

触媒に使用されるレアメタル 資源の状況

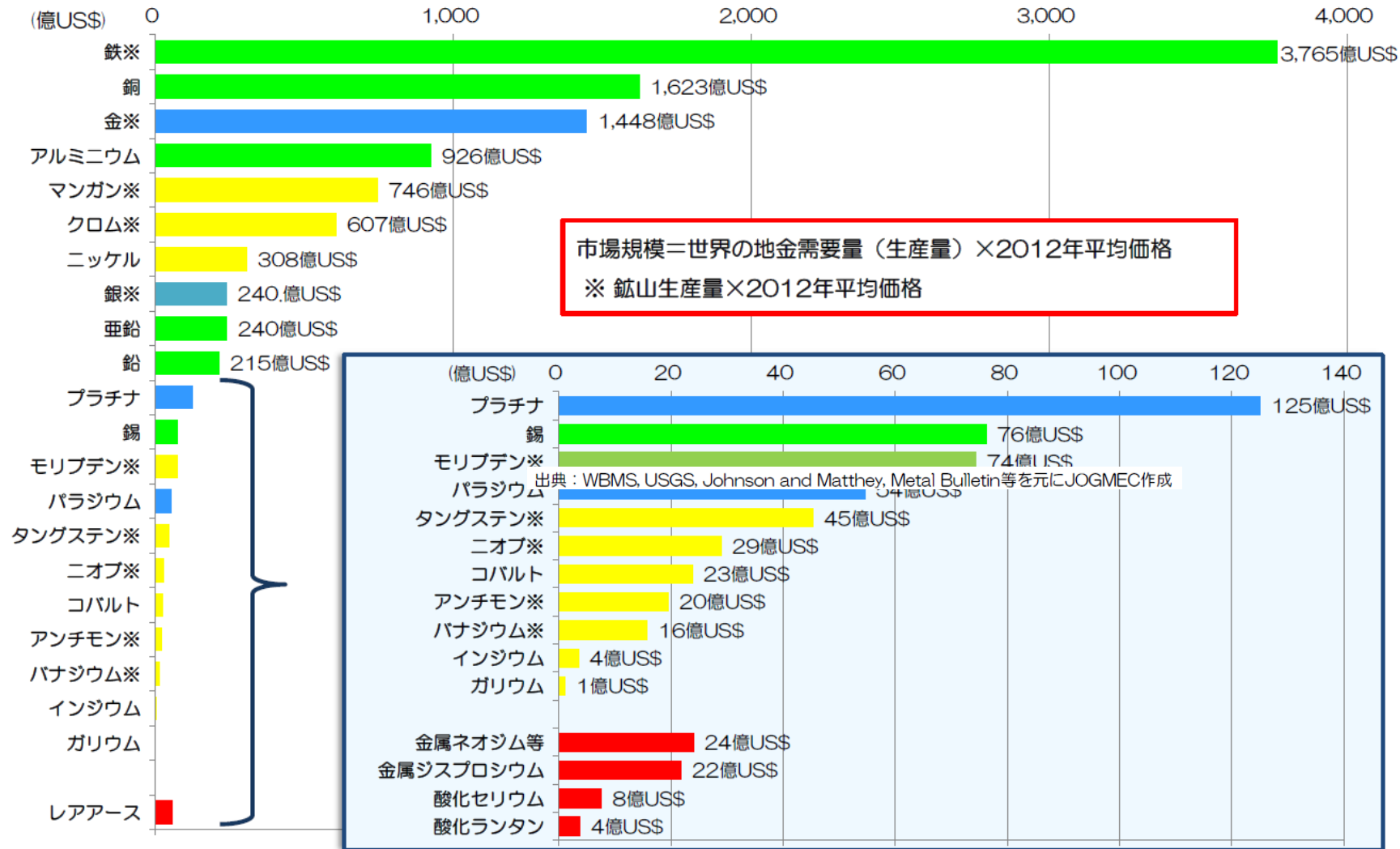
次世代自動車宮城県エリア
レアメタル戦略と触媒開発の進め方に関するシンポジウム
平成27年5月29日
仙台AER21階 ホールB-1

東北大学 多元物質科学研究所
中村 崇

内容

- はじめに
- 希土類元素 主にセリア
- PGM
- まとめ

鉱物資源の市場規模



出典：WBMS, USGS, Johnson and Matthey, Metal Bulletin等を元にJOGMEC作成

地球環境問題を克服する材料

省エネルギー・低炭素社会の構築

- 省エネルギーのインフラ・移動体の利用

構造物・移動体の軽量化 : 超高強度金属素材、炭素繊維素材等

動力 : 高効率モーター ← 強力磁石 + 低損失軟磁性材料

- 再生可能エネルギーの利用促進

太陽電池、燃料電池、風力、バイオ発電

+ 大容量安全な蓄電池

ただし、高度な文明を維持するにはそれらを支える材料と素材が必要

↑

将来の人口を支える素材を供給するには循環型社会の構築が必要

エネルギー問題を鉱物資源問題とリンク して考えるのは世界の常識

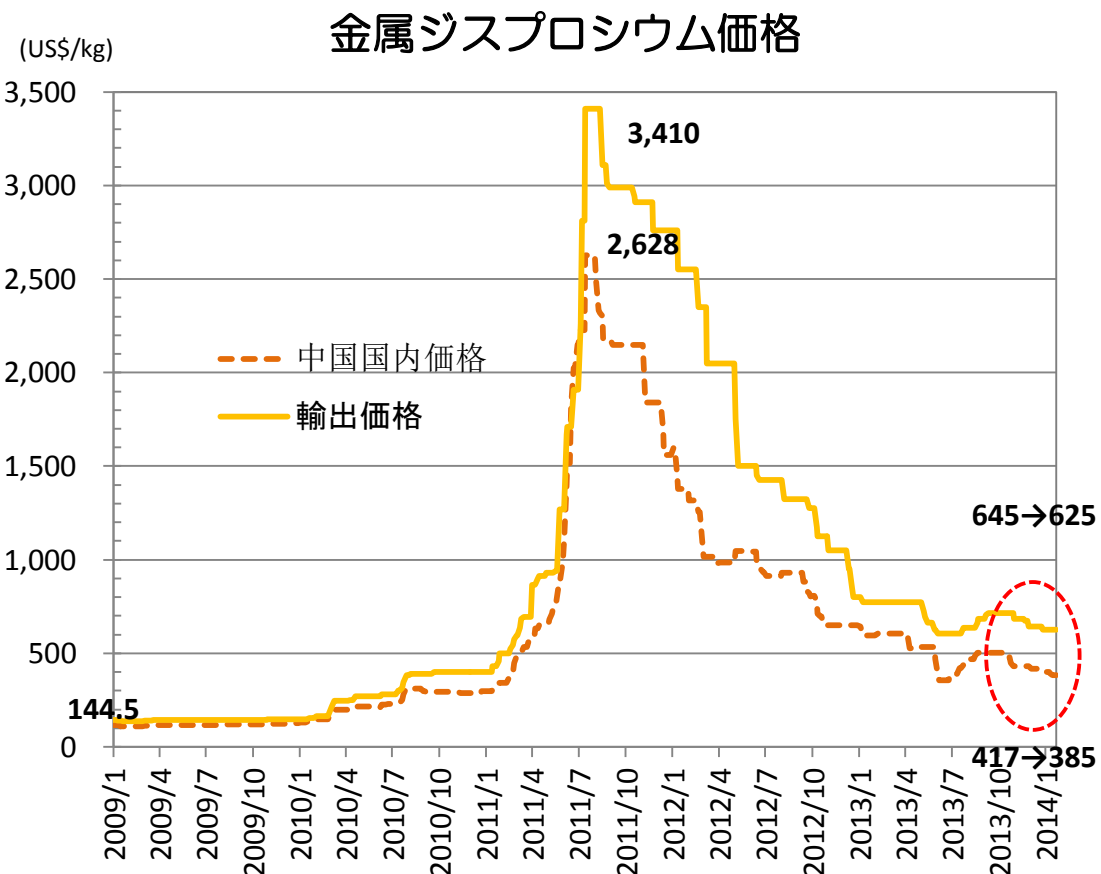
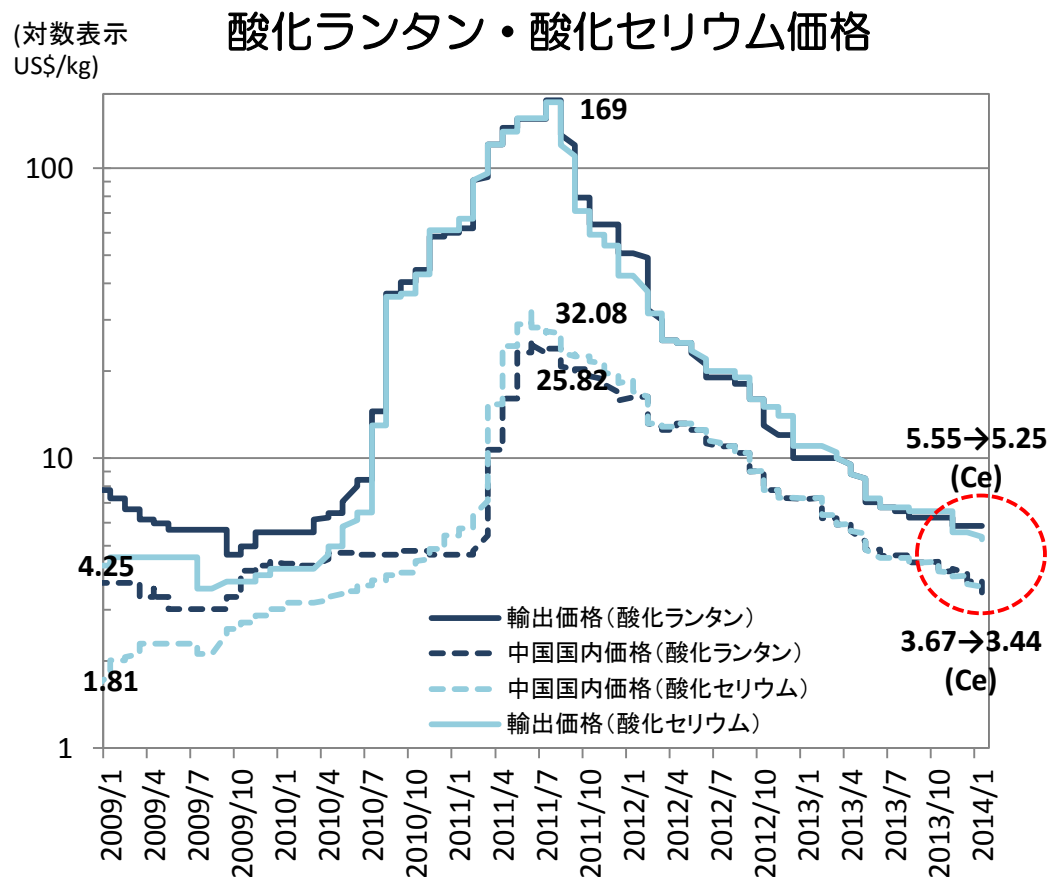
- クリティカルメタル 日・米・欧三協会議
- 日本では 材料開発部分においては
経済産業省 希少元素代替材料開発プロジェクト と
文部科学省元素戦略(新元素戦略)
リサイクルは 環境省と経済産業省(JOGMEC)
- 米国・EUではサプライチェーンを考えながら資源から
材料開発まで総合して検討を行う

テーマ	実施年度		H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	
	目標											
委託事業	In(透明電極)	50%減代替	→									
	Dy(磁石)	30%減	→									
	W(工具)	30%減代替	→									
	Pt(排ガス触媒)	50%減			→							
	Ce(研磨材)	30%減			→							
	TbEu(蛍光体)	80%減			→							
	Nd、Dy(磁石)	代替			→		→					
	Nd、Dy(磁石)	代替					→					
	Ce(排ガス助触媒)	30%減				→						
	In代替(透明電極)	50%減				→						
助成事業	希少金属代替・低減 (省エネ材料) 実用化開発助成事業	事業終了 2~3年 後の 事業化	H22 補正予算		→							
			W	→								
			Bi、(La、Ta、Ga)、Sb	→								
						Dy、Eu、Y、PGM(Pt, Pd, Rh)、W	→					

