

原油タンカー用高耐食性厚鋼板 (NSGP®)

Corrosion Resistant Steel Plate for Crude Oil Tanker (NSGP™)

伊 藤 実*
Minoru ITO鹿 島 和 幸
Kazuyuki KASHIMA本 田 貴 之
Takayuki HONDA原 宗 理
Motomichi HARA稲 見 彰 則
Akinori INAMI西 村 誠 二
Seiji NISHIMURA

抄 録

タンカーの原油タンク用の耐食鋼 NSGP®-1, NSGP®-2 を開発した。造船用厚鋼板は高能率溶接性が要求されるが、耐食鋼は一般的に合金添加量が多く、高能率溶接性に制約がかかることが多い。そこで、原油タンク底板と上甲板の腐食機構を解明し部位に応じて少ない合金添加量で耐食性を確保することで、IMO の腐食試験を満足しながら溶接性も従来鋼と同等のものを開発した。これらの鋼材は実船適用でも優れた耐食性を示した。

Abstract

NSGP™-1 and NSGP™-2, corrosion resistant steels, have been developed for cargo oil tanks of crude oil tankers. Steel plate for ship is usually required to have highly efficient weldability, however; corrosion resistant steel generally contains too much alloy to be good at highly efficient weldings. Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation has clarified the corrosion mechanism and developed low alloyed corrosion resistant steels that satisfy the requirement from the perspective of both corrosion test of IMO and high efficient weldability, the same as conventional steel for ships. These show excellent corrosion resistance on boards.

1. 緒 言

1990 年代以降タンカーの原油流出による海洋汚染が非常に大きな問題となり、IMO (International Maritime Organization : 国際海事機関) でタンカーの国際ルールが厳格化されてきた。代表的なものとしては、構造対策ではダブルハル化が、腐食対策では原油タンク (Crude Oil Tank : COT) の防食基準化 (MSC.288(87)) 等がある。

2013 年に発効された原油タンカーの原油タンクの防食基準においては、日本から提案した耐食鋼が船舶分野で初めて塗装と代替可能な腐食対策として認められた。これには新日鐵住金(株)の腐食試験方法および耐食鋼の実船での試験適用結果が大きく貢献している。

防食基準作成時の寿命の目標は、塗膜の劣化は 15 年としたのに対し、耐食鋼は 25 年推定で腐食量が船級ルールで規定されている設計時の腐食予備厚以下になるように設定した。

耐食鋼開発には腐食機構の解明が重要な要素の一つで

あり新日鐵住金が独自に解明したものであるが、この元となったのは、(社)日本造船研究協会第 242 研究部会(SR242)での 10 数隻におよぶ大型原油タンカーの腐食損傷調査結果りであった。これは、原油タンク内部の腐食の問題がダブルハル化後に提起され、その対応のために 1999 ~ 2001 年度に実施されたものである。

原油タンク内部の腐食発生形態は底部と天井部で異なり、底部は穴状の腐食(以下、ピット)、天井部は全面腐食である。腐食機構が異なるため耐食鋼もそれに合わせてそれぞれ Nippon Steel & Sumitomo Metal's Green Protect (NSGP®)-1 と NSGP®-2 を開発した。新日鐵住金が 50 年以上の低合金耐食鋼の開発により培った知見を生かし少ない合金添加で耐食性と高能率溶接性を両立させることに成功した。なお、NSGP-1 は日本郵船(株)と共同開発したものである。

これらの鋼材を原油タンカーに使用することにより、建造時の塗装、塗装用足場設置等の工数削減、塗料からの有機揮発物質(VOC)排出量削減が期待でき、竣工後は補

* 鉄鋼研究所 厚板・形鋼研究部 主幹研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

修コスト低減と補修期間の短縮が期待できる。

本稿では、原油タンクの底部用の鋼材（以下、底板）、天井部用の鋼材（以下、上甲板）の腐食機構と NSGP-1、-2 の耐食性、機械的性質、実船適用結果について紹介する。

2. 底板用耐食鋼 (NSGP-1)

2.1 底板の腐食メカニズム¹⁻³⁾

原油タンクの底板の腐食は、局所的に起こる穴状の形態のものであり、深さは最大で 10mm にも及ぶ。図 1 に実船調査と実験室検討結果から導き出された腐食機構を示す。

