

## 省エネルギーのための高温燃焼を可能とする 新しい表面処理技術の研究

Study of Surface Treatment Technology to Enhance The Possibility of High Temperature Incineration for Energy Saving



技術開発センター  
坂田 太志  
Futoshi Sakata

技術開発センター  
興梠 隆  
Takashi Koroki

### 要旨

各種の廃棄物焼却プラントにおいて、省エネルギー効果を高めるために、蒸気ボイラ条件の高温・高圧化が図られている。このため、プラントにおいては、金属部材の劣化・損耗が顕在化し、その対策が急務となっている。

高温域の腐食環境下に晒される金属部の耐食性向上を図るため、耐食性の高い材料をMIG溶接機により肉盛りする技術については、「創る」No. 9（廃棄物発電ボイラの高温耐食表面処理技術）に示している。

本号では、新たに数種の表面処理法による低希釈化の可能性について、研究調査した内容を報告する。

### Synopsis:

Incineration plants are operating their waste heat boilers to generate higher-temperature higher-pressure steam as an effort of energy saving power generation, but having in turn a problem that the steam accelerates the deterioration and wear of metal parts of the equipment.

We presented a study report of MIG hard facing technology titled “High Temperature Hot Corrosion-resistant Cladding Technology for Boilers at Municipal Waste-fired Power Plants” in the preceding technical report “tsukuru” Volume No.9 as a breakthrough to improve the corrosion resistance of metal parts exposed to an corrosive environment.

We have further studied other surface treatment possibilities to lower dilution, and hereby present what we have learnt from the study.

### 1 緒言

ごみや廃棄物の焼却時に発生する排熱を熱交換し発電する廃棄物発電において、発電効率の大幅な向上がサーマルリサイクルの柱として社会的に注目されている事は、既に多くの報告書に述べられている。この発電効率の高効率化における問題点には、ボイラ発電設備内の高温化に起因し、燃焼ガスやダストに含まれる塩素やアルカリ溶融塩による高温腐食、飛灰中のシリカやアルミナ等の硬質粒子による高温アブレッシブ摩耗などにより、金属部材の劣化や損耗が激化する事があげられる。<sup>1)</sup> この劣化や損耗を防ぐため、ボイラ設備内の金属部材には、溶射・溶接などにより耐食性や耐摩耗性を向上させるための表面処理が広く行われて

いる。しかし、発電効率30%を可能とするようなボイラ蒸気の高温・高圧力条件下における耐食・耐摩耗表面処理性能が、現状では十分満足するレベルにあるとは言い難い。溶接による表面処理では、施工条件にもよるが、溶接時の表面処理対象材の溶け込みが大きいいため、溶接材料自体の性能の劣化が大きい。また、溶射による表面処理では、表面処理対象材の溶け込みはほとんど無いが、密着強度が低く、また溶射皮膜中に気孔が内在する 경우가多く、腐食成分の皮膜内部への浸透の問題もある。

そこで、材料の性能を100%活かし、また密着強度も強靱な表面処理方法の研究調査を行った。具体的には、下記の三項目について、その特性調査・試験を行った。

①ダブルワイヤ（以下DWと記す）方式MIG溶接機の研究調査

②交流パルスMIG溶接機の研究調査

③摩擦による表面処理の研究調査

それぞれについての技術説明と、試験内容、試験結果、考察等を、以下順次報告する。

## 2 ダブルワイヤ方式MIG溶接機の研究調査

### 2.1 技術説明

DW方式MIG溶接機は、従来の1本溶接ワイヤ使用のMIG溶接機に更にもう1本溶接ワイヤを使用するMIG溶接機であり、低融点材料のアルミ用に開発された装置である。

このDW方式MIG溶接機を鋼材の溶接へ応用し、溶接速度の向上や従来と同じ溶接入熱で溶着量を増加させる目的で、1999年から実用化が進められている。一般的に使用されているシングルMIG溶接機に比べて、一般のSC材では同一溶着量を30%ほど少ない入熱量で実施できることが確認されている。<sup>2)3)4)</sup>

