

ウラン廃棄物等の諸課題について

京都大学 山名 元,

原子力研究バックエンド推進センター 前田 充

ウラン廃棄物は、製錬、転換、濃縮、再転換、成型加工の各工程の運転および解体に伴って発生する廃棄物であり、核分裂生成物や TRU 核種などを含む放射性廃棄物とは扱いが大きく異なる。このためもあって、クリアランスや処分に関する安全上の基準も今後整備される予定である。ウラン廃棄物に関する様々な課題を振り返り、その処分等の方向性について解説する。

I. はじめに

ウラン燃料を製造するための鉱石の製錬、転換、濃縮、再転換、成型加工の各工程の運転および解体に伴って、ウラン等を含む廃棄物およびクリアランス対象物が発生(以下、「ウラン廃棄物等」という)する。民間のウラン燃料加工施設、日本原子力研究開発機構のウラン濃縮施設、日本原燃のウラン濃縮施設においてかなりの運転廃棄物が蓄積しているだけでなく、今後は解体廃棄物の発生も予想される。また、研究機関や大学などにおいて発生してきたものにもウラン廃棄物等が含まれている。ウラン廃棄物等は、汚染が主としてウランであり、核分裂生成物や超ウラン元素(TRU)などの放射性廃棄物とは、扱いが大きく異なることが特徴である。本稿では、ウラン廃棄物等に関する様々な課題を振り返り、その処分およびクリアランスに向けての方向性について解説する。詳細については、文献1)を参照されたい。

II. ウラン廃棄物等の諸課題

高レベル放射性廃棄物や発電所廃棄物のような、主に人工放射性核種を含む放射性廃棄物の処分や制度については、共通的な考え方や安全上の基準が整備されてきたが、ウラン廃棄物等はこれらと本質的に異なる点が多い。ウラン廃棄物等にかかわる課題を紹介する。

1. ウラン廃棄物等の発生量

ウラン廃棄物等は、主に燃料加工事業者、日本原子力

研究開発機構(JAEA)、日本原燃(JNFL)の3者から発生する。これら事業者による調査(第1表)によると、2005年時点ですでにドラム缶92,000本程度が蓄積している。今後、JNFLのウラン濃縮施設の運転が進むとともに、JAEAのウラン取扱施設の解体が予定され、2050年度末には、496,530本にまで、ウラン廃棄物等が増加すると予想されている。

これらを貯蔵する貯蔵能力については、燃料加工事業の場合、事業者によって異なるものの、現状のままでは2020年頃に貯蔵庫が満杯になるケースが発生すると予想される。立地自治体の事情などから、貯蔵庫の増設を簡単には期待できない実情があり、燃料加工事業への将来的な圧迫につながる懸念される。また、ウラン廃棄物の処分方策が定まらないうちは濃縮施設など老朽化施設の廃止・解体を行うことができない。2050年までに発生するウラン廃棄物等のうち4/5程度が1 Bq/g^{a)}を下回ると予想される(第1表)。

2. ウラン廃棄物の放射化学的特徴

ウラン廃棄物等に含まれる放射性核種としては、基本的には天然に存在する²³⁸U、²³⁵U、²³⁴Uがほとんどである。なお、回収ウランを取り扱った履歴を持つ施設(濃縮施設、加工施設)から発生するウラン廃棄物等には、²³²Uおよび²³⁶U、並びに核分裂生成物などが含まれる可能性があるが、これらの放射能はごくわずかである。²³⁴Uの比放射能が他の核種よりも圧倒的に高いために、濃縮度の高いウランほど、比放射能が高くなるのが特徴である。ウランの同位体組成が厳密にわからない廃棄物もあり、評価に際して慎重が必要である。

他の人工放射性核種に見られないウラン廃棄物の特徴として、子孫核種の成長による放射能の増加(ビルドアップ)を挙げることができる。第1図に、精製した天然ウランの放射能の経時変化を示す。1,000年以降、²³⁰Thや²²⁶Raの成長により放射能が増加し、10万年以降に系列全体の放射平衡が達成されることがわかる。ウラン廃

Issues for the Rational Management of the Uranium-contaminated Materials: Hajimu YAMANA, Mitsuru MAEDA.

