

レアメタル・レアアース等の
代替材料・高純度化技術開発
プロジェクト

事後評価用資料

平成26年10月17日

経済産業省 製造産業局 非鉄金属課

研究開発実施事業者：愛知製鋼(株)、(株)大阪チタニウムテクノロジーズ、(株)神戸製鋼所、堺化学工業(株)、東邦チタニウム(株)、日本ハードメタル(株)、プライムアースEVエナジー(株)、マツダ(株)、ヤマハ発動機(株)

目 次

1. 事業の目的・政策的位置付け.....	1
1－1 事業の目的.....	1
1－2 政策的位置付け.....	2
1－3 国の関与の必要性.....	8
2. 研究開発目標.....	1 1
2－1 研究開発目標.....	1 1
2－1－1 全体の目標設定.....	1 1
2－1－2 個別要素技術の目標設定.....	1 1
3. 成果、目標の達成度.....	1 5
3－1 成果.....	1 5
3－1－1 全体成果	
3－1－2 個別要素技術成果	
3－1－3 特許出願状況等	
3－2 目標の達成度.....	1 7
4. 事業化、波及効果.....	1 8
4－1 事業化の見通し.....	1 8
4－2 波及効果.....	1 9
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	2 0
5－1 研究開発計画.....	2 0
5－2 研究開発実施者の実施体制・運営.....	2 1
5－3 資金配分.....	2 2
5－4 費用対効果.....	2 3
5－5 変化への対応.....	2 4
6. 各論.....	2 5

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1 事業目的

【標準的評価項目】

○事業目的は妥当か。

- ・事業の科学的・技術的意義(新規性・先進性・独創性・革新性・先導性等)
- ・社会的・経済的意義(実用性等)

我が国の経済基盤を根底から支えるレアメタル・レアアース等の金属資源の安定確保対策を早急に実施することは、我が国の製造業の事業環境に関する安全保障を確保する上で不可欠である。

今般、次世代自動車や風力発電の普及に伴い、中国への一国依存度が高いジスプロシウムの需要ポテンシャルの高まりが顕在化していることに加え、新興国における消費量の急増に伴い、チタン等のレアメタルについても事業環境が激変している。

このような近時の環境変化に緊急的に対応する観点から、価格高騰や一国依存等による供給リスクが高いレアメタル・レアアース等について、企業等によるレアメタル・レアアース等の使用量削減・代替材料技術開発及び低品位鉱石の高純度化のための実用化研究及び実証研究、試作品製造又は性能・安全性評価を目的とした設備等の整備及び研究開発に対する平成24年度補正予算における補助事業として、レアメタル・レアアース等の代替材料・高度化技術開発事業を実施した。

具体的には本事業は、磁性材料、触媒、蓄電池向けのレアメタル等の使用量削減・代替材料の開発及びチタンを念頭に低品位鉱石の利用拡大に資する研究開発の二つから構成しており、経済産業省の公募による選定手続きを経て以下の9事業者の研究開発事業に対して直接補助を行ったものである。

A. レアメタル等の使用量削減・代替材料開発に資する研究開発事業（7事業）

（1）Dy フリーNd 系ボンド磁石活用による EV モータ実用化技術の開発【愛知製鋼㈱】

ジスプロシウムフリーネオジム系異方性ボンド磁石を活用した電気自動車用モータの実用化技術開発。

（2）自動車駆動モータに用いる省ジスプロシウム型永久磁石の実用化に向けた研究開発事業【マツダ㈱】

従来型ネオジム磁石から省ジスプロシウム型ネオジム磁石に置換するための研究開発を推進。

（3）排ガス触媒に使用するセリウム、ランタン、ネオジム、ジルコニウム、パラジウム、白金、ロジウム低減技術開発用設備導入【ヤマハ発動機㈱】

二輪車向け排ガス触媒に使用するセリウム、ランタン、ネオジム、ジルコニウ

ム、パラジウム、白金、ロジウム低減技術を開発。

(4) **レアアース削減に資するハイブリッド自動車用ニッケル水素電池の実用化研究【プライムアース EV エナジー㈱】**

ハイブリッド自動車用ニッケル水素電池を実用化。

(5) **ガラス研磨用酸化チタン【堺化学工業㈱】**

ガラス研磨用酸化チタンによる酸化セリウムの削減。

(6) **切削工具における WC-SiC 系超硬合金の実用化研究によるタングステン・コバルトの使用量削減【日本ハードメタル㈱】**

超硬合金の実用化研究によるタングステン、コバルトの使用量削減。

(7) **金属材料製造に係る研究開発事業【㈱神戸製鋼所】**

先端溶解技術の実用化によるレアメタル使用量の削減。

B. レアメタル等の低品位鉱石の利用に資する研究開発事業（2事業）

(8) **金属素材製造における技術開発【㈱大阪チタニウムテクノロジー】**

低品位鉱石の高純度化及び低品位鉱石を実利用するための技術開発及び最適化

(9) **環境調和型低品位チタン鉱石のアップグレード技術開発【東邦チタニウム㈱】**

環境調和型低品位チタン鉱石のアップグレード

1-2 政策的位置付け

【標準的評価項目】

○政策的位置付けは明確か。

・事業の政策的意義（上位の施策との関連付け等）

レアメタル・レアアース等の希少金属は高付加価値・高機能性を有しているハイテク製品（自動車、IT製品等）の製造に不可欠な素材であり、我が国の産業競争力の要であることに加え、これらの資源をベースとした部素材産業は高い技術力と高品質を背景に世界シェアの大半を占めるなど、高い国際競争力を有している。

特に、今後の普及が期待されるハイブリッド電気自動車のモーターや蓄電池、また、太陽光パネル等の新エネルギー分野や高効率照明等の省エネルギー分野、さらに燃料電池用触媒等の環境対策分野での需要拡大が見込まれている。このように我が国の産業競争力の強化を支える製品の部材に使用されるレアメタル・レアアース等の安定供給確保は我が国製造業の国際競争力の維持・強化の観点から極めて重要である。

レアメタルの重要性

- ・我が国にとって、レアメタルの確保は、製造業の産業競争力確保のための大前提。
- ・我が国の競争力の基盤である高度部材・部品の製造業の存立の基盤。

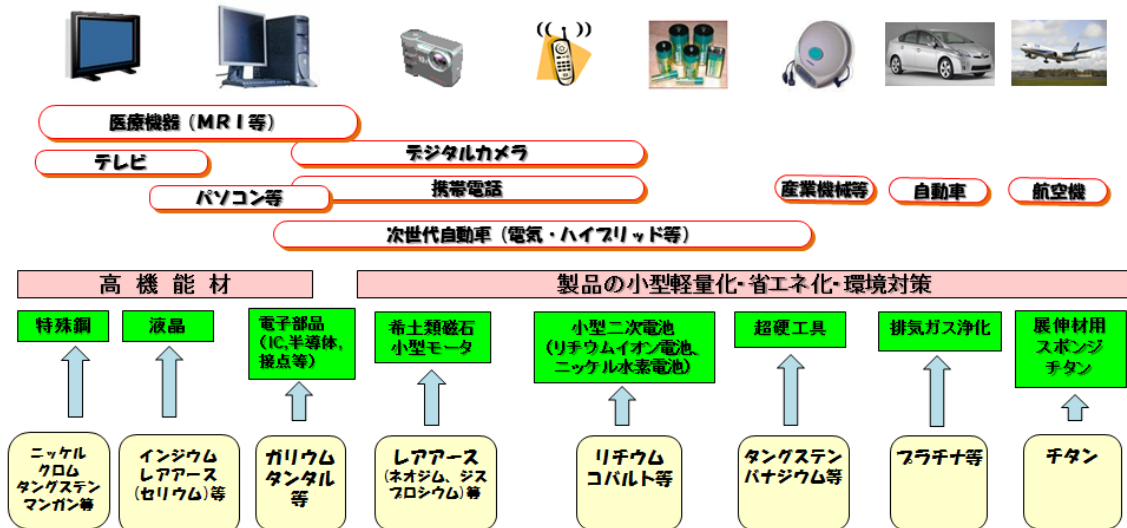


図1 レアメタルの重要性

今後のレアアース(中重希土)対策の重要性

○今後、レアアースは中重希土を中心に、当面の間、中国への依存が続くとともに、次世代自動車や風力発電の普及等による増大が今後も見込まれているところ、今後も必要な対策を実施する必要がある。

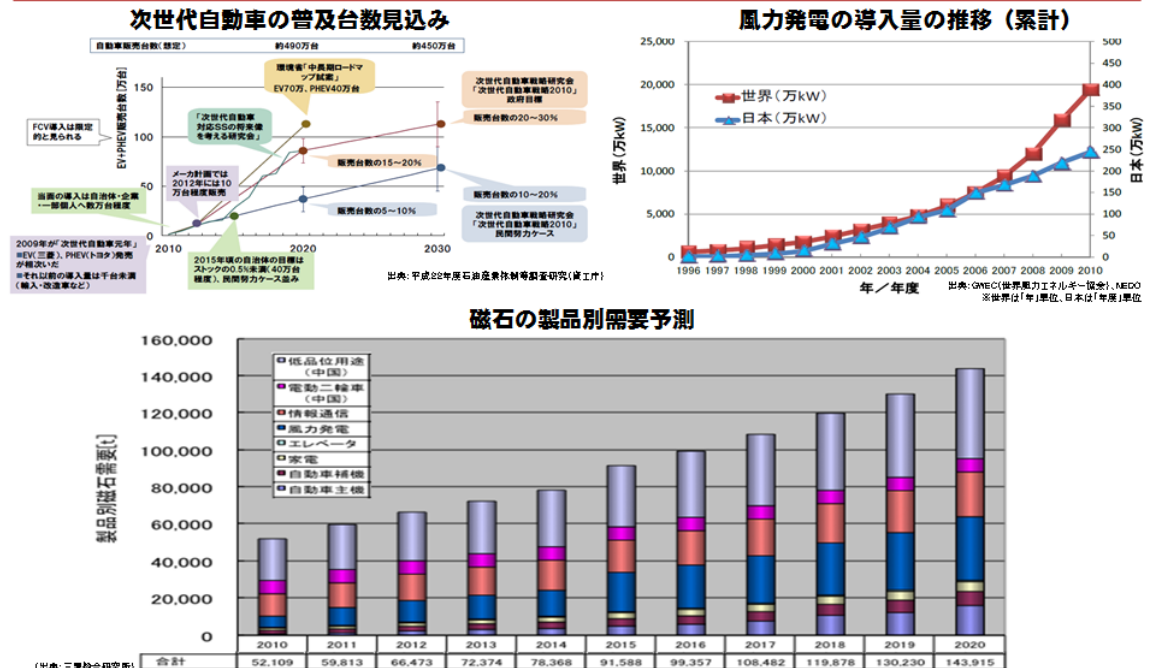


図2 今後のレアアース対策の重要性

しかし、レアメタルは一般に希少性や偏在性が強く、生産国の輸出政策、主要生産施設の状況等の影響を大きく受け易い。また、レアアースはベースメタル等の副産物として産出される場合が多く、主産物であるベースメタルの生産動向等の影響を大きく受け易いといった特殊性も有しているため、産出国の輸出政策や主要生産施設の状況等の影響を大きく受けやすい。

さらに、レアアースユーザー企業は高い競争力を有する中間材料を製造し、自動車、電子機器産業等を下支えしている。そのため、供給障害が発生するとサプライチェーンが断絶され、国民経済に甚大な影響を及ぼすことになってしまうため、供給国の政策に左右されない事業環境の確立を目指すことが重要である。

このため、平成21年7月に経済産業省の「総合資源エネルギー調査会鉱業分科会」において、「レアメタル確保戦略」が取りまとめられ、全省をあげて①代替鉱山の開発・権益確保、②原料の安定調達、③使用量低減・代替材料技術の利用促進、④リサイクルに取り組むこととなった。図3に「レアメタル確保戦略」のポイントを示す。

また、平成22年6月に閣議決定された「エネルギー基本計画」及び同年平成22年6月18日に閣議決定された「新成長戦略」においてレアメタルやレアアース等についての方針が明示されている。

【エネルギー基本計画（平成22年6月閣議決定）＜関係箇所抜粋＞】

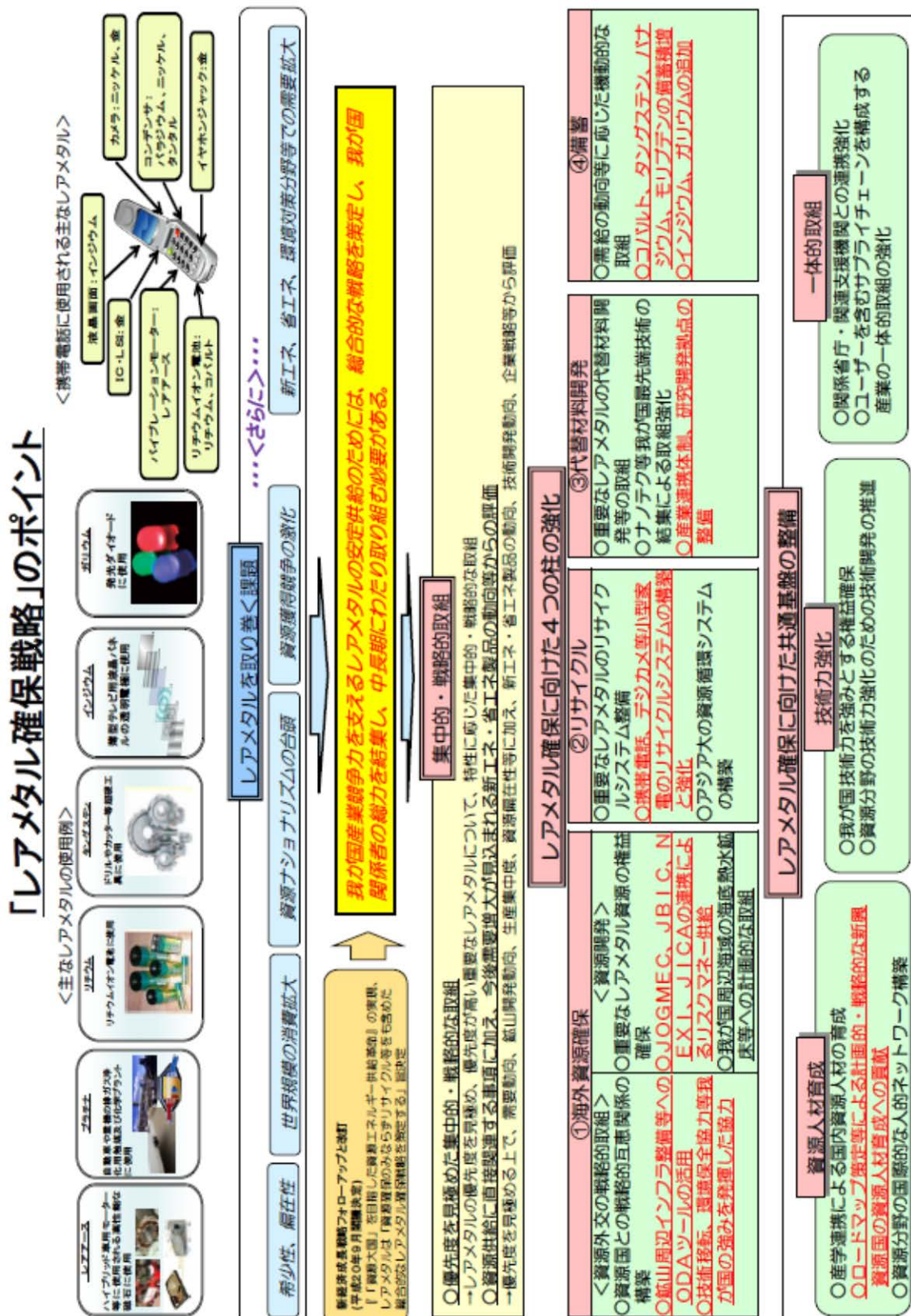
- ・リサイクルによる供給源確保や代替材料開発もあわせて推進することにより自給率を、2030年に50%以上とすることを目指す。

【新成長戦略（平成22年6月18日閣議決定）＜関係箇所抜粋＞】

- ・リサイクルの推進による国内資源の循環的な利用の徹底や、レアメタル、レアアース等の代替材料などの技術開発を推進するとともに、総合的な資源エネルギー確保戦略を推進する。
- ・レアメタルを使用する製品の市場動向等を踏まえ、代替材料開発及び使用量削減のための技術開発を実施する。

本事業では、部素材産業の国際競争力強化に向けて成長分野において潜在需要の高い部素材を見極めた技術開発を行うとともに、こうした部素材生産に使用されるレアアースの原料供給リスク低減に資する取り組みを行った。図4に部材産業における技術政策の方向性、図5にレアアース対策の一体的な推進を示す。

図3 「レアメタル確保戦略」のポイント



出所：レアメタル確保戦略（平成21年7月28日）

図 4 部材産業における技術政策の方向性

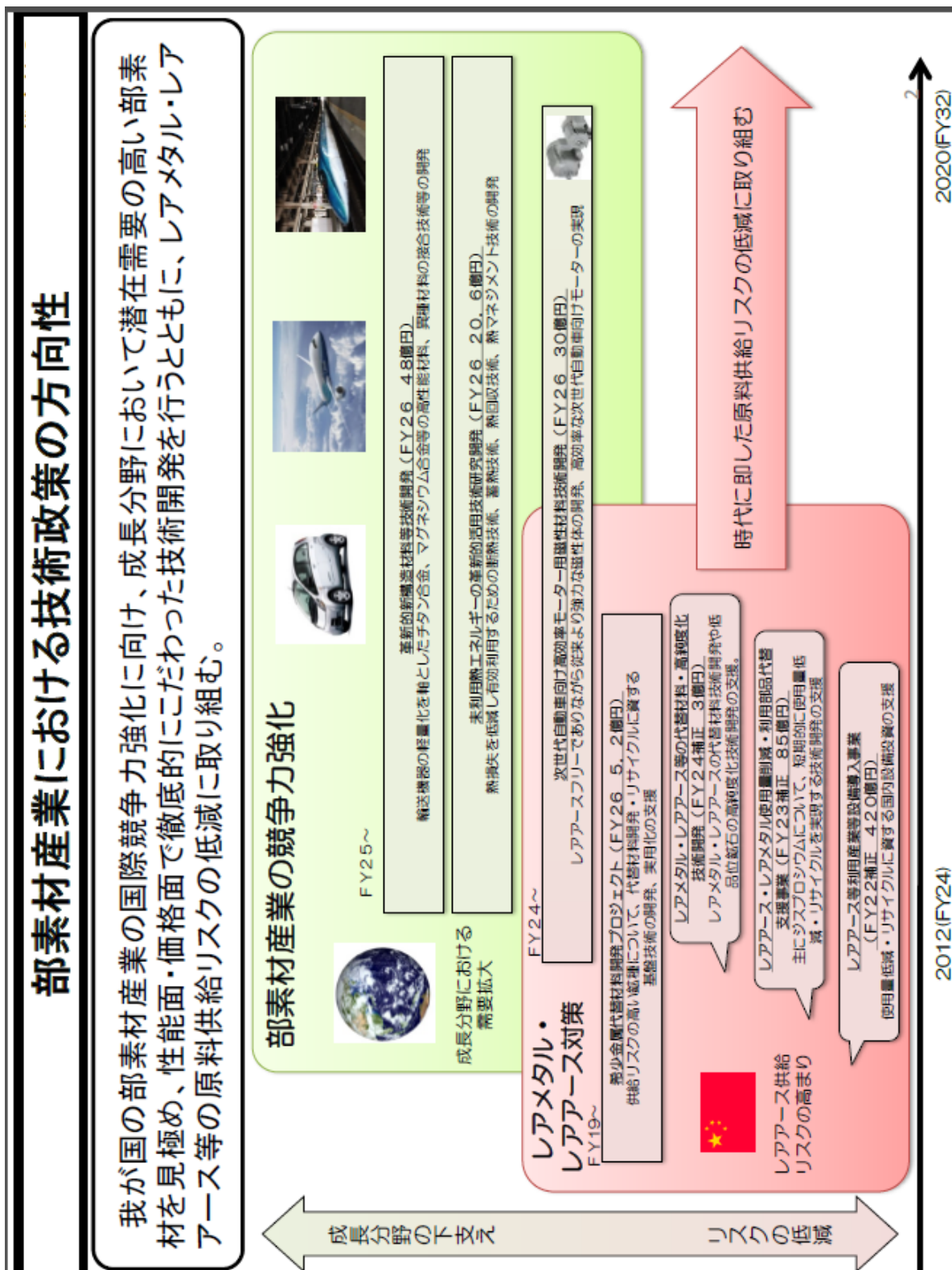
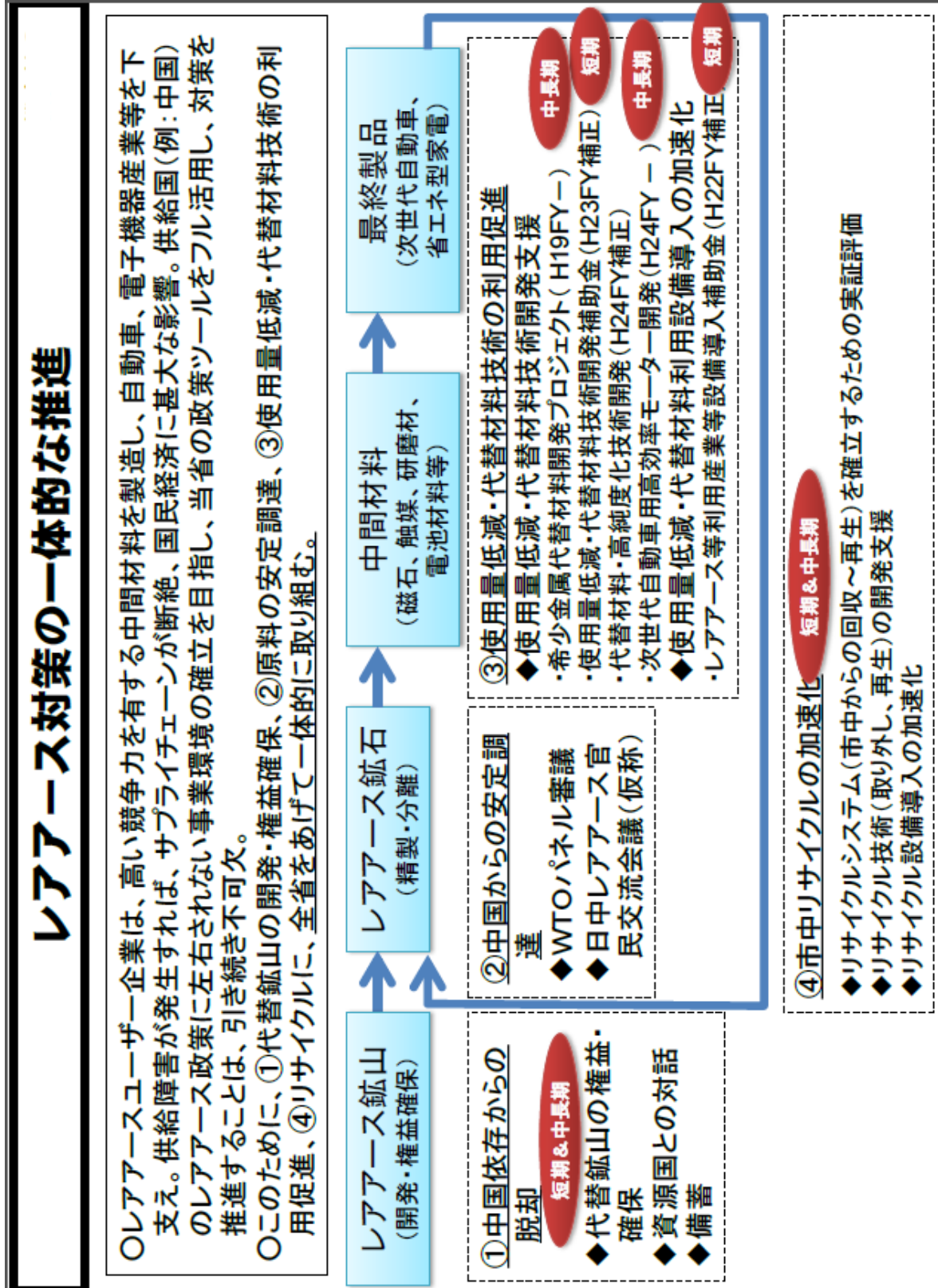


図5 レアアース対策の一体的な推進



1-3 国の関与の必要性

【標準的評価項目】

○国の事業として妥当であるか、国の関与が必要とされる事業か。

- ・国民や社会のニーズに合っているか。
- ・官民の役割分担は適切か。

我が国のレアメタル・レアアース等を用いた高付加価値製品は、製造業の競争力を支える必須の部素材となっているものの、レアアース・レアメタル供給源の一国依存等による供給リスクが高いため、供給国の政策に左右されかねない状況になっている。

我が国が輸入するレアメタルの偏在性

我が国が輸入するレアメタル等の金属資源についても、特定国への輸入依存度が高いものが多数存在。特に、中国は我が国にとって最大規模の資源輸入国となっている。

	資源(鉱石)の上位産出国(2013年)					上位3国のシェア	
レアアース	① 中国	91%	② 米国	4%	③ インド	3%	【98%】
アンチモン	① 中国	78%	② ロシア	4%	③ 米国	3%	【85%】
白金族	① 南ア	73%	② ロシア	13%	③ ジンバブエ	6%	【92%】
タングステン	① 中国	85%	② ロシア	4%	③ カナダ	3%	【92%】
リチウム	① チリ	39%	② 豪州	37%	③ 中国	11%	【87%】
インジウム※	① 中国	53%	② カナダ	19%	③ 日本	8%	【80%】
モリブデン	① 中国	41%	② 米国	23%	③ チリ	14%	【78%】
コバルト	① コンゴ民	48%	② カナダ	7%	③ 中国	6%	【61%】
ニッケル	① フィリピン	18%	② インドネシア	18%	③ ロシア	10%	【46%】
チタン	① 南ア	16%	② 中国	14%	③ 豪州	14%	【44%】

※インジウムは地金ベース

(出典):USGS Mineral Commodity Summaries 2014

図6 我が国が輸入するレアメタルの偏在性

特に、主要な産出国の中国は、2006年からレアアースの輸出に対して輸出税を賦課し、さらに2010年7月にレアアースの輸出数量制限を強化し、輸出数量枠を前年に対して40%削減とするなど、レアアース等の供給不安が急激に高まった。

中国による輸出規制

(1) 輸出数量制限

(出所) 中国商務部HP

	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年
レアース(トン)	60,173	47,449	50,145	30,259	30,184	30,996	30,999	31,000
タングステン(トン)	15,400	18,828	18,526	19,490	19,925	18,967	19,066	19,404
モリブデン(トン)	N.A.	42,753	41,582	41,678	41,678	40,862	40,679	35,923

(2) 輸出税(例)

(出所) 中国国務院関税税則委員会

	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年
金属ネオジム	0%	↗10%	↗15%	15%	15%	↗25%	25%	25%	25%
金属ジスプロシウム	0%	↗10%	↗25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
金属テルビウム	0%	↗10%	↗25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
酸化セリウム	10%	10%	↗15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
酸化ネオジム	10%	10%	↗15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
酸化ジスプロシウム	0%	↗10%	↗25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
酸化テルビウム	0%	↗10%	↗25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
レアース磁石合金	0%	0%	0%	0%	0%	0%	↗20%	20%	20%
レアース鉄合金	0%	0%	0%	↗20%	20%	25%	25%	25%	25%
三酸化タングステン	0%	↗5%	↗10%	↘5%	5%	5%	5%	5%	5%
モリブデン酸化物・水酸化物	0%	↗15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%

図7 中国による輸出規制

世界のレアース需要と中国の輸出枠

- 2014年7月14日、中国商務部が2014年第2期(下期)のレアース輸出枠を15,500トンとすると発表した。
 - ・内訳としては、軽希土が13,691トン、中重希土が1,809トンとなっている。
- 2014年の通年輸出枠は31,000トン、内訳は、軽希土が27,383トン、中重希土が3,617トンとなっており、2013年の通年輸出枠および内訳とほぼ同じ。
- なお、2014年1～6月の中国から世界へのレアース輸出量は、14,298トンであり、2014年(第1期)の輸出枠に占める割合(消化率)として約92%相当。

●中国のレアース輸出枠

(出典: 中国商務部) (単位: トン)

暦年	2009	2010	2011			2012			2013			2014		
			(第1期)	(第2期)	計	(第1期)	(第2期)	計	(第1期)	(第2期)	計	(第1期)	(第2期)	計
輸出数量枠	50,145	30,259	14,446	15,738	30,184	21,226	9,770	30,996	15,499	15,500	30,999	15,500	15,500	31,000

約40%削減

鉄合金を新たに
管理対象に追加

<内訳>
軽希土 13,692トン
中重希土 1,808トン

前期
同

<内訳>
軽希土 13,691トン
中重希土 1,809トン

軽希土: ネオジム、セリウム、ユーロピウム等。磁石や自動車用触媒等に使われる。
中重希土: ジスプロシウム、テルビウム等。磁石やLED等に活用される。

図8 中国のレアース輸出枠

さらに、中国を中心とした新興国の経済成長に伴い、一部の国では戦略物資と位置づけ輸出抑制等の国家管理を強める等、レアメタルを取り巻く環境には不安定な要素が多く、将来、国際的な需給逼迫や供給障害が発生する可能性も懸念されている。

世界のレアアース需給動向

○2013年以降、中国外のプロジェクが計画通り新たに稼働すれば、全体としては需要の伸びに対応できる見込み。
○しかしながら、新しいプロジェクトは軽希土中心であり、次世代自動車や次世代家電に必須な元素を含む中重希土については、需要が底堅く伸びる可能性も高く、引き続き、需給がタイトな状況が継続する可能性大。

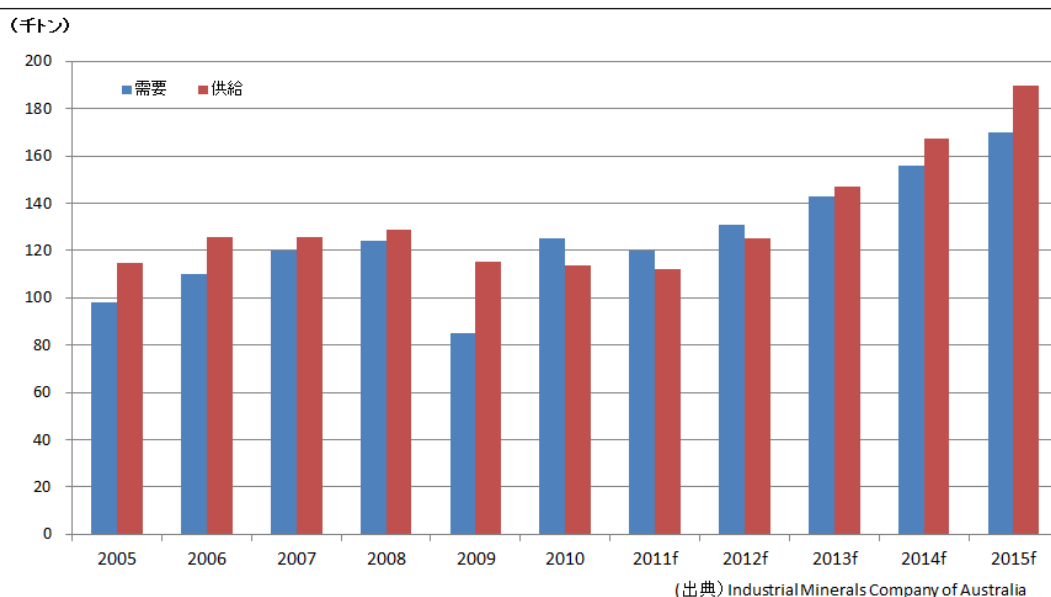


図9 世界のレアアース需給動向

また、チタンについて、世界の展伸材用スポンジチタンの需要は、年間約7%の成長率で急増しており、今後10年間で世界需要は約2倍に増加すると予測されているものの(図10)、原料となるTi鉱石は酸化チタンメーカーとの間で奪い合う構造となっている。さらに、近年は新興国における酸化チタン需要増加による価格高騰が生じているために供給リスクが高くなることが懸念されている(図11)。

このような我が国の経済基盤を根底から支えるレアメタル・レアアース等の供給リスクの緩和、及び新興国における消費量の急増等といった事業環境の激変に早急に対応し、我が国の金属資源を安定的に確保するために、国が一時的に民間へ資金を投入する必要がある。

世界の展伸材用スポンジチタン需要予測

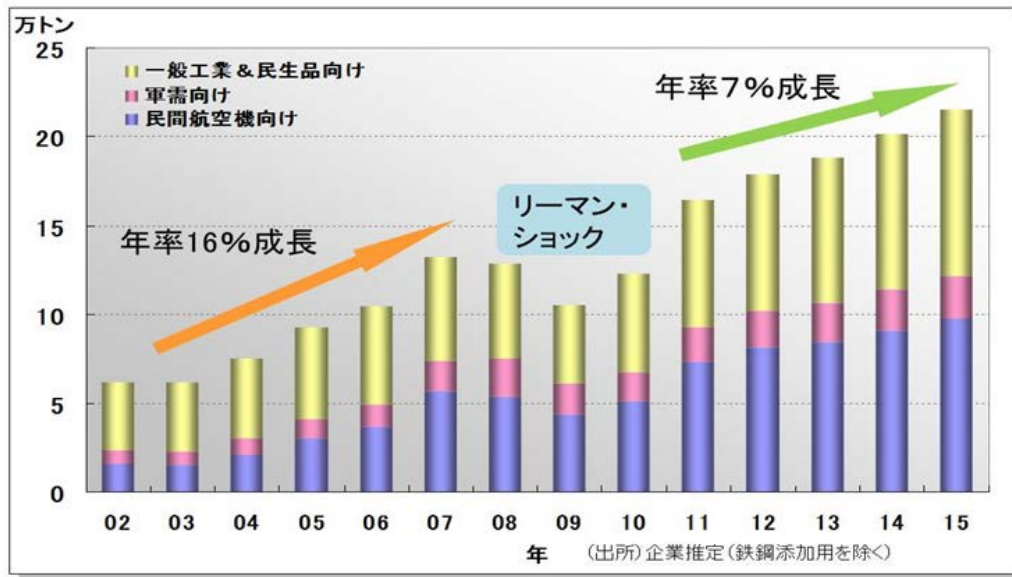


図 10 世界の展伸材用スポンジチタン需要予測

スポンジチタン価格とチタン鉱石価格の比較



出所：チタン産業におけるサプライチェーンに関する調査（平成 25 年度経済産業省製造基盤技術実態等調査）

図 11 スポンジチタン価格とチタン鉱石の比較

2. 研究開発目標

2-1 研究開発目標

【標準的評価項目】

○研究開発等の目標は適切かつ妥当か。

- ・ 目的達成のために具体的かつ明確な研究開発等の目標及び目標水準を設定しているか。特に、中間評価の場合、中間評価時点で、達成すべき水準(基準値)が設定されているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

