

平成 20 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「革新的鑄鋼製造技術の開発とその実証」

研究開発成果等報告書

平成 21 年 3 月

委託者 中国経済産業局
委託先 財団法人 くれ産業振興センター

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景、研究目的、研究目標及び実施結果	1
(1) 研究開発の背景	1
(2) 研究開発の目的	2
(3) 研究開発の目標	4
(4) 実施結果	4
1-2 研究体制	5
1-3 成果概要	6
1-4 当該研究開発の連絡窓口	7
第2章 本論	8
2-1 簡易モデル他を用いた加炭メカニズムの解明	8
2-2 2.6トン ベルマウス形状による実用化試験	11
2-3 最終製品評価	13
2-4 FM鋳造CAEによる解析技術	15
第3章 全体総括	16
3-1 複数年の研究開発成果	16
3-2 研究開発後の課題・事業化展開	16

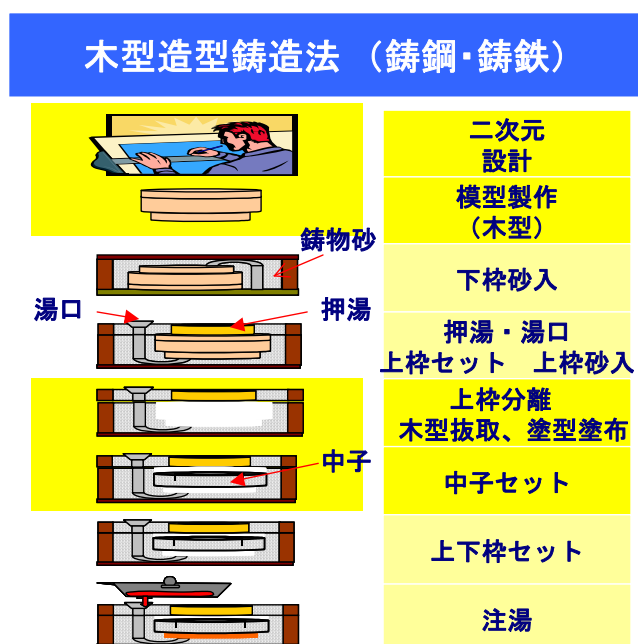
第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景、研究目的、研究目標及び実施結果

(1) 研究開発の背景

日本の必須の基盤産業である造船・鋳造業界は、量、質共にリーディングカントリーとしての地位を確立することが求められており、以下に示すような国内外の状況変化への速やかな対応が迫られている。

- ◆ 造船業界では、国際市場における厳しい価格競争の中で受注を促進して勝ち抜くために、工期短縮、コスト低減や、軽量化、一体成形、複雑形状の製作精度向上等による技術力向上が強く求められている。
- ◆ 鋳造業界では、従来鋳鋼は図1-1-1に示す「木型造型鋳造法」を用いて製造されてきたが、この方法は作業工数が多く、熟練作業者を必要とする複雑な作業が多い。しかし、その熟練技能者が減少し、造船業界のニーズに対応することが難しい現状である。また、3K職場とされ、若手労働者が少なく、技能伝承も危機的状況にある。



課題

- ・熟練技能(模型・造型)を要し、事業継承が困難
- ・作業工数が多くかつ複雑
- ・作業環境が劣悪で若手労働者の職場離れ
- ・コスト高かつ長納期

図1-1-1 従来の木型造型鋳造法と課題

このような状況の中で、「フルモールド法」を鋳鋼に対して採用することが可能となれば、川下産業である造船業界への要求を十分満足することができる。さらに、鋳造業界においては、熟練技能者の減少で技術継承が困難であったが、三次元 CAD・CAM、CAE などと組み合わせてコンピュータによる技術継承が容易になるとともに、若手技術者の参入も促進できる。

(2) 研究開発の目的

現在、鋳鉄においては図 1-1-2 に示す「フルモールド法」が採用されている。鋳鉄では材料中の炭素含有量が高く加炭の影響を受けにくい、鋳鋼では炭素含有量が低く、加炭や炭素偏析が材料の機械的特性である伸びや絞りを低下させるとともに溶接性に悪影響を与える。そのため、過去、数多くの研究開発が行われているにもかかわらず、特に、低炭素鋳鋼製品では、「フルモールド法」を用いた製造は困難とされ、実用化されていないのが現状である。低炭素鋳鋼製品へ「フルモールド法」を採用することは、画期的な鋳鋼製造技術であるとともに、海外に対し優位性のある技術としてその波及効果は大きい。

