

地球温暖化対策技術の普及と関連金属の重要度

橋本 征二^{1,2}・佐橋 慶一²・村上 進亮³・森口 祐一^{1,2}

¹(独)国立環境研究所 循環型社会・廃棄物研究センター (〒305-8506 つくば市小野川16-2)

E-mail: hashimoto.seiji@nies.go.jp

²東京大学大学院 新領域創成科学研究科 (〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

³東京大学大学院 工学研究科 (〒113-8654 文京区本郷7-3-1)

資源の供給を考慮した地球温暖化対策技術の普及戦略の検討に資することを目的として、地球温暖化対策技術の普及にとって重要な金属を同定するための枠組みについて検討するとともに、これをいくつかの技術に適用し、重要な金属の同定を試みた。その結果、次世代自動車に必要となる金属が重要であると同定された。すなわち、これらの金属の供給が今後の地球温暖化対策技術の普及にとって重要であり、リサイクルや代替などを検討すべき対象であると考えられた。

Key Words : electric vehicle, plug-in hybrid vehicle, fuel cell vehicle, lithium, neodymium, dysprosium, platinum

1. はじめに

電気自動車や太陽電池といった地球温暖化対策技術の急速な普及に伴って、そうした技術に必要な金属の需要は急増するものと考えられる。中でも、希少金属については、生産規模の変異性や資源の偏在性などの問題があるため、その供給不安定性が指摘されている。

本稿は、資源の供給を考慮した地球温暖化対策技術の普及戦略の検討に資することを目的として、地球温暖化対策技術の普及にとって重要な金属を同定するための枠組みについて検討するとともに、これをいくつかの技術に適用し、重要な金属の同定を試みたものである。

なお、地球温暖化対策技術の資源制約については、これまでも二次電池¹⁾、燃料電池自動車²⁾等を対象とした研究が報告されている。本稿は、複数の技術や金属を対象として、各技術の地球温暖化対策技術として位置づけ(CO₂削減効果)と各金属の生産規模の変異性に着目して重要な金属の同定を行おうとしている点に特徴を有する。

2. 資源の重要度の評価手法

米国のNational Research Council³⁾は、図-1に示すように供給リスクと供給制限の影響によって、鉱物の重要度を評価する枠組みを提案している。

このうち、供給リスクについては、絶対的な枯渇、生産規模の変異性、偏在性、他の素材による代替可能性、

リサイクル可能性などの様々な要素が指摘されている。

本稿では、その検討課題に照らしたとき、急激な需要の増加が供給リスクの重要な要素であると考え、生産規模の変異性に着目することとした。また、供給制限の影響としては、当該技術による潜在的なCO₂削減効果への影響が該当すると考えた。

これら、当該技術の普及による「金属需要の増加速度(将来のある時点までの累積金属需要量/現在の金属生産量)」と「潜在的なCO₂削減効果(将来のある時点までの累積CO₂削減効果)」により、重要な希少金属を同定することとする。

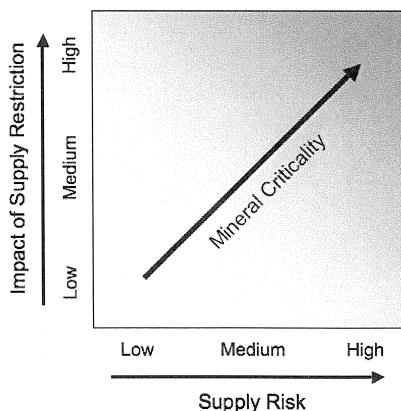


図-1 鉱物の重要度評価の枠組み¹⁾

3. 地球温暖化対策技術に関連する金属の重要度

(1) 対象技術・金属と対象技術の普及シナリオ

本稿では、次世代自動車、太陽電池、風力発電の各技術を対象とした。これらの技術に関連する金属としては表-1に示すようなものがある。各技術に関連する金属の詳細については後述する。

また、対象技術の普及シナリオとして、国際エネルギー機関(IEA)が最近公表したEnergy Technology Perspective 2010(ETP2010)⁹⁾におけるBLUE mapシナリオを用いた。BLUE mapシナリオは、エネルギー起源の世界のCO₂排出量を2050年までに2005年より半減することを目標に、コスト最小化のもとで温暖化対策技術を導入していくシナリオである。

