

# 使用済み家電製品からの希土類磁石のリサイクル

## 報告内容

1. 家電製品に使用されている希土類磁石
2. 使用済み家電製品からの希土類磁石の回収
3. 使用済み家電製品に使用されている希土類磁石の特性解析
4. リサイクルシステムの実現に向けた検討

平成22年7月9日

三菱マテリアル株式会社

環境リサイクル事業室

新井 義明

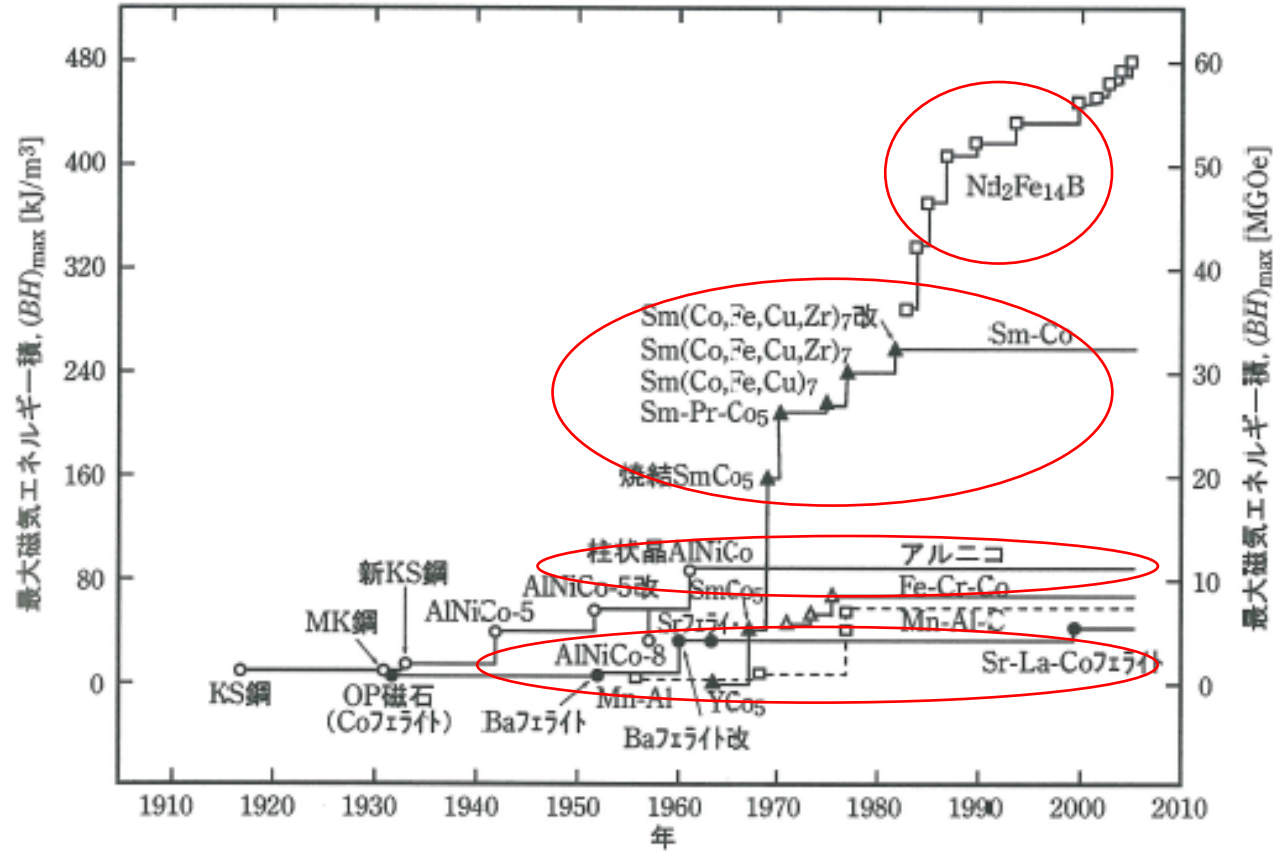
# 1-1. 永久磁石の種類と特性の推移

## 主な永久磁石の種類

1. フェライト系焼結磁石
2. ネオジム系焼結磁石
3. サマリウム系焼結磁石
4. アルニコ系鑄造磁石
5. フェライト系ボンド磁石
6. ネオジム系ボンド磁石
7. サマリウム系ボンド磁石
8. ナノコンジット系ボンド磁石

1~4 バルク磁石  
焼結磁石、鑄造磁石

5~8 ボンド磁石  
永久磁石粉末とバインダである樹脂・ゴムとの複合材料磁石であり樹脂成形技術により製造



永久磁石の特性の推移

出典: 佐川真人氏、浜野正昭氏「永久磁石」

最大磁気エネルギー積(磁石の強さを表す)

フェライト磁石 < アルニコ磁石 < サマリウム-コバルト磁石 < ネオジム磁石

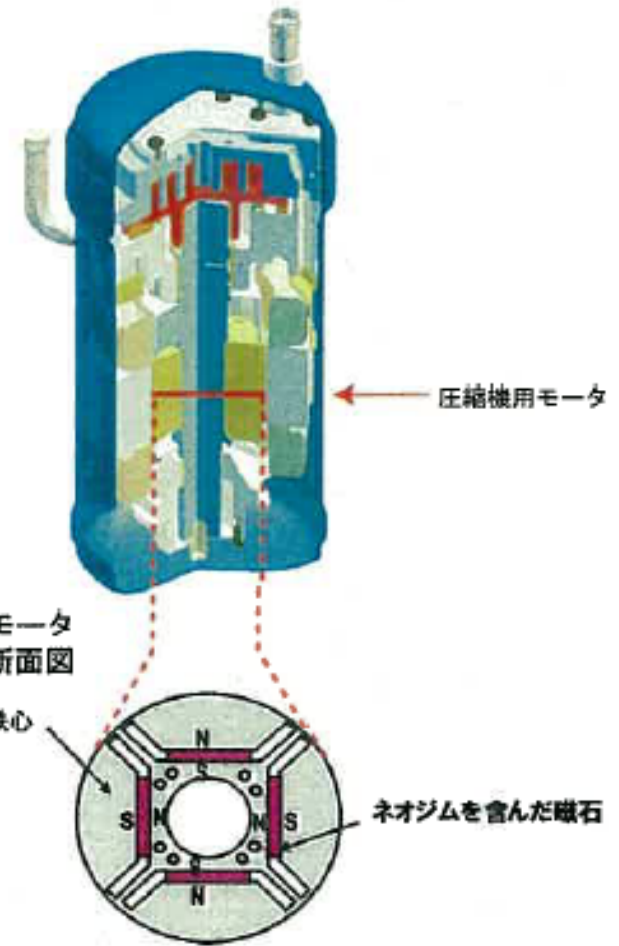
希土類磁石は、ネオジム系(Nd-Fe-B)、サマリウム系(Sm-Co)に分類 → ネオジム磁石が95%以上の生産量を占める

# 1-2. 家電製品における希土類磁石の使用状況(エアコン)

## 家庭用エアコン



+



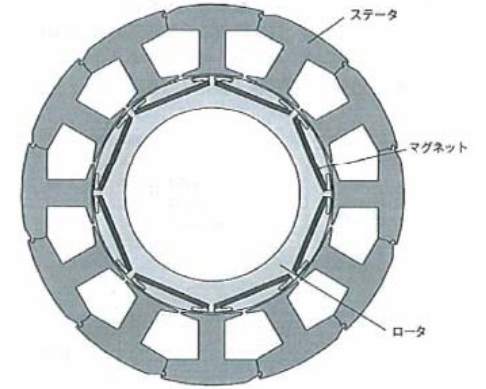
モータのロータ部に  
希土類磁石が埋め込まれている

# 1-3. 家電製品における希土類磁石の使用状況(洗濯機)

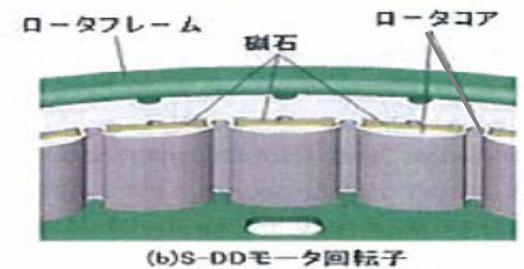
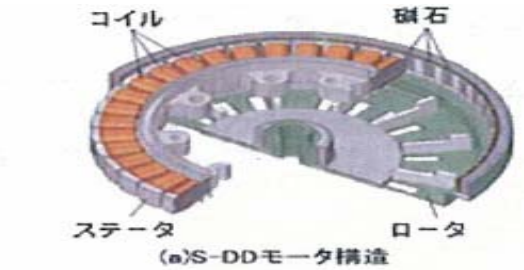
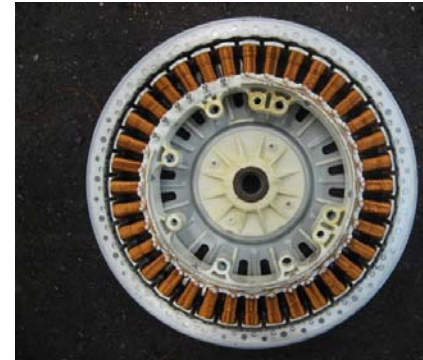
## 洗濯機・乾燥機



