

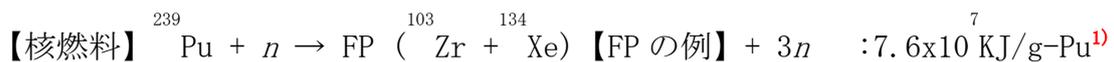
[ここに入力]

核燃料サイクルの資源地政学

小澤正基
TYW 社顧問
東京工業大学名誉教授

1. 核燃料サイクルの原典

プルトニウム (Pu) の核分裂反応は炭素の酸化・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) CO₂ (炭酸ガス) 共に産業廃棄物となる。原子力は発電にあたりウラン (U) 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 (CO₂) 放出による環境汚染も起こさない。



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である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る²⁾。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、²³⁹Pu のリサイクル燃焼が可能な高速増殖炉・核燃料サイクルが実現すれば石油枯渇以降の 1000 年間に渡るエネルギー源の基盤となりえるが、化学的に活性な金属 Na の取り扱いを克服し Na 冷却型高速増殖炉を実稼働させている国はロシア以外に見当たらない。

【廃棄物管理の新戦略】 廃棄物の管理思想は 1960 年代以降、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 CO₂ 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、液体ともに放出が質及び量的に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量内で環境放出が認められるが (①)、残り大方の放射性核種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)。一般産業廃棄物の猛毒ダイオキシンや PCB は環境条件

[ここに入力]

下で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、放射性廃棄物核種の約 80%は半減期 100 年以下で自然に崩壊、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種 (LLFP) は極めて減衰が遅く、再処理工程で全て HLW に濃縮されるので、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。即ち、長寿命の毒性を有する廃棄物の処理・処分は一般、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 年代後半より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 (Partitioning & Transmutation (P&T))³⁾ 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 (Options Making Extra Gains from Actinides and fission products generated in nuclear fuel cycle : OMEGA) 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。ここへきて近年、計画中の商用再処理工場へ MA 分離機能を付加する実用化の動きが中国で出てきており⁴⁾、先導的かつ戦略的意思決定として注目される。

【資源としての放射性廃棄物】 原子力はエネルギー生産一辺倒のシステムではない。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原子力に課せられた使命を確実なものにするためには、負の遺産の「産業廃棄物」である核分裂生成物 (元素) の取り扱いを根本的に見直す必要がある。即ち、これを人工元素・核種の集合体ととらえ、個々の元素の属性に応じた「産業資源」、或いは放射性核種の放つ各種放射線を「医療資源」(RI) とするなど“核のゴミ”に対する認識の転換をしなければならない。日本における RI・放射線の市場は 2000 年の時点で既に、原子力発電市場を上回っていたにも係わらず日本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 ^{99m}Mo-^{99m}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 (⁶⁰Co) さえも国産化できず 100%輸入に依存している。放射性物質・放射線に纏わる日本国民のトラウマはかくも異常に大きい。コロナワクチンについても同様だが、製造が面倒な 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、⁹⁹Mo の輸入が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。コロナ禍の現在も国産化への動きは遅々としているようにも見えるが、エネルギー及び医療の安全保障策として、原子炉などを活用した有用元素・RI の自給化に取り掛かるべきである。もはやコスト云々の段階ではなく、予算を投入して実用化を図らねば将来に禍根を残す。放射性廃棄物を抱える核燃料サイク

[ここに入力]

ルのミッションも伝統的な「処分」から戦略的「利用」へと、自己革新を図る時にきている。50年前の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た水素経済、水素社会を究極のエネルギーシステムとして提案している⁵⁾。この水素経済システムでの最大の課題の一つの水素製造法について電解や放射線分解製造の可能性を評価し、前者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、以下で述べる核燃料サイクルの白金族金属 (PGM)、レアメタル及び RI の利用を窺わせる示唆となっている。