(2) 次世代自動車に関連する金属需要量

本稿で対象とする次世代自動車は、電気自動車(EV)、プラグインハイブリッド自動車(PHEV)、燃料電池自動車(FCV)とする。

a) 技術の普及シナリオ

ETP2010 BLUE mapシナリオにおける次世代自動車の普及シナリオは図-2に示すとおりである。このシナリオにおいては、EV/PHEVの販売台数が2050年には1億台程度となり、販売台数のシェアが60%程度となる。また、FCVのシェアも20%程度となる。

b) 金属需要量

EV/PHEVにおいては二次電池が重要な役割を担うが、本稿ではこれらの自動車に搭載されるLi-ion電池に必要なLiを推計対象とした。Li-ion電池用のLi需要量は、各車種の販売台数、搭載される二次電池の電力量、電力量あたりのLi使用量から推計した。電力量については、表-2の「備考」欄に示す情報を参考に「電力量」欄に示される値を用い、幅を持たせて推計を行うこととした。また、Li-ion電池のLi使用量については、表-3に示すような報告があり、本稿では0.14kg/kWhとして推計を行った。

また、EV/PHEVにおいては駆動モーターに永久磁石が用いられるが、本稿ではこれらの永久磁石に必要なNd、Dyといったレアアースを推計対象とした。永久磁石用のNd、Dy需要量は、EV/PHEVの販売台数、搭載される永久磁石量、永久磁石量あたりのNd、Dy使用量から推計した。本稿では、1台あたり1.5kgの永久磁石を使用し、Ndを375g-450g(重量比25-30%)、Dyを75-150g(重量比5-10%)使用するとした。

さらに、FCVには燃料電池が搭載されるが、本稿ではこの燃料電池(固体高分子形燃料電池とする)に必要なPtを推計対象とした。燃料電池用のPt需要量は、FCVの販売台数、FCV1台あたりのPt使用量から推計した。

表-1 対象技術と対象金属

	Li*	Nd**	Dy**	Pt***	In	Ga
次世代自動車	○	○	○	○		
太陽電池					○	○
風力発電		○	○			

*二次電池、**永久磁石、***燃料電池

表-2 車種別の二次電池の電力量

車種	電力量	備考
EV	25-50kWh	日産 Leaf: 24kWh(160km以上) IEA ⁹⁾ : 50kWh(500km)
PHEV	10-20kWh	BYD F3DM: 20kWh(100km) IEA ⁹⁾ : 5kWh(20km); 12.5kWh(50km); 20kWh(80km)

表-3 Li-ion電池のLi使用量

文献	Li-ion 電池	Li 使用量(kg/kWh)
Andersson and Rade ¹⁾	Li-ion (Mn)	0.085-0.14
	Li-ion (Ni)	0.10-0.14
	Li-ion (Co)	0.11-0.14

表-4 FCVのPt使用量

文献	シナリオ	Pt 使用量(g/FCV)				
		2010	2020	2030	2040	2050
Saurat and Bringezu ⁷⁾	Low	80.67	46.28	41.52	39.11	39.11
	High	30.00	7.06	5.32	4.55	4.55

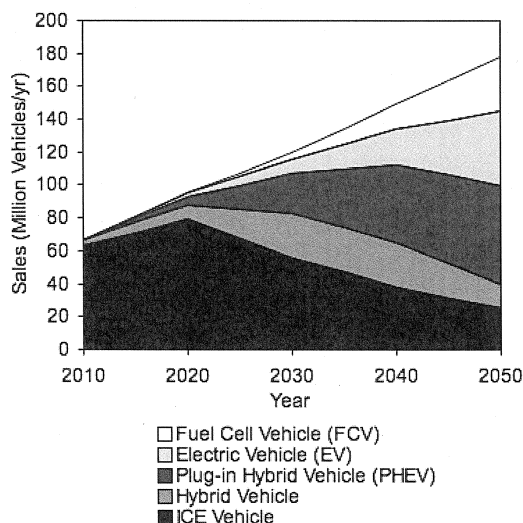


図-2 ETP2010 BLUE mapシナリオにおける自動車販売量のシナリオ

ここで、燃料電池の触媒として使用されるPt量は、今後の技術開発により低減していくと考えられる。本稿では、Saurat and Bringezu⁷⁾をもとに、表-4のような経年変化を想