(2008年 1月11日 受理)

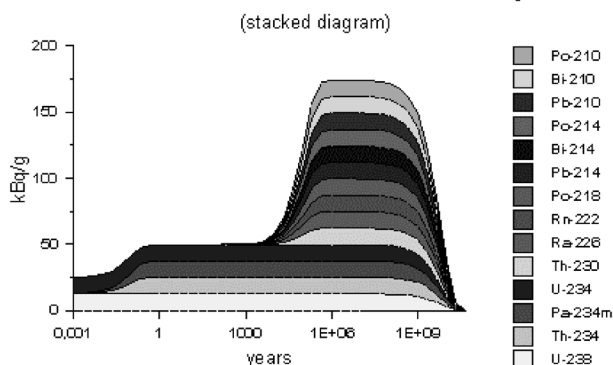
^{a)}Bq(ベクレル):毎秒原子核が1個崩壊する放射能量の単位。

第1表 ウラン廃棄物の発生子測¹⁾

事業者別	2005年3月 現在	2050年度末予測 (JAEA については2048年度)			
		運転廃棄物		解体廃棄物	
		1Bq/g 未満	1Bq/g 以上	1Bq/g 未満	1Bq/g 以上
日本原燃六ヶ所ウラン濃縮工場	4,000	133,970	14,460	3,170	2,870
燃料加工メーカー	41,000	35,250	53,270	82,180	3,070
日本原子力研究開発機構	47,000	40,860	24,840	101,180	1,410
合計	92,000	210,080	92,570	186,530	7,350
全国合計		2050(2048年)度末予測			
1 Bq/g 未満		396,610			
1 Bq/g 以上		99,920			
合計		496,530			

引用：ウラン廃棄物発生事業者による「ウラン廃棄物の処分及びクリアランスに関する検討書(平成18年)」

Natural Uranium Activity



第1図 天然ウランの精製後の放射能の経時変化

第2表 日本の土試料中のウラン濃度

	平均 (U Bq/g)	最小 (U Bq/g)	最大 (U Bq/g)
地殻	0.059		
高速道路近傍	0.003	0.007	0.073
森林土	0.043	0.006	0.112
表層土	0.048		
非農耕地土壌	0.036		
河川堆積物	0.031	0.003	2.191
水田土壌	0.070	0.040	0.119
畑土壌	0.062	0.026	0.107
河川水	0.000	0.000	0.002

放医研・研究レポートより

棄物の処分地の地形変化もなく、かつウラン核種および子孫核種がその場に10万年間以上、留まって蓄積すると保守的に想定すると、処分地周辺での被ばく影響は10万年后付近で最大となるはずである。これは、時間とともに放射能が減衰する他の放射性廃棄物にはない特徴であり、ウラン廃棄物の処分やクリアランスの評価において本質的な課題となる。

3. ウランの自然界での賦存状況

ウランは地殻中に広く分布する元素である(3 ppm程度)。第2表に、国内の環境試料中のウラン濃度の実測値の例を示す。土中に、平均で数十 mBq/g 程度のウランが含まれているのがわかる。土壌や河川堆積物では、最大値で数100 mBq/g 以上の値を示すケースも見られる。ウランは、その化学的な特性から地下水や雨水中で溶解したり沈殿したりするため、場所に応じて賦存状況が異なる。

我々は、1年に平均して約1.5 mSv^{b)}の自然被ばくを受けているが、このうち、ウラン起源の、①ラドンの吸

^{b)}Sv(シーベルト)：放射線の種類等による人体への影響度を表す被ばく線量の単位。mSvはSvの1/1,000。

入、②食物経路によるウラン系列核種の摂取、③ウラン系列核種による大地からの外部被ばく、の合計は約0.6 mSv/年に上る。ウラン廃棄物等の評価結果を考察する際には、自然界におけるウランの存在やその影響の存在、自然環境中でのウランの挙動の特徴など、バックグラウンドの存在が十分考慮される必要があるだろう。

