

「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」

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）	18
評点結果	21

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「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」（事後評価）の研究評価委員会分科会（第1回（平成24年7月9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34回研究評価委員会（平成25年1月15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1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「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」分科会
（事後評価）

分科会長 金子 祥三

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
「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」(事後評価)

分科会委員名簿

(平成24年8月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	かねこ しょうぞう 金子 祥三	東京大学 生産技術研究所 特任教授
分科会長 代理	たかき せつお 高木 節雄	九州大学 大学院工学研究院 材料工学部門 教授
委員	あさい さとる 浅井 知	株式会社東芝 電力システム社 京浜事業所 参事
	おがた たかし 緒方 隆志	千葉工業大学 工学部 機械サイエンス学科 教授
	くわばら としひこ 桑原 利彦	東京農工大学 大学院工学研究院 先端機械システム部門 教授
	こせき としひこ 小関 敏彦	東京大学 大学院工学研究科 マテリアル工学専攻 教授
	よこぼり よしみつ 横堀 嘉光	東北大学 大学院工学研究科 ナノメカニクス専攻 教授

敬称略、五十音順

プロジェクト概要

概要

		作成日	平成 24 年 8 月 6 日
制度・施策 (プログラム)名	ナノテク・部材イノベーションプログラム エネルギーイノベーションプログラム		
プロジェクト名	鉄鋼材料の革新的高強度・高機能 化基盤研究開発	プロジェクト番号	P 0 7 0 0 5
担当推進部/ 担当者	電子・材料・ナノテクノロジー部 松井 直樹 (平成 24 年 8 月現在) 電子・材料・ナノテクノロジー部 藤村 浩志 (平成 22 年 1 月～平成 23 年 12 月) ナノテクノロジー・材料技術開発部 飯田 純生 (平成 20 年 1 月～平成 21 年 12 月) ナノテクノロジー・材料技術開発部 吉川 幸宏 (平成 19 年 6 月～平成 19 年 12 月)		
0. 事業の概要	<p>エネルギー資源の多くを海外に依存する我が国にとって、省エネルギー化を図ることは、エネルギー政策上重要な課題である。本事業では鋼構造物やプラント、自動車等の革新的な省エネルギー化、長寿命化、安全・安心化を図るため、鉄鋼材料及び鋼構造物を高機能化することを目的とした基盤的研究開発を行う。具体的には、高強度鋼、高機能鋼の実用化拡大の基盤となる(1)高級鋼厚板溶接部の信頼性・寿命を大幅に向上する溶接施工・溶接材料及び金属組織制御技術の開発、(2)部材の軽量化を図るために高強度と加工性の両立を可能とする鍛造技術の開発を行う。この結果、鋼構造物、エネルギープラント等の高強度・高機能化・長寿命化、および自動車等の更なる軽量化が可能となり、高度な省エネルギー社会を構築すると共に、日本製造業の国際競争力の更なる向上を図る。</p>		

<p>I. 事業の位置付け・必要性について</p>	<p>【NEDO が関与する意義】</p> <p>鉄鋼材料には、「安全・安心な低炭素社会の実現」、「高効率・省エネルギー化の追求」といった社会的要請から、エネルギー・インフラ分野における鋼構造物等の極低温、高温、高圧など極限環境への対応、自動車等の輸送機器・産業機械分野におけるさらなる軽量化への対応などが求められている。そのためには、革新的な溶接技術、鍛造技術及びそれに最適な組織制御技術が必要であり、具体的には、鋼構造物・鍛造部材の破壊損傷機構解明、溶接技術の経済的・革新的改善、組織制御による鍛造部材特性の最適傾斜機能化等の要素・基礎研究を着実に実行することが必要である。また、これら技術課題を解決することでもたらされる鉄鋼材料の高強度・高機能化は、鋼構造物の軽量化や安全性の向上、部材の小型・軽量化による自動車等の燃費向上につながり、我が国社会全体に与える波及効果は大きい。</p> <p>しかし、これら技術課題の解決は既存技術の延長だけでは対処が困難であり、研究開発の難易度が高いことから、国内の最先端技術を有する鉄鋼メーカー、プラントメーカー、大学及び独法等の研究機関の連携による領域を超えた基礎研究成果と知識の集約が必要である。よって、本研究開発は投資規模が大きく、開発リスクも高いといった側面がある一方、社会的必要性が大きく、日本鉄鋼業界の国際競争力の更なる強化にも貢献できる国家的課題であることから、NEDO が有するこれまでの知識・実績を活かして推進すべき事業と判断される。</p> <p>【実施の効果(費用対効果)】</p> <p>(1) 事業費用の総額：42 億円（実績）</p> <p>(2) 市場創出効果：1,600 億円</p> <p>*2020 年時点、成果活用による各社売上げベース（成功率 100%で算出）</p> <p>高強度・高機能鋼・鍛工品市場：500 億円／年</p> <p>各種インフラ市場（造船、橋梁、LNG タンクなど）：1,100 億円／年</p> <p>(3) ・省エネ効果：約 55 万 kL／年（275 億円／年）の石油削減効果</p> <p> 溶接前後の予熱・後熱フリー化：2 万 kL</p> <p> 船舶の構造部材の軽量化：19 万 kL</p> <p> 耐熱材料の開発による発電効率向上：23 万 kL</p> <p> 自動車部品軽量化による燃費向上：11 万 kL</p> <p>・火力発電建設材料コスト削減：37 億円／基</p> <p> （欧米の Ni 基合金による建設費比較）</p>
---------------------------	--

