

# ASTM G185 に準拠した Autolab 回転円筒電極 (RCE) を用いた乱流条件における腐食防止剤(抑制剤)の効率測定

液体がハイフライン(配管)を通過して輸送されるときに発生する乱流を実験室環境でシミュレートするために、回転円筒電極 (RCE) は腐食研究で用いることのできる技術です。

ハイフライン(配管)内壁の腐食は、ハイフ(配管)材料とハイフを流れる流体との間の電気化学的相互作用によって発生します。そして、その腐食は、ハイフライン(配管)内部で発生する流れの乱れ(乱流)により著しく促進されます。

回転円筒電極(RCE)は、サンプル表面に乱流を発生させながら使用することできます。言い換えれば、ある内径のハイフライン(配管)を通過する流量既知の液体の乱流とその材料表面への影響は、コントロールされた速度で回転する所定のシリンターサイズ(ハイフと同じ材料で作られた)の回転円筒電極

(RCE)を用いることにより、実験室環境で再現することできます。

したがって、回転円筒電極(RCE)の主な用途のひとつは、ハイフ(配管)の流動条件を模擬した簡単に迅速な電気化学実験で、腐食防止剤(抑制剤)の効率やハイフ(配管)材料の腐食のしやすさを試験することにあります。

回転円筒電極(RCE)を用いる標準試験方法は規格 ASTM G185 [1]に規定されています。

この技術資料(アプリケーションノート)では、1018炭素鋼シリンターをサンプルとした回転円筒電極(RCE)による直線分極(LP)測定技術を説明します。電解液に腐食防止剤(抑制剤)の添加有無の2種類のLP実験を行いました。

## 実験

メトローム Autolab PGSTAT302Nは、メトローム Autolabモーターコントローラー、ローテーター、回転円筒電極(RCE)を装備しています。

メトローム Autolab 回転円筒電極(RCE)は、外径(OD)12 mmのサンプルシリンダーを使用し、PEEK製ホルダーにハイトン製Oリングで固定します。メトローム Autolab 回転円筒電極(RCE)を図1に示します。

一般的に、回転円筒電極(RCE)の場合、レイノルズ数 $Re > 200$ で乱流となります。

シリンダー外径が12 mmであることを考慮すると、回転数が100 rpmで、既に乱流に達しています[2]。

回転円筒電極(RCE)インサートの材質は炭素鋼(密度 $\rho = 7.87 \text{ g cm}^{-3}$ ; 等価重量 $EW = 27.93$ )です。

測定セルは、Ag/AgCl 3 mol/L KCl参照電極と、対極として対称に配置された2本のステンレスロッドを用いました。

電解液は、0.5mol/L HClと0.5mol/L NaClの混合水溶液を用いました。

別に、上記と同じ電解液を調製し、それにエタノールと1000ppm(0.78mol/L)のトリフタミンからなる腐食防止剤(抑制剤)溶液を4mL添加しました。

内径 30.32 cm (12 インチ) のスケジュール 40規格のハイフ(配管)内の流体速度 $v_{RCE} = 82.3 \text{ cm s}^{-1}$  ( $2.7 \text{ ft s}^{-1}$ )に相当するように回転円筒電極(RCE)を500 rpmで回転させました。

実験の前に、安定化のため、サンプルを腐食防止剤(抑制剤)が無添加の電解液中で一晩静置しました。

## 結果と考察

腐食電位 $E_{corr}$  (V)を測定したところ、腐食防止剤(抑制剤)なしの電解液の場合は $E_{corr} = -0.479 \text{ V}$ 、腐食防止剤(抑制剤)ありの電解液の場合は $E_{corr} = -0.392 \text{ V}$ となりました。図2に、直線分極(LP)実験から



図1. 回転円筒電極(金属インサート、ハイトンOリング(黒)、PEEKホルダー)

開回路電位(OCP)を5分間記録した後、OCPに対して $-20 \text{ mV}$ および $+20 \text{ mV}$ から $1 \text{ mV s}^{-1}$ のスキャン速度でLP測定を行いました。腐食の場合、OCPは腐食電位、 $E_{corr}$ とも呼ばれます。

