

ウラン廃棄物処理処分の検討状況について

平成12年6月26日

ウラン廃棄物分科会では、ウランの製錬、転換、濃縮、再転換、成型加工の各施設から発生する放射性廃棄物（以下、「ウラン廃棄物」という）及びR I・研究所等廃棄物のうちウラン廃棄物に相当するものを対象に、具体的な処理処分方策の検討を行ってきた。本資料は、ウラン廃棄物の特徴を踏まえた安全かつ合理的と考えられる処理処分方策の基本的考え方について、これまでに当分科会で行ってきた検討をまとめたものである。

1. ウラン廃棄物の発生の現状と将来の見通し

(1) 発生形態

ウラン廃棄物の主な発生形態は、気体廃棄物の処理によって発生する使用済排気フィルタ、液体廃棄物の処理等から生ずるスラッジ（水分を含んだ粉粒状の物質）、可燃性雑固体廃棄物（作業着、手袋、木材等、これらの一部については焼却処理が行われ焼却灰となっている）、難燃性雑固体廃棄物（ゴム靴、ビニールホース等）、不燃性雑固体廃棄物（金属、コンクリート、ガラス等）、使用済遠心分離機（ウラン濃縮施設で使用される機器の一つで、一定期間の操業を経たものは、新しいものと取り替えることがある）等である。

(2) 発生の現状

ウラン廃棄物は、ウラン燃料加工施設（再転換、成型加工）及びウラン濃縮施設の操業や核燃料サイクル開発機構（以下、「サイクル機構」という）等の研究開発活動に伴って発生し、一部については焼却処理が行われているが、固型化等の処理は行われておらず、焼却処理の結果発生する焼却灰も含めて、未処理のまま貯蔵施設に保管されている。これらの廃棄物の1999年3月末（平成10年度末）時点までの累積発生量は、未処理の廃棄物として200Lドラム缶で約10万本（累積貯蔵量実績等の調査による）となっている。

(3) 将来の見通し

将来的には、上記の施設の解体や、ウラン濃縮施設の遠心分離機の取り替えが行われることも考えられ、それらに伴うウラン廃棄物の発生が予想される。今後の発生量として、2030年度末時点の主要発生施設（ウラン燃料加工施設、ウラン濃縮施設及びサイクル機構）からの累積発生量を試算した。この試算においては、ウラン燃料加工施設、サイクル機構の関連施設の解体及びウラン濃縮施設の遠心分離機の取り替えも想定し、これら解体・取り替えに伴い発生するウラン廃棄物の量も別途試算した。この結果、これらの累積発生量（可燃物については焼却処理を前提）は、200Lドラム缶換算で約5

6万本になると推定される。このうち、約6割は、解体及び遠心分離機の取り替えにより発生する見込みとなっている。

RI使用・研究所等の施設からの2030年度末の発生量は、アンケート調査等に基づいて検討され、200Lドラム缶換算で約4万本と推定される。

以上の結果、2030年度末時点の総累積発生量は、200Lドラム缶換算で約60万本と推定される。

(参考資料1…ウラン廃棄物の発生量と濃度分布)

2. ウラン廃棄物の特徴

(1) ウラン廃棄物の特徴

ウラン廃棄物は、ウラン核種を含む物質が付着したもの等、含まれる核種が実質的にウランに限定されており、原子炉等において生ずるような放射化による放射性核種が含まれないという特徴を有する。具体的な形態としては、金属、プラスチック等の表面にウラン核種が付着した廃棄物と焼却灰、スラッジ等のウラン核種が均質に含まれる廃棄物に分類される。ウランは、他の放射性核種と比較して、質量当たりの放射能が小さく、同じ濃度でも、より質量が大きくなるため、ウラン廃棄物は比較的除染が容易とされる。これらのうち、ウラン核種が表面に付着したものは高い除染効果が期待でき、平滑で単純な形状のものは、ほぼ完全にウラン核種を除去することも可能と考えられる。

ウラン廃棄物に含まれるウラン核種の濃度については、除染前の値で 10^{10} Bq/tオーダーのものから、 10^6 Bq/t以下のものまで幅広く分布している。

(2) ウラン核種の特徴

ウラン核種は、天然起源の放射性核種であること（土壌等にも有意に存在する）、半減期が長いこと、質量当たりの放射能は小さく比較的容易に除染できると考えられること等の特徴を有している。また、ウランの性状によっては資源価値を持つこと、精製されたウランについては娘核種の生成及び累積によって数十万年間にわたって放射性核種の合計濃度が增大すること、存在する量によっては化学毒性が問題となる可能性があること、ウラン濃縮度及び一箇所に集中して存在する量等の条件によっては臨界の可能性のあること等の特徴を有している。

これらの特徴には、これまでに処分方策の検討が行われてきた放射性廃棄物に含まれる核種とは異なるものがあり、特に、天然にも存在すること、半減期が長いこと、放射性娘核種の生成及び累積についてはウラン核種の顕著な特徴である。これらの特徴は、ウラン廃棄物の処分方策を検討する上でも重要であると考えられる。

天然起源の放射性核種であることに関しては、土壌中に含まれる ^{238}U の平均的な濃度は 40Bq/kg （UNSCEAR1993、放射平衡を前提とすると全ウラン濃度は約 $80\text{Bq/kg}=8\times 10^4\text{Bq/t}$ ）とされており、ウラン等の自然放射性核種による線量は、日本（約 $320\mu\text{Sv/}$

年)を含む13カ国の平均で約450 $\mu\text{Sv}/\text{年}$ (ウランの寄与は約1/3)になるとされている。また、土壌に含まれるウラン等の自然放射性核種の濃度には地域差があり、それによる被ばくへの寄与は、UNSCEAR1993の報告によると国別の平均値の範囲で約150 $\mu\text{Sv}/\text{年}$ ~980 $\mu\text{Sv}/\text{年}$ と試算される(換算係数0.7 Sv/Gy)。また、国内の県別の大地放射線+宇宙線の地域差は最大380 $\mu\text{Sv}/\text{年}$ 程度とされている。

(参考資料2…ウラン核種の天然賦存性について)

ウラン及び娘核種の合計放射能の経時変化をみると、初期には緩やかに増加しており、数十万年後にピークあるいは平衡に達する。このような放射能の増大が生じるのは、ウラン核種が放射線を放出して別の核種(娘核種)になっても、その別の核種も放射性であるからである。ウラン核種の主要な崩壊系列には、 ^{238}U では13の、 ^{235}U では10の放射性娘核種がある。天然に存在する状態では、娘核種とともに存在している状態があり得るが、原子燃料として利用される場合には、ウラン元素が抽出された段階で、娘核種は分離されてしまう。娘核種のうち、短期間で存在比が平衡に達するもの(^{238}U では3核種、 ^{235}U では1核種)は、当初からウラン廃棄物に含まれているが、これ以外の娘核種(^{238}U では10核種、 ^{235}U では9核種)は、長期間かけて生成及び累積していく。

(参考資料3…ウラン廃棄物の α 、 β 、 γ 核種濃度の経時変化)

(参考資料4…ウラン核種の崩壊系列)

3. 海外における浅地中処分の状況

ウラン廃棄物は、海外においては、独立した放射性廃棄物のカテゴリとして扱われておらず、低レベル放射性廃棄物の一種として、処分方策・安全規制等も低レベル放射性廃棄物の一環として扱われている例が多い。

ウラン核種を含む放射性廃棄物の浅地中処分場の例としては、低レベル放射性廃棄物の浅地中処分場又は一般及び産業廃棄物処分場が挙げられる。前者の処分濃度の上限値は、 $10^9\text{Bq}/\text{t}$ オーダーであり、後者の処分濃度の上限値は $10^7\text{Bq}/\text{t}$ オーダーとなっている。前者の処分は、米国(素掘り処分相当)、英国(かつては素掘り処分相当であったが、現在はコンクリートピット処分相当)、仏国(コンクリートピット処分相当)で行われており、後者は、米国、英国、スウェーデン(いずれも素掘り処分相当)で行われている。

(参考資料5…ウラン核種を含む放射性廃棄物の海外での浅地中処分状況)

4. 国際機関における関連検討状況

ICRP等の国際機関では、ウラン廃棄物のように、長期間減衰が期待できない放射性廃棄物の処分に対する放射線防護の考え方等について検討されている。ICRPが出版した最新の勧告(Publ.81: Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste, 2000 長寿命放射性固体廃棄物に対して適用されるも

のとしての放射線防護勧告、仮訳)では、次のような考え方が示されている。

地下水移行のような自然のプロセスに伴う被ばくと、処分場跡地における居住等の人間侵入による被ばくは区別して考えるべきである。なお、人間侵入は、偶然の侵入のみが考慮されるべきであり、埋設場へ故意に侵入したことに伴う放射線学的結果は、侵入者の責任である。自然のプロセスから生じると評価された線量又はリスクは、年あたり0.3 mSv という線量拘束値あるいはそれと等価のリスク値の年間約 10^{-5} と比較されるべきである。

