

国際熱核融合実験炉 (ITER) のセンター ソレノイドコイル (CS) 用導体の円周溶接技術

～開先形状および材料成分が溶け込み深さに与える影響～

A technology for circumferential welding of center solenoid coil conductor for International thermonuclear experimental reactor
～Influences of groove shapes and chemical composition in CS materials on penetration depth～

木坂 有治 Yuji KISAKA
技術統括センター 技術開発研究所
マテリアルサイエンス室 溶接グループ
シニアマネジャー

三木 聡史 Satoshi MIKI
技術統括センター 技術開発研究所
マテリアルサイエンス室 溶接グループ

木村 文映 Fumiaki KIMURA
技術統括センター 技術開発研究所
マテリアルサイエンス室 溶接グループ
グループ長

関口 信雄 Nobuo SEKIGUCHI
営業本部 橋梁商品部 橋梁商品技術室
シニアマネジャー

抄 録

国際熱核融合実験炉 (ITER) のセンターソレノイドコイル (CS) 用導体製作時に直面した二つの溶接現象の原因を究明した。一つ目は、CS 管周溶接時に発生した角部 (開先が深い部分) で深溶け込みとなる現象である。異なる開先の溶接シミュレーションと実験から、当現象は開先形状によるシールドガス流の違いが溶接中に発生する Mn 蒸気分布の違いを生み出し、これがアーク電圧に影響を及ぼすことが原因であると突き止めた。二つ目は CS 管の微量成分の違いによって溶け込み深さが変わる現象である。表面張力の温度依存性を調査し溶融池のマランゴニ対流の変化が当現象の原因であることを突き止めた。これらにより CS 導体製作の溶接品質安定化を達成した。

Abstract

Two interesting phenomena that we experienced in the welding process during production for center solenoid (CS) coil conductors of International Thermonuclear Experimental Reactor were investigated. The first interesting welding phenomenon is to appear deeper penetration at corners in a CS conductor when butt circumferential welding was performed. We revealed that the main cause is the difference of voltage which is generated by distribution of metal vapor affected by shielding gas flow with groove shape. Another phenomenon is to change penetration depth in the case of changing production lot of base materials. We found that the phenomenon was caused by changing Marangoni convection on molten metals resulted from investigation of the relationship between surface tension and temperature for two different materials. By those investigations, we contributed to the welding quality stabilization in the production of CS conductors.

1 はじめに

国際熱核融合実験炉(International Thermonuclear Experimental Reactor, 以下 ITER と略す)プロジェクトは、次世代の発電技術の候補の一つである核融合発電の科学および技術的な実現性を実証することを目的に日欧露米中韓印の7極が参加して研究開発を行う国際プロジェクトであり、ITERは、2025年の実験開始を目指してITER機構と呼ばれる国際機関によってフランスのサン・ポール・レ・ディランズ市に建設されている¹⁻²⁾。ITERの外観図を図1に示す。ITERは真空容器内に数億度の超高温プラズマを発生させ重水素と三重水素(トリチウム)を核融合反応させることで熱エネルギーを生み出す装置である³⁾。ITERの主要パーツとして、超高温プラズマを真空容器内に閉じ込めるための磁場を形成するトロイダル磁場(以下、TFと略す)コイルとプラズマに電流を流すためのセンターソレノイド(以下、CSと略す)コイルがある。

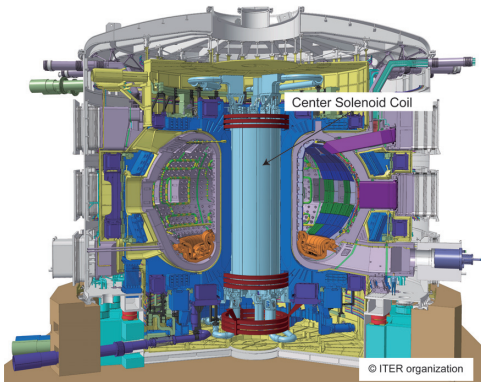


図1 国際熱核融合実験炉(ITER)の外観図³⁾
Fig. 1 Appearance of International Thermonuclear Experimental Reactor(ITER)

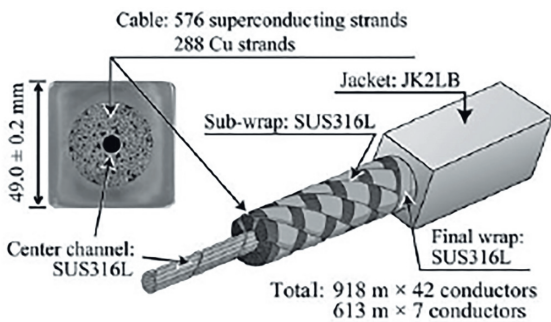
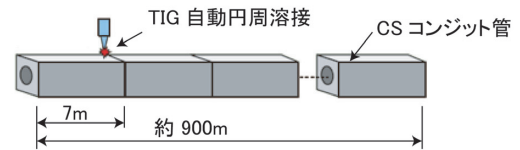


