

H1207-01
0385-9894/12/Y500/ 論文 /JCOPY

〔 解 説 〕

光ファイバAEを用いたCUI検査技術の開発

＜実機適用化に向けた実験・検討と実機適用結果＞

住友化学(株) 末次 秀彦・多田 豊和・戸田 勝彦
Hidehiko Suetsugu Toyokazu Tada Katsuhiko Toda

(株)レーザック 町島 祐一
Yuichi Machijima

1. はじめに

断熱材下腐食(Corrosion under Insulation、以下「CUI」)は当社のような化学プラントのみならず、石油精製プラント、発電所など様々なプラント設備で老朽化、経年化の代表的な事象として問題視されている。しかし、広大なプラント敷地に設置された膨大な設備機器、それらを接続するために張り巡らされた長距離の配管など、対象となる範囲が非常に広大なためにCUIの状況を網羅的に把握して適切なタイミングでメンテナンスすることは難しい。

このような中で配管についてはガイド波超音波法、リアルタイム放射線法、パルス渦流法等の非破壊検査技術が検討され、(一財)エンジニアリング協会が保温材下配管外面腐食(CUI)に関する維持管理ガイドラインとしてまとめられている。

当社では主に断熱された塔・槽・反応器などの静機器のCUI検出を対象として、2007年度から光ファイバAE法を用いたCUI検出技術の開発に取り組んでいる。実験室内で人口的にCUIを発生させて光ファイバAE法で腐食進展に伴って発生するAEが検出できることを確認するとともに、実機設備にも適用してCUIの有無によってAE発生状況に差があることが確認された⁽¹⁾。本稿では光ファイバAE法の現場機器適用性を向上させるための検討結果と実機検査への適用結果について報告する。

2. 現場機器適用性の向上化検討

2-1 FODセンサの設置個数低減

従来実験室で使用してきた光ファイバドップラーセンサ(Fiber Optical Doppler、以下「FOD」)は100kHz付近に受信感度のピークを持っていた。このFODセンサを用いて腐食進展に伴って発生するAEを検出可能な距離は約5mであった。光ファイバAE法を用いたCUI検査を現場で効率良く実施するためには、FODセンサの検知範囲を拡大し、機器へ設置するセンサ数を減少させることが望まれた。そこで、FODセンサの受信感度ピークとなる周波数を低周波化し、より伝播距離が長いAE信号を受信対象とすることにした。なお、腐食進展に伴って発生するAEの周波数帯域は数十kHz～数百kHzまで非常に広い周波数帯域を持っているため、FODセンサの受信ピークとなる周波数帯域を低周波化してもAE検出性は低下しないことは確認済みである。写真1に新たに開発したFODセンサと従来

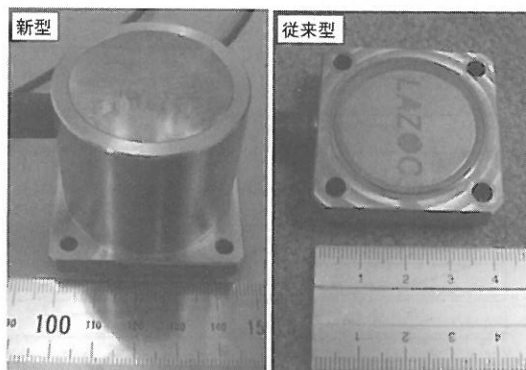
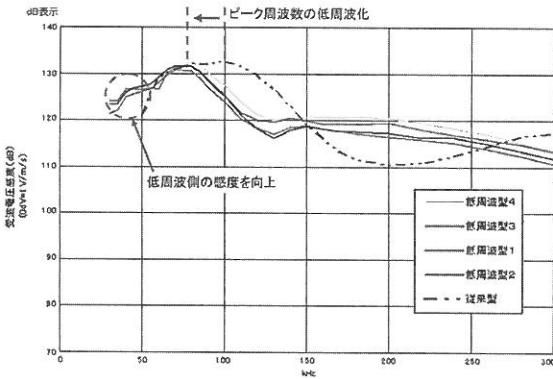
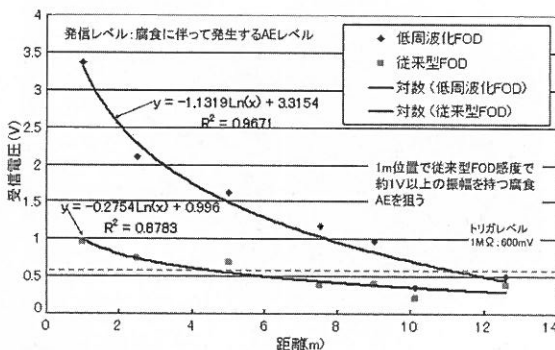