2-1-1 全体の目標設定

「1. 事業の目的・政策的位置づけ」にて述べたように本事業の目的に合致する研究開発事業を公募により採択したものであり、以下の9事業について表1のとおり、それぞれの事業において、レアメタル等の使用量削減、代替材料の開発、低品位鉱石の利用等の目標を設定している（詳細は各論参照。以下、この章において同じ）。

A. レアメタル等の使用量削減・代替材料開発に資する研究開発事業（7事業）

B. レアメタル等の低品位鉱石の利用に資する研究開発事業（2事業）

2-1-2 個別要素技術の目標設定

上述のように個別要素技術についてそれぞれの事業において表1のとおり目標を設定している。

事業目的	採択企業	補助事業名称	事業内容	要素技術	目標・指標	成果	達成度
レアメタル等の使用量削減・代替材料開発に資する研究開発	(1)愛知製鋼株式会社	DyフリーNd系ボンド磁石活用によるEVモータ実用化技術の開発	ジスプロシウムフリーネオジム系異方性ボンド磁石活用によるEVモータの実用化	DyフリーNd系異方性ボンド磁石を活用したモーター設計及び基本性能の評価検証	Dy使用量をゼロに抑えたNd系ボンド磁石を活用した50kw以上のEVモータの設計・試作	Dy含有Nd系焼結磁石に比べ、DyフリーNd系異方性ボンド磁石の形状等の工夫、およびモータ設計の工夫により同等のモータ性能を達成	達成
	(2)マツダ株式会社	自動車駆動モーターに用いる省ジスプロシウム型永久磁石の実用化に向けた研究開発事業	自動車用駆動モータ用の省ジスプロシウム型永久磁石の実用化	船界協賛による省ジスプロシウム型ネオジム磁石の磁気特性の把握及び耐熱性検証	ジスプロシウム使用量を50%に低減	ジスプロシウム使用量の67%削減、高温駆動におけるモータ性能の耐熱性は従来磁石比同等	達成
	(3)ヤマハ発動機株式会社	排ガス規制に使用するセリウム、ランタン、ネオジム、ジルコニウム、パラジウム、白金、ロジウム低減技術開発用設備導入	二輪車向け排ガス触媒に使用するセリウム、ランタン、ネオジム、ジルコニウム、パラジウム、白金、ロジウム低減技術の開発	排ガス浄化触媒を構成するウオッシュ・コート及び触媒材料の高機能化・最適化	2015年におけるレアアース・レアメタル使用量を2012年比で50%削減	実車による排気ガス浄化性能評価の結果、従来品と同等以上の排ガス浄化性能を確保しつつ、製品1個あたりのレアアース量を53%削減	達成
	(4)プライムアースEVエナジー株式会社	レアメタル削減に資するハイブリッド自動車用ニッケル水素電池の実用化研究	ハイブリッド自動車用ニッケル水素電池の実用化	極板材料を削減したNi水素電池の性能評価	実用化に向けた試作品の性能評価を行い、Ni水素電池に使用されているレアメタル等を低減	製造条件の適正化によりNi水素電池に使用するレアメタル等の使用量を低減	達成
	(5)堺化学工業株式会社	ガラス研磨用酸化チタン	ガラス研磨用酸化チタンによる酸化セリウムの削減	酸化セリウム被覆酸化チタンの研磨効率改善及び研磨後のガラス表面粗さ改善	セリウムの使用量を90%削減	研磨効率の改善は限定的なもの、酸化チタンの結晶形をルチルからアナタースに変更することで、研磨後のガラス表面粗さを改善	一部達成
	(6)日本ハードメタル株式会社	切削工具におけるWC-SiC系超硬合金の実用化研究によるタングステン・コバルトの使用量削減	超硬合金の実用化研究によるタングステン、コバルトの使用量削減	秋田大学及び秋田県産業センターが開発したWC-SiC系超硬合金の実用的焼結技術の確立	a)Co未使用のWC-SiC系超合金の無加圧焼結における緻密化、焼結助剤・添加剤の検討を行い、一連の製造工程技術を確立 b)実工具での評価試験を行い、工具としての適正を検証	a)混合から焼結までの一連の製造工程確立 b)実工具を作製する段階で、開発品の硬度が予想以上に硬かったため、丸棒工具に加工するために時間を要した。結果、丸棒工具での評価のみ未実施となった。	一部達成
	(7)株式会社神戸製鋼所	金属素材製造における技術開発に係る研究開発事業	先端溶解技術の実用化・実証研究	鋳肌改善技術及び成分均一化技術と先端溶解技術の組合せによる最適化	従来溶解技術と比較して約8%の歩留向上によるレアメタル使用量の削減、及び生産性の向上	従来溶解技術と比較して歩留向上による約8%のレアメタル使用量削減と生産性向上を可能とする最適な設備仕様を設計	達成

表 1. 田端

事業目的	採択企業	補助事業名称	事業内容	要素技術	目標・指標	成果	達成度
レアメタル等の低品位鉱石の利用に資する研究開発事業	(8)株式会社大 阪チタニウムテ クノロジーズ	金属材料製造における技 術開発	低品位鉱石の高純度化及び低品 位鉱石を実用するための技術 開発及び最適化	原料改質技術の開発及び 塩化炉操業技術の開発	低品位鉱石混合比率60%以上の 条件で a) 鉱石中阻害元素濃度平均0.2% 以下、廃棄物放射線量0.14 μ Gy/h以下 c) 操業条件最適化、廃棄物削減、 炉壁劣化防止	左記条件で以下を達成 a) 鉱石中の阻害元素濃度0.2%以下、廃棄物 放射線量0.14 μ Gy/h以下。 b) 安定的にTiCl ₄ を生成しつつ、操業不良の 低減および放射性廃棄物の低減可能な操業 条件を見いだした。炉壁劣化防止についてレ ンガ損耗抑制が可能となる最適な操業条件 を見いだした。	達成
	(9) 東邦チタニ ウム株式会社	環境調和型低品位チタン 鉱石のアップグレード技術 開発	環境調和型低品位チタン鉱石の アップグレード	①選択塩化法によるチタン スラグのアップグレード技 術開発 ②チタン製錬塩化工程の 廃棄物処理プロセス技術 開発	①TiO ₂ 品位80～90%のチタンスラ グを高品位チタン鉱石(TiO ₂ 品位 92%以上)にアップグレードする ②チタン製錬塩化工程(TiCl ₄ 製 造)で発生する副生不純物塩化物 中の塩素と、未反応原料(酸化チ タン、コークスなど)を回収し再利 用する	①チタンスラグ(TiO ₂ 品位84%)を用いて、選 択塩化法により、塩化反応試験(流動層)をし たところ、目標TiO ₂ 品位92%以上にアップグ レードできた。 ②不純物塩化物物を加熱酸化させ、酸素と反 応(酸化焙焼)することで、連続的に効率よく 塩素を回収できることが確認できた。未反応 原料のチタン製錬塩化工程への再利用は、 経済性の面などから困難であるため、今後、 未反応原料の有価物化を検討する。	達成

表 1. 目標 (続き)

3. 成果、目標の達成度

3-1 成果

【標準的評価項目】

○成果は妥当か。

- ・得られた成果は何か。
- ・設定された目標以外に得られた成果はあるか。
- ・共通指標である、論文の発表、特許の出願、国際標準の形成、プロトタイプの作製等があったか。

3-1-1 全体成果

A. レアメタル等の使用量削減・代替材料開発に資する研究開発事業

「2. 研究開発目標」にて示した表1のとおり、7事業中5事業において、目標として設定した成果を得ている。具体的には、使用量削減技術開発5事業のうち4事業は当初の設定目標を達成できたが、1事業のみ目標値を達成することができなかった。また、代替材料開発2事業についても、1事業が当初実施を予定していた試作品での評価試験の一部を事業期間内に終了出来なかった。

しかしながら、削減目標を一部達成出来なかった2事業も基礎研究では目標達成の目処が得られているため、引き続き実用化研究を行っており、全体としては、おおむね良好な成果が得られていると考えられる（詳細は各論参照。以下、この章において同じ）。

B. レアメタル等の低品位鉱石の利用に資する研究開発事業

「2. 研究開発目標」にて示した表1のとおり、2事業ともに目標として設定したものを達成している。

3-1-2 個別要素技術成果

「2. 研究開発目標」にて示した表1のとおり、それぞれの事業における目標を達成するための個別要素技術について、おおむね良好な成果が得られている。

3-1-3 特許出願状況等

表 2. 特許・論文等件数

要素技術	論文数	論文の被引用度数	特許等件数（出願を含む）	特許権の実施件数	ライセンス供与数	取得ライセンス料	国際標準への寄与
要素技術 1	0	0	0	0	0	0	0
要素技術 2	0	0	0	0	0	0	0
要素技術 3	0	0	0	0	0	0	0
要素技術 4	0	0	0	0	0	0	0
要素技術 5	0	0	0	1	0	0	0
要素技術 6	0	0	0	0	0	0	0
要素技術 7	0	0	0	0	0	0	0
要素技術 8	0	0	0	0	0	0	0
要素技術 9	0	0	0	0	0	0	0
計	0	0	0	1	0	0	0

表 3. 論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
発表	(5)化学工業日報「ガラス研磨材に進出」	H24.10
特許	(5)特許 第 5278631 号 ガラス研磨用複合粒子	H25.5

3-2 目標の達成度

【標準的評価項目】

○目標の達成度は妥当か。

- ・設定された目標の達成度(指標により測定し、中間及び事後評価時点の達成すべき水準(基準値)との比較)はどうか。

「2. 研究開発目標」にて示した表1のとおり、9事業中7事業において、目標として設定したものを達成している。残り2事業については削減目標を達成することは出来なかったものの、基礎研究では目標達成の目処が得られているため、引き続き実用化研究を行っている。

4. 事業化、波及効果について

4－1 事業化の見通し

【標準的評価項目】

○事業化については妥当か。

- ・事業化の見通し(事業化に向けてのシナリオ、事業化に関する問題点及び解決方策の明確化等)は立っているか。

A. レアメタル等の使用量削減・代替材料開発に資する研究開発事業

今回実施した7事業のうち6事業が実用化への目処がついており、各々の開発進捗状況にあわせたタイミングで量産化を目指す予定になっている。残り1事業についても引き続き実用化研究を行っており、おおむね事業化の見通しが立っている（詳細は各論参照。以下、この章において同じ）。

B. レアメタル等の低品位鉱石の利用に資する研究開発事業

本事業で実施した低品位チタン鉱石の利用拡大が実用化すればチタン鉱石価格が安定し、スポンジチタン事業の事業環境の改善が可能となる。本事業で得られた成果をもとに各事業者においてチタン需要見通し、チタン価格の動向等を見つつ、実用化を目指している。

4-2 波及効果

【標準的評価項目】

○波及効果は妥当か。

- ・成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。
- ・当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

A. レアメタル等の使用量削減・代替材料開発に資する研究開発事業

本事業の波及効果については、それぞれの事業者における波及効果に加え、本事業を含め、「1. 事業の目的・政策的位置づけ」で述べたような官民挙げてレアアースの代替・使用量削減対策を進めたこと等により、日本国内のレアアース需要の低減、及び供給リスクへの対応強化を通じた市況の安定をもたらすことで、レアメタル等を活用した我が国の高付加価値・高機能性を有している製品（自動車、IT製品等）の競争力の維持・向上に寄与している（図12参照、個別事業の波及効果は各論参照）。

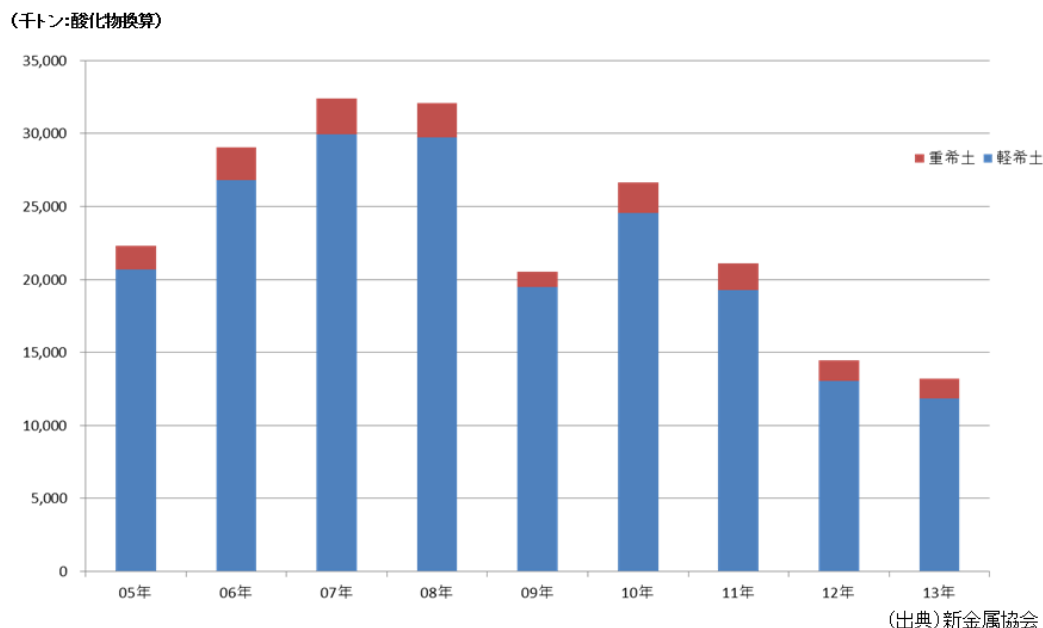


図12 我が国のレアアース需要量推移

B. レアメタル等の低品位鉱石の利用に資する研究開発事業

本事業の波及効果については「4-1 事業化の見通し」で述べた我が国のスポンジチタン業界の事業改善に加えて、他の変動要因はあるものの、航空機向け部材を製造するチタン展伸材産業にとっても安定的な事業の運営に寄与するものである。

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

5-1 研究開発計画

【標準的評価項目】

○研究開発計画は適切かつ妥当か。

・事業の目標を達成するために本計画は適切であったか(想定された課題への対応の妥当性)

「3. 成果、目標の達成度」で述べたように本事業で採択した9事業ともおおむね良好な成果を得られたことから、それぞれの事業における研究開発計画はおおむね適切かつ妥当であると考えられる（詳細は各論参照）。

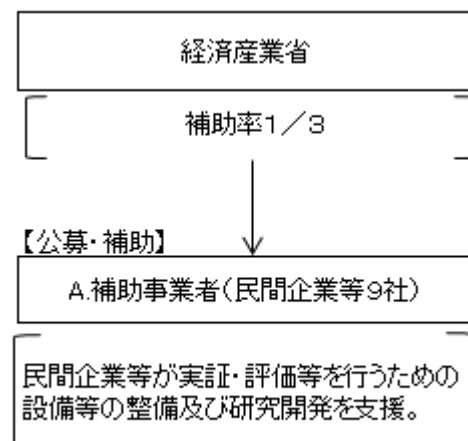
5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

【標準的評価項目】

○研究開発実施者の実施体制・運営は適切かつ妥当か。

- ・適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか、いたか。
- ・全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか、いたか。
- ・目標達成及び効率的実施のために必要な、実施者間の連携／競争が十分に行われる体制となっているか、いたか。
- ・成果の利用主体に対して、成果を普及し関与を求める取組を積極的に実施しているか、いたか。

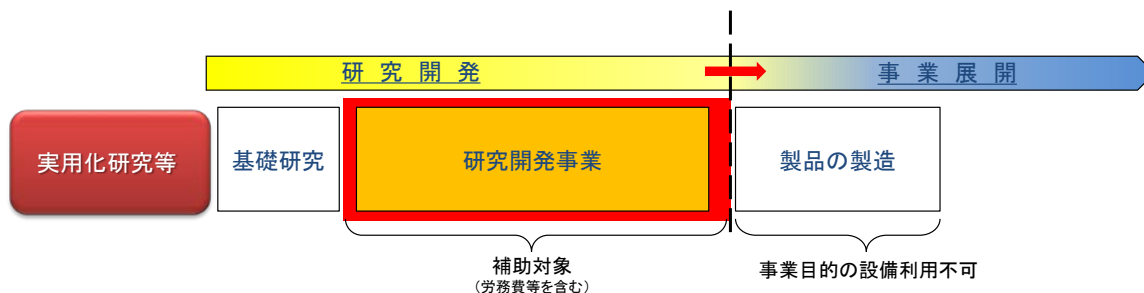
これまで述べてきたように本事業は、経済産業省の公募による選定手続きを経て、9事業者の研究開発事業に対して直接補助を行ったものである。9事業者において、研究開発体制を整備し、それぞれに研究開発事業を実施したものである（詳細は各論参照）。



＜補助対象研究開発事業＞

- 1)実用化研究 …… 理論が確立され、産業用途が明確となっているものを、研究室・実験室レベルで技術開発を行うもの
- 2)実証研究 …… 研究室・実験室レベルの研究で成果が得られたものを、実証プラント等を構築して研究を行うもの
- 3)試作品製造 …… 複数の試作品の製造を行い、製品化に向けた試行錯誤を行うもの
- 4)性能・安全性評価 …… 試作品・製品等の性能の測定や、事故防止のための安全性の確認を行うもの

<位置づけ>



5-3 資金配分

○資金配分は妥当か。

- ・ 資金の過不足はなかったか。
- ・ 資金の内部配分は妥当か。

本事業は補正予算による補助事業のための単年度事業であり、公募手続きによりそれぞれの事業の申請に基づき採択したものである。各事業における補助金執行額を以下に示す。

事業資金の配分については、有識者からなる事業者選定委員会と経済産業省の厳正な審査を経て、事業遂行のために過不足の無い額に決定されている。なお、実施事業者それぞれにおいておおむね良好な成果が得られたことから、資金の配分は妥当であったと考えられる。

表 4. 資金配分表（補助金執行額）

A. レアメタル等の使用量削減・代替材料開発に資する研究開発事業（単位：百万円）

要素技術	25年度
(1)Dy フリーボンド磁石活用による EV モータ実用化技術開発	6.4
(2)自動車駆動モーターに用いる省 Dy 型永久磁石の実用化に向けた研究開発事業	10.5
(3)レアアース削減に資するハイブリッド自動車用 Ni 水素電池の実用化研究	11.5
(4)排ガス規制に使用するセリウム、ランタン、ネオジム、ジルコニウム、パラジウム、白金、ロジウム低減技術開発用設備導入	37.5
(5)ガラス研磨用酸化 Ti	9.1
(6)切削工具における WC-Sic 系超硬合金の実用化研究による W・Co の使用量削減	10
(7)金属素材製造に係る研究開発事業	11
合計	96

B. レアメタル等の低品位鉱石の利用に資する研究開発事業（単位：百万円）

要素技術	25年度
(8)金属素材製造における技術開発	89
(9)環境調和型低品位 Ti 鉱石のアップグレード技術開発	13
合計	102

5－4 費用対効果

【標準的評価項目】

○費用対効果等は妥当か。

- ・投入された資源量に見合った効果が生じたか、期待できるか。
- ・必要な効果がより少ない資源量で得られるものが他にないか。

これまで述べてきたように、本事業の実施の結果、

- ① 補正予算事業という制約の中で公募により採択されたそれぞれの事業においておおむね良好な成果が得られたこと、
- ② 本事業を含めた官民挙げてレアアースの代替・使用量削減対策を進めたこと等により供給リスクへの対応が強化されたこと、
- ③ 当該事業者のみならず、サプライチェーンの川中・川下の事業者にとっても事業の安定性が向上したこと
- ④ 本事業は、磁石・触媒・電池・超硬工具・チタン製造プロセス（製錬・溶解）等、幅広い分野に広がっており、それぞれの事業に関する経済効果や製造コストの低減などの波及効果が期待できること

等、我が国のレアメタル等を活用した製品の競争力が維持・強化された。

このように、公募により採択した事業に配分された資金を活用して、上記のような効果が得られており、本事業の費用対効果は妥当と考えられる。

5-5 変化への対応

【標準的評価項目】

○変化への対応は妥当か。

- ・社会経済情勢等周囲の状況変化に柔軟に対応しているか(新たな課題への対応の妥当性)。
- ・代替手段との比較を適切に行ったか。

A. レアメタル等の使用量削減・代替材料開発に資する研究開発事業

当該事業は平成24年度補正予算を用いて平成25年度に研究開発を実施したものであるが、この間に社会経済情勢等の大きな変化は生じていない。

中国による輸出制限が開始された2010年以降、我が国では官民挙げてレアアースの代替・使用量削減対策を進めたこと等により、需要の低減や市況の安定化に相当程度の効果があったが、次世代自動車や次世代家電に必須なネオジム等のレアメタル等は、需要が底堅く伸びる可能性も高く、引き続き予断を許さない状況となっていることから、今後とも鉱種ごとにサプライチェーン全般を詳細に見つつ、鉱種におけるリスクに対応した様々な対策を検討していく必要がある。

B. レアメタル等の低品位鉱石の利用に資する研究開発事業

当該事業は平成24年度補正予算を用いて平成25年度に研究開発を実施したものであるが、この間に社会経済情勢等の大きな変化は生じていない。

近年、特に航空機分野における高品質スポンジチタンの需要が高まってきていることから、本事業で得られた技術の活用を含め、サプライチェーン全体を見つつ、我が国のチタン産業の競争力を強化する観点から適切な対応を行っていく必要がある。

（ 各 論 ）

- （１）愛知製鋼株式会社
- （２）マツダ株式会社
- （３）ヤマハ発動機株式会社
- （４）プライムアースＥＶエネルギー株式会社
- （５）堺化学工業株式会社
- （６）日本ハードメタル株式会社
- （７）株式会社神戸製鋼所
- （８）株式会社大阪チタニウムテクノロジーズ
- （９）東邦チタニウム株式会社

レアメタル・レアアース等の
代替材料・高純度化技術開発
プロジェクト

事後評価用資料（各論）

平成２６年１０月１７日

（１）愛知製鋼株式会社

目 次

1. 事業の目的・政策的位置付け.....	2
1－1 事業の目的	
2. 成果、目標の達成度.....	3
2－1 全体目標	
2－2 個別目標	
2－3 目標の成果・達成度	
3. 事業化、波及効果.....	16
3－1 事業化の見通し	
3－2 波及効果	
4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	17
4－1 研究開発計画	
4－2 研究開発実施者の実施体制・運営	

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1 事業目的

本補助事業の目的は、現在実用化されている50kW級から100kW級のエンジン代替の磁石駆動モータに使用されるジスプロシウム（Dy）含有ネオジム（Nd）系焼結磁石の使用量の100%削減である。代表的モータで自動車駆動（EV）用モータの設計・試作を通じて実用化技術の開発を実施する。当社は、これまでに耐熱性を有するジスプロシウム（Dy）フリー異方性ネオジム（Nd）系磁石粉末の開発・量産化に成功した。また、平成22年度希少金属代替・削減技術実用化開発助成事業、「DCブラシレスモータ用Nd磁石の使用量半減の研究開発」によって、Dyフリー異方性Nd系磁石粉末と熱可塑性樹脂の混合粉末（ペレット）を直接、積層鋼板ロータに射出成形する磁石ロータ一体成形技術の実現性を示した。その実用化を目的とした、平成23年度希少金属使用量削減・代替技術開発設備整備費等補助金（レアアース・レアメタル使用量削減・利用部品代替支援事業）による補助事業「エアコンコンプレッサ及びEPSモータ用DyレスNd系異方性ボンド磁石ロータ用の実用化研究」をモータ出力1kW級と位置づけて、コンプレッサモータ用とEPSモータ用について取組んで来た。

さらに、平成23年度希少金属使用量削減・代替技術開発設備整備費等補助金（レアアース・レアメタル使用量削減・利用部品代替事業支援事業）による補助事業「農機具用、小型モビリティ用及びEV用DyレスNd系ボンド磁石ロータの実用化研究」ではモータ出力を1kWから50kW級と位置づけて、農機具用モータと小型EV用でも取組んで来た。

これまでの開発助成事業と2つの補助事業を通じて、我々は、ジスプロシウム（Dy）含有ネオジム（Nd）系焼結磁石を使用しているIPM（Internal Permanent Magnet）構造のモータの磁石ロータの磁石配置を種々検討した結果、モータの出力に応じて磁石の磁極数や磁石の配置を工夫することにより、ジスプロシウム（Dy）フリー異方性ネオジム（Nd）系磁石粉末を活用した射出成形異方性ボンド磁石で、ほぼ同等のモータサイズで具現化することについて、1kW級から5kW級のモータについては実用化に目処を得、小型EVモータについてもモータの基本特性を試作検証することが出来た。

そこで、本補助事業では、小型EVモータ用で得た設計技術を活用し、ジスプロシウム（Dy）フリー異方性ネオジム（Nd）系磁石粉末を活用した樹脂成形ボンド磁石で50kW級以上の大出力駆動用モータ（EV用途）に適応するための技術開発を行うものである。このクラスのEVモータは実需要が主流であるため、そこでジスプロシウム（Dy）含有ネオジム（Nd）系焼結磁石の使用量を100%削減することの意義は非常に大きい。

ジスプロシウム（Dy）の供給は、埋蔵量と分離精製の容易性の点から、今後とも中国への依存が高いことが予想される。一方、需要面においてはモータの高効率化、自動車の電動化の進展で、益々その必要量は高まり、安定供給、適

正な価格維持のためには、国、産業界を挙げて、その使用目的を議論し、本当に必要な分野のみにジスプロシウム（Dy）の使用を行なっていかなければならない。ジスプロシウム（Dy）フリー異方性Nd系磁石粉末に必要なレアアースは、Ndまたは、NdとPrの混合希土のジミウムで、これらの元素については世界各地の鉱山開発が、進展中であり、今後、需給がバランスし、価格は安定することが予想される。

本補助事業の取り組みは、現在、ジスプロシウム（Dy）の使用の大半を占める50kW級以上のEV/HEVモータ用で使用されているNd焼結磁石の使用量ゼロを目的としており、その意義は極めて大きく、国策の一つとして喫緊の課題に対応したものとなっている。

2. 成果、目標の達成度

2-1 全体目標

一般的にモータ出力が高くなると、PM（永久磁石）型モータの場合、モータの出力に比例して、保磁力の高い磁石が使用される。保磁力は磁力の安定性を示す指標である。モータ出力が高くなると、一般的に磁石に掛かる（逆）磁界は大きくなり、より高い温度で使用されることになるため、その環境で磁力の安定性を保つためには、磁石が減磁しないことが重要である。EV/HEVモータで主に使用されているNd系焼結磁石の場合、高い保磁力の磁石とするために、ジスプロシウム（Dy）の含有量を増加させている。

本事業の目標は、昨今のジスプロシウム（Dy）の供給不安、価格の高騰問題に対応し、ジスプロシウム（Dy）フリー異方性Nd系ボンド磁石を活用することで、50kW級以上のEV/HEVモータ用で使用される磁石のジスプロシウム（Dy）使用量をゼロとすることである。

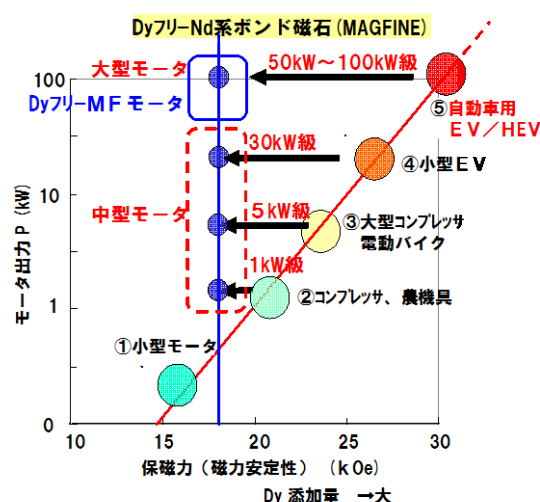


図1. モータ出力と磁石の保磁力の関係

2-2 個別目標

表 1. 個別要素技術の目標設定

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	設定理由・根拠等
(1) 減磁しない モータ設計技術	・無負荷誘起電圧定数の低下率 5%以内。 評価は、トルク試験前（電流を掛けない状態での）無負荷回転数（N=8,000rpm）時の誘起電圧定数に対し、最大トルク試験後の無負荷誘起電圧定数の低下率で行う。	EVモータへの実用化においては、モータ駆動による磁石の減磁が原因によるモータ特性の低下は問題となる。 従って、Dy 含有 Nd 焼結磁石に比べて保磁力が低い Dy フリーNd 系異方性ボンド磁石（MF）を活用したEVモータにおいて実用上減磁しないことを検証する。検証においては、無負荷誘起電圧定数を評価指標とした。
(2) 高トルク高出力EVモータ設計技術 (リラクタンストルクを活用したモータ設計)	・最大トルク 270Nm (最大電流 270Arms) ・最大出力 50kW (回転数 N=2,000rpm)	Dy フリーNd 系異方性ボンド磁石（MF）を活用したEVモータがモータの基本特性を満足する必要がある。 従って、最大トルクと最大出力についてその評価指標とした。
(3) 高効率EVモータの設計技術 (コントローラ駆動を考慮したモータ設計)	モータ効率 90%以上。 評価は、典型的な3つの動作時で評価した。 ①2,000rpm, トルク 200Nm 時 ②4,000rpm, トルク 25Nm 時 ③8,000rpm, トルク 50Nm 時	実際のEVモータの駆動においては、インバータによる制御が行われている。 モータのコイルを正弦波で励磁した場合に比べ、インバータ励磁した場合はコイル電流波形などの歪の影響から、モータ効率が異なることがわかっていて。そこで、我々は、コントローラ駆動を考慮したモータシミュレーションを実施することで、より高効率なEVモータの開発を目指すこととした。 評価においては、加速走行モード（2,000rpm、トルク 200Nm）、市街地走行モード（4,000rpm、トルク 25Nm）、高速走行モード（8,000rpm、トルク 50Nm）の3つのモードで行った。

2-3 目標の成果・達成度

(1) 減磁しないモータ設計技術

図2は、DyフリーNd系ボンド磁石の特徴を示す。DyフリーNd系異方性ボンド磁石をEVモータなど高出力モータに使用する際の課題は、Dy含有Nd焼結磁石に比べて、保磁力が低いため、減磁し易いという問題を設計で解消することである。

我々は、減磁対策としては、モータの磁石の極数を多極化することにより、磁石1極分にかかる逆磁界を低減することを基本設計とすることを考えてきた（図3）。

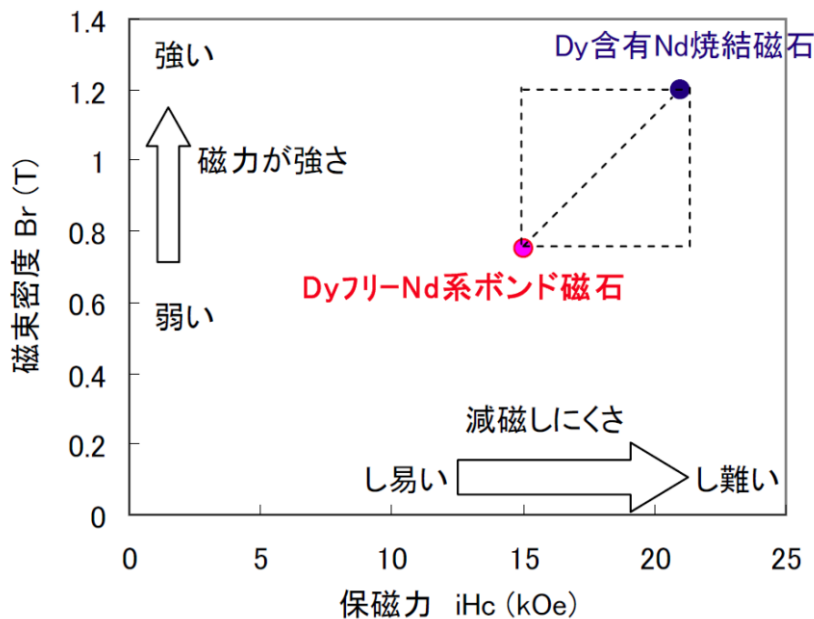


図2. Dy 含有 Nd 焼結磁石との比較による
Dy フリーNd 系異方性ボンド磁石の特徴

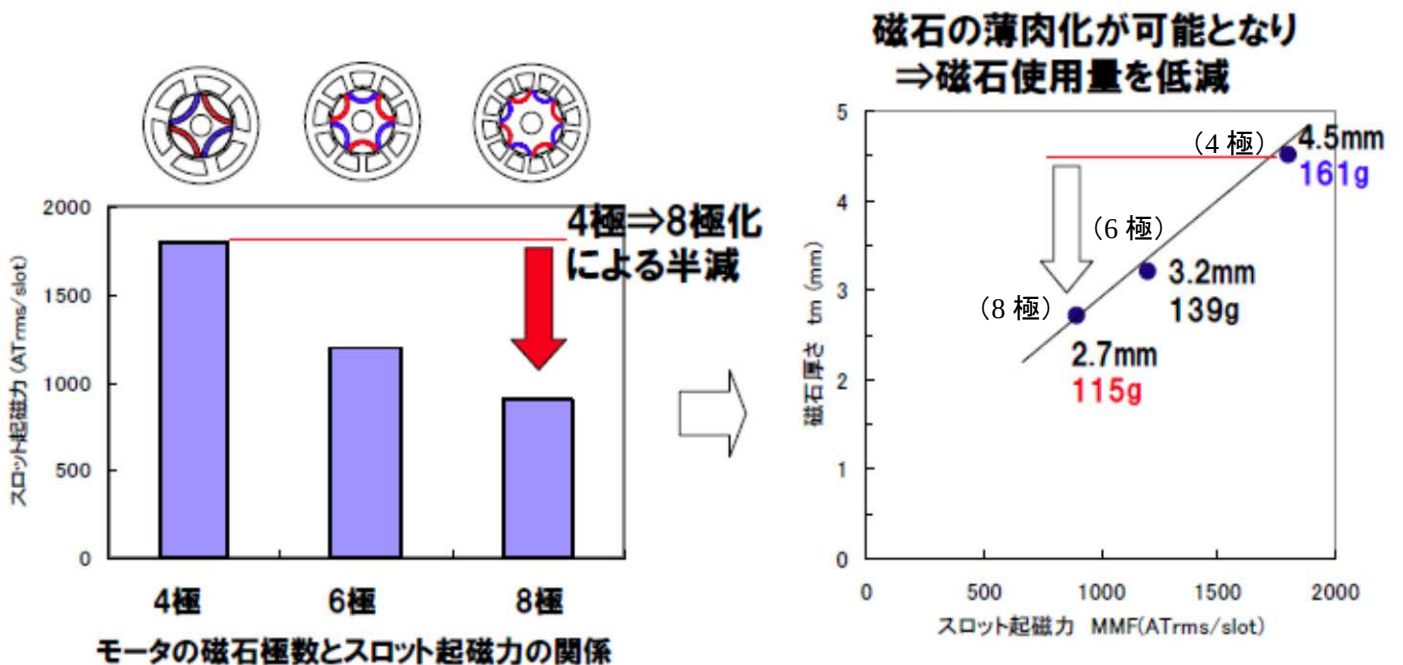


図3. 減磁対策の基本的考え方

しかし、今回の場合、磁石の極数を8極からさらに多極化しようとする、コントローラが対応できないということで、減磁対策についてはケイ素鋼板か

らなるロータに一体射出成形を行う工程で、Dy フリーNd 系異方性ボンド磁石の安定化処理（熱からし）を考案した（図4）。つまり、ロータに埋入されている磁石に掛かる温度と逆磁界（Hex）の大きさを把握することで、最大温度（例えば 150℃）で最大に電流が印加されている状態の磁石の動作点 D 点を想定しモータを設計した。一旦、温度 150℃で最大の電流が印加された磁石の動作点は、同磁石の 150℃の BH 曲線上の D 点となる。その後、電流がゼロになると、磁石の動作点は初期の BH 曲線上ではなく、リコイル線上を動き C' 点に移動する。その後、150℃の環境下においては、電流の大きさに応じて C' -D ラインを可逆的に動作する。その後、温度が室温（RT：Room Temperature）になった場合は、磁石の動作点は RT のリコイル線上の A' -B' で可逆的に動作する。従って、一度、磁石が最大温度かつ最大電流による最大逆磁界 Hex_{max} にさらされると、その後は、磁石の各温度のリコイル線に沿って動作する。つまり、このモータは、温度が RT から 150℃の範囲では、黄色の領域 A' -B' -D-C' 内で可逆的に動作することとなる。