図2 CSコイル導体の外観図および断面写真⁴⁾
Fig. 2 Appearance and cross sectional photo of CS coil conductors

CSコイル導体の外観図および断面写真を図2に示す。本コイル導体は超伝導状態の高い安定性と大きな電磁力を支えるためにCable in conduit構造となっている⁴⁾。また本CSコイル導体のコンジット管には、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構が開発したJK2LB(高Mnステンレス鋼)材が用いられ、正方形断面の中心部に円形の穴を有する断面形状となっている⁵⁻⁶⁾。外形の1片の長さは51.3mm(縮径加工前)で最薄部の板厚は8mm、最厚部(角部)の板厚は16mmである。なお本コイル導体に内包される超伝導ケーブル材にはNb₃Sn材が用いられる。当社は、ITERに用いられるCSコイル導体の全数(49本)の製作を量子科学技術研究開発機構より受注し製作した。

CSコイル導体の製作フローを図3に示す。製作工程として、最初にコンジット管の端面を、溶接を行うために開先加工し、その後、自動TIG溶接装置を用いて端面同士の突き合わせ円周溶接を行う。そして溶接部の非破壊検査としてビード表面の外観

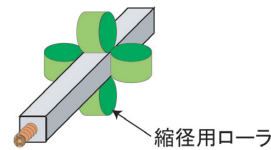
(1) 円周自動 TIG 溶接+非破壊検査



(2) 超伝導ケーブルの挿入



(3) 縮径 (CS コンジット管と超伝導ケーブルの一体化)



(4) 曲げおよび巻き取り

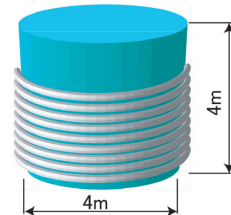


図3 CSコイル導体の製作フロー図
Fig. 3 Illustration of production flow for CS superconducting coil conductors

検査, 小型カメラを用いた裏波ビードの外観検査, ヘリウムリーク試験, 放射線透過試験, 浸透探傷試験等を実施し, 溶接品質を確認する。これらの作業を繰り返し, 所定の長さ(CSコイル導体の場合は約900m)にコイル導体材料を長尺化する。次に超伝導ケーブルをこの長尺化したコイル導体材料の片端面から挿入する。その後, コンパクション装置を用いてコンジット管を縮径し, 超伝導ケーブルと一体化しコイル導体とする。最後に曲げ装置を用いてコイル導体を螺旋状に巻き取り, 外観検査, ヘリウムリーク試験および浸透探傷試験を実施し, 曲げ加工後の溶接部に割れないことを確認した後, 梱出し出荷する。各工程における技術紹介およびコイル導体製作に関するプロジェクト概要については, 既報(参考文献1)を参照されたい。本紙では, 溶接工程において発生した興味深い二つの溶接現象に関する考察について述べる。

2 CS コンジット管の突き合わせ円周溶接について

上述したように, CSコイル導体の製作は溶接して約900mに長尺化した後に超伝導ケーブルを引き込む順序で実施されるため, 溶接による管の変形を可能な限り小さくする必要があった。加えて裏波ビードの高さが高くなると超伝導ケーブル挿入時に同ケーブルを損傷させる恐れがあるため, 完全溶け込み溶接を達成しつつ, かつ裏波ビード高さを最大0.3mm以下に制御する必要もあった。さらに全工程の内, 溶接作業が全作業時間の約70%を占めることから溶接品質の安定化はコイル導体製作を円滑に遂行するための最重要課題であった。これらの課題を解決するために本コイル導体の製作には, 溶接作業および品質の安定化が見込まれる自動溶接が採用された。自動TIG円周溶接機の外観写真を図4に示す。小径管の円周溶接にて実績のある市販の溶接機をベースとしCSコンジット管用に改造を施し適用した。本自動溶接機の特徴として, 溶接条件を溶接姿勢によって自動変更できる機能, アーク電圧制御(Arc Voltage Control)によるトーチ上下自動做い機能, ティーチングプレイバックによるトーチ左右自動做い機能, およびアーク監視用のカメラを搭

載していることなどが挙げられる。

CSコンジット管は, 外形が矩形で内形が円形という溶接施工上は複雑な形状であるため, 図5に示すように自動TIG溶接と手動TIG溶接を組み合わせた溶接施工法とした。開先形状を図6に示す。U型開先として, 初層溶接はノンフィラーワイヤでの溶接とし, 2層目以降はフィラーワイヤを添加して溶接した。フィラーワイヤには共金材が用いられ, シールドガスには75%He-25%Arのプレミックスガスが用いられた。

