



『CUI抑制の保温構造』

ニチアス株式会社
基幹産業事業本部
黒坂 和弥

1. はじめに

石油精製、石油化学、製鉄関連のプラントは多くが屋外に設置され、建設以来30年～50年経過した老朽化設備が多く存在する。プラント設備に使用されている保温材は、法的規制による溶接部など点検が行われない箇所は、保温材が建設時から更新されずに存在する。保温材は、雨水の浸入によりCUI (Corrosion under Insulation) といわれる保温材下配管外面腐食の発生に伴い漏洩事故も多発化している。特に100℃以下の温度領域に顕著に発生している。これは、1973年の第一次オイルショック以降、それまで149℃以上の箇所で使用されていた保温材が、省エネルギーの観点から100℃以下の温度領域まで保温されたことに由来すると言われる。

国内では、CUIの問題が1988年頃からクローズアップされてきた。欧米では日本より10年～20年以上前からこの問題に直面している。

最近では、海外の大手石油会社でCUI対策にエアロジェル保温材が使用されている。

2. 保温材の含水劣化

保温材の劣化は、雨水などが浸入し含水によることが知られている。

プラントで多く使用されているけい酸カルシウム保温材の含水率と、熱伝導率の関係を以下の条件で試験を実施した。

- ・試験条件：測定温度：20℃
- ・試験体：けい酸カルシウム保温材（試験片寸法：200×200×25mm）
- ・絶乾状態で熱伝導率（W/(m・K)）測定
- ・保温材を2週間水槽で浸漬、含水（vol%）
- ・105℃で徐々に乾燥し、それぞれの熱伝導率（W/(m・K)）

この時の保温材の含水率と熱伝導率の関係は、図1のグラフに示す。

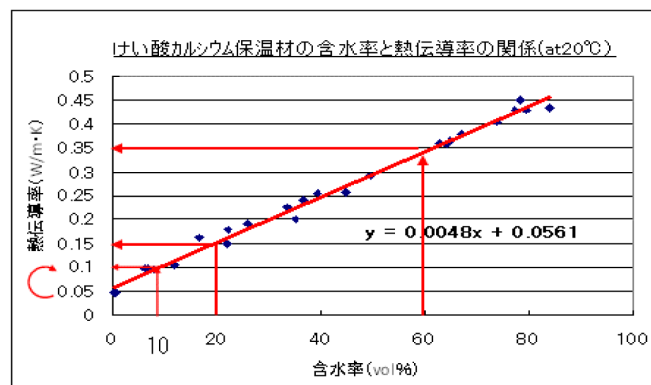


図1. けい酸カルシウム保温材の含水率と熱伝導率の関係

『JIS保温』に保温材の定義は、熱伝導率の低い空気を閉じ込めて断熱している材料、空隙率90%以上、常温に於いて、熱伝導率 0.065W/(m・K) 以下の材料とある。

けい酸カルシウム保温材が絶乾状態含水率0vol%の熱伝導率は、0.05W/(m・k) が、10vol%含水すると熱伝導率は2倍の0.1W/(m・K) となり、20vol%含水すると熱伝導率は3倍の0.15W/(m・K) となる。

『JIS保温』の定義から、10vol%含水したけい酸カルシウム保温材は、既に保温機能が喪失しており、保温材の劣化は、含水が原因であると言える。

3. 保温材パイロジェル™XTEの紹介

蒸気配管等のメンテナンスに使用するエアロジェル保温材パイロジェルXTEを紹介する。

エアロジェルは、二酸化けい素をベースにゾルゲル法によって製造され、ゲル中に含まれる水分を超臨界乾燥により気体に置換された空隙率95%以上の低密度の物質である。

代表的なエアロジェル保温材は、ガラスマットにエアロジェルを含浸させたパイロジェルXTEがある。特長は、低熱伝導率、フレキシブル、はっ水性、水蒸気透過性を有する保温材である。その特長を図2、3に示す。メーカーは、米国 Aspen Aerogels社。ニチアスは、国内代理店として材料販売、工事を行い、パイロジェルXTEを供給している。

