

# 「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」

## 中間評価報告書（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） .....	14
評点結果 .....	20


作成日	平成21年 6月 9日
-----	-------------

制度・施策 (プログラム)名			
プロジェクト名		プロジェクト番号	
担当推進部/ 担当者			
0. 事業の概要	( )	( )	( )

<p>I . 事業の位置付け・必要性について</p>	<p><b>【NEDO が関与する意義】</b></p> <p>省エネルギー化を図るとともに、安全・安心社会の実現及びCO<sub>2</sub>排出削減といった強い社会的要請に貢献するため、エネルギー・インフラ分野で求められる極低温、腐食、高温・高圧といった極限環境対応及び、輸送機器分野での軽量化等が必要である。</p> <p>このため、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、鋼構造体・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・基礎研究の着実な実行が必要である。また、鉄鋼材料はあらゆる分野で活用されるものであり、本研究開発の成果による部材の高強度・高機能化によりもたらされる、安全・安心かつ低炭素な社会の実現は、我が国社会全体への波及効果が極めて高い。</p> <p>しかしながら、現状業界各社だけでは、これらの製品実用化の目処が立っておらず、産官学の連携を通じて大幅な加速化が必要である。</p> <p>このように、本技術は、環境エネルギー技術革新計画等に示されている低炭素社会の実現に必要であり、かつ、エネルギー安定供給にも寄与するものである。このような国家的課題は、個々の民間企業の経済的な観点に基づく自主的努力に単純に任せる分野ではなく、政府が主体的に進める重点分野の一つであり、従来から NEDO がこれまでに蓄積してきた知識、実績を生かし、推進すべき課題である。</p> <p><b>【実施の効果】</b></p> <p>(1) 溶接部の高強度化・鋼構造体の高機能化</p> <p>高級鋼厚板（高強度・低温用）の溶接前後の熱処理フリー化により 2030 年 5.3 万 kL/年が見込まれる。</p> <p>火力発電所の発電効率向上を可能とする耐熱材料の開発により 2030 年 126.5 万 kL/年の石油削減効果が見込まれる。また、欧米の Ni 基合金のみによる建設に比較し 54 億円/基のコスト削減が見込まれる。</p> <p>(2) 先端的制御鍛造技術</p> <p>自動車鍛造部品の軽量化による燃費改善により、2030 年 36.3 万 kL/年の石油削減効果が見込まれる。</p> <p><b>【実施の効果(費用対効果)】</b></p> <p>(1) 費用：58.8 億円</p> <p>(2) ・省エネ効果：約 170 万 kL/年の石油削減効果</p> <p>・火力発電建設材料コスト削減：54 億円/基</p>
----------------------------	---

**【事業の背景・目的・位置付け】**

鉄鋼材料の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・高圧など極限環境対応、輸送機器分野等での軽量化による高効率化、省エネルギー化、安心・安全等に向けて鋼材に対する社会的ニーズは近年一段と高度化している。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きている。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。

このような背景の元、本研究は、「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、安全・安心社会構築を目指すものである。

具体的には、上述した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<sup>\*</sup>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・高機能化による、省エネルギーとの長寿命化および運輸機器等の更なる軽量化と信頼性を高める。これにより、高度な省エネルギーと安全・安心を両立できる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。

(<sup>\*</sup>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

事業の目標	<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、下記の溶接技術と鍛造技術の2分野の技術開発を行う。</p> <p><b>【共通基盤技術】</b></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><b>【実用化技術】</b></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>
-------	---

事業の計画内容	<b>主な実施事項</b>	2007	2008	2009	2010	2011
	①高級鋼材の革新的溶接接合技術の基盤開発	—————▶				
	②先端的制御鍛造技術の基盤開発	—————▶				
	③高級鋼材の革新的溶接接合技術の開発	—————▶				
	④先端的制御鍛造技術の開発	—————▶				

開発予算 (会計・勘定別に実績額を記載) (単位:百万円)	会計・勘定	2007	2008	2009	2010	2011
	一般会計					
	特別会計(需給)	1,092	1,033	933		
	総予算額	1,092	1,033	933		

