平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「シミュレーションを用いた制御システムによる 自溶合金再溶融プロセスの開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 3月

- 委託者 関東経済産業局
- 委託先 株式会社キャンパスクリエイト

目	次
н	- 25

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 - 2	研究体制		2
1 - 3	成果概要		4
1 - 4	当該研究開発の連絡窓口		5
第2章	本論		
2 - 1	高周波誘導加熱での均一皮膜形成条件の数値化		6
2 - 2	シミュレーション利用技術の確立		9
2 - 3	シミュレーションを用いた最適生産条件算出方法の)検証 ・・・・・・・・	1 5
2 - 4	シミュレーションを用いた高周波誘導加熱温度制御	■システムの開発・・・・	1 7
第3章	全体総括		
3 - 1	複数年の研究開発成果		2 1
3 - 2	研究開発後の課題・事業化展開		23
3 - 2	その他特記事項		23
第4章	プロジェクトの運営管理		
プロジ	ェクトの運営管理		24

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

焼却炉や火力発電所のボイラに用いられる伝熱 管などには、耐食性、耐摩耗性を向上させるために、 表面にニッケル基自溶合金が溶射されている。ニッ ケル基自溶合金は、ニッケル、クロム、ホウ素、ケ イ素を基本成分とする合金である。自溶合金は溶射 後に再溶融(フュージング処理)を施すことにより、 皮膜組織が均一になり皮膜中の気孔が減少し、さら に溶射粒子間の結合と基材との密着強さが向上す ることで良好な耐食性、耐摩耗性が得られる。

現在、この再溶融プロセスは、ガスバーナー等の ガストーチ炎を用いて手動で行われているため、生 産性の向上および品質の再現性が課題となっている。

一部では、加熱効率の良い高周波誘導加熱に置き 換え生産性の向上を図っている。しかし、高周波発 振機の出力や周波数、加熱コイル形状などの条件に より発生する熱量が異なるため、運用する際は、そ れらの条件をその都度探す必要がある。それゆえ、 多品種少量生産の再溶融プロセスではあまり普及し ていないのが現状である。

本研究開発では、従来ガストーチ炎にて行ってい た加熱を加熱効率の良い高周波誘導加熱に置き換 えることで生産性の向上を図る。また、高周波誘導 加熱の制御応答性の良さを利用し、シミュレーショ



図 1-1-1 トーチによる再溶融作業



図 1-1-2 高周波誘導加熱による 再溶融作業

ンや計測センサーを用いた自動制御と組み合わせることで、作業者のスキルに影響されずに、 品質の再現性の向上を図る。そして、これらの研究開発で得られた技術を搭載した高周波フ ュージング装置を市場に投入することが目標である。



図 1-1-3 従来技術と新技術の比較

- 1-2 研究体制
- 1-2-1 研究組織及び管理体制
 - 1)研究組織(全体)



2) 管理体制

事業管理機関
[株式会社キャンパスクリエイト]



②再委託先

[日本サーモニクス株式会社]



[学校法人青山学院大学]



1-2-2 管理員及び研究員

【事業管理機関】株式会社キャンパスクリエイト

(管理員)

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
堺 奈都	技術移転部 産学官連携コーディネータ	5
伊藤 正昭	技術移転部 産学官連携コーディネータ	5

【再委託先】

(研究員)

日本サーモニクス株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
長田 智司	開発グループ グループ長	1, 2, 3, 4
彦坂 憲和	開発グループ	1, 2, 3, 4
鈴木 貫太	開発グループ	1, 2, 3, 4
狐崎 晶雄	開発グループ	2, 3, 4
学校注意主要问题。		

学校法人青山学院

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
水澤 純一	理工学部情報テクノロジー学科 教授	② 平成 22~23 年度
狐崎 直文	理工学部情報テクノロジー学科 助教	② 平成 24 年度

<実施内容>

高周波誘導加熱での均一皮膜形成条件の数値化

②シミュレーション利用技術の確立

③シミュレーションを用いた最適生産条件算出方法の検証

④シミュレーションを用いた高周波誘導加熱温度制御システムの開発

⑤プロジェクトの管理・運営

1-2-3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

株式会社キャンパスクリエイト

(経理担当者)	総務部	川﨑	和美
(業務管理者)	代表取締役	安田	耕平

(再委託先)

日本サーモニクス核	朱式会社					
(経理担当者)	総務部	宮田	智子			
(業務管理者)	代表取締役会長	宮崎	英典			
学校法人青山学院						
(経理担当者)	相模原事務局研究	支援ユニ	ニット	課長	小池	肇
(業務管理者)	理工学部情報テク	ノロジー	-学科	助教	狐崎	直文

- 1-3 成果概要
- 1. 高周波誘導加熱での均一皮膜形成条件の数値化

従来のトーチ炎加熱では、均一な皮膜を形成するために必要な再溶融温度までの温度上昇 率や再溶融温度域での保持時間などの制御は作業者の勘と経験により行なわれてきた。そこ で、新たに定義した「温度時間」というパラメータで数値化し、高周波誘導加熱で再溶融す る条件を見つけた。これにより、手作業で行われているフュージング工程を、高周波誘導加 熱を利用した加熱装置に置き換えることができ、生産性の向上と作業環境の大幅な改善の可 能性が見出せた。

2. シミュレーション利用技術の確立

誘導加熱シミュレーションにおけるメッシュサイズや時間ステップ、空気領域などのシミ ュレーション計算設定用パラメータの算出方法を確立した。

また、シミュレーション計算値に含まれる誤差の発生要因を分析し、材料パラメータに吸 収させる手法を考案した。これにより、加熱コイルの設計や試作、試行の段階が大幅に合理 化、効率化できた。

さらに、市販されている電磁界・熱解析シミュレーションソフトは入力パラメータが多く 使いこなすのに高度な知識が必要となる。その弱点を克服するためのアプリケーションソフ トを開発した。この支援ソフトを使用することで、実データに近い計算値を高速かつ簡易的 に得ることが可能となった。