原油タンク底板には、原油積載運航時に腐食に不可欠な水が滞留していることが観察されている。この水は高濃度の塩化物を含む中性水（ブライン）であり、原油中の含有水分が搬送中に析出したものと考えられている。一方、原油タンク内面にはオイルコートと称されている原油成分が固着している。このオイルコートは塗装と同様の環境絶縁性を有する。このため腐食はオイルコートの欠陥部で生じると考えられる¹⁾。

欠陥部で腐食が生じると加水分解によって pH が低下する。底板には 10mass% の高濃度のブラインが滞留しているため、腐食部は強い酸環境になり得る。このため、ピット内では活性溶解が生じ半球状の腐食が形成すると考えられる。実際にピット内部の pH 値を計測した結果、pH 値が 1.5 以下を示す結果が示されている²⁾。一方で SR242 の調査結果からピットの進展はドック検査後に停止すると考えられることから³⁾、新日鐵住金は上記環境での腐食速度を大幅に低減した NSGP-1 を開発した。

2.2 腐食試験結果

図 2 に IMO の試験結果を示す³⁾。図中には従来鋼の結果も比較に合わせて示す。NSGP-1 は IMO 耐食鋼性能基準の約半分の腐食速度を示す。写真 1 に NSGP-1 の継手部の腐食試験結果の例を示す。IACS (International Association of Classification Societies: 国際船級協会連合) 統一解釈 UI SC258⁴⁾ では、継手部の段差が $30\mu\text{m}$ 以下、もしくは段差 $50\mu\text{m}$ 以下かつ境界部傾斜 15° 以下を合格としている。従来溶材を用いた場合では、母材と溶接金属の境界に約

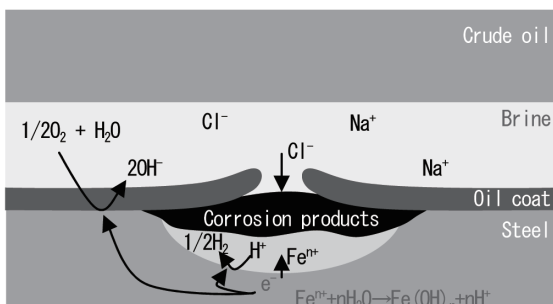


図 1 底板の腐食機構の模式図

Summarized process and mechanism of localized corrosion on COT bottom plate

$60\mu\text{m}$ の明確な段差があり目標値を満足しないが、日鐵住金溶接工業(株)製の専用溶材を用いた場合では母材と溶接金属の境界に段差は認められず目標値を満足する。

2.3 NSGP-1 の機械特性

表 1 に母材の機械特性を示す。NSGP-1 の機械特性は従来鋼と同等である。なお、NSGP-1 の化学成分は、IACS 統一規則 UR の本耐食鋼材に関する規定 W30 を満足する。

2.4 NSGP-1 の溶接性

表 2 に y 形溶接割れ試験 (JIS Z 3158) の結果を示す。

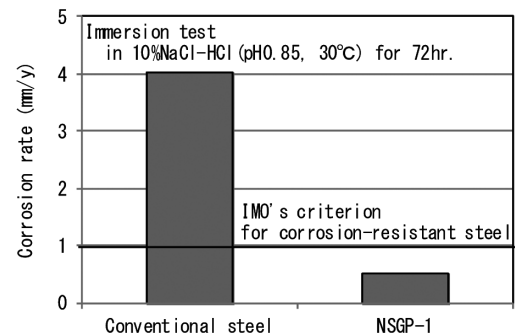


図 2 NSGP-1 と従来鋼の腐食試験結果
Corrosion test results of NSGP-1 and conventional steel

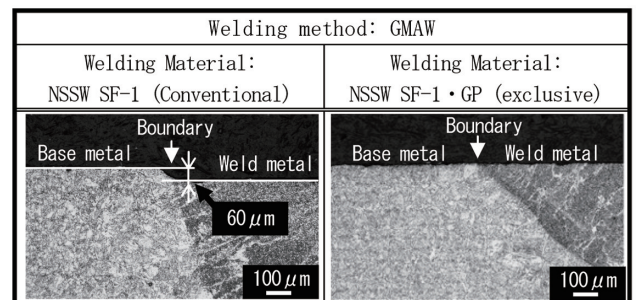


写真 1 NSGP-1 溶接継手部の腐食試験後の断面（一例）
Cross section view of welded joints of NSGP-1 after corrosion test

