

プロジェクト中間評価報告書

評価委員会開催日：平成25年12月11日

評価委員：（敬称略、五十音順）

潮田浩作 新日鐵住金（株）技術開発本部 フェロー

落合庄治郎 京都大学構造材料元素戦略研究拠点 副拠点長

丸山公一 東北大学名誉教授

山本真人 （一財）電力中央研究所材料科学研究所 上席研究員

確定年月日：平成26年2月10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
研究責任者の氏名・所属・役職	黒田聖治 先進高温材料ユニット長
実施予定期間	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CO₂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、$\alpha+\beta$-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）チタン合金の耐熱温度を650℃以上（137MPa- 1000時間クリープ）に、高温形状記憶合金は、200から600℃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℃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25年度中間評価時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> <ol style="list-style-type: none"> 1. 材料設計：チタン高温酸化における酸素固溶シミュレーション手法を開発した。また、チタン合金への表面処理として、Alの活量を制御した拡散浸透法を検討し、所望の相(例：TiAl)を表面に形成できるようになった。 2. フェライト系耐熱鉄合金：650～750°Cのクリープ強度は既存の9Crフェライト耐熱鋼の約2倍に、破断寿命は10～100倍に延長した。Ni添加によって、クリープ強度だけでなく、クリープ破断延性や衝撃特性も改善した。水蒸気酸化増量は既存9Crフェライト鋼よりも小さく、熱膨張係数も既存鋼より小さかった。 3. 高温軽量合金：耐熱チタン合金の高温強度、酸化特性に対する添加元素の役割を系統的に調べ、新たな析出物や酸化物による析出強化を行うことにより600°C-310MPaで従来材よりも長寿命のチタン合金を、650°Cでも目標値に近い合金を開発できた。 4. 高温形状記憶合金：第三元素添加による変態温度低下、組織、形状回復について検討し、400～550°Cの間で2%以上の回復を示す合金を見いだした。 5. オーステナイト系鉄基超合金：従来Fe-Ni基超合金で最強のGH2984より耐熱温度が約50°C高く、Ni基超合金GCA617の性能を超える、鍛造性にも優れたSINM合金を開発した。 6. 厚膜系表面改質：高圧ウォームスプレーによって高強度チタン合金の緻密で酸化の少ない膜の形成に成功した。また、TiAl基の耐酸化皮膜形成を素粉末から行うプロセスを検討し、目途をつけた。 7. 薄膜系表面改質：イオンプレーティングを用いて開発した六方晶・立方晶混成窒化硼素膜の摩擦係数(μ)を室温から800°Cまで測定した結果(荷重約1Nで100回摺動)、800°Cまで低摩擦性能が維持できることが初めて示された。 <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>本プロジェクトで開発中の材料を先進高効率火力発電プラントやジェットエンジンの高温構造材料に応用すれば、より『クリーンで経済的な火力発電やジェットエンジン』が実現でき、グリーンイノベーションとして世界中の電力需要や輸送を賄いつつ地球環境問題の解決に貢献できる。</p>
<p>中間評価時の進捗状況及び自己点検・評価</p>	<p>中間評価時の進捗状況：</p> <p>全体として予定通りの進捗状況で目標を達成できる。</p> <p>自己点検・評価：</p> <p>プロジェクト開始前から研究が先行していた15Crフェライト鋼はクリープ特性がターゲットの700°Cではまだ不十分なものの、フェライト鋼としては画期的な650°Cでの使用に対しては十分な性能を示し、水蒸気酸化や破壊靱性もクリアできる目途がついた。材料設計からスタートしたチタン合金(650°C)とオーステナイト基超合金(750°C)、さらに高温形状記憶合金は、それぞれ有望な候補材が出てきた。表面改質も、厚膜、薄膜ともに着実な進展を見せており、基材側の耐環境性能が顕在化してくるプロジェクト後半ではより本格的な連携を進める。総体的にほぼ計画通りに進捗している。</p>

