

# 東海再処理施設における海中放出管からの漏えいについて —海中放出管の漏えい原因究明（その3）再発防止対策及び管理方法—

Liquid leakage from the sea release pipe of the Tokai reprocessing plant

-Investigation into the cause of the leak (3): Preventive measures against recurrences and the management method-

日本原子力研究開発機構	西田 恭輔	Kyosuke NISHIDA	(Non-Member)
日本原子力研究開発機構	鋤柄 光二	Kouji SUKIGARA	(Non-Member)
日本原子力研究開発機構	照沼 朋広	Tomohiro TERUNUMA	(Non-Member)
日本原子力研究開発機構	岩崎 省悟	Shogo IWASAKI	(Non-Member)
日本原子力研究開発機構	伊波 慎一	Shinichi INAMI	(Member)

The leak phenomenon of the sea release facilities of the Tokai reprocessing plant was observed. According to the inspection of the leakage, it was found that a crack occurred on the release pipe buried in the sea floor. The cause of the crack produced was that the release pipe was damaged at the time of construction. Furthermore, it was estimated that hydrogen generated by a cathodic protection system had influenced the damaged part, and hydrogen embrittlement cracking was generated. The relationship between the generation of hydrogen and the protective potential was studied and the appropriate electric potential that can prevent hydrogen embrittlement cracking was considered. This paper reports future measures and management method.

Keywords: sea release pipe, cathodic protection system

## 1. 緒言

平成21年4月に確認された東海再処理施設の海中放出設備の漏えい事象は、漏えい箇所が海底埋設の放出管であった。漏えいの原因は、放出管の施工時に損傷し、経年変化として損傷箇所に電気防食で発生した水素が影響したことで水素脆性割れが起り、き裂が発生、さらには水素誘起割れによりき裂が進展し貫通したことによるものと推定した。

損傷箇所に水素脆性割れが生じる原因となった水素は電気防食によるものであり、このときの防食電位と水素発生の関係等の調査を行った。この結果、損傷があったとしても水素脆性割れを生じさせない適正な電位で管理する対策をとることとした。

## 2. 電気防食の概要

### (1) 海中放出管の電気防食の方法

海中放出管の電気防食は、図1に示すように外部電源方式で行っている。

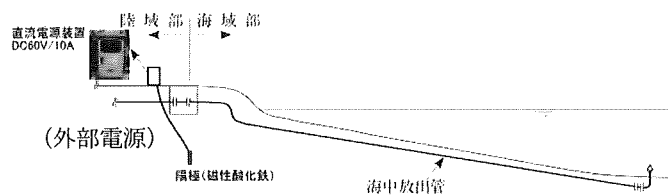


図1 海中放出管の電気防食装置設置概要図

これを概略的に表したものを図2に示す。外部電源方式は、直流電源装置により電流を陽極（磁性酸化鉄）を通じて海中、土中に流し、陰極となる金属面に流れ込むようにして金属が持つ自然電位を防食できる電位（防食電位）に下げる防食方法である。

このように防食対象である陰極に、電流を流入させる方式をカソード防食という<sup>1)</sup>。

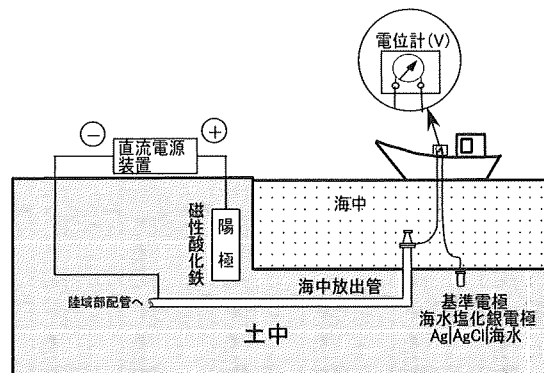


図2. 海中放出管の電気防食電位測定概要図

連絡先：西田 恭輔  
〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33  
日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター  
施設管理部 施設保全第2課  
E-mail:nishida.kyosuke@jaea.go.jp  
TEL:029-282-1111 (内 73321)

