

光ファイバーAE（アコースティックエミッション）を使った保温材下腐食の検査技術

住友化学(株) 生産技術センター
多田 豊和
末次 秀彦
森 久和

Inspection Technique for CUI (Corrosion under Insulation) by Using Fiber Optical AE Sensor

Sumitomo Chemical Co., Ltd.
Process & Production Technology Center
Toyokazu TADA
Hidehiko SUETSUGU
Hisakazu MORI

Corrosion under insulation (CUI) is one of the degradation phenomena that have become a serious problem in recent years especially in chemical plants that have been operating for a long time. Development of a CUI inspection technique which doesn't require the removal of insulation and which is applicable to explosion-proof petrochemical plants is strongly needed. So we focused attention on optical fiber Doppler sensors which already have the explosion-proof characteristics, and we tried to develop a new CUI inspection technique using them. The development of this new inspection technique is explained.

はじめに

1. 保温材下腐食に関する国内外の対応状況

欧米先進国や国内の化学プラント、石油精製プラント、発電所等において保温材下腐食（Corrosion under Insulation、以下「CUI」）が大きくクローズアップされだしたのは1980年代からである。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100℃以下の低温域でも使用されだしたことによるようである。国内では1988年に高圧ガス保安協会（以下、KHK）より外面腐食に関する報告書が提出され、2007年から2011年にかけて、財団法人エンジニアリング振興協会（以下、エン振協）で非破壊検査技術とモニタリング技術の適用についての検討が行われている。2007年度のエン振協報告によれば、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開発され現場適用されてきたが完全なものではなく、そのため、優先順位を定めて保温材を全長、全面剥がしての目視検査が推奨されている¹⁾。

2. 当社での対応状況

2007年度以降の生産技術センターの対応状況を以下に示す。2007年度には、Fig. 1に示すようなモックアップ配管（模擬配管）を作製して実験室にて光ファイバーアコースティックエミッション（Acoustic Emission、



Fig. 1 Photo of the mock-up pipe

以下「AE」) センサによる錆びこぶ検出の適用化検討を行い、2008年度以降では、現場適用も含めて環境ノイズの分別技術の開発に取り組んでいる。2008年度にはさらにモックアップ配管を用いて防食対応保温材構造(外装板構造)の検討、そして、60℃~100℃の温度範囲においての最適な下地塗装材の選定検討を行ってきた。2009年度についても引き続きこれらの検討を行ってきたところであるが、ここでは光ファイバーAEセンサを用いた検査方法の開発状況について述べる。

光ファイバーAE法を用いたCUI検査技術の開発²⁾

炭素鋼製の機器・配管におけるCUIは、長年稼働している化学プラントにおいて近年特に深刻化してきている劣化現象の一つである。特に屋外配管については高所のパイプラック上への設置など、外面からの目視点検が難しいのに加え、総距離が長いために、保温材を取り外しての目視検査よりも有効なCUIの検査手法が確立されていない。また、これらの検査費用のうち70~80%が足場と保温材解体に占められていることも大きな問題の一つである。したがって、保温材の取り外し作業を必要とせず、かつ防爆要求の多いプラント設備に対応した配管のCUI検査技術の開発が強く求められている。我々は、光ファイバードップラー(Fiber Optical Doppler、以下「FOD」)センサが元々防爆性能を有していることに着目し、新しいCUI検査技術の開発を試みた。

1. 従来の配管でのCUI検査手法の比較と課題

これまで配管に適用されてきた各種検査手法の特徴をTable 1に示す。検査精度の良い手法では、短距離の検査しかできず、長距離の検査(5m程度)が可能

Table 1 Comparison of the CUI inspection technique for pipes

Inspection method	Ultrasound Testing (UT)	Eddy Current Testing (ECT)	Radio graphic Testing (RT)
	Ultrasonic guided waves	Pulsed ECT	Real-Time RT
Influence of internal fluid	YES	NO	YES
Inspection of long distance	Applicable	Not Applicable	Not Applicable
Removal of insulations	Need	No need (Less than 80mm in thickness)	No need
Corrosion can be detected	localized corrosion (10% depth level of sectional area)	General corrosion like concave	localized corrosion (φ2mm through wall hole)
Inspection accuracy	Not good	Not good	Good

な手法では検査精度が悪い。そのため、先述したように断熱材を取り外しての検査を多くの事業所では行っているが、多額の費用をかけて全面解体検査を行ったとしても腐食が発見されるのは、1000系統の内2~3系統程度であり、非常に効率が悪いことが問題とされている。

2. FODを用いたAEモニタリングの原理³⁾

配管CUIの有効な検査手法を確立するため、腐食とAEの関係に注目した。Fig. 2にAEの発生メカニズムのイメージ図を示す。まず活性な腐食の進行により、局所的に腐食生成物(錆びこぶ)の剥離や割れが発生する。その際に内部に蓄えていたひずみエネルギーが微小な弾性波として放出される。この弾性波は可聴音から500kHzの比較的low周波数であるため、広い範囲に伝播することが知られている。したがって、AEセンサで、腐食剥離や割れに起因する弾性波をAEとして検知することによって、腐食の存在を検知することができる。すなわちAEの観測された配管のみ保温材の解体・目視検査を行うことで、CUI検査の効率を向上することができると考えられる。

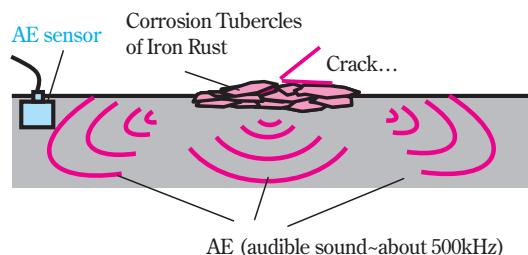


Fig. 2 Image of AE technique

AE法は腐食のモニタリングに優れており、タンクの底板の腐食損傷評価などには一部で既に適用されているが、実際には様々な問題がある。AE法にはこれまでピエゾ型のセンサが用いられてきたが、①風、振動、騒音、内部流体の擦過音などの影響を受けやすい、②センサの感度を高くしようとすると、測定範囲が狭帯域となるため、ノイズの周波数帯域と重なったときに分別できない、③ケーブルの耐電磁ノイズ性が悪いため長距離の使用ができない、④非防爆性である、⑤適用温度範囲が限られるなどといった問題点がある。そこでこれらの問題を解決するために、近年開発された光ファイバーAE技術に着目した。