3. シミュレーションを用いた最適生産条件算出方法の検証

高周波誘導加熱での均一皮膜形成条件にてフュージングを行った自溶合金皮膜の妥当性を 組織観察や硬さ試験、各種分析機器による分析、耐摩耗試験などで検証した。その結 果、高周波誘導加熱にてフュージングを行った自溶合金皮膜は、実績のあるトーチ炎フュー ジングした自溶合金皮膜と同等であることが分かった。このことからトーチ炎加熱から、高 周波誘導加熱への置き換えは可能であり、また、「温度時間」パラメータを用いた最適生産 条件は、高周波フュージング条件として有効であることが分かった。 4. シミュレーションを用いた高周波誘導加熱温度制御システムの開発

開発した制御システムを搭載した高周波フュージング装置は自溶合金再溶融プロセスの 自働化を可能とし、従来と同等以上の品質を維持しながら従来比3倍以上の生産性を実現で きた。

さらに、高周波誘導加熱の制御応答性の良さを利用し、シミュレーションや計測センサー を用いた自動制御と組み合わせることで、作業者のスキルに影響されずに、品質の再現性を 向上させることができた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口
株式会社キャンパスクリエイト
〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘1-5-1 電気通信大学産学官連携センター
T E L: 042-490-5734 F A X: 042-490-5727
担 当: 堺 奈都 E-mail: sakai@campuscreate.com

第2章 本論

本支援事業は平成22年度から活動しており、全体の計画書の研究項目に従い記述する。

2-1 高周波誘導加熱での均一皮膜形成条件の数値化

従来技術では、均一な皮膜を形成するために必要な再溶融温度までの温度上昇率や再溶融 温度域での保持時間などの制御は作業者の勘と経験により行なわれてきた。自溶合金再溶融 工程の生産性向上及び皮膜の品質の再現性の向上を図るためにはそれらの経験値を数値化 し、高周波誘導加熱の加熱条件として整備する必要がある。

そこで本研究では、加熱コイル形状や高周波周波数、母材材質、自溶合金皮膜厚さ等の条件が温度勾配と保持時間の制御にどのような影響を及ぼすかを把握し、高周波誘導加熱での 自溶合金再溶融条件(フュージング条件)を数値化した。

○試験方法

試験片は、ボイラチューブの代表的な材料である、STBA22(ボイラ・熱交換器用合金鋼管)、 SUS304(配管用ステンレス鋼管)材を用いた。それらの試験片の表面にフレーム溶射にて自溶 合金溶射皮膜を施工した。試験に用いた自溶合金は、米国コルモノイ社製 COLMONOY No4 とした。試験片寸法及び自溶合金溶射材の成分表を図 2-1-1、表 2-1-1 に示す。



主おお好	溶射皮膜厚さ	溶射部外径
巫竹竹貝	t	φ Β
CTD 1 99	0.5mm	49.6mm 以上
SIDAZZ	1.5mm	51.6mm 以上
SUSSO4	0. 5mm	49.6mm 以上
303304	1.5mm	51.6mm 以上

図 2-1-1 フュージング試験 試験片寸法及び材質

表 2-1-1 使用した溶射材成分表

材料	化学成分 (mass %)						
コルエノイNoA	Cr	С	Ni	Fe	Mo	В	Si
コルモノイ No.4	10.0	0.3	Bal.	3.0	0.6	2.0	3.5

高周波発振機は日本サーモニクス製 NT4100 とし、基本仕様を表 2-1-2 に示す。 高周波周波数はボイラチューブ管の大きさより 10kHz とした。加熱コイルはコイル内径 70mmの10 ターンコイルとした。使用した加熱コイルの写真を図 2-1-2 に示す。

· 我看了看 的的风口风风上闲	表 2-1-2	高周波発振機仕様
-----------------	---------	----------

型式	NT 4 1 0 0
メーカ	日本サーモニクス(株)
入力電源	3ϕ 50/60Hz 400/440V 120KVA
公称出力	100kw
出力調整範囲	5%~100%(加熱負荷による)
変換部	ブリッジ接続
出力調整回路	自動電圧調整回路
発振回路	並列共振型自制式発振方式
サイズ	$700(W) \times 735(D) \times 2080(H)$



図 2-1-2 加熱コイル

条件を決定するために以下の3試験を実施した。各試験の温度グラフイメージを図2-1-3 に示す。なお、温度測定はK種熱電対及び赤外線放射温度計を用いた。

 ①溶融温度試験:到達温度(再溶融温度)の違いが、再溶融皮膜の機械的性質および生成 組織に及ぼす影響の調査

②昇温速度試験:ワークを加熱する速度(昇温速度)の違いが、再溶融皮膜の機械的性質 および生成組織に及ぼす影響の調査

③保持時間試験:再溶融温度を保持する時間(保持時間)の違いが、再溶融皮膜の機械的 性質および生成組織に及ぼす影響の調査



図 2-1-3 フュージング条件決定試験イメージ

各試験条件で高周波フュージングを行ったサンプルを切断し研磨・琢磨工程を経たのち、 以下の5項目の測定を行った。これらの測定結果を従来技術であるトーチ炎加熱によるフュ ージングで製作したサンプルと比較し高周波フュージング条件を決定した。 ①外観検査:目視にてひび割れや加熱ムラが無いか確認する ②外径測定:フュージング前後で外径寸法がどのように変化したか確認する ③組織観察:自溶合金溶射皮膜組織が再溶融し合金組織となっているか確認する ④硬さ測定:ビッカース硬さ試験(JIS Z 2244)にて皮膜硬度を測定する ⑤空孔率測定:再溶融後の組織内に空孔がどのくらい存在するか測定する。 ○試験結果

