

パネルディスカッション
&
特別講演

「レアメタルの現状とリサイクルの最新の話題」

2007年11月21日(水)
14:40~16:40
第1会場(1階大会議室101)
つくば国際会議場

廃棄物学会
リサイクルシステム・技術研究部会

第 19 回廃棄物学会研究発表会 リサイクルシステム技術研究部会 小集会

レアメタルの現状とリサイクルの最新の話

日時 2007 年 11 月 21 日 (水) 14:40-16:40

場所 つくば国際会議場 第 1 会場

趣旨

希少金属の備蓄や循環利用は大変重要な国家戦略の一つで、鉄鋼添加材料の備蓄や、高機能材料向けのインジウムターゲットや白金などのリサイクルが行われているが、中国でのレアメタルの輸出制限政策への転換を受け、長期的安定確保への新たな対応が必要となって来ている。本研究会では部会メンバーに加え、企業、学識経験者などの参加を頂き、現状整理とこれからの新しい技術・社会システムの可能性をテーマに、パネル討論会を開催する。

パネリスト (五十音順、敬称略)

佐藤明史 (株)九州テクノリサーチ (部会メンバー)

中村 崇 (東北大学 教授)

本田大作 (株)リサイクル・ワン 取締役

コーディネーター

遠藤小太郎 ((社) 産業環境管理協会) (部会メンバー)

総合司会

稲葉陸太 ((独) 国立環境研究所) (部会メンバー)

次第

1440~1450

開会挨拶 (総合司会)

部会長挨拶 (松藤 敏彦 北海道大学)

ワーキング活動報告 (遠藤 小太郎 (社) 産業環境管理協会)

1450~1530

特別講演

インジウム資源の有効利用 (三井金属(株) 高橋英俊)

インジウムの回収技術 (シャープ(株) 辻口雅人)

1530~1610

パネリストによる発表

人口鉱山構想・リサイクル実証試験 (中村 崇)

レアメタルの国際循環とその課題 (本田大作)

国際循環港構築に向けての現状と課題 (佐藤明史)

1610~1630

パネルディスカッション

1630~1640

会場からの質疑応答

閉会挨拶 (総合司会)

リサイクルシステム技術研究部会 小集会作業メンバーリスト

(敬称略)

氏 名	所 属	担当	WG
松藤敏彦	北海道大学大学院工学研究科	部会長	—
稲葉陸太	(独) 国立環境研究所 循環型社会形成推進・廃棄物研究センター		WG1
佐藤明史	ひびきエコソリューションズ・(株)九州テクノリサーチ		WG1
田崎智宏	(独) 国立環境研究所 循環型社会形成推進・廃棄物研究センター	幹事	WG1★
中石一弘	(株)イーツーエンジニアリング	幹事	WG1
藤井 実	(独) 国立環境研究所 循環型社会形成推進・廃棄物研究センター		WG1
山田芳幸	(株)エックス都市研究所 環境開発本部 循環型社会推進G	幹事	WG1
亀田泰武	クボタ環境エンジニアリング事業本部	幹事	WG2
杉山智	株式会社ヒラテ技研 静岡事業所 技術室 コンサルタントG		WG2
加茂 徹	産業技術総合研究所 つくばセンター西事業所 環境管理技術研究部門吸着分解研究グループ	幹事	WG2
西 隆之	(株)日立製作所 情報・通信グループ 環境推進センタ		WG2
早田輝信	(株)テルム 環境リサイクル本部 技術担当	幹事	WG2
行本正雄	中部大学 工学部機械工学科	幹事長	WG2★

注) ★は各WGのグループ長

WG1：レアメタルと資源・環境対策

WG2：レアメタルのリサイクル技術

ワーキンググループ1

「レアメタルと資源・環境対策」報告

【目次】

1. レアメタルとは	1-1
1.1 レアメタルの定義	
1.2 用途	
1.3 生産・需要データ	
1.4 価格データ	
1.5 マテリアルフロー	
2. レアメタルの資源性・資源枯渇性	1-5
2.1 レアメタル資源の埋蔵量	
2.2 偏在性	
2.3 NEDOの資源リスク評価結果	
2.4 副産物の資源性	
3. 資源セキュリティの確保	1-21
3.1 探鉱開発	
3.2 リサイクル	
3.3 代替材料開発	
3.4 備蓄	
3.5 その他	
4. レアメタルに係る環境問題と物質利用管理	1-28
4.1 人ならびに水生生物への有害性	

4.2	採掘から製錬・精製段階における環境負荷	
4.3	有害物質利用管理のあり方	
5.	国際資源循環に関する国の動向.....	1-31
5.1	経済産業省の動向	
5.2	環境省の動向	
5.3	国土交通省の動向	
6.	バーゼル法の改正とレアメタルの円滑な国際循環のための“システム”提言	1-42
6.1	バーゼル法の改正	
6.2	レアメタルの円滑な国際資源循環のための“システム”提言	

1. レアメタルとは

1.1 レアメタルの定義

どの金属をレアメタルと呼ぶかについては、統一された定義が存在する訳ではない。経済産業省、総合資源エネルギー調査会鉱物分科会、レアメタル対策部会によると、“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である鉱種等を指すものと考えられる”との説明がなされており、表 1-1 に挙げる、31 鉱種（レアアースは 17 鉱種を 1 鉱種として数える）を対象としている。また 1983 年度より、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、バナジウムの 7 種類のレアメタルについて国家備蓄が行われており、民間備蓄分を合わせて国内基準消費量の 60 日分を確保することが目標とされている。本部会では、鉄やアルミなどのベースメタル以外の金属全てを幅広くレアメタルとして調査・検討の対象とした。

表 1-1 レアメタルの特性・用途

元素番号	元素記号	元素名	原子量	族	融点(°C)	密度(g/cm ³)	地殻存在度(%)	用途
3	Li	リチウム	6.941	IA	180.5	0.534	0.0013	電池陽極材、半導体材料
4	Be	ベリリウム	9.012	IIA	1280	1.85	0.00015	ベリリウム-銅合金、X線管の窓 原子炉減速材
5	B	ホウ素	10.811	IIIA	2080	2.37	0.001	脱酸材、合金添加材 半導体ドーピング材
22	Ti	チタン	47.867	IVB	1660	4.50	0.54	航空機用構造材、電解用電極材 化学装置用耐食材
23	V	バナジウム	50.942	VB	1890	6.11	0.023	合金鋼の添加剤、合金 核燃料被覆材
24	Cr	クロム	51.996	VIB	1860	7.19	0.0185	合金、めっき
25	Mn	マンガン	54.938	VIII	1240	7.44	0.14	鋼の脱酸剤、脱硫剤 鋼・アルミの添加元素、合金
27	Co	コバルト	58.933	VIII	1490	8.9	0.0029	磁性合金、高速度鋼、超硬合金
28	Ni	ニッケル	58.693	VIII	1450	8.90	0.0105	ステンレス鋼材、耐食耐熱材 合金、めっき
31	Ga	ガリウム	69.723	IIIA	29.78	5.91	0.0018	化合物半導体、易融合金 半導体添加剤、高温温度計
32	Ge	ゲルマニウム	72.612	IVA	937.4	5.32	0.00016	半導体素子、熱電対、抵抗温度計 歯科用合金
34	Se	セレン	78.963	VIA	217	4.79	0.000005	ガラスの着色、脱色剤 複写機感光体、触媒
37	Rb	ルビジウム	85.468	IA	38.9	1.53	0.0032	
38	Sr	ストロンチウム	87.621	IIA	769	2.54	0.026	
40	Zr	ジルコニウム	91.224	IVB	1850	6.51	0.01	原子炉材料、化学装置用耐食材料 鉄鋼の脱酸剤、脱窒剤、導電材料
41	Nb	ニオブ	92.906	VB	2470	8.56	0.0011	電子部品、化学装置用耐熱合金 超伝導合金、核燃料被覆材
42	Mo	モリブデン	95.941	VIB	2620	10.22	0.0001	特殊鋼材、電球・電子管の材料
46	Pd	パラジウム	106.421	VIII	1550	12.02	1E-07	触媒、電気接点、歯科用材料 装飾品
49	In	インジウム	114.818	IIIA	156.6	7.31	0.000005	化合物半導体、トランジスター 易融合金、透明導電膜
51	Sb	アンチモン	121.76	VA	630.7	6.69	0.00002	蓄電池の電極材、減摩合金 化合物半導体、易融合金
52	Te	テルル	127.603	VIA	449.5	6.24		鉄・非鉄金属の添加剤

元素番号	元素記号	元素名	原子量	族	融点(°C)	密度(g/cm ³)	地殻存在度(%)	用途
55	Cs	セシウム	132.905	IA	28.4	1.87	0.0001	光電管陰極材料、光電子倍増管
56	Ba	バリウム	137.327	IIA	725	3.5	0.025	金属の脱酸剤
72	Hf	ハフニウム	178.492	IVB	2230	13.31	0.0003	原子炉の制御材、電球フィラメント ジェットエンジン部品
73	Ta	タンタル	180.948	VB	2990	16.65	0.0001	電解コンデンサー、電子工業用材料 化学装置用材料、合金添加元素
74	W	タングステン	183.841	VIB	3400	19.3	0.0001	特殊鋼成分、超硬合金、フィラメント 電気接点、X点ターゲット、ヒーター
75	Re	レニウム	186.207	VIIIB	3180	21.02	5E-08	真空管、電球のフィラメント 電気接点、熱電対、触媒
78	Pt	白金	195.078	VIII	1770	21.45		装飾品、熱電対、るつぼ 排気ガス処理用触媒
81	Tl	タリウム	204.383	IIIA	303.5	11.85	0.000036	耐食性合金、易融合金
83	Bi	ビスマス	208.980	VA	271.3	9.75	0.000006	ヒューズ、冶金添加剤 化合物半導体、γ線遮蔽材
21 39 57-71	(RE)	レアアース	-	IIIB				

理化学辞典第5版(岩波書店)、理科年表2006(丸善)より作製

1.2 用途

レアメタルには、他の元素と合金を作り、新たな機能や性能を持つことのできる特徴がある。レアメタルの用途は、図 1-1 に示されるように、耐熱性や耐腐食性などの機能を持つ特殊鋼、液晶、電子部品、磁石、二次電池、超硬工具、排ガス浄化装置など、非常に幅広い。

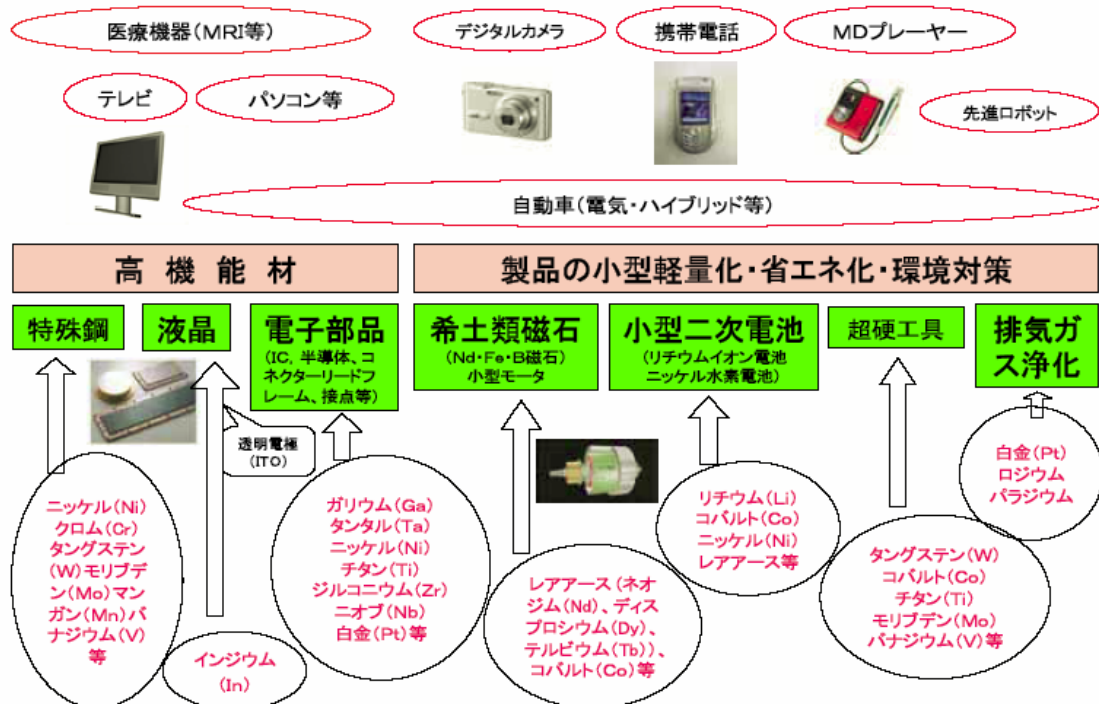


図 1-1 レアメタルの用途

経済産業省・総合資源エネルギー調査会鉱物分科会・レアメタル対策部会（平成 19 年 6 月 11 日）資料より転載

1.3 生産・需要データ

クロム、マンガン、コバルト、タングステン、モリブデン、バナジウムについて、世界の生産量と、日本及び世界の需要量を表 1-2 に示す。レアメタル全体の市場は 2000 年以降急拡大しており、一時的に需要量が生産量を上回る場合もある。日本では自動車や IT などの産業分野において、需要が拡大している。

表 1-2 レアメタル（6 元素）の生産量と需要量の推移

			1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005 (推定値)
クロム (高炭素 フェロクロム)	生産量(千トン)	世界合計	4213	4750	3849	3957	5422	5859	6042
	需要量(千トン)	日本	721	833	777	815	898	939	953
		世界合計	4146	4286	4095	4517	5461	5882	5951
マンガン (マンガン系 合金鉄)	生産量(千トン)	世界合計	7101	7688	7624	8210	9103	10798	10642
	需要量(千トン)	日本	-	-	-	-	763	807	826
		世界合計	-	-	-	-	8956	10084	11100
コバルト (地金)	生産量(千トン)	世界合計	35.1	38.6	40.0	41.2	44.9	46.7	52.5
	需要量(千トン)	日本	7.5	8.7	8.2	9.4	11	12.6	13
		世界合計	31.9	34.7	35.3	35.7	40.2	45	48.8
タングステン	生産量(千トン)	世界合計	44.2	48.2	55	45.1	57.1	56.7	63.1
	需要量(千トン)	日本	5.6	8.0	6.9	6.0	6.0	7.2	7.4
		世界合計	44.2	48.2	55	45.1	57.1	56.7	63.1
モリブデン	生産量(千トン)	世界合計	112.8	118.2	129.9	124.3	131.5	149.7	158.7
	需要量(千トン)	日本	19.1	21.8	23.6	23.6	23.6	27.2	28.6
		世界合計	108.9	117.9	128	128	133.4	142.2	152.2
バナジウム (V2O5)	生産量(千トン)	世界合計	66	78.3	80.6	78.7	71.5	82.3	88.1
	需要量(千トン)	日本	7.7	8.6	8.8	9.5	12.2	9.1	9.5
		世界合計	60.2	65	68.9	70.2	76.9	86	92.1

JOGMEC: 金属資源レポート、レアメタル2006より作製

1.4 価格データ

レアメタルの価格は表 1-3 に示すように、ベースメタルと同様に、急速に上昇している。

表 1-3 ベースメタル、レアメタルの価格の推移

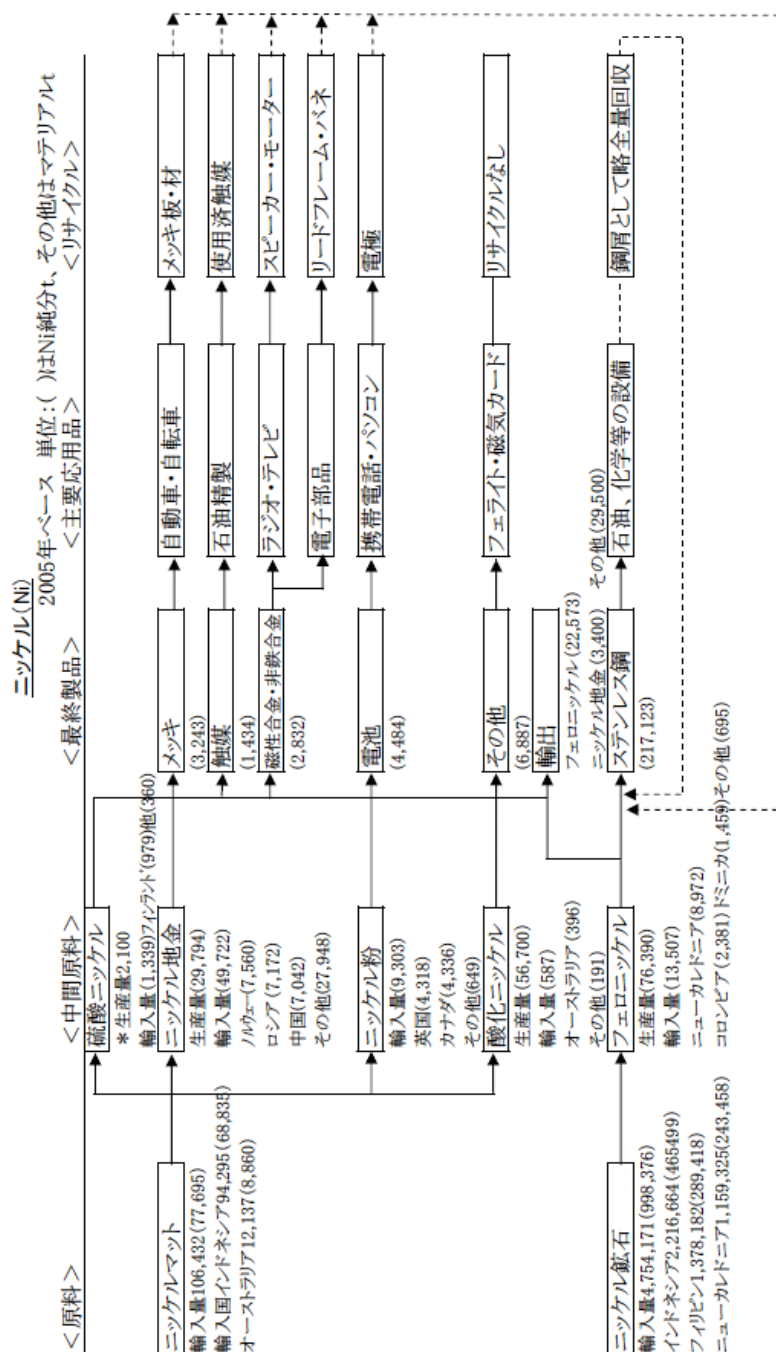
		2002年3月	2007年5月	変化率%
鉄スクラップ	USD/kg	0.0734	0.273	370
アルミ	USD/kg	1.4	2.7	196
銅	USD/kg	1.6	7.4	459
鉛	USD/kg	0.5	2.2	441
インジウム	USD/kg	85	710	835
ニッケル	USD/kg	6.5	52.2	798
レアアース(ネオジウム)	USD/kg	7.3	44.0	603
タングステン(鉱石)	USD/MTU*1	35.3	165	467
レアアース(ジスプロシウム)	USD/kg	34.0	120	353
白金	USD/kg	16518	41466	251

*1 三酸化タングステン10kgを含む鉱石の価格

経済産業省リサイクル推進課: 中央環境審議会第37回循環型社会計画部会
ヒアリング資料(H19.10.1)より作成

1.5 マテリアルフロー

銅、鉛、亜鉛、アルミニウム、金、銀、マグネシウム及びレアメタル31鉱種のマテリアルフローが独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構によりまとめられている。ここでは一例として、ニッケルのマテリアルフローについて図1-2に示す。



2. 換算率: Ni精鉱2.1%、Niマット73%、酸化Ni82.5%、硫酸Ni37.9%、
国内産フェロNi21%、輸入フェロNi28%

1. 鉱石埋蔵量(Reserves): 62百万トン(USGS:MCS 2006)
3. 工業レアメタル、他

図1-2 ニッケルのマテリアルフロー
JOGMEC: 鉱物資源マテリアルフロー2006(平成19年6月)より転載

2. レアメタルの資源性・枯渇性

ここでは、レアメタルの資源性・枯渇性について、各種統計・報告書のデータを収集・整理した。本章では、1987年の鉱業審議会（1962年設置、鉱山部会と石炭部会があった）鉱山部会レアメタル総合対策専門委員会で検討対象となった31鉱種（元素）についての資源性・枯渇性を調査・整理した。

日本でレアメタルの安定供給・備蓄が議論され始めたのは、石油危機直後のことといわれる。日本におけるレアメタルの現状としては、素材産業・電子産業などの幅広い分野でレアメタルを利用する一方、海外からの供給への大きな依存、および供給国の少なさと偏在性などの問題を抱えている。

本章では、1983年から備蓄が実施されている7鉱種（ニッケル、クロム、タングステン、コバルト、モリブデン、マンガン、バナジウム）と、資源エネルギー庁の総合資源エネルギー調査会鉱業分科会・レアメタル対策部会で議論された、注視すべき10鉱種（パラジウム、プラチナ、ニオブ、アンチモン、ジルコニウム、ストロンチウム、希土類、タンタル、ガリウム及びビインジウム）について調べた。図 2-1 に元素周期表におけるレアメタル、備蓄7鉱種、および要注視10鉱種を示す。また、後述する（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構の調査で資源リスクが高いとされた元素、経済産業省による代替材料開発の対象となる3元素も図 2-1 に示した。

1																	18
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15	16	17	18 Ar
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
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43	44	45	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*1	72	73	74 W	75	76	77	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	*2	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
			Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo
	*1	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
	ランタノイド	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
	*2	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	
	アクチノイド	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

- 上段: **123** …備蓄7鉱種(1983年から備蓄開始)
123 …レアメタル31鉱種(1987年, 鉱業審議会鉱山部会レアメタル総合対策専門委員会で検討)
123 …要注視10鉱種(2000年のレアメタル対策分科会報告書で列挙)
 (Sc, Y, ランタノイドは「希土類」として1鉱種扱い)
- 下段: **Ab** …資源リスクが高い元素(2006年, NEDO「各種レアメタルに関するリスク評価…」)
Ab …代替材料開発対象3元素(2007年, 経済産業省「希少金属代替材料開発プロジェクト」)

図 2-1 元素周期表とレアメタル

2.1 レアメタル資源の埋蔵量

資源の分野では、「埋蔵量」にも様々な捉え方や呼び名がある。比較的好く使われるのが「埋蔵鉱量 (reserves)」や「埋蔵鉱量ベース (reserves base)」という言葉である。埋蔵鉱量ベースの定義は「既知鉱物資源量の中で、現在の採掘および生産の操業に関係した、はっきり限定された物理的・化学的最低基準を満たす部分」とされる。埋蔵鉱量の定義は「埋蔵鉱量ベースの中で、それを決めた時点で経済的に採掘または生産され得る部分」とされる。

2.1.1 備蓄7鉱種 (Ni, Cr, W, Co, Mo, Mn, V) の埋蔵量

備蓄7鉱種について、合衆国地理調査 (U.S. Geological Survey: USGS) の報告書¹⁾に示された鉱石生産量、埋蔵鉱量、および埋蔵鉱量ベースのデータを表 2-1 から表 2-7 に示す。データの単位は基本的にトン (metric tons) であるが、一部千トンや百万トン等の単位も示されている。

表 2-1 ニッケル (Ni) の鉱石生産量、埋蔵鉱量、埋蔵鉱量ベース

	(metric tons)		
	Mine production 2005	Reserves	Reserve base
United States	-	-	-
Australia	210,000	22,000,000	27,000,000
Botswana	37,100	490,000	920,000
Brazil	46,000	4,500,000	8,300,000
Canada	196,000	4,900,000	15,000,000
China	71,000	1,100,000	7,600,000
Colombia	72,500	830,000	1,100,000
Cuba	75,000	5,600,000	23,000,000
Dominican Republic	47,000	720,000	1,000,000
Greece	22,100	490,000	900,000
Indonesia	140,000	3,200,000	13,000,000
New Caledonia	122,000	4,400,000	12,000,000
Philippines	22,000	940,000	5,200,000
Russia	315,000	6,600,000	9,200,000
South Africa	41,700	3,700,000	12,000,000
Venezuela	22,000	560,000	630,000
Zimbabwe	9,800	15,000	260,000
Other countries	26,000	2,100,000	5,900,000
World total (rounded)	1,500,000	62,000,000	140,000,000

Reference: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (2006),
Mineral Commodity Summaries 2006

表 2-2 クロム (Cr) の鉍石生産量、埋蔵鉍量、埋蔵鉍量ベース

	(metric tons)		
	Mine production 2005	Reserves	Reserve base
United States	-	-	-
Australia	210,000	22,000,000	27,000,000
Botswana	37,100	490,000	920,000
Brazil	46,000	4,500,000	8,300,000
Canada	196,000	4,900,000	15,000,000
China	71,000	1,100,000	7,600,000
Colombia	72,500	830,000	1,100,000
Cuba	75,000	5,600,000	23,000,000
Dominican Republic	47,000	720,000	1,000,000
Greece	22,100	490,000	900,000
Indonesia	140,000	3,200,000	13,000,000
New Caledonia	122,000	4,400,000	12,000,000
Philippines	22,000	940,000	5,200,000
Russia	315,000	6,600,000	9,200,000
South Africa	41,700	3,700,000	12,000,000
Venezuela	22,000	560,000	630,000
Zimbabwe	9,800	15,000	260,000
Other countries	26,000	2,100,000	5,900,000
World total (rounded)	1,500,000	62,000,000	140,000,000

Reference: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (2006),
Mineral Commodity Summaries 2006

表 2-3 タングステン (W) の鉍石生産量、埋蔵鉍量、埋蔵鉍量ベース

	(metric tons)		
	Mine production 2005	Reserves	Reserve base
United States	-	140,000	200,000
Australia	1,400	10,000	15,000
Bolivia	400	53,000	100,000
Canada	750	260,000	490,000
China	69,000	1,800,000	4,200,000
Korea, North	600	NA	35,000
Portugal	850	25,000	25,000
Russia	3,000	250,000	420,000
Other countries	510	360,000	700,000
World total (rounded)	76,500	2,900,000	6,200,000

Reference: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (2006),
Mineral Commodity Summaries 2006

表 2-4 コバルト (Co) の鉱石生産量、埋蔵鉱量、埋蔵鉱量ベース

	(metric tons)		
	Mine production	Reserves	Reserve base
	2005		
United States	–	NA	860,000
Australia	6,600	1,300,000	1,600,000
Brazil	1,400	35,000	40,000
Canada	5,700	130,000	350,000
Congo (Kinshasa)	16,000	3,400,000	4,700,000
Cuba	3,600	1,000,000	1,800,000
Morocco	1,600	20,000	NA
New Caledonia	1,400	230,000	860,000
Russia	5,000	250,000	350,000
Zambia	9,000	270,000	680,000
Other countries	2,100	200,000	1,500,000
World total (rounded)	52,400	7,000,000	13,000,000

Reference: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (2006),
Mineral Commodity Summaries 2006

表 2-5 モリブデン (Mo) の鉱石生産量、埋蔵鉱量、埋蔵鉱量ベース

	(metric tons)		
	Mine production	Reserves	Reserve base
	2005	(thousand metric tons)	
United States	56900	2,700	5,400
Armenia	2,800	200	400
Canada	9,800	450	910
Chile	45,500	1,100	2,500
China	28,500	3,300	8,300
Iran	1,500	50	140
Kazakhztan	210	130	200
Kyrgyztan	250	100	180
Mexico	3,500	90	230
Mongolia	1,300	30	50
Peru	9,700	140	230
Russia	3,000	240	360
Uzbekistan	500	60	150
World total (rounded)	163,000	8,600	19,000

Reference: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (2006),
Mineral Commodity Summaries 2006

表 2-6 マンガン (Mn) の鉱石生産量、埋蔵鉱量、埋蔵鉱量ベース

	(metric tons)		
	Mine production 2005	Reserves	Reserve base
United States	-	-	-
Australia	1,340	68,000	130,000
Brazil	1,300	23,000	51,000
China	900	40,000	100,000
Gabon	1,300	20,000	160,000
India	640	93,000	160,000
Mexico	136	4,000	9,000
South Africa	2,200	32,000	4,000,000
Ukraine	720	140,000	520,000
Other countries	1,250	Small	Small
World total (rounded)	9,790	430,000	5,200,000

Reference: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (2006),
Mineral Commodity Summaries 2006

表 2-7 バナジウム (V) の鉱石生産量、埋蔵鉱量、埋蔵鉱量ベース

	(metric tons)		
	Mine production 2005	Reserves	Reserve base
United States	-	45,000	4,000,000
China	14,500	5,000,000	14,000,000
Russia	9,000	5,000,000	7,000,000
South Africa	18,000	3,000,000	12,000,000
Other countries	1,000	NA	1,000,000
World total (rounded)	42,500	13,000,000	38,000,000

Reference: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (2006),
Mineral Commodity Summaries 2006

2.1.2 要注視 10 鉱種 (Pd, Pt, Nb, Sb, Zr, Sr, 希土類, Ta, Ga, In) の埋蔵量

要注視 10 鉱種について、備蓄 7 鉱種と同様に、合衆国地理調査 (U. S. Geological Survey: USGS) の報告書¹⁾に示された、鉱石生産量、埋蔵鉱量、および埋蔵鉱量ベースのデータを表 2-8 から表 2-16 に示す。備蓄 7 鉱種と同様に、データの単位は基本的にトン (metric tons) であるが、一部千トンや百万トン等の単位も示されている。なお、同報告書ではガリウム (Ga) に関する鉱石生産量等のデータは示されていない。その理由として同報告書では「Data on world production of primary gallium are unavailable because data on the output of the few producers are considered to be proprietary.」と記述されている。つまり、生産量のデータを財産とみなして管理するガリウム鉱石生産者がほとんどいないようである。日本の総合資源エネルギー調査会鉱業分科会、レアメタル対策部会の中間報告²⁾でも「生産企業が少数のため、生産量のデータは公表されていない」と記述されている。

表 2-8 パラジウム (Pd) の鉱石生産量、埋蔵鉱量、埋蔵鉱量ベース

	(metric tons)		
	Mine production	Reserves	Reserve base
	2005	Platinum Group Metals	
United States	14,200	900,000	2,000,000
Canada	13,500	310,000	390,000
Russia	96,000	6,200,000	6,600,000
South Africa	81,700	63,000,000	70,000,000
Other countries	10,400	800,000	850,000
World total (rounded)	216,000	71,000,000	80,000,000

Reference: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (2006),
Mineral Commodity Summaries 2006

表 2-9 プラチナ (Pt) の鉱石生産量、埋蔵鉱量、埋蔵鉱量ベース

	(metric tons)		
	Mine production	Reserves	Reserve base
	2005	Platinum Group Metals	
United States	4,200	900,000	2,000,000
Canada	9,000	310,000	390,000
Russia	27,000	6,200,000	6,600,000
South Africa	170,000	63,000,000	70,000,000
Other countries	7,600	800,000	850,000
World total (rounded)	218,000	71,000,000	80,000,000

Reference: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (2006),
Mineral Commodity Summaries 2006

表 2-10 ニオブ (Nb) の鉱石生産量、埋蔵鉱量、埋蔵鉱量ベース

	(metric tons)		
	Mine production	Reserves	Reserve base
	2005		
United States	–	–	Negligible
Australia	200	29,000	NA
Brazil	29,900	4,300,000	5,200,000
Canada	3,400	110,000	NA
Congo (Kinshasa)	52	NA	NA
Ethiopia	6	NA	NA
Mozambique	110	NA	NA
Namibia	1	NA	NA
Nigeria	170	NA	NA
Rwanda	63	NA	NA
Uganda	2	NA	NA
Other countries	NA	NA	NA
World total (rounded)	33,900	4,400,000	5,200,000

Reference: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (2006),
Mineral Commodity Summaries 2006

表 2-11 アンチモン (Sb) の鉱石生産量、埋蔵鉱量、埋蔵鉱量ベース

	(metric tons)		
	Mine production 2005	Reserves	Reserve base
United States	-	80,000	90,000
Bolivia	2,500	310,000	320,000
China	105,000	790,000	2,400,000
Russia (recoverable)		350,000	370,000
South Africa	5,300	44,000	200,000
Tajikistan	1,800	50,000	150,000
Other countries	2,200	150,000	330,000
World total (rounded)	117,000	1,800,000	3,900,000

Reference: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (2006),
Mineral Commodity Summaries 2006

表 2-12 ジルコニウム (Zr) の鉱石生産量、埋蔵鉱量、埋蔵鉱量ベース

	(metric tons)		
	Mine production 2005 (thousand metric tons)	Reserves (million metric tons, ZrO ₂)	Reserve base
United States	W	3.4	5.7
Australia	450	9.1	30
Brazil	35	2.2	4.6
China	15	0.5	3.7
India	20	3.4	3.8
South Africa	305	14	14
Ukraine	35	4.0	6.0
Other countries	10	0.9	4.1
World total (rounded)	870	38	72

Reference: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (2006),
Mineral Commodity Summaries 2006

表 2-13 ストロンチウム (Sr) の鉱石生産量、埋蔵鉱量、埋蔵鉱量ベース

	(metric tons)		
	Mine production 2005	Reserves	Reserve base
United States	-	-	1,400,000
All other		6,800,000	11,000,000
Argentina	6,700		
China	140,000		
Iran	7,000		
Mexico	143,000		
Morocco	2,700		
Pakistan	2,000		
Spain	160,000		
Tajikistan	NA		
Turkey	60,000		
World total (rounded)	520,000	6,800,000	12,000,000

Reference: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (2006),
Mineral Commodity Summaries 2006

表 2-14 希土類の鉱石生産量、埋蔵鉱量、埋蔵鉱量ベース

	(metric tons)		
	Mine production 2005	Reserves	Reserve base
United States	–	13,000,000	14,000,000
Australia	–	5,200,000	5,800,000
China	98,000	27,000,000	89,000,000
Commonwealth of Indep	2,000	19,000,000	21,000,000
India	2,700	1,100,000	1,300,000
Malaysia	250	30,000	35,000
Thailand	2,200	NA	NA
Other countries	–	22,000,000	23,000,000
World total (rounded)	105,000	88,000,000	150,000,000

Reference: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (2006),
Mineral Commodity Summaries 2006

表 2-15 タンタル (Ta) の鉱石生産量、埋蔵鉱量、埋蔵鉱量ベース

	(metric tons)		
	Mine production 2005	Reserves	Reserve base
United States	–	–	Negligible
Australia	1,200	40,000	80,000
Brazil	215	NA	73,000
Burundi	6	NA	NA
Canada	65	3,000	NA
Congo (Kinshasa)	60	NA	NA
Ethiopia	35	NA	NA
Mozambique	260	NA	NA
Namibia	5	NA	NA
Nigeria	5	NA	NA
Rwanda	40	NA	NA
Uganda	1	NA	NA
Zimbabwe	15	NA	NA
Other countries	NA	NA	NA
World total (rounded)	1,910	43,000	150,000

Reference: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (2006),
Mineral Commodity Summaries 2006

表 2-16 インジウム (In) の鉱石生産量、埋蔵鉱量、埋蔵鉱量ベース

	(metric tons)		
	Mine production	Reserves	Reserve base
	2005		
United States	–	300	600
Belgium	30	()	()
Canada	50	1,000	2,000
China	250	280	1,300
France	10	()	()
Germany	9	NA	NA
Japan	70	100	150
Peru	6	100	150
Russia	15	200	300
Other countries	15	800	1,500
World total (rounded)	455	2,800	6,000

Reference: U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey (2006),
Mineral Commodity Summaries 2006

<ガリウム (Ga) の鉱石生産量、埋蔵鉱量、埋蔵鉱量ベース>

(データ無し)

※前述したように、合衆国地理調査の報告書¹⁾では、ガリウム鉱石の生産量、埋蔵鉱量、埋蔵鉱量ベースのデータが、鉱石生産者の事情により入手できない、と述べられている。しかしながら、以下のような推定を示している。

- In 2005, world primary production was estimated to be about 63 metric tons.
- China, Germany, Japan, and Ukraine were the leading producers.
- Countries with smaller output were Hungary, Russia, and Slovakia.
- World primary gallium production capacity in 2005 was estimated to be 160 metric tons; refinery capacity, 140 tons; and recycling capacity, 68 tons.