2. 核燃料サイクルの資源地政学

【原子力鉱脈】偏在による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⁶⁾。重元素になるほど存在比は減少し、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。レアメタルであるPGMは”Gamow線”の下方に大きくずれ最稀少元素と位置付けられる。上方にずれているレアアース(REE)は稀少性よりも偏在性が問題となる。軽・重レアアースは先端産業に不可欠となっており生産の95%を中国が占めている。最稀少のPGMについてもパラジウム(Pd)の46%をロシアの、ロジウム(Rh)の83%及びルテニウム(Ru)の93%を南アの、それぞれ一国の独占状態にある⁷⁾。鄧小平は南巡講話(1982年)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うと宣言、2010年9月の尖閣紛争を理由に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略戦争では、石油に加え天然ガスもNATOを揺さぶる資源武器となった。さて1992年、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(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)。Reは超耐熱ジェットエンジン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Re13%の他、ゲルマニウム(Ge)34%、インジウム(In)45%及び金(Au)などが含まれているとされる⁸⁾。北方領土におけるこのような有用レアメタルの存在は日露間の領土返還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)までの核分裂元素・レアメタルが有意量含まれる。一般鉱石と比べた場合、高レベル放射性廃液中のレアアースやPGMは高品位であり、もしこれらを取り出して利用することができれば地政学的リスクフリーの資源となり、核燃料サイクルに資源的価値を付与することができる。同様にテクネチウム(Tc)は自然界には存在しないⅦ族の放射性元素であり、もし同族のReと類似した物理化学的特性を活用できればTcがRe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。ちなみに、Reは

[ここに入力]

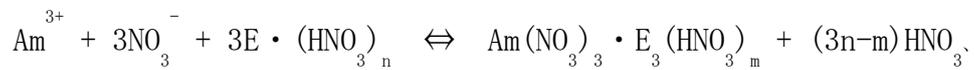
半減期 $4.5E+10y$ の長寿命放射性核種 $^{187}\text{Re}(\beta^-)$ を 62.60% 含むため天然の放射性元素である。なお資源国ほど地政学的な資源戦略や枯渇に敏感である。筆者は 2018 年、ロシア人科学者と共著で原子力レアメタルの分離と利用技術の現状をまとめたモノグラフをロシア D. I. メンデレーエフ大学から上梓している⁹⁾。

【原子力レアメタル】使用済み核燃料には 31 鉱種の原子力レアメタルが含まれ、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 33Gwd/t, 3 年冷却）軽水炉使用済み燃料 1t には、ウラン(U) 955Kg、Pu 10Kg、MA0.7Kg に対し、FP は 34Kg 含まれる。その内、レアアースは Pu とほぼ同量の 10Kg、PGM は 4Kg、Tc 1Kg、モリブデン(Mo) 3Kg と豊富である。FP の比率は燃焼度に比例して増加するので、高燃焼度の高速炉使用済み燃料の場合 Rh や Pd は天然鉱石に比べ 1 千倍以上の高品位となる。いわば、核燃料サイクルはレアメタルの「原子力マイパーク」、使用済み核燃料・高レベル放射性廃液は「原子力鉱脈」と言っても過言ではない。図 2 は高速増殖炉使用済み燃料 (MOX 燃料内炉心, 燃焼度 150Gwd/t) 1t に含まれる FP の放射能 (Bq) の経時変化を示している¹⁰⁾。全てのレアメタル FP は炉停止時には放射性であるが、核種それぞれの固有の半減期に応じ減衰する。PGM 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 FP (Ru, Rh)、長寿命ではあるが IAEA が定める国際基本安全基準 (BSS) の規制免除レベル値 (Bq/g) が高く放射性毒性が低い FP (Pd, (Tc))、のようにそれぞれ放射化学特性が異なる。Mo、In、及び Dy の比放射能 (Bq/g) は取り出し時 (5 年冷却後) にはゼロ (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 La 或いは Nd 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 MA 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}Cs 、ストロンチウム ^{90}Sr などととも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、深宇宙探査機の電源としても活用されている。“都市鉱山” についての“混ぜればゴミ、分ければ資源” のコンセプトは “原子力鉱山” 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、原子力鉱山のレアメタルは、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、特にアクチニドからの精密分離が最大の制約となる。次に分離・利用技術及び元素変換の *state of the art* の一端を概説する。

3. 原子力鉱脈からのレアメタルの分離と資源創成

[ここに入力]

〔MA・レアアース分離技術〕 使用済み核燃料中のレアメタル FP は溶解後、再処理 PUREX 法の抽出剤 TBP (Tri-*n*-Butyl Phosphate) に対し、一部イオン (例えば RuNO³⁺, Zr⁴⁺) を除き、大凡非抽出性であるため MA³⁺とともに高放射性抽残液 (HAR) に排出される。未溶解分も清澄後不溶解残渣として高放射性廃液に纏められる。MA³⁺分離技術については 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 MA³⁺ (Am³⁺) と硝酸根 (NO₃⁻) のイオン対をキレート抽出するが、Ce³⁺などの三価レアアースも共抽出される。