試験風景を図 2-1-4 に、各試験結果の一例を図 2-1-5 ~図 2-1-7 に示す。再溶融温度が高くなるにしたがい 積層状態であった自溶合金溶射金属が活発化するとと もに、冷却時間が長くなることで Ni 主体の粒子部と呼 ぶ部分の粒径が大きくなることが分かった。

また、昇温速度を遅くした場合や、保持時間を長く した場合にも同様に粒径が大きくなった。一方、基材 材質や溶射皮膜厚を変えた各試験結果に大差はなく条 件の違いを見出せなかった。



図 2-1-4 高周波フュージング風景



図 2-1-5 IH 加熱(950℃)

図 2-1-6 IH 加熱(1050℃)

図 2-1-7 トーチ炎加熱

○まとめ

試験結果から、再溶融時に皮膜へ与える熱が重要なパラメータとなることが分かった。そこで、各試験の温度カーブから図 2-1-8 で示す斜線部を「温度時間」と定義し結果を整理した。すると「温度時間」によってトーチ炎加熱と同等な再溶融皮膜を形成するための条件を表すことができ、再溶融条件の数値化が可能となった。

これにより、手作業で行われているフュージング工程が高周波誘導加熱利用した加熱装置 に置き換えられることが判明し、生産性の向上と作業環境の大幅な改善の可能性が見出せた。



図 2-1-8 高周波誘導加熱フュージング条件定義図

2-2 シミュレーション利用技術の確立 現在市販されている高周波誘導加熱のシミ ュレーションソフトを単純に利用すると、シ ミュレーションにより算出された温度デー タと、その対応部位を実測したデータとの間 では、10%以上(100℃以上)の差が生じるこ とが分かっている。

このことから、シミュレーションで得られ たデータをそのまま用いて高周波誘導加熱 プロセスの温度制御を実施することは難し い。

また、シミュレーション計算では対象の空 間範囲を規定しそれを細かく分割する。その ため、シミュレーション空間を広げ、空間の 分割数を増やすとシミュレーションは正確 になるが、計算時間が増大するため、一回の



図 2-2-1 シミュレーション利用技術 の確立背景

シミュレーションで数日を要することもしばしば発生する。

実際の製造プロセスにシミュレーションを利用して生産効率を向上させるには、計算の精 度と計算時間の間で、最適なバランスを得る必要がある。

そこで本研究では、さまざまな条件下で測定した温度データからシミュレーションの計算 条件を決定し、その条件で得られたシミュレーションの計算結果を製造プロセスに適用する 技術を確立する。

○シミュレーション環境

高周波誘導加熱のシミュレーションは、3次元モデルを用いて電磁界解析と熱解析を連成 させる必要がある。(注1)

そこで、3 次元モデルの作成は解析ソフトと連携が可能な SolidWorks(ソリッドワークス 社製)を用い、電磁界・熱解析は実績があり操作性に優れた JMAG (JSOL 株式会社製)を 用いた。また、これらを動作させるワークステーションは HP 社製の Z800 を採用した。表 2・2・1 にワークステーションの仕様を示す。

(注1)

電磁界解析は、加熱コイルに流した電流が発生させた電磁場を計算し、ワーク(被加熱物)内に発生する渦 電流からジュール熱を求める。一方、熱解析は、電磁界解析で求めたジュール熱が物体内部及び外部に伝播 する量を計算する。ここでいう連成とは、この双方の計算を単位時間(時間ステップ)ごとに繰返し計算さ せていくことである。

メーカ	日本ヒューレット・パッカード株式会社
名称	HP Z800 Workstation
OS	Windows XP Professional SP2 64bit
プロセッサー	インテル Xeon W5590 ×2
CPU コア	クアッドコア
メモリ	32GB(4GB×8)デュアルプロセッサ
HDD	300GB SAS 3Gb/s

表 2-2-1 ワークステーション仕様

(1) シミュレーション計算用設定条件パラメータの算出手法

熱伝導率・透磁率等の温度依存等の材料特性値やメッシュサイズ、空間領域の大きさ等の シミュレーション動作条件といった設定条件により、算出される解は大きく異なる。

本研究では、シミュレーション計算に要する時間を考慮しつつ、実験値と計算値が同じ傾向の温度分布となる設定条件パラメータの算出手法を確立した。

ここでは、計算設定条件パラメータのなかでも重要なパラメータである、メッシュサイズ、 時間ステップ、空気領域の大きさについて検討した結果を示す。

この研究開発に使用したモデルは、外径 48.6mm、肉厚 5.1mm のパイプの周囲に内径 70mm の加熱用のコイルを設けたモデルである。

軸対称のモデルの場合、全体の一部分をモデルとして計算することが可能で、メッシュの 数を節約して全体を計算した場合とまったく同じ結果を得ることが出来る。これは、計算時 間の短縮化に必要な手法である。解析に用いたモデルを図 2-2-2 に示す。



図 2-2-2 シミュレーションモデル図



図 2-2-3 解析結果一例

まず始めに、パイプのメッシュのサイズと表皮のメッシュサイズとを変えて、シミュレーション計算結果がどのように変化するかを確かめた。パイプのメッシュサイズを1mm~2mm、パイプの表皮メッシュサイズを0.03mm~0.25mmの範囲で設定した。どの組み合わせでも計算結果に大きな差はないので、計算時間の短い計算方法を採用しても問題がないことが分かった。

次に、時間ステップについて調査を行った。時間ステップとは解析対象に生じる時間的変 化において、どのタイミングでの解析を行うかを決めるもので、ステップ数が多いほど解析 時間は長くなる。また、ステップ数とステップの決め方によって、どの時間からどの時間ま での変化を解析するかが決まる。計算結果を見ると、時間ステップ 0.1 秒~0.5 秒では、ほ とんど同じ結果となっているが、時間ステップ1秒では、キュリー点に達するまでの時間が 3秒ほども遅れることが分かる。したがって、時間ステップは 0.5 秒以下に設定して計算す ることが必要であることが判明した。

