

# オートクレーブ型 LDPE リアクター塔内非破壊検査装置の開発と実用化

## Development and Practical Application of Inside Inspection System for Autoclave-type LDPE Reactors



米国ケンタッキー州登録技術士  
安富 章忠\*  
P.E. Akitada Yasutomi



本間 海人\*\*  
Kaito Homma



宇川 祐丞\*\*\*  
Yusuke Ukawa



茅野 俊大\*\*\*  
Toshihiro Chino



田中 勇\*\*\*  
Isamu Tanaka



博士(工学) 荒島 裕信\*\*  
Dr. Hironobu Arashima

### 要 旨

石油化学プラントの低密度ポリエチレン (LDPE : Low Density Polyethylene) 製造用オートクレーブ型反応器 (LDPE リアクター) への供用適性評価 (FFS : Fitness-For-Service) の適用を目的として、現地シャットダウン検査工事に向けた塔内非破壊検査装置を開発し実用化した。開発した装置の適用により、LDPE リアクターの設計構造上、以前はアクセスできなかった部位への探傷が可能となり、さらに検出される減肉や亀裂状欠陥に対する必要な検出能も確保できることから、FFS の実施や追跡調査のための検査と、検査期間の短縮化が図れた。

### — Synopsis —

This report describes the required performance and verification results of the launched non-destructive inspection system of autoclave-type LDPE reactors to apply Fitness-For-Service (FFS) to them. We have confirmed that this novel inspection system enables us to detect flaws in areas that were previously inaccessible due to structural design of the LDPE reactors and secured enough detectability to evaluate local metal loss and crack-like flaws.

### 1. 緒 言

低温でのヒートシールや透明なフィルムなどの LDPE は 1000 気圧以上の高圧下でエチレンを重合させて製造されている。その密度は 0.910 ~ 0.924 で結晶性が低く軟質であるため加工性が良好で、耐衝撃性、防湿性、電気的性質に優れる。第二次世界大戦中では軍需用に投入され、高周波絶縁性を活かしてレーダーの被覆配線や兵器部品の絶縁材料として使用されていた。現在では、全需

要の約 50 % が食品用、農業用、産業資材用のフィルムに用いられている。当社では、1966 年から 19カ国 36カ所の石油化学プラントに合計 58 基のオートクレーブ型 LDPE リアクターの納入実績がある。1960 ~ 1970 年代に製作されたリアクターの老朽化に伴い、シャットダウン検査 (SDI : Shutdown Inspection) においてリアクターボディー内表面に減肉や亀裂状欠陥が検出されている<sup>(1)</sup>。これらの損傷の検出には、検査員が入塔して行う塔内検査作業やボディー外面側からの超音波探傷 (UT :

\* : イノベーションマネジメント本部 マテリアル技術研究所 Material Technology Laboratory, Innovation Management Headquarters

\*\* : 日本製鋼所 M&E (株) 機器製品部 Steel Structure Engineering Department, Japan Steel Works M&E, Inc.

\*\*\* : 日本製鋼所 M&E (株) エンジニアリングサービス部 Engineering Service Department, Japan Steel Works M&E, Inc.

Ultrasonic Testing)が必要となる。しかしながら、ボディーが細径であるため検査員が入塔できないものや、ボディーがジャケット構造であるため UT 検査施工が困難なリアクターが存在する。そこで、このようなリアクターボディー内表面に発生している減肉や亀裂状欠陥を検出する非破壊検査装置を開発して実用化したので、本装置の特徴と利点を紹介する。

