

## LNG煙突用新耐食厚板(WELACC5)

## New Corrosion Resistance Steel Plate (WELACC5) for LNG Funnel

宇佐見 明 <sup>(1)</sup> Akira USAMI	田辺 康児 <sup>(2)</sup> Kouji TANABE	都築 岳史 <sup>(3)</sup> Takeshi TUZUKI	糟谷 正 <sup>(4)</sup> Tadashi KASUYA
間 淵 秀里 <sup>(5)</sup> Hidesato MABUCHI	富田 幸男 <sup>(6)</sup> Yukio TOMITA	江原 隆一郎 <sup>(7)</sup> Ryuichiro EBARA	近藤 浩 <sup>(8)</sup> Hiroshi KONDO

## 抄 録

LNG焚きボイラーの煙突環境で裸使用でき、長期間メンテナンスフリーを可能とするLNG煙突用新耐食厚板(WELACC5)を開発した。LNG煙突環境における開発鋼の腐食速度は0.0007mm/yで、普通鋼に比較し著しく小さい。また、開発鋼の表面には飛散しにくい密着さびが形成される。機械的性質、加工性、溶接性及び溶接継手性能ともに普通鋼と同等であり、煙突用厚板として十分な性能を有することを工場試作材の各種性能評価で確認した。1997年度の現在、LNG焚きコンバインドサイクル発電煙突向けに2000t以上の生産が進められている。

## Abstract

WELACC5, a new corrosion resistance steel plate for LNG funnel which can be used in a funnel environment of LNG-firing boiler with bare treatment and free of maintenance for a long time, has been developed. The corrosion rate of the developed steel in the LNG funnel environment is 0.0007mm/year, a remarkably small figure comparing with the one of ordinary steel. It has been confirmed through evaluating performances of test materials for industrial experimentation that the rust, hardly scattering and sticking closely onto the surface of the developed steel, is formed, that any of its mechanical properties, workability, weldability and weld-joint properties are all the same as comparative with those of the ordinary steel, and that it has enough performance as the steel plate material for funnel. More than 2,000 tons of WELACC5 is expected to be produced in 1997 for LNG-firing funnels of the combined cycle power generation.

## 1. 緒 言

最近、地球規模での環境問題や燃料の多様化施策を背景に、従来の石油系燃料や石炭に加え都市部を中心にLNG(液化天然ガス)、LPG(液化石油ガス)などガス焚きの火力発電設備の建設が多く進められている。

一般に、火力煙突の内面には筒身の保護のために、キャストブルなどの無機系材料を主体としたライニングが施されている。しかし、ライニングの多くは排ガス中の腐食性成分や熱などにより経年劣化するため、内筒の損傷やライニングの飛散が問題にされることがある。したがって、劣化状況に応じたメンテナンスが必要となるが、相当の費用と補修期間を要し、また、プラントの操業停止により多大な損失を生じることがある<sup>1)</sup>。そのため、最近、筒身材の

耐食性を高めてメンテナンスフリー化を指向する場合が増えている。

メンテナンスフリー鋼としては、新日本製鐵で耐硫酸露点腐食ステンレス鋼YUS260<sup>2)</sup>が開発されて実用化されているほか、新日本製鐵のS-TEN鋼に代表される耐硫酸露点腐食低合金鋼の使用実績も多い<sup>3)</sup>。ただし、いずれの金属系材料も石油、石炭などの化石燃料プラントの燃焼排気ガス環境を想定し開発された材料である。

一方、LNG焚き煙突においても、建設コスト及び維持管理費の低減に対するニーズは大きく、経済性に優れかつメンテナンスフリーを可能とする新耐食鋼が強く求められていた。そこで新日本製鐵では、LNG煙突環境において低腐食速度で、かつ密着性に優れたさび層を形成する低合金鋼を開発すれば、優れた経済性とメンテナンスフリーとを両立できると考え、三菱重工業株の協力を得て、LNG煙突の腐食環境でキャストブルライニングを省略でき、長期間メンテ

<sup>(1)</sup> 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主任研究員  
千葉県富津市新富20-1 ☎ 293 ☎ (0439)80-2863

<sup>(2)</sup> (株)日鉄テクノリサーチ 研究開発部 技術主管

<sup>(3)</sup> 名古屋製鐵所 厚板工場 マネジャー

<sup>(4)</sup> 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員

<sup>(5)</sup> 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主幹研究員 工博  
(現 大分技術研究部 部長)

<sup>(6)</sup> 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主幹研究員 工博

<sup>(7)</sup> 三菱重工業株 広島研究所 物質工学研究室 主査 工博

<sup>(8)</sup> 三菱重工業株 広島製作所 鉄構技術部 次長

ナンスフリーを可能とし、ステンレスクラッド鋼よりも経済性に優れたLNG煙突用新耐食厚板(WELACC5)を開発した。

本報では、WELACC5の開発経緯及び各種性能についてその概要を報告する。

## 2. WELACC5の開発経緯

開発のフローは次の通りである。まず、実機煙突の腐食環境調査に基づきシミュレーション腐食試験法を開発した。それらの試験で鋼材の耐食性及びさびの密着性に及ぼす合金組成の影響を明らかにし、最適基本成分系を導出し、実機曝露試験で性能を確認した。更に、開発鋼を工場試作し、製造性及び各種利用加工特性について確性した。

