

# 難加工性特殊鋼等に対する次世代圧延技術の開発 プロジェクト評価（事後）報告書

平成21年4月  
産業構造審議会産業技術分科会  
評 価 小 委 員 会

## はじめに

研究開発の評価は、研究開発活動の効率化・活性化、優れた成果の獲得や社会・経済への還元等を図るとともに、国民に対して説明責任を果たすために、極めて重要な活動であり、このため、経済産業省では、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成17年3月29日、内閣総理大臣決定）等に沿った適切な評価を実施すべく「経済産業省技術評価指針」（平成17年4月1日改定）を定め、これに基づいて研究開発の評価を実施している。

経済産業省において実施した「難加工性特殊鋼等に対する次世代圧延技術の開発プロジェクト」は、低コスト高生産効率である圧延加工技術の利点を活かし、石油代替エネルギーとして期待されている燃料電池用金属セパレータを適用例として、精密圧延加工技術を開発するため、また、熱間圧延プロセスの更なる省エネルギー化のため従来よりも低温で加工するのに必須の高耐久性熱間加工工具材料の開発を行い、その低廉化かつ汎用化が可能な新しい製造方法の開発も行うため、平成15年度から平成19年度まで実施したものである。

今回の評価は、この「難加工性特殊鋼等に対する次世代圧延技術の開発プロジェクト」の事後評価であり、実際の評価に際しては、省外の有識者からなる「スラグ利用に係る研究開発プロジェクト等」事後評価検討会（座長：中村 崇 東北大学 多元物質科学研究所 資源変換・再生研究センター 教授）を開催した。

今般、当該検討会における検討結果が評価報告書の原案として産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会（小委員長：平澤 冷 東京大学名誉教授）に付議され、内容を審議し、了承された。

本書は、これらの評価結果を取りまとめたものである。

平成21年4月

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会

# 産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会

## 委員名簿

委員長	平澤  冷	東京大学 名誉教授
	池村 淑道	長浜バイオ大学バイオサイエンス学部 教授
	伊澤 達夫	東京工業大学 理事・副学長
	大島  まり	東京大学大学院情報学環 教授 東京大学生産技術研究所 教授
	菊池  純一	青山学院大学法学部・大学院法学研究科ビジネス法務専攻 教授
	鈴木  潤	政策研究大学院大学 教授
	辻  智子	日本水産株式会社 顧問
	富田  房男	放送大学北海道学習センター 所長
	中小路 久美代	株式会社S R A先端技術研究所 主幹 東京大学先端技術研究センター 特任教授
	山地  憲治	東京大学大学院工学系研究科 教授
	吉本  陽子	三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社 経済・社会政策部 主任研究員

(委員敬称略、五十音順)

事務局：経済産業省産業技術環境局技術評価室

スラグ利用に係る研究開発プロジェクト等事後評価検討会  
委員名簿

座長 中村 崇 東北大学 多元物質科学研究所 資源変換・再生研究センター  
教授

一柳 朋紀 株式会社 鉄鋼新聞社 鉄鋼部長

奥村 博昭 鉄鋼スラグ協会 技術部長

小紫 正樹 財団法人 金属系材料研究開発センター 専務理事

宗像 鉄雄 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構  
環境技術開発部長

(敬称略、五十音順)

事務局：経済産業省製造産業局鉄鋼課製鉄企画室

## 難加工性特殊鋼等に対する次世代圧延技術の開発プロジェクト の評価に係る省内関係者

### 【事後評価時】（平成20年度）

製造産業局 鉄鋼課製鉄企画室長 覚道 崇文（事業担当室長）

産業技術環境局 技術評価室長 長濱 裕二

### 【中間評価時】（平成18年度）

製造産業局 鉄鋼課製鉄企画室長 阿部 聡（事業担当室長）

産業技術環境局 技術評価調査課長 柴尾 浩朗

### 【事前評価時】（事業初年度予算要求時）

製造産業局 鉄鋼課製鉄企画室長 喜多見 淳一（事業担当室長）

## 難加工性特殊鋼等に対する次世代圧延技術の開発プロジェクト事後評価 審議経過

第1回事後評価検討会（平成21年3月18日）

- ・評価の方法等について
- ・プロジェクトの概要について
- ・今後の評価の進め方について
- ・質疑応答

第2回事後評価検討会（平成21年3月31日）

- ・評価報告書(案)について
- ・質疑応答

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会（平成21年4月23日）

- ・評価報告書(案)について  
審議の結果、原案のとおり了承された。

# 目 次

はじめに

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会 委員名簿

スラグ利用に係る研究開発プロジェクト等事後評価検討会 委員名簿

難加工性特殊鋼等に対する次世代圧延技術の開発プロジェクトの評価に係る省内関係者

難加工性特殊鋼等に対する次世代圧延技術の開発プロジェクト事後評価 審議経過

ページ

事後評価報告書概要 .....	
第1章 評価の実施方法	
1. 評価目的 .....	1
2. 評価者 .....	1
3. 評価対象 .....	2
4. 評価方法 .....	2
5. プロジェクト評価における標準的な評価項目・評価基準 .....	2
第2章 プロジェクトの概要	
1. 事業の目的・政策的位置付け .....	5
2. 研究開発等の目標 .....	14
3. 成果、目標の達成度 .....	21
4. 事業化、波及効果について .....	34
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 .....	39
第3章 評価	
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性 .....	49
2. 研究開発等の目標の妥当性 .....	50
3. 成果、目標の達成度の妥当性 .....	51
4. 事業化、波及効果についての妥当性 .....	52
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性 .....	53
6. 総合評価 .....	54
7. 今後の研究開発の方向等に関する提言 .....	55
8. 個別要素技術について .....	56
第4章 評点法による評点結果 .....	58
参考 今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針	

# 事後評価報告書概要



## 事後評価報告書概要

プロジェクト名	難加工性特殊鋼等に対する次世代圧延技術の開発
上位施策名	社会基盤材料関連技術開発施策
事業担当課	鉄鋼課製鉄企画室

### プロジェクトの目的・概要

低コスト高生産効率である圧延加工技術の利点を活かし、石油代替エネルギーとして期待されている燃料電池用金属セパレータを適用例として、精密圧延加工技術を開発する。さらに熱間圧延プロセスの更なる省エネルギー化のために、従来よりも低温で加工するのに必須の高耐久性熱間加工工具材料の開発を行うとともに、その低廉化かつ汎用化が可能な新しい製造方法の開発も行う。

### 予算額等

（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成 15 年度	平成 19 年度	平成 17 年度	平成 20 年度	新日本製鐵株式會社
H17FY 予算額	H18FY 予算額	H19FY 予算額	総予算額	総執行額
102,000	39,000	38,000	393,000	331,010

### 目標・指標及び成果・達成度

#### (1) 全体目標に対する成果・達成度

以下の通り、本研究開発で設定した目標は全て達成された。

個別要素技術	目標・指標	成果	達成度
1) 精密圧延加工技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 特殊なロール圧下成形によりロール表面の溝形状を転写成形することが可能なプロトタイプ機を開発し、高耐食ステンレスセパレータの精密成形加工技術を確立する。</li> <li>・ 本開発の新しい加工法で、板厚 0.1mm 程度の高耐食ステンレス薄板を厚さ 1mm / 枚以下に薄型化した PEFC セパレータに造り込む技術を確立する。</li> </ul> <p>【判断基準】</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 高精度ロール圧下成形装置の位置合わせ精度 <math>\pm 10 \mu\text{m}</math> 以下。</li> <li>2) 精密ロール金型の形状精度 <math>\pm 10 \mu\text{m}</math> 以下。</li> </ol>	<p>素材厚み 0.1mm の SUS 鋼を用いて、<u>厚み 0.6mm の実機規模 (400cm<sup>2</sup>) サイズのセパレータを製作</u>できた。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) セパレータ形状精度より、<u>位置合わせ精度が <math>\pm 10 \mu\text{m}</math> 以下</u>であることを実証できた。</li> <li>2) <u>ロール金型の主要寸法が <math>\pm 10 \mu\text{m}</math> 以下の寸法精度で製作</u>されていることを確認できた。</li> </ol>	達成

2) 高耐久性熱間加工工具材料の開発	現状ハイスロールと比べ、耐摩耗性 4 倍、耐熱衝撃性 3 倍の FRM ロール材を開発する。	HIP 法でハイス鋼粉末とアルミナ繊維(20vol.%)の FRM 材を試作し、 <u>鑄造ハイスロール材に比べて、耐摩耗性が 4 倍(熱間転動摩耗試験による)、耐熱衝撃性が 3 倍(落重式摩擦熱衝撃試験による)</u> であることを検証できた。	達成
	この超高耐久性ロール材を用いて、150 程度の加熱炉温度の低温化操業により加熱燃料と圧延動力の合計使用量を 10%程度削減する。 【判断基準】 FRM ロール材で通常よりも加熱炉温度を 150 程度低下させて圧延したときと、鑄造ハイスロール材で通常の加熱炉温度で圧延したときとで、ロール摩耗量がほぼ同等であることを確認。	150 程度の加熱炉温度の低温化操業により加熱燃料と圧延動力の合計使用量を 10%削減可能な目処を得た。  熱間コイル圧延実験により、鑄造ハイスロール材を使用して加熱温度 1000 の鋼材を圧延したときの摩耗量と、HIP 法で試作した FRM ロール材を使用して加熱温度 850 の鋼材を圧延したときの摩耗量とがほぼ同等であることが明らかになった。	達成
	焼結反応を解明する目的で 1200 までの加熱過程に対応したダイナミックな組織変化を観測する技術を開発し、界面ダイナミクス制御を活用した革新的 LIP 焼結法(Low Isostatic Pressing)による FRM 材の製造技術を確立する。 【判断基準】 LIP 焼結法で作成した FRM 材と HIP 焼結法で作成した FRM 材とで耐摩耗性がほぼ同等であることを確認する。	繊維凝集がほとんど発生しない繊維分散混合手法を確立し、高温動的観察手法にて得られた知見を取り入れて最適化された LIP 焼結法によって、10mm x 10mm x 15mm 程度の FRM 材(ショア硬度 Hs80 以上)を製作できた。  この LIP 焼結法で作成した FRM 材の耐摩耗性が、HIP 焼結法で作成した FRM 材の耐摩耗性とほぼ同等であることを、熱間転動摩耗試験機によって確認できた。	達成

## (2) 目標及び計画の変更の有無

### < 共通指標 >

論文数 (口頭発表を含む)	特許等件数 (出願を含む)
16	17

### 評価概要

#### 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

本研究開発は、燃料電池の主要部品となるセパレータをステンレス薄板から成形製造する技術開発を行うとともに、圧延プロセスの更なる省エネルギー化に資する次世代圧延ロール用の材料開発を実施するもので、国民・社会のニーズに合致し、事業の目的は非常に重要で、政策的位置付けは極めて明確である。

後発国の製鉄技術向上が顕著な中、特殊鋼の精密圧延加工に着目したことは独創性・革新性が

あり産業競争力向上の観点からも、社会的意義が認められる。また、燃料電池等将来的な技術課題への取組は、一企業で行うにはリスクが大きく、補助金事業として国が支援することは適切である。

## 2．研究開発等の目標の妥当性

それぞれのテーマにおいて、具体的な開発目標が設定されており、また、その根拠も明確であり適切である。特に、燃料電池の主要部材の開発において、強度、重量で具体的な優位性を設定し、それを実現した点については、評価できる。

## 3．成果、目標の達成度の妥当性

燃料電池用ステンレスセパレータの精密成形加工技術の確立、熱間加工用セラミック繊維強化金属の開発等、設定した目標値全てを達成した。

特許出願も多数あり、有意義な研究開発であったと評価できる。

## 4．事業化、波及効果についての妥当性

今後の普及が期待される燃料電池用のセパレータは注目されている技術であり、安価に量産化ができれば燃料電池の普及に大きく寄与できると期待できる。また、熱間加工用セラミック繊維強化金属においてLIP焼結法のプロセス開発は実用化の可能性が高いと考えられ、さらに、圧延ロール以外への適用可能性も検討されており、波及効果の広がりが期待できる。

今後、実用化に向けた更なる自主研究の推進が期待される。

## 5．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

本プロジェクトの研究開発計画、実施体制・マネジメントは適切かつ妥当であったと考えられる。

体制においては、燃料電池普及の大きな分野である自動車メーカーからも適切な情報収集を行っており評価できる。費用対効果は十分であり、燃料電池車の開発に重要な技術となる。

## 6．総合評価

燃料電池の主要部品となるセパレータをステンレス薄板から成形製造する技術開発を行うとともに、圧延プロセスの更なる省エネルギー化に資する次世代圧延ロール用の材料開発を目指した本プロジェクトは、国が関与する事業として政策的位置付けも明確であり、社会的意義も大きく、妥当であった。研究開発のマネジメントも適切に行われたと評価できる。

また、目標も妥当で、低コストの圧延加工技術を用いて燃料電池用セパレータを製造する技術を確立するとともに、省エネルギーに資するための熱間加工工具材料を開発した点は評価できる。開発された技術は、既存技術に代替しうる内容であり、世界初の試みも取り入れて成果を達成した。

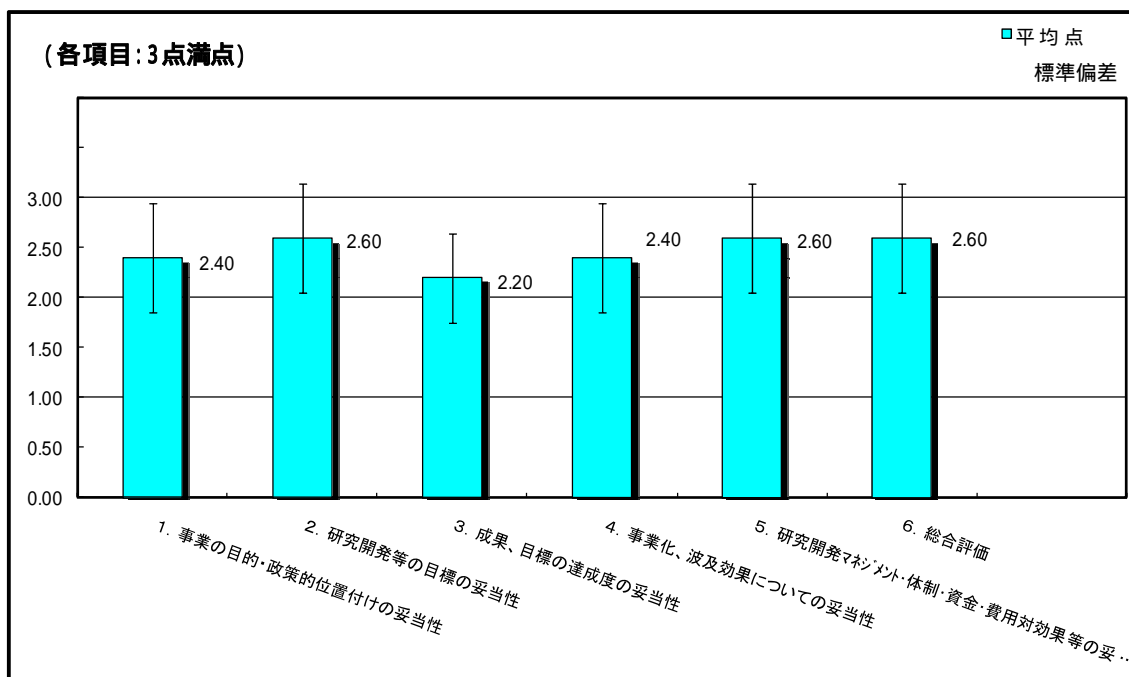
なお、開発した成果を活かしていくため、今後は燃料電池車の普及度合いなど社会情勢や技術シーズを見極めながら実用化に向けた研究開発のスピードやターゲットを柔軟に見直していくことが望まれる。

## 7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

精密圧延加工技術の開発は、燃料電池の国際的競争力向上に資する技術と考えられ、早期の事業化が望まれる。高耐久性熱間加工工具材料の開発は、ハイス粉末とアルミナ繊維の複合化により画期的な耐久性をもたせるもので、熱間加工工具の長寿命化によりコスト削減効果が期待される。

燃料電池セパレータについては、実際に燃料電池に用いて性能評価を行い、これまでのものと遜色のない性能を示すことは確認されているが、燃料電池は長時間使用するものであるため、耐久性も問題になると思われる。また、使用するステンレス薄板の厚さがシステム全体の重量に大きく影響するため、開発した技術による使用限界ステンレス板厚についても明らかにしていくことが望まれる。

### 評点結果



# 第 1 章 評価の実施方法

# 第1章 評価の実施方法

本プロジェクト評価は、「経済産業省技術評価指針（平成17年4月1日改定、以下「評価指針」という。）に基づき、以下のとおり行われた。

## 1. 評価目的

評価指針においては、評価の基本的考え方として、評価実施する目的として

- (1) 研究開発に対する経済的・社会的ニーズの反映
- (2) より効率的・効果的な研究開発の実施
- (3) 国民への施策・事業等の開示
- (4) 資源の重点的・効率的配分への反映
- (5) 研究開発機関の自己改革の促進等

を定めるとともに、評価の実施にあたっては、

- (1) 透明性の確保
- (2) 中立性の確保
- (3) 継続性の確保
- (4) 実効性の確保

を基本理念としている。

プロジェクト評価とは、評価指針における評価類型の一つとして位置付けられ、プロジェクトそのものについて、同評価指針に基づき、事業の目的・政策的位置付けの妥当性、研究開発等の目標の妥当性、成果、目標の達成度の妥当性、事業化、波及効果についての妥当性、研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性の評価項目について、評価を実施するものである。

その評価結果は、本プロジェクトの実施、運営等の改善や技術開発の効果、効率性の改善、更には予算等の資源配分に反映させることになるものである。

## 2. 評価者

評価を実施するにあたり、評価指針に定められた「評価を行う場合には、被評価者に直接利害を有しない中立的な者である外部評価者の導入等により、中立性の確保に努めること」との規定に基づき、外部の有識者・専門家で構成する検討会を設置し、評価を行うこととした。

これに基づき、評価検討会を設置し、プロジェクトの目的や研究内容に即した専門家や経済・社会ニーズについて指摘できる有識者等から評価検討会委員名簿にある5名が選任された。

なお、本評価検討会の事務局については、指針に基づき経済産業省鉄鋼課製鉄企画室が担当した。

### 3．評価対象

「難加工性特殊鋼等に対する次世代圧延技術の開発プロジェクト」(事業期間：平成15年度～平成19年度)を評価対象として、研究開発実施者(株式会社神戸製鋼所株式会社)から提出されたプロジェクトの内容・成果等に関する資料及び説明に基づき評価した。

