

2019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

「鑄放し無チル化を可能にする金型球状黒鉛鑄鉄鑄物の

大量生産技術の研究開発」

研究開発成果等報告書

2020年3月

担当局 中国経済産業局

補助事業者 公益財団法人中国地域創造研究センター

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1. 1 研究開発の概要（目的）・背景及び目標
 - 1. 1. 1. 研究開発の概要（目的）
 - 1. 1. 2. 研究開発の背景
 - 1. 1. 3. 研究目標
- 1. 2. 研究体制
 - 1. 2. 1. 研究体制
 - 1. 2. 2. 管理員及び研究員
 - 1. 2. 3. 研究開発推進会議委員
- 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. 金型鑄造技術の確立
 - 2. 1. 1. 無チル化を実現する溶解技術について
 - 2. 1. 2. 鑄造方案、及び鑄造条件の確立
- 2. 2. 金型鑄造の低コスト化、生産性向上技術の開発
 - 2. 2. 1. 長寿命低コスト金型技術の確立
 - 2. 2. 2. 鑄造自動制御技術の確立

第3章 全体総括

- 3. 1. 研究開発の成果（平成29年度～令和元年度）
 - 3. 1. 1. 金型鑄造技術の確立
 - 3. 1. 2. 金型鑄造の低コスト化、生産性向上技術の開発
- 3. 2. 今後の課題・事業化展開
 - 3. 2. 1. 今後の課題
 - 3. 2. 2. 事業展開

第1章 研究開発の概要

1. 1. 研究開発の概要（目的）・背景及び目標

1. 1. 1. 研究開発の概要（目的）

自動車、建設物等の構造部材として広く使用されている球状黒鉛鉄鋳物は、一般に砂型鋳造法で製造されているが、労働環境やコスト競争力の面で問題があり、早晚、国内の鋳造産業の維持が困難になることが危惧される。本研究共同体では、砂型の代わりに金型を用いる球状黒鉛鉄の製造法の実用化に取り組む。従来、金型による球状黒鉛鉄の鋳造は、異常組織であるチルの発生など技術的な障壁のために実用化されていない。本研究共同体のメンバーらは、これまでにフリー窒素を制御する革新的な溶解・精錬法を提案、特許化し、実験室レベルではあるが、球状黒鉛鉄の革新的な金型鋳造方法を見出している。今回の提案では、金型を用いて鋳造された鋳鉄中の黒鉛粒径の違いによる材料特性への影響評価を行うとともに、本製造プロセスの安定化/標準化、生産性の向上、コスト低減、及び新素材の部品化に必要なエンジニアリングデータの標準化に取り組むことで、金型を用いる球状黒鉛鉄の量産技術を実用化する。この技術の実用化により、長年課題とされてきた鋳造職場の画期的な環境改善を実現させたい。図1に本研究開発の概要を示す。

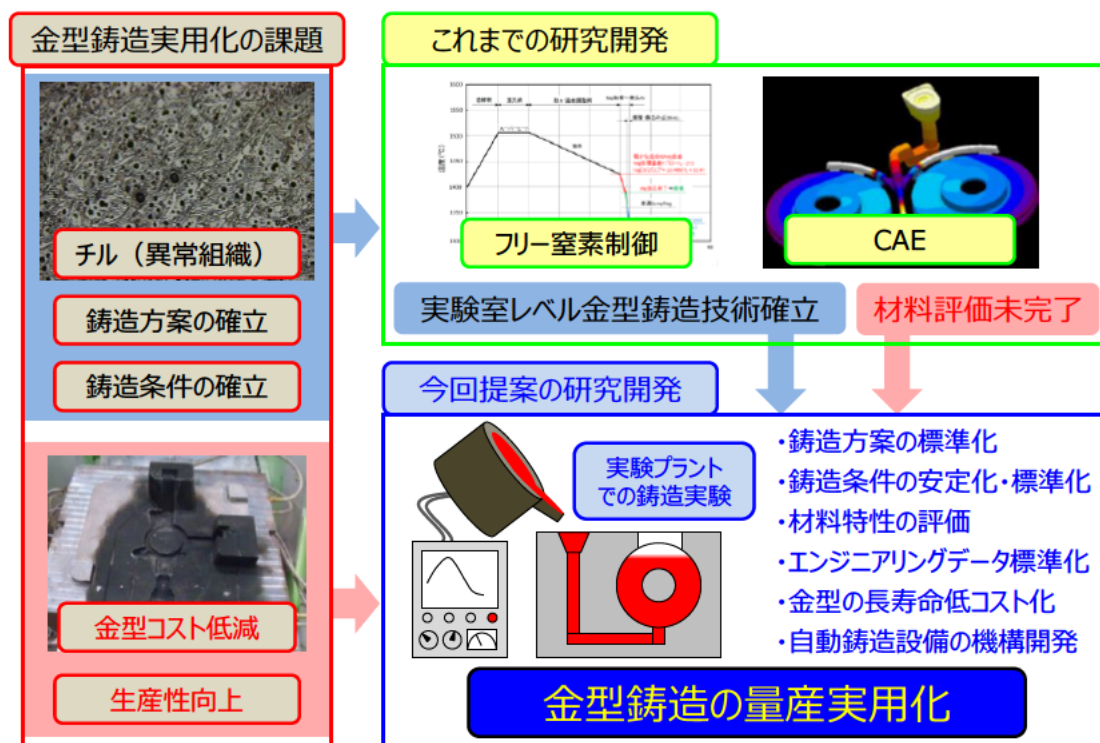


図1 本研究開発の概要

1. 1. 2. 研究開発の背景

球状黒鉛鉄鋳物は、中空の三次元形状部品を高い自由度で実現できる等の使い勝手の良さから、自動車、産業機械、建設機械他の構成部品として広く採用されており、社会を支える重要な素材である。世界における球状黒鉛鉄の生産量の推移は、図2に示す様に漸次増加傾向にある。

鑄鉄鑄物の製造には、砂型鑄造法が広く採用されているが、海外を含めた技術の一般化、川下製造業者のグローバル調達推進により、国内の鑄造メーカは特に厳しい競争環境下に置かれている。また、環境負荷低減の観点から鑄物砂を使用しない耐久鑄型を使った製造法が待望されている。

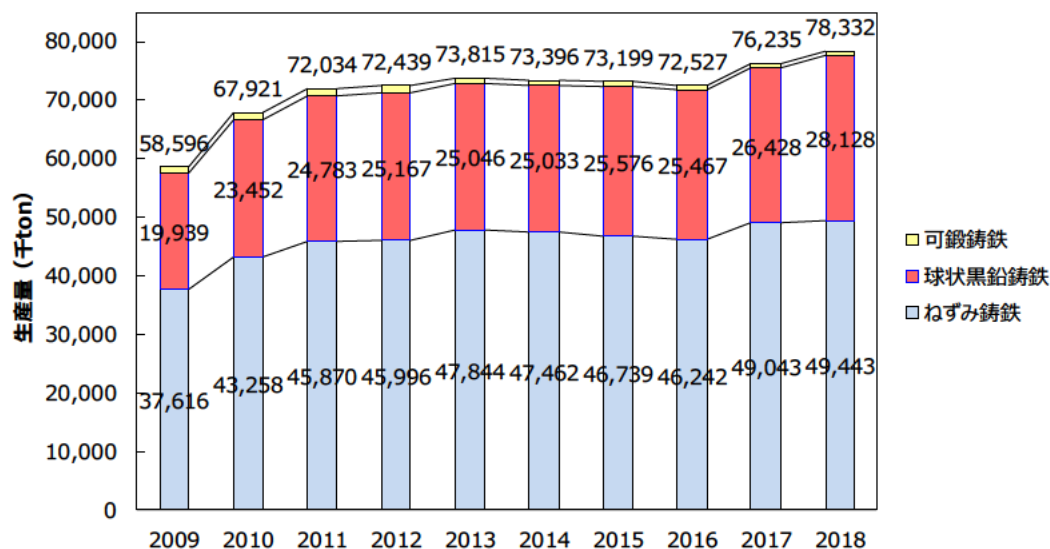


図 2 世界の鑄鉄生産量の推移 (Modern Casting 2019 年 12 月号データより作成)

[当該分野の研究開発動向]

同じ鑄造産業の中でも、例えばアルミニウム合金鑄物では、金型鑄造、ダイカスト技術の採用などの近代化が進行しているが、球状黒鉛鑄鉄鑄物では図 1 に示した未解決の技術的課題が有り、金型鑄造は実用化されていない。本研究共同体では、これまでにフリー窒素を制御する革新的な溶解・精錬要領により、実験室レベルでの基礎的な鑄造技術を確立した。今回提案の研究開発はこれらの成果の延長線上に位置するもので、球状黒鉛鑄鉄の金型鑄造を実用化すべく、製造プロセスの標準化、生産性の向上、及び新素材の部品化に必要なエンジニアリングデータの標準化をねらいとする。

球状黒鉛鑄鉄鑄造の従来技術（砂型鑄造）と新技術（金型鑄造）の工程フローを図 3 に、その特徴と評価を表 1 に示す。砂型鑄造においては、製品の製造プロセスと並行して、鑄物砂を回収・再生処理する設備、及び付随する環境保護設備が必要で鑄造工場の設備規模が非常に大きくなる。このため巨額の初期投資を必要とし、新規設備導入が困難な上、鑄造産業のコスト競争力の低下を招いている。これに対し、金型鑄造では、製品フローを中心とした非常にシンプルな製造プロセスを実現でき、需要の多様化、変動に合わせて、柔軟・迅速な設備導入が可能になることが期待される。

