

「希少金属代替材料開発プロジェクト／「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石」及び「排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発、透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発」

事後評価報告書（案）概要

目 次

分科会委員名簿 .....	1
プロジェクト概要 .....	2
評価概要（案） .....	19
評点結果 .....	25

## はじめに

本書は、第31回研究評価委員会において設置された「希少金属代替材料開発プロジェクト／「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石」及び「排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発、透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発」」（事後評価）の研究評価委員会分科会（第1回（平成24年12月10日））において策定した評価報告書（案）の概要であり、NEDO技術委員・技術委員会等規程第32条の規定に基づき、第35回研究評価委員会（平成25年3月26日）にて、その評価結果について報告するものである。

平成25年3月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会「希少金属代替材料開発プロジェクト／「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石」及び「排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発、透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発」」分科会  
（事後評価）

分科会長 内田 裕久

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 研究評価委員会

「希少金属代替材料開発プロジェクト／「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石」及び「排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発、透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発」」（事後評価）

分科会委員名簿

(平成24年12月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	うちだ ひろひさ 内田 裕久	東海大学 工学部 原子力工学科 教授
分科会長 代理	ほその ひでお 細野 秀雄	東京工業大学 フロンティア研究機構 教授
委員	いりえ としお 入江 年雄	株式会社 三徳 経営企画部知財課 課長
	おおもり けんじ 大森 賢次	日本ボンド磁性材料協会 専務理事 兼 事務局長
	さとう さとし 佐藤 智司	千葉大学 大学院工学研究科 共生応用化学専攻 教授
	ふじた じゅんいち 藤田 淳一	筑波大学 大学院 数理物質科学研究科 電子物理専攻 教授
	ふじた てつや 藤田 哲也	株式会社 いすゞ中央研究所 エンジン研究第2部 主任研究員
	やまもと きよし 山本 清	旭硝子株式会社 中央研究所 ガラス・化学境界領域技術グループ グループリーダー

敬称略、五十音順

# プロジェクト概要

		最終更新日	平成24年11月22日
プログラム（又は施策）名	ナノテク・部材イノベーションプログラム 環境安心イノベーションプログラム（資源制約克服／3R）		
プロジェクト名	希少金属代替材料開発プロジェクト	プロジェクト番号	P08023
担当推進部/担当者	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 研究開発項目⑨-1、⑨-3-1、⑨-3-2 電子・材料・ナノテクノロジー部 下前直樹（平成23年4月～平成24年11月現在） 川上信之（平成23年1月～平成23年3月） 三宅倫幸（平成22年2月～平成22年12月）</li> <li>・ 研究開発項目⑩-1A、⑩-1B、⑩-2 電子・材料・ナノテクノロジー部 柳喜芳（平成23年3月～平成24年11月現在）</li> </ul>		
0. 事業の概要	<p>希少金属は、我が国の産業分野を支える高付加価値な部材の原料であり、近年需要が拡大している。しかし、途上国においても著しく需要が拡大していることや、他の金属と比較して希少であることから、その代替性も著しく低いとともに、その偏在性ゆえに特定の産出国への依存度が高い等から、我が国の中長期的な安定供給確保に対する懸念が生じており、実際、平成22年7月にはレアアースの供給懸念が顕在化した。</p> <p>本プロジェクトは、Nd-Fe-B系磁石向けネオジウムおよびジスプロシウム、排ガス浄化向けセリウム、透明電極向けインジウムを研究対象元素とした代替材料の開発、または使用量低減技術の開発を目的とし、本プロジェクトを通じて持続可能な社会構築に貢献する。</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p><b>【NEDOが関与する意義】</b> 本研究開発は、「ナノテク・材料分野」に列挙されている「戦略重点科学技術」のうち「資源問題解決の決定打となる希少資源・不足資源代替材料革新技術」にあたるものである。明確な政策意図のもと行われる事業であり、レアメタル・レアアースの使用量を低減するために産官学の連携を取った高度な技術開発が必要であること、1企業での開発リスクが非常に高いこと等の観点からNEDOが推進すべき研究開発プロジェクトである。研究開発対象元素は、研究開始前にリスク調査を行うことで、国としてリスクの高い元素を定期的に把握し選定している。また、文部科学省/JSTの元素戦略プロジェクトと連携し基礎から実用化までの間隙のない研究開発支援を府省連携で進めており我が国の科学技術力の向上という観点からも極めて意義が高いものである。</p> <p><b>【実施の効果】</b></p> <p>(1) ⑨-1 Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の研究          ⑨-3-1 Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の実用化に向けた技術開発／窒化鉄ナノ粒子の大量合成技術およびバルク化技術の構築          ⑨-3-2 Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の実用化に向けた技術開発／非平衡状態相の形成を利用したNd系磁石代替実用永久磁石の研究開発</p> <p>2008年のNd-Fe-B系焼結磁石の国内生産量は19,000～20,000tonであり、ネオジウムの原料であるジウム（ネオジウムとプラセオジウムの混合物）の使用量は5,000～5,300tであった。また、2011年のNd-Fe-B系焼結磁石の国内生産量は9,800～10,500tであり、ジウム使用量は4,000～4,300tと2008年に比べ減少している。これは需要家の一部で希土類の相場高騰によるネオジウム磁石離れを引起したためであるが、ハイブリット車等の駆動用モータは、急な設計変更ができないため、この分野でのNd-Fe-B系焼結磁石使用量は堅調に推移する。2011年のジウムの需要金額は約11億ドル（単価266\$/kg）、892億円である。（\$は米国ドル。為替レートは78円/\$で計算。以下同様。）</p> <p>本技術開発により、ネオジウム磁石を100%削減可能となった場合、4,300t、892億円の削減効果があり、本プロジェクトによる削減効果は大きく、日本の産業分野へ貢献する重要な技術である。</p>		

2008年のネオジム系焼結磁石に使用されたジスプロシウムは750tであった。2011年の使用量予測は600tであり2008年比減量している。これは需要家の一部で希土類の相場高騰により、ジスプロシウム添加量を削減したネオジム磁石への代替やネオジム磁石離れを引起したためであるが、ハイブリット車等の駆動用モータは、急な設計変更ができないため、この分野でのジスプロシウム使用量は堅調に推移している。2011年のジスプロシウム需要金額は約13億ドル（単価2,123\$/kg）、994億円である。

本技術開発により100%削減可能となった場合、およそ600t、994億円の削減効果があり、本プロジェクトによる削減効果は大きく、日本の産業分野へ貢献する重要な技術である。

- (2) ⑩-1A 排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発／排ガス浄化用触媒のセリウム量低減代替技術の開発  
⑩-1B 排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発／高次構造制御による酸化セリウム機能向上技術および代替材料技術を活用したセリウム使用量低減技術開発

2009年実績でセリウムの生産量は全世界で約5万tであり、その大半が中国で生産されている。国内での需要量は年間11,350tであり、用途別では、研磨材向けが9,000t（79%）、次いで排ガス触媒向けが1,450t（13%）となっている。本研究開発により30%削減が可能になった場合、435tの削減効果がある。これは、2011年の酸化セリウム価格（99\$/kg）で計算すると、34億円の削減効果がある。また、これらの技術開発は、自動車産業（2009年の市場規模で約15兆円）の市場確保にも大きく寄与する。

- (3) ⑩-2 透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発／グラフェンの高品質大量合成と応用技術を活用した透明電極向けインジウム代替技術の開発

2006年実績でインジウムの生産量は全世界で480tであり、その大半が中国で生産されている。この内、ITOターゲット用として430tが使用されている。2011年の日本国内のITOターゲット使用量の実績値は929tであり、本研究開発により50%削減が可能になった場合、465tの削減効果がある。これは、2011年のインジウム地金相場価格（730\$/kg）では、265億円の削減効果がある。また、これらの技術開発は、液晶パネル（生産規模：43億9100万枚 市場規模予測14兆円（2013年予測））や太陽電池への応用や装置等の関連産業を含めて、日本の産業競争力の向上への貢献が期待される。

#### 【実施の効果（費用対効果）】

##### 1. 定量効果

- (1) 費用：37億円  
(2) 効果：2,185億円/年  
内、892億円/年（永久磁石向けネオジム削減）  
994億円/年（永久磁石向けジスプロシウム削減）  
34億円/年（排ガス触媒向けセリウム削減）  
265億円/年（透明電極向けインジウム削減）

##### 2. 定性効果

本プロジェクトでターゲットとしているネオジム、ジスプロシウムは、ネオジム磁石としてHEV車、EV車、風力発電機に、また、セリウムは自動車に、インジウムはカラーテレビや携帯端末など、日本の産業競争力を支える製品に使われている。本開発によるレアメタルへの依存リスクの軽減は、本対象のみならず日本の産業競争力の向上に寄与する。

【事業の背景・目的・位置付け】

現在及び将来において我が国経済を牽引していく産業分野において、競争力を発揮し世界を勝ち抜いていくために、多様な連携（川上・川下産業の垂直連携、材料創製・加工との水平連携）による研究開発の推進により、当該市場のニーズに応える機能を実現する上で不可欠な高品質・高性能の部品・部材をタイムリーに提供し、又は提案することができる部材の基盤技術を確立することを目的とした「ナノテク・部材イノベーションプログラム」、及び環境・資源制約を克服し循環型経済システムを構築することを目的とした「環境安心イノベーションプログラム」の一環として本プロジェクトを実施する。

希少金属は、我が国産業分野を支える高付加価値な部材の原料であり、近年その需要が拡大している。しかし、途上国における著しい需要の拡大や、そもそも他の金属と比較して、金属自体が希少であり、代替性も著しく低く、その偏在性ゆえに特定の産出国への依存度が高いこと等から、我が国の中長期的な安定供給確保に対する懸念が生じている。これに対する具体的な対策として、平成 18 年 6 月、資源エネルギー庁から報告された「非鉄金属資源の安定供給確保に向けた戦略」において、(1)探鉱開発の推進、(2)リサイクルの推進、(3)代替材料の開発、(4)備蓄、等が整理され、現在それぞれにおける具体的な対策が進められている。

本研究開発は、この総合的な対策の一部として非鉄金属資源の代替材料及び使用量低減技術の確立を目的としている。

II. 研究開発マネジメントについて

事業の目標

最終目標（各研究開発項目終了年度末）では、希少金属元素の使用原単位（一製品当たり）について現状と比較して下記に示した低減が可能となる製造技術を開発し、ユーザー企業、大学等の外部機関に対して機能評価のためにラボレベルでサンプル提供できる（試料提供）水準に至るまでの技術を確立する。また、製品の機能や製造コストは少なくとも現状と同等を維持することを前提とする。

研究開発項目	対象元素	使用原単位の低減目標値
⑨-1	永久磁石向けジスプロシウム(Dy)	現状から 30%以上低減
⑨-3-1 ⑨-3-2	永久磁石向けネオジム(Nd)、ジスプロシウム(Dy)	現状から 100%低減(代替)
⑩-1A、⑩-1B	排ガス触媒向けセリウム(Ce)	現状から 30%以上低減
⑩-2	透明電極向けインジウム(In)	現状から 50%以上低減

事業の計画内容	主な実施事項	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy	総額
事業の計画内容	①透明電極向けインジウム使用量低減技術開発								
	②透明電極向けインジウム代替材料開発								
	③希土類磁石向けジスプロシウム低減技術開発								
	④超硬工具向けタングステン使用量低減技術開発								
	⑤超硬工具向けタングステン代替材料開発								
	⑥-1 排ガス浄化向け白金族/日産自動車他								
	⑥-2 排ガス浄化向け白金族/産総研他								

