

茨城大学工学部 講義
「原子科学と倫理」
平成22年12月27日(月)
14:30-15:50(再処理)
16:00-17:30(核種分離・利用)

再処理(PUREX)概論

小澤 正基

茨城大学工学部 理工学研究科 応用粒子線科学専攻 非常勤講師
日本原子力研究開発機構 主任研究員・研究主幹
東京工業大学大学院理工学研究科 連携教授
ozawa.masaki@jaea.go.jp, ozawa@nr.titech.ac.jp

自己紹介

原子力基礎工学部門 部門内連絡会議紹介用資料(様式) A4用紙1枚			
(ふりがな)	おざわ まさき	生年月日(年令)	1959年9月1日 (58才)
氏 名	小澤 正基	出身都道府県	山梨県甲府市
所属	原子力基礎工学研究部門、主任研究員、研究主幹		
専門分野	核燃料再処理、Pu分離化学、分離変換工学、工業電気化学		
学位	工学博士(東京大学)1993年7月		
主な所属学会	電気化学会、日本原子力学会、日本化学会、日本溶媒抽出学会、水素イオン協会、日本希土類学会、国際核燃料サイクルシナリオ・Advisory Committee 委員、JAEA EC及びJAEA査読委員、JAEA編集委員		
主な外部兼職・委員	「分離変換技術」研究専門委員会・委員(1993～)、(国)東京工業大学大学院理工学研究科原子核工学専攻客員教授(2003～)、「核燃料の物質利用」研究専門委員会委員・幹事(2005～)、(独)科学技術振興機構(JST)原子力領域主管(プロジェクトリーダー)(2007～)		
略歴	1975年3月山梨大学大学院工学研究科修了(燃料電池電極触媒の研究)、同年4月旧動力炉・核燃料開発事業団(PNC)入社(東海再処理工場配属)、1981年5月～1982年6月旧西ドイツ・カールスス原子核センター(HIC)留学、1986年～1990年RETF主分離工程の設計及び日米F再共研TC、1994～1998年分離に関する日仏協力TC、1991年担当役、1996年主研(PNC)、1998年10月旧技術機構(JNC)経営企画本部、2005年分離変換工学GL、2006年主研(JAEA)。		
これまでの研究・業務概要	1975～1986; 軽水炉燃料再処理技術開発(東海再処理工場主分離担当) 1986～1990; 高速炉燃料再処理技術開発(PUREX法のSalt-Free研究、他) 1990～1998; 核種分離に関する研究開発(TRUEX法研究、他) 1998～2000; 実用化戦略調査研究の立ち上げ 2001～現在; 分離・変換・利用工学研究(Adv.-ORIENT Cycle)		
これからの計画・抱負	長寿命核種、希少元素の分離・変換・利用に関する「先進核燃料サイクル」研究を推進する。東工大連携大学院教育及びJST・PO業務を通じ、学生及び若手研究者の指導・育成に務める。		
趣味・特技	伊・トナリ料理、独・白ワイン、Alchemy、バーベキュー、社交ダンス、ゴルフ(数回/年)		
その他	座右の銘: 智謀如湯、先取先制。武田信是末裔(信玄弟、後の松尾氏(母方))、今枝真理(宇宙物理学者、幼馴染)、中沢新一(文化人類学者、甲府一高同級)、中田英寿(小・中同学区、近所)		

講義内容

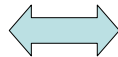
- Global Standardとしての再処理・PUREX
- 原子カルネッサンス(*Nuclear Renaissance*)
- 再処理の原理、工程の仕組み、放射性廃棄物(課題)
- 原子力レアメタル(*NRM*)とは何か? どのくらい創生するのか?
- それらの同位体組成及び放射化学的特性(毒性)は?
- どのように分離するか?
- どのように利用(あるいは備蓄)するか?
 - 水素製造触媒利用(研究中)
- 利用“出口”戦略は描けるのか?
- 新核燃料サイクル(*Adv.-ORIENT Cycle*)の提案
- まとめ(Scientist Game)

1

■ なぜ、原子力(リサイクル)か?

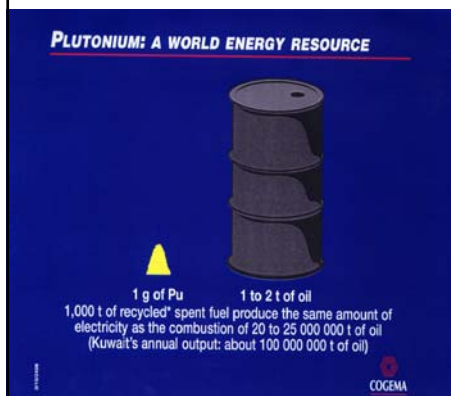
2

“*Nuclear Renaissance*”

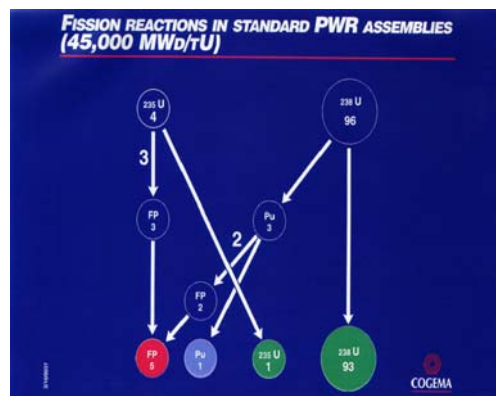


$^{235}\text{U}; ^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{95}\text{Mo} + ^{138}\text{Ba} + 3n + 6\beta : 7.8 \times 10^7 \text{KJ/g}$
 $\text{Coal}; \text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 : 33.9 \text{KJ/g}$
 Fission energy is approximately two million times greater than chemical energy.

- Environmental Aspect (CO_2)
- Resource Aspect (U, Oil)
- Energy & Resource Security
- National Commitment to Scientific Technology & Industry
- From “Molecular Control” to “Atomic (Nucleus) Control”

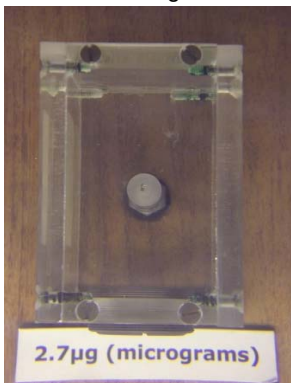


エネルギー源としてのPuと石油



標準的PWR (45000MWd/tU) における核分裂収支

◆最初の100 μg のプルトニウム (^{239}Pu); 1942.9.10.



G. Seaborg等によって抽出され、計量されたプルトニウム (Pu-239) の、最初のサンプル、 $2.77 \mu\text{g}$
→ “全ての始まり!!”



On September 10, 1942, the first weighing of a transuranium element was accomplished in Jones Laboratory at the University of Chicago.
The 60" cyclotron at the Berkeley Radiation Laboratory and a similar machine at Washington University in St. Louis, Missouri, produced neutrons to bombard hundreds of pounds of uranium during the summer of 1942, to produce about 100 micrograms of plutonium. The plutonium was extracted by a team of scientists working with Glenn Seaborg at Chicago. This sample was the first of the batch to be weighed. Using specially designed balances, one of which is shown above, the weight was determined: 2.77 micrograms.
Although the total amount of plutonium was very small, the Chicago scientists were able to determine its chemical properties. As a result, they designed larger plutonium production reactors and chemical separation plants. These new installations were built at Hanford, Washington and produced the plutonium used in the second atomic bomb dropped on Japan.



カリフォルニア大学バークレイ校UCB; 2007.9.17

現存する最古の C-14サンプル; 1941.1.19. 製造



3

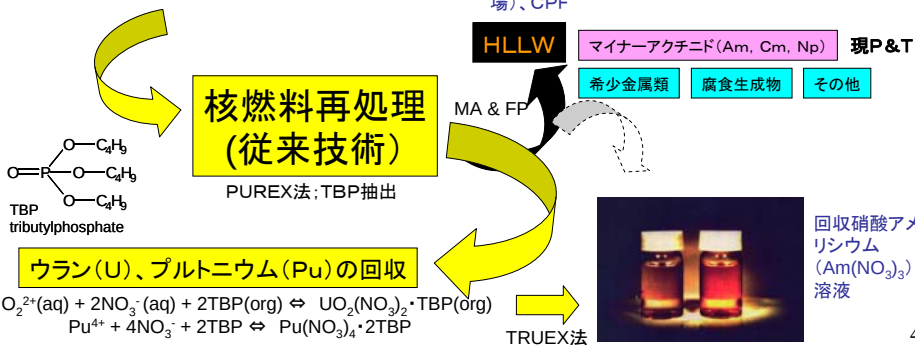
■核燃料再処理 (PUREX法) と核種分離



高速炉 (「常陽」) 照射済み燃料溶解液 (東海、CPF)



高レベル放射性濃縮廃液 (HLLW; 東海再処理工場)、CPF



4

◆再処理プロセス(工場)の特徴

- ・使用済燃料からの核分裂物質(U,Pu)の回収(回収率: >99.5%)、FPからの分離(除染係数: $10^6 \sim 10^8$)。
- ・核物質、放射性物質をマクロ量扱う、巨大化学工場。
- ・技術(工学)及び人間の信頼性を最も重視。

溶解(固→液)	抽出	還元分配	再酸化・精製・濃縮	転換(液→固)
$\text{PuO}_2 \rightarrow \text{Pu(NO}_3)_4$	$\text{Pu(NO}_3)_4 \rightarrow \text{Pu(NO}_3)_4 \cdot 2\text{TBP(org)}$	$\text{Pu(NO}_3)_3$	$\text{Pu(NO}_3)_3 \rightarrow \text{Pu(NO}_3)_4$	$\text{Pu(NO}_3)_4 \rightarrow \text{PuO}_2$
IV	IV	IV	III	IV
Non VI			Non VI	

1. 選択的であること。即ち分配係数の比が大きいこと。
 2. 抽出能力が良いこと。即ち抽出部における分配係数は1に近いがそれより大きいこと(工学規模設計では10以上が望ましい)。
 3. 逆抽出が容易なこと。即ち逆抽出部における分配係数は1よりは大きくないこと(工学規模設計では0.1以下が望ましい)。
 4. 溶解による損失(並びに漏洩率)を小さくするため、水に対し比較的不溶性であること。
 5. 抽出後の相分離を促進するために、密度が水と異なること、また粘度が低くかつ界面張力が大きいこと。
 6. 比較的不揮発性かつ不燃性、また有害でないこと(安全性)。
 7. 分別蒸留などにより、容易に精製できること(リサイクル)。
 8. 化学薬品(例えば硝酸)に対し安定であること。放射線に対しても十分安定なこと(安全性、経済性)

TBPはほとんどの要件を満たすが、粘度及び水との密度差が小さいという欠点
 ⇒ 芳香族を含まないケロシンのような軽飽和炭化水素で希釈する

Phosphoryl (P=O)化合物

TBP: $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}-\text{P}(=\text{O})(\text{OC}_6\text{H}_5)_2$ LD₅₀: 3000 mg/kg for rats

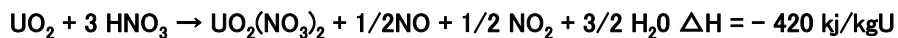
GA(Tabun): $(\text{CH}_3)_2\text{N}-\text{P}(=\text{O})(\text{CN})(\text{OC}_2\text{H}_5)$ LD₅₀: 0.6 mg/kg for mice

GB(Sarin): $(\text{CH}_3)_2\text{CH}-\text{P}(=\text{O})(\text{F})(\text{OC}_2\text{H}_5)$ LD₅₀: 0.42 mg/kg for mice
 Lethal dose for men: 0.01 mg/kg

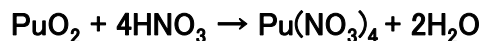
Hydrolysis: NaOH, Na₂CO₃
 Non Toxic Acid I

前処理(Chop and Leach法): 溶解反応機構

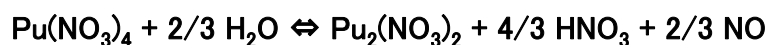
- ・燃料集合体を機械的に脱被覆した後、硝酸による燃料ペレットの溶解を行う。溶解は回分式または連続式で行われる。3~8 Mの高温濃硝酸によるUO₂の溶解反応式は次の通りである。



- ・燃料中のPuの主形態をPuO₂とすると、プルトニウムの溶解はフュームレスで進行する。



- ・溶解後、Pu(VI)への遅い酸化反応が生ずることがある。



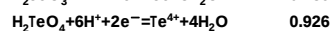
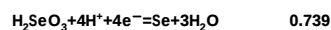
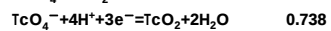
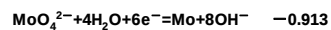
■PUREX溶液中の主なアクチニド及びFPの酸化状態とREDOX電位

元素	原子番号	1	2	3	4	5	6	7
An	U				○	△	◎	
	Np				○	◎	○	
	Pu			○	◎	△	○	
	Am			○	△			
	Cm			○				
Ln	La			○				
	Ce			○	△			
	Pr			○				
	Nd			○				
	Pm			○				
	Sm			○				
	Eu			○				
	Gd			○				
M/LFP: 希少元素 FP	Cs	○						
	Sr		○					
	Zr				○			
	Mo						○	
	Tc							○
	Ru		○	○	△			
	Rh			○				
	Pd		○					
	Se				○			
	Te				○		△	

○stable ◎stable(main) △unstable

分離(制御)対象元素(従来再処理)

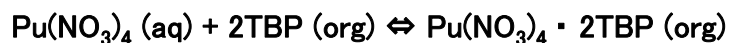
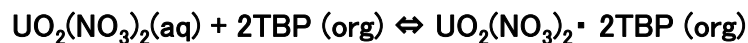
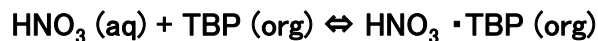
分離対象元素(高度化再処理)



7

主分離(溶媒抽出法):PUREX法

- 調整した溶解液に30 % TBP溶媒を向流多段接触させ、U(VI)及びPu(IV)を選択的に抽出しFPから分離する。
- アクチニドの硝酸塩は、TBPと中性の親油性キレート錯体を形成し有機相に抽出される。



8

◆PUREXプロセス(溶媒抽出)の化学的基礎

9



分配比(D)、分配係数(KD)、抽出率(E(%))、分離係数 α 、除染係数(DF)
 UO_2^{2+} を例にとると、

- $D_U = [\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{TBP}(\text{org})] / [\text{UO}_2^{2+}(\text{aq})]$
- $K_D = [\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{TBP}(\text{org})] / [\text{UO}_2^{2+}(\text{aq})][\text{NO}_3^-]_2[\text{TBP}(\text{org})]^2$

→ $D_U = K_D[\text{NO}_3^-]_2[\text{TBP}(\text{org})]^2$
 $\log D_U = 2 \log[\text{TBP}] + C$ ($C = \log K_D[\text{NO}_3^-]_2$ とすると) ⇒ 配位子分子数2の決定

- $E(\%) = 100D / (D + V_{\text{aq}} / V_{\text{org}})$
- $\alpha = D_A / D_B$
- $DF_U = ([\text{FP}]_{\text{inlet}} / [\text{UO}_2^{2+}]_{\text{inlet}}) / ([\text{FP}]_{\text{product}} / [\text{UO}_2^{2+}]_{\text{product}})$
 $= [\text{FP}]_{\text{inlet}} \cdot [\text{UO}_2^{2+}]_{\text{product}} / [\text{UO}_2^{2+}]_{\text{inlet}} \cdot [\text{FP}]_{\text{product}}$

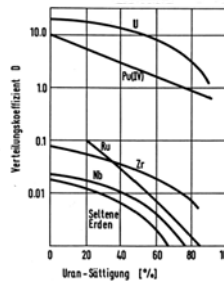
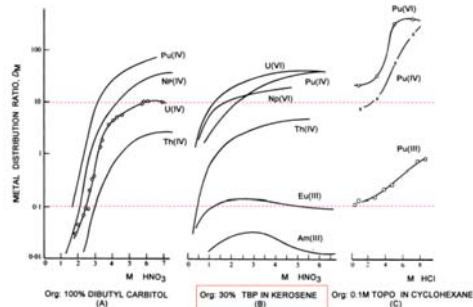


Abb. 9.4: Einfluß der Uranbeladung des organischen Extraktionsmittels auf die Verteilungskoeffizienten von U, Pu und Spaltprodukten, nach [4] (30 Vol.-% TBP/Kerosin, wäßrige HNO_3 -Konzentration von 2 mol/l bei 0 % Beladung auf 3 mol/l bei 90 % Beladung steigend)

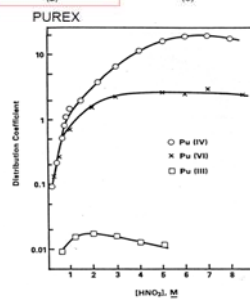
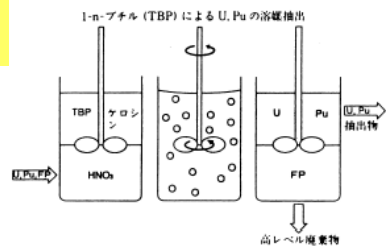


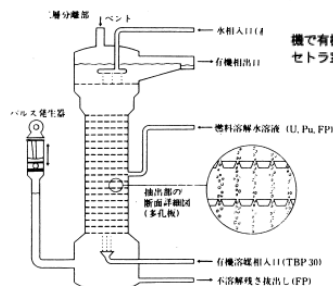
FIGURE 3. Extraction of plutonium in the III, IV, and VI valency states by 30% tributyl phosphate. (From McKay, H. A. C., and Wragg, P. R., The extraction of plutonium by tributyl phosphate, I. U.K. Atomic Energy Res. Establishment Rep. AERE-C/R 194, Her Majesty's Stationery Office, London, England, 1952. With permission.)