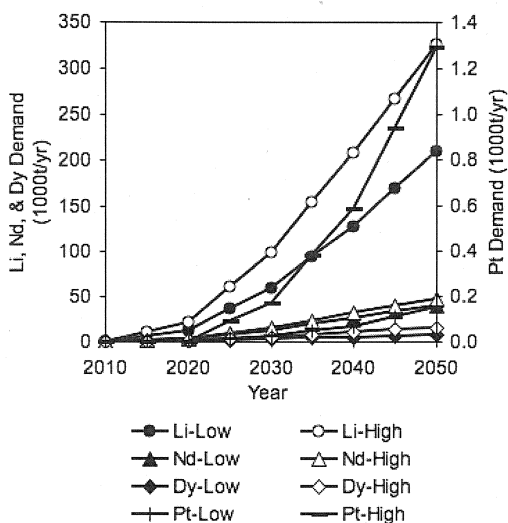


図3 ETP2010 BLUE mapシナリオをもとに推計した次世代自動車の金属需要量

定して推計を行った。

これらをもとにした推計結果は、図-3に示すとおりである。登載されるLi-ion電池の電力量、FCV1台あたりのPt使用量によって異なる需要量(Low, High)のシナリオが描ける。

(3) 太陽電池に関連する金属需要量

太陽電池には半導体材料によって様々な種類があるが、本稿で対象とするのは、In, Ga等を使用するCIGS系太陽電池とする。

a) 技術の普及シナリオ

ETP2010 BLUE mapシナリオにおける太陽電池の普及シナリオは図-4に示すとおりである。このシナリオにおいては、太陽電池の市場規模が2050年には約140GW/yrとなる。また、2050年時点で世界の電力需要の11%を太陽電池で賄うようになる。

このうち、CIGS系太陽電池の市場規模は、Franklら⁸⁾等を参考にすると、2025年頃以降には太陽電池販売量の20-40%程度を占めようになると考えられる。本稿では、この幅で推計を行うこととした。

b) 金属需要量

CIGS系太陽電池用のIn, Ga需要量は、当該太陽電池の販売容量、電池容量あたりのIn, Ga使用量から推計した。CIGS系太陽電池の金属使用量については、表-5に示すような報告がある。本稿では、この幅で推計を行うこととした。

これらをもとにした推計結果は、図-5に示すとおりで

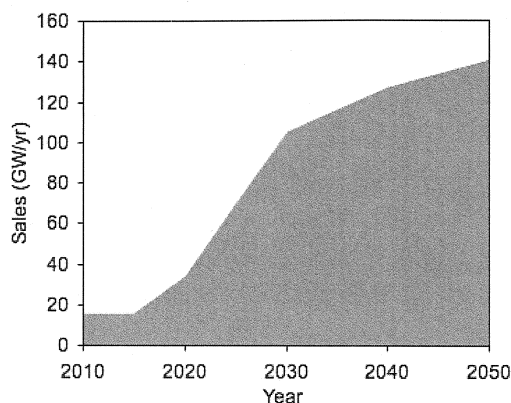


図4 ETP2010 BLUE mapシナリオにおける太陽電池販売量のシナリオ

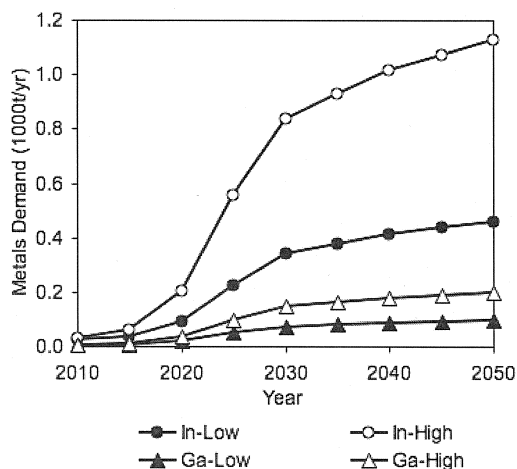


図5 ETP2010 BLUE mapシナリオをもとに推計したCIGS系太陽電池の金属需要量

表-5 CIGS系太陽電池の金属使用量

文献	In使用量(g/kW)	Ga使用量(g/kW)
馬場 ⁹⁾	16.3	6.7
Dhere ¹⁰⁾	~20.0	

ある。CIGS系太陽電池の販売量、電池容量あたりの金属使用量によっていくつかの需要量のシナリオが描けるが、図ではその最小値(Low), 最大値(High)を示している。