パイロジェルXTEは、建築基準法第2条第9号の規定により不燃材料の評価方法として定められた発熱試験（20分加熱）に合格する保温材である。

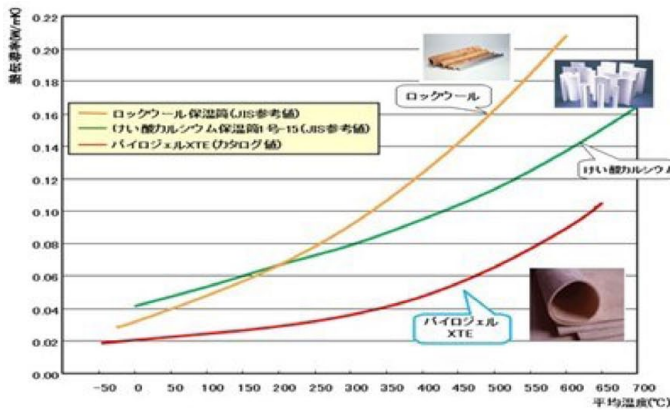


図2. 他保温材とパイロジェルXTEとの熱伝導率比較表

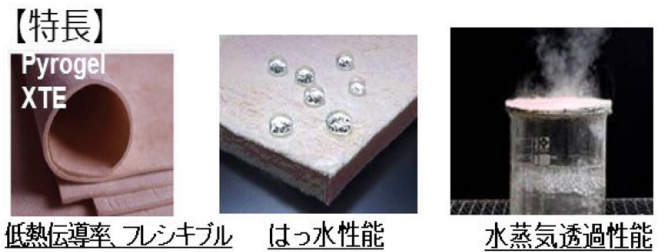


図3. パイロジェルXTEの特徴

4. 配管保温構造の比較

国内プラントで広く使用されている従来の保温材として、けい酸カルシウム保温材やロックウール保温材等がある。これら従来の保温材を使用した保温構造とエアロジェル保温材を使用した保温構造とに於いて、CUIの原因となる含水保温材乾燥試験と炭素鋼腐食速度試験を実施した。試験に使用した保温構造を図4に示す。

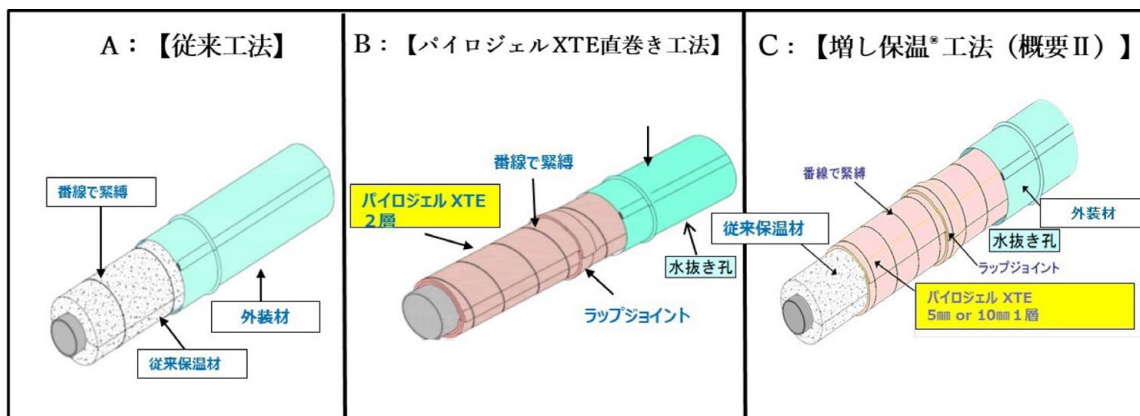


図4. 各種配管保温構造の比較

A：従来工法

・けい酸カルシウム、ロックウール保温材等を使用する。国内プラントで広く使用されている保温構造である。

B：パイロジェルXTE直巻き工法

・APIにエアロジェル保温材が仕様として記載されている。CUI対策で欧米、アジアで広く採用され始めている材料のエアロジェルを直接巻きつける工法である。

C：増し保温®工法（概要Ⅱ）

・従来保温材のけい酸カルシウムやロックウール保温材+パイロジェルXTE 1層巻き付ける複合の保温構造である。
・配管内部温度が常温程度の温度から150℃以下温度域に採用するCUI予防に重点を置いた保温構造である。

- ・メンテナンス及び建設時に省エネ対策、CUI予防保全として推奨する保温構造である。
- ・従来工法の含水防止と保温機能維持を図った、弊社が考案した工法である。