光ファイバーは通信システムのイメージが強いが、光ファイバーのドップラー効果を利用することによって、センサとして用いることができる。今、光ファイバー内に光源から音速 C 、周波数 f_0 の光波が入射されたときに、光ファイバーが速度 v で長さ L 伸びたとする

(Fig. 3参照)。このときドップラー効果により、周波数 f_0 が f_1 に変化すると、変化後の周波数 f_1 はドップラー効果の公式により、Eq. 1のようにあらわすことができる。

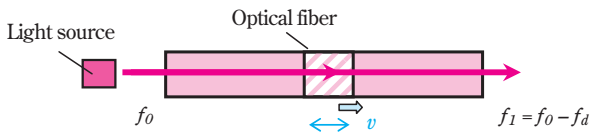


Fig. 3 Model of Doppler effect of optical fiber

$$f_1 = \frac{C - v}{C} f_0 = f_0 - \frac{v}{C} \cdot f_0 \quad (\text{Eq. 1})$$

したがって、変化後の周波数 f_1 を、入射前の周波数 f_0 から f_d 分変調したとして考えると、 f_d はEq. 2となる。

$$f_d = f_0 \cdot \frac{v}{C} \quad (\text{Eq. 2})$$

これとEq. 3に示した波の公式により、 f_d はEq. 4のように表すことができる。

$$C = f_0 \cdot \lambda \quad (\text{Eq. 3})$$

$$f_d = f_0 \cdot \frac{v}{C} = \frac{f_0}{C} \cdot v = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{dL}{dt} \quad (\text{Eq. 4})$$

Eq. 4は、光ファイバーの伸縮速度を光波の周波数変調として検出することができることを示している。すなわち、光ファイバーの周波数変調 f_d を読み取るこ

とによって、光ファイバーに加わった、ひずみ（弾性波や応力変化等）を検知することが可能となる。このような光ファイバーが伸縮した際のドップラー効果を利用したセンサとしてFODセンサが開発されている (Fig. 4参照)。このセンサは、感度を高め、かつ全方位からの受信を可能にするため、光ファイバーをコイル状に巻いたもので、ファイバーの伸縮速度に比例した出力が得られること、1Hz~1MHzと受信帯域が広帯域であること、-200℃から250℃までと広い温度範囲を持つことなどが特徴として挙げられる。また、FODセンサの利点については①高絶縁性である、②耐電磁ノイズ性が高い、③防爆性で電気火花が発生しない、④長距離測定が可能、⑤広い使用環境を持つ、などが挙げられる。したがって、FODセンサを用いることで、上述した従来のピエゾ型AEセンサの欠点②~⑤については原理的に解決することができる。