人間侵入に関しては、必要に応じて、その可能性を低減させる、あるいは、その影響を制限するための合理的な努力が、処分場の開発段階において行われるべきである。人間侵入がサイト周辺に居住する人々に対して、介入がほとんど常に正当化されるような線量を生じるような状況では、上記のような合理的な努力が必要であろう。それ以下であれば介入が正当化されそうもないという一般的参照レベルとして、約10 mSvの現存年間線量が使用できるであろう。逆に、約100 mSvを超える現存年間線量は、それ以上であれば介入がほとんど常に考慮されるべきであるという一般的参照値として使用できるであろう。

なお、ここで示された約10 mSvあるいは約100 mSvという年間線量の参照値は、ここまでの線量が許容されるという意味ではなく、処分システムの設計・開発段階において考慮すべき人間侵入の可能性低減化の努力について判断するための指標として示されている。

また、Publ.81の背景情報を与える勧告(Publ.82:Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure,長期放射線被ばく状況における公衆の防護：近日出版予定)があり、関連する放射線防護の考え方が記述されている。

(参考資料6…放射性廃棄物の処分に係る線量基準の検討状況について)

5. ウラン廃棄物処理処分方策の検討にあたっての考え方

(1) 基本的考え方

放射性廃棄物対策としては、一般の廃棄物と同様に、発生量の抑制が大前提であり、廃棄物の発生量低減や有効利用に努めることが重要である。

放射性廃棄物の処分は、廃棄物に含まれる放射性核種が生活環境に対して影響を及ぼすことを防止することが必要であり、このためには、処分方法に適した形態に処理した後、放射性物質(放射線)の影響が安全上支障のないレベルになるように処分することが基本となる。したがって、処分の方法は、廃棄物の性状、特にこれに含まれる放射性物質の種類及び濃度を考慮して設定する必要がある。

これまでの低レベル放射性廃棄物においては、上述の基本的考え方を踏まえ、含有する放射性核種の濃度等により適切に区分し、その区分に応じた合理的な処理処分方策が検討されてきた。すなわち、濃度等の性質によって、素掘り処分、コンクリートピット処分、一般的と考えられる地下利用に対して十分余裕を持った深度(例えば、地下50～100 m)への処分、(例えば、地下数百m以深の)地層処分等の適切な処分概念を適用するという考え方である。

他の廃棄物と異なるウラン廃棄物の特徴として、廃棄物中に含まれるウランが資源となる可能性があることが挙げられる。ウラン廃棄物の処理処分を検討するにあたっては、この特徴を踏まえ、合理的に回収可能なウランは除染処理等によって回収し、廃棄物の濃度を低減させるなどの方策を検討する必要があると考えられる。

(2) ウラン廃棄物の処理

ウラン核種は単位質量当たりの放射能が小さく、金属等の表面に付着している場合には、除染が比較的容易と考えられ、高い除染効果が期待できる。焼却灰やスラッジのように、ウラン核種が物理的・化学的に媒体に取り込まれている場合には除染が困難であるが、これらについては除染係数100程度までの除染が可能であるとの試験結果が得られている例もある。

一般的に、除染処理に期待する効果は、低減された放射能濃度に応じた処分方法の選択肢の拡大、クリアランスレベルまで除染することによる放射性廃棄物量の低減化である。また、ウラン廃棄物に含まれるウラン核種は、資源としての性格も有しており、特に濃縮ウランにおいては資源的価値が高い。したがって、ウランの資源性の観点から、合理的に可能な範囲でウラン廃棄物からウランを除染回収することを検討する必要がある。

このように、ウラン廃棄物の除染は、回収されたウランを資源として再利用できる可能性があることから、環境負荷低減につながると考えられる。

ウラン廃棄物に対する除染技術の適用性については、必ずしも全ての形態の廃棄物について確認されておらず、さらに高度な除染の可能性のある技術が適用されることも期待される。

(参考資料7…ウラン廃棄物に対する除染処理技術)

(3) ウラン廃棄物の処分方策の検討

a. 従来の低レベル放射性廃棄物処分方策による線量評価試算例

ウラン廃棄物の処分方策の検討に当たっては、まず、検討の論点を明らかにする観点から、仮に、人工構築物を設置しない浅地中処分概念(素掘り処分)を適用したとして、既に原子力安全委員会で行われている現行の政令濃度上限値の評価に準じて線量評価を行ってみた。具体的には、自然過程でおこる地下水移行シナリオと人間が関わる跡地建設シナリオ及び跡地居住シナリオで評価を行った。

評価の結果、最も高い線量を与えるシナリオは跡地居住シナリオであり、ピーク時の線量を比較すると、跡地居住シナリオは地下水移行シナリオの約1万倍になる。また、線量の経時変化としては、処分後約1000年間は線量はほとんど変化せず、その後徐々に増加し、約20万年後にピークに達し、この時の線量は、跡地居住シナリオで処分当初の約100倍となる。

仮に、このピーク線量を規制除外線量の $10\ \mu\text{Sv/年}$ 以下に抑えたとすれば、処分当初の

約1000年間は、その約1/100の0.1 $\mu\text{Sv}/\text{年}$ に抑制する必要があり、この場合の処分可能な廃棄物の範囲は、線量の試算結果からウラン濃度で約 10^5Bq/t 以下となる。

(参考資料8…ウラン廃棄物浅地中処分の線量試算例)

b. ウラン廃棄物の特徴を考慮した処分方策の考え方

上記の線量評価試算の結果を踏まえると、従来の低レベル放射性廃棄物の処分方策では考慮されてこなかった、以下のような視点が必要と考えられる。

- ① ウラン廃棄物は、半減期が長く（例えば ^{238}U の半減期は約45億年）、娘核種の生成及び累積があることから、廃棄物に含まれる放射性核種濃度の減衰が期待できない。したがって、従来の低レベル放射性廃棄物で適用されていた段階管理の考え方を適用することは適切ではなく、これに代わる考え方が必要になる。
- ② 上記と同様に、半減期が長く、娘核種の生成及び累積があることから、処分後の線量評価においてピークが現れる時期が数十万年後になる。したがって、従来の低レベル放射性廃棄物の線量評価に用いられている評価シナリオがそのまま適用できるかどうかの検討を行うことが必要になる。また、時間の経過とともにモデルやパラメータに関する不確実性が大きくなることも考慮する必要がある。
- ③ ウラン核種は天然にも普遍的に存在する核種であり、地殻からの平均的な自然放射線量約 $450\mu\text{Sv}/\text{年}$ の約1/3は、 ^{238}U 系列からの寄与である。従来の段階管理の考え方は、放射能が時間とともに減衰することが前提であるため、段階管理を終了する要件として、規制除外線量（ $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ ）を採用している。しかし、この数値は、地殻からの平均的な自然放射線量やその地域差と比較しても小さいことは明らかであり、天然にも存在し、かつ、減衰が期待できない核種を主に含む放射性廃棄物の処分に対して、同様の考え方（規制除外線量）を適用することが合理的かどうかの検討を行うことが必要である。

これらの視点を踏まえた検討の際には、海外における処分の状況や、国際機関における関連検討状況も参考になると考えられる。

c. まとめ

上述のように、ウラン廃棄物の処理処分方策については、段階管理の考え方や線量評価シナリオ等、これまでに検討されてきた考え方を適用することは必ずしも合理的ではなく、ウラン廃棄物の特徴を考慮した新しい考え方が必要になると考えられる。この観点から、今後検討する必要がある論点を以下に示す。

- 放射能の減衰が期待できないものに対する管理の考え方
- 長期間経過後に線量ピークが現れるものに対する評価の考え方
- 天然にも存在する核種を主に含む放射性廃棄物に対する処分方策の考え方

6. 今後の進め方

今後、分科会においては、ウラン廃棄物の特徴を考慮した新しい考え方を適用した安全かつ合理的な浅地中処分の可能性について、具体的に検討を進める。

また、ウラン廃棄物の特徴を考慮した新しい考え方を適用しても、浅地中処分できないと考えられるものについては、処分できる可能性のある処分方策の検討を行い、濃度の高いウラン廃棄物も含めた、ウラン廃棄物全体の処分方策を明らかにしていく予定である。

さらに、ウラン廃棄物特有の課題として、保障措置上の手続、臨界防止上の管理、化学毒性の取扱等があることが認識されており、今後、これらの視点についても考慮して検討を進めることとする。

ウラン廃棄物の発生量と濃度分布

我が国におけるウラン廃棄物の現況累積発生量は、平成 10 年度末において 200 ㏩ドラム缶換算で約 10 万本に達している。今後も諸施設の運転と操業（サイクル機構における遠心分離機の解体を含む）に伴ってウラン廃棄物が発生し、2030 年度末には全施設で約 27 万本（可燃物を含む）に達すると推定されている。この他、計画は定まっていないが、日本原燃における遠心分離機のリブレースやウラン加工事業者における施設の解体等に伴うウラン廃棄物の発生も予想される。

そこで、今後の検討に資するため、2030 年度末において主要な施設（ウラン加工事業者、サイクル機構、日本原燃）から発生するウラン廃棄物について、発生時の濃度分布を推定するとともに、既存の試験結果等を参考に一定の仮定に基づき、廃棄物からウラン回収除染を行ったとしたときの除染処理後の濃度分布を推定した。