すべてのデータはNOVAソフトウェアで記録され、解析されました。

すべての電位は、参照電極の電位、つまり、Ag/AgCl 3 mol/L KClの電位を基準として記録されています。

実験はすべて室温で行いました。

得られたホルタモグラムを示します。青は腐食防止剤(抑制剤)なしで測定したデータ、赤は電解液に腐食防止剤(抑制剤)を添加して測定したものを示しています。

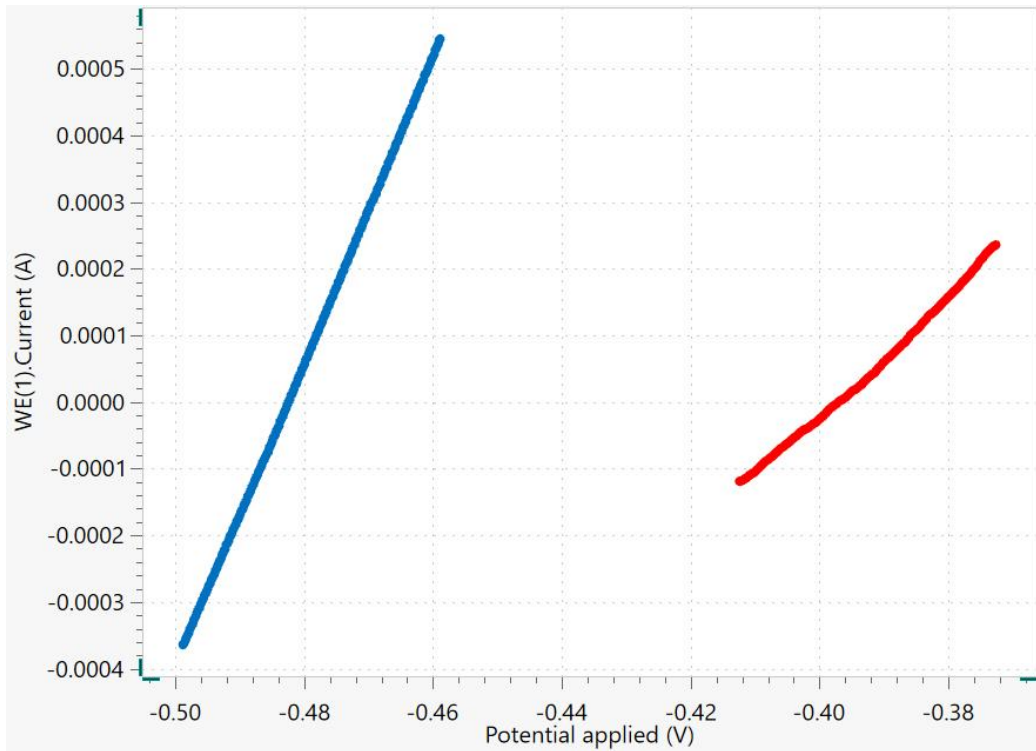


図 2. 直線分極のポルタンモグラム、腐食防止剤(抑制剤)なし (青)、腐食防止剤(抑制剤)添加あり (赤)

図 2 は、腐食防止剤(抑制剤)無添加のデータに対して、腐食防止剤(抑制剤)添加のデータがフロッツの右側に現れていることを示しています。これは、腐食防止剤(抑制剤)添加ありの電解液の場合、腐食防止剤(抑制剤)なしの電解液よりも高い電位(より貴な電位)で同じ電流値が発生することを意味しています。LP測定では、 $E_{corr}$  付近の  $i$  vs  $E$  フロッツの傾きの逆数を用いて分極抵抗値( $R_p$ ,  $\Omega$ )を推定することか

