

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

「SiC セラミックス大幅適用拡大の為の
新規2段反応焼結法
(接合・精密加工技術)の開発」

研究開発成果等報告書

平成29年6月

担当局 九州経済産業局
補助事業者 公益財団法人 北九州産業学術推進機構

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

1-1-1 研究開発の背景

1-1-2 研究の目的

1-1-3 研究の目標

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織

1-2-2 管理員、研究員、協力者

1-3 成果概要

1-3-1 接合技術の最適化

1-3-2 精密加工技術の最適化

1-3-3 成形可能サイズの大型化

1-3-4 プロトタイプ of 作製・評価

1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 接合技術の最適化

2-1 粉末材料（組成・攪拌方法等）の適正化による割れ抑制

2-2 接合面の特性（粗さ・間隙等）の把握と最適化

2-3 接合用補助剤（成分・組成等）の適正化による接合合格率の向上

2-4 焼結時雰囲気（真空度・温度等）の改善による組織の緻密化

2-5 含浸用 Fe-Si 合金（組成・粒径等）の適正化による組織の緻密化

第3章 精密加工技術の最適化

3-1 放電加工電極（材質・形状等）の選定と放電加工特性の把握

3-2 放電加工条件（電圧印加条件等）の最適化による加工精度の向上

第4章 成形可能サイズの大型化

4-1 プレス加工機（温度・圧力均一性等）の大型化対応

4-2 真空炉（排気構造・雰囲気等）の大型化対応

第5章 プロトタイプ of 作製・評価

5-1 エルボパイプ・ローラーの試作・基本評価

5-2 川下企業での実証試験・課題抽出

第6章 全体総括

6-1 複数年の研究開発成果

6-2 研究開発後の課題

6-3 事業化展開

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

1-1-1 研究開発の背景

特定ものづくり基盤技術の分類

主たる技術（四）接合・実装に係る技術に関する事項

従たる技術（二）精密加工に係る技術に関する事項

1）川下製造業者等の共通の課題及びニーズ

ア．高強度化

ウ．難接合素材の部材接合

製鉄所の圧延工程等の高温鋼材の搬送ローラー・圧延ロールや発電所・焼却施設等の粉末ダストを伴う排気ダクト(特に、配管エルボ部)等に、高温構造部材、耐摩耗部材が多用されている。しかし、現在使用されている金属製部材（高クロム鋳鉄系、ハイス系、炭化タングステン WC-Co 系など）では、高温雰囲気では軟化および熱歪みにより性能が著しく落ちることから、十分な耐久性が無く、1 ヶ月～半年毎に交換が必要で、事業者は多大な設備保全コストや設備休止が大きな課題となっているのが現状である。そこで、川下企業のニーズとして現行の硬化肉盛溶接品からセラミックスへの転換が切望されている。

具体的には、軽量化、高強度化、耐摩耗性や耐熱性等耐久性向上を目的として、高温構造部材を含む様々な部品にセラミックス(アルミナ、ジルコニア、窒化ケイ素、炭化ケイ素等)の適用が広まっている。プレス加工では製造困難なアンダーカット形状（金型が抜けない形状）等を持つ、複雑形状の部品への適用拡大のため、難接合素材であるセラミックス素材の接合・精密加工技術の高度化研究がなされている。しかし、セラミックスの場合、金属同様の接合や加工が極めて困難であり、プレス成形可能な形状に限定され、川下企業の多様な要求形状に対応できていない。セラミックスの適用が必要な場合、複数の小型部品の貼合わせ加工で製造が行われているのが現状であるが、セラミックス本来の性能が十分に発揮されないことが課題となっている。

上記背景より、㈱フジコーでは、セラミックスとして炭化ケイ素 SiC に着目し、これまでも2段反応焼結法を応用し形状自由度を高める新規技術開発を行っている（特願2013-33295）。SiC セラミックスへの転換効果は以下の通りである。

(1) 高耐摩耗性を要求されるロール・ローラー材質を超硬金属から SiC セラミック

スに置換することにより、初期投資やランニングコストを削減することができ
る。また SiC の優れた耐熱性と耐高温酸化性によりロールの破損事故が抑えら
れ、より安定した操業が可能となる。

(2) 発電所や焼却設備など、高温構造部材、耐摩耗部材を多用する施設では、複雑
形状部品に対応した SiC セラミックスを適用することで、設備の長寿命化が図
られ、設備保全コストの大幅削減が可能になる。また、設備稼働率が高くなり
生産性の向上に繋がる。

(3) 国外の安価なセラミックスあるいは超硬製品に対して、高いコストパフォーマ
ンスを実現し、適用範囲を大幅拡大することで、国際的な技術競争力をつける
ことができる。

(4) ハイス系、超硬系の合金に含まれるタングステン W, コバルト Co, クロム Cr
等のレアメタルの使用削減することで資源の有効活用や、ケイ素 Si や炭素 C
は豊富な資源で国内素材メーカーも多く存在することから安定供給され、海外
状況に左右されにくい。

1-1-2 研究の目的

本研究では、川下企業のニーズである耐摩耗性や耐熱性等の耐久性向上を目的として、
高温構造部材を含む様々な部品にセラミックスとして SiC を適応するために、新規の
2 段反応焼結法を開発する（図 1）。その特徴は焼結時の寸法歪抑制と接合工程を持つこ
とで、SiC セラミックスの接合を可能にし、複雑形状対応への自由度を高める。更に Fe-
Si 含浸により導電性を付与することにより、放電加工での寸法仕上げを可能とする精密加
工技術を確立する。この SiC セラミックスの接合および精密放電加工技術が確立できれば、
新たな用途開発が進められ、SiC セラミックスの優れた性能による上記課題解決、および
適用拡大による事業展開が期待できる。

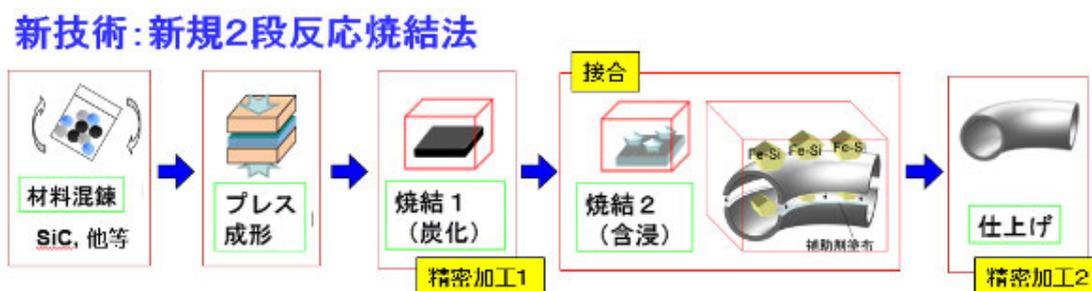


図 1 接合技術・精密加工技術が可能な 2 段反応焼結法

1-1-3 研究の目標

SiC セラミックスにおける部品の高強度化により、高温および劣悪な摩耗環境では大きな負担である部品交換費などのメンテナンスコストを大幅に削減可能とする。さらに部材交換頻度を抑えられるため、稼働率が向上する。従来技術では適用が困難であった部品に対して、SiC セラミックスの接合技術および精密加工技術の高度化により適用拡大を図り、設備の高強度化を促進する。以下に、実施項目と技術的目標値を示す。

(1) 接合技術の最適化

(1-1) 粉末原料（組成・攪拌方法等）の最適化による割れ抑制

従来原材料に SiC を配合することで、ニアネットシェイプ化を促進する。従来の体積変化率3%以上から0.1%以下を目指し、接合反応時の割れを抑制する。

(1-2) 接合面の特性（粗さ・間隙等）の把握と最適化

1段目の炭化工程後の接合面の仕上げ精度を1mmから10 μ m未満まで高めることにより、合わせ面境界部の接合不良を低減させる。

(1-3) 接合用補助剤（成分・組成等）の適正化による接合合格率の向上

非接合部の健全な場所においても、5 μ m以下の気孔が存在することから、接合部の気孔サイズ目標を5 μ m以下とする。接合率100%を目指す。

(1-4) 焼結時雰囲気（真空度・温度等）の改善による組織の緻密化

炉内真空圧力を10Paから10⁻³Paレベルに強化し、Fe-Si含浸での昇温速度や保持時間等を最適化し、組織改善を行う。

(1-5) 含浸用 Fe-Si 合金（組成・粒径等）の適正化による組織の緻密化

含浸金属を Fe-Si とし、不純物の影響や含浸金属設置方法の最適化を図り、従来15%以上あった気孔率を2%以下に緻密化する。

(2) 精密加工技術の最適化

(2-1) 放電加工電極（材質・形状等）の選定と放電加工特性の把握

電極の材質と形状等の選定により、製品形状における寸法精度を10 μ m未満への向上を目指す。

(2-2) 放電加工条件（電圧印加条件等）の最適化による加工精度の向上

2-1の電極選定と並行して、要求される寸法公差に柔軟に対応するため、本研究のSiCにマッチした加工条件（電圧・電流・ワークからの距離・加工速度等）を選択し、加工精度10 μ m未満を目指し、試作品の製作を自社内で行う。

(3) 成形可能サイズの大型化

(3-1) プレス加工機（温度・圧力均一性等）の大型化対応

最大直径400mm×厚み50mm リングサンプルに対するプレス設備を対応し、試作品を作製および課題を抽出する。

(3-2) 真空炉（排気構造・雰囲気等）の大型化対応

上記サイズに対応した真空処理条件を検討し、試作品を作製および課題を抽出する。

(4) プロトタイプ of 作製・評価

(4-1) エルボパイプ・ローラーの試作・基本評価

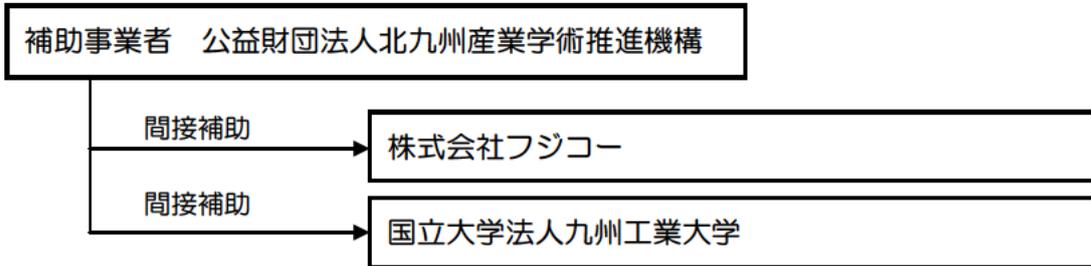
新規技術により、欠陥なく図面寸法通りのプロトタイプを試作する。

(4-2) 川下企業での実証試験・課題抽出

川下企業での試作品の実証試験を行う。その使用実績を評価し、試作品の課題を明確にする。また川下企業における部材に要求されるスペックは、使用環境や操業状態への対応、規制法律の遵守が必要であり、常に新しいニーズをヒアリングする。