## (2) 電気防食の原理<sup>2)</sup>

海中放出管はポリエチレン被覆が施され、腐食の要因となる海水等との接触がない状態では腐食は生じない。しかし、ポリエチレン被覆がはがれ金属面が露出すると腐食が始まる。図3に腐食時及び防食時の被覆のはがれ部の電流及び電位の変化を示す。

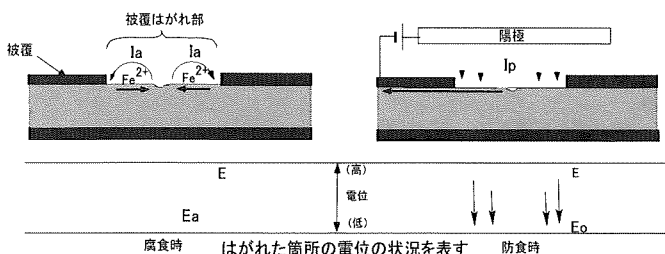
### ①腐食時の被覆はがれ部の電流及び電位

ポリエチレン被覆がはがれ金属面が露出すると金属面の鉄がイオン化( $\text{Fe}^{2+}$ )し、腐食が始まる。この腐食が始まった箇所の電位( $E_a$ )は、腐食していない箇所の電位( $E$ )に比べ低くなり、この電位の高低差により、金属面に電流が生じ、海水等を介して露出した金属面に腐食電流( $I_a$ )が流れ、腐食が進行していく。

### ②防食時の被覆はがれ部の電流及び電位

電気防食は、土中に設置した陽極からの電流を露出した部分へ流すことにより、腐食電流( $I_a$ )を消滅させることで防食するものである。この陽極からの電流を防食電流( $I_p$ )といい、防食電流( $I_p$ )を流すことにより金属面の電位の高低差がなくなり( $E_o$ )、腐食電流( $I_a$ )が消滅する。

このように、直流電源装置(陽極)より海中放出管のポリエチレン被覆がはがれた部分に防食電流を流し、腐食の原因となる電位差をなくすことで防食することができる。このときの電位( $E_o$ )が直流電源装置により設定した防食電位となる。



Ia:腐食電流  
Ip:防食電流  
E-Ea:腐食時の電位  
Eo:防食達成時の電位(腐食電流は0になる)

図3. 腐食時、防食時の被覆はがれ部の電流及び電位

## 3. 防食電位の管理

### (1) 管理方法

防食電位の測定は、放出口部及び陸域部と海域部との境界において年1回の頻度で行っている。この際、海水塩化銀を照合電極として用い、この電極との相対的な電位差を求めている。

海水塩化銀を照合電極とした場合、防食が達成できる電位は $-0.78\text{V}$ より卑側(一側)となる。しかし、防食電位を約 $-2.4\text{V}$ より卑側(一側)にすると過防食となり<sup>3)</sup>、水素が発生し、ポリエチレン被覆のはがれ等の影響が生じる。このため、海中放出管の防食電位は、約 $-0.78\sim-1.5\text{V}$ の範囲で管理していた。

防食電位を測定した結果が目管理している範囲と異なる場合は、直流電源装置の出力を増減させることにより防食電位の調整を行っている。この直流電源装置については、出力(電圧値、電流値)の確認を週1回の頻度で行っている。

### (2) 防食電位の管理実績

海中放出管の供用開始後、年1回実施している放出口部での防食電位の測定結果を図4に示す。防食電位は、水温、塩分濃度、潮流、波浪、溶存酸素、海水汚染<sup>4)</sup>、土壌抵抗などの環境の条件による影響を受けて変動するため、この間、放出口部の電位を管理範囲内で維持できるように出力の調整を適時実施しており、これまでの測定結果は、 $-0.92\sim-1.35\text{V}$ の範囲にあった。

