

放射化金属の分留特性の数値解析

Numerical Analysis of Fractional Distillation for Radioactive Metal

日本原子力研究所東海研究所
環境科学研究部環境技術開発グループ
赤岡 克昭, 丸山庸一郎

我々は、原子力施設の解体等により発生する放射化金属廃棄物中に含まれる極微量の放射性核種を除去し、放射性廃棄物の量を削減するために、原子ビーム状に蒸発させた金属の分留とレーザー照射による核種除去を組み合わせた分離方法の研究を行っている。現在、金属の分留特性を把握するためにHenryの法則をLangmuirの式に適用した簡単なモデルを用いた解析コードを作成し数値解析を行っている。この解析コードにより、超々ジュラルミン（アルミニウム合金7075: Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-0.25Cr）の蒸発について解析したところ実験と良く一致する結果が得られた。

更に、本解析コードを用いて、動力試験炉（JPDR）から排出されたSUS304を母材とする炉内構造物について分留特性の解析を行った結果、1/100以下に減量できる可能性を示すことができた。本稿では、この解析モデルを中心に解析結果について報告する。

1. はじめに

原子力施設の解体等により発生する放射化金属廃棄物の大部分は安定核種であり、そこに含まれる放射性核種の量は非常に少ない。例えば、日本原子力研究所で解体実地試験¹⁾により解体された動力試験炉（Japan Power Demonstration Reactor : JPDR）から排出された放射化金属廃棄物の量は約180 tである。しかし、JPDR解体廃棄物のデータ分析結果²⁾に基づき、その全てが放射能濃度の最も高い炉内構造物と同等であると仮定しても、その中に含まれる放射性核種の量は $8 \times 10^{-4} \%$ 以下であり、僅か1.4 kg程度である。このように原子力施設の解体に伴って発生する金属廃棄物のほとんどは安定核種であるため、極微量の放射性核種を除去することによって廃棄物量を激減できる可能性がある。安

定核種から放射性核種などの同位体の除去や分離をするには同位体固有の光吸収を利用したレーザーによる選択的励起・電離による方法が効果的である。しかし、ステンレスなど多くの元素から構成されている系から個別の核種をレーザーのみで除去することは、単一元素から特定の同位体を分離する従来のレーザー同位体分離法に比べ、そのシステムが極めて複雑になるため適当ではなく、レーザーで処理する元素数を減らす必要がある。そのためには元素の蒸気圧などの違いによる熱特性を利用した分留が効果的であり、レーザー処理との適合性も良いと考えられる。我々は、放射化金属廃棄物中に含まれる極微量の放射性核種を除去するために、このような金属の分留とレーザー照射を組み合わせた金属中の微量元素の分離方法を提案^{3)~5)}し、その研究

を行っている^{6)~9)}。

我々が提案している方法は、微量の放射性核種を含む合金や金属をFig. 1 (a) に示すように真空中で原子ビーム状に蒸発させ、各元素の蒸気圧等の熱特性の違いによる蒸発時刻の差を利用して分離する。しかし、熱特性が似ているため同時刻に蒸発する元素や同位体を分留のみで分離することはできない。そこで、Fig. 1 (b) に示すように、その元素群が蒸発している時間内に、放射性核種を含む元素あるいは特定の放射性同位体のみを吸収される波長のレーザー光を照射することにより、目的の元素あるいは同位体のみをイオン化することによって、電磁的に分離、回収する。この方法による分離は原子力施設の解体等で発生する放射化金属廃棄物の減量に適用できるばかりでなく、核種分離を元素分離に置き換えることにより、一般の合金や金属に含まれる微量元素の量を制御する等への応用が可能である。このような金属の分留とレーザー照射を組み合わせる方法においては、分