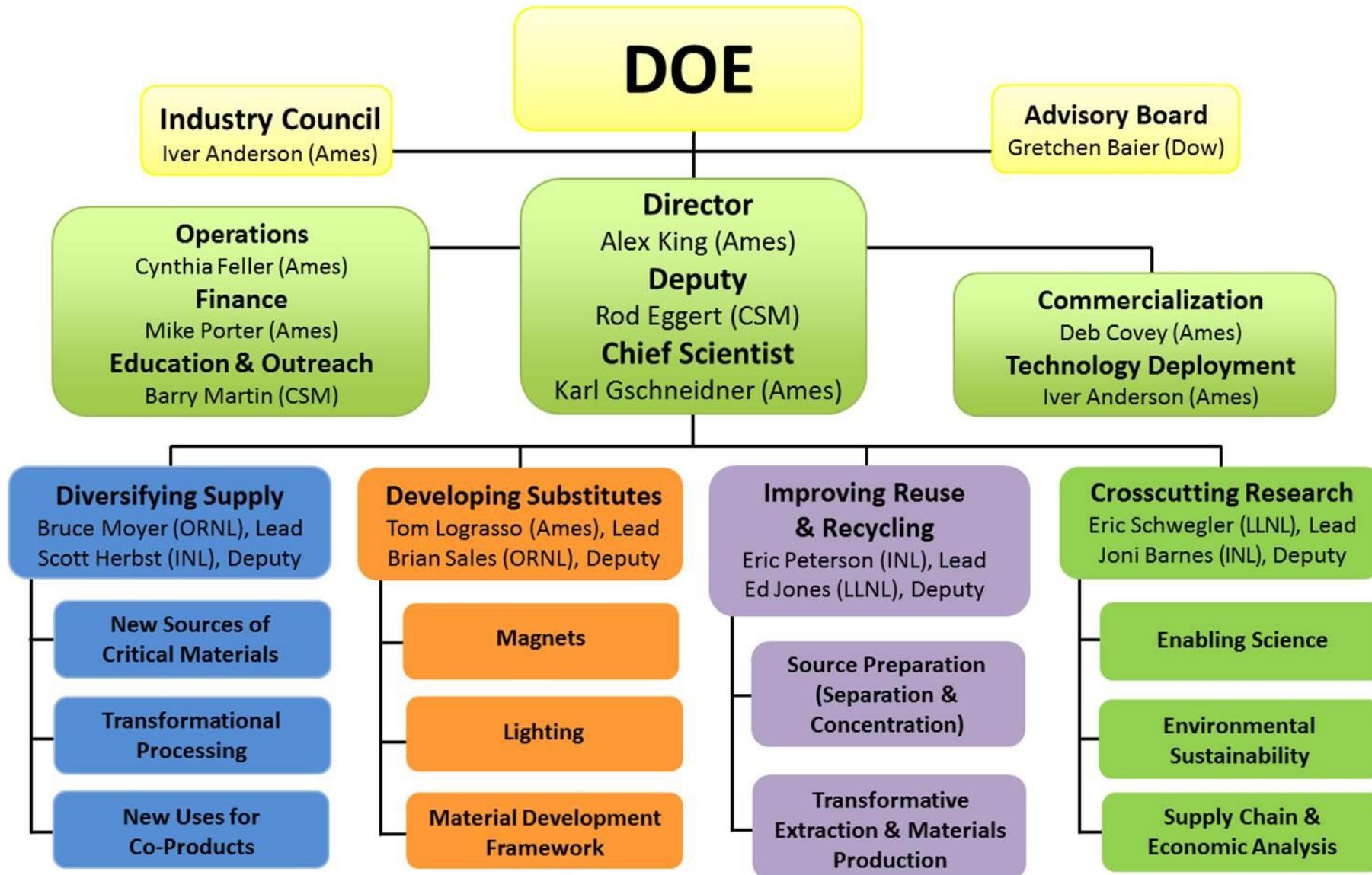
レアアース輸出価格と中国国内価格動向（2013.12/18～2014.1/21）

■ 価格

- 酸化セリウム及び酸化ランタン: 値下がり傾向が継続
- 金属ジスプロシウム: 605US\$/kg(7月輸出価格)を底に上昇傾向にあったが、10月末以降、再び下落傾向。



米国Ames研究所内に設置されたCritical Metal Institute の組織





16 October 2014, Politecnico di Milano – Room Rogers

08:00 – 09:00 Registration open & welcome coffee

09:00 – 09:10 Welcome greetings

- Donatella Sciuto (Vice Rector of Politecnico di Milano)
- Roberto Maroni (President of Lombardy Region, Italy)

09:10 – 09:30 Keynote speech

- Ferdinando Nelli Feroci (European Commissioner for Enterprise and Industry)

09:30 – 10:00 Opening session

Moderator: Mattia Pellegrini (European Commission – Chief of Cabinet of Ferdinando Nelli Feroci, European Commissioner for Enterprise and Industry)

- Antonio Tajani (Vice-President of the European Parliament)
- Patrizia Toia (European Parliament – Vice-Chair of ITRE Committee)

10:00 – 11:30 The challenge of rare earths

Chair and keynote speech: Gwenole Cozigou (European Commission – Director of Directorate-General for Enterprise and Industry)

- Jaakko Kooroshy (Chatham House, UK): *The future of rare earths in Europe: presentation of key findings from the ERECON report*
- Reactions from high-level panel
 - o Roderick Eggert (Professor and Director of the Division of Economics and Business at the Colorado School of Mines; Deputy Director, Critical Materials Institute, The Ames Laboratory, USA)
 - o Kaj Lax (Director, Mineral Resources Department at Geological Survey of Sweden)
 - o Frank Petzoldt (Deputy Director of the Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, Germany)

11:30 – 12:00 Networking coffee break

12:00 – 13:00 Closing the loop: What's next for re-use and recycling

Chair: Prof Raimund Bleischwitz (BHP Billiton Chair for Sustainable Resource Use, UCL)

- o Danilo Bonato (General Director, Remedia, Italy)
- o Allan Walton (Senior Science City Research Fellow, School of Metallurgy and Materials, University of Birmingham, UK)

14:00 – 15:00 Understanding the end-user perspective

Chair: Prof Arnold Tukker (Director, Institute of Environmental Sciences, Leiden University/TNO)

- o Alexander Pulkert (Head of Direct Drives, Wind Power Division, Siemens, Germany)
- o Francis Johnson (Senior Engineer, GE Global Research, USA)
- o Elbert Loois (Head Business Development, RA Rohstoffallianz GmbH, Germany)

15:00 – 16:00 Views from stakeholders in the field of mining and processing

Chair: Gareth Hatch (Founding Principal of Technology Metals Research, LLC, USA)

- o Alain Rollat (Technology Development Manager, Rare Earths Global Business Unit, Solvay, France)
- o Mark Saxon (CEO of Tasman Metals Ltd, Australia)
- o Jim Sims (Vice-President, Molycorp Inc., USA)
- o Anton Auer (Managing Director, Treibacher Industrie AG, Austria)

16:00 – 16:30 Networking coffee break

16:30 – 17:30 What are the tasks for policymakers? What contribution can international cooperation make?

Chair: Gwenole Cozigou (European Commission – Director of Directorate-General for Enterprise and Industry)

- o The US approach and experience: Alex King (Director of Critical Materials Institute, The Ames Laboratory, USA)
- o The Japanese approach and experience: Shingo Nakazawa (Deputy Director of Critical Material Office, Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan)
- o The Canadian approach and experience: Ian London (Chair of the Canadian Rare Earth Elements Research Network (CREEN), Avalon Rare Metals Inc.)
- o The Australian approach and experience: Dudley Kingsnorth (Professor, Critical Materials Initiative, Curtin Graduate School of Business, Curtin University, Western Australia)

17:30 – 17:45 What's next for Europe and rare earths?

Reinhard Bütikofer (European Parliament – Member of ITRE Committee)

17:45 – 18:00 Closing remarks

Gwenole Cozigou (European Commission – Director of Directorate-General for Enterprise and Industry)

18:00 – 19:00 Networking buffet/cocktail

内容

- はじめに
- 希土類元素 主にセリア
- PGM
- まとめ

中国レアアースメーカーの収益構造（軽稀土）

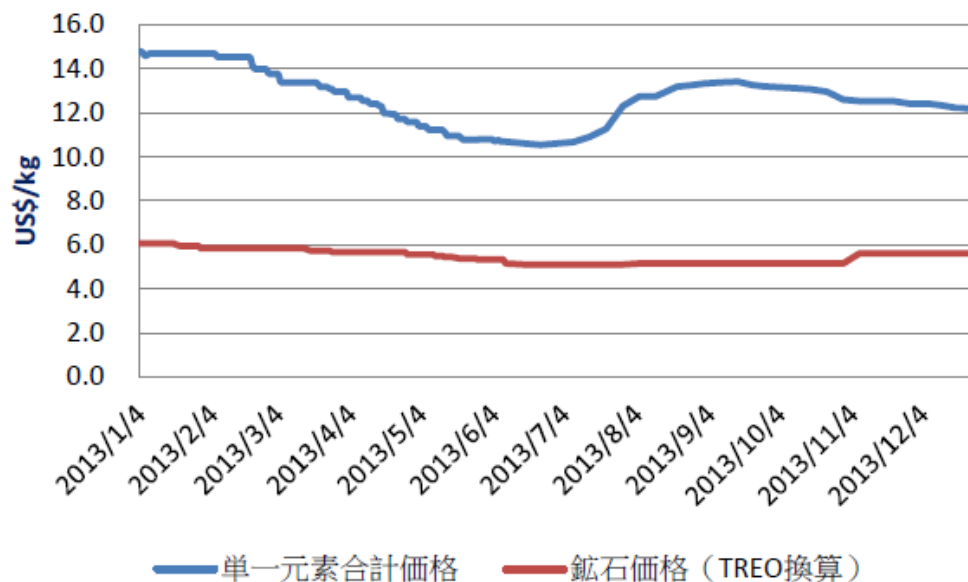
四川鉍 鉍石・分離商品価格差異(TREO、単一元素が全て販売できる前提)

比較的需のある磁石向けDi (Nd/Pr) が価格全体に占めるポーション大きい。Nd/Prで収益を獲得している状態

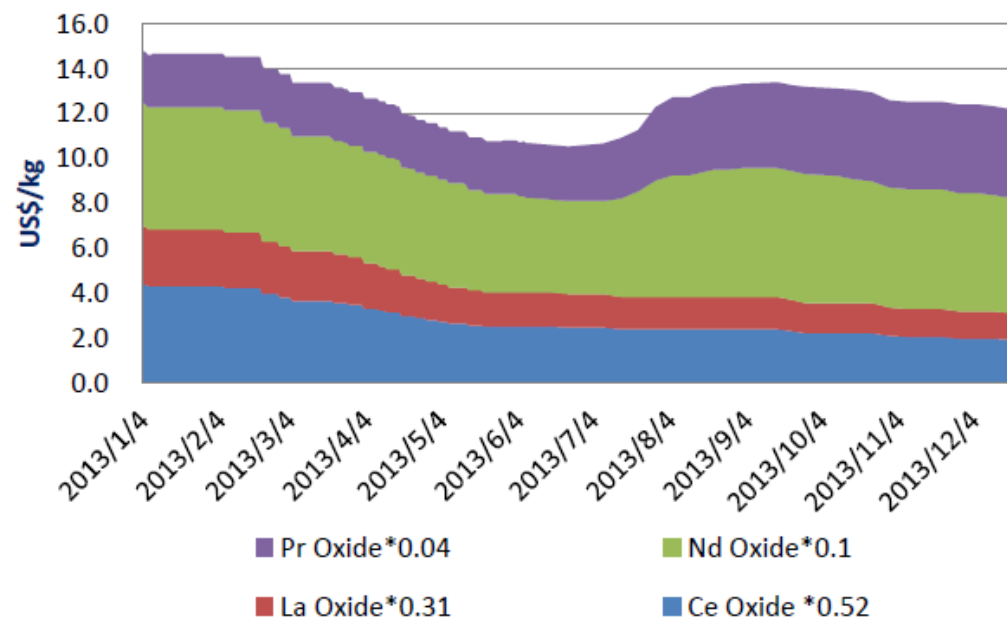
注： 単一元素合計価格 : Ce Oxide La Oxide Nd Oxide Pr Oxide の中国国内価格を組成比で乗算したもの