	⑦-1 精密研磨向けセリウム／三重県他									
	⑦-2 精密研磨向けセリウム／立命館大学他									
	⑧ 蛍光ランプ向けテルビウム・ユウロピウム									
	⑨-1 Nd-Fe-B 系磁石を代替する新規永久磁石									
	⑨-2 超軽量高性能モータ向けイットリウム系複合材料									
	⑨-3-1 Nd-Fe-B 系磁石を代替する新磁石／東北大学他									
	⑨-3-2 Nd-Fe-B 系磁石を代替する新磁石／大阪大学他									
	⑩-1A 排ガス浄化向けセリウム／名古屋工業大学他									
	⑩-1B 排ガス浄化向けセリウム／東北大学他									
	⑩-2 透明電極向けインジウムを代替するグラフェン									
	平成 22 年度リスク調査									
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位：百万円)  契約種類： ○をつける (委託 ○) 助成 ( ) 共同研究 ( ) (負担率 ( ))	会計・勘定	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy	総額	
	一般会計 (⑨、⑩)			900	2,497	270	30		3,697	
	特別会計 (電源・需給の別)								-	
	加速予算(成果普及費を含む)								-	
	総予算額 (⑨、⑩)			900	2,497	270	30		3,697	
	(委託)			900	2,497	270	30		3,697	
	(助成) : 助成率(1/2) (共同研究) : 負担率								-	
開発体制	経産省 担当原課	製造産業局非鉄金属課								
	プロジェクトリーダー (開発責任者)	⑨-1	東北大学未来科学技術共同研究センター			教授	高橋研			
		⑨-3-1	東北大学未来科学技術共同研究センター			教授	高橋研			
		⑨-3-2	大阪大学大学院工学研究科			准教授	井藤幹夫			
		⑩-1A	名古屋工業大学大学院工学研究科			教授	小澤正邦			
		⑩-1B	東北大学未来科学技術共同研究センター			教授	宮本明			
		⑩-2	技術研究組合単層 CNT 融合新材料研究開発機構			プロジェクト本部長	長谷川雅考			

	委託先	<p>⑨-1 帝人(株)、戸田工業(株)、トヨタ自動車(株)、(独)物質・材料研究機構、京都大学、倉敷芸術科学大学、千葉工業大学、東北大学 再委託先：(独)産業技術総合研究所、(財)電気磁気材料研究所 共同実施先：大同特殊鋼(株)、(株)本田技術研究所、日亜化学(株)</p> <p>⑨-3-1 (株)T&amp;Tイノベーションズ、戸田工業(株)、秋田大学、京都大学、倉敷芸術科学大学、東北大学、広島大学 再委託先：(独)産業技術総合研究所、住友電気工業(株)</p> <p>⑨-3-2 日産自動車(株)、大阪大学、九州大学、千葉工業大学、長崎大学 共同実施先：大同特殊鋼(株)</p> <p>⑩-1A (株)アドマテックス、(株)ノリタケカンパニーリミテド、名古屋工業大学、 再委託先：共立マテリアル(株) 共同実施先：(株)キャタラー、トヨタ自動車(株)</p> <p>⑩-1B 第一稀元素化学工業(株)、(株)本田技術研究所、(株)ルネッサンス・エナジー・リサーチ、宮城県産業技術総合センター、熊本大学、東北大学、名古屋大学、北海道大学 再委託先：(独)産業技術総合研究所、八戸工業高等専門学校 共同実施先：トヨタ自動車(株)、(株)豊田中央研究所</p> <p>⑩-2 技術研究組合単層CNT融合新材料研究開発機構 加入機関：(株)アルバック、尾池工業(株)、(株)カネカ、大日本印刷(株)、東レ(株)、(独)産業技術総合研究所</p>
情勢変化への対応	<p>本プロジェクトでは、研究開発を実施する前に、レアメタル・レアアースの各元素についてリスク調査を行い、調査時点でリスクの高い国として取り組むべき重要な元素を選定し、研究開発の対象元素としている。この調査は、平成17年度、平成18年度、平成20年度、平成22年度と実施している。平成22年7月以降大きな問題となったレアアースの供給不安の顕在化に対し、国としてこの問題を先取りした研究開発の動きを取っており、研究成果が出ていること、研究成果の上市化予定等を示すことができとこと一定の評価が得られている。</p> <p>平成19年度からインジウム、ジスプロシウム、タングステンの3鉱種について実施しており、平成20年度の鉱種のリスク調査結果を受けて、平成21年度から、新たに白金族、セリウム、テルビウム・ユウロピウムの3鉱種について実施している。</p> <p>平成21年度以降、レアアース等に対する供給不安が現実のものとなってきたことから、既に研究開発を開始している鉱種について緊急に対策を開始した。具体的には、平成21年度補正予算および平成23年度予算でジスプロシウム(ネオジム含む)を、平成22年度補正予算でセリウムおよびインジウムに対する研究開発を実施した。</p> <p>また、平成22年度には鉱種のリスク調査を実施し直近のリスクの把握を行い、平成23年度以降の研究開発のための準備を行った。</p>	
評価に関する事項	<p>事前評価</p> <p>中間評価</p> <p>事後評価</p>	<p>⑨-1： 未実施</p> <p>⑨-3-1、⑨-3-2： 平成23年度実施 担当部 電子・材料・ナノテクノロジー部</p> <p>⑩-1A、⑩-1B、⑩-2： 平成22年度実施 担当部 電子・材料・ナノテクノロジー部</p> <p>未実施</p> <p>平成24年度実施</p>



Ⅲ. 研究開発成果について

⑨-1 Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の研究

1. 事業全体の成果

目標	研究開発成果	達成度
(1) 窒化鉄系材料の開発 ・80%以上の $\text{Fe}_{16}\text{N}_2$ 相からなる微粒子を作製し、高性能磁石化に資する基本特性を確認する。 ・磁石化に向けて、より保磁力を高める磁性粉末の開発指針を得る。	(1) 窒化鉄系材料の開発 ・間接合成法により80%以上の高純度 $\alpha$ - $\text{Fe}_{16}\text{N}_2$ ナノ粒子粉末の合成に成功した。 ・第一原理計算による材料設計から、ある金属元素で一部のFeサイトを置換した $\text{Fe}_{12}\text{M}_4\text{N}_2$ 材料では、永久磁石のポテンシャルを有することが分かった。	(1) 達成
(2) R-Fe-N系材料の開発 ・モータ用磁石としての実用を考え、保磁力20kOe程度を目標とする。	(2) R-Fe-N系材料の開発 ・SmFeN粉末にZnを添加し熱処理した等方性ボンド磁石で保磁力20kOe以上が得られた。	(2) 達成

2. 研究開発項目毎の成果

(1) 窒化鉄系材料の合成とその基礎特性把握

- ・いくつかの直接合成法では、窒化したナノ粒子を生成することに成功し、部分的ではあるものの所望相である  $\alpha$ "- $\text{Fe}_{16}\text{N}_2$  相を得ることに成功している。
- ・間接合成法では、独自に構築した鉄化合物原料合成技術と熱処理の技術の融合により、グラムスケールで生成率80%を超える高純度の  $\alpha$ "- $\text{Fe}_{16}\text{N}_2$  ナノ粒子粉末の合成に成功した。これにより、本研究開発で掲げた当初目標値(80%以上)を達成した。

(2) R-Fe-N系磁石の高性能化に向けた要素技術開発

- ・原料粉の微粉化は保磁力増加に効果がある。SFN粉末を0.53  $\mu\text{m}$  まで微粉化することにより、保磁力が0.91 MA/m (11.4 kOe) から1.27 MA/m (16.0 kOe) まで増加した。
- ・Znを5 wt%添加し450  $^{\circ}\text{C}$ で熱処理した等方性ボンド磁石において、保磁力1.6MA/m (20kOe) を超える保磁力が得られ、目標をクリアした。
- ・力場や電磁場などを組み合わせた複合場焼結技術を高度化し、難焼結粉末であるSm-Fe-N磁石粉末への適用を行った。充填性や焼結性を検討し、粉末の磁石特性を生かした緻密な焼結体を作製できる技術を開発し、高性能な焼結磁石を作製するための焼結技術を達成した。その結果、焼結密度90%以上、最大エネルギー積  $(\text{BH})_{\text{max}}$  で16.1MG0eを有する等方性磁石を作製することができた。
- ・異方性粉末では、焼結による保磁力の低下が著しく、また焼結密度も80%程度となった。この保磁力はZn処理することによって改良でき、熱処理条件の適正化によって焼結体の保磁力を元の粉末より高い18kOeまで向上させることができた。
- ・冷間圧縮せん断法により作製した等方性のSm-Fe-N磁石の最大エネルギー積は8MG0e程度であったが、異方性のSm-Fe-N磁石は最大エネルギー積で20MG0e以上の高性能なSm-Fe-N磁石であることがわかった。

(3) 新規磁石材料の高特性化に向けた指導原理獲得

- ・第一原理計算による材料設計から、ある金属元素M1あるいはM2で一部のFeサイトを置換した  $\text{Fe}_{12}\text{M}_4\text{N}_2$  材料では、Fe-III (4d) サイトをM1,2で置換することにより  $\alpha$ -Feに匹敵する飽和磁気モーメントを維持しつつ、磁気異方性エネルギーが正の値を示し、永久磁石材料としてのポテンシャルを有していることが分かった。
- ・ $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$  粉をメカニカルミリングと窒化により試作し、それを磁場中配向させスパークプラズマ焼結 (SPS) 法を用いて低温焼結を行い、Znとの混合量、SPS法のプロセス条件最適化によって、バルク材で約24kOeという高保磁力を達成した。高保磁力を示した試料のSEM-EDS、アトムプローブ組織解析の結果、結晶粒表面近傍に、Sm、Znの濃化とZnリッチ粒界相の形成が観察され、保磁力向上との関連が示唆された。
- ・合成した  $\alpha$ "- $\text{Fe}_{16}\text{N}_2$  ナノ粒子粉末に対し、透過型電子顕微鏡観察およびEDS、電子線回折を用いて詳細に分析した結果、 $\alpha$ "- $\text{Fe}_{16}\text{N}_2$  ナノ粒子は単結晶  $\alpha$ "- $\text{Fe}_{16}\text{N}_2$

コアの周囲に酸化鉄シェルの複合構造となっていることが分かった。

(4) モータの評価・解析

・市場より入手した主駆動モータを基準として、これをFe-N系磁石に置き換えた場合の特性をFEMにより算定した。その結果、高配向かつ高充填の理想的なFe-N系磁石を適用することで、無負荷誘起電圧波形における電圧振幅は従来のNd-Fe-B系磁石材料を適用した場合に比べ、1.6~1.7倍増大し、トルクは40%程度向上することが分かった。

・モータ構造において、表面磁石型構造および埋込磁石型構造における磁石の不可逆減磁を検討した結果、両構造において磁石の不可逆減磁を抑制する最適な構造があることを見出した。特に、Fe-N系磁石の場合は、分布巻で埋込磁石構造とした方が、トルクおよび減磁耐力の面で有利であることが明らかになった。

⑨-3-1 Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の実用化に向けた技術開発／窒化鉄ナノ粒子の大量合成技術およびバルク化技術の構築