モータのロータ部に  
希土類磁石が埋め込まれている

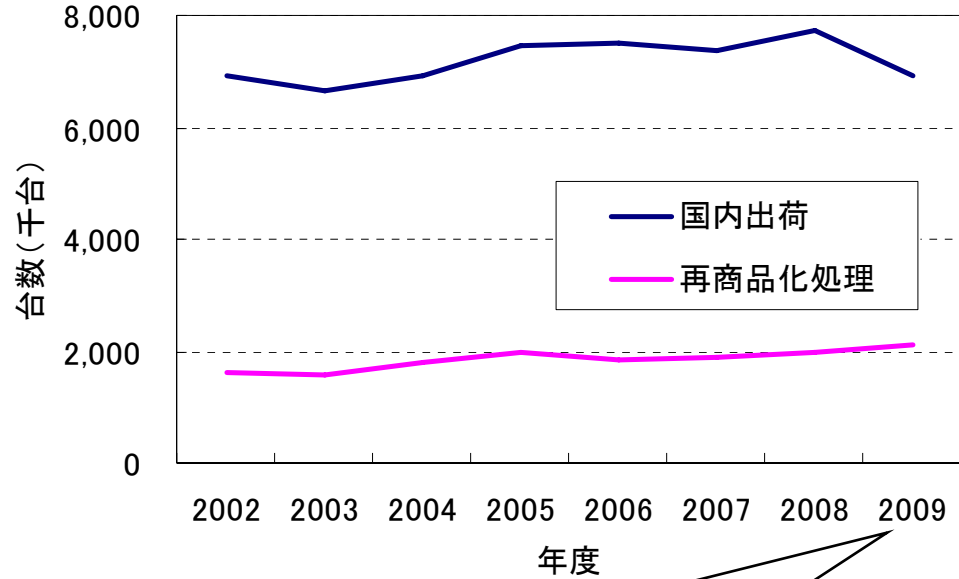


ドラム式洗濯機の  
モータ部



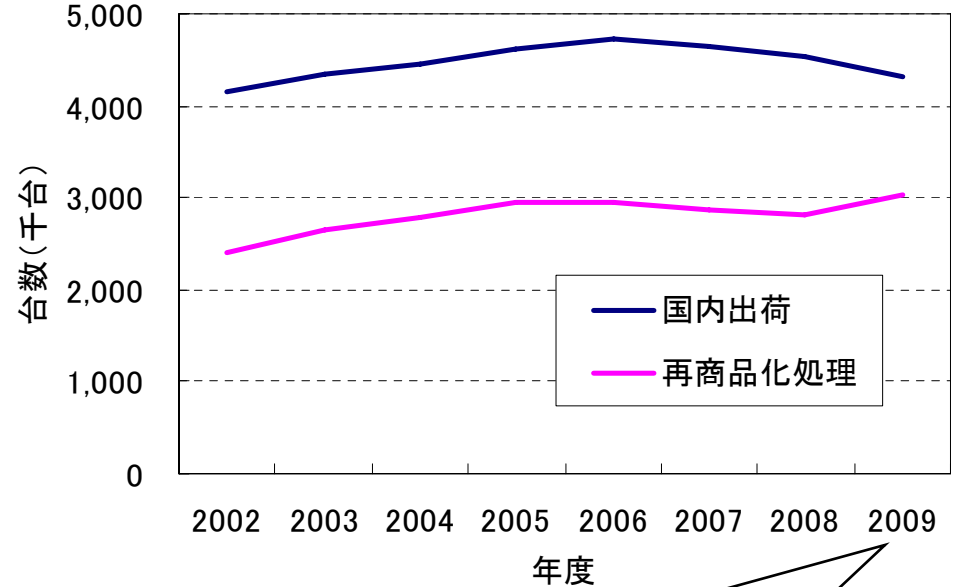
# 1-4. 家電リサイクル法による再商品化状況

## エアコン



2009年度 再商品化处理台数  
**2,114千台**

## 洗濯機

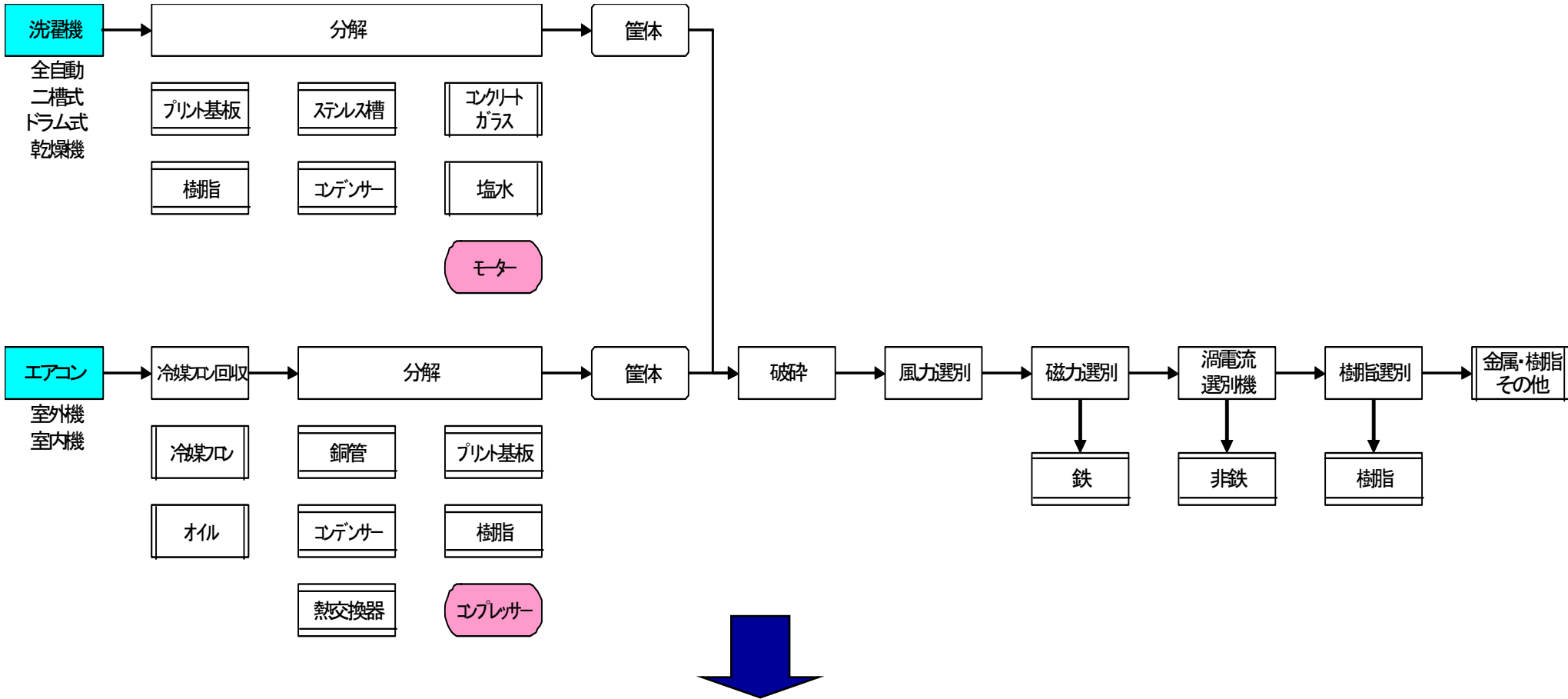


2009年度 再商品化处理台数  
**3,031千台**

※2009年度再商品化处理のみ、乾燥機を含む

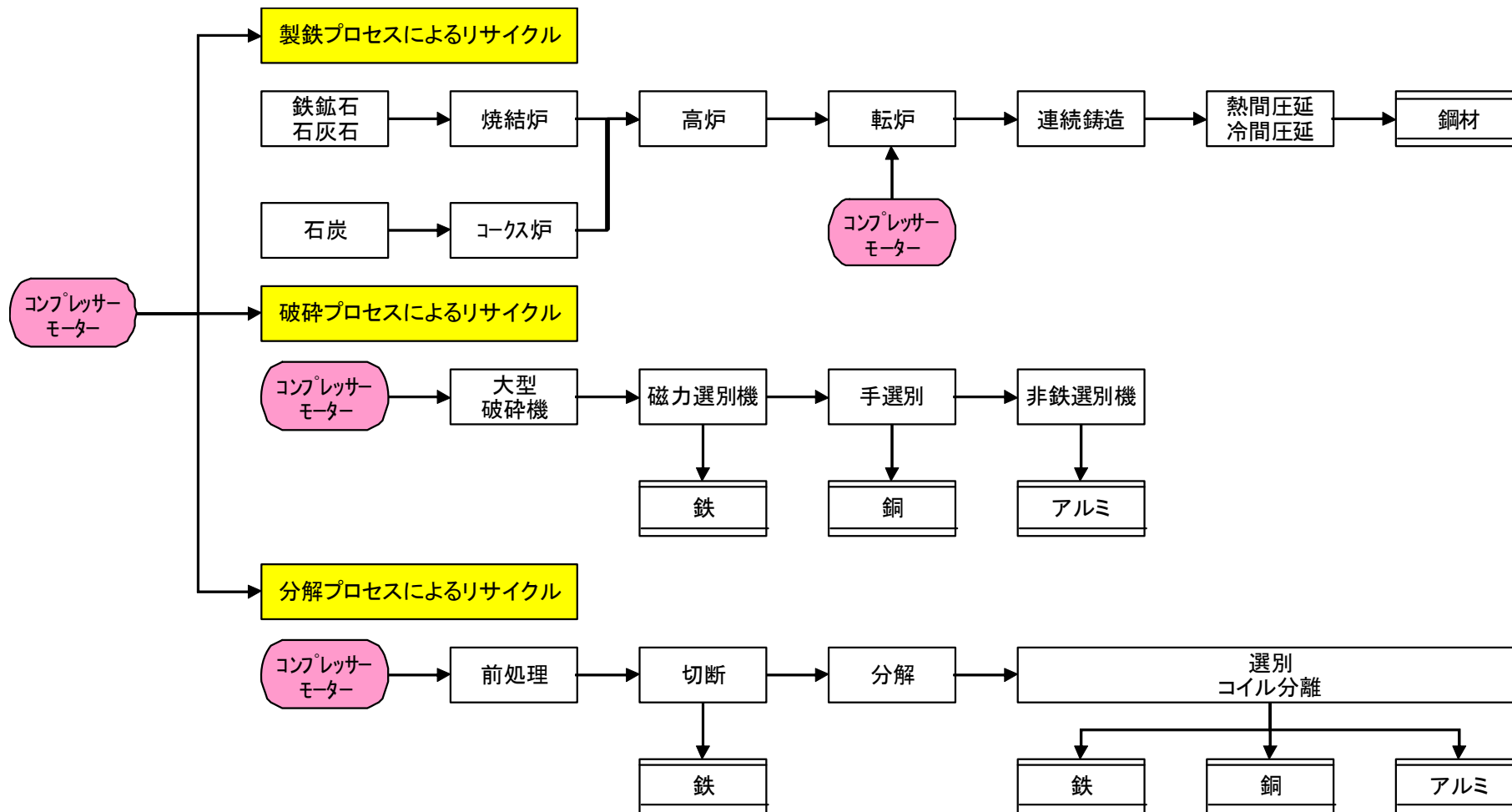
- ・エアコン : 出荷されたエアコン700万台のうちの約45%にネオジム磁石が使用(2004年度 日本冷凍空調工業会調べ)
- ・洗濯機 : 出荷された洗濯機462万台のうちの約13%にネオジム磁石が使用(2005年度 日本電機工業会調べ)

# 1-5. エアコン・洗濯機の現状のリサイクルフロー



家電リサイクルプラントでエアコン・洗濯機から回収されたコンプレッサー・モーター  
 → さらに分解または破碎～選別を実施し、鉄・銅を回収する  
 → 鉄系の再生原料として使用 → 電炉用原料、転炉用原料

# 1-6. コンプレッサー・モーターの現状のリサイクルフロー



エアコン・洗濯機から回収されたコンプレッサー・モーターは、非鉄を回収または再利用しているものの、モーターに使用されている希土類磁石は、磁石としてリサイクルされておらず、鉄系の再生原料の一部になっている

## 2-1. エアコン 希土類磁石調査結果

調査期間 2009年度に実施

冷媒種類別 高性能磁石調査結果

冷媒種類	冷媒種類別調査		希土類磁石調査		