## 2. LDPE リアクター設計構造上のシャットダウン検査導入における課題

LDPE リアクターの設計構造は、図1に示すようにジャケットを取り付けた円筒ボディー、その上下の平蓋であるカバーおよびクランプ締結体で構成されている。これらの耐圧部材の材料には ASME 規格材である SA-723M, Gr. 3, Cl. 1 もしくは Cl. 2 相当の 4Ni-1½Cr-½Mo-V 鋼が広く使用されており、運転圧力は 150 MPa ~ 280 MPa、運転温度は約 300 °C、スタートアップ・シャットダウンの回数は 30 年間の運転で 2000 回 ~ 3000 回という仕様になっている。当社の LDPE リアクターの設計構造別の納入実績を図2に示す。ボディー内径が 450 mm 以下の細径リアクターの SDI においては、検査員の入塔による塔内検査作業が困難となるが、その納入基数は 62 % を占めている。また、塔内検査作業ができない場合には、リアクターボディーを模擬したキャリブレーションブロックを用いた亀裂状欠陥検出能の検証<sup>(1)</sup>により、ボディー外面側からの UT がその代替となり得るが、ボディー外面側からの UT ができないジャケット溶接付けリアクター

基数は納入基数の 59 % を占めている。これらの設計構造上の理由から、40 年以上稼働している LDPE リアクターのほとんどは、ボディー内表面に発生した局部減肉や亀裂状欠陥の検出、位置の特定とサイジングのための詳細な SDI の実施ができない状況となっている。

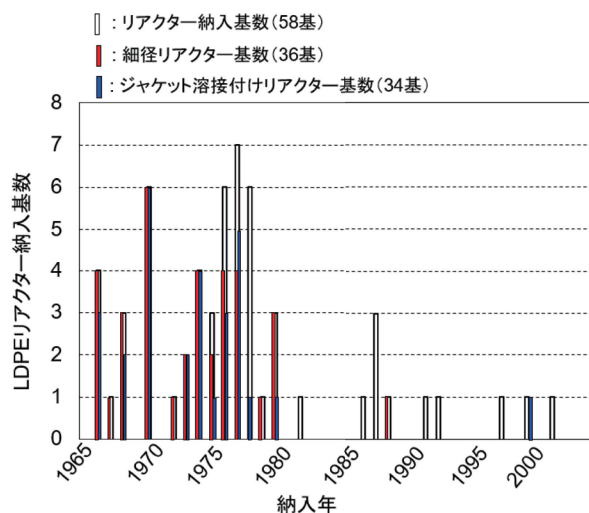


図2 LDPE リアクター設計構造別納入実績

さらに、リアクターボディーには、その内外径比が 1.6 ~ 2.3 の厚肉円筒にイニシエーターインレット、ラプチャーディスクや温度計を取り付けるためのクロスボアを多数有している。図3に示す運転圧力 241 MPa、運転温度 300 °C で定常運転時の典型的な設計構造の LDPE リアクターボディーにおける Mises 応力分布では、クロスボア内面コーナー部で 810 MPa の応力集中が発生