写真1 FODセンサの外観



第1図 新型と従来型のFODセンサの周波数帯域と受波感度の関係

型のFODセンサの外観を示す。センサ内の光ファイバの設置方法を変更しているため、従来型と比較してセンサの厚みが増している。第1図は新型と従来型のセンサの周波数帯域と受波感度の関係を示している。従来型に比べて受波感度がピークとなる周波数を100kHz付近から70kHz付近に下げ、かつ50kHz付近の感度を向上させている。更に100kHz付近の感度は低下したものの、150~200kHz付近の感度を向上させている。よって、結果的に周波数帯域における受波感度特性がよりフラットになっている。第2図は新型と従来型のFODセンサのAE検出性能を比較した結果を示している。各FODセンサと圧電素子タイプのAEセンサとの距離を変えてAEを発信し、距離によって変化する受信電圧を比較した。まず、近距離での受信感度が大幅に改善されている。これは先述の通り周波数特性がフラットになったため、より多くの周波



第2図 新旧FODセンサの受信性能比較結果

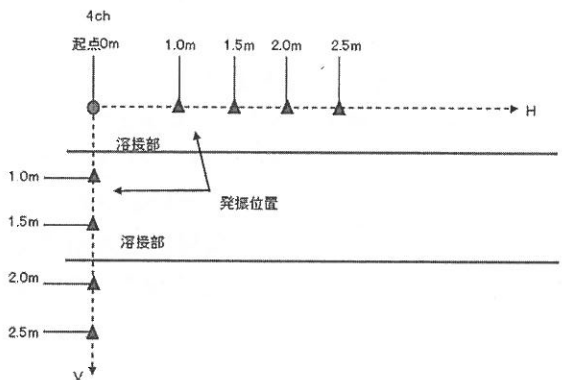
数成分のAEを受信した結果と思われる。伝播距離が長くなると高周波成分は減衰しやすいため、新型と旧型の感度差は減少する方向になるが、伝播距離によって減衰が少ない低周波数のAE成分を受信できる新型センサの受信電圧が高い。AE計測を行う際のトリガレベルを600mVとすれば、旧型センサでは5mまでしかAEを計測できないのに対して、新型では11mまで計測が可能となっている。このように新型センサを使用することで1個のFODセンサが検出可能な面積は旧型センサと比較して約4倍になり、FODセンサの設置個数を減少させることが可能になった。

2-2 形状不連続部の影響調査

機器には突合せ溶接部やマンホール、ノズルなどの形状不連続部が存在する。腐食によって発生したAEがFODセンサで受信されるまでの伝播過程において、このような形状不連続部を通過すると、AEは減衰するものと考えられる。実機検査を実施するにあたり、FODセンサのカバー範囲を策定する上で、こうした形状不連続部の影響を考慮する必要がある。

(1) 突合せ溶接部の影響

突合せ溶接部の影響について検討した。第3図は実験の方法を説明した図である。実験には写真2に示したような円筒平底タンクの胴体部を用いた。起点部にFODセンサを設置した状態で、起点から垂直方向と水平方向に1.0、1.5、2.0、2.5mそれぞれの位置からピエゾ型AEセン



第3図 突合せ溶接部通過に伴うAE減衰量の検討方法

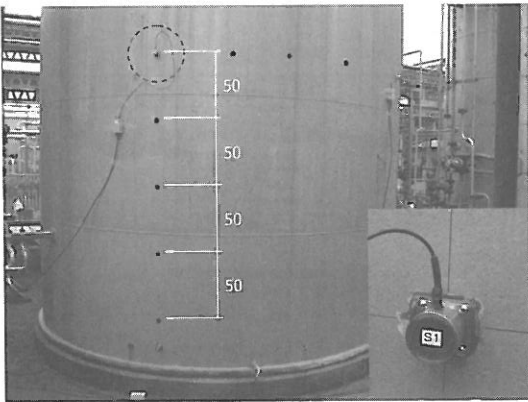


写真2 溶接部の影響調査の実験状況

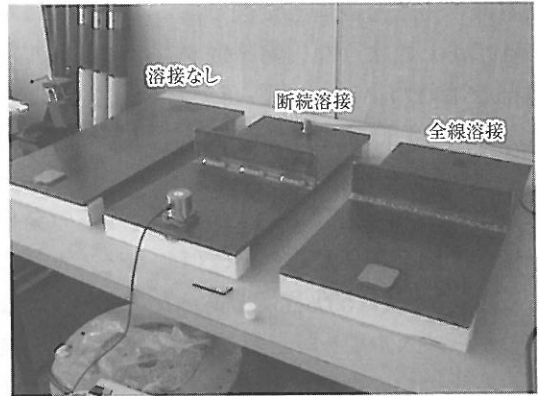


写真3 すみ肉溶接部の影響調査の状況

サを用いてAEを発信し、起点部のFODセンサでAE波形を受信する。なお、垂直方向には突き合わせ溶接部が計2ヶ所存在する。実験結果を第1表に示した。溶接線1ヶ所を通過した時のAEの減衰は平均で79%、溶接線2ヶ所を通過した時のAEの減衰は平均で70%であった。少し乱暴ではあるが、現場計測時の指標を得るため、溶接線1ヶ所につき15%AE振幅が減衰すると決めた。

