

大径管全姿勢自動 TIG 溶接の開発と適用

Development and Application of All Position Automatic TIG Welding to Boiler Piping

横山 成就	エネルギー・プラントセクター工務・生産センター相生工場製造部
小林 亮	エネルギー・プラントセクター工務・生産センター相生工場製造部
金光 秀起	エネルギー・プラントセクター工務・生産センター相生工場製造部
佐々木 拓也	エネルギー・プラントセクター工務・生産センター相生工場製造部 課長
小林 和行	技術開発本部生産技術センター溶接技術部

発電用火力ボイラ大径管の溶接施工は、近年の蒸気条件の高温・高圧化を背景に素材の厚肉化・高級化が進んでおり、従来と同様に製作納期短縮のニーズがある。このような情勢に伴い、溶接施工にはより高い品質・効率が求められる傾向にある。しかし、熟練した被覆アーク溶接士の確保が世代交代によって難しくなっており、その育成には長期間にわたる訓練と経験が必要である。そこで、自動溶接施工技術を開発することによって、安定した品質と工期短縮を実現するとともに熟練工依存からの脱却を図る。本稿ではその開発経緯と実機への適用状況について述べる。

Boiler piping materials have to be thicker and of higher grades because of the increasingly intense steam conditions. And as is often the case, short delivery times are required. This means that welding procedures must be of higher quality and efficiency than ever before. However, it is becoming hard to keep a workforce of skilled shielded metal arc welders as the current generation ages and the next generation yet lacks the necessary skills because long term training and experience is needed to cultivate skilled welders. Therefore, to achieve stable quality and shorter delivery times as well as break away from this dependence on skilled welders, IHI is developing automatic welding technology. This paper describes the development trends and applications to real plant piping.

1. 緒 言

発電用火力ボイラにおける大径管は、近年のプラント蒸気条件の高温・高圧化によって素材の厚肉化・高級化の傾向にある。このような素材を用いた溶接施工では基本ニーズである納期短縮という命題とともに、高い品質が求められる。

大径管の溶接施工は、管を回転させて下向きで施工するサブマージアーク溶接 (SAW) が主に適用されている。この溶接方法は高電流による効率的な施工が可能であるが、フラックスを用いるため溶接姿勢は下向きに限定される。一方、ブロック化に伴い管の回転が不可能な場合は被覆アーク溶接 (SMAW) による全姿勢溶接を実施している。なお、この溶接方法において高品質の溶接継手製作を実現するためには、熟練工による施工が求められる。しかし、近年の世代交代によってその確保が難しくなっており、育成に当たっては長期間の施工訓練と継続的な施工実績が必要である。

この熟練工依存からの脱却を図り、高品質な溶接製品を安定供給し、かつ効率化を図るために自動溶接施工技術の

開発を進めた。自動溶接施工技術の開発に当たっての溶接方式の選定としては、先述の SAW のほかにガスメタルアーク溶接 (GMAW) も選択肢として挙げられるが、溶接スパッタやスラグの処理が発生する。開発の方針として連続溶接・自動化を目指すため、溶接方式は TIG 溶接を採用した。本稿ではその開発経緯と実機への適用状況について述べる。

2. 開発課題

全姿勢自動 TIG 溶接は当社相生工場における自動溶接継手 (初層自動 TIG 溶接 + 残層 SAW 溶接) において多数の施工実績をもっているが、全層での自動 TIG 溶接を実現するに当たり、課題である項目を以下に示す。

2.1 開発コンセプト

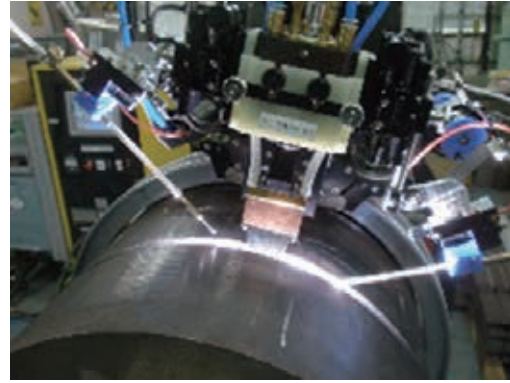
(1) 装置開発

素材の厚肉化・狭開先化に対応するため、トーチの小型化、シールド性を確保するためのノズル形状とする装置を開発した。全姿勢自動 TIG 溶接機の開発前後の外観を第 1 図 - (a) および - (b) に示す。

