<研究論文>

(受理：平成 23 年 12 月 26 日)

ポリエチレン被覆鋼材の接着耐久性に及ぼす鋼中 Cr の影響

村瀬 正次*

要 旨

鋼材中に 0~9 %Cr を添加した鋼材および SUS410, 430, 304 を基材としたポリエチレン被覆鋼材の接着耐久性を、温塩水浸漬および塩水噴霧試験 (SST) にて調査した。Cr 量が増加するに従い温塩水浸漬後の接着耐久性は向上する。SST 試験後の端部からの被覆層の剥離速度も Cr 量の増加に従い改善するが、9 %添加以上では効果が飽和する。Cr 量増加とともに接着耐久性が改善するのは、鋼材裸面の腐食電位と関係することが示唆された。Cr 添加による電位の貴化は、被覆層下の鋼表面と鋼材露出部分の電位差を小さくすることで、被覆層下のカソード反応を抑制すると考えられる。ただしステンレス鋼は剥離面における隙間腐食の影響や、SUS304 は接着性が劣ることを考慮しなければならない。

1. 緒 言

ポリエチレンライニングは、埋設管や海洋鋼構造物の防食被覆¹⁾として広く使用されている。ポリエチレン層は通常 2mm を超える厚みでライニングされるので、水、酸素、イオンなどの遮断性に優れ、優れた防食性¹⁾を有していると考えられる。しかしながら、完全に環境からの侵入因子を遮断できるものではなく、界面への水や各種イオン、酸素の浸入などを招き接着劣化を引き起こす^{2~4)}。これらの有機被覆層の接着劣化現象は、界面の接着特性や鋼材表面での腐食反応が複雑に作用する現象であることが多数報告^{5~10)}されている。特にライニング端部 (ライニング終端部や機械的な傷部など) においては、接着劣化現象は剥離となって現れる。これら接着劣化現象は、ライニング層の防食寿命を限定するので、接着耐久性を向上させる方策が求められている。これら接着劣化防止対策として、例えば鋼材面への表面処理やポリエチレン層と鋼材の接着の仲立ちをするプライマー層の最適化などの接着耐久性向上策^{11~20)}が採用されている。一方で、例えば塗装に低合金耐食鋼を使用すると塗装のクロスカット部からの膨れや剥離を抑制できる報告^{21, 22)}がある。これは、接着界面劣化には、鋼材その表面での電気化学挙動が深く関与していることを示唆しており、腐食抑制が即ち接着耐久性の向上

に繋がることを示している。ライニングなどの厚い防食被覆を施す場合には、ライニング自身の防食性が高く、基材となる鋼材がその湿潤環境における接着耐久性へ及ぼす影響は明らかになっていない。また Cr は湿潤環境における鋼材の耐食性を改善する元素^{23~25)}として良く知られている。そこで、Cr 添加鋼とライニングの組みあわせにおいては、接着耐久性を向上させ得ると推測される。本報告では、ポリエチレンライニングの基材としての鋼材中の Cr 量に着目し、ポリエチレンライニング層の接着耐久性に及ぼす影響を調査した結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 実験に供した材料

鋼板は厚さ 5mm の 100×100mm の SS-400 および Cr 添加量を変えた鋼材 (0.56~9 %添加 Cr 鋼) および 3.2mm の 100×100mm の SUS410, SUS430, SUS304 を使用した。Table 1 に鋼材の成分を示す。エポキシプライマーは、エポキシ樹脂 (ジャパンエポキシレジン (株) 製エピコート 828) とアミン系硬化剤 (ジャパンエポキシレジン (株) 製 B002) を混合して使用した。ポリエチレン被覆層は、低密度ポリエチレン (宇部興産 (株) 製 LDPE) と無水マレイン酸変性接着性ポリエチレン (三菱樹脂 (株) 製 AX014L) を使用した。

2.2 供試材の作製方法

鋼板はスチールグリッドを使用してブラスト処理を行った。表面状態は、ISO SA 2 1/2 とし、表面粗さは 10 点

* JFE スチール (株) スチール研究所
岡山県倉敷市水島川崎通 1 丁目 〒712-8511
(原稿受付日：平成 23 年 11 月 21 日)