### 4．評価方法

第1回評価検討会においては、研究開発実施者からの資料提供、説明及び質疑応答、並びに委員による意見交換が行われた。

第2回評価検討会においては、それらを踏まえて「プロジェクト評価における標準的評価項目・評価基準」、今後の研究開発の方向等に関する提言等及び要素技術について評価を実施し、併せて4段階評点法による評価を行い、評価報告書(案)を審議、確定した。

また、評価の透明性の確保の観点から、知的財産保護、個人情報で支障が生じると認められる場合等を除き、評価検討会を公開として実施した。

### 5．プロジェクト評価における標準的な評価項目・評価基準

評価検討会においては、経済産業省産業技術環境局技術評価調査課において平成19年6月1日に策定した「経済産業省技術評価指針に基づく標準的評価項目・評価基準について」のプロジェクト評価(中間・事後評価)に沿った評価項目・評価基準とした。

#### 1．事業の目的・政策的位置付けの妥当性

(1) 国の事業として妥当であるか、国の関与が必要とされる事業か。

- ・国民や社会のニーズに合っているか。
- ・官民の役割分担は適切か。

(2) 事業目的は妥当で、政策的位置付けは明確か。

- ・ 事業の政策的意義（上位の施策との関連付け等）
- ・ 事業の科学的・技術的意義（新規性・先進性・独創性・革新性・先導性等）
- ・ 社会的・経済的意義（実用性等）

## 2. 研究開発等の目標の妥当性

(1) 研究開発等の目標は適切かつ妥当か。

- ・ 目的達成のために具体的かつ明確な研究開発等の目標及び目標水準を設定しているか。特に、中間評価の場合、中間評価時点で、達成すべき水準（基準値）が設定されているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

## 3. 成果、目標の達成度の妥当性

(1) 成果は妥当か。

- ・ 得られた成果は何か。
- ・ 設定された目標以外に得られた成果はあるか。
- ・ 共通指標である、論文の発表、特許の出願、国際標準の形成、プロトタイプの作製等があったか。

(2) 目標の達成度は妥当か。

- ・ 設定された目標の達成度（指標により測定し、中間及び事後評価時点の達成すべき水準（基準値）との比較）はどうか。

## 4. 事業化、波及効果についての妥当性

(1) 事業化については妥当か。

- ・ 事業化の見通し（事業化に向けてのシナリオ、事業化に関する問題点及び解決方策の明確化等）は立っているか。

(2) 波及効果は妥当か。

- ・ 成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。
- ・ 当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

## 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

(1) 研究開発計画は適切かつ妥当か。

- ・ 事業の目標を達成するために本計画は適切であったか（想定された課題



への対応の妥当性)。

- ・採択スケジュール等は妥当であったか。
- ・選別過程は適切であったか。
- ・採択された実施者は妥当であったか。

(2) 研究開発実施者の実施体制・運営は適切かつ妥当か。

- ・適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか、いたか。
- ・全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか、いたか。
- ・目標達成及び効率的実施のために必要な、実施者間の連携/競争が十分に行われる体制となっているか、いたか。
- ・成果の利用主体に対して、成果を普及し関与を求める取組を積極的に実施しているか、いたか。

(3) 資金配分は妥当か。

- ・資金の過不足はなかったか。
- ・資金の内部配分は妥当か。

(4) 費用対効果等は妥当か。

- ・投入された資源量に見合った効果が生じたか、期待できるか。
- ・必要な効果がより少ない資源量で得られるものが他にないか。

(5) 変化への対応は妥当か。

- ・社会経済情勢等周辺の状況変化に柔軟に対応しているか(新たな課題への対応の妥当性)。
- ・代替手段との比較を適切に行ったか。

## 6. 総合評価

## 第2章 プロジェクトの概要

## 1 . 事業の目的・政策的位置付け

### 1 - 1 事業の目的

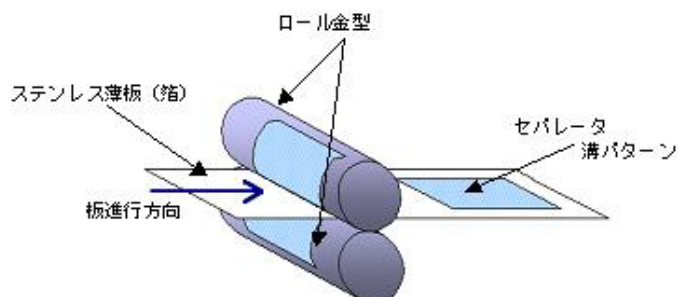
近年、環境問題（地球温暖化問題、リサイクル等）への対応が益々重要になっている。鉄鋼業のエネルギー消費は我が国全体の約1割を占めており、製鉄プロセスにおける省エネルギーの成否は、我が国全体のエネルギー消費量に大きなインパクトを与える。また、鉄鋼製品は全素材製品の約2割（出荷額）を占め、自動車、建築物、家電製品等に幅広く利用されている。そのため、鉄鋼製品の性能向上や新機能の付与、鉄鋼技術を活用した新材料の創製は、様々な産業分野における省エネルギー化の推進や、国際競争力の向上に貢献する。我が国の製造業が直面する環境問題を克服しつつ、国際競争に打ち勝つためには、他の追随を許さない難易度の高い技術開発に挑戦し、その成果を着実かつ早急に実用化しなければならない。

このため、本事業では、高効率で大量生産に有利な鉄鋼業の圧延技術を活用・進化させる次の2つの技術開発を実施した。一つは、圧延技術を機能部材の成形加工に適用する**精密圧延加工技術の開発**で、適用対象製品を燃料電池の金属セパレータ\*（末尾用語集参照。以下同じ。）とし、特に自動車用燃料電池の普及に貢献する技術開発に取り組んだ。もう一つは、圧延技術の一層の省エネルギー化を実現するための**高耐久性熱間加工工具材料の開発**で、熱間圧延用ワークロール\*材（以下、圧延ロール材と記す。）として適用可能な金属とセラミックスの複合材料の開発に取り組んだ。加えて要素技術開発として、新しい工具材料の新粉末焼結製造法の開発も実施し、さらにその粉末焼結製造法の開発に必要な要素技術である、高温での焼結過程のダイナミック観察技術を開発し、焼結反応機構の解明も実施した。

#### 1 - 1 - 1 事業の科学的・技術的意義

##### （1）精密圧延加工技術の開発

精密圧延加工技術の開発においては、複雑な形状が成形された機能部材の製作を連続圧延により加工することを発想し、極薄金属コイルを素材とし、上下



に配置された特殊な金型ロールにより、ロール表面の複雑な凹凸形状を転写成形する新しく独創的な圧延加工法の開発に取り組む共に、燃料電池セパレータの成形加工に適用する。

試験導入段階の燃料電池車両に数多く搭載されている現状セパレータは、炭素系材料をNC工作機械で反応ガス流路をミリング加工しているため、1枚数万円の莫大なコストがかかっている。現在、種々の加工法の開発が進められているが、炭素系材料を用いたセパレータでは、素材の強度上厚みを大きくせざるを得ず、自動車搭載時に求められる低容積化、低コスト化には限界がある。

一方、金属系材料は0.1mm程度の厚みでも十分な強度を有し、低容積及び軽量化に極めて有利であり、中でも、ステンレス鋼はコスト面、強度面、加工性、耐久性から、セパレータ素材として適している。ステンレス鋼に代表される金属セパレータは、一般的にプレス成形による製法の検討が進められているが、高引張り歪み・張り出し成形を伴う強加工となり、延性の劣る高耐食性ステンレス鋼の加工には不適である。さらに、張り出し主体の成形となるプレス加工では、材料の減肉などにより、電池性能上重要な電極との接触平坦部など、成形できる形状の自由度が少ない。そこで、上述の問題点を鑑み、鍛造に近い圧縮成形、即ち矩形の頂上部を平坦にするためのコイニング加工のような潰しの加工を低荷重で実現できる、ロールによる精密圧延加工法を考案した。

本案の圧延加工法を具現化するため、FEM(Finite Element Method：有限要素法)による成形シミュレーションを用いた加工メカニズムの解明や素材の材料特性に応じたロール金型形状の最適化、精密ロール金型の開発を行い、高精度ロール圧下成形プロトタイプ機を設計製作する。さらに、機能部品である燃料電池用金属(主にステンレス)セパレータを加工品の適用例として取り上げ、実機規模のセパレータを効率よく高精度に成形加工できることを実証し、自動車用を中心とした燃料電池の実用化、普及拡大に貢献する先導的な製造加工技術として確立させる。尚、燃料電池用セパレータは微細な流路溝加工が施された燃料電池の基幹部品であり、その流路溝加工により、燃料ガス(水素、空気)を電極面、固体高分子膜面に均一に供給する機能、凸部が電極面に接触することにより発電された電気を通電させる機能、セパレータの断面剛性を上げる機能が付与されることになる。

## (2) 高耐久性熱間加工工具材料の開発

高耐久性熱間加工工具材料の開発では、現行の熱間圧延プロセスに適用が可能で熱間圧延温度を低温化することが可能な省エネルギー化に資する工具材料を開発する。本事業で開発する工具材料は、セラミックス材料と金属材料の特性を併せ持ち機械的熱的特性に優れるセラミックス繊維強化金属(Fiber

Reinforced Metal、以下 FRM と略す ) \*材料である。

FRM 材料開発の技術的意義に関しては、FRM 材料の研究開発がこれまでに国内外で多数実施されてきたが、工業的に実用化されている FRM 材料はアルミニウム系のものが殆どで、アルミニウムの融点 660 を超える温度域では使用できない。従って、鉄鋼製造プロセス用の工具材料として実用可能な FRM 材料は例が無く、本事業で取り組む FRM 材料の開発は先進性及び革新性に富んだ研究開発と位置付けられる。

本研究開発では、FRM 材料の開発だけでなく、FRM 材料の製造技術の開発にも取り組む。FRM 材料のような粉末焼結材料の製造法として、現状では HIP 法で製造することができるが、HIP\*法は製造サイズ制約があるため熱間圧延ロール材を製造できない場合がある。そのため、本研究開発では LIP 法という手法を試みる ( 詳細は 1 - 4 に記載 )。この LIP(Low Isostatic Pressing)法は低廉かつ汎用的な粉末焼結法として活用でき、HIP 代替をも可能にする革新的な技術となりうるものである。

また、LIP 法の開発に際して高温下における焼結現象を直接観察する要素技術開発にも取り組む。この技術による知見は LIP 法の最適な焼結条件の探索を効率的に推進するのに有用であるとともに、高温での焼結過程をダイナミックに観察した研究例は少ないことから、基礎科学的にも革新的な技術開発である。

## 1 - 1 - 2 事業の社会的・経済的意義

### ( 1 ) 精密圧延加工技術の開発

本事業で適用対象としたステンレスセパレータは燃料電池のセルを構成する基幹部品であり、燃料ガスの供給、通電などの重要な役割を果たす板状電極である。現状品はカーボン系素材にミリング加工を施すものであるが、厚み・重量オーバー、低生産性、高い加工コスト等の課題を抱え、燃料電池普及拡大への阻害要因の一つになっている。これらはいずれも素材をカーボン系から鉄系に置き換えれば解決できるものが多く、本研究開発の完遂によってステンレスセパレータの量産化が実現すれば、燃料電池の実用化を加速させる効果が大きいと期待できる。

本開発手法が技術確立すると、ステンレスセパレータの量産化、燃料電池の普及促進のみでなく、熱交換器用プレートフィンや、電子機器用部品への適用も考えられ、薄板加工業の応用分野への新たな可能性を切り開くものである。また、本開発手法のニーズが高まり、広く浸透すればロール加工メーカー、小型圧延機



図 2 プレートフィン

メーカーなど中小産業界への活性化に繋がる。

## (2) 高耐久性熱間加工工具材料の開発

鉄鋼製造業をはじめとする加工産業においては、使用する加工工具の耐久性・寿命向上は製造コストの低減に直結しており競争力強化に結びつく課題であるため、本事業で取り組む高耐久性熱間加工工具材料が実用化されたときの経済的意義・インパクトは非常に大きい。特に、熱間圧延ロールのような過酷な条件で実用可能な工具材料が開発されると、多くの金属加工産業で使用されているロールや金型等の材料として容易に適用可能と考えられ、先導的な技術的・経済的価値をもつからである。また、汎用的な LIP 焼結法が開発・実用化されると、普通の窯業炉を用いて HIP 法と同等の製品が製造できるようになり、多くの加工工具製造業に普及・実用化するなどの可能性がある。

### 1 - 2 国の関与の必要性

ここで、本事業の成果の 1 つとして期待されている燃料電池セパレータは、実機規模サイズと目される 400cm<sup>2</sup> の広面積に亘り数十 μm の高精度で凹凸パターンが形成された機能部材である。燃料電池の普及は、現在の性能・価格では困難な状況下にあるが、そのセパレータを高精度かつ安価に量産加工する技術は難易度が高い。また、熱間圧延ロールは、約 2000MPa の接触圧力、1 回転あたり約 500 の温度差の加熱冷却を繰り返すという、加工工具の中でも非常に過酷な条件で使用されるものであり、技術開発の難易度が高く、また、実験用試作品の製造費用も高価であるため、民間企業だけで実施するにはリスクが高い。

従って、本事業での官民の役割分担に関しては、成果の実用化の見通しが得られるまでは国が成果発現にむけた技術開発リソースを積極的に支援・推進することが必要である。民間企業は実用化を常に視野にいれながら、これまでに蓄積された研究手法を駆使して技術開発を効率的に推進することが望まれる。

自動車向け燃料電池用のセパレータの開発は、燃料電池の普及・促進に必須であり、省エネルギー施策に対して緊急性・優先性が高い。本事業で取り組む精密圧延加工技術は自動車向け燃料電池セパレータの小型化及び量産化に資するものである。

なお、燃料電池自動車は近未来における実用化が視野にあるとはいえ、未だ普及していないことなどから、大きな「市場の不確実性」が存在する中で研究開発を進める必要がある

### 1 - 3 政策的位置付け

2005年2月に発効した京都議定書において、日本は二酸化炭素等の温室効果ガスの排出量を2008年から2012年までの期間中に1990年比で6%削減する義務を負っており、その実施には省エネルギー技術が必要不可欠である。

「エネルギーの使用の合理化に関する法律」(昭和54年制定)及び「エネルギーの使用の合理化に関する基本方針」(平成18年閣議決定)において、「エネルギー消費効率の向上及び効率的な使用」が事業者に求められている。また、「新・国家エネルギー戦略について」(平成18年経済産業省)において、2030年までにエネルギー効率を少なくとも30%改善するとの目標が示されている。

本研究開発は、これらの要請に対応するもので、経済産業省における省エネルギー技術開発プログラム(2007)の「超燃焼システム技術」のひとつに位置付けられていたものである。

#### 1 - 4 研究開発課題設定の経緯

本事業で実施する研究開発は、シーズ創出・実験室レベルでの原理、特性および効果の検証段階という位置付けである。なぜならば、精密圧延加工技術の開発では、ミクロンオーダーでの精度を要求されるロール圧下成形技術を初めて開発しようとするものであり、実用化・工業化のステップへ進む前に、実験室レベルでの技術の検証が必要であるからである。また、一方の高耐久性熱間加工工具材料の開発においては、金属とセラミックスの新しい複合材料を開発するにあたり、その製造方法も含めて産学の連携体制で得られた研究成果が実用化可能か否かを、企業内実験室にて原理および効果の検証から開始する必要があるからである。

なお、本研究開発は、製造業に従事する企業を主体とした研究開発であり、その実行に際しては常に実用化を視野におき、実製造プロセスでの評価も適宜実施することによって、早期戦力化、並びに広範囲な普及のための課題発掘もあわせて行うこととした。

##### 1) 精密圧延加工技術の開発

本技術の適用分野としている燃料電池車関連については、国内外大手の自動車メーカーは、公用などの特殊用途に限って実用化試験を兼ねたリース販売を実施しており、本格普及へ向け緩やかではあるが着実に技術が進展している。その反面、本格普及には、電池性能、寿命改善と共に低コスト化、生産性、量産品の品質安定が強く求められており、特に自動車搭載用燃料電池は低コスト化、軽量化、コンパクト化、耐振動性などが重点課題としてあげられる。

本事業で開発する精密加工法の具体的な適用対象部品として取り上げた燃料電池用セパレータは、燃料電池のセルを構成する一对の板状部品で表裏に溝状凹凸を有する精密加工部品である。現状品はNC工作機械を用い、カーボン系素材にミリング加工で反応ガス流路を成形加工したカーボン製セパレータであるが、厚み及び重量が大、ミリング加工のため生産性が低い、加工費が大、強度不足などの実用上の問題を抱え、燃料電池の拡大普及への大きな阻害要因になっている。

一方、本提案の手法は、極薄高耐食ステンレス板を母材とし特殊なロール圧下成形によりロール表面の溝形状を転写するもので、この技術確立によって上記課題を解決して量産化、実用化に資するものである。ステンレスセパレータの成形加工法としては、プレス成形が従来から検討されているが、高引張り歪み・張り出し成形を伴う強加工となり、延性の劣る高耐食性ステンレス鋼の加工には不適である。さらに、張り出し主体の成形となるプレス加工では、材料の減肉などにより、電池性能上重要な電極との接触平坦部など、成形できる形状の自由度が少ない。そこで、上述の問題点を鑑み、本研究開発ではステンレスセパレータの精密加工方法として、鍛造に近い圧縮成形、即ち矩形の頂上部を平坦にするためのコイニング加工のような潰しの加工を低荷重で実現できる、ロールによる精密圧延加工法を考案した。このような潰し加工をプレス成形で行うとすると、例えば、 $400\text{cm}^2$ の広面積に亘る凹凸形状の頂上部全てに圧縮成形を施すためには、1000トン以上の成形荷重が必要であり、そのような高荷重下で数十ミクロンの位置決め精度を保持しつつ加工することは極めて困難である。ロールによる精密圧延加工法は、セパレータの反応ガス流路となる凸部及び凹部の形状とほぼ相似形の凹凸加工を表面に施した上下一対の圧下ロールを有し、その圧下ロール間にステンレス薄鋼板（ステンレス箔）を通板させ、セパレータの流路溝パターンを転写・加工するものである。本方式の特徴は、電極と接触する平坦部を高圧下荷重で成形する加工に極めて有利であること、ロール圧下式であるため成形加工中に形状矯正（反り制御）が可能であること、プレス成形時の荷重に比べ成形荷重を大幅に削減でき設備をコンパクト化、低コスト化できる事などが挙げられる。また、通常、ステンレス箔は薄くなればなるほど製造コストが増加する傾向にある。本方式では圧延と加工成形が同時にできることから、より厚手のステンレス箔もしくはステンレス薄鋼板をセパレータ素材として用いることができ、成形加工前の素材コストを圧縮できる。さらに、ステンレス薄板（箔）製造、セパレータ成形加工、表面処理、仕上加工のプロセスを統合化し、連続製造ライン化が可能であり、生産性の高い量産設備の構築が期待できる。