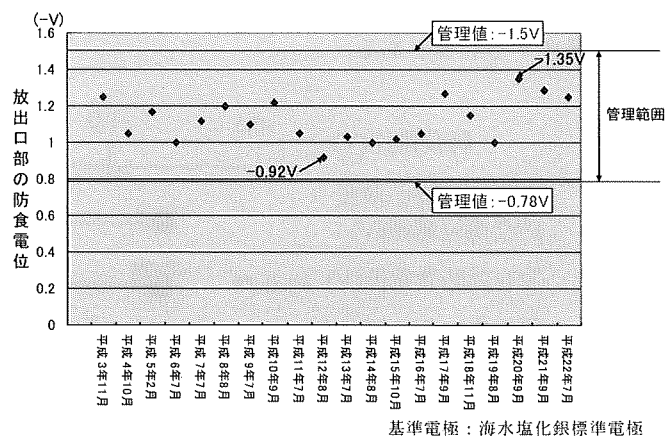


図4. 放出口部の防食電位測定結果

放出管の各部位における防食電位を表1に示す。防食電位は、放出口部において $-1.25\text{V}$ 、漏えい箇所

所において-1.26V であり、ほぼ同じ値であった。また、陸域部と海域部の境界部は-1.28V であり、海中放出管の海域部全経路にわたり防食電位に大きな変化はなく、ほぼ一定であった。

表 1. 放出管の各部位における防食電位測定値

測定箇所	測定電位 (V)
陸域部と海域部の境界部	-1.28
漏えい箇所の切断回収部	-1.26
放出口部	-1.25

#### 4. 漏えい原因（経年的な変化）における電気防食装置による水素の発生

##### (1) 経年的な変化が生じた推定原因

漏えいが生じた原因として、打痕により鋼材表面が硬化し水素に対する感受性が高くなった状態において、電気防食に伴う海水の電気分解により生成した水素が、硬化した箇所に水素脆性割れを引き起こしたと推定された。よって、今回漏えいがみつかった箇所以外にも同様な損傷箇所があった場合を想定し、今後の管理として、防食ができる電位を維持しつつ、水素発生量を極力抑える必要があることがわかった。

(2) 腐食、水素の影響等を考慮した防食電位の調査  
海中放出管の適正な防食電位を選定する場合、炭素鋼の腐食に対する有効な防食電位、電気防食に伴い生成される水素による脆性割れを考慮した防食電位及び土に含まれる細菌による腐食を防ぐ防食電位を考慮する必要がある。

また、ポリエチレン被覆がはがれていない箇所でも、過防食であると水素が発生し、被覆がはがれることを防止する必要がある。

以上のことを踏まえ、防食電位に関する文献調査を行った。その結果、図 5 に示すとおり炭素鋼の腐食に対する有効な防食電位は-0.78~-1.26V であるが、水素による割れを考慮した防食電位は、図 6 に示すように、含水率 30%の海底粘土では約-1.33V より貴側(+側)、含水率 14%の真砂土では約-1.13V より貴側(+側)である。海中放出管の設置環境としては、含水率 30%の海底粘土の方が近いが、保守的に考えると約-1.13V より貴側(+側)が望ましい。

一方、土に含まれる細菌による腐食を防止するには、鉄細菌の場合が-0.78V より卑側(-側)、硫酸塩還元菌の場合が-0.88V より卑側(-側)である。したがって、被覆と電気防食を併用する場合の防食電位は-0.8~-1.1V が適正であると考える。