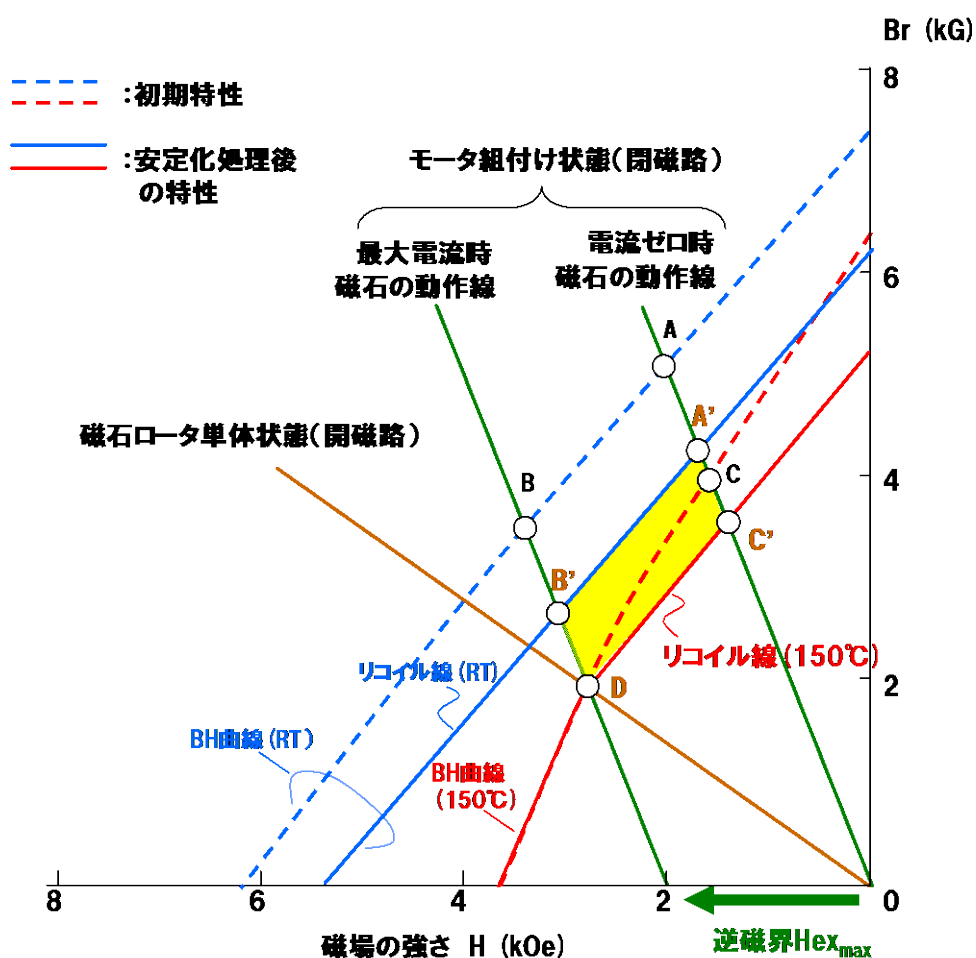


図4. Dy フリーNd 系異方性ボンド磁石の熱からしによる安定化

そこで、我々は、Dy フリーNd 系異方性ボンド磁石の初期の磁気特性から、この可逆的に安定な磁気特性を有する磁気特性に調性する安定化処理のプロセスを考案した（図5）。

図5は Dy フリーNd 系異方性磁粉を使用した磁石ロータの一体射出成形のプロセスを示す。ケイ素鋼板が積層されたロータに Dy フリーNd 系異方性磁粉からなるペレットが一体射出成形され、ボンド磁石となった後、高温で磁石ロータを磁場金型から取出すと、磁石ロータ単体の場合、開磁路構造となるため磁石のパーミアンス係数は低くなり、図4の点Dの動作点となる。これは、あたかも、モータ動作時の磁気回路（閉磁路構造）で 150℃、最大電流印加時の逆磁界 Hex_{max} が掛かった状態と、磁石の動作点としては等価な点である。

従って、保磁力が弱い Dy フリーNd 系異方性ボンド磁石の一体射出成形後に、適切な温度で、磁石ロータを開磁路状態にして取出すことにより、磁気特性の安定化処理を施すことができる。これにより、モータを組付けた初期状態から、その後、減磁することのない、磁石ロータを製作することが可能となる。

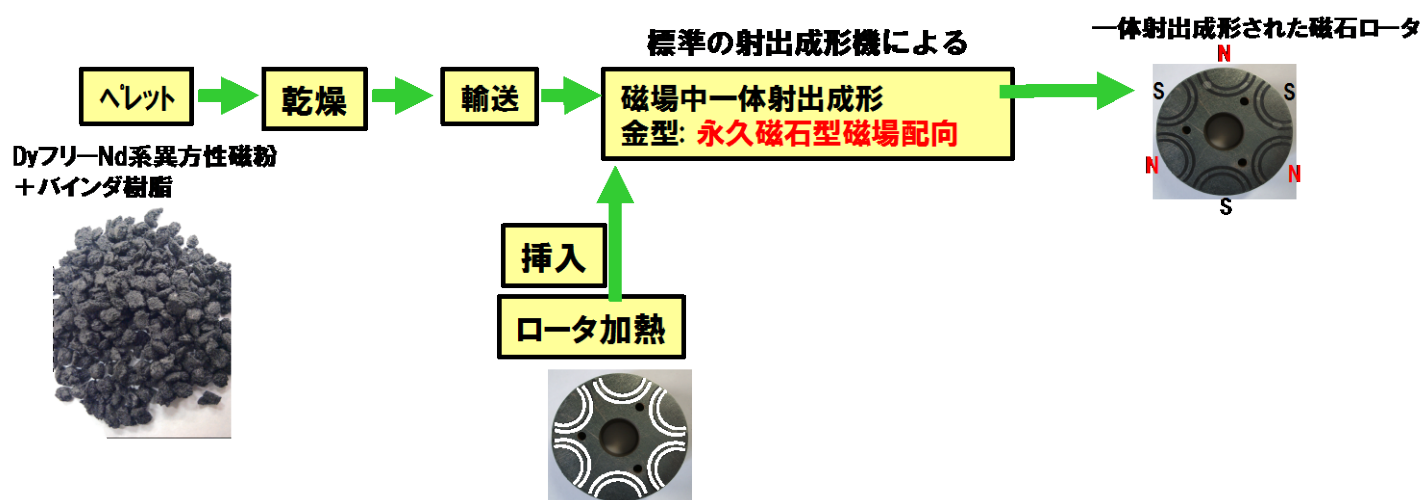


図5. Dy フリーNd 系異方性ボンドの一体射出成形中の安定化処理

以上の考え方に基づいて実際に試作したEVモータのDy フリーNd 系異方性ボンド磁石の減磁の有無を確認する。評価方法は、電流を印加せず最大回転数 8,000rpm 時の無負荷誘起電圧定数をトルク評価前と最大トルク評価試験を終えた後で測定し、その結果から判断する。測定結果を図6に示す。

これより、磁石の減磁は 0.3%であり、目標値である 5%以内を十分満足している。

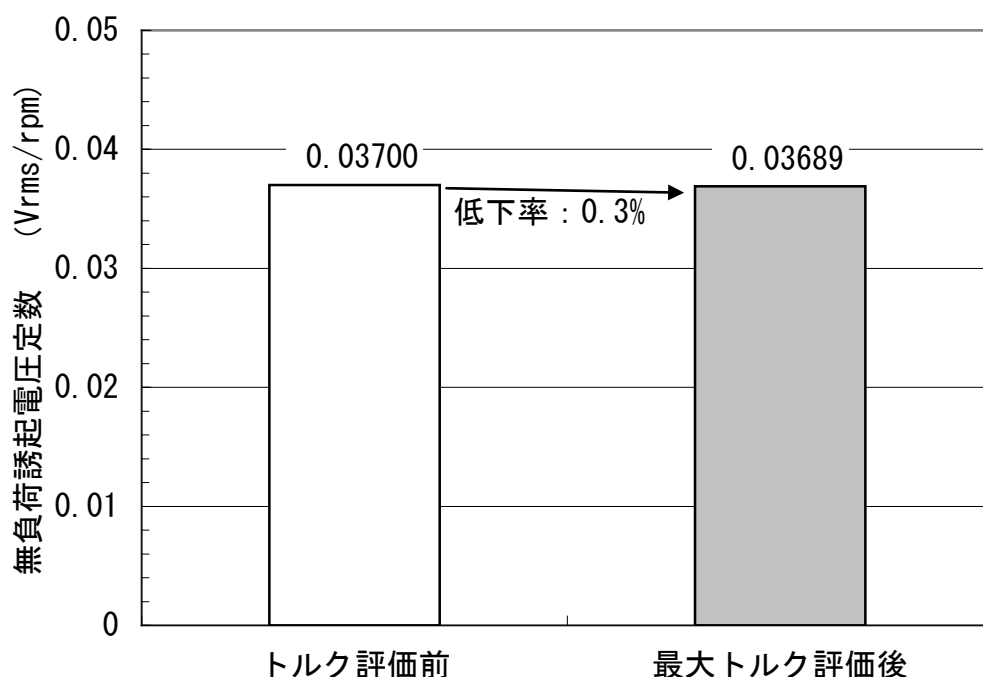


図6. 無負荷誘起電圧定数による磁石の減磁の有無

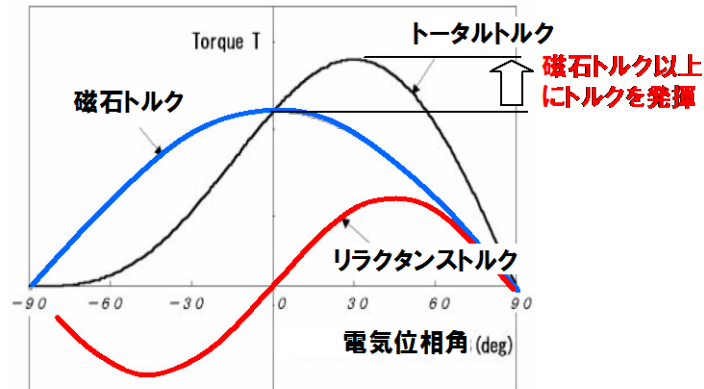
(2) 高トルク・高出力EVモータ設計技術

(リラクタンストルクを活用したモータ設計)

一方、DyフリーNd系異方性ボンド磁石の磁力の弱さに対する基本的方策は、磁石の力（磁石トルク）のみでモータのトルクを発揮するのではなく、ボンド磁石の形状自由度を活かすことでリラクタンストルクをいかに上手く発揮させるかということで、モータの基本形状の検討を行った。それでもトルクが不足する場合は、モータの軸長を長くすることでDy含有Nd焼結磁石モータと同等のモータ性能を発揮するように設計を行った。

図7は、リラクタンストルク発現の原理で、電気位相角を変えることでリラクタンストルクを発揮させることにより、磁石トルクの最大値よりも大きなトータルトルクを発揮させることができることを示している。

●リラクタンストルク活用によるトータルトルクの向上



$$T = P_n \left\{ \underbrace{\psi_a I_a \cos \beta}_{\text{磁石トルク}} + \underbrace{\frac{1}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta}_{\text{リラクタンストルク}} \right\} \quad (1)$$

P_n : 極対数
 ψ_a : 電機子鎖交磁束
 I_a : 電機子電流
 L_q : q軸インダクタンス
 L_d : d軸インダクタンス
 β : 電流位相角

図7. リラクタンストルク活用によるトータルトルクの向上

我々は、DyフリーNd系異方性ボンド磁石の形状自由度に着目し、形状などを工夫することでリラクタンストルクの向上について検討を行った。図8に示すように、リラクタンストルクを発揮する基本的方策は、磁石を1層配置から2層配置すること、さらに、コイル巻方式を集中巻方式から分布巻方式にすることで向上できることが明らかとなった。

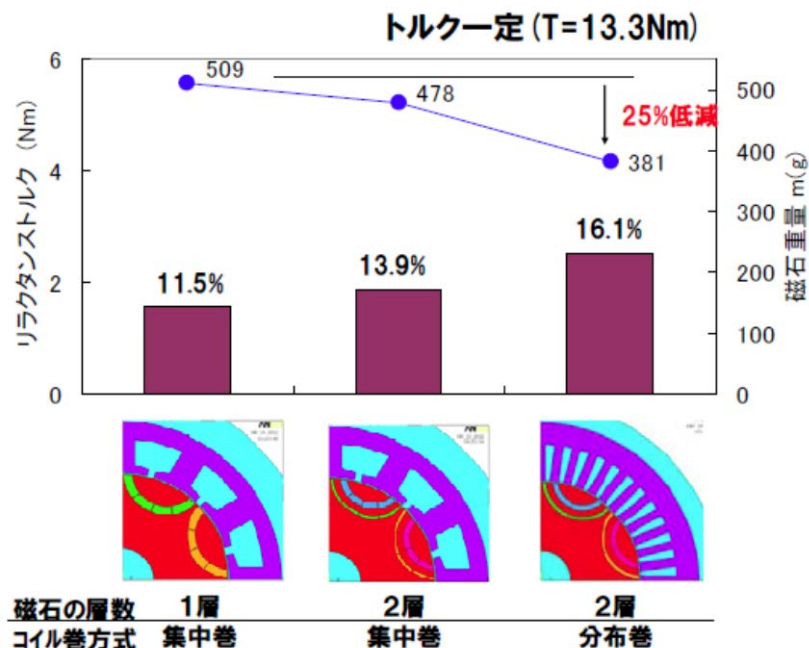


図8. リラクタンストルク向上の検討

以上の設計方針をベースに、E Vモータの仕様に対してDy含有Nd焼結磁石に対抗するDyフリーNd系ボンド磁石によるE Vモータの設計案を作成した(図9)。

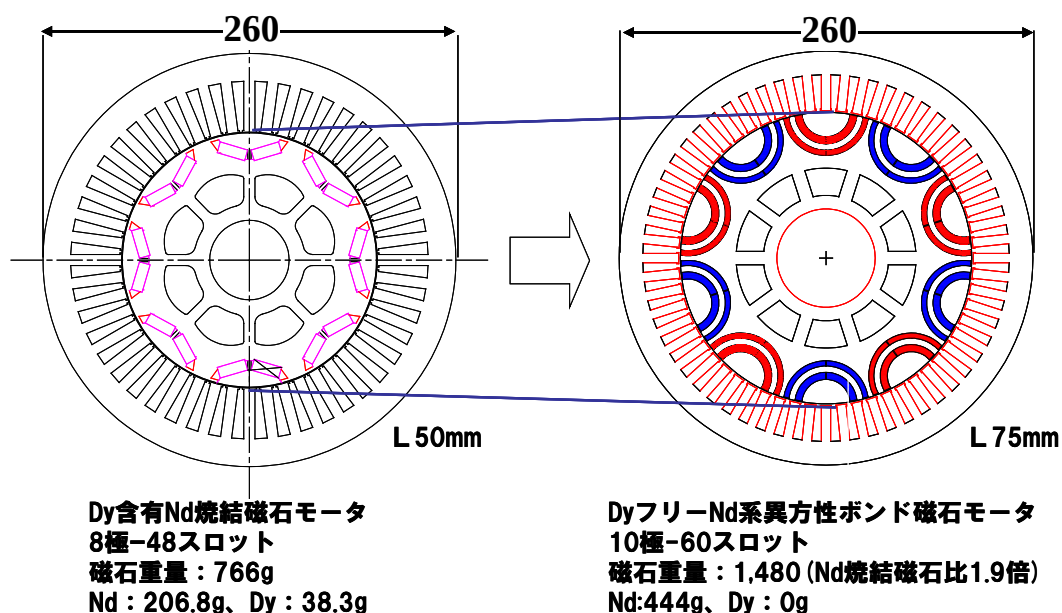
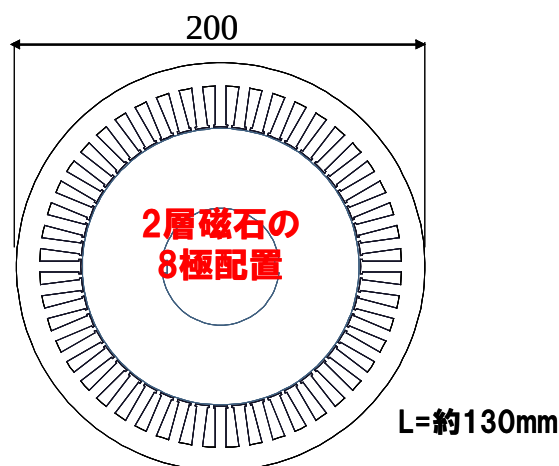


図9. Dy フリーNd 系異方性ボンド磁石E Vモータの設計案

上記の提案をベースに、実際に試作するE Vモータの概略を図10に示す。



DyフリーNd系異方性ボンド磁石モータ
 8極-48スロット
 磁石使用量：1,900g (Nd焼結磁石比約1.5倍)
 Nd:570g、Dy：0g

図10. 8極型 Dy フリーNd 系異方性ボンド磁石E Vモータ

試作評価したモータのトルク、出力特性を図 1 1 に示す。最大トルクは 280Nm（目標値 270Nm）、最大出力は 57.6kW（目標値 50kW 以上）であった。この結果は、いずれも目標値を満足したものであった。

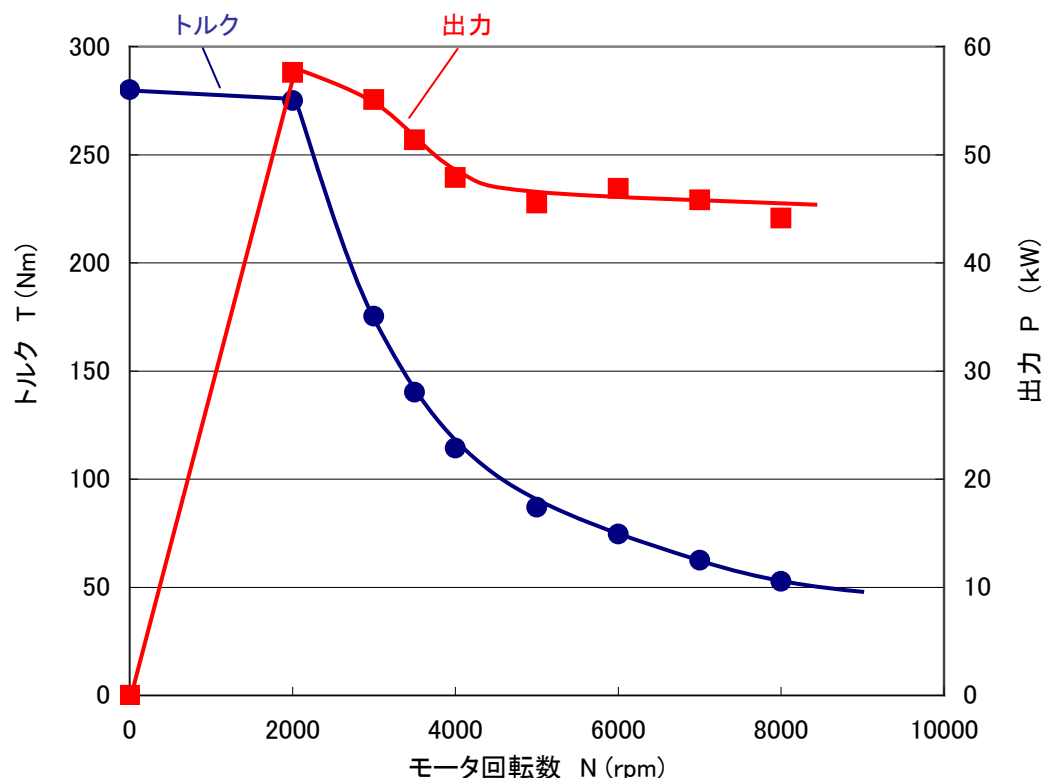


図 1 1. 試作した Dy フリーNd 系異方性ボンド磁石 EV モータの基本特性

(3) 高効率 EV モータの設計技術

(コントローラ駆動を考慮したモータ設計)

実用的な EV モータ設計においては、90%以上の効率を有する必要がある。これまでの磁界解析によるモータ特性のコンピュータシミュレーションにおいては、正弦波駆動によるものが主流であった。しかしながら、実際の駆動は PWM (Pulse Width Modulation) 制御を行っている (図 1 2 (A)、図 1 3)。そこで、我々は、PWM 励磁によるモータ効率への影響に注目した。特に、PWM 励磁時が磁石の渦電流損失に及ぼす影響に着目した。本磁界解析ができる磁界解析ソフトウェアを導入し検討を行った。

磁石ロータとして検討した磁石の材料特性を表 2 に示す。Nd 焼結磁石と Dy フリーNd 系異方性ボンド磁石の 2 種類である。基本周波数 50Hz 時、相間電圧 20V の条件で、励磁方法は図 1 4 に示す様に、PWM インバータ励磁の場合と正弦波励磁の場合の 2 種類で基礎的検討を行った。

結果を図 1 5、図 1 6 に示す。図 1 6 に示すモータの鉄損は、Nd 焼結磁石の

PWMインバータ励磁の時の値を 100%として、相対的に表示している。この結果から、電気伝導率が高い Nd 焼結磁石においては、磁石の渦電流損失が損失内大きな比率を占め、PWM励磁の場合では全体の 74%程度を占める。一方、電気伝導率が低い Dy フリーNd 系異方性ボンド磁石を使用した場合、磁石の渦電流損失は非常に小さくなるが、その場合でも正弦波励磁に比べてPWM励磁の場合は磁石の渦電流損失が2倍以上になっている。

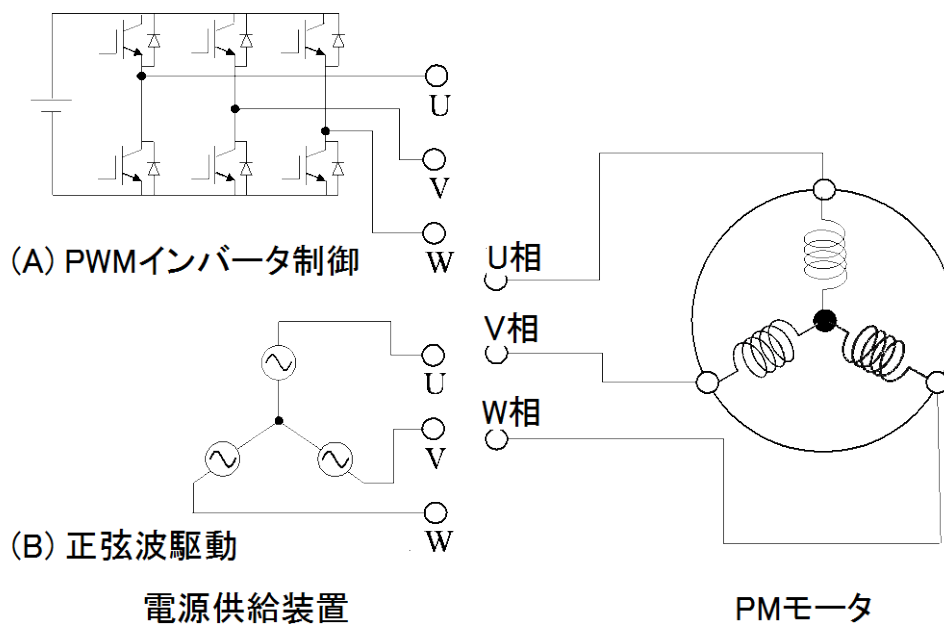


図 1 2. PM モータ駆動用電源供給装置のダイアグラム

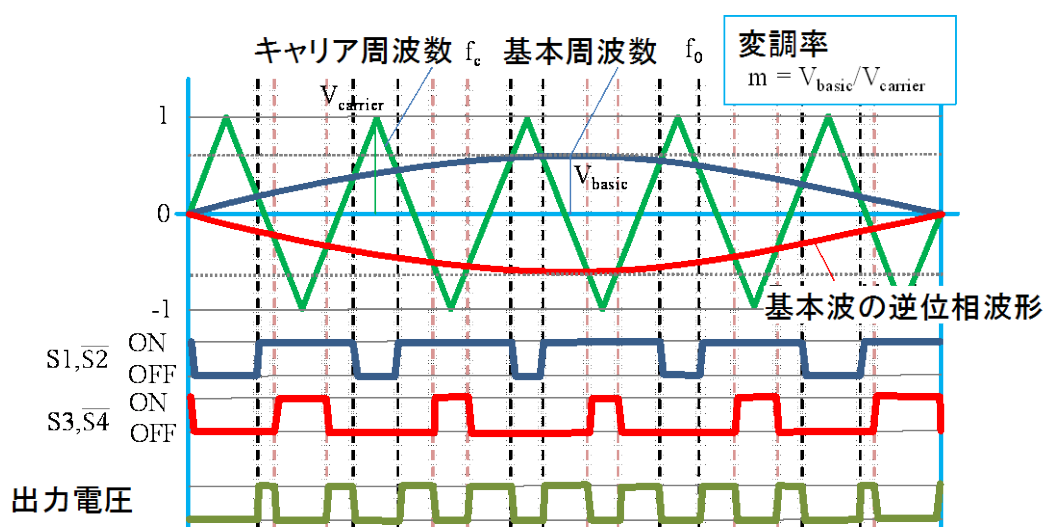


図 1 3. PM 制御の出力電圧

表2. 検討に使用した磁石の特性値

項目	Nd焼結磁石	DyフリーNd系 異方性ボンド磁石 (MAGFINE)
残留磁束密度 B_r (T)	1.28	0.8
保磁力 bH_c (A/m)	1.02×10^6	5.49×10^5
電気伝導率 σ (S/m)	6.25×10^5	7.69×10^3

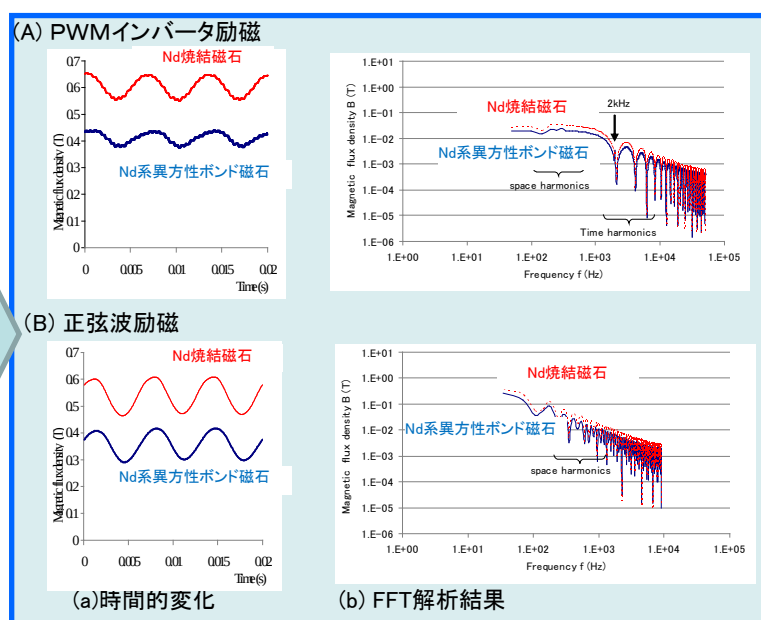
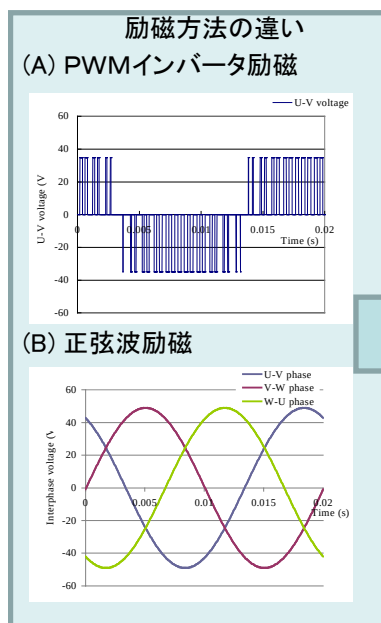


図14. 入力電圧波形 図15. 磁石中央部の磁束密度の時間変化とそのFFT解析結果

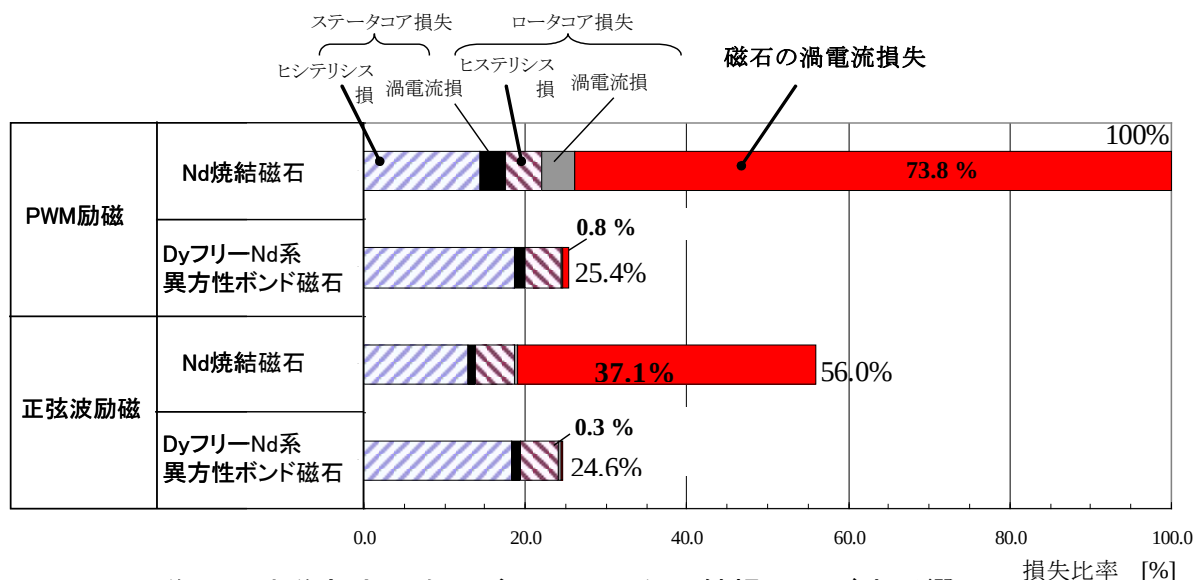


図 1 6 . 磁石と励磁方法の違いがPMモータの鉄損に及ぼす影響

以上、基礎的検討をベースにメーカーに協力いただき、図 1 0 (10 頁) のEVモータを試作し、モータ効率を典型的な3つの走行モードで計測評価した。評価ポイントは、加速走行モード (2,000rpm、トルク 200Nm)、市街地走行モード (4,000rpm、トルク 25Nm) および高速走行モード (8,000rpm、トルク 50Nm) である。

図 1 7 に示すように、加速走行モードで効率 90%を達成し、市街地走行モードおよび高速走行モードでは 88%とほぼ目標値の値を示した。モータメーカーからは、「今回試作した Dy フリーNd 系異方性ボンド磁石使用のEVモータは、量産実績 (50kW) のあるEVモータに対し、全車速領域において高い駆動力を示すことができたことから、標準的なEVモータとして使用可能と判断できる。」と評価を頂いた。

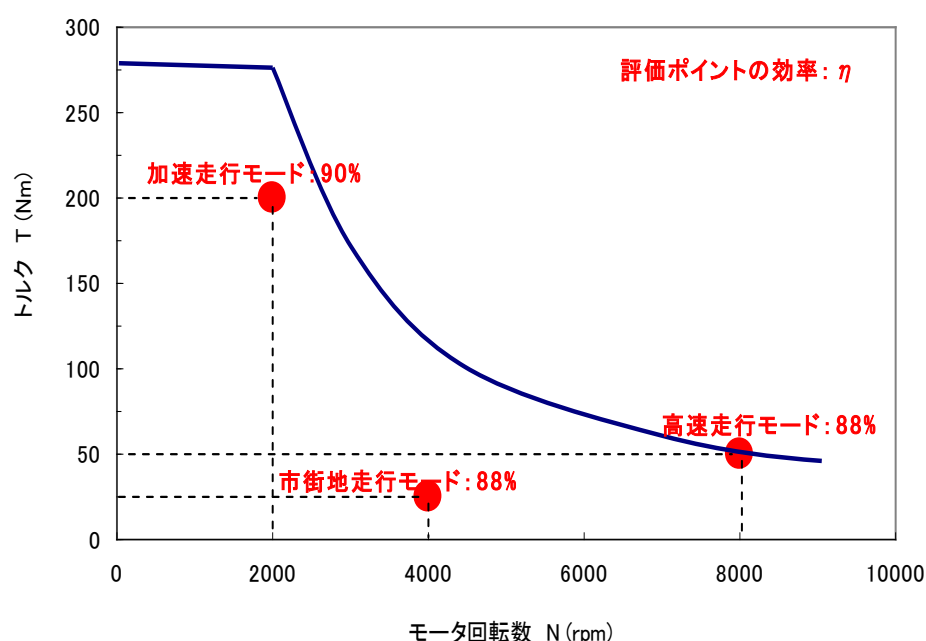


図 1 7 . 試作した Dy フリーNd 系異方性ボンド磁石EVモータの効率

表 3. 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
(1) 減磁しない モータ設計技術	① 無負荷誘起電圧定数の低下率 5%以内。 評価は、トルク試験前（電流を掛けない状態での）無負荷回転数（N=8,000rpm）時の誘起電圧定数に対し、最大トルク試験後の無負荷誘起電圧定数の低下率で行う。	① 無負荷誘起電圧定数の低下率 0.3%。 ② Dy 含有 Nd 焼結磁石に比べ保磁力の低い Dy フリー Nd 系異方性ボンド磁石の EV モータ設計の際に必要な磁石に掛かる起磁力低下の設計技術を明らかにできた。 ③ 磁石材料側から磁石ロータ成形のプロセスで材料を安定化するプロセスの開発に成功した。	達成
(2) 高トルク高出力 EV モータ設計技術 （リラクタンストルクを活用したモータ設計）	① 最大トルク 270Nm （最大電流 270Arms） ② 最大出力 50kW （回転数 N=2,000rpm）	① 最大トルクは 280Nm ② 最大出力は 57.6kW （回転数 N=2000rpm 時） ③ Dy 含有 Nd 焼結磁石に比べ残留磁束密度の低い Dy フリー Nd 異方性ボンド磁石の EV モータ設計において、ボンド磁石の形状自由度を活用し、リラクタンスを発揮させるための設計技術を明らかにできた。	達成
(3) 高効率 EV モータの設計技術 （コントローラ駆動を考慮したモータ設計）	モータ効率 90%以上。 評価は、典型的な 3 つも動作時で評価した。 ① 加速走行モード：2,000rpm, トルク 200Nm 時 ② 市街地走行モード：4,000rpm, トルク 25Nm 時 ③ 高速走行モード：8,000rpm, トルク 50Nm 時	EV モータ効率は以下の結果であり、ほぼ目標を達成することができた。 ① 加速走行モード：90% ② 市街地走行モード：88% ③ 高速走行モード：88% モータメーカーから標準的な EV モータとして使用可能と判断できると評価いただいた。	達成