一 現状の鋳鉄・鋳鋼鋳造技術とその課題 一

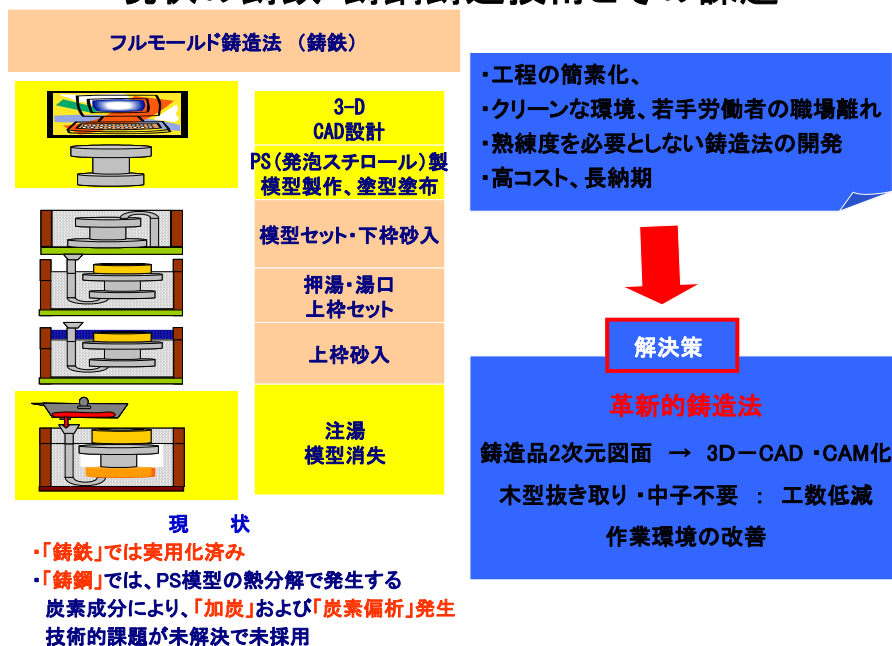


図 1-1-2 鋳鉄のフルモールド鋳造法

本研究開発では、低炭素鋳鋼製品への加炭を抑制・制御する手法として「減圧フルモールド法」に着目し、消失模型から発生する分解ガスを効率的に排気する「バキュームアシス

ト」を付加した革新的「バキュームアシスト・フルモールド鋳造法 (Vacuum Assisted Full Mold、以下、VAFM 法と記す)」を開発し、低炭素鋳鋼製品を「フルモールド法」で製造可能にすることが目的である。

この技術開発により、従来、2次元設計図面から熟練技能者が加工していた木型は、3次元 CAD・CAM データを用いたマシニングセンターによる模型加工へと変わり、造型作業の簡素化を初めとする工数の抜本的削減と熟練技能者が行っていた作業はコンピュータにより技術伝承が図れる。また、一体成形化と適用部品の拡大、納期短縮、コストダウン、作業環境のクリーン化が可能となる。

上述したように、鋳鋼では炭素含有量が低く、加炭や炭素偏析が材料の機械的特性である伸びや絞りを低下させるとともに溶接性に悪影響を与える。そこで、本研究開発では、加炭と炭素偏析を抑制・制御できる技術確立を目指し、図1-1-3に示すような加炭・炭素偏析のメカニズムの解明、FM鋳造CAEの開発、最適鋳造条件の確立とその実証を行い、低炭素鋳鋼製品に対する「フルモールド法」を用いた鋳造法を実用化する。

技術的課題の解決ステップと開発目標

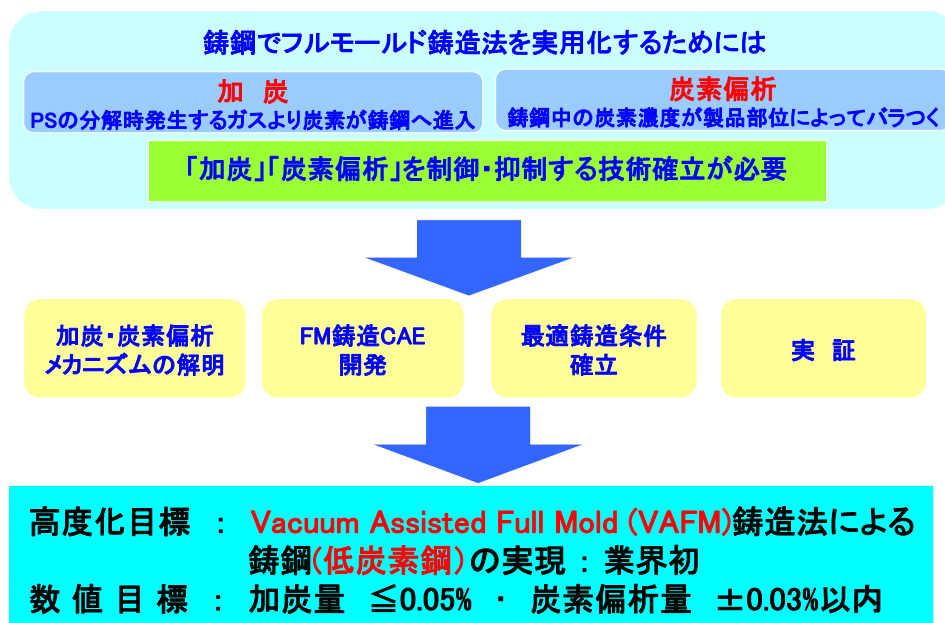


図1-1-3 本研究開発の開発ステップ

(3) 研究開発の目標

上記開発目的に基づき、本研究開発の最終的な開発目標は、図1-1-4の通りである。



図1-1-4 本研究開発の最終目標

(4) 実施結果

上記目標を達成するために実施した研究開発の主要な実施結果は下記の通りである。

a) 簡易モデル他を用いた加炭メカニズム解明

①加炭に影響を及ぼす PS 模型の分解挙動は铸枠に部分的、または全面に設けた観察窓を通して、高速度ビデオカメラで直接観察することにより、現象把握と加炭主要因子を考察した。即ち、3年度にわたり、簡易モデルや小型モデルを用いて溶湯充填挙動を可視化した。また、铸枠内の模型の温度、圧力を測定し、消失模型の熱分解挙動、分解ガスのガス圧・ガス層の厚さを推測し、ガス発生が湯流れに及ぼす影響を減圧度、塗型の通気度を変化させて定量的に把握した。さらに、模型が分解して発生するガス組成等についても調査を行なった。

