

技術報告

耐海水性ステンレス鋼被覆による海洋鋼構造物の防食技術

Corrosion Protection for Offshore Steel Structures Using a Metallic Sheathing Technology with Seawater-resistant Stainless Steel

松永修平* 片山翼 佐藤弘隆
Shuhei MATSUNAGA Tsubasa KATAYAMA Hirotaka SATO
木村文映 関口太郎
Fumiaki KIMURA Taro SEKIGUCHI

抄 録

日鉄エンジニアリング(株)は、厳しい腐食環境下で供用される海洋鋼構造物のライフサイクルコスト最小化のため、信頼性が高く経済性に優れた耐海水性ステンレス鋼被覆による防食技術を数多くの海洋鋼構造物に適用している。これまでに、実環境での被覆材の長期耐久性や異種金属接触腐食への対応等を考慮した防食設計技術、実構造物への溶接施工技術を開発し高度化してきた。それらの防食技術、溶接技術について説明し、プロジェクトでの適用実績や維持管理、および供用開始から10年経過時点での検査結果等について報告する。

Abstract

Nippon Steel Engineering Co., Ltd. has developed a corrosion protection sheathing technology that uses highly reliable and economical seawater-resistant stainless steel. We have applied this technology to a number of offshore steel structures to minimize the life cycle cost in severe corrosive environments. So far, we have advanced corrosion protection technologies that consider long-term durability of sheathing materials and galvanic corrosion in the actual corrosive environment, welding technologies to apply actual structures. We explain these technologies and report the application records to some projects, the maintenance guidelines and the inspection results after 10 years of service.

1. はじめに

埠頭や防波堤、海上空港、タンカーバース等の海洋鋼構造物は重要な社会資本であり、長期の耐久性が求められる。海洋鋼構造物は均質で安定した品質の鉄鋼材料を用いた溶接構造物であり、設計自由度が高く、短期間での施工が可能等多くの利点がある。だが、海洋は鋼材にとって厳しい腐食環境であるため、海洋鋼構造物を長期供用する場合は、相応の腐食対策が必要となる。特に、過酷な腐食環境となる飛沫帯、干満帯に置かれる鋼部材に対しては、信頼性の高い防食法を施す必要がある。そこで、日鉄エンジニアリング(株)では、設計供用年数が30~100年といった超長期の海洋鋼構造物の防食法として、耐海水性ステンレス鋼被覆工法を開発した。本工法は、漂流物の衝突による損傷や材料自体の経年劣化等によるメンテナンスコストを考慮し

た場合、従来の有機材料による被覆防食よりも有利になるため、羽田空港D滑走路橋脚部(図1)をはじめとし、多くの海洋鋼構造物に適用されてきた。

日鉄エンジニアリングでは、海洋鋼構造物への耐海水性



図1 海洋鋼構造物へのSUS鋼被覆の適用
Application of SUS sheathing to offshore steel structures

* 日鉄エンジニアリング(株) 技術開発研究所 マテリアルサイエンス室 防食・材料グループ 福岡県北九州市戸畑区大字中原46-59 ☎ 804-8505

ステンレス鋼被覆の適用にあたり、これまでに防食技術および溶接を中心とした施工現場での被覆技術の高度化を図ってきた。本報では、それら高度化された技術の概要や海洋鋼構造物への適用実績、10年経過時点での維持管理等について報告する。

2. 耐海水性ステンレス鋼被覆の適用範囲

代表的なジャケット式海洋鋼構造物が置かれる腐食環境は、図2に示すよう鉛直方向の上から、海上大気部、飛沫帯、干満帯、海中部、海底土中部の大きく5つに区分される。これらの中で最も腐食速度が大きくなるのは、波浪や干満の影響により表面の水膜中の酸素や塩分が多くなる飛沫帯、干満帯である。

耐海水性ステンレス鋼被覆による防食は、鋼部材表面を強度が高く耐食性に優れたステンレス鋼で被覆し、腐食環境から遮断することを目的に、海上大気部、飛沫帯、干満帯および海中部の一部に適用される。海中部および海底土中部は、経済性に優れ、信頼性も高い電気防食工法を適用している。

被覆材料費の抑制や部材への取り付け容易化のためには、必要な防食性能を確保しつつ、可能な限り薄い板材を貼り付ける必要がある。ステンレス鋼被覆のための薄板は、防食性や耐衝撃性を考慮して、0.4～1.5mm厚程度のものを適用している。

