

D滑走路における棧橋ステンレス鋼ライニング工法とその溶接技術

～品質安定、大量、高能率、連続、生産を可能とする施工法の確立～

新日鉄エンジニアリング ○岩見博志、阪上精希

ジャケット製作工区 関口太郎、風野裕明

キーワード：ジャケット、ステンレス鋼ライニング、溶接施工

1. まえがき

D滑走路のジャケットは鋼構造部材である。そのなかでもレグ部の干満・飛沫帯は最も厳しい腐食環境にあって、浮遊物等の衝突による防食工の損傷も想定される飛沫帯、干満帯は耐久性及び耐衝撃性のある金属ライニング防食工法が求められた。

薄肉耐海水性ステンレス鋼ライニング工法は、従来の金属ライニング工法に比べ、材料の薄肉化、ライニング溶接の高能率化によりライフサイクルコストの低減およびライニング品質の安定化を達成した工法である。その結果、ジャケット構造を中心に港湾構造物などでの適用事例が増加しており、今回、D滑走路ジャケットのレグ構造部の干満帯、飛沫帯の防食工法にも採用されたものである。

本報告では、従来の金属ライニング工法と比較しながら、薄肉ステンレス鋼ライニング工法の溶接プロセス、溶接施工技術を中心にその概要を紹介する。

2. 薄肉耐海水ステンレス鋼ライニング工法の選定理由

飛沫帯、干満帯は非常に厳しい腐食環境であり、補修も困難であることから、100年の耐久性を想定した長期耐久性の確認された金属ライニング工法が求められた。チタンは海洋環境で優れた耐食性を有するが、鋼材に溶接することが実用上できない。東京湾アクアライン等で実績のあるチタンクラッド鋼は、鋼管部材へのライニングには突合せ部分とライニング端部の溶接処理が煩雑となるため、鋼管での製造・加工方法に難点がある。このため、鋼材に直接溶接が可能で、一般海洋環境ではチタンと同等の耐食性を有する耐海水性ステンレス鋼（SUS312L）を選定した。

SUS312Lは一般のステンレス鋼（SUS304系、SUS316系）に対して、クロム、ニッケル、モリブデン等の合金成分を増し、海水環境における耐孔食性、耐隙間腐食性を飛躍的に向上させた材料であり、試験体の促進試験や長期暴露試験等により、一般環境下では腐食しないことが確認されている。¹⁾

D滑走路棧橋への適用に当たっては、コンクリート床版によって上部が覆われ、飛来塩分が降雨によって洗浄されない海上軒下環境での100年間の耐久性確保が求められるため、耐食性上の弱点となる隙間構造の排除と溶接部表面の高温酸化部を除去することとした。また、万が一損傷した場合の現地での補修方法についても実証試験により確認した。²⁾

3. 薄肉ステンレス鋼ライニングの概要

耐海水性ステンレス鋼ライニングは図-1、図-2に示すように、D滑走路ジャケット部全域のレグトップ部からAP-1.5mの範囲に使用するものであり、下部レグの鋼管部材の工場製作段階で0.4mm厚耐海水性ステンレス鋼をライニングしている。大量連続高能率生産を狙いとする一括施工拠点として、被ライニング鋼管製造拠点に近い兵庫県播磨地区に新たにライニング工場を立ち上げた。

棧橋部レグの薄肉ステンレス鋼ライニング本数は全数で1,201本あり、ライニング長さは約8～11m、ライニング総面積は約69,000m²、ステンレス鋼の使用量は約250トンである。その内訳を表-1に示す。

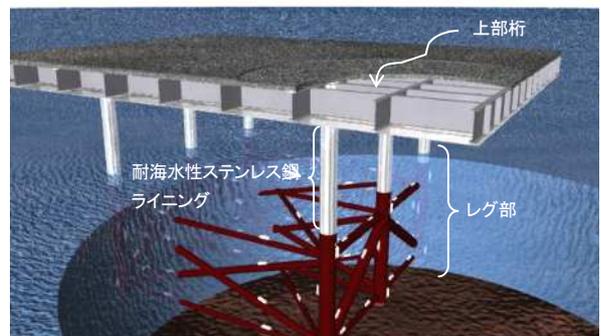


図-1 薄肉ステンレス鋼ライニング概要図

4. 薄肉ステンレス鋼ライニングの施工

4-1 ライニング施工工程

栈橋部下部工レグのステンレス鋼ライニング工場における主な施工工程は鋼管表面前処理，ステンレス鋼シート巻付け，ライニング溶接，検査，溶接部表面処理，保護フィルム貼付け，となっている。

ライニング施工は，1日最大約2.5本のレグ鋼管をライニング施工しており，平成19年6月から平成21年7月に至る延べ26ヶ月間で1,201本を施工する工程となっている。

表-1 薄肉ステンレス鋼ライニング概要図

レグの種類	レグ径 (mm)	ライニング厚 (mm)	本数 (本)	ライニング面積 (m ²)
滑走路A	1884	0.4	605	36,967
滑走路B				
誘導路A				
誘導路B				
高速脱出路				
着陸帯A	1724		16	900
着陸帯B	1625.6		391	20,473
着陸帯B	1651		27	1,118
ショルダー	1707		84	4,792
埋立接続部	1936		42	1,977
杭式防衝工	2100	36	2,672	
合計			1201	68,899

