

平成 2 2 年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「真空処理による溶湯改質で高強度鋳鉄の
半凝固鋳造法の確立とコンパクトライン
による実用化の開発」

研究成果等報告書概要版

平成 2 3 年 3 月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人中部科学技術センター

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 当該プロジェクト連絡窓口

第2章 球状黒鉛鋳鉄の高強度化材料の実用化開発

- 2 - 1 研究目的及び目標
- 2 - 2 実験方法
- 2 - 3 研究成果

第3章 半凝固鋳造金型の設計と開発（シミュレーション含む）

- 3 - 1 研究目的及び目標
- 3 - 2 実験方法
- 3 - 3 研究成果

第4章 半凝固鋳造装置の設計・製作と鋳造・加圧条件の確立

- 4 - 1 研究目的及び目標
- 4 - 2 実験方法
- 4 - 3 研究成果

第5章 コスト評価

- 5 - 1 研究目的及び目標
- 5 - 2 実験方法
- 5 - 3 研究成果

第6章 川下産業の評価

- 6 - 1 研究目的及び目標
- 6 - 2 実施内容および結果
- 6 - 3 研究成果

第7章 全体総括 3年間にわたること。

- 7 - 1 成果の総括
- 7 - 2 工業所有権の取得状況及び対外発表等の状況
- 7 - 3 今後の事業化に向けた取組み

成果報告書概要版

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

本研究開発は、「中小企業の特定制品づくり基盤技術の高度化に関する指針」のうち、以下の項目に対応した研究開発である。

十) 鑄造に係る技術に関する事項

1 鑄造に係る技術において達成すべき高度化目標

- ・川下製造業者の抱える課題及び要請

(1) 自動車に関する事項 ア．高強度化 カ．低コスト化

背景

- ・自動車産業においては、国際競争力確保の観点から、機能向上を図りながらコストの低減を求めている。また、安全問題への対応等から、構成部品の高強度化が進展し、駆動部品をはじめ、車体部品等においては、これまで以上に高強度な部品が求められ、低コストで高品質・高強度でバラツキの少ない部品製造を可能とする新たな製造技術開発のニーズが高まっている。
- ・現状、強度が要求される構成部品については、一般的に鋼の鍛造材が採用されているが、鋼の鍛造材は、化学成分から炭素含有量が少なく、低サイクル疲労などの疲労強度がヤング率に比例するので一般の鑄鉄品に比べて高くなる。
- ・一方、これまで自動車部品においては、保安部品としての制動・足廻り部品およびエンジン部品のフランジ・ブラケット類およびクランクシャフトに至る各種高強度部材の鋼の鍛造品が、鍛造と比べ低コストで製造できる球状黒鉛鑄鉄に転換された実績があるものの、剛性及び靱性について鍛造材に匹敵するレベルを維持しつつ、低コストかつ中小企業においても安定的に製造することを可能とする鑄造技術については現時点では確立されていない。

研究開発動向

- ・近年アルミニウムの鑄物では、ダイキャスト、重力金型鑄造に加え、機械攪拌や超音波攪拌による「半凝固鑄造法」が実用化されている。
- ・一方、鉄系における「半凝固鑄造」の研究開発については、鉄系の普通鑄鉄の砂型鑄造では、名古屋大学での産・学・官連携での成果である溶解技術およびシミュレーション技術（滝田光晴、阿部泰雄ら「鑄鉄への半凝固プロセスの適用の有効性」鑄造工学 第76巻3号 pp. 185 - 191 小林賞受賞論文）の研究があり、同様に普通鑄鉄の半凝固鑄造においては、名古屋大学の「高融点合金のセミソリッド（半凝固）鑄造」（名古屋大学：鑄鉄の鑄造方法、特許 2004-315994）及び中小企業提案者らを含めて、実験研究してきたT形ボルトの鑄造試験での知見（T形鑄物の半凝固鑄造・加圧プロセス、第149回日本鑄造工学会全国講演大会）が存在する。

- ・しかしながら、いずれも普通鑄鉄の研究にとどまり、高強度な材質である球状黒鉛鑄鉄での研究は、球状黒鉛鑄鉄の黒鉛を球状化させる工程が、高温で粉塵発生が多く、温度制御や化学成分のコントロールの面で難しいといった課題が存在し、これまで実施されていない。

1 - 1 - 2 研究目的及び目標

本研究開発は、現在合金化または熱処理で高強度化が図られている鑄鉄鑄物について、「半凝固鑄造法」を適用し、鑄鉄組織を微細化することで鋼に匹敵する高強度を実現可能とするような新たな鑄造技術を確立する。本半凝固鑄造法は、後工程の切削性の改善にも寄与するものであり、これにより、新たな鑄造品用途拡大を目指すとともに、関連産業へのコスト削減へ貢献する「新材質」の創生に資するものとする。

1 - 1 - 3 研究の概要

自動車産業においては、国際競争力確保の観点から、機能向上を図りながらコストの低減が求められている。また、軽量化指向、安全性の追求への対応等から、構成部品の高強度化が進展しており、駆動部品をはじめ、車体部品等において、高強度な部品が求められている。このため、球状黒鉛鑄鉄品の半凝固鑄造法による高機能化、実用化への技術開発により新材質の創生をはかる。さらにIT技術を駆使しプロセスコントロールを進め、省スペース化を実現した製品1個込めのコンパクトラインの開発へつなげ、中小企業にも導入しやすい鑄造装置を提供する。これらにより低コストで高品質・高強度でバラツキの少ない部品製造を可能とする新たな製造技術開発を行うものである。

最終的には、以下の技術目標値の達成を目指す。

- 1) 高強度：引張強さ 1 0 0 0 M P a
伸び 1 8 %
硬さ H B 2 6 0 ~ 2 8 5
- 2) 高品質：不良 1 %
歩留 9 0 %
- 3) コスト削減： 2 0 %

本年度は、次の三つの課題についての研究開発を行なった。

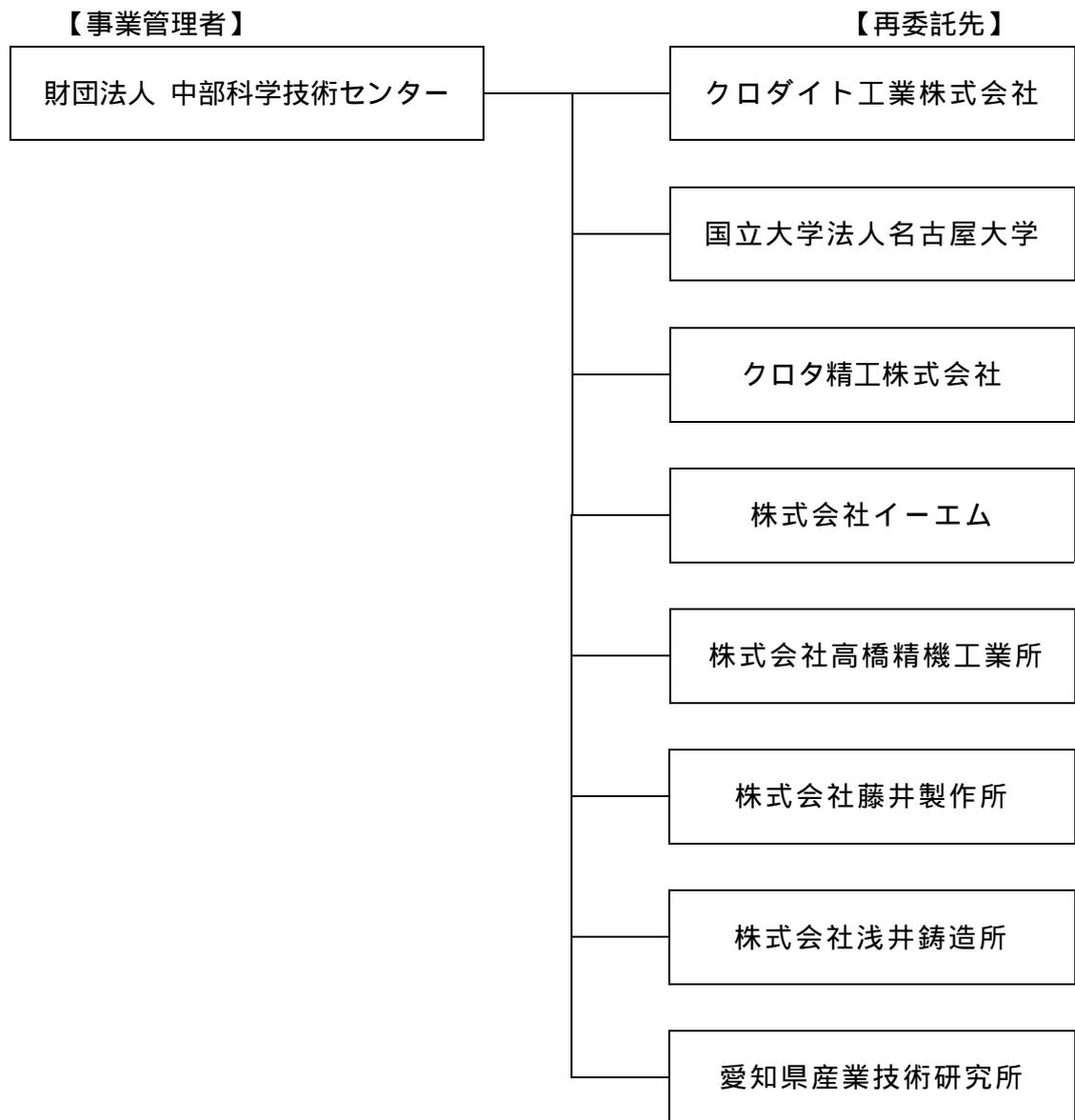
半凝固鑄造法の製造装置を使用して対象製品キャップを高強度・高品質化レベルで量産化する鑄造条件の開発・検証・改善

