

# 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	低炭素化社会を実現する耐熱・耐環境材料の開発
研究責任者の所属・役職・氏名	構造材料研究拠点・上席研究員・黒田聖治
実施期間	平成23年度～平成27年度
研究目的と意義	<p>本プロジェクトでは火力発電、ジェットエンジンなどの中温域（本プロジェクトでは500～900℃を中温域と定義）で大量に使用される構造用金属材料（耐熱鋼、チタン合金、鉄基超合金）に着目し、新しい合金設計によってこれらの耐熱性をそれぞれ従来材料より100℃以上向上させることを目的とする。さらにこれらの材料が高温使用環境で長期間機械的特性を維持できるよう、耐環境特性（耐酸化、耐エロージョン、耐高温腐食等）を各開発材料に付与する表面改質・コーティング技術を併せて開発する。また、ジェットエンジンのブレードとケーシング間のクリアランスの自動制御を目的とする高温作動形状記憶合金と、タービン等の軸受部の摩擦、冷却低減を目的として高温でも低摩擦を維持できるコーティングを開発する。基材と表面の研究を連携させつつ並行的に研究・開発する新しい材料開発モードを確立する。</p> <p>第4期科学技術基本計画のグリーンイノベーションの柱の一つとして基幹エネルギー供給源の効率化と低炭素化に向けて、火力発電の高効率化が明記されている。また、エネルギー利用の高効率化及びスマート化の課題として高効率輸送機器の開発があり、燃焼エンジンの効率向上も重要な課題と位置づけられている。具体的な例として火力発電の蒸気温度700℃での操業が可能になれば、発電効率は46%以上（従来は蒸気温度600℃で発電効率は42%）に向上し、日本のCO<sub>2</sub>総排出量の約1.4%を削減できるだけでなく世界に輸出できる発電技術（A-USC）となる。</p>
研究内容	<p>1. 材料設計・シミュレーション、2. フェライト系耐熱鉄合金、3. 高温軽量合金、4. オーステナイト系鉄基超合金、5. 厚膜系表面改質、6. 薄膜系表面改質の6つのサブテーマを置き、設計、基材開発、表面改質技術の三者が連携しつつ研究を進める。サブテーマ1では、基材と表面層の相互作用が少なく、かつ耐環境特性に優れた材料の組み合わせを提案する。サブテーマ2、3、4では、析出強化、加工熱処理等の冶金的手法を駆使して、耐熱性を向上させた超耐熱鋼および鉄基超合金、<math>\alpha+\beta</math>-チタン合金、高温形状記憶合金を開発する。サブテーマ5、6では、上記テーマと連携しつつ、耐環境性能に優れた厚膜コーティング、および高温トライボロジー特性を目的とした薄膜系のプロセス開発を行う。</p>
ミッションステートメント （具体的な達成目標）	<p>（サブテーマ1 材料設計）高温使用中の拡散・組織変化を最小限に抑制するような表面改質層とそれに対応する基材を設計し、使用可能温度を50℃上げる。</p> <p>（サブテーマ2 フェライト系耐熱鉄合金）10万時間クリープ破断強度が、700℃で100MPaを目標とする。</p> <p>（サブテーマ3 高温軽量合金）チタン基合金の耐熱温度を650℃以上（137MPa-</p>

	<p>1000時間クリープ)に、高温形状記憶合金は、200から600°Cで2%の回復を示す。</p> <p>(サブテーマ4 オーステナイト系鉄基超合金) 1万時間クリープ破断強度が、750°Cで160MPaを目標とする。</p> <p>(サブテーマ5 厚膜系表面改質) 耐環境コーティングとして、設計(原料)に対して組成のずれを5%以内で大気中成膜可能なプロセスを開発する。</p> <p>(サブテーマ6 薄膜系表面改質) タービン等高温機器のベアリングの動作温度を200°C向上させる。</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>650°C～900°Cの中・高温域で使用できる耐熱構造材料をターゲットに、基材と耐酸化・潤滑などの表面改質技術を並行して開発した。</p> <p>サブテーマ1「材料設計・シミュレーション」：耐熱チタン合金設計のためのシミュレーション技術や組織・特性データを構築し、酸化現象に及ぼす粒度の影響などで有効性を実証した。</p> <p>サブテーマ2「フェライト系耐熱鉄合金」：700°Cでの10万時間クリープ破断強度が80MPaの析出強化型フェライト系超耐熱鋼を開発し、パイプ製造性の実証を行った。</p> <p>サブテーマ3「高温軽量合金」：Ga固溶強化と金属間化合物の析出効果の併用により650°C(137MPa下で1000時間クリープ寿命)の耐熱性を有するTi合金を開発した。