

第4回先進オリエントサイクル研究開発セミナー
“先進原子力科学が拓く新資源戦略と課題”講演集

2010年7月30日：六ヶ所村スワニーホール・大会議室

Proceedings of the 4th Seminar of R&D on Advanced ORIENT
“Strategy and Technical Requirement for New Resource of Noble Metals in
Advanced Atomic Energy Science”
Swany Hall, Rokkasho-Mura, on July 30th, 2010

(編) 佐々木 祐二 小山 真一 小澤 正基
(Eds.) Yuji SASAKI, Shinichi KOYAMA and Masaki OZAWA

原子力基礎工学研究部門
燃料・材料工学ユニット

Division of Fuels and Material Engineering
Nuclear Science and Engineering Directorate

December 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

第4回先進オリエントサイクル研究開発セミナー
“ 先進原子力科学が拓く新資源戦略と課題 ” 講演集

2010年7月30日：六ヶ所村スワニーホール・大会議室

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門 燃料・材料工学ユニット
(編) 佐々木 祐二・小山 真一・小澤 正基

(2010年9月28日受理)

本報告は2010年7月30日、六ヶ所村スワニーホール・大会議室において開催された第4回先進オリエント研究開発セミナー“ 先進原子力科学が拓く新資源戦略と課題 ” で使用された発表資料を収録したものである。本セミナーは放射性廃棄物の放射能の低減及び処理処分における負荷低減のための新しい戦略的構想「先進オリエントサイクル」に基づく研究・技術開発の進捗を報告、議論するものであり、第1回を平成19年5月にJAEA大洗研究開発センター、第2回を平成20年11月に東海村、第3回を平成21年10月に仙台市の東北大学多元物質科学研究所で行ったものを受けて、第4回を六ヶ所村スワニーホール・大会議室で開催した。核燃料サイクルにおいては、放射性元素の回収・有効利用の可能性だけでなく、使用済み燃料或いは高レベル放射性廃液が軽白金族や希土類元素の資源ソースとしての位置づけることもでき、今後原子力・非原子力の専門家との議論を深める必要がある。ポスター発表のセッションを設けるとともに十数名の学生の参加もあり、今後の燃料サイクルのコンセプトや各要素技術について活発な議論が交わされた。

**Proceedings of the 4th Seminar of R&D on Advanced ORIENT
“Strategy and Technical Requirement for New Resource of Noble Metals in
Advanced Atomic Energy Science”
Swany Hall, Rokkasho-Mura, on July 30th, 2010**

(Eds.) Yuji SASAKI, Shinichi KOYAMA and Masaki OZAWA

Division of Fuels and Material Engineering
Nuclear Science and Engineering Directorate, Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 28, 2010)

The 4th Seminar of R & D on advanced ORIENT, “Strategy and technical requirement for new resource of noble metals in advanced atomic energy science” was held in Swany hall, Rokkasho-Mura, on July 30th, 2010 organized by Japan Atomic Energy Agency. The first meeting of this seminar was held at Oarai, Ibaraki on May, 2007, the second seminar was held at Tokai, on November, 2008, and the third seminar was held at Sendai, on October, 2009. Spent nuclear fuel should be recognized as not only mass of radioactive elements but also potentially useful materials including platinum metals and rare earth elements. Taking the cooperation with universities related companies and research institutes, into consideration, we aimed at expanding and progressing the basic researches. In this seminar, there are many poster presentation included, and the useful discussion with many students are performed.

This report records abstracts and figures submitted from the oral speakers in this seminar.

Keywords: Nuclear Fuel Recycling, Platinum Metal, Rare Earth Elements, Separation, Recovery, Utility, Radioactive Elements

目次

1.	先進オリエントサイクル研究が紡ぐ未来の夢	1
	小澤 正基 (原子力機構)	
2.	先進オリエントサイクル研究から一分離技術	13
	鈴木 達也 (東工大)	
3.	先進オリエントサイクル研究「利用・貯蔵技術」	34
	小山 真一 (原子力機構)、山岸 功 (原子力機構)	
4.	露国におけるテクネチウム及びレニウムの研究開発戦略 “テクネチウム・ルネッサンス 2010 ”	49
	コンスタンチン ゲルマン (A.N. フラムキン物理化学・電気化学研究所)	
5.	最近の鉱物資源を巡る状況と課題	74
	鯉江 雅人 (経済産業省資源エネルギー庁)	
6.	産業エコロジーから見た廃棄物と再資源化	97
	中村 慎一郎 (早稲田大学)、山末 英嗣 (京都大学)	
7.	原子力リサイクル最前線	110
	吉田 信之 (日本原燃株)	
8.	核変換“原子炉錬金術”の視点	111
	高木 直行 (東海大学)	
9.	[分離・利用の視点]からのコメント	115
	藤田 玲子 (東芝)	
10.	使用済燃料中元素の有効利用の可能性について—核燃料サイクルの視点から—	118
	深澤 哲生 (日立 GE)	
11.	放射性廃棄物、貯蔵の視点	121
	森 久起 (RANDEC)	

Contents

1. Advanced ORIENT Cycle, Spinning A Dream Come True Masaki OZAWA (JAEA)	1
2. Advanced ORIENT Cycle, –Separation technology- Tatsuya SUZUKI (Tokyo Institute of Technology)	13
3. Advanced ORIENT Cycle, –Utilization and storage- Shin-ichi KOYAMA (JAEA), Isao YAMAGISHI (JAEA)	34
4. Russian Experience on Tc and Re: “Technetium Renaissance 2010” K.E. GERMAN (A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry)	49
5. Recent Situation and Problem of rare metals in Japan Masato KOIE (METI)	74
6. Waste and its resource from Industrial ecology Sinichiro NAKAMURA (Waseda Univ.) and Eiji YAMASUE (Kyoto Univ.)	97
7. Recent technology in recycle of atomic energy Nobuyuki YOSHIDA (JNFL)	110
8. Viewpoints of Advanced ORIENT Cycle “Alchemy by transmutation” Naoyuki TAKAGI (Tokai Univ.)	111
9. Comments and prospect from Viewpoints of Separation and Utilization Reiko FUJITA (Toshiba)	115
10. Possibility of Utilization of Elements in Spent Nuclear Fuels (Viewpoints of Fuel cycle) Tetsuo FUKASAWA (Hitachi GE)	118
11. Viewpoints of radioactive waste and storage Hisaoaki MORI (RANDEC)	121

1. 先進オリエントサイクル研究が紡ぐ未来の夢 *Advanced ORIENT Cycle, Spinning A Dream Come True*

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門
東京工業大学

小澤正基

1. 戦略

CO₂ 排出量の少ない持続的なエネルギー源として、原子力発電の役割が再認識され（原子力ルネッサンス）、核燃料サイクルにおいては資源有効利用や環境負荷低減、等の一層の向上が求められている。一方、白金族、希土類など、天然稀少金属資源も化石燃料同様有限であり、その多くは地球上に偏在し、総じて我国には乏しい。先進オリエントサイクル(Advanced ORIENT Cycle)構想では、長寿命放射性核種の分離・変換技術の高度化に関する研究と、核分裂反応で生じた人工元素中の有用稀少金属（原子力レアメタル NRM と称す）の有効利用を目指した、分離・変換・利用の三位一体研究を進める。

2. 構想と戦術

先進オリエントサイクル構想では使用済み燃料を“原子力鉱山”と見立て、そこに豊富に含まれる軽白金族元素（ルテニウム Ru、ロジウム Rh、パラジウム Pd）、テクネチウム Tc、モリブデン Mo、セシウム Cs、ストロンチウム Sr 及び希土類元素等を個別に回収し、それぞれの放射化学特性などに応じて利用あるいは備蓄する。マイナーアクチニド MA もアメリシウム Am やキュリウム Cm まで精密に分離し、高速炉などで燃焼処理することにより、廃棄物中から長寿命放射能を取り除く。これにより数百年程度で廃棄物（ガラス固化体）中の放射能を自然の放射性鉱石レベルにまで低減化させることが見込める。白金族 PGM、モリブデン及び発熱性元素を能動的に分離することは、放射性廃棄物の処理・処分における負担軽減も期待できる。原子力エネルギー利用の廃棄物であるレアメタルの利用出口戦略の構築やガラス固化体の毒性についても、ともに 100 年(3 世代)ぐらいのスパンでの評価が必要である。

先進オリエントサイクルの要諦は“多機能再処理”プロセスの構築にあり、そのため、

- ◆ 高速炉燃料サイクルを機軸とした分離・変換・利用 (S&T, U) の“三位一体”研究
サイクル戦略の コペルニクスの転回(廃棄物→資源) (*Copernican Revolution*) を図る
- ◆ 放射性廃棄物の量及び質（放射性毒性）の改善
 - ・ ガラス固化体の元素組成を、処分後数百年内(三世代相当) に内蔵放射性毒性が原料ウラン鉱石量相当にまで減衰するよう、改質する
- ◆ 多機能でかつコンパクトな再処理プロセスの構築
 - ・ 再処理スキームの転換；大量成分 (U, Pu) 抽出系から少量成分 (FP, MA) 分離系への転換

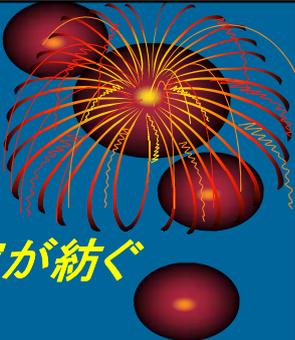
- ・ 多様な製品；アクチニド以外に、原子力レアメタル（軽白金族、テクネチウム、モリブデン及びランタニド Ln、他）及び発熱性核種（ ^{90}Sr , ^{137}Cs ）。分離目標値は、90-99.9%の範囲で設定
 - ・ 原子力レアメタルについては高純度、アクチニド An については高回収だが、低除染を許容する
 - ・ 湿式冶金分離法の採用；精密分離を目指す。二次的廃棄物低減のため、ソフト *Soft* で、ソルトフリー *Salt-free* なプロセス及び試薬を選定
 - ・ シャープな分離を達成するため、塩酸媒体の併用を許容
- ◆ 長寿命核分裂生成物 LLFP 及び原子力レアメタルの核変換・利用にむけた、先進的同位体分離技術への挑戦
- ◆ 核燃料サイクル内（再処理、ガラス固化）及び外（希土類学・産業）との連携の強化

等、を研究のフェーズ I（2006-2010）での研究方針と定め、内外の9つの研究機関との連携の元、原子力レアメタルの元素分離研究に加え、アルカリ金属（ルビジウム Rb 及びセシウム）の同位体分離の基礎化学、及び耐食材料やイオン交換樹脂熱化学特性に関する検討を進めてきた。

その結果、3級ピリジン樹脂プロセスによるアクチニドの精密分離や樹脂自身の熱化学安定性を実験的に確認するとともに、Pdatom などによるルテニウム、テクネチウム及びレニウム Re の電解析出促進現象、析出した NRM アダトム触媒の電解水素製造における高活性など、利用に向けての新知見を得た。また一方、塩酸媒体と硝酸媒体を併用する場合、高効率の媒体変換技術あるいは分離プロセスの最適化が必要であり、新塩酸耐蝕材料の開発、更には廃棄物処理法などの工学的研究課題も摘出され、それぞれの解決に向け基礎工学研究に踏み出したところである。

フェーズ I では元素レベルから混合系、模擬高レベル廃液まで研究が進んだが（一部、常陽照射済み燃料を用いたホット試験も実施）、続くフェーズ II 研究（2011-）では更に原子力レアメタルの“仕分け”とデータベース化を進めるとともに、実用化を念頭に置いた“課題解決型”の研究に移行する。

第4回先進オリエントサイクル研究開発セミナー
スワニーホール・大会議室、六ヶ所村、青森県
2010年7月30日(金)



**先進オリエントサイクル研究が紡ぐ
未来の夢**

*Advanced ORIENT Cycle, Spinning A Dream
Come True*

小澤 正基

日本原子力研究開発機構
東京工業大学

The Fourth Seminar (International)

on

Advanced ORIENT Cycle

Rokkasho-mura, Jul. 30th, 2010

1st, O-arai(大洗), May 25th, 2007, 2nd, Tokai(東海), Nov. 7th,
2008, 3rd, Sendai(仙台), Oct. 30th, 2009

*Adv.-ORIENT Cycle, A Challenging Fuel Cycle
Strategy Turning Wastes into Resources*

(先進オリエントサイクル: 廃棄物を資源に転換するた
めの挑戦的核燃料サイクル)



原子力レアメタル *NRM* (*Nuclear Rare Metals*) とは？

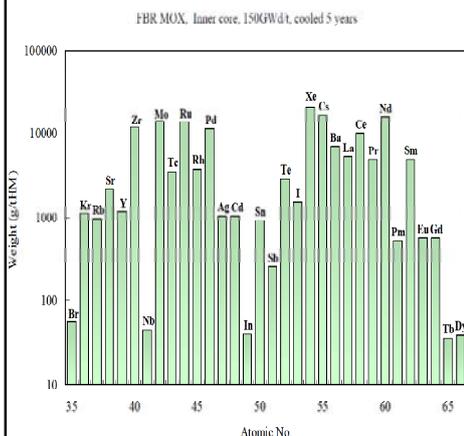
- ・我国では 47 元素を“レアメタル”と認定(内,希土類 17 元素を含む)
- ・暫定的に 31 元素(有意量(>10g/tHM)の元素に限定)を利・活用の可能性の高い“原子力レアメタル”と定義(希ガス,ハロゲン,Cd, Sn, Sb, Bk, Cfは除く)

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period 1	1 H	FP																2 He
Period 2	3 Li	4 Be	Actinides										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
Period 3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
Period 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
Period 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
Period 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
Period 7	87 Fr	88 Ra	89-103	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			

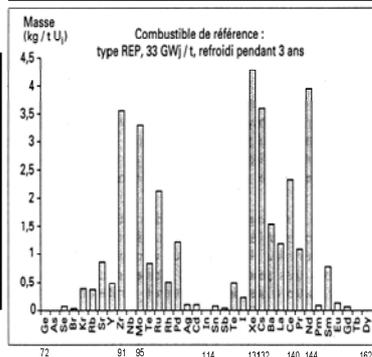
3

原子力レアメタル生成量 (g/tHM) ; 軽水炉と高速炉の比較

年間、白金族2.56t、希土類6.4t、モリブデン1.92t、テクネチウム0.64t
アルカリ(Cs,Rb)2.56t、アルカリ土類(Sr,Ba)1.28t、他、の生産量となる



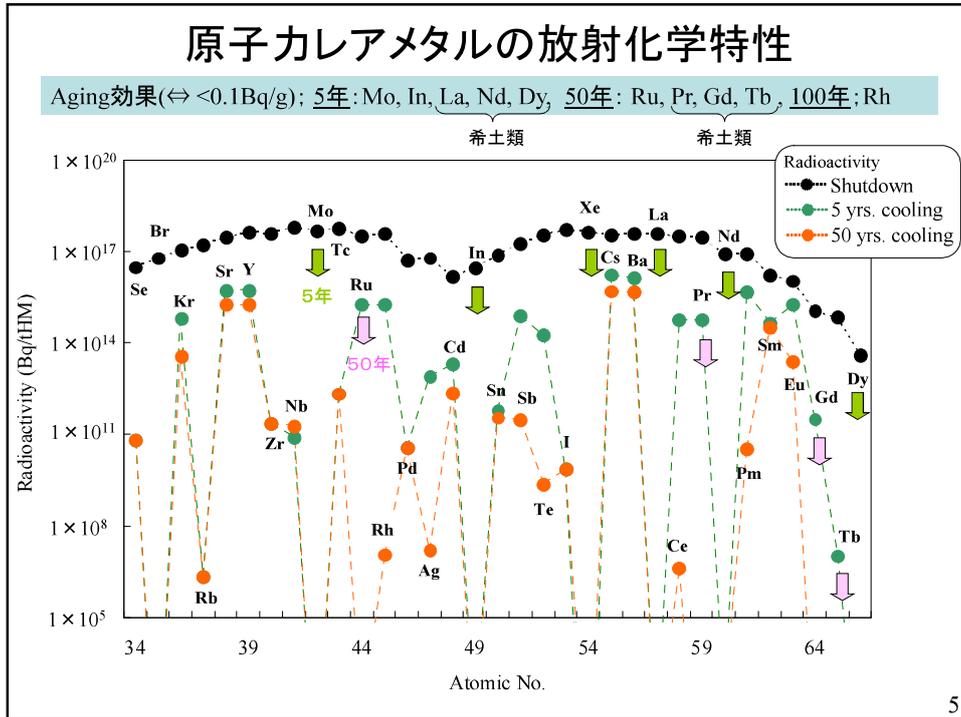
軽水炉800t/年プラント、回収率80%とすると



燃焼度5倍の高速炉では

Mass of FP elements in irradiated fuel
(M.Bourgeois, Retraitement du combustible, 1994)

4



一般鉱石と“原子力鉱山”

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

Major (base) metals	Greenhouse gas emissions (kg CO ₂ -eq/kg)	Environmental impacts (dimensionless points/kg)
Aluminum (from plant)	12	0.78
Lead (at regional storage)	1.1	0.38
Zinc (at regional storage)	3.4	0.80
Minor (scarce) metals		
Gallium (at regional storage)	190	11
Gold (at regional storage)	13000	1600
Indium (at regional storage)	160	33
Rhenium (at regional storage)	34	3.2
Palladium (at regional storage)	9300	9300
Tantalum (at regional storage)	280	30

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

地質学的要因

核燃料・再処理要因

技術的要因

環境負荷要因

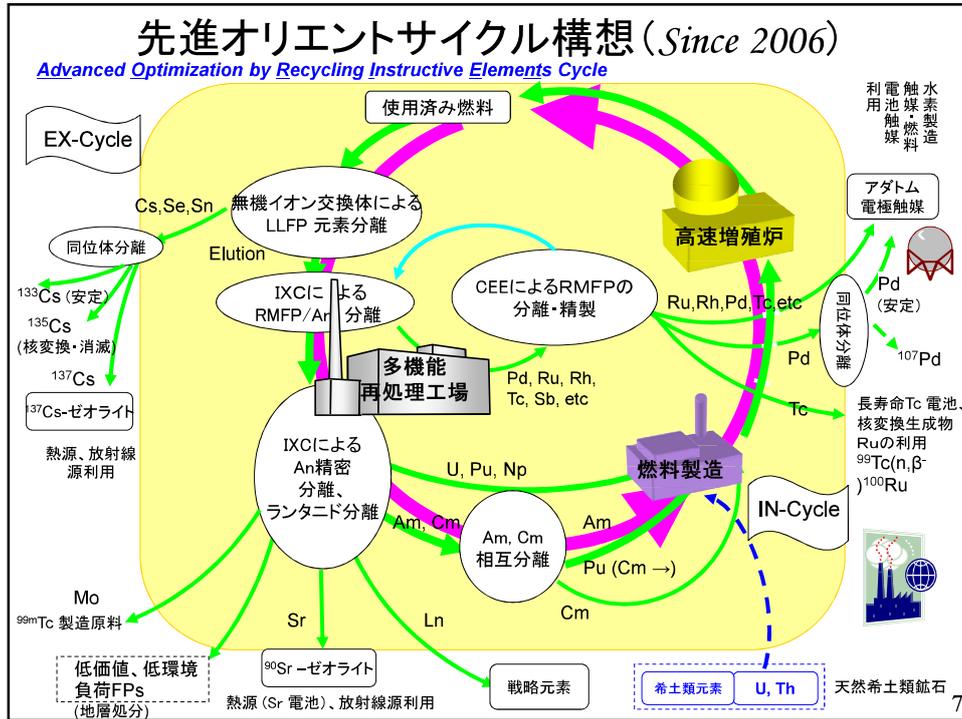
放射化学的要因

原子力鉱石としての品位

元素名	鉱石中の含有率 (ppm)	軽水炉使用済燃料中の含有率 (ppm)	FFR使用済燃料中の含有率 (ppm)	備考 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年採生産実績と平均的な品位1~%より算定
Mo	140	4,021~6,039	36	8,966	84	モンゴルのコルネト鉱山実績
Rh	(0.4~0.6)	578~849	1,527	2,543	6,552	主な鉱山ではPGME産量の1割程度をロシアが占めるため、PGME産量の1割を算定
Pd	2.4~7.4	1,900~4,150	617	6,988	1428	オーストラリアのノーザン・クロス産量実績
Ag	46~201	102~251	1.4	715	5.8	アイルランドのGalvaney産山、ロシアのUralmash産山の実績
Te	(3.8~29)	634~842	45	1,840	113	鉱石中の含有率は、ロシアUGMK社の2004年採生産実績と平均的な品位1~%より算定

高レベル放射性濃縮廃液の組成 (軽水炉燃料再処理)

6



- ### 構想と戦略 (Phase I)
- ◆ **高速炉燃料サイクルを機軸とした分離・変換・利用 (S&T,U) の“三位一体”研究**
サイクル戦略の コペルニクスの転回(廃棄物→資源)(*Copernican Revolution*)
 - ◆ **放射性廃棄物の量及び質(放射性毒性)の改善**
 - ・ ガラス固化体の元素組成を、処分後数百年内(三世相当)に内臓放射性毒性が原料ウラン鉱石量相当にまで低減するよう、改質する
 - ◆ **多機能でかつコンパクトな再処理プロセスの構築**
 - ・ 再処理スキームの転換; 大量成分(U,Pu)抽出系から少量成分(FP,MA)分離系への転換
 - ・ 多様な製品; アクチニド以外に、発熱性核種 (^{137}Cs , ^{90}Sr) 及び原子力レアメタルNRM (軽白金族, テクネチウム, モリブデン及びランタニド, 他)。分離目標値は、90-99.9%の範囲で設定
 - ・ NRM については高純度、アクチニドについては、高回収だが、低除染を許容
 - ・ 湿式冶金分離法の採用; 精密分離。二次的廃棄物低減のため、ソフト*Soft*で、ソフトフリー*Soft-free*なプロセス(IXC, CEE)及び試薬を選定
 - ・ シャープな分離を達成するため、塩酸媒体の併用を許容
 - ◆ **長寿命核分裂生成物LLFP 及びNRMの核変換・利用にむけた、先進的同位体分離技術への挑戦**
 - ◆ **核燃料サイクル内(再処理、ガラス固化)及び外(希土類学・産業)との連携の強化**

原子力レアメタルの利用; 過去～現在、海外の例

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)
出典: PNCT-7099(1970)BNWL-25(1965)

元素あるいはRI	可能性のある用途	半減期(年)	比出力 (ワット/g)	おおよその含有量 (g/1ton 25000MWD/tの場合)	見積り価格 (＄/t 使用済み燃料)	キューリー数 (×10 ⁹) 1.0 * MWDの場合
Kr-85	特殊照明, 放射線源				1,700	
Sr-90	熱源, β線源				822	8.7
Tc-99	耐食材料, 合金材				628	
Ru-106	工業, 電気および放射線関係				674	
Pd-107	工業, 電気および放射線関係				354	
Xe	特殊照明					
Cs-137	熱源, 放射線源					
Ce-144	熱源, β線源					
Pm-147	熱源, 放射線源					
U-238	親物質					
U-235	Np-237の親的					
Np-237	Pu-238の親的					
Am-241	熱源 (Cm-242の親的)					
Cm-242	熱源 (縮変してPu-238となる)					
Am-243	Cm-244の親的					
Cm-244	熱源					
Pu-238	熱源					
Pu-239	核分裂性物質					
Pu-240	親物質 (Pu-241の原料)					
Pu-241	核分裂性物質 (Am-241の原料)					
Pu-242	Am-243の親的					

238Pu ペースメーカー (KRI, ロシア)
ca.150mg PuO₂
241Am (n, γ) 242Am (β⁻) → 242Cm (α)
→ 238Pu



90Sr 電池 (KRI, ロシア)
23,000Ci 90Sr 150W

表-2 地球上におけるRIのエネルギー利用

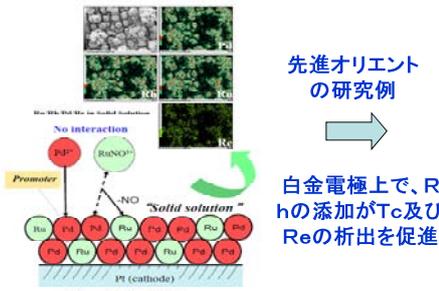
出力レベル	RI	応用の分野	応用の測定基準
Microwatts	Pu-238	心臓のペースメーカー, 生医学的計測	長寿命, 信頼性, 安全性
100 ~ 1000mW	Pu-238, Sr-90, Pu-147	海洋学的計測, ケープル用増圧器, 水中兵器	価格, 取り扱いの容易さ, 信頼性, 安全性
10 ~ 200watts	Sr-90	測候所, マイクロ波自動観測所, 海洋学的地質観測と計測	価格, 長寿命, 信頼性, 安全性
1 ~ 10 KW	Co-60, Sr-90, Ce-144	南極の支援施設, 探査探鉱と調査, 軍用通信	価格, 信頼性, 安全性

99Tc 電池 (RAS, ロシア)

原子力レアメタルの分離・利用; 先進オリエント研究から UPD現象を利用したNRMの電解採取技術

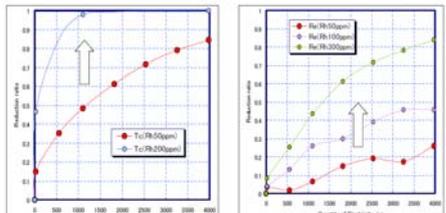
UPD(UnderPotential Deposition)とは? 異種原子間の結合力が同種間よりも大きい場合に、REDOX電位よりも貴な電位で起こる析出現象。特異な触媒活性を示す。NRMではPd及びRhが他種の析出を促進。

Ru_{adatom}/Pt電極における有機種(R)酸化に対する二元機能触媒作用の例(燃料電池酸化極)。Ru_{adatom}が酸素を、Ptが有機種を受け持つ。Ruの代わりにAuでもよい。

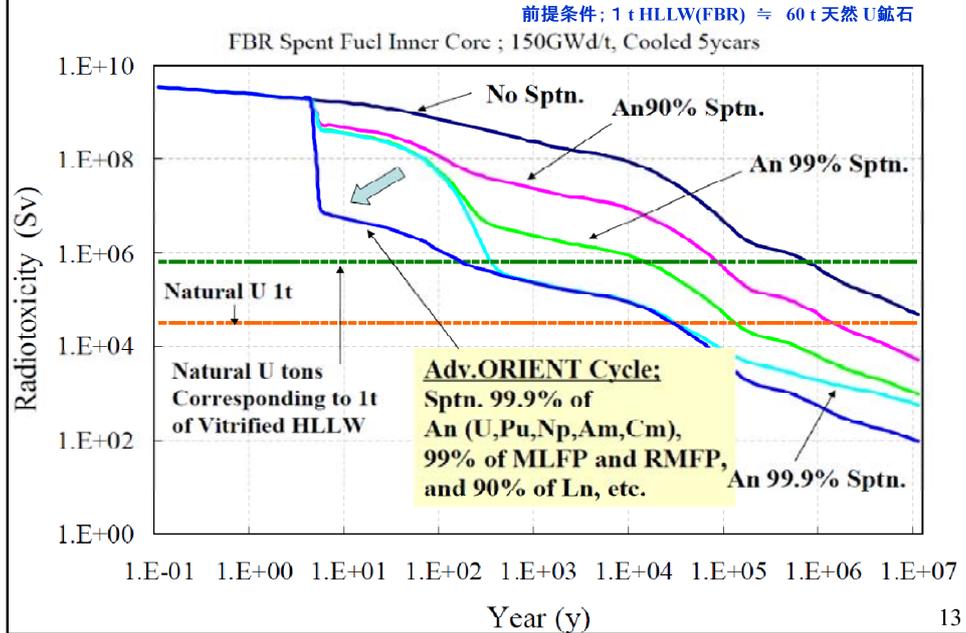


先進オリエントの研究例
白金電極上で、Rhの添加がTc及びReの析出を促進

CEC Conditions
•Electrodes: Smooth Pt, Cathode (2cm²), Anode (8cm²), Ag/AgCl
•Catholyte: 0.5MHCl
•50 °C
•Ic: 2.5mA/cm² (1hr) → 75mA/cm² (2hr) → 100 mA/cm² (4hr)

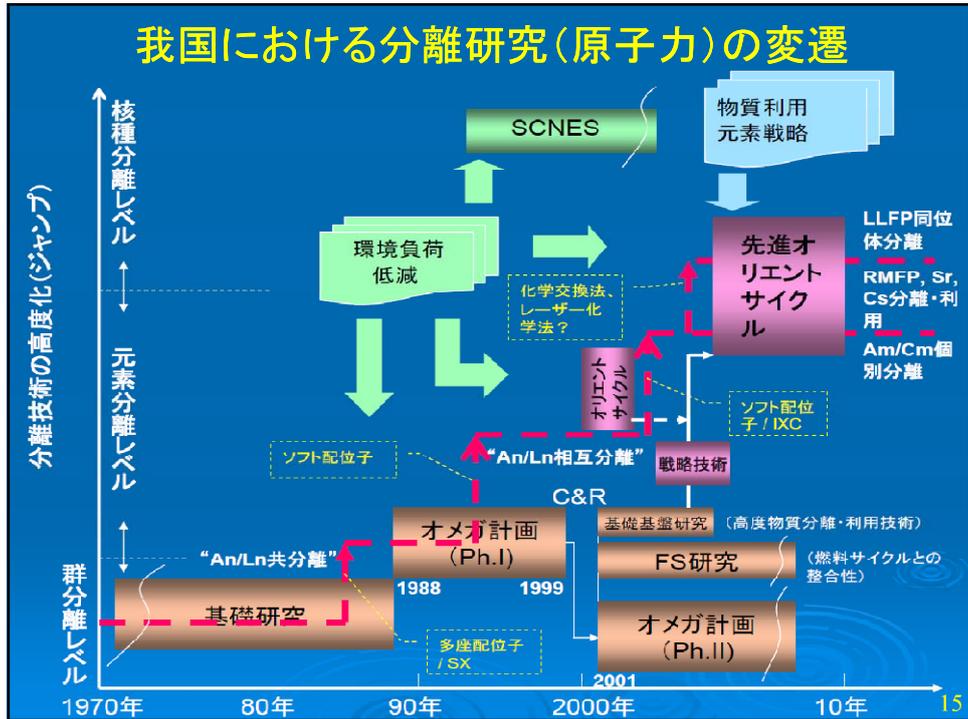


■ (3) ~100年の貯蔵(Cooling)でガラス固化体の放射能を天然ウラン鉱石並みまで低下させる。(収蔵するFPが減るので)固化体の量も低減



“仕分け”から“目利き”へ(原子カリアメタル)

元素群	放射化学特性 (Bq/g)	鉱石としての品位 (Kg/t; 高速炉使用済み燃料(内側炉心)の例)及び資源的インパクト	分離法の例(CEE:電解, SX; 溶媒抽出, IXC; イオン交換クロマト)	利用の例	既往技術との関連
白金族 (Ru, Rh)	短半減期核種を含む。Ruは備蓄後40年で<10 ⁶ Bq/g, Rhは80年で<10Bq, の安全基準濃度レベルにまで低減。	Ru13.4 Rh3.7 Pd11.8 Tc3.4 量的インパクト大	触媒の電解採取法(CEE) 3級ピリジン樹脂 (IXC) MIDOA(SX)	備蓄後、通常使用。アトム電極触媒(水素製造、燃料電池など)利用	白金族の分離はガラス固化処理操作性の向上に寄与
Tc, 白金族 (Pd)	長半減期核種を含む。ただし放射性毒性は極めて低い。			取り出し後、隔離使用。アトム電極触媒利用。TcのレニウムRe(戦略元素)代替利用。	⁹⁹ Tc及び ¹⁰⁶ Ruの除去は再処理プロダクトの除染性の向上に寄与
Mo, Dy, 他、重希土類	取り出し時、安定。	Mo14.3 Dy0.038	MIDOA(SX), 3級ピリジン樹脂 (IXC)	(高次化)Moの ⁹⁹ Mo- ^{99m} Tc 剤製造原料	Dyは“元素戦略”対象
希土類(La, Nd, Pr, Gd, Tb), In	La, Ndは取り出し時, Pr, Gd, Tb, Inは備蓄後50年で、それぞれ<0.1Bq/g	La5.3 Nd16.4 Pr4.9 Gd0.67 量的インパクト小	3級ピリジン樹脂 (IXC)	先端産業利用	Inは“元素戦略”対象
Cs, Sr	中半減期核種を含む。	Cs16.2 Sr2.0	Cs: AMP (IXC), GCD (SX), 他 Sr: DCH18C6(SX), D18C6-GAALG (IXC)	¹³⁷ Csの ⁶⁰ Coの代替線源利用。熱発電利用。	ガラス固化体の環境負荷低減に寄与(処分場スペースの縮減)
U, Pu, マイナーアクチニド(Am, Cm, Np)	長寿命核種 (Cmを除く)	N.A.	TODGA(SX), 3級ピリジン樹脂, PDA (IXC), TPEN(SX), LUCA(SX)	核燃料利用	ガラス固化体の環境負荷低減に寄与(内蔵放射性毒性の低減)
その他元素 (利用優先性が低い元素)	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	固化処理・地層処分
自然界の放射性物質(U, Th)	N.A.	N.A.	CMPO-TRUEX(SX), 他	核燃料サイクル内で燃焼処理。核燃料利用	希土類産業の廃棄物



連携研究 及び 情報交換

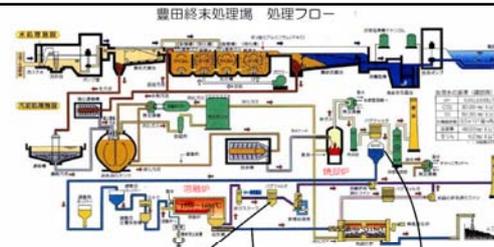
- 現状
 - 1/ 東京工業大学 (2002-); 戦略 & アクチニド精密分離
 - 2/ 東北大 (2002-); セシウム、ストロンチウムの分離・固化・利用
 - 3/ 東芝 (2003-); 白金族、テクネチウム、レニウム の分離・利用
 - 4/ 産業総合研究所(筑波) (2006-); 3級ポリジメチレン樹脂、他、の熱化学安全性
 - 5/ 化研 (2007-); 塩酸耐食材
 - 6/ ア・ユー (2006-) 及び3R (2008); データベース (使用済み燃料、利用)
- 過去
 - 1/ フロービンラジウム研究所KRI (St-Petersburg, Russia) (2002-2007); 溶媒抽出法による全アクチニドの同時一括回収プロセス (ORGA)
 - 2/ アルメニア科学アカデミー・物理学研究所IP (Ashtarak, Armenia) (ISTC Project, 2002~2004); レーザー化学法によるアルカリ金属 ($^{85/87}\text{Rb}$, $^{133/135}\text{Cs}$) の同位体分離
- 情報交換
 - 1/ ロシア科学アカデミー・A.N. フラムキン物理化学・電気化学研究所、D. I. メンデレーフ大学 (Moscow, Russia); テクネチウム及びレニウムの科学技術、テクネチウムシンポジウム(IST)
 - 2/ カリフォルニア大学・バークレイ校 (US); 放射性廃棄物、同位体分離
 - 3/ 日本原子力学会「核燃料サイクルの物質・放射線利用」研究専門委員会、レアメタル研究会 (東大生産研、岡部研)、日本希土類学会・希土類討論会

結論と課題

- ◆ レアメタルは先端産業に直結した重要元素、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、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が高く、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、創生する。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、個々の化学及び放射化学特性に応じ、利用モデルを描く。今後、社会的に受容される導入シナリオの構築及び分離(元素及び核種)技術の進展が不可欠。
- ◆ 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。特に、Re代替物質としてのTc、⁶⁰Co代替線源としての¹³⁷Cs、^{99m}Tc製造源としての(高次化)Moなど。
- ◆ 分離研究では、現行の“ソフト”で“ソルト・フリー”から、更に進んだ環境適応型分離技術(低炭素放出型)を志向すべき。“化学試薬フリー”の電気化学制御、温度制御、光(レーザー)化学制御などの研究の進展を望む。
- ◆ 今年度で先進オリエントサイクル研究の第Iフェーズ(2006-2010)が終了。第IIフェーズ(2011-)では課題解決型の研究に移行。今後とも、関係各位の御協力、あるいは叱咤・激励をいただければ幸いです。

17

豊田最終処理場 処理フロー



諏訪湖流域下水道において汚泥焼却灰から『金』の回収を始めました。

諏訪湖流域下水道豊田最終処理場(受称: クリーンレイク諏訪)の下水汚泥焼却灰等に金が含まれています。金が含まれている焼却灰は売却が可能であることから、平成20年11月から売却を始め、今月末に初めての売却収入があります。売却収入については、流域下水道の維持管理のために活用し、流域下水道を利用する皆様へのサービス向上を図ってまいります。金の回収の概要は、下記のとおりです。

実施前(今まで)

当該処理場の汚泥焼却灰の中には金が多く含まれており、これの溶出を防ぐため溶融結晶化処理をして人工骨材として有効利用していますが、下記については骨材化が不可能なため、特別管理産業廃棄物として処分していました。

- 1 溶融焼灰(焼却灰を溶融結晶化する過程で発生するばいじん)
- 2 年1回の定期清掃に伴う溶融結晶化炉停止時の焼却灰
- 3 溶融過程で発生する平良スラグ

↓

実施後(これから)

溶融焼灰等の金の含有量試験により、一定の含有が認められる場合、有価物として金属製錬会社へ売却します。

【平成20年10月分】

焼却灰 約500万t(溶融焼灰 約500万t、焼却灰 約500万t)

溶出量 溶融焼灰 1.4t 焼却灰 19t

金の含有量 溶融焼灰 約1,890g/t 焼却灰 約25g/t

参考)平成20年度年間売却予想数量(金の市場価格及び含有量により変動します。)

溶融焼灰 5t

焼却灰 60t

金の回収の概要

平成19年10月から平成20年12月までで発生した溶融焼灰等を処分する中で、10月に抽出した溶融焼灰1.4tと焼却灰19tに金が含有しており、約500万円の売却収入がありました。残りの溶融焼灰等についても同様の月単位で順次、売却収入が確定します。

施設とは?