3. 耐海水性ステンレス鋼被覆の防食性

3.1 被覆材の材料特性

耐海水性ステンレス鋼被覆では、被覆材として、海水に対して優れた耐食性を示すスーパーステンレス鋼 SUS 312L を適用している。表1に、SUS 312Lの機械的性質の規格値および代表例を示す¹⁾。SUS 312Lは常温においてSUS 304、SUS 316の約1.5倍の耐力を有する。また、硬度も高いため、優れた耐衝撃性、耐磨耗性が期待できる。

ASTM G48に準拠してSUS 312Lの耐孔食性、耐すきま腐食性を評価した結果を表2に示す¹⁾。表2のすきま腐食発生限界温度は自然海水中で腐食しない上限温度にほぼ対

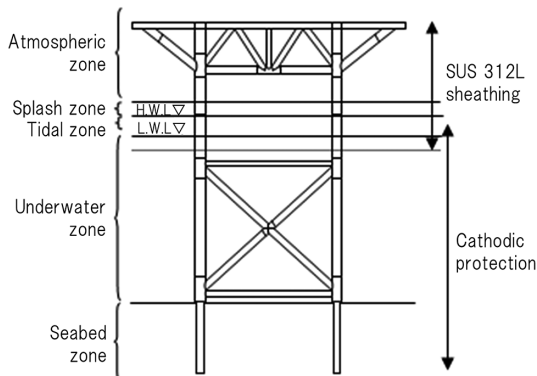


図2 海洋鋼構造物への適用範囲
Application of metallic sheathing to offshore steel structures

応するとされており、SUS 312Lは常温海水中での腐食発生の懸念がほとんどないことがわかる。

3.2 実環境を想定した防食性評価

日鉄エンジニアリングでは、実際の海洋環境での被覆材の耐食性を評価するため、これまでに各種暴露試験を実施している。神奈川県横須賀市の長期暴露試験施設にて、実海水のシャワー暴露試験を4年間実施した結果を図3に示す。シャワー暴露試験は飛沫帯での乾湿繰返しを想定した試験であり、比較材のSUS 304やSUS 316では腐食が発生しているが、SUS 312Lは金属光沢を保持しており、耐食性に優れることを確認した。また、図4に示すように、日鉄鋼構造(株)若松工場内の岸壁を利用した暴露試験も1997年から継続実施しており、海洋環境での長期間の耐食性を確認している²⁾。

表1 SUS 312Lの機械特性¹⁾
Mechanical properties of SUS 312L¹⁾

	0.2% proof stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (HV)
JIS	≥300	≥650	≥35	≤230
Example t=1.2mm	461	843	39	192

表2 SUS 312Lの耐食性¹⁾
Corrosion resistance of SUS 312L¹⁾

	SUS 312L	SUS 316L
Critical pitting temperature (°C) (ASTM G48-E)	70-75	20
Critical crevice temperature (°C) (ASTM G48-F)	55	5



図3 海水シャワー暴露試験²⁾
Seawater shower exposure test²⁾



図4 実海域岸壁での暴露試験
Exposure test in coastal area

3.3 異種金属接触腐食への対応

SUS 312Lは海水中で普通鋼よりも貴な電位を示すため、海水中で普通鋼が接触していると、電位差により普通鋼からSUS 312Lへ海水を介して電流が流れ、普通鋼の腐食速度が増大する(異種金属接触腐食)。ステンレス鋼被覆境界部ではSUS 312Lと普通鋼が接触しているが、大気部は塗装により普通鋼の露出はないため、通常は異種金属接触腐食の懸念はない。また、海中部はアルミニウム合金陽極による電気防食が施されており、電位が最も卑なアルミニウム合金陽極から電流が流れ込むことによって、普通鋼の腐食は抑制される。干満帯～海中部において、衝突物等によってステンレス鋼被覆部が損傷した場合を想定し、損傷部を設けた10.5年間の暴露試験によって普通鋼の腐食速度を評価した結果を図5に示す。飛沫帯では普通鋼単独の腐食速度と同程度、干満帯～海中部では電気防食によって腐食が抑制されており、いずれの部位も異種金属接触腐食の影響はほとんど認められず、普通鋼露出部の腐食量予測が可能であることを確認している³⁾。