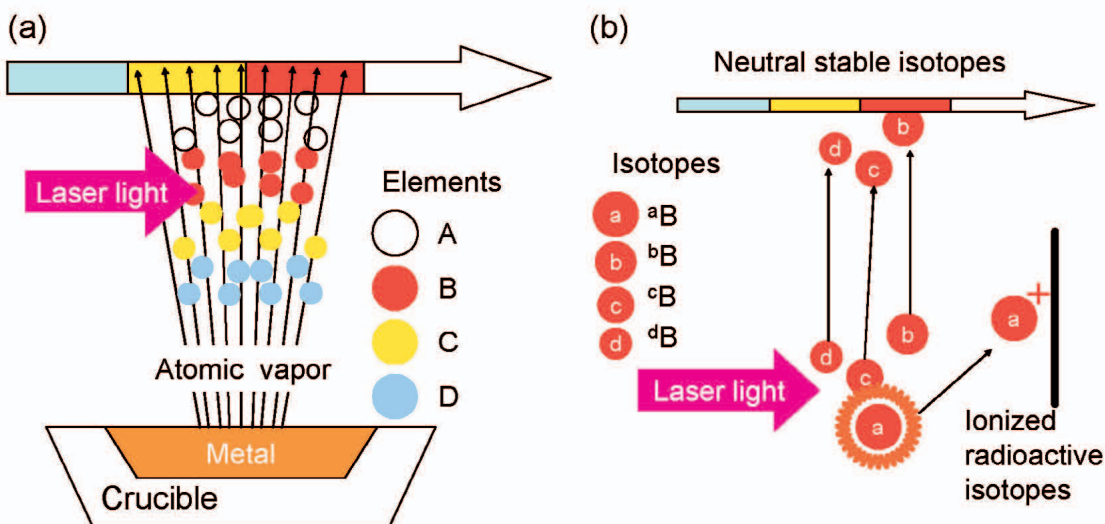
留による分離が非常に重要である。そこで、我々はこのように原子ビーム状に蒸発させた金属の分留をモデル化して、簡単な解析コードを作成し、その検証を行っている。

2. 解析モデル

分留では、高真空中で金属を融点以上に加熱し、液体金属の状態から原子ビーム状に全量蒸発させ、各元素の蒸気圧等の熱特性の違いによる蒸発時刻の差を利用して分離する。このため、分留が行われる系を溶融した液体金属と蒸発した原子から形成される液体と気体からなる混合系とみなすことができる。そこで、それぞれの系について考察する。

(1) 気体の系 (原子ビーム)

最初に、原子ビーム状に蒸発させる気体の系について考える。本方法は蒸発時刻の差を利用して分離することから、蒸発原子と他の時刻に蒸発する原子との混合を低く抑える必要がある。このために、他の元素や真空雰囲気に含まれる他の分子との衝突による拡散等



Distillation.

Vaporization time of each elements is controlled by the crucible temperature.

Laser separation.

Specific isotope is ionized by laser irradiation.

Fig. 1 Process of distillation and laser separation.

を防ぎ、狭い範囲に凝集させるため、原子をビーム状に蒸発させる必要がある。このように原子をビーム状に蒸発させ、狭い凝集面に回収するためには、蒸発面から凝集面までの距離に比べて原子の平均自由行程が十分長い必要がある。蒸発する原子の温度を T 、圧力を P 、分子半径を D とすると、平均自由行程 l は、

$$l = \frac{kT}{\sqrt{2\pi}PD^2} \quad \dots(1)$$

であるから、蒸発する原子の温度 T と圧力 P は以下の関係で表される。

$$\frac{\sqrt{2\pi}D^2l}{k} = \frac{T}{P} \quad \dots(2)$$

但し、 $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/Kはボルツマン定数である。今、多くの金属元素の金属結合半径は2 Å以下であり、イオン半径は更に小さいので、原子半径を2 Åと仮定し、蒸発面から凝集面までの距離を1 mとし、必要な平均自由行程をその10倍の10 m程度と仮定すると、

$$\frac{T}{P} \geq 1.3 \times 10^5 \quad \dots(3)$$

となり、これを満足するときには原子はビーム状に蒸発し、他の原子と衝突すること無しに凝集面に到達することができる。例えば、この式から、 10^{-3} Pa以下の真空中で蒸発する元素はほぼ全てが原子ビーム状に蒸発し、このため蒸発原子は溶液に戻ってくることは無く、溶液に対しては理想気体として振舞うことが判る。

(2) 液体の系（溶融金属）

次に、液体の系について考える。加熱され、融点を超えて液体金属となった放射化金属廃棄物に含まれる放射性核種は非常に微量である。このため、溶媒である母材に微量の放射性核種が溶質として溶け込んだ希薄溶液とみなすことができる。従って、溶媒が極微量の溶質から受ける作用を無視することがで

きる。更に、蒸発した原子はビーム状に蒸発するため溶液に戻ることはない。これらのことから、溶媒を理想溶液と仮定できる。同様に溶質間の相互作用も無視できるが、溶質が溶媒から受ける作用は無視できない。しかし、後で述べるように溶媒中における溶質の活量係数を導入することで、その作用を取り入れることができる。

