岩石や土の性質はそう簡単には変化しないように思うし、実際そう考えても大きな違いを体験することはない。ところが、万年のオーダーを超えると、それらが一定であると保証することは難しくなるだろうし、ましてや火山、地震などを身近に感ずる我が国では、処分場を建設する地質環境が安定であるかどうかは本質的な問題となる。2012年日本学術会議から、超長期の地質環境安定性をどこまで議論できるかという観点で、処分プロセスの再検討と暫定保管を提言する報告があつたことは記憶に新しいことである。

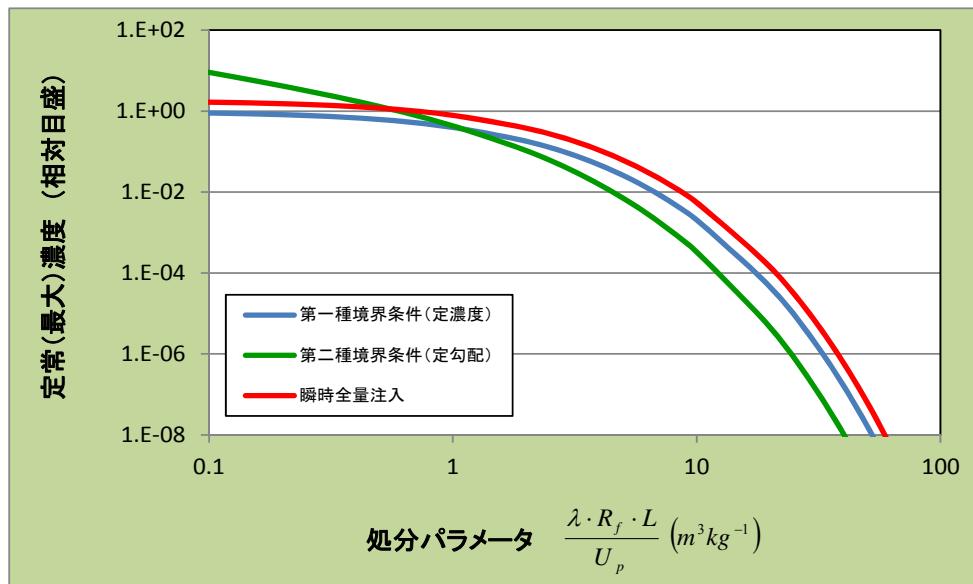


図2 処分場から距離 L にある天然バリア(地層)中の地下水濃度の最大値

3 影響評価の手法と事例

低レベル放射性廃棄物埋設処分の事例をもとに、被ばく線量を算定する手順について示す。処分場から核種が漏えいした場合、地下水中での核種の移動は前述の移流・拡散方程式を解くことにより求める。核種を含む地下水が生物圏に到達すると、そこに暮らす将来の人間に被ばくが生ずる可能性が出てくるが、そのときの人間の暮らしぶりを予測することは難しいので、ここで言う被ばく線量とは、現在の人間がそのまま将来も同じ生活様式で存在するとした仮想的な被ばく線量のことである。このような仮定を「様式化」(stylize)という。

1) 被ばく線量への換算

低レベル放射性廃棄物埋設処分は「管理型」であるので管理期間終了後に着目して述べる。まず、地下水中へ漏洩した核種による被ばく経路を、平常時と稀頻度の2つに大別する。前者には汚染した地下水の飲用や、汚染地下水を利用した農産物や畜産物の摂取、汚染地下水の移動中に汚染した土壌に起因するもの、などがある。後者には、発生確率が低いと考えられるが処分場を破壊するような大規模掘削工事に起因するもの、同じく処分場破壊により汚染した土壌の上に居住した場合、などの被ばく経路がある。

(1) 処分場の破壊を伴う大規模土地利用（外部被ばく）

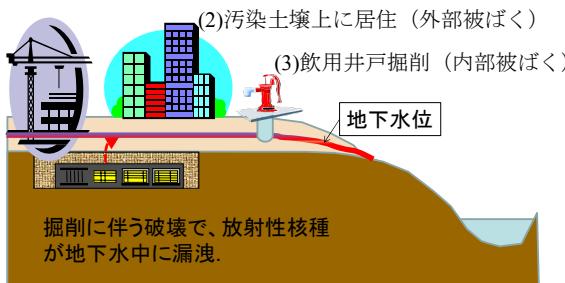


図3 稀頻度事象のシナリオ

そして、これらの経路上で想定される外部被ばく、内部被ばくの線量計算が行われ、目安とする線量 $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ との比較から、処分という行為の妥当性が判断される。

最近、原子力規制委員会（2013年9月）から示された浅地中処分の新規制基準骨子(案)では、将来起こり得る可能性の高い状態（隆起浸食や海水準変動など）を考慮して処分システムの設計および考え方の妥当性確認を行う基本シナリオ、基本シナリオの持つ不確かさを考慮して条件やパラメータの変動要因を分析し、その影響を把握するための変動シナリオ、を中心に据えながら、さらに、確率はきわめて低いが、仮に起こったら影響が大きいのであらかじめ評価しておき、それでもなお、極端な被ばく影響をもたらしそうもないことを把握するために自然現象および人為事象の2つがつけ加えられている。ただし、同様のシナリオ区分に対する評価の必要性をすでに答申している旧原子力委員会報告が述べた、シナリオ区分ごとに線量の目安を定める点は、当該骨子案では具体的に触れられていない。

