

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「廃棄物発電用ボイラー管の耐熱・耐食性を向上させる

摩擦熱を利用した溶接技術に関する研究開発」

研究開発成果等報告書

平成22年3月

委託者 経済産業省 九州経済産業局

委託先 財団法人 北九州産業学術推進機構

－ 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	1
1-2 研究体制(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	2
1-3 成果概要	6
1-4 当該プロジェクト連絡窓口	6
第 2 章 ボイラー管への摩擦肉盛条件の研究	
2-1 摩擦肉盛条件の均一化	7
2-2 長尺肉盛	10
2-3 小径ボイラー管への摩擦肉盛試験	10
2-4 結論および今後の課題	11
第 3 章 摩擦肉盛部特性評価	
3-1 高温腐食試験(実験室レベル)	11
3-2 高温腐食試験(実炉テスト)	18
3-3 結論及び今後の課題	21
第 4 章 摩擦肉盛した肉盛管の品質評価	
4-1 肉盛厚さの管理	21
4-2 ボイラー管曲げ試験	22
4-3 結論および今後の課題	31
第 5 章 全体総括	
5-1 H19 年度研究開発成果	32
5-2 H20 年度研究開発成果	33
5-3 H21 年度研究開発成果	34
5-4 研究開発後の課題・事業化展開	34

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

ごみ焼却時のダイオキシン類の生成は、ごみ焼却場周辺土壌の汚染を起し、人体への悪影響を及ぼすことからダイオキシン類を発生させないために、ごみ焼却設備の焼却温度 800℃以上での操業が義務づけられ、今後も急速にさらなる高温度処理化が進むと言われている。一方、主に火力発電に頼る国内のエネルギー事情では、発電による炭酸ガスによる地球温暖化が問題視されて以来、ごみ焼却のエネルギーの有効利用がますます重要視されるようになっている。

ごみ燃焼時のエネルギーを発電するごみ発電化が近年特に進められている。現在は国内の約 1800 あるごみ焼却設備の内 300 基がごみ発電を行っているが発電効率は 20%前後と低いレベルである。

これは、ごみ燃焼時のエネルギーを熱交換するためのボイラー管表面温度が 400℃以上では、急激にごみ中に混入した塩化物やアルカリの酸化により発生する塩素ガスや硫酸塩により腐食が進行するためボイラー管表面温度を 400℃以下で使用する事が主な理由である。しかし、ボイラー管表面温度が 550℃以上でも使用できると発電効率 30%以上が達成でき、大幅な省エネルギーが可能となるが現状の熔融溶接・溶射の表面処理方法や処理材では侵食が激しく、対応が不十分であるのが実情である。

表面処理方法としての溶接法は、表面処理対象材料自体を溶かすために、表面処理材料の特性を表面処理対象材料の成分により希釈させ、十分な表面処理材料特性を出せない。また、溶射法は、表面処理対象材料自体の溶解は無いが表面処理材料を 500 μ m 以上の肉厚にした場合に、高温での使用条件下で特に表面処理対象材料自体と表面処理材料の熱膨張差によって剥離するなどが主な理由である。

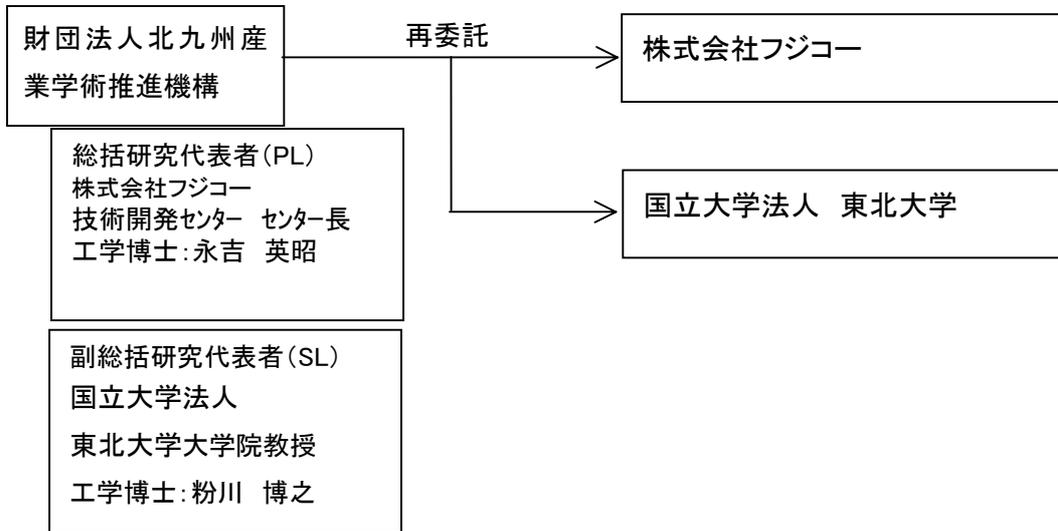
そこでこれら2つの課題を同時に解決する新規技術を提案する。それは表面処理自体の材料を所定圧力下で回転させ、表面処理対象材料自体を溶かさず(希釈しない)、しかも表面処理材と表面処理対象材料自体の拡散接合により強固な特性の優れた表面処理層を形成させることが可能となる摩擦による表面処理方法である。

表面処理材として、溶接法ではインコネル 625 と溶射法では自溶性合金が最良であり、これらの材料が、ごみ焼却炉プラント設備関連に使われる傾向にある。従って、摩擦肉盛溶接によってこれらの表面処理材料の特性を失うことなくボイラー管へ表面処理することにより、ボイラー管の使用温度をより高温化し、発電効率を5%以上の向上及び管の補修頻度を(補修頻度: 熔融溶接対比2倍以上に延伸)減少させることを目標とする。

1-2研究体制(研究組織・管理体制、研究者指名、協力者)

(1) 研究組織及び管理体制

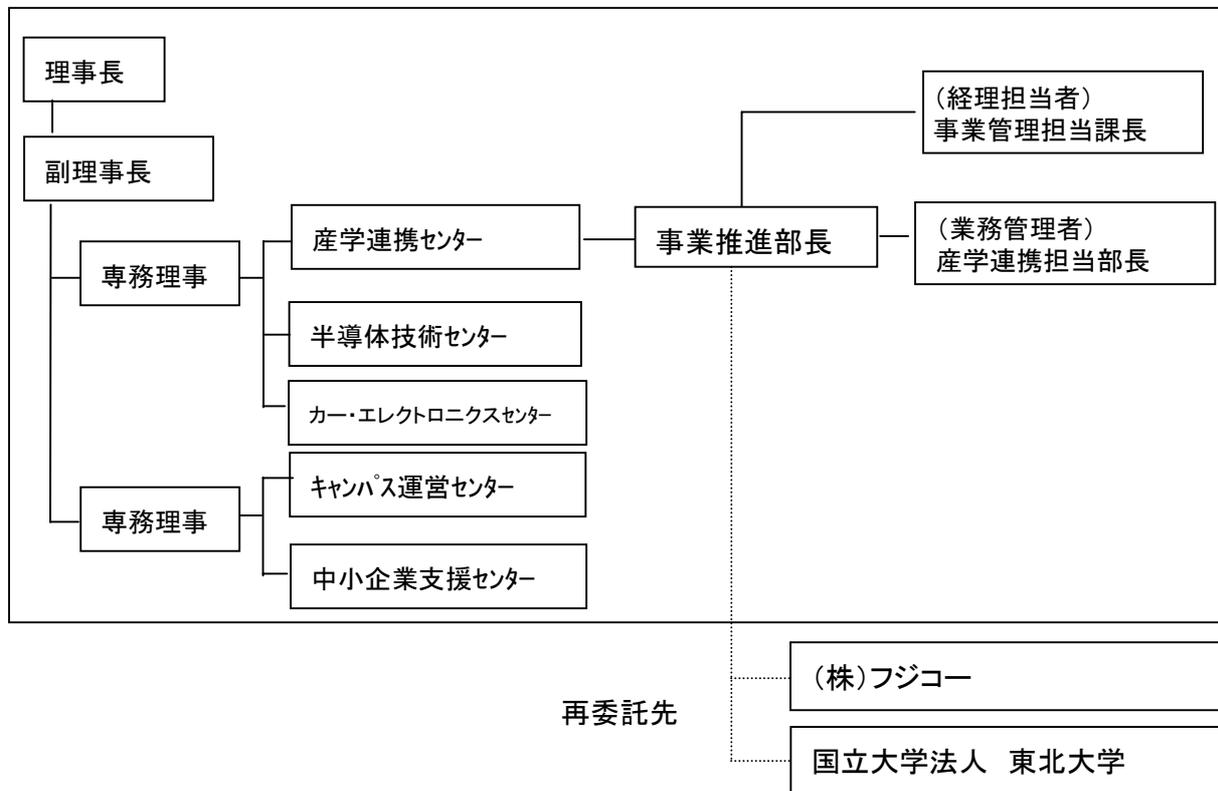
1) 研究組織(全体)



2) 管理体制

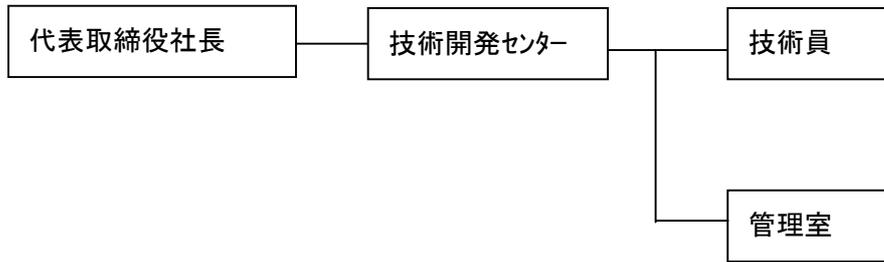
①事業管理者

〔財団法人北九州産業学術推進機構〕

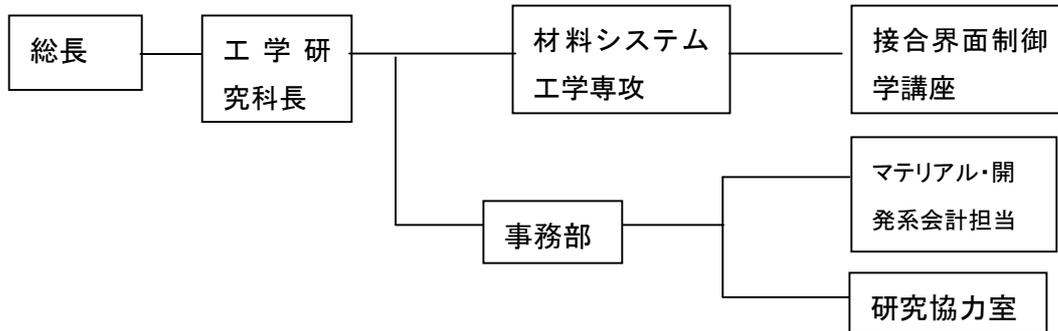


②(再委託先)

株式会社フジコー



国立大学法人東北大学



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】財団法人北九州産業学術推進機構

①管理員(プロジェクト管理員)

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
富工 雅人	産学連携センター 産学連携 担当部長	④

【再委託先】※研究員のみ

株式会社フジコー

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
永吉 英昭	技術開発センター センター長	①, ②, ③
寺村 敏一	技術開発センター 室長	①
木村 健治	技術開発センター 主任	①, ②, ③
吉永 宏	技術開発センター センター長付	①, ②, ③

国立大学法人 東北大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
粉川 博之	大学院工学研究科教授	②
佐藤 裕	大学院工学研究科准教授	②

* 実施内容(番号)

- ①10m ボイラー管への 5m 長さの摩擦肉盛条件の研究
 - ①-1 摩擦肉盛条件の均一化
 - ①-2 摩擦肉盛重ね部の欠陥(未溶着部)の極少化
 - ①-3 小径ボイラー管への摩擦肉盛試験
- ②摩擦肉盛部の特性評価 (株)フジコー、(国)東北大学
 - ②-1 高温腐食試験
- ③摩擦肉盛したボイラー管の品質評価 (株)フジコー
 - ③-1 肉盛厚さの管理
 - ③-2 摩擦肉盛部の外観と内部欠陥の相関性調査
 - ③-3 ボイラー管曲げ試験
- ④プロジェクトの管理・運営((財)北九州産業学術推進機構)

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人北九州産業学術推進機構

(経理担当者) 産学連携センター 事業推進部 事業管理担当課長 湯村 隆史

(業務管理者) 産学連携センター 産学連携 担当部長 富工 雅人

(再委託先)

株式会社フジコー

(経理担当者) 総務経理部 経理室 係長 徳丸 治美

(業務管理者) 技術開発センター センター長 永吉 英昭

国立大学法人 東北大学

(経理担当者) 工学研究科マテリアル・開発系事務室長 菅野浩幸

(業務管理者) 工学研究科長 内山 勝

(4) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

推進委員会委員

(外部推進委員)・・・

氏名	所属・役職	備考
篠田 剛	有限会社サーモフォーミングテクノロジー 代表取締役	アドバイザー
坂本 満	(独)産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 副研究部門長	アドバイザー