1. 事業全体の成果

目標	研究開発成果	達成度
(1) 分散・表面修飾の基礎技術 ・分散・表面処理により全粒子のうち単粒子の割合が50%以上となることを目指す。	(1) 分散・表面修飾の基礎技術 ・ $\mu\text{m}$ 程度の凝集粒径をもつ窒化鉄ナノ粒子の一部を1次粒子径相当の粒径まで分散安定化させることに成功した。	(1) 達成
(2) 大量合成技術 ・窒化鉄ナノ粒子を約10g/バッチで合成可能な技術の構築を目指す。	(2) 大量合成技術 ・大型炉の一部改造により10g/バッチの合成に成功した。	(2) 達成

2. 研究開発項目毎の成果

(1) 分散・表面修飾の基礎技術

・酸素および水分フリーの雰囲気下にて微小ビーズを用いることで、 $\mu\text{m}$ 程度の凝集粒径をもつ窒化鉄ナノ粒子の一部を1次粒子径相当の粒径まで分散安定化させることに成功した。

・分散後プロセスとして、1次粒子状態で分散安定化した窒化鉄ナノ粒子を用い、非水系溶剤中で非水系ゾルゲル法を用いて非磁性被覆を行って、コア-シェル型の非磁性/窒化鉄ナノ粒子の合成を実施中である。また、原料段階のプロセスとして、非磁性材料で被覆した酸化鉄ナノ粒子を原料とし、可能な限り極薄の非磁性層で被覆された窒化鉄ナノ粒子を作製するプロセスの基礎検討も実施中である。今後、分散・表面処理のプロセス条件の最適化により、全粒子のうち単粒子の割合が50%以上とすることに成功した。

(2) 大量合成技術

・合成装置の一部改造を行い、10g/バッチの合成を可能とする大型炉を用いて $2\text{g}$ /バッチで窒化鉄ナノ粒子の合成に成功した。その後、合成装置の更なる改造、ならびに、合成条件の最適化により $10\text{g}$ /バッチの合成目標を達成した。

(3) バルク化技術

・材料粘性や固化時間を中心とした母材料のスクリーニングを行った。また、簡易的に磁場中で成型できる装置を試作し、窒化鉄ナノ粒子を磁場中で $\text{mm}$ スケールにて固化できることを確認した。

・コアサイズ $30\text{nm}$ 程度のフェライト系ナノ粒子、シリカシェル厚 $2\text{-}3\text{nm}$ のコア-シェル構造ナノ粒子を用いて緻密化の検討を行った。焼成温度 $500^\circ\text{C}$ 、印加圧力 $1.2\text{GPa}$ 、保持時間1時間の条件下で相対密度98.6%の焼結体が得られた。

・複合場焼結技術を用いて鉄系ナノ粒子を低温で焼結した。超硬金型に充填し、加圧力と充填密度の関係を調べたところ、 $1.3\text{GPa}$ 程度で飽和することが明らかとなった。このときの相対密度は約60%であった。

・マグネタイト（酸化鉄）を用いて、数  $10\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$  程度の顆粒化を行った。この結果、充填時の飛散や金型クリアランスへの噛み込み等を起こすことなく成型可能な事を確認。成型圧  $1.2\text{GPa}$  の油圧プレス成型において相対密度で  $69\%$  到達を確認した。

(4) 評価・解析

・マイクロマグネティクス的手法を用いて磁化反転プロセスの解析をした結果、単一の結晶粒径が単磁区結晶粒径よりも小さい条件であるにもかかわらず、磁壁幅と比較して大きな場合には、磁壁を生成するための磁化分布の内部自由度を考慮しなければならないことが分かった。

・局所磁化過程計測に有効となる、パルス磁石を付加した高機能・高分解能・磁気力顕微鏡の開発のために、パルス磁場波形に対して、局所磁化過程計測時の信号雑音比向上に適した長い立ち下がり時間を実現できるコンデンサ電源ならびにパルス磁場コイルの仕様を明らかにし、特注のコンデンサ電源を開発・導入した。また、高磁場環境用スキャナに対し、予備実験の結果より、大きなパルス磁場に対するノイズ対策を施した特注品を開発・導入した。

・透過型電子顕微鏡観察から、窒化鉄ナノ粒子の原料となる  $\alpha\text{-Fe}$  ナノ粒子は合成直後において凝集しているものの、結晶方位関係から 1 次粒子に相当するナノ粒子は単結晶であることが分かった。

⑨-3-2 Nd-Fe-B 系磁石を代替する新規永久磁石の実用化に向けた技術開発／非平衡状態相の形成を利用した Nd 系磁石代替実用永久磁石の研究開発

1. 事業全体の成果

目標	研究開発成果	達成度
・独自の経験則に基づく磁石材料探索マップに従い、磁石を試作し代替磁石の可能性を見極める。	PLD 法による人工積層構造膜磁石の開発および急凝固法による新規磁石の探索において、当初の目標値を満足する代替磁石の開発に成功した。また複合磁石の新規成型プロセスを提案した。	達成

2. 研究開発項目毎の成果

Nd-Fe-B 代替磁石の創製を念頭に、積層型  $\text{SmCo}_5/\alpha\text{-Fe}$  人工積層磁石のナノ組織と室温で得られる磁気特性の関係をマイクロマグネティクス理論に基づく計算機シミュレーションで検討した。計算の結果、積層周期を  $20\text{nm}$  まで減ずることにより、Nd-Fe-B 磁石の最大エネルギー積  $(BH)_{\text{max}}$  の限界値 ( $512\text{kJ/m}^3$ ) を越える  $(BH)_{\text{max}}$  を達成できることが明らかになった。実用温度を念頭に置いた  $200^\circ\text{C}$  での磁気特性においても  $\text{SmCo}_5/\alpha\text{-Fe}$  積層磁石の  $(BH)_{\text{max}}$  値が  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$  積層磁石で到達可能な  $(BH)_{\text{max}}$  値を大きく上回り、 $\text{SmCo}_5/\alpha\text{-Fe}$  人工積層構造磁石は比較的高温で使用される Nd-Fe-B 系磁石を代替できる可能性を持った磁石であることが明らかとなった。実際に PLD (Pulsed Laser Deposition) 法を用いて積層周期  $10\text{-}20\text{nm}$  の  $\text{SmCo}_5/\alpha\text{-Fe}$  を 500 周期程度積層した人工積層構造  $\text{SmCo}_5/\alpha\text{-Fe}$  磁石を作製した。その結果、 $150\sim 200^\circ\text{C}$  において、等方性 Nd-Fe-B 磁石に勝る特性を得ることに成功した。

急凝固法による新規磁石材料の研究開発では、Fe系合金、Co系合金、Mn系合金の探索を行った。その結果、本研究開発項目における目標である「新規磁石材料としては  $B_r > 0.5\text{ T}$  を有するもの」を満たす新規磁石材料としては Sm-Zr-Fe 系磁石、Fe-Ni 系磁石、Co-Fe-Zr-B 系磁石を、また「新規磁石材料としては  $H_{c_j} > 0.5\text{ MA/m}$  以上を有するもの」を満たす新規磁石材料としては Sm-Fe 系磁石、Co-Zr-Mo-B 系磁石、Mn-Ga 系磁石、MnBi 系磁石をそれぞれ見出すことに成功した。特に飽和磁化の高い Fe-Ni 磁石と保磁力の大きい Sm-Fe 系磁石は今後の研究により Nd-Fe-B 磁石に匹敵する永久磁石になることが期待できることが、また MnBi 系磁石は高温特性が優れているため高温用に限定すれば Nd-Fe-B 磁石に匹敵する永久磁石になることが期待できることがわかった。

新規磁石創製を目指した組織制御プロセスおよび磁石化成型技術の開発を行った。SmCo<sub>5</sub>の粉碎については、界面活性剤としてAOT（ジ(2-エチルヘキシル)スルホコハク酸ナトリウム）を用いたヘキサン中での湿式ボールミルが有効であることが分かった。Feとの複合化では相互作用が不十分であるものの、8 wt%Fe程度までは保磁力が比較的維持できており、残留磁化も 11% 程度の向上が見られた。分子軌道法を用いた計算では、Sm<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>CN<sub>2</sub>およびFe<sub>16</sub>C<sub>2</sub>が構造安定性が高く、高温仕様磁性材料に適している可能性が示唆された。また、難焼結性のSm<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>N<sub>3</sub>やSmCo<sub>5</sub>ハード磁性相では、FeやCoのソフト相複合化により、焼結時の緻密化を促進させることに成功した。これはソフト相が結合材の役割を果たしていることによると考えられ、複合磁石の焼結法として有効であることが期待される。

PLD (Pulsed Laser Deposition) 法あるいは急冷凝固法で試作された5種類の新規磁石材料について、主に透過電子顕微鏡 (TEM) を用いた詳細な構造解析および組成分析を行った。急冷凝固FeNi合金磁石では、コラム状FeNi結晶の集合組織が形成されており、各コラム内はいずれもfcc格子点をFe原子とNi原子がランダムに占めたほぼ完全な不規則状態であった。その他急冷凝固Co-Zr系合金磁石、急冷凝固Mn-Bi系合金磁石などについても微細組織と磁気特性の関係について明らかにした。

⑩-1A 排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発／排ガス浄化用触媒のセリウム量低減代替技術の開発

(テーマ全体の目標達成度：◎目標達成)

(1)セリウム使用量を低減した微粒子触媒材の開発

OSC を担うセリウム等とジルコニア（一部セリウムを含む）担体との複合形態において、セリウム成分を表面にナノレベルで濃化する（コアシェル型）コンセプトによる新材料の原理を確立した。微粒子触媒材のラボレベル合成技術、OSC 性能、その安定性を検討し、製造方法を開発した。また、セリウム不使用材を検討した。

(2)セリウム使用量を低減した酸素貯蔵能 (OSC) 材の開発

セリウム低減を図った複合微粒子の構造と OSC の相関を明確化し、性能を把握したところ、セリウム利用率 80%以上を達成した。実用材料として最適化した開発技術に向け、具体的な触媒材でセリウム 30%以上を低減した試作品を提示した。白金を担持した OSC 材を対象に、触媒化にとって必要な触媒活性データを取得、その基本的特性を評価し、白金添加による高性能保持の現象を把握した。

(3)ガソリン車排ガス浄化触媒の開発

開発した材料および新 OSC 材を用いて、30%以上を低減した触媒を調製し、排ガス浄化用触媒の物性の観点から評価を行い、その性能評価と改善、大量製造上の問題点を検討した。現状生産レベルの触媒と同等の製造条件で触媒調製を検討、最適な触媒組成物ならびに小型および大型ハニカム型触媒の試作を検討した。さらに実車コンバータ向け触媒部品試作とその実車搭載エンジンによる法定モード試験を行いその基準をクリアした。

⑩-1B 排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発／高次構造制御による酸化セリウム機能向上技術および代替材料技術を活用したセリウム使用量低減技術開発

(テーマ全体の目標達成度：◎目標達成)

理論計算で裏付けられた酸化セリウム (CeO<sub>2</sub>, 以下セリアと表記) の優れた酸素吸蔵能と貴金属触媒安定化機能の原理に基づき、セリアのもつポテンシャルを最大限に引き出した新材料の開発、そして現状セリアと同等機能を有する代替材料の開発を行った。具体的な技術項目として、①理論シミュレーションによる材料設計指針、②形態制御による高性能化、③非セリア系材料開発、④ サンプル性能評価、⑤開発材料の量産化の5つの項目について研究を推進した。開発した材料は、各研究室での予備評価、模擬ガスによる単体評価、実車での性能評価の3段階の評価により、選抜を行った。産総研における単体評価は156サンプルにのぼる。