Fig.1にDW方式のシステム概要を示す。

電極ワイヤで通常溶融させ、もう1本のフィラワイヤを溶融池に供給する方法である。

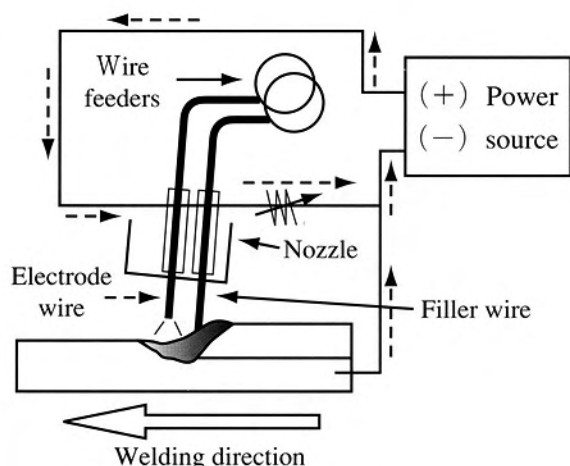


Fig.1 Configuration of DW system

このDW方式の特徴は、メインの電極ワイヤから母材側へ電流が流れるが、もう1本のフィラワイヤには母材側からの逆流の電流が流れる。そのため、溶接時の入熱量を一般の1本ワイヤ方式に比べ30~40%低く抑えることができる。

耐食材料についても同様の入熱量削減効果が期待できるが、DW方式MIG溶接機を用いた耐食材料の溶接には前例が無い。そこで、DW方式MIG溶接機を用いた耐食材料の溶接ビード形成の可否と入熱量削減効果の確認のため、以下に示す試験を行った。

### 2.2 試験内容と結果

開発段階の鋼材用DW方式MIG溶接機にて試験を実施した。Fig.2に試験に使用した装置の外観写真を示す。

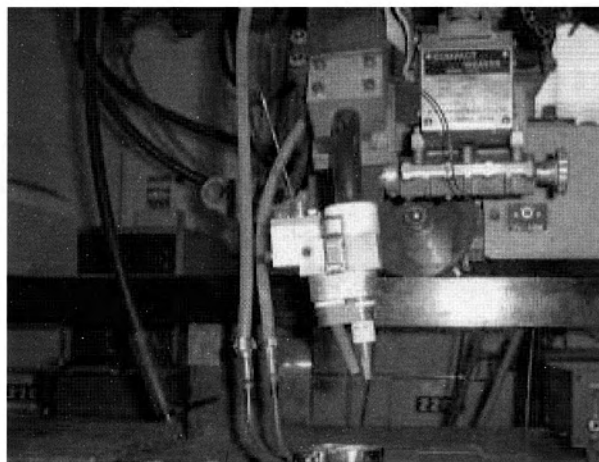


Fig.2 DW MIG Welding equipment DW MIG welding

耐食性溶接材料としては、一般的に用いられているインコネル625を用いた。

溶接条件をTable 1に示す。1.0mmφのインコネル625ワイヤを、メインとフィラワイヤの両方に使用した。

Table 1 DW welding conditions of alloy 625

No.	Shield gas		Welding wire	Welding conditions				
	Type	Flux (L/min)		Pulsation	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Filler feed (g/min)
1	100% Ar	20	Alloy 625	Yes	140	25	250	4.8
2	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	16.7

Fig.3に実験で行った溶接部の状況写真を示す。結果は、現状のDW装置では安定した溶接ビードが得られなかった。溶接部のビード形状変化が大きく、完全に溶けきれていないワイヤが飛散しているのが分かる。

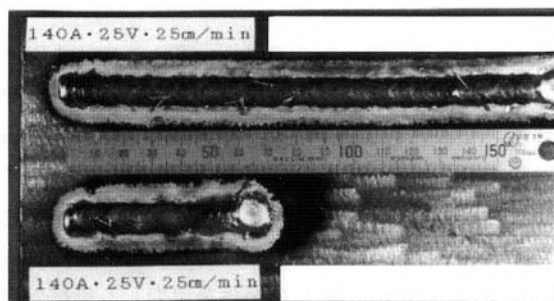


Fig.3 Welding bead of DW MIG welding

### 2.3 考察および今後の取り組み

Fig.4に示すようにメインワイヤである電極ワイヤは電流が母材側に流れ、溶接対象の母材に熔融池を形成する。その熔融池中にフィラワイヤを挿入しながら溶接は進行するが、フィラワイヤ側に母材側から電極ワイヤとは逆の電流が流れている。その結果として、入熱量の削減を期待した。