(内部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
永吉 英昭	(株)フジコー 技術開発センター センター長	委
寺村 敏一	〃 技術開発センター 室長	
木村 健治	〃 技術開発センター 主任	
吉永 宏	〃 技術開発センター センター長付	
粉川 博之	(国)東北大学 大学院工学研究科 教授	
佐藤 裕	(国)東北大学 大学院工学研究科 准教授	
富工 雅人	(財)北九州産業学術推進機構 産学連携センター 担当部長	

委：委託費対象研究員

1-3 成果概要

平成21年度は、前年度の研究課題であった肉盛厚さの均一化及び肉盛層とボイラー管との境界に発生する欠陥の極小化、さらに小径管(Φ48.6)への摩擦肉盛に関して研究を実施した。また、摩擦肉盛部の特性評価と品質評価を実施した。

研究開発実施内容の詳細については本論にて紹介するが、得られた結果についての概略を以下箇条書きに記す。

- (1) 温度制御を行い、ボイラー管への全周肉盛の肉盛条件を均一化することで肉盛厚さのばらつきを無くすことが可能となった。
- (2) 摩擦肉盛時のボイラー管の内面と長手方向の変形を最小限に抑えることで5m長さの摩擦肉盛が可能となった。
- (3) 小径ボイラー管(Φ48.6×5t)用の内面治具を設計製作し、小径ボイラー管への全周肉盛が可能な条件を見出した。
- (4) 摩擦肉盛法とアーク溶接法の肉盛部の材料組織的特長、耐食性を比較し、インコネル625の摩擦肉盛部の特性的優位性が明らかになった。
・高温腐食試験の結果、摩擦肉盛法はアーク溶接法に比べて、優れた耐高温腐食性を有するとともに、実使用環境中で十分な結晶粒組織安定性を有していることが確認できた。
- (5) 摩擦肉盛部の実炉中での高温腐食試験の結果、今回の試験環境では摩擦肉盛とアーク溶接共に腐食はほとんど進行していないことが確認できた。
- (6) 内挿式超音波検査装置と画像処理装置を使用することで、ボイラー管の全長・全周の肉盛厚さを連続的に調査することが可能となった。
- (7) 摩擦肉盛管の曲げ試験の結果、ボイラー管外径に対して曲げRが厳しいこと、また通常のアーク溶接肉盛管の曲げ加工と同一条件では、曲げ加工が困難であることが判明した。
- (10) 同上の理由により曲げ部はインコネル625のチューブを使用し、直管部に本研究開発の成果である摩擦肉盛ボイラー管を使用する事が、事業化を早く実現するために有効である。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

(財)北九州市産業学術推進機構 産学連携センター

産学連携担当部長 富工 雅人

TEL: 093-695-3006

FAX: 093-695-3018

E-mail: m-tomiku@ksrp.or.jp

第2章 ボイラー管への摩擦肉盛条件の研究

ここでは、初年度に開発した摩擦肉盛装置に2年度で得られた知見により改造を加え摩擦肉盛試験を行った結果を示す。

2-1 摩擦肉盛条件の均一化

前年度の研究成果より、現状の摩擦肉盛装置では肉盛条件(加圧力、回転数、予熱時間等)を同一にしても肉盛厚さにばらつきが発生することが判明した。ばらつきの原因は、予熱工程の温度のばらつきであることがわかった。予熱温度のばらつきは、肉盛棒の短面形状や長さの違い、予熱時の肉盛棒との接触がボイラー管なのか肉盛層なのか、また予熱時のボイラー管や肉盛層の温度の違いなどが原因だと考えられる。そこで肉盛棒の予熱温度を一定にするため、摩擦肉盛装置に温度制御装置と肉盛棒セット自動化装置を追加した。

2-1-1 温度制御装置

摩擦肉盛法は、予熱工程と肉盛工程で構成されており、温度制御装置で予熱工程を制御する研究を実施した。温度制御方法の仕組みを以下に示す。図1に示すように摩擦肉盛時の肉盛棒とパイプとの接触部の温度を放射温度計で測定する。接触部が予熱温度(設定温度 800°C~1000°C)に到達すると放射温度計から摩擦肉盛装置へ信号を発信する。信号を受信した摩擦肉盛装置は、予熱工程から次の肉盛工程へ進行する。

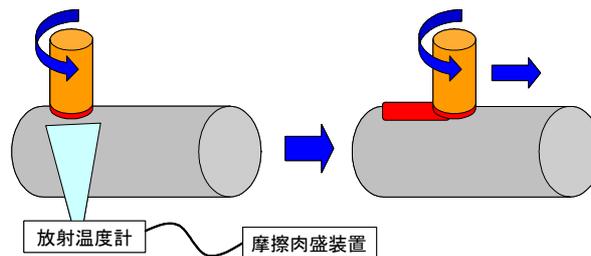


図1 温度制御の仕組み

予熱工程と肉盛工程の摩擦肉盛装置の動作について、図2に示す肉盛データを用いて説明する。

予熱工程では、高速回転する肉盛棒がボイラー管と接触して徐々に加圧することで、主軸モータートルクが上昇し接触部(摩擦面)が発熱する。次第に、温度が上昇していき肉盛棒が軟化する。肉盛棒が軟化する段階では、上昇していた主軸モータートルクが下がっていく。図2に示す予熱工程(⇔)が前述した動作の範囲である。

肉盛工程では、テーブルを移動させ軟化状態の肉盛棒をボイラー管上に肉盛する。このとき肉盛棒の圧力を肉盛可能な圧力まで上げる。肉盛中は、主軸モータートルクが一定範囲を保持し、ヘッド変位が一定であれば肉盛は順調である。図2に示す肉盛工程(⇔)が前述した動作の範囲である。

通常、予熱工程は、時間設定で行っていたが種々の要因で肉盛棒の温度上昇が変化することは前年度の研究成果で判明している。温度のばらつきによる問題は二つある。一つは、肉盛棒の温度不足は肉盛工程で肉盛層が薄くなり場合によっては、ボイラー管を削るだけになってしまうことである。もう一つは、肉盛棒の温度過剰は肉盛工程で肉盛層に無駄なバリを発生させ内部欠陥の原因になってしまうことである。

図3に温度制御を使用して肉盛した結果を示す。

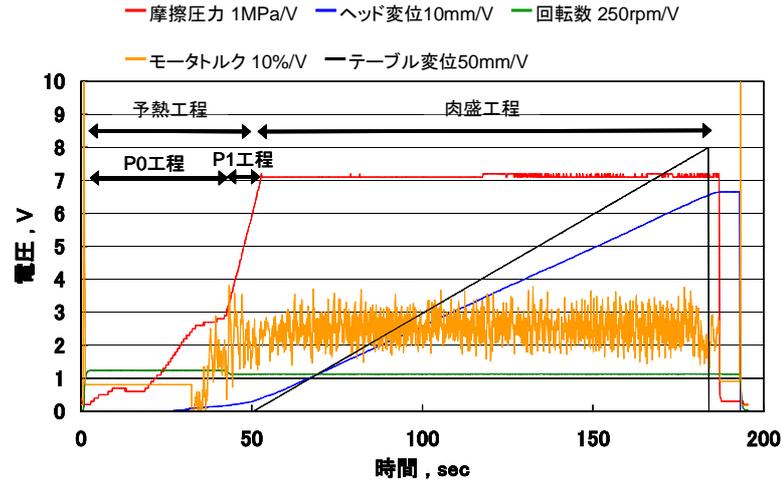


図 2 摩擦肉盛サイクル

(a)は、通常の時間設定で予熱工程を行った。(b)は、温度制御を用いて予熱工程を行った。両者の予熱工程条件は同じだが、肉盛工程開始時間が異なっている。すなわち、(b)は温度制御により肉盛工程の開始が早まった。この結果より、温度制御が問題なく作動することが確認できた。

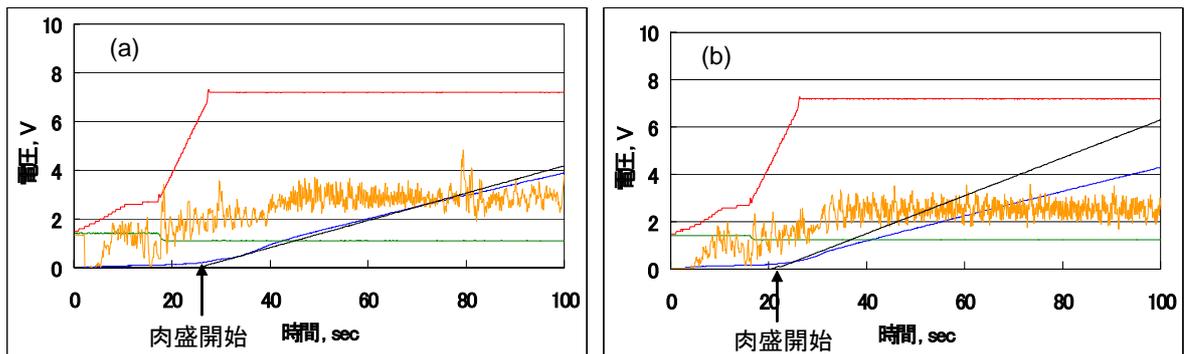


図 3 予熱工程温度制御

温度制御を用いてボイラー管へ全周肉盛を実施した結果を図 4 に示す。予熱工程時間は、肉盛の 1・2 パス目が 23 秒程度で、3・4 パス目が 20 秒程度で、7・8 パス目が 18 秒程度、11・12 パス目が 16 秒程度となった。パス数を重ねるごとに予熱工程時間が短縮して最終パスは 13 秒程度であった。1 パス目と最終パスの予熱工程時間差は 10 秒程度発生することが判明した。これだけ時間が異なると肉盛工程に大きな影響を与えると考えられる。温度制御を用いて全周肉盛した肉盛管の断面写真を図 5 に示す。温度制御により肉盛開始温度を一定にすることで、重ね肉盛部の肉盛厚さを確保可能な条件を達成することが可能となった。

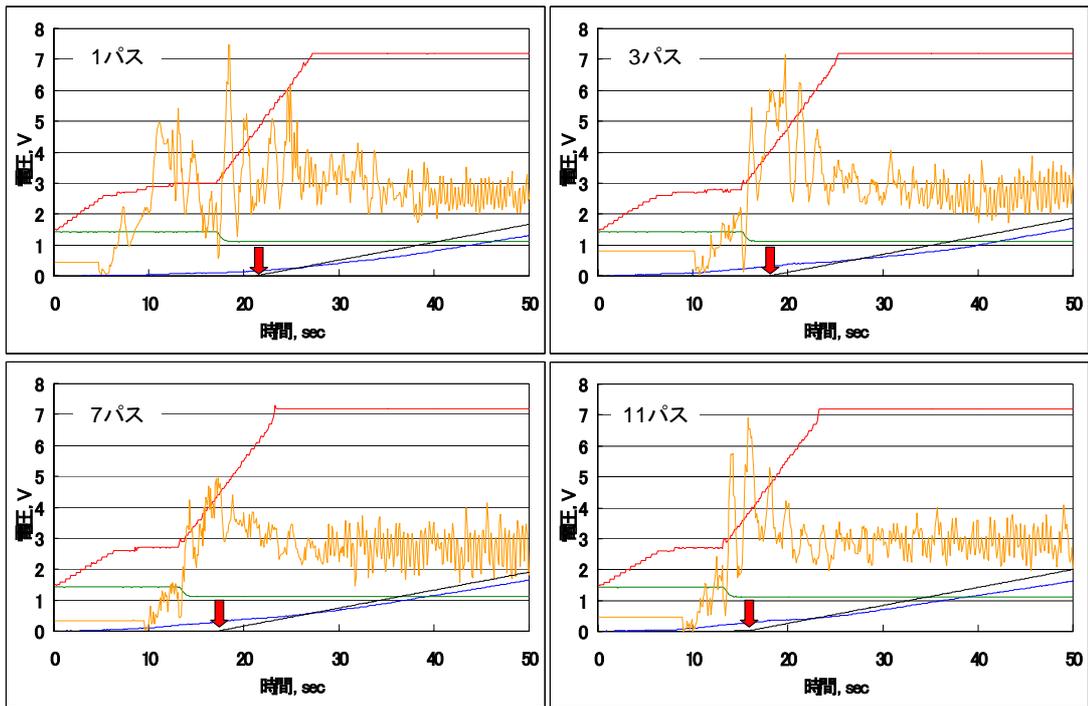


図 4 温度制御を用いて全周肉盛した肉盛データ

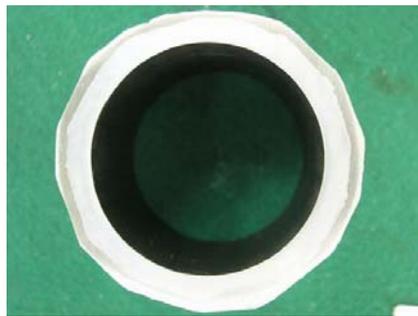


図 5 温度制御を用いた全周肉盛管断面

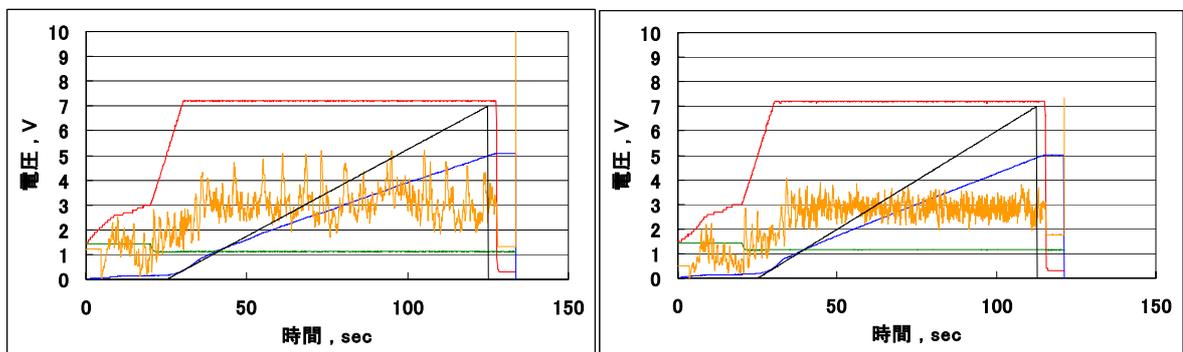


図 6 摩擦肉盛データ 左(1パス目), 右(3パス目)

