

平成23年度第3次補正予算事業 戦略的基盤技術高度化支援事業
「非磁性・超低温用の高強度オーステナイト球状黒鉛鋳鉄製品の製造技術開発」

研究開発成果等報告書

平成24年12月

委託者 東北経済産業局
委託先 公益財団法人あきた企業活性化センター

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	P.	1
1-2	研究体制	P.	3
1-3	成果概要	P.	7
1-4	当該研究開発の連絡窓口	P.	8

第2章 本論

2-1	鑄造技術の確立		
2-1-1	球状化処理工程の検討	P.	9
2-1-2	注湯工程の検討	P.	9
2-1-3	鑄造欠陥の調査・検討	P.	10
2-2	熱処理技術の確立		
2-2-1	非磁性条件の調査・検討	P.	16
2-2-2	低温条件の調査検討	P.	17
2-2-3	製品性能試験による継手強度評価	P.	17
2-3	迅速分析技術の確立		
2-3-1	Mn 検量線の作成	P.	18
2-3-2	諸元素の検量線補正	P.	19

第3章 全体総括

3-1	研究開発成果	P.	20
3-2	研究開発後の課題・事業化展開	P.	21

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) 研究背景

近年、建築・土木産業では非磁性・低温用途の鉄筋コンクリート構造物のニーズが高まっており、非磁性・低温用鉄筋は既に開発され流通しているが、継手については高性能で低コストな製品を製造できる材料が無いため継手実現への課題が残されている。本研究では非磁性、且つ強靱で低温靱性、耐摩耗性に優れた高強度オーステナイト球状黒鉛鋳鉄の開発材料での製品性能を研究し、商品化を目指す。以下に具体的な用途についてまとめた。

A 超低温用 RC 構造物の具体例：LNG 貯蔵タンク

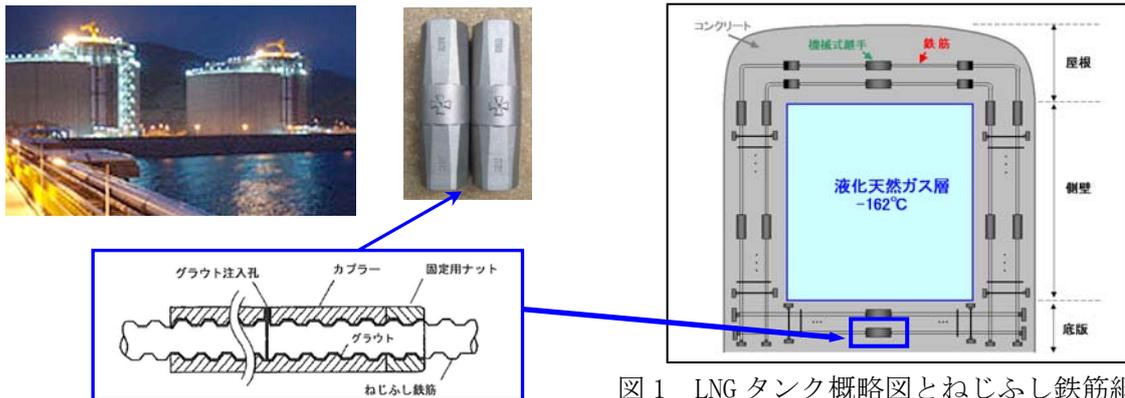


図1 LNG タンク概略図とねじふし鉄筋継手

天然ガスは、パイプラインによる輸送が困難な場合には -162°C という超低温で液化し、体積で600分の1のLNG（液化天然ガス）にして貯蔵、運搬される。図1のLNGタンク概略図に示すように、LNGタンクの鉄筋は機械式継手により接合されている。RC構造部（鉄筋コンクリート構造部）温度は、コンクリートの種類により断熱効果が異なるため、RC部の低温度に合わせて継手材料が使い分けされている。（約 -100°C より低温では非常に高価なSUS304が使われている。）

B 非磁性 RC 構造物の具体例：リニアモーターカー、MRI 施設

リニアモーターカーの車両には強力な超伝導磁石が搭載されているため、図2に示すガイドウェイの範囲には磁化に伴うエネルギー損失により走行抵抗を及ぼさないように非磁性鉄筋が使われている。しかし、コスト面などで大量生産に適した非磁性機械式継手が無いため、現在は鉄筋に重なり部を設けて針金を巻き付けて止める重ね継手（工事に時間がかかり、コスト高）で対応している状況にある。一方、最近では機械式継手を使うプレキャスト工法の採用が増えている。風雨の当たらない工場内環境でコンクリートを養生するため品質が高く、現場作業効率も良く、作業によるバラツキが少ないため現在施工箇所数が増加している工法である。JRリニア新幹線のガイドウェイにプレキャスト工法を採用できれば、工期短縮およびコスト削減が可能となり、更には完成後のメンテナンス、地震などによる改修工事が効率よく行える。

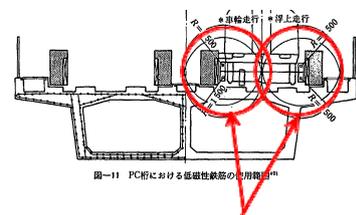


図2 ガイドウェイの非磁性材料が要求される範囲

C 非磁性、且つ 低温用 RC 構造物の具体例：原子力発電の炉心部

最近の原子炉の炉心部には鉄筋コンクリートを採用する例が増えてきており、炉心部では非磁性および低温脆性（中性子照射による材料の脆化温度上昇を想定して、低温衝撃値に優れた材料を採用している）が同時に要求されるため、現在高Mn鋼またはSUS304が鉄筋材料として使われている。高Mn鋼に適した継手工法として、信頼性が高く評価されている機械式継手の採用が望まれており、低コスト、高強度の非磁性かつ低温用途に適した機械式継手の実現が急務である。

(2) 研究目的

前の具体例に示したように、非磁性や低温用途など機能性を要求される鉄筋コンクリート構造物（鉄筋+継手+コンクリート）の需要が増加しており、低コストで高強度な非磁性、耐超低温の機械式継手のニーズが高くなっている。こうした状況の中、図3に示すように鉄筋材料としては低コスト、高強度の高Mn鋼鉄筋、超低温用SUS304鉄筋などが開発され、実用化されている。一方で、これらを接合する機械式継手材料の開発が遅れており、現在実用化されている機械式継手材料は非常に高コストなSUS304製のみである。高マンガン材料は casting 及び加工困難などの理由で実用化が難しい状況である。よって本研究は機械式継手向け、非磁性・耐超低温かつ高強度で低コスト、被削性良好な材料の開発を目的とする。

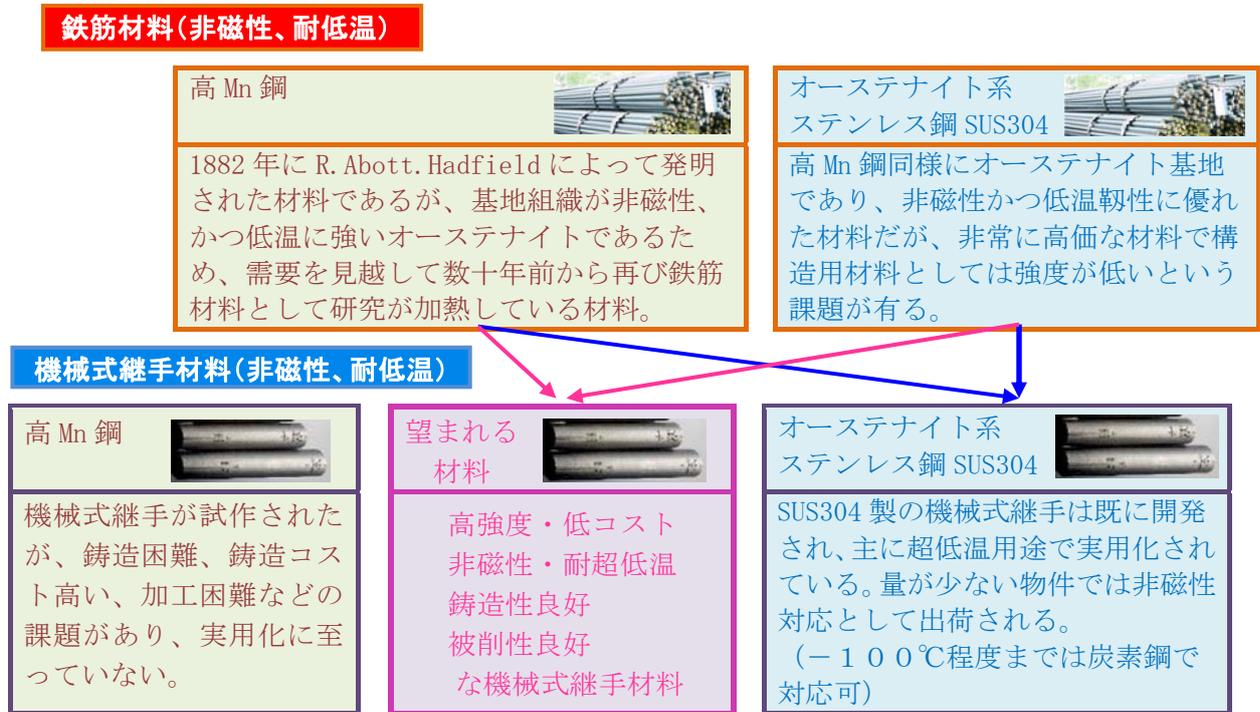


図3 機械式継手に望まれる材料

(3) 研究目標

本事業では、上の望まれる材料による機械式継手の実現に向け、新材料による機械式継手の製造技術の確立を目指す。新材料によるテストピースでの実験により、非磁性・耐低温用機械式継手に適した材質であることが分かっているが、 casting は特に形状因子による冷却速度の違いにより材質が変化するため、新材料の casting 技術確立により材質を制御する必要がある。更に、新材料は熱処理により優れた特性を得るため、製品形状で優れた特性を得られる熱処理技術の確立が不可欠である。また、新材料はMnを約10%含有する特殊な球状黒鉛 casting であるため、発光分析などの迅速分析技術が確立されていない。現在、 casting 製造現場では、電気炉で溶解した casting 溶湯を迅速分析しながら操業することにより品質の向上を図っており、新材料での実操業では迅速分析が不可欠となる。そこで本研究では**サブテーマ①：新材料の casting 技術の確立、サブテーマ②：新材料の熱処理技術の確立、サブテーマ③：新材料の迅速分析技術の確立、**の3本を柱とする研究を実施し、商品化に向けた実操業ラインレベルでの製品製造技術の確立を目指す。以下に①～③のサブテーマについて目標を示す。

