

# プロジェクト事後評価報告書

評価委員会開催日：平成29年2月20日

評価委員：（敬称略、五十音順）

- 生駒俊之 東京工業大学 大学院理工学研究科 材料工学専攻 准教授  
 坂本浩一 株式会社神戸製鋼所 技術開発本部 材料研究所 所長  
 鈴木隆之 (株)日立製作所 インダストリアルプロダクツビジネスユニット  
 電機プロダクト設計部 担当部長  
 辻 伸泰 京都大学大学院 工学研究科 材料工学専攻 教授  
 南二三吉 大阪大学接合科学研究所 副所長（教授）

確定年月日：平成29年4月18日

プロジェクト名	元素戦略に基づく先進材料技術の研究
研究責任者の所属・役職・氏名	構造材料研究拠点・拠点長・土谷浩一
実施期間	平成23年度～平成27年度
研究目的と意義	<p>我が国の基幹産業を支える重要な部品材料の製造において、資源確保が困難になる可能性のあるDyやPtならびにNiなどの希少元素への依存を低減しても、同等またはそれ以上の特性を発現できる材料を開発する。具体的には自動車・エネルギー・環境産業での基幹材料として、鉄鋼・チタン合金・マグネシウム合金・アルミニウム合金等の構造材料、ネオジム磁石に代表される磁石材料、自動車排ガス用の触媒材料等を取り上げ、これらにおける希少元素の減量・代替・循環のための材料技術を開発する。</p> <p>レアメタルを出来るだけ使わずにユビキタス元素からなる材料によって優れた特性を具現することは、現在の材料科学・工学にとって最重要の課題であり本プロジェクトの意義は深い。材料特性の従来の壁を、ヘテロ微細構造の活用（構造材料）、元素機能の解明（磁性材料）、ナノフラワー材料（触媒）、メソポーラス材料（資源回収）のトポロジーの活用で突破しようとするものであり、挑戦的である。ヘテロ構造組織の計測技術、組織形成と特性予測シミュレーション技術、組織制御技術などは学術的価値が高い。</p> <p>将来、レアメタルの需要や重要性は一層増大する。グリーンイノベーションの推進には、レアメタルを始めとする資源供給上の制約が大きい元素の安定確保やリサイクルさらに使用量の低減技術の開発は極めて重要な課題であり、本プロジェクトの重要性は大きい。</p>
研究内容	<p>構造材料については、微視組織の不均質性（ヘテロ構造）を活用することによって希少元素使用量を低減した上で高比強度化などを達成するとともに、微細組織を精緻に解析・予測する計測・シミュレーション技術を開発する。磁性材料については、材料中における希少元素の存在位置を解明し、保磁力発現との関係を明らかにすること等を通じてDyフリーの高保磁力・高エネルギー積ネオジム磁石材料の開発に必要な微細組織制御法を確立する。触媒材料については、貴金属使用量の大幅削減のために、ナノフラワー触媒を開発し、従来触媒と比べて大幅に優れた熱凝集耐性を実現する。また、使用済み製品からの希少元素の高選択性高効率抽出を常温・常圧下で実現する新しい材料技術を確立する。</p>
ミッションステートメント （具体的な達成目標）	<p>本プロジェクトは元素戦略に基づく研究であり「希少元素を出来る限り使わずにユビキタス元素活用などによって要求特性を達成する」は当然の前提条件である。構造材料研究においても、中長期的視野に立った挑戦的課題を遂行する。すなわち、従来特性の壁を打ち破る夢のある材料、実用化につながる革新</p>