シミュレーション計算に使用するソフトウエア「JMAG」では、電磁界解析のために、 コイルやワークの外側に空気領域を設定して、有限要素法によって電磁界を求めている。空 気領域の境界線の上では磁力線が境界線と並行となるという自然とは異なる仮定を与えて 解析しているので、境界が近いと正確な電磁界とならない。そこで、空気領域の大きさを変 えて一定電圧の電源につないだ同一のコイルに流れる電流値を比較することで、空気領域の 大きさの計算への影響を調べた。その結果、空気領域の大きさは、モデルサイズの7倍以上 が必要であることが分かった。 また、電磁気学の理論式から手計算にて導き出した解と、シミュレーションソフトにて計算した値、さらには実験値とを比較する事により、計算用設定条件パラメータを多方面から 調査した。

その結果、計算に用いる材料特性値と実際の材料の特性値とでは必ず誤差がある。さらに、 低磁界領域と高磁界領域にて渦電流による磁化特性の誤差や、治具等の周辺物体の影響によ り誤差は増大される。そのほかにも誤差の発生する要因は多く存在することが分かった。こ れらの影響を一つ一つ物理的に測定し把握することは不可能であり、計算結果は常に誤差を 含んだものであるという認識を持つ必要がある。さらに、計算過程を理解しどのパラメータ が計算結果にどのように影響するのかを意識しながら解析を進めていくことが望ましいと の結論を得た。

(2)シミュレーション材料特性パラメータ設定手法 今回使用するシミュレーションソフトは、加熱 コイル、被加熱体形状及び計算用設定条件を決定 し、加熱コイルに流れる電流を代入すれば、温度 分布が算出される。しかし、材料特性のばらつき や発振回路特性等により、実験値とシミュレーシ ョン値との間には必ず誤差が発生する。

そこで本研究では、その誤差発生要因を把握し、 材料パラメータを用いて実験値と解析値との誤 差を少なくする手法の検討を行った。

まず、加熱コイルの電流値、電圧値、周波数の 計測を行う装置を開発した(図 2・2・4 参照)。次 に、数値目標値を定めた。今回使用した自溶合金 は、コルモノイ No4 で溶融温度(共晶点)が 1052℃であり、フュージング可能温度は990℃ ~1160℃である。また、実験データより温度測 定誤差は2%存在することが分かっている。そこ で、フュージング目標温度を1050℃とし、誤差 をすべて含めてもフュージング可能温度域から 外れないようにするためには、実験値と解析値 との差を4%以内にする必要がある。その値を実 験値と解析値との差の数値目標値とした。

実際に測定した加熱コイル電流値及び磁化曲 線を代入し、JMAG にて電磁界解析と熱解析の双 方向連成解析を行った。その結果を図 2-2-5 に 示す。キュリー点(770℃)までの温度グラフの傾 きは実験値よりも小さく、キュリー点からの温 度グラフの傾きは実験値より大きくなったこと が分かった。



図 2-2-4 高周波電流測定装置



図 2-2-5 解析値結果と実験値の比較 (材料パラメータ設定前)

今回使用した高周波発振機は、電圧一定型並列インバータ方式を採用しており、この方式 では、電圧を一定にするために材料の磁性変化に応じて電流と周波数を変動させている。一 方解析では、電流値こそ実験値を用いているが、周波数は一定値のままで計算している。こ の誤差が温度変化率の差に影響したと考える。そこで、材料の磁性変化による周波数変化を 電気伝導率パラメータに吸収させる方法を考案した。

図 2-2-6 に計算で用いた電気伝導率を示す。Ver1 は今まで使用していた電気伝導率である。 図 2-2-7 は各電気伝導率を用いて計算した温度推移のグラフである。これより Ver.3 の電気 伝導率を用いた解析値が実験値に最も近いことが分かった。低温部での差に若干の改善余地 はあるが、目標温度の 1050℃付近での差の割合は 2.4%となり、目標値である 4%に収めるこ とができた。



図 2-2-6 計算に用いた電気伝導率

図 2-2-7 温度推移比較

なお、電圧一定型並列インバータ方式の高周波発振機を使用した誘導加熱シミュレーションを行う場合、STBA 材のような材料の磁性変化の大きな材料は発振周波数の変動が大きいため周波数変化分を考慮した材料パラメータを設定する必要がある。一方、SUS 材のように材料の磁性変化の小さな材料は、発振周波数の変動が少ないため、定周波数による計算でも 誤差の少ない結果となることが分かった。

(3) シミュレーション計算手順書の作成・アプリケーションソフトの作成

電磁界解析、熱解析シミュレーションソフトは汎用的なシミュレーションツールであり、 本開発のような高周波誘導加熱プロセスへ適用するには複雑で操作性に劣る。 そこで、上記(1),(2)の項目を反映した、使いやすいマニュアルを作成するとともに、 初心者でも簡便にシミュレーションを実施でき、計算結果を製造プロセスに容易に適用でき るようにする支援ツールソフトウエアを開発した。

○計算手順書の作成

シミュレーション利用技術の確立の総括として、シミュレーション計算設定用パラメータ の選択方法、シミュレーション計算値に含まれる誤差の発生要因などを記した計算手順書の 整備を行った。ここでは、手順の一例として溶射皮膜付モデルの解析方法を紹介する。

前項で紹介した計算設定用設定パラメータや材料特性パラメータを用いて溶射皮膜付モデ ルのシミュレーションを行うと、図 2-2-8 に示すように実験値と解析値とが大きく乖離して しまう。その原因は実際に加熱される部位と解析での加熱部位とに違いがあるからである。 実際の誘導加熱は溶射皮膜内での発熱は少なく、基材である鉄パイプの表皮が発熱し溶射皮 膜へと熱が流れる。しかし、解析では鉄パイプと溶射皮膜の境界面からの発熱を正しく計算 することができなかった。そこで、この問題を解決するために電磁解析と熱解析を別々のモ デルを用いる手順を確立した。