Table 1 Chemical composition for steel used (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Oters
SS-400	0.15	0.16	0.45	0.02	0.012	0.01	
0.5Cr	0.08	0.25	0.95	0.01	0.005	0.55	
2.0Cr	0.08	0.25	0.95	0.01	0.005	2.25	
4.0Cr	0.08	0.25	0.94	0.01	0.005	3.98	
5.0Cr	0.08	0.25	0.94	0.01	0.005	5.05	
9.0Cr	0.08	0.25	0.94	0.01	0.005	8.92	
SUS410	0.06	0.32	0.76	<0.04	<0.03	12.2	
SUS430	0.06	0.37	0.35	<0.04	<0.03	17.2	
SUS304	0.05	0.38	1.08	<0.04	<0.03	18.5	Ni

平均粗さ R_{ZJIS} で $75\mu\text{m}$ であった。エポキシプライマーは、エポキシ樹脂 100 重量部に対して硬化剤 50 重量部添加した。これをハンドミキサーにて攪拌・混合しパーコーターによりエポキシ樹脂を塗布した。室温で約 2 時間放置後、 140°C のホットプレート上で約 8.5 分予備硬化を行った。膜厚は予備硬化後電磁膜厚計で測定し平均で $50\mu\text{m}$ であった。これに 0.3mm の接着性ポリエチレンと 2.2mm のポリエチレン層を積層し、 180°C のホットプレスで 0.1MPa の圧力で 10 分間圧着した。圧着後の総膜厚は、 2.1mm とした。

3. 実験方法

3.1 温塩水浸漬試験

作製した供試験材を $20\text{mm} \times 100\text{mm}$ に切断し、側面および裏面はシールしないで、鋼材が露出した状態とした。この試験材を各試験材毎に 4 枚を $60^\circ\text{C}/0.5\text{M}$ の NaCl 溶液中に浸漬した。なお浸漬時には、各鋼材が直接接触しないように、試験材間隔を 30mm 以上確保し、アクリル性の仕切り板にて各試験材を隔離した。浸漬期間は 4 日～16 日とし、所定の期間毎に試験材を抜き出してその 90 度剥離強度を調査した。

3.2 90 度剥離試験

$20\text{mm} \times 100\text{mm}$ の試験片の被覆先端部分約 30mm をタガネで強制的に剥離した。この部分を引張試験機でつかみ、 $10\text{mm}/\text{min}$ の一定速度で被覆部分を強制的に剥離した。ポリエチレン被覆を 65mm ほど剥離した後、反力の平均値を求め 90 度剥離強度とした。90 度剥離強度は、温塩水浸漬試験前および各日数浸漬した後に、接着強度保持率を以下の式として定義した。

$$\gamma = \frac{\alpha}{\beta} \times 100 \quad (1)$$

γ : 接着強度保持率 (%)

α : 温塩水浸漬後の 90 度剥離強度 (N/cm)

β : 初期 (温塩水浸漬前) の 90 度剥離強度 (N/cm)

3.3 塩水噴霧試験

$50\text{mm} \times 100\text{mm}$ に切断した試験材の裏面および端面の長辺 1 辺を残して、残り 3 面についてシリコン系シール剤にてシールを施した。本試験材について、JIS K5600 に準拠した塩水噴霧試験機により塩水噴霧試験 (5% NaCl 溶液, 35°C) を $500 \sim 2000$ 時間実施した。所定の時間後に試験材を試験機より回収し、シールを施していない長辺部分について、端部を強制的に剥離した。剥離界面は主に鋼材/エポキシプライマー面およびエポキシプライマー/接着性ポリエチレン界面であった。この内切断端部より鋼材/エポキシプライマー面の剥離を示した領域を端部剥離距離とし、鋼材端部からの剥離距離を、試験材の上端 20, 40, 60, 80mm の位置でノギスにて計測し、その平均値を剥離距離とした。

3.4 鋼材の腐食電位の測定

各種鋼材を $15\text{mm} \times 15\text{mm}$ に切断し、表面をエメリーパーペーパーにて #1200 まで研磨した。銅線を端部に抵抗溶接にて溶接した。 $5\text{mm} \phi$ のガラス管を銅線に通し、鋼材部分を接着剤で固定した。試験材の中央部 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ を残し、エポキシ樹脂にて表面を被覆した。本試験材を、 0.5M NaCl 溶液に浸漬し、参照電極として銀/塩化銀電極を用い鋼材の腐食電位を測定した。測定は 1 時間継続して行い電位が安定した所を腐食電位とした。