その結果、単体評価からはドーブ材による CeO<sub>2</sub> 改良材において低温域での NO<sub>x</sub> 浄化活性に効果があることを確認した。さらに、非 CeO<sub>2</sub> 材であるペロブスカイト系でも同様に低温域での NO<sub>x</sub> 浄化活性に効果があることを確認した。さらに、実車評価の結果からは、本プロジェクトの成果として見出された各種のプロモーターをセリアに添加した WC-04、WC-07 および WC-08 が CeO<sub>2</sub> を 30%減らしているにも拘らず基準触媒に同等以上あるいは近い性能を持つことが確認された。さらなる低温浄化活性、A/F 変動タフネス、SV タフネスの改善、および熱以外の耐久劣化課題を確認・克服すれば基準触媒を超える触媒となる可能性があり、本プロジェクトにおける提案材料が目標としたセリア 30%削減技術の方向性を示すものであることを証明した。さらに、今回は実車評価まで至っていないが、ペロブスカイト材料でも十分に高い NO<sub>x</sub> 浄化活性を単体評価で確認しており、実車で触媒活性にも期待が持てる。短期間の開発ながら、事業目的である (1) 新材料・代替材料の開発、(2) 新規材料に最適な大量合成技術の開発、(3) 自動車実排ガステストによる耐久性評価、(4) セリア使用量を 30%以上削減する技術の確立を実施し、さらに実車評価までの結果を踏まえて目標を実現する複数の候補材料を見出すことができ、十分にプロジェクト目標を達成した。

- ⑩-2 透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発／グラフェンの高品質大量合成と応用技術を活用した透明電極向けインジウム代替技術の開発  
(テーマ全体の目標達成度：◎目標達成)
- (1) 高品質グラフェン合成技術の開発  
最適プラズマ CVD 技術の確立、プラズマ源の探索、銅箔の表面特性向上、CVD 合成後のグラフェンへの吸着ドーピングによる低抵抗化などにより、目標のシート抵抗 500Ω/sq 以下で透過率 87%以上のグラフェンを達成。
- (2) ロール to ロール大量合成技術の開発  
幅 600mm、連続合成速度 0.6m/分のロール to ロール合成技術を実証した。さらに基板表面前処理・グラフェン合成・後処理機能を有するマイクロ波表面波プラズマ CVD ロール to ロール成膜装置を開発、グラフェン合成に成功し、目標を達成。
- (3) 透明フィルムの製造技術の開発  
最適なパターン形成のためのレーザー加工条件探索、レーザーを使用したグラフェンの転写パターンニング、グラフェンの剥離・転写、グラフェン膜の液相処理での除去技術等の開発に取り組み、目標である線幅 0.3mm のグラフェン膜のパターンニングを達成した。さらに PET フィルムへのロール to ロール連続転写法の開発に取り組み、目標である 300mm 幅、長さ 5m の連続転写を達成。
- (4) 透明導電性フィルムの性能評価  
グラフェン透明導電性フィルムの性能に関し、抵抗膜式タッチパネルに要求される電気的・光学的特性、耐環境性、耐摺動特性、信頼性について評価を行った。さらにグラフェン透明電極を利用した抵抗膜式タッチパネルを試作。b\*値 4、ヘイズ 3%、シート抵抗リニアリティ ±1.5%を確認し、目標を達成。

投稿論文	「査読付き」 42 件、「その他」 5 件
特許	「出願済」 14 件（うち国際出願 0 件）
その他の外部発表 (プレス発表数)	187 件

IV. 実用化見通し  
について

- ⑨-1 Nd-Fe-B 系磁石を代替する新規永久磁石の研究  
窒化鉄系ナノ粒子材料については、単相合成技術を当初計画より数年前倒して達成できている。数年内で数十グラム/日程度の合成技術を得る。また、永久磁石の応用用途別に必要となる高充填集合体形成技術に関して 5~7 年内での確立を目指し、バルク体形成技術の進捗を踏まえつつ、実用化検討を通して最終的に 10 年程度での実用化を考えている。一方、R-Fe-N 系磁石については、本研究機関終了後も高飽和磁束密度化を目指した高充填化プロセス技術の構築を継続して行い 5 年内に現行の Nd-Fe-N ボンド磁石に匹敵するプロトタイプの試作が可能な技術を構築する。その後、耐食性や強度特性などの検討を通して最終的に 8~10 年内の実用化の判断をする。

⑨-3-1 Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の実用化に向けた技術開発／窒化鉄ナノ粒子の大量合成技術およびバルク化技術の構築

2013年度までに~kg/B級の合成技術指針を獲得し、2015年度には高配向・高充填化指針の獲得と数mm~10mmのバルク化技術の構築を図る。また、2015年度からは、電気メーカー・自動車メーカー等のユーザ企業を交え、窒化鉄材料のポテンシャルを最大限発揮できるモータ設計検討に入り早期の実用化を目指す。

⑨-3-2 Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の実用化に向けた技術開発／非平衡状態相の形成を利用したNd系磁石代替実用永久磁石の研究開発

等方性Nd-Fe-B/ $\alpha$ -Feナノコンポジット厚膜磁石については、多極着磁の容易性から、小型高トルクの小型モータへの応用が可能である。150℃程度で使用する設計では、研究で創製したSmCo<sub>5</sub>/ $\alpha$ -Fe厚膜磁石の残留磁化が、Nd-Fe-B/ $\alpha$ -Fe厚膜磁石の残留磁化を上回るため、SmCo<sub>5</sub>/ $\alpha$ -Fe厚膜磁石に優位性がある。また、昇温した基板の上に堆積させたSmCo<sub>5</sub>はその磁化容易軸が面内に配向ことが知られている。その技術を本研究のSmCo<sub>5</sub>/ $\alpha$ -Fe厚膜磁石に適用すれば、残留磁化をさらに増加させることが可能であり、室温においてもSmCo<sub>5</sub>/ $\alpha$ -Fe厚膜磁石に優位性が出る可能性もある。

急冷凝固法により探索・開発した新規磁石では、飽和磁化の高いFe-Ni磁石、保磁力の大きいSm-Fe系磁石が得られており、これらは今後も研究を続けていくことにより、Nd-Fe-B磁石に匹敵する永久磁石になることが期待できる。また、MnBi系磁石では高温特性が優れているため、高温用に限定すればこれもNd-Fe-B磁石に匹敵する永久磁石になることが期待できる。

⑩-1A 排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発／排ガス浄化用触媒のセリウム量低減代替技術の開発

微粒子材料製造技術やOSC触媒技術などの要素技術に関して、当初の計画通り目標が達成されており、またハニカム触媒の試作・性能評価についても、基準に達した性能が得られている。今後は、さらに実用的な触媒材料を完成に向け技術的高度化を目指した対応をしてゆく。開発計画に沿った製品開発フェーズに移行するに際しては、将来のガソリン車とその排ガス浄化用触媒の開発動向、さらには社会情勢の変化により需給や市場全体の技術展開が不確定な部分もある。材料の耐久性・信頼性の評価や改良、量産化のための生産技術、コスト面の検討、具体的な新規実用触媒に合わせた材料の提供など、当面は試作レベルの材料提供や開発情報収集等をしながら実用化への検討を進め、最終的には実用化に至る見通しであると考えている。

⑩-1B 排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発／高次構造制御による酸化セリウム機能向上技術および代替材料技術を活用したセリウム使用量低減技術開発

単体および実車評価結果から、WC-08が-30%CeO<sub>2</sub>目標をクリアしうることを確認できた。今後、さらなる触媒としての低温活性やSVタフネスの向上、熱以外の耐久劣化課題を確認・克服することで十分に-30%CeO<sub>2</sub>触媒を実現することは可能と言える。

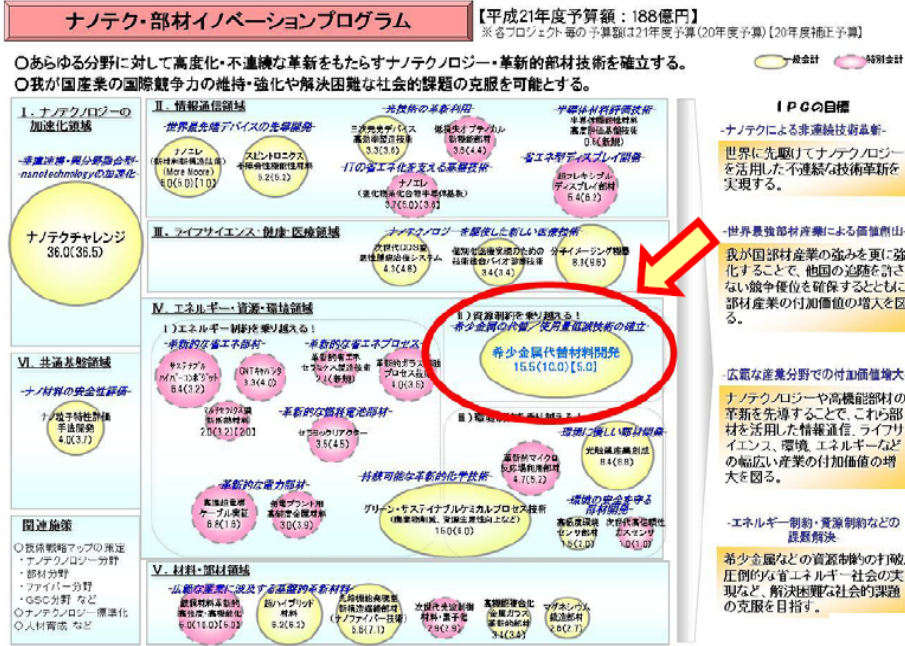
WC-08以外にも、WC-04やWC-07も実車で高い触媒活性を確認できており、今後の改良に期待が持てる。さらに、今回実車評価まで至っていないが、ペロブスカイト材料でも十分に高いNO<sub>x</sub>浄化活性を単体評価で確認しており、実車で触媒活性にも期待が持てる。

これらのセリア削減触媒、100%セリア削減非セリア系触媒に関する成果をもとに、今後さらに社内における実用化におけるさらなる性能向上と社内における耐久性基準のクリアを進める。量産性やコスト見通しもあるので、18M(2017年秋)以降に実用化出来るよう材料技術の改良や量産触媒への組み込みを検討する計画である。