本観察結果に基づき、加炭量を支配する因子と加炭メカニズムを解明し、加炭を抑制する最適な条件を選定した。

②発生ガスを効率よく排出でき、加炭が抑制・制御できる最適バキュームアシスト铸造方案を提案・確立するため、各種寸法、形状の PS 模型を用いて、VAFM 方案について铸造試験を実施し、実験的に最適な VAFM 法を確立した。

③実製品の大型製品を考慮し、製品形状が加炭量に及ぼす影響を解明し、大型製品へのスケールアップを可能とするパラメータを構築した。

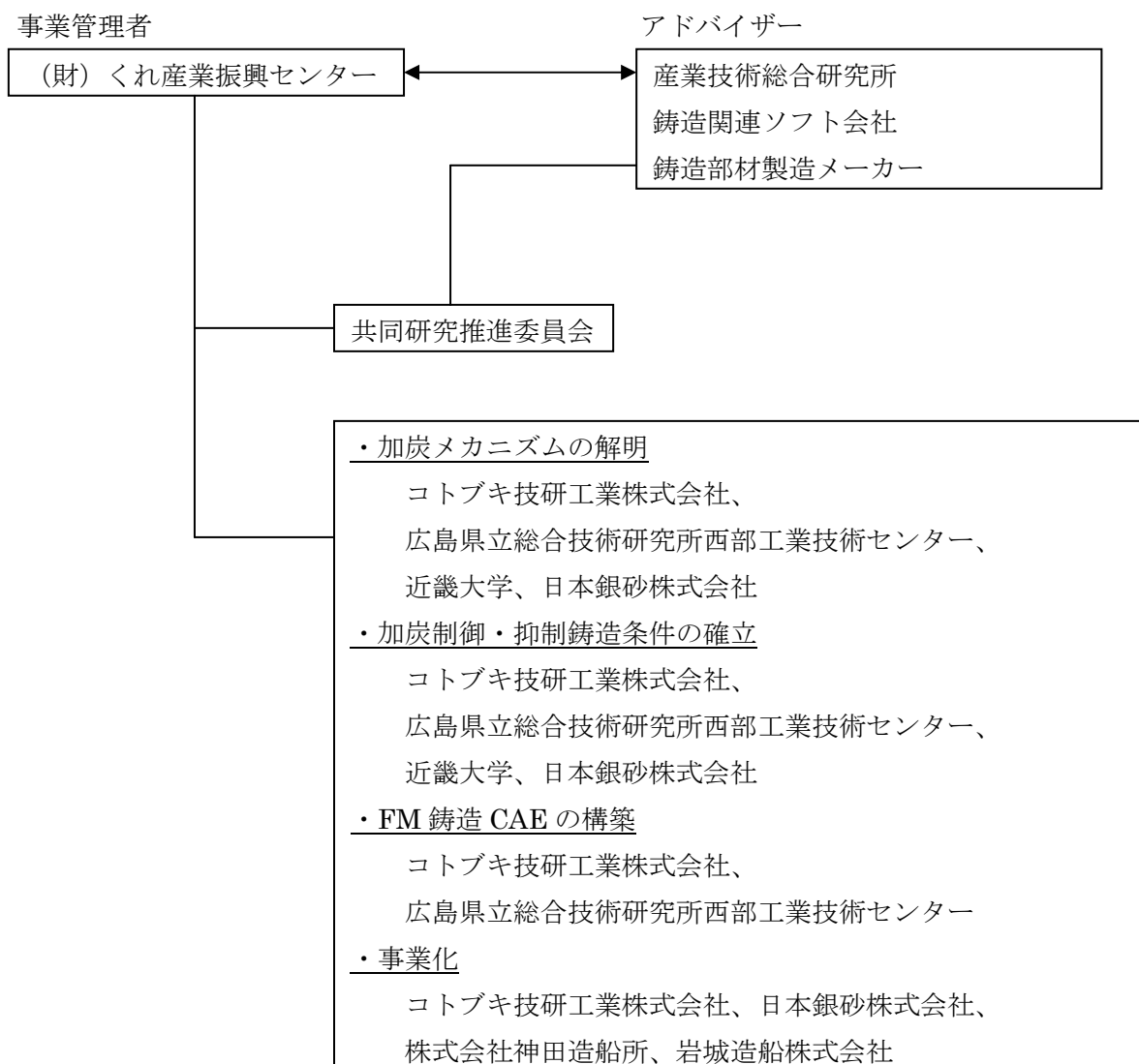
b) 実証試験 (2.6トン ベルマウス形状)