開発体制	経産省担当原課	製造産業局 鉄鋼課 製鉄企画室
	運営機関	新エネルギー・産業技術総合開発機構
	プロジェクトリーダー	名古屋大学 副総長 宮田 隆司

	委託先	<p>【大学等(委託)】室蘭工大、東北大、東工大、上智大、横浜国大、豊橋技科大、名大、阪大、九大、九工大、原子力研究機構、NIMS、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、住友金属小倉、IHI、川崎重工業</p>
情報変化への対応	NEDO 技術開発機構、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、円滑な推進に協力する。	

Ⅲ. 研究開発  
成果について

【共通基盤技術】

①高級鋼材の革新的溶接接合技術の基盤開発

1) クリーン MIG 溶接プロセス技術の開発

a. 同軸複層ワイヤ法：同軸複層ワイヤの試作とパルス波形制御法の開発により純 Ar による基本クリーン MIG 溶接を実現（世界初）した。安定溶接条件下では、表面および内部欠陥の発生はなく、開先内多層盛で 40ppm（平均値）の低酸素化を達成した。

b. 電離プラズマ法：新構造プラズマ MIG トーチ（電極径最適化）とプラズマ/MIG 協調電流制御による基本溶接制御法（世界初）を開発し、安定した高速溶接施工（50cm/min）を実現した。最適条件下で表面と内部欠陥防止と酸素量 24ppm を達成した。

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

a. 適正収差制御による長[焦点深度]光学系（AFO）を開発した。これによるレーザ光軸上パワー密度分布制御でキーホールの安定化を実現して貫通完全溶込み溶接で JIS1 類相当品質のポロシティの低減を達成した。25kW による 25mm 厚溶接（世界初）を実現する見込み。また、良好な貫通裏波ビード及び隅肉平滑ビードを形成するアーク・レーザの最適位置関係を導出した。

b. レーザ先行ワイヤ添加と酸素含有（ $\geq 2\%$ ）シールドガス法による均質合金化指針を提示した。レーザ先行ハイブリッドによる隅肉溶接ビードの平滑化とアークのタンデム化による実用的ギャップ突合せ貫通溶接の余盛形状制御指針を提示し、それを実現するハイブリッドトーチを開発した。

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

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した（世界初）。観察基礎データベースに基づき凝固割れ抑止に有効な凝固モードを明示し、対応する成分系も明示できる見込みを得た。

b. フルマルテンサイト組織の水素放出スペクトル解析から残留  $\gamma$  によるトラップ効果（放出ピーク温度の高温遷移：約 200°C  $\rightarrow$  300°C）を実証した。ミクロ組織の必要条件の導出のため、成分系や溶接熱履歴から残留  $\gamma$  を予測する基本ツールを完成した。

c. 中性子回折法による定量的残留応力計測技術を確立し疲労強度との関係の定量化を達成する見込み。

d. 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  $\gamma$  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 FMS により明示した（世界初）。溶接金属のクリーン化（酸素含有 20ppm）と 15%の残留  $\gamma$  相導入で-196°Cでは約 10 倍の顕著な向上効果を確認した。



- 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. 溶接継手クリープ強度係数 0.7 以上、3 万 h クリープ強度 100MPa の 700°C 級耐熱材料の合金設計指針を世界で初めて明確化した。
- ・ 650°C 用フェライト系耐熱鋼：高 B 低 N 鋼を提案、粒界強化モデルを提案
  - ・ 700°C 用オーステナイト系鋼：金属間化合物粒界析出強化鋼を提案  
(18Cr-30Ni-3Nb 鋼)
- b. 溶接継手のクリープ特性と組織劣化パラメータをリンクできるプラットフォームプロトタイプを提案した。
- ・ 組織劣化パラメータによる新劣化診断法の確立（組織自由エネルギー法、粒界方位差測定法、高精度陽電子寿命測定法、極小クリープ試験法）
  - ・ クリープ強度新解析法の提案とデータベースの収集・蓄積
- 5) 溶接部水素侵入による低温割れ機構の研究
- a. ・ 鉄中の空孔、転位、粒界、表面と水素の相互作用エネルギー ( $E_b$ ) を第一原理計算と分子動力学法により定量的に決定した。（世界初の成果、空孔 > 転位芯 > 粒界を明示）
- ・ 各種格子欠陥の  $E_b$  を実験的に求める基盤構築を達成した。（世界唯一の低温昇温脱離分析装置の開発に成功）
- b. ・ 1000MPa 級鋼の破断応力を水素量 4ppm まで実験的に取得。（応力と水素量の危険域を明示）
- ・ 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。（世界初の成果）
- 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
- a. VC 析出の定量的評価手法を新たに確立した。
- b. VC 析出強化は低温ほど大きいこと、等温変態では析出強化を最大にする保持時間が存在すること、加工による変態促進により高温でも VC 析出強化を大きくできることを示した。
- 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 のオーステナイト中、フェライト中、ならびに相界面析出予測モジュールを構築し、一般鍛造プロセスにおける V 添加非調質鋼の組織と降伏応力の分布予測可能な有限要素用解析システムを構築した。