注2： 鉍石価格は、四川鉍の取引価格をREO換算したもの

鉍石・単一製品 価格差異



単一製品 価格内訳



出典：Asian Metal

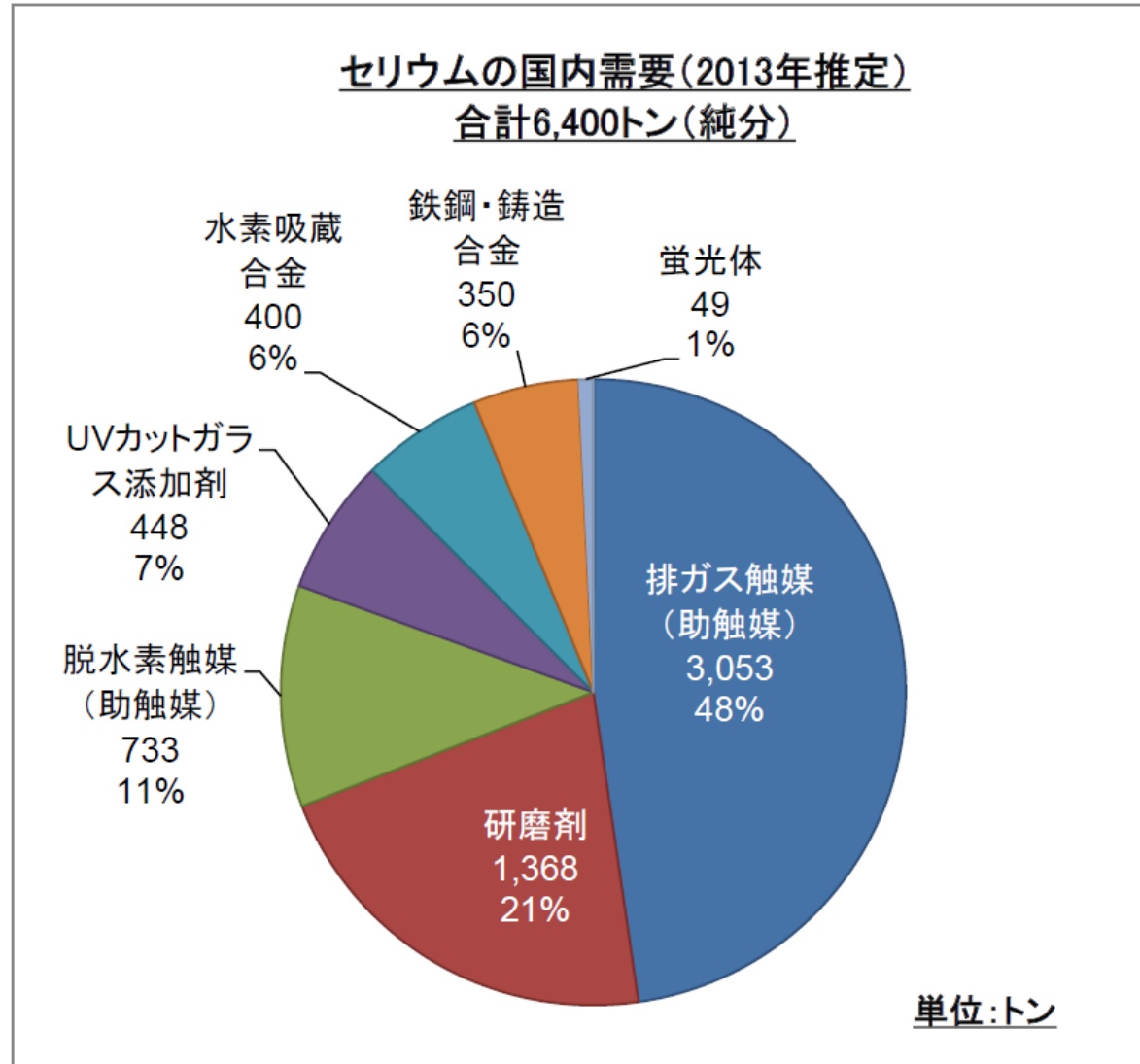


図 15 国内需要と用途別内訳(積上げ)

出典: 工業レアメタル 2014 を元に MCTR 作成

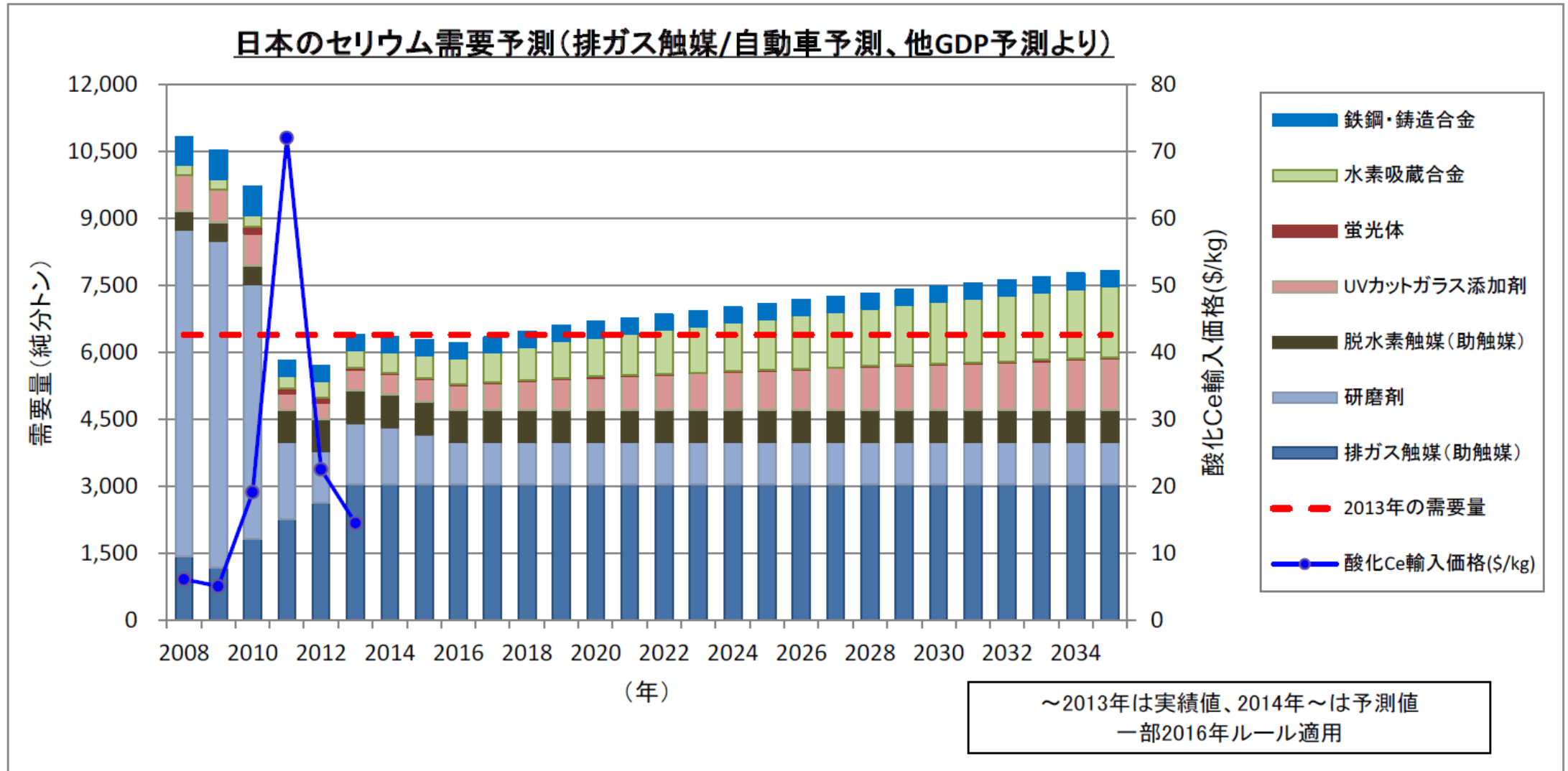


図 19 日本のセリウム需要の推移と予測(自動車生産予測から推計)

出典: 工業レアメタル、財務省貿易統計、OICA を元に MCTR 作成

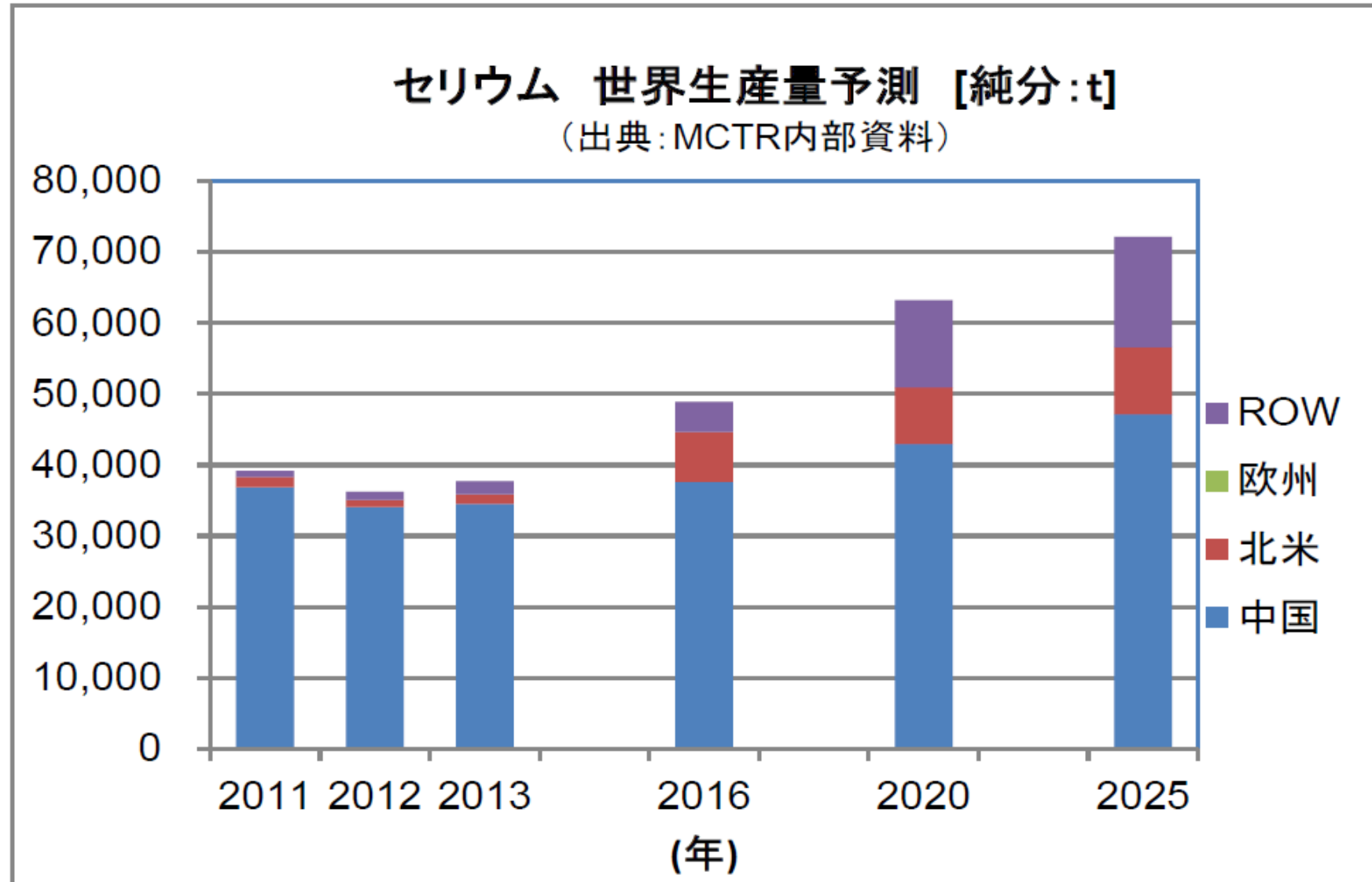
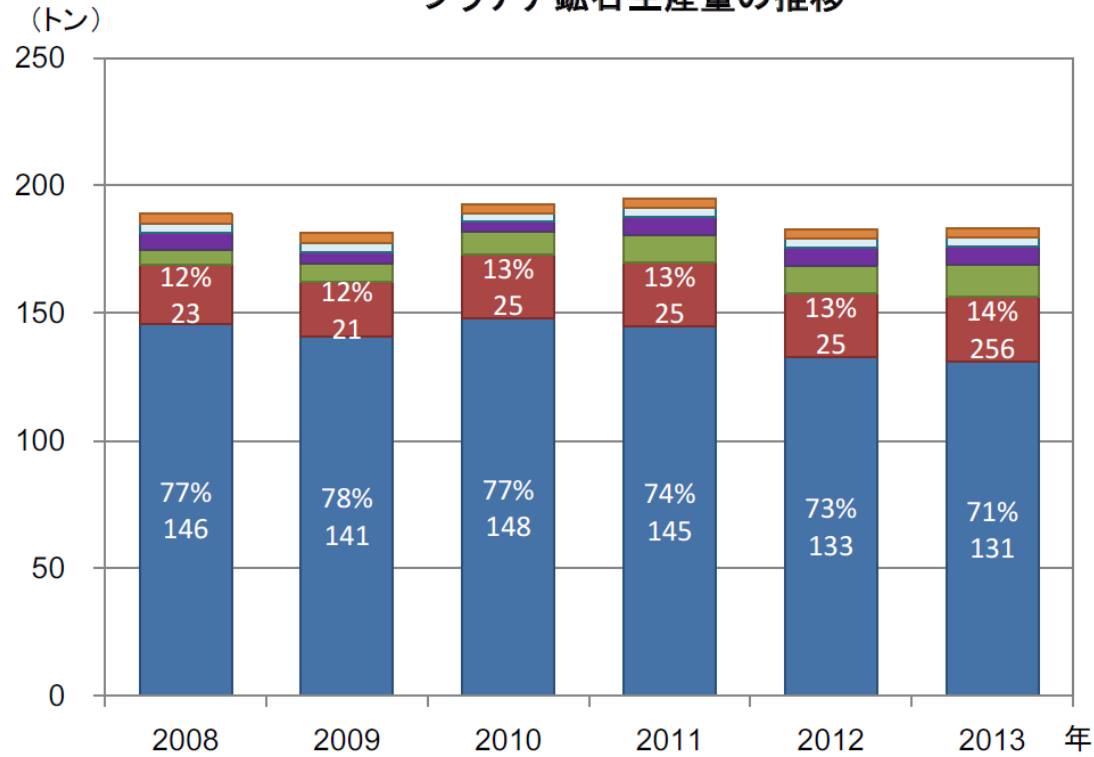


