

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「エネルギー効率向上を目指した発電用新材質の
鋳造技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成22年6月

委託者	東北経済産業局
委託先	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	3
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2	研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	8
1-3	成果概要	9
1-4	当該プロジェクト連絡窓口	12
第 2 章	成果報告	13
①	剛性、靱性に資する鑄造技術の開発への対応	
①-1	最適結晶粒の探索(結晶粒微細化)	
①-2	クリープ特性の向上	
①-3	実部品を用いた最適熱処理条件の確立	
②	品質の確保、向上及びコスト低減に資する鑄造技術への対応	
②-1	アルミナ系人工砂による鑄型造型技術	
②-2	デルタフェライト析出防止	
②-3	最適鑄造方案の確立	
第 3 章	全体総括	23
3-1	全体総括	23

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

地球温暖化の主原因である二酸化炭素の排出量の削減を目的に、電気事業者はエネルギー効率の向上を図っている。その目標値を達成するためには、蒸気タービン入り口における蒸気温度と蒸気圧を向上させる必要があり、その要求仕様に耐え得る新鑄造材料、新鑄造技術の開発が求められている。本開発では、高温・高圧雰囲気中で剛性と靱性に優れた新たな鑄物材質の開発と、その鑄造方案及び熱処理技術を含んだ鑄造技術の開発を行う。

地球温暖化防止対策として二酸化炭素排出量の低減が課題となっており、「実効性のある地球温暖化対策に向けて」（電気事業連合会、2007年4月20日）によれば、電気事業では2008～2012年度の目標として、二酸化炭素排出量を1990年度と比較し平均で20%低減するとしている。

この目標達成には、発電設備のエネルギー効率を現状の40%から46%～48%にする必要があり、そのためにはタービン入口の蒸気条件として、蒸気温度866K、蒸気圧24MPaから蒸気温度923K、蒸気圧35MPaにまで引き上げる必要がある。

具体的には、クリープ特性（破断強度）を1,073Kにおいて80MPa、1000時間を満たす材質が必要とされる。本事業では火力発電プラント用耐熱鑄鋼の対象製品として、プラント部品内では最も高温・高圧となる「ノズルボックス」を開発ターゲットに、その鑄造技術開発と製品化を目指す。

(以下実施内容)

① 剛性、靱性に資する鑄造技術の開発への対応（秋木製鋼株式会社、秋田県産業技術総合研究センター）

クリープ特性（破断強度）を1,073Kにおいて80MPa、1000時間を満たす材質特性を達成するため、材質、部品形状、重量、熱処理条件（温度、時間、冷却等）と熱処理品質（硬さ、組織、引張強さ、クリープ特性等）を整理し、熱処理品質と条件などについて相関を求め、数値解析に取り入れることによって、最適熱処理条件を確立する。

秋木製鋼株式会社は、火力発電プラント用耐熱鑄鋼の対象製品として、プラント部品内では最も高温・高圧となる「ノズルボックス」を開発ターゲットに、最適結晶粒の探索、クリープ特性の向上研究の実施や実部品を用いた最適熱処理条件の確立を行い、その鑄造技術開発を行う。秋田県産業技術総合研究センターは、数値解析技術を活用し最適な熱処理条件を確立することによって、高温・高圧雰囲気中で剛性と靱性を兼ね備えた材質の開発を行う。本研究実施にあたり、発光分光分析装置を秋木製鋼株式会社に設置し、同社がこれを使用する。

①-1 最適結晶粒の探索（結晶粒微細化）

テスト溶解を行い、得た供試材から物性値（熱伝導率、比熱、密度等）を測定し、数値解析で用いる物性値データを最適化する。このデータを用いて数値解析を行い供試材に対する最適な熱処理条件を求め、その温度で供試材を熱処理し、数値解析結果との整合性、及び熱処理条件と熱処理品質の相関を求める。

①-2 クリープ特性の向上研究

クリープ特性の向上研究への対応として、一般に結晶粒径が小さい程変形する為の応力は大きくなる事から、粒径が小さい程クリープ特性が向上していく事をクリープ特性試験と結晶粒径の相関から解明する。

①-3 実部品を用いた最適熱処理条件の確立

更に、実部品を用いた最適熱処理条件の確立への対応として、ここまでで得た情報から製品の熱処理解析を行い、最適な条件を求める。求めた最適熱処理条件で製品を熱処理し、解析結果と比較検証する。

現状の熱処理技術と課題

肉厚変化の大きな部品の熱処理作業は、経験とカンなど熟練作業によって行なわれている。肉厚な部分の内部の組織を完全に変態化させる為に、高温または長時間加熱を行う事が一般的であるが問題点がある。

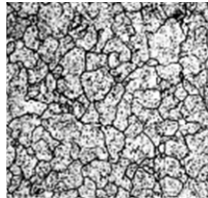
【過剰な加熱による問題点】

○現状の結晶状態、クリープ特性

現状の材質の一般的なクリープ特性値：968K、81MPa、150時間

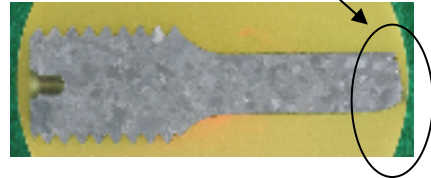
○現状の熱処理後の結晶状態

- ・熱処理不十分のため、結晶粒が大きい。



○現状のクリープ試験結果

- ・脆性的な破断となる。



新熱処理技術と目標値

これまでに蓄積した熱処理技術と基礎研究段階の新熱処理技術を、肉厚変化が大きくかつ複雑形状な実際部品に適用するため、数値解析技術を活用しながらモデル形状部品へ適用することで、最適熱処理条件を確立する。