(3) 解析モデル

これらより、本方法においては、微量の放射性核種を含んだ鋼材が溶融した液体金属を理想溶液、(3)式を仮定できる環境において蒸発する原子をビーム状に蒸発する理想気体としてモデル化できる。

このモデルでは、蒸発原子は蒸発面に戻ってこないので、Langmuirの式を適用することができ、物質 i の蒸発速度は以下の式で表わされる。

$$\frac{dw_i(T(t))}{dt} = 0.0583 \cdot K \cdot P_i(T(t)) \sqrt{\frac{M_i}{T(t)}} \quad \dots(4)$$

但し、時刻 t 、温度 T における物質 i の単位面積あたりの蒸発量を $w_i(T(t))$ 、その混合物質中の分圧を $P_i(T(t))$ とし、原子量を M_i 、蒸発係数を K とした。

一方、溶融した液体金属を理想溶液と仮定できるので、溶質にはHenryの法則が適用でき、溶質 i の分圧を、その原子濃度比率 $N_i(T(t))$ と溶質単体の蒸気圧 $P_i^0(T(t))$ の積で表すことができる。しかし、先に述べたように溶質間の相互作用は無視できるが、溶媒が溶質に及ぼす作用は無視できない。そこで、溶媒中における溶質の存在状態を熱力学的に表す化学ポテンシャルが原子濃度比率に依存し、そのずれの程度が活量係数 γ_i で表わされることから、実質的な原子濃度比率を活量係数と原子濃度比率の積で表わすことによって溶媒が溶質に及ぼす作用を取り入れることができる。これにより、混合溶液から蒸発する

溶質 i の分圧を実質的な原子濃度比率である $\gamma_i N_i(T(t))$ を使って、以下のように表すことができる。

$$P_i(T(t)) = \gamma_i N_i(T(t)) P_i^0(T(t)) \quad \dots(5)$$

ところで、溶液は蒸発により、その原子濃度比率が変化する。そこで、物質 i の初期質量を $w_{i,0}$ 、蒸発面面積を α とすれば、ある時刻 t における物質 i の質量は $w_{i,0} - \alpha w_i(T(t))$ となり、その原子濃度比率は、

$$N_i(T(t)) = \frac{w_{i,0} - \alpha w_i(T(t))}{\sum_{l=1}^n \frac{M_l \sum_{k=1}^n (w_{k,0} - \alpha w_k(T(t)))}{M_l \sum_{k=1}^n (w_{k,0} - \alpha w_k(T(t)))}} \quad \dots(6)$$

となる。

また、物質 i の単体の蒸気圧は以下の VanLaar の式を用いて、温度依存性を与えることができる。

$$\log P_i^0(T(t)) = -\frac{A}{T(t)} + B + C \log T(t) + DT(t) \quad \dots(7)$$

但し、A、B、C、D は定数である。

(5)式から判るように、温度 T が時間 t によらず一定であれば、混合物質のそれぞれの蒸気圧 (分圧) は蒸発源における混合物質のそれぞれの原子濃度比率に比例する。従って、蒸発源に蒸発物質を補充することが無ければ、蒸発により原子濃度比率が変化するため、時刻により蒸気の組成も変化し、分離能力も変化する。

3. 実験結果と解析結果の比較⁷⁾

上のモデルに基づいて Runge-Kutta 法を用いた解析コードを作成し、数値解析を行い、実験と比較した。対象とした合金は、その蒸気圧が 900 K 程度で 1 Pa に達する Mg、Zn と 1700 K 以上にならないと 1 Pa を超えない Al、Cu、Cr で構成されるアルミニウム合金 7075 (超々ジュラルミン: Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-0.25Cr) を選んだ。このように高蒸気圧の Mg、Zn と低蒸気圧の Al、Cu、Cr で構成される超々ジュラルミンは、分留による元素分離が顕著に起こると予想され、数値解析との比較・検証を行うのに適当な金属である。