溶融炉で溶融処理する際、排ガスの中に飛んでいる灰で、バグフィルターで捕集されます。

処理場の運転経費

- ・処理場全体: 約14億3千万円
- ・溶融炉: 約1億7千万円

1890g x 5t x 約3500円(金)/g ÷ 3,300万円/年

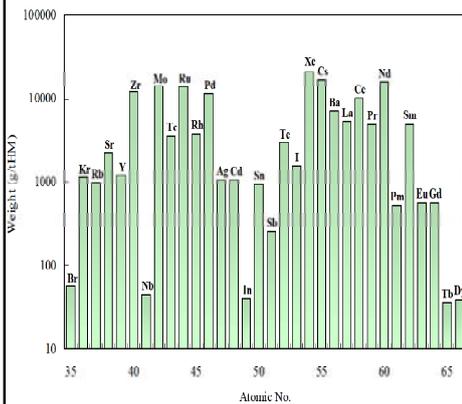
18

原子力レアメタル(白金族)の潜在的、資産価値

年間、白金族2.56t、希土類6.4t、モリブデン1.92t、テクネチウム0.64t
アルカリ(Cs,Rb)2.56t、アルカリ土類(Sr,Ba)1.28t、他、の生産量となる

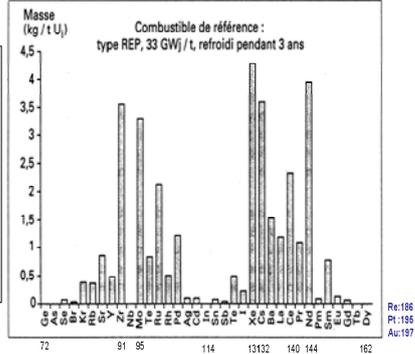
白金族を一番廉価なRu(500円/g)で見積もっても年間、12.8億円となる

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



燃焼度5倍の高速炉では

軽水炉800t/年プラント、回収率80%とすると



Mass of FP elements in irradiated fuel (M.Bourgeois, Retraitement du combustible, 1994)

夢

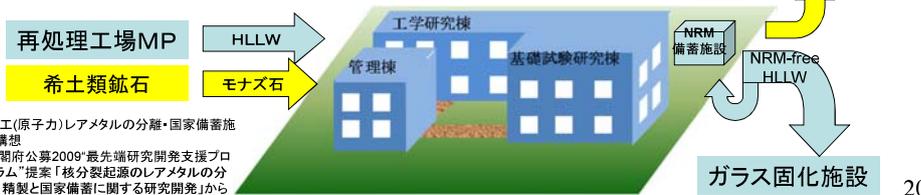
*It has often proved true that,
the dream of yesterday is the hope of today, and the reality of tomorrow*

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

- 一般 ; 廃水から金(Au)の回収(現実) *諏訪下水処理場の例、火山口ガスからのレニウム(Re)回収 *択捉島クドリヤバイ火山の例
- 原子力; 放射性廃液から白金族、他、レアメタルの回収(将来)
- OP. 希土類鉱石からのアクチニド(U,Th)の分離



・人工(原子力)レアメタルの分離・国家備蓄施設構想
内閣府公募2009"最先端研究開発支援プログラム"提案「核分裂起源のレアメタルの分離・精製と国家備蓄に関する研究開発」から

2. 先進オリエントサイクル研究から —分離技術—

東京工業大学 原子炉工学研究所

鈴木 達也

先進オリエントサイクルと原子炉で発生する有用元素

先進オリエントサイクルは、原子炉で発生する様々な物質を分離して、有効利用あるいは核変換もしくは核変換後有効利用を図り、核分裂により生じた廃棄物の発生量を最小限に抑えると共に今まで廃棄物として厄介者扱いとされていた物質を資源に変えることが目的である。また、この研究の実現により、原子力がエネルギーを発生させる手段に加えて、希少な資源を創造する「現在の錬金術」にも成る。原子炉で発生するものは、核燃料の中性子吸収と壊変過程の組み合わせによって生じるアクチノイドと核燃料の核分裂によって生じる核分裂生成物(FP)がある。原子炉中で生じたアクチノイドの内、元々核燃料として用いられるウランやプルトニウム以外のものを総称してマイナーアクチノイド(MA)と呼び、それら MA も高速炉では燃料として利用することが出来る。また、MA には長半減期の核種が含まれているので、MA を燃料とすることは、有効利用の観点のみならず、廃棄物処分の観点からも重要である。FP は多種多様な元素が含まれている。元素として有用かつ希少なものも多い。例えば、白金族元素であるルテニウム、ロジウム、パラジウムであり、昨今様々なハイテク分野で欠かせないものとなっている希土類元素などである。しかも、これらの元素では放射能を持たないもの、持っている半減期が極めて短く保管することにより放射能がなくなるもの、放射能はあるが極めて低いものなども多い。これらの元素は、様々な状況に応じて使い分けることで有効に活用できる。原子炉内で発生し、放射能を持たない元素として知られているものの一つにモリブデンがあり、モリブデンは特殊鋼に欠かすことが出来ないだけでなく、触媒などの分野でも重要であり、近年、急激に価格が上昇している。ごく僅かに放射性物質を含むが半減期が短く保管後に利用できるものと考えられるもので重要なものはルテニウムとロジウムであり、これらは触媒として利用されるが価格が極めて高いことで知られている。また、同族のパラジウムは原子炉で生成するものは極微量の放射能を含むため、使用に関しては種々の状況による判断が必要であるが、極めて有用な元素であり、回収して利用することを考えるべきであろう。また、希土類元素についても放射能を持たないか、半減期が短く保管後利用可能なものが数多く存在する。また、放射能を持つ元素であっても放射線が利用できたり、発生する熱が利用できたりする元素があり、代表格がセシウムとストロンチウムである。更には、テクネチウムのようにもう一度原子炉に入れることによりルテニウムに核変換して利用できる元素もある。

前述の通り、原子炉中では非常に多くの元素が作り出され、しかも有用な元素が数多く存在する。しかしながら、分離しなければ、単なる廃棄物に過ぎず、分離することによって初めて利用することが出来るのである。

有用元素の分離

原子炉で発生する有用元素を分離・回収する考え方は大きく分けて2つある。一つは既存の再処理システムで発生する「高レベル廃棄物」から有用な元素を回収する考えであり、この考え方は既存の施設に回収システムを付加するもので、比較的導入は易しいと考えている。次の考え方は核燃料物質も含む有用元素の分離・回収を最初から考慮してシステムを構築する方法である。この方法は研究開発要素が多く、直ぐに実現するものではないが、既存の枠にとらわれず開発が可能で、先進オリエントサイクル研究では理想的な有用元素分離システムを目指して研究開発を行っている。ここでは、前者の方法も含めた分離法について記述する。

前者、つまり既存の再処理システムからの有用元素回収システムでは、再処理プロセスで発生した高レベル廃液から有用元素を回収するために図1に示したような高レベル廃液貯留槽の中に捕集材を浸ける方法を提案している。吸着剤は後者の「先進オリエントサイクル」で利用するのと同じピリジン樹脂を候補として研究している。研究は模擬高レベル放射性廃液に吸着剤を24時間浸漬させて模擬廃液中の濃度変化を調べることにより行った。図2に白金族元素回収結果を示す。縦軸は模擬廃液中の濃度変化を示し、横軸は模擬廃液中に投入した樹脂体積を示している。この手法ではパラジウムは少量のピリジン樹脂を加えるだけで回収できる。ルテニウムは有る程度回収できるが、ロジウムの回収に多くの回収材を必要とすることが確認された。なお、模擬高レベル廃液中の他の元素について確認したところアルカリ金属、アルカリ土類金属、アルカリ土類金属はこの方法では回収できず、遷移金属ではモリブデン、テクネチウム（本試験ではレニウムで代替）なども回収できること

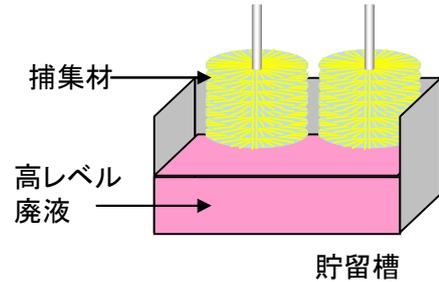


図1 高レベル廃液貯留槽からの有用元素回収システム概念図

を確認した。この試験では模擬高レベル廃液からの元素の回収結果しか示しておらず、樹脂に吸着回収した有用元素を個別に溶離して取り出す方法の研究が必要である。また、本法では単純な回収システムだけで行ってものであり、希土類元素を含む他の有用元素の分離法は別途考える必要がある。この件についてはここでは記述しないが、先進オリエントサイクルでも別途取り組んでいる方法を用いることが出来る。

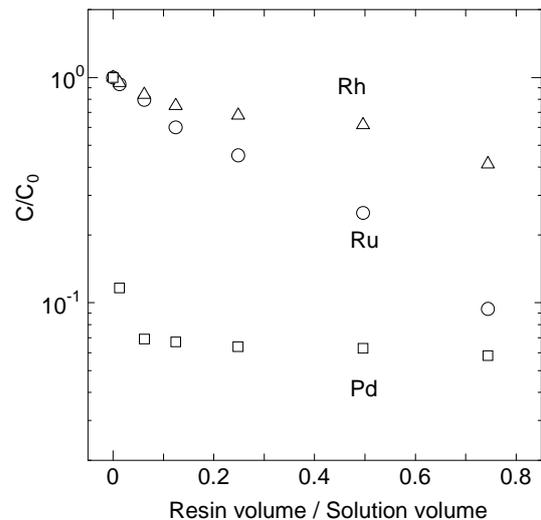


図2 白金族元素の回収結果

先進オリエントサイクルでの分離法では、ピリジン樹脂を中心に据えたプロセスが考えられている。ピリジン樹脂は3級アミンの一種である3級ピリジン基を官能基とするスチレン-ジビニルベンゼン系の樹脂であり、特長としては耐放射線性が極めて強いということ、官能基がイオン交換基の機能とソフトドナー配位子の機能を持つということが挙げられる。前者の特長は非常に高い放射線場を伴う使用済燃料からの有用元素回収プロセスには欠かせないものである。

後者の特長は、官能基の2つの機能を有効に利用することにより、種々有用元素の回収に適用できる。つまり、ピリジン樹脂のイオン交換特性を利用した再処理技術とソフトドナー配位子の機能を有効に利用したMAと希土類元素の分離が可能になる。この機能を有効に利用するために塩酸をベースとした分離システムを考案している。先進オリエンタサイクルの分離フローシートを図3に示す。使用済燃料溶解液をまずセシウム・ストロンチウム回収系に通し、この2種類の元素の回収を行う。この回収プロセスはピリジン樹脂

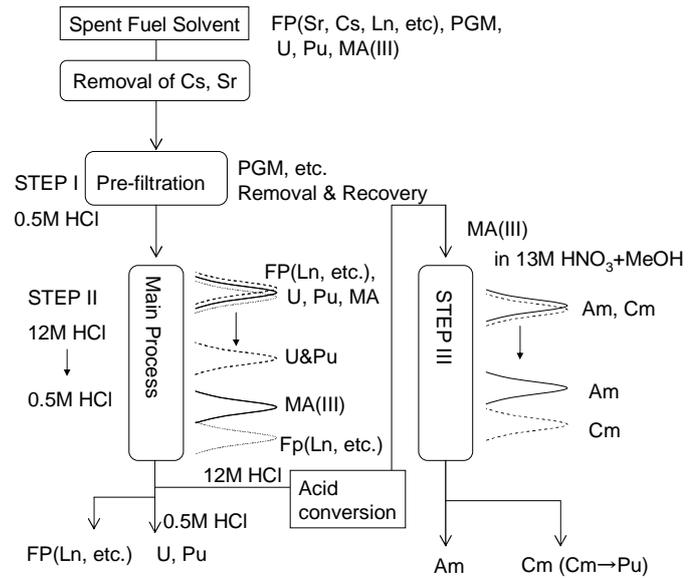


図3. 先進オリエンタサイクル核種分離フローシート

とは異なる吸着剤を用いる。セシウムとストロンチウムを回収した溶液を0.5Mの塩酸に溶液に調整してピリジン樹脂のフィルターに通す。このプロセスをSTEP I(プレフィルトレーション)と呼んでいる。STEP Iでは白金族元素であるルテニウム、ロジウム、パラジウムの回収が可能である。前述の既存再処理システムをベースとした硝酸を用いるものではロジウムの回収が不十分であるが、塩酸を用いたプロセスではロジウムも含めて回収が可能である。また、STEP Iでは白金族元素だけでなく、Tcの回収も可能で、Tcと白金族元素を個別に溶離回収する手法も既に得られている[1]。更に、モリブデンについても吸着が観測され、プレフィルターの高さなどを調整することにより、回収できる可能性がある。STEP II(主工程)では、核燃料物質を回収すると共にMAとLnの分離を同時に行う[2]。分離したMAは更に液性を塩酸から硝酸溶液に切り替えることによりアメリシウムとキュリウムを別々に分けることが可能となる(STEP III)[2,3]。更にはSTEP IIで分離した希土類元素についてもピリジン樹脂を用いて個別に元素分離する方法についても開発している[4]。

まとめ

先進オリエンタサイクル研究における有用元素の分離研究では、既存の再処理プロセスで発生する高レベル廃液からの分離研究と全く新しい分離プロセスを行っており、種々有用元素の回収に成功している。

参考文献

[1] T. Suzuki et al. J. Radioanal. Nucl. Chem. 282(2009)641.
 [2] S.Koyama et al. J. Nucl. Sci. & Technol. 43(2006)681.
 [3] T. Suzuki et al. J. Radionanal. Nucl. Chem. 272(2007)257.
 [4] T. Suzuki et al. J. Alloys and Compounds 408-412(2006)1013.

先進オリエントサイクル研究から —分離技術—

鈴木達也
東京工業大学
原子炉工学研究所

先進オリエントサイクルにおける分離技術の目的

先進オリエントサイクルとは、
原子炉中の核燃料物質の核反応によって生じる
核分裂生成物(FP)中の有用元素の積極的利用と
マイナーアクチノイド(MA)のリサイクルにより、
原子力により発生する廃棄物を極限まで減らすと共に
原子力を**エネルギー**のみの観点からではなく、
新たな**資源を生み出す**観点と見てサイクルを考えるものである。

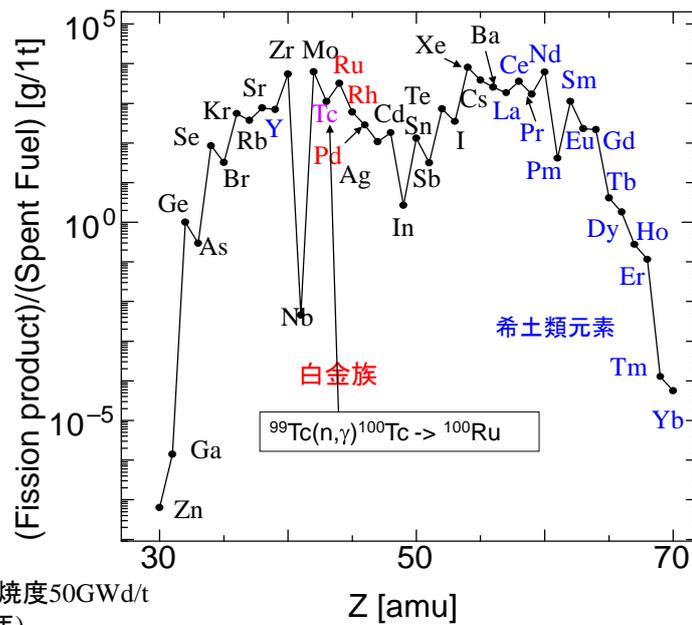


高度な**分離技術**により、**廃棄物**を**資源**に転換！

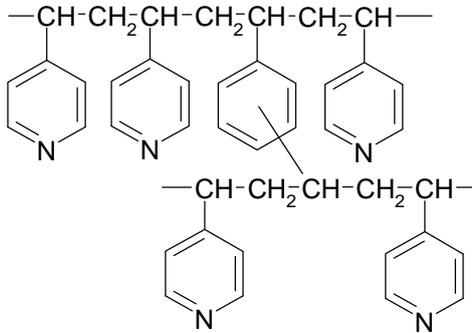
周期表における核分裂生成物とMA

1																	18		
H																	He		
3	4											5	6	7	8	9	10		
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne		
11	12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar												
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Su	Sb	Te	I	Xe		
55	56	*1	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86		
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
87	88	*2	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118		
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo		
		*1 ランタノイド																	
		ド:		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
				La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
		*2 アクチノイド																	
		ド:		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	
				Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

使用済燃料中に含まれる核分裂生成物とその割合



ピリジン樹脂の構造と特長

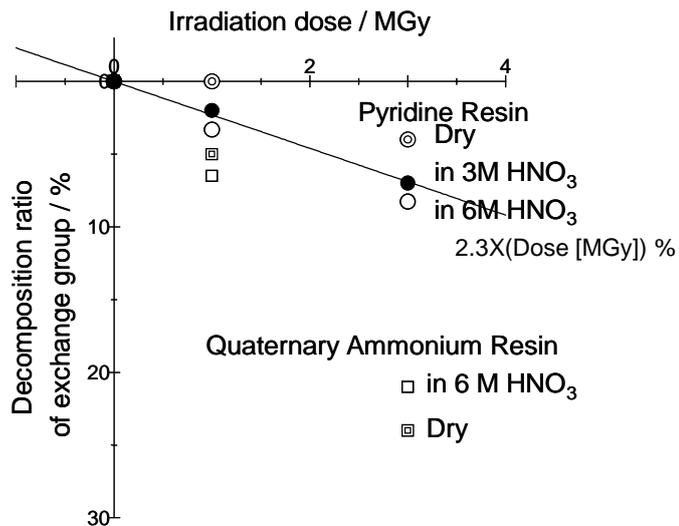


ピリジン樹脂の化学構造

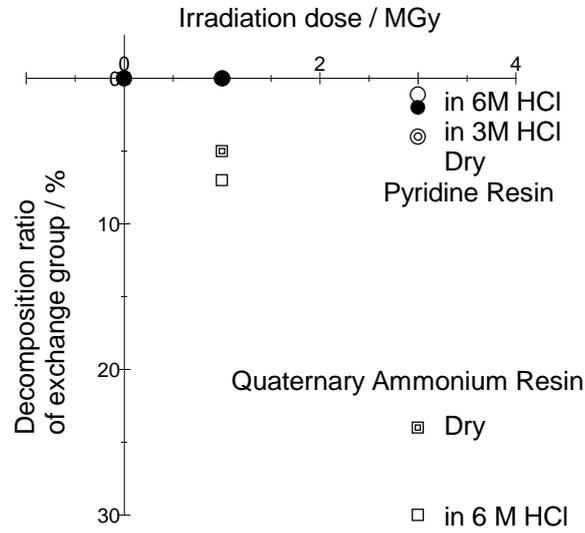
ピリジン樹脂の特長

- ・耐放射線性に優れている。
- ・耐熱性に優れている。
- ・弱塩基性陰イオン交換樹脂とソフトドナー配位子としての機能を持つ。
- ・合成が比較的簡単

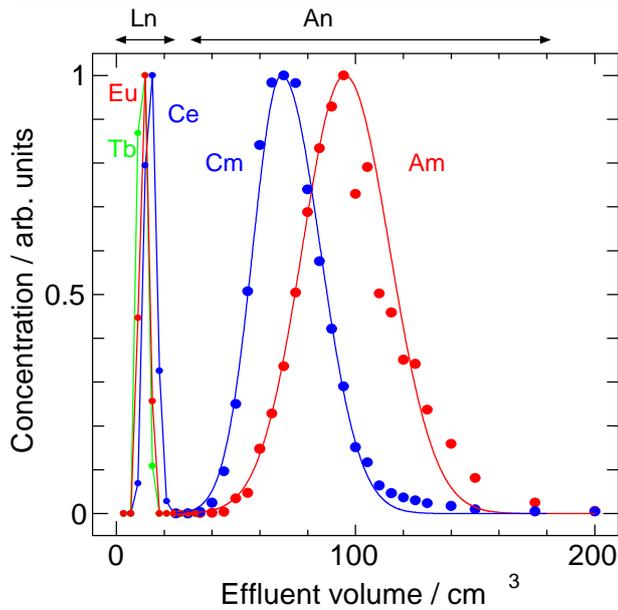
放射線による樹脂のダメージ



放射線による樹脂のダメージ（塩酸溶液中）



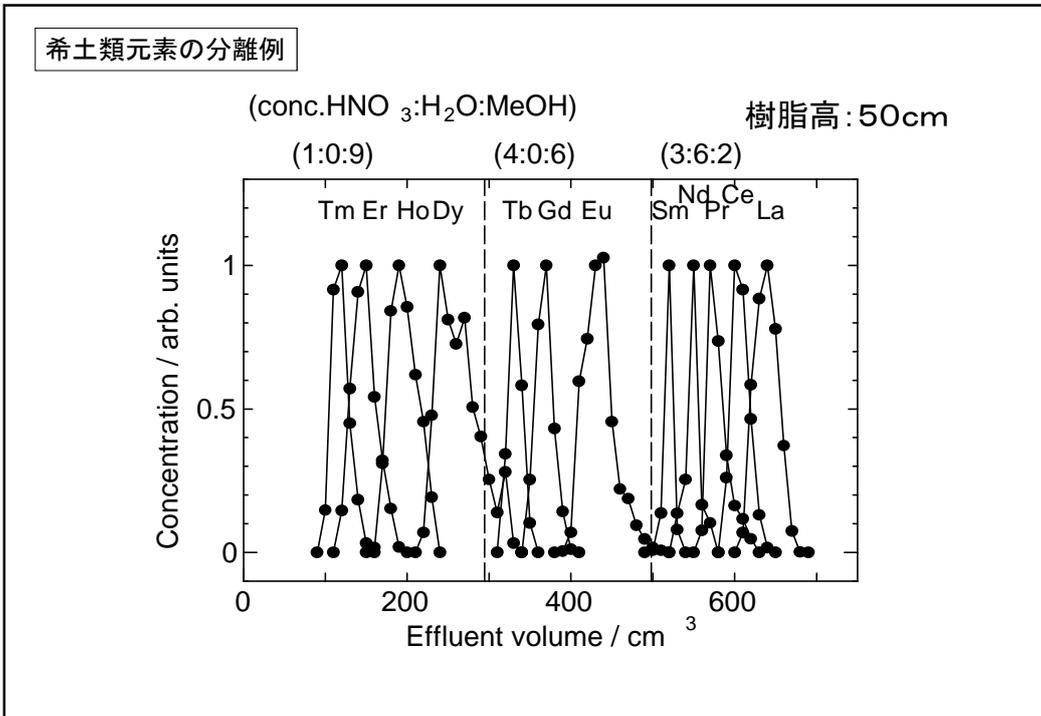
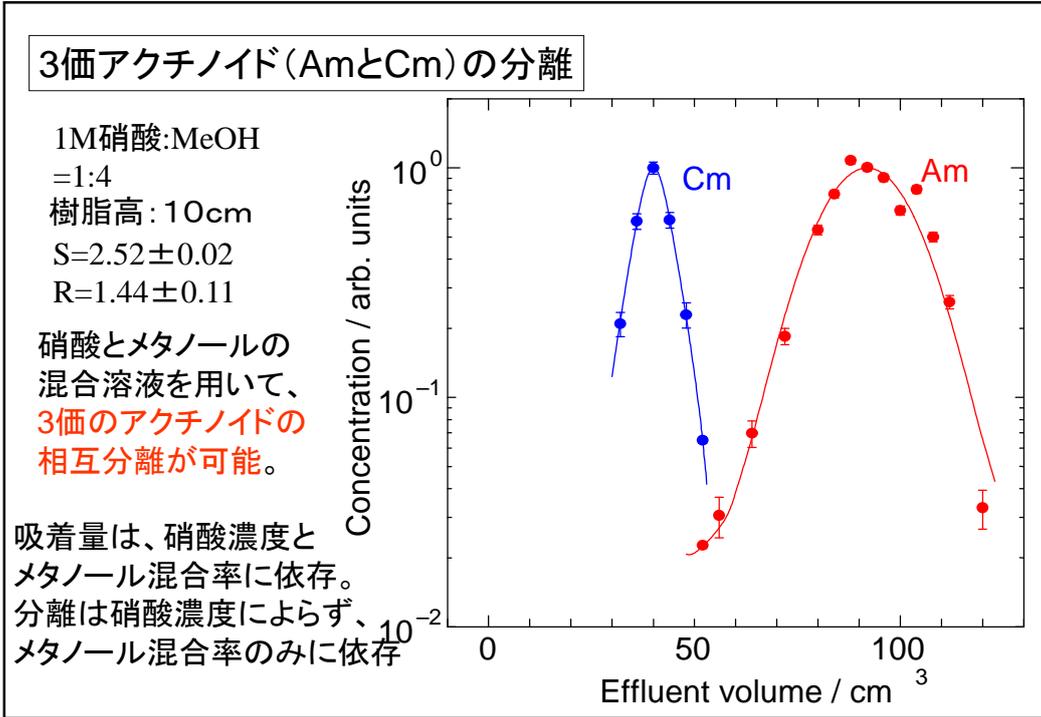
希土類元素とマイナーアクチノイドの分離



濃塩酸:MeOH
=7:3

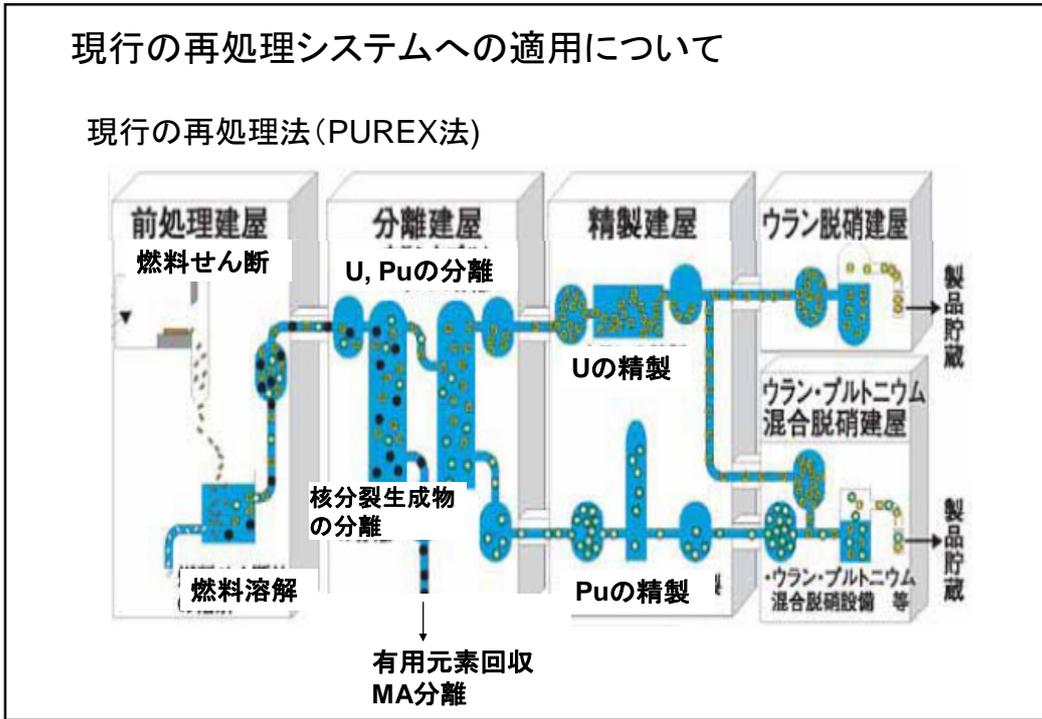
樹脂高:10cm

塩酸系では
希土類元素と
アクチノイドで
吸着量が大きく異なり、
希土類元素と
アクチノイドの分離が
可能。

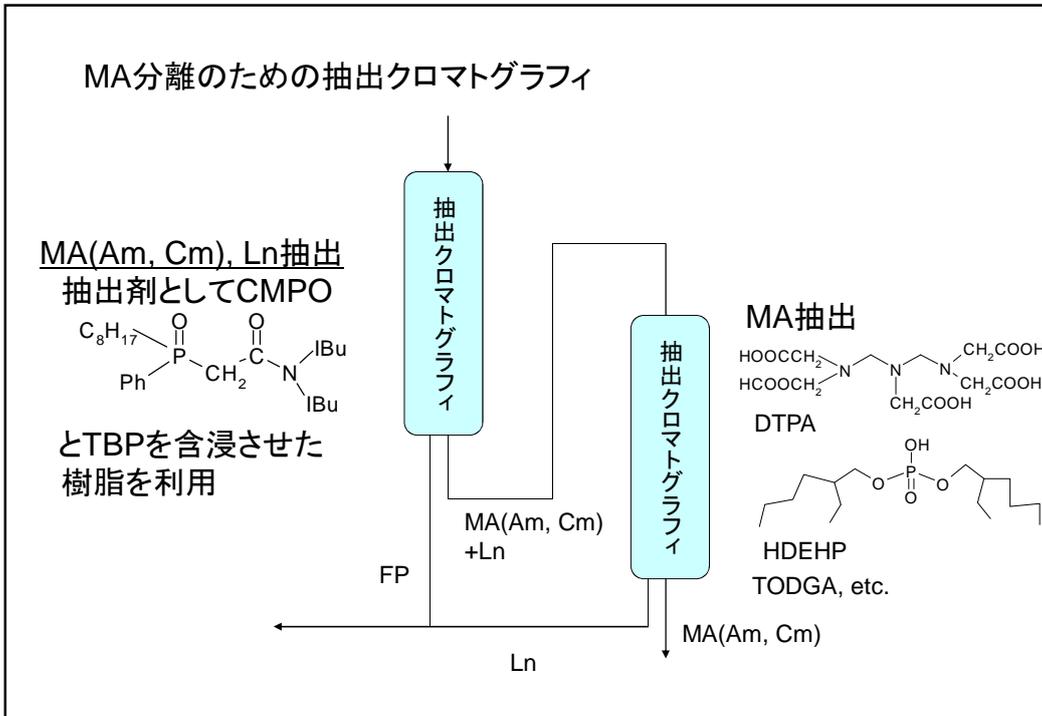


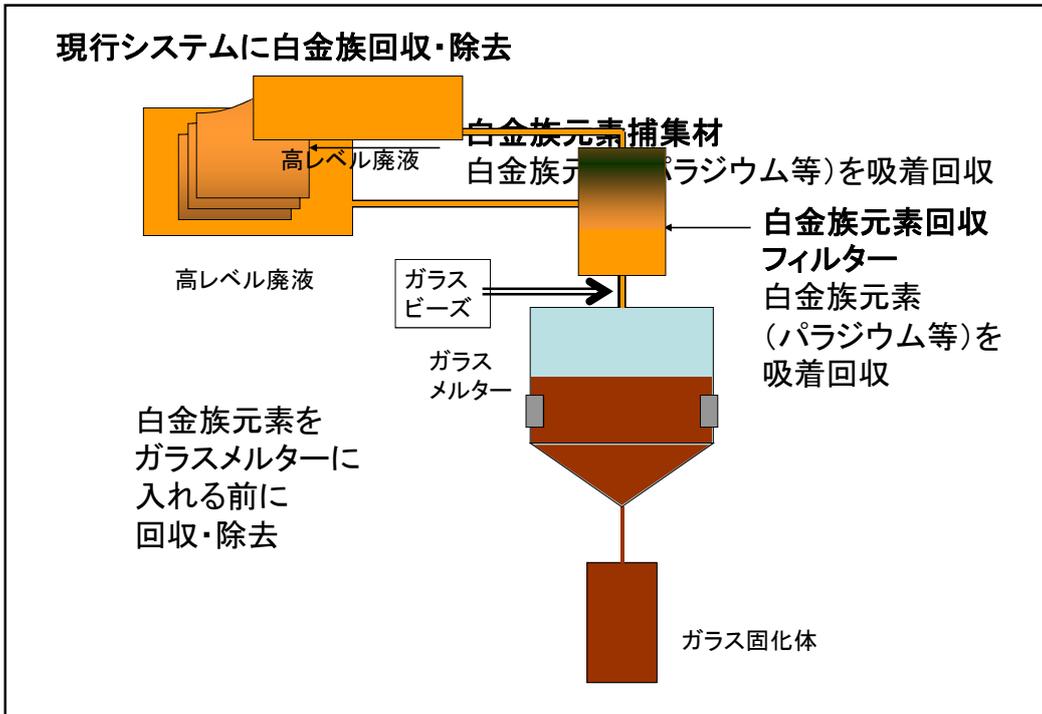
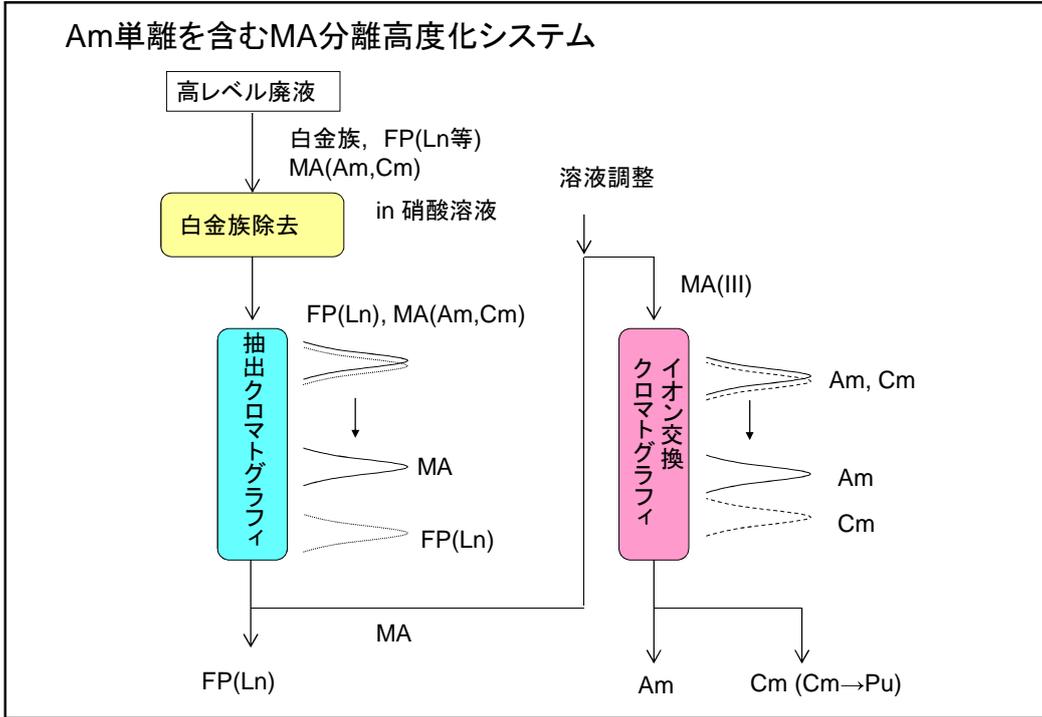
現行の再処理システムへの適用について

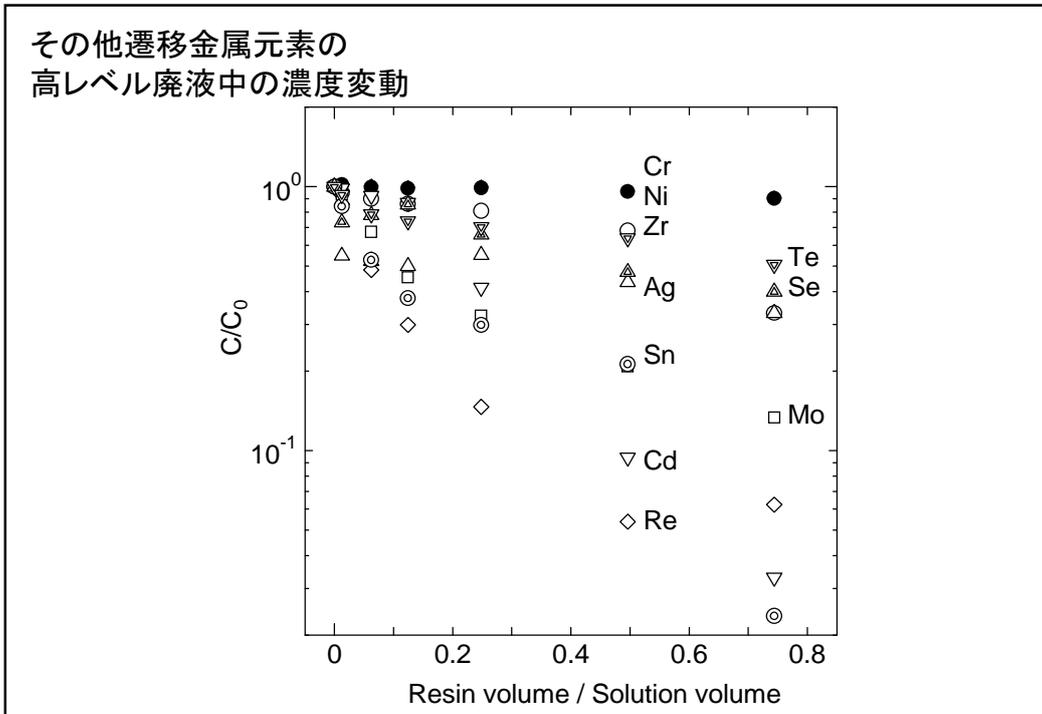
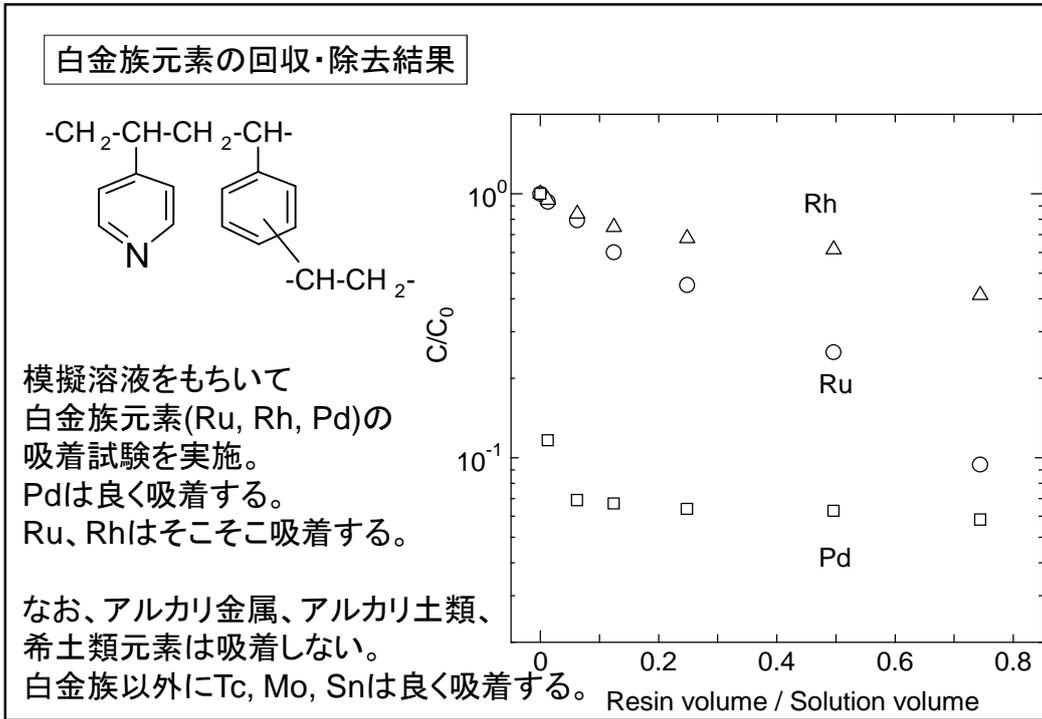
現行の再処理法 (PUREX法)



MA分離のための抽出クロマトグラフィ

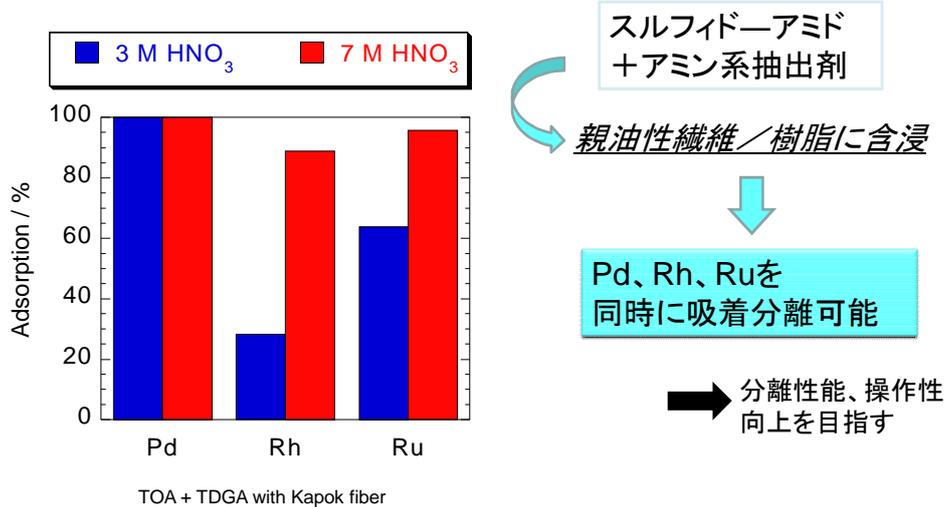






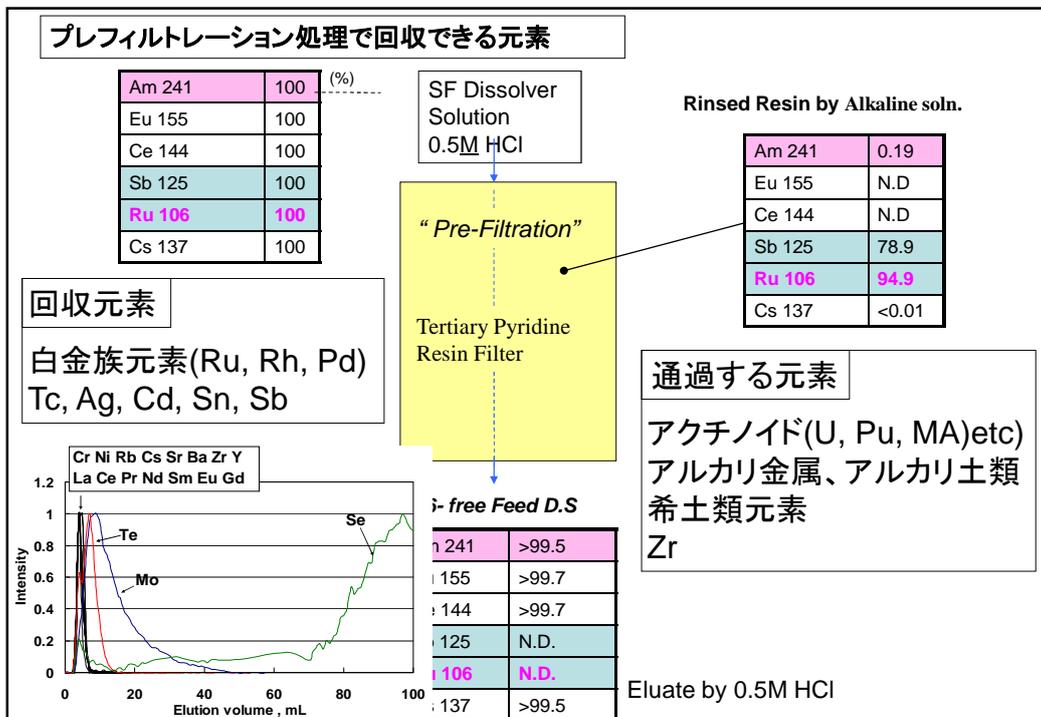
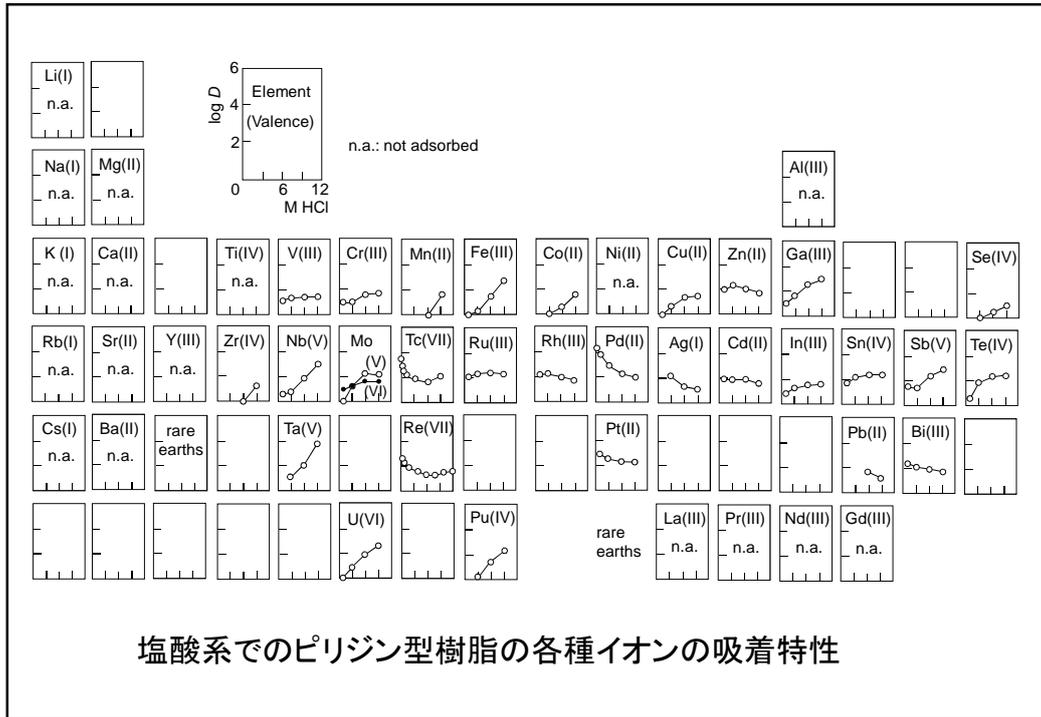
新規白金族捕集材を用いた白金族回収