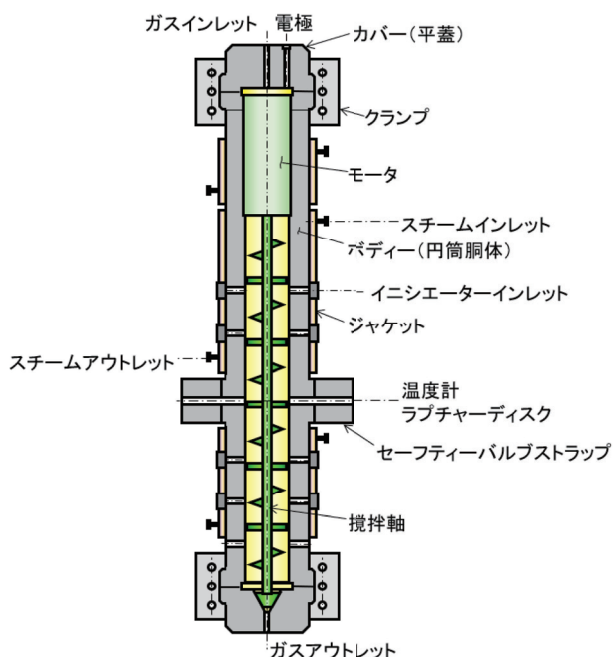


図1 オートクレープ型 LDPE リアクター設計構造の概略図

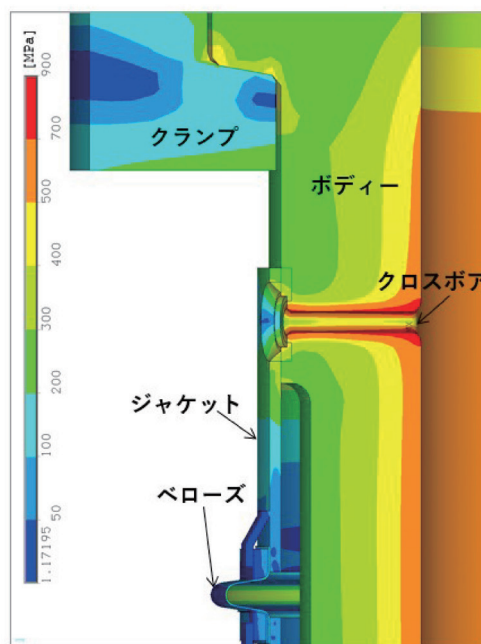


図3 LDPE リアクター定常運転時 (運転圧力 241 MPa, 運転温度 300 °C) のボディークロスボア内面コーナー部での応力集中例

しているのが認められる。このようなクロスボアを有する厚肉の円筒胴体の設計構造に対して ASME BPVC Section VIII, Division 3 等の超高压容器の設計・製作規格では、クロスボア内面コーナー部での応力集中や疲労の影響に対して、該当部に想定した割れ(クロスボアクラッキング)の亀裂進展解析により設計寿命を評価することが規定されている。この規定による設計寿命に対して 40 年以上稼働後の妥当性評価を実施するためには、SDI でのクロスボアクラッキングを検出・サイジング対象とした該当部表面での磁粉探傷(MT : Magnetic Particle Testing)やボディー外面側からの UT が必要となる。

また、リアクターボディーには、その外表面にジャケットを隅肉溶接により取り付ける設計構造、もしくは、ジャケット分割部に設けたラグによりボルト締めで取り付ける設計構造が採用されている。前者に関して、運転温度 300 °C でのリアクターボディーにおける温度分布とそれを熱荷重に変換して Mises 応力分布として表示した結果を図 4 に示す。ペローズによる熱応力の緩和が作用しているもののジャケット取り付け溶接部で 200 MPa 程度の熱応力集中が発生しているのが認められ、ジャケットを取り付けるためのパタリングや隅肉溶接部とボディーの接合部が、スタートアップ・シャットダウン運転の繰返しに伴い発生するジャケットの熱膨張と収縮に起因する応力集中と疲労の影響下にあることが分かる。したがって、ジャケット取り付け溶接部からボディー外表面へ進展する割れが懸念されるが、この既設溶接部を起点としたボディー外表面への割れの進展(疲労亀裂進展)をジャケット外表面側から検出しサイジングするのは難しく、そのため該当部内面側からの UT による探傷が必要となる。さらに、ボディーの素材である SA-723M, Gr. 3 鋼は ASME 規格において溶接構造物への適用が禁止されており、ジャケット取り付け溶接部にボディーと同等の化学成分、機械的性質を確保できる適当な溶接材料がなく補修溶接施工ができない。そのため、SDI でのジャケット取り外し後の再組み立てが困難であることから、ジャケットの既設溶接部を起点とした疲労亀裂進展に対する SDI には、ジャケットの取り外しと再組み立てが不要となる該当部内面側からの UT による探傷が求められる。