■主分離工程機器;ミキサ・セトラーとパルスカラム

10



ピューレックス抽出法。「ミキサセトラ」型の模式図で、モータ駆動かくはん機で有機相と無機相を混合するミキサ室と混合後の両相を静置して密度差により分離するセトラ室からなる。図は、ミキサ室におけるリン酸トリブチル(TBP)によるPuの溶媒抽出を模式的に示す



ピューレックス抽出法。「パルスカラム」型による技術的な実現(多孔板使用)。上部から水相が下部から連続的に供給され、密度差により向流分配が実現する。カラム内には多孔板を多数配置し、パルス発生器により液に脈動を与えることにより、一方の連続相の中を他相の分散相が小さい液滴となって流れる



Figure 4. Section of the 10cm diameter single pulsed column at Sellafield showing the stainless steel mesh plates and a dispersion of aqueous drops in a continuous organic phase

Figure 5. The new stainless steel mixer-settler unit at Sellafield showing the stainless steel mesh plates and a dispersion of aqueous drops in a continuous organic phase

THORP Plant(英国)のPC
 15cm ϕ -8m PC(左)、22.5cm ϕ -14m PC(右)

- ・CCは高遠心場により瞬時に抽出後のエマルジョンの相分離を達成できる。従って、設備小型化が達成できる上、接触時間は僅か数秒間なので、溶媒の放射線損傷対策上も有利で、溶媒のリサイクル回数も増すことができる。
- ・しかしながら一方で、不溶解性残渣に対する高感受性や遅い化学反応が関与する抽出系との整合性などに開発課題を残している。

遠心抽出器の特徴;油水分離～500G、
ローター4cmΦ (10kgHM/hr)
相分離時間～5秒
耐放射性 $\geq 10^8$ R

11

■FP(Tc, Ru,Cs)の除染

- ・テクネチウムは、次の分配ステップで、亜硝酸によるヒドラジンの酸化反応に触媒として関与し、それによりヒドラジンの消費量を増加させたり、アジ化水素や硝酸アンモニウムのような活性な副生成物の増加をもたらす。従って、なるべく抽出の前段階で除去することが望ましいが、抽出メカニズム的には困難な操作となる。
- ・ちなみに、共除染、洗浄工程での ^{99}Tc 、 ^{106}Ru 及び ^{137}Cs の除染係数(対ウラン)として実プラント(UP2-800)から以下のデータが報告されている^[2]。

$DF_{\text{Tc}}: \sim 30$ 、 $DF_{^{106}\text{Ru}}: > 2 \times 10^4$ 、 $DF_{^{137}\text{Cs}}: > 10^7$

- ・なお、最近のフローシート研究から、昇温させた高硝酸濃度ゾーン(I)で ^{106}Ru 及び ^{99}Tc を除去し、続く低硝酸濃度ゾーン(II)で次分配工程へのフリー HNO_3 の移行を防ぎながら ^{95}Zr の除去を図る、“ダブルスクラブ法”が提案されている。

12

■Npの挙動

- ・標準的溶解液条件では、Npは主として非抽出性Np(V)として存在するが、実際はほぼ定量的抽出が達成される。
- ・その抽出は水相中での抽出性Np(VI)への遅い酸化反応に続き、生成したNp(VI)が有機相に連続的に抽出され、これが反応の平衡をさらに右へ移行させるメカニズムによるものと考えられる。



- ・従って、亜硝酸濃度が $10^{-3} \sim 10^{-4}$ M程度の場合、相接触時間の長いMS条件ではほぼ全量のNpの抽出が達成されることになる。
- ・もし、短接触時間のCCサイクルでNpの定量抽出を設計する場合には、バナジウムV(V)の添加や電気化学的方法等による強制的酸化が必要になるのかもしれない。

13

ウラン、プルトニウムの分配 (PUREX法の核心)

- ・有機相中のPu(IV)を非抽出性Pu(III)に還元し、選択的に水相に逆抽出する。
- ・有機相に残ったU(VI)は希硝酸で逆抽出する。分配法としては以下の方法が開発されている。

(a)スルファミン鉄： $\text{Fe}(\text{SO}_3\text{NH}_2)_2$ (英国)

(b)硝酸ウラナス、硝酸ヒドラジン混合液： $\text{U}(\text{NO}_3)_4 - \text{N}_2\text{H}_5\text{NO}_3$
(仏、日)

(c)硝酸ヒドロキシルアンモニウム (HAN)、硝酸ヒドラジン混合液：
 $\text{NH}_3\text{OHNO}_3 - \text{N}_2\text{H}_5\text{NO}_3$ (仏、日)

(d) *in situ* 電解還元法 (旧西独、日)

(e) 酸分配法 (米、英、日)

14

ウラン、プルトニウムの精製(プルトニウムの再酸化)

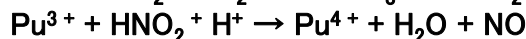
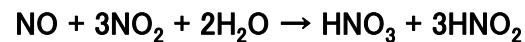
- ・所定の抽出サイクルで目的とする製品純度が達成されない場合、ウラン及びプルトニウムを再度抽出にかけ精製する必要が生ずる。
- ・このためには還元分配生成液(Pu(III), U(IV), HAN, 硝酸ヒドラジン成分の混液)の再酸化処置が必要となる。再酸化法としては、

(a) 亜硝酸ソーダ NaNO_2 あるいは NO_x ガス(仏、日)

(b) *in situ* 電解酸化法(旧西独、日)

がある。

- ・通常、亜硝酸による再酸化は、 $\sim 60^\circ\text{C}$ 、 $\sim 4\text{M}$ 硝酸濃度の条件下で行われる。



15

- ・単味HANは、 2M 以上の沸騰硝酸中で速やかに酸化できるが、



硝酸ヒドラジンが共存するとその反応速度は著しく低下する傾向にある。

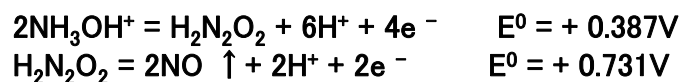
- ・(a)法の酸化効率はプラント規模で実証済みであるが、多量の α 放射性硝酸ナトリウム廃液(UO_2 酸化物使用済み燃料1t処理当たり、約500kg)が生ずる。また、生成する α -エアロゾルや残余 NO_x ガスの処置も必要となる。

- ・Pu(III)は電気化学的に直接酸化が可能である。電極反応は可逆的であり拡散支配である。

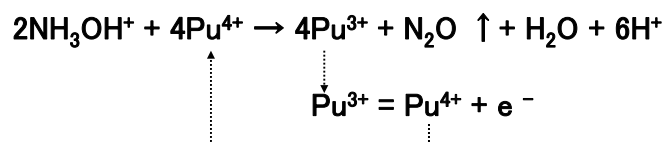


16

- ・さらに、抽出操作に好ましくないプルトリルPu(VI)の生成はHNO₃ > 2Mで無視できる程度に抑制できる。
- ・硝酸ヒドラジンの白金電極での過電圧は大きいが約900mVであるので、硝酸ヒドラジンの酸化はPu(III)に優先して起こる。HANは硝酸ヒドラジンに比べ、電気化学的にさらに安定であるので、直接電極反応での酸化は困難である。



・しかしながら、下記のように共存するPu(III)/Pu(IV)対が間接電解触媒(メディエータ)としてHANを速やかに酸化するので*in situ*電解酸化法が成立する^[6]。



17

劣化溶媒の再生(SR)とリサイクル

- ・硝酸による加水分解あるいは放射性核種からのα、γ線照射で溶媒は損傷し、酸性のHDBP、H₂MBPや希釈剤のニトロ化物を生成する。
- ・これらはFP(主にRu, Zr)やアクチニド(U, Pu)と親和性が高く、それらを溶媒中に強固に保持して第3相クラッドの形成の原因となり、除染性能の低下やアクチニドの異常流出を引起す。
- ・最終的な放射性有機廃棄物の量を減らすため、抽出操作で劣化した溶媒は可能な限り洗浄・再生し、リサイクル使用する必要がある。劣化溶媒の再生法としては、

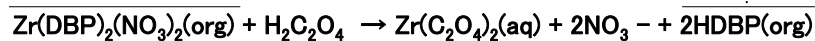
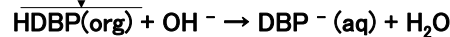
(a)炭酸ナトリウム、水酸化ナトリウムによるアルカリ洗浄法
(仏、日)

(b)ソルト・フリー洗浄法(旧西独、米、日)

(c)活性アルミナ等による固体吸着法(米、日)
がある。

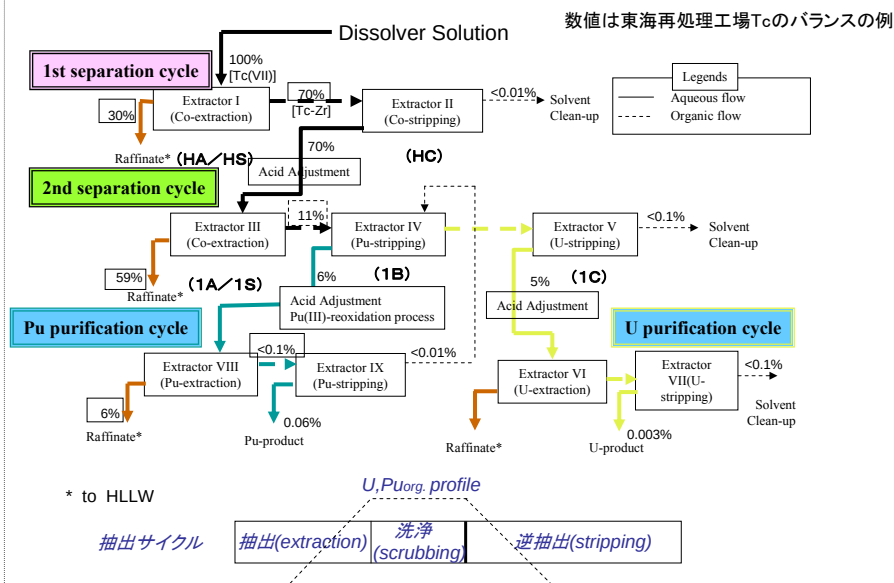
18

- ・現在全ての商用再処理プラントでは(a)法が採用されている。しかしながら、洗浄効率は ^{106}Ru に対して約50程度と低く、ナトリウム廃棄物は UO_2 酸化物使用済み燃料の1t処理量当たり、約100kg(硝酸ソーダ換算)発生する。
- ・(a)法は、洗浄試薬中のカチオン(Na^+ , N_2H_5^+)のHDBPとの錯化、それによる水相への分配を洗浄の根拠としている。
- ・これに対し、HDBPの洗浄は試薬のカチオンの種類、濃度には関係せず(ただしZrあるいはUの洗浄はアニオン種にも依存)水相のpH値のみに依存し、洗浄は主に酸解離反応に支配されるという実験的事実に基けば、洗浄剤分子のカチオンはナトリウムである必然性はなく、水相中のアニオン(OH^- , CO_3^{2-} , $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ 他)が洗浄を支配するメカニズムによる(b)法が成立する^[7]。



19

◆再処理主分離工程(東海再処理工場の例)



20

◆ウラン及びプルトニウム製品スペックの例

Uranyl nitrate:

Uranium concentration 1–2 M
Free $\text{HNO}_3 > 1 \text{ M}$
Impurities: Fe, Cr, Ni $< 500 \text{ ppm}$
Boron equivalents $< 8 \text{ ppm}^*$
Fission products $< 19 \text{ MBq/kg U}$
 α -activity (excluding uranium) $< 250 \text{ kBq/kg U}$

TRP

UO_3 powder
6FPnuclides $\leq 0.5 \mu \text{ Ci/gU}$
Non U $\alpha \leq 15000 \text{ dpm/gU}$
Metal (Fe, Ni, Cr) $\leq 500 \text{ ppm}$
Boron equivalents $< 8 \text{ ppm}$
Total impurity $\leq 2.25\%/\text{UO}_3$

Plutonium nitrate:

Plutonium concentration $\sim 1 \text{ M}$
Free $\text{HNO}_3 2-10 \text{ M}$
Impurities: Metallic $< 5000 \text{ ppm}$
Uranium $< 5000 \text{ ppm}$
Boron equivalents $< 10 \text{ ppm}$
Sulfate $< 1000 \text{ ppm}$
Fission products ($t_{1/2} > 30 \text{ d}$) $< 1.5 \text{ GBq/kg Pu}^{**}$

TRP

$\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ soln.
 $\text{Pu} \leq 250 \text{ g/l}$
6FPnuclides $\leq 50 \mu \text{ Ci/gPu}$
 $^{241}\text{Am} \leq 5000 \text{ ppm}$
Metal (Fe, Ni, Cr, Ti, U)
 $\leq 4000 \text{ ppm}$

^{241}Am content (9 months after delivery to MOX-plant) $< 5000 \text{ ppm}$

* The equivalent values are **B** 1.0, **Cd** 0.4, **Gd** 4.4, **Fe** 0.0007, etc. The amount measured for each of these elements multiplied by the factor indicated must not be more than 8 ppm.

** $^{95}\text{Zr-Nb} < 185 \text{ MBq/kg Pu}$.

21

■再処理工場からの環境放出核種と量(例)

		(TBq)		
Source		Half-life (y)	Sellafield* (TBq)	Purex** (TBq/GW _e y)
^3H	airborne	12.33	222	41
	liquid		1050	643
^{14}C	airborne	5730	4.1	2.0
	liquid			0.54
^{85}Kr	airborne	10.72	26000	12300
^{90}Sr		28.5	600	11
^{95}Nb		0.0958	150	
^{95}Zr		0.175	150	
^{99}Tc		2.13×10^5	180	
^{106}Ru		1.02	810	39
^{129}I	airborne	1.57×10^7		0.006
	liquid		0.074	39
^{131}I	airborne	0.022		0.0007
	liquid			0.032
^{137}Cs	airborne	30.0		0.002
	liquid		4090	13
^{144}Ce		0.781	100	
^{241}Pu		14.4	1800	
U			11000 (kg)	

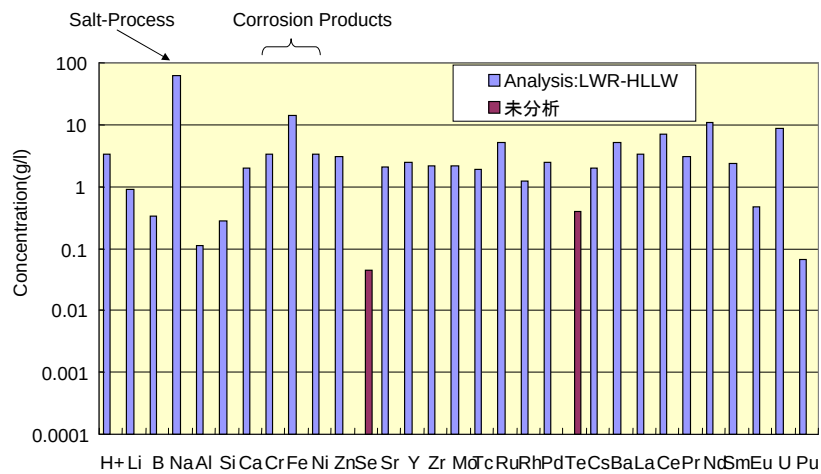
* Releases in 1978 only; 1.8 GWe produced from fuel reprocessed.