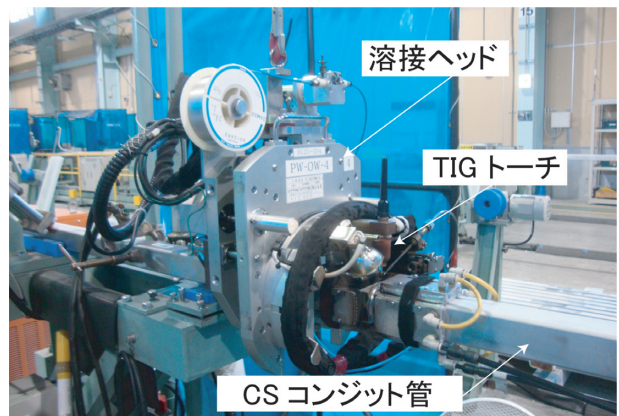


図4 自動TIG円周溶接機
Fig. 4 Automatic TIG welding machine for circumferential welding

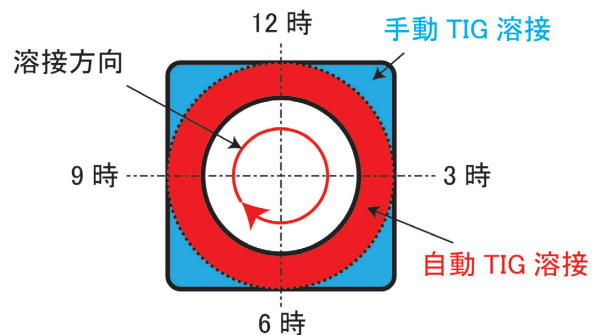


図5 CSコンジット管の円周溶接施工図(断面図)
Fig. 5 Schematic for circumferential welding for CS conduit pipes(cross sectional view)

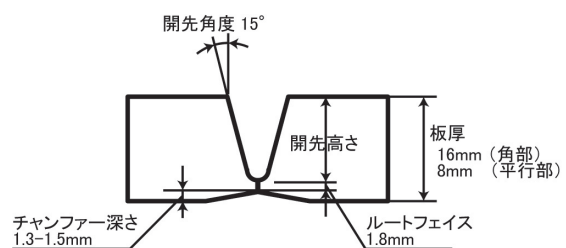


図6 開先形状
Fig. 6 Groove shape for circumferential welding

コンジット管の矩形平行部の開先がほぼ埋まり平坦となる5層目まで自動溶接を用いて溶接し、残った角部を手動TIG溶接にて仕上げた。本溶接法においては円周自動溶接時に、溶接位置によって開先深さが変化する。CSコンジット管の角部と一致する位置(1.5時位置, 4.5時位置, 7.5時位置, 10.5時位置)において、開先深さが最大値を取り、平行部(12時位置, 3時位置, 6時位置, 9時位置)で開先深さは最小となる。

CSコンジット管の自動円周溶接時に、二つの興味深い溶接現象が発生した。一つ目はノンフィラワイヤでの初層溶接時に、開先深さが最も深くなるCSコンジット管の角部と一致する位置で、溶け込みが深くなる現象である。もう一つは、CSコンジット管の微量な硫黄成分量の変動によって溶け込みが大きく変化する現象である。上述した様に、本CSコンジット管の溶接には厳しい裏波ビード高さ制限が課されており、製造期間中継続して安定した溶接品質を確保するために、これらの現象の原因を究明することが強く求められた。

3 開先深さが溶接時の溶け込みに与える影響の調査

3.1 シミュレーションおよび実験方法

開先深さが溶接時の溶け込みに及ぼす影響を調査するために、まず初めに当該溶接現象を、数値シミュレーションを用いて可視化した。シミュレーションモデルを図7に示す。本シミュレーションの領域サイズを $30 \times 30 \times 30$ mmサイズとし、ノズル内部から100%Arガスを 20 l/min で添加する条件とした。TIGノズル径は $\phi 9 \text{ mm}$ 、タングステン電極径は $\phi 2.4 \text{ mm}$ とし、電極突き出し長さは 15 mm 、アーク長(タングステン電極から母材までの距離)は 0.8 mm で一定(変化しない)とした。開先深さの影響が最も顕著に表れると思われる開先無しの場合と開先有りの場合の二種類のシミュレーションを実施した。なお開先有りの場合はルートギャップを 8 mm 、開先高さを 11 mm とした。溶接電流は 76 A とした。シミュレーションソフトとしてANSYS Fluent 18.1を用い、本シミュレーションでは母材からの金属蒸気の発生(Mn成分の蒸発)も考慮した。金

