

# 改質管と構成部品

## 改質管検査の総合サービス



改質管検査	4 - 5
管外部の検査 (LEO-Scan)	6 - 9
管内部の検査 (LEO-iScan)	10
アウトレットピグテールの測定	11
上端部の検査	12 - 13
余寿命評価 (RLA)	14 - 15
テクノロジー	16
FOERSTER 検査タワー	17
世界中に	18 - 19



### 新しい名前、変わらぬミッション

石油化学プラントを安全かつ効率的に稼働させるためには、使用されている部材、特に遠心鑄造の改質触媒管とその関連部品の非破壊検査が重要な役割を果たします。この分野では長年、ドイツのMP (Magnetische Pruefanlagen) と米国のUSTT (US Thermal Technology) の2社がリーダーとして活躍してきました。MP は、ドイツのロイトリンゲンに本社を置くグローバル企業FOERSTER グループの完全子会社であり、グループの必要不可欠な一員でした。USTT は1989年から、2020年のFOERSTERによる直接買収まで、長年にわたり MP の管材検査で西半球におけるパートナーでした。2021年には、MP が

FOERSTER 本社 (Institut Dr. Foerster GmbH & Co.KG) に統合されました。ついに2021年末、FOERSTER グループはQuest Integrity 社の合成ガスビジネスユニットの買収を完了しました。この取引には、同ビジネスユニットの技術スタッフと、LOTIS およびMANTIS の検査技術が含まれています。

FOERSTER 傘下に入り、検査ビジネスユニットという名で知られるようになった専門家パートナーたちは、この分野で30年以上信頼されてきた重要な仕事を続けています。名前は変わってもミッションは同じ。改質管検査のニーズに対応した包括的なサービスを提供しています。

### 品質の可視化

FOERSTERグループは、渦電流 (EC) 技術などを用いた非破壊材料検査用の機器・システムの開発・製造・販売を行っています。FOERSTERは、亀裂検出や微細構造検査のために、高度に専門化された渦電流プローブのカスタム製造もしています。

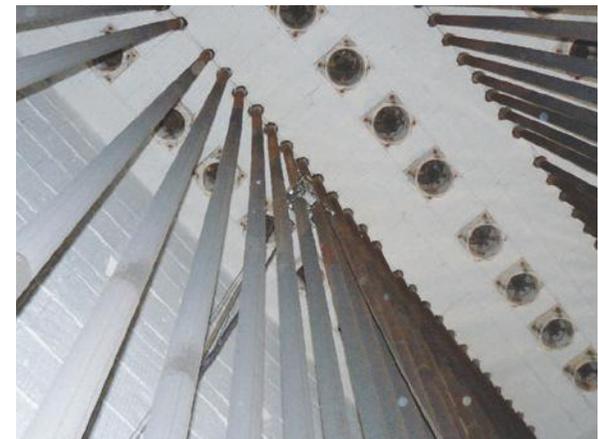
検査対象部品の複雑な形状に合わせて特別に設計・カスタマイズしたセンサーを採用することで、検査結果は著しく改善されます。FOERSTERは、検査システムの校正用として、深さ、幅、長さが異なる人工欠陥を、標準校正片と併せて製作しています。



LSBインダストリーズ社のエルドラド・ケミカルサイト (米国アーカンソー州エルドラド)