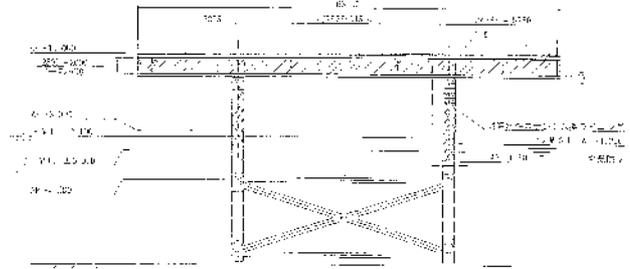


図-2 薄肉ステンレス鋼ライニング構造図

4-2 ライニング施工方法の概要

図-3に薄肉ステンレス鋼ライニング施工フローを示す。

<p>①レグ鋼管受入れ・検査</p>	<p>②ライニング位置野書き</p>	<p>③鋼管表面研削</p>
<p>④リークテストポート加工</p>	<p>⑤ライニング材切断</p>	<p>⑥ライニング材巻付け</p>
<p>⑦ライニング材一次仮付け溶接</p>	<p>⑧ライニング材本仮付け</p>	<p>⑨ライニング材溶接（鋼管長手方向）</p>
<p>⑩ライニング溶接（鋼管円周方向）</p>	<p>⑪リーク検査</p>	<p>⑫補修溶接（TIG）</p>

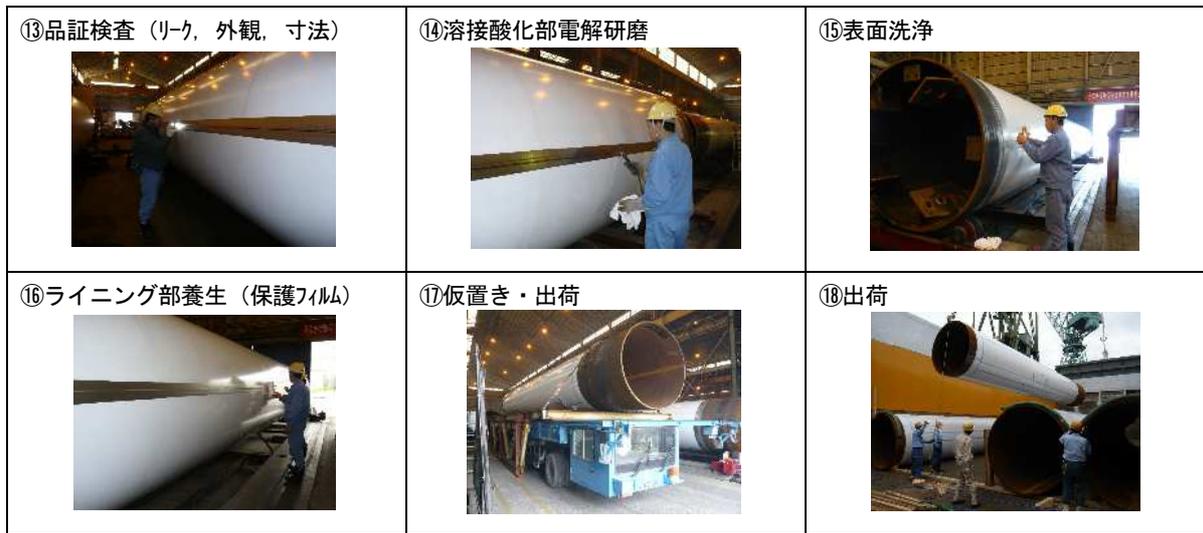


図-3 薄肉ステンレス鋼ライニング加工フロー

5. 従来の金属ライニング工法の優位性と課題

従来の金属ライニング工法はプラントや鋼構造物などの普通鋼や低合金鋼部材に1.5~2mm厚のライニング材料を貼り付ける工法である。図-4に示すように、溶接法はTIG溶接または被覆アーク溶接で継手はオーバーラップ法、スリーブド法などが用いられている。1930年頃から化学プラント、発電プラントなど、耐熱、耐食を必要とする機器に用いられてきた。その後、50年~100年といった長期の耐用年数を期待される海洋構造物にも、各種ステンレス鋼やモネル、キュプロニッケル、チタンなどの耐食性金属による防食法として適用される場合もあり、それによって耐久性の向上、大幅なメンテナンスコストの削減が達成された。