濃度の推定に当たっては、可燃物は焼却されるとし、表 1 に示す廃棄物種類ごとに、DF（除染係数：除染前後の濃度比で、DF=10 は除染後濃度が除染前の 1/10 になることを意味する）又は除染後の到達濃度を設定し、一律に除染処理を行ったとして除染処理後の濃度分布を推定した。

2030 年度末までに推定される運転・操業に伴って発生する廃棄物の濃度分布を図 1 に、解体等に伴って発生する廃棄物の濃度分布を図 2 に示す。いずれも、上段のグラフが除染処理前、下段の 2 つのグラフが除染処理後である。

なお、除染試験の結果に幅があることから、除染係数等としては期待できそうなケースと濃度の高いものほど除染効果が高くなるとしたケースの 2 つを設定したが、両者の除染後濃度分布にはほとんど差がない。

表1 廃棄物の種類と内訳（例）

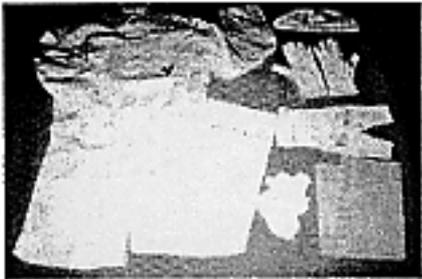
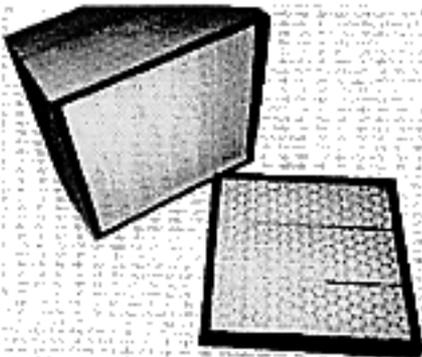
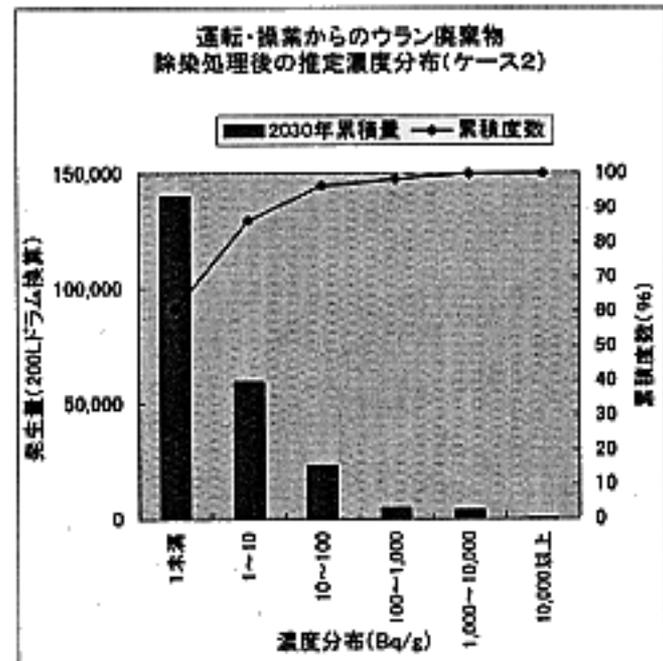
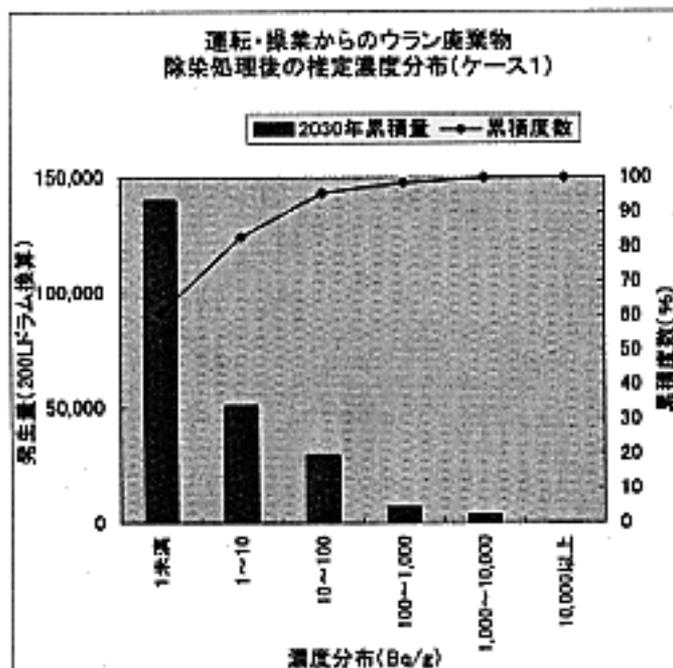
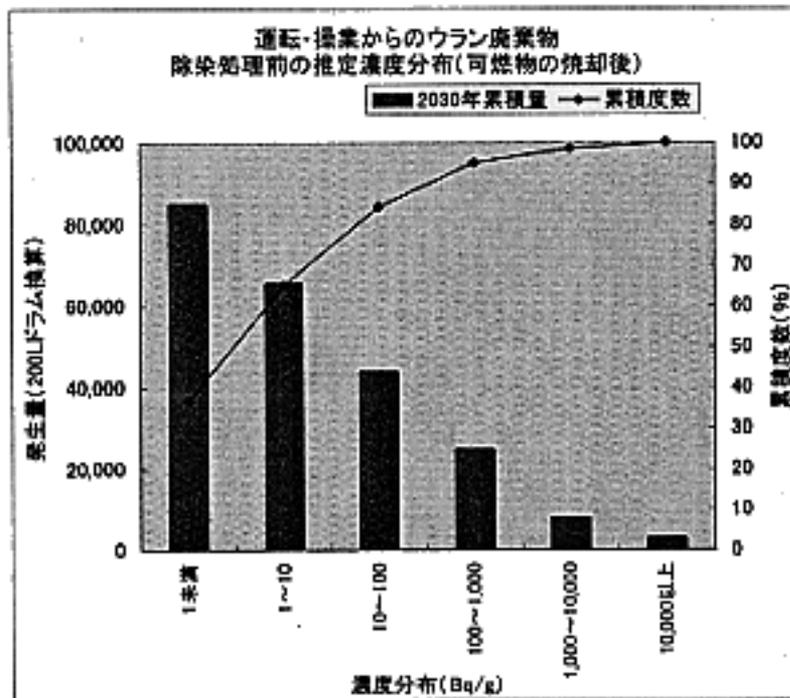
廃棄物の種類	内訳（例）	写真（例）
スラッジ類	廃液からのウラン除去処理によって生じる沈殿物（鉄殿物、ろ過助剤）などの残留物や種々の沈殿物、使用済イオン交換樹脂など	
焼却灰	紙、布やフィルタ木枠などの可燃物の焼却によって生じる灰などの残留物	
フィルタ類	排気からのウラン除去処理に用いた使用済み HEPA フィルタやプレフィルタ	
雑固体 プラスチック類： 金属類： コンクリート類：	運転と操業などに伴って発生する雑多な固体廃棄物であり、その材質に基づき、以下の3種類に大別できる。 塩化ビニルや合成ゴム製で、改修や更新等に伴って発生する配管、仕切板、ホースや、使用済みの手袋や長靴など 改修や更新等に伴って発生するパイプ、鋼材、使用済機器など 改修等に伴って発生するコンクリート、レンガ、耐火物、ガラス、断熱材、土砂など	

図1 主要施設からのウラン廃棄物の濃度分布（運転・操業）

2030年度末における主要施設の運転・操業から発生するウラン廃棄物の推定累積発生量（可燃物の焼却後）
（200Lドラム缶換算）

施設区分	スラッジ類		焼却灰	フィルタ類	軽固体			合計	割合 (%)
	除染物・ろ過助剤	左記以外			プラスチック類	金属類	コンクリート類		
サイクル機類	0	7,100	473	5,298	17,526	81,888	17,400	109,703	47.5
ウラン燃料加工施設	16,104	8,830	5,642	8,817	16,479	31,971	18,255	106,098	46.0
ウラン濃縮施設	0	2,050	124	1,150	9,850	1,200	600	14,974	6.5
合計	16,104	17,980	6,239	15,265	43,855	85,069	36,263	230,775	100.0