コスト削減可能な半凝固鑄造法のコンパクトラインの及び検証・改善
事業化の検討

また、本研究開発の円滑な推進を図るため、事業管理者を中心にプロジェクトの進捗状況を定期的にチェック・フォローする体制で推進した。

1 - 2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者、協力者）

1 - 2 - 1 研究組織（全体）



総括研究代表者（PL）
クロダイト工業株式会社
高木 浩

副総括研究代表者（SL）
国立大学法人名古屋大学
准教授 滝田 光晴

副総括研究代表者（SL）
クロダイト工業株式会社
取締役 黒田 英嗣

1 - 2 - 2 研究開発分担・・・(主たる研究実施場所については、下線表記)

クロダイト工業株式会社高浜工場

〒444-0013 愛知県高浜市八幡町一丁目1番地

国立大学法人名古屋大学

〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

ククタ精工株式会社

〒447-0887 愛知県碧南市汐田町1丁目26番地

株式会社イーエム

〒464-0856 愛知県名古屋市千種区吹上2丁目3番11号

株式会社高橋精機工業所

〒457-0007 愛知県名古屋市南区駈上1丁目7番38号

株式会社藤井製作所

〒447-0003 愛知県碧南市雁道町4丁目15番地

株式会社浅井鋳造所

〒491-0814 愛知県一宮市千秋町小山字東仲田12番地

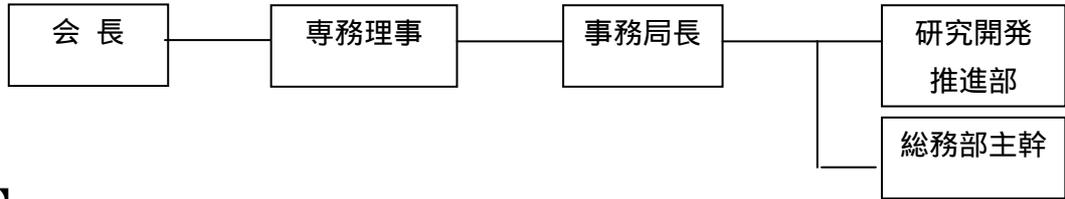
愛知県産業技術研究所

〒448-0013 愛知県刈谷市恩田町一丁目157-1

1 - 2 - 3 管理体制

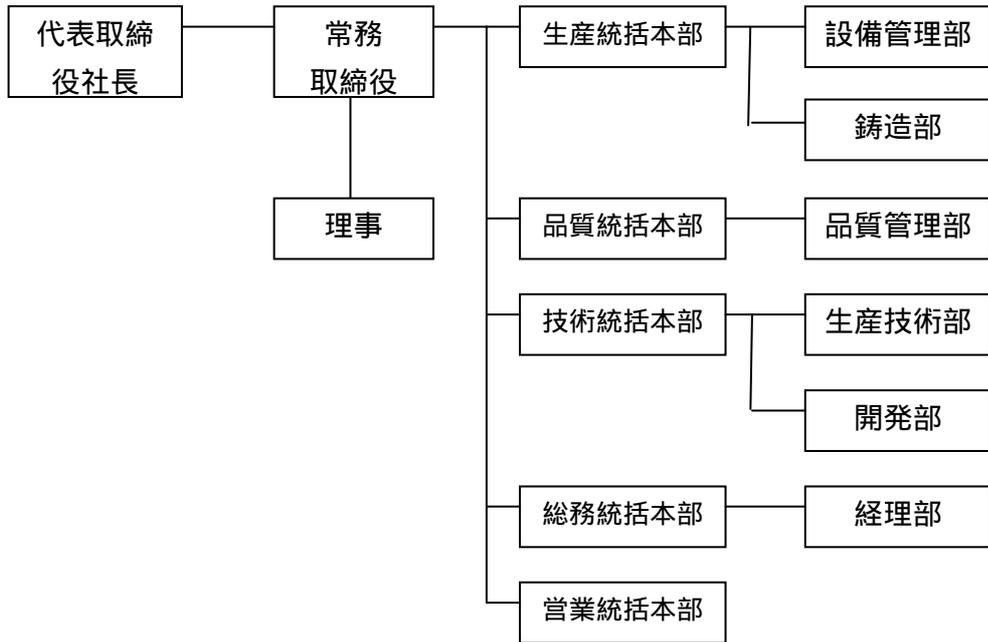
【事業管理者】

財団法人 中部科学技術センター

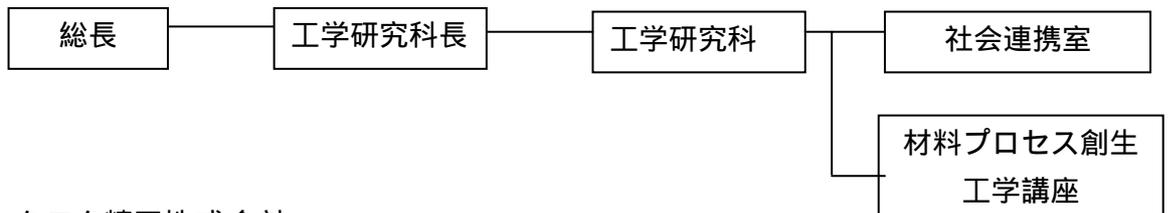


【再委託先】

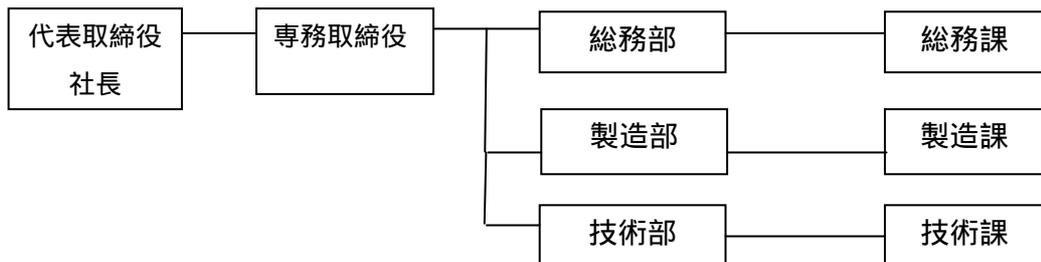
クロダイト工業株式会社



国立大学法人名古屋大学



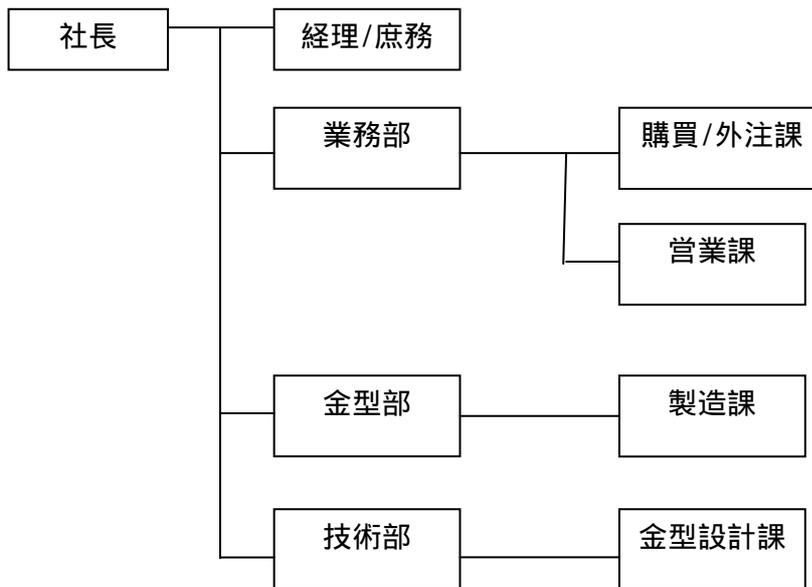
クロタ精工株式会社



株式会社イーエム



株式会社高橋精機工業所



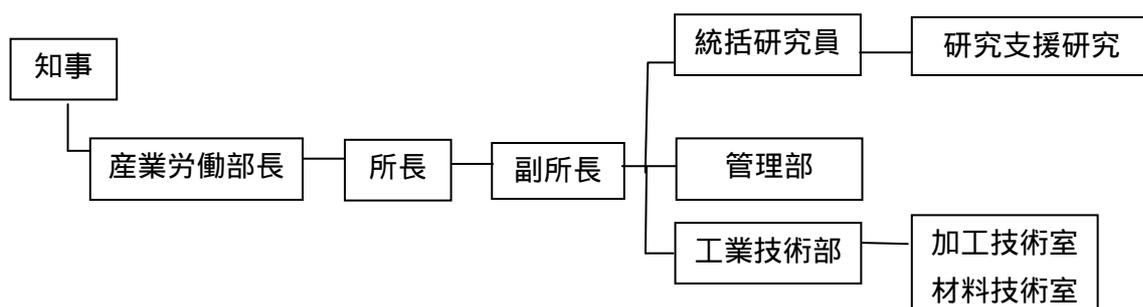
株式会社藤井製作所



株式会社浅井鑄造所



愛知県産業技術研究所



1 - 2 - 4 管理員及び研究員

【事業管理者】 管理員のみ

財団法人 中部科学技術センター

氏名	所属・役職	実施内容
永田達也	研究開発推進部長	
福嶋 昭	研究開発推進部 担当部長	
大沢秀敏	研究開発推進部 担当部長	
平澤 進	研究開発推進部 主幹	
宮島和恵	研究開発推進部 主任	
高須容功	研究開発推進部 主任	