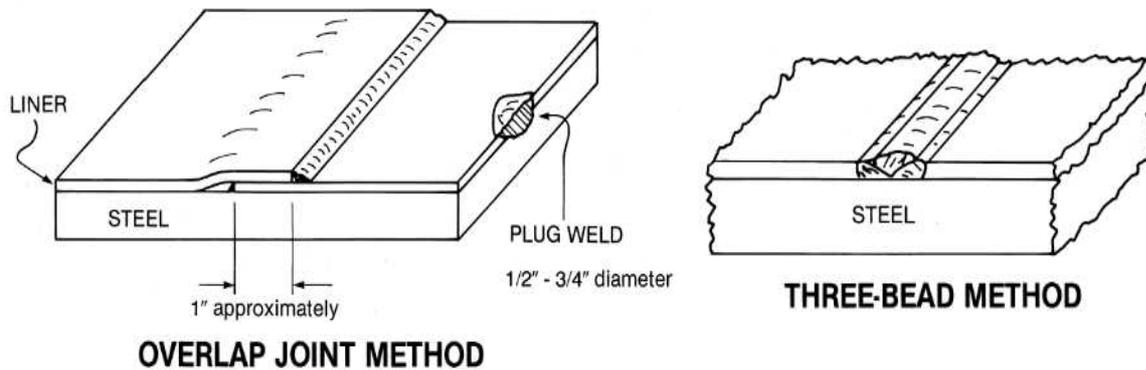


図-4 従来のライニング溶接方法³⁾

しかしながら、各種防食工法のコスト比較によれば、有機塗料やポリエチレン樹脂塗装による重防食工法と比較して、初期施工コストが割高となっている。また、床版下の桁下部などは、飛来した塩分が降雨によって洗浄されない極めて厳しい腐食環境にあり、それに耐えるにはライニング材料の耐食性グレードアップの必要性が明らかで、ますます高価となる。そのため、メンテナンスコストを含めたライフサイクルコストで比較しても割高となり、海洋構造物の防食工法としては適用が限られていた。

従来の金属ライニング工法では、材料費と溶接施工費がコスト全体の約70%を占めていることから、ライニングコスト低減のためには、①ライニングの薄肉化、②溶接能率の向上、が必須であった。ライニング材として選定したSUS312Lは、耐腐食性能が極めて優れていることから腐食代を見込む必要がなく、耐衝撃性も従来の有機ライニング等と比べて格段に優れているため、薄肉化を図っても十分な耐久性が期待できる。

しかしながら、オーステナイト系ステンレス鋼は、熱伝導率が小さく熱膨張率が大きいいため、厚み1mm程度になると、溶接中の熱膨張によりライニング材同士間もしくはライニング材と部材の間に著しい隙間が生じてしまう。隙間があると、従来のアーク溶接法では、溶接中の溶損により穴が開き、健全な溶接を実施できない。図-5に1mm厚のすみ肉TIG溶接状況を示すが、隙間発生を防ぐ対策として、①仮付け溶接のピッチを増やす、②隙間の発生に応じて溶接速度、狙い位置、フィラーワイヤー供給速度を微調整していくなどがあるが、結局、高技量溶接工による極めて遅いかつ慎重な施工が要求され、高能率化に向けた自動溶接化、機械溶接化も不可能であった。



図-5 溶損による穴あきビード (1.0mt SUS304)

6. 薄肉ステンレス鋼高能率・高耐食性ライニング法の確立

オーステナイト系ステンレス鋼である SUS312L の薄肉化と溶接能率向上を両立するには、以下に示す課題を解決する必要があった。

薄肉母材と同等の強度を有する健全な継手を安定形成するための溶接法として、他産業において実績のある抵抗シーム溶接技術を応用して開発したインダイレクト抵抗シーム溶接
腐食環境に接する隙間をなくし、継手部の高耐食性を確保するプラズマすみ肉溶接

6-1 抵抗シーム溶接によるライニング

ライニング防食面積の主要部分を占める鋼管部材を対象に、従来の金属ライニング工法に比べライニング材の大幅な薄肉化と高速溶接施工の両立を図ることができる溶接施工法を検討した。具体的には、厚み 0.4～0.6mm のライニング材を 1m/min 程度の溶接速度で安定して溶接可能なレベルを目標とした。

まず、抵抗シーム溶接、レーザ溶接、プラズマ溶接などの複数の候補から抵抗シーム溶接を選定した。抵抗シーム溶接は重ね合わせた接合すべき部分に直接高電流を通じて、その電流による抵抗発熱で溶接部の温度を上昇させて溶接する方法であり、薄いライニング材を高速溶接できる。特に電極による加圧を与えながら溶接するため、溶接熱による変形の影響を回避できることから、薄板および熱膨張率の大きい材料の溶接には合理的な溶接法である。

図-6にダイレクト通電方式抵抗シーム溶接の原理図を示す。重ね合わせた薄板の表裏面から対象に電極で挟んで加圧して通電路の集中を図ることにより接合に必要な箇所のみを理想的に溶融することが可能な溶接法である。しかし、ライニング溶接では裏面側への電極配置が困難になるため適用は不可能である。