4. 実験結果

4.1 温塩水浸漬試験

Fig. 1 には温塩水浸漬試験後の接着強度保持率の経時変化を示す。接着強度保持率は、以下の (2) 式²⁶⁾に従うと仮定して整理した。

$$\gamma = A \cdot \exp(k(t-B)) \quad (2)$$

γ : 接着強度保持率, t : 時間, A, B, k : 定数

Fig. 1 Adhesion remaining ratio of various chromium content steel with polyethylene coating after immersion test in 0.5M NaCl aqueous solution at 60°C .

Fig. 2 The relationship between Cr content and time to 1 % of adhesion remaining ratio after immersion test.

Fig. 3 Appearance of test samples after peeling test. (These samples were immersed for 12 days in 0.5M NaCl aqueous solution)

接着強度保持率はいずれの供試材でも時間とともに低下している事が判る。各試験材の接着強度保持率について (2) 式で外挿した接着強度保持率が 1 % になる時間と鋼材中の Cr 量について整理した結果を Fig. 2 に示す。SUS304 を除き概ね Cr 量が増加すると接着強度保持率が 1 % になる時間が伸びていることが判る。ただし効果は限定的であり、10%Cr を含有して、接着強度保持率が 1 % に達する時間が 2 倍に伸びる程度であり、リン酸塩処理やクロメート処理を施したものに比べてその効果は小さいと考えられる。Fig. 3 には、温塩水浸漬 12 日後における 90 度剥離強度測定後の試験材の外観を示す。接着強度保持率が比較的高い、SUS410 や SUS430、9 %Cr 鋼については、鋼材側にエポキシプライマーが残留しており、普通鋼や低 Cr 鋼ではエポキシプライマーの残留が少ないことが判る。鋼材面とエポキシプライマー間の接着が喪失し接着強度保持率が低下しているものと考えられる。ステンレス鋼においては、試験材の端部に隙間腐食と考えられる腐食が観察されたが、他の鋼種には外観上腐食生成物が見られなかった。ステンレス鋼では、端部からの接着劣化 (剥離) に伴いライニング層と鋼材の間が隙間構造となり隙間腐食が発生したと推定される。

Fig. 4 Polyethylene coating delamination length of various Cr content steel after SST test.

Fig. 5 The relationship between delamination kinetics and Cr content after SST test.

4.2 塩水噴霧試験結果

Fig. 4 には、塩水噴霧試験後の剥離距離の経時変化を示す。試験時間 500 時間～2000 時間の間で剥離距離は概ね直線で増加する傾向を示した。この直線の傾きから剥離速度を求め Cr 含有量と剥離速度の関係を Fig. 5 に示す。Cr 含有量が増加するに従い剥離速度が低減する傾向を示している。ただし SUS304 のみは、本結果からややはずれ、剥離速度は最も大きな値を示した。Fig. 6 には、塩水噴霧試験後の試験材中央部、幅 10mm 部分の 90 度剥離強度の経時変化を示す。塩水噴霧試験では接着強度の低下は小さく、接着劣化は端部のみで起きていることが判る。本塩水噴霧試験結果においては、僅かに端部に腐食生成物がライニング界面に認められたが、剥離部においては殆ど認められなかった。

5. 考 察

ライニングを施した鋼材の接着劣化部分について、温塩

Fig. 6 Peel strength at 90° of various Cr content steel coated with polyethylene after SST test.

水浸漬試験, SST 試験いずれにおいても接着界面での腐食生成物が認められなかった。(ただしステンレス鋼は除く) 一般的に接着層を有する鋼材端部の場合, ライニング以外の鋼材部分では (3) 式で示すアノード, (4) 式で示すカソードの混合反応になり, ライニング下ではカソード反応が起きる^{6, 7, 8, 10, 27~30}) と言われている。