てきます。腐食防止剤(抑制剤)を添加すると、傾きの減少が観察され、これは  $R_p$  が増加したことを示しています。 $E_{corr}$  を中心とした線形回帰(ここでは図はありません)は、 $R_p$  の算出に役立ちました。腐食防止剤(抑制剤)無添加のLP測定の場合、 $R_p=42.62 \Omega$  という値が得られました。腐食防止剤(抑制剤)添加ありでは、 $R_p=135.96 \Omega$  という値となりました。図3には、ターフェルフロッツを示します。

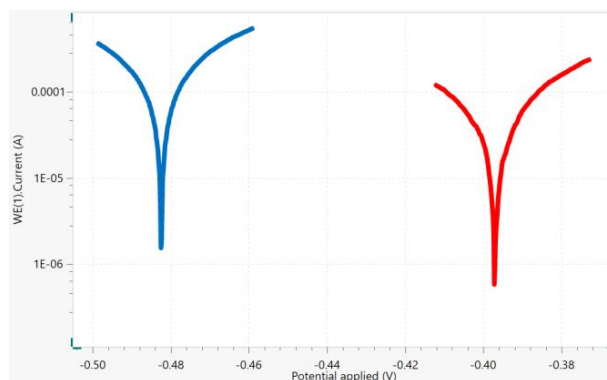


図 3. 腐食防止剤(抑制剤)なし (青) とあり (赤) で測定したデータのターフェルフロッツ

そこでは、電流がゼロに低下する電位値、つまり  $\log(i)$  vs  $E$  プロットにおける負のスライクの位置である  $E_{corr}$  を簡単に測定することかできます。テーラ解析はさらに行われ、NOVAソフトウェアの腐食速度解析コマンドを使用することで、追加の腐食パラメータを計算することかできます。腐食防止剤(抑制剤)無添加の電解液に浸漬したサンプルの分極抵抗

の計算値は  $R_p = 43.32 \Omega$  で、腐食防止剤(抑制剤)添加ありの電解液に浸漬した試験材質の分極抵抗は  $R_p = 136.39 \Omega$  でした。この結果は、前述したLP測定値の線形回帰で得られた結果と同様でした。表1は、線形回帰と腐食速度解析から得られた結果を、腐食防止剤(抑制剤)の有無で比較したものとなります。ここには腐食速度の値も示しました。

表 1. LPの線形回帰と腐食防止剤(抑制剤)添加有無の腐食速度解析の結果

パラメータ	抑制剤なし	抑制剤あり
$E_{corr}$ (V) (直線分極の結果から)	-0.479	-0.392
$E_{corr}$ (V) (腐食速度解析から)	-0.482	-0.396
$R_p$ ( $\Omega$ ) (直線分極の結果から)	42.62	135.96
$R_p$ ( $\Omega$ ) (腐食速度解析から)	43.32	136.39
腐食速度 ( $mm\ year^{-1}$ ) (腐食速度解析から)	0.25	0.065

腐食速度解析で算出された  $R_p$  の値か、LPの線形回帰で算出された値に近いという事実は、算出された腐食パラメータが有効であることを示しています。腐食防止剤(抑制剤)を添加した溶液中での試験材質の腐食速度 ( $0.065\ mm\ year^{-1}$ ) は、腐食防止剤(抑制

剤)を添加しない電解液中で同条件で測定した腐食速度 ( $0.25\ mm\ year^{-1}$ ) よりもはるかに低いことかわかりました。規格 ASTM G185によると、腐食防止剤(抑制剤)の抑制効率は以下の式で計算できます:

$$\text{Inhibitor efficiency (\%)} = 100 \cdot \frac{CR_{no\ inhib} - CR_{inhib}}{CR_{no\ inhib}}$$

ここで、 $CR_{no\ inhib}$  ( $mm\ year^{-1}$ ) は腐食防止剤(抑制剤)なしで計算された腐食速度であり、 $CR_{inhib}$  ( $mm\ year^{-1}$ ) は腐食防止剤(抑制剤)添加ありで計算された