** Average for 3 plants normalized to 1985–1989; La Hague, France, Sellafield, UK, and Tokai-Mura, Japan.

(From NSCEAR 1993.)

22

◆実高レベル放射性廃液 (LWR-HLLW)の組成



Characterization

- U, Pu: $\leq 0.5\%$, MA (Am, Cm): $\sim 100\%$, FP: $>99.9\%$
- High conc. of Na and Corrosion Products, Trace of Organics (Degraded Solvent)
- Highly Oxidative (HNO_3 : $2\sim 3\text{M}$)
- Highly Radioactive (e.g., $T\cdot\alpha$: 6.5×10^7 , $T\cdot\beta$: 1.5×10^{10} , $T\cdot\gamma$: 7.0×10^9 Bq/ml)
(参考: チェコ・ヤヒモフ(源泉): $1.05\times 10^8\text{Bq}({}^{222}\text{Rn})/\text{ml}$, 山梨・増富温泉: $1.60\times 10^2\text{Bq/ml}$)

23

◆異常事象と想定事故

○再処理工程の異常事象、事故

- ・経年劣化と計画更新
- ・材料腐食と固体粒子による詰まり

プロセス化学に関連した事象例としては、

- ・第3相界面クラッドの生成とその解消法
- ・ α 核種テーリング現象とその解決法
- ・Heavy Oilの生成とPu回収法
- ・ヒドラジンによる突沸現象とその解決法
- ・高レベル廃液蒸発濃縮缶のフォーミング現象

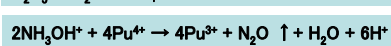
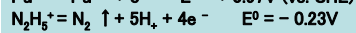
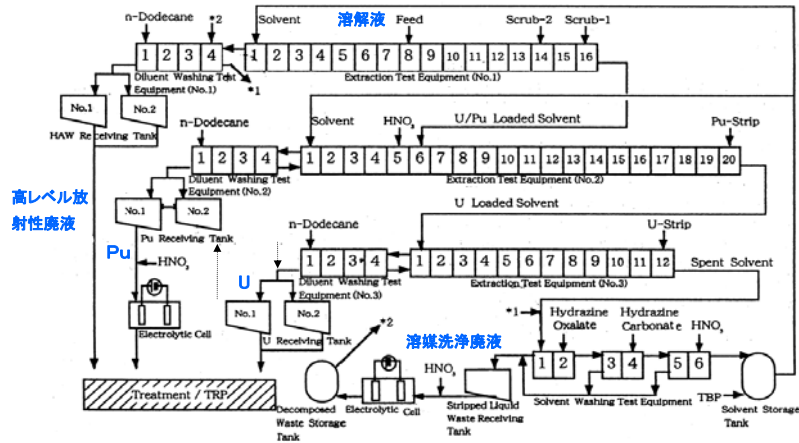
○想定事故の例(GE社の想定事故1967.11.16提出、エネ総研報告書(昭和58年5月)より)

- ・溶解液貯槽での臨界事故
- ・高放射性廃液蒸発缶の爆発(Red Oil)
- ・イオン交換樹脂の火災
- ・溶媒火災
- ・アスファルト固化物の火災
- ・ヨウ素反応器からのヨウ素放出
- ・プルトニウム蒸発缶の爆発(Red Oil)

24

高速炉燃料再処理プロセス; 高度化湿式再処理・工程設計の例 (R ETF)

再生溶媒



完全 Salt-Free + 遠心抽出器サイクル

25

◆ 今後の再処理; 湿式法・乾式法の比較

利点 ^{a,b}

湿式

沈殿法

溶媒抽出法

有機イオン交換法

無機イオン交換法

乾式

ゾーンメルティング法

溶融塩法 (高温冶金法)

フッ化物揮発法

- a (1) Flexible, i.e., able to meet varying requirements; (2) compact; (3) high degree of separation; (4) tractable wastes; (5) operation at or near ambient temperature; (6) suited to high levels of radioactivity; (7) continuous operation feasible; (8) suited to remote operation; (9) no major corrosion problems; (10) no fire or explosion hazard; and (11) demonstrated on industrial scale.

- b X denotes advantage; (X) denotes possible or limited advantage.

- c Hazards with some solvents, but not with TBP in a high-boiling, high flash-point diluent.

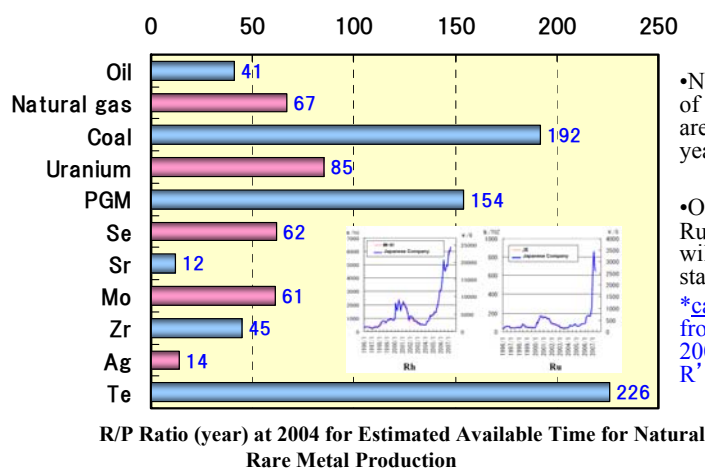
26

茨城大学工学部 講義
「原子科学と倫理」
平成22年12月27日(月)
14:30-15:50(再処理)
16:00-17:30(核種分離・利用)

核種分離・利用

◆資源と環境

世界の電力需要は2030年までに50%増、人口は28%増との見通しがある。40-60年後の石油の枯渇及び200年後の石炭の枯渇と原子力の再登板については、多くの報告者が強調したところである。サウジのヤマニ元石油相の言葉として、「父は駱駝に乗った、私は車に乗る、息子は飛行機を操縦する、しかしながら孫はまた駱駝に乗るだろう」(O. Q-Trias/European Commission, PL1.1 / ICENES2009, Ericeira, Portugal)は資源枯渇に直面する産油国の人の言葉として極めて印象深い。多くの人が「石油40-60年枯渇」を強調するようになった(原油生産の現場では、ひょっとすると既に枯渇の兆候がでているのかも知れない)。



•Natural energy and most of rare metal resources are limited within 200 years

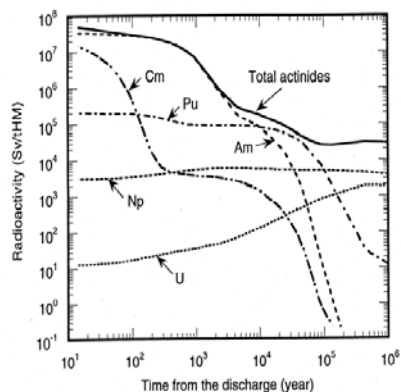
•On PGM, strategy of Russia and South Africa* will strongly affect the stable supply and prices.
*ca.90% of PGM came from both countries in 2008(P. Wager, et al., R' 09).



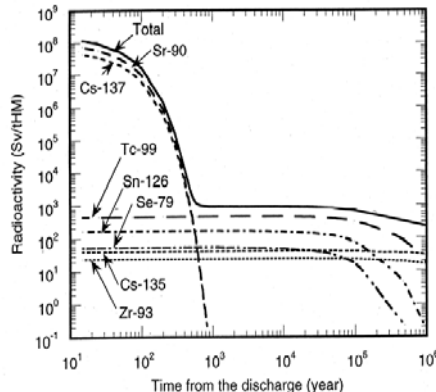
◆資源と環境(Rad. Wastes, CO_2)

- ・廃棄物処理思想の高度化; (60年代から) 希釈後、拡散→濃縮後、封入→貯蔵後、崩壊。(21世紀に入り) 分別、分解、循環(混ぜればゴミ、分ければ資源)
- ・高レベル放射性廃液ガラス固化体の潜在放射性毒性の低減; アクチニド(An)及び長寿命核分裂生成物(LLFP)の分離変換(P&T) $\Rightarrow$ Svとは? (参考資料-2,3)

Potential radioactivity of actinides in the glasses from the standard reprocessing of PWR type spent fuel (4.1% ^{235}U , 40 GWd/tHM)

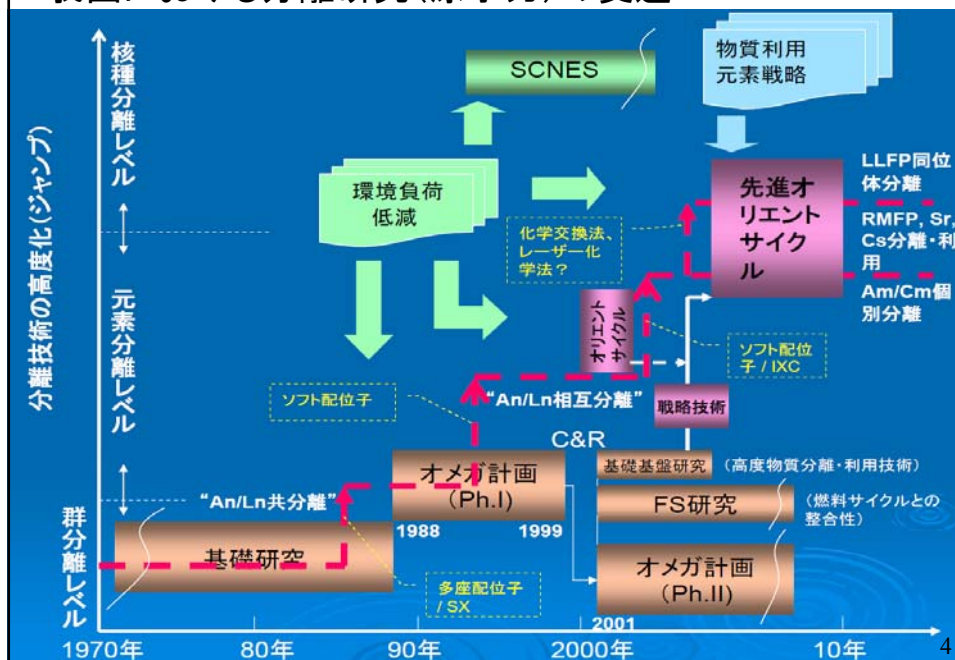


Potential radioactivity of main fission products in the glasses from the standard reprocessing of PWR type spent fuel (4.1% ^{235}U , 40 GWd/tHM)

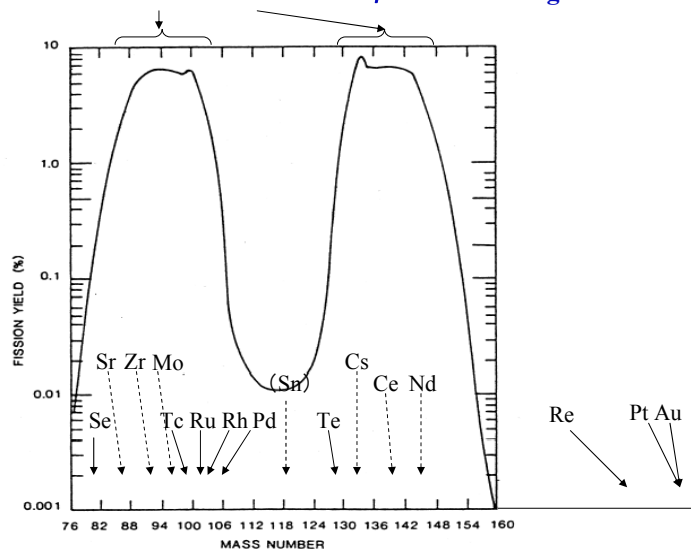


Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation-Status and Assessment Report, pp.196, OECD 1999. 3

■ 我国における分離研究(原子力)の変遷



◆ 熱中性子による ^{235}U の核分裂収率



Mass yield curve for the fission of ^{235}U with thermal neutrons
(Choppin et al.,(1980))

■原子力レアメタル(NRM ; Nuclear Rare Metals)

Definition as Rare Metals in Japan ; 47 elements, including 17 rare earth

Definition as Nuclear Rare Metals (tentative) ;31 elements in >10g/t,

e.g., excluding Noble gas, Halogen, Cd, Sn, Sb, Bk, Cf

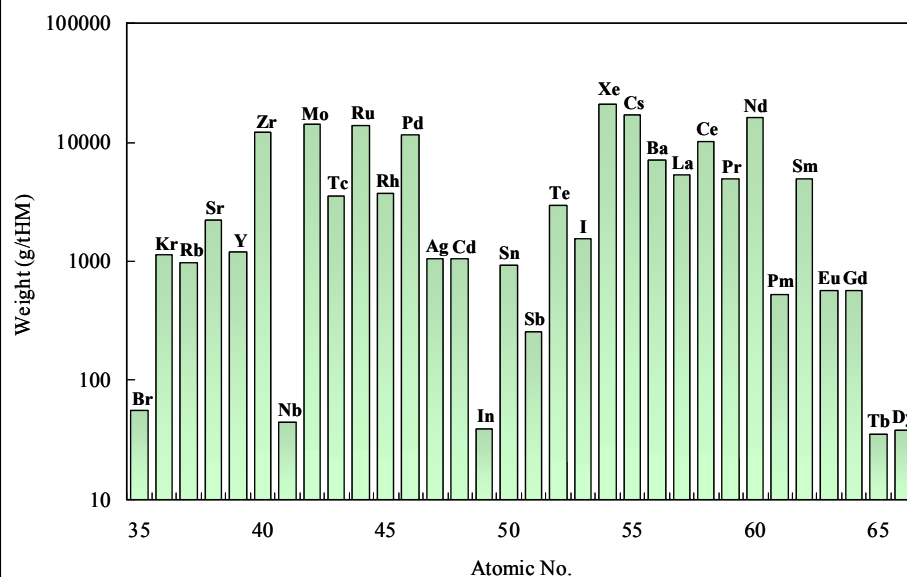
Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period	1 H	FP Rare Metal Artificially Radioactive Stable V.L. Radioactive Short-lived ($\tau_{1/2} < \text{ca. } 1\text{y}$) Low Radioactivity Exothermic																2 He
2	3 Li	4 Be	Actinides Exothermic										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89-103 Lanthanides	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt									
Lanthanides			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
Actinides			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

6

6

◆使用済み燃料(SF)中のNRM生成量

FBR MOX, Inner core, 150GWd/t, cooled 5 years



7

■SFを“鉱脈”とみると

元素名	鉱石中の含有率 (ppm)	軽水炉使用済燃料中		FBR使用済燃料中		備考*2
		含有率(ppm)	比*1(-)	含有率 (ppm)	比*1(-)	
Se	(12~92)	50~98	1.4	140	7.1	鉱石中の含有率は、ロシアUGMK社の2004年銅生産実績と平均的な銅品位1~8%より算定
Mo	140	4,021~6,059	36	8,966	84	モンゴルのコルデネット鉱山実績
Rh	(0.4~0.6)	578~949	1,527	2,543	6,652	主な鉱山ではPGM生産量の1割程度をロジウムが占めるため、PGM品位の1/10と仮定
Pd	2.4~7.4	1,900~4,150	617	6,988	1426	カナダのノース・アメリカン・パラジウム社実績
Ag	46~201	102~251	1.4	715	5.8	アイルランドGalmony鉱山、コンゴDikulushi鉱山の実績
Te	(3.6~29)	634~842	45	1,840	113	鉱石中の含有率は、ロシアUGMK社の2004年銅生産実績と平均的な銅品位1~8%より算定

* 1: 鉱石中の含有率に対する使用済燃料の含有率の比を、それぞれの間値にて算出。

* 2: 鉱石中の含有率、備考欄の想定などは、石油天然ガス・金属鉱物資源機構の「世界の鉱業の趨勢 2005」(平成17年8月)に基づく。

8

◆一般鉱石と原子力鉱石の相違点;
Sustainable Governance(4つの視点:
品位、生産技術、環境負荷指数、放射能)
から考える

Technological factors

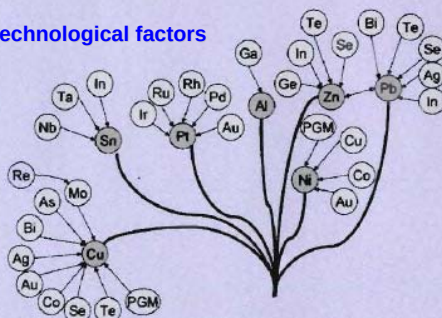


Figure 3: Coupling of major and minor metals (Hagelüken and Meskers, 2009)

P.Wager, et al., Sustainable Governance of Scarce Metals, R'09 Twin World Congress (2009).