また、Ti基金属間化合物をベースに第三元素を添加、200から600°Cの温度範囲で2%の回復を示す形状記憶合金を開発した。</p> <p>サブテーマ4「オーステナイト系鉄基超合金」：金属間化合物による析出強化をオーステナイト系鉄基超合金に応用し、750°C-160MPaで1万時間クリープ寿命を達成、パイプ製造性も実証した。</p> <p>サブテーマ5「厚膜系表面改質」：ウォームスプレー法によって設計(原料)に対して組成のずれを5%以内でTiAl合金を成膜し、優れた耐酸化性(750°C)を実証した。</p> <p>サブテーマ6「薄膜系表面改質」：イオンプレーティングを用いてBN系セラミックコーティング複合組織を創製、800°Cまでの低摩擦を実現しベアリングボールへのコーティングにも成功した。</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> <p>得られた成果は、ジェットエンジンの圧縮機後段やA-USCで必要となる耐熱構造材料技術であり、耐熱温度の100K上昇という極めて野心的な目標をラボレベルとは言えほぼ達成しているために技術シーズとしてのインパクトは大きい。NIMS第4期のプロジェクト、SIPなどの国家プロジェクト、企業との共同研究等を通じて継承・発展しており、実用化への「死の谷」を越えて熱機関の効率向上等を通して世界のCO<sub>2</sub>排出量削減に貢献していくことが大いに期待される。</p>
<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>目標の達成度 大きな成果を挙げており目標を十分上回った。</p> <p>自己点検・評価： エネルギー機器に用いられる構造材料開発では、実用化に近づくほどクリアしなくてはならないパラメーター(例： casting性、鍛造性、溶接・接合性、加工性、疲労特性等)が増え、試験規模も大きくなるので必要な予算が膨大なものとなる。今後、計算科学の活用やNIMS内外の組織的連携によって本プロジェクトで得られた成果の産業利用への展開を加速していく必要がある。また、実用性が見えてくるほど、海外からの連携要請にどう対応していくかにはより高度な戦略性が必要。</p>

【評価項目】	コメント
<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>・プロジェクトの当初計画から順調に進められており、実施体制・マネージメントもサブテーマ間で協調されつつ、進められていた。</li> <li>・中温域の耐熱鋼およびチタン合金にターゲットを絞り、耐熱性向上の目標温度を明確化して研究を進めた。</li> <li>・高温用チタン合金、鉄鋼材料の耐熱性を 100℃以上向上させるという挑戦的な目標を掲げ、耐熱材料およびその表面改質と材料設計・シミュレーションを行う 6つのサブテーマからなるプロジェクトを遂行している。</li> <li>・耐熱性 100℃向上という高い目標設定はよいが、そのインパクトを定量的かつ世界との彼我分析も含めて説明して欲しかった。</li> <li>・発電プラント用耐熱鋼と航空機用チタン合金を対象として、基材開発と表面改質（コーティング）技術の開発を目指し、6つのサブテーマが機能的に連携して目標達成を図っている。</li> <li>・また、開発前から想定される課題（溶接部等）も並行して進めているようであるが、それも含めた取組みでないと学術的な指導原理を示しただけになってしまうので、実用化に向けては、進め方、マネージメントが重要である。</li> <li>・計算によるグループとの密接な連携があれば、学術に与える影響が高まると期待される。</li> <li>・ロードマップ、実施体制は十分である。</li> <li>・基材とコーティングの各サブテーマが連携した一貫評価も行われており、実製品への適用を見据えた研究協力体制が敷かれている。</li> <li>・サブテーマ責任者の力強いリーダーシップが、研究を牽引し、若手人材の育成にもつながっている。</li> <li>・一方、マネージメントとして、やや各サブテーマの並列になっている印象があり、相乗効果には不足があるのではないか。</li> <li>・ポーランドその他の海外大学・機関との学生・若手研究者を通じた連携を活発に行っている点が本プロジェクトの特徴の一つであり、将来の財産になる活動として評価できる。</li> <li>・海外の大学からのインターンシップ学生を積極的に受入れ、日本人学生の研究モチベーション、コミュニケーション力を高めている。