3. 事業化、波及効果について

3-1 事業化の見通し

本事業の成果により、DyフリーNd系ボンド磁石を活用した大出力駆動用モータ(50kW級以上)での実用領域での可能性が明らかとなった。現在、平成30年度(2018年度)の実用化・量産化を目指して、2社のモータメーカーと共同開発を推進中である。また、本技術成果を活用した他メーカーへの共同開発の展開を計画しており、EV/HEV用途向け当社DyフリーNd系異方性ボンド磁石の生産予測を表4に示す。

表4. 当社 Dy フリーNd 系異方性ボンド磁石マグファインのEV/HEV用との生産予測 (ton/年)

メーカー	平成26年度 (2014年度)	平成27年度 (2015年度)	平成28年度 (2016年度)	平成29年度 (2017年度)	平成30年度 (2018年度)	平成31年度 (2019年度)	平成32年度 (2020年度)
①A社	共同開発開始 ◆				→ 10	50	300
②B社	共同開発開始 ◆					→ 30	250
③C社		共同開発開始(予定) ◆				→ 50	200
④D社		共同開発開始(予定) ◆					→ 50
⑤その他		共同開発開始(予定) ◆				→ 20	200
合計	0	0	0	0	10	150	1,000

3-2 波及効果

経済効果としては、2020年EV・HEVモータ用磁石としてDyフリーNd系ボンド磁石の年間磁粉産を約1,000t(80万台、1,300g/台)、売上高約50億円/年、波及効果としては、約100億円を予想している。

※普及効果は、産業関連分析における逆行列係数の列和(生産波及力)における非鉄金属分野を使用。列和:2.1369

4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

4-1 研究開発計画

表5. 研究開発計画

実施項目／年度	平成 25 年度			
	5 — 6 月	7 — 9 月	10 — 12 月	1 — 3 月
(1) 減磁しない モータ設計技術	対減磁のモータ設計技術検討		射出成形プロセスでの安定化処理技術開発	
(2) 高トルク高出力EV モータ設計技術 (リラクタンストルクを活用 したモータ設計)	リラクタンス発揮モータ設計技術検討			
(3) 高効率EVモータの 設計技術 (コントローラ駆動を考慮し たモータ設計)			PWM 励磁モータ 設計技術開発	
(4) EVモータの試作検 証 ※モータメーカと協業			試作用EVモータ設計	
				試作・検証

4-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本実用化技術開発・研究は、平成 24 年度の二次公募による選定審査手続きを経て、経済産業省殿からの事業採択を受けて交付決定書に基づいて実施した。

また、技術開発・研究の実施に当たっては、開発推進を統括するためのリーダー（磁石事業室室長）を設置し、その下に今回の鍵となる設計機能グループと、実用化に向けた技術開発を迅速に進める目的で生産技術機能グループを設置した。

さらに、経済産業省殿とのスムーズな情報共有、連絡体制を実現する目的で、本事業の担当窓口を設置した。尚、EVモータの実用的な設計および評価においては、モーターメーカーに協力をいただき推進した。

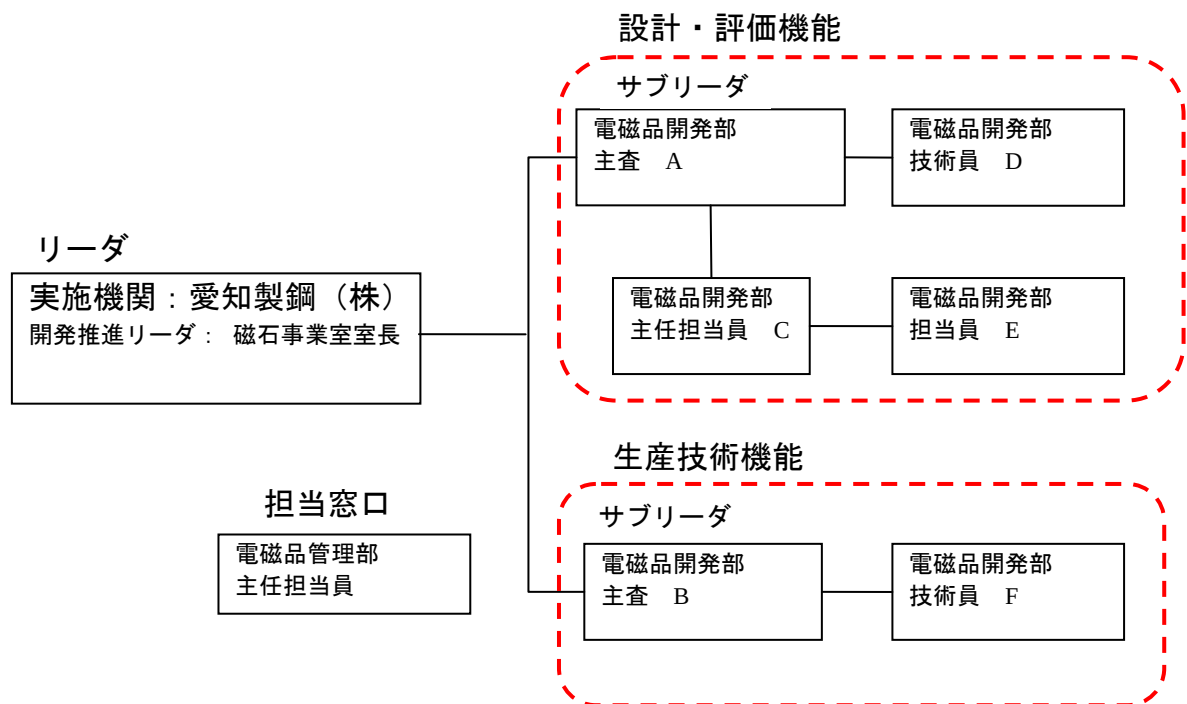


図 18. 研究開発実施体制

レアメタル・レアアース等の
代替材料・高純度化技術開発
プロジェクト

事後評価用資料（各論）

平成２６年１０月１７日

（２）マツダ株式会社

目 次

1. 事業の目的・政策的位置付け.....	2
1－1 事業の目的	
2. 成果、目標の達成度.....	2
2－1 全体目標	
2－2 個別目標	
2－3 目標の成果・達成度	
3. 事業化、波及効果.....	7
3－1 事業化の見通し	
3－2 波及効果	
4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	8
4－1 研究開発計画	
4－2 研究開発実施者の実施体制・運営	

1. 事業の目的・政策的位置付け

1－1 事業目的

電気自動車やハイブリッド電気自動車に搭載される駆動モータに用いられるネオジム磁石は、他の用途に比べ、優れた耐熱性が要求される。この磁石の耐熱性を向上するために、現状では、5～10％程度のジスプロシウム（Dy）が添加されている。ジスプロシウムは一国依存度が高いレアメタルであり、この使用量を削減することが、重要な課題になっている。本事業の目的は、現在、磁石メーカー等で開発が進められている省ジスプロシウム型ネオジム磁石（粒界拡散磁石）の自動車駆動モータへの適合性を検証し、今後のジスプロシウム使用量の削減を図ることである。

2. 成果、目標の達成度

2－1 全体目標

自動車駆動モータには主として磁石式三相交流同期モータが用いられており、このモータには、優れた特性を有するネオジム磁石が組み込まれている。このネオジム磁石に添加するジスプロシウム量を削減する目的で、磁石メーカー等において粒界拡散磁石が開発されている。本事業では、従来型磁石に比べて50%以上ジスプロシウム添加量の少ない粒界拡散磁石が、自動車駆動モータに適用可能であることを検証することを目標として設定した。

2－2 個別目標

個別要素技術の目標設定

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	設定理由・根拠等
(1) 磁石内部の磁気特性分布の明確化	粒界拡散磁石の保磁力分布を定量的に測定する。	粒界拡散磁石は、従来の磁石とは異なり、保磁力が一様ではなく分布を有するので、この分布を把握する必要がある。
(2) 電磁界解析による磁石減磁に伴うトルク低下の明確化	粒界拡散磁石が従来型磁石と同等以上の耐熱性を有することを確認することを確認する。	自動車駆動モータは、他の用途のモータに比べて、高温で使用される。従って、磁石の耐熱性を確保することが重要な課題となる。
(3) 粒界拡散磁石の化学成分の確認	粒界拡散磁石のジスプロシウム削減率：50%以上	磁石メーカー等が公表している情報を参考にして削減率の目標値を設定した。

（１）磁石内部の磁気特性分布の明確化

ネオジム磁石のジスプロシウム添加量削減を目的として、磁石メーカー等で開発されている粒界拡散磁石は、その製法に起因して、表面と内部で保磁力等の磁気特性が異なるという特徴を有する。保磁力とは、逆向きの磁場に対する磁石の耐性を示す指標であり、高い温度で使用される磁石ほど、高い保磁力が要求される。

従って、粒界拡散磁石の自動車駆動モータへの適用可否を判断するためには、磁石内部の保磁力分布を定量的に把握した上で、必要な耐熱性を備えているかを確認する必要がある。

（２）電磁界解析による磁石減磁に伴うトルク低下の明確化

モータに適用する磁石の耐熱性が十分ではない場合は、磁石の磁力が低下し、モータのトルクが低下するという問題が生じる。従って、モータが高温になった時の磁石磁力低下に起因するトルク低下の程度を、従来型磁石と粒界拡散磁石を適用した両場合について比較確認する必要がある。確認方法は、効率的に行うために、電磁界解析（CAE）により行うことにした。

（３）粒界拡散磁石の化学成分の確認

自動車駆動モータ用として、必要な耐熱性を有していることが確認された粒界拡散磁石及び同等の耐熱性を有する従来型磁石のジスプロシウム含有量を比較する。磁石メーカー等が公表している情報に基づき、粒界拡散磁石のジスプロシウム含有量は、従来型磁石の 50%以下になると推定した。

２－３ 目標の成果・達成度

（１）磁石内部の磁気特性分布の明確化

粒界拡散磁石の保磁力分布を明らかにするために、試作した粒界拡散磁石の任意の位置から、一辺 1mm の立方体試験片を切り出した。この試験片の保磁力を図 1 に示す BH トレーサを使用して測定した。



図1 BH トレーサの外観写真

粒界拡散磁石の保磁力測定結果の一例を図2に示す。保磁力は、表面近傍ほど高い値を示している。粒界拡散磁石は、ジスプロシウム添加量が比較的少ないネオジム磁石を焼結により製作し、その後、ジスプロシウムやテルビウム等の重希土類元素を表面から拡散して作られている。表面の保磁力が高い理由は、この製法に起因し、表面の重希土類元素濃度が高くなっているためと考えられる。

上述の粒界拡散磁石と比較するために、略同等の保磁力を有する従来型磁石を試作して、内部の保磁力分布を計測した結果、全ての位置で一様な保磁力を示した。

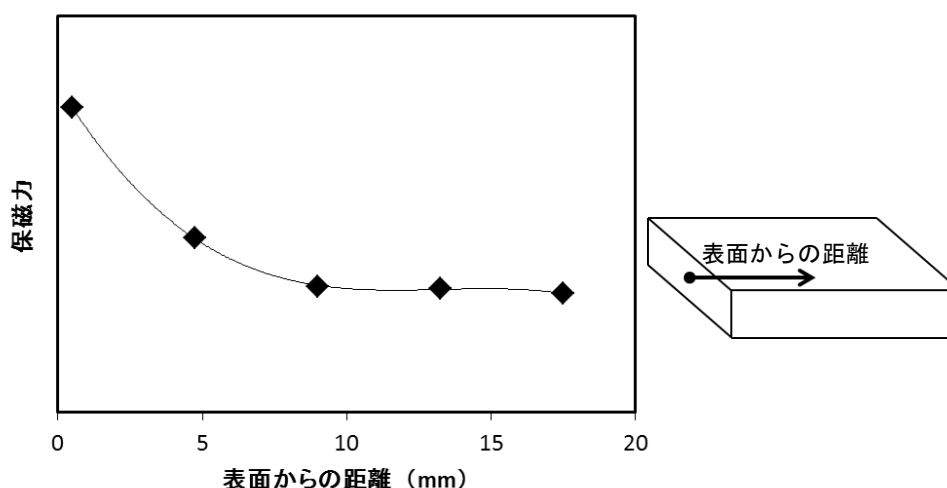


図2 粒界拡散磁石の保磁力分布測定例

（２）電磁界解析による磁石減磁に伴うトルク低下の明確化

自動車駆動モータ用途を想定して、埋め込み磁石式三相交流同期モータの解析モデル（図３）を作成した。解析モデルの磁石の仕様は、粒界拡散磁石及び従来型磁石の２種類とし、これらの保磁力の値は、前述の実測値に基づき設定した。

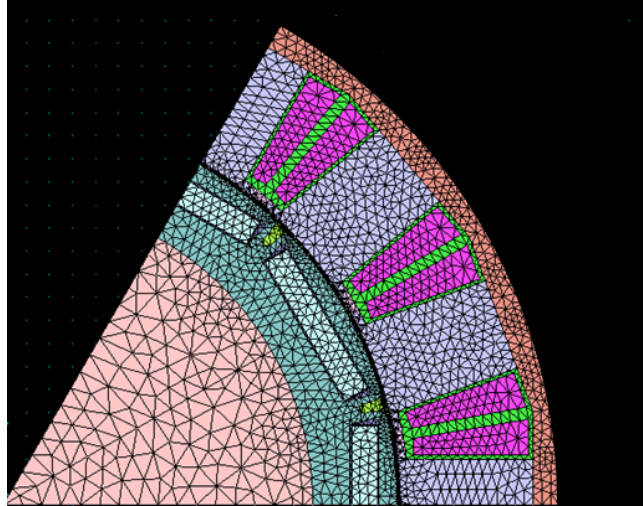


図３ モータの解析モデル

この解析モデルを用いて、電磁界計算解析により、モータを高温駆動させた場合の磁石の減磁（磁力の低下）に伴う、モータ性能の変化（トルク低下）を以下の手順で計算した。

- ①室温（25℃）におけるモータトルク計算
- ②高温（100、150、200℃）における運転による磁石の減磁量（磁力の低下量）計算
- ③各高温運転を経た後の状態で、室温におけるモータトルク計算

以上の結果に基づき、高温運転後のトルク変化率を算出した。算出式を以下に示す。

$$\text{高温運転後のトルク変化率（\%）} = (\text{③トルク値} - \text{①トルク値}) / \text{①トルク値} \times 100$$

トルク変化率の計算結果を図４に示す。高温運転時の磁石温度が100℃及び150℃の場合では、両磁石共に、高温運転後のトルク低下は認められない。磁石温度が200℃の場合、両磁石共に、大幅にトルクが低下した。その低下率は、従来型磁石よりも、粒界拡散磁石を組み込んだモータの方が若干小さい。従って、今回評価した粒界拡散磁石は、比較した従来型磁石と同等以上の耐熱性を有していると言える。

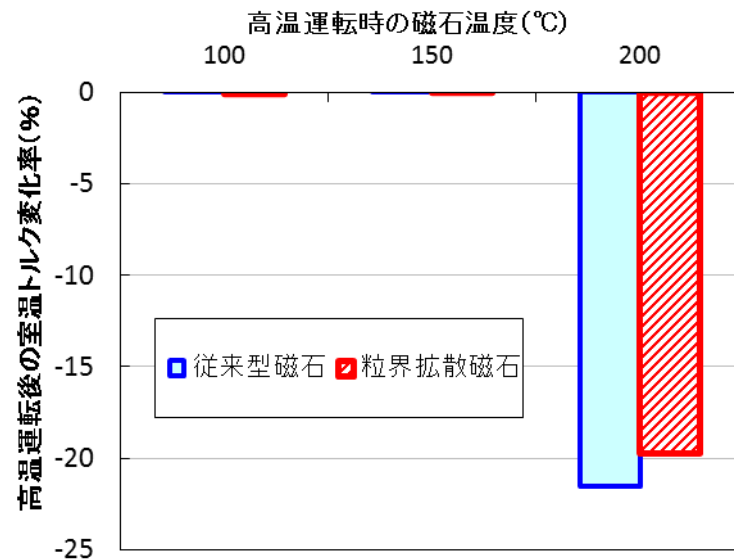


図 4 高温運転後の室温モータトルク変化率

(3) 粒界拡散磁石の化学成分の確認

上述の粒界拡散磁石及び従来型磁石の化学成分を ICP 発光分光分析法により分析した。ジスプロシウム含有率は、前者は 2.3mass%、後者は 6.9mass%であった。粒界拡散磁石のジスプロシウム含有量は、従来型磁石よりも 67%少ない。従って、今回評価したモータモデルにおいては、従来型磁石から粒界拡散磁石に置換することにより、ジスプロシウムの使用量を 67%削減することが可能であると言える。

表 1. 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
(1) 磁石内部の磁気特性分布の明確化	粒界拡散磁石の保磁力分布を定量的に測定する。	磁石の任意の位置から試験片（一辺 1mm 立方体）を切り出し、BH トレーサを用いて、保磁力を計測することにより、保磁力分布を明確にすることができた。	達成
(2) 電磁界解析による磁石減磁に伴う	粒界拡散磁石が従来型磁石と同等以上の耐熱性を有することを確認することを確認	電磁界解析によりモータを高温下で駆動した際の磁石減磁に起因したトル	達成

トルク低下の 明確化	認する。	ク低下量を計算した。粒 界拡散磁石と従来磁石を 適用した場合のトルク低 下量は同等であることを 確認した。	
(3) 粒界拡 散磁石の化学 成分の確認	粒界拡散磁石のジスプロシ ウム削減率：50%以上	同等の耐熱性を示した粒 界拡散磁石と従来型磁石 のジスプロシウム含有量 を分析した結果、前者は 後者に比べて 67%少なか った。	達成

3. 事業化、波及効果について

3-1 事業化の見通し

本事業において得られた成果と知見は、ハイブリッド電気自動車や電気自動車の研究開発に、基盤技術として織り込む予定である。これら電動車両の事業化については、世界各国の燃費規制動向等に鑑み、適切に判断して行く。

3-2 波及効果

本事業により、ジスプロシウム含有量が従来の磁石に比べ大幅に少ない粒界拡散磁石が、自動車駆動モータ用として適用可能であることを確認することができた。従って、駆動モータを搭載した自動車を生産する際に、粒界拡散磁石を使用することにより、ジスプロシウムの使用量を大幅に削減することが可能になる。

4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

4-1 研究開発計画

本事業は表1に示すように平成25年度の1年で実施した。

表1. 研究開発計画

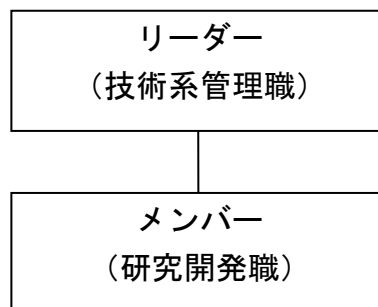
実施項目	平成25年度 4月	7月	10月	1月
要素技術1 磁石内部の磁気特性 分布の明確化		測定方法の検討	磁石の試作	測定
要素技術2 電磁界解析による磁 石減磁に伴うトルク 低下の明確化			モデル作成/解析方法検討	解析
要素技術3 粒界拡散磁石の化学 成分の確認				分析

4-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、マツダ株式会社が経済産業省からの補助を受けて実施した。

また、研究開発は、図1に示す体制で行った。

図1. 研究開発実施体制



レアメタル・レアアース等の
代替材料・高純度化技術開発
プロジェクト

事後評価用資料（各論）

平成２６年１０月１７日

（３）ヤマハ発動機株式会社

目 次

1. 事業の目的・政策的位置付け.....	2
1－1 事業の目的	
2. 研究開発目標.....	3
2－1 全体目標	
2－2 個別目標	
2－3 目標の成果・達成度	
3. 事業化、波及効果.....	10
3－1 事業化の見通し	
3－2 波及効果	
4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	12
4－1 研究開発計画	
4－2 研究開発実施者の実施体制・運営	

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1 事業目的

四輪の排ガス規制の後を追うように、二輪車の排ガス規制が強化されている。二輪車の排ガス規制の動向を各国から発表される情報をもとに予想すると図1のようになり、2016年には全世界でEU3以上の規制が導入される見込みである。更に、2016年以降に適用されるEU4以上の規制では耐久後の劣化触媒においても排出ガス規制が著しく強化される予定である。（図2、表1）

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
日本	2次(≒EU3)						EU4				EU5
EU	EU3						EU4				EU5
台湾	5期(≒EU3)						EU4				EU5
中国	3期				EU3			EU4			
インド	Bharat3				Bharat4						
IDN	EU2					EU3					
VNM	EU2							EU3			
タイ	EU3						EU4				
ブラジル	EU3						EU4				

図1 二輪車排ガス規制動向（予測含む）

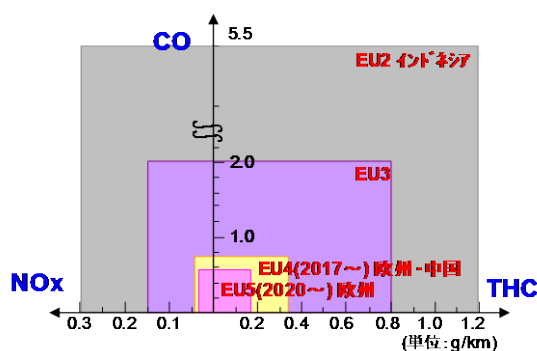


図2 排出ガス規制値

表1 距離耐久規制と担体サイズ

規制	コールドスタート	耐久	担体サイズ
EU2	無	無	-
EU3	有	5,000km	1
EU4	有	20,000km	2.0倍
EU5	有	30,000km	3.0倍

図1に示したように2016年には世界のほとんどの地域でEU3以上の規制になることが見込まれる。2020年時点の規制に対応した二輪車を生産するために必要な触媒数量は急増し、レアアース・レアメタルの使用量が急増する。

現状技術のまま2020年時点でEU4、EU5相当の規制に対応する場合に必要なレアアース・レアメタル量は表2のように推定されている。（2012年時点で使用していた触媒の成分比率を元に算出）

表2 レアメタル・レアアース必要量試算結果

	2020年時点の使用量 (t/年)
CeO ₂	54
ZrO ₂	72
La ₂ O ₃	7.2
Nd ₂ O ₃	10.8
Pt	3.6
Pd	3.6
Rh	2.2
合計	153.4

本事業では、レアアース・レアメタルの使用量を削減するための技術開発を行い、レアアース・レアメタルの価格変動リスクや調達リスクの回避を目指している。

2. 成果、目標の達成度

2-1 全体目標

排出ガス浄化触媒は、メタル担体に数 $10\mu\text{m}$ のウォッシュコート（触媒膜）を塗布したものであり、排出ガスはこのメタル担体を流通し浄化される。ウォッシュコートとは、浄化成分材料の触媒粉末を粘性のあるスラリーに調整し、それを塗布・焼成して成形したものを指す。触媒粉末は、セリウム・ジルコニウム等のレアアースを主成分とする化合物（助触媒）に、白金・パラジウム・ロジウムのレアメタル（浄化活性成分）を分散・固定した材料である。（図3）

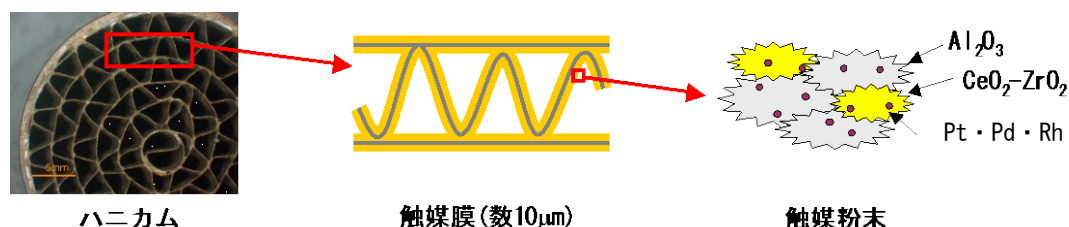


図3 触媒構造の模式図

触媒の機能を向上させ、レアアース・レアメタルの使用量を削減するには、ウォッシュコートおよび、それを構成する触媒材料の高機能化・最適化が必須となる。（図4）

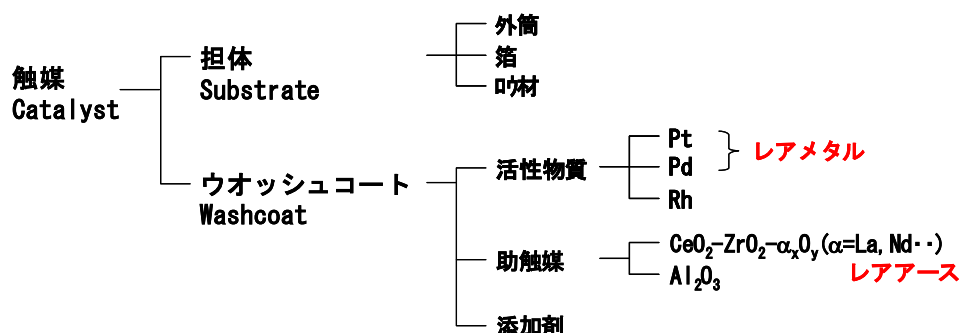


図4 触媒を構成する因子

EU4、EU5相当の規制対応するための開発目標として、レアアース・レアメタル使用量を2012年比で70%低減（使用量107.4t/年削減）することを目標とした。本事業では、まずEU3相当の規制に対応する触媒開発を目的として、スラリー塗布装置および高性能スラリー製造装置などを導入し、「スラリーの分散安定化」、「レアメタル高濃度化」および「ウォッシュコート構造最適化」のための技術開発を行った。

2-2 個別目標

レアアース・レアメタル使用量を削減するための要素技術開発の目標値を表3にまとめた。

表3 個別要素技術の目標設定

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	設定理由・根拠等
1. 高性能スラリー製造技術開発		
スラリー 攪拌技術	①スラリー攪拌後の固形分が25%に達するまでの時間15分以下 ②助触媒粉末のゼータ電位制御によるレアメタル吸着率100%	従来工程では、助触媒粉末がタンクの底に沈んでいたため、仕込みの固形分率に達するまでの時間を設定。また、従来の加工条件では助触媒粉末へのレアメタル吸着率が0%であったため、吸着率の目標値を設定。
スラリー 粉碎技術	目標の粒度分布に達するまでの処理時間10分以下	従来工程では、ウォッシュコートの密着性を確保できる粒度分布調整に要する時間が30分以上かかっていたため、加工時間短縮のために目標と10分に設定。
長期安定性	遠心分離(1500rpm、50min)で固液の分離が生じないこと	従来工程で製造したスラリーは1ヶ月程度の保管で分離するため、長期保管3ヶ月に相当する目標値を設定。
2. ウォッシュコート塗布技術		
膜構造の 最適化	下層 Pt 層／上層 Rh 層の2層構造化	排気ガス中のNOx増加への対応および、規制強化に伴う耐久後の性能保証の必要性から、Pt 層と Rh 層を分離し、NOx 浄化能力の高い Rh 層を上層にした2層構造化にする必要がある。
3. 性能評価技術		
台上劣化試験	レアアース・レアメタル使用量を削減した触媒において、925℃×5hの熱劣化後の浄化性能が現行品同等以上	EU3 用触媒に要求される耐久距離5000kmに対して、2倍の安全率の10000kmの劣化条件を設定。

2-3 目標の成果・達成度

2-3-1 高性能スラリー製造技術開発

2-3-1-1 スラリー攪拌技術

従来工程では、下記の二点の課題があるため、助触媒上に固定できなかったレアメタルを乾燥・焼成工程で助触媒上に分散・吸着させる必要があった。

- ①水に助触媒を攪拌したときの助触媒が攪拌槽の底に溜り、分散状態が均一にならないため、助触媒への貴金属の分散・吸着が均一にならなかった。
- ②スラリー中の助触媒のゼータ電位とレアメタル錯体の電位ともに正であったため、投入したレアメタル錯体を助触媒状に分散・吸着できなかった。

一般的に、攪拌効率の高い装置で水と固体を攪拌すると、攪拌後に採取したスラリー中に含まれる固形分割合が短時間で配合どおりの値に達することが知られている。本事業では、攪拌実験の結果から、効率の高い攪拌槽と攪拌羽の形状選定を行った。選定した攪拌装置を用いて、攪拌後のスラリー中の固形分測定を行い、粉末配合時の固形分に到達するまでの攪拌時間を調査した。表4に用いたスラリーの配合を示す。また、攪拌実験時の配合から求めた固形分と攪拌実験時の実測値を表5に示す。今回導入した攪拌装置は、従来品に比べて短時間で配合時の固形分に達することが確認できた。この攪拌装置を用いて、本事業のスラリー開発を実施した。

表4 攪拌試験で用いたスラリーの配合

助触媒	配合（重量：kg）			総重量 (kg)	目標固形分 (%)
	イオン交換水	粉末	硝酸		
アルミナ-セリア-ジルコニア	52.5	17.5	2.00	70	25

表5 攪拌処理時間と固形分調査結果

	攪拌時間	仕込み時の固形分値に対する 攪拌後の固形分の割合
従来装置	60min	94%
今回導入装置	10min	100%

（仕込み時の固形分値に対する攪拌後の固形分の割合の目標値 95%以上）

次に、水中に助触媒を均一に分散した状態で、レアメタル錯体を投入し、助触媒表面に分散・吸着させる必要がある。助触媒上へのレアメタルの分散・吸着のしやすさを判断するために水中に分散された助触媒表面のゼータ電位測定装置を導入した。図5に本事業で用いたスラリーのpHと助触媒のゼータ電位の関係を示す。

本事業で使用しているRhの電荷状態はスラリーのpHによって変化し、pH3 以下では正、4.5以上では負の電荷を持つ。それに対して助触媒はpH7以下ではゼータ電位が正になっていることがわかった。従来品は助触媒のゼータ電位とメタル錯体の電荷がともに正になるpH1.5~2.5の範囲でレアメタルの分散・吸着を行っているため吸着率が0%であった。それに対して、開発品はレアメタルの電荷が負、かつ助触媒のゼータ電位が正の値で安定する領域（pH4.5~5.5）でレアメタルの分散・吸着を行った結果、100%吸着できることがわかった。以上の攪拌実験とゼータ電位測定の結果から、乾燥・焼成無しに助触媒へのレアメタルの分散・吸着を行えることが確認できた。

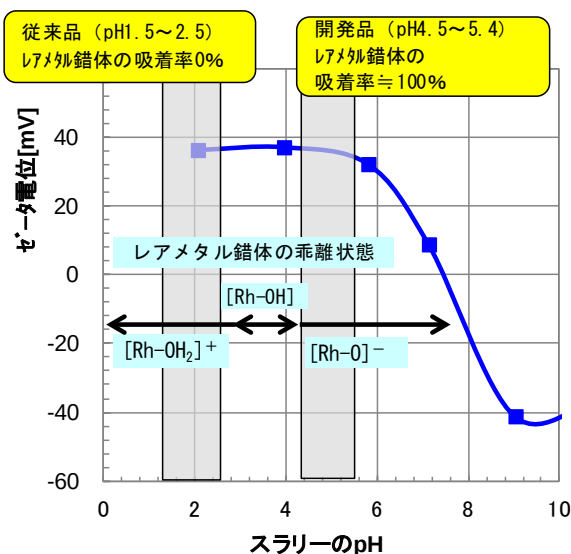


図5 スラリーpHと助触媒ゼータ電位の関係

2-3-1-2 スラリー粉砕技術

スラリーをハニカムに塗布したウォッシュコートに要求される性能として、膜の密着性がある。この密着性に影響を及ぼす要因のひとつとして、スラリー中の助触媒粒径が挙げられる。従来工程では所定の粒度分布にするために、30分以上の処理時間を要していた。本事業では粉砕に用いるミルの構造変更と粉砕条件の最適化により、処理時間の短縮を行った。粉砕装置の処理時間を変えたときの粉砕後の助触媒粒径を調べた結果を図6に示す。処理時間の増加に伴って粒径が小さくなることがわかった。また、処理時間3分を越えると、粒径変化の割合が小さくなることがわかった。

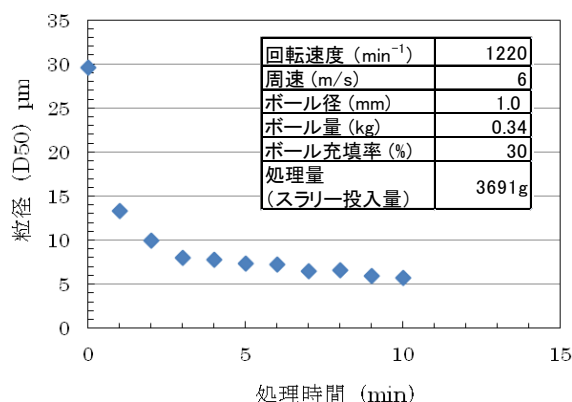


図6 粉砕装置の処理時間と粒径D50の関係

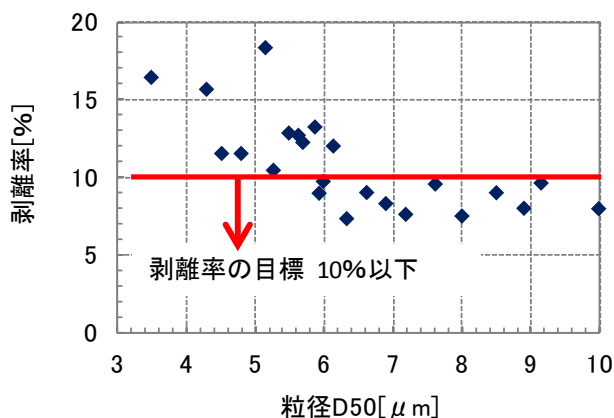


図7 ウォッシュコートの剥離率に及ぼす粒径の関係

次に粉碎したスラリーをハニカムに塗布し、剥離試験を行ったときのウォッシュコート剥離率を調べた。図7は、ウォッシュコート剥離率に及ぼすスラリーの粒径（D50）の関係を示している。図中の赤線で示した本事業におけるウォッシュコートの剥離率目標値を安定して満足するためには、粒径D50が7 μ m以上にする必要があることがわかった。