### 2.1 LNG煙突環境と合金設計の考え方

#### 2.1.1 LNG煙突の腐食環境

LNGコンバインドサイクル排ガスの煙突入口における温度は、正常運転時で373~383K、異常運転時で408K程度である。排ガスの代表的な組成は、 $H_2O$ : 6~10vol%,  $CO_2$ : 3vol%,  $O_2$ : 14vol%,  $N_2$ : 73~77vol%といわれている。石油、石炭焼きの場合、燃焼排気ガスに接する煙突筒身の内面が硫酸露点温度を下回ると高濃度の硫酸が結露し、硫酸露点腐食を生じる。一方、LNG焼きの場合、燃料中にSを含まないために硫酸凝縮を生じず、燃焼排気ガス中の水蒸気の結露に起因した腐食、いわゆる水腐食となる。煙突内面の温度は、DSS(Daily Start and Stop)運転等による起動・停止時に水露点以下となって凝縮水を生じ、排ガスや付着灰などを溶解した水溶液の乾湿繰り返し腐食になっていると考えられる。

表1に実機LNG煙突内面付着物の水溶性イオン及びドレインの化学分析結果を示す。ともに硫酸イオンを主体としてpH3.6~4.4の弱酸性であった。また $NH_4^+$ 、 $Cl^-$ が認められた。 $NH_4^+$ はおそらく、脱硝設備からのキャリアオーバーと思われる。 $Cl^-$ が検出される理由としては排ガス中の極微量成分あるいは空気中の海塩粒子などが考えられるが、詳細は不明である。その他の腐食性因子として、燃料中の硫黄化合物(メルカプタン)、不完全燃焼時に生じるホルムアルデヒド、硝酸、 $NO_2$ などが考えられるが、実機煙突の腐食調査では検出されなかった。

図1に、鋼材の代表的な使用環境とLNG煙突環境との関係を示す。LNG煙突の腐食環境は、燃焼排ガス成分や付着物を溶解した弱酸性凝縮水による腐食で、他の一般的な腐食環境の中では大気腐食環境に比較的近いといえよう。

#### 2.1.2 合金設計の考え方

腐食環境調査の結果、LNG煙突環境では、排ガス中の $CO_2$ が溶解

した水溶液による乾湿繰り返し腐食が支配的であると予想されたことから、まず、 $CO_2$ 腐食での耐食性向上元素としてよく知られているCrを主要合金元素として選定した。また、最終的な腐食形態が局部腐食とはならず全面腐食となるように3~9%Crに絞った。更に、耐さび飛散性の観点から、さびの密着性向上を期待してCu, Ni, Moを添加した。

以上の考えを基に試作した低合金鋼の化学組成を表2に示す。50kg真空溶解で溶製後、板厚12mm及び6mmに熱間圧延し、必要に応じて熱処理を施し、各種試験片を採取した。また、市販のSM400, SUS304, SUS316を比較鋼とした。

### 2.2 耐食性に及ぼす合金組成の影響

#### 2.2.1 腐食試験方法の考え方

耐食性の検討に際して、LNG煙突の腐食過程を(a)起動・停止時と(b)定常運転時との二つの過程に分けた。過程(a)はボイラーの起動・停止に伴う乾燥/湿潤の繰り返し腐食過程となり、過程(b)は運転

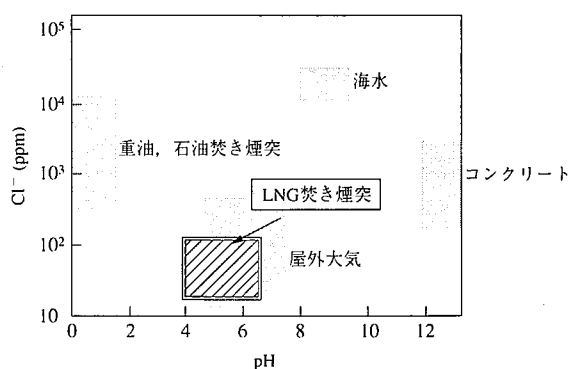


図1 LNG煙突の腐食環境

表2 試作鋼の化学成分 (mass%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
3Cr	0.030	0.21	0.48	0.006	0.001	-	-	3.03	-
5Cr	0.032	0.19	0.50	0.001	0.001	-	-	5.04	-
7Cr	0.030	0.20	0.49	0.005	0.001	-	-	6.97	-
9Cr	0.028	0.21	0.49	0.005	0.001	-	-	8.56	-
3Cr-0.5Mo	0.030	0.20	0.49	0.001	0.001	-	-	2.99	0.52
5Cr-0.5Mo	0.030	0.20	0.50	0.005	0.001	-	-	5.11	0.52
5Cr-1.5Ni	0.030	0.20	0.49	0.001	0.001	-	1.48	4.93	-
5Cr-0.3Cu-0.3Ni	0.029	0.20	0.51	0.001	0.001	0.34	0.30	5.02	-
SM 400B	0.120	0.19	0.85	0.013	0.009	0.01	0.02	-	-
SUS 304	0.060	0.48	0.86	0.028	0.007	-	8.65	18.26	-
SUS 316L	0.020	0.48	0.85	0.026	0.001	-	12.21	17.35	2.18