### 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、磁場顕微鏡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。

- a. ひずみ勾配の可視化と組織変化の検出に成功し、き裂形成がひずみ勾配領域であることを発見した。
- b. フラットバイトと楕円振動切削を組み込んだ3次元内部構造顕微鏡を構築し、鉄系材料内部の介在物・き裂の三次元形状をサブミクロン精度で自動観察する手法を世界で初めて実現した。
- c. 磁場顕微鏡観察において、応力拡大係数と磁場の相関性を発見した。また、構造物の疲労劣化診断の新技术開発に成功した。

#### 【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た。9%Ni鋼に対するクリーンMIG溶接試験を実施し、溶接施工性ならびに溶接継手性能を把握した。
- b. HT980鋼に対するクリーンMIG溶接試験を実施し、プロセスの棲み分け提示と試作装置仕様を決定した。Cr-Ni系一次試作ワイヤにて予後熱なしでの低温割れなし、および目標継手性能を達成した。

##### 2) レーザー溶接、レーザー・アークハイブリッド溶接技術の980MPa級高強度鋼への適用と、制御手法、継手性能評価法を提示した。

- a. レーザ溶接割れ試験法の開発と妥当性の検証。継手破壊データの収集。継手健全性を保障するモニタリング手法の開発。最終的に12mm厚のJIS1類1パス貫通突合せ溶接技術確立の見込み。
- 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： $vE-40^{\circ}C \geq 47J$ ）を満足するレーザー溶接金属の成分設計指針（組織制御）を明確化。またレーザー溶接金属に吸蔵される拡散性水素量の測定し、溶接割れ防止に向けた冶金学的基礎データを収集。
- c. サイドグループシャルピー試験法の提案とCTODとの相関を提示。疲労特性に関しては、突合せ継手の強度支配因子としてアンダーフィルが提示された。

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  
Cr-Ni 成分系において、以下のことを実施した。

- ・予熱なしで低温割れが回避される成分範囲を把握
- ・目標以上の引張強さを得る成分範囲を把握
- ・酸素量を抑えることで高い衝撃値確保を把握
- ・耐低温割れ性、強度、靱性を同時に満足する溶接金属の推奨成分範囲を提示

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

- 9Ni 系溶接金属の強度・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、クリーン MIG プロセス条件範囲で強度・靱性が確保できる成分系を見出した。
- 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。

5) 溶接継手特性に優れた耐熱鋼の合金設計

- 新開発鋼のクリープ強度が中間目標を超過達成可能な組織モデル、合金設計指針に沿って試作・評価を実施し検証すると共に、フェライト鋼で実溶接継手強度係数 0.7 以上を実現できる組織制御技術(高 B&メモリーイフェクト)を世界で初めて実証した。
  - ・650°C  $\alpha$  系耐熱鋼：高 B 低 N 鋼の提案。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。
  - ・700°C  $\gamma$  系耐熱鋼：粒界析出強化モデル合金を提案。オーバーマッチ継手効果も検証。
  - ・750°C Ni 基合金： $\gamma/\gamma'$  整合析出型モデル合金試作。高延性。液相拡散接合高延性継手も目処。
- 各種組織因子パラメータによる強度評価法として新クリープ変形モデリング、新クリープ変形曲線予測法を提案した。
  - ・データベース収集+プラットフォーム概念提案。

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

- ・粒界、転位、空孔の主要格子欠陥を変化した鉄鋼モデルサンプルを作製した。これらを用いた低温 TDS (委託) と第一原理計算 (委託) から目標とした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。
  - ・水素存在状態を可視化するマイクロプリント法により、粒界からの放出水素量が予歪(転位増)とともに低下すること(粒界水素量に及ぼす転位の影響)を量的に見出した。