	<p>的シミュレーション、統一理論構築につながる革新的ナノ計測技術、インフラ老朽化やシステム革新への対応技術などを達成する。</p> <p>触媒材料の合成や希少元素の抽出は、これまで主に高温冶金プロセスであった。使用済み電子機器由来の都市鉱石からの希少元素の抽出循環を経済的に見合うものとするためには、この高温プロセスから脱却する新規なプロセスへ挑戦する。また、都市鉱山からのレアメタル抽出から高付加価値材料への一貫した循環プロセスの構築という新しいレアメタルマネジメントの実現を目指す。</p>
<p>平成23年度～平成27年度までの主な研究成果(アウトプット)及び研究成果から生み出された(生み出される)効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト)</p>	<p>1) 主な研究成果(アウトプット)：</p> <p>元素戦略の観点から構造材料、機能材料について希少元素への依存を低減するために基礎科学と材料開発の両面からの研究を行った。鉄鋼材料について降伏現象の素過程が従来の転位易動度支配型の変形機構ではなく、瞬時に大量の転位が生成される転位密度変化支配型の変形機構であることをナノインデンテーションやTEM内その場観察によって明らかにした。マグネシウム合金については靱性における各種添加元素の影響が軸比の観点から整理できる事を明らかにした。さらにβチタン合金については不規則固溶体を正しくモデル化した第一原理計算を行い、SPring-8における光電子分光の結果と比較する事でその妥当性を明らかにした他、種々の相安定性における種々の合金元素の元素機能を明らかにした。元素の分布をあえて不均一にする事でチタン合金の強度延性バランスの向上などに成功した他、結晶粒の形態を制御する事で低合金鋼でありながら高合金鋼を凌駕する強靱さを持ち、耐水素脆性も優れた鉄鋼材料を開発し、その強靱化の機構を解明した。機能材料については貴金属フリーで等重量の白金触媒を凌駕するNO清浄化能を有するCuOナノフラワー触媒や、メソポーラス材料(HOM)を様々な官能基で修飾する事で都市鉱山から希少元素を高効率、高選択性で回収する材料技術を開発することできた。</p> <p>2) 研究成果から生み出された(生み出される)効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト)：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 微細伸長粒による強靱化や、元素の分布を不均一にすることで特性を向上させるという材料設計指針、不規則固溶体の第一原理計算手法は、様々な構造材料に適用可能である。</li> <li>・ ユビキタス耐鋼性鋼の溶接部の高靱性化は国土強靱化と元素戦略という課題に対応した鋼構造物改生に貢献する。</li> <li>・ 貴金属使用量の大幅削減を可能にするCuOナノフラワーによる排ガス清浄化と熱凝集耐性は脱硫などの他の触媒にも適用可能である。</li> <li>・ 反応効率、抽出速度、再利用耐久性が向上した3次元スポーク状空隙構造HOMは戦略的レアメタル単離抽出技術として有用であるほか、他の廃棄物の減量化も可能にする。</li> </ul>
<p>プロジェクトの目標の達成度合い及び自己点検・評価</p>	<p>プロジェクトの目標の達成度合い： 順調に進展し目標をほぼ達成できた。</p> <p>自己点検・評価： 鉄鋼材料の降伏挙動、強靱化の機構、マグネシウム合金の粒界破壊、チタン合金の相安定性における元素機能を解明するとともに、希少元素の使用量を低減しながら優れた特性を実現するとともに、他の材料にも波及効果が期待できる材料設計指針を得た。</p> <p>触媒材料については貴金属フリーで熱凝集耐性にも優れ白金触媒を上回る特性のナノフラワー触媒を開発した。さらに3次元スポーク構造を有するメソポーラス材料を開発し、反応効率、抽出速度、耐久性に優れた希少元素抽出技術を実現した。</p> <p>また本プロジェクトを通じて開発された不規則固溶体の第一原理計算手法、微細組織観察技術などの解析手法は今後様々な構造材料、機能材料への展開が期待される。</p>