補助事業前の自主研究では、まず、従来からあるプレス成形方法で、FEMによる弾塑性成形シミュレーションを駆使して最適な金型形状、素材設計を行った後、表面処理を施した小サイズ（約2cm角）のセパレータを試作し、単体セルでの燃料電池性能評価を実施している。表面処理については、別途開発したメカニカルプレーティングによる金微量付着法（特許公開済）を採用しており、その手法を用いることにより、接触抵抗が低減され、強酸化雰囲気での耐食性、及び接触抵抗がカーボンセパレータとほぼ同等なレベルまで達することを評価試験により確認している。また、金属ロール円筒面に精密抜型を加工するダイカットロール技術を適用し、約50mm直径の小径ロール金型を製作し、ロール圧下成形法で小サイズ（約2cm角）のセパレータは試作済である。

本研究開発では、上記先行開発の実績と知見を融合し、実用規模サイズ（400cm<sup>2</sup>程度）に向けた技術開発・試作・性能評価を推進し、量産プロセスへの実用化を目指した。

## 2) 高耐久性熱間加工工具材料の開発

鉄鋼製造における熱間圧延工程では、高い耐摩耗性を有するハイスロール\*材が、仕上圧延用ロール材として適用されている。しかし、耐熱衝撃性が従来のロール材であるニッケルグレンロール\*材よりも劣るため、仕上圧延機の後段には適用されていない（項目末の\*1参照）。低温操業を可能とするには、圧延負荷の上昇によるロールの損傷を抑制する必要がある。より一層の耐摩耗性の向上と耐熱衝撃性の改善を図る必要がある。耐摩耗性の向上には、硬質である炭化物等のセラミックスの増量が効果的であるが、現状の鋳造による製造法では、面積率で20～30%程度が限界であり、大きな改善は期待できない。また、単にセラミックス粒子量を増加しても靱性や耐熱衝撃性が劣化するため、極端に増加することは困難である。

そこで、本研究開発では高硬度と延性を有するセラミックス繊維に着目し、ハイスロール材と複合したFRM材料を検討する。但し、セラミックス繊維の耐熱性が約1300程度なので、FRM材料の製造プロセスは、必然的に鋳造法（1500以上）ではなく粉末焼結法（1000～

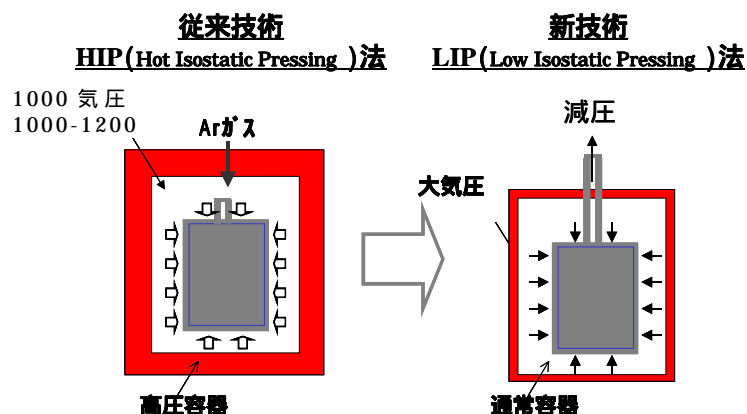


図3 HIP法とLIP法の比較

1200 ) を選択することになる。FRM 材料の開発と同時に、FRM 材料を製造する焼結方法の開発も実用化に必要な研究開発課題になる。

現在工業的に稼働している HIP 法には製造可能な製品サイズの制約(国内では、炉容積で最大直径 850mm、長さ 3m 以内)があり、あらゆる鋼材の熱間圧延用ロール(胴長部分の最大サイズが直径で 1200mm 位、胴長長さで最大 5.8m 位)を製造することはできない。従って、このことが開発した FRM 材料の実用化の障壁になることが予想される。本研究開発では、HIP 代替焼結技術として、革新的 LIP(Low Isostatic Pressing)焼結法の開発も実施する。なお、繊維量が多くなる、あるいは材料のサイズが大きくなると緻密化が困難となることが懸念されるので、LIP 焼結時の圧力を、窯業炉で大気圧力(1 気圧)にした場合(大気減圧型 LIP 法)に加え、10 気圧未満の場合(加圧型 LIP 法)の 2 つのアプローチから検討する。既に工業的に利用されている窯業炉では、10 気圧未満の圧力設定が可能なものがあり、製造可能サイズも熱延ロールを製造するのに十分な仕様のもので存在する。

また、複合材料の焼結技術の開発に際し、セラミックス繊維の焼結過程における挙動、またセラミックス繊維が存在する中で、どのように金属粒子が焼結するか等の焼結メカニズムを解明することは、焼結法の開発に必要な要素技術開発である。

この目的で、当社の鉄鋼材料開発研究において培ってきた高度な電子顕微鏡解析技術を駆使して、ナノレベルで FRM 材料の組織を観察し、セラミックス繊維やハイス鋼粉末の存在状態の解析や、炭化物の生成状態を解明する。さらに、焼結挙動・メカニズムの解明に有効と考えられるダイナミックな観察技術開発に挑戦する。従来から報告のある顕微鏡技術を主体とするのではなく、全く新しい集束イオンビーム\*加工法(項目末の\*2 参照)に着目し、そこに高温ステージの開発を組み合わせることで、高温下における焼結過程の動的観察技術の開発に取り組んだ。

\*1) 仕上圧延機(通常 7 基の圧延機が並んだ連続圧延工程)の後段(5 機目から 7 機目)では、鋼板の厚さが薄くなり、圧延速度も速くなるため、鋼板が蛇行し板の最後端部がガイド等にあたって鋼板が折れ曲がり、そのまま次の圧延機へ入る場合がある。(これを絞り事故という) このとき、折れ曲がった部分だけ板厚が他よりも 2 倍、重なり具合によっては 3 倍以上になっているので、それが圧延されると、局部的に大きな加工発熱による温度上昇を引き起こし、その熱がロールに伝わって、熱膨張差によってロールの表面に細かな亀裂が発生する。このときに入る亀裂の深さの大小によって、ロールの耐熱衝撃性(もしくは耐熱亀裂性)の優劣が決まる。ハイスロール材は粒界に沿って炭化物が分布した組織になっているため、炭化物に沿って亀裂が伝播しやすく、仕上圧延機の後段への普及が進んでいない。

\*2) 半導体デバイスの不良部補修技術として開発され、Ga イオンビームを集束して配線部分を加工補修する技術である。そのスパッタリング原理によりあらゆる材料を加工できる事が判り、透過電子顕微鏡用の薄片試料作製装置として最近は広く普及している。さらに Ga イオンビームが照射された部分から発生する二次電子を像として捕らえた時に、金属材料では、結晶方位に非常に敏感な組織像が得られる。当社では、この顕微鏡としての能力と高温で試料内部を加工できる能力に着目した。

## 2. 研究開発目標

### 2-1 研究開発目標設定

本事業は、「燃料電池用金属セパレータの低コスト高効率製造法を適用対象例とした、機能部材の成形加工に関する精密圧延加工技術の開発を行う」、「新しい焼結法（LIP）と接合界面観察技術を駆使し、新しいセラミックス繊維強化金属材料（FRM）を開発し、耐摩耗性・耐熱衝撃性に優れた低温熱間加工用工具材料の開発を行う」ものである。

研究開発を実施するに当たっては、以下の目標を設定し開発を行った。

表 1. 全体の目標

目標・指標	設定理由・根拠等
1) 精密圧延加工技術の開発の目標	
特殊なロール圧下成形によりロール表面の溝形状を転写成形することが可能なプロトタイプ機を開発し、高耐食ステンレスセパレータの精密成形加工技術を確立する。	「目標の設定根拠」に記載
本開発の新しい加工法で、板厚 0.1mm 程度の高耐食ステンレス薄板を厚さ 1mm / 枚以下に薄型化した PEFC ( Polymer Electrolyte Fuel Cell ) *セパレータに造り込む技術を確立する。	「目標の設定根拠」に記載
2) 高耐久性熱間加工工具材料の開発の目標	
現状ハイスロールと比べ、耐摩耗性 4 倍、耐熱衝撃性 3 倍の FRM ( セラミックス繊維強化金属 ) ロール材を開発する。	「目標の設定根拠」に記載
この超高耐久性ロール材を用いて、150 程度の加熱炉温度の低温化操業により、加熱燃料と圧延動力の合計使用量を 10% 程度削減する。	「目標の設定根拠」に記載
焼結反応を解明する目的で 1200	「目標の設定根拠」に記載

までの加熱過程に対応したダイナミックな組織変化を観測する技術を開発し、界面ダイナミクス制御を活用した革新的 LIP 焼結法 (Low Isostatic Pressing) による FRM 材の製造技術を確立する。

## 【目標設定の根拠】

### 1) 精密圧延加工技術の開発の目標

#### ロール圧下成形による精密成形加工技術の確立

本開発では、加工によって新機能を付与しつつ複雑形状の連続圧延加工を実現することを目的にしており、その技術確立を実証するため、微細な流路溝を有する加工難易度の高い燃料電池用金属セパレータの製作を具体的な目標として設定した。セパレータは、膜、電極、触媒等と同様な燃料電池の主要な基礎素材であり、燃料電池の本格普及に向けたセパレータの喫緊の課題は低コスト化、高強度化、薄型化である。低コスト化、高強度化については、現状主流であるカーボンセパレータよりも強度が高い高耐食ステンレス鋼を素材として用いることで対応する。

#### セパレータの薄型化

薄型化に関する目標設定については、資源エネルギー庁長官の私的研究会である燃料電池実用化戦略研究会の技術開発目標を採用した。この戦略研究会では、我が国の燃料電池実用化、普及に向けた技術開発面における取組みが産官学の適切な役割分担の下、有機的、体系的に推進されることを目的として、燃料電池技術開発における技術開発課題を整理している。セパレータの開発については共通要素技術課題として取り上げており、薄型化に関しては、燃料電池スタック自体の長さを抑えコンパクト化するため、流路の凸部高さを含めたセパレータ厚みの目標を 1mm 以下としている。例えば、燃料電池スタックがセパレータを 800 枚積層されて用いられた場合、セパレータの厚みを 1mm 以下とすると、全長で 1m 弱となり自動車用途に適した燃料電池サイズとなり得る。

### 2) 高耐久性熱間加工工具材料の開発

#### -1 耐摩耗性 4 倍

150 程度の加熱炉温度の低温化を実施すると、それに伴って圧延温度も

低くなる。すると、鋼材の熱間変形抵抗の増加に起因する圧延負荷の増大は、およそ 1.3～1.4 倍である。また、低温化によるロールの摩耗増大要因として、ロール扁平変形増大による接触長増加（摩擦長さの増加）、鋼材表面スケール性状の変化による摩耗速度の変化等があげられる。しかしながら、これらの要因によって、150 程度の圧延操業温度の低温化を実施したときにロールの摩耗がどの程度増加するかを推定することは、現時点での技術では非常に困難である。そこで、実施者所有の熱間コイル圧延実験機により、鑄造ハイスロール材を用いて、鋼材の加熱温度を 150 低温化させたときの摩耗量を調べた結果、最大摩耗深さで約 3 倍程度増加することが判明した。さらに、4 章に述べる FRM ロールコスト試算では、FRM ロールの耐摩耗性が約 3.3 倍で鑄造ハイスロールと同等のコストであることから、本研究開発の目標設定にあたっては、経済的にも実用可能な性能をもたせることをも考慮して耐摩耗性 4 倍の目標とした。

#### -2 耐熱衝撃性 3 倍

鑄造ハイスロール材よりも、ニッケルグレンロール\*材の方が耐熱衝撃性に優れていたため、熱間圧延工程の仕上圧延機の後段には、現在も鑄造ハイスロール材の適用が進んでいない（1 - 4 2）参照）。この経験を踏まえて実用化時の普及促進を考慮すると、本研究で取り組む FRM 材の耐熱衝撃性は、鑄造ハイスロール以上、少なくともニッケルグレンロール材並の性能を有することが必要である。具体的には、耐熱衝撃性に関しては、絞り事故時のハイスロール材の熱亀裂深さ（言い換えると、その熱亀裂を除去するのに必要な研削加工深さ）がニッケルグレンロール材に比べて 2 倍強程度大きいという実製造ラインでの使用実績から、ニッケルグレンロール材以上の耐熱衝撃性を有することを目指し、ハイスロール材に比べて耐熱衝撃性 3 倍という目標を設定した。

#### 加熱燃料と圧延動力の合計使用量の 10% 程度削減

本研究開発では、熱間圧延プロセスにおける加熱炉温度を 150 程度低温化し、加熱燃料消費量を 10%強程度削減することを狙いとしている。150 程度の加熱炉温度の低温化によって加熱燃料消費量を現行よりも 10%以上削減できることは、実施者所有の熱間圧延工場の加熱炉燃料原単位実績によって明らかである。加熱炉温度の低温化によって圧延操業温度も低下し、圧延動力消費量が増加する分を考慮して、加熱燃料と圧延動力とを合算したエネルギー消費量を現状よりも 10%削減する。熱間圧延プロセスにおいて省エネルギー化を達成するには、加熱炉の燃料消費量を削減するのが最も効果が大きく、加熱燃料と圧延動力の合計使用量の 10%程度を削減する。

## LIP焼結法の確立

既に実用化されているHIP焼結法では、1 - 4に記載したように、製造可能な製品サイズに制約がある。圧延ロールのサイズのバリエーションを考えた場合、HIP法では製造できないサイズも存在するため、従来の窯業用もしくは熱処理用の加熱炉の流用が可能な革新的LIP焼結法による製造技術の開発に取り組む。

## 2 - 2 目標の達成度の測定・判断について

### 1) 精密圧延加工技術の開発

#### ア) 高精度ロール圧下成形装置の位置合わせ精度 $\pm 10 \mu\text{m}$ 以下(目標 関係)

複雑な流路溝形状をロールにより転写成形する加工原理であるため、上下ロールの型形状を位相方向と軸方向に精度良く位置合わせし、適正なクリアランスに設定して、所定の成形形状を得る必要がある。この条件を満足するため、上下ロールの位相方向および軸方向の位置調整がミクロンオーダーで設定可能な高精度位置合わせ機構を開発する。また、成形加工時に上下ロールが回転する間、位置合わせ機構で設定された上下金型ロールの位置関係(金型クリアランス)を確保する必要がある。このため、高荷重の成形反力負荷時に上下ロールを高精度に同期させる同期駆動機構を開発すると共に位置合わせ調整手段を考案し、高精度ロール圧下成形プロトタイプ機を設計製作する。この成否については、開発機で成形加工されたセパレータの形状寸法をデジタルマイクروسコープ(CCDカメラを用いたデジタル顕微鏡)により測定し、位置合わせ精度が、 $\pm 10 \mu\text{m}$ 以下を達成できたか否かで判断する。

本開発で用いるステンレス素材の板厚は  $100 \mu\text{m}$  と極薄であり、セパレータ流路溝のパターンを転写成形するには金型クリアランスを板厚と同程度に保つ必要がある。一般的に板成形において、板厚の10%までの板厚減少であれば、板破断は生じない。従って、その板厚の10%程度の位置ズレまでは、ステンレス素材のかじりや摩耗によって板破断しないと判断し、上記の値を設定した。最近、市販されている精密サーボプレス装置の金型移動時の停止精度、真直度は  $\pm 50 \sim 100 \mu\text{m}$  であり、本設定値は高荷重(数十トンレベル)の工作機械の機械精度として極めて高いレベルにある。

#### イ) 精密ロール金型の形状精度 $\pm 10 \mu\text{m}$ 以下(目標 関係)

彫刻ロール等の特殊なロール製造に用いられているダイカットロール加工技術を適用して精密ロール金型の試作評価を行い、数十ミクロンオーダーの形状精度を確保しうる加工方法を検討する。また、実機規模サイズに対応するロール金型を試作し、金型形状及びセパレータ試作品形状の精度評価を行

う。

さらに、主要な高合金工具鋼について、上記金型加工法を用いて試作加工し、その金型形状精度、表面性状等を確認する。

尚、精度確認については、金型表面に彫り込まれた凹凸形状寸法をデジタルマイクロスコープにより測定し、寸法精度が $\pm 10 \mu\text{m}$ 以下を達成できたか否かで判断する。

## 2) 高耐久性熱間加工工具材料の開発

研究開発目標の達成度をはかる指標として以下に記載するウ)~カ)を設定した。

ウ)FRM材が現状の鑄造ハイスロールに比べて耐摩耗性が4倍であることを確認する(目標 関係)。

この達成度の指標は研究開発目標そのものであり極めて適切な指標である。「耐摩耗性が現状ハイスロール材に比べて4倍向上していること」を確認する判断基準は、開発されたFRMロール材の摩耗量が現状ハイスロール材の摩耗量の1/4以下であればよいものとする。摩耗量の比較・評価については、実施者が所有している熱間転動摩耗試験機を用いて判断する。なお、熱間転動摩耗試験機による摩耗量の比較・評価結果が実圧延ロール材の摩耗深さの実績と、ほぼ一致することが、実施者のこれまでの技術開発の成果として確立されている。

エ)FRM材が現状の鑄造ハイスロールに比べて耐熱衝撃性が3倍であることを確認する(目標 関係)。

この達成度の指標は研究開発目標そのものであり極めて適切な指標である。「耐熱衝撃性が現状ハイスロール材に比べて3倍向上していること」を確認する判断基準は、開発されたFRMロール材に生じる熱亀裂深さが現状ハイスロール材の1/3以下であればよいものとする。熱亀裂進展深さの比較・評価については、実施者が所有している落重式摩擦熱衝撃試験機を用いて判断する。なお、落重式摩擦熱衝撃試験機による熱亀裂進展深さの比較評価結果が、実際の熱間圧延ロールで絞り事故時に生じる亀裂進展深さ実績とほぼ一致することが、実施者のこれまでの技術開発成果として確立されている。加えて、ロールメーカーでもこの評価試験法を用いて、開発したロール材の耐熱衝撃性の評価を実施している。

オ)FRMロール材を使用して加熱炉温度を通常よりも150 程度低下させて圧延した場合のFRMロール材の耐摩耗性と、鑄造ハイスロール材を使用して通常の加熱炉温度で圧延したときの鑄造ハイスロール材の耐摩耗性とが、ほ