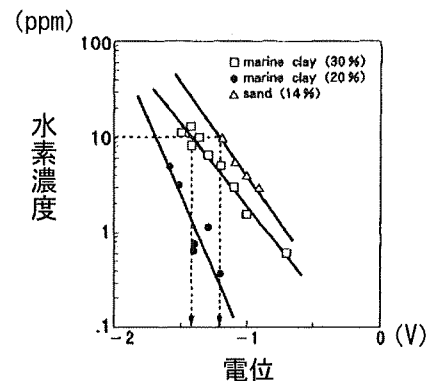
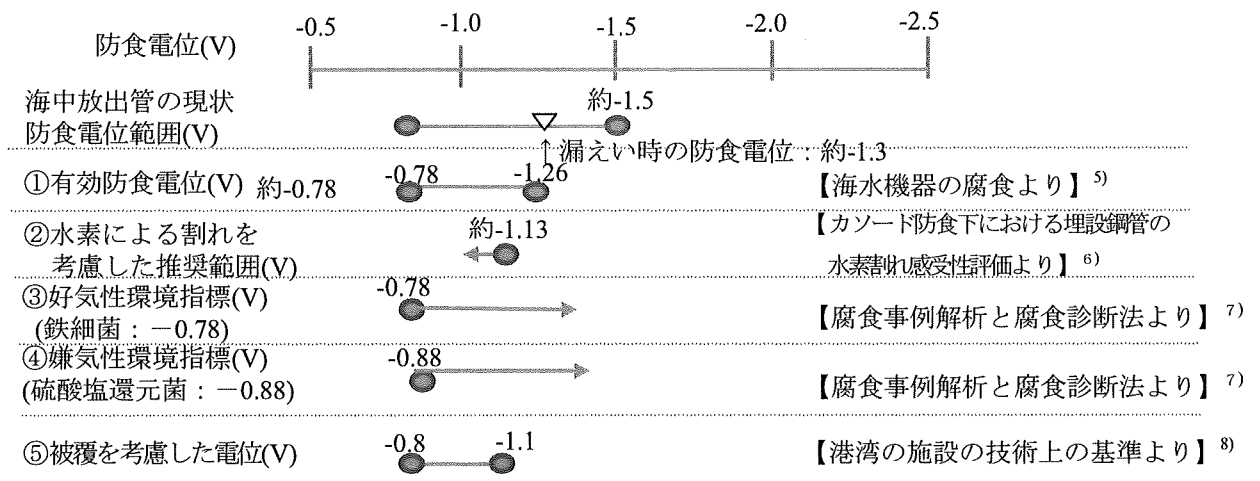


図 6. 土の性状毎の水素濃度と電位との関係<sup>6)</sup>



\*②,③,④は、文献では標準電極として硫酸銅電極を使用しているため-66mV、①は飽和カロメル電極を使用しているため6mVを海水塩化銀電極の値に補正している。

図 5. 適正な防食電位の調査結果

### (3) 防食電位と出力電流の関係による管理

防食電位は、直流電源装置の出力電流により調整している。防食電位の変化量は、陰極電流密度の対数とほぼ直線関係にあり、Tafel の式  $\Delta E = a + b \ln(I)$  <sup>9)</sup> で表される。この関係を利用し、これまでの防食電位の測定値と電流値から a, b の値を算出した。この結果、 $\Delta E = 0.46 + 0.20 \ln(I)$  となり、図 7 に示すとおりほぼ直線関係で表すことができる。このことから、-1.3V のとき  $\Delta E$  は、海中放出管の自然電位が -0.5V であるから  $\Delta E_{-1.3} = -0.8V$ 、 $I = 4.8A$  である。また、-1.0V のときは、 $\Delta E_{-1.0} = -5.0V$ 、 $I = 1.1A$  である。したがって、防食電位を -1.3V から -1.0V に調整する場合、出力電流を 4.8A から約 1.1A にすれば良いこととなり、放出口部での防食電位は、直流電源装置の出力電流を調整することにより管理できる。