第1表 溶接部の通過によるAEの減衰評価結果

距離 [m]	受信電圧 [V]		溶接線 通過数	溶接線 なし/あり	
	溶接線 あり	溶接線 なし		[%]	平均 [%]
1.0	2.46	1.84	1	75	79
1.5	1.28	1.06	1	83	
2.0	1.07	0.80	2	75	70
2.5	0.88	0.57	2	65	

(2) すみ肉溶接部の影響

塔などに代表されるような円柱形の機器では、ある高さレベルごとに保温材のずれを防止するためのリングがすみ肉溶接で取り付けられている。このようなすみ肉溶接部をAEが伝播する場合のAE減衰量について検討した。写真3は実験の状況を示したものである。50mmピッチの断続すみ肉溶接と連続ですみ肉溶接したものを準備した。試験結果を第2表に示した。すみ肉溶接のタイプによらず、すみ肉溶接部の

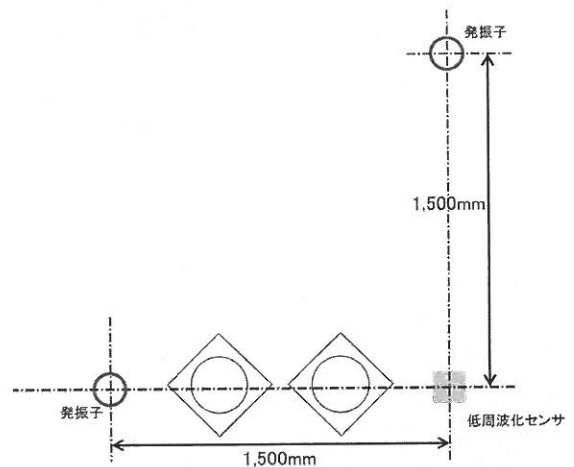
第2表 すみ肉溶接部の通過によるAEの減衰評価結果

溶接種類	受信最大電圧				平均
	0.3V 発信		0.6V 発信		
溶接なし	2.88	比 [%]	5.03	比 [%]	
50mmピッチ溶接	2.61	91	4.45	89	90
全線溶接	2.55	89	4.39	87	88

通過により約10%の減衰が認められる。このようなことからすみ肉溶接部の通過により10%AE信号が減衰すると決めた。

(3) ノズル等の影響

AEの伝播経路にノズルなどの取り付け部がある場合、AEはノズル等を迂回して伝播する。この際のAE減衰量について検討した。第4図



第4図 ノズルなどの接合部通過に伴うAE減衰量の検討方法

は実験の方法を説明した図である。実験には写真4に示したような円筒平底タンクのノズル設置部を用いた。ピエゾ型AEセンサを用いてAEを発信し、1,500mm離れた位置に設置したFODセンサでAEを受信してノズル有無の比較を行った。実験結果を第3表に示した。AEの発信強度は強弱2条件としたが、何れもノズル部によるAEの減衰は50%程度であった。このことからノズル1ヶ所当たり50%AE振幅が減衰すると決めた。なお、今回の実験部もノズルは2ヶ所存在するが、近接しているのでAEが伝播できないような障害物としては1ヶ所としてカウントする。

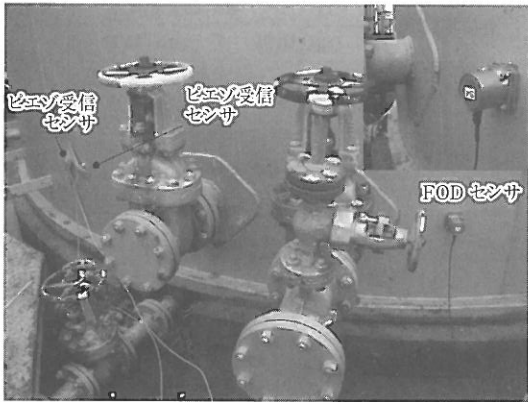


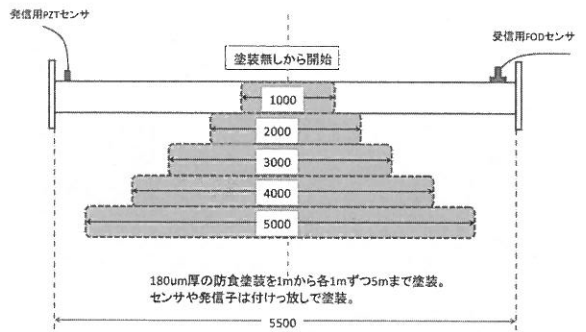
写真4 ノズル接合部の影響調査の状況

第3表 ノズル接合部の存在によるAEの減衰評価結果

ノズル有無	12V 発信		30V 発信		平均
	2.20	比 [%]	5.23	比 [%]	
無し	2.20	比 [%]	5.23	比 [%]	44
有り	0.94	43	2.37	45	