5. A：従来工法 vs C：増し保温工法（概要Ⅱ）の乾燥試験

図5に示す100Aのモックアップ配管に40mm厚みのけい酸カルシウム保温材を、予め飽和状態（約60～70vol%）まで含水させて取り付ける。以下の保温構造で配管内分温度50℃、70℃、90℃の各温度領域でけい酸カルシウム保温材の乾燥時間を測定した。

A：従来工法：けい酸カルシウム保温材+外装

C：増し保温工法（概要Ⅱ）：けい酸カルシウム保温材+パイロジェルXT^{注1} 5mm1層+外装材

（注1：パイロジェルXTは、パイロジェルXTEの前世代の保温材。熱伝導率、はっ水性、水蒸気透過性等の性能は、同等である。）

2つ割りけい酸カルシウム保温材の含水の多い下部のみの含水率を評価した。

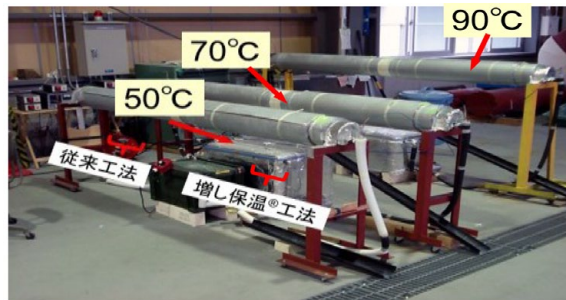


図5. A：従来工法 vs C：増し保温工法（概要Ⅱ）の乾燥実験モックアップ試験体

各温度に於けるけい酸カルシウム保温材の含水率と経過時間のグラフを図6、7、8に、評価を9に示す。

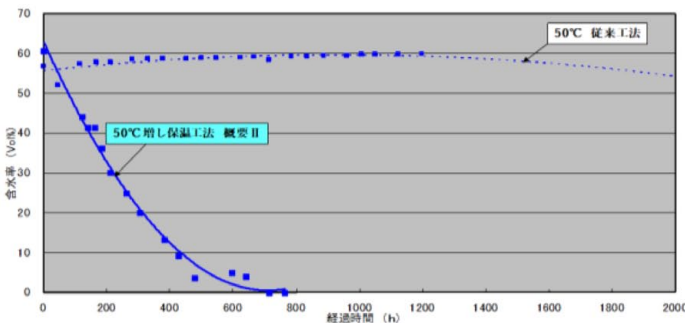


図6. 50℃けい酸カルシウム保温材乾燥時間

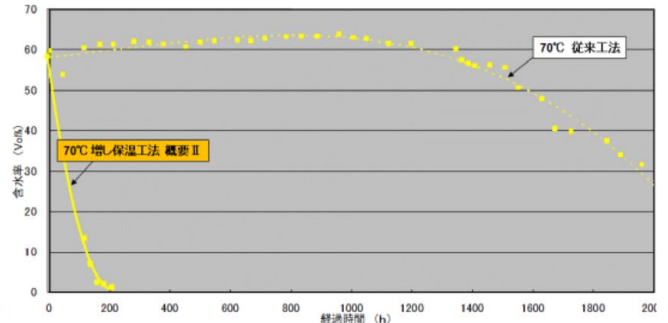


図7. 70℃に於けるけい酸カルシウム保温材乾燥時間

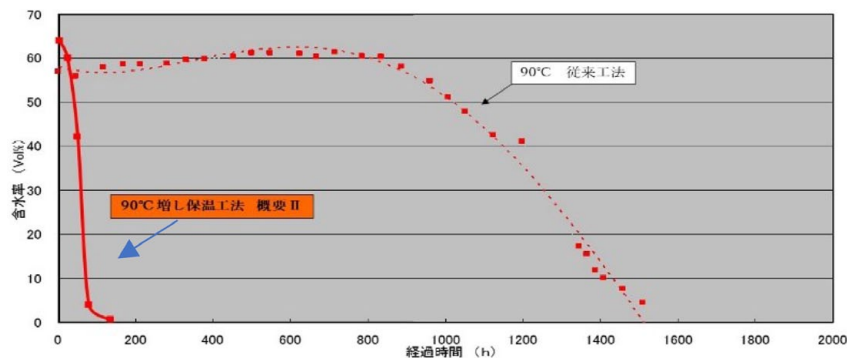


図8. 90℃に於けるけい酸カルシウム保温材乾燥時間

この結果と評価を図9に示す。

工 法	保温構造	50℃		70℃		90℃	
		乾燥時間 (h)	評価	乾燥時間 (h)	評価	乾燥時間 (h)	評価
A: 従来工法	けい酸カルシウム保温材40mm	1200 (変化無し)	×	2000 (乾燥せず)	×	1500	×
C: 増し保温工法(概要II)	けい酸カルシウム保温材40mm +パイロジェルXT5mm1層	500	○	150	○	50	○

