

[ここに入力]

## 資源地政学的核燃料サイクル論

2022年8月

小澤正基

TWY 社、東京工業大学名誉教授

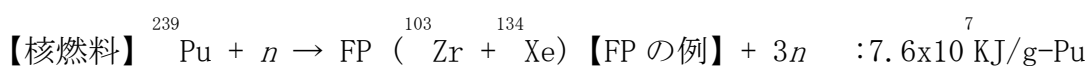
ロシア科学アカデミー・フラムキン研究所名誉教授

英国・王立化学会フェロー

【要旨】核燃料サイクルの技術とシステムを資源地政学的視点から論考した。40 元素 400 核種からなる使用済み核燃料は、核燃料となるプルトニウム ( $^{239}\text{Pu}/^{238}\text{U}$ ) やウラン ( $^{235}\text{U}$ ) の他、白金族金属 (PGM) やレアアース (REE) などのレアメタル、核医学用  $^{99}\text{Mo}$  ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) などの放射性核種を含有する、地政学的リスクフリーの原子力レアメタル鉱脈で、核燃料サイクルは原子力マイパークである。原子力レアメタル・レアアースの選鉱精錬法として溶媒抽出法及び adatom 触媒による電解採取法を概説し、回収 PGM やテクネチウム (Tc) の海水電解水素製造触媒としての利用可能性を示唆した。また高速炉での中性子捕獲反応を利用するテーラーメイドレアメタル創成をシミュレーション評価し、元素変換効率、放射能低減率、生成元素の戦略的価値などの点から、元素変換対象として 19 組の元素系よりプラセオジウム (Pr)→ネオジウム (Nd), テルビウム (Tb)→ジスプロシウム (Dy), テクネチウム (Tc)→ルテニウム (Ru), ロジウム (Rh)→パラジウム (Pd) の 4 系を特定した。資源性 (Resourceability) に基づいた放射性廃棄物のトータルリサイクル (Recycle) と核種・元素の変性 (Metamorphosis) は高速炉核燃料サイクル概念にコペルニクスの転回 (Kopernikanische Wende) を促す。原子力レアメタルの実用化には微弱な放射線・放射能への謂れなき忌諱感の克服が必須であるが、SDGs に向けた自動車産業界におけるネオジウム (Nd)、ランタン (La)、サマリウム (Sm) など天然放射性レアアースの急速な利用拡大がこの新しい地平を切り拓く一つの道標となるのかも知れない。

### 1. 核燃料サイクルの原典

プルトニウム ( $^{239}\text{Pu}$ ) やウラン ( $^{235}\text{U}$ ) の核分裂反応は炭素の燃焼反応に比べ約 230 万倍のエネルギー密度 (J/g) を与え、その 1g は 1~2t の原油に相当する。反応生成物である FP (核分裂生成物) 及び  $\text{CO}_2$  (炭酸ガス) は産業廃棄物となる。原子力は発電にあたりウラン以外の天然資源はほとんど消費せず、温暖化の原因となる炭酸ガス放出による環境汚染も起こさない。



[ここに入力]

これが原子力（核分裂）エネルギー利用の原点であり、経済的にも従来エネルギーと競合するエネルギー源として多くの国での利用が進んできた。もし（1996年当時の）原子力発電量を石油で賄うとしたら毎年5億トンの石油が必要であったし、逆に全ての火力発電の原子力への置き換えができたとしたならば産廃炭酸ガス排出量を年間20億トンずつ減らすことが出来ていたはずであり<sup>1)</sup>、この放出削減が実現していたなら今日のような厳しい温暖化と異常気象（巨大台風など）は軽減されていたであろう。一方、プルトニウムのリサイクル燃焼が可能な高速炉・核燃料サイクルが実現すれば、石油枯渇以降千年に渡るエネルギー源の基盤となりえる。化学的に活性な金属ナトリウム（Na）の取り扱いが難しいが、工学に不可能はない。現に日仏が断念したナトリウム冷却型高速増殖炉をロシアは実稼働させている。化学技術者が奮起しなければ道は開かれない。

**【廃棄物管理の新戦略】** 廃棄物の管理思想は1960年代以降の①希釈→拡散、②濃縮→封入、そして③貯蔵→④崩壊へと変遷する。化石燃料発電の産業廃棄物である炭酸ガスは19世紀から今日まで全量環境に放出されてきたのに対し（即ち、①）、原子力発電の産業廃棄物である核分裂生成物（FP）は、核燃料サイクルの黎明期から今日まで気体及び液体共に、質及び量的に放出が管理されてきたのは事実である。核燃料再処理の過程で、特定の放射性核種については放出基準枠内で環境放出が認められるが（①）、大方はほぼ全量が高レベル放射性廃液（HLW）に濃縮され、ガラス固化した後深地層処分により生物圏から隔離する方式が取られてきた（②）。一般産業廃棄物のPCBなど猛毒ダイオキシン類は極めて安定でその毒性はほぼ永久的に持続するのに対し、核分裂生成物の放射性毒性についてはその約80%が半減期100年以下と短く崩壊、安定化する。しかしながら0.1wt%程度含まれるマイナーアクチニド（MA）を始めとして長寿命核分裂生成物（LLFP）は極めて減衰が遅く、再処理工程でHLWに濃縮後その放射性有害度が原材料である天然ウランと同等まで軽減するのに1万年を要する。かように長寿命の毒性を有する廃棄物の処理・処分は、一般及び放射性を問わず、世代間にまたがる課題である。高レベル放射性廃棄物の処理・処分に関しては、1980年代後半からはガラス固化技術開発と並行し、長寿命核種を選択的に分離し原子炉あるいは加速器に再装荷・照射して安定あるいは短寿命核種に核種変換する研究（P&T; Partitioning & Transmutation）<sup>2)</sup>が、日本、フランスを中心に国家プロジェクトレベルで進められてきた（④の発展型としての分離変換）。分離研究については1988年のオメガ研究（OMEGA; Options Making Extra Gains from Actinides and fission products generated in nuclear fuel cycle）以降、原理実証レベルからプロセス開発レベルへと展開が進み、工学的スキーム構築の為の経済性評価を除けば、*Just-in-time Technology*の技術レベルまで進んでいる。近年、計画中の商用再処理工場へマイナーアクチニド分離機能を付加する実用化の動きが日仏に先んじて中国で出てきており<sup>3)</sup>、戦略的かつ先導的意思決定として注目される。

**【廃棄物から資源へ】** 原子力は電力生産一辺倒のエネルギーシステムではないはずである。地球的環境汚染を抑制しつつ超長期的なエネルギーを保障するという課せられた使命を確実なものにするためには、核分裂生成物イコール産業廃棄物の取り扱いを根本的に見直す必要がある。使用済み核燃料は40元素400核種の集合体であり、個々の元素の物理化学特性に応じた産業資源に、また核種の放射化学特性に基づいた医療資源とするなど、今こそ発想

[ここに入力]