2-3 塗膜の影響

ここまで溶接部やノズル設置部などの影響について述べたが、炭素鋼製機器の防食には不可欠な塗装の影響について検討した。検討の方法は第5図に示したように6BのSTPG配管の軸方向に1mずつ塗装をしながら、それぞれのタイミングでAEの受発信を行ってAEの塗装による減衰を評価した。測定結果を第4表に示した。AEの発信強度によっても若干差はあるが、平均し



第5図 塗装によるAE減衰量の検討方法

第4表 塗膜によるAEの減衰評価結果

塗装長さ	S波最大受波電圧 [V]		塗装による減衰量 [%]	
	弱発信	強発信	弱発信	強発信
0	0.07	9.79	100	100
1	0.07	9.75	96	100
2	0.06	9.68	88	99
3	0.06	9.36	92	97
4	0.05	8.71	87	93
5	0.05	8.26	98	95
平均			93	97
総平均			95	

て1m塗装部を伝播することで5%AEが減衰すると決めた。

2-4 位置評定精度の確認

AEをCUI計測に用いる強みとして、AEの発信源を評定することで腐食位置が推定できることがあげられる。腐食位置を推定できれば、腐食部をピンポイントで詳細に調査することが可能となる。また、部分的な断熱工事で済むため足場設置も最小限となり検査や腐食部の処置を行うための付帯工事コストのミニマム化が可能となる。

AEによる腐食位置の評定は地震の震源評定と基本的に同じである。複数のFODセンサを設置して腐食から発せられたAEをそれぞれのセンサで計測し、各センサ間の受信時間差とAE伝播速度から位置評定を行う。写真5に位置評定精度の実験状況を示した。円筒型タンクの側板に1辺が3mの正方形を模り四隅にFODセンサを設置した。その正方形の中で位置を変えてピ

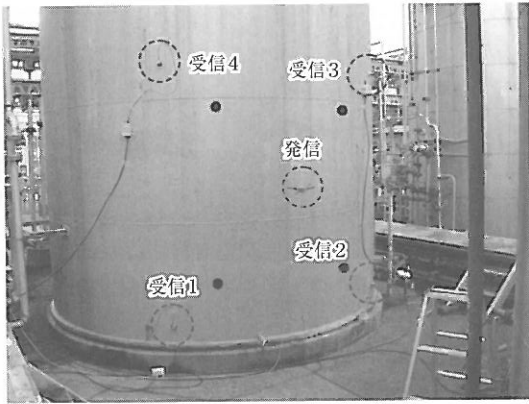
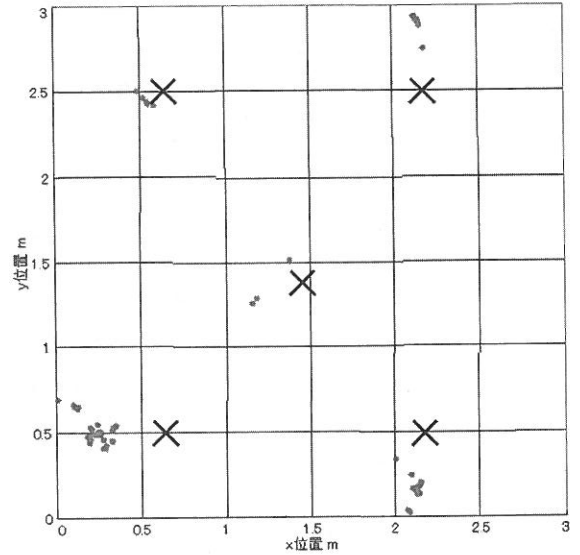