加熱コイルで発生した磁束分布からジュ ール熱を計算する電磁界解析では、溶射皮 膜が無いモデルを使用する。発生熱量をも とに熱伝導や熱伝達、輻射損出などを計算 する熱解析では、溶射皮膜を付けたモデル を使用する。このように電磁解析と熱解析 とを別個のモデルで連成解析を行うことで、 図 2-2-9 に示すような実験値に十分近い解 析結果を得ることができた。しかも、この 手法を用いれば、フュージング温度域で実 測値と解析値との誤差は 4%以内であった。 この計算手法を含め、シミュレーション 計算設定用パラメータの選択方法や計算値 に含まれる誤差の発生要因などを記した計 算手順書を完成した。この計算手順書を用 いることで、誘導加熱の電磁界・熱解析を 短時間で習得することができた。

○アプリケーションソフトの作成

市販されている電磁界・熱解析シミュレ ーションソフトは入力パラメータが多く使 いこなすのに高度な知識が必要となる。し かも、理論的な解析のみでは誤差が存在

してしまう。そこで、今まで実験で集め たデータから計算式を立て、高速かつ簡易的 で実データに近いアプリケーションソフト を作成した。



(別個モデルにて計算)

このアプリケーションソフトのコンセプトは以下の通りである。

・簡易的な実験データから傾向を読み取り予測することが可能であること。

・高速かつ簡易的で実データに近い結果となるシミュレーションソフトとすること。

これらのコンセプトを具体化することで、製品を生産するために最適なパラメータを事前 に高速かつ簡易的に予測することが可能となり、リスクの軽減や余分な時間の短縮に貢献で きる。

この支援ソフトを開発するにあたり、現在使用している JMAG による高精度シミュレーションのメリットとデメリットを調査した結果を表 2-2-2 に示す。

表 2-2-2	高精度シミ	ェレーショ	ンのメ	リ	ット	・デ	メリ	リッ	\mathbb{P}
---------	-------	-------	-----	---	----	----	----	----	--------------

メリット	デメリット
・理論上実験値にフィットさせることが可能	・膨大な解析時間が必要
・細かい点・時間の値が導出可能	・理論的な解析のみでは誤差が存在
・シミュレーションの有効範囲が広い	・入力に必要なパラメータが多い

アプリケーションソフトのフローを図 2-2-10 に示す。

静止状態の加熱データから、コイル中央の温度推移を近似式に変換する。次に、加熱コイル長手方向の加熱効率(加熱コイル長手方向にける温度分布)を求める。これらのデータは、 汎用性のある表計算ソフト(Excel)上に蓄積される。計算フォームに高周波発振機出力値 と移動速度を入力すれば、その値に応じた固定加熱計算式を抽出し、移動速度に応じて固定 加熱計算式を積算する。計算結果はグラフで出力され、最高温度や保持時間が視覚的に判断 することができる。図 2-2-11 に実際に作成した、アプリケーションソフトの画面を示す。



図 2-2-10 ソフトフロー図

作成したアプリケーションソフトで計算した値と、実際に実験で得られたデータとの比較 を行い、アプリケーションソフトの有用性の検証を行った。

その結果、計算値が実験値を 7.8℃~88.8℃の範囲で上回った。この理由は、計算データの基になる静止状態加熱と実際の移動加熱状態では、加熱コイル内の材料の磁性変化が異なっており、その影響が計算値と実験値との差として現れたものである。

このアプリケーションソフトを使用することで実データに近い計算値を高速かつ簡易的に 得ることができた。移動加熱実験前にこの支援ソフトで必要なコイル移動速度を算出すれば、 リスクの軽減や余分な実験時間を削減することができる。また、課題として加熱コイル内の 負荷状態への対応や、移動実験前に必要な加熱出力を予測するツールの開発があげられる。 今後、高周波フュージング装置を製品化するにあたり、シミュレーション有効範囲の広い 市販の電磁界・熱解析ソフトウエアと、静止加熱実験から傾向を読み取り予測を行う支援ソ フトウエアを組み合わせることで、双方の長所を活かすことができると考える。

図 2-2-11 アプリケーションソフト画面

2-3 シミュレーションを用いた最適生産条件算出方法の検証

短時間で均一な皮膜を形成するためには、母材材質・形状、溶射皮膜厚さ、製造プロセス を勘案して加熱コイル形状や高周波周波数などの加熱条件を組合せる必要がある。 ここでは、前項で求めた均一皮膜形成条件をもとに、確立されたシミュレーション技術を 用いて、製造プロセスに応じた最適条件の算出方法を確立し、その妥当性を検証する。

(1) 高周波誘導加熱によって再溶融した自溶合金組織の評価

最適生産条件にて再溶融処理を施した自 溶合金組織について、ガストーチ炎を用い て再溶融を施した組織との違い(析出組織、 機械的性質等)を比較評価した。

評価に用いた試料は、STPT410 (φ48.6× 5.1t)の鋼管に自溶合金をフレーム溶射で 1.2mmの膜圧に製膜し、その後高周波誘導 加熱にてフュージングしたものを用いた。 その試料について、再溶融組織観察、マイ クロビッカース硬さ試験、気孔率測定、EDX 分析(線分析:エネルギー分散型X線分光 法)、多目的X線回析、EPMA分析(面分析)を行っ た。それらの結果を下図に示す。







図 2-3-4 多目的 X 線回析結果



coating substrate

図 2-3-3 EDX 分析結果

diffusion layer





これらの結果から、組織形態、硬さ、気孔率、Ni3Bの析出等の評価から、高周波誘導加熱 による再溶融組織は、ガストーチ炎と同等の性能であることが分かった。 (2) 耐摩耗試験

「温度時間」という新たなパラメータを定義し、 高周波誘導加熱による自溶合金再溶融プロセスの最 適生産条件を算出した。その条件で生成した高周波 加熱による自溶合金再溶融組織とトーチ炎加熱で生 成した組織が同等であることが明らかになった。