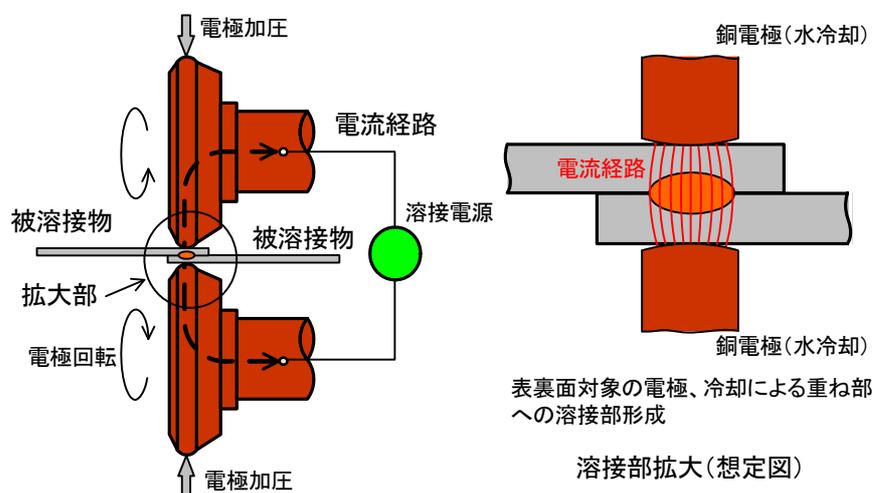


図-6 ダイレクト通電方式抵抗シーム溶接法

そのため、インダイレクト通電方式の溶接法を採用した。これによって、構造物の片面からのアクセスのみによって溶接を可能にしている。

図-7にインダイレクト通電方式の抵抗シーム溶接の原理図を示す。通常、溶接する板を貫通するような通電経路を安定的に得ること、表裏の面の電極による冷却の熱バランスを良好にするために、裏面に銅などのバックバーを配置する。

本法ではライニング材の裏側には鋼構造部材があるために、バックバーを配置することは不可能であるが、電流経路に当たる鋼構造材表面(図-7の黄線部分)を導電性確保のために研削して、通電経路を得ることにより、0.5mm厚前後の薄板ステンレス鋼のライニング溶接が可能であることを確認した。

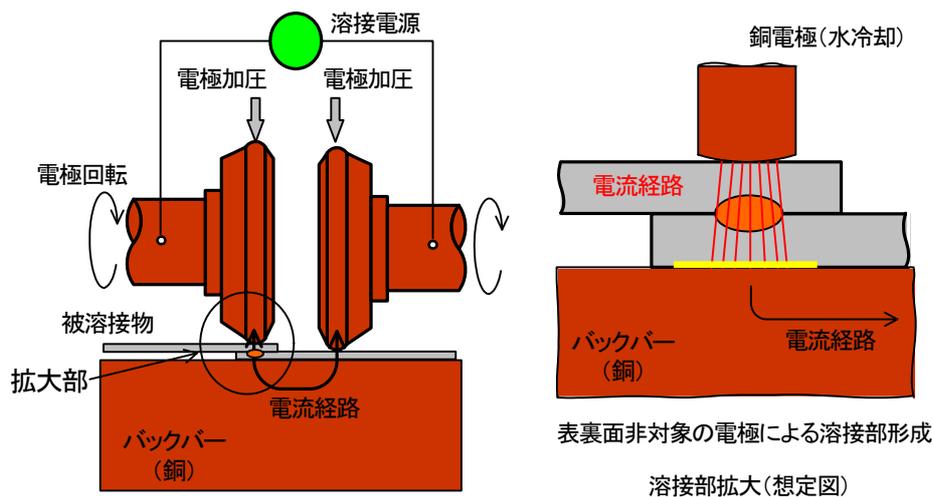


図-7 インダイレクト通電抵抗シーム溶接法

図-8にインダイレクト抵抗シームステンレス鋼ライニング溶接方式図を示すが、裏面が鋼構造物であるため、表裏面の冷却熱バランスの影響から、バックバーを配した溶接法とくらべ溶融部の形成が異なると考えられる。

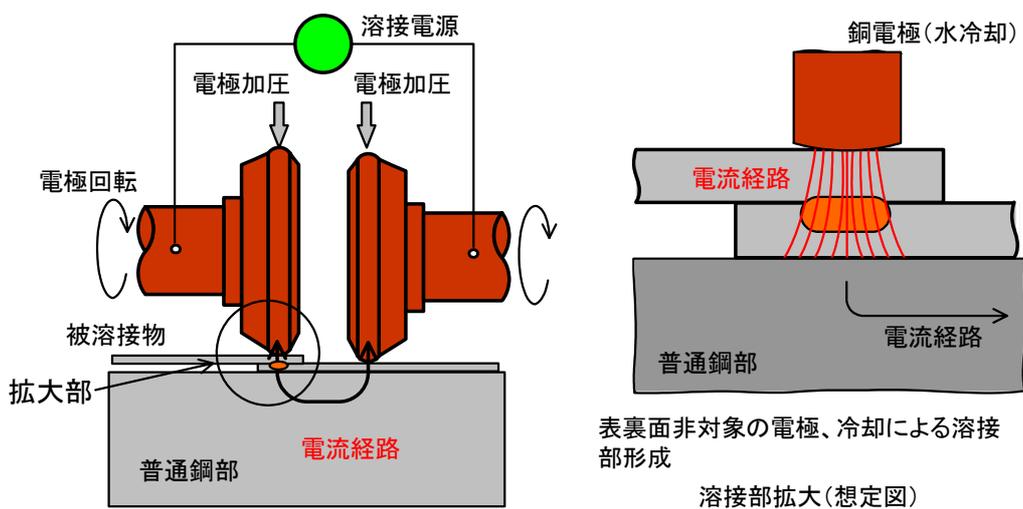


図-8 インダイレクト抵抗シームステンレス鋼ライニング溶接法

図-9に溶接部外観を、図-10に溶接部断面状況を示す。図-10に見られるように溶融部の形成が裏面側に偏る傾向がある。これは銅などのバックバーを用いていないために表面側に比べ、裏面側の冷却が遅くなるためと考えられる。しかし、この板厚方向の溶接部の偏りがライニング材下板と鋼構造物との間に固相的な接合をさせている。裏面の鋼構造物は薄肉ステンレス鋼ライニング材に比べ融点が高く、板厚も大きい。保有熱量が大きいので、溶融することはなくステンレス鋼溶融部への普通鋼の希釈は起こらず、希釈による