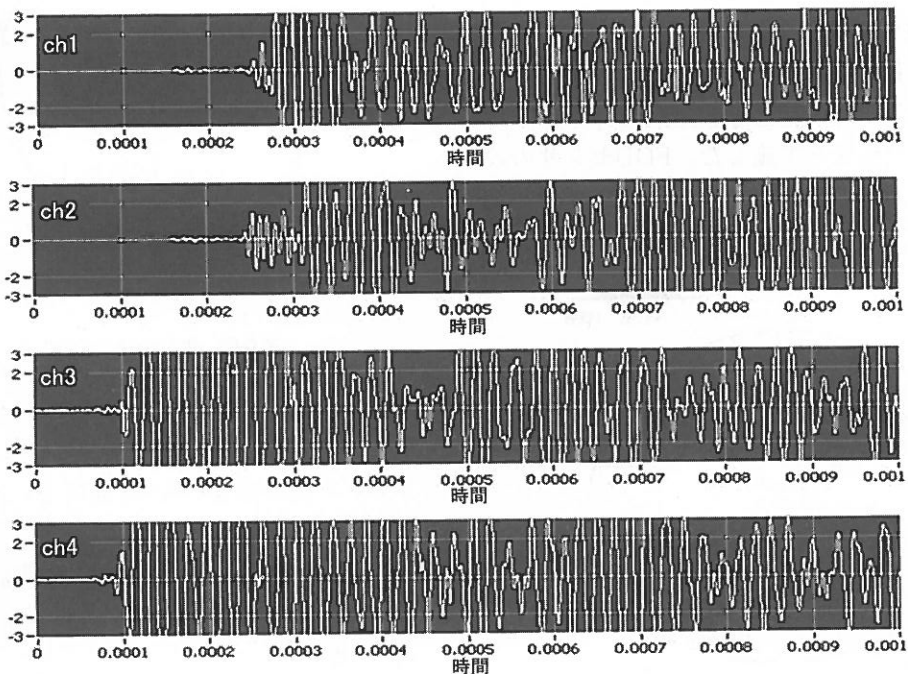
写真5 位置評定の精度確認のための実験実施状況

エゾ型センサによりAEを発信して位置評定の精度を確認した。第6図は4つのFODセンサのAE受信状況の一例である。ch1とch2、ch3とch4がそれぞれ同じタイミングでAEを受信し、ch3、ch4の方がAE受信までの時間が短い。この結果からAEの発信源はch1とch2のちょうど中間とch3とch4のちょうど中間を結ぶ直線上で、中央よりch3、ch4に近い位置であることがわかる。第7図はこの実験の結果を示したもの



第7図 位置評定精度検証結果

である。×印がAEの発信源、点がAE発信源の評定結果を示している。音速の設定や溶接部の影響などにより評定位置が偏ってずれている部位も見られるが、概ね50cmの範囲内で評定ができています。



第6図 位置評定実施時の代表的なAE受信状況

3. 現場機器への適用

これまで光ファイバAE法の現場機器への適用性を向上させるための検討結果について述べてきた。これらの検討結果を用いて現場の塔、槽、貯槽などの機器に適用している。本章ではその中の一事例について紹介する。

3-1 適用機器

光ファイバAE法を適用した機器は保冷断熱した球形タンクの本体と敷設配管ならびに耐火材で被覆した脚柱である。いずれも凝縮水や雨水の浸入による腐食の発生が懸念されている。本機器の仕様を第5表に示した。

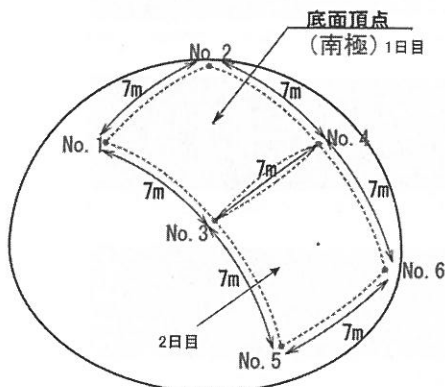
第5表 検査実施機器の概略仕様

容積	3,003m ³
設計圧力	7kg/cm ² -G (0.686MPa-G)
内径	17,900mm
材質	60kg/mm ² 級高張力鋼
板厚	16mm、18mm、19mm
脚柱	12本
敷設配管	8B

3-2 検査範囲

(1) 本体

今回の検査では工期と保有するFODセンサ数の関係で、第8図に示すように4個のFODセンサを用いて7×7mの範囲を2回(2日間)に分けてCUIの有無検査を実施した。FODセンサの設置については、写真6に示したようにタンク本体にベースプレート(SUS304製)をエポキシ系



第8図 球形タンクのAE検査実施範囲

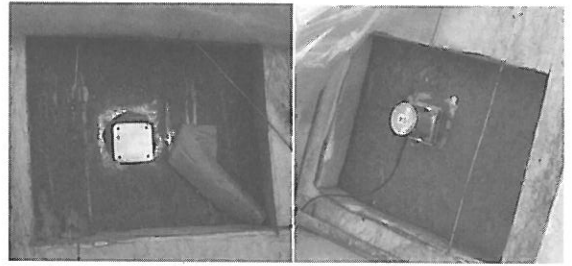
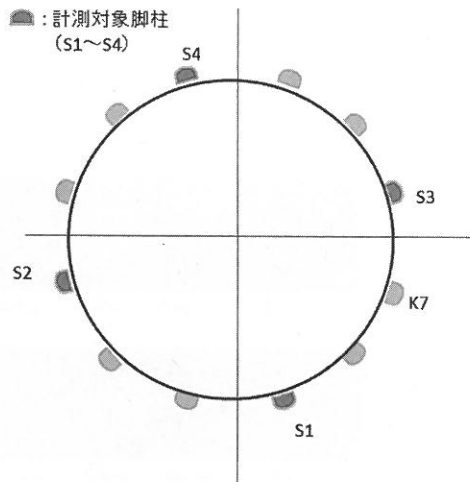