図 24 セリウムの世界生産量

内容

- はじめに
- 希土類元素 主にセリア
- PGM
- まとめ

プラチナ鉱石生産量の推移



パラジウム鉱石生産量の推移

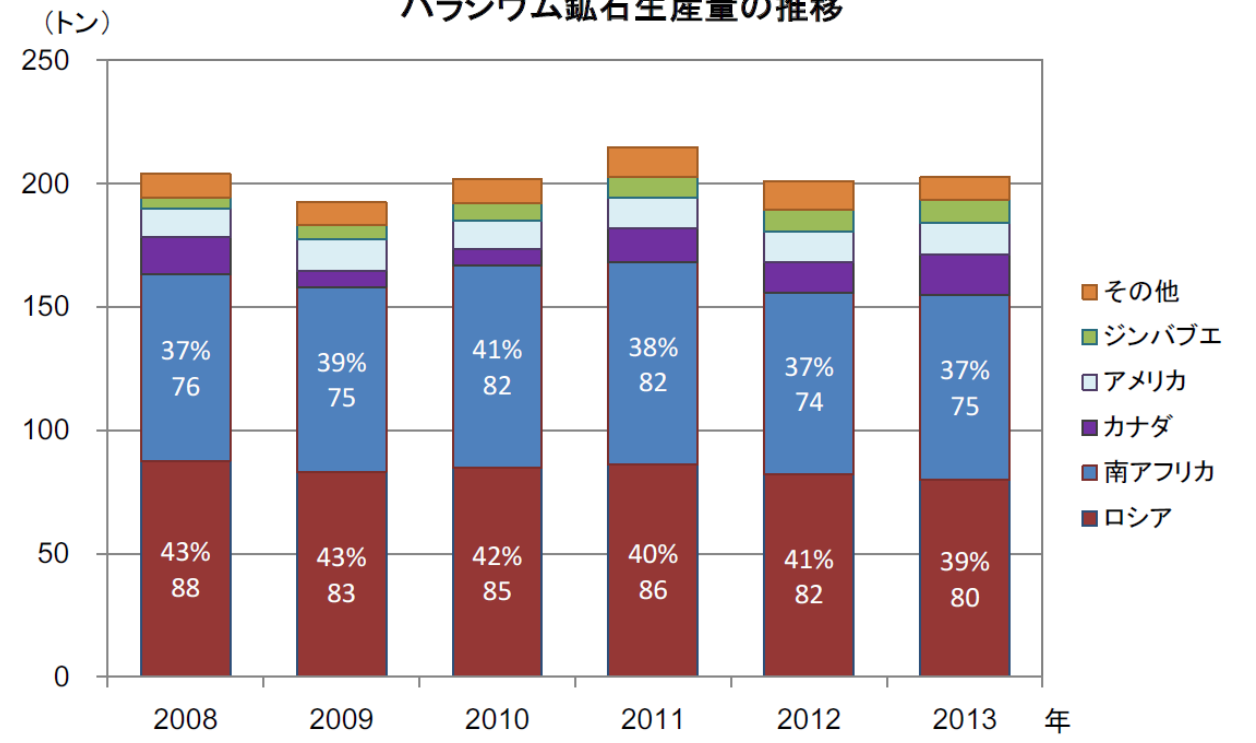
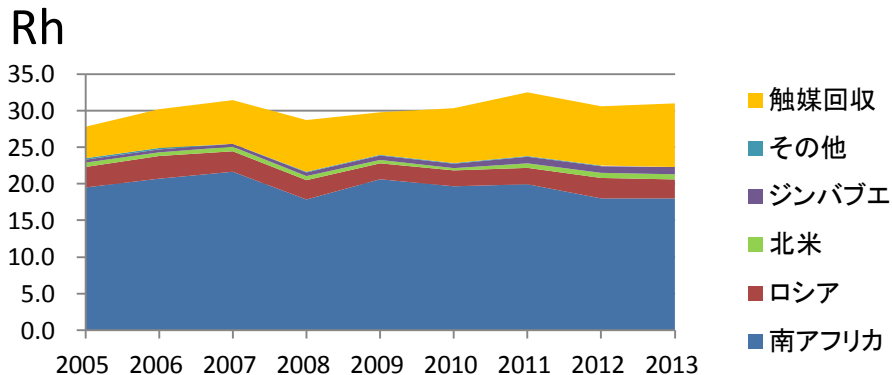
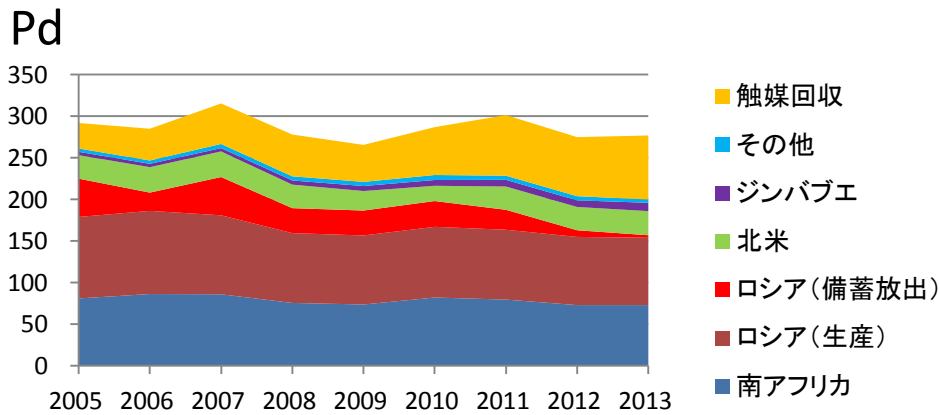
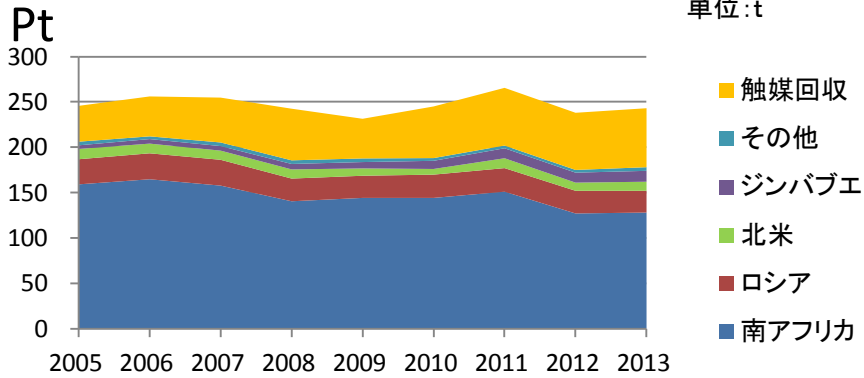


図 3.6- 16 世界生産量の推移(プラチナ、パラジウム)

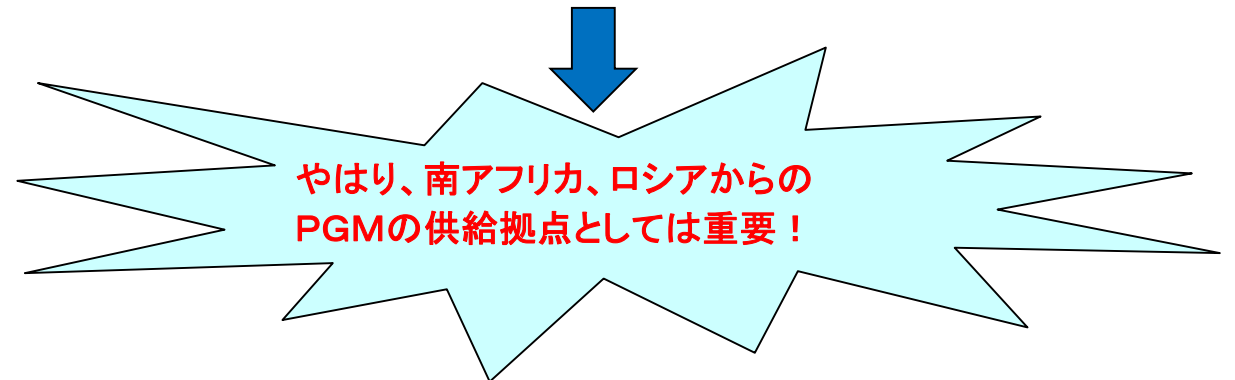
出典: USGS

世界のPGMの鉱山・触媒回収からの供給状況

2005年～2013年のPGM供給推移



- 1、南アフリカ:供給ソースとしての位置付けは高い
PGMでは、南アフリカは、全世界の埋蔵量の**約90%以上**。
日本の輸入では、南アは **Pt:85%,Pd:54%、Rh:61%のシェア**。
- 2、ロシア:日本での輸入では**Pd:40%のシェア**。一時生産量は2008年以降変わらないが、**国家備蓄放出量は、2012年から急減**。
- 3、触媒及びスクラップからの回収量の大部分は、10年以上前に販売した自動車の廃棄スクラップからの発生。増大傾向だが、安定した供給ソースになりにくい。



但し、南アフリカ。ロシアでは、2012年から生産量が急減。



南アのPGM鉱山/主要PGM鉱山企業の状況のまとめ

A,生産推移:

- 1,メレンスキー鉱脈のPGM埋蔵量が減少し、今後はUG2鉱脈での採掘に移行。
- 2,深部に採掘する必要。
- 3,安全性の確保のため度重なる操業の停止。

各社とも2011年まで生産が順調に増加していたが、南ア全体では、上記のため2006年のピーク時に比較して年々減少しており、2012年のLonmin/Marikana鉱山を始めとしたストライキで2012年に急減になったと思われる。

2013年は、Amplatsの合理化案の締結が、2013年10月の締結されたことで、労使交渉が翌年に持ち越された事。Amplatsの合理化案にあったAmplats/ Rustenburg鉱山(4シャフト)の停止で、大規模ストライキはなかったが、2012年並みと予想される。

B,売上推移: Pt/Pdの価格は2009年以降上昇しており、2012年以降伸び悩み。Rhの価格は、2011年に下落しており、また、UG2ではAu, NiよりCrが多く、販売価格での寄与分が少なく、UG2鉱床が多いAmplats.Lonminの決算に影響を与えている。

C,コスト状況: **労働賃金と電力代は、操業費の50-60%を占めている。**

1, 人件費

- ① 鉱山では、全て手作業であり、掘削するのに機械化が困難。
- ② 熟練した労働者が必要。さらに落盤事故などの死亡率が高いため、他業種と比較して人件費が高い。
- ③ **労使交渉でここ最近で年率平均7-13%の労働賃金の上昇率になっている。**
- ④ Amplatsでは契約社員の数全体の約7% (Implats.Lonminでは、約30%) でいまだ正社員の割合が高い。

2, 電力代のアップ(鉱山、製錬・製錬関係)

電力代は、**年率20-25%以上の伸びであり**、2008年の電力危機以降、南アフリカ電力公社(Eskom)は、将来にわたり電力料金を上げる意向。

3, 減価償却費の増加

- ① より深部に採掘するため、新規シャフトの増設。
- ② 一方、不採算のシャフトの廃却も進める。

4, **メレンスキーからUG2鉱床へ移行でのコストアップ**: Crの分離にコストがかかる



今後は、生産量は減少し、コストは増加していく

ロシアのPGM鉱山開発状況

Maslovskoe 鉱床の鉱床状況

1, Norlinsk Nickel

Polar Div 近辺, Norlinsk 1 の延長上に下記開発中。

① Skalisty mine:

埋蔵量: 58Mt、現在、建設途中(28%完了)で2014年から生産開始。

② Maslovskoe 鉱床:

探鉱 → 開発、2017年:F/S, 建設: 2017-2023年

Estimated Reserves(1)				
	Reserve Ore (Mt)	Head Grades		
		Ni, (%)	Cu, (%)	6PGM, (g/t)
Disseminated Ore	217	0.34%	0.52%	6.44
Rich Ore	18	0.61%	1.05%	13.44
Total	235	0.36%	0.56%	6.99

2, Russian Platinum (Artel Starately(Amur)が主要株主。Kondyor 鉱山ですでに生産。2011年、Ptを約3.7t生産)

① Chernogorskoye 鉱山: Norlinsk Nickel、Polar Divの近辺、

可採埋蔵量: 約143Mt。(品位: Ni:0.22%, Cu:0.29%, Pt, Pd, Rh, Au 合計: 3.9g/t.)

PGM 鉱床は、西部では20m深度、東部では245mの深度にある。

2015年に開始する予定。

②, Norlinsk Nickel 所有の Norlinsk-1 鉱区南部分の地下資源利用権を取得したと発表した、Norlinsk Nickel は 本件は無効とのことで訴えている。

3、Eurasia Mining : 英国に拠点を置く国際的資源開発会社。2008年にAnglo PlatinumとHard Rock PGM プロジェクトの共同開発の契約を締結

① 西 Kytlim 鉱山(中央ウラル): ボーリング、ピットによるサンプリングを行い埋蔵量が増加している。

② Monchetundra 鉱山(コラ半島) 2008年までAnglo Platinumと共同でボーリングで16,000Mほど探鉱をした。

4、Barick Gold: Federovo Pana Province(Kola半島)で開発

5、ロシア主要PGM 鉱山企業のまとめ

①、ロシアのPGMのほとんどは、**Norlinsk Nickel**が生産している。

②、Norlinsk Nickelは収益強化のためPdの販売を強化する。既存の鉱床での枯渇化もあり、豪州での資産を売却しNiの生産をロシアに集中。Norlinsk 全体でのNi生産は維持しながら、Pdの生産を維持する意向。

③一方、他鉱山会社もロシアでの資源開発を活発化させ、Norlinskとの摩擦が増加する傾向にある。

PGM資源に関するまとめ

1, PGMの供給

- ①南アフリカ: PGMの埋蔵量は世界一。供給量で、Pt、Rhでは世界の50%以上。Pdは、30%程度だが、ロシア国家備蓄放出量が減少傾向であり、ますます、PGMの供給の南アフリカの地位は高まる。
- ②ロシア: Pdについては、上記国家備蓄放出量の減少及び主要産物であるNi供給量の抑制でPdでの供給を増加する見通しは少ない。また、ロシアからの供給は常に国家政策に左右されるため、安定的供給源になりづらい。

2、南アフリカの鉱業政策と労働問題

- ①南アフリカ政府の懸案事項は雇用政策。そのために、自国での高付加価値化を進めており、今回の新鉱業法もそのステップ。
- ②南アフリカ政府は、2014年に総選挙、大統領選挙があるので国民の人気取りを優先。
- ③PGM鉱山の労使交渉も2014年から始まるが、上記状況から政府としての介入する可能性は低い。

3、南アフリカの主要PGM鉱山企業の状況

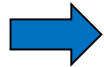
- ①問題点: 生産量: メレンスキー鉱床からUG2鉱床への移行で、PGMの生産量が減少。
深部での採掘、多発するストライキ、安全性を保つための操業停止による生産性ダウン
コスト: 人件費高騰、鉱山労働者の増大(特に、熟練労働者が必要)、電力代アップ、深部での採掘、UG2でのCr処理費のアップ
- ②解決策: 生産量アップ: 鉱山運営の正常化、機械化、PGM鉱量の多い鉱床の開発: Waterburg, Platleaf等
コスト削減: 人件費ダウン、人員整理、機械化、政府の雇用政策と対立
不採算部門の撤退: 大手鉱山会社での不採算鉱山の撤退、中小鉱山企業の倒産
新規の生産性のよい鉱山がなければ生産量縮小へ



現在の市場価格及び南アの状況が継続すれば、南アフリカ鉱山会社の経営悪化で世界への供給体制が崩れる可能性大。

4、ロシアの主要PGM鉱山企業の状況

- ①現状、Norlinsk Nickelのロシア市場での占有率が高く、国家のBack Upもあり、海外を含めた他資源開発会社が力を伸ばしていくのには困難。
- ②ロシア国内での開発には、資金不足から海外資源開発会社との取り組みを盛んに行おうとしているが、海外投資家に有利な条件は出にくく、海外投資家からの資金は集めにくい。



ロシアは、国家備蓄分を供給の調整弁として使い、市場をコントロールする。

5、結論

- ①自動車触媒でのPGMの需要増加を考慮すれば、PGMの供給確保は絶対必要。
- ②南アフリカへの自動車産業の進出拡大でPGMの輸出削減の可能性大。
 - ・自動車産業の、今後のアフリカ市場攻略では南アフリカは重要拠点になる。また、世界大手の自動車製造会社のみならず大手自動車触媒メーカー（Johnson Matthey, BASF, Umicore）は製造拠点を南アに置き、触媒を輸出する計画がある。
 - ・南アフリカ政府は“雇用確保”で多種の政策で後押しをしている。
 - “国家開発政策（NDP）”、“国内生産優遇補助（APDP）”など自動車産業育成プログラム及び“新鉱業法”、“高付加価値政策”の推進
- ④南アPGM企業の財務状況悪化になれば、海外資本からのアプローチは強まる。
特に、上記ロシア企業及び中国企業のアプローチが可能性として高い。
(バナジウムでは、ロシア、Evraz社が南アフリカ、Highveld Steelを買収し、EU委員会からの提訴で精錬部門は売却したが、実際には、世界の50%以上のバナジウム原料のシェアを確保している。) => **ロシアの寡占化へ**
- ⑤ロシアからの海外企業への安定供給は困難で、いつ国家が市場に介入するか不安が大きい。
- ⑥他地域での埋蔵量は少なく、安定供給に不安。新規鉱山の実際の生産がいつになるか、プロジェクトとして採算性が取れるか疑問。

PGMの鉱床は遍在しており、南アフリカの埋蔵量は非常に多い。ロシアの自己中心な政策やロシアでの閉塞的な投資環境を考えれば 南アフリカからの安定確保に努めるべきだが方策は？

世界の白金族 (2013年)

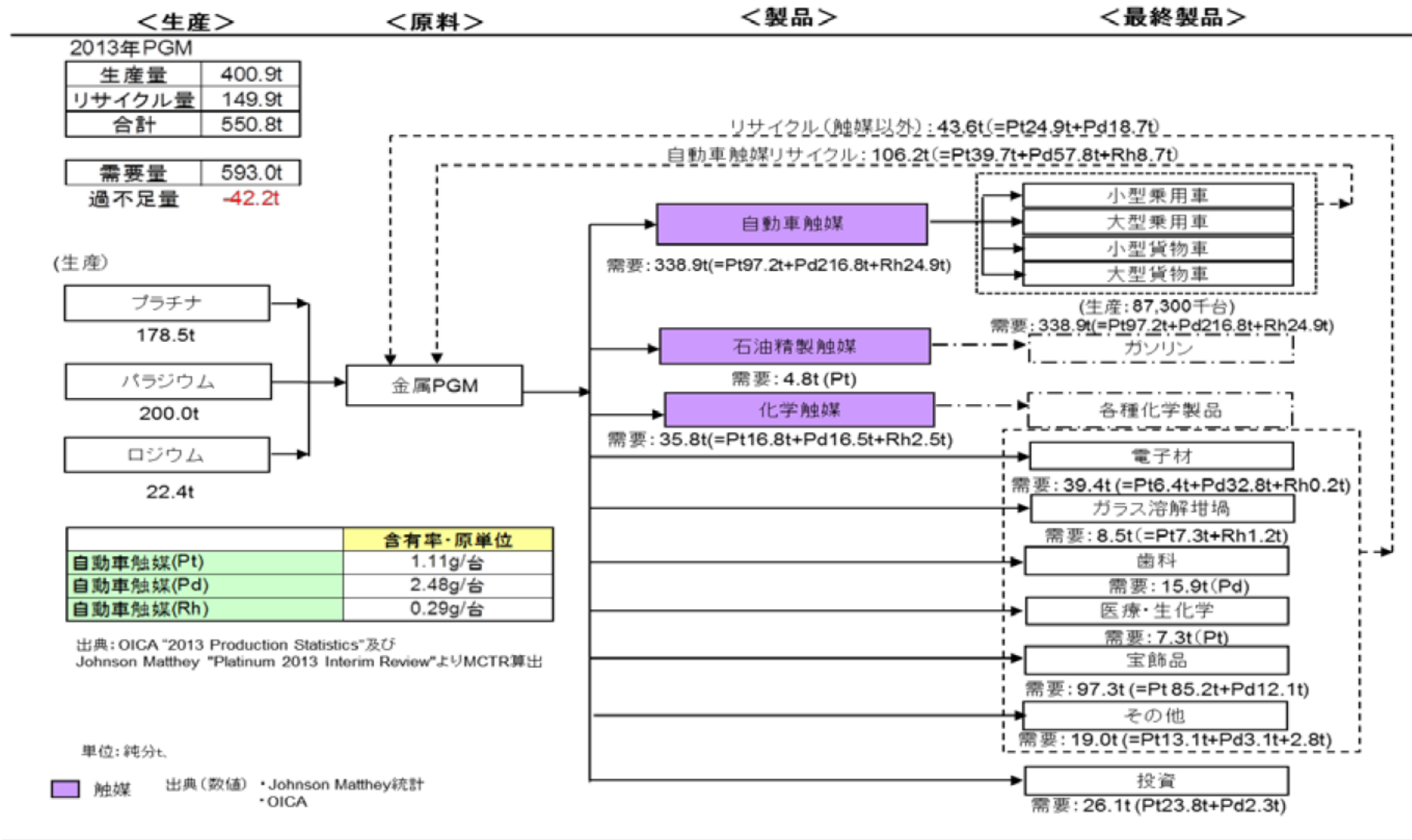


図 3.6- 10 世界の白金族のマテリアルフロー(2013年)
(世界生産量 401t 世界需要量 Pt 262t、Pd 300t、Rh 31t)