ケース2では、ケース1の設定に対して、除染効果の向上が見込めそうなものの下記除染係数等を考慮した。

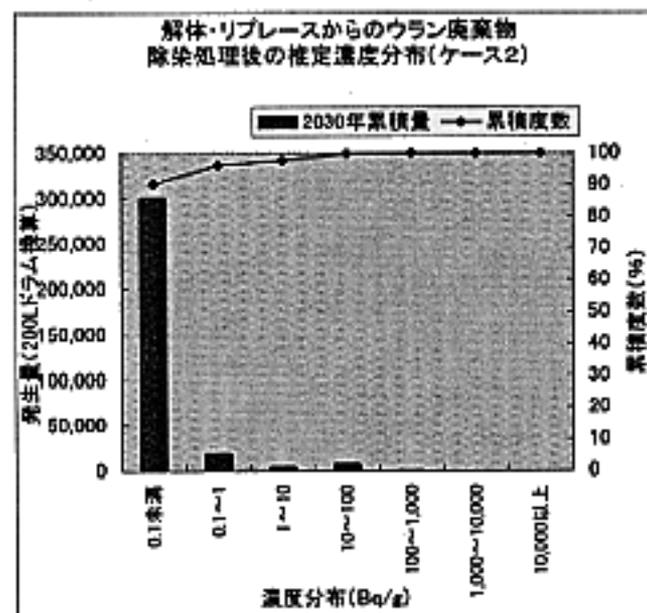
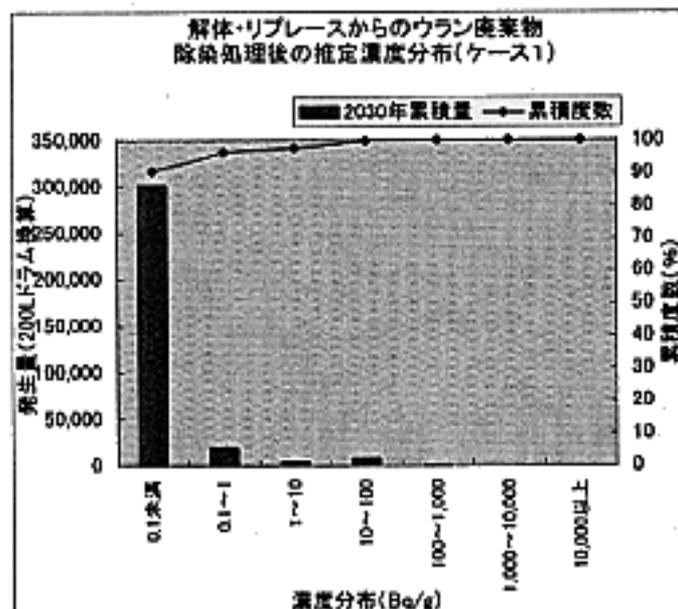
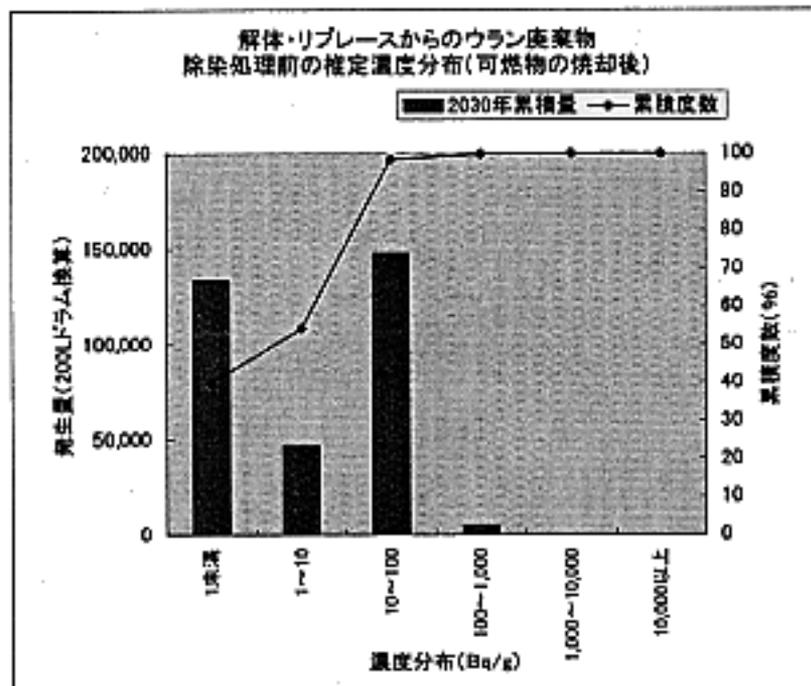
- ・ろ過助剤の到達濃度を1桁下げる。
- ・1,000Bq/gを超えるプラスチック類と金属類のDFが1桁高いと想定。

図2 主要施設からのウラン廃棄物の濃度分布（解体・リプレース）

主要施設からの解体廃棄物又は遠心分離機リプレース廃棄物の推定累積発生量（可燃物の焼却後）
（200Lドラム換算）

施設区分	金属類	金属類以外の雑固体	合計	割合（%）
サイクル機構	52,592	18,871	89,463	21
ウラン燃料加工施設	47,060	29,440	76,490	23
ウラン濃縮施設	185,800	1,365	187,165	56
合計	285,442	47,676	333,118	100

- 注1) 日本原電の現在の濃縮施設の規模は1,050tSMU/年であるが、1,500tSMU/年を目指していることから、ここでは、1,500tSMU/年分の遠心分離機のリプレースを1回行った場合の発生量を想定した。
なお、日本原電の場合、施設本体については、現状、解体の予定はない。
- 注2) ウラン燃料加工施設については、既存の施設を全て一度解体するものと仮定した。
なお、解体される物以外の廃棄物の発生を考慮していない。



ケース2では、ケース1の設定に対して、除染効果の向上が見込めそうなものの下記除染係数等を考慮した。

- ・ろ過助剤の到達濃度を1桁下げる。
- ・1,000Bq/gを超えるプラスチック類と金属類のDFが1桁高いと想定。

ウラン核種の天然賦存性について (UNSCEAR 1982,1988,1993 報告等より)

天然に存在するウラン核種 (^{238}U 、 ^{234}U 、 ^{235}U) 及びその娘核種は、土壌中にも普遍的に存在し、わが国の土壌中の平均濃度は 1 ppm 程度である。天然ウラン同位体比を前提とすると、1 ppm = 約 0.025 BqU/g である。全世界での平均的な土壌中濃度については、約 0.025 Bq ^{238}U /g (UNSCEAR 1988)、あるいは約 0.040 Bq ^{238}U /g (UNSCEAR 1993) とされており、2～3 ppm 程度のウラン濃度に相当する。

わが国の河川水には 0.01 ppb のオーダーで含まれている。鉱泉水には特に高濃度に含まれる場合があり、10 ppb～最高約 70 ppb に達している。

海水中の含有量は、約 3.3 ppb であり、地球上の海水全体では約 40 億トン存在するとされている。

ウラン以外にも天然に存在する放射性核種はいくつか知られており、トリウム (^{232}Th) 及びその娘核種、 ^{40}K 、 ^{87}Rb などがある。

これらの天然起源の放射性核種は、土壌や岩石などの天然環境の他、種々の工業製品、副産物、廃棄物等にも極微量含まれている。それらがまとめて紹介されている事例として、平成2年度「ウラン廃棄物処理処分システム開発調査報告書」(1991)の表及び IAEA-TECDOC-855(1996)の付属書を末尾に添付する。

平成2年度「ウラン廃棄物処理処分システム開発調査報告書」(1991)の表から、地圏環境におけるウラン核種濃度の例を示すと、以下のとおりである。

- ① 3×10^8 Bq/t ～ 3×10^9 Bq/t (高品位ウラン鉱床:1～10%U相当)
- ② 5.0×10^5 Bq/t ～ 2.4×10^6 Bq/t (国内マンガン鉱床)
- ③ 3.9×10^6 Bq/t ～ 3.4×10^7 Bq/t (国内リン鉱床の一例)
- ④ 3.0×10^4 Bq/t ～ 5.5×10^5 Bq/t (国内花崗岩類)
- ⑤ 1.2×10^4 Bq/t ～ 7.3×10^4 Bq/t (国内土壌)

天然核種による普通のバックグラウンド地域における自然放射線からの一人あたり年間実効線量当量及び土壌中の K-40、U-238、Th-232 の平均放射能質量濃度と地上 1 m の点での空気吸収線量率の関係を以下の表 1, 2 に示す。

これら天然核種による普通のバックグラウンド地域における自然放射線からの一人あたり年間実効線量は、約 2,400 μ Sv であるが、この 10 倍程度の高バックグラウンドを示す地域がいくつか見つかっている。また、数 100 μ Sv/y 程度のバックグラウンド線量の地域差は、ごく一般的にみられる。

表 1 普通のバックグラウンド地域における自然放射線からの一人あたり年間実効線量当量 (UNSCEAR 1982,1988) (括弧内は 1982 年報告書の推定値)

被曝源	年間実効線量当量 (μ Sv)		
	体外被曝	体内被曝	合計
宇宙線			
電離成分	300 (280)		300 (280)
中性子成分	55 (21)		55 (21)
宇宙線生成核種		15 (15)	15 (15)
原始放射性核種			
K-40	150 (120)	180 (180)	330 (300)
Rb-87		6 (6)	6 (6)
U-238 系列			
U-238 \rightarrow U-234		5 (10)	
Th-230		7 (7)	
Ra-226	100 (90)	7 (7)	1,300 (1,040)
Rn-222 \rightarrow Po-214		1,100 (800)	
Pb-210 \rightarrow Po-210		120 (130)	
Th-232 系列			
Th-232		3 (3)	
Ra-228 \rightarrow Ra-224	160 (140)	13 (13)	340 (330)
Rn-220 \rightarrow Tl-208		160 (170)	
合計 (丸めてある)	800 (650)	1,600 (1,340)	2,400 (2,000)