サブテーマ①： casting 技術の確立

Mn 約 10wt% 含有球状黒鉛 casting のライン生産で肉厚 5mm 以下の製品を不良率 3% 以下で製造する。

サブテーマ②：熱処理技術の確立

casting 製品（継手）を熱処理し、高強度化（継手性能 SD390 相当）、非磁性化（透磁率 1.3 以下/JR リニア仕様）、耐低温化（-196℃で衝撃値 20J）を実現する。

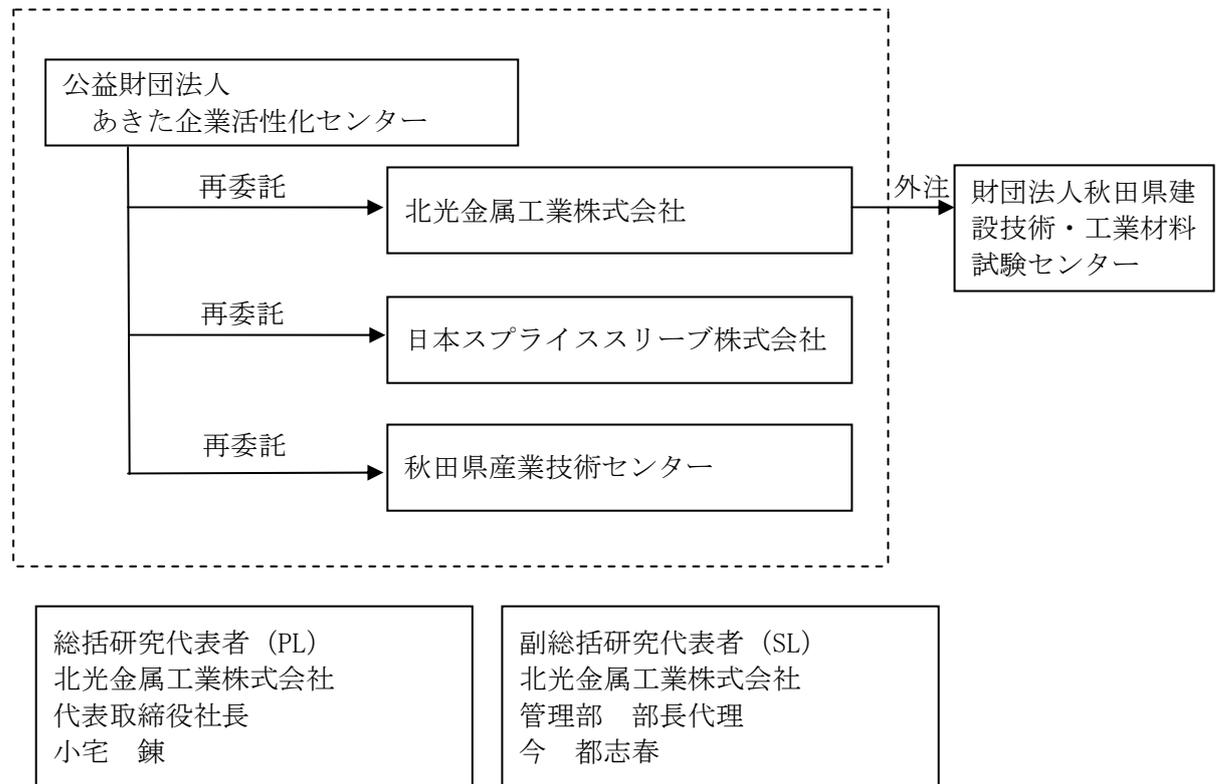
サブテーマ③：迅速分析技術の確立

高 Mn 溶湯での迅速分析を湿式分析値の 3% 以内の精度で実現する。

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

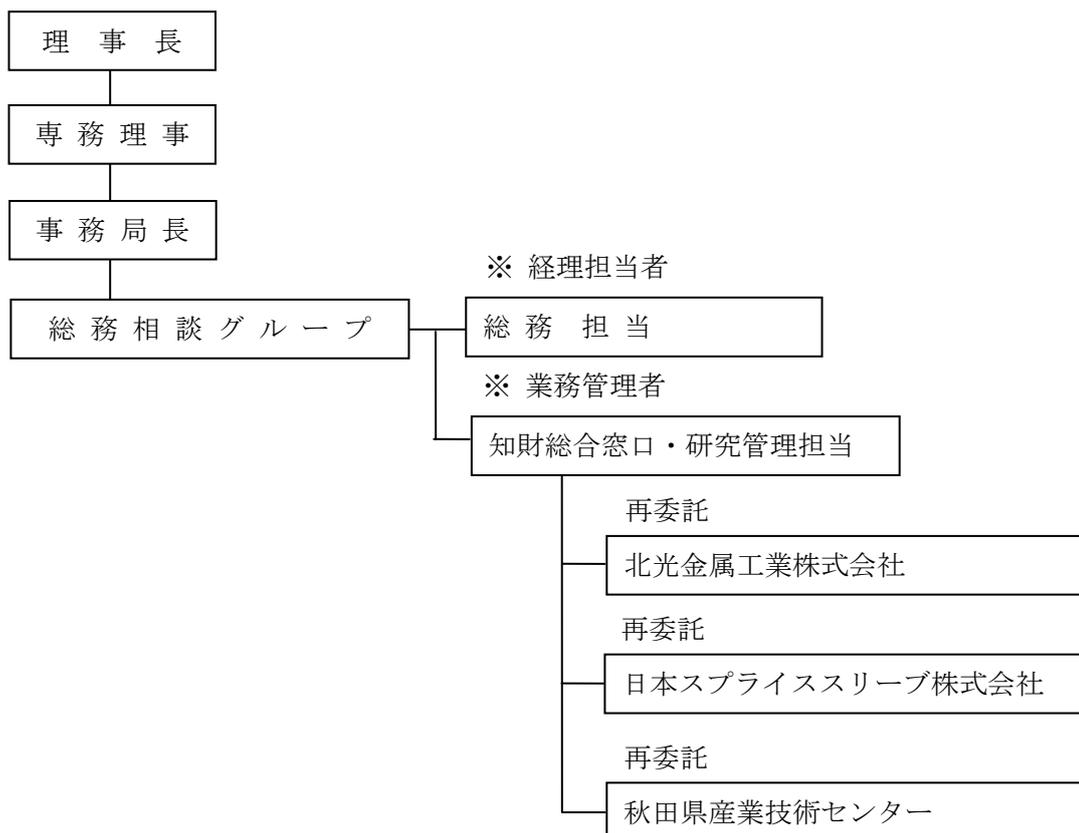
1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

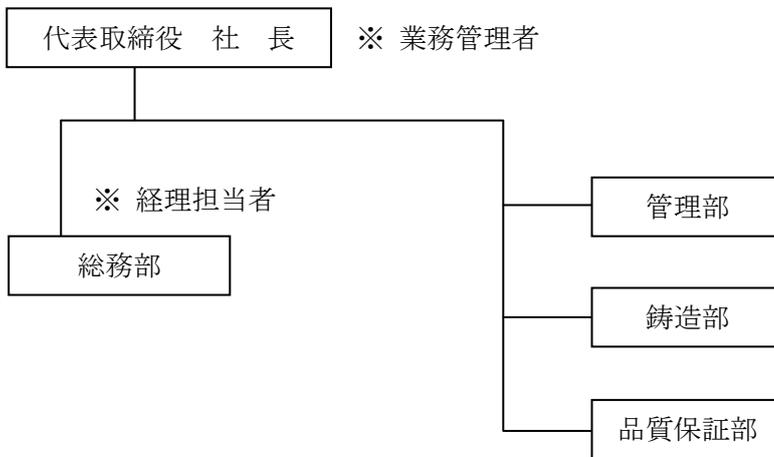
① 事業管理者

[公益財団法人あきた企業活性化センター]

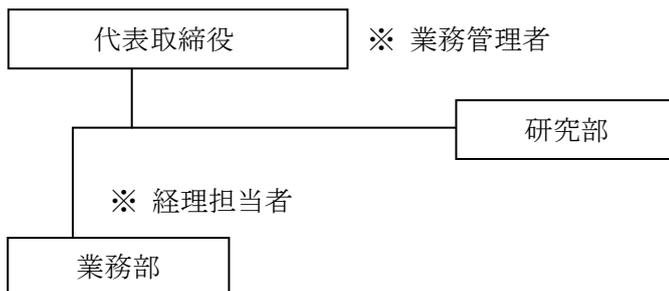


② 再委託先

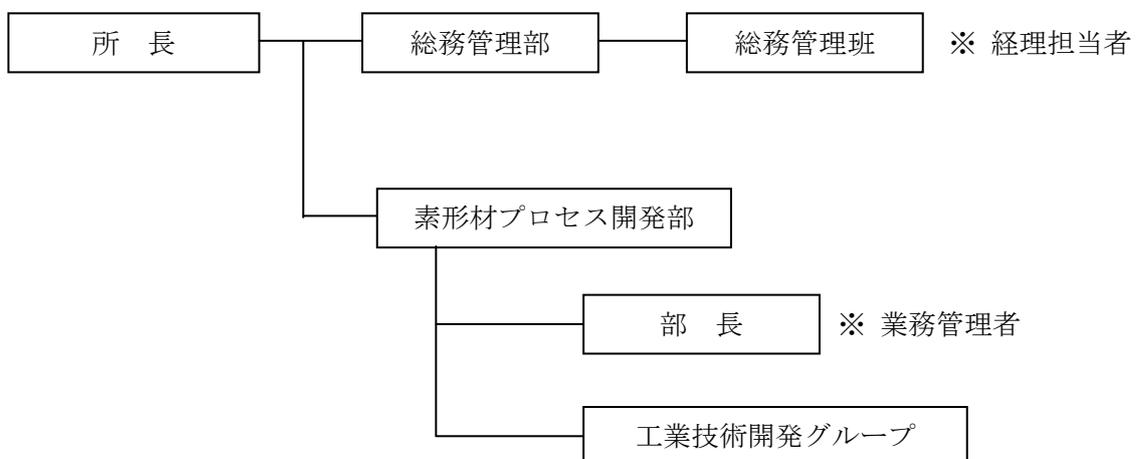
[北光金属工業株式会社]