2-2 長尺肉盛

ボイラー管への長尺肉盛を温度制御及びオフセット機能を使用して実施した。長尺の肉盛を行う際に問題となるのが摩擦肉盛時におけるボイラー管の変形である。ボイラー管の長手方向の変形は、摩擦肉盛を180°交互に行うことで抑制が可能である。また、摩擦肉盛後のボイラー管内面の変形は、肉盛時の内面治具の状態や温度制御を使用することで最小限に抑制することが可能となった。これらボイラー管の変形を最小限にすることで、ボイラー管への長尺肉盛が可能となった。図7に長尺肉盛管の写真を示す。



図7 ボイラー管への長尺肉盛

2-3 小径ボイラー管への摩擦肉盛試験

H19年度、H20年度研究開発を進めた摩擦肉盛では、当初その圧力に耐えるパイプ内面治具の強度・動作に不安があったため、強度設計上使用可能と判断したパイプ外径63.5mm(肉厚5mm)のボイラー管を使用した。本年度はさらに、一般的にスーパーヒータ用として使用されることの多い、外径48.6mm(肉厚5mm)のより細かいサイズのボイラー管に肉盛可能なパイプ内面治具を製作し、より事業化につながる研究開発を実施した。

2-3-1 小径ボイラー管への摩擦肉盛試験

小径管用内面治具を用いて小径管(Φ48.6×5t)へ肉盛試験を実施した。図8にΦ48.6管への摩擦肉盛試験状況と全周肉盛後の外観写真を示す。



図8 小径管肉盛試験状況及び全周肉盛管外観写真

内面治具の動作に問題もなく、肉盛長さ 300mm の全周肉盛が可能であることが判明した。外観上均一な肉盛厚さが確保出来ている。今後は、長尺の肉盛試験を行い肉盛管の特性および品質調査を実施していく。

2-4 結論および今後の課題

本論では、ボイラー管への摩擦肉盛テストを行った結果についてまとめる。

- (1)温度制御装置を追加することで均一な肉盛条件での肉盛が可能となった。また、全周肉盛管の肉盛厚さを十分確保できることが判明した。
- (2)摩擦肉盛によるボイラー管の変形を最小限に抑制することでボイラー管への長尺肉盛が可能となった。
- (4)小径管(Φ48.6)用の内面治具を設計製作し摩擦肉盛試験を実施した結果、内面治具の変形等の問題もなく小径管(Φ48.6)への全周肉盛が可能なが判明した。

今後の課題は、小径管へ長尺の全周肉盛条件の研究及び摩擦肉盛管の肉盛厚さと内部欠陥有無の調査をすることである。

第3章 摩擦肉盛部の特性評価

本論では、第2章でボイラー管へ摩擦肉盛した肉盛層と従来のアーク溶接肉盛層の特性調査を行った結果を以下に記す。

実プラントを想定した実験室レベルの高温腐食試験を実施して、摩擦肉盛部とアーク溶接肉盛部の耐食性評価を行った。また、上記結果を踏まえ摩擦肉盛したボイラー管の実プラントにおける高温腐食試験を実施して、アーク溶接肉盛部との耐食性比較を行った。上記の試験で得られたサンプルの腐食状態を把握するため、マイクロ解析(3次元レーザ顕微鏡、SEM/EDX、EPMA など)を実施した。

3-1 高温腐食試験(実験室レベル)

ここでは、インコネル 625 の摩擦肉盛部とアーク溶接肉盛部の高温腐食試験を行い、耐食性を比較した結果を以下に示す。高温腐食試験は、実炉雰囲気を模擬して実施した。試験条件を以下に示す。

試験条件

- ・試験温度: 650°C
- ・試験時間: 300hr
- ・試験環境: サンプルは実灰中に埋没

実炉同様の腐食ガス中(成分表 1)

高温腐食試験のサンプルには、下記の4種類を使用した。

サンプル: 摩擦肉盛層(インコネル 625), アーク溶接肉盛層(インコネル 625)
溶射被膜(自溶性合金), 摩擦肉盛棒(インコネル 625)

表 1 腐食ガス成分値

	目標値
HCl	1000ppm
SO ₂	50ppm
CO ₂	10%
O ₂	10%
N ₂	Bal.
H ₂ O	65°C飽和水蒸気

高温腐食試験に供したサンプルの形状を図 9 に示す。肉盛管より寸法 20×10 で切り出し、表面を研磨(#600)後、腐食対象面以外の面を腐食防止するため対酸化性の耐熱塗料を塗布して高温腐食試験片とした。

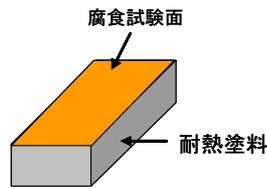


図 9 高温腐食試験片形状

図 10 と図 11 に高温腐食試験前後のサンプル表面写真を示す。試験後の摩擦肉盛に対してアーク溶接の方が表面上の凹凸が激しいように見える。

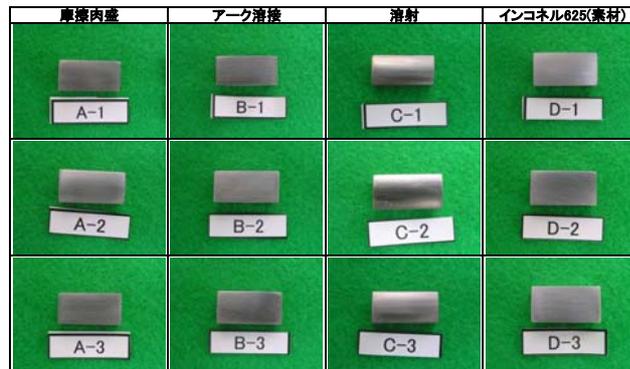


図 10 高温腐食試験片(試験前)

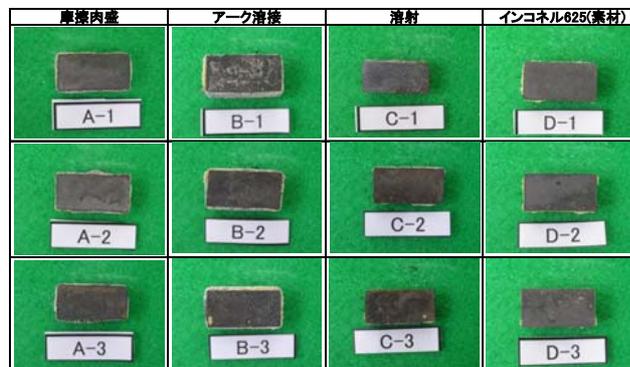


図 11 高温腐食試験片(試験後)

高温腐食試験前後の重量変化を測定した結果を表 2 に示す。試験前後の重量変化は、アーク溶接が最も大きく溶射が最も少ない結果となった。しかし、摩擦肉盛及びアーク溶接の基材側の腐食が激しいことや表面に付着する焼却灰等が重量に影響するため、重量変化で耐食性を評価するのは不可能である。そこで耐食性評価は、肉盛部断面組織を SEM、SEM/EDS、EBSD 解析を用いて解析することとした。

表 2 高温腐食試験後の重量変化

サンプル	試験片重量(g)		試験前後の重量変化	
	試験前	試験後		
摩擦肉盛	A1	10.908	11.509	0.601
	A2	10.816	11.626	0.810
	A3	10.942	11.582	0.639
アーク溶接	B1	12.086	13.164	1.078
	B2	12.551	13.561	1.010
	B3	12.157	13.326	1.170
溶射	C1	8.512	8.547	0.035
	C2	9.038	9.100	0.062
	C3	8.944	8.988	0.043
摩擦肉盛棒	D1	13.991	14.122	0.130
	D2	13.060	13.196	0.136
	D3	13.976	14.102	0.126

3-1-1 肉盛部の腐食挙動(東北大学)

腐食挙動を調査するため、高温腐食試験サンプル断面の SEM 観察を実施した。図 12~14 に各サンプルの断面写真を示す。断面写真は、肉盛層表面から深さ約 100 μm 程度を観察したもので、写真中の組織は全て肉盛層(インコネル 625)の部分である。各サンプルには、断面の最表面に堆積する腐食生成層と肉盛層中に発生するピitting層が確認できる。断面の腐食範囲を測定した結果を表 3 に示す。腐食生成層の深さは、摩擦肉盛が 5 μm でアーク溶接が 15 μm 、肉盛棒が 10 μm である。腐食範囲は、摩擦肉盛が 25 μm でアーク溶接が 40 μm 、肉盛棒が 25 μm である。従って摩擦肉盛はアーク溶接に比較して腐食深さが浅く、肉盛素材である肉盛棒と同等の耐食性を有していることが判明した。

表 3 腐食深さ

	腐食深さ, μm	
	表面腐食生成層	表層からの腐食範囲
摩擦肉盛	5	25
アーク溶接	15	40
肉盛棒	10	25

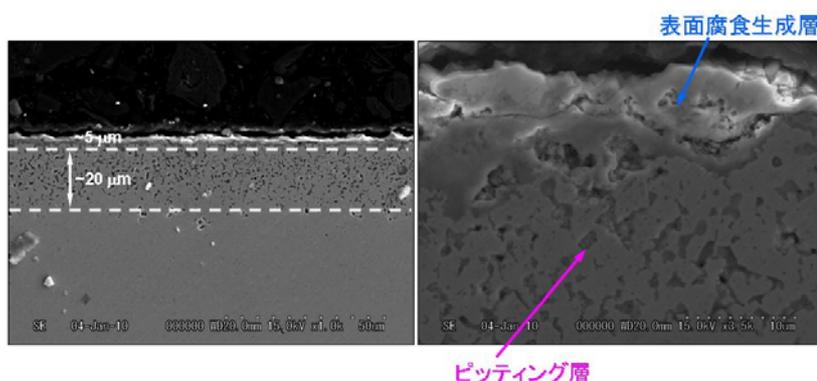


図 12 摩擦肉盛の断面写真

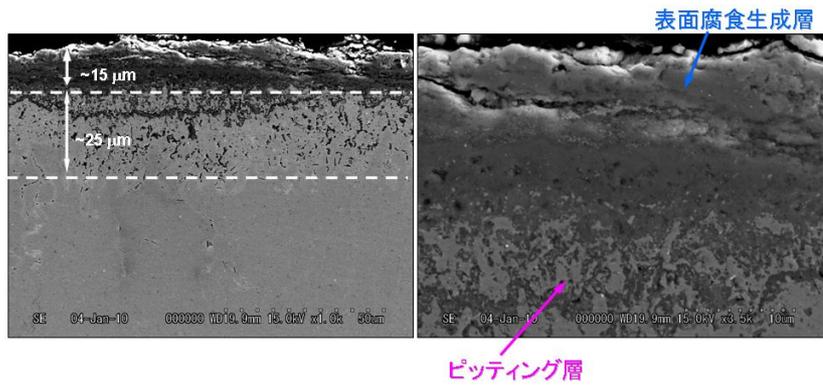


図 13 アーク溶接の断面写真

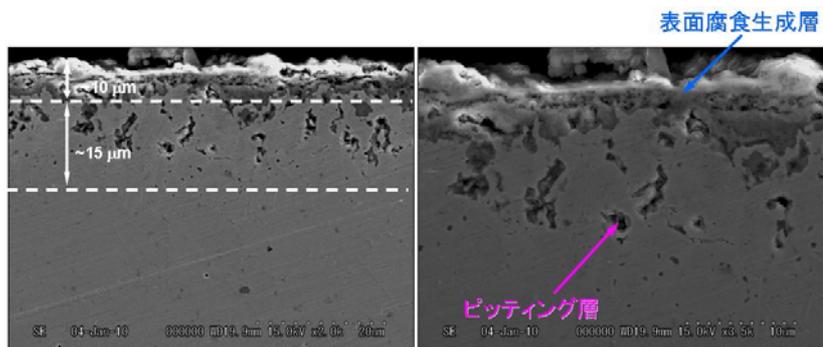


図 14 肉盛棒の断面写真

次に、各サンプルの腐食メカニズムを調査するため、腐食層の元素分布状態を分析した。図 15～17に面分析の結果を示す。表面の腐食生成層は、Cr と O が濃化しており主に Cr 酸化物により構成されていると考えられる。アーク溶接に関しては、腐食生成層の表面側に Fe が濃化していることが確認できた。ピitting層も Cr と O が濃化しており一部で S や Mo が濃化していることが確認できた。腐食メカニズムは、どのサンプルも Cr と O を主体とする腐食であることが判明した。一方、アーク溶接については、表層に Fe の分布が著しく、Cr の欠乏層が存在し、Mo の偏析が発生している。これらの現象がアーク溶接の耐食性を劣化させていると考えられる。摩擦肉盛は、Fe の希釈がなく均一な組織を有することから、アーク溶接のような現象が発生せず耐食性が良好であると考えられる。