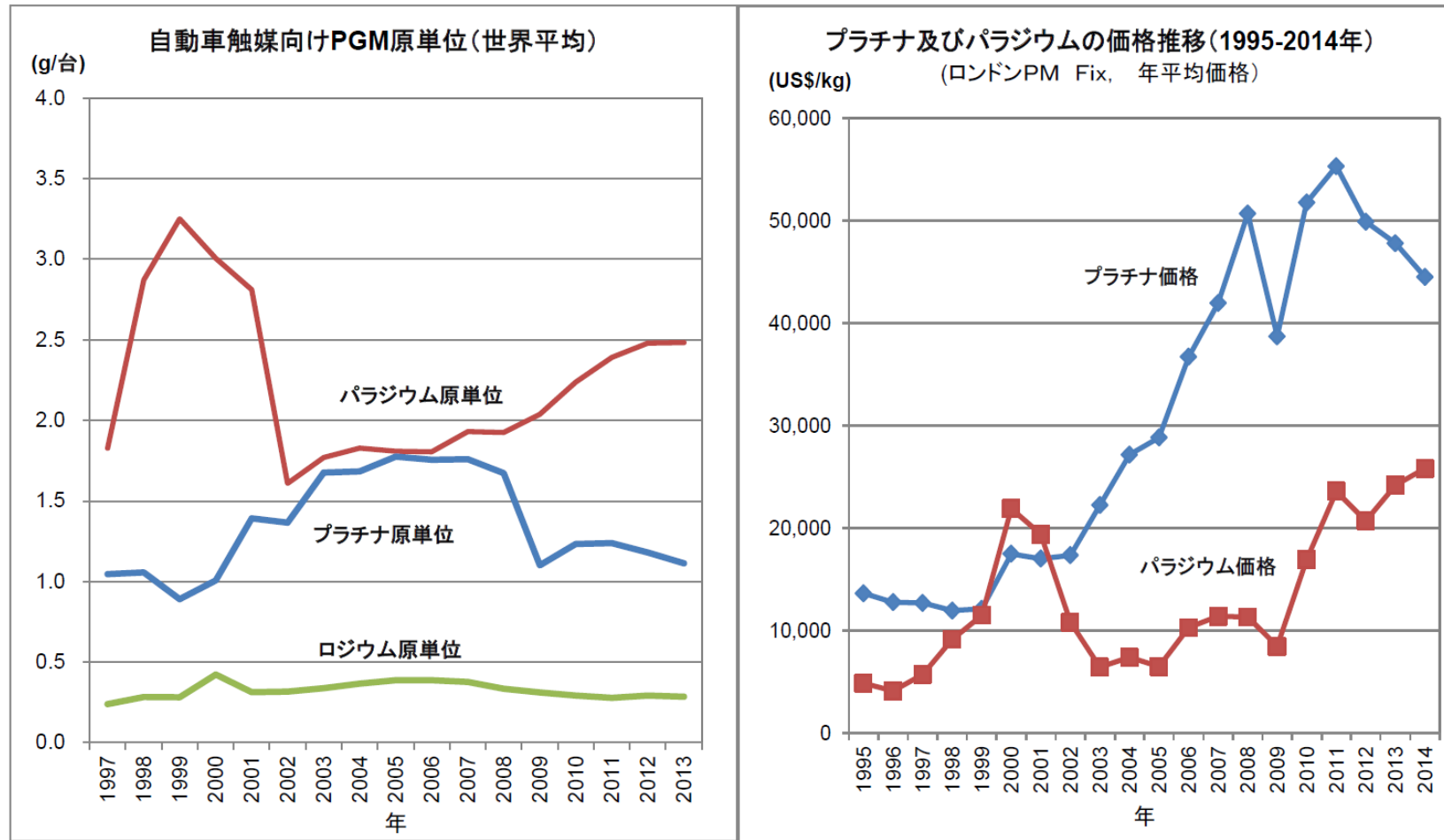


図 3.6- 13 自動車触媒向け PGM 原単位(世界平均)及び Pt/Pd 価格の推移

出典: Johnson Matthey 統計、OICA、LLPM (London Platinum and Palladium Market)

表 3.6- 1 日本の PGM 原単位(2008 年、2012 年及び 2013 年)

元素(触媒成分)	原単位 (単位:g/台)		
	2008 年	2012 年	2013 年
Pt	1.50	1.56	1.70
Pd	2.28	2.46	2.47
Pt+ Pd	3.78	4.02	4.17

出典: Johnson Matthey 統計、OICA

表 3.6- 2 世界の PGM 原単位 (2008 年、2012 及び 2013 年)

元素 (触媒成分)	原単位 (単位:g/台)		
	2008 年	2012 年	2013 年
Pt	1.67	1.20	1.11
Pd	1.93	2.45	2.48
Rh	0.33	0.29	0.29
Pt+ Pd+Rh	3.93	3.94	3.88

出典: Johnson Matthey 統計、OICA

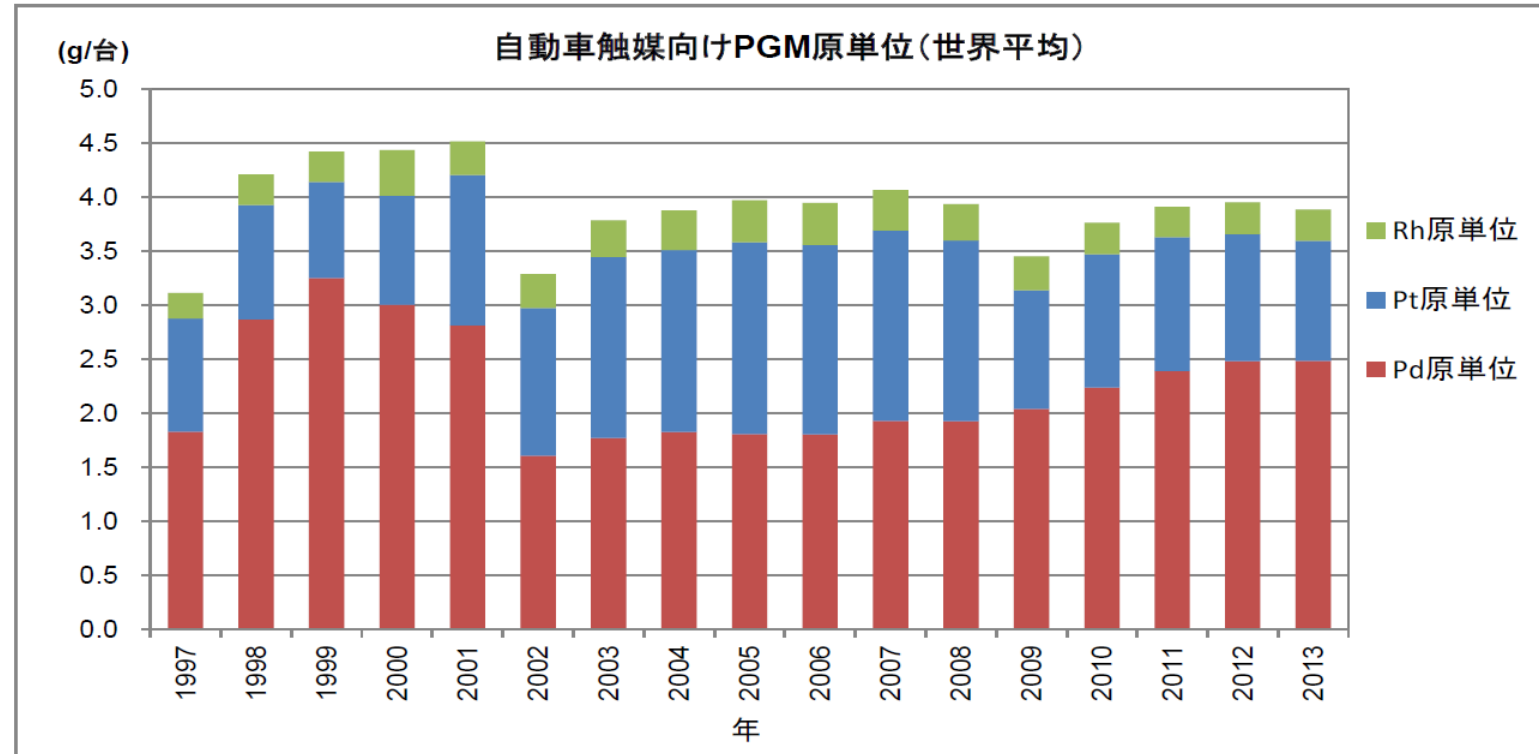


図 3.6- 14 自動車触媒向け PGM 原単位 (世界平均) の推移

出典: Johnson Matthey 統計、OICA

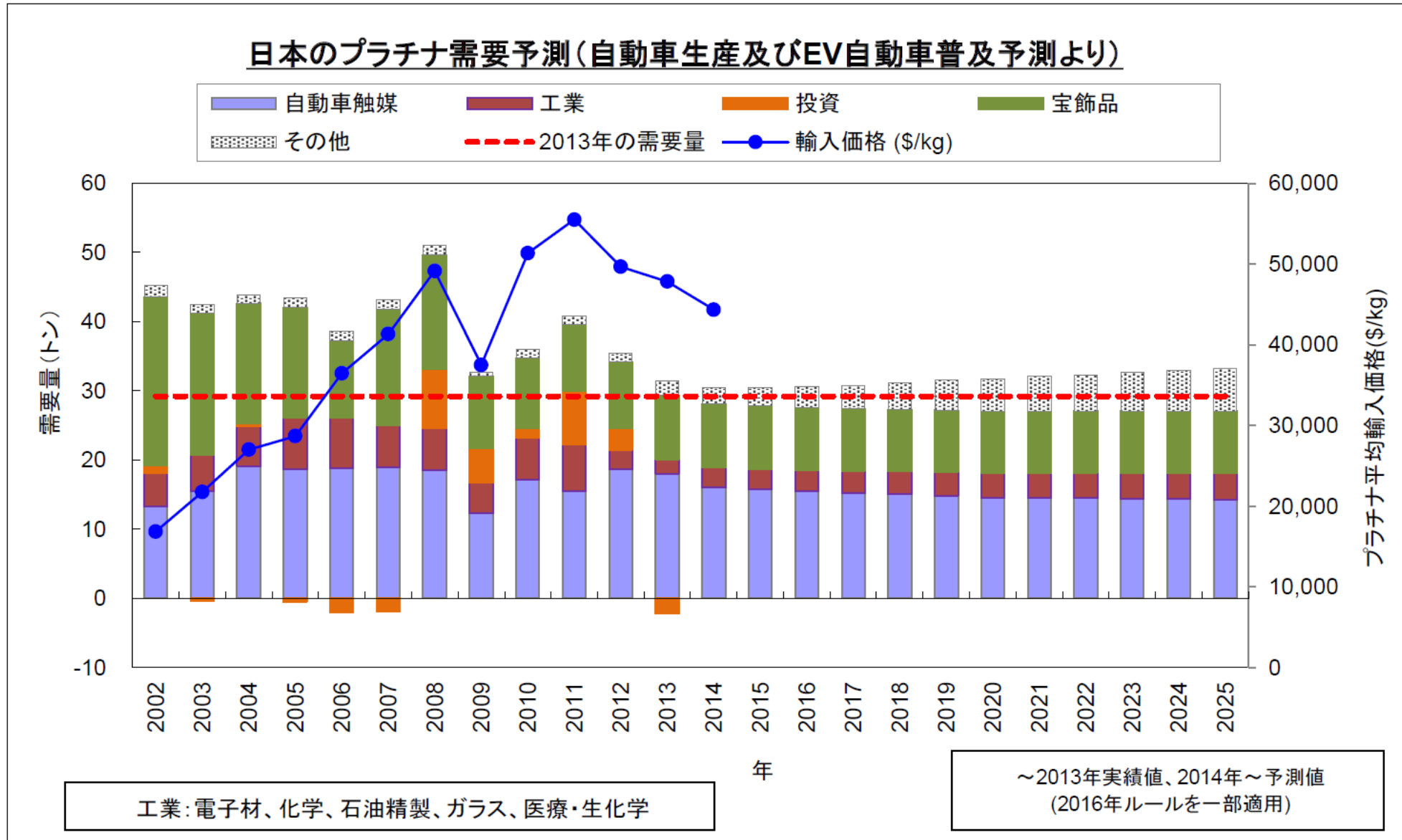


図 3.6- 25 日本のプラチナ需要の推移と予測(自動車生産及びEV自動車普及予測から推計)