Fig. 5に配管CUIの光ファイバーAEモニタリングシステムのイメージ図を示す。まず計測回路のレーザー

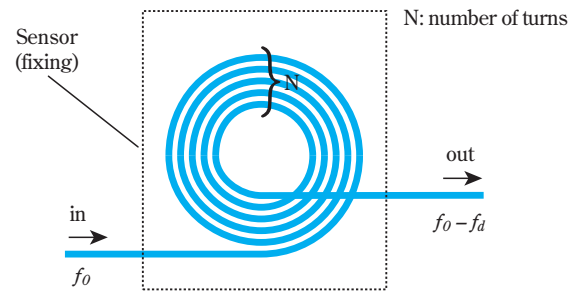


Fig. 4 Principle of FOD sensor

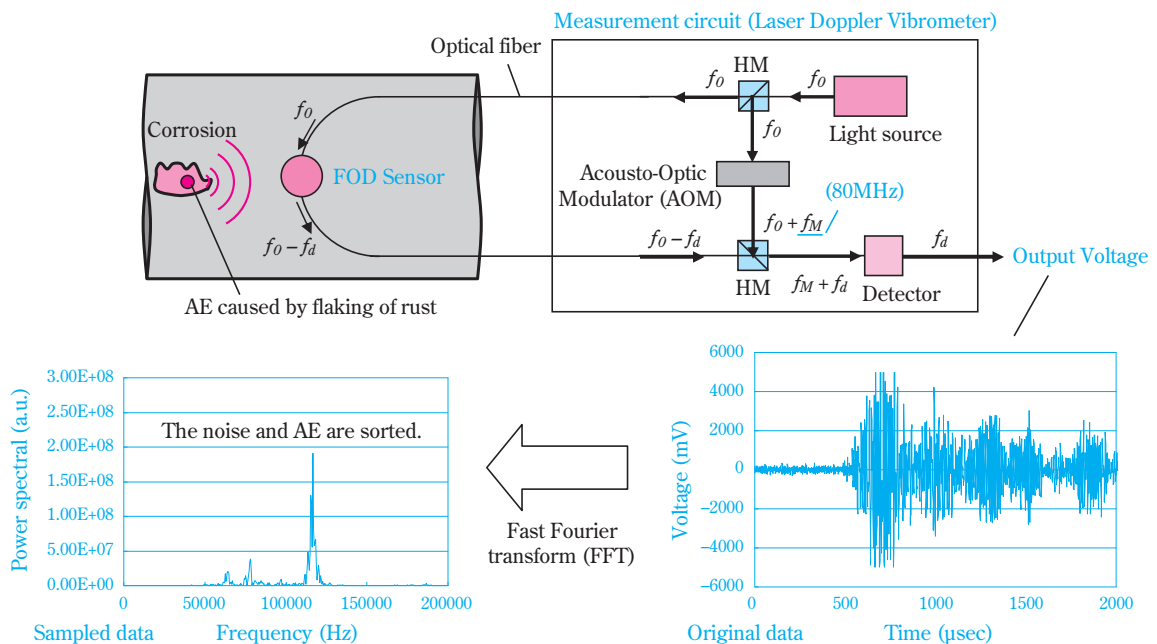


Fig. 5 Image of optical fiber of CUI

ドップラー振動計の光源から周波数 f_0 の光波が入射される。FODセンサに入射された光波は腐食剥離や割れなどに起因して生じるAEを受信して周波数が $f_0 - f_a$ に変調する。一方、計測回路ではヘテロダイン干渉法を用いて周波数変調量を検出する。具体的にはAOM（周波数変調器）により周波数 f_M （80MHz）の基準光を加え、 $f_0 + f_M$ に変調される。そして、センサ回路からのレーザー光と計測回路からのレーザー光の周波数の差 $f_M + f_a$ が導かれ、検知器で f_a が検出され、FV変換器によって電圧 V に変換されて出力される。このとき得られた原波形データに周波数解析（FFT）を用いて、横軸が周波数、縦軸がスペクトルパワーとなる抽出データに変換する。このような波形解析も、ノイズと腐食起因のAEを分別する技術として重要である。

3. CUI検査検討のためのモックアップ配管

これまで光ファイバーAEは地下貯槽掘削に伴う岩盤のゆるみ領域の評価などでの実績はあるが、CUIの

評価に用いられた実績はない。そこで、このような光ファイバーAEによるCUI検査技術の開発が可能であるかを検討するために、Fig. 6に示すようなモックアップ配管を作製した。5mの炭素鋼配管に保温材をとりつけ、配管の内部には、加熱装置によって加熱されたシリコン油を循環させている。またCUIを効率よく発生させるために、ちょうど濡れ乾きが生じる程度に滴下量を微調整した純水と食塩、さらにシリコン油による60~70℃の加熱によって、人工的に腐食を促進させる。FODセンサをこのモックアップ配管の任意の位置に設置して、この腐食部位からのAEに関するデータを収集した。

今回の検討には、65mの光ファイバーを積層のコイル状に積み上げた、市販の積層型のFODセンサを用いた（Fig. 7参照）。このセンサは積層型に光ファイバーを設置することによって、感度が非常に高くなっていることが特徴である。広帯域であるにもかかわらず、狭帯域である従来のピエゾ型AEセンサと同等、もしくはそれ以上の受信感度を持っている。

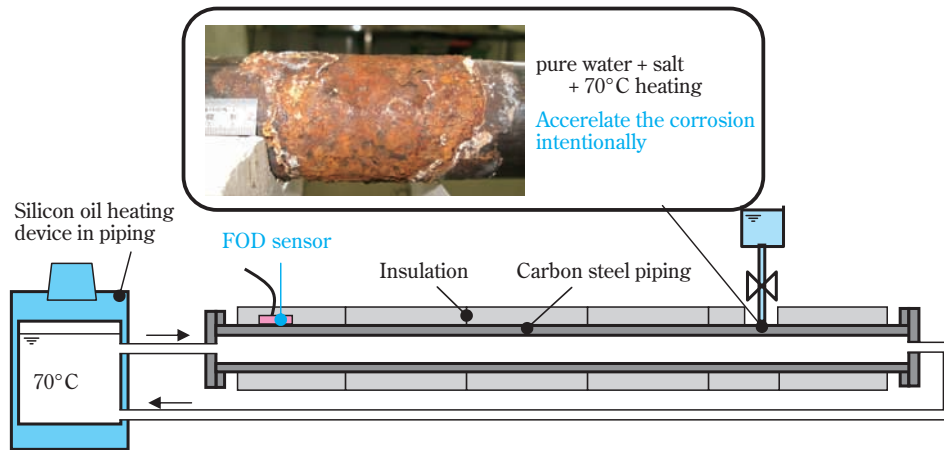


Fig. 6 Mock-up piping for CUI inspection investigation

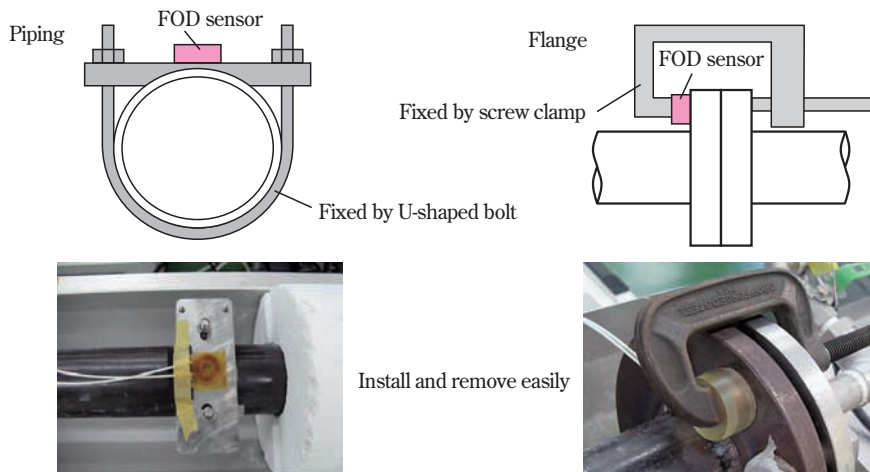


Fig. 7 FOD sensor installation

積層型FODセンサは配管に設置するときにはU字ボルトで固定し、フランジに設置するときにはクランプで固定する。いずれも脱着が非常に簡単であり、またピエゾ型AEセンサと同様、市販の接触媒質を介して送受信ができる。