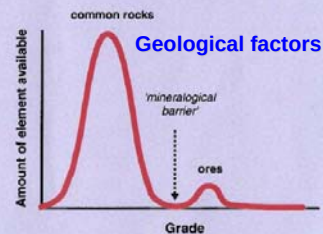
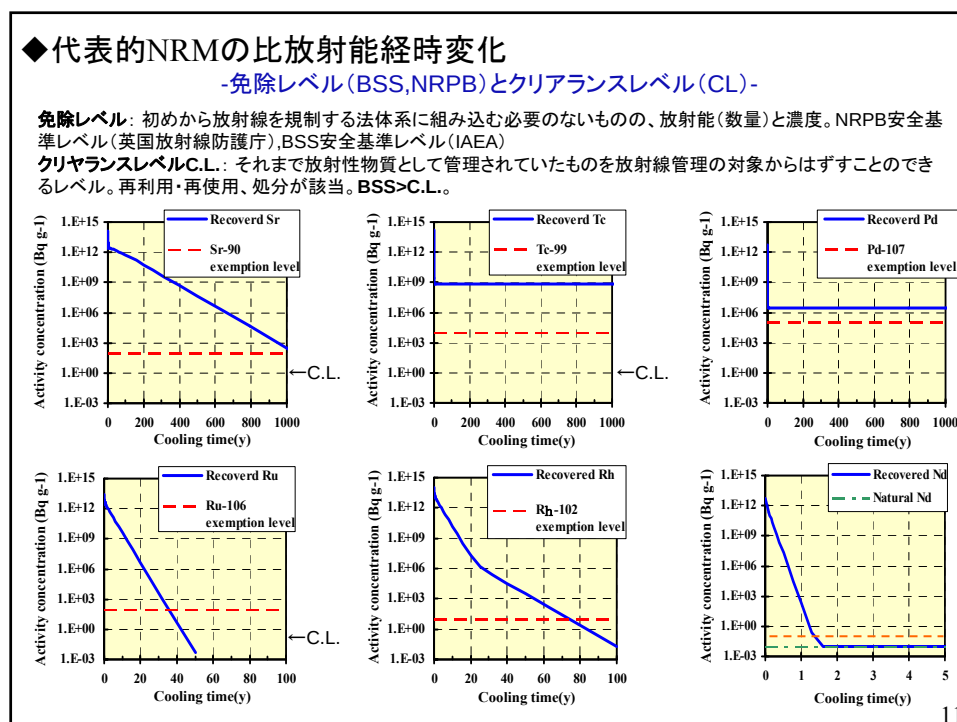
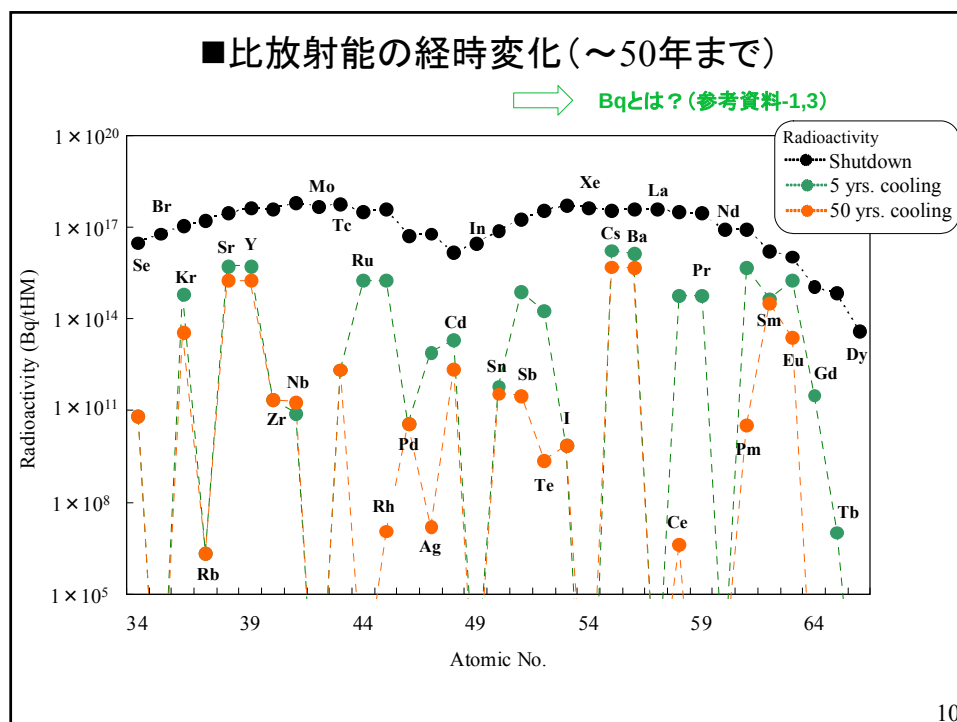


Figure 2: Distribution of geochemically scarce metals in the earth crust (Sklinner, 1976)

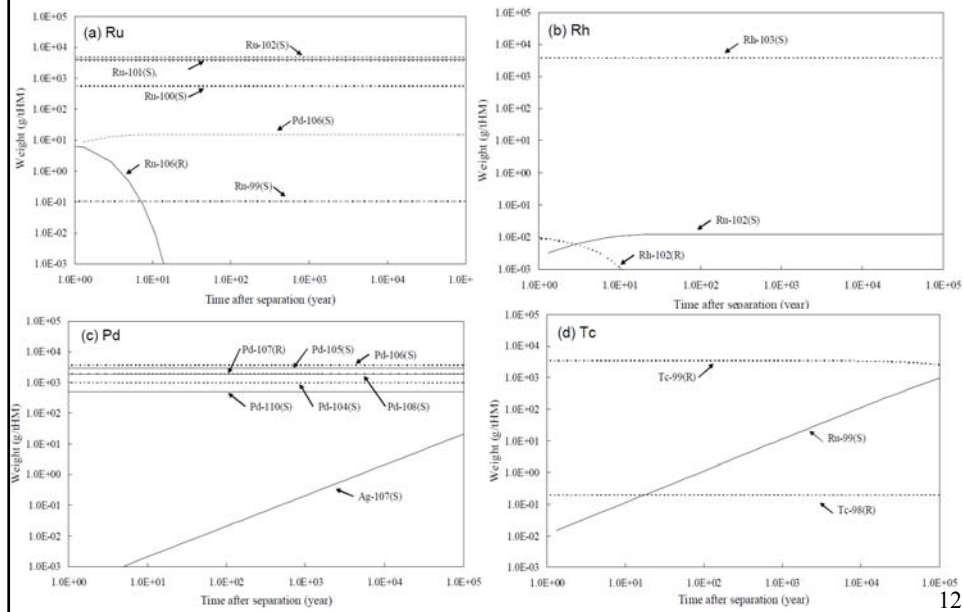
Table 1: Specific greenhouse gas emissions and aggregated environmental impacts of primary metals production (source: ecoinvent 2.0)

Ecological factors	Greenhouse gas emissions [kg CO ₂ -Eq / kg]	Environmental impacts [Ecoindicator'99 - points / kg]
Major (base) metals		
Aluminum (from plant)	12	0.78
Lead (at regional storage)	1.1	0.16
Zinc (at regional storage)	3.4	0.90
Minor (scarce) metals		
Gallium (at regional storage)	190	11
Gold (at regional storage)	13'000	1'600
Indium (at regional storage)	160	33
Neodymium (neodymium oxide, at regional storage)	34	3.2
Palladium (at regional storage)	9'900	9'600
Tantalum (at regional storage)	280	20

9



◆代表的NRMの同位体組成の経時変化



12

■NRMの放射化学特性

FBR MOX, Inner core, 150GWd/t, cooled 5 years

Ru, Rh ; Short-lived FP

After 40 years stockpile, radio-activity of Ru will become at below than exemption level (BSS).
By element separation of Pd/Ru, stable Ru and pure ^{106}Pd isotope will be obtained.

After 80 years stockpile, radio-activity of Rh will become at below than exemption level (NRPB).
By element separation of Rh/Ru, stable pure ^{103}Rh and ^{102}Ru isotopes will be obtained.

Pd, Tc ; Long-lived FP

Low radio-toxicity (e.g., Exemption Level $\geq 10^4\text{Bq/g}$)
 ^{99}Tc : 10^4 (BSS)
 ^{107}Pd : 10^5 (NRPB)

La, Nd, Ru*, In*, Pr*, Gd*, Tb* (*after 50 years) ; Very low radio-active FP

Less than 0.1Bq/g^* . Note that radio-activity of a hot-spa water of Jachmov / Czech for cure is $10.5\text{Bq }^{222}\text{Rn/ml}$.

Seem to become highly strategic and important resources in the forefront industries.

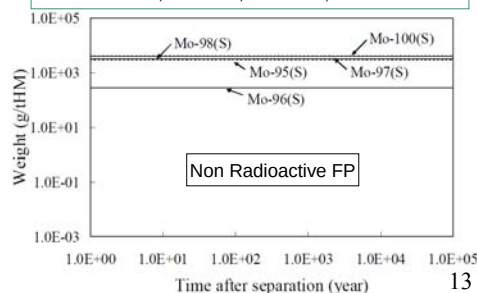
Cm, Cs-Ba, Sr-Y, Rh, Eu, Cf ;

High Radiation & Exothermicity (e.g., $>0.1\text{W/g}$)
 ^{137}Cs , as instead of ^{60}Co

Mo, Dy, Er, Yb ; Stable FP

Would be of great value. Higher order isotopic abundance of FBR Mo would be beneficial for production of ^{99}Mo ($\rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$).

Natural Mo(%); ^{92}Mo :14.8, ^{94}Mo :9.25, ^{95}Mo :15.9, ^{96}Mo :16.6, ^{97}Mo :9.5, ^{98}Mo :24.1, ^{100}Mo :9.63



13

■先進的(環境負荷低減)分離技術

1) ソフト&ソルト・フリープロセス

- 常温・常圧プロセス
- 湿式プロセス(現段階では、非SXプロセスに統一)
- グリーンケミストリー(二次廃棄物低減化プロセス)

2) 物質の高度分離(高除染、高回収、高純度)を達成

3) 媒体としては硝酸に加え、塩酸、他を許容する

4) 既往工学装置類の利用(工学的“冒険”はしない)

5) (核変換・利用のための)LLFPの同位体分離に挑戦する

6) An分離及びガラス固化プロセスの双方に共通する妨害核種(白金族、Tc、Cs他)については、主(アクチニド)分離の前段で分離する



1) 優先分離対象NRM;

- 軽白金族(Ru,Rh,Pd),Tc, Mo, Zr
- 希土類元素(Y, La~Dyまで)
- Cs, Sr
- アクチニド(UからAm,Cmまで)

2) 分離手法;

- (元素分離)固体吸着法(S)、イオン交換クロマト法(IXC)、電解法(E)、溶媒抽出法(SX)(比較として)、他
- (同位体分離)レーザー化学法(LC)、他

14

◆ 軽白金族及びテクネチウムの分離

(1) 触媒的電解採取法(CEE)

1/ 基本的に放射線場の影響を受けない

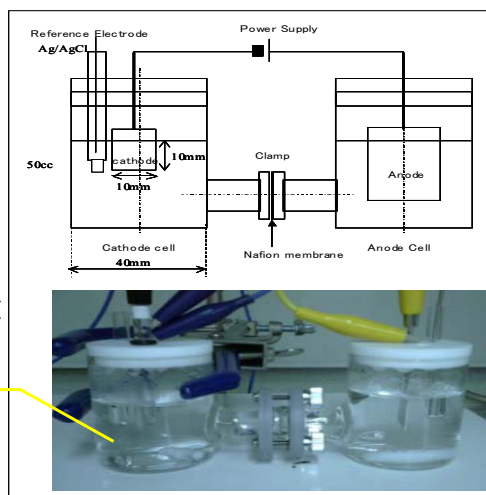
2/ アクチノイド/Cs/Sr/Other FPsとの分離が可能

3/ 二次的廃棄物発生量が少ない

4/ (定電流電解法の場合)工学的展開が容易

5/ 白金族の製造で産業実績が豊富(ほぼ100%。電気化学便覧第5版、pp.9-10、平成12年)

Catholytes ;
S・HLLW etc, for electrolytic
extraction runs
NaOH or Sea Water in the case
of H₂ production runs

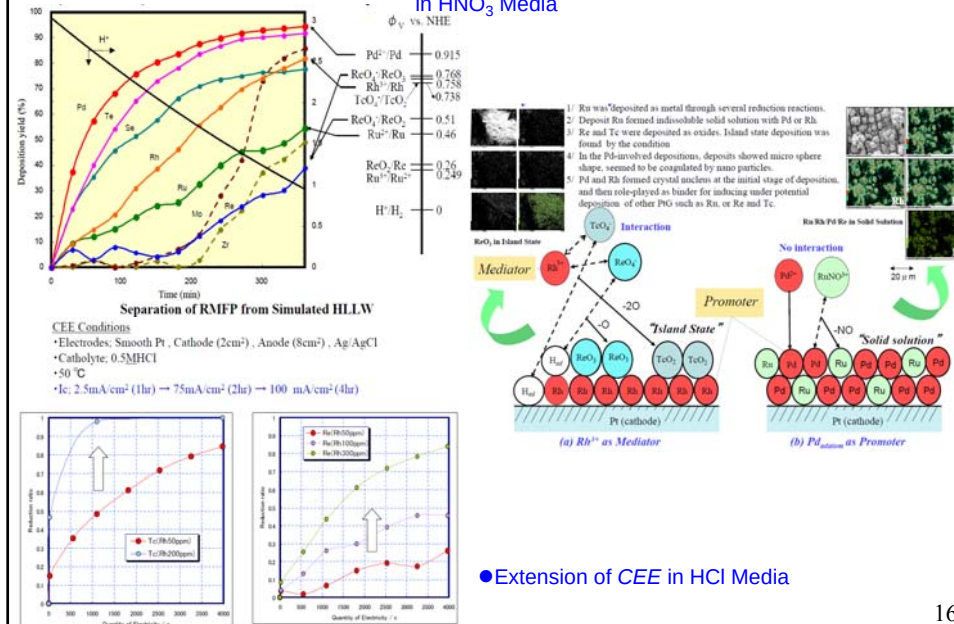


Electrolytic Cell employs for Separation of RMFP from Simulated HLLW
and for Generation of Hydrogen by Electrolysis

15

CEE (2)

- Basis of CEE (Catalytic Electrolytic Extraction) utilizing UPD (Under Potential Deposition) effect in HNO_3 Media



16

CEE (3); 共存イオン種 による析出促進効果の違い(塩酸溶液系)

CEEの発現は金属によって異なる;

1/ PdのCEE効果 $\rightarrow$ 大:Ru、中:Tc*、小;Re *ロシアKRI 共同研究データ(硝酸系)