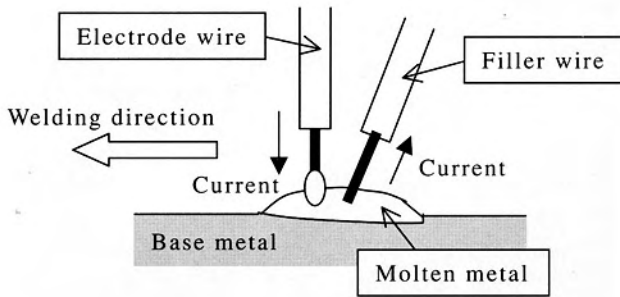


Fig.4 Outline of DW MIG welding

しかし、インコネル625はNi元素を60%程度含有するオーステナイト系であることから、フィラワイヤが熔融池に到達する前に、断続的に熔融・飛散し、良好なビードが得られないことが確認できた。原因は、現状の装置ではフィラ側の戻り電流がフィラ突き出し部（熔融池表面へ戻り電流給電点の間）での電気抵抗に左右され、オーステナイト系合金の場合、炭素鋼と比較して電気抵抗が大きく、フィラ突き出し部の温度変化に応じて戻り電流が不安定に変化したためであると考えられる。そのため熔融池に安定してフィラワイヤが挿入されない結果となった。現状の装置制御では、フィラワイヤへ流れる電流制御が十分にできないため、インコネル625の適用は難しい。

今年度より、今回の結果を元にフィラワイヤの電流制御を加えたDW溶接機をメーカーが開発する意向であることを確認した。その装置開発を待って、改めてインコネル625での溶接表面処理実験を行い、溶接ビード形成の確認と入熱量削減効果の確認を実施する予定である。

## 3 交流パルスMIG溶接機の研究調査

### 3.1 技術説明

通常使用される直流パルス溶接は、深い溶け込みが得られる棒プラス（EP=Electrode Positive）の極性が用いられる。しかし、アルミ板のように低融点材料や2mm以下の薄肉板などの溶接を行う場合は、母材への入熱が大きくなりすぎるため入熱量を抑制する必要がある。交流パルスMIG溶接機は、ベース電流出力時に棒マイナス（EN=Electrode Negative）の極性を出力し、母材への溶け込みを浅く（入熱制御）しながらワイヤ溶融量を確保することができるように開発された溶接機である。Fig.5に直流パルスMIGと交流パルスMIGの概要を示す。

電流パターンは、交流パルスMIGでは電極プラスと電極マイナスのサイクルを細かく制御でき、また周波数も変更できることから希釈率制御の可能性が高いことが確認できた。

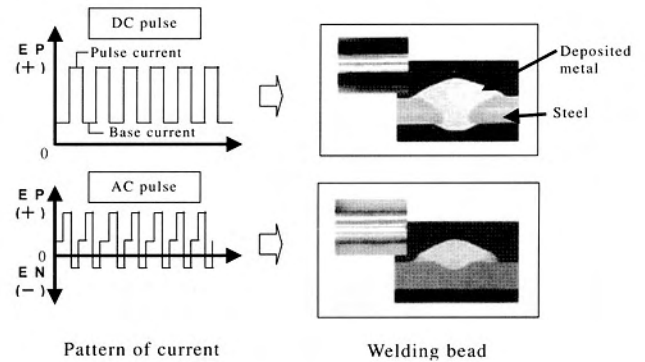


Fig.5 DC and AC-pulsed Properties of welding

耐食材料についても同様の希釈率制御が期待できるが、前例が無い。そこで、交流パルスMIG溶接機を用いた耐食材料の溶接ビード形成の可否と希釈率制御の確認のため、以下に示す試験を行った。

### 3.2 試験内容と結果

まず、希釈率制御の確認を行うため、溶接機メーカーより直流パルスMIG溶接機と、アルミ用の溶接機として平成12年に開発発売された交流パルスMIG溶接機で試験を行った。耐食性溶接材料にはインコネル625(1.2mmφ)を使用した。