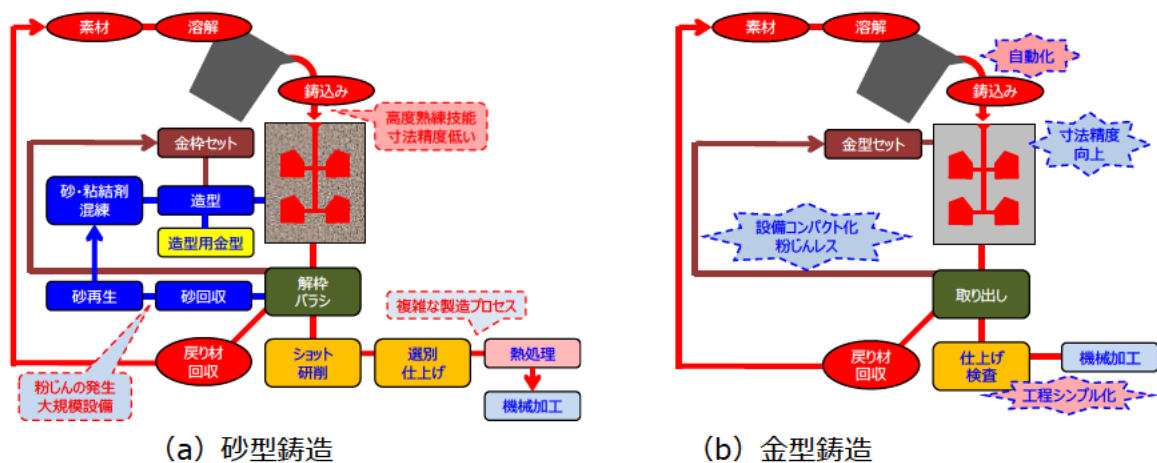


図 3 砂型鑄造と金型鑄造の工程フロー模式図

表 1 砂型鑄造と金型鑄造の特徴と評価

項目	砂型鑄造	金型鑄造
品質	△ ・鑄造欠陥（引け巣、介在物、形状不良）散発 鑄造不良率：約2% ・寸法精度が低い 鑄造公差等級：CT11～12 加工代：2～8mm	◎ ・鑄造欠陥の発生極小化 鑄造不良率：0.5%以下 ・寸法精度が高い 鑄造公差等級：CT8～9 加工代：1～2mm
コスト	○ ・砂の回収/再生に莫大なコスト ・大規模な設備、巨額な初期投資が必要 約20～30億円/ライン	○ ・金型コストが金型寿命に依存 ・コンパクトな設備、初期投資の抑制 約5億円/ライン
生産性	○ ・大量生産に特化 約800個/hr・ライン，最小ロット：100個 ・高度な作業熟練が必要/自動化が困難	◎ ・大量生産/多品種少量生産いずれにも対応 約400個/hr・ライン，最小ロット：1個 ・スキルレス化/自動化が容易
環境	× ・砂採掘による自然環境破壊 ・工程での有毒ガス、粉じんの発生	◎ ・砂使用無く、低環境負荷、ゼロエミッション化可能 ・汚染物質の発生源無し

【記号説明】◎：非常に優れる ○：優れる △：劣る ×：非常に劣る

また、表 1 に示す通り、砂型鑄造では品質、環境面で直ちに解決すべき問題がある上、コスト、生産性の面では、大量生産の場合にのみ競争力を有する構成となっており、市場要求の多様化、流動化への対応に限界がある。ここに金型鑄造を適用することで、環境問題の解決、及び多品種少量生産といった川下産業ニーズへの対応を同時に達成できる。

1. 1. 3. 研究目標

【1】金型鑄造技術の確立【平成 29 年度～令和元年度実施】

【1－1】鑄造方案、及び鑄造条件の確立（ヨシワ工業、I2C 技研、眞工金属、ツチヨシ産業）

表 2 の鑄物品質を実現するため、品質影響因子を明確にし、鑄造時の管理項目の制御条件を確立する。

表 2 鋳物品質目標及び管理項目

項目		目標内容	管理項目
品質	寸法	寸法公差等級：CT8 ※下記参考	溶湯化学成分 球状化処理方法/球状化剤 金型温度/塗型 湯道/押湯形状 溶湯フィルタ要否 鑄込温度/鑄込速度 冷却方法/時間 等
	鑄造欠陥	湯回り不良、チル化組織無し その他、使用上有害な欠陥無し	
	機械的性質	(FCD450同様の化学成分の場合) 引張強さ：従来の1.5倍/680MPa以上、伸び：10%以上	

<参考>

鑄造公差等級（JIS B0403 鑄造品-寸法公差方式及び削り代方式 1995）について

鑄造品の寸法公差については、JIS 規格により下表 3 の通り鑄造公差等級が定められている。砂型球状黒鉛鑄鉄鑄物では、CT11～12 が一般的である。

表 3 鑄造公差等級（JIS B0403/1995 表 1 を抜粋し編集）

単位：mm

鑄放し鑄造品の基準寸法		全鑄造公差												
を 超え	以下	鑄造公差等級 CT												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
-	10	0.09	0.13	0.18	0.26	0.36	0.52	0.74	1	1.5	2	2.8	4.2	-
10	16	0.1	0.14	0.2	0.28	0.38	0.54	0.78	1.1	1.6	2.2	3	4.4	-
16	25	0.11	0.15	0.22	0.3	0.42	0.58	0.82	1.2	1.7	2.4	3.2	4.6	6
25	40	0.12	0.17	0.24	0.32	0.46	0.64	0.9	1.3	1.8	2.6	3.6	5	7
40	63	0.13	0.18	0.26	0.36	0.5	0.7	1	1.4	2	2.8	4	5.6	8
63	100	0.14	0.2	0.28	0.4	0.56	0.78	1.1	1.6	2.2	3.2	4.4	6	9

金型鑄造

砂型鑄造

平成 30 年度は、上記の品質目標値を全て満足できる鑄造条件を確立することを目標とし、CT7 級相当の鑄物を実現した。令和元年度は、鑄造実験の反復実施により、安定して目標達成できる品質の鑄物を得ることを目標とした。

【2】金型鑄造の低コスト化、生産性向上技術の開発【平成 30 年度～令和元年度実施】

【2-1】長寿命低コスト金型技術の確立（ヨシワ工業、I2C 技研、眞工金属）

表 4 の開発目標を確立することで、金型の予想寿命：1 万回以上を実現する。

金型の予想寿命の定義：一定期間に発生する、

（保全/補修コスト+鑄物の品質不良での損失費） $\geq$ 金型新製時の償却費となる予想使用回数

表 4 長寿命低コスト金型の開発目標

項目	開発目標
設計	金型材質の標準化
	肉厚設計の標準化
	熱処理、及び表面処理/改質の有無・手法の標準化
使用	予熱・冷却要領の確立
	塗型要領（塗布方法、材質）の確立
点検・保全	表面性状（割れ、肌荒れ）、摩耗・変形の使用可否判定基準の確立
	損傷部位の補修要領の確立

このうち、平成 30 年度は金型の使用回数とメンテナンス必要箇所、メンテナンス必要頻度の相関を明確にすることを目標とし、コスト低減/長寿命化を同時に達成できる金型の設計に着手した。令和元年度は、コスト低減/長寿命金型を製作し、鑄造実験によりその効果を検証した。

【 2 - 2 】鑄造自動制御技術の確立（ヨシワ工業、I2C 技研、眞工金属）

下表 5 の鑄造時に鑄物品質に影響を与える因子を定量化し、制御条件を明確化した自動制御アルゴリズムを構築することで、自動鑄造設備機構のコンセプト設計を完了する。

表 5 鑄造自動制御の開発対象項目

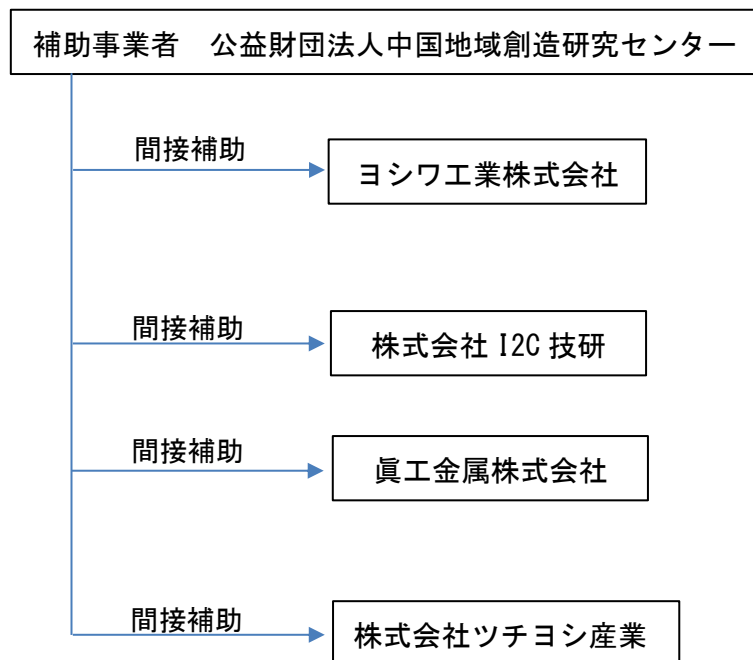
工程	自動制御対象項目
溶解・精錬	出湯温度
	出湯重量
	球状化处理（球状化材重量、添加方法）
	溶湯処理（不純物除去）
鑄込み	注湯温度
	注湯速度
	注湯重量
冷却・取り出し	金型冷却方法・型内冷却時間
	取り出し・離型方法

また、今回研究開発する製造プロセス、及び素材に対する川下製造業者における設計データの整備、及び品質マネジメントシステムに関わる製造プロセス変更の承認取得に活用するために、上記【 1 】、【 2 】の研究開発を通して収集される材料特性データや、プロセス制御データを収集し、データベース化・標準化することも本研究開発の目標とする。