4. 耐海水性ステンレス鋼被覆の溶接施工技術

4.1 鋼管への自動溶接

鋼構造物のうち、被覆面積の主要部分を占める鋼管部材への施工には、0.4mm厚のSUS 312Lを自動溶接するために開発したインダイレクトシーム・プラズマ複合溶接法を適用している。インダイレクトシーム溶接は、図6に示すように被覆材側に2つの電極を当てて行うインダイレクト通電形式のシーム溶接法である。通常のインダイレクトシーム溶接では、溶接する板を貫通するような通電回路を安定的に得るために、裏面に銅などのバックバーを配置するが、本法ではライニング材の裏側にある鋼構造物を通して通電回路が得られるため、薄板のSUS 312Lを直接部材に溶接することが可能である⁴⁾。

インダイレクトシーム溶接のみでも鋼材にSUS 312Lを接合可能であるが、接合部が隙間構造となり、使用環境によっては隙間腐食の起点となる可能性がある。そのため、インダイレクトシーム溶接によって鋼部材へ被覆材を接合すると同時に、隙間構造を排除するためプラズマ溶接法を併用している⁴⁾。プラズマ溶接法では、溶接材料としてイ

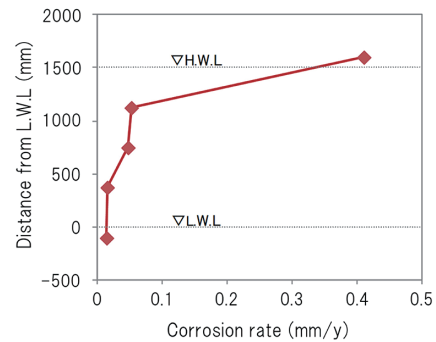
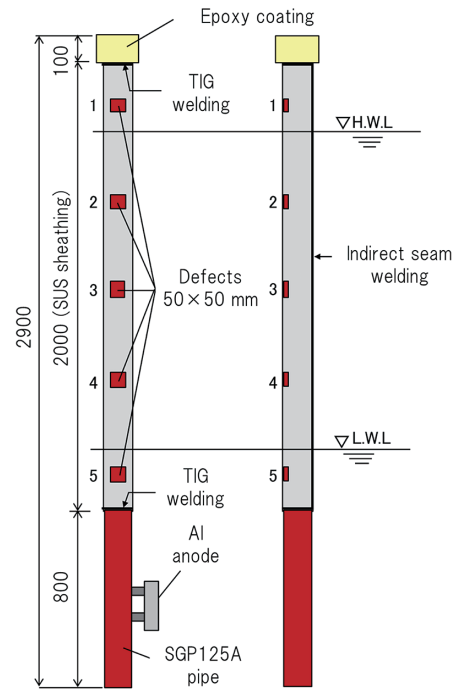


図5 SUS鋼被覆損傷部普通鋼の腐食速度評価³⁾
Measurement of corrosion rate of steel at SUS damaged area³⁾

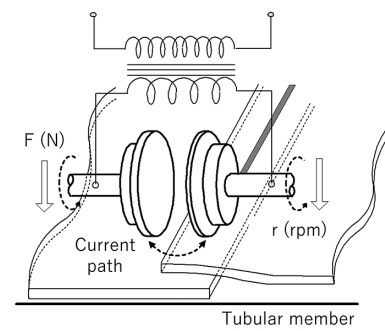


図6 インダイレクトシーム溶接⁴⁾
Schematic illustration of indirect seam welding⁴⁾

ンコネル625を使用する。インダイレクトシーム・プラズマ複合溶接法の模式図を図7に示す。インダイレクトシーム溶接部の軸方向の両端部は、水密性を確保するためにTIG(Tungsten Inert Gas)溶接によってシールする。また、本溶接法による溶接条件の一例を表3に示す。0.4mm厚のSUS 312Lを対象に、溶接速度80cm/minの高速溶接を実現している⁵⁾。インダイレクトシーム・プラズマ複合溶接設

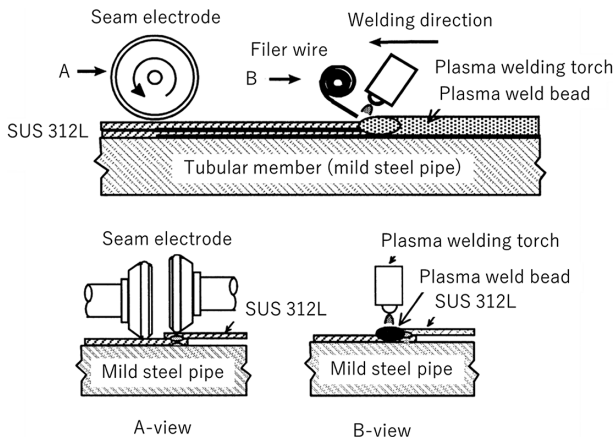


図7 インダイレクトシーム・プラズマ複合溶接⁴⁾
Schematic illustration of combined welding⁴⁾

表3 インダイレクトシーム・プラズマ複合溶接の条件⁵⁾
Welding condition of combined welding⁵⁾

	Current (A)	Speed (cm/min)	Pressure (kN)	Shielding gas
Indirect seam welding	5500-7500	80	2-5	-
Plasma welding	80-120		-	Ar+7%H ₂