表 1 NSGP-1 の機械的特性 (板厚: 25mm)
Mechanical properties of steel plate of NSGP-1
(plate thickness: 25 mm)

	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	vE _{-20°C} (J)
NSGP-1	462	554	22	273
D36 TM spec.	≥ 355	490-620	≥ 18	≥ 34

表 2 NSGP-1 の y 型溶接割れ試験結果
Results of y-groove weld cracking test

Plate thickness	Temp. / Humidity	Preheat temp.	Crack ratio		
			Surface	Section	Root
20 mm	13°C / RH90%	0 °C	0 %	0 %	0 %
		25 °C	0 %	0 %	0 %

表3 NSGP-1の継手靱性 (板厚: 20mm)
Impact test results of welded joint
(plate thickness: 20 mm)

Notch position	Weld metal	Fusion line	HAZ 1 mm	HAZ 3 mm	HAZ 5 mm
vE _{0FC} (J)	117	103	103	193	208

HAZ: Heat affected zone

何れの部位も割れは認められず NSGP-1 の溶接性は良好である。

表3にNSGP-1の継手シャルピー試験結果を示す。継手は片面サブマージアーク溶接 (FAB 法) により作製したものであり、入熱は約 125 kJ/cm である。何れの部位も必要靱性値の 34J 以上を十分に満足しており、良好な溶接性を示す。

2.5 実船適用結果

NSGP-1 は既に約 10 隻の大型原油タンカー (VLCC: Very Large Crude Oil Carrier) の原油タンク底板上に適用されている。

最初の適用は 2004 年で、全 15 タンク底板上に試適用され、そのうち 6 タンクは無塗装で適用されている。図3は、NSGP-1 無塗装適用 6 タンクにおける 4 回目ドック (10 年) 時の補修対象となる 4mm 以上のピット数の平均と最大値を示したものである。図には SR242 で調査された従来鋼適用船の 2 回目ドック (5 年) 時の結果を VLCC-1 として併せて示す。いずれも、前回検査時と今回検査時の差である。

従来鋼適用船の 5 年目検査では、ピット数が 1300 個/タンク以上増加したタンクもあり、平均 200 個/タンク発生している。一方、NSGP-1 適用船の 10 年目検査では、多いタンクで 100 個/タンク程、平均 50 個/タンク程である。このように原油タンク底板上のピットに対して NSGP-1 は優れた耐食性を有することが実船でも確認できた。

また、初回ドック時から同じピットの深さをドック毎に計測しているが、図4に示す通りピット深さは 5 年目と 10 年目で変わらず、ピットが成長していないことを検証した。さらに、底板の板厚を測定した結果、初期の板厚と変化は無く全面腐食がないことも確認している。

次に、NSGP-1 を全 15 の原油タンク底板上に無塗装で適用している、航路の異なる 6 隻の VLCC について、初回ドック時 (就航 2.4 年～3.1 年経過) のピット調査結果を示す。図5は 6 隻の各タンクの深さ 4mm 以上のピット数の平均と最大値である。図には SR242 で調査された従来鋼適用船の結果を VLCC-2 として併せて示す。従来鋼適用船は平均で 100 個/タンク近く、最大で 400 個/タンク近く発生している。一方 NSGP-1 適用船の VLCC-C を除く 5 隻の平均は 1.6 個/タンク、最大でも 10 個/タンク未満とピット数は大幅に低減している。これらの VLCC のピット発生にはばらつきがあるが、その要因解析結果から操業等の影

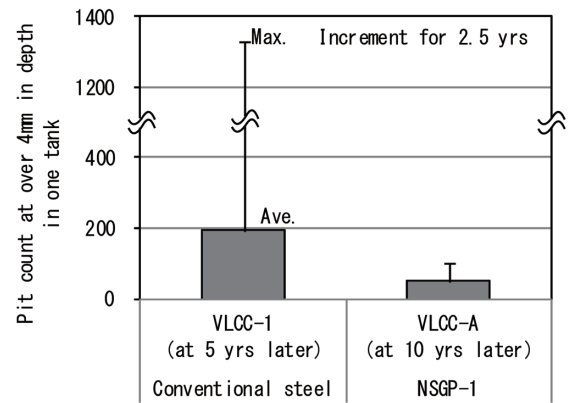


図3 従来鋼適用 VLCC-1 の 5 年後と NSGP-1 適用 VLCC-A の 10 年後のピット数の比較

Observed pit count for VLCC-1 using conventional steel upon 5-year and VLCC-A using NSGP-1 upon 10-year inspection