表1 LNG煙突内面付着物の水溶性イオン (mass%)

	トップ		マンホール			ドレインピット	
	T1	T2	M1	M2	M3	DH	DP
	析出物	析出物	析出物	析出物	さび	水溶液	水溶液
pH	4.4	4.1	6.4	7.3	3.8	4.0	3.6
$Fe^{3+}$	0.01	-	-	-	-	-	-
$Fe^{2+}$	0.06	0.02	-	-	-	-	-
$NH_4^+$	7.50	0.38	0.15	-	0.28	102ppm	92ppm
$Cl^-$	<0.02	0.08	0.29	0.14	0.19	19ppm	19ppm
$SO_4^{2-}$	26.0	5.70	23.0	7.20	1.82	360ppm	350ppm

条件などで温度が比較的低い場合、付着物と鋼板表面との間に少量の水が存在した条件での腐食過程となり得る。過程(a)については、特にシミュレーションガス環境下での耐食性を評価するために乾湿繰返しCO<sub>2</sub>ガス腐食試験を、シミュレーション水溶液影響下での耐食性を評価するために間欠浸漬腐食試験を実施した。また過程(b)については、模擬付着灰中浸漬腐食試験を実施した。

2.2.2 腐食試験方法

(1) 乾湿繰返しCO<sub>2</sub>ガス腐食試験

図2に示す乾湿繰返しガス腐食試験装置を用い、実機煙突の稼働条件を考慮して328Kから373Kまでの温度範囲で昇温、保持、冷却を組み合わせたパターンを1サイクル(計5.5h)とし、最長1000h(約181サイクル)まで実施した<sup>3)</sup>。

(2) 間欠浸漬腐食試験

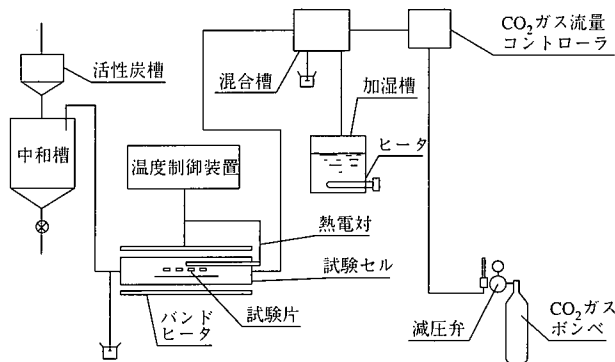
付着灰及びドレインの分析結果に基づき所定の組成に調整したシミュレーション水溶液への浸漬/引き上げ・乾燥を行う試験である。シミュレーション水溶液には、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaClを各々440ppm、140ppm、40ppm溶解した蒸留水を希硫酸でpH4.0に調整したものをを用いた。浸漬2min、乾燥58minを1サイクル(計1h)とし、最長236h(236サイクル)まで実施した。

(3) 模擬付着灰中浸漬腐食試験

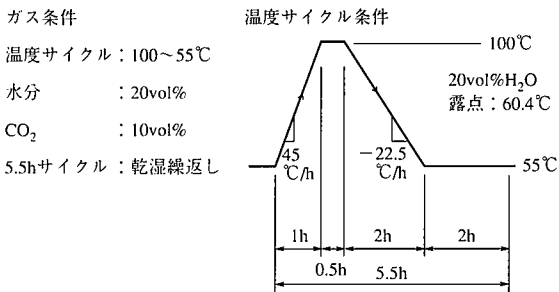
(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.8g当量、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.2g当量、NaCl 0.02g当量、水分量40mass%からなる模擬付着灰中に板状試験片を十分埋没させ、353K、相対湿度70%の恒温恒湿環境に1か月間保持した。試験中、定期的にセルの重量を計測したところ、水分の蒸発、凝縮に伴う大きな重量変化は認められなかった。従って、模擬付着物中の水分は試験期間内ではほぼ一定と考えられる。

2.2.3 耐食性に及ぼす合金組成の影響

(1) 耐食性に及ぼすCr添加の影響



(a) 試験装置



(b) 試験条件

図2 乾湿繰返しCO<sub>2</sub>ガス腐食試験

図3に乾湿繰返しCO<sub>2</sub>ガス腐食試験における鋼の腐食速度に及ぼすCr添加量の影響を示す。この結果から、Cr添加が耐食性向上に極めて有効であることは明かである。しかも、5%のCr添加で耐食性を効果的に確保できることが分かる。また、SUS304、SUS316L鋼ではいずれの試験条件でも腐食減量はほとんど認められなかった。これら結果と同様に間欠浸漬腐食試験及び模擬付着灰中浸漬腐食試験でも5%のCr添加で耐食性が向上する結果が得られた。

(2) 5%Cr鋼の耐食性に及ぼすCu、Ni、Mo添加の影響

図4に乾湿繰返しCO<sub>2</sub>ガス腐食試験における各種供試鋼の腐食速度の比較を示す。5CrへのCu-Ni、Ni、Moの各々複合添加によって腐食速度が2割ほど低減した。間欠浸漬腐食試験及び模擬付着灰中浸漬腐食試験では、Cu、Ni、Moの添加で有意な腐食速度の低減が認められなく、5Cr鋼とほぼ同等であった。