	台数	比率	台数	調査台数比率	冷媒別比率
R22	1,939	87.38	0	0.00	0.00
R410A	280	12.62	126	5.68	45.00
合計	2,219	100.00	126	5.68	

メーカー別 高性能磁石調査結果(R410A冷媒)

製造メーカー	R410A冷媒調査		希土類磁石調査		
	台数	比率	台数	冷媒別比率	メーカー別比率
A社	61	21.79	36	12.86	59.02
B社	108	38.57	5	22.73	4.63
C社	89	31.79	81	28.93	91.01
その他	22	7.86	4	1.43	18.18
合計	280	100.00	126	45.00	



# 2-2. エアコン コンプレッサのマテリアルバランス

シェル下部



シェル上部



アキュムレータ



ステータ(珪素鋼板)



	分解前 コンプレッサ 重量(kg)	マテバラ(kg)							
		シェル 下部	シェル 上部	アキュ ムレータ	ステータ (珪素鋼板)	銅線	ロータ	ロータ	
								磁石	その他
A社	8.79	1.18	4.07	—	1.39	0.78	1.16	0.11	1.05
B社	9.00	2.89	1.73	0.86	1.97	0.61	0.88	0.10	0.78
C社	9.37	2.69	1.81	0.97	2.01	0.78	1.13	0.10	1.02

コンプレッサ  
1台に  
約100g/台の  
希土類磁石が  
使用されている

銅線



ロータ

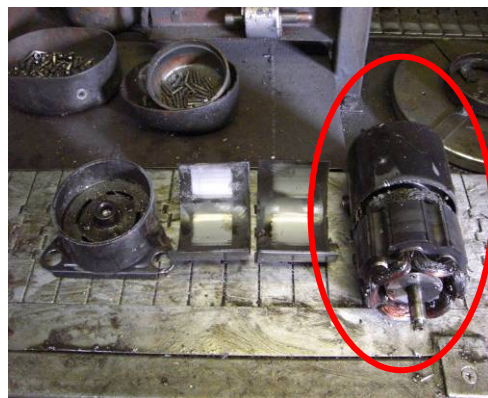


構成素材	重量比
鉄(シェル下部、シェル上部、アキュムレータ)	59.6%
珪素鋼板(ステータ、磁石を除いたロータ)	30.3%
銅(銅線)	8.0%
磁石	1.2%