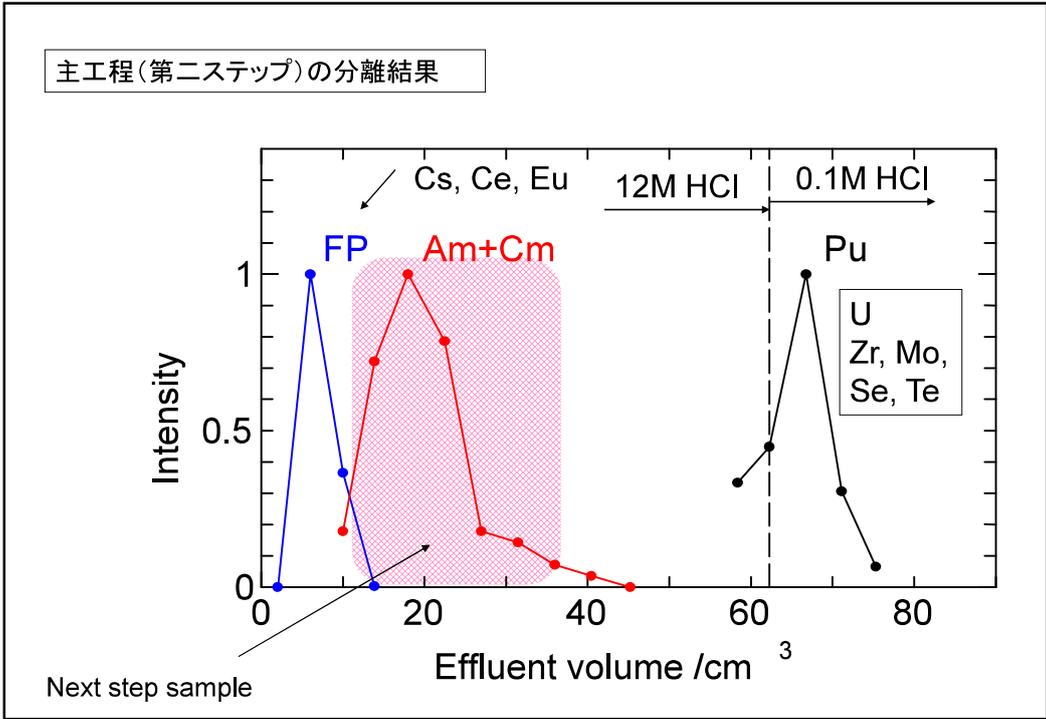
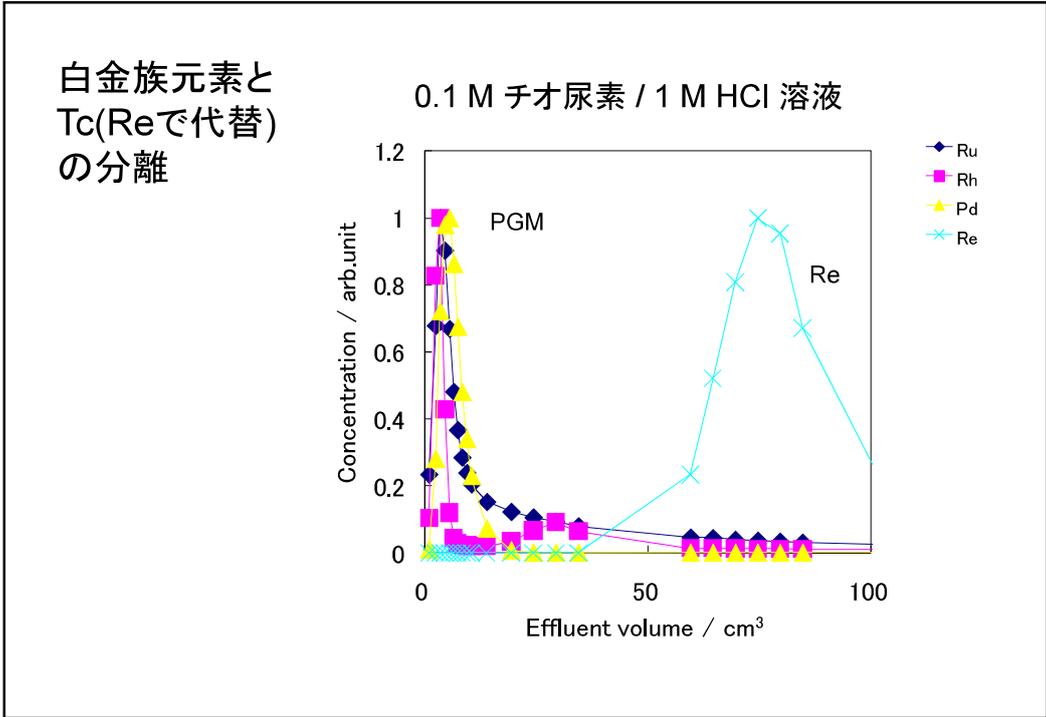
Pdに加え、これまで極めて困難であった硝酸溶液系でのRh、Ruの回収が可能

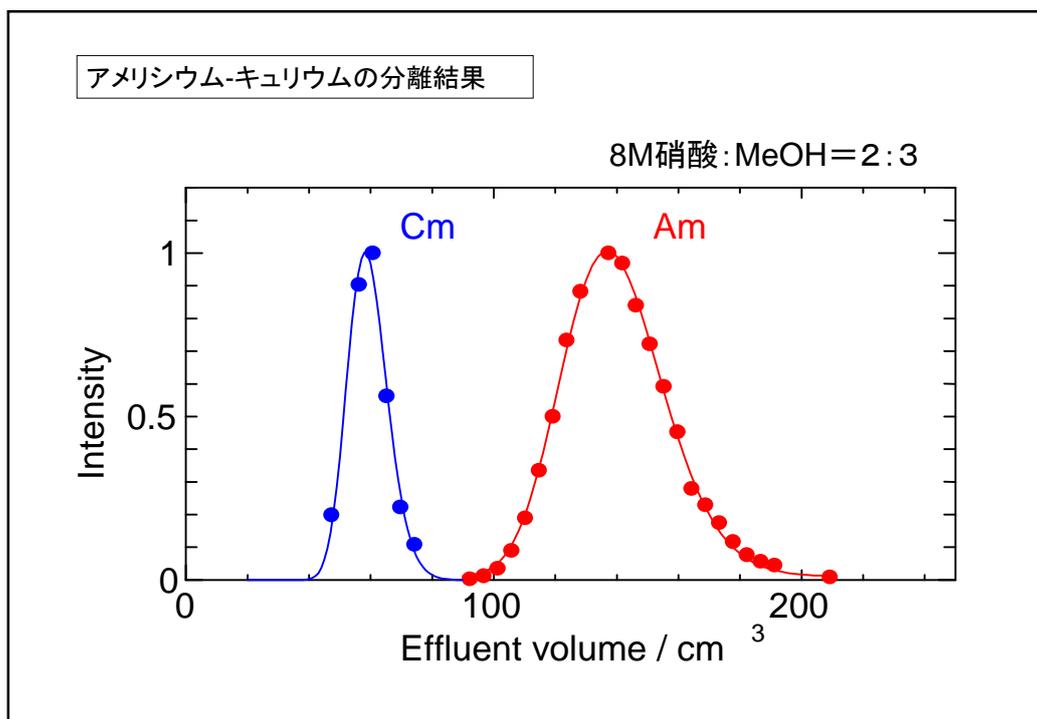


現在の再処理からの有用元素回収のまとめ

- ・現行の再処理システムでも有用元素回収システムを組み込むことは可能である。
- ・ピリジン樹脂を用いる白金族元素回収システムを提案し、模擬高レベル廃液を用いて、種々元素濃度の変動を確認した。
+ 白金族元素は概ね回収できることを確認した。
+ Tc、Moも回収できる。
+ 遷移金属の中にはいくつか樹脂に吸着するものがあり、その是非について検討する必要がある。
- ・Ru、Rhの回収技術は更なる研究が必要である。

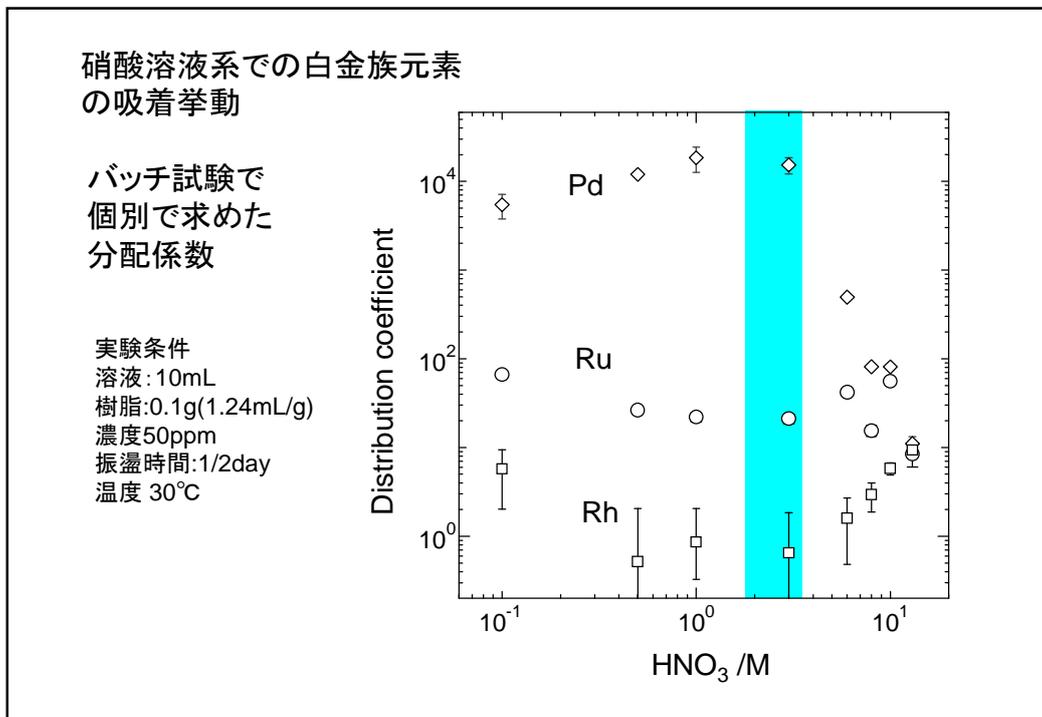
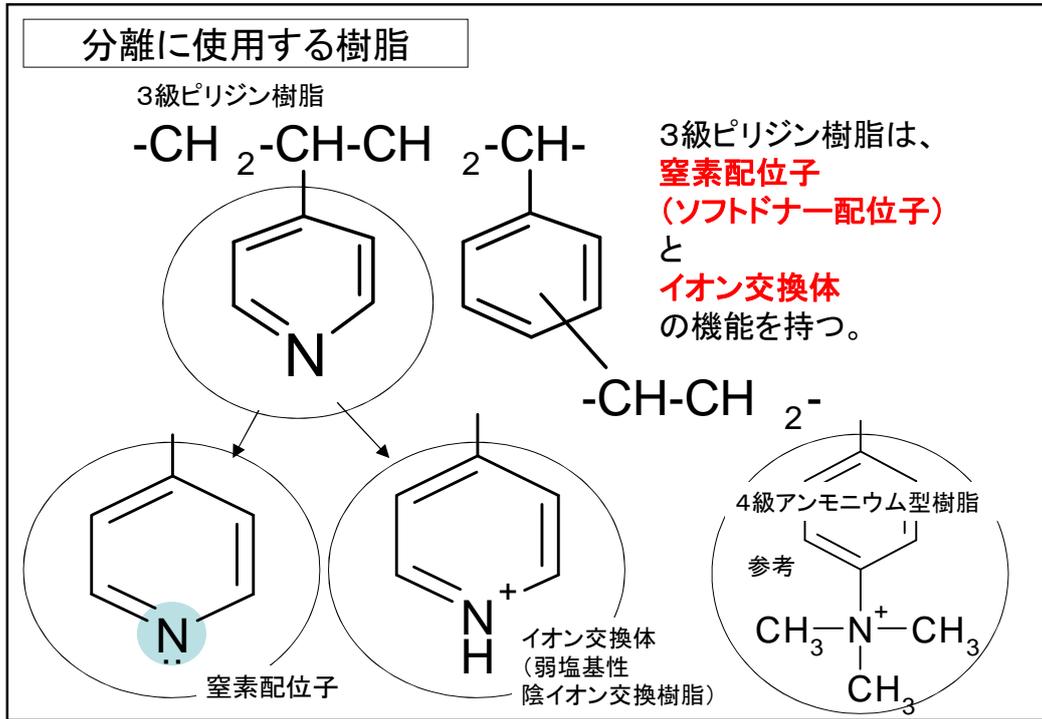






ピリジン樹脂を用いた有用核種分離システムのまとめ

- ・ピリジン樹脂を用いる有用核種分離を有する新しい再処理システムを考案している。
- ・塩酸溶液を用いることにより、システムを簡単なものとする事が出来る。
- ・本法で、再処理及びMA回収が実現できる。
 - +ウラン等にZrが混在する可能性があり、対応を考える必用がある。
 - +AmとCmの分離も実現可能である。
- ・白金族元素はRu, Rhも含め全て回収できる。
 - +白金族元素とTcの分離も実現している。



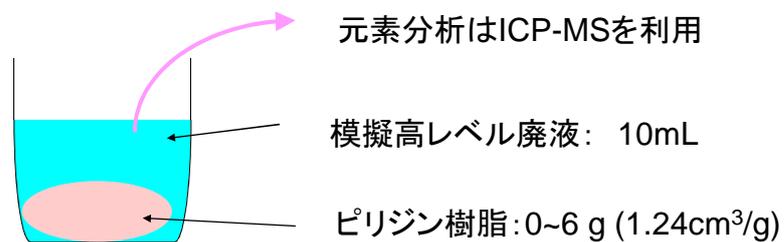
実験に用いた模擬高レベル廃液試料の組成

	g/L		g/L		g/L
Na	22.6	Mo	2.94	Y	0.433
P	0.393	Re*	0.876	La	1.1
Fe	4.34	Ru	1.71	Ce	2.11
Cr	0.205	Rh	0.349	Pr	1.05
Ni	0.55	Pd	0.921	Nd	3.61
Rb	0.311	Ag	0.037	Sm	0.767
Cs	2.14	Cd	0.052	Eu	0.121
Sr	0.769	Sn	0.039	Gd	0.061
Ba	1.34	Se	0.043	HNO ₃	2N
Zr	3.29	Te	0.456		

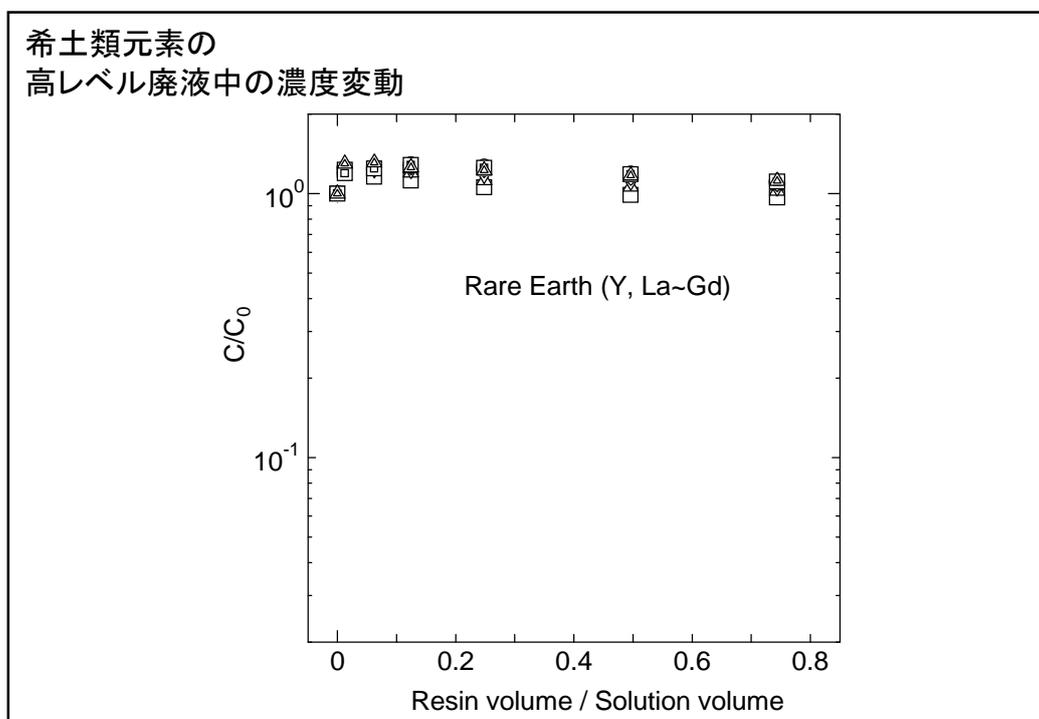
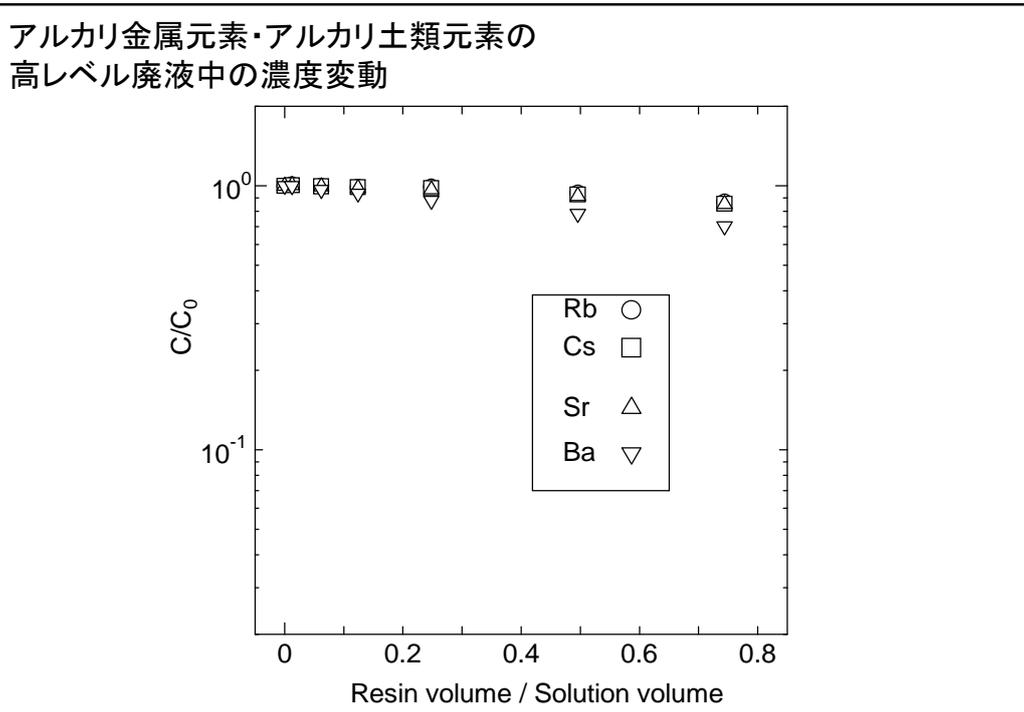
*Re: Tcの代替

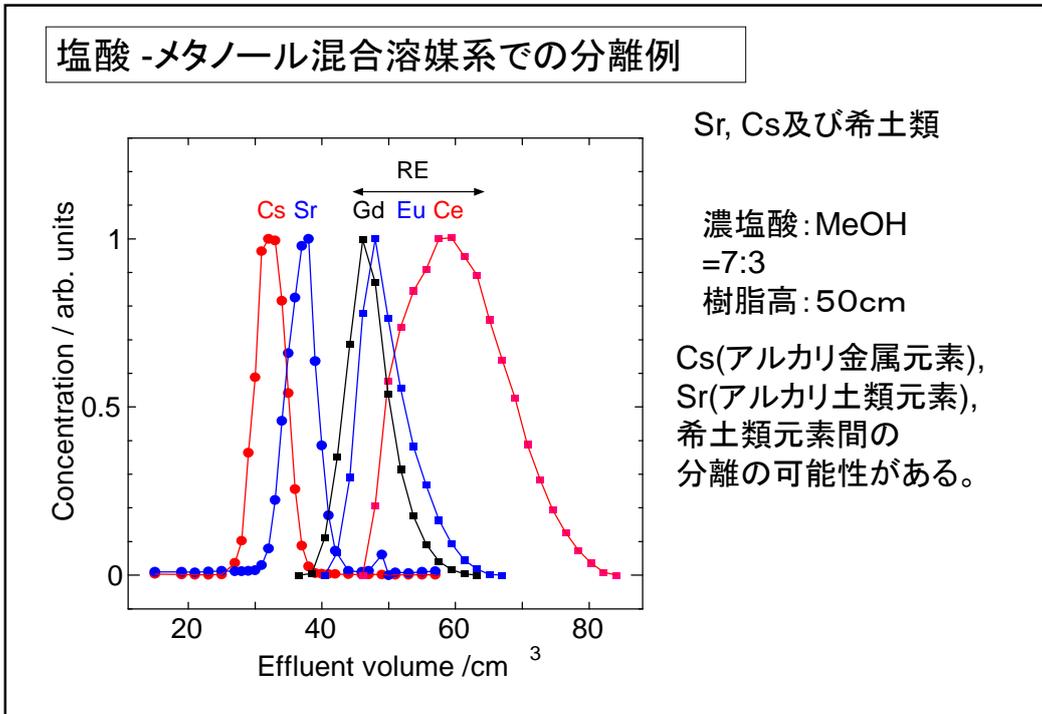
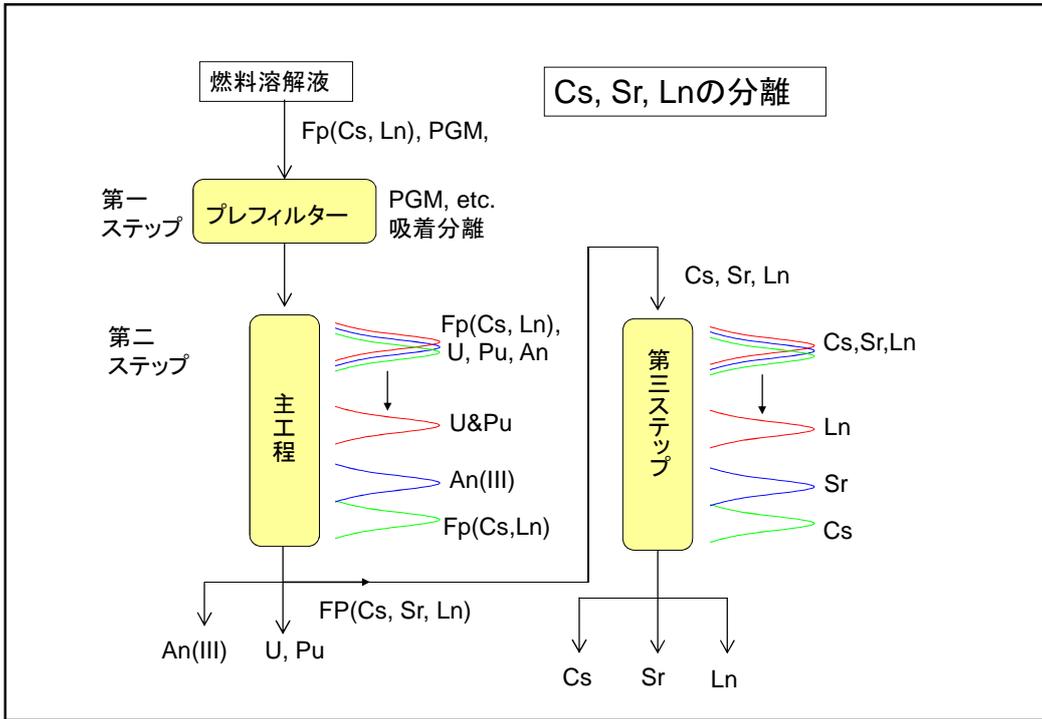
模擬高レベル廃液中の白金族除去試験
兼

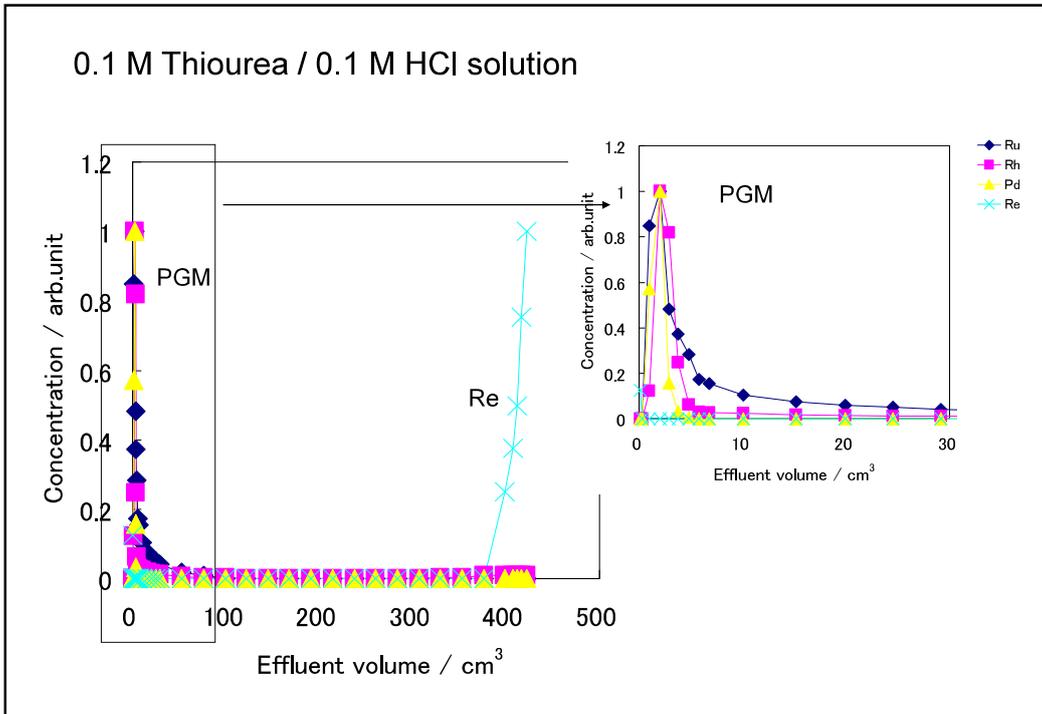
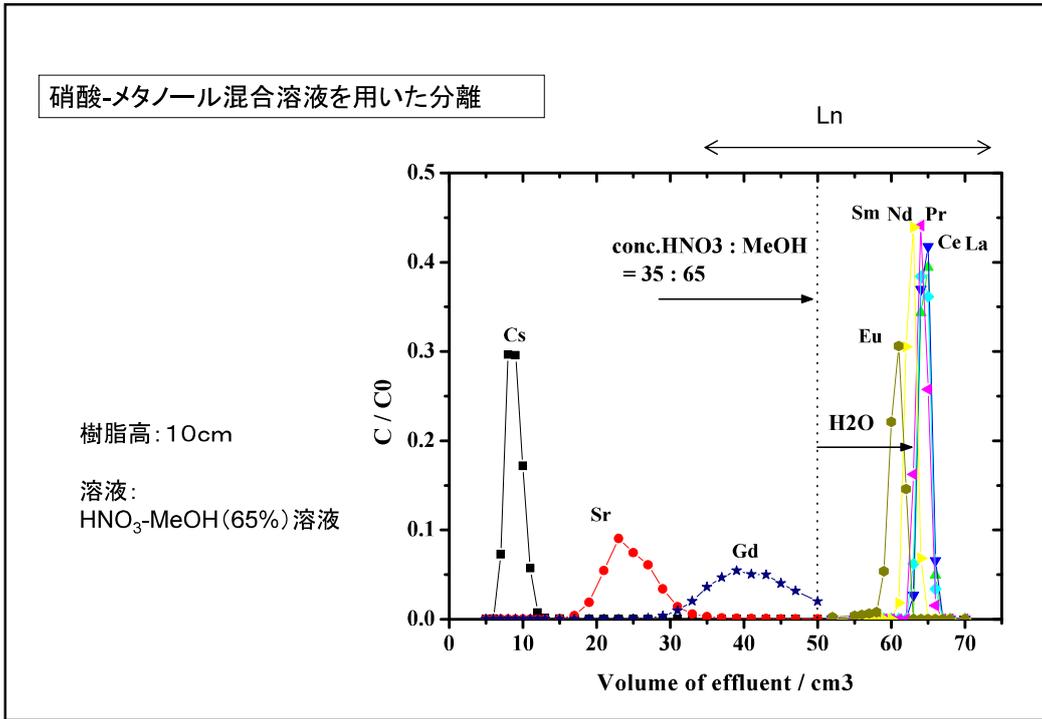
種々元素の振る舞いの検討 実験手法



実験温度: 25°C (恒温振盪槽を利用)
振盪速度: 150RPM
振盪時間: 24時間







3. 先進オリエントサイクル研究「利用・貯蔵技術」

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究開発部門
 燃料材料ユニット 湿式分離プロセス化学研究 Gr
 小山真一

先進オリエントサイクル研究 (Advanced Optimization by Recycling Instructive Elements) は、高速炉を基軸とする新しい燃料サイクルの提案である。高速炉サイクルは全アクチノイド(An)をリサイクルし発電するとともに、自らの長半減期核分裂生成物 (LLFP) を短寿命核種あるいは安定核種に核変換する他、熱及び有用人工資源を社会に供給することができる。これを実現するためには、同位体分離技術の開発を含む、分離技術の高度化が必須である。特にマイナーアクチノイド(MA)とランタニド(Ln)の精密分離、MA (主に Am, Cm) の個別高度分離回収、LLFP の同位体分離、希少元素 FP(RMFP)、Sr、Cs の利用など幾つかの新技术については、技術的ブレークスルーを果たさねばならない。

近年、使用済燃料中に生成される核種には一般産業界で希少元素とされるものが含まれており、これを都市鉱山の一部分として位置づけ、利用を模索する動きが出てきた。先進オリエントサイクル研究では、これらの元素を原子力レアメタル (NRM : Nuclear Rare Metal) として、暫定的に 31 元素を定義している。ここでは使用済燃料中に生成され、かつ有意量 (>10g/tHM) であること、資源的に利活用の可能性の高さなどを判断基準としている。図 1 に先進オリエントサイクル研究で定義する原子力レアメタルを示す。

図1 核分裂生成物、アクチノイド元素及び定義した原子力レアメタル

核分裂生成物
 アクチノイド
 原子力レアメタル (NRM)

● : 希少元素, ● : 放射性のみ
● : 非放射性(安定), ● : 短半減期 (<約1年)
● : 低毒性, ● : 発熱性

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Ln	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	An	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									
		Ln	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		An	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

元素利用を設計するには、分離される元素または元素群、その分離係数及び分離手法を考慮する必要がある。先進オリエントサイクル研究における分離対象元素群とその回収率目標値を以下に示す。

- ①有用希少金属 FP 群 (RMFP;白金族元素、Tc 等) : 分離係数、回収率 ≥ 99%
- ②希土類+その他 FP 群 : 分離係数、回収率 ≥ 90%
- ③MA 群及び燃料要素群 : 分離係数、回収率 ≥ 99.9%
- ④MA を Am 及び Cm に分離 : 分離係数、回収率 ≥ 99.9%
- ⑤FP 群より発熱性 FP(Sr/Cs)および妨害 FP(Mo/Zr)の分離 : 分離係数、回収率 ≥ 99%

その他、オプションとして高極性のフッ素系希釈剤を用いた全 An 同時一括抽出法 (ORGA プロセス) の研究開発、LLFP として、レーザー化学法による ¹³⁵Cs、化学的手法による ⁷⁹Se、¹²⁶Sn の同位体分離技術の確立を目指している。

NRM の利用については、広義には核変換も含まれる。特にアクチノイド元素は、燃料とともに高速炉で照射するための燃料製造、照射及び照射挙動評価が重要となる。原子力機構では、最大で 5% の Am を含む混合酸化物 (MOX) 燃料についてホットセルを利用した遠隔製造技術開発を行い、作製した MOX 燃料の「常陽」における照射試験を行っている。

分離した元素の個別利用技術の研究開発として、RMFP の還元反応利用 (電解水素製造や炭酸ガス固定化技術) 及び酸化反応利用 (燃料電池酸化極) 基礎研究や、長期的には水素製造源としての海水利用の検討を視野に入れている。さらに、発熱性 FP である Cs や Sr の熱電発電素子用熱源あるいは放射線源利用のため、Cs 及び Sr 固化体の諸物性並びに放射化学的、熱的特性に関する基礎研究に着手して現在に至っている。

元素戦略面では、本研究成果をベースに、戦略的優先性が高い元素から順に実用化に向けた取り組みを開始している。

次の段階としては工学的実証への取り組みとなるが、分離及び利用面では民間第 2 再処理工場のプロセスラインからの上記希少元素群の回収を想定し、実規模の希少元素回収設備・施設設計なども視野に入れる予定である。また、個別の要素技術開発と並行して分離・回収した元素 (もしくは核種) の軽水炉平衡サイクル、高速炉による核変換特性や諸量評価、核燃料サイクルにおける分離効果の検討を行っている。

希少元素、発熱性元素の利用研究

① ナノ吸着剤による発熱性 FP (Cs, Sr) の利用

発熱性元素である Sr, Cs の選択性ナノ吸着剤として、それぞれクラウン化合物、ヘテロポリ酸塩 (AMP) を用いて、模擬高レベル廃液による吸着試験を実施した。これをゼオライト、フライアッシュ等の固化素材に再び吸着させ、固化体の初期粒度、発現した結晶相、化学組成を確認し、また機械的強度、熱的性質を評価した。現在は、固化体を放射線源及び熱源として利用するための調査に着手している。今後は、実廃液より分離した核種を用いた固化体製造を行い、高密度固化技術を検討するとともに物性試験を行い、線源・熱源、熱電発電のための熱特性データを継続的に取得する。熱源としての利用は主に熱電発電が考えられる。熱電変換効率の良い素子を選定し、Sr, Cs を吸着した固化体に取り付けて熱電変換体を製作する案などを検討していく予定である。

② 希少元素 FP 電析電極による水素製造技術の開発

イオン交換法による主分離工程との整合を考慮し、高レベル廃液からの希少元素 (Pd, Ru, Rh, Tc (Re)) の電解回収技術として、標準試料を用いて塩酸系での電解析出メカニズムを解明し、Rh の共析効果を明らかにした。その後、硝酸系における Rh 効果を確認し、最終的に模擬高レベル廃液を用いた析出条件について研究を行った。

これらの研究の結果得られた電解回収金属を用いて、

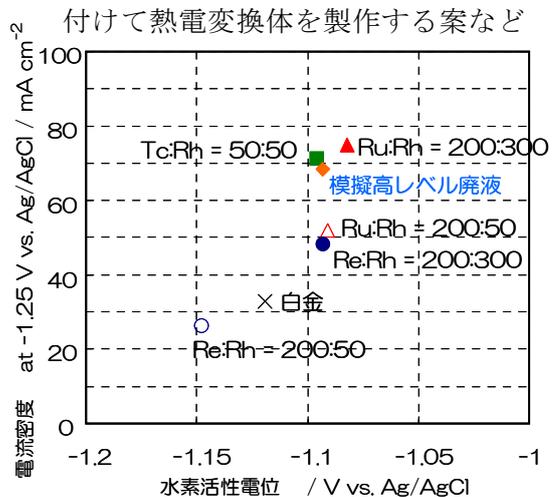


図2 水素活性電位に対する陰極電位-1.25V における電流値の相関性 (1N-NaOH中)

アルカリ溶液による水素製造に関する試験を行った。図 2 に水素活性電位に対する陰極電位 -1.25V における電流値の相関性を示す。右上に位置するほど、触媒性能は良いことを示し、逆に左下に位置するほど、性能は悪いことを示す。最も触媒性能が良い電極は、Pd-Rh-Ru-Re 電極であった。水素活性電位 -1.09V 、電流値が約 $70\text{mA}/\text{cm}^2$ に位置しており、白金電極に対して高い値を示している。したがって、水素製造用の電極触媒の効果があることを確認した。今後は、実廃液を用いて回収した希少元素 FP 析出電極による 分離プロセスフローを構築するため、ホット施設において使用済燃料を用いた実証試験を行い、水素製造フローの設計を行う。



第4回オリエントサイクル研究開発セミナー
 スワニーホール・大会議室、六ヶ所村、青森県
 2010年7月30日(金)

先進オリエントサイクル研究から 「利用・貯蔵技術」

日本原子力研究開発機構
 原子力基礎工学研究部門 燃料材料ユニット
 湿式分離プロセス化学研究Gr

小山 真一、山岸 功

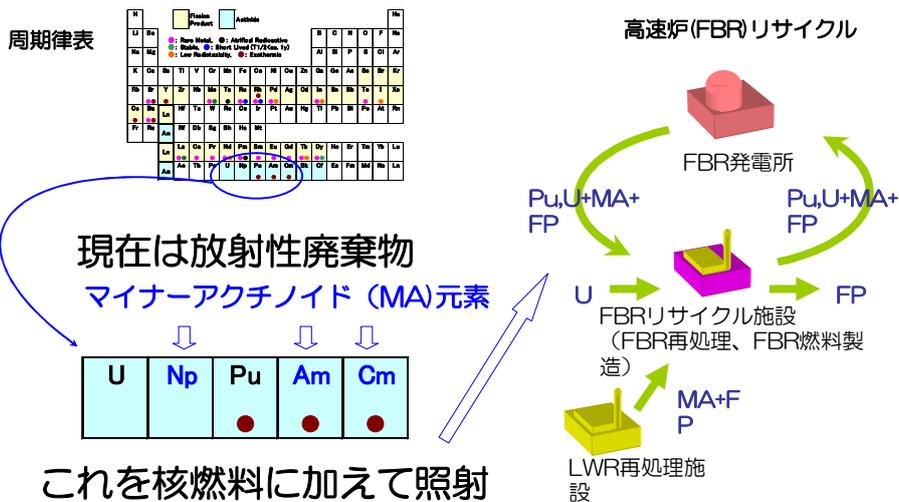
2010/7/30 4th Ad-orient seminar

1

先進オリエントサイクル研究における利用研究の考え方



[1]放射性廃棄物の放射能の低減及び処理処分における負担軽減
 →使用済み燃料中の長寿命核種の分離・核変換(消滅)に関する基盤研究



2010/7/30 4th Ad-orient seminar

2

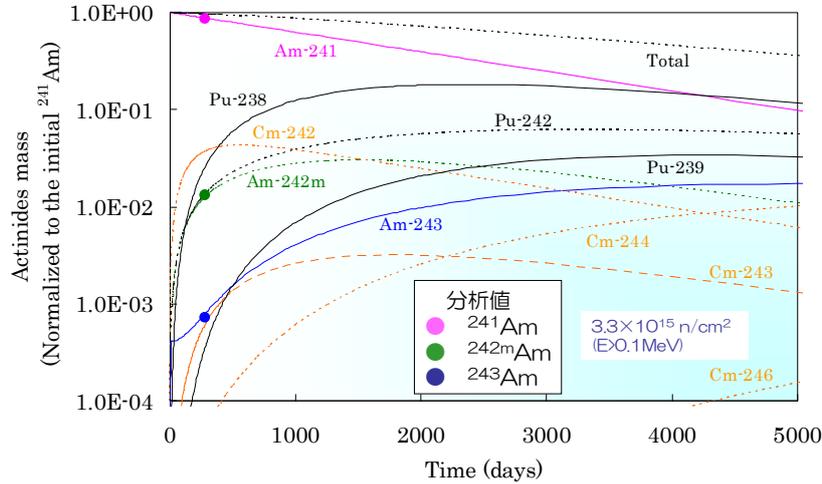
核変換(MA利用)に関する研究はどこまで進んでいるか？



その前に

Am-241を照射するとどうなる？

- ① Am-241は減少していく
- ② ただしPuやCmが少しずつ増加
- ③ 燃料中に増えていくAmと差し引きゼロ？



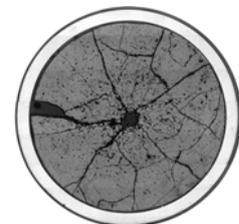
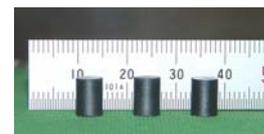
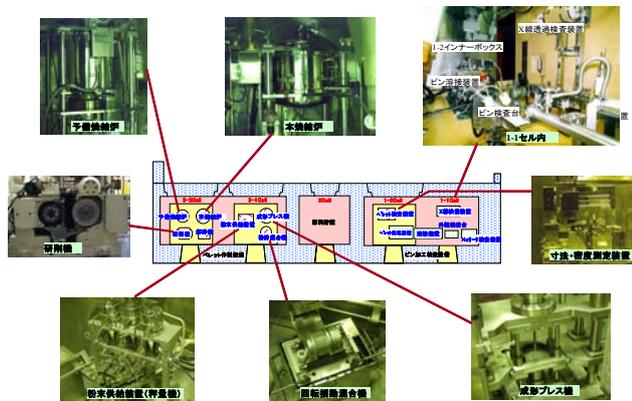
2010/7/30 4th Ad-orient seminar

Am-241を5%添加した混合(U,Pu)酸化物燃料の作製・照射試験



→大洗・高速実験炉「常陽」での短期・長期照射試験で成立性・照射特性を調査

- 遠隔操作による高密度・均質ペレットの作製に成功
- 短期照射試験終了



As-polished
 ・5%Am-MOX
 ・LHR:430W/cm

遮蔽セル内遠隔設備によるAm含有MOX燃料の作製設備

2010/7/30 4th Ad-orient seminar

先進オリエントサイクル研究における利用研究の考え方

[2]核分裂生成物 (FP)の人工元素としての資源性に着眼し
 →有用核種分離・有効利用に関する研究 (高度先進分離・利用技術開発)

核分裂生成物 (FP)の有効利用研究の考え方

- 放射性：扱いが難しい
- 資源性：需要や希少性が高く、経済的に成り立つことが条件
- 間接：直接扱うのではなく、生成物 (エネルギーなど) を利用
- 直接：元素分離後、直接利用もしくは貯蔵 (ニーズを待つ)

時間 (~100年)

2010/7/30 4th Ad-orient seminar 5

① ナノ吸着剤による発熱性FP (Cs、Sr) の利用

目的
 ナノ吸着剤により高純度に分離回収し、安定固化体に変換
 →熱源・線源として利用

周期律表

H	核分裂生成物																He
Li	Be	アクチニド										B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	分離対象元素										Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Ce	Pr	Ln	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	An	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
An	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Ln		

