

平成 28 年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「鋳鉄の耐摩耗性の向上及び安定化技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 29 年 5 月

担当局	東北経済産業局
補助事業者	有限会社渡辺鋳造所
	公益財団法人山形県産業技術振興機構

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1－1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1－2 研究体制 （研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）
- 1－3 成果概要
- 1－4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 2－1 黒鉛組織微細化技術の開発
- 2－2 熱処理による硬さ制御技術の確立
- 2－3 機器分析の精度向上
- 2－4 機械加工条件の確立
- 2－5 耐摩耗性評価手法の確立
- 2－6 補修溶接及び肉盛溶接技術の確立

最終章 全体総括

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

本研究開発の対象部材は、エレベータ用シーブ（綱車）並びに高張力鋼板（ハイテン材）の曲げ加工に用いられるホットプレス用金型に用いる大型の鑄鉄部材である。これらの部材に共通して求められる特性は耐摩耗性であり、川下企業からは必要な硬さを確保すること、並びに硬さのばらつきを小さく抑えることが要求されている。これを実現するためには、材料における金属組織の均質化（微細化）を図った上で、材料の硬さを向上させるための技術を開発することが必要である。

本事業では、本グループが開発した独自材料である「マルテンサイト球状黒鉛鑄鉄」を対象として、鑄鉄部材の硬さに及ぼす溶湯処理、化学組成、熱処理の効果を明らかにし、川下企業のニーズに応えることを目標とした。また、実用化する上で必須となる付帯技術の確立、並びに品質管理・品質保証上必要となる研究開発も実施した。

【川下製造業者等の抱える課題及びニーズ】

（五）立体造形に係る技術に関する事項

（三）川下分野横断的な共通の事項

- ①川下製造業者等の共通の課題及びニーズ（イ、品質保証、ウ、長寿命化、オ、生産性、効率化の向上、低コスト化）

（四）川下分野特有の事項

4）その他の川下分野に関する事項

ア、自動車分野に関する事項

- ①川下製造業者等の特有の課題及びニーズ（エ、新素材への対応）

【研究開発の高度化目標】

（三）川下分野横断的な共通の事項

イ、品質の保証及び向上に資する技術の確立

マルテンサイト球状黒鉛鑄鉄の材質を安定化させるためには化学組成を管理することが重要となる。しかし、分析精度に悪影響を及ぼす「黒鉛の晶出」を完全に防ぐことができないため、従来の分析手法では精確な分析値を得られないことがわかっている。そこで、本研究開発では機器分析の精度向上を高度化目標とした。また、シーブの品質は現状では硬さで管理しているが、硬さと実験室的な摩耗試験の結果との間には必ずしも高い相関関係がないことがよく知られており、実製品の摩耗特性の指標となる摩耗試験方法の確立が必要である。そこで、本研究開発では、シーブ材料の耐摩耗性評価技術の開発を高度化目標とした。

ウ、長寿命化に資する技術の向上

エレベータ用シーブでは、ワイヤロープを傷めないこと、かつシーブ自身が摩耗しないこと（メンテナンスフリー）という絶対条件がある。そのため、川下企業から硬さ 350～450HBW となる材料の開発を要求されている。また、プレス用金型においても、安定した耐摩耗性を確保するためには硬さの制御が必須である。そこで、本研究開発では、マルテンサイト球状黒鉛鑄鉄製大型部材における硬さ制御技術の確立を高度化目標とした。また、エレベータシーブにおけるロープ溝の加工精度は、振動や揺れ等のエレベータの基本性能に直接影響するため、厳しい精度管

理が要求される。そこで、本研究開発では、マルテンサイト球状黒鉛鑄鉄材料の切削加工条件の確立を高度化目標とした。

(4) 川下分野特有の事項

4) その他の川下分野に関する事項

a. 自動車分野に関する事項

ア. 衝突安全に寄与する部品の実用化

ウ. 精密成形加工、金型内組立加工の向上

ハイテン用ホットプレス金型では金型内に設けた流路に冷却水を流して温度調節（温調）をする必要があるが、従来の金型では機械加工による直線的な流路しか設けることができないため、温度分布の不均一に起因する割れや欠けが生じやすい。一方、耐摩耗性に優れたマルテンサイト球状黒鉛鑄鉄を金型に適用することができれば、予め曲げ加工を施した三次元的な流路（配管）を鑄ぐるむことができるため、耐摩耗性の確保並びに精密で効率的な温調が可能となり割れや欠けを防止することができる。しかし、マルテンサイト球状黒鉛鑄鉄をハイテン用ホットプレス金型として使用するためには、補修溶接技術並びに設計変更に対応するための肉盛溶接技術が必須である。そこで、本研究開発ではマルテンサイト球状黒鉛鑄鉄の補修溶接及び肉盛溶接技術の確立を高度化目標とした。