以上の結果から、5Cr鋼へのCu-Ni、Ni、Moの各々の複合添加は腐食条件によっては耐食性を改善する作用があり、耐食性を阻害することはない。

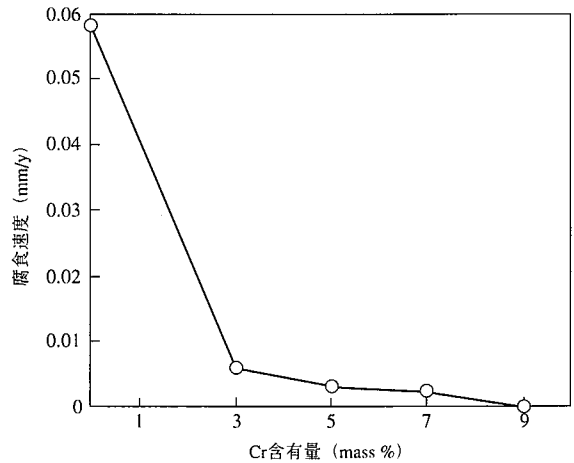


図3 腐食速度に及ぼすCr含有量の影響 (乾湿繰返しCO<sub>2</sub>ガス腐食試験248h)

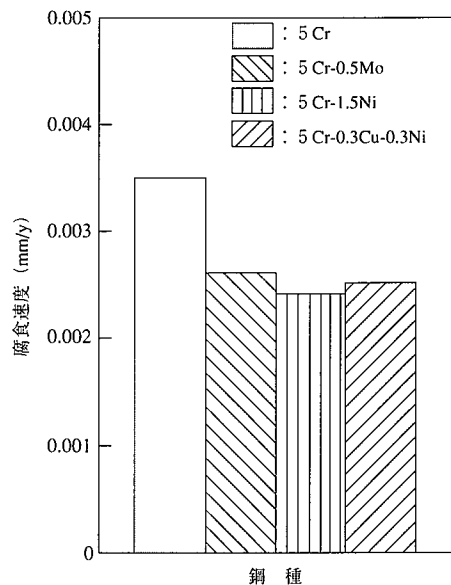


図4 5Cr鋼の腐食速度に及ぼす合金元素の影響 (乾湿繰返しCO<sub>2</sub>ガス腐食試験1000h)

2.2.4 煙突環境中におけるアノード、カソード分極挙動

これまでの各種腐食試験で判明したCr添加及び5Cr鋼へのCu-Ni, Ni, Mo添加による腐食速度抑制作用, 更に排ガスの腐食反応に及ぼす影響を検討するため, 間欠浸漬腐食試験で使用した組成のシミュレーション水溶液を用い, Ar脱気中でアノード分極挙動を, シミュレーションガス(CO<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>=11:1.5:残分)/大気/Arガスを各々通気させたシミュレーション水溶液でカソード分極挙動を電位走査法で調査した。

図5にCr鋼のアノード分極曲線を示す。Cr添加量に従い, アノード分極が増大していることから, Crはアノード反応を抑制していると考えられる。5Cr鋼のアノード分極挙動に及ぼすCu-Ni, Ni, Moの複合添加の影響を同様に調査した結果, 各々の複合添加の場合もアノード分極のわずかな増大が認められたが, Crほど明瞭ではなかった。

図6に5Cr鋼の各種通気条件下でのカソード分極曲線を示す。排ガスの通気によってAr脱気や大気解放条件よりもカソード反応が促進されていることが分かる。これは, 水溶液中に溶解したCO<sub>2</sub>の緩衝作用によるものと考えられる。排ガスの通気によってカソード反応が促進される現象は, 模擬付着灰中浸漬腐食試験で用いた複合塩の飽和溶液にシミュレーションガスを通気した条件下でのカソード分極挙動でも認められた。

これらの結果から, LNG煙突環境では, 排ガス中のCO<sub>2</sub>によってカソード反応が促進されるが, Cr添加鋼の場合はCrによってアノード反応が抑制される結果, 腐食速度が抑制されるものと推察される。