簡易モデルや小型試験等で実験的に確立したバキュームアシスト铸造法を実用化するため、スケールアップパラメータの考えを確認するため、2.6トンのベルマウス形状を用いた実証試験を実施した。その結果、目標とする加炭量以下の結果を得ることができた。

c) 最終製品評価

VAFM 方案にて製作した铸造製品を、川下ユーザである造船会社にて製品品質の評価を実施し、本 VAFM 铸造法が実用化可能であることを検証した。

1-2 研究体制



共同研究推進委員会 : 研究開発の全体内容を審議、評価、提案、次年度計画案の審議を行う。

1-3 成果概要

本研究開発により、次のような成果を得ることができた。

- (1) 簡易モデル試験において、減圧条件下の鑄枠内に設置した PS 模型に、約 1600℃の鑄鋼溶湯による分解挙動および溶湯の流れ方を直接観察した。
- (2) 各種寸法、形状の PS 模型を用い、加炭・炭素偏析が抑制・制御できる VAFM 鑄造方案について小型モデル試験による鑄造試験を実施し、加炭抑制効果を高めるパラメータを見つけ出した。また、実験室的規模（70~200kg）の試験から実製品規模（2.6ton）へのスケールアップが可能なパラメータを導いた。
- (3) 上記結果を踏まえ、図 1-3-1 に示す最大径 1.9m・最大高さ 0.6m の実製品形状（鑄込み重量 2.6ton）の実用化試験を行い、目標とする加炭量 0.05%以下を達成することができた。



図 1-3-1 実製品形状による実用化試験結果

- (4) 本研究成果は、今後、事業化（実用化）を推進するため、技術的には生産性、製品品質向上を目指して開発を実施する。改善された FM 鑄造装置による実用化試験による確認を終えた後国内鑄造メーカーへの販売を図っていく予定である。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

本プロジェクトの連絡窓口は下記の通りである。

住	所	〒737-0004 広島県呉市阿賀南2丁目10番1号 (広島県立総合技術研究所 西部工業技術センター本館内)
機	関	財団法人 くれ産業振興センター
代表者役職・氏名		理事長 小村 和年
連絡担当者役職・氏名		新産業育成 Gr 事務局員 村上 敏
		Tel : 0823-76-3766
		Fax : 0823-72-0333
		E-mail : murakami-kssc@kure-city.jp

第2章 本論

本研究開発の開発ステップと研究方法を図2-1-1に示す。

— 研究開発ステップと研究方法 —

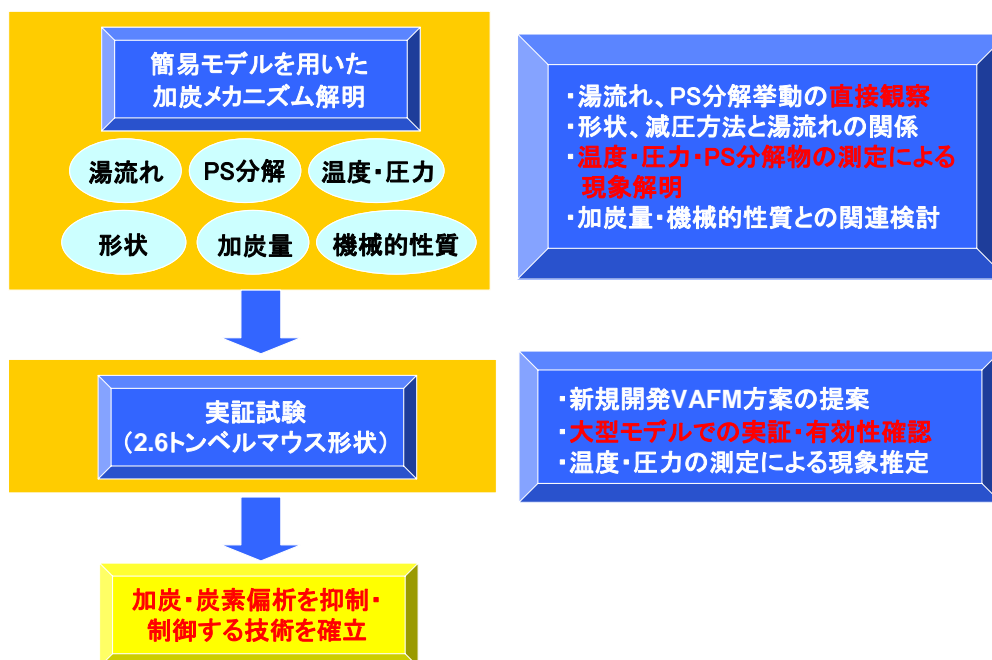


図2-1-1 研究開発ステップと研究方法

本研究開発では、加炭・炭素偏析の要因である消失模型 PS の溶湯による熱分解挙動を簡易モデル、小型モデルにて解明した。これらのモデルの実験的把握から、発生ガスを効果的に除去できる鑄造方案を提案し、加炭・炭素偏析が抑制・制御できる「VAFM」技術を開発し、実製品の2.6トンのベルマウスで実証試験して実用化を目指した。

2-1 簡易モデル他を用いた加炭メカニズムの解明

砂型の内部が可視化できるように工夫した簡易モデルや小型モデルの鑄枠を製作し、これらモデル砂型に鑄鋼を鑄込み、減圧条件下での溶湯の流れ、PS 模型の熱分解・消失・ガス化過程等を直接可視化すると同時に、各部分の温度計測、発生ガスの分析、発生ガス圧を測定し、加炭を抑制する手法を確立した。