の転換を図らねばならない。日本における放射性同位体 (RI)・放射線の市場規模は、既に 2000 年の時点で原子力発電を上回っていたにも係わらず一般社会の認知度は低いままである。今日癌診断薬として普遍的に使用されているテクネチウム ( $^{99m}\text{Tc}$ ) や、癌治療、滅菌処理及び非破壊検査に広い用途のあるコバルト ( $^{60}\text{Co}$ ) さえも全量輸入に依存している。放射性物質・放射線被ばくに纏わる一般国民の忌諱感は異常なほど大きく、例えばレアアースはウラン及びトリウム (Th) の除染後でないとは輸入できない。コロナワクチン (COVID-19) についても同様だが、製造や取り扱いが厄介な放射性同位体 (RI) や放射性医薬品は必要量輸入すればよいとしてきたが、いつまでも平時の論理が通用するはずもない。2009 年 5 月カナダの RI 製造用原子炉が故障し、 $^{99m}\text{Tc}$  の原料である放射性モリブデン ( $^{99}\text{Mo}$ ) の輸入が長期間途絶えたとき日本の癌治療現場が大混乱したことは記憶に新しい。エネルギー及び医療の安全保障策として一刻も早く有用元素・RI の自給化に取り掛かからないと将来に禍根を残す。核燃料サイクルは従来の「処分」から戦略的「利用」へと、ミッションを転換する時にきている。半世紀前の 1970 年 J. O' M. Bockris は、水素をエネルギー媒体とした原子力及び太陽光と組み合わせによる水素経済社会を究極のエネルギーシステムとして提案している。この水素経済システムでの最大の課題は水素製造であるとして、電解法や放射線分解法の可能性を指摘し、電解法では貴金属電極触媒の代替触媒が無いことが課題であるとした<sup>4)</sup>。本論では核燃料サイクルの白金族金属がその代替電極触媒になることを示すが、セシウム ( $^{137}\text{Cs}$ ) を含む高レベル放射性廃液自体の放射線分解でも水素製造が可能であることを付け加えたい。

## 2. 原子力マインパークとしての核燃料サイクル

[元素の資源地政学] 偏在した資源の独占とそれへのアクセスを巡る競争は、産出国のプレゼンスや外交力を高めるための地政学上の有力な武器となっている。図 1 は地殻を構成する資源元素の対ケイ素 (Si) の相対的頻度である<sup>5)</sup>。重元素になるほど存在率は減少し、銀 (Ag) からはほぼ一定となるものの、存在のバラツキは大きくなる。白金族金属は” Gamow 線” の下方に大きくずれる最稀少元素である。一方上方にずれているレアアースは稀少性よりも偏在性が問題となる。今日軽・重レアアースは SDGs 向け先端産業に不可欠となっておりそれら生産の 95%を中国が占めている (2010-2014 年平均)。白金族金属についてはパラジウム (Pd) の 46%をロシアが、ロジウム (Rh) の 83%及びルテニウム (Ru) の 93%を南アが占め、当該国のほぼ独占状態にある<sup>6)</sup>。ちなみに SDGs 燃料電池触媒として最重要な白金 (Pt) についてもロシアのシェアは 12%と高い<sup>7)</sup>。鄧小平は 1982 年の南巡講話で「中東有石油 中国有希土」と言いレアアースを石油のような資源武器として扱おうと宣言、実際に 2010 年 9 月の尖閣紛争では日本へのレアアース禁輸の挙に出ている。2022 年 2 月に始まったロシアによるウクライナ侵攻戦争では、石油に加え天然ガスも NATO を揺さぶる資源武器となった。また 1992 年には千島列島択捉島北部のクドリャブイ火山 (茂世路岳) の噴出ガスから最稀少元素レニウム ( $\text{ReS}_2$ ) が発見され年間約 500Kg の生産が可能との報道がなされた (2003 年)。レニウムはジェットエンジンの耐熱合金の素材として注目される戦略元素である。このガスにはレニウム 13%の他、ゲルマニウム (Ge) 34%、インジウム (In) 45%及び金 (Au) 4%など有価

[ここに入力]

元素が含まれるとされる<sup>8)</sup>。北方領土における有用レアメタルの存在は、日露間の領土返還交渉におけるロシア側の論点の一つであろう。図中示したように、高レベル放射性廃液(使用済み核燃料)には原子番号34セレン(Se)～原子番号65ジスプロシウム(Dy)までの核分裂生成物レアメタル(以降、原子力レアメタルと総称す)が分布し、白金(Pt)或いは金は無いものの、軽白金族金属のルテニウム、ロジウム、パラジウムは豊富で一般鉱石と比べた場合においても高品位である。同様にテクネチウムは自然界には存在しないⅦ族の放射性元素であり、もし同族レニウムと類似した物理化学的特性を活用できるのであればレニウムの代替金属となって、懸案のレニウムの資源地政学的価値を軽減することができるはずである。因みにレニウムも半減期  $4.5E+10y$  の長寿命放射性核種  $^{187}\text{Re}(\beta^-)$  を 62.60%含むため、天然の放射性元素である。一般に資源国ほど地政学的な資源戦略や枯渇に敏感である。筆者は2018年、ロシア人科学者と共著で原子力レアメタルの分離と利用技術の現状をまとめたモノグラフをロシア D. I. メンデレーエフ大学から上梓している<sup>9)</sup>。

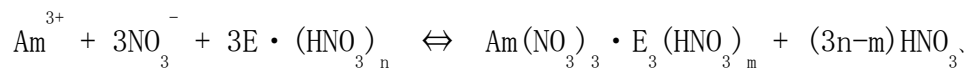
**[原子力レアメタルの本性]** 使用済み核燃料に含まれる40元素400核種の内、31鉱種が原子力レアメタルでありそれらの核分裂収率は原子番号に対し凸型である。例えば標準的(燃焼度  $33\text{GWd/t}$ , 3年冷却)軽水炉使用済み燃料1tには、ウラン955Kg、プルトニウム10Kg、マイナーアクチニド(Np, Am, Cm)0.7Kgに対し、核分裂生成物は34Kg含まれる。その内、レアアースはプルトニウムとほぼ同量の10Kg、白金族金属(Ru, Rh, Pd)は4Kg、テクネチウム1Kg、モリブデン3Kg、カルコゲン(Se, Te)0.7Kgと豊富である。核分裂生成物の生成量は燃焼度に比例して増加するので、高燃焼度高速炉使用済み燃料の場合パラジウムやロジウムは天然鉱石に比べ1千倍以上の高品位となる。謂わば、使用済み核燃料・高レベル放射性廃液は「原子力鉱脈」、核燃料サイクルは「原子力マイパーク」と称して過言ではない。図2は高速炉使用済み燃料(MOX燃料内炉心, 燃焼度  $150\text{GWd/t}$ )1tに含まれる核分裂生成物放射能(Bq)の経時変化を示している<sup>10)</sup>。炉停止時には全元素放射性であるが、放射能は核種固有の半減期に応じ減衰する。白金族金属については、高放射性ではあるが半減期が1年程度で極めて短寿命のもの(Ru, Rh)、長寿命ではあるが放射性毒性が低いもの(Pd, Tc)に二分される。モリブデン、インジウム、及びジスプロシウムの比放射能(Bq/g)は5年冷却後の取り出し時にはほぼゼロ(非放射性)にまで減衰しており分離直後から工学利用を見通すことができる元素群である。ランタン(La)及びネオジウム(Nd)の比放射能はそれぞれ0.001(Bq/g)、0.01(Bq/g)となっており共に、天然のランタン及びネオジウムが持つ放射能レベル以下である。比発熱量(Watt/g)に関してはマイナーアクチニドのキュリウム(Cm)が2.25(Watt/g)と特段に高く、欧米ではセシウム( $^{137}\text{Cs}$ )、ストロンチウム( $^{90}\text{Sr}$ )などと共に熱源あるいは線源としての利用が実用化している。因みにアクチニドはキログラム量の二酸化プルトニウム( $^{238}\text{PuO}_2$ )がアポロ宇宙船やカッシーニ土星探査機のアイソトープ電池(RTG)として用いられたように、深宇宙探査機の熱・電源としても活用されている。都市鉱山についてのコンセプト“混ざればゴミ、分ければ資源”は原子力鉱脈にも当てはまる。都市鉱山はエレクトロニクス製品ゴミ中のレアアースを主な対象としてエントロピーが極限的に拡大した社会的条件下での分別回収であるのに対し、原子力鉱脈のレアメタルは、高品位ではあるが高レベル放射性廃液中に共存する強烈な放射能、特にアクチニドとの相互分離が最大の