TRUEX 抽出 (剤) 法の利点は、MA³⁺抽出能が高く H⁺抽出と競合しないので高レベル放射性廃液の硝酸濃度を希釈しなくてよいこと、CMPO に相改質剤の TBP を混合することにより第 3 相生成抑制能に優れている点である。また抽出剤の生物学的毒性が低く、火災爆発に対する安全性も高いのでハンドリングが容易である。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 Y³⁺や Ce³⁺などレアアースイオンの除染が MA 分離技術における最重要課題であることが認識され、TPTZ や Cyanex301 など新規ソフトドナー (N 原子、S 原子) 型配位子による分離研究が進められた。既往の水溶性 DTPA 錯化剤を TRUEX 法に組み合わせた SETFIX 法では約 80% のレアアースの分離 (除染) が達成されている。他方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を用いてのイオン交換分離試験¹¹⁾において MA に対するレアアースの高分離係数 SF_{Ce/Am}=E+5 及び Ce/Am=0.3ppm が得られた。イオン交換樹脂は少量のスループットにおける精密分離に優れるといえる。レアアースを“製品”とする場合においても MA の高除染は必要であり、大量スループット条件下の分離に優れる溶媒抽出法にイオン交換樹脂法による精製をハイブリッドに組み合わせる分離方法が有望である。

〔白金族レアメタルの分離回収と利用〕 長寿命レアメタル FP の分離についてはオメガ研究の一環¹²⁾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。パラジウムの分離については、電解採取法では



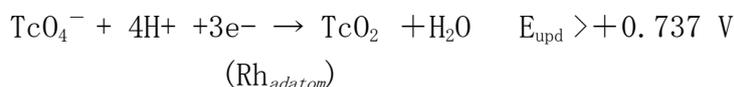
と極めてシンプルで、基本的に化学試薬を必要としないので、放射性二次廃棄物は発生しない。また酸性溶液中では電気化学的に卑なアクチニドイオンは基本

[ここに入力]

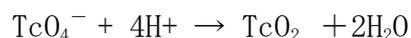
的に共析しないので、パラジウムの α 汚染はなく実用化に向け極めて有利な方法といえる。再処理技術の高度化や元素戦略的視点によるサイクル概念の見直しを図った結果、Adv.-ORIENT Cycle (ORIENT: Optimization by Recycling Instructive ElemeNTs) 構想^{13),14)}を国家基幹技術(一般会計FBRサイクル技術)として提案し、本法はその要素技術の一つとして触媒的電解採取法(CEE: Catalytic Electrolytic Extraction)として発展させた^{15),16)}。CEE法は白金(Pt)電極上にPd²⁺から析出したPd_{adatom}が、Ru³⁺など難電析PGM及びTcのUPD(Under Potential Deposition; E_{upd}-E_{eq}>0)を著しく促進する現象に基づき、回収したPdあるいはRhを再び電析触媒としてリサイクル添加する方法である。



興味深いことにRh_{adatom}はRu³⁺の他、TcO₄⁻やReO₄⁻のUPDも促進する。



しかしながらTc酸化物の析出域はPt電極の水素発生電位域と一致することから吸着H_{adatom}によるTcO₄⁻の化学還元反応も寄与しているものと考えられる。



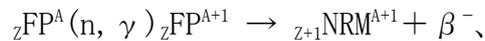
なおRuやTc、Reのadatomには他イオンのUPD促進効果は見られない。またCEE法ではレアメタルLLFPのSe(及びテルルTe)も同時回収可能である。

通常UPD金属で修飾した電極の触媒活性は増大する¹⁷⁾。Pd_{adatom}による混合析出物は凝集粒状を呈し比表面積も大きく、電気化学的にも安定である。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Pt黒電極の触媒活性を上回り、平滑Pt電極を3倍程度上回る高活性を得ている^{18),19)}。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、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している。この4元系電極ではPdが比表面積の増大を、UPDしたRu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が成立する。放射性廃棄物を触媒として海水電解による水素製造²⁰⁾は将来、ボックリス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システムとなるポテンシャルがある。本質的にTcの水素過電圧 η は低い上に、UPDしたTcはReと同等以上の水素製造触媒活性を呈するので、人工元素Tcが天然の戦略元素であるReの代替となる可能性は十分高い。