ば同等であることを確認する(目標 関係)。

この達成度の指標は研究開発目標に沿ったものであり極めて適切な指標である。達成度の判断に必要な加熱炉温度及びロール材質を変えて圧延したときの耐摩耗性の評価は、実施者所有の熱間コイル圧延実験機によるロール摩耗量の実験結果を用いる。加熱炉温度の低温化にともなって余儀なくされる圧延温度の低温化により、ロールへの負荷が増大して摩耗が増加する。この摩耗増加によって生じるロール交換回数の増加を抑えないと生産性が著しく低下する。加熱炉温度の低温下達成のためには、加熱炉温度を低温下しないときと同等のロール摩耗状態を維持しなければならない。そこで、通常の加熱条件で鍛造ハイスロール材を使用して圧延したときのロール摩耗量と、通常よりも150程度低い加熱条件でFRMロール材を使用して圧延したときのロール摩耗量とがほぼ同等であるかどうかを達成度の判断基準とする。加えて、開発したFRM材で製作した圧延ロールと、比較用の鍛造ハイスロール材とを用いて、同じ加熱温度条件ならびに圧延条件で圧延したときに、鍛造ハイスロール材とFRMロール材とでほぼ同じ圧延荷重レベル(10%以内の差異)であることと、鍛造ハイスロールでは発生しないような圧延に支障をきたすロール肌荒れの発生が無いことについても確認する。

カ) LIP焼結法で作成したFRM材とHIP焼結法で作成したFRM材とで耐摩耗性がほぼ同等であることを確認する(目標 関係)。

本目標の達成度は、LIP焼結法で製作したFRM材の耐摩耗性がHIP焼結法で製作されたFRM材の耐摩耗性と同等であるかどうかで判断する。耐摩耗性の評価には実施者所有の熱間転動摩耗試験機を使用する。製造方法の確度を判断するには、その製造方法で製作された製品の性能を指標に判断するのが適切である。本研究開発では圧延ロール材に適用可能なFRM材の製造法の開発とFRM材の材料開発にも取り組んでおり、そのFRM材の開発目標の達成指標である耐摩耗性という指標を採用するのは妥当な選択である。達成度の判断基準としては、大気減圧型LIP焼結法もしくは加圧型LIP焼結法のいずれかの手法によって製造されたFRM材で、実施者所有の熱間転動摩耗試験機用の試験片に装着可能な試験小片を作成し、HIP焼結法で作成されたFRM材とともに、熱間転動摩耗試験を実施して両者の耐摩耗性を比較する。焼結材料の耐摩耗性は、その平均気孔率や硬度に大きく依存するため、ロール材として使用可能な平均気孔率や硬度に到達していないと、良好な耐摩耗性を得ることができない。従って、耐摩耗性を評価することで、焼結材料の平均気孔率や硬度も同時に評価することとなる。なお、達成度を評価するためのLIP法で製作する試験片の大きさは、本事業で導入したLIP焼結実

験炉で製作可能な直径 20mm、長さ 10mm 程度のものとする。この程度の試験片サイズの製作に留めるのは、実用可能な大きさの試験片（例えば、圧延ロール）を製造するには、本事業で得られる LIP 焼結法の最適な製造条件に関する知見を活かした製造設備（大型実験装置）が必要であり、本事業計画期間内では設備設計や設備導入まで実行することができないためである。

### 3 . 成果、目標の達成度

#### 3 - 1 成果

##### 3 - 1 - 1 成果概要

###### 1 ) 精密圧延加工技術の開発

ロール成形装置の位置決め 10  $\mu$ m 以下の目標を、上下ロールの位置合わせ機構，位相合わせ装置，精密ロール金型等の開発によって達成し、素材厚み 0.1mm の金属セパレータを形状創成できた。また、塑性加工学を駆使して金型形状と成形条件の最適化を行い、本開発のシミュレーション技術等に関する基盤技術を確立した。

###### 2 ) 高耐久性熱間加工工具材料の開発

ハイス鋼基地にアルミナ繊維を分散させた FRM 材を世界に先駆けて開発し、現用鑄造ハイスロール材比、耐摩耗性 4 倍で耐熱衝撃性 3 倍の性能を有することを確認でき、150 程度の加熱温度の低温化を実施しても圧延ロールの摩耗増大化の懸念無く操業できることを確認した。また、焼結反応の高温動的観察技術を確立し、新焼結法として提案した LIP 法によって HIP 法と同等の耐摩耗性を有する FRM 材の試作に成功した。

ただし、実機相当の大型サイズ FRM ロール材の製造に際しては、ロール胴長幅方向の硬度均一化のための熱処理条件の最適化検討が課題であることが判明した。

##### 3 - 1 - 2 成果の詳細

###### 1 ) 精密圧延加工技術の開発

精密圧延加工技術の開発に関しては、具体的な適用対象として燃料電池用ステンレスセパレータを取り上げて研究開発を推進し、以下の成果、技術知見を得ることができた。

###### ア) 高精度ロール圧下成形装置の開発(目標 関係)

既設の小型圧延機に、高精度位置合わせ機構と、スパーギアによる上下ロール同期駆動機構を組み込んだプロトタイプ機を製作し、セパレータ成形試験によって装置の高精度化を確認した。高精度位置合わせ機構については、各種精密機械で用いられるハーモニックドライブ機構を採用し、高精度な上下金型ロールの位相合わせが可能な

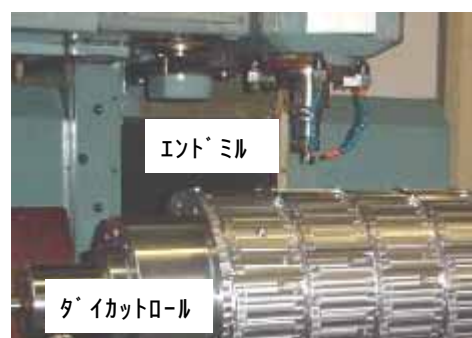


図 4 ダイカットロール加工

調節装置を開発すると共に位置合わせ調整手段を考案した。本装置を用いた成形テストの結果、所定の流路形状（溝深さ 0.5mm、溝ピッチ 2.0mm）を厚み 0.1mm の高耐食性ステンレス薄板に割れ、しわの欠陥がなく  $\pm 10\mu\text{m}$  以下の形状精度でかつ再現性よく転写成形でき、位置合わせ精度が  $\pm 10\mu\text{m}$  以下であることが実証できた。また、プロトタイプ機のミル縦剛性係数や張力設定能などの基本的な機械特性を把握し、高精密ロール圧下成形装置の立ち上げを完了した。

#### イ) 精密ロール金型の開発(目標 関係)

超硬合金のエンドミルを用いた研削加工で溝パターンを彫りこむダイカットロール加工技術を用いて、実機想定サイズ（400cm<sup>2</sup>）のセパレータ用金型ロールを製作し、当該サイズのロール金型が製作可能であること、また、ロール圧下成形法にて当該サイズのセパレータ（素材厚み 0.1mm、セパレータ厚さ 0.6mm）が製作可能であることを実証した。また、流路パターンに関して、ロール周方向に対する溝方向が平行、45°、及び垂直方向すべて網羅されているサーペンタイン型（10cm 角）の汎用流路形状を想定し、複雑な流路形状を有する精密ロール金型を製作すると共に、ロール圧下成形法にてサーペンタイン型セパレータが成形可能であることを実証できた。

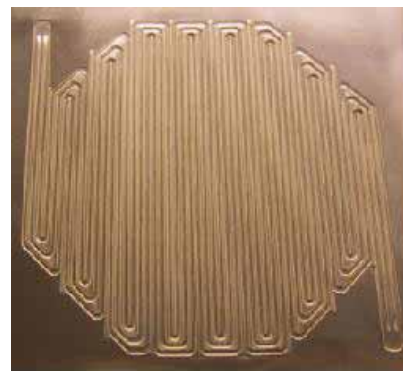


図5 汎用流路形状

代表的な金型工具鋼\*である S45C 材( ショア硬さ Hs34 )、SKD61 材( Hs54 )、SKD11 材( Hs78 ) の 3 種類についてロール金型の試作を行い、デジタルマイクロスコープにより形状精度を確認した結果、何れの材質についても溝ピッチ、溝高さ、ポンチ肩 R 部などの主要寸法が  $\pm 10\mu\text{m}$  以下の精度で製作されていることを確認した。一方、成形後のセパレータの加工硬化による表面硬度を測定した結果、S45C よりも硬度が高いことが判明し、ロール金型材質としては SKD61 および SKD11 が適正であると判断した。

#### 個別要素技術に係わる研究成果

##### (a)加工メカニズムの解明と微細反応ガス流路溝成形加工条件の最適化

###### 1) 加工メカニズム検討と金型形状の最適化

セパレータ流路溝中央部の繰返し断面形状を 2 次元 FEM モデル化した局所弾塑性解析や 3 次元 FEM 成形シミュレーションにより、降伏応力と n 値（加工硬化指数）をパラメータとして変更した仮想材料を条件設定して、材

料特性と成形性の関係を検討した結果、低降伏応力、高  $n$  値の材料が本成形に有利であることが判明した。また、成形後セパレータの表面を SEM 等により詳細に観察した結果、曲げ加工部で材料の局所変形が起こり、成形不良である割れにつながることを確認できた。さらに、これらの知見をもとに、FEM 成形シミュレーションにより、金型ロールのピッチ、高さ、クリアランス、ポンチ肩 R などの形状寸法について解析モデルを用いてケーススタディを行い、成形加工時に割れなどの欠陥が生じない最適な金型形状を設計すると共に、ロール金型形状に関する最適設計手法を確立した。

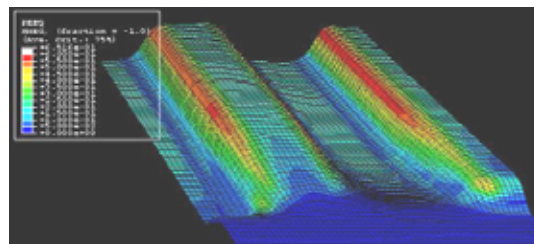


図 6 成形シミュレーション

#### ）成形条件の最適化

ロール圧下成形条件として、板張力の付与、絞りビードによる板幅方向の張力付与により、成形時、しわが発生しにくいことが確認できた。また、成形前に上下ロールを締め込み高圧下条件で成形加工をおこなった場合、コイニング加工の効果を発揮し、流路溝凸部頂部が平坦化して縦壁部も含めてより矩形断面に近い形状に成形加工できることを見出した。さらに、FEM 解析によりロール圧下成形過程を 2 工程化し、材料の局所変形箇所を各工程において変更することにより、成形限界を向上させることが可能であることを考案した。実際に 2 工程化した 2 段ロール圧下成形基礎試験において、その効果を実証した。



図 7 セパレータ断面写真例

一方、適正な成形条件の下、ロール圧下成形法により成形したステンレスセパレータを単体セルの燃料電池に組み込み、発電特性を評価した結果、実際に燃料電池のセパレータとして機能し、良好な特性が得られることを確認した。

#### (b) 高精度圧延一貫製造プロセスの検討

##### ）通板機構の検討

セパレータ加工装置（ロール圧下成形装置）と仕上加工装置（ロータリーカッター装置）を連動させる通板装置の基本設計を行った。具体的には、材料歩留まり向上のためのロール金型形状を考案すると共に、スタンド間に設置したエンコーダーによる板送り量検出機能、セパレータ成形加工タイミング検出機能等を有する通板機構を設計・製作した。

### ）連続切断加工装置の検討

小型ダイカッターを試作し、極薄ステンレス板の小片を抜き加工する基礎試験を行った結果、ロータリーカッター方式により厚さ 0.1mm の高耐食性ステンレス薄板を抜き加工することが可能であることを確認した。また、製品側の刃先角度を変更して抜き加工を行った結果、刃先角度が小さいほど切断部のダレが小さくなる傾向にあることを確認した。

さらに、ロール圧下成形装置にロータリーカッタースタンドを新たに新設して2スタンド化し、連動実験を行った結果、セパレータの成形加工とトリミング加工(抜き加工)の連動運転が実現可能であることを実証すると共に、将来の量産フェーズに即した高精度圧延一貫製造プロセスイメージを構築した。

## 2) 高耐久性熱間加工工具材料の開発

高耐久性熱間加工工具材料の開発においては、個別要素技術も含めて、下記に示す技術知見が得られた。

ウ)FRM 材が現状の鑄造ハイスロールに比べて耐摩耗性が 4 倍であることを確認する(目標 関係)。

ハイス鋼粉末と複合させるのに適したセラミックス繊維として、鉄系金属との反応のないアルミナ繊維を選定した。HIP 法によって、ハイス鋼粉末とアルミナ繊維 (20vol.%) の混合粉で製作した FRM 材の組織や硬度を調査し、気孔等

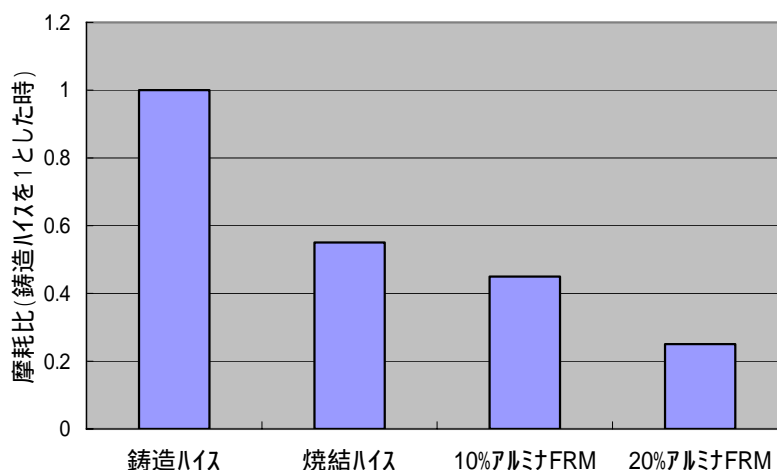


図 8 FRM 材の耐摩耗性

の欠陥が殆ど無い組織が得られ、鑄造ハイスロールと同等程度の硬度を有する FRM 材料が製造可能であることが判明した。また、HIP 法によって、ハイス鋼粉末と高純度アルミナ繊維 (20vol.%) の混合粉で、実施者所有の熱間転動摩耗試験機用の試験片を製作し、耐摩耗性を評価した結果、従来の鑄造ハイスロール材に比べて摩耗量が 1/4、つまり耐摩耗性が 4 倍であることを検証した。

エ)FRM 材が現状の鑄造ハイスロールに比べて耐熱衝撃性が 3 倍であることを確認する(目標 関係)。

上記の熱間転動摩耗試験機用の試験片と同じ素材を使って、落重式耐熱衝撃試験機用の試験片を製作し、耐熱衝撃性を評価した結果、従来の鑄造ハイスロール材を用いた場合、約 150  $\mu$ m の亀裂が発生していたのに対して、FRM 材を用いた場合、約 30~40  $\mu$ m の亀裂が発生した。従って、FRM 材の耐熱衝撃性は鑄造ハイスロール材よりも 3 倍以上であることが判明した。

オ)FRM ロール材を使用して加熱炉温度を通常よりも 150 程度低下させて圧延した場合の FRM ロール材の耐摩耗性と、鑄造ハイスロール材を使用して通常の加熱炉温度で圧延したときの鑄造ハイスロール材の耐摩耗性とが、ほぼ同等であることを確認する(目標 関係)。

熱間コイル圧延実験機用スリーブロール(外径 80mm-内径 45mm×長さ 90~100mmL)を FRM 材と鑄造ハイス材で試作し、この 2 種類のロール材を用いて、1000 および 850 に加熱された鋼材を、圧下率 30% から 35% 程度、圧延速度 80m/min. で、約 1000m 圧延した。その結果、鑄造ハイスロール材を使用して加熱温度 1000 の鋼材を圧延したときの摩耗量と、FRM ロール材を使用して加熱温度 850 の鋼材を圧延したときの摩耗量とがほぼ同等であることが明らかになった。なお、同じ加熱温度条件で、鑄造ハイスロール材と FRM ロール材との摩耗量を比較すると、どちらの加熱温度条件でも、FRM ロール材の方が鑄造ハイスロール材よりも少なくとも 3 倍耐摩耗性に優れていることが確認された。FRM ロール材を用いて圧延した際、ロールの破壊を招くことなく、問題なく圧延できることも確認できた。同じ加熱温度条件では圧延荷重は鑄造ハイスロール材と FRM ロール材とでほぼ同じレベルであった。また、圧延後のロール表面の肌状況も鑄造ハイスロール材に比べて同等以上であり、鋼材製品の表面品質に与える悪影響も少ないことが期待されることも判明した。従って、150 程度の加熱温度の低温化を実施しても、FRM ロール材を使用することによって、通常の加熱温度での鑄造ハイスロール材のロール摩耗と同じ程度にすることができ、ロール摩耗起因による生産性低下を招くことなく、加熱温度の低温化ができるものと考えられる。

カ) LIP 焼結法で作成した FRM 材と HIP 焼結法で作成した FRM 材とで耐摩耗性がほぼ同等であることを確認する(目標 関係)。

新規設置の LIP 焼結実験炉や遊星ボールミルを活用して、ハイス鋼粉末やアルミナ繊維の均一混合手法に関して種々の探索・検討を行った結果、繊維凝集がほとんど発生しない繊維分散混合手法を確立した。さらに、高温動的観察手法によって得られた知見を取り入れて LIP 焼結条件（焼結温度・パターン、加圧力、時間）の最適化を行い、10mm×10mm×15mm 程度の大きさで、ロール材に必要な硬度（ショア硬度 Hs80 以上）の FRM 材を製作することができた。FRM 材の製作に際しては、大気減圧型 LIP 焼結法（LIP-S 法）および加圧型 LIP 焼結法（LIP-K 法）の両方の手法で行い、同様の FRM 材の製作が可能であることも確認した。これらの LIP 焼結法によって製作した FRM 材と、HIP 焼結法によって製作した FRM 材の耐摩耗性を、熱間転動摩耗試験機によって比較・調査した結果、LIP 焼結法で作成した FRM 材の耐摩耗性は、HIP 焼結法で作成した FRM 材の耐摩耗性とほぼ同等であることを確認できた。

鹿児島大学への受託研究成果として、パイプ中に一軸成形したハイス鋼単体及び FRM 予成形材を通常炉にて焼結する大気減圧型 LIP 焼結法（LIP-S 法）の適正条件に関する検討を実施し、FRM 材の製造に最適な LIP-S 焼結条件（焼結温度、焼結時間及び雰囲気圧力（真空度））を明らかにした。また、ハイス鋼粉末とアルミナ繊維を混合するときに生じる繊維凝集抑制指針を得るため、繊維と粉末との混合時の幾何学的な理論検討を行い、繊維限界体積率という指標を用いて繊維凝集防止に適正なアルミナ繊維直径とハイス鋼粉末粒径の関係を明らかにした。この指標に基づいて FRM 材を LIP-S 焼結法によって試作した結果、繊維凝集がほとんど無い組織が得られることが確認され、この指標の妥当性を確認した。