このうち、平成 30 年度については、出湯温度、球状化处理、注湯温度、注湯速度の適正条件範囲を明確化し、自動制御可能なアルゴリズムを提案した。令和元年度は、実験プラント設備に自動制御装置を組み込み、自動化できることを確認、検証した。

1. 2. 研究体制

1. 2. 1. 研究体制



1. 2. 2. 管理員及び研究員

【補助事業者】

(公財)中国地域創造研究センター 管理員

氏 名	所属・役職
成末 明博	理事 産業創造部長
山田 和浩	産業創造部 事業支援 Gグループ長
松原 健之	産業創造部 事業支援 G 主幹
石原 稔久	産業創造部 事業支援 G 主幹
佐藤あけみ	産業創造部 事業支援 G 主事

[実施内容/番号説明]

【1-1】鋳造方案、及び鋳造条件の確立

【2-1】長寿命低コスト技術の確立

【2-2】鋳造自動制御技術の確立

【間接補助事業者】

ヨシワ工業株式会社 研究員

氏 名	所属・役職	実施内容
吉野 正弘	代表取締役社長	【1-1】【2-1】【2-2】
下西 淳	技術開発部長	【1-1】【2-1】【2-2】
阪谷 岳洋	技術開発部技術開発課長	【1-1】【2-1】【2-2】
榎田 康弘	技術開発部技術開発課主任	【1-1】【2-1】【2-2】
堀江 景子	技術開発部技術開発課	【1-1】【2-1】【2-2】
亀ノ上拓海	技術開発部技術開発課	【1-1】【2-1】【2-2】

【間接補助事業者】

株式会社 I2C 技研 研究員

氏 名	所属・役職	実施内容
糸藤 春喜	代表取締役	【1-1】【2-1】【2-2】
板村 正行	非常勤顧問	【1-1】【2-1】【2-2】

【間接補助事業者】

眞工金属株式会社 研究員

氏 名	所属・役職	実施内容
吉谷 邦宏	技術開発部部長	【1-1】【2-1】【2-2】
大門 忠生	品質保証部部長	【1-1】【2-1】【2-2】

【間接補助事業者】

株式会社ツチヨシ産業 研究員

氏 名	所属・役職	実施内容
吉國 晃宏	営業部副長	【1-1】【2-1】【2-2】
枝根 和也	技術部副長	【1-1】【2-1】【2-2】

1. 2. 3. 研究開発推進会議委員

氏 名	所属・役職	備考
吉野 正弘	ヨシワ工業株式会社 代表取締役社長	PL
下西 淳	ヨシワ工業株式会社 技術開発部長	
阪谷 岳洋	ヨシワ工業株式会社 技術開発部技術開発課長	
榎田 康弘	ヨシワ工業株式会社 技術開発部技術開発課主任	

堀江 景子	ヨシワ工業株式会社 技術開発部技術開発課	
亀ノ上 拓海	ヨシワ工業株式会社 技術開発部技術開発課	
糸藤 春喜	株式会社 I2C 技研 代表取締役	SL
板村 正行	株式会社 I2C 技研 非常勤顧問	
吉谷 邦宏	眞工金属株式会社 技術開発部長	
大門 忠生	眞工金属株式会社 品質保証部長	
吉國 晃宏	株式会社ツチヨシ産業 営業部副長	
枝根 和也	株式会社ツチヨシ産業 技術部副長	
中川 成人	株式会社超高温材料研究センター 代表取締役社長	アドバイザー
桑原 修	公益財団法人広島市産業振興センター 主任技師	アドバイザー
福森 久夫	福森国際特許事務所 代表弁理士	アドバイザー
山口 正人	株式会社エヌ・シー・ロード 代表取締役	アドバイザー
安斎 浩一	国立大学法人東北大学大学院 工学研究科 教授	アドバイザー

1. 3. 成果概要

開発テーマ	目標	結果	評価
【1】金型鑄造技術の 確立 【1-1】鑄造方案及び 鑄造条件の確立	鑄造品質目標 ○寸法:寸法公差等級 CT8 ○鑄造欠陥:湯回り不良、チル化組織なし その他、使用上有害な欠陥なし ○機械的性質:引張強さ 680MPa 以上 伸び 10%以上	○寸法公差等級 CT7 ○鑄造欠陥無し ○チル無し ○引張強さ:759MPa 伸び : 15.7%	達成
【2-1】長寿命低コスト 金型技術の確立	○開発目標の確立 ・設計: ・材質の標準化 ・肉厚設計の標準化 ・熱処理及び表面処理/改質の標準化 ・使用: ・予熱・冷却要領の確立 ・塗型要領の確立 ・点検・保全: ・表面性状、摩耗・変形の使用可否判定基準の確立 ・損傷部位の補修要領の確立 ○金型の予想寿命 1 万回以上	○ナックル金型の設計済 ○低コスト金型試作検証実施済 ○塗型膜厚管理値設定済 ○金型の予想寿命 1 万回達成の可能性有り (追加検証必要)	一部 達成

【2-2】鋳造自動制御 技術の確立	○自動鋳造設備機構のコンセプト設計 完了 ○データベース化・標準化 材料特性データ、プロセス制御データ の収集	○自動鋳造の実現 ○鋳造サイクルタイム 目標達成 ○実験用のプロセス 管理値設定済	一部 達成
----------------------	---	---	----------

1. 4. 当該研究開発の連絡窓口

当該研究開発に関する連絡窓口は、以下のとおりである。

【郵便番号】 730-0041

【住所】 広島市中区小町 4-33 中電ビル 3 号館 5 階

【組織名称】 公益財団法人中国地域創造研究センター

【担当者氏名】産業創造部 主幹 石原 稔久

電話:082-241-9912

FAX: 082-245-7629

E-mail:ishihara@crirc.jp

第2章 本論

2. 1. 金型鑄造技術の確立

先行研究により、試験片及び自動車部品模擬試験体での無チル化が達成できることが示されている。そこで、本研究開発では、実際の自動車部品形状で試験体を作製し、外観、寸法、組織観察、機械試験により第 1 章で紹介した各品質目標について評価した。

2. 1. 1. 無チル化を実現する溶解技術について

球状黒鉛鑄鉄の金属組織は、図 4 a)に示すように、フェライト－パーライトの基地組織となるように製造されるが、従来検討されてきた金型鑄造では、図 4 b)に示すように、チルと呼ばれる針状の組織が発生する。

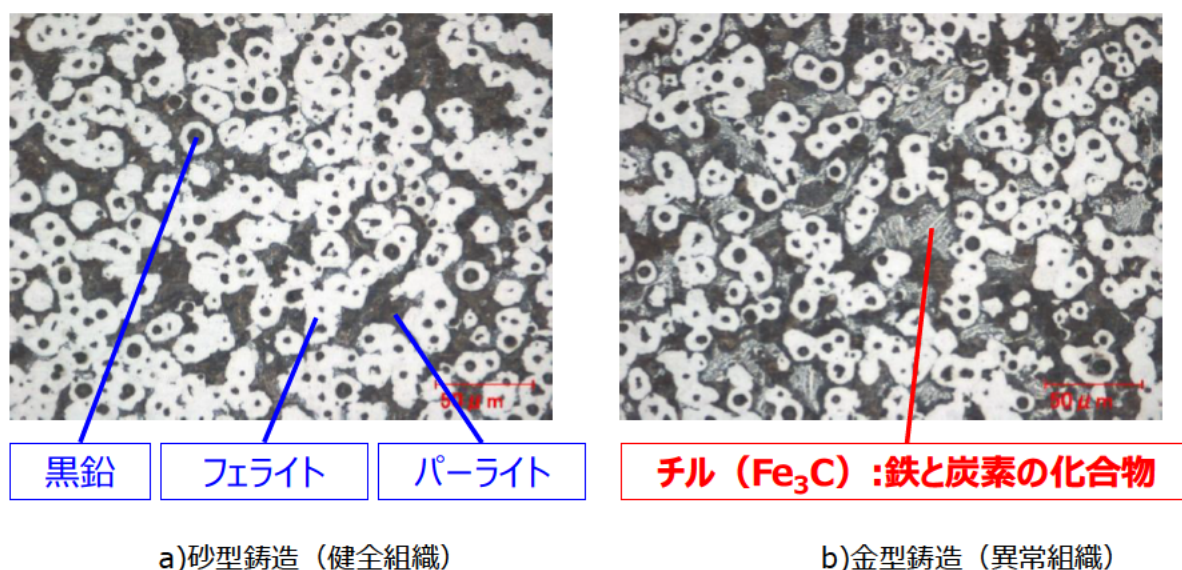


図 4 球状黒鉛鑄鉄の組織

このチル組織は、 Fe_3C の化学式で表される化合物で、非常に硬くて脆い性質であり、耐衝撃性が要求される部位の素材として不適切である、また、チルが発生した球状黒鉛鑄鉄は、製造工程においても機械加工が困難である等の問題を有しており、素材内部に残存しないように制御されるのが一般的である。現在、実用化されている金型鑄造法では、このチル組織の発生を抑えられず、後工程において黒鉛化を促進する熱処理を実施しているが、熱処理による歪の発生などが問題となっている。

一方、本研究の先行研究において、チルの発生が溶湯中のフリー窒素と関連があることを示し、溶解時にフリー窒素（溶湯中に存在する窒素分のうち、化合物を形成せず、窒素原子単体で存在するもの）を低減させるプロセスとすることで、無チル金型鑄造が実現できることを明らかにした。尚、チル生成に対するフリー窒素制御の概念は、従来にない本研究独自のものである。溶解方法の概要について以下に述べる。