以上で述べた、レアメタルの埋蔵鉱量に関するデータをまとめて図 2-2 に示す。図 2-2 には備蓄 7 鉱種、要注視 10 鉱種のレアメタルの他、ベースメタル (鉄: Fe, アルミ: Al, 銅: Cu) や貴金属 (金: Au, 銀: Ag) の埋蔵鉱量も参考として示している。図 2-2 に示すように、レアメタルは埋蔵鉱量が概ね 10 億 t 以下である。特にインジウム (In) は最小であり、次いでタンタル (Ta) である。タンタルは金 (Au) の埋蔵鉱量と同程度である。これらレアメタルに比べ、ベースメタルである鉄の埋蔵鉱量は 3 桁ほども上回る。アルミに関してはボーキサイトの鉱量を示している。白金族金属 (PGMs) は埋蔵鉱量が比較的大きいが、白金元素の含有率は非常に低いことなどに注意しなければならない。

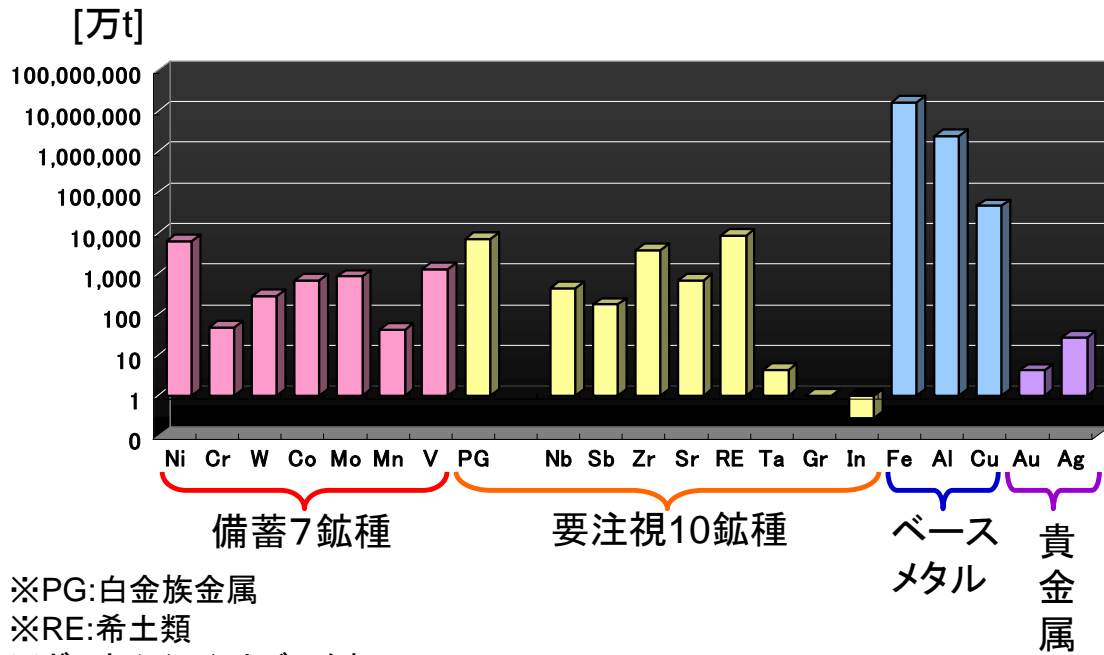


図 2-2 レアメタル、ベースメタル、貴金属の埋蔵鉱量

2.2 偏在性

2.1 で示したように、レアメタルの鉱石生産量、埋蔵鉱量、および埋蔵鉱量ベースはいずれも特定の国に偏っていることがわかる。総合資源エネルギー調査会鉱業分科会、レアメタル対策部会の中間報告²⁾では、各鉱種の鉱石生産国および対日輸出国の偏在性について考察が述べられている。本節では、この考察を抜粋・整理して紹介する。

2.2.1 備蓄7鉱種 (Ni, Cr, W, Co, Mo, Mn, V) の偏在性

レアメタル対策部会の報告²⁾における、備蓄7鉱種の偏在性に関する記述を抜粋・整理したものを表 2-17 に示す。

表 2-17 レアメタルの偏在性（備蓄 7 鉱種）

鉱種	元素記号	地域偏在性	具体的内容
ニッケル	Ni	高い	・対日輸出国上位 5 カ国比率が 1999 年と比較して上昇（2004 年）。
クロム	Cr	高い	・欧州及び日本のフェロクロムメーカーが国際競争力を喪失し、自国内生産から撤退。 ・コスト競争力ある南アフリカ（55%）、カザフスタン（14%）などによる寡占化が進行。 ・主要生産国及び対日輸出国の上位 5 カ国比率とも 1999 年と比較して上昇（2004 年）。
タングステン	W	極めて高い	・中国の生産量が世界の 79% を占める。 ・中国から日本への輸入量は総輸入量の 74%。
コバルト	Co	高い	・対日輸出国上位 5 カ国比率が 1999 年と比較して上昇（2004 年時点）。 ・生産国上位 5 カ国のシェアは減少。
モリブデン	Mo	高い	・生産国上位 5 カ国比率が 1999 年と比較して微増（2004 年）。 ・対日輸出国上位 5 カ国比率が 1999 年と比較して減少（2004 年）。 ・対日輸出における 2 位の中国のシェア拡大。
マンガン	Mn	高い	・対日輸出国上位 3 カ国（南アフリカ、中国及び豪州）シェアは約 90%。
バナジウム	V	極めて高い	・生産国上位 3 カ国（中国、南アフリカ及びロシア）シェアは 99%。 ・対日輸出国上位 5 カ国のシェアは 96%。

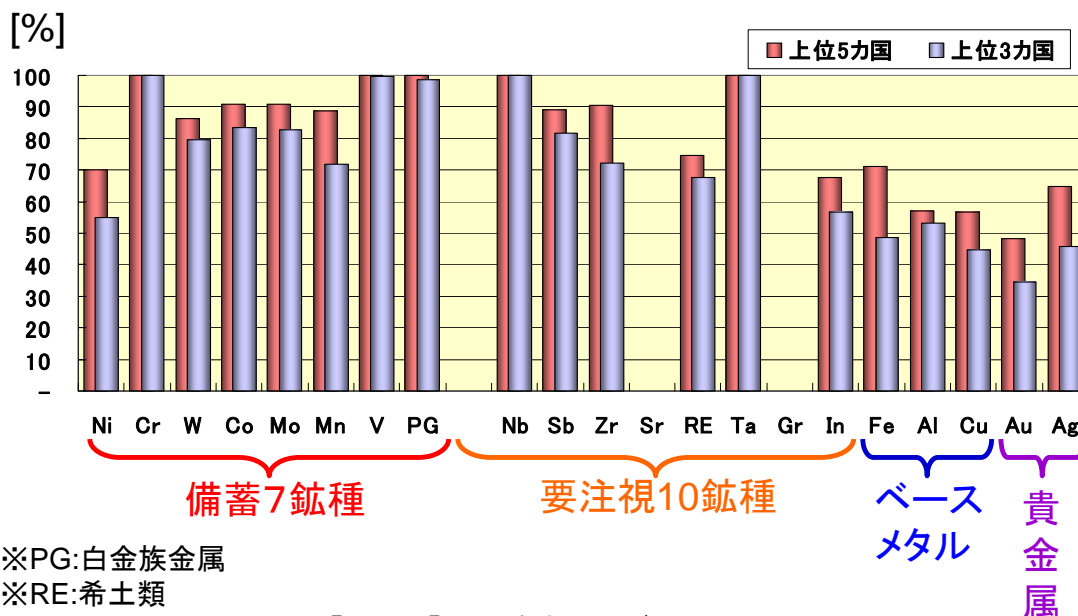
2.2.2 要注視 10 鉱種（Pd, Pt, Nb, Sb, Zr, Sr, 希土類, Ta, Ga, In）の偏在性

備蓄 7 鉱種同様、レアメタル対策部会の報告²⁾における、要注視 10 鉱種の偏在性に関する記述を抜粋・整理したものを表 2-18 に示す。

表 2-18 レアメタルの偏在性（要注視 10 鉱種）

鉱種	元素記号	供給偏在性	具体的内容
パラジウム	Pd	中間的	・南アフリカ及びロシアに偏在（世界生産量の約 8 割（2002 年））。
プラチナ	Pt	特に高い	・南アフリカに偏在（世界生産量の約 7 割（2002 年））。
ニオブ	Nb	特に高い	・ブラジルに偏在（世界生産量の約 9 割（2002 年））。
アンチモン	Sb	特に高い	・中国に偏在（世界生産量の約 8 割（2002 年））。
ジルコニウム	Zr	比較的低い	・豪州及び南アフリカに偏在（世界生産量の約 7 割（2002 年））。
ストロンチウム	Sr	比較的低い	・スペイン及びメキシコに偏在（世界生産量の約 8 割（2002 年））。
希土類	-	特に高い	・中国に偏在（世界生産量の約 9 割（2002 年））。
タンタル	Ta	比較的低い	・豪州及びブラジルに偏在（世界生産量の約 8 割（2002 年））。
ガリウム	Ga	比較的低い	・生産企業が少数のため、生産量のデータは公表されていない。
インジウム	In	中間的	・大きな偏りはないが、主に中国及びフランスでの生産量が多い。

以上では、レアメタルの偏在性に関して定性的に述べた。ここで、2.1 で示したレアメタルの埋蔵鉱量のデータをもとに、埋蔵鉱量上位国の集中度を求め、これを図 2-3 に示した。



※PG:白金族金属
 ※RE:希土類
 ※ストロンチウム(Sr)は「米国」「他国全部」のデータのみ
 ※ガリウム(Gr)はデータ無し

図 2-3 レアメタルの偏在性（埋蔵鉱量上位国の集中度）

図 2-3 に示すように、レアメタルのほとんどは、埋蔵鉱量が上位 3 カ国で 70%以上占められている。また、上位 5 カ国では 90%近いものも多い。これに対し、ベースメタルでは上位 3 カ国の集中度が 50%程度、貴金属でも金などは 30%程度である。

2.3 NEDO の資源リスク評価結果

2006 年に独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）がレアメタルの資源リスクに関する評価方法やその結果を報告している³⁾(以下「NEDO 報告書」と呼ぶ)。本節ではその内容を抜粋して紹介する。

NEDO 報告書では、「...、国においてもレアメタル備蓄制度を実施しているが、省エネルギー対策の観点からも 3R 技術開発の推進が重要である」とし、「レアメタル 3R 技術開発に関する調査」の第一段階として、下記 3 点を目的とした調査が実施されている。

- ・レアメタル 36 元素のリスク評価を行いリスクの高い元素群を選ぶこと
- ・リスクの高い元素群から重要元素を抽出すること
- ・抽出した重要元素について需給の現状と課題を整理すること

NEDO 報告書に示された調査内容を以下に抜粋した。

①基本コンセプト

- ・リスクを数値で評価すること
- ・推測や恣意を排除すること
- ・リスクの変化を再評価できる仕組みとすること

②リスクの数値評価が可能な項目、及び評価に用いる過去10年分の基礎データを整理

③基礎データと評価基準から、全36元素、12項目のリスクを数値化

(重み付け...供給・価格・需要リスク各25%、リサイクル20%、潜在リスク5%)

④13元素群を対象に、カントリーリスク及び将来の需要動向を考察、重要3元素を選定

⑤重要3元素について、需給の現状と課題を整理

上記内容における③のリスク数値化に関して、備蓄7鉱種の結果を表2-19、要注視10鉱種の結果を表2-20に示す。

表2-19 レアメタルの資源リスク評価（備蓄7鉱種）

鉱種	記号	最終評価						一次評価					
		合計	供給	価格	需要	リサイクル	潜在	合計	供給	価格	需要	リサイクル	潜在
ニッケル	Ni	13	3	7	1	2	1	12	4	5	1	1	1
クロム	Cr	14	2	7	3	2	1	13	3	5	3	1	1
タンクステン	W	18	5	5	5	2	0	19	8	4	6	1	0
コバルト	Co	15	1	4	6	4	0	13	1	3	7	2	0
モリブデン	Mo	15	3	7	3	2	0	14	5	5	3	1	0
マンガン	Mn	17	3	7	4	2	1	17	5	5	5	1	1
バナジウム	V	14	1	7	4	2	0	12	1	5	5	1	0

参考:独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2006),
平成17年度「各種レアメタルに関するリスク評価及び重要元素に関する需給の現状と課題」

表2-20 レアメタルの資源リスク評価（要注視10鉱種）

鉱種	記号	最終評価						一次評価					
		合計	供給	価格	需要	リサイクル	潜在	合計	供給	価格	需要	リサイクル	潜在
パラジウム	Pd	12	1	7	2	2	0	10	2	5	2	1	0
プラチナ	Pt	17	3	8	4	2	0	16	4	6	5	1	0
ニオブ	Nb	15	6	1	4	4	0	16	9	1	4	2	0
アンチモン	Sb	15	5	4	0	4	2	16	8	3	0	2	2
ジルコニウム	Zr	14	3	5	0	6	0	11	4	4	0	3	0
ストロンチウム	Sr	12	2	3	3	4	0	10	3	2	3	2	0
希土類	-	19	4	4	4	6	0	17	6	3	5	3	0
タンタル	Ta	23	4	5	7	6	0	21	6	4	8	3	0
ガリウム	Gr	9	0*		3	6	0	6	0*		3	3	0
インジウム	In	18	3	4	5	6	0	16	4	3	6	3	0

参考:独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2006),
平成17年度「各種レアメタルに関するリスク評価及び重要元素に関する需給の現状と課題」

一次評価の結果から最終評価を行うための重み付け係数を表2-21に示す。

表 2-21 資源リスク評価の重み付け

重み付け	合計	供給	価格	需要	リサイクル	潜在
①一次評価満点	32	12	6	9	3	2
②一次配点比率(%)	100	38	19	28	9	6
③重み付け(%)	100	25	25	25	20	5
④補正係数(③/②)		0.67	1.33	0.89	2.13	0.8

参考:独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2006),
平成17年度「各種レアメタルに関するリスク評価及び重要元素に関する需給の現状と課題」

以上の結果から、備蓄7鉱種、要注視10鉱種の中では、タンタル、希土類、タングステン、インジウム、プラチナ、マンガンの順でリスクが高いことが分かる。

また、NEDO 報告書での最終的な評価結果から抽出されたリスクの高い元素を図 2-4 に示す。図中、黒地に白文字で示されるのがリスクが高い元素である。

1																	18			
1 H	2														13	14	15	16	17	2 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	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	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	Sn	Sb	Te	I	Xe			
55	56	*1	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86			
Cs	Ba	*1	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	*2	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo			
		*1	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
		ランタノイド	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
		*2	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
		アクチノイド	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

図 2-4 資源リスクが高いレアメタル

2.4 副産物の資源性

NEDO 報告書の資源リスク評価における、一次評価のリサイクルの評点を表 2-22 に示す。この評点を用いると、ジルコニウム、希土類、タンタル、ガリウム、インジウムの評点が3点である。これらは希少性が特に高く、備蓄やリサイクルが積極的に実施されているものと思われる。

表 2-22 リサイクルの評点

評価項目	評点	評価基準
備蓄の有無	1	国家備蓄なし
	0	国家備蓄あり
リサイクルの状況	2	リサイクルされていない
	1	一部リサイクルされている
	0	マテリアルリサイクルが行われている

参考:独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2006),
平成17年度「各種レアメタルに関するリスク評価及び重要元素に関する需給の現状と課題」

(引用文献)

- 1) U. S. Department of Interior and U. S. Geological Survey (2006), Material Commodity Summaries 2002, United States Government Printing Office, Washington
- 2) 総合資源エネルギー調査会鉱業分科会 レアメタル対策部会(2004), 総合資源エネルギー調査会鉱業分科会 レアメタル対策部会 -中間報告-
- 3) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2006), 平成 17 年度「各種レアメタルに関するリスク評価及び重要元素に関する需給の現状と課題」

付表 2-1 備蓄 7 鉱種選定基礎

元素名		原子番号	元素記号	希少度	重要28元素	レアメタル31鉱種	供給構造脆弱16鉱種	我が国備蓄目標量	(参考)米国防略備蓄目標量
※1				※2	※3	※4	※5	※6(☆純分)	※7
リチウム		3	Li	32 △	C	○			
ベリリウム		4	Be	47 △		○			45.3MT
ホウ素		5	B	37 △	A	○			
マグネシウム		12	Mg	8					
アルミニウム		13	Al	3					
ケイ素		14	Si	2	C	○	○	△	
チタン		22	Ti	9	C	○	○	△	○
バナジウム	○	23	V	19 △	A	○	○	フェロ 916MT	
クロム	○	24	Cr	21 △	A	○	○	フェロ 135,504MT	メタル3,185MT
マンガン	○	25	Mn	12 △	A	○	○	フェロ 61,690MT	メタル189,669MT
コバルト	○	27	Co	30 △	A	○	○	358MT☆	○
ニッケル	○	28	Ni	23 △	C	○	○	27,864MT☆	
銅	○	29	Cu	26 △					
亜鉛		30	Zn	24 △					○
ガリウム		31	Ga	35 △	B	○			
ゲルマニウム		32	Ge	54 △	C	○	○	▽	○
ヒ素		33	As	52 △	B				
セレン		34	Se	69 ○	B	○			
ルビジウム		37	Rb	22 △		○			
ストロンチウム	○	38	Sr	15 △	C	○	○	◇	
ジルコニウム		40	Zr	18 △	A	○			
ニオブ	○	41	Nb	34 △	A	○	○	◇	○
モリブデン	○	42	Mo	53 △	A	○	○	酸化物 2,530MT	
パラジウム	○	46	Pd	71 ○	A	○	○	◇	342g
銀		47	Ag	68 ○					○
カドミウム		48	Cd	63 ○					○
インジウム		49	In	66 ○	B	○			
スズ		50	Sn	49 △					○
アンチモン	○	51	Sb	64 ○		○	○	◇	○
テルル		52	Te	72 ○	B	○			
セシウム		55	Cs	45 △		○			
バリウム		56	Ba	14 △	C	○			
ランタノイド		57~71	(RE)	25 △	A	○			
ハフニウム		72	Hf	44 △	A	○			
タンタル	○	73	Ta	50 △	△	○	○	□	54,534kg
タングステン	○	74	W	55 △	C	○	○	精鉱827MT	○
レニウム		75	Re	76 ○					
イリジウム		77	Ir	78 ○	A	○	○	□	781,942g
白金	○	78	Pt	73 ○	A				○
金		79	Au	75 ○	C				
水銀		80	Hg	67 ○					○
タリウム		81	Tl	62 ○		○			
鉛		82	Pb	36 △					○
ビスマス		83	Bi	65 ○	B	○			

- (注) ※1 1981年通商産業省非鉄鉱物資源安定供給確保策検討会において取り上げられた46鉱種からメタルではない螢石、アスベスト、燐の3鉱種を除き、イリジウムを加えた44鉱種に相当する元素名。この中で経済安全保障の観点から政府として何らかの対策が必要とされるもの14鉱種(○印)
- ※2 数字は地殻の元素存在度順位(科学技術庁資源調査会報告第100号, 1986. 4)
無印: 1~11位(地殻中存在度0.1%以上)で99.275%を占める
△: 希少元素、12~57位(0.0001%以上0.1%未満)
○: 超希少元素、58位~(0.0001%未満)
- ※3 先端科学技術を支える材料の主成分で資源が偏在するもの(科学技術庁資源調査会報告第100号, 1986. 4)
A: 長期的には資源確保に困難が伴う可能性のあるもの(13)
B: 副産物として得られる元素で、我が国の生産・消費シェアの大きいもの(6)
C: その他(9)
- ※4 1987年鉱業審議会鉱山部会レアメタル総合対策専門委員会の検討対象
- ※5 1982年4月産業構造審議会経済安全保障問題特別小委員会の指摘した「供給構造脆弱」な鉱種
△資源量豊富、▽副産物回収、□代替可能、◇供給不安国への依存度小
- ※6 第61回鉱業審議会鉱山部会(2000.12.20)
国防国家備蓄センターが2000.9.30現在備蓄している金属。目標値(99.10.5発効)を持つものはその数量、目標0であるが、備蓄されている金属には○が付してある。全て目標以上の在庫を持っている。(米国会への戦略・重要物資報告書、国防総省、2001.1.16)
- ※7 (注)網掛けの元素はレアメタル備蓄対象鉱種

出典: 社団法人特殊金属備蓄協会 ウェブサイト
http://www.tokubikyo.or.jp/7syu.htm

3. 資源セキュリティの確保

資源セキュリティ確保のためには、国内資源に乏しく輸入に依存している状況下において、多面的・総合的アプローチを戦略的に展開する必要がある。具体的には、中長期的な安定確保のための方策として以下の方策がある。

- ① 探鉱開発の推進
- ② リサイクル推進
- ③ 代替材料開発

一方、上記の中長期的方策に対し、鉱山ストライキや事故など短期的な供給障害に備える視点から、「備蓄」による対応が図られている。

以下に、各方策・対応の概要について記述する。

なお、記述の内容は、下記の文献を基に作成した。

- ・「今後のレアメタルの安定供給対策について（案）」（平成 19 年 6 月 11 日）総合資源エネルギー調査会鉱業分科会レアメタル対策部会
- ・「総合資源エネルギー調査会鉱業分科会レアメタル対策部会－中間報告－」（平成 16 年 7 月 28 日）総合資源エネルギー調査会鉱業分科会レアメタル対策部会
- ・「非鉄金属資源の安定供給確保に向けた戦略〈報告書〉」（平成 18 年 6 月）資源エネルギー戦略研究会

3.1 探鉱開発

3.1.1 位置づけ

探鉱開発は、海外権益を確保することで可能となるが、その意義及び位置づけとして以下の事項が挙げられ、レアメタルの安定供給確保に当たり、極めて重要な事項として位置づけられる。

- ① 生産される資源に係る権益を直接取得することで、長期的かつ安定的な資源の確保が可能となる。
- ② 海外資源メジャー等との共同事業を進めることで、鉱山操業等に関するノウハウの取得が可能となる。
- ③ 資源国への直接投資であり、資源生産量の拡大を通じて相手国との相互依存関係の構築を可能とする。

3.1.2 現状と課題

海外における探鉱開発事業は、探鉱開始から開発、生産に至るまでに最低でも10年以上の長期間を要するものであることに加え、対象地域の政治リスク等、様々なリスクを伴う。特に、近年においては、以下に示す状況から資源権益確保を巡る環境は厳しくなりつつある。

- a) 探査技術の進歩にも関わらず探鉱が成功し開発・生産に至る可能性は数%程度。
- b) 鉱床の奥地化や深部化、低品位化、開発の大型化等により、探鉱開発におけるリスクが増大
- c) 海外資源メジャーは、資金力の拡大を背景に独力で資源開発に取り組む傾向を強め

ているほか、鉍石等の売却先として中国市場への指向を強めていることから、日本企業との連携を行う可能性は減少している。

- d) 中国、インド等の経済成長により、これらの国が新たな資源輸入国として台頭し、資源確保に向けた戦略的な活動を強化しつつある。
- e) 最近の資源価格の高騰の結果、資源国における鉍業課税の強化や資源ナショナリズムの動きが顕在化しつつある。

上記のような状況に対し、我が国企業による海外探鉍開発が円滑に実施されていくために、以下の取組みが特に重要であるとの認識されている。

表3-1 海外探鉍開発の現状に対応した課題

重要な取組み	現状	今後の対応（課題）
(ア) リスクの高い探鉍開発案件への対応	<p>①海外資源メジャーとの提携による優良案件への参画の機会を模索してきた。</p> <p>②アフリカ等における探鉍開発プロジェクトは、治安面、インフラ面、その他の投資環境の問題があり、探鉍開発が進展して来なかった。</p> <p>③探鉍開発に係るリスクは基本的に民間企業が負う。</p>	<p>①海外資源ジュニア（探鉍専門会社）とのネットワークの構築による探査事業への参入や、リスクの高い探鉍事業の積極的な展開にも取り組む。</p> <p>②アフリカへの積極的取組み。アフリカは地質条件上、燃料電池の触媒に使われるプラチナ等、将来の我が国経済にとって極めて重要な役割を持つ鉍種の賦存が期待される。</p> <p>③探鉍開発に伴うリスクが高まる中で、公的な支援機関による適切なサポートの下で、民間では負担し切れない、あるいは、国がリスクの一部を負担することで、民間企業における探鉍開発への参画や事業活動がより積極的かつ安定的になるような支援のあり方を検討する必要がある。</p>
(イ) 探鉍開発に資する技術の確保	<p>近年の探鉍開発案件では、鉍石品位が低下傾向にある。</p>	<p>技術開発課題につき、関係機関による取組みが必要である。我が国が新たな技術の確立によって他国に対する優位性を確保できれば、こうした技術を我が国の強みとして活用し、資源開発権益の獲得能力の強化につなげていくことが可能となる。</p>
(ウ) 資源偏在の著しい鉍種への対応	<p>レアメタルの中でも、特に、レアアース、タングステン、インジウム等は、中国に著しく偏在しているとともに、中国国内における消費量拡大が見込まれている。</p>	<p>供給源の多様化の観点から、中国以外の資源国における新たな供給源の確保に向けて、最大限の努力を行うことが必要である。ただし、探鉍開発事業の実施に係わるリスク評価は、相当の困難が伴うものと推測されるため、関係機関が、鉍床地質学の新たな知見を踏まえつつ、新たな探鉍開発の候補地点において、対象鉍種に係る賦存可能性調査を行う必要がある。</p>

前表以外に、資源国との関係強化のための多面的・総合的な取組みの強化として、以下の支援並びに改善が行われている。

表3-2 資源国との関係強化のための取組

支援改善策	(ア) 資源国の探鉱開発の推進に資する支援	(イ) 資源国による貿易制限や投資環境の改善
具体的取組	<ul style="list-style-type: none"> ○ ODA 等の活用による鉱業セクターへの支援 ○ JOGMECによる権益確保の働きかけ、国営鉱山会社との連携強化等 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 資源国との政策対話の推進 ○ EPA/FTA交渉の活用 ○ APEC 等のマルチの会合の活用等

3.2 リサイクル

3.2.1 位置づけ

鉱物資源は、製造工程で生じる副産物（工程くずなど）や使用済製品から物質を抽出して再生利用することが原理的には可能である。このため、レアメタルについても、新原料を補完する供給手段として、リサイクルを推進することが重要であると位置づけられる。具体的には、以下の方策が推進されている。

- ① 使用済製品からのリサイクル
- ② 製造工程における「工程くず」の発生抑制及び再生利用

3.2.2 リサイクル推進の現状と課題

レアメタルのリサイクルは、希少性からも国内でリサイクルされているケースが多い一方で、国内外におけるリサイクルコストや能力の差等の理由から「工程くず」や「使用済み」製品が海外へ輸出されるケースも多くある。これらのレアメタルは、そのまま廃棄されたり、リサイクルされた場合でも日本国内に還流するケースは限定されている。こうしたレアメタルについては、国内で適切にリサイクルするか、海外でリサイクルされる場合も再生資源として我が国向けに安定的に供給されるように、回収ルートの整備や回収量確保、経済性のあるリサイクル技術の確立等が必要である。

また、レアメタル等の有用金属を高品位に含有する「使用済み」製品に関しては、その回収・リサイクルを促進するため、有用金属に関する情報提供の方策について検討する必要がある。さらに、製品や部品における有用金属の使用合理化や易リサイクル設計の促進等についても検討が必要である。

以下に、レアメタルを主原料として用いる製品別のリサイクル現状と課題と、原料として使用されるレアメタルが多種類に及び単一鉱種の視点では十分に捉えることができない触媒、特殊鋼に係るリサイクルの現状の課題を各々まとめた。

表3-3 レアメタルを主原料として用いる製品別のリサイクル現状と課題

レアメタル (製品)	「使用済み」製品からのリサイクル	「工程くず」のリサイクル
レアアース (ネオジム鉄ボロン磁石)	<p>【現状】</p> <p>ネオジム磁石の「使用済み」製品中のレアアースの回収は、磁石単体で行われておらず、また、他の金属くずと併せてリサイクルされている。</p> <p>〈⇒課題〉</p> <p>以下に示す技術開発・高度化ならびにシステム化が課題</p> <p>(i) 製品からの分離・剥離技術、(ii) 表面メッキ層の除去技術、(iii) スラグを含むレアアース金属の固体粉碎技術</p> <p>(iv) 粉体固化技術等の要素技術</p>	<p>【現状1】</p> <p>ネオジム鉄ボロン磁石製造に投入される合金原料の35%程度が「工程くず」としてリサイクルされる。</p> <p>〈⇒課題1〉</p> <p>歩留まり向上等による「工程くず」の発生抑制</p> <p>【現状2】</p> <p>「工程くず」のうち、国内における処理能力を超える分は海外へ輸出されている。</p> <p>〈⇒課題2〉</p> <p>国内におけるリサイクル能力の増強も含め、経済性のあるリサイクルプロセスの開発・整備</p>
タングステン (超硬工具)	<p>【現状】</p> <p>リサイクル設備の処理能力の問題やリサイクルコストの問題から、国内でのリサイクルは進展しておらず、「使用済み」製品の約75%が中国、ドイツ等に輸出されていると推定される。</p> <p>〈課題〉</p> <p>国内で「使用済み」超硬工具のリサイクル拡大を図るための回収ルート整備と回収量の確保が課題。すなわち、より高度で経済性のあるリサイクルプロセスの開発・整備等が課題。</p>	<p>【現状】</p> <p>超硬工具の製造段階における「工程くず」については、製造原料の約10%が工程くずとして排出され、「工程くず」は国内タングステンカーバイトメーカーに超硬工具用途等としてリサイクルされている。</p> <p>〈課題〉</p> <p>なし</p>
インジウム (液晶パネル)	<p>【現状】</p> <p>液晶パネルの製造に係る使用済みITOターゲット材(ターゲットに使用されるインジウム量の70%程度)については、海外輸出分を含めてリサイクルが進展している。また、「使用済み」液晶パネルに含有されるインジウムは極めて少量(パネル製造工程に投入されるインジウムの3%程度)である。</p> <p>〈⇒課題〉</p> <p>インジウムの回収率向上、リサイクルの効果・効率性の検討や液晶パネルからのインジウム抽出コストの低減を検討することが必要。</p>	<p>【現状】</p> <p>ITOターゲット製造プロセスでは相当量の「工程くず」が発生している。</p> <p>〈⇒課題〉</p> <p>「工程くず」の発生抑制が課題。</p>
コバルト リチウムイオン電池	<p>【現状】</p> <p>電池正極材料や電池製造段階における「工程くず」や、資源有効利用促進法に基づき回収された「使用済み」二次電池は、磁性材料としてリサイクルされている。</p> <p>〈⇒課題〉</p> <p>再度電池材料としてリサイクルするためには、リサイクル制度に基づく更なる回収率向上、官民の協力を通じた、コバルトの高純度回収技術の開発の検討が課題。</p>	

表3-4 触媒、特殊鋼の原料レアメタルの用途別のリサイクル現状と課題

用途	「使用済み」製品からのリサイクル	「工程くず」のリサイクル
触媒	<p>【現状】</p> <p>国内で発生した「使用済み」触媒は、国内においてリサイクルされている。海外で発生した「使用済み」触媒についても技術的には国内でリサイクル可能であるが、バーゼル条約の規制対象となった場合、円滑な輸入が出来ないといった事例も見られる。</p> <p>〈⇒課題〉</p> <p>海外からの「使用済み」触媒の輸入拡大に向けた対応が課題。</p>	<p>【現状】</p> <p>触媒製造において「工程くず」はほとんど発生しない。</p> <p>〈⇒課題〉</p> <p>なし</p>
特殊鋼	<p>【現状】</p> <p>「使用済み」製品中のレアメタル含有部品（特殊鋼）については、レアメタル含有量が僅かであること、正確な含有情報が把握されていないこと等の理由により、レアメタルとしてのリサイクルはなされていない。</p> <p>〈⇒課題〉</p> <p>レアメタルの有効利用の観点から、レアメタル含有部品（特殊鋼）のリサイクルにおいては、きめ細かな分別による品質確保が課題。</p>	<p>【現状】</p> <p>特殊鋼の製造時に発生する「工程くず」は、ほぼ100%リサイクルされている。</p> <p>〈⇒課題〉</p> <p>なし</p>

3.3 代替材料開発

3.3.1 位置づけ

レアメタルは、その特殊な機能的特性から製造業の競争力の源として必要不可欠なものであるとともに供給制約が極めて高いため、その代替材料開発は、需給緩和ひいては安定供給の確保、更に、今後のマテリアル・サイエンスの発展にも貢献するものとして重要である。

3.3.2 代替材料開発の現状と課題

代替材料開発の取組みは、材料使用量原単位の低減に係る取組みとともに、民間企業において、自社製品の製造コスト低減のため、日常的な研究開発活動の一環として進められている。

そのような中、インジウム、レアアース、タングステンのようにレアメタル特有の特殊な機能的特性を満たす画期的な材料の開発が求められるケースでは、代替材料の開発において原理解明レベルからの抜本的な基盤研究が求められ、国主導による推進が必要である。このため、国としては、平成19年度から開始された「希少金属代替材料開発プロジェクト」において、社会動向及び目標となる製品・サービスを整理した「導入シナリオ」、要素技術や周辺技術の種類・性能等の目標を整理した「研究開発ロードマップ」を策定している。今後は、これらのロードマップに基づいたプロジェクトの着実な推進が課題であり、このような国家プロジェクトの推進をもとに、民間企業における応用開発を促していくことが重要である。

3.4 備蓄

3.4.1 位置づけ

レアメタルの備蓄は、短期的な供給途絶リスクへの対応を目的に、1983年に官民の備蓄の組み合わせによる制度として創設された。制度創設以来、とくに代替性が乏しく供給国の偏在が著しい7鉱種（ニッケル、クロム、タングステン、コバルト、モリブデン、マンガン、パナジウム）を対象鉱種と位置づけ運営されてきた。

3.4.2 備蓄制度の概要と今後の対策

レアメタルの備蓄は、短期的な供給途絶リスクへの対応を目的に官民共同で、法律により制度化され管理運営されている。以下に備蓄制度の概要と今後の対策をまとめた。

表 3-5 備蓄制度の概要と今後の対策

	現行制度の概要	今後のレアメタルの安定供給対策について（案）※
備蓄対象鉱種	7 鉱種（ニッケル、クロム、タングステン、コバルト、モリブデン、マンガン、パナジウム）	引き続き現在の7 鉱種とする。 （レアアース、インジウム、プラチナについては、備蓄に適さない鉱種とし対象を見送る）
備蓄目標	60 日	引き続き現在の60 日とする。 ただし、ニッケル、クロム、マンガンの3 鉱種は、供給体制の実情、海外鉱山開発の進展等を踏まえ備蓄数量の削減が可能な鉱種と位置づけ、需給動向、価格動向を見つづ機動的な売却を進める。
官民割合	官：民＝7：3	引き続き現在の7：3を原則とする。
基準消費量	備蓄目標設定時の直近の4 年間における平均消費量	クロム、モリブデン、マンガン、パナジウムは、過去4 年間における国内消費量が現行の基準消費量と大きく乖離してきたため、平成19 年度以降の基準消費量は、 <u>直近10 年間の平均消費量</u> とすることが適当
備蓄目標期間	5 年間	引き続き現在の5 年間とする。 （当面は平成19 年度から平成23 年度の5 年間とすることが適当）
国家備蓄の運営 供給障害時の最後の手段	緊急時放出 高騰時放出 平常時放出	緊急時放出 平常時放出（高騰時放出と平常時放出の区分が不明確なため統合）
民間備蓄 緊急時の初期段階での対応手段	在庫の外数として国内消費量の18 日分または9 日分を保有	現行制度の機動性の高い放出体制を維持するとともに、国家備蓄放出に至る期間の主要生産活動の停滞回避の観点からも引き続き、維持すべき