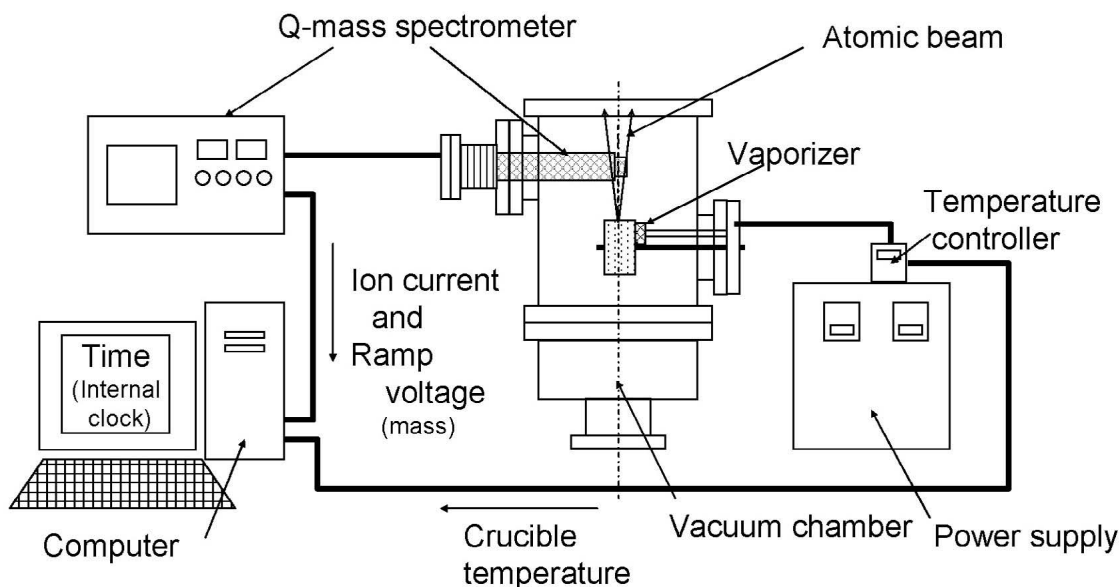


Fig. 2 Experimental set up.

(1) ジュラルミンの分留実験

使用した実験装置の概略図をFig. 2に示す。装置は、ターボ分子ポンプとロータリーポンプにより 1×10^{-3} Pa以下の真空に保たれた真空容器と、その内部に設置された、熱電対(WRe5-26)で測定した温度を元にPIDで温度制御される最高加熱温度1773 Kの抵抗加熱蒸発装置、そして、最大分析質量数400 (M/e) の四重極質量分析計で構成される。蒸発装置は内径8.3mm ϕ 、高さ16mmのPBN(窒化ホウ素)製ルツボとタングステンヒータで構成され、加熱された金属は原子ビーム状に蒸発し、ルツボの中心から高さ128mm上にある質量分析計に導かれフィラメントによりイオン化され、イオン電流が計測される。計測されたイオン電流、質量数に比例するランプ電圧、時刻及びルツボ温度は、分解能12bitのA/Dコンバータを通してコンピュータに取り込まれる。

実験は、市販の超々ジュラルミンロッドから378.7mgを分取し、これを室温から1773Kまで昇温速度200K/hで加熱し、全量蒸発させた。質量分析計は質量数20から70までを200秒で掃引し、時刻、ルツボ温度、イオン電流及び掃引ランプ電圧を200ms毎にコンピュータに取り込んだ。

(2) ジュラルミンの数値解析

数値解析では計算条件を実験条件と一致させた。但し、Alを溶媒、ZnやMg等のその他の微量元素を溶質とし、各成分の活量係数として、それぞれの初期濃度における値を採用した。また、ジュラルミンは理想的に蒸発すると仮定し、その蒸発係数を $K=1$ とした。

(3) 実験結果と数値解析の比較

実験で取り込んだデータのイオン電流を質量数毎に積分し、経過時間について整理した結果をFig. 3 (a) に、その数値解析結果をFig. 3 (b) に示す。実験では、Crが観測され