[ここに入力]

制約となる。次章では原子力レアメタルの分離・利用及び元素変換の基礎研究を例示する。

### 3. 原子力レアメタルの元素戦略

[MA・レアアース分離技術] 再処理工程では使用済み核燃料中の核分裂生成物レアメタルは硝酸により大方が溶解し、PUREX 抽出剤 TBP (Tri-*n*-Butyl Phosphate) に対し、RuNO<sup>3+</sup>, Zr<sup>4+</sup>などを除いて、非抽出性であるため 3 価マイナーアクチニド MA<sup>3+</sup>とともに高放射性抽残液 (HAR) に排出される。一部未溶解分は不溶解残渣となるが清澄後、高放射性濃縮廃液に纏められる。高放射性抽残液からの MA<sup>3+</sup>の分離研究は TBP 以上に抽出能の優れた抽出配位子を創出する方向で進められ、70 年代初頭ごろから単座配位子 (DIDPA, DBBP, TRPO; 第一世代型抽出剤)、80 年代後半辺りから二座配位子 (DIAMIDE, CMPO; 第二世代型)、さらに多座配位子 (TODGA 他; 第三世代型) へと進んでいる。CMPO-TRUEX 法については 3 つの CMPO 分子 (E) が MA<sup>3+</sup> (Am<sup>3+</sup>) と硝酸根 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) の中性イオン対をキレート抽出することで進むが、



$$\text{E: } 0 \leq [\text{iB}]\text{CMPO}, n+m \leq 5,$$

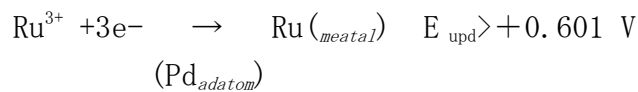
Ce<sup>3+</sup>などの 3 価レアアースも共抽出される。本法の主な利点は、CMPO 分子内の P=O ドナーが主として MA<sup>3+</sup>を、C=O ドナーが競合する H<sup>+</sup>の抽出を受け持つメカニズムにより廃液の硝酸濃度 (2.5~3M HNO<sub>3</sub>) を希釈しなくて済むこと、CMPO に相改質剤として TBP を混合することにより抽出錯体の溶媒和が増し第 3 相生成を抑制できる点である。また CMPO は生物学的毒性が低く取り扱いが容易であり、火災爆発に対する安全性も高いのも有利な点である。本法では高放射性抽残液中の >99.9% の <sup>241</sup>Am<sup>3+</sup> (α 核種) の回収を実証している。90 年代以降原子炉 (核変換) と燃料サイクル (分離) の整合性が検討された結果、中性子捕獲により炉心性能を低下させる振る舞いをするレアアース (4f 元素) 群の除染がマイナーアクチニド (5f 元素) の核変換における最重要課題であることが認識され、両イオングループ間の僅かなソフト性の違いを利用する N 原子や S 原子などソフトドナーを有す配位子 (DTPA、TPTZ や Cyanex301 など) による Inter-group 分離研究が進められた。水溶性 DTPA を TRUEX 法に組み合わせた SETFIX 法ではレアアースの約 80% が除染され、Cyanex301 では pH3.4 の条件で分離係数 SF<sub>Am/Eu</sub> 約 6,000 を確認した<sup>11)</sup>。イオン交換法については、3 級ピリジン樹脂による実照射済み核燃料溶解液を用いての分離結果<sup>12)</sup>として、マイナーアクチニド (<sup>241</sup>Am) 製品に対するレアアース (<sup>155</sup>Eu) の分離係数; SF<sub>Am/Eu</sub> > 100,000、純度; (<sup>144</sup>Ce, <sup>155</sup>Eu)/<sup>241</sup>Am < 0.3ppm、更にキュリウム (<sup>243</sup>Cm) との分離係数; SF<sub>Am/Cm</sub> > 2,200 がそれぞれ実証されている。イオン交換樹脂法は少量のスループット下における精密分離に優れている。レアアース 4f 元素を製品とする場合においてもアクチニド 5f 元素の高除染は必要であり、大量スループット下の分離に優れる溶媒抽出にイオン交換樹脂による精製を組み合わせたハイブリッド分離法が有望と考えられる。

[白金族レアメタルの分離回収と利用] レアメタル核分裂生成物の分離については、オメガ研究の一環<sup>13)</sup>として 80 年代以降、吸着法、沈殿法及び電解採取法など諸法についての検討が進められた。電解採取法によるパラジウムの分離は、

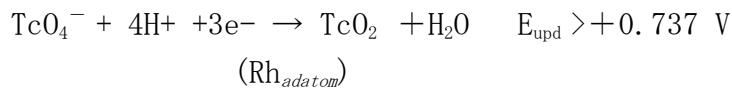
[ここに入力]



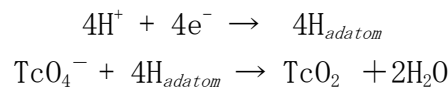
と極めてシンプルで、基本的に化学試薬は必要としないので放射性二次廃棄物は発生しない。また酸性溶液中では電気化学的に卑な *4f5f* イオンは基本的に共析しないので、 $\alpha$  汚染はなく実用化に向け極めて有利な方法といえる。再処理技術を元素戦略的視点で見直し新構想 Adv.-ORIENT Cycle (ORIENT: Optimization by Recycling Instructive Elements) <sup>14), 15)</sup> を国家基幹技術 (一般会計 FBR サイクル技術) として提案した。触媒的電解採取法 (CEE: Catalytic Electrolytic Extraction) <sup>16), 17)</sup> は、白金電極上に  $\text{Pd}^{2+}$  から析出した  $\text{Pd}_{\text{adatom}}$  が、 $\text{Ru}^{3+}$  など難電析 PGM 及び  $\text{TcO}_4^-$  の UPD (Under Potential Deposition;  $E_{\text{upd}} - E_{\text{eq}} > 0$ ) を著しく促進する現象に基づき、回収したパラジウムあるいはロジウムを再び電析触媒イオンとしてリサイクル添加して最終的にテクネチウムを加えた軽白金族金属三種を回収する方法である。



興味深いことに  $\text{Rh}_{\text{adatom}}$  もまた  $\text{Ru}^{3+}$  の他、 $\text{TcO}_4^-$  や  $\text{ReO}_4^-$  の UPD も促進する。



ここでテクネチウム酸化物の析出域は白金電極の水素発生電位域と一致することから電極表面での  $\text{H}_{\text{adatom}}$  による  $\text{TcO}_4^-$  の直接還元反応も寄与しているものと考えられる。