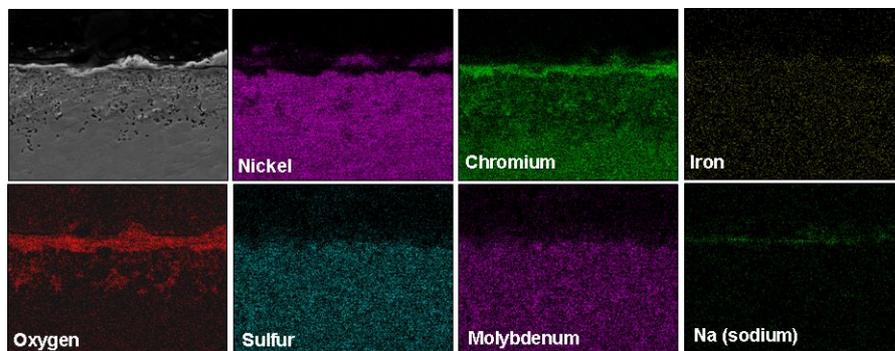


図 15 摩擦肉盛の面分析

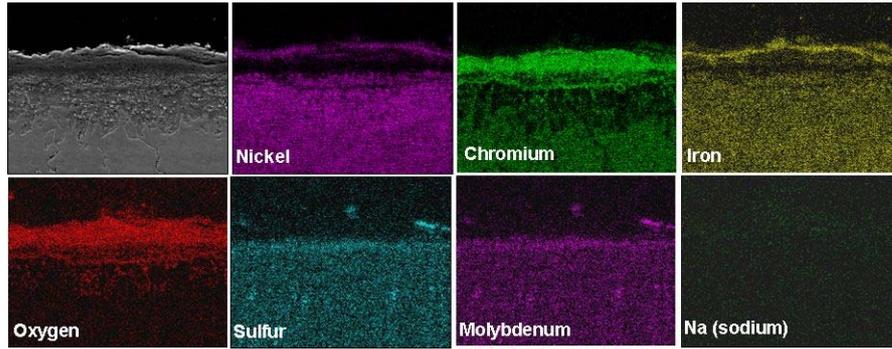


図 16 アーク溶接の面分析

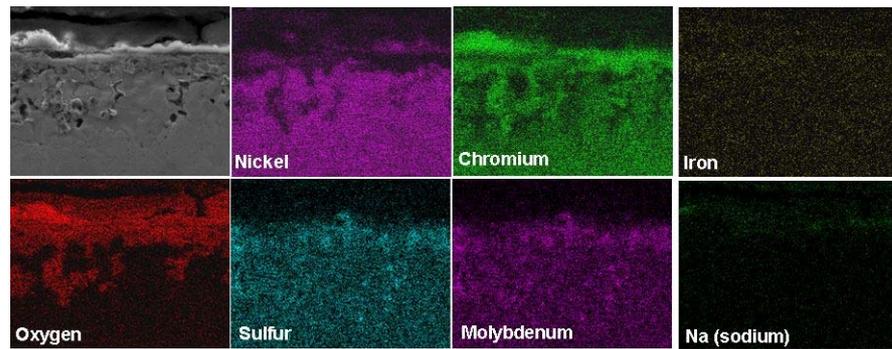


図 17 肉盛棒の面分析

上記の面分析では、腐食生成物の特定が出来ないため、EDSによる定量組成分析を用いて腐食生成物の特定を行った。各サンプルの定量分析結果を図 18～20 に示す。どのサンプルについても表面の腐食生成層は、 CrO_2 が大部分で、部分的に Ni 酸化物も存在している。アーク溶接は、最表層に Fe を 10～20% 含む酸化物層が存在することが判明した。ピitting層は、Ni と Cr の酸化物と思われるが、EDS の分解能を考慮すると、分析結果がピitting部だけではなくマトリックスの情報も検出している可能性がある。そこで、高分解能を有する FE-EPMA を用いてピitting層の組成分析を行った。EPMA 分析結果を図 21 と図 22 に示す。ピitting層中には、比較的大きく不規則な形状をもつ第 2 相と比較的小さく粒状である析出物の 2 種類が存在することが判明した。第 2 相は、Cr と O が濃化していることから CrO_2 である。析出物は、S が濃化していることから硫化物であると考えられる。高分解能分析の結果、ピitting層の腐食メカニズムは、摩擦肉盛とアーク溶接に違いはなく同様な挙動を示した。

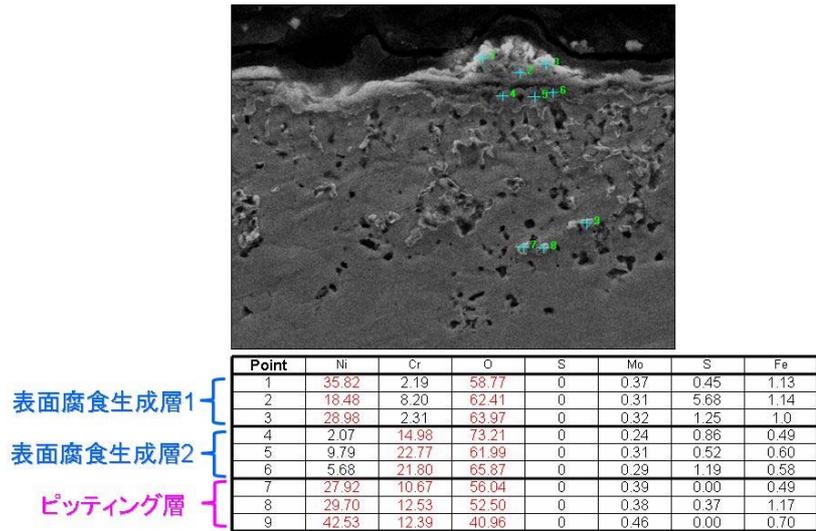


図 18 摩擦肉盛の腐食生成物の定量分析結果

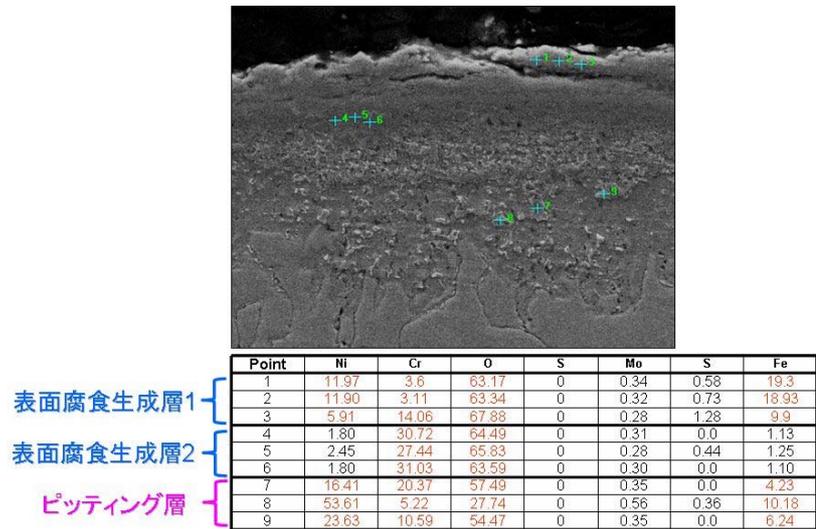


図 19 アーク溶接の腐食生成物の定量分析結果

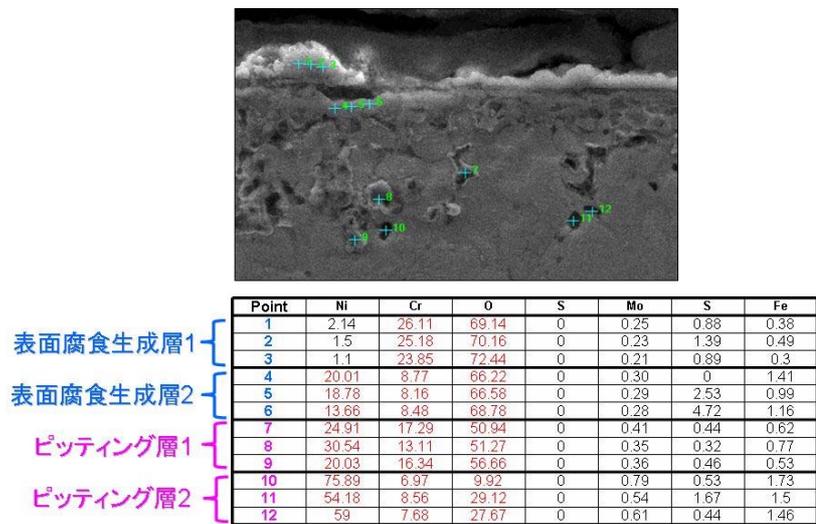


図 20 肉盛棒の腐食生成物の定量分析結果

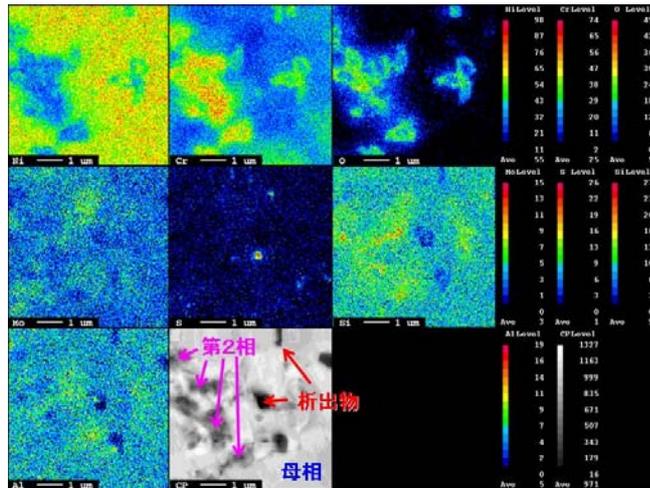


図 21 摩擦肉盛の高分解能分析結果

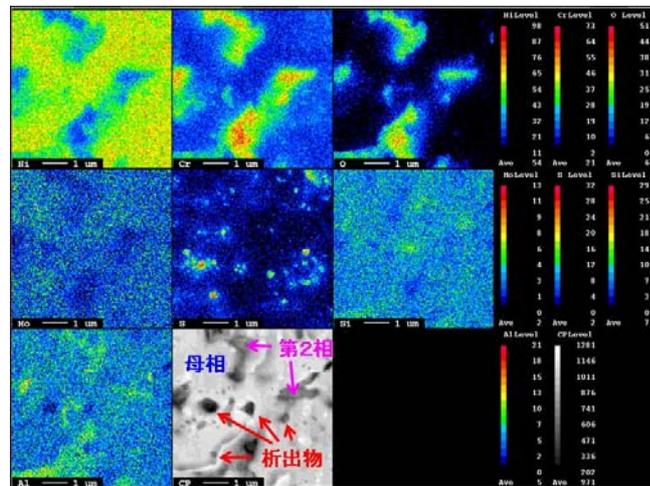


図 22 アーク溶接の高分解能分析結果

3-1-2 肉盛部の熱的安定性

摩擦を利用した接合法(摩擦攪拌接合)において、接合後の熱処理中に微細結晶粒の異常粒成長が発生することが数多く報告されている。摩擦肉盛部の結晶粒組織は、微細かつ等軸的であり摩擦攪拌接合同様の特徴を有するとともに、その形成機構も類似することから、摩擦肉盛部でも異常粒成長が生じることが考えられる。異常粒成長が生じると、延性が著しく低下する等の実用上の問題が発生する。そこで高温腐食試験前後の結晶粒の形状を調査するため、EBSD 法による結晶方位マップを作成し、試験前後の結晶粒径を評価した。各サンプルの結晶粒径調査結果を図 23～25 に示す。いずれのサンプルも試験後の結晶粒径は若干成長するが、異常粒成長は発生しないことが判明した。すなわち、実際の腐食環境下で摩擦肉盛部を使用したとしても、微細かつ等軸的な結晶粒組織は熱的に安定であることが示された。