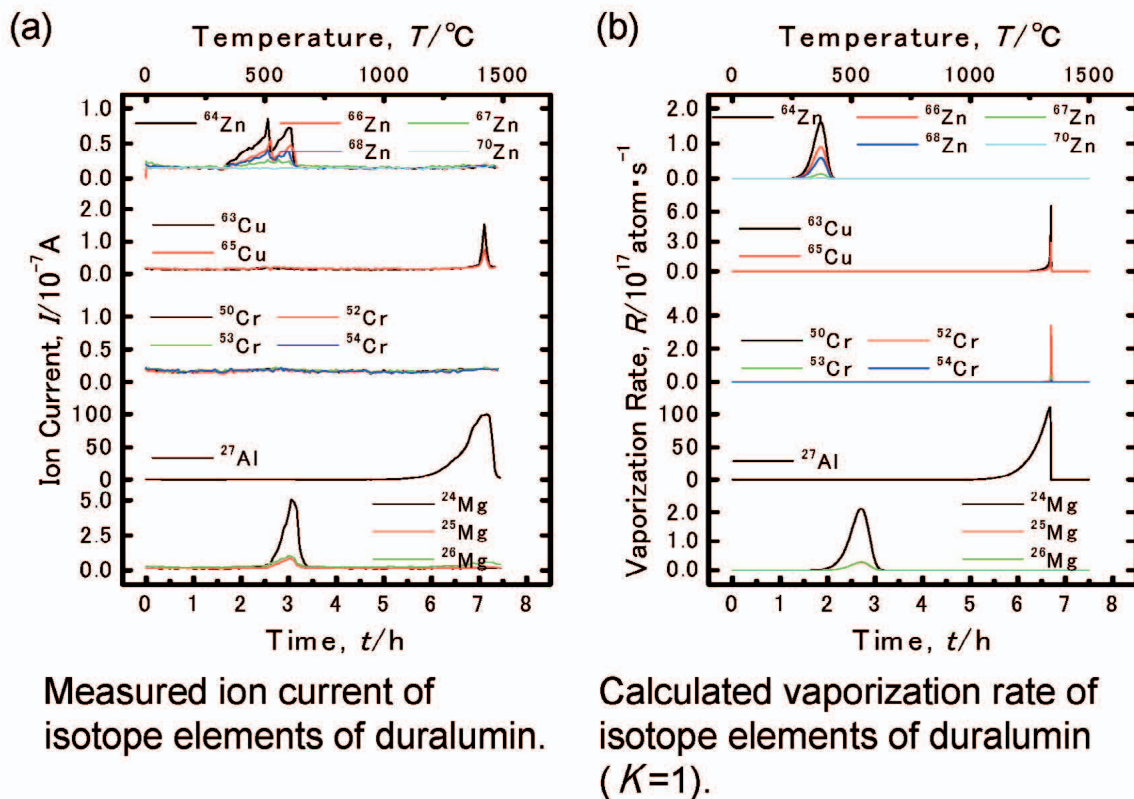


Fig. 3 Characteristics of vaporization of duralumin.

なかったが、これは、Crの含有量が0.25%と少なく、短時間での蒸発であったために、200秒の長い測定インターバルに掛からなかったためである。また、数値解析では現れなかったZnの2つのピークは、ジュラルミンの融点(850K)以下で固体表面から昇華したZnと融点以上に上昇した後に融解したジュラルミンから蒸発したZnとが観測されたためであり、固体からの昇華と液体からの蒸発の2段階で蒸発したことが判る。それ以外の点については実験と数値解析で非常に良い一致をしていることが判る。

これらの結果より、Henryの法則をLangmuirの式に適用した数値解析の結果は、昇華を伴わなければ、実験結果と良く一致することが判った。

4. 放射化金属廃棄物の数値解析⁹⁾

上の実験と数値解析の比較によって、本モデルによる数値解析では、昇華を伴わない溶解した金属からの蒸発を良く再現できることが明らかになった。そこで、融点以上で蒸発させる場合についてJPDRの放射化金属廃棄物である炉内構造物(放射能濃度: $1.0 \times 10^{13} \text{Bq/t}$)を対象に数値解析を行った。更に、放射化金属廃棄物の減量と減量前後の廃棄物の冷却期間について考察を行った。

(1) 数値解析結果

蒸発条件は、単位面積当たりの蒸発量を 10g/cm^2 とし、1800~2600Kまで蒸発速度 200K/h 、4時間で全量蒸発させるとした。また、活量係数は鋼材の最大成分であるFeに対する平均濃度における値を採用し、濃度によらず一定とした。更に、理想的な蒸発を仮定し、蒸発係数を $K=1$ とした。

解析結果をFig. 4に示す。グラフの上2段が安定元素、下3段は放射性核種である。安定核種であり全体の97%以上を占めるFe、Ni、Crは1800~2122Kの間に大部分が蒸発していることが判る。放射性核種である¹⁵²Eu、

¹⁵⁴Eu、⁵⁴Mn及び¹²⁵Sbは蒸発開始直後の1800Kでほぼ蒸発しつくし、¹⁴Cと⁹⁴Nbは2600K近い高温になってから蒸発している。従って、¹⁵²Eu、¹⁵⁴Eu、⁵⁴Mn、¹²⁵Sb、¹⁴C及び⁹⁴Nbは分留によりFeから除去できるが、それ以外の⁵⁵Fe、⁵⁹Ni、⁶³Ni及び⁶⁰Coについては、Feとほぼ同時刻・同温度帯で蒸発するため、分留での除去は困難である。