図 5 に溶解の時間－温度管理チャートを示す。管理ポイントとしては次の点がある。

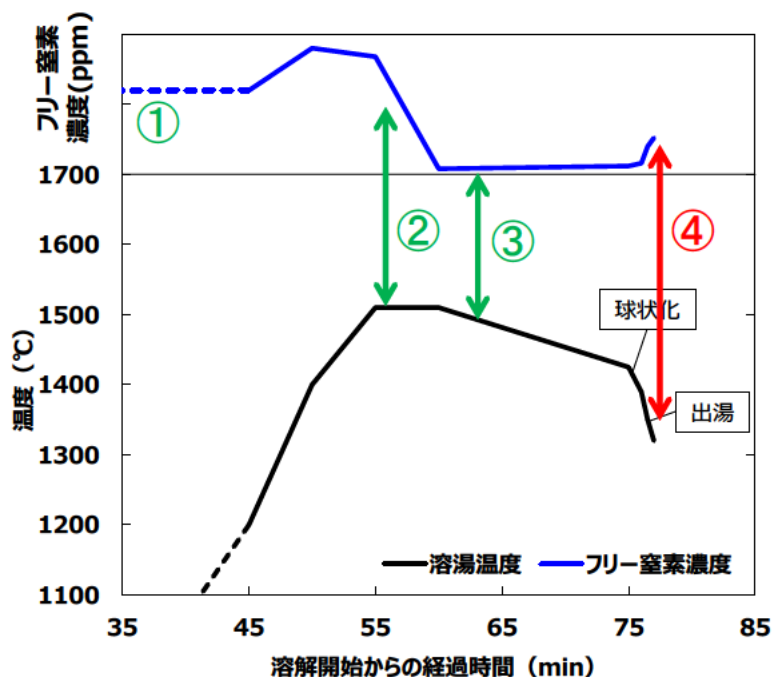


図5 フリー窒素制御のための溶解時間-温度フロー

- ①使用する材料を厳選し、チル化を促進する元素、不純物の混入を防止する。
- ②黒鉛球状化剤として添加するMgは、酸素との親和力が高い。このため、酸素の形態の中でもフリー酸素は、10ppm以下に含有量を抑えておく必要がある。これは、溶解中にCO発生温度領域（還元反応域）にスーパーヒートすることにより脱酸を進行させることで達成される。
- ③還元反応域にスーパーヒート後は、球状化处理温度まで徐冷する。これによりチル発生の大きな原因であるフリー窒素の除去が可能となる。溶解温度に平衡する溶湯への窒素溶解度から、温度の効果に伴い過飽和なフリー窒素が比較的容易に放出されることを利用し、含有フリー窒素を20ppm以下に抑える。
- ④球状化处理時、あるいは出湯・鋳込み時に大気と溶湯が接触することにより、吸窒素が進行する。
したがって、球状化处理時の温度管理を徹底し過剰なボイリング防止、溶湯ハンドリングを自動・迅速化し、接種処理から鋳込みまでを30秒以内で完了させることとする。

以下に述べる実験結果については、上述のフリー窒素制御溶解法により溶解を実施した。鋳造には、湯流れ解析により形状を決定した金型を使用し、鋳造は金型を回転させて溶湯を流し込む傾動鋳造法とした。金型の構造および鋳造実験プラントの様態を図6、7に示す。鋳造実験プラントには、50kg高周波誘導炉、溶湯ハンドリングロボット、鋳造装置の他、溶湯成分分析装置、溶湯温度計などの周辺機器を本研究のため導入した。溶湯ハンドリングロボットにより、所定の重量の溶湯を受湯し、金型に設置した結家に移し替える。その後、金型を90°旋回させることにより、溶湯を金型内部へ鋳込む。凝固完了後、試験体を金型から取り出し、各試

験に供した。なお、試験体の対象部品としては、生産部品数、部品の形状の複雑さなどを勘案し、自動車部品のナックル、及びマンホール部品の F 型ヒンジを選定した。

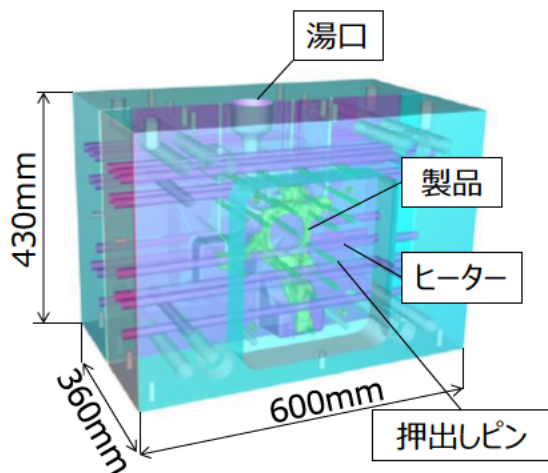


図 6 金型構造



図 7 鑄造実験プラント写真

鑄造条件として、表 6 の範囲で条件を適宜選定・調整した。

表 6 鑄造条件概要

パラメータ	管理内容
素材	低Mn銑鉄（市販）、及び実験戻り材
化学成分	C : 2.5~3.3%, Si : 3.2~4.4%, Mg : 0.025%狙い
球状化処理方法	低窒素球状化材（特注）を炉内に投入
球状化処理前温度	1420℃
出湯温度	1380℃
鑄込み温度	1250℃以上
接種方法	Fe-Si合金による注湯流接種
断熱塗型	珪藻土塗型材を吹き付け 膜厚：400μm以下
離型用塗型	アセチレンバーナーにより一定厚みに煤を塗布
金型予熱温度	300℃以上
鑄造（傾動）時間	3~13秒
鑄造後静置時間	30~45秒

金型の鑄造方案については、湯流れ解析（図 8 に事例を示す）、凝固解析などを実施し、溶湯をスムーズに注湯でき、かつ注湯中に極端に温度の低下する部位を発生しない形状を選定した。図 8 中、製品から上方に伸びる細長い部分は、鑄込み中に金型内部の空気を抜くためのガス抜きである。

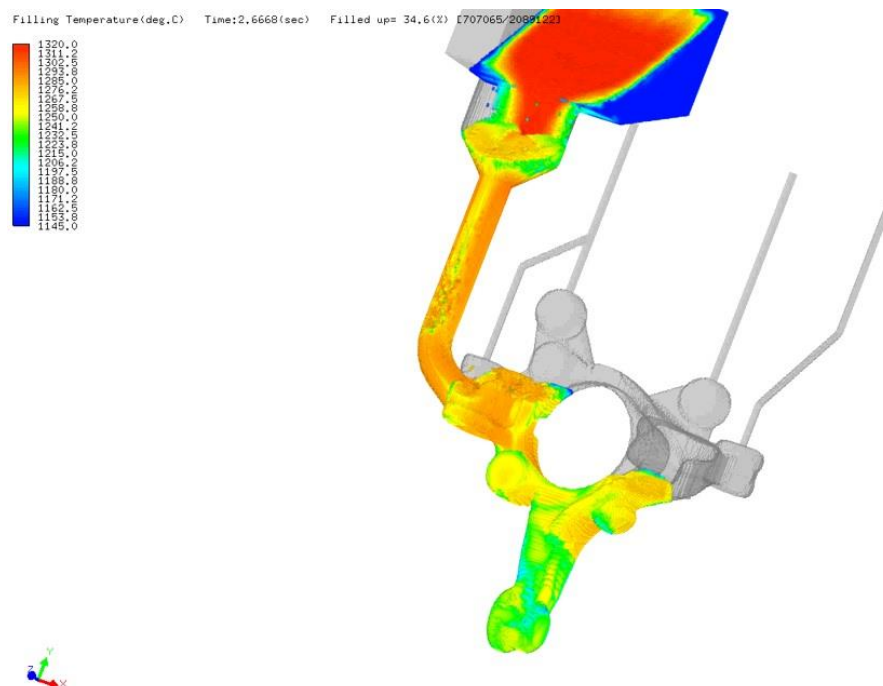
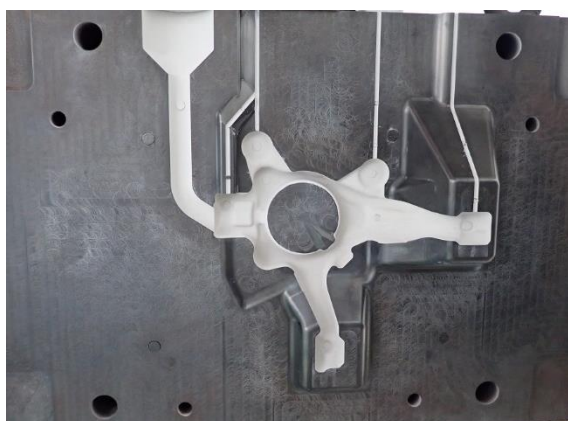
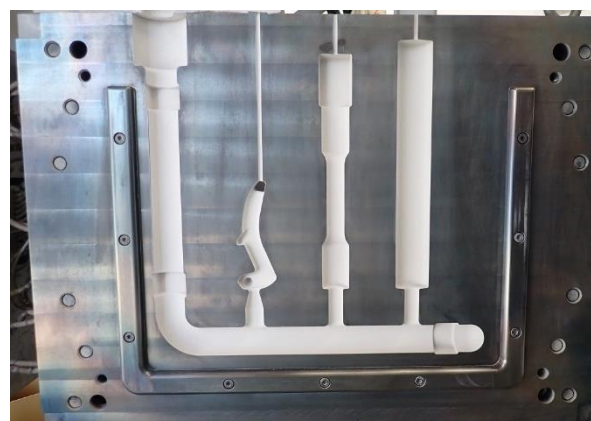


図 8 鋳造解析事例（ナックル傾動鋳造の湯流れ解析）

実際に試験に使用した金型内面（下型）の模様を図 9 に示す。



a)ナックル



b)ヒンジ

図 9 金型内面（下型）写真 ※白色の断熱塗型塗布部分が溶湯流入箇所

2. 1. 2. 鋳造方案、及び鋳造条件の確立

①鋳造欠陥

外観について、図 10 に示す。ナックル、ヒンジともに湯回り不良といった大きな鋳造欠陥は見られないが、バリ、湯ジワが残存している。また、溶湯の化学成分や塗型の膜厚、傾動速度を調整することで、ナックルのサンプル A、B のように表面の平滑度、湯ジワの発生状況を変動させられた。しかしながら、単純な形状の部位