- b. ・TiC 炭化物の各種水素トラップサイトのトラップエネルギーを解明し、炭素空孔位置が強いトラップサイトであることがわかった。（炭素空孔 $\sim 1.3\text{eV}$ 、整合界面 $\sim 0.5\text{eV}$ 、整合歪 $< 0.15\text{eV}$ 、TiC 格子間 非トラップサイト）
- ・固溶炭素は水素に対して強い反発となる最近接位置以外では極めて相互作用が弱く、影響が無視できることがわかった。

#### 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. 大型部品装置

低温での小さな加工ひずみと変態を同期させる技術（加工誘起析出と想定）により、強化部想定で 0.2%耐力 1085MPa、軟質部想定で 875MPa を達成した。

###### b. 中型部品想定

VC 析出と相変態を同期させた冷却制御により高強度化を果たすと同時に、加熱温度差付与で同一 TP 内 高強度部 0.2%耐力 1094MPa、軟質部 537MPa を達成した。

###### c. 小型部品想定

微細 $\gamma$ 相間隔 $\beta$ -フェライト+微細 VC を最大限活用する高強度化手法により、0.2%耐力 1350MPa 達成と同時に、軟質部形成条件も解明し、同成分鋼で 0.2%耐力 750MPa を達成した。

##### 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データベースの構築

a. VC 固溶、析出予測 D/B 構築： $\gamma$  域での VC 析出挙動には $\gamma$  粒界からの不均一核生成と、粒内での均一もしくは転位上への核生成の両方が存在し、モデルを構築するには両方を勘案する必要のあることが判明した。

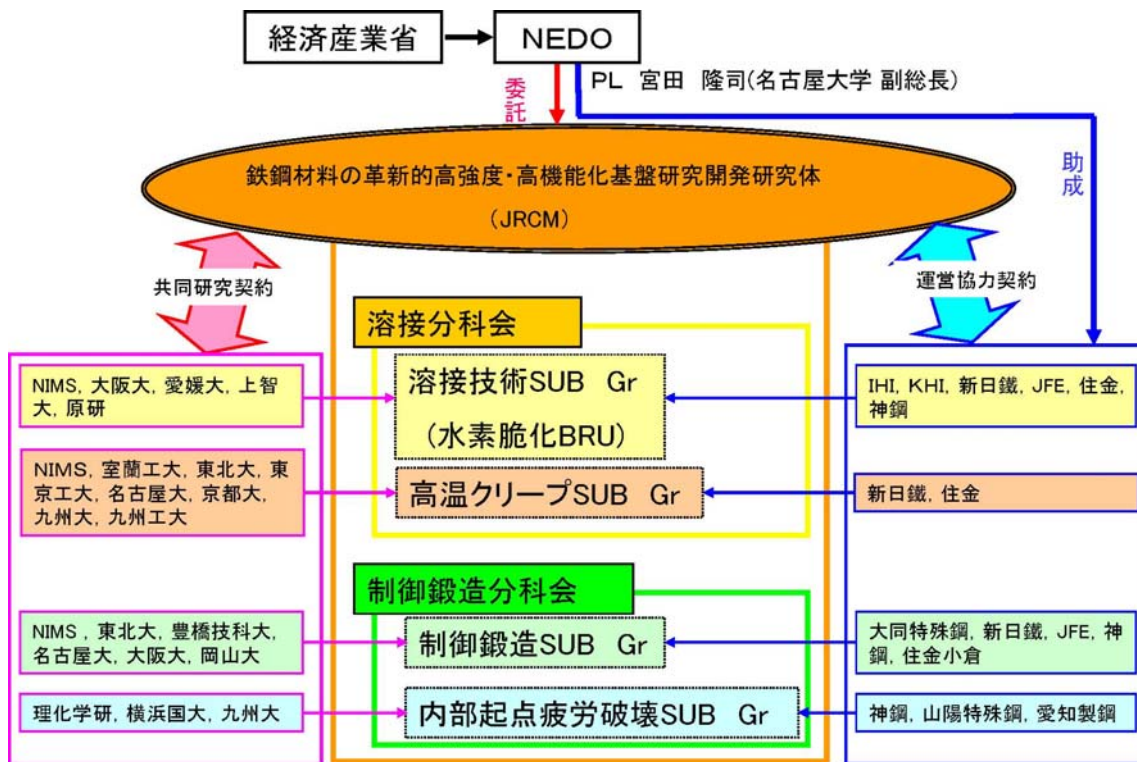
b. 逆変態 D/B 構築：V 添加による粒成長抑制効果とその温度依存性に関する定量データを採取した。