(2) 放射化金属廃棄物の減量

現在、原子力施設の解体金属廃棄物等の処分を目的として、原子力安全委員会において、放射性物質として取り扱う必要のないもの(クリアランスレベル)の調査・検討が行われ、その処分や再利用等についての基準の作成が試みられている¹⁰⁾。実際、放射化金属廃棄物を減量するためには、それぞれの放射性核種がクリアランスレベルを満足する必要がある。そこで、上の解析結果を元に蒸気中に含まれる放射能濃度を核種毎に計算しクリアランスレベルと比較した。その結果、¹⁵²Euと

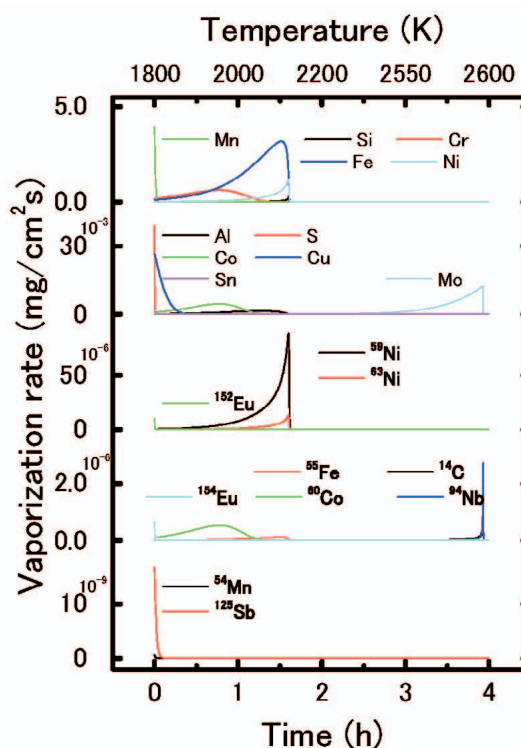


Fig. 4 Vaporization Rate of isotope elements in radioactive metallic waste of JPDR

^{154}Eu については1802Kを超えるとクリアランスレベルを下回り、 ^{14}C と ^{94}Nb については2122K未満でクリアランスレベルを下回ることが判った、従って、1802~2122Kの間に蒸発する成分のみを回収することによってこれら4つの核種をクリアランスレベル以下にすることができる。そこで、蒸発成分を~1802K、1802~2122K及び2122K~の3つに分割して回収するとして、廃棄物中に含まれる放射性核種の元の廃棄物の量に対する割合(Fractional ratio)と放射能濃度及びクリアランスレベルを満足させるために要する期間を計算し、Table 1にまとめた。これによれば1802~2122Kの間には全体の99.2%が蒸発し、上の4つの核種についてはクリアランスレベルを満足させることができる。しかし、その他の核種はクリアランスレベルを満足させることができない。そこで、 ^{60}Co がクリアランスレベルを満足するために要する冷却期間が126年であることから、全ての放射性核種が130年程度の冷却期間でクリアランスレベルを満足するために必要な除去率を核種の半減期から計算した。その結果、 ^{59}Ni について

は、約97%、 ^{63}Ni については約99.7%となった。従って、これら2つのNiの放射性同位元素をレーザー処理等によって更に除去し、130年の冷却期間をおくことにより、放射化金属廃棄物の99.2%をクリアランスレベル以下にでき、残りの0.8%を放射化金属廃棄物として処分すればよいことになる。

一方、これらNiの放射性同位元素の必要な除去率が99.7%であることから、放射能濃度が炉内構造物の0.3%である 3.0×10^{10} Bq/t以下の放射化金属廃棄物や、ニッケルの含有量がSUS304の0.3%以下である炭素鋼等の放射化金属廃棄物については、その中に含まれる放射性ニッケルは130年の冷却期間をおくことで、クリアランスレベルを満足させることができる。従って、このような放射化金属廃棄物については、核種除去をすることなく分留のみで1/100以下に減量できる可能性があることが判る。

(3) 放射化金属廃棄物の冷却期間

これらの結果から、クリアランスレベル比の冷却期間による変化を各放射性核種の寿命より計算した結果をFig. 5に示す。但し、ク

Table 1 Period in which clearance level is satisfied for radioactive metallic waste of JPDR