[日本プラインスリーブ株式会社]



[秋田県産業技術センター]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】

公益財団法人あきた企業活性化センター

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
松橋 亨	総務相談グループ 知財総合窓口・研究管理担当サブリーダー	④-2、④-3、④-4
特別任用職員	総務相談グループ 知財総合窓口・研究管理担当 スタッフ	④-2、④-3、④-4
特別任用職員	総務相談グループ 知財総合窓口・研究管理担当 スタッフ	④-2、④-3、④-4

【再委託先】

北光金属工業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
小宅 錬	代表取締役社長	①-1、①-2、①-3、②-1、②-2、③-1、 ③-2、④-1
今 都志春	管理部 部長代理	①-1、①-2、①-3、②-1、②-2、③-1、 ③-2、④-1
熊谷 明	鑄造部 鑄造課長	①-1、①-2、①-3
大月 栄治	管理部 次長	①-1、①-2、①-3、②-1、②-2、③-1、 ③-2
村井 智幸	品質保証部 次長	①-3、③-1、③-2
越後屋 靖	鑄造部 技術課 主任	①-2、①-3、②-1、②-2
中村 一美	管理部 改善推進課 課員	①-3、③-1、③-2
千葉 雅則	管理部 生産技術課 課員	①-3、③-1、③-2

日本スプライススリーブ株式会社

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
茅 富郎	代表取締役社長	②-3
虻川 真大	研究開発部長	②-3

秋田県産業技術センター

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
沓澤 圭一	素形材プロセス開発部上席研究員	①-2、①-3、②-1、②-2
内田 富士夫	主任研究員	①-2、①-3、②-1、②-2

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【管理法人】

公益財団法人あきた企業活性化センター

(経理担当者) 総務相談グループ 総務担当 サブリーダー 大西 勝

(業務管理者) 総務相談グループ 知財総合窓口・研究管理担当 サブリーダー 松橋 亨

【再委託先】

北光金属工業株式会社

(経理担当者) 総務部 部長 古館 若菜

(業務管理者) 代表取締役社長 小宅 錬

日本スプライススリーブ株式会社
 (経理担当者) 業務部 部長 山岡 正子
 (業務管理者) 代表取締役社長 茅 富郎

秋田県産業技術センター
 (経理担当者) 総務管理部 主査 町本 智美
 (業務管理者) 素形材プロセス開発部 部長 赤上 陽一

(4) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

研究推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
小宅 錬	北光金属工業株式会社 代表取締役社長	PL
今 都志春	北光金属工業株式会社 管理部 部長代理	SL <input type="checkbox"/>
熊谷 明	北光金属工業株式会社 鋳造部 鋳造課長	
大月 栄治	北光金属工業株式会社 管理部 次長	<input type="checkbox"/>
村井 智幸	北光金属工業株式会社 品質保証部 次長	<input type="checkbox"/>
越後屋 靖	北光金属工業株式会社 鋳造部 技術課 主任	
中村 一美	北光金属工業株式会社 管理部 改善推進課 課員	
千葉 雅則	北光金属工業株式会社 管理部 生産技術課 課員	<input type="checkbox"/>
茅 富郎	日本スプライススリーブ株式会社 代表取締役社長	
虻川 真大	日本スプライススリーブ株式会社 研究開発部長	
沓澤 圭一	秋田県産業技術センター 素形材プロセス開発部 工業技術開発グループ 上席研究員	
内田 富士夫	秋田県産業技術センター 素形材プロセス開発部 工業技術開発グループ 主任研究員	
堀江 皓	岩手大学 工学部附属鋳造技術研究センター 客員教授	アドバイザー
小寺 耕一郎	共英製鋼株式会社 東京営業所 所長	アドバイザー
高橋 昇	秋田県産業労働部地域産業振興課 技術統括アドバイザー	アドバイザー
進藤 亮悦	秋田県産業技術センター 技術イノベーション部 技術コーディネーター	アドバイザー

アドバイザー

氏名	主な指導・協力事項
堀江 皓	鋳物専門家の立場から、鋳造技術全般の指導を頂く。
小寺 耕一郎	川下企業の立場から、世界動向・ニーズ・市場の情報を頂く。
高橋 昇	表面処理専門家の立場から、鋳造欠陥表面分析技術に関する指導を頂く。
進藤 亮悦	熱処理専門家の立場から、鋳造技術全般の指導を頂く。

1-3 成果概要

サブテーマ① 鑄造技術の確立

①-1 球状化処理工程の検討

高マンガン球状黒鉛鑄鉄による球状化処理については、実験室レベルの30kg溶解実験において、可能であることが分かっていた。しかし、500kg～1 tonのライン操業レベルで実現可能かは不明であった。本事業では、電気炉の耐火材、球状化剤等の選定および処理温度の研究等を実施して500kg～1 tonでの球状化処理に成功した。更に諸処の鑄造欠陥対策を実施して、不良率低減化の研究を行った結果、不良率3%以下で鑄造する技術を確率することができた。今後、不良率低減化および高品質化に向け、CEメーターによる測定技術の向上、鑄造方案の研究を継続していく必要があると考えている。

①-2 注湯工程の研究

化学組成の側面から、一般的な球状黒鉛鑄鉄同様にC、Si量が共に少ない亜共晶組成で炭化物が出やすいことが分かっている。またSiが多いほど黒鉛粒数が増し鑄放し炭化物は少くなる傾向が明らかとなっている。一方で、接種の研究により、Mn10%含有する球状黒鉛鑄鉄において0.3%程度の接種で炭化物抑制が可能であることが明らかとなった。ライン鑄造実験により、これらの検証を行ない、製造ラインで鑄造する実製品レベルにおいて鑄放し炭化物を20%以下に抑制可能であることを確認できた。更に事業化に必要な高マンガン鑄鉄溶湯のCEメーターによるCE値測定の研究を行った結果、C3.6%以下での測定は可能であることが分かった。量産時には加炭により更に高いC濃度が想定されるため、継続した研究によりC3.6%以上での過共晶溶湯のCE値測定技術の確立に向けた研究を検討している。

①-3 鑄造欠陥の調査・研究

これまでの研究により、高マンガン球状黒鉛鑄鉄はMnに起因するガス欠陥が発生し易いことが明らかとなり、出湯温度を高くするなどの対策を実施して一定の効果を確認できたが、更なる品質向上のためには鑄造方案的に解決する方法が最も合理的であり、今後の課題であることが分かってきた。一方、内部の引け巣に関しては、通常材料より若干出やすい傾向があるように感じられ、溶湯の充填温度および押湯の形状など、基本に立ち戻った対策が必要と考えている。延性材料であるため欠陥感受性が低く性能への影響は少ないが、高マンガン球状黒鉛鑄鉄の更なる品質向上には、湯流れ、凝固解析などの活用が不可欠であると考えている。

サブテーマ② 熱処理技術の確立

②-1 非磁性条件の調査・検討

これまでの研究により、流動層熱処理炉により機械式継手の炭化物分解が可能であり、満足する性能が得られることを性能試験により実証してきた。前倒し事業では、量産化に適した熱処理を想定して、治具の変形対策、治具位置による熱処理均一性の確認実験を行った。組織検査の結果、改良治具では、当初開発した治具より、遥かに変形量が少なく、量産向きであることが検証できた。また治具内側、外側共に良好な組織が得られることが分かった。治具の変形度合および寿命は、製品コストに大きく影響を与える要因であり、機械式継手の熱処理量産化に不可欠な技術となった。今後の課題としては、治具に製品をセットする工程に時間を要するため、製品セットを効率的に実施できる方法を考案していく必要があると考えている。

②-2 低温条件の調査・検討

高マンガン球状黒鉛鑄鉄は低温での脆化が非常に少ないオーステナイト基地組織である。本事業では、高マンガン球状黒鉛鑄鉄の化学組成を更に調整して、超低温に適した製造条件を研究した結果、-196℃(液体窒素温度)という超低温下でシャルピー衝撃値が20 J以上(フェライト、パーライト系の常温衝撃値の約2倍)になる条件を見出すことができた。更に研究を進める中で、LNGタンクに適用するには常温強度も必要となることが明らかとなり、熱処理等の研究により-100℃仕様の性能を満足する高強度製品を製造することに成功した。

②-3 製品性能試験による継手強度評価

22年度までの研究により非磁性製品、低温用途製品共に目的の仕様を満足する性能を得ることができた。23年度前倒し事業では、早期事業化に向けて、量産向けに開発した改良治具

により熱処理した製品について、治具中の製品位置による性能のバラツキがどの程度かの確認が必要となった。ライン鑄造実験にて鑄造した各種、各サイズの製品について、熱処理を実施完了し、組織観察により良好な組織が得られていることが分かっている。今後性能試験の継続実施により、位置による性能のバラツキが無いか検証することを検討している。

サブテーマ③ 迅速分析技術の確立

③-1 Mn 検量線の作成

前倒し事業では発光分析装置を導入し、高精度分析による値の分かる試料について発光分析を行い校正の研究を行った結果、高マンガン球状黒鉛鑄鉄の Mn 検量線を作成し、高マンガン鑄鉄溶湯の Mn の迅速分析を実現した。

③-2 諸元素の検量線補正

前倒し事業では発光分析装置を導入し、高精度分析による値の分かる試料について発光分析を行い校正の研究を行った結果、高マンガン球状黒鉛鑄鉄の諸元素の検量線を作成し、高マンガン鑄鉄溶湯諸元素の迅速分析を実現した。これにより、事業化に向けた量産化に対応した迅速分析が可能となり、高マンガン鑄鉄操業時に、迅速分析⇒成分調整⇒(CE 値測定)⇒出湯という量産工程を構築することが可能となる。ライン鑄造実験においては、3 トン電気炉より分析 TP を採取して発光分析を実施し、成分調整を行った後に出湯する作業を行い、高マンガン鑄鉄量産操業を想定した形で実験を行うことができ、即事業化に対応可能な製造技術を確立することができたと考えている。