【再委託先】

研究員のみ

クロダイト工業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容
高木 浩	理事	総括研究代表者 ~
黒田英嗣	社長室 取締役	副総括研究代表者 ~
磯村仁志	生産技術部 副部長	~
中村直樹	生産技術部	~
尾崎 誠	生産技術部	、
前田 崇	設備主任	

国立大学法人名古屋大学

氏名	所属・役職	実施内容
滝田光晴	准教授	副総括研究代表者 ~ 4月～9月

クワタ精工株式会社

氏名	所属・役職	実施内容
鈴木泰博 杉浦定義	代表取締役社長 専務取締役	研究統括 、

株式会社イーエム

氏名	所属・役職	実施内容
斎藤 謙 岡田 勝美	代表取締役 取締役部長	研究統括

株式会社高橋精機工業所

氏名	所属・役職	実施内容
高橋 茂壽 後藤 幸喜 高橋 寿崇 臼木 稔 秋田 信夫 塩入 武郎	代表取締役社長 金型部 製造課 工場長 業務部 営業課・金型部 製造課 金型部 製造課 技術部 金型設計課 主席技師 技術部 金型設計課	研究統括

株式会社藤井製作所

氏名	所属・役職	実施内容
藤井孝夫	取締役	研究統括 、

株式会社浅井铸造所

氏名	所属・役職	実施内容
浅井敬司 渡邊弘志	工場長	研究統括

愛知県産業技術研究所

氏名	所属・役職	実施内容
黒澤 和芳 古澤 秀雄 斉藤 昭雄 山本 紘司 花井 敦浩 伊藤 賢次 藤原 梨斉 彦坂 武夫	工業技術部 加工技術室 室長 工業技術部 加工技術室 主任研究員 工業技術部 加工技術室 技師 工業技術部 加工技術室 技師 工業技術部 加工技術室 技師 工業技術部 材料技術室 主任研究員 工業技術部 材料技術室 技師 企画連携部付 研究支援専門員	研究統括

1 - 2 - 5 アドバイザー

ビヨonz株式会社

氏名	所属・役職	実施内容
秋山 琢也	業務部 営業課・課長	

三井ミーハナイトメタル株式会社

氏名	所属・役職	実施内容
鈴木 昌行	技術部・マネージャー	

品川白煉瓦株式会社

氏名	所属・役職	実施内容
南部 安利	元 工場長	

新東工業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容
橋本 邦弘	鋳物センター・所長	

海上保安大学校

氏名	所属・役職	実施内容
前田 安郭	海上安全学講座・教授	

社団法人日本鋳造協会

氏名	所属・役職	実施内容
竹田 功	グループリーダー	

社団法人中部航空宇宙技術センター

氏名	所属・役職	実施内容
近藤 靖彦	専務理事兼事務局長	

国立大学法人名古屋大学

氏名	所属・役職	実施内容
野村 宏之	工学研究科 名誉教授	

1 - 3 成果概要

成果報告書については、3年間の成果報告書として、各章で記述した。本年度の実施計画書の実施項目は、表 1 に成果概要を示す。

研究開発の概要（本章の内容）

球状黒鉛鋳鉄の高強度化材料の実用化開発

半凝固鋳造用金型の設計と開発（シミュレーションを含む）

半凝固鋳造装置の設計・製作と鋳造・加圧条件の確立

コスト評価

川下産業の評価

全体総括

表 1 本年度（平成22年度）の実施計画の項目と成果概要

本年殿実施内容		実施項目および成果
半凝固鋳造法の研究		
-1	キャップ試作品の評価と量産実用化への改善	・高強度化の物性値目標は、ほぼ達成した。不良率・歩留・コストは未達成。
-2	加圧の研究	・加圧機構を持つシールドブロック金型の製作と加圧代の自動計測を実施。 ・加圧機のサーボ化を実施。
-3	超急冷効果による金型の半凝固鋳造への金型製作研究	・急速冷却（超急冷）を実現する金型材質の銅と鋼の複合化を実施
-4	半凝固鋳造法へのシミュレーションの活用研究	・鋳造方案も決定できるシミュレーションを確立した。
-5	半凝固鋳造法によるフィールドテストの実施	・溶解チャージ91チャージで注湯回数228回の実験から鋳造条件と管理限界の設定を行った。
	半凝固鋳造法のコンパクトラインの開発	・注湯で真空容器から溶湯を汲み出す作業のみ手動で、鋳造自動化の試作機が完成した。
	事業化の検討	・川下産業による加工評価を受けた。 ・メーカーへの提案には至らず

目標に対する成果は、球状黒鉛鋳鉄の半凝固鋳造品の高強度化については、達成に近いが、半凝固鋳造が低温域の注湯で、その課題である不良・歩留・コストの目標達成へ開発を続けている。

1 - 4 当該プロジェクト連絡窓口

事業管理者

住所：愛知県名古屋市中区栄二丁目 17 番 22 号 名称：財団法人中部科学技術センター 代表者役職・氏名： 会長 野嶋 孝 連絡先：Tel (052) 231-3043 Fax (052) 204-1469
連絡担当者所属役職・氏名：研究開発推進部長 永田達也 Tel: (052) 231-3043 Fax: (052) 204-1469 E-mail: h.sado@cstc.or.jp

総括研究代表者	副総括研究代表者	副総括研究代表者
(フリガナ)：タカギ ヒロシ 氏名：高木 浩 所属組織名：クワダ 工業(株) 所属役職：理事 Tel：0566-52-4069 Fax：0566-52-0001 E-mail：takagi@kurodite. co.jp	(フリガナ)：タタ ミツル 氏名：滝田光晴 所属組織名：国立大学法人 名古屋大学 所属役職：准教授 Tel：052-789-4646 Fax：052-789-4646 E-mail：	(フリガナ)：クワダ ヒデツグ 氏名：黒田英嗣 所属組織名：クワダ 工業(株) 所属役職：取締役 Tel：0566-52-4069 Fax：0566-52-0001 E-mail：hkuroda@kurodite. co.jp

第2章 球状黒鉛鑄鉄の高強度化材料の実用化開発

2-1 研究目的及び目標

名古屋大学において傾斜冷却板及び加圧方式採用の半凝固鑄造による鑄鉄高強度化の技術開発がなされた。このシーズの実用化を図る目的で、自動車部品の熱間鍛造材の代替を狙い、「キャップ部品」を対象として開発を進めた。しかし、現場での鑄物作りで、傾斜冷却板による半凝固鑄造では、鑄鉄組成の極めて狭い半凝固領域の温度の制御の難しさと冷却板上での溶湯の層流状態が得られ難く、鑄物への気泡巻き込み不良の対策が極めて困難であった。また、溶湯加圧では加圧ピンが鑄物に溶着する問題点など、最適な鑄造条件と加圧条件のブレークスルーに至れなかった。そのため、研究開発委員会で議論し、低温鑄造及び超急冷（急速冷却）鑄造そして金型全面加圧方式に開発技術の変更を行った。球状黒鉛鑄鉄の高強度化に向けた鑄造条件および熱処理条件の確立を目指し、半凝固鑄造の実用化の研究開発を進めた。

開発目標

高強度化	引張強さ	> 1000MPa
	伸び	> 18%
	硬度	HBS260~285
低コスト化	歩留	> 90%
	不良率	< 1%
	鑄造サイクルタイム	30秒

2-2 実験方法

各研究開発担当委員は、真空処理装置および45トンプレス機の改造を進め、鑄造そして加圧実験から半凝固鑄物の検証を進めた。図1は、真空処理装置及び鑄造実験装置の全体を示す。



図 1 真空処理装置および鑄造装置

半凝固鑄造鑄鉄品キャップの鑄造実験では、平成21年度に達成できなかった高強度化の

実現に向けて、初晶がオーステナイトと黒鉛で異なる亜共晶組成と過共晶組成の化学成分の2組成を用い、事前に発光分光分析で成分保証された球状黒鉛鑄鉄溶湯を1480で溶製した。この溶湯を100kg取鍋に移し、真空処理装置内で、 10^{-3} MPaに1分間減圧保持し、鑄鉄中のガス等の不純物を取り除いて、球状黒鉛の微細化と湯流れ性の改善を行った。

100kg取鍋から1000以上に予熱された小型取鍋（ヒシャク）で、球状黒鉛鑄鉄溶湯を一定量汲み出し、注湯温度を3段階（1310、1280、1250）に変化させて、自動注湯装置にて、対象製品キャップ2個込み金型の材質構成を変えて3種類製作した金型内に注湯速度1秒以下で瞬間注湯した。

サーボ機構化したプレス機で、組織の緻密化と共に、内部巣を低減するため、金型に低温で鑄込まれたキャピテイ内の溶湯が半凝固状態を保った状態で1mmの加圧位置シロの移動量を45トンで型の全面加圧を行い、凝固終了までそのまま保つシールドブロック方式で加圧した。

半凝固鑄造品の高強度化を図るオーステンパー処理では、オーステナイト化保持と恒温保持についての最適な温度及び保持時間の条件を探索した。

鑄造品の高強度化については、テストピース用金型で作製した鑄造品をオーステンパー処理後、引張試験用のテストピースに加工して、50トンアムスラー試験機とオートグラフ引張試験機で引張試験を行った。硬度についてはロックウエル硬度計およびピッカース硬度計で測定して、ブリネル硬度に換算した。

引張試験後のテストピース破断面は、破断面拡大顕微鏡を使いマクロ組織を観察した。そして、破断面のミクロ組織を金属顕微鏡組織、画像解析装置でミクロ組織検査を行った。

対象製品であるキャップ鑄造品については、図2に示す鑄造品の外観検査を行い不良解析をシミュレーションでも検討した。内部欠陥については、超音波試験機で内部巣の確認調査を行った。キャップ鑄造品良品については、寸法検査を行った。その後川下産業での試加工を行い、製品評価までを行った。図-2に、鑄造状態のキャップ鑄物を示す。