#### 個別要素技術に係わる研究成果

焼結反応機構解明の為に動的観察技術の開発（目標 関係）。

試料のない状態において真空中で 1300℃ まで加熱できる加熱ステージを開発した。これを実際に高温動的組織観察装置の中で加熱し、試料から発生する加熱に伴う発光から検出器を保護する機構と、熱電対や粉体試料のマウント方法を開発し、1200℃ 程度での 1μm スケール規模での動的組織変化が観察できることを確認した。構築した焼結過程のその場観察技術の活用により、焼結反応の機構解明で鍵となるネッキング現象の直接観察および FRM 造粒粉の金属粉同士が焼結する過程を動的観察することに成功した。

上記の開発した動的組織観察装置を活用して、LIP 法の焼結過程の観察を



行い、何が起きているかを明確にすることから、以下に述べる焼結条件の最適化に資する知見が得られた。

- ・ハイス鋼粉末とアルミナ繊維とを混合するとき用いるバインダーが、約 400 から 500 で蒸発することを、その場観察によって明らかにし、LIP 焼結時の昇温条件に反映した。
- ・金属粉表面の酸化被膜が焼結時に障害となることが懸念されたが、焼結反応（ネッキング）が始まる前の低温度域において、鉄酸化膜が除去されることが判明し、酸化被膜が悪影響を及ぼさないことを明らかにした。
- ・ハイス鋼粉末の焼結反応は、900 以下の温度で開始することが判明し、大きなサイズの焼結体を作成する際に急速昇温を実施すると、焼結体表面でのネッキング進行によって内部のバインダーが除去できなくなることを見出した。このことから、大きなサイズの焼結体を作成する際には、前記 400 から 500 の温度域で長時間保持してバインダーを完全に除去してから昇温する条件を提示した。
- ・ネッキング開始直後（900 から 1100 ）に局所的な圧力を加えても、アルミナ繊維とネッキングが起こり始めたハイス鋼粉末が固まり状に動くか変形するだけであり、焼結体の緻密化が期待できないと考えられる。しかし、1200 程度の温度域で局所的な圧力を加えると、焼結途中のハイス鋼粉末に軟化挙動が観察され、この温度域での圧力付加が緻密化に貢献できる可能性があることを明らかにし、加圧型 LIP 焼結法（LIP-K 法）の焼結条件の一つとして提示した。
- ・前記の高温焼結時のアルミナ繊維とハイス鋼粉末の圧力付加時の挙動観察から、焼結条件の最適化によって繊維凝集を改善するのは非常に困難であり、ハイス鋼粉末とアルミナ繊維の混合・造粒時に均一に分散させるかが LIP 焼結技術の確立のキーファクターであることが確認された。

#### 小～大サイズ製鉄部材の試作と実機プロセスでの評価

小物製鉄部材への実用評価として、HIP 法によって製作した FRM 材を棒線圧延用ガイドロール（74mm×70mmL）に適用し、工場での実用評価を実施し、従来材に比べて耐久性が約 5 倍向上することを確認した。

中物製鉄部材への実用評価として、HIP 法によって FRM 材（ステンレス鋼粉末 + アルミナ繊維 20vol.%）製の連続鑄造用ロール（300mm×160mmL）を試作し実機試験を行った結果、厳しい使用温度条件（約 1250 の鑄片に接触）であるにも関わらず、約 2 ヶ月弱の連続使用に耐えられるこ

とが確認された。

実施者所有の熱間コイル圧延機で使用可能な直径 400mm、胴長 100mm の圧延ロールを FRM 材にて製作し、熱間コイル圧延実験を行った結果、特に問題なく熱間圧延ロールとして使用可能であることを確認した。この FRM ロールは円筒状のスリーブ表層約 8mm に FRM 材を HIP 焼結法にて作成し、現状の圧延ロールと同様に、焼嵌めにてロールシャフトと FRM 材スリーブとを接合した。このとき、現状のロール製造時と同じ焼嵌め率でもって焼嵌め接合を行い、さらに鑄造ハイスロール材と同じ条件で熱処理を実施して、ロールとして必要な硬度を得ていること、また、試作加工時に研削および研磨加工に関して特段の問題なく FRM ロールを試作することができた。

実機熱間圧延用ロールとしては小型サイズではあるが、直径 480mm、胴長 800mm の FRM 材スリーブを HIP 焼結法によって試作した。胴長方向の硬さ分布を調査したところ、一部硬度が低い部分があることが判明し、実機サイズのロールを製作するには、胴長方向の均一性確保に関する技術課題があるものと考えられる。

### 3 - 1 - 3 特許出願状況等

#### 特許の出願

#### 1) 精密圧延加工技術の開発関連：公開 8 件

- ・特開 2004-220908 「固体高分子型燃料電池セパレータ製造装置」  
ロール圧下成形装置とロータリーカッター用いた連続成形加工製造装置を提示。
- ・特開 2004-265855 「固体高分子型燃料電池セパレータの製造方法及び製造装置」  
ディフレクターロールを用い、板進行方向で曲げ加工を施しながら成形加工し、製品の湾曲やうねりを低減する方法を提示。
- ・特開 2004-265856 「固体高分子型燃料電池セパレータ、製造方法、製造装置及び固体高分子型燃料電池」  
接触面積を増し、セパレータの接触抵抗を低減する適正断面構造を提示。
- ・特開 2005-174918 「固体高分子型燃料電池セパレータ製造方法及び圧下ロール」  
製品の溝形状のダレや、金型ロールの型かじりを低減した上下ロールの同期駆動方法を提示。
- ・特開 2005-224854 「しわ又は反りのない凹凸形状板のロール成形方法」  
製品の四隅に反りしわが生じないロール圧下成形方法を提示。

- ・特開 2006-75900 「金型ロール及び凹凸形状板の成形方法」  
複数の平行な凹凸形状を有する金型ロールを用いた成形とプレス成形を組み合わせた成形方法を提示。
- ・特開 2006-289447 「多段ロール成形装置」  
溝深さ大きい成形困難な凹凸形状を多段ロールにより成形するコンパクトな装置を提示。
- ・特開 2007-283308 「圧下ロール」  
成形時の位置ズレによる凹凸模様のだれ，割れを防止し，目標の凹凸模様を安定して得ることのできる成形加工装置用の圧下ロールを提示。

## 2)高耐久性熱間加工工具材料の開発関連：公開 7 件、出願 2 件

- ・特開平 11-28508 「複合ロール及びその製造方法」  
少なくとも外層がセラミックス繊維強化ハイスからなる複合ロールで、焼結法、熔融法にて製造する方法を提示。
- ・特開 2001-59147 「耐磨耗性焼結外層を有する鋼製複合部材」  
セラミックス短繊維強化 Fe 基金属よりなる焼結複合部材で、繊維種、繊維形態及び内層との接合法等を規定。
- ・特開 2001-192791 「繊維強化金属及びそれを用いた複合材とその製造方法」  
鉄基金属薄シートとセラミックス長繊維を交互に積層した FRM 材およびその製造方法。
- ・特開 2003-119554 「繊維強化金属の製造方法」  
繊維と金属の混合粉を予成形した後、低加圧焼結法による製造方法を提示。
- ・特開 2004-315877 「焼結用予成形体のキャニング方法及びそれによる焼結材料の製造方法」  
電鍍メッキ法によりニアネットに繊維強化金属成形体をカプセル化する方法を提示。
- ・特開 2006-342374 「金属及び合金焼結体の製造方法」  
金属及び合金単体の低加圧焼結法による製造方法。
- ・特開 2007-131886 「耐磨耗性に優れた繊維強化金属の製造方法」  
金属粉粒径を規定した低加圧焼結法による繊維強化金属の製造方法。
- ・特願 2007-244112 「繊維強化金属の製造方法」  
繊維と金属を混合時の繊維凝集防止策を提示。
- ・特願 2008-114346 「集束イオンビーム装置用の局所領域温度計測装置及び温度計測方法」  
走査電子顕微鏡内の局所的な試料温度測定方法。

学会の口頭発表、論文発表

1)精密圧延加工技術の開発関連：3件

- ・ 2005年日本鉄鋼協会春季大会「微細形状ロール圧下成形法の開発」
- ・ 2005年日本塑性加工学会春季講演会「微細形状ロール圧下成形装置の開発」
- ・ 2005年自動車技術会秋季大会「微細形状ロール圧下成形装置の開発」

2)高耐久性熱間加工工具材料の開発関連：13件

- ・ 2004年日本熱処理協会講演大会「高速度鋼粉末の低等方圧加圧焼結」
- ・ 2005年日本鉄鋼協会春季講演大会「熱間工具材としてのFRM材の検討」
- ・ 2005年日本顕微鏡学会関東支部第29回講演会「FIBを利用した高温動的組織観察」
- ・ 2005年日本金属学会秋季講演大会「アルミナ繊維強化金属の焼結挙動の動的観察」
- ・ 2005年日本熱処理技術協会第61回講演大会「低等方圧加圧焼結によるセラミック繊維強化Fe基複合材料の作成」
- ・ "Low-Isostatic-Press Sintering of Alloy Powder", Materials Transactions, (No.11, vol.47, 2006)
- ・ 2007年日本機会学会九州支部・中国支部合同企画講演会「低等方圧加圧焼結によるセラミック繊維強化Fe基複合材料の作成」
- ・ 2007年日本顕微鏡学会第63回学術講演会「FIB顕微鏡法による金属融解現象の観察」
- ・ 2007年日本金属学会誌,第71巻第9号「Fe基合金粉末の低等方圧加圧焼結」
- ・ 2007年日本熱処理技術協会,熱処理,第47巻第6号「セラミック繊維強化Fe基複合材料のプロセッシング」
- ・ 2008年日本顕微鏡学会第64回学術講演会「FIB顕微鏡法による焼結過程のその場観察」
- ・ 2008年日本顕微鏡学会第64回学術講演会「焼結気孔形態の三次元観察と組織分析」
- ・ 2008年日本鉄鋼協会秋季講演大会「繊維強化複合金属の熱間摩耗特性」

### 3 - 2 目標の達成度

表 2 に目標に対する成果・達成度の一覧を示す。

表 2 目標に対する成果・達成度の一覧表

項目	目標・指標	成果	達成度
1) 精密圧延加工技術の開発	<p>1) 特殊なロール圧下成形によりロール表面の溝形状を転写成形することが可能なプロトタイプ機を開発し、高耐食ステンレスセパレータの精密成形加工技術を確立する。</p> <p>2) 本開発の新しい加工法で、板厚 0.1mm 程度の高耐食ステンレス薄板を厚さ 1mm / 枚以下に薄型化した PEFC セパレータに造り込む技術を確立する。</p> <p>【設定条件】</p> <p>1) 高精密ロール圧下成形装置の位置合わせ精度 <math>\pm 10 \mu\text{m}</math> 以下。</p> <p>2) 精密ロール金型の形状精度 <math>\pm 10 \mu\text{m}</math> 以下。</p>	<p>素材厚み 0.1mm の SUS 鋼を用いて、厚み 0.6mm の実機規模 (400cm<sup>2</sup>) サイズのセパレータを製作できた。</p> <p>1) セパレータ形状精度より、位置合わせ精度が <math>\pm 10 \mu\text{m}</math> 以下であることを実証できた。</p> <p>2) ロール金型の主要寸法が <math>\pm 10 \mu\text{m}</math> 以下の寸法精度で製作されていることを確認できた。</p>	達成
2) 高耐久性熱間加工工具材料の開発	<p>現状ハイスロールと比べ、耐摩耗性 4 倍、耐熱衝撃性 3 倍の FRM ロール材を開発する。</p>	<p>HIP 法でハイス鋼粉末とアルミナ繊維 (20vol.%) の FRM 材を試作し、鑄造ハイスロール材に比べて、耐摩耗性が 4 倍 (熱間転動摩耗試験による)、耐熱衝撃性が 3 倍 (落重式摩擦熱衝撃試験による) であることを検証できた。</p>	達成
	<p>この超高耐久性ロール材を用いて、150 程度の加熱炉温度の低温化操業により加熱燃料と圧延動力の合計使用量を 10% 程度削減する。</p> <p>【判断基準】</p> <p>FRM ロール材で通常よりも加熱炉温度を 150 程度低下させて圧延したときと、鑄造ハイスロール材で通常の加熱炉温度で圧延したときとで、ロール摩耗量がほぼ同等であることを確認。</p>	<p>150 程度の加熱炉温度の低温化操業により加熱燃料と圧延動力の合計使用量を 10% 削減可能な目処を得た。</p> <p>熱間コイル圧延実験により、鑄造ハイスロール材を使用して加熱温度 1000 の鋼材を圧延したときの摩耗量と、HIP 法で試作した FRM ロール材を使用して加熱温度 850 の鋼材を圧延したときの摩耗量とがほぼ同等であることが明らかになった。</p>	達成

	<p>焼結反応を解明する目的で1200 までの加熱過程に対応したダイナミックな組織変化を観測する技術を開発し、界面ダイナミクス制御を活用した革新的 LIP 焼結法 (Low Isostatic Pressing) による FRM 材の製造技術確立する。</p> <p>【判断基準】 LIP 焼結法で作成した FRM 材と HIP 焼結法で作成した FRM 材とで耐摩耗性がほぼ同等であることを確認する。</p>	<p>繊維凝集がほとんど発生しない繊維分散混合手法を確立し、高温動的観察手法にて得られた知見を取り入れて最適化された <u>LIP 焼結法によって、10mm×10mm×15mm 程度の FRM 材 (ショア硬度 Hs80 以上) を製作できた。</u></p> <p>この LIP 焼結法で作成した FRM 材の耐摩耗性が、HIP 焼結法で作成した FRM 材の耐摩耗性とほぼ同等であることを、熱間転動摩耗試験機によって確認できた。</p>	<p>達成</p>
--	---	--	-----------

### 1) 精密圧延加工技術の開発

前項の成果より、本開発法を採用した高精度ロール圧下成形プロトタイプ機の試作立ち上げを完了し、素材厚み 0.1mm のステンレス鋼 (SUS316) を用いて、厚み 0.6mm の実機規模 (400cm<sup>2</sup>) サイズのセパレータを安定して製作することができ、目標を達成した。

#### ア) 高精度ロール圧下成形装置の位置合わせ精度 ±10 μ m 以下 (目標 関係) 計画通り進捗、目標達成。

上下金型ロールの位相合わせが可能な調節装置及び位置合わせ調整手段を開発すると共に、上下ロール同期駆動機構を開発し、セパレータをしわ等の欠陥がなく、かつ再現性よく転写成形でき、デジタルマイクロスコープにより形状精度を確認した結果、±10 μ m 以下の精度で成形できており、位置合わせ精度が ±10 μ m 以下であることが実証できた。

#### イ) 精密ロール金型の形状精度 ±10 μ m 以下 (目標 関係) 計画通り進捗、目標達成。

代表的な高合金工具鋼\*である S45C 材 (ショア硬さ Hs34)、SKD61 材 (Hs54)、SKD11 材 (Hs78) の 3 種類についてロール金型の試作を行い、デジタルマイクロスコープにより形状精度を確認した結果、何れの材質についても溝ピッチ、溝高さ、ポンチ肩 R 部などの主要寸法が ±10 μ m 以下の寸法精度で製作されていることを確認できた。

### 2) 高耐久性熱間加工工具材料の開発

前項記載の具体的成果に基づき、耐摩耗性が 4 倍で耐熱衝撃性が 3 倍の FRM 材を開発することができ、LIP 焼結法でも、HIP 焼結法で製造した FRM 材と

同等の性能の FRM 材が製造可能であることを確認でき、最終目標を達成した。

ウ)FRM 材が現状の鑄造ハイスロールに比べて耐摩耗性が 4 倍であることを確認する(目標 関係)

計画通り、目標達成。

熱間転動摩耗試験機によって、FRM 材の耐摩耗性が鑄造ハイスロール材に比べて 4 倍であることが検証できた。

エ)FRM 材が現状の鑄造ハイスロールに比べて耐熱衝撃性が 3 倍であることを確認する(目標 関係)

計画通り、目標達成。

落重式摩擦熱衝撃試験機によって、FRM 材の耐熱衝撃性が鑄造ハイスロール材に比べて 3 倍であることが検証できた。

オ)FRM ロール材を使用して加熱炉温度を通常よりも 150 程度の低下させて圧延した場合の FRM ロール材の耐摩耗性と、鑄造ハイスロール材を使用して通常の加熱炉温度で圧延したときの鑄造ハイスロール材の耐摩耗性とが、ほぼ同等であることを確認する(目標 関係)

計画通り、目標達成。

熱間コイル圧延実験によって、鑄造ハイスロール材で加熱温度 1000 の材料を約 1000m 圧延したときと、FRM 材で加熱温度 850 の材料を約 1000m 圧延したときとで、両者のロールの耐摩耗性がほぼ同レベルであることが確認できた。

カ) LIP 焼結法で作成した FRM 材と HIP 焼結法で作成した FRM 材とで耐摩耗性がほぼ同等であることを確認する(目標 関係)

計画通り、目標達成。

熱間転動摩耗試験機によって、LIP-S 焼結法および LIP-K 焼結法で試作した FRM 材と、HIP 焼結法で試作した FRM 材の耐摩耗性が、ほぼ同等であることが確認でき、LIP 焼結法の原理を実証できた。

#### 4．事業化、波及効果

##### 4 - 1 事業化の見通し

###### 1) 精密圧延加工技術の開発

本研究開発終了後も、研究開発実施者において、引き続き事業化へ向けた自主活動が展開されている。具体的には、本研究の独自の成形手法や成果に関し興味を示している企業に対して、機密保持のもと、本成形品サンプル供給およびユーザー共研を実施し、実用化、実機化を図っている。

本事業計画時、経済産業省の基本計画に基づき、以下に示す事業化の見通しを試算した。本開発法が実用化されると、セパレータ製造ラインを、素材である高耐食ステンレス薄板コイルの製造から極薄ステンレス薄板（箔）製造、セパレータ成形加工、表面処理、仕上工程までをコイル通板による一貫製造連続プロセスに集約でき、極めて生産性の高い量産設備を構築できる可能性がある。燃料電池本格普及時にこの量産設備の実機化を図る事により、低コストで低容積の高耐食ステンレスセパレータの供給が可能となる。