は平滑な表面を得られるものの、部品の形状（ casting direction に垂直な断面積）が急変する箇所を中心に湯ジワが残存し、ゼロ化することはできなかった。一方、いずれの製品においても切断面に引け巣などの内部欠陥は見られなかった。製品の外観品質向上のため、湯ジワを防止できる casting プロセスの確立が課題となる。



図 1 0 本研究での金型 casting 品外観

② 寸法

ナックルの寸法について、3D スキャナで計測した結果を 3D モデルとの寸法差をカラーバーで表示し、図 11 に示す。モデルとの寸法差は最大で $\pm 1.5\text{mm}$ 程度であり、JIS casting 公差等級では、CT7 級以上に相当する結果が得られ、目標の CT8 級を超過達成した。一方で、寸法については、基礎塗型の膜厚に依存してい

ることから、塗型塗布の安定化・自動化、及び塗型の剥離・脱落防止、部分補修技術の開発が残課題として挙げられる。

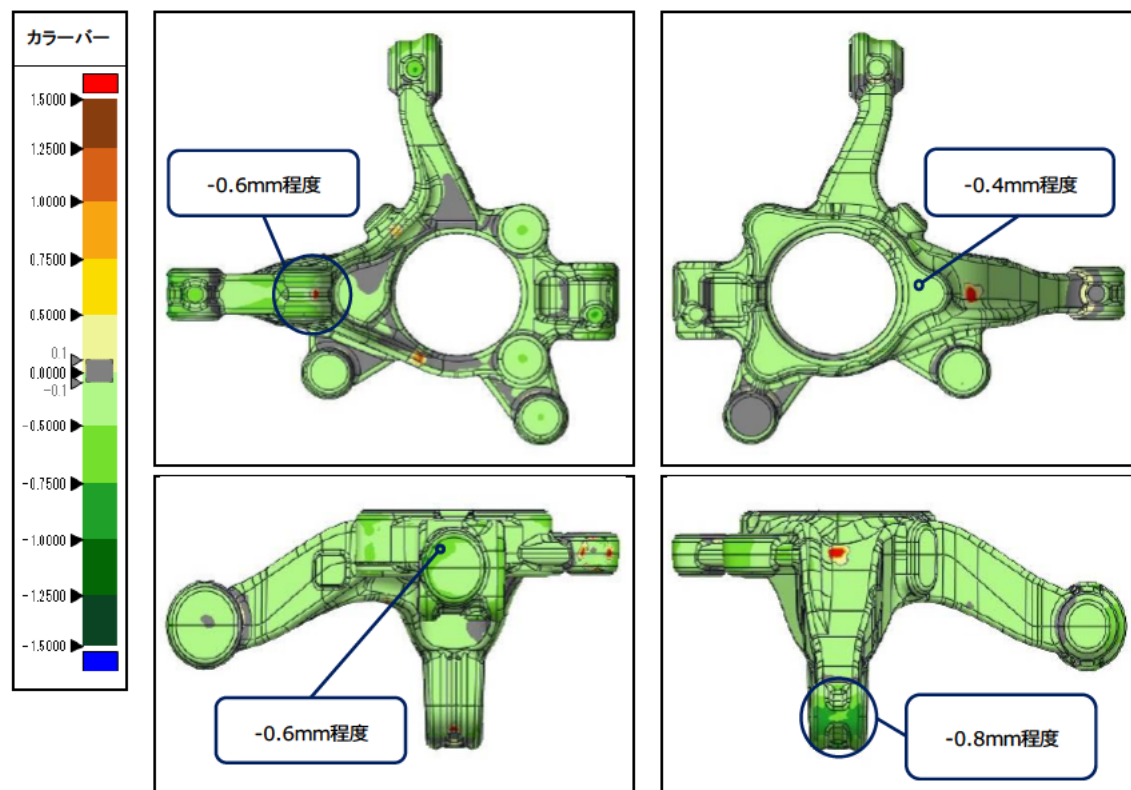


図 11 金型铸造品と 3D モデルの寸法差

③組織観察

ナックル試験体の代表部位について、組織観察を行った結果、図 12 に示すように、大部分は白色のフェライト層となっているが、最薄内部にチルが発生した。図 13 にチル発生状況について示す。このチルは、鋳物内部に発生する逆チルと呼ばれるものであり、冷却速度の調整により対策されるのが一般的である。本研究においては、冷却速度を遅くするのは困難であることから、溶湯の化学成分を調整することで無チル化を目指すこととし、フェライト化促進元素である Si を増加させることにより、図 14 のように全面的にフェライトを中心とした組織となり、無チル化が可能であることを示した。ヒンジに対しても同様の組織観察を行い、無チルでの鋳造が可能であることを確認した。