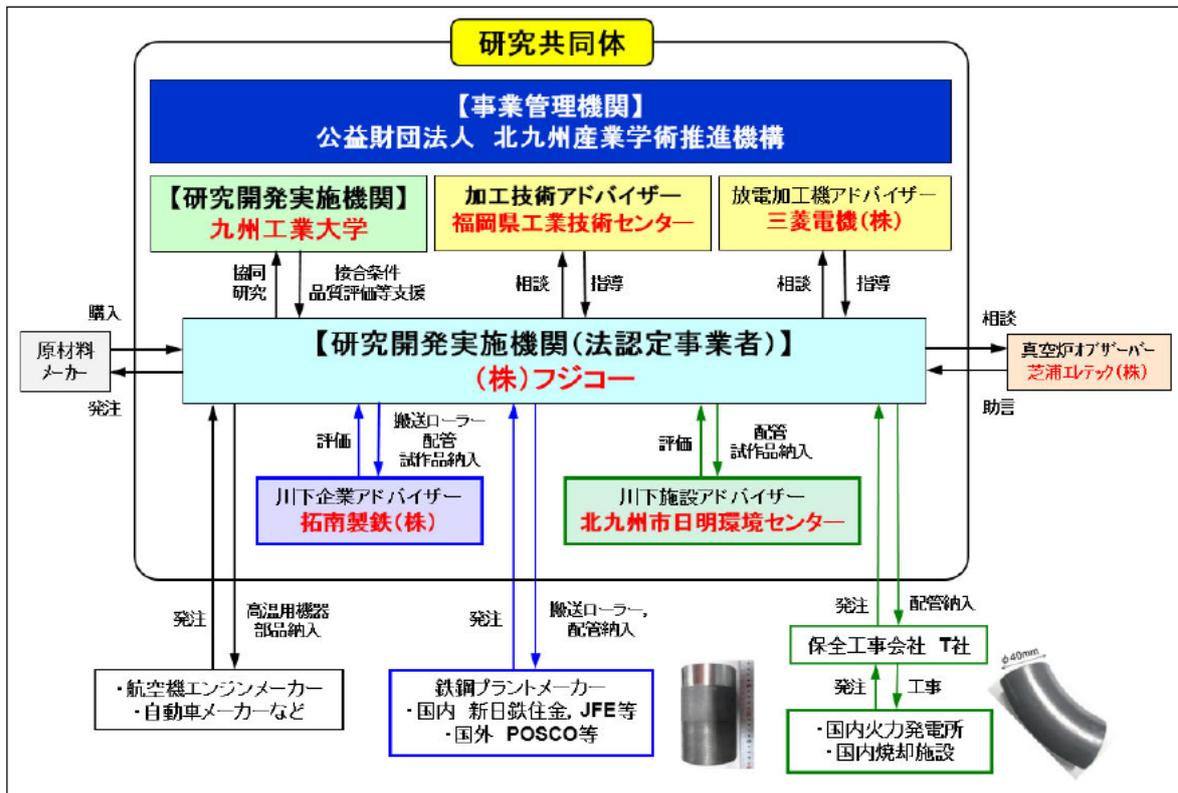
1-2 研究・管理体制

1-2-1 研究組織



総括研究代表者 (PL) : 株式会社フジコー 常務取締役 技術開発センター長 永吉 英昭

副総括研究代表者 (SL) : 国立大学法人九州工業大学大学院 材料開発部門 教授 恵良 秀則



1-2-2 管理員、研究員、協力者

【補助事業者】

管理員

公益財団法人北九州産業学術推進機構

氏名	所属・役職	実施内容
牧田 厚雄	産学連携統括センター ものづくり革新グループ 産学連携担当部長	事業管理
熊高 宏之	産学連携部 事業管理担当課長	事業管理
宮崎 さやか	産学連携部 事業推進課	事業管理
白橋 可奈子	産学連携部 事業管理担当課	事業管理

【間接補助事業者】

研究員

株式会社フジコー

氏名	所属・役職	実施内容
永吉 英昭	常務取締役 技術開発センター センター長	全実施項目
姜 孝京	副センター長	全実施項目
園田 晃大	商品・生産技術開発室 室長	全実施項目
花田 喜嗣	商品・生産技術開発室 課長	全実施項目
肖 陽	商品・生産技術開発室 係長	全実施項目
近藤 加寿心	商品・生産技術開発室 主任	全実施項目
舛添 太一	開発管理室	全実施項目

国立大学法人九州工業大学

氏名	所属・役職	実施内容
恵良 秀則	大学院 材料開発部門 教授	全実施項目

【他からの指導・協力者名】

氏名	機関名または指名、所属・役職	備考
在川 功一	福岡県工業技術センター 機械電子研究所 生産技術課 主任技師	アドバイザー
大城 秀政	拓南製鐵株式会社 常務取締役	アドバイザー
木村 宗雅	三菱電機株式会社 関西支社 産業メカトロニクス部加工技術グループマネージャー	アドバイザー
佐藤 禎一	北九州市環境局日明環境センター 日明工場ボイラー・タービン担当係長	アドバイザー
山下 巧郎	芝浦エレクトック株式会社 大分営業所 CSセンターフィールドエンジニア	オブザーバー

1-3 成果概要

SiC セラミックスの接合技術および精密加工技術の高度化のために、下記の項目を実施した。その成果を示す。

1-3-1 接合技術の最適化

(1) 粉末材料（組成・攪拌方法等）の適正化による割れ抑制

混合比および粉末攪拌方法の改善に加え、炭化および含浸処理法の見直しにより、体積変化率を 0.06%まで抑制することができた。試作品製作でも割れを低減させることができた。

(2) 接合面の特性（粗さ・間隙等）の把握と最適化

自作 SiC 製チップを用いることで、炭化体の加工表面粗度 Ra 2.2 μ m を達成した。炭化体に対しても、切れ味が落ちずに滑らかで安定した粗度を保つ加工が可能になった。また炭化処理においては、2 段階にすることで炭化度を高めることができ、含浸性の向上につながった。

(3) 接合用補助剤（成分・組成等）の適正化による接合合格率の向上

接合用補助剤の組成調整だけでなく、事前処理や接合処理工程の最適化により、気孔サイズ 1~3 μ m で接合率 100%を達成した。しかし、JIS による曲げ強度の評価が不十分であり、今後評価の適正化を行う。

(4) 焼結時雰囲気（真空度・温度等）の改善による組織の緻密化

新規導入の真空炉により、既設炉よりも 3 桁以上の高真空度が到達できるようになった。高温処理時の到達炉内圧力は 10⁻²Pa 台であり、当初目標であった 10⁻³Pa は達成していないが、含浸不良を解消でき緻密な組織が得られた。

(5) 含浸用 Fe-Si 合金（組成・粒径等）の適正化による組織の緻密化

既設真空炉では Fe-Si 合金の微量成分や添加サイズの影響があったが、新規真空炉ではその影響が小さいことがわかった。さらに含浸金属の設置方法の改善により組織の緻密化を図れ、気孔率 0.8%を達成した。

1-3-2 精密加工技術の最適化

(1) 放電加工電極（材質・形状等）の選定と放電加工特性の把握

荒加工においては、銅グラファイト（Cu-Gr）を選定し、加工時間を大幅に短縮することができた。仕上げ加工では、銅（Cu）に決定した。形状については、現寸法と仕上げ寸法から公差内に入れるため、SiC と電極材質から電極寸法を決定する方法を見出した。加工後の表面粗度 10 μ m以下を達成した。

(2) 放電加工条件（電圧印加条件等）の最適化による加工精度の向上

本研究の SiC と電極の相性や設備特性などの条件設定とそのノウハウ管理が重要で、一概に単純設定ではできないことが分かった。ワークに合わせた加工条件を与えることで、厳しい寸法公差でも加工できる技術を確立した。荒加工前のワーク表面状態が加工異常を招くため、手仕上げの平滑化が必要であることが分かった。加工精度 10 μ m 未満を達成し、試作品の製作を自社内で行える体制ができた。

1-3-3 成形可能サイズの大型化

(1) プレス加工機（温度・圧力均一性等）の大型化対応

中小型の直径 100mm×幅 40mm×厚み 5mm リングを作製できた。また、直径 420mm×幅 50mm×厚み 20mm の大型リングを成形まで行うことができた。大型化に伴う成形治具の重量増大による長時間化が今後の課題である。

(2) 真空炉（排気構造・雰囲気等）の大型化対応

(1) のリングを作製することができた。400mm クラスまでの対応は可能とした。厚みに対して十分に焼結反応を行う条件設定が重要であることが分かった。400mm リングは試作中である。

1-3-4 プロトタイプ of 作製・評価

(1) エルボパイプ・ローラーの試作・基本評価

プラント向け配管内壁（エルボーパイプ）および製鉄所向け搬送用ローラー（ガイドローラー）の製作、粉末成形から焼結、加工までの一連の条件設定ができた。課題として、強度評価が不十分であり、実機に近い環境における疑似評価が必要である。また出荷検査方法の確立も必要である。

(2) 川下企業での実証試験・課題抽出

試作品としてガイドローラーを作製し、拓南製鐵(株)で平成 27 年 2 月に初めて実証試験を行うことができた。圧延材通過量 2,000ton で破断したが、品質を改善した試作品を作製し、平成 29 年 4 月より 2 回目の実証試験を行っている。現在 5,000ton 使用中である。課題としては、スペック妥当性検討や品質評価方法の確立である。本技術を確立することで、拓南製鐵(株)以外のユーザーにおいても試用ヒアリングを行えるようになった。またエルボーパイプではプラント設備では試作製作中である。具体的な部品をイメージして、ユーザーと取り組めるようになった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社フジコー

技術開発センター 商品・生産技術開発室

係長 肖 陽

Tel: 093-871-0761 Fax: 093-882-0522

E-mail: y-xiao.fujico@kfjc.co.jp

第2章 接合技術の最適化

2-1 粉末材料（組成・攪拌方法等）の適正化による割れ抑制

従来の体積変化率3%以上から0.1%以下を目指すことで、製造時の割れや欠けの発生を抑える。これには従来の原材料に加えて、新規にSiCを配合することで、体積変化を抑えることにより、焼結工程におけるニアネットシェイプ化の促進を目指す。

実施内容は、原料配合の調整・均一混合が可能な攪拌設備の選定である。主原料にSiC粉末を加えた。バインダーとして樹脂を添加し、加熱とプレスによる成形を行う。この樹脂は有機物であるが、後に炭化（炭素化）工程で炭素Cになる。粉末類は全体的に数 μm 程度である。新たに乳鉢を使った摺込式材料攪拌機を導入した。この装置は2本の乳棒があり両方とも回転しながら粉末を乳鉢に押し当てつつ摺り込んでいくため、一定の荷重で粉末に動きを与えることができる。

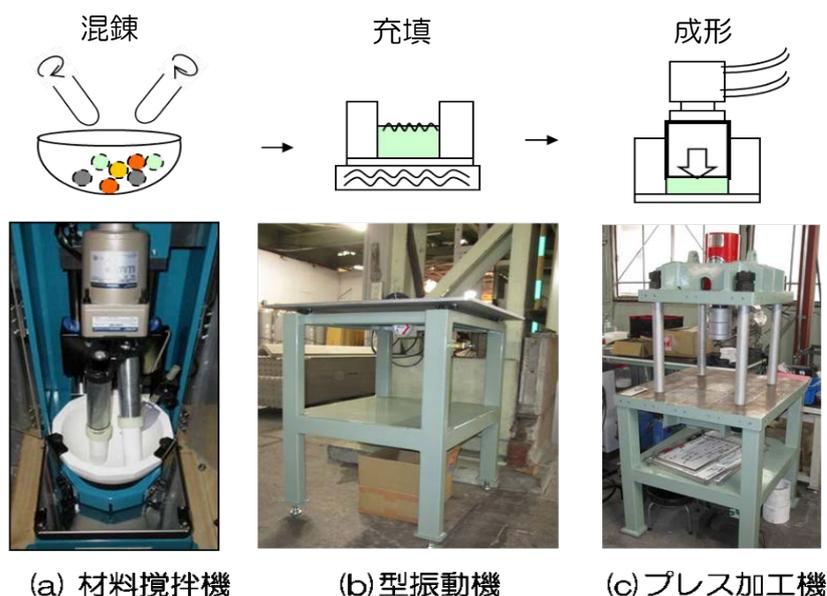


図2 各工程の設備写真

図2に示すように摺込式材料攪拌機に加えて、型振動機およびプレス加工機を導入した。振動機は粉末投入後の空気抜きおよび平坦化を行い、プレス加工機は大型製品向けに製作し、油圧ポンプは電動化した。攪拌からプレス成形までの工程において、これによりなるべく人的作業のバラツキ排除を促し、材料の偏りの解消を図った。