4. ウランの検出および定量の難しさ

ウランの主要核種はすべてα崩壊核種であるが、崩壊に際してほとんどγ線放出を伴わない。廃棄体外部からの定量については、²³⁵Uに同伴する186 keVγ線(放出率：壊変当たり54%)等を利用して、ある程度の精度の範囲で測定可能であるが、基本的には、シンチレータや電離イオン式測定器によるα線検出、あるいは放射化学的な手法に頼る必要が少なからず出てくる。放射線計測によって測定できない核種が存在するため、検出可能核種の定量結果から核種組成の代表値を用いて推測する方法などを利用せざるを得ない。検出精度と検出下限の限界の存在は、処分に係る廃棄体確認やクリアランス検認に際してのハンディキャップとなる。

5. ウランの化学毒性と産業廃棄物処分との関連

ウランは化学毒作用があり、慢性毒性と発ガン性を考慮する必要がある。慢性毒性は他の重金属と同様に耐用品日摂取量(TDI)で評価され、例えばWHOの暫定値(mg重金属/kg体重/日)では、Cdの0.001やHg(総水銀)の0.005に対し、ウランは0.06である。WHOはこれらをもとに飲料水水質ガイドライン第3版において、暫定値として0.015 mg/lを示した。なお、我が国の飲料水に関する厚生労働省令(2004年)の管理目標値や環境基準に係る環境省令(2004年)の要監視項目は、0.002(mg/l)のままで改訂されていない。

一方、産業廃棄物についても、毒性、感染性等健康または生活環境に被害をもたらすおそれのある廃棄物は、遮断型処分場または管理型処分場に埋設することが求められ、構造・維持管理基準、廃止基準等が定められている。処分場の廃止により、廃棄物処理法の規制から解放され、環境基準が適用される。これはウラン廃棄物を含む放射性廃棄物の浅地中処分施設についても同様であろう。

6. 長期原子力利用の中でのウラン廃棄物等

我が国での現在までの濃縮ウラン燃料累積使用量は約23,000 t程度であるが、原子力政策大綱による原子力利用の長期展望に基づいて概算すると、2100年にはこれが約110,000 t程度に上ると考えられる。この累積使用量の一定割合(0.1%以下程度)がウラン廃棄物として発生することは、我が国の宿命といってもよい。海外から大量に輸入したウランの利用については、ダウンストリームまで含めて、国内で責任を持てる仕組みが確立されることは、長期的な原子力利用国としての必須要件であるといえる。

ウラン廃棄物の処分はこのように、我が国における原子力の長期利用を支える上で本質的な問題の一つであるが、原子力発電の経済メカニズムの中ではその位置づけは見えにくい。ウラン廃棄物処分にかかるコストは原子力発電コストの中では極めて小さい部分に過ぎない上、核燃料費の中に含まれるため、ダウンストリームに必要なコストとしては表に見えにくいというのが実情である。一方、ウラン廃棄物の処分やウラン汚染物のクリアランスに係るコストは、燃料加工事業や濃縮事業の加工コストの中ではかなり大きなインパクトを与え得る可能性がある。国内での燃料供給体制を長期に安定化させ、ウラン廃棄物等に対する社会的な受容性を確保していくことが、原子力の長期利用に必須であることを考えると、ウラン廃棄物等の課題は、特定の事業の個別問題ではなく、我が国の原子力利用全体における課題の一つと考えるべきではないだろうか。

III. 規制等の制度整備に関する課題

ウラン廃棄物の管理を具体化する上では、規制等の制度や処理処分システム等の仕組み整備が必要となる。課題整理の観点から、国内外における取組みの現状について概要を述べる。