(a) 従来の装置



(b) 新規開発の装置



第 1 図 全姿勢自動 TIG 溶接機
Fig. 1 All position automatic TIG welding machine

(2) 電極回転方式の採用

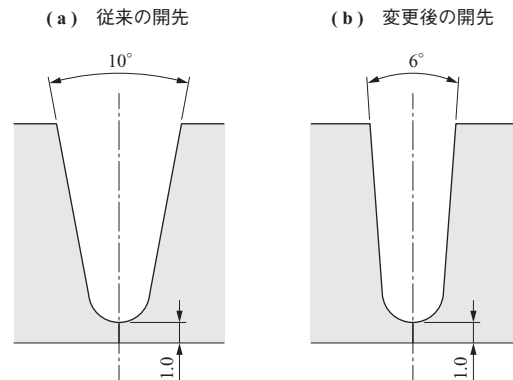
狭開先の溶接を実現するために電極先端を斜めに切り落とした形状の斜切電極を採用した。斜切電極は電極中心軸からのアーク偏芯を可能にし、先端を壁面に向けることで狭開先に対する安定した壁面溶融が容易になり、融合不良を低減できる。また、電極回転方式にオシレーション（溶接トーチを溶接の進行方向に対してほぼ直角に交互に動かす手溶接の手動運棒を模写し、軽便な機械装置によって運棒を行わせること）機構を付与することで広い開先幅においても 1 層多パス溶接から 1 層単パス溶接を可能にした。斜切電極の電極回転方式の概要を第 2 図に示す。

2.2 工期短縮

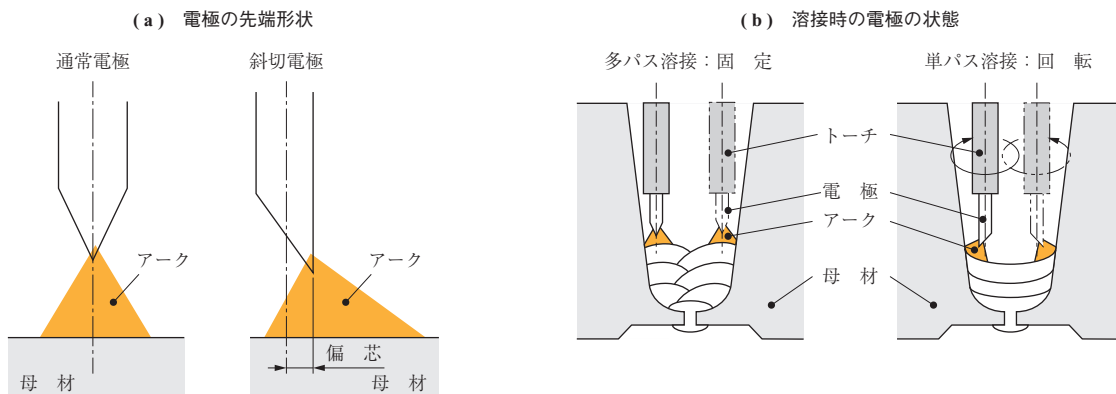
TIG 溶接は全姿勢への適用が可能で溶接スパッタやスラグの処理が不要であるため、連続溶接・放置化に適した溶接方法であるが、ほかの溶接方法と比較して溶着効率が低い。このため、工期の短縮を目指して以下に示す検討を行った。

(1) 狭開先化

溶接領域そのものを削減するため、開先形状の狭開先化を図り、開先角度を従来の 10 度から 6 度への変更を検討した。開先形状の狭開先化比較図を第 3 図に示す。厚さ 150 mm の周継手を想定した場合、この狭開先化によって 78% 程度の断面積削減が見込まれる。



第 3 図 開先形状の狭開先化比較図（単位：mm）
Fig. 3 Schematic diagram of narrow bevel (unit: mm)



第 2 図 斜切電極の電極回転方式
Fig. 2 Schematic diagram of diagonal cutting electrode

(2) 溶接作業効率の向上

従来の自動 TIG 溶接は配管の下側から左右に振り分けた上進 2 分割溶接で施工していた。これは溶着速度が大きい上進溶接を選択したための施工方法である。しかし、振分けを変更するため、装置の引き戻しと次パスの溶接狙い位置のセッティング作業が半周ごとに発生する。これを簡略化して溶接作業効率の向上を図るため、全姿勢で均一に溶接金属が積層可能な適正溶接を確立して往復での施工を可能にする。