【事業の背景・目的・位置付け】

鉄鋼材料の高強度・高機能化や長寿命化については、日本が最先端の技術力を維持し、世界を牽引してきた。しかし、エネルギー・インフラ分野で求められる極低温、腐食、高温・高圧などの極限環境への対応、輸送機器分野等でのさらなる軽量化への対応等、安心・安全かつ高度な省エネルギー社会の実現に向け、鉄鋼材料や鋼構造体に対する社会的ニーズは一段と高度化しており、既存技術の延長ではこれらの課題に対処することが困難になっている。また、エネルギー資源の多くを海外に依存する我が国にとって、省エネルギー化を図ることは、エネルギー政策上の重要な課題である。

このような背景のもと、本研究開発は、「エネルギーイノベーションプログラム」および「ナノテク・部材イノベーションプログラム」の一環として鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤技術を構築し、これを産業技術へ繋げ、運輸分野の軽量化、産業分野の構造体の高性能化と長寿命化、転換分野の先進的超々臨界圧火力発電の実現等による省エネルギーの実現および部材の高信頼性を実現して安全・安心な社会の構築を目指すものである。

具体的には、課題を克服するための前提となる、高強度鋼、高機能鋼の実用化拡大の基盤技術の高度化をめざし、(1) 高級鋼*厚板溶接部の信頼性・寿命を大幅に向上する溶接施工・溶接材料及び金属組織制御技術の開発、(2) 部材の軽量化を図るために高強度と加工性の両立を可能とする鍛造技術の開発を行い、鋼構造物、エネルギープラント等の高強度・高機能化・長寿命化、自動車等の更なる軽量化を可能とする。これにより、高度な省エネルギー社会を構築すると共に、日本製造業の国際競争力の更なる向上を図ることを目的とする。

(*高級鋼とは、高強度鋼・低温用鋼・耐熱鋼の総称)

II. 研究開発マネジメントについて

<p>事業の目標</p>	<p>鋼材の高強度化・利用技術およびその信頼性向上技術の開発により、プラント、構造物、自動車等に関する災害や事故から身体等の安全を確保する。具体的には共通基盤技術と実用化技術に分けて、下記の技術開発を行う。</p> <p>【共通基盤技術】</p> <p>① 高級鋼材の革新的溶接接合技術の基盤開発 <u>全体の最終目標</u>：予熱なしで 980MPa以上の高級鋼（現状 400MPa）の溶接を可能とする溶接技術と材料技術の基盤を確立する</p> <p>② 先端的制御鍛造技術の基盤開発 <u>全体の最終目標</u>：降伏強度 1000MPa以上（現状 600MPa）を有する傾斜機能部材の鍛造技術の基盤確立</p> <p>【実用化技術】</p> <p>③ 高級鋼材の革新的溶接接合技術の開発 <u>全体の最終目標</u>：980MPa以上の高級鋼（現状 400MPa）の溶接を可能とする溶接技術と材料技術を開発する</p> <p>④ 先端的制御鍛造技術の開発 <u>全体の最終目標</u>：降伏強度 1000MPa以上（現状 600MPa）を有する傾斜機能部材の鍛造技術の開発</p>					
<p>事業の計画内容</p>	<p>主な実施事項</p>	<p>2007</p>	<p>2008</p>	<p>2009</p>	<p>2010</p>	<p>2011</p>
	<p>①高級鋼材の革新的溶接接合技術の基盤開発</p>					
	<p>②先端的制御鍛造技術の基盤開発</p>					
	<p>③高級鋼材の革新的溶接接合技術の開発</p>					
	<p>④先端的制御鍛造技術の開発</p>					
<p>開発予算 （会計・勘定別に実績額を記載） （単位：百万円）</p>	<p>会計・勘定</p>	<p>2007</p>	<p>2008</p>	<p>2009</p>	<p>2010</p>	<p>2011</p>
	<p>特別会計（需給）</p>	<p>1,092</p>	<p>1,036</p>	<p>1012</p>	<p>432</p>	<p>637</p>
	<p>総予算額</p>	<p>1,092</p>	<p>1,036</p>	<p>1012</p>	<p>432</p>	<p>637</p>
<p>開発体制</p>	<p>経産省担当原課</p>	<p>製造産業局 鉄鋼課 製鉄企画室</p>				
	<p>プロジェクトリーダー</p>	<p>名古屋大学 宮田 隆司</p>				

	<p>委託先等</p> <p>【大学等（委託）】東北大、東工大、上智大、横浜国大、豊橋技科大、名大、阪大、岡山大、愛媛大、九大、九工大、鹿児島大、NIMS、原研、理研、JRCM</p> <p>【企業（助成）】新日本製鐵、JFE スチール、住友金属工業、神戸製鋼所、大同特殊鋼、愛知製鋼、山陽特殊製鋼、IHI、川崎重工業</p>
情報変化への対応	<p>NEDO、実施者とも、研究開発の実施に関し、情報交換に努めるとともに、その取り組み方等を討議して、円滑な推進に協力した。</p> <p>企業での実用化研究に移行しても事業化が可能であると見込まれたテーマや研究開発が順調に進捗し、平成 21 年度に中間目標あるいは最終目標を達成した研究テーマについては、終了時期を繰り上げて早期終了し、他の重要な研究テーマへ財源を集中するなど、実用化の加速と財源の有効活用を目的とした研究テーマの選択と集中を実施した。また状況変化に応じ、委託事業の研究機関の一部を助成事業の委託先へシフトするなど、最大限事業成果を達成できる研究実施体制に刷新した。</p> <p>研究テーマの選択と集中によってテーマの重点化を図り、財源を有効活用する一方、目覚ましい技術的成果があげられ、国際競争上の優位性の確立が期待されると判断されたテーマについては、研究開発を加速的に進捗させることを目的に研究加速財源の追加配賦を行った。例えば、平成 22 年度「耐熱鋼損傷評価用クリープ試験機」では、クリープ試験機を導入し、長時間クリープ試験の評価能力を向上させた。これにより、本プロジェクトで開発した耐熱鋼のクリープデータを拡充し、国際標準化に向けたデータ収集に活用した。開発鋼の早期実用化が加速され、火力発電分野における国際的な競争優位性を維持できると期待される。</p>
中間評価結果への対応	<p>外部有識者による研究開発の中間評価を平成 21 年度に実施した。中間評価の結果や提言は翌年度以降の実施方針等の研究方針に反映するとともに、研究テーマの早期終了や加速・縮小等の見直し、研究実施体制の刷新などを迅速に行い、プロジェクトの運営管理に反映した。</p>
評価に関する事項	中間評価 平成 21 年 7 月 実施
	事後評価 平成 24 年 8 月 実施予定