【研究内容】

課題1 最適結晶粒の探索（結晶粒微細化）

課題2 クリープ特性の向上研究

課題3 実部品を用いた最適熱処理条件の確立

【目標値】

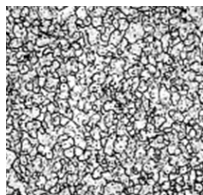
結晶粒の微細化クリープ強度の向上を図ることで、次の目標を達成する。

1073K、80MPa、1000時間

○目標とする熱処理後の結晶状態

（基礎研究データを以下に示す）

- ・最適な熱処理であるため結晶粒が微細である



○目標とするクリープ試験結果

（基礎研究データを以下に示す）

- ・延性的な破断となる。



② 品質の確保、向上及びコスト低減に資する鑄造技術への対応（秋木製鋼株式会社、秋田県産業技術総合研究センター）

高品位な表面層を有する鑄造品を製造することと、造型時間を 32 時間から 1/5 に短縮するため、高融点（2, 273K）のアルミナ系人工砂を使用したワンサンドによる造型技術と最適鑄造方案を確立する。

秋木製鋼株式会社は、上述の目標を達成するため、高品位な表面層を有する鑄造品を製造するために、差込欠陥の防止やデルタフェライトの析出防止を研究し、高融点（2, 273K）のアルミナ系人工砂を使用したワンサンド造型技術を開発する。

秋田県産業技術総合研究センターは、上述の目標を達成するため、アルミナ系の人工砂の熱伝導率、比熱、密度等の物性値を測定し、粒径との関係の解析を行う。

本研究実施にあたり、鑄造&熱処理解析・計測機器を秋木製鋼株式会社に設置し、同社がこれを使用する。

②-1 アルミナ系人工砂による鑄型造型技術

アルミナ系人工砂の造型方法（粒径、樹脂鑄型等）について検討するとともに、アルミナ系人工砂の物性値（熱伝導率等）について測定し、その実験データを踏まえ、溶湯の差込み欠陥を抑制できるワンサンドによる造型技術と最適粒径を明らかにする。

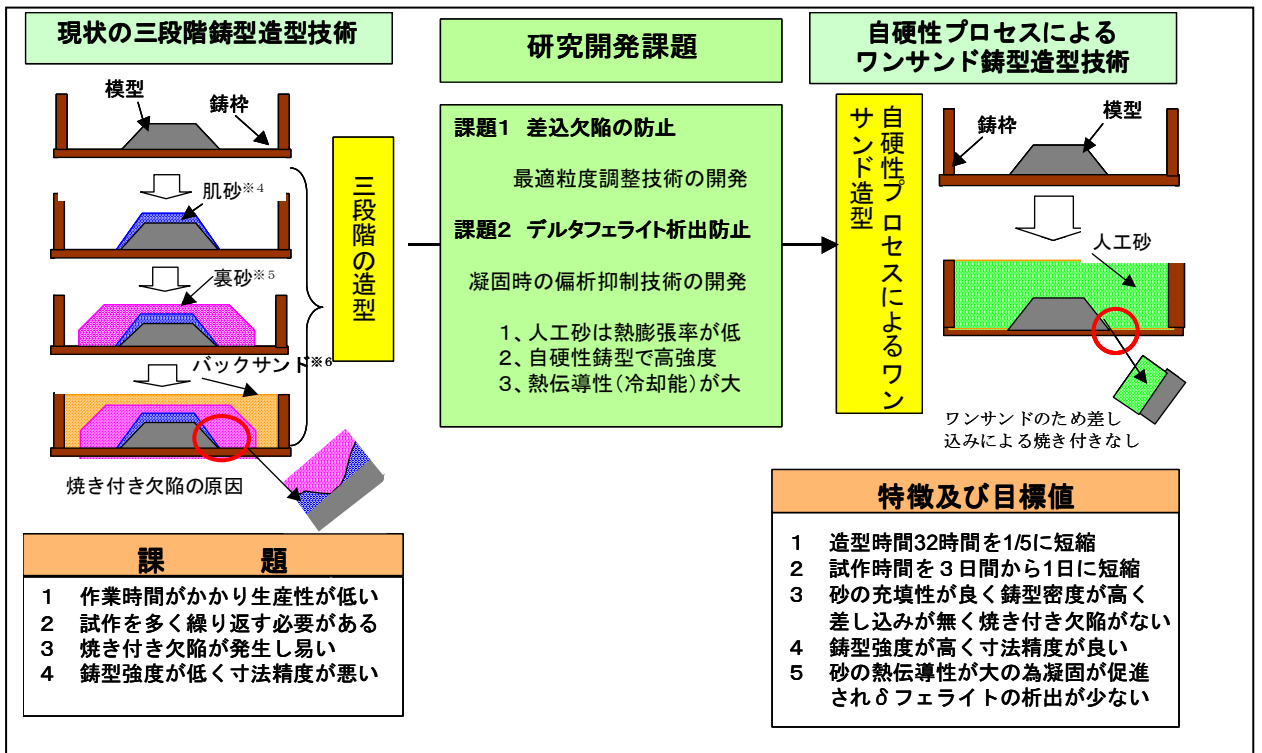
具体的には、差込欠陥の防止への対応としてアルミナ系の人工砂の熱伝導率、比熱、密度等の物性値を測定し、粒径との関係を解析し、その結果に基づき、造型、鑄造実験を行い、凝固シミュレーション結果と実際の製品の欠陥を比較検証する。