最近では, KFM などを使用して薄い有機被膜下の電位を測定できるようになっており, 有機層下の接着界面では電位が鋼材に対して貴 (+) 側な値を示すことが報告^{23~26}) されている。つまりライニングの接着界面と鋼材が接する部分では異なった電位分布部分が接触することになり, 一種の異種金属接触腐食の状態と考えられる。Fig. 7 に鋼材露出部とライニング下の分極曲線の模式図を示す。ライニング下では, 微小に生成したアルカリなどの影響でアノード反応が抑制された状態であると考えられ, その腐食電位は大きく貴 (+) 側を示すと考えられる。従って, 鋼材露出部とライニング下では, 腐食電位差が発生する。これによりライニング下では, カソード反応が主となると考えられる。Fig. 7 に示すように, 腐食電位差が生じると卑 (-) 側にある鋼材露出部分はアノード反応が増加し, 貴 (+) 側にあるライニング下部はカソード反応が増加する。両者を繋ぐ経路の抵抗値によって, その電流増加は以下の (5) 式として表される。(Fig. 8 参照)

$$V = I \cdot R \quad (5)$$

V: 鋼材端部とライニング下の電位差 (V), I: 鋼材端部とライニング下との間に流れる電流 (I), R: 両者間の抵抗 (Ω)

鋼材露出部とライニング下を結ぶ経路は, ライニング層を貫通する経路およびライニング層と鋼材の接着界面の 2 種類が考えられる。この経路を通しての電荷輸送が起きる

Fig. 7 Schematic diagram of electrochemical reaction at both bare steel and steel surface under lining layer.

Fig. 8 Schematic diagram of electrochemical reaction at both bare steel and steel surface under lining layer after coupling between bare steel and steel surface under lining.

はずであるが, ライニング層を経由する経路は, ポリエチレン層の絶縁抵抗値は極めて高く ($10^{12} \Omega$ 以上), 電荷輸送の経路としては考え難い。そのため電荷輸送の主経路は, ライニングと鋼材の接着界面が電荷輸送の主経路と考えられる。電荷輸送は, 各反応により起きる反応生成物の電荷を補償 (電気的中性条件を満たす) することで発生する。鋼材露出部では, (3) 式の反応が増加するので, 鋼材露出部への電荷が集まり, ライニング下では (4) 式の反応が増加するので, + の電荷が集まることになる。これらは溶液中のイオン (Na^+ , Cl^- など) が各サイトへ輸送されることで達成される。

ライニング下でのカソード反応の増加は, (4) 式にあるように OH^- を増加させ, これはライニング接着層の接着劣化を招くことになる。

以上の事から, 鋼材露出部の電位がより貴 (+) 側にあることは, ライニング下と鋼材露出部の間の電位差を減少

Fig. 9 Corrosion potential of various Cr content steel in 0.5M NaCl aqueous solution.

Fig. 10 The relationship between corrosion potential and delamination kinetics of various Cr content steel after SST.

させアルカリの生成を抑制することで接着劣化を抑制する効果を持つと推定される。Fig. 9 には、各種鋼材の腐食電位と Cr 量の関係を示す。Cr 量が増加することで、腐食電位は貴 (+) 側になることが判る。このことから、鋼材が露出した部分とライニング層部が同時に腐食環境に置かれる場合には Cr 量が増加するほど、腐食電位が貴 (+) 側にあり、鋼材露出部とライニング下の電位差が低減することで、接着劣化速度を低減していると推定される。

端部からの劣化例として SST 試験時の端部剥離速度と鋼材の腐食電位の関係を Fig. 10 に示す。(SUS304 鋼は除く) 5 %Cr 鋼以下では腐食電位が貴 (+) 側になるほど剥離速度が低減している事が判る。また、5 %Cr 鋼以下ではその傾きは 0.12V/decay を示し、これは (4) 式に示す酸素還元反応の初期立ち上がりの傾きに一致している。この事は、以下の事を示唆する。剥離速度が、酸素還元反応の結果生成するアルカリに比例 (即ち酸素還元反応の電流量に比例) していると仮定する。ライニング下で起きる酸素還元反応は、Fig. 7, 8 の模式図において示すように

ライニング下での酸素還元反応の初期の立ち上がり部に沿って、露出した鋼材部の腐食電位に応じて卑側 (側) へ引っ張られ変化して行く。従って 5 %Cr 以下の剥離速度電位依存性の傾きが、酸素還元反応に伴う電流量の電位依存性の傾きと一致することは、5 %Cr 鋼以下のライニング下では、酸素還元反応の初期の立ち上がりに沿った領域で反応が起きている事を示唆する。9 %Cr 以上の添加鋼では、鋼材裸部の電位がより貴側 (+ 側) にあるため、ライニング下での腐食電位に近い部分の酸素還元反応量であると考えられる。