図3に従来法で混合したときの組織状態を示す。白色、黒色、灰色とあり、均一分散されているとは言い難い。特に右上の灰色部では、全体に見える部分は一つの粒ではなく、小さな粒の集合体であり、塊のように存在していた。

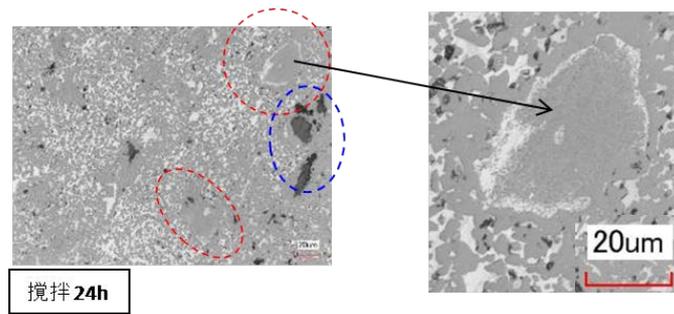


図3 従来攪拌方法での組織

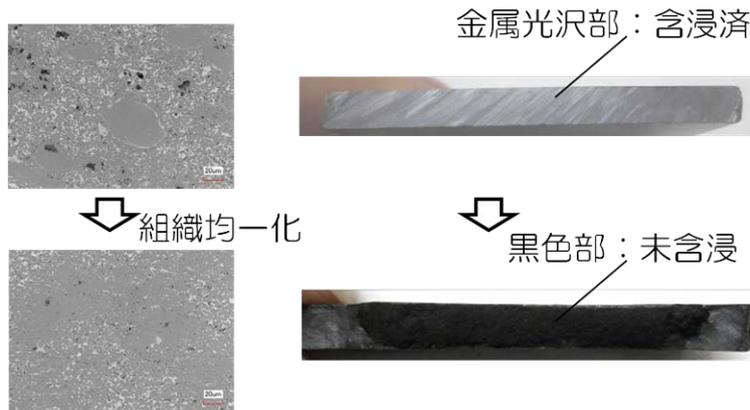


図4 組織均一化による含浸不良

いずれの攪拌方法においても、粉末の混合状態が改善し均一化が図られると結果的に組織も均一化される。しかし、その反面、含浸性が低下することがわかった。もともと含浸性が良い原料配合率であっても、粉末の分散性を高めると、図4のように中心が未含浸になる場合が多い。回転式、摺込式、造粒式、いずれの攪拌方法でも同じ傾向が見られた。したがって、体積変化率の低減においては、含浸性も維持する必要がある。

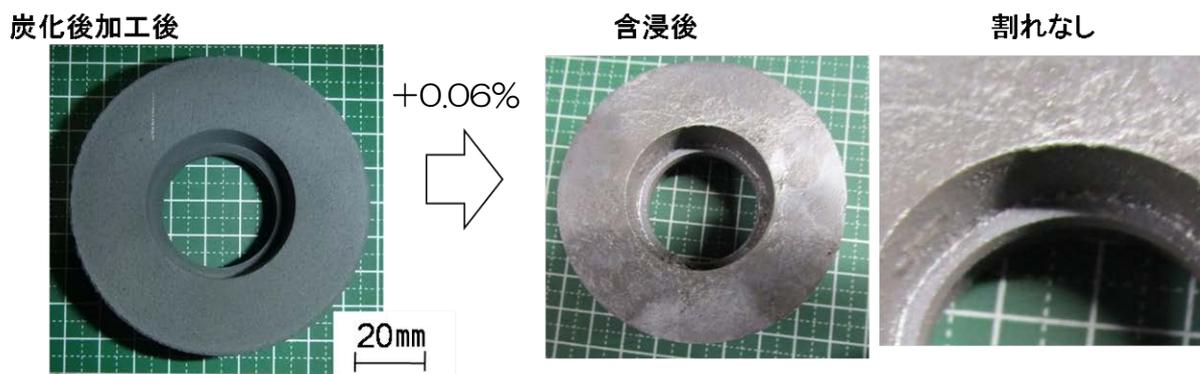


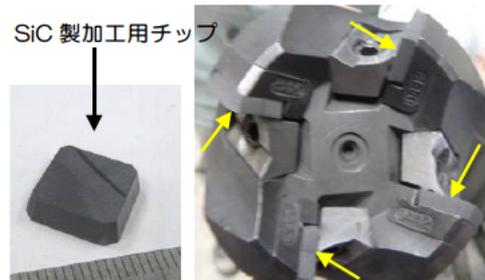
図5 製品形状での工程時変化

含浸性の改善は、後節の組織の緻密化において、改善が見られたので後ほど詳細に報告する。結果として、炭化処理と含浸処理も含めて、SiC セラミックスの製造工程における

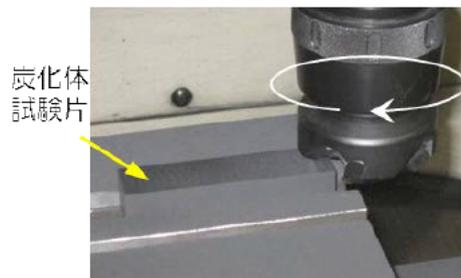
一連の改善が必要であった。図5に示すように、最終的に搬送用ローラーのサイズでの体積変化率は0.06%となり、目標を達成することができた。

2-2 接合面の特性（粗さ・間隙等）の把握と最適化

1段目の炭化工程後の接合面の仕上げ精度を1mm から10 μ m 未満まで高めることにより、合わせ面境界部の接合不良を低減させる。



(a) SiC 製加工用チップ，切削ツール



(b) テスト様子

図6 炭化体のフライス加工テスト

図6に示す方法で炭化体の平面加工を行っている。図6(a)に SiC 材による自製加工用チップを示す。炭化体を加工特化した SiC 製のチップ開発を行い、精密切削加工の最適条件出しを実施した。従来の加工用チップでは、本事業の炭化体に対して摩耗が激しく、数 μ m オーダーの面粗度達成は大量のチップを必要とするため時間とコストが掛かる。本研究では2段反応焼結法で製作した SiC 製のチップを用いる。このカッターは4枚刃で、チップのサイズは10x10x2mm である。

図6(b)に示すように、30x30x100mm の炭化体のブロックを用いて、加工テストを行った。テスト後は粗度計により表面の粗さ形状を測定した。そのプロファイルを図7に示す。プロファイルを見てわかるように、SiC 製の加工表面は凹凸が少なく平坦に加工出来ており、超硬製の場合粗度 Ra 10 μ m に対して、SiC 製は Ra 4.5 μ m と2倍ほど粗さを抑えることができた。ただし、SiC 製のプロファイルをよく見ると、いくつか深い溝

ができていることがわかる。

図8にエッジを整えたチップとそれによる加工後の表面状態を示す。その結果、炭化加工後の表面粗さもさらに小さくなり、突出した深溝部分も見られなくなった。最終的に表面粗度 Ra 2.2mm となり目標を達成した。

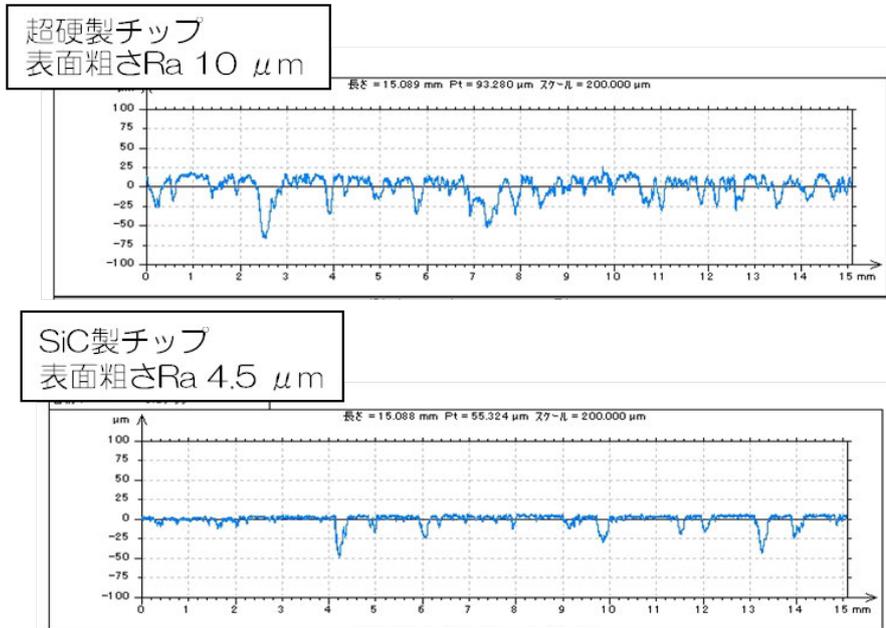
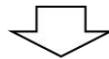
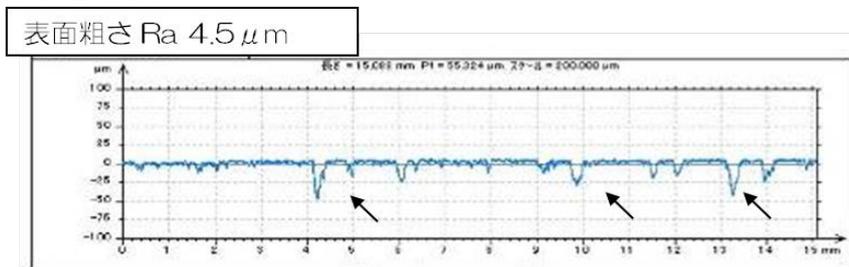


図7 加工後のサンプル表面粗度プロファイル

チップ改善前



チップ改善後

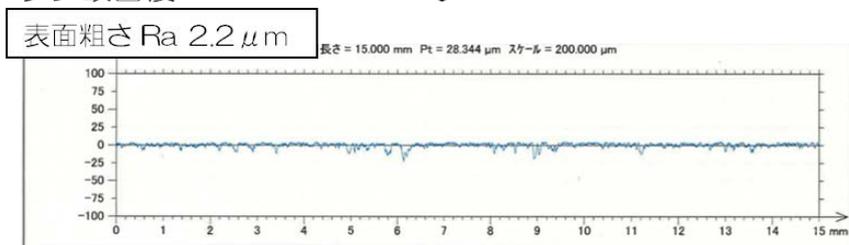


図8 形彫放電仕上げチップによる加工表面の改善

炭化工程においては、既存の電気炉を流用して不活性雰囲気での焼成を行っている。単純に炉内へ不活性ガスを流入させて置換しただけの状態である。熱処理を行うと大量のガスが発生するため、ガスによる排出も兼ねている。図9に不活性ガスを流入させた場合