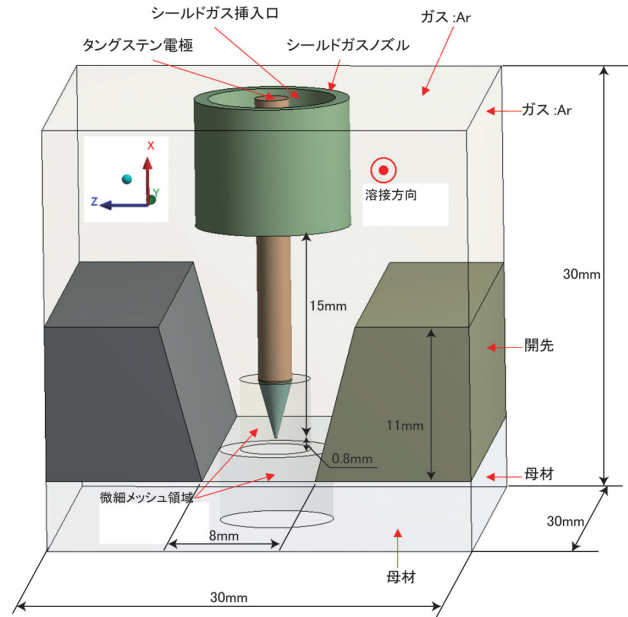


図7 シミュレーションモデル⁸⁾
Fig. 7 Simulation model

属蒸気の混入量によって電気伝導率および放射損失は大きな影響を受けるため金属蒸気の混入量と電気伝導率および放射損失の関係については参考文献7に記載の関係を用いた⁷⁾。さらに本シミュレーションの結果の妥当性を評価するために各種フィルターを用いたアーク状況の撮影実験も併せて実施した。

3.2 シミュレーション結果

シミュレーションで得られたアーク近傍のガス流速分布の比較図を図8に、温度分布の比較図を図9に、それぞれ示す。図8より、開先無しの場合((a)図)は、タングステン電極先端近傍(すなわち母材表面付近)に渦が発生していることがわかる。一方で開先有りの場合((b)図)は、渦の位置が電極の上側に位置し、電極先端にガスが直接流入している。また図9に示した温度分布の比較図から、開先有りの場合の方が、最高温度が高く($16,588 \text{ K}$)、かつ高温領域が狭くなっている。これは図8に示したように開先によってシールドガスがタングステン電極先端近傍に集中したことによるアークのピンチ効果に起因していると考えられる。また、図10に金属蒸気の濃度分布を示すが、開先有りの場合は無しの場合と比較してタングステン電極先端近傍に大きな高濃度領域が生成していることがわかる。この理由としては、図9に示すようにアーク近傍の温度が高いため

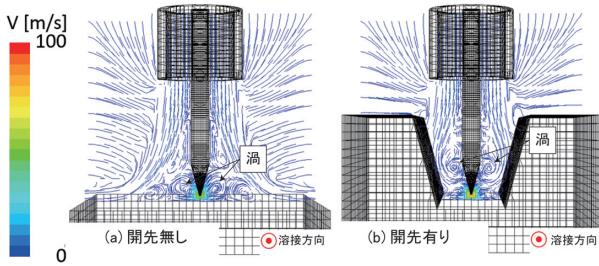


図8 シミュレーションから得られたガス流速分布 (a)開先無しの場合 (b)開先有りの場合
Fig. 8 Distribution for gas flow resulting from numerical simulation (a) without groove, (b) with groove

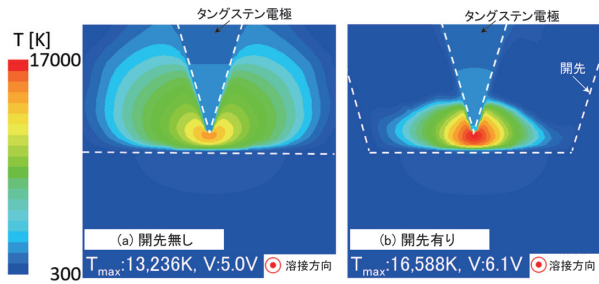


図9 シミュレーションから得られた温度分布 (a)開先無しの場合 (b)開先有りの場合
Fig. 9 Distribution for temperature resulting from numerical simulation (a) without groove, (b) with groove

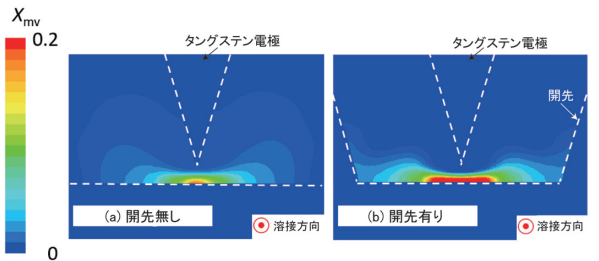


図10 シミュレーションから得られた金属蒸気の濃度分布 (a)開先無しの場合 (b)開先有りの場合
Fig. 10 Distribution for metal vapor fraction resulting from numerical simulation (a) without groove, (b) with groove

金属蒸気の発生量が多いこと、図8に示すように、母材から発生した金属蒸気が開先内のシールドガス流によって押し下げられていることなどが考えられる。これらの結果は開先が深いほど母材表面に発生する渦の影響が小さくなり、アークのピンチ効果による温度上昇とシールドガスの直接流入量の増加による金属蒸気の濃度増加が起こることを示唆するものである。