図 - 2 鑄造した状態のキャップ

2 - 3 研究成果

鑄造実験については、平成22年3月末までは昨年度のSKD61鋼製金型2個込めを使った開発実験を続けた。

真空処理溶湯のSKD61鋼製キャップ2個込めシールドブロック金型での鑄造結果は、SKD61金型による半凝固鑄造品では、鑄物形状では良品率22%に至ったが、高強度化の達成に至れなかった。

2 - 3 - 1 銅金型で高強度化及び不良対策を図るため鑄造条件の確立

銅金型を使った化学組成の影響についての実験では、高強度化への化学成分を、亜共晶成分と過共晶成分とで実験をした。

亜共晶成分では、真空処理をした後も溶湯の湯流れが悪く、湯廻り鑄造欠陥がますます多くなり、その不良対策が難しかった。

過共晶成分では、真空処理による球状黒鉛の微細化と共に、流動性が増してこのキャップ鑄物の良品率は向上した。

また、銅金型を使った「注湯条件」「金型条件」「加圧条件」を主とし、各種鑄造条件を検証し、半凝固鑄造条件の管理項目表を作成した。

作成した管理項目表に基づき行った実験では、湯流れによる湯境不良および加圧タイミングの遅れによる湯境不良への対策が図られ、内部欠陥の無い緻密な鑄物が得られた。また、鑄物の非破壊検査の方法も管理項目に付け加えた。

高強度化目標値へは引張強さ、硬さについては100%達成、伸びについては目標値の95%と近づけることが出来た。

画像解析において、管理限界内の鑄造条件では、注湯後のキャビティ内では、液相（固相率0%）は、非常にわずかであることが、画像解析で判った。これまで外観不良に悩まされた原因についてミクロ組織から裏付けも出来た。本プロジェクトで開発実験している鑄物のキャビティ内の溶湯温度分布は、液相温度より低い凝固開始温度TLと凝固終了温度TEの範囲内にあることが確認された。

傾斜冷却板を使用した半凝固鑄造組織の特徴は、デンドライトの分断と粒状化がある。

本鑄造品では、デンドライトの分断については、デンドライト100ミクロン以下が得られ、デンドライト晶出の方向性を無くし高強度化への効果があると考ええる。

粒状化については、鑄物組織全面的に見られないが、一部ではミクロ組織の粒状化が観察された。すなわち低温で鑄込まれて凝固開始温度以下で湯口、湯道、セキ及びキャビティ内を溶湯が流入することにより傾斜冷却板と同じ効果により粒状化が起これると考える。



図 - 3 内部欠陥の調査状況

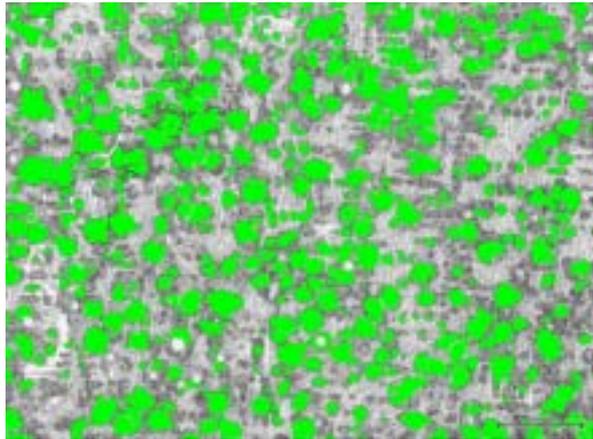


図 - 4 固相率 30% 画像解析結果

現在、この管理項目表の鑄造条件に、流気鑄造を加えて、内部欠陥の無い鑄物への実験を継続している。

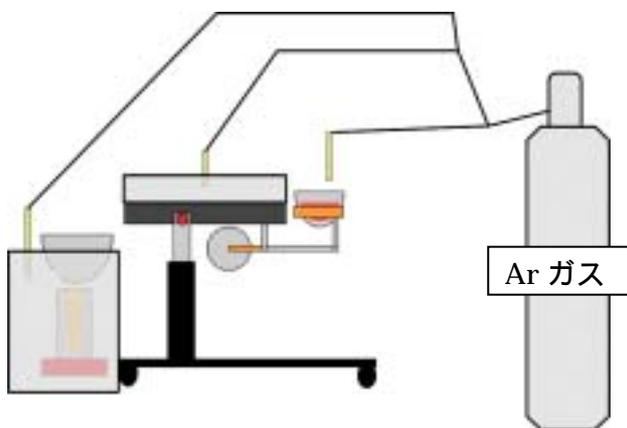
2 - 3 - 2 半凝固鑄造の基礎研究（傾斜冷却板を使った実験）

半凝固鑄造法には様々な手法がある。傾斜冷却板を使用した鑄造法による研究開発と評価を進め重要な知見を得た。

しかし現状の鑄造条件ではテストピース表面にノロ欠陥が多く見受けられ、製品として採用されるには不十分である。金型鑄造において砂落ちなどの不良は考えられないため、ノロの原因の多くは大気中での溶湯表面の酸化による酸化物が原因と考えられる。

名古屋大学の知見から、他金属で不活性ガスを傾斜冷却板に吹きかけて鑄造した場合には、大気中で実験した場合に比べ傾斜冷却板上に残る溶湯が非常に少なくなるという結果が得られている。

そこで ノロ欠陥の原因である酸化物を発生しにくくする、半凝固溶湯の流動性を高める、の2つの観点で、注湯カップ・傾斜冷却板・金型周辺のみを不活性ガス雰囲気で満たすことにより流動性の向上と製品表面の改善に取り組むこととした。



改造概略図

左図のように、注湯カップ・傾斜冷却板・金型容器それぞれにノズルを設置して、ポンペから Ar ガスを充満させ注湯実験を行った。

以下に得られたテストピース外観および組織写真を示す。

(テストピース外観)



Ar 雰囲気中 1195 注湯



大気中 1250

Ar 雰囲気中・1195 で注湯したテストピースよりも、大気中・1250 で注湯したテストピースの方が、製品表面のノロなどが多く発生した。通常大気中で注湯する場合には温度の低い方が酸化物がより多く発生するが、Ar ガスでシールドすることにより酸化物の発生を抑えることが出来た。

また Ar 雰囲気中の実験では、注湯後に傾斜冷却板に残る溶湯はほとんど観察されなかった。しかし大気中では全体に注湯温度が高かったにも関わらず相当量が傾斜冷却板上に残った。これは Ar ガスにより溶湯表面の酸化が抑えられることで流動性が低下するのを抑えることが出来たと推測する。

(組織写真)

大気中組織写真



外周部 (半凝固組織)

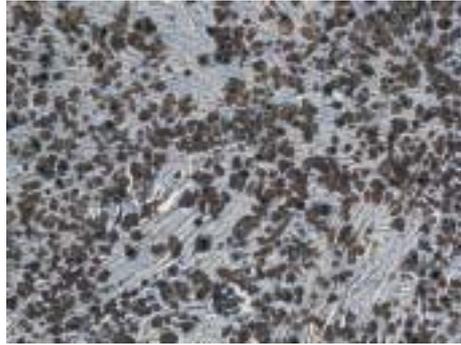


内部 (半凝固組織)

Ar 雰囲気中組織写真



外周部（半凝固組織）



内部（半凝固組織）

< 研究成果 >

- ・安定的に半凝固組織を得るためには注湯開始温度を CE 値の設定に応じて[目標温度] ± 20 程度に管理する必要がある。
- ・大気中・Ar 雰囲気中のどちらの条件においても、注湯温度が同じであれば同等の組織が得られる。
- ・Ar 雰囲気などの不活性ガス下におくことで溶湯の流動性を保ち酸化物の発生を抑えることができる。

以上のような研究成果を得ることが出来たが、半凝固組織を得るための注湯温度の管理幅が非常に狭いため、今後は傾斜冷却板を使用して得られる組織と同等と考えられる低温鋳造を推し進めることにより、製品化を実現していく方向である。

第3章 半凝固鑄造金型の設計と開発

3 - 1 研究目的及び目標

平成20年度、名古屋大学シーズの半凝固鑄造と同様に、湯口部をピン加圧する対象製品キャップの1個込め金型を製作した。平成21年度には、歩留向上・不良対策をねらい、鑄造シミュレーションを駆使して、2個込め金型の作製に至った。平成22年度は、クロム及びジルコン合金化した銅金型とSKD61相当の鋼金型に加えて、両者の金型材料を複合化させた3種類の金型を用いて実験を行い、急速冷却（超冷却）効果と金型寿命を考慮し半凝固鑄造に適した金型材質の選定と鑄造方を確立した。そしてキャビティ内溶湯の全面加圧を実現させるシールドブロック金型の改善をして、最適加圧が出来る金型構造とした。

金型の目標

シミュレーションによる歩留90%、不良率1%への鑄造方の確立

可動型であるシールドブロックの最適設計の確立

金型寿命を一般的な金型鑄造の7000回(注湯温度1400)から10000回に伸ばす

3 - 2 実験方法

名古屋大学でのシミュレーションと現場の経験から作成した鑄造方図から、ソリッドモデルを作成してFCD450溶湯の熱物性値や金型材質の熱物性値の各種パラメータの設定をした。本サポインの特有なパラメータである、熱伝達係数や注湯速度については、実験により冷却曲線や注湯時間、注湯量などのデータ収集を行い、そのデータを元に同定を行った。