9 %Cr 鋼、ステンレス鋼については、SST 試験において電位の影響がほぼ飽和していることが判る。これら高 Cr 鋼は、ライニング部と鋼材の隙間部で腐食が発生していることが認められ、ライニング部と鋼材界面の電位が必ずしも、鋼材露出部の電位に対して単純に貴 (+) 側になるという状態ではなかった事が原因として挙げられる。

SUS304 鋼は、温塩水浸漬試験および SST 試験で接着強度保持率および端面剥離速度が大きかった原因は、その接着性にあると考えられる。ただし SUS304 のライニング層の初期 90 度剥離強度は、他鋼種と大差なく、概ね 110N/cm であった。この場合の破壊形態は、エポキシプライマー層とポリエチレンライニング層の層間での破壊であるのでこの界面は問題がない。一方、腐食試験後には劣化界面が、エポキシプライマー層/鋼材間に移っていたことから、SUS304 とエポキシプライマー層間の接着相互作用に違いがあるものと推定される。今回使用したエポキシ樹脂はアミン系硬化剤を使用しており、アミンは鋼材表面でプロトネーションを起こし酸-塩基結合を生成すると言われている^{31~33)} ことから、このプロトネーションの度合いを XPS により計測した。鋼材表面にアミン硬化系エポキシ樹脂のモデル物質³³⁾ としてジエタノールアミンを吸着させ、XPS の N1s ピークの 401eV 近傍のピークをプロトネーションの代表とし、このピークの表面元素割合を求めた結果を Table 2 に示す。SS400 鋼や低 Cr 鋼に比較して、N1s/401eV 近傍のピークから求めた表面元素割合が少なく、酸-塩基結合が少ないことが示唆された。SUS304 鋼の表面に生成する不動態皮膜が他の鋼材よりも不活性であ

Table 2 Surface atomic ratio of N1s for protonation of diethanolamine.

Steel	N1s Surface atomic ratio (atomic%)	ratio of peak1	total surface atomic ratio (atomic %)
SS400	1.6%	45%	0.72%
2%Cr	1.8%	45%	0.81%
4%Cr	1.5%	50%	0.75%
SUS304	0.9%	40%	0.36%

るためアミンとの相互作用（酸-塩基反応）が低下したと考えられる。以上から SUS304 鋼の接着耐久性は劣っていたと考えられる。

6. 結 言

各種 Cr 含有鋼ポリエチレンライニング層の接着耐久性を温塩水浸漬試験および SST 試験で調査した結果、以下の事が判った。

- (1) Cr 含有鋼は、温塩水浸漬試験後の接着耐久性を改善する。その効果は、Cr 1%添加あたり 10%程度であった。
- (2) Cr 含有鋼は、SST 試験後における端面剥離を改善するが、(1)と同程度にその効果は小さく、9%Cr 以上ではその効果は飽和する。
- (3) ライニング層の接着耐久性の改善には鋼材自身の腐食電位が関与していることが示唆され、貴側になるほど接着耐久性を改善する。
- (4) SUS304 鋼は、今回の試験では接着耐久性が普通鋼と同程度あるいはそれ以下であったが、これはプライマー層であるアミン硬化エポキシ樹脂と SUS304 の表面におけるアミンによる酸-塩基結合が少ないためと推定した。