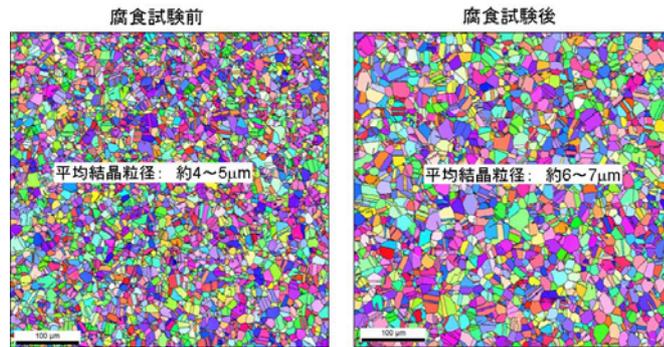


図 23 肉盛棒の試験前後の結晶粒径

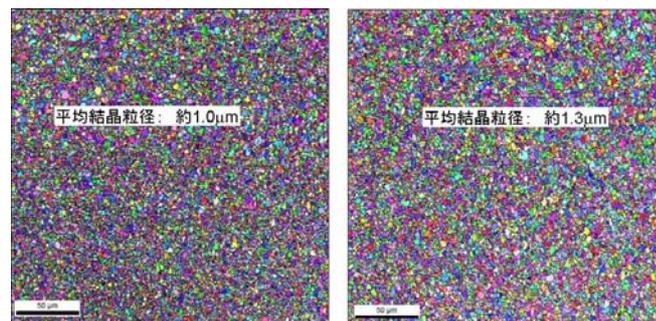


図 24 摩擦肉盛の試験前後の結晶粒径

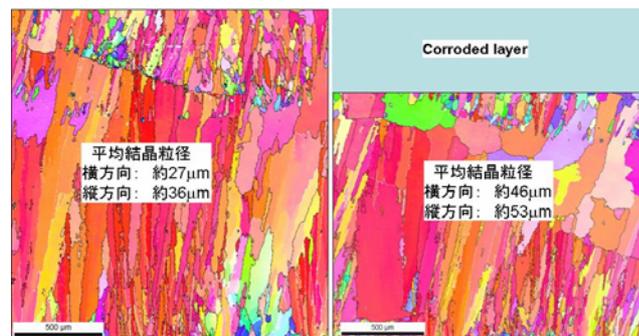


図 25 アーク溶接の試験前後の結晶粒径

3-2 高温腐食試験(実炉テスト)

摩擦肉盛部とアーク溶接肉盛部の高温腐食性を実炉の環境で評価するため、北九州市環境局日明環境センター日明工場の焼却炉内において高温腐食試験を実施した。

試験条件は次のとおりである。

設置場所 焼却炉内

雰囲気温度 約 600°C

試験期間 約 2 ヶ月半(H21 年 12 月 24 日～H22 年 3 月 12 日

試験片には、摩擦肉盛及びアーク溶接の肉盛管(インコネル 625)より、図 26 に示す形状に加工したものを使用した。形状は、肉盛層のみとボイラー管を残した状態の肉盛部の 2 種類である。表 4 に準備した試験

片の数量を示す。図 27 に準備した試験片の外観を示す。肉盛層のみは、表面を#600 まで研磨を行った。基材を残したものは、表面の加工を特に行っていない。

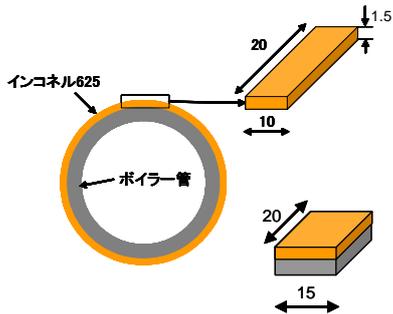


図 26 腐食試験片の形状

表 4 高温腐食試験片の数量

	サンプル個数	
	肉盛層のみ	基材含む
摩擦肉盛	3	1
アーク溶接	3	1

上記の試験片の炉内取付けは、スーツブローア用プロテクタに各試験片を溶接で固定したものを炉内に設置した。図 28 にプロテクタへの試験片取付け状況写真を示す。左側がアーク溶接で、右側が摩擦肉盛である。

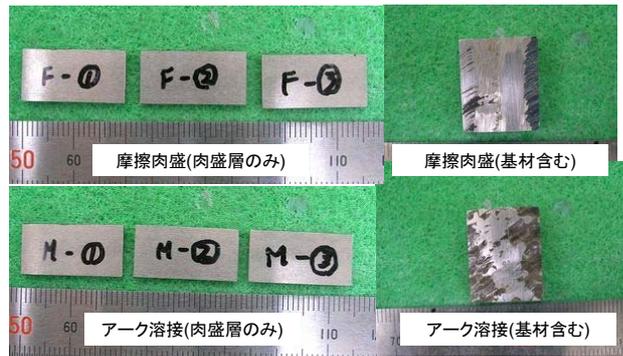


図 27 試験片の表面状態

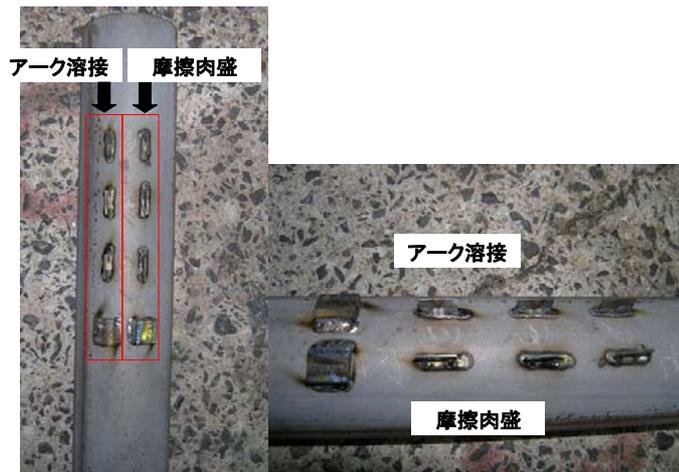


図 28 試験片の取付け位置

図 29 に試験開始から2ヶ月半後(H22年3月16日)に取り出した試験片の外観を示す。試験片及びプロテクタには、かなりの焼却灰が堆積している。図 30 に試験片の表面状態を示す。上側が摩擦肉盛層で、下

側がアーク溶接肉盛層である。焼却灰が付着して表面の状態が確認出来ないため、灰を除去後の試験片表面を図31に示す。各試験片の表面には、試験片作製時の研磨痕が残っているため腐食の程度は軽いと思われる。試験片の厚みは、試験前の厚みと同じか10 μ m程度減耗している。摩擦肉盛とアーク溶接肉盛で厚みの変化に差はなかった。図32に試験片断面の観察結果を示す。摩擦肉盛とアーク溶接肉盛の表面の凹凸差は、ほぼ同程度であった。



図 29 実機テスト終了後の試験片全体の外観

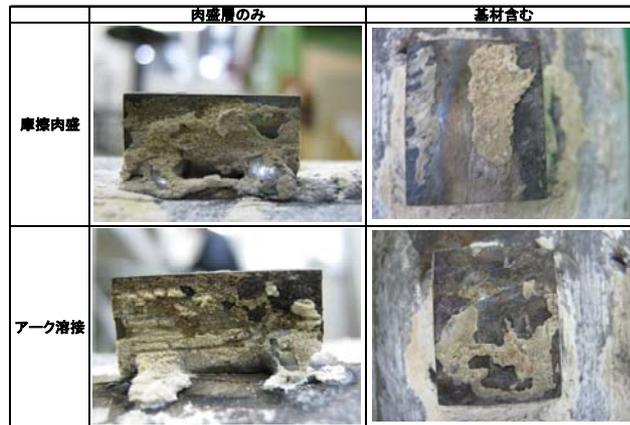


図 30 実機試験終了後の各試験片の表面状態



図 31 表面付着物除去後の写真

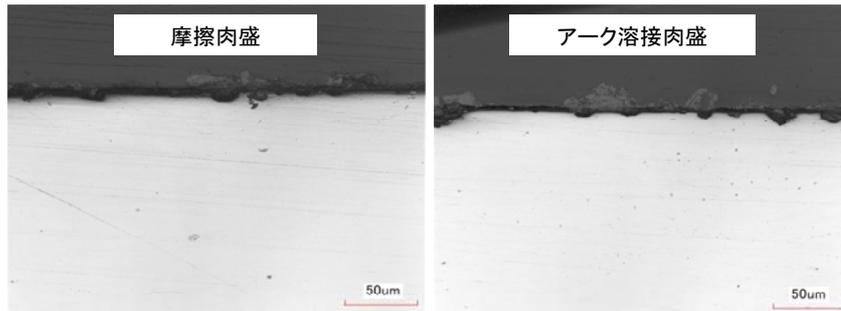


図 32 試験片断面の観察

3-3 結論および今後の課題

本論では、ボイラー管の摩擦肉盛及びアーク溶接肉盛部の特性評価を行った。研究成果を以下にまとめる。

(1) 高温腐食試験(ラボテスト)

腐食は表面から進行して、表層に腐食生成層が形成されるとともに、肉盛内部にピittingが多数存在する組織が形成された。アーク溶接および摩擦肉盛部ともに、表層の腐食生成層は Cr を多く含む酸化物であることが明らかとなった。ピittingが多く存在する部分を解析した結果、ピittingの多くは Cr を多く含む酸化物であったが、一部、硫化物の存在も確認された。ピitting部は、アーク肉盛部においては柱状晶境界におおよそ一致していたが、摩擦肉盛部では明らかにできなかった。腐食挙動ならびに腐食生成相に対するアークおよび摩擦肉盛の違いは見られなかった。アーク肉盛部で腐食速度が高いのは、アーク肉盛に伴うインコネルの基材(軟鋼)との希釈により Cr 量が減少したことに起因していた。

高温腐食試験前後の結晶粒組織を EBSD 解析により調べた結果、アークおよび摩擦肉盛部ともに腐食試験中に若干の結晶粒粗大化が見られたが、摩擦攪拌部でしばしば見られるような異常粒成長は確認できなかった。

以上の結果より、摩擦肉盛法はアーク肉盛法に比べて、優れた耐高温腐食性を有するとともに、実使用環境中で十分な結晶粒組織安定性を有していることが明らかとなった。

(2) 高温腐食試験(ラボテスト)

摩擦肉盛及びアーク溶接肉盛の実炉環境で高温腐食試験を実施し、試験片の腐食減肉量の測定と断面の調査を行った。今回の実炉試験では、腐食が軽微で摩擦肉盛とアーク溶接肉盛との差異は見られなかった。

第 4 章 摩擦肉盛した肉盛管の品質評価

本論では、第 2 章でボイラー管へ摩擦肉盛した肉盛管の品質評価を行った結果を以下に記す。

4-1 肉盛厚さの管理

ここでは、今年度導入した画像処理装置を使用して、肉盛管の肉盛厚さ及び内部欠陥を全周・全長に渡って連続的に検査を実施した。画像処理装置を用いて、超音波検査データを表示した結果の一例を図 33

に示す。画像処理装置は、超音波検査データを3種類の画像として表示する。1は縦軸に管の円周方向を横軸に管の長手方向の検査結果(肉厚)を色別に示す。2と3は、一断面の検査結果を示す。2は管の断面を輪切りにした状態を表示し、3は通常の内挿式超音波検査装置で表示される画像を表示する。4は、厚みの色別及び2と3に表示する断面の長手方向の位置を示す。

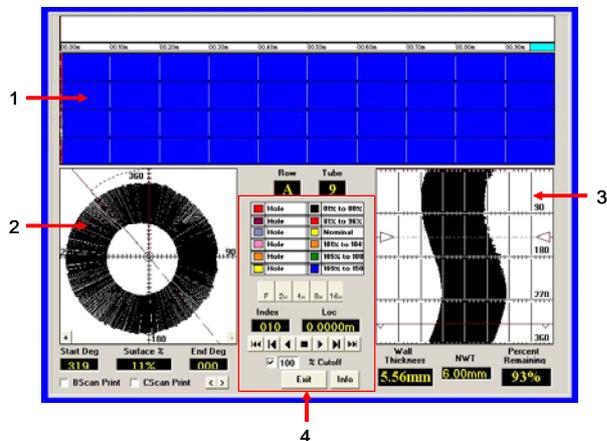


図 33 超音波検査データ

図 346 に肉盛管の肉盛厚さを測定した結果を示す。厚さの表示方法は、基準厚さを超音波検査装置側で設定し、それを基準に%で表示範囲を設定して色分を指定して表示することが可能である。画像処理装置を使用することで、肉盛管の肉盛厚さを連続的に検査することが可能となった。