※総合資源エネルギー調査会鉱業分科会レアメタル対策部会平成19年6月11日作成による

下線部；変更点

3.4.3 廃棄物の備蓄

上記で述べた備蓄は新規に用いられるレアメタルの備蓄であるが、廃棄物に含まれるレアメタルを備蓄することも考えることができる。廃棄物に含まれるレアメタルのうち将来的に供給が不足する、ないしは金属価格が高騰するものを選別・保管しておき、時期をみてリサイクルするというものである。このような検討は、例えば、東北大学の中村崇教授らの R to S 研究会などで行われている。また、有用性が高いものが含まれている特定の廃棄物種のみを特定の埋立地に埋め立てて必要なときにリサイクルするというアイデアも同種の対策といえる。

廃棄物の備蓄は技術的には可能であるが、制度的にはいくつかの課題がある。まず、廃棄物処理法のもとでは manifests の回付期限である 3 ヶ月以上の廃棄物の保管は違法行為となる。また、仮に例外的に廃棄物の備蓄を認めた場合には、不適正保管をどのように防止するかという難問があり、備蓄と称した投棄を増加させることになりかねない。それから、備蓄運営主体が倒産した場合はどうするのか、備蓄していた廃棄物が想定していた期間よりも長期間有価物にならない場合など、資金管理上の問題も残る。

3.5 その他

3.5.1 統計の整備

資源セキュリティの確保のためには、実態に対応した需給統計の整備が不可欠である。近年のレアメタルの国内需給は、輸入形態の変化やIT産業、自動車産業など新たな消費分野が拡大している状況である。このような中、レアメタルの需給構造に即した生産から消費までの実態を把握するためには、統計調査の拡充を検討する必要がある。そのためには、まずレアメタルの需給動向の実態を把握できるような統計調査の体制整備を検討することが必要とされている。

3.5.2 人材育成等

レアメタルの探鉱開発やリサイクルの促進を図るためには、必要な専門知識や技術をもった専門家・技術者の育成・確保が必要である。このため、以下に示すような各機関による取組が必要とされている。

表3-6 関係機関において必要とされている人材育成等の取組

関係機関	(独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構	(財) 国際資源大学校
取組	情報収集	国内技術者に対する研修の実施・拡充

4. レアメタルに係る環境問題と物質利用管理

レアメタルのなかには、それ自体が有害な金属であるものがあるとともに、レアメタルの採掘・選鉱・製錬などのプロセスにおいて環境負荷を発生させている。ここでは、このような環境問題上の負の側面について述べる。

4.1 人ならびに水生生物への有害性

レアメタルのなかには、環境基準値等が定められているものがある。これを表 1-4-1 に示す。典型的なものとしては、水銀、鉛、カドミウムがある。その一方で、表 1-4-1 の右側に示したように、毒性データが存在し、かつ毒性が高いものが必ずしも規制の対象になっているわけではないことが分かる。多くのレアメタルに対する人ならびに水生生物への毒性データを集め、水質環境基準と同様の意味を有する水質環境管理濃度に換算した値を表 1-4-2 に示す。未規制ではあるが、鉛の基準値 (0.01mg/L) と同等の値を有するレアメタルが少なくないことが分かる。

EU の RoHS 指令に代表されるように、製品中の有害金属などの利用を削減するというこれまでの規制は特定によく知られた有害金属だけを対象としてきたが、今後はレアメタルにも対象が拡大することは十分に考えられるため、レアメタルの利用にあたっては、レアメタルの有害性を十分に評価した上で利用することが求められる。

4.2 採掘から製錬・精製段階における環境負荷

図 4-1 は、鉄と白金の既採掘量とその際に採掘された鉱石量の比較結果である。これより、白金のようなレアメタルは金属使用量としては少ないものの、その採掘においては鉄並みの量の鉱石を採掘していることが分かる。つまり、採掘、選鉱、製錬・精製といったプロセスにおいて、レアメタルはベースメタルと同等の環境負荷が発生させている可能性があるため、この点にも注目しておく必要がある。

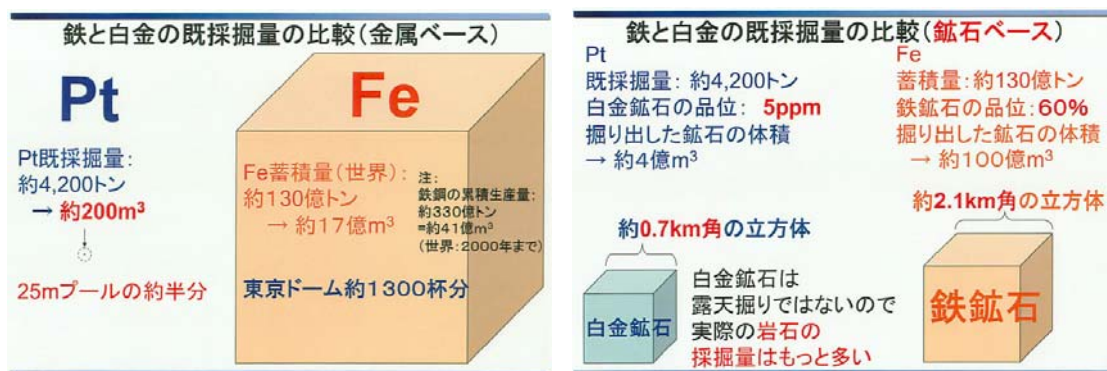


図 4-1 鉄と白金の既採掘量とその際に採掘された鉱石量の比較
(東京大学生産研究所 岡部徹准教授の講演資料より)

金属材料研究所の平成 12 年度委託調査報告書「金属元素の製錬・精製段階における環境負荷の基礎データ調査」によれば、例えば、Cr については原料鉱石 100 トンを用いた場合

表 4-1 有害レアメタルに対して定められている環境基準値等

	水質環境 基準	地下水環 境基準	土壌環境 基準 ^{a)}	水道水質 基準 ^{b)}	排水基準	埋立判定 基準 ^{c)}	海洋投入基準 含有有機性 汚泥・廃酸・ 廃アルカリ	海洋投入基準 含有非水溶 性無機性汚泥	経口による ¹⁾ 基準曝露量 (mg/kg/d)	発がん ²⁾ ランク
Ag									0.005	
As	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1	0.3	0.15	0.01	0.0003	化合物 1
Ba									0.07	
Be							2.5	0.25	0.005	化合物 1
Cd	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1	0.3	0.1	0.01	0.0005	化合物 1
Cr(VI)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.5	1.5	0.5	0.05	0.005	1
Cu							10	0.14	-	
Hg	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.005	0.005	0.025	0.0005	-	3
Mn									0.14	
Mo	0.07 ^{d)}	0.07 ^{d)}		0.07 ^{d)}					0.005	
Ni	^{d)}	^{d)}		^{d)}			1.2	0.12	0.02	化合物 1
Pb	0.01	0.01	0.01	0.05	0.1	0.3	1	0.01	-	無機 2B
Sb	^{d)}	^{d)}		^{d)}					0.0004	三酸化2B
Se	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1	0.3	0.1	0.01	0.005	
Sr									0.6	
Tl									0.00008	
V							1.5	0.15	-	
Zn							20	0.2	0.3	

a) 地下水への汚染のおそれがないときにはこの3倍値。農用地における基準値は除いた。検液の作成は、環境庁告示第46号による。

b) 健康項目のみ（色などの快適水質項目は除く）を示した。

c) 汚泥、燃えがら、ばいじん、鉱さい、およびこれらを処理したものが対象。検液の作成は、環境庁告示第13号による。

d) 要監視項目。値がないものは、要監視項目ではあるが、基準値がないことを示す。

特殊な有機金属化合物は除いた。

1) U.S. EPA, Integrated Risk on Information System

2) IARC, IARC Monographs Programme on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans

表 4-2 レアメタルの毒性値から求めた水質環境管理濃度 (mg/L)

	For humans (m_H)	Ref. ^a	For aquatic biota (m_A)	Spe- cies ^b		For humans (m_H)	Ref. ^a	For aquatic biota (m_A)	Spe- cies ^b
Ag	0.01	4	0.00003	D	Mn	0.5	2	0.004	F
Al	NA		0.009	F	Mo	0.07	1	2	D
As	0.01	1	0.007	A	Ni	0.01	1	0.007	A
Au	NA		0.2	F	Pb	0.01	1	0.01	D
Ba	0.7	2	0.1	D	Pt	NA		0.04	F
Be	0.004	3	0.03	D	Sb	0.002	1	0.007	A
Cd	0.01	1	0.00004	F	Se	0.01	1	0.002	A
Co	0.004	4'	0.009	F	Sn	5	4'	0.3	D
Cr	0.05	1	0.0002	D	Sr	2	4	1	D
Cu	2	2	0.0003	D	Ti	NA		NA	
Fe	NA		0.09	D	Tl	0.0002	4	0.001	A
Hg	0.0005	1	0.00003	D	V	0.005	4'	0.08	F
Li	NA		0.01	F	Zn	9	3	0.001	A

Note: The calculation procedure is shown in Appendix. NA = Not Available. Data for Bi, Cs, Hf, Ge, In, Nb, Pd, Re, Rh, Ru, Ta, Te, W and Zr were not available.

^a1 = The environmental quality standards for water pollution and the water quality standards for drinking water in Japan; 2 = the World Health Organization guideline values for drinking water (1993), 3 or 3' = the water quality criteria or the drinking water primary standards in the U.S.; 4 or 4' = acceptable concentrations calculated respectively from the reference dose in the integrated risk on information system database of U.S. EPA or oral human limit value collected by Huijbregts (1999) using equation (5).

^bSpecies whose acute LC₅₀ value determines the management concentration. F = Fish; D = Daphnia; A = Algae.

(引用) Tasaki, T., Oguchi, M., Kameya, T., and Urano, K. (2007) Screening of Metals in Waste Electrical and Electronic Equipment Using Simple Assessment Methods, 11 (4) (in press)

に炭化還元プロセスで 0.5 トンのコークスが消費されていること、電解採取プロセスで 1,323GJ の電力が消費されることなど、22 金属元素のプロセスフローと物質収支等データが整理されている。

4.3 物質利用管理のあり方

図 4-2 は、物質循環の全サイクルにおける有害物質の管理方針を示したものである。管理方針の基本としては、リスク等に応じて管理方針を進めること、ハザード管理とリスク管理とを組み合わせること、規制と自主管理とを組み合わせることがあり、管理方針の手段としては、チェックゲート的な管理方針とトレーサビリティを確保するための管理方針があることを示したものである。薄緑色で示した吹き出しは、各種の管理方針が示されている。

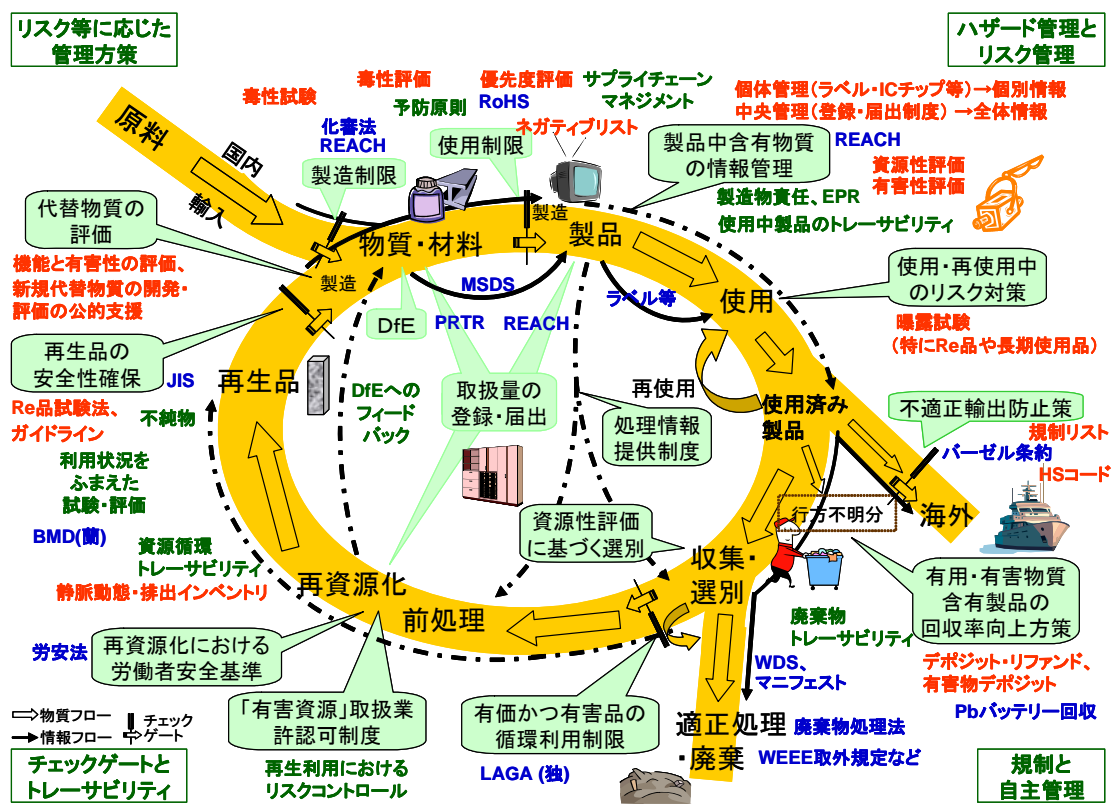


図 4-2 物質循環における有害物質の管理方針（チェックゲートとトレーサビリティ）
 （引用）田崎智宏、リサイクル促進方策の比較と評価、第 17 回廃棄物学会研究発表会
 講演論文集、2007）

有害物質としてのレアメタルについては、他の製品の製造時（レアメタルの利用時）における代替物質の評価や使用制限、製品中含有レアメタルの情報管理、レアメタルを含む使用済み製品等の回収率向上方策、未回収分の適正処理、他の循環資源への有害レアメタルの混入防止（上記でいう「循環利用制限」）などが主要な管理方針になると考えられる。

5. 国際資源循環に関する国の動向

ここでは国際資源循環に関する経済産業法、環境省、国土交通省の動向を整理し、各省庁の取組の特徴を取りまとめる。

5.1 経済産業省の動向

経済産業省は国内及び海外の日系企業の活動の円滑化を図るため、経済活動の実態に即して経済的な国際資源循環を活性化させる方向での対応が主となっている。

また国際資源循環の際には現地の適正処理能力の充実が前提となるが、都市間協力を通じた現地の能力向上に資する事業の実施が特徴的な動きとなっている。

5.1.1 トレーサビリティを確保した資源循環ネットワークの構築 (H17 - 19)

アジア諸国の旺盛な資源需要を受け、我が国からアジア各国へのプラスチックくずや鉄くず等の輸出量が急増する等、循環資源の移動が国際化する傾向にある。また海外進出日系企業は、海外拠点において排出した廃棄物を適正に処理・リサイクルすることが困難なケースが見受けられる。

そのため、資源循環の国際的な流れを適正化し、透明性を高めていくため、廃棄物の移動や適正処理の方法を確認・追跡できるトレーサビリティシステムの調査検討を継続実施している。

北九州市及び協力都市である中国・天津市をフィールドにトレーサビリティの実証実験が行なわれ、資源の適正な越境循環を行うためのルール検討を行い、「国際資源循環トレーサビリティ」ガイドライン及び、「認証機関」のイメージ検討を行った。また両市間では国際資源循環に関する覚書が締結されている。

平成 19 年度調査は、これら成果を元に、都市間にまたがる国際資源循環におけるトレーサビリティシステムの活用可能性について調査を実施するとともに、日中双方の自治体関係者を中心とする委員会においてシステムの活用方法を検討することとなっている。

経済発展を遂げるアジア各国からの資源需要を受け、日本からアジアへの廃プラ、くず鉄等の輸用量が急増する中、越境移動を行う循環資源について「適正に処理が行われ、環境汚染をもたらさないこと」を担保する仕組み＝トレーサビリティ確保の必要性が高まっている。

エコタウンをはじめとする環境事業を推進し、「環境先進都市」として注目されている北九州市及びその協力都市である中国、天津市をフィールドとし、資源の適正な越境循環を行うための運用ルールの事例を示す。

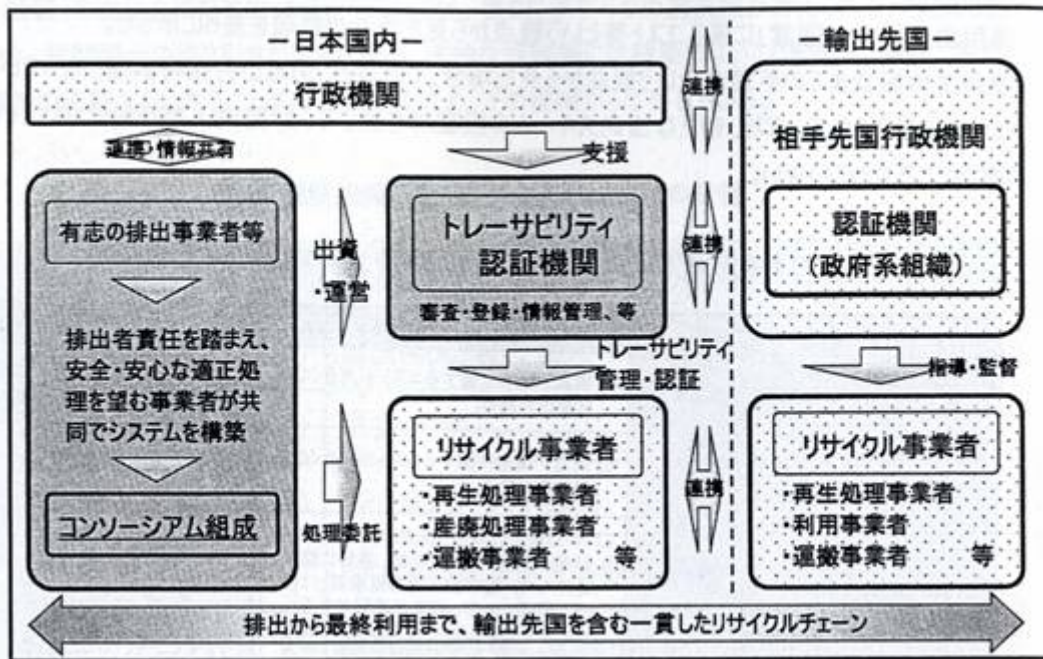
- ★「北九州方式」の基本的な考え方
- ★「国際資源循環トレーサビリティガイドライン」の位置付け（対象範囲、対象品目 等）
- ★「国際資源循環トレーサビリティ」の基本的考え方（実現手法、行政機関の役割、IT技術の活用 等）
- ★「安全・安心な北九州方式」における運用ルール（関係者による体制作り、商取引の際の取り決め、現場での作業等に係る運用ルール）
- ★「認証機関」について（認証機関の機能、運営主体、設立に向けた方向性）



それぞれのリサイクルチェーンに係わる全ての事業者がこの北九州方式に則った「マネジメントシステム」を構築することで適正な資源循環を行うことは、行政機関を含む国内外の関係者からの信頼が得られ、結果的に循環資源の輸出入等に係る諸手続き効率的に進むこと、更には将来的には諸規制の緩和等につながることも期待される。

出典)「平成 17,18 年度環境問題対策調査 二国間におけるトレーサビリティを確保した資源循環ネットワークの在り方に関する検討」報告書より作成

図 5-1 国際資源循環トレーサビリティガイドライン

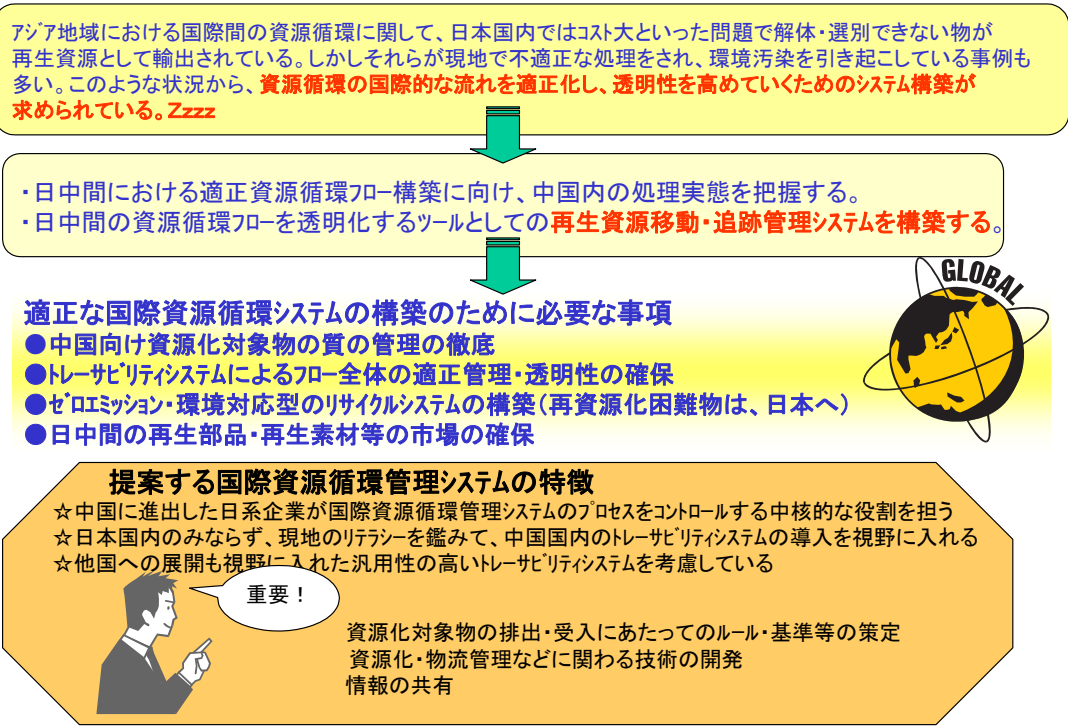


出典)「平成 17,18 年度環境問題対策調査 二国間におけるトレーサビリティを確保した資源循環ネットワークの在り方に関する検討」報告書より

図 5-2 企業コンソーシアム形式による「認証機関」の設立及び運用イメージ

5.1.2 二国間におけるトレーサビリティを確保した資源循環ネットワークのあり方に関する検討 (H17 - 19)

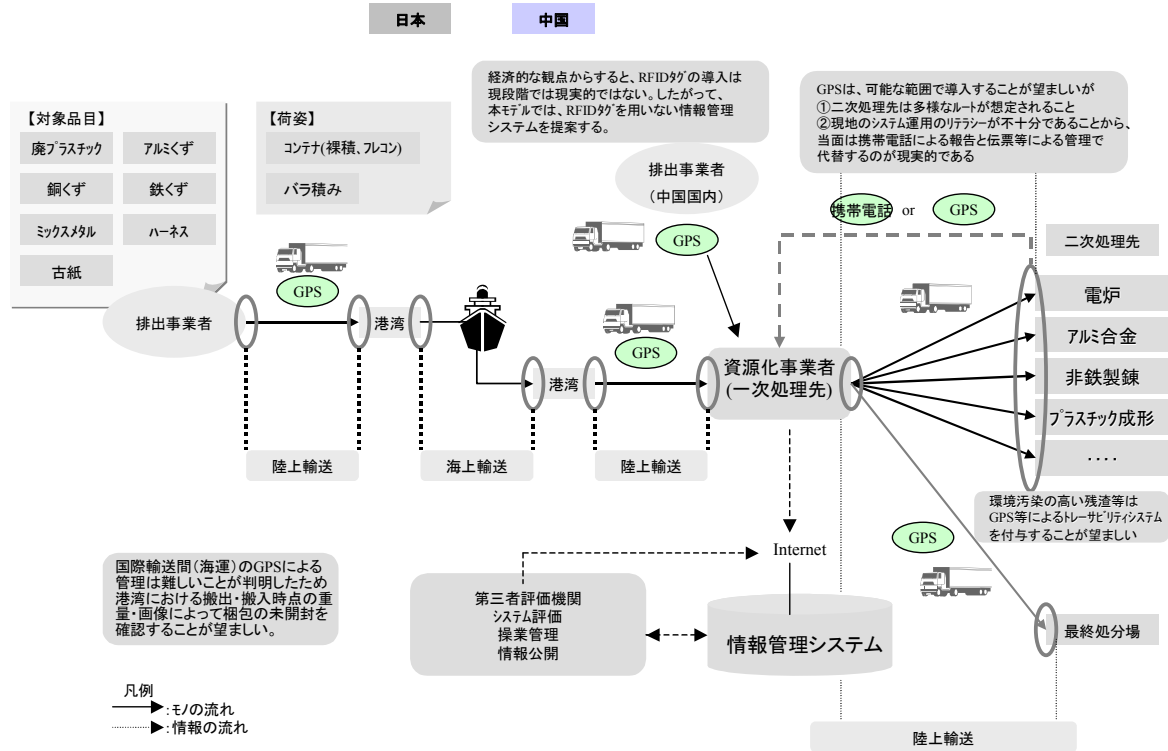
(1) と同様の背景・目的で、民間主導での日中間の資源循環フローを透明化するツールとしての再生資源移動・追跡管理システムの構築検討を行い、国際資源循環管理モデルの作成と、「国際資源循環におけるトレーサビリティシステム～運用マニュアル～」を取りまとめている。



出典)「平成 17,18 年度国際資源循環に関する調査事業 トレーサビリティを確保した資源循環ネットワークの構築に関する調査」報告書から作成

図 5-3 トレーサビリティを確保した資源循環ネットワークの構築

実証試験結果に基づき、技術的・中国国内でのリテナーの観点から実現可能と考えられるモデル



出典)「平成 17,18 年度国際資源循環に関する調査事業 トレーサビリティを確保した資源循環ネットワークの構築に関する調査」報告書より

図 5-4 国際資源循環管理システムの全体イメージ

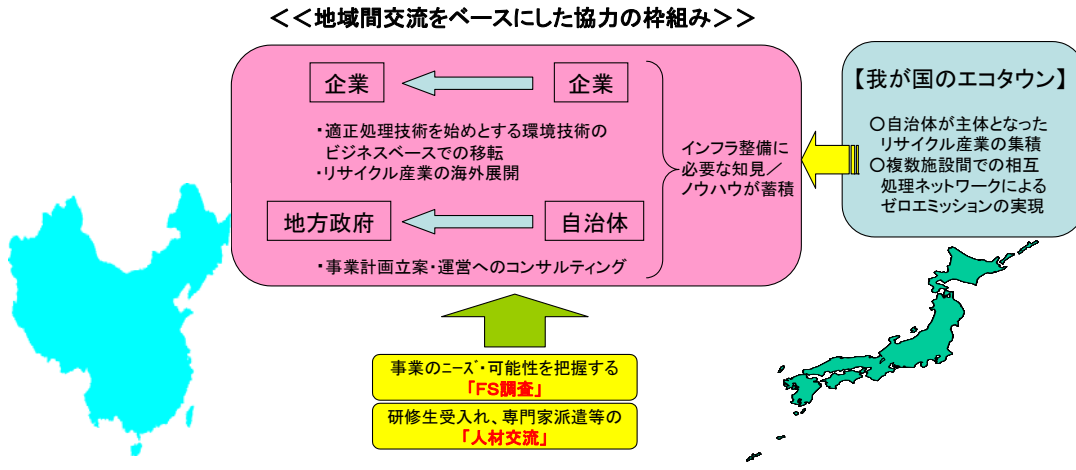
平成 19 年度調査は、これら成果を元に、国際資源循環管理モデルを実際に構築し、その運用を通じて有効性を評価し、民間レベルで活用可能になるための改善点等について検討を行うこととなっている。

5.1.3 国際循環システム対策費 - 都市間連携による循環型都市協力事業

中国の急速な経済発展・工業化・都市化が深刻な環境汚染をもたらしている中、2006 年 3 月の全人代で承認された第 11 次五ヵ年計画では循環型経済を發展させるための取組が示されている。また中国沿海部では幾つかのリサイクル工業団地も建設されているところである。

一方、日中協力分野では、2006 年 12 月の経済産業大臣訪中時に、我が国自治体のエコタウン運営ノウハウ、企業のリサイクル技術をベースに、エコタウン自治体とリサイクル関連プロジェクト実施を検討している中国自治体との間での地域間交流を通じた協力を実施することについて国家發展改革委員会と合意している。

また 2007 年 6 月の 3R 政策対話において、北九州市 - 青島市、兵庫県 - 広東省間の協力を進めることに合意しており、9 月に北京で行われた第 2 回日中省エネフォーラムの場で、北九州市 - 青島市間で事業開始に関する覚書が締結されている。また兵庫県 - 広東省についても事業の具体化を図るべく調整中となっている。



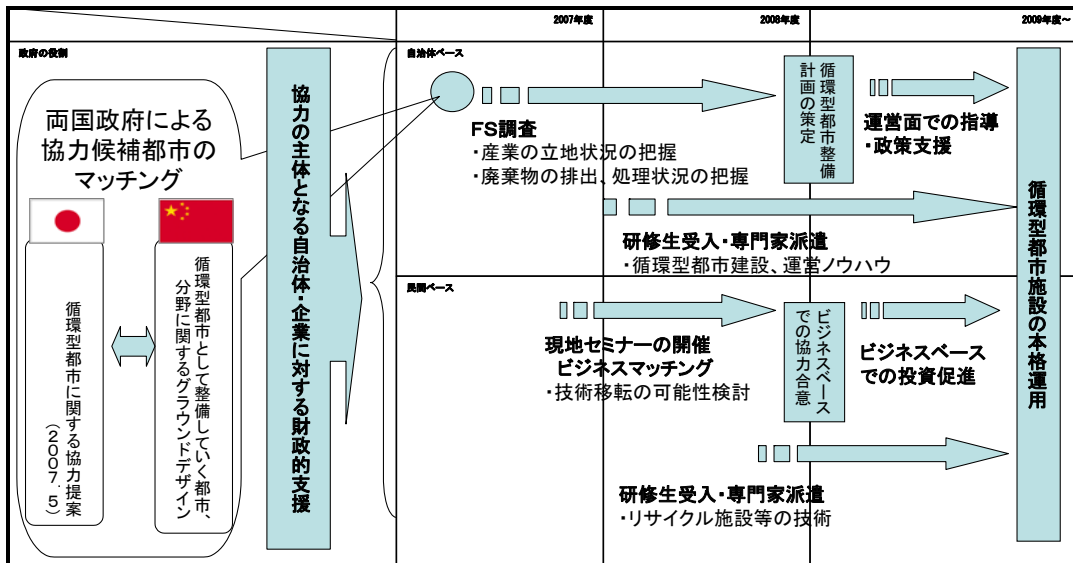
出典) 経済産業省資料

図 5-5 地域間交流をベースにした協力の枠組み

循環型都市に関する協力の進め方

循環型都市に関する協力にあたっては、対象となる都市でどのようなリサイクル施設等を整備すべきか等についてのFS調査がまず必要。FS調査を踏まえ、現地セミナー等の機会を通しての民間企業間のビジネスマッチングが促進される。また、実施するための人材の育成も重要であり、研修生の受入、専門家の派遣を実施。

循環型都市に関する協ロードマップ



出典) 経済産業省資料

図 5-6 循環型都市に関する協力の進め方

北九州市と青島市による日中間の循環型都市に関する協力の推進についての覚書の抜粋は以下の通りであり、「政策」と「技術」の一体的アプローチにより、政策だけでは総花的な机上の提言にしかならない、一方民間の取組ではリスクが大きく事業化につながらないという限界を打破して具体的な成果に繋げることが狙いである。

<p>1 目的 北九州市の循環型社会構築の取組に関する経験やノウハウを活用し、青島市の循環型都市構築に対する協力をを行うことを目的とする。</p> <p>2 実施内容</p> <ul style="list-style-type: none">・ 青島市が策定する「青島市再生資源産業建設計画」について北九州市が協力する。・ 廃家電回収処理モデルプロジェクト建設について、技術・設備の導入の可能性を検討する。・ 青島市が既に始めたあるいは計画中のリサイクル関連産業について、協力の可能性を模索する。・ 日本の循環型社会構築の取組を学ぶことを目的とした、青島市の行政・企業関係者の訪日研修を行う。・ 北九州市ならびに青島市は、協力して日中両国において本協力の PR を行う。 <p>3 実施体制</p> <ul style="list-style-type: none">・ 北九州市と青島市は、日中両国政府がメンバーとなる合同調整委員会の下に、両都市政府や専門家などで構成される「日中循環型都市協力委員会」を組織し、共同で双方の協力研究の主な分野、研究内容、および実施案について検討する。・ 委員会には「政策検討部会」と「技術検討部会」を設置する。・ 本協力の窓口は、北九州市環境局及び青島市環境保護局が担当する。

5.2 環境省の動向

環境省は有害廃棄物の不法輸出入の防止や、現地国での循環資源等の不適正処理防止のため、アジア諸国での基準共通化等の取組に力を入れている。

またトレーサビリティの構築にも乗り出しているが、経済産業省が有価物に関する検討を行っているのに対し、環境省はバーゼル法の特定有害廃棄物の輸出に関するトレーサビリティ検討を行っているのが特徴である。

5.2.1 廃棄物不法輸出防止国際ネットワーク事業 (H17-18)

近年リサイクル等を目的とした再生資源等の国際移動が活発化している。こうした中、脱法的に廃棄物等を海外に輸出しようとする事例や、海外に輸出された E-waste (電気電子機器廃棄物) 等の再生資源の不適正な処理により環境上の問題を引き起こしている事例等が指摘されている。またこれらのことが原因で、我が国からの輸入が禁止された事例もある。

そのため、国内対策としては以下のような取組を実施している。

- ・ 事業者向け説明会の開催による輸出入制度の周知徹底 (全国各地約 10 ヶ所で開催)
- ・ 個別案件に対する事前相談の実施
- ・ 税関と連携した立ち入り検査等水際対策の強化

また国際対策として、アジア諸国のバーゼル条約担当官の連携のもと、E-waste 対策や循環型社会構築等に関連する国際的な取組についての状況把握や、有害廃棄物不法輸出入防止に関するアジアネットワークの構築・運用に向けて、循環資源の輸出入の在り方に関する調査や、アジア諸国における E-waste のインベントリー作成を行っている。

5.2.2 有害廃棄物越境移動体策調査 (H18)

有害性の判定方法に係る調査、規制対象物質情報の整備、有害性該非判定に係る情報の整備等について検討を行った。

5.2.3 アジアにおける資源循環の推進方策に関する戦略的検討事業(H19)

有害廃棄物と中古品、有害と非有害廃棄物の判断基準に関して、法規制に加え、実務上の判断にまで踏み込んで情報収集を行い、アジアネットワーク参加国で共有し、国による有害廃棄物の範囲の解釈の違いを最小化することを目的としている。

また良好な国際関係の構築のもと、開発途上国では適正処理が困難な有害廃棄物を、処理・資源回収する技術・施設を用いて国際的な 3R の推進や途上国の環境負荷の低減、我が国の希少資源の確保の観点から実現可能性について、相手国のニーズを踏まえて検討を行う。

5.2.4 廃棄物等輸出入トレーサビリティ整備検討事業(H19)

アジア諸国の資源需要から、循環資源の輸出量が急増にしている一方、輸出された循環資源が輸出先国で環境破壊を引き起こしているとの指摘もなされている。このような指摘に答えるため、廃棄物のトレーサビリティを確保し、輸出先国で循環資源が適正に処理されていることを確認できる制度設計を行うことが求められてきている。

現状、廃棄物処理法に基づく廃棄物又はバーゼル方に基づく特性有害廃棄物等の輸出については、処理が完了した後は、輸出者等から処理が完了した旨の報告書が提出されることとなっているが、事後的な報告であるため、輸出先国にて確実に処理がなされる場所に運搬されたかどうかを確認することは困難である。