参 考 文 献

- 1) 田中満生ほか, 防錆管理, 27, 312 (1983).
- 2) 村瀬正次, 加藤千昭, 日本接着学会誌, 37, 140 (2001).
- 3) 村瀬正次, 加藤千昭, 日本接着学会誌, 37, 298 (2001).
- 4) 村瀬正次, 加藤千昭, 日本接着学会誌, 37, 385 (2001).
- 5) U. R. Evans, Trans. Electrochem. Soc., 55, 243 (1929).
- 6) H. Leidheiser Jr. and W. Wang, *J. Coat. Technol.*, 53, 77 (1981).
- 7) H. Leidheiser Jr., W. Wang and L. Igetoft, *Prog. Org. Coat.*, 11, 19 (1983).
- 8) M. R. Horner and F. J. Boeria, *J. Adhes.*, 2, 141 (1990).
- 9) J. H. Payer, B. Trautman D. Gervasio and I. Song, *Mat. Res. Symp. Proc.*, vol. 304, Material Research Society (1993).
- 10) Nguyen, T, Hubbard, JB, McFadden, GB, "Mathematical Model for the Cathodic Blistering of Organic Coatings on Steel Immersed in Electrolytes." *J. Protect. Coat. Linings*, 63, 43 (1991).
- 11) 相川真紀子, 若松富夫, 大岸英夫, 材料とプロセス, 9, 527 (1996).
- 12) 上村隆之, 岸川浩史, 材料とプロセス, 10, 614 (1997).
- 13) 原田佳幸, 山本正弘, 材料とプロセス, 9, 526 (1996).
- 14) 原田佳幸, 材料とプロセス, 11, 1054 (1998).
- 15) 上村隆之, 岸川浩史, 材料とプロセス, 11, 1047 (1998).
- 16) 向原文典, 小菅崇文, 鉄と鋼 講演大会予稿集, 70, 446 (1984).
- 17) 村瀬正次, 加藤千昭, 色材協会誌, 73, 217 (2001).
- 18) 村瀬正次, 加藤千昭, 色材協会誌, 73, 285 (2001).
- 19) 村瀬正次, 加藤千昭, 色材協会誌, 73, 15 (2001).
- 20) 村瀬正次, 加藤千昭, 色材協会誌, 73, 172 (2001).
- 21) 渡辺常安, 増田一広, 防錆管理, 33, 386 (1989).
- 22) 松本剛史, 永井正憲, 防錆管理, 51, 459 (2007).
- 23) 渡辺常安等, 八幡製鉄技術研究所技術調査報告, 第 5 号 (1963).
- 24) 寺前章ほか, 第 15 回腐食防食討論会講演概要, 75 (1968).
- 25) 松島巖, 上野良之, 防食技術, 19, 10 (1970).
- 26) T. Wakamatsu, M. Murase and Y. Naruse, 2nd congress on corrosion prevention by organic coatings by organic coatingsproceedings (1994).
- 27) A. Leng, H. Streckel and M. Stratmann, *Corrosion Sci.*, 41, 547 (1999).
- 28) A. Leng, H. Streckel and M. Stratmann, *Corrosion Sci.*, 41, 579 (1999).
- 29) A. Leng, H. Streckel and M. Stratmann, *Corrosion Sci.*, 41, 599 (1999).
- 30) M. Stratman, R. Fesser and A. Leng, *Electrochim. Acta*, 39, 1207 (1994).
- 31) S. Affrossman and S. M. MacDonald, *Langmuir*, 10, 2257 (1994).
- 32) S. Affrossman, D. R. Armstrong, D. Robb and J. A. Treverton, *Langmuir*, 11, 2060 (1995).
- 33) M. Murase, A. M. Brown and J. F. Watts, *J. Mat. Chem.*, 9, 1211 (1999).

<Original Paper>

The Effect of Chromium Content for Adhesion Durability of Polyethylene Coated Steel

Masatsugu MURASE*

*JFE Steel Corporation, Steel research Laboratory
Kawasakidori 1-chome, Mizushima, Kurashiki 712-8511, Japan

(Accepted for publication : December 26, 2011)

Abstract

The adhesion durability of the polyethylene coated steel which used as the base material the steel which added Cr 0-9 % and SUS410, 430, 304 was investigated in immersion test and a neutral salt spray test (SST). The adhesion durability after 0.5M NaCl immersion at 60°C improves as the amount of Cr increases. Although the delamination kinetics of the coating layer from the edge after a SST is also improved according to the increase in the amount of Cr, but this effect is saturated above 9 % addition.

It was suggested that it is related to the corrosion potential of bare steel that adhesion durability improves with the increase in the amount of Cr. It is thought that corrosion potential is shifted to noble by adding Cr is making small electrode potential difference between the steel surface under coating layer and bare steel area, and is considered to inhibit the cathode reaction under coating layer.

However, the stainless steel must take into consideration that the influence of the crevice corrosion under coating delamination and adhesion loss area and SUS304 are inferior in adhesiveness.

Key words : Adhesion durability, Chromium, polyethylene coated steel, Corrosion, delamination

(Received : November 21, 2011)