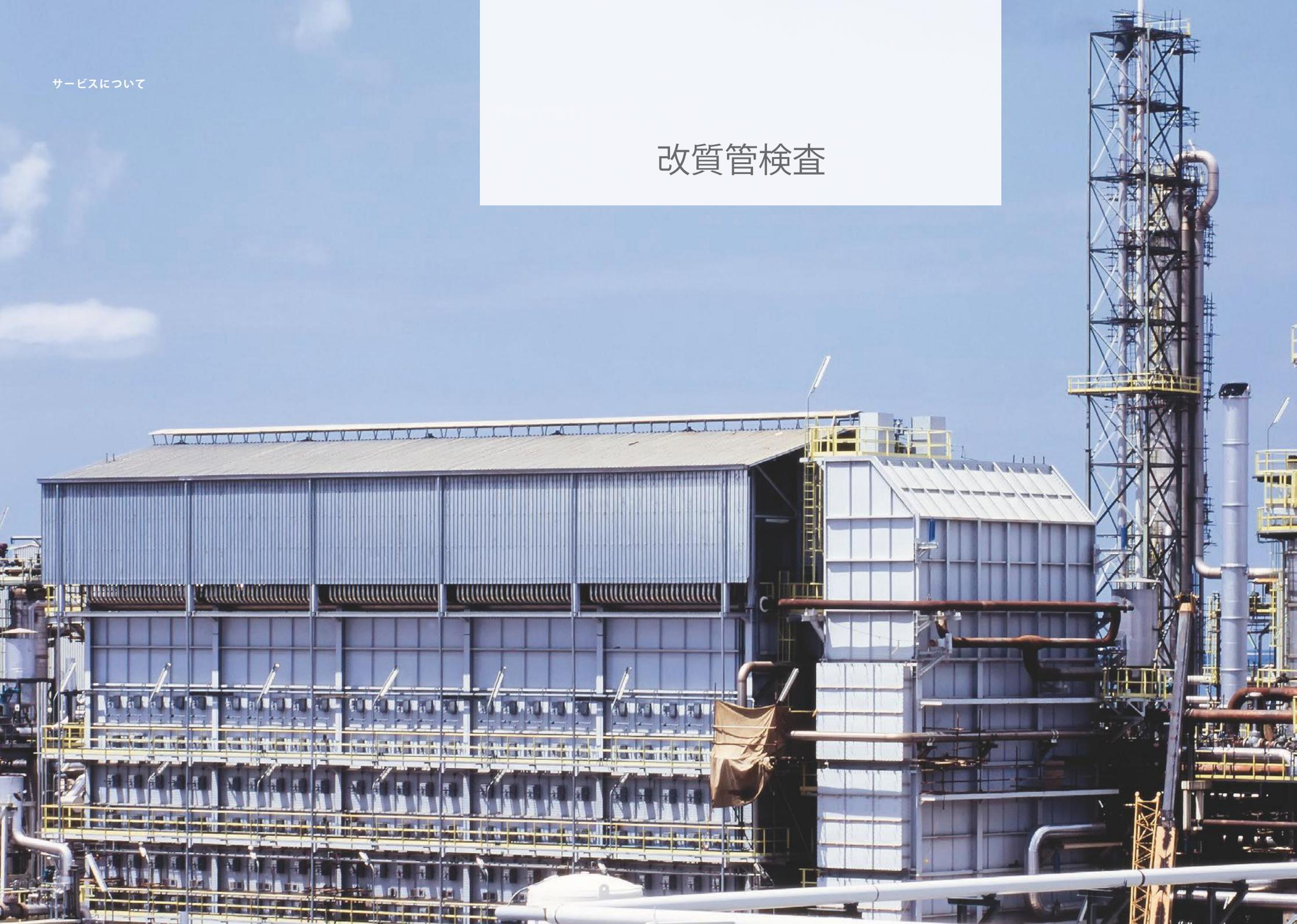
Parent Company of MP and USTT  
Owner of LOTIS and MANTIS Technology



LEO-Scanによる改質管検査

サービスについて

## 改質管検査





検査ビジネスユニットは、改質管検査に関する包括的なサービスをお客様に提供することを重視しています。改質管検査は世界中のアンモニア、メタノール、直接還元鉄（DRI）、水素の製造プラントで実施されています。