2-3-1-3 スラリーの出来栄確認

スラリーの要求性状として、高い分散安定性が求められる。従来のスラリーは、製造後1ヶ月以内で固液分離が生じるため、塗布の直前にスラリーの粘度を再調整する必要があった。スラリー中の助触媒材料の分散安定性が高くなると、スラリーの長期保管時の安定性が向上するだけでなく、スラリーをハニカムに塗布する際の助触媒材料と水分の分離を抑制も可能になる。今回導入した分散安定性分析装置を用いることにより、遠心分離評価中のスラリーの分散安定性を比較することができる。当該装置による測定データの模式図を図8に示す。

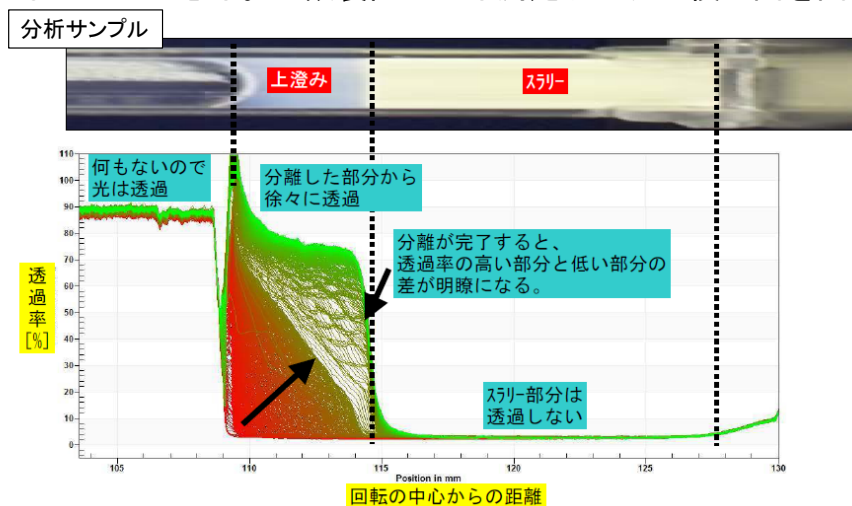


図8 分散安定性分析装置の分析事例（模式図）

さらに、当該装置では、遠心分離評価中のスラリーにレーザーを照射し、透過率を測定することによって、分離状態を定量化することができる。スラリーの分離が生じていない部分は透過率が低くなるが、分離して溶液のみの部分は透過率が大きくなる。本事業では長期保管3ヶ月に相当する評価条件を見出し、試作したスラリーの分散安定性を評価した。分析の結果、開発品は、現行品に比べてスラリー分離が生じにくいことが確認できた。（図9）

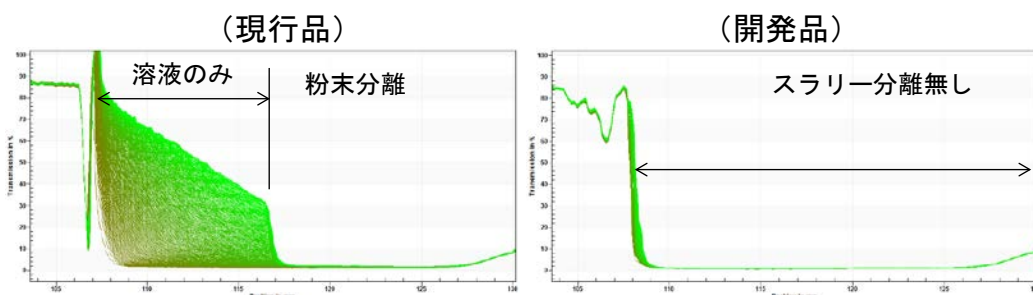


図9 現行品と開発品のスラリー分散安定性分析結果

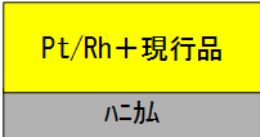
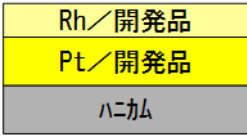
回転速度1500rpm 測定間隔10s 測定回数300回 測定時間50min

各論（3）

2-3-2 スラリー塗布工程

今後の排出ガス量の規制強化に伴ってNOx浄化が重要になる。また、規制強化に伴って走行後の劣化状態でも浄化性能を確保する必要がある。そこで、開発品は耐熱性の低い白金（Pt）のウォッシュコートを1層目（下層）に塗布し、2層目（上層）に耐熱性が高く、NOx浄化能力が高いロジウム（Rh）のウォッシュコートを塗布した2層構造にした。

表6 試作触媒のウォッシュコート構造

	従来品	開発品
レアメタル担持量	Pt0.5g/L-Rh0.3g/L	Pt0.3g/L-Rh0.1g/L
担体仕様	Φ35×L30 300 ㍓	
触媒構造イメージ図		
1層目塗布量	0.075g/cm ³	0.07g/cm ³
2層目塗布量	0.075g/cm ³	0.045g/cm ³
総塗布量	0.15g/cm ³	0.115g/cm ³

2-3-3 性能評価

規制強化に伴って、実車で走行したのちの劣化状態でも排出ガス量の規制値を満足することが要求される。そのため、効率よく触媒を開発するには、触媒材料開発の過程で実車走行を模擬した劣化状態での浄化性能評価を行う必要がある。今回導入設備の高速寿命試験機は、触媒をエンジンからの排気ガスを模擬したモデルガス雰囲気中で短時間に台上で過熱劣化させることができる。本事業では、実車走行10000kmに相当する台上劣化条件を下記のように設定して、高速寿命試験機による台上劣化試験を実施した。台上劣化前後の触媒について、ウォッシュコートの物性評価と実車を用いた排出ガス量測定を実施した。

◆実車走行10000km相当の台上劣化条件（平均50km/hと8h/日運転すると25日必要）

温度・時間：925℃×5h

雰囲気ガス流量：13.1L/min

ガス組成

リッチガス（空気／燃料の比が小） N₂ 87%、CO 5%、H₂O 8%

リーンガス（空気／燃料の比が大） N₂ 79%、CO 5%、O₂ 8%、H₂O 7%
（リッチガスとリーンガスを5分後とに切り替え）

図10に未使用触媒と上記10000km相当の台上劣化触媒の実車による排出ガス浄化性能評価結果を示す。排出ガス中に含まれる規制ガス種毎で浄化性能の劣化の程度（直線の傾き）に差があることがわかった。CO成分とTHC成分（トータルの炭化水素）については、従来品と開発品の間で顕著な浄化性能の劣化の差が認められなかったが、NOx成分においては、開発品のほうが従来品に比べて浄化性能の劣化が小さいことが確認された。

各論（3）

また、試験に供した触媒の未使用状態と台上劣化後のレアメタル粒子と助触媒について、今回導入したCOパルス装置と比表面積計によって分析を行い、シンタリングによるレアメタル粒子と助触媒の粒径変化についても評価を行い、著しい変化が生じていないことを確認した。

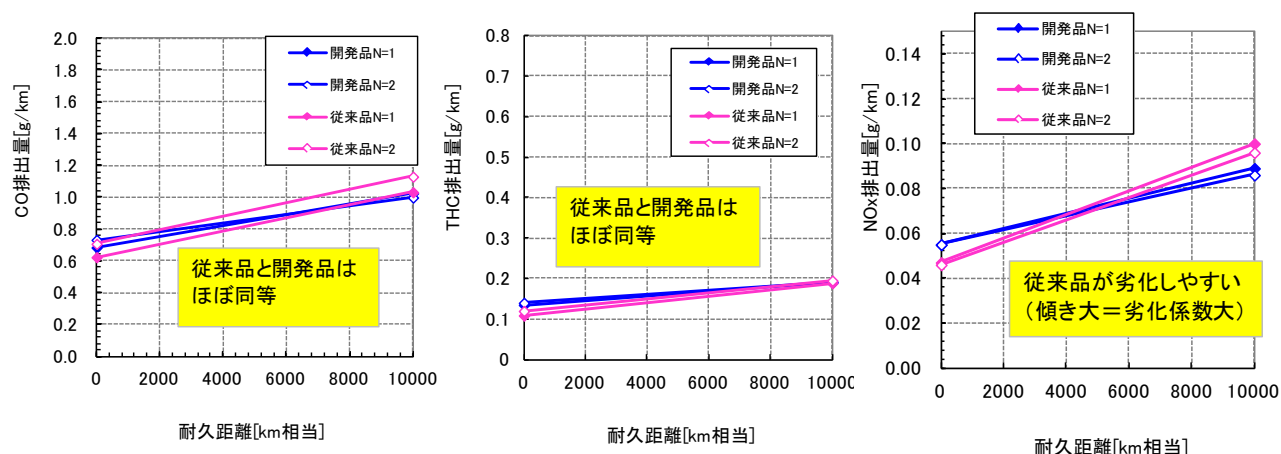


図10 実車の排出ガス量測定結果

これらの評価結果より、開発品は、従来品に比べてレアアース量とレアメタル量を低減しても、同等以上の排出ガス浄化性能を確保できていることが確認できた。劣化後の排出ガス浄化性能の低下が小さいことから、本事業で開発したスラリーおよびウォッシュコート構造を適用することにより、今後強化される排出ガス規制への対応が可能になると考えている。

表7. 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	成果	達成度
1. 高性能スラリー製造技術開発			
スラリー 攪拌技術	①助触媒分散後のスラリー中固形分の割合が、助触媒の仕込み重量割合に一致する ②助触媒粉末のゼータ電位制御によるレアメタル吸着率 100%	①攪拌装置の最適化を行うことによって、助触媒の分散後の固形分が仕込み重量割合に一致するようになった。 ②ゼータ電位計により、水に分散した助触媒の電価測定を行い、スラリー中の pH を調整することによってレアメタル吸着率を 100%にした。	達成
スラリー 粉砕技術	①ウォッシュコート塗布後の剥離試験での剥離率 10%以下 ②粒度調整後の D50 : 7 μ m 以上	スラリー粉砕プロセスの最適化を行い、粒度と膜の剥離率の関係を定量化し、剥離率の目標を満足することを確認した。	達成

品質管理	遠心分離で固液の分離が生じないこと	分散安定性分析装置を用いて、固液分離に適した条件を設定し、開発スラリーの品質確認を行えるようになった。	達成
B. ウォッシュコートの塗布技術			
膜構造の最適化	下層 Pt 層／上層 Rh 層の 2 層構造化	塗布装置の改良により、塗布重量の安定化ができ、Pt 層と Rh 層の 2 層塗りわけが可能になった。	達成
3. 性能評価技術			
台上劣化試験	レアアース・レアメタル使用量を削減した触媒において、925℃×5h の熱劣化後の浄化性能が現行品同等以上	高速寿命試験機を用いて、熱負荷を加えることにより、実車 10000km 走行時と同様の触媒劣化を再現できたので、開発品の浄化性能が現行品と同等であることを確認できた。	達成

3. 事業化、波及効果について

3-1 事業化の見通し

本事業で開発した触媒について、実車を用いた排気ガス浄化性能評価を行った結果、製品1個あたりのレアアース量を53%削減できることを確認した。（表8、担体サイズ：φ35×L30(25.6cm³)、300cpi）

表8 触媒1個あたりのレアアース・レアメタル削減量

	使用量[g/piece]		削減率[%]
	現行品	開発品	
Pt	0.013	0.008	40
Rh	0.008	0.003	68
CeO2	1.190	0.377	68
ZrO2	1.190	0.658	45
La2O3	0.089	0.101	-13
Nd2O3	0.141	0.092	34
トータル	2.630	1.239	53

125cc 車両の触媒において、触媒 1 個あたりのコストに占めるレアアース・レアメタルのコストは約 3 割であり、その使用量を 53%削減できることにより低コスト、且つ現行品同等の浄化性能の触媒を製造することが可能になる。

当初は、この触媒を125cc車両に適用を進めていたが、対象車種の生産打ち切り計画の変更に伴い、2015年生産開始の125cc車両への適用を進めている状況である。

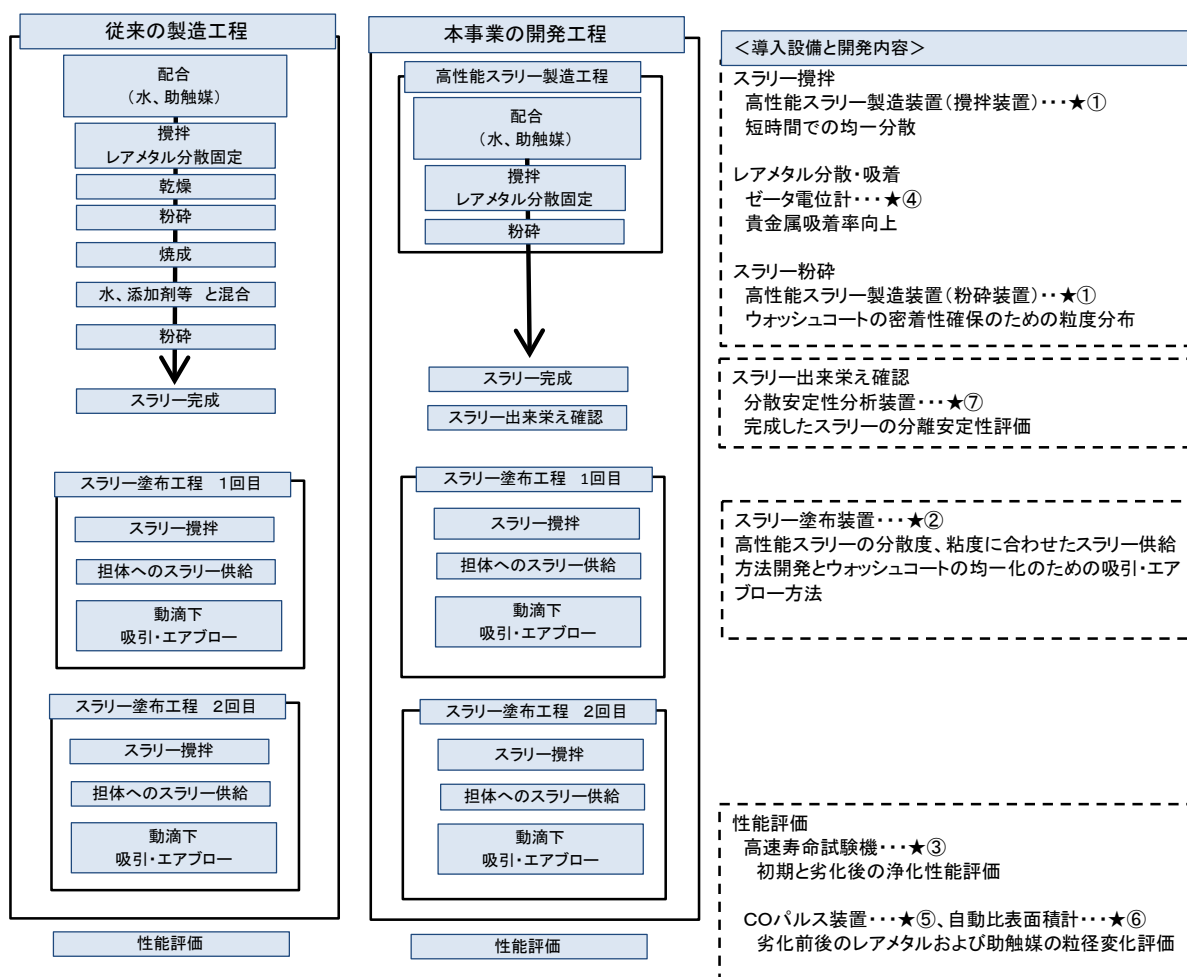


図 11 触媒製造工程の模式図

3-2 波及効果

本事業の開発技術は、将来的な 2 輪車の排出ガス規制にも対応できるものであり、今後導入される EU3、EU4、EU5 規制用の触媒の製造工程にも適用が見込まれる。仮に EU3、EU4、EU5 規制が導入された場合、現時点の技術レベルを前提にすると、ハニカムサイズを EU2 用担体の 2～4 倍にする必要がある。ハニカムの大型化にともない、塗布されているレアアース・レアメタルの量も著しく増加する。本事業の高性能スラリー製造技術および塗布技術を適用することにより、貴金属量を大幅に増加させることなく高次既成に対応できる触媒を製造できるため、さらに大きなレアアース・レアメタル使用量削減の効果が得られると考える。

4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

4-1 研究開発計画

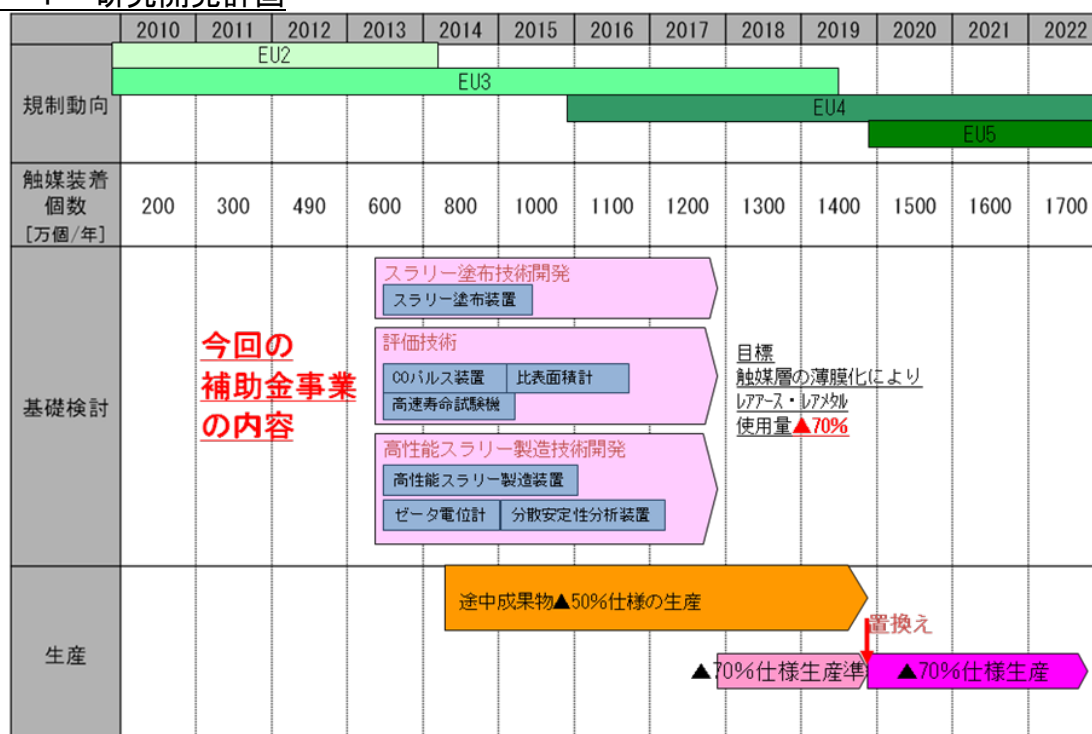


図 12 開発大日程

4-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、ヤマハ発動機株式会社が経済産業省からの補助を受けて実施した。

また、研究開発の実施に当たっては、ヤマハ発動機株式会社 材料技術部触媒技術開発グループ内で、研究開発統括のためのプロジェクトリーダーを選任し、グループ員 4 名からなるチームを設置した。

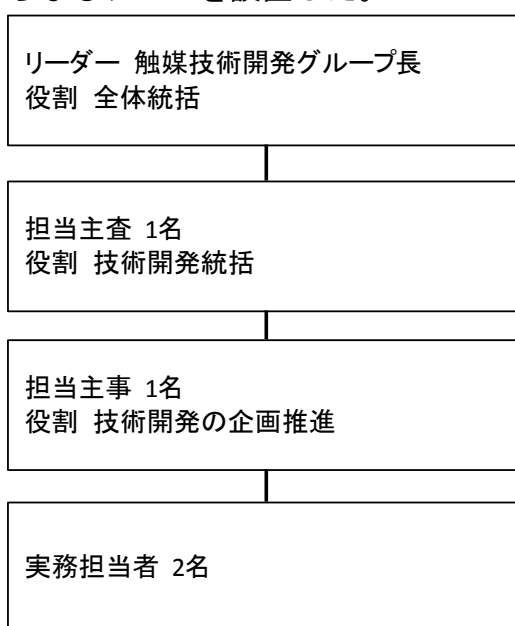


図 13 体制図

レアメタル・レアアース等の
代替材料・高純度化技術開発
プロジェクト

事後評価用資料（各論）

平成２６年１０月１７日

（４）プライムアース EV エナジー株式会社

目 次

1. 事業の目的・政策的位置付け.....	2
1－1 事業の目的	
2. 成果、目標の達成度.....	3
2－1 全体目標	
2－2 個別目標	
2－3 目標の成果・達成度	
3. 事業化、波及効果.....	5
3－1 事業化の見通し	
3－2 波及効果	
4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	5
4－1 研究開発計画	
4－2 研究開発実施者の実施体制・運営	

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1 事業目的

レアメタルは特定国に依存している為、輸出制限が実施されると国内の流通量が減少し、レアメタルを必要とする企業が十分に資源を入手することが困難になる。弊社にとってもレアアースは電池製造において大変重要な資源であるが、前述の理由により必要な量を調達できないリスクが想定される為、当社独自の新しい技術を導入することで、少量の資源で電池製造を可能にすることが目的である。

これまで、ニッケル水素電池は所定の電気容量を確保するために、電池の経年使用による材料劣化を勘案し必要以上に多くのレアメタルを含む材料を使用してきたが、2010年のレアメタル供給不足を契機に、ニッケル水素電池中のレアメタル等の低減化を検討してきた。

本事業ではレアメタル等を低減したニッケル水素電池の量産化を実現するためのプレ量試品および量試品の評価、並びに量産化のための工程検討を行った。

【事業概要】

◇ 実証研究（量産化検討）

・設計検証（プレ量試品性能評価）

新仕様の極板材料を用い、その使用量を削減した電池モジュールを製造工程で製作し、性能評価を実施

・工程検証（量試品性能評価）

上記プレ量試品の結果を元に、新仕様の極板材料を用い、その使用量を削減した電池モジュールを製造工程にて製作し、製造工程の課題抽出、及び対策の目処付を実施

2. 成果、目標の達成度

2-1 全体目標

レアメタル等を削減したニッケル水素蓄電池の製作・評価を行い、実用化を目指す。

2-2 個別目標

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	設定理由・根拠等
(1) 設計検証 (プレ量試品性能評価)	目標/規格を満たすこと	要求特性を満たすため
(2) 工程検証 (量試品性能評価)	製造工程の課題抽出および 対策に目処を付けること	実用化するため

表 1. 個別要素技術の目標設定

(1) 設計検証(プレ量試品性能評価)

ニッケル水素蓄電池に求められる電池性能として、容量、内部抵抗、自己放電特性があり、これらの特性は幅広い温度領域における安定した性能が求められている。更に容量、内部抵抗に対しては、耐久性能(耐久後の性能確保)も必要である。そこで、設計検証として上記性能評価を実施した。

(2) 工程検証(量試品性能評価)

ニッケル水素蓄電池を実用化するため、製造工程における懸念点(課題)を洗い出し、実用化に向け課題対策を行う必要がある。そこで、工程検証として製造工程の課題抽出、及び対策の目処付を実施した。

2-3 目標の成果・達成度

要素技術	目標・指標	成果	達成度
(1) 設計検証 (プレ量試品性能評価)	目標/規格を満たすこと	全項目目標/規格を満たす	達成
(2) 工程検証 (量試品性能評価)	製造工程の課題抽出および 対策に目処を付けること	量産への目処付け完了	達成

表 2. 目標に対する成果・達成度の一覧表

(1) 設計検証(プレ量試品性能評価)

実用化研究で開発した新仕様の極板材料を用い、その使用量を削減した電池モジュールを製造工程で製作し、各種性能評価を実施した。(表1)

判定：○(要求特性を満足)

評価項目			目標/規格 (判断基準)	工程試作品評価結果	
				補助事業品	判定
基本性能	容量	低温	100以上	100以上	○
		常温		100以上	○
		高温		100以上	○
	内部抵抗	常温	100以下	100以下	○
	自己放電	常温	100以上	100以上	○
耐久性能		耐久試験後 内部抵抗	100以下	100以下	○
		耐久試験後 容量	100以上	100以上	○

表3 製造工程作製品の評価結果(設計検証結果)

※目標/規格(判断基準)100に対する補助事業品の評価結果を記載

上記表3に示すように、各種性能(容量、内部抵抗、自己放電、耐久性能)がいずれも目標(判断基準)を満たすことを確認出来た。

(2) 工程検証(量試品性能評価)

新仕様の極板材料を用い、その使用量を削減した電池モジュールを製造工程にて製作し、製造工程における懸念点(課題)の抽出を実施した。

(2-1) 極板製造

① 極板重量変更

極板材料の使用量を削減するために、極板塗工工程の設定条件及び重量管理値の変更が必要である。製造工程を用いた試作検証により、狙い通りの重量となる工程条件を確立した。

② 極板プレス条件の変更

極板材料の使用量削減により極板重量が低減するが、極板の厚みを既定の厚みに調整する必要がある。製造工程を用いた試作検証により、狙い通りの厚み(従来品と同じ)となる工程条件を確立した。

(2-2) 塗工のための材料ペースト製造

① 材料添加量の変更

極板材料の使用量削減のため、材料と水を混合する工程にて、材料使用量の管理値を変更する必要がある。製造工程を用いた試作検証により、材料使用量を削減しても設計通りの極板を作製出来ることを確認した。

② 材料ペースト粘度の確認

極板材料の使用量削減により、極板の重量ムラ（電池特性の悪化につながる現象）が生じないようにペースト（材料、水の混合物）の粘度を調整する必要がある。製造工程を用いた試作検証により、材料を低減しても従来品と同等のペースト粘度となる工程条件を確立した。

以上、今回の仕様変更に伴う工程懸念点（課題）を洗い出し、製造工程を用いた試作検証により工程条件を確立することで、実用化の目処付けが完了した。

3. 事業化、波及効果について

3-1 事業化の見通し

各研究者の実証研究により、要求特性を全て満たす電池モジュール（商品サイズ）の実用化に目処を付けた。

3-2 波及効果

新仕様のニッケル水素電池が実用化されると、極板で使用するレアメタル量の低減が可能。

4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

4-1 研究開発計画

実施項目／年度	12年度	13年度	14年度	15年度
(1) 設計検証／13年度 (プレ量試品性能評価)	実用化研究	性能評価		
(2) 工程検証／13年度 (量試品性能評価)	基礎検討 工程トライ	工程課題抽出 対策		

表 4. 研究開発計画

実用化研究で開発した新仕様の極板材料を用い、その使用量を削減した電池モジュールを、製造工程で製作し性能評価を実施した。その結果、各種性能（容量、内部抵抗、自己放電、耐久性能）がいずれも目標（判断基準）を満たすことを確認出来た。

更に、新仕様の極板材料を用い、その使用量を削減したモジュールを、製造工程を用いた試作検証により工程条件を確立することで、実用化の目処付けが完了した。

4-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、プライムアース EV エナジー株式会社が経済産業省からの補助を受けて実施した。

研究開発の実施に当たっては、研究開発を統括するためのプロジェクト統括責任者を設置するとともに、技術担当役員からなるプロジェクト管理委員会にて、開発方針および進捗を管理しながら推進した。

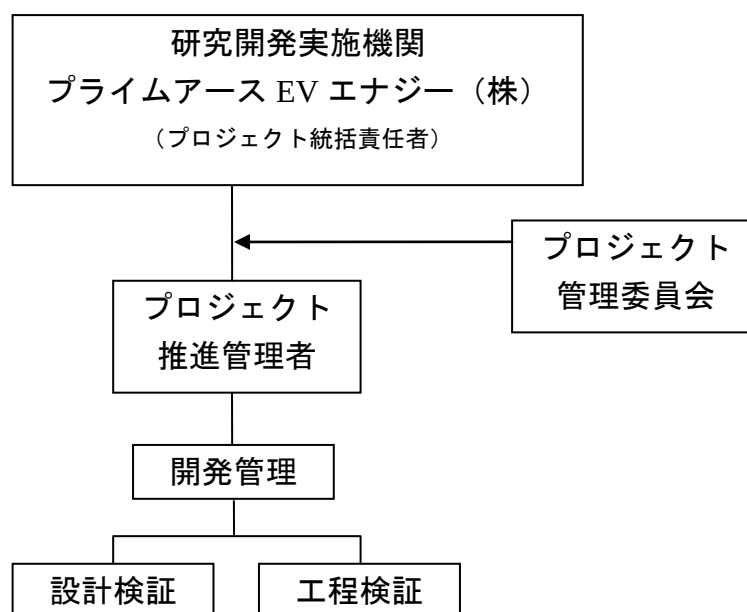


図 1. 研究開発実施体制

レアメタル・レアアース等の
代替材料・高純度化技術開発
プロジェクト

事後評価用資料（各論）

平成２６年１０月１７日

（５）堺化学株式会社

目 次

1. 事業の目的・政策的位置付け.....	2
1－1 事業の目的	
2. 成果、目標の達成度.....	3
2－1 全体目標	
2－2 個別目標	
2－3 目標の成果・達成度	
3. 事業化、波及効果.....	5
3－1 事業化の見通し	
3－2 波及効果	
4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	6
4－1 研究開発計画	
4－2 研究開発実施者の実施体制・運営	

1. 事業の目的・政策的位置付け

1－1 事業目的

酸化Ceを用いたガラス研磨剤は他の砥粒と比較して研磨速度が早い上、平滑度の高い表面を得ることができるが、生産国の輸出政策等の影響を大きく受けやすいという問題がある。供給量の限られたCeを有効に活用するため、酸化Ti粒子表面に酸化Ceをコーティングすることにより、研磨剤中のCe使用量を削減した新素材を検討した。

2. 成果、目標の達成度

2－1 全体目標

ガラス研磨用酸化セリウムの代替えとなる新規研磨材の開発

2－2 個別目標

個別要素技術の目標設定

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	設定理由・根拠等
(1) ガラス 研磨効率改善	市販酸化セリウム(SHOROXA-10)と同等以上の研磨効率	現行使用されている市販酸化セリウムと少なくとも同程度の研磨効率を有していないと研磨事業者での代替えが進まない。
(2) 研磨後の ガラス表面 粗さ (Ra) の 改善	市販酸化セリウム(SHOROXA-10)同等以下の表面粗さ (Ra)	現行使用されている市販酸化セリウムと少なくとも同程度の研磨精度 (研磨後のガラス表面粗さ (Ra)) を有していないと研磨事業者での代替えが進まない。

- (1) 従来よりガラス研磨に使用されている市販酸化セリウムと同等以上の研磨効率を達成する新規研磨材を開発する。
- (2) 従来よりガラス研磨に使用されている市販酸化セリウムと同等以下の表面粗さ (Ra) を達成する新規研磨材を開発する。

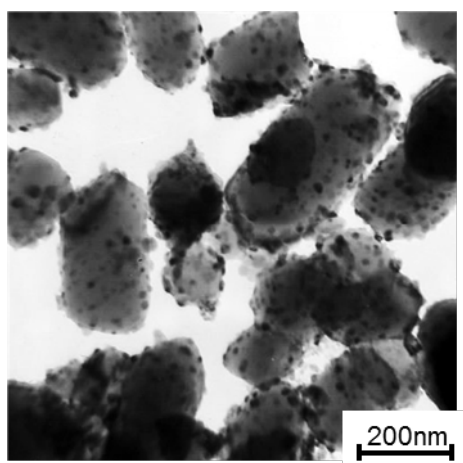
2－3 目標の成果・達成度

(1) ガラス研磨効率改善

酸化チタンを主基材とする粒子表面に基材粒子の 10wt%の酸化セリウムを担持させる (図 2-1) ことにより、スラリー濃度 15%の条件では市販酸化セリウム(SHOROXA-10)に対して 95%の研磨レートが達成できた。これは市販酸化セリウムとほぼ同等の研磨レートが得られたと言え

る。単に酸化チタンと酸化セリウムを 90:10 の重量比で混合したものでは 50%の研磨レートにしかない。この成果によって市販酸化セリウムの使用量を 90%低減できる。但し、研磨事業者の一般的な使用方法はスラリー濃度 5%である。スラリー濃度 5%の条件では市販酸化セリウムに対して 85%の研磨レートであった。この条件での研磨レートは今後更に改善する必要がある。

図 2-1. 新規ガラス研磨材の透過型電子顕微鏡観察像



約 200nm 強の粒子径の酸化チタン粒子表面にアイランド状に酸化セリウムを担持させた。

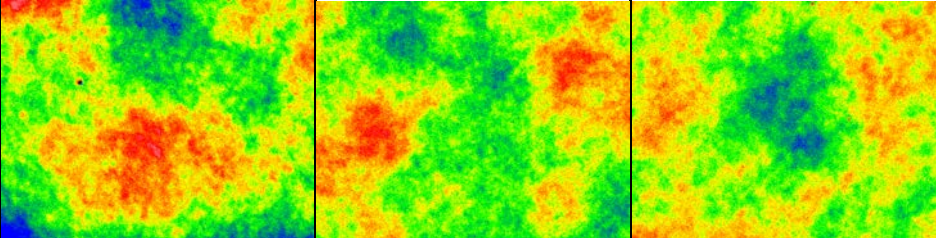
(2) 研磨後のガラス表面粗さ (Ra) の改善

酸化チタンの結晶形をルチルからアナターズに変更することで、市販酸化セリウム(SHOROX A-10) 同等以下の表面粗さ (Ra) が得られた。ただし、研磨レートは低くなった。更に表面粗さ (Ra) を改善する検討を行う。

表 2-1. 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
(1) ガラス 研磨効率改善	市販酸化セリウム(SHOROX A-10)と同等以上の研磨効率	酸化チタンを主基材とする粒子表面に基材粒子の10wt%の酸化セリウムを担持させることにより、スラリー濃度 15%で酸化セリウムに対して 95%の研磨レートが達成できた。スラリー濃度 5%の条件では 85%の研磨レートであった。この条件での研磨レートは今後更に改善する必要がある。	未達成
(2) 研磨後のガラス表面粗さ (Ra) の改善	市販酸化セリウム(SHOROX A-10)同等以下の表面粗さ (Ra)	酸化チタンの結晶形をルチルからアナターズに変更することで、酸化セリウム以下の表面粗さ (Ra) となった。	達成

表 2-2. 新規ガラス研磨材の研磨レートとガラス表面粗さ (Ra)

	市販酸化セリウム	新規ガラス研磨材① 結晶形=ルチル	新規ガラス研磨材② 結晶形=アナターズ
	SHOROX A-10	FPT-10	FPT-20
研磨レート(%)	100	85	76
表面粗さ Ra(nm)	0.77	0.68	0.59
走査型白色干渉計 による2次元観察像			