# 2-3. エアコン コンプレッサ分解フロー(1)



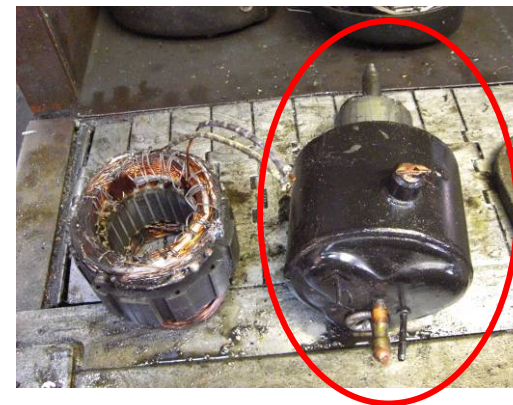
シェルカット



ステータ取り外し



ロータ取り外し



# 2-3. エアコン コンプレッサ分解フロー(2)



ロータ



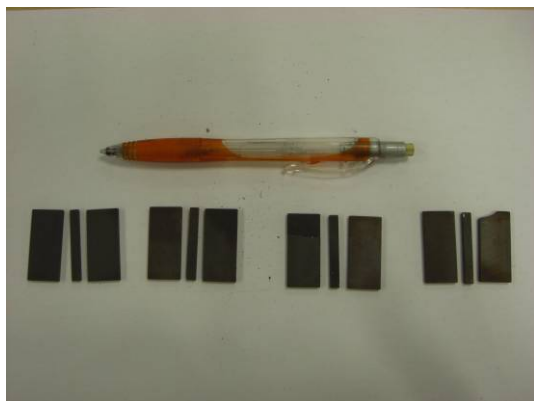
脱磁

・500°C、15分程度



ロータ分解

磁石を抜き出せる状態に


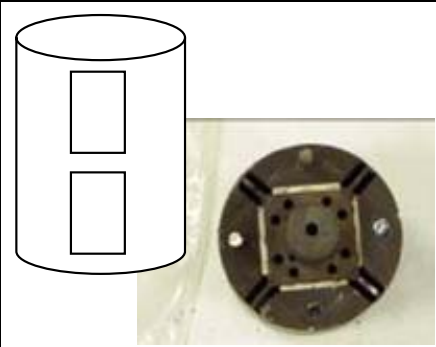




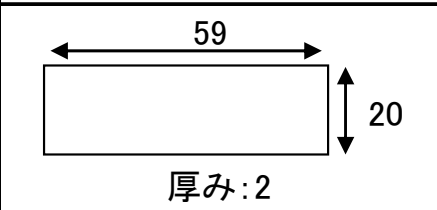
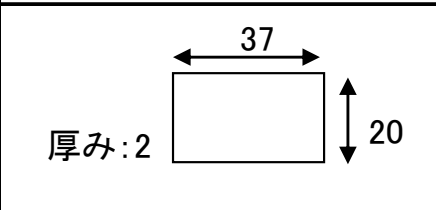
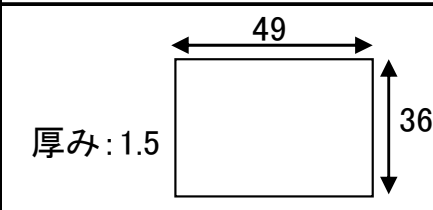


磁石

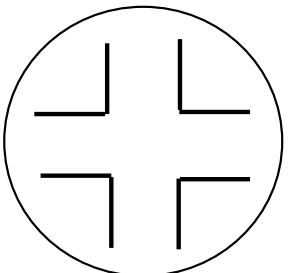


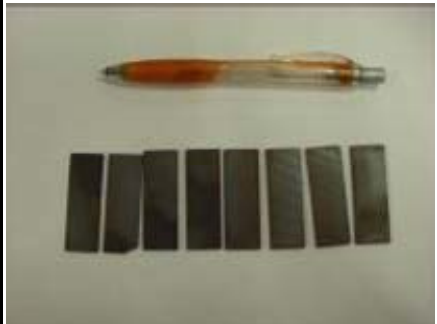
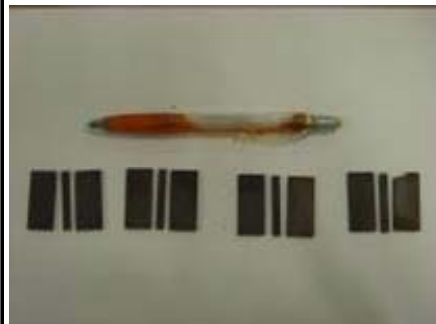

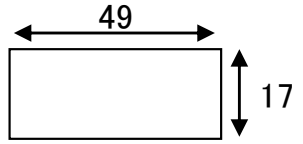
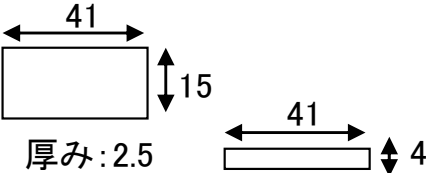
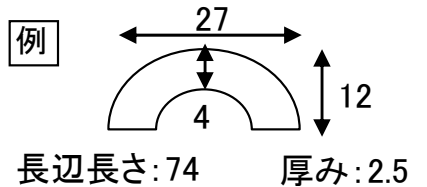
その他



# 2-4. 磁石の形状 (1)

磁石の埋め込み形式	小さな四角形 4枚	小さな四角形 8枚	大きな四角形 4枚
口一々断面			
磁石形状			
磁石個数	板状4枚	板状8枚	板状4枚
磁石重量(kg)	0.08	0.12	0.10
磁石寸法(mm)	 <p>59 20 厚み:2</p>	 <p>37 20 厚み:2</p>	 <p>49 36 厚み:1.5</p>

# 2-4. 磁石の形状 (2)

磁石の埋め込み形式	L字型 (8部品)	L字型 (12部品)	フェライト アーチ型
ロータ断面			
磁石形状			
磁石個数	板状8枚	板状8枚、棒状4本	アーチ状4~8本
磁石重量(kg)	0.12	0.10	0.34~0.48
磁石寸法(mm)	 厚み: 2	 厚み: 2.5	 例 長辺長さ: 74 厚み: 2.5

## 2-5. 洗濯機 希土類磁石調査結果

調査期間 2009年度に実施

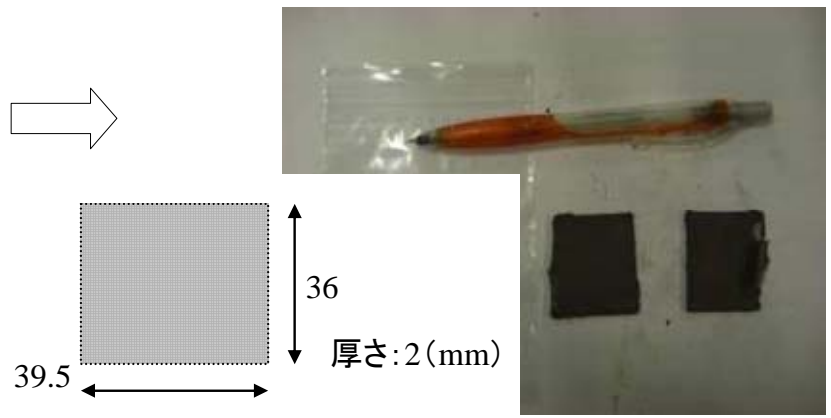
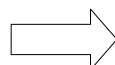
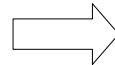
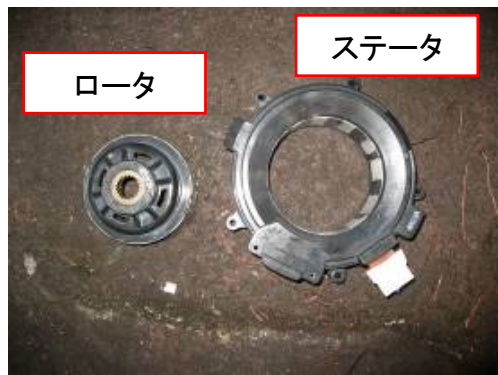
### 型式別 希土類磁石調査結果

型式	型式別調査		希土類磁石調査		
	台数	比率	台数	調査台数比率	型式別比率
全自動式	4,811	70.14	4	0.06	0.08
二槽式	909	13.25	0	0.00	0.00
ドラム式	267	3.89	50	0.73	18.73
乾燥機	872	12.71	0	0.00	0.00
合計	6,859	100.00	54	0.79	

### メーカー別 希土類磁石調査結果(ドラム式)

製造メーカー	ドラム式調査		希土類磁石調査		
	台数	比率	台数	ドラム式比率	メーカー別比率
A社	58	21.72	32	11.99	55.17
B社	175	65.54	18	6.74	10.29
その他	34	12.73	0	0.00	0.00
合計	267	100.00	50	18.73	