c. 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た。

d. 相変態予測 D/B 構築：V 添加による $\beta$ -フェライト/ $\beta$ -フェライト変態の遅延等の定量的データを採取した。

e. 組織-特性 D/B 構築：60 水準の D/B 構築および VC 析出強化量には加熱温度が大きく影響し、1000 $^{\circ}\text{C}$ 加熱で 200MPa 弱、1200 $^{\circ}\text{C}$ 加熱で 400MPa 弱の強化を見出した。

	<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>a. 初期き裂生成に関する応力シミュレーション技術を構築した。</p> <p>b. 応力シミュレーションと3次元観察結果との対応を検証し、初期き裂長さに対する影響因子を抽出した。(酸化物系介在物)</p> <p>c. き裂生成-伝播に基づいた概略破壊モデルが提示できた。全寿命=伝ば寿命であって、初期き裂長さが寿命の支配要因である。[世界初の知見]</p> <p>d. 非金属介在物大きさからの下限寿命予測を行った。(酸化物系介在物)</p>	
	投稿論文	「査読付き」45件
	特許	「出願」10件
IV. 実用化、事業化の見通しについて	<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・長寿命化の大幅な加速、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が図られる。</p> <p>このうち、先進的超々臨界圧火力発電は2017年の運転開始を目指している。これを遅滞なく実現するために、本PJでは耐熱合金の新材料設計指針を提示し、引き続き、プラントの実用化試験、実缶・実証試験を行う予定である。</p> <p>また、強化部と非強化部の傾斜機能付与鍛造技術の開発においては、本PJで開発した技術を元に、各社が、規格認証、安全性評価等を経た後に、2020年度頃の実用化を目指す予定である。</p>	
V. 評価に関する事項	評価履歴	平成21年度 中間評価実施
	評価予定	平成23年度 事後評価実施
VI. 基本計画に関する事項	策定期期	平成19年3月、制定
	変更履歴	<p>(1) 平成19年3月、制定。</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p>



CO2

NEDO

85

welding

Metal Inert Gas





\_\_\_\_\_

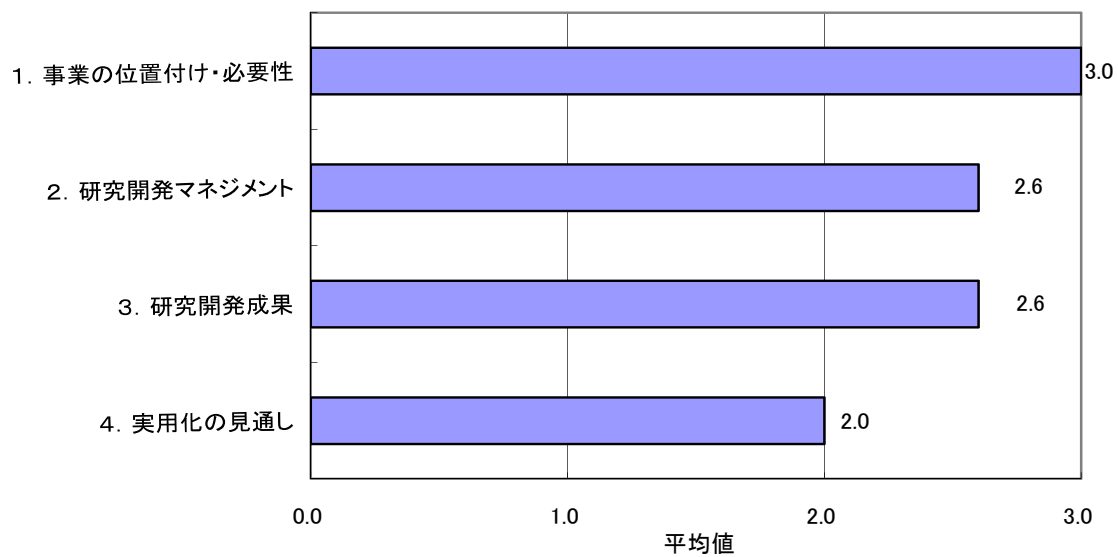
	MG	
		N 10

VC

MPa

3

	B, N HAZ Type IV N	Fact or 1. 2
	V Ma V	“ ”