	<p>⑩-2 透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発／グラフェンの高品質大量合成と応用技術を活用した透明電極向けインジウム代替技術の開発</p> <p>本研究では、高品質グラフェンの合成技術開発に関して当初の目標を大幅にクリアするレベルを達成しており、ITO代替グラフェン透明導電膜の可能性を実証した。そこで委託事業後の研究開発により今後主流となる高スペックの静電容量型タッチパネルも視野に、さらなる低抵抗化、および生産技術高度化・量産化ステージの転写技術開発などを経て、実用化を目指す。尾池工業(株)は抵抗膜式タッチパネル向け透明導電膜の実用化に引き続き、今後は静電容量方式タッチパネル、及び優れた屈曲性を生かしたタッチセンサー等がグラフェン実用化の第1候補となると見込んでいる。(株)カネカはさらに高スペックが要求される有機太陽電池、有機LED向けの透明導電膜としての利用を目指すと同時に、本研究で開発した熱処理法による高品質グラファイトフィルムの開発を進めエレクトロニクス分野への適用を図る。また、本研究の成果をもとにグラフェンの生産技術とフィルム加工技術、印刷技術との融合を図り、東レ(株)はフレキシブル透明電極、大日本印刷(株)は静電容量式タッチパネル用グラフェン透明フィルムなど、競争力の高い透明フィルム製品開発を行い、事業化を目指す。(株)アルバックは本研究で得られた知見を元にグラフェン合成装置の高性能化を目指す。</p>		
<p>V. 基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p> <p>変更履歴</p>	<p>平成24年3月 作成</p> <p>平成20年3月 制定</p> <p>平成20年7月 改訂</p> <p>平成21年3月 改訂</p> <p>平成21年12月 改訂</p> <p>平成22年3月 改訂</p> <p>平成22年6月 改訂</p> <p>平成22年12月 改訂</p> <p>平成23年7月 改訂</p> <p>平成24年3月 改訂</p> <p>平成24年11月 改訂</p>	<p>イノベーションプログラム基本計画の制定により、「(1) 研究開発の目的」を修正</p> <p>新鉱種追加により修正</p> <p>研究開発項目⑥～⑧の委託者決定に伴う詳細目標と事業実施内容の確定による修正と「明日の安心と成長のための緊急経済対策(平成21年度補正予算(第2号))」に係る研究開発項目⑨の追加</p> <p>研究開発項目⑦-2目標の細分化に伴い改訂</p> <p>採択条件等反映のため、研究開発項目⑨-1および⑨-2の最終目標等を修正</p> <p>「円高・デフレ対応のための緊急総合経済対策(平成22年度補正予算(第1号))」に係る研究開発項目⑩の追加</p> <p>研究開発項目⑨-1の後続テーマとして研究開発項目⑨-3を追加</p> <p>希少金属代替・削減技術実用化開発助成を追加</p> <p>研究開発項目⑨-3の実施期間の変更、事後評価時期の変更、達成目標の変更、中間評価の削除</p>

技術分野全体での位置づけ  
(分科会資料5-2より抜粋)

国の政策における位置づけ



NEDOが関与する意義

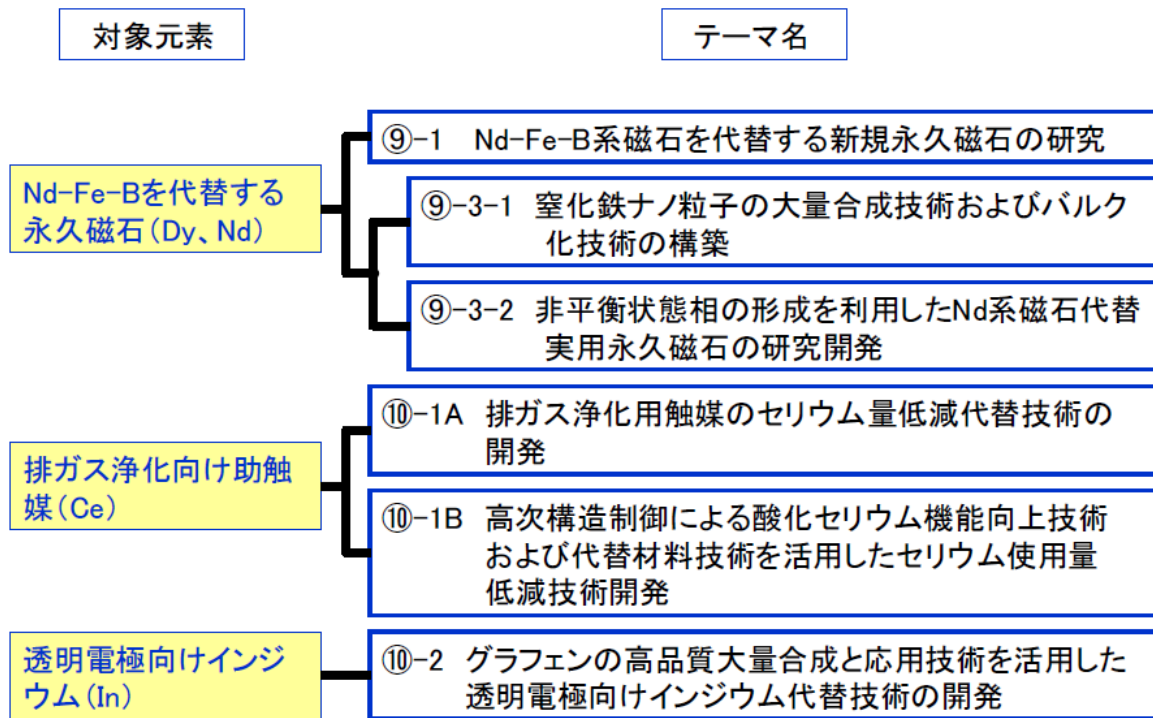
- 希少金属の代替材料開発、使用量低減技術の開発は、
- 社会的必要性が大きな国家的課題であるが、研究開発の難易度が高く産官学(企業-研究機関)の連携による課題解決が必要
  - 早期実用化のために産業の川上、川下連携を取った開発が必要
  - 現在の電子機器、自動車産業の競争力強化、今後の電気・ハイブリッド自動車、モーター産業、情報家電産業等の拡大に対応

政策的な位置付け、資源セキュリティ、技術開発の開発リスクの観点からNEDOが推進すべき研究開発プロジェクトである

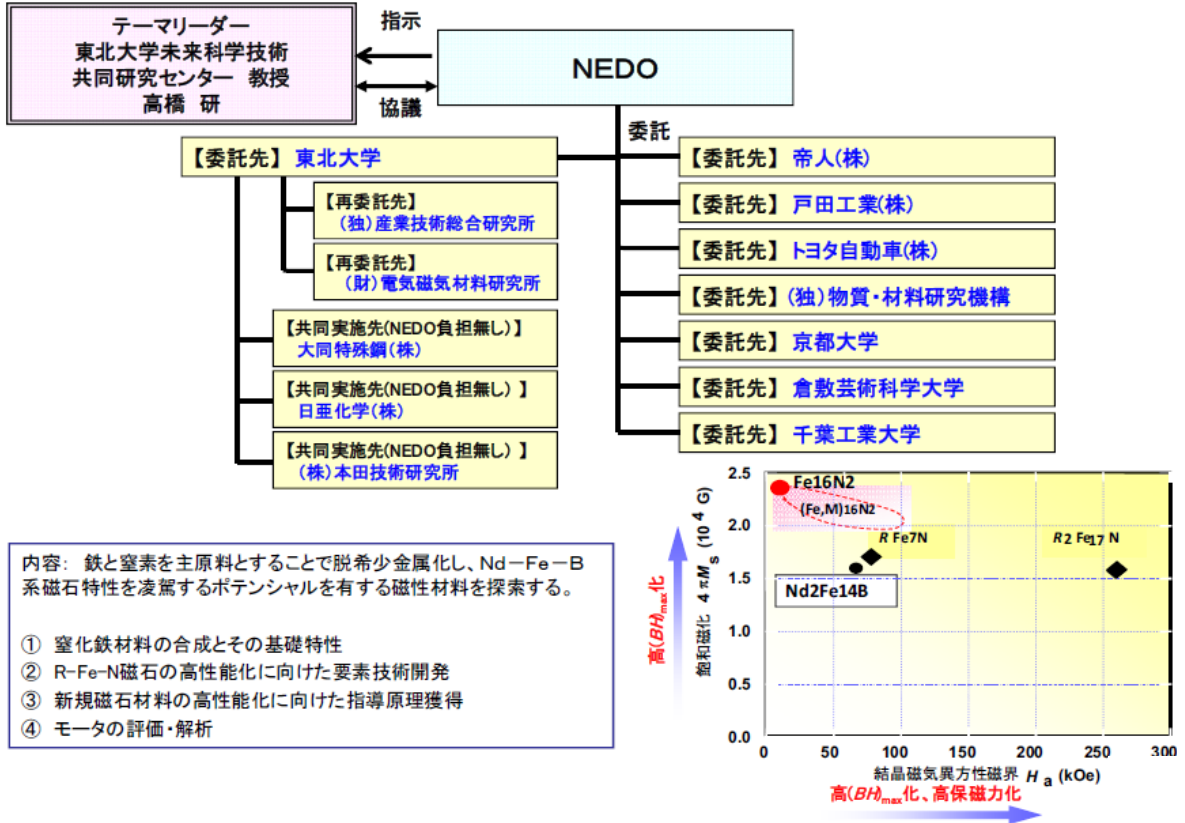


「希少金属代替材料開発プロジェクト／「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石」及び「排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発、透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発」