表 2 土壌中の K-40、U-238、Th-232 の平均放射能質量濃度と地上 1 m の点での空気吸収線量率 [B32] (UNSCEAR 1982,1988)

放射性核種あるいは壊変系列	土壌中の単位放射能質量濃度当りの線量率 (nGy h^{-1} per Bq kg^{-1}) (湿重量)	土壌中の単位放射能質量濃度 a/ (Bq kg^{-1}) (湿重量)	空気吸収線量率 a/ (nGy h^{-1})
K-40	0.043	370 (100-700)	16 (4-30)
U-238	0.427	25 (10- 50)	11 (4-21)
Th-232	0.662	25 (7- 50)	17 (5-33)

ウラン廃棄物の α 、 β 、 γ 核種濃度の経時変化

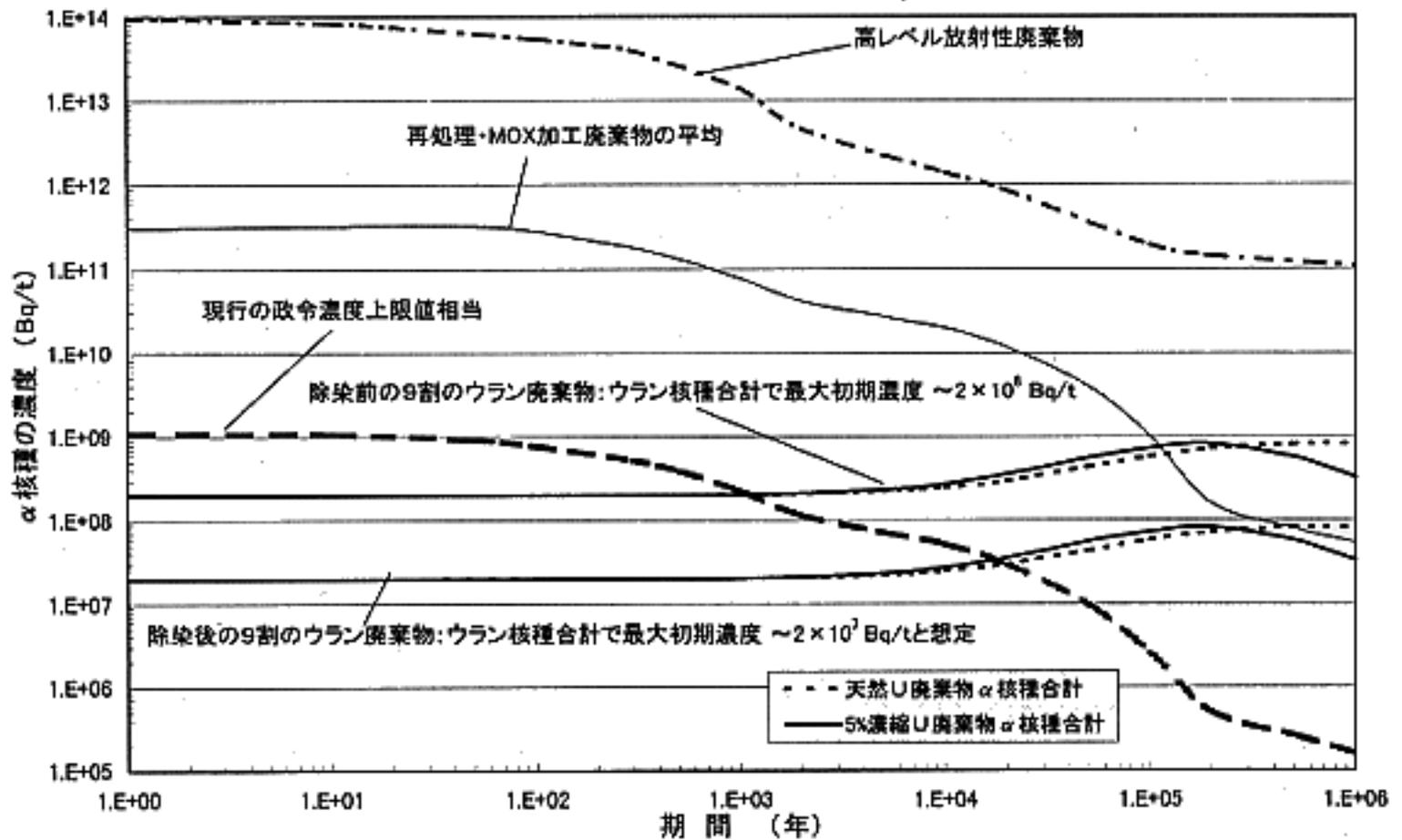


図1 ウラン廃棄物の α 核種濃度の経時変化 (他放射性廃棄物との比較)

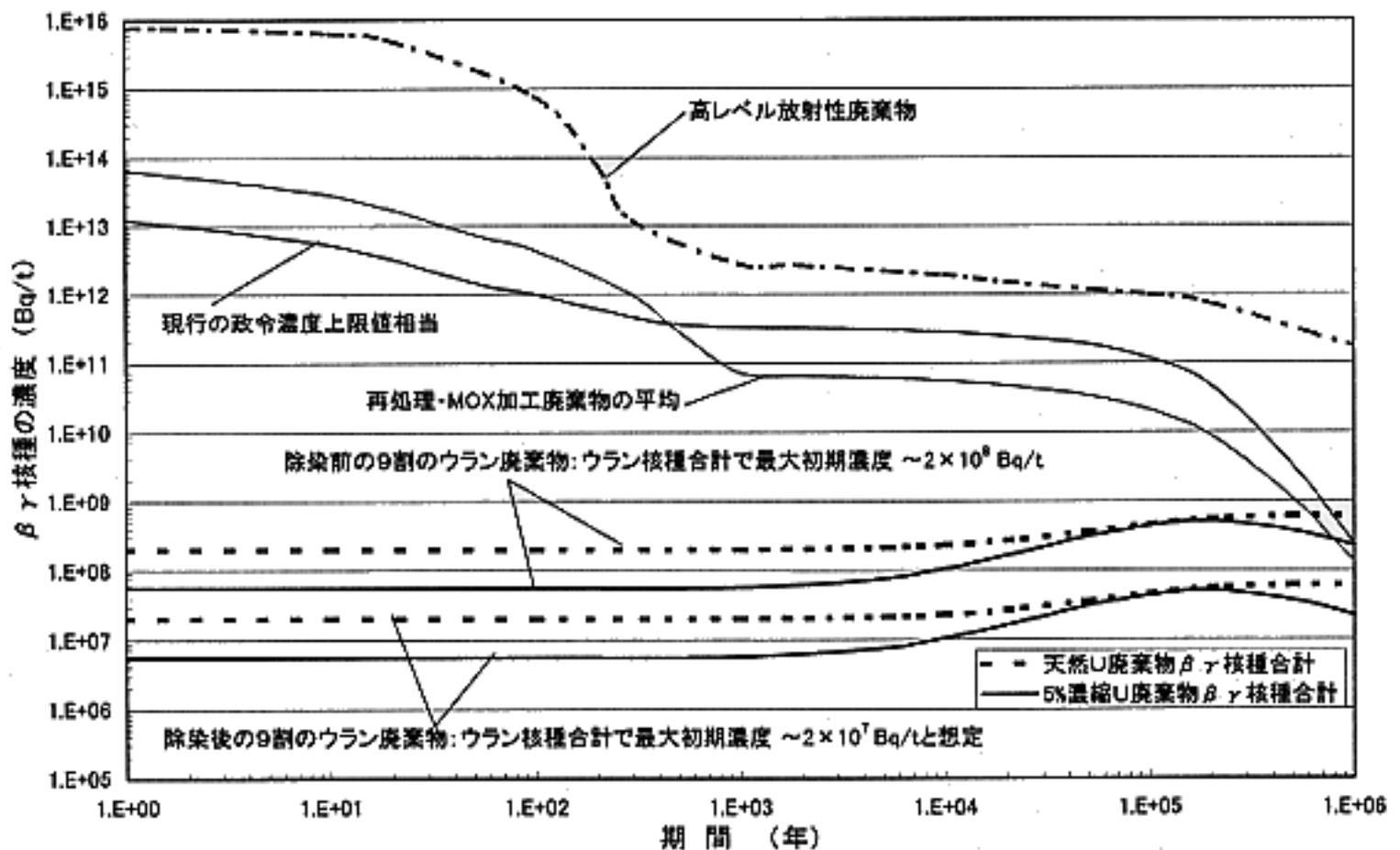


図2 ウラン廃棄物の β 、 γ 核種濃度の経時変化 (他放射性廃棄物との比較)