【研究開発の技術的目標値と実施結果】

サブテーマ	目標値	結果
【1】黒鉛組織微細化技術の開発		
【1-1】黒鉛組織微細化の実験室的検討	黒鉛粒径：平均 20 μm 以下	18 μm （達成）
【1-2】黒鉛組織微細化技術の現場での応用	黒鉛粒径：平均 30 μm 以下	18～21 μm （達成）
【2】熱処理による硬さ制御技術の確立		
【2-1】試験片における熱処理条件の検討	合金組成及び熱処理による組織及び硬さの変化の把握	Mn 添加、熱処理時間の影響等を把握し、【2-2】へ反映（達成）
【2-2】大型シープの熱処理条件の検討	目標硬さ (350～450HBW) $\pm 20\text{HBW}$	目標を満たす焼戻し曲線を作成（達成）
【3】機器分析の精度向上		
【3-1】機器分析における分析手法の検討	C：化学分析値 $\pm 0.2\%$ Si：化学分析値 $\pm 0.2\%$ Ni：化学分析値 $\pm 0.3\%$ Mn：化学分析値 $\pm 0.05\%$	C：誤差 0.18%以内（達成） Si：誤差 0.02%以内（達成） Ni：誤差 0.11%以内（達成） Mn：誤差 0.03%以内（達成）
【3-2】現場での分析手法の最適化	元素に応じた分析方法（装置、補正等）の標準化	分析方法：2 元素 発光分光分析 3 元素 蛍光 X 線分析 試験片形状：ディスク状
【4】機械加工条件の確立		
【4-1】試験片における加工条件の検討	丸棒試験片を用いた切削条件の把握	切込量の影響大（最適条件把握）
【4-2】シープの加工条件の確立	溝加工の精度（寸法公差）：50 μm 以内	19 μm （達成）
【5】耐摩耗性評価手法の確立		
【5-1】シープ材料の摩耗試験方法の検討	シープの摩耗を評価する試験法の確立	ボールオンディスク試験を選定

【5-2】開発材料の耐摩耗性評価	摩耗試験方法と耐摩耗性の検証	摩耗機構の解明、開発材の優位性（ころがり摩耗）の確認
【6】補修溶接及び肉盛溶接技術の確立		
【6-1】溶接による鋳鉄の組織変化の調査	溶接条件（溶加材、予熱・後熱）と硬さとの関係の把握	溶接方法：TIG 溶接 溶加材、予熱後熱条件の把握
【6-2】プレス金型への適用	溶着金属及び熱影響部と母材の硬度差：100HBW 以内	78HBW（達成）

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

総括研究代表者（PL） 山形県工業技術センター 専門研究員 松木俊朗
 副総括研究代表者（SL） 有限会社渡辺鋳造所 代表取締役 渡辺利隆

事業管理機関

研究等実施機関

有限会社渡辺鋳造所（代表）

有限会社渡辺鋳造所
 株式会社ナガセ
 ワタナベ・コア有限会社

公益財団法人山形県産業技術振興機構

山形県（山形県工業技術センター）
 国立大学法人秋田大学

アドバイザー 川下企業 2名、学術機関等 4名

1-3 成果概要

本研究開発において、マルテンサイト球状黒鉛鋳鉄の組織を改質するとともに、化学組成、熱処理条件が組織や硬さに及ぼす影響を詳細に調査し、これらを管理する体制も整えた結果、従来技術では提供できなかった大型の高硬度エレベータシーブを現場で安定して製造することが可能となった。また、シーブの加工技術を確立することにより、ユーザが求める加工込みでの納品に応えることも可能となった。さらに、マルテンサイト球状黒鉛鋳鉄の溶接技術の確立により、プレス用金型といった新たな用途への展開も可能となった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

有限会社渡辺鋳造所 代表取締役 渡辺 利隆
 電話 023-643-7010 FAX 023-643-7013
 E-mail watana-f@jan.ne.jp

第2章 本論

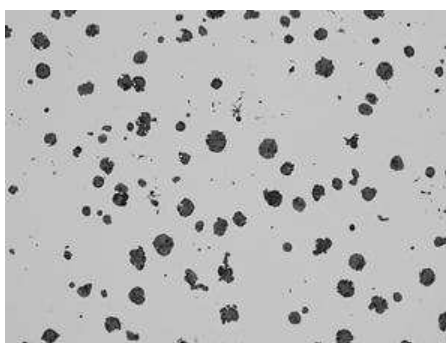
2-1 黒鉛組織微細化技術の開発

2-1-1 黒鉛組織微細化の実験室的検討

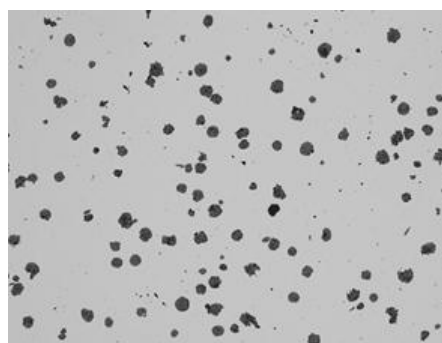
溶湯処理手法や微量元素の有無を変えた溶湯によりマルテンサイト球状黒鉛鑄鉄の試験片を作製し、組織や硬さに及ぼす溶湯処理の影響を調査した。実験室的な検討の結果、適切な溶湯処理を施すことで、目標とした平均黒鉛粒径 $20\mu\text{m}$ 以下を達成した。また、マルテンサイト組織内の元素分布等も明らかにした。