	3.0	A	A	A	A	A	A	A
	2.6	A	B	B	A	B	A	A
	2.6	B	A	B	B	A	A	A
	2.0	B	B	B	C	A	A	C

A=3 B=2 C=1 D=0

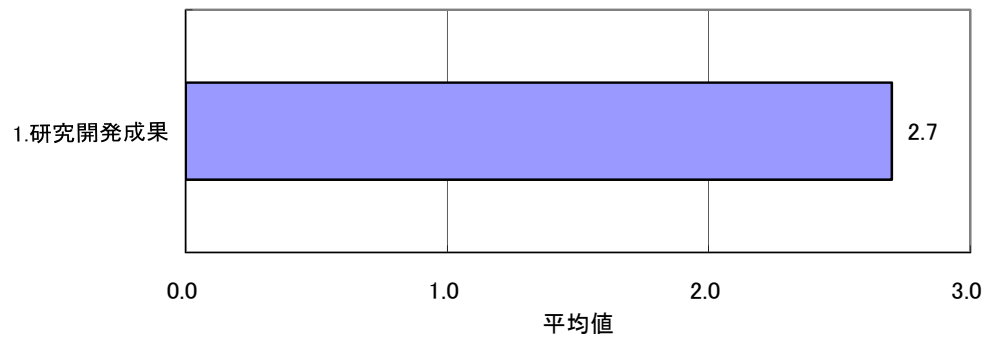
A	A
B	B
C	C
D	D
A	A
B	B
C	C
D	D

1) MIG

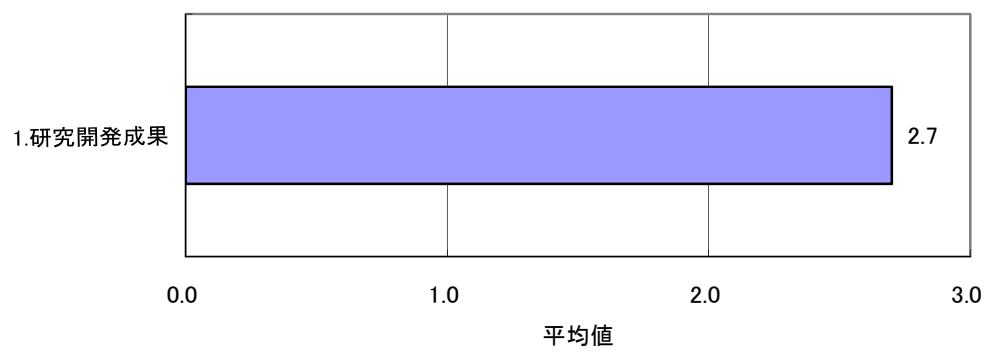
2)

3)

5)

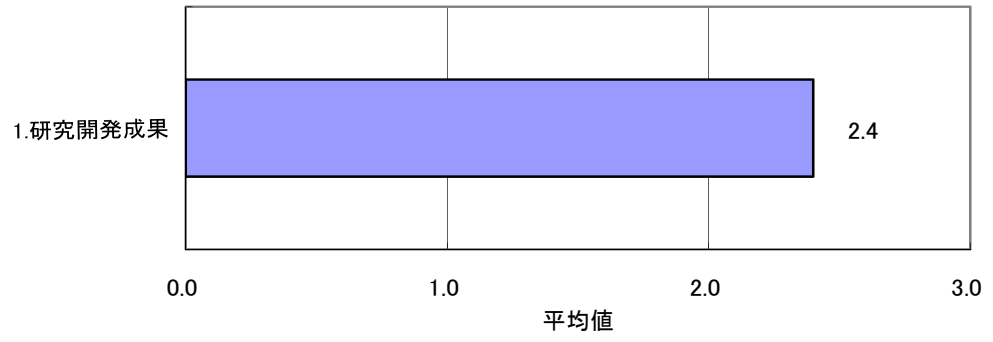


4)