第 4 図に見直し前後の溶接施工シーケンス比較図を示す。このシーケンスの見直しによって、溶接作業効率は 30% 程度向上することが見込まれる。

2.3 自動化

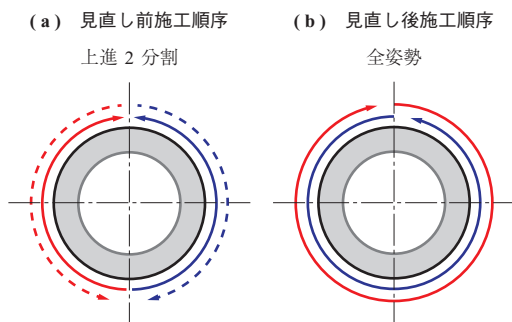
溶接施工時は積層中の状況変化を確認して条件を修正する、あるいは狙い位置を変更するという技量に依存した状況判断をする必要がある。また、厚肉・狭開先となった場合、溶接状況の視認が困難になる。溶接士の技量によらず品質の安定化を図るため、以下の検討を実施した。

(1) CCD カメラによるモニタリング

溶接作業では欠陥の発生を防止するため、アークの状況をオペレータが確認することで適切な溶接が施工されているかを判断している。しかし、厚板狭開先の全姿勢溶接におけるこの施工確認はオペレータの負担が大きいため、CCD カメラを導入し、溶接のモニタリング負荷を低減させて一人で複数台の同時施工の実現を図った。

(2) 開先倣い機構の開発

溶接施工では積層を重ねるごとに開先幅が少しずつ広がるため、従来技術では積層ごとに振幅の設定が必要であった。このため、電極が開先壁面を検知するまで移動する開先倣い機構の開発によって、振



第 4 図 溶接施工シーケンス比較図
Fig. 4 Comparison of welding sequences

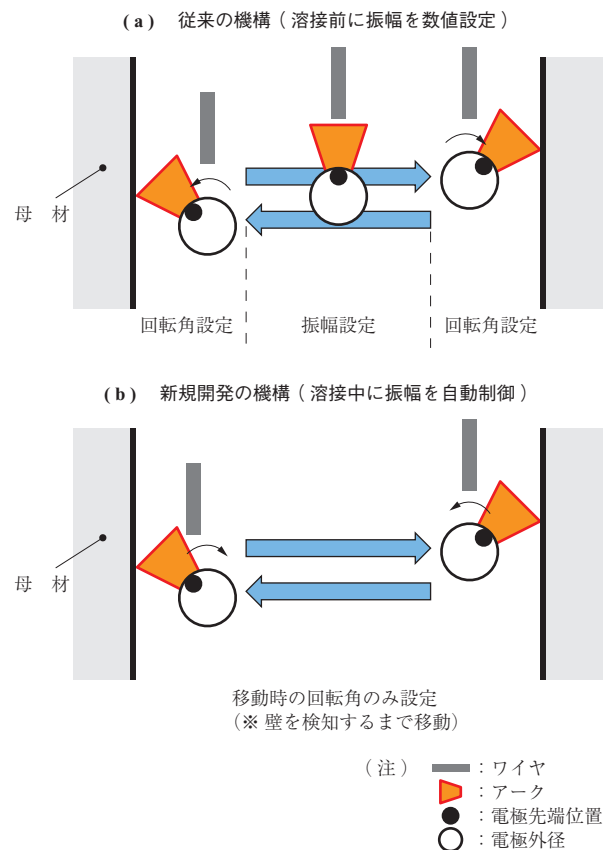
幅設定の省略を図った。開先倣い機構の概念図を第 5 図に示す。

(3) ワイヤ送給位置制御機構の開発

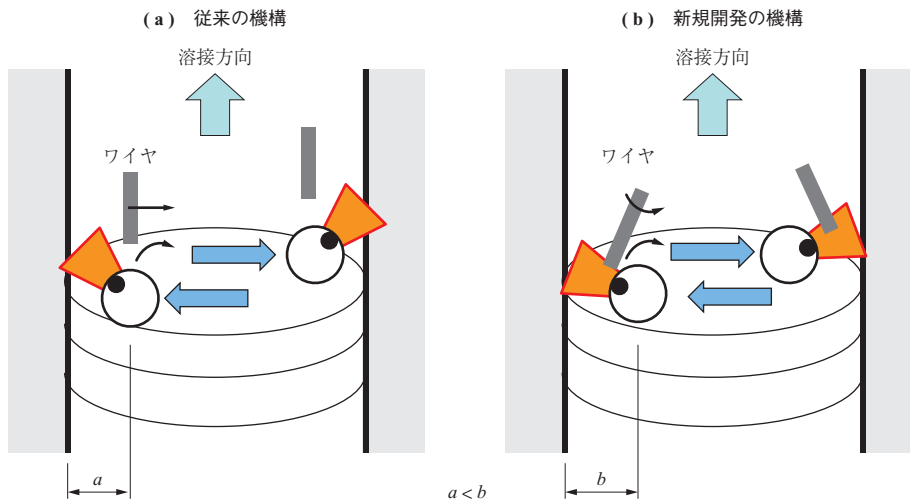
従来技術では電極回転によってアークが偏向しても、開先倣い機構による開先壁面の検出性とワイヤ供給性を両立するためには電極の回転角度は 30 度程度としていた。また、開先壁面とノズルの干渉を避けるため、タングステン電極突出し長さを 30 mm 程度確保していた。