3.3 実験結果

アークの観察結果を表1に示す。アーク外観写真は減光フィルターを用いて撮影した写真である。一

方で表下の Mn 蒸気濃度分布は、Mn の輝線スペクトル波長である482.4nm の波長の強度分布を示している。ここで実験に用いた CS コンジット管は Mn を21%含むステンレス鋼材であり、かつ Mn は沸点が2061℃と低いため、溶接中に Mn が金属蒸気として発生しアーク中に混入する。上述した様に Mn の輝線スペクトルの波長は482.4nm であるため同波長のバンドパスフィルターを用いて、アークを撮影し、撮影した写真から同波長の強度分布を示した。

開先無しの場合は、表1中のアーク外観写真から電極の上方まで青色の金属蒸気による光が存在し(表中 A)、かつ Mn 蒸気分布を示す図においても、上方まで Mn 蒸気が存在していることがわかる(表中 B)。一方、開先有りの場合は、Mn 蒸気を示す青色の光は上方にまで達していない(表中 C)。これらの実験結果は、前述したシミュレーション結果と傾向がよく一致している。

表1 アーク観察結果
Table 1 Results on arc observation

	開先無し	開先有り
アーク外観写真		
Mn 蒸気の濃度分布		

3.4 考察

図11にシミュレーションから得られたタングステン電極中央部における母材からの距離と金属蒸気のもル分率の関係およびアーク電圧(電位)の関係を示す。開先有りの場合は金属蒸気濃度が母材近傍でかなり高く、母材から離れるにつれて急激に減少し、母材表面からの距離が0.4mm くらいから0となっている。一方で開先無しの場合は、金属蒸気分布の傾向は開先有りの場合と同様であるが、母材表面から0.4mm 以上離れた位置でも金属蒸気が存在している点が異なる。アーク電圧を比較すると開先有りの場合は、タングステン電極近傍(母材表面からの距離0.4mm 以上の範囲)で開先無しの場合に比べ高

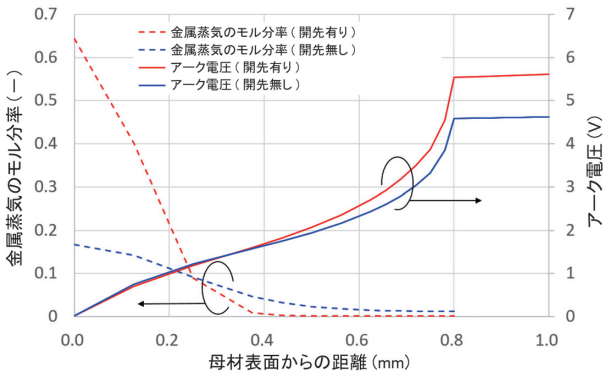


図11 タングステン電極中央部の母材からの距離と金属蒸気
のモル分率の関係およびアーク電圧(電位)の関係⁸⁾
Fig. 11 Relationship between distance from base metal
surface and molar fraction of metal vapor, and arc voltage,
which are calculated by numerical simulations

くなっている。山本らによると、金属蒸気がわずかにでもアークに混入した場合、アークの電気伝導度が急激に増加することが示されている⁹⁾。すなわち、金属蒸気の有無が電圧の高さに大きく影響し、金属蒸気がなく電気伝導度が低い場合は、電流が流れにくくなるため電圧としては高くなる。よって、電極近傍にて金属蒸気が存在しない開先有りの場合は、開先無しの場合と比較して、アーク電圧が高くなったと考えられる。実際にCSコンジット管の円周溶接に採用された円周自動TIG溶接機には溶接中のアーク電圧を一定に維持するアーク電圧制御(Arc Voltage Control, AVC)機能が備え付けられている。これはあらかじめ入力した設定電圧と溶接中に測定した測定電圧が等しくなるように溶接中に電極-母材間距離を変化させることで制御する機能である。開先が深い場合は、開先の影響によって実際の測定電圧が高くなるため、AVCが作動し電圧を下げる、つまり電極-母材間距離が短くなるようにAVCが作動する。アークは基本的には円錐形状であるため、電極-母材間距離が短くなると、アークの電流密度は増加する。これによって溶け込みが深くなったと推察される。以上述べたメカニズムにてCSコンジット材の周溶接時に角部において溶け込みが深くなることが解明された。CSコイル導体製作時に裏波形状をより安定化させるために、上述した深溶け込みのメカニズムを考慮した周溶接条件の調整等を行い、この開先深さによって溶け込み量が増える問題を解決した。