そこで、特性有害廃棄物等について、IT システムを用いて、輸出国先において当該物が予め予定されている処理施設に搬入されたか否かを把握するトレーサビリティシステムの整備を行うことを念頭に、現在、書類による事後報告に頼っている特性有害廃棄物等の移動をより効率的に管理するための制度設計について検討を行うことを目的とする。

本業務は、日本で排出された廃棄物等が、予め予定されている相手国の処理施設に搬入されたか否かを把握するシステムを、IT を用いて整備する場合、いかなる制度設計があるかを調査検討し、ありえるオプションとその課題を提示するものであり、検討対象国としては、特性有害廃棄物等の輸出の多くが韓国向け（セメント製造における粘土代替利用を目的とする石灰灰）であることから、韓国としている。

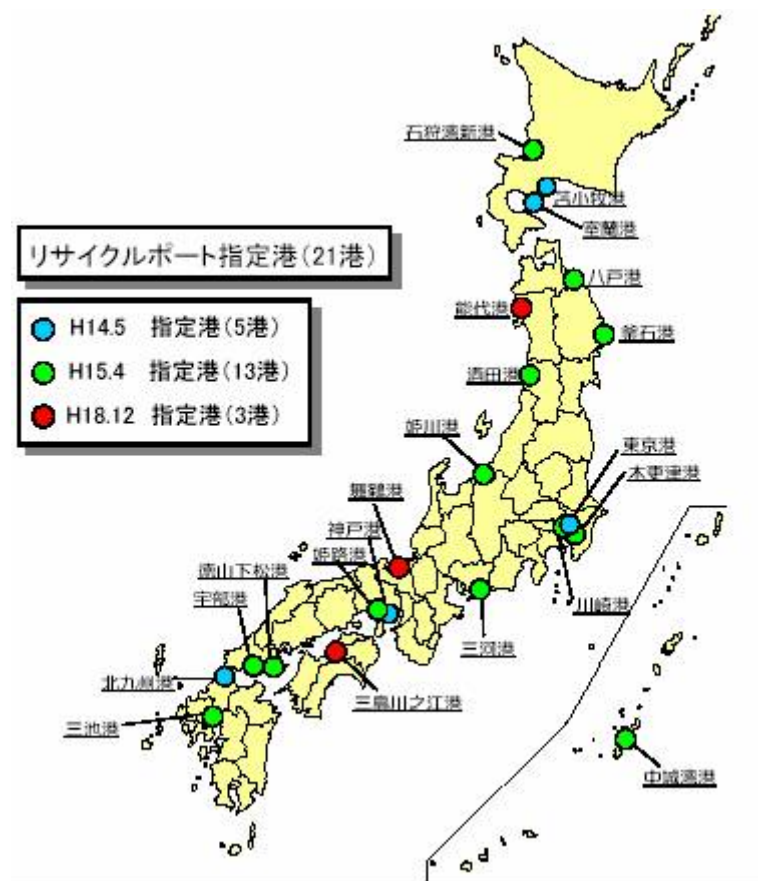
5.3 国土交通省の動向

国土交通省は、港湾の立場から、国内での静脈物流円滑化のために構築してきたリサイクルポートを、国際資源循環物流拠点港湾として推進する方向で取組を進めている。

5.3.1 リサイクルポート

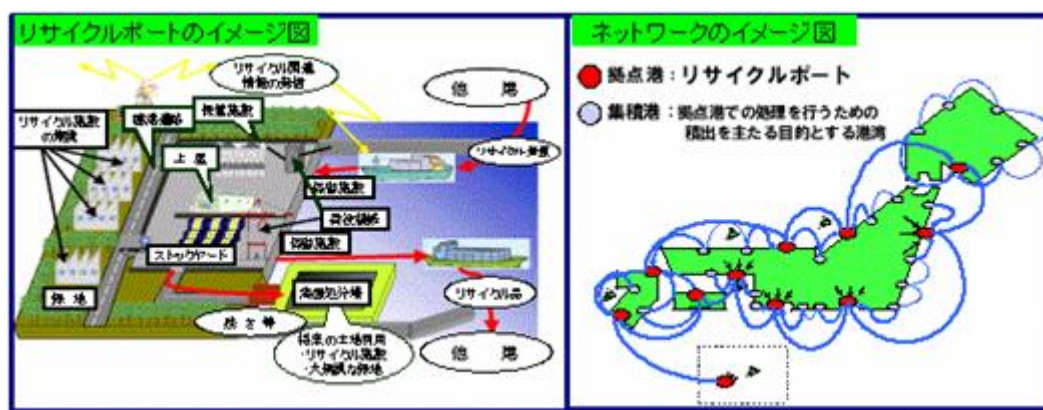
循環型社会形成推進基本計画（平成 15 年 3 月閣議決定）には「港湾を核とした総合的な静脈物流システムの構築」が位置づけられており、港湾が持つ物流基盤、生産基盤・技術の集積、動脈物流で培った物流管理機能、リサイクル処理で生じた残さを処分できる廃棄物海面処分場など、高いポテンシャルを生かした拠点化や低コストで環境負荷の小さい海上輸送を活用したネットワークの形成を目指すものである。

具体的には広域的なリサイクル施設の立地等に対応した静脈物流の拠点となる港湾を、港湾管理者の申請に基づき「リサイクルポート（総合静脈物流拠点港）」と指定し、「静脈物流拠点」として育成することとして、平成 18 年 12 月までに全国 21 港を指定している。



出典) 国土交通省資料

図 5-7 リサイクルポート 21 港位置図 (平成 18 年 12 月現在)



出典) 国土交通省資料
 図 5-8 リサイクルポートの概要

指定を受けると、リサイクル産業の新規立地促進、国と港湾管理者による静脈物流システム事業化調査の共同実施、民間事業者のリサイクル施設整備に対する補助、静脈物流基盤に対する支援などの優遇措置を受けられることになっている。そして、今後これら指定港を拠点として全国的なリサイクルの輪の構築や、海上静脈物流による臨海部産業の再生・活性化を目指して、官民連携による取組を進めていくこととしている。

また、平成 15 年 4 月にはリサイクルポートでリサイクル事業を行う企業や港湾管理者である自治体などの参加の下、ネットワーク組織「リサイクルポート推進協議会」が設立された。この協議会では、Web サイトによる情報発信や会員間の情報交換、セミナーの開催、静脈物流と環境産業を組み合わせた新たなビジネスのコンセプトづくりなどに取り組むこととなっている。

5. 3. 2 拠点港を核とした国際循環資源物流への対応 「～リサイクルポート政策の充実に向けて～提言書」より (H18)

海上輸送の円滑化が進まない要因と、その改善状況をレビューし、更なる改善の方向性と、具体化に向けた施策を討議するため、永田勝也早稲田大学理工学部教授を委員長とし、関係団体、物流事業者、港湾管理者、関係省庁等からなる「循環型社会形成促進のための海上輸送円滑化検討委員会」を設置し、検討を行い4つの提言が取りまとめられた。

そのうちのひとつが、「拠点港での国際循環資源物流への対応」となっており、リサイクルポートを国際循環資源物流の拠点とした展開として、関係省庁と連携しながら検討を進めている港湾をモデルとして、あるべき省庁間の連携・役割分担の姿を提言している。

- 近年の東アジア諸国において循環資源需要が急激な拡大。
- これに対して、国内に留まらず東アジア地域全体における循環資源の有効活用の促進と、安全・安心が担保された適正な循環資源物流の円滑化に資する「国際循環資源物流拠点」の整備が求められている。
- リサイクルポートの中でも循環資源の輸出入が多い港湾等について、国際循環資源物流の核となる拠点港として必要な機能や国際的な循環資源物流の適正管理のあり方について、関係省庁と連携を図り検討する必要がある。

- ◆海上輸送円滑化が進まない理由・障害
 - ・国際間の循環資源取扱いルールが未成熟

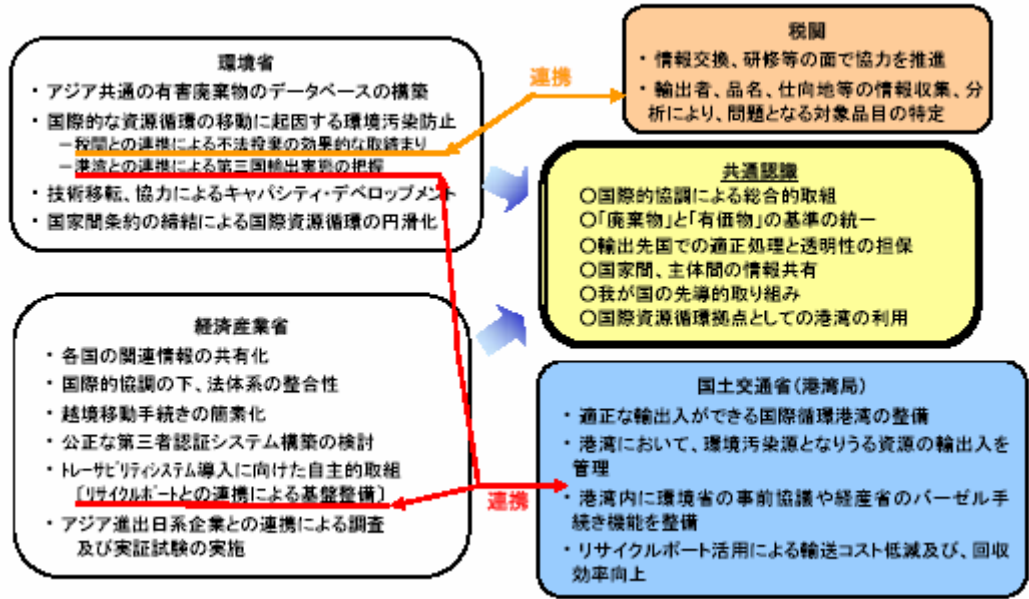
- ◆課題の改善状況
 - ・関係省庁や一部港湾で国際的な取り組みがあるが品質管理や専用拠点の必要性に対する認識が少ない。

- ◆更なる改善の方向性
 - ・循環資源の国際間の再生利用システムは、各国の現状や機能分担を考慮し、国内循環産業の基盤施設や有害廃棄物処理基盤施設などが有効に活用できる総合的なシステムを構築する必要がある。

- 【早急に取り組むべき事項(アクションプラン)】**
- ①国際循環資源物流拠点モデル港の検討
 - ②国際循環資源物流に関する関係行政機関との連携強化
- 【中長期的な対応を検討すべき事項】**
- ①循環資源の取扱いルールに関する国内基準と連携した国際基準共通化への取り組み
- * 我が国が率先、先導して、港湾における循環資源取扱い基準の国際化を推進する

出典) 循環型社会形成促進のための海上輸送円滑化検討委員会「循環型社会形成促進のための海上輸送円滑化検討委員会報告～リサイクルポートの充実に向けて～」(平成18年10月)

図 5-8 提言 4 拠点港を核とした国際循環資源物流への対応



出典) 循環型社会形成促進のための海上輸送円滑化検討委員会「循環型社会形成促進のための海上輸送円滑化検討委員会報告～リサイクルポートの充実に向けて～」(平成18年10月)

図 5-9 国際循環資源ネットワークの構築に向けた関係機関の連携

・効率的かつ、安全・安心の国際的な循環資源物流システム構築に向けて、水際における循環資源の管理が非常に重要になってきており、港湾が大きな役割を担っていくことが期待される。

I. 循環資源の基準に関するガイドラインの作成

- ◆ 相手国での適正処理が困難かつ、我が国での適正処理が可能なものみの越境移動

II. 水際における新たな管理システムの構築

- ◆ 既存検数、検量機能を活用した循環資源管理
- ◆ 相手国港湾を起点とした我が国のトレーサビリティシステムの構築
- ◆ 輸出国関連法、資源需給、処理実態、トレーサビリティ情報の把握

III. 二国間・地域間協定の締結

- ◆ 輸出国から我が国への不適切な資源の不法越境の未然防止
- ◆ トレーサビリティ情報の相手国への提供

IV. 手続きの厳格化、容易化

- ◆ パーゼル、廃掃法審査機関の設置
- ◆ 公正な第三者認証システムの構築の検討
- ◆ 重点品目、悪質業者の管理強化

出典) 循環型社会形成促進のための海上輸送円滑化検討委員会「循環型社会形成促進のための海上輸送円滑化検討委員会報告～リサイクルポートの充実に向けて～」(平成18年10月)

図 5-10 国際循環資源物流システム構築に向けて港湾に期待される役割

6. バーゼル法の改正とレアメタルの円滑な国際資源循環のための“システム” 提言

6.1 バーゼル法の改正

発展途上国を中心に、先進国からの廃棄物の輸出を禁止するバーゼル条約の改正（BAN改正）の主張がなされ、1995年に採択・可決されている。改正案では、リサイクル目的を含め先進国（OECD、EU、リヒテンシュタイン）から発展途上国への有害廃棄物等の越境移動を禁止しているが、未だ発効の見込みは立っていない¹⁾。

【BAN改正の概要】¹⁾

<改正の背景>

- バーゼル条約発効後も不適正な有害廃棄物の越境移動が行われた。
- 事前通知・承認手続では不十分とする発展途上国がバーゼル条約を批准しない動きを見せた。
- 発展途上国、ヨーロッパ諸国、グリーンピースがバーゼルの規制強化に動いた。

<規制の強化>

- 1994年第二回締約国会議では、最終処分目的での先進国から途上国への有害廃棄物の輸出が禁止された。

<バーゼル条約 BAN改正案>

- 1995年第三回締約国会議で採択・可決。
- リサイクル目的でも先進国（OECD、EU、リヒテンシュタイン）から発展途上国への有害廃棄物の越境移動を禁止する。

<現状>

- 改正バーゼル条約は発効に必要な批准国数(3/4の国)に達していないため、発効の見込みは立っていない。
- 2005年12月現在、必要批准国122カ国に対して、60カ国1機関が批准している。
- アジアでは、中国、インドネシア、マレーシア、スリランカが批准。ベトナムはBANと同等の輸入制限を行っている。
- 発効され次第、OECD諸国から発展途上国への有害廃棄物の輸出は全面禁止となる。

我が国は、締約国には、条約上、廃棄物の受け入れ（輸入）を拒否することができ、また、途上国の中での処理能力（特にリサイクル能力）の格差が考慮されていないとして反対の立場をとっていた。しかし、途上国を含め大勢が条約改正を支持したことから、我が国としても、最終的には、コンセンサス方式による本件改正の採択に参加した。

本件条約改正は、改正を受け入れた締約国の少なくとも4分の3の批准・受諾・加入により当該改正を受け入れた締約国の間で効力を生ずる。

バーゼル条約第17条5項によると、本件条約改正は、改正を受け入れた締約国の少なくとも4分の3の批准・受諾・加入により当該改正を受け入れた締約国の間で効力を生ずる。他方、当該第17条5項の解釈は各締約国間で分かれており、2006年11月の第8回締約国会議（ナイロビ）では、バーゼル条約の95年改正との関係で、次回公開作業部会にお

いて当該第 17 条 5 項の解釈について検討を行う旨の決議が採択された。なお、2006 年 12 月現在、締約国数は、63 カ国 1 機関（EC）²⁾。

6.2 レアメタルの円滑な国際資源循環のための“システム”提言

6.2.1 循環資源の輸入

国際資源循環を考えると、循環資源を海外から輸入する場合と、国内から海外へ輸出する場合の 2 つを考える必要がある。

循環資源の輸入に関しては、国内の精錬メーカーが希望しており、海外で精錬できない循環資源を国内に持ち込んで処理したいと考えている。輸入元の対象地域としては、国として輸出を禁止している中国を除き、主に東南アジアの国々である。現状、東南アジアの貴金属スクラップやレアメタルは、日本へ輸出するためのバーゼル条約の手続きが煩雑なため、バーゼル条約を批准していない米国や、バーゼル条約に関する担当者のネットワークが整備されているヨーロッパなどに輸出されるケースも多い³⁾。

6.2.2 循環資源の輸出

6.2.2.1 ルール

循環資源の輸出に関しては様々な問題がある。まずどのような場合に循環資源を輸出しても良いと考えるか、に関するルールを作る必要がある。システム全体の環境影響を考えると、例えば、日本においては、埋立や焼却処分に回ってしまうが、海外に輸出するとマテリアルリサイクルできるものを対象とするなど、一定の考え方を整理する必要がある。できれば、汚染性の回避のためのバーゼル法に対応するような、資源有効法のような法ができることが望ましい。

また、何でも海外に輸出してしまうと、国内のリサイクル産業が衰退してしまうことも予想される。したがって、海外で一部行われているような、全体の量のある一定の割合は、国内リサイクル産業保護の観点から輸出を制限する、などのルールの検討も必要かもしれない。

6.2.2.2 汚染性の回避

循環資源の輸出を考えた場合、最も重要なのは汚染性を回避することである。このためには、循環資源のトレーサビリティを確保することが重要である。循環資源のトレーサビリティの確保については、経済産業省リサイクル推進課、(株)NTT データ経営研究所と北九州市ならびに関連企業が、「資源循環ネットワーク検討委員会」を設置し、平成 17 年度及び 18 年度と、主に循環資源のトレーサビリティの確保に関する諸検討を行っている⁴⁾。そして平成 19 年度には、NTT データ経営研究所やリコー、山九など 7 社が、廃プラスチックなどの“循環資源”が適切に処理されたというトレース情報を IC タグを活用して提供する事業会社を 2008 年 3 月までに設立する“と発表している⁵⁾。さらに経済産業省リサイクル推進課と(株)リーテムも、(株)リーテムの国内工場と自社の中国工場との間における循環資源のトレーサビリティに関する実証試験を実施している。

循環資源のトレーサビリティについては、家電リサイクル法や自動車リサイクル法関連の循環資源の流れが不透明な中、これらの見える化にも貢献することが期待されている。

6.2.3 エコタウンと国際資源循環

循環資源の輸出入に積極的に係わっていきたいということで、北九州市は2006年、「国際資源循環拠点を狙いたい」、との要望を国の関係機関に行い、北九州市の国際資源循環拠点のイメージを発表した⁶⁾。イメージの中では、

適正で効率的な国際資源循環の実現に向けて

- 国際間のトレーサビリティの確保
- 拠点形成による安全性と効率性の向上

を掲げ、響灘大水深港湾を軸として、

- 破砕・分別・洗浄・圧縮等の前処理リサイクル機能
- 循環資源・廃棄物の検査機能
- バーゼル法の現地手続き機能
- 中国側検査機関
- 認証機関（トレーサビリティ情報管理センター）

などの機能を持つことを目指している。

また北九州エコタウンのもつ

- リサイクルによる再生資源
- 無害化・適正処理
- 希少金属回収

などの機能との連携も述べている。

これら国際資源循環拠点到想定される機能のうち、特に前処理リサイクル機能については、既存のエコタウンとの連携が考えられる。輸出に関しては、必要なものを海外へ輸出して、その他は国内でリサイクルすることとし、輸入に関しても、エコタウンで濃縮などを行って、レアメタルなど、最終的に必要なものを精錬所へ送るなどの、エコタウンとの連携が可能ではないかと考えられる。

従来は、国際資源循環というと、国内の循環資源が海外により流出し、国内リサイクル産業がダメージを受けるとの考え方もあったが、今後は、北九州に限らず、各エコタウンにおいて、国際資源循環とエコタウンの最適なパートナーシップを、いかに構築するかが重要な課題になると考えられる。

6.2.4 東アジアエコタウンネットワーク

最後に最近東アジアにおいて、日本のエコタウンを参考に、静脈産業団地を作りたいとの動きがある。日本のエコタウンは、エコタウンプランの承認を受けた段階で、いわゆるブランドとなり、エコタウン内でトラブルが起きると、ブランド自体が傷つくため、エコタウン立地企業同士の相互監視が利いた、極めて安全・安心なシステムとなっている。

国際資源循環を積極的に行うに際し、トレーサビリティの確保は重要であるが、より積極的に安全・安心に仕事をやろうとする仕組みが必要であると考えられる。その意味で、東アジアにエコタウンのようなものが複数できて、エコタウンのようなもの同士で国際資源循環を行うようになれば、より相互監視が利いて透明度のある、安全・安心の仕組みになると期待される。

(参考文献)

- 1) バーゼル条約、条約の改正、外務省ホームページ
<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/jyoyaku/basel.html>
- 2) 循環資源の国際的な移動をめぐる動き、第3回国際資源循環型社会形成と環境保全に関する専門委員会資料(2005.12)、環境省ホームページ
<http://www.env.go.jp/council/03haiki/y0310-03/mat01-1.pdf>
- 3) 国際資源循環セミナー、エコ・テクノ 2006
- 4) NTT データ経営研究所ホームページ
<http://www.keieiken.co.jp/monthly/2006/0612-9/index.html>
- 5) 廃プラスチックなどの不法投棄を防ぐ、IC タグ使う新会社を NTT データ経営研などが設立、ITpro、日経 BP 社、
<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20070802/279008/>
- 6) 北九州市の国際資源循環拠点のイメージ、北九州市(2006)

ワーキンググループ2

「レアメタルのリサイクル技術」

【目次】

1. リサイクル対象.....	2-1
1.1 レアメタルとは	
1.2 量の多い	
1.3 戦略性の高い	
2. 技術体系.....	2-3
2.1 レアメタルと回収技術マップ	
3. 具体的製品事例.....	2-5
3.1 液晶テレビ（インジウム）	
3.2 電池、磁石（リチウム、コバルト、ネオジム）	
3.3 自動車、工具	
3.4 触媒金属（ニッケル、バナジウム、プラチナ、レアアースを中心に）	
4. 非鉄精錬技術.....	2-45
4.1 湿式法	
4.2 乾式法	
5. まとめと今後の課題点	2-54

1. リサイクル対象

1.1 レアメタルとは？

希少金属は、地球上にもととの存在量が少ない金属や量は多くても経済的に技術的に純粋なものを取り出すのが難しい金属を総称するものである。一般的にはレアメタルと呼ばれている元素は図 1.1 に示すように 31 種類あり、他の元素と合金を作りこれまでにない性能や機能を有する。レアメタルは表 1.1 に示す特性を利用して家庭製品から産業機械やハイテク分野にいたるまで幅広く用いられており、わが国の産業にとって欠くことのできない必要な原材料の一つである。

1.2 量の多い

レアメタルはデジタルカメラ、液晶パネル、電子レンジなどの小型電子、電気機器や自動車の排気ガス浄化などの金属触媒、工具など製品の高機能化、高品質化には欠かせない原料である。例えば、小型電子、電気機器の 40 品目に限定しても年間 70 万 t、例えば MD プレーヤーに 230g/t の金が含有されている。金属資源産業のリサイクル原料としては自動車触媒が 5,000t/年、廃基板 12,000t/年、廃バッテリー64,000t/年、シュレッダーダスト 20 万 t/年がリサイクルプラントから非鉄精錬メーカーに送られている。

1.3 戦略性の高い

論点は資源回収量の確保、リサイクル技術の問題、リサイクルの国際的な展開などである。最近では文部科学省が「元素戦略プロジェクト」を、経済産業省が「希少金属代替材料開発プロジェクト」をそれぞれ立ち上げている。このプロジェクトでは、レアメタルの総合的な対策の一部として代替・使用量低減を目指し、希少資源代替材料の革新的技術開発を担うとともに、基礎から実用化までの支援体制を確立するものである。



図 1.1 レアメタルの定義

2011年までに透明電極向けインジウム(50%削減)、希土類磁石向けジスプロシウム(30%削減)、超硬工具向けタンゲステン(30%削減)の使用原単位を目標とする割合まで低減できる製造技術およびそれを企業、大学などのラボレベルでの試料提供できる水準に至るまでの技術を確立することが目標とされている。

レアメタルの元素別特性	
▶ 超伝導	:Ti Nb RE Mo B V Ge Ga Ba
▶ 強磁性	;Ni Cr Co Mn RE
▶ 半導体	;Ge Ga Se In Te Bi Sb
▶ 高温耐熱	;Cr W Co Mo V Nb Ti B Zr Hf
▶ 光電変換	;Sb Ga Se In Cs Te
▶ 熱伝変換	;Sb Pt Zr Te Re Bi RE
▶ 触媒特性	;V Pd Co W Mo Rb Zr RE
▶ 放射線機能	:Sr Li Be B Zr Te Tl Bi RE
▶ 耐食性	;Cr Co Mo Nb Pd Pt Ti Be Rb Zr Hf Tl
▶ 光学特性	;Pd Ta Ge Be Ga Be Se In Te Cs Tl RE

表 1.1 レアメタルの元素別特性

2. 技術体系

2.1 レアメタルと技術体系マップ

金属資源の物質循環やリサイクル技術に関して幾つかの報告がある。表 1.2 に示すように、原田は金属元素のリサイクル率について資源経済学のすすめ、鉄鋼統計年報、鉄鋼界、資源統計年報、レアメタル 31 から耐用年数、生産量、用途、リサイクル率などを整理している¹⁾。(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)では鉱物資源マテリアルフロー分析を 40 鉱種について調査し、報告書をまとめている²⁾。銅、亜鉛、鉛、のベースメタルフローに関しては十分なデータがあり、リサイクルの状況も把握されているが、レアメタルに関しては十分とは言えない。特に、触媒に関してはそれ自体は反応の前後で変化せず、また生成物にも含有されず、微量で化学反応を促進させるものであり、フローの把握が困難である。

表 1.2 各種金属のリサイクル率²⁾

	生産量 t/y	耐用年数	リサイクル率	主要リサイクル源	主要用途
Fe	982.M	67	37.6	建設老廃物、自動車加工屑	建築、自動車
Mu	22.1M	37	6.5	鉄鋼スラグ	鉄合金、乾電池
Al	13.0M	192	55.2	加工屑	圧延品
Cr	11.7M	116	27	特殊鋼	特殊鋼、耐火物
Cu	9.0M	39	46.5	電線屑、伸銅屑、鋳物屑	電線、伸銅品
Zn	7.3M	20	13.1	加工屑、ドロス	めっき、伸銅
Ti	6.5M	27	50	Ti合金屑	酸化チタン、Ti合金
Ba	5.4M	80	s	苛性ソーダ脱硫剤	ブラウン管、塗料
Pb	3.3M	21	31.8	蓄電池	蓄電池、無機薬品
Ba	2.9M	110	s	ガラス屑	FRP 断熱材
Zr	993.M	36	33	使用済耐火レンガ	耐火レンガ、耐火物
Ni	872.K	56	81	ステンレス加工、老廃	ステンレス、めっき
Sr	235.K	29	0		ブラウン管、磁性体
Sn	211.K	20	8.3	はんだ	ハンダ、ブリキ、塩ビ安定剤
Mo	110.K	50	25	特殊鋼自家発生、触媒	特殊鋼、触媒
Sb	52.6K	80	25	Sb合金、蓄電池	樹脂難燃助剤
Co	43.4K	76	23	磁石、触媒	磁石、工具、磁気テープ
W	43.3K	59	19	使用済み工具、触媒	工具、触媒
V	33.2K	129	24	スラグ、Ti合金加工屑	特殊鋼
Nb	13.7K	258	0.6	スラグ	特殊鋼、光学レンズ
Li	4.9K	490	s	使用済触媒、電池箔屑	陶磁器、フラックス
Bi	2.8K	32	s	触媒	低融点合金
Se	1.8K	44	38	感光体スクラップ	複写機、着色剤
Ta	376	58	32	ヒータ、電子部品不良品、工具	コンデンサ
Pt	270	208	12.1	使用済触媒、電子部品加工屑	触媒、電子部品
Ge	85		29	使用済触媒、半導体屑	触媒、医療用有機Ge、光ファイバ
In	65	25	5.3	I/Oターゲット残、はんだ、ウェーハ屑	I/O透明電極、ブラウン管
Te	59.8	244	5.6	使用済感光体	快削鋼
Ga	46	2391	79	半導体加工屑	半導体
Hf	36		s	超合金自家発生屑	原子炉制御棒
Re	33.6	82	49	使用済触媒	触媒、フィラメント
Tl	13		0	-	ガラス添加
Be	7.1	54	26	ベリリウム銅屑	ベリリウム銅
Bi	2.8	32	s		
Cs	NA		0	-	触媒
Pd			9.9	使用済触媒、電子部品加工屑	電子部品、歯科材料
Rb			0		光学ガラス

これらは資源の利用効率を高めている。一部のレアアースでは経済的にリサイクルが成立しないものもある。また、有力な代替物が出現した場合、突然に経済規模が激減し、探鉱リスクが増加することもある。表 1.3 にはレアメタルリサイクルや代替材料の開発について代表的なインジウム、REM、触媒金属、タングステン、コバルト、工具鋼について整理した³⁾。

表 1.3 レアメタルの長期的課題³⁾

	供給元の多様化	工程内リサイクル	使用済製品リサイクル	代替材料開発
インジウム(液晶パネル)	<ul style="list-style-type: none"> ○インジウム含有量の高い重鉛鉱石の確保、亜鉛製錬所のインジウム生産能力の拡大の可能性の検討 ○より経済性のあるインジウム回収技術の開発による製造コスト低減 	<ul style="list-style-type: none"> ○液晶パネル等製造時における工程くずの発生抑制 ○プロセスの収率・経済性の向上(ITOターゲット) ○内張り材料の開発(内壁)、抽出コストの低減(パネル不良品) 	<ul style="list-style-type: none"> ○インジウム抽出コストの低減等。 	<ul style="list-style-type: none"> ○用途分野等に合わせた代替材料の開発 ○代替製品開発を見据えた材料開発
レアアース(ネオジム磁石)	<ul style="list-style-type: none"> ○探鉱開発、休止鉱山の再開 	<ul style="list-style-type: none"> ○磁石製造時における工程くずの発生抑制 ○リサイクルコストの低減:経済性のあるリサイクルプロセスの開発・整備 	<ul style="list-style-type: none"> ○最終製品からのリサイクルのための要素技術の開発・高度化とこれらのシステム化。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ネオジウム鉄ボロンに変わる磁石の金属間化合物の開発、ネオジウム鉄ボロン磁石の磁気欠陥の制御技術、磁石結晶の微細化技術の開発。
レアメタル全般(触媒)	<ul style="list-style-type: none"> ○探鉱開発資金の確保、探鉱開発技術の開発、日本への供給ルートの確保 	<ul style="list-style-type: none"> (触媒製造において工程ロスほとんど発生しない。) 	<ul style="list-style-type: none"> ○海外での回収ルートの整備と制度的障害の除去 ○技術の優位性の維持。 	<ul style="list-style-type: none"> ○触媒ユーザーにおける実証試験体制の確立。
タングステン(超硬工具)	<ul style="list-style-type: none"> ○さらなる探鉱開発、休止鉱山の再開 	<ul style="list-style-type: none"> ○超硬工具用途としてのリサイクルのため経済性のあるプロセスの開発・整備 	<ul style="list-style-type: none"> ○回収ルートの整備と回収量(ロット)の確保 ○経済性のあるリサイクル技術の確立 	
コバルト(リチウムイオン電池)	<ul style="list-style-type: none"> ○新規ニッケル鉱山に対する探鉱開発と調達ルートの確保(リチウム) 	<ul style="list-style-type: none"> ○高純度回収技術の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ○回収率向上に向けた取組 ○高純度回収技術の開発 	
レアメタル全般(特殊鋼)	<ul style="list-style-type: none"> ○新規探鉱開発 	<ul style="list-style-type: none"> (工程くず(自家発生くず)は、ほぼ100%リサイクルされている。) 	<ul style="list-style-type: none"> ○徹底した分別による未回収資源のリサイクルの促進 	<ul style="list-style-type: none"> ○産官学連携による基礎的研究開発の促進。

レアメタルのリサイクル事業では、天然資源と同等以上の経済性を持たせる必要がある。このためには大量生産体制をいかに作り、いかに既存の非鉄精錬産業の副産物回収システムやプロセスを有効利用できるかが鍵となる。また一定の処理量を確保するための人工鉱床を準備する必要がある。

(参考文献)

- 1) 原田幸明、金属材料のリサイクル、<http://www.nims.go.jp/ecomaterial/>
- 2) 鉱物資源マテリアルフロー分析調査、2005年7月金属資源レポート、p.12
- 3) 馬場洋三、レアメタルを巡る最近の動向、廃棄物学会リサイクル研究部会講演資料、2007年8月24日、p.29

3. 具体的製品事例

3.1 液晶テレビ（インジウム）

3.1.1 インジウムの資源分布

インジウムは図 3.1.1 に示すような光沢のある銀白色の金属で、軟らかく可鍛性や展延性



図 3.1.1 インジウム¹⁾



図 3.1.2 ITO ターゲット¹⁾

に優れている。融点が 154.6℃と低く、ガラスやセラミックスの表面と接合できるので、電子材料として適している。酸化インジウム(In_2O_3)に数%の酸化スズ(SnO_2)を添加すると可視光の透過率が約 90%以上の透明な導電体 (ITO: Indium Tin Oxide :酸化インジウム錫) となるので、液晶、プラズマ、有機 EL などのフラットパネルディスプレイの電極材 (図 3.1.2 に示す、透明導電膜) として多用されており、今後、フラットテレビの大型化と普及に伴い需要が急速に伸びると予想されている。また、ボンディング、半導体素子 (InP : 燐化インジウム)、電池材料、ベアリング等にも用いられている。

インジウムはこれまで主に亜鉛精錬工程の副産物として回収されており、その埋蔵量はカナダ(2,000 t)、中国(1,300 t)、米国(600 t)と推定されてきた²⁾。これに対して日本メタル経済研究所は、最近、信頼性の高い亜鉛の埋蔵量および各鉱床のインジウム含有率から埋蔵量を表 3.1.1 に示すように再計算し、インジウム埋蔵量を約 30,000 t と発表した³⁾。

表 3.1.1 インジウムの埋蔵量および資源量の試算 (t) ³⁾

No.	国名	①亜鉛(kt)		②インジウム(t)		③インジウム/亜鉛比(%)	
		[出典: 下記資料]		[本調査研究推定(*1)]		[本調査研究推定推定]	
		鉱石埋蔵量	概測・精測	鉱石埋蔵量	概測・精測	鉱石埋蔵量	概測・精測
		Reserves	鉱物資源量 Reserve base	Reserves	鉱物資源量 Reserve base	Reserves	鉱物資源量 Reserve base
1	ペルー(*1)	18,200	20,000	4,700	5,170	0.032	0.032
2	豪(*2)	22,000	41,800	2,690	5,120	0.015	0.015
3	ボリビア(*3)	5,300	6,600	2,560	3,180	0.060	0.060
4	露(*4)	20,000	34,000	2,300	3,920	0.014	0.014
5	ポルトガル(*5)	1,300	4,000	2,210	6,800	0.212	0.212
6	加(*6)	5,226	14,728	1,860	5,240	0.044	0.044
7	中国(*7)	25,184	37,560	1,779	3,014	0.005	0.008
8	墨(*8)	4,000	6,000	540	810	0.017	0.017
9	南ア(*9)	7,000	9,000	370	480	0.007	0.007
10	カザフ(*10)	17,000	32,000	330	620	0.002	0.002
11	米国(*11)	30,000	90,000	290	880	0.001	0.001
12	スペイン(*12)	2,500	3,000	130	150	0.006	0.006
13	チリ(*12)	300	600	80	150	0.031	0.031
14	独(*12)		3,600		700		0.024
	日本(*13)					0.169	0.169
	その他(*14)	61,900	157,112	8,100	21,740	0.020	0.020
	合計(*14)	320,000	460,000	30,000	62,000	0.014	0.008