②-2 デルタフェライト析出防止

デルタフェライト析出防止への対応として、この凝固シミュレーションの中で凝固が遅れデルタフェライトが析出する可能性がある部位を特定し、冷金の形状や追加方法等のデルタフェライト析出防止方案を確立する。

②-3 最適鑄造方案の確立

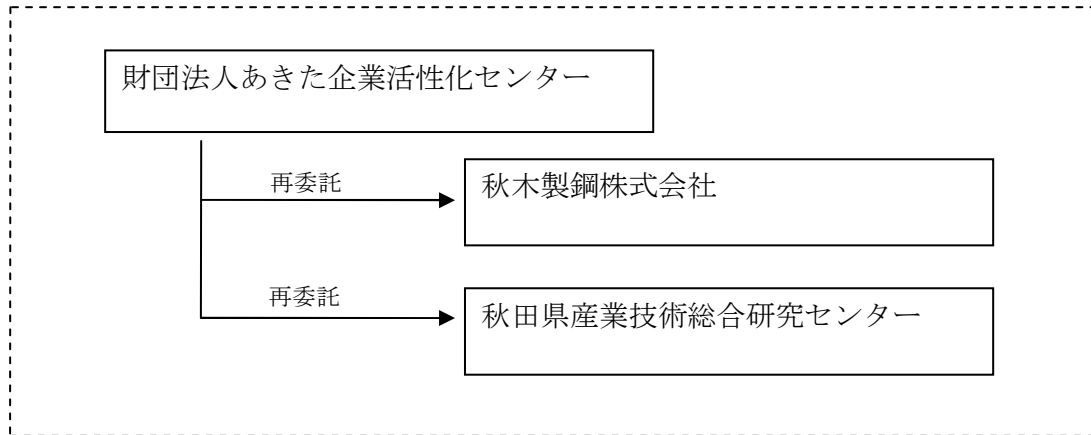
②-1、②-2 の評価から、欠陥を抑え、品質の確保、向上を目指した最適鑄造方案を作成する手順を作業標準として確立し、数値解析による試作時間を 3 日間から 1 日に短縮する。



1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織（全体）



総括研究代表者（PL）
秋木製鋼株式会社
取締役常務 工場長
永坂 直美

副総括研究代表者（SL）
秋田県産業技術総合研究センター
上席研究員
沓澤 圭一

(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】

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
松橋 亨	技術支援グループ サブリーダー
阿部 秀樹	技術支援グループ副主幹
渡辺 淳一	技術支援グループスタッフ

【再委託先】

秋木製鋼株式会社

氏名	所属・役職
永坂 直美	取締役常務 工場長
小野 幸夫	品管・技術担当副工場長
山谷 隆	営業・機械担当副工場長
畠山 慶幸	品質管理グループ長
京 三春	製造技術グループサブグループ長

秋田県産業技術総合研究センター

氏名	所属・役職
沓澤 圭一	上席研究員
進藤 亮悦	上席研究員
内田 富士夫	主任研究員

1-3 成果概要

本研究にて次の成果を得た。

- ①. 剛性、靱性に資する鋳造技術の開発への対応として、発電用合金鋼鋳鋼品火 SCPH91 を基本材料として、合金添加並びに熱処理技術の課題を解決することによってクリープ強度を 1,073K において 80MPa・1,000 時間を満たす材料特性を達するため、以下の 3 テーマに関して研究を行った。

①-1 最適結晶粒の探索(結晶粒微細化)

結晶粒の微細化組織を得るまでに至らなかったが、この要因として、高温、長時間を有する拡散焼鈍工程を検討することによって結晶粒径の制御が可能と考えられる。ただ、結晶粒径サイズに関しては、使用温度、応力によって最適結晶粒径や結晶粒界強化方法が考えられることから、今後、詳細に検討する必要がある。

①-2 クリープ特性の向上

クリープ強度試験は、川下企業（発電プラント機器メーカー）の提示する条件は十分に満たした。

ただ、本事業で目標とする 1073K、80MPa、1000 時間は達成できなかった。

このことは、前述したように、結晶粒の粗大化や窒化物による結晶粒界強化が得られていないことが要因と推察される。

したがって、実機（ノズルボックス）などに適用する場合は、改めて、クリープ強度の向上に寄与する結晶粒径や結晶粒界強化、すなわち、合金の効果や熱処理条件に関して検討する必要がある。