2-1-2 黒鉛組織微細化技術の現場での応用

シーブ（ $\phi 200$ 及び $\phi 1000\text{mm}$ 級）の試作鑄造を行い、溶湯処理を効果的に行うことで、組織の微細化を目指した。その結果、現場における検討の結果、目標の平均黒鉛粒径 $30\mu\text{m}$ に対して、適切な接種処理により平均黒鉛粒径 $20\mu\text{m}$ を達成した。

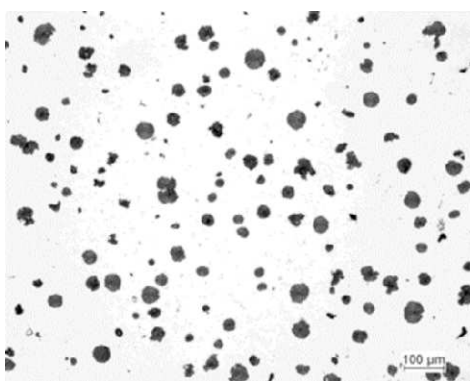


通常製法（粒径 $30\mu\text{m}$ ）

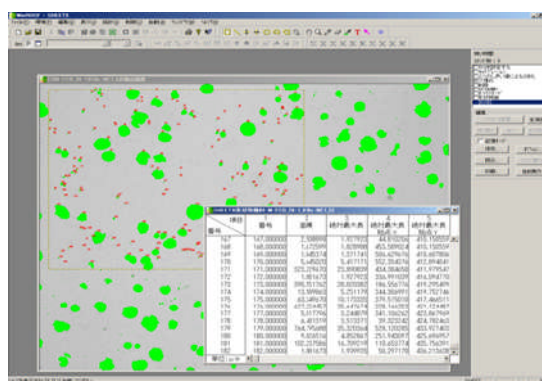


改良製法（粒径 $18\mu\text{m}$ ）

実験室的な検討



現場での検討 改良製法（粒径 $20\mu\text{m}$ ）

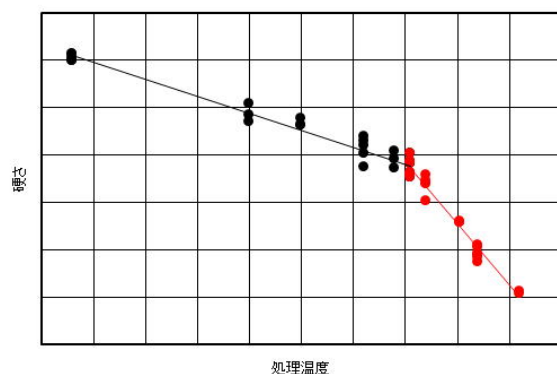


黒鉛粒径の評価（一例）

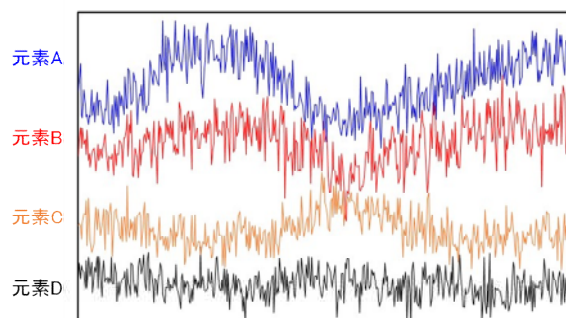
2-2 熱処理による硬さ制御技術の確立

2-2-1 試験片における熱処理条件の検討

化学組成を変えた複数の試験片を作製し、実験室での熱処理実験を行うことにより、硬さや組織に及ぼす熱処理温度の影響を調査した。その結果、化学組成及び熱処理温度・時間と硬さとの関係を明らかにした。また、ミクロ組織中の元素分布も明らかにした。