2/ RhのCEE効果 $\rightarrow$ 大:Ru、Re、Tc

3/ Re(Tc?)及びRuにはCEE効果はない。Pd,Rh間は競争的

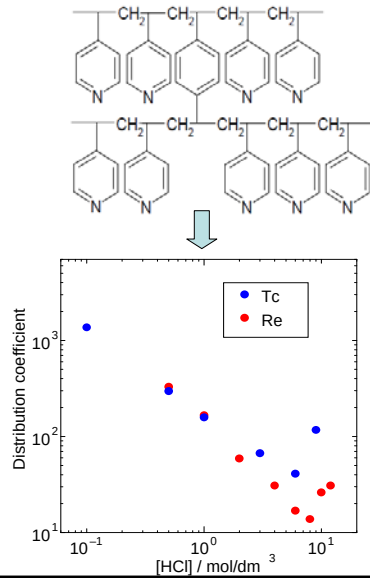
Run	RMFP	Reduction Ratio (%)				
		Pd	Ru	Rh	Re	Tc
1	Pd	97.8	—	—	—	—
2	Ru	—	17.6	—	—	—
3	Rh	—	—	90.2	—	—
4	Re	—	—	—	13.2	—
5	Tc	—	—	—	—	57.5
6	Pd-Ru	>99	>99	—	—	—
7	Pd-Rh	99.1	—	98.9	—	—
8	Pd-Re	99.1	—	—	17.6	—
9	Ru-Rh	—	99.2	93.5	—	—
10	Ru-Re	—	6.8	—	11.3	—
11	Rh-Re	—	—	92.2	41.6	—
12	Rh-Tc	—	—	>99	—	99.7
13	Pd-Ru-Rh-Re(3.5:4:1:0.5)	>99	83.3	>99	91.4	—
14	Pd-Ru-Rh-Tc(3.5:4:1:0.5)	>99	86.9	>99	—	68.9

CEE Conditions; Electrodes; Smooth Pt, Cathode (2cm^2), Anode (8cm^2), RE; Ag/AgCl, Catholyte; 0.5M HCl , Temp.; 50°C , Ic; $2.5\text{mA}/\text{cm}^2$ (1hr) $\rightarrow 75\text{mA}/\text{cm}^2$ (2hr) $\rightarrow 100\text{mA}/\text{cm}^2$ (4hr)

17

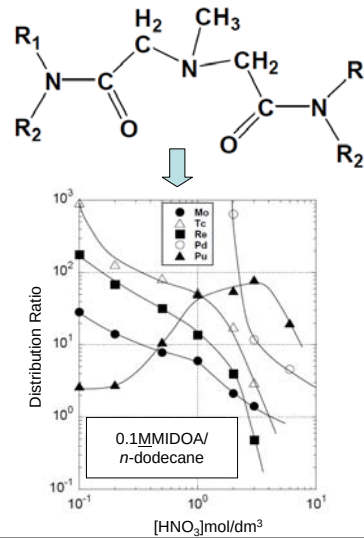
イオン交換クロマト分離法 (IXC) 及び 溶媒抽出法 (SX)

Tertiary Pyridine Resin (TPR)



MIDOA

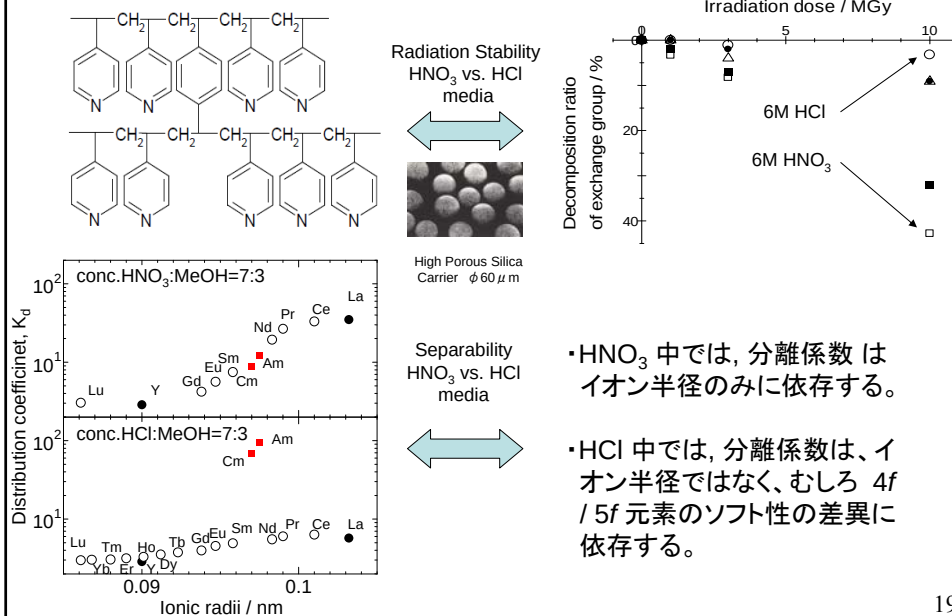
(Y. Sasaki, et.al., *Chem. Lett.* **36**, 1394 (2007).)



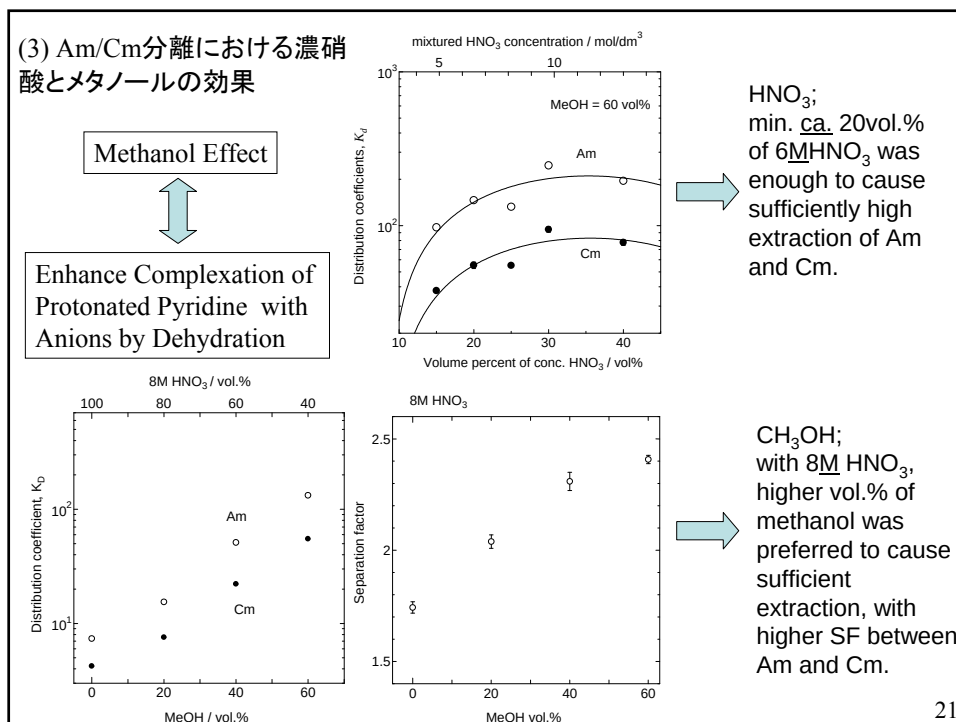
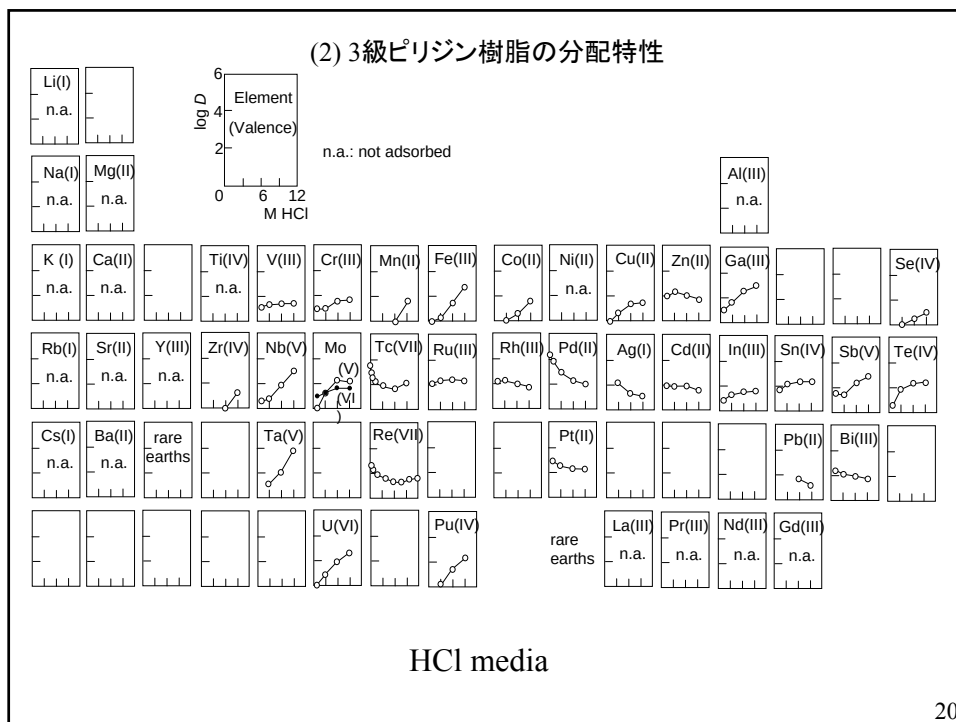
18

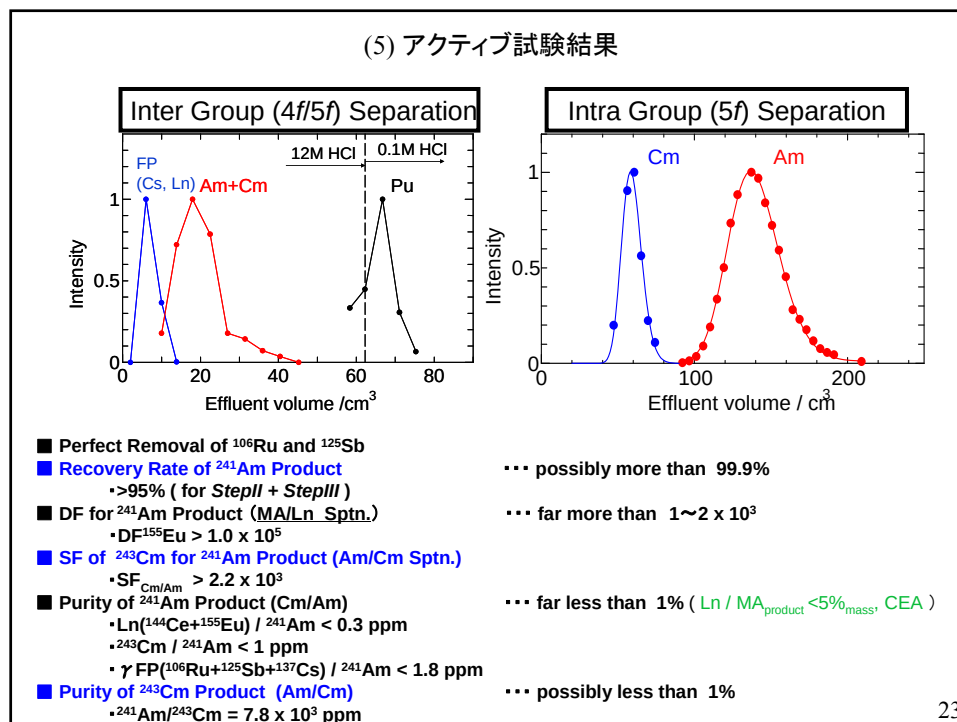
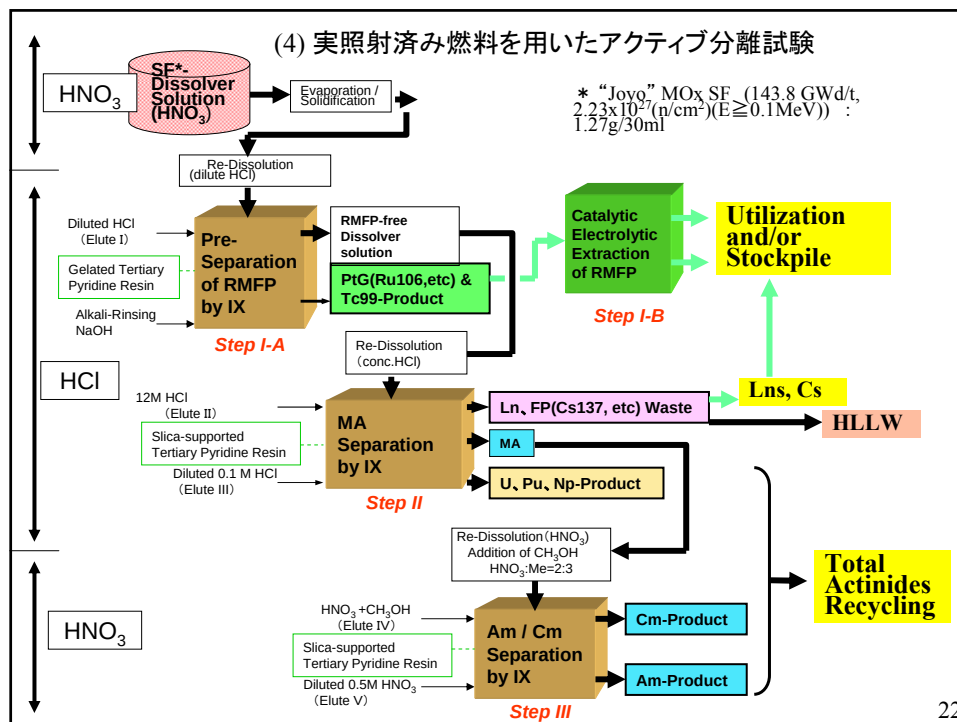
◆ アクチニド及びランタニドの分離

(1) 3級ピリジン樹脂の基本特性

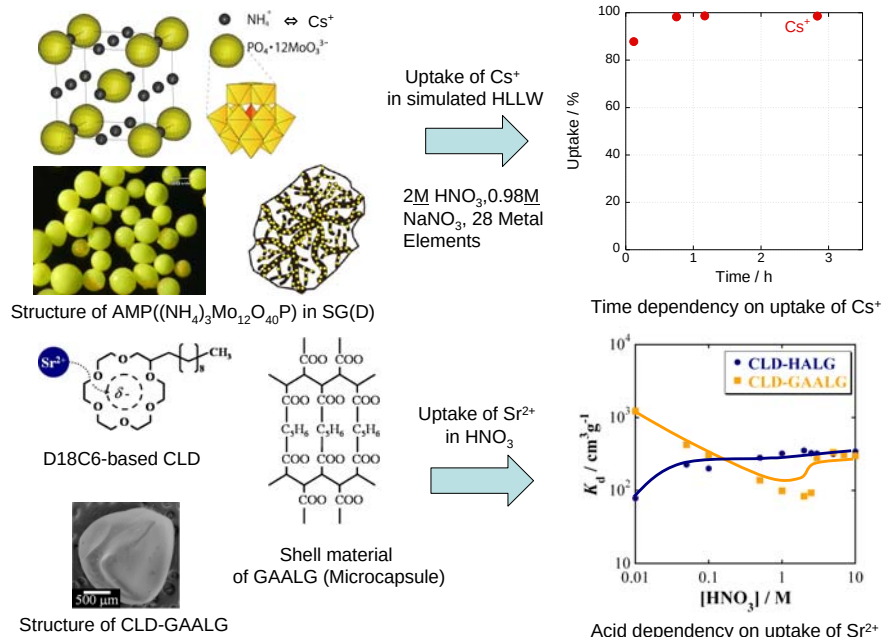


19





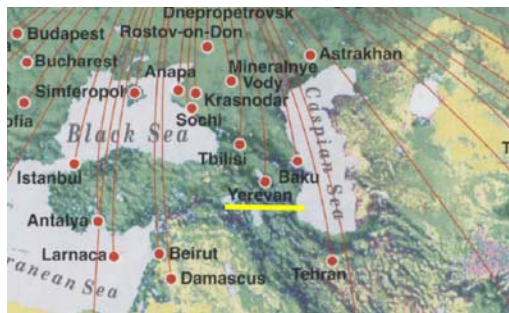
◆ セシウム及びストロンチウムの分離



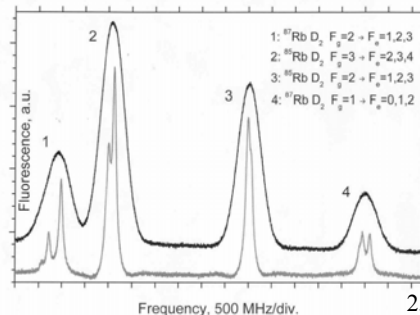
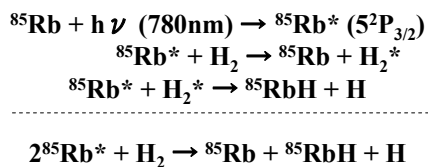
24