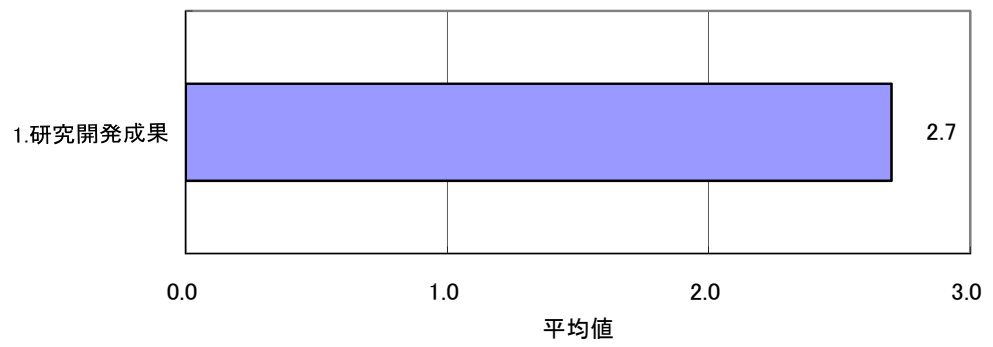


1)

2)



3)

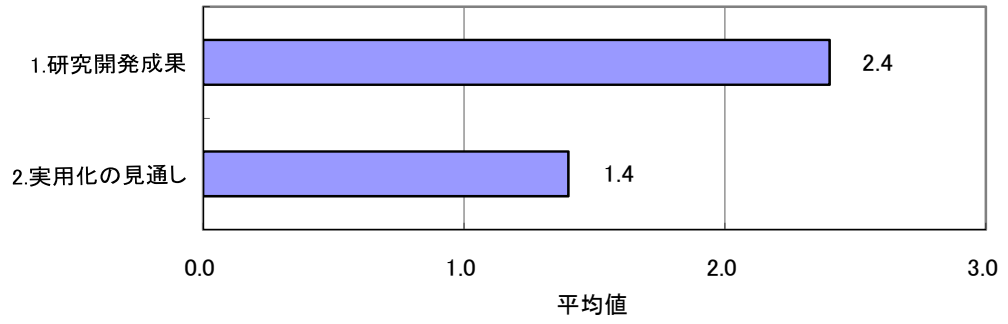




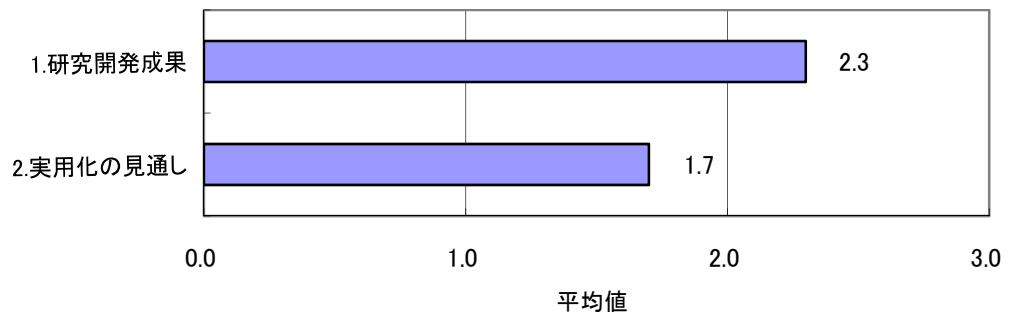


1)

2)



3)



		2.7	A	A	A	B	A	B	A
		2.7	A	A	A	A	B	B	A
		2.4	A	B	B	B	A	B	A
		2.7	A	A	B	A	A	B	A
		2.7	A	A	A	B	A	A	B
		2.1	A	A	B	B	C	B	B
		2.4	A	A	B	B	B	B	A
		2.0	B	B	B	A	C	B	B
		2.4	A	B	B	B	A	B	A
		1.4	A	C	C	B	C	D	B
		2.3	A	B	B	B	B	B	A
		1.7	A	C	C	B	B	C	B

A=3 B=2 C=1 D=0

A  
B  
C  
D

A  
B  
C  
D