①-3 実機を用いた最適熱処理条件の確立

ノズルボックスの熱処理条件を設定するため、クオリカ製 GRANTAS によって、熱処理シミュレーション解析を行い、組織が焼ならし温度からの強制冷却によって製品全体がマルテンサイトに変態する事を確認できた。

ただ、本事業で実施する2段階焼き戻しのシミュレーションに関しては、十分な解析データが得られないことから、今後は、2段階焼き戻しの熱理解析シミュレーション技術に関して検討する必要がある。

クリープ強度に関しては、前述のように川下企業（発電プラント機器メーカー）の要求値は十分満足している。ただし、目標とする 1073K、100MPa では極めて短時間で破断した。このことは、鑄造組織の均一化のために行なう拡散焼鈍温度、時間並びに強度向上のために行なわれる焼きならし温度、時間がいずれも、オーステナイト化温度以上で、高温で長時間保持することに起因すると推察される。したがって、実機（ノズルボックス）などの肉厚鑄造品に適用する場合は、今後さらに、クリープ強度の向上に寄与する結晶粒径や結晶粒界強化、すなわち、合金の効果や熱処理条件に関して検討する必要がある。

②. 品質の確保、向上及びコスト低減に資する鑄造技術への対応を達成するため、以下の3テーマに関して研究を行った。

②-1 鑄造欠陥である差し込みによる焼き付き防止と造型時間の短縮

アルミナ系人工砂を使用したワンサンドシステム造型法の鑄型物性値を測定し、そのデータを数値解析ソフトにインプットして鑄造欠陥の予測精度を上げて鑄型造型した。

従来の製造方法で発生していた製品狭隘部の差し込みによる焼き付き欠陥に対し、注湯後の製品の凝固時の温度分布を検証し凝固シミュレーションを行って、狭隘部分の鑄型構造を中子構造とし、粒径の小さい充填性の良いアルミナ系人工砂で造型した。鑄造後の製品の確認結果、差込が無く焼き付きも改善された。

造型時の工程に於いて鑄砂の充填・突き固め作業・ガス硬化時間・抜型時間・手入れ作業などをトータル工程で比較した結果、従来の三段階鑄型造型法による時間を、32時間から6時間に短縮できた。

②-2 デルタフェライトの析出防止

本鑄造方法は、人工砂の熱伝導性が大きいいため凝固は促進されるが、更に凝固シミュレーションによりデルタフェライトの発生する部位を特定し、冷し金によって凝固を促進させた。又、熱処理のオーステナイト化温度をフェライトの発生しない温度域（1343K）を採用し、熱処理を行った、最終熱処理後のデルタフェライト析出量を0%にすることが出来た。

②-3 最適鑄造方案の確立

(1) 最適鑄造方案を確立するため、鑄型物性値を測定し、数値解析による鑄造欠陥の予測精度を上げる。更に、3次元CADデータ(STL)のインポート機能を利用してこれまで蓄積したデータを活用し、精度の良い解析用形状を作成するとともに、短時間に効率良く解析を行う為に、重要な製品部分に解析を集中させ、他の部分は少ないメッシュ数にして解析する。

そして、湯流れ解析及び凝固解析において、湯流れ過程及び凝固過程における製品及び鑄型内の温度分布を時系列に把握する。また、自由曲面を有する製品では、曲面に沿ったメッシュを作成する機能を活用すると同時に鑄型砂や造型使用部材の物性値を取り込んでシミュレーションを行った。

以上のことから最適鑄造方案が確立された。

(2) 試作時間の効率を図る為、造型方法を従来の三段階鑄型造型からワンサンド鑄型造型への切り替えにより、従来の解析装置と新規導入の解析装置との比較を行い、試作時の工程内容において、解析用図面作成・形状入力・解析条件設定・PCによる解析時間・結果の評価・鑄造方案図作成などトータル工程で比較した結果、試作時間が24時間から8時間に短縮できた。

(3) 鑄型強度及び寸法精度を向上させる為に、自硬性プロセスによるワンサンド鑄型で行った。鑄型強度は従来方法と比べ約4倍になったことにより、木型設計寸法通りの寸法精度が得られた。また、これまでに見られた鑄型の張られ(鑄込まれた溶湯に鑄型が押し出され膨らんだ状態)が見られず、製品重量も設計重量との差が0.5%にとどまっている。

以上のことから、鑄型強度が大きく寸法精度のよい結果が得られた。

1-4. 当該プロジェクト連絡窓口

住所：〒010-8572 秋田市山王三丁目1番1号 秋田県庁第2庁舎2階

名称：財団法人あきた企業活性化センター

連絡担当者所属役職・氏名：技術支援グループ サブリーダー 松橋 亨

Tel: 018-860-5624 Fax: 018-860-5704

E-mail: toru-matsuhashi@bic-akita.or.jp

第2章 成果報告

①剛性、靱性に資する鑄造技術の開発への対応

クリープ強度を1,073Kにおいて80MPa、1000時間を満たす材質特性を達成するため、発電用合金鋼鑄鋼品 火 SCPH91 を基本材料として、合金添加並びに熱処理技術の課題を解決することによって、高温・高圧雰囲気での剛性と靱性を兼ね備えた火力発電プラント用耐熱鑄鋼を開発する。