</li> <li>・日本人ポスドク 2名の人材育成にも貢献し、加えて首都圏大学の学部学生の教育にも貢献している。</li> <li>・研究費の約半分が人件費で、かつ人件費の約半分がポスドクに充てられており、若手の自由な発想を引き出しながら、人材育成を図っている。</li> <li>・ポスドクに人件費予算の半分を割いているが、これは否定するようなことではなく、いずれも現在も研究分野で活躍しているということなので、若手人材育成活動として評価すべきである。</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>・提案されている材料物性は当初目標値が高いが、ほぼ達成できている。</li> <li>・目標とする温度および特性はほぼ達成されており、その成果は基材開発、コーティング開発、共に実験結果として定量的に示されている。</li> <li>・耐熱性 100℃以上向上という高い目標を設定し、それに近い成果を上げている。</li> <li>・発電プラント用耐熱鋼、航空機用チタン合金の両研究対象について、耐熱性を 100℃以上させるというプロジェクト目標をほぼ達成する成果が得られていると判断される。</li> <li>・研究者サイドでは達成度 100%と自己評価しているが、そもそも高い目標を掲げているので、少し無理がある。</li> <li>・しかし、学術的価値、社会的価値の創造につながる優れた成果を複数挙げていることは事実なので、当初の高い目標に対してどのような進歩が獲得できたのかを主張する方がよいように思う。</li> <li>・個別にはほぼ目標を達成しており、その成果の競争力も高い。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ただし、実用化に向け、必要な他特性の確認は今後の課題である。</li> <li>・当初ロードマップと比べ、計算の部分の成果が弱い。当初計画で、すべての出口を計算に押し付けすぎたきらいもあるのではないかな？</li> <li>・開発された発電プラント用耐熱鋼は、700℃超級の次世代超々臨界圧プラント(A-USC)ボイラの実現を期待させ、世界的に注目を集めている石炭火力の高効率化技術の開発に貢献できるものである。</li> <li>・高エネルギー効率によって世界のCO<sub>2</sub>排出量削減に貢献する、文字通り低炭素化社会の実現につながる成果が得られている。</li> <li>・社会的な価値は優れているが、経済的価値の創造につながったかは、再度見直しが必要な部分があるように見受けられる。</li> <li>・技術的レベルの向上に関しては、原因と制御方法を検討されており、今後の成果が期待できる。</li> <li>・また、得られた成果は国家プロジェクトや企業との共同研究の形で継続、発展をしている。</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>・研究成果として、多くの特許出願と登録がなされており、世界レベルと比較しても成果が得られている。</li> <li>・国際会議等における招待講演が群を抜いて多いことは、世界トップレベルの研究成果が得られていることを物語っている。</li> <li>・開発した耐熱合金の特性は、同種合金の既存データと比べて温度特性が大幅に改善し、他開発機関の成果と比較しても良好な結果が得られた。</li> <li>・また、コーティングにより耐環境性の顕著な向上が得られた。</li> <li>・高温強度、耐熱性に優れた次世代材料開発・表面改質技術開発の指導原理および設計指針の構築につながっている。</li> <li>・マルテンサイト以外の組織を有する優れた特性の15Crフェライト系耐熱鋼、高温クリープ・耐酸化性に優れたチタン合金、高温形状記憶合金、新しい鍛造Fe-Ni基超合金の開発、コーティング用耐酸化合金厚膜形成技術の開発など、優れた成果が得られている。</li> <li>・メカニズム解明のための取組みも並行して進めることで、他特性との両立等、相反課題の解決が可能になると思う。</li> <li>・なぜ特性発現できたかの取組みについてもっと説明して欲しかった。</li> <li>・高温形状記憶合金について、NIMS開発合金はNASA合金よりも高温で大きな仕事量を示すなど、世界的にも優位性のある成果が得られている。</li> <li>・これらは将来の研究発展の芽となり得ると考えられる。