熱処理温度と硬さとの関係（実験室）



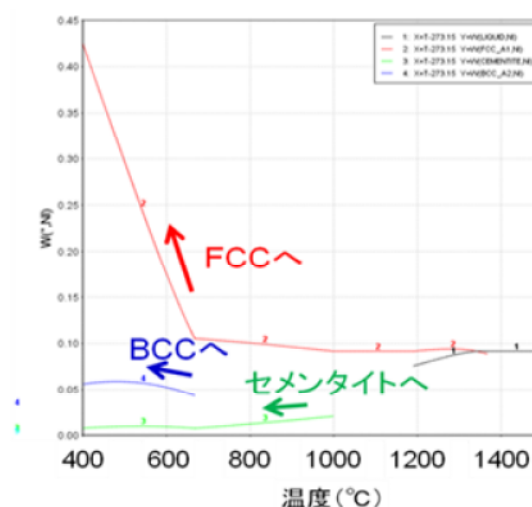
組織中の元素分布（SEM-EDS で分析）

2-2-2 大型シーブの熱処理条件の検討

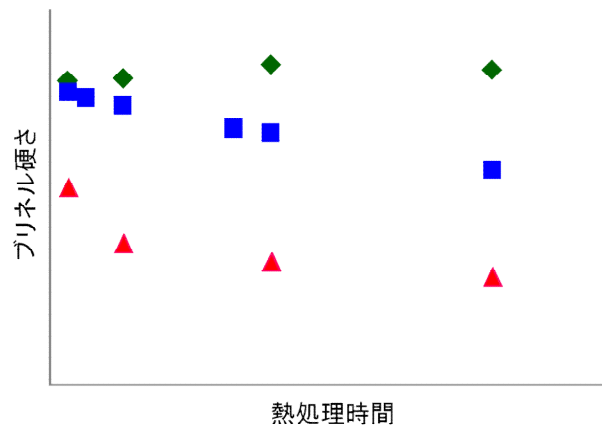
2-1-2で試作したシーブを用いて熱処理温度と硬さとの関係を明らかにするとともに、要求仕様（形状・寸法・硬さ）に応じた化学組成、熱処理手法を検討した。また、化学組成の最適化に当たって多元系の状態図による組織の予測が必要であることが明らかとなったため、熱力学計算システムによる計算状態図を用いた化学組成の検討を行った。その結果、熱処理炉の温度設定と実体温度との乖離の少ない運転条件（ $\pm 7^{\circ}\text{C}$ ）を見い出すとともに、特定元素を少量添加することにより硬さの低下を低減し、より硬さを向上できることがわかった。さらに、鋳造 CAE ソフトを用いた伝熱解析も行いながら、熱処理時間による影響も考慮しながら熱処理条件の最適化を進めた結果、指定の硬さ $\pm 20\text{HBW}$ に調整できる条件を確立できた。



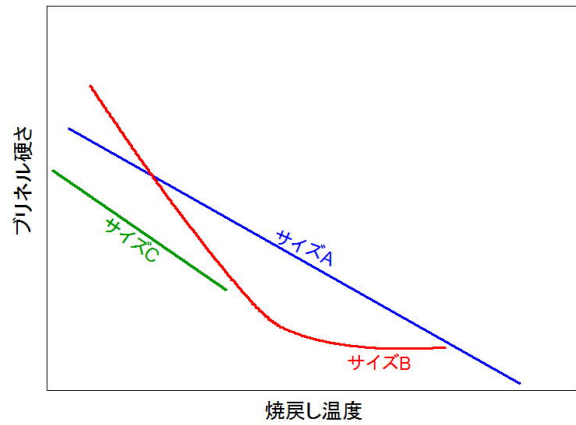
試作シーブの熱処理状況



計算状態図による元素挙動の予測



熱処理時間と硬さとの関係

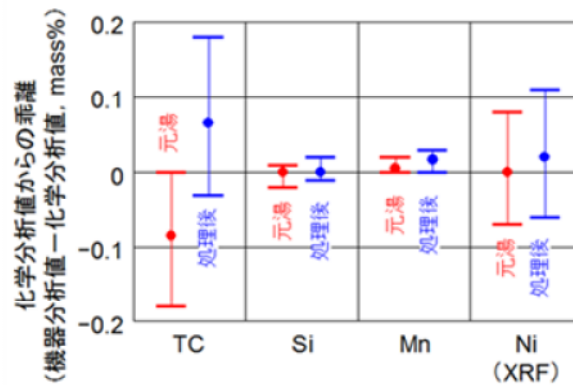


シーブの熱処理条件

2-3 機器分析の精度向上

2-3-1 機器分析における分析手法の検討

合金元素を複合添加した試験片について湿式分析で値付けするとともに、蛍光 X 線分析装置及び発光分光分析装置での分析を実施した。その際、黒鉛の形状や量が分析結果に及ぼす影響を調査した。その結果、試料の前処理等を検討することにより、目標精度（機器分析と化学分析との差、C 及び Si： $\pm 0.2\%$ 以内、Ni： $\pm 0.3\%$ 以内、Mn： $\pm 0.05\%$ 以内）を達成した。