図9. A：従来工法 vs C：増し保温工法（概要II）の乾燥実験結果と評価

従来工法の保温構造と増し保温工法（概要II）と比較し、5vol%程度の含水率を回復の目安にすると、明らかに増し保温工法（概要II）は、各温度領域で乾燥速度が速くなることが確認できた。配管内部温度が低温の50℃、70℃、90℃に於いてCUIの原因となる保温材の含水は、従来保温材にパイロジェルXT5mm1層を巻付ける保温構造で解決される。

6. 屋外配管に於けるCUI抑制効果試験

保温されている実機プラント屋外配管を試験に供し、各種保温構造に於ける屋外暴露試験を梅雨の降雨時期に実施した。CUIの抑制効果をACM（Atmospheric Corrosion Monitor）腐食センサ、温湿度センサのデータより評価しCUI抑制効果の保温構造を検討した。試験体の保温構造は、図10に示す。

【試験条件】

○測定期間：2020年5月27日～8月3日（日数：69日、降雨日37日）

○配管径：300A（現状の保温仕様：ロックウール50mm）

○内部温度：55℃（化学薬品設備配管）

No.	施工法	保温構造	ACMセンサ	温湿度センサ
①	従来工法	けい酸カルシウム保温材 50mm	2カ所	1カ所
②		ロックウール保温材 50mm	2カ所	1カ所
③	エアロジェル直巻き	パイロジェルXTE 20mm（10mm×2層）	2カ所	1カ所
④	増し保温工法	けい酸カルシウム保温材 50mm +パイロジェルXTE 5mm	2カ所	1カ所
⑤		ロックウール保温材 50mm +パイロジェルXTE 5mm	2カ所	1カ所
⑥	-	大気環境（外気）（雨が直接当たらない箇所）	1カ所	1カ所

図10.試験体の保温構造

7. ACMセンサの原理と構造

基板（Fe、亜鉛メッキ鋼板など）の上に、絶縁ペーストをスクリーン印刷・焼成硬化し、さらにその上に絶縁が保たれるように導電性ペースト（Agなど）を積層印刷・焼成硬化する。これを、大気中に暴露すると、降雨や結露などによって両金属間に薄い水膜が形成されて、ガルバニック電流が流れる。この電流は腐食速度と良い相関関係があるので、大気環境の腐食性をモニタリングすることができる。ACMセンサの原理と構造を図11に示す。

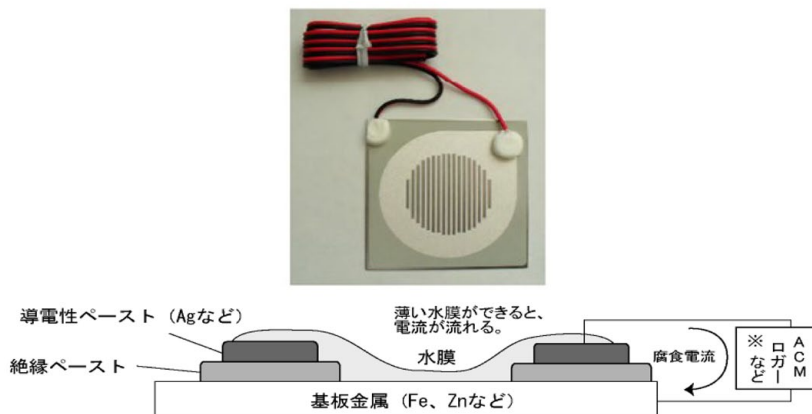


図11.ACMセンサの原理と構造

今回の実験は、加速試験として人工海水アクアマリン4%溶液を作成しセンサ表面に均一に1ml塗布し試験を実施した。

8. 屋外配管に於けるCUI抑制効果試験状況

既設ロックウール保温材50mmをベースに、けい酸カルシウム保温材、パイロジェルXT直巻きの保温厚みを決定した。増し保温工法は、ロックウール保温材、けい酸カルシウム保温材にパイロジェルXTE 5mm 1層巻き付ける保温構造とした。予め既設保温材を撤去し、同一配管上に、それぞれの保温構造で施工した。各保温構造を施工する箇所の配管頂部に、模擬ノズルを設置。模擬ノズルの両脇にACMセンサを取り付け、片側に温湿度計を取り付けた。それぞれの保温構造で施工後外装材を取り付ける。模擬ノズルと外装材のクリアランスは2mmとした。参考に外気を測定するACMセンサ、温湿度計を各1個ずつ配管サポート部に設置した。その状況を図12に示す。