[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、結局夢に潰えた。しかしながら、それは後の化学の原典となった。前述のAdv. ORIENT Cycleが“放射分離化学”に基づく元素

[ここに入力]

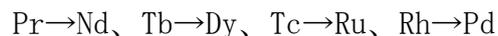
利用構想であったのに対し、【Après ORIENT】は核のゴミである放射性廃棄物を“核物理”によって核種変換し、放射能が消滅あるいは大幅に低減した新元素を資源として利用する構想である²¹⁾。その要諦は高速炉心にターゲット ${}^A_Z\text{FP}$ を装荷し、高速炉で大量に発生する余剰中性子を利用して中性子捕獲反応、



を生じせしめ、新しいレアメタル(${}^A_{Z+1}\text{NRM}$)を得る。これまでの長寿命核種の核変換処理では ${}^A_Z\text{FP}$ の減少(核変換率)が重要であったのに対し、Après ORIENT では生成核種 ${}^A_{Z+1}\text{NRM}$ の種類・収量や放射化学特性が重要となる。核変換率は共に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 $\phi(E)$ のみ人為的制御が可能となる。このため適切な中性子減速材などを選択

することにより、原料ターゲット ${}^A_Z\text{FP}$ の $\sigma \cdot \phi$ が生成レアメタル ${}^A_{Z+1}\text{NRM}$ 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る²²⁾。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・重核種の選定が鍵となる。高中性子束の高速炉ブランケット領域に、各種減速材を組み合わせたターゲットを装荷し共鳴エネルギー領域条件で中性子捕獲反応率を増大させる試みはこれまでにない構想である。18種の核分裂生成物 FP についての元素変換シミュレーション結果を表1に示す²³⁾。評価は、変換効率 A

(%/y)、放射能低減率 B(—)、創成レアメタル ${}^A_{Z+1}\text{NRM}$ 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る。表に示す軽水炉及び高速炉による予備的結果から、 $A > 1\%/y$ 、 $B < 1/100$ 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 $C < 5$ 年と置くと、



これら4ペアの元素変換は A, B, C 全ての要件を満足している。なお FP ではないが $\text{W} \rightarrow \text{Re}$ ²⁴⁾ も A 及び C を満足し、軽水炉のバーナブルポイズンであるガドリニウムが中性子捕獲する際生ずる $\text{Gd} \rightarrow \text{Tb} \rightarrow \text{Dy}$ ²⁵⁾ の元素変換も有望と考えられる。この実用化に向けては米国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い一部核種変換の検証を行っているが^{26), 27)}。

核燃料サイクルの元素戦略コンセプトを図3に纏める²⁸⁾。Adv. ORIENTcycle 構想では高レベル放射性廃液から、比放射能 10^{-2} Bq/g 以下の極低あるいは非放射能レアメタルの Mo, In, Pd 及び一部 RE(ランタン La, ネオジム Nd, ジスプロシウム Dy) 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。 10^8 Bq/g 以上の極高放射性のレアメタルは再度原子炉に再装荷し Ru, Rh など高価値・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

[ここに入力]