開先壁面の検出性をより安定させるためには電極回転角度を大きくし、溶接時のシールド性を向上させるためには、タングステン電極突出し長さを短くする必要があった。

この課題を解決するため、ワイヤ送給位置を電極中心から角度を付けて制御する機構を開発した。ワイヤ送給位置制御機構の概念図を第 6 図に示す。これによって電極回転は角度 90 度でもワイヤの安定送給が可能になり、タングステン電極の突出し長さは溶接姿勢が変化する全姿勢溶接においても、外乱に強く、良好なシールド性能を確保できる 15 mm への短化を実現した。



第 5 図 開先倣い機構の概念図
Fig. 5 Schematic diagram of groove following system



第 6 図 ワイヤ送給位置制御機構の概念図
Fig. 6 Schematic diagram of welding wire feed system

3. 試験内容および結果

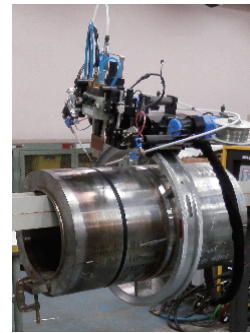
3.1 開先做い機構の検証試験

狭開先に対する開先做い機構の実機適用性評価として、9Cr 系配管を用いた施工性検証試験を実施した。溶接試験状況を第 7 図に、溶接施工選定条件を第 1 表に示す。全姿勢において開先做い機構は有効に機能し、ほぼ放置した状態で溶接施工が可能であった。なお、オペレータによる溶接状況の確認は溶接線前後に配置した CCD カメラの映像で行った。溶接施工後の 90 度ごとの断面マクロ結果を第 8 図に示す。溶接継手は JIS に則った RT (Radiographic Testing) および UT (Ultrasonic Testing) によって、有害なきずが認められないことを確認した。

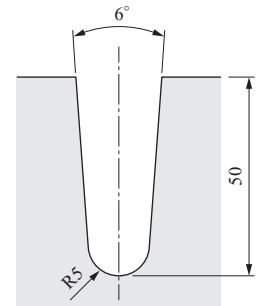
3.2 実工事への適用

3.1 節によって確立した条件を基に、実機の 9Cr 系鋼配管に対して溶接施工を実施した。実機施工は第 2 表に示す三つのステップで実施した。施工時の状況を第 9 図に、施工結果を第 3 表に示す。各ステップにおける実機

(a) 試験状況



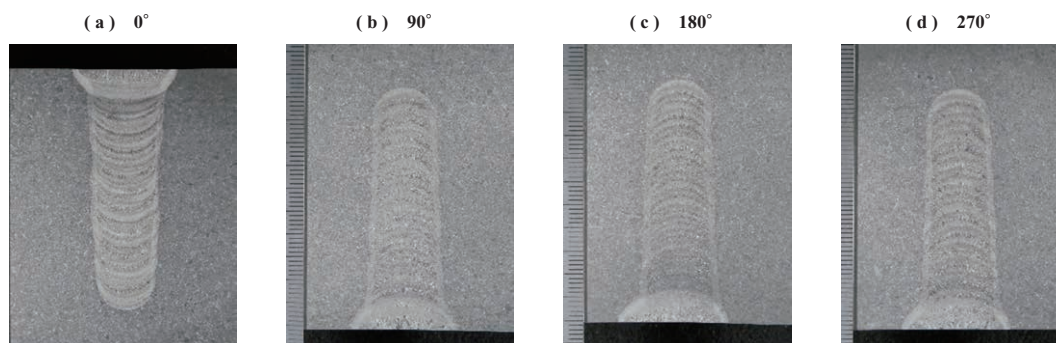
(b) 狭開先形状



第 7 図 9Cr 系配管を用いた溶接試験状況 (単位: mm)
Fig. 7 Welding test of 9%Chromium piping materials (unit: mm)