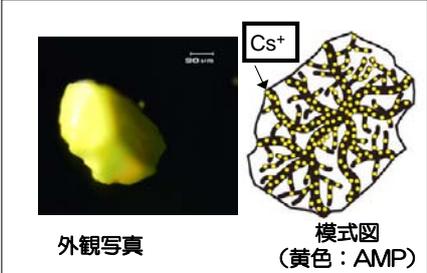
●: 希少元素, ●: 放射性のみ
 ●: 非放射性(安定), ●: 短半減期 (<約1年)
 ●: 低毒性, ●: 発熱性

2010/7/30 4th Ad-orient seminar 6

① ナノ分離剤による再処理廃液からのCs/Srの分離

ナノ吸着剤

- AMP担持吸着剤 (Cs)
- クラウンMC (Sr)

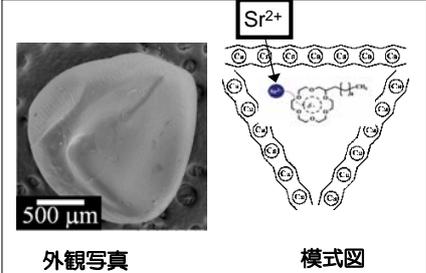


外観写真

模式図
(黄色: AMP)

シリカゲルの中に、微細な分離剤AMPを埋め込んだ無機吸着剤

AMP: モリブドリン酸アンモニウム



外観写真

模式図

アルギネートゲルポリマーの中に、分離剤クラウンを埋め込んだ有機吸着剤

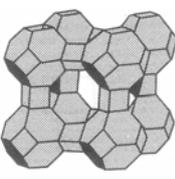
クラウン: D18C6

7

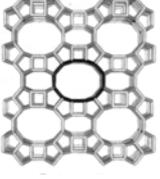
2010/7/30 4th Ad-orient seminar

① 分離後 Cs/Sr固定セラミックス固化体の製造

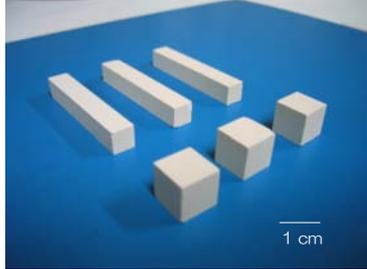
ナノ吸着剤で分離後の固化媒体



A型ゼオライト



モルデナイト, M



1 cm

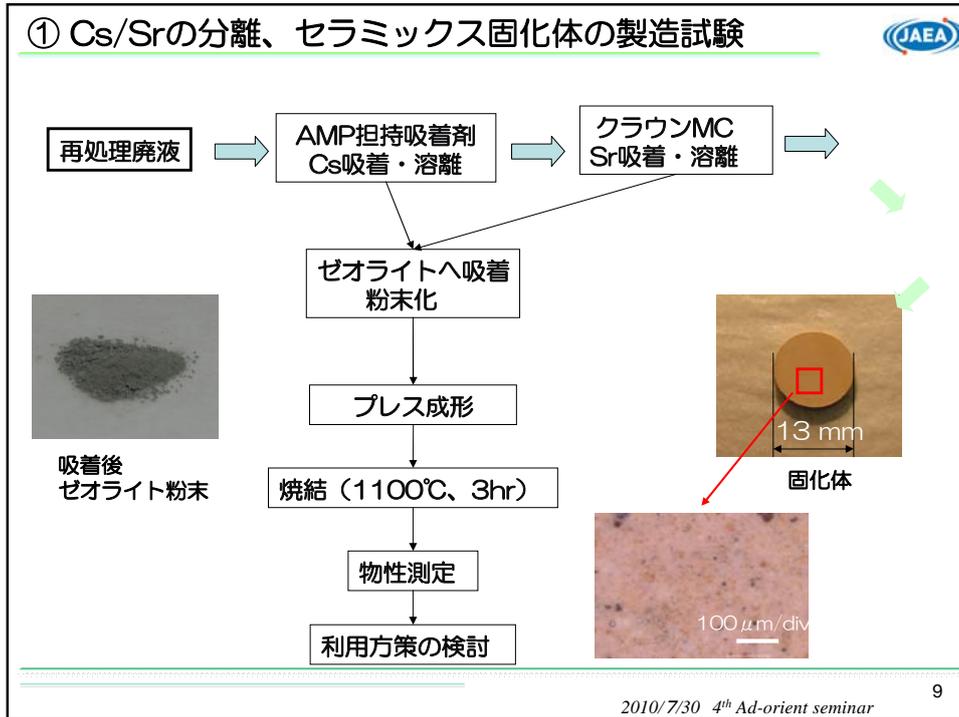
ゼオライトを利用した固化体のイメージ

固化媒体としてのゼオライトの特徴：

- 我が国に豊富に産出
- Cs, Srの選択性やや高い
- 自己焼結性有、セラミックス固化可能
- カラム吸着時の粒子の安定化
- 種類により耐酸性高い (Si/Al比に依存)

8

2010/7/30 4th Ad-orient seminar



① Cs/Srセラミックス固化体の基礎物性

- 焼成セラミックス固化体の圧縮強度および密度
 焼成前のプレス成形時の粒度に依存
 圧縮強度: Cs-M(-100M): 1.2 GPa, (Cs,Sr)-A型 > Cs-M ≫ Sr-A型
 密度: 1.5~2.5 g/cm³, (Cs,Sr)-A型 ≧ Cs-M > Sr-A型
- セラミックス固化体からのCs,Srの浸出性
 浸出性: 0.1 M HNO₃ > 0.1 M NaOH > 0.1 M NaCl > 蒸留水
- 放熱性の向上
 Al金属にセラミックス埋め込み → 熱伝導度が向上(47 W/(m.K))

セラミックス固化体の圧縮強度

Solid form ^(a)	Temp. (°C)	% leached ^(b)			
		0.1 M HNO ₃	DW ^(c)	0.1 M NaCl	0.1 M NaOH
CsM(-100M)	25	Cs 2.94×10 ⁻²	<3.74×10 ⁻³	6.39×10 ⁻³	1.78×10 ⁻²
CsM(20-50M)	25	Cs 4.91×10 ⁻²	5.00×10 ⁻³	9.39×10 ⁻³	3.43×10 ⁻²
CaM(-100M)	90	Cs 1.08	9.19×10 ⁻³	1.32×10 ⁻²	3.88×10 ⁻²
CsM(20-50M)	90	Cs 1.49	1.67×10 ⁻²	2.61×10 ⁻²	4.20×10 ⁻²
SrA(-100M)	25	Sr 4.85×10 ⁻²	<6.69×10 ⁻³	1.01×10 ⁻²	<6.71×10 ⁻³
SrA(-100M)	90	Sr 1.15×10 ⁻²	<6.33×10 ⁻³	1.59×10 ⁻²	<6.31×10 ⁻³
(Cs,Sr)A(-100M)	25	Cs 1.23	<7.31×10 ⁻³	1.30×10 ⁻²	3.27×10 ⁻²
(Cs,Sr)A(-100M)	25	Sr <5.30×10 ⁻²	<5.27×10 ⁻³	<5.20×10 ⁻³	<5.23×10 ⁻³
(Cs,Sr)A(-100M)	90	Cs 1.11	1.10×10 ⁻²	5.49×10 ⁻³	3.34×10 ⁻²
(Cs,Sr)A(-100M)	90	Sr 8.50×10 ⁻²	<5.30×10 ⁻³	<5.28×10 ⁻³	<5.35×10 ⁻³

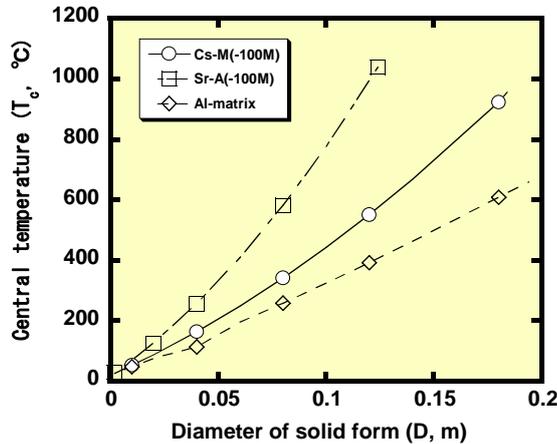
(a): Cubic specimen, 10 mm in side.
 (b): Leaching condition: 5.4 l/m² 0.3 cm² 1 d.
 (c): Deionized water.

セラミックス固化体からのCs, Srの浸出試験

① Cs/Sr固定セラミックス固化体の熱特性



発熱密度と熱伝導度:
 $10^4 - 10^5 \text{ W/m}^3$, $0.56 - 1.00 \text{ W/(mK)}$



直径10 cmの
 セラミックス固化体の
 中心温度 (T_c) は
 300-700°C。



固化体の溶融はない。

固化体寸法と温度の関係

2010/7/30 4th Ad-orient seminar

① Cs/Sr熱源・線源利用



- 熱源利用の例 熱電発電
 → 熱電変換効率の良い素子を選定し、Sr,Cs を吸着した固化体に取付け熱電変換体を製作。

使用済燃料 1t-HM から回収される Cs-137 は
 軽水炉燃料では 2~5kg

加熱面が 500°C、冷却面が 20°C (室温)
 (温度差 480°C の場合)

モジュール 1 個 (約 14.4cm²、半径 2.14cm) で
 約 15W の発電が行えるという試算

直径 40cm 以下の (Cs,Sr)A(-100M) 円柱状熱源
 30モジュール程度を搭載した熱電発電システム
 を構成すると発電出力は 450W 程度

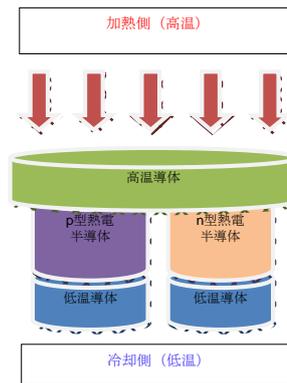


図 熱電変換素子 (p型半導体とn型半導体) として
 耐熱温度を大幅に改善させた半導体材料を
 最小して排熱利用モジュール例

- 線源利用の例
 → Co-60 線源のCs-137 線源による代替 (米国では下水の殺菌の実例あり)

2010/7/30 4th Ad-orient seminar



① Cs/Sr利用としてのまとめ

■ 分離元素の固化体製作

分離元素の固化体の製造条件を明らかにした。
 固化体の基礎物性（圧縮強度・密度、Cs/Srの浸出性）
 や熱特性の基本データを取得した。
 熱源利用として、熱電発電の調査・検討を継続して実施中。

■ 課題

実廃液より分離した核種を用いた固化体製造と放射線耐性
 評価が必要。
 高密度固化技術。
 線源・熱源、熱電発電のための熱特性データ取得。

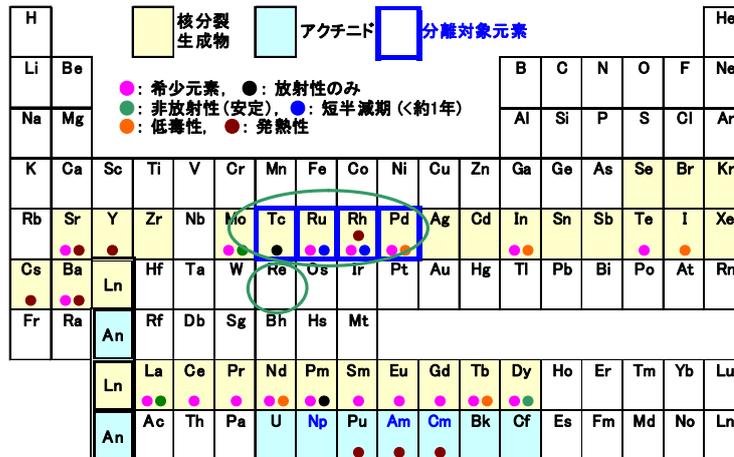
② 希少元素FP電析電極による水素製造技術の開発

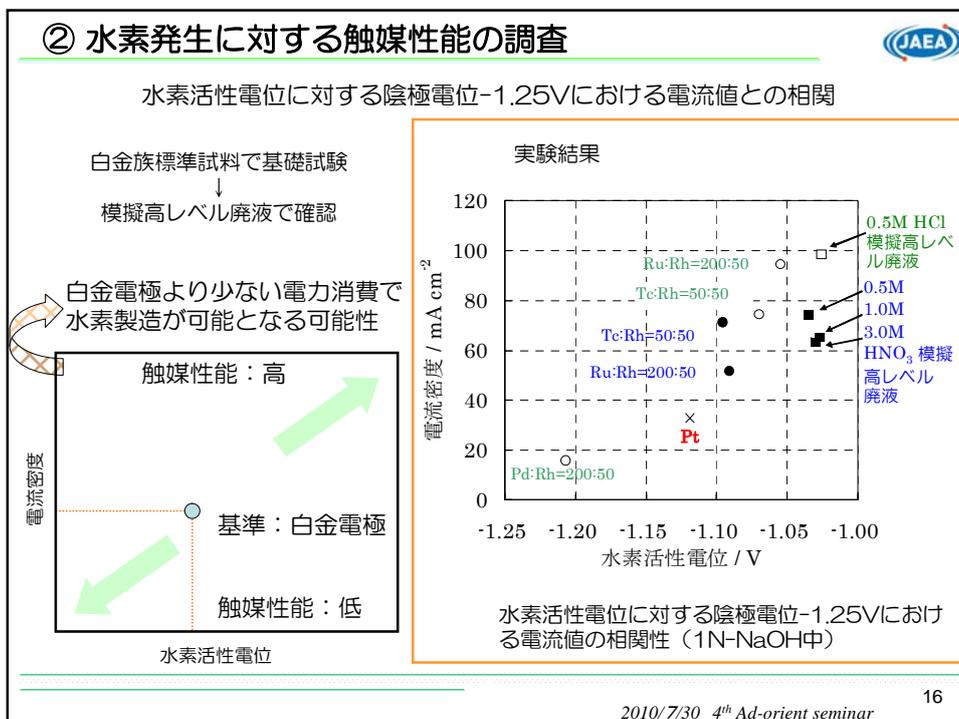
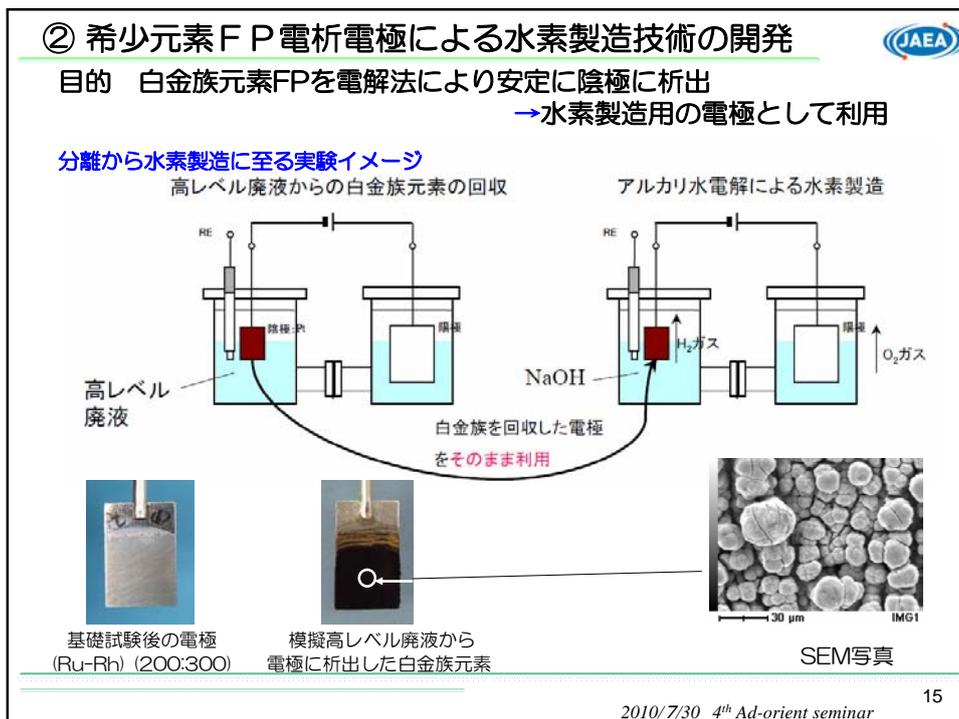


目的

白金族元素FPを電解法により安定に陰極に析出
 →水素製造用の電極として利用

周期律表





② 水素発生電位とエネルギー消費率



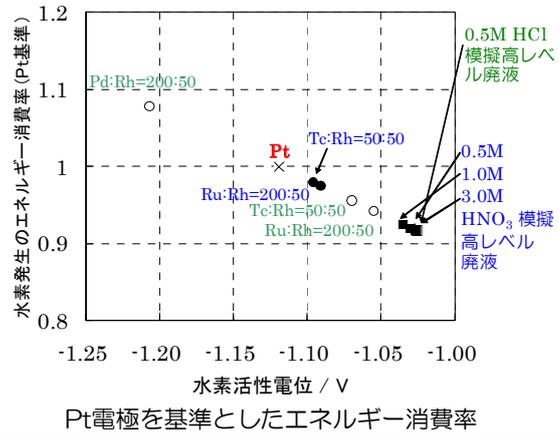
模擬高レベル廃液を用いた白金族元素の回収

0.5M塩酸系HLLW (コールド)			0.5M硝酸系HLLW (コールド)		
回収白金族	濃度 (電解前/電解後) (g/L)	還元率 / %	回収白金族	濃度 (電解前/電解後) (g/L)	還元率 / %
Pd	0.023 / 0.018	21.7	Pd	0.21 / 0.025	88.1
Ru	0.45 / 0.10	77.8	Ru	0.44 / 0.35	20.5
Rh	0.077 / 0.004	94.8	Rh	0.086 / 0.074	14.0
Re	0.21 / 0.031	85.2	Re	0.19 / 0.16	15.8

水素発生電位と白金電極を1としたときのエネルギー消費率



電極の高機能化として白金族元素の適用が有効



2010/7/30 4th Ad-orient seminar

17

② 希少元素FP電析電極による水素製造技術まとめ



■ 水素製造触媒効果

模擬高レベル放射性廃液の希少元素FP析出電極は、水素発生電位および電位-1.25Vでの水素発生電流が大きく、水素製造用電極触媒効果があることを確認した。

■ 課題

実廃液を用いて回収した希少元素FP析出電極による分離プロセスフローの構築及び実証。
→水素製造フロー設計

2010/7/30 4th Ad-orient seminar

18

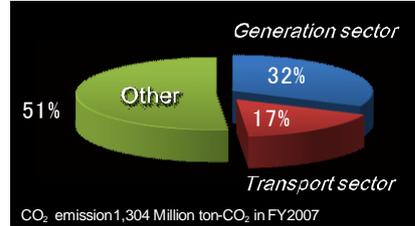
③ 分離元素の利用



目的 有用元素の諸量評価研究

我が国のCO₂排出量

約50%は、
発電と交通機関による。



Generation sector: Investigation by The Federation of Electric Power Companies
Transport sector: Investigation by Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

発電→原子力利用
→廃棄物増

交通→ハイブリッドや電気自動車
→希少元素の需要増
→電気需要増

2010/7/30 4th Ad-orient seminar

19

③ 原子炉や燃料のタイプと希少元素生成量の関係

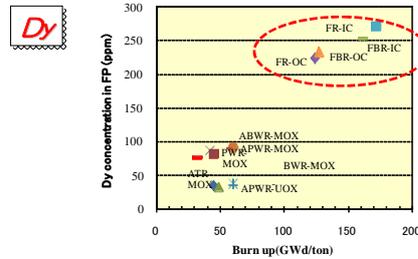
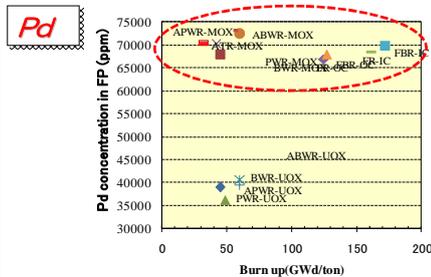


炉や燃料によって、違いあり



		希少元素(g/ton)				冷却期間(年)
		Pd	In	Nd	Dy	
家電製品	携帯電話	66	25	66	0	
	デジタルカメラ	18	23	0	0	
	ビデオカメラ	232	8	1,770	194	
	携帯音楽プレーヤー	0	16	0	0	
使用済燃料	軽水炉-UO ₂ ^[1]	2,005	2	5,719	2	20
	軽水炉-UO ₂ ^[2]	2,671	2	7,276	2	10
	軽水炉-MOX ^[1]	3,339	4	4,656	4	20
	高速炉-MOX ^[3]	10,710	46	14,970	38	7

備考 燃焼度: [1]約40GWd/t, [2]約60GWd/t, [3]炉心150GWd/t

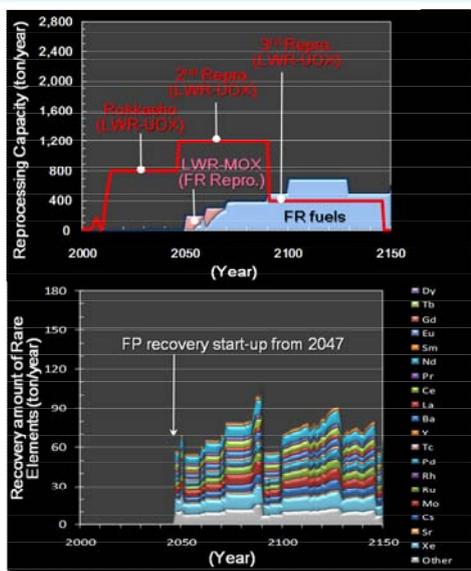


燃焼度とFP濃度の関係(炉・燃料形態別)

2010/7/30 4th Ad-orient seminar

20

③ 想定再処理量における希少元素回収量定量化



再処理量と回収FP量のリファレンスケース

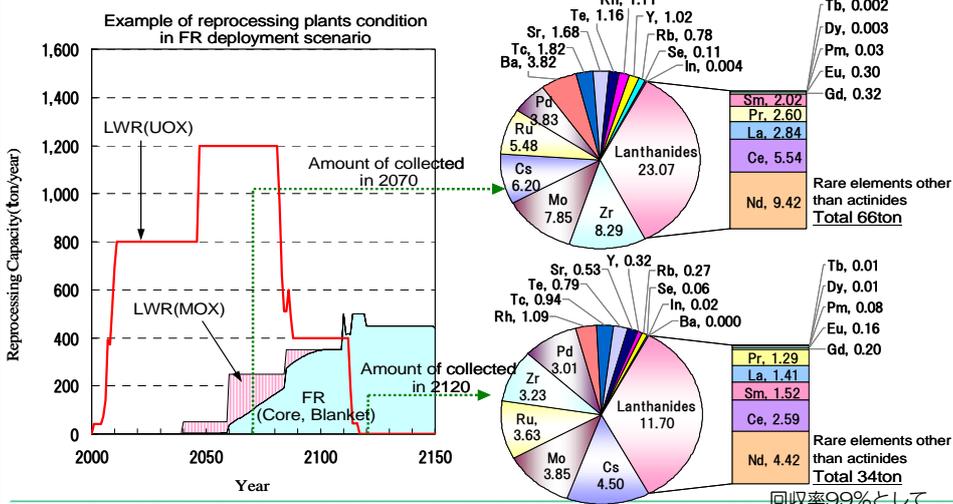
- 想定再処理量 (最大値) ; 1,600 ton/年
- 希少元素回収量 (年平均)
 - 総計(アクチニド除く希土類19元素) **61.9 ton/年**
 - Mo 6.9 ton/年
 - 白金族元素 (短半減期、低放射性) 11.0 ton/年
 - Tc 1.6 ton/年
 - Nd 8.0 ton/年
 - Dy 0.01 ton/年
 - Sr & Cs (発熱性) 7.1 ton/年
 - Xe 10.4 ton/年
 - その他 (→廃棄物?) 10.7 ton/年
- 供給能力
 - Pd : ガス浄化触媒用 車 **641000台** (国内生産量の約 6%)
 - 白金族元素 : 燃料電池触媒 車 **52300台** (Honda FCX-V3 相当)
 - Nd : HV モーター 車 **8000台** (Toyota Prius 相当)

2010/7/30 4th Ad-orient seminar

③ 貯蔵後の白金族元素：将来利用の可能性



日本における需要量の例 (2006年) ; Ru:3.7t, Rh:2.7t, Pd:50.6t
 →2070年の回収量想定、Ruは100%, Phは約40%、Pdは約7% (2006年比)



2010/7/30 4th Ad-orient seminar

まとめ



- 一般産業で抵抗感のある放射性元素の（間接的な）利用方策として、熱源や水素製造触媒としてのエネルギー創出の研究を実施し、ラボスケールでの効果を確認。
- 貯蔵（保管）による分離元素や崩壊生成物利用のため、諸量評価により、各元素の放射化学特性に応じた供給可能性について検討。
- 課題
 - ① 分離条件に応じた工学的な利用技術設計及びホット実証。
 - ② （一般産業界含む）利用の導入シナリオの構築。

4. Russian Experience on Tc and Re : “Technetium Renaissance 2010”

Konstantin E.German

**Laboratory of Radiochemical Researches, Institution of Russian Academy of Sciences
A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS, Moscow, Russia**

Abstract

The principle achievements of recent Russian researches in technetium chemistry, metallurgy, environmental science, nuclear reprocessing and applications are overviewed. The allied aspects of rhenium chemistry and applications are compared. The progress in technetium handling during the spent nuclear fuel reprocessing was based on the fundamental studies of numerous new technetium mono- and polynuclear compounds and species [1-15]. The previous achievements were reviewed in [16].

In concentrated water solutions Tc(VII) often forms crystals isomorphous with perchlorates while in concentrated anhydrous solutions Tc(VII) behaviour is more similar to Re(VII) compared to Cl(VII) [1-5].

Interesting results were obtained with the Tc-DTPA complex formed under advanced PUREX conditions [8]. Great progress have been achieved in the understanding of Tc(VII) behaviour in acids [9-11, 22] that is important for explanation and prediction of Tc and Re handling in acids, including the concentrated acid solutions. The investigation in crystal structures of Tc compounds [2-4] enabled us with direct recommendations for the template synthesis for Tc and Re sensors [10] that are used in Tc-ion-selective electrodes [23]. The progress in Tc chloroacetate and carbonyl compounds gave chance for advanced Tc metal and Tc carbide films deposition [14-15, 19]. Technetium and rhenium sulphides, peroxides, nanoclusters and complex organic derivatives were studied both with respect to medicine and to environmental behaviour of these elements [6-8, 11-13, 24, 28]. Technetium influenced by extremophilic microorganisms was reported in [25] with respect to technetium behaviour under extreme environmental conditions (up to 80°C, high pH and salinity). The work on DTPA complexes was carried in Russia in 2009-2010 within RFBR-09-08000153 [8, 21], while the work on technetium nanomaterials was fulfilled within RFBR-09-03-00017 [17, 20, 26-31].

References.

1. Peretrukhin V.F., German K.E., Maslennikov A.G. etc. Development of chemistry and technology of technetium. In.: «Modern problems of physical chemistry» pp. 681 – 695. M.: «Granitsy Publ.» (2005) pp. 681-695.
2. Grigoriev M.S., German K.E., Maruk A.Y. // *Acta Crystallogr. Sect E.* (2007) V. 63. Pt.9: P. m2061, and p. m2355.
3. Maruk A.Y. Grigoriev M.S., German K.E. *Russ. Coord.Chem* (2010) v.36, No 5, pp. 1–8.
4. Maruk A.Y. Grigoriev M.S., German K.E. Abstracts of ” *The Conference on diffraction methods for substance investigations: from molecules to crystals and nanomaterials*”, Chernkgolovka. 30 June-3 July 2008.

5. Maruk A.Y., Grigoriev M.S., German K.E. Abstracts of "The Conference on diffraction methods for substance investigations: from molecules to crystals and nanomaterials", Chernogolovka. 25 June- 28 June 2010.
6. D.N. Tumanova, K.E. German, V.F. Peretrukhin, Ya.A. Obruchnikova, A.Yu. Tsivadze. Stabilization and spectral characteristics of technetium and rhenium peroxides. In: *6-th International Symposium on Technetium and Rhenium*. NMMU-Port Elizabeth, 7-10 October 2008, p.47.
7. D.N. Tumanova, K.E. German, V.F. Peretrukhin, A.Yu. Tsivadze. Formation of technetium peroxydes in anhydrous sulfuric acid. *Doklady Phys. Chem.* 420 (2008) pp. 114-117.
8. German K.E., Melentiev A.B., Kalmykov S.N., etc. Tc-DTPA sediments formed in technetium – hydrazine – DTPA – nitric acid solutions. *Journ. Nucl. Medicine and Biol.* (2010). September No.
9. B.Ya. Zilberman. *Radiochemistry*, 42 (2000) pp. 1-14.
10. Katayev E.A., Kolesnikov G.V., Khrustalev V.N. etc. // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* (2009) 282: pp. 385–389.
11. Maruk A.Y., German K.E., Kirakosyan G.A. etc. Abstracts of the *6-th Russian conference on radiochemistry*, 12-16 Oct. 2009. Moscow.
12. F. Poineau, Ph. Weck, K. German, A. Maruk, G. Kirakosyan, W. Lukens, D. B. Rego, A. P. Sattelberger, K. R. Czerwinski . Speciation of Heptavalent Technetium in Sulfuric Acid: Structural and Spectroscopic Studies. *RSC-Dalton Transactions* (2010) Dec. pp. (in press).
13. Peretrukhin V.F., Moisy Ph., German K.E. etc. *J. de la Soc. de Chim. D.I. Mendeleev* (2007) v.51, № 6, pp.11-23.
14. Plekhanov Yu.V., German K.E., Sekine R. Electronic structure of binuclear technetium chloroacetate cluster: quantum Chemical calculations and assignment of optical and XPE spectra. *Radiochemistry*, 45 (2003) pp. 243-249.
15. German K.E., Kryutchkov S.V. Polynuclear technetium halide clusters. *Russ. Journ. Inorg. Chem.* 47 (2002) pp. 578-583.
16. N. N. Popova, I. G. Tananaev, S. D. Rovnyi, B. F. Myasoedov, *Russ. Chem. Rev.*, 72 (2003) p.101.
17. German K.E., Peretrukhin V.F., Gedgovd K.N., etc. // *Journ. Nucl. Radiochem. Sci.* 6 (2006) No.3, pp. 211-214.
18. Alekseev I.E., Antropov A.E. Accelerated transport of impurity Tc-99m atoms at polymorph transition in irradiated metal molybdenum. *Radiochemistry*, 44 (2002) pp. 334-336 (Russ).
19. Sidorenko G.V., Miroslavov A.E., Suglovov D.N. Vapor deposition of technetium coatings by thermolysis of volatile carbonyl complexes : II. Chemical and phase composition, microstructure, and corrosion resistance of coatings. *Radiochemistry*, 51 (2009) pp.583-593.
20. K.E. German, Yu.V. Plekhanov. // Quantum chemical model of Technetium Carbide. *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences* (2006) V. 6, No.3, pp. 215-216.
21. A.B. Melent'ev, V.A. Misharin, A.N. Mashkin, I.G.Tananaev, K.E.German. Abstracts of the 6-th Russian conference on radiochemistry, 12-16 Oct. 2009. Moscow. p. 209.
22. D.N.Tumanova, K. E. German, Ph. Moisy, M. Lecomte, V. F. Peretrukhin. Catalytic effects of Tc ions on the Np-hydrazinium - nitric acid system. In: Abstracts of the 6-th International Symposium on Technetium and Rhenium. NMMU-Port Elizabeth, 7-10 October 2008, p.46.
23. German K. E., Dorokhov A. V., Kopytin A. V., etc. // *Journ. Nucl. Radiochem. Sci.* (2006) V. 6, No.3, pp. 217-220.
24. German K.E., Kosareva I.M., Peretroukhin V.F., etc. In: Proceedings of the 5-th Int. Conf. on radioactive waste management and environmental remediation. ICEM'95. V.1. Cross-cutting Issues and management of high-level waste and spent fuel. (Eds.: S.Slate, Feizollahi, C.Creer), NY(1995) pp. 713 - 722.

25. Slobodkin A.I., Tourova T.P., German K.E., etc. *Int. Journ. System. Evolut. Microbiol.* (2006). V. 56. pp. 369-372.
26. Tarasov V.P., Muravlev Yu. B., German K.E., Popova N.N. Tc-99 NMR of Technetium and Technetium-Ruthenium nanoparticles. In: *Magnetic Resonance in Colloid and Interface Science*. Edited by Jacques P. Fraissard and Olga Lapina. Book Series: NATO Science Series: II: Mathematics, Physics and Chemistry: Volume 76. Kluwer Academic Publishers. Netherlands (2002) pp. 455-468.
27. Pirogova G.N., Panich N.M. Physicochemical properties of Technetium. *Russ. Journ. Inorg. Chem.* 47 (2002) pp. 681-687.
28. Maruk A.Ya., Khaustova T.A., German K.E. etc. Labeling conditions study for technetium-99m thiosemicarbazid derivatives. School-conference on radiochemistry 2010 Ozersk.
29. German K.E., Obruchnikova Ya.A., Popova N.N. etc. Abstracts of All-russian conference ” Physico-chemical aspects of nanotechnology – properties and applications”. Moscow, L.Ya. Karpov Institute of Physical Chemistry. 2009.
30. German K.E., Popova N. N., Tarasov V.P., etc. *Journ. Russ. Chem. Soc. Mendeleev*, (2010) Sept.No. pp. (in press).
31. Peretrukhin V. F., Rovnyi S. I., Ershov V. V, German K. E., Kozar A. A., *Russ. J. Inorg. Chem.*, 47 (2002) p. 637.

露国におけるテクネチウム及びレニウムの研究開発戦略
“テクネチウム・ルネッサンス 2010”

コンスタンチン ゲルマン

ロシア科学アカデミー (A.N. フラムキン物理化学・電気化学研究所)

講演要旨

テクネチウムの化学、冶金学、環境科学、核燃料再処理及びその応用について、ロシアにおける最近の研究成果の主要な成果について概要を述べる。さらに、これと関連したレニウムの化学と応用についても触れる。使用済燃料の再処理過程におけるテクネチウム取扱技術の進展は、数多くのテクネチウムの単核及び多核化合物及び化学種に関する基礎的な研究によるものである。[1-15] これに関するこれまでの成果については、文献[16]に詳しい総説がある。

濃厚な水溶液中では Tc(VII)はしばしば過塩素酸塩と同形の結晶を形成するのに対し、濃縮された無水固溶体においては、Tc(VII)の挙動は Re(VII)よりも Cl(VII)に類似している。[1-5] 興味深い結果として、Advanced PUREX 条件における Tc-DTPA 錯体形成について報告されている。[8] 酸性条件下における Tc(VII)の挙動に関する理解について重要な進展が得られているが[9-11, 22]、これは濃縮した酸溶液を含む酸性条件下での Tc と Re の取り扱いにおける予測や挙動の理解に対して、非常に重要である。Tc 化合物の結晶構造に関する研究[2-4]は、Tc イオン選択性電極として使用される Tc 及び Re センサー[10]の生成法のための直接的な知見を与えてくれるものである。[23] テクネチウムのクロロ酢酸及びカルボニル化合物に関する研究の進展は、新規なテクネチウム金属及び炭化物の薄層について理解の機会をもたらした。[14-15, 19] テクネチウムとレニウムの硫化物、過酸化物、ナノクラスター及び有機化合物との錯体については、医薬品及び環境における挙動の双方との関係で研究が進められている。[6-8, 11-13, 24, 28] テクネチウムの極限環境微生物による影響について報告されている[25]。これは、極限環境条件 (80°C、高 pH、高塩濃度) における Tc の挙動に関連している。DTPA 錯体に関する研究は、ロシアにおいて 2009-2010 に RFBR-09-08000153 として実施された[8, 21]。テクネチウムのナノ材料に関する研究は、RFBR-09-03-00017 として実施された。[17, 20, 26-31]

(翻訳、文責：原子力機構 松村達郎)

*The Fourth Adv.-ORIENT Cycle Seminar
"New Resource Strategy Pioneered by Advanced Nuclear
Science and Technology"
Rokkasho-mura, Aomori, Japan
July 30, 2010*

Russian Experience on Tc and Re : "Technetium Renaissance 2010"

K. E. German

**Russian Academy of Sciences
A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and
Electrochemistry**

Plan of the presentation

1. Tc and Re discovery, their abundance in the Earth crust
2. The main problems allied with Tc
3. And its solutions based on the fundamental studies in IPCE RAS
4. Development of separation technologies
5. Attempts of application (corrosion, metallurgy, catalysts).
6. Rise of ecological accent in the investigations.
7. Discussion: Spent Fuel Storage, Separate long-term storage or Transmutation
8. Improvements of separation technologies (SPIN-program (France), Adv.-ORIENT Cycle (Japan), PO Mayak- IPCRAS- Radium institute Russian program.
9. International collaboration of IPCE RAS with USA, France and Japan
10. "Renaissance" of Transmutation program

$^{99}_{43}\text{Tc}$ and Re in Earth crust

Re – the *lowest natural* abundance of all stable elements, Tc even less...
 Usually we say – no Tc on the Earth, but : *Tc natural concentration in earth crust $7 \cdot 10^{-8} \%$*

- (Mo, Ru, Nb) cosmic rays → ^{99}Tc (50 ton)
- $^{235,238}\text{U}$, ^{232}Th (spontaneous fission) → ^{99}Tc (50 ton)
- Total Tc 100 ton naturally, plus: accumulation 10 ton per year in NPPs

Question arise : who discovered Tc?

1937
 C. Perrier and E. Segre

Technetium (Z=43)
 $^{42}\text{Mo}^A (d,n) ^{43}\text{Tc}^{A+1}$

?
 ↔

1908
 Prof. Ogawa (Japan)
 Nipponium

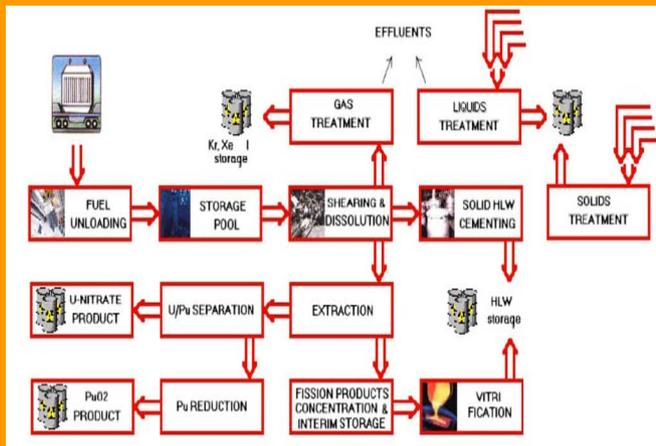
Confirmation in 1999: K. Yoshihara,

 1925
 V. Noddak , I. Taker, O.Berg
 Mazurium (Z = 43) in one (U,Re) ore
 X-ray spectral and ICPMS
Confirmation in 1988: P.H.M.Assche
 (Molle, Belgium)

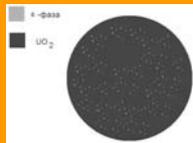
Main problems of Tc

- Tc is important item in Nuclear Industry
- Tc redistribution in PUREX produces flows with long-lived high radioactive wastes
- Tc interferes at U/Pu separation stage in PUREX process
- Tc accumulation in High burn-up fuel together with Mo, Ru, Rh
- Tc in nuclear waste vitrification: Tc-Mo-Ru metal phases, Tc(VII) volatility

Typical nuclear spent fuel reprocessing involving PUREX



High level solid Tc wastes : dissolution and vitrification



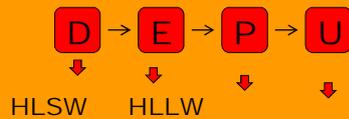
Increasing burn-up in the SNF leads to lower oxidative potential – the metals like Mo, Tc, Ru forming mutual ϵ -phase (white inclusions) that is insoluble in nitric acid – formation of HLLW.