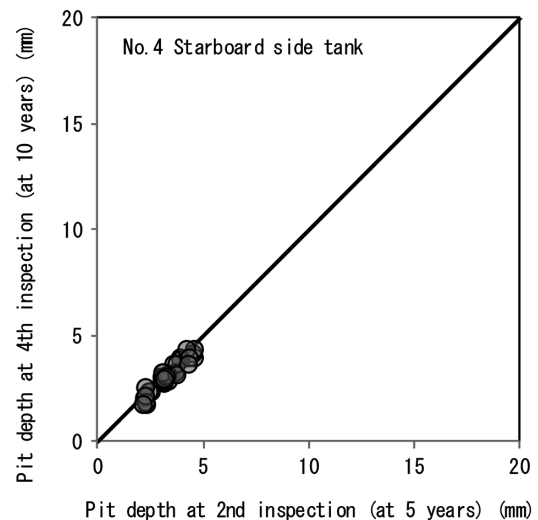


図4 同一ピットの 5 年目と 10 年目検査時の深さ計測結果
Depth measurement result of the fifth year and the tenth year of the same pits

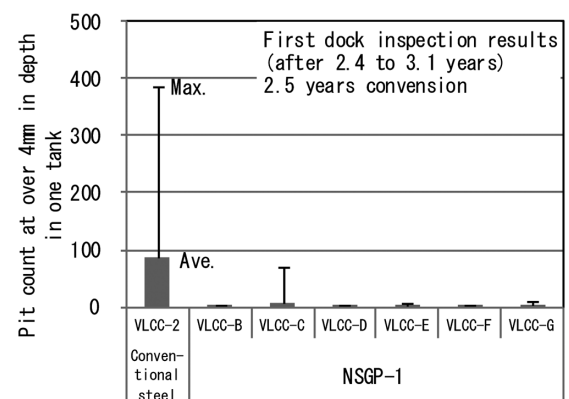


図5 従来鋼適用と NSGP-1 適用 6 隻のピット数の比較
Observed pit count of VLCC-2 using conventional steel and six VLCCs using NSGP-1

響がみられており、ばらつきを大幅に低減させる目途もついている。

3. 上甲板用耐食鋼 (NSGP-2)

3.1 上甲板裏の腐食メカニズム

原油タンクの上甲板裏側の腐食は、鋼板がほぼ均一に腐食するいわゆる全面腐食の形態であり、平均の腐食速度は概ね年間 0.1mm 以内であると報告されている⁷⁾が、腐食環境によってはそれを上回る腐食速度となり長期間の使用の際に問題となる場合がある。塗装による防食もおこなわれているが、特に上甲板裏側は初期塗装に加えメンテナンスに膨大な費用がかかるため、無塗装使用可能な鋼材開発が望まれている。

上甲板裏側の空隙部にはタンク内の防爆目的でイナートガスと呼ばれるエンジン排ガスが導入されるため、 CO_2 、 O_2 、 SO_2 等の腐食性ガスが存在する。さらに、原油由来の H_2S も比較的高濃度に存在する。表 4 に上甲板裏気相部のガス分析結果を示す⁸⁾。このような O_2 と H_2S が共存する環境は自然界ではありえないことから、上甲板裏の腐食環境がいかに特異であるかがわかる。また、上甲板裏側は昼夜の温度差により夜間の結露と昼間の乾燥が繰り返される環境であり、結露水は CO_2 や SO_2 の存在により pH が 2 ～ 4 程度まで低下する。腐食生成物としては鉄さびに加え H_2S が酸化されて生成する S (固体硫黄) が比較的多くみられるのが本腐食環境の特徴であり、腐食生成物層はさびと S が層状に存在する構造となっている。腐食メカニズムについて図 6 にまとめる。上甲板裏側はイナートガス成分と H_2S 存在下における弱酸水による乾湿繰り返しにより腐食が進行すると考えられる。