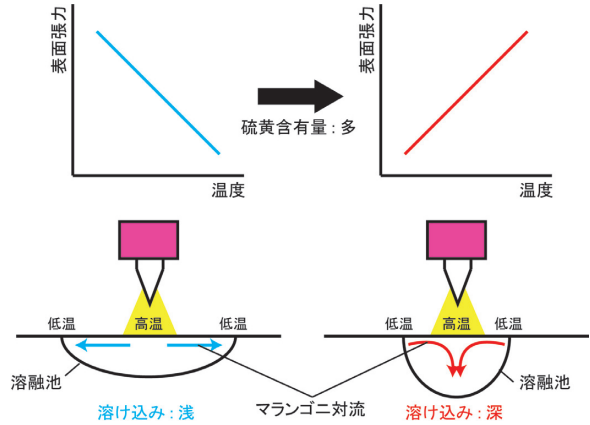


図12 溶融池内のマランゴニ対流の向きと溶け込み深さの
関係の模式図
Fig. 12 Schematic in terms of relationship between the
directions of Marangoni convection into molten pool and
penetration depth

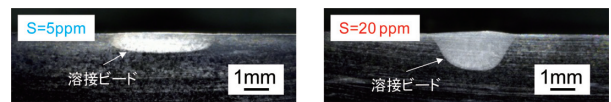


図13 S量が5 ppmの場合とS量が20ppmの場合の断面マ
クロ写真の比較¹¹⁾
Fig. 13 Comparison of cross sectional macro photos be
tween the case of 5 ppm and 20 ppm sulfur content

4 材料中の硫黄量が溶接時の 溶け込み深さに与える影響の調査

4.1 シミュレーションおよび実験方法

一般的に鋼材中の硫黄含有量(以下S量)によって表面張力の温度依存性は図12上図に示すように変化する。S量が多い材料を溶接した場合、図12下図に示すように溶融池のマランゴニ対流(液体表面の表面張力によって引き起こされる対流)の向きが内向きとなり、深い溶け込みが得られることは既知である¹⁰⁾。例えば田中らは、SUS304を対象にした検討を実施し、S量が40ppmの場合は浅い溶け込みが得られ、220ppmの場合は深い溶け込みが得られることを示している¹⁰⁾。一方で今回我々が直面した現象は、S量が5 ppmの場合は溶け込みが浅く、20ppmの場合は溶け込みが深いという現象であり、従来知見と比較するとS量のオーダーが大きく異なる。図13にそれぞれの材料を同溶接条件にてビードオン溶接した場合の断面マクロ写真を示す。図より溶け込み形状がS量によって大きく異なっていることがわかる。

CS コンジット管は、新規に開発された高 Mn ステンレス鋼であり、マランゴニ対流の変化を生み出す表面張力の温度依存性に関するデータは見当たらない。そこでS量が5 ppmと20ppmのCSコンジット管をそれぞれ用いて表面張力の温度依存性を測定した。本測定には高温域まで表面張力を測定できる電磁浮遊法を用いた。ここで電磁浮遊法とは、熔融金属を電磁力(ローレンツ力)にて空中に浮遊させた状態で保持し、その振動モードを解析することによって材料の表面張力を算出する方法である¹²⁻¹³⁾。その後、得られた表面張力の温度依存性を用いてシミュレーションを実施し、S量が異なる場合の溶接中における熔融池状態を把握した。シミュレーションモデルは図7に示したモデル(開先無し)とし、シミュレーションに用いた条件は上述した条件と同じとした。さらにシミュレーション結果の妥当性を確認するために実験計測も実施した。実験ではトレーサー(ジルコニア粒子)を用いた熔融池表面对流の観察を実施した。

4.2 電磁浮遊法による表面張力の温度依存性の測定結果

電磁浮遊法により測定した表面張力の温度依存性を図14に示す。図に示すようにS量5 ppmの表面張力は温度に対して負の比例関係であることがわかる。一方でS量20ppmの表面張力カーブは温度が1950℃程度までは表面張力が温度に比例し上昇し、以降はS量5 ppmのカーブと同様に温度上昇に

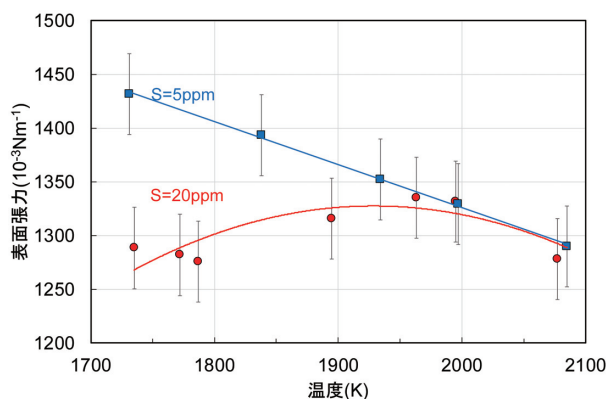


図14 電磁浮遊法測定から得られた表面張力の温度依存性¹¹⁾

Fig. 14 Relationship between surface tension and temperature for each material which is measured by electromagnetic levitation method