自動検査は、EN ISO 9712に準拠した資格を持つ、高度な訓練を受けた弊社の非破壊検査（NDT）検査員によって行われます。検査員は、渦電流法をはじめとするさまざまな分野でレベル2およびレベル3の技術認証を多数取得している大卒のエンジニアです。使用される部材の設計、構築、指定を実際に行っているため、技術的な専門知識を必要とする条件下でも、改質触媒管の検査を確実に実施することができます。

すべてのお客様に対し、FOERSTERが提供する適用可能で適切な技術の完全な検査パッケージを利用して、資産全体の費用対効果と信頼性の高い監視を行うことをお勧めしています。この包括的なアプローチにより、改質管とその構成部品は、耐用期間全体を通じて適切な間隔で定期的に検査を受けます。検査結果に問題が示された場合、迅速な是正措置を講じることで、生産量を最大化し、ダウンタイムをなくし、より安全な職場を提供することができます。

### サービス内容

- 改質管のベースラインスキャンニング（新品の場合、試運転前に）
- 遠心鑄造改質触媒管の耐用年数に応じた定期的なスキャンニング（2～4年毎）
- 非破壊検査法による改質管の余寿命評価（RLA）
- 第三者研究機関による、選定されたサンプル管を用いた改質管の破壊検査
- アウトレットピグテールの歪みと透磁率の測定
- 渦電流による上端部の内径（ID）検査
- 必要に応じたサポートサービス

LEO-SCAN

## 管外部の検査 (LEO-Scan)



FOERSTERは、メタン水蒸気改質装置に使用される遠心铸造改質触媒管の検査を目的として、渦電流とレーザー技術を用いて管の外側から検査を行う独自の「LEO-Scan」システムを開発・構築しました。

LEO-Scanシステム一式は、独自の管クローラー上に搭載されています。特殊構造のクローラーが、センサーを炉床（改質装置の設計によっては）から屋根まで搬送します。これには、排ガス収集トンネルがある場合、その最上部の下のエリアも含まれます。プローブとレーザーはクローラーの底部近くに取り付けられており、一般的なダウンフロー式改質装置では、管内で最も高温になると考えられる最重要部分で測定を行うことができます。この装置は、管と管の間のクリアランスが20mm（0.79インチ）と狭い改質装置の検査も目的としています。これにより、外径（OD）とのクリアランスが非常に狭い設計の炉でも検査できます。他に、アップフロー式改質装置検査用のクローラーやプローブの構成も用意されています。管の洗浄は必要ありません。

渦電流システムの校正は、長さ0.4m（15.75インチ）の改質管の実物を長さ方向に割り、内径（ID）側に放電加工（EDM）のノッチを付けて人工欠陥とし、実施しています。この校正により、欠陥の特定と、渦電流が管壁の肉厚に完全に浸透することが証明されます。

LEO-Scan装置は、2軸レーザーシステムを使用して、加熱炉内の管の全長にわたり外径（OD）を測定します。外径測定は検査の最重要項目ではありませんが、クリープを特定するための重要な二次検査です。この検査にレーザーを使用することで、再現性を確保し、改質装置内の管の全長にわたって管径をデジタル記録することができます。

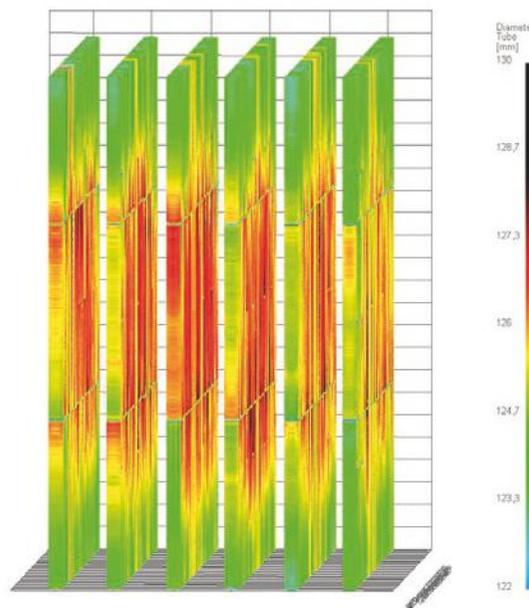


図1: 典型的な検査結果

この技術は、炉の焼成プロファイルの傾向を見極め、触媒の装填や触媒の状態に問題がある箇所を特定するのに役立ちます。また、このデータを使って、排ガスの流れの問題を特定することもできます。外径（OD）の結果と渦電流（EC）の測定値が同時に表示されるので、解釈が容易になります。