1. 我が国における検討

原子力委員会は平成12年、ウラン廃棄物処理処分の基本的考え方を取りまとめ、ウラン廃棄物についても、“核種濃度等により適切にレベル区分し、合理的な処分方策を検討する必要がある、素掘り処分等の浅地中処分も考えられる”とし、“線量目標値、濃度基準の検討に当たっては、ICRPなどの放射線防護の考え方や海外事例を勘案し、また天然に普遍的に存在すること、長期性に伴う不確実性を考慮した上で、発生の可能性も考慮した適切なシナリオの設定が望まれる”²⁾としている。

一方、原子力安全委員会は、これまで発電所廃棄物を主対象に浅地中処分に関して安全規制の考え方、安全審査の考え方、基準値等を示してきたが、最近、余裕深度埋設等の長寿命核種を含む廃棄物の処分に関して重要事項、濃度上限値、安全規制の考え方等の報告書を取りまとめた。

「低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方(中間報告)」(平成19年)では、“極めて長期間に及ぶ安全評価では不確実性を考慮し、シナリオの発生の可能性とその影響を組み合わせたりリスク論的考え方が有効”とし、発生の可能性に基づいて基本シナリオ、変動シナリオ、人為・稀頻度事象シナリオを想定することを求め、各シナリオ評価のめやす線量を示している。基本シナリオは“発生の可能性が高く通常考えられるシナリオ”とし、被ばくの管理を必要としないめやす線量として10 μ Sv(0.01 mSv)/年の値を提案している。

ただし、ウラン廃棄物については、“天然の放射能との関連なども考慮する必要があると考えられることから、濃度上限値とともに埋設計画が具体化する段階で検討する”としている³⁾。同様の但し書きは、平成16年の共通の重要事項、平成18年の研究所等廃棄物の浅地中処分、平成19年の濃度上限値に関する報告書等でも認められ、例えば、研究所等廃棄物の報告書では、ウランの天然賦存性やビルドアップ等の特徴を考慮し、IAEAやICRPの提案する考え方や諸外国の規制を参考にすることを検討すべきであるとしているが、具体的な検討は開始されていない。

2. 国際機関等での検討

欧米ではウラン廃棄物という区分概念はないが、天然起源核種のクリアランスレベルや天然起源の放射性物質

を含む物質(NORM)の免除レベルにおいてウランの特徴を踏まえた考え方が示されており、ICRP, IAEA, EC委員会等において多くの検討がなされてきた。

(1) 放射性廃棄物処分の放射線防護の考え方

ICRP は、Pub 77(1997), Pub 81(1999), Pub 82(1999)等において、“放射性廃棄物処分に対しても、行為(Practices)に関する放射線防護の3原則が適用できる”として、正当化、最適化、線量限度の適用の考え方について多くの勧告を行ってきた。

線量限度を1 mSv/年とし、この値とⅢ-2(2)項で述べる規制免除レベル10 μ Sv/年との間において、複数の線源からの被ばくの可能性を考慮して設定される単一线源に関する線量拘束値を指標として最適化を行うことを求めている。地下水汚染等の自然過程から生じる線量またはリスクの算定では、0.3 mSv/年の線量拘束値または約 10^{-5} /年のリスクと比較されるべきとしている。

なお、Ⅲ-1節で述べた基本シナリオのめやす線量は規制免除レベルと同じであり、ICRP が勧告する最適化の検討が必要のない値となっている。

(2) 規制免除

放射線量が非常に低いため、個人にとって無視できるようなリスクレベルの線量域があることが広く認識されており、NORM を含む放射線源の規制免除レベルやクリアランスレベルに関して幅広い検討が行われてきている。

IAEA は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(いわゆる BSS)において、行為または行為の中で使用される線源に対し、正当化の枠組みの下で、一定の基準以下であれば、規制の適用を受けない免除レベルとして下記を提案し、国際的に幅広く受け入れられている。

- ・公衆の構成員に予想される実効線量が年間10 μ Sv のオーダーか、超えないこと。
- ・年間の預託集団実効線量が、おおよそ1人・Sv を超えない、あるいは防護の最適化評価から免除が最適の選択肢であること。