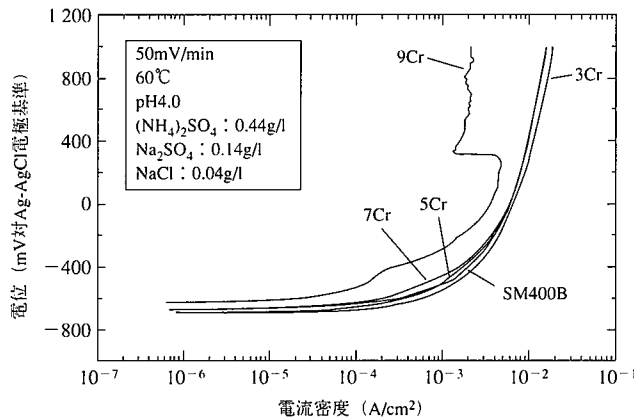


図5 アノード分極挙動に及ぼすCr含有量の影響

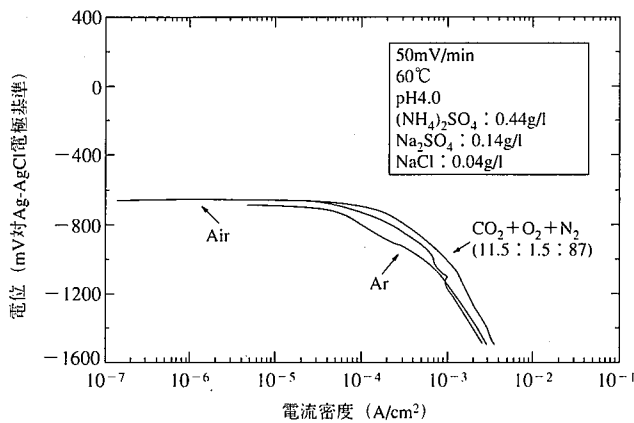


図6 5Cr鋼のカソード分極挙動に及ぼす通気ガスの影響

2.3 さびの安定性に及ぼす合金組成の影響

煙突内筒に低合金鋼を無被覆で使用する場合, 使用中に鋼材表面は比較的緻密な腐食生成物(さび)で覆われると予想される。この場合, 腐食生成物の特性としては下記の特性が望ましい。

- 1) 生成量が少ないこと
- 2) 密着性が良いこと
- 3) 鋼材表面に均一に生成すること

そこで, 各種試作鋼のさび性状について調査し, さびの安定性に及ぼす合金組成の影響を検討した。供試材は, 間欠浸漬腐食試験236サイクル後の試験片を用い, (1)付着さび重量測定によるさび生成量の評価, (2)さびた鋼板表面の実体顕微鏡観察による比較的剥離しやすいさびの生成状況の評価, (3)さび層/地鉄断面観察によるさび層生成の均一性の評価, (4)さび粒子のTEM観察によるさび層構成粒子の緻密さの評価, (5)さび層/地鉄断面のEPMA元素分析, を行った。

図7にさび量(剥離さびの重量と密着さびの重量との和)に及ぼすCr量の影響を示す。さび総量はCr添加量によって支配的に決まり, 腐食減量と良い対応を示した。

さびた鋼板表面の実体顕微鏡観察では, SM400B鋼では粗大, 粒状, 剥離性の浮さびが表面を被覆し, Cr添加量の増加に従って粒状, 剥離性の浮さびの生成が抑制されることが判明した。更に5Cr鋼でCu, Ni, Moを種々添加した試験片では, 5Cr単独添加鋼よりも更に粒状剥離性の浮さびが減少していた。

図8にSM400B鋼, 5Cr鋼及び5Cr-0.3Cu-0.3Ni鋼のさびの密着性評価結果を示す。さびの密着性はテープ剥離試験で評価した。さび

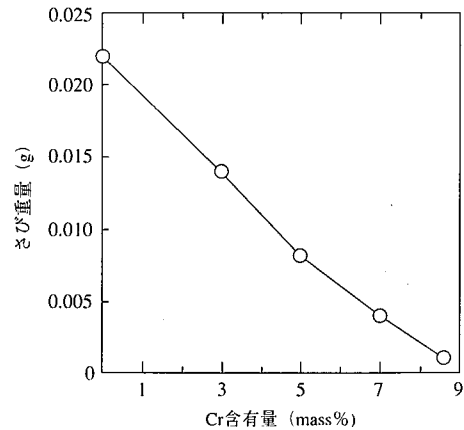


図7 さび量に及ぼすCr含有量の影響 (間欠浸漬腐食試験236h)

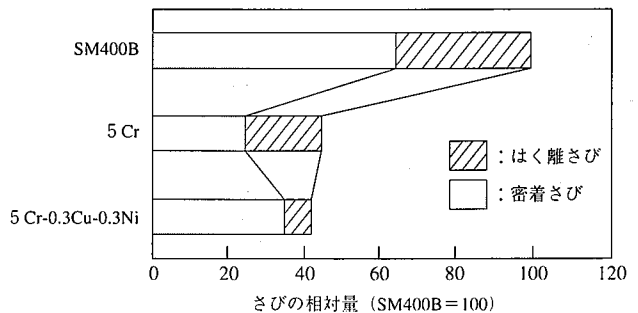


図8 さび量に及ぼす合金元素の影響 (間欠浸漬腐食試験236h)

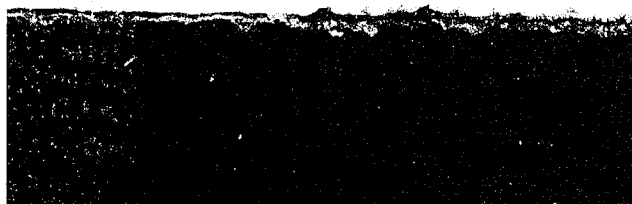
た試験片表面にテープを張り、はがした後にテープに付着したさびを“剥離さび”、はがれずに試験片表面に固着していたさびを“密着さび”と定義して各々の重量を測定し、密着性を評価した。5Cr鋼と5Cr-0.3Cu-0.3Ni鋼とを比較すると、さび総量は同程度であるが、Cu-Ni複合添加鋼では密着さびの割合が増加し、剥離さびが減少する傾向となった。また、この5Cr-0.3Cu-0.3Ni鋼で認められたさびの密着性向上と同様の傾向が5Cr-1.5Ni及び5Cr-0.5Mo鋼でも認められた。