BSS 免除レベルに応じた利用先に供する。ターゲット FP (${}_Z\text{FP}^A$) 及び生成レアメタル (${}_{Z+1}\text{NRM}^{A+1}$) の分離法としては、まず高放射性毒性を有するプルトニウムなど長寿命アクチノイド核種の前段分離が必須でありそれには前述の溶媒抽出法が有効である。後段におく PGM、Tc 及び Se (テルル Te) 製品化の為の精密分離としては、前述の、アクチノイドに加えレアアースも精密分離できる UPD-CEE や 3 級ピリジン樹脂法などの組み合わせ法が良いと考えられる。それ以外 ${}^{137}\text{Cs}$ 、 ${}^{90}\text{Sr}$ の分離など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組み合わせが必須となろうが、ゴミを処理するのにゴミ (放射性二次廃棄物) を増やのは愚の骨頂である。プロセス構築にあたっては高速炉再処理研究で培った Salt-free 技術²⁹⁾ 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、日本では線状降水帯などによる風水害が多発している。温暖化ガス排出によると考えられる地球環境悪化は 2022 年夏、極値に達した感がある。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。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、天然ガスをエネルギー資源武器として恫喝に用いている。2015 年に始まった SDGs は太陽光発電など再生可能エネルギーへの傾斜を促すが、原子力発電を否定するものではない。主要国の内フランス、中国、ロシアなどは原子力を維持・推進し、アジアでは原子力は“中国の宝、ベトナムの夢”と言われて久しい。一方、ドイツ、イタリアは脱原子力の方針に変わりない。“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³⁰⁾ 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”という矜持によるのであろう。化石燃料は開発途上国に残し、先進国は核燃料・先端エネルギーを使う資源分担論も一定の説得力を持つ。この文脈では原子力が渋滞或いはゼロに向かう日本は残念ながら後進国の仲間入りをしたことになる。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り、実際核兵器を保有しないまでも少なくとも敵対国に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²⁾ がある。プルトニウムや核分裂生成物 RI (${}^{137}\text{Cs}$ 、 ${}^{90}\text{Sr}$ 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の心理的、社会的ダメージを与える“放射化学兵器”となり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、一時ロシア軍がウクライナの各原発を占拠したが、自らが

[ここに入力]

核保有国であるが故にこのような恐れを抱いたためではないか。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]の函数とされるが、さらにC[資源・エネルギー]や[食料]の因子も加えるべきと考えられる。特に、C及び[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が大にして[食料及びエネルギー自給率]も130%を超え「富国強兵」を達成しつつある。更に世界で唯一ナトリウム冷却高速増殖炉を稼働させ、Akademik Lomonosov と呼ばれる海上原子力発電所も実用化することにより、数十年～百年後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。地震国日本こそ、この浮揚型原発を導入するメリットは大きいのだが。原子力発電の負の面、放射性廃棄物処分に対する社会的受容さだけを捉え、せっかく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、国家力を衰亡させる方向に突き進むことになりかねないと危惧される。

【資源創世型への転換】目下の地球温暖化や資源の枯渇・占有についての危機的状況はAutophage（自食）とStruchian（ダチョウ）の二つに象徴される⁵⁾。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タイタニック号の乗客に例えられる。残念ながらダチョウに象徴される市民感覚・感情が政策を支配する国家では破滅的状況が切迫しても発想の転換と技術革新は起こりそうもない。高速炉ベースでゴミ（放射性廃棄物）を有価物（レアメタル）に転換する核燃料サイクルは原子力産業に“コペルニクスの転回（Kopernikanische Wende）”を求める。核燃料であるUやPuに加え、高レベル放射性廃棄物から白金族やレアアースを取り出し、さらに^{99m}Mo（^{99m}Tc）、⁹⁰Sr、¹³⁷Csのような有用放射性核種を回収利用する。それにより天然資源の枯渇を延命させるばかりでなく地政学的価値を軽減させることができる。天然のRe 始めレアアースのLa、Nd、サマリウムSm、Gdは元来放射性であるにも関わらず自動車産業などで広範に使用されていることからそれらの利用拡大の可能性は大きい。これら原子力レアメタルの分離利用・創成の基盤技術開発は、2節で述べた通り進んでいるが、社会的受容性を高めるための微弱の放射能・放射線に対する過剰の恐怖心・トラウマの克服が必要であろう。放射性廃棄物の資源性（Resourceability）に基づいたリサイクル（Reuse）によって、放射性廃棄物量自体も低減するので、地層処分の負担軽減も図られる。

プルトニウムは千年持続する高密度エネルギーマテリアルであり、高レベル放射性廃棄物はレアメタル資源である。原子炉（高速炉）は自ら放射性廃棄物を非放射性的の新レアメタルに変性することができる。原子力レアメタルを分離する技術については3節で述べたが、それに留まるものではない³⁾。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

[ここに入力]

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” (K(カリウム)REE(レアアース)P(リン)) と称される元素群が含まれている。さらに最近のセンシングによれば Th トリウム (及び U ウラン) の放射性元素が、表側月面に豊富に、かつ偏在していることが明かにされた³¹⁾。正に “耕雲種月”のごとく、米中の宇宙開発戦略は月面の核燃料やレアアース資源 (宇宙鉱脈) 開発まで視野にいれているかのようなのだが、実用化までの難度は原子力鉱脈に比べればはるかに高いのは明らかである。五言絶句” 登鶴鵲楼 “