第 1 表 9Cr 系配管を用いた溶接施工選定条件
Table 1 Welding plan for 9%Chromium piping materials

溶 接 区 分	1 ~ 8 (1 周を 8 分割)
ピーク電流 (A)	300
ベース電流 (A)	220
アーク電圧 (V)	10
ヘッド走行速度 (mm/min)	30 ~ 40
ピークワイヤ速度 (mm/min)	1 000 ~ 1 530
ベースワイヤ速度 (mm/min)	600 ~ 900

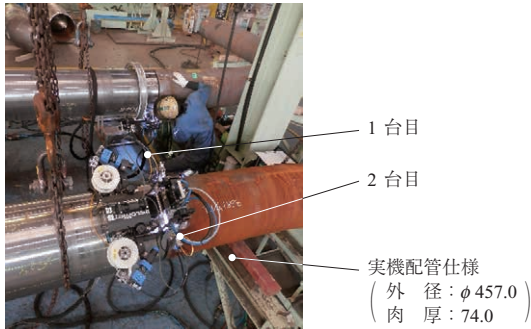


第 8 図 9Cr 系配管を用いた溶接施工断面マクロ結果
Fig. 8 Microscopic observation of weld joint of 9%Chromium piping material

第 2 表 実機配管への全姿勢自動 TIG 溶接の施工ステップ
Table 2 Steps to automatically weld real plant piping

項 目	操作台数	電極回転	開先倣い	ワイヤ回転
ステップ 1	1	適 用	-	-
ステップ 2	2	適 用	-	-
ステップ 3	2	適 用	適 用	適 用

(注) ステップ 1, 2 は溶接経験 7 年の中堅溶接士, ステップ 3 は溶接経験 3 年未満の非熟練者が担当施工した。



第 9 図 実機配管への全姿勢自動 TIG 溶接の施工状況
(単位: mm)

Fig. 9 Automatic welding of actual plant piping (unit: mm)

第 3 表 実機配管への全姿勢自動 TIG 溶接の施工結果
Table 3 Results of automatically welding real plant piping

溶 接 方 法	手溶接	全姿勢自動 TIG 溶接		
		1 継手施工	2 継手施工	
施 工 継 手	1 継手	1	2	3
ス テ ヱ ッ プ	-	1	2	3
施 工 時 間 (h)	58.8	54.0	58.5	51.5

(注) 表中に記載した手溶接に要する時間は、開先面積と平均的な溶接作業効率から算出した参考値を示す。

溶接では非破壊検査として RT (ASME: American Society of Mechanical Engineers 要求) および UT (社内自主検査) を実施して合格であることを確認した。

ステップ 1 では電極回転機構の実機適用を実施し、適切な施工が確認された。ステップ 2 ではステップ 1 と同じ機構を用い、溶接士 1 人で溶接機 2 台を操作し、2 継手の施工を実施した。装置の段取り替えによってステップ 1 と比較して若干の施工時間の増加が認められたが、1 台操作時と同レベルの時間で 2 継手の施工が可能であることが確認された。ステップ 3 ではステップ 2 に加えて開先

倣い・ワイヤ回転機構を追加し、溶接経験 3 年未満の非熟練者で施工を実施した。施工の結果、各種機能の活用によって非熟練者でも安定した品質の溶接継手が施工可能であり、溶接施工に要する時間も短縮することができた。

4. 今後の課題

本検討において全姿勢自動 TIG 溶接の施工技術は確立されたが、今後、さらなる効率化・適用拡大を踏まえて以下の検討を実施する予定である。

(1) 異常検知機構の開発

開先倣い機構と CCD カメラでのモニタリングによって溶接士への負荷低減を図り、溶接機 2 台持ち施工の実現が可能になった。現在、さらなる複数台持ちと自動化の実現を目指し、溶接機に異常検知機能を搭載するための検討を進めている。

(2) 現地溶接への適用

本検討の開発は工場溶接の適用とともに現地溶接への適用もターゲットとしている。工場の自動溶接では開先ギャップをゼロとして適用しているが、現地溶接では配管の合わせを実施する観点でギャップをゼロとすることは困難である。現状はギャップをもつ開先に対して初層手溶接で施工した後、残層で自動溶接を適用する実績がある。今後の検討事項としてギャップをもつ状態から自動溶接初層を適用する技術開発を進めてゆく。

5. 結 言

全姿勢自動 TIG 溶接の開発を実施し、装置開発、適正溶接条件検討、回転電極および開先倣い機構を確立して実機溶接へ適用し、以下を実現することができた。溶接経験の少ない非熟練者で溶接装置 2 台持ちでの施工を可能にし、適切な品質を確保しつつ、手溶接と比較して半分の工数での施工を実現することができた。今後は 4 章に挙げた課題を克服し、さらなる安定化と適用拡大を目指してゆく。