写真6 機器へのFODセンサの取り付け状態

の接着剤で取り付け、その後、ベースプレートとFODセンサとの間にグリス(音響カップリング材)を塗布してボルトで締め付けて固定している。

(2) 脚柱

第9図に示したように12本ある脚柱の内4本について検査を実施した。脚柱へのFODセンサの取り付けは本体と同様にベースプレートを介して取り付けた(写真7)。



第9図 脚柱の検査実施位置

(3) 敷設配管

タンク敷設配管のAE計測は第10図に示したように3個のセンサを使って垂直立ち上がり管と斜めに設置された管に分割して実施した。

3-3 検査結果

(1) 本体

AE測定結果を第6表および第11図に示した。

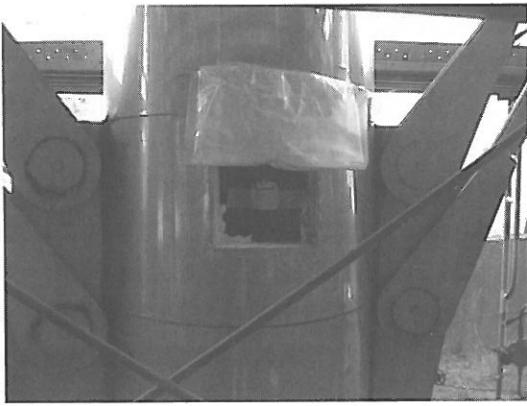
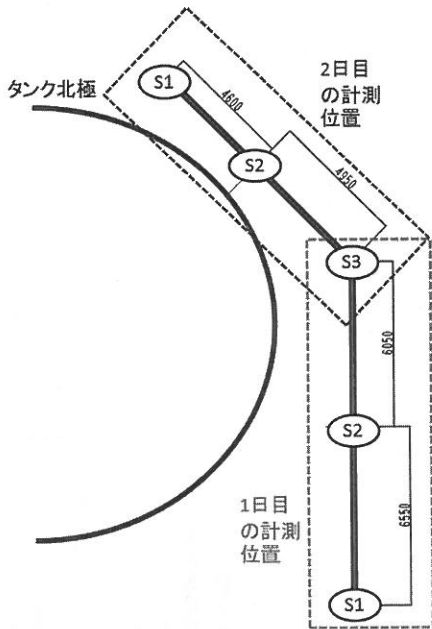
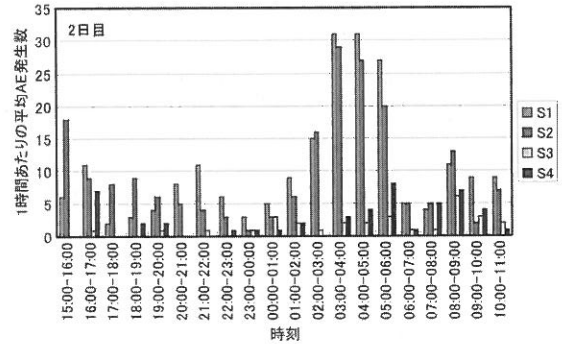
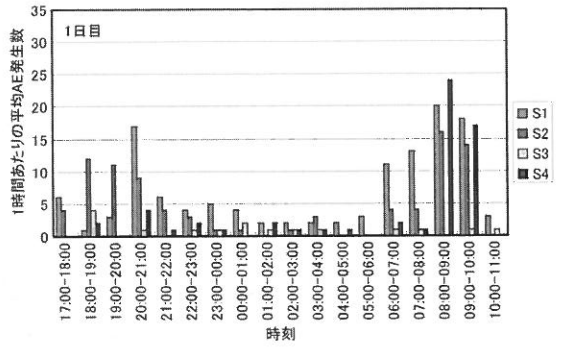