肉盛厚さ

- : 4.86~5.76mm , ■ : 5.82~6mm , ■ : 6.06~6.24mm
- : 6.3~6.48mm , ■ : 6.54~7.5mm

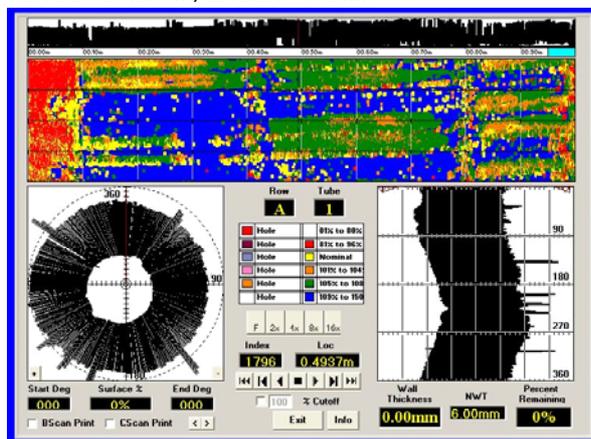


図 34 全周肉盛管の肉厚測定結果

4-2 ボイラー管曲げ試験

ここでは、ボイラー管へ摩擦肉盛を行った肉盛管の曲げ試験を行い、摩擦肉盛管の曲げ加工性について評価した結果を示す。

4-2-1 ボイラー管曲げ試験(曲げ加工専門メーカー)

ここでは、摩擦肉盛管の曲げ試験を専門メーカーで実施した結果を示す。

ボイラー管の曲げ試験は、発電用ボイラーチューブの加工専門メーカーである株式会社長崎鋼業所にて実施した。選定理由は、当社で施工したアーク溶接肉盛管の曲げ加工を数年間行っているため、今回の摩擦肉盛管とアーク溶接肉盛管の曲げ加工性の違いを明確に比較可能なためである。

ボイラー管曲げ試験の仕様は、1000mm のボイラー管に長さ 800mm の範囲全周を摩擦肉盛した肉盛管を曲げ R100 にて 180° 曲げを実施する内容である。下記に曲げ試験片形状及び試験条件を示す。

試験片形状:

ボイラー管長さ 1000mm(肉盛部:800mm)

ボイラー管(肉盛部)外径 Φ67~67.5

試験数 5本(一回目:2本、2回目:3本)

試験条件:

曲げ加工法 回転引き曲げ

曲げ R 100R(1.5D)

加工速度 アーク溶接肉盛管と同様

予熱 900~1050°C(測定:放射温度計) ※冷間でも曲げ試験を実施。

4-2-1-1 第一回目の曲げ試験結果

図 35 に第 1 回目の曲げ試験に使用したサンプルの外観写真を示す。肉盛管の重ね部の段差は、グラインダーで切削して、実際に曲がる範囲(中央 400mm)は完全に重ね部段差を無くした状態にした。曲げ試験片は、事前に超音波検査を行い、内部欠陥の状況確認を実施した。図 36 に示すように、部分的に内部欠陥が存在する。この内部欠陥と曲げ加工性との相関性を調査するため、内部欠陥が残存する状態で曲げ試験を実施した。



図 35 曲げ試験片の外観写真

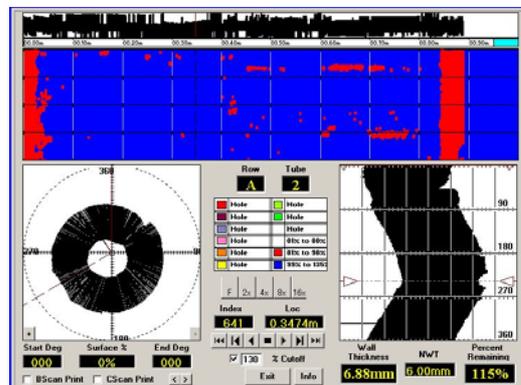


図 36 曲げ試験片の超音波検査結果

曲げ加工装置を図 37 に示す。曲げ加工は、ロール(A)の外周に沿って金型(B)が移動することで、ボイラー管がロールの R に沿って曲がる仕組みである。通常、アーク肉盛管の曲げ加工は、曲げ R がボイラー管外径の 1.5 倍程度の厳しい条件では、肉盛管の曲げ範囲の内側を予熱して実施する。そこで、摩擦肉盛管も同様に予熱して曲げ試験を行った。

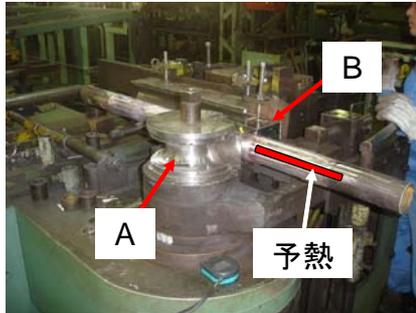


図 37 曲げ試験概要

図 38 に曲げ試験を実施した摩擦肉盛管の写真を示す。曲げ部外側の肉盛層に剥離や割れが発生している。そこで、曲げの外側に伸びがでるように予熱を行って、曲げ試験を実施した。図 39 に示すようにボイラー管の両側面を予熱した結果、肉盛管は基材ごと破断した。原因は、両側面を予熱したことで、肉盛管の強度が低下したためと考えられる。他に失敗の原因として、肉盛管の外周が多角形なので金型に面で接触していないことが考えられる。



図 38 曲げ試験後のサンプル外観



図 39 曲げ試験後のサンプル外観(両側予熱)

4-2-1-2 摩擦肉盛層の引張特性

前述の曲げ試験条件には、肉盛層の伸びが 33% 必要である。摩擦肉盛層の引張特性を調査するため、図 40 に示す形状のサンプルを作製して引張試験を実施した。今回の試験では、摩擦肉盛層の熱処理による引張特性の変化を調査するため、3 種類の温度条件で熱処理したサンプルを準備した。各条件で熱処理した肉盛層の硬度と引張特性との相関性を調査するため、硬度測定を実施した。図 41 に示す位置の硬度測定結果を図 42 と図 43 に示す。肉盛層中で境界付近が最も硬度が高い。800°C の熱処理では、肉盛層の硬度は肉盛状態と変わらず、1000°C と 1200°C の熱処理で肉盛状態に比較して硬さが低下することが確認できた。表 5 に肉盛層中の硬度の平均値を示す。肉盛層の硬度は、肉盛状態と 800°C 熱処理状態ではほぼ同じである。1200°C 熱処理状態の硬度が、肉盛層境界で HV280、中間層で HV270 と最も低い値を示した。

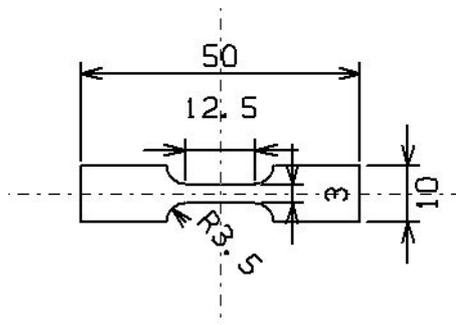


図 40 引張試験片及び試験後サンプル

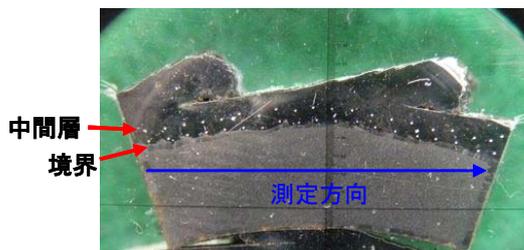


図 41 硬度測定位置

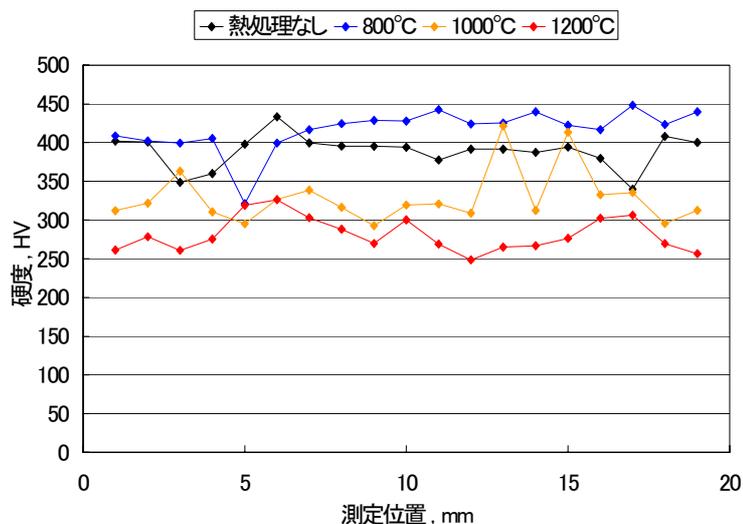


図 42 肉盛層境界付近の硬さ

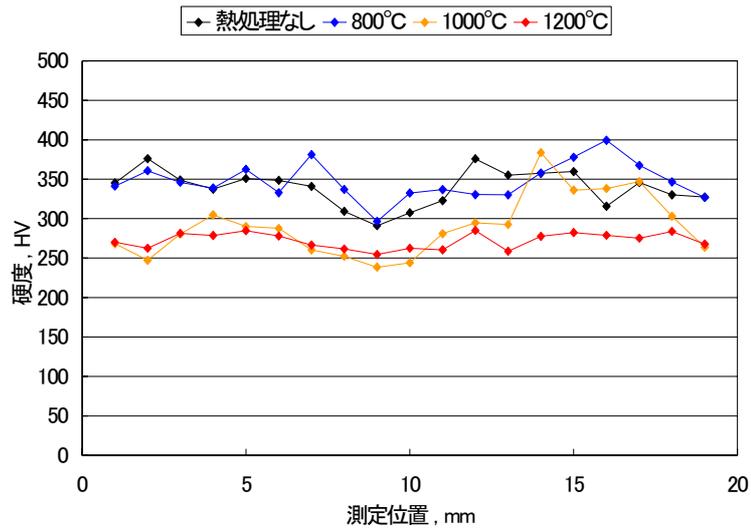


図 43 肉盛中間層の硬さ

表 5 肉盛層の平均硬度(HV)

測定位置	熱処理なし	800°C	1000°C	1200°C
境界付近	389.3	416.6	328.9	281.2
中間層	339.3	347.5	290.2	272.1

引張試験後のサンプル外観を図 44 に示す。熱処理条件は、左側から熱処理なし・800°C・1000°C・1200°Cである。引張試験データより得られた応力-ひずみ曲線を図 45 に示す。表 6 に引張試験より得られた引張特性値を示す。肉盛状態のままでも伸びが、48%あることが確認できた。しかし、引張試験片の加工の制約で、引張試験片の組織は中間層が基準となる。すなわち、引張試験片の硬度は、表 5 の中間層の硬度に近い値である。今回の試験結果より、1000°C及び 1200°Cの熱処理を実施することで肉盛層の境界付近の伸びが 45%以上確保可能だと考えられる。

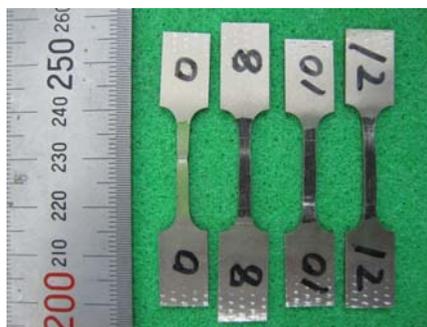


図 44 引張試験片外観

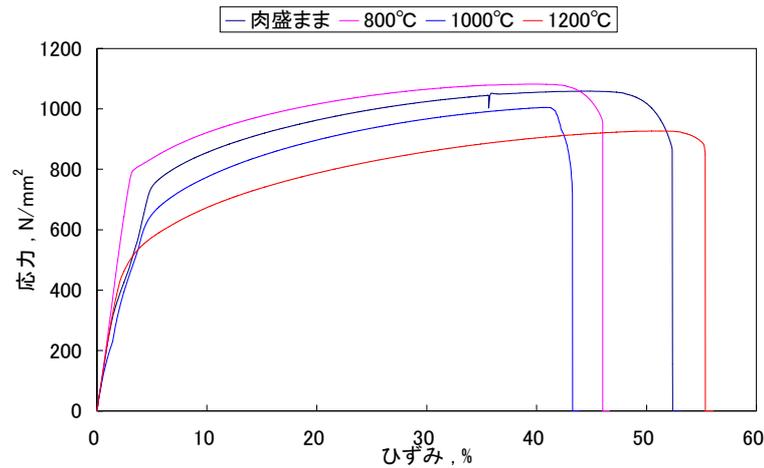


図 45 肉盛層の応力-ひずみ曲線

表 6 肉盛層の引張特性

サンプル	降伏強度, N/mm ²	引張強度, N/mm ²	伸び, %
肉盛まま	763	1055	48
800度	801	1078	45
1000°C	639	1004	48
1200°C	485	924	50