【評価項目】	コメント（記入に従い、コメント欄枠は下に広がります）
<p>①研究計画、実施体制、マネージメント、連携  （事前・中間評価の結果を受けて、ロードマップに問題はなかったか、実施体制は十分だったか、マネージメントの是非、連携の範囲や連携課題、連携の成果はどうだったか）</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・本プロジェクト内部の連携や議論も日常的になされ、定期的な研究会なども設定されている。</li> <li>・外部との連携も積極的に行われている。</li> <li>・国内外の研究機関との連携が研究を加速させ、相互作用効果によって優れた研究成果につながっている。</li> <li>・次世代の研究リーダー育成も視野に入れたメンバ構成とした高度研究の継続性や、ワークショップ、共同研究、人材交流による情報共有、関係深化が積極的に行われた。</li> <li>・多くの優れた研究成果が期間内に出ており、対費用効果においても十分なプロジェクトであった。</li> <li>・一方で、各サブテーマ間の連携と、元素戦略に対する、本プロジェクトの考え方・理念についての説明が必要である。</li> <li>・設定した技術的課題に対する課題解決力は極めて高く成果を上げられている一方で、課題設定に対しては、なぜその課題なのか不明で、さらに技術マーケティングや企業ニーズヒアリング等、課題設定面で課題があると感じる。</li> <li>・今後、課題設定にも注力するとのことであるので期待したい。</li> <li>・プロジェクト終了後も、京都大学構造材料元素戦略研究拠点などとタッグを組み、日本における構造材料分野および元素戦略研究の活性化に寄与していただきたい。</li> </ul>
<p>②プロジェクトの具体的な達成度  （目標は達成されたか、学術的価値、社会的価値、経済的価値の創造につながったか、技術レベルの向上につながったか）</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・目標の達成度は極めて高く、社会的にもインパクトのあった研究成果であった。</li> <li>・目標は十分達成されている。</li> <li>・各サブテーマとも、目標通り、あるいは目標を上回る成果を上げられ、希少元素の使用を低減しながら、優れた機能・性能を示す構造材料、機能材料の創製が成し遂げられている。</li> <li>・個々の課題解決に対しては、非常に面白い指導原理が創出できており、将来の希少金属低減が期待できる。</li> <li>・ただし、課題設定が個別断片的である印象を持った。元素戦略を先導する技術戦略を説明していただき、その主要課題として、技術マーケティングに基いた具体的課題設定、課題解決策、今後の展望を聞いたかった。</li> <li>・技術レベルとしては、触媒・レアアース抽出などに関する到達度は十分な説明がなかったが、計算科学と構造材料の製造を結び付けた学術的な価値は極めて高い。</li> <li>・構造材料4テーマでは微視的観察、シミュレーション、実験により効果検証およびメカニズム解明を行い、目標の検討材料の性能向上に加えて合金材料開発の指針を得ることが出来た。</li> <li>・経済的価値の創造に関しては、当初目標が十分でなかった感は否めないが、技術レベルの向上には確実に繋がった。</li> <li>・新しい組成傾斜チタン合金の創製、ナノインデンテーション法を用いた鉄中の合金元素が転位挙動に及ぼす影響の解明、Mg合金の強靱化に及ぼす合金元素の影響、貴金属フリーナノフラワー触媒の創成、といった学術的に価値のある研究成果から、B添加による溶接部の強靱化、電子基板などからのPd、Auの抽出といった、社会的・経済的価値の創造につながる研究成果まで幅広く獲得できている。</li> <li>・組織不均質性の活用が研究のキーワードとなっている。この活用メカニズムを一般化することが、次世代材料創製の指導原理および技術構築につながるものと期待される。</li> <li>・機能材料はナノフラワー触媒の創成および高秩序メソポーラス物質の表面積が非常に大きくなる特長的な空隙構造を構築できた。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・本成果の実用化に向けた今後の活動、連携を期待する。</li> </ul>
<p>③研究開発の進捗状況 (研究により得られた成果は、世界レベルと比較して高いか、予算に見合った成果が得られたか、将来の新しい研究の芽が得られたか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・個々の研究成果は世界レベルと比較しても極めて高く、予算規模に見合った研究成果が得られていた。</li> <li>・投資予算を上回る成果が得られていると考えられる。</li> <li>・創出された指導原理は、十分競合優位性のあるものとのことであるが、客観的根拠をもって説明して欲しかった。</li> <li>・数多くの特許出願・登録がなされていることより、研究開発された高機能材料創製手法・技術は世界的にも突出していると推察される。</li> <li>・低炭素鋼の強靱化、希土類フリー展伸マグネシウム合金、CuO ナノフラワーは従来材料と比較しての大幅な特性改善が求められている。</li> <li>・元素の偏析を積極的に利用するというアイデアの下での、連続的に組成の変化した界面を有するチタン合金積層材の創製とその興味深い力学特性に関する研究成果は、新しい研究分野を創出し世界を牽引できる優れた成果である。</li> <li>・また、試験方法、観察手法など今後の材料開発に活用できる解析手法が構築された。</li> <li>・国内外の元素戦略研究拠点との差別化（NIMSの元素戦略研究の特徴、オリジナリティー）や、連携・共同研究で得られた成果の強みを具体的に示すことよい。</li> <li>・構造材料といった国策的にも重要な研究を継続する上で、新たな研究の芽も得られており、今後更なる躍進が期待できる。</li> </ul>
<p>④見込まれる直接の成果（アウトプット）、効果・効用（アウトカム）や波及効果（インパクト） (質の高い論文・特許が多く出たか、新技術や実用材料につながるか、思いがけない成果があったか、他分野への波及効果はあるか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・415件の学術雑誌論文、90件の国際会議プロシーディングス論文、141件の解説・総説論文が著されており、国際的にレベルの高い学術誌への掲載も多いなど、質量ともに十分である。</li> <li>・研究期間において400件を超える実に多くの論文が発表され、その成果に対して著名な学会論文賞を受賞すると共に、国際会議でもベストポスター賞などを受賞し、質の高い研究成果を上げている。</li> <li>・I Fの高い雑誌にも投稿しており、多くの分野への波及効果があった。</li> <li>・560件の招待講演がなされていることから、関連分野への波及効果も見込まれる。</li> <li>・400件を超える論文数、約90件の特許出願があり、受賞の形での外部評価を受けると共にプレス発表による成果の公開も積極的に行われている。</li> <li>・また、同時に数多くの特許出願・登録がなされ、材料創製研究をリードする研究アクティビティの高さがうかがえる。</li> <li>・特許出願87件、特許登録62件なども行われている。</li> <li>・特に特許の出願件数とその登録件数は極めて高く、今後の産業界との連携が期待できる。</li> <li>・波及効果は、期待通りであった。</li> <li>・今後、実用化が加速することを期待したい。</li> <li>・本プロジェクトで得られた成果はいずれも貴重であるが、特に基礎的な知見は構造材料研究の大きな展開をもたらす効果が期待できる。</li> <li>・実用化、実装化に向け外部連携センター機能を最大限活用して企業連携をもっと進めて欲しい。</li> <li>・創出された指導原理は、汎用性の高い方法であり、今後、企業との共同研究等、実用化に向けて進展していくことが期待できる。</li> <li>・開発した材料の特性向上メカニズムを解明し、実験による定量的な向上結果を示したことは大きな成果である。</li> <li>・強度-延性バランスの発現・向上は、構造用材料に希求される課題であり、積層構造を活用してβ型チタン合金を対象に研究がなされているが、他の元素戦略研究にも、是非波及してほしい研究要素である。</li> </ul>