ものとなります。腐食速度解析(表1)から得られた腐食速度を用いると、腐食防止剤(抑制剤)の効率は74%と計算されました。

## 結論

この技術資料(アプリケーションノート)では、工業・学術での腐食研究分野における回転円筒電極の一般的な使用例を示しました。2種類の電解液が使用され、一方はトリフタミンヘースの腐食防止剤(抑制剤)を含むものでした。直線分極実験は、内径30.32 cm (12インチ)のスケシュール40規格のハイフ(配管)内の流体速度 $v_{RCE} = 82.3 \text{ cm s}^{-1}$  ( $2.7 \text{ ft s}^{-1}$ )に相当

する500 rpmの回転速度で行いました。腐食防止剤(抑制剤)の効果は、目視観察、線形回帰、直線分極データの腐食速度解析から評価しました。最後に、腐食防止剤(抑制剤)の効率を計算した結果、腐食防止剤(抑制剤)添加ありでの腐食速度は、腐食防止剤(抑制剤)なしよりも74%低いことが示されました。

## 参考文献

1. ASTM G185-06(2016), Standard Practice for Evaluating and Qualifying Oil Field and Refinery Corrosion Inhibitors Using the Rotating Cylinder Electrode, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, [www.astm.org](http://www.astm.org)
2. Metrohm Autolab White Paper: "[Corrosion Best Practice. Creating Pipe-flow Conditions Using a Rotation Cylinder Electrode](#)".

## CONTACT

メトロームジャパン株式会社  
143-0006 東京都大田区平  
和島6-1-1  
null 東京流通センター アネ  
ックス9階

[metrohm.jp@metrohm.jp](mailto:metrohm.jp@metrohm.jp)

## 装置構成



### Autolab PGSTAT204

The PGSTAT204 combines the small footprint with a modular design. The instrument includes a base potentiostat/galvanostat with a compliance voltage of 20 V and a maximum current of 400 mA or 10 A in combination with the BOOSTER10A. The potentiostat can be expanded at any time with one additional module, for example the FRA32M electrochemical impedance spectroscopy (EIS) module.

The PGSTAT204 is an affordable instrument which can be located anywhere in the lab. Analog and digital inputs/outputs are available to control Autolab accessories and external devices are available. The PGSTAT204 includes a built-in analog integrator. In combination with the powerful NOVA software it can be used for most of the standard electrochemical techniques.



### Autolab PGSTAT302N

This high end, high current potentiostat/galvanostat, with a compliance voltage of 30 V and a bandwidth of 1 MHz, combined with our FRA32M module, is specially designed for electrochemical impedance spectroscopy.

The PGSTAT302N is the successor of the popular PGSTAT30. The maximum current is 2 A, the current range can be extended to 20 A with the BOOSTER20A, the current resolution is 30 fA at a current range of 10 nA.



### 0.250 L Corrosion Cell

Complete cell for corrosion measurements, 250 mL.



### Rotating Cylinder Electrode (RCE)

Autolab Rotating Cylinder Electrode (RCE) with a **non-carbon liquid contact** provides **superior noise-free corrosion** measurements. The RCE's Hg contact produces smooth and accurate data that requires no special handling or tools for use in your lab.

With the **highest rotation rate** among commercially available systems, the Autolab Rotating Cylinder Electrode allows you to simulate the widest variety of pipe flow conditions in your lab. The **RCE has double the rotation rate** of any other **12 mm rotating cylinder electrode** making achievable flow rates are 50% higher than any other commercially available RCE.

#### Maximum simulated turbulent flow rates:

1 inch/2.66 cm pipe with schedule 40 is 365 cm/s

24 inch/57.48 cm pipe with schedule 40 is 566 cm/s

The Autolab RCE is **very compact**, only a tenth of the size of other commercially available RCEs. You can access the full rotation rate of the Autolab RCE (100-5000 rpms) with a 12 mm cylinder.

**Operating temperature range:** max 40 C°

**Exposed sample surface:** 3 cm<sup>2</sup>

Image shows RCE and controller, RRDE cell, PGSTAT204 and NOVA software.

Keywords: Rotating Cylinder Electrode, Corrosion, RCE, pipe flow, turbulent flow, corrosion in pipes, pipes, Reynolds number, cylindrical sample.