伴って低下することがわかる。

4.3 シミュレーションおよび実験結果と考察

図14に示す表面張力の温度依存性を入力して数値シミュレーションを実施した結果を図15に示す。当該図は溶け込み深さの比較図を示しており、図中の溶接ビード部(赤色にて表示)は融点を越えた要素として示している。図から明らかなようにS=20ppmの場合の方がS=5 ppmの場合と比較して深い溶け込みとなっている。これは実現象と同様の結果である。

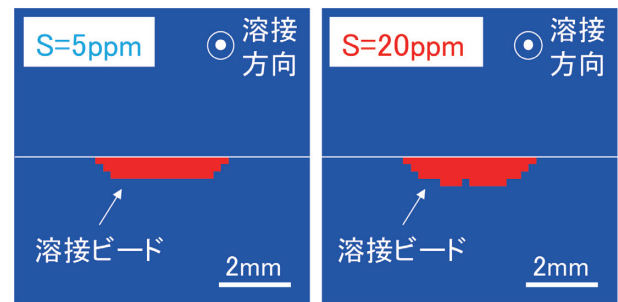


図15 シミュレーションによって得られた溶け込み深さの比較

Fig. 15 Comparison of penetration depth which are resulted from numerical simulation

図16に熔融池表面における速度と温度の計算結果を示す。ここで速度(第二軸)は外向成分を正として示している。図16より、熔融池中心部の温度はS=20ppmの方が高くなっていることがわかる。また速度に関しては、S=5 ppmの場合は全ての位置において正の成分しかない。これは熔融池中心から外側へ向かう方向の対流のみが存在し、内向きの成分が存在しないことを示している。一方でS=20ppmの場合は、ビード中央部から1.3mmから1.7mm程度離れた範囲にて負の成分が存在しており、これは内向きの熔融池対流が発生していることを示唆している。

図17に溶接中の熔融池表面状況の比較写真を示す。上述したようにジルコニア粒子を熔融池表面に浮遊させて、その粒子の溶接中の動きを高速度カメラで観察した。S=5 ppmの場合は、ジルコニア粒子は熔融池中心部付近から外側へ吐き出されるように動くことが観察された。一方でS=20ppmの場合、ジルコニア粒子が熔融池の中央部と端部の間に留まる現象が観察された。これは熔融池上に淀み点

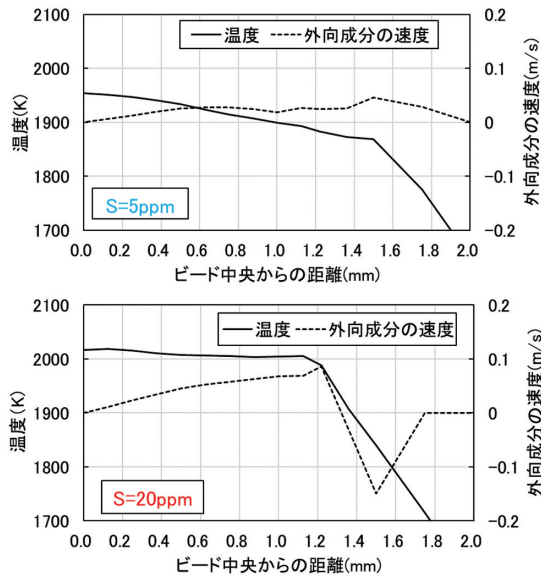


図16 溶融池表面における速度と温度の計算結果¹¹⁾
 Fig. 16 Velocity and temperature at the surface of molten pool which are calculated by numerical simulation

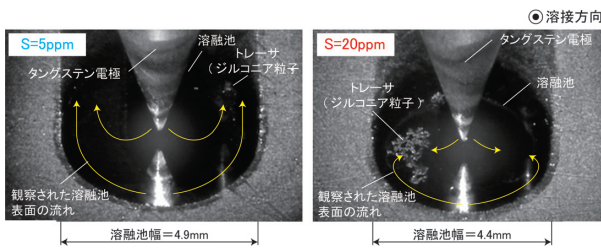


図17 溶接中の溶融池表面状況の比較¹⁰⁾
 Fig. 17 Comparison of molten pool condition during welding

があることを示唆しており、上述したシミュレーション結果が妥当であることを示している。

以上述べた結果から、材料ロットが変わった場合に溶け込み深さが変化する理由は、微量なS量の違いによるマランゴニ対流の向きの変化が原因であると考えられ、そのマランゴニ対流の向きの変化が発生する限界S量は5ppmと20ppmの間に存在することが明らかになった。CSコイル導体製作時に、CSコンジット管供給者に硫黄成分のバラツキをできるだけ小さくすることをお願いするとともに、CSコンジット管を受け入れる際に材料中のS量を詳細に把握し、それに合わせて溶接条件を微調整することで当該問題に対応した。