耐食性の劣化は生じない。また、ライニング材上板の端部耳部とライニング材下板との間が隙間構造になっているのがわかる。

図-11 に鋼管部材への薄肉ステンレス鋼のインダイレクト抵抗シーム溶接ライニングを示す。インダイレクト抵抗シーム溶接部の軸方向の両端部はライニング材の保持を確実にするためと水密性をより確実に得るTIG溶接を行う。ライニング溶接後はリーク試験を行って接合部の健全性を確認する。



図-9 インダイレクト抵抗シーム溶接部外観

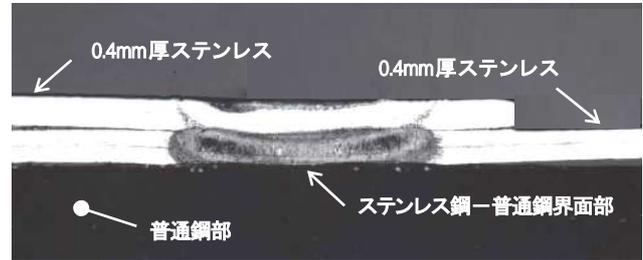


図-10 インダイレクト抵抗シーム溶接部断面

図-12 に実機化されたインダイレクト抵抗シーム溶接装置の写真を示す。

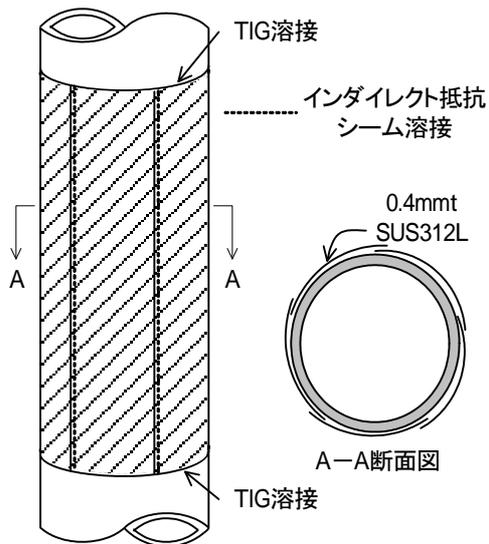


図-11 鋼管部材の SUS312L 鋼ライニング例



図-12 インダイレクト抵抗シーム溶接装置

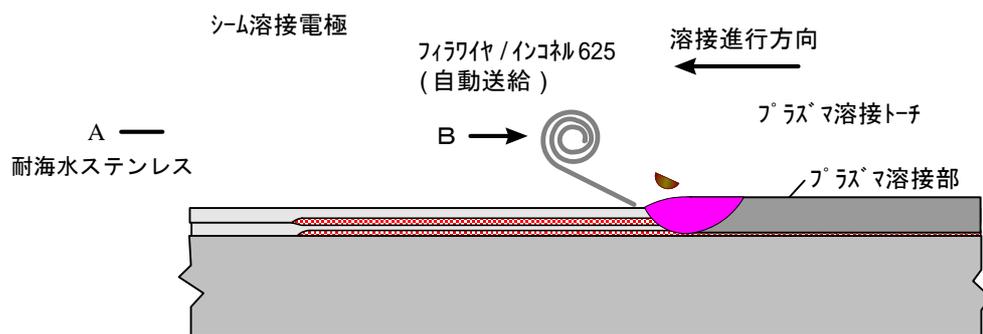
表-2 に SUS312L ステンレス鋼のインダイレクト抵抗シーム溶接条件例を示す。結果、0.4mm 厚 SUS312L ステンレス鋼を溶接速度 80cm/min の高速溶接で実施することができた。

表-2 インダイレクト抵抗シーム溶接条件の一例 (0.4mm 厚 SUS312L ステンレスライニング鋼)

溶接電流(A)	加圧力(kN)	溶接速度(cm/min)
5,500~7,500	2~5	80

6-2 高耐食性ライニング法

インダイレクト抵抗シーム溶接によるライニング法を用いれば、ライニング材の薄肉化と溶接の高効率化が達成できる。しかし、過酷な腐食環境で超長期の耐久性が求められる構造物では長期の維持管理性を考慮すると隙間構造は極力減らす必要があった。そこで隙間構造がなく、薄肉のまま高効率を損なわないライ



a) A矢視図

b) B矢視図

図-14 インダイレクト抵抗シーム・プラズマ複合溶接構成 (模式図)

図-15 に溶接装置の写真を、図-16 にシーム溶接・プラズマ溶接ヘッドの写真を示す。



図-15 ライニング溶接装置

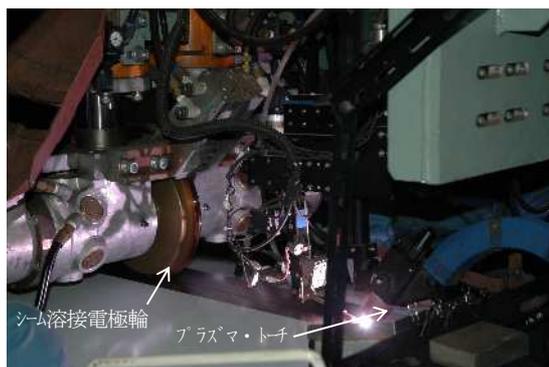


図-16 抵抗シーム・プラズマ溶接ヘッド

(2) インダイレクト抵抗シーム・プラズマ複合溶接による薄肉ステンレス鋼ライニング

表-2 に示したインダイレクト抵抗シーム溶接条件と表-3 に示したプラズマ溶接条件の組合せで 0.4mm 厚 SUS312L ステンレス鋼のライニング溶接を実施した。