■ アルカリ金属 (Rb, Cs) の同位体分離研究

ISTC Collaboration with IP, Armenian Academy of Science (2002-2004)

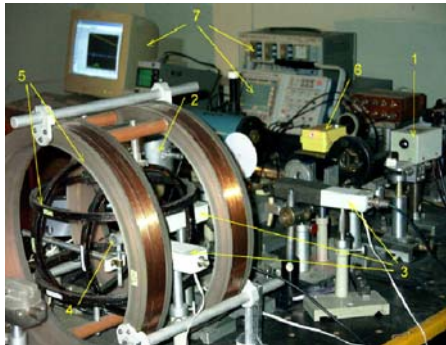


Laser-chemical Isotope (⁸⁵Rb) Separation - Mechanism



25

◆ レーザー化学法 (LCIS) による^{85/87}Rbの同位体分離



1; 波長可変ダイオードレーザー、2; Rb(Cs)セル、3: 発光ダイオード、5; 交互直交ヘルムホルツコイル

Desk-top LCIS Equipments



⁸⁵RbH Deposits at the Cell Window

Item	Figure
Rb vapor density	5×10^{14} atom/cm ³
H ₂ density (converted into pressure)	5 Torr
Cell temperature	220~240°C
Laser power, Irradiation time	50mW, 30min~2.5hour
⁸⁵ Rb ratio	72% (Before exp.) 98.4% (After two exps.)
⁸⁷ Rb ratio	28% (Before exp.) 1.6% (After two exps.)

$$\frac{Y/(1-Y)}{X/(1-X)}$$



Head Separation Factor was 2.99 (1st), and 23.9 (2nd)

26

■NRMの利用(過去の調査例)

表-1 動力炉より発生する燃料中にふくまれる元素ならびにRIの価値評価 (BNWL-25より引用)

元素あるいはRI	可能性のある用途	半減期(年)	比 出 力 (Watt/g)	おおよその含有量 (g/ton) 25000 MWD/t の場合	見積り価額 (＄/t 使用済み燃料)	サマリー数 (×10 ⁴) 10 ⁴ MWD の場合
Kr-85	特殊照明、放射線源	10.4	0.54	17	1,700	
Sr-90	熱源、β線源	28	0.95	411	822	8.7
Tc-99	耐食材料、合金材	2.1×10 ⁵	—	628	628	
Rh	工業、電気および装飾関係	安定	—	337	674	
Ru	工業ならびに電気関係	安定 (Tc-99-106)	—	1,707	354	
Pd	工業、電気および装飾関係	安定	—	976	244	
Xe	特殊照明	安定	—	3,987	1,196	
Cs-137	熱源、放射線源	30	0.42	950	950	12.3
Ce-144	熱源、β線源	0.78	25.6	241	260	
Pm-147	熱源、放射線源	2.6	0.33	133	335	
U-238	親物質	4.5×10 ⁹	—	8.9×10 ⁵	0	
U-236	Np-237の標的	2.4×10 ⁷	—	3277	3,6070	
Np-237	Pu-238の標的	2.2×10 ⁶	—	316	6,320	
Am-241	熱源 (Cm-242の標的)	458	0.1	56	2,800	
Cm-242	熱源 (既述してPu-238となる)	163日	120	23	3,450	
Am-243	Cm-244の標的	7,650	—	87	39,120	
Cm-244	熱源	176	2.8	22	19,800	
Pu-238	熱源	90	0.56	—	3,450	
Pu-239	核分裂性物質	2.4×10 ⁴	—	5,453	49,100	
Pu-240	親分物 (Pu-241の原料)	6.8×10 ³	—	1,517	7,585	
Pu-241	核分裂性物質 (Am-241の原料)	13	—	1,412	24,000	
Pu-242	Am-243の標的	3.8×10 ⁵	—	386	15,050	

表-2 地球上におけるRIのエネルギー利用

出力レベル	使用するRI	応 用 の 分 野	応用の適定基準
Microwatts	Pu-238	心臓のペースメーカー、 生医学的計測	長寿命、信頼性、 安全性
100 ~ 1000mW	Pu-238, Sr-90, Pm-147	海洋学的計測、 ケーブル用増幅器、 水中兵器	信頼、取り扱いの容易さ、 信頼性、安全性
10 ~ 200watts	Sr-90	発電所、 マイクロ波自動中継所、 海洋学的地質調査と計測	信頼、長寿命、 信頼性、安全性
1 ~ 10 KW	Co-60, Sr-90, Ce-144	癌の治療施設、 探査探鉱と調査、 軍用通信	信頼、信頼性、 安全性

出典:
PNCT-7099(1970)
BNWL-25(1965)

27

◆ロシアにおける ^{90}Sr 及び ^{238}Pu の利用例



^{90}Sr Battery (KRI)
23,000Ci ^{90}Sr 150W



^{238}Pu pacemaker (KRI)
ca.150mgPuO₂
 $^{241}\text{Am}(n, \gamma)^{242}\text{Am}(\beta^-) \rightarrow ^{242}\text{Cm}(\alpha) \rightarrow ^{238}\text{Pu}$

旧フロービンラジウム研究所本部にて撮影

28

◆人工元素、テクネチウム (^{99}Tc) の利用

アメリカ

- 1/ NASAのW/Tc合金開発プロジェクト(1964)
TcのWへの延性付与、Reより優れる。ジェットエンジン合金の改良
- 2/ その他、常磁性、高温超伝導性、対腐食抑制効果、Tc合金コイルの医学利用に注目。



Prof. V. Peretroukhin checks the electric battery based on β -emission of technetium-99

ロシア

- 1/ β -emission を利用する 長寿命Tc電池 (1978-1983, O.Balakhovsky)
- 2/ β -Sourcesを利用する眼球の欠陥検査及び医学療法 (1983 – 1993, K. Bukov)
- 3/ 腐食抑制剤 (1960-1975, Kuzina)
- 4/ 付着抑制剤 (1975 – 1987, S.Bagaev, S.Kryutchkov, K.German)
- 5/ Tc 触媒 (1975 – 2000, G. Pirogova)

日本

- 1/ 過去に利用研究実績なし。
- 2/ 水素製造触媒利用の研究開始(JAEA, 2002-)。その他の電極触媒利用研究開始(JAEA, 2008-)

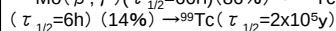
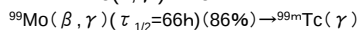
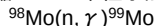
29

99mTc

99mTcの製造法

(1) FPからの分離: ^{235}U 高濃縮U(90%)/Al合金の中性子照射、無担体 ^{99}Mo を分離する(クロマトグラム法)。300TBq/g以上の放射能の製造。約100GBq/g(担体 Al_2O_3)のアイソトープジェネレーターの製品化が実現。一種のイオン交換再処理を行うためのホットセルが必要。

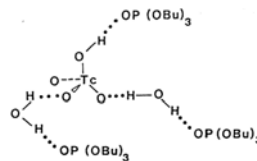
(2) 濃縮 ^{98}Mo の中性子照射



この反応で生ずるMoの比放射能は低い。モスクワ付近で実施

注: Gatchinaで高濃縮 $^{98}\text{MoO}_3$ を照射、KRI / St.Petersburgで照射後の $^{99}\text{MoO}_3$ を硝酸溶解。MEK(Methylethylketone)を用い、遠心抽出器により TcO_4^- 塩を分離。DF>10⁶。生理食塩水で再溶解後、所定の化学形に変換、病院へ供給する(所定時間約4~5時間=製剤+輸送時間)

テクネチウム錯体の例



Possible structure of TcO_4^- -TBP extraction complex.

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 標識化合物(放射性医薬品); Tcの高錯体形成能を利用。錯体の血流移動。腫瘍に集積。短半減期(6h)の γ 線を利用して追跡。1964年から実用化。

Tc-99m核医学診断法(抜粋)

化学形または化学結合	利 用
過テクネチウム酸塩	シンチグラフィ(甲状腺・胃・脳腫瘍・唾液腺)、甲状腺機能診断
ポリリン酸塩または二リン酸メチレン	シンチグラフィ(骨) 骨イメージ
硫黄コロイド	シンチグラフィ(肝臓・脾臓)
イミノ二酢酸塩	機能診断(肝臓・胆管)
チオグルコース、ジメルカプトコハク酸	シンチグラフィ(腎臓)
アスコルビン酸鉄錯体	シンチグラフィ(腎臓)
エチレンジアミンテトラアセタート錯塩 EDTA	シンチグラフィ(腎臓・脳腫瘍)
グルコヘプトナート錯塩	機能診断(腎臓)
アルブミン顆粒	シンチグラフィ(肺)
フィチン酸塩(モノイノシット六リン酸塩)	シンチグラフィ(肝臓・脾臓・骨髄)、血球の標識

30

カナダの原子炉停止で放射性検査薬が供給不安に

2007年12月14日 読売新聞

<http://www.yomiuri.co.jp/iryou/new/OYT8T00797.htm>



$^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ は種々の化学形に容易に変換できる長所。我が国は $^{99}\text{Mo}(\beta, \gamma)(\tau_{1/2}=66\text{h})$ を毎日輸入。生理用食塩水でMoから溶離(カウミルキングによるアイソトープジェネレータ)。

がんや心臓病の検査など医療現場で広く使われる放射性物質「モリブデン99」が、世界的な供給不安に陥る可能性が出てきた。

生産拠点であるカナダの原子炉が、11月中旬から管理上の問題で停止したためだ。

モリブデン99から作る製剤での医学検査は、日本国内で年間約100万件も実施されており、放射性医薬品メーカーなどでつくる日本アイソトープ協会が医療機関に緊急連絡を出すなど対応に追われている。

停止したのはカナダ原子力公社のオンタリオ州にある研究炉。モリブデンに放射線を照射して「99」を生産、世界の半分の生産量を占めている。

カナダ原子力安全委員会による11月の立ち入り検査で安全装置の不備が発覚、停止に追い込まれた。カナダ議会は12日、運転を120日間暫定的に認める緊急法案を可決。今月20日前後にも再稼働が可能になる見込みだが、その後の供給体制も不安を残したままだ。

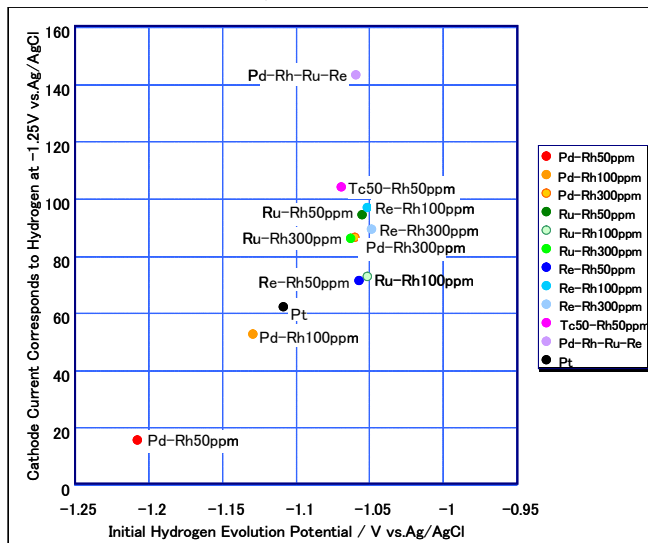
「99」が原料のテクネチウム製剤は医療現場で診断に広く使う。「99」の半減期は約67時間、テクネチウム製剤の半減期は7時間と長期貯蔵が不可能。国内生産していない日本は毎週、カナダから空輸している。

AP通信によれば、今回の停止により、米国では多くの病院で、検査件数が通常の2~3割に落ち込んだという。日本も輸入元が代替入手先の確保を急いでいるが、これまでほぼ全量をカナダに依存し、他国の生産はいずれも少量のため、同協会は「17日以降、必要量を安定的に確保できるかどうかは不透明」とみている。

京都大学薬部の佐治英郎教授は「テクネチウム製剤は検査に欠かせない薬。日本でも研究炉などを利用して、緊急時に国内生産・供給できる体制を整えるべきだ」と話している。

31

◆析出NRMの水素製造触媒活性;アルカリ水の電解

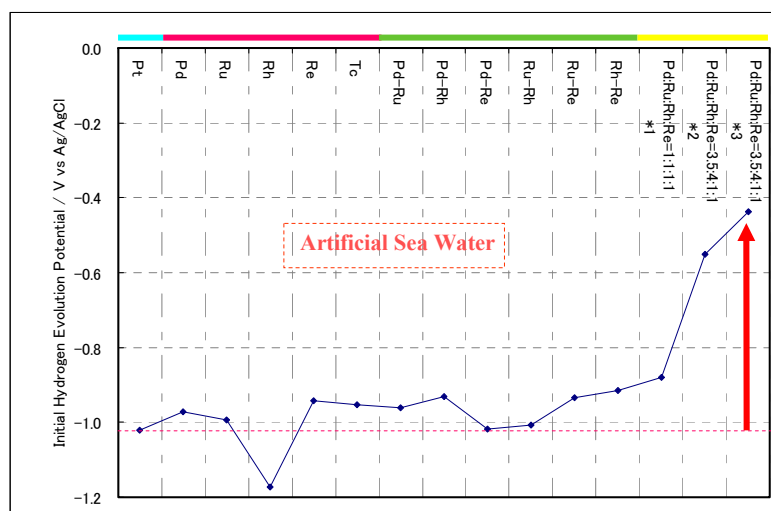


Catalytic ability of RMFP deposit electrodes on electrolytic H₂ production

- 1/ 単味よりも混合析出物の活性が高い(混合効果)
- 2/ -1.05Vが水素発生電位の限界電位と考えられる。
- 3/ 2元系ではTc-Rh及びRe-Rhの活性が高い。Tc及びReは二元系ではPd及びRuの代替となる可能性が高い。
- 4/ Pd-Rh系では、表面Rh原子数が多いほど活性が増大する。しかしながら、Pdは活性に寄与しない
- 5/ 活性支配元素はRh及びRuの可能性が高い
- 6/ 硝酸起源よりも塩酸起源のTc(金属?)の活性が高い(→今後確認する必要あり)
- 7/ 4元析出系触媒の活性は白金電極(平滑及び白金黒)を上回る。平滑白金の2倍程度。人工海水の電解でも同様な傾向
- 8/ 4元析出系触媒は安定な球状析出で、水素吸着席が著しく多く、電解時の過電圧が著しく小さい(反応抵抗が小さい)

32

◆析出NRMの水素製造触媒活性;人工海水の電解



*1 Pd:Ru:Rh:Re = 1:1:1:1 *2 Pd:Ru:Rh:Re = 3.5:4:1:1;Pd/(Ru+Rh+Re)=1.6 Block Addition of Pd²⁺
 *3 Pd:Ru:Rh:Re = 3.5:4:1:1 ;Pd/(Ru+Rh+Re)=1.6 Divided Addition of Pd²⁺

Initial Hydrogen Evolution Potentials on Various RMFP deposit Pt Electrodes

33

■利用に向けての新視点

1/ 非核的利用。安定、短寿命、低放射性毒性(β^-)のもの

Rh; 有用、最高価格元素
 Ru; 極めて有用、有望
 Pd; 有用、低毒性、最小限の管理
 Tc(Tc-99); 未知、限定的管理、**Re代替元素**
 Mo; 非放射性、**核医薬品Tc-99m源**
 希土類(La、Nd、Dy、・・・); 微・非放射性