4. モックアップ配管での測定結果⁴⁾

(1) 腐食初期段階でのAE検出検討結果

2007年11月に腐食初期段階でのAE検出検討に関する実験を行った。この時点での配管の腐食状況をFig. 8に示す。まだ錆びこぶは発生しておらず、白く見えているのは再結晶した塩である。FODセンサは腐食部位から300mmの位置に設置した。AEの検出結果をFig. 9に示す。棒グラフが一時間あたりのAE検出数、折れ線グラフが累積のAE検出数を示している。

このように腐食初期の段階でAEが計測可能であることを実証した。また、グラフからわかるように純水と塩の滴下を開始し、かつ昇温をした後にAEは急激に増加している。また、ある程度時間がたつとAEは収束していき、また油温を下げるとAEが増加している。このように錆びに濡れ乾きや温度変化を加えるとAEの検出数が増加するのが大きな特徴である。

また今回収録したAE波形は、Fig. 10に示すように、



Fig. 8 Corrosion of piping (1st monitor: 11/2007)

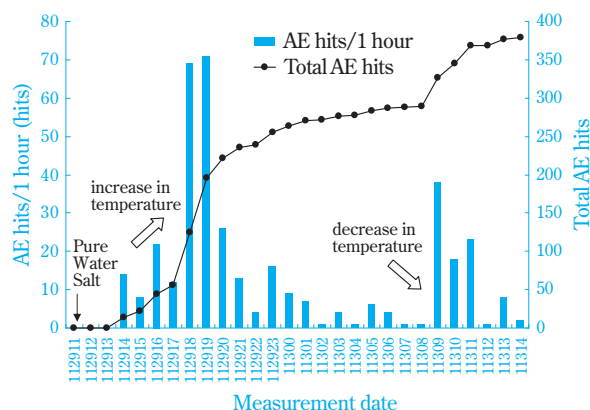


Fig. 9 AE hits by initial corrosion

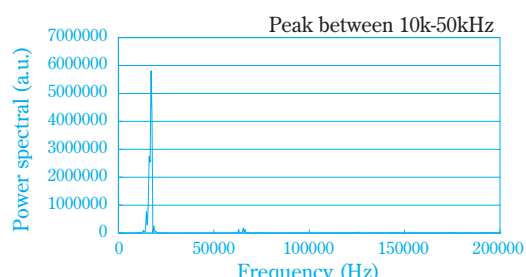
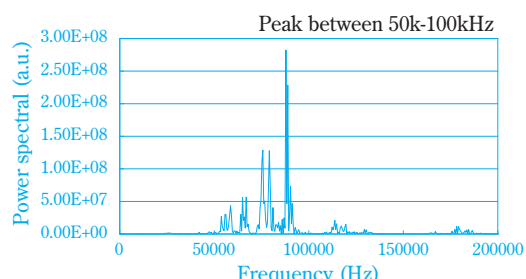
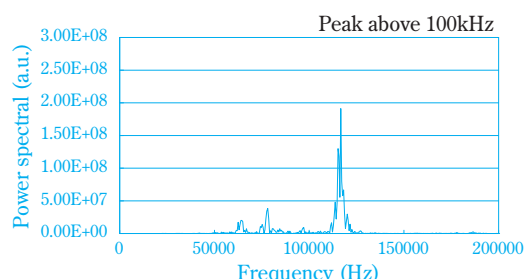
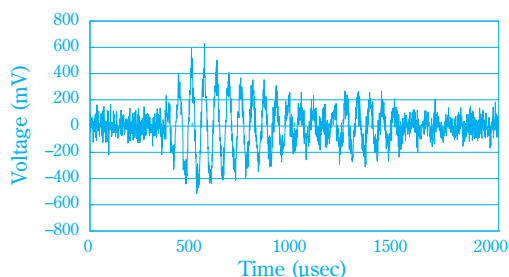
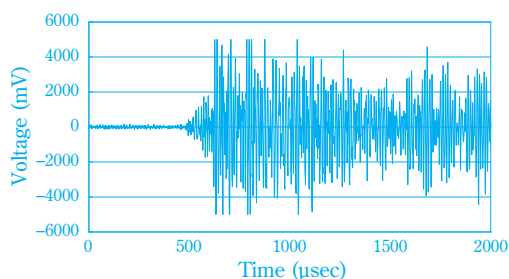
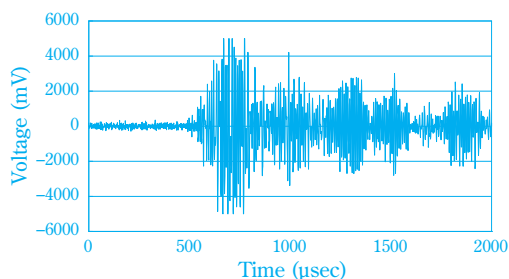


Fig. 10 Data of original AE and Frequency spectrum pattern

周波数が100kHz超のもの、50k~100kHzのもの、10k~50kHzのものという三つのパターンに分類された。これは光ファイバーAEが広帯域の受信が可能であるがゆえの結果といえる。実機の計測ではこれらの三つのパターンの周波数のうち、測定ノイズと重ならない周波数帯域のAEを選択的に受信することが重要となる。またAEは低周波ほど遠くに伝播するが、測定ノイズは低周波側に発生しやすいため、なるべく低い周波数でかつノイズとは重ならないパターンのAEを計測する必要がある。

(2) AEの検出可能距離の検討結果

2008年1月にAEの検出可能な距離の検証を行った。この時点での配管の腐食状況を Fig. 11 に示す。錆びこぶが発生し、腐食の進行が見てとれる。FODセンサは腐食部位から2,000mm, 3,000mm, 3,900mmの位置に設置した。3,900mmの位置でのAEの検出結果を Fig. 12 に示す。このように最大3,900mmでも十分な感度でAEの検出が可能であることが確認された。また、三つのAEパターンのうち、50k~100kHzの周波数が最も多く検出されていることがわかった。これは今後の課題となるが、実機での測定においてこの範囲の周波数にノイズが存在していなければ効率よく腐食起因のAEを検出することが可能となる。