図2-1-2は、考慮・検討した各種パラメータを模式的に示した。又、図2-1-3は、湯流れやPS分解挙動を直接観察するために製作した鑄枠形状、測定項目とその測定方法を模式的に示した。この図は文献調査により当初推定していたPS分解挙動と加炭メカニズムを示している。これら測定データより、溶鋼の上昇速度、湯暴れ、消失模型PSが分解する時間的変化、発生ガス層の時間的変化を解析し、加炭メカニズムを推定し、

加炭抑制 VAFM 法を検討した。

— 当初推定したPS分解挙動と加炭メカニズム —

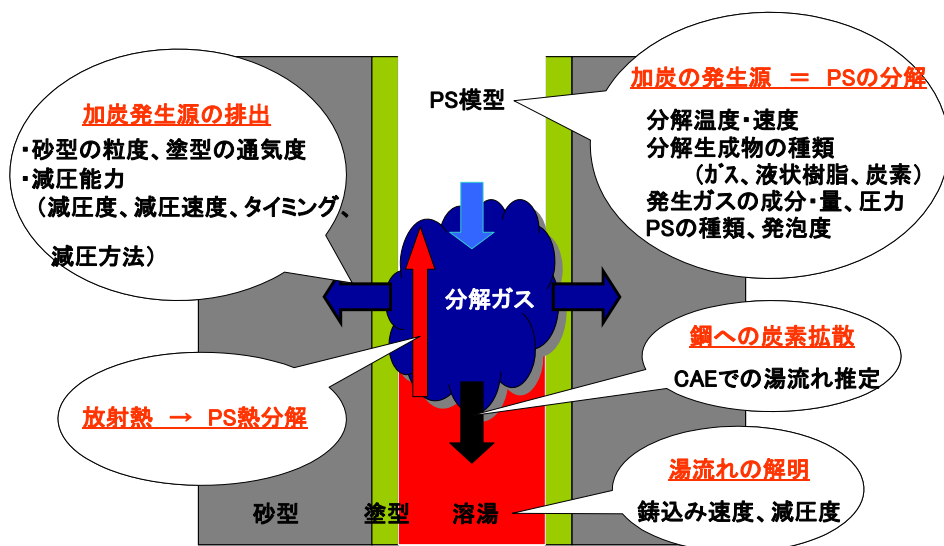


図 2-1-2 加炭メカニズム解明のための各種パラメーター

— 湯流れ・PS分解挙動の直接観察方法 —

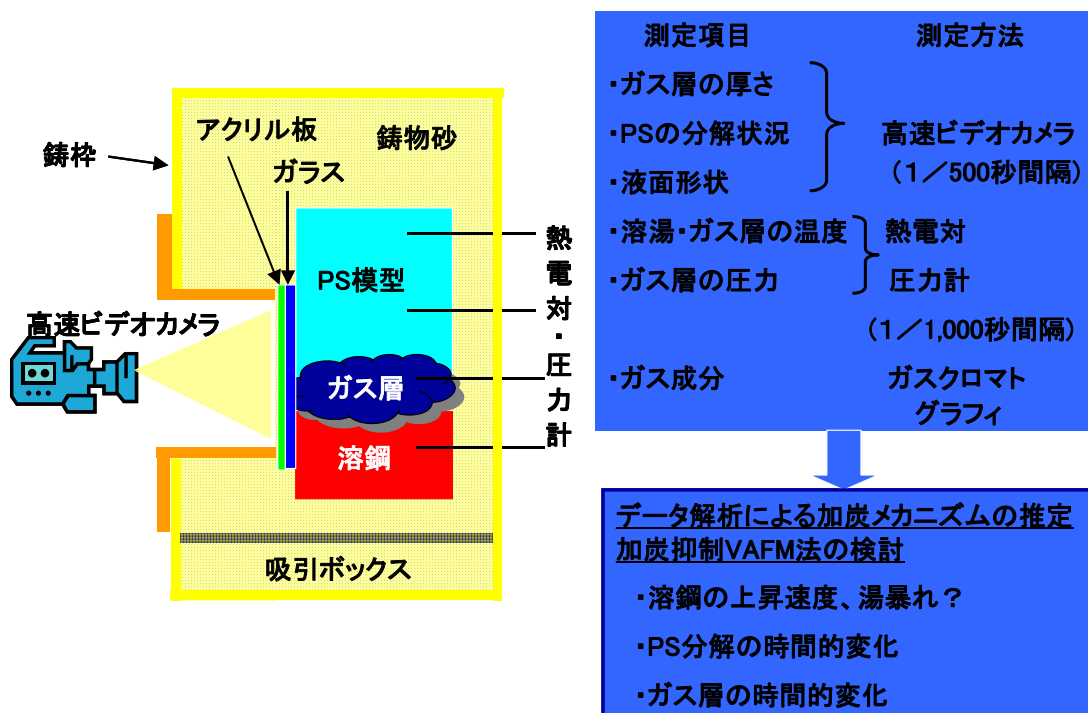


図 2-1-3 湯流れ、PS 分解挙動解明のための直接観察方法

図2-1-4は、簡易モデル試験において、静かに注湯した時の溶湯、ガス層、PS模型の挙動を、高速度ビデオカメラにて直接観察した結果の一例である。溶湯とPS模型との間に薄いガス層が観察され、また、温度、圧力の連続測定から、PS模型の分解速度、ガス層厚さ、湯面上昇速度などが定量的に把握することができた。この場合、注湯状況としては比較的良好な状況であったが、鋳鋼中の炭素濃度分析結果では、目標とする加炭防止・抑制効果は認められず、有効な VAFM 方案としては不適であった。