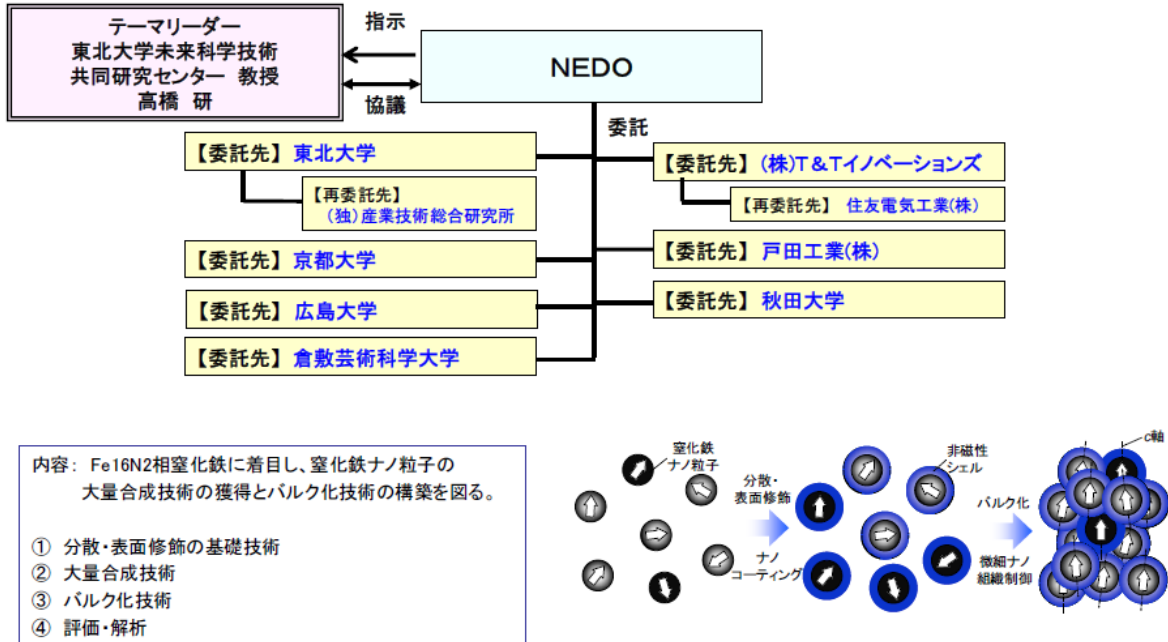
全体の研究開発実施体制



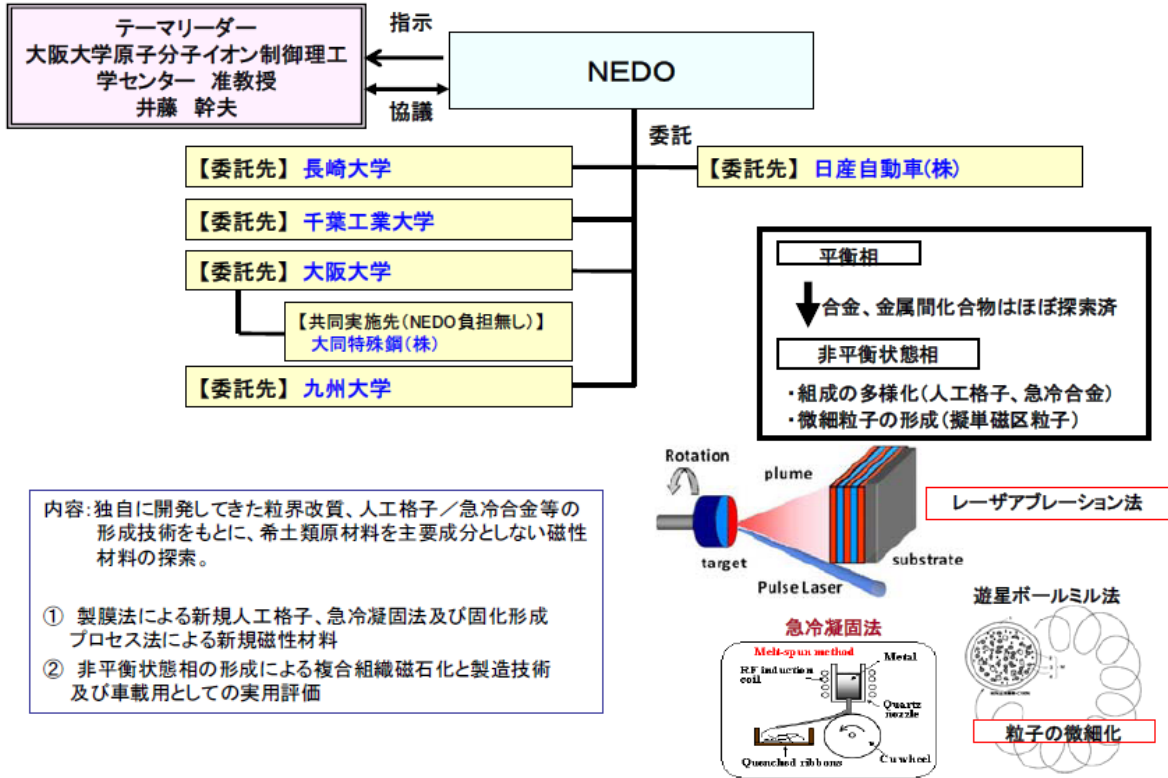
### ⑨-1 Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の研究



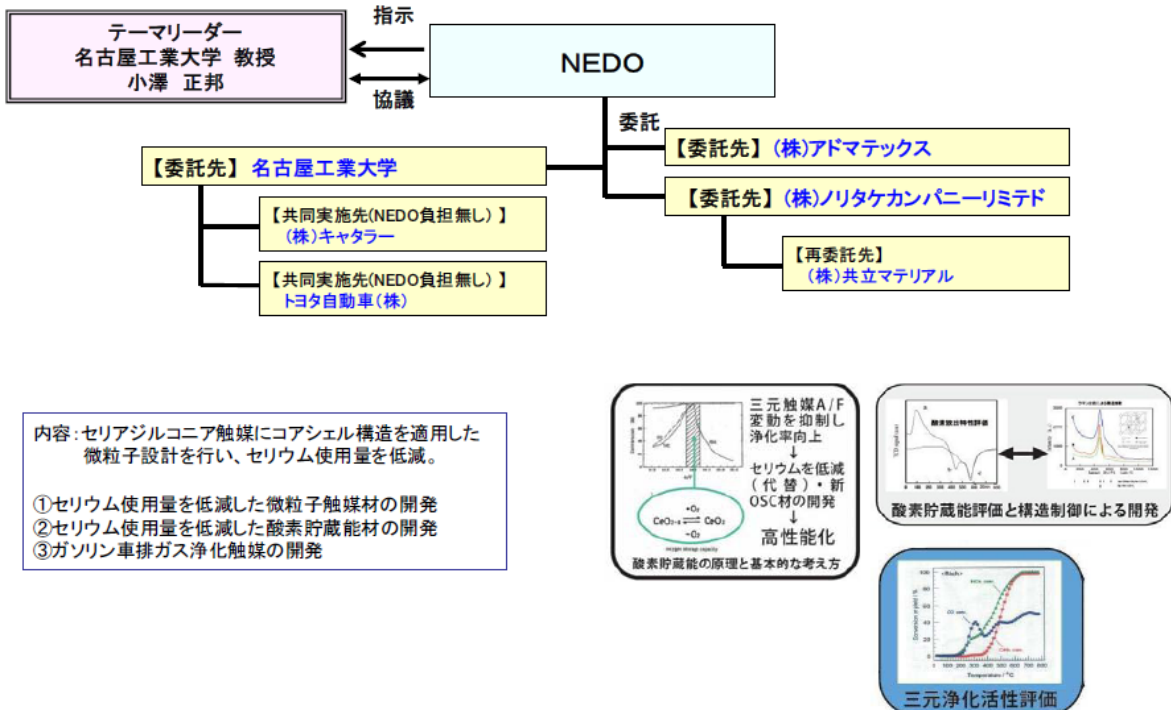
### ⑨-3-1 窒化鉄ナノ粒子の大量合成技術およびバルク化技術の構築



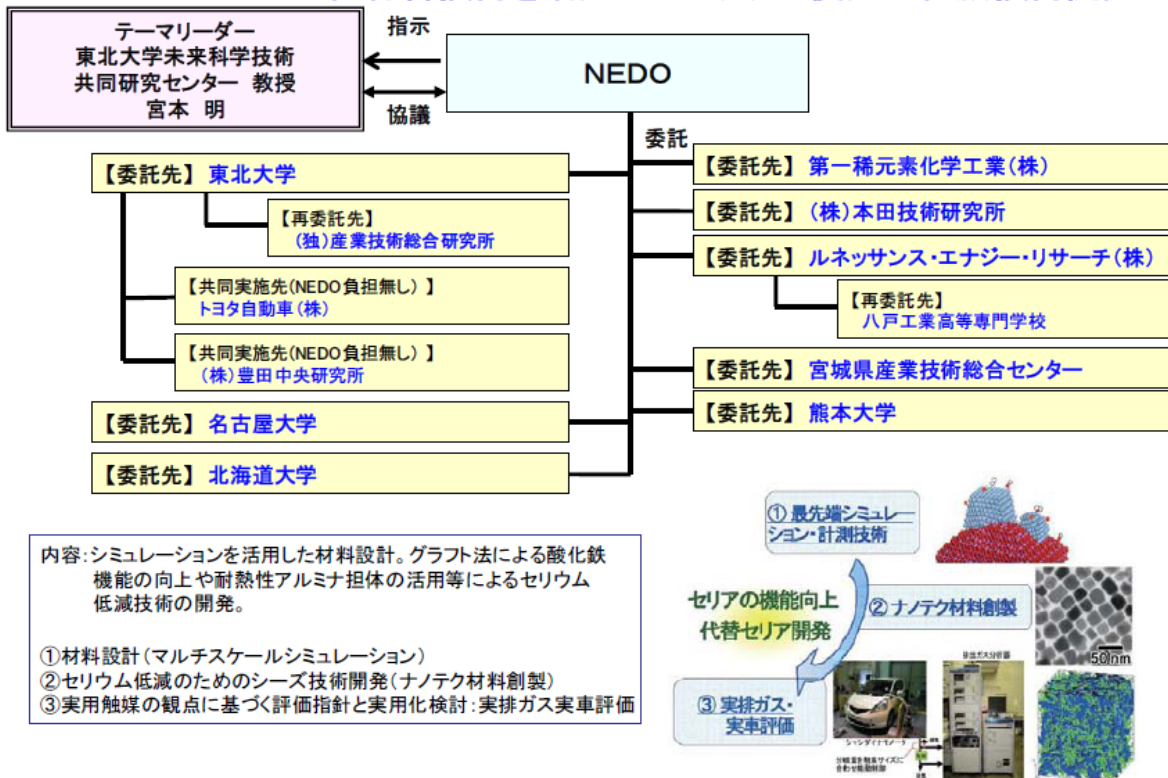
### ⑨-3-2 非平衡状態相の形成を利用したNd系磁石代替実用永久磁石の研究開発



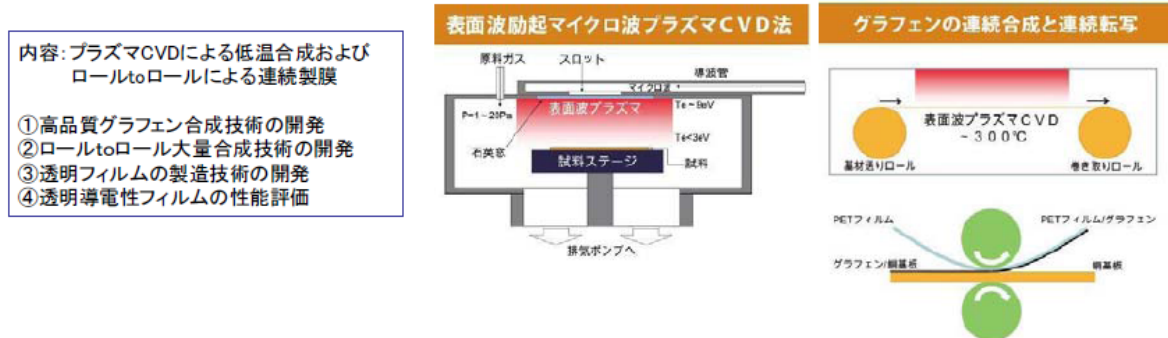
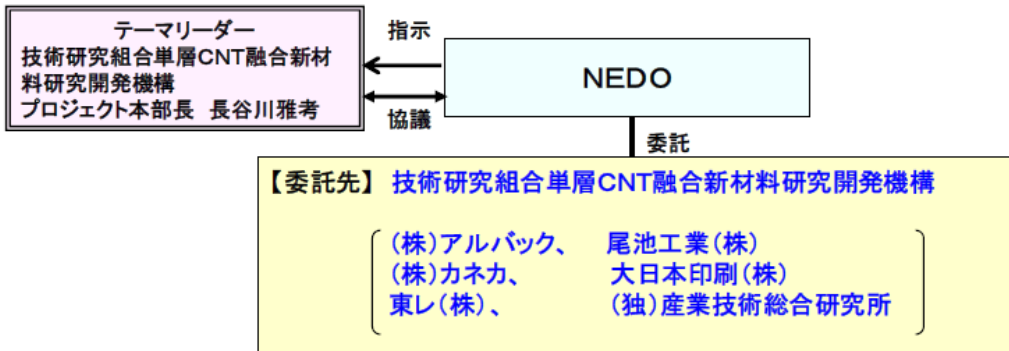
### ⑩-1A 排ガス浄化用触媒のセリウム量低減代替技術の開発



## ⑩-1B 高次構造制御による酸化セリウム機能向上技術および代替材料技術を活用したセリウム使用量低減技術開発



## ⑩-2 グラフェンの高品質大量合成と応用技術を活用した透明電極向けインジウム代替技術の開発



「希少金属代替材料開発プロジェクト／「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石」及び「排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発、透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発」」（事後評価）