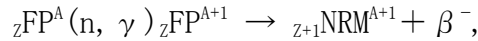
なお、ルテニウムやテクネチウム、レニウムの adatom には他イオンの UPD 促進効果は見られない。高レベル放射性廃液 (0.5M  $\text{HNO}_3$  に希釈) の通常電解では、酸化還元電位の貴なパラジウム及び銀 (Ag) の回収率は  $>85\%$ 、セレン (Se) は  $>50\%$  に達するが、レニウム、テクネチウム、ルテニウム及びロジウムは  $10\sim 20\%$  に留まる。しかしながら触媒的電解採取法 (単味電解試験) では格段にそれらの回収率が高まり、例えばルテニウムについては  $>90\%$  の回収が可能となる。また長寿命核分裂生成物のテルル (Te) も本法で回収できる。

通常 UPD 金属で修飾した電極の触媒活性は増大する <sup>18)</sup>。  $\text{Pd}_{\text{adatom}}$  による混合析出物は凝集粒状を呈し、比表面積が大きく安定である。アルカリ水電解による水素発生反応では、回収した Ru/Rh/Pd/Re 4 元素混合析出電極は白金黒電極の触媒活性とほぼ同等、平滑白金電極を 3 倍程度上回る高活性を得ている <sup>19), 20)</sup>。また人工海水からの水素製造実験でも 4 元系電極の水素発生開始電位は平滑 Pt 電極に比べ、約 0.6V 貴側にシフトしており、これはより少ないエネルギー負荷で多くの水素が得られることを示唆する。この 4 元系電極ではパラジウムが比表面積の増大を、UPD したルテニウムが触媒活性の向上をそれぞれ受け持つ 2 元触媒のメカニズムを提示した。放射性廃棄物を触媒に用いた海水電解による水素製造 <sup>21)</sup> は、Bockris が唱えた原子力と水素の両非炭素エネルギーをブリッジする構想に寄与できるポテンシャルがある。本質的にテクネチウムの水素過電圧  $\eta$  は約 200mV と低い上に UPD したテクネチウムはレニウムと同等以上の水素製造触媒活性を有することを実証できたので、将来的にテクネチウムが戦略元素レニウムの代替となる可能性は十分高いといえる。

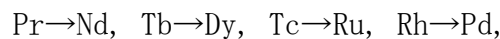
[原子炉を利用する新レアメタルの創成] ルドルフ 2 世が統治した 16~17 世紀の神聖ローマ

[ここに入力]

帝国プラハでは、錬金術 (ALCHIMIA) 即ち “化学” による元素変成 (METAMORPHOSIS) が隆盛したが結局は夢に潰えた。前述の Adv. ORIENT Cycle が放射分離化学に基づく元素戦略構想であったのに対し、核分裂生成物を核物理的手法によって元素変換し、放射能が大幅に低減あるいは消滅した生成元素を資源として利用する構想を【Après ORIENT】として提唱した<sup>22)</sup>。その要諦は高速炉ブランケット部にターゲット核分裂生成物  ${}_Z\text{FP}^A$  を装荷し大量の余剰中性子により中性子捕獲反応、



を生じせしめ、生成レアメタル ( ${}_{Z+1}\text{NRM}^{A+1}$ ) を得る。この所謂テーラーメイドのレアメタルは、これまでの長寿命核種の核変換処理において  ${}_Z\text{FP}^A$  の減少 (核変換率) が重要であったのに対し、生成レアメタル  ${}_{Z+1}\text{NRM}^{A+1}$  の収量や属性、放射化学特性が重要となる。核変換率は中性子エネルギーの関数である中性子捕獲断面積  $\sigma$  (E) と中性子束  $\phi$  (E) の積  $\sigma \cdot \phi$  に比例するが、 $\sigma$  (E) は物理的固有値なので、中性子束  $\phi$  (E) のみ人為的制御可能因子となる。このためには原料ターゲット  ${}_Z\text{FP}^A$  の  $\sigma \cdot \phi$  が生成レアメタル  ${}_{Z+1}\text{NRM}^{A+1}$  の  $\sigma \cdot \phi$  より大きくなるようなエネルギー依存中性子束  $\phi$  (E) 条件を見出す必要があり、適切な中性子減速材の選択が重要になる<sup>23)</sup>。減速材としては減速能力の大きい軽核種だけではなく、高い共鳴散乱断面積を持ち特定のエネルギーのみ減速させることのできる中・重核種の選定とそれらの組み合わせがポイントとなる。18種の核分裂生成物についての元素変換シミュレーション結果と評価を表1に示す<sup>24)</sup>。ここでは変換効率 A (%/y)、放射能低減率 B (—)、生成レアメタル  ${}_{Z+1}\text{NRM}^{A+1}$  の比放射能 (Bq/g) の数値指標の他、日本におけるレアメタルの供給リスク並びに米 DOE が示す資源地政学的供給リスクを組み合わせで評価する。表に示す軽水炉及び高速炉による予備的評価で、 $A > 1\%/y$ 、 $B < 1/100$  及び生成レアメタルの比放射能が BSS 免除レベル EL を下回るに要する時間  $C < 5$  年を満足値と置くと、



4 ペアアの元素変換は A, B, C 全ての指標を満足する。なお核分裂生成物ではないがタングステン → レニウム ( $\text{W} \rightarrow \text{Re}$ )<sup>25)</sup> も A 及び C を満足する。また軽水炉のバーナブルポイズンであるガドリニウム (Gd) が中性子捕獲する際生ずる  $\text{Gd} \rightarrow \text{Tb} \rightarrow \text{Dy}$ <sup>26)</sup> の元素変換も有望と考えられる。なおこの中性子捕獲反応による元素変換の検証に向け、カリフォルニア大学アーバインの TRIGA 炉を用いての先行照射実験を行っている<sup>27), 28)</sup>。

二つの元素戦略を統合したコンセプトを図3に示す<sup>29)</sup>。Adv. ORIENT cycle 構想では高レベル放射性廃液から、比放射能  $10^{-2}\text{Bq/g}$  以下の極低あるいは非放射能レアメタルのモリブデン、インジウム、パラジウム及び一部レアアース (ランタン (La), ネオジウム (Nd), ジスプロシウム (Dy) の 6 鋼種【一次原子力レアメタル】を分別的に抽出し社会に供給する。比放射能  $10^8\text{Bq/g}$  以上の極高放射能のレアメタルは再度原子炉に再装荷し、ルテニウム、ロジウムなどの高価値・低放射能レアメタル【二次原子力レアメタル】に元素変換後、それぞれの BSS 免除レベルに応じた利用先に供する。ターゲット  ${}_Z\text{FP}^A$  及び生成レアメタル ( ${}_{Z+1}\text{NRM}^{A+1}$ ) の分離法としては上述の方法が有効であるが、それ以外の例えば  ${}^{137}\text{Cs}$ 、 ${}^{90}\text{Sr}$  の分離にはゼオライト吸着材や新規の大環状化合物樹脂によるイオン交換法などが可能である。商品化に向けての分離・精製には各単位操作の特徴に合わせた合理的組み合わせが必須とな

[ここに入力]

ろうが、ゴミを分別処理するのに結果としてゴミ（放射性二次廃棄物）が増えるのは本末転倒である。分離プロセス構築にあたってはグリーン・ケミストリーや高速炉再処理研究で培った Salt-free 技術<sup>30)</sup>が有効であろう。