前項と同様に、燃料電池の普及により、燃料電池搭載の乗用車は 2010 年には国内約 5 万台、2020 年には国内約 500 万台になると想定し、自動車用燃料電池に使用されるセパレータ価格を燃料電池実用化戦略研究会で提示されたコスト目標 100 円/枚と設定すると、その市場規模は、以下の如く試算される。

2010 年：100 円/枚 × 800 枚/台 × 5 万台 × 0.5 = 20 億円

2020 年：100 円/枚 × 800 枚/台 × 500 万台 × 0.5 = 2,000 億円

また、燃料電池の普及は、自動車用の普及に留まらず広く一般家庭用及び産業用としての普及も見込まれること、またその燃料である水素の製造、輸送・貯蔵等のインフラ整備等々多くの関連技術、関連産業を必要としていることから、わが国経済への波及効果は極めて大きいと考えられている。経済産業省の「固体燃料電池 / 水素エネルギー利用プログラム」基本計画によれば、燃料電池普及に伴う全体の市場規模は 2010 年で約 1 兆円（年間）、2020 年で約 7 兆円（年間）と見積もられており、またその雇用創出規模は 2010 年で約 2 万人（年間）、2020 年で約 15 万人（年間）と推定されている。これらの試算に基づき前述の市場規模から推定すると、本開発事業により新たに創出される雇用規模は、2020 年には 4,300 人と推定される。

\*  $15 \text{ 万人} \times 2,000 \text{ 億円} \div 7 \text{ 兆円} = 4,300 \text{ 人}$

さらに、リサイクル性の高いステンレス鋼の採用により、国内の鉄鋼需要の再生を図り、資源を有効活用する循環型社会への貢献に大きく寄与できるものと考えられる。

しかしながら、燃料電池車の普及状況は、水素供給インフラ整備の問題，ガ



ソリン車並の航続距離確保の問題，ハイブリッド車や電気自動車の急速な進歩等により、当初に比べ減速傾向にある。現在のところ、公的機関等が示唆する燃料電池車の普及台数に関する明確な予測値はないが、今後、自主研究を進める中、燃料電池を取り巻く周辺環境を常に把握し、市場規模，雇用規模を適宜見直していきたい。

## 2) 高耐久性熱間加工工具材料の開発

本研究開発によって、FRM材が熱延ロールとして優れた耐摩耗性及び耐熱衝撃性を有するものであることが、実験室レベルのサイズの試作材によって確認された。一方、直径480mm、胴長800mmのスリーブロールをFRM材で試作したところ、胴長方向の硬度のバラツキが発生し、大型サイズのFRM材を製作する時の課題の一端も明らかになった。従って、FRM材の実用化には、サイズアップ時の課題を見極めながら、徐々に適用拡大を図る必要があると考えられ、 今後は、実施者の自主研究開発としてFRM材の実用化に取り組む。

LIP焼結法については、小さなサイズの試作サンプルを用いて、提案したLIP焼結法の原理を実証できた。本課題についても、徐々に試作試験片のサイズアップをはかり、実用化に向けた取り組みを自主研究開発として実施する。

FRM材によって圧延ロールを製造するときのコストを試算し、現状の鑄造ハイスロールの価格との比較から、製造コストの観点でFRM材製圧延ロールが十分な実用化の可能性をもつかどうか検討した。表3に示すように、目標通りの性能を有するFRM材が開発されれば、経済性の観点からも十分な実用性をもつ圧延ロールが製造できると考えられる。

表3 FRMロールの製造コスト試算

<p>&lt; 前提条件 &gt;</p> <p>1) ロールサイズ：外径 800mm×胴長 1900mm</p> <p>2) FRM材料：ハイス鋼 + 20vol%アルミナ繊維化 (FRM肉厚 15mm)</p> <p>3) FRMロール構造：外径 800mm、スリーブ肉厚 15mm</p> <p style="padding-left: 40px;">FRM材部の体積：<math>1.5 \times (80 - 1.5) \times 3.14 \times 190 = 70250 \text{ cm}^3</math></p> <p>鑄造ハイスロール構造</p> <p>CPC鑄造法：外径 800mm、スリーブ肉厚 50mm</p> <p>従って、本試算ではFRMロールの耐摩耗性は、50 / 15 3.3倍</p> <p>鑄造ハイスロール (CPC法による) よりも優れている前提になる。</p> <p>また同じ条件で圧延され肉厚分だけロールを使用した場合を想定。</p> <p>&lt; FRMロール製造コスト試算 &gt;</p> <p>1) 素材費 約 553 万円</p> <p style="padding-left: 40px;">ハイス粉末：<math>(70250 \times 0.8 \times 7.8 / 1000) \text{ kg} \times 0.8 \text{ 万円/kg} = 350.4 \text{ 万円}</math></p>	
--	--

アルミナ繊維： $(70250 \times 0.2 \times 3.6 / 1000)$  kg  $\times$  4 万円/kg=202 万円  
 2) 製作加工費 約 950 万円(HIP 法)、約 775 万円(LIP 法)  
 HIP 法の費用試算内訳 250 万円  
 HIP カプセル処理費：50 万円、HIP 処理費：200 万円  
 LIP 法の費用試算内訳 75 万円  
 LIP カプセル処理費：25 万円 (HIP 法の 1/2 と仮定)  
 LIP 処理費：50 万円 (汎用炉使用で HIP 法の 1/3 と仮定)  
 HIP 法及び LIP 法共通費用 700 万円  
 粉末混合・分級・充填費：200 万円、熱処理費：100 万円、  
 ロールシャフト製作費：200 万円、仕上げ加工費：200 万円  
 HIP 法で製造した場合 1503 万円/本  
 LIP 法で製造した場合 1328 万円/本

< 鑄造ハイスロール製造コスト >

CPC 鑄造法の場合：約 1100 万円/本 ~ 1800 万円/本

FRM 材ロールのコスト試算結果は参考値レベルではあるが、鑄造ハイスロールコストと比較して、ほぼ同等レベルであると考えられる。

今回開発する FRM 材は、最終的に熱間圧延用ロールへ適用するが、超耐久性を有することから、あらゆる分野の熱間、冷間加工用工具材として使用することができる。大きく、以下の 4 つの分野での導入予測を述べる。本事業終了時の平成 19 年度末時点では、前提となる粗鋼生産量が本事業開始時よりも大幅に増加していたが、最近の経済情勢の変化から今年度以降粗鋼生産量が本事業開始時と同じレベルに近づくことが予想され、研究開発着手時とそれ程変化が無いと考えられる。

a) 製鉄関連熱間加工用工具市場

日本の粗鋼生産量は約 1 億トン、世界的には約 7 億トンである。日本における熱・冷間加工用工具・ロールの市場規模は約 200 億円、世界では約 1400 億円と推定される。2010 年には国内市場の 5%、2020 年には大物も販売を開始できるようになり 100%が FRM 材で製造されると仮定すると、2010 年には約 10 億円、2020 年には約 200 億円の規模の市場が期待できる。

b) 金型及び鍛造用工具市場

素形材工業・工学年鑑によると平成 10 年度のプレス型の生産金額は約 2000 億円、鍛造型の生産金額は約 150 億円である。2010 年には約 5%、2020 年には 30%のシェアを FRM 材が獲得できると仮定すると、2010 年には約 108 億円、2020 年には約 645 億円の市場が期待できる。

#### c) 鑄造モールド（鑄造時に溶融金属を注ぐ鑄型）市場

鑄造用に使用されるモールドは 50 円/トンであり、鉄鋼製造においては日本で約 1 億トンの生産量であることから、その市場は約 50 億円、世界的には 350 億円と推定される。2010 年は国内市場の約 5%、2020 年には約 30% のシェアを FRM 材が獲得できると仮定すると、2010 年には約 2.5 億円、2020 年には約 30% の 15 億円の市場が期待できる。

#### d) 切削工具市場

平成 10 年の国内市場は 1410 億円、海外も入れると数千億円以上である。単純形状の切削工具チップだけでも国内の生産高は約 800 億円である。2010 年は国内切削工具チップの約 3%、2020 年には約 10% のシェアを FRM 材が獲得できると仮定すると、2010 年には約 40 億円、2020 年には約 140 億円の市場が期待できる。

これら 4 分野の効果を合算すると、現在の市場規模は製鉄用熱間加工工具で 200 億円/年、金型・鍛造用工具で 2,150 億円/年、切削工具で 1,400 億円/年であり、さらに 2010 年及び 2020 年の普及率をそれぞれ、製鉄用熱間加工工具で 5% 及び 100%、金型・鍛造用工具で 5% 及び 30%、鑄造モールドで 5% 及び 30%、切削工具で 3% 及び 10% と仮定すると、2010 年には年間 162.5 億円、2020 年には 1000 億円の市場規模が期待できる。

### 4 - 2 波及効果

#### 1) 精密圧延加工技術の開発

本事業計画時においては、経済産業省の基本計画に基づき、以下に示す波及効果を予想した。

本事業で開発した精密圧延加工技術が実用化され、低コスト、低容積ステンレスセパレータの量産の目処が得られれば、自動車用を中心とした燃料電池の実用化、普及拡大が一段と加速することが期待される。平成 13 年 8 月の経済産業省・燃料電池実用化戦略研究会報告によれば、燃料電池車(乗用車)の普及は 2010 年には 5 万台、2020 年には 500 万台とされている。1 台当たりのセパレータ使用枚数 800 枚/台とし、本事業で開発されたステンレスセパレータのシェアを 50%、エネルギー変換効率をガソリンエンジン車で 13%、燃料電池車で 30% とした場合、ガソリンエンジン車に替わって燃料電池車の普及が促進されると、2010 年には原油換算で 2 万 KI/年、2020 年には 200 万 KI/年の削減に貢献する。また、従来のプレス法による製造を当開発法に代替した場合、前

記のセパレータの生産枚数を想定すると、省エネ効果として原油換算で 2010 年に 0.01 万 KI/年、2020 年に 0.7 万 KI/年の削減が見込まれる。

しかしながら、前項でも言及したように、燃料電池車の普及状況は、水素供給インフラ整備の問題、ガソリン車並の航続距離確保の問題、ハイブリッド車や電気自動車の急速な進歩等により、当初に比べ減速傾向にある。現在のところ、公的機関等が示唆する燃料電池車の普及台数に関する明確な予測値はないが、今後、自主研究を進める中、燃料電池を取り巻く周辺環境を常に把握し、上記の波及効果を適宜見直していきたい。

## 2) 高耐久性熱間加工工具材料の開発

鉄鋼製造の熱間圧延工程での 150 程度の低温操業化により、加熱燃料と圧延動力を合算したエネルギー消費量を 10%程度削減することが期待される。さらに熱間圧延処理量を 93 百万 t/年(2001Fy)との前提に立ち、普及率をそれぞれ 2010 年に 5%、2020 年に 100%とすると、2010 年には原油換算 1.7 万 KI/年(成功率 100%と仮定)、2020 年には原油換算 34.0 万 KI/年(成功率 100%と仮定)の省エネ効果が期待できる。

加えて、熱間圧延ロールに実際に使用されるのは先になるが、小物部材で既に実績効果を得ていることから、製鉄プロセスのローラー部材を中心とした熱間加工工具への適用はいうまでもなく、プレス用の金型及び鍛造用工具への適用、鑄造モールドや切削工具への適用も進むものと期待される。

また、LIP 焼結法が完成すると、HIP 法よりも低コストで同等性能の材料製造が可能になり、安価で従来と同等性能の工具材が供給できることから、加工産業全体に対して、製造コスト削減効果を与えることが推定される他、高価な HIP 装置が導入できない中小企業でも、高性能焼結材料を製造できることで、加工産業の活性化にも寄与できるものと考えられる。

## 5 . 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

### 5 - 1 研究開発計画

本事業では、2 - 1 に記載した目標を達成するため、自動車向け燃料電池用の金属セパレータのような機能部材の成形加工に適用する精密圧延加工技術の開発と、熱間圧延プロセスの操業温度の低温化を実現するのに必要な高耐久性熱間加工工具材料の開発を実施した。本事業の目的を達成するための着眼点や手段に関しては、1 - 4 に記載したとおり、適切な選択であったと考える。本事業で取り組む内容は、シーズ創出・実験室レベルでの原理、特性及び効果の検証段階という位置付けであるが、事業化を視野に入れた実機プロセスでの検証試験なども盛り込み、本研究開発の目的達成だけでなく実用化に向けた検討も実施した。

スケジュールに関しては、最初の3年間で精密圧延加工技術の開発を完遂し、高耐久性熱間加工工具材料の開発を5年間で実行した。これは、高耐久性熱間加工工具材料の開発での最初の実施内容がシーズ検証とLIP焼結技術を開発するのに必要な焼結過程の観察手法という要素技術の開発が必要であったため、5年間のうち前半は精密圧延加工技術の開発とLIP焼結シーズ技術検証および観察手法の要素技術の開発に資源を重点的に投入し、後半はFRM材料の開発とLIP焼結技術の開発に注力した。こうした開発スケジュールの振り分けによって、特定の時期に大きな資源を集中させることなく、かつ効率的な研究推進ができた。実用化に向けて必要と考えられる技術開発課題（例えば、表4の や 、 や ）にも過不足なく、かつ適切な時期に取り組むことができ、研究開発の目的達成に有効な技術知見を創出することができた。

一方、LIP焼結技術の開発過程でLIP焼結法の成否をにぎるポイントが、予成形体を製造する前の均一に原料の粉末や繊維を混合する方法にあるという知見から、表4記載の「セラミック繊維と金属粉体の複合化技術の開発」項目のスケジュールを当初の平成16年度末終了予定から、最終的に平成19年度末まで延長した。粉末混合方法に関する研究スケジュール変更に伴い、LIP焼結条件に関する研究項目である、「-3 動的観察によるFRM組織の最適化」ならびに「-1 最適LIP条件の確立」のスケジュールについても、平成19年度末まで延長した。さらに、本事業当初には予定していなかった、直径400mmの圧延ロール試作を最終年度に実施したことにあわせて、実用化に関する研究項目である、「-2 最適切削技術の開発」、「-1 最適構造体の研究開発」についても最終年度まで延長し、研究開発進捗に応じて臨機応変に開発スケジュールを修正し、本事業目標達成に資する有用な知見を得ることができた。

本事業では、精密圧延加工技術の開発における要素技術開発として、加工

メカニズムの解明と微細反応ガス流路溝成形加工条件の最適化と、高精度圧延一貫製造プロセスの構築を選別・実施した。の要素技術は精密ロール金型の試作に必要な金型加工条件に対して有用な知見を得ることができた。の要素技術は実用化を視野に入れた取組みであり、実用化するときに必要なプロセスイメージを提案するのに必要な技術開発である。また、高耐久性熱間加工工具材料の開発では、焼結反応機構解明のための動的観察技術の開発と、-2最適切削技術の開発、およびFRM新材料の実用化評価を選別・実施した。

の要素技術は、焼結過程を直接観察してFRM材のLIP法による製造技術の確立に有用な焼結メカニズムを解明し、最適な製造条件の確立に資する知見を得るための研究開発である。の要素技術は、FRM材の実用化促進を目的とした実プロセスでのFRM材の性能評価を行うものであり、良好な評価結果が得られた場合は、そのまま当該実プロセスに適用する取組みである。また、ハイステル粉末を使用していることから、焼結後に必要な熱処理条件の検討、様々な形のロールに加工するための切削技術(-2)の開発および大きなサイズのロールを製造するときの構造を検討する内容が含まれている。本事業で実施された要素技術は直接本研究の目的達成に資するものばかりでなく、本研究成果の早期実用化のために重要な要素技術も含まれており、これらのことから本事業の要素技術の選別は適切なものであったと考えられる。

本事業で開発する技術が精密圧延加工技術と高耐久性熱間加工工具材料であることから、圧延技術や成形加工技術に精通し、圧延ロールユーザーでもある当該実施者は本技術開発を担うのに妥当な選択であった。当該実施者が担保している圧延ロール材料の種々の評価技術、省エネルギーの知見、成形加工に関する解析技術および既存研究設備の充実度の観点からも、本事業を推進するのに適切な選択であった。

表 4 研究開発実施課題とスケジュール

項目	15年度	16年度	17年度	18年度	19年度	20年度
<b>1) 精密圧延加工技術の開発</b>			中間評価			事後評価
高精密ロール圧下成形装置の開発 -1) 上下金型ロール位置合わせ機構の開発 -2) 上下金型ロール同期駆動方式の検討		←→				
加工メカニズムの解明と微細反応ガス 流路溝成形加工条件の最適化 -1) 加工メカニズム検討と金型形状の最適化 -2) 成形加工条件の最適化		←→				
精密ロール金型の開発 -1) 金型加工方法の検討 -2) 金型材質の検討		←→				
高精度圧延一貫製造プロセスの構築 -1) 通板機構の検討 -2) 連続切断加工装置の検討			←→			
<b>2) 高耐久性熱間加工工具材料の開発</b>						
セラミックス繊維と金属粉体の複合化 技術の開発 -1) 予成形・加圧セル法の開発 -2) 評価用小片試作・評価		←→				(*1)
焼結反応機構解明の為の動的観察 技術の開発 -1) 高温下での最適観察条件の検討 -2) FRM焼結現象の動的観察 -3) 動的観察によるFRM組織の最適化		←→				(*2)
革新的LIP焼結法による製造技術の開発 -1) 最適LIP条件の確立 -2) 最適切削技術の開発		←→				(*2)
FRM新材料の実用化評価 -1) 最適構造体の研究開発 -2) 最適熱処理条件の研究 -3) 小～大サイズ製鉄部材の試作・評価		←→				(*2)
研究開発費（単位：百万円）	104	89	92	58	57	-
	5年間総額：400					