表-3 プラズマ溶接条件の一例 (0.4mm 厚 SUS312L ステンレスライニング鋼)

溶接電流(A)	溶接速度(cm/min)	シールドガス
80~120	80	Ar+7%H ₂

図-17 に溶接ビード外観、図-18 に溶接部断面の例を示した。図-17 の溶接ビード外観に見られるように、表面荒れのないシーム溶接部と良好なプラズマ溶接ビードが得られている。図-18a) の溶接部断面写真(組織現出)でも安定なシーム溶接状況と溶込み形状の良好なプラズマ溶接状況が見られ、シーム溶接部直下の普通鋼部が溶融凝固組織となっていないのが見られる。また図-10 に示した抵抗シーム溶接のみでライニング溶接した断面写真と比べ、プラズマ溶接により隙間構造部がなくなっているのが分かる。

図-18b) の組織現出前(ノーエッチング)の溶接部断面写真では、抵抗シーム溶接部直下のライニング材

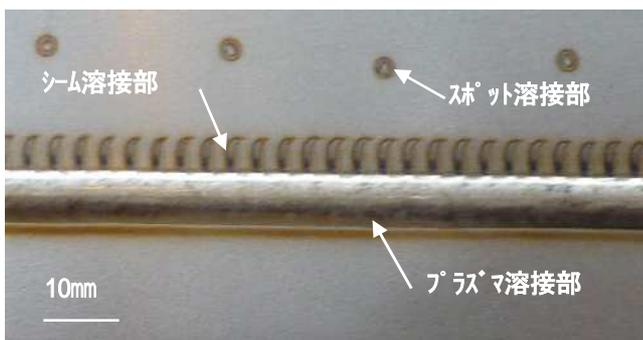
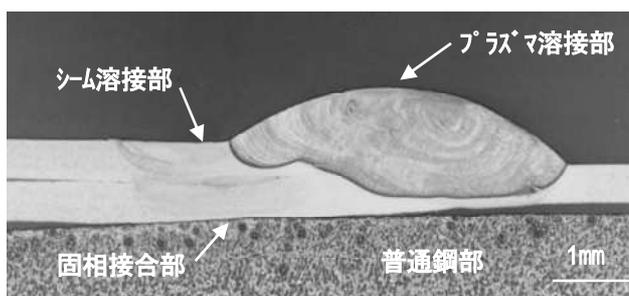


図-17 ライニング溶接ビード外観(電解研磨前)

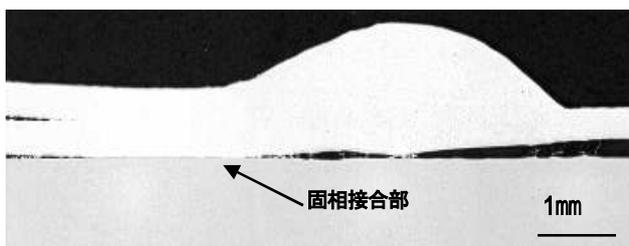
と普通鋼の界面が一体化され、固相接合部が形成されているのがみられる。

薄肉ステンレス鋼ライニング材がプラズマ溶接熱によっても溶損しないのは、この固相接合部の安定な形成によるものであり、これをいかに安定に形成させるかが要点であった。

インダイレクト抵抗シーム溶接、インダイレクト抵抗シーム・プラズマ複合溶接による耐海水性ステンレス鋼の溶接部特性については、新日鐵技報⁴⁾、溶接



a) ライニング溶接部断面(組織現出)



b) ライニング溶接部断面(組織現出前)

図-18 ライニング溶接部断面状況

技術⁵⁾に報告しているので参照いただきたい。

6-2-2 溶接部の表面処理

図-17 の溶接部外観に見られるように溶接部およびその近傍は溶接熱影響によって、高温酸化部が形成されている。高温酸化部の耐食性能がライニング母材部と同等であるという確証はない。よって、電解研磨もしくは砥粒入りナイロン不織布ブラシにより高温酸化部を除去している。図-19 に電解研磨による高温酸化部除去の状況を、図-20 に電解研磨後の溶接部表面状況を示す。電解研磨によって、図-17 に見られたシーム溶接部、スポット溶接部、プラズマ溶接部およびその近傍に見られた高温酸化部は完全に除去されている。

また、使用している耐海水性ステンレス鋼（SUS312L）の表面は光輝焼鈍（BA 処理）後に防眩性確保のために調質圧延による艶消しをしているが、この表面仕上げで耐食性に問題ないことを確認している。