In vitrification of HLLW the same metals (Mo, Tc, Ru) are either volatile (oxic conditions) or forming metal ϵ -phase dendrites (reducing conditions) that lead to several furnace problems

Investigation of these phases by means of NMR, EXAFS and others could help us in handling them

Some important features of liquid waste problems and its actual or possible solutions

1. Tc redistribution in PUREX produces flows produces long-lived high radioactive wastes



Ways of improvement:

1. Improved PUREX: Additional step inserted at E-P for Tc wash-out with 4M HNO₃ (Fance, UK, Russia, Japan)
2. Move from PUREX to UREX (considered in USA)
3. Pyrometallurgical reprocessing of high burn-up fuel (Russia, NIIAR - Dimitrovgrad)

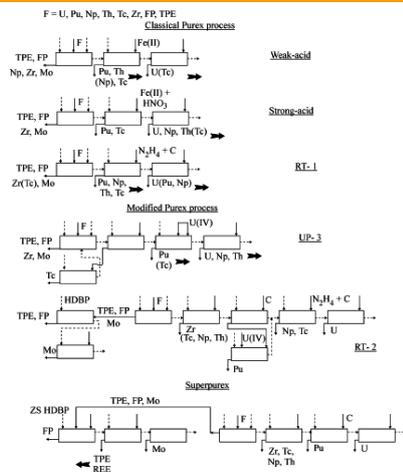
2. Tc interferes at U/Pu partitioning stage in PUREX process
feed ↓ ↓ reductor



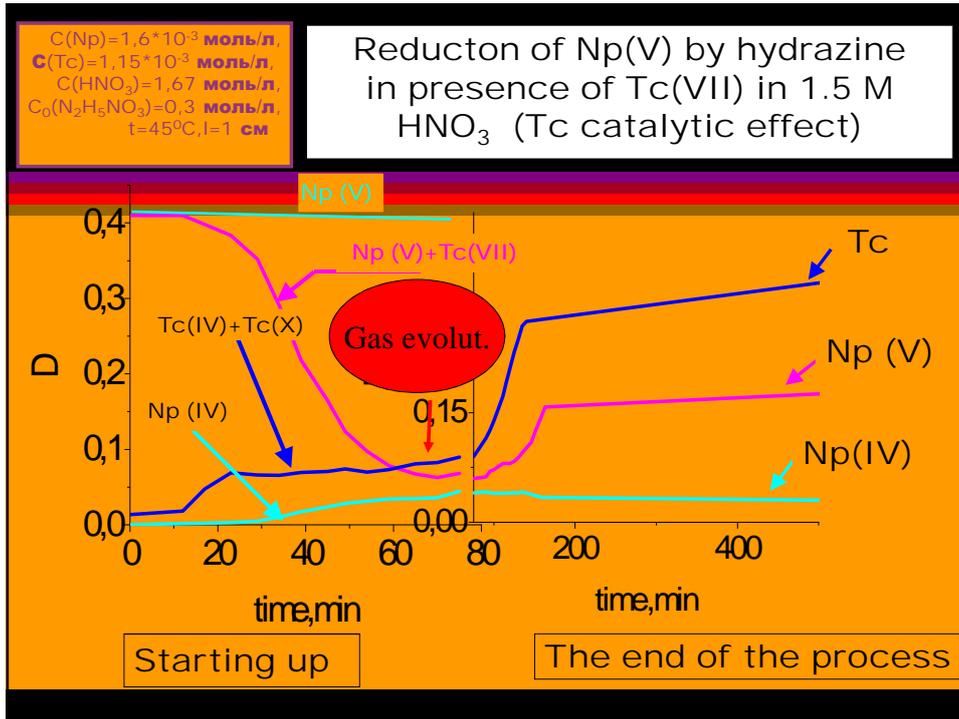
Ways of improvement:

1. Preliminary separation of Tc (Cogema, La-Hague)
2. Acidity control and soft reductors (RT-1, Ozersk)
3. Complexation of reduced Tc with DTPA or other complex forming agent (RT-1, Ozersk)

Some examples of Russian experience in PUREX improvement (compared to w



- The first cycle flowsheet of RT-1 plant is essentially similar to the THORP flowsheet but is distinguished by more reliable joint stripping of Pu, Np, and Tc due to fairly low acidity.
- This is attained owing to introduction of a special cycle for separation of Pu and Np using large amounts of Fe(II);
- As a result, there are serious problems with evaporation of the raffinate of Pu-Np purification cycles and with localization of Tc in the high-level waste.
- [Zilberman, Radiochemistry 2008]



Tc benefits:

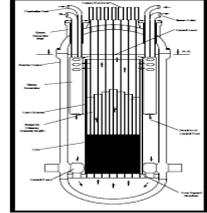
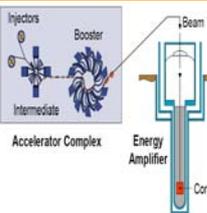
⁹⁹Mo-^{99m}Tc production for medicine
Possible: transmutation into **Ru**

Three main approaches elaborated, also having advantages and disadvantages

- HEU irradiation in the nuclear reactors (NR) or ADS
- LEU irradiation in the NR or ADS
- Enriched Mo-98 or other isotope irradiation at accelerators

● **Medical Tc-99m application** : 800 publications all over the world per year ! Millions of patients treated.

● Possible conversion of waste Tc-99 into stable noble metal – monoisotopic Ru-99 in NR or ADS

Elaboration of separation methods and extensive fundamental studies (by 1957 – 1977)

USA, Germany

- Boyd G., Cobble J., Parker G.
- C. Coleman et all (Oak Ridge, extraction with trilaurylamine)
- Rapp A.F.
- Davison S.A, Trop H., Cotton F.A.
- Schwochau K.

Russia, Czechoslovakia

- V. Spitsyn, A. Kuzina, F. Tsarenko (extraction with acetone, ion exchange)
- V. Shvedov, Kotegov, later - G. Akopov, A. Krinitsyn (analyt. chem., extraction, ion exchange)
- L. Zaitseva, V. Volk (crystallization and other)
- Arapova, Yu. Prokopchuk, G. Chepurkov (extraction, ion exchange)
- Macasek F., Kadrabova

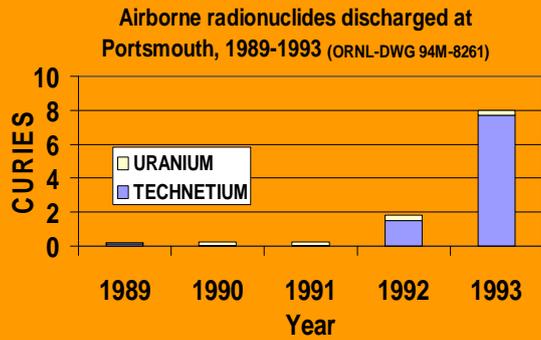
Industrial separation of Tc-99g and Tc-99m

Five main approaches were elaborated,
each one has its advantages and disadvantages

- Precipitation \ co-precipitation
(USA, Russia)
- Selective gas adsorption
(USA, Kentucky)
- Anion exchange (USA, Russia)
- Adsorption at carbon (Japan)
- Liquid-Liquid Extraction (USA, Russia, France, Japan)

Separation of Tc from HAW of gas-diffusion plant in USA

- Separation of Tc as TcF_6 was made with MgF_2 filters at $125^\circ C$ in 1960 - 1963 from HAW of gas-diffusion plant in Kentucky, USA
(Total = 25 kg Tc)
Tomlinson, Judson, Zahn, ICP UAE, 1964



- Back side : releases of Tc from decommissioned plant

Development of ion-exchange technology for Tc separation in IPCE RAS (1971-1976)



Prof. A.F. Kuzina (Tc Group leader till 1985) presents her Tc samples prepared in the Institute from the concentrate separated from radioactive wastes generated at Krasnoyarsk Reprocessing Plant to Glean SEABORG (1978)

Separation of macro amounts of Tc-99g in USSR



- ❖ Anna KUZINA and Victor SPITSYN analyzing the sample of Tc metal
- ✓ 1 kg of Tc was converted to metal in hot cell of IPCE RAS and distributed among different Russian institutes
- ✓ In 1971-1976 IPC RAS in collaboration with Krasnoyarsk Mining Enterprise has separated from HAW some kilograms of $K^{99}TcO_4$
- ✓ In 1983 -1986 collaboration of PO "Mayak", IPCE RAS and Radium Institute resulted in elaboration of anion-exchange technology for Tc separation and 40 kg of $K^{99}TcO_4$. This work was awarded with the special Diploma of the Russian authorities

New research options available for Tc-group in IPCE

- Modern XRD instruments
- Power microscopy
- NMR-Tc-99 spectrometer
- EXAFS (at RRC Kurchatov Institute)

Some new Tc(VII) compounds synthesised in IPCE RAS

N	New compound of Tc or Re	Structure	C solubility 25° C, M/L	ρ	Kass
1	Tetrapropylammonium pertechnetate	$Pna2_1$, $a = 13.22(4)$, $b = 12.35(3)$, $c = 10.13(4)$ Å	$(8.7 \pm 0.2) \times 10^{-3}$	1,26	$2,6 \pm 0,4$
2	Tetrapropylammonium perrhenate	$Pna2_1$, $a = 13.169(2)$, $b = 12.311(2)$, $c = 10.107(1)$ Å	$(8.9 \pm 0.2) \times 10^{-3}$	1,57	$2,5 \pm 0,3$
3	Anilinium pertechnetate	$P2_1/c$ 9.8388(2) 5.89920(10) 14.6540(2) Å	$(7.9 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	2,07	-
4	Anilinium perrhenate	$P2_1/c$ 9.8714(4) 5.9729(2) 14.6354(5)	$(8.3 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	2,7	-
5	Tetrahexylammonium pertechnetate	-	$(7.1 \pm 0.5) \times 10^{-5}$	1,07	40 ± 5
6	Tetrapentylammonium pertechnetate	-	$(8.0 \pm 0.2) \times 10^{-4}$	1,33	-
7	Threephenylguanidinium pertechnetate	P-1 9.87(1) 14.09(1) 15.44(1) 99.6 101.8 95.4	$(3.9 \pm 0.3) \times 10^{-3}$	1,3	-
8	$LiTcO_4 \cdot 3H_2O$	$P6_3mc$, $a=7.8604(1)$ $b=5.4164(1)$ Å	5.1		
9	$[(NpO_2)_2(TcO_4)_4 \cdot 3H_2O]_n$	P-1 5.322(5) 13.034(7) 15.46(9) 107.08 98.05 93.86(6)	0.95	4,99	

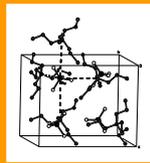
New compounds (continued)

N	New compound of Tc or Re	Structure	C solubility 25° C, M/L	ρ	Kass
11	Tetraphenylphosphonium pertechnetate	$a=17.25(5)$ $b=17.26(5)$ $c=14.239(5)$	$(4.0 \pm 0.2) \times 10^{-4}$	~1,1	40 ± 5
12	Cetylpyridinium pertechnetate	-	$(3.9 \pm 0.3) \times 10^{-3}$	~1,12	-
13	Cetylthreemethylammonium pertechnetate	-	$(6,8 \pm 0,5) \times 10^{-3}$	~1,15	-
14	Guanidinium pertechnetate	$a=7.338(2)$ Å $b=7.338(2)$ Å $c=9.022(4)$ Å $\gamma=120^\circ$	$(9.7 \pm 0.3) \times 10^{-2}$	2,30	-
15	Guanidinium perrhenate	4.9657(4) 7.7187(7) 8.4423(7) $\alpha=75.314(4)^\circ$ $\beta=88.707(5)^\circ$ $\gamma=80.985(5)^\circ$	$(7 \pm 0.5) \times 10^{-2}$	3,30	
16	Dodecylthreemethylammonium pertechnetate	liquide	$(4.0 \pm 0.2) \times 10^{-5}$	~1,05	-

A few examples of new Tc compound structures made in IPCE RAS (K.German, M.Grigoriev, A.Maruk etc.)



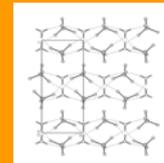
[Bu₄N]TcO₄



[Pr₄N]TcO₄



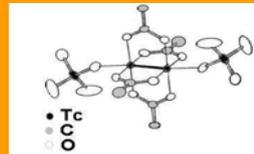
[GuH]ReO₄



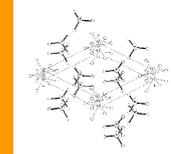
[AnH]TcO₄



$[(AnO_2)_2(MO_4)_4 \cdot 3H_2O]_n$,
(An = U, Np; M = Tc, Re)

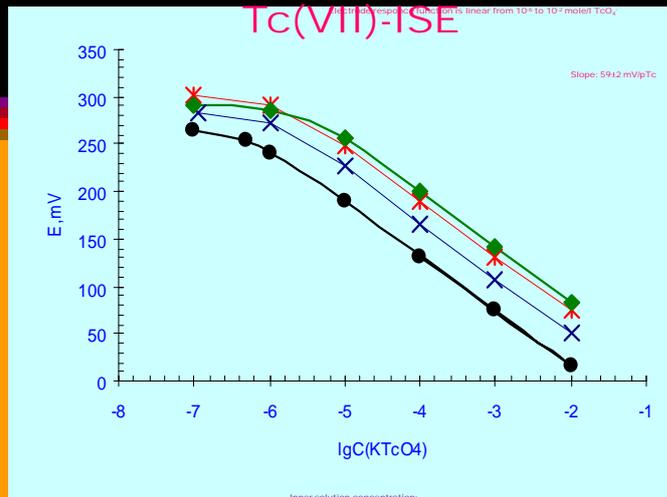


[Tc₂Ac₄](TcO₄)₂



LiTcO₄ · 3H₂O

Electrode response function of Tc(VII)-ISE



- ◆ - 10⁻⁶M KTcO₄, 10⁻⁵M KCL ✖ - 10⁻⁵M KTcO₄, 10⁻⁴M KCl
 ✕ - 10⁻⁴M KTcO₄, 10⁻³M KCl ● - 10⁻³M KTcO₄, 10⁻²M KCl

Top of the fundamental studies on Tc in IPCE RAS



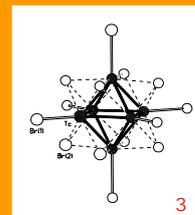
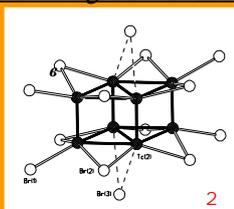
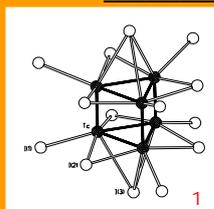
10 (!) oxidation states were found for

Tc in HX (X = Cl, Br, I) :

7+, 6+, 5+, 4+, 3+, 2.5+, 2+, 1.83+, 1.66+, 1.5+

Each synthesis involve up to 10 g of Tc!

Structures: unique in inorganic chemistry



1. 3-gonal-prismatic Tc chlorides and iodides (2 clusters of Tc(1.83+) and Tc(1.66+)) : $(Me_4N)_x[Tc_6(m-Cl)_6Cl_6]Cl_y$ (K.German and others)
2. 4-gonal-prismatic Tc cluster bromide (addition of Tc_2X_2 to (1) S.Kryutchkov)
3. octahedral Tc cluster bromides and iodides (angular conversion of (1))



Attempts of ^{99}Tc application in IPC RAS (1975-2009)

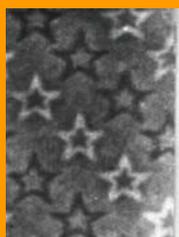
- ❖ Electric battery based on β -emission of Tc (1983, O.Balakhovsky - low duty, 2008 – high duty long trem battery - K.German)
- ❖ β - Sources for eyeball medical treatment and defectoscopy (1983 – 1993, K. Bukov)
- ❖ Corrosion protection (1960-1975, Kuzina)
- ❖ Antifouling protection (1975 – 1987, S.Bagaev, S.Kryutchkov, K.German)
- ❖ Tc catalysts at ceramic supports (1975 – 2000, G. Pirogova)

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

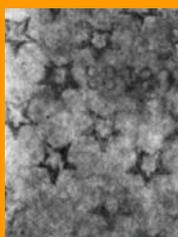
Detectoscopy and defectoscopy of light materials



- Water signs at ex-USSR banknotes



True,
alteration of
dark and light stars



Forged,
only dark

- Tensometric detector



Painted



Same in
Tc β -rays

Environmental Tc (1968-2009)

- Fragmental environmental Tc studies in 1968-1978 (less 1% of publications)

- Important efforts in environmental Tc studies (5% of publications) in 1979-83 were reviewed in 1984 at the Seminar in Cadarache (34 reports, 419 pages)

- IPCE RAS joined environmental Tc program in 1989 (sorption on minerals and lake sediments)

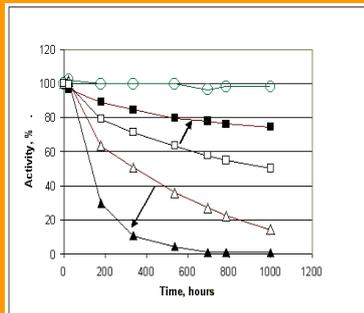
Main features of Tc environmental behaviour

- Tc(VII) – most stable under typical environmental conditions is highly mobile in the environment
- It could be reduced to Tc(IV) by some minerals or some microorganisms and thus immobilized at the mineral or organic surfaces
- In IPCERAS we studied the lake sediment effect on Tc behavior: L. Navolok, L. Kezadra (Kalininskaya NPP region) , L. Beloe Kosino, L. Torfyanoe (Peaty) (Moscow region)
- I. Tananaev participated in Tc study in Mayak region



Using a Molchanov-type batometer for the lake sediment sampling

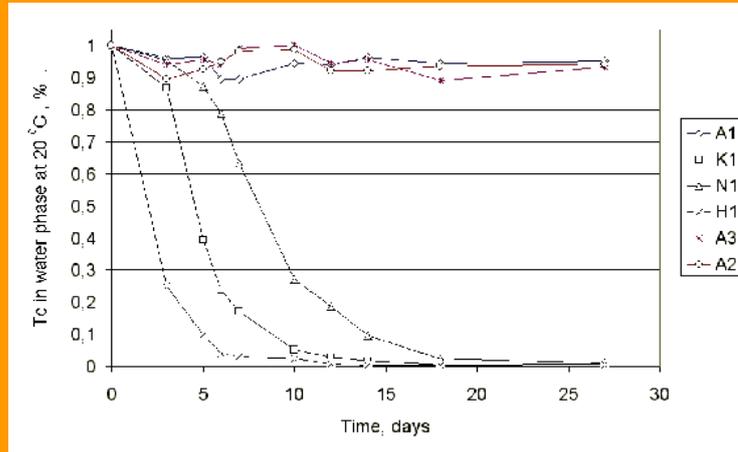
Tc behavior in different Lakes and Lake Sediments



Tc uptake by Lake Sediments:
 O – steril sample; □-Torfyanoe,
 ▽-Beloe;
 white points - sedimentation;
 black points – agitated in overhead

- Rovniy S., Ivanov I., Tananaev I. etc. Radiation safety aspects 3(2007)17-27 :
- Area of ⁹⁹Tc bloom around R-9 within the limits of the intervention level value (220 Bq/l) is 11.7 km², within the boundaries of LAW distribution it is 2.9 km².
- The area of ⁹⁹Tc bloom around R-17 within the limits of the intervention level value is 1.2 km².
- ⁹⁹Tc exists in contaminated underground waters in highly mobile forms that are weakly sorbed by the local grounds.

Tc uptake by Lake Sediments
in Kalininskaya NPP region:
A1 – steril sample; K1 – I. Kezadra,
N1- I. Navolok; H1- r. Homutovka



Tc interaction with microorganisms

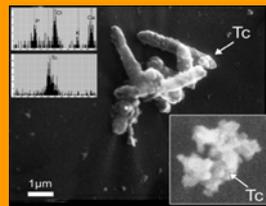
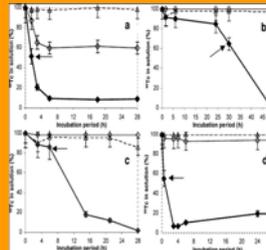
Most species of Sulphate-reducing bacteria as well

Anaerobic hyperthermophilic archaea
Thermococcus pacificus and

Thermoproteus uzoniensis,

anaerobic thermophilic gram-positive bacteria
Thermoterra bacterium ferrireducens and *Tepidibacter thalassicus*

reduced technetium(VII), supplied as soluble pertechnetate with molecular hydrogen or some other reductor as an electron donor, forming highly insoluble Tc(IV)-containing grayish-black precipitate.

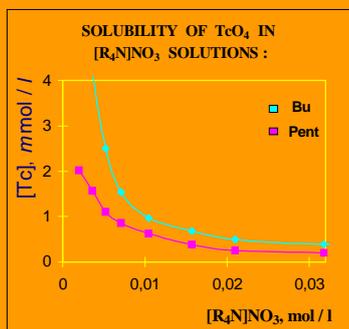


Some important gaps in our knowledge of Tc chemistry and thermodynamics

1. Tc metal: No heat capacities for Tc(cr) above 15, thermodyn. stability of the cubic Tc metal at nano-scale.
2. No heat capacities and entropies for TcO₂(cr) and Tc₂O₇(cr).
3. Poor characterization of TcO₃, Tc₂O₃, Tc₄O₅ and TcO₂·nH₂O
4. Poor characterization of Tc sulfides (possible solubility limiting phases under reducing conditions) and carbides (alternative nuclear fuel)
5. Inconsistence of different experimental data on TcO₂·nH₂O solubility as function of pH (colloid speciation)
6. Poor definition of the protonation constant for HTcO₄
7. Almost no equilibrium complex formation constants between Tc(III), Tc(IV) and Tc(V) and even most of the common inorganic anions present in groundwater
8. Inconsistence of stability estimations for Tc(IV) and Tc(V) from environmental and radiopharmaceutical studies

After J. Rard with some modifications

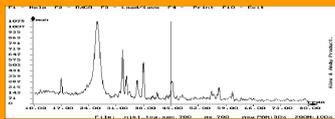
International collaboration of IPCE RAS with CEA (France)



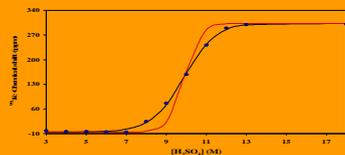
- Tc studies in frame of SPIN PROGRAM at MARCOULE (1995-1997):
- Analytical and technological Tc control in advanced PUREX (extraction separation with additional stripping) (K. German)
- R₄NTcO₄ solubility measurements, separation methods, conversion to metal for long-term storage or transmutation targets preparation
- Electrochemistry of Tc as base for alternative Tc separation (A. Maslennikov)

In 1995-1996, long-term storage was still regarded by HAW-technologists as preferable policy compared to transmutation

International collaboration of IPCE RAS with DOE and Nevada University (USA)

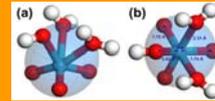


X-ray pattern of simulated Component of brown sludge of SRS HAW Tanks

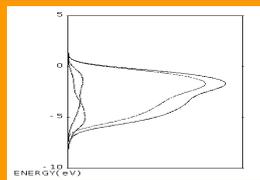


⁹⁹Tc-NMR shift vs. TcO_4^- of K_2TcO_4 in 3 M to 18 M H_2SO_4 .

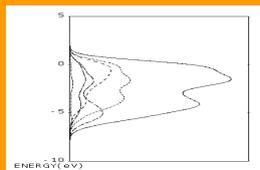
- Tc reduction, co-precipitation studies and U-corrosion studies on decontamination of HAW tanks at **Hanford Site** (V. Peretrukhin, K. German in 1995-2007)
- Tc co-precipitation with cancrinite, sodalite, cryolite, oxalate and brown sludges with respect to decontamination of HAW tanks at **Savannah River Sites**. Fe(II) and Mn(III) oxides were effective Tc carriers and underwent chemical transformations on ageing that increased leaching resistance to most agents (K. German, 1999 – 2000, under contract with US DOE)
- EXAFS and NMR study of Tc in concentrated acid solutions (Nevada Univ. & IPCE, 2010)



International collaboration of IPCE RAS with Japan



66 atoms (hcp)



55 atoms (fcc, layers), layers d-contributions

- Invited professor in JAERY (V. Peretrukhin, 1 months in 1997)
- Computing cooperation for Tc quantum chemical studies with Shizuoka University; utilization of non-empirical X₂DV method using DVSCAT code (Yu. P'fekhanov - R.Sekine, since 1999).
- Results applied to Tc-transmutation project
- M.Ozawa cooperation with Khlopin Radium Institute and IPCE RAS
- K.German – today lecture

International collaboration of IPCE RAS with Japan (CONTINUED)



- Joint Japan-Russian Tc-Seminars on Tc:
- 1996 – Moscow, Russia
- 1999 – Shizuoka, Japan
- 2002 – Dubna, Russia
- and International Symposiums on Tc :
- 1993 – Sendai, Japan
- 2005 – O-arai, Japan
- 2008 – Port-Elizabeth, South Africa
- Next:
- 2011 , July 4-8 – Moscow, Russia
- www.technetium-99.ru
- You are welcome to Moscow !!!

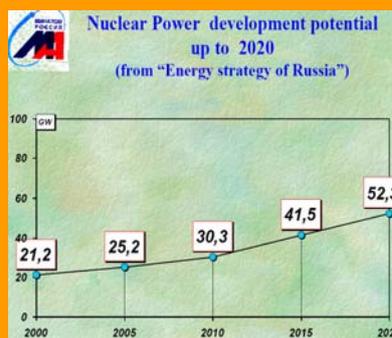
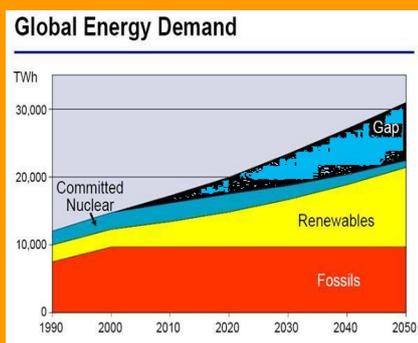


Possible items of Rus-Jap cooperation

- Tc in reprocessing
- Tc application in RECS
- Oftalmoapplicators
- Ru production by transmutation
- Immobilization of Tc wastes
- Tc handling in vitrification of HAW
- Tc-99m

Global energy demand and its filling

A 2000 year's forecast and its vision today



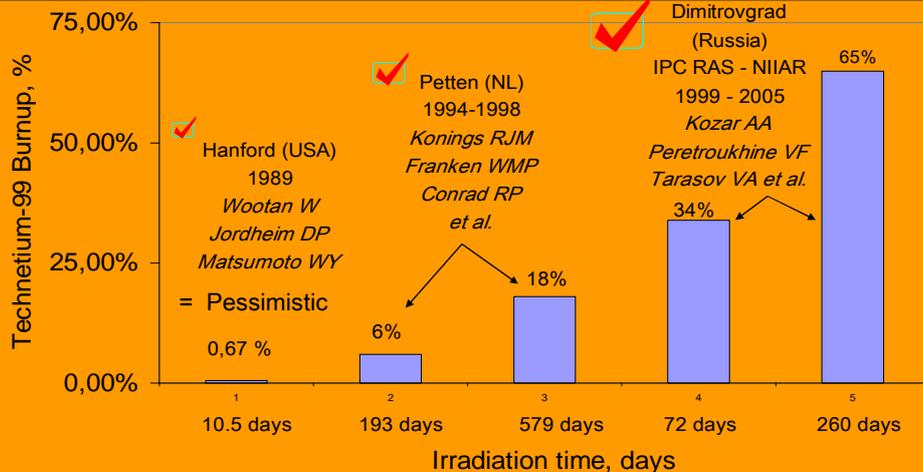
The IPCE publications used in the presentation

- The principle achievements of recent Russian researches in technetium chemistry, metallurgy, environmental science, nuclear reprocessing and applications are overviewed. The allied aspects of rhenium chemistry and applications are compared. The progress in technetium handling during the spent nuclear fuel reprocessing was based on the fundamental studies of numerous new technetium mono- and polynuclear compounds and species [1-10]. The previous achievements were reviewed in [11].
- In concentrated water solutions Tc(VII) often forms crystals isomorphous with perchlorates while in concentrated anhydrous solutions Tc(VII) behaviour is more similar to Re(VII) compared to Cl(VII) [4-6].
- Interesting results were obtained with the Tc-DTPA complex formed under advanced PUREX conditions [6-7]. Great progress have been achieved in the understanding of Tc(VII) behaviour in acids [8-10] that is important for explanation and prediction of Tc and Re handling in acids, including the concentrated acid solutions up to highest. The investigation in crystal structures of Tc compounds [2] enabled us with direct recommendations for the template synthesis for Tc and Re sensors [6]. The progress in Tc carbonyl compounds gave chance for advanced Tc metal and Tc carbide films deposition [7]. Technetium sulphide and rhenium were studied both with respect to medicine and to environmental behaviour of these elements [1]. The work on technetium nanomaterials was carried in Russia in 2009-2010 within RFBR-09-03-00017, while the work on DTPA complexes with RFBR-09-0900153.
- References.
- Peretrukhin V.F., German K.E., Maslennikov A.G. etc. Development of chemistry and technology of technetium. In: «Modern problems of physical chemistry» p. 681 - 695. M.: «Granitsy Publ.» (2005) 681-695.
- Grigoriev M.S., German K.E., Maruk A.Y. // *Acta Crystallogr. Sect. E* (2007) V. 63, Pt.9. : P. m2061, and p. m2355.
- Maruk A.Y., Grigoriev M.S., German K.E. *Russ. Coord. Chem* (2010) v.36, No 5, pp. 1-8.
- Maruk A.Y., Grigoriev M.S., German K.E. Abstracts of the "Conference on diffraction methods for substance investigations: from molecules to crystals and nanomaterials", Chernogolovka, 30 June-3 July 2008, p.
- Maruk A.Y., Grigoriev M.S., German K.E. Abstracts of the "Conference on diffraction methods for substance investigations: from molecules to crystals and nanomaterials", Chernogolovka, 25 June- 28 June 2010, p.
- D.N. Tumanova, K.E. German, V.F. Peretrukhin, Ya.A. Obruchnikova, A.Yu. Tsvadze. Stabilization and spectral characteristics of technetium and rhenium peroxides. In: *6-th International Symposium on Technetium and Rhenium*. NMMU-Port Elizabeth, 7-10 October 2008, p.47.
- D.N. Tumanova, K.E. German, V.F. Peretrukhin, A.Yu. Tsvadze. Formation of technetium peroxides in anhydrous sulfuric acid. *Doklady Phys. Chem.* 420 (2008) 114-117.
- German K.E., Molentiev A.B., Kalmykov S.N., etc. Tc-DTPA sediments formed in technetium - hydrazine - DTPA - nitric acid solutions. *Journ. Nucl. Medicine and Biol.*(2010), Sept. pp.
- B.Ya. Zilberman. *Radiochemistry*, 42 (2000) 1-14.
- Katsyev E.A., Kolesnikov G.V., Khristalev V.N. etc. // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* (2009) 282: p. 385-389.
- Maruk A.Y., German K.E., Kirakosyan G.A. etc. HtC04. Abstracts of the 6-th Russian conference on radiochemistry, 12-16 Oct. 2009, Moscow, p.
- F. Poinneau, Ph. Weck, K. German, A. Maruk, G. Kirakosyan, W. Lukens, D. B. Rego, A. P. Sattelberger, K. R. Czerwinski. Speciation of Heptavalent Technetium in Sulfuric Acid: Structural and Spectroscopic Studies. *RSC-Dalton Transactions* (2010) Dec. pp. (in press).

The IPCE publications used in the presentation (continued)

- Peretrukhin V.F., Moisy Ph., German K.E. etc. *J. de la Soc. de Chim. D.I. Mendeleiev* (2007) v.51, No. 6, p.11-23.
- Plekhanov Yu.V., German K.E., Sekine R. Electronic structure of binuclear technetium chloroacetate cluster: quantum chemical calculations and assignment of optical and XPE spectra. *Radiochemistry*, 45 (2003) 243-249.
- German K.E., Kryuchkov S.V. Polynuclear technetium halide clusters. *Russ. Journ. Inorg. Chem.* 47 (2002) 578-583.
- N. N. Popova, I. G. Tananaev, S. D. Rovnyi, B. F. Myasoedov. *Russ. Chem. Rev.* 72 (2003) 101.
- German K.E., Peretrukhin V.F., Gedgovd K.N., etc. *J. Journ. Nucl. Radiochem. Sci.* 6 (2006) No.3, pp. 211-214.
- Alekseev I.E., Antropov A.E. Accelerated transport of impurity Tc-99m atoms at polymorph transition in irradiated metal molybdenum. *Radiochemistry*, 44 (2002) 334-336 (Rus)
- Sidorenko G.V., Miroslavov A.E., Suglobov D.N. Vapor deposition of technetium coatings by thermolysis of volatile carbonyl complexes: II. Chemical and phase composition, microstructure, and corrosion resistance of coatings. *Radiochemistry*, 51 (2009) 583-593
- K.E. German, Yu.V. Plekhanov. // Quantum chemical model of Technetium Carbide. *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences* (2006) V. 6, No.3, pp. 215-216.
- A.B. Melentev, V.A. Misharin, A.N. Mashkin, I.G. Tananaev, K.E. German. Abstracts of the 6-th Russian conference on radiochemistry, 12-16 Oct. 2009, Moscow, p. 209.
- D.N. Tumanova, K. E. German, Ph. Moisy, M. Lecomte, V. F. Peretrukhin. Catalytic effects of Tc ions on the Np-hydrazinium - nitric acid system. In: Abstracts of the 6-th International Symposium on Technetium and Rhenium. NMMU-Port Elizabeth, 7-10 October 2008, p.46.
- German K. E., Dorokhov A. V., Kopytin A. V., etc. *J. Journ. Nucl. Radiochem. Sci.* (2006) V. 6, No.3, pp. 217-220.
- German K.E., Kosareva I.M., Peretroukhin V.F., etc. In: Proceedings of the 5-th Int. Conf. on radioactive waste management and environmental remediation. ICEM'95, V.1, Cross-cutting Issues and management of high-level waste and spent fuel. (Eds.: S.Slate, Feizollahi, C.Cree), NY(1995), p. 713 - 722.
- Siobodkin A.I., Tourova T.P., German K.E., etc. *Int. Journ. System. Evolut. Microbiol.* (2006), V. 56, P. 369-372.
- Tarasov V.P., Muravlev Yu. B., German K.E., Popova N.N. Tc-99 NMR of Technetium and Technetium-Ruthenium nanoparticles. In: Magnetic Resonance in Colloid and Interface Science. Edited by Jacques P. Fraissard and Olga Lapina. Book Series: NATO Science Series: II. Mathematics, Physics and Chemistry: Volume 76. Kluwer Academic Publishers, Netherlands (2002) Pp. 455-468.
- Pirogova G.N., Panich N.M. Physicochemical properties of Technetium. *Russ. Journ. Inorg. Chem.* 47 (2002) 681-687.
- Maruk A. Ya., Khaustova T.A., German K.E. etc. Labeling conditions study for technetium-99m thiosemicarbazid derivatives. School-conference on radiochemistry 2010 Ozersk.
- German K.E., Obruchnikova Ya A., Popova N.N. etc. Abstracts of All-Russian conference " Physico-chemical aspects of nanotechnology - properties and applications", Moscow, L.Ya. Karpov Institute of Physical Chemistry, 2009. P.
- German K.E., Popova N. N., Tarasov V.P., etc. *Journ. Russ. Chem. Soc. Mendeleev*, (2010) Sept.No. pp. (in press).
- Peretrukhin V. F., Rovnyi S. I., Ershov V. V., German K. E., Kozar A. A., *Russ. J. Inorg. Chem.*, 47 (2002) 637.

“Renaissance” of Tc - Transmutation program (1992-2005, 2009-2010)



Tc Transmutation experiment (IPC RAS - NIIAR, 1999-2001)

- ✓ In IPC RAS metal disc targets of 0.3 mm and were prepared and assembled in two batches with total weight up to 5 g
- ✓ Transmutation experiment was carried out at high flux SM-3 reactor (NIIAR, Dimitrovgrad)

2nd batch: $F_t > 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
1st batch: $F_t = 1.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

^{99}Tc burnups have made:
 $45 \pm 6 \%$ and $70 \pm 11 \%$
 for the 1st and 2nd targets batches

- ❖ The ^{99}Tc burnups of 80 % in further tests and about 5 g of transmutation Ru-99 (stable) are accumulated as a result of experiments on reactor SM-3
- ❖ These values are much higher of burnups 6 and 16 % achieved on HFR in Petten earlier

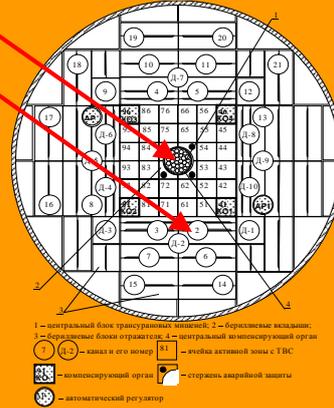


Рис. 5. Картограмма реактора СМ

Preparation of artificial stable Ruthenium by transmutation of Technetium

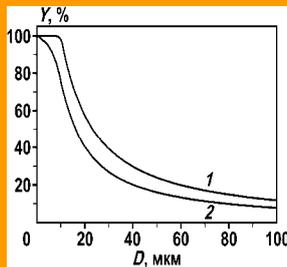


Table 2. Content of isotopes in natural and artificial ruthenium (at. %)

Isotope	Natural Ru [6]	Ru from indicated sample	
		Tc-19% Ru	Tc-45% Ru
^{96}Ru	5.46 ± 0.01	—	—
^{98}Ru	1.868 ± 0.005	—	—
^{99}Ru	12.63 ± 0.02	0.06	0.003
^{100}Ru	12.53 ± 0.02	98.93 ± 0.02	97.94 ± 0.02
^{101}Ru	17.02 ± 0.03	0.54 ± 0.02	1.35 ± 0.02
^{102}Ru	31.63 ± 0.06	0.45 ± 0.01	0.71 ± 0.01
^{104}Ru	18.87 ± 0.04	0.02	0.002

- Tc target material:
- Tc metal powder / Kozar (2008)
- Tc - C composite Tc carbide / German (2005)
- Rotmanov K. etc. Radiochemistry, 50(2008)408
- New Ruthenium is almost monoisotopic Ru-100
- It has different spectral properties
- It is available only to several countries that develop nuclear industry

*For conclusion:
OUR MODERN VISION
of Tc-99 FATE:
Born to Burn*

And this fire will give
not ash
but the noble metal



5.

最近の鉱物資源を巡る 状況と課題

平成22年7月

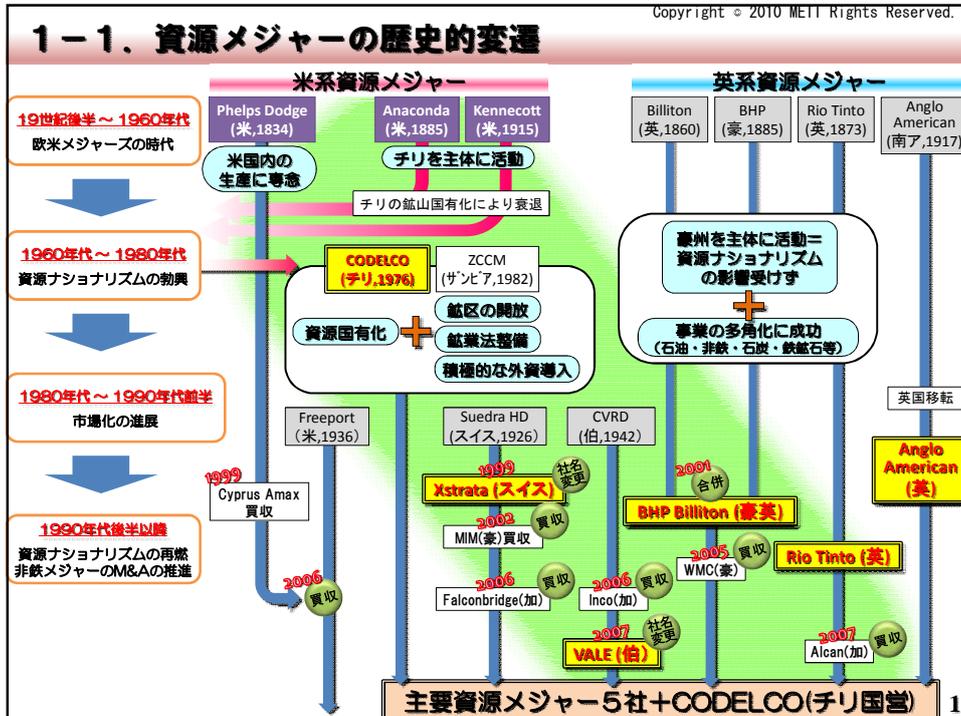
経済産業省 資源エネルギー庁 鉱物資源課
鯉江 雅人

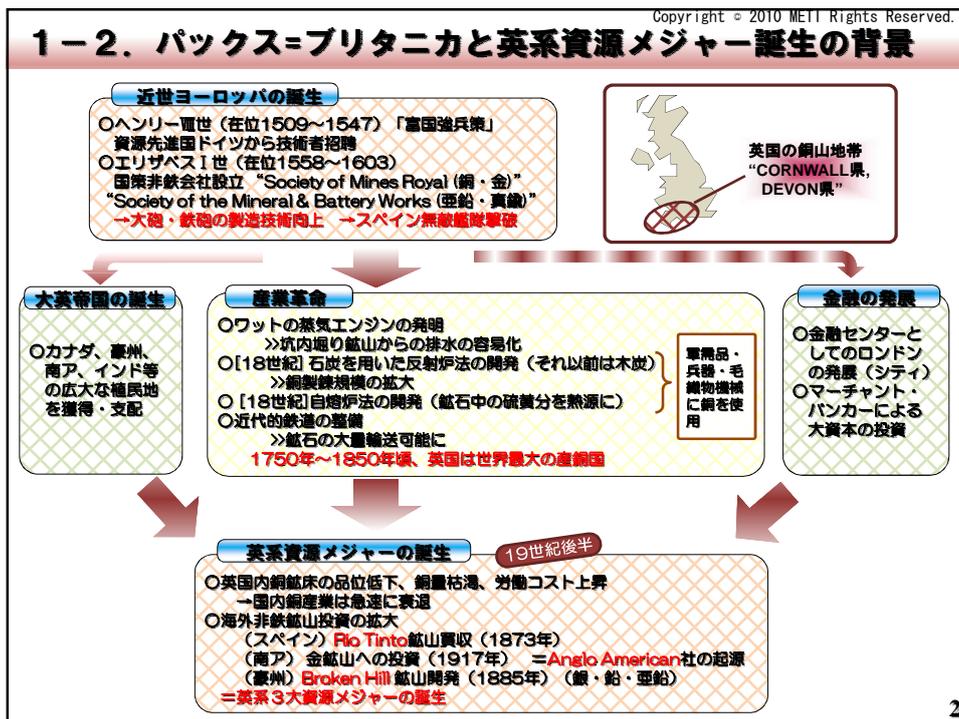
～ 目次 ～

- (第1部)
資源メジャー、中国、日本の資源獲得競争
- (第2部)
注目を浴びるレアメタル
- (第3部)
我が国の資源政策の展開

(第1部)

資源メジャー、中国、日本の
資源獲得競争





Copyright © 2010 METI Rights Reserved.