これまでの研究により量産化を想定した必須技術の確立は完了したと考えている。あとは個々の技術を改良する研究を継続することにより、より競争力の高い製品を製造する技術を確立できると考えている。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人あきた企業活性化センター（最寄駅：東日本旅客鉄道秋田新幹線秋田駅）
〒010-8572 秋田県秋田市山王三丁目1番1号
TEL 018-860-5614 FAX 018-863-2390
総務相談グループ 知財総合窓口・研究管理担当 サブリーダー 松橋 亨

第2章 本論

2-1 鑄造技術の確立（北光金属工業株式会社、秋田県産業技術センター）

平成 22 年度は、Mn 約 10wt% 含有する鑄鉄溶湯について実操業ラインで 500kg~1ton を球状化処理し、肉厚 5mm 以下の製品へ注湯する実験を実施した。製品について欠陥の調査を行い、異状黒鉛、マイクロポロシティーが存在することが明らかとなった。これらを踏まえて、平成 23 年度は異状黒鉛、マイクロポロシティー対策を重点課題として SEM、EPMA などによる欠陥の調査を継続し、対策条件にて鑄造実験を行い、異状黒鉛の発生しない鑄造条件を特定することができた。

平成 23 年度前倒しでは、CE メーター（炭素当量測定装置）を新たに北光金属工業株式会社に設置し CE 値測定技術確立により更なる不良率低減化を目指した。実際の操業では良品を鑄造できる溶湯（元湯）かどうかを判断して球状化処理する必要があり、事業化に向けて CE メーターの校正作業を行っておくことが必須となる。しかし、高マンガン球状黒鉛鑄鉄における CE 値の研究は前例がなく、内部プログラムの変更自由度が高い CE メーターが必要である。これら鑄造欠陥低減化の研究により、事業期間中に最終目標である Mn 約 10wt% 含有球状黒鉛鑄鉄のライン生産で、肉厚 5mm 以下の製品を不良率 3% 以下で製造するという目標を達成した。図 4 に鑄造実験工程を示す。

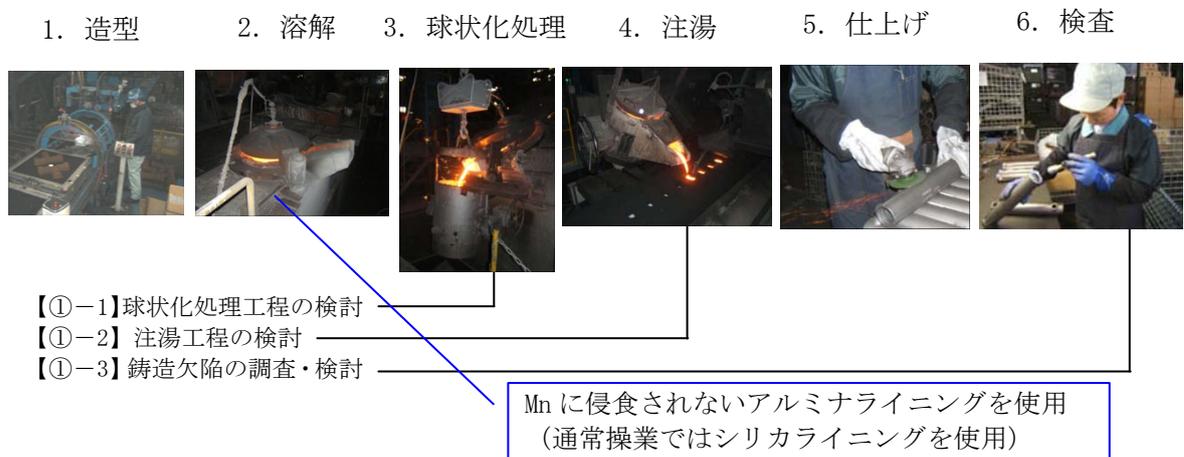


図 4 鑄造実験工程

2-1-1 球状化処理工程の検討（北光金属工業株式会社）

北光金属工業株式会社は、平成 22 年度に、球状化処理に必要な条件出しのために以下の実験を行った。

- ・ 低周波誘導電気炉にアルミナ質の耐火材をライニングし、原材料を溶解して Mn を約 10% 含有する 3 トンの溶湯を準備して 500kg 用の球状化処理取鍋でサンドイッチ法にて球状化処理を実施
- ・ 球状化処理した溶湯を自動造型ラインまで運び、鑄型（生型）に鑄造する。冷却⇒型バラシ後に製品の球状化率を測定し、JIS-G-5502 に規定する黒鉛球状化率 80% 未満の不良品が無いかを確認
- ・ Mn は強い脱酸効果を有する元素であるため、処理前後の溶湯の酸素含有量を分析して Mg の酸化消耗量との関係を調査し、次年度以降の研究で、球状化剤添加量を決定するための条件出し
- ・ Ni 含有量と Mg 歩留まりの関係を調査し、Ni 含有量に適した添加量に調整するための条件出し

以上の平成 22 年度の研究で、3 トンの溶解で 500~700kg の球状化処理を実現し、製品球状化率 80% 以上を達成した。これらの実験により球状化処理工程に必要な条件出しは完了した。

2-1-2 注湯工程の検討（北光金属工業株式会社、秋田県産業技術センター）

平成 22 年度は渦巻き試験片により湯流れ性（鑄造性）を評価した結果、通常の鑄鉄同様に湯流れ性が良く、合金組成及び温度条件等の研究により肉厚 5mm 以下の製品が容易に製造できる

ことが分かった（北光金属工業株式会社、秋田県産業技術センター）。一方で Mn 含有による製品焼付き程度をランク分けして評価した結果、実験したいずれの組成でも鋳型との反応の少ない良好な鋳肌が得られた。また、ライン実験での接種効果フェーディング研究の結果、炭化物 20%以下の製品を安定して製造できた（北光金属工業株式会社）。

平成 23 年度は厚肉、薄肉、製品形状に最適な接種方法を更に検討し、炭化物析出を更に低くする条件を検討して熱処理タクトタイム短縮化を目指した結果、高 Mn 溶湯の接種フェーディングは早く、可能な限り注湯直前に接種することが望ましく、注湯流接種により肉厚 5mm以下の製品で炭化物 10%以下とすることが可能で、10%以下の炭化物は熱処理により消滅することが明らかとなった。

平成 23 年度前倒しでは、化学組成、接種タイミングおよび最適接種量を更に研究し、量産熱処理における炭化物処理時間短縮化に取り組むため、平成 22 年度および平成 23 年度の研究成果を基礎として、ライン鋳造実験を実施した。実験目的は、化学組成および接種を検討することにより、鋳放し炭化物低減化を実現し、炭化物分解熱処理時間短縮化による熱処理タクトタイム短縮化である。

実験により、RE（レアアース）系および Ba（バリウム）系の接種剤を 0.3%添加することによって、肉厚 10 mm程度では鋳放し炭化物 10%以下、肉厚 5 mm程度の薄肉部においても 20%以下に抑制可能となることが明らかとなった。Mn は炭化物促進元素として名高い元素であるが、Mn10%においても鋳放しで、5~20%以下に抑制可能である事実は常識を覆す結果と言える。これにより炭化物分解時間を 30 分短縮することが可能となった。

前倒し事業における鋳造実験では、冷却速度が非常に速い製品である M20 ナット（肉厚 5mm/70 グラム）を鋳造して炭化物抑制効果を確認する実験も行った。また、M20 ボルトを鋳造してボルト・ナット双方の加工が可能であるかの確認を行った。ボルト・ナット共に炭化物は 20%以下であり、炭化物分解熱処理により炭化物は皆無となり、ボルト・ナット共にネジ加工を実施することも可能であることが分かった。高マンガン球状黒鉛鋳鉄で製造した初めてのボルト・ナットであり、高マンガン鋼と比べて格段に加工性に優れている事が裏付けられた。図 5 に熱処理後にねじ加工したボルト・ナットの外観を示す。



図 5 熱処理後に加工した M20 六角ボルト・ナット外観

また、前倒し事業におけるライン鋳造実験を実施するにあたり、3 トン低周波誘導電気炉の築炉作業を行った。耐火材には昨年同様にアルミナ・マグネシア質の材料を採用した。昨年度の実験においては築炉後のトップ部の未焼結による多少の崩れおよび炉底から 1/3 高さ付近での部分的な減りが生じた。今回のアルミナ・マグネシア系耐火材ライニングでは、トップ部にホウ酸を増量した耐火材を適用してトップ部を硬化させ（トップキャップという）、炉底から 1/2 高さまで充填時に「かきならし」作業を実施して耐火材充填度を高め、部分的な減りを抑制する対策を施した。焼き締め作業を行い、高マンガン球状黒鉛鋳鉄のライン鋳造実験に備えた。焼き締め作業は予定の条件で実施し、トップキャップの崩れは大幅に改善された。ライン実験後にも部分的な減りは全く認められず、事業化の際に必須となる高マンガン球状黒鉛鋳鉄用ライニングの築炉作業技術を確立することができた。

2-1-3 鋳造欠陥の調査・検討（北光金属工業株式会社、秋田県産業技術センター）

平成 22 年度は、実ライン実験で鋳造した総数約 400~500 本の製品について全数外観検査を実施した結果、ブローホール欠陥が多く発生している事が判明し、第 2 回目の対策トライ実験でブローホール欠陥の抑制に成功した。しかし、肉厚製品に異状黒鉛、マイクロポロシティが発生していることが新たに判明し、Al 含有量を低減する対策により異状黒鉛発生の低減化に成功した。