地鉄／さび層断面の光学顕微鏡による観察例を写真1に示す。SM400鋼ではさび層の厚さが不均一で局部的に100 $\mu$ m以上あり、写真にみられるような粒状剥離性の浮きさびが認められた。さび層の厚さは3%以上のCr添加鋼では10~30 $\mu$ mと薄く均一であった。Cu, Ni, Moを各々添加した5Cr鋼ではCr単独添加鋼に比較してさび層厚さがさらに均一となり、密着性が良好なさび層の形成が確認された。

さび粒子のTEM観察では、生成したさびは鉄オキシ水酸化物の



(a) SM400B



(b) 5Cr-0.3Cu-0.3Ni

写真1 さび層／地鉄断面(間欠浸漬腐食試験236h)



(a) 5Cr

(b) 5Cr-0.3Cu-0.3Ni

写真2 さび層を構成するさび粒子のTEM像(間欠浸漬腐食試験236h)

コロイド凝集体からなり、針状・結晶化が進んだ粗大粒子と微細な一次粒子で構成されていた。この結果は、大気暴露された低合金鋼のさび層構成粒子と同様であった<sup>4)</sup>。SM400B鋼では1 $\mu$ m以上の粗大で針状の粒子が多いが、5Cr鋼では粗大粒子の生成数が減少していた。写真2に5Cr鋼と、5Cr-0.3Cu-0.3Ni鋼のさび粒子の代表的なTEM像を示す。5Cr-0.3Cu-0.3Ni鋼では5Cr鋼に比較して更に粗大で針状の粒子の生成が抑制されていた。この傾向は5Cr-1.5Ni鋼及び5Cr-0.5Mo鋼でも認められた。

さび層／地鉄断面のEPMA観察では、5Cr鋼ではさび層中にCrが母材濃度以上に様に濃縮し、Cu-Ni, Ni, Moを各々添加した5Cr鋼ではCrの濃縮ほど高い濃度ではないが、Cu, Ni, Moがさび中に含まれていた。各種試作鋼のさびの安定性に関する総合評価結果を表3に示す。

以上の結果から、5Cr添加は腐食速度を抑制する結果、さび生成量を低減し、Cu-Ni, Ni, Moの複合添加はCu, Ni, MoがFe及びCrとともにさび中に溶解し、さび粒子の成長過程において個々のさび粒子の粗大化、結晶化を抑制することによりさびの密着性、均一性が向上し、剥離さびが減少するものと推察した。

#### 2.4 基本成分系の決定

耐食性に及ぼすCrの影響を調査した結果から、5%Crを基本成分とし、耐食性の更なる向上とさびの密着性向上を図る上で経済性も考慮し、5Cr-0.3Cu-0.3Ni系がLNG煙突用鋼として目的にかなった新耐食鋼として最適と判断した。

### 3. WELACC5の特性

#### 3.1 工場試作

5Cr-0.3Cu-0.3Niを基本成分とした新耐食鋼を工場試作した。表4に試作鋼の化学成分を示す。工場試作では、転炉出鋼、二次精錬、鋳造、スラブ精整、再加熱、厚板圧延、熱処理のプロセスにより、板厚4.5, 12, 21, 30mmの厚板を試作し、以下に示す各種特性評価を行った。

#### 3.2 母材材質

表5に母材材質の引張試験結果を示す。各板厚材ともに400MPa級の溶接構造用鋼として十分な強度及び延性、曲げ加工性を示し、特にシャルピー試験による韌性値は良好である。

#### 3.3 加工性、切断性

実機煙突の製造を想定し、板厚12mmの鋼板を用い、3 000tプレ

表3 さび密着性の評価結果

	SM400B	5Cr	5Cr-0.3Cu-0.3Ni	5Cr-1.5Ni	5Cr-0.5Mo
付着さび重量	××	◎	◎	◎	◎
浮きさび	××	○	◎	◎	◎
さび層の均一性	××	△	◎	◎	◎
さび構成粒子の緻密さ	××	○	◎	◎	◎
さび層中元素分布	-	Cr濃縮	Cr,Cu,Ni濃縮	Cr,Ni濃縮	Cr,Mo濃縮
劣←×× < × < △ < ○ < ◎→良					

表4 工場試作WELACC5の化学成分(mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	T-Al	
仕様値	最小値	-	-	0.30	-	-	0.15	0.15	4.00	-
	最大値	0.09	0.50	0.60	0.030	0.030	0.50	0.50	6.00	-
レドール成分	0.03	0.20	0.50	0.006	0.004	0.28	0.34	4.89	0.033	

スによる端曲げ(曲げ加重150t, 回数9回)及びベンディングローラーによる本体曲げ試験(曲げ変位10~20mm, 10回)を実施した。その結果, いずれの試験でも曲げR及び直線度ともに良好であった。曲げ精度, トータル曲げ時間ともに普通鋼及びステンレスクラッド鋼と同等で問題はなかった。

また, 切断性をプラズマ切断及びガス切断について試験した。試験条件及び結果を表6に示す。120mA, 直切り, 切断速度1600mm/minの条件で良好なプラズマ切断性が確認された。更に, ガス切断も十分に可能であることが分かった。

### 3.4 溶接性

#### 3.4.1 溶接材料の選定

まず, 本開発の板厚範囲を4.5~30mmとし, 溶接部の強度がSM400A鋼と同等で, かつ予熱・後熱なしで低温割れのないことを前提として溶接材料を検討し, オーステナイト系のSUS309を選定した。