1-3. 近年の「資源ナショナリズム」と1960年代後半の違い

	第1次資源ナショナリズム (1960年代後半)	第2次資源ナショナリズム (現在)
動機 Why?	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 当時の少数非鉄メジャー（Kennecott, Anaconda等の銅国際10大資本）による独占的利益からの脱却し、価格決定権を奪回 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 大需要国のバーゲニングパワーへの対抗力獲得 ➢ しかし、サプライチェーンの中で、上流側（資源国側）の下流分野の利益に対する不公平感
形態 How?	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 国有化政策の始まり ➢ 自国内の非鉄メジャーズの権益の国有化 ➢ オペレータも極力国内化（自主開発・操業）⇒海外投資は拒絶 ➢ 資源カルテルの結成 <ul style="list-style-type: none"> ■ CIPEC（銅輸出国政府間協議会、1968） ■ AIOEC（鉄鉱石輸出国連合、1974） ■ IBA（国際ボーキサイト連合、1974）等 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 権益を高値売却（国際入札） ➢ オペレータシップには拘らない⇒一定範囲の海外投資は歓迎 ➢ 製錬所立地のみならず、下流の産業投資（高付加価値産業の立地）や地域開発・インフラ整備等を要望 <ul style="list-style-type: none"> ■ ボリビア：リチウム電池工場、地熱発電所 ■ カザフスタン：原子力発電所 ■ ベトナム：道路、給水システム整備、学校、病院 ■ ブルキナファソ：鉄道敷設 ■ インドネシア：製錬所の建設 ➢ 輸出規制を、技術移転を要求するツールとして活用 <ul style="list-style-type: none"> ■ 中国：レアアース利用技術、リサイクル対策等 ➢ 鉱山への直接投資は制限（国家所有） <ul style="list-style-type: none"> ■ モンゴル：国の権益比率51%以上化、ロイヤリティアップ →価格下落により断念 ■ ベトナム・ボリビア：外資による鉱山所有の禁止
対応・ 結末 So what?	<p style="text-align: center; color: blue;">結末</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 商品先物市場の形成やLMEの機能強化等により、市場メカニズムが浸透。新興資源国も誕生し、市場の主導権を失う。 ➢ 国有化政策を転換し、投資環境を外資に好ましいものとしたチリ・ペルー以外は、鉱山運営にも国家発展にも失敗。また、豪州・カナダのシェアが上昇。 	<p style="text-align: center; color: blue;">今後の対応</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 我が国としては、資源確保のためにはオールジャパン体制により、中流・下流分野も含めた総合的な支援が必要。企業としても資源国からの現地化要請にどこまで応えるか、即ち、多様な下流企業も相手国要請に産業協力の一環として関わっていくことが重要。 <p style="text-align: center; color: red;"><権益確保、成功事例></p> <ul style="list-style-type: none"> ■ ベトナム：レアアース現地生産、インフラ整備支援 ■ カザフスタン：技術協力、資金協力、交渉協力

3

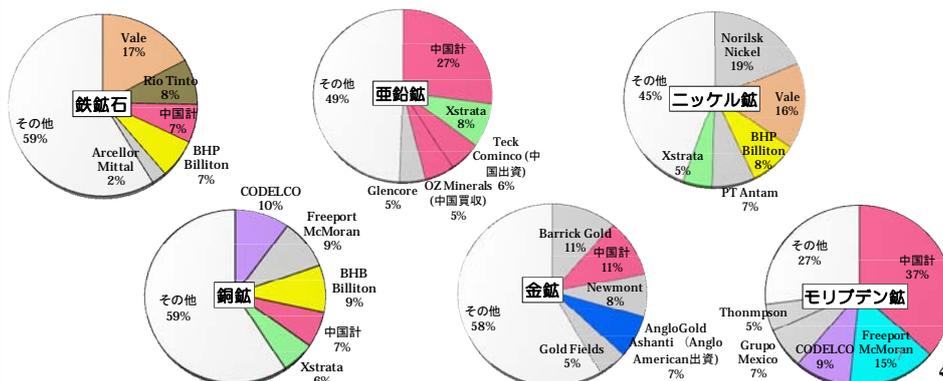
1-4. 主要金属供給に占める資源メジャーの位置付け

▶ “資源メジャー”の明確な定義はないが、次のような事項に該当する鉱物資源開発企業。

- (1) グローバル・多国籍に事業展開している。
- (2) 鉱山開発をコアビジネスとし、下流分野（製錬、金属加工・製造）よりも上流分野を志向する。
- (3) 特定の金属鉱種、あるいは燃料鉱物も含め複数鉱種の上位生産者である。
- (4) オペレーションシップを有して大規模な鉱山開発・操業を行っている。
- (5) 強力な経営資源（技術・人材・設備資産）を有する。
- (6) M&Aにより事業拡大と多国籍化・多鉱種化・寡占化を進め、バーゲニングパワーを強化している。

（参考）資源メジャー20社

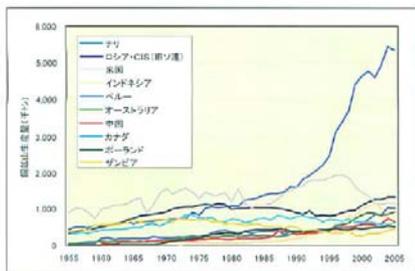
- ①BHP Billiton、②Anglo American、③Rio Tinto、④Vale、⑤Xstrata、⑥CODELCO、⑦Freeport McMoran Copper&Gold、⑧Phelps Dodge、⑨MMC Norilsk Nickel、⑩Teck Cominco、⑪Newmont、⑫Barrick Gold、⑬Grupo Mexico、⑭KGHM Polska Miedz、⑮Boliden、⑯Antofagasta、⑰Gold Fields、⑱Zinifex、⑲Peñoles、⑳Harmony Gold Mining



1-5. 銅の需給の状況変化（過去50年間）

供給側の変化

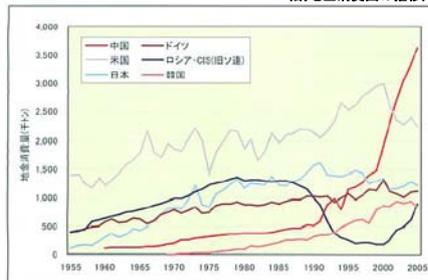
〈銅鉱山生産国の推移〉



90年代以降、チリが生産量を増加させ他国を圧倒。米国の生産量が減少し、生産国の寡占が進む。

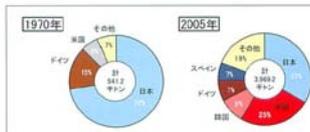
需要側の変化

〈銅地金消費国の推移〉



90年代から中国の消費量が急増。2002年には米国を抜いて、世界一の消費国となる。

〈主要銅鉱石輸入国シェア〉



70年代は日本が輸入国として圧倒的なシェアを持っていたが、近年、資源需奪国としての中国のプレゼンスが拡大。

Copyright © 2010 METI Rights Reserved.

1-8. 資源メジャー、中国、我が国の「三つ巴」の資源獲得競争

資源メジャー	中国	日本
(08年10月) > Xstrata社(スイス)が、フラチナ等を生産するLonmin社(南ア)の株式10.4%を追加取得 (08年11月) > Anglo American社(英)が、海底の銅金プロジェクトを行うMantus Mineral社(加)の株式5.4%を追加取得 (08年12月) > Vale社(白)が、ザンビアやナミビア等で探鉱活動しているTeal Exploration & Mining社(加)の株式35%を取得 (09年6月) > BHP Billiton社(豪・英)とRio Tinto社(豪・英)が、西豪州鉄鉱石の生産JV会社を設立 > Xstrata社(スイス)が、Anglo American社(英)に対等合併を提案(※不成立) (09年10月) > BHP Billiton社(豪・英)が、United Minerals(豪)の全株式取得に合意	(09年1月) > 中国五鉱集団が、Vizirama社(南ア)の株式70%取得 (09年2月) > 鞍山鋼鉄が、Gindalbie Metals社(豪)の株式36%取得 > 中国アルミが、Rio Tinto社(豪・英)の株式18%取得(※不成立) > 有色金屬東地輿勘査局が、北部準州でレアアースの鉱山開発を遂げるArafra社(豪)の株式25%取得 > 湖南華菱鋼鉄が、Fortescue Metals Group(豪)の株式17.6%取得 (09年3月) > 中国中鋼集団が、Murchison Metals社(豪)の株式5.85%取得 > 武漢鋼鉄会社が、Consolidated Thompson社(加)の株式19.9%取得 (09年4月) > 中国五鉱集団が、豪州やカナダ、ラオスで複数の鉱山を保有するOZ Mineral社(豪)を完全買収 (09年7月) > 中国投資有限責任会社が、Teck社(加)の株式17.2%取得 (09年8月) > 古惑ニッケル製鉄会社が、ヴィクトリー・ニッケル社(加)の株式14.7%取得 (09年10月) > 有色金屬集団有限公司が、Luanshya Copper Mine(ザンビア)の株式80%取得 > 漢龍鉱業投資有限公司が、Moly Mines社(豪)の株式55.3%取得	(08年10月) > 双日が、西豪州の鉄鉱山の権益30%取得 > 国内鉄鋼大手5社とPOSCO社(韓)、伊藤忠商事の日韓企業連合が、Namisa社(白)の株式40%取得 (08年11月) > 住友商事は、ボリビアのサン・クリストバル鉛・亜鉛・銅鉱山の残りの全権益を取得し、100%の権益取得 (09年1月) > 双日と豊田通商は、ベトナム政府との間で、ドンパオ・レアアース鉱床を共同で開発することに合意 (09年2月) > 三菱商事は、インドネシアでニッケルプロジェクトを保有するストランド社(豪)の株式33.4%取得 (09年6月) > JOGMEC、住友商事、三菱商事は、ボリビア政府に「ユニニ」連環リチウム資源の共同開発を提案 (09年7月) > 住友金銅山及び住友商事は、Teck社(加)からアメリカ、ボリビアの残りの全権益を取得し、100%の権益取得 > 三菱マテリアルは、カナダのシムコ銅鉱山の権益を保有するSimco Mines社(加)の株式25%を取得し、その親会社との共同再開発に合意 (09年8月) > 住友商事は、カザン・アトム社とウラン鉱石精製からのレアアース回収事業に合意 > 住友金銅山は、ニッケル・コバルト・マンガン(フィリピン)の株式16.5%取得

赤字：レアメタル+金案件
 ：買収・資本参加案件

8

Copyright © 2010 METI Rights Reserved.

1-9. 中国のアフリカにおける資源確保戦略と最近の問題点

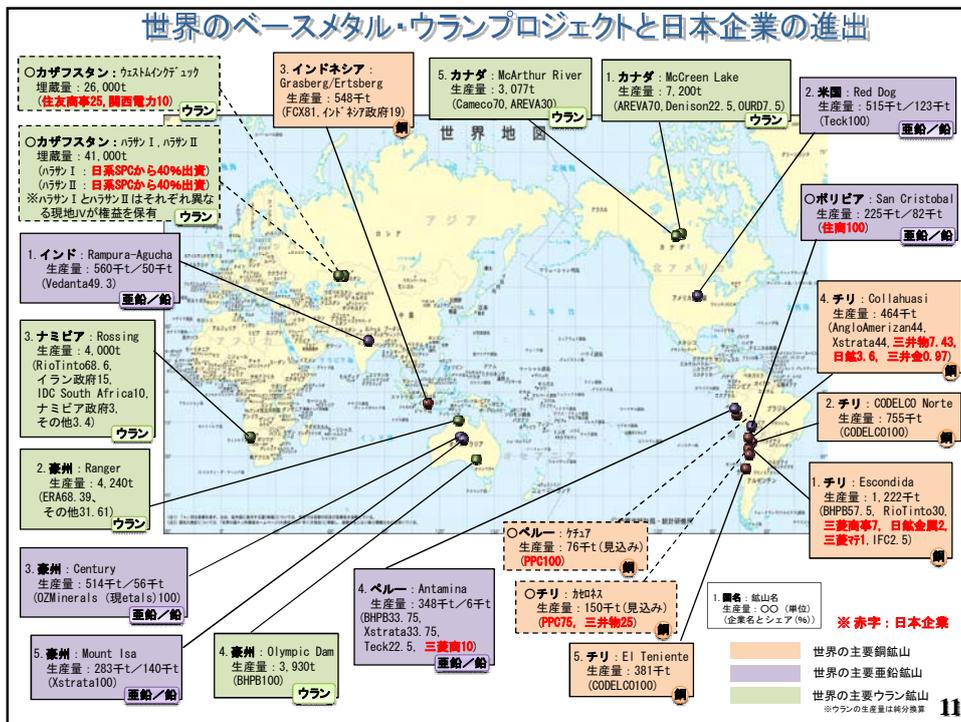
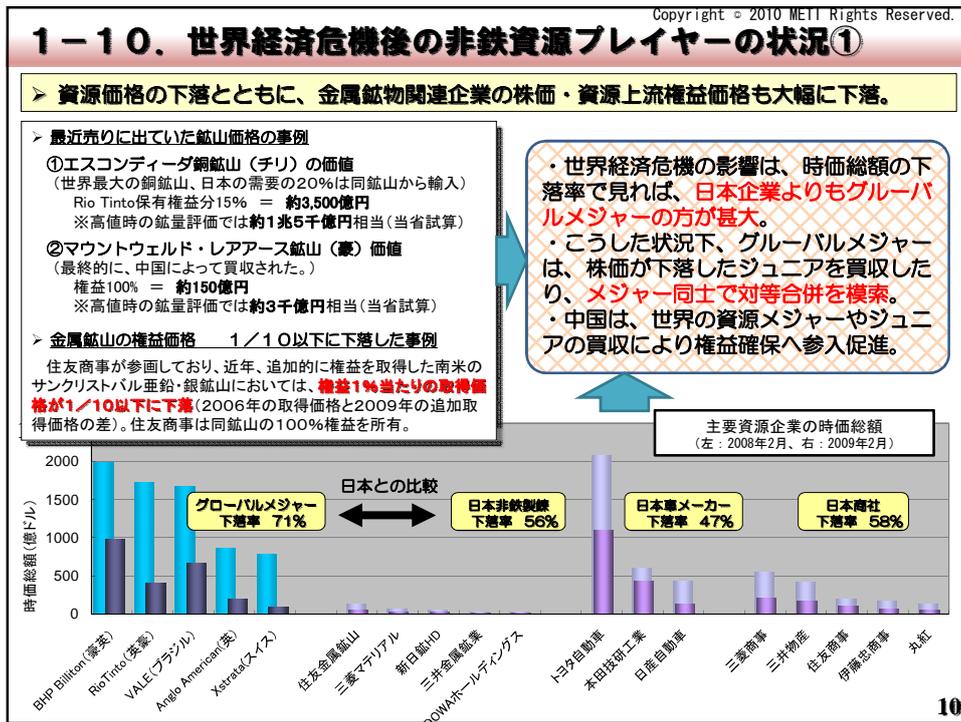
中国の海外資源確保戦略	最近の問題点
<p>トップ外交</p> <ul style="list-style-type: none"> ・トップが資源国を訪問し、資金供与と引き替えに、高額で資源権益を獲得。 ・胡锦涛 アジア9回、アフリカ14回、中東4回 ・温家宝 アジア6回、アフリカ2回、中東1回 ・2006年には、北京にて全てのアフリカの国々から首脳を集め、アフリカ開発会議を開催 <p>潤沢な資金（外貨準備(?)の活用)による資源国へのインフラ投資</p> <p>(例) ザンビア：農業技術センター、学校、病院、マラリア対策センターの建設協力 モザンビーク：農業技術センター、学校の建設、農業、保険、教育分野への155百万\$の融資 ナミビア：学校建設、人材育成等へ、4.2百万\$の資金供与、4.2百万\$の無利子融資</p> <p>軍隊の派遣による労働力供給及び警備</p> <p>兵器・軍需物資の供与</p> <p>(例) ボリビア：軍用車両40台、戦車数台、軍用艇2隻をモラレス大統領に供与 (その他、ボリビア大統領の地元小学校も建設)</p>	<p>中国のアフリカ等への投資は「紐付き」融資がほとんどで、中国企業採用が条件であり、地元へ利益が落ちない。</p> <p>建設現場労働者を中国本土から連れて行き、現地人は真金の安い単純労働作業に従事。</p> <p>人権侵害とも思われる事象も発生。</p> <p style="text-align: center;">〇徐々に、各国で不満が噴出</p> <p>(例) ザンビア ①爆発物製造工場で爆発事故発生、40人以上のザンビア人が死亡。中国人労働者は全員脱出。 ②銅鉱山では、労働環境を訴える6人のザンビア人労働者が射殺。</p> <p>エチオピア 中国石油化工の油田を反政府系武装集団が襲撃、9人の中国人スタッフと65人の現地労働者殺害。7人の中国人を誘拐。</p> <p>スーダン ①1年間に中国資本の油田への襲撃が3件 ②9人の中国人スタッフが先月誘拐される。 (補足：最近の問題点については、中国側も認識している模様)</p> <p>中国アルミによって、Rio Tinto(豪)を190億ドルで資本参加する提案に合意するも、Rio側が最終的に拒絶 結果的に、BHP Billiton社がRio Tinto社と西豪州鉄鉱石の生産JVを設立</p>

資源メジャーズのM&A

2001年、BHPとBillitonの合併 → BHP Billiton
 2006年、XstrataがFalconbridgeを買収。CVRDがIncoを買収。FCXがPhelps Dodgeを買収
 2007年、Rio TintoがAlcanを買収
 2008年11月、BHP BillitonによるRio Tinto買収断念。
 2009年6月、XstrataとAnglo American合併不成立。

資源メジャーズのM&Aは一段落 → 中国が参入

9



(第2部)

注目を浴びるレアメタル

2-1. レアメタルとは

Copyright © 2010 METI Rights Reserved.

レアメタルとは

●「地球上の存在量が稀であるか、技術的・経済的な理由で抽出困難な金属」のうち、工業需要が現に存在する(今後見込まれる)ため、安定供給の確保が政策的に重要であるものを、鉱業審議会においてレアメタルと定義(現在、31種類が対象)。

1	1 H 水素																	2 He ヘリウム
2	3 Li リチウム	4 Be ベリリウム											5 B ホウ素	6 C 炭素	7 N 窒素	8 O 酸素	9 F フッ素	10 Ne ネオン
3	11 Na ナトリウム	12 Mg マグネシウム											13 Al アルミニウム	14 Si ケイ素	15 P リン	16 S 硫黄	17 Cl 塩素	18 Ar アルゴン
4	19 K カリウム	20 Ca カルシウム	21 Sc スカンジウム	22 Ti チタン	23 V バナジウム	24 Cr クロム	25 Mn マンガン	26 Fe 鉄	27 Co コバルト	28 Ni ニッケル	29 Cu 銅	30 Zn 亜鉛	31 Ga ガリウム	32 Ge ゲルマニウム	33 As ヒ素	34 Se セレン	35 Br 臭素	36 Kr クリプトン
5	37 Rb ルビ등ム	38 Sr ストロンチウム	39 Y イットリウム	40 Zr ジルコニウム	41 Nb ニオブ	42 Mo モリブデン	43 Tc テクネチウム	44 Ru ルテチウム	45 Rh ロジウム	46 Pd パラジウム	47 Ag 銀	48 Cd カドミウム	49 In インジウム	50 Sn スズ	51 Sb アンチモン	52 Te テルル	53 I ヨウ素	54 Xe キセノン
6	55 Cs セシウム	56 Ba バリウム	57~71 ランタノイド	72 Hf ハフニウム	73 Ta タンタル	74 W タングステン	75 Re レニウム	76 Os オスマニウム	77 Ir イリジウム	78 Pt 白金	79 Au 金	80 Hg 水銀	81 Tl タリウム	82 Pb 鉛	83 Bi ビスマuth	84 Po ポロニウム	85 At アスタチン	86 Rn ラドン
7	87 Fr フランシウム	88 Ra ラジウム	89~103 アクチノイド															
ランタノイド		57 La ランタン	58 Ce セリウム	59 Pr プラセオジム	60 Nd ネオジム	61 Pm プロメチウム	62 Sm サマリウム	63 Eu ユウロピウム	64 Gd ガドリウム	65 Tb テルビウム	66 Dy ジスプロシウム	67 Ho ホウメシウム	68 Er エルビウム	69 Tm ツリウム	70 Yb イットリウム	71 Lu ルテチウム		

Copyright © 2010 METI Rights Reserved.

2-2. 近年の「レアメタルブーム」と1980年代との違い

	第1次レアメブーム（1980年代）	第2次レアメブーム（現在）
鉱種・量	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 特殊鋼用材料が主（レアメタルでも比較的量が深い） ニッケル、クロム、マンガン、コバルト、タングステン、モリブデン、バナジウム 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 高付加価値製品（自動車産業、IT産業）のための材料需要が増加 ▶ レアメタルの中でも更に量が少なく、極端な偏在 レアアース、プラチナ、リチウム、インジウム
資源国	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 南ア・旧ソ連邦が主 (ニッケル) 豪州、ニューカレドニア、旧USSR (クロム) 旧USSR、南ア、インド等 (マンガン) 旧USSR、南ア、豪州、インド (タングステン) 中国、カナダ、ロシア (モリブデン) 中国、米国、チリ (バナジウム) 旧USSR、中国、南ア 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 必要なレアメタルが多様化する中で、資源の偏在化が顕著。中国のプレゼンスが拡大。 (レアアース) 中国、ベトナム、カザフスタン、豪州、カナダ等 (プラチナ) 南ア (リチウム) チリ、ボリビア、アルゼンチン、中国、カナダ (インジウム) 中国、豪州
我が国のプレーヤー	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 鉄鋼用材料の観点から、商社や非鉄製錬企業が対応 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 下流のユーザー企業のニーズ等により、量が少ないレアメタルでも、商社が積極的に参画
資源ナショナリズム		<ul style="list-style-type: none"> ▶ 高付加価値産業化まで視野にいれ要求を強める 例：中国、インドネシア、ボリビア
業種（サプライチェーンの状態）	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 鉄鋼業界（ステンレス鋼、特殊鋼等） ▶ 我が国の需要の落ち着きに応じて、安定 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 先端技術、省エネ・新エネ技術分野（日本の競争優位産業） <ul style="list-style-type: none"> ■ 次世代自動車（高性能モーター、リチウムイオン電池、排ガス触媒） ■ 省エネ家電（液晶等） ■ 照明器具（蛍光灯）等 ▶ 国内需要のみならず、世界的な増加が見込まれる
		長期的な需要継続の可能性

13

Copyright © 2010 METI Rights Reserved.

2-3. 非鉄金属資源の偏在性

▶ レアメタルは、一般に希少性や偏在性が強く、加えて、ベースメタル等の副産物として産出される場合が多いという特殊性があり、主産物であるベースメタルの生産動向や、生産国の輸出政策、主要生産施設の状況等の影響を大きく受ける。

	資源の上位産出国(2008年)			上位三カ国の合計シェア
レアアース	①中国 97%	②インド 2%	③ブラジル 0.5%	【99%】
リチウム	①チリ 44%	②豪州 25%	③中国 13%	【82%】
バナジウム	①南アフリカ 38%	②中国 33%	③ロシア 27%	【98%】
タングステン	①中国 75%	②ロシア 6%	③カナダ 5%	【86%】
白金	①南アフリカ 77%	②ロシア 13%	③カナダ 4%	【93%】
インジウム※	①中国 58%	②日本 11%	③韓国 9%	【77%】
モリブデン	①米国 29%	②中国 28%	③チリ 21%	【78%】
コバルト	①コンゴ民 45%	②カナダ 12%	③ザンビア 11%	【70%】
マンガン	①南アフリカ 21%	②中国 20%	③豪州 16%	【57%】
ニッケル	①ロシア 17%	②カナダ 16%	③インドネシア 13%	【46%】
銅	①チリ 36%	②米国 8%	③ペルー 8%	【52%】
亜鉛	①中国 28%	②ペルー 13%	③豪州 13%	【55%】
鉛	①中国 41%	②豪州 15%	③米国 12%	【67%】

(出典):Mineral Commodity Summaries 2009 ※インジウムは地金ベース

14

2-4. レアメタルの重要性①

レアメタルは、自動車、IT製品等の製造に不可欠な素材であり、我が国の産業競争力の要。

- (例) ハイブリッド自動車用高性能磁石モーター：レアアース（ネオジウム、ジスプロシウム）
 超硬工具：タングステン
 燃料電池用触媒、自動車用排ガス触媒：プラチナ
 液晶パネルの透明電極：インジウム



2-5. レアメタルの重要性②

	自動車産業	エレクトロニクス産業	産業用機器/製造プロセス
産業発展の重点	<ul style="list-style-type: none"> ●環境性能の向上 <ul style="list-style-type: none"> ・化石燃料消費の低減 ・NOx・SOx・PM等の排出低減 >>ハイブリッド車、電気自動車、燃料電池自動車 	<ul style="list-style-type: none"> ●低消費電力化/小型・軽量化 <ul style="list-style-type: none"> ・半導体、ディスプレイ、電池等 ・省エネ照明 	<ul style="list-style-type: none"> ●高機能化、耐久性向上、低コスト
基幹部品と使用レアメタル	<p>強力モーター</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 強力な固体磁石が不可欠であり、日本開発のNd-Fe-B磁石が利用 ➢ 温度特性改善にDy添加必要 <p>高エネルギー密度・軽量の二次電池</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Ni-H電池に代りLiイオン電池 ➢ 正極材にLiに加えCo/Mn必要 <p>小型・軽量・安価な燃料電池</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 燃料の改質や水素と酸素の反応電極に触媒としてPtが必要 <p>排ガス浄化触媒</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 排ガス浄化触媒には白金の3元 (Pt/Pd/Rh) 触媒が不可欠 	<p>通信用半導体</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 高い周波数で動く半導体が必要 ➢ 日本が得意なGa-As系は、今後はGa-N/Ga-In-P等も必要 <p>LED(発光ダイオード)</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 電球より長寿命で省エネ ➢ 発光素子にGaを使用 <p>液晶ディスプレイ/太陽電池パネル</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 発電するシリコン基板の上に透明電極の塗布が必要 ➢ 透明電極としてInが不可欠 <p>超小型コンデンサ</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 小型電解コンデンサにはTaが必要 	<p>超硬工具</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 金属中で最も硬いWを用いたタングステンを使用 <p>各種プラント・航空機・インフラ</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 耐熱性・耐摩耗性・耐食性に優れた特殊鋼にはNi/Cr/Mnが必要 ➢ 高張力鋼・高速度鋼にはV/Moが必要
現時点での主要な供給国	【Nd (ネオジウム)】 中国 【Dy (ジスプロシウム)】 中国 【Li (リチウム)】 チリ 【Co (コバルト)】 コンゴ(民) 【Mn (マンガン)】 南ア 【Pt (白金)・白金属】 南ア	【Ga (ガリウム)】 中国 【In (インジウム)】 中国・カンボジア 【Ta (タングステン)】 タイ・中国	【W (タングステン)】 中国 【Ni (ニッケル)】 日本・ロシア 【Cr (クロム)】 南ア 【Mn (マンガン)】 南ア 【V (バナジウム)】 中国 【Mo (モリブデン)】 チリ・中国

レアアース (希土類) を巡る3つの話題
 ~日本のハイテクを支えてきたのはレアアース~

○日本人が初めてレア・アース(希土類)を意識したのは~?

✓ 1970年代に、日立製作所が製造・販売していたカラーテレビ「キドカラー」
 画面の「輝度」を上げ、発色を良くするため「希土類」を使用。
 「赤」がキレイなのはY(イットリウム)によるもの。

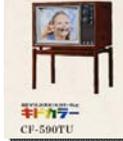
○「軽薄短小」家電のSONY・ウォークマン(初代)の実現の鍵を握ったのもレア・アース

✓ 1979年に発売されたSONY・ウォークマン開発の最重要技術課題がカセットテープ駆動用モーターの小型化
 これを可能としたのが希土類を用いたSm=Co(サマリウム=コバルト)磁石

○日本の大学・企業は磁石材料研究のレベルは世界一

✓ ハイブリッド自動車に使われるNd=Fe=B(ネオジム=鉄=ボロン)磁石は、最強の磁力を持つ磁石
 ✓ 第2世代Sm=Co磁石の研究を通じてNd=Fe=B磁石の研究への途を拓いた研究者の一人が、俵好夫博士(東北大~松下電器~信越化学)

『サラダ記念日』の歌人・俵万智女史(現在、希土類学会名誉会員)は俵博士の御息女。
 「希土類元素(レア・アース)とともに息して来し父はモジリアーニの女を愛す」





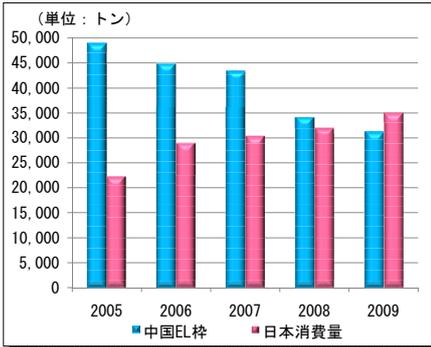
17

Copyright © 2010 METI Rights Reserved.

2-6. 次世代自動車用レア金属の需給ギャップ予測

レアアース

(単位: トン)

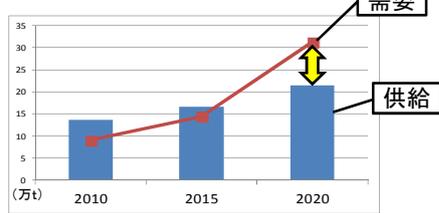


(※日本消費量の2008年以降は資源エネルギー庁類推。)

リチウム

	2010	2015	2020
供給(万t)	13.7	16.6	21.4
車載用需要	0.4	4.0	18.6
その他の需要	8.5	10.4	12.7
需要合計	9.0	14.4	31.3

* 供給量は、USG, M.S., Jan. 2010と各種資料より資源エネルギー庁類推
 * 需要量は、Roskill, ドイツ銀行の資料より資源エネルギー庁推測
 * 自動車のリチウムイオン使用量は、HEV: 1kg/台、EV: 4kg/台で試算。
 * 民生用は年4%の需要増と仮定して試算。
 * リチウムは、炭酸リチウムで換算。

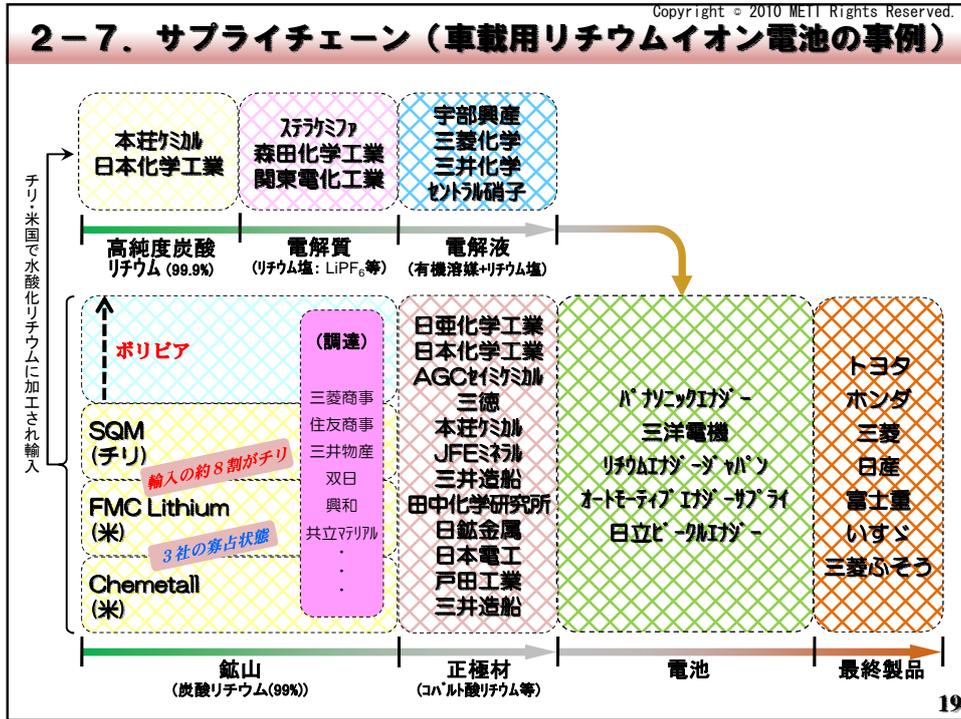


既に、統計上は日本だけで中国の公式輸出枠(E/L)を超えた需要が存在。

今の3社独占の供給体制では、2020年には需要が供給を上回る見込み

➢ レア金属の大幅な需要増が予測されるが、大部分はEV、HEV、FCV等の先端自動車産業。
 ➢ 新たな供給ソースが必要。

18



Copyright © 2010 METI Rights Reserved.

2-8. 中国の輸出規制（レアメタル供給国としての中国）

「中華人民共和国国民経済・社会発展第11次5ヶ年（2006年～2010年）計画要綱」において、冶金工業の発展のため、**希土類及びタングステン、錫とアンチモンの資源保護を強化し、希土類のハイテク産業への応用を推進する方針等を明確化。**

中国政府の断続的なレアメタル貿易管理政策の実施

【増値税と輸出税】

①増値税は17%の付加価値税で、通常、輸出の場合は還付。輸出抑制のため、還付率を削減し、**2006年9月多くのレアメタルについて還付制度を廃止。**

- 2004年1月：レアアース等多くの非鉄金属鉱石で還付の廃止
- 2005年5月：インジウム、モリブデン精鉱、レアアース酸化物等で還付の廃止
- 2006年9月：タングステン、モリブデン、アンチモン等の金属製品で還付の廃止
- 2007年7月：五酸化バナジウム、三酸化クロム等の還付の廃止、非鉄金属製品の還付率の引き下げ。

②資源製品の**輸出を一層抑制するため、輸出税を課税**

- 2006年11月：金属など110品目に最大15%の輸出関税を適用。金属鉱石、レアアース等の輸出関税を10%、ニッケル、マンガン等の輸出関税を15%とした。
- 2007年1月：更に、タングステン等が0→5%に、モリブデン、クロム、インジウム等が0→15%に税率引き上げ。
- 2007年6月：ネオジム、ジスプロシウム等が0→10%、ニッケル、マンガン、クロム等の各鉱石が10→15%に引き上げ。
- 2008年11月：レアアース等が10%→最大で25%、タングステン等が10%に、フェロクロム等が20%に引き上げ。
- 2009年7月：タングステン、モリブデン、インジウム等を5%に引き下げ。

【輸出割当数量の削減】と【輸出許可対象品目の拡大】

①輸出許可証制度
 輸出許可を得た者しか輸出できない制度。

- 2009年の対象品目は50品目（亜鉛、タングステン、モリブデン、インジウム、コバルト、白金族、バナジウム、アンチモン等）

②E/L制度
 輸出許可に加えさらに輸出数量を制限する制度。
 対象品目の**輸出数量は毎年削減**される。

（単位：t）	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年
希土類	49,000	45,000	43,500	34,156	31,310
タングステン	16,300	15,800	15,400	14,900	14,600
アンチモン	65,700	63,700	61,800	59,900	58,700
モリブデン	-	-	N.A.	26,300	25,500
インジウム	-	-	N.A.	240	233

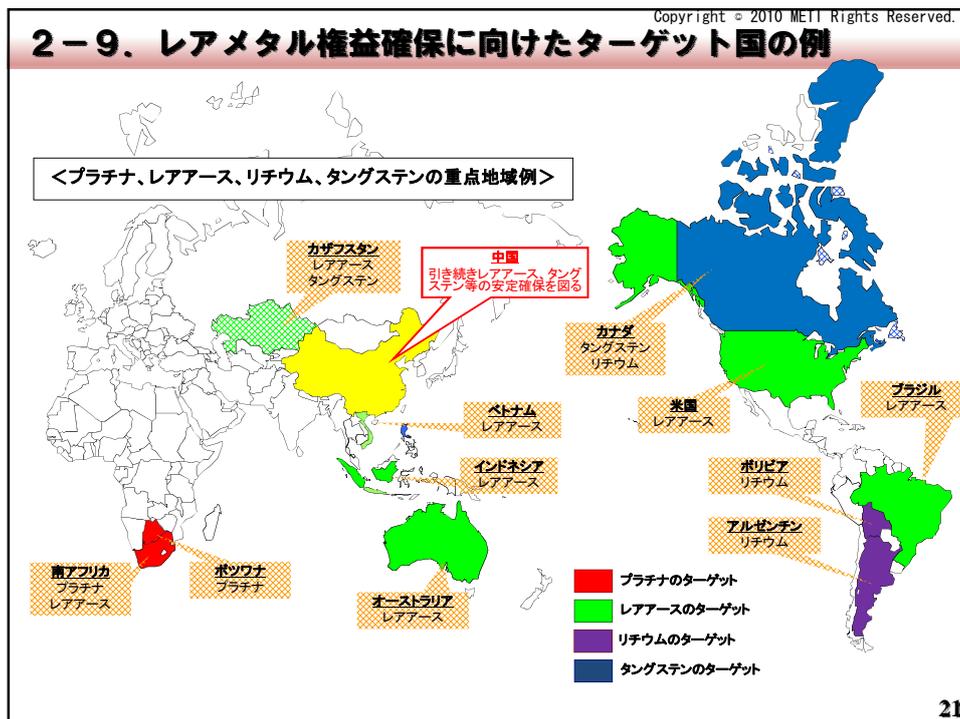
2007年6月、モリブデン、インジウムが当該制度の対象に追加。
 ※輸出数量は未公表。上記は関係者からの聴取に基づくもの。

【加工貿易の禁止】

- 2006年1月より銅等の加工貿易（輸入した鉱石やスクラップを製錬し、製品を輸出）を禁止。
- 2006年9月14日、2007年4月5日及び2007年7月23日に対象品目を追加。レアメタルの一部も対象。

更なるレアメタル輸出量の削減の可能性

20

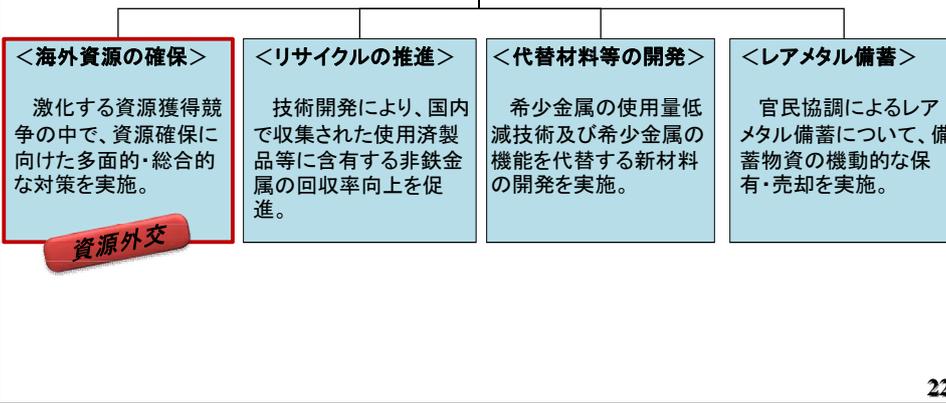


(第3部)

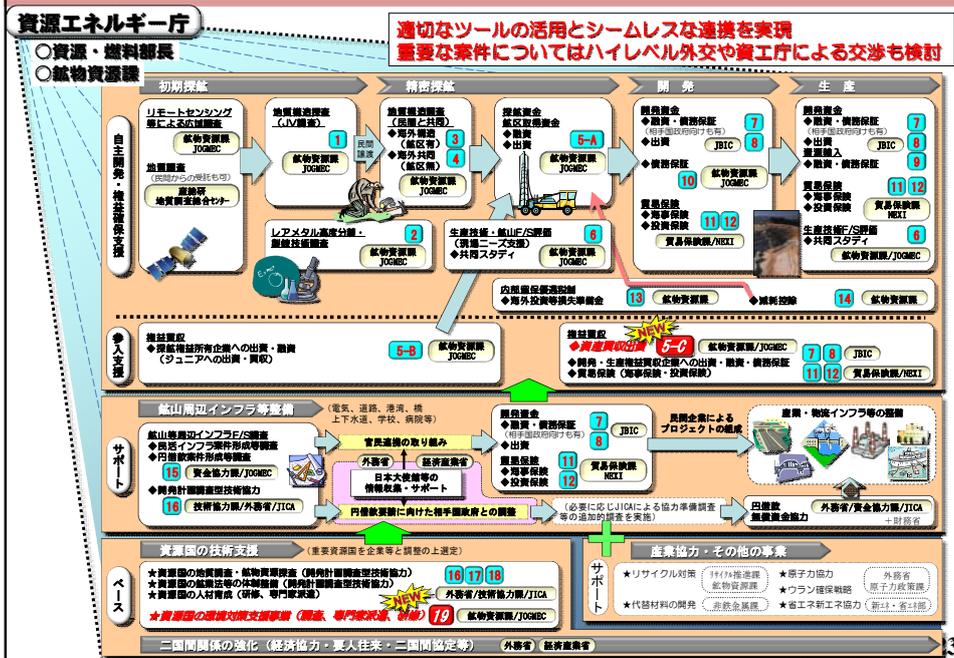
我が国の資源政策の展開

3-1. レアメタルの安定供給確保

【レアメタルの安定供給確保】
海外資源の確保、リサイクルの推進、代替材料等の開発、レアメタル備蓄等により、中長期的かつ持続的に鉱物資源の安定供給の確保を図る。



3-2. 『海外鉱物資源確保ワンストップ体制』の整備 (2008年10月~)



Copyright © 2010 METI Rights Reserved.

3-3. 資源外交（南部アフリカ）

ボツワナ 銅 ニッケル プラチナ

○**甘利経済産業大臣(当時)訪問(07年11月)**
 ✓ 大統領や鉱山・エネルギー・水資源大臣等と会談。
 ✓ 地質リモートセンシング・プロジェクト実施に合意。

○**吉川経済産業省副大臣(当時)訪問(08年8・9月)**
 (南部アフリカ貿易・投資促進合同ミッション)
 ✓ 大統領、鉱山・エネルギー・水資源大臣、SADC事務局長等と会談。

○**福田元総理訪問(09年3月)**
 (TICADIVフォローアップ会議出席)
 ✓ 鉱山・エネルギー・水資源大臣と共に地質リモートセンシング・センターを視察。

→2008年7月にJOGMEC地質リモートセンシング・センターを開設。対象国をボツワナから他のSADC諸国へも拡大中。
 →1件のニッケル・プラチナの共同探鉱を開始。(*)

モザンビーク

○**吉川経済産業省副大臣(当時)訪問(08年9月)**
 (南部アフリカ貿易・投資促進合同ミッション)
 ✓ 首相、商工大臣、鉱業資源大臣、エネルギー大臣等と会談
 ✓ SADC地域リモートセンシングプロジェクトへの参加を要請

ナミビア

○**高橋政務官からレター**
 ✓ 伊藤忠ウラン探鉱融資
 (モロ(長))

マダガスカル

○**吉川経済産業省副大臣(当時)訪問(08年9月)**
 (南部アフリカ貿易・投資促進合同ミッション)
 ✓ 大統領、外務大臣、経済大臣と会談
 ✓ 日本企業が出資するプロジェクトへの協力や地質リモートセンシング・プロジェクトへの参加を要請

(*)有望な結果が得られれば、日本企業に優先的に権益を譲渡

24

Copyright © 2010 METI Rights Reserved.