このECシステムは、現在使用されているECシステムの中で唯一、管壁の肉厚24mm（0.95インチ）までを完全に浸透することが証明されています。クローラーが管を上昇するにつれ、独自設計のECプローブが信号を記録し、評価を行います。ECシステムは、透磁率の変化を記録するだけでなく、さらに重要なのは、それを処理して継続的に監視することで、管壁内と外径・内径（OD、ID）表面の亀裂や欠陥を検出できるということです。システムは電子的に機能するため、LEO-Scanは水などの接触媒体を必要とせず、検査全体を完全に再現することができます。

この種の検査では、再現性が重要な要素となります。これにより、各検査の結果を重ね合わせて、年ごとに直接比較できます。信号に偏差があれば、それを管壁の損傷と関連付けることができます。これは超音波検査とは全く対照的です。結合強度のばらつきにより再現性が失われ、また、例えば鋳造時の粗さや大きく粗い粒径(高い散逸性/減衰性)などにより、材料を貫通することが困難なため、超音波検査は遠心鋳造管には適していません。

LEO-Scanは、最大4本のレーザー(管と管の間のクリアランスによって異なる)を使用して、EC検査の実施と同時に外径を測定します。レーザーを使用することで、最高の精度と再現性が得られます。管径の測定は、通常のクリープを検出する二次的な手順として行われ、損傷の原因となった可能性の高い条件を特定するのにも役立ちます。

### 改質管が損傷する3つのシナリオ

- 運転上の障害、触媒の問題や火災の衝撃(短時間の過熱)、排ガスの流量分布の問題、熱衝撃などの結果、管の直径が膨張せずに亀裂が発生することがあります。
- 亀裂を伴わずに管が膨張することもあり得ます(長時間の過熱による)。
- 上記2つの組み合わせによる場合。

LEO-Scanは、EC検査とレーザー測定との組み合わせにより、このような複雑な欠陥を明らかにする能力があり、市場で最も徹底的で効果的なシステムの1つとなっています。

検査結果または材料の経年変化のいずれかに基づいて、必要ならば、余寿命評価(非破壊、ひずみベースのアプローチ)を推奨する場合があります。この分析では経験と専門家の判断に基づいた余寿命計算を行い、結果を、サービスに対する適合性(FFS)の決定、交換計画の立案、購買支援など管の寿命管理全般に活用します。この分析の最終結果は、API-579サービスレベルIIの適合性評価としてお客様に提供されます。



LEO-Scan

図2は、管の外側から行った数年分の検査を重ね合わせたものです。このようなチャートの作成は、基準検査から始め、検査を繰り返すたびに結果を重ねていくのが理想的です。これにより、外径(OD)信号やEC信号の変化が一目瞭然となり、簡単に評価することができます。この図では、管の底部を表すチャートの左側付近で、外径(OD)の変化(膨張)がはっきりと示されています。