直流パルスMIG溶接機と交流パルスMIG溶接機にて、同一溶接条件とそれぞれの溶接機に合った母材溶け込み最適条件で溶接を行い、溶接完了試験片の溶接部を切断して溶け込み状況（希釈率）を確認した。溶接による溶け込みは、単ビードのウィーピング無しで比較した。

Fig.6に交流パルスMIG溶接機電源部と溶接試験状況の写真を示す。

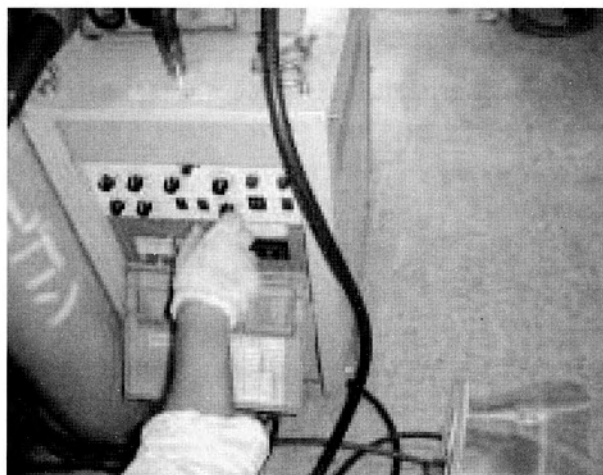
希釈率の測定方法は、表面処理材料の耐食性や耐摩耗性などの目的で含有するCr、Ni、Moなどの特殊元素の含有重量変化率を表したものである。例えば、インコネル625の場合は、Cr、Ni、Mo元素の溶接ワイヤの含有する重量率に対する溶接後のFig.7に示す溶接ビード部のCr、Ni、Mo元素の含有重量変化率である。

希釈率は、Fig.7に示す溶接対象母材の溶け込み深さと相関がある。そこで、まず溶接後の溶け込み深さを確認した。

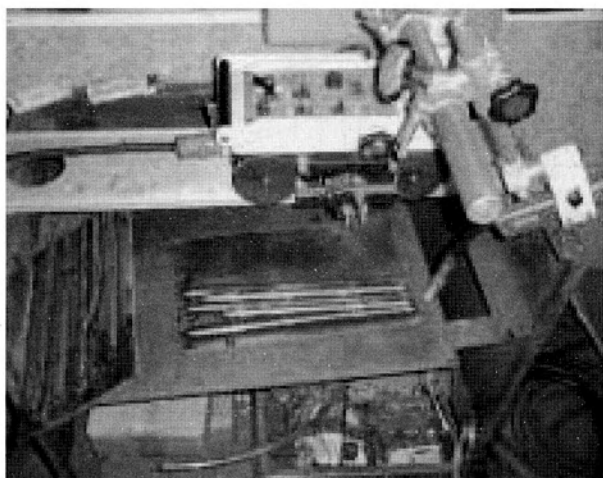
Table 2に溶接条件と溶接後の溶け込み深さの結果について示す。

従来型の直流パルスMIGで溶接した場合、電流100A、電圧20.5V、溶接速度300mm/minでは、溶接ビード幅は4.5mmと小さく、また溶け込み深さが0.9mmに対して、交流パルスMIGの同一条件で溶接した結果はビード幅が





Power source of AC-pulsed arc welding



Appearance of welding part

Fig.6 Appearances of testing (AC-pulsed arc welding)

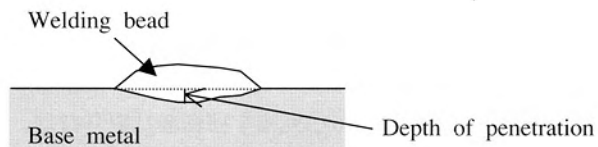


Fig.7 Welding bead

Table 2 Welding parameters and penetration depth

No.	Welding machine	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Width of welding bead (mm)	Welding thickness (mm)	MAX depth of penetration (mm)
1	AC pulse MIG	100	19~20	300	5	3.2	0.2~0.3
2		120	21	300	7	2.6	0.5
3		160	22	600	7.5	2.6	0.4
4	DC pulse MIG	100	20.5	300	4.5	2.7	0.9
5		120	21	300	7	3.3	1.5
6		160	22	600	6	2	1.4