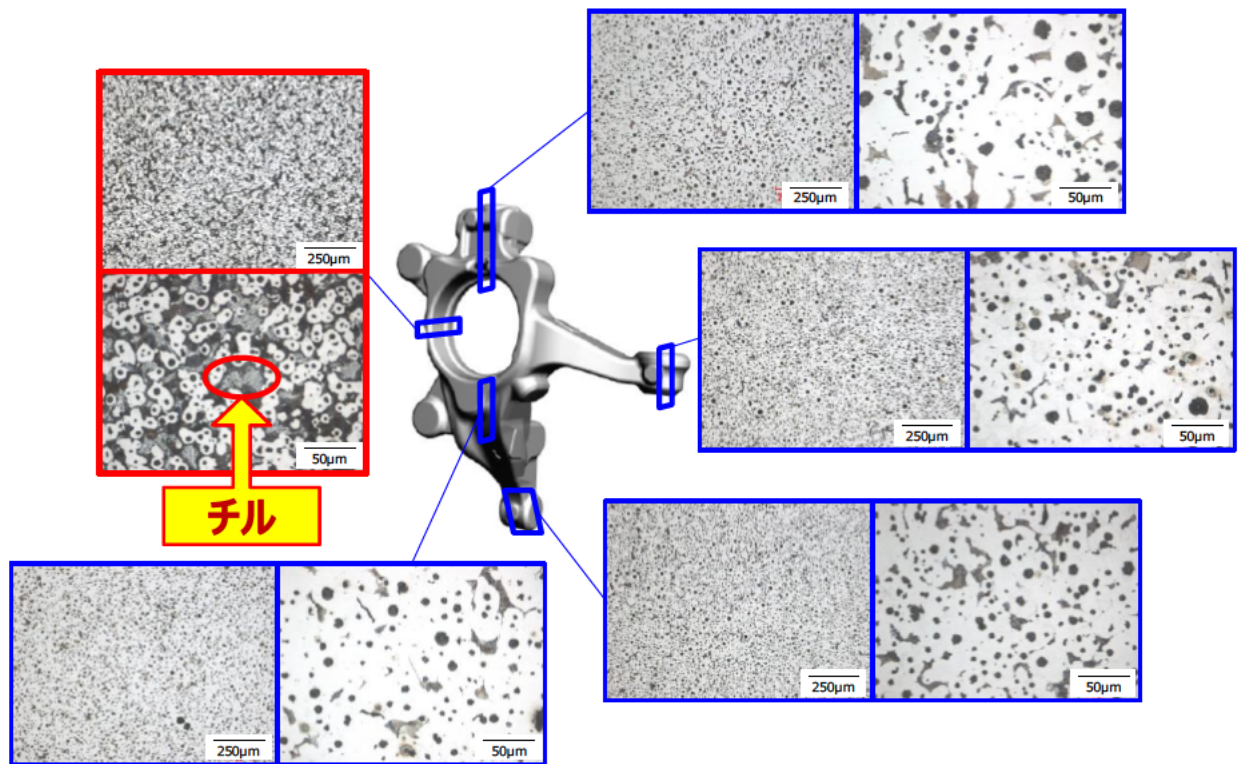


図 12 金型鑄造品の組織観察（チル発生品）

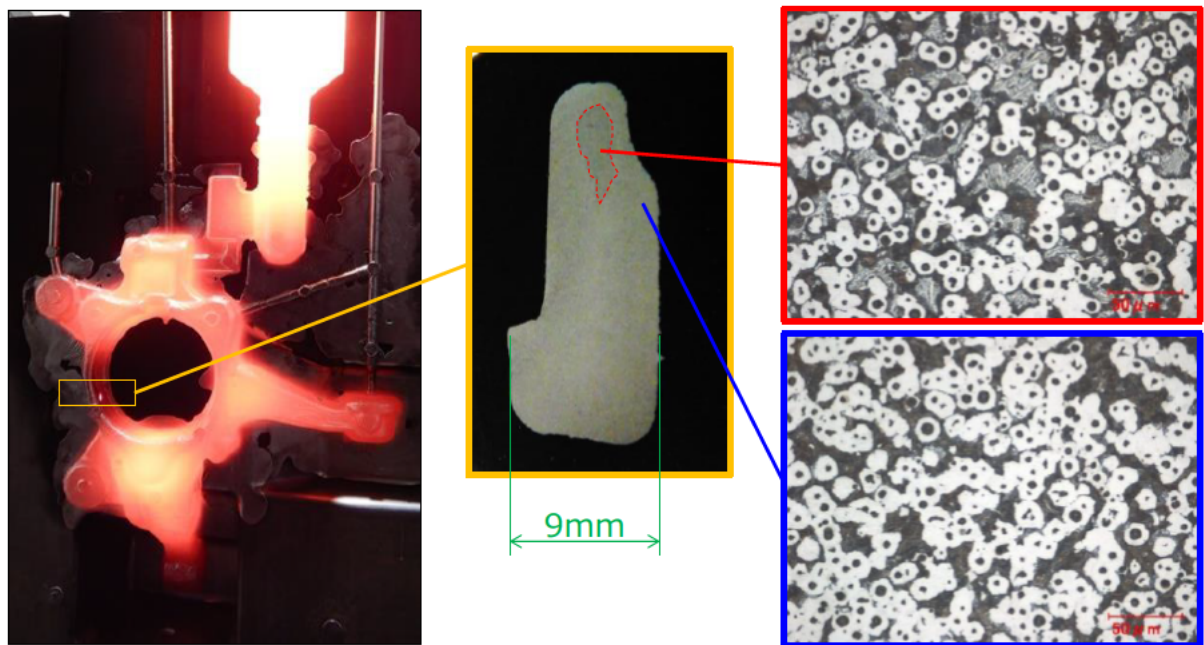


図 13 チル発生状況の分析

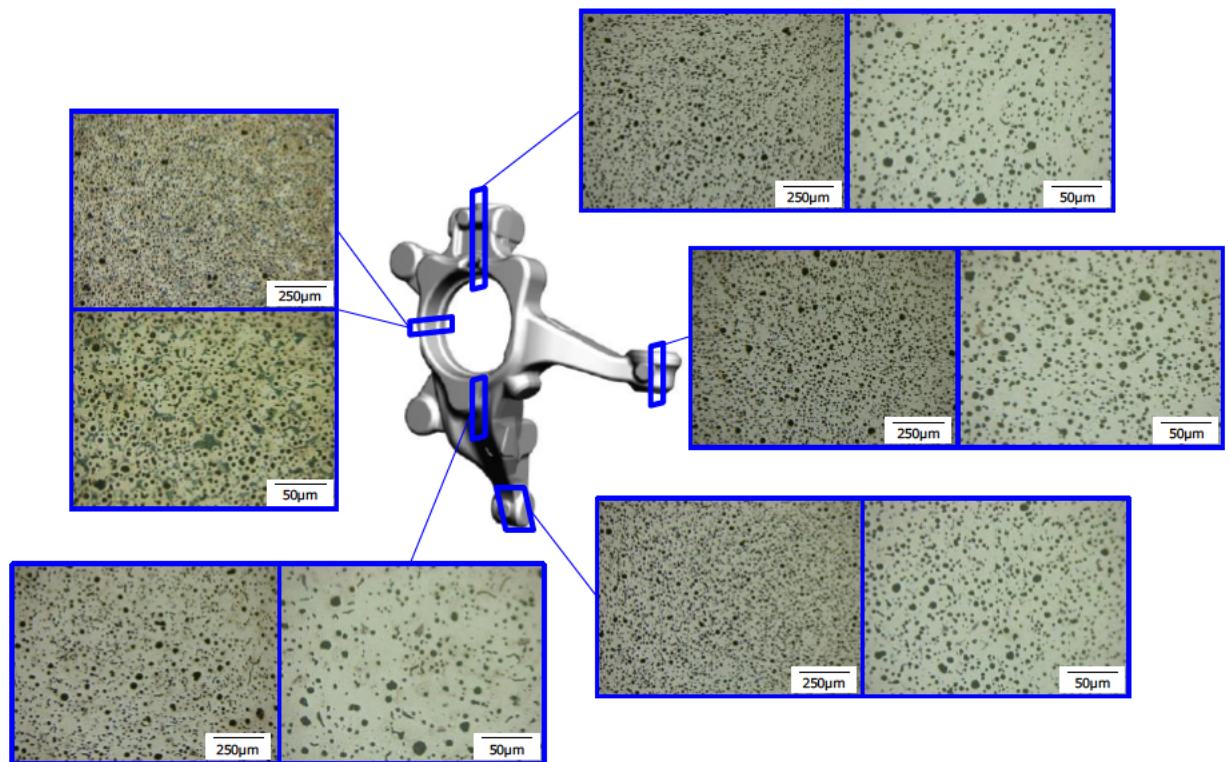


図 14 金型铸造品の組織観察（無チル品）

④機械的性質

金型铸造した球状黒鉛铸铁は、その急冷効果により結晶粒が微細化することから、機械的性質が向上することが期待される。そこで、ナックルについて、引張強さ 680MPa 以上、伸び 10%以上を目標値として、引張試験を実施した。試験片は $\phi 6.2 \times$ 平行部 26mm の丸棒試験片を試験体本体より機械加工により切り出した。引張試験結果を図 15 に示す。

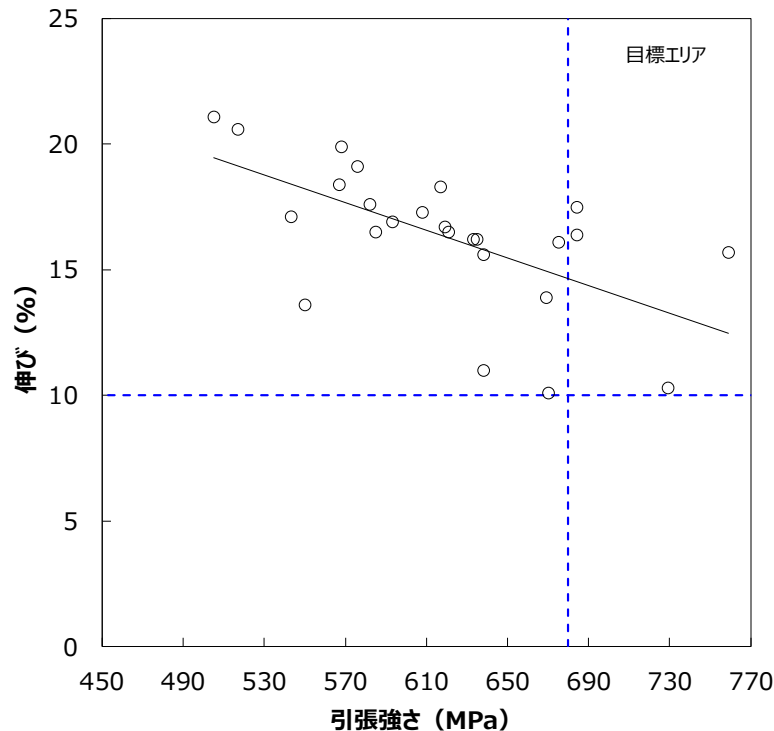


図 15 ナックルの引張試験結果

溶湯の化学成分などの条件により結果にばらつきがみられるものの、化学成分を調整することで、目標を達成できることが確認できた。一方で、同一試験体から切り出した 2 本の試験片においても、伸びの結果が大きく異なるケースが見られ、局所的な凝固条件の差に機械的性質が大きく影響を受けることが示唆された。このことは、繰り返し铸造品での性能再現性が低いことも示すものであり、ロバスト性の高い铸造条件の確立が不可欠である。また、溶湯注入部である湯道から切り出した試験片での引張試験においては、伸びが製品本体部の約 50% 以下の不十分な値となった。試験片本体を破壊せずに機械的性質を評価できる手法の確立が量産化実現には欠かせず、品質保証度を量産レベルまで引き上げることが残課題である。

また、ヒンジについては、製品と同時に铸造した丸棒試験体、試験片形状試験体、湯道から試験片を切り出し、機械試験に供した。結果、図 16 のように引張強さは目標の 450MPa を十分に達成可能であるものの、試験片形状で铸造した試験体では目標 10% を下回るものも見られた。これは、金型铸造品の表面に残存しているドロスなどの不純物の影響を受けているものと考えられる。このように、試験片の切り出し部位による機械的性質のばらつきが大きく、ナックル同様、製品本体の機械的性質について製品を破壊せずに評価できる手法の開発が不可欠である。

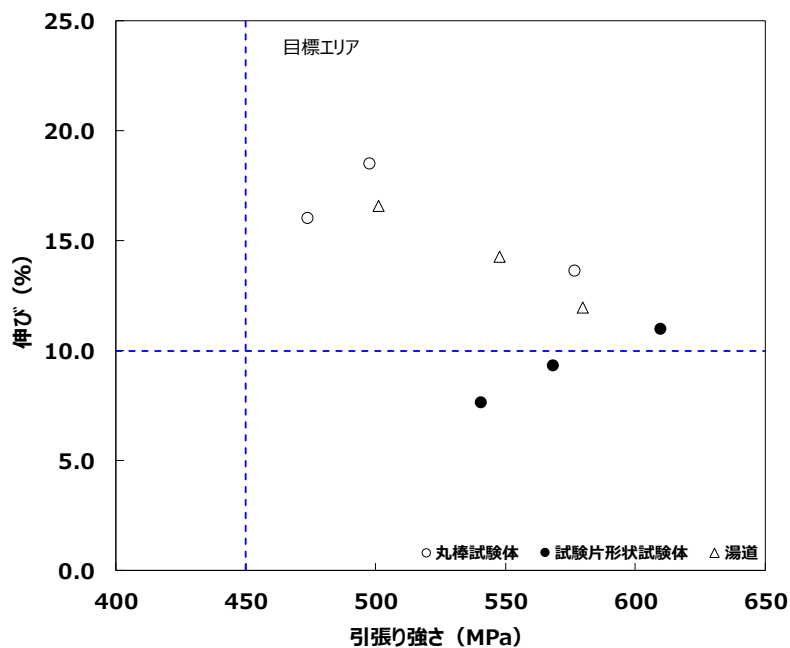


図 16 ヒンジ試験片の引張試験結果

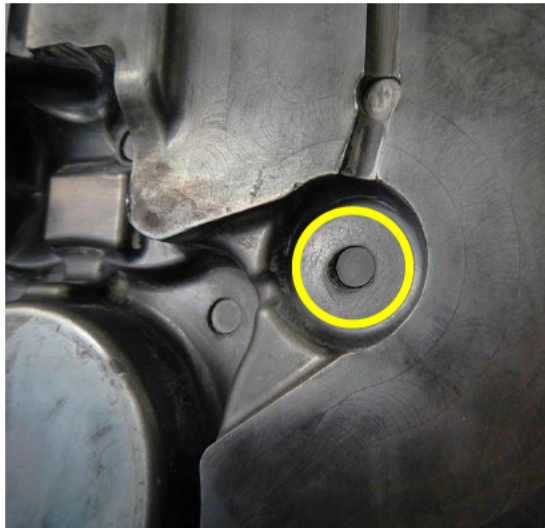
2. 2. 金型鑄造の低コスト化、生産性向上技術の開発

金型鑄造技術の量産化にあたっては、製造原価へのインパクトが大きい金型の安価で高耐久性を有する設計方法確立することが不可欠である。また、現行の砂型鑄造と匹敵できる生産性を実現することも要求されるため、鑄造実験から金型の損傷度合、損傷個所の明確化、及び予測寿命の検討、自動鑄造によるサイクルタイムの短縮に取り組んだ。