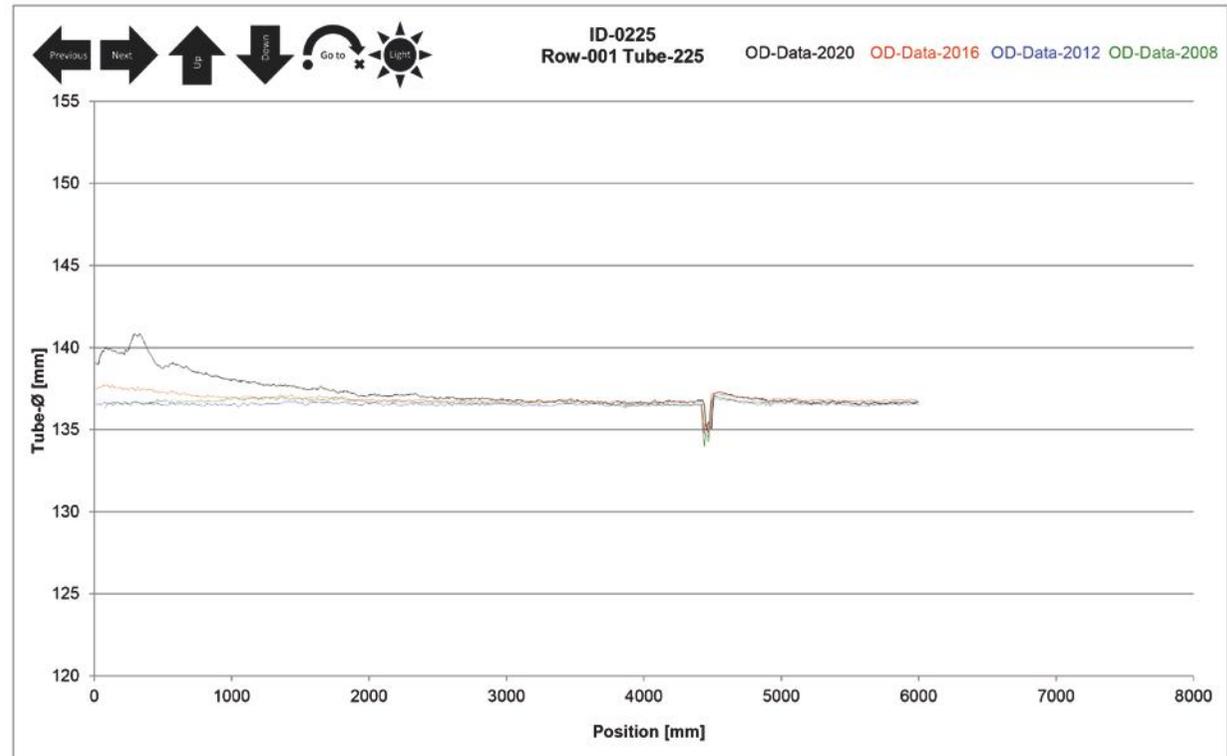


図2: 改質管の外径に関する4つの検査結果を重ね、経年変化を示したもの(基準検査は2008年、継続検査は2012年、2016年、2020年実施)。

検査ビジネスユニットの開発による、洗練された新装置LEO-iScanが発売されました。LEO-iScanは、内径(ID)を正確に測定する強力なレーザー装置とECシステムを搭載しており、現場での使用で堅牢性と信頼性が実証されています。管のフランジ上部から触媒担体グリッドまで、下降しながら管全体を検査します。これは改質管が触媒交換中の場合のみ可能です。改質管の内表面は機械加工されているため、過去のデータ(基準データ)がなくても、測定値はクリープの成長を容易に示します。このシステムでは、管の内径(ID)の全体像を把握するために、4軸構成の8つのレーザーを使用しています。

ECを使って内側から検査する利点は、プローブがクリープ損傷の可能性のある部位に接近できることです。クリープ損傷は一般的に内径(ID)表面から肉厚の約1/3の深さのところから始まります。

このシステムは、床下のクリープ損傷を監視する必要がある炉や、大きな湾曲によって管同士が接触し、外部からアクセスできない管のために開発されました。また、管のクリープ状態を確認するための二次的な管理装置としても使用できます。