5mmと若干広く、溶け込み深さは0.2~0.3mmと非常に浅いことが確認できた。すなわち、同じ溶接ビード形状で溶け込み深さの抑制が可能であり、希釈率の大幅低減ができることが分かった。

溶接電流を120A、160Aまで上げたがいずれの溶け込み深さも0.5mm以下と小さく、それぞれ直流パルスMIGよりも浅いことが確認できた。参考までに1.0mmφの軟鋼溶接ワイヤでも溶け込み確認を行ったが、この場合も溶け込み深さは小さい結果となった。

交流パルスMIG溶接機による溶接は、直流MIG溶接機に比較して溶け込み深さを極端に小さく抑制できることが分かる。

Fig.8に電流120A、電圧21V、溶接速度300mm/minでの溶接断面写真を示す。交流パルスMIG溶接の方は溶け込み深さが殆どないことが分かる。

本実験では、溶接時のウィービング処理を実施しなかったが、事業化への展開ではウィービングをしながらの溶接が必要であることから、交流パルスMIG溶接装置をお借りして、ウィービング処理を実施した場合の、希釈率確認試験を実施した。

Table 3にその結果を示す。

この結果からもウィービング機能を持たせた交流パルスMIG溶接機による溶け込み深さの小さい施工の可能性が高いことが確認できた。

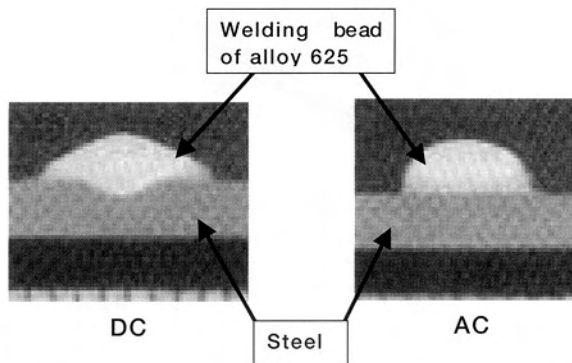


Fig.8 Weld sections of DC & AC-pulsed arc welding (Current 120A, Voltage 21V, Welding speed 300mm/min)

Table 3 Results of AC-pulsed MIG arc welding

No	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Width of weaving (mm)	Width of welding bead (mm)	Welding thickness (mm)	Appearance	Depth of penetration (mm)
1	100	18	200	12.5	15	2.5	△	0.2~0.4
2	135	20	200	17	20	2.3,2.0	○	M0.8,A0.4
3	140	22	200	17	21	2.2,1.7	○	M0.8,A0.5
4	130	22	200	16	17	3	○	0.2~0.4
5	145	25	200	17	21	2.5	◎	M0.9,A0.2
6	132.5	23	200	17	20	2.5	○	M0.8,A0.2

M:Maximum  
A:Average

### 3.3 考察および今後の取り組み

単ビードの溶接テストにより、交流パルスMIGの方が直流パルスMIGよりも、希釈率を低く抑えられることが判明した。また、ウィーピング処理においても、その効果を確認する事ができた。

今回の溶接施工は下向きで行ったが、今後はボイラ内での現地施工を想定し、溶接姿勢として立向きや上向きの溶接施工の研究が必要である。また、プラントメーカーからの許容希釈率条件はさらに厳しくなっており、この調査にとどまらず溶接条件の選定を実施する必要がある。

## 4 摩擦により表面処理の研究調査

### 4.1 技術説明

摩擦による表面処理（＝摩擦肉盛）とは、棒状の表面処理材料を回転させ、一定圧力で表面処理しようとする対象材料に押し付け、移動することによって一定肉厚の表面処理を行う方法である。接合形態は、母材と表面処理材との拡散接合であり、表面処理しようとする対象材料を溶かさずに摩擦を使って肉盛の方法である。Fig.9に摩擦肉盛法の略図を示す。<sup>5)6)</sup>