ウラン核種の崩壊系列

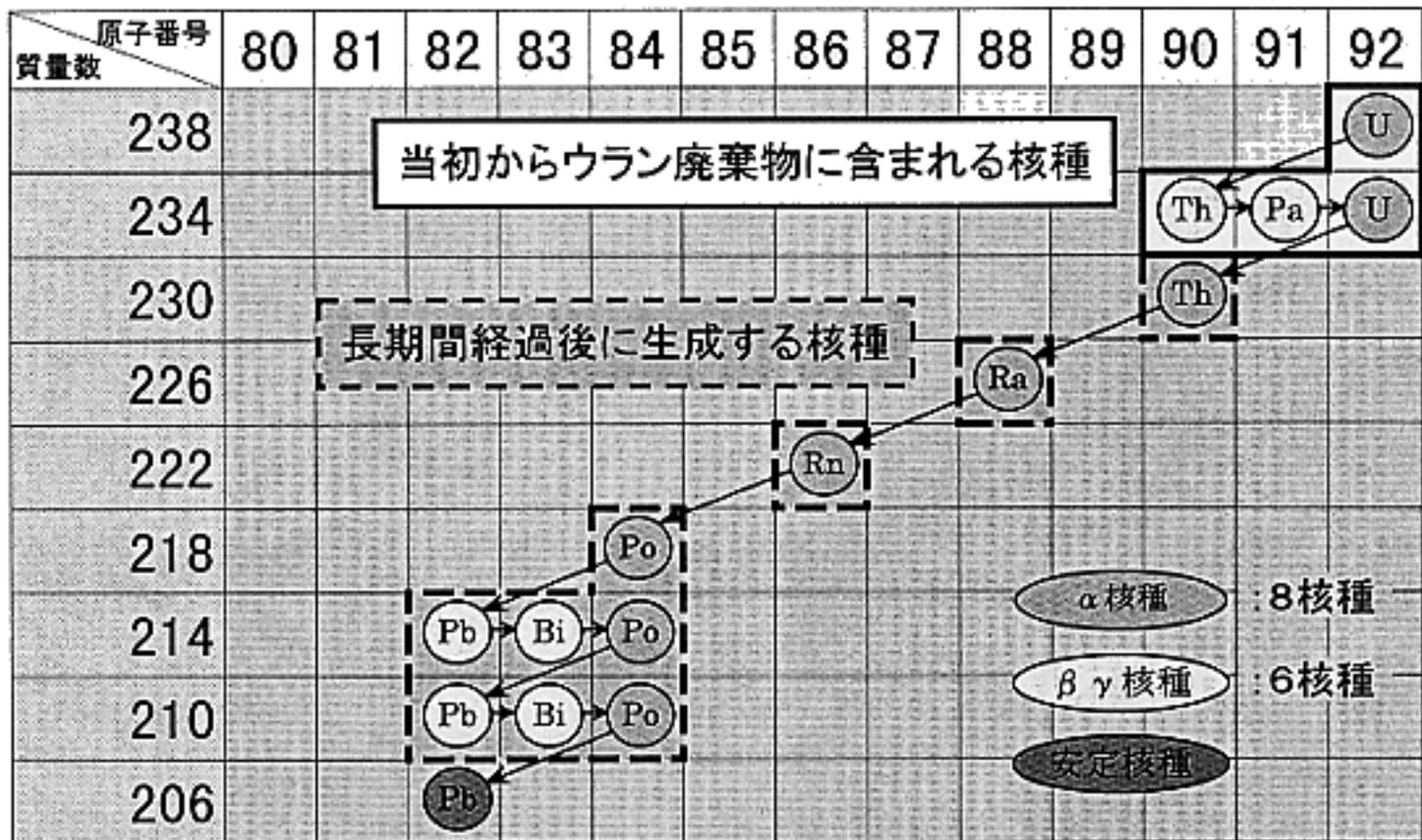


図 1 238-Uの崩壊系列

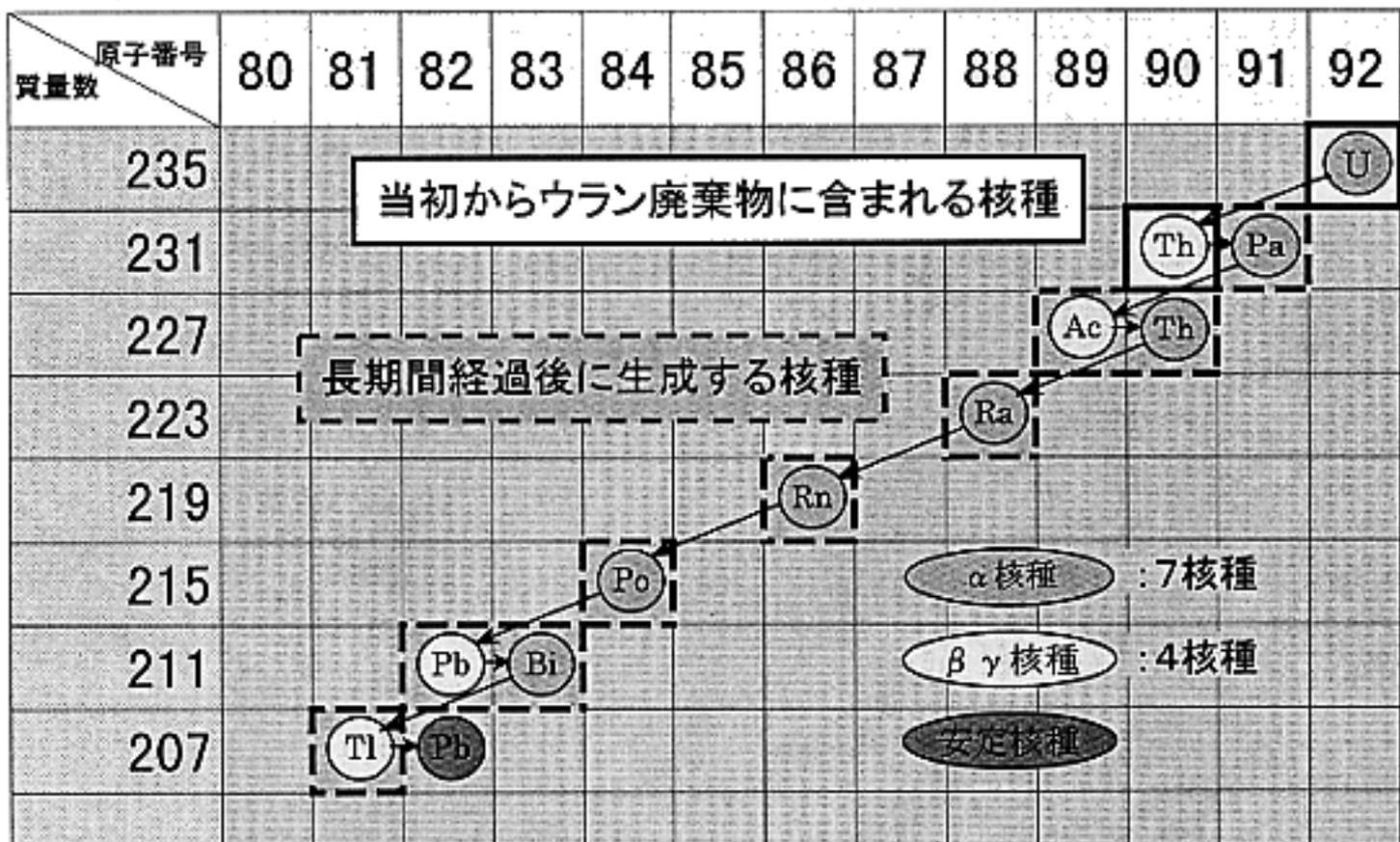


図 2 235-Uの崩壊系列

表1 放射性廃棄物処分場におけるウラン核種を含む廃棄物の受入濃度上限値(例)

(1) 規制の概要及び受入濃度上限値

国別	米 国			英 国	仏 国
処分場	バーンウェル処分場	リッチランド処分場	クライヴ処分場	ドリッグ処分場	オーブ処分場
所在地	サウスカロライナ州	ワシントン州	ユタ州	カンブリア州	オーブ県
運営者	Chem-Nuclear Systems, Inc. (CNSI)	US Ecology, Inc.	Envirocare of Utah, Inc.	British Nuclear Fuel plc (BNFL)	ANDRA
操業開始	1971年	1965年	1988年	1959年	1992年
処分対象廃棄物	低レベル廃棄物	低レベル廃棄物	低レベル廃棄物 NARM、混合廃棄物	低レベル廃棄物	低中レベル廃棄物
施設形態	素掘りトレンチ	素掘りトレンチ	素掘りトレンチ	コンクリートポールト (No. 7まではトレンチ)	コンクリートセル
閉鎖に至る管理	1. 処分場用地は連邦政府又は州政府の所有地 2. 処分場閉鎖のライセンス取得→閉鎖・安定化計画に基づく5年間の監視及び保守 3. 土地所有者へのライセンス移転→100年間の制度的管理 4. ライセンス終了→モニタメントの設置等/州、郡、近くの市等への記録の送付			埋設終了後も保健安全執行部が危険なしと認めるときまでライセンス及び管理を継続	300年間を超えない期間制度的管理を行う
線量基準	放射線物質のサイト外放出: 0.25mSv/y 不慮の侵入: 5 mSv/y (規則制定の根拠、ワシントン州政府)			管理期間中: 0.3mSv/y 管理終了後: リスク 10^{-4} /y	通常時、劣化した長期シナリオ: 0.25mSv/y 大きく劣化したシナリオ: 10mSv/y
評価期間	連邦規則では規定されていない。ワシントン州政府は10,000年			設定しない (ケース・バイ・ケース)	最大線量を評価
受入濃度上限値	350g- ²³⁵ U/容器 (特殊核物質)	100g- ²³⁵ U/容器 (特殊核物質)	受入時における容器の平均濃度 U-232 7.5E04 pCi/g U-233 7.5E04 U-234 3.7E05 U-235 1.9E03 U-236 3.8E05 U-238 3.3E05 天然U 6.8E05 劣化U 3.7E05	濃度上限値 α核種 4GBq/t 総量上限値 U 0.3TBq/y	濃度上限値 α核種特例最大 18.5GBq/t α核種最大 3.7GBq/t 処分場平均 α核種 0.37GBq/t 核分裂性物質 0.1g/リットル
処分実績	1998年 280GBq 1999年 110GBq	1998年 74GBq 1999年 54GBq	1998年 3,200GBq	1996年 100GBq 1997年 63GBq	40~100GBq/y