#### 4. 核燃料サイクルのコペルニクスの転回

[安全保障力としての原子力・核燃料サイクル] 南欧や米では異常熱波による広域な山火事が頻発し、日本では線状降水帯などによる風水害が続いている。2022年夏、温暖化ガス排出に起因すると考えられる環境悪化は極限に達した感がある。このような惨状下においても人類は化石燃料（石油、石炭及び天然ガス）エネルギーの呪縛から逃れることができない。それどころかウクライナ侵略戦争ではロシアはドイツなど NATO 諸国に対し、天然ガスの供給遮断を恫喝に用いている。2015年に始まった SDGs 運動は太陽光発電など再生可能エネルギーへの傾斜を強く促すが、原子力エネルギーを否定するものではない。しかしながらドイツは電力不足が懸念される中でも一度決めた脱原子力の流れを変えることができない。日本の電源構成（2020年度）における化石燃料依存率は75%を超え、原子力の割合は僅か3.9%に過ぎない。それにも係わらず原発再稼働への足踏みは続き、六ヶ所再処理工場の運開はいつになっても見通せない。一方、主要国の内フランス、ロシアは原子力を維持・推進する一方、アジアでは原子力は“中国の宝、ベトナムの夢”と言われて久しく、UAEなど中東の産油国での原子力開発が進む。“エネルギーの他国依存がある限り一国の独立はあり得えず、国民生活の発展、福祉の向上もない”とのフランスの政策<sup>31)</sup>は終始一貫ブレないように見える。これはキュリー夫人以降の“原子力開発における旗手の座は他国には明け渡さない”という矜持の所以であろう。易しい化石燃料発電は開発途上国に残し、難しい核燃料・先端エネルギーは先進国が受け持つ分担論も一定の説得力を持つ。この文脈では、長期停滞が続き将来的には脱原子力（fade out）に向かう日本は既に先進国から脱落しつつあるといえる。ところで、原子力を民生利用している国、とりわけ再処理能力（即ち、プルトニウム分離技術）を保有する国は潜在的核保有国であって、核兵器を実保有しないまでも少なくとも敵対国になんらかの疑念を抱かせること自体抑止力になりうるという安全保障の捉え方<sup>1)</sup>がある。核分裂生成物（<sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr など）を通常爆弾に混ぜれば、破壊力は小さいが相手に対して心理的、社会的ダメージを与える“放射化学兵器”となり、核兵器使用に対しての一定の抑止効果はあるとされる。ウクライナ侵略戦争では、ロシア軍がウクライナの原発を占拠しているが、核攻撃に対する報復兵器としての放射化学兵器の製造を恐れたためではないか。一般論として国家力は A[領土、人口、経済力、防衛力] x B[戦略、意思] の関数とされるが、さらに C[資源・エネルギー] や [食料] の因子も加えるべきであろう。C 因子と [情報] を制するものは世界を制すとのテーゼがある。ちなみにロシアは A・B が強大にして [食料及びエネルギー自給率] も 130% を超えており「富国強兵」を達成したかに見える。加えて世界で唯一ナトリウム冷却高速増殖炉を稼働させ、Akademik Lomonosov と呼ばれる海洋浮揚型原子力発電所を実用化したことにより、数十年～百年先に訪れる石油文明の終焉に向け着々布石を打っているように思われる。大地震・津波被災国日本こそ浮揚型原発を導入するメリットは大きいのだが、専門家レベルの議論にさえなっていないのは残念である。津波による福島第一原子



[ここに入力]

力発電所事故や放射性廃棄物処分に対する社会的不受容さだけを捉え、これまで築き上げた原子力・核燃料サイクル(プルトニウム)を放棄するようなことになれば国家力を衰弱させる方向に突き進むことになることは間違いない。

【創資源型核燃料サイクルへ】上述の地球温暖化や資源の枯渇・占有がもたらす危機的状況は Autophage (自食) と Struchian (ダチョウ) の二つに比喻される<sup>4)</sup>。ダチョウは危機の際頭を砂に突っ込んで、迫りくる危険を直視しない人々の象徴で、危機にまるで気が付かない(ふりをする)タイタニック号の乗客に例えられる。市民感情が政策を支配するようなダチョウ国家では破滅的状況が切迫してもそれを打破する発想の転換や技術革新は起こりそうもない。核燃料のウランやプルトニウムのリサイクルに加え、高レベル放射性廃棄物から白金族金属やレアアースを取り出し利用する。更に高速炉では中性子捕獲反応を利用したテラーメードのレアメタル創成を行う。これは核燃料サイクルのコペルニクスの転回(Kopernikanische Wende)を意味する。天然のレニウム始めレアアースのランタン、ネオジム、サマリウム(Sm)及びガドリニウム(Gd)は、元来放射性であるにも関わらず図4に示すようにハイブリッド電気自動車などSDGs自動車産業などで広範に使用されている。レアアースやRIの核医学利用などが進み微弱の放射能・放射線に対する過剰の恐怖心・トラウマが克服されるなら、資源地政学的リスクのない原子力レアアースが代替する時が来るかもしれない。資源性(Resourceability)に基づいた放射性廃棄物のトータルなリサイクル(Reuse)によって、放射性廃棄物も質量ともに軽減するので処分上のリスク(Risk)も減らすことができる。

プルトニウム(<sup>239</sup>Pu)は千年持続する高密度エネルギー媒体で、高レベル放射性廃棄物はレアメタル鉱脈となり、高速炉はテラーメードのレアメタルを創成することができる。正に核燃料サイクルは地政学的リスクのない、究極の資源・エネルギーシステムといえる。多くのApollo探査船が持ち帰った300kg以上の月面岩石サンプルには”Kreep”と称される元素群(カリウム(K)、レアアース(REE)、リン(P))が含まれ、最近の月面センシングによれば核燃料物質のトリウム(Th)(及びウラン)が特に表側に偏在していることが明かにされている<sup>32)</sup>。“耕雲種月”のごとく、米中の宇宙開発戦略が月面の核燃料やレアアース資源(宇宙鉱脈)まで視野にいれているとしたら、これまで述べてきた原子力鉱脈の方が実用化までの道程ははるかに容易であろう。五言絶句”登鶴鵲楼“

“白日依山盡 黃河入海流  
欲窮千里目 更上一層樓”

は千里先を見極めるためには更なる高みに昇らなければならないと解される。非核保有国の中で日本だけが幸運にも核燃料サイクルを保有できている。千年先までの地政学的リスクフリーのエネルギーとレアメタル資源を確実なものにするためには、サイクル概念のコペルニクスの転回とそれを支える技術の高度化が急務となる。

#### 【参考文献】

1) ジャック・アタリ, 「核という幻想」, (株)原書房, 1996年5月.