3.2 腐食試験方法

上述の腐食環境を考慮し、再現腐食試験法を確立した。図 7 に試験装置の概要を示す。密閉容器中に蒸留水を入れ、イナートガスを模擬したガスと H_2S を吹き込み原油タンク内の環境を模擬した。試験槽天井裏に取り付けた試験片には 25℃ ～ 50℃ の温度サイクルを付与することにより結露と乾燥の繰り返しを模擬した。

再現腐食試験後の鋼材上に生成した腐食生成物の組成を表 5 に示す。腐食生成物の組成は実船と類似しており、

表 4 原油タンク気相部のガス分析結果 (例)
Analysis results of gas concentration in vapor space of COT

Tank	3S	4C	4S	5C
Crude oil	A	B	C	D
H_2S	2790	1330	498	817
H_2O	4.9	3.9	5.3	2.5
O_2	1.7	2.5	1.8	3.9
CO_2	3.7	4.0	2.2	10.9
SO_x	1.3	3.9	1.6	2.7
N_2	32.9	45.0	25.7	62.0
C_xH_y	54.9	42.4	62.2	15.0

H_2S , SO_2 : vol.ppm, Others: vol.%

実環境の腐食生成物として特徴的な単体 S も検出された。また、図 8 に示すように、腐食生成物層の断面分析より単体 S が層状に存在することから、実環境において見られるさびと S の層状構造が本試験により再現されることが確認された⁹⁾。なお、IMO において規定された評価試験法は、本試験方法がベースとなっている。

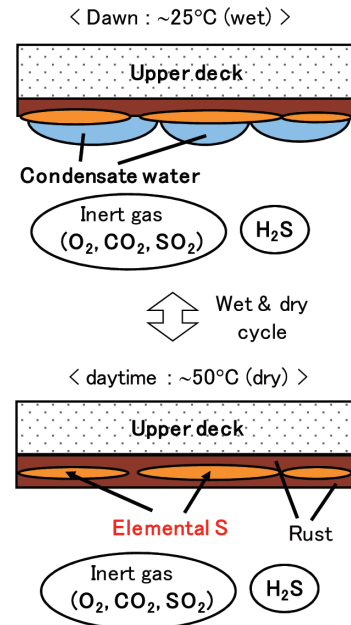


図 6 上甲板裏側の腐食機構
Corrosion mechanism at COT upper deck plate

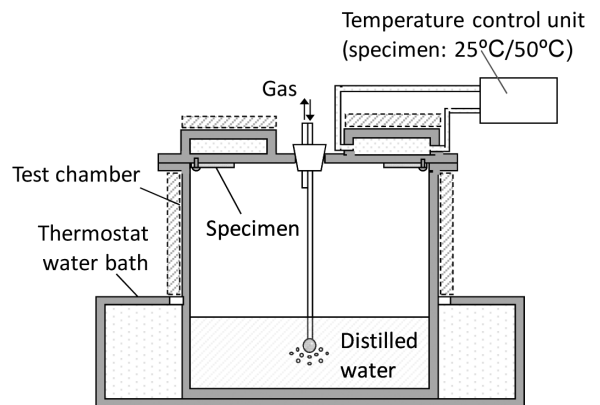


図 7 再現腐食試験装置
Simulated corrosion test apparatus for upper deck of COT

表 5 X線回折による再現腐食試験後および COT 上甲板のさび組成 (mass%)

Compositions of corrosion products on simulated test specimen and upper deck plate of COT analyzed by X-ray diffraction method (mass %)

	α -FeOOH	β -FeOOH	γ -FeOOH
Simulated test	30	0	3
COT	37	0	8

	Fe_3O_4	S	Others
	8	21	38
	0	12	43

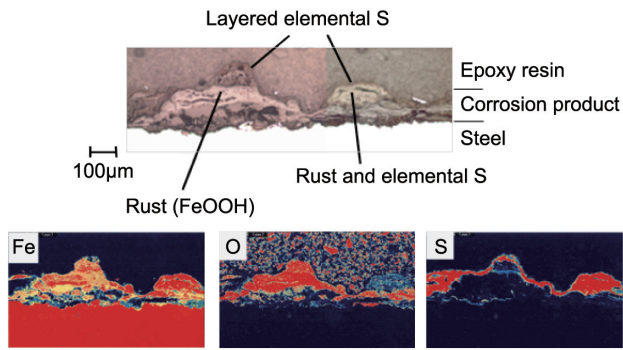


図8 再現腐食試験後の腐食生成物断面および元素分布
Cross sectional morphology and distribution of elements by electron probe micro analyzer (EPMA) in corrosion product of specimen after simulated corrosion test for upper deck