<p>Ⅲ. 研究開発成果について</p>	<p>【共通基盤技術】</p> <p>① 高級鋼材の革新的溶接接合技術の基盤開発</p> <p>1) クリーン MIG 溶接プロセス技術の開発</p> <p>[同軸複層ワイヤ法]板厚 12mm の HT780 および 980 鋼において、レーザ・アークハイブリッド溶接での溶着量最適制御により、実用的ギャップを想定した開先間隙 0~1mm に対して、裏当て材無しで JIS1 類相当の貫通溶接を可能（世界初）にする溶接技術基盤を確立した。</p> <p>ワイヤ溶融を安定化するため開発溶接材料成分と等価な成分で、芯材とフープ（外周）材の融点差が約 50℃となるように各成分を決定した同軸複層ワイヤを作製し、かつ定電流型パルス波形制御電源特性法の開発により純 Ar による安定施工できるクリーン MIG 溶接システムを実現（世界初）し、スパッタ発生量の半減化を達成した。</p> <p>25mm 厚板で従来開先角度を半減した開先 30 度以下の狭隘開先にて、適正溶接条件下では、表面および内部欠陥の発生はなく、溶接パス数を従来の 8 パスから 4 パスへ半減して高能率化を達成した。また同時に溶接金属含有酸素量 18ppm の低酸素化（50ppm 以下のクリーン化）を達成した。種々の溶接条件に最適化された定電流型パルス波形制御条件をノウハウ化するため ROM 化し、汎用デジタル溶接電源に装着可能として普及を見据えた実用クリーン MIG 制御技術基盤を確立した。</p> <p>[電離プラズマ法]（平成 21 年度にて課題終了）</p> <p>一般ソリッドワイヤを用い、シールドガスを一部電離して通電可能とし、その電流による電磁ピンチ力でワイヤ変動を安定化する新構造プラズマ MIG トーチ（小型最適化）と電離プラズマ/MIG 協調電流制御による基本溶接制御法を開発（世界初）した。</p> <p>安定した高速溶接施工（50cm/min）とスパッタ低減を実現した。適正条件下で表面と内部欠陥防止と酸素量 24ppm を達成した。</p> <p>いずれの方法でも、従来 TIG 溶接の 4 倍以上の高能率施工を実現した。</p> <p>2) ファイバーレーザ、レーザ・アークハイブリッド溶接適用基盤技術の開発</p> <p>a. 板厚 12mm の HT780 および 980 鋼において、レーザ・アークハイブリッド溶接での溶着量最適制御により、実用的ギャップを想定した開先間隙 0~1mm に対して、裏当て材無しで JIS1 類相当の貫通溶接を可能（世界初）にする溶接技術基盤を確立した。</p> <p>板厚 25mm を想定した非貫通ハイブリッド溶接において、20% CO₂ 混合シールド（MAG アーク）で JIS1 類相当のポロシティ（欠陥）防止が可能であることを提示した。（平成 21 年度にて課題終了）</p>
----------------------	--

	<p>板厚 25mm 厚 HT780 および HT980 鋼において、実用的ギャップを想定した開先間隙 0～1mm に対して、両面 2 パスでポロシティや割れなどの欠陥のない JIS1 類相当の突合せ継手を形成できる入熱配分法を提案し、16kW 大出力レーザー/MAG アークハイブリッド溶接における適正溶接条件を明示した。</p> <p>レーザーとアークの最適相対設置位置関係を探索し、両面 2 パスの完全溶込み隅肉継手と片面貫通隅肉継手を無欠陥で形成できるレーザー/MAG アークハイブリッド溶接条件を明示した。</p> <p>b. レーザ先行ワイヤ添加と酸素含有 (≧2%) シールドガス法による均質合金化指針を提示した。(平成 21 年度にて課題終了)</p> <p>レーザー先行ハイブリッド溶接において、レーザーとアークの相対設置位置関係とビード表面形状形成を系統的に整理して、最適相対設置位置関係を容易に設定できるハイブリッドトーチを開発し、かつ溶着量最適制御により、疲労強度向上のための実用隅肉溶接を想定した滑らかな余盛形状形成の最適施工条件を明示した。</p> <p>上記 a、b の成果を駆使し、大型の橋梁用モックアップ (400×440×1000mm) を製作し、開発技術の施工安定性 (実用性) を実証し、技術基盤を確立した。</p> <p>3) 高強度鋼、低温用鋼厚板のための高強度・高靱性溶接金属の開発および溶接継手信頼性評価技術の研究</p> <p>a. 溶接凝固過程の高時間分解その場観察システムを構築し、溶接金属組織の非平衡析出挙動の観察に成功 (世界初)。凝固割れ抑止に有効な凝固モードを明示し、適正成分系を示した。</p> <p>低温割れ抑止条件の理論付けのため、残留 γ を有する溶接ビードルート部の水素集積挙動を予測する基本ツールを完成し、残留 γ による水素の拡散速度やルート局部集積の低下を提示した (世界初)。</p> <p>種々の実用拘束条件および施工条件下で、残留 γ 約 5% 以上において予熱無しで低温割れが発生しないことを明示した。</p> <p>クリーン溶接金属において、γ 25% 以下においては熱安定で経時変化の影響がないこと、またマルテンサイトに約 5% 以上の残留 γ が存在するとき、トリップ効果によりシャルピー衝撃靱性が約 1.5 倍の 70J (平均: -40℃) へ上昇することを明示した。</p> <p>b. 9%Ni 鋼の原質部 (低靱性部) と再熱部 (高靱性部) の強度的ミスマッチと原質幅が必要靱性に悪影響を及ぼさず、原質部靱性が継手靱性を支配することを明示し、これによって入熱制限が撤廃でき、高能率施工を可能とした。(平成 21 年度にて課題終了)</p>
--	---