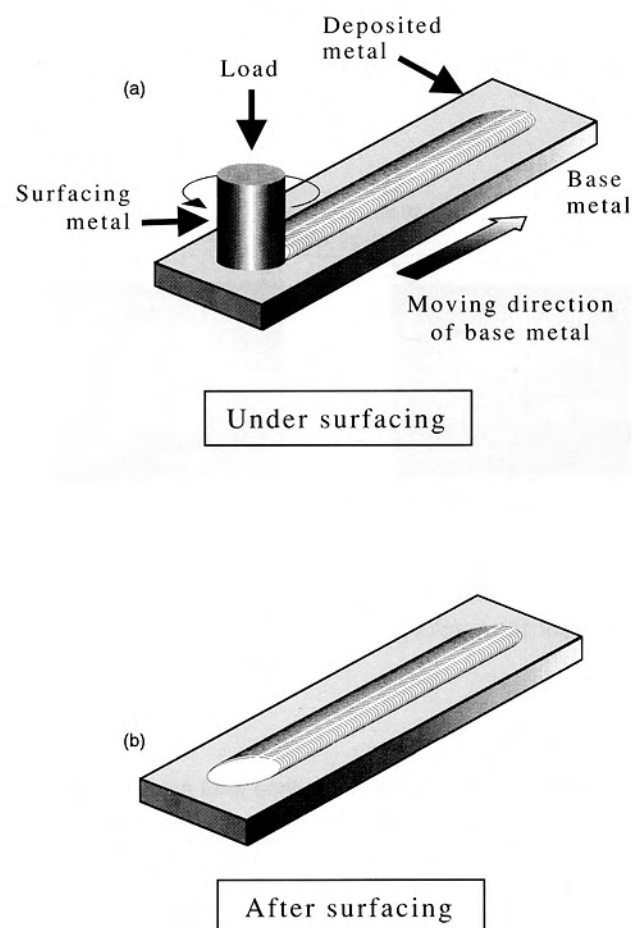


Fig.9 Outline of friction surfacing

棒状の肉盛材を一定の速度で回転させ、軸方向に圧力をかけて基材に押し付ける (Fig.9(a))。回転している肉盛材と基材との界面に摩擦熱が発生し、十分に肉盛材の温度が上がった時点で基材を移動させる。回転する肉盛材は融点に近い温度に達し、基材に塑性的に圧着する。基材、肉盛材の熱伝導率、熱容量に差があるため、最高温度は界面から少し肉盛材の側に寄った点で得られる。ここで肉盛材がせん断し、基材側に移動する。このプロセスは固相のままの加工であり、溶融はしない。このため基材の成分が肉盛材に溶け込んで材質が変わることがなく、高温で割れる心配もない。また溶射と違って多孔質になることがなく、高い強度が得られる。<sup>5)6)</sup> 摩擦肉盛法での最も基本的な応用は、基材の耐摩耗性・耐食性・耐高温性などの向上のための保護皮膜形成であり、Fig.10のような適用例の可能性があることが確認できた。<sup>5)6)</sup>

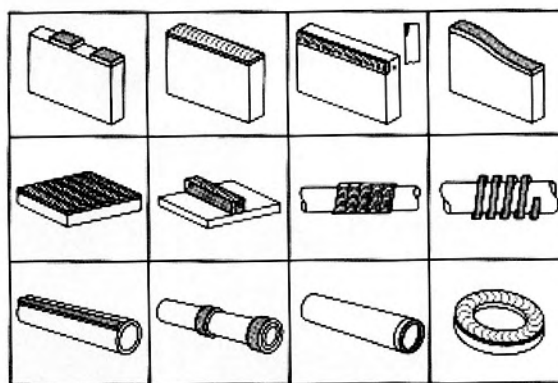


Fig.10 Promising example of friction surfacing

耐食材料についても同様の希釈率低減が期待できるが、前例が無い。そこで、耐食材料の摩擦肉盛の可否と希釈率低減確認のため、以下に示す試験を行った。

### 4.2 試験内容と結果

Fig.11に試験に使わせていただいた摩擦圧接機の仕様と外観写真を示す。

表面処理材料は、インコネル625 20mm φ × 150mmの丸棒を用いた。インコネル625丸棒を回転部に取り付け、回転させながら10mm厚さのSS400に所定の圧力で表面に押し付け、さらにSS400を移動してインコネル625を肉盛した。