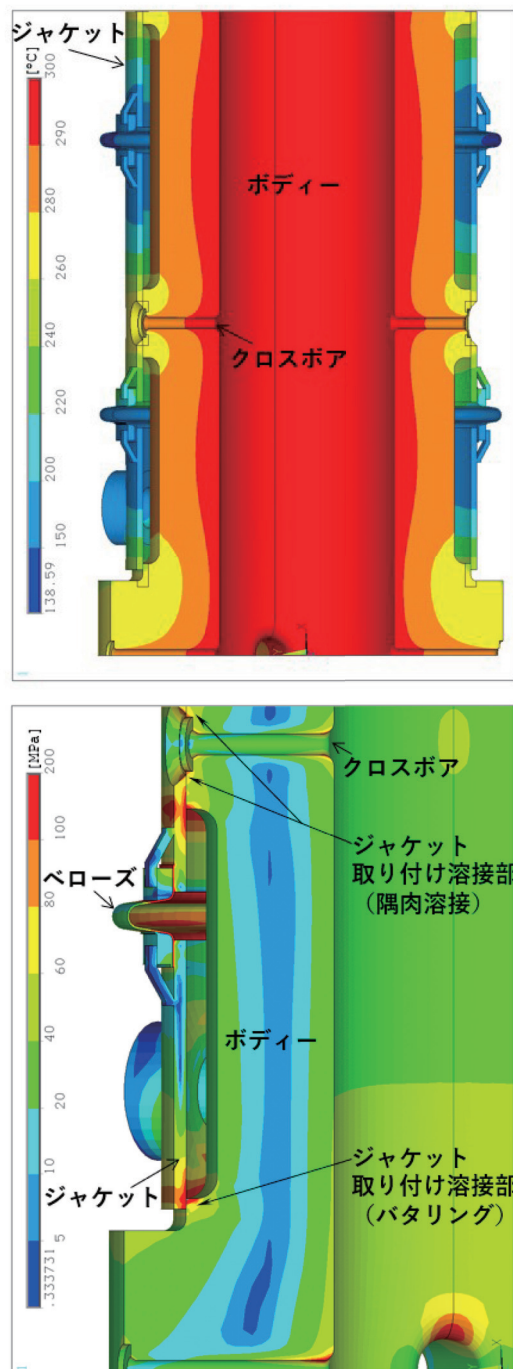


図4 運転温度 300 °C での LDPE リアクターボディーの温度分布(上図)とジャケット取り付け溶接部での熱応力集中(下図)の例

### 3. 塔内非破壊検査装置への要求性能

上記2項で挙げたLDPEリアクターの設計構造によるSDI導入における課題を解決するため、次の要求性能に基づき塔内非破壊検査装置を開発した。

- ① リアクター余寿命へ影響する損傷<sup>(1)</sup>を検査対象
  - ・ ボディー内表面の局部減肉、凹みや亀裂状欠陥
  - ・ クロスボアクラッキング
  - ・ クロスボア内面コーナー部近傍の局部減肉
  - ・ ジャケットの既設溶接部からの疲労亀裂進展
- ② 追跡調査<sup>(1)</sup>が可能
  - ・ 探傷結果(欠陥位置とサイズ)の映像化と記録
  - ・ 寿命解析の妥当性検証と更新
- ③ SDI期間を短縮<sup>(1)</sup>
  - ・ ジャケットの取り外しと再組み立て不要
  - ・ 検査員の入塔による塔内検査作業不要

検査手法(ユニット)と適用部位の関係、リアクター製作実績から設定したボディーとクロスボアの寸法に対する塔内非破壊検査装置の適用範囲を表1、表2にそれぞれ示す。これまでの検査員の入塔による塔内検査の実績から、クロスボア内面コーナー部近傍では局部減肉、凹み、擦り傷に分類される損傷が検出されている<sup>(1)</sup>。これらの損傷の検出、位置の特定とサイジングのための検査手法にはカメラによる目視検査(VT: Visual examination)、レーザースキャンによる寸法検査(DT: Dimensional check)を採用し、局部減肉に対してφ1.0 mm 範囲を欠陥検出能とした。さらに、クロスボアクラッキングに対しては、MTによりクロスボア内面コーナー部でMin. R1 mm 長さで探傷し、そのインディケーションをVTにより測定する仕様とした。同様にボディー内表面の全面探傷においても、局部減肉に対する検出能をφ1.0 mm 範囲とした。また、図5に

表1 検査手法(ユニット)と適用部位の関係

VT/DTユニット	ボディー内表面全面およびクロスボア周辺
MTユニット	クロスボア内面コーナー部周辺
UT(FMC/TFM)ユニット	ジャケット既設溶接部からボディー外表面