表 3.1.2 インジウムの主な供給国 (t) ⁴⁾

	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年 (推定)
中国	34	59	73	100	129	118	197	274	292	262	183
日本	40	50	50	50	55	60	74	75	76	89	121
カナダ	25	30	35	35	45	45	43	72	63	82	90
韓国	—	—	—	—	—	—	—	—	34	70	90
ベルギー	40	40	35	35	40	40	30	30	30	35	35
アメリカ	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
カザフスタン	—	—	—	—	—	—	—	15	15	15	15
ロシア	30	15	15	15	15	15	7	7	7	12	12
フランス	35	35	43	43	65	65	10	5	0	0	0
その他	32	44	24	25	24	25	26	25	26	26	26
一次地金供給 合計	251	288	290	318	388	383	402	518	558	606	587
日本	—	—	—	—	—	120	161	270	350	530	680
中国	—	—	—	—	—	49	51	132	120	137	20
その他	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
二次地金供給 合計	—	—	—	—	—	169	212	402	470	667	700
日本	180	210	274	337	325	353	399	541	696	888	1,146
アメリカ	50	50	52	55	65	85	90	100	115	125	136
その他	42	45	45	56	63	65	67	69	71	73	58
					(うち中国)	(15)	(18)	(24)	(31)	(34)	(39)
需 要 合 計	272	305	371	448	453	503	556	710	882	1,086	1,340

3.1.2 インジウムの需給

表 3.1.2 に示すように世界のインジウムの一次地金生産量は増加しており、2006 年において中国 262 t、日本 89 t、カナダ 82 t、韓国 70 t、ベルギー 35 t、米国 15 t、カザフスタン 15 t、ロシア 12 t で、特に韓国、カナダ、日本など 3 カ国の生産量は急速に伸びている³⁾。一次地金の供給量は中国と日本で全世界の 50 %以上を占め、寡占状態にあると言える。しかしインジウムは亜鉛精錬の副産物であるため、亜鉛を産出するオーストラリア、カナダ、チリ、ペルー、ボリビア、メキシコなどの国々は、潜在的なインジウムの供給可能国と考えられる。インジウムの大部分はフラットパネルディスプレイ用の透明電極材として利用されているが、液晶テレビ等の最終製品に使用し消費されるインジウム量は全体の数%に過ぎず、大部分は製造段階で回収されて二次地金として再び供給される。日本の二次地金の生産は、2002 年 120 t であったが、2006 年には 530 t と急増しており、日本や中国から供給される二次地金の合計は、全世界の一次地金供給量を上回っている。

表 3.1.3 ITO の企業別生産量³⁾

(単位:t)	2004	2005	2006	2007	2008	2009
日鉱金属(磯原)	252	360	480	600	600	600
東ソー(山形)	72	180	240	240	360	360
ISエレクトロード・マテリアル(*青梅)	24	96	96	180	240	240
アルバックマテリアル(鹿児島、千葉)	12	12	36	36	36	36
三井金属鉱業(三池)	44	88	120	160	200	200
日本における生産計	404	736	972	1,216	1,436	1,436
台湾(三井金属鉱業:台湾特格)	88	176	240	320	400	400
三井金属鉱業(三池+台湾特格)	132	264	360	480	600	600
日本企業計	492	912	1,212	1,536	1,836	1,836
韓国(三星コーニング)	120	120	144	240	240	240
中国(主要3社ほか)	3	4	4	6	7	7
世界計	615	1,036	1,360	1,782	2,071	2,071

ITO の企業別生産量は、表 3.1.3 に示すように日鉱金属、三井金属、東ソがほぼ市場を独占しており、日系企業全体の生産量は全世界の約 89%に達している。

3.1.3 インジウムの価格

インジウムの価格は、図 3.1.3 に示すように 2002 年には 100 US\$/kg 程度であったが、その後、透明電極用 ITO ターゲット材の需要急増で価格が急騰し 2005 年には 1000 US\$/kg 以上に達した。その後 2006 年以降は若干低下し、2007 年では約 700 US\$/kg 前後を推移している⁴⁾。ITO 屑や洗浄屑のリサイクルの採算ラインは、それぞれ 50~70 US\$/kg, 200 US\$/kg 程度であり、現在、各 ITO 電極の生産工程内におけるリサイクルが進められている。また、

亜鉛鉱さいからのインジウム回収の採算ラインは約 400～500 US\$/kg 程度と推定されており、インジウムの高価格がこのまま長期間続けば、インジウムの新規回収施設の建設が始まると考えられる。中国では、いわゆる資源戦略に基づいて 2004 年からインジウムの輸出制限を始めており、中国の動向が世界の需給・価格に多大なる影響を与えている。また、インジウムは主に亜鉛や錫などの副産物として生産されるため、インジウムそのものの需給・市況ではなく、主産物である亜鉛などの需給・市況により生産量や価格が影響されることも多い。

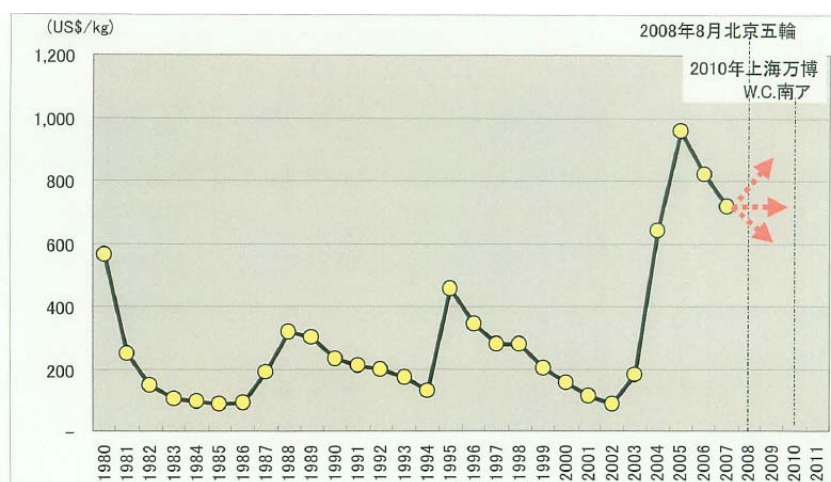


図 3.1.3 インジウムの価格変動⁴⁾

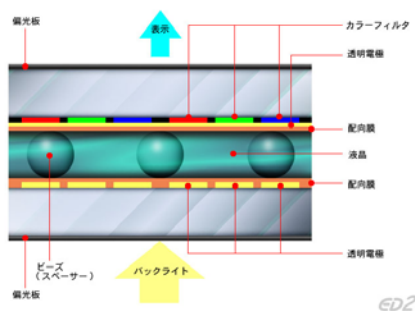
3.1.4 インジウムの用途

日本のインジウムの全需要量 888t (2006 年) の 96%に相当する 850 t が表 3.1.4 に示すようなフラットテレビのディスプレイ製造用の透明電極 (790 t) 及びボンディング材 (60 t : ITO ターゲット材製造用) に使用された。2006 年の海外における需要量は、米国 125 t (11.5%)、中国 34 t (3%) と推定され、米国の用途は ITO 88 t (70%)、電子部品・半導体 15 t (12%)、合金・はんだ 15 t (12%) で、中国では主にアルカリ電池用 25 t (74%) に使用された。

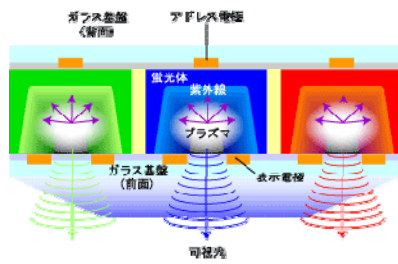
表 3.1.4 日本のインジウムの需要⁴⁾

	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年 (推定)	
一次地金生産量	35	50	50	50	55	60	74	75	76	89	121	
二次地金生産量	91	103	137	173	127	120	161	270	350	530	680	
輸入量	101	85	91	131	171	140	264	421	422	433	420	
供給 合計	227	238	278	354	353	320	499	766	848	1,052	1,221	
《用途別需要》	透明電極	145	165	223	282	260	298	340	470	610	790	1,030
	ボンディング	6	10	15	18	19	21	25	35	46	60	78
	化合物半導体	6	9	9	9	17	7	7	7	7	9	9
	蛍光体	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	低融点合金	3	6	6	6	8	6	6	8	12	8	8
	電池材料	4	5	6	6	5	5	5	5	5	5	5
	歯科用合金	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	ベアリング	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	その他	7	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
	需要 合計	180	210	274	337	325	353	399	541	696	888	1,146

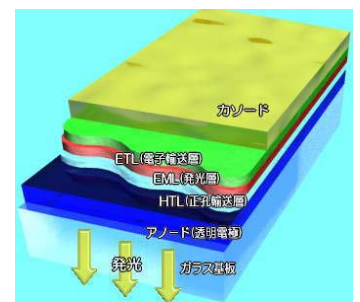
インジウムは、図 3.1.4 に示すように液晶ディスプレイ (LCD : Liquid Crystal Display) において、2 枚のガラス板に挟まれた液晶に電圧を印加するための透明電極(ITO)として利用されている。ITO を使用しない初期の液晶パネルでは光の透過率が低かったが、透明な ITO を用いることにより輝度やコントラスト比が高まり用途が飛躍的に広がった。また、プラズマディスプレイ (PDP : Plasma Display Panel) や有機 EL ディスプレイ (ELD : organic Electro Luminescence Display) などにおいても透明な電極材として利用されている。インジウムはこの他に、化合物半導体、蛍光体、低融点合金、電池材料、歯科用合金、ベアリングなどにも利用されている。また最近、インジウムを添加した高輝度の発光ダイオード (LED : Light Emitting Diodes) が開発され、省エネルギー対策として各種ランプ、車のヘッドライト、交通信号等への使用が増加している。



液晶の構造⁵⁾



プラズマディスプレイの構造⁶⁾



有機 EL の構造⁷⁾

図 3.1.4 フラットディスプレイにおけるインジウムの役割

フラットテレビの普及は今後急速に進むと予想されており、ディスプレイ方式が上記のどの方式が主流になろうとインジウムは使用される。しかし、インジウムの製造工程内リサイクルの促進、ITO 製法の効率化、およびディスプレイ製造技術の向上により、インジウムの単位面積当たりの使用量は減少するため、将来のインジウムの需要増加は図 3.1.5 に示すように鈍化すると考えられている。

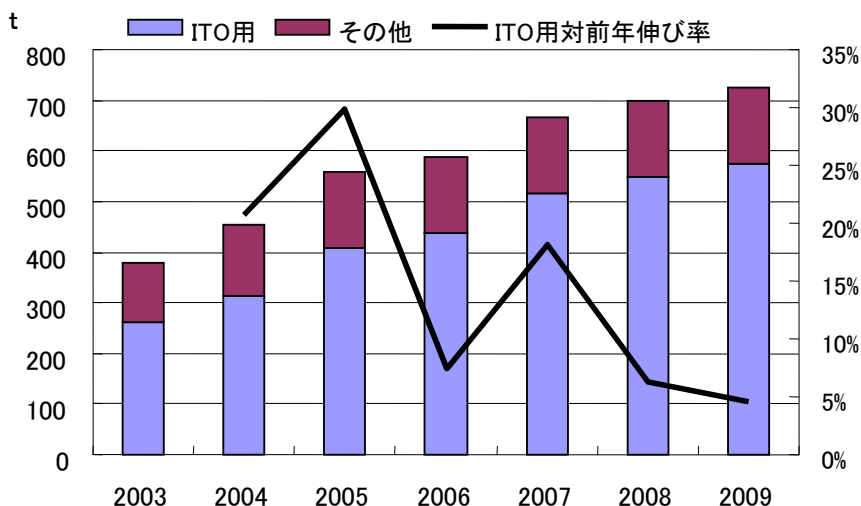


図 3.1.5 インジウム需要予想 ¹⁾

3.1.5 液晶ディスプレイ製造におけるインジウムのマテリアルフロー ⁴⁾

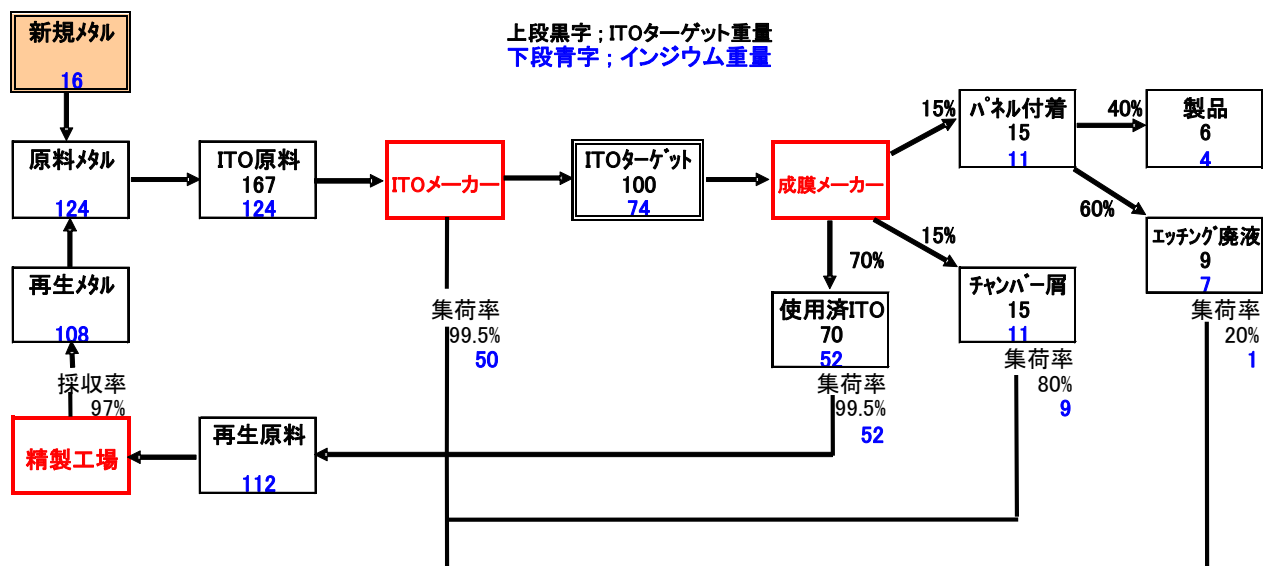


図 3.1.6 ITO 製造におけるマテリアルフロー ¹⁾

液晶ディスプレイを製造する場合、ITO ターゲットは初期重量の 30%程度使用すると製品表面に均一にインジウムをスパッタリングで蒸着できなくなるために交換され、再生原料となる。また、スパッタリング時にチャンバーやマスキング材に付着する割合も多く、最終製品である液晶ディスプレイの透明電極として消費されるインジウムは僅か 4%程度に過ぎない。インジウムの価格が安価であった場合には、使用済みの ITO のみが再生利用されてきたが、インジウムの価格が上昇するに従ってチャンバー屑やエッチング廃液からのインジウムが回収・再利用されるようになった。現時点では、液晶テレビの再資源化は法制化されておらず、廃棄される数量も少ないため、使用済みの液晶テレビからインジウムの回収は実用化されていない。現在、家電リサイクル法の改定作業の進捗状況を見ながら、液晶テレビを製造しているメーカーを中心に廃液晶ディスプレイからのインジウム回収技術の開発が進められている。

3.1.6 インジウムの利用効率の向上

現在のスパッタリング法では、ITO ターゲットの 30%程度して利用することができない。ITO をインク化して、ガラス基板に直接塗布、加熱融着させる手法の開発が進んでいる。これらの印刷法が実用化されれば、低コストで成膜でき、しかも製造時に廃棄されるインジウムを飛躍的に削減できる可能性がある。しかし現状では、ITO インクを使って ITO 膜を形成すると、スパッタリング法で形成させた一般的な ITO 膜に比べて抵抗率が 1~2 桁程度大きくなる。

3.1.7 インジウムの代替材料

インジウムの価格が一時的ではあるが 1000 US\$/kg を越え、日本の主な輸入先が中国に限定されて安定供給が不安視されているため、ITO に代替できる透明な電極材料の開発が精力的に進められている。表 5 に示すように、現在、酸化亜鉛 (ZnO) を中心に多くの代替物質が研究されている⁸⁾。また、カーボンナノチューブを使ったディスプレイパネルの試作品も日米企業により共同製作され、実用化への進展が注目される。

表 3.1.5 透明電極用 ITO の代替材料の候補⁸⁾

区分	材 料		膜 特 性		特 記 事 項 (成膜条件・測定波長など)
	名称 or 化学式	組成比	比抵抗 ($\times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$)	透過率 (%)	
ITO	In ₂ O ₃	10%SnO ₂	1~3	84~88	-
ITO系	Ag添加 ITO	Ag 1 at%以下	2~3	80~90	RF, 200~250°C, 膜厚2200~2400 Å, $\lambda=400\sim800\text{nm}$, ガラス基板
	Hf添加 ITO	HfO ₂ 2 wt%	1.7	≥85	DC, 350°C, 膜厚3000 Å, $\lambda=550\text{nm}$, ガラス基板
	Y添加 ITO	Y/(In+Sn+Y) 0.1~2 at%	2.1	86.7	DC, 200°C, 膜厚3000 Å, $\lambda=550\text{nm}$, ガラス基板
	Al添加 ITO	Al/(In+Sn+Al) 0.1~2 at%	2	86.7	DC, 200°C, 膜厚3000 Å, $\lambda=550\text{nm}$, ガラス基板
	In ₄ Sn ₃ O ₁₂	Sn 50 at%	2~6	≥85	DC&RF, 350°C, 膜厚3000~6000 Å, ガラス基板
ITO以外 でIn含有	Zn添加 In ₂ O ₃ (IZO)	ZnO 10 wt%	3~4	81	DC&RF, 室温~250°C, ガラス基板
	Ge添加 In ₂ O ₃	Ge/(Ge+In) 5~7 at%	1.2~1.5	87~90	DC, 200°C, 膜厚1500 Å, $\lambda=550\text{nm}$, ガラス基板
	CdIn ₂ O ₄ (CIO)		2.3	80~90	RF, 膜厚2900 Å, $\lambda=400\sim800\text{nm}$, ガラス基板
	Zn ₂ In ₂ O ₅	Zn/(Zn+In) 30 at%	3.9~5	≥80	DC&RF, 室温~350°C, 膜厚4000 Å, ガラス基板
	In ₃ SbO ₇		2.5~3.8	88~93	DC, 500°C, 膜厚1900~2020 Å, ガラス基板
	Ag添加ZnO/In ₂ O ₃	Ag 0.05~3 at% Zn/In 1~7/2(比)	6.5~7.2	80~84	RF, 150°C, 膜厚2800 Å, $\lambda=380\sim780\text{nm}$, ガラス基板
	In無含有	Al添加 ZnO (AZO)	Al ₂ O ₃ 2 wt%	1.4~6	≥85
	Al,B添加 ZnO	Al ₂ O ₃ 3.5~6.4 at% B 0.5~2.3 at%	6.9~7.3	80~82	DC, 室温, 膜厚5000 Å, $\lambda=550\text{nm}$, ガラス基板 $\lambda=1000\text{nm}$ では透過率76~78%
	Ga添加 ZnO (GZO)	Ga ₂ O ₃ 3~10 wt%	2.2~24	80~87.5	DC, 100~300°C, 膜厚3000 Å, $\lambda=400\sim800\text{nm}$, ガラス基板
	Cd ₂ SnO ₄ (CTO)		1.2	84~92	RF, 膜厚5300 Å, $\lambda=400\sim800\text{nm}$, ガラス基板

(参考文献)

- 1) 高橋英俊「最近のインジウム市場並びに資源調達の現状及び今後」廃棄物学会 リサイクルシステム研究部会講演会資料 6月29日(2007)
- 2) Mineral Commodity Summaries, U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, 79 (2007)
- 3) 細井 明、上木隆司、日本メタル経済研究所 平成 18 年度成果報告書 自主調査研究 No.142 (2006)
- 4) 南 博志「レアメタル 2007(3)、インジウムの需要・供給・価格動向等」金属資源レポート 171(2007)
- 5) 液晶の構造 <http://kyoiku-gakka.u-sacred-heart.ac.jp/jyouhou-kiki/sozai/1603/index.html>
- 6) プラズマディスプレイ http://www.lec-jp.com/it/itsp/mini/ad_mini/ad_mini11.htm
- 7) 有機 EL ディスプレイ <http://www.s-graphics.co.jp/nanoelectronics/kaitai/oel/2.htm>
- 8) 遠藤小太郎 「希少金属の循環とリサイクルーインジウムを例としてー」廃棄物学会 リサイクルシステム研究部会講演会資料 3月26日(2007)

3.2 電池・磁石（コバルト、ネオジム）

3.2.1 コバルトの特性¹⁾

コバルトは、耐腐食性（鉄より酸化されにくく、酸やアルカリにも強い）、助電導性がある金属で、図 3.2.1 に示すように純度の高いものは銀白色の外観となっている。また強磁性、高強度、耐摩耗性、耐熱性などの特性も併せ持っており、磁石、磁性材料やスーパーアロイなどにも使用されている。融点は 1495℃である。コバルト磁石の一例を図 3.2.2 に示す²⁾。



図 3.2.1 コバルト（ $\geq 99.995\%$ ）

3.2.2 コバルトの資源分布³⁾

コバルトはニッケルや銅の副産物であり、埋蔵量は 695 万 t と推定されている⁴⁾。主な鉱石産出国は、コンゴ(48.9%)、オーストラリア(20.1%)、キューバ(14.4%)であり、国別のコバルト埋蔵量は図 3.2.3 のようになっている⁵⁾。



図 3.2.2 コバルト磁石²⁾

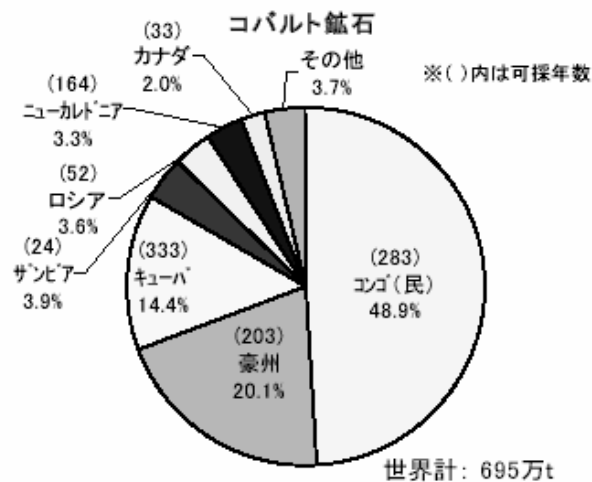


図 3.2.3 コバルト埋蔵量⁴⁾

表 3.2.1 コバルトの生産量推移⁷⁾

		1990年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年(推定)	2006年(予想)
生産国	生産者									
フィンランド	OMG	1,300	6,200	7,700	8,100	8,200	7,990	7,893	8,170	7,800
ザンビア	Chambishi, Mopani	4,844	3,946	3,342	4,665	6,144	6,620	5,791	5,422	5,500
ノルウェー	Falconbridge	1,830	4,009	3,433	3,314	3,993	4,556	4,670	5,021	5,200
カナダ	ICCI (Sheritt)	688	2,770	2,855	2,943	3,065	3,141	3,225	3,391	3,200
	INCO	1,380	1,420	1,470	1,450	1,480	1,000	1,562	1,563	2,000
ロシア	Norilsk	0	4,000	4,100	4,600	4,200	4,654	4,524	4,748	4,800
オーストラリア	Queensland Nickel	0	1,539	1,520	1,818	1,863	1,800	1,900	1,400	1,800
	Murrin Murrin	0	83	905	1,452	1,838	2,039	1,979	1,750	2,000
モロッコ	CTT	0	470	1,200	1,200	1,354	1,431	1,593	1,613	1,500
ブラジル	Tocantins	70	630	792	889	960	1,097	1,155	1,136	1,300
日本	住友金属鉱山	198	221	311	350	354	379	429	471	850
コンゴ民主共和国	Gecamines	10,033	5,180	4,320	3,199	2,149	1,200	735	600	600
その他生産者		399	1,976	2,500	3,008	3,188	5,297	6,701	13,002	13,900
再生品		1,000	950	1,110	1,090	1,135	1,704	2,947	3,298	3,400
アメリカ戦略備蓄放出		0	1,679	3,083	1,893	1,284	1,987	1,632	888	1,000
供給合計		21,742	35,073	38,641	39,971	41,207	44,895	46,736	52,473	54,850
日本		4,300	7,500	8,700	8,200	9,400	11,000	12,600	13,000	14,300
中国		1,000	3,500	3,800	4,000	5,000	6,400	8,500	9,800	12,800
アメリカ		7,500	10,700	11,600	11,800	9,800	10,000	10,000	10,800	11,700
欧州		6,600	7,500	7,800	8,000	7,200	7,800	8,200	8,600	9,100
その他		2,000	2,700	2,800	3,300	4,300	5,000	5,700	6,600	7,300
需要合計		21,400	31,900	34,700	35,300	35,700	40,200	45,000	48,800	55,200
需給バランス		342	3,173	3,941	4,671	5,507	4,695	1,736	3,673	-350

3.2.3 コバルトの需要

国内では1.5万tのコバルトが消費されている(2005年)¹⁾。一方、コバルト地金の生産量は1997年ごろ2.8万tであったが、2008年には1997年の2倍以上の6.4万tになると予想されている⁶⁾。

表3.2.2に国内におけるコバルトの需要推移を示す。なお、表には最大の需要である二次電池は含まれていない(二次電池需要量は3.2.4で述べる。)

表 3.2.2 コバルトの需要推移

	2002年	2003年	2004年
特殊銅	730	1,041	873
磁石	193	173	210
超硬	206	307	419
触媒	134	257	254
電子合金	367	404	489
その他	230	1,360	1,181
合計	1,859	3,541	3,426

出所：工業レアメタル2005、経済産業省資源統計月報

3.2.4 コバルトの価格⁵⁾

コバルトの価格は、図 3.2.4 に示すように 1995 年に最高値の US\$65/kg であったものが、中国等の経済発展により 2002 年を底値として急騰し 2004 年には US\$50/kg を越えたものの、2005 年には再度低下している。

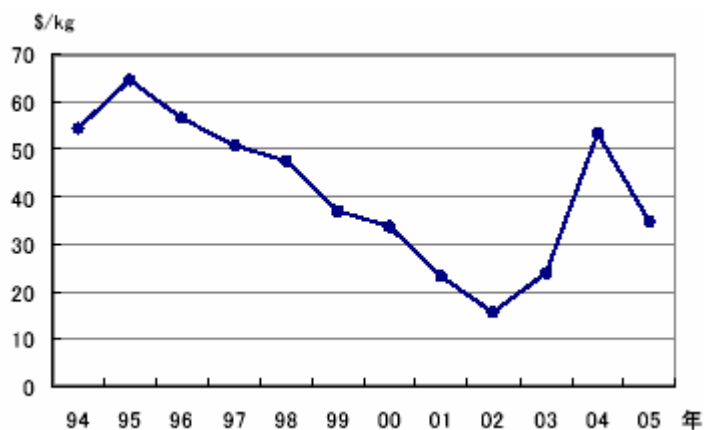


図 3.2.4 コバルトの価格推移

国内におけるコバルトの最大の用途は二次電池向けであり、二次電池向け用途の 95%以上がリチウムイオン二次電池用と推定されている。携帯電話やノートパソコンの生産増大に伴い、リチウムイオン電池の生産数量も、4.53 億個（2001）→5.68 億個（2002）→7.63 億個（2003）→7.79 億個（2004）と増加し続けているが、これに加えハイブリッド自動車用バッテリーもニッケル水素電池からリチウムイオン電池に代わっていくことから、コバルトの需要や価格へ大きく影響を与えることが予想される。

3.2.5 コバルトの採掘、精製⁷⁾

コバルトの精錬法は、①銅・コバルトの硫化鉱、酸化鉱からの精錬、②ニッケル精錬時の回収物からの精錬、③含コバルト黄鉄鉱からの精錬がある。

図 3.2.5 に住友金属鉱山がフィリピンで稼働させている②の方法である HPAL 法（高圧硫酸浸出）のプラント外観を示す。

同社では、この工場においてニッケル・コバルト硫化物を生成し、その硫化物を国内の工場に運搬して、溶媒抽出によりニッケルとコバルトを生産している。

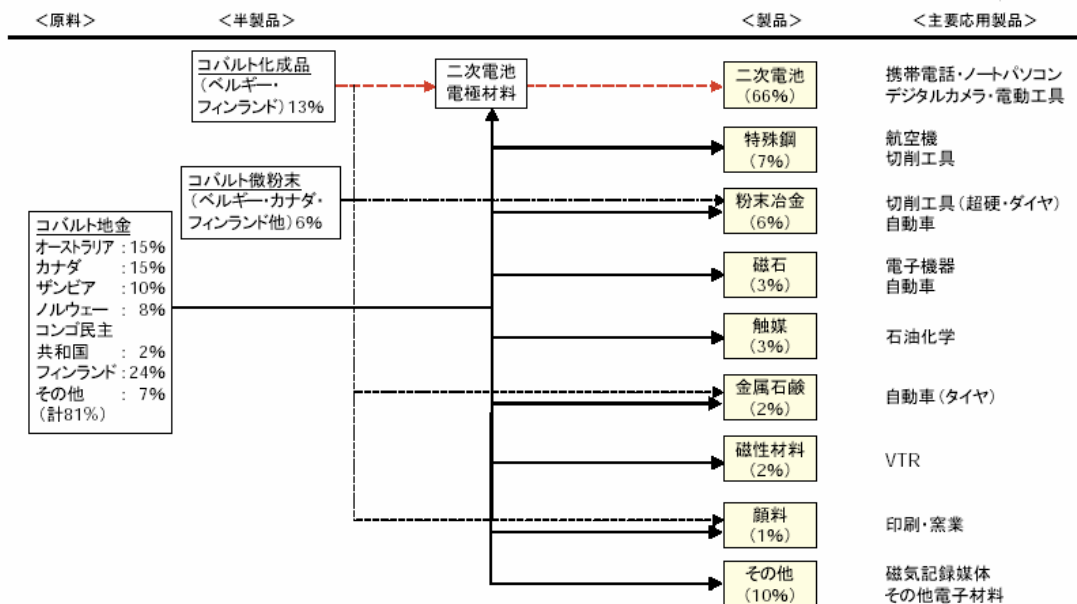


図 3.2.5 HPAL 法プラント

3.2.6 コバルトの用途とマテリアルフロー⁷⁾

3.2.3 で述べたように、コバルトの最大の用途はリチウムイオン二次電池であり、図 3.2.6 に示すように、66% (10,570t 2004 年) が消費されている。

また耐磨耗性・高強度の特性から特殊鋼や粉末冶金、強磁性から磁石や磁性材料などに利用されている。3.2.4 に述べたように今後はリチウムイオン二次電池としての用途が急速に拡大すると考えられる。



1. 資源量 : 13 百万 t (U. S. Geological Survey 推定)
2. 可採埋蔵量 : 7 百万 t (U. S. Geological Survey 推定)
3. リサイクル : 参考として 1999 年ベースを記載 (量の単位は Co 純分t)

出典:平成17年度特殊金属プロジェクト報告書(特殊金属備蓄協会)

図 3.2.6 コバルトの用途

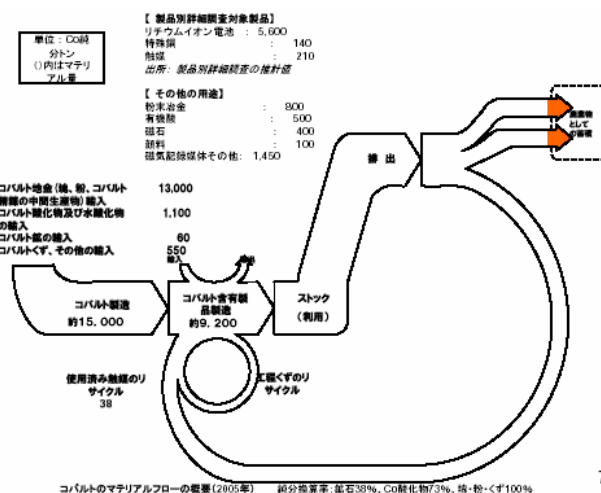


図 3.2.7 コバルトのマテリアルフロー¹²⁾

3.2.7 コバルトの代替材料³⁾

電池の正極材料として古くはマンガンが使われてきたが、放電容量の不足やサイクル特性の低さなどの課題が残されていた。産業技術総合研究所⁸⁾などの研究により2004年にコバルト-マンガンのハイブリッド材料が開発され、コバルトの使用量を半減させた製品が既に流通している。

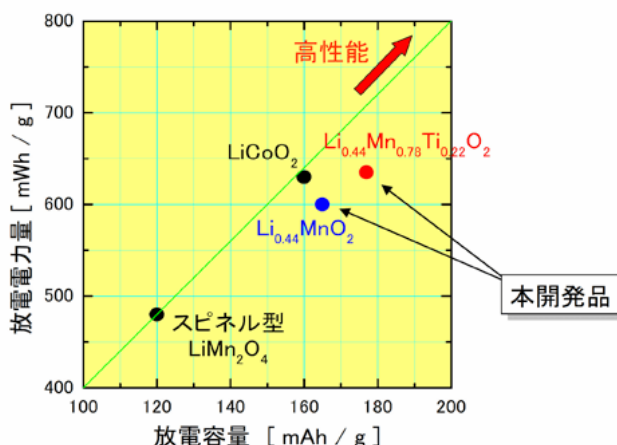


図 3.2.8 リチウムイオン電池用正極材料の放電容量

3.2.8 コバルトのリサイクル

コバルトの最大の用途である二次電池からの回収技術は実用化レベルに達しているが、回収システムの構築が今後の課題と言われている。リチウムイオン電池スクラップからのコバルトの回収は、国内ではティーエムシー社（大阪府東大阪市）だけで行われている。その他の用途も含めたコバルトのリサイクル状況を表 3.2.3 に示す。

表 3.2.3 コバルトのリサイクル状況⁷⁾

主な応用製品	利用形態	使用済品の存在形態・量		リサイクル形態		
		形態	量 (注①)	リサイクルの実態	リサイクルのサイクル (注②)	リサイクル率
工作機械, 鉱山機械	超硬工具(約 10%)	使用済みチップ		専門業者が集荷	1年	%
一般工具, 工作機械, 航空機, タービン	切削工具, 炉製品, エンジン部品(4~40%)	使用済み工具, 鋼材スクラップ		専門業者が集荷 特殊鋼用の溶解原料として使用	5年	%
音響機器, 電子機器	SmCo 系磁石(66%) アルニコ系磁石(4~20%)	機械部品		リサイクルなし 専門業者が集荷	(5年) 5年	0% %
電子機器	蒸着材料(100%)	パッケージ等		リサイクルなし	(5年)	0%
石油化学用	触媒(約 4%, 一部約 50%)	使用済み触媒			2年	%
石油精製用	触媒(約 2%)	使用済み触媒			(2~8年)	%
VTR テープ	磁気テープのコティング層添加剤	テープ		リサイクルなし	(3年)	0%
NiCd 電池	電極材(約 5%)	使用済み電池		法的規制	(5年)	%
NiMH 電池 Li イオン電池	電極材料(5~20%)	使用済み電池		リサイクルが始まったが, 量は不明	(5年)	%
ガラス	添加剤	ガラス廃材		リサイクルなし	(5年)	0%
鍋, タンク	ホロボの下塗り	ホロボ廃材		リサイクルなし	(3年)	0%
電子機器	ソフтверайт	電子機器		リサイクルなし	(5年)	0%

(注)①量の単位: ()内は使用量純分トン、その他は発生量純分トン

②サイクル: ()内は推定使用年数、その他は実リサイクル年数

3.2.9 ネオジムの特性

ネオジウムはランタノイドに属する銀白色の金属で、融点は1024℃となっている。地球にはバストネサイトやモナザイトに含まれた形で存在しており（レアアースの99%はこのどちらかに含まれて存在している）、鉄やホウ素との化合物が強力な磁性を示すことから、レアアース以外では性能が発揮できない環境で使用されるモーターに使用されている。



図 3.2.9 ネオジウム

3.2.10 ネオジウムの資源分布

3.2.9 に述べたようにネオジウムの資源分布は、バストネサイト及びモナザイトの分布と同じである。表 3.2.4 にバストネサイト及びモナザイト中のレアアースの埋蔵量を示す。