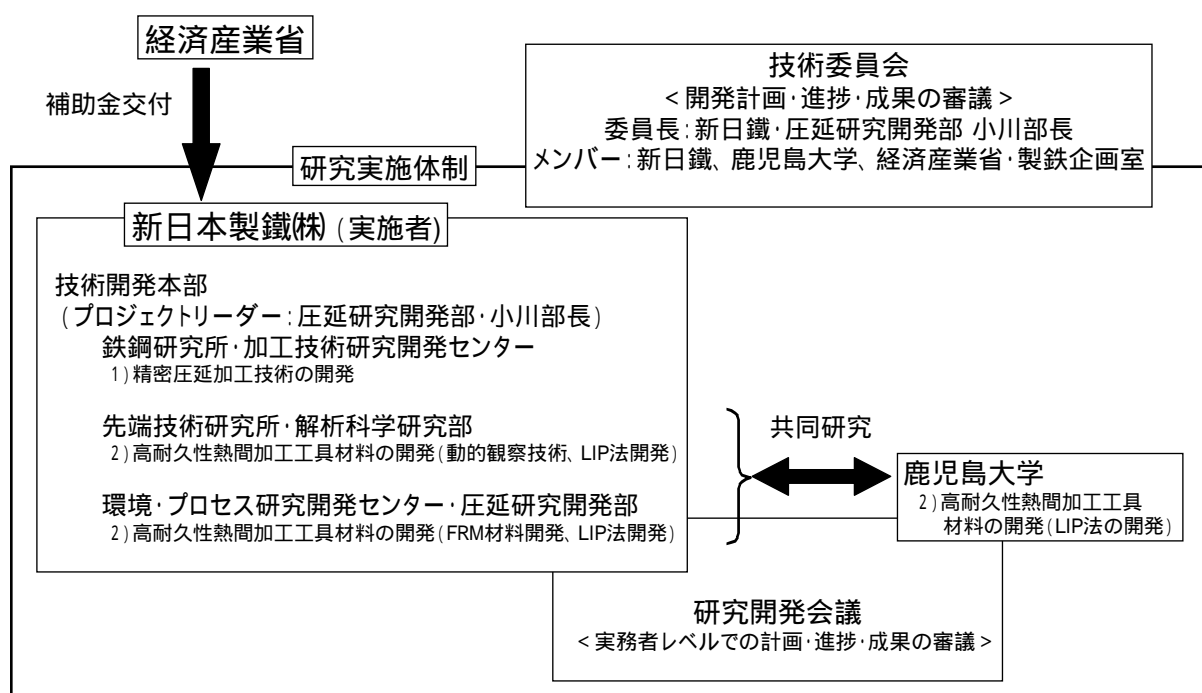
研究開発費は平成15年度～平成19年度の実績

(\*1)平成17年度第1回技術委員会，平成18年度第2回技術委員会にてH19年度まで実施に変更。

(\*2)平成18年度第2回技術委員会にてH19年度まで実施に変更。

## 5 - 2 研究開発実施者の事業体制・運営

本事業は、経済産業省から実施者への補助事業（補助率 2 / 3）であり、研究開発上の必要性から、鹿児島大学と共同で実施した。決定最高機関として「技術委員会」を設置し、基本的に年度 2 回開催し、研究開発進捗状況の確認や開発方針ならびに成果の審議を行った。また、複数の部門が関与する高耐久性熱間加工工具材料の開発に関しては、「研究開発会議」を適宜実施し、各個別課題の研究実務者レベルによる進捗、計画の討議、技術成果の妥当性や課題などの審議を行い、必要に応じて技術委員会への答申等も行う機能をもたせた。本事業の事務局は実施者のプロジェクト構成員が務めて会議運営を補佐した。



研究開発方針および年間実施計画の策定と成果、進捗評価は技術委員会にて審議、承認することで決定した。プロジェクトリーダーは技術委員会委員長（実施者 / 小川研究部長）を兼ねて、圧延技術に基づく広い技術知見や視野から、研究開発全体の運営、管理を行った。

研究開発実施者間の連携については、実施者は民間企業単独であるため、会社同士の連携が問題になることはなく、前項記載の技術委員会、研究開発会議以外にも必要に応じ個別ミーティングを実施し、情報共有に注意をはらって研究開発を推進した。また、鹿児島大学と実施者との連携については、試験場所が離れているため、意思疎通を円滑にすることに注意し、適宜電子メールを多用し、研究進捗状況や成果に関連する情報交換を怠ることなく実施した。



開発された FRM ロール材の実用化に際しては、実施者がロールユーザーであり、ロールメーカーも関連会社としていることから、ロールサプライヤーとユーザーとの両者の技術知見を活用できる立場にあり、円滑な事業化を推進することができた。具体的には、通常実施困難なハイス鋼の熱処理等の製造ノウハウを必要とする作業に関して、実施者の関連会社のロールメーカーに委託することで、短期間で FRM 材の試験片製作が可能になり、FRM 材の耐摩耗性及耐熱衝撃性の評価が早期に実施できた。実プロセスでの試験・評価についても、社内ニーズの円滑な情報収集によって適切なプロセスでの試験が実施できた。また、金属セパレータに関しては当該実施者と自動車メーカーとの間には密接な取引関係、技術サポート関係を構築しており、実用化・普及促進に必要な情報収集機能や技術知見などを入手・活用できる立場にあるので効率的な実用化を推進することができた。

### 5 - 3 資金配分

本研究開発は 5 年間の補助金事業で約 4 億円を投入した。このうち、平成 18 年度と平成 19 年度は補助率 2/3 で、1/3 を実施者負担で行った。精密圧延加工技術の開発においては、本開発法の根幹を成すロール金型の製作に重点投入し（平成 15 年度と平成 16 年度に合計約 3000 万円）、目標どおりの成果を得た。高耐久性熱間加工工具材料の開発においては、初年度に技術確立に時間を要する動的観察手法の設備に資源を重点投入し（平成 15 年度に約 5000 万円）、それ以降は各開発課題に対してバランスよく資金配分し、当初の目標を達成することができた。

表 5 . 資金配分 (単位：百万円)

年度	平成	15	16	17	18	19	合計
精密圧延加工技術の開発		26	27	28	0	0	81
高耐久性熱間加工工具材料の開発		78	62	64	58	57	319
合計		104	89	92	58	57	400

合計額は研究開発費総額。平成 15 年度から平成 17 年度は補助率 100%、平成 18 年度から平成 19 年度は補助率 2/3 のため、補助金総額は 361 百万円。

### 5 - 4 費用対効果等

本事業では、実施者所有の既存設備を流用もしくは改造する等、最大限活用することによって、新たな新規設備導入費用を最小限に抑えた。こうした努力

により比較的少ない資金（総額事業費：4.0 億円）によって新たな技術知見を得ることができた。また、予測される波及効果（熱延工程での省エネフル効果である 2020 年の原油換算省エネ効果のみで約 130 億円(原油価格 40 円/l として算出)) に対して、総投入資金額は約 4% と非常に小さく、十分な投資対効果が得られるものと考えられる。

#### 5 - 5 変化への対応

研究開発期間において、特段、対応が必要となる変化はなかったが、実施者ならびに実施者社内の企画部門において情報を収集し、各年度始めに研究開発計画の検討を行った。

本事業が対象とする技術分野、マーケットの動向は大きく変化しておらず、事業目的、政策課題、位置付け等については、事業発足時と同じ方向性で問題はなく、本事業の重要性、必要性は依然高い。

精密圧延加工技術の開発で適用例としたセパレータは燃料電池の基幹部品であるが、その燃料電池分野については、CO<sub>2</sub> 削減等の地球温暖化問題への対応や省エネルギーの面から重要な技術分野として位置付けられている。また、近年における世界的な開発競争の活発化により環境、エネルギー面からだけでなく産業競争力強化の観点から技術開発を推進すべき戦略的分野として位置付けられている。

セパレータ開発の動向としては、炭素製および金属製セパレータの実用化開発が進みつつある。炭素製では、樹脂と黒鉛を混合して作るセパレータが開発されているが、機械的強度は金属より劣ると共に、素材の厚みは金属より厚肉となるためコンパクト化に対して不利であり、自動車用燃料電池への搭載は実用上難しい。一方、金属セパレータでは、ステンレス鋼、チタン鋼等をベースに耐食性向上を目的に材料開発が数例行われているが、金属セパレータの新しい加工法の開発例は今のところない。従って、本精密圧延加工技術で製造可能となる金属セパレータが実用化されなければ、自動車用燃料電池の実用化は極めて困難になると考えられる。

熱間加工工具材料に関しては、鑄造ハイスロールの材質改善による新ロール開発事例はあるものの、その性能向上代は耐摩耗性で 10～30%程度であり、本事業で開発している FRM ロール材の耐摩耗性 4 倍に匹敵するロール材は開発されていない。(開発段階ではあるが、超硬工具材をロールに適用する研究開発が別機関にて進められている。)従って、現状では対鑄造ハイスロール比数倍オーダーのロール材は存在せず、FRM ロール材の実用化に対する社会的・経済的インパクトは大きい。

参考資料 1 本事業で使用した主要設備リスト

既存設備リスト

設備名称		内 容
小型圧延装置	(1)	小型ロール圧下式加工実験装置(最大荷重 20t)
ステンレス箔製造装置	(1)	ゼンジミア圧延機, 焼鈍炉, スキンパス圧延機, ベルトグライダー等で構成されたステンレス箔製造ライン(弊社光製鐵所保有)。板厚 10~200 $\mu$ m, 板幅 20~400mm のフェライト系, オーステナイト系など各種ステンレス鋼箔の製造可能。
精密旋盤	(1)	研削条件の検討用設備
万能引張圧縮試験機	(1)	機械特性の評価装置
熱間転動摩耗試験機	(2)	熱間における耐摩耗性の評価装置
熱間コイル圧延実験機	(2)	1mm 厚 $\times$ 50mm 幅 $\times$ 1000m 長さのコイル材を 1000 に加熱して最大 40tonf の荷重をかけて 100m/min の速度で圧延可能
落重式摩擦熱衝撃試験機	(2)	急熱急冷による耐熱亀裂性の評価装置
3点曲げ試験機	(2)	曲げ強さ、破壊靱性等の機械特性の評価装置
粉末混合装置	(2)	FRM 混合粉の調合のための装置
焼結試験炉	(2)	加 <sup>o</sup> 封止条件, 低加圧焼結条件検討用設備
電子線マイクロアナライザ	(2)	組織調査、セラミック繊維の分散性等の分析装置
透過電子顕微鏡	(2)	焼結体材料の内部組織をナノレベルで解析可能な分析装置
高温加熱ステージ	(2)	透過電子顕微鏡用の高温加熱ステージ

新規導入設備リスト

デジタルマイクロスコープ	(1)	成形品形状の観察 (5,623 千円)
金型ロール	(1)	精密圧延成形用の試作ロール(29,370 千円)
ダイカットロール	(1)	ロータリーカッティング用(2,000 千円)
成形装置改造	(1)	既設小型圧延機の駆動系を改造, カッタースタンドの増設 (14,167 千円)
材料評価試験機	(1)	材料の成形特性を評価(8,750 千円)
3次元形状自動測定装置	(1)	金型形状寸法測定用(2,840 千円)
入子駒式ダイカッター	(1)	ロータリーカッティング基礎試験用(1,000 千円)
卓上シーム溶接機	(2)	LIP 用金属箔カプセルの溶接(1,958 千円)
試料前処理用ラボカッター	(2)	焼結体の観察用簡易切断装置(870 千円)
フィルタープレス	(2)	繊維凝集防止処理用絞り装置(1,250 千円)
LIP 焼結実験炉	(2)	FRM 材 LIP 焼結炉(13,448 千円)
遊星ボールミル	(2)	繊維と金属粉末の混合装置(1,800 千円)
高温動的組織観察装置	(2)	焼結過程のダイナミック組織観察(51,000 千円)
微小試料抽出装置	(2)	試料抽出のためのマニピュレータ機構(14,000 千円)
高温動的組織観察装置改良	(2)	ダイナミック観察技術の改良装置(10,000 千円)

- (1) : 精密圧延加工技術の開発で使用する設備  
 (2) : 高耐久性熱間加工工具材料の開発で使用する設備

## 1) 精密圧延加工技術の開発に関する用語集

### 固体高分子型燃料電池 (PEFC)

燃料極と空気極の間で、数十ミクロン厚程度の固体高分子膜を介して水素イオンを移動させるタイプの燃料電池で PEFC ( Polymer Electrolyte Fuel Cell ) と略称される。この PEFC は自動車用、携帯発電機用、小容量コジェネ用といった幅広い用途が期待されている。PEFC の特徴は出力密度が高くできることから、小型化・軽量化が可能であり、また常温でも発電も可能であることから、特に自動車用燃料電池として期待されている。開発課題は、低コスト化、小容積化、軽量化である。

PEFC は、セパレータ、電極、電解質膜より構成される。

### セパレータ

固体高分子型燃料電池の重要な構成要素で、燃料 ( 水素 ) と空気を隔てる隔壁の役目を果たす。現在は合成黒鉛や黒鉛と樹脂との混合材料が用いられているが、燃料電池の低コスト化、小容量化及び軽量化の為に、金属材料を使用したセパレータの開発が期待されている。その為に耐食性や導電性等の向上が必要である。

### ダイカットロール

印刷された紙などをその図柄等に合わせて効率よく打ち抜くときに、表面に刃を加工したロールと軟質ロールで紙を挟んで連続的に打ち抜く方法が用いられる。この刃を表面に施したロールをダイカットロールといい、この方法により大量の打ち抜きを短時間に、かつ精度よく行うことができる。今回の提案では、このダイカットロールの製造方法を利用して、今回セパレータ用の精密加工用ロール金型を試作する。

### 金型工具鋼

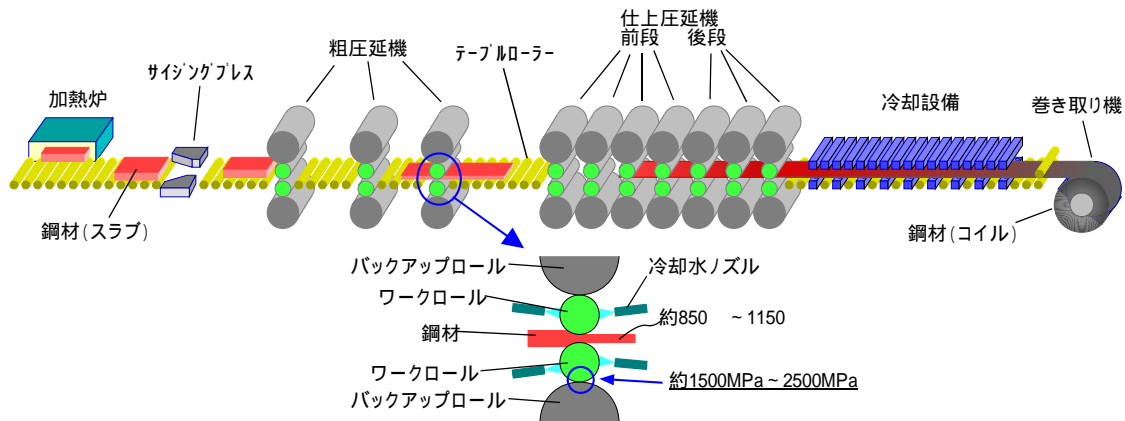
0.3 ~ 2.0% の炭素を含む鋼で、硬さと耐磨耗性に優れ、金属加工に用いられる金型等に用いられる。代表的な金型工具鋼は、クロム ( Cr )、モリブデン ( Mo ) およびバナジウム ( V ) などの特殊元素を添加して硬さと耐磨耗性などの特性を改善した SKD11 ( 冷間金型用合金工具鋼 / 冷間ダイス鋼 )、SKD61 ( 熱間金型用合金工具鋼 / 熱間ダイス鋼 ) が挙げられる。また、使用条件が厳しくない場合は S 4 5 C などの機械

構造用炭素鋼材が金型に用いられる。

## 2) 高耐久性熱間加工工具材料の開発に関する用語集

### ワークロール

薄板、厚板、H形鋼、線材など種々の鋼材の圧延において、鋼材と直接接触して鋼材を変形させるための圧延用工具(圧延ロール)。使用される場所、鋼材の種類によって使用される材質が異なり、例えば、薄板の熱間圧延プロセス(下記の参考図1を参照)の仕上圧延機の前段ではハイスロール材が使用されている。(参考図1では、緑色のワークロールが本研究開発のFRMロール材を適用しようとしているメインターゲットの圧延ロールである)



参考図1 代表的な薄板の熱間圧延プロセス例

### セラミックス繊維強化金属(FRM)

金属材料にアルミナやSiC等の繊維を均一に混入させて、金属基の持つ高強度や高靱性に加えて、耐熱性や耐摩耗性等の特性を向上させた複合材料。FRM(Fiber Reinforced Metals)と略称する。製法は材料により種々考案されているが、セラミックス繊維を均一に分布させることが必要となる。

### ハイスロール

高速度鋼の成分を基本とした耐熱工具鋼で作った熱間圧延用ロール。耐摩耗性を向上させるため、C量を増やし、析出炭化物(VC、(Mo・W)C)による耐摩耗性の向上効果をねらったもの。ただし靱性の点から、耐ク

ラック性にやや問題がある。

### ニッケルグレンロール

高 C、Ni 含有組成により焼入性を向上させた黒鉛晶出型鑄鉄製熱間用ロール。焼入性向上と Fe 炭化物による耐摩耗性および黒鉛晶出で耐亀裂、耐焼付き性をねらったもの。耐摩耗性はハイスロールに劣るものの、現在も熱延最終スタンドで使用されている。

### H I P

圧力容器中で粉末材料を、アルゴン等の不活性ガスにより通常 100MPa 以上の圧力と 1000 以上の温度で加圧処理をする方法で、高温下での高い等方性圧力により焼結や欠陥除去等を行う技術。HIP( Hot Isostatic Pressing ) と略称。拡散接合や高圧含浸炭素化等にも利用する。

### 界面ダイナミクス観察

高温下で、金属粒子あるいはセラミックス繊維が焼結するさいの界面の動く様子を直接観察する技術。本プロジェクトでは、観察手法として集束イオンビーム装置の機能の一つである、走査イオン顕微鏡法により開発した加熱ステージを用いて観察する。

### ネッキング

粒子同士が互いに接着した部分から合体が始まり、丁度首が太くなるように曲面が鈍化していくため、ネッキング現象と呼ばれている。焼結初期過程の粒子界面の挙動を説明する言葉である。

### 集束イオンビーム ( FIB )

Ga イオンビームを細く絞って対象試料に走査線として照射し、発生する二次電子を同期させて検出することにより、照射部位の組織変化を直接観察する技術。同時に照射するイオンビームにより、目的とする試料表層部を加工することができ、その試料組織の内部構造を、断面組織として観察することができる。FIB ( Focused ion beam technology ) と略称する。観察された像は、走査イオン顕微鏡像 SIM ( Scanning Ion Microscopy ) と呼ぶ。

## 第3章 評価

### 第3章 評価

#### 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

本研究開発は、燃料電池の主要部品となるセパレータをステンレス薄板から成形製造する技術開発を行うとともに、圧延プロセスの更なる省エネルギー化に資する次世代圧延ロール用の材料開発を実施するもので、国民・社会のニーズに合致し、事業の目的は非常に重要で、政策的位置付けは極めて明確である。

後発国の製鉄技術向上が顕著な中、特殊鋼の精密圧延加工に着目したことは独創性・革新性があり産業競争力向上の観点からも、社会的意義が認められる。また、燃料電池等将来的な技術課題への取組は、一企業で行うにはリスクが大きく、補助金事業として国が支援することは適切である。