表2 LDPEリアクターのボディーとクロスボアの寸法に対する塔内非破壊検査装置の適用範囲

ボディー内径	285~500mm
ボディー長さ	6~8m
ボディー肉厚	114~289mm
クロスボア径	11~110mm
クロスボア内面コーナーR	2R~40R

示すジャケットの既設溶接部からの疲労亀裂進展の検査手法にはFMC/TFM (Full Matrix Capture / Total Focusing Method)を採用し、周方向±45°傾きに対して亀裂深さ5 mmを亀裂検出能とした。

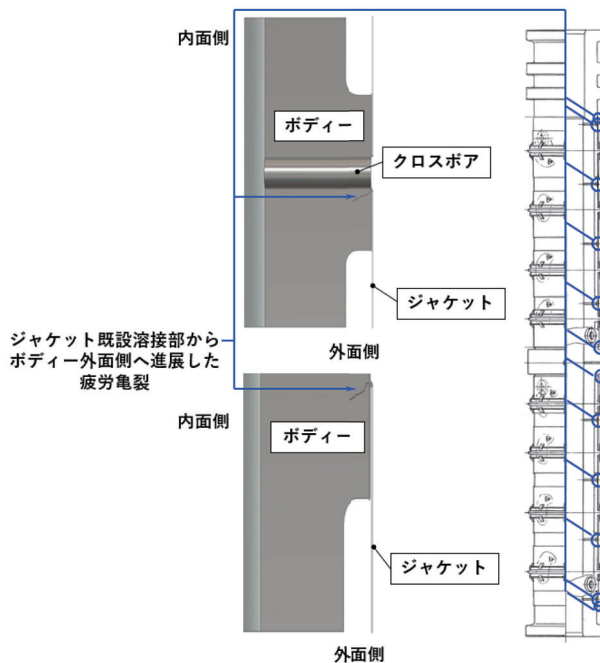


図5 リアクタージャケット既設溶接部からボディー外表面へ進展した疲労亀裂の概略図

### 4. 塔内非破壊検査装置の性能検証

現地SDI工事におけるLDPEリアクター塔内非破壊検査装置の施工方法を図6に示す。評価対象欠陥、損傷に応じて、①VT/DTユニット、②MTユニット、③UT(FMC/TFM)ユニットを駆動ユニットへ搭載し、検査装置としてリアクターへ入塔させる。検査対象とする

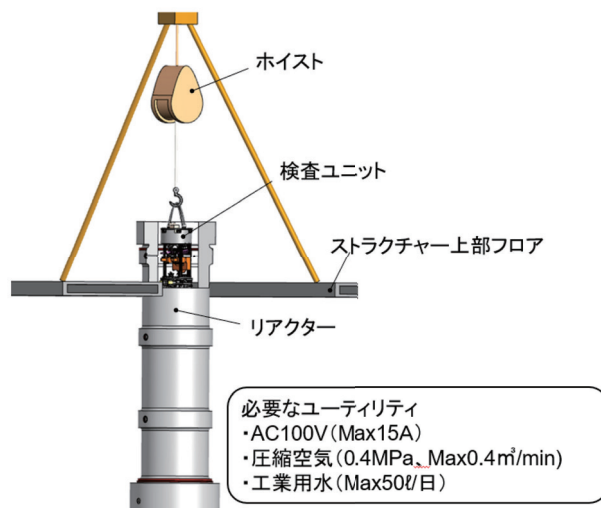


図6 LDPEリアクター現地SDI工事における塔内非破壊検査装置の施工方法

リアクター部位(高さ)に装置をセット後、リアクター内表面に沿って回転することで探傷する。以下に開発した各種検査ユニットの概要と性能検証例をそれぞれ示す。

① VT/DT ユニット

ユニット外観と仕様を図7に示す。VTカメラをリアクター周方向へ回転させることでボディー内表面の全面を探傷する。局部減肉を確認した場合にはレーザーを照射して減肉範囲と深さをスキャンし、得られたスキャンデータを解析・映像化する。ボディー内表面の局部減肉を模擬した試験片による二次元レーザーの性能検証例を図8に示す。深さ1mm、開口部4mmの人工傷に対してスキャンした結果を示すプロファイルからは減肉形状を明瞭に映像化し、解析データからは減肉範囲と深さをマッピングとして数値化できることを確認した。