c. 突合せ継手と廻し溶接継手止端において、開発 Ni-Cr 系溶接金属の変態膨張による残留応力低減量は、単位長さ当たり約 11~15MPa となる施工上の目安を提示した。

クリーン溶接金属において、マルテンサイトに 7%以上の残留 γ が存在するとき、トリップ効果により疲労き裂の進展が 2.5~4 倍遅延することを FSM (電場指紋法) により明示した (世界初)。(平成 21 年度にて課題終了)

残留オーステナイト活用時の降伏強度、靱性の性能バランスを考慮した大型アーク継手における破壊靱性評価手法を確立し、従来の 1.5 倍の設計応力条件での必要 CTOD 評価値を明示し、開発継手の CTOD 実験値が評価値を十分上回る靱性を有することを明示した。

狭隘硬化域を持つレーザ継手での FPD 破壊事象を抑制して正しい溶接金属靱性を決定する簡易靱性 (シャルピー衝撃エネルギー) 評価法としてサイドグループ法を提案し、その靱性値をワイブル応力から定量評価する手法を確立した。

溶接部領域狭隘継手となる大型レーザ溶接継手における破壊性能評価手法を確立し、この手法を駆使して従来の 1.5 倍の設計応力条件での許容欠陥寸法を明示した。

4) 溶接継手特性に優れた耐熱鋼の合金設計指針提示と長時間クリープ強度予測法の開発

a. [650℃用フェライト系耐熱鋼] 10 万時間、100MPa を達成する高 B 低 N 鋼を提案し、粒界析出強化機構に基づいて、溶接継手クリープ強度係数 0.7 以上を実現した。

[700℃用オーステナイト系耐熱鋼] 高温で安定な金属間化合物による粒界析出強化を導入した合金設計で、18Cr-30Ni-3Nb 鋼を提案した。10 万時間、100MPa を達成することを加速試験で実証した。

b. 多岐にわたる組織パラメータによる新劣化診断法を確立するとともに、クリープ強度新解析法を提案し、Factor of 1.2 の高精度強度予測が可能であることを実証した。

新解析法や組織劣化パラメータをリンクして Factor of 1.2 の高精度クリープ強度推定可能な組織診断プラットフォームを構築した。

5) 溶接部水素侵入による低温割れ機構の研究

a. 第一原理計算と分子動力学法による鉄中の各種格子欠陥の相互作用エネルギー (E_b) の定量化を達成するとともに、BCC 鉄中の水素拡散の温度依存性を定量化した。

複数の格子欠陥が重畳する金属組織での各種格子欠陥の E_b を低温昇温脱離分析装置（本PJ開発による世界唯一の装置）によって定量的に取得した。また残留オーステナイトを含む鋼での水素存在状態を定量化した。

b. 第一原理計算と原子スケールの分子動力学計算の結果を有限要素計算に用いた2次元メソスケールでの亀裂の進展モデル構築を達成した。

c. 水素粒界割れによる破断応力の低下を第一原理計算に基づき定量評価した。

980MPa級焼き戻しマルテンサイト鋼の局所応力-局所水素量に基づく破断限界を平均水素量4ppmまで実験的に取得した。

② 先端的制御鍛造技術の基盤開発

1) 鍛造部材の組織制御による傾斜機能付与技術の研究

相界面析出VCの定量化法を構築し、低炭素フェライト鋼における相界面析出VCがOrowan機構により高強度化することを明確にした。VCの加熱時の固溶、冷却時の析出（ γ 中、相界面、 α 中）を測定し、強化量が最大となる条件を明らかにした。また、中炭素鋼のフェライトとパーライト変態に対するV添加の影響を実験的に明らかにし、その原因を熱力学的に明らかにした。V添加の連続冷却変態温度域への影響を冷却速度と γ 化温度の関数として明らかにした。

2) 組織・特性分布を予測する鍛造プロセスのバーチャルラボシステム基盤技術の開発

VC相界面析出と相変態を含む材質予測FEM鍛造システムを構築し、温度差加熱の前方押し出しで強度や組織の検証を行った。VCの固溶析出モジュール、熱間変形抵抗モジュール、再結晶・粒成長モジュール、相変態予測モジュールを構築し、それらを組み込んだ材質予測FEM鍛造システムを開発した。開発したシステムを使って、温度差加熱後前方押し出した中炭素鋼の時間による組織変化と冷却後の強度分布を検証し、精度を確認した。