(4) 風力発電に関連する金属需要量

風力発電の発電機部分には永久磁石を使用するものがあり、永久磁石にはDy, Nd等が使用される。本稿で対象とするのは、永久磁石を使用する風力発電とする。

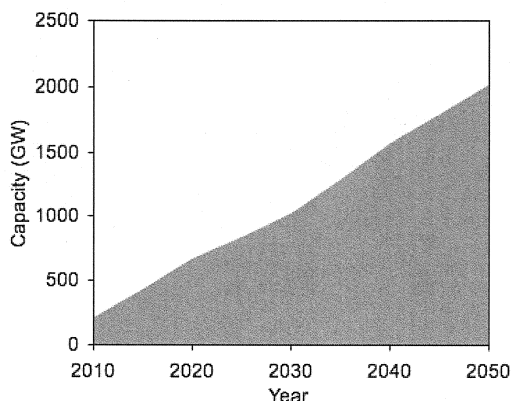


図-6 ETP2010 BLUE map シナリオにおける風力発電の発電容量のシナリオ

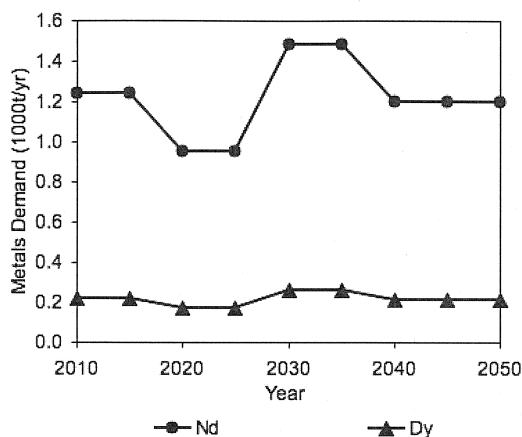


図-7 ETP2010 BLUE map シナリオをもとに推計した風力発電の金属需要量

a) 技術の普及シナリオ

ETP2010 BLUE mapシナリオにおける風力発電の普及シナリオは図-6に示すとおりである。このシナリオにおいては、2050年時点で世界の電力需要の12%を風力発電で賄うようになる。なお、これは各時点での発電容量であるため、これから毎年の新規導入量を推計した。

このうち、永久磁石を用いる風力電池がどれだけかを占めるかは明らかではないが、本稿では、今後永久磁石を用いる風力電池が100%を占めることを仮定する。

b) 金属需要量

永久磁石用のDy, Nd需要量については、風力発電の販売容量、発電機容量あたりのDy, Nd使用量から推計した。永久磁石を使用する風力発電の金属使用量については、表-6に示すような報告がある。

これらをもとにした推計結果は、図-7に示すとおりである。

表-6 永久磁石を使用する風力発電の金属使用量

文献	Nd使用量(g/kW)	Dy使用量(g/kW)
馬場 ⁹⁾	27.0	4.8

表-7 対象金属の生産量・埋蔵量

金属	生産量	埋蔵量
Li	2008年: 25,400t ¹¹⁾ 2009年: 18,000t ¹¹⁾	2009年: 9,900,000t ¹¹⁾
Nd	2008年: 4,600~5,000t ⁹⁾ (日本の需要量)	
Dy	2008年: 600~700t ⁹⁾ (日本の需要量)	
Pt	2008年: 189t ¹¹⁾ 2009年: 178t ¹¹⁾	6880t ¹²⁾
In	2008年: 570t ¹¹⁾ 2009年: 600t ¹¹⁾	2007年: 11000t ¹¹⁾
Ga	2008年: 95t ¹¹⁾ 2009年: 78t ¹¹⁾	