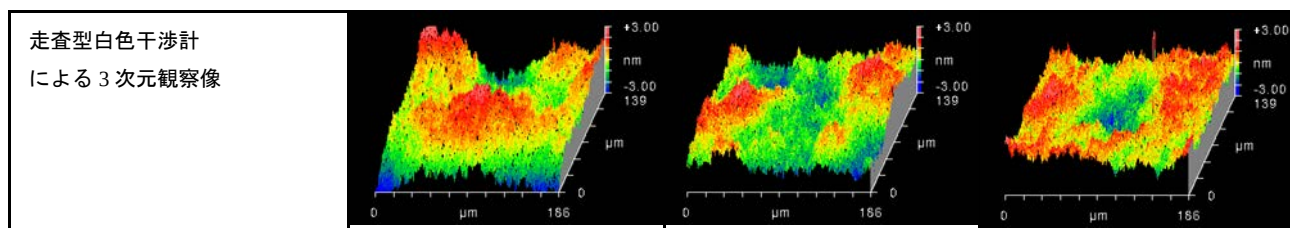


表 2-3. 研磨評価条件及び評価機器一覧表

研磨機	卓上型研磨機 (株式会社エム・エー・ティ製、MAT BC-15C、定盤径 300mmφ)
ガラス板	ソーダライムガラス (松浪硝子工業株式会社製 36×36×1.3mm)
研磨パッド	発砲ポリウレタンパッド (セリア含浸なし、ニッタハース、MHN-15A)
加工圧力	101 g/cm ² (9.9kPa)
定盤回転数	100 min ⁻¹
スラリー濃度	5 wt%
分散媒	イオン交換水
供給速度	100 mL/min
ドレッサー	ダイヤモンド粒度： #100
研磨レート	研磨前後のガラスの重量を測定 研磨レート = 重量減少率×ガラスの厚み/研磨時間
表面粗さ (Ra)	測定機： New View 7100 (Zygo Corp.) 測定原理： 走査型白色干渉法 対物レンズ： 50 倍 (測定視野： 186×139 μm)

3. 事業化、波及効果について

3-1 事業化の見通し

FPT-10、FPT-20、FPT-30、FPT-10T、FPT-20Tをラインナップして、拡販を進めている。

上記 5商品は何れも酸化セリウム被覆量は10wt%であり、90%の削減効果は実現した。

現在 (H26.9)、FPT-10は3社で採用決定しており、使用量はあわせて約100kg/Mなので、使用量からの削減量は90kg/月になり、削減見込13.5T/Mの約0.7%であった。

	使用量からの削減量	使用量からの削減率
当初計画	13.5T/M	90%
事業終了時	90kg/M (上記計画に対して達成度 0.7%)	90% (上記計画に対して達成度 100%)

今後は、更なる顧客獲得に向けた拡販活動を進めることと、酸化セリウム被覆酸化チタン15T/Mの生産を想定した実機設備による量産化の検討を進めていく。平成28年度末に売上数量15T/Mを達成することを目標としている。

3-2 波及効果

従来品と比較して平滑度の高い表面を得ることができるため、研磨率の課題が改善され実用化することができれば、高度な面品質が要求される材料に対するの需要が高まり、将来的に従来品が開発品に置き換わっていくことが期待される。

4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

4-1 研究開発計画

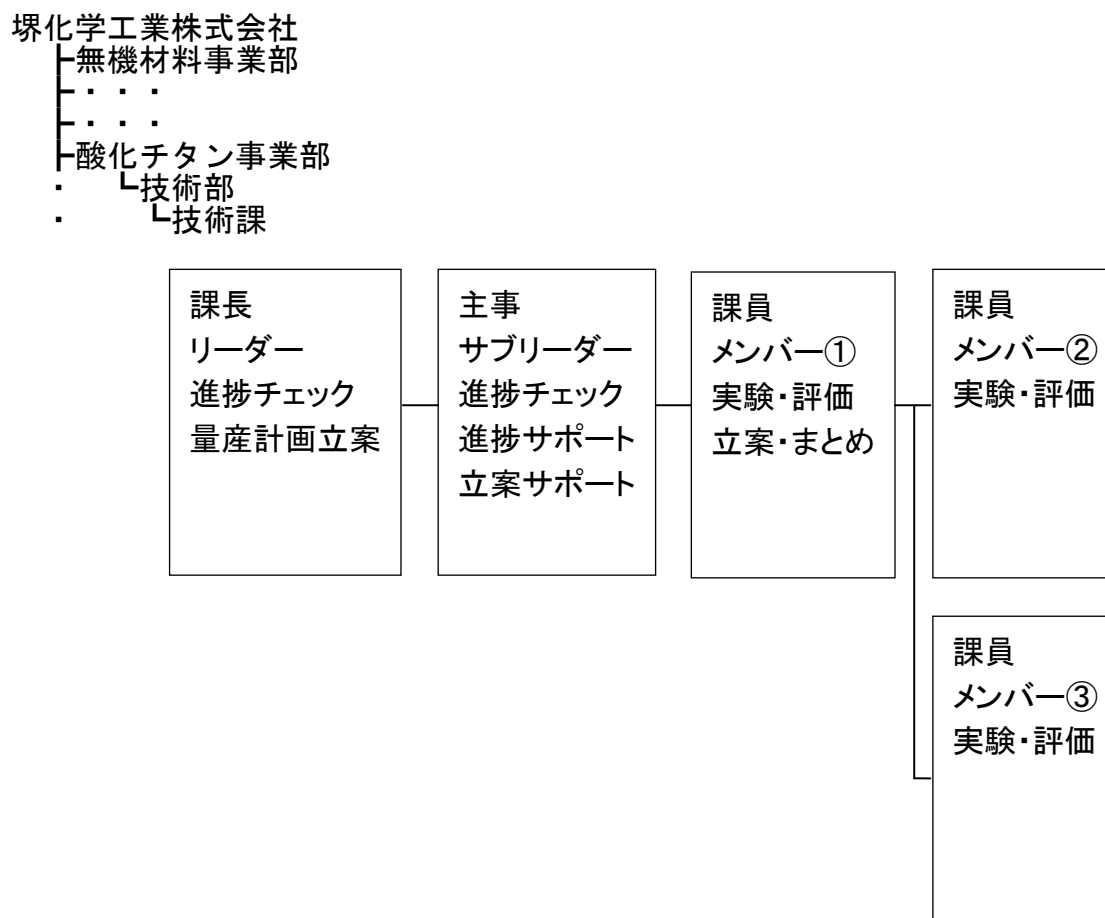
本事業は表 5-1 に示すように平成 24 年度から実施した。事業は「ガラス研磨用酸化セリウムの代替えとなる新規研磨材の開発」を実施した。

表 4-1. 研究開発計画

実施項目／年度	H24 年度	H25 年度	H26 年度
ガラス研磨効率改善			→
研磨後のガラス表面粗さ (Ra) の改善			→

4-2 研究開発実施者の実施体制・運営

図 4-1. 研究開発実施体制



別紙： 特許出願状況等、論文、マスメディア等

表 1. 特許・論文等件数

要素技術	論文数	論文の被引用度数	特許等件数（出願を含む）	特許権の実施件数	ライセンス供与数	取得ライセンス料	国際標準への寄与
ガラス研磨効率改善	0	0	0	1	0	0	0
計	0	0	0	1	0	0	0

表 2. 論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
発表	化学工業日報「ガラス研磨材に進出」	H24. 10
特許	特許 第 5278631 号 ガラス研磨用複合粒子	H25. 5

レアメタル・レアアース等の
代替材料・高純度化技術開発
プロジェクト

事後評価用資料（各論）

平成２６年１０月１７日

（６）日本ハードメタル株式会社

目 次

1. 事業の目的・政策的位置付け.....	2
1－1 事業の目的	
2. 成果、目標の達成度.....	2
2－1 全体目標	
2－2 個別目標	
2－3 目標の成果・達成度	
3. 事業化、波及効果.....	1 1
3－1 事業化の見通し	
3－2 波及効果	
4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	1 1
4－1 研究開発計画	
4－2 研究開発実施者の実施体制・運営	

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1 事業目的

一般に超硬合金は、WC と Co を組み合わせて粉末冶金法で焼結して造る。WC を用いる最大の理由は、WC が本来有する高硬度・高ヤング率といった特性が工具や金型に最適なためである。しかし、WC 単独では焼結が困難なため、WC の結合剤として特に Co が使用される。Co は WC との濡れ性が良く、強度や靱性も高まるため WC の焼結助剤として非常に優れているためである。しかし、Co をバインダーとして添加することにより、硬度・ヤング率が低下、耐食性・耐熱性が低下する。これらのことから、一部ではバインダレス超硬合金（金属無添加）が作製されている。

秋田県産業技術センターと秋田大学の研究グループは、WC に Co や Ni 等の希少金属を全く添加せずに WC を焼結する実験を進め、WC にセラミックスの一種である炭化ケイ素（SiC）を添加することで焼結性が大きく改善し、WC の緻密化に成功した。安価な炭化ケイ素を使用することで、供給不足が懸念されている希少金属のコバルトやタングステンの使用量を減らせる。また、製造方法が超高压装置等の特別な装置を必要とせずに従来の超硬合金の製造方法を使用することができる。

本研究では、弊社既存技術を活用し、この秋田県産業技術センター・秋田大学が開発した素材（WC-SiC 系焼結体）の実用的焼結技術の確立を図り、切削工具（特に丸棒工具）へ適用することにより、タングステン及びコバルトの使用量削減を図ることを目的とする。

2. 成果、目標の達成度

2-1 全体目標

弊社既存の超硬合金作製技術を活用し、WC-SiC 系焼結体素材の実用的焼結技術の確立を図り、切削工具（特に丸棒工具）へ適用する

2-2 個別目標

個別要素技術の目標設定

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	設定理由・根拠等
(1) WC-SiC 系焼結体の製造プロセスの開発	普通焼結（無加圧焼結）で緻密化、物性値が最適となる焼結助剤・添加剤の検討	素材（特に工具材料）への適用範囲を拡げるため。
	既存技術をもとに、一連の製造工程の技術を確立。	量産・スケールアップへの問題点を明確にし、技術を確立。

(2) WC-SiC 系焼結体の工具材料への適用	実際に工具を作製（コーティング含む） 評価試験を行い、工具としての適正を明確にする。	工具として適用していく方向性を明確にする。
--------------------------	---	-----------------------

(1) WC-SiC 系焼結体の製造プロセスの開発

- ・ 普通焼結（無加圧焼結）で緻密化し、物性値が最適となる焼結助剤・添加剤の検討を行う。

特殊な装置を使わずに無加圧で緻密な焼結体を得るためには、さらに焼結性を向上させる必要がある。またその上で機械的性質を向上させるための添加剤と最適配合割合を見出す必要がある。

- ・ 既存技術をもとに、一連の製造工程の技術を確認する。 下図に超硬合金の製造工程を示す。

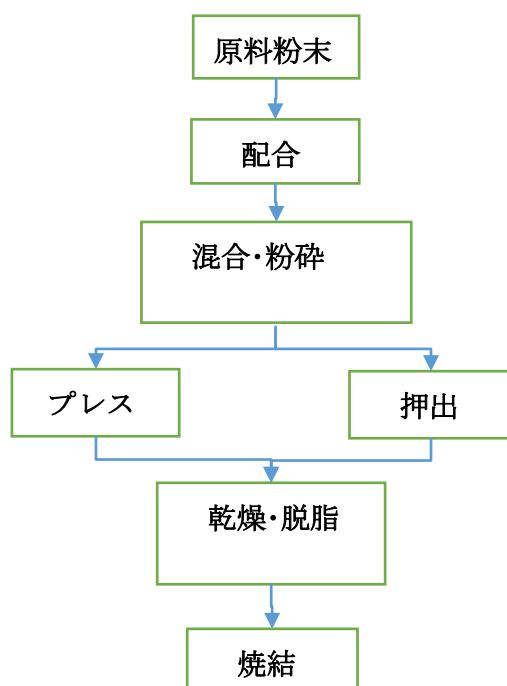


図 2－1．超硬合金製造工程図

これらの工程における弊社既存の技術を元に、製造工程内の課題や問題点を明確にし、新たな成形助剤等のバインダーの開発も行い、製造工程に反映させていく。

(2) WC-SiC 系焼結体の工具材料への適用

作製した素材の機械的性質について調査を行い、各物性を明確にする。これらの素材を工具形状に作製、切削試験を行い工具材料としての性能

の確認を行う。

本研究では、工具形状は特に丸棒工具への適用を目的としている。

ある程度の仕様が固まったところで、丸棒工具としての具体的な工具形状に加工・コーティングを行い、切削試験を行っていく。

a) 小型ボールミルを使用して、最適原料粉の選定・最適配合割合・粉碎条件・最適な添加剤・成形及び焼結助剤の検討を行い、Co を添加していなくても十分成形・焼結可能な粉末の作製ができることがわかった。



図 2－2． 小型ボールミル外観

b) 乾燥炉を使用して、添加物の除去に最適な温度・真空度・温度パターンの検討を行い、添加物の種類・量が変わっても最適な乾燥・脱脂条件を迅速に探求し、絞り込むことができるようになった。



図 2－3. 真空乾燥炉外観

c) 高温焼結炉を使用して、従来の普通焼結（無加圧焼結）においてより緻密な焼結体を得るために、最適焼結条件（昇温速度・焼結温度・雰囲気・保持時間等）の検討を行い、1750～1900℃程度の高温で普通焼結（無加圧焼結）を行い、Co の添加なしで、SPS（放電プラズマ焼結）・HOT プレス等の特殊な装置を必要とせずに十分緻密化された焼結体を形成できることが確認された。



図 2－4. 高温焼結炉

d) 小型押出機を使用して、最小添加量で良好な押出用原料の作製を検討し、丸棒素材（φ6）の作製を行った。
丸棒を成形、素材の焼結体を得ることはできたが、さらに緻密な焼結体を得るために、最適な条件の検討が必要である。



図 2－5. 小型押出機

(2) 製造プロセスの検討を行い、現状の最適条件を使用して開発材を3種製作。その機械的特性(硬度・破壊靱性値・抵折力・ヤング率)を測定した。

表1 焼結体の特性評価結果(秋田県産業技術センター測定)

試料名	サンプルNo.	かさ密度 [g/cm ³]	ヤング率 [GPa]	ポアソン比 [-]	剛性率 [GPa]	ビッカース硬さ [Hv]	破壊靱性値 (JIS式) [MPa・m ^{1/2}]	破壊靱性値 (ED式) [MPa・m ^{1/2}]
開発材1	1	12.805	610	0.196	255.0	2295	4.9	6.3
	2	12.797	612	0.195	256.3	2328	4.9	6.3
開発材2	1	12.719	601	0.196	251.0	2373	4.8	6.2
	2	12.725	602	0.195	251.7	2295	4.8	6.2
開発材3	1	12.694	607	0.192	254.4	1961	5.3	6.6
	2	12.683	607	0.191	254.8	1961	5.3	6.7

※超硬材1 ビッカース硬さ 1512[Hv]

(WC-10%Co 微粒 汎用 Hv1550~1650 程度)

超硬材2 ビッカース硬さ 1874[Hv]

(WC-8%Co 超微粒 高硬度用 Hv1850~1950 程度)

超硬材料と比較して高い硬度が得られた。

※抗折力に関しては、現状1.0~1.3GPaであり、工具材料として適用していくためには、さらに高靱性化が求められていくと思われる。

開発材の3材種に関して、詳細に諸物性・評価試験を行った。

① 熱特性[熱伝導率]

表2 各温度での熱伝導率測定結果(秋田県産業技術センター)

試料名	サンプルNo.	熱伝導率[W/(m/K)]					
		測定温度[°C]					
		25	100	200	400	600	800
開発材1	1	57.6	54.1	52.1	50.3	49.2	48.0
	2	59.7	60.4	59.3	54.2	51.3	49.2
開発材2	1	58.5	55.5	52.5	50.6	48.9	47.2
	2	61.5	62.3	60.0	54.9	51.8	48.8
開発材3	1	72.0	65.3	60.1	55.5	53.0	49.3
	2	74.3	73.0	69.9	61.4	56.7	52.0
超硬材1	1	76.5	69.8	67.5	63.6	62.0	58.2
	2	81.8	82.3	79.2	69.3	64.7	59.7
超硬材2	1	58.1	55.6	54.4	54.5	52.9	50.1
	2	58.4	60.6	60.1	56.5	54.5	51.8

※熱伝導率に関しては、超硬材料と大差のない結果であった。

今後より高い熱伝導率が出せるか検討・解析を行っていく。

② ダイヤモンドコーティング密着強度（オーエスジー測定）

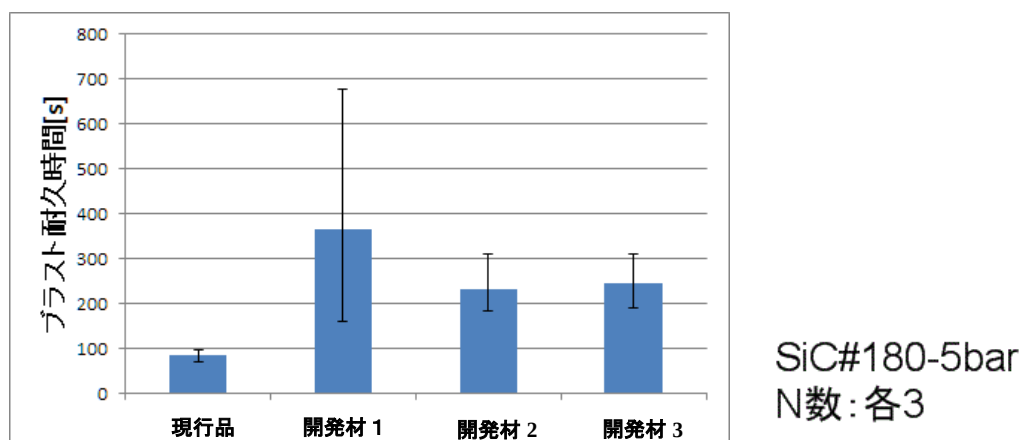


図 2－6．ダイヤモンドコーティング密着力測定結果

※現行超硬材料の 3 倍程度の密着力となった。

③ 切削試験（チップ形状）



図 2－7．工具形状

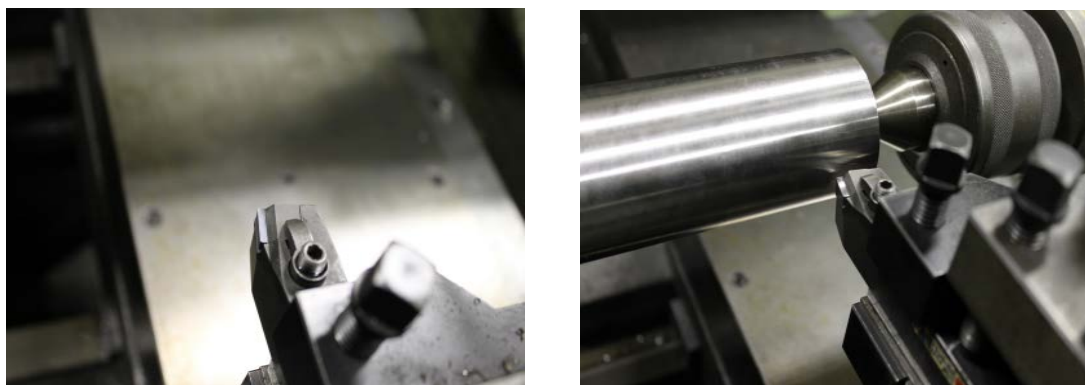


図 2－8．旋盤による切削試験

※チップ形状の工具をホルダーに取り付け、旋盤に取り付けた被削材を回転させ、工具を当て切削していく。

被削材として、

a) SKD11

高い硬度を生かし、高硬度材といわれる SKD11 の切削性の確認をおこなった。比較として超硬材（高硬度用）を使用した。

b) Ti-6Al-4V

耐熱性が期待されることから、耐熱合金として Ti-6Al-4V の切削性の確認を行った。比較としては、超硬材（耐熱合金用）を使用した。

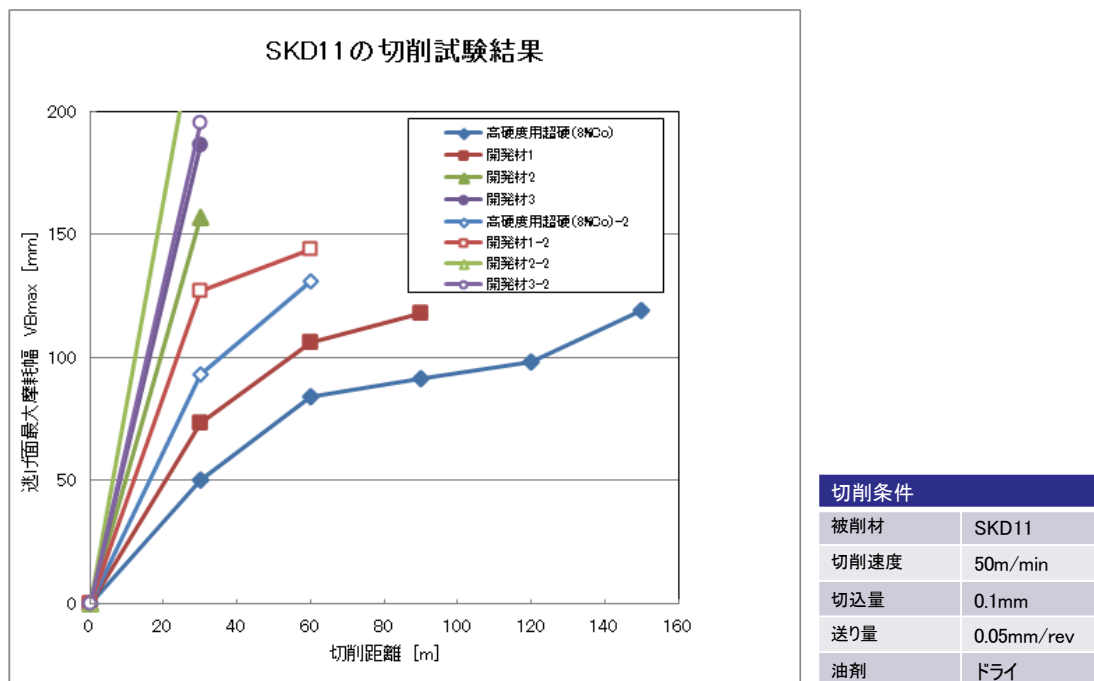


図 2 - 9 . SKD11 の切削試験結果

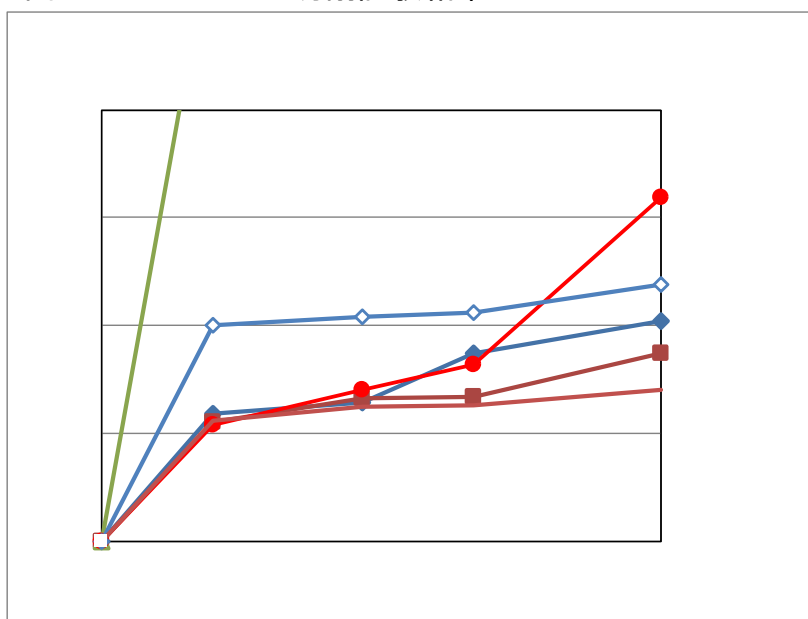


図 2 - 10 . Ti-6Al-4V の切削性試験結果

※逃げ面最大摩耗幅は、工具の寿命を測る場合の指標となっており、同一距離の切削を行ったときの摩耗幅の比較を行う。

切削試験の結果、Ti-6Al-4V の切削において、開発材 1 が超硬材を上回る結果となった。耐熱合金用の切削工具として期待が持てる結果であった。

④ 工具の作製→評価試験

小型押出機にて開発材 1・2 について評価用・工具作製用として $\phi 6 \times 80$ の丸棒を作製した。

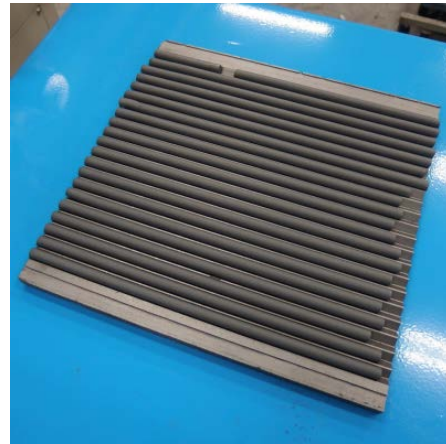
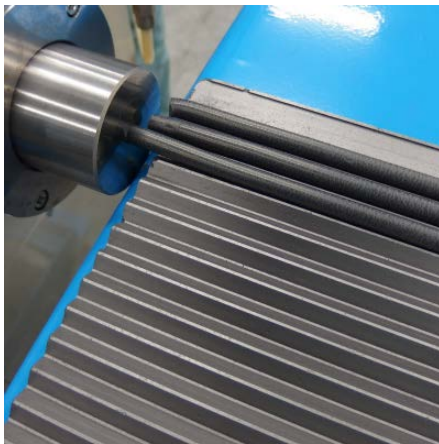


図 2－1 1．小型押出機による押出



図 2－1 2．焼結後の押出丸棒



図 2－13．作製した試験用工具
このあとコーティングを行い、評価試験を行う。

2－3 目標の成果・達成度

表 3．目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
(1) WC-SiC 系焼結体の製造プロセスの開発	普通焼結（無加圧焼結）で緻密化し、物性値が最適となる焼結助剤・添加剤の検討をおこなう。	普通焼結で十分緻密化し、焼結助剤・添加剤が決定された。	達成
	既存技術をもとに、一連の製造工程の技術を確立する。	・混合から焼結までの一連の製造工程が確率された。 ・押出での更なる性能向上のため検討が必要	一部達成
(2) WC-SiC 系焼結体の工具材料への適用	実際に工具を作製（コーティング含む） 切削試験を行い、工具としての適正を明確にする。	・チップ形状での耐熱合金切削に有効であった。 ・開発品の硬度が予想以上に硬く丸棒工具に加工	一部達成

		するために時間を要したため、事業実施期間中に丸棒工具での評価が実施出来なかった。	
--	--	--	--

3. 事業化、波及効果について

3-1 事業化の見通し

Co の添加なしで、SPS・HOT プレスなどの特殊な装置を必要とせずにも十分緻密な焼結体が形成されることが確認され、製造プロセスに関してもほぼ確立することができた。物性値に関しても、超硬合金より高い硬さ・ヤング率を持ち、チップ形状における耐熱合金の切削試験においては、超硬合金よりも良い結果となった。これらのことより、十分に事業化できることを示すことができた。

今後は、性能・安全性評価を積み重ね、素材の工具をはじめとした適用範囲を拡大。丸棒工具へ適用のため、更なる素材性能の向上が必要となる

3-2 波及効果

SiC は Co に比べて比重が軽いため (Co : 8.87、SiC : 3.2)、Co の代わりに SiC を使用して同一体積の超硬合金を作成した場合、Co 及び W の使用量を減らすことが可能である。

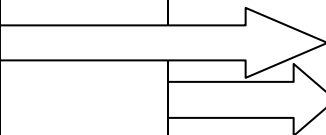
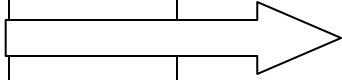
今後、工具をはじめとする素材の適用範囲を広げ、超硬合金材料に置き換わっていく分野が増えることにより、レアメタルであるタングステン・コバルトの使用量の削減することができる。

また、この WC-SiC 系焼結体は耐食性・耐熱性にも優れるため、超硬合金が使用できなかった分野においても能力を発揮でき、新しい分野への活用の可能性が期待される。

4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

4-1 研究開発計画

表 4. 研究開発計画

実施項目／年度	H24 年度	H25 年度	H26 年度
(1) WC-SiC 系焼結体の製造プロセスの開発			
(2) WC-SiC 系焼結体の工具材料への適用			

4-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、経済産業省の公募による選定審査手続きを経て、日本ハードメタル株式会社が経済産業省からの補助を受けて実施した。事業運営は日本ハードメタル株式会社があたり、本事業に関する技術や研究施設を有する企業、研究機関と共同研究を実施した。

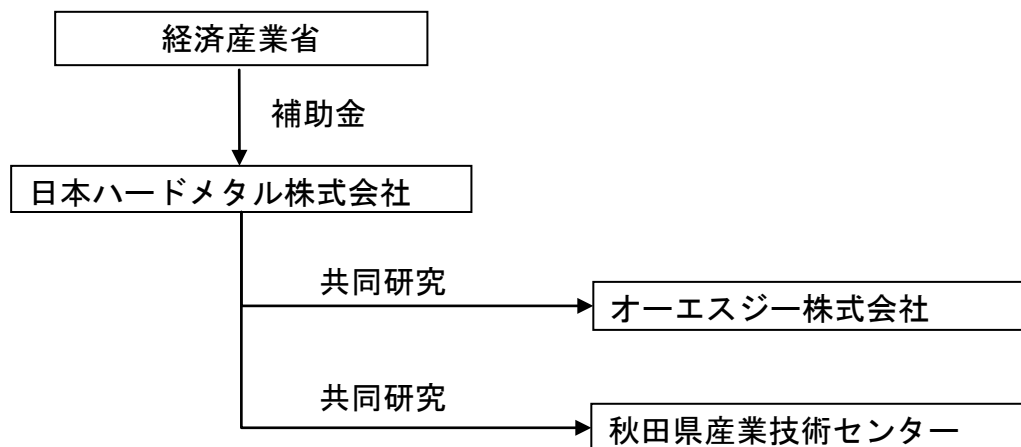


図 4. 研究開発実施体制

レアメタル・レアアース等の
代替材料・高純度化技術開発
プロジェクト

事後評価用資料（各論）

平成２６年１０月１７日

（７）株式会社神戸製鋼所

目 次

1. 事業の目的・政策的位置付け.....	2
1－1 事業の目的	
2. 成果、目標の達成度.....	3
2－1 全体目標	
2－2 個別目標	
2－3 目標の成果・達成度	
3. 事業化、波及効果.....	8
3－1 事業化の見通し	
3－2 波及効果	
4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	9
4－1 研究開発計画	
4－2 研究開発実施者の実施体制・運営	

1. 事業の目的・政策的位置付け

1－1 事業目的

中長期的なチタン需要は、景気変動の影響を受けつつも、世界の航空旅客輸送量の拡大、新興国インフラ（電力・造水）整備への根強い潜在需要に加え、海洋温度差発電向け等の新規需要の拡大により、需要規模の増大が期待されている。一方、競合はより厳しさを増しており、コスト競争力の強化が不可欠な状況である。

上記の背景のもと、高品質かつ、コスト競争力の高い素材製造技術の獲得が競争力の確保に向けて不可欠な要素となっている。

このような課題を解決するため、本事業では、当社が本事業と平行して実施した独自の溶解・凝固シミュレーション技術により適正化した要素技術と、本事業による先端溶解技術の融合により、溶解技術を最適化した設備仕様を検討した。

本技術を導入した暁には、レアメタルであるチタン使用量の削減と、それに伴う素材製造時の電力使用量の削減が期待できる。また、国内での一貫製造体制の構築への寄与に資することにより、我が国のチタンをはじめとする素材関連産業の国際競争力強化にも貢献することが期待できる。

2. 成果、目標の達成度

2-1 全体目標

表 1. 要素技術の目標設定

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	設定理由・根拠等
(1) 鑄肌改善技術及び成分均一化技術と先端溶解技術の組合せによる最適化	従来溶解技術と比較して約 8%の歩留向上によるチタン使用量の削減、及び生産性の向上	従来プロセスで問題となる種々の不具合要因のないインゴットを製造できる先端溶解技術により歩留ロスがなくなり、生産性が向上する。

2-2 個別目標

(1) 鑄肌改善技術及び成分均一化技術と先端溶解技術の組合せによる最適化
チタン素材の従来溶解プロセスは、溶解原料をプレス加工で電極を製造後、成分均一化のために複数回の真空アーク溶解（以降、VAR という）されてからインゴットとなる。従来溶解プロセスでは鍛造・熱延までに複数の工程があり、次工程に影響を与える熱間加工割れ等を各工程間で切削除去、また、成分外れ部分の除去する必要性から、大きな歩留ロスが発生するという課題があった。本事業で検討する先端溶解技術に、当社が本事業と平行で独自に開発した要素技術「鑄肌改善技術」と「成分均一化技術」を適正化して融合させることにより、この大きな歩留ロスを最小化可能なインゴットを製造することができる。

上記のようなインゴットを製造可能とすることにより、当社試算では約 8%の歩留が向上して生産性の向上が可能となる。

2-3 目標の成果・達成度

(1) 鑄肌改善技術及び成分均一化技術と先端溶解技術の組合せによる最適化

表2. 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
(1) 鑄肌改善技術及び成分均一化技術と先端溶解技術の組合せによる最適化	従来溶解技術と比較して約8%の歩留向上によるチタン使用量の削減、及び生産性の向上	従来溶解技術と比較して歩留向上による約8%のチタン使用量削減と生産性向上を可能とする最適な設備仕様を設計	達成

レアメタルであるチタンの使用量削減を可能とするため、当社が独自に開発した要素技術「鑄肌改善技術」および「成分均一化技術」と、本事業を通じて得られた先端溶解技術との融合により生産性を飛躍的に向上させることが可能となる。

本事業にて開発した先端溶解技術の最大の特徴は、インゴットを溶解・凝固させる鑄型内において、溶湯攪拌による溶解中の熱制御条件を適正化させたことである。

従来溶解技術によるインゴット製造は、チタン溶湯を鑄型からの抜熱により凝固させながら行われる。しかし、溶解中の入抜熱バランスが崩れると、熱間加工割れに起因する鑄肌性状等が形成される。そのため、当社独自に同時平行で実験およびシミュレーションによる技術開発を実施した。表3に示した当社開発成果を、生産性の向上を目指す本事業に逐次反映させて融合させた結果、生産性を飛躍的に高めることが可能となり、当社試算では従来比で約8%の歩留向上によるチタン使用量の削減、及び生産性の向上を達成した。