図7 VT/DTユニットの外観と仕様

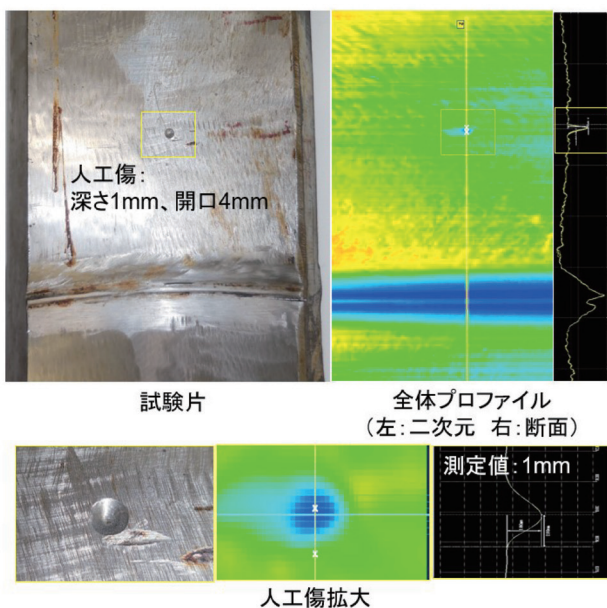


図8 VT/DTユニットの性能検証例

② MTユニット

ユニット外観と仕様を図9に示す。クロスボアクラッキングに対してリアクター軸方向と周方向にそれぞれ磁化できる装置とした。クロスボア位置にヨークを押



図9 MTユニットの外観と仕様



モックアップ 磁化方向  
(リアクター周方向に磁化した場合)

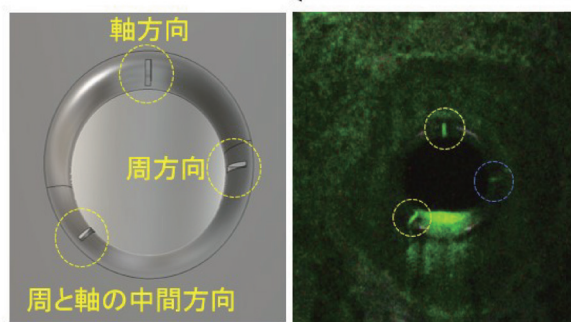
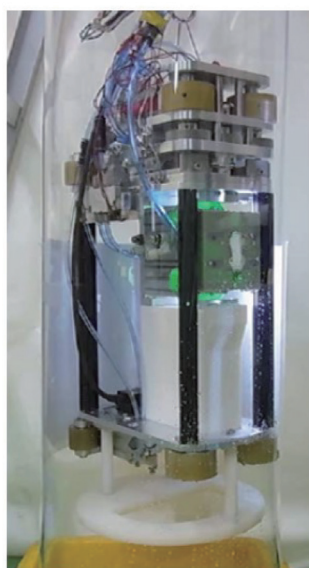


図10 MTユニットの性能検証例

し当て磁粉液を噴射し、ブラックライトの照射によりインディケーションを観察、その寸法を測定する。リアクターの軸方向、周方向、周と軸の中間方向のクロスボアクラッキングをそれぞれ模擬した鋼管でのモックアップによる MT ユニットの性能検証例を図 10 に示す。人工クロスボアクラッキングとそれに対するリアクター周方向に磁化した場合の MT 検証画像を比較した。R1 mm 長さの軸方向、周と軸の中間方向の人工クロスボアクラッキングが明瞭に検出されているのに対して、周方向の人工クロスボアクラッキングが明瞭に検出されていないのが分かる。したがって、MT ユニットにより磁化する方向を逆にすれば、明瞭に検出されるクロスボアクラッキングの方向も逆となるため、クロスボア全周においてクロスボアクラッキングに対する検出能 R1 mm 長さを確保していることになる。