図-19 電解研磨による高温酸化部除去の状況



図-20 電解研磨後の表面状況

6-2-3 ライニング溶接部の品質管理

ライニング部については、①気密性および水密性の確保、②ライニング外面に隙間腐食の起因となるような隙間や凹凸をなくす、の2点が品質管理の要点である。①については鋼管内面から窒素ガスあるいは圧縮空気を充填する気密検査、②については溶接部外観検査による。図-21 に気密検査（発泡漏れ検査）の状況を示す。



図-21 発泡漏れ検査の状況

6-2-4 ライニング面の保護

ライニング施工中や屋外での組立加工中に、飛散している鉄粉等の異物がライニング面に付着すると、鉄粉が錆びる、いわゆるもらい錆となることがある。表面に付着した鉄粉は錆びても、それが耐海水ステンレス鋼（SUS312L）の錆進展につながらないことは確認しているが、維持管理段階での点検に支障があるため除去する必要がある。このため、ライニング施工中および部材輸送中、ジャケット組立中の鉄粉等異物の付着や、物を当てるなどの機械的ダメージによる破れのリスクを回避するために、ライニング材表面を保護フィルムで覆っている。保護フィルムはライニング材コイル段階で貼付けられたものを、溶接部近傍のみを剥離してライニング施工後に剥離した部分に再度保護フィルムを貼り付け、ジャケット構造物としての組立の最終段階において、保護フィルムを除去している。ジャケット出荷前には、ライニング部全域の外観目視検査により、ライニングの健全性を確認している。図-22 にライニング後の保護フィルム貼り付けの状況を示す。



図-22 保護フィルムの貼付け

6-2-5 ライニング溶接安定化のための要素技術、施工技術

良好なライニング溶接法確立が達成されたのは、単に適切な溶接法の選択、溶接法複合化だけではなく、溶接要素技術、施工技術の総合化によるものである。図-23 に薄肉ステンレス鋼ライニング溶接法確立のための要素技術、施工技術の組合せについて示す。図-24 には主な要素技術について写真で示す。