“白日依山盡 黄河入海流
欲窮千里目 更上一層樓”

は、千里先を見通すためには更なる高みに昇らなければならないと読む。千年先までのエネルギーと資源を確実にするためには目下の核燃料サイクルに新しい地平を切り拓く覚悟と勇気、挑戦と努力が求められる。断固、核燃料サイクル技術を手放すことがあってはならない。

【参考文献】

- 1) 私信, 横山次男
- 2) ジャック・アタリ, 「核という幻想」, (株) 原書房, 1996 年 5 月.
- 3) 「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.
- 4) China Institute of Atomic Energy at ASNFC2019 The 5th China-Japan Academic Symposium on Nuclear Fuel Cycle, Harbin, China, July 2019.
- 5) J.O' M. Bockris, 「エネルギーオプション」, 技報堂出版 (株), 1982 年 7 月
- 6) Masaki Ozawa and Mikael Nilsson, ” Transmutation of Radioactive Waste into Resource, as *Kopernikanische Wendung*”, 247th 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.
- 7) 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.
- 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.

[ここに入力]

- 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) 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).
- 12) Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Status and Assessment Report, pp.130, *Synthèse des travaux*, OECD/NEA, Publication date: May 1999
- 13) 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).
- 14) 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).
- 15) Masaki Ozawa, Yuichi Sano, Chisako Ohara, Takamichi Kishi, "Radioactive Wastes Minimization by Electrolytic Extraction and Destruction in a PUREX-TRUEX Actinide Separation System", *Nuclear Technology*, May 2000, Vol. 130, No. 2, pp. 196-205 (2000).
- 16) 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).
- 17) 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).
- 18) 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, pp. 275-278 (2005).
- 19) 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)
- 20) 特許 3549865 号「使用済み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/

[ここに入力]