[ここに入力]

- 2) 「総説 分離変換工学」 分離核変換工学専門委員会, 社団法人日本原子力学会, 2004年2月.
- 3) China Institute of Atomic Energy at ASNFC2019 The 5<sup>th</sup> China-Japan Academic Symposium on Nuclear Fuel Cycle, Harbin, China, July 2019.
- 4) J. O' M. Bockris, 「エネルギーオプション」, 技報堂出版(株), 1982年7月
- 5) Masaki Ozawa and Mikael Nilsson, "Transmutation of Radioactive Waste into Resource, as *Kopernikanische Wendung*", 247<sup>th</sup> ACS National Meeting and Exposition, Industrial and Engineering Chemistry R&D in Processes for Waste Recycling and Metal Recovery" Symposium in Honor of Professor Jan Rydberg", March 18, 2014, Dallas, Texas.
- 6) ギョーム・ピトロン, 「レアメタルの地政学-資源ナショナリズムのゆくえ-」, (株)原書房, 2020年3月.
- 7) Anthony King, Russian invasion of Ukraine shakes global supply chains, CHEMISTR WORLD, pp.5, Vol.19, Issue 4 April 2022.
- 8) ID. Troshkina, et al, "Rhenium Metallurgy" (in Russian), HAYKA, Moscow, 2007.
- 9) Rare Elements in Nuclear Fuel Cycle (Редкие элементы в ядерном топливном цикле), Irina Troshkina, Masaki Ozawa, Konstantin E. German, Monograph in Russian, D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, April 2018 ISBN ; 978-5-7237-1600-1.
- 10) Shinichi Koyama, Tatsuya Suzuki, Masaki Ozawa, "From Waste to Resource, Nuclear Rare Metals as a Dream of Modern Alchemists", Energy Conversion and Management 51, 1799-1805 (2010).
- 11) C. Hill, C. Madic, P. Baron, M. Ozawa, Y. Tanaka, Trivalent minor actinides/lanthanides separation, using Organophosphinic Acids, *Journal of Alloys and Compounds* 271-273 (1998) 159-162.
- 12) M. Ozawa, S. Koyama, T. Suzuki and Y. Fuji, Innovative Separation Method for Advanced Spent Fuel Reprocessing Based on Tertiary Pyridine Resin, *The Czechoslovak Journal of Physics*, Vol. 56, Suppl. D, Part II, pp. D579-587 (2006).
- 13) Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Status and Assessment Report, pp. 130, Synthèse des travaux, OECD/NEA, Publication date: May 1999
- 14) 小澤正基, "徹底分析 使用済み核燃料からの有用な稀少金属の活用を考える", 「エネルギーレビュー」, 2010年5月号, pp. 42-46 (2010).
- 15) 小澤正基, "先進オリエントサイクルの研究戦略", 特集-先進オリエントサイクル研究構想の進展を-使用済み燃料からレアメタル・レアアースの分離・回収, 「原子力 eye (Nuclear Viewpoints)」 Vol. 56 No. 10, pp. 7-11 (2010年10月号).
- 16) Masaki Ozawa, Yuichi Sano, Chisako Ohara, Takamichi Kishi, "Radioactive Wastes Minimization by Electrolytic Extraction and Destruct-

[ここに入力]

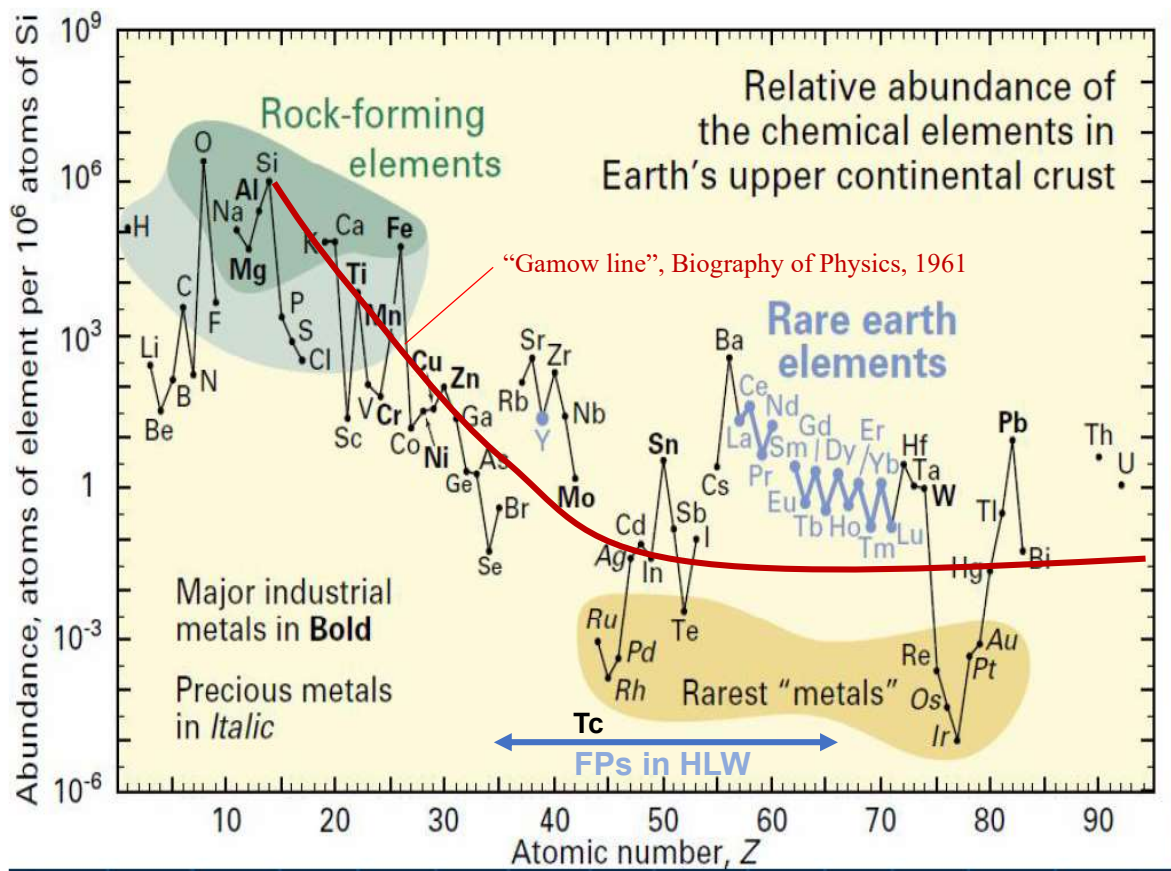
- ion in a PUREX-TRUEX Actinide Separation System”, Nuclear Technology, May 2000, Vol.130, No.2, pp196-205 (2000).
- 17) M. Ozawa, M. Ishida, Y. Sano, “Strategic Separation of Technetium and Rare Metal Fission-Products in Spent Nuclear Fuel”, Radiochemistry, 45, No.3, pp.225-232 (2003).
- 18) 瀬尾眞治, “アンダーポテンシャル析出と金属腐食反応”, 材料と環境、61, 341-348(2012).
- 19) Masaki Ozawa, Shinichi Koyama, Tatsuya Suzuki and Yasuhiko Fujii, “Separation and Utilization of Tc and Other Rare Metal Fission Products by an Extended Aqueous Reprocessing”, *Journal of Nuclear and Radiochemical Science*, 6, No.3, pp275-278 (2005).
- 20) Masaki Ozawa, Akihiko Kawabe, Reiko Fujita, “Separation and Utilization of Fission Products in Nuclear Fuel Cycle as Hydrogen Production Catalyst”, 水素エネルギーシステム, 33, No.1, pp.35-41(2008)
- 21) 特許 3549865 号「使用済核燃料中の希少元素 FP の分離回収方法およびこれを利用した原子力発電-燃料電池発電共生システム」小澤正基, 佐野雄一, 篠田佳彦, 登録日 2004/4/30, 米国登録番号 6793799 登録日 2004/ 9/21, 英国登録番号 2382591 登録日 2005/4/1, 3 仏国登録番号 0208118 登録日 2006/3/3, 露国登録番号 2242059 登録日 2004/12/10.
- 22) Masaki Ozawa, “Après ORIENT, A New P&T Challenge to Transmute Radioactive Wastes into Resources”, The 2nd China-Japan Academic Symposium on Nuclear Fuel Cycle (ASNFC 2013), Abstract Book, pp64-65, Nov.27- Nov.30 2013, Shanghai, China
- 23) HAN Chi Young, OZAWA Masaki, SAITO Masaki, Resourceability on Nuclear Fuel Cycle by Transmutation Approach, SCIENCE CHINA Chemistry (SPECIAL TOPIC: Nuclear Fuel Cycle Chemistry), Vol.55 No.9, pp.1746-1751, September 2012.
- 24) Masaki Ozawa, Après ORIENT cycle, “A Resource-oriented P&T program on Fission Products”, Program and Abstract, 2B-16, pp.98, *The 3<sup>rd</sup> Japan-China Academic Symposium on Nuclear Fuel Cycle (ASNFC2015)*, 2<sup>nd</sup> -5<sup>th</sup> December, 2015, Tokyo Institute of Technology, Japan.
- 25) Tsugio Yokoyama, Yuki Tanoue, Atsunori Terashima and Masaki Ozawa, “Production of Rhenium by Transmuting Tungsten Metal in Fast Reactors with Moderator”, 159-165, Vol.10 No.3, Mar., 2016. *Journal of Energy and Power Engineering* ISSN 1934-8975, USA, David Publishing Company (2016)
- 26) Yuki Tanoue, Tsugio Yokoyama and Masaki Ozawa, “Resource Evaluation of Heavy Rare Earth Derived from the Spent Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Burnable Poison in LWRs”, 237-241, Vol.10 No.4, April 2016, *Journal of Energy and Power Engineering* ISSN 1934-8975, USA, David Publishing Company (2016)
- 27) Atsunori Terashima, Leila Safavi-Tehrani, Mikael Nilsson, Masaki