そこでさらに耐摩耗性に着目し最適生産条件の妥 当性検証を行った。ボイラチューブの表面に溶射さ れる自溶合金皮膜の主目的は、燃焼ガス中に飛び交 う炭化物によってボイラチューブの摩耗を防ぐこと である。そのため耐摩耗性能は比較項目として重要 な意味を持つ。

図 2-3-6 に今回使用した耐摩耗装置を示す。

試験は圧縮空気の負圧でアルミナ粉を吸い上げ試 験片に衝突させる。衝突距離は20mmで衝突角度60°

粒子衝突速度は 60m/s である。粉末濃度 4.28g/0 で 10 秒間連続して試験片に衝突させたのち、試験片を取り出し、接触式測定子を用いた深 さ測定機にセットし皮膜表面の凹凸を測定する。

測定された表面のへこみ量(摩耗量)で耐摩耗性を比較した。



図 2-3-7 摩耗量比較グラフ



図 2-3-6 耐摩耗試験装置概略図

試験片は、10 mm×40mm×6mmの 大きさで、高温下での使用を想定 し、室温の他、電気炉で 200℃、 400℃、550℃に加熱したものを用 いた。

各試験片温度における、トーチ フュージングと高周波フュージ ングとの摩耗量の測定結果を図 2-3-7 に示す。

この結果は、5個のサンプルの 摩耗量を平均したものである。

摩耗量に大きな違いが無く、耐 摩耗試験後の試料を観察した結 果も摩耗痕大きさに違いはない。、 また、どちらかに著しい剥離や亀 裂が生じている箇所もなかった。 これらの試験結果より、高周波 誘導加熱にてフュージングを行

った自溶合金皮膜は、実績のあるトーチ炎フュージングした皮膜と同等の耐摩耗性があ るといえる。皮膜硬度や空孔率、皮膜組織だけでなく、実運用を意識した機械的特性で も同等であるので、従来技術であるトーチ炎フュージングから、新技術である高周波誘 導加熱への置き換えは可能である。

また、「温度時間」パラメータを用いた最適生産条件は、高周波フュージング条件とし て有効であることが分かった。

2-4 シミュレーションを用いた高周波誘導加熱温度制御システムの開発

外気温や、構造物への放熱、輻射等の外乱により、作業の都度、到達温度、温度分布に誤 差が生じる。

そこで加熱コイルの入り口温度と出口温度の2つの値で代表した所望の温度分布からの 誤差を少なくするために、シミュレーション計算の結果得られる目標とすべき温度と実際の 温度との差を修正量としたフィードフォワード制御およびフィードバック制御を開発し、温 度分布を自動的に再現した。

(1) 制御仕様の決定

高周波フュージング装置のフローを下図 2-4-1 に示す。

フュージングを行う製品の形状や材質等の要求仕様をもとに、電磁界・熱解析シミュレー ションを実行する。その結果は、高周波誘導加熱での均一皮膜形成条件の数値化で得られた 加熱条件で判断する。

電磁界・熱解析シミュレーション計算では、移動速度データ・温度データ・加熱コイル電 流値データの値が出力される。速度データはPLCを介してサーボモータドライバへ送られる。 温度データは、温度設定数を増設やデータ処理速度を高めるなど高周波誘導加熱向けに開発 した温度信号処理装置へ送る。また、電流データは、独自開発の制御回路を経て高周波発振 機へ送る。

なお、実際のフュージングでは、解析誤差や外気等の外乱、材料物性の違いなどから目標 値と差が生じるため、赤外線放射温度計にて測温するとともに、溶射皮膜の表面状態を検出 するシステムを開発した。

これらのシステムにより、より高品質なフュージング製品を生み出すことが可能となった。 また、フュージングデータはアプリケーションソフトへ送られ、類似形状であれば作業者 が現場で条件の確認ができるシステムである。



図 2-4-1 高周波フュージングフロー図

次項以降、温度誤差を解消するためのコイル追従機能の開発、電流誤差を解消するための 電流制御回路の開発、再溶融状態を検出するシステムの開発について報告する。

(2) コイル追従機能の開発

加熱効率を安定させるためには、被加 熱体と加熱コイルとの位置関係を一定 にする必要がある。

被加熱体であるボイラチューブは、長 尺なので、保持の状態により撓み(変形) が生じてしまう。このような長尺ものを 加熱する場合、前後の工程に歪取りの機 構を備えるのが一般的であるが、ボイラ チューブは表面には溶射皮膜があるた め、チューブ自体の歪をとることは難し い。

そこで、ボイラチューブの形状に合わ せて加熱コイルを移動させる方式を開 発した。加熱コイルの中心軸延長上に水 平方向と垂直方向の2か所にレーザー変



図 2-4-2 レーザー変位計取付部

位計を設置し、(図 2-4-2 参照)水平方向と垂直方向の距離を常時測定する。測定された撓 み量のデータは 0.33ms ごとに PLC に取り込まれ、回転数に応じて測定値を平均化し、その 値と基準値との差を算出する。基準値との差は、そのままコイルの変位量としてコイルを水 平方向、垂直方向に動かすサーボモータドライバへ指令値として送られる。

コイル追従機能の有無による、ワークとコイルとの距離の違いを図 2-4-3 に示す。

この結果、コイル追従機能が効果的に機能して、ボイラチューブと加熱コイルとのギャッ プが一定に保たれ、ワークとコイルとの位置関係が変化せず、常に安定した加熱が可能とな った。



図 2-4-3 ワークとコイルとの距離 (左側:水平方向変位量 右側:垂直方向変位量)

(2) 電流制御回路の開発

従来の高周波発振機は、電圧一定のもと負荷変動(磁気変態)に対して電流値と周波数を 変更することで制御している。しかし、シミュレーションソフトでは、それら高周波発振機 の制御を考慮することができず、コイル電流一定で計算するしかできない。そこで、高周波 発振をシミュレーションソフト計算と同様に、加熱コイルに流れる電流を一定とする制御方 式を開発した。