(左)と大気のままの場合(右)で処理したサンプルの加工後の外観を示す。不活性ガスを流入させた場合は黒色であるのに対し、大気のままでは表面も内部も白色であった。黒色サンプルは炭化が良好な状態であり硬く、図6の加工もしやすいが、白色サンプルは炭化不良(酸化)の状態であり、非常に脆く、加工時に刃が当たった瞬間に崩壊した。



図9 炭化によるサンプルの状態

図10に炭化処理に用いる既設炉と新規炉を示す。今後の大量処理、大型化および更なる炭化度の向上のために炭化専用の電気炉を設計し導入した。150×150mmから400×400mmサイズとし大型サンプルも処理できるよう炉内容積を大きくした。最高処理温度は1,050℃である。炭化の状態は加工時の割れの防止だけでなく含浸性に大きく影響することがわかり、温度や時間の最適化を行い2段階処理にすることで、これまでよりも炭化度を高めることができた。



図10 炭化処理に用いる電気炉

2-3 接合用補助剤(成分・組成等)の適正化による接合合格率の向上

従来には無い接合補助剤(スラリー化原材料)を開発し、接合境界部の組織を部品本体と一体化する。図11のようにパイプ状の製品は接合により作製できる。接合部の顕微鏡組織観察

によって接合部の気孔サイズ目標を5 μm 以下および合格率 100%を目指す。

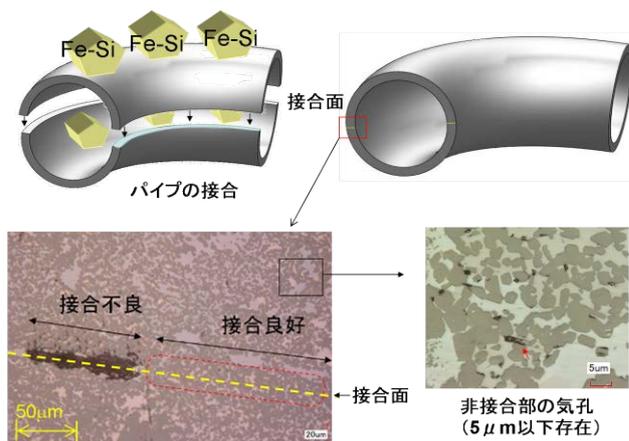


図 11 接合部分の組織状態

まず、小サイズサンプル (15×15×30mm) の試験片を用意し、接合補助剤の塗布方法について検討を行った。接合補助剤の主原料は、図 12 のように溶媒と混ぜてスラリー状にする。これを糊のように接合面に塗布した後に通常の含浸工程を行うことで接合することができた。



図 12 接合補助剤スラリー

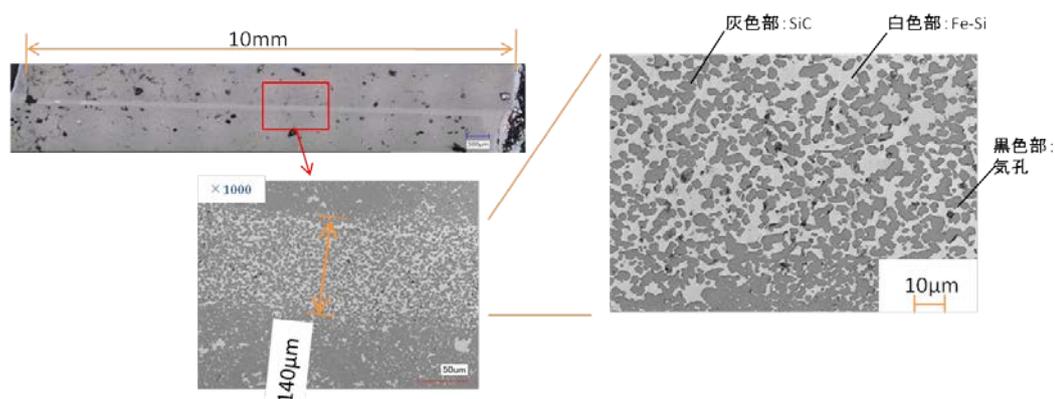


図 13 接合部の断面組織

図 13 に接合部断面組織を示す。接合面は SiC チップを用いた機械加工で平面加工した。また接合面の粗度は Ra 2.2mm のサンプルを用いた。10mm に対してほぼ全域の接合が可能になった。接合処理の最適化を行い、結果として気孔サイズ 1~3 μm 、接合合格率

100%を達成した。

ただし、接合部は強度評価を行う必要がある。得られた接合部は接合していない組織との強度差を生じさせないことが重要である。図 14 に JIS R1601 や R1604（ファインセラミックスの室温・高温曲げ強さ試験方法）を示す。今後は接合判定の合格基準を設ける必要がある。さらに組織的な判断基準の確立はミクロ観察・組織分析・視点追加（1 方向だけでなく 3 次元的に評価）して、総合的な評価を行う。

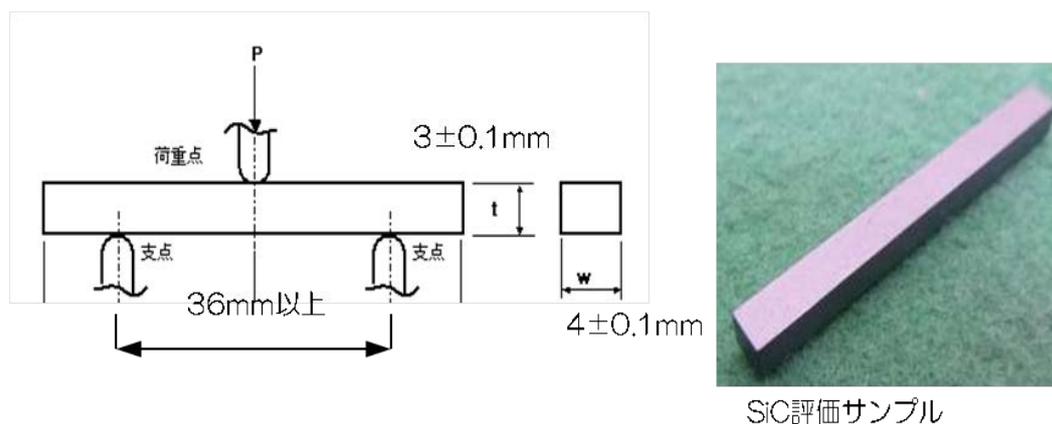


図 14 セラミックス曲げ強度試験（JIS R 1601）

2-4 焼結時雰囲気（真空度・温度等）の改善による組織の緻密化

炉内の真空度の悪化や対象製品のサイズや形状によっては、十分な熔融金属の浸透深さが得られず、含浸不良になることを確認している。新規に導入する真空炉では、ガス吸着が少なく排ガス能力の高くするため、加熱部は金属製、排気部は管のサイズを大きく設計した。



図 15 新規導入の真空炉

図 15 に新規真空炉を示す。角型の真空炉で 400×400×400mm の容積を持ち、最高温度 1500℃、炉内真空炉 10⁻²Pa 以下に到達が可能である。図 15 の中央が真空炉の反応槽チャンバーであり、その両脇に制御盤・トランスを設置している。制御盤にて昇温パターンのプログラムを組みこむことで、排気や昇温など自動運転を行う。既存真空炉が高温時 10Pa 台であるのに対して、新規真空炉は 10⁻²Pa 台となった。室温時はさらに低く 10⁻⁵Pa 台である。3 桁以上の圧力改善が見られた。最高温度到達速度も早まり、含浸処理までの時間が 6h 以上も短縮できることがわかった。

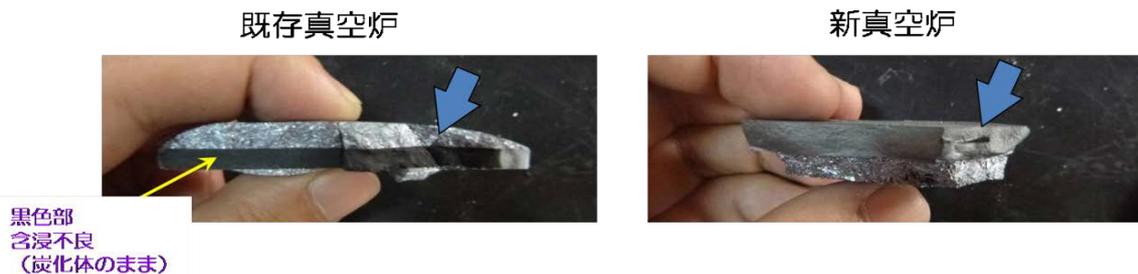


図 16 新規真空炉による含浸性改善

図 16 に新規真空炉の効果を示す。これまで含浸不良であったサンプルも新規真空炉のように環境を整えると、含浸性が高まった。さらにやや厚肉のガイドローラーの製作に関しても、改善効果が見られた。しかし、100%の含浸を実現できている状態ではなかった。さらなる組織改善のために、再度工程の見直しを行った。真空状態が改善したにもかかわらず、含浸不良となる原因は、調査の結果、炭化処理に問題があることがわかった。脱脂処理、炭素化処理を行う工程を確立した。さらに厚肉素材でも十分に含浸ができるように、処理条件を見直した。ガイドローラーの炭化体を対象に行い、処理時間や処理温度の最適化によって、図 17 のように全面に含浸がなされ不良部が無くなった。

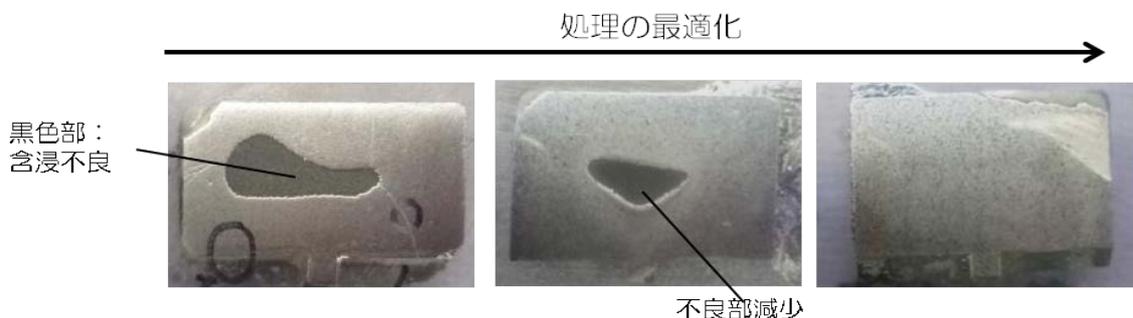


図 17 処理最適化による不良部の解消

最終年度の目標として炉内圧力 10⁻³Pa 台到達を計画していたが、テストの実績から実質上 10⁻²Pa 台止まりと想定される。ワーク無しや相当の長時間を維持するという条件で

あれば 10^{-3}Pa 台を実現可能と考えるが、現実的ではない。結果から、 10^{-2}Pa でも十分に綺麗な不良なき組織が得られているので、当初の目的は達成できていると判断した。

2-5 含浸用 Fe-Si 合金（組成・粒径等）の適正化による組織の緻密化

従来 15%以上あった気孔率を2%以下に緻密化する。材料の混錬や焼成時の条件の影響もあるが、ここでは含浸合金の選定や設置の仕方を検討した。図 18 のように未含浸部や気孔が多く存在すると、放電加工の精度が低下することがわかっている。また加工時の破損を招く恐れがあり、含浸する Fe-Si 合金を適正化することで、気孔率の低減を図る。