(2) 受入濃度上限値のGBq/tへの換算結果

国別	米 国			英 国	仏 国
処分場	バーンウェル処分場	リッチランド処分場	クライヴ処分場	ドリッグ処分場	オーブ処分場
換算項目	容器当たりのU-235重量→GBq/t	容器当たりのU-235重量→GBq/t	濃縮U: 核種毎→ウラン合計のBq pCi/g→GBq/t 天然U、劣化U: pCi/g→GBq/t	-	1リットル当たりのU-235重量 →GBq/t
換算条件	容器当たり廃棄物重量: 200kg 濃縮度: 5% 比放射能: 100GBq/tU	容器当たり廃棄物重量: 200kg 濃縮度: 5% 比放射能: 100GBq/tU	濃縮U 濃縮度: 5% 比放射能: 100GBq/tU	-	容器当たり廃棄物重量: 200kg 濃縮度: 5% 比放射能: 100GBq/tU
換算結果	3.5GBq/t	1GBq/t	1.8GBq/t (5%濃縮U) 25 GBq/t (天然U) 14 GBq/t (劣化U)	濃度上限値 4GBq/t 総量上限値 300GBq/y	0.2GBq/t

ウラン核種を含む放射性廃棄物の海外での浅地中処分状況

(参考資料5)

表2 非放射性廃棄物処分場におけるウラン核種を含む放射性廃棄物の受入濃度上限値（例）

(1) 受入濃度上限値

国 別	米 国	英 国	スウェーデン
廃棄物処分場	パインウッド処分場	クリフトンマーシュ処分場	リセンゲン処分場
ライセンス取得者	GE	BNFL	ABB ATOM
受入濃度上限値	250pCi/g	工程残さ 濃度：天然ウラン0.2wt%相当 処分可能量：30t/3月間 焼却灰 濃度：天然ウラン0.5wt%相当 処分可能量：20t/3月間 ほか4種類の形態を規定	最高含有率600ppm （数バッチに限定） 1回の投棄 ウラン含有率：250ppm 平均濃縮度：3.5% 総量 60kgU/y

(2) 受入濃度上限値のMBq/tへの換算結果

国 別	米 国	英 国	スウェーデン
廃棄物処分場	パインウッド処分場	クリフトンマーシュ処分場	リセンゲン処分場
換算項目	pCi/g→MBq/t	天然U重量%→MBq/t	ppm→MBq/t
換算条件	1Ci = 3.7x10 ¹⁰ Bq	天然Uの比放射能：25GBq/tU	最高濃度（最大含有率） 濃縮度5% 比放射能：100GBq/tU 1回の投棄・総量 濃縮度3.5% 比放射能：73GBq/tU
換算結果	9.3MBq/t	工程残さ 濃度：50MBq/t 処分可能量：30t/3月間 焼却灰 濃度：125MBq/t 処分可能量：20t/3月間 ほか4種類の形態を規定	最高濃度60MBq/t （数バッチに限定） 1回の投棄 濃度：18MBq/t 平均濃縮度：3.5% 総量 4400MBq/y

放射性廃棄物の処分に係る線量基準の検討状況について^{注)}

1. 国際放射線防護委員会 (ICRP) での検討状況

国際放射線防護委員会 (ICRP) においては、すべての放射性廃棄物を対象とした ICRP Pub. 77「放射性廃棄物の処分に係る放射線防護の方策」(1977年)の策定を受け、長寿命固体廃棄物の処分に適用する放射線防護の勧告として、ICRP Pub. 81「長寿命放射性固体廃棄物に対して適用されるものとしての放射線防護勧告(仮訳)」(2000年)が出版され、この中で、自然のプロセスに適用する線量拘束値及び人間侵入の放射線防護上の重要性の判断に適用する線量規準の勧告等が行われている。

2. 国際原子力機関 (IAEA) での検討状況

国際原子力機関 (IAEA) においては、RADWASS出版計画による IAEA Safety Series No. 111-F「放射性廃棄物管理の原則」(1995年)に基づいて、IAEA Safety Series No. 99「高レベル放射性廃棄物の地下処分に係る安全原則及び技術基準」(1989年)の改訂作業が行われており、2001年を目途に安全要件として出版が計画されている。なお、IAEA Safety Series No. 99での線量に関する規定は、国際放射線防護委員会 (ICRP) の勧告に基づいて策定される IAEA Safety Series No. 9「放射線防護の基本安全基準」(1982年版)に従っているが、本基準は、1996年に改訂が行われており、IAEA Safety Series No. 115「電離放射線に対する防護と放射線源の安全のための国際基本安全基準」として刊行されている。

3. 諸外国の状況

諸外国での安全基準等の策定状況として、ドイツの0.3mSv/年をはじめとして、フランスの0.25mSv/年、フィンランド及びスイスの0.1mSv/年のように、概ね0.1~0.3mSv/年の範囲で線量目標値を設定するとともに、評価時間枠(期間)を含めた安全基準等が策定されている。

米国では、高レベル放射性廃棄物等の処分の環境放射線防護の一般基準である40 CFR Part 191において、線量基準値として0.15mSv/年が規定されているものの、高レベル放射性廃棄物(使用済燃料)の処分場であるユッカマウンテンに適用する基準については、規則案が連邦官報に掲載されている段階である。これらの規則案では、原子力規制委員会(NRC)の10 CFR Part 63で0.25mSv/年の線量基準値が、環境保護庁(EPA)の40 CFR Part 197で0.15mSv/年の線量基準値が提案されている。

また、英国、スペイン等のその他の国々においても、安全基準等の策定の途上にある。

^{注)} 出典:「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(案)」参考資料17(H.12.6.16 放射性廃棄物安全規制専門部会)。ただし、1. 国際放射線防護委員会(ICRP)での検討状況は、ICRP Pub. 81が出版されたことにより一部加筆修正している。