2/ 核的利用。放射線及び熱源利用

Cs-137; 殺菌・除菌用放射線源、**非破壊検査用Co-60代替線源**
 Sr-90、Cs-137、Ce-144、**Pu-238(深宇宙探査用動力源)**、Pm-147、Am-241、Cm-242/244; 動力用熱源

3/ 核分裂性、燃料親物質

Np-237、Am-241、Cm-242,244

4/ 同位体市場

34

◆ 同位体の市場価格 (ORNL, etc)

Element	Isotope	Price(\$/g), (A)	Price(¥/g) 27th Feb.,2003	Amount (g/tHM) (B)	Abundance	Rad. or Stable	$\tau_{1/2}$	Solubility (C)	RR by CEE (D)	Property of isotopes in the spent fuel(\$/tHM) A*B*C*D
Tc	Tc98	3.00E+10		est. 2.66E-02	0	rad. $\beta^- \gamma$	4.2×10^6 y	0.8	0.9	
	Tc99	ca. 100		1.09E+03	100	rad. active f	2.1×10^5 y			LLFP 7.85E+04
Ru	Ru99	39,040		2.55E-02	0					
	Ru100	43,170		1.38E-02	3.3					3.75E+06
	Ru101	35,050		1.18E+03	28.6					2.61E+07
	Ru102	20,410		1.52E+03	36.4					1.95E+07
	Ru104	27,300		1.32E+03	31.6					2.27E+07
	Ru106			1.47E+01	0.4	rad. active f	372.6d			
Rh	Rh102			4.39E-03	0					
	Rh103	29		1.28E+03	100			0.8	0.99	2.94E+04
	Rh106			1.38E-05	0	rad. active f	29.80s			
Pd	Pd104	63,800		1.71E+02	8					8.64E+06
	Pd105			9.85E+02	28.6					
	Pd106			1.07E+03	31					
	Pd107			5.67E+02	16.4	rad. active f	7×10^6 y	0.8	0.99	LLFP
	Pd108	67,090		5.20E+02	15					7.28E+06
Se	Se76			1.37E+02	4					
	Se77			3.25E-02	0					
	Se78			1.86	2.7					
	Se79			5.37	7.8					
	Se80			8.57	12.5	rad. active f	6×10^4 y	0.8	0.9	LLFP
	Se82			1.67E+01	24.4					
Te	Te122	76,850		3.60E+01	52.6					
	Te123	140,000		1.37E+00	0					
	Te124	29,230	est.	5.27E-02	0	radioactive	1.3×10^{13} y			
	Te125	16,040		1.16E+00	0					
	Te126	8,950		2.48E+01	2.8			0.8	0.9	2.86E+05
	Te128	4,340		4.02E+00	0					
	Te130	4,490		2.25E+02	25.1					7.03E+05
U	U234	61,800		6.40E+02	71.4	radioactive	2.4×10^{21} y			LLFP 2.09E+06
Ag		0.2	20.16	6.94E+01		radioactive	454×10^3 y			
Au		10	1,455							
Ru										
Rh										
Pd			980							
Pt		12	2,756							
Diamond		28,000	1,126,514/ct							

35

■利用“ビジネスモデル”

1/ 低環境インパクト分離技術(LGET)によるレアメタル生産・利用: 現行のAu、Pd生産技術は他元素に比べ桁違いにEcological Factors (Kg CO₂-Eq/Kg)が高いといわれる(スライド-22)。ここにNRMの出番はないか?

例1) Mo, Dy, La, Nd(取り出し時)、Ru, In, Pr, Gd, Tb(50年冷却後)、Rh(100年冷却後)

・冷却・備蓄後利用

例7) FP・Ru → RI免除レベル以下 (40年) → クリヤランスレベル以下(50年)

例8) FP・Rh → RI免除レベル以下 (80年)

・冷却後高度元素分離による安定同位体生産 (ただし、Ru-99, Ru-102は ≤ 0.1 g/t)

例2) FP・Ru/Pd分離 → Pd-106(s)

例3) FP・Rh/Ru分離 → Rh-103(s) 29\$/g, Ru-102(s) 20,410\$/g

例4) FP・Pd/Ag分離 → Ag-107(s)

例5) FP・Tc/Ru分離 → Ru-99(s) 39,040\$/g

2/ 安定元素希釈

例6) FP・Pd → RI免除レベル以下

3/ β -封じ込め利用

例9) FP・Pd(Pd-107), Tc(Tc-99)

4/ 核種変換利用

例10) Tc-99 → 安定Ru-100~102

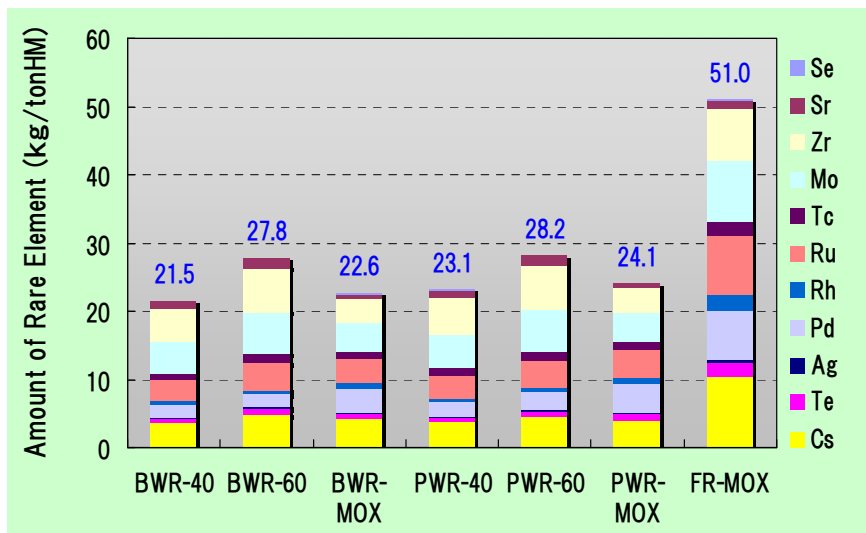
5/ 低コスト同位体分離による安定核種利用

例11) 原子レーザー法 → 白金族の同位体分離(LLNL, 1982)

例12) レーザー化学法 → アルカリ金属以外への適用性?

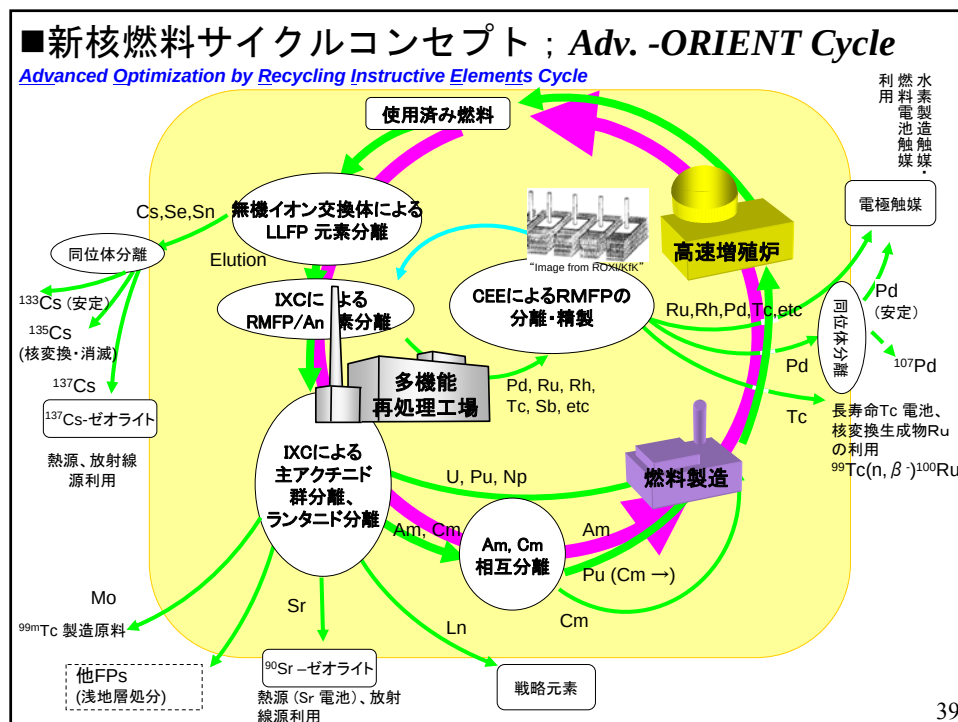
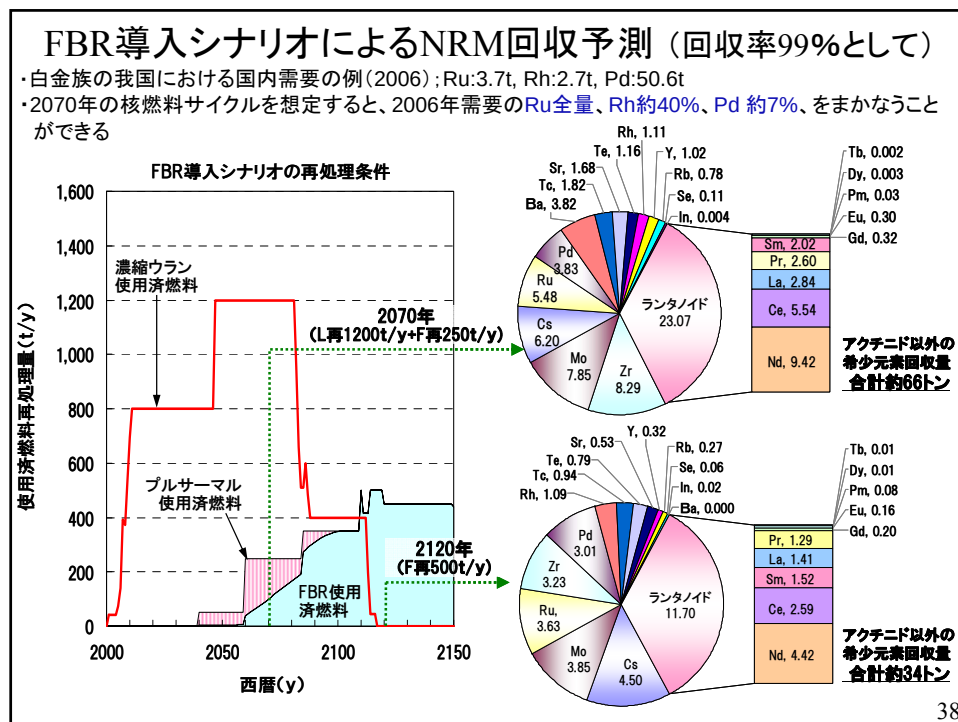
36

◆炉型別NRM生成量



BWR-40(45,000MWd/t, 3.8%EU), BWR-60(60,000MWd/t, 4.9%EU), BWR-MOX(45,000MWd/t, 3.9%EU, 3.8%Puf)
PWR-40(49,000MWd/t, 4.6%EU), PWR-60(60,000MWd/t, 5.3%EU), PWR-MOX(49,000MWd/t, 3.9%EU, 5.9%Puf)
FR-MOX(90,000MWd/t, 0.3%EU, Inner core18.3%Puf, Outer core20.9%Puf)

37



■新核燃料サイクルの研究開発戦略

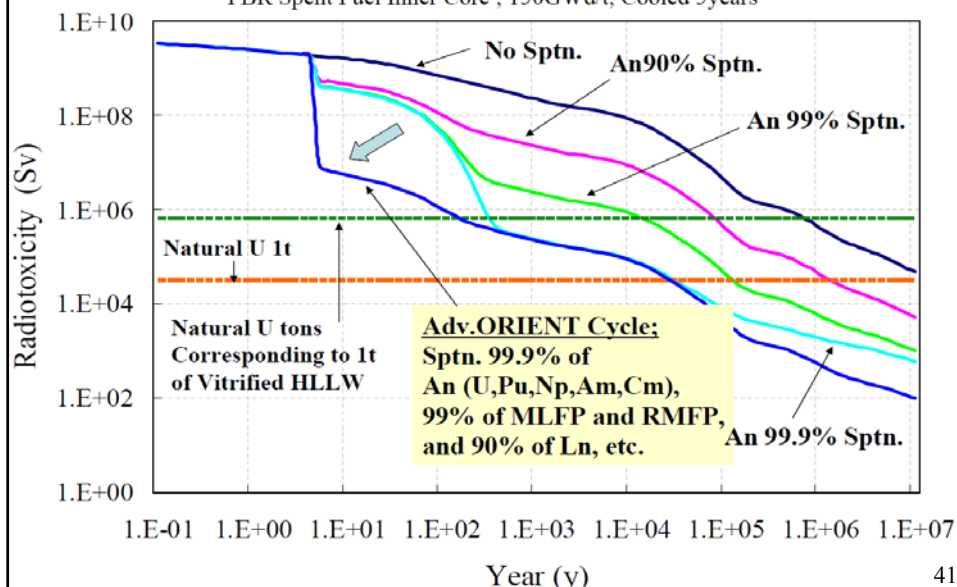
- **Trinitarian Research on Separation, Transmutation and Utilization (S&T,U) of Nuclides and Elements, Based on FBR Fuel Cycle. A Copernican Revolution on Fuel Cycle Strategy.**
- **Reduction of Volume and Toxicity of Rad. Wastes.**
 - Within a few hundred years, let the radiotoxic inventory decrease to the level of natural U tons corresponding to 1t of vitrified HLLW.
- **Multi-functional and Compact Reprocessing Process and Plant.**
 - Separate all actinides, LLFP (^{135}Cs , etc), MLFP (^{137}Cs , ^{90}Sr) and prioritized NRM (light PGM, Tc, Mo and Ln, etc). Target S.F. are not uniformly, as 90-99.9%.
 - Direct and deep separation of all actinides into 3-4 groups, U+Pu+Np, Am and Cm from the spent fuel.
 - High purity for NRM in utilization, low DF allowed for An in burning.
 - Hydrometallurgical Separation: Adopt **Soft** processes and **Salt-free** reagents for suppressing the secondary rad. wastes.
 - Allow hydrochloric acid media as well, for the sharp separation.
- **Challenge Isotope Separation of LLFP (^{135}Cs , etc) and NRM.**
- **Contribute to Improve Existing Reprocessing and Vitrification Processes.**

40

◆Adv.-ORIENT Cycleの導入効果; 固化体毒性 (Sv) の低減

Provided, 1 t HLLW(FBR) $\approx$ 60 t Natural U

FBR Spent Fuel Inner Core; 150GWd/t, Cooled 5years



41

■ Vision and Strategy; One Conclusion

Through Adv.-ORIENT Cycle,

■ Products; **Energy** and **Nuclear Rare Metals** (*actinides are consumed in the cycle)

(5 years (at the reprocessing); **Pd, Tc** (long-lived, but low radio toxicity)
Mo, Dy (non radioactive), **La, Nd** (<0.1Bq/g)
Cm, Cs, Sr (highly exothermic)
~50 years (after stockpile); **Ru** (below than exemption (BSS) level),
In, Pr, Gd, Tb (<0.1Bq/g)
~100 years (after stockpile); **Rh** (below than exemption (NRPB) level)

■ Wastes; Around **100 years**, the radiotoxic inventory will decrease to the level of natural U tons corresponding to 1t of vitrified HLLW.

, will be realized. Low Greenhouse Gas Emission Technology (KgCO₂-Eq/Kg) seems to be Key.