この背景として、IAEA は数10 μ Sv/年(some tens of microsieverts per year)を取るに足らない線量(trivial dose)と考えており⁴⁾、免除とクリアランスに関する EC 委員会は、“10 μ Sv/年に切り下げたことは複数の免除された線源から起こり得る被ばくに関連した便宜上のこと”と述べている⁵⁾。

これに対して、天然起源核種のクリアランスレベルは、宇宙線、体内カリウム、銩物中放射性物質等による被ばく管理は規制の実行可能性や効率性等の観点から、規制になじまないとする規制除外の概念により導かれている。天然土壌よりも濃度が高められた廃棄物等が除外対象とならないようレベルが導出されている。

天然起源核種に対する同様な配慮は、NORM の免除

レベルの検討においても採用されており、EC 委員会は、“天然起源線源に対する値は、trivial risk に基づいて行うことは適切ではなく、NORM に係る作業活動に伴う個人被ばくは10 μ Sv/年よりずっと高い場合があり、10 μ Sv/年を課すならば、自然のバックグラウンドの変動よりも低く抑制することであり、そのような小さい増加を管理体系に適用することは一般に不可能である”と述べている⁶⁾。このような考え方は、いずれも規制の実行性、合理性、効率性を重視する国際的な考え方に基づくものであろう。

(3) ウラン含有低レベル放射性廃棄物等の取扱い

米国、英国、フランス、フィンランド、スウェーデン等において、ウランを含む低レベル廃棄物は浅地中埋設場または特定の産廃処分場において処分されている。公衆の安全性の判断基準はいずれも100~300 μ Sv/年の範囲内にある。主要な例としてフランス⁷⁾とスウェーデン⁸⁾の現状について述べる。

フランスでは、微量の α 核種を含む低レベル廃棄物がオープン中低レベル廃棄物処分場⁹⁾およびモルビリエ極低レベル廃棄物処分場¹⁰⁾で受け入れられており、前者の α 核種受入濃度基準は、容器詰めの場合、単位廃棄体平均で3,700 Bq/g である。この値の策定の経緯として、1980年代当時、長寿命核種廃棄物の処分場は存在せず、処分場の活用策として長寿命核種が1~2%の廃棄物をマンシュ¹¹⁾に受け入れることを決定し、この考え方がオープン処分場にも適用されたものとされている。

一方、モルビリエ極低レベル廃棄物処分場の受入濃度基準は、放射能毒性に基づいて4区分されたIRASという指標で定められ、ウランはClass 2に指定されており、これからウラン単独の場合、最大で、バッチ当たり：100 Bq/g、パッケージ当たり：1,000 Bq/g となる。

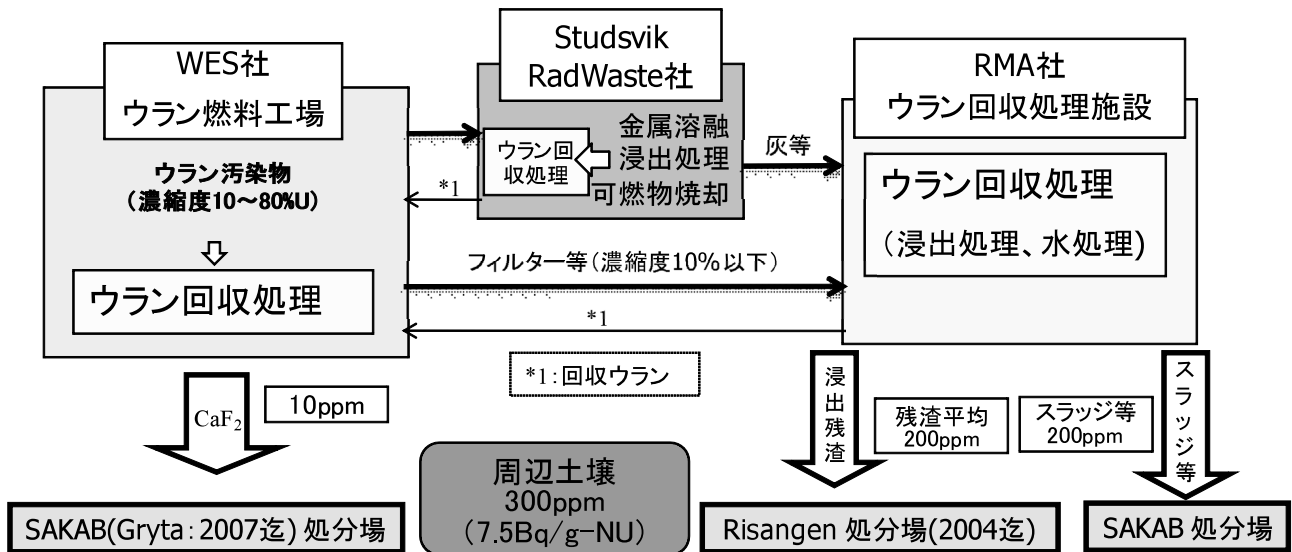
スウェーデンは、ウラン汚染物は潜在的資源物質であるとして極低レベル以上のものはすべてリサイクルするため徹底した回収除染処理を行っており、“いわゆるウラン廃棄物は発生していない”としている。