平成 23 年度は、FE・SEM（走査型電子顕微鏡）、EPMA（電子プローブ・マイクロアナライザー）を活用して異状黒鉛・マイクロポロシティの対策を重点課題として取り組んだ結果（北光金属工業株式会社、秋田県産業技術センター）、低 Mg 含有 Fe-Si-Mg 球状化剤にて処理すると、球状化反応が静かで長時間のため処理後の C 値が安定することが明らかとなった。これにより C

含有量に起因するマイクロポロシティ、異状黒鉛を共に抑制でき、ライン鑄造した肉厚 10mm の製品においても異状黒鉛が抑制できた。

平成 23 年度前倒しでは、CE メーターを導入して高マンガン溶湯の炭素当量を測定する研究を行った。鑄鉄における引け巣欠陥対策として最も重要となるパラメーターが CE 値である。元湯（球状化処理前の溶湯）の C 値と球状化処理後の C 含有量の関係を調査し、ライン操業における球状化処理条件ごとの最適元湯 CE 値を決定できた。

高マンガン球状黒鉛鑄鉄は Mn を多量に含有する上、元湯組成が過度な過共晶組成であるため、CE 値の測定が難しい。そこで溶解実験時に CE メーター（図 6）による高マンガン溶湯の種々の添加物を使用した炭素当量測定を試みた。

実験の結果、Te、Ce、Ni-Mg 合金、Sn などの添加を試み、Ce、Ni-Mg、Sn にて炭素当量を測定できることが分かった。しかし、炭素含有量が 3.6% 以上に高くなると正確な測定ができなくなり、炭素含有量が高くなった場合の溶湯管理が課題として残されている高純度鉄を添加する方法も有効とのアドバイスを頂いており、継続した研究を検討している。



図 6 CE メーター外観
（低温まで測定可能）

高マンガン球状黒鉛鑄鉄ではガス欠陥が発生し易いことが、これまでの研究で明らかになっている。鑄鉄においては Al 等の特に酸化物を形成し易い元素を含有する場合、ガス欠陥が発生し易くなる傾向を示すことが知られている。Mn は酸化物を形成し易い元素であり、鑄型界面で鑄型水分に起因する水分子を還元して水素を発生させ、ガス欠陥を誘発していることが考えられる。温度の低下した溶湯が型に充填され、急速に凝固が進行した場合に湯圧により水素ガスが鑄型中へ放出される間も無く凝固してしまう。高マンガン溶湯では水素ガス発生量が多く、特に薄肉製品では溶湯温度低下が早いため、ガス欠陥が発生し易いと考えている。

Mn を 10% 程度含有させることは高マンガン球状黒鉛鑄鉄に必須条件であるため、他の条件を変化させることを検討してきた。現在までの実験で、出湯温度および方案での対策が有効であることが分かってきており、今後の課題と位置付けている。

2-2 熱処理技術の確立（北光金属工業株式会社、日本プライススリーブ株式会社、秋田県産業技術センター）

鑄造製品を熱処理し、最終年度には継手性能 SD390 相当で透磁率 1.3 以下の非磁性（JR リニア仕様）、並びに -196°C で衝撃値 20J を有する耐低温の機械式継手の実現を目指す。

平成 22 年度は予備実験として、ライン鑄造製品を秋田県産業技術センターの熱処理炉を使用して 2~3 本/バッチで熱処理を行い、透磁率 1.01 以下の非磁性を達成し、継手性能試験では S D345~SD390 の性能を達成した。

22 年度は流動層炉（加熱用、保持用）を 2 基、23 年度には、図 7-1 の A に用いる予熱炉と図 7-1 の D に用いる二槽式攪拌冷却水槽を設置した。これにより、予熱→加熱→恒温保持→冷却という新材料製品の量産化実現に必要な研究設備一式の導入が完了した。研究により更に、均一な急冷を得ることができる整流板（図 8 水槽底に設置）の形状を探った結果、平成 23 年度には 100 本/バッチ（S5U/S6U~リニア向け製品）を達成した。

平成 23 年度前倒しでは、熱処理前後の組織観察に 1,000 倍まで観察できる顕微鏡を活用し、粒界炭化物の影響を迅速に行うことにより、100 本~150 本/バッチで処理した熱処理品について流動層炉内の製品位置による組織のバラツキを調査した。

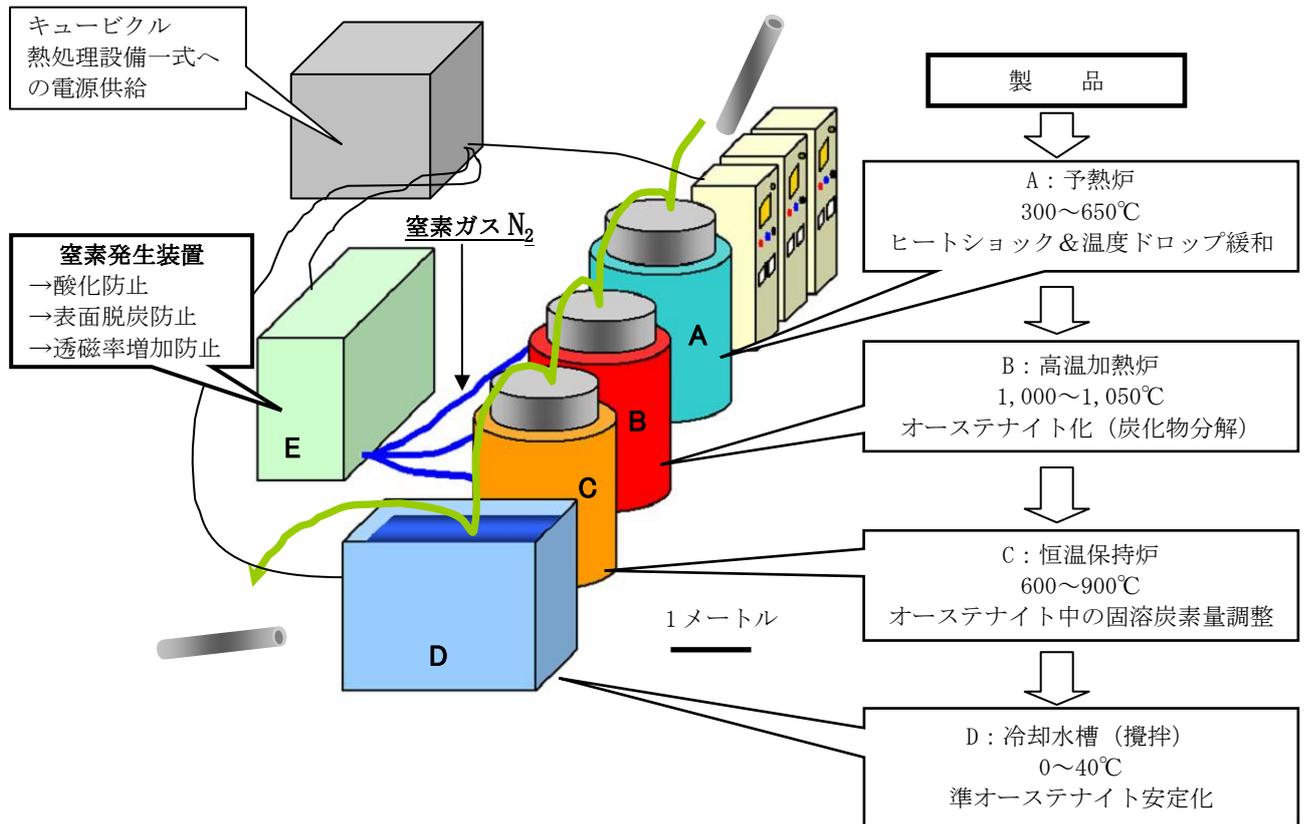


図 7-1 熱処理装置一式

〔流動層熱処理炉の特徴〕

平成 22 年度に購入・設置した図 7-1 の高温加熱炉 B、恒温保持炉 C および平成 23 年度に購入・設置した予熱炉 A は流動層熱処理炉と呼ばれる低コスト、高性能型の次世代熱処理炉であり、以下の特徴を有する新材料における熱処理に最も適した熱処理炉である。

- ・ 無酸化熱処理が可能 (非磁性化に不可欠)
- ・ 優れた機械的特性を実現するために不可欠な急速加熱および目的温度への急冷が可能
- ・ 低コスト処理が可能

本装置にはプログラム制御可能な制御装置を備え、本研究対象製品形状・重量に適したヒーター制御が行えるようにプログラムをスイッチ選択できるようにした特殊仕様のものとした。その構造を図 7-2 に示す。



層内に充填されたアルミナ粒子が、下からの流入ガスにより流動層化して液体に似た振舞いをする。

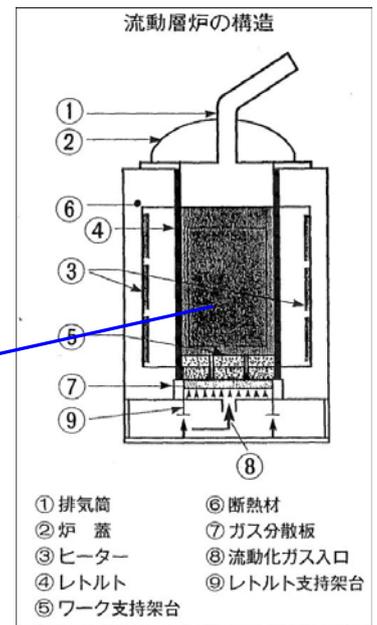


図 7-2 流動層炉の構造

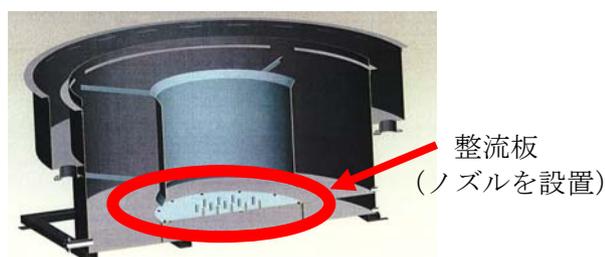


図 8 二槽式攪拌冷却水槽 (断面図)