具体的には、次の3テーマに関して研究を行なった。

①-1 最適結晶粒の探索(結晶粒微細化)

①-2 クリープ特性の向上

①-3 実機を用いた最適熱処理条件の確立

①-1 最適結晶粒の探索(結晶粒微細化)

【試験方法】

(1) 化学成分

本研究開発における鋼種は、発電用合金鋼鑄鋼品 火 SCPH91 を基本ベースとするが、より高温(600℃以上)での使用を可能にするために、CとCr量の上限を高め、且つ、固溶強化のためにW, Co, 微量Bを追加し、更にフェライトの析出量を抑制するためにCr当量(Newhouse)を7以下とするような成分範囲を定めた。

$$\text{Cr 当量}(\%) = \text{Cr} + 6\text{Si} + 4\text{Mo} + 11\text{V} + 5\text{Nb} + 1.5\text{W} - 40\text{C} - 2\text{Mn} - 4\text{Ni} - 2\text{Co} - 30\text{N}$$

(2) 試験片(TP)

試験片は、30kg 高周波誘導溶解炉(秋田県工業技術センター)にて溶解し、目標とする化学成分に調整後、1923Kで砂型に鑄造した。

化学成分は、島津製作所製発光分光分析装置(PDA-7000)にて分析した。

なお、Cr当量(%) = Cr + 6Si + 4Mo + 11V + 5Nb + 1.5W - 40C - 2Mn - 4Ni - 2Co - 30N より

Cr当量(%)は、5.6(%)である。

(3) 機械的性質

引張試験は、JIS-2201 14号試験片に機械加工後、30ton引張試験機にて行った。

また、硬さ試験については、ブリネル硬さ試験機にて行い、衝撃値については、シャルピー衝撃試験機にて行なった。

(4) 熱処理

得られたTPの熱処理条件は、化学成分から推定される変態点及び過去に弊社で行った研究の結果や実機試験を予定しているノズルボックスの形状及び製造工程手順等も考慮して次のように設定し、実施した。

<熱処理条件>

拡散焼鈍はAc3+ αで15時間以上保持した後、炉中で冷却した。

焼ならしはAc3+ αで10時間以上保持した後、強制空冷した。

焼戻しは、炭窒化物をマルテンサイトラス内に均一且つ微細に析出させ、更にM₂₃C₆型析出物を結晶粒界及び、マルテンサイトラス境界に優先的に析出させるため、2段階焼戻しとした。

【結果と考察】

(1) 組織

拡散焼鈍後の組織は、フェライト組織で、焼ならし後は、マルテンサイト組織+Cr化合物が結晶粒界に観察された。

また、焼戻し後の組織は、焼き戻しマルテンサイト組織であった。

(2) 機械的性質

常温での機械的性質であるが、引張強さ 825.8~852.5(N/mm²)、伸び 21.6~22.0(%)、ブリネル硬さ(HB)262.0~269.0、衝撃値は、22.87~24.09(J/cm²)であった。

(3) 結晶粒について

一般にクリープ強度は、結晶粒径に依存することと、定常クリープ速度を最小とする結晶粒径が存在し、この粒径より粗粒(結晶粒径が大きい)あるいは細粒側で定常クリープ速度が増大する。

また、材質による結晶粒界強化によっても、この結晶粒径依存性は、変化する。

本事業では、材質の強度向上を目的として結晶粒の微細化かつ結晶粒界の強化を図ることによって、クリープ強度の向上を目指すものとしており、**最適結晶粒径**と結晶粒界強化を目標として実験を行った。

熱処理条件による違いによって、粗大な結晶粒径となり、結晶粒の微細化まで達成されていない。

ただし、後述するクリープ強度に関しては、目標とするクリープ強度までは達成して

いないものの、これまで当社で取り組んできた材質のクリープ強度を大きく改善することを可能とした。

このことは、前述したように、材質独自の結晶粒径が存在し、本研究では、追求しきれなかったが、本材質における最適結晶粒径と結晶粒界強化方法に関して、詳細に解析を続けることによって、目標とするクリープ強度、1,073Kにおいて80MPa、1000時間を満たす材質を開発することは可能である。

特に結晶粒径は、鑄造組織の均一化のために行なう拡散焼鈍温度、時間並びに強度向上のために行なわれる焼きらし時のオーステナイト化温度以上での加熱時間、加熱温度によってコントロール可能であることから、より最適な熱処理技術を確立する。

合わせて、結晶粒界強化、すなわち、ピン止め力の向上を目指した合金添加方法に関しても解析を進めることによって目標達成が可能となる。

①-2 クリープ特性の向上

【試験方法】

(1) クリープ試験

クリープ試験は、平行部直径6mm、標点間距離30mmとし、高温クリープラプチャー試験装置を使用し、金属材料の引張クリープ試験方法（JIS Z 2272）に従って、応力80MPa、100MPa及び試験温度963K、1073Kの条件にて行なった。