表 3.2.4 レアアース埋蔵量（酸化物バランス試算）（単位 1,000t）⁴⁾

レアアース酸化物	バストネサイト 鉍山(Mt.Pass(USA), Baiyun Obo(China))	モナザイト 鉍山 (USA,China, Australia,India)
La ₂ O ₃	7676	3566
CeO ₂	13774	7055
Pr ₆ O ₁₂	1356	679
Nd ₂ O ₃	4081	2539
Sm ₂ O ₃	278.2	502.1
Eu ₂ O ₃	51.0	13.6
Gd ₂ O ₃	106.2	301.8
Tb ₄ O ₇	23.7	14.2
Dy ₂ O ₃	71.3	138.3
Ho ₂ O ₃	23.7	13.3
Er ₂ O ₃	47.1	66.4
Tm ₂ O ₃	24.2	65.9
Yb ₂ O ₃	23.7	67.3
Lu ₂ O ₃	23.7	12.8
Y ₂ O ₃	74.3	419.1
Total	27633	15451

また、表 3.2.5 に示すようにレアアースの埋蔵量は 31%、資源量は 58%を中国が 80%を占めており、また鉱石生産量は 2004 年時点で中国が 93%となっており、レアアース産業は中国に依存していると言える。2004 年の時点での埋蔵量は約 87,000 kt と推定されている。

表 3.2.5 レアアースの埋蔵量と資源量 (単位 1,000t) ⁹⁾

	埋蔵量	埋蔵量ベース
中国	27,000	89,000
ロシア	19,000	21,000
米国	13,000	14,000
豪州	5,200	5,800
インド	1,100	1,300
マレーシア	30	35
その他	22,000	23,000
合計	87,330	154,135

3.2.11 ネオジムの需要 ¹⁰⁾

2004 年の焼結磁石用ネオジムの消費は 4,000 t と見られている。表 3.2.6 にレアアース全体の国内需要を示す。表のうち、磁石用途の大部分をネオジムが占めていると見なす。また表 3.2.7 にネオジム磁石の生産量を示す。

表 3.2.6 レアアースの国内需要

	2000 年	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年
輸入	26,928	19,736	22,571	25,705	26,758
供給計	26,928	19,736	22,571	25,705	26,758
国内需要					
研磨剤	3,738	2,544	3,721	4,061	6,000
蛍光体	n.a	n.a	850	1,200	400
紫外線吸収ガラス	2,832	2,381	2,366	2,257	2,000
工学ガラス・レンズ	526	409	384	437	1,200
磁石	3,918	3,204	3,483	4,185	4,300
水素吸蔵合金	2,360	1,490	3,920	3,560	3,200
その他					
需要計					

(財務省貿易統計、2000～2003 年はレアメタル備蓄事業調査報告書、

表 3.2.7 ネオジム磁石の生産量⁹⁾

		Nd 磁石の生産量*1 (トン/年)
自動車用	EV 用	360
	パワーステアリング	600
	その他 (自動車用)	600
	自動車用小計	1,560
VCM		6,000
MRI		720
FA		1,200
音響		1,800
家電製品		1,800
ピックアップ		600~1,200
合計		12,480~13,080

3.2.12 ネオジムの価格¹¹⁾

ネオジムの価格は、2003年の時点で 6.8 US\$/kg であったものが、11.7 US\$/kg (2005)、24 US\$/kg (2007) へと4年間で3.5倍へと高騰している。ネオジム磁石は情報通信機器や携帯電話、パソコンに加えて、ハイブリッド自動車用の駆動モーターと発電機にも使用されており、ハイブリッド自動車1台当たりのネオジム磁石使用量は1~2kgといわれている。今後、ハイブリッド自動車を初めとして自動車用の用途が拡大する場合、ネオジムの価格に大きな影響を及ぼすと予想される。

3.2.13 ネオジムの採掘、精製

3.2.10 で述べたようにネオジムはパストネサイト及びモナサイトに含まれた状態で採掘される。ここでは、埋蔵量の多いパストネサイトからの分離精製方法を、図 3.2.10 に示す。

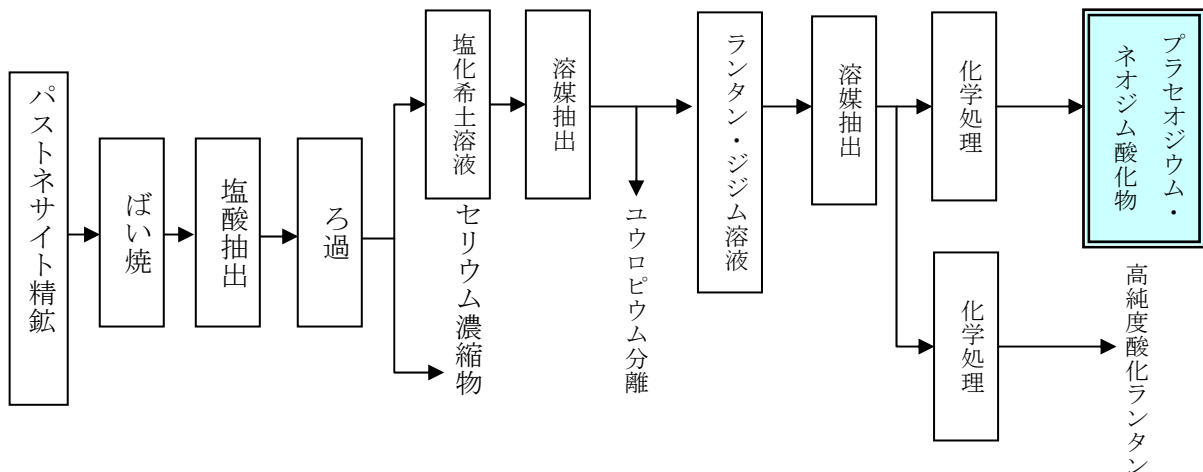


図 3.2.10 ネオジムの分離・精製

3.2.14 ネオジムの用途とマテリアルフロー

ネオジム磁石の用途を表 3.2.7 に示す。図 3.2.11 に示したレアメタルのマテリアルフローから、製品に使用されるネオジムは 2,500 t/年であり、工程くずとして 1,300 t/年が発生しリサイクルされている。

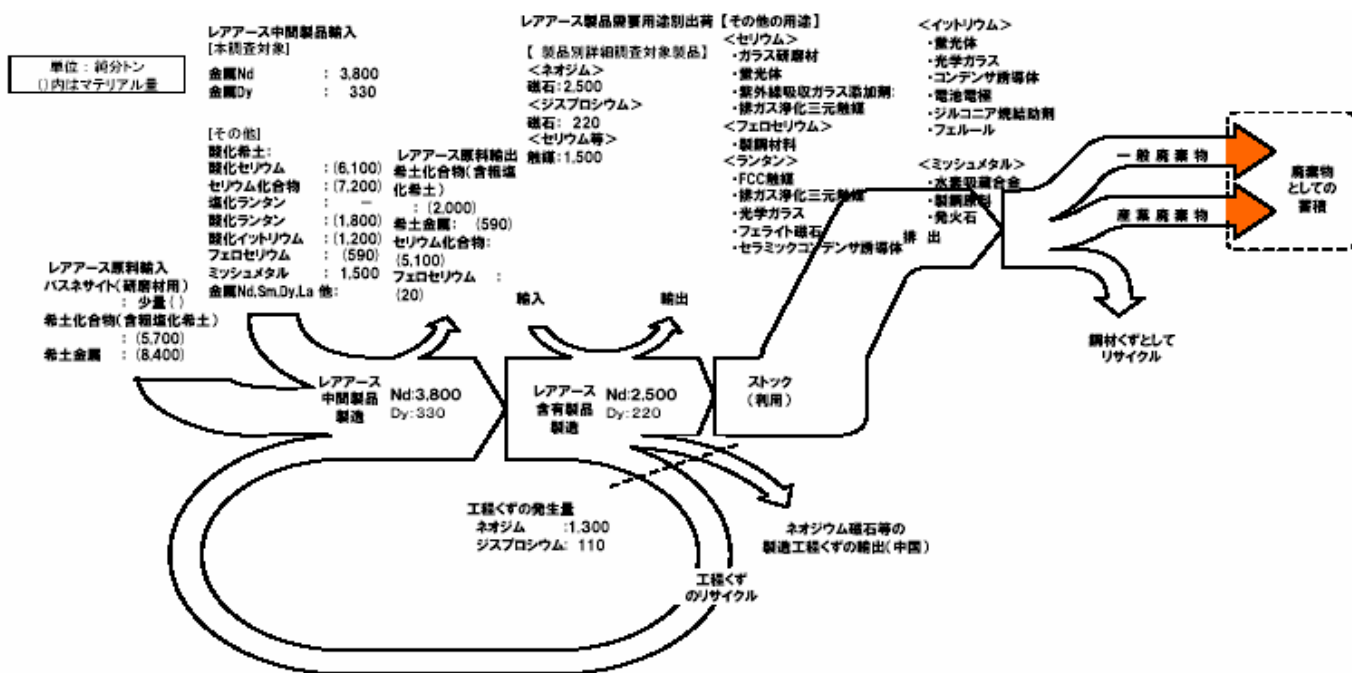


図 3.2.11 レアアースのマテリアルフロー (2005) ¹²⁾

3.2.15 ネオジムの代替材料³⁾

小型モーター用耐熱磁石など、ネオジム以外では性能が発揮できない製品が非常に多く、代替材料を開発するにおいては、まず機能発現の理論研究や界面制御等の材料開発関連技術研究等の推進が先行すべきであり、特にネオジム鉄ボロン磁石に代わる磁石の安定相(金属間化合物)を見つけることが重要である。

3.2.16 ネオジムのリサイクル¹⁾

使用済み製品に含まれるネオジムの回収は行われておらず、他の金属と併せてリサイクルされている。本年度(2007)から国家研究開発プロジェクトとして、「希少金属等高効率回収システムの開発プロジェクト」等が行われている。

工程で発生する工程くずの 35%程度がリサイクルされているが、参考文献 9) によれば、ネオジム磁石の歩留まりは 60%程度となっていることから、歩留まりの向上やリサイクル率の向上などにより、新原料の投入量を減らすことも課題である。

(参考文献)

- 1) 「レアメタルのリサイクルの現状」 (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構
- 2) <http://www.kinkimagnet.com/permanent/cobalt/>
- 3) 「今後のレアメタルの安定供給対策について」 総合資源エネルギー調査会鉱業分科会
レアメタル対策部会 6月11日 (2007)
- 4) 金子秀夫、大町良治、北村健二、吉松史朗 「レアメタル」 森北出版(2005)
- 5) 「諸外国の資源循環政策に関する基礎調査」 経済産業省 2月17日 (2006)
- 6) 西川信康 「21世紀のコバルト需給動向の予想」 (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源
機構
- 7) 南博志 「レアメタル 2006(3)コバルトの需要・供給・価格動向等」 (独) 石油天然ガ
ス・金属鉱物資源機構 (2006)
- 8) http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2004/pr20041122/pr20041122.html
- 9) 「1 希少性資源の需要動向」 経済産業省 2月8日 (2006)
- 10) 「40 レアアース」 (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構(2005)
- 11) 河本洋 「希少金属資源に関する我が国の採るべき方策」 科学技術動向月報(2007)
- 12) 「レアメタル 17 鉱種のマテリアルフローと課題について」 資源エネルギー庁鉱物資
源課 4月27日 (2007)

3.3 自動車・工具

3.3.1 自動車

自動車の構成部品は 1 台につき数万点に及ぶとされている。下記に示すように広い分野にわたる部品から組み立てられる。

エンジン系	…………エンジン、シリンダー、エンジンバルブ、燃料ポンプ、噴射装置、燃料タンク、エアクリーナ、マフラー、触媒、ラジエーター、水ポンプ、スターターモーター
駆動・シャシ系	…………トランスミッション、クランクシャフト、プロペラシャフト、シャシー、ディファレンシャルギヤ、ショックアブソーバ、ホイール、ディスクパッド、サスペンション、パワーステアリング
車体系	…………バンパー、ロアーバック、センターヒラー、センターメンバー、カバーメイン、ルーフパネル、ガラス、アウトサイドミラー、ラジエータグリル、ウエザーストリップ、ミラー、天井内張、シート
電装系	…………ヘッドライト、テールライト、ウインカー、インスツルメントパネル、ワイヤーハーネス、蓄電池、アルミ電解コンデンサ
装備系	…………ファン、カーエアコン

自動車産業において、環境技術が今後のキーテクノロジーになることは間違いなく、自動車の主要構成部品・材料にも変化が起こっている。特に日米欧では大気汚染に繋がる排ガス規制は厳しくなっており、環境を軸とした新素材の開発が進んでいる。また軽量化やリサイクルの観点から材料選定が重要な要素になっている。こうしたことからプラスチック化と並んでレアメタルを使用した新素材は今後とも増加していくものと考えられる。開発進行の例として次のものがある。

① 自動車用の鋼板—車体軽量化のためより強い材質へ¹⁾

高強度鋼板は、強化元素として P により 340MPa 程度、また Si, Mn により 390~440MPa までの強度が出る。780~1,000MPa の極低炭素 IF 鋼は Ti, Nb (ニオブ) が炭素、窒素と炭窒化物として析出固定されバンパーリンフォース、ドアビームなどへの応用性がある。熱鍛用非調質鋼は、0.1%~0.3%の V の添加により靱性が向上し、クランクシャフト、コンロッドなどに使われる。

② 効率の良いモーター

高性能ネオジム系磁石は Dy (ジスプロシウム) 添加により耐熱性が高まる。^{2),3)}
零膨張合金は、Zn, Ga, Cu などの窒化物に Ge を加えることにより膨張率を抑えることができ、クランプ、ヒートシンクへの応用可能性がある。²⁾

3.3.2 工具

工具鋼が含む元素には、鉍石由来の有害元素、精錬過程で入る精錬用元素、性能を付与する有益元素がある。添加ないし加減する主な元素は Cr, Mo, W, Ni, N, Co である。³⁾

Cr：耐摩耗性、焼き戻し抵抗性の向上

Mo：焼入性、耐食性の向上

W：高硬度、高温耐摩耗性向上

V：高温焼き戻しにより非常に固い炭化物になる

Ni：強度、靱性向上

Co：熱間強度保持

① 工具鋼に使われる特殊元素

工具鋼は 4 種類に分類され、特殊元素が多量に添加されている。炭素工具にはレアメタルは含まれないが、冷間金型用には Cr が 0.2%以上含まれ、高硬度の SKD11 には Cr が 11～13%、Mo が 0.8～1.2%、V が 0.2～0.5%含まれる。熱間金型用では Cr が 0.8%以上、Mo が 0.3%以上、V が 0.05%以上含まれ、ものによっては SKD8 で W が 3.8～4.5%、Co が 4～4.5%含まれる。高速度工具鋼ではレアメタルの添加はもっと大きいものが多い。SKH57 では、Cr が 3.8～4.5%、Mo が 3.2～3.9%、W が 9～10%、V が 3～3.5%、Co が 9.5～10.5%も添加される。⁴⁾

② 切削用工具

切削用工具として、粗粒のダイヤモンドを焼結したもの、微粒のダイヤを焼結、超微粒のダイヤモンドを焼結したものがある。このうち超高压焼結体工具 (CBN 工具) には 2 タイプあり、Ti, N ないし Ti, C を介して結合しているタイプは高強度材料の切削加工に、また Co を用い焼結体が結合しているタイプは高硬度材料の高速切削に使われる。⁵⁾

③ その他の元素

合金に使われる次の元素もある。Y (イットリウム) は、特殊鋼、Ni 基超合金の脱酸、脱硫剤として有効で熱間加工性改善効果を持つ。Sm (サマリウム) は、最近ネオジム磁石に変わってきているが、フェライト磁石を上回り、さびにくい特性で十分利用価値がある。Te (テルル) は、鋼に添加して快削性を付与したテルル快削鋼などの用途がある。Bi (ビスマス) は、可鍛鋳鉄の黒鉛安定化やアルミ、鋼の切削性改善のための添加。またガンマ線の遮蔽材としての用途がある⁶⁾

3.3.3.2 金属とリサイクル

3.3.3.2.1 タングステン⁷⁾

タングステン重量コストで、5年くらい前まで4 US\$/kg だったものが12 US\$/kg になっている。リサイクルに関しては以下に示す。

① 高速度鋼関係

高速度鋼の製鋼時におけるスクラップや工具製造時の切削屑、研磨屑等素性のはっきりした物は製鋼時に戻して使われるとともに、最終製品の使用済高速度鋼は鋼屑(スクラップ)として回収され溶解原料として再利用される。

② 超硬合金関係

粉末冶金製造法で作られた超硬工具のタングステン・リサイクルは、特殊鋼製造時にタングステンとコバルトの添加剤として再利用される方法と湿式処理でタングステンを回収し中間原料や特殊鋼(高速度鋼)の原料とする方法の2つが採られる。湿式処理でタングステンを回収した残滓からは更にコバルトが回収される。超硬工具の約30%がリサイクルされていると言われており夫々10%が超硬工具への再利用、10%が特殊鋼(高速度鋼)添加剤、残り10%が輸出と見られている。但し、このリサイクル率は飽くまでも推測であり、現在改めてその実態調査を行おうとする動きがある。

③ その他金属タングステン製品

その他の金属タングステン製品は廃棄製品の回収ルートがはっきりしており且つその回収コストが見合うものはリサイクルされているが大半は回収されずに廃棄処分されている。

④ 触媒

現在、我国で使用されている石油化学系タングステン触媒は、リサイクルのサイクルが6～7年と寿命も長く、使用済触媒からのタングステンの回収は非常に少量と推定される。火力発電所からの脱硝触媒は、タングステン含有量が低いためほとんどリサイクルされていない。

⑤ 染色

染色に使われるものは製品自体が回収されないためリサイクルはされていない。

表3.3.3.1に日本のタングステンの輸入量の推定値を示す。2005年で約1万トンが輸入されている。

表3.3.3.2に日本のタングステン関連業界の生産実績を示す。超硬工具としては約6,000 tが生産されている。高速度鋼はその3倍、金属タングステン(触媒金属)は約4000 tであ

る。表 3.3.3.3 に中間産物に関する主要産業者および生産品国を示す。日本、中国、米国で生産されている。

表 3.3.3.1 日本のタングステン輸入量推定 (W 純分 t)

輸入品目	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年
鉍石	528	492	421	73	2
フェロタングステン	636	428	1,007	1,023	1,193
APT他	4,335	3,386	3,361	4,314	4,473
金属タングステン粉	693	493	452	663	699
タングステンカーバイド粉	1,170	1,086	1,368	1,756	2,072
線・板・棒・その他	636	510	623	747	1,329
合計	7,998	6,395	7,232	8,576	9,768

(工業レアメタル 2006)

表 3.3.3.2 日本のタングステン関連業界の生産実績 (t)

	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年
特殊鋼					
高速度鋼	16,842	14,640	17,535	17,610	18,305
金属					
金属タングステン	3,678	3,303	2,597	4,254	4,131
超硬工具					
切削用	2,834	2,698	2,893	4,080	4,713
耐磨・耐蝕用	1,004	1,004	1,029	1,213	1,347
鉍山土木	210	247	244	204	195
その他	5	9	11	11	13
超硬工具計	4,053	3,958	4,177	5,508	6,268

(工業レアメタル 2006)

表 3.3.3.3 中間産物に関する主要産業者及び生産品国

主要生産者	国	生産品目
日本新金属	日本	タングステン金属、APT、化合物
日本タングステン	日本	タングステン金属、APT、化合物
アライドマテリアル	日本	タングステン金属、化合物
東邦金属	日本	タングステン金属、化合物
東芝マテリアル	日本	タングステン金属、化合物
Xiamen Tungsten Group	中国	タングステン全般
Shizhuyuan Nonferrous Metals Co.	中国	タングステン
Yaogangxian Tungsten Mine	中国	タングステン
Nanchang Co.	中国	タングステン
Allegheny Technologies Inc.	米国	タングステン
Buffalo Tungsten Inc.	米国	タングステン
General Electric Co.	米国	タングステン
Kennametal Inc.	米国	タングステン
Osram Sylvania, Inc.	米国	タングステン

(出典: USGS「Minerals Information, Statistics and Information by Country」、工業レアメタル 2006、新金属データブック 2002、国内各社ウェブサイト他)

図 3.3.3.1 にタングステン製造フロー図を、表 3.3.3.5 にリサイクルの現状を示す。スクラップからのリサイクルは 40% 程度であるが、その他は不明である。

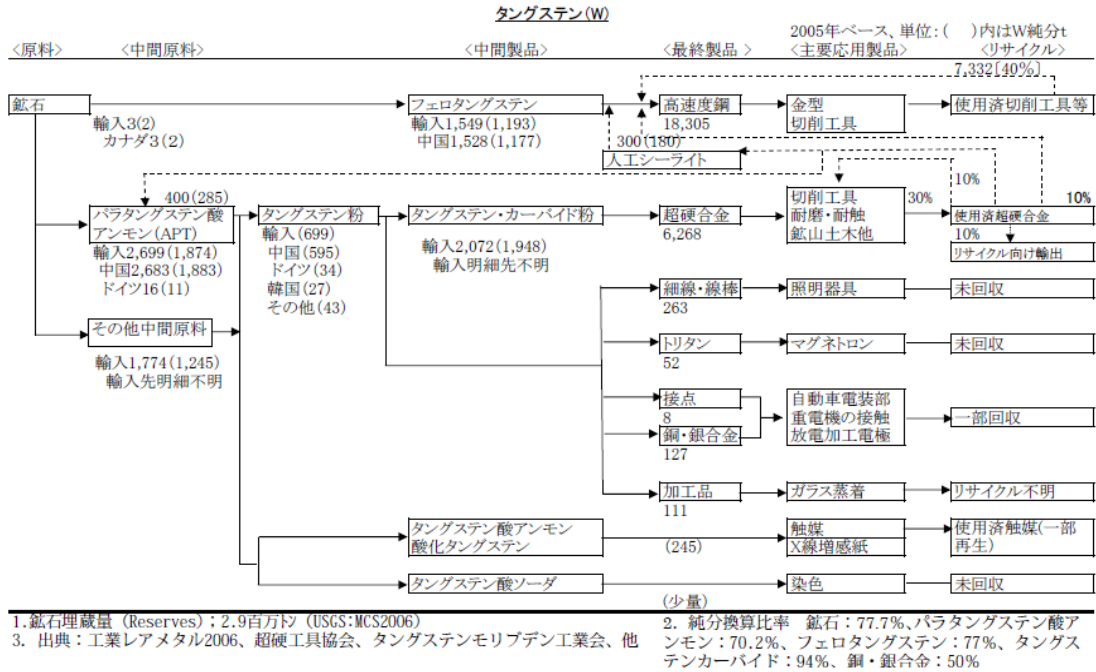


図 3.3.3.1 タングステン製造フロー図

表 3.3.3.5 リサイクルの現状

主な応用製品	利用形態	使用済みの存在形態		リサイクル形態			リサイクルの現状 評価(A~G) (注③)	備考 (注④)
		形態	量(注①) (t)	リサイクルの実態	リサイクルの サイクル(注②)	リサイクル率		
特殊鋼	高速度鋼	切削・研磨屑、スクラップ	18,305	製造工程のスクラップ や屑として回収	7,322	40%		
触媒	木素添加用 重油燃焼脱硝用	廃触媒	不明	リサイクルされる触媒の 大部分は石油精製用直 設法により回収	不明	不明		
超硬工具	超硬合金工具	使用済工具・チップ	6,268	バイト、カッター等の工具 の先端の取り外し可能 な物及び研磨、耐食用 工具がリサイクルの対象	1,880 (6年~7年)	不明		
金属タングステン 製品	照明・電子機器 溶接棒 自動車接点等	製造工程屑、廃棄製品	不明	製造工程中の線、板、 棒鋼として回収	不明	不明		

注 ①の量の単位：
 ()は使用量純分
 その他は発生量純分

②サイクル：
 ()内は推定耐用年数
 その他は実リサイクル量

③現状評価
 A. 応用製品が消耗品である
 B. 添加物として使用されている
 C. リサイクルの流通システムがない
 D. 効果的なリサイクル技術がない
 E. 経済性がない
 F. 需要開発が十分になされていない
 G. その他

④リサイクルのボトルネック
 と、解決の難易度
 毒性、保管の危険性の有無等

3.3.3.1.2 モリブデン

1.5年くらい前まで10 US\$/kgだったものが70 US\$/kgになっている。リサイクルに関しては以下に示す⁶⁾。表3.3.4.1に日本のモリブデン需要量を、表3.3.4.2に日本の酸化モリブデンとフェロモリブデンの生産量を、表3.3.4.3に金属添加用モリブデンの生産量を、表3.3.4.4に粉末製品と加工製品の生産実績を、表3.3.4.5に触媒用モリブデンの消費実績を、表3.3.4.6に中間産物に関する主要生産者と品目を示す。

① 触媒

国内で使用されたモリブデン触媒のうち石油精製用のものはリサイクルシステムが確立されており、直接脱硫用は1～2年、間接脱硫用は7～8年の使用の後、リサイクルされ再利用されている。石油化学工業用モリブデン触媒はアクリロニトリル製造用のものが一部リサイクルされている。

② 無機薬品

モリブデンを含む無機薬品としては、防錆塗料用に塩基性モリブデン酸亜鉛(Mo：25～30%)、着色顔料としてモリブデート赤(Mo：9%)がある。これらは消耗品であるため、最終製品からリサイクルされることはない。

③ 線・板・棒・粉末 スーパーアロイ

金属モリブデンを線、板、棒、箔の形態で使用する応用製品としては、照明器具(マンドレル、反射鏡)、電子管用陰極及びヒーターグリッド、ガラス炉融炉用電極棒、工業炉用発熱体、半導体素子基板用の板、箔、円板、電子レンジの心臓部に使用されるマグネトロン部品(陰極、端子等)等がある。これらのMo含有スクラップの発生元は電気製品メーカーの工場など。工場での選別保管が成されており、専門の回収業者が回収し、ステンレス特殊鋼メーカーでステンレス、またはスーパーアロイの原料としてリサイクルされている。リサイクル率は高くほぼ100%と推定されている。照明用については、業者経由でリサイクルされ、酸処理後にモリブデン塩としてリサイクルされ特殊鋼用に利用されている。スーパーアロイに関しては、工場内でのスクラップはほぼ全量原料として回収されているが、製品として出荷された後は、再溶解原料に、溶解原料に適さない物はNi精錬工場等に戻される。

④ Mo含有鉄鋼スクラップからの回収

工場内でのスクラップはほぼ全量原料として回収されているが、製品として出荷された後は、ステンレススクラップディーラー等の回収流通を経て、再溶解原料としてリサイクルされる。又、溶解原料に適さない物はNi精錬工場等に戻される。鉄連統計によると、ステンレス特殊鋼メーカーで使用されたMo含有スクラップは4,522 t(うちリターンが70%、外部購入が30%)となっている。ステンレス特殊鋼メーカーがモリブデン源としてスクラ

ップを使用している。Mo 含有率の高いハステロイ等は、Mo を評価のうステンレス鋼の原料として再利用されているものもあるが、これらは Mo 純分量で 50 t にも満たないとみられている。

表 3.3.4.1 日本のモリブデン需要量 (t)

歴年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年
数量	21,600	21,800	24,500	25,400	27,200

(工業レアメタル2006)

表 3.3.4.2 日本の酸化モリブデンとフェロモリブデンの輸入量 (t)

歴年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年
酸化モリブデン(焙焼鉱)	31,705	30,140	32,727	35,462	40,289
フェロモリブデン	3,873	3,993	5,121	5,066	4,119

(工業レアメタル2006、日本貿易統計)

表 3.3.4.3 金属添加用モリブデンの生産量 (t)

歴年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年
酸化モリブデンブリケット	633	505	599	744	682
フェロモリブデン	3,485	2,375	2,691	3,323	4,011

(工業レアメタル2006、タングステン・モリブデン工業会)

表 3.3.4.4 粉末製品と加工製品の生産実績

歴年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年
粉末製品	751	574	648	936	960
加工製品	434	376	481	759	876

(工業レアメタル 2006、タングステン・モリブデン工業会)

表 3.3.4.5 触媒用モリブデンの消費実績 (t)

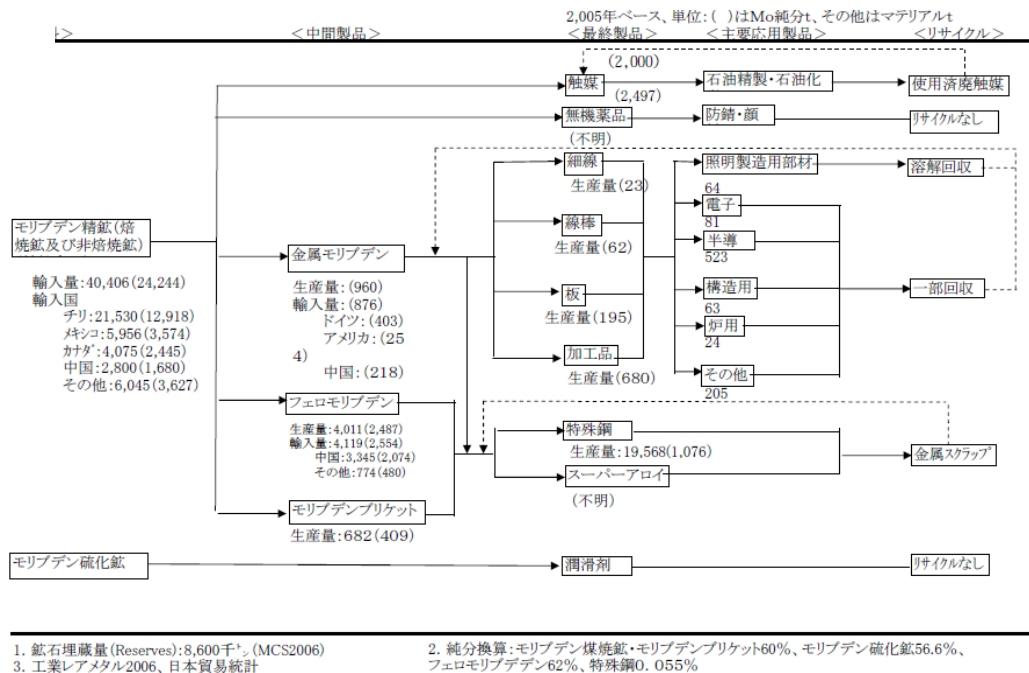
歴年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年
数量	1,852	2,019	1,889	2,468	2,497

(工業レアメタル 2006、経済産業省化学工業統計)

表 3.3.4.6 中間産物に関する主要生産者及び生産品目

主要生産者	国	生産品目
太陽鉬工	日本	モリブデン (フェロ、ブリケット)
日本新金属	日本	モリブデン、化合物
日本タングステン	日本	モリブデン合金
アライドマテリアル	日本	モリブデン粉、棒、線、板
東邦金属	日本	モリブデン粉、棒、線、板
妙中鉬業	日本	モリブデン (フェロ、ブリケット)
BHP Billiton	カナダ	モリブデン
Endako	カナダ	モリブデン
Jinduichang Mining Corp.	中国	モリブデン
Luoyang Luanchuan Molybdenum Co. Ltd.	中国	モリブデン
Codelco	チリ	モリブデン
Minera Los Pelambres S.A.	チリ	モリブデン
Molycorp, Inc.	米国	モリブデン
Phelps Dodge Corp.	米国	モリブデン
Thompson Creek Metals Co.	米国	モリブデン
Southern Peru Copper Corp. (SPCC) co.	ペルー	モリブデン
Antamina	ペルー	モリブデン
Mexicana de Cobre, S.A.	メキシコ	モリブデン
Shakhtaminskoye molybdenum mining enterprise	ロシア	モリブデン
Sorsk molybdenum mining enterprise	ロシア	モリブデン

(出典: USGS「Minerals Information, Statistics and Information by Country」、
工業レアメタル 2006、新金属データブック 2002、合金鉄年鑑 2006、
国内各社ウェブサイト)



1. 鉬石埋蔵量(Reserves):8,600千t (MCS2006)
 2. 純分換算:モリブデン煤焼鉱・モリブデンブリケット60%、モリブデン硫化鉬56.6%、
 3. 工業レアメタル2006、日本貿易統計
 フェロモリブデン62%、特殊鋼0.055%

図 3.3.4.1 モリブデン製造フロー図

図 3.3.4.1 にモリブデン製造フローと表 3.3.4.7 にリサイクルの現状を示す。

表 3.3.4.7 リサイクルの現状

主な応用製品	利用形態	使用済み品の存在形態・量		リサイクル形態			リサイクル現状評価 (A~G) (注③)	備考 (注④)
		形態	量 (注①)	リサイクルの実態	リサイクルのサイクル (注②)	リサイクル率		
特殊鋼	スプリング鋼 高張力鋼 高速度鋼	同左	(1,076 t)	鋼屑として回収	(5年~10年)	100%	B	
触媒	石油精製用 石油化学工業用	廃触媒	(2,497t)	リサイクルされる触媒の大部分は石油精製用直接法	(1年~7年)	80%		
無機薬品	防錆顔料 着色顔料	塗膜	不明	リサイクル無し		0	B	製品全体に対して微量故回収はされない 一部のみ回収
モリブデン製品	マシナリ、陰極ヒータ、電極棒	電極棒、マグネトロン部品、廃炉材	(960t)	コスト・品質面で回収価値のある物に限定される	(1年未満~3年)	不明	A	
スーパーアロイ	タービン部材 化学プラント部材	同左	(特殊鋼に含む)	工場内はほぼ全量リサイクル、製品としては鋼屑として回収	(5年~10年)	不明	B	
潤滑材	潤滑剤	消耗品	不明	リサイクル無し		0%	A	消耗品

(注) ①量の単位：
() 内は使用量純分 t
その他はマテリアル量 t
②サイクル：
() 内は推定使用年数
その他は実リサイクル量

③現状評価：
A. 応用製品が消耗品である
B. 添加剤として使用されている
C. リサイクルの流通システムがない
D. 効果的なリサイクル技術がない
E. 経済性がない
F. 需要開発が十分になされていない
G. その他

④リサイクルのボトルネックと解決の難易度
毒性、保管の危険性の有無など

3.3.3.3 ジスプロシウム⁷⁾

3年前頃まで 30 US\$/kg 程度だったものが 110 US\$/kg までに上昇している。用途とリサイクルを以下に示す。

中性子吸収断面積が大きいので原子炉の制御用材料として利用される (→鉛または鉛、ガドリニウムとの合金)。光磁気ディスク (光メモリ) の材料や磁石、蓄光剤の添加剤としても利用される。他に伸縮合金にも使われる。近年はネオジム磁石の保磁力を高めるための添加物としての利用が急増している。この種の磁石の我が国の生産量は年間約 1 万 t である⁸⁾。ただジスプロシウムの使用量はネオジムの 1 割よりも小さい現状にある。リサイクルの状況は不明である。

(引用文献)

- 1) 自動車製造における材料と加工技術の開発動向-- 日本金属学会東海支部, 1997.12
- 2) 自動車材料・加工技術のすべて. 2007 / 日経 Automotive Technology, 日経ものづくり. -- 日経 BP 社, 2006.10
- 3) 金型, 工具鋼の基礎から実用まで(3)3. 工具鋼の主な合金元素の機能 / 田部 博輔 型技術. 18(3) (通号 216) [2003.3]
- 4) 工具鋼 (特集 やさしく知る合金元素の役割) -- (合金元素の応用) / 田村 庸 特殊鋼. 51(3) (通号 593) [2002.3]
- 5) 先端生産加工技術を支える工具の開発と応用の最前線.-- 日本機械学会, 2005.11 講習会教材
- 6) 合金元素データシート 特殊鋼. 51(3) (通号 593) [2002.3]
- 7) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 HP
- 8) http://www.neomag.jp/newtopics/index_20070625.html

3.4 触媒金属（ニッケル、バナジウム、プラチナ、REM を中心に）

触媒金属の代表例としてニッケル、コバルト、タングステン、モリブデン、バナジウム、プラチナ、レアアースを示す。表 3.4.1.1 に示す石油化学の合成繊維や樹脂の合成、アンモニア化学、環境浄化など多くの用途に用いられている。