Elements	~1802K		1802~2122K			2122K~	
	Fractional ratio	Activity (Bq/g)	Fractional ratio	Activity (Bq/g)	Cooling period in which a clearance level is satisfied (years)	Fractional ratio	Activity (Bq/g)
^{14}C	5.63×10^{-18}	9.29×10^{-7}	7.55×10^{-14}	1.25×10^{-2}	<clearance level	6.64×10^{-6}	1.10×10^6
^{54}Mn	1.40×10^{-10}	4.01×10^4	1.52×10^{-12}	4.37×10^2	7.50	0.00	0.00
^{55}Fe	9.32×10^{-10}	8.22×10^4	2.57×10^{-8}	2.27×10^6	16.4	3.11×10^{-11}	2.75×10^3
^{60}Co	2.49×10^{-8}	1.04×10^6	1.46×10^{-7}	6.11×10^6	126	2.47×10^{-19}	1.03×10^{-5}
^{59}Ni	9.66×10^{-8}	2.85×10^2	6.85×10^{-6}	2.02×10^4	3.86×10^5	2.06×10^{-6}	6.08×10^3
^{63}Ni	1.30×10^{-8}	2.73×10^4	9.54×10^{-7}	2.00×10^6	998	3.64×10^{-7}	7.64×10^5
^{94}Nb	2.34×10^{-18}	1.62×10^{-8}	3.01×10^{-14}	2.09×10^{-4}	<clearance level	5.99×10^{-6}	4.16×10^4
^{125}Sb	3.89×10^{-9}	1.49×10^5	1.05×10^{-10}	4.02×10^3	-	0.00	0.00
^{152}Eu	2.39×10^{-6}	1.54×10^7	2.92×10^{-14}	1.88×10^{-1}	<clearance level	0.00	0.00
^{154}Eu	1.52×10^{-7}	1.52×10^6	2.03×10^{-15}	2.03×10^{-2}	<clearance level	0.00	0.00
stable	6.20×10^{-3}	0	9.92×10^{-1}	0	-	2.06×10^{-3}	0

クリアランスレベル比は各放射性核種の放射能濃度をクリアランスレベルで割った値の最大値を取った。従って、全ての放射性核種がクリアランスレベルを満足すれば、このクリアランスレベル比は1を下回る。このグラフから処理前後いずれの場合においても、放射化金属廃棄物は⁶⁰Coの寿命により130年程度で大幅にクリアランスレベル比が下がるが、その後は放射性ニッケルの長い半減期のためクリアランスレベル比が下がらない。特に、処理前 (Before processing) の放射化金属廃棄物はクリアランスレベル比が 10^3 と高い状態で10万年近く続く。また、分留後 (After distillation) も数十万年の冷却期間が必要であるが、¹⁴Cや⁹⁴Nbが除去されているため、クリアランスレベル比は処理前の1/10であり、その毒性は低い。一方、分留とレーザー処理 (Before distillation and laser processing : レーザー処理により⁵⁹Niの97%、⁶³Niの99.7%を除去したと仮定) をした放射化金属廃棄物は130年の冷却期間をおく事によりクリアランスレベルを満足できる。ここで、先に議論した「放射能濃度が炉内構造物の0.3%

である 3.0×10^{10} Bq/t以下の放射化金属廃棄物を分留処理のみ実施した場合」については、この分留とレーザー処理後の放射化金属廃棄物に対応するので、やはり、130年の冷却期間でクリアランスレベルを満足することができる。

このように、分留あるいは分留とレーザー処理を組み合わせることによって、数十万年もの冷却期間が必要な放射化金属廃棄物を130年程度の冷却期間で一般廃棄物とすることが可能になる。

5. おわりに

Henryの法則をLangmuirの式に適用し、原子ビーム状蒸発を用いた真空分留についてモデル化を行い、解析コードを作成した。これを用いて超々ジュラルミン (アルミニウム合金7075 : Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-0.25Cr) の蒸発実験について数値解析したところ、良く一致する結果が得られた。更に、JPDRの解体に伴い排出された放射化金属廃棄物を対象にステンレス鋼 (SUS304) を母材とする炉内構造物について原子ビーム状蒸発を用い