[ここに入力]

Ozawa,” Predictive Simulation on Nuclear Transmutation of Rare Earth Elements and Evaluation of the Reliability by Nuclear Analysis of PIE at UC Irvine TRIGA Reactor” ,Program and Abstract, 2B-13, pp.92-93, The 3<sup>rd</sup> Japan-China Academic Symposium on Nuclear Fuel Cycle (ASNFC2015), 2<sup>nd</sup> -5<sup>th</sup> December,2015, Tokyo Institute of Technology, Japan.

- 28) Atsunori Terashima and Masaki Ozawa, “Evaluation of the specific radioactivity of 40 elements created by nuclear transmutation of fission products” , Progress in Nuclear Energy, Vol.93, November 2016, pp.177-185.
- 29) Masaki Ozawa and Mikael Nilsson,” Transmutation of Radioactive Waste into Resource, as “Kopernikanische Wendung” , 247<sup>th</sup> ACS National Meeting and Exposition, Industrial and Engineering Chemistry R&D in Processes for Waste Recycling and Metal Recovery ” Symposium in Honor of Professor Jan Rydberg” , March 18, 2014, Dallas, Texas.
- 30) Masaki OZAWA, Hiroyasu HIRANO, Yoshikazu KOMA, Yasumasa TANAKA, Tomio KAWATA, “Enhancing Actinides Separation by Consolidated PUREX and TRUEX processes Intensified by Salt-Free Requisite” , International Conference on Evaluation of Emerging Nuclear Fuel Cycle Systems, Proc.of Global’95 Vol.1, pp585-594, Sept. 11~14, 1995, Versailles, France, Palais des Congres (1995).
- 31) 「フランスの何が優秀か」 , (株)サイマル出版会, 1980年11月
- 32) Mike Sutton, Moon Geochemistry, CHEMISTRY WORLD, Vol.16, Issue 8 pp.52-55 August 2019.

[ここに入力]



Jesse Scheuer, "An Introduction to Rare Earths", Molycorp, June 2010

図 1<sup>5)</sup> 地殻を構成する元素の相対的頻度と原子番号との関係

[ここに入力]

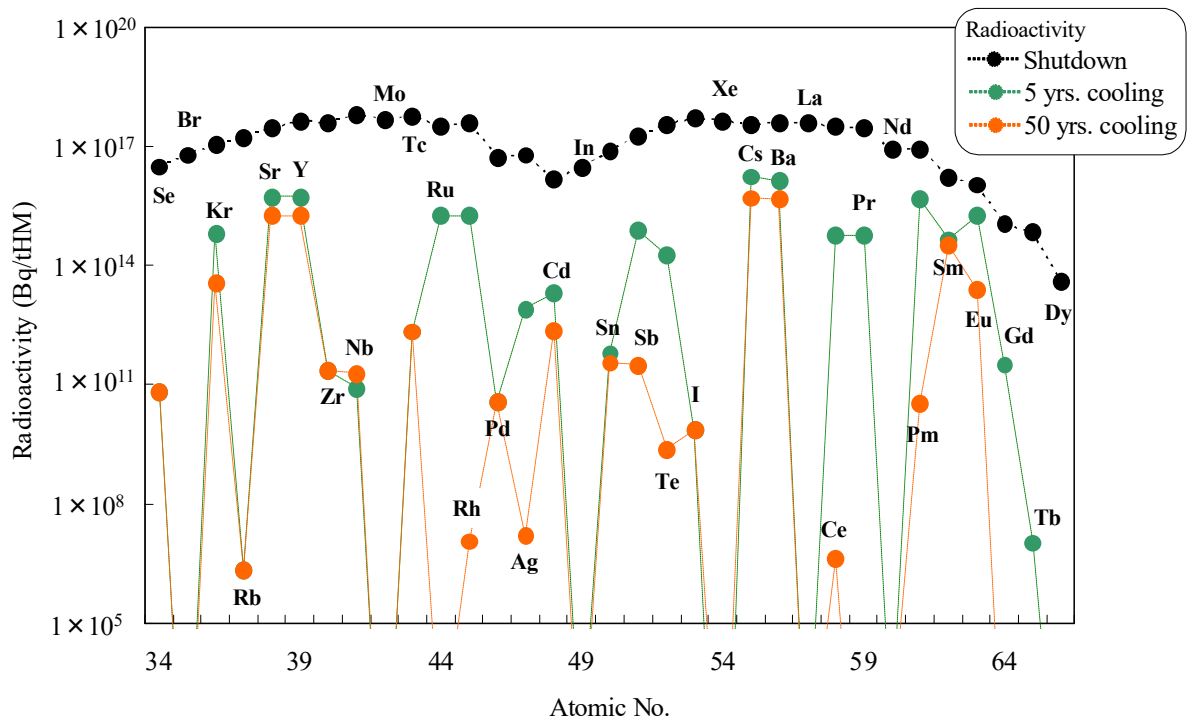


図 2<sup>10</sup>) 核分裂生成物の放射能 (Bq/tHM) の時間的变化  
FBR MOX, Inner core, 150Gwd/t, cooled 0~50years

[ここに入力]