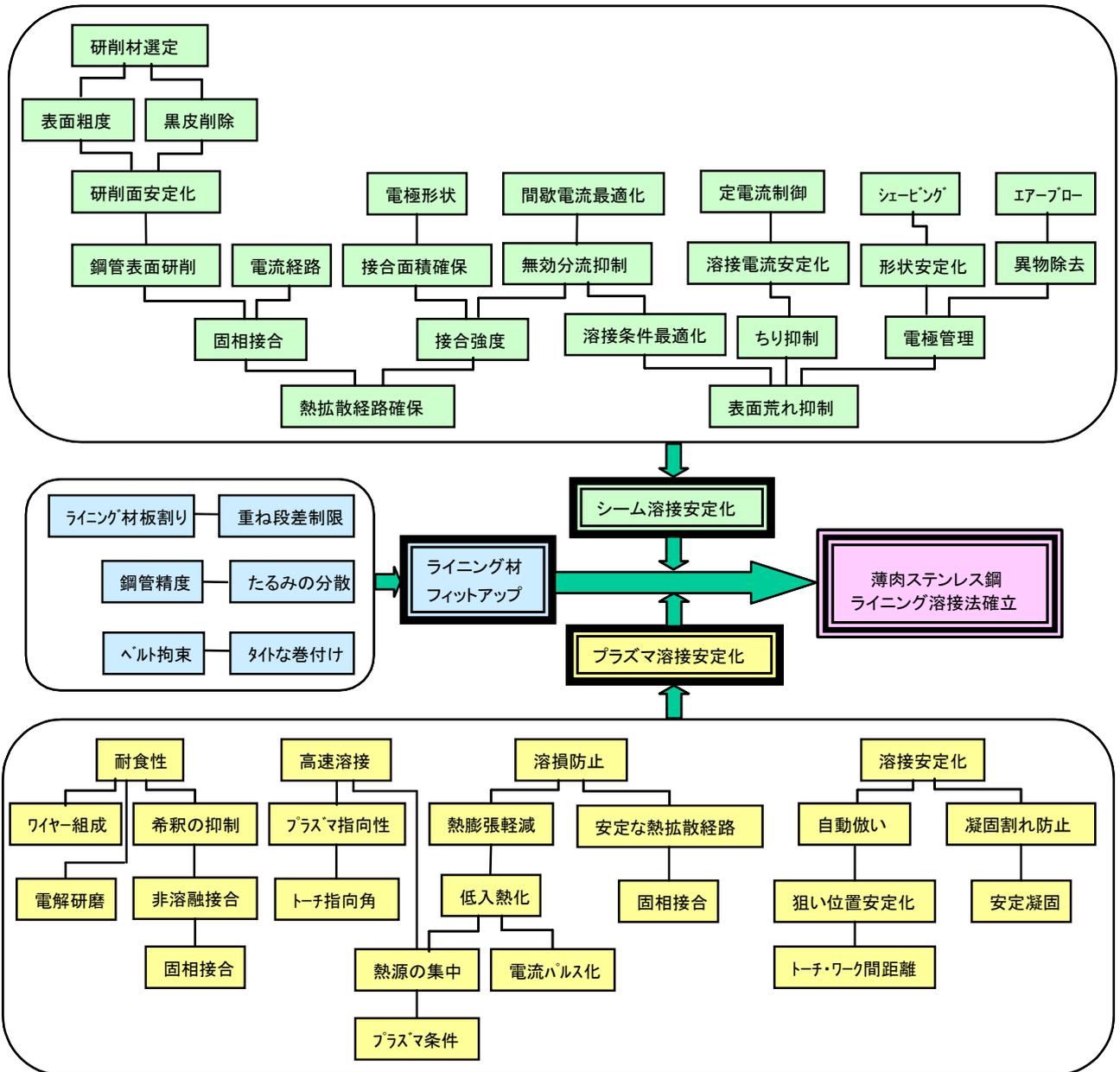


図-23 薄肉ステンレス鋼ライニング溶接法の要素技術、施工技術の総合化

鋼管表面研削 黒皮削除による通電路確保、目荒らしによる固相接合安定化



研削装置



黒皮削除、目荒らし研削



特殊研削ホイール

シーム溶接電極 電極形状、表面状態の管理によるシーム溶接安定化



電極形状設定



電極形状管理(シェーピング)



シーム溶接電極(溶接中)

ライニング材フィットアップ 割付検討による3枚重ねの回避、溶接長最短化、たるみ防止



ライニング材割付



タイト・フィットニング



たるみの分散

プラズマ溶接 トーチ指向角、プラズマ基本条件最適化、自動做いによるプラズマ狙い適正化



トーチ指向角



プラズマ基本条件

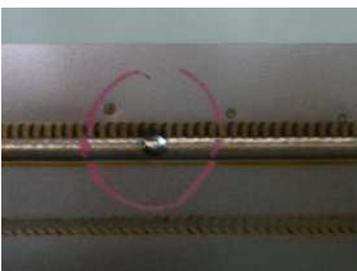


レーザ・センサー自動做い

補修・検査 外観検査、リーク検査による品質確保



ライニング材を溶損させない補修溶接



補修溶接部



リーク検査

図-24 ライニング溶接要素技術

7. 補修可能なステンレス鋼ライニング工法

漂流物の衝突などによりステンレス鋼ライニングが損傷して緊急な補修が必要な場合の対応として、薄肉ステンレス鋼を溶損させずに溶接補修する方法を確立²⁾している。溶接補修時の薄肉ステンレス鋼ライニング材の溶損防止方法として、薄肉ステンレス鋼ライニング材よりも板厚の厚い 1.0～1.5mm の同材質のパッチ当て材を用い、溶接アークをパッチ当て材に発生させて、薄肉ライニング材に直接に発生させずに、間歇アーク（反復法：アークの点弧、消弧を繰り返す）により溶接する方法を確立している。

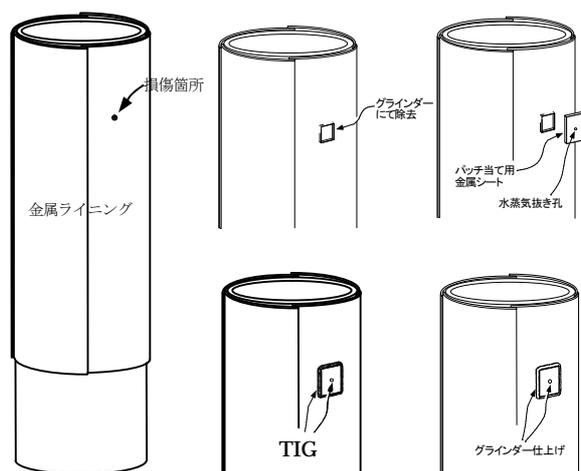


図-25 補修溶接要領

図-25 にパッチ当て溶接補修要領を示す。とくに損傷部からライニング材と部材の間に海水が侵入している場合にはパッチ当て材の中央付近に溶接時の熱による内部水分の逃げ口（水蒸気抜き孔、5mm）を取り付ける。補修部近傍が乾燥している場合はこの孔は不要である。前記の要領でパッチ当て材周囲を TIG 溶接で重ね隅肉溶接した後、水蒸気抜き孔を TIG 溶接で塞ぐ。浸透探傷にて検査後、電解研磨で仕上げる。

図-26 に羽田沖で建設中の D 滑走路ジャケットライニング部の損傷部の補修例を示す。海上においても容易に短時間で補修ができることが実証されている。



a) 補修前損傷部状況

b) 海上でのパッチ当て補修溶接状況

c) 補修後の状況

図-26 海上での補修溶接施工例

8. 播磨工場におけるライニング現状進捗

播磨工場におけるライニング施工は、品質トラブルもなく、予定工程通りに進捗している。6月3日現在の栈橋ジャケットレグについては、188基/198基、杭式防衝工については15本/36本終了しており、7月末には全量完了する予定である。

また、栈橋完成後は、維持管理段階においても定期的にライニング部の近接目視調査や肉厚測定、暴露したステンレス鋼試験片の回収、分析により、ライニングの健全性をモニタリングしていく予定である。

参照文献

- 1) 山岡ら：東京港大井コンテナ埠頭新5バース栈橋の建設，JSSC，No.47，pp.22-27，2003
- 2) 佐藤ら：海洋環境における耐海水性ステンレス鋼被覆補修部の耐久性，第27回防錆防食技術発表大会講演予稿集，105，pp.41-44，2007
- 3) Richard E. Avery：Nickel Development Institute Technical Series No. 10039 16, Oct. 91
- 4) 河合ら：新日鐵技報，(385)，86，(2006)
- 5) 木村ら：溶接技術，53，2009年2月号