3) 高強度鍛造材のき裂発生・伝播メカニズム解明

マルテンサイト鋼において、電子線後方散乱回折法による疲労損傷評価基礎技術、介在物の高速・自動切削法による3次元構造観察技術、磁場顕微法による疲労き裂先端の検出技術を開発し、疲労初期き裂の3次元観察技術の基礎を確立した。さらに開発手法を用い、高強度鋼材に生じる内部起点疲労損傷の疲労き裂発生・伝播メカニズムについて統一的な理解を導き、転動疲労き裂の進展あるいは停留を決める限界き裂長さに及ぼす非金属介在物と応力の影響の明確化を達成した。

【実用化技術】

③ 高級鋼材の革新的溶接接合技術の開発

1) クリーン MIG 技術の低温用鋼・980MPa 級高強度鋼への適用性究明と継手性能評価

a. クリーン MIG 試作溶接装置を導入し、溶接ロボットと結合した自動溶接システムを構築した。9%Ni 鋼に対するクリーン MIG 溶接試験を実施し、予後熱なしで割れが発生しないこと、溶接施工性ならびに溶接継手性能を把握した。（平成 21 年度にて課題終了）

HT980 鋼に対するクリーン MIG 溶接方法として、同軸複層ワイヤ MIG、プラズマ MIG 両プロセスの自動溶接システムを構築。橋梁箱桁およびボックス柱を模擬した大型モックアップを予後熱なしで製作し、施工性を検証することができた。

b. 低温用鋼の多層盛り溶接を実施し、JIS1 類の品質を確保するとともに、TIG 溶接の 2 倍以上の施工効率を確保した。また、継手性能では最終目標（耐力：590MPa 以上、引張強さ：690～830MPa、シャルピー吸収エネルギー(-196℃)50J 以上）を確保した。（平成 21 年度にて課題終了）

c. 板厚 25mm の HT980 鋼に対して、プラズマ MIG 溶接および同軸複層ワイヤ MIG 溶接、いずれの継手においても JIS1 類、TS 母材以上、 $vE-40^{\circ}C \geq 47J$ を達成した。溶接効率はプラズマ MIG では従来 MAG 同等、同軸複層ワイヤ MIG では片側狭開先にて 2 倍の効率を達成した。疲労強度についても突合せ、隅肉共に、従来鋼のアーク溶接継手と同等以上の強度を有することが分かった。

2) レーザ溶接、レーザー・アークハイブリッド溶接技術の 980MPa 級高強度厚鋼板への適用と、制御手法、継手性能評価法の提示

a. レーザ溶接およびレーザー・アークハイブリッド溶接用割れ試験法を開発し、試験の妥当性を検証。実用的な拘束ひずみ量において、割れが発生しないことを把握し、ポロシティも合わせて JIS1 類レベルの継手を得た。

b. 高強度レーザー溶接金属のマイクロ組織におよぼす化学成分の影響を調査し、目標特性（強度：980MPa、靱性： $vE-40^{\circ}C \geq 47J$ ）を満足する溶接金属の成分設計指針（組織制御）を明確化。またレーザーおよびレーザー・アークハイブリッド溶接金属に吸蔵される拡散性水素量を測定し、溶接割れ防止に向けた冶金学的基礎データを収集した。

HT780、980 鋼レーザー・アークハイブリッド溶接継手において、突合せで E 等級、隅肉で D 等級の疲労強度を得ることができた。破壊靱性に関しては、広幅引張試験（DENT およびディープノッチ試験）により破壊安全性を検証した。

	<p>c. 板厚 12mm の HT780、980 鋼に対してレーザ・アークハイブリッド溶接による大型構造要素試験体を製作し、施工性を検証。継手性能に関しては、破壊特性を取得することで、安全性を検証した。</p> <p>3) 予熱・後熱なしに低温割れの抑止を可能とする 980MPa 級鋼用溶接材料の開発</p> <p>予熱・後熱なしで低温割れを発生せず、高強度・高靱性 ($vE-40 \geq 47J$, $TS \geq 980MPa$) を得ることが可能な溶接金属の化学組成範囲を明らかとした。</p> <p>この知見によりクリーン MIG 溶接法 (プラズマ MIG、同軸複層ワイヤ MIG) で安定した溶接施工が可能な溶接条件での希釈率を想定することにより溶接材料の成分を決定し、溶接ワイヤを作製した。</p> <p>開発された溶接ワイヤとクリーン MIG 溶接法を用いることにより、予熱・後熱なしで低温割れを発生しない高強度・高靱性の溶接継手が作製された。</p> <p>建築用鉄骨および水力発電用水圧鉄管への適用を想定した溶接割れ試験、溶接継手の破壊安全性評価およびモックアップ試験を行い、実構造物へ適用可能であることを実証した。</p> <p>4) 熱処理なしで割れない 9Ni 系低温用鋼用溶接材料の開発</p> <p>9Ni 系溶接金属について、耐割れ性兼備に向け、偏析計算モデルを構築し偏析挙動に及ぼす溶接条件・溶接材料成分の影響を把握できるようにした。また強度・靱性に及ぼす入熱・酸素量・成分の影響を把握するデータを採取した。得られた知見からクリーン MIG プロセス条件範囲で強度・靱性が確保できる溶接材料の成分系を見出し、最終目標で掲げた数値目標を達成した。</p> <p>5) 溶接継手特性に優れた耐熱鋼の合金設計</p> <p>a. [650°Cα系耐熱鋼] 高 B 低 N 鋼の合金設計指針提案。安定粒界強化モデルの知見獲得。細粒域抑制技術 (高 B&メモリーイフェクト) で継手強度係数 >0.7 を実現した。</p> <p>[700°Cγ系耐熱鋼] 粒界析出強化モデル合金の設計指針提案。オーバーマッチ継手効果も開発鋼で実証した。</p> <p>[750°CNi 基合金] γ/γ' 整合析出型モデル合金の設計指針提案。高強度かつ高延性。液相拡散接合高延性継手の健全性も確認した。</p> <p>b. データベース収集+組織診断プラットフォーム概念を確立し、同系統の新材料へ適用可能な寿命予測プロシージャを完成した。世界初の同技術を新開発鋼へ適用し、Factor of 1.2 の高精度寿命予測ならびに 10 万時間強度を評価・実証することに成功した。</p>
--	---