電源制御回路は、所望のコイル電流値に対応する電圧値のVsと、電流の測定値Vpとをも とにして制御用の電圧Vm(あるいは制御回路の出力なのでVout)を発生する「演算回路」 が含まれている。(Vs:設定値、Vp:測定値、Vm:制御値=制御信号の値 これらは自動制 御の技術用語)「演算回路」での演算は、下式(1)である。

 $Vm = Vs + k \times (Vs - Vp) \quad \dots \quad (1)$

k は制御係数(フィードバック係数)で、Vp が設定値 Vs より大きい時には、Vp と Vs の差のk 倍だけ、Vs より低い電圧を Vm として出して、電源装置に「今よりこれだけ低いパワーで電流を供給するように」という指令を出す。また、(1)式のままでは、(Vs-Vp)が負の値になることを考えなければならない。なぜなら回路は 0V 以上のプラス電圧しか扱わないからである。(演算増幅器を $\pm \chi V$ の正負両側の電圧につないで使う場合には負の電圧も扱えるが、今回は正の電圧しか使わない回路とした。)そこで、(1)式を分解して、

$V1 = (1+k) \times Vs$	$\cdots(2)$
$V2=(1+k)\times Vp-Vp$	$\cdots(3)$
V3=V1-V2	
=Vs+k(Vs-Vp)	$\cdots(4)$

という演算を行うことにした。演算増幅器では、(1+k)倍の演算しかできないので、kVpを 作るために(3)式のような計算を行った。ここで、二つの演算での k を合わせるために、2 連バイオームの抵抗値を測定して、二つの可変抵抗の値を補正するために補正抵抗 1kΩを 直列に追加した。演算の途中で(1+k)Vpというような大きな電圧が発生するが、この電圧が 電源電圧 19Vを超えてしてしまうことが十分に考えられる。そうすると回路の演算動作は正 常に機能しなくなる。それを回避するため 1/11 の電圧分割回路を設けた。

開発した回路を実際に高周波発振機に接続して、制御した結果を図 2-4-4 に示す。この回路により、加熱コイルに流れる電流値を指令値通りに制御することができた。



図 2-4-4 電流制御回路検証結果 (左図:制御なし、右図:制御あり)

(3)再溶融状態を検出するシステムの開発 高周波誘導加熱による自溶合金再溶融 において、再溶融時の表面温度を赤外線放 射温度計で計測すると、図2-4-5の温度グ ラフとなる。

A部は、自溶合金を溶射した基材 (STBA22)の磁性が変化する点(キュリー 点)であり、B部は自溶合金が再溶融した 点である。自溶合金は再溶融する際に皮膜 表面が一瞬ガラス面のような光沢に覆わ れる特徴がある。放射率を一定値にセット した赤外線放射温度計で表面温度を測温 すると、表面性状の変化に伴い、測温デー タが乱れB部のような変曲点が生じる。そ こで、B部の変曲点を利用し、再溶融状態 を検出するシステムを開発した。



図 2-4-5 高周波フュージング温度グラフ

システムの概略図を図2-4-6に示す。

放射温度計で自溶合金の表面温度を測定し、その結果を温度測定装置へ送る。温度測定装置では測温データを単位時間当たりの温度変化率に換算し、温度変化率が設定値した値を下回ったときにアラームを出力する。PLCは、そのアラーム信号を受けて、モータや発振機等の出力を制御する。図2-4-7に温度測定装置で演算した結果のグラフを示す。

このシステムの運用により、自溶合金の再溶融状態を確実に把握することができ、安定的 な高周波フュージングが可能となった。現時点では、Ni基自溶合金の一部において本システ ムが有効であることを確認している。今後はNi基自溶合金やCo基自溶合金、WC含有自溶合金 についてもデータを収集し、システムの有効性の確認を進めたい。



図 2-4-6 制御機器概略図



図 2-4-7 時間当たり温度変化測定結果

3-1 複数年の研究開発成果

3年間の研究により、シミ ユレーションを用いた制御 システムを搭載した高周波 フュージング装置が完成し た。開発した装置の外観写真 を図 3-1-1 に示す。加工でき るワークの長さは 4,000mm である。また、レールを延長 することで伸長可能である。 発振機・トランス・加熱コイ ルを載せたトラバーサーが ワークに沿って移動する方 式を採用しており、これによ って省スペース化を実現し た。

開発した高周波フュージ ング装置の仕様を下表に示す。



図 3-1-1 高周波フュージング装置外観

高周波発振機部	型式	NT 4 1 0 0			
	メーカ	日本サーモニクス㈱			
	入力電源	3φ 50/60Hz 400/440V 120KVA			
	公称出力	100kw			
	サイズ	$700(W) \times 735(D) \times 2080(H)$			
	出力調整回路	自動電圧調整回路			
	発振回路	並列共振型自制式発振方式			
移動	型式	WMM-2			
	メーカ	星工業㈱			
	移動速度	Max 2000mmm/min			
	移動駆動方式	サーボモータ駆動			
装	ワーク回転速度	Max 200rpm			
置	回転駆動方式	インバータモータ駆動			
印	加熱コイル調整機構	上下方向:±10mm前後方向:±10mm			
	調整機構制御方式	レーザー変位計による追従制御			
	サイズ	$5000(W) \times 2000(D)$			
制御盤部	型式	SP-2			
	メーカ	システムページワン			
	制御回路	PLC を用いたラダー回路			
	ユーザインタフェイス	タッチパネル方式			
	サイズ	$800 (W) \times 300 (D) \times 800 (H)$			
対応ワークサイズ		外径; ϕ 34~60.5mm 長さ; 500~4,000mm			