表 3.4.1.1 用途別の触媒分類と用いられるレアメタル元素

触媒分類	用いられるレアメタル	触媒分類	用いられるレアメタル
石油精製触媒		高分子重合触媒	Ti, (Al), Mg, Co
接触分解触媒	La, Ce, Si, (Al)	無機化学品製造触媒	
水素化分解触媒	Ni, Mo, W, Pt	アンモニア合成触媒	(Fe), K, Ca, (Al)
接触改質触媒	Pt, Re	硝酸製造触媒	Pt, Rh
スライティング触媒	(Fe)	硫酸製造触媒	V, K
重油脱硫触媒	Co, Ni, Mo	ガス製造触媒	
石油化学品製造触媒		都市ガス製造用分解触媒	Ni
水素添加触媒	Ni, Co, Mo, Cr, Pt, Pd	改質触媒	Ni
塩素化触媒	(Hg), (Cu)	一酸化炭素転化触媒	Cr, (Fe), (Cu), (Zn)
酸化触媒	V, Ag, Mo	メタネーション触媒	Ni
脱水素触媒	Cr, (Fe), (Cu)	脱硫触媒	(Zn), (Fe)
異性化触媒	Pt, (Al)	油脂加工触媒	Ni, (Cu), Pt, Rh, Pd
アルキル化触媒	B, P	医薬食品製造触媒	Ni, Co, (Cu), Pt, Rh, Pd
選択水添触媒	Ni, Co, Mo, Pd	公害防止触媒	Pt, Pd, Rh, Ni, V, W, Ti, Ce, La
アクリロニリル合成触媒	Mo, Bi, V	その他の触媒	
メタノール合成触媒	Cr, (Zn)	雲母製ガス製造触媒	Ni, Pt, (Fe)
ホルマリン合成触媒	Ag, Mo, (Fe)		
脱水触媒	(Al)		
重合触媒	P		

3.4.1 ニッケル触媒

ニッケル触媒は、石油精製の水素化脱硫触媒として直接脱硫と間接脱硫があり、直接脱硫触媒は全量フェロニッケルの原料としてリサイクルされている。油脂加工、石油化学、リホーミング用触媒はニッケル含有が多く、ほぼ全量集荷リサイクルされている。リサイクル業者は太陽鉦工、JFE マテリアル、日本キャタリスト、阪和興業などである。消費量の45%、650 t が回収されている。触媒は Ni-Co、Ni-Co-Mo、Ni-V 系で Co と Mo は分離抽出されているが、Co は微量で分離されていない。

表 3.4.1.2 ニッケルの供給推移

(単位：純分 t)

	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	
ニッケル 地金	生産量	32,526	32,297	34,942	32,677	29,794
	輸入量	28,139	40,413	53,611	51,959	49,722
	計	60,655	72,710	88,553	84,636	79,516
フェロ ニッケル	生産量	68,113	74,418	74,804	73,655	76,390
	輸入量	12,732	14,017	11,993	15,569	13,507
	計	80,845	88,435	86,797	89,224	89,897
酸化 ニッケル	生産量	49,600	48,950	52,700	60,300	56,700
	輸入量	708	885	915	967	587
	計	50,308	49,835	53,615	61,267	57,287
ニッケル粉 輸入量	8,246	9,680	7,734	9,952	9,303	
合計	200,064	220,660	236,699	245,079	236,003	

(出典：工業レアメタル 2006、日本貿易統計)

表 3.4.1.3 中間生産物に関する主要生産者及び生産品目

主要生産者	国	生産品目
住友金属鉱山	日本	ニッケル地金、フェロニッケル
東京ニッケル	日本	酸化ニッケル
日本冶金	日本	フェロニッケル
大太平洋金属	日本	フェロニッケル
Falconbridge Limited	カナダ	ニッケル地金
Inco Limited	カナダ	ニッケル地金、酸化ニッケル
Sherritt	カナダ	ニッケルブリケット
BHP Billiton	オーストラリア	酸化ニッケル、ニッケルブリケット
Mineral Resources	オーストラリア	ニッケルブリケット
Société Métallurgie le Nickel (SLN)	ニューカレドニア	フェロニッケル
Jinchuan Nonferrous Metals Corp.	中国	ニッケル
Chengdu Electro-Metallurgy Factory	中国	ニッケル
Stillwater Mining Company	米国	ニッケル
ASARCO LLC	米国	ニッケル
INCO Europe Ltd.	イギリス	ニッケル
Société Métallurgie le Nickel (SLN)	フランス	ニッケル
Falconbridge Limited	ドミニカ	フェロニッケル
Cerro Matoso	コロンビア	フェロニッケル
OM Group, Inc. (旧 Outokumpu)	フィンランド	ニッケル地金
MMC Norilsk Nickel	ロシア	ニッケル地金
Anglo American Platinum Corp. Ltd.	南アフリカ	ニッケル地金、ニッケルブリケット
Companhia Niquel Tocantins	ブラジル	ニッケル地金
CODEMIN S.A.	ブラジル	フェロニッケル
Korea Nickel Corp.	韓国	ニッケル地金
PT Aneka Tambang Tbk	インドネシア	フェロニッケル
PT International Nickel Indonesia Tbk	インドネシア	ニッケルマット
Loma de Niquel C.A.	ベネズエラ	フェロニッケル
Larco G.M.M. S.A.	ギリシャ	フェロニッケル

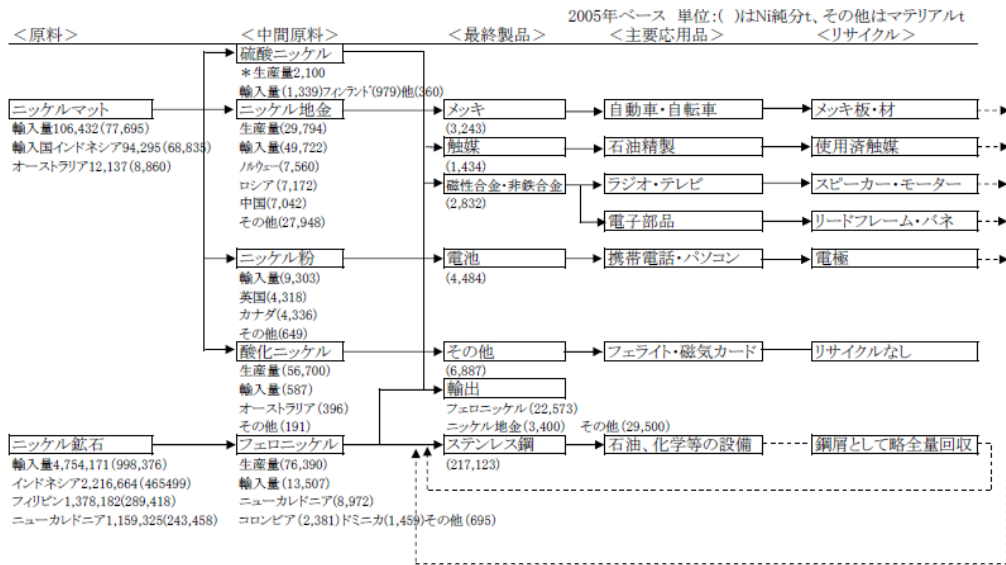
(出典：USGS「Minerals Information, Statistics and Information by Country」、JOGMEC「メタルマイニング・データブック 2005」、工業レアメタル 2006、合金鉄年鑑 2006、新金属データブック 2002、国内各社ウェブサイト)

表 3.4.1.2 にニッケルの供給推移を、表 3.4.1.3 に中間生産物に関する主要生産者と品目を、表 3.4.1.4 に日本企業の海外投資プロジェクトを、図 3.4.1.1 にニッケル製造フローを、図 3.4.1.2 をリサイクルの現状を示す。

表 3.4.1.4 我が国企業の海外投資状況（操業中のプロジェクト）

現地法人名 (及び鉱山名)	所在地域	主たる株主	生産品目
P. Tインコ (ソロアコ鉱山)	インドネシア・ スラウェシ島	住友金属鉱山他日本側 4 社 21.27%、インコ社 58.73%、 その他 20%	ニッケルマット
リオツバ・ニッケル・ マイニング (リオツバ鉱山)	インドネシア・ パラワン島	大太平洋金属 36%、双日 4%、 M.T.V.REALITY40%、その他 20%	ニッケル鉱石
タガニート・マイニング (タガニート鉱山)	フィリピン・ミ ンダナオ島	大太平洋金属 33.5%、双日 1.5%、ヒナトワン社 65%	ニッケル鉱石
コーラルベイ	フィリピン・パ ラワン島	住友金属鉱山 54%、三井物産 18%、双日 18%、リオツバ・ ニッケルマイニング 10%	NiCo 混合硫化物

(出典：JOGMEC「メタルマイニング・データブック 2005」、国内各社ウェブサイト)



1. 鉱石埋蔵量(Reserves):62百万トン(USGS:MCS 2006)
3. 工業レアメタル、他

2. 換算率: Ni精鉱2.1%、Niマット73%、酸化Ni82.5%、硫酸Ni37.9%、
国内産フェロNi21%、輸入フェロNi28%

図 3.4.1.1 ニッケル製造フロー図

主な応用製品	利用形態	使用済みの存在形態		リサイクル形態			リサイクルの現状 評価(A~G) (注③)	備考 (注④)
		形態	量(注①) (t)	リサイクルの実態	リサイクルの サイクル(注②)	リサイクル率 %		
電池	Ni-MH Ni-Cd	電池	(4,484t)	リサイクル業者	3年	77		
ステンレス鋼	ニッケル系板・条 含有量9%	板・条	} (217,123t)	〃	11年	40	D	
その他特殊鋼	ニッケル系板・条 含有率50%	板・条		〃	8年	40	D	
磁性材・非鉄合金	部品	家電等	(2,832t)	一部回収	-	不明		
メッキ製品・カード	塗布剤	自動車・カード等	(10,130t)	メッキ鋼板のみ回収	-	不明		ニッケル目的の回収は無し

注 ①の量の単位:
()は使用量純分t
その他は発生量純分t

②サイクル:
()内は推定耐用年数
その他は実リサイクル年数

③現状評価
A.応用製品が消耗品である
B.添加物として使用されている
C.リサイクルの流通システムがない
D.効果的なリサイクル技術がない
E.経済性がない
F.需要開発が十分にされていない
G.その他

④リサイクルのボトルネック
と、解決の難易度
毒性、保管の危険性の有無等

図 3.4.1.2 リサイクルの現状

3.4.2 コバルト触媒

石油精製用触媒、石油精製水素化触媒にコバルトが微量使用されている。使用済み廃触媒はTMC高岡工場で若干リサイクルされており、2004年46t、2005年2.5tが回収されている。石油精製水素化処理ではコバルトは1%未満の含有でリサイクルは経済的に難しいが、今後天然ガス液化触媒の大量消費が見込まれ、そこからのコバルト回収が重要である

3.4.3 タングステン触媒

石油精製用水素化触媒、排煙脱硝触媒、有機合成触媒などにタングステンが微量に使用されている。触媒の入れ替えがおよそ10年に1回であるため使用済み触媒の発生は少ない。2005年の回収量は10tで大半が有機合成用触媒であった。

3.4.4 モリブデン触媒

国内で使用されたモリブデン触媒のうち石油精製用のもの(水素化脱硫、水素化分解)はリサイクルシステムが確立しており、直接脱硫用は1~2年、間接脱硫用は7~8年の使用の後、リサイクルされ再利用されている。石油化学工業用モリブデン触媒はアクリロニトリル製造用のものが一部リサイクルされている。水素脱硫は、モリブデン含有が4.5%、水素分解では7%が含有され、年間860tが使用されている。石油化学では12%の含有で約2000tが使用されている。モリブデンは、使用済み触媒をばい焼し、含有されている油分、水分、硫黄分などを除去した後、塩基性条件で浸出を行ってモリブデン、バナジウムを抽出し、その浸出液からモリブデンとバナジウムを回収する。2003年のモリブデン含有廃触媒の受け入れが18,990t(50%回収)、モリブデン回収が870t、バナジウム回収が463tであった。太陽鉱工、日本キャタリストサイクル(住金鉱山系)はソーダばい焼法により高純度99.99%までアップグレードしリサイクルしている。

3.4.5 バナジウム触媒

重油脱硫触媒（Ni、Mo、V 含有）、石油精製用触媒、硫酸製造用、排ガス脱硝用のケミカル触媒にバナジウムが使用されている。硫酸や排ガス触媒には 2～3%含有しており、回収後は鉄鋼材料用としてリサイクルされている。重油燃焼灰や重油ボイラー灰には高濃度（10～40%）のバナジウムが含有されており、年間 100 t の原料リサイクルされている。ケミカル触媒も含め化学処理後 V_2O_5 （五酸化バナジウム）として 2005 年は 800 t リサイクルされている。リサイクル業者は脱硫触媒が日本キャタリストサイクル、JFE グループ、エヌ・イーケムキャスト、重油燃焼灰が新興化学、鹿島共同発電、JFE 環境、ケミカル触媒が新興化学のみである。バナジウム含有の触媒は使用原単位量が少なく、原油中のバナジウム回収が上回っている。脱硝触媒は天然ガス発電により使用が減少している。

表 3.4.5.1 に五酸化バナジウムの日本の輸入推移を、表 3.4.5.2 にフェロバナジウムの日本の輸入推移を示す。中国、南アフリカが中心であることがわかる。表 3.4.5.3 に世界のバナジウム消費量を示す。年々増加しており、米国、中国、西欧、日本の順番である。表 3.4.5.4 に中間産物に関する主要生産者と品目を示す。図 3.4.5.1 にバナジウム生産フローを示す。

表 3.4.5.1 日本の輸入推移（五酸化バナジウム）（t）

輸入先	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年
中国	1,292	1,889	1,696	1,074	2,383
オーストラリア	1,400	1,080	100	0	0
南アフリカ	886	1,012	1,962	1,200	290
その他	41	0	52	0	0
合計	3,618	3,981	3,810	2,274	2,713

（工業レアメタル 2002～2006）

表 3.4.5.2 日本の輸入推移（フェロバナジウム）（製品 t）

輸入先	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年
中国	469	341	365	300	371
南アフリカ	2,029	2,527	3,459	4,124	3,726
チェコ	196	20	76	180	396
ロシア	151	220	60	421	618
オーストリア	70	70	140	130	120
その他	80	55	250	364	589
合計	2,995	3,233	4,251	5,518	5,821

（工業レアメタル 2002～2006）

表 3.4.5.3 世界のバナジウム消費量推移 (V₂O₅換算、単位：100万 lb)

	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年
米 国	36.0	36.0	36.0	35.0	37.0
カナダ	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
西ヨーロッパ	37.5	38.0	38.0	41.0	41.0
東ヨーロッパ	3.0	4.0	5.0	6.5	8.0
C I S	11.0	13.0	14.0	15.5	18.0
中 国	12.0	14.0	17.0	32.0	35.0
日 本	18.0	17.0	19.0	20.0	22.0
韓 国	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
その他	16.0	17.0	17.0	21.0	21.0
合 計	144.5	150.0	157.0	182.0	193.0
ロス (5%) 加算分	151.7	157.5	165.3	191.6	203.2

(工業レアメタル 2002～2006)

表 3.4.5.4 中間産物に関する主要生産者及び生産品目

主要生産者	国	生産品目
新興化学工業	日本	バナジウム金属、化合物
太陽鉱工	日本	フェロバナジウム、金属、化合物
Xstrata Windimura Pty. Ltd.	オーストラリア	バナジウム酸化物
Stratcor Inc.	米国	バナジウム酸化物
Gulf Chemical	米国	バナジウム酸化物
Highveld Vanadium and Chemicals	南アフリカ	バナジウム酸化物
Vametco Minerals Corp.	南アフリカ	バナジウム酸化物、フェロバナジウム
Vanadii-Tulachermet	ロシア	バナジウム酸化物
Chusovoy	ロシア	バナジウム酸化物

(出典：USGS「Minerals Information, Statistics and Information by Country」、
工業レアメタル 2006、新金属データブック 2002、合金鉄年鑑 2006、国内各社
ウェブサイト)

2005年ベース
 単位：()内はV純分t
 その他はマテリアル量t

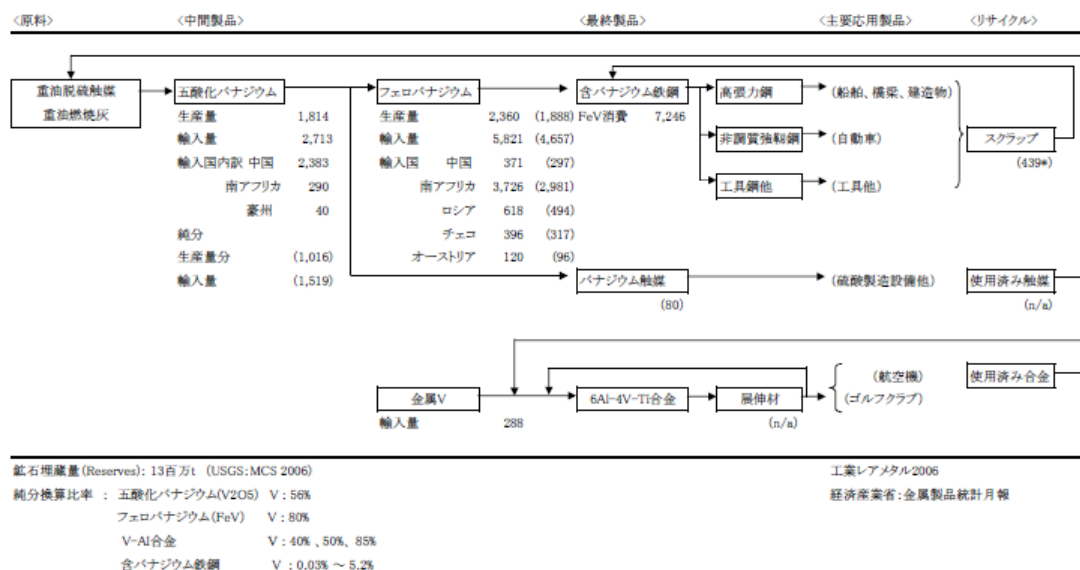


図 3.4.5.1 バナジウム生産フロー図

(参考文献)

- 1) 原田幸明、金属材料のリサイクル、<http://www.nims.go.jp/ecomaterial/>
- 2) 鉱物資源マテリアルフロー分析調査、2005年7月金属資源レポート p.129
- 3) レアメタルリサイクル市場の現状と今後の方向性、調査資料
- 4) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構HP

3.4.6 プラチナ触媒

① 資源分布と産出量

プラチナ (Pt) はパラジウム(Pd)、ロジウム (Rh)、ルテニウム(Ru)、オスミウム(Os)などとともに、PGM (Platinum Group Metal) と称され、南アフリカに偏在している。世界の生産量を表 3.4.6.1 に示すが、南アフリカとロシアで全生産量の 90%以上を占めている。

我が国はリサイクル品以外は全て輸入に依存しており、2004 年度の輸入量は約 60t で、そのほとんどを南アフリカ (約 70%) とロシア (13%) から輸入している。

表 3.4.6.1 世界のプラチナ生産量および埋蔵量¹⁾ (生産量 : kg)

生産国	2002 年度		2003 年度		2004 年度		埋蔵量
	生産量	割合(%)	生産量	割合(%)	生産量	割合(%)	
南アフリカ	133,796	72	151,000	74	155,000	74	63,000,000
ロシア	35,000	19	36,000	18	36,000	17	6,200,000
カナダ	7,400	4	7,400	4	8,600	4	310,000
米国	4,390	2	4,170	2	4,200	2	900,000
ジンバブエ	2,306	1	4,400	2	4,700	2	n.a.
その他	2,108	1	2,030	1	500	-	800,000
合計	185,000	100	205,000	100	209,000	100	71,000,000

(注) 経済産業省資料「希少性資源の需要動向」から抜粋

② 触媒としての用途と需要量

自動車排ガスコンバータ用触媒 (以下、「排ガスコンバータ用触媒」と略す) として、プラチナ、パラジウム、ロジウムなどの PGM が数 g (1.5~4g) 使用されている。

排ガスコンバータは、ガソリンやディーゼルエンジンからの排ガスを、プラチナなどの触媒で被覆されたハニカム構造のセラミックなどを通すことにより、環境に有害な物質 (炭化水素、一酸化炭素、窒素酸化物など) を、許容可能な物質 (水、二酸化炭素、窒素など) に変換するものである。

表 3.4.6.2 に我が国の排ガスコンバータ用触媒用途でのプラチナの使用量を示す。年々増加の傾向にあり、2006 年度は 17.6 t とのデータもある。

表 3.4.6.2 我が国の自動車排ガスコンバータ用触媒の使用量¹⁾ (単位 : t)

2000 年度	2001 年度	2002 年度	2004 年度	2004 年度
9.0	10.7	13.2	15.2	16.5

(注) 経済産業省資料「希少性資源の需要動向」から抜粋

③ 価格変動

排ガスコンバータ用触媒需要が、パラジウムの高騰からの代替需要、EUでのディーゼル自動車用触媒用途の増加で使用量が多くなっていることに加え、電気部品の接点やハードディスクの磁気合金層などへの使用も増加していることから、価格は上昇傾向にある。表 3.4.6.3 は田中貴金属工業㈱の HP に掲載されている価格²⁾を抜粋したものである。

表 3.4.6.3 プラチナの価格変動

年度	ニューヨーク・フリーマーケット (米ドル/トロイオンス)平均価格	田中小売価格(円/グラム) 平均価格
2001	530.16	2,142
2002	541.24	2,238
2003	692.23	2,634
2004	846.58	3,008
2005	897.53	3,245
2006	1,140.69	4,337

④ マテリアルフロー

図 3.4.6.1 にプラチナの国内におけるマテリアルフローを示す。

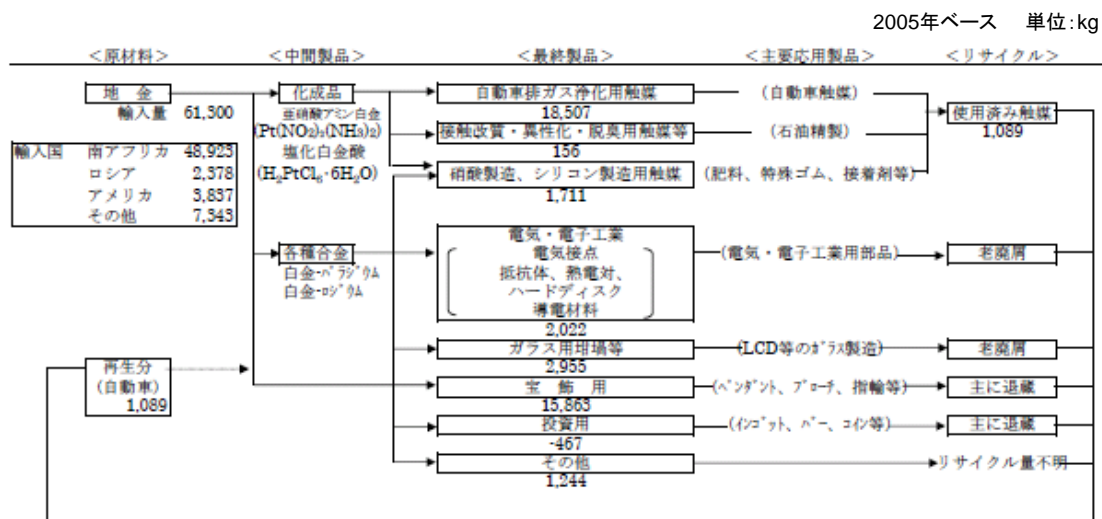


図 3.4.6.1 プラチナの国内におけるマテリアルフロー³⁾

⑤ リサイクル技術

排ガスコンバータ用触媒に含まれるプラチナのリサイクルは、同和鉱業、田中貴金属工業、小坂精錬が共同出資して 1991 年に設立した(株)日本 PGM などで行われている。日本 PGM では高回収率、低コスト、回収期間が短いという特徴の「ROSE 法」によるリサイクルが行われている。図 3.4.6.2 に日本 PGM のリサイクルフローを示す。

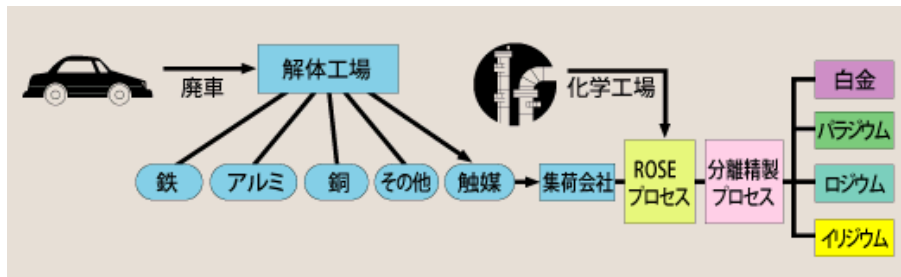


図 3. 4. 6. 2 日本 PGM の自動車排ガスコンバータのリサイクルフロー⁴⁾

現状の国内における排ガスコンバータ用触媒からのプラチナの回収量は、年間約 1 ～ 2 t で推移している⁵⁾。

⑥ 代替物質

プラチナより効率の良い触媒材料の開発は難しいとされている。なお、今後プラチナの用途として増加が考えられる燃料電池については、プラチナ原単位低減技術の開発が課題とされている。

(引用文献)

- 1) 経済産業省資料「希少性資源の需要動向」
http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/research/h17fy/180208-1_src_1.pdf
- 2) 田中貴金属工業(株)HP 年次プラチナ価格推移
<http://gold.tanaka.co.jp/commodity/souba/y-platinum.php>
- 3) 鉱物資源マテリアルフロー 2006：(独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (平成 19 年 6 月)
- 4) 田中貴金属グループ HP： http://www.tanaka.co.jp/products/html/g_3.html
- 5) レアメタル 2007(1)プラチナの需要・供給・価格動向等
http://www.jogmec.go.jp/mric_web/kogyojoho/2007-05/MRv37n1-07.pdf
- 6) 日本経済新聞：2007 年 3 月 23 日

3.4.7 レアアース（希土類）

レアアースとは、原子番号 57 番のランタン(La)から 71 番のルテチウム(Lu)までの 15 元素のグループ(ランタノイド)に、原子番号 21 番のスカンジウムと 39 番のイットリウム(Y)を加えた 17 元素の総称である。

① 資源分布と産出量

レアアースの生産量は表 3.4.7.1 に示すように、約 90%が中国で生産されている。中国は国家保護鉱種に指定するとともに、外資によるレアアース鉱山企業の設立を禁止した。

表 3.4.7.1 世界のレアアースの生産量¹⁾

	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年
世界の生産量 (t)	83,500	98,300	99,100	102,000	105,000
中国の生産量 (t)	(80,600)	(88,400)	(92,000)	(98,310)	(98,000)

② 触媒としての用途と需要量

表 3.4.7.2 にレアアースの種類と主な用途を示すが、「セリウム」「サマリウム」が排ガスコンバータ用触媒として、「スカンジウム」が化学分野での触媒として使用されている他は、触媒としての使用はほとんどない。近年、触媒以外の用途として、「ランタン（光学レンズ）」「セリウム（研磨剤）」「ネオジウム、サマリウム、ジスプロシウム（磁石）」などの使用量が増えており、輸入量が表 3.4.7.3 に示すとおり増加傾向にある。

表 3.4.7.2 レアアースとその主な用途

希土類元素一覧			主な用途（太字は触媒としての利用を示す）
元素名	元素記号	原子番号	
ランタン	La	57	光学レンズ、コンデンサ、磁石
セリウム	Ce	58	ガラスの研磨材、UVガラス、CRTの添加剤、 自動車排ガス浄化用触媒
プラセオジウム	Pr	59	ガラスの着色剤、磁石
ネオジウム	Nd	60	水素吸蔵合金用のミッシュメタル、永久磁石の磁性材料
プロメチウム	Pm	61	夜光塗料、蛍光灯のグロー放電管
サマリウム	Sm	62	サマリウムコバルト磁石、 自動車排ガス浄化用触媒
ユウロビウム	Eu	63	磁性半導体用途、カラーTVの発光面
ガドリニウム	Gd	64	磁性材料、MRI検査用の造影剤、 原子炉の制御用材料
テルビウム	Tb	65	ブラウン管、水銀灯の蛍光体の材料
ジスプロシウム	Dy	66	原子炉の制御用材料、磁石、蓄光剤の添加剤、 ネジ磁石の保磁力を高める添加剤
ホルミウム	Ho	67	希少で高価なこともあり、あまり利用されていない。 YAGレーザーの添加物として利用
エルビウム	Er	68	ガラスの着色材、光ファイバー YAGレーザーの添加物
ツリウム	Tm	69	光ファイバーの添加剤
イッテルビウム	Yb	70	ガラスの着色材、YAGレーザーの添加物
ルテチウム	Lu	71	年代測定を必要とする分野で利用、 放射線治療用途
イットリウム	Y	39	蛍光体、光学ガラス、セラミックスの安定剤、 電池極板、コンデンサー
スカンジウム	Sc	21	有機化学分野での触媒 、 スカンジウム・ランプでの利用

表 3.4.7.3 レアアースの輸入量²⁾

	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年
輸入量 (t)	19,737	22,571	25,705	26,762	31,107

③ 価格変動

図 3.4.7.1 に「プラセオジウム」「ネオジウム」「ジジウム（主に、Nd と Pr を含む混合希土）」の価格推移を示す³⁾。2007 年 8 月以降、中国での在庫放出の影響で価格上昇が一服している。

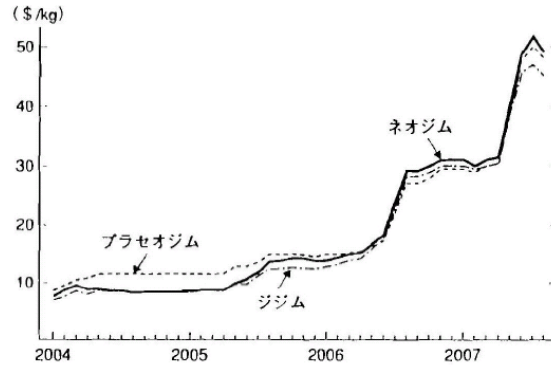


図 3.4.7.1 軽希土類の磁性関連材料の価格推移 (US\$/kg、CIF)

④ マテリアルフロー

図 3.4.7.2 にレアアースの国内におけるマテリアルフローを示す。

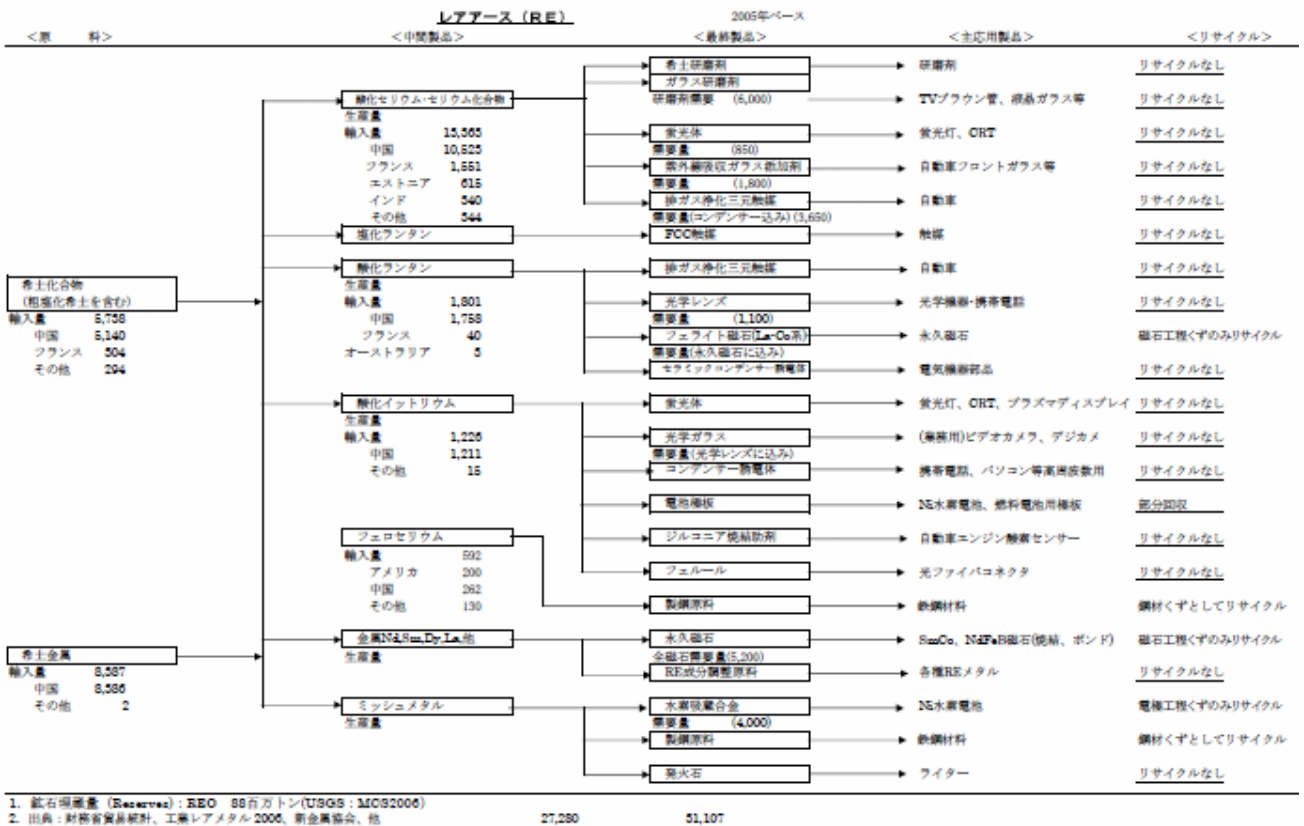


図 3.4.7.2 レアアースの国内におけるマテリアルフロー²⁾

⑤ 回収技術

排ガスコンバータ用触媒からプラチナは回収されているが、セリウムとサマリウムは回収されていない。

触媒以外の製品に使用されているレアアースも、リサイクルするにはコスト面の問題があり、ほとんど回収されていない。製造工程内のスクラップはリサイクルされているものもあるが、ネオジムのように製造工程で発生する屑は 95%以上回収されるが、コスト面から処理は中国で実施されているようなものもある。技術開発を含む、国内の処理体制の整備が課題である。

⑥ 代替技術

小形モータ用耐熱磁石など、レアアース以外では性能が確保できない製品が非常に多い。枯渇が懸念されている一部のレアアースについては、代替技術の研究が行なわれているようである。

(引用文献)

- 1) 2006 年度レアアース工業発展レポート：アドバンストマテリアルジャパン株式会社
<http://amjc.co.jp/pdf/r-2005.pdf>
- 2) 鉱物資源マテリアルフロー2006：(独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構（平成 19 年 6 月）
- 3) レアメタルニュース：アルム出版社、2007 年 10 月 01 日号、p.2 抜粋
<http://www.neomag.jp/newtopics/pdfs/071004-01RMNEWS.pdf>

4. 非鉄精錬技術

4.1 湿式法

目的とする金属を溶液中にいったん溶かし、化学的あるいは電気化学的な手法を用いて分離回収する湿式法には、浸出・溶解法、中和沈殿法、硫化物沈殿法、キレートなどによる吸着法、溶媒抽出法などがある。一般に湿式法は乾式法に比べて処理温度が低く省エネルギー型であり、処理プロセスの設計が容易で重金属の精密・高純度回収が可能で、例えばJFE スチール株式会社の水洗プロセス、ユニチカ株式会社のAERプロセス、神戸製鋼所の酸浸出プロセス、同和鉱業株式会社のMRGプロセス等が提案されている。一方、浸出後に発生する残渣や廃酸・廃液の処理などのためプロセスが複雑になり費用がかかり、反応速度が低いために生産性が低いなどの課題も多い。