分析精度の確認

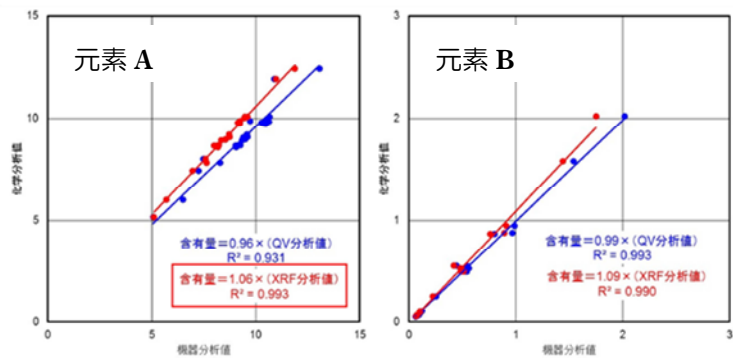
2-3-2 現場での分析手法の最適化

2-3-1 の結果を踏まえ、現場で成分を管理するための作業標準を検討した。その結果、試験片の形状をディスク状にすることに決定するとともに、成分ごとの分析手法も決定した。（2 元素を発光分光分析、3 元素を蛍光 X 線分析により実施する。）



キノコ状 ディスク状
(採用)

試験片形状



分析精度の確認（一例）

2-4 機械加工条件の確立

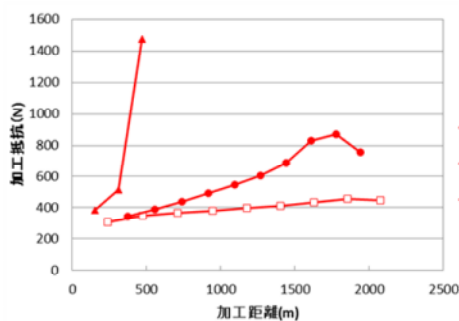
2-4-1 試験片における加工条件の検討

旋盤を用いて加工試験を行い、加工面の状態や工具摩耗等を調査した。その結果、加工条件に対する面粗さがほぼ想定どおりであること、並びに表面形状に問題のないことなどから、機械加工性が比較的良好であることを明らかにした。

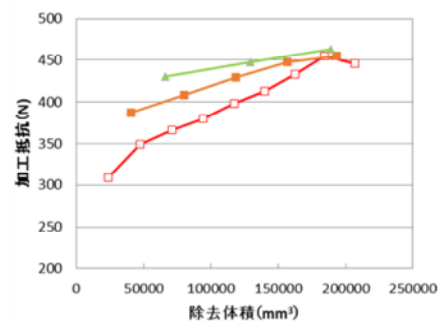
さらに、切削動力計を用いて加工抵抗を計測し、加工条件（切り込み、送り、周速度等）と切削抵抗の関係や加工面の状態、工具摩耗等を調査した結果、加工抵抗を低減し、開発材料を能率良く加工できる条件を明らかにした。



試験状況



加工速度の影響



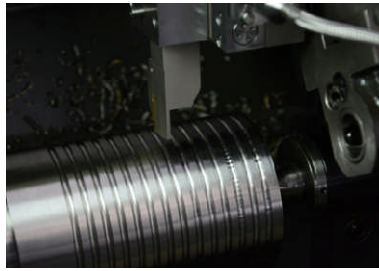
切込量の影響

2-4-2 シーブの加工条件の確立

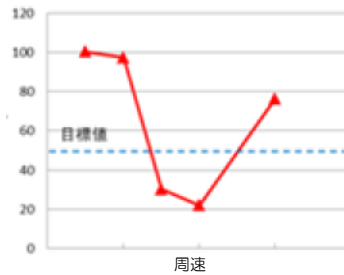
2-1-2で試作したマルテンサイト球状黒鉛鋳鉄製シーブについて試作加工を行った。

実験室では、試験片による溝加工条件の検討を行い、周速及び切り込み量の最適化によりびりりの無い加工面が得られた。また、この条件で加工した溝幅の精度が $50 \mu\text{m}$ 以内であることも確認した。

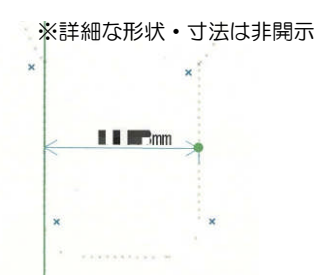
上記により確立した加工条件を用いて現場で試作シーブの加工試験を実施した。その結果、実験室と同等の条件で加工できることを明らかにした。導入した 3D デジタイザ等により加工品の形状・寸法を評価した結果、溝部の寸法精度が $50 \mu\text{m}$ 以内であることを確認した。