# 2-6. A社 洗濯機モータ マテリアルバランス



・ロータコアに磁石が埋め込まれている  
 ・表面が樹脂でモールドされているため、分解による磁石の取り出しは困難

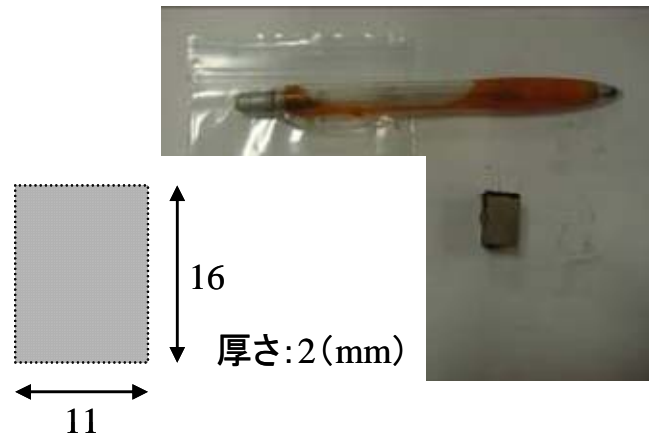
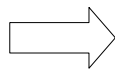
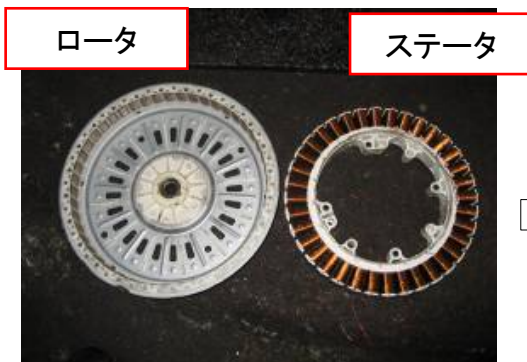
・加熱によりモールド樹脂を灰化すると同時に脱磁  
 ・軽く衝撃を与えると埋め込まれている磁石が落下  
 →特に工具を使うことなく抜き出し可能

約20gの板状の磁石が8枚  
 = **160~170g/台**

A社	マテバラ(kg)				
	ロータ	ロータ			ステータ
樹脂		磁石	その他金属		
分解前重量 (kg)	1.62	0.27	0.17	1.18	4.75
6.38	1.62	0.27	0.17	1.18	4.75

構成素材	重量比
金属、樹脂混合物	92.9%
樹脂	4.2%
磁石	2.7%

# 2-7. B社 洗濯機モータ マテリアルバランス



- ・ロータに磁石が埋め込まれている
- ・表面が樹脂でモールドされているため、分解による磁石の取り出しは困難

- ・加熱によりモールド樹脂を灰化すると同時に脱磁
- ・樹脂を除去すると、ロータは「珪素鋼板+磁石」と「その他金属」に分離
- ・珪素後半に衝撃を与えると磁石の抜き出しが可能

約3.5gの磁石が48枚  
= **160~170g/台**

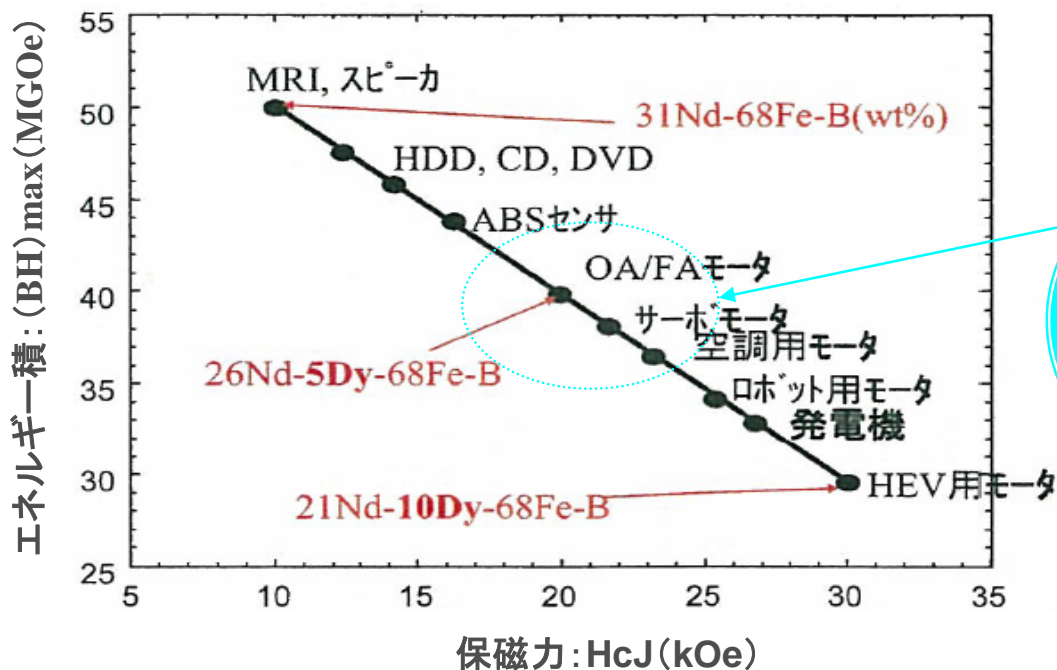
B社	マテバラ(kg)							
	ロータ	ロータ				スタータ	スタータ	
分解前重量(kg)		樹脂	磁石	珪素鋼板	その他金属		銅線	その他
4.5	2.08	0.19	0.17	0.93	0.81	2.43	0.54	1.89

構成素材	重量比
金属類混合物	60.0%
珪素鋼板	20.7%
銅線	12.0%
樹脂	4.2%
磁石	3.8%



# 3-1. 家電製品に使用される磁石の組成

	定量分析(%)								キュリー温度
	Fe	B	Co	Cu	Nd	Dy	Pr	Tb	(°C)
平均値	66	1	2	0	23	5	3	0	349
最大値	69.6	1.11	3.66	0.23	27.6	7.67	6.48	1.61	376
～	～	～	～	～	～	～	～	～	～
最小値	61.6	0.95	0.54	0.11	18.6	2.97	0.26	0.00	327