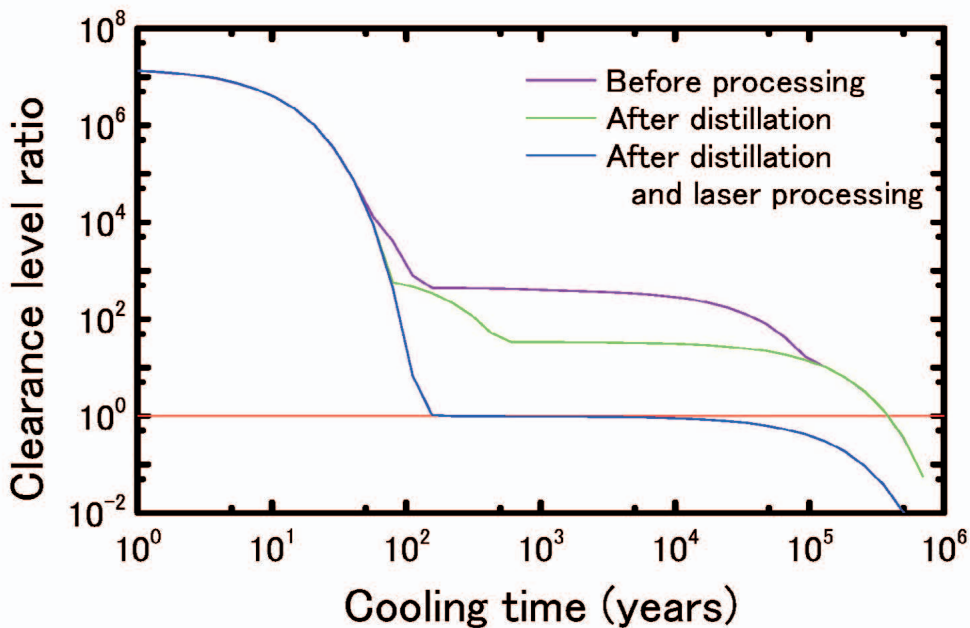


Fig. 5 Clearance level ratio

た分留特性の数値解析を行った結果、分留によって1802~2122Kの間の蒸発物を回収することにより、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu 、 ^{14}C 及び ^{94}Nb を除去することが可能であり、更に、 ^{59}Ni と ^{63}Ni の核種分離による除去を行うことで、クリアランスレベルを満足できることが判った。更に、放射能濃度が 3.0×10^{10} Bq/t以下である放射化金属廃棄物については、分留のみで減量できる可能性があることが判った。なお、本分留方法は、原子ビーム状に蒸発させることが特徴であるが、これは、原子法レーザー同位体分離の蒸発方法と同じである。このため、更に除去が必要な ^{59}Ni と ^{63}Ni については、レーザーを用いた核種分離による除去が利用できると考えられる。

今後、放射能濃度の違いによる放射化金属廃棄物の分留特性の数値解析や分留実験を実施するとともに、分留のみで除去できない ^{59}Ni と ^{63}Ni についてのレーザーを用いた核種分離等による除去方法の検討及び実験を実施する必要がある。また、本解析および実験において、 1 cm^2 足らずの蒸発面積において数gの物質を蒸発させる場合について良く一致することが判っているが、 1 m^2 程度の蒸発面積で数tの物質を蒸発させる必要がある実用規模の分留については、蒸発面の温度分布や熔融金属の熱対流あるいは昇華などを取り入れた、より実用規模に近いモデルによる数値解析の必要がある。

参考文献

- 1) 宮坂靖彦、渡辺正秋、田中貢、他、“JPDR 解体実地試験の概要と成果”、日本原子力学会誌、38 [7]、553 (1996)
- 2) 白石邦夫、助川武則、柳原敏 “動力試験炉 (JPDR) の解体廃棄物データの分析 (受託研究)”、JAERI-Data/Code99-050、日本原子力研究所 (2000)
- 3) 有澤孝、赤岡克昭、“レーザー直接再処理法”、特許番号 2097367
- 4) 丸山庸一郎、赤岡克昭、“放射化された金属廃棄物の減容・減量方法”、特願平15-012087 (2003)
- 5) 赤岡克昭、丸山庸一郎、“金属或いは合金に含まれる微量元素を制御・除去する方法”、特願平15-028127 (2003)
- 6) 赤岡克昭、丸山庸一郎、“金属元素の蒸留の研究—ジュラルミンの元素分別—”、JAERI-Research2003-022、日本原子力研究所 (2003)
- 7) 赤岡克昭、丸山庸一郎、“ジュラルミンの分留特性”、日本金属学会誌68 [2]、181 (2004)
- 8) 赤岡克昭、丸山庸一郎、“放射化金属廃棄物の分留特性の数値解析”、JAERI-Research 2004-012、日本原子力研究所 (2004)
- 9) 赤岡克昭、丸山庸一郎、“原子ビーム状に蒸発させた放射化金属廃棄物の分留特性の数値解析”、日本原子力学会和文論文誌 4 [2]、(2005)
- 10) 原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会、“主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて” 平成11年3月17日