表3. 先端溶解技術に融合させた最適設計シミュレーション技術と成果

目的	要素技術	シミュレーション技術確立による成果
インゴット歩留向上	鑄肌改善技術	・入熱条件の適正化により、熱間加工割れ等を起こさないインゴット溶解時の入抜熱条件を明確化
インゴット品質向上	成分均一化技術	・上記開発技術を適用して、チタン溶湯成分を均一化する指針構築

3. 事業化、波及効果について

3-1 事業化の見通し

本事業で実施した先端溶解技術を実機に適用することにより、目標に掲げた歩留向上によるチタン使用量削減に資する生産性向上の実現につなげることが可能となる。今後、市況の変化を鑑み、投資回収効果を見極めながら、適切な時期に事業化を検討していく。

3-2 波及効果

革新的溶解プロセス実用化の暁には、厳しい競争に晒される純チタン分野では、歩留向上によるコスト競争力強化で、将来的に、国内生産規模の維持拡大に繋げることができる。そのためには、需給回復に時間を要するものの、NEDOプロジェクトにて沖縄県久米島で実証中の海洋温度差発電 OTEC に採用された PHE 用高伝熱チタン板等、今後の需要拡大が見込まれる分野への積極的な受注・採用を働きかけていく。チタン製品の国内生産が拡大すれば、川上ではチタンスポンジメーカー、およびチタン製造工程における外注加工業者の仕事量増大による設備投資の誘発効果が期待できる。更には、国内生産の拡大により国内物流業者、商社等の業務拡大にも寄与し、レアメタルの効率的な利用の促進が期待できる。

4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

4-1 研究開発計画

表 4. 研究開発計画

実施項目	平成 25 年			平成 26 年
	4-6 月	7-9 月	10-12 月	1-3 月
【当社独自の取組】	鋳肌改善および成分均一化技術開発（当社独自）			
（１）鋳肌改善技術 及び成分均一化技術 と先端溶解技術の組 合せによる最適化				

本事業における実施課題に対し、当社が独自に開発した要素技術「鋳肌改善技術」と「成分均一化技術」を先端溶解技術に融合させて適正化を推進した。

表 4 に本事業において実施した研究開発計画を示す。

4-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発事業は、経済産業省製造産業局非鉄金属課の公募による選定審査手続きを経て、神戸製鋼所が補助を受けて実施した。

研究開発の実施に当たっては、社内に研究開発全般を統括するプロジェクトリーダー（PL）を設置すると共に、その下に設備仕様を検討するワーキンググループ（WG）と、要素技術課題を解決する技術開発 WG を設置し、連携した事業運営を行う体制を構築した。また、本事業の実施に当たっては、PL が企画・運営する全体会議を月 1 回の頻度で開催し、各 WG 間の進捗状況を共有化して、効率的な事業運営を推進した。

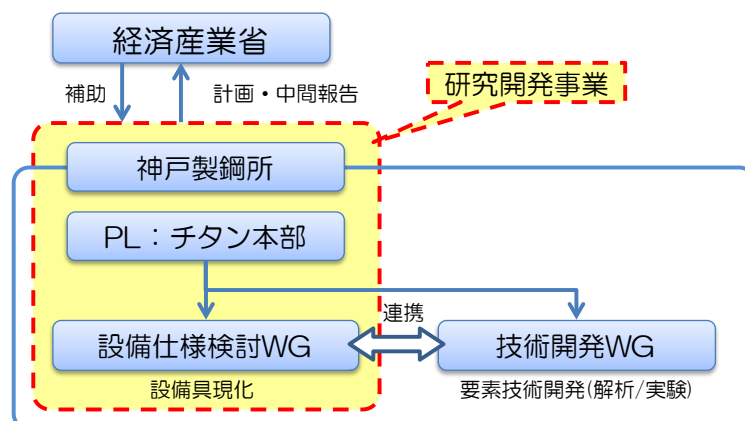


図 1. 研究開発実施体制

各論（7）

レアメタル・レアアース等の
代替材料・高純度化技術開発
プロジェクト

事後評価用資料（各論）

平成２６年１０月１７日

（８）大阪チタニウム株式会社

目 次

1. 事業の目的・政策的位置付け.....	2
1－1 事業の目的	
2. 成果、目標の達成度.....	3
2－1 全体目標	
2－2 個別目標	
2－3 目標の成果・達成度	
3. 事業化、波及効果.....	14
3－1 事業化の見通し	
3－2 波及効果	
4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	18
4－1 研究開発計画	
4－2 研究開発実施者の実施体制・運営	

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1 事業目的

中国を始めとする新興国において、生活レベル向上により酸化チタン（白色顔料）の需要が急拡大した。そのため、年率40%でチタン鉱石の需要が伸びており、酸化チタンを高純度に含有するチタン鉱石を中心に買い占めの動きが活発化した。それに伴い、チタン鉱石の価格も2011年以降約4倍に高騰した。金属チタンの原料はこのようなチタン鉱石の高騰のために需給が逼迫しており、比較的安価な低品位鉱石の使用を検討せざるをえない状況となった。こうした状況を踏まえ、低品位鉱石の使用比率を上げた場合、低品位鉱石に多く含まれるとされる特定不純物により流動不良を生じた。そのため、前記課題を解決するために、低品位鉱石を使用するための技術開発が必要となった。

低品位鉱石を利用するために必要な技術開発は、以下2点。

①原料改質技術の開発、②塩化炉操業技術の開発（操業条件最適化、廃棄物削減など）の課題があった。これらの課題に対して、技術開発の取組みを行った。従って、本件は金属チタン（レアメタル・レアアース等に属する）製造において、低品位鉱石の高純度化を目的とする開発と低品位鉱石を実利用するための技術開発との2方向からの開発を行い、最適化することにより実用化を目指した。開発のステージとしては、基礎試験が終了したところであり、実用化研究及び実証研究、試作品製造又は性能・安全性評価を目的とした技術開発の検討を行った。

チタン原料としてのアップグレードは古くから行われてきた技術である。しかしながら、原料高騰のため従来使用しなかった不純物を多く含む原料を利用していくことについて新規性があった。スラグ中に含有する不純物は、化合物の形で含有している場合が多く、また、鉱石の原産地毎に様々な形の鉱物として含有している。これらの鉱石を解析することにより、狙いの不純物濃度を合理的に低減することを目的とした。

実生産では金属チタン原料として利用するためには塩化を行い、 TiCl_4 を生成する（塩化技術）。この技術において、操業を阻害する因子を抽出したことにより、ターゲットが明確になり、対応する独自技術の開発を行うことができた。

本研究開発のターゲットは高騰するチタン原料について、実質的な利用技術を開発することとしており、①原料改質技術では特定不純物を低減する技術と並行して放射性物質を低減する技術を開発し、最終的に廃棄物として環境問題が生じない原料の供給を狙った。さらに、原料からの除去方法についても合理的な方法の選択を検討し、工業的に利用できる範囲での原料価格の維持を確保できることとした。

②塩化炉操業技術において実操業での試験により、塩化時の反応性、レンガの損耗などの操業阻害因子を解決し、経済合理性を伴った開発を行うこととした。低品位鉱石に含有する不純物については最終的に廃棄物となり環境への悪

影響があるため廃棄物量の低減も行い、全体的な経済合理性および社会環境問題への対応も行うこととした。

以上ことにより、従来利用できなかった低品位原料を金属チタン生成に利用できる技術を開発できた。本事業は十分高いレベルでの新規性、独創性をもった革新的な研究開発であり、さらに、実機での利用試験により、実用化に近い開発となった。廃棄物削減も含めた環境問題にも対応した。

2. 成果、目標の達成度

2-1 全体目標

開発の全体像は図1に示すように、原料改質技術の開発と塩化操業技術の開発の2項目について開発を実施した。各取り組み項目に対して、個別の取り組み項目を有しており、個別取り組みを達成することにより、全体項目の達成を図った。

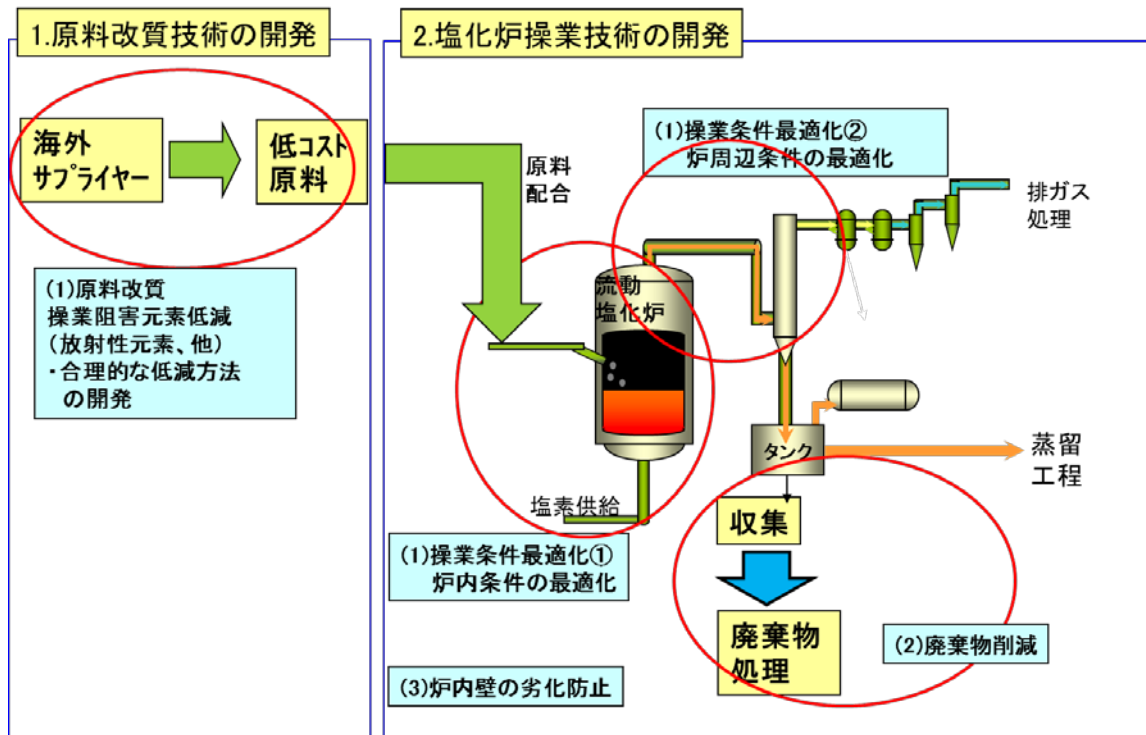


図1 開発全体

2-2 個別目標

個別要素技術の目標設定

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	設定理由・根拠等
1. 原料改質技術の開発		
(1) 操業障害元素 の低減	条件: 低品位原料混合比 60% 以上とする 1) 障害元素 $\leq 0.2\%$ 且つ 2) 環境障害元素合計 (放射性 元素) の低減処理を行った 廃棄物中 放射線量 $\leq 0.14 \mu\text{Gy/h}$	塩化工程操業時に、障害元素を 含む原料を使用した場合、原料 中の障害元素濃度が 0.2% を越 えたと、流動不良を起こす可能 性が高くなる。 従って、特定障害不純物濃度を 低減することにより、低品位原 料の利用率の向上を狙う。 環境障害元素は、チタン鉱石原 料に含まれる放射性元素を示し ている。廃棄物中の放射線量に 規定が $0.14 \mu\text{Gy/h}$ 以下規定され ており、放射線量の制御技術を 開発する必要がある。 本技術について制御技術を確立 することにより、原料中の特定 不純物を制御し、低品位原料の 使用量を増加させることを狙っ た。
2. 塩化炉操業技術の確立		
(1) 操業条件最適 化	1) 低品位原料の利用率向上 条件最適化 2) 不純物増加による周辺技 術の対応	低品位原料を利用する場合、 塩化炉内で、流動障害元素が 0.2% 以上となると、流動不良を 生じる確率が上昇した。 TiCl ₄ 生産では、流動不良を防 止するために、温度、塩素流量、 投入速度など操業因子を最適化 していく必要があった。 低品位原料の利用を安定的に 行うためには、流動不良を引き 起こす障害元素だけではなく、 通常のアップグレードでは除去

		できない不純物の増加に対しても対策が必要となる。これらの不純物は経済的に合理的な除去方法が存在しないため、塩化炉操業上の問題を引起す。これらは、操業中に物理的に除去することは困難で有り、途中での流動停止などを行うことにより除去してきた。流動停止は生産性低下を引き起こすため、連続生成を目指す技術開発が必要となった。
(2) 廃棄物低減	低品位鉱石利用時の廃棄物削減	低品位鉱石の利用を行うと、廃棄物量が増加する(10～20%程度)。廃棄物は処理量が増加するだけでなく、厳しい放射線量の管理が必要となる。低品位原料を利用するためには、このような環境問題に対応しなければ、利用することができない。
(3) 炉壁劣化防止	低品位原料利用時の炉ライフ延長	低品位原料を利用する場合、通常のレンガを利用した炉体では炉寿命が短くなることが判っていた。これは、不純物による物理的および化学的影響によるものである。炉内高さ方向の位置毎に劣化原因が異なる。従って、各位置での耐性の強いレンガをライニングすることを検討した。最適構造を選択することにより炉寿命の延長を行った。低級不純物を利用しない炉寿命を基準として、低品位不純物を60%以上利用したときに同レベルの炉寿命となることを目標とした。

本事業における開発課題と狙い、開発項目について下表にまとめる。主として2つの課題を開発することによって、本事業の開発を完了させる。この2課題について研究開発することによって、低品位鉱石（低コスト）の利用率をUPさせることが可能となる。

開発項目		狙い	内容
1. 原料改質技術の開発 (補足1)	1) 鉱石中の操業阻害元素濃度低減技術開発	低品位鉱石 混合比率 60% 以上条件で 平均 0.2% 以下	・低品位鉱石の操業阻害元素濃度低減技術開発を行う。 ・原料メーカーにて合理的なプロセス改善の適応を検討する。 ・低減技術、原料メーカーへの適応を繰返し、混合比率 60% 以上まで技術開発する
	2) 鉱石中の放射性元素濃度低減技術開発	低品位鉱石 混合比率 60% 以上条件で 廃棄物放射線量 0.14 μ Gy/h 以下	・低品位鉱石(放射性元素濃度高い)の放射性元素濃度低減技術開発を行い、廃棄物の放射線量が 0.14 μ Gy/h 以下となるように最適化する。 ・原料メーカーにて合理的なプロセス改善の適応を検討する。 ・低減技術、原料メーカーへの適応を繰返し、混合比率 60% 以上まで技術開発する
2. 塩化炉操業技術の開発	1) 操業条件の最適化技術開発	①低品位鉱石利用時の安定操業条件を選定する ②低品位鉱石利用時の周辺条件最適化	・低品位鉱石混合比率 60% 以上で安定した生産性条件を選定する。 ・炉周辺でのトラブル低減のために、条件の最適化を行う。
	2) 廃棄物削減技術開発	低品位鉱石利用時の廃棄物削減	・低品位鉱石利用時の廃棄物量低減を行い、放射線量を基準値 0.14 μ Gy/h 以下にする。 ・廃棄物中の含有物の低減条件を選定する。

	3)炉体劣化防止技術 開発	低品位原料利用時 の炉ライフ延長	・低品位原料利用時の炉ライフ延長のために内壁レンガ材質、構造、などを検討する。 ・実証試験により最適化を図る
--	------------------	---------------------	---

2-3 目標の成果・達成度

発項目	狙い	成 果		
		A社	B社	C社
1) 鉱石中の操業 阻害元素濃度 低減技術開	低品位鉱石 混合比率 60% 以上条件で阻害 元素濃度 0.2% 以下	①阻害元素を多く含む鉱石の低比重鉱物と粘土を、比重差選鉱工程の強化と磁力選鉱工程の最適化した。 粘土除去効率向上を向上し、パイロットスケールまで達成した。 ②混合比率 60%で、鉱石平均 $\leq 0.2\%$ を達成した。	①従来から阻害元素濃度 $\leq 0.2\%$ のため開発不要。	①阻害元素を多く含む鉱石の低比重鉱物を、比重差選鉱工程の強化と磁力選鉱工程を最適化した。 ②混合比率 60%で、鉱石平均 $\leq 0.2\%$ を達成した。
2) 鉱石中の放射 性元素濃度低 減技術開発	低品位鉱石 混合比率 60% 以上条件で 廃棄物放射線量 0.14 μ Gy/h 以下	①放射性元素を多く含む鉱石を、磁力選鉱工程の最適化と操業管理強化にて除去した。 粘土除去効率を向上させ、磁力選鉱効率を向上させることにより、放射性元素の低減を行った。 パイロットスケールにて達成した。 ②廃棄物放射線量 <0.14 μ Gy/hr を遵守し、混合比率 60%を達成。	①放射性元素を多く含む鉱石を、磁力選鉱と静電選鉱工程の最適化と操業管理強化にて除去した。 重砂鉱物の細粒における、放射性元素の高濃度偏在を利用した分級利用選鉱フローの設計検討に貢献できた。 ②廃棄物放射線量 <0.14 μ Gy/hr を遵守し、混合比率 60%を達成。	①放射性元素を多く含む鉱石を、磁力選鉱工程の最適化にて除去した。 磁力選鉱での低磁化化によって、放射性元素の低減を行った。パイロットスケールにて達成できた。 ②廃棄物放射線量 <0.14 μ Gy/hr を遵守し、混合比率 60%を達成。

A社、B社、C社ともに、開発により操業阻害元素および放射性元素が低減した結果を下図にまとめた。各社ともに低減効果が見られた。高品位鉱石とA～C社の鉱石を混合して成分調製すると、開発前では、低品位鉱石の利用率 60%では放射線量 0.14 μ Gy/h を限定すると、操業阻害元素の濃度が高く操業上問

題があった。開発後では、低品位鉱石利用率 60%でも操業阻害元素の濃度を 0.20%以下，放射線量 0.12 μ Gy/h(0.14 μ Gy/h 以下)とすることが可能となることが判った(表1)。操業上の問題が低減できた。

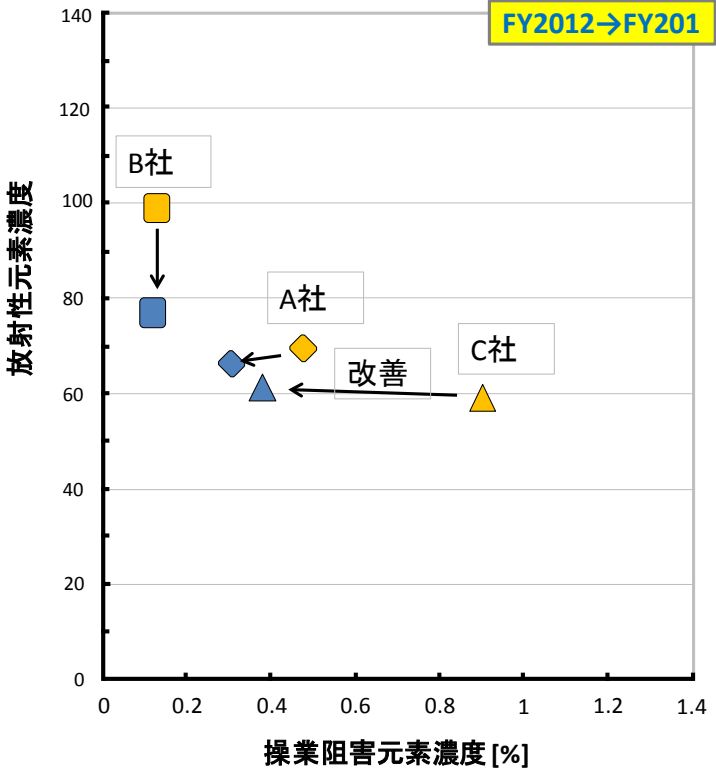


図2 チタン原料鉱石の改質

		表 1 原料組成の改善						
		開発前			開発後			
		混合比	阻害 元素	鉱石 放射線量	廃棄物 放射線量	阻害 元素	鉱石 放射線量	廃棄物 放射線量
		%	改善 必要性	μ G y /hr	μ G y /hr	改善率	μ G y /hr	μ G y /hr
高品位		40	無	基準 以下	-	-	基準 以下	-
低 品 位	A社	20	有			65%		
	B社	20	無			-		
	C社	20	有			150%		
加重平均			-	60%混合-操業上問題あり		0.17	-	0.12
目標値			0.20		0.14以下	0.20		0.14以下
判定			-		-	達成		達成

[塩化炉操業技術の開発]

開発項目	狙い	成果
1) 操業条件の最適化 技術開発	①低品位鉱石利用時の安定操業条件を選定する ②低品位鉱石利用時の周辺条件最適化	①低品位鉱石混合比率 60%以上でのテストを行なった結果、安定的に TiCl_4 を生成できることを確認した。 ②炉周辺での構造・材質を検討した結果、低品位鉱石利用時のトラブルが低減した。
2) 廃棄物削減技術 開発	低品位鉱石利用時の廃棄物削減	・原料鉱石の成分および低品位鉱石の配合率から廃棄物増加率を計算し、廃棄物の放射線量予測式を作成した。精度向上を行い、安定的に基準値以下とする条件での操業（配合）に利用した。 ・低品位鉱石利用時、何種類かの方法により廃棄物量の低減を行った。
3) 炉体劣化防止技術 開発	低品位原料利用時の炉ライフ延長	・レンガの損耗要因を検討し新規レンガ選定テストを行なった。 レンガ損耗の抑制条件を検討した。レンガ配置の配置最適化を行い、さらに、操業条件を最適化した。レンガ損耗を抑制できた。

下記の図に示す塩化炉での実機テストを行った。テスト項目は①低品位鉱石利用時の安定操業条件検討、②周辺設備の操業条件最適化、③炉ライフ延長などについて検討した。

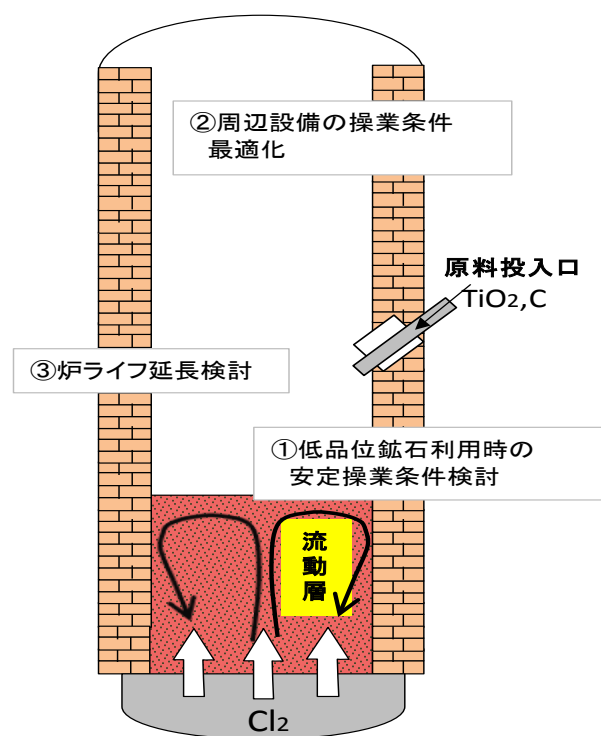


図3 課題全体

①低品位鉱石利用時の安定操業条件検討

低品位鉱石混合テスト時の塩化炉の状況について測定した結果を図にまとめた。低品位鉱石混合 60%以上の試験でも、塩化炉のガス流量(主として塩素ガス)は安定しており、大きなガス流れの変動は見られなかった。炉内温度についても、テスト時に急上昇がなく、通常の操業内でのばらつきと同様の変動となった。さらに、塩化炉内の流動不良の原因となる阻害元素濃度の急上昇はなく、むしろ、低下した。

低品位鉱石混合率 60%以上で操業できる条件を確立した。

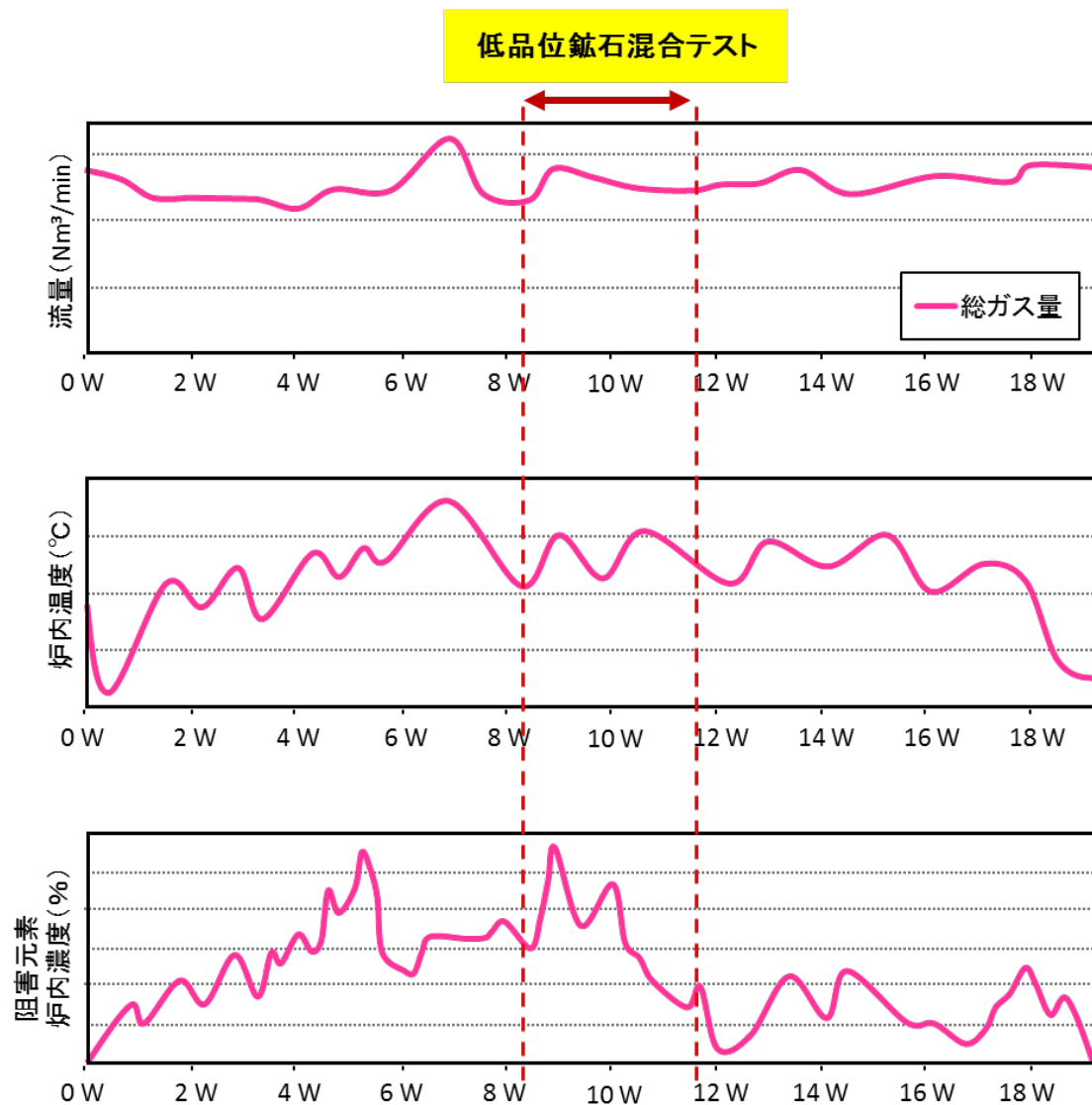


図4 操業条件最適化

②炉周辺部分のトラブル低減

下記に塩化炉の周辺配管での詰まり防止を改善した(図5)。付着防止のために材質、作業条件を最適化し、不純物による物理的な付着を防止した。

配管詰まりによるトラブル防止ができることが判った。この技術を確認することにより、低品位鉱石の利用条件が確立できた。

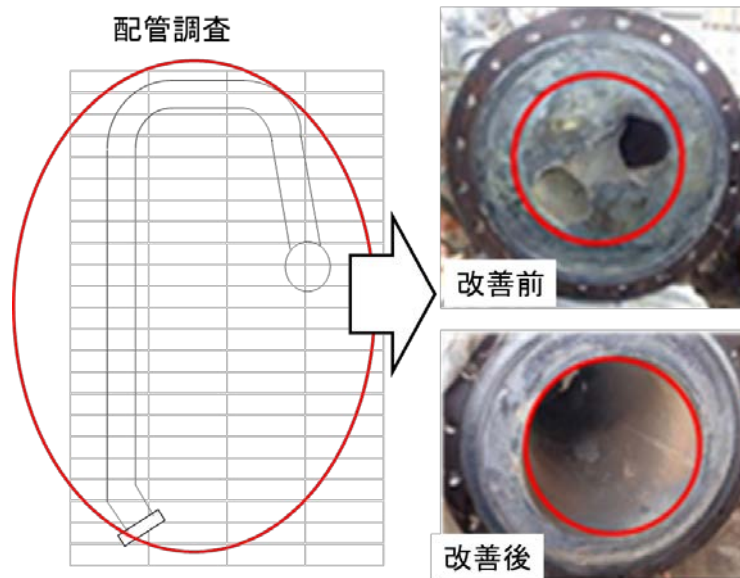


図5 周辺技術開発による改善

③炉ライフ延長

レンガ消耗の基礎データを収集し、各損耗部位に対して、最適レンガを配置した。その結果、炉内温度基準以下の作業条件では、レンガ損耗が抑制されることが判った(図6)。長期間、レンガ消耗を防止することができ、炉ライフ延長技術を確認できた。

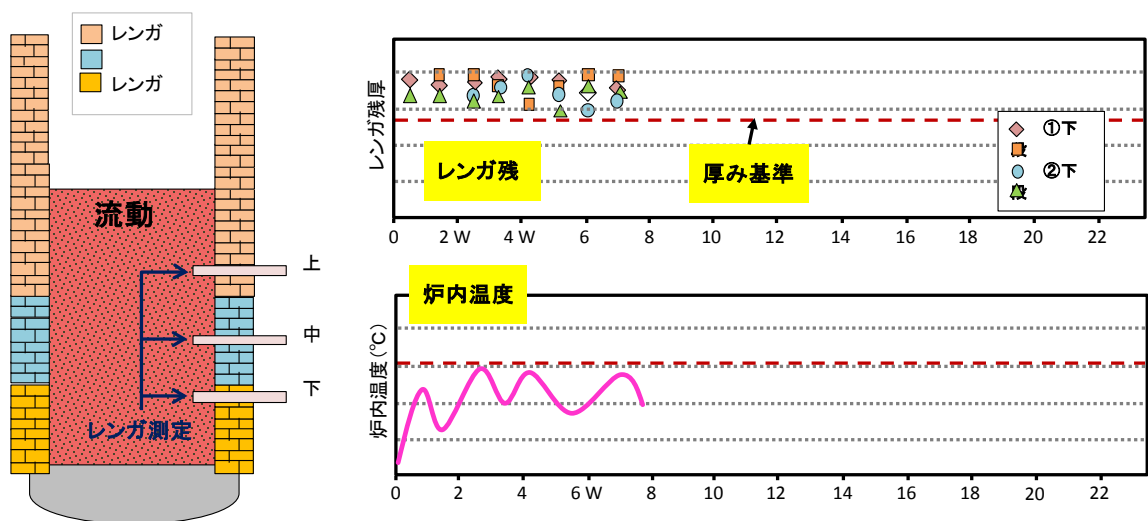


図6 レンガ損耗状況調査

廃棄物削減技術については、下表にて削減量をまとめた。低品位鉱石を利用する上では、廃棄物量が増加するため、廃棄物の削減は重要であり、脱水機の改善、改良などにより、廃棄物量の削減技術を確立した。

低品位鉱石の利用時でも廃棄物量が過度に増加しない技術を確立し、低品位鉱石を利用可能となった。

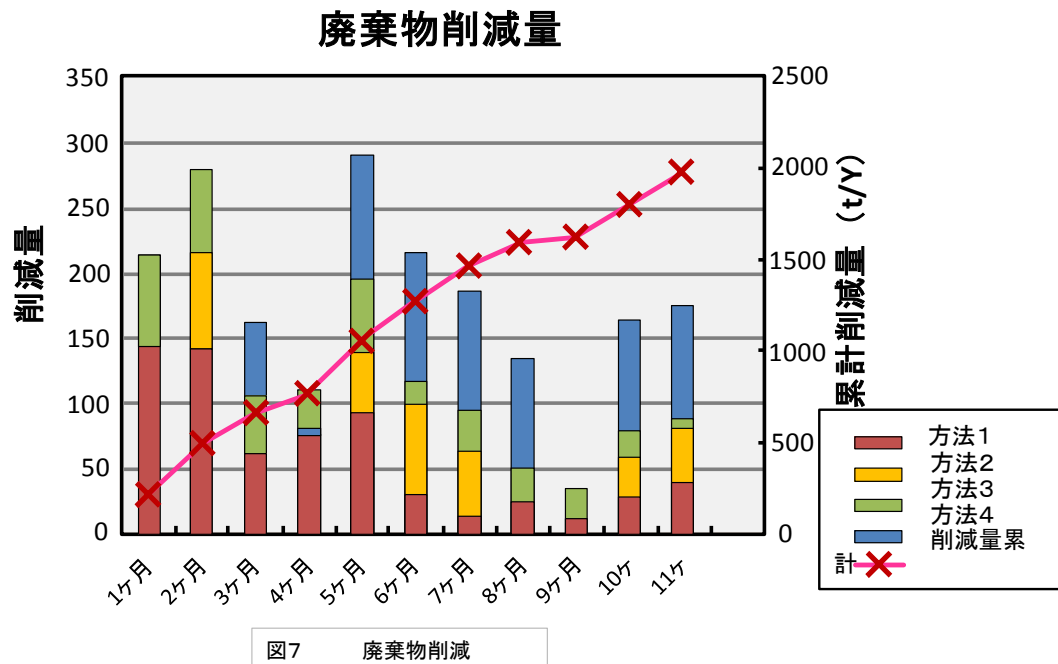


表. 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
1. 原料改質技術の開発			
(1) 操業阻害元素の低減	条件: 低品位原料混合比 60% 以上とする 1) 阻害元素 $\leq 0.2\%$ 且つ 2) 放射性元素の低減処理を行った 廃棄物中放射線量 $\leq 0.14 \mu\text{Gy/h}$	A,B,C 3 社において、操業阻害元素濃度低減、放射性元素低減技術を確立した。 この 3 社を含めた低品位原料を 60% 以上利用したとき、操業阻害元素 $\leq 0.2\%$ を達成し、且つ、廃棄物中放射線量 $\leq 0.14 \mu\text{Gy/h}$ を達成した。	達成
2. 塩化炉操業技術の確立			
(1) 操業条件最適化	1) 低品位原料の利用率向上 2) 炉周辺での操業トラブル対策	① 低品位鉱石混合比率 60% 以上でのテストを行なった結果、安定的に TiCl_4 を生成できることを確認した。 ② 炉周辺での構造・材質条件の最適化を行い、低品位鉱石利用時の操業トラブルを低減した。	達成
(2) 廃棄物低減	低品位鉱石利用時の廃棄物削減	・ 原料鉱石の成分および低品位鉱石の配合率から廃棄物増加率を計算し、廃棄物の放射線量予測式を作成した。安定的に基準値以下とする条件での操業（配合）に利用した。 ・ 低品位鉱石利用時、廃棄物量の低減を行った。	達成
(3) 炉壁劣化防止	低品位原料利用時の炉ライフ延長	・ いがの損耗要因を検討し新規いが選定テストを行なった。	達成