Fe + Co + Cu = 68%

B = 1%

レアアース合計 = 31%

Nd + Pr = 26%

Dy = 5%

出典: 佐川真人氏  
「レアメタル研究会」(東大)  
講演資料

耐熱温度 ⇒ 100°C

150°C

200°C

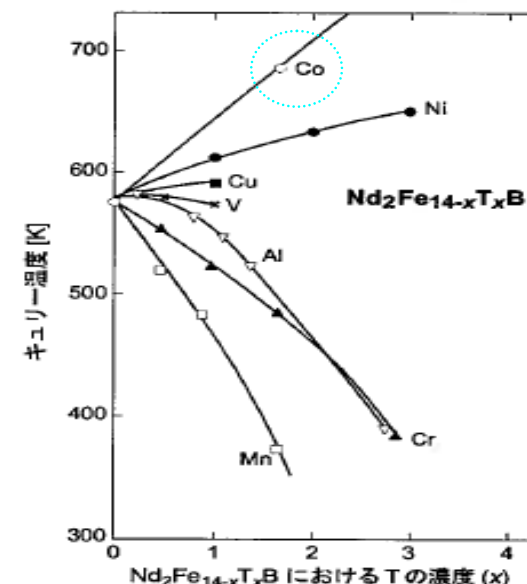
# 3-2. キュリー温度とCo添加量

## キュリー温度による分類

- ① 370°C前後
- ② 350°C前後
- ③ 330°C前後

数個の例外はあるものの、  
メーカー別、製品別(エアコン・洗濯機)  
で特性が異なる

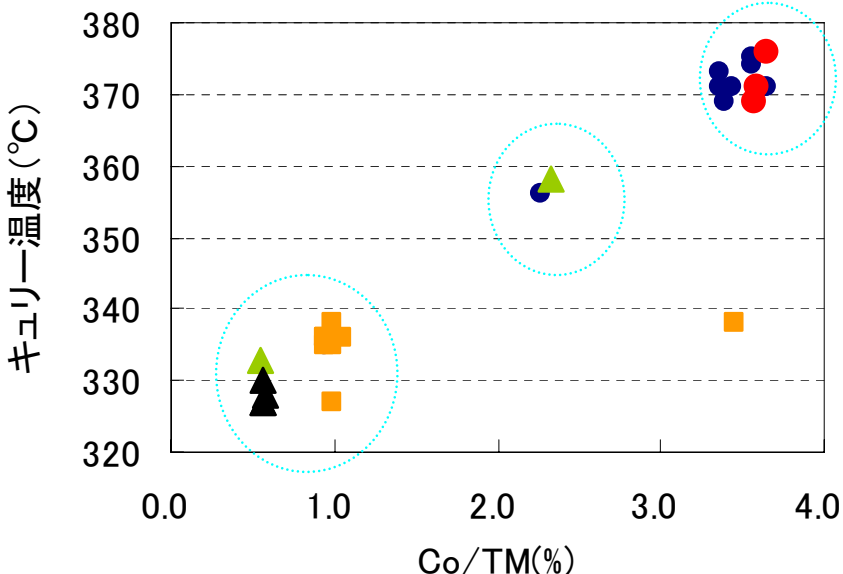
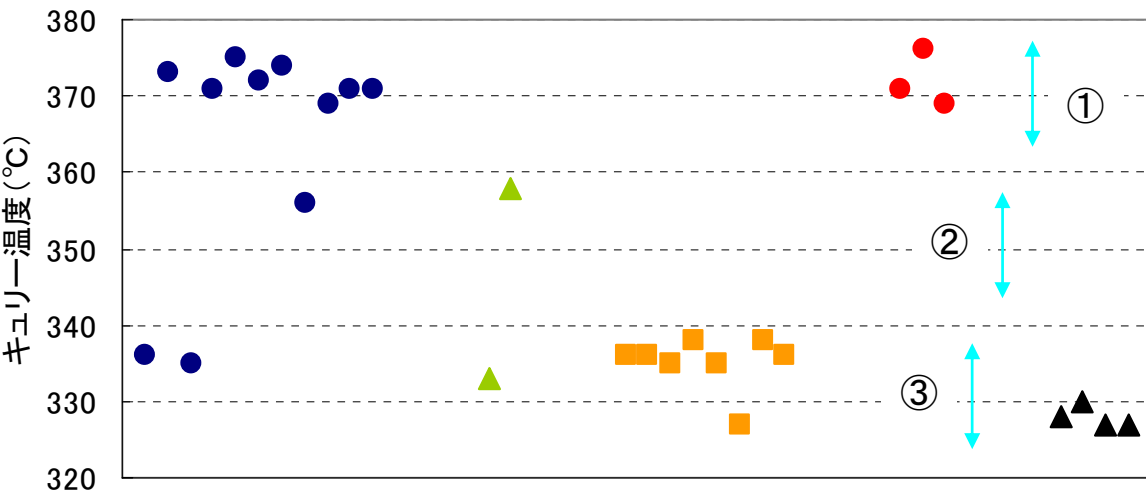
出典: 佐川真人氏、浜野正昭氏「永久磁石」



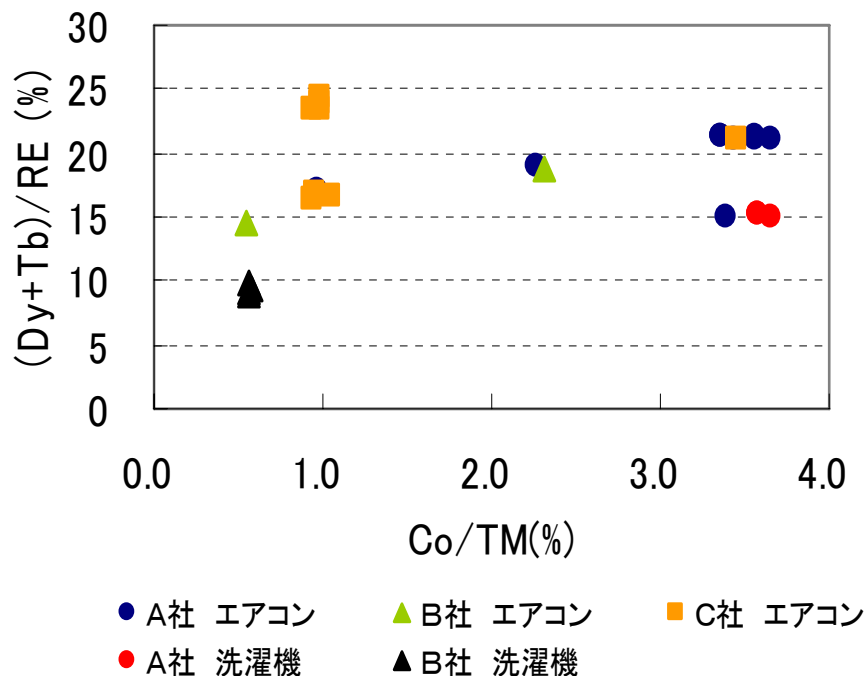
Feを他の元素で置換した場合の  
キュリー温度の変化

## Coの添加量と キュリー温度の関係

- Coの添加はキュリー温度を上昇
- 本試験結果も同様な傾向
- 1%以下、2~3%、3%以上の  
3グループに分類



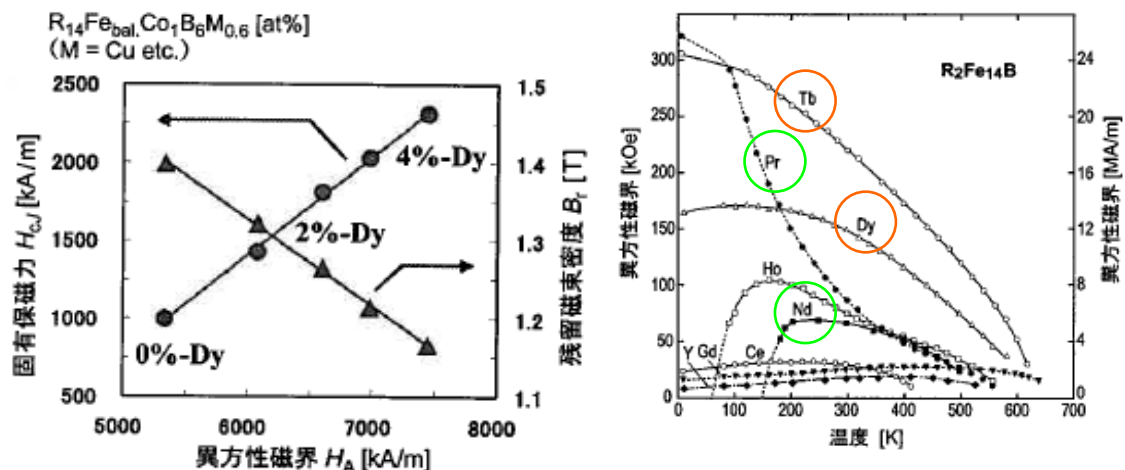
# 3-3. 保磁力を高める元素



## 保磁力(耐熱温度)を高める元素の添加量

保磁力は温度を上げていくと低下し、キュリー温度でゼロ

- ① 異方性磁界の大きな元素を添加し、保磁力を向上
  - Dy、Tbを添加
  - Tbは効果は大きいが高価であり、Dyが使用(残留磁束密度とコストは犠牲になる)
- ② 保磁力が下がらないようにキュリー温度を高くする
  - Coを添加(Coは耐食性を向上させるためにも添加)



R2Fe14Bの異方性磁界と保磁力、温度依存性

出典: 佐川真人氏、浜野正昭氏「永久磁石」

磁石に求められる必要特性により、保磁力を高めるためにDyやTbを添加している(Dy添加が多い→Tb高価なため)キュリー温度を高くして保磁力の低下を抑えるようにしている

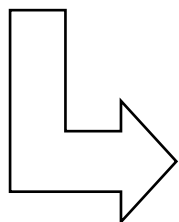
## 3-4. 分析結果のまとめと3種分類

分析結果より

- ①Coを少量含み、キュリー温度が330°C程度
- ②Coを含み、キュリー温度が350°C程度
- ③Coを多く含み、キュリー温度が370°C程度

に分類できる

	定量分析(%)								キュリー温度 (°C)	メーカー別
	Fe	B	Co	Cu	Nd	Dy	Pr	Tb		
①	66.4	1.0	0.8	0.1	21.3	5.2	5.1	0.0	333	C社エアコン B社洗濯機
②	66.3	1.0	2.3	0.1	24.3	5.1	0.3	0.6	357	B社エアコン
③	63.6	1.0	3.5	0.2	25.5	5.8	0.3	0.2	372	A社エアコン A社洗濯機



磁石の回収量と、レアアース埋蔵量を試算

## 3-5. 高性能磁石回収量の試算

調査結果より試算した現在の希土類磁石 回収可能重量

平成20年度試算 リサイクル台数	回収台数 (千台)	希土類磁石 比率(%)	希土類磁石 使用量(g/台)	希土類磁石 回収重量(t)
エアコン	1,968	6	100	11.8
洗濯機	2,821	1	150	4.2
合計	4,789			16.0