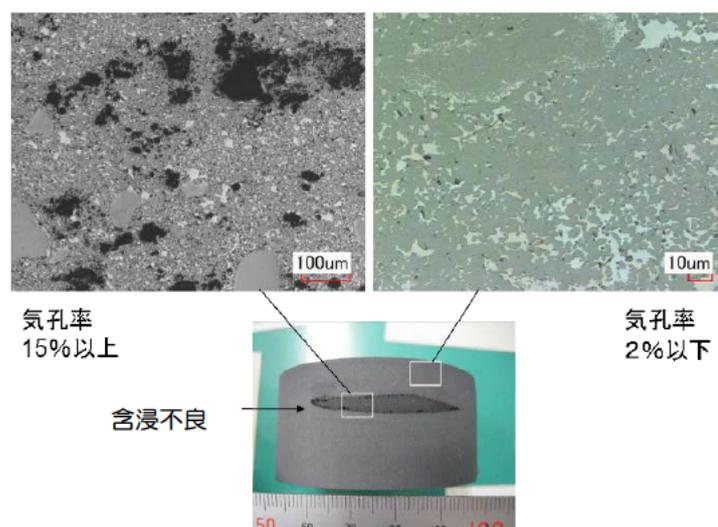


図 18 気孔率と加工性の関係

気孔率については、まず製品全体の含浸が十分になされていないと SiC の性能を発揮できず、製品としての価値はないと考える。図 18 にある全体のマクロ視野における黒色部は未含浸である。そこは非常に脆く、気孔というより空洞で構成されている。この部位が存在すると優先的な摩耗や極度の強度低下を招く恐れがあり、先だって目視で確認される限りは不良品と判別される。したがって、端面において目視で黒色部が確認できる場合は、まずマクロ視野での黒色部を解消するための対策を講じるのが先である。気孔率の測定は、顕微鏡の観察写真を用いて画像解析によって算出した。1 視野によらず、数視野の測定結果の平均を取った。

次に、Fe 含有率や Al などの微量成分が内部気孔率へ及ぼす影響を確認した。3 種類の微量成分の異なる市販の Fe-Si を準備した。含浸状態をみると、いずれのサンプルも同じように含浸できていた。今回の成分の違いではほとんど変化が認められなかった。ただし、この結果は既存真空炉で実施した内容であるので、再度新規真空炉で再確認や微量元素の

影響を調査する必要がある。



図 19 各含浸金属における含浸断面状態

これまでの混錬の最適化や焼結処理（炭化・含浸）の最適化により、5mm 厚さの薄板のワークに対して気孔率は 0.8%を達成している。しかし、20mm 以上の厚物のワーク形状においてはさらなる改善が必要である。そこで含浸金属の置き方に着目し調査を行った。このポイントは、熔融金属を無駄なく SiC 化に貢献させることである。ワークの形状に対して適切な金属粒の設置をすることは非常に重要な項目であることがわかった。このような浸み込みのバランスは様々な検証によって、今回の条件を見出すことができた。

図 20 に最適化後の組織を示す。含浸の最適化によって気孔率は約 15%であったのが、約 6%まで減少した。また冷却時の割れも減少し、ワークの取出しも容易になり、不良率を大幅に下げることができた。気孔率の低下には更なる改善が必要である。

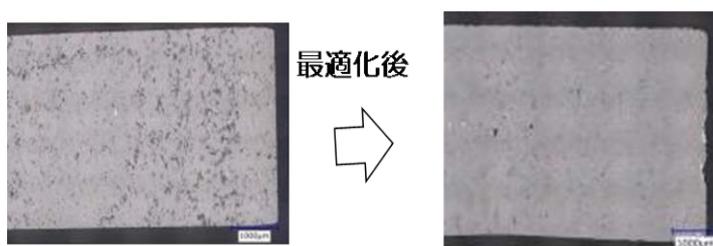


図 20 含浸金属設置による気孔率の低減

第3章 精密加工技術の最適化

3-1 放電加工電極（材質・形状等）の選定と放電加工特性の把握

電極の材質と形状等の選定により、10 μm 未満の寸法精度への向上を目指す。これは対象製品の寸法公差を満足する数値に設定した。一例として、搬送用ガイドローラーの設計図面を図 21 に示す。この部品にはベアリングが搭載される。ベアリング寸法は一般規格があり、厳密な嵌め合い公差を満たす必要がある。内径が小さければベアリングは入らず、逆に大きければその隙間により振動が発生し、場合によっては設備が故障する。この部品は図面により公差は $-0\sim+0.025\text{mm}$ とされており、直径の歪を25 μm 以内に収めなければならない。それを加工により制御するには、1 μm オーダーでの加工精度が必要となってくる。さらに形彫放電加工では、ワークの状況によって加工量が変化しやすく、加工毎に条件設定を行い、また加工後にその効果を確認するしかなく、慎重にならざるを得ない状況である。それでも高硬度のSiCセラミックスを加工できる有効な手段として放電加工が位置づけられており、この技術を確立することで、精密な加工を行うことができる。

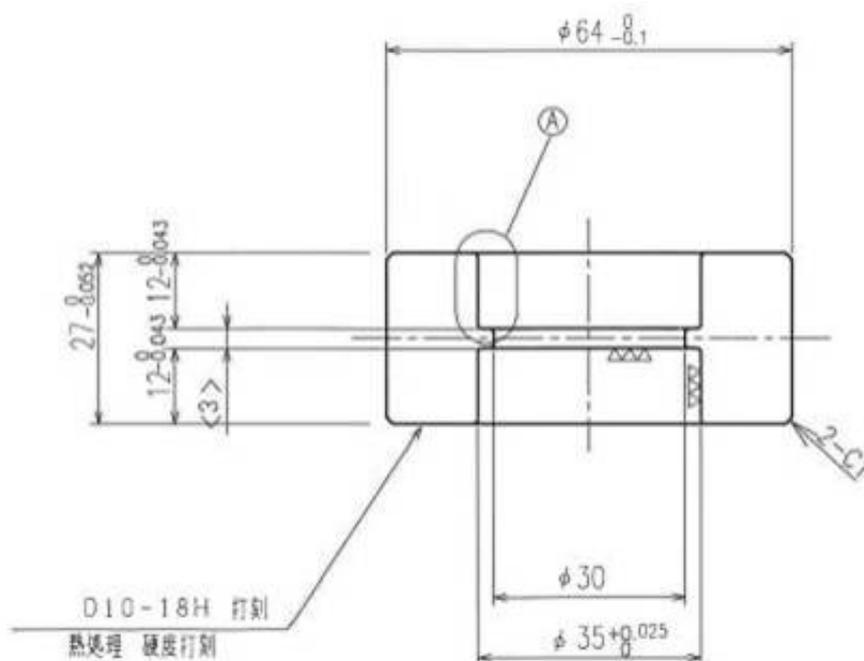


図 21 ガイドローラーの寸法

そこで、高い寸法精度を達成するためには、放電電極材質とワークの材質の相性を把握し、加工方法や条件を設定する必要がある。新規導入した形彫放電加工機により放電加工条件の最適化、また同じく新規の3次元加工機により必要な電極の形状加工を行った。それぞれを図 22、図 23 に示す。図 22 の形彫放電加工機は、アーク放電によって瞬時

にワークを溶かして表面を削る加工方法である。加工には時間がかかるがワークへの損傷が少ない加工が可能である。図 23 の 3 次元加工機は乾式と湿式の両方の仕様を備えているため、炭化体や電極の加工ができる。主にこの 2 台の加工機により試作サンプルに必要な加工を自社内で行うことができるようになった。



図 22 放電加工機



図 23 3次元加工機

放電加工では作業時間短縮のため、荒加工と仕上げ加工に分けて行う。まず、荒加工の電極材質の選定を行った。本研究で開発した SiC 材と電極素材に対する加工精度の相関を明確化する。具体的には、加工面粗さ、電極摩耗や加工時間を検討する。

一般的に荒加工には安価なグラファイト Gr が用いられる。Gr において材質が異なる 3 種類 (A, B, C)、これに銅グラファイト Cu-Gr は 1 種類 (Gr(C)相当) を選定した。図 24 に電極形状を示す。凸部が電極であり、放電面積は先端面 $10 \times 10\text{mm}$ であり、それをワークに当てて加工を行う。

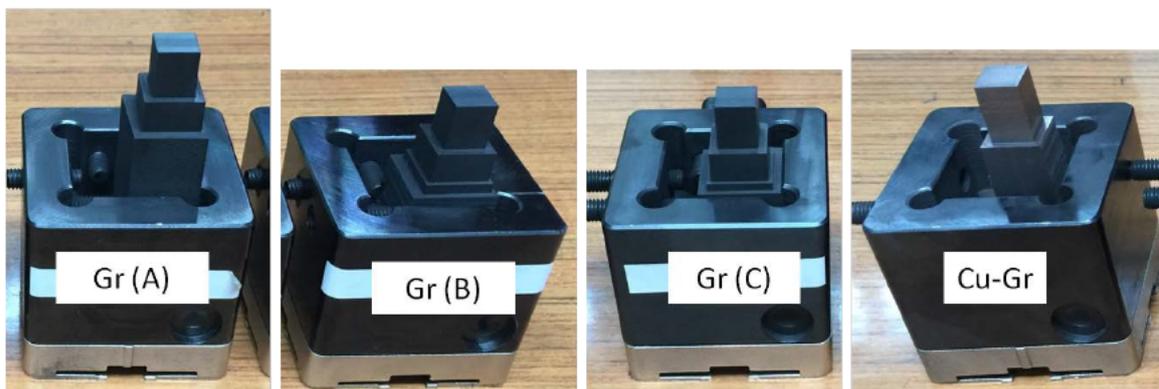


図 24 荒加工テスト用電極

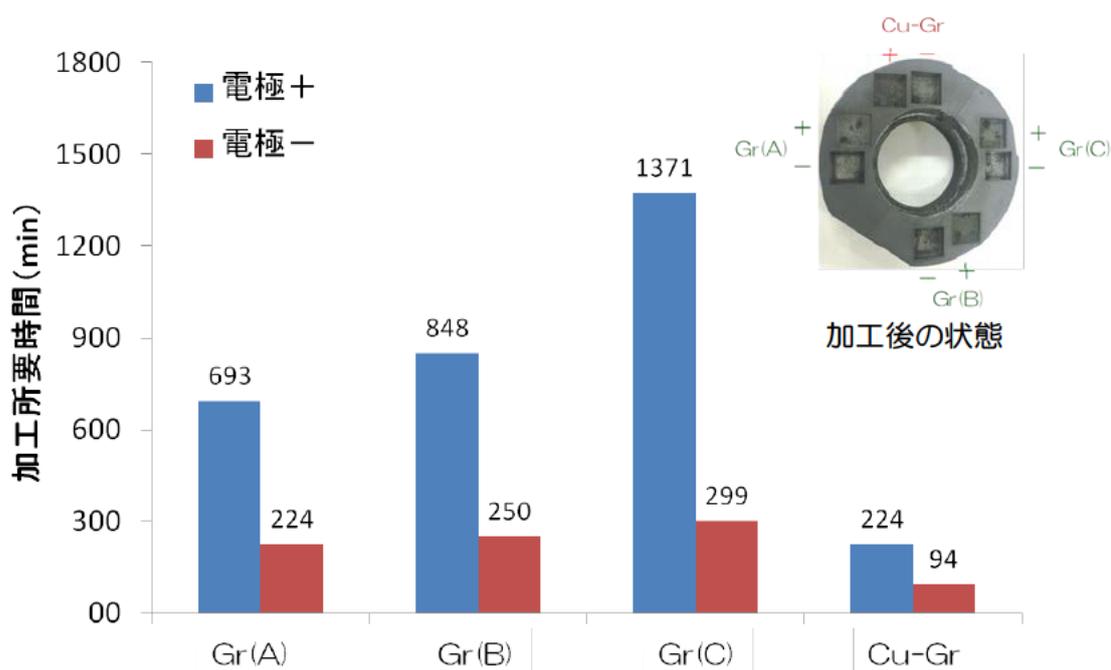


図 25 各材質における加工時間の比較

各電極における所用加工時間を図 25 に示す。Cu-Gr が最も加工時間が短かった。放電加工の加工所要時間は作業者が決めるのではなく、機械側が判断して自動で加工条件を設定している。形彫放電加工の特長として、電極や材質、表面状態など様々な要因によって、都度の加工量が異なる現象がある。そのため、設定した加工量に対する必要な時間は不明である。したがって一度テスト加工をしないと凡その加工時間が把握できない。特に未知の材質は試行錯誤の連続である。