【結果と考察】

クリープ強度試験は現時点で、川下企業（発電プラント機器メーカー）の要求は十分に満たした。

ただ、本事業で目標とする1073K、80MPa、1000時間をクリアすることは、難しかった。

このことは、前述したように、結晶粒の粗大化や窒化物による結晶粒界強化が得られていないことが要因と推察される。

よって、実機などに適用する場合は、クリープ強度の向上に寄与する最適結晶粒径、最適結晶粒界強化技術、すなわち、合金の効果や熱処理条件に関してさらに研究を進める。

①-3 実機を用いた最適熱処理条件の確立

【試験方法】

(1) 実機の鑄造

実機の試験鑄造は10tonエルー式アーク炉で溶解・鑄造した。

また、同時に試験片を鑄造した。

(2) 化学成分

Cr 当量(%) = Cr+6Si+4Mo+11V+5Nb+1.5W+40C+2Mn+4Ni+2Co+30N より

Cr 当量(%)は、4.8 (%) である。

(3) 熱処理条件

①-1 最適結晶粒の探索、①-2 クリーブ特性の向上の結果を踏まえ、実機の熱処理条件を設定するため、クオリカ製 GRANTAS によって、熱処理シミュレーション解析を行なった。

解析では組織が焼ならし温度からの強制冷却によって製品全体がマルテンサイトに変態する事を確認できた。

ただ、焼き戻し条件に関しては、機能上困難なことから、実際に試験片において熱処理を行い、比較検討を行った。

その結果、シャルピー衝撃試験において、良好な結果が得られたことから、2段階焼き戻し熱処理を採用した。

(4) クリーブ試験

熱処理後の TP からクリーブ試験片を採取し、クリーブ試験を行った。

クリーブ試験は、平行部直径 6mm、標点間距離 30mm とし、高温クリーブラプチャー試験装置を使用し、金属材料の引張クリーブ試験方法 (JIS Z 2272) に従って、応力 80MPa 等 4 条件、及び試験温度 1073K 等 4 つの条件にて行なった。

【結果と考察】

(1) 熱処理シミュレーション

実機の熱処理条件を設定するため、クオリカ製 GRANTAS によって、熱処理シミュレーション解析を行い、組織が焼ならし温度からの強制冷却によって製品全体がマルテンサイトに変態する事を確認できた。

(2) クリーブ強度

テスト溶解を踏まえ、熱処理シミュレーション解析による熱処理条件並びに化学成分調整等を検討した結果、963K、100MPa では 300 時間を達成し、現在もクリーブ強度試験は継続中である。

【まとめ】

剛性、靱性に資する鑄造技術の開発への対応として、発電用合金鋼鑄鋼品 火 SCPH91 を基本材料として、合金添加並びに熱処理技術の課題を解決することによって、クリーブ強度を 1,073K において 80MPa、1000 時間を満たす材質特性を達成するため、次の 3

テーマに関して研究を行なった結果、次のことが判った。

①-1 最適結晶粒の探索(結晶粒微細化)

結晶粒の微細化組織を得るまでに至らなかったが、この要因として、高温、長時間を有する拡散焼鈍及び焼きなまし工程を検討することによって結晶粒径の制御が可能と考えられる。

ただ、結晶粒径サイズに関しては、使用温度、応力によって最適結晶粒径や結晶粒界強化方法が考えられることから、今後、詳細に検討する必要がある。

①-2 クリープ特性の向上

クリープ強度試験は、川下企業（発電プラント機器メーカー）の要求は十分に満たす値を得た。

①-3 実機を用いた最適熱処理条件の確立

実機の熱処理条件を設定するため、クオリカ製 GRANTAS によって、熱処理シミュレーション解析を行い、組織が焼ならし温度からの強制冷却によって製品全体がマルテンサイトに変態する事を確認できた。

クリープ強度に関しては、963K、100MPa では 300 時間以上を達成した。

しかし、より高い温度でのクリープ強度に対しては、短時間で破断した。このことは、鑄造組織の均一化のために行なう拡散焼鈍温度、時間並びに強度向上のために行なわれる焼きならし温度、時間がいずれも、オーステナイト化温度以上で、高温、長時間保持することに起因すると推察される。

したがって、実機などの肉厚鑄造品に適用する場合は、今後さらに、クリープ強度の向上に寄与する結晶粒径や結晶粒界強化、すなわち、合金の効果や熱処理条件に関して検討する必要がある。

② 品質の確保、向上及びコスト低減に資する鑄造技術への対応

②-1 アルミナ系人工砂による鑄型造型技術

(1) 造型時間 32 時間を 1/5 に短縮

造型時間短縮のため、三段階鑄型造型法からワンサンド鑄型造型法で造型した。
また、CO₂硬化鑄型から、自硬性鑄型とし、時間短縮の効果の検証を行った。

表②-1-1 造型時間比較 (h)

造型工程	三段階鑄型造型	ワンサンド鑄型造型
中子作成	3.0	2.5
木型セット	0.5	0.5
砂込め	3.0	1.0
砂突き固め	16.0	0.0
ガス硬化時間	2.5	0.0
鑄型反転	0.5	0.5
抜型時間	4.0	1.0
手入れ	2.5	0.5
合計時間	32.0	6.0

【まとめ】

鑄型造型実験結果、三段階鑄型造型とワンサンド鑄型造型と比較すると、ワンサンドにより砂込め時間が3時間から1時間に短縮された。また、自硬性鑄型により、砂の突き固め作業がなくなったため、16時間の作業の短縮が出来た。その結果、表②-1-1となり、目標である造型時間の短縮(1/5)を達成できた。