加工試験（実験室）



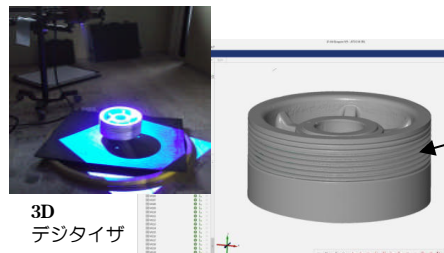
加工精度の評価（実験室）



溝幅の計測（実験室）



加工試験（現場）



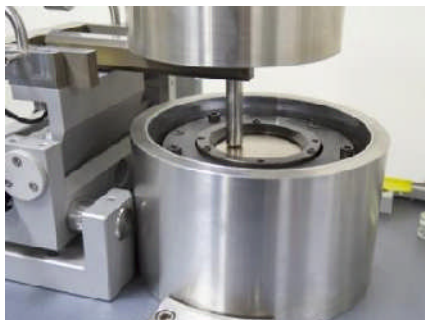
試作加工品の形状評価

2-5 耐摩耗性評価手法の確立

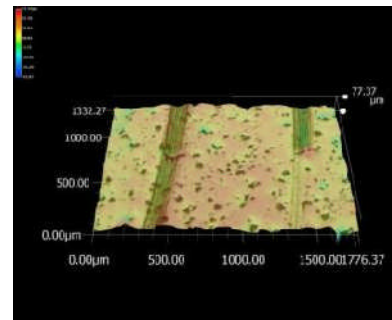
2-5-1 シーブ材料の摩耗試験方法の検討

既存の材料について実験室的な摩耗試験を行い、シーブとロープ間の接触形態の考察や試料表面の観察から、摩耗試験方法及び試験条件の検討を行った。

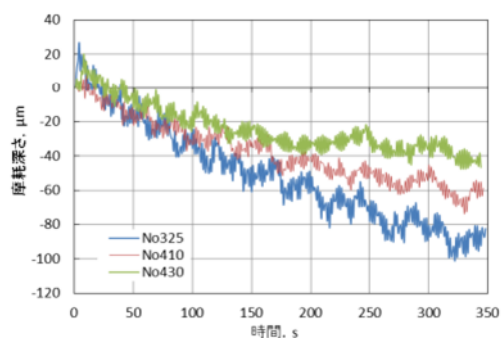
その結果、シーブの摩耗を再現するための試験方法としてボールオンディスク摩耗試験を選定するとともに、試験荷重、速度等のパラメータも定めた。



ボールオンディスク試験装置



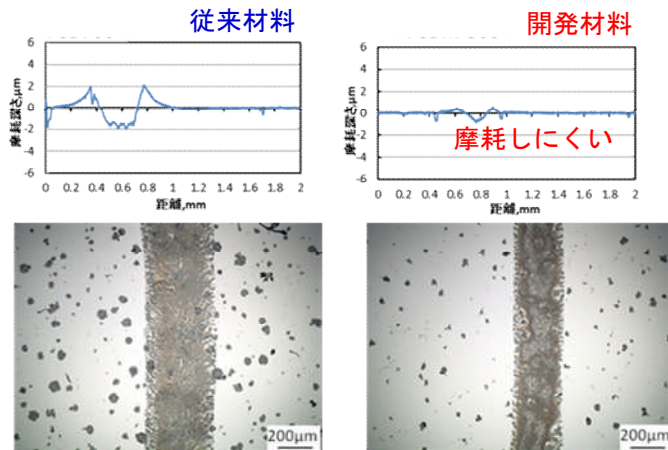
形状の評価（デジタルスコープ）



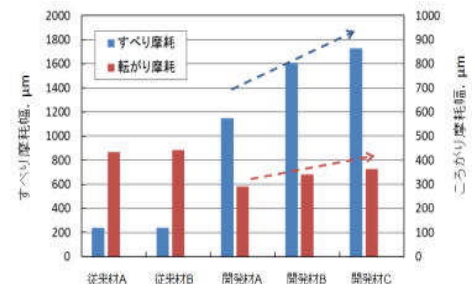
摩耗量測定

2-5-2 開発材料の耐摩耗性評価

2-5-1での検討結果を踏まえ、ボール・オン・ディスク摩耗試験により開発材料の耐摩耗性を評価した。潤滑下におけるすべり摩耗では開発材料と従来材料に差がないこと、転がり摩耗では開発材料が優れることわかり、トータルとして開発材料に優位性があることが示された。



ころがり摩耗試験結果（摩耗痕の評価）



摩耗幅の比較

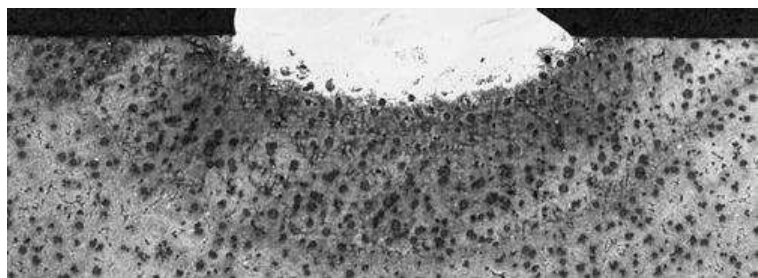
2-6 補修溶接及び肉盛溶接技術の確立

2-6-1 溶接による鋳鉄の組織変化の調査

TIG 溶接機及び半自動溶接機を用いたビードオンプレート試験を行い、溶接時の組織、硬さの変化を調査し、溶接部の組織改善に必要な要素を考察した。その結果、有害な炭化物の晶出や硬さの急激な変化を低減できる溶加材や溶接条件（予熱、後熱を含む）を把握することができ、マルテンサイト球状黒鉛鋳鉄に対して溶接が可能であることを明らかにした。