電極とワーク間においては、電圧が掛かっており、通常電極側は (+) に設定されてある。変更は簡単にでき、形状制約のためにワークを機械軸に付ける場合や、材質によっては逆極性の方が加工性が良好な場合など、様々なケースによって使い分ける。CuGr

を使用すると、加工時間は Gr の 1/2 以下に減少した。

次に、加工後の粗度測定の結果を図 26 に示す。算術平均粗さ Ra、十点平均粗さ Rz、いずれにおいても Cu-Gr が最も小さくなった。電極の極性についても Ra、Rz とともに差は見られなかった。いずれの電極も極端に凹凸のある所は見られず平坦な形状を示していた。これらの結果から、荒加工の電極は CuGr を選定した。

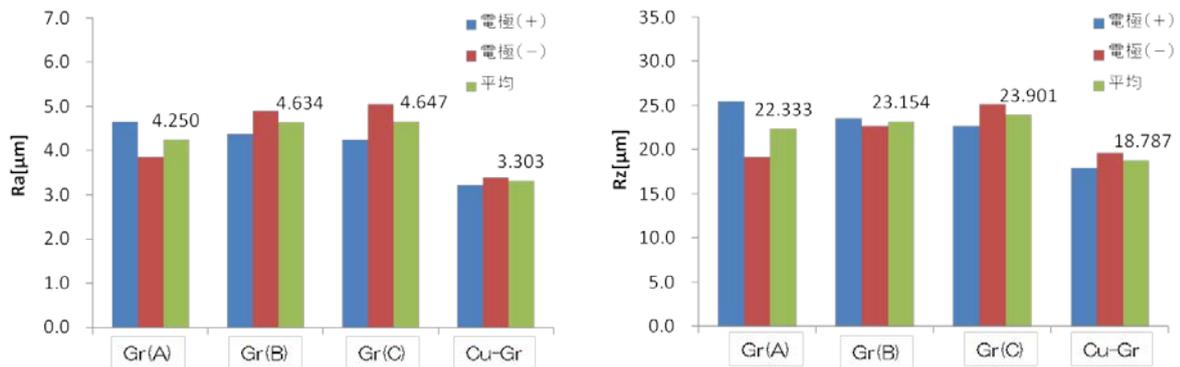


図 26 各材質における加工後の粗度比較

次に仕上げ加工の電極選定のために、図 27 に銅タングステン CuW と銅 Cu の加工比較を行った。一般的に仕上げ加工に用いられる材質として CuW がある。しかし、CuW を用いると異常放電が生じた。この異常放電は条件設定の変更による解消ができなかった。一方、Cu で加工した場合は CuW よりも摩耗は早いものの、ほとんど異常は見られなかった。これにより、仕上げ加工用の電極材質は Cu に決定した。

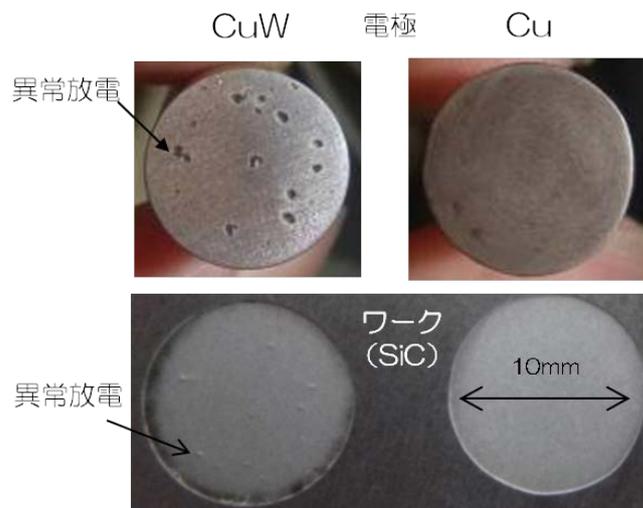


図 27 電極 Cu と CuW の特性

3-2 放電加工条件（電圧印加条件等）の最適化による加工精度の向上

放電加工条件の最適化のため、ガイドローラー形状を主としてテストを行った。ガイドローラーにおいて加工すべきところは内面、外周、端面、角である。それぞれに対応する電極の加工はすべて自社内で行えるようになった。CuGrは乾式加工、Cuは湿式加工である。

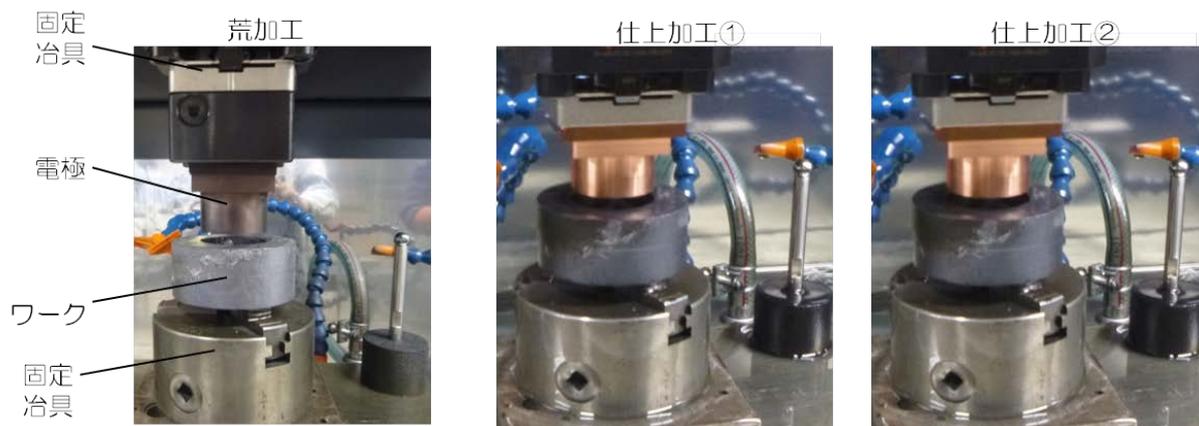


図 28 ガイドローラーの内面放電加工の様子

図 28 に内面加工実例を示す。荒加工を 1 回、仕上げ加工を 2 回行い、寸法を合わせる。2 回で公差外れの場合は、公差に入るまで仕上げ加工を繰り返す。都度加工状態を測定し、現状の寸法と図面寸法を比較し、必要な条件として電極径や揺動（電極の加工方向への動き）を微調整する。放電加工工程は長時間化する傾向があり、製品納期の問題にも絡むが、事業化を見据えるとコストへの影響が懸念される。今後は時間短縮も課題の一つである。しかし、このように高い精度で加工の制御を管理できるようになったのは大きな成果である。

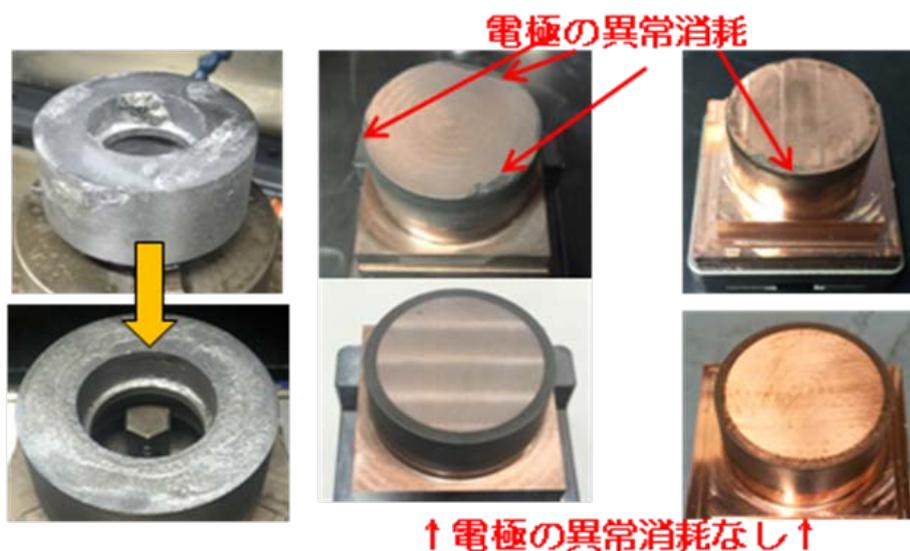


図 29 残留突起物による加工状態への影響

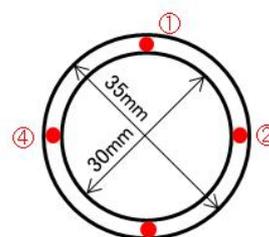
図 29 の左上のように含浸後はほとんどの場合、残留 Fe-Si がサンプル表面に付着している。このような場合、事前に平坦になるように施しておけば、安定に加工ができることがわかった。加工時間の事例を紹介すると、図 28 の直径 35mm 深さ 13mm の内面加工に要した時間は、3 時間 41 分であった。直径 30mm 深さ 3mm の場合には 27 分かかった。

加工面の粗さを表 1 に示す。今回は測定長さ全てにわたって均一な加工面となった。適切な処置を施し、寸法に対応する電極と加工条件を制御すれば、精度良く加工することができるようになった。Ra1.6 μm 以内にすべて収まっている。加工精度は 10 μm 以下の目標を達成した。

表 1 内面加工後の粗さ (μm)

		1	2	3	4
測定範囲0~5mm	Ra	1.126	1.294	1.138	1.138
	Rz	8.050	8.163	7.273	8.229
測定範囲5~10mm	Ra	1.307	1.374	1.034	1.195
	Rz	8.072	9.425	7.465	7.841

測定箇所



本研究では、新しい素材の SiC に対する加工条件を設定できるまで技術開発を進めることができた。さらに加工時間が非常に長く、特に仕上げ加工による微調整は数 μm 削るために、何時間もかかる。現状では、生産性が低くコスト高騰の原因となっているので、今後は加工時間の短縮の課題がある。様々な形状に合わせて加工する方向や条件が異なるが、今回の研究で基礎的な加工条件を掴むことができ、ノウハウをうまく管理・利用すれば、速やかに対応ができるようになった。