4-2-1-3 第二回目の曲げ試験結果

ここでは、1回目の曲げ試験で得られた知見をもとに、二つの改善を行った試験片で曲げ試験を実施した。改善の一つは、試験片表面をグラインダーで重ね部段差を切削後に、肉盛管を回転させながら研磨することで凹凸がないよう滑らかな状態に仕上げたことである。もう一つの改善は、熱処理により肉盛層の伸びを向上したことである。曲げ試験片の表面状態を図 46 に示す。上側が肉盛のまま、下側が 1200°Cの熱処理を行ったものである。今回の曲げ試験は、R160(2.5D)で行った。図 47 に試験結果を示す。A は、熱処理なし、B・C が熱処理を行っている。いずれの試験片も曲げ加工の初期段階で肉盛層が割れてボイラー管が破断する結果となった。試験片 A・B は、予熱して曲げ試験を実施し、試験片 C は予熱なしの冷間状態で曲げ試験を実施した。図 47 右側の曲げ試験片の形状を比較すると、A はほぼ直管であるが B は若干ではあるが曲がっている。A と B は曲げ条件を同一のため、熱処理をすることで若干曲げ加工性が向上していると考えられる。また試験片 C は、B よりも曲がりが発生しているため、摩擦肉盛管の曲げは冷間で実施するほうが加工性が良好だと考えられる。図 48 に曲げ試験片の破断面を示す。破断面の左側と右側は図 60 の左側の写真の位置に対応する。破断面を観察すると、熱処理なしの A は B・C と比較して肉盛層とボイラー管との境界の大部分が剥離していることが確認できる。熱処理を行うことで、肉盛層とボイラー管との密着性が向上すると考えられる。

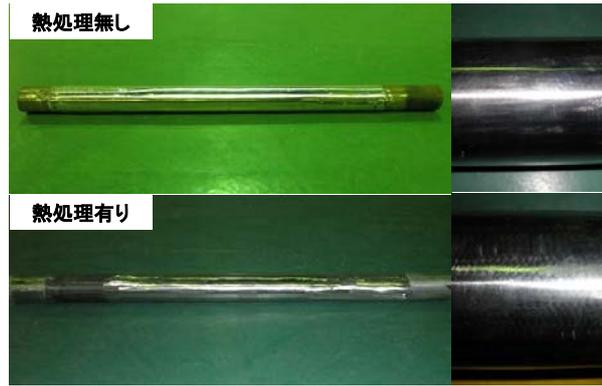


図 46 曲げ試験片外観写真

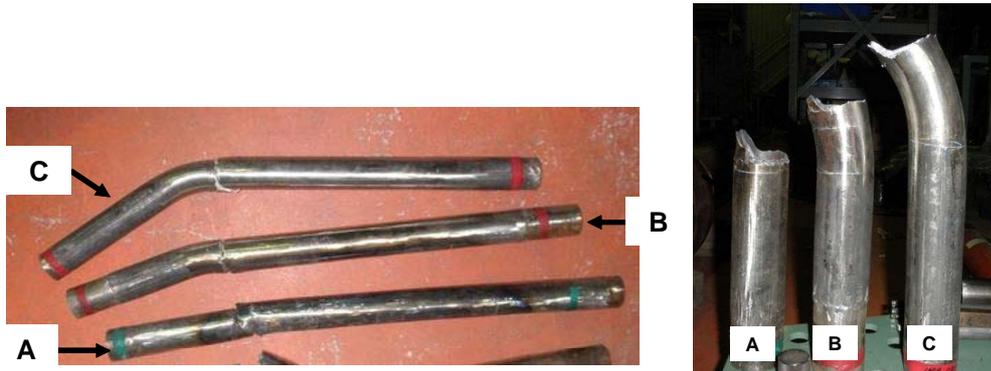


図 47 曲げ試験後外観写真

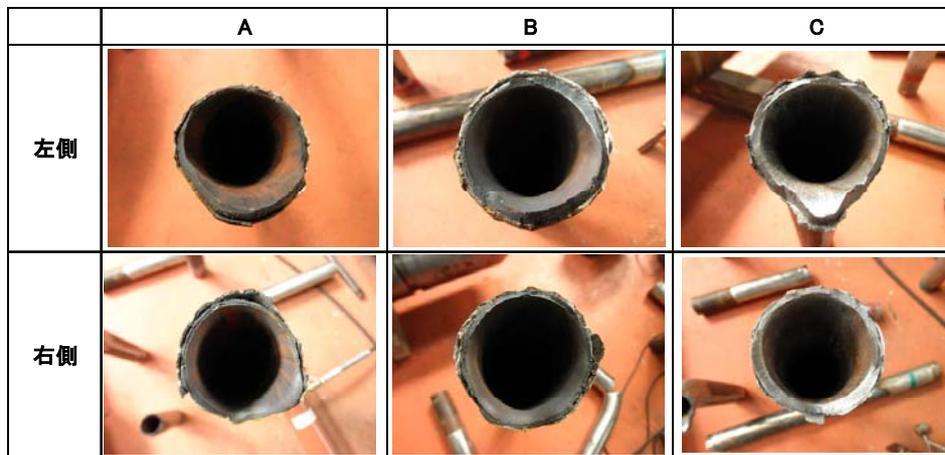


図 48 曲げ試験片の破断面写真

4-2-1 ボイラー管曲げ試験(パイプベンダー)

ここでは、今年度導入したパイプベンダー装置を使用して、摩擦肉盛管の曲げ加工が可能となる条件を実証する試験を行っている段階である。

図 49 にパイプベンダー本体の写真及びパイプベンダーの曲げ加工法の概略図を示す。パイプベンダーは、シリンダー及びセンターフォーマー、エンドフォーマー、油圧ポンプで構成されている。概略図のようにパイプをセットして油圧シリンダーを駆動させセンターフォーマーをパイプに押し付けてパイプの曲げを行う。図 50 にボイラー管の曲げ試験を実施した写真を示す。Φ63.5×5t ボイラー管の曲げ加工が可能であること

が確認できた。現状の装置の曲げ角度の限界は 90° である。

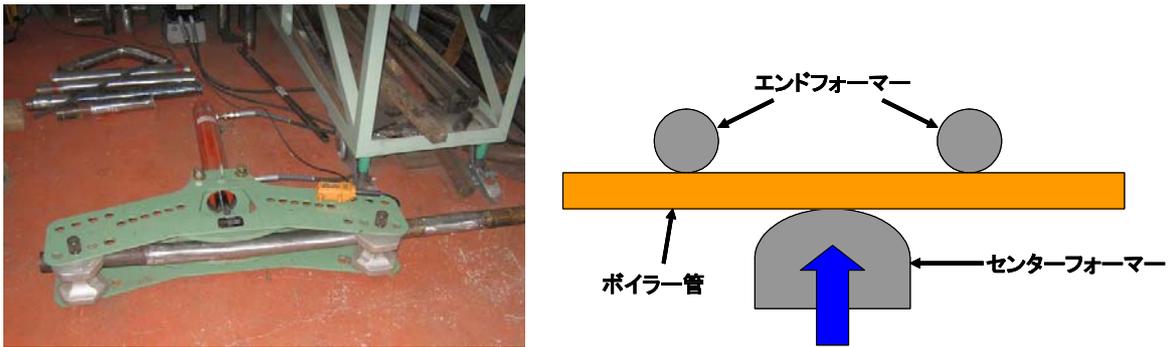


図 49 パイプベンダー本体及び曲げ加工法概略図



図 50 パイプベンダーの曲げ加工試験

図 51 に肉盛管の曲げ試験結果を示す。曲げ加工を始めて直ぐ肉盛層表面に割れが発生した。割れの発生位置は曲げのセンターより5cm 右側(c)である。肉盛の位置では、肉盛終了位置から230mm 手前である。

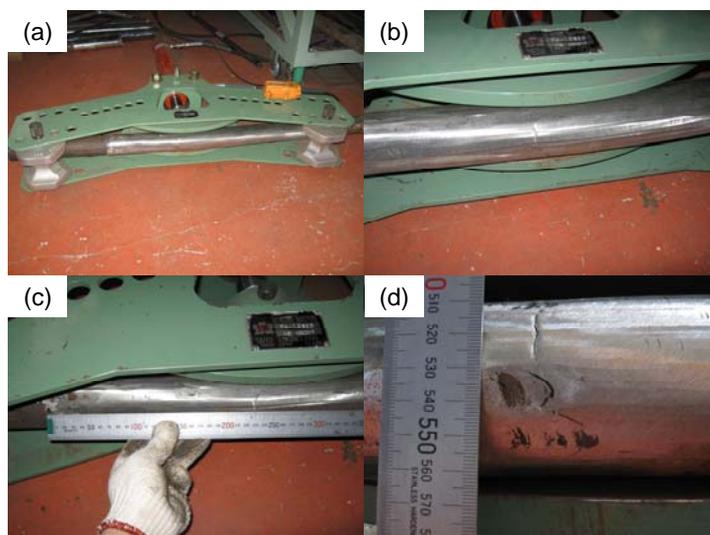


図 51 肉盛管曲げ試験結果

この試験片の超音波検査結果を図 52 に示す。図 51 に示す試験片の割れの発生した位置は、超音波検査結果の画像上に左側であることが確認できた。多数の欠陥が存在するため、割れが発生したと考えられる。そこで、欠陥がほぼ存在しない肉盛管の右側で曲げ試験を実施した。図 53 に曲げ試験の結果を示す。曲げ加工は、位置をずらしながら数回行った。一回目の曲げで肉層の一部に割れが発生したが、曲げ加工を続行して 90° まで加工した。曲げ試験後の代表的な外観写真を図 54 に示す。図中の番号は、図 53(d) 中の番号に対応する。1 は、曲げ加工初期に発生した割れである。肉盛管の曲げ外側半周に割れが発生して肉盛層が剥離した。割れの位置は、長手方向の重ね肉盛部に対応することがわかった。現状の肉盛条件では、長手方向の重ね肉盛部での曲げ加工が困難であることがわかった。2 は、曲げ方向に対して 90° に近い位置で、約 100mm の範囲に渡って割れが発生した。割れの発生位置は、全周肉盛の 15 パス目に対応する。超音波検査結果で確認すると、15 パス目の前半に存在する長さ 100mm 範囲に存在する内部欠陥の位置に重なることが判明した。内部欠陥が長範囲に存在すると、曲げ加工時の割れ発生の原因になることが考えられる。3 は、曲げ加工時に最も伸びが発生しやすい外側の位置である。この位置には内部欠陥が存在せず、割れが発生しないことが確認できた。