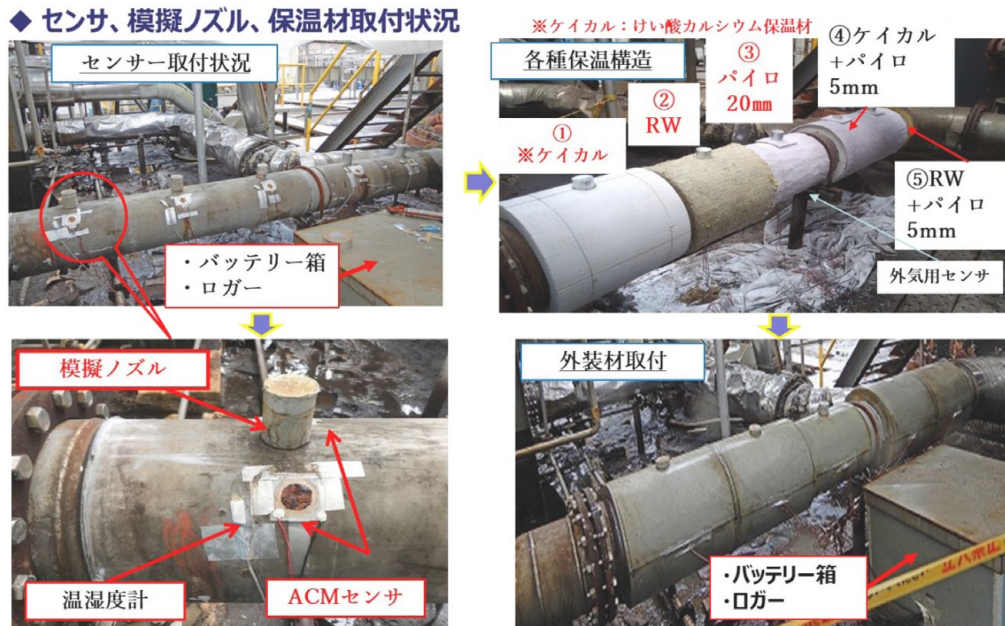


図12. 屋外配管に於けるCUI抑制効果試験状況

9. 屋外配管に於けるCUI抑制効果試験結果

9-1. 各保温構造に於けるACMセンサ、温湿度計データ

各保温構造を対比して、ACMセンサと、温湿度計のデータを図13、14、15に示す。

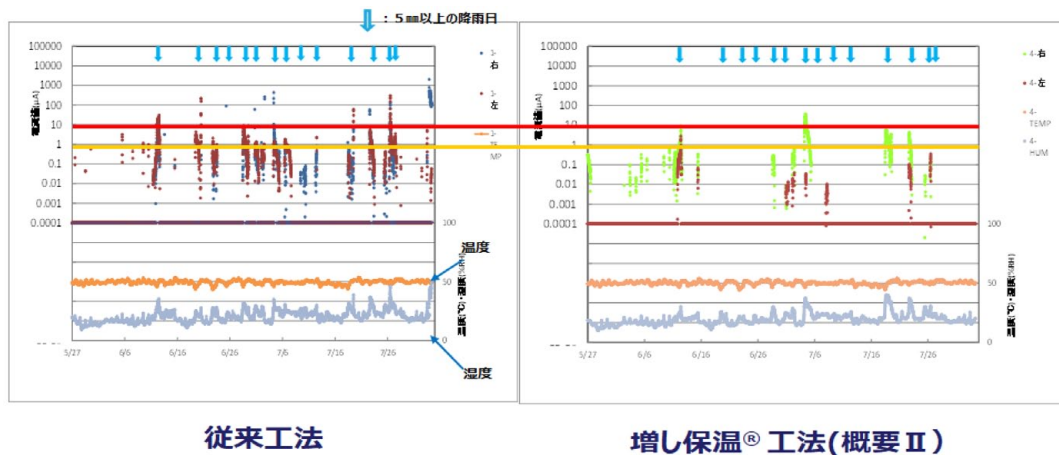


図13. ①けい酸カルシウム保温材 vs ④けい酸カルシウム保温材+パイロジェルXTE 5mm

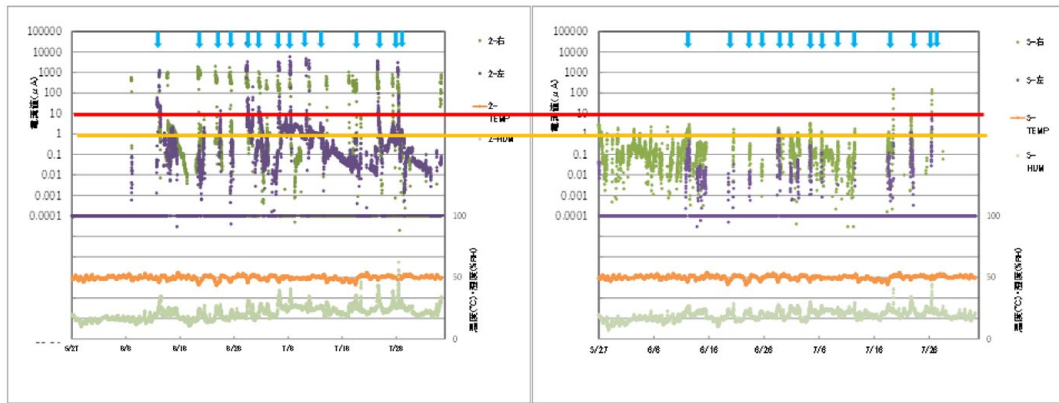


図14. ②ロックウール保温材 vs ⑤ロックウール保温材+パイロジェルXTE 5mm