Fig. 11 Corrosion of piping (2nd monitor: 01/2008)

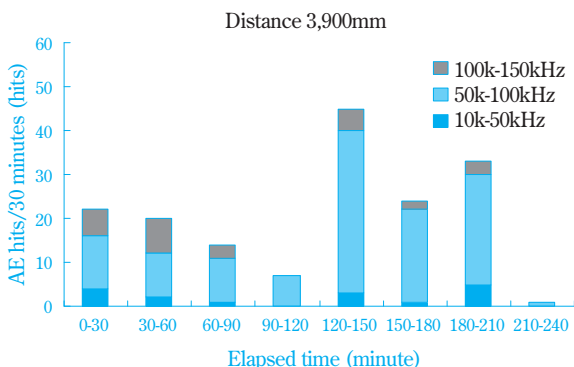


Fig. 12 AE hits by corrosion progress at 3,900mm

(3) 配管とフランジ部のAE検出結果の比較

2008年3月に配管とフランジ部のAE検出の比較を行った。この時点での配管の腐食状況を Fig. 13 に示す。錆びこぶがさらに成長し、錆びこぶに一部亀裂が発生している。FODセンサは Fig. 14 に示すように腐食部位から3,900mmの配管と3,950mmのフランジ部に設置した。



Fig. 13 Corrosion of piping (3rd monitor: 03/2008)

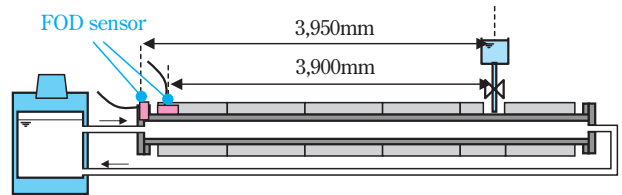


Fig. 14 The position of FOD sensor installation

Fig. 15 に配管とフランジ部とのAE検出の比較結果を示す。この結果より配管本体より感度は劣るものの、フランジ部でも良好にAEを検出していることが確認された。フランジでAEが検出できるならフランジ部のみの保温材の解体で、AEを計測することが期待できる。

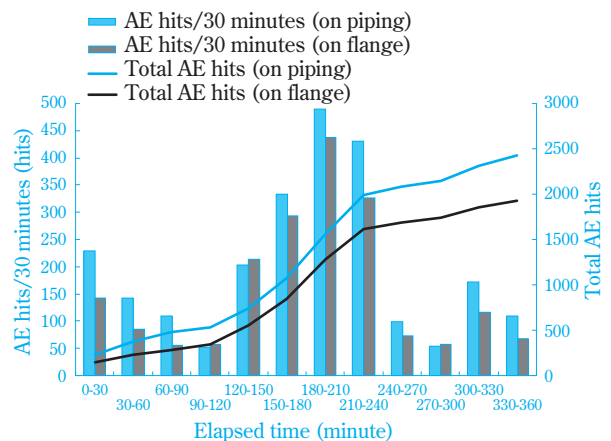


Fig. 15 Comparison of the situation of AE hits piping and flange

(4) 腐食進展度とAE検出数の検討

2008年1月時点での腐食部位からのAE検出数と、さらに腐食が進展した2008年3月時点での腐食部位からのAE検出数とを比較するため、同じ3,900mmの位置にFODセンサを設置して計測した結果を比較した。その結果をFig. 16に示す。ただし、2008年1月のAE計測は240分までしか計測していない。この図からも明らかなように、3月のAE検出数は1月に比べて、腐食進展に伴って明らかに増加していることがわかる（240分の時点でAE総検出数は10倍程度）。AE法は腐食面積や減肉深さを定量化することはできないが、錆びこぶの体積が増加するとAEの発生する確率が増加することから、AE検出数をカウントすることによって、腐食進展度をある程度相関性を持って評価できると考えられる。

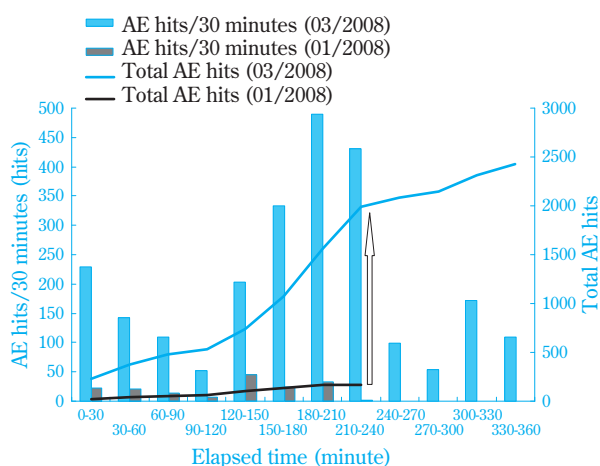


Fig. 16 Comparison of the number of AE hits 01/2008 and 03/2008

実機での光ファイバーAE測定⁵⁾

1. 静機器の選定と環境ノイズ分別

配管では先述したように、完全とはいえなくても保温材を解体しなくても検査は可能であるが、機器については保温材を解体しての目視検査以外の方法がない。そこで、CUIが顕在化していると思われる稼働中の縦型反応器（内径3.8m、塔長約28m）を測定対象機器として選定した。本機器では塔全面の断熱材を取り外して、CUIによって生じた錆びのケレンによる除去作業が計画されていた。従って、この工事にあわせてFODセンサを設置し、錆びの除去前後でAE測定を行い、内部流体による環境ノイズが含まれる条件下で、腐食からのAEの分別性について検討することとした。尚、縦型反応器のような静機器に対して目視検査以上の有効なCUIの検査手法が確

立されれば、足場の設置および保温材の解体が不要となり大きなコストメリットが得られる。

2. 縦型反応器へのFODセンサ取り付け

縦型反応器へのFODセンサの取り付け位置をFig. 17およびFig. 18に示す。高さ方向は反応器本体の下鏡と胴体との周溶接線を基準として9,500mmの位置とし、周方向には90°ピッチの約3,000mm間隔で4個（4ch）のFODセンサを取り付けた。