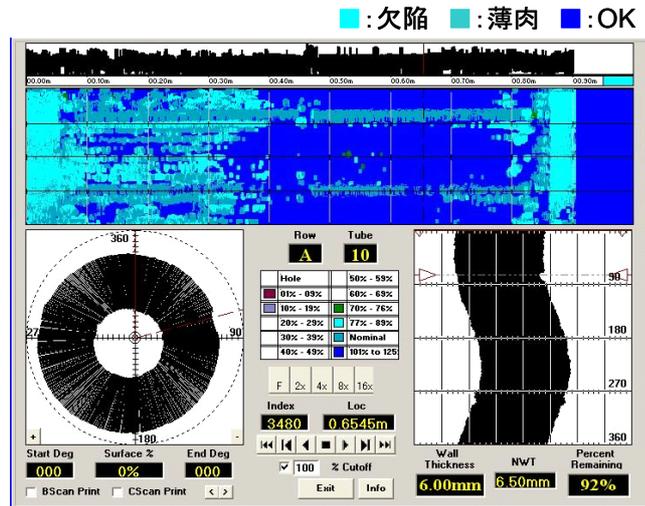


図 52 曲げ試験片の超音波検査結果

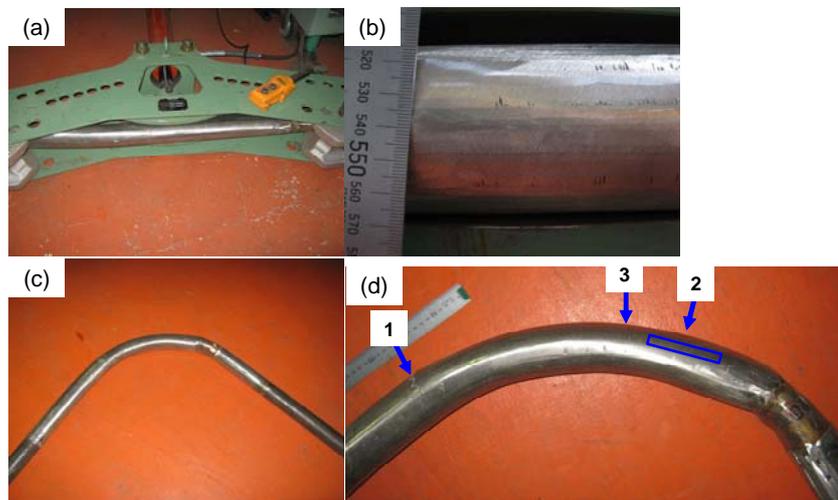


図 53 曲げ試験片の外観写真

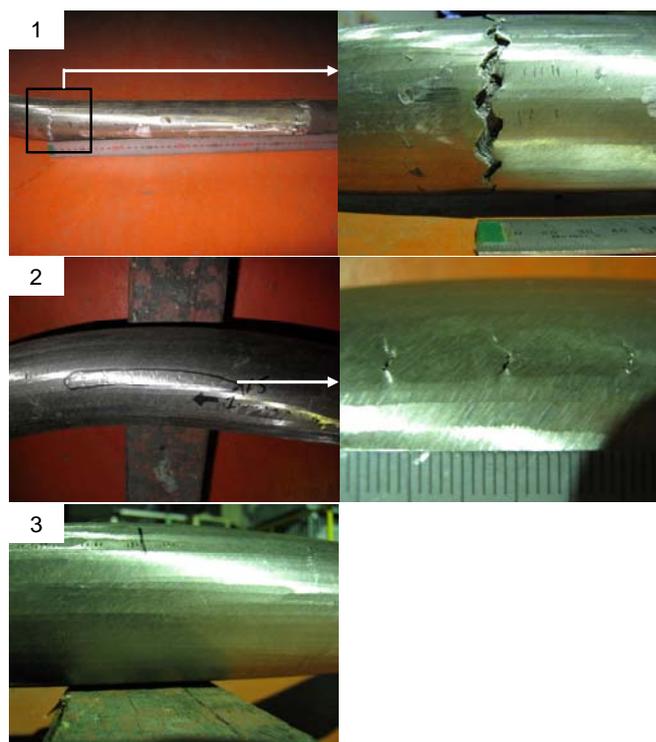


図 54 曲げ試験片の詳細写真

4-3 結論および今後の課題

本論では、第 2 章でボイラー管へ摩擦肉盛した肉盛管の品質評価を行った。研究成果を以下にまとめる。

- (1) 超音波検査装置により、摩擦肉盛管の全周・全長の肉盛厚さの測定及び内部欠陥の検査が可能となった。また、画像処理装置を使用することで、円周方向と長手方向の位置関係がより正確に分析可能となった。
- (2) 曲げ試験の結果(専門メーカー)、曲げ R の厳しい条件では、摩擦肉盛管の曲げ加工が困難であることが判明した。
- (3) 摩擦肉盛層の引張特性を調査した結果、肉盛層の硬度 HV350 であれば伸び 45% であることが判明した。すなわち熱処理を行えば、十分な曲げ加工性を有することが確認できた。
- (4) パイプベンダーを使用した曲げ試験の結果、摩擦肉盛管の長範囲に内部欠陥が存在しなければ曲げ加工が可能であることが判明した。

現時点の判断としては、スーパーヒーターに適用される曲げ半径の加工は困難と思われ本研究の成果である摩擦肉盛管はスーパーヒーターの直管部のみに使用し、バンド部にはインコネル 625 の曲げ管を接合して使用することも事業化を早く実現するために有効であると考えられる。

第5章 全体総括

本論では、H19 年度～H21 年度で実施した研究開発で得られた成果を総括する。

5-1 H19 年度研究開発成果

5-1-1 ボイラー管内面治具の開発

摩擦肉盛時にかかる圧力に耐え、肉盛によるボイラー管の塑性変形と熱収縮で管の内径が縮小しても抜けるボイラー管内面治具を開発するため、ネジ拡縮式の内面治具を試作した。

5-1-2 ボイラー管内面治具のテスト

5-1-1 で作製したボイラー管内面治具を用い、ボイラー管へ肉盛長さ 400mm の全周肉盛を行った。肉盛材はΦ25 インコネル棒を使用した。施工方法は、ボイラー管長手方向に長さ 400mm 肉盛した後、ボイラー管を 180 度回転させ同様に 400mm 肉盛する。以降は肉盛部が数 mm 程度重なるようにこれを繰り返すことで全周肉盛を行った。

5-1-3 摩擦肉盛装置の改造

ボイラー管への摩擦肉盛が可能な仕様に改造を行った。摩擦肉盛装置の新設内容を以下に記す。

(1)パイプ把持装置、(2)パイプ荷重受装置、(3)切削装置、(4)摩擦圧接用装置

5-1-4 肉盛条件及び肉盛部特性

5-1-2 の全周肉盛品の調査を行った結果、肉盛重ね部分に未圧着部が存在し今後肉盛条件等の検討が必要である。インコネルの摩擦肉盛部の特性的優位性を明らかにするため、肉盛部の材料組織学的試験、硬さ測定、耐食性試験を実施し、インコネルのアーク溶接肉盛部と比較した。図 55 に摩擦肉盛とアーク溶接肉盛の SEM 及び OIM 観察結果を示す。アーク肉盛部は粗大粒により構成されており、基材近傍で基材とインコネルの希釈が見られた。一方、摩擦肉盛部は、基材との希釈がない微細な組織が観察された。硬さに大きな違いは見られなかったが、結晶粒径の細かい摩擦肉盛部の方が若干硬化する傾向にあった。硫酸・硫酸第二鉄腐食試験に供した結果、アーク肉盛部の方が早く腐食される傾向にあった。以上の結果より摩擦肉盛法はアーク溶接肉盛法に比べ優れた品質のインコネル肉盛部を製造するのに効果的な手法であることが示された。

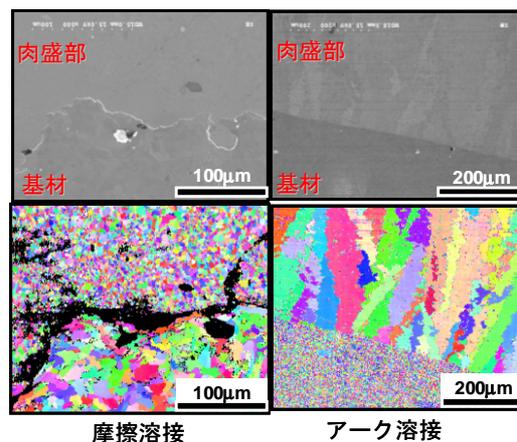


図 55 摩擦肉盛とアーク溶接肉盛の SEM 及び OIM 観察結果

5-2 H20 年度研究開発成果

5-2-1 ボイラー管への摩擦肉盛研究

ボイラー管への摩擦肉盛研究結果を以下に要約する。①全周肉盛品の肉厚 2mm を達成可能な条件を確立した。②ボイラー管への重ね肉盛部の欠陥を減少させる条件を見出した。③ボイラー管へ5m 長さの肉盛が可能な条件を見出した。現状の設備では、①と②の同時達成は不可能だとわかった。

5-2-2 摩擦肉盛部の特性評価

高温腐食試験の結果、腐食の程度が従来のアーク溶接に比べ摩擦肉盛の方が軽微で、耐食性に優位だとわかった(図 56)。また浸漬試験(王水)でも摩擦肉盛のほうが高い耐食性を示した(図 57)。これら摩擦肉盛の高い耐食性は、微細かつ均一なマイクロ組織を形成するためと考えられる。

5-2-3 摩擦肉盛品の品質評価

2次元レーザ変位計により、摩擦肉盛部の肉厚を1μmの精度で測定が可能である。しかし摩擦肉盛による若干のボイラー管の変形が発生するためオンライン測定が困難であることがわかった。重ね肉盛部の内部欠陥(未圧着部)と重ね部外観形状の相関性の確認を3次元レーザ顕微鏡で行った結果、重ね部凹凸のばらつきが多く相関性の判断が困難だと判明した。高温腐食試験及び浸漬試験(王水)後のサンプル調査で摩擦肉盛とアーク溶接の耐食性評価に十分活用できた。内挿式超音波検査装置で平底φ1mm の欠陥検出が可能で肉盛したボイラー管の肉厚測定が1/100mmの精度で可能だと判明した。

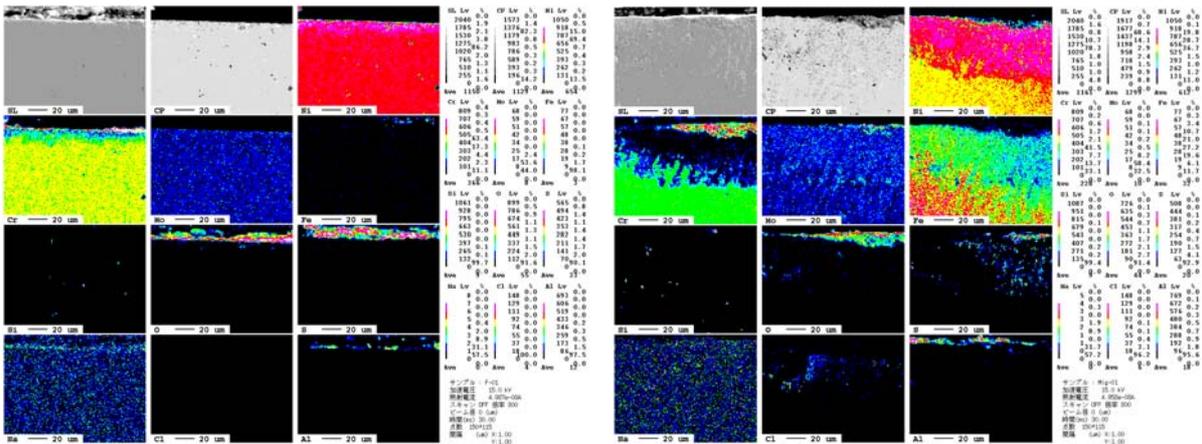


図 56 高温腐食試験後断面の EPMA 分析結果 左:摩擦肉盛, 右:アーク溶接

	浸漬前	1hr浸漬後	2hr浸漬後
摩擦肉盛			
アーク溶接			

図 57 浸漬試験(王水)後の外観写真

5-3 H21 年度研究開発成果

5-3-1 10m ボイラー管への 5m 長さの摩擦肉盛条件の研究

- (1) 温度制御を行い、ボイラー管への全周肉盛の肉盛条件を均一化することで肉盛厚さのばらつきを無くすことが可能となった。
- (2) 摩擦肉盛時のボイラー管の内面と長手方向の変形を最小限に抑えることで5m長さの摩擦肉盛が可能となった。
- (3) 小径ボイラー管(Φ48.6×5t)用の内面治具を設計製作し、小径ボイラー管への全周肉盛が可能な条件を見出した。

5-3-2 摩擦肉盛部の特性評価

(1)高温腐食試験(実験室レベル)

試験条件 温度:650°C 時間:300hr 環境:実灰塗布・腐食性ガス雰囲気とした。高温腐食試験の結果、摩擦肉盛法はアーク肉盛法に比べて、優れた耐高温腐食性を有するとともに、実使用環境中で十分な結晶粒組織安定性を有していることが確認できた。

(2)高温腐食試験(実炉:北九州市環境局日明環境センター 日明工場)

試験条件 設置場所:焼却炉内 温度:約 600°C 期間:H21 年 12 月 24 日~H22 年 3 月 12 日とした。H22 年 3 月 12 日に焼却炉の停止に合わせ試験終了し、H22 年 3 月 16 日に炉内よりサンプルを取外した。今回の試験環境では摩擦肉盛とアーク溶接共に腐食はほとんど進行していないことが確認できた。

5-3-3 摩擦肉盛したボイラー管の品質評価

- (1) 内挿式超音波検査装置と画像処理装置を使用することで、ボイラー管の全長・全周の肉盛厚さを連続的に調査することが可能となった。
- (2) 摩擦肉盛管の曲げ試験の結果、ボイラー管外径に対して曲げ R が厳しいこと、また通常のアーク溶接肉盛管の曲げ加工と同一条件では、曲げ加工が困難であることが判明した。同上の理由により曲げ部はインコネル 625 のチューブを使用し、直管部に本研究開発の成果である摩擦肉盛ボイラー管を使用する事が、事業化を早く実現するために有効であると考えられる。

5-4 研究開発後の課題・事業化展開

(1) 技術的課題の対策

摩擦肉盛を実施したボイラー管は、スーパーヒーターとして使用する曲げ加工時、皮膜と母材の伸びの差で皮膜の剥離が生じることが判明した。直管でスーパーヒーターに使用するためインコネルの曲げ管と性能劣化することなく接合する技術を開発することで早期事業化につなげる必要がある。

(2) 実機試験の体制及び生産体制

すでにごみ発電プラント及び発電プラントに熔融溶接肉盛と溶射技術で市場展開している(株)フジコーの環境プラント部と一体となって生産に向けてのコスト試算と具体的なユーザーへのアプローチ方法について検討を進め実機試験の実践に向けて活動する。また、生産体制の整備については、(株)フジコー新工場(H24 予定)の計画に摩擦肉盛管の生産ラインを折り込んでおり、全社的なバックアップのもと計画的に実施していく。