一 湯流れ・PS分解挙動の直接観察例—その1—

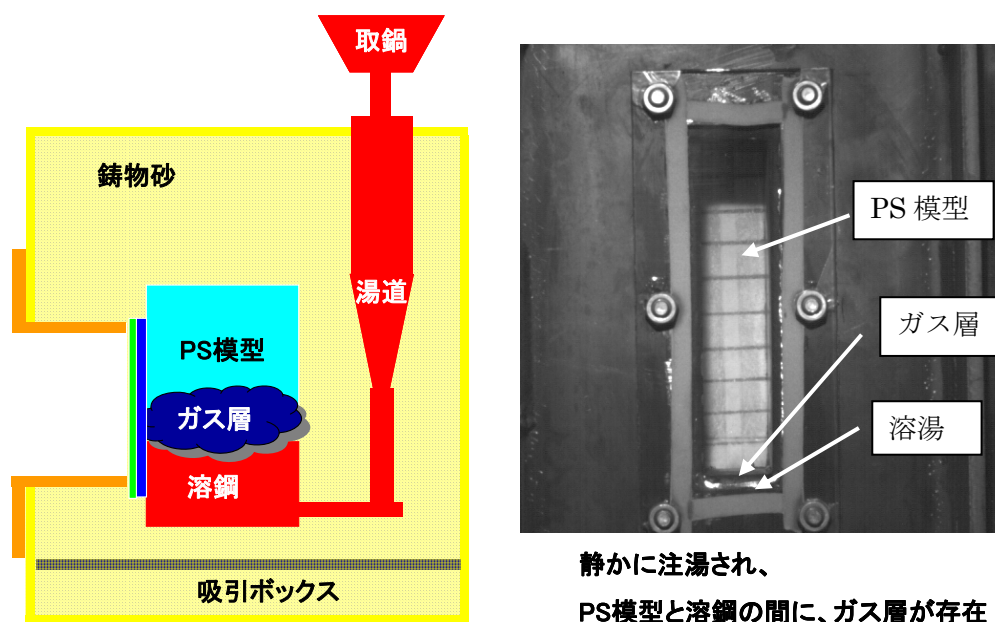


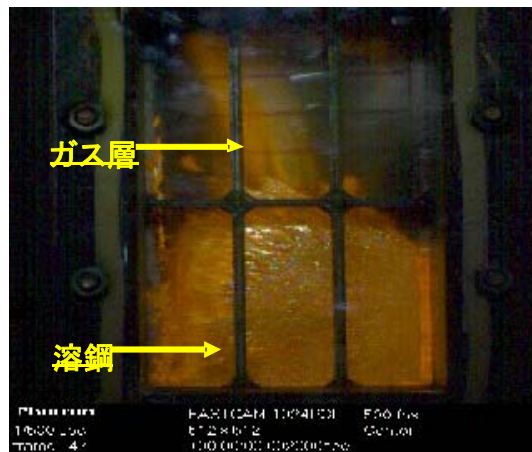
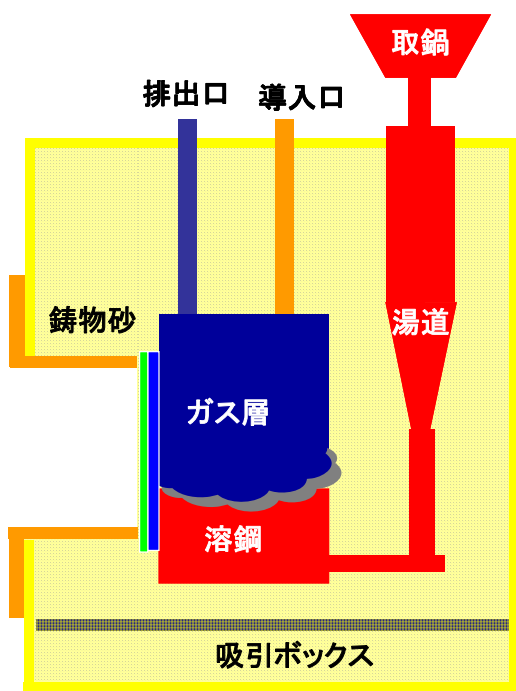
図2-1-4 溶湯、ガス層、PS模型分解挙動の直接観察結果例（その1）

一方、図2-1-5は、PS模型の側面全体を観察して、PS模型の分解挙動を高速度ビデオで観察した結果である。この場合には、注湯直後に、一瞬にして炎が立ち、PS模型が熱分解・燃焼した。鋳鋼内の炭素濃度分析結果は、レードル値からの加炭量は、目標値を満足する0.05%以内であった。