オーステナイト系溶接材料を使用する場合, 異材溶接となるので, 溶接金属での高温割れ及びマルテンサイトによる脆化, 割れが懸念される。この点に関して, 新耐食鋼の組成及び溶接材料の組成を基にシェフラーの状態図上などで検討した結果, SMAW, FCAW溶接の場合, 希釈率が30%未満となるので, マルテンサイトが生成する領域に入らないため低温割れの心配がなく, 更に $\delta$ フェライトが数%生成するので高温割れの心配もないことが判明した。

#### 3.4.2 溶接割れ感受性

板厚30mmの試作材を供試材とし, 溶接割れ感受性を表す基本特性である斜めy型拘束溶接割れ試験結果を表7に示す。新耐食鋼とオーステナイト系溶接材料との組み合わせで予熱なしでも割れは発

生せず, 溶接性に問題のないことが分かった。

#### 3.4.3 継手特性

板厚12mmの鋼板を供試材とし, 表8に示す条件で溶接した継手の引張, 衝撃, 曲げ試験及びマクロ観察を行った。継手の引張試験結果を表9に, 衝撃試験結果を図9に, 曲げ試験結果を表10に示す。その結果, いずれの特性ともに良好でSM400B鋼なみの特性を有することを確認した。更に, 実機煙突の製作工程を想定した溶接条件での立向及び横向溶接施工を行い, 継手特性を評価した結果, ともに引張強さは503~508MPaで母材破断を示し, 2tR-180°曲げ試験においても欠陥は認められなかった。

以上, 継手特性に関しては, 引張, 靱性, 曲げ性ともSM400Bと同等以上であることが確認された。

表7 WELACC5の斜めy型拘束溶接割れ性  
(a)斜めy型溶接割れ試験溶接条件

板厚 (mm)	溶接条件	溶接方法	溶接材料			
			電流 (A)	電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)	入熱 (kJ/cm)
30	SMAW	S-309MR 4mm $\phi$	170	24	15	16

(b)斜めy型溶接割れ試験結果(試験数: 2)

予熱温度 (°C)	割れ率 (%)					
	表面		断面		ルート	
25	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0

表8 WELACC5の溶接条件

溶接方法	溶接材料	電流 (A)	電圧 (V)	速度 (cm/min)	入熱 (kJ/cm)	層数	シールドガス	層間温度 (K)
SMAW	309 type 3.2mm $\phi$	100	24	200	7.2	15	-	$\leq 423$
FCAW	309 type 1.2mm $\phi$	220	28	300	12.3	6	80% Ar +20% CO <sub>2</sub>	$\leq 423$

SMAW: 被覆アーク溶接

FCAW: フラックス入りワイヤアーク溶接

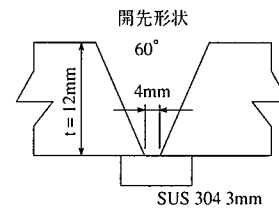


表5 WELACC5母材の引張試験結果

板厚 (mm)	試験片 種類	試験数	試験 方向	0.1%耐力 (MPa)	降伏点 又は耐力* (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
4.5	JIS 5号	3	圧延 直角 方向	330	336	478	37
				328	337	480	37
				328	340	482	38
12	JIS 1A号	3	圧延 直角 方向	307	311	463	28
				310	311	463	29
				311	315	464	26
21	JIS 1A号	3	圧延 直角 方向	285	297	475	29
				294	303	478	26
				297	325	484	23
30	JIS 1A号	3	圧延 直角 方向	247	262	459	32
				248	268	462	32
				249	268	461	32

\*0.2%耐力

表6 切断性試験結果

切断条件	形状	切断速度 (mm/min)	切断結果 粗度(ノッチの有無)
プラズマ切断	直切り	1100	○
	直切り	1400	○
	直切り	1500	○
	直切り	1600	○
	直切り	1700	△
ガス切断	開先(30°)	280	○

表9 WELACC5溶接継手の引張試験結果

板厚	溶接方法	試験片 の種類	試験片 の数	引張強さ (MPa)	破断位置
12mm	SMAW	JIS No.1 GL=30	2	499 494	母材
		JIS No.1A GL=68	2	480 484	母材
	FCAW	JIS No.1 GL=30	2	508 503	母材
		JIS No.1A GL=68	2	483 485	母材