図-5に示す鑄造シミュレーションによる鑄造方確立のステップの手順に従い、シミュレーションと実験を実施した。また鑄造実験で観察された鑄物欠陥については、品質管理(QC)手法を活用して解析すると共に、シミュレーションでの欠陥判定においても同手法を用いた。また平行してシミュレーションと実験の結果を比較して、熱伝達係数などのパラメータ修正により精度向上を実施した。

また、鑄造方の決定、変動やゆらぎの調査においては、CAE分科会において、シミュレーションにおける入力パラメータを調整して使用した。

湯流れシミュレーションでの重点項目として、低温注湯による半凝固域(1111 ~ 1185)を想定し、欠陥種別と要因解析、そしてその評価方法を定めた。

金型製作では、シミュレーションでモデリングしたソリッドモデルをもとに、分割金型への設計などの金型詳細設計を行ってCADCAMデータを作成して金型を製作した。

開発段階では、

- ・急速冷却（超急冷）効果を考えた材質展開による各種材質での金型製作
SKD61とCu Cr Zr合金
- ・加圧方法を改善した金型

全面加圧へのシールドブロック構造

- ・各種ガス抜き（ベントホール・スリット）の金型への設置

ベントホール及び0.2mmスリット

の変更や改善を行った。特に1点のみの加圧であるピン加圧方式から鑄物全体に加圧効果のある金型全面加圧方式（上下駆動するシールドブロック金型）に変更した金型を設計・製作して実験に供した。さらに、金型寿命を延ばす方法への改善を行った。

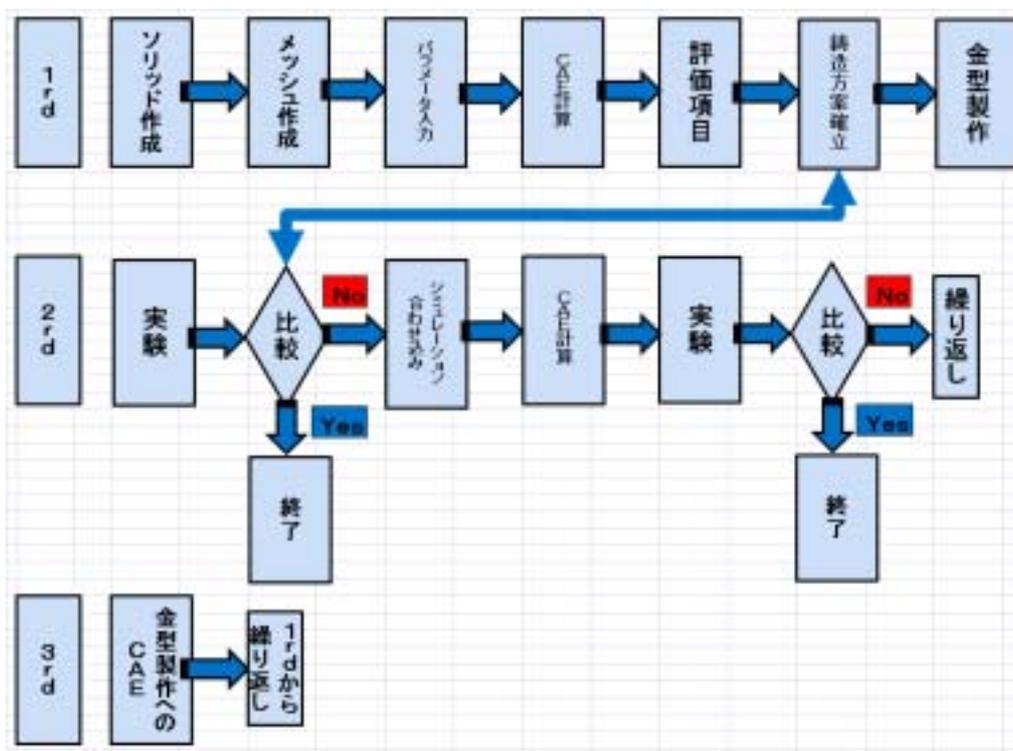


図 - 5 鑄造シミュレーションによる鑄造方案確立のステップ

3 - 3 研究成果

シミュレーションによる目標達成への鑄造方案の成果と金型製作の成果をそれぞれ記述する。

SKD61金型で検討した結果として、1個込み型時の歩留まり率34%に対して、2個込み型では歩留まりが52%となり、18%の歩留まり率向上が見込めることがわかった。

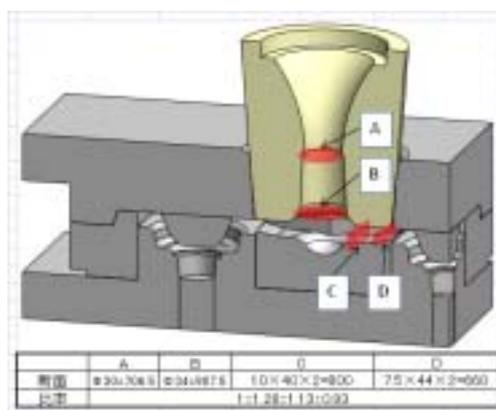


図 - 6 SKD61 鋼型鑄造方案ソリッドモデル図(100401)

便宜上パラメータの同定および調整を繰り返した結果、注湯時間や注湯速度の精度が向上し、実験により合致したシミュレーション結果を得ることが出来るようになった。

キャビティ内の湯流れを直接観察（手注ぎにて下型のみ注湯し、湯流れを目視観察）と短絡センサー（上型があるときの充填パターンを確認するために、溶湯が流れた際にエナメル線に溶湯が触れるとLEDランプが点灯する湯流れ観察装置）による可視化により、溶湯は先走ってセキの反対側まで行き、戻ってくる流れが確認出来た。

実験で得られたデータから、修正を行った結果、湯流れ充填挙動や欠陥発生位置などが一致するようになった。この結果を踏まえ、図 - 7 のように、現場での実験の不良解析をした結果を欠陥モデル化した。シミュレーション結果で、溶湯の湯先を解析する際に、この不良発生箇所を重点的に観察する指針とした。

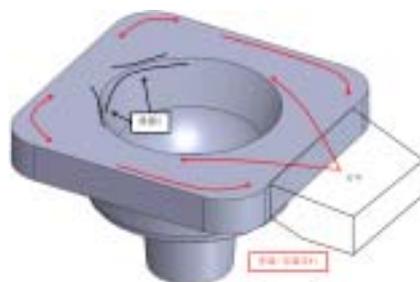


図 - 7 注湯装置改善後での鋳物の欠陥発生部位模式図

急冷効果のある金型材質を検討して、SKD61鋼材より銅合金材が好ましいとの解析結果が得られ、銅およびSKD61鋼の複合金型製作に反映出来た。

キャップキャビティ主要部は周囲に0.2mmスリットのガス抜き溝を持つ銅金型で、周囲の剛性を要する部分はSKD61鋼型での複合材質で作製した。ガス抜きは、瞬間注湯での空気の巻き込みによるブローホール不良を防ぐ目的である。

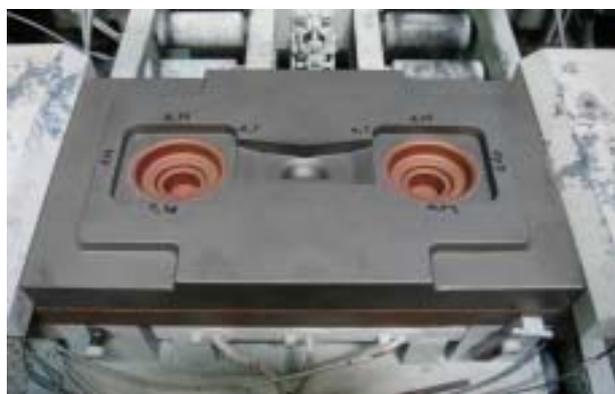


図 - 8 複合金型 100726

実験用湯口部の金型寿命については、一般的に損傷されやすい湯口底などを含め、

現場実験使用上、金型の損傷は認められなかった。



図 - 9 下型銅型の127回実験後の角部のタレ

スムーズな湯流れ、充填挙動を目指して、セキ厚み寸法について検討した結果、7.5mmより10.5mmの方が短時間で乱れの少ない充填が出来ることがわかり鑄造方案へ反映が出来た。

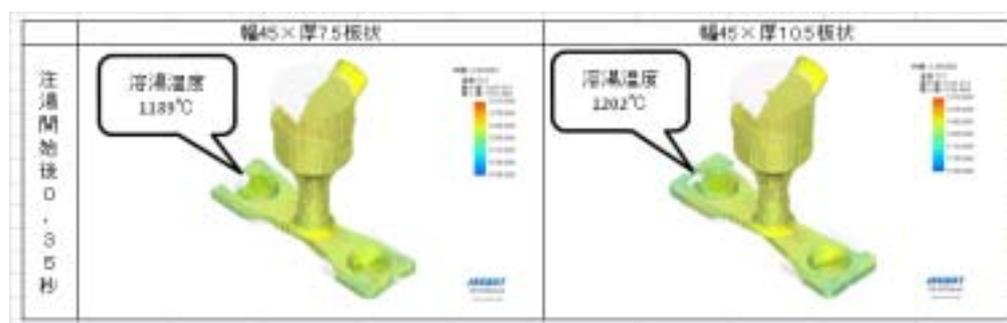


図 - 10 セキ厚み寸法による湯流れ比較

不良率低減に向けた不良率解析では、評価項目や評価方法を具体的に詳細化して要因分析と対策を検討することが出来た。

鑄造工程の管理限界については、さらに装置、作業の管理項目を固定的なものと同変的なものを実験で確かめながら、綿密なシミュレーションを続けて不良低減を進める。

さらに、今後は、鑄造方案の最適化を最重要課題として、金型・装置・作業での不良低減・歩留まり向上への要因をシミュレーションで検証できる方法を見つけ、

不良率 半減 歩留まり率 80%
を実現させる指針を与えたい。

第4章 半凝固鑄造装置の設計・製作と鑄造・加圧条件および熱処理条件の確立

4-1 研究目的及び目標

名古屋大学シーズの傾斜冷却板による半凝固鑄造をサブ研究にして、各委員で開発を分担した上で、球状黒鉛鑄鉄で低温鑄造と急速冷却（実施計画書では超急冷とした）により名古屋大学シーズの半凝固鑄造による「高強度化」を満足させる「超急冷鑄造」の開発への装置と鑄造条件および熱処理条件を確立する。