図8 インダイレクトシーム・プラズマ複合溶接設備^{4,5)}
Equipment for automatic combined welding^{4,5)}

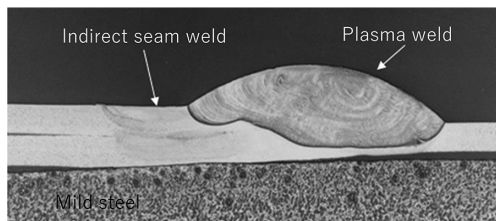


図9 溶接部の断面観察像⁴⁾
Cross section of weld bead⁴⁾

備^{4,5)}を図8に示す。

本溶接法によって得られる溶接部断面写真を図9に示す。プラズマ溶接による溶け落ちや穴あきの発生がなく、隙間構造のない良好な溶接部が得られている⁴⁾。

本溶接法による溶接部およびその近傍は、溶接時の熱影響によって、図10(a)に示すような高温酸化部が形成される。高温酸化部の耐食性はステンレス鋼母材部と比べて耐食性が低下する懸念がある。そのため、溶接後に電解研磨

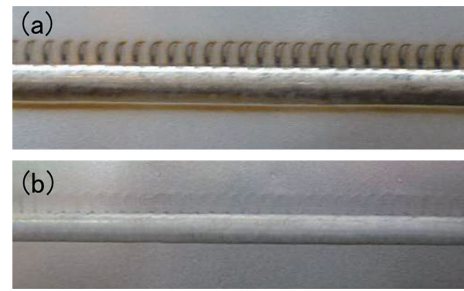


図10 電解研磨前後の溶接ビード外観
(a) 電解研磨前, (b) 電解研磨後
Appearance of weld bead after electrolytic polishing
(a) Before polishing (b) After polishing

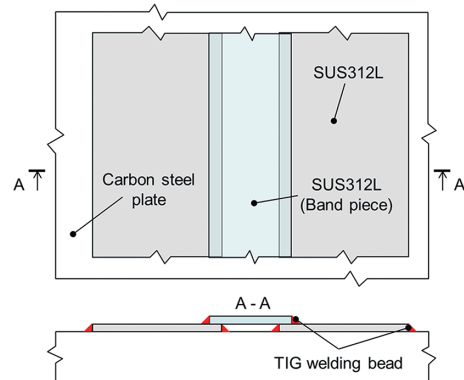


図11 平面へのTIG溶接による適用
Application of SUS 312L to a plane surface by TIG welding

によって、高温酸化部を除去している。図10(b)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、溶接部近傍に見られた高温酸化部が完全に除去されていることがわかる。

4.2 平面への溶接

インダイレクトシーム・プラズマ複合溶接法は、その装置構造上、溶接姿勢が下向に限定される。そのため、立向や上向での施工が必要な海上大気部等の平面部材へのステンレス鋼被覆材の溶接は、溶接材料にインコネル625を用い、マニュアルのTIG溶接により実施しており、溶接施工性(溶け落ちや穴あきの抑制)の観点から厚み1.0~1.5mm程度の薄板を用いる。図11に平面部材への被覆要領の一例を示す。まず、被覆材(SUS 312L薄板)を鋼部材(普通鋼)へ溶接で貼り付け、次に、ライニング材同士の隙間をバンド材と呼ばれる被覆材で覆うように溶接する。なお、被覆材およびバンド材の仮固定はそれぞれTIG溶接による点付けによって行う。

4.3 損傷部の溶接補修

漂流物の衝突等により金属ライニングが損傷し、現地補修が必要になった場合を想定して、パッチ当て溶接補修法を確立している。補修要領を図12に示す。パッチ当て用材料には、厚み1.0~1.5mmのSUS 312L材を用いる。損