【評価項目】	コメント
<p>①研究計画、実施体制、マネジメント、連携 (研究開発の方向性・目的・目標の見直し、計画・ロードマップの問題点、実施体制・マネジメントの改善、連携のあり方、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・各種高温材料の耐用温度をおしなべて100℃上げようという大変野心的で、高い目標を掲げて研究しており、成果が達成されたときの期待は大きい。 ・高温で使う燃焼器の作動温度を上げ、省資源とCO₂排出削減を可能にする技術として期待される。 ・表面改質関連でも、低コスト化や長寿命化への貢献が期待される。 ・細分化、最適化が進み、新たな開発が難しくなっている高温用金属材料の開発に関し、目的とする強度・機能を得るための指導原理を見据えた材料開発を行う手法はNIMSの特徴であり、この武器を活かしつつ、現実的なニーズと指導原理の設定のもと、適切な研究計画が立案されている。 ・得意分野を活かしつつ、その適用先を広げていく手法で開発計画が立案されており、将来を見据えた発展性のある計画となっている。 ・中温域耐熱・耐環境材料の基材と表面改質の開発研究を具体的な数値目標を掲げ、6サブテーマグループを構成して、推進している。 ・目標、ロードマップはクリアであり、6つのサブテーマがお互い良く連携して体系的に取り組んでいる。有機的な連携が取れる体制となっている。 ・方向性・目的・計画は特に問題ない。 ・実施体制、マネジメントについても、推進会議を設定して進捗状況の確認と問題点の早期把握に努め、サブグループ間の研究連携を行い、ユニットセミナーで発表と議論を行って協力体制を強化する、そのなかで学会前にリハーサルセッションを設け若手に研鑽を積ませるなど、地道なシステムを作って実行している点も評価される。 ・プロジェクト推進会議、ユニットセミナーなどを通して、各サブテーマの協力強化や若手の研鑽を実施しており、評価される。
<p>②研究開発の進捗状況及び進め方 (進捗状況の把握、研究責任者の自己点検・評価の妥当性、進め方の見直し(継続・変更・中止等)、研究資源(資金・人材)の再配分、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・プロジェクト全体としては、クリープ強度に飛躍のある耐熱合金の開発が進み、かつ耐酸化特性や低摩擦特性にも優れた世界トップレベルの材料が開発されつつある点は評価される。このような飛躍に対する学理の追求を今後は期待したい。 ・次のような点に関して、大きな成果を得ている。—チタン合金での酸化シミュレーションの高度化。析出強化型15Cr鋼のクリープ強度を高め、650℃で使えるフェライト鋼の用途を立てた。耐熱チタン合金、高温形状記憶合金で、開発目標をほぼ達成した。Fe-Ni基高温材料でも、従来材の性能を凌駕し、Ni基合金と同等の性能を達成した。高密度、高強度で延性もある表面改質層を作る用途が立った。BN薄膜コーティングにより、摩擦係数が低い表面改質層を作る用途が立った。 ・各サブテーマともに概ね計画通り進捗している。 ・研究成果概要にみられるように新知見や今後に繋がる成果を得ており、ほぼ計画通りの成果を挙げたと言える。 ・高い目標のため、一部に目標達成の用途が立っていないものもあるが、順調に研究は進展している。 ・新規な合金設計のアイデアや耐環境表面の作り込みのための独自性の高いプロセス技術は高く評価される。 ・グループのプロジェクト推進会議で進捗状況を把握しながら研究を進めている。 ・研究責任者の自己点検・評価は妥当である。 ・タイムリーな結果の公表と実用化に向けた方策の検討がなされている。 ・具体的に用途を絞り、素材から表面技術までの一貫的視点で実験的に評価し、検証することも重要である。