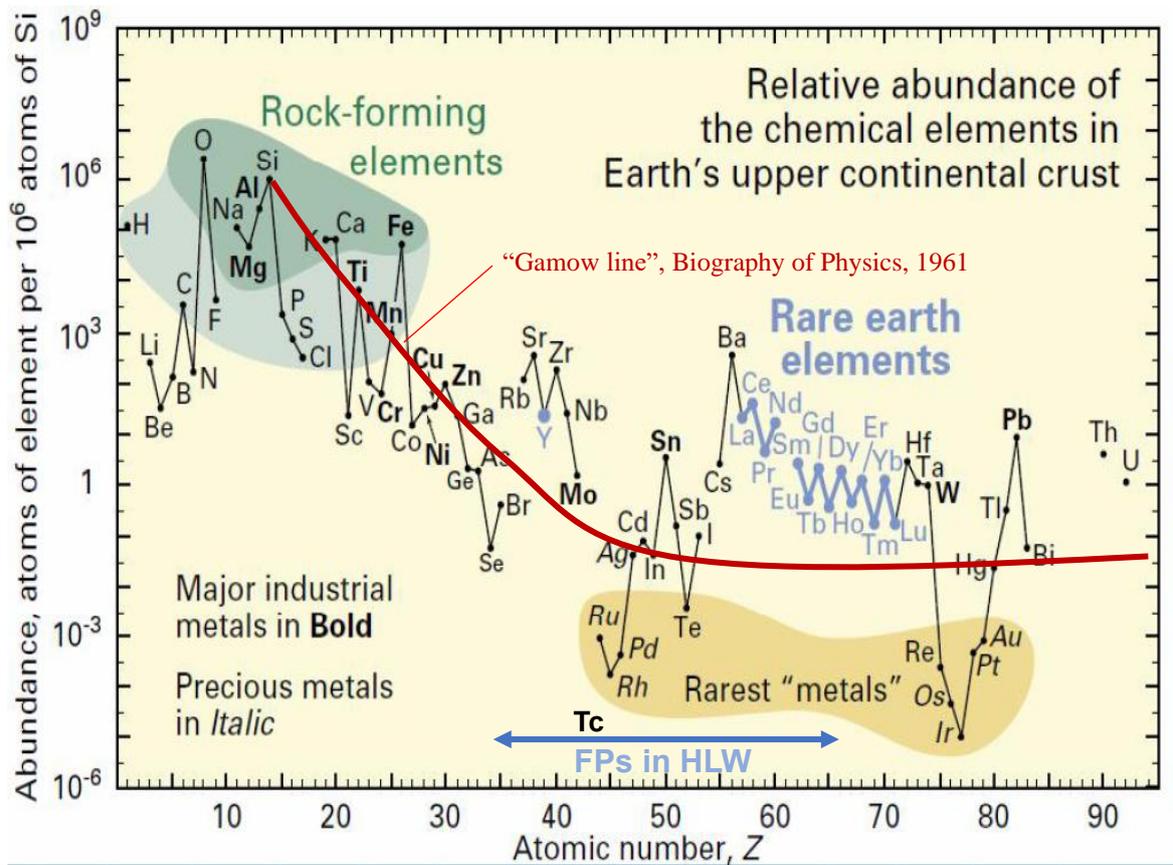
- 9/21, 英国登録番号 2382591 登録日 2005/4/1, 3 仏国登録番号 0208118 登録日 2006/3/3, 露国登録番号 2242059 登録日 2004/12/10.
- 21) Masaki Ozawa, “Après ORIENT, A New P&T Challenge to Transmute Radioactive Wastes into Resources”, The 2nd China-Japan Academic Symposium on Nuclear Fuel Cycle (ASNFC 2013), Abstract Book, pp64-65, Nov.27- Nov.30 2013, Shanghai, China
- 22) 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.
- 23) Masaki Ozawa, Après ORIENT cycle, “A Resource-oriented P&T program on Fission Products”, Program and Abstract, 2B-16, pp.98, *The 3^d* Japan-China Academic Symposium on Nuclear Fuel Cycle (ASNFC2015), 2nd -5th December, 2015, Tokyo Institute of Technology, Japan.
- 24) 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)
- 25) Yuki Tanoue, Tsugio Yokoyama and Masaki Ozawa, “Resource Evaluation of Heavy Rare Earth Derived from the Spent Gd₂O₃ 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)
- 26) Atsunori Terashima, Leila Safavi-Tehrani, Mikael Nilsson, Masaki 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 3rd* Japan-China Academic Symposium on Nuclear Fuel Cycle (ASNFC2015), 2nd -5th December, 2015, Tokyo Institute of Technology, Japan.
- 27) 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.
- 28) Masaki Ozawa and Mikael Nilsson, “Transmutation of Radioactive Waste into Resource, as “Kopernikanische Wendung”, 247th ACS National

[ここに入力]

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.

- 28) 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).
- 30) 「フランスの何が優秀か」 , (株)サイマル出版会, 1980年11月
- 31) 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 1⁶⁾ 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]