表6 再現腐食試験結果
Simulated corrosion test results

	Test results
NSGP-2	1.53 mm
IMO spec.	≤ 2 mm

3.3 腐食試験結果

再現試験法を用い、耐食性に及ぼす各種合金元素の影響を調査し、NSGP-2を開発した⁹⁾。NSGP-2は微量の合金元素を添加することにより大幅に耐食性を向上させたものである。NSGP-2のIMO評価試験結果を表6に示す。本試験における25年推定板厚減少量は1.53mmであり、規格を満足することが確認された。耐食メカニズムを電気化学的に検討した結果を図9に示す。NSGP-2においては、弱酸性環境で腐食試験前、腐食試験後も鋼材のアノード反応が抑制されることから、母材と腐食生成物両方により地鉄の溶解を抑制するため耐食性が大幅に向上しているものと考えられる。

3.4 機械的特性

耐食性以外の特性として、表7に開発鋼の機械特性を示す。また、表8にy型溶接割れ試験結果、表9に継手シャルピー試験結果を示す。継手靱性はサブマージアーク溶接（3電極FCuB法）により作製したものであり、入熱は約108kJ/cmである。機械特性は船級規格（IACS W30）を満足するものであり、溶接性や継手靱性も良好であることを確認しており、従来鋼と同様原油タンクへの適用が可能である。

3.5 実船適用試験結果

NSGP-2はアフラマックスタンカーの上甲板に約8年間試験適用されており、ドック点検時の板厚計測により実環境での長期耐食性を評価した。実船試験結果およびこの結果より推定した25年後の腐食量を図10に示す。NSGP-2の腐食量は従来鋼に比べ大幅に低減しており、実環境にお

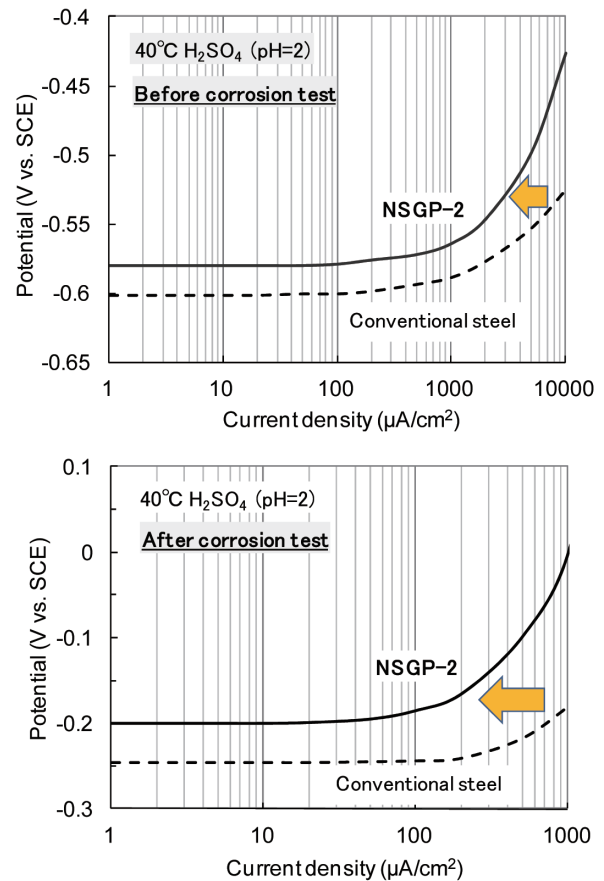


図9 従来鋼およびNSGP-2のアノード分極曲線
Anodic polarization curves of conventional steel and NSGP-2

表7 NSGP-2の機械特性（板厚：16.5mm）
Mechanical properties of NSGP-2
(plate thickness: 16.5 mm)

	YP (N/mm²)	TS (N/mm²)	EL (%)	vE _{-20°C} (J)
NSGP-2	432	504	24	258
D36 TM spec.	≥ 355	490-620	≥ 20	≥ 34