熱処理治具の変形対策として図9に示す一部鋳鋼部品（JIS-SCH22）とした改良型熱処理治具（最高セット本数204本、約200Kgの製品を処理可能）を構築した。高マンガン球状黒鉛鋳鉄にてライン鋳造した計951本の製品（機械式継ぎ手/D16~D29鉄筋用）についてサンプリングして熱処理を実施した。また図10-1、2に熱処理した製品の外観および製品主要寸法箇所を示し、表1に熱処理品の製品主要寸法を示す。



図9 改良型熱処理治具製品セット状況



図10-1 熱処理製品外観



図10-2 製品の主要寸法箇所

表1 製品主要寸法 (mm)

製品名	L (長さ)	D (外径)	t (肉厚)
S5U	240	38	4
S6U	270	41	4
S7U	300	45	5
S8U	330	49	5
S9U	370	55	6
S10U	410	60	7
5UX (SA)	245	45	4
6UX (SA)	285	49	4
7UX (SA)	325	53	5
8UX (SA)	370	58	5
9UX (SA)	415	63	5
10UX (SA)	455	66	6

治具1段当たりのセット本数を68本まで増やし、3段組みで204本/バッチを実現した。処理ごとに改良型熱処理治具の変形量を測定した結果、改良前の10~15mm変形/1バッチから、6mm/8バッチに大きく改善された。一方で処理温度の微調整および、窒素ガス流量の増量により、品質（TPの強度、靱性）が大きく改善されることが明らかとなった。

これらの改善により、事業化に適用可能なレベルに熱処理技術を向上させることができたが、更に量産時の改良治具寿命を確認するためには50回、100回といった熱処理回数での変形量を確認する必要があり、継続した研究を検討している。また、窒素ガス流量増量は品質のみならず、熱伝達性向上によるタクトタイム短縮化が見込まれるため、今後の研究課題となっている。

また、炭化物分解を目的とした流動層熱処理炉における熱処理後の各製品（S6U~S10U、5UX~10UX）中心部断面組織により行った球状化率測定結果を表2に示す。測定時の黒鉛粒径しきい値（測定対象外黒鉛粒径）について、JIS規格である15 μ m以下、及び薄肉製品における微細黒鉛も対象とするために5 μ m以下の2水準として測定した。S6U~S10Uの結果より、S8U製品の肉厚からしきい値の違いで約2倍程度の黒鉛粒数差が見られ、しきい値を15 μ m以下とした場合に多くの微細な黒鉛が測定対象外となっている結果が見られた。また、10UX~5UXの結果でも同様の傾向となった。黒鉛球状化率はしきい値を5 μ m以下とした際に低下する傾向が見受けられるが、JIS規格80%を下回る製品はなく、問題は見られなかった。

表2 各製品中心部断面組織

製品名	黒鉛粒径しきい値 (μ m以下)	黒鉛球状化率 (%)	黒鉛粒数 (個/mm ²)	黒鉛粒径 (μ m)	黒鉛面積率 (%)
S10U	15	88.4	284	19.3	10.2
	5	86.3	471	16.0	10.0
S9U	15	88.3	298	18.7	9.8
	5	82.0	536	15.3	10.5
S8U	15	88.1	303	16.8	9.3
	5	86.5	680	13.1	9.8
S7U	15	89.8	316	19.4	11.0
	5	87.3	629	15.5	12.8
S6U	15	89.6	280	18.6	10.3
	5	86.7	545	15.1	10.3
10UX	15	90.3	307	18.6	10.3
	5	85.4	507	15.5	10.2
9UX	15	87.1	284	19.4	10.4
	5	87.5	592	15.4	11.7
8UX	15	90.4	217	16.5	10.3
	5	86.1	855	12.4	11.0
7UX	15	89.7	325	18.1	11.0
	5	87.1	620	15.0	11.4
5UX	15	90.2	303	17.7	9.9
	5	86.7	553	14.6	9.8

製品の鑄放し組織および熱処理組織（3%ナイトール液により腐食後）を倍率 500 倍、1,000 倍で観察した結果を図 11-1、2、3、4 に示す。熱処理により炭化物は完全に消滅している。

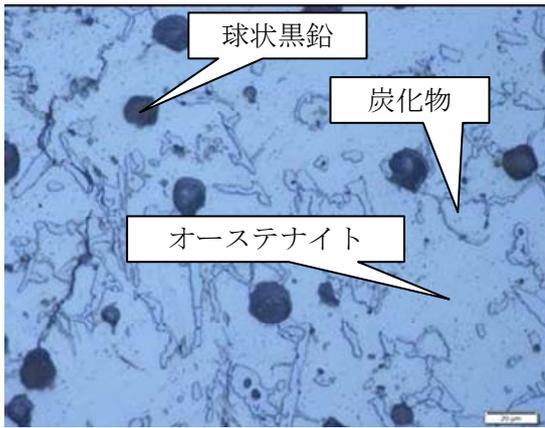


図 11-1 鑄放し組織／3%ナイトール腐食／観察倍率 500 倍

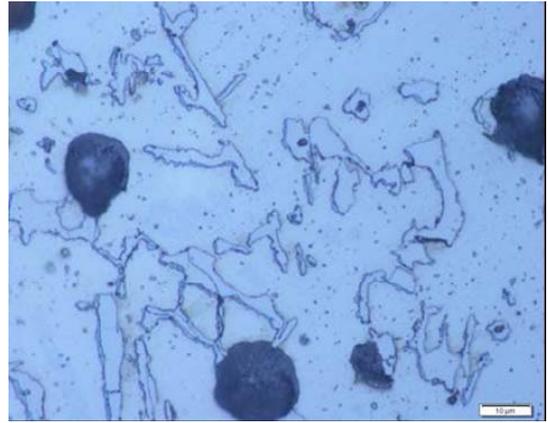


図 11-2 鑄放し組織／3%ナイトール腐食／観察倍率 1,000 倍

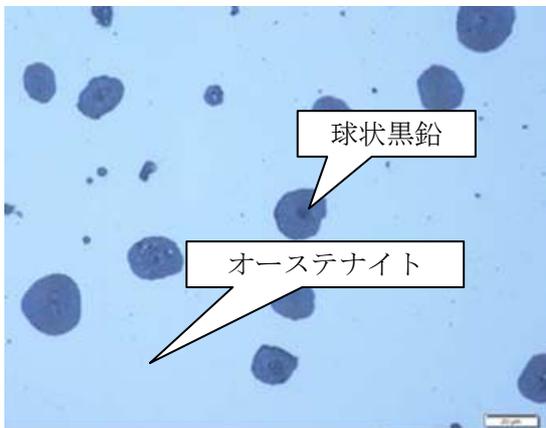


図 11-3 熱処理組織／3%ナイトール腐食／観察倍率 500 倍

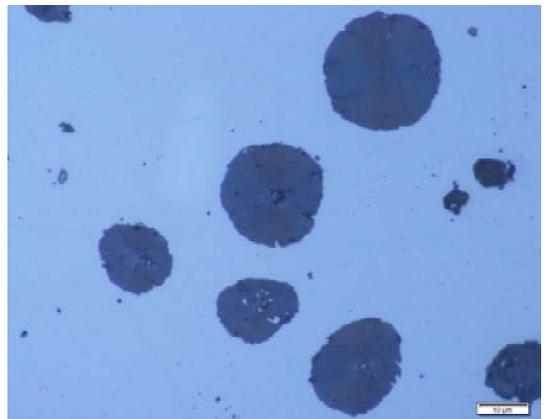


図 11-4 熱処理組織／3%ナイトール腐食／観察倍率 1,000 倍

図 12 に TP 熱処理試験のセット状況を示す。流動層炉は窒素の流量および治具、製品の形状により、内部の温度が微妙に変化することが分かっており、より品質の高い製品製造のためには、位置による TP の引張試験値の変化を測定することが重要である。そこで本治具を用いて TP を 4 箇所配置した熱処理試験を実施し、TP の引張試験値の安定性を評価した。

引張試験結果を表 3 に示す。引張強さは全て 700MPa を超えており、伸びも全て 30%以上という良好な機械的特性が得られた。本試験では窒素ガス流量を増量して行ったため、炉内温度が均一に保たれたことにより、機械的特性が安定したものと考えられる。

表 3 熱処理バケットによる TP 熱処理試験結果

試料No.	引張強さ (MPa)	伸び (%)	透磁率 μ
1	719	34.0	1.006 以下
2	713	32.2	1.006 以下
3	741	38.2	1.006 以下
4	734	33.0	1.006 以下



図 12 熱処理バケットによる熱処理品セット状況

2-2-1 非磁性条件の調査・検討(北光金属工業株式会社、秋田県産業技術センター)

平成 22 年度は、北光金属工業株式会社にて①-1 で鋳造した製品について秋田県産業技術センターの小型熱処理炉を用いて簡易的な熱処理を行い、各化学組成に適した非磁性となる熱処理条件を見出した。(秋田県産業技術センター)

平成 23 年度は、22 年度の結果をもとに、北光金属工業株式会社に設置する流動層熱処理炉を用いて非磁性材料の量産化に適した熱処理技術を研究した。水槽底の整流板については、有限会社志渡鉄工所と北光金属工業株式会社が共同で最適形状(水を噴き上げるノズルの長さ、本数、口径、設置場所、角度など)を探った。また、処理重量に合わせて熱交換を考慮した流動層炉の温度設定技術を確認することができ、より短時間で炭化物分解処理を行う技術を確認した。

平成 23 年度前倒しでは、量産向け熱処理設備での実験により、質量効果を考慮した治具形状および処理パターンを研究し、高品質熱処理の実現およびタクトタイムの短縮化という最終目標に取り組み、また、熱処理条件を変えた実験における粒界炭化物の析出傾向を解析するために、北光金属工業株式会社に 1,000 倍程度まで観察可能な顕微鏡を設置し、熱処理条件と炭化物の関係を研究した。これらの実験により最終目標である表面透磁率 1.3 以下で、SD390 の性能を満足する製品を量産レベルの処理重量で実現した。

また、本事業における非磁性材料製品はリニア中央新幹線での採用をターゲットとしているため、疲労強度に対する客先要求が想定される。そこで TP レベルでの疲労強度測定実験を実施した。表 4, 5 に回転曲げ疲労試験および軸力疲労試験の試験条件を示し、図 13 に試験結果を示す。軸力疲労試験片については表面粗さによる試験結果への影響を考慮して 2 本について平行部にバフ研磨を施した。試験結果より、回転曲げ疲労試験の疲労限は 300MPa、軸力疲労試験の疲労限は 250MPa であり、リニア仕様を満足していることが確認できた。