検査結果は、管の直径を3D、360°ビューで表示します。この情報は、単一の管、単一の列、または改質装置全体について表示できます。

## 複数のレーザーとECによる ID(内径)測定(LEO-iScan)



## アウトレットピグテールの 状態監視



鍛造アウトレットピグテールは、その位置と課された機能のために、厳格な検査を必要とする重要部品です。クリープの識別と測定のために、弊社はピグテールの直径を管の出口からマニホールドまで測定する独自の装置を開発しました。

測定は2軸で行われます。この構成により、曲げ工程による固有の（そして通常の）直径の違いを考慮して、ピグテールのストレート部と湾曲部の両方の直径成長を評価することができます。手動のゲージ検査と比較して、この新システムは非常に高速で、信頼性が高く、再現性があります。また、ピグテールの全長にわたって正確な直径プロフィールが得られ、クリープの評価をデジタル形式で行うことができるため、将来の評価に役立ちます。

FOERSTERのMAGNETOSCOPEを使用して、アウトレットピグテールの透磁率を測定することも可能です。これは、管が故障した際にピグテールをニップするとき特に重要です。ここでは、材料がニップできる適切な状態、すなわち延性が十分かどうかを判断することが重要です。この手順は、漏洩のある管を分離するためにプラントを停止する必要がなく、オンラインで採用できます。最近まで、多くのプラントでニッピングを行うためだけにプラントを停止するか、少なくとも プロセスガスのカーボン/スチム比を落とす必要がありました。

上端部の検査

上端部の検査



メタン水蒸気改質装置 (SMR) の使用中の改質管の検査は、これまで炉内で加熱された管の長さを検査することが標準とされてきました。しかし最近の傾向として、一部のプラント設計で、これまで検査されなかった管の上端部分に内部欠陥や損傷が発見されたことにより、その見方が変わりました。欠陥が見つかったのは、上段点火のダウンフロー型と下段点火のアップフロー型という、まったく異なる2つの設計形態です。いずれの場合も「熱疲労」と呼ばれる損傷メカニズムが原因でした。