42

まとめ

- 再処理課題(放射性廃棄物)の解決に向けての戦略; 守るより攻めろ。“負”を克服する以上に、“正”を伸ばせ!
- レアメタルは先端産業に直結した重要元素で、我国のGDPを制する。白金族、希土類及びReなどは、その資源が局在化しており、産油国における原油の取り扱い同様、“戦略物質”として扱われる可能性に十分留意し、今から対策を講ずる必要がある。
- 核分裂反応はエネルギーの生産とともに31種を超えるレアメタルを有意量、創生している。使用済み燃料を“廃棄物”ではなく“人工資源”として捉えるべきである。
- “原子力レアメタル”(NRM)については個々の放射化学特性に応じ、利用モデルを描くことができるが、今後、社会的に受容される導入シナリオの構築及び技術(特に環境負荷低減技術)の進展が必要である。
- NRMの内、Mo / Tc / Zr / Ru, Rh, Pd (軽白金族) / Cs / Sr / La, Nd, Dy (希土類) は、放射化学特性、技術的有用性及び資源地政学などの視点から、極めて重要と考えられる(特に、代替物質としてのTc、代替線源としてのCs、^{99m}Tc製造源としてのMo)。
- 先進オリエントサイクル研究では、ソフトでソルト・フリーな環境適応型分離技術を開発しているが、さらに“**非CO₂放出型分離・利用技術**”を目指すことが重要となろう。アクティブ試験+工学規模試験への展開が必要である。

43

The diagram illustrates the ADV-ORIENT Cycle as a system of four interlocking gears. The gears are arranged in a diamond shape, with each gear representing a different sector of the cycle. The top gear is pink and labeled "Industry". The left gear is light blue and labeled "Electricity Hydrogen". The right gear is yellow and labeled "Nuclear Rare Metals". The bottom gear is green and labeled "Adv.-ORIENT Cycle". The gears are interlocked, suggesting a continuous and integrated process. The background is a solid blue color.

■参考 1

注: Bq:放射能の単位。毎秒1個の壊変の場合を1Bqとする。
 $1\text{Ci}=3.7\times 10^{10}\text{Bq}$ 。

スラグ・スケール(ブラジル)
 ^{226}Ra 1911Bq/g

ウラン鉱石(中国)
 ^{238}U 7605Bq/g

ウラン鉱石(オーストラリア)
 ^{238}U 1347Bq/g
 触媒用セラミツク(市販品)
 1240Bq/g

モナザイト(温泉浴素、塗料) ~
 ^{238}U 340Bq/g (^{238}U ~40, ^{232}Th ~300)

バストネサイト(レアアースCe鉱石(オーストラリア) ^{230}Th (^{238}U 50, ^{232}Th 180)

増富温泉(山梨) 温泉水 ^{222}Rn 160.7Bq/ml

国際免除レベル10⁴Bq/g;
 ^{135}Cs , ^{99}Tc , ^{14}C , ^{147}Pm

国際免除レベル10³Bq/g;
 ^{239}Pu (ALi); 職業人) 625Bq
 ^{90}Y , ^{93}Zr +

国際免除レベル10²Bq/g;
 ^{90}Sr +, ^{144}Ce +, ^{99}Mo , ^{106}Ru +, ^{99m}Tc

ラドン ^{222}Rn (屋内・空気) ~40Bq/ml

^{239}Pu (ALi); 公衆) 31.3Bq

ウランガラス 天然ウラン
 26Bq/g

ヤヒモフ(チェコ) 温泉水(^{222}Rn) 10.5Bq/ml

国際免除レベル10Bq/g;
 ^{60}Co , ^{137}Cs +, ^{222}Rn +, ^{226}Ra +

花崗岩 1.14Bq/g(^{40}K ;
 1, ^{232}Th 0.08, ^{238}U 0.06)

国際免除レベル1Bq/g;
 ^{241}Am , ^{237}Np +, ^{239}Pu , 天然 ^{232}Th , 天然 ^{238}U

人体~0.1Bq/g

高レベル放射性廃液 (T α):
 $6.5\times 10^7\text{Bq/ml}$ (参考値)

高レベル放射性廃液 (T α):
 $7\times 10^8\text{Bq/ml}$ (参考値)

高レベル放射性廃液 (T β):
 $1.5\times 10^{10}\text{Bq/ml}$ (参考値)

高レベル放射性廃液 (T β):
 $9.3\times 10^5\text{Bq/ml}$ (参考値)

国際免除レベル10⁵Bq/g;
 ^{85}Kr , ^{107}Pd

国際免除レベル10⁶Bq/g;
 ^3H

低レセラツグ (T β):
 $1.3\times 10^4\text{Bq/ml}$ (参考値)

低レセラツグ (T β):
 $9.3\times 10^5\text{Bq/ml}$ (参考値)

廃溶媒(T β):
 $9.3\times 10^5\text{Bq/ml}$ (参考値)

高レベル放射性廃液 (T α):
 $6.5\times 10^7\text{Bq/ml}$ (参考値)

高レベル放射性廃液 (T α):
 $7\times 10^8\text{Bq/ml}$ (参考値)

高レベル放射性廃液 (T β):
 $1.5\times 10^{10}\text{Bq/ml}$ (参考値)

高レベル放射性廃液 (T β):
 $9.3\times 10^5\text{Bq/ml}$ (参考値)

国際免除レベル10⁴Bq/g;
 ^{135}Cs , ^{99}Tc , ^{14}C , ^{147}Pm

国際免除レベル10³Bq/g;
 ^{239}Pu (ALi); 職業人) 625Bq
 ^{90}Y , ^{93}Zr +

国際免除レベル10²Bq/g;
 ^{90}Sr +, ^{144}Ce +, ^{99}Mo , ^{106}Ru +, ^{99m}Tc

ラドン ^{222}Rn (屋内・空気) ~40Bq/ml

^{239}Pu (ALi); 公衆) 31.3Bq

ウランガラス 天然ウラン
 26Bq/g

ヤヒモフ(チェコ) 温泉水(^{222}Rn) 10.5Bq/ml

国際免除レベル10Bq/g;
 ^{60}Co , ^{137}Cs +, ^{222}Rn +, ^{226}Ra +

花崗岩 1.14Bq/g(^{40}K ;
 1, ^{232}Th 0.08, ^{238}U 0.06)

国際免除レベル1Bq/g;
 ^{241}Am , ^{237}Np +, ^{239}Pu , 天然 ^{232}Th , 天然 ^{238}U

人体~0.1Bq/g

高レベル放射性廃液 (T α):
 $6.5\times 10^7\text{Bq/ml}$ (参考値)

高レベル放射性廃液 (T α):
 $7\times 10^8\text{Bq/ml}$ (参考値)

高レベル放射性廃液 (T β):
 $1.5\times 10^{10}\text{Bq/ml}$ (参考値)

高レベル放射性廃液 (T β):
 $9.3\times 10^5\text{Bq/ml}$ (参考値)

国際免除レベル10⁵Bq/g;
 ^{85}Kr , ^{107}Pd

国際免除レベル10⁶Bq/g;
 ^3H

低レセラツグ (T β):
 $1.3\times 10^4\text{Bq/ml}$ (参考値)

低レセラツグ (T β):
 $9.3\times 10^5\text{Bq/ml}$ (参考値)

廃溶媒(T β):
 $9.3\times 10^5\text{Bq/ml}$ (参考値)

高レベル放射性廃液 (T α):
 $6.5\times 10^7\text{Bq/ml}$ (参考値)

高レベル放射性廃液 (T α):
 $7\times 10^8\text{Bq/ml}$ (参考値)

高レベル放射性廃液 (T β):
 $1.5\times 10^{10}\text{Bq/ml}$ (参考値)

高レベル放射性廃液 (T β):
 $9.3\times 10^5\text{Bq/ml}$ (参考値)

国際免除レベル10⁴Bq/g;
 ^{135}Cs , ^{99}Tc , ^{14}C , ^{147}Pm

国際免除レベル10³Bq/g;
 ^{239}Pu (ALi); 職業人) 625Bq
 ^{90}Y , ^{93}Zr +

国際免除レベル10²Bq/g;
 ^{90}Sr +, ^{144}Ce +, ^{99}Mo , ^{106}Ru +, ^{99m}Tc

ラドン ^{222}Rn (屋内・空気) ~40Bq/ml

^{239}Pu (ALi); 公衆) 31.3Bq

ウランガラス 天然ウラン
 26Bq/g

ヤヒモフ(チェコ) 温泉水(^{222}Rn) 10.5Bq/ml

国際免除レベル10Bq/g;
 ^{60}Co , ^{137}Cs +, ^{222}Rn +, ^{226}Ra +

花崗岩 1.14Bq/g(^{40}K ;
 1, ^{232}Th 0.08, ^{238}U 0.06)

国際免除レベル1Bq/g;
 ^{241}Am , ^{237}Np +, ^{239}Pu , 天然 ^{232}Th , 天然 ^{238}U

人体~0.1Bq/g

高レベル放射性廃液 (T α):
 $6.5\times 10^7\text{Bq/ml}$ (参考値)

高レベル放射性廃液 (T α):
 $7\times 10^8\text{Bq/ml}$ (参考値)

高レベル放射性廃液 (T β):
 $1.5\times 10^{10}\text{Bq/ml}$ (参考値)

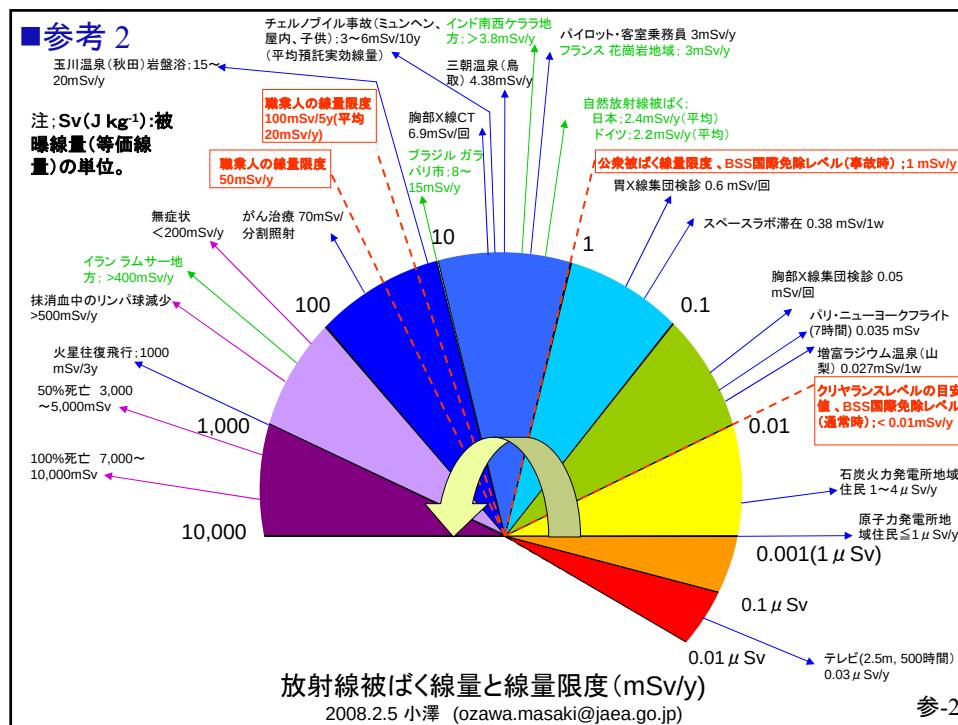
高レベル放射性廃液 (T β):
 $9.3\times 10^5\text{Bq/ml}$ (参考値)

国際免除レベル10⁵Bq/g;
 ^{85}Kr , ^{107}Pd

国際免除レベル10⁶Bq/g;
 ^3H

低レセラツグ (T β):
 $1.3\times 10^4\text{Bq/ml}$ (参考値)

低レセラツグ (T β):
 $9.3\times 10^5\text{Bq/ml}$ (参考値)



◆BqとSvの相関の例

表 A-6 内部被ばく線量換算係数 (吸入・経口)

(μSv/Bq)

単位	吸入	経口
核種		
H-3	2.6E-05	1.7E-05
C-14	5.6E-04	5.6E-04
Cl-36	5.5E-03	8.2E-04
Ca-41	3.5E-04	3.3E-04
Mn-54	1.7E-03	7.3E-04
Fe-55	6.9E-04	1.6E-04
Co-60	4.1E-02	7.0E-03
Ni-59	3.6E-04	5.4E-05
Ni-63	8.4E-04	1.5E-04
Zn-65	5.0E-03	3.9E-03
Sr-90	3.4E-01	3.6E-02
Nb-94	9.0E-02	1.4E-03
Tc-99	2.0E-03	3.4E-04
I-129	4.7E-02	7.4E-02
Cs-134	1.4E-02	2.0E-02
Cs-137	8.7E-03	1.4E-02
Eu-152	5.9E-02	1.6E-03
Eu-154	7.0E-02	2.5E-03
Pu-239	1.2E+02	9.7E-01
Am-241	1.2E+02	1.0E+00

参-3

Scientist Game

創造的研究開発

創造的研究開発の必要十分条件(個人要因)(東工大小森氏 1986)

- ビジョン・・・新しい仮説や新パラダイムの構築力を有すること
- アクション・・・研究対象に取り組む集中力、忍耐力、不思議だと思ったことは徹底して解明する姿勢
- コミュニケーション・・・O次情報（印刷物になる前の人の頭にしかない情報）を第3者と交えることにより解決の糸口をつかむ
- 日本国、企業、組織、社会文化面の要因も

アイデアを生み出すもの(日新製鋼板倉氏)

- アイデア（要素技術）の創出、ヒナ型化、これに続く組織的な研究開発（工業化努力）が重要
- 独創は個人のもので、会議からは生まれない
- 独創と組織力＝専門家と正しいマネジメント（超一流のプレイヤーがいて始めていいチームプレーができる）
- アイデアを生み出すもの・・・高い目標（明確なニーズ）、体験的研究（基礎的フォロー）、成果の評価（個人の尊重）
ライフワークとしての大目標をしっかりと「インプット」。
それに自らの体験（即ち実験に基づく現象）を「インプット」し続けると、ある緊迫感に満ちた特殊な環境の下で素晴らしい「アウトプット」が生ずる。
- “勘”をはたらかす・・・体験したものだけに授けられる科学的結論
自分の努力、考察。他人の話、説明、文献は整理されすぎてあまり役に立たない。
プロジェクトX：小柴先生
- 徹底的なラボ実験→ブレイクスルー

独創的業績をあげるために（化研水田氏 1986）

「してはいけない」5ヶ条（江崎玲於奈）

- 従来からの行きがかりにとらわれ過ぎてはいけない。さもないと飛躍の機会を見失う
- 他人の影響を受け過ぎてはいけない
- 無用のものはすべて捨てなければいけない
- 闘うことを避けてはいけない。そのためには独立精神と勇気が必要
- 安心感、満足感にひたってはいけない

研究にマニュアルはないが・・・

- 1 常に腕を磨き、きちんと実験する
- 2 とにかく実験結果に失敗はない。予想外の結果は何かの始まり・・・
- 頭より目を信じる（多くのノーベル賞受賞者）
- 3 実験結果のディスカッションは生の現象を重視
- 1 基本テーゼを否定した仮説に立った実験もやる
- 2 常識に反した現象は自己を信じ、常識の方が誤っていると考えることも
- 1 先ず、先人の研究を全く同条件で追試、同じ結果を確認する
- 2 次に、材料だけ変えて物まねする
- 3 思わぬ結果がでればしめたもの

独創的研究の型（ノーベル賞レベル）

- 全く新しい考えを提言する
- その考えのもとに新しくある事実を証明する
- 実験の過程で新しい現象を発見する
- 多くの人が困難だと思ふ実験テーマに敢えて挑戦する・・・ただし、十分な勝算をもてるか、勝機を悟れるかがポイント

その他

- 毎日少しの時間でも文献に目を通す・・・基本的な知識と情報の着実な蓄積による先見的な判断
- 新しい原理に基づく機器をいかに早く取り込み利用できるか・・・問題の解決、さらに大きな飛躍（歴史が示す）
- 研究のインパクト性・・・基礎研究の成果が工業プロセスとして利用可能なことを常にアピールしなければならない
- 他人に自分の研究内容をうまく伝えられるか（研究者本人がわかっていなければ伝えられない）
- 完璧な論文（課題に対する完膚なき答え、完璧な文献引用）、OHP シート（完璧なイラスト、

夢

*It has often proved true that,
the dream of yesterday is the hope of today, and the reality of tomorrow*

by Robert Hutchings Goddard

昨日の夢は、今日の希望、明日の現実

Scientists are those people who solve the problems which they can solve, and engineers are the people who solve the problems which have to be solved

by Albert Einstein

解ける問題を解くのが科学者、解かねばならない問題を解くのが技術者