表 4 回転曲げ疲労試験条件

試験機	最大曲げモーメント	負荷テコの長さ	試験温度	回転速度	中止回転数	測定項目
小野式回転曲げ疲労試験機	10kgf・m	200mm	室温	3,000rpm	1×10 ⁷ 回	繰返し数

表 5 軸力疲労試験条件

試験機	試験機容量	試験条件						測定項目
		試験温度	制御方式	制御波形	応力比	試験速度	中止回転数	
50Hz 電気油圧サーボ型疲労試験機	50kN	室温(大気)	荷重制御	正弦波	R=-1	20~25Hz	1×10 ⁷ 回	繰返し数

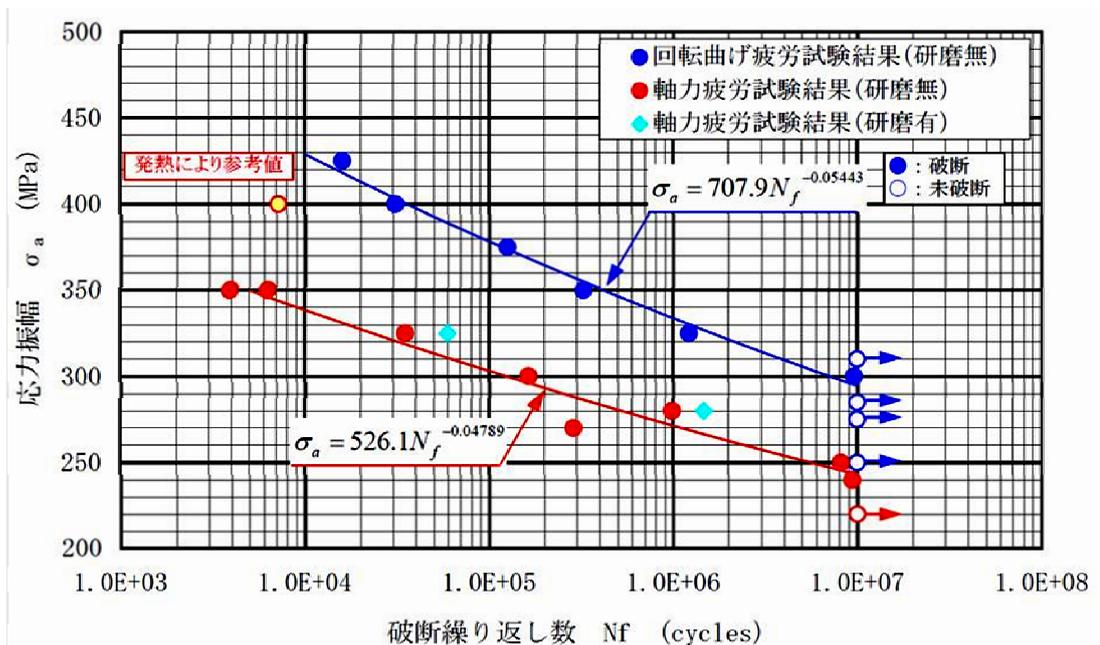


図 13 疲労試験結果

2-2-2 低温条件の調査検討(北光金属工業株式会社、秋田県産業技術センター)

平成 23 年度は、平成 22 年度に行った②-1 の非磁性条件の研究から得られた実験データ及び解析結果に基づき、低温に適した恒温保持温度の特定を行った。低温に適した化学組成の新材料を鋳造し（北光金属工業株式会社／秋田県産業技術センター）、製品と同時に鋳込んで熱処理した TP においてシャルピー衝撃値 20 J（-100℃）以上を実現できた。

一方で、LNG タンク向け低温用継手については-100℃仕様において常温強度が求められており、低温下でのシャルピー衝撃値よりも低温での継手強度が優先される状況となっている。こうした中で、強度を優先した低温用継手をラインで鋳造し、流動層熱処理炉にて熱処理した製品を JFE テクノリサーチ株式会社に送り、-100℃における継手性能試験を実施した結果、要求を満足する継手性能が得られた。

2-2-3 製品性能試験による継手強度評価(日本スプライススリーブ株式会社)

平成 22 年度は①-1 で鋳造し、秋田県産業技術センターにて簡易的に熱処理した製品について図 14 に示す試験装置により、機械式継手に鉄筋を両側から挿し込み、隙間にモルタルを充填し、養生して硬化させた後、図中の 250 トンの疲労試験機にセットして継手性能試験を実施した。

平成 23 年度は 22 年度に引き続き、異状黒鉛およびマイクロポロシティ対策製品による継手性能試験を実施する。製品は非磁性を目的とした製品であり、透磁率 1.3 以下、且つ SD390 相当の継手性能実現を目指した。

平成 22 年度は機械式継手そのものの材質強度確認のための高強度鉄筋（強磁性材）による性能試験を実施したが、平成 23 年度は非磁性鉄筋による製品性能試験を実施し SD390 の継ぎ手性能を実現した。

平成 23 年度前倒しでは、量産対応本数での熱処理を実施した製品についてサンプリング位置による性能のバラツキを調査するため、材質のバラツキについて調査を完了した。継続した研究により、性能バラツキへの影響について調査・研究することを検討している。

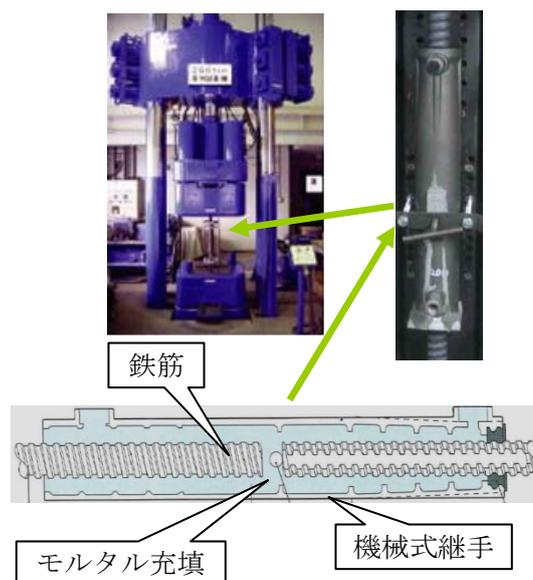


図 14 弾・塑性域正負繰り返し性能試験
(日本スプライススリーブ株式会社)

表 6 に非磁性鉄筋による非磁性機械式継手の性能試験結果を示す。S5U～S8U の全てのサイズにおいて、SD345 規格を満足する性能を満足していることが確認できる。鉄筋および機械式継手共に非磁性であり、リニアガイドウェイに適した組み合わせとなる。

表 6 継手性能試験結果

鉄筋	鉄筋継手	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び能力 (%)
	規 格	345～440	≥490	≥2.0
D16-SND345 (非磁性鉄筋)	S5U	396	642	6.7
	S6U	391	634	6.0
	S7U	392	660	6.3
D19-SND345 (非磁性鉄筋)	S6U	384	613	6.3
	S7U	383	628	6.0
	S8U	380	634	5.8

2-3 迅速分析技術の確立（北光金属工業）

品質の安定した鋳鉄を実操業ラインで生産するためには、30分に1回の迅速分析が要求され、量産化実現のためには迅速分析の実現が不可欠である。発光分光分析は通常の成分範囲の球状黒鉛鋳鉄であれば検量線がデフォルトで作成されており、微調整して利用するが、本研究における成分範囲の設定は現状ではない。

平成22年度に引き続き、平成23年度においても、溶解試験時に採取した試料について精度の高い湿式分析を実施し、発光分光分析の検量線作成のためのバックデータを作成した。これらの目標を達成するために、平成22年度は平成23年度前倒しでの本格的な研究に備えて、試料の採取、湿式分析結果の蓄積など基礎的な研究を行った。また平成23年度も、平成22年度に引き続き鋳造実験時に迅速分析TPを採取し、湿式分析を実施した。迅速分析試料形状についても検討を行い、試料急冷却に起因する割れによる分析不良の予防対策を検討した。

平成23年度前倒しでは、本研究の範囲を設定した発光分光分析装置を購入し、北光金属工業株式会社に設置し、これまでのバックデータおよび分析試験片を用いて導入する発光分光分析装置の高Mn鋳鉄成分での検量線を作成し、迅速分析を実現した。特に鋳鉄の場合、多量のMnがC、Si値に影響を与える事が懸念されたため、双方の相関性を把握して精度を高め、品質安定化を図る計画である。また、検討してきた分析試料形状について、型を作製して分析精度への影響を調査した。

2-3-1 Mn検量線の作成（北光金属工業）

分析装置は平成23年度前倒し事業での購入となるため、平成22、23年度は、試作時に採取する化学組成の異なる分析用試料について湿式分析を実施して結果を蓄積した。また、迅速分析試料形状についても検討を行い、試料急冷割れによる分析不良の予防対策を検討した。

上記研究と同時に、新材料分析に適した発光分光分析装置の要求仕様を検討した結果、新材料の組織と熱処理後の機械的特性の関係を研究するためには、主要元素（C、Si、Mn、Ni）および球状化剤、接種剤、量産実験の原材料となる鉄屑などに含まれる素材への影響力の高い微量元素の分析精度が高い事が最も重要との結論に至った。

平成23年度前倒しでは、前述仕様の発光分光分析装置（図15-1、2）を北光金属工業株式会社に設置し、平成23年度の実験で作製した試料および湿式分析結果（精密分析）より、Mnの検量線を作成した。鋳鉄溶湯においてMn10%添加は前例が無かったが、作成した検量線で湿式分析値の3%以内の精度にてMn含有量が測定できることが明らかとなった。表7に研究により作成した最終検量線による分析結果を示す。Mnの真値との誤差は0.1%と目標の測定精度3%以内となった。