<p>③論文・特許等の直接の成果(アウトプット)、効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト) (研究成果の質は世界レベルか、どのような効果・効用あるいは波及効果が出たか/期待されるか、研究タイプを考慮した費用対効果はどうか、セレンディピティ一、ほか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 中温域で新材料が実用化されれば、火力発電、ジェットエンジンのエネルギー効率向上、環境保護など、社会への貢献はきわめて大きい。本プロジェクトでは、既存材料では対応できない新中温域高温材料やタービンにおけるクリアランスコントローラーとしての実用化が期待できる、高クリープ特性・低熱膨張のフェライト系耐熱合金、高クリープ・高耐酸化特性のチタン合金、高形状回復能の高温形状記憶合金、高耐熱・耐食・製造性のオーステナイト系超合金、など、有望な基材候補材を得ている。 ・ 表面改質についても、高強度を有するチタン合金厚膜、高温潤滑性・耐摩耗性を有する複合BN薄膜などについて、今後に繋がる有用な知見を得ている。世界的にも先進的・重要知見を取得したといえる。 ・ 多数の論文、会議抄録、招待講演はこのグループが活発に研究し、その成果が高く評価されていることを示している。 ・ 研究成果を論文、発表として発信しており、招待講演、受賞などでも評価されている。一部の成果は、海外企業が興味を示している。この様に、アウトプット、アウトカムでも評価できる。 ・ 世界をリードする研究成果を創出し、多くの論文としてまとめ、特許出願・登録を推進し、知的財産化を図っている点は高く評価できる。 ・ 実用化を見据えた開発の結果が得られ、タイムリーに公表されている。独占特許のオファーを受けるなど、対外的に注目に値する成果が各サブテーマで得られている。 ・ 国際競争力の強化の観点からも、戦略的な知的財産の創出が継続して望まれる。
<p>④総合評価 (研究全体に対する総合的所見、及び上記評価項目①～③に含まれない、その他の評価ポイント、問題点等があれば追加してコメント)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 全体的に良く進捗している。 ・ 目標が明確であり、またサブテーマのミッションもクリアで、お互いが良く連携して世界をリードする成果を挙げている点は高く評価できる。 ・ これまでほぼ計画通りに研究を推進し、重要な知見を得て、目標実現の可能性を示した段階、あるいは目途が立った段階に入ったことは評価される。 ・ 一部については非常に高い目標が掲げられており、目標を100%達成出来なくても、現状を十分に超える性能が得られれば十分に評価できる成果である。 ・ テーマごとの研究開発、それを統合化し実用化しようとする体制の双方がバランスよく機能しており、学術的価値、実用的価値の双方でインパクトの強い成果が着実に得られている。 ・ NIMSは、この分野で世界をリードしてきた。今後も、国際交流や、世界への情報発信を続け、高温材料分野の国際センターへ発展するよう一層の努力を期待したい。 ・ 材料開発の指導原理や、学理発展への貢献など、波及効果も期待したい。 ・ 新知見の学術的な掘り下げを更に強化するとともに、今後は実用化に向け、産業界との連携を強化しながら用途を絞り込んだ効率的な推進も期待したい。 ・ 本プロジェクト以外との連携、例えば木村チーム(「エネルギー関連構造材料の信頼性評価技術の研究開発」プロジェクト)やJSTの先端的低炭素化技術開発(ALCA)プロジェクト等との連携を図り、相互に基盤の強化を図るとともに新知見を横展開することも必要となろう。その際には、可能ならNIMSがリーダーシップをとってオールジャパンの力を結集して推進することも期待したい。 ・ 発電分野などでは、鉄鋼やチタンをベースにした中温域での新耐熱材料の開発が叫ばれて久しい。世界的な競争もある。メカニズム解明と社会からの期待が大きい実用化への準備を進めてほしい。本研究の今後3年間での大きな進展を期待する。

		・ 戦略的な知的財産化、周辺技術の知的財産化も今後益々重要となろう。
各委員の総合評価点 (10点満点)		8、10、9、8 (順不同)
総合評価点平均 (10点満点)		8.8 (小数第二位四捨五入)
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る。 計画を変更することなく継続すべきである。
9		
8	A	総合的に優れている。 一部計画を見直し継続すればS評価になる可能性がある
7		
6		
5	B	平均的なプロジェクトである。 継続は認めるが、継続する時に、一部計画を見直した方が良い点がある。
4		
3		
2	C	プロジェクトの見直し、計画の抜本的な変更が必要である。 大きな問題があり、継続を中止すべきである。
1		