出典: (実績値) Johnson Matthey 統計、貿易統計、環境省 次世代自動車普及戦略

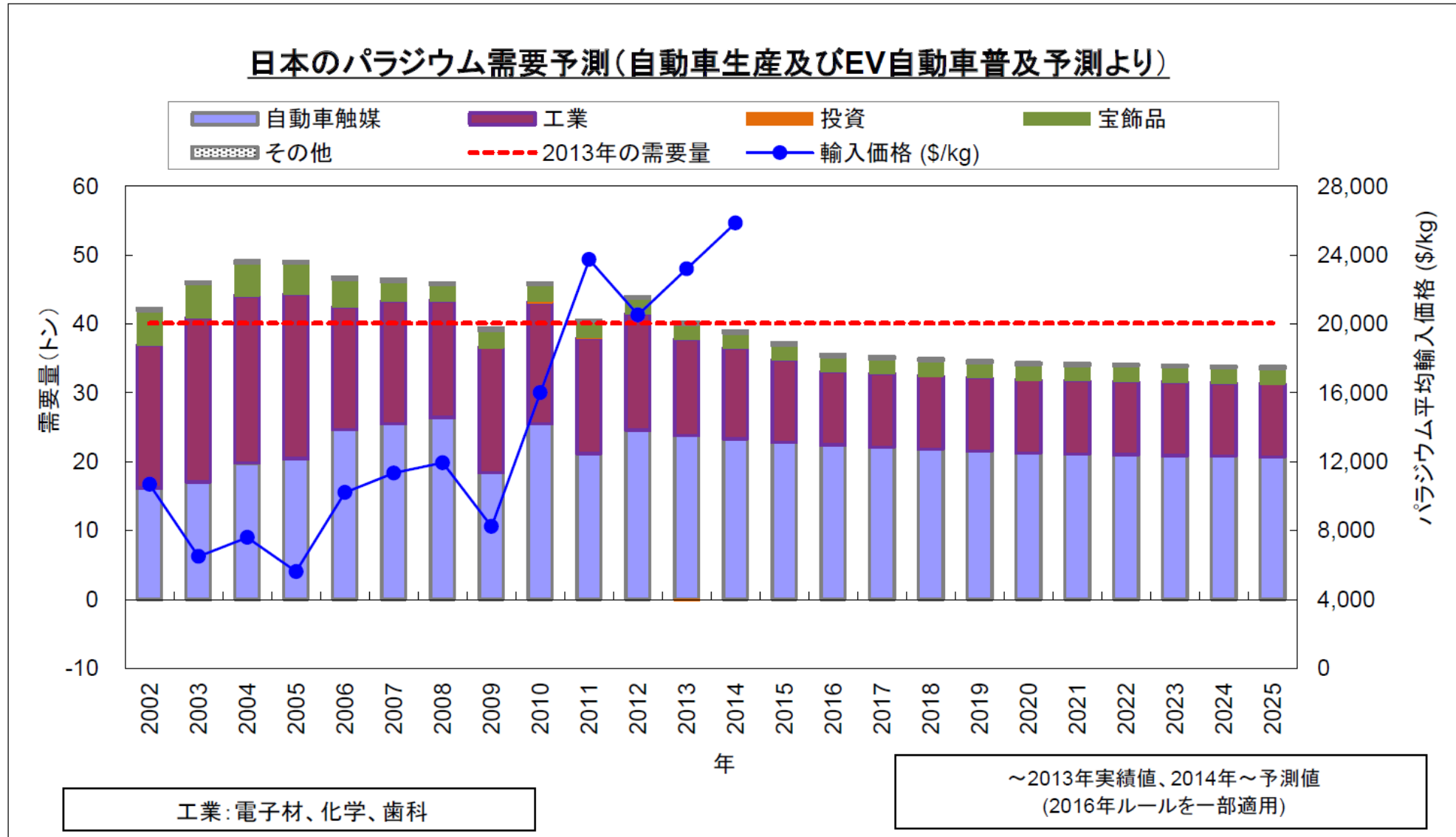


図 3.6- 27 日本のパラジウム需要の推移と予測(自動車生産及びEV自動車普及予測から推計)

出典: (実績値) Johnson Matthey 統計、貿易統計、環境省 次世代自動車普及戦略

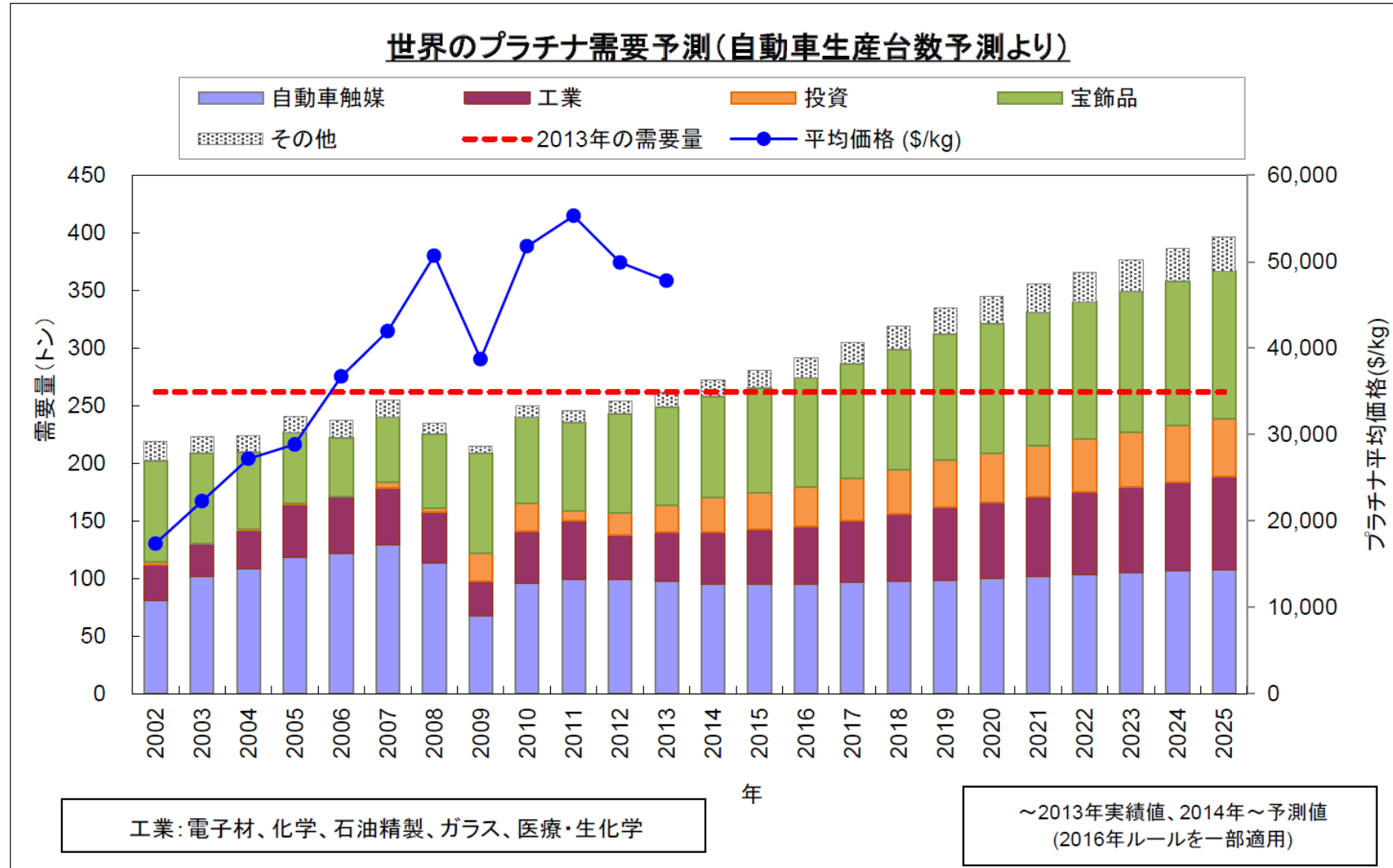


図 3.6- 45 世界のプラチナ需要の推移と予測(自動車生産台数予測から推計)

出典: (実績値) Johnson Matthey 統計、LLPM (London Platinum and Palladium Market)

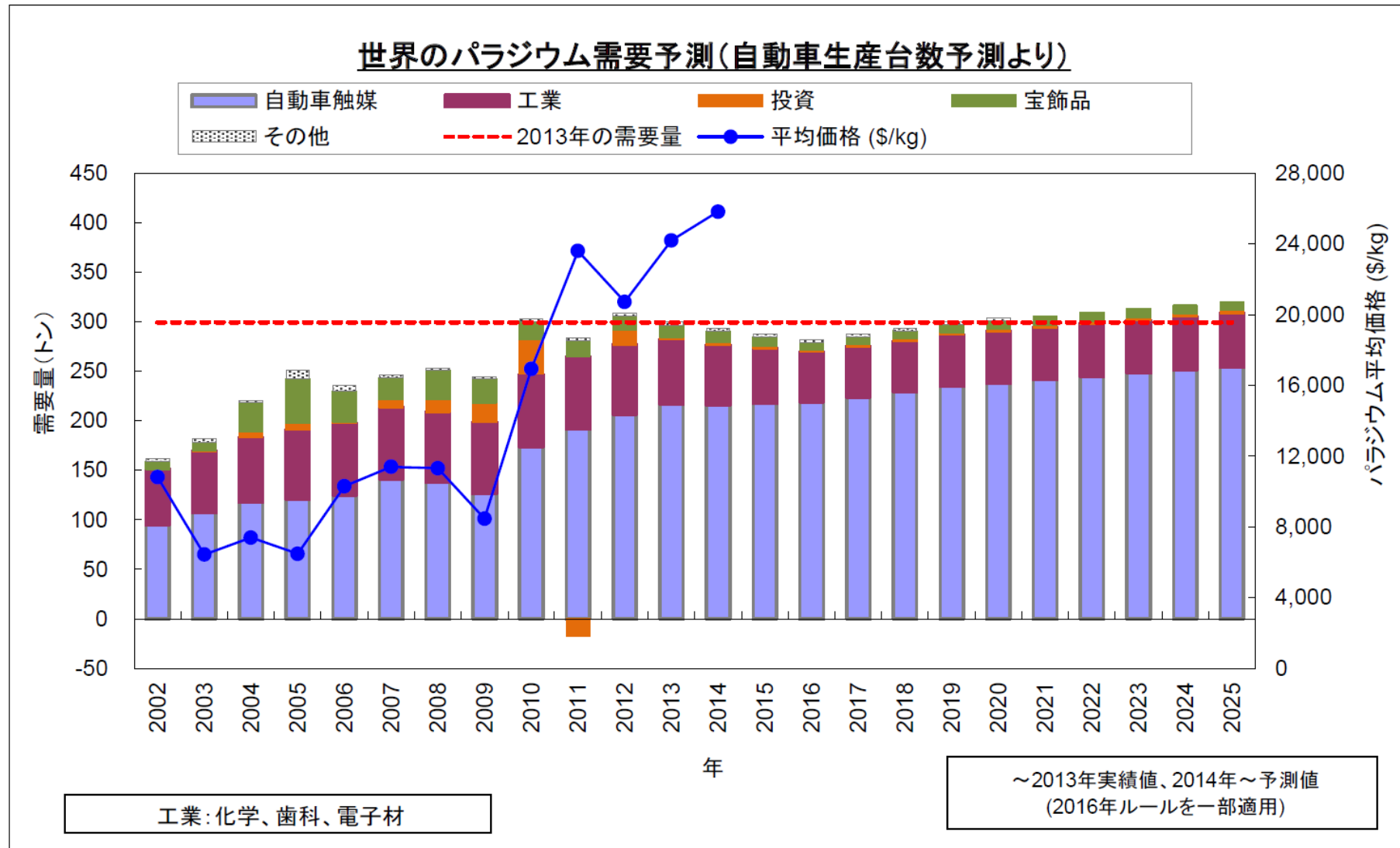


図 3.6- 47 世界のパラジウム需要の推移と予測(自動車生産台数予測から推計)