(2) 砂の充填性及び高密度、差込の無い鑄型製作の研究

(a) 鑄型造型時、高充填性及び高密度の鑄型製作により、差込欠陥がない鑄型製作の為、砂の粒度調査を行った。

樹脂添加量 : 1.20%

硬化剤添加量 : 0.3%

砂の粒度は、新砂と再生砂とでは、大きな差は生じていなかった。
その為、再生砂のワンサンドでの造型をベースとして、考える。

- (b)凝固シミュレーション結果による実際の製品の差込欠陥の予想
注湯後の製品の凝固時の温度分布を検証する為、凝固シミュレーションを行った。
凝固シミュレーションの結果、狭隘部となっている部分が熱がこもり、差し込み欠陥の発生が予想される。

解析結果により、外面側は粒度のバランスがとれた再生砂を使用、温度の低下が少ない狭隘部分は、再生砂より粒度の細かい細粒新砂を使用する。

- (c)シミュレーションと実際製品の比較
(b)の凝固解析の結果から、鑄造実験では、外面側は、再生砂を使用、狭隘部は、細粒新砂で造型した。

【まとめ】

この結果から、差込欠陥を防止する為の砂の粒度は、再生砂と細粒新砂を組み合わせることで得ることが出来た。

②-2 デルタフェライト析出防止

(1)凝固解析による検証

デルタフェライトはクリープ強度と靱性を低下させるので少ないほど良い。本研究では、Cr 当量を7以下とするように溶鋼の化学成分を調整して、デルタフェライトの発生を抑制しているが、更に凝固シミュレーションにより、デルタフェライトの発生が予測される部位を特定し、冷し金によってその部位の冷却速度を速くする処置を採った。また、熱処理のオーステナイト化温度は、通常フェライトの発生しないといわれる 1343K を採用した。

(2)鑄型の物性値

ベースとして使用する再生砂のアルカリフェノール鑄型の物性値を測定した。測定結果は、凝固シミュレーションの物性値に入力し、より実際に近い数値で解析を行った。

解析条件

手法：差分法+規則・不規則混合要素

メッシュ数： 総要素数 28, 312, 320

鑄物要素数 3, 445, 236

初期温度:1, 560°C

凝固が遅れる部分は押湯間や肉厚交差部等の最終凝固部位とほぼ同じであることが分かった。

この結果から、凝固の遅れている部分に冷し金を使用し、再解析を行った所、凝固の遅れは解消された。

【まとめ】

実製品の铸造結果は、凝固シミュレーションの内容を適用した結果、焼付きは見られず、目標は達成された。

(3) 組織写真による検証

製品を代表する供試材の熱処理後の組織を観察し、デルタフェライトの有無を確認した。

【まとめ】

組織を観察の結果、焼戻しマルテンサイトであり、デルタフェライトは0%であることが分かった。

これらの結果から、解析によって特定されるデルタフェライトは、発生予想部位に冷し金を設置することで防止できることが分かった。

②-3 最適铸造方案の確立

(1) 最適铸造方案

②-1、②-2の評価を取り入れ、新たな手法を確立した。

新たに確立された手法

- ① 3次元CADデータ(STL)のインポート機能を利用してこれまで蓄積したデータを活用し、精度の良い解析用形状を作成する。
- ② 短時間に効率良く解析を行う為に、重要な製品部分に解析を集中させ、他の部分は少ないメッシュ数にして解析する。
- ③ 湯流れ解析及び凝固解析において、湯流れ課程及び凝固課程における製品及び鋳型内の温度分布を時系列に把握する。
- ④ 自由曲面を有する製品では、曲面に沿ったメッシュを作成する機能を活用する。
- ⑤ 鋳型砂や造型使用部材の物性値を取り込んでシミュレーションを行う。

(2) 試作時間の短縮

従来の解析装置を用いた試作時間と、新規導入した解析装置を用いた試作時間の比較を行った。1日の業務時間は8時間なので、これまで業務時間で24時間、業務日数で3日かかっていた試作時間は、新装置では8時間、業務日数で1日に短縮できている事が確認できた。

表②-3-1 試作時間調査

項目	単位(h)	
	従来方法	新装置
解析用図面作成	2.5	2.5
形状入力	3	0.3
解析条件設定	3	0.5
PCによる解析時間	12	1.2
結果の評価	1.5	1.5
鑄造方案図作成	2	2
合計時間	24	8

【まとめ】

数値解析は(i)造型方法を従来の三段階鑄型造型からワンサンド鑄型造型への切り替え、(ii)PC性能のアップ、(iii)ソフトの最新機能によって従来と比較し、試作時間が1/3となった。また、再現性のレベルが向上した。

(3) 鑄型強度と寸法精度

a) 鑄型強度について、これまでの三段階鑄型造型(CO₂ガス硬化型)と自硬性鑄型を比較した。

測定はφ50×L50mmのTP材を作成し、圧縮強度の測定で比較した。鑄型強度は従来方法に比べ、約4倍の強度となっており、ワンサンド鑄型(自硬性鑄型)は十分な強度が得られた。

b) 寸法精度について解析上の重量及び、実製品の重量比較を行った。従来造型品は類似の10Cr鋼であり、ほぼ同一比重であった。

表②-3-2 製品重量比較

単位 (kg)