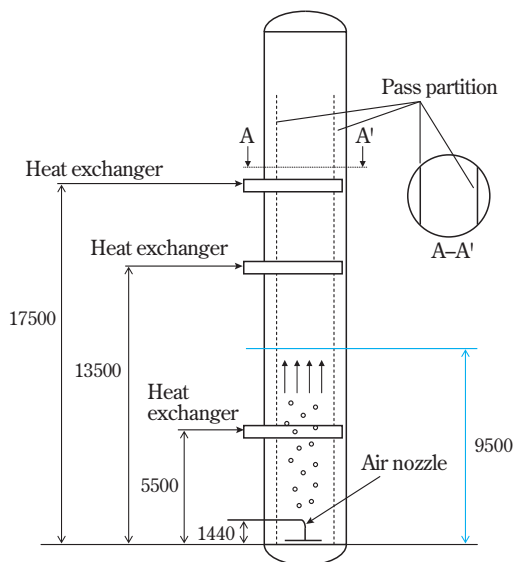


Fig. 17 Structure of the vertical reactor

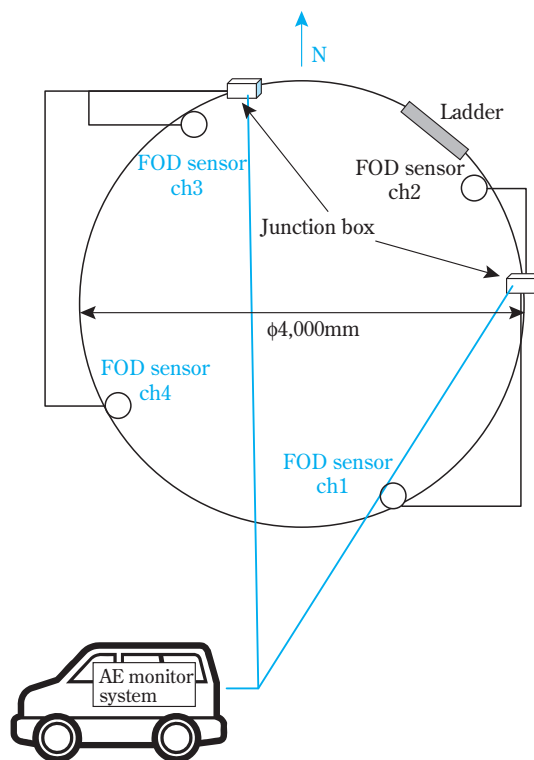


Fig. 18 The position of FOD sensor installation and wiring for signal cable

Fig. 19に示すように、FODセンサを防水ケースで保護し、反応器外表面の塗装をサンドペーパーで除去した後、耐熱エポキシ樹脂系接着剤を用いて接着して、その上からアルミテープを用いて固定した。各FODセンサから伸びた信号ケーブルはch1とch2, ch3とch4をそれぞれジャンクボックスに集約し (Fig. 20参照)、そこから地上までケーブルを伸ばしている。AE測定を実施する時は、地上部に設置された端子ボックスと車に設置したFOD干渉計をケーブルで接続する (Fig. 21参照)。このように、FODセンサを一度実機に取り付けられれば、センサから遠く離れた地上部からでも容易に検査を実施できることも本手法の大きな利点の一つといえる。

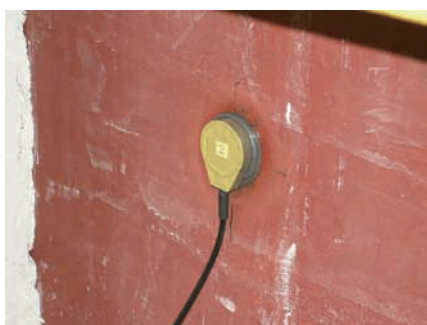


Fig. 19 The condition of FOD sensor installation on the vertical reactor



Fig. 20 Connection of 4ch FOD sensor to junk BOX

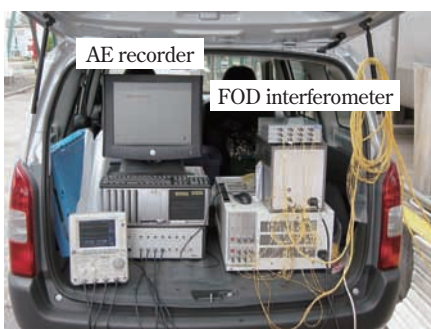


Fig. 21 AE measurement condition in which FOD interferometer and collection analysis device are loaded into car

3. 腐食部改修前後のAE測定結果

機器に発生したCUIによる錆びをケレン作業で除去する前後でのAE測定結果をそれぞれFig. 22およびFig. 23に示す。この結果、CUIによる錆びが存在する状態では多くのAEが検出され、錆び除去後にはAE検出数が1/10程度に激減していたことから、実機においても腐食起因と思われるAEを検出できたと考えられる。また、錆び除去前において各センサでAEの検出数に大きな差異があった。断熱材取り外し後の目視検査で多数のAEを検出しているセンサ近傍には複数の腐食箇所が存在が確認された。このように実機を用いた実施試験でも錆びの状況とAEの検出状況に良い相関関係があることを確認できた。

ただし、Fig. 23に示す錆び除去後に検出されたAEは腐食起因によるものではなく、現状の波形処理技術によるフィルタリング処理では除去しきれなかった環境ノイズと思われる。本技術を現場適用するにはこの環境ノイズをいかに精度よく分別できるかが極めて重要となる。