表 3-1-1 高周波フュージング装置仕様

高周波フュージング装置は処理時間 を大幅に短縮できる高性能な装置であ る。

トーチ炎によるフュージングでは、 ワークの予熱からフュージングが完了 するまでの所要時間が560秒であった のに対して高周波フュージング装置で は、ワークが自己発熱するため加熱効 率が良く、フュージング完了までの所 要時間は220秒である(図3-1-2参照)。

これにより、フュージング処理時間 を約 60%短縮することが実証できた。

最後に、高周波フュージング装置の 品質の再現性について検証した結果を示す。



図 3-1-2 フュージング所要時間比較

従来技術であるトーチ炎加熱で処理した再溶融皮膜と、高周波フュージング装置で再溶融した自溶合金再溶融組織との硬度バラつき度合を比較して品質の再現性を検証した。

硬度のバラつき度合いを示したものを図 3-1-3 に示す。

再溶融組織の硬度のバラつきを高周波フュージング装置、トーチ炎両者の分布図で比較す ると、高周波フュージング装置の方が、バラツキが少なく、高周波誘導加熱の繰り返し温度 制御がトーチ炎加熱よりも優れていることが明らかとなった。



図 3-1-3 ワーク硬度のバラつき比較(左図:高周波誘導加熱、右図:トーチ炎加熱)

開発した装置は自溶合金再溶融プロセスの自働化を可能とした。

さらに、従来と同等以上の品質を維持しつつ従来比3倍以上の生産性を実現させた。

また、高周波誘導加熱の制御応答性の良さを利用し、シミュレーションや計測センサーを 用いた自動制御と組み合わせることで、作業者のスキルに影響されずに、品質の再現性を向 上させることができた。

本装置は、ボイラー用伝熱管のような長尺部材のフュージング処理をターゲットとしているが、高周波誘導加熱が他の加熱方式に比べエネルギー消費が少なく、運転の自由度(制御 応答性)や信頼性が高いことから、今回対象とした製品の加工以外にもガラス金型やロッカ

ーアーム等の自動車用部品、ポンプのインペラや圧延ロール等の産業用機械、航空機エンジン部材等への応用が期待できる。

また、シミュレーション利用技術については、シミュレーション計算設定用パラメータの 選択方法やシミュレーション計算値に含まれる誤差の発生要因などについて開発を行い計 算手順書を完成させることができた。

今回作成した計算手順書を用いることで、誘導加熱に用いられる電磁界・熱解析が短時間 で習得することが可能となり、解析技術者の裾野が広がり、今まで高周波誘導加熱で用いら れる加熱コイルの設計や加熱条件出しのために費やしていた試作、試行の段階を大幅に合理 化、効率化できる。

さらには、市販されている電磁界・熱解析シミュレーションソフトは入力パラメータが多 く使いこなすのに高度な知識が必要なので、その弱点を克服するために、アプリケーション ソフトを開発した。この支援ソフトは実データに近い計算値を高速かつ簡易的に得ることが でき、移動加熱実験前に必要なコイル移動速度を算出して、リスクの軽減や余分な実験時間 の削減が可能となっている。

本研究により、研究の目標である自溶合金再溶融プロセスの生産性および品質の再現性を向上させることができた。

また、当該研究成果は論文発表や特許出願を通じて、ものづくり基盤技術の確立・普及に 貢献することができた。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

(1) 技術課題

シミュレーション技術の向上

誘導加熱におけるシミュレーション技術はまだまだ発展途上である。ユーザーとソフト 提供元とが積極的に情報交換を行うことや大学等の研究機関における理論検証などを交え て発展させていく必要がある。

(2) 事業化展開

溶射加工業者へのヒアリングより加工現場での熟練者の減少が進行し、機械化へのニーズが高ま っていることを実感した。

今後は、本研究で明らかになった高周波フュージングの優位性を積極的な情報発信により市場に 浸透させ、技術の普及に努めること。さらに、ユーザーのニーズを深く汲み上げ製品の仕様に落 とし込む方策の検討と機能向上を図っていく所存である。

3-3 その他特記事項

・出願特許

「合金の再溶融状態検出方法」

(特願:2012-277384)

- ・論文発表
- 「高周波誘導加熱による自溶合金溶射皮膜の再溶融組織の評価」
- (溶射 第49巻 2012年10月 日本溶射学会)
- ・講演

「実験値と解析結果の比較検討」

(JMAG ユーザー会 誘導加熱セッション 2011 年 12 月 7 日 東京コンファレンスセンター品川)

株式会社キャンパスクリエイト

平成22年度から平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業、「シミュレーションを用いた制御 システムによる自溶合金再溶融プロセスの開発」において研究開発推進委員会を、下記の日程で開催し、 日本サーモニクス株式会社、青山学院大学、株式会社キャンパスクリエイトの三者で、協議しながら研 究開発を進めた。

<研究開発委員会及び特許発掘委員会の開催実績>

平成22年度研究開発委員会 ・第1回研究開発委員会 平成22年8月31日 開催場所:日本サーモニクス 株式会社 ・第2回研究開発委員会 平成22年10月26日 開催場所:日本サーモニクス 株式会社 ・第3回研究開発委員会 平成22年 12月21日 開催場所:日本サーモニクス株式会社 ・第4回研究開発委員会 平成23年2月9日 開催場所:日本サーモニクス 株式会社 平成23年度研究開発委員会 ・第1回研究開発委員会 平成23年4月26日 開催場所:日本サーモニクス 株式会社 ・第2回研究開発委員会 平成23年10月21日 開催場所:日本サーモニクス 株式会社 ・第3回研究開発委員会 平成24年2月21日 開催場所:日本サーモニクス 株式会社 平成24年度研究開発委員会

・第1回研究開発委員会 平成24年5月11日 開催場所:日本サーモニクス株式会社
・第2回研究開発委員会 平成24年10月5日 開催場所:日本サーモニクス株式会社
・第3回研究開発委員会 平成25年2月22日 開催場所:日本サーモニクス株式会社

以上