現在の希土類磁石 使用量試算

平成20年度試算 国内出荷	出荷台数 (千台)	希土類磁石 比率(%)	希土類磁石 使用量(g/台)	希土類磁石 使用重量(t)
エアコン	7,500	60	100	450.0
洗濯機	4,540	20	150	136.2
合計	12,040			586.2



上記のように出荷された製品が10年後にリサイクル(70%回収)されたと仮定すると

10年後の希土類磁石 回収可能重量試算

平成30年度試算 リサイクル台数(70%)	回収台数 (千台)	希土類磁石 比率(%)	希土類磁石 使用量(g/台)	希土類磁石 回収重量(t)
エアコン	5,250	60	100	315.0
洗濯機	3,178	20	150	95.3
合計	8,428			410.3

# 3-6. 資源埋蔵量の試算

調査結果より試算した現在の回収可能重量

平成20年度試算 リサイクル台数	希土類磁石	資源量(t)							
	回収重量(t)	Fe	B	Co	Cu	Nd	Dy	Pr	Tb
エアコン	11.81	7.75	0.12	0.20	0.02	2.67	0.63	0.41	0.01
洗濯機	4.23	2.73	0.04	0.11	0.01	1.01	0.24	0.09	0.01
合計	16.04	10.48	0.16	0.30	0.03	3.69	0.87	0.50	0.02

現在の製品使用量試算

平成20年度試算 国内出荷	希土類磁石	資源量(t)							
	回収重量(t)	Fe	B	Co	Cu	Nd	Dy	Pr	Tb
エアコン	450.00	295.17	4.54	7.50	0.72	101.89	24.10	15.66	0.42
洗濯機	136.20	88.01	1.36	3.45	0.25	32.63	7.57	2.76	0.18
合計	586.20	383.18	5.90	10.95	0.98	134.52	31.67	18.42	0.60

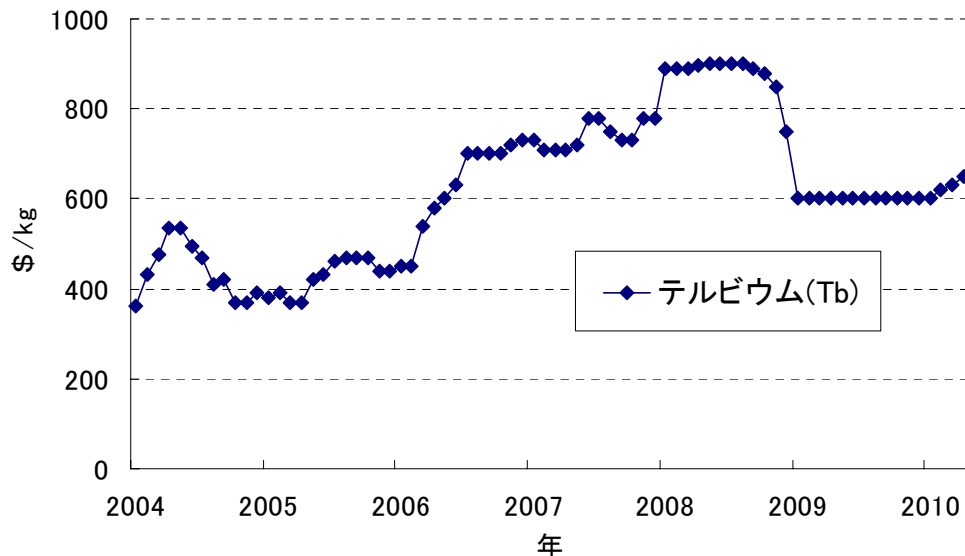
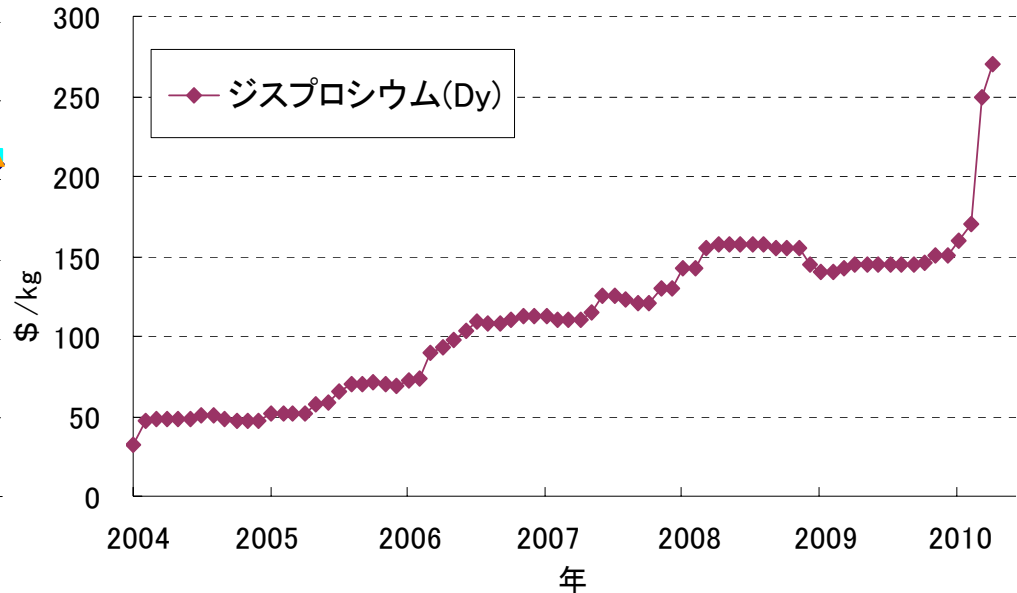
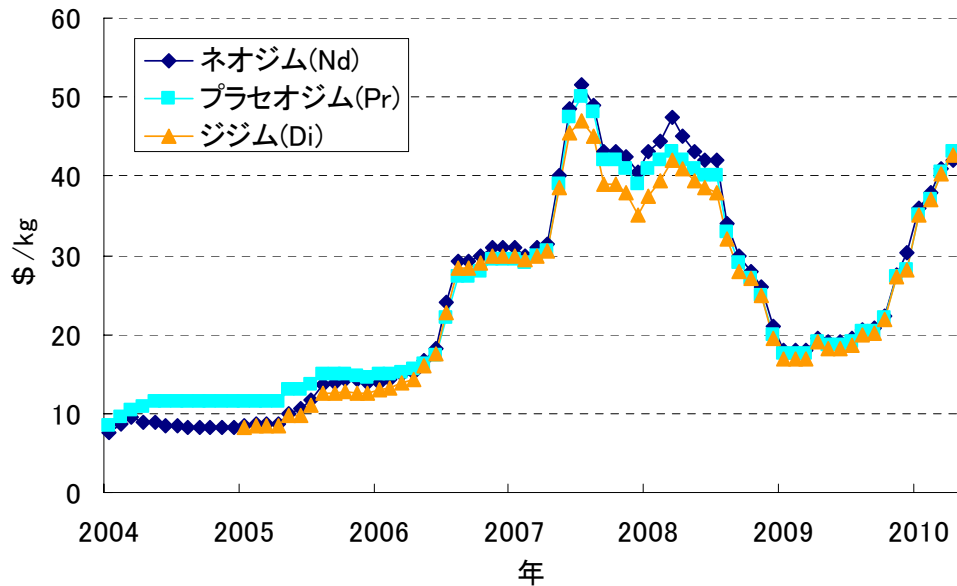
上記のように出荷された製品が10年後にリサイクル(70%回収)されたと仮定すると



10年後の回収可能重量試算

平成30年度試算 リサイクル台数(70%)	希土類磁石	資源量(t)							
	回収重量(t)	Fe	B	Co	Cu	Nd	Dy	Pr	Tb
エアコン	315.00	206.62	3.18	5.25	0.51	71.32	16.87	10.96	0.30
洗濯機	95.34	61.61	0.95	2.41	0.18	22.84	5.30	1.93	0.12
合計	410.34	268.22	4.13	7.66	0.68	94.16	22.17	12.89	0.42

# 4-1. レアアースの価格推移



- ・希土類磁石関連材料価格は、その需要に応じて2005年頃から価格が急騰
- ・2004年に比べ依然として2～5倍
- ・日本や中国の磁石需要が低迷することは考えにくく、価格に関しても現状維持orさらなる上昇が予想される
- ・資源価格が高い、または偏在性があるTbやDyは磁石特性を低下せずに使用量を低減するような開発が行われている