3-4. 資源外交（ベトナム、カザフスタン）

カザフスタン レアアース 開発

○**カザトンプロムの資源エネルギー庁訪問(09年7月)**
 ✓ 日本側より当該プロジェクトの支援を宣言。
 ✓ JOGMECもトリウム分離技術に関する支援を実施。

○**日カザフスタン経済官民合同協議会(09年10月)**

→住友商事、カザトンプロム社、JOGMECの3者でウラン鉱石残渣からのレアアース回収事業に係るMOUを締結
 →東芝、カザトンプロム社でウラン抽出尾液からのレアアース回収事業に係るMOUを締結

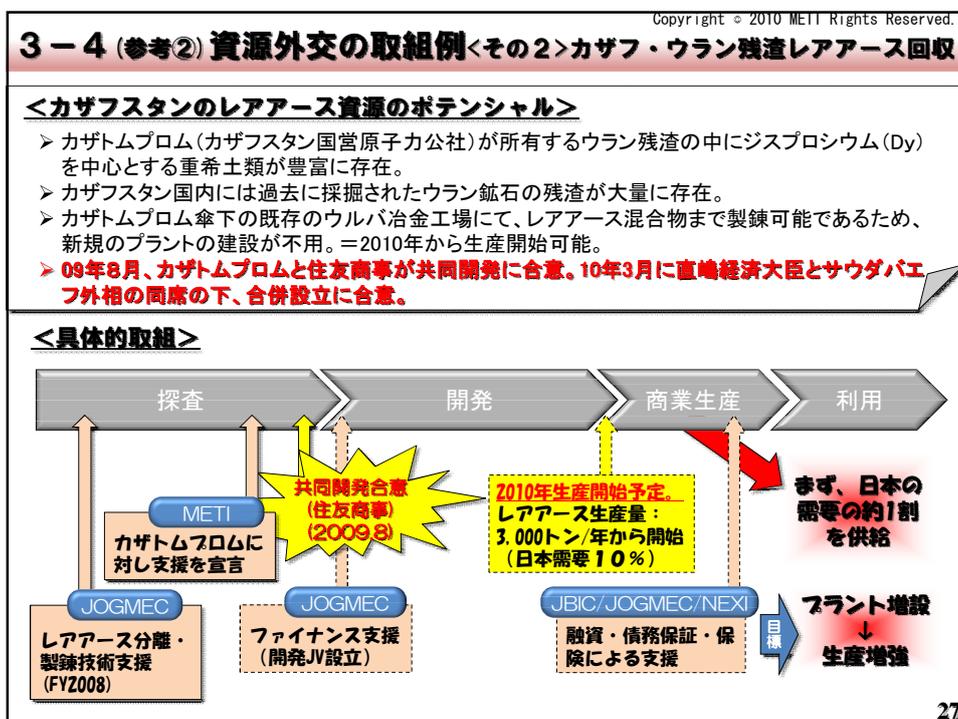
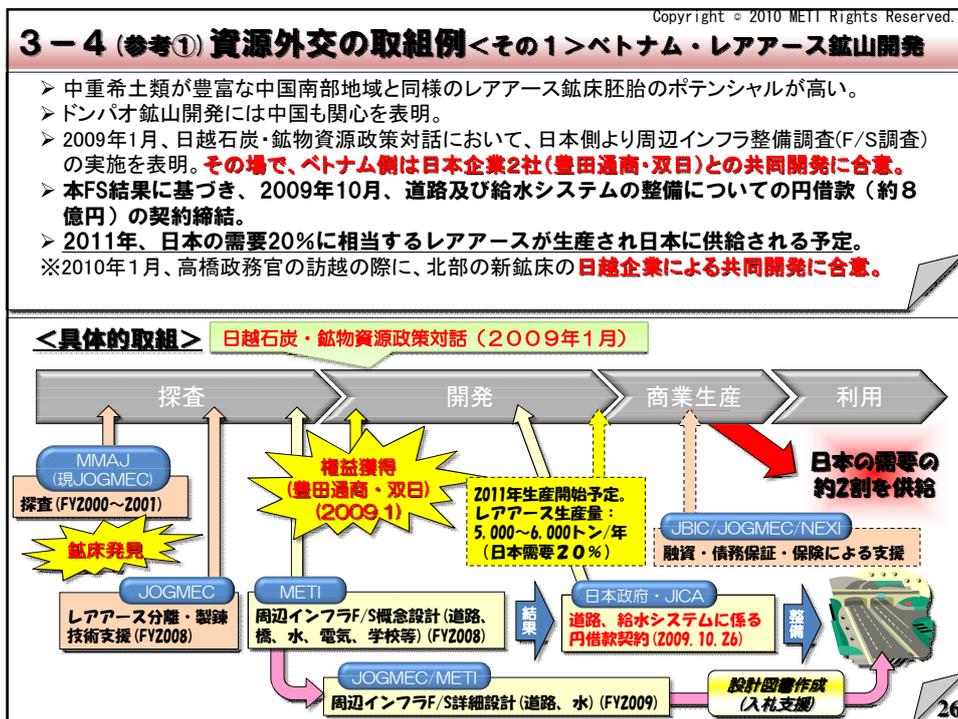
ベトナム レアアース 開発 ホーキサイト

○**吉川経済産業省副大臣(当時)訪問(09年1月)**
 (第2回日越石炭・鉱物資源政策対話)
 ✓ 商工副大臣、天然環境資源省、VINACOMIN総裁等と対話。
 ✓ 日本側は、JCOAL、NEDO、JBIC、民間企業の総勢約70名が出席。
 ✓ 越側は、ドンバオ・レアアース鉱山の日本企業との共同開発に合意。日本側も周辺インフラ整備調査の開始に合意。

→09年4月、ベトナム側と日本企業2社によるMOUを締結。
 →09年10月、ドンバオ鉱山周辺インフラ(道路、給水システム)について円借款契約を締結。
 →2011年より生産開始予定(日本需要の約20%)

○**高橋経済産業大臣政務官訪問(10年1月)**
 ✓ 豊田通商がベトナム北部の新たなレアアース鉱山開発につき越側企業と合意。
 ✓ 商工副大臣、開発計画大臣と会談し、両国政府も日越企業のレアアース共同開発を支援することに合意。

25



Copyright © 2010 METI Rights Reserved.

3-5. 資源外交（ボリビア、アルゼンチン）

ボリビア

○日本ボリビア友好議員連盟ミッション(09年2月)

- ✓ キンタナ大統領府官房長官、エチャス鉱業冶金大臣等と会談。
- ✓ 日本側は、METI、JOGMEC、民間企業が同行。
- ✓ リチウム開発、地熱発電プロジェクト等について会談。

○JOGMEC理事長訪問(09年6月)

- ✓ エチャス鉱業冶金大臣等と面談。
- ✓ 日本側は、民間企業、METI、JBIC、NEXI、JICA、大使館が同行。
- ✓ リチウム資源の共同開発を提案し、協議の継続に合意。

○外務省中南米局長訪問(09年9月)

- ✓ モラレス大統領、アギレ開発企画大臣と会談。

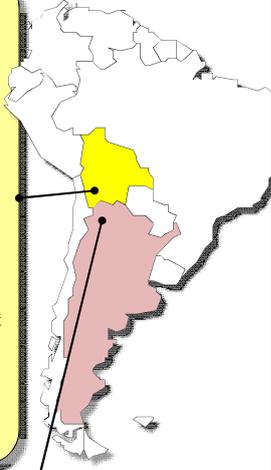
○鉱物資源課長訪問+専門家ミッション訪問(09年10~11月)

- ✓ **ウユニ塩湖からのリチウム回収分離技術試験の結果を報告。**（日本側は、METI、JOGMEC、民間企業、大使館）**ボリビア側は日本のリチウム回収技術を高く評価。**
- ✓ エチャス鉱業冶金大臣、コカ炭化水素エネルギー大臣、アギレ開発企画大臣、COMIBOL（ボリビア鉱業公社）等と会談。リチウム資源の回収に係る日本の技術の活用や同国の産業振興等への我が国の考えを提示。
- ✓ ボリビア主催の「リチウム産業化に向けた国際科学技術フォーラム」に参加し、ボリビアの経済開発に関し、鉱物資源課長、東京大学、産総研、自動車メーカー、JOGMECが講演。

○高橋大臣政務官訪問(10年2月)

- ✓ ボリビア南部経済開発セミナーへ参加。
- ✓ 第2次モラレス政権下の主要閣僚とリチウム資源開発を含む両国間の協力について会談。

リチウム **亜鉛・銀**

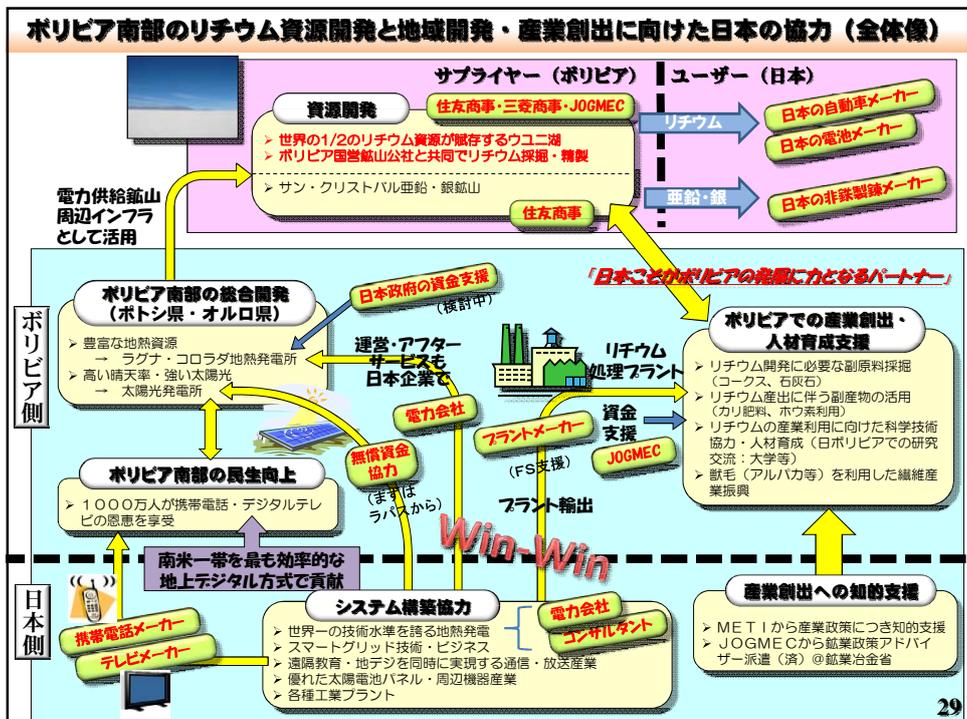


アルゼンチン

○リチウム「日の丸権益」第1号(2010年1月)

- ✓ 2009年5月よりJOGMECの継続的な支援を実施（輸送設備、発電所等周辺インフラ調査、埋蔵量調査、回収技術調査）
- 2010年1月、豊田通商、オロコブレ社（兼）2社によるオウロス塩湖の開発に関するMOUを締結。
- 2012年より生産開始予定（炭酸リチウム15000トン/年（HV300万台相当/年））

28



ポホーレイク

世界のリチウム資源の半分が眠ると言われるウユニ塩湖（ポリビア）

塩湖表面（車から撮影）

塩湖の中央にある「魚島」

塩のホテル

塩を探っている風景

30

Copyright © 2010 METI Rights Reserved.

3-6. 資源外交（モンゴル、中国、ASEAN）

モンゴル

○第2回日本・モンゴル鉱物資源開発官民合同協議会(08年10月)
 ✓ 日本側は、石炭課長、鉱物資源課、NEDO、JOGMEC、JBIC、NEXT、JCOAL、民間19社が参加。
 ✓ 鉱業法改正、政府組織改革の現状を確認。

中国

○望月経済産業省次官訪問(08年10月)
 (第27回日中高級事務レベル協議)
 ✓ 日本側から日中レアアース交流会議の継続の必要性にも言及。
 → 2009年4月 日中レアアース交流会議を開催。

○二階経済産業大臣(当時)訪問(09年06月)
 (第2回日中ハイレベル経済対話)

○望月経済産業省次官訪問(08年10月、09年05月)
 (第28回日中高級事務レベル協議)
 ✓ 輸出規制問題について懸念を表明し、改善を要望。

○経済産業省通商政策局長訪問(09年08月)

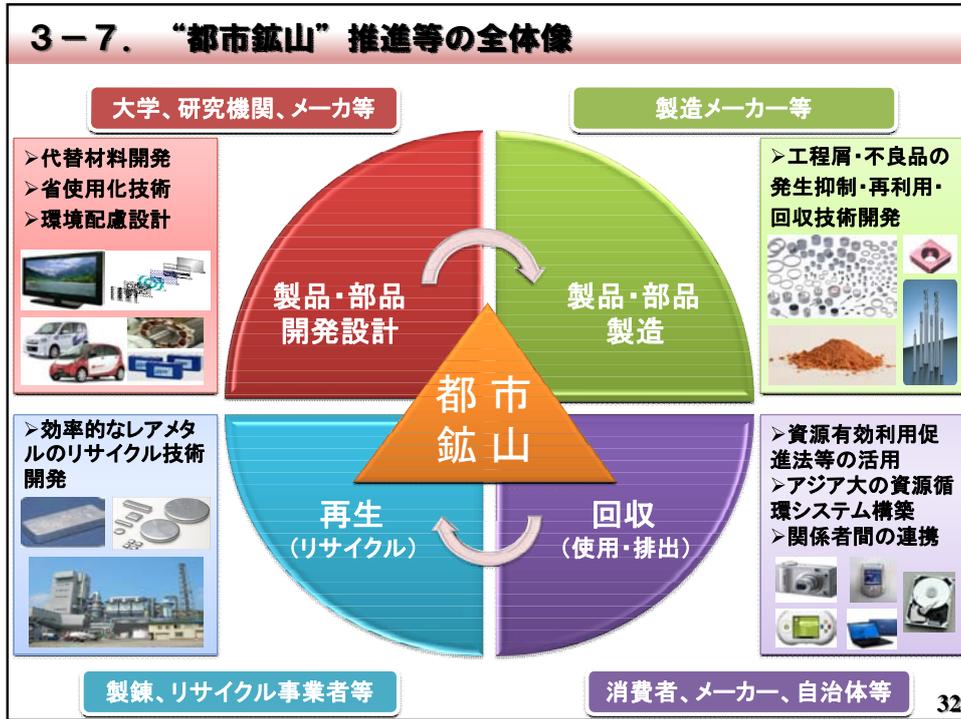
○中国工業信息化部との意見交換(09年10月)

ASEAN

○ASEAN鉱物高級事務レベル会合+3(日本、中国、韓国)第1回鉱物協力協議会(07年6月)
 → リサイクル人材育成協力及びCSRワークショップ開催支援(08年)

○ASEAN鉱物高級事務レベル会合+3(日本、中国、韓国)第2回鉱物協力協議会(08年10月)
 ✓ 2009年も同様のリサイクル人材育成協力の要請有
 → 09年2月 鉱物・金属リサイクル研修を実施
 (ASEAN6カ国+中国、計16名)

31



レアメタルリサイクルの現状と課題

製品1t当たりに含まれる金属量 ①									生産・出荷された製品に含まれる総金属量(平成18年) ①×④								
	Ta	Co	W	In	Pd	Pt	Nd	Dy	Ta	Co	W	In	Pd	Pt	Nd	Dy	
携帯電話 PHS	516	250	808	25	66	8	66	0	3.30	1.60	5.16	0.16	0.42	0.05	0.42	0.00	
デジタルカメラ	2,130	38	84	23	18	3	0	0	10.75	0.19	0.42	0.12	0.09	0.02	0.00	0.00	
ビデオカメラ	748	13	29	8	232	0	1,770	194	3.53	0.06	0.14	0.04	1.10	0.00	8.36	0.92	
携帯型オーディオプレーヤー	16	8	8	16	0	3	0	0	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	
合計	-	-	-	-	-	-	-	-	17.58	1.85	5.73	0.31	1.61	0.07	8.78	0.92	

①製品1t当たり金属含有量: 経済産業省資源エネルギー庁植物資源課試算
 ②携帯電話等、デジタルカメラ、ビデオカメラの国内生産台数: 工業統計(経済産業省調査統計部)
 ③各種音楽プレーヤーの出荷台数: デジタルAV機器市場マーケティング調査要覧(2007年版)((株)富士キメラ総研)
 ④1t当たり重量: 経済産業省リサイクル推進課調査

しかし、

例えば、携帯電話1台から現在採取されている金属

・金	0.02~0.03g (110.0 円)	} 価値としても 131円 程度
・銀	0.1~0.13g (7.0 円)	
・銅	10.1~12.8g (7.7 円)	
・パラジウム	0.003~0.005g (6.6 円)	

課題

非鉄製錬企業によるレアメタル回収技術の開発と設備投資は進展し、レアメタルリサイクルに向けての技術的基盤は整いつつある。

経済性のあるリサイクルのための社会システムの構築

- ・レアメタルを多く含む製品を対象
- ・効率的・大量の収集を行う社会システム
- ・レアメタル抽出技術の更なる開発

回収しやすい製品の設計 (Design for Recyclability)

(参考) リサイクル原料の例

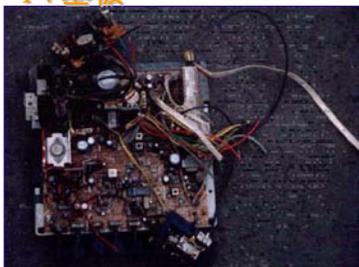
携帯電話



OA機器破碎屑



TV基板



自動車破碎屑(ASR)



出典:「産業構造審議会環境部会廃棄物・リサイクル小委員会第2回基本政策WG」資料(2007年3月1日)

3-9. 代替材料開発

原単位改善のため早急な対応が必要なレアメタルについてナノテクノロジー等の最先端技術を活用した代替材料開発

平成19年度から研究開発着手

①インジウム(In)：液晶・太陽電池パネル用透明電極に使用
進捗：酸化亜鉛代替で原単位50%削減を達成。また、3インチの液晶カラーディスプレイの試作に成功。今後は、20インチレベルのパネル試作に取り組む。

②ディプロシウム(Dy)：ハイブリッド車用モーター等に使用される希土類磁石に使用
進捗：結晶粒微細化技術による保磁力向上により、原単位20%削減を達成。今後は更なる組織制御により、目標の達成を目指す。

③タングステン(W)：超硬工具に使用
進捗：金属とセラミックスのハイブリッド材料の試作により、原単位20%削減を達成。今後は、接合技術の改善により、目標の達成を目指す。

プロジェクト最終目標

使用原単位で現状から50%以上低減

使用原単位で現状から30%以上低減

最終目標年度
平成23年度末

平成21年度から研究開発着手

④プラチナ(Pt)：排ガス浄化触媒等に使用

⑤テルビウム(Tb)・ユーロピウム(Eu)：蛍光体に使用

⑥セリウム(Ce)：液晶ディスプレイ等ガラス精密研磨に使用

使用原単位で現状から50%以上低減

使用原単位で現状から80%以上低減

使用原単位で現状から30%以上低減

最終目標年度
平成25年度末

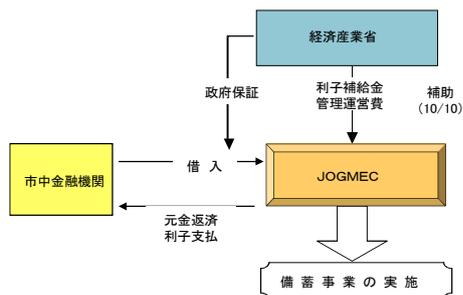
3-10. レアメタル備蓄

➢ 代替が困難で、供給国の偏りが著しいレアメタル9鉱種について、短期的な供給障害等に備える備蓄制度を実施(国家備蓄及び民間備蓄)。

【備蓄対象9鉱種】 ニッケル、クロム、モリブデン、マンガン、タングステン、コバルト、バナジウム、インジウム、ガリウム



➢ 国内消費量の60日分(国家備蓄42日分、民間備蓄18日分)を目標とし、9鉱種平均で備蓄量は52.3日分。(平成22年3月末見込。国家備蓄34.3日分、民間備蓄18日分)

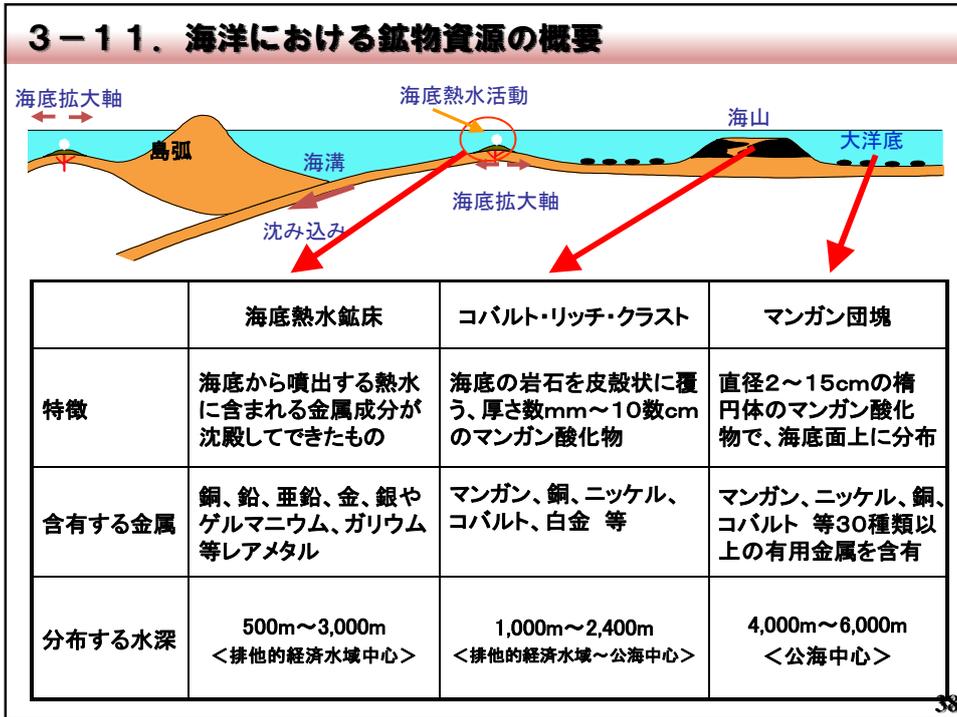


国家備蓄...備蓄事業の実施主体は独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構。緊急時等に備え、国家備蓄を実施

民間備蓄...備蓄事業の実施主体は民間企業。



茨城県高萩国家備蓄倉庫



独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)法の一部を改正する法律

○レアメタル等の金属鉱物の安定供給確保は低炭素社会の構築に向けた喫緊の課題。また、円高等の好機を捉えて、我が国企業が資源権益を最小限の資金で確保するには、国としてタイムリーに大規模な資金供給の支援を行うことが必要。

○そのため、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)について、レアメタル等の金属鉱物の資産買収(鉱山の買収)に係る出資業務の拡充及び政府保証付の長期借入金等の対象業務の追加等を行う。(第174回 通常国会で成立)

レアメタルの重要性

高画質機(MBR等)、デジタルカメラ、携帯電話、MP3プレーヤー、テレビ、パソコン等、自動車(電気・ハイブリッド等)、自動販売機、ICチップ、半導体、液晶ディスプレイ、携帯電話、ICチップ、半導体、液晶ディスプレイ

ニッケル クロム システム、ガリウム、インジウム レジスタ、リチウム ジェルポリマー、コバルト、マンガン、バナジウム

資源権益の価格は為替・資源価格・金融市場等の状況により大きく上下

ALレアース鉱山
: 高値時の価格は約3000億円
→ 中国企業が150億円で購入

中国による資産買収の例

○2009年6月: 中国資源企業によるコバルト・銅鉱山(ザンビア)買収合意(約4億ドル)

○2009年7月: 中国政府系ファンドによるカナダの大手金属資源企業への出資(約15億ドル)

現状

○レアメタル等の金属鉱物の鉱山買収支援の必要性
JOGMECは、金属鉱物の開発・生産段階の鉱山権益取得を支援するための出資業務が認められていない。(石油・天然ガスについては既に可能。)

○機動的かつ大規模な資金供給の必要性
JOGMECは、機動的な資金供給ニーズや、比較的风险は低いが大規模な金額が必要な資金供給ニーズに対応することが困難。

改正のポイント

(1)レアメタル等の金属鉱物の資産買収に係る出資業務の拡充
我が国企業がレアメタル等の金属鉱物の資産買収(鉱山買収)を行う場合に、JOGMECが出資による支援を行うことができるようにする。

(2)政府保証付の長期借入金を活用できる対象業務の追加
政府保証付の長期借入金を活用できる対象業務に、石油・天然ガス・金属鉱物の資産買収に係る出資業務及び債務保証業務を追加する。

(3)その他の改正
上記の資源獲得機能の強化に伴い、主たる事務所を神奈川県から東京都に移転する。

3-12. エネルギー基本計画（平成22年6月、閣議決定）（抄）

- 第3章. 目標実現のための取組
 - 第1節. 資源確保・安定供給強化への総合的取組
 - 1. エネルギーの安定供給源確保
 - (1) 基本的考え方より抜粋

ベースメタル(銅・亜鉛)については、海外資源開発やリサイクルによる供給源確保を含む**自給率を2030年に80%以上**とすることを旨とする。

レアメタルについては、需要拡大の見込みや特定国への偏在性や依存度、供給障害リスク等の観点から、安定供給のために政策資源の集中投入が必要と考えられるもの**(レアアース・リチウム・タングステン等)**を「**戦略レアメタル**」として特定するものとする。その上で、海外資源開発に加え、リサイクルによる供給源確保や代替材料開発もあわせて推進することにより**自給率を、2030年に50%以上**とすることを旨とする。

また、こうした条件を満たさないものの今後戦略レアメタルとなる可能性の高いレアメタルを「**準戦略レアメタル**」(**ニオブ・タンタル・白金族等**)と位置付け、常にその需給、価格等に関する動向を注視していく。

6. 産業エコロジーから見た廃棄物と再資源化

中村慎一郎

早稲田大学政治経済学術院 名古屋大学エコトピア科学研究所

山末 英嗣

京都大学大学院エネルギー科学研究科

「環境に優しい」は今や少なくとも先進国においては政治経済に関わる意志決定において重要な位置を占めるに至っている。ここで重要なのが観念論ではなく客観的科学的に「環境に優しい」程度を測ることであるが、その手法として ISO 化され内外で広く使われているのが LCA(ライフサイクル評価)である。LCA は身近な消費財から複雑なシステムまで広範な分野に適用可能である。前者の例としては日本でも一部の食品で導入が試験的に開始されたカーボンフットプリント(CF)、後者の例としては「世界初のカーボンマイナス五輪」として招致を目指した 2016 年東京オリンピックがある。一方、先端工業製品に不可欠なレアメタル・希土類を巡っては、「都市鉱山」の有用性が注目されている。金以外の操業中天然鉱山を持たない日本における「都市鉱山の発見」と深く関わるのが、特定の物質について、その経済におけるフローを同定する手法である MFA(マテリアルフロー解析)である。MFA を用いることで、ある物質のリサイクルを工程スクラップにおいてすべきか、あるいは使用済み製品に対して行うべきか、を判断することも可能になる。LCA と MFA は環境負荷の計測において補完的に用いられる手法である。これらの手法に関わる学理として定着しているのが産業エコロジー(Industrial Ecology)である。産業エコロジーは広範な分野で内外において研究・応用されているが、原子力分野における適用は希少である。少なくとも、産業エコロジーの主要国際学会である ISIE における原子力関連分野に関わる議論は皆無に等しい。この背景には様々な原因があろうが、人的交流の欠落が最大の原因である。これは、双方にとって非生産的である。生産的な交流をめざすべく、産業エコロジーからのオリエンタサイクルへの接近についていくつかの話題を提供する。特に以下に触れる予定である(順不同)：

- 産業エコロジーとその考え方：LCA, MFA, 産業共生
- 省エネ機器とジェボンスの「石炭問題」
- 経済活動と物質・廃棄物フローと廃棄物処理とリサイクル
- (非放射性)物質・廃棄物フローの数理モデル
- 原子燃料サイクル：放射性物質・廃棄物フロー
- レアメタル：都市鉱山「こでんプロジェクト」とオリエンタサイクル

産業エコロジーから見た廃棄物と再資源化

中村 慎一郎* 山末 英嗣#

*早稲田大学政治経済学術院

*名古屋大学エコトピア科学研究所

#京都大学大学院エネルギー科学研究科

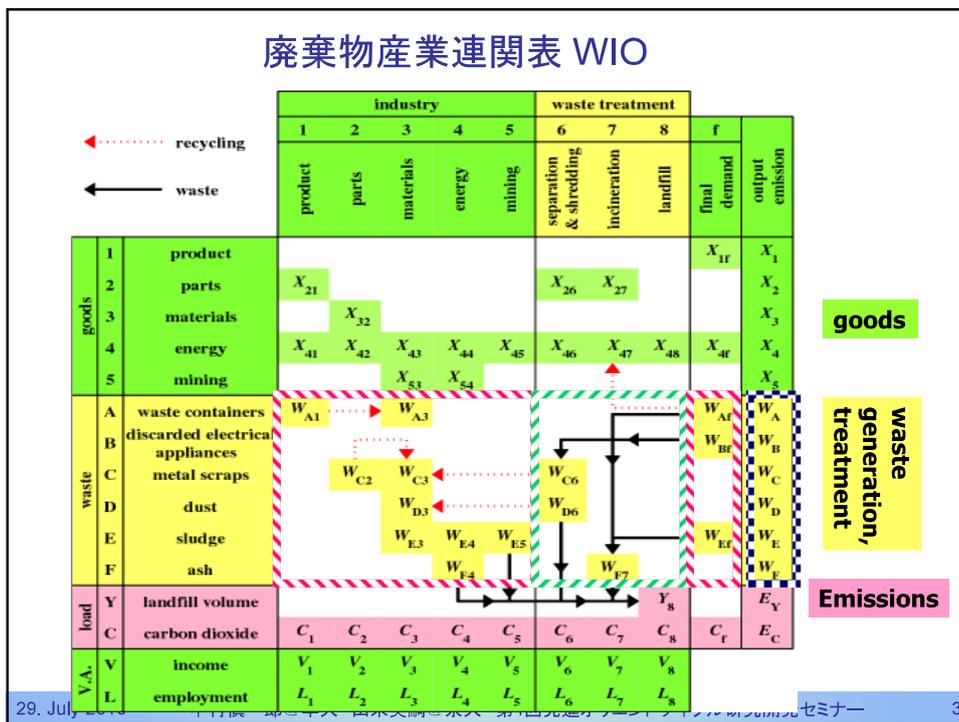
29. July 2010 中村慎一郎@早大 山末英嗣@京大 第4回先進オリエントサイクル研究開発セミナー 1

もくじ

- 自己紹介
- 産業エコロジー?
- 省エネ機器とジェボンスの「石炭問題」
- 天然鉱山・都市鉱山・原子力鉱山と希土類(Nd)回収

29. July 2010 中村慎一郎@早大 山末英嗣@京大 第4回先進オリエントサイクル研究開発セミナー 2

廃棄物産業連関表 WIO



Waste IO:

Nakamura & Kondo: JIE6-1,2002

Table 1 WIO table for Japan, 1995

	AGRC	MING	FOOD	WOOD	CHEM	CMNT	METL	METP	MCHN	CNST	UTIL	SRVC	TRNS	INCN	LNDF	SHRD	FNLD	Total
Interindustry flow of goods* (units: billion yen)																		
AGRC	1,716	1	7,660	709	142	1	0	0	154	136	0	1,097	2	0	0	0	4,198	15,816
MING	0	3	0	8	132	607	47	2	2	801	42	1	0	0	0	0	23	1,669
FOOD	1,081	7	7,268	123	276	27	1	41	293	202	7	6,784	107	0	0	0	33,773	49,991
WOOD	184	7	1,305	7,295	707	247	6	246	1,350	4,046	130	9,808	724	0	0	0	3,883	29,938
CHEM	914	31	1,829	1,346	13,170	323	337	663	5,528	2,346	934	8,115	3,539	0	0	0	11,334	50,485
CMNT	20	0	176	98	207	960	121	127	1,002	5,610	17	400	3	0	0	0	965	9,708
METL	0	0	0	0	34	13	1,365	4,684	215	2	0	3	0	0	0	0	176	6,491
METP	23	28	910	445	449	198	4	8,818	9,612	10,369	29	846	105	0	0	0	3,865	35,701
MCHN	84	12	175	86	68	36	0	125	40,766	1,837	27	6,638	590	12	13	24	79,693	130,295
CNST	50	11	138	130	271	136	55	287	374	225	1,142	4,643	628	0	15	0	80,030	88,277
UTIL	71	45	787	575	1,417	358	323	877	1,363	565	2,304	5,899	905	2	10	20	7,760	23,256
SRVC	1,500	207	6,907	4,038	7,740	1,423	809	4,066	20,113	14,471	3,559	67,128	15,028	13	2	1	280,205	427,211
TRNS	728	408	1,828	1,308	1,481	811	387	1,147	2,785	5,108	529	17,123	6,443	0	0	0	24,533	64,618
Net generation of waste (units: 1,000 tons)																		
grb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,999	0	0	0	0	10,000	15,999
pap	151	10	540	11,748	225	232	163	397	1,133	1,322	180	9,266	210	0	0	0	1,701	17,634
pl	255	0	392	670	1,906	77	7	789	892	1,021	38	2,571	780	0	0	0	7,063	13,451
med	3	1	37	134	54	10	40,147	2,770	5,440	7,536	13	5,427	47	0	0	0	22,917	3,000
gls	3	1	4,405	34	137	2,138	97	331	211	1,772	67	5,554	53	0	0	0	3,457	8,901
wood	13,854	0	1,584	1,627	90	0	0	0	0	3,235	0	175	0	0	0	0	391	29,520
ash	0	4,716	0	0	0	0	5,120	1,794	0	3,182	4,736	40	0	0	0	0	14,752	14,752
slg	-5,743	4,514	2,421	7,327	3,023	95	214	1,777	595	11,752	843	351	23	0	0	0	0	28,673
oil	6	3	1,375	157	855	91	309	1,501	1,369	97	29	987	159	0	0	0	0	7,381
cons	0	133	23	53	202	311	211	657	433	14,190	154	681	380	0	0	0	0	17,238
blk	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,203
ehc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,585
dst	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,581

* AGRC = agriculture, forestry, and fishery; MING = mining; FOOD = food, feed, and beverage; WOOD = wood, pulp, and paper; CHEM = chemical industry; CMNT = cement, earthen, and glass; METL = basic metals; METP = metal products; MCHN = machinery; CNST = construction and civil engineering; UTIL = electricity, gas, and water; SRVC = service; TRNS = transport and communication; INCN = incineration; LNDF = landfilling; SHRD = shredding; FNLD = final demand.

† grb = garbage; pap = waste paper and textile; pl = waste plastics; med = metal scraps; gls = waste glass and ceramics; wood = plant and animal waste; ash = ash, dust, and slag; slg = sludge; oil = waste oil, acid, and alkali; cons = construction debris; blk = bulky waste; ehc = discarded automobiles; dst = shredder dust.

WIO as an accounting system

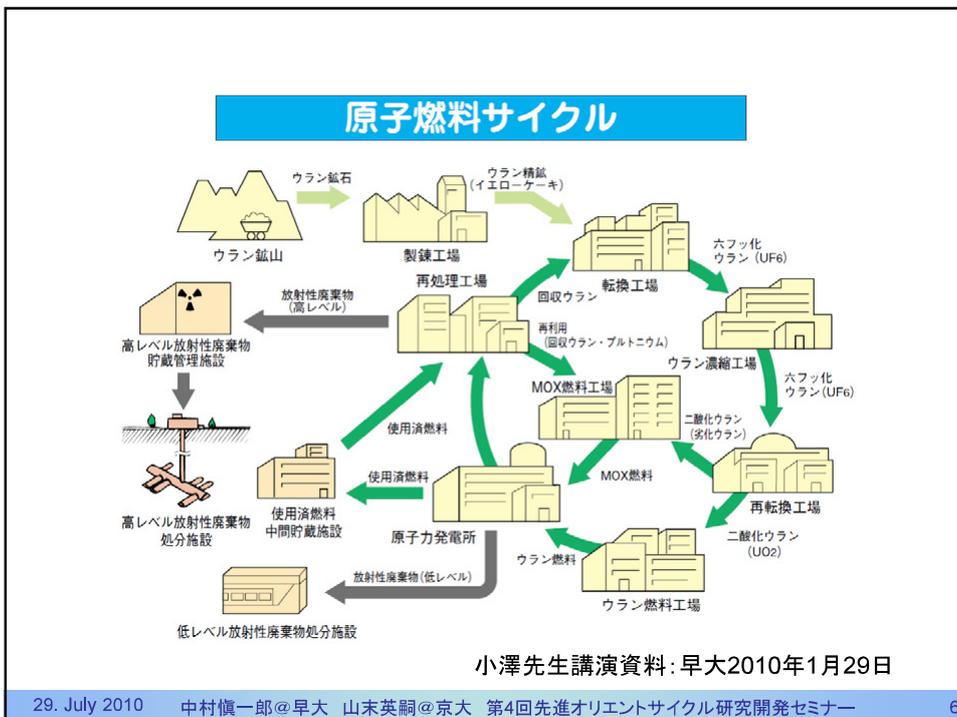
From the point of view of accounting system, WIO can be seen as a variant of NAMEA. A distinguishing feature of WIO consists in its detailed description of waste stream and waste management. Furthermore, we have also developed an accompanying analytical model called WIO model that can be used as a hybrid LCA tool of waste management. For details of the WIO model, see below.

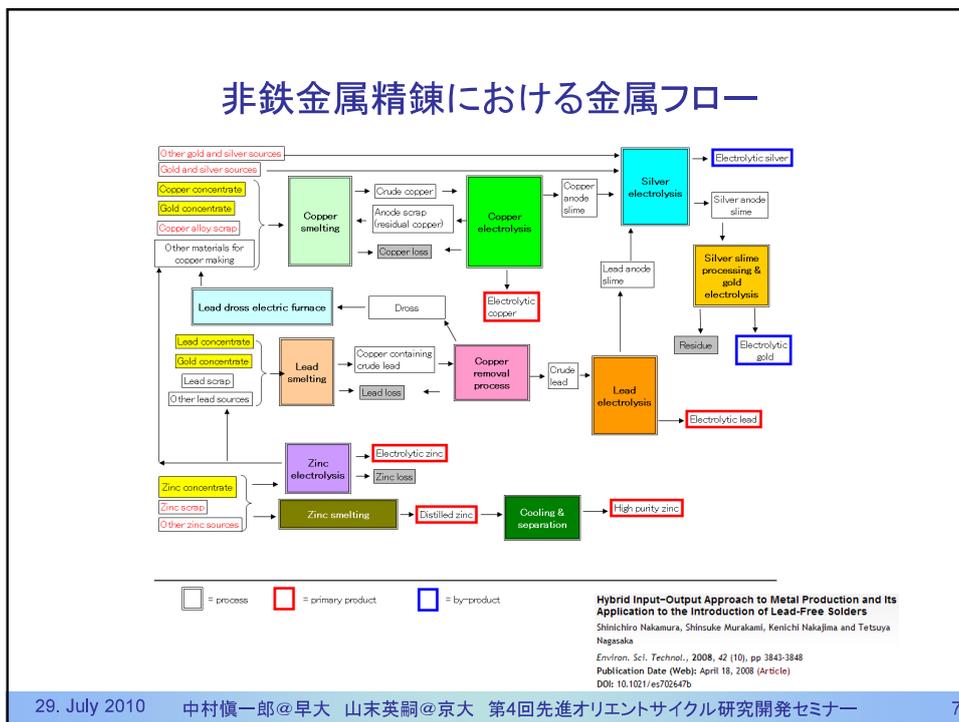
Download and use WIO Table

- The WIO table for Japan 2000 in Excel format (498Kb). The last update: 10. January 2010
- The WIO table for Japan 1995 in Excel format (212Kb). The last update: 24. July 2003

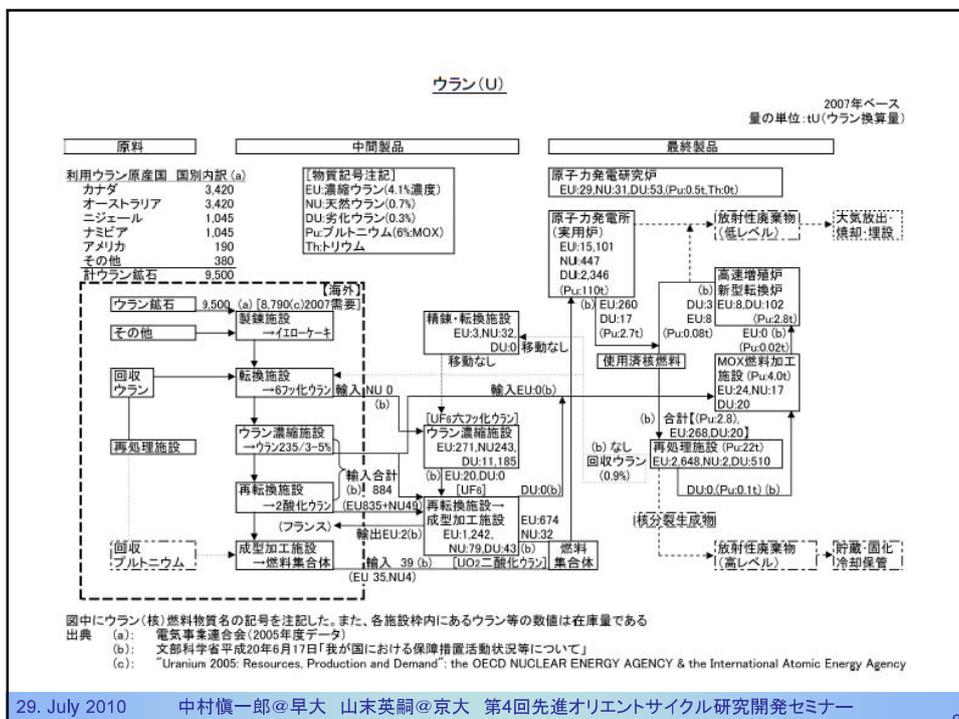
Please read the "Readme" sheet before using the WIO tables.