ビードオンプレート試験

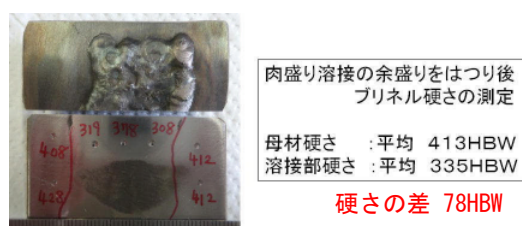


溶接部の組織（割れ等の欠陥無し）

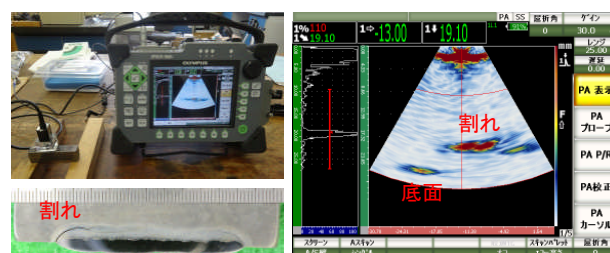
2-6-2 プレス金型への適用

2-6-1での検証結果をもとに、補修溶接及び肉盛溶接を現場で実施した。その結果、実験室と同様に予熱、後熱等を行うことで溶接品質を向上できることを明らかにした。溶接部と母材との硬さを比較した結果、硬さの差が78HBWとなり、目標（100HBW以内）を達成した。

また、金型に铸ぐるむ温調回路について、冷却水を流す配管の接続方法を検討するとともに、配管を固定するためのサポート材の溶接試験を実施した。これらの検討を踏まえ、実際に温調回路を内蔵した（铸ぐるんだ）金型を試作した。さらに、金型や溶接部の健全性を超音波探傷により評価した。