この目標を達成する為に、低温鑄造・急速冷却及び加圧を連続的に行う、プロセスコントロールで各工程を高度に制御されたコンパクトなライン装置を開発する。

目標： プレス加圧のサーボ化の実現
鑄造から鑄物取出しまでの自動化
サイクルタイム30秒

4-2 実験方法

クロダイト工業（株）のフィールドテストで、鑄造を繰り返しながら、装置の設計と鑄造及び熱処理の各工程毎の管理項目と管理限界を決め込み、品質の安定性を目指した装置の設計と改善を行った。

中小企業にも導入しやすい、低価格でコンパクトなラインを目標に装置開発を進めてきた。

4-3 研究成果

半凝固鑄造および加圧工程の装置を図-1に示す。全体写真は第2章を参照。

図1に示す低温・半凝固鑄造のコンパクトライン化には、真空処理装置、自動回転注湯装置及びヒシヤク保温装置、加圧（プレス）機の3ブロックに大別される。これに、金型保温装置と鑄物取出し装置が加わり全体を構成している。

図3には、工程順に、金型取付 金型保温 注湯 加圧 鑄物取出しのサイクル図を示している。



図 1 加圧装置付き鑄造機と全体制御盤

プレス機の流れ

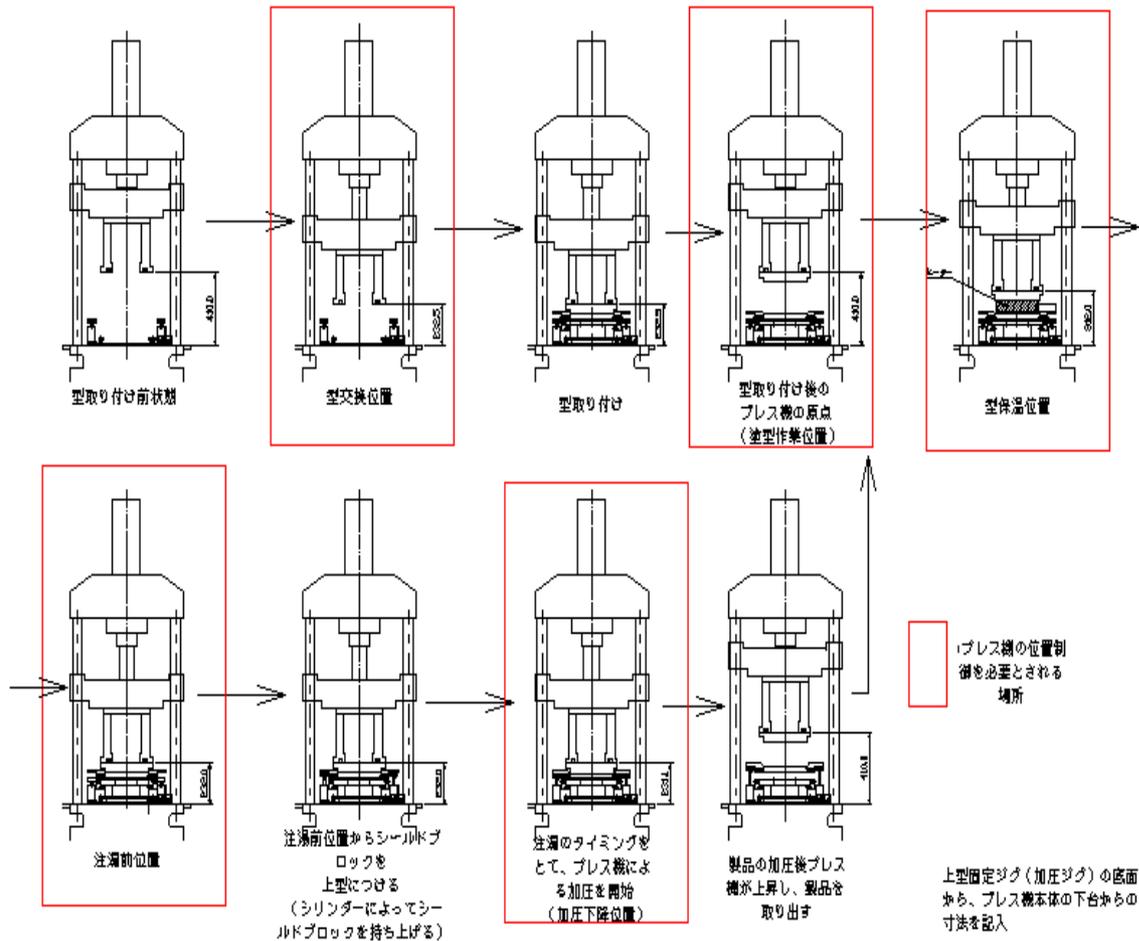


図 - 3 鋳造フローの金型取付から加圧鋳造までを表す図

4 - 3 - 1 改善を加えた装置（真空装置、注湯装置、加圧機（サーボ化）、湯口砂型固定装置、金型加熱装置、鋳物取出し装置、ヒシャク保温装置、流気鋳造装置）

注湯開始から製品取出しまでを自動制御で行えるように、シーケンスプログラムを製作し、実験条件で変更が必要な部分については外付けの機器によって容易に設定変更できるようにしたプロセスコントロール機器を使い、管理限界の工程能力を確かめ、シミュレーションにより管理限界の確認を行った。

真空度（プルドン管型とピラニゲージ型真空計で計測）

真空ポンプの減圧性能を確認した結果、減圧目標 10^{-3} (MPa) を満足した。

運転時の動作は、容器、配管内の脱気処理に約 20 秒要するため、減圧を行うためには、管理目標の 60 秒 + 20 秒となった。また、溶湯温度は、約 1430 で行い 80 秒後では、約 60 の温度低下で真空処理が出来た。

凝固範囲および化学成分（溶湯の成分調整は発光分光分析装置・炭素分析装置、凝固温度の測定は CE メーターを使用）

過共晶の化学成分の実験では、初晶温度 TL では 1183 (+4, -7) 共晶温度は 1110 (±6) 加冷温度 5 (+5, -3) であった。

溶湯温度測定値を記録計（PLC）に記録して、記録された値の最高値を真空処理前後の温度、注湯温度とした。

また、注湯温度を熱電対と放射温度計で、測定した結果、1250～1350 で2種類の測定器は高い相関があることが判り、放射温度計で自動計測とした。

各工程による溶湯温度低下状況（低温注湯への注湯温度をリアルタイムで測定する放射温度計及び熱電対温度計を使用）

溶湯温度は、反応取鍋から100kg処理取鍋（耐火材と断熱材を組み合わせた取鍋）へのあけかえ後の設定温度1420以上、真空処理後の温度（第1回目の注湯温度）1320以上とする事ができた。

金型温度

上型、シールドブロック、下型の表面温度を熱電対で測定した。

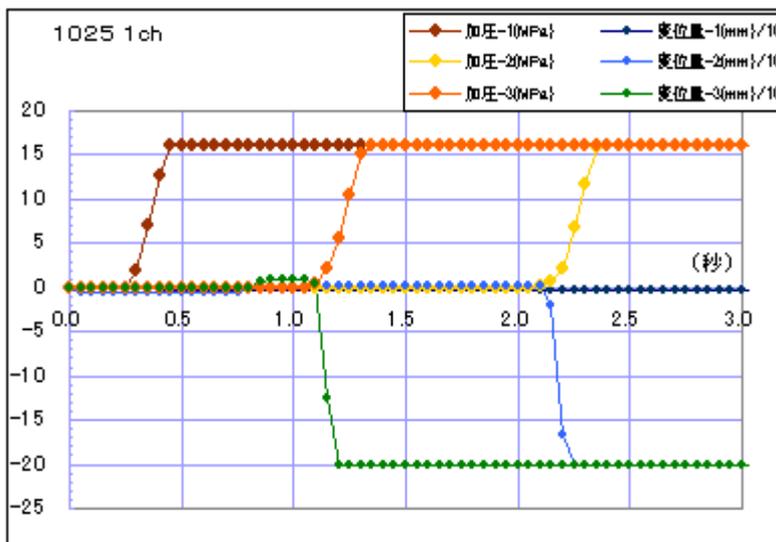
金型温度は、温度調節器（ON-OFF制御）を行い温度範囲を±20で制御した。

加圧位置制御

加圧プレス機に取り付けた上金型位置をレーザー変位センサーで読み取り、加圧プレス本体のレーザー変位センサー出力で下降停止位置を読み取り位置を決める。その後、シールドブロック金型持ち上げ用シリンダーを作動させ、4カ所の近接変位センサー値を確認し、シールドブロック金型の隙間設定を行った。