## 評価概要（案）

### 1. 総論

#### 1) 総合評価

希少金属の使用量低減技術、もしくは希少金属を使用しない代替材料の開発は、資源小国である我が国がグローバル社会で競争力を発揮し続けるために戦略上極めて重要である。厳しい国際競争にあり、実用化を最終的に目指した取り組みは、国家的な視点から見ても重要かつ時機を捉えた開発プロジェクトであった。NEDOプロジェクトとして実用化を強く意識した成果を求めたことは高く評価できる。それぞれの技術テーマにおいて、当初目標をかなりの部分で達成し得た点は評価できる。一方、技術ストックとなるためには現行技術と性能だけではなく、コスト面も重要である。技術ストックとなるためには現行技術と性能だけではなく、コスト面でも同等以上でないと、開発技術が眠ってしまい技術ストックとして生かされない懸念がある。

実用化を見通せる具体的成果を求めるためには、より長いプロジェクト期間が必要であったと考えられる。

#### 2) 今後に対する提言

材料の開発では突然思いがけない成果が生まれることがあるが、逆に、開発を進めていない限りその成果は生まれない。今回のプロジェクトのように希少金属戦略の一つとして国が音頭を取って使用量低減技術または代替材料を開発することは、たとえすぐに実用化・事業化に進まないとしても、今後も積極的に推進すべきである。窒化物を焼結するのは大変に困難な技術であり、実用的なマグネットを製造するためには、さらなる高度な技術開発が必要である。是非ともこの世界を先導し得る日本発の最先端材料技術をNEDOのバックアップの基で発展させ、実用化への先鞭を付けていただきたい。また、今回の評価は、短期間に集中的に投資された経費に対するものなので、実質的な成果を今後も長期に渡り検証する必要がある。進捗状況を確認し、必要があれば修正しつつ、今後も産官学連携プロジェクトを継続、推進することが、日本の活力維持のために期待される。

数値目標の設定は、その設定の科学的、あるいは経済的な根拠を外部からみても明確にすべきである。

成果が時間の関数で、マーケットとの関係が強く、きわめて短い期間で出さねばならない課題の場合、初期のプロジェクト計画に客観的評価を行うことや、十分な研究開発期間を設定し、毎年、中間評価を行いながら、実施者へ進行管理をフィードバックする方法を提案したい。

## 2. 各論

### 1) 事業の位置付け・必要性について

希少金属代替プロジェクトで取り上げられた開発技術課題は、ナノ構造によって画期的な特性を得ようとするテーマが選ばれている。課題解決には基礎、応用から実用化、事業化までを見通した取組みが必要であり、産官学の結集なくして為し得ることは困難である。また、必要性和緊急性が高く、NEDOとして産学官連携によるプロジェクトを行ったことは妥当であった。

極めて価値のある技術シーズを育成し、産業界を巻き込みながら実用技術へ結びつける使命を果たし、技術進展に寄与した。成果は、グリーンイノベーションを掲げるわが国の産業発展にも大きく期待できる。

一方、開発プロジェクトへの研究開発予算を見ると、目標としたテーマは妥当であっても、研究開発期間が短かった。今後は実施者の開発期間を十分に考慮すべきである。

### 2) 研究開発マネジメントについて

希少金属代替を目的としたタイムリーなプロジェクト企画運営となっている。各課題への取組みは適切で、効果的な産学官連携体制ができていた。参加した企業は、それぞれの課題分野で十分な経験と活発な活動を展開しており、適切なチーム構成だった。特に、排ガス浄化用触媒のテーマでは企業が厳しい必要条件を出して、それを了解事項として各実施機関の参画している研究者がそれぞれの得意とする分野に携わっており、NEDOのプロジェクトとして理想的であった。

一方、研究開発期間が短く、有機的な連携成果を出すには困難が伴うと考えられる。予算規模に対して研究開発期間が短く、初期の計画設定の妥当性を十分に考慮すべきであった。テーマ終了後の実用化への進め方についてもより一層の工夫が必要である。「技術ストック」としての開発であることを理解したとしても、実用化を目指すプロジェクトであれば、供給懸念が起きた時の希少金属価格を予想しながら、それに見合ったコスト目標を持った開発が望まれる。課題の技術的難易度や実用化までの時間スケールを評価する上でも、コスト目標を含めたロードマップ、マイルストーンを意識したプロジェクト遂行を期待する。

### 3) 研究開発成果について

プロジェクトで当初立てた目標値はほぼクリアされており、成果があったと評価する。今後の課題、計画も明確に示されている。特に、高飽和磁化を有する窒化鉄磁石を創製したことは高く評価できる。排ガス浄化セリウム代替材料開発では、基本技術まで確立でき、成果の普及も期待できる。全体としては産官学連携の取組みが、それぞれの立場の違いの理解を促し、技術開発の進展につながった。

一方、特許出願が遅れているテーマもある。特許性の無い実用化技術では世界経済に太刀打ちできないことを十分に認識し、知財戦略を進めていただきたい。

#### 4) 実用化の見通しについて

窒化鉄磁石は保磁力をあまり必要としない発電機用に適しており、風力など、再生可能エネルギーの展開とともに、今後の実用化、波及効果が期待できる。また、排ガス浄化用セリウム使用量の低減では、自動車メーカーが主導的役割を果たし三元触媒としての実用化のマイルストーンが明確である。今後、自動車メーカーの利用と社会的貢献が期待できる。

一方、供給懸念が起こった時の対応技術ストック開発をプロジェクトの意義とするならば性能・コストを含め現行技術同等レベルを達成しておかないと技術ストックとしては不十分である。実用化という意味では道半ばというテーマが多かった。短期間のプロジェクトから、実用化まで要求すること自体が産学官連携チームにはきわめて厳しい。

## 個別テーマに関する評価

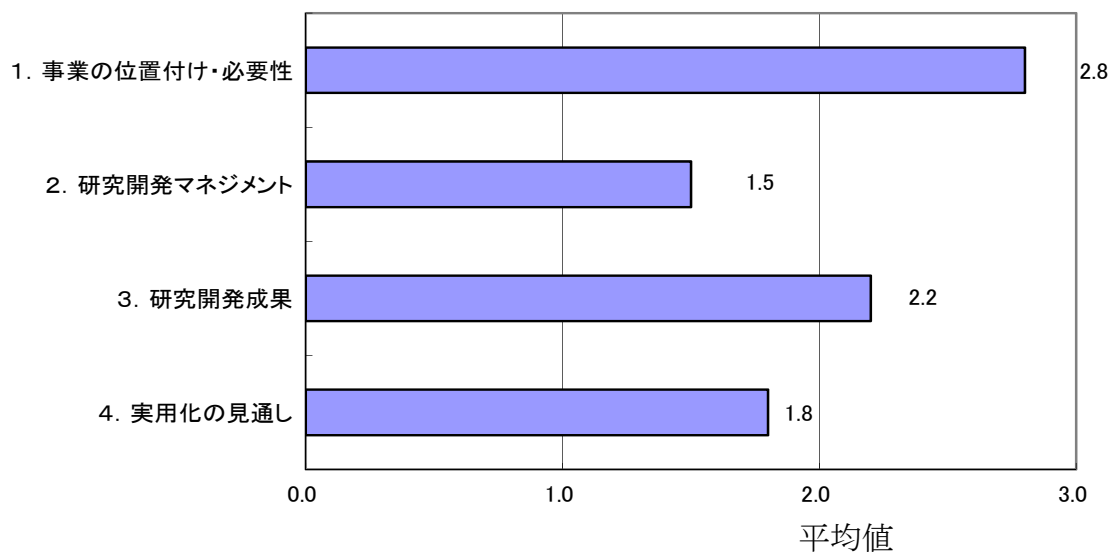
	成果に関する評価及び実用化の見通しに関する評価及び今後に対する提言
<p>⑨-1 「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の研究」</p> <p>⑨-3-1「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の実用化に向けた技術開発」(窒化鉄ナノ粒子の大量合成技術およびバルク化技術の構築)</p>	<p>複合場焼結法を開発し、SmFeN 粉末を分解させることなく 90%以上の密度に固化できたこと、マイクロポア（微細な空孔）が殆ど見られない窒化鉄相（<math>\alpha</math>-Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub>）の固形物が得られたことは評価する。低温焼結体の試作も評価できる。ナノテクを駆使して窒化鉄単相製造が可能であることを実証し、実用化に必要な大量合成技術の見通しをつけた事は、世界的にも高く評価できる。窒化鉄磁石は、保磁力が小さく、現状では永久磁石としてネオジム磁石の代替にはならないが、飽和磁化が高く、発電機用磁石としての利用が期待できる。わが国のグリーンイノベーションに資する成果といえる。</p> <p>一方、高い磁化は 200℃以上で急速に低下してしまい、さらなる改良が不可欠である。ネオジム鉄磁石の代替とするには保磁力の大幅な向上も今後の課題である。微細な単磁区粒子の配向を安定に実現する技術が今後益々重要になる。是非自動車用モーターに実装できるバルク磁石の形成にむけて技術を発展させてほしい。</p>
<p>⑨-3-2「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の実用化に向けた技術開発」(非平衡状態相の形成を利用したNd系磁石代替実用永久磁石の研究開発)</p>	<p>短い実施期間の中で、PLD（Pulsed Laser Deposition）法、超急冷の製法による組成探索を行ったことは評価できる。また、SmCo<sub>5</sub>と<math>\alpha</math>-Feを複合化し、Snで結合することで2 MA/mを超える保磁力を有する成形体を試作したことは評価できる。人工格子構造・積層構造において、Nd-Fe-Bを凌駕する特性を高温領域で見出し、微細構造と組織制御による磁石特性の改善を示すことができた。</p> <p>一方、「非平衡状態相の形成」を軸として、ネオジム鉄磁石に変わりうる磁石材料の研究成果を、磁性材料の研究を行っている各参加機関を集めて、各磁性材料の特性を整理した結果が報告されているが、企業での実用に資する成果はみられなかった。また、実施者間での有機的連携は見られなかった。材料を広く調べ上げ、分子起動計算で構造安定性を予測し、さらに人工的な構造を構築するという研究推進方法自体は自然なアプローチである。</p>



	成果に関する評価及び実用化の見通しに関する評価及び今後に対する提言
<p>⑩-1A「排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発」 (排ガス浄化用触媒のセリウム量低減代替技術の開発)</p>	<p>開発方針が明確にされており、計画の通り順調に研究が実施された。セリウム表面濃化によるセリウム利用効率向上によるセリウム量低減するという独自のコンセプトに基づき開発を進め、狙いとした特性を持ったセリウム低減酸素吸蔵材料を比較的量产化に適した方法で開発できた事は十分な成果であった。開発された触媒を、自動車メーカーがエンジンと組み合わせた排ガス浄化テストを行い、浄化効果も実証できたことは高く評価できる。学術的な発表と特許も出願しており、バランスの良い成果が出ている。セリア使用量の低減と同時にトータルでのコスト低減を行い、実機での目標排ガス浄化率の達成と触媒の寿命が基準をクリアできれば、実用化・商品化の可能性が高いと考えられる。</p> <p>一方、ジルコニアバルク上に生成したセリアの高温での劣化・不安定性がこれから解決すべき問題である。触媒耐久性（寿命）が今後検討されるものと期待する。基本技術の実証を踏まえ、商業化へと進む段階で、関係する多くの知的財産権との調整・整理が必要になってくる。</p>
<p>⑩-1B「排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発」 (高次構造制御による酸化セリウム機能向上技術および代替材料技術を活用したセリウム使用量低減技術開発)</p>	<p>最終ユーザーである自動車メーカーが厳しい必要条件を明らかにしてプロジェクトを進め、セリア助触媒の使用量が 30%低減できる材料開発に至った。明確な開発基準のもと、組織内の国内有数の触媒研究者が開発に参加し、研究期間の短さを考慮した、よく考えられたプロジェクトフォーメーションといえる。自動車メーカーがもつ経験と、大学、研究機関の先端科学的アプローチが功を奏し、短期間で異なる視点に基づくセリウム低減 OSC 材（Oxygen Storage Component ; 酸素吸放出材）を開発し、いくつかの有望な OSC 材を見出し、ハニカム三元触媒を試作し実車評価まで実施して目標を達成した点は評価できる。実機試験を通して、商品化に有望なものが開発されるものと期待される。</p> <p>一方、理論シミュレーションによる材料設計指針と実材料開発との連携が十分生かされなかった。理論的予測とメカニズム解明、さらに新規材料開発とのシナジー効果が発揮されることを期待する。また、研究発表、論文等は十分に実施されているのに特許提出がゼロであるが、重要な成果については特許取得を早急に推進すべきである。</p>