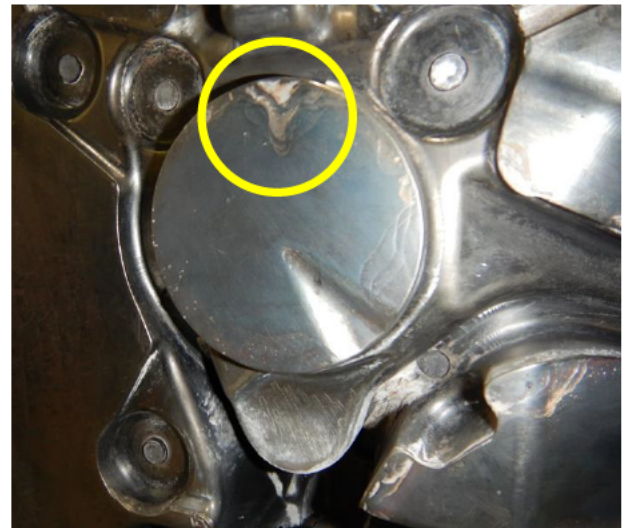
2. 2. 1. 長寿命低コスト金型技術の確立

実験中に確認された金型の損傷例を図 17 に示す。これらについては、部分補修により、鑄物品質を維持管理可能なものと考えられる。一方で、今回の実験繰り返し数（138 回）の中ではこれらの損傷が鑄物品質に対して大きな影響を与えることは無く、問題とならなかった。

金型の補修費、バリの発生状況などから、金型の維持管理費用を予想した結果を図 18 に示す。金型新製によるコストと比較した結果、約 1.2 万回の使用で維持管理コストが新製コストを上回ることが予想された。



①押し出しピン周辺部の変形



②型合わせ面への溶湯侵入による溶損

図 17 金型損傷事例

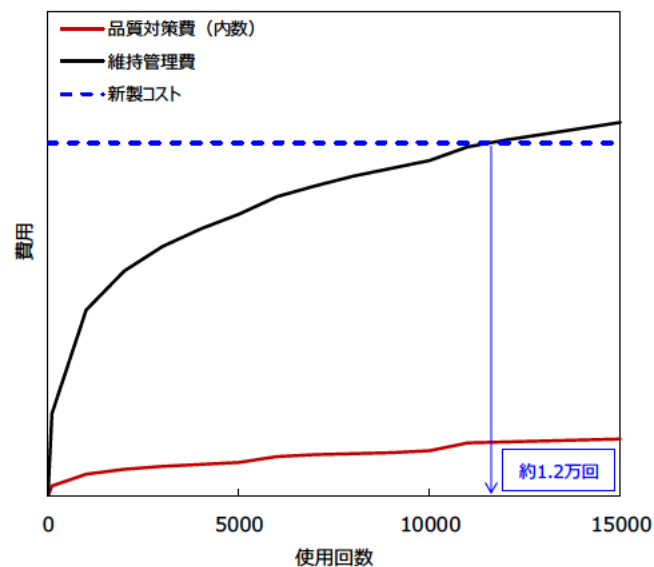


図 18 金型維持管理コスト予想曲線

2. 2. 2. 鑄造自動制御技術の確立

本研究では、金型の段取、搬入・位置決め、出湯、溶湯搬送、鑄造、金型搬出、抜型を自動化の対象とした（図 19）。自動制御が必要な設備として、溶解炉、溶湯ハンドリングロボット、鑄造装置がある。溶解炉、及び溶湯ハンドリングロボットは市販の装置に鑄造装置からの制御信号を入力する回路を追加することで、本研究用に開発した鑄造装置から統合制御する形とし、操作者 1 名での作業を可能とした。制御の流れは以下のとおりである。溶解炉の出湯準備完了後、ロボットに備え付けた取鍋を出湯樋下にセットし、受湯重量を計測しながら出湯する。目標重量に近づいた段階で出湯を停止し、受湯重量を確定させる。受湯終了後、鑄造装置にセッティングされた金型の湯受けに溶湯移し替える。鑄込み完了後、溶湯を凝固させるまでの一定時間は金

型を締結した状態で保持する。保持時間経過後に、金型を開き、押し出しピンにより押し込むことで製品を抜型する。

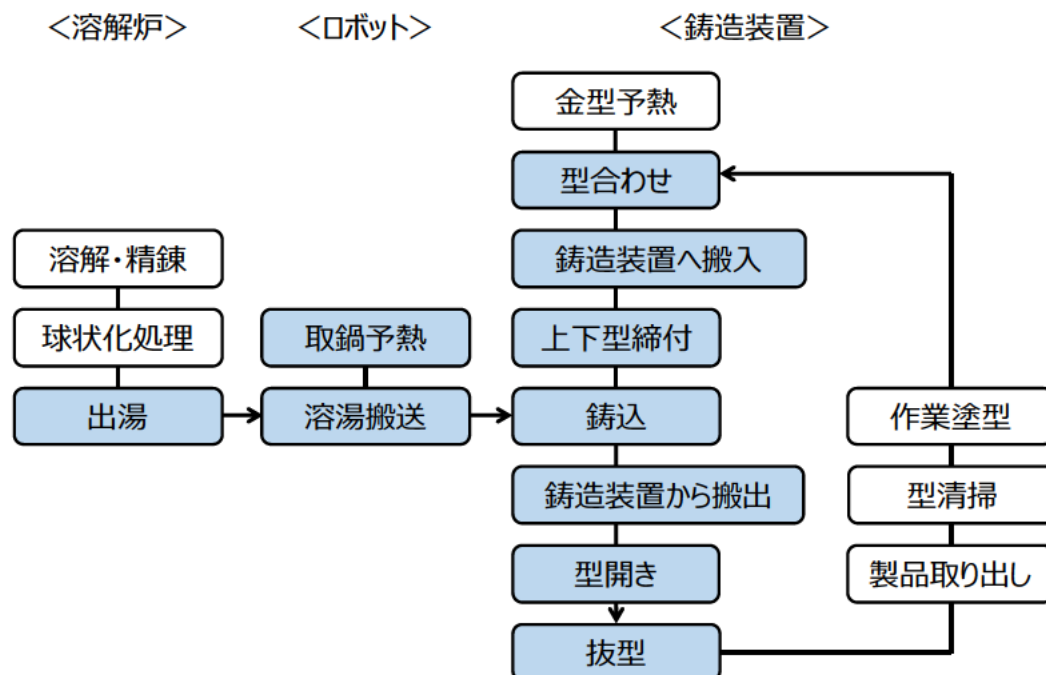


図 19 鑄造フローと自動化対象工程 ※着色部が自動化の対象工程

自動鑄造実験を実施する中で問題となったのが、抜型工程である。砂型鑄造では、鑄込み後、砂を除去することで、比較的容易に製品を取り出すことができる。一方、金型鑄造では、製品の冷却に伴う収縮により鑄物が金型を締め付けている部位が発生するため、部品形状によっては、金型から抜き取ることが困難になる。これを解決するため、金型内部に押し出しピンを設け、型開き後に油圧シリンダーで押し込むことにより製品を取り出す構造とした。押し出しピンと金型穴部のクリアランスについては、溶湯が侵入せず、かつピンがスムーズに動く程度に調整した。

この自動鑄造設備で、実験サイクルタイムを管理指標として、機構の成立性及び生産性を評価した。機構については、作業場の大きな問題はなく、狙い通りの実験を遂行できた。実験サイクルタイム（受湯から次回受湯準備完了までの時間）については、目標を 330 秒と設定し、実験時間を計測した。実験サイクルタイムの実測値を図 20 に示す。自動化の対象としていない作業塗型の塗布についても、取り出しの際に抜型抵抗が高いエリアを重点的に塗布するように作業を改善し時間短縮を図った結果、317 秒となり、目標を達成できた。