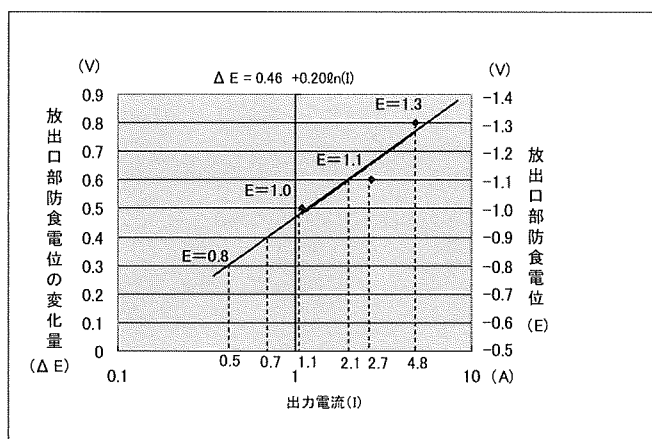


図 7. 出力電流と放出口防食電位変化量との関係

### (4) 今後の管理

防食電位の調査の結果、放出管に損傷があった場合を想定した望ましい防食電位は、最貴値(+)が約 -0.9V、最卑値(-)が約 -1.1V であった。このことから、海中放出管の卑側の防食電位を -1.3V から -1.1V へ変更した場合、出力電流(防食電流)は 4.8A から 2.1A に低減され、生成される水素量が減少するため、水素の影響を抑制する効果が期待できる。この効果は、エレクトロコーティングの生成により防食電流が約 1/3~1/2 に低下されることに伴い生成する水素量の減少と同様の効果である。このことから、防食電位を

-1.1V へ変更することは、漏えい部のようにエレクトロコーティングが生成されていない箇所においても、水素の影響を抑制することができるものとする。

以上のことから、海中放出管の防食電位は、腐食、水素の影響等を考慮し、貴側を約 -0.9V、卑側を約 -1.1V の範囲で管理する。これらを出力電流に換算すると約 -0.9V のとき 0.7A、約 -1.1V のとき 2.1A となる。

防食電位については、今後も年 1 回の測定を行うとともに、直流電源装置の点検を実施する。また、週 1 回直流電源装置の出力を確認する。なお、出力電流が管理範囲から外れた場合、出力電流を調整するとともに、放出口部の防食電位の測定を実施し、防食電位を管理範囲内に維持していく。

(注) 電位の表示については、特に記載がない場合には、照合電極に海水塩化銀を使用した場合の値を示す。

## 5. まとめ

従来防食電位は、防食域の電位ではあるが管理値を高く(卑側)設定していた。損傷箇所のように被覆がはがれた箇所では、電位が高いと水素の発生が大きい。このため、損傷箇所のように打撃により硬化した部分では水素感受性が高いため、水素の影響を大きく受けたと思われる。

## 6. 結言

電気防食を用いて防食管理する場合には、防食電位を維持すると共に水素による影響を考慮する必要がある。漏えい原因を調査した結果、放出管のような軟鋼の場合、強い打撃で表面が硬化した箇所は水素感受性が高くなり、水素が存在すると水素脆性割れが生じる可能性があることが分かった。この結果を踏まえ、海中放出管では、防食の維持とともに水素の影響を緩和する必要があるため、防食電位については貴側を約 -0.9V、卑側を約 -1.1V の範囲で管理することとした。これにより漏えい箇所以外に海中放出管に強い打撃による損傷があったとしても、水素脆性割れを生じさせず、かつ腐食を防止することができるものとする。

## 参考文献

- 1) 松島 巖:腐食防食の実務知識 オーム社, p. 72-74(2002).
- 2) 日本エルガード協会 <http://www.elgard.com/index.html>  
(最終アクセス2010年11月25日)
- 3) 電気学会、電食防止研究委員会:新版 電食・土壌腐食ハンドブック, コロナ社, p. 213(1986).
- 4) 腐食防食協会:防食技術便覧, 日刊工業新聞社, p. 702(1986).
- 5) 尾崎 敏範ほか:海水機器の腐食, 技術評論社, p170(2002).
- 6) 山口 祐一郎ほか:鉄と鋼 第78年第12号 カソード防食下における埋設鋼管の水素割れ感受性評価, 日本鉄鋼協会, p. 70(1992).
- 7) 石原 只雄:最新 腐食事例解析と腐食診断法, テクノシステム, p. 957-958(2008).
- 8) 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 日本港湾協会, p. 440(2007).
- 9) 電気学会、電食防止研究委員会:新版 電食・土壌腐食ハンドブック, コロナ社, p. 214(1986).