	成果に関する評価及び実用化の見通しに関する評価及び今後に対する提言
⑩-2「透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発」 (グラフェンの高品質大量合成と応用技術を活用した透明電極向けインジウム代替技術の開発)	<p>大量合成に向けて実施企業が短いプロジェクト期間内で、有用な基本データが得られ、国際間の実用化競争にあるタッチパネル用透明電極グラフェン量産化に向け、開発の遅れを挽回する成果が得られた。また、グラフェンを用いた大面積透明導電膜製造技術を開発し、実際にカーナビ画面を動作させ得る技術を実証した点は評価できる。実施者間の知的財産権に関するマネジメントも慎重に、また効率的に行われた。今後、更に解決すべき問題点も明らかで、実用化の見通し計画も提示されており、グラフェン透明導電膜の商品化が期待できる。</p> <p>一方、ITO 代替としては、抵抗膜式タッチパネルをターゲットとしており、透明電極材料としての技術的難易度は低いところにとどまっている。研究の内容自体が海外の後追いであり、先行する海外の特許技術を陵駕できる技術を確立してほしい。</p>

## 評点結果〔プロジェクト全体〕



評価項目	平均値	素点 (注)							
		A	A	B	A	B	A	A	A
1. 事業の位置付け・必要性について	2.8	A	A	B	A	B	A	A	A
2. 研究開発マネジメントについて	1.5	C	C	B	B	C	B	B	C
3. 研究開発成果について	2.2	-	-	-	-	-	-	-	-
4. 実用化の見通しについて	1.8	-	-	-	-	-	-	-	-

(注 1) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

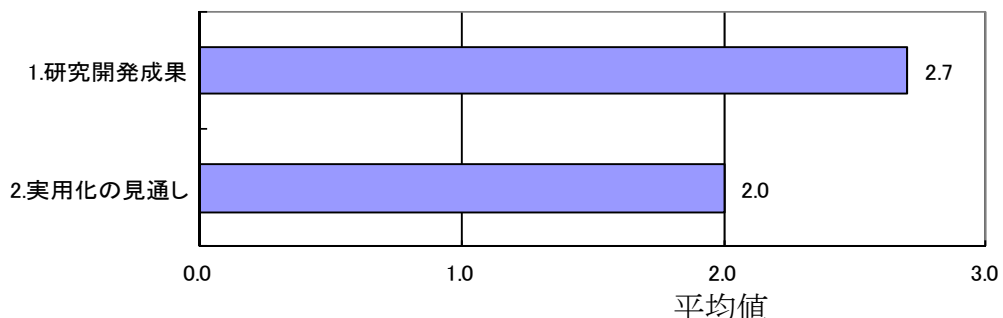
(注 2) 研究開発成果及び実用化の見通しにおける平均値は、個別テーマの評点の平均値。

### 〈判定基準〉

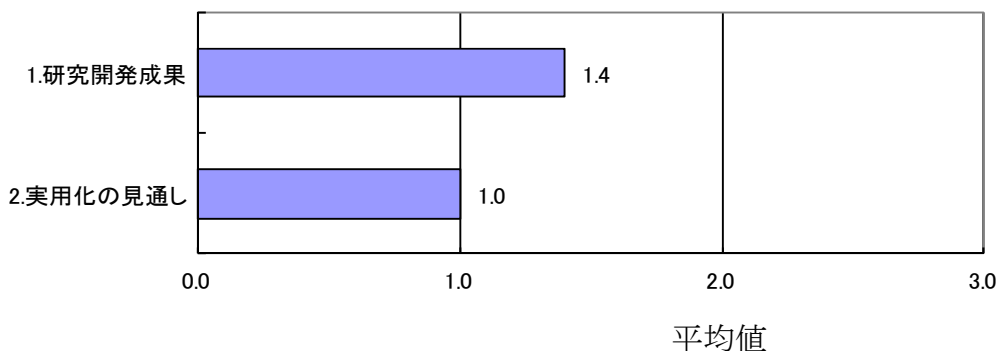
1. 事業の位置付け・必要性について	3. 研究開発成果について
・非常に重要 →A	・非常によい →A
・重要 →B	・よい →B
・概ね妥当 →C	・概ね妥当 →C
・妥当性がない、又は失われた →D	・妥当とはいえない →D
2. 研究開発マネジメントについて	4. 実用化の見通しについて
・非常によい →A	・明確 →A
・よい →B	・妥当 →B
・概ね適切 →C	・概ね妥当であるが、課題あり →C
・適切とはいえない →D	・見通しが不明 →D

評点結果〔個別テーマ〕

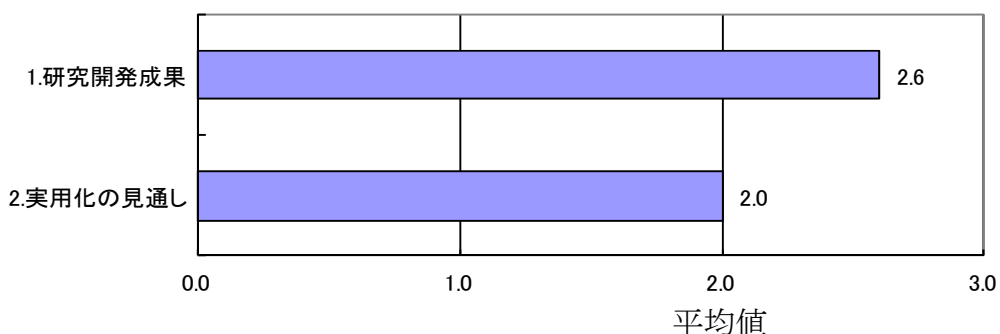
- 1 研究開発項目⑨-1「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の研究」  
 研究開発項目⑨-3-1「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の実用化に向けた技術開発」(窒化鉄ナノ粒子の大量合成技術およびバルク化技術の構築)



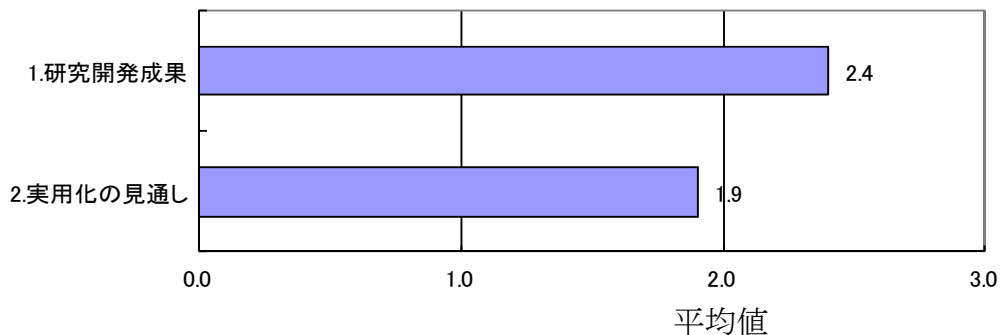
- 2 研究開発項目⑨-3-2「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の実用化に向けた技術開発」(非平衡状態相の形成を利用したNd系磁石代替実用永久磁石の研究開発)



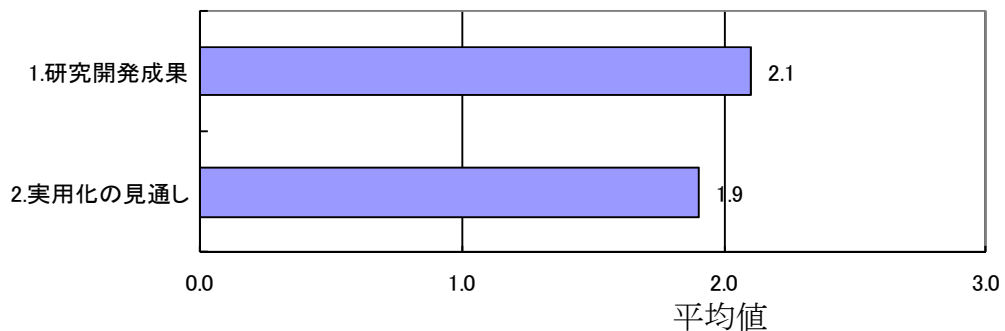
- 3 研究開発項目⑩-1A「排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発」(排ガス浄化用触媒のセリウム量低減代替技術の開発)



- 4 研究開発項目⑩-1B「排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発」(高次構造制御による酸化セリウム機能向上技術および代替材料技術を活用したセリウム使用量低減技術開発)



- 5 研究開発項目⑩-2「透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発」(グラフェンの高品質大量合成と応用技術を活用した透明電極向けインジウム代替技術の開発)



個別テーマ名と評価項目	平均値	素点 (注)								
1 研究開発項目⑨-1「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の研究」 研究開発項目⑨-3-1「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の実用化に向けた技術開発」(窒化鉄ナノ粒子の大量合成技術およびバルク化技術の構築)										
1. 研究開発成果	2.7	A	A	A	B	B	A	A	—	
2. 実用化の見通し	2.0	B	A	B	B	C	B	B	—	
2 研究開発項目⑨-3-2「Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石の実用化に向けた技術開発」(非平衡状態相の形成を利用したNd系磁石代替実用永久磁石の研究開発)										
1. 研究開発成果	1.4	B	C	C	C	C	B	B	—	
2. 実用化の見通し	1.0	C	D	B	C	D	B	C	—	
3 研究開発項目⑩-1A「排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発」(排ガス浄化用触媒のセリウム量低減代替技術の開発)										
1. 研究開発成果	2.6	A	B	A	B	B	A	A	—	
2. 実用化の見通し	2.0	B	B	B	B	C	A	B	—	
4 研究開発項目⑩-1B「排ガス浄化向けセリウム使用量低減技術及び代替材料開発」(高次構造制御による酸化セリウム機能向上技術および代替材料技術を活用したセリウム使用量低減技術開発)										
1. 研究開発成果	2.4	A	B	A	B	B	A	B	—	
2. 実用化の見通し	1.9	B	B	B	B	C	B	B	—	
5 研究開発項目⑩-2「透明電極向けインジウムを代替するグラフェンの開発」 (グラフェンの高品質大量合成と応用技術を活用した透明電極向けインジウム代替技術の開発)										
1. 研究開発成果	2.1	B	A	B	B	C	A	B	B	
2. 実用化の見通し	1.9	B	B	B	B	C	A	B	C	

(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

1. 研究開発成果

- ・ 非常によい →A
- ・ よい →B
- ・ 概ね適切 →C
- ・ 適切とはいえない →D

2. 実用化見通しについて

- ・ 明確 →A
- ・ 妥当 →B
- ・ 概ね妥当であるが、課題あり →C
- ・ 見通しが不明 →D