	従来造型品	本製品	解析重量
製品重量	2,480	2,380	2,370

この結果から、解析装置での重量と比較し、自硬性ワンサンド鋳型造型では、ほとんど差が無い。

- c) 重量での比較のみではなく、寸法精度確認の為の製品の肉厚測定を行なった。

表②-3-3 寸法測定比較

単位 (mm)

	従来造型品	本製品	木型寸法
図示寸法89.5	93~95	91~92	91
図示寸法55.0	58~60	56~57	56

【まとめ】

鋳型強度が約4倍になった為、これまでに見られた鋳型の張られ(鋳込まれた溶湯に鋳型が押し出され膨らんだ状態)が見られず、寸法精度のよい鋳型製作が出来た。

第3章 全体総括

3-1 全体総括

地球温暖化防止のため、主原因である二酸化炭素の排出量の削減を行っていくために、発電プラント機器メーカーはエネルギー効率の向上を図っている。そのために、発電用蒸気タービンにおける高温高圧雰囲気での剛性と靱性に優れた鋳物材質の開発と、その鋳造方案及び、熱処理技術を含んだ鋳造技術の開発をする必要がある。

この目標を達成するためには、タービン入口の蒸気条件として、蒸気温度 866K、蒸気圧 24MPa から蒸気温度 923K、蒸気圧 35MPa の条件を満足するものを開発しなければならない。

本開発では使用する蒸気温度条件に対してクリープ強度を、試験温度 1073K、応力 80MPa 破断時間 1000 時間を満たす材質が必要とされている。

このような観点から本開発では、火力発電プラント用耐熱鋳鋼の対象製品として、プラント部品内では最も高温・高圧になる「ノズルボックス」を鋳造して、①最適結晶粒の探索 ②クリープ特性の向上研究 ③最適熱処理条件の確立④アルミナ系人工砂による鋳型成型技術の開発 ⑤デルタフェライト析出防止の研究 ⑥最適鋳造方案の確立を研究開発した。

研究開発成果として

- (1) 剛性、靱性に資する鋳造技術の開発への対応においては、30kg 高周波誘導電気炉でテスト溶解をし、熱処理条件と熱処理組織の関係から、クリープ特性を得るための最適熱処理条件を設定し、クリープ特性と結晶粒径の関係を求めたのち、10ton エルーフ式アーク炉で実機（製品重量 2480kg の火力発電用機器ノズルボックス）の試験鋳造を行った。クリープ強度試験の結果から、本研究のテーマである 1073K・80MPa では目標値に到達していないものの、それぞれ川下企業（発電プラント機器メーカー）の要求する特性をクリアできたことから、一定の成果を上げたものと考えられる。

引き続き結晶粒径や結晶粒界強化や熱処理条件について検討する必要がある。

- (2) 品質の確保、向上及びコスト低減に資する鋳造技術への対応においては、アルミナ系人工砂を使用したワンサンドシステム鋳造法の鋳型物性値を測定し、そのデータを数値解析ソフトにインプットして鋳造欠陥の予測精度を上げ、クリープ強度と靱性を低下させるデルタフェライトの発生を抑制するための諸策（化学成分の調整、鋳型への冷し金の適用、熱処理におけるオーステナイト化温度の適正化等）をし、実機の試験鋳造において、品質の確保（鋳造欠陥の抑制）、デルタフェライトの析出防止、試作時間の短縮、鋳型強度・寸法精度の向上はそれぞれ

クリアできた。

本研究開発後の課題として、本研究開発では具体的な実機で試作を行ったが、クリープ強度試験の結果は、当初計画したものを満足できる結果とはならなかったが、当社にとって重要な取引先である川下企業の国内発電プラント機器メーカーからは評価を得ており、同材質による蒸気タービン用部品の試作製作依頼が商業ベースで実現している。

更に同タービンにおける他部品への展開や、国内の発電プラント機器メーカーである川下企業各社への事業展開が期待できるものと考えている。

3-2 事業終了後の方針

本研究開発において、

- ①-1 最適結晶粒の探索(結晶粒微細化)
- ①-2 クリープ特性の向上
- ①-3 実部品を用いた最適熱処理条件の確立
- ②-1 アルミナ系人工砂による鋳型造型技術
- ②-2 デルタフェライト析出防止
- ②-3 最適鋳造方案の確立の研究

上記の研究開発についてそれぞれ成果が得られた。

但し、①-2 クリープ特性の向上については、本研究開発の目標である数値はクリアしなかった。今後、継続して研究を進めていく。

本試作品は、他の製品・部品との接合溶接があり、鍛造品などとの異材溶接がある為、今後は、異材との溶接施工方法の確立を進めていく必要がある。

川下企業である発電プラント機器メーカーからは、具体的に今回の開発製品である成分範囲の製品の注文を戴いている。それに伴い、本研究開発用に設置した発光分光分析装置、熱処理解析装置を活用し、解析精度を上げ、最適結晶粒の微細化、及び最適熱処理条件を模索し、より健全性の高い製品を作り上げていかなければならないと考えている。