#### 【肯定的意見】

韓国・中国など後発メーカーが技術力向上を進める中、特殊鋼に代表される、超高級鋼の分野で差別化を図ることで、日本メーカーはプレゼンスを保持すべき。そうした観点から研究開発テーマとしては望ましい。製品に近い下工程である「圧延技術」は一般的には各企業が技術を開示し合って共同で進めることが難しい面もあるが、革新的な技術開発により従来の常識を打ち破るブレークスルーを期待したい。

目前に迫った燃料電池の実用化に必要な主要部品の開発は、国策的にも重要なものであり、資金的に国のサポートは適切である。

燃料電池用セパレータ、高耐久性熱間加工工具とも、社会ニーズ、企業ニーズに合致している。省エネ、産業競争力向上等の面から本事業の政策的意義は高い。助成事業であり、官民の役割分担は適切である。

精密圧延加工技術開発は、燃料電池用セパレータの開発で、重要ではあるが、全体システムが将来の課題であり、一企業で開発するにはリスクが大きい。したがって、国のプロジェクトとして意義がある。

今後の普及が期待される燃料電池用セパレータの開発および省エネルギーのための圧延プロセス低温下を目的とした加工工具材料の開発は、国の事業として重要であり、目的・政策的位置付けも明確である。

#### 【問題点・改善すべき点】

なし。



## 2. 研究開発等の目標の妥当性

それぞれのテーマにおいて、具体的な開発目標が設定されており、また、その根拠も明確であり適切である。特に、燃料電池の主要部材の開発において、強度、重量で具体的な優位性を設定し、それを実現した点については、評価できる。

### 【肯定的意見】

数値目標を含めて明確である。その設定根拠も分かりやすく説明されている。

燃料電池の主要部材の開発において、強度、重量で具体的な優位性を設定し、それを実現したのは適切である。圧延ロールの開発において、従来よりも高強度、高耐久性を設定し、達成した。

具体的な目標が示されている。

それぞれの技術開発について具体的な開発目標が定められている。その設定も問題ない。

目標性能が具体的数値で明記されており、またその根拠についても明確に記されている。

### 【問題点・改善すべき点】

なし。

### 3. 成果、目標の達成度の妥当性

燃料電池用ステンレスセパレータの精密成形加工技術の確立、熱間加工用セラミック繊維強化金属の開発等、設定した目標値全てを達成した。

特許出願も多数あり、有意義な研究開発であったと評価できる。

#### 【肯定的意見】

目標を達成したことにつき、明確で分かり易く示されている。特許出願も多数あり、有意義な研究開発であったと評価できる。

精密な加工が困難なステンレス鋼を、厳密な精度で加工しており、十分目標を達成できた。圧延ロールはアルミナ繊維とハイス鋼の複合化を達成し、目標を達成した。

高い成果が実現している。波及効果には大きいものがある。

いずれの技術開発も目標値を明確に達成している。ただ、特に大幅に上回る成果はない。

燃料電池用ステンレスセパレータの精密成形加工技術の確立、熱間加工用セラミック繊維強化金属の開発等、設定した目標値全てを達成した。

#### 【問題点・改善すべき点】

なし。

#### 4. 事業化、波及効果についての妥当性

今後の普及が期待される燃料電池用のセパレータは注目されている技術であり、安価に量産化ができれば燃料電池の普及に大きく寄与できると期待できる。また、熱間加工用セラミック繊維強化金属においてL I P焼結法のプロセス開発は実用化の可能性が高いと考えられ、さらに、圧延ロール以外への適用可能性も検討されており、波及効果の広がりが期待できる。

今後、実用化に向けた更なる自主研究の推進が期待される。

#### 【肯定的意見】

画期的なプロセスであり、実用化した場合の波及効果は大きいと見られる。燃料電池の普及次第だが、将来が楽しみな技術だとの印象を強く持つ。

燃料電池の高性能主要部材が安価で製造でき、量産化ができれば燃料電池の普及は飛躍的に促進されると期待できる。アルミナ繊維とハイス鋼の複合化は、圧延ロールの高寿命化が可能で、他の部材にも適用できると思われる。

研究開発の成果は事業化の前提をクリアしたものと考えます。今後、さらに実用化に向けた自主研究を期待する。

F R M材のL I P焼結法のプロセス開発は実用化が間違いないと思われる。また燃料電池用セパレータも燃料電池が軌道に乗れば使用される可能性は高い。F R M材のL I P焼結法は他の製品にも波及する可能性がある。

今後の普及が期待される燃料電池用のセパレータは注目されている技術であり、また、熱間加工用セラミック繊維強化金属については圧延ロール以外への適用可能性も検討しており、事業化、波及効果が期待できる。

#### 【問題点・改善すべき点】

実用化のためには、ユーザとの共同研究などに、一層力を入れるべきだと考える。今後の燃料電池の普及は水素インフラの整備および燃料電池の信頼性向上・低コスト化と関連し流動的である。実際に本事業で開発したセパレータの事業化は、このような周囲の状況により変化する可能性があることも考慮すべきである。

## 5 . 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

本プロジェクトの研究開発計画、実施体制・マネジメントは適切かつ妥当であったと考えられる。

体制においては、燃料電池普及の大きな分野である自動車メーカーからも適切な情報収集を行っており評価できる。費用対効果は十分であり、燃料電池車の開発に重要な技術となる。

### 【肯定的意見】

投資対効果などから考えて、効率的な研究開発が実施できたと評価できる。計画変更も柔軟に実施した。

目標が具体的であり、それに対しての体制、資金投入ほか妥当と思われる。

研究開発計画、実施体制・運営などは適切かつ妥当であった。

計画・実施体制には問題ない。資金的にも無駄はなかったと思われる。波及効果は明確でないが、可能性はある。費用対効果は十分であり、燃料電池車が開発されれば、重要な技術である。

体制においては、燃料電池普及の大きな分野である自動車メーカーからも適切な情報収集を行っており評価できる。また、比較的少額の研究資金で当初の目標は達成されているため、研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等は非常に良かったと判断する。

### 【問題点・改善すべき点】

なし。

## 6 . 総合評価

燃料電池の主要部品となるセパレータをステンレス薄板から成形製造する技術開発を行うとともに、圧延プロセスの更なる省エネルギー化に資する次世代圧延ロール用の材料開発を目指した本プロジェクトは、国が関与する事業として政策的位置付けも明確であり、社会的意義も大きく、妥当であった。研究開発のマネジメントも適切に行われたと評価できる。

また、目標も妥当で、低コストの圧延加工技術を用いて燃料電池用セパレータを製造する技術を確立するとともに、省エネルギーに資するための熱間加工工具材料を開発した点は評価できる。開発された技術は、既存技術に代替しうる内容であり、世界初の試みも取り入れて成果を達成した。

なお、開発した成果を活かしていくため、今後は燃料電池車の普及度合いなど社会情勢や技術シーズを見極めながら実用化に向けた研究開発のスピードやターゲットを柔軟に見直していくことが望まれる。

### 【肯定的意見】

既存技術に代替しうる内容であり、世界初の試みも取り入れて有意義に成果を達成したとの印象を持つ。

燃料電池の開発は国際的に熾烈な競争下にあり、性能的に優位な本技術が早期に実用化されることが熱望される。ハイス粉末とアルミナ繊維の複合化は、高性能ロールの製造に期待できるものである。

研究開発目標を達成し、高い成果をあげている。我が国の圧延事業の競争力向上に寄与することとなると考えます。今後、市場ニーズを踏まえながら、事業化への自主研究が進むものと期待する。

非常に基本的な生産技術開発であるが、このような積み重ねが日本の技術力を支えることになっており、これからも推進すべき。

低コストの圧延加工技術を用いて燃料電池用セパレータを製造する技術を確立するとともに、省エネルギーに資するための熱間加工工具材料を開発した点は評価できる。

### 【問題点・改善すべき点】

燃料電池車の普及度合いなど社会情勢や技術シーズを見極めながら研究開発のスピードやターゲットを柔軟に見直していく必要があると思われる。

PEFC燃料電池の普及が今後どのように進んでいくのかが、本事業で開発した技術の事業化に向けた課題である。

## 7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

精密圧延加工技術の開発は、燃料電池の国際的競争力向上に資する技術と考えられ、早期の事業化が望まれる。高耐久性熱間加工工具材料の開発は、ハイス粉末とアルミナ繊維の複合化により画期的な耐久性をもたせるもので、熱間加工工具の長寿命化によりコスト削減効果が期待される。

燃料電池セパレータについては、実際に燃料電池に用いて性能評価を行い、これまでのものと遜色のない性能を示すことは確認されているが、燃料電池は長時間使用するものであるため、耐久性も問題になると思われる。また、使用するステンレス薄板の厚さがシステム全体の重量に大きく影響するため、開発した技術による使用限界ステンレス板厚についても明らかにしていくことが望まれる。

### 【各委員の提言】

このような世界の最先端を行く技術を次々と開発していくことが、国益に叶い、日本製造業全体の競争力を底上げする底力になると考えられる。大いに期待したい。精密圧延加工技術の開発は、燃料電池の国際的な競争を行う上でわが国を優位なものにする技術と思われる。早期の事業化が望まれる。高耐久性熱間加工工具材料の開発は、ハイス粉末とアルミナ繊維の複合化により画期的な耐久性をもたせるものである。熱間加工工具の長寿命化が、コスト削減効果も期待でき、実用化が望まれる。

今後、市場ニーズを踏まえながら、事業化への自主研究が進むものと期待する。今回の実施された両技術とも目標、成果十分である。ただし、圧延というキーワードで二つの異なったプロジェクトを合体しているように見える。両者のプロジェクト間の関係がわかりにくい。その懸念をなくすためには、両技術開発から出てくる普遍的な開発事項を見つけて整理することが望まれる。

本事業で開発した燃料電池セパレータは、実際に燃料電池に用いて性能評価を行い、これまでのものと遜色のない性能を示すことは確認されているが、燃料電池は長時間使用するため、耐久性も問題になると思われる。また、使用するステンレス薄板の厚さがトータルの重量に大きくきいてくるため、開発した技術の使用限界ステンレス板厚についても明らかにする必要があると思われる。

## 8. 個別要素技術に関するコメント

### 精密圧延加工技術の開発

#### 【成果に対する評価】

目標の達成が明確に示されている。

精度高い加工が必要とされる技術であるが、所定の目標を達成した。

研究開発目標を十分に達成している。燃料電池の低コスト化に貢献することとなる。

将来、非常に重要な意味を持つ技術開発がなされている。

安価な圧延技術で燃料電池用セパレータを開発できた意義は大きい。

#### 【事業化の見通しに関する評価】

大きな波及効果が期待できるため、ユーザとの共同研究などにより一層の技術向上を期待したい。

燃料電池の競争力を高める技術であり、早期の事業化が期待される。

今後の市場動向を踏まえながら、さらなる自主研究の継続を期待します。

燃料電池の普及には水素インフラの整備が欠かせないため、今後のインフラ整備の進展が事業化の進展のカギになると思われる。

### 高耐久性熱間加工工具材料の開発

#### 【成果に対する評価】

目標の達成が明確に示されている。

本技術は過酷な使用にさらされる圧延ロールの長寿命化を可能とするものである。

研究開発目標を十分に達成している。

目標を十分達成し、波及効果も期待できる。

省エネに資するFRMロール材を開発した意義は大きい。

#### 【事業化の見通しに関する評価】

実機化に向けての課題と大凡の時間軸をもう少し具体的に示すことが望ましいと考える。

ハイス粉末とアルミナ繊維の複合化技術は完成しているが、事業化のためにLIP法による製造条件の確立が期待される。

今後、新技術のサイズアップによる課題解決、経済性向上、用途拡大を含めた自主研究の継続を期待します。

製造コストの観点からLIP法の方が優れているため、事業化に向けては、LIP法の大

型化への適用を中心とした研究開発の継続を期待する。



## 第4章 評点法による評点結果

## 第4章 評点法による評点結果

「難加工性特殊鋼等に対する次世代圧延技術の開発」に係るプロジェクト評価の実施に併せて、以下に基づき、本評価検討会委員による「評点法による評価」を実施した。その結果は「3. 評点結果」のとおりである。

### 1. 趣旨

評点法による評価については、産業技術審議会評価部会の下で平成11年度に評価を行った研究開発事業(39プロジェクト)について「試行」を行い、本格的導入の是非について評価部会において検討を行ってきたところである。その結果、第9回評価部会(平成12年5月12日開催)において、評価手法としての評点法について、

(1)数値での提示は評価結果の全体的傾向の把握に有効である、

(2)個々のプロジェクト毎に評価者は異なっても相対評価はある程度可能である、との判断がなされ、これを受けて今後のプロジェクト評価において評点法による評価を行っていくことが確認されている。

また、平成17年4月1日に改定された「経済産業省技術評価指針」においても、プロジェクト評価の実施に当たって、評点法の活用による評価の定量化を行うことが規定されている。

これらを踏まえ、プロジェクトの中間・事後評価においては、

(1)評価結果をできる限りわかりやすく提示すること、

(2)プロジェクト間の相対評価がある程度可能となるようにすること、

を目的として、評価委員全員による評点法による評価を実施することとする。

本評点法は、各評価委員の概括的な判断に基づき点数による評価を行うもので、評価報告書を取りまとめる際の議論の参考に供するとともに、それ自体評価報告書を補足する資料とする。また、評点法は研究開発制度評価にも活用する。

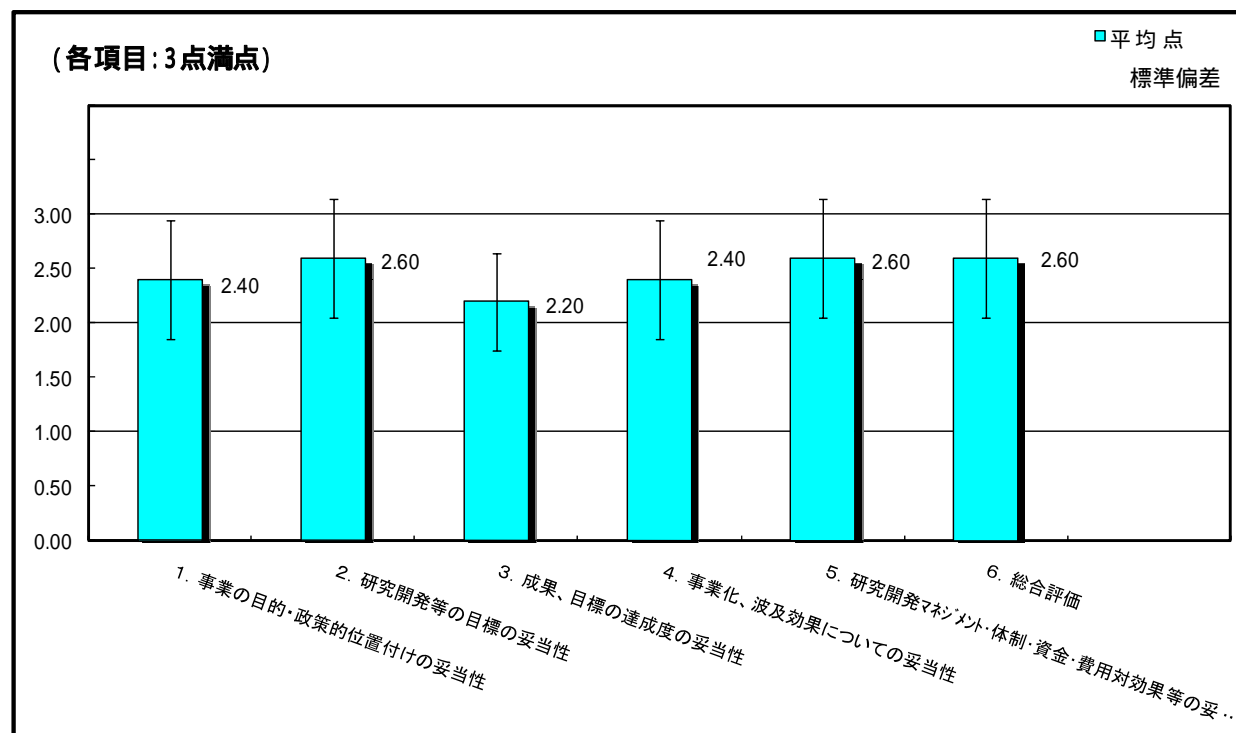
### 2. 評価方法

- ・各項目ごとに4段階(A(優)、B(良)、C(可)、D(不可)<a, b, c, dも同様>)で評価する。
- ・4段階はそれぞれ、A(a)=3点、B(b)=2点、C(c)=1点、D(d)=0点に該当する。
- ・評価シートの記入に際しては、評価シートの《判定基準》に示された基準を参照し、該当と思われる段階に を付ける。
- ・大項目(A, B, C, D)及び小項目(a, b, c, d)は、それぞれ別に評点を付ける。
- ・総合評価は、各項目の評点とは別に、プロジェクト全体に総合点を付ける。

### 3. 評点結果

#### 評点法による評点結果 (難加工性特殊鋼等に対する次世代圧延技術の開発)

評価項目	平均点	標準偏差
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.40	0.55
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.60	0.55
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.20	0.45
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.40	0.55
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.60	0.55
6. 総合評価	2.60	0.55





「難加工性特殊鋼に対する次世代圧延技術の開発」プロジェクト評価(事後)

今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針

提 言	対 処 方 針
<p>精密圧延加工技術の開発は、燃料電池の国際的競争力向上に資する技術と考えられ、早期の事業化が望まれる。高耐久性熱間加工工具材料の開発は、ハイス粉末とアルミナ繊維の複合化により画期的な耐久性をもたせるもので、熱間加工工具の長寿命化によりコスト削減効果が期待される。</p> <p>燃料電池セパレータについては、実際に燃料電池に用いて性能評価を行い、これまでのものと遜色のない性能を示すことは確認されているが、燃料電池は長時間使用するものであるため、耐久性も問題になると思われる。また、使用するステンレス薄板の厚さがシステム全体の重量に大きく影響するため、開発した技術による使用限界ステンレス板厚についても明らかにしていくことが望まれる。</p>	<p>実施者において、燃料電池用ステンレスセパレータ製造プロセスは、市場動向等を勘案し早期の事業化を、FRM圧延ロール材は、多様な分野への適応を図ることとしている。いずれも、従来にない難加工圧延プロセスであるが、さらなるコスト削減効果を目指し、実機導入に向け、引き続き研究を進める。</p> <p>また、実際に製造プロセスへの展開が図られた場合には、加工鋼材の板厚が製品価値に大きく影響を与えることから、使用限界ステンレス板厚を把握するための製品イメージを持った加工データベースの整備を促していくこととしている。当省としても事業展開が円滑に進むよう、環境整備を進めてまいりたい。</p>