Adv.-ORIENT Cycle  
+ Après ORIENT

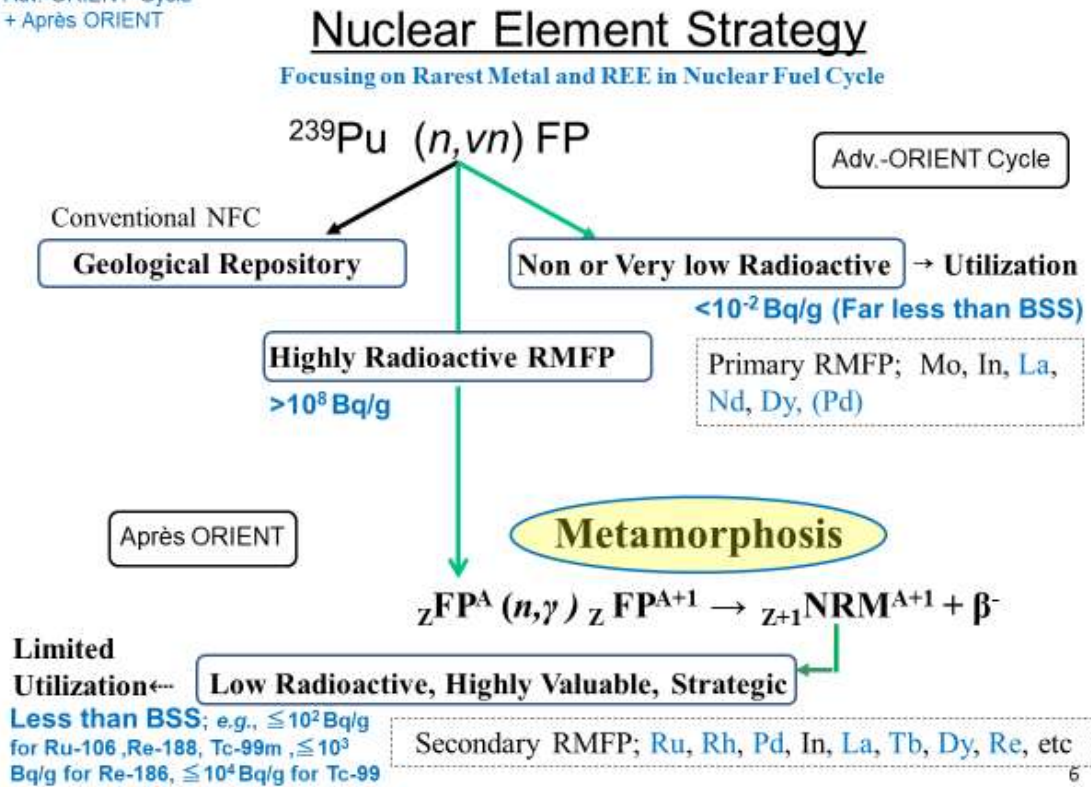


図 3 <sup>29)</sup>核分裂生成物レア金属の元素戦略

[ここに入力]

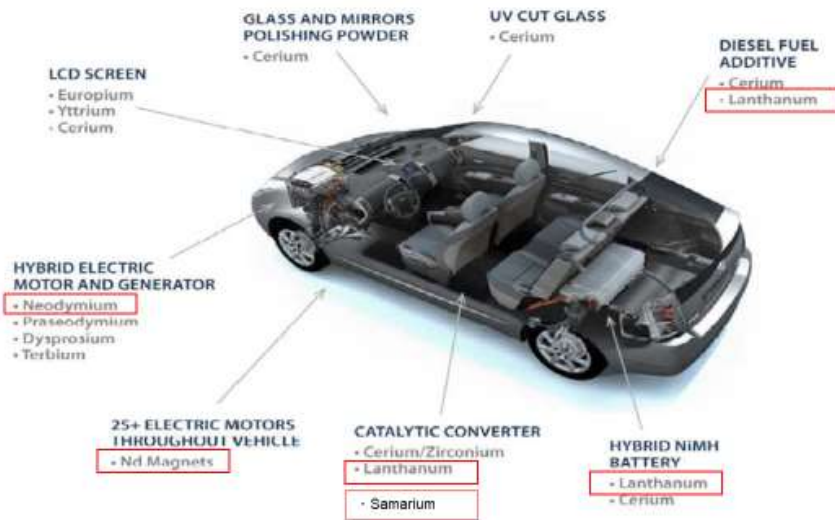


図 4 ハイブリッド車の微放射性レアアース (La, Nd, Sm) の利用



[ここに入力]

表 1 <sup>22)</sup>核分裂生成物レア金属の元素変換 (数値評価)

EVALUATION INDICES				A	B	C	D	E	F	G
Target Element (T: <sub>Z</sub> FP <sup>A</sup> )	Product Element (P: <sub>Z+1</sub> NRM <sup>A+1</sup> )			Transmutation Ratio (%/y) (by LWR or FBR); >1%/y	Specific Radioactivity (Bq/g) of T at LWR	Specific Radioactivity (Bq/g) of P at LWR or FBR at 5y Cooling	Reduction Effect of Radioactivity (B/C); >ca.E+2	Required Period (y) for Lowering the E.L. of P ; <5y	Supply Risk on P in Japan ; Hi/Mi/Lo	Strategical importance on P by USDOE, etc
FP	Ba	REE	La	0.0474 (FBR)	1.97E+12	1.11E-02	1.77E+14	0	H	DOE
	La		Ce	0.798 (LWR)	2.05E+02	6.04E+04	3.39E-03	3.5	M	DOE
	Ce		Pr	0.0376 (FBR)	1.94E+11	1.27E+11	1.52E+00	8.7	M	DOE
	Pr		Nd	2.91 (FBR)	4.19E+11	1.63E-05	2.57E+16	0	H	DOE (Highly)
	Nd		Pm	0.0295(FBR)	1.29E-02	N.E			L	N.E
	Pm		Sm	2.67 (LWR)	3.43E+13	2.87E+09	1.19E+04	1600	M	DOE
	Sm		Eu	2.96 (LWR)	1.39E+10	2.06E+12	6.74E-03	400	M	DOE (H)
	Eu		Gd	23.4 (LWR)	1.78E+12	1.36E+08	1.03E+04	13.4	M	
	Gd		Tb	0.613 (FBR)	6.84E+07	1.09E+07	6.27E+00	3600	M	DOE (H)
	Tb		Dy	17.1 (FBR)	9.18E+06	9.93E+04	9.24E+01	2.7	H	DOE (H)
	Dy		Ho	7.44 (LWR)	2.36E+04	1.14E+09	2.07E-05	33250	M	
	Sr		Y	0.0146 (FBR)	2.99E+12	4.28E+15	6.98E-04	2.5	H	DOE (H)
	Mo	PGM	Tc	0.373(FBR)	3.40E-01	N.E			N.A	N.A
	Tc		Ru	8.03 (FBR)	6.33E+08	8.06E-02	7.85E+09	0	H	Rarest Metal
	Ru		Rh	0.674 (FBR)	2.71E+11	5.15E+10	5.26E+00	10	H	Rarest Metal
	Rh		Pd	20.6 (LWR)	1.32E+12	9.51E+01	1.38E+10	0	H	Rarest Metal
Pd	Ag		0.584(FBR)	2.89E+06	N.E			L		
Cd	In	In	0.108 (FBR)	9.08E+09	1.16E+01	7.82E+08	0	H	DOE	
Non FP	W	Re,Os	Re	3.05 (LWR)	0	2.59E+03	N.A	0	Hi Strategic	Rarest Metal