29. July 2010 中村慎一郎@早大 山末英嗣@京大 第4回先進オリエントサイクル研究開発セミナー 5

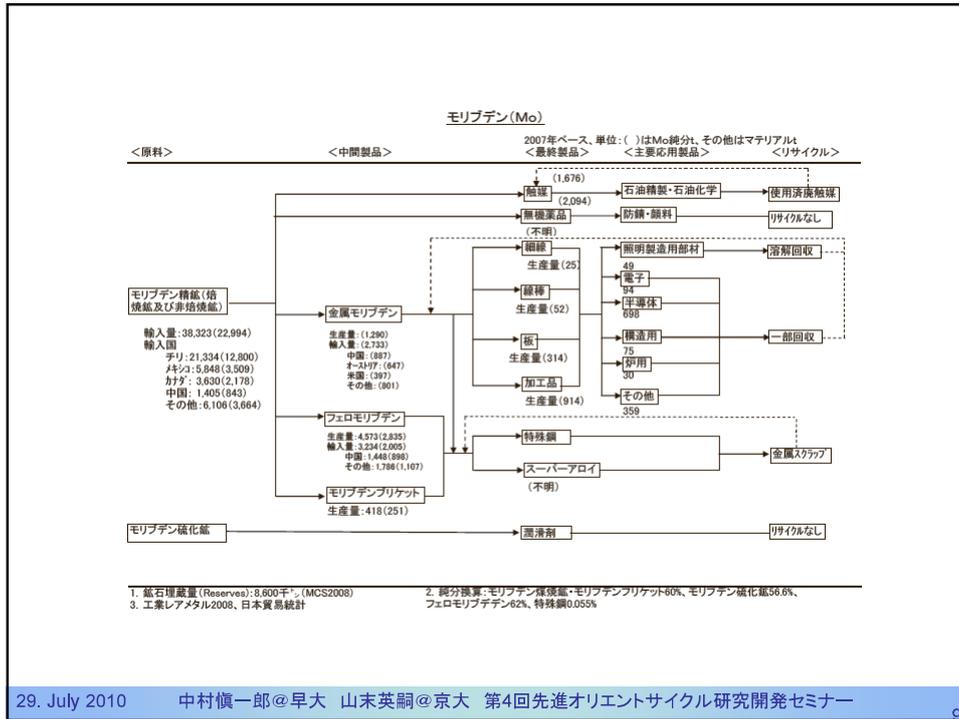




29. July 2010 中村慎一郎@早大 山末英嗣@京大 第4回先進オリエントサイクル研究開発セミナー



29. July 2010 中村慎一郎@早大 山末英嗣@京大 第4回先進オリエントサイクル研究開発セミナー



省エネ機器の普及 => 省エネ？

ジェボンス: 石炭問題 (1865)

William Stanley Jevons

From Wikipedia, the free encyclopedia

William Stanley Jevons (1 September 1840 – 13 August 1882) was a British economist and logician. Irving Fisher described his book *The Theory of Political Economy* (1871) as beginning the mathematical method in economics.^[2] It made the case that economics as a science concerned with quantities is necessarily mathematical.^[3] In so doing, it expounded upon the "final" (marginal) utility theory of value. Jevons' work, along with similar discoveries made by Carl Menger in Vienna (1871) and by Léon Walras in Switzerland (1874), marked the opening of a new period in the history of economic thought. Jevons' contribution to the marginal revolution in economics in the late 19th century established his reputation as a leading political economist and logician of the time.

Jevons broke off his studies of the natural sciences in London in 1854 to work as an assayer in Sydney, where he acquired an interest in political economy. Returning to the UK in 1859, he published *General Mathematical Theory of Political Economy* in 1862, outlining the marginal utility theory of value, and *A Serious Fall in the Value of Gold* in 1863. For Jevons, the utility or value to a consumer of an additional unit of a product is inversely related to the number of units of that product he already owns, at least beyond some critical quantity.

It was for *The Coal Question* (1865), in which he called attention to the gradual exhaustion of the UK's coal supplies, that he received public recognition. The most important of his works on logic and scientific methods is his *Principles of Science* (1874)^[4], as well as *The Theory of Political Economy* (1871) and *The State in Relation to Labour* (1882).

「目指せ！一人，一日，1kgCO2削減」

原子力発電CO₂: 石炭の3%以下, LNGの4%以下

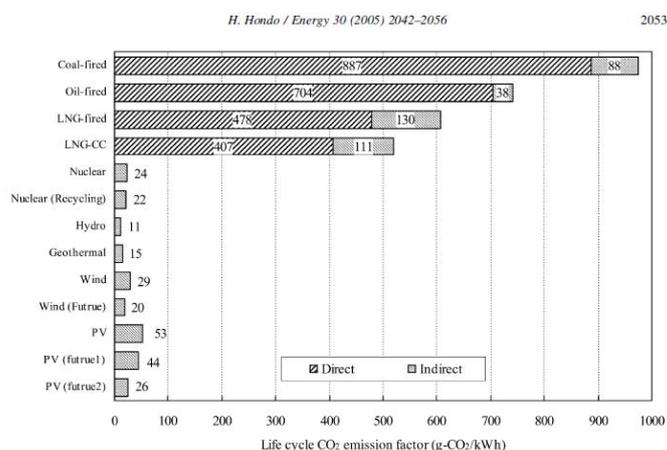


Fig. 4. Life cycle CO₂ emission factors for different types of power generation systems.

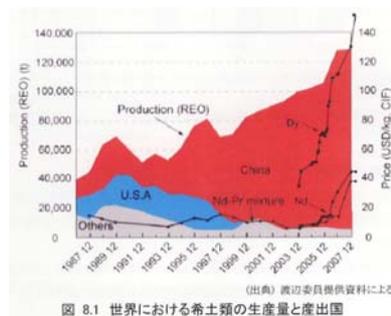
Nd

天然鉍山・都市鉍山・原子力鉍山

天然鉱山

- 生産地が偏在(中国)
- Nd は他の希土類元素と同時に生産:
 - Pr, Ce, Er, La, Eu, Y 等の供給過剰
 - (Bi : Pb の副産物, Pb free ハンダの課題)
- 採掘・生産における環境負荷
 - エネルギー
 - エコリユクサック

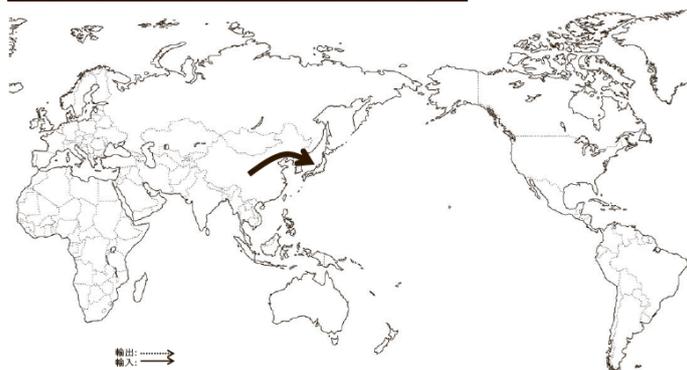
生産地が偏在



生産地が偏在

ネオジウム原料の輸出入(2007)

(本文表3-2)									総計
	韓国	中国	台湾	ASEAN	インド	米国	EU	その他	
輸出	-	-	-	-	-	-	-	-	-
輸入	-	3,620	-	-	-	-	-	-	-



JOGMEC 2009

他の希土類元素と同時に生産： Pr, Ce, Er, La, Eu, Y 等の供給過剰

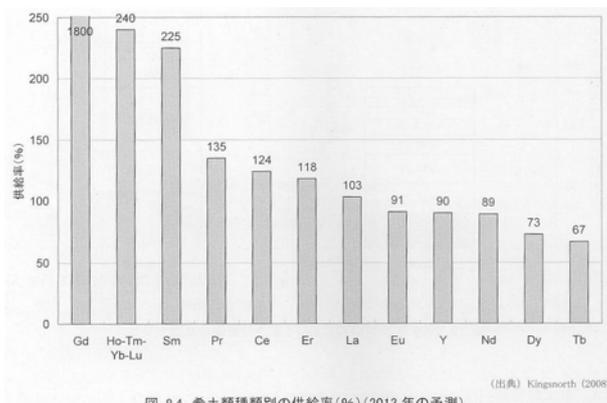


図 8.4 希土類種類の供給率 (%) (2013 年の予測)

(出典) Kingnorth (2008)

CJC 2009

リサイクル:都市鉱山

- 国内: 工程屑は回収
 - 廃酸・残渣(水酸化鉄)処理コストから大半を中国で再生
- 使用済み製品からの分別・選別なし
 - 鉄スクラップへ移行
- 効率的消磁技術開発の必要性
 - 熱消磁以外の効率的消磁技術(逆着磁)

29. July 2010 中村慎一郎@早大 山末英嗣@京大 第4回先進オリエントサイクル研究開発セミナー

19

表 4.4 ネオジム磁石回収見込み量の試算の前提条件¹⁰と試算結果

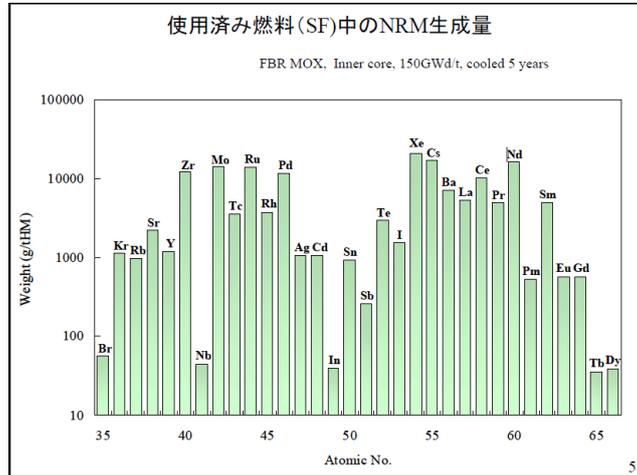
製 品	2015 年の 回収台数 (推定)	ネオジム磁石の 使用量	回収された使用 済製品中のネ オジム磁石量	想定した 平均 使用年数	2015 年に廃棄されるとした 製品の製造年と出典	
ハードディスク 拡散しやすい	50 万台	10 g/台	5 トン	—	2007 年度におけるパソコン 3Rセンターによって回収さ れたパソコンは約 50 万台。 この回収量がこのまま続くと 考えた。	
家電製品	エアコン	320 万台 ¹¹	100~250 g/台	320~800 トン	10 年程度	2004 年度(2005 年が不明 なので、2004 年で援用) (社)日本冷凍空調工業会
	洗濯機	58 万台 ¹²	100~200 g/台	60~120 トン	10 年程度	2005 年 (社)日本電機工業会
ハイブリッド車 (駆動用モータ および発電機)	5 万台 (ただし、 2020 年 には 20 万台)	1~2 kg/台	50 トン (ただし、2020 年 には 200 トン)	15 年程度	2000 年 (財)日本自動車研究所	
携帯電話・PHS 拡散しやすい	640 万台	1~2 g/台	6~12 トン	—	現在のモバイル・リサイク ル・ネットワークによる回収 台数は年間約 640 万台。こ の回収量がこのまま続くと 考えた。	
MRI	120~ 180 台	1.5 t/台	180~270 トン	10~15 年 程度	精密小型モータ市場実態 調査 2008(富士経済)によ ると現在の国内設置台数 は 5800 台で、そのうち 1800 台がネオジム磁石を利用し たMRIであるという。	

CJC 2009

29. July 2010 中村慎一郎@早大 山末英嗣@京大 第4回先進オリエントサイクル研究開発セミナー

20

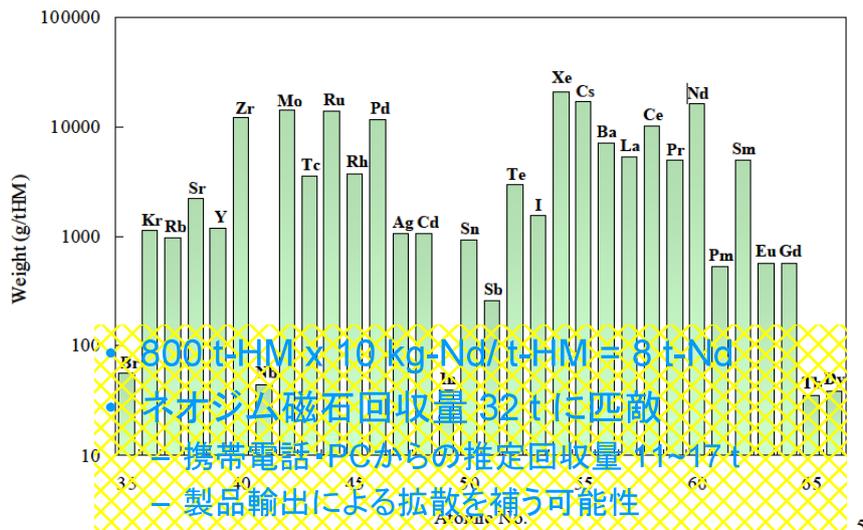
原子力鉱山



小澤先生講演資料:早大2010年1月29日

使用済み燃料(SF)中のNRM生成量

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



都市鉱山 vs. SF鉱山: Nd

都市鉱山

- 空間的に分散
- 労働集約的(収集)
- 技術フロンティア?
- 消磁技術
- せいぜい水平リサイクル, or down-cycling
- 費用: 現状は海外でリサイクル
- 輸出による散逸

SF鉱山

- 空間的に集中
- 装置集約的
- 技術フロンティア: 分離技術
- -
- Up-cycling: 錬金術
- SF処理費用との比較
- -

7. 原子力リサイクル最前線

日本原燃株式会社 理事・企画部部長
吉田 信之

日本原燃の使命は、国内において原子燃料サイクルを確立することであり、このプロジェクトの成否にはエネルギー資源の乏しいわが国の将来がかかっていると言っても過言ではない。また、非核兵器国にあって原子力の平和利用に徹して再処理、MOX加工、ウラン濃縮、廃棄物埋設など原子燃料サイクルに挑戦している民間企業は弊社しか例はなく、厳しい規制と経済性の両立、安全第一の工場運転の成否が世界からも注目されている。

現在、再処理工場は試運転最終工程のアクティブ試験に2006年3月に入ってから以来、主工程の試験は極めて順調に終了した。しかし、高レベル放射性廃液のガラス固化工程で渋滞し、この間、廃液のセル内漏れや低レベル放射性廃棄物の管理問題など種々のトラブルも発生し、竣工が大幅に遅延している。この難関を突破すべく All Japan 体制での基礎的研究や実規模コールド試験などガラス固化工程の再検証を実機の補修工事などと並行して実施している。

ウラン濃縮の新型遠心分離機導入計画、低レベル放射性廃棄物埋設事業の展開なども含めて日本原燃の原子燃料サイクル確立に向けての活動状況を報告する。

8.

第4回先進オリエントサイクル研究開発セミナー
“先進原子力科学が拓く新資源戦略と課題”

提言と展望

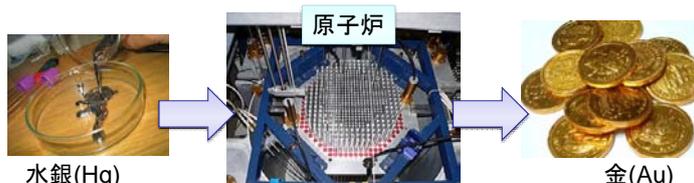
【核変換“原子炉錬金術”の視点】

高木直行
東海大学 原子力工学科

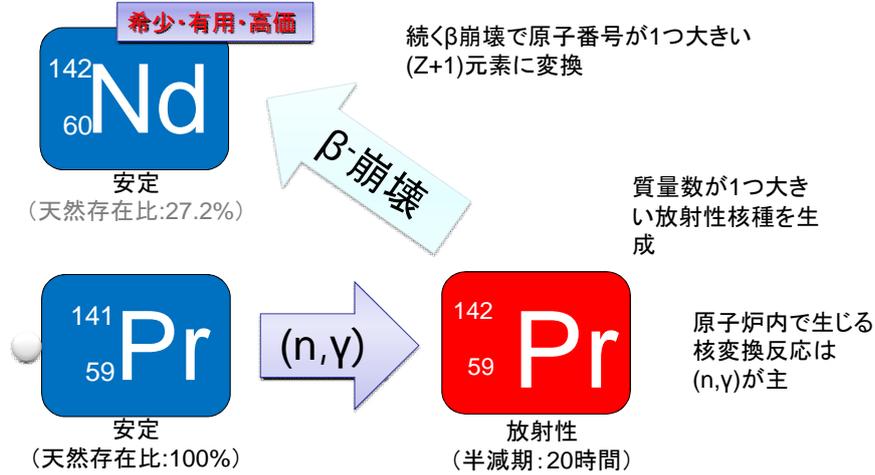
日時;平成22年7月30日(金)13:00-18:10
開催場所;六ヶ所村スワニーホール・大会議室

原子炉(核変換)を利用した 稀少元素製造の可能性

- 原子炉の内部では中性子による核反応により、原子炉運転開始時には存在していなかった新たな核種が随時生成されている。
- 中性子によるこの「物質の核変換」は、いわば「**現代の錬金術**」であり、照射する物質や照射条件を適切に設定することにより、核変換を有用物質製造方法として活用できる可能性がある

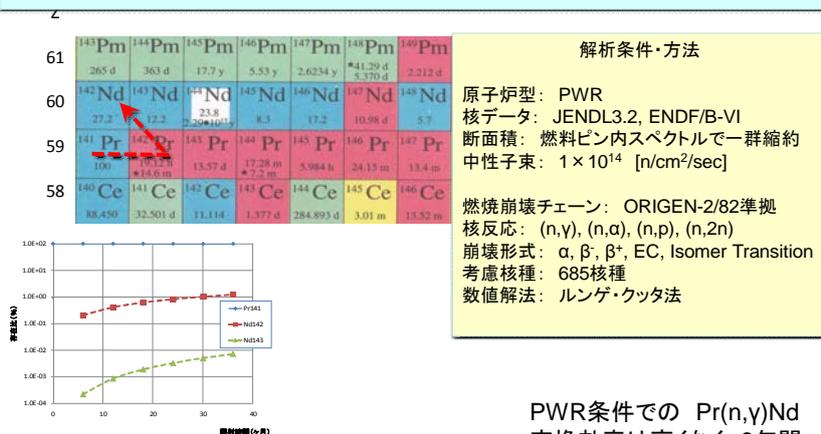


原子炉錬金術の原理 (Pr→Ndの例)



3

生成量評価 (Pr→Ndの例)

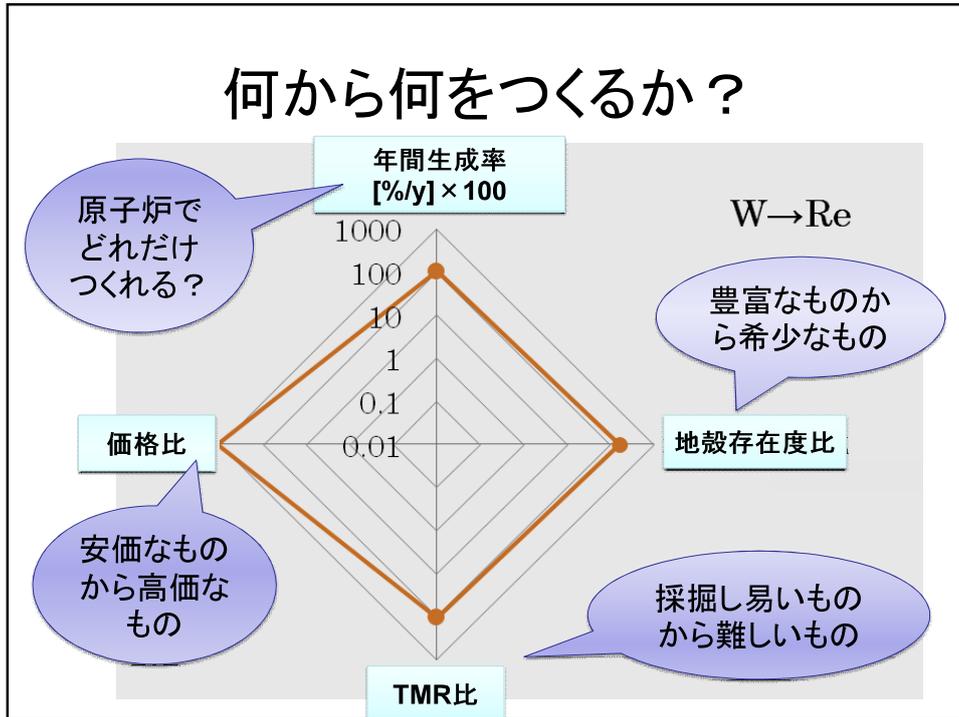


PWR条件での Pr(n,γ)Nd
変換効率は高くなく、3年間
照射で生成率は1%程度

本検討は豊田通商(株)と東海大学の
共同研究として実施したものである。

4

何から何をつくるか？



原子炉錬金術のコスト評価

有用元素生産コスト [円/g]

$$\frac{\text{総経費 (資本費 + 運転費 + 燃料費 + 照射・分離費)} \text{ [円/年]}}{\text{年間元素生産量} \text{ [g/年]}}$$

原子炉錬金術の成立条件

有用元素生産コスト < 相場価格

但し、レアメタルやレアアースなど、資源小国かつ技術立国日本の産業資源確保戦略上重要な意味をもつ元素については、

有用元素生産コスト ≒ 相場価格

でも成立の可能性あり。

照射・分離費の内訳

- ・ターゲット元素原料費
- ・ターゲット加工費
- ・装荷・取出費
- ・冷却保管費
- ・生成元素分離回収費

生産量の決定因子

- ・照射場の中性子束レベル
- ・核変換断面積(スペクトル)
- ・装荷量
- ・装荷取出回数、など

結論

- 原子炉錬金術は、
 - 新たな物質供給源(人工鉱山)として、資源小国である日本の資源確保戦略に寄与する可能性がある。
 - 使用済み燃料からの元素回収に比べ、
 - 混在する元素種類が少なく、
 - 低放射能であるため、
 - 回収の難易度は相対的に低く、
 - 生成元素の種類・量設定の自由度大
- という特徴がある。

9.

TOSHIBA
Leading Innovation >>>

**【分離・利用の視点】からの
コメント**

2010年7月30日

(株)東芝
藤田 玲子

TOSHIBA © TOSHIBA CORPORATION 2010
Leading Innovation >>>

分離(変換)・再利用

第4回先進オリエントサイクル研究開発セミナー
スワニーホール・大会議室、六ヶ所村、青森県
2010年7月30日

分離の課題

技術的(工学的)

原子力レアメタル(白金族元素や希土類元素など)の
分離: 同属金属であるので原理的に難しい
プロセスの確立: 技術開発から装置開発までの技術の継承
コスト: 経済性のあるプロセスが可能か?
二次廃棄物: 発生させないプロセス
→ **自ずと可能なプロセスが限定される***

社会的受容性(社会科学的)

分離のものについては課題は多くない。

*: Masaki OZAWA, Akihiro 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(1), pp1-7, (2008)

TOSHIBA 2/7
Leading Innovation >>>

分離(変換)・再利用

第4回先進オリエントサイクル研究開発セミナー
スワンホール・大会議室、六ヶ所村、青森県
2010年7月30日

変換の課題

技術的(工学的)

長半減期核種を短半減期核種への

変換: 変換ターゲット材の形態(例えば、Cs)

核変換の成立性: 設計可能な炉心は?

変換生成物: 放射性核種の残存は?

保管期間は?

同位体分離の必要性は(例えば、Cs-135とCs-137)?

実際の確認: 確認試験の許認可に時間がかかる

実物での確認は困難: 何で担保する?

シミュレーションコード?

社会的受容性

変換技術の成立性への疑問

TOSHIBA
Leading Innovation >>>

3/7

分離(変換)・再利用

第4回先進オリエントサイクル研究開発セミナー
スワンホール・大会議室、六ヶ所村、青森県
2010年7月30日

再利用の課題*

技術的(工学的)

放射能低減: クリアランスレベルまで低減できるのか?

保管もしくは備蓄: 期間は? 形態は?(例えば、Sr)

放射能の密閉: 非密封で取り扱うための課題はないのか?

社会的受容性(社会科学的)

安全性: 放射能が問題ないことをどうやって担保するか?

安心感: クリアランスレベル以下であること

密閉の確実性

*: 藤井靖彦編, "原子力レアメタル利用の可能性-核燃料サイクルの物質・放射線利用研究専門委員会", 原子力学会誌、投稿中

TOSHIBA
Leading Innovation >>>

4/7

リサイクルの意義

第4回先進オリエントサイクル研究開発セミナー
スワンホール・大会議室、六ヶ所村、青森県
2010年7月30日

- 希少資源の確保

- コスト低減

例：アルミウムのリサイクル*

アルミ缶のリサイクル：ボーキサイドからアルミニウム金属を精錬すると膨大が電気代がかかる。

BNFLのウランのガス拡散法で使用された使用済みアルミ材料はインゴットにしてクリアランスレベル以下であることを確認すると、市場に出している(リサイクルの実例)

*:Wikipedia

TOSHIBA
Leading Innovation >>>

5/7

資源と廃棄物

第4回先進オリエントサイクル研究開発セミナー
スワンホール・大会議室、六ヶ所村、青森県
2010年7月30日

- 廃棄物量低減

- コスト低減

「ジルコニウム廃棄物のリサイクル技術の開発」*

- MOX燃料の被覆管の需要を満たせる

- ジルコニウム廃棄物：

200トン/年(六ヶ所)発生：90%回収できればL1廃棄物発生量は1/10

ただし、再利用先：MOX燃料被覆管材料

L1廃棄物のコーティング材

HLW廃棄物のオーバーパック材

*: 藤田玲子、中村等、春口佳子、高橋陵太、宇都宮一博、佐藤光吉、伊藤靖彦、後藤琢也、寺井隆幸、小川寛、"ジルコニウム廃棄物のリサイクル技術の開発", 日本原子力学会誌, 6(3), pp343-357, (2007)

TOSHIBA
Leading Innovation >>>

6/7

10. 使用済燃料中元素の有効利用の可能性について —燃料サイクルの視点から—

日立GEニュークリア・エナジー株式会社 燃料サイクル部
深澤 哲生

序論

将来の低炭素社会における国内基幹エネルギーとして期待されている原子力発電では、発電後の使用済燃料中のウラン(U)とプルトニウム(Pu)を再処理で回収して核燃料として利用し、残りの元素を安定に固定化して処分する計画である(基本的な燃料サイクル方策)。一方、処分に関わる負担を軽減したり、核燃料以外の目的に利用するため、再処理で特定元素(核種)を分離する研究も進められている。使用済燃料中元素の利用策を概略評価検討した。

検討結果

検討結果を表1に示す。軽水炉使用済燃料(SF)中元素の大部分(約94%)は燃え残りのUで、新たな生成元素ではPuが最も多い(約1%)。これらは核燃料(準国産資源)として再利用するのが資源小国の日本にとって大切である。Pu利用により有限資源であるUの利用効率を数10倍向上できる。マイナーアクチニド(Np,Am,Cm)と一部の核分裂生成物(Tc,I,Sr,Cs等)は、分離変換で高レベル廃棄物処分場低減の可能性はあるが、後者は課題が大きくSr,Csは比較的短寿命なので処分が望ましい。他の核分裂生成物も利用価値(需要に対する生成量)が少なく処分が適切だが、Ru,Rh,Pdは需要の3-15%程度の生成量があり、検討の可能性が残されている。

以上、エネルギーセキュリティの観点でU,Pu利用、他元素処分の燃料サイクルを実現することが基本であり、オプションとして技術課題や費用対効果等をよく見極めた上で、分離変換そして有効利用の研究開発を推進することが重要と考える。

表1 将来の国内軽水炉使用済燃料中元素の利用案

元素	SF *1	需要 *2	有効利用方法、処理方法 *3	主要課題 *4	妥当案 *5
U	1,130	—	①LWR-MOX、②LWR-UO ₂ 、③FBR-U、U/Pu	①余剰U	②→③
Pu	13	—	①LWR-MOX、②FBR-U/Pu	①FBR用Pu確保	②
Np	0.81	少量?	①アイソトープ電池源、②分離変換、③処分	①低需要	②or③
Am	0.55	少量?	①煙探知機、②分離変換、③処分	①低需要、②Cm分離?	②or③
Cm	0.049	少量?	①アイソトープ電池、②分離/変換、③処分	①低需要、②貯蔵/燃料製造	②or③
Tc	1.2	0	①船底塗装?、②分離変換、③処分	①需要なし?、②不溶性残渣	③or②
I	0.37	9,500	①X線造影消毒、②分離変換、③処分	①量不足、②安定化合物	③or②
Se	0.093	200	①太陽光発電電極めっき等、②処分	①量不足	②
Sr	1.4	40,000	①管球ガラス等、②分離/変換、③処分	①量不足、②貯蔵/短寿命	③
Y	0.77	200	①蛍光体等、②処分	①量不足	②
Zr	5.9	10,000	①耐火物、触媒等、②処分	①量不足	②
Mo	5.5	20,000	①特殊鋼材料、②処分	①量不足	②
Ru	3.6	25	①触媒等、②処分	①単離?Ru-106(半減期374d)	②or①
Rh	0.68	25	①触媒等、②処分	①単離?	②or①
Pd	2.2	80	①触媒等、②処分	①単離?Pd-107(半減期6.5E6y)	②or①
Ag	0.11	2,000	①写真感光材料等、②処分	①量不足	②
Sn	0.14	20,000	①ブリキ、はんだ等、②処分	①量不足	②
Sb	0.035	6,000	①難燃助剤等、②処分	①量不足	②
Cs	4.2	50	①触媒等、②線源、③分離変換、④処分	①Cs-137、②単離、③同位体分離	④
Ln	16	14,000	①磁石等、②処分	①量不足	②

*1 将来の軽水炉再処理施設の処理容量を1200t/y、使用済燃料(SF)の平均燃焼度を45GWd/tと想定(単位:t/y)

*2 (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構などのホームページを参照(単位:t/y)

*3 ガラス固化影響排除、管理区域内使用などについては未考慮

*4 共通課題としてコストがあげられる

*5 発表者の個人的考え




第4回先進オリエントサイクル研究開発セミナー
 <提言と展望>

使用済燃料中元素の有効利用の 可能性について

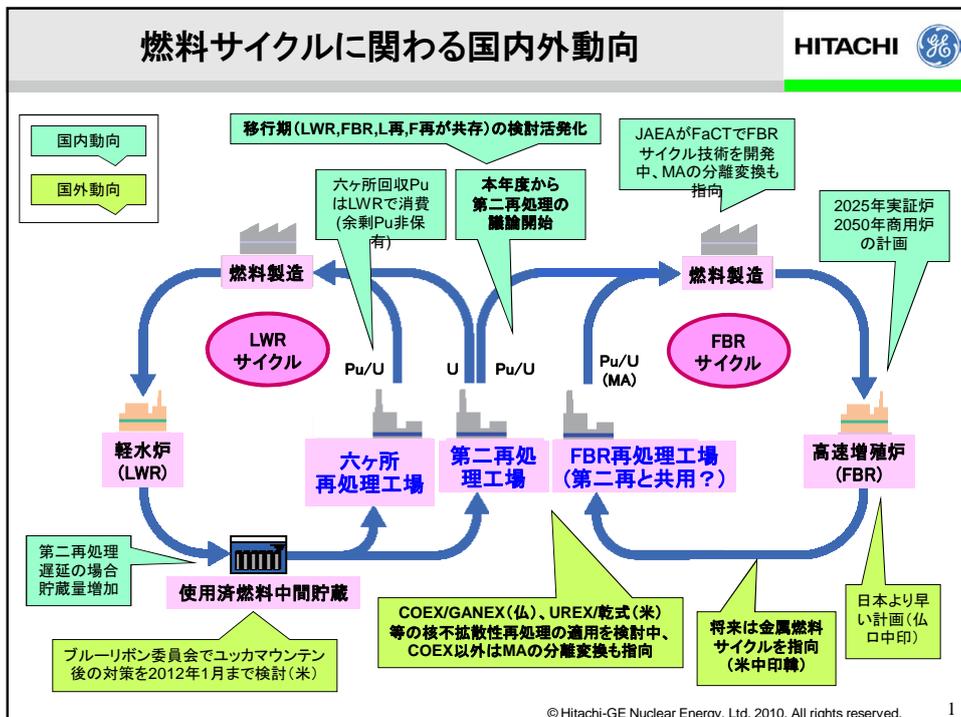
—燃料サイクルの視点から—

2010/07/30

日立GEニュークリア・エナジー株式会社
燃料サイクル部

深澤 哲生

© Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd. 2010. All rights reserved.



使用済燃料中元素の利用案						HITACHI	
元素	L-SF *1	F-SF *2	需要 *3	有効利用方法、処理方法 *4	主要課題 *5	妥当案 *6	
U	1,130	561	—	①LWR-MOX、②LWR-UO ₂ 、③FBR-U、U/Pu	①余剰U	②→③	核燃料
Pu	13	64	—	①LWR-MOX、②FBR-U/Pu	①FBR用Pu確保	②	
Np	0.81	0.2	少量?	①アイソトープ電池源、②分離変換、③処分	①低需要	②or③	分離変換
Am	0.55	0.7	少量?	①煙探知機、②分離変換、③処分	①低需要、②Cm分離?	②or③	or 処分
Cm	0.049	0.056	少量?	①アイソトープ電池、②分離/変換、③処分	①低需要、②貯蔵/燃料製造	②or③	
Tc	1.2	0.81	0	①船底塗装?、②分離変換、③処分	①需要なし?、②不溶性残渣	③or②	処分 or 分離変換
I	0.37	0.36	9,500	①X線造影消毒、②分離変換、③処分	①量不足、②安定化合物	③or②	
Se	0.093	0.056	200	①太陽光発電電極、めっき等、②処分	①量不足	②	
Sr	1.4	0.45	40,000	①管球ガラス等、②分離/変換、③処分	①量不足、②貯蔵/短寿命	③	
Y	0.77	0.26	200	①蛍光体等、②処分	①量不足	②	処分
Zr	5.9	2.6	10,000	①耐火物触媒等、②処分	①量不足	②	
Mo	5.5	7.5	20,000	①特殊鋼材料、②処分	①量不足	②	
Ru	3.6	3	25	①触媒等、②処分	①単離?Ru-106(半減期374d)	②or①	処分 or 有効利用
Rh	0.68	0.91	25	①触媒等、②処分	①単離?	②or①	
Pd	2.2	2.6	80	①触媒等、②処分	①単離?Pd-107(半減期6.5E6y)	②or①	
Ag	0.11	0.26	2,000	①写真感光材料等、②処分	①量不足	②	
Sn	0.14	0.19	20,000	①ブリキはんだ等、②処分	①量不足	②	
Sb	0.035	0.052	6,000	①難燃助剤等、②処分	①量不足	②	処分
Cs	4.2	3.8	50	①触媒等、②線源、③分離変換、④処分	①Cs-137、②単離、③同位体分離	④	
Ln	16	8.8	14,000	①磁石等、②処分	①量不足	②	

*1 将来の軽水炉再処理施設の処理容量を1200t/y、使用済燃料(SF)の平均燃焼度を45GWd/tと想定(単位:t/y)
 *2 将来のFBR再処理施設の処理容量を660t/y、使用済燃料(SF)の炉心・ブランケット平均燃焼度を48.3GWd/tと想定(単位:t/y)
 *3 (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構などのホームページを参照(単位:t/y)
 *4 ガラス固化影響排除、管理区域内使用などについては未考慮
 *5 共通課題としてコストがあげられる
 *6 発表者の個人的考え

© Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd. 2010. All rights reserved. 2

結論		HITACHI	
<p>1. 使用済燃料中のウランとプルトニウムを再処理で分離回収して核燃料として(再)利用し、残りの元素を安全に処分する燃料サイクルが基本であり、その実現に最優先で取り組む必要がある。燃料サイクル(再処理)がなければ、分離変換も有効利用もありえない。</p> <p>2. 処分負担(処分場面積や管理期間)低減のため、マイナーアクチノイド等を再処理で分離回収して核変換する分離変換技術は、基本的な燃料サイクルのオプションとして、費用対効果等の実用性を考慮の上、研究開発を推進すべきであり、定期的なC&Rを受ける必要がある。</p> <p>3. Ru,Rh,Pd等の有効利用は、さらなるオプションとして、技術課題、費用対効果、社会的受容性等をよく見極めた上で、研究開発を推進すべきである。</p>			

© Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd. 2010. All rights reserved. 3

11. 放射性廃棄物、貯蔵の視点

財団法人 原子力研究バックエンド推進センター

森 久起

豊饒な海から陸に這い上がった生物は、熱帯など一部の豊饒な地域を除いて、直ぐに飢餓に直面した。

四季の移り変わりが激しい地域ではなおさらであった。シロクマは雪が降り続く冬は体内にエネルギーとなる脂肪を蓄積し冬眠によって生命をつないできた。百舌は枯れ木に挿し餌をし、リスはねぐらに木の実を蓄えて生命をつないできている。

陸上生物にとって貯蔵は生命を維持し、次世代へ種を引き継ぐために獲得した本能、体質である。人類も陸上生物であるので、飢餓を前提とした体質になっていると言う。

しかし、人類は単に貯蔵するだけではなく、保管という物品を傷つけず価値を保持することを可能とすることによって、より高度な社会システムを構築することができるようになった。

保管と言う概念は多様であり、将来の高い価値を期待して保持すること、継続への担保として保持すること、過去の記録として保持すること、安全確保のために保持することなど様々な方策を可能としてきた。その多様性は、何のために保管するのかという「意図軸」とどの程度の期間保管するかという「時間軸」にて整理すると、保管の意味合いが良く見えてくる。

放射性物質には夫々の核種に特有な半減期と言う物理的性質があり、時間とともに放射能を減じていく性質がある。PCBなどの化学物質はそのままでは何時までたっても性質が変わらないのとは違っており、放射性物質は放射能が高い時点では利用に制約があるものの、放射能が減れば利用が大きく開けてくる可能性を有している。先進オリエントサイクルで着目しているレアメタルやレアアースがこれに相当する。

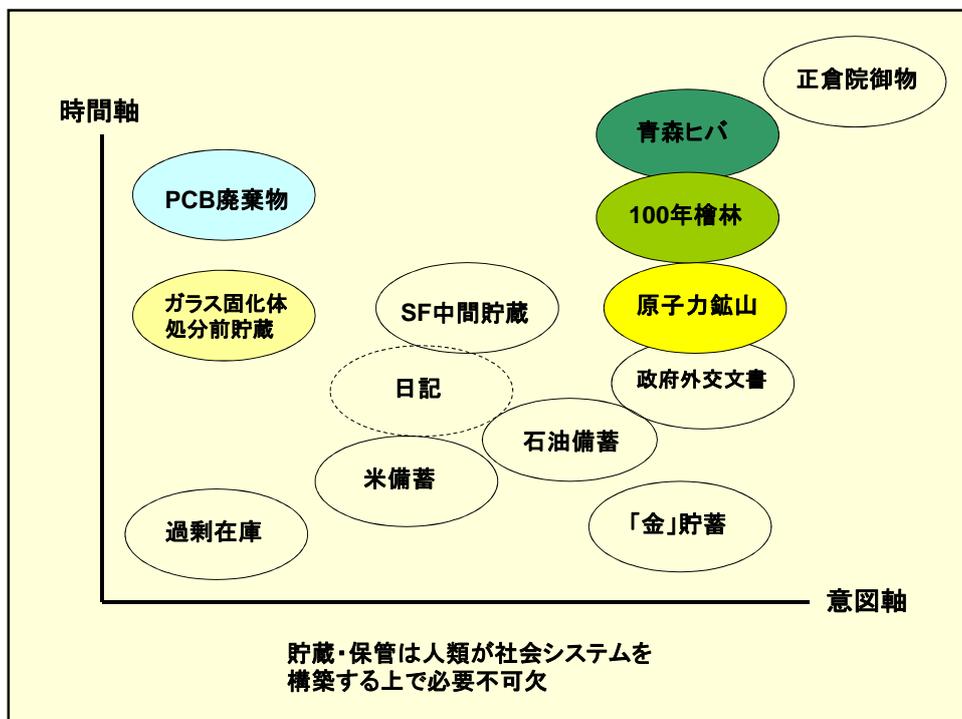
また、低レベル放射性廃棄物の埋設処分場も同じで、極低レベルのものを扱うトレンチ埋設処分場は50年後、低レベルを扱うピット埋設処分場は300年後に開放することができるのも、放射性物質特有の性質を利用しているものである。

使用済燃料中にはレアメタルなどの有用な物質が多く含まれているが、現在の技術では、再処理した後、これらは高レベル廃液に保持され、ガラス固化して地層処分されてしまう。しかし、高レベル廃液から分離し、貯蔵・保管すれば、50年~100年後には原子力鉱山としてレアメタルを産業利用することも可能となってくる。

利用まで 50 年~100 年は非常に長い年月と思われるが、わが国の産業モデル、ビジネスモデルで、50 年~100 年の年月をかけているのは林業である。杉の植林は約 30 年、檜は 100 年である。青森県にあるヒバは自然林であるが 200 年以上と言われている。

「百聞は一見にしかず」と 5 月下旬に三重県紀北町にある大田賀檜林を見学した。山奥深くに、日露戦争(1904 年)の翌年に植林した檜が大切に育てられていた。

この檜林を散策しながら感じたことは、植林をする気持ちになれば、原子力鉱山を作ることにも志し次第であるということだ。勿論、産業であるので、経済性は重要なファクターであるが、燃料サイクル全体にて見れば、原子力鉱山も十分に経済的に見合うものと思われる。



100年檜林

2010年5月22日 三重県紀北町の「大田賀檜林」を見学
面積：約90ha (東京ドーム約20個分の面積)



1905年植林
(1904年 日露戦争)
12万本⇒304本



国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質的量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電流量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量	ルクス	lx		lm/m ²
放射線当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についての、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ³ kg s ⁻²
電荷密度	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ³ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値	
		SI単位	SI単位による値
分	min	1 min=60s	
時	h	1h=60 min=3600 s	
日	d	1 d=24 h=86 400 s	
度	°	1°=(π/180) rad	
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad	
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad	
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²	
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³	
トン	t	1t=10 ³ kg	

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
ファ	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π)A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ) 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