シールドブロック金型の隙間を0～2mmの間では、設定値に対し±0.3mmで制御出来た。

加圧タイミング（加圧に際して金型にかかる加圧力（通常は18MPa）を測定する加圧センサーを使用）



加圧タイミングの設定

加圧 タイ ミング	(秒)	注湯1回	注湯2回	注湯3回
		設定	0.0	2.0
1 C H	指令 - 加圧max 測定時間	0.45	2.35	1.35
	シールドブロック動作 測定時間	0.30	2.25	1.20

加圧プレス用油圧シリンダーは、180mm、18.8MPaで作動しているの、加圧量は、48.8トとなる。

図 - 26 加圧プレス油圧機器の加圧量と動作遅れ

加圧量45トンが実際に掛かる遅れ時間は、設定時間に対して、0.45～0.35秒であった。

また、シールドブロック金型の設定した隙間が加圧により閉じる遅れ時間は0.30～0.20秒で動作した。

4 - 3 - 2 鋳造サイクルタイム

現在、鋳造方案上の湯口部分の冷却が遅く、注湯・加圧後の金型を開く時間を50秒としている。従って1サイクルの設定時間は、105秒となっている。この実績値は99秒である（この秒数はコア時間+ ）。現在の鋳造方案の金型開き時間は40秒まで短縮が可能なので、実質の1サイクルタイムは、80秒を標準サイクルタイムとしている。

目標の30秒にするためには、鋳造機を3台据えたターンテーブル式のコンパクトラインが必要である。

4 - 3 - 3 安全対策

コンパクトに配置された各機器に、高温状態の溶湯を素早く、処理を行うため、各工程の流れと機器の配置を考慮したレイアウトにした。試作では、作業員2名が、ペアになって行う事が多く、作業分担（溶湯処理、測定作業、機器の設定、など）事前に準備、調整が重要となる。そこで、作業員の負担軽減のため下記の作業の自動化をしてポカヨケをした。

- (1) 注湯装置（掛け堰セット - 注湯開始指令～製品抜き出し）
- (2) 加圧プレス（シールドブロック金型隙間設定 - 加圧指令～加圧保持時間 - 上金型上昇）

また、試作段階では、不意に起こるトラブルが多くそれに対応する治具の作成をした。

目標の30秒にするためには、鋳造機を3台据えたターンテーブル式のコンパクトラインが必要である。

第5章 コスト評価

5 - 1 研究目的及び目標

この章では、実用化開発へのコスト目標を定め、その成果を述べる。

コスト目標：対象製品キャップで、現状の熱間鍛造品の20%コスト削減

鋳物費	120円/個
加工費	135円/個

5 - 2 実験方法

クロダイト工業(株)での鋳造のコスト算出から、目標への達成への考察を行った。加工のコストについては、川下産業での評価として第6章に記述した。

5 - 3 クロダイト工業でのコスト積算への研究成果

低温鋳造による急速冷却(超急冷)効果での半凝固鋳造で、100%良品に至れず、コスト試算が難しい状態である。

真空処理での温度低下は100Kg取鍋では、58が実績値である。これは、工場の溶解電力使用量の原単位から計算すると、溶湯トン当たり25kwhの消費となり、30円/トン(電力料金12円/kwhとして)のコストアップとなる。

このコストアップを鋳造時の溶湯の流動性を良くして、歩留向上と不良低減がねらいである。

現状の不良率は、ロットによってバラツキがある。今後の不良対策は、内部欠陥対策を目標して鋳造方案でのシミュレーションの活用と鋳造条件を管理限界に制御する技術改善で、目標値の1%を実現させたい。

歩留向上については、サポイン提案の1個込めで、高温に保温された掛けゼキ湯口にいったん半凝固溶湯をためる方法による歩留90%達成を提案したが、傾斜冷却板からの溶湯が瞬間的にはいらず、鋳造の原則である「速く静かに」注湯することが出来なかった。さらに半凝固状態での溶湯流動性の悪さによる空気巻き込み欠陥の解決には至れなかった。また、傾斜冷却板を使わない低温鋳造による半凝固鋳造では、2個込み金型として、注湯装置の改善により、0.6秒の注湯が可能となり、歩留向上を図った。初年度に予備実験を繰り返した保温掛けゼキに湯を溜める歩留向上対策は、注湯を遅らせることになり使用を断念した。

現状の歩留は、鋳造品の重量が500gと極めて軽量なこともあり、歩留47%と半分以下である、この歩留対策には、湯道の削減を最終の鋳造方案ではねらって実験を進めている。最終の歩留はシミュレーションでは、55%となっている。

4個込み金型構想による歩留は80%まで上がり、さらに、砂型湯口を金型に変更することで歩留90%への達成に近づくと考える。

また第4章の鑄造機を3台配置したターンテーブル方式で並べたコンパクトライン構想(装置見積り1セット2500万円)で、鑄造機を3セット設置すれば、サイクルタイムは、1名作業で30秒サイクルの実現を可能と考えている。

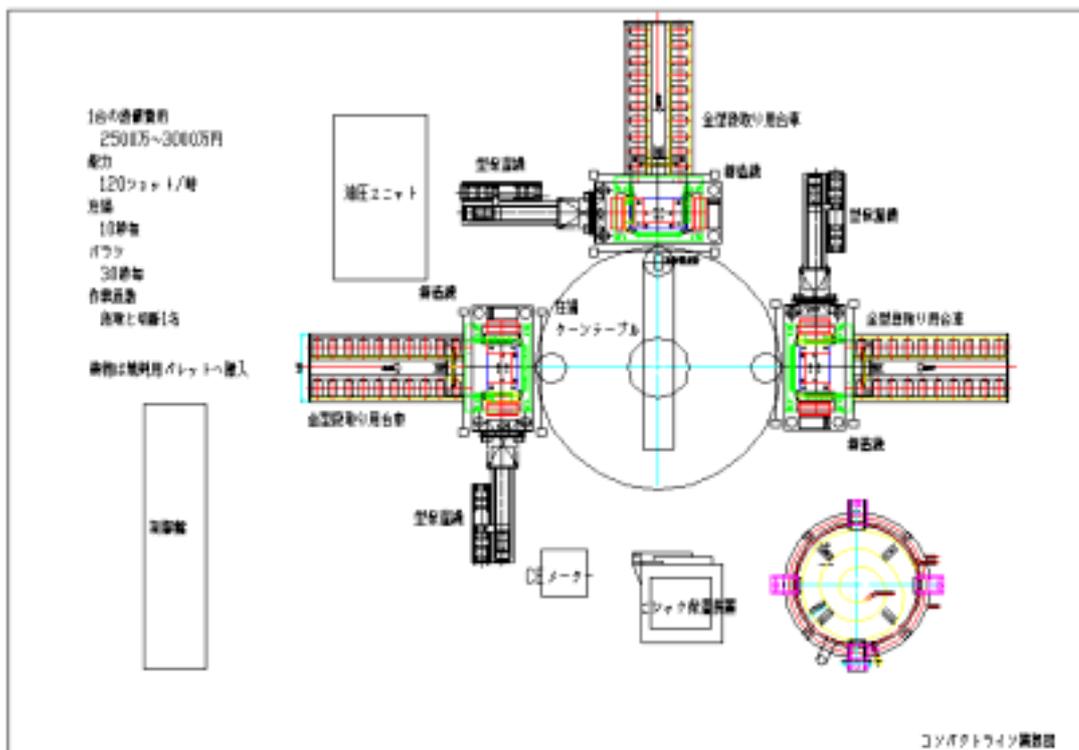


図 3 コンパクトライン構想図(1台分)

歩留90%、不良1%、サイクルタイム30秒の条件を満足させた状態での鑄造コストは、キャップのコスト目標値120円に対し達成可能と考える。

加工コストについては、第6章で論じる。

第6章 川下産業の試加工による加工性の評価

6-1 研究目的及び目標

鑄造後の機械加工工程に於いて、従来材の熱間鍛造と比較し、半凝固鑄造素材の切削性への影響を調査実施する。

「CAP-KNU FLG」(キャップ)

加工ネック工程

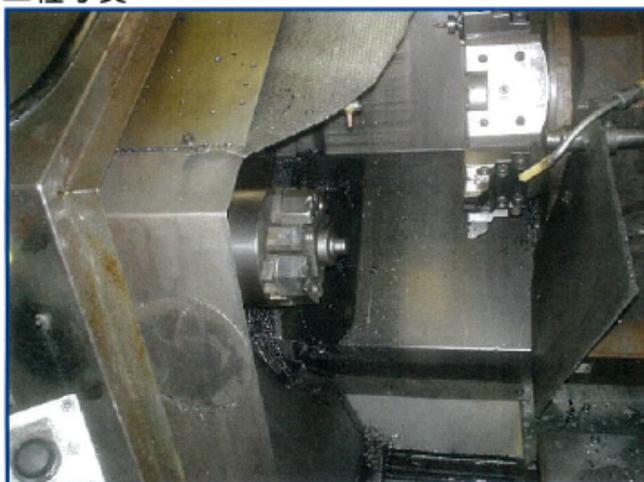
NC旋盤				
① φ20側外径削り				
	現状		目標(鑄鉄)	
	荒	仕上	荒	仕上
送り速度(F) 単位:mm/分	0.2~0.25	0.15~0.2	0.2	0.15
回転数(S) 単位:回/分	988~ 2730	1140~ 3170	2000	2500
サイクルタイム 単位:秒	82.8秒		70.0秒	
製品サイクルタイム 単位:秒	94.8秒		78.4秒	
チップ寿命(※1) 製品消耗数量	50ヶ		70ヶ	