一例として、Westinghouse Electric Sweden(WES)社のウラン燃料加工施設(UF転換を含む)で発生するウラン汚染物の処理の流れを第2図に示す。ここではRanstad Mineral社(RMA社)、Studsvik社といった社外処理施設のほかに、特別に許可された地方自治体の産廃埋設施設(Gryta, Risangen, SAKAB)の機能が適切に

⁹⁾原子力施設で発生する半減期30年以下の $\beta\gamma$ 核種主体の中低レベル廃棄物を調整・埋設する基本原子力施設で1992年以来、放射性廃棄物管理庁(ANDRA)が運転している。

¹⁰⁾極低レベルの原子力施設解体廃棄物のほか、濃縮 NORM 廃棄物、有害廃棄物等を受け入れ、調整・埋設する特定環境防護施設で2003年以来、ANDRA が運転している。

¹¹⁾1970年代初頭より操業を開始した中低レベル廃棄物埋設施設。すでに埋設容量が満杯となり、2003年から公式に管理段階に入っている。オープン処分場はこれを引き継いだ役割。



第2図 Westinghouse Electric Sweden (WES)社ウラン燃料加工施設におけるウラン汚染物処理の主な流れ

組み込まれ、総合的なリサイクル・処分システムが構築されている。割愛したが、RMA社、Studsvik社を中心とするシステムでは、ドイツ等国外からのフローも含まれる。回収・除染に伴う微濃度のウランを含むCaF₂、スラッジ等は、条件付きクリアランス物質として図示した産廃施設で埋設されている。

3. 我が国における課題

上述のように欧州では、実行性や合理性を考慮した規制と合わせ処理処分のインフラが整備されている。我が国において、今後、具体的な検討が期待されるところである。

現行の安全審査の基本的考え方では、廃棄物中の放射能の減衰を前提に段階管理の適用を定めているが、ウランについては現実的期間内での放射能レベルの低下は期待できないばかりか、II-2節で述べたように、ビルドアップにより放射エネルギーが増加する。

我が国のウラン廃棄物について行われた試算例(初期ウラン(天然組成)濃度100 Bq/g)では、跡地利用に伴う潜在被ばくにおいて、埋設処分後約1万年間は数10 μSv/年オーダーであるが、数万年以降、100 μSv/年を超える可能性があることが示され、環境中濃度の変動幅等を参考とする新たな判断指標の必要性を指摘している⁹⁾。

IV. おわりに

以上、ウラン廃棄物等の課題とこれにかかわる国内での取組みや海外での状況について解説した。自然放射性物質としてのウランの特殊性を加味した上で、科学的かつ合理的な、ウラン廃棄物等の処理処分およびクリアランスの制度化が重要である。前述した原子力委員会原子