第4章 成形可能サイズの大型化

4-1 プレス加工機（温度・圧力均一性等）の大型化対応

大型の対象製品として図 30 に示す超硬製仕上げロールのように、直径約400mm までのロールを視野に入れている。本研究の試作としては1年目で直径100mm×厚み30mm までのサイズ対応を確認する。3年でプレス設備を直径400mm×厚み50mm まで対応できるように大型化する。プレス加工では、加熱方法や金型の形状を改善して、温度と圧力の均一化を行う。



図 30 仕上げロール例

まず、中小型の部材として直径 100mm×厚み 8mm×高さ 60mm のリングの試作品製作を行った。これまで、平板状 100×100×5mm やリング状直径 60×30mm などの比較的小型サイズの製作がメインだったが、図 31 に示すリングサイズのように大きく薄くなると、割れ易く含浸不足など不良率が激増した。割れについては、含浸の冷却時に発生した。その後、炭化や含浸条件の最適化により良品を製作することができ、目的のリング状まで仕上げることができた。



図 31 $\Phi 100$ リングの試作

次に外径 420mm×内径 320mm×幅 50mm の大型リングのプレス成形テストを行った。自作プレス台と成形用金型とによって実施した。直径 420mm となると成形治具もか

なり大型になり、ホイストクレーンを使っでの作業になった。設置するだけでも人手と時間がかかることがわかった。



図 32 金型加熱の様子

粉末を入れた金型を加熱する。金型加熱の様子を図 32 に示す。作業者の判断により金型を全体的に加熱した。初回で外部と内部の温度相関が取れない状況であったため、圧力変化を確認しながらプレスと加熱を行った。プレスは小型品を作製するときと同じ圧力になるように調整した。その後、作業ができる程度まで冷却を待って成形品を取り出した。成形品外観を図 33 に示す。取り出す際もかなり手間がかかった。結果として厚みは 20mm となり、ほぼ狙い通りのサンプルを製作することができた。

今回、小型サンプルの 6 倍以上のサイズアップとなり、通常作業とは異なる条件での実施をせざる得ない状況であった。今後は安全性を含め、治具の修正や手順の見直しなど多くの課題がある。



図 33 直径 420mm リング成形品（上）

4-2 真空炉（排気構造・雰囲気等）の大型化対応

直径 420mm の大型製品の対応をするためには、発生ガスの効率的な排気構造の検討に必要があり、焼結時の条件を再設定しなければならない。大量の発生ガスは真空設備を痛めるため、安定した稼働が難しい。最悪の場合には故障により莫大な修繕費用がかかる恐れがある。新規真空炉は高い真空度に到達することができるが、それはもともとサンプル

ルからの放出ガスがない状態が前提である。

このままでは相当量のガスが発生することが予想され、真空炉への損傷は避けられないことになる。したがって実際に作製する前はかなり慎重に検討する必要がある。この対応に関しては今後の課題である。

第5章 プロトタイプの作製・評価

5-1 エルボパイプ・ローラーの試作・基本評価

新規技術により、欠陥なく図面寸法通りのプロトタイプを試作する。候補として精密加工を必要とするガイドローラーと、接合技術を必要とするエルボパイプがある。まずガイドローラーは図 34 に示すように、製鉄所にて圧延材の搬送ガイドとして用いられる。

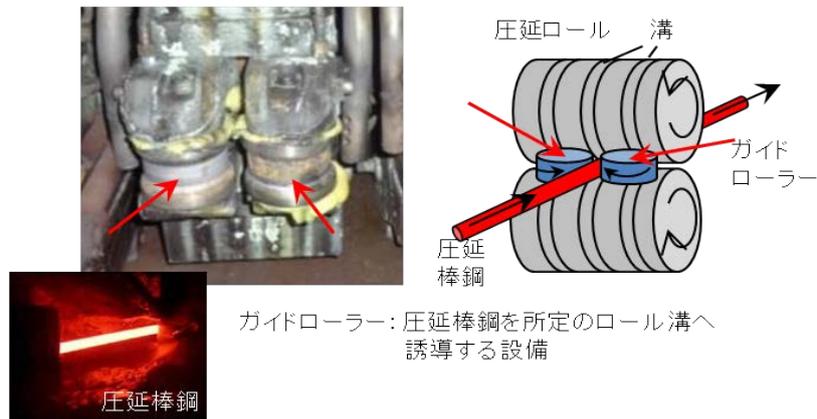


図 34 ガイドローラーの使用環境

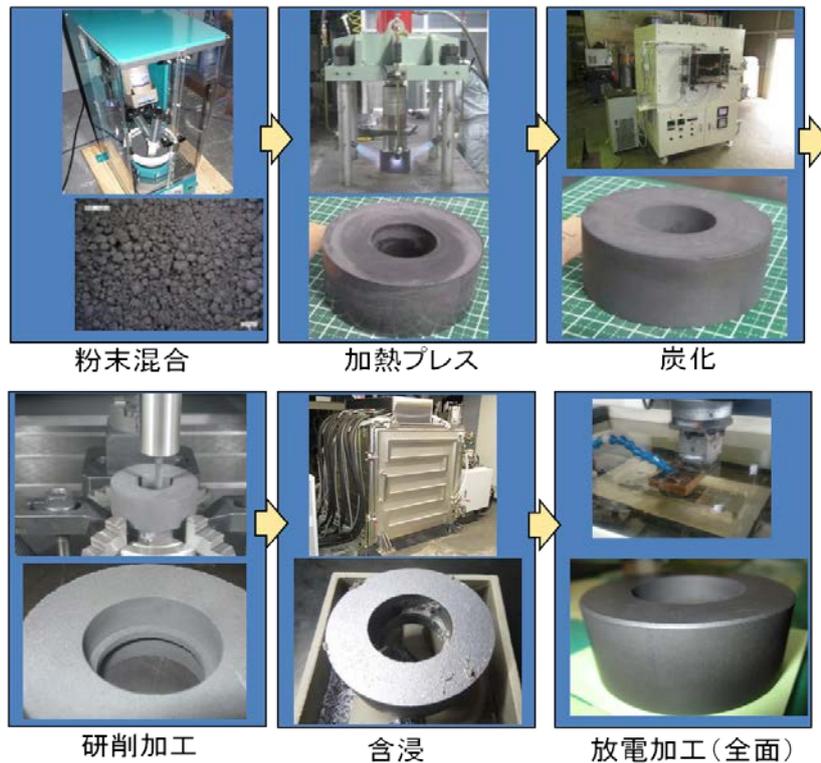


図 35 ガイドローラーの製作手順

ガイドローラー試作品の製作手順を示す（図 35）。各工程条件設定の最適化が図られ、精密な加工技術を確立できた。試作品は製品寸法公差に合格し、実証試験に移行できた。



図 36 プラント設備例

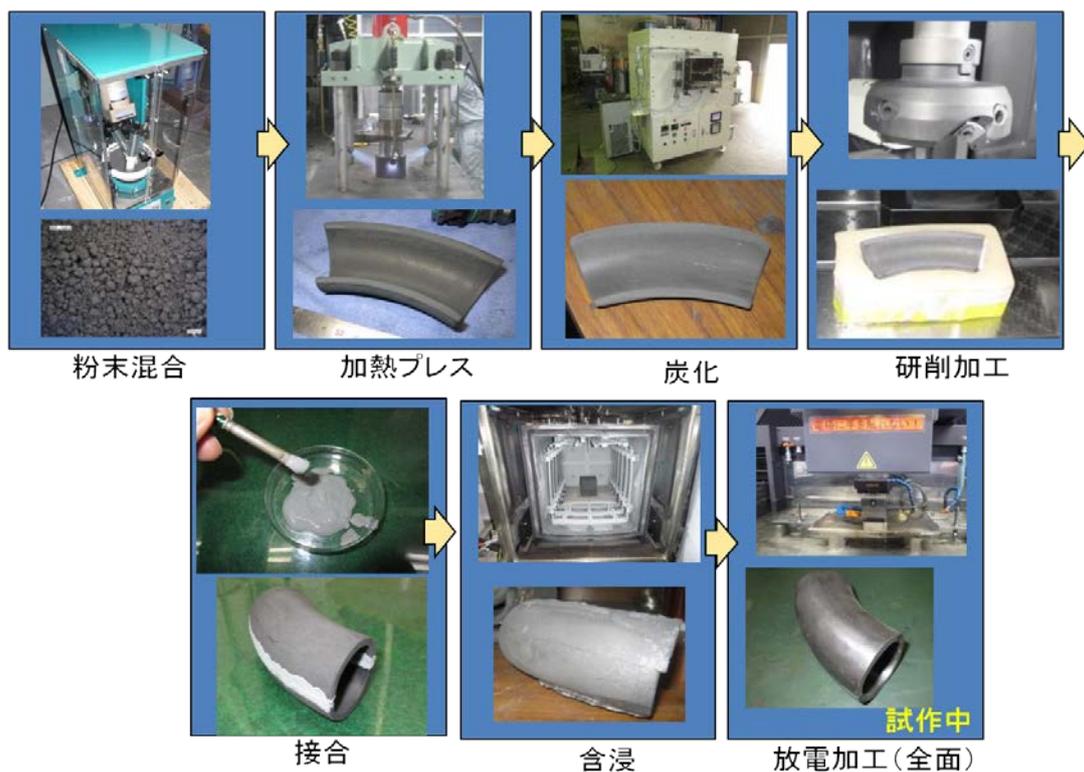


図 37 エルボーパイプの製作手順

エルボーパイプは焼却場や化学プラントなど配管の向きを変えるために用いられる部品である。使用環境例を図 36 に示す。気体、液体、個体、またはそれらの混合体、さらには腐食性、高温状態で内部を通り、プラント設備や使用箇所によって様々である。図 37 に製作手順を示す。現在、含浸後調査を行い、放電加工の準備を行っている。最終仕上げ

はまた途中であるが、ガイドローラーと同じように製作の条件設定を行うことができた。早々に試作品を完成させ、実証評価を行う予定である。

5-2 川下企業での実証試験・課題抽出

川下企業での試作品の実証試験と、その実績を評価し、使用時の課題を明確にする。年度毎の川下ユーザーの要求スペックを明確化する。

① 川下での実証試験・課題抽出

川下企業の拓南製鐵(株)において、平成 27 年 2 月に初めて試作品（棒鋼圧延設備部品：ガイドローラー）実証試験を実施した。1,467ton 通過時に現地に出向き、現物確認を行った。調査時には大きな問題は無かったが、約 2,000ton の圧延材通過後、破損した。