4 新しい問題 ー汚泥と焼却灰の最終処分ー

東京電力福島第一原子力発電所の事故に起因する放射性セシウムに汚染した焼却灰あるいは汚泥の最終処分が不可避となっている。処分方針の拠りどころとしては、下表の環境省の示した放射能濃度レベルの区分があるが、この根拠を導いたのが放射性廃棄物の安全評価手法である。

1) 濃度区分

下表の $8,000\text{Bq/kg}$ 以下という区分は、操業中の最終処分場の敷地境界での外部被ばくが $1\text{mSv}/\text{年}$ を超えないという制約から決まる。また、操業終了後には特段の留意が払われないとして、さまざまなシナリオを想定して被ばく線量を評価し、もはや放射性廃棄物とはみなさないレベルと同等の線量以下にあることが確認されている。この際に用いられたのがクリアランスレベルを設定する際に用いた手順である。クリアランスレベルとは、当該廃棄物をもはや放

表1 汚泥、焼却灰の処分に係る濃度区分

濃度の区分	対処	処分形態
$100,000\text{Bq/kg}$ 超える	適切に放射線を遮へいできる施設で保管	遮断型最終処分場
$8,000\text{Bq/kg}$ 超える	隔離層の設置、長期耐久性のある容器での埋設、屋根付き処分場などでの埋設、により一般廃棄物最終処分場への処分が可能	管理型最終処分場
$8,000\text{Bq/kg}$ 以下	管理型最終処分場に埋め立て可能	管理型最終処分場
100Bq/kg 以下	汚泥はセメント原料として使用可能	セメント会社への引取り要請

環境省 $8,000\text{Bq/kg}$ を超え $100,000\text{Bq/kg}$ 以下の焼却灰等の処分方法に関する方針 (平成23年8月31日)

射性廃棄物とみなす必要がない放射性核種濃度のことである。例えば、処分場の跡地を公園として利用した場合や、農作物を育ててそれを食用とした場合など、数多くの被ばく経路が選定され、その経路での（外部および内部）被ばく線量が $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ を超えない濃度を算定したもの、それをクリアランスレベルと呼ぶ。

2) クリアランスレベルとの比較

クリアランスレベルの算定で用いられた手法を用いて、跡地利用の井戸水飲用シナリオを解析すると、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の両核種が各々 $4,000\text{Bq}/\text{kg}$ 存在する廃棄物からの合計線量は $1\mu\text{Sv}/\text{y}$ となる。そして、このことが「 $8,000\text{Bq}/\text{kg}$ 以下の場合は管理型最終処分場に埋め立て可能」とする根拠のひとつとなることが確認できる。ただ、表1の数値を導く評価では、評価のパラメータ、例えば地下水水流速、は1つの代表値を用いているだけである。そこで、当該シナリオに対する解析解を導出して地下水濃度の最大値を直接求める式を得て、パラメータの変動がどのような影響を与えるかを評価してみた。図4のように、焼却灰からのセシウム溶出速度係数 η （単位時間当たりの溶出割合）にほぼ比例して地下水中の核種濃度（最大値）が変化し、影響の大きいパラメータ η を正しく評価することが重要であることが判る。

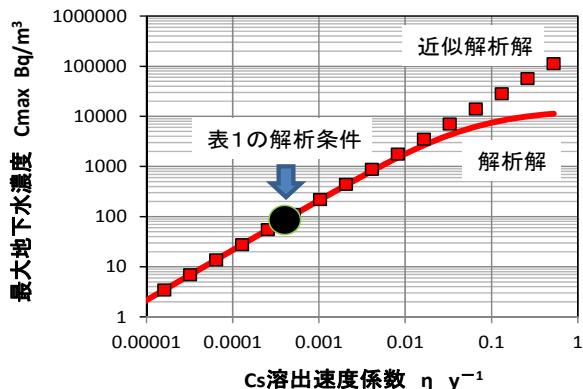


図4 Cs溶出速度係数 η が最大地下水濃度に与える影響

5まとめ

この講義では、我が国の放射性廃棄物、とくに事例が存在する低レベル放射性廃棄物の処分について、次の4点を中心述べた。

・処分方法の分類と事例

処分方法には、管理期間終了後に特段の管理を要しない「管理型」と、減衰が期待できず漏洩抑制が基本となる「隔壁型」の2つがあり、処分深度に応じて前者は「浅地中処分」、後者は「地層処分」と呼ぶ。また、両者の中間に位置する「余裕深度処分」がある。

・防護と処分の重要なパラメータ

基本的な安全評価経路である地下水移行シナリオでは、 $\lambda \cdot R_f \cdot L / U_p$ の数値の組み合わせの大小が安全確保のうえでキー・パラメータとなる。

・影響評価の手法と事例

浅地中処分では平常時と稀頻度事象の2つのシナリオ区

分に対する安全評価によって、種々の被ばく経路での線量評価値が目安線量である $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ を上回らないことが求められていた。新規制基準（骨子案）では、基本、変動の2つシナリオに、自然事象、人為事象の2つを追加して、それぞれに対する評価を求めるように改訂された。

・新しい問題—汚泥と焼却灰の処分—

東京電力福島第一発電所事故に起因する放射性セシウムを含む汚泥、焼却灰の最終処分においては、外部被ばく、内部被ばくの評価によって放射能濃度が区分され、その評価には浅地中処分の安全評価手法やクリアランスレベルの算定手法が活用されている。