この図2-1-5に相当する各種 VAFM 鋳造方案について、PS模型の形状、減圧度、注湯方法などについてさまざまな試験を実施し、加炭量、炭素偏析量、機械的性質についても調査を行い、最適な VAFM 鋳造方案を見出すことができた。

更に、加炭に影響を及ぼす影響因子を検討した結果、加炭量を支配する定量的関係を見出した。この結果に基づき、スケールアップの考え方が確立でき、実用化試験の試験条件が設定できた。

— 湯流れ・PS分解挙動の直接観察例—その2—



注湯と同時に、一気にPS模型が消滅(熱分解・燃焼)している

図 2-1-5 溶湯、ガス層、PS 模型分解挙動の直接観察結果例 (その 2)

2-2 2.6 トン ベルマウス形状による実用化試験

上記簡易モデル試験他の試験結果を踏まえ、図 2-2-1 に示すように、船舶の鎖の巻き揚げ口に設置されるベルマウスという部品について、実製品規模・実寸の大きさの 2.6 トンの重量での実証試験を行った。その形状は、最大直径が 1,888mm、最大高さ 556mm で、鑄込み重量 3,649kg であった。

図 2-2-2 は、本研究開発の簡易モデルおよび小型モデル試験の結果、最適と考えられた VAFM 鑄造方案にて実証試験を実施した後の鑄鋼製品の外観写真である。外観上特に問題となる肌荒れ、欠陥は観察されなかった。鑄鋼内部での炭素濃度を約 200 点測定し、その結果、平均加炭量は開発目標である 0.05% を十分満足する結果であり、炭素濃度の偏析もほぼ目標値を満たしていた。また、マイクロ組織観察結果や機械的強度特性である引張試験特性やシャルピー衝撃試験結果も規格値を十分満足する結果が得られた。図 2-2-3 は、代表的な部位におけるマイクロ組織観察結果を示す。いずれの部位も「フェライト+パーライト」の標準的なマイクロ組織であった。

この結果により、加炭量を抑制・制御できるフルモールド鑄造法の技術が確立したことを裏付けるものである。

－ 2.6トン ベルマウス形状での実証試験 －

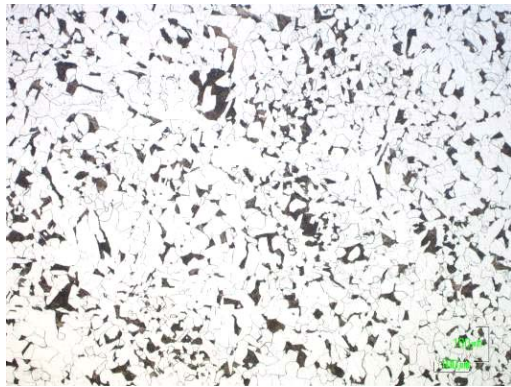


図2-2-1 実証試験に用いたベルマウス形状

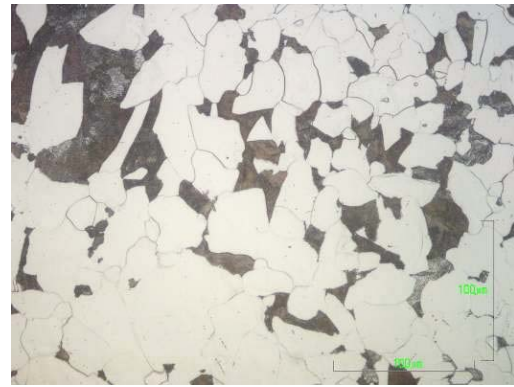
－ 2.6トン ベルマウス形状での実証試験結果 －



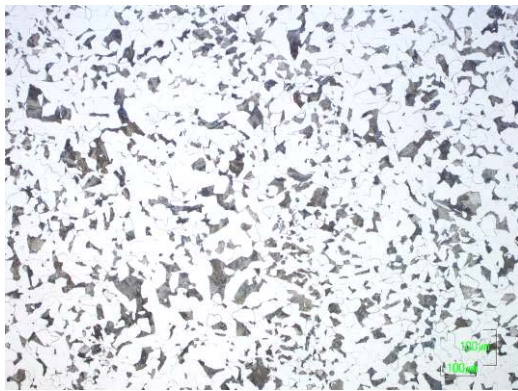
図2-2-2 2.6トンのベルマウス形状での実証試験結果



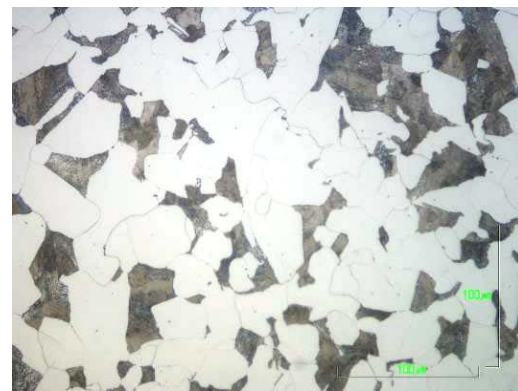
部位 A ×100



部位 A ×400



部位 B ×100



部位 B ×400

図 2-2-3 2.6 トンのベルマウス形状での実証試験サンプルのマイクロ組織観察結果

2-3 最終製品評価

実用化のポイントは現状の溶接施工条件において問題なく溶接できることである。そこで、川下分野の造船企業において、最終製品評価試験として、本実証試験サンプルを用いて、実製品と同一の溶接条件での溶接施工試験を実施した。