		テスト 1 ではインガ 損耗抑制条件を検討した。 テスト 2 ではインガ 配置の最適化を行い、さらに、操業条件を最適化した。 インガ 損耗を抑制することが可能となった。	
--	--	---	--

3. 事業化、波及効果について

3-1 事業化の見通し

世界の展伸材用スポンジは、年間約 7 % の成長率で急増している。航空機向けを中心に、さらなる用途拡大を背景に今後 10 年間で、世界需要は約 2 倍に増加すると予測される。



(図 8 出典 経済産業省資料)

しかしながら、チタンでは、原料価格の高騰（図 9）により、供給リスクが高く、「第 2、第 3 のレアアース」になることが懸念される。経済産業省での詳細調査では、高品位鉱石であるルチルは約 4 倍、比較的低品位な鉱石が多いイ

ルメナイトでも約4倍に価格が高騰していることが判っている。

チタン需要の拡大が見込まれる中で原料であるチタン鉱石の高騰は産業に大きな影響を与えることになる。このような価格の高止まりが続くと、チタン産業に大きなダメージを及ぼすことは必須であり、緊急に対処する必要性がある。

＜主原料市況（指標）推移表＞

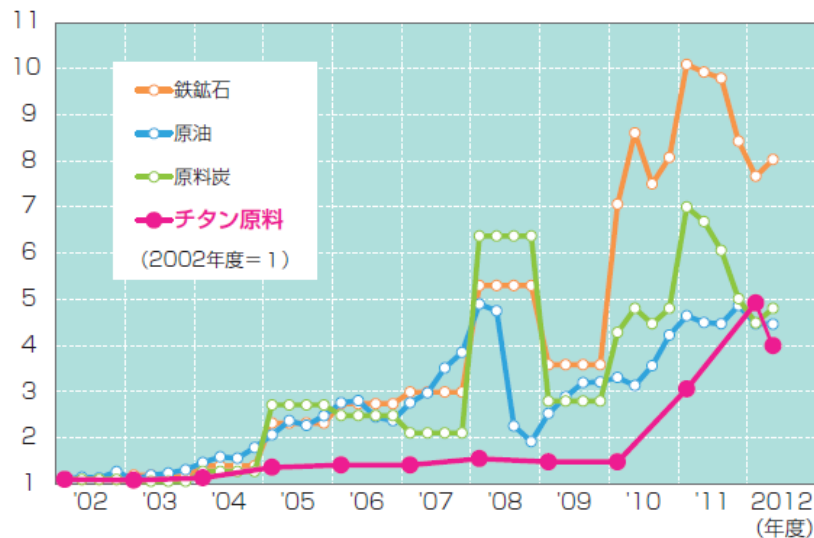


図9 チタン原料価格推移（OTC 公開資料）

そこで、本事業により、比較的低価格のチタン原料を利用できるようにすると、チタン原料の価格の高騰に歯止めをかけることに繋がる。チタン需要は拡大が見込まれており、原料価格を安定することができれば、チタン産業全体が安定し、チタンの生産が安定化していくこととなる。本事業での技術開発は、チタン製造を支える技術開発で有り、原料安定供給を指示するものである。従って、チタン産業の安定化と共に、実機での事業化が推進されることになる。

3-2 波及効果

1. 研究開発を行う技術の波及効果について

1-1. 地域や周辺への波及効果

(1) チタン産業へ及ぼす影響

本事業を行うことによって、日本国内のチタンサプライチェーンに影響を及ぼすことになる(図10)。チタン鉱石側の価格を安定させ、上工程でのチタンコストを安定させると、下工程側への供給が安定し、チタン産業の不安を解消することができる。

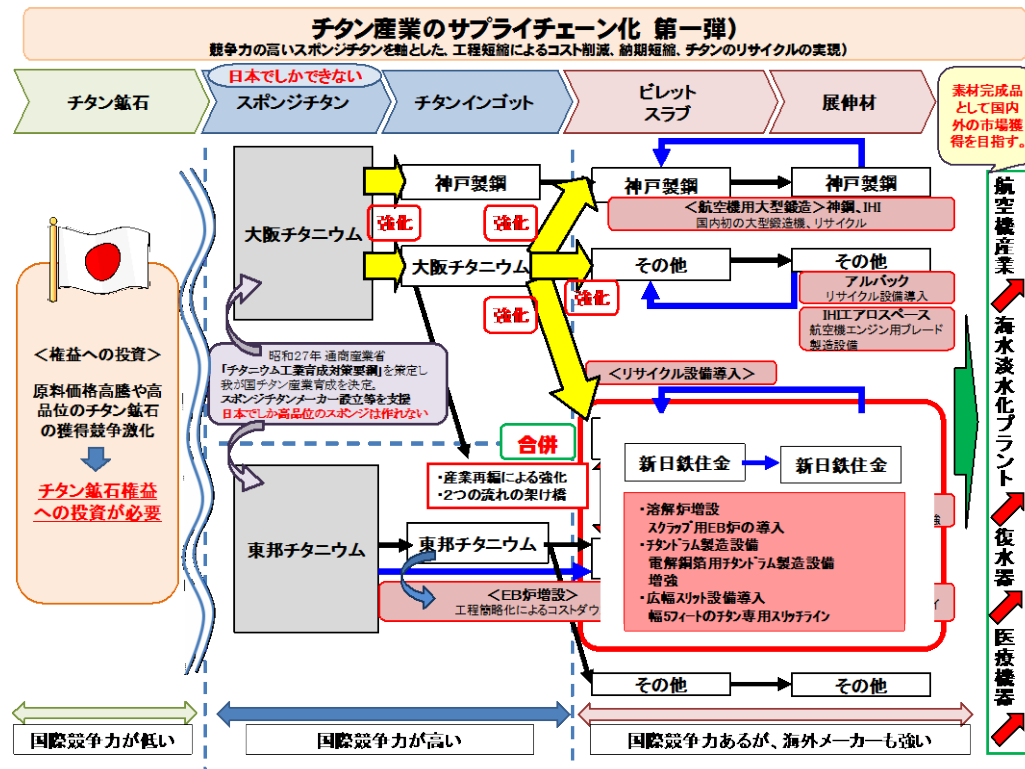


図 10 チタン産業に与える影響

(2) 本事業が及ぼす波及効果イメージ

本事業を行うことにより、図 11 に示すような影響が生じることが見込まれる。補助事業を行うために、資材調達および施工、工事などを行うために、地域に経済効果を生み出す。鉱石価格の安定により、チタン産業自身の競争力が安定し、堅調な需要が見込まれる。そのため、低品位鉱石の購入量増加による経済効果を生み出す。チタンの堅調な需要に基づいて、チタン製造に必要な備品、設備増強、労働力などが必要となり、経済効果を生出す。また、廃棄物量削減効果により、環境負荷の低減効果も予想される。

金額での算出は出来ないが、チタン産業のコスト競争力強化に伴う経済効果は多大である

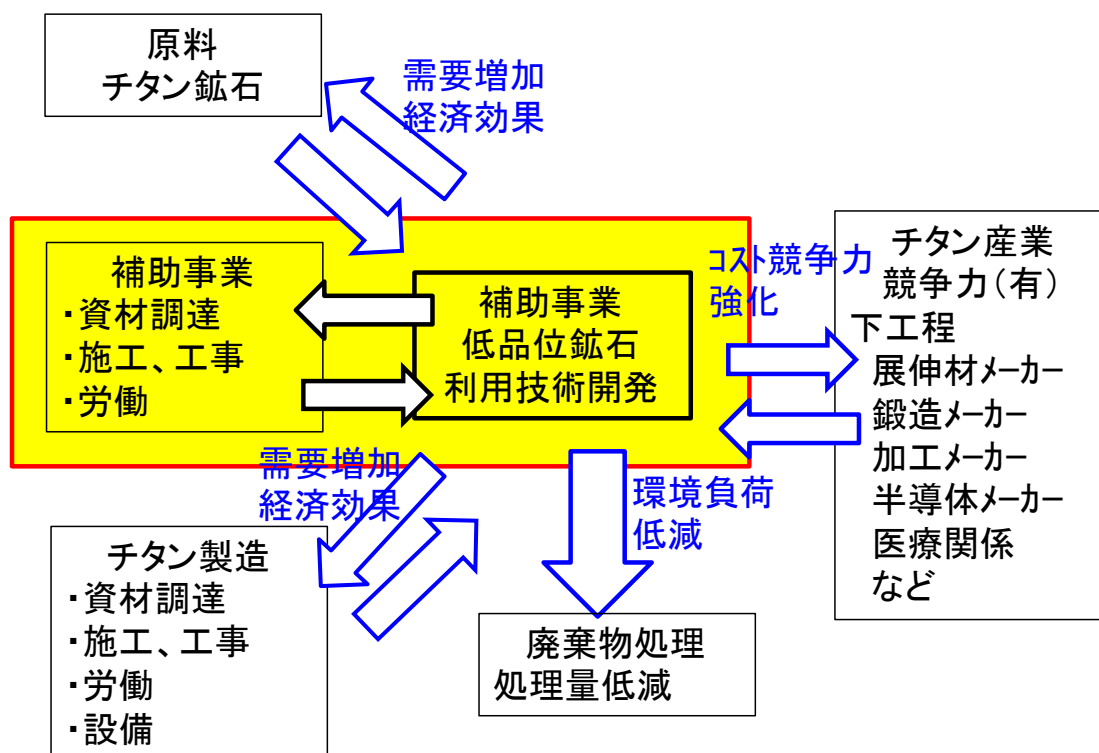
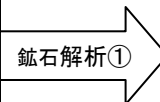
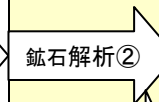
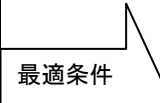
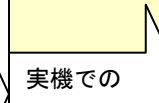
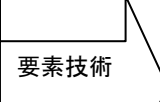
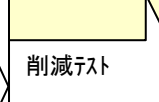
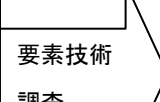
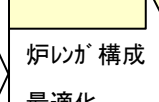
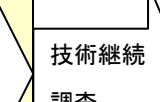
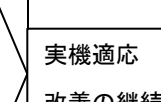


図 1 1 波及効果

4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

4-1 研究開発計画

表2 研究開発計画

実施項目／年度	H22 度	H23 年度	H24 年度	H25 年度	H26 年度
要素技術 1 原料改質技術の開発 鉱石中の操業阻害元素濃度，放射性元素濃度低減	 鉱石解析①	 鉱石解析② 低減技術確立	 低減技術のサプライヤーへの展開 （事業への反映）		
要素技術 2 塩化炉操業技術の改善 操業条件の最適化 技術開発	 最適条件の調査	 実機での条件最適化	 実機適応 改善の継続		
要素技術 3 塩化炉操業技術の改善 廃棄物削減技術開発	 要素技術調査	 削減テスト 技術確立	 実機適応 改善の継続		
要素技術 4 塩化炉操業技術の改善 炉体劣化防止技術開発	 要素技術調査	 炉体構成最適化	 技術継続調査	 実機適応 改善の継続	

4-2 研究開発実施者の実施体制・運営

研究開発体制としては、O T C単独での開発を行った。社内の関連部門としては、チタン製造部および原料部にて試作試験、テスト、評価を行った。テスト装置、テスト部品の購入、作成については設備部にて事業推進を行った。

社内にて開発進捗管理を行い、3回/年の進捗確認会により進捗管理を行い、本事業を推進した。

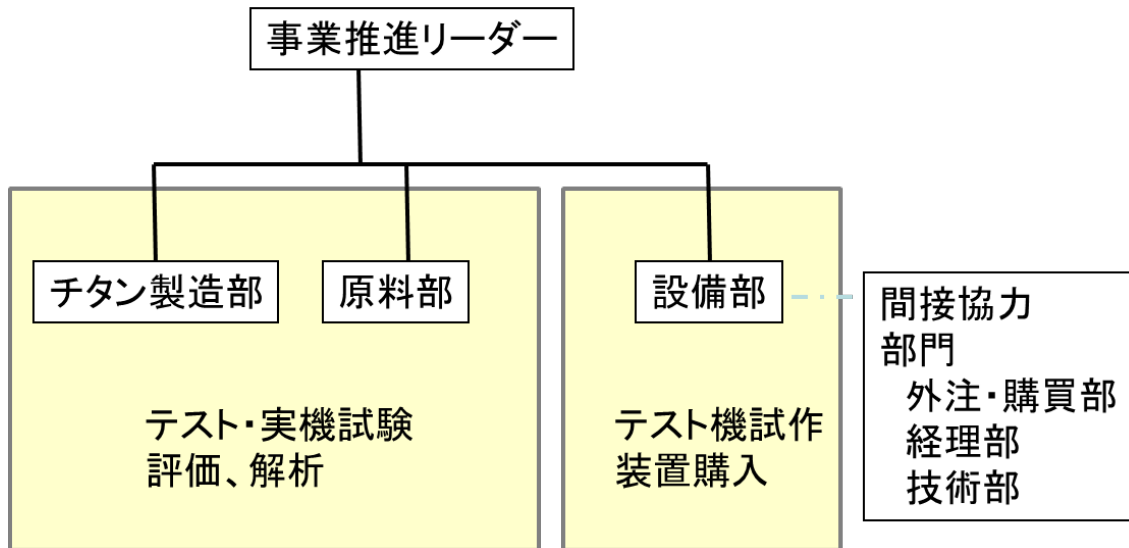


図 1 2 研究開発実施体制

レアメタル・レアアース等の
代替材料・高純度化技術開発
プロジェクト

事後評価用資料（各論）

平成２６年１０月１７日

（９）東邦チタニウム株式会社

目 次

1. 事業の目的・政策的位置付け.....	2
1－1 事業の目的	
2. 成果、目標の達成度.....	4
2－1 全体目標	
2－2 個別目標	
2－3 目標の成果・達成度	
3. 事業化、波及効果.....	8
3－1 事業化の見通し	
3－2 波及効果	
4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	9
4－1 研究開発計画	
4－2 研究開発実施者の実施体制・運営	

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1 事業の目的

世界の金属チタン市場は、今後も着実な成長が見込まれている。しかし、その金属チタンの原料価格は、一時高騰したが高騰前の価格に戻らないものと推測されている。また、その原料価格の高騰問題が再燃する可能性もあるため、原料供給リスクへの対応が急がれる（図1）。

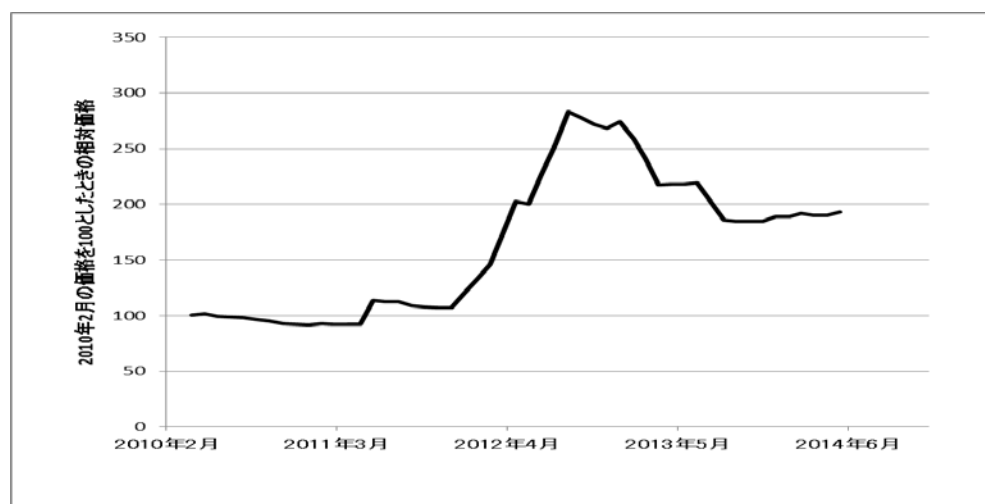


図1 金属チタンの原料価格推移（高品位(TiO₂ 95%)原料）

他方、一般的に金属チタンの原料は、比較的、高品位の原料を使用している。しかし、その高品位原料中にも、なお鉄、マグネシウムなどの不純物酸化物が多く残留している。その不純物酸化物は、金属チタン製錬の塩化工程（中間原料（TiCl₄）製造工程）で、不純物塩化物（塩化鉄など）となり、塩化残渣として回収される。また、その塩化残渣には、塩化工程で反応しなかった微細な酸化チタンやコークスなど（以下、未反応原料）も含まれる。その塩化残渣は、中和、脱水処理し廃棄処分するため、環境にも大きな負荷となっている。

そこで、高品位原料より安価で入手が容易である中低品位原料の高品位化技術の実用化に向けた取組みとして、「選択塩化法」による中低品位原料（チタンスラグ、TiO₂品位：80～90%）のアップグレード技術（図2）と、金属チタン製錬の中間原料(TiCl₄)製造工程で発生する塩化残渣の処理技術（図3）の統合化（図4）を目指した基本技術の確立（～ラボ試験）を目的とする。

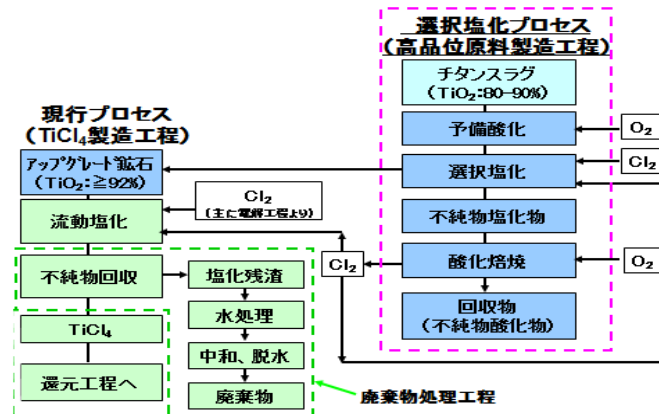


図2 チタンスラグの選択塩化法によるアップグレードプロセス案

現行プロセス(TiCl₄製造工程)

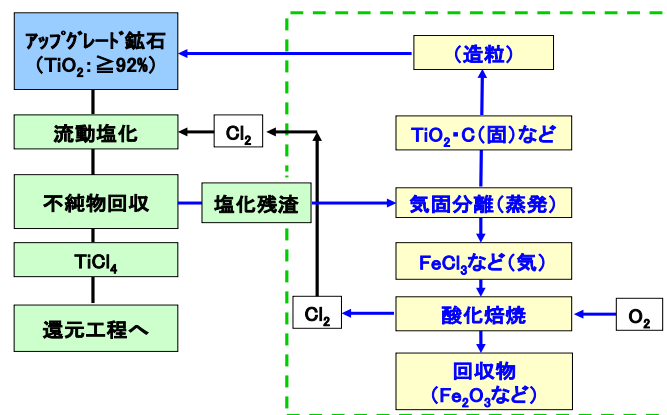


図3 チタン製錬塩化工程の廃棄物処理プロセス案（乾式回収法）

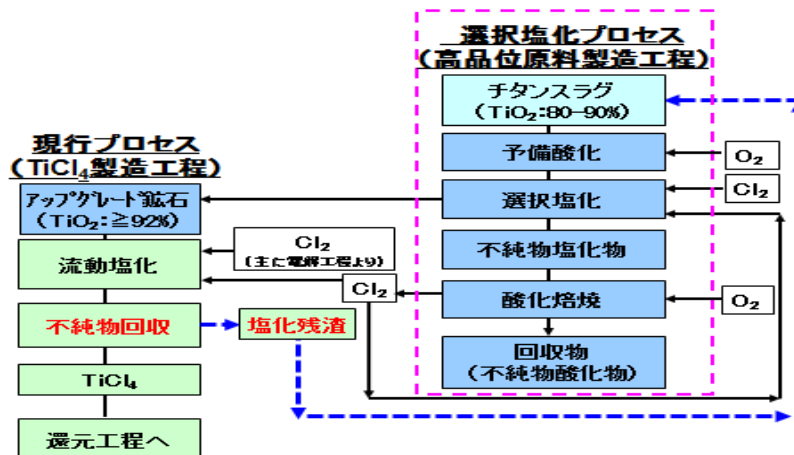


図4 選択塩化工程と廃棄物処理工程の統合化プロセス案

2. 研究開発成果、目標の達成度

2-1 全体目標

中低品位鉱石であるチタンスラグ(80～90%)を用いて、選択塩化法により 92%以上にアップグレードすることを目標とする。

2-2 個別目標 (表 1)

(1) 選択塩化法によるチタンスラグのアップグレード技術開発 (図 2 参照)

①アップグレード技術

予備酸化処理した TiO_2 品位 84%のチタンスラグを用いて、選択塩化炉にて、流動状態で選択塩化反応試験を実施し、 TiO_2 品位 92%以上にアップグレードできるかを確認する。

②塩素回収技術

チタンスラグの主要不純物成分で構成された人工塩化物 (FeCl_2 , MgCl_2 , MnCl_2) を用いて、気化炉で上記塩化物を気化させ、その塩化物ガスと酸素と反応させ (酸化焙焼)、連続的に効率よく塩素が回収 (70%以上) できるかを確認する。

(2) チタン製錬塩化工程の廃棄物処理プロセス技術開発 (図 3 参照)

①未反応原料回収技術

チタン製錬の塩化工程で発生する塩化残渣中の未反応原料が、チタン製錬塩化工程などへ再利用できるかを調査する。

②塩素回収技術

上記の塩化残渣を原料として、(1) -②と同様な試験を実施し、塩素が効率良く (70%以上) 回収できるかを確認する。

(3) 選択塩化工程と廃棄物処理工程との統合化技術開発 (図 4 参照)

上述の (1) と (2) の結果などを踏まえて、選択塩化工程と廃棄物処理工程との統合化の可能性を机上検討する。

表 1 個別要素技術の目標設定

要素技術			目標・指標 (事後評価時点)	選定理由・根拠等
(1)	選択塩化法による アップグレード技 術 開発 (図 2 参照)	①アップグレード技 術 (選択塩化法)	アップグレード後 TiO_2 品位: $\geq 92\%$	92%以上であればチ タン製錬の塩化工程 で使用する可能性 があるため
		②塩素回収技術 (酸化焙焼法)	効率良く塩素が回収 できるかを確認する (塩素回収率: $\geq 70\%$ (暫定))	まだ、温度等の各因子 との影響が把握でき ていないため

(2)	チタン製錬塩化工程の廃棄物処理プロセス 技術開発(図3参照)	①未反応原料回収技術	未反応原料の再利用工程を調査する。	まずは、再利用工程を確定する必要があるため
		②塩素回収技術(酸化焙焼法)	効率良く塩素が回収できるかを確認する(塩素回収率: $\geq 70\%$ (暫定))	まだ、温度等の各因子との影響が把握できていないため
(3)	選択塩化工程と廃棄物処理工程との統合化 技術開発(図4参照)	①統合化技術((1) + (2))	統合化の可能性を机上検討する。	(1)と(2)の結果にて統合化の可能性が推測できるため

2-3 成果、目標の達成度(表2)

(1) 選択塩化法によるチタンスラグのアップグレード技術開発(図2参照)

①アップグレード技術

予備酸化した TiO_2 品位 84% のチタンスラグ用いて、流動状態で選択塩化試験を実施したところ、 TiO_2 品位 92% 以上にアップグレードすることができた(図5)。

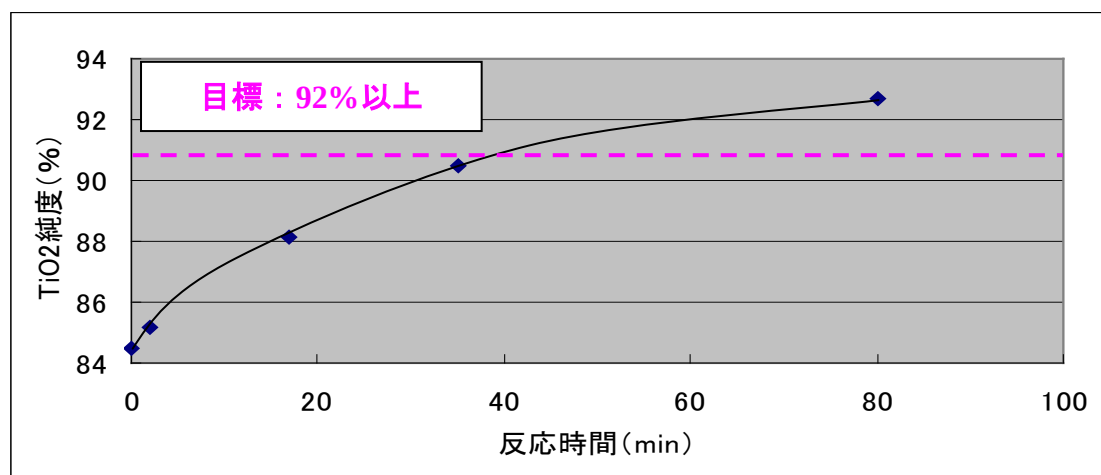


図5 流動選択塩化試験結果

また、当初の選択塩化プロセス案(図2)より、工程簡略ができるプロセス(同時予備酸化・選択塩化)を検討したところ、実現の可能性があることを確認した(図6)。

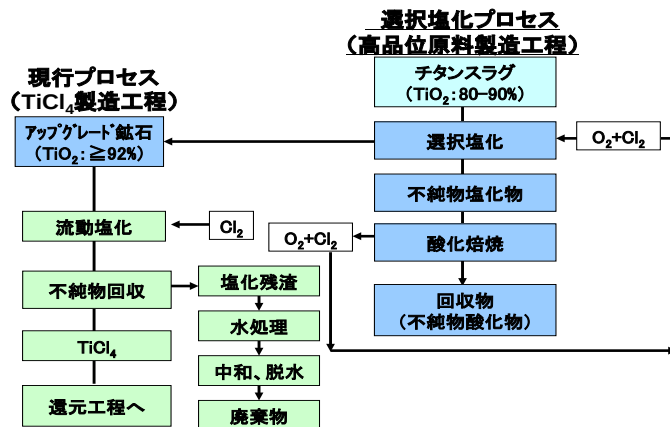


図6 チタンスラグの選択塩化法によるアップグレードの実用化プロセス案

②塩素回収技術

チタンスラグの主要不純物成分で構成された人工塩化物を利用し、酸化焙焼により不純物塩化物ガス中の塩素を、連続的に効率良く回収（70%以上）できることが確認できた。

以上、①、②の結果から、現時点では図6のプロセスで実用化を目指す予定である。

（2）チタン製錬塩化工程の廃棄物処理プロセス技術開発

①未反応原料回収技術

未反応原料をチタン流動塩化炉へ再利用することは、技術、経済合理性の面などから困難であることが判った。ただし、未反応原料には、コークスが多いため、今後、未反応原料自体が有価物（燃料など）になるかを検討する。

②塩素回収技術

塩化残渣中の不純物塩化物を気化させ、酸化焙焼したところ、効率良く連続的に塩素を回収（70%以上）できることが判った。

以上、①、②の結果から、現時点では図7のプロセスで実用化を目指す予定である。

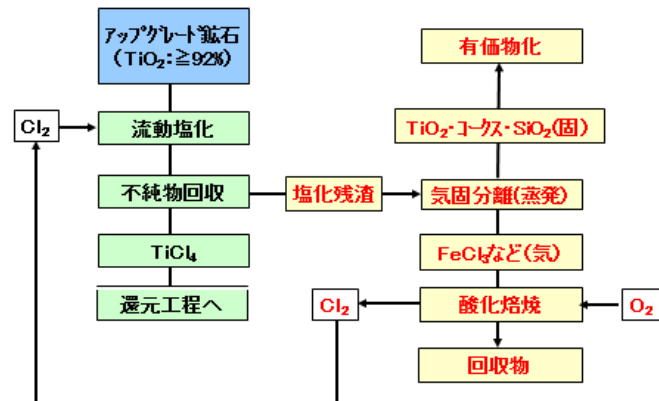


図7 チタン製錬塩化工程の廃棄物処理の実用化プロセス案（乾式回収法）

（３）選択塩化工程と廃棄物処理工程との統合化技術開発

上述の（１）と（２）の結果などを踏まえ、選択塩化工程と廃棄物処理工程の統合化を机上検討した結果、塩化残渣を選択塩化プロセスで一括処理することは難しいと推測された。（塩化残渣中にある大量のコークスが、選択塩化プロセスの酸化焙焼工程でCO₂/COガスとなり、酸化焙焼反応（塩素回収）を阻害される可能性があるため）。

今後、図7の廃棄物処理プロセスで処理された不純物塩化物ガスのみを選択塩化プロセスで処理するという統合化プロセス（図8）の実用化を目指す。

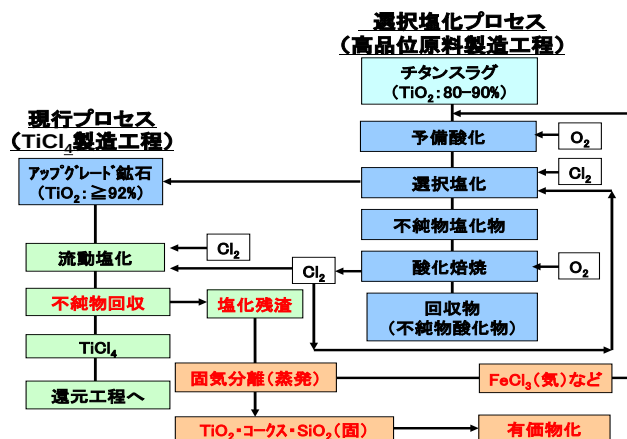


図8 選択塩化工程と廃棄物処理工程の統合化の実用化プロセス案（机上検討結果）

表 2 目標に対する成果・達成度一覧表

要素技術			目標・指標	成果	達成度
(1)	選択塩化法によるアップグレード技術開発（図 6 参照）	①アップグレード技術（選択塩化法）	アップグレード後 TiO ₂ 品位：≥92%	92%以上	達成
		②塩素回収技術（酸化焙焼法）	効率良く塩素が回収できるかを確認する（塩素回収率：≥70%（暫定））	70%以上	達成
(2)	チタン製錬塩化工程の廃棄物処理プロセス技術開発（図 7 参照）	①未反応原料回収技術	未反応原料の再利用工程を調査する。	有価物化の可能性有	達成
		②塩素回収技術（酸化焙焼法）	効率良く塩素が回収できるかを確認する（塩素回収率：≥70%（暫定））	70%以上	達成
(3)	選択塩化工程と廃棄物処理工程との統合化技術開発（図 8 参照）	①統合化技術（（1）＋（2））	統合化の可能性を机上検討する。	統合化の可能性有	達成

3. 事業化、波及効果

3-1 事業化の見直し

現在、金属チタンの原料価格は事業開始時より更に緩んでいるものの、高騰前の価格には戻っておらず、将来、再び高騰する懸念もある。（図 1 参照）また、環境負荷低減の面から廃棄物の資源化技術は重要である。

そこで、今後、当社としては、当初の実用化計画どおり、まずはチタン塩化工程の廃棄物処理プロセス技術（塩素回収、未反応原料の有価物化）を実用化させ、最終的には、チタンスラグの選択塩化法によるアップグレード技術との統合化を目指す。

3-2 波及効果

本補助事業において、当初の計画通り環境調和型低品位チタン鉱石のアップグレードの基本技術が確立できた。この技術の実用化による技術革新によって、原料安定調達と

廃棄物の資源化による環境負荷低減やチタン製錬のコスト削減が可能となる。更に、チタン鉱石がない我が国において、国内のチタン製錬業界の成長、チタン産業の飛躍的な発展に貢献できる。

4. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

4-1 研究開発計画（表 3）

表 3 に示すとおり、平成 26～27 年度は、廃棄物処理プロセスに注力し、要素技術（ラボ試験）、スケールアップ（ベンチ試験）技術を確立する。その後、生産技術（パイロット試験）を確立したうえで、平成 30 年度に実用化する。

一方、選択塩化プロセスは、平成 28 年度から、ベンチ、パイロット試験を実施し、平成 32 年度に廃棄物処理プロセスと統合させ、「環境調和型低品位チタン鉱石のアップグレード技術」の実用化を実現する。

表 3 環境調和型低品位鉱石のアップグレード技術開発の実用化計画

技術項目	平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度	平成31年度	平成32年度
選択塩化法によるチタンスラグのアップグレード技術開発									
基礎研究	→								
実用化研究(ラボ試験)		→							
実用化研究(ベンチ試験)					→	→			
実証化研究(パイロット試験)							→	→	
実用化									→
チタン製錬塩化工程の廃棄物処理プロセス技術開発(乾式回収法)									
基礎研究	→								
実用化研究(ラボ試験)		→	→						
実用化研究(ベンチ試験)				→					
実証化研究(パイロット試験)					→	→			
実用化							→	→	
									統合化

4－2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、東邦チタニウム(株)が経済産業省からの委託を受けて実施した。また、研究開発の実施に当たっては、研究開発を統括するためのプロジェクトリーダーを設置した(図9)。

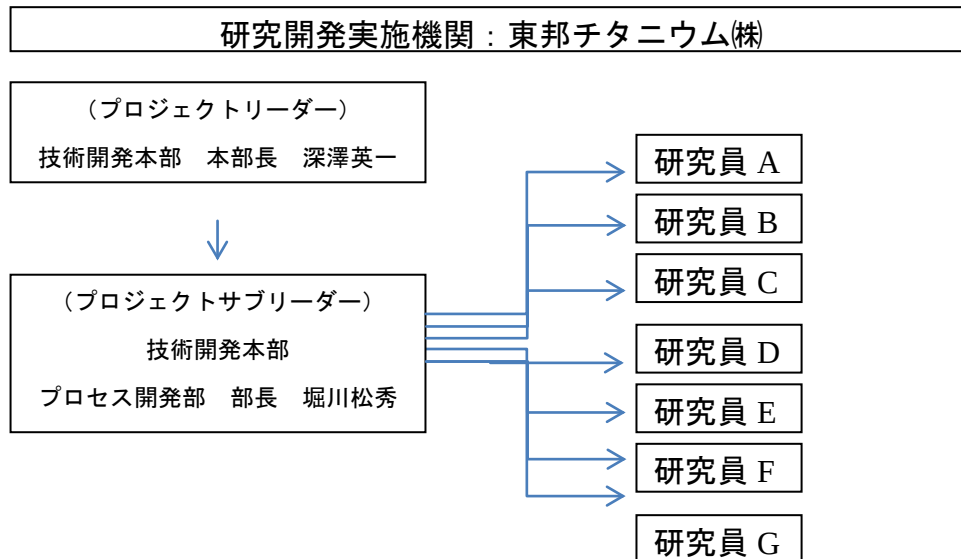


図9 研究開発実施体制