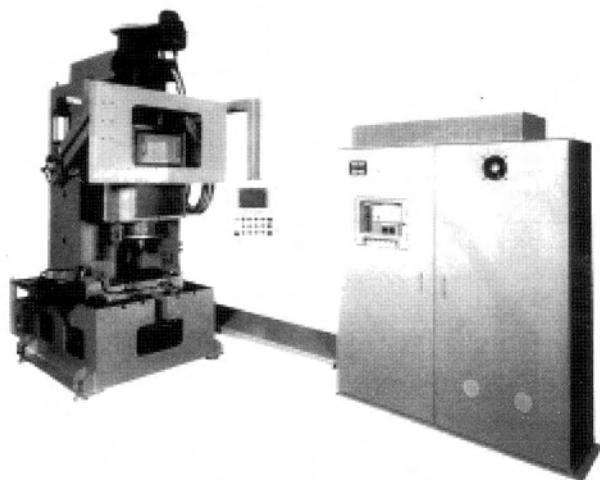
Fig.12に摩擦による表面処理状況写真を示す。

まず、インコネル625丸棒を今回の試験では、400～800rpmの回転数でSS400平板に接触させ、丸棒とSS鋼材の接触部が十分に過熱した時点でSS鋼材を移動させる。その後、回転している棒材とSS鋼材との界面に発生する定常的な摩擦熱によって棒材を塑性的に圧着させ、SS鋼材上に安定した肉盛層を形成した。

Table 4に試験条件と肉盛部外観結果を示す。

Full automatic friction pressure welding machine

Model: ACM-1



The maximum thrust 98.06KN  
Revolving speed of main shaft  
100~4000rpm

Fig.11 Appearance of friction surfacing machine (SINODA laboratory in NAGOYA University)

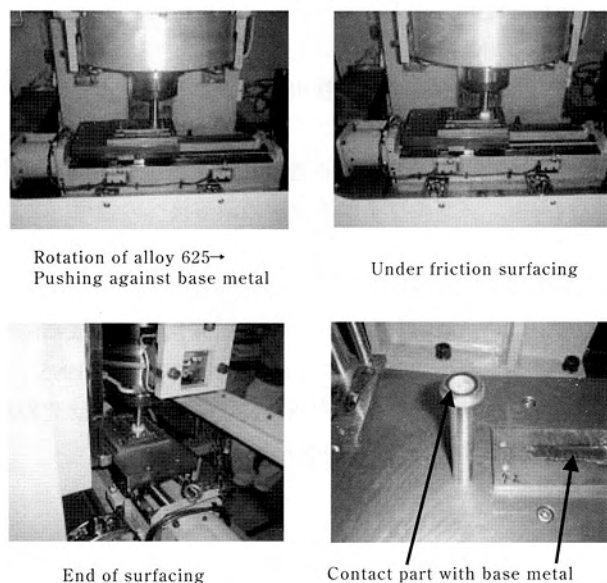


Fig.12 Appearance of friction surfacing examination

Table 4 Testing parameters of friction surfacing, and appearance of processed surface

No	Rotating speed (rpm)	Moving speed of base metal (mm/sec)	Forcing pressure (Mpa)	Appearance of surfacing
1	800	1.0	20 → 40	Excessive holding time → Interruption
2	600	1.0	20 → 40	Uneven
3	600	0.5	20 → 40	Uneven
4	400	0.5	20 → 40	Uneven
5	400	1.0	20 → 40	Good
6	400	1.5	30 → 60	Slightly irregular
7	400	2.0	30 → 60	Good

インコネル625丸棒の回転数は400rpmが良好の結果となった。移動速度が1.0mm/secの低速では、押し付け圧力が20~40MPaの低圧が良好な外観結果を示し、2.0mm/secの高速側では押し付け圧力も30~60Mpaの高圧側が良好であった。

Fig.13に摩擦肉盛部外観の良好な試験No.5、6、7について肉盛部外観と切断面部カラーチェック写真を示す。

No	Friction surfacing bead	Result of penetrant testing
5		
6		
7		

Fig.13 Appearance and section of friction surfacing bead

Table 5に試料No5~7の肉盛部断面の肉盛幅、肉盛厚および接合幅を示す。Fig.14には肉盛部と母材接合幅測定位置を示す。

No.5は、肉盛断面確認結果で、母材と肉盛り部の間に一面未接合部があり、接合が不十分であった。No.7は接合幅が10mm以上であり、摩擦による連続重ねを行うことによって未接合部低減の可能性は高いと判断する。また、接合面の溶け込みは全くなく、また希釈率はほぼ0%であることも確認できた。