写真7 脚柱へのFODセンサの取り付け状況



第10図 敷設配管のAE検査範囲とFODセンサの設置位置

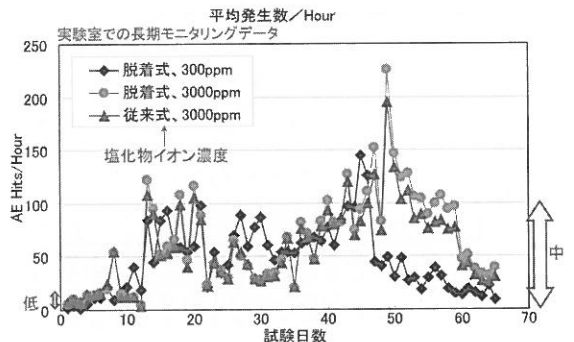


第11図 タンク本体のAE計測結果

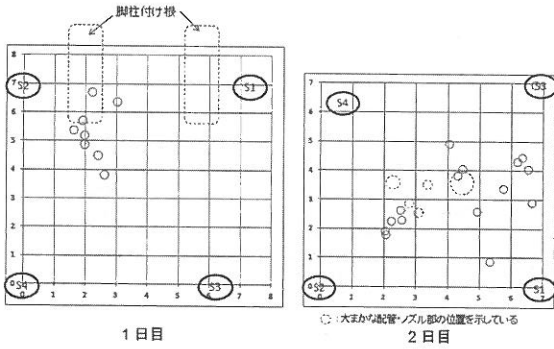
全てのFODセンサで腐食AEが検出された。総AE発生数は16~210個であり、1時間あたりの平均AE発生数に換算すると1~11個であった。1時間あたりの平均AE発生数から腐食の活性度を評価した結果、いずれも活性度の低い腐食と推定された。腐食の活性度は1時間あたりの平均AE発生数が100個未満で中、20個未満で低として評価した。これは塩化物イオンを加えた水を炭素鋼試験片に滴下させて腐食させた時の腐食の進展状況とAE発生数との関係(第12図)をもとに暫定的に評価した結果である。第13図

第6表 タンク本体のAE計測結果

計測日 (計測時間)	測定位置	総AE発生数	1時間当たりの平均AE発生数	腐食の有無
1日目 (18時間)	S1	122	7	有
	S2	87	5	有
	S3	16	1	有
	S4	59	3	有
2日目 (20時間)	S1	210	11	有
	S2	196	10	有
	S3	30	2	有
	S4	49	2	有



第12図 実験室における腐食とAE検出数の関係



第13図 代表的な腐食AEの位置評定結果

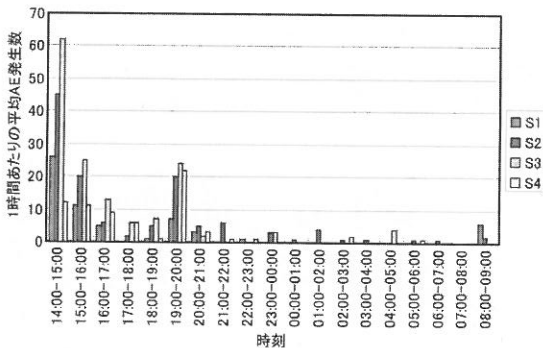
はAEの発生位置を評定した結果である。今回の測定ではAEの発生数が少ないため、腐食位置として位置評定されたポイントは非常に少なかった。

(2) 脚柱

脚柱のAE計測結果を第7表および第14図に示した。総AE発生数は60~146個、1時間あたりの平均AE発生数は3~8個であった。脚注についても腐食は発生しているものの腐食程度は軽微と評価した。なお、脚柱についてはFODセンサを1つしか設置していないため位置評定は実施できない。

第7表 脚柱のAE計測結果

計測時間	測定位置	総AE発生数	1時間当たりの平均AE発生数	腐食の有無
18時間	S1	60	3	有
	S2	123	6	有
	S3	146	8	有
	S4	69	4	有



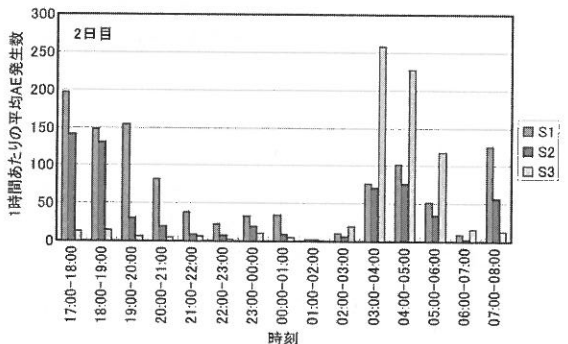
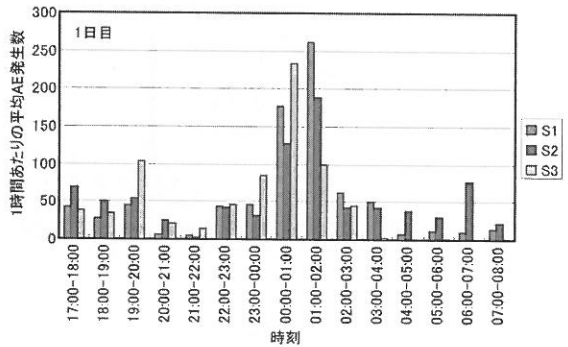
第14図 脚柱のAE計測結果