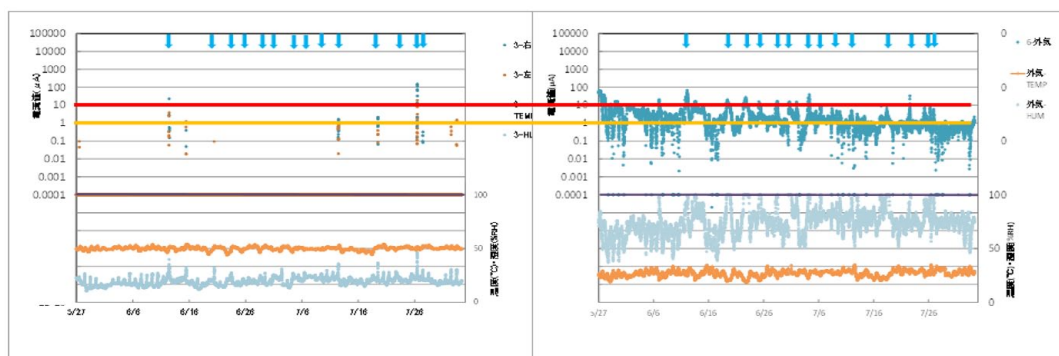


図15. ③パイロジェルXTE 直巻き工法 ⑥ (参考) 外気

グラフの読み方は、横軸が経過時間、縦軸の上半分がACMセンサのプロットした電流値 (μA) を、下半分が温湿度計の温度と湿度、グラフ上部の「↓」降雨が5mmあった日を示している。ACMセンサのグラフに、 $10\mu\text{A}$ 、 $1\mu\text{A}$ の箇所に目安の野線を引いている。

9-2. ACMセンサデータ解析した炭素鋼腐食速度

ACMセンサより得られたデータから炭素鋼腐食速度 ($\mu\text{m}/\text{y}$) を導き出した結果を図16に、炭素鋼腐食速度 ($\mu\text{m}/\text{y}$) を図17に示す。