総合評価点平均 (10点満点)	9.4点 (小数第二位四捨五入)
<p>その他 研究全体に対する総合的な所見、①～④に入らない所見、問題点、あるいはプロジェクトに対する印象など自由にご記入ください</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 課題設定に対し、技術マーケティング、ニーズヒアリング等をさらに加えることで、日本の国際競争力の維持・強化に向けてさらにインパクトある成果が期待できる。</li> <li>・ 目標設定において、研究者個人のテーマと、NIMS として行うべき研究テーマを区別して、機構として行う研究テーマをプロジェクトとして推進すると、研究領域として魅力の増強につながる。</li> <li>・ メーカーとの共同研究で実用化研究が進められていますが、基礎・基盤となる課題は明確に示して頂き、NIMS の研究として継続して進めることを期待する。</li> <li>・ 本元素戦略研究により、飛躍的に優れた機能・性能を発現する構造材料、機能材料が創製できたことは特筆される成果といえる。</li> <li>・ 次ステップは、これらの材料を構造化することであり、加工性、接合性の観点からの継続的な研究展開を是非期待したい。</li> <li>・ 微量 B 添加による Al-Si 耐候性鋼の溶接 HAZ (熱影響部) 靱性向上手法は、従来の TMCP (熱加工制御) 鋼での技術開発と類似しているように思える。本研究によって B 添加による靱性向上メカニズムが解明されたと判断されるので、そのことを明示した方がよい。</li> <li>・ 負荷過程での pop-in (不連続変形) 挙動は、引張負荷モードか曲げ負荷モードかなどの負荷様式、および試験片寸法 (特に厚さ) に依存するので、考察しておくことを勧める。</li> </ul>

### 第3期中長期計画プロジェクトの事後評価基準

評価点	評価	評価基準
10	S	全ての点において模範的に優れていた。
9		多くの点において模範的に優れていた。
8	A	総合的に優れていた。
7		顕著な成果が出た優れたプロジェクトであった。
6		
5	B	平均的なプロジェクトであった。
4		一部の計画の見直しが必要であった。
3		
2	C	期待されたほどではなかった。
1		計画を大幅に見直して実施すべきであった。