4.1.1 沈殿法による金属の回収

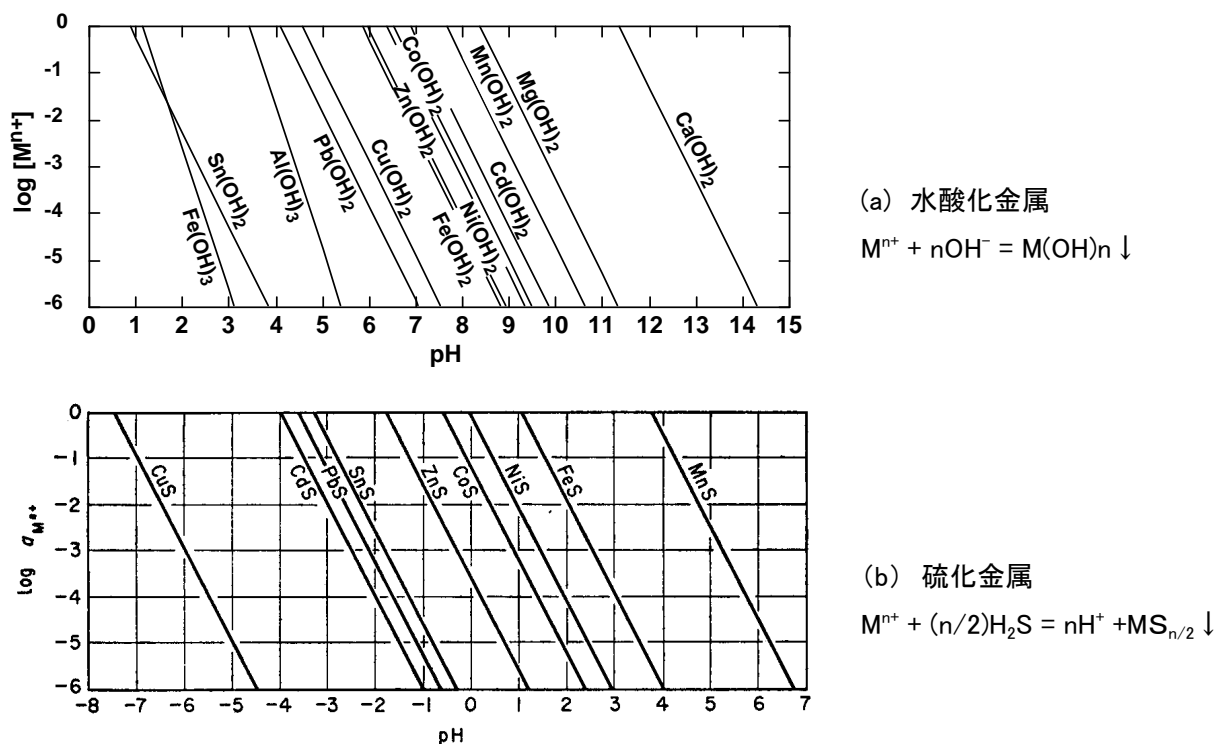


図 4.1.1 水酸化金属および硫化金属の溶解度¹⁾

各種の水酸化金属および硫化金属の溶解度と pH との関係を図 4.1.1 に示す¹⁾。水酸化金属や硫化金属の溶解度は pH が大きくなるに従って減少するため、金属をいったん酸など浸出させた後にアルカリを添加することによって pH を調整し、目的とする金属を沈殿・分離する方法はこれまでに多く使用されてきた。しかし共存する金属の種類が多い場合、沈殿法だけで目的とする金属を高い選択率で回収することは困難である。

4.1.2 吸着法によるインジウムの回収

インジウムの回収法としては、これまで酸で浸出させた後に pH による硫化物や水酸化物の溶解度の違いを利用した沈殿法や、キレート剤を用いた方法等が知られているが、pH 調整のために多くのアルカリ剤を利用するため、使用後の廃酸・アルカリの処理が課題であった。最近、シャープ㈱は液晶から高純度のインジウムを安価に回収するため、スチレンあるいはアクリルアミドとジビニルベンゼンとの共重合体に 3 級または 4 級アンモニウム基を付与したアニオン交換樹脂を吸着剤とする分別法を発表した²⁾。本法によると酸溶液中のインジウムは、図 4.1.2(a)に示すようにインジウムと塩素からなるインジウム・塩素錯体としてアニオン交換樹脂に吸着される。

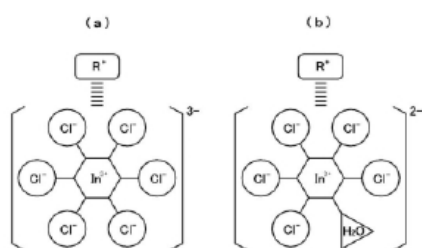


図 4.1.2 インジウムの吸着メカニズム

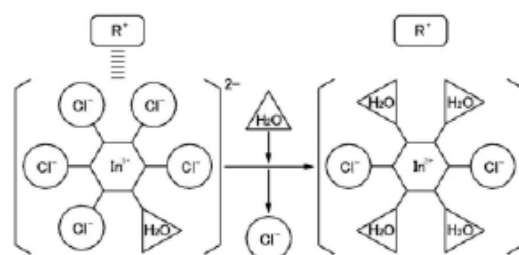


図 4.1.3 インジウムの脱離メカニズム²⁾

このアニオン交換樹脂と水を接触させると、図 4.1.3 に示すようにインジウム・塩素錯体の塩素イオンの一部が水分子に置換されてインジウム・水・塩素錯体となり、中性あるいはカチオンとなってアニオン交換樹脂から脱離する。塩酸溶液中に硝酸が共存する場合、図 4.1.2(b)に示すようにインジウムは塩素イオン配位子の一部が水に置換されたインジウム・水・錯体として存在するので、アニオン交換樹脂を水と接触させてインジウムを脱離させる際、水分子への置換が促進されてインジウムの回収濃度を高めることができる。

インジウムの回収操作を図 4.1.4 に示す。初めに液晶パネルを 10 mm 以下の大きさに破碎し、液晶パネル中の ITO 導電膜を硝酸と塩酸との混酸に溶出させた後、不溶物をろ過等で除去する。次にインジウムを溶出させた酸溶液を吸着剤を充填したカラムに通し、インジウムを吸着剤に吸着させる。この操作においてアルミニウム等の夾雑金属は金属塩として通過するが、インジウムやスズは共にカラムに吸着される。カラムを通過した溶液中の夾雑金属は、水酸化ナトリウム等を添加して pH を 8 程度に調整しスラッジとして回収される。インジウムを回収するには吸着剤を充填したカラムに水を通し、吸着剤に吸着している酸を溶出させる。酸回収液は液晶パネル等を溶出させるための酸として再利用することができる。酸濃度が一定値より低くなったところで、カラムを酸回収ラインからインジウム回収ラインにつなぎかえてインジウム回収液を採取する。インジウム回収液にはまだスズが含まれているため、水酸化ナトリウム等のアルカリを添加して pH を 1.5～2.5 に調整し、スズをスラッジとして沈殿・分離させた後、インジウム回収液の pH を 4.5 ～ 5.5 程度に調整すると高純度インジウムを水酸化インジウムとして回収することができる。

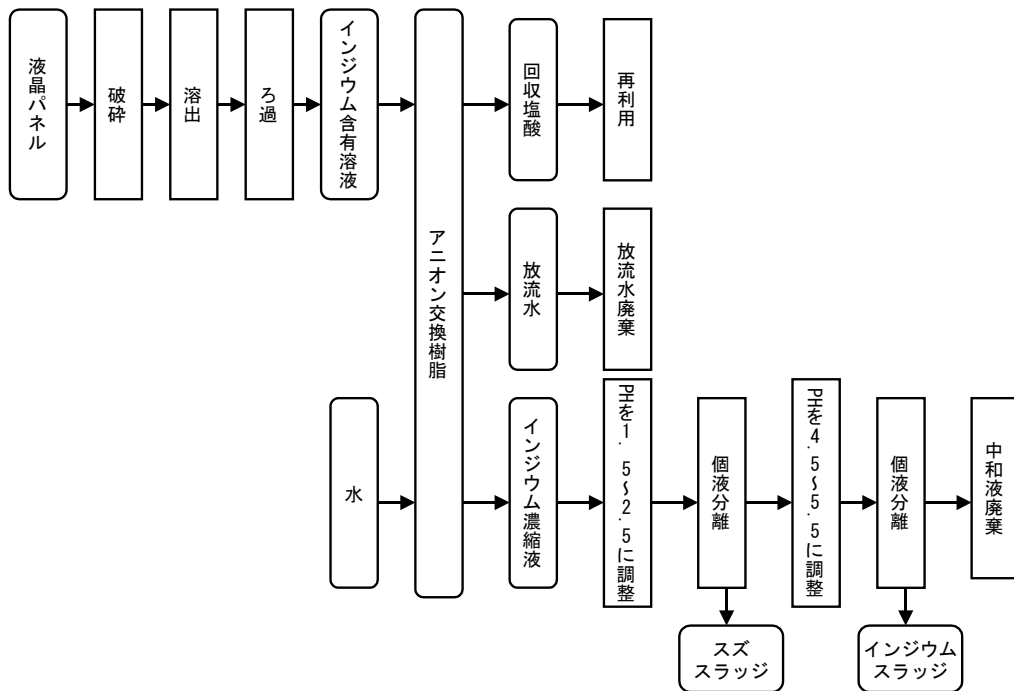


図 4.1.4 吸着剤を用いたインジウムの回収法²⁾

4.1.3 溶媒抽出法による金属の回収

溶媒抽出法はイオン交換法やキレート法等に比べて処理速度が速く、施設が安価で工業的に広く実用化されている。一方、希薄溶液への適用や目的とする金属の超高純度化には適していない。一般的な溶媒抽出法による金属の分離回収法の概要を図 4.1.5 に示す¹⁾。各金属に適した有機溶媒を用いることにより、多くの夾雑金属が含まれている供給液から選択的に目的とする金属を抽出し、いったん抽出された金属を水相に逆抽出することによって目的とする金属を分離回収することが可能となる。また、抽出槽を並べることにより、複数の金属を連続かつ逐次的に分離回収できる。

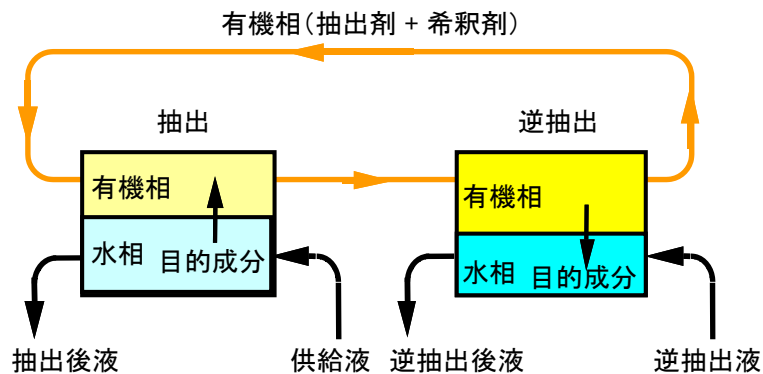


図 4.1.5 溶媒抽出法による金属の分離回収¹⁾

湿式法による貴金属の分離精製は、これまで抽出速度や抽出率が小さいために実用化されていない。田中ら¹⁾は3級アミド化合物を抽出溶媒として用いることにより、金、パラジウム、白金等の貴金属を連続的かつ選択的に分離回収できる手法を提案した。パラジウムと白金の混合溶液から TDA (N,N'-ジ-n-オクチル-チオジグリコールアミド) や DHS (ジヘキシルスルフィド) を用いてパラジウムを抽出した例を図 4.1.7 に示す。TDA を溶媒として用いた場合、DHS を用いた場合に比べてパラジウムは速やかにしかも選択的に抽出された。また、逆抽出の際に硫酸などの強酸を使用した場合、図 4.1.8 に示すように DHS は硫酸によって容易に酸化されて抽出率が低下するのに対し、TDA は殆ど酸化されず抽出率はほとんど減少しなかった。

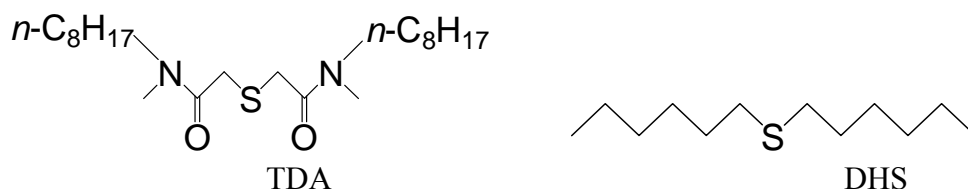


図 4.1.6 抽出溶媒の化学構造¹⁾

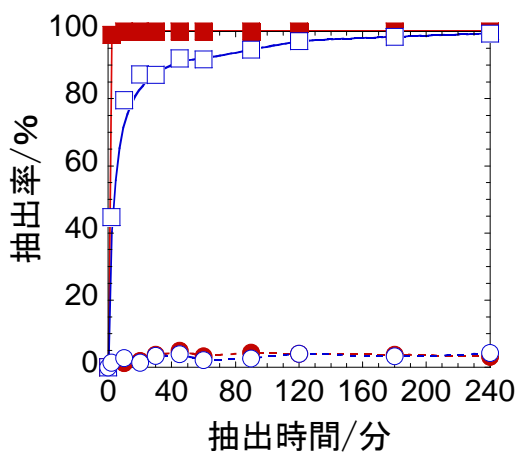


図 4.1.7 DHS および TDA によるパラジウムおよび白金の抽出¹⁾

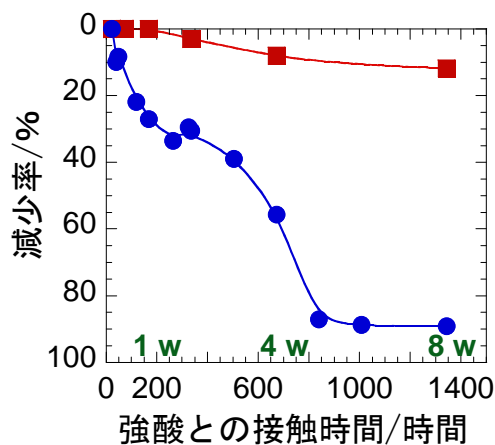


図 4.1.8 強酸との接触によるパラジウム抽出率の低下¹⁾

(引用文献)

- 1) 田中幹也 廃棄物学会リサイクル研究部会 講演会資料より抜粋 (2007).
- 2) 本馬隆道、村谷利明、シャープ技報、92, 17(2005).

4.2 乾式法

4.2.1. 乾式精錬法の現状

レアメタルは活性が高いため、他の金属と合金化したり、安定な酸化物として存在する。純金属を製造するためには、他の金属や酸素を分離除去する必要があり、多段の分離処理（加熱溶融比重分離と電気分解の組合せが多い）で高純度化が図られている。このため、鉱石から製造する場合は、レアメタルは他の金属の副産物として生産されている。銅では貴金属や鉛、亜鉛ではインジウムやビスマス、アルミニウムではガリウム、錫ではタンタルが副産物として回収されている。

銅製錬の例を図 4.2.1¹⁾に示す。銅鉱石は乾式精錬工程（自溶炉→転炉→精製炉）で加熱溶融され、粗銅とスラグに比重分離される。この時、貴金属系のレアメタルは粗銅に溶解している。粗銅は電気分解で高純度化されるが、その工程で貴金属はアノードスライムとして分離される。このスライムをさらに溶錬と電気分解して貴金属、セレン、テルルなどが製造される。また、乾式製錬工程で揮発したレアメタルは電気集塵機で回収され、その塵を湿式処理、溶錬、電気分解することにより、鉛やビスマスが製造される。

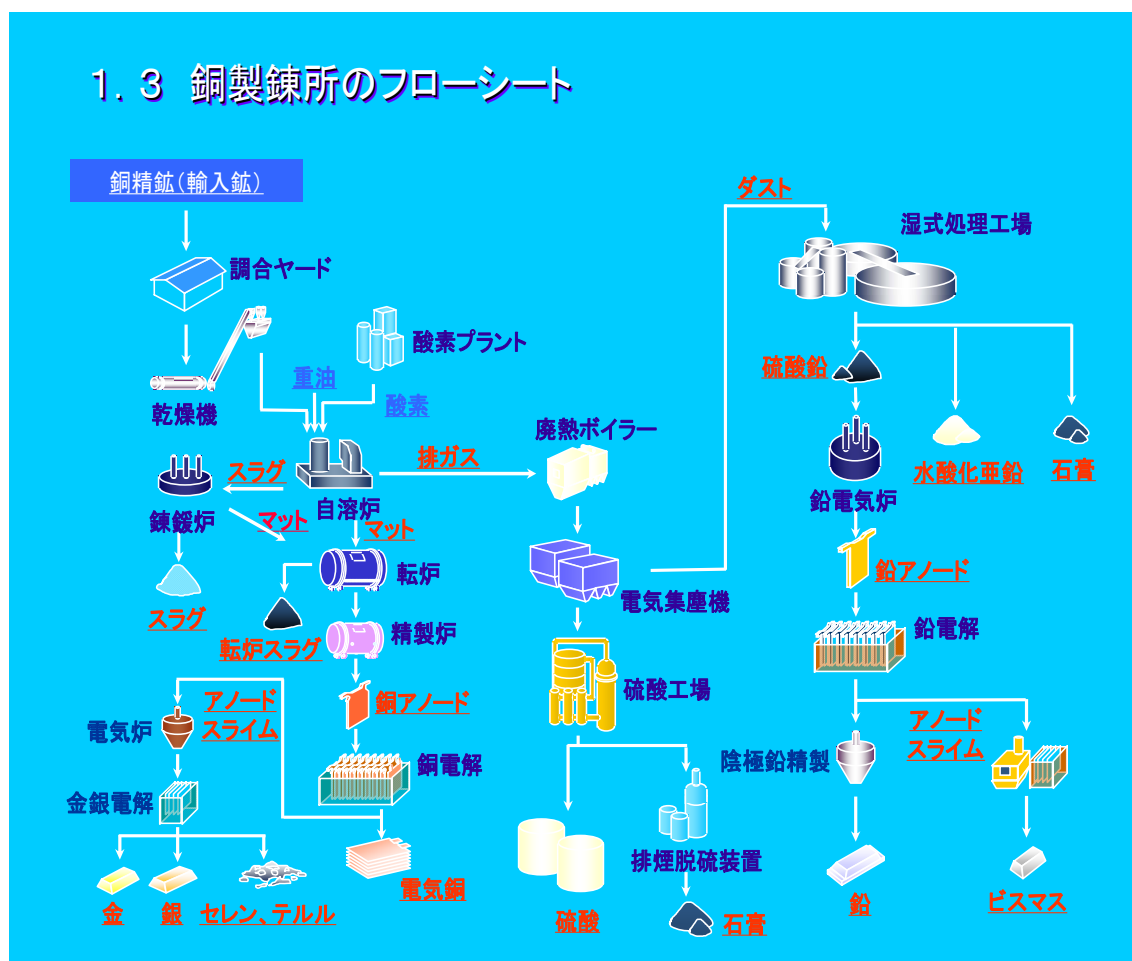


図 4.2.1 小坂製錬の銅精錬工程¹⁾

また、鉛の詳細な精錬工程を図2に示す²⁾。鉛も銅の製錬工程と同様に、鉛原料は溶鉱炉で溶かされ鉛とスラグに分別される。鉛は電気分解工程で高純度化され、この工程でスライムが回収される。スライムはさらに電解され、ビスマスなどのレアメタルが回収される。

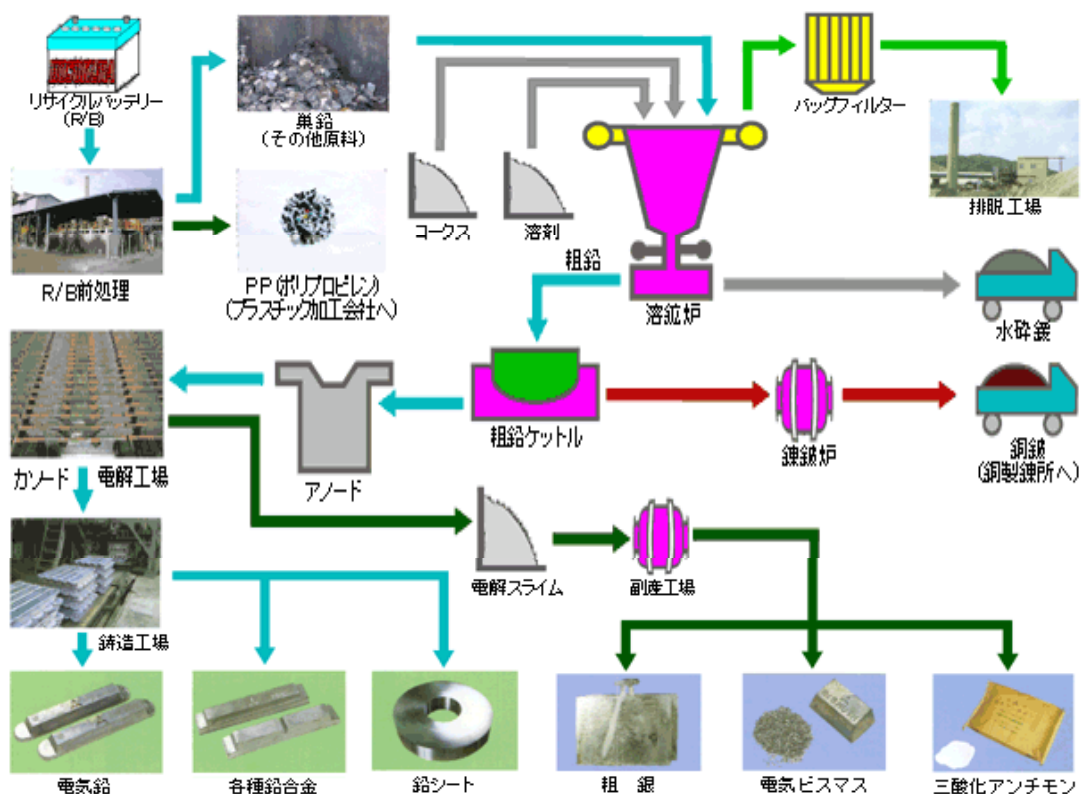


図 4.2.2 細倉金属鉱業の鉛精錬工程²⁾

なお、廃棄物中の鉛は銅製錬時に揮発することにより分離濃縮されているが、この考え方をさらに強化した方法として塩化揮発法がある。塩化カルシウムを混練した原料を加熱し、レアメタルを塩化物として揮発させ、下流で塩化物を回収する方法である。レアメタル塩化物の揮発温度が物質により異なることを利用して、レアメタルを単独で回収することも試みられている。その工程の一例を図4.2.3³⁾に示す。

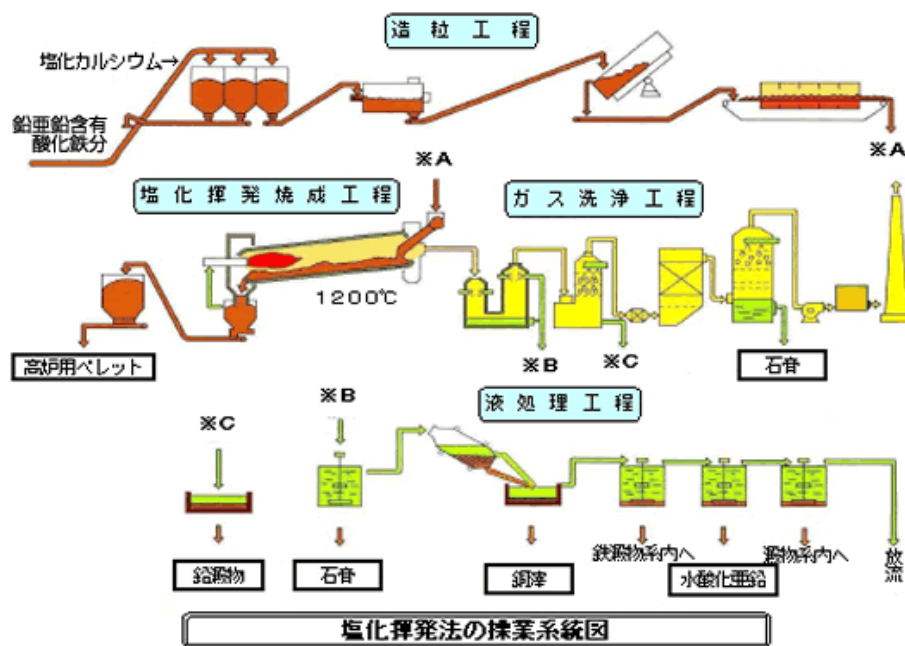


図 4.2.3 光和精鉛の塩化揮発法³⁾

4.2.2 スクラップへの対応

スクラップは鉛石に比べ金属の純度が高いため高純度化が容易になり、コストも大幅に低減できる。その一例を表 4.2.1 に示す⁴⁾。スクラップを使用することにより精錬工程から処理を始められるので、コストは約 1/5 になり、LCA 的にも優位と言える。

表 4.2.1 白金の採掘・精錬の各プロセスにおけるコスト、品位、収率、処理日数⁴⁾

工 程	全コストに占める割合 (%)	PGMs グレード (g/t)	PGMs 収率 (%)	富化率 (倍)	処理時間 (日)
採鉛	65~75	5~6	N/A	N/A	N/A
粉碎、浮遊選鉛	9~12	100~600	80~90	30~80	2
精錬、転化	6	640~6,000	95~98	20	7
ベースメタル精製	7	30~65%	>99	75	14
貴金属精製	4~5	>99.8%	98~99	2	30~150
合 計	100	N/A	75~85	200,000	~170

そこで、スクラップを対象とした既設炉の改善や新型炉の新設などの動きが強まっている^{5),6)}。スクラップを対象とした炉の課題として以下の点が挙げられる。

① スクラップを直接投入するために

- ・ 投入口を大きくする：従来は粉だったが、スクラップは破碎片形状で、大きさは10cm程度。絡み合い防止などのエンジニアリングも必要。
- ・ プラスチック対策：焼却促進のため、空気吹込み量を増やすとともに、炉の耐熱性を高めることも必要。
- ・ 品質の変動対策：質の異なるスクラップを事前に混ぜ合わせる前処理は行われているが、炉自体を大きくするなど変動吸収対策が必要

② 製錬性能の向上

- ・ 炉形状の改善：現在でも、鉛やレアメタルは乾式精錬時に揮発回収されているが、混合物であるため、さらに分離工程が必要である。レアメタルは金属ごとに揮発温度が異なるため、製錬温度を制御すれば段階的にレアメタルを取り出すことができる。そこで、炉を長くゾーンごとに加熱温度を変える。
- ・ レアメタル揮発促進剤の添加：揮発温度を下げたり、レアメタル揮発温度の差を広げたり、特定のレアメタルを選択的に揮発させる促進剤の添加する⁷⁾。
- ・ レアメタル回収促進剤の添加：貴金属を含むレアメタルなどを吸収しやすい金属（銅など）を積極的に添加し、レアメタルの回収率を向上させる試みあり。携帯電話などを対象として実証試験がなされている。

DOWAはスクラップを対象とした専用新型炉を建設中で08年春からの営業運転を発表した⁵⁾。処理の流れを図4.2.4に示す⁸⁾。レアメタルの回収が従来の17種類から2種（錫とニッケル）増えて、19種の元素が回収出来ることを強調している。

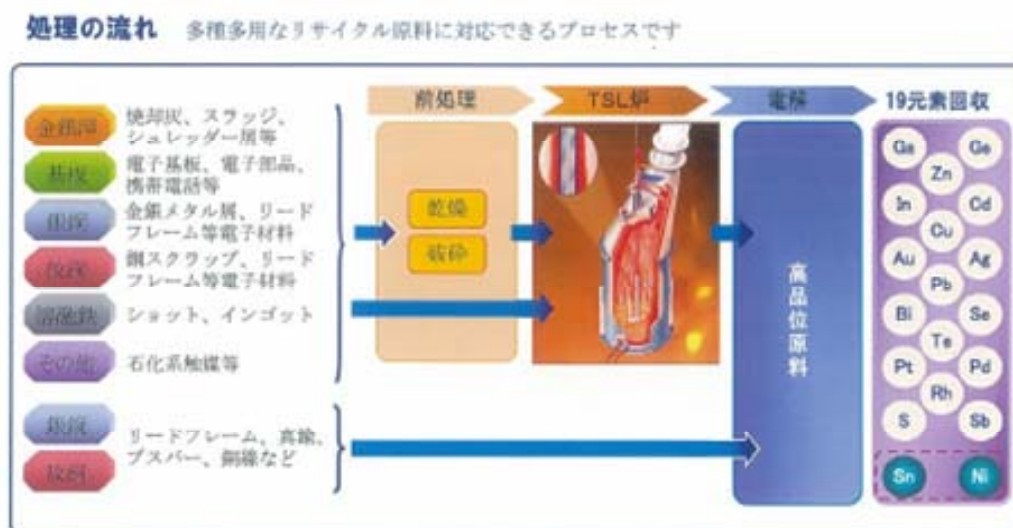


図 4.2.4 DOWA 処理の流れ⁸⁾

(参考文献)

- 1) 小坂製錬 会社案内
- 2) 三菱マテリアル HP
- 3) 光和精鉱 HP
- 4) 次田泰裕 「白金族金属」、自家出版、136
- 5) 日本経済新聞 2007年3月23日
- 6) 日鉱金属 HP
- 7) 岡部徹 希土類金属の製造技術とリサイクル、「金属」Vol.77(2007), No.6, 10~16
- 8) エコシステムジャパンのパンフレット「新たなリサイクルの時代へ」

5. まとめと今後の課題点

レアメタルはステンレス鋼の鉄鋼材料からハイテク産業に至るまで幅広く使用されており、欠かせない材料である。政府は安定供給に対するリスクを軽減するため主要レアメタル7種（ニッケル、クロム、タングステン、コバルト、モリブデン、マンガン、バナジウム）を備蓄している¹⁾。だが中国の需要高騰、ベースメタルの鉱山閉鎖など供給不測、価格高騰が起こっている。リサイクル業者、輸入商社などのデータからレアメタルの希少性、需要、価格などの側面からリサイクルの必要性度合いの検討が報告されている。

表 5.1 からリサイクル量が多いのはクロム (18.6 万 t)、マンガン (15.3 万 t)、ニッケル (4.2 万 t) であるが、鉄鋼屑の再溶解でまかなわれている。リサイクル率が高いレアメタルはベリリウム (100%)、ニオブ (85%)、アンチモン (77%) である²⁾。

また、廃棄物からのレアメタルの回収では、シュレッダーダストや建設廃棄物、廃触媒などの例があり、2007年3月8日に三菱マテリアル(株)、三菱商事(株)、(株)フルヤ金属の3社は、共同で廃触媒などのスクラップから白金族金属を回収する技術について共同開発契約を締結し、回収技術の開発によりリサイクル事業の早期展開を目指すことを発表した。

表 5.1 レアメタルのリサイクル必要性²⁾

ランキン グ	摘要 レアメタル	埋蔵量 (万t)	国内需要量 (t/年)	傾向	輸入価格 (kg/円)	傾向	市場規模 (億円/年)	リサイクル量		リサイクル必要性度合				
								(t/年)	リサイクル率(%)	希少性要因	需要要因	輸入価格要因	環境基準要因	点数
1	インジウム(In)	0.3	550		101046		556	250	45	◎	△	○		9
2	クロム(Cr)	81000	626000		27		169	186280	29.7		◎		○	8
3	ニッケル(Ni)	6200	106000		1019	→	1080	41658	39	△	◎		△	7
3	マンガン(Mn)	30000	535000		19		102	153500	28.7	△	◎		△	7
5	ゲルマニウム(Ge)	-	38	→	96319	→	37	0	0		○	○		6
5	ボロン(B)	17000	23000		89	→	20	0	0		○		○	6
5	バリウム(Ba)	17	8000		9	→	1	0	0	○	○			6
8	プラチナ(Pt)	7.1	50		3142997		1571	18	35			◎		5
8	ニオブ(Nb)	440	7000		16736		1172	5985	85	△	○	△		5
8	モリブデン(Mo)	860	25000		4522		1131	10425	41	△	○		△	5
8	レニウム(Re)	0.3	2		4000000		80	200	10			◎		5
8	ハフニウム(Hf)	45	2	→	2400000	→	48	0	0			◎		5
13	ガリウム(Ga)	17	150		260000	→	390	0	0		△	○		4
13	コバルト(Co)	700	15000	→	3897		585	5790	38.6	△	○			4
13	タングステン(W)	290	8000		1922		154	2560	32	△	○			4
13	ビスマス(Bi)	11	1000		1034		10	0	0	△	○			4
13	リチウム(Li)	410	13000		299		39	40	0.3	△	○			4
13	ストロンチウム(Sr)	816	30000		50		15	9600	23	△	○			4
13	セレン(Se)	7000	150		5507		8	20	13		△		○	4
20	パラジウム(Pd)	7.1	50		670296		335	32	63			○		3
20	バナジウム(V)	1300	5800		5571		323	4517	76		○			3
20	タンタル(Ta)	4.3	400		13712	→	55	0	0	△	△	△		3
20	セシウム(Cs)	10	100		50000	→	50	0	0	△	△	△		3
20	ジルコニウム(Zr)	3800	10800		91		10	0	0		○			3
20	タリウム(Tl)	380	36		160000	→	58	0	0			○		3
20	ベリリウム(Be)	40	0.7		328915	→	2	455	100			○		3
20	チタン(Ti)	27000	9000		13		1	900	10		○			3
20	ルビジウム(Rb)	200	0.2	→	300000	→	1	0	0			○		3
29	アンチモン(Sb)	180	500		372		2	385	77		△		△	2
30	テルル(Te)	2000	100		14748		15	0	0			△		1

- ・市場規模＝需要量×輸入価格、リサイクル率＝リサイクル量/需要量
- ・希少性要因は、需要量/埋蔵量の比率の著しく高いものを◎、やや高いものを○、高いものを△とした。
- ・需要要因は、需要量が著しく高いものを◎、やや高いものを○、高いものを△とした。
- ・輸入価格要因は、輸入価格が著しく高いものを◎、やや高いものを○、高いものを△とした。
- ・環境基準要因では、水質汚濁防止法の物質を○、要監視項目の物質を△とした。
- ・◎印を5点、○印を3点、△印を1点と換算し、得点を算出。

東京大学生産技術研究所の岡部准教授らは、炉を使用せずに白金族金属を回収する基礎技術を開発している。マグネシウムやカルシウムなどの金属を蒸気にして、廃棄された排ガス触媒に吹き付け、プラチナ表面を合金にする。合金処理したスクラップを王水に漬けてプラチナを溶かし回収する。未処理のプラチナは王水でもなかなか溶けないが、合金処理をして取り出せるようになる。炉など大規模な施設は不要になる。

一般的に金属スクラップをリサイクルするための条件は、量の確保、主成分の含有率が高い、汚れが少なく、有害成分が少ないあるいは分離が容易、販売コストが安定していることである。しかしレアメタル含有スクラップはこれらの条件を満たしておらず、比較的リサイクルが進んでいるのは、使用済み触媒（プラチナ、ニッケル、モリブデン、バナジウム）、超硬工具（タングステン）、二次電池（ニッケル、コバルト、カドミウム）、スーパーアロイ（ニッケル、モリブデン）、ステンレススクラップである。最終製品に含まれたレアメタル含有スクラップを、効率よく回収し、適切な前処理で品位を高め、低コストで分離精製し、採算があえばリサイクルができる。レアメタルのリサイクル事業を育成するためには、専門家の育成、環境対策コストの国からの支援、発生現場での分別協力が必要である¹⁾。

(参考文献)

- 1) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 HP
- 2) 2006 年度レアメタル市場の現状と今後の方向性、株式会社トータルビジョン研究所 (2006 年 1 月～4 月)、抜粋見本資料より