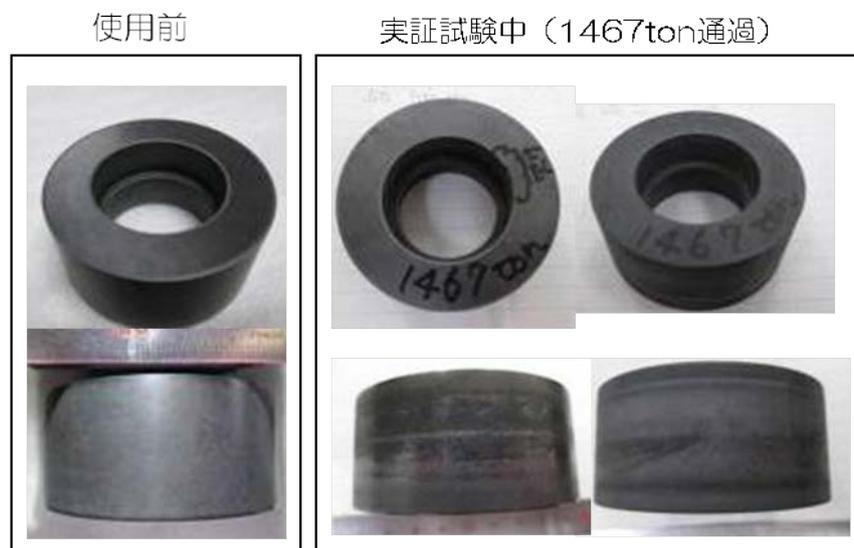


図 38 実証試験中のガイドローラー外観

この結果を受けて、これまでの 3 年間の研究の成果と合わせ、2 回目の実証試験に向けて製作を進めた。実証試験に用いたローラーについて組織観察や強度測定を行い、得られた結果から、品質の改善を行った。組織の評価は画像解析で、強度の評価は 3 点曲げ試験による数値や硬度測定値で行った。新規導入の設備およびこれまでの攪拌、炭化、含浸処理の改善により、気孔率のバラツキを大きく抑えることができ、全体的に均一な組織にすることができた。曲げ強度も高くなり、前回作成したローラーよりも安全と判断し、試作品の製造方法を決定した。寸法精度も前回よりも高くなった。また出荷前検査として亀裂検査や超音波測定などを行い、欠陥を調査した。製作中も川下企業の拓南製鐵(株)と相談し、加工のアドバイスをいただき、試作品を完成させ、再度実証試験を進めた。



図 39 実証試験 2 回目の試作品（左）取付状態、（右）検査時

図 39 に実証試験 2 回目の試作品の写真を示す。横並びに 2 個取り付けられ、これが対になるよう設置される。使用開始は平成 29 年 4 月上旬であり現在も実施中である。現在は既に前回の実績を上回り、5 月末で圧延材通過量は 5,000ton に到達した。1 次目標は 10,000ton である。6 月上旬に引き取り調査を行い、問題なければ引き続き実証試験を行う予定である。

表 2 開発 SiC と現行ローラー材 WC の物性比較

	WC-Co	SiC
曲げ強度 (GPa)	1.7	0.29
比重 (g/cm ³)	15.7	3.14
硬度 (HV)	1000	2850
熱膨張率 (10 ⁻⁶ /°C)	5.4	4.5
熱伝導率 (W/m・K)	70	294

川下企業のニーズに応えるには、必要な仕様を明確にしなければならない。ここで開発した SiC と現行の一般ローラー材 WC-Co の物性値の比較を表 2 に示す。超硬 WC-Co の曲げ強度 1.7GPa は SiC の曲げ強度 0.29GPa の 6 倍である。一例として熱衝撃に対する評価を行うと、温度差使用温度 1,000°C、熱伝達係数 5,000W/m²・K と想定して、ガイドローラーサイズに発生する熱応力は、WC-Co の場合 494MPa、SiC では 69MPa と算出された。したがって、発生応力は SiC の方が約 7 倍小さいため、高い熱衝撃を要する環境では超硬よりも SiC 製の方が適正は良いと考える。

これまでの製造技術の確立により適応拡大への展開が可能になった。様々な部材への適応は同じ仕様ではないことは明らかであるが、現状適応できる部材、これから開発を進めて強化すべき性能など課題を明確にし、多くのニーズへ対応できるように情報を整理する必要がある。

②川下企業への視察

川下企業として現状把握のために拓南製鉄株式会社(沖縄県)に視察を行った。会社概要を図

40 に示す。沖縄に拠点を置いた電炉メーカーであり、棒鋼棒線などの生産を行っている。製鉄所内の見学を行い、詳細かつ丁寧に工場全体、生産ラインの説明を頂いた。この時、1 回目実証試験中の試作品の調査も行った。また実際にガイドローラーを取り付ける場所や設備などの確認もできた。実際に現場に立ち、肌感覚で理解できた。今年 4 月にも、2 回目の実証試験に際して再び調査訪問を行っており、今後も目標達成まで調査を続ける。さらにガイドローラー以外の製品についても、SiC で代替できるかなどニーズ情報をしっかりと取り込んでいく。

北九州市環境局日明環境センター日明工場（福岡県）においてはヒアリングを実施したが、早急にテストできる部品はなかった。今後も市内にある施設情報に関しては幅広く視野を広げ、ニーズの確認・模索を積極的に行い、常に新しい情報を取り入れ、計画・目標に反映する必要がある。



製品

Products

T-コン
シルバー鉄筋

鉄筋コンクリート用棒鋼 (JIS G3112)

- SR 材 丸鋼 (R7,8,9,10,12,12.5,16)
- SD 材 異形棒鋼 (D10 ~ D51)
- ネジテツコン (D10 ~ D51)
- 異形コイル (D6,10,13,16/ レイニング式)

軟鋼線材 (JIS G3505) SWRM材 コイル (φ7,8,9,10,11,12,12.5,16)

- 国際規格 コイル (φ7,8,9,10,11,12,12.5,16)

一般構造用圧延鋼材 S S 材 コイル (φ7,8,9,10,11,12,12.5,16)

溶融亜鉛めっき鉄筋 (シルバー鉄筋) 異形棒鋼 (D10 ~ D51)

溶融亜鉛めっき鉄筋 (シルバー認定鉄筋: 国土交通省大臣認定)

- 異形棒鋼 (SD295AG:D10 ~ D32, SD345G:D10 ~ D38)

高強度異形棒鋼 SPR785 (拓南製鐵) (国土交通省大臣認定) 異形棒鋼 (T10 ~ T16)

閉鎖形フープ筋 (日本建築センター評定) T-コンフープ・パワーリング 7R5

工業用石灰 (JIS R9001) 生石灰、消石灰

図 40 拓南製鉄(株)の紹介

第6章 全体総括

6-1 複数年の研究開発成果

3年間の研究成果は下記の通りである。

サブテーマ	No.	実施項目	最終技術的目標値	成果概要
[1] 接合技術の最適化	1-1	粉末原料(組成・攪拌方法等)の最適化による割れ抑制	焼結時体積変化率0.1%以下	① サブテーマ[1], [2]の目標値をほぼ100%クリアーでき、一連の工程に対する条件設定を決定することができた。 ② 品質保証の担保は用途別検討の重要性が把握された。 ③ その担保として、強度・均質性等があり、それらを数値化する方式を掴みつつある。 ④ 事業化に向けて、コストダウンの狙いどころが把握できた。
	1-2	接合面の特性(粗さ・間隙等)の把握と最適化	接合面加工精度10 μ m以下達成	
	1-3	接合用補助剤(成分・組成等)の適正化による接合合格率の向上	気孔5 μ m以下 or 接合合格率 100%	
	1-4	焼結時雰囲気(真空度・温度等)の改善による組織の緻密化	真空度改善 10 ⁻¹ Pa \rightarrow 10 ³ Pa以下	
	1-5	含浸用Fe-Si合金(組成・粒径等)の適正化による組織の緻密化	気孔率 5% \rightarrow 2%以下	
[2] 精密加工技術の最適化	2-1	放電加工電極(材質・形状等)の選定と放電加工特性の把握	放電加工精度 10 μ m未未満達成	⑤ 川下企業におけるモニター用プロトタイプが完成でき、実モニターに投入できた。
	2-2	放電加工条件(電圧印加条件等)の最適化による加工精度の向上	放電加工精度 10 μ m未未満達成	
[3] 成形可能サイズの大型化	3-1	プレス加工機(温度・圧力均一性等)の大型化対応	ϕ 400ロールの試作	⑥ ϕ 400ロールの試作品完成まで到達。
	3-2	真空炉(排気構造・雰囲気等)の大型化対応	ϕ 400ロールの試作	
[4] プロトタイプの作成・評価	4-1	エルボパイプ・ローラーの試作・基本評価	試作品製作ラボ試験評価	
	4-2	川下企業での実証試験・課題抽出	試作品の川下企業での実証試験	

新規の2段階反応焼結法が確立でき、現在実証試験を行っていることは大きな成果である。また、川下企業の現場を実際に確認すると共に、現地での打合・協議を重ねること等により、ニーズを的確・迅速に捉える体制の下に製品を開発し、早期事業化の実現に結び付ける。

6-2 研究開発後の課題

- まずは性能面での強化を対応中である。コストに関して、加工時間に伴う人件費が大半を占めるため、今後、加工時間の短縮については補完研究で対応する。
- 川下とのヒアリング・視察を含め、適正な環境見極めを行う。
- 当社営業部への本取組みに対する周知徹底を行い、各営業先のニーズのヒアリングを実施する。さらに社内的に用途開発を組織的に考え、体制作りを進める。試作評価で多くの実績が得られれば、展示会や発表を積極的に行い、広く発信する。
- 当社来年度以降の事業計画(開発・営業)に取り入れ、予算組みおよび販売計画を明確にする。

- 試作品の曲げ強度評価方法については、JIS による評価を行い明確化する。内外部の見た目で判断だけでなく、画像解析やシミュレーションを利用し、数値評価とその標準化を進める。まだ実環境実績がないため、これから多くのデータ蓄積により、SiC を適応する効果を明確にする。
- 欠陥や性能優劣の非破壊検査方法を確立させ、不良検出・出荷可否の判断を速やかにできるように、検査技術を整える。
- 派生技術で特許（技術・商標：国内外）を出願する。学術的な現象については論文発表する。国内に関わらず、国外メーカーにも十分に通用する技術であるため、知財戦略に対しては、海外特許を含め重点課題として対応し、広く販売展開が図れるよう対応する。

6-3 事業化展開

事業化に向けたスケジュールは以下の通りである。

実施内容	平成29年度 上期	平成29年度 下期	平成30年度 上期	平成30年度 下期	平成31年度 上期	平成31年度 下期	
【1】補完研究 ・工程の最適化 ・製品性能評価 ・出荷検査 ・大型化 ・量産化	→						
【2】実証試験による評価 ・ローラー【鉄鋼分野】 ・パイプやフランジ【環境プラントや電力関係】 ・その他新規製品	→						
【3】技術営業展開 ・社内営業へ周知徹底 ・組織的な用途開発体制構築 ・既存や新規客先への発信 ・市場調査、拡販計画		→					
【4】量産体制構築 ・生産スペース ・設備増強増設 ・製販増員				→			

補完研究を進め、さらに工程の最適化を図る。開発できた試作品は実証試験に乗せ、評価実績を作る。社内営業展開と量産のための設備や増員を検討する。

販売計画は下記の通りである。3年後には製品販売開始を計画している。

- 川下企業の拓南製鐵(株)との連携については、本提案の前から弊社と良好な連携を図っており、この提案においても使用環境や既存製品情報について、率直な意見やアドバイス

を頂くなど協力を得られている。

- 製鉄分野に関わる当社の営業部では従来から国内外に問わず、鉄鋼メーカーとの取引実績（ロール・ローラー）があるため、新規商品として SiC 製品の売込みが容易である。使用環境に対応する信頼性評価やサンプル出荷などは顧客要望に基づいた対応が可能であり、速やかに事業化への足掛かりを整えることができる。
- 未開拓分野のプラント・電力関係があるが、取引企業経由で共同提供が可能である。民間プラント設備であれば実機評価も容易であるため、速やかに実証試験を行うことができる。

以上により、解決すべき課題の明確化と優先順位を決定し、補完研究により適切な対応を行う。また生産と営業の社内体制を整え、早期の事業化実現に向けて取り組んでいく。