図 2-3-1 は、2.6 トンのベルマウス形状試験体から採取した溶接用サンプルを示す。また、図 2-3-2 は、溶接施工したサンプルの外観写真である。溶接は現状の溶接方法で問題となることはなかった。また、溶接部についての検査の結果、溶接部は健全で溶接欠陥は認められず、また断面マクロ組織観察においても有意な欠陥はなく、金属顕微鏡による組織観察において健全な組織を呈していた。

これから、本 VAFM 铸造方案を用いた铸钢製品は実用可能であることが確認できた。



図 2 - 3 - 1 溶接用試験サンプル

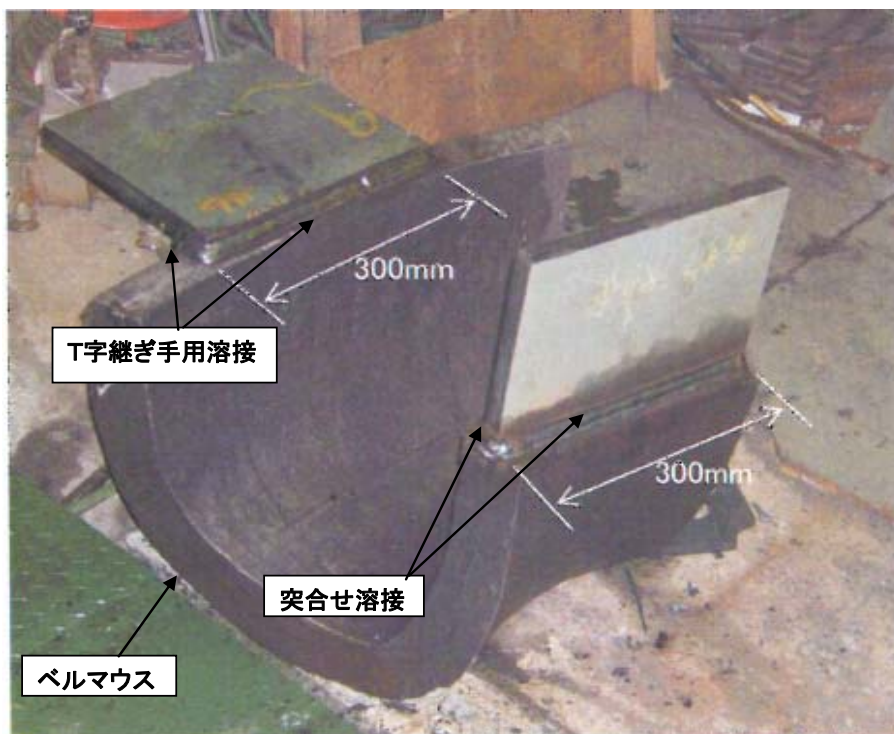


図 2 - 3 - 2 溶接試験後の外観状況

2-4 FM鋳造CAEによる解析技術

PS模型が溶湯からの輻射と熱伝達で熱を受けてガス化するとする、フルモールド鋳造法の湯流れシミュレーションコードを組み込み、可視化実験に対するモデルでシミュレーションを実施した。その結果、可視化結果を再現できることが分かった。

また、ガスと溶湯間の物質伝達率の概念を導入し、更に、溶湯中の対流と拡散を考慮して、炭素吸収のシミュレーションを可能とするソフトを開発した。これは実験結果をかなり説明でき、種々のVAFM鋳造法の最適方案に役立つ。

溶湯中の炭素濃度分布を推定する試みとして、炭素の拡散と対流による移動を考慮したプログラムを開発した。

第3章 全体総括

3-1 複数年の研究開発成果

従来、鋳鋼へのフルモールド鋳造法を適用することは非常に困難であると考えられたが、3年間の研究開発により、革新的技術として、減圧下での「バキュームアシスト・フルモールド (VAFM) 鋳造法」が確立できた。これにより、高度化目標である、加炭量 0.05%以下が満足できた。

本開発技術によれば、当初特長と考えていた

- ・ 模型・鋳型製作の簡略化 : CAD・CAMによるPS模型の製作
- ・ 作業工数の削減
- ・ 作業環境のクリーン化 : PS模型の燃焼ガスの冷却部での固定化
- ・ コスト削減・納期短縮

は、いずれも達成でき、鋳鋼における加炭・炭素偏析が制御できる「VAFM システム」が確立できたと考える。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

3-2-1 技術課題

以上述べた本研究開発の技術成果として、今回開発したフルモールド鋳造法を鋳鋼に採用することで、加炭を抑制・制御するフルモールド鋳造法の技術は確立できた。

今後、実用化に対しては、生産性向上・合理化、製品品質の安定性・向上を目指す必要があると考える。

3-2-2 事業化へのアプローチ

上記した技術課題解決と併せ、事業化へのアプローチとして、

- ・ 本研究開発技術成果を実製品に適用するため、引き続き関係部署との共同により課題を解決する。
- ・ 本開発技術の成果である「FM 鋳造装置」の第一号機を製作、関連会社に販売する。併せて国内鋳鋼メーカーへの販売を進める。