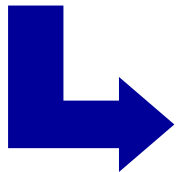
※CIF価格 出典:レアメタルニュース(アルム社)

## 4-2. 高性能磁石に使用される資源の価格

資源価格							
Fe	B	Co	Cu	Nd	Dy	Pr	Tb
\$/t	円/kg	\$/lb	\$/t	\$/kg	\$/kg	\$/kg	\$/kg
239	1,000	22.0	4,999	21.1	145	20.5	600
2010/2 鉄鋼新聞	—	2009/11 高品位 品	2009/1-11 LME価格	2009 輸入価格 平均 レアメタルニュース			

※参考:2010年4月価格

Nd	Dy	Pr	Tb
\$/kg	\$/kg	\$/kg	\$/kg
42.0	270	43.0	650
2010/4 輸入価格 レアメタルニュース			



資源価格を使って、回収される磁石の資源価値を算出

(計算例) 高性能磁石を使用したエアコンコンプレッサ1台あたりの資源価値

エアコン コンプレッサ 平均重量(kg)	構成素材	重量比	素材別 重量 (kg)	資源価値 (\$)	1台あたりの 資源価値 (\$)
9.12	鉄(シェル下部、シェル上部、アキュムレータ)	59.6%	5.43	1.96	7.16
	珪素鋼板(ステータ、磁石を除いたロータ)	30.3%	2.76		
	銅(銅線)	8.0%	0.73	3.65	
	磁石	1.2%	0.11	1.55	



# 4-3. 回収される高性能磁石の資源価値試算

調査結果より試算した現在の回収可能重量

平成20年度試算 リサイクル台数	高性能磁石 回収重量(t)	資源価値(\$)								
		Fe	B	Co	Cu	Nd	Dy	Pr	Tb	合計
エアコン	12	1,850	—	9,540	95	56,400	91,700	8,420	6,660	175,000
洗濯機	4	653	—	5,200	39	21,400	34,100	1,760	3,290	66,400
合計	16	2,500	—	14,700	134	77,800	126,000	10,200	9,940	241,000

平成20年度試算 国内出荷	高性能磁石 回収重量(t)	資源価値(\$)								
		Fe	B	Co	Cu	Nd	Dy	Pr	Tb	合計
エアコン	450	70,500	—	364,000	3,620	2,150,000	3,490,000	321,000	254,000	6,660,000
洗濯機	136	21,000	—	167,000	1,260	688,000	1,100,000	56,500	106,000	2,140,000
合計	586	91,600	—	531,000	4,880	2,840,000	4,590,000	378,000	359,000	8,790,000

5,650,000 8,550,000 793,000 389,000 16,000,000

上記のように出荷された製品が10年後にリサイクル(70%回収)されたと仮定すると...

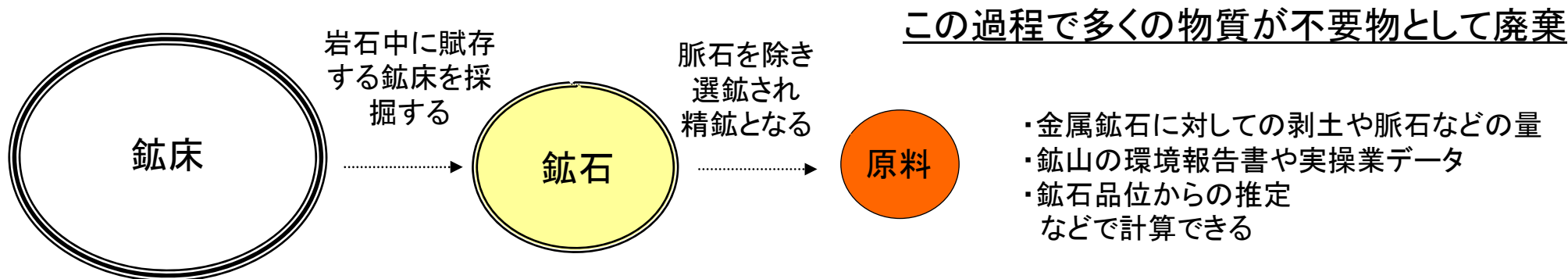
10年後の回収可能重量試算

平成30年度試算 リサイクル台数(70%)	高性能磁石 回収重量(t)	資源価値(\$)								
		Fe	B	Co	Cu	Nd	Dy	Pr	Tb	合計
エアコン	315	49,400	—	254,000	2,530	1,500,000	2,450,000	225,000	178,000	4,660,000
洗濯機	95	14,700	—	117,000	880	482,000	768,000	39,600	74,000	1,500,000
合計	410	64,100	—	372,000	3,410	1,990,000	3,210,000	264,000	252,000	6,160,000

3,960,000 59,900,000 555,000 272,000 11,200,000

※朱書は2010年4月価格で試算

# 4-4. 隠れた物質フロー～エコリユックサック～



関与物質総量 (TMR : Total Material Requirement) = エコリユックサック

回収した磁石をリサイクルをすると酸化溶解工程からスタートするので「資源採掘」の工程はカットされる



エコリユックサックを用いて環境負荷低減効果を試算

どれだけ荷物を背負っていたか、というイメージ

高性能磁石中の元素のエコリユックサック							
Fe	B	Co	Cu	Nd	Dy	Pr	Tb
8	140	600	360	3,000	9,000	8,000	30,000

# 4-5. リサイクルによる環境負荷低減量の試算

調査結果より試算した現在の回収可能重量

平成20年度試算 リサイクル台数	希土類磁石 回収重量(t)	エコリュックサック(t)								合計
		Fe	B	Co	Cu	Nd	Dy	Pr	Tb	
エアコン	12	62	-	118	7	8,020	5,690	3,290	333	17,500
洗濯機	4	22	-	64	3	3,040	2,120	685	164	6,100
合計	16	84	-	182	10	11,100	7,810	3,970	497	23,600

現在の製品使用量試算

平成20年度試算 国内出荷	希土類磁石 回収重量(t)	エコリュックサック(t)								合計
		Fe	B	Co	Cu	Nd	Dy	Pr	Tb	
エアコン	450	2,360	-	4,500	261	306,000	217,000	125,000	12,700	668,000
洗濯機	136	704	-	2,070	91	97,900	68,100	22,100	5,290	196,000
合計	586	3,070	-	6,570	351	404,000	285,000	147,000	18,000	864,000

上記のように出荷された製品が10年後にリサイクル(70%回収)されたと仮定すると



10年後の回収可能重量試算

平成30年度試算 リサイクル台数(70%)	希土類磁石 回収重量(t)	エコリュックサック(t)								合計
		Fe	B	Co	Cu	Nd	Dy	Pr	Tb	
エアコン	315	1,650	-	3,150	183	214,000	152,000	87,700	8,880	467,000
洗濯機	95	493	-	1,450	63	68,500	47,700	15,400	3,700	137,000
合計	410	2,150	-	4,600	246	282,000	200,000	103,000	12,600	605,000

# まとめ

## 希土類磁石の回収

- ・使用済み家電製品から希土類磁石を回収するための社会システムは、家電リサイクル法が施行されていることから、製品回収に対しては基本的に問題はない
- ・リサイクルするためには、希土類磁石使用製品の判別や磁石を取り出し易くするための製品設計が重要  
→ 将来的には、製品・部品への表示が必要

## リサイクル技術

- ・使用済み家電製品のエアコン・洗濯機のコンプレッサ・モータから希土類磁石を回収できることを確認したが回収をより効率的に実施するためには、今後さらに継続的な調査や技術検討が必要
- ・分解～磁石取り出しまでの工程で、装置による自動化・省力化(処理時間の短縮、人手作業の低減)を検討し、コスト低減の可能性を検証することが必要 → 試験装置や治具の製作等
- ・磁石合金の再生プロセス(希土類回収法や合金再生法)でリサイクルできるような技術的・経済的な検討が必要  
→ 分解回収技術・合金再生技術の両方で必要(回収した磁石の組成・不純物の除去)

## レアースリサイクルシステムの必要性(資源セキュリティ)

- ・天然資源から磁石を製造した場合に比べてリサイクルをすることにより、環境負荷低減効果があることを確認
- ・希土類磁石は、用途や使用量が拡大することが予想され、使用元素を確保するためにも政策的な対応が必要  
→ 備蓄等の対応が必要