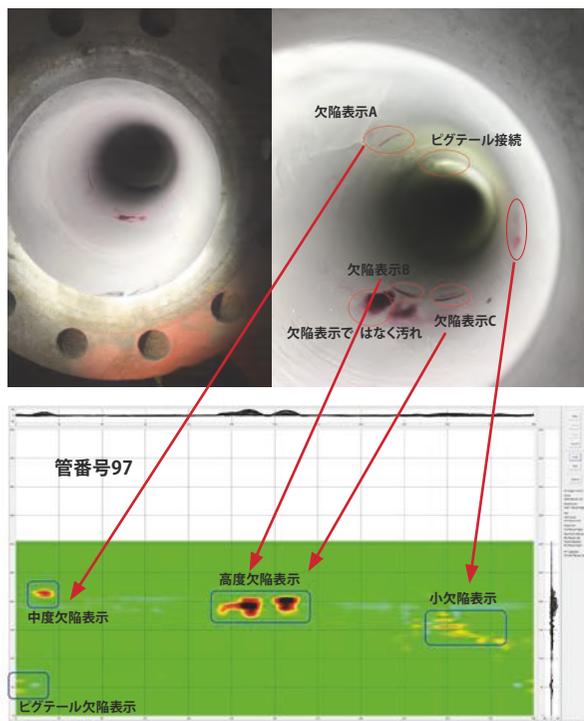


図3: 上端部の欠陥を示す典型的なスキャン画像

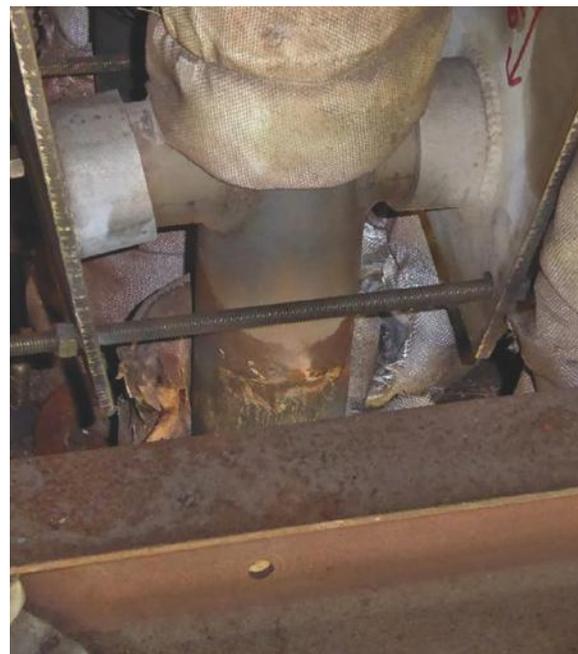


図4: 典型的な上端部

ここで強調すべきなのは、このような亀裂欠陥は内側から始まり、外側に向かって伝播しますが、予期せぬ故障が発生してサービスが停止するまで、何の前兆も示さないということです。また、これらの亀裂は一般的に、測定可能なクリープを示さないと知っておくことも重要です。したがって、上端部を効果的に検査するには、クリープ損傷よりも亀裂を検出する必要があります。

この種の故障が発生すると、壊滅的な物的損害、生産停止、安全性の侵害を引き起こす恐れがあります。なぜなら改質管の上端部で火災が発生した場合、頻繁に作業員が訪れる場所ではないため、しばらくの間発見されない可能性があるからです。隣接する管の上端や、インレット

ピグテール、構造用鋼材も過熱し、さらなる故障の連鎖を引き起こしかねません。

検査ビジネスユニットは、このような災害を回避するために、管の上部領域をチェックする信頼性の高い技術と専用装置を開発しました。専用の渦電流プローブを使って、上端部に亀裂やその他の熱疲労の兆候がないかをスキャンします。欠陥をタイムリーに発見することで、改質装置の安全で信頼性の高い運転に貢献し、甚大な損失をもたらす火災を防ぐことができます。

図3は、改質管の上端部の典型的なスキャン画像で、管壁に内面から放射状に広がる亀裂が見られます。このお客様は亀裂を浸透探傷検査 (PT) で確認しました。このような欠陥を迅速に発見することで、安全性を確保しつつ、資産の信頼性を高め、価値を守ることができます。

使用中の管の余寿命は？



TubeLifeは、改質管の余寿命を評価する際のギャップを解消するために共同開発された独自の（専売権付）ソフトウェアです。以前は、改質管の寿命を示す複雑な挙動を正式に扱うコードや手法は公開されていませんでした。TubeLifeは、ひずみと亀裂サイズのデータを独自のモデルに統合することでこれを実現しました。

過去には、この重要な数量の推定値は、API571、API579、R5および/またはBS7910などの建設後の規格の原則と要素に基づいていました。しかしこれらの規格の適用は、改質管の寿命に影響を与える損傷メカニズムの複雑さを直接反映していないため、理想的とは言えません。TubeLifeに組み込んだ改良ダイソンモデルは、材料の劣

化を予測し管の余寿命を計算する手段として、一定期間に蓄積されたひずみを評価します。さらに、管の故障モードは通例亀裂が原因で始動するため、解析では管壁の損傷を示す渦電流の測定値を加重します。

また、このソフトウェアは、工程情報や運転停止の履歴とともに、ひずみ測定のためレーザーによる直径データも利用します。

このモデルでは、改質管で発生することが知られているいくつかの劣化メカニズムを利用しています。これには、熱老化／軟化、ひずみ軟化、結晶粒構造の粗大化（特に二次炭化物）、可動転位密度の増加、クリープボイドの形

成／空洞化および成長などがあります。複数の劣化タイプを統合することで、管の耐用期間全体を通したひずみの蓄積に基づく現実的な余寿命の推定と、EC信号による亀裂形成の正確な評価が可能になります。

この評価手法は、世界中の多くの企業で成功を収めています。