測定期間(5/27~8/3期間)	①保温材	②保温材	③保温材	④保温材	⑤保温材	⑥外気
各保温構造	けい酸カルシウム50mm	ロックウール50mm	パイロジェルXTE20mm	+パイロジェルXTE 5mm けい酸カルシウム50mm	+パイロジェルXTE 5mm ロックウール50mm	-
(i) 総積算電気量Q(C)	8.3	138.8	0.21	0.52	0.50	14.2
(ii) 炭素鋼腐食速度 ($\mu\text{m}/\text{y}$)	104.1	302.2	26.1	36.6	36.1	138.0
(iii) 炭素鋼1mm腐食するのに要する年数(年)	9.6	3.3	38.3	27.3	27.7	7.2
(iv) 平均温度($^{\circ}\text{C}$) (配管外面)	50	50	50	50	50	27
(v) 平均湿度(RH%) (配管外面)	21	21	19	19	19	74

図16. ACMセンサデータ解析、温湿度計データ

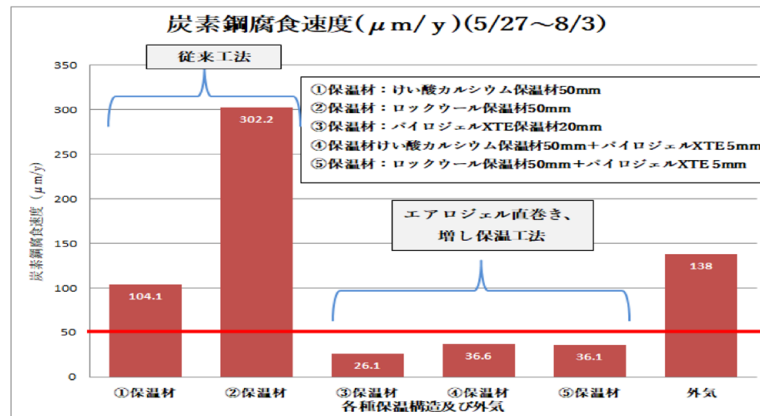


図17.各保温構造に於ける炭素鋼腐食速度

図16の表は、(i)は、ACMセンサより得られた総積算電気量Q(C)、(ii)は、総積算電気量から解析した炭素鋼腐食速度(μm/y)である。(iii)炭素鋼1mm腐食するのに要する年数(年)は、炭素鋼腐食速度(μm/y)から逆算した数値である。(iv)、(v)温湿度計のデータの平均値を記載している。

10. 考察

本試験に於ける考察は、以下の通りである。

○(ii)のデータより炭素鋼腐食速度の早い順番から並べると以下の様になる。

②ロックウール>①けい酸カルシウム>④けい酸カルシウム増し保温≧⑤ロックウール増し保温>③パイロジェルXTE直巻き

○従来工法と増し保温工法の腐食速度を比較すると

・①けい酸カルシウムvs④けい酸カルシウム+パイロジェルXTE(増し保温)

=104.1 μm/y : 36.6 μm/y = 1 : 0.35 約1/3増し保温工法が炭素鋼腐食速度を遅延させる効果が確認された。

・②ロックウールvs⑤ロックウール+パイロジェルXTE(増し保温)

=302.2 : 36.1 = 1 : 0.12

約1/8増し保温工法が炭素鋼腐食速度を遅延させる効果が確認された。

本試験に於けるデータでは、パイロジェルXTEを直巻き、増し保温で使用すると炭素鋼腐食速度の大幅な遅延が確認された。

11. おわりに

地域によって気象条件、温度条件、飛来塩分量などに差異はある。本データが全国を網羅するとは言い切れないが、試験条件と酷似する地域が存在することも否定できない。

今回の各種保温構造を比較すると、エアロジェル保温材のパイロジェルXTEを使用した保温構造が腐食速度を遅延させる効果を有していると考えられる。

予防保全としてパイロジェルXTE増し保温工法、パイロジェルXTE直巻き工法は、CUI抑制の保温構造の一助になると、本試験で確証が得られた。今後、パイロジェルXTE増し保温工法、もしくは、パイロジェルXTE直巻き工法の標準仕様化を推奨する。

※「増し保温」は、ニチアス(株)の登録商標です。

※「パイロジェル」は、Aspen Aerogels, Incの製品で同社の商標です。

※本稿のデータは参考値であり、保証値ではありません。

〔参考文献〕

- ・第50回日本芳香族工業大会発表論文 『CUI対策・省エネ対策の保温構造』
- ・公益社団法人腐食防食学会 材料と環境 No.4 2018 Vol.67 腐食の電気化学測定法の応用『ACM型腐食センサ』
- ・第55回日本芳香族工業大会発表論文 『CUI抑制効果の保温構造』