※1.チップ寿命…寿命は向上により、工具交換ロスによる

HT(ハンドタイム)通常0.2分→0.14分の短縮となる。

※2.効果見込み…加工費は、150円/ヶ→135円/ヶとなり、
約10%の低減効果が見込まれる。

工程写真



※現状のサイクルタイムは、'09年度実績となっております。加工費については、クロダイトの査定方式により算出したものであり、実際の加工費とは異なります。

6 - 2 実験内容および結果

川下産業の評価については、技術アドバイザーの「ピヨンス(株)」殿にお願いした。対象製品のキャップの試加工を、現状の量産ラインでの加工評価を受けた。

但し、現有ラインでのトライアル、現行量産品の加工負荷により、トライアル数量は制限されたため、加工条件の変更、工具寿命トライアルまでは未実施である。

6 - 3 研究成果

6 - 3 - 1 加工時間

従来の熱間鍛造品と半凝固鑄造素材の加工サイクルタイムについては、熱間鍛造品の 1.571 分 / 個に対し、半凝固鑄造素材は、1.395 分 / 個と、0.175 分 / 個 (11.1%) の低減が見込まれた。切削時での負荷 (切削抵抗) や音などから判断した。

また、ネック工程である旋盤加工工程のチップの摩耗が鍛造より早く、校正回数が増え、サイクルタイムに影響を及ぼす。これは、内部欠陥による断続切削が原因と判断する。



【旋盤チップ】

6 - 3 - 2 加工費

熱間鍛造品 150 円 / 個に対し、132.5 円 / 個となり、約 11.6% の低減効果を見込め、
またさらに、製品の出来映え改善や工具選定といった条件変更により、更なる低減効果が見込まれるのは確実である。

第7章 全体総括 3年間にわたること。

7-1 成果の総括

名古屋大学の半凝固鑄造法（SSCP法）のシーズと球状黒鉛鑄鉄製造技術、金型製造技術、装置製作技術を持つメーカーのマッチングを基盤に、「球状黒鉛鑄鉄の半凝固鑄造法の実用化」へのブレークスルーには、産官学の技術アドバイザーによりサポイン共同体が成立した。本サポインの提案書における開発目標を表 1 に示す。

表 1 提案書での開発目標値

開発項目（その詳細）		目標値
高強度化 （合金鋼H鋼と同等）	引張強さ	> 1000MPa
	伸び	> 18%
	硬度	HB260~285
低コスト化 （20%削減）	歩留	> 90%
	不良率	< 1%
	鑄造サイクルタイム	1サイクル30秒
半凝固鑄造のコンパクトラインの製作		実用化

実用化目標を達成への鑄造工程ごとの管理項目表は第2章で述べているが、主な工程と、開発で得た管理項目を図 1 で示す。

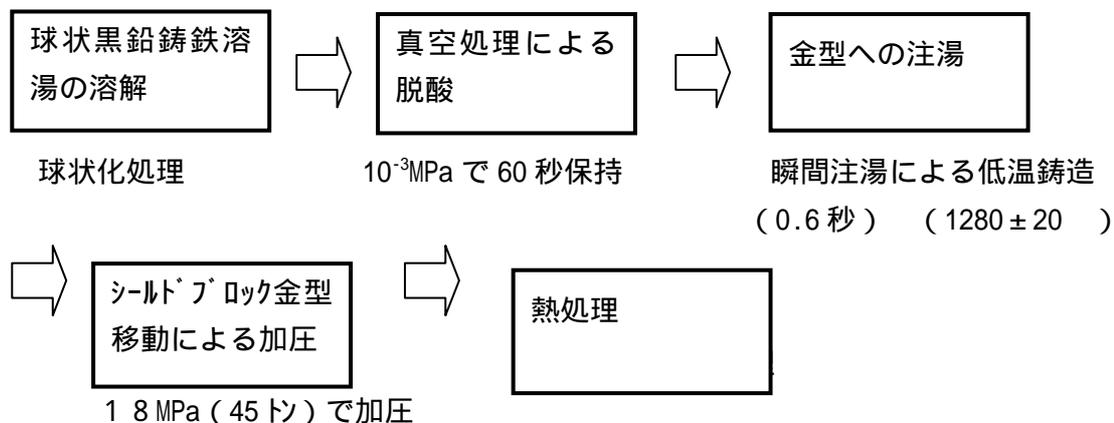


図 1 急速冷却（超急冷）鑄造と加圧製造プロセスと条件（管理項目）

この鑄造条件での目標への実績値を表 2 に示す。高強度化については、真空処理と

表 2 開発した鑄造条件による目標の実績値

開発項目	（その詳細）	実績値
高強度化	引張強さ	1038~1097MPa
	伸び	16~18%
	硬度	HB272~303
低コスト化	歩留	50%
	不良率	20%
	鑄造サイクルタイム	1サイクル99秒

低温鑄造条件と加圧の条件を制御することにより、半凝固鑄造組織に匹敵するミクロ組織の粒状化及び微細化で高強度化目標に対して、伸びの達成度が90%~100%であるが、引張強さと硬度は満足している。実績の機械的性質のバランスは非常に良くなっているので、新材質創生への高強度化への達成は可能と考える。

低コスト化については、歩留目標に対して50%、不良目標に対しては、良品率80%と非常に低い達成率である。不良対策で歩留向上が進まず、低コスト化目標も未達成である。現在認定企業と技術アドバイザー全員で、未達成部分の展望を深め、鑄造シミュレーションの活用レベル向上による鑄造方案の最適化や金型のガス抜き方法や加圧条件など、最適条件の獲得への実験を続けている。

サイクルタイムの改善と装置の改善で、半凝固鑄造コンパクトライン実用化とコスト削減20%を達成して行く覚悟である。

3年間では、サポイン1年目は、熱間鍛造合金鋼品である自動車部品キャップの材料代替えをねらい、傾斜冷却板を使い、半凝固状態の溶湯を金型に鑄込み、半凝固温度域で、湯口部分を加圧ピンで一点加圧する実用化開発を行った。真空処理による球状黒鉛鑄鉄溶湯の流動性の改善で、何とか外観良品である鑄物を作ったが、鑄造時の溶湯の流れが遅く空気巻き込みによるブローホール欠陥が多発した。加工後にも巣穴が点在して鑄物の実用化には程遠かった。

傾斜冷却板による半凝固鑄造による鑄鉄の高強度化、さらに傾斜冷却板により、傾斜冷却板を流れる鑄鉄溶湯の黒鉛を粒状化さらに球状化させて、Mgやレアアースメタルによる鑄鉄の球状化処理工程を無くせるというFCD鑄造にとって画期的な技術目標を実現するため、低温鑄造による半凝固鑄造で高強度化を目指す研究開発への検討も実施し、各委員が熱意を持って取組んだ。

サポイン2年目では、既存設備のプレス機を使い、加圧装置の制御および注湯装置の回転制御、金型の保温制御、鑄物取出しなどの付帯装置の改善が必要になった。さらに、傾斜冷却板による半凝固鑄造法では、~~実~~実用化に限界があることを見極めた。

技術アドバイザーを含めた全員の開発研究委員会で、「低温鑄造による急速冷却効果(超急冷効果)を銅金型(Cu-Zr-Cr系銅合金型材料)で、半凝固鑄造の実用化を図る」へ、方向転換を実施した。名古屋大学で、傾斜冷却板による半凝固鑄造の実用化へ向け、基本的な鑄造条件を再構築することの解析と開発を進めた。

3年目に入り、銅金型にシールドブロック分割部を設けて、金型構造を全面加圧可能な設計にした。これに伴い2年目の装置の大幅な改善を図った。これによりプレス機のサーボ化をはじめ、各種の制御が可能となり、「急冷効果による半凝固鑄造の実用化」の実験が軌道に乗った。

実用化に関しては、滝田S.Lの指導による球状黒鉛鑄鉄の熱処理で、球状黒鉛鑄鉄の高強度化を実現出来たこと、シールドブロック銅金型で、0.2mmスリットによるガス抜き設置からの鑄造品の良品率が80%まで上がったことが、実用化実験の推進力になった。技術アドバイザーの熱意や各委員の熱意により研究開発が進められた。感謝したい。

7 - 2 工業所有権の取得状況及び対外発表等の状況

2件の出願をした。

件名：球状黒鉛鋳鉄の低温鋳造方法及び低温鋳造装置

出願番号：2011-19116

件名：金型構造

出願番号：2011-19118

7 - 3 今後の事業化に向けた取組み

鋳造品の実用化・販売については、川下産業からは、自動車メーカー2社への本サポイン開発技術のPRによる市場拡大への提案やキャップ鋳物の加工などで、協力と評価がもられた。

コンパクトラインの装置の販売では、計画時には1億円を想定していた。自動注湯などブレードスルーすべき大きな課題はあるが、1ライン鋳造機3台の手動でのヒシャク汲み出し自動注湯セットで2500万円を装置見積り価格とした。3ラインのセットで7500万円となる。これに真空装置の2500万円を加えると概算見積りで1億円の装置となる。

金型の需要については、計画時には100万円で500型を想定したが、多数個込めの加圧金型となったために、400万円で4個込めの金型を目標にしている。

鋳物や金型など素形材産業では、海外調達が多くなっている。今回のサポイン活動を通じて、難しいテーマに対して挑戦し、若手技術者による熱意、金型製作での知恵や、装置化への創意工夫には目を見張るものがあった。この技術向上は特許申請にもつながった。IT技術の鋳造シミュレーションについても技術アドバイザーの努力で、鋳造工程の各ステップでの活用術の指導を得て、今年度は、技術の輝きの見える報告書になっている。将来のものづくりに活躍できる力量を付けたと評価している。

これらの若手技術者が、大学や公設研究所との共同研究の機会を与えられ、研鑽を積めたことは、中小企業にとって、次世代の経営承継への良いプレーンになると考える。有意義な機会を与えられたサポイン事業に感謝している。