表-8 ETP2010 BLUE map シナリオにおける各技術の累積CO₂削減量⁹⁾

技術	2010-2030 年の累積 CO ₂ 削減量(GtCO ₂)	2030-2050 年の累積 CO ₂ 削減量(GtCO ₂)
EV/PHEV	3.7	32.5
FCV	1.9	19.5
太陽電池	3.7	45.4
風力発電	13.0	38.9

(5) 対象金属需要の増加速度

本稿が対象とする金属の近年の生産量・埋蔵量を整理したものが表-7である。このうち、Nd, Dyについては、その生産量に関する適当な資料がなく、表中には日本の需要量を記した。岡部¹³⁾は、2005年頃の数値として、Ndの世界の生産量4,000tに対し、日本の需要量2,700t、Dyの世界の生産量740tに対し、日本の需要量500tといった値を報告している。本稿では、日本のシェアが変わらないものとして、世界の生産量を仮にNd 7,000t、Dy 1,000tと設定した。

重要な希少金属の同定に用いる「金属需要の増加速度」については、(2)-(4)で推計した累積の金属需要量を当該金属の生産量で除した値を用いた。なお、Nd, Dy

については上記の仮定生産量、その他の金属については表-7に示す2009年の生産量を用いた。

(6) 対象技術の潜在的なCO₂削減効果

EPT2010 BLUE mapシナリオにおいては、各技術

(EV/PHEV, FCV, 太陽電池, 風力発電)の普及による累積CO₂削減量が表-8のように報告されている。

2030年までは風力発電によるCO₂削減効果が非常に大きく、それ以降は太陽電池の効果が大きくなっている。また、2030-2050年の期間では、次世代自動車に関わる技術(EV/PHEV+FCV)がこれら以上の効果をもつと推計されている。本稿では、重要な希少金属の同定に用いる「潜在的なCO₂削減効果」としてこれらの値を用いた。

(7) 地球温暖化対策に関連する金属の重要度

(5)(6)をもとに、2030年、2050年までを対象として、金属需要の増加速度と潜在的なCO₂削減効果をプロットしたものが図-8、図-9である。金属によっては複数のプロットがあるが、これは対象技術の違い、計算根拠とした数値の幅による違いを反映している。

いずれの場合も、EV/PHEVに必要な金属が、重要な金属であると同定されよう。すなわち、これらの金属の供給が今後の地球温暖化対策技術の普及にとって重要であり、リサイクルや代替などを検討すべき対象であると考えられる。

なお、Liについては、表-7に示すように大きな埋蔵量があり、絶対的な意味での枯渇は考えにくい、需要の急増に合わせた生産増加を行っていかどうかが重要な点である。また、Nd、Dyについては、埋蔵量に関して十分な議論を行えるデータがないものの、すでに中国が輸出を制限することで問題となっているように、その産出が中国に偏在していることに対する対応が重要となる。

4. おわりに

本稿では、資源の供給を考慮した地球温暖化対策技術の普及戦略の検討に資することを目的として、地球温暖化対策技術の普及にとって重要な金属を同定するための枠組みについて検討するとともに、これをいくつかの技術に適用し、重要な金属の同定を試みた。その結果、次世代自動車に必要な金属が重要であると同定された。すなわち、これらの金属の供給が今後の地球温暖化対策技術の普及にとって重要であり、リサイクルや代替などを検討すべき対象であると考えられた。

なお、本稿の需要推計では上述の通り様々な仮定を用いており、推計幅については更なる検討が必要と考えられる。現時点では、これらの数値は暫定的なものと考えていただきたい。

謝辞：本研究は、平成22年度環境研究総合推進費(S-6-4)の支援を受けて行ったものである。

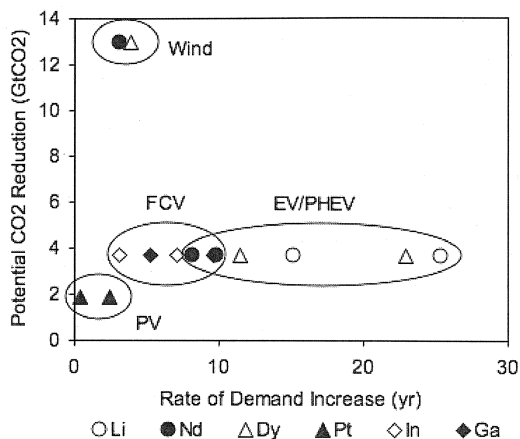


図-8 2030年までの金属需要の増加速度(2010-2030年の累積の金属需要量/現在の金属生産量)と潜在的なCO₂削減効果(2010-2030年の累積のCO₂削減効果)