### ③ UT (FMC/TFM) ユニット

ユニット外観と仕様を図 11 に示す。ジャケットの既設溶接部からの疲労亀裂進展の検出とサイジングのため FMC/TFM を採用し、高度化された PC 処理により再現性の高い像が得られる。5 mm 深さの鋭角ノッチを与えたジャケット溶接取り付け部およびクロスボア部を含むリアクター肉厚断面を模擬したテストブロックを用いて、ユニットに搭載する FMC/TFM に対する疲労亀裂進展の検出能とサイジング能を検証した結果を図 12 に示す。検証 S スコープではノッチ形状までは再現できないが、ノッチ位置を特定し深さを測定できるのが分かる。このことから、リアクター内面からの FMC/TFM により、ジャケット既設溶接部からボディー外表面に進展している疲労亀裂に対して、亀裂深さ 5 mm の亀裂検出能を有した探傷ができると判断した。



仕様  
 ・検出能: d5.0mm以上  
 L3.0mm以上  
 (対比試験片にて)  
 ・周速度: 20mm/s以下

図 11 UT (FMC/TFM) ユニットの外観と仕様

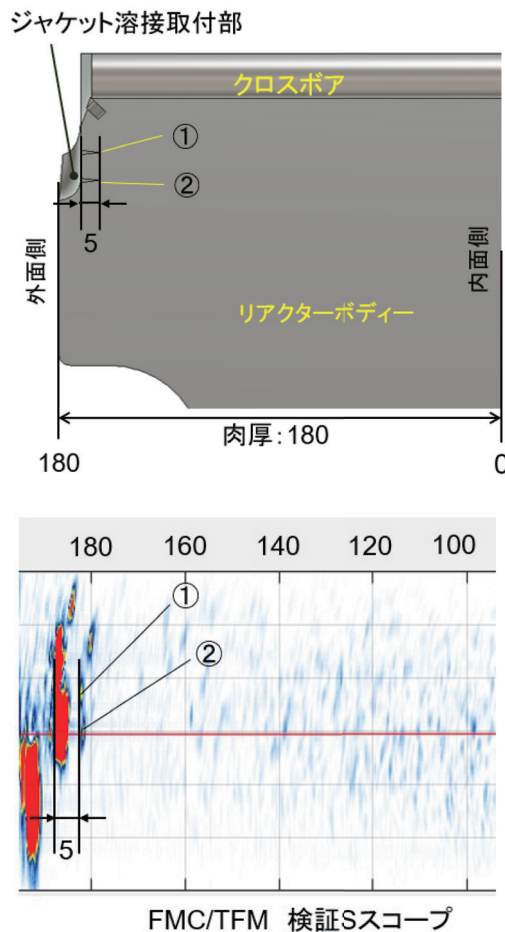


図 12 UT (FMC/TFM) ユニットの性能検証例

## 5. 結 言

オートクレープ型 LDPE リアクターの設計構造によるシャットダウン検査導入における課題を解決するための塔内非破壊検査装置への要求性能とその検証結果について紹介した。本検査装置の開発により、検査員が入塔できない細径リアクターボディー内部などの以前はアクセスできなかった部位での減肉や亀裂状欠陥を検出し、検出した劣化損傷状態を供用適性評価や追跡調査の対象とすることで、適正な安全性評価が可能となった。本検査装置は既に実用化されており、ジャケットの取り外しと再組み立て、検査員の入塔による塔内検査作業のためのゴンドラの設置といった現地工事が不要となることで、シャットダウン検査期間の短縮(2週間/基)と派遣要員の削減(現場監督1名)にも貢献している。

## 参 考 文 献

- (1) 安富章忠：“石油精製および石油化学プラントにおける圧力容器の供用適性評価技術（亀裂状欠陥評価方法 - 第3段階評価）”，日本製鋼所技報，No.72（2021），pp.80-92