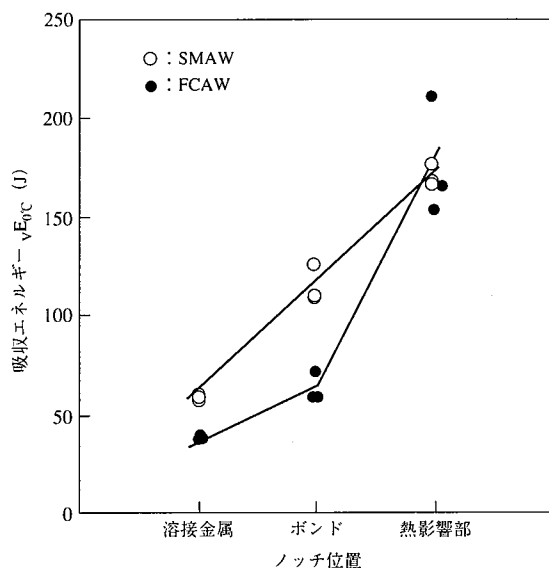


図9 WELACC5溶接継手の衝撃試験結果

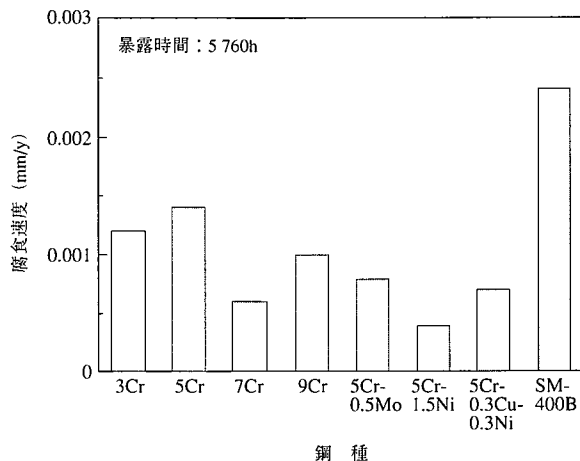


図10 実機LNG焚き煙突環境におけるWELACC5の暴露試験結果

8640h経過後の試験片を評価した結果、溶接部、溶接熱影響部及び母材で局部腐食が生じていないことが確認された。

表10 継手曲げ試験結果

板厚 (mm)	溶接方法	試験片種類 試験方法	試験数	試験結果	
				表曲げ	裏曲げ
12	SMAW	JIS Z 3122 w=40	2	Good	Good
	CO <sub>2</sub>	t=10 r=2t	2	Good	Good

5. WELACC5の仕様

表11にWELACC5™の仕様を示す。

WELACC5は5Cr-0.3Cu-0.3Niを基本組成とする低合金厚板で、Crの添加により耐食性を、Cu、Niの添加により耐食性及び耐さび飛散性を向上させている。製造板厚は4.5～30mmで、機械的性質及び利用加工特性はSM400B鋼並を確保している。

4. 実機煙突暴露試験結果

LNG焚き実機煙突のダクト部における新耐食鋼の暴露試験結果を図10に示す。5Cr-0.3Cu-0.3Ni系の新耐食鋼の腐食速度は0.0007mm/yでSM400B鋼の1/3程度であり、実機煙突環境中でも優れた耐食性を示すことが確認された。新耐食鋼の試験片表面には、茶褐色の腐食生成物がわずかに生成していた。腐食生成物のX線回折を行った結果、(NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>H(SO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>が同定された。これらの化合物は付着物で、LNG焚き実機煙突付着物からも同定されている。ノマルスキープリズムを用いた光学顕微鏡による表面観察の結果、新耐食鋼の表面にはわずかに腐食痕が観察されたが、X線回折でオキシ水酸化鉄などの鉄さびの構成成分が検出されなかったことを併せて考えると、新耐食鋼はまだ腐食のごく初期の段階にあったと考えられる。従って、新耐食鋼のさびの密着性の評価には、より長期の暴露試験による確性が必要である。

また、溶接継手の試験片も同じ場所で暴露試験を行っている。

6. 結 言

長期間のメンテナンスフリーを可能とするLNG煙突用新耐食厚板(WELACC5)を開発した。WELACC5は、煙突環境での耐食性向上のために5%Crを添加し、耐食性の一層の向上、及びさびの密着性向上(耐さび飛散性)のために更にCu-Niを微量複合添加し、機械的性質及び溶接性をSM400B並に確保すべく成分、製造プロセスを調整した厚板である。

実験室腐食試験結果及び実機LNG煙突環境中の暴露試験結果から、WELACC5の腐食速度は0.0007mm/yと小さく、耐食性及び耐さび飛散性共に良好である。また、機械的性質はSM400B鋼並であり、オーステナイト系溶接材料を使用することにより予熱なしで溶接施工性、耐割れ性、溶接継手性能及び耐食性のいずれにおいても実用上満足できる溶接継手性能が確保されている。

開発したWELACC5を転炉出鋼、厚板製造確性を行い、煙突製作、加工工程で各種特性を評価した結果、実用上十分な性能を有していることが確認された。

表11 WELACC5™の主な仕様

材料	化学組成 (mass%)								機械的性質			
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	シャルピー吸収エネルギー 273K (J)
WELACC5	0.03	0.20	0.50	0.006	0.004	0.28	0.34	5.00	311	463	28	圧延方向: 245 圧延直角方向: 206
規定値	≤0.09	≤0.50	0.30/0.60	≤0.030	≤0.0030	0.15/0.50	0.15/0.50	4.00/6.00	245≤*	400~510*	18≤*	27≤*

\*: JIS G 3106溶接構造用圧延鋼材SM 400B鋼 (板厚12mm)

1997年度には、LNGコンバインドサイクル発電煙突用に2 000t以上の生産が進められている。今後、LNG煙突、ダクト用途へ幅広い適用が期待される。

参考文献

- 1) 阿部倫夫：火力原子力発電，46.600(1995)
- 2) 寺前章 ほか：富士製鉄技報，(17).103.(1968)
- 3) 江原隆一郎 ほか：三菱重工技報，27.431(1990)
- 4) 宇佐見明 ほか：第42回腐食防食討論会講演集，1995.p. 257