ウラン廃棄物に対する除染処理技術

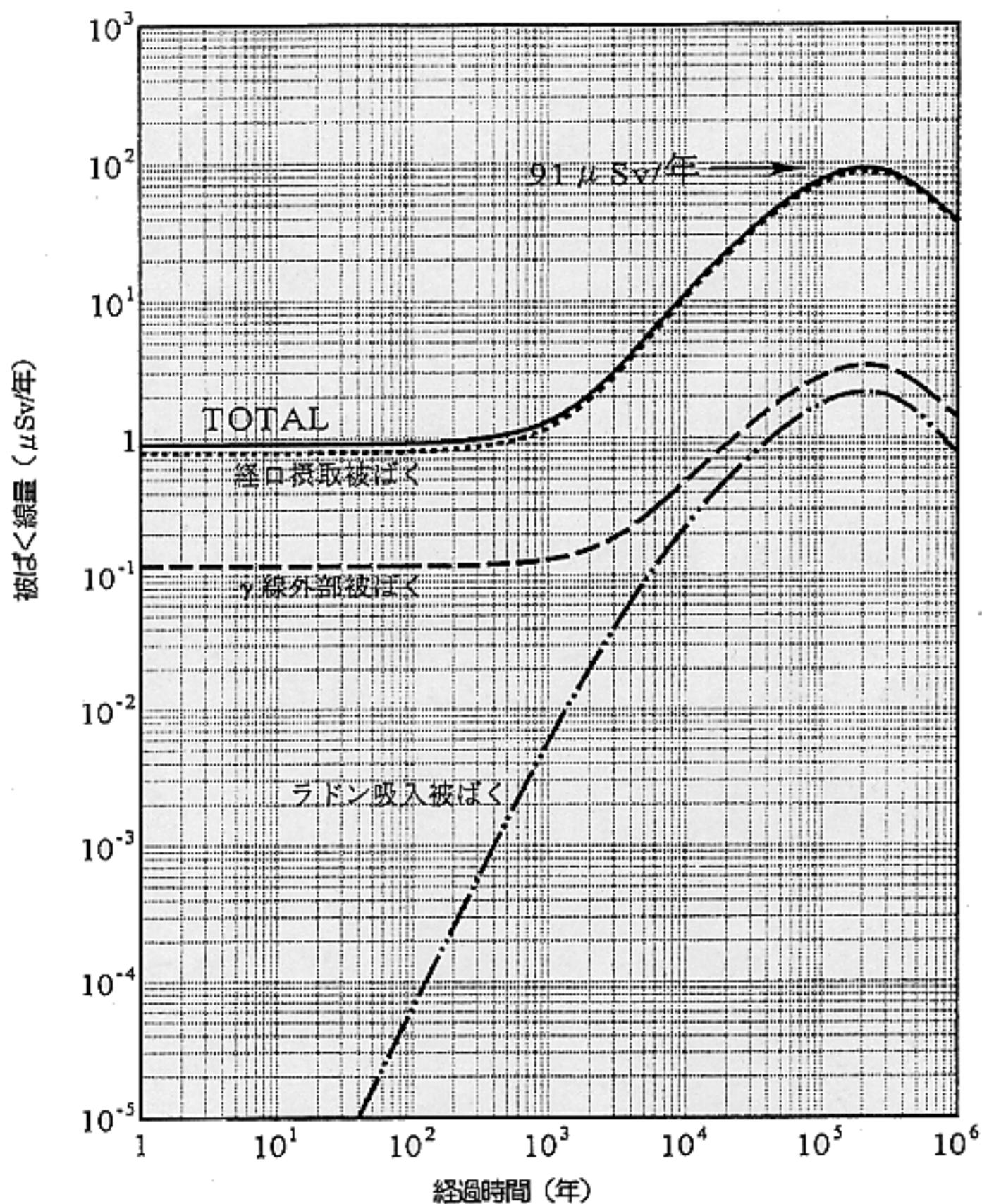
対象廃棄物	除染技術の分類	適用する汚染の種類	技術の概要	除染性能目安		
金属	電気化学除染	電解研磨法	浸漬槽中に陽極に接した除染対象物を吊し電解処理して金属を溶出させる方法	1,000~10,000		
金属		レドックス法	硫酸や硝酸による化学除染に Ce の酸化力を付加したシステム。Ce は電解再生使用する。	100~10,000		
金属		サスペンション流動電解研磨	電解質溶液中に硬質研削粒子を混合し、混合液の流動による研削作用も加味した除染方法	3000~5000 (開発中)		
金属		磁気振動研磨除染	外部磁場の周期的変動により液中の磁性研磨材を振動させ、その研磨作用により除染する方法	数百 (開発中)		
焼却灰、スラッジ		溶融塩電解	均質汚染	溶融塩浴中にイオンとして存在する元素を電解により金属まで還元させて回収する方法	開発中(電力中央研究所等)	
金属(難燃物)	溶融除染	プラズマアーク法	電極と対象物の間に発生するアーク熱で加熱溶解する方法。	適用性検討中		
金属(難燃物)		高周波溶融法	炉外部の一次コイルに電流を送ると電磁誘導作用で二次電流が流れそのジュール熱を利用	適用性検討中		
金属		溶融金属精製法(スラグ溶融法)	ウラン又は TRU の酸化物が物理的現象又は熱力学的に安定なスラグ中に移行させる方法	100 ~ 10,000 以上		
金属、難燃物		エレクトロスラグ溶融法	スラグにより大気と遮断させ、さらにスラグに不純物を吸収させる方法	適用性検討中		
金属、難燃物	物理(機械)除染	拭き取り法(手除染)	ウエス、塗れウエスで拭き取る方法	~10 程度		
金属、難燃物		ブラシ洗浄法	床面に回転ブラシ等を押つけて除染する方法	~10 程度		
金属、耐火物、難燃物		ウォータージェット法(高圧ハイドロ)	70~1400kg/cm ² の高圧力で水を噴出させ物理的衝撃で研磨、研削、剥離する方法	50~1,000		
金属、難燃物		スチームジェット法	スチームの温度効果を利用した方法	~100 程度		
金属、難燃物		フロンジェット法	フロンを吹き付け物理的衝撃力とフロン自体の持つ除染力の相乗効果を利用した方法	10~2,000 (床除染)		
金属、耐火物		ドライブラスト法	砂、プラスチック等のプラスト材を超高速で噴射(圧送空気)させその衝撃力で研磨する方法	~10 程度		
金属		ウェットブラスト法	金属、セラミック等のプラスト材を超高速で噴射させその衝撃力で研磨する方法	10~1,000		
金属		アイスブラスト法	研磨材にドライアイス、氷を使用	10~100		
金属、難燃物(硬質)		超音波洗浄法	10~100kHz の周波数を使用して除去する方法、化学浸漬除染と組み合わせると効果的	100~1,000		
金属、難燃物(硬質)		振動研磨法	研磨材と共に振動させながら除染する方法	30~60		
金属、耐火物、難燃物		泡沫法	除染液に界面活性剤等の発泡剤を添加する除染法、比較的単純形状に適用	~10 程度		
金属、耐火物、難燃物		塗膜剥離法	塗布したペイント剤の剥離時に固定された汚染核種も除去する方法、平滑表面に適用	~10 程度		
金属、耐火物、難燃物		化学除染	浸漬法	化学除染液中に汚染物を溶解剥離する方法、複雑形状に対応可、除染液によっては高温加熱必要。	10~1,000	
焼却灰、スラッジ	硝酸浸出法		均質汚染	比較的高温の硝酸中にウランを浸出させる方法、溶媒抽出によりウランを回収も可	10~1,000?	
焼却灰、スラッジ	ハロゲン化除染		均質汚染	塩化物やフッ化物に変換させて揮発する温度差を利用して除染する方法	開発中	
金属、塩ビ	気相化学除染		固着汚染	汚染核種をカルボニル化合物やフッ素化合物等揮発性化合物に変換して除去する乾式法	開発中	
金属、塩ビ	ラジカル除染		固着汚染	例えば Ag ²⁺ と水による水酸基ラジカルの電気化学的に極めて強い酸化力を利用する除染方法	開発中	
金属、セラミック、塩ビ	その他		パルスレーザ	固着汚染	汚染核種と母材の光に対する吸収率の差を利用して汚染物を蒸発除去する方法	10~1,000 以上
コンクリート			バイオデコンタミネーション法	固着汚染	バクテリアにより例えば強力な無機酸を発生させてコンクリートを劣化させる方法	開発中

ウラン廃棄物浅地中処分の線量試算例¹

- トレンチ処分の政令濃度上限値評価において考慮されている3つのシナリオ（跡地建設、跡地居住、地下水移行シナリオ）のうち、最も高い線量を与えるシナリオは、跡地居住シナリオであり、次いで、跡地建設シナリオ、地下水移行シナリオとなる。線量の相対比は、線量の評価値がそれぞれ最大になる時点で、およそ100（跡地居住）：2（跡地建設）：0.01（地下水移行）となる（1 Bq/g に対する線量では、およそ100 μ Sv/y（跡地居住）：2 μ Sv/y（跡地建設）：0.01 μ Sv/y（地下水移行）。）。なお、跡地居住シナリオでは、地下水によるウラン核種の流出移行を無視して、ウラン核種（及び生成した娘核種）はすべて跡地に残留すると仮定した評価を行っている。
- ウラン核種の濃縮度等の特性の違いによる影響は比較的小さく、劣化ウラン、天然ウラン、5%濃縮ウラン、20%濃縮ウラン、再処理回収ウランのいずれも類似した線量の経時変化を示す。
- トリウム核種（²³²Th）については、すべての娘核種の半減期が短く、数十年で放射平衡に達し、それ以降のビルドアップがないため、従来の低レベル放射性廃棄物で考えられていた管理期間の範囲内の評価で対応できる可能性がある。
- ウラン核種のビルドアップによる線量の増加については、跡地建設シナリオで約10倍、跡地居住シナリオで約100倍である。処分当初約1000年間はビルドアップはほとんど生じず、比較的早期に影響が現れる濃縮ウランの場合で、約20万年後にピークに達する（娘核種のビルドアップによる線量増加は、極めて緩慢であり、濃縮ウランの場合、約0.05%/年の割合で増加する。）。
- 最も高い線量を与える跡地居住シナリオのピーク時点の線量を規制除外線量の10 μ Sv/y以内に抑えたとすれば、処分当初の約1000年間は、その約1/100の0.1 μ Sv/yに抑制する必要がある。これは、自然線量と比較して1万分の1以下になる。）

¹ 試算結果の一例として、5%濃縮ウラン核種組成の単位濃度（10⁶ Bq/t=1 Bq/g）を前提とした線量試算例（跡地居住シナリオ）を添付図に示す。なお、本試算は、以下に記述するような理由等から、限定的な目的で行われたものと理解されるべきである。

①シナリオの設定については、本来、評価の長期性を踏まえた検討が行われるべきであるが、必ずしも定量的な結果に結びつかないため、あえて単純に現行の政令濃度上限値の評価シナリオに準拠した試算が行われたものである。②ラドン吸入被ばくは、サイト特有のパラメータ値の設定等によって評価結果が比較的大きく変動するものであり、その他の被ばくについても評価パラメータへの依存性があり、評価条件の設定によって評価結果は変動し得るものである。③現行の政令濃度上限値の評価には、ラドンによる被ばくは含まれておらず、ラドンによる線量の評価は、独自のモデルとパラメータの設定により行われたものである。



添付図 政令評面に準じた被ばく線量試算 (跡地居住シナリオ)

ウラン：5%濃縮ウラン

廃棄物中ウラン濃度：1 Bq/g (= 10^6 Bq/t)