Table 5 Sectional dimensions of friction surfacing

No	Bead width (mm)	Thickness (mm)	Width of joined part (mm)
5	11.5	1.65	0
6	15.0	1.61	9
7	16.0	1.45	10

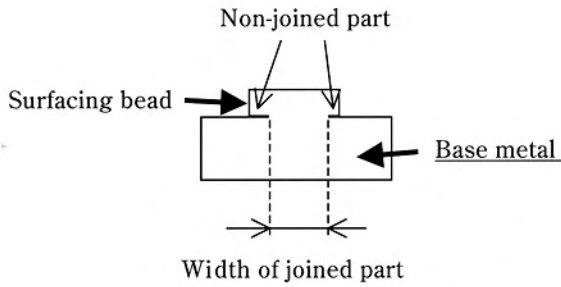


Fig.14 Junction width measurement position

#### 4.3 考察および今後の取り組み

摩擦肉盛法でのインコネル625の肉盛に成功した。ただし、最も接合幅が大きな条件でも、ビード幅に対して約35%が未接合部であり、今後さらに肉盛条件の選定を行う必要がある。

接合部の溶け込みはほぼ存在せず、希釈率も0%である事が確認出来た。

作業性では、接合面のバリ生成によるロスが約50%であることから、事業化に向けては、このバリ低減方法や表面肉盛材料の連続供給方法など解決すべき課題が多々ある。

#### 5 まとめ

##### ①DW方式MIG溶接機

初めて、この装置でのインコネル625肉盛を実施したが、フィラワイヤの電流制御が現状の装置では困難であったため、健全なビード形状を得ることができなかった。フィラワイヤの電流制御装置の開発を待ち、新たに試験を実施したい。

##### ②交流パルスMIG溶接機

この装置で初めてインコネル625肉盛を実施し、低希釈率で肉盛りできることが確認できた。希釈率の面で、対象とするボイラ関連の表面処理法として十分に検討でき、今後さらに溶接条件を選定していきたい。

##### ③摩擦による表面処理

肉盛棒として、初めてインコネル625を採用して試験を行い、SS鋼材表面に肉盛りできることが確認できた。しかし、品質の面では接合幅に問題を残している。また、作業性の面ではバリ発生抑制・肉盛棒の連続供給などの問題がある。

摩擦肉盛法は、将来的にも非常に大きな効果をもたらすことが期待でき、今後とも名古屋大学に協力を仰ぎ、肉盛テストを実施したい。

#### 6 総括

表面処理材料の性能を100%活かし、また密着強度も強靱な表面処理方法の探索のため、3方法について研究調査を行った結果、交流パルスMIG溶接法・摩擦肉盛法の2つについては、希釈率の面で良好な結果を得ることができた。さらに、事業化に結び付けられるような、詳細の条件選定を実施していきたい。DW方式MIG溶接法についても、現状装置の問題提起ができたので、今後の調査を進めたい。

#### 参考文献

- 1) 川原雄三・折田寛彦・高橋和義・中川裕二, 高効率廃棄物発電ボイラ用新耐食合金管の実証試験, 鉄と銅 Vol. 87 No. 8, 2001
- 2) 宮内秀樹・中田実雄・篠田剛, ダブルワイヤ溶接法の銅溶接への適用 (1)
- 3) 高野悠敬・山本光・高谷透・瀬山泰洋・中田実雄・宮内秀樹, ダブルワイヤ溶接法の銅溶接への適用 (2)
- 4) 池上祐一・中田実雄・宮内秀樹・篠田剛・山本光, ダブルワイヤ溶接法の銅溶接への適用 (3)
- 5) 篠田剛ら, 摩擦肉盛法による表面硬化層の形成に関する研究, 溶接学会論文集 Vol. 13 No.3 p.432, 1995
- 6) 篠田剛・李錦旗, 摩擦肉盛法による表面改質研究の現状, 溶接学会誌 Vol. 66 No. 6 p.441, 1997