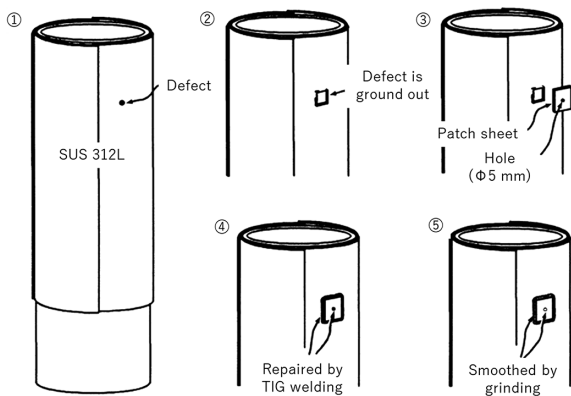


図12 補修溶接施工要領⁴⁾
Procedure of repair welding⁴⁾

傷部から被覆材と鋼部材の隙間に海水が浸入している場合には、パッチ材の中央付近に、溶接時の熱による内部水分の水蒸気抜き孔(5mmφ)を設ける。補修部近傍が乾燥している場合は、この孔処理は不要である。周囲をTIGによる重ね隅肉溶接を実施した後、水蒸気抜き孔をTIG溶接で塞ぐ。溶接材料にはインコネル625を用い、溶接後浸透探傷試験にて欠陥がないか検査し、完了する⁴⁾。

5. 耐海水性ステンレス鋼被覆の実績

5.1 実績紹介

耐海水性ステンレス鋼被覆工法は、羽田空港D滑走路(図1)をはじめとして、これまでに港湾のジャケット構造物において多くの適用実績がある。

海上に建設され、2010年に運用が開始された羽田空港D滑走路は、多摩川河口域近傍に位置するため、河川水の通水性確保のために滑走路の約3分の1は栈橋構造となっている。栈橋構造は、大平面を構成するための格子状の鋼桁上部構造と、上部構造を支えるレグ(脚部)と補剛材(ブレース)をトラス状に組み立てた下部構造からなる鋼製ジャケット198基と、ジャケットを固定する基礎杭1165本から構成される。海上輸送前のジャケット構造物の外観を図13に示す。羽田空港D滑走路では、栈橋部の全1165本のジャケットレグ表面(総面積114000m²)に、本報で述べたステンレス鋼被覆を施している。なお、ステンレス鋼被覆材としては、設計供用年数が100年であることを考慮し、SUS 312L薄板製造時(焼鈍時)に生成する酸化スケールが鋼材の耐食性に悪影響を与える可能性を排除するため、日鉄ステンレス(株)山口製造所にて光輝焼鈍(BA: Bright Annealing)処理を施したSUS 312L材を用いた。以降、日鉄エンジニアリングが施工する被覆材には、設計供用年数の長短に関わらず、全てBA処理を施したSUS 312Lを用いている。

日鉄エンジニアリングにおけるステンレス鋼被覆を施したジャケット構造物の、近年の製作実績の一部を表4に示す。厳しい腐食環境下で長期間の耐久性が求められる港湾



図13 ジャケット構造物
Jacket structure

表4 ジャケット構造物への近年の適用実績
Recent application records to jacket structures

Year	Project	Sheathing area (m ²)
2019	Tokuyama-Kudamatsu Port Kudamatsu Area Pier	3561
2018, 2019	Fukuoka Island City	1339
2018	Mizushima Port Tamashima Area	2124
2018	Sasebo Port Uragashima Area	2216
2016, 2018	Tokyo Port No.13 Terminal	4141
2016, 2017	Hakata Port Chuo Wharf Berth	1725
2016, 2017	Kushiro Port	927

表5 維持管理要領
Maintenance procedure

Action	Frequency
Annual patrol	Once a year
Emergency inspection	In case of emergency
Close-up visual inspection	After 5, 15, 30, 60, 90 years
Corrosion monitoring	After 5, 15, 30, 60, 90 years

インフラにおいて、信頼性を確保するための重要な防食技術として数多く適用されている。

5.2 羽田空港D滑走路の維持管理

羽田空港D滑走路では、設計・施工時に100年間の維持管理計画が策定されており⁶⁾、鋼製ジャケットに対しては、大規模な補修を未然に回避するために予防保全の思想を導入している。ステンレス鋼被覆の維持管理要領の概要を表5に示す。