6) 980MPa 級継ぎ手の水素侵入による低温割れの解明・信頼性確保のための予測手法の構築

a. 炭化物 (TiC、セメンタイト) の水素トラップ状態を解明した。

低温 TDS (委託) と第一原理計算 (委託) から、粒界、転位、空孔等の主要水素トラップサイトにおける水素存在状態の定量評価 (脱離順位明示) を達成した。

格子間隔の増大によって水素が空孔にトラップされやすくなるが、弾性応力下ではその影響は小さい。また、転位の動きが速い場合は水素が転位のトラップから外れるが、静的応力下では転位の移動に水素が追随することを解明した。

各種欠陥での水素トラップエネルギーを基に動的効果 (水素拡散) を考慮した局所熱平衡解析により、複数トラップサイト下での水素マイクロ分配計算モデルを構築し、粒界水素量を予測することが可能となった。

b. 水素量を変化した Y 割れ試験と中性子回折により、980MPa 級溶接金属で低温割れが発生する限界の水素量と残留応力の条件を明確化した。

水素チャージ-切欠引張試験 (SSRT) による低温割れ限界条件 (局所応力-局所水素量関係) によって、実継手の割れ発生を予測できることを確認した。

トラップサイト密度が異なる場合でも、粒界水素量によって低温割れ発生条件を一義的に表されることが明確になった。

粒界水素量増加によって粒界結合力が低下することが、第一原理計算によって証明された。

④ 先端的制御鍛造技術の開発

1) 高強度化・傾斜機能付与のための合金設計・プロセス開発

a. [大型部品想定] 低温での小さな加工ひずみ付与により、VC 析出強化の最大化が図れることを世界で初めて見出し、耐力 1000MPa 以上を実現した。この知見を活用し、大型部品想定 (コンロッドプロトタイプ部品) の鍛造工程設定を行い、同一部品内での 0.2%耐力で高強度部 1086MPa、軟質部 854MPa を達成した。

b. [中型部品想定] フェライト中への相界面析出 VC による析出強化を最大化できる成分・プロセス設計指針を導出した。この知見を活用し、中型部品想定プロトタイプ (ハブ模擬形状) での高強度かつ傾斜機能を付与させるために、傾斜機能加熱+鍛造工程設計+制御冷却のプロセス設計を開発し、同一部品内での 0.2%耐力で高強度部 1005MPa、軟質部 673MPa を達成した。

	<p>c. [小型部品想定] 微細パーライトによるマトリックス組織の高強度化とパーライト中への VC のナノ析出により、耐力 1100MPa 以上を実現できる指針を見出した。この知見を活用し、小型部品想定プロトタイプ（シャフト部品模擬）で高強度化・傾斜機能化を実現できるプロセス設計を行い、同一部品内での 0.2%耐力で高強度部 1400MPa、軟質部 700MPa を達成した。</p> <p>2) 組織・特性分布を予測する鍛造プロセスのバーチャルラボシステムデータベースの構築</p> <p>[VC 固溶、析出予測 D/B 構築] 加熱時の固溶、γ 域での析出、α 変態時の相界面 VC 量の定量的データを採取し、VC 析出モジュールに反映させた。</p> <p>[再結晶・粒成長 D/B 構築] V 添加による再結晶の遅延（VC 析出との相互作用大）の定量的データを採取し、再結晶・粒成長モジュールに反映させた。</p> <p>[相変態予測 D/B 構築] V 添加によるフェライト/パーライト変態の遅延等の定量的データを採取し、相変態予測モジュールに反映させた。</p> <p>[組織-特性 D/B 構築] 組織・VC 析出状態と強度特性について定量的データを採取し、組織-特性モジュールに反映させた。</p> <p>3) 転動疲労メカニズム解明と非金属介在物組成・サイズ制御指針提示</p> <p>き裂生成-伝播に基づいた概略破壊モデルを提示。全寿命=伝播寿命であって、初期き裂長さが寿命の支配要因。材料力学と材料因子の両方を考慮した世界初の転動疲労の寿命予測式を構築に成功した。</p>
投稿論文	100 件
特許	「出願」34 件
その他 外部発表等	「研究発表・講演」304 件 「新聞・雑誌等への掲載」37 件 「展示会・シンポジウム」3 件