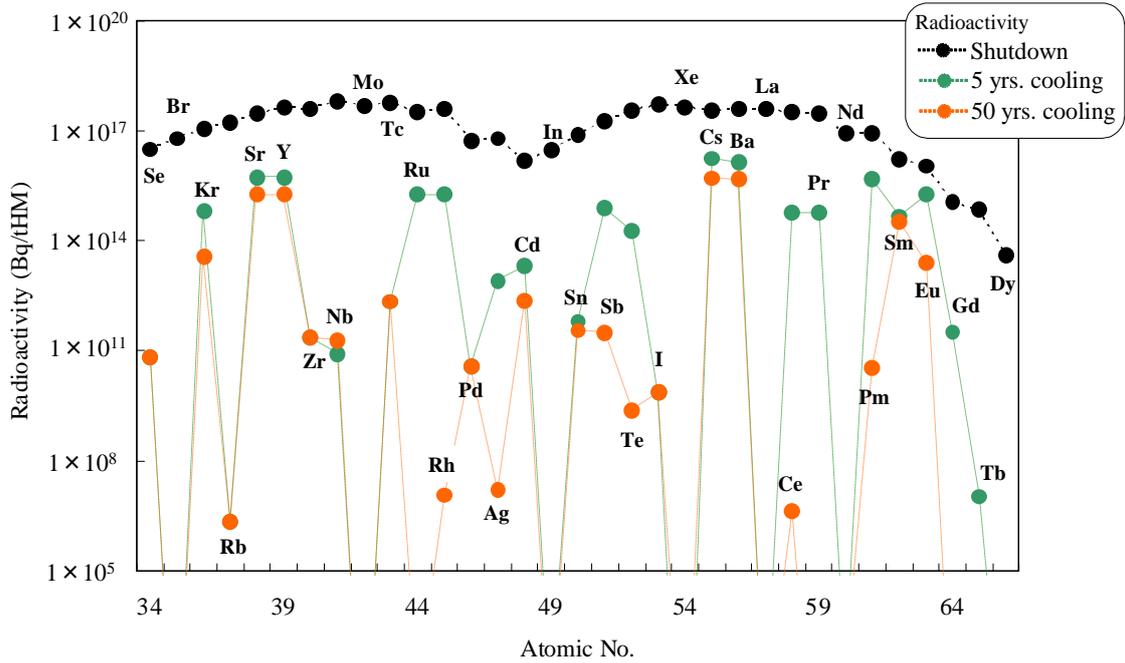


図 2¹⁰) 核分裂生成物の放射能 (Bq/tHM) の時間的变化
FBR MOX, Inner core, 150Gwd/t, cooled 0~50years

Adv.-ORIENT Cycle
+ Après ORIENT

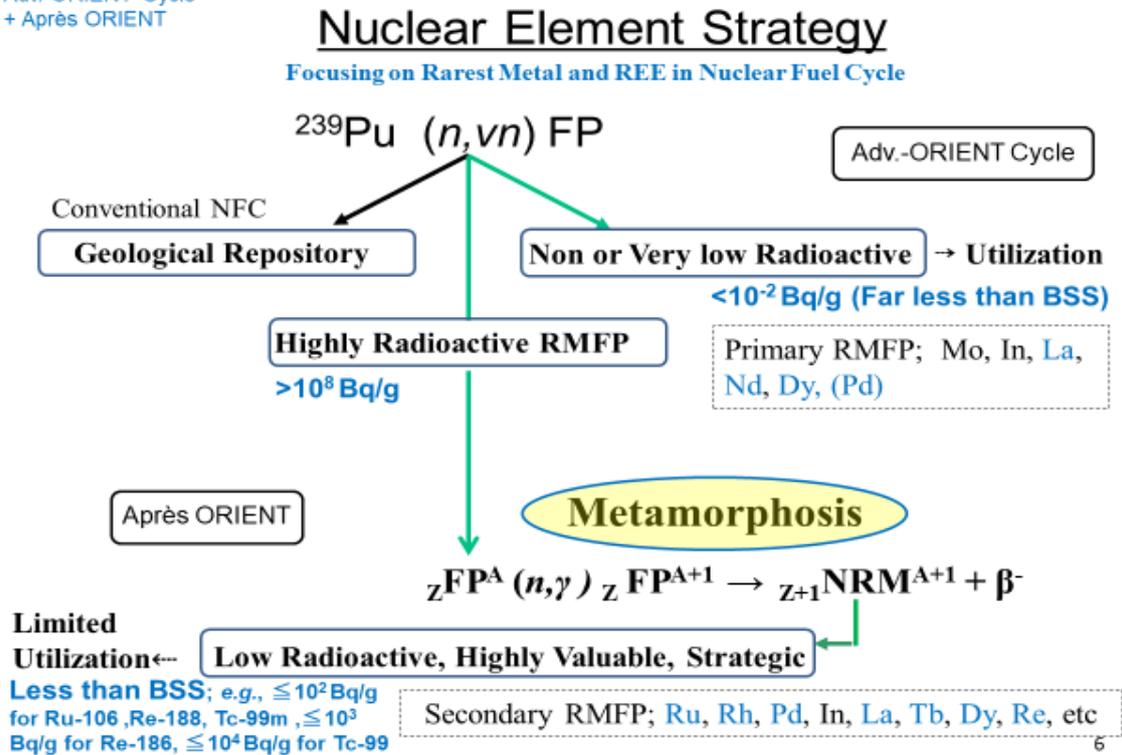


図 3²⁸) 核分裂生成物の元素戦略

[ここに入力]

表 1 ²³⁾核分裂生成物の元素変換 (数値評価)

EVALUATION INDICES			A	B	C	D	E	F	G	
Target Element (T:zFP ^A)	Product Element (P:z+1NRM ^{A+1})		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	
	Gd	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