ステンレス鋼被覆が損傷し防食機能を喪失する大きな要因としては、漂流物の衝突による破損が考えられ、D滑走路においては、大型河川の河口域であり漂流物も多いため、年に1回、全レグに対して調査船上から遠望目視点検(巡回目視点検)を行っている。供用開始から約10年が経過したD滑走路のジャケットレグ1203本の直近の巡回目視点検結果を表6に示す。ステンレス鋼被覆の複数個所に漂流物の衝突跡等の部分的な変状が認められた(c判定:233箇所)が、損傷により素地の鋼材が腐食していた部位は0箇所であり、ステンレス鋼被覆の優れた信頼性が実証された

表6 10年経過時点での検査結果
Inspection results after 10 years of service

Inspection items	Degree of deterioration*			
	a	b	c	d
SUS sheathing: Deformation, damages, corrosion	0	0	233	970

*a: Protection performance has deteriorated and structural steel is corroded.

b: Protection performance is about to deteriorate because of corrosion and/or abrasion of SUS sheathing.

c: Protection performance has not deteriorated, but slight corrosion and/or deformation of SUS sheathing are identified.

d: No changes of SUS sheathing are identified.

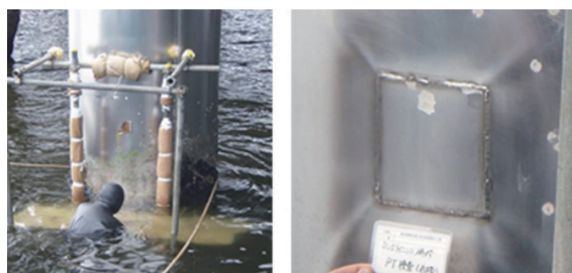


図14 現地での補修状況
On-site repair of damaged area

結果となっている。

なお、今後の巡回目視点検等でステンレス鋼被覆の損傷が見つかった場合は、4.3節で述べた要領に従って、現地補修を行う。現地補修に関しては、D滑走路の建設工事中に作業船の衝突によりステンレス鋼被覆が損傷し、補修を実施した事例がある。当時の補修状況を図14に示す。補修後約10年が経過しているが、補修個所に腐食等の変状は認められず、損傷した場合も適切な現地補修を施せば、防食機能を回復および長期保持可能であることを確認している。

上記結果より、現行の維持管理を継続することで、100年後も大規模な補修工事が必要になることなく、防食性能

を保持可能と考えている。なお、D滑走路における維持管理は、劣化度判定や劣化予測結果に基づいて点検項目、頻度を見直していく計画になっており、維持管理データも全てデータベース化されている。

6. おわりに

耐海水性ステンレス鋼被覆は、羽田空港D滑走路をはじめとして多くの実績を重ねてきており、長期耐久性と経済性を両立した防食技術として、海洋鋼構造物の信頼性確保に貢献している。溶接をはじめとしたステンレス鋼被覆施工技術も日々改良されてきている。

今後も、適用範囲の拡大や施工面での能率改善等を目指した技術開発に取り組んでいき、海洋鋼構造物の更なる信頼性向上、施工コスト低減を実現していきたいと考えている。

謝辞

神奈川県横須賀市での各種暴露試験の実施については、故阿部正美氏(当時(独)港湾空港技術研究所 主任研究官)に、多大なるご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日鉄ステンレス(株)：スーパーステンレスNSSC® 270カタログより抜粋
- 2) 佐藤弘隆 ほか：新日鉄技報. (377), 34 (2002)
- 3) 金田文香 ほか：新日鉄住金エンジニアリング技報. 7, 19 (2016)
- 4) 河合康博 ほか：新日鉄技報. (385), 86 (2006)
- 5) 岩見博志 ほか：第7回東京国際空港建設技術報告会. 国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所, 6-1, 2009
- 6) 佐藤弘隆：第64回白石記念講座. 日本鉄鋼協会, 2012



松永修平 Shuhei MATSUNAGA
日鉄エンジニアリング(株)
技術開発研究所 マテリアルサイエンス室
防食・材料グループ
福岡県北九州市戸畑区大字中原46-59 〒804-8505



片山翼 Tsubasa KATAYAMA
日鉄エンジニアリング(株)
技術開発研究所 マテリアルサイエンス室
溶接グループ マネジャー



佐藤弘隆 Hiroataka SATO
日鉄エンジニアリング(株)
技術開発研究所 マテリアルサイエンス室
防食・材料グループ長



木村文映 Fumiaki KIMURA
日鉄エンジニアリング(株)
技術開発研究所 マテリアルサイエンス室
溶接グループ長 Ph. D.



関口太郎 Taro SEKIGUCHI
日鉄エンジニアリング(株)
海洋本部 プロジェクト部長