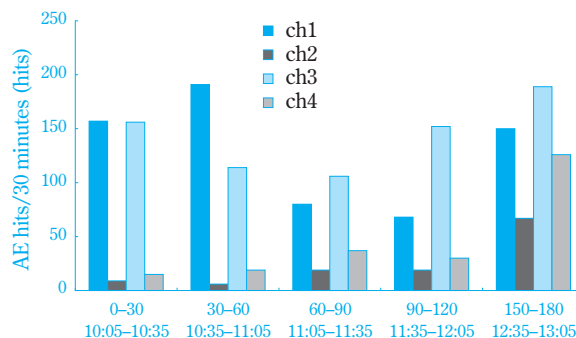


Fig. 22 AE hits/30 minutes before removing rust

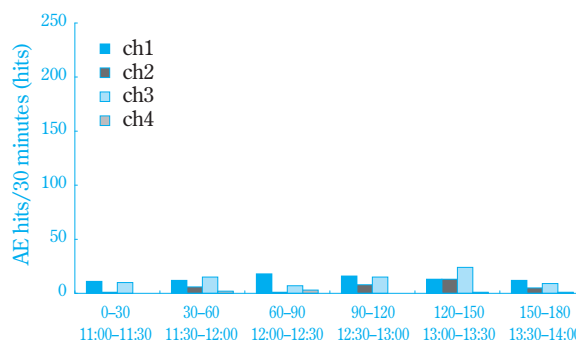


Fig. 23 AE hits/30 minutes after removing rust

4. 環境ノイズ分別の検討

錆びの除去前後で検出されたそれぞれの代表的なAE波形および、CUIモックアップ配管の検討で得られた腐食からのAE波形をそれぞれFig. 24~Fig. 26に示す。波形の立ち上がり、持続時間等良く似た形状

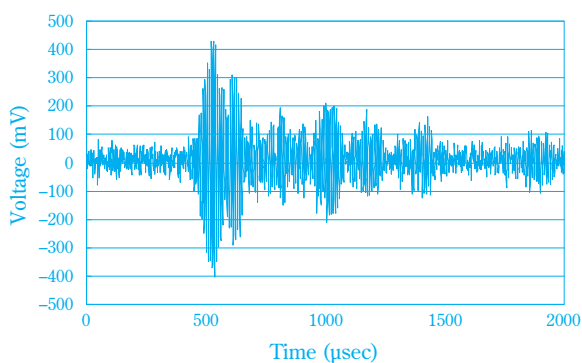


Fig. 24 Representative Waveform of AE obtained before removing rust

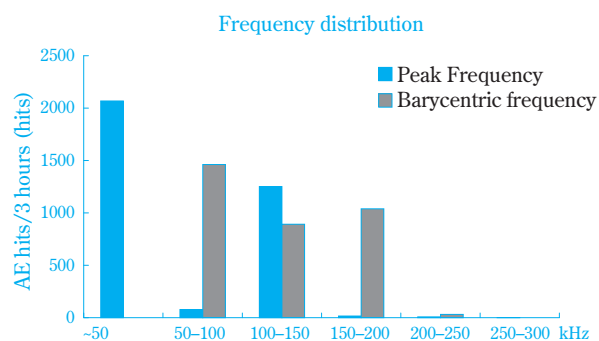


Fig. 27 Frequency distribution of AE obtained before removing rust

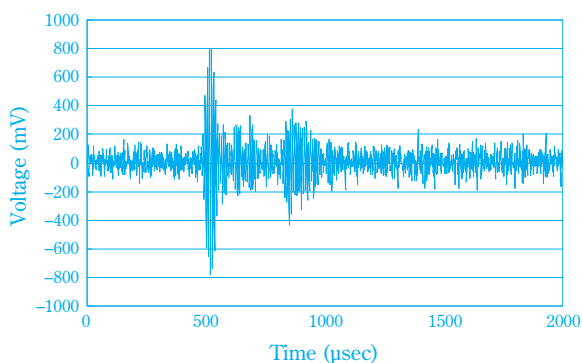


Fig. 25 Representative Waveform of AE obtained after removing rust

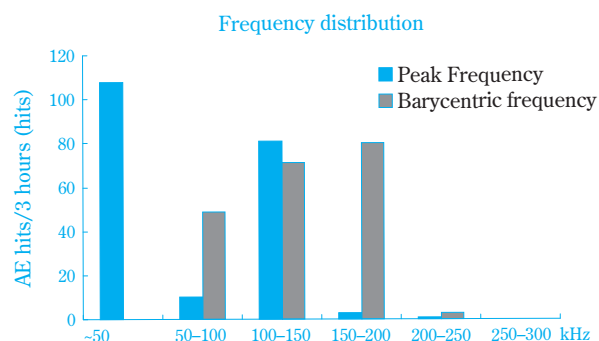


Fig. 28 Frequency distribution of AE obtained after removing rust

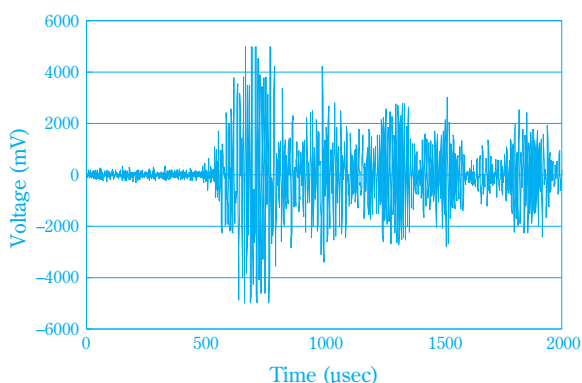


Fig. 26 Representative Waveform of AE obtained from mock-up piping

をしていることから、波形の形状による環境ノイズ分別は困難と考えられる。

次に、錆びの除去前後で検出された測定時間3時間でのAEのそれぞれのピーク周波数(周波数スペクトルの中で最大の振幅を持つ周波数)および重心周波数(周波数スペクトルの面積の重心点となる周波数)の度数分布をFig. 27およびFig. 28に示す。いずれも周波数帯域はCUIモックアップ配管の検討で得られた腐食AEの周波数帯域(10k~150kHz)とほぼ同等であり、また錆びの除去前後のAEのピーク周波数および重心