出典: (実績値) Johnson Matthey 統計、LLPM (London Platinum and Palladium Market)

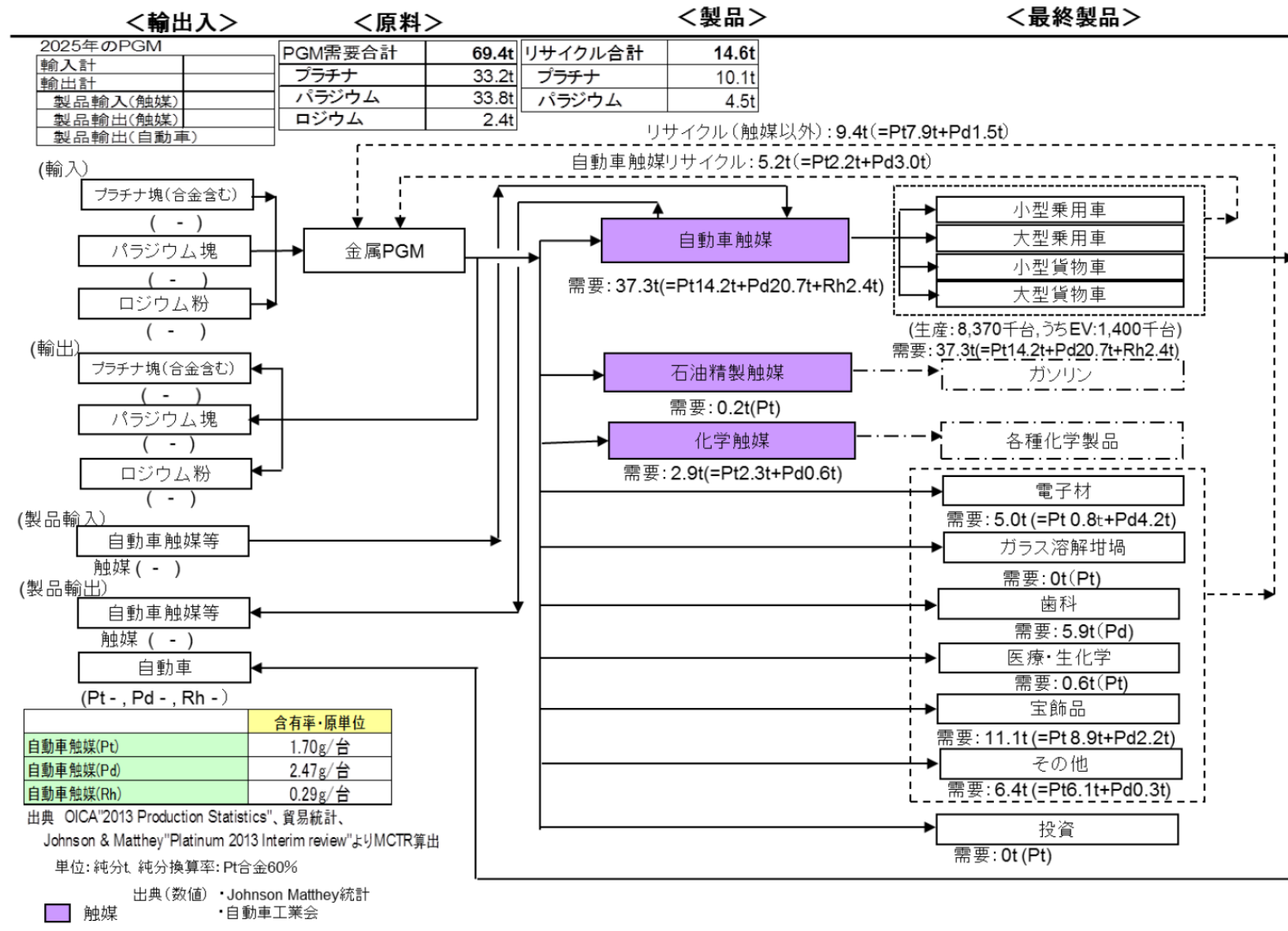


図 3.6- 50 日本の白金族の材料フロー(2025年予測)
 (日本需要量 69.4t: Pt 33.2t、Pd 33.8t、Rh 2.4t)

内容

- はじめに
- 希土類元素 主にセリア
- PGM
- まとめ

これからの方向 希土類元素

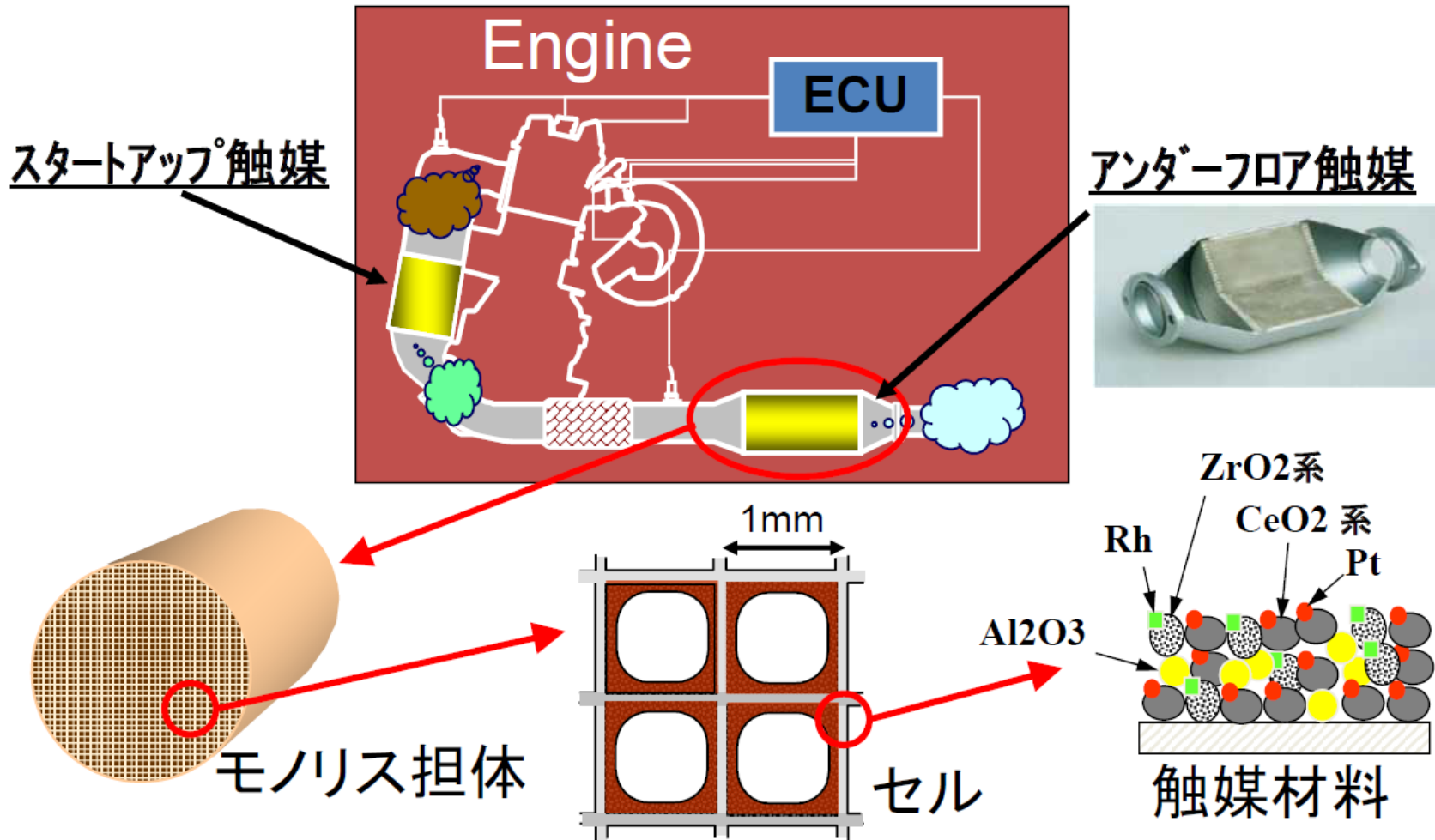
- 希土類元素の活用は総合科学が必要
- 特に各種希土類は1種類の元素のみが得られることはない
 - 利用のバランスが重要
- まだ、Dy, Eu, Tbなどの重希土類の需要は増大、しかし供給はタイト
- したがって、これからは再度**軽希土類と中希土類元素の活用がポイント**
- **新しい軽希土類と中希土類元素を使用した材料開発は大変有意義**

軽希土類元素と重希土類元素の存在比は100:1

酸化セリウムの機能と用途

機能	用途	機能の説明
4f-5d軌道間 電子遷移	蛍光体 顔料	発光材料は希土類元素の持つ特異な電子軌道に起因する特性を利用するものが多い。セリウムでは4f-5d軌道間の電子遷移(4f→5d)の際に放出されるエネルギーが利用されている。 顔料は発光の逆で、4f-5d間の電子遷移(5d→4f)で吸収される光の波長により発色することを利用する。
4f-伝導 電子強相関	熱電変換材料	4f電子が不安定なCeの化合物では、4f電子と伝導電子が強く混成した電子状態を形成し、4f電子は結晶の中を動くことができ、熱電能に発現に寄与し、熱電変換材料に適した高いゼーベック係数を示す。
格子欠陥導入	固体電解質	Ceの3価と4価の価数変化により化合物中の格子欠陥が安定化されることで欠陥の導入が容易になる。
イオン交換	吸着剤	酸化セリウム(水酸化セリウム)は、陰イオンを吸着する機能を持つ。水への溶解度が低いことから水処理用の吸着剤として用いられる。
酸化力強	ガラスの消色	Ceの強い酸化力がガラスの着色原因となるFe ²⁺ イオン(青緑色)をFe ³⁺ イオン(黄緑色)に酸化することで消色する。
	有機合成	有機合成は化合物を酸化することで行われる場合が多い。その酸化を、酸化力の強いCeで行うことにより少量で効果を得られる。
4f励起	紫外線吸収	酸化セリウム(CeO ₂)に紫外線を当てると、酸素の2P軌道の電子が励起される。この励起電子をCe ⁴⁺ イオンの空いた4f軌道が受け取ることにより紫外線が吸収される。
高硬度	研磨剤 CMP	酸化セリウムの硬度がモース硬さで6前後と比較的固いことに加えて、ガラスの構成元素であるSiO ₂ と化学的な反応を起こすことが研磨剤として有効である。
水素親和度	水素吸蔵合金	MmNi ₅ の構造は六方晶のCaCu ₅ 型構造で水素を受容するサイトが多く、また水素との親和度の大きなCeと小さなNiの位置関係が水素の吸放出を可能にしている。
酸素貯蔵能	触媒	酸化セリウムは、雰囲気によって酸素を吸蔵・放出する機能を持つことから、三元触媒の雰囲気制御に寄与し触媒の浄化活性を高める効果がある。
黒鉛球状化	ダクタイル鋳鉄	マグネシウムとセリウム添加により鋳鉄中の黒鉛を球状化して鋳鉄の耐衝撃性を増す。実施例ではランタンと併用、またはミッシュメタルとして添加される。
硫黄親和度	硫化物制御	鉄鋼中の硫黄を微細な希土硫化物として、鉄鋼の強度を増す。

自動車触媒の種類と構造



自動車触媒でのPGMの削減は最重要課題であるので、徹底した技術開発が望まれる。

担体や触媒白金族の材料開発が性能に直結