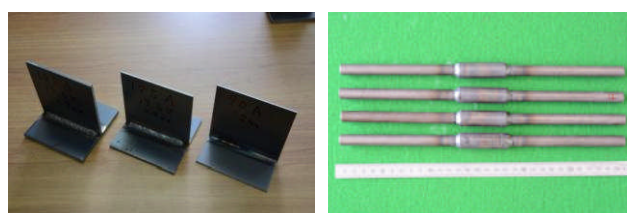
補修溶接試験（硬さ測定）



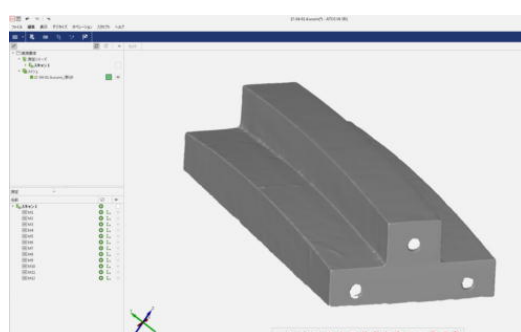
補修溶接部の超音波試験



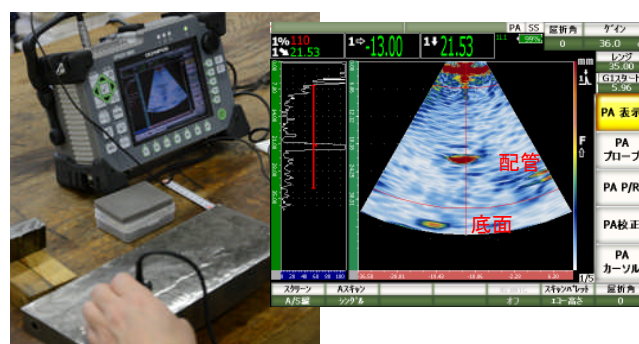
試作金型（温調配管内蔵）



金型用サポート材及び配管の溶接試験



試作金型の形状評価



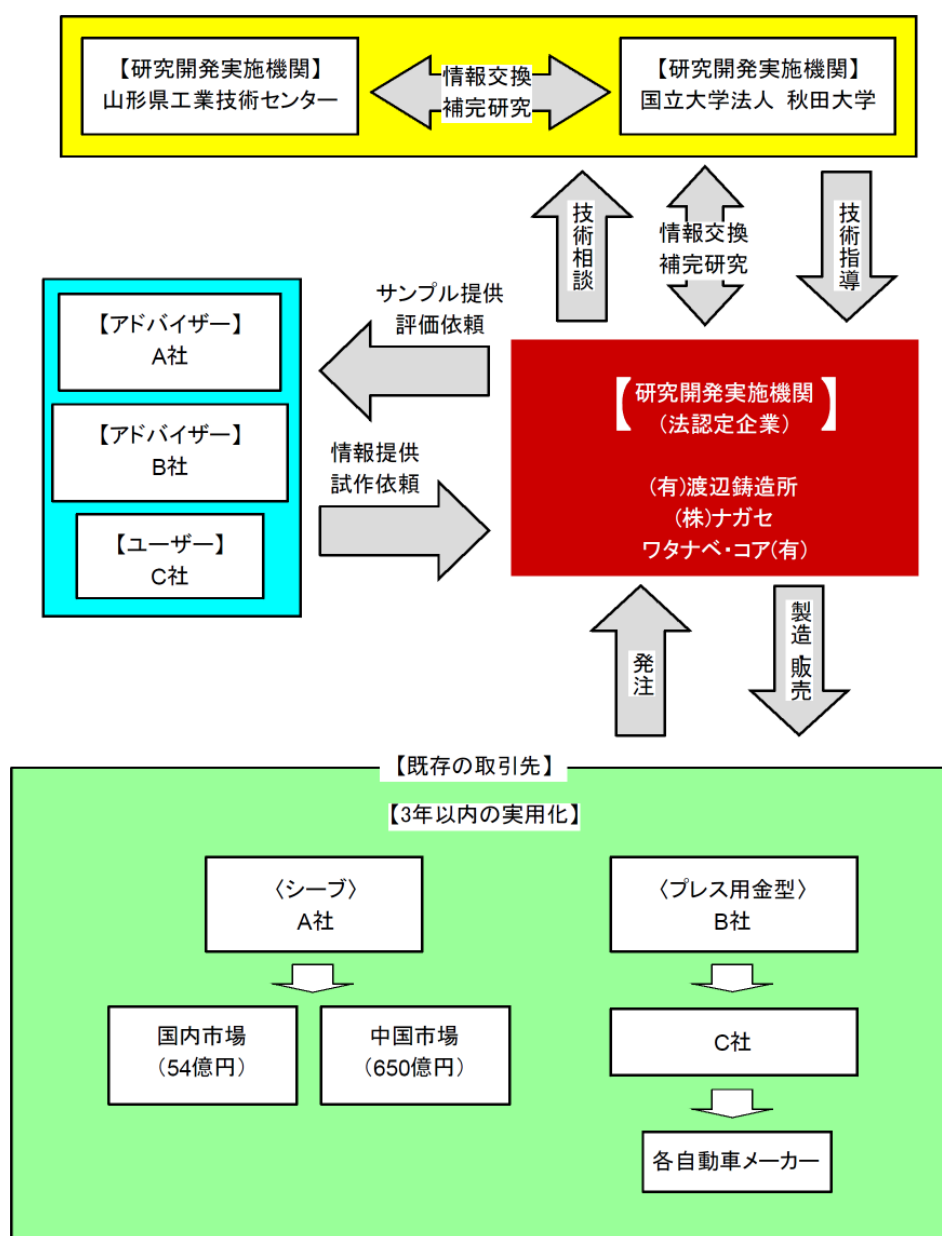
試作金型の超音波試験

最終章 全体総括

3ヶ年の研究開発により、大型の高硬度エレベータシーブ及びプレス用金型について、製造、評価（品質管理）及び補修技術を確立することができた。結果をまとめて再掲すると以下のとおりである。

1. 開発材料の材質安定化において重要となる黒鉛組織の微細化技術を確立した。
2. 開発材料による大型シーブを試作し、その硬さを制御する技術を確立した。
3. 開発材料の品質管理に不可欠な化学成分の現場分析技術を確立した。
4. 開発材料の旋盤による加工技術を確立した。
5. 開発材料をシーブとして使用するための摩耗試験方法を確立し、優位性を評価した。
6. 開発材料をプレス金型として使用するための溶接技術を確立し、金型を試作した。

上記の結果を踏まえ、事業終了後、下記の体制で事業化を目指す。



エレベータ用シーブについては、本材料に代わりうる
鑄造材料がないことから、エレベータの高速化・大容量
化に対応できるのは本事業で形成するコンソーシアムだ
けであり、事業化できる可能性は高いと考えられる。そ
のため、早期にサンプルを出荷し、事業終了後 3 年以内
での実用化を目指す。また、中国でもビルの高層化が進
んでおり、事業終了後 5 年を目処に中国市場への参入も
考えている。

また、金型については市場ニーズを踏まえた材料の改
良（高温強度の向上）も行いながら、ユーザへの提案を
進める。この際、ダイカスト用金型など、他の用途への
展開も視野に入れ、事業終了後 5 年以内の実用化を目指
す。



試作シーブ