(3) 敷設配管

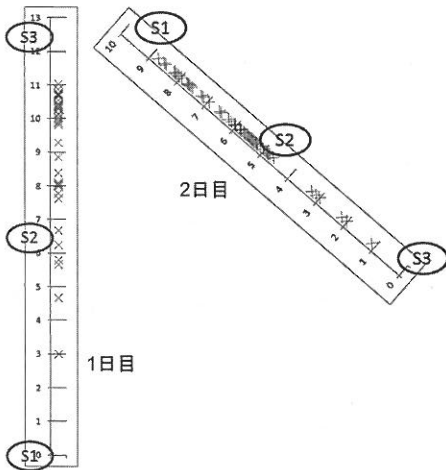
敷設配管のAE計測結果を第8表および第15図に示した。総AE発生数は618~1,086個、1時間あたりの平均AE発生数は41~72個であった。AEの発生ピークでみれば1時間あたり250個余りのAEが発生している。また、第16図にはAE発生位置を評定した結果を示したが、2日目に計測した斜め配管のS2位置にAEの発生源が集中している。この結果から敷設配管では腐食が発生し、その腐食程度は本体や脚柱と比較して大きく、特に斜め配管のS2位置に集中していると評価した。

第8表 敷設配管のAE計測結果

計測日 (計測時間)	位置	総AE発生数 (15時間)	1時間当たりの平均AE発生数	腐食の有無
1日目 (15時間)	S1	812	54	有
	S2	846	56	有
	S3	726	48	有
2日目 (15時間)	S1	1,086	72	有
	S2	618	41	有
	S3	715	48	有



第15図 敷設配管のAE計測結果



第16図 代表的な腐食AEの位置評定結果

3-4 確認検査結果との対応

タンク本体、脚柱、敷設配管についてAE検査を実施した部位あるいはその一部の保冷材、耐火材を剥がして腐食状況を調査した。その代表的な部位を写真8～写真10に示した。タンク本体の腐食状況は軽微な腐食痕は認められるが、塗装の劣化も少なく腐食状況は軽微でありAEの発生数と対応していた。脚柱については塗装が劣化し、その表面には錆びこぶが目立つ状況であったが、腐食程度はやはり大きくなかった。敷設配管については、全体的に塗装が劣化して錆びこぶの発生が多く認められる。特にAEの発生位置の評定でAEの発生が集中していた部位(配管サポート部近傍)では顕著な錆びこぶ



写真8 タンク本体の断熱材解体後の腐食状況



写真9 脚柱の耐火材除去後の腐食状況



写真10 敷設配管の保冷材除去後の腐食状況

ぶの発生と積層が認められた。今回、光ファイバAE検査を実施し、代表部の腐食状況を検証した結果、腐食の状況(錆びの発生状況)とAEの発生数との間には相対的に関連性が認められた。

4. まとめ

4-1 現場検査適用性の向上

- 新型センサ開発によってAE検出範囲を拡大することに成功した。
- 溶接部、ノズル等取り付け、塗膜によるAE減衰の影響度を決定し、センサの最適設置に活かした。
- 腐食発生位置推定技術を確立した。

4-2 現場適用と検証

- 活性な腐食の有無を評価できる。

- 複数のFODセンサを配置すれば活性な腐食の発生位置を評定できる。
- AEの発生数と腐食状況の間に相関性が認められる。
- AEの短期モニタリングは瞬間的な腐食の活性度の評価であり、腐食深さや減肉量を推定することはできない。

5. おわりに：今後の課題

光ファイバAE法を実機に適用し適用性の評価をするるとともに様々な知見を得てきたが、今後も実機への適用を進めてデータ採取を継続するとともに、平行して腐食とAEとの関連性について実験室データの拡充をはかり、現場AEデータの裏づけに利用していきたい。機器保全の面からは腐食の発生有無や位置評定だけでなく、腐食の活性度や腐食程度の評価を可能とし、断熱材を解体しての検査・補修の必要性を判断できる技術へ展開していくことが望まれており、今後の大きな課題といえる。

<参考文献>

- (1) 多田豊和・末次秀彦・森 久和・長 秀雄・町島祐一：配管技術, Vol.53, No.2(2011.2), pp.27-35

【筆者紹介】

末次秀彦

住友化学(株) 生産技術センター
材料設備技術グループ 主席研究員
〒792-8521 愛媛県新居浜市惣開町5-1
TEL：0897-37-1066 FAX：0897-37-3153
E-Mail：suetsugu@sumitomo-chem.co.jp

多田豊和

住友化学(株) 生産技術センター
材料設備技術グループ 研究員
〒792-8521 愛媛県新居浜市惣開町5-1
TEL：0897-37-1066 FAX：0897-37-3153
E-Mail：tadat2@sumitomo-chem.co.jp

戸田勝彦

住友化学(株) 千葉工場 工務部 設備チーム
主任技師
〒299-0195 千葉県市原市姉崎海岸5-1
TEL：0436-61-1329(代) FAX：0436-61-2394
E-Mail：todak2@sumitomo-chem.co.jp

町島祐一

(株)レーザーック 代表取締役 社長
〒113-0033 東京都文京区本郷3-40-9 石狩ビル3F
TEL：03-3816-3864 FAX：03-3816-3867
E-Mail：machijima@lazoc.jp