表8 NSGP-2のy型溶接割れ試験結果
Results of y-groove weld cracking test

Plate thickness	Temperature / Humidity	Surface crack ratio	Section crack ratio
30 mm	20°C / 60%RH	0 %	0 %

表9 NSGP-2の継手靱性（板厚：16.5mm）
Impact test results of welded joint (plate thickness: 16.5 mm)

Notch position	WM	FL	HAZ 1 mm	HAZ 3 mm	HAZ 5 mm
vE _{0°C} (J)	174	132	172	224	250

いても耐食性が良好なことが検証された。また25年後の推定腐食量は従来鋼で約2.7mmとなり腐食試験の合格基準として設定されている2mmを上回るが⁹⁾、NSGP-2は約1.6mmである。このように、NSGP-2を用いることにより、

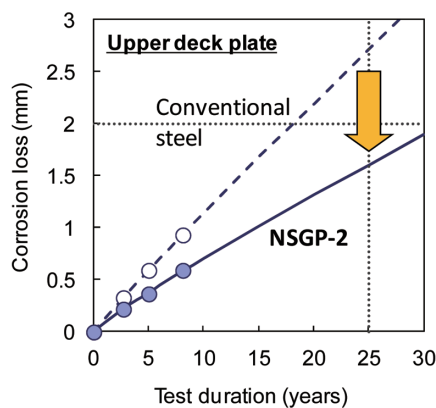


図10 NSGP-2の実船試験結果および25年後推定腐食量
Onboard test results of NSGP-2 and estimated corrosion loss after 25 years

長期間の無塗装使用が可能となると考えられる。

4. 結 言

原油タンクの腐食機構解明と底板、上甲板用の耐食鋼であるNSGP-1、NSGP-2の耐食性、機械的性質、実船適用結果について紹介した。腐食機構を独自に解明し少ない合金添加で耐食性を持たせることに成功し、高能率溶接性含めて従来鋼と同等に取り扱える商品となった。また、実船適用による長期評価結果からも高い耐食性を有していることが確認できた。このような結果から、IMO 決議 MSC.288 (87)を満足する耐食鋼として世界で初めて船級承認を取得し、原油タンカーへの無塗装での使用が可能となった。専用の溶接材料も開発し船級承認を取得している。本耐食

鋼を使用することで、原油タンカー建造時のコスト低減やVOC排出量削減、竣工後の補修コストの低減や補修期間短縮が大きく期待できる。

参考文献

- 1) 日本造船研究協会 第242研究部会：原油タンカーの新型コロージョン挙動の研究－研究概要総括書－. 2002
- 2) Katoh, K. et al.: Study on Localized Corrosion on Cargo Oil Tank Bottom Plate of Oil Tanker. Paper No. A15, WMTC2003, San Francisco, 2003
- 3) Ito, M. et al.: Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. OMAE2012-83821, 2012
- 4) IACS UI SC 258. For Application of Regulation 3-11, Part A-1, Chapter II-1 of the SOLAS Convention (Corrosion Protection of Cargo Oil Tanks of Crude Oil Tankers), Adopted by Resolution MSC.289 (87) The Performance Standard for Alternative Means of Corrosion Protection for Cargo Oil Tanks of Crude Oil Tankers.
- 5) Ito, M. et al.: Proceedings of the NACE International East Asia & Pacific Rim Area Conference & Expo 2013. EAP13-4621, 2013
- 6) 吉川：材料と環境. 53, 388 (2004)
- 7) Kashima, K. et al.: Proceedings of International Symposium on Shipbuilding Technology 2007, 2007, p. 5
- 8) Kashima, K. et al.: Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. OMAE2011-49503, 2011



伊藤 実 Minoru ITO
鉄鋼研究所 厚板・形鋼研究部 主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



鹿島和幸 Kazuyuki KASHIMA
鉄鋼研究所 厚板・形鋼研究部 主幹研究員



本田貴之 Takayuki HONDA
大分製鉄所 厚板部 厚板工場長



原 宗理 Motomichi HARA
鹿島製鉄所 品質管理部 厚板管理室 主査



稲見彰則 Akinori INAMI
厚板事業部 厚板技術部 厚板商品技術室 主幹



西村誠二 Seiji NISHIMURA
厚板事業部 厚板技術部 厚板商品技術室 上席主幹