5 終わりに

本報では、ITER CSコンジット管の自動円周溶

接時に発生した二つの溶接現象の発生メカニズムについて検討した。一つ目の初層溶接時にCSコンジット管角部にて溶け込みが深くなる現象に関しては、そのメカニズムは開先形状によるシールドガス流の違いが、溶接中に蒸発するMn蒸気濃度分布の違いを生み出し、これがアーク電圧に影響を与えることが原因であると考えられる。二つ目のCSコンジット管の微量な硫黄含有量の違いによって溶け込み深さが大きく変化する現象に関しては、溶融池のマランゴニ対流の向きの変化が原因であることを突き止めた。それぞれの原因を踏まえて溶接条件調整等の対策を実施し、大きな溶接品質トラブルを発生させることなく本CSコイル導体の製作を全数完遂した。本紙で説明したCSコンジット管の溶接のみならず、ITERプロジェクトを実行するにあたり培ったエンジニアリング力を生かして、今後も引き続き、世の中に貢献していく所存である。

6 謝辞

本報で述べた溶接現象解明にあたり、多大なるご協力をいただいた大阪大学 接合科学研究所の田中 学 教授、田代 真一 助教、電磁浮遊法によって表面張力の温度依存性を計測いただいた千葉工業大学の小澤 俊平 教授に心より御礼を申し上げます。さらに当社にCSコイル導体の製作をご発注いただき、かつ当該コイル導体製作時には、ITER工場にて様々なご助言およびご指導いただきました国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 那珂研究所の皆様にも厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 関口信雄, 矢野嘉孝, 木坂有治, 吉村有司, 足立安隆, & 山口孝典. (2019). 国際熱核融合実験炉(ITER)の超伝導コイル用導体の製作技術: 技術課題を克服しITER計画の推進に貢献. *新日鉄住金エンジニアリング技報 = Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., Ltd. technical review*, 10, 10-19.
- 2) 井上, 多加志, 杉本, 草間, 義紀, 奥野, & 中嶋. (2016). はじめに(プロジェクトレビュー ITER計画の機器開発・製作の進展). *プラズマ・核融合学会誌*, 92(6), 393-395.
- 3) ITER Organization Webpage. <http://www.iter.org/>
- 4) 名原啓博, 諏訪友音, 尾関秀将, 布谷嘉彦, 磯野高明, 高橋良和, & 奥野清. (2016). ITER トロイダル磁場コイ

- ル用及び中心ソレノイド用超伝導導体の製作. プラズマ・核融合学会誌. Vol. 92, No. 6 P396-401.
- 5) Hamada, K., Nunoya, Y., Isono, T., Takahashi, Y., Kawano, K., Saito, T., ... & Matsuda, H. (2011). Preparation for the ITER central solenoid conductor manufacturing. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 22(3), 4203404-4203404.
 - 6) 濱田一弥, 中嶋秀夫, 河野勝巳, 高野克敏, 堤史明, 奥野清, ... & 藤綱宜之. (2006). ITER 中心ソレノイド用コンジット材料 JK 2 LB の成分最適化. *低温工学*, 41(3), 131-138.
 - 7) Tashiro, S., Tanaka, M., Nakata, K., Iwao, T., Koshiishi, F., Suzuki, K., & Yamazaki, K. (2007). Plasma properties of helium gas tungsten arc with metal vapour. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(3), 202-207.
 - 8) Tashiro, S., Miki, S., Murohy, A. B., Tanaka, M., Kisaka, Y., Kimura, F., Suwa, T., Takahashi, T. (2020). Influence of groove shape on penetration depth in TIG welding of high manganese stainless steels. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. (投稿中)
 - 9) 山本健太郎, 田中学, 田代真一, 中田一博, 山崎圭, 山本恵理, & 鈴木啓一. (2007). 数値計算シミュレーションによるガスタングステンアーク溶接の金属蒸気挙動解析. *溶接学会論文集*, 25(3), 443-449.
 - 10) Tanaka, M., Tashiro, S., Satoh, T., Murphy, A. B., & Lowke, J. J. (2008). Influence of shielding gas composition on arc properties in TIG welding. *Science and technology of welding and joining*, 13(3), 225-231.
 - 11) Kisaka, Y., Miki, S., Sekiguchi, N., Kimura, F., Tashiro, S., Tanaka, M., Ozawa, S., Suwa, T., Takahashi, Y. (2020). Influence of sulfur content on penetration depth in TIG welding for high manganese stainless steels. *Metallurgical and Materials Transaction A*. (投稿中)
 - 12) Ozawa, S., Morohoshi, K., Hibiya, T., & Fukuyama, H. (2010). Influence of oxygen partial pressure on surface tension of molten silver. *Journal of Applied Physics*, 107(1), 014910.
 - 13) Ozawa, S., Morohoshi, K., & Hibiya, T. (2014). Influence of oxygen partial pressure on surface tension of molten type 304 and 316 stainless steels measured by oscillating droplet method using electromagnetic levitation. *ISIJ international*, 54(9), 2097-2103.