周波数の度数分布ともによく似た分布形状を示していることから、周波数解析による環境ノイズ分別も困難と考えられる。

次に、錆びの除去前後で検出された測定時間3時間でのAEのそれぞれの最大振幅とAE個数の度数分布をFig. 29およびFig. 30に示す。錆びの除去前のAEは最大振幅の小さいものが多数存在し、最大振幅が大きくなるに従って、AE個数は減少している。一方、錆び除去後のAEは除去前のAEと概ね分布形状は似ているものの、最大振幅の小さいものが最も多く存在しているわけではなく、この度数分布には明らかな有意差が見られた。そこで、この結果をさらにわかりやすく数値化するために、 m 値(分布関数の形状パラメータ)による比較を試みた。 m 値とはFig. 29およびFig. 30に示したAEの最大振幅と個数の度数分布のグラフの両軸を対数表示とし、このときに得られた散布図の直線の傾きである。錆びの除去前後で検出されたそれぞれのAEおよび、CUIモックアップ配管の検討で得られた腐食AEの m 値をFig. 31に示す。

この結果、錆び除去前後のAEのそれぞれの m 値は-2.23および-1.71であり、CUIモックアップ配管の腐食からのAEの m 値は-2.67となった。錆び除去前のAEの度数分布はCUIモックアップ配管の腐食からのAEの度数分布とよく似ており、錆び除去後のAEと

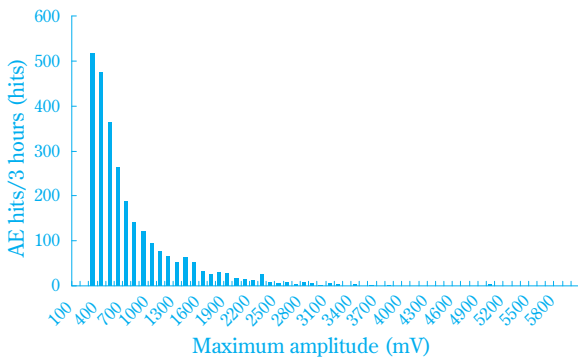


Fig. 29 Distribution of AE hits and maximum amplitude obtained before removing rust

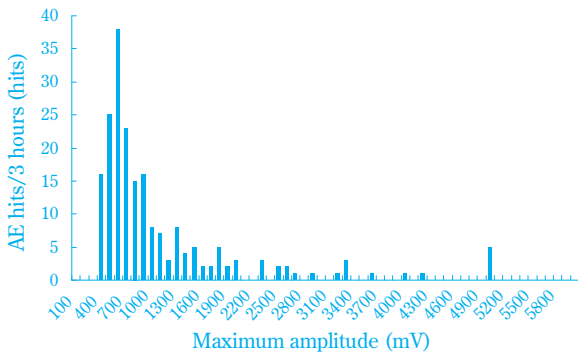


Fig. 30 Distribution of AE hits and maximum amplitude obtained after removing rust

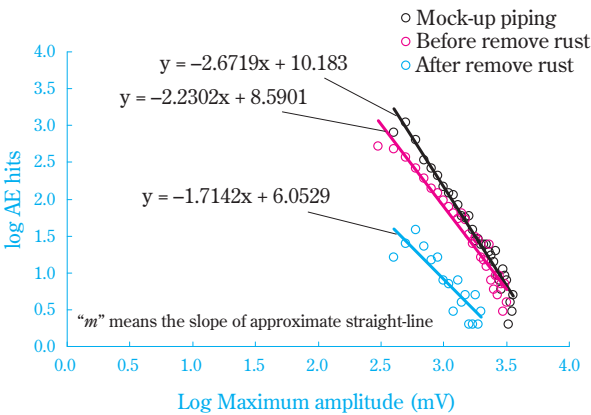


Fig. 31 Comparison by *m* value (Shape parameter)

は度数分布が異なっていることが確認された。このような結果から *m* 値を求めることによって、腐食によるAEと環境ノイズによるAEを分別できる可能性が示唆された。

ただし、この分別技術を現場に適用していくためには、更なる実験室ベースでの基礎データの蓄積および、現場での実機テストを重ねていくことによって、腐食によるAEと環境ノイズとの分別データの蓄積が必要である。

まとめ

錆びこぶから発生したAEを、概ね10k~150kHzの周波数範囲で捕捉した。また最長約4,000mmでもAEを捕捉可能であることを示した。これは左右8,000mmの範囲を一つのセンサで検査可能であることを示しており、感度に余裕があったことから、さらに長距離の検査も可能と考えられる。またフランジ部にセンサを設置しても配管部同様にAEを捕捉することができた。また実機においても腐食起因と思われるAEを検出でき、環境ノイズについても *m* 値（形状パラメータ）を評価することによって、腐食AEとの分別が可能であることが示唆された。光ファイバー型AEセンサは元々防爆性を有するため、石油化学プラントのような防爆地域を有するプラント内においてもセンサ部の常設が可能となる。今後更にデータを蓄積し、早急に実用化を進めたい。

引用文献

- 1) 原 修一, 山本 勝美, 防錆管理, **53** (3), 106 (2009).
- 2) 多田 豊和, 森 久和, 長 秀雄, 町島 祐一, 日本非破壊検査協会 平成20年度秋季大会講演概要集, 243 (2008).
- 3) K. Kageyama, H. Murayama, K. Uzawa, I. Ohsawa, M. Kanai, Y. Akematsu, K. Nagata and T. Ogawa, Journal of Lightwave Technology, **24**, 1768 (2006).
- 4) 住友化学(株), 特許出願中.
- 5) 住友化学(株), 特許出願中.



多田 豊和
Toyokazu TADA

住友化学株式会社
生産技術センター
研究員



森 久和
Hisakazu MORI

住友化学株式会社
生産技術センター
研究員



末次 秀彦
Hidehiko SUETSUGU

住友化学株式会社
生産技術センター
主席研究員