</li> <li>・提案されたプロジェクトでは、現行の問題点を解決するためにさらに検討が必要であり、必ずしも将来に向けた新しい芽が得られていたかは、明確ではない。</li> <li>・そうした発展、および世界レベルの研究に育てられるかどうかは、各研究者の力にかかっている。</li> <li>・今後の産業利用に向けた連携強化や展開の加速を期待したい。</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>・200件近くの論文発表で研究成果をアピールすると共に90件を超える特許創生により今後の国内産業での利用が期待される。</li> <li>・197件の学術雑誌論文、132件の国際会議プロシーディングス論文、46件の解説・総説論文が著されている。</li> <li>・247件の招待講演がなされており、十分な影響力を有していると思われる。</li> <li>・論文成果は十分に出されて、企業連携も多く進められている。</li> <li>・十分な量であるが、国際会議プロシーディングよりも学術雑誌論文文化に力を入れた方が良い。</li> <li>・特許出願92件、特許登録41件なども行われている。</li> <li>・本研究開発の成果が、数多くの出願特許、登録特許および新規実施許諾特許につながっていることは特筆すべき成果といえる。</li> <li>・特許の多さは、実用化に向けたポテンシャルの高さを示唆しているように思われる。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実用化に至る道のりにはまだ時間が必要と思われるが、成果の波及効果は極めて高い。</li> <li>・ SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）などの国家プロジェクトの推進につながる波及効果が得られている。</li> <li>・ 耐熱性が 100°C 近く向上するコンセプトは魅力的であるので、今後これを実現する課題を発信して、外部連携も活用して継続して実用化を目指していただきたい。</li> <li>・ また、計算科学を活用した材料設計は、大規模計算へ拡張することによる実用化検討の加速施策など、更なる進化が望まれる。</li> </ul>
総合評価点平均 (10点満点)	8. 2点 (小数第二位四捨五入)
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	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 当初の目標は十分達成されているといえるが、構造化への展開のためには、加工性、溶接性の確保、および溶接部も含めた高温強度確保が必須であり、その方向への研究展開が大いに望まれる。</li> <li>・ 実機プラントへの適用検証と利用拡大のためには大型予算投入が必要であり、国主導型のオールジャパンでの研究体制が今後望まれる。</li> <li>・ 個別には面白い芽が出ている。</li> <li>・ 今回成果が社会的、経済的価値をどれだけまたはどのように高めることが出来るのかを分かり易く説明頂くと研究のすばらしさが伝わると感じた。</li> <li>・ 耐用温度向上の鍵となる原理、メカニズム、手法など代表的なものでかまわないので併せて説明すると良いと思われる。</li> <li>・ 何が克服できて何ができないのか、自分たちはどのようにするのか、もう一歩具体的に踏み込んで考えることが、次の研究につながると思われる。</li> <li>・ 評価委員会においてプレゼンで示された今後の課題は、やや評論的に過ぎるよう感じられた。</li> <li>・ 実際のプロジェクトにおいて、当初計画、の適宜の見直しが必要と思われる。</li> <li>・ 具体的には、シミュレーションが極めて重要と思われるが、耐熱・耐環境材料の設計指針を確立するために、十分でない場合には、速やかな見直しが必要であろう。</li> <li>・ 研究予算等の配分の見直しも含めて、臨機応変な対応が求められる。</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。 多くの点において模範的に優れていた。
9		
8	A	総合的に優れていた。 顕著な成果が出た優れたプロジェクトであった。
7		
6		
5	B	平均的なプロジェクトであった。 一部の計画の見直しが必要であった。
4		
3		
2	C	期待されたほどではなかった。 計画を大幅に見直して実施すべきであった。
1		