<p>IV. 実用化、事業化の見通しについて</p>	<p>本事業で創出される技術により、鋼構造物、エネルギープラント等の高強度・高機能化・長寿命化、および自動車等の更なる軽量化が可能となり、高度な省エネルギー社会の構築、日本製造業の国際競争力の更なる向上が期待される。このうち、先進的超々臨界圧火力発電は2020年以降において商用プラントでの高位発熱量基準送電端効率46%達成の見通しを得ることを目指して開発が進められている。これを遅滞なく実現するために、本PJで開発された材料の国際標準化、プラントの実用化試験、実缶・実証試験が行われる予定である。また、傾斜機能付与鍛造技術は、本PJで開発された技術をもとに、各社が鍛造メーカーや自動車メーカーとともに量産技術の確立や信頼性の検証を行ったうえで、2020年頃を目途に実用化を目指す予定である。</p>	
<p>V. 基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p>	<p>平成19年3月、制定</p> <p>変更履歴</p> <p>(1) 平成19年3月、制定。 (2) 平成19年6月、研究開発責任者（プロジェクトリーダー）決定に伴い改訂。 (3) 平成20年7月、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」の記載を改訂。 (4) 平成22年3月、平成21年度の間評価を踏まえ、研究開発した基盤技術により各企業での実用化研究に移行しても事業化が見込まれる実施テーマを繰り上げ終了することにより、大幅な縮減予算においても最大限事業成果を達成できる研究開発体制に刷新、加えて繰り上げ終了テーマの一部最終目標を改訂。 (5) 平成23年3月、前回改訂の内容補足のため、研究開発項目毎に特記事項を追記、及び文言等軽微な修正。</p>

技術分野全体での位置づけ

(分科会資料 6 より抜粋)

I. 事業の位置付け・必要性 (1)背景 公開

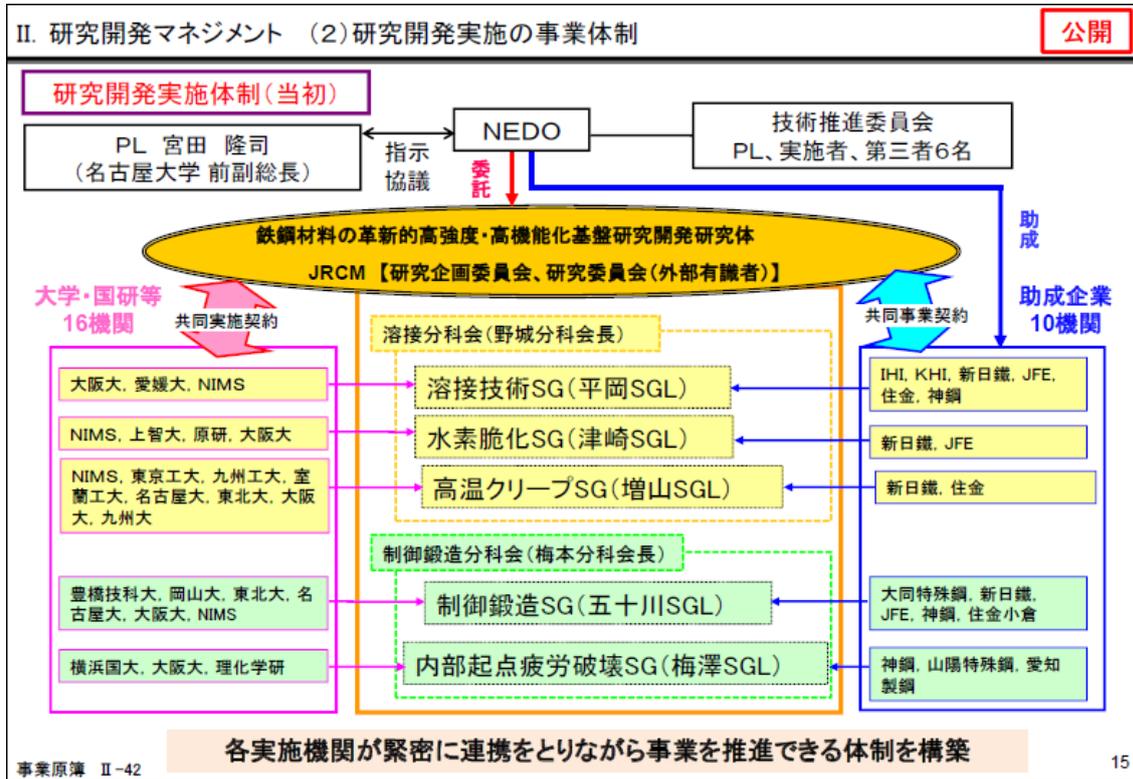
事業原簿 I-7 4

I. 事業の位置付け・必要性 (2)NEDO事業としての妥当性 公開

事業原簿 I-1~2 6

「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」

全体の研究開発実施体制



「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」(事後評価)

評価概要(案)

1. 総論

1) 総合評価

本プロジェクトは、産官学をあげての鉄鋼関連技術の先進的研究開発事業として評価できる。日本における鉄鋼材料の基礎および実用化技術について、国際競争力の強化という明確な目的をもって差別化技術を創出し、それを基礎(大学)と応用(産業界)を密接に関連させて推進し、実用化に近づける成果を生み出した。基礎研究は、課題毎に学術基盤に関連した重要な知見が得られており、全般的に本プロジェクト開始当初の予想を上回る成果が得られている。応用研究の成果の中には早期実用化の可能性の高いものも含まれており、その実現により国際競争において優位性を発揮することが期待できる。また鉄鋼材料の素材の性能を多面的、かつ系統的にスクリーニングしており、将来の材料開発に向けて貴重なデータベースを構築した。このようなプロジェクトで一番問題となる実用化、事業化の観点においても、各項目ともにロードマップにて具体的な製品化時期が明示され、実用化まで十分な道筋がたてられている点でも高く評価できる。