力バックエンド対策専門部会報告書²⁾では「ウラン廃棄物の特徴や処分方法を考慮した安全規制の基本的考え方や線量目標値の設定をはじめとした安全基準などが、原子力安全委員会において検討され、これを踏まえて、必要な制度の整備が図られることの重要性」を述べているが、筆者らもこれに同感である。ウラン廃棄物等の問題が、軽水炉による長期的な原子力利用の根幹にかかわる問題の一つであることに鑑み、その処分およびクリアランスの制度化に向けての検討が早期に進められることが期待される。

—参考文献—

- 1) 日本原燃, 日本原子力研究開発機構, (株)グローバル・ニュークリアーフuel・ジャパン, 三菱原子燃料(株), 原子燃料工業(株), (株)ジェー・シー・オー, ウラン廃棄物の処分およびクリアランスに関する検討書, (2006).
- 2) 原子力委員会, ウラン廃棄物処理処分の基本的考え方について(平成12年).
- 3) 原子力安全委員会, 低レベル放射性廃棄物埋設に関する安全規制の基本的考え方(中間報告)(平成19年).
- 4) IAEA, *Principles for the Exemption of Radiation Sources and Practices from Regulatory Control*, IAEA SS No.89, (1988).
- 5) European Commission, *Practical Use of the Concepts of Clearance and Exemption*, RP-122 Pt. I, (2001).
- 6) European Commission, *Practical Use of the Concepts of Clearance and Exemption*, RP-122 Pt. II, (2001).
- 7) Jean-Marie Lavie, “フランスにおけるα廃棄物の浅地処分およびクリアランスの考え方と現状”, デコミッションング技報 No.36, p 11 (2007).
- 8) 宮坂靖彦, “スウェーデン及びドイツにおけるウラン廃棄物の処理処分の現状(仮題)”, デコミッションング技

報 No.37, (2008), 投稿中.

9) 川妻伸二, ウラン廃棄物処分方策の提案, 原子力学会

「2007年秋の大会」企画セッション(ウラン廃棄物の処分に関する検討)(2007).

著者紹介

山名 元(やまな・はじめ)



京都大学
(専門分野/関心分野)再処理等に関わる湿式・乾式系でのアクチニド化学研究, 放射化学研究, 核燃料サイクル工学など。

前田 充(まえだ・みつる)



(財)原子力研究バックエンド推進センター
(専門分野/関心分野)原子力バックエンドの技術および安全性

From Editors **編集委員会からのお知らせ**

○英文論文誌の全通過論文に
対して英文 Editorial Correction
を開始しました



— ホームページ更新情報 —

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/> (2/10 現在)

- 学会誌ホームページに, Web アンケートで評点が高かった記事(2007年1~10月号)を掲載しましたのでご覧下さい (<http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/atomos/index.htm>)。
- 英文論文誌について, 全通過論文に対する英文 Editorial Correction (素読校閲: 主として文法上のミスの修正や冠詞・接続詞などのチェック)を開始しました。詳しくは, <http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/publication/071001suyomikosei.html> をご覧下さい。



—最近の編集委員会の話題より—
(2月8日 第8回幹事会)

【論文誌関係】

- 論文誌への投稿から審査終了までのインターネットを利用した電子化を進めている。電子化に伴い, 英語版投稿規程の改訂することとし, その内容を検討した。

【学会誌関係】

- 原子力学会 50周年記念号は学会誌 2009年4月号とし, 現学会活動と今後の展望を主体とする若い層向けの記事とし, 110ページ程度とする。今後, 編集委員会と学会 50周年記念事業WGとで連携して進めることとした。
- 主なマスメディア関係者へ学会誌を送付することとし, 従来送付している機関とあわせて, アンケートによる活用状況の確認をする予定。
- 学会誌 Web アンケート回答数が若干減少したため, 引き続き部会モニターの方々に回答を依頼することとした。
- 学会誌等を送付する際の封筒の透明ラップ化を検討中。4月号を目処に封筒デザインを決めることとした。

編集委員会連絡先 hensyu@aesj.or.jp