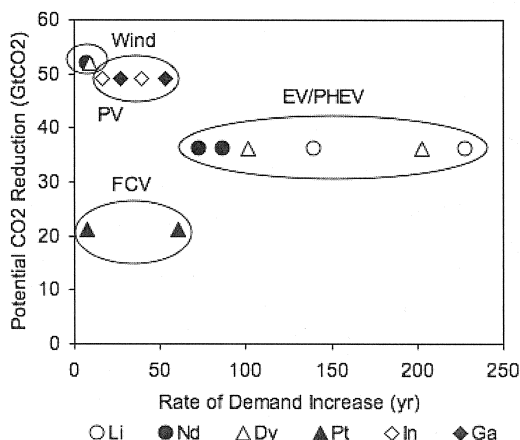


図-9 2050年までの金属需要の増加速度(2010-2050年の累積の金属需要量/現在の金属生産量)と潜在的なCO₂削減効果(2010-2050年の累積のCO₂削減効果)

参考文献

- 1) Andersson, B.A. and Rade, I.: Metal resource constraints for electric-vehicle batteries, *Transportation Research Part D*, Vol.6, pp.297-321, 2001.
- 2) Rydh, C.J. and Svard, B.: Impact on global metal flows arising from the use of portable rechargeable batteries, *The Science of the Total Environment*, Vol.302, pp.167-184, 2003.
- 3) Spiegel, R.J.: Platinum and fuel cells, *Transportation Research Part D*, Vol.9, pp.357-371, 2004.
- 4) National Research Council of The National Academies: *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy*, The National Academy Press, 2008
- 5) IEA (International Energy Agency): *Energy Technology*

- Perspectives 2010: Scenarios & Strategies to 2050*, OECD/IEA, 2010.
- 6) IEA (International Energy Agency): *Energy Technology Perspectives 2008: Scenarios & Strategies to 2050*, OECD/IEA, 2008.
 - 7) Saurat, M. and Bringezu, S.: Platinum group metal flows of Europe, Part II: Exploring the technological and institutional potential for reducing environmental impacts, *Journal of Industrial Ecology*, Vol.13, pp.406–421, 2009.
 - 8) Frankl, P., Menichetti, E., and Raugei, M.: *Final report on technical data, costs and life cycle inventories of PV applications*, Project no: 502687, NEEDS (New Energy Externalities Developments for Sustainability), 2006
 - 9) 馬場洋三：新エネルギー導入促進に伴うレアメタル需要，*金属資源レポート*，227，pp.734–743，2009.
 - 10) Dhere, N. G.: Toward GW/year of CIGS production within the next decade, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol.91, pp.1376–1382, 2007.
 - 11) USGS (US Geological Survey): Commodity Statistics and Information.
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>
 - 12) 近藤敏，武山眞，大藏隆彦：白金族金属の長期需給見通しに関する一考察，*資源と素材*，Vol.122，pp.386–395，2006.
 - 13) 岡部徹：レアメタルの実情と日本の課題，*工業材料*，Vol.55，No.8，pp.18-25，2007.

PENETRATION OF TECHNOLOGIES FOR CLIMATE CHANGE MITIGATION AND CRITICALITY OF ASSOCIATED METALS

Seiji HASHIMOTO, Kei-ichi SABASE, Shinsuke MURAKAMI,
and Yuichi MORIGUCHI

A strategy must be developed to accommodate the penetration of mitigation technologies considering resource supplies. We produced a framework for identifying critical rare metals for mitigation of climate change, applied it to several technologies, and identified critical rare metals. Results show that metals used for new generation vehicles are of critical importance: the supply of those metals is important for the penetration of technologies necessary for climate change mitigation. Recycling and substitution of these metals need to be considered.