しかしながら、「溶接技術」「高温クリープ」「制御鍛造」「内部疲労破壊」4テーマの各テーマ内の産学官連携は進められたが、テーマのなかには独立性の高いものもあったことから、シナジー効果の観点からも再評価し、今後の大型プロジェクトのあり方に生かしてほしい。

また、長期間にわたるプロジェクトにおいては、特に成果が有望なものについては、途中からでもエンドユーザーを参画させ、実用化の確度向上と効率化を図ってもよいのではないかと考える。

2) 今後に対する提言

社会インフラなどの大型構造物への事業化、実用化は長期間にわたるので、ロードマップに従い計画的に辛抱強く商品化につなげてほしい。先進的鍛造技術などの実用化には、鍛造メーカーや軸受けメーカーなどの関連企業との連携が不可欠であり、企業間で開発スケジュールを共有化して、商品化の実現をはかってほしい。商用化のためには規格化・国際標準化などユーザが安心して採用可能にするために必要があるものの、個々の企業ではなかなか進め難いものもあり、特に有望な成果に対してはNEDOも参画して支援してほしい。

2. 各論

1) 事業の位置付け・必要性について

我が国の鉄鋼産業の技術力の向上と国際競争力の強化という観点から必要性の高い時宜を得た妥当なテーマである。研究開発目標の難易度が高く、企業が単独で行うにはリスクが大きい。目標達成には、最先端技術を有する鉄鋼メーカー、プラントメーカー、大学および独法等の研究機関の連携が必要であることから、NEDO の関与が不可欠の事業である。さらに本プロジェクトで開発される材料の適用対象は、火力発電の高効率化、自動車の動体部品の小型・軽量化など、省エネルギー技術に大きく関わる部材であり、公共性も高く、NEDO の事業として妥当である。

2) 研究開発マネジメントについて

研究開発の目標設定、開発計画、事業体制ならびに実用化に向けた方向性など、研究課題毎に明確に管理・運営されており、問題ない。基礎（大学）と応用（企業）を共通のテーマで連携しながら進めるというやや複雑なプロジェクト体制であったが、うまく成果に結びつけた点で研究開発マネジメントは妥当であった。中間評価の段階で研究体制の再編成と研究テーマの選択と集中が行われ、適切に情勢変化に対応した施策、計画の見直しがはかられている。

しかしながら、溶接技術、高温クリープ、制御鍛造等の学術的基盤が異なる研究テーマに対する関係が明確でなく、連携した研究開発の推進という観点から、今後検討の余地があると考ええる。また、知財マネジメントの方針についても成果の実用化、事業化を効果的に推進するという観点から、今後検討の余地がある。

3) 研究開発成果について

成果は目標値をクリアしていると判断され評価できる。その中には世界初、世界最高の成果が多く含まれており、優位性のある技術として、国際競争力強化に寄与すると考えられ、本プロジェクトの成果の意義が確認できる。特に、高強度耐熱材料の開発では、現状強度を大きく上回る材料開発への見通しが得られており、同材料の実用化により発電効率の向上に加え、安全性の向上にも寄与するものと考ええる。特許がプロジェクト全体として 34 件提案されており、実用化戦略上評価できる。

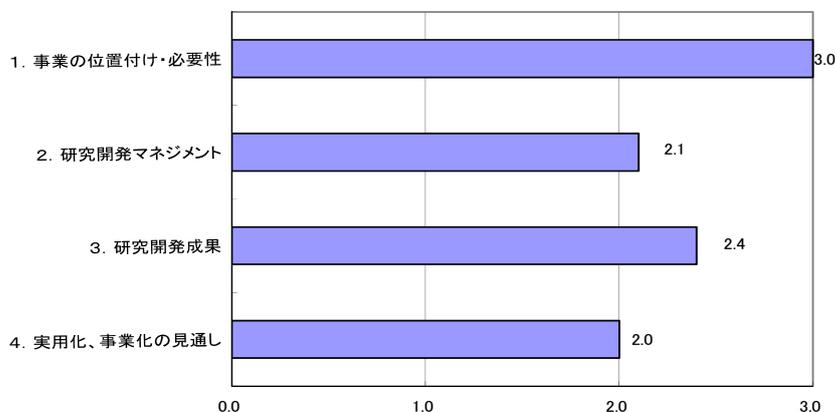
4) 実用化、事業化の見通しについて

実用化に向けた研究の方向性や努力目標が明確に示されていること、メーカ

一において実用化の検討がなされ、一部のテーマについては事業化の見通しが確認されていること、競争力強化やコスト改善につながる実用化のシナリオが提案されていることは評価できる。クリーン溶接技術、高強度耐熱材料の開発などは、市場導入までに解決すべき課題は残るものの、実用化の可能性が高い成果である。

長期プロジェクトにおいてはプロジェクト期間内であってもある程度の成果の見通しが得られた時点でエンドユーザーの参画を図り、実用化のための真の課題と判断基準を明確化できれば、実用化の確度はさらに改善できる。

評点結果〔プロジェクト全体〕



平均値

評価項目	平均値	素点 (注)						
		A	A	A	A	A	A	A
1. 事業の位置付け・必要性について	3.0	A	A	A	A	A	A	A
2. 研究開発マネジメントについて	2.1	B	B	B	A	B	B	B
3. 研究開発成果について	2.4	A	B	B	A	A	B	B
4. 実用化、事業化の見通しについて	2.0	C	C	B	B	A	A	B

(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. 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、事業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