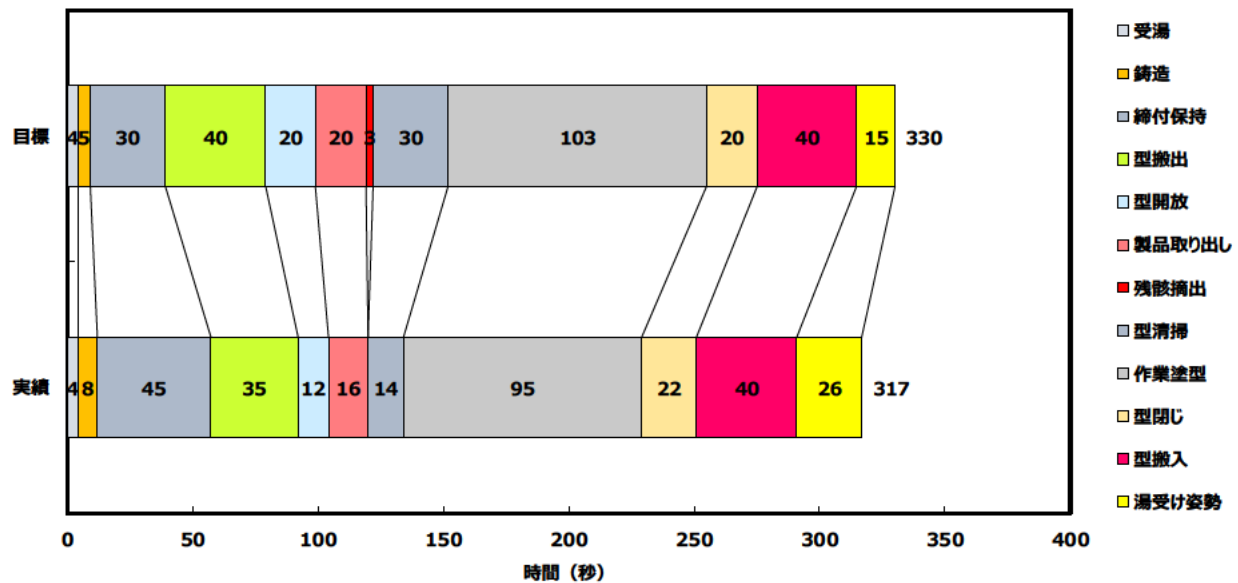


図 20 自動鑄造実験のサイクルタイム

第3章 全体総括

3. 1. 研究開発の成果（平成29年度～令和元年度）

3. 1. 1. 金型鑄造技術の確立

鑄物品質面では、第2章で述べた通り、当初設定した目標値については、達成できた。一方で、湯ジワなどの外観の問題や、量産化に耐えられるだけの安定したプロセスが確立できたとは言えない。

したがって、引き続き製品品質の再現性の向上、プロセスのロバスト性向上を主眼に量産技術開発を継続する。

3. 1. 2. 金型鑄造の低コスト化、生産性向上技術の開発

上記の結果から予想される金型鑄造の製造コストについて、砂型鑄造のレベルを100とした指数で図21に表示する。尚、コスト試算の条件として、重量30%の軽量化達成、1鑄込み当たり2個取り、金型寿命1万回で設定した。

金型鑄造では、材料歩留まりの向上による材料費及び溶解費の低減、砂再生設備の廃止による設備費の削減などが見込まれ、全体として33%のコスト低減が見込まれる結果となった。従って、本研究の狙いであった、砂型鑄造対比コスト30%低減について、達成できる見込みである。

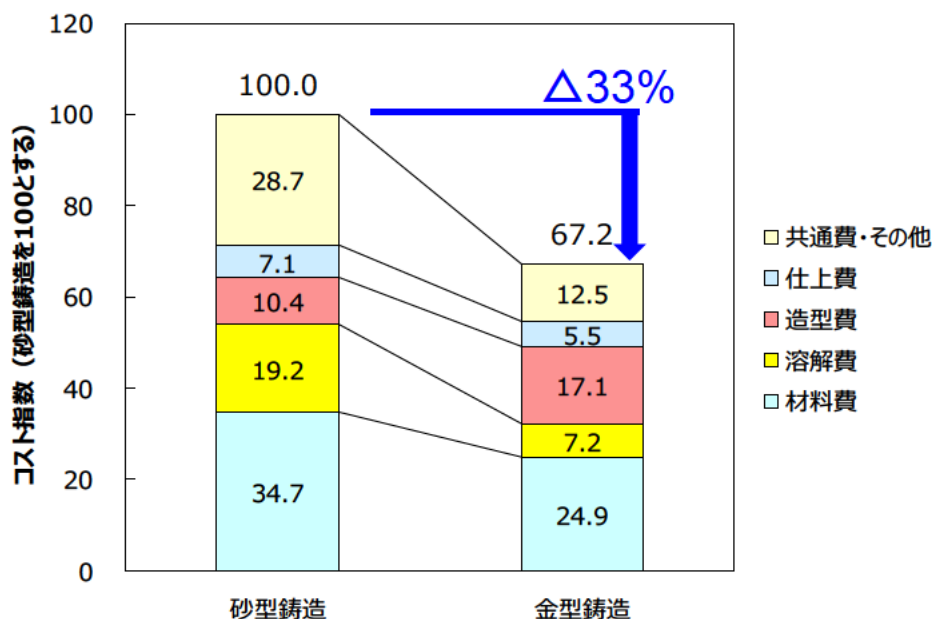


図 21 砂型鑄造と金型鑄造のコスト比較

以上の本研究における成果を総括すると、当初目論んでいた品質/コストの目標について、個別には達成できている。特に、従来は不可能と思われていた金型鑄造での鑄放し無チル化が可能であるという知見が得られたことは、新プロセス実現に向けた大きな一歩である。一方、品質に対する繰り返し安定性の点で、量産に耐えられるレベルには達していないものと考えられる。また、湯ジワに代表されるような、当初想定しきれていなかった技術的に解決すべき問題も残っており、即時の量産化は困難なものと判断される。しかしながら、金型鑄造法が球状黒鉛鑄鉄の製造法を革新的に改善するプロセスであることは間違いなく、引き続き他社に先駆けて量産化実現を目指す。

3. 2. 今後の課題・事業化展開

3. 2. 1. 今後の課題

本研究で未解決の状態に残っている課題と、その取り組み方針について表 7 に示す。本研究において量産化できる可能性は示されたものの、これらの課題を解決しなければ、効率的な量産は不可能であると考えられる。したがって、引き続き課題解決に向けた技術開発を進める。

表 7 本研究の残課題と対処方針

区分	プロセス	項目	現状/課題/解決すべき内容	取り組み
コスト	素材	戻り材の適用	戻り材の繰り返し使用により、不純物が濃化し、機械的性質が管理値を外れる可能性があるため、本研究では新材料を使用したが生産においては戻り材を活用しコスト低減する必要がある	戻り材を使用して casting した試験体での機械的性質評価により、許容される不純物の上限値を決定する
コスト	溶解	フリー窒素低減	フリー窒素低減のためのスーパーヒートにより、溶解時間が延長するため、生産性が低下する	時間当たりの生産量を最大化できる設備運用案の机上検討
品質	溶解	フリー窒素低減	フリー窒素低減のスーパーヒート・徐冷後、溶湯を保持し続けても良い時間基準が不明である	溶湯保持時間と吸窒素量の定量化により管理基準値を設定する
品質 コスト	溶解	球状化処理	本研究で実施した炉内での球状化処理では、Mg以外の元素の濃化により、繰り返し球状化処理が困難で溶湯歩留まりが低下する	出湯後の少量での球状化処理について、技術開発に取り組む
品質	鋳込み	湯ジワ	鋳物表面に湯ジワが残存し、鋳放しでの使用ができない	湯ジワの生成に対する形状、鋳込み条件の影響を定量化し、鋳造解析により湯ジワ発生を抑制できる作業方法を明確にする
品質	組織	組織解析	凝固解析での組織予測について、金型鋳造を想定したパラメータの設定ができておらず、鋳造方案を効率的に立案できない	鋳造実験結果とCAE解析結果の合わせこみ
品質 コスト	金型	金型構造	金型の使用回数に応じた不具合について、実験レベルで検証しきれていない	中長期での反復使用による影響評価
コスト	金型	補修技術	金型に発生した局所的な損傷について、補修方法が未検討となっている	溶接補修、部分メッキ等、採用可能な技術の選定・試験
品質	金型	基礎塗型	金型への塗型塗布が俗人的作業となっており、塗型膜厚がばらつくことにより、金属組織・機械的性質がばらつく可能性がある	恒久的な断熱層の設定方法の開発 溶射法など、自動化可能な技術の採用
コスト	金型	作業塗型	塗型塗布が俗人的作業であり、自動化・省力化が必要	煤塗布に代わる複数回使用可能な離型材の採用
品質	品質管理	機械的性質	鋳物の部位による機械的性質のバラつきを抑制できる普遍的なプロセスの管理値をまとめられていない	鋳造実験により各プロセス管理値の機械的性質への影響を定量化し、管理値を設定する
品質	品質保証	機械的性質	鋳込み毎に機械的性質がバラつくため、各製品に対する品質保証が困難である	各プロセスの管理値を明確にし、プロセス保証で成り立つだけの品質安定性を担保できる操業要領を見出す

3. 2. 2. 事業展開

事業化に向けた今後 5 年間の活動計画を表 8 に示す。金型鋳造技術については、品質の安定化が非常に重要な問題となり、特に部品生産数の多い自動車部品に適用することは、相当にハードルが高いと懸念される。そこで、まずはマンホールのヒンジ部品の量産を実現すべく、川下事業者との協議、製造プロセスや品質評価法の規格化に取り組む。ヒンジ部品の量産化を実現し、生産実績を積み重ねた上で、自動車部品の量産化を目指す。上記課題の解決の目処が着いた時点で、川下事業者へ採用提案が可能となるよう、規格化、標準化も併せて取り組む。

表 8 量産化に向けた向こう 5 年間の活動計画

取組み項目	2020				2021		2022		2023		2024		2025
	1Q	2Q	3Q	4Q	前	後	前	後	前	後	前	後	前
3年間の活動での残課題の整理と現状整理	→												
残課題への対処方針確認・実験計画		→											
残課題の対策効果確認の実験・評価			→	→									
残課題の対策効果確認の実験・評価					→	→	→	→	→	→			
JIS規格化 実現性調査	→	→											
マンホール部品 品質再現性評価試験	→	→											
マンホール部品 客先説明			→	→									
マンホール部品 試作品提供・評価					→								
量産設備 導入						→							
マンホール部品 量産化							→	→	→	→	→	→	→
自動車部品 客先説明								→					
自動車部品 試作品提供・評価									→	→			
量産設備 導入											→		
自動車部品 量産化											→	→	→
特許（オプション権の保持）	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
展示会への出展・技術公表									★ (海外)	★ (海外)			

以上