図 15-1 発光分光分析装置（迅速分析）

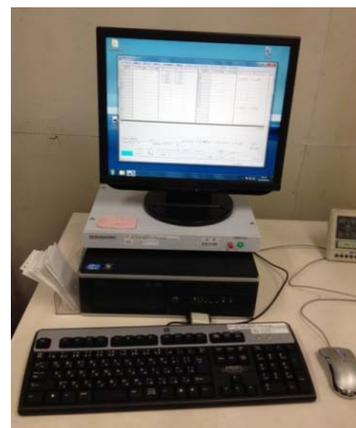


図 15-2 発光分析装置モニター

表 7 Mnの発光分析値の精密分析（真値）との誤差 単位：%

	精密分析	発光分析	誤差
Mn	9.80	9.81	0.1

* 最終検量線による測定

この検量線により、前倒し事業においてライン鑄造実験を実施した際、発光分析装置による分析値を基に、元湯の成分調整を行なうことができた。これにより量産化の際の高マンガン球状黒鉛鑄鉄における Mn の迅速分析が可能となり、事業化に大きく前進することができた。

2-3-2 諸元素の検量線補正（北光金属工業）

前述の目標を実現するため、平成 23 年度は試作時に採取する化学組成の異なる分析用試料について湿式分析を実施して結果を蓄積した。平成 23 年度前倒し事業では、北光金属工業株式会社に設置する発光分析装置を用いて、新材料分析に適した検量線の補正方法を検討した。

検量線作成に使用する試料を準備するために秋田県産業技術センターにて溶解実験を実施し、微量元素を強制的に含有させた試料（Ti、Mo、V、Co、La、Ce、Sn、Pb、Zn、B、Bi を合金添加）を溶製し、これらの試料について委託にて高精度分析を行い、併せて発光分析装置による分析を実施した。双方の分析データを基に検量線補正作業を行い、高マンガン球状黒鉛鑄鉄試料の分析精度向上を実現した。通常の球状黒鉛鑄鉄試料と比べて特に Si の値が偏移することが確認でき、補正により高マンガンに適した検量線を作成することができ、諸元素についても測定精度は高精度分析値との誤差 3%以内を実現することが可能となった。表 8 に事前に精密分析を実施した試料について発光分析を実施した結果を示す。

表 8 発光分析値の精密分析（真値）との誤差（単位：%）

	精密分析	発光分析	誤差		精密分析	発光分析	誤差
C	2.93	2.95	0.7	Mo	0.092	0.092	0.0
Si	2.58	2.59	0.4	V	0.150	0.151	0.7
Mn	9.80	9.81	0.1	Al	0.022	0.022	0.0
P	0.026	0.026	0.0	B	0.00240	0.00240	0.0
S	0.008	0.008	0.0	Ce	0.00800	0.00820	2.5
Mg	0.015	0.015	0.0	Bi	0.00140	0.00140	0.0
Cu	0.510	0.518	1.6	Pb	0.00630	0.00631	0.2
Ni	0.16	0.16	0.0	Ca	0.002	0.002	0.0
Sn	0.025	0.025	0.0	Co	0.04300	0.04322	0.5
Cr	0.040	0.040	0.0	Zn	0.01500	0.01489	0.7
Ti	0.004	0.004	0.0	La	0.00410	0.00412	0.5

*最終検量線による測定

サブテーマ③-1 Mn 検量線の作成及び③-2 諸元素の検量線補正の研究により、高マンガン球状黒鉛鑄鉄における Mn および諸元素の迅速分析が可能となった。前倒し事業におけるライン鑄造実験で、研究で作成した検量線により実ライン操業で分析可能か検証するために、3 トン電気炉を用いたライン鑄造実験で実際に発光分析を活用して成分調整を行い、製品に鑄造する実験を実施した。銑鉄、SS 材、Fe-Si、Fe-Mn、Ni を所定重量準備し、3 トンの高マンガン球状黒鉛鑄鉄の元湯を溶解した。昇温後に発光分析試料を採取して事前に校正作業を行った発光分析装置で分析した。不足合金成分について計算量を追加投入して成分を目標組成とした。主要諸元素は全て目標組成範囲内に入り、球状化処理後に製品に鑄造できた。表 9 に前倒し事業で実施したライン鑄造実験での発光分析結果を示す。

表 9 元湯成分調整時の発光分析結果（単位：%）

元素	成分調整前の分析値	成分調整後の分析値	目標値
C	3.56	3.60	3.5~3.6
Si	3.77	3.76	3.75~3.85
Mn	10.49	10.26	9.8~10.4
Ni	2.25	2.27	2.2~2.4

C、Fe-Si、Fe-Mn、Ni を分析値に応じて添加調整。

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果

本事業では、新材料である高マンガン球状黒鉛鑄鉄の製品製造技術の確立に向けたコンソーシアムによる研究を実施してきた。当初より事業化、すなわち量産化を視野に入れた研究を行ってきた。初年度に、新材料としては初のライン鑄造実験を実施し、製品の鑄造が可能であることが確認でき、同時に新たな問題点や課題の存在が明らかとなった。対策条件でのライン鑄造実験と原因究明を繰り返して不良率の低減化を実現した。鑄造した製品について目的の特性を得るための熱処理の研究を行い、性能試験により仕様を満足する製品性能が得られることを確認した。事業後半は、事業化に向けた製造技術の確立に重点を置き、発光分析技術の確立、CE 値測定技術の確立、量産型熱処理技術の確立に重点的に取り組み、個々の技術の確立により、量産に対応した高マンガン球状黒鉛鑄鉄製品の製造技術を確立することができた。個々の技術確立過程について以下にまとめる。

高マンガン球状黒鉛鑄鉄の製造工程として、①溶解⇒②分析⇒③成分調整⇒④鑄造⇒⑤仕上げ⇒⑥熱処理がある。これらの工程の内、①溶解、②分析、④鑄造、⑥熱処理に焦点を絞り実際の操業形態に適用可能な製造技術を確立すべく計画的に研究を進めてきた。

①溶解工程については、通常シリカライニングではMnによる浸食と、スラグ発生の問題があることから、アルミナ系耐火材を採用した実験を行ってきた。前倒し事業では鑄鉄の焼結温度としては高い温度で焼結を行い、炉最上部の溶湯と接しない部分にホウ酸を添加して築炉した。また溶湯攪拌による部分的な浸食を抑えるために「かきならし」作業を追加した。これらの改善により、トップの崩れおよび攪拌による浸食を著しく改善することに成功した。

②分析については、当初、高マンガン球状黒鉛鑄鉄の迅速分析が不可能であったため、鑄造実験の際は、全て計算で予測した組成値により鑄造実験を完了して、後日、分析を行うしかなかった。事業化のためには、迅速分析により、その場で最適な成分調整をして鑄造する必要があった。前倒しの研究により、高マンガン鑄鉄溶湯に適した検量線を新たに作成し、信頼できる分析値との誤差を3%以内にして分析することが可能となった。また、合金組成が整ったところで数十分間保持すると炭素が消耗されて含有量が低下していく。ここでCE 値を測定することにより、再度発光分析を実施することなく球状化処理作業に移ることができるようになった。

④鑄造については、高マンガン球状黒鉛鑄鉄の組成と湯流れの関係を明らかにして、高マンガン球状黒鉛鑄鉄が湯流れの良い溶湯であることを明らかにした。ここで適正な化学組成で鑄造することにより、肉厚5～10 mmの機械式継手をライン鑄造することに成功した。研究の中でMn含有によるガス欠陥発生傾向、通常品と比べて若干の引け巣発生傾向があることが分かり、対策を検討してきた。ガス欠陥については、注湯温度上昇により改善されるが、基本的には湯流れと溶湯が型に充填された瞬間の温度が重要であることが分かった。引け巣に関しては、効果的な押湯を設置するといった基本的な対策が必要であることが分かってきた。今後、高マンガン溶湯に適した鑄造方案を構築していくことが品質安定化に大きく寄与すると考えており、継続した研究を検討している。

⑥熱処理については、窒素ガス発生装置を活用した流動層熱処理炉による炭化物分解熱処理を研究した結果、流動層熱処理炉で、製品およびテストピースの炭化物分解熱処理が可能であることが実証された。事業化に向け、1 バッチ当たりの処理増量、タクトタイムの短縮化を目指した実験を行ってきた結果、200 本/バッチをタクトタイム 1.5 時間で処理する技術を確立できた。今後の継続した研究により、更なるタクトタイム短縮化に取り組むことを検討している。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

本事業の遂行により、高マンガン球状黒鉛鑄鉄製品の製造技術は量産レベルまで、ほぼ確立できたと考えている。

残る課題としては、鑄造技術の確立において、CEメーターによるC含有量3.6%以上でのCE値測定技術の確立および製品内部の微小引け巣対策として高マンガン球状黒鉛鑄鉄に適した鑄造方案の確立が挙げられる。熱処理技術の確立においては、治具の寿命がどの程度かの見極めが課題として残されている。治具は消耗品でありコストと深く関わるため、更なる形状改良などの研究が必要と考えている。迅速分析技術の確立においては、試料形状の改良が、課題として残されている。発光分析用の試料は急冷が必要であるが、高マンガン球状黒鉛鑄鉄組成では試料にクラックが入る問題が生じている。改良型によりクラックが生じない形状を考案し、分析精度を確認する必要がある。事業化に向けた量産は可能となったが、今後の継続した研究により、残された個々の技術的課題を解決していく予定である。

事業化の見通しとして、非磁性機械式継手は、継手性能試験の結果、十分に満足する性能を有することが確認された。これらの結果を基に、リニア中央新幹線の非磁性鉄筋継手として採用される見通しである。今後、ラインアップを広げた性能確認試験実施により、採用拡大を見込んでいる。また、MRI施設への適用も可能であり、実際に事業期間中に引き合いもあった。

低温用機械式継手についても、性能試験により-100℃での低温継手性能試験を実施した結果、仕様を十分満足する性能が得られた。今後、LNGタンクへの採用が見込まれている。天然ガスの需要は現在増加の一途を辿っており、一刻も早い採用が望まれている状況である。

非磁性、低温用材料の双方が次世代の高速輸送、エネルギー分野の発展に欠かせない材料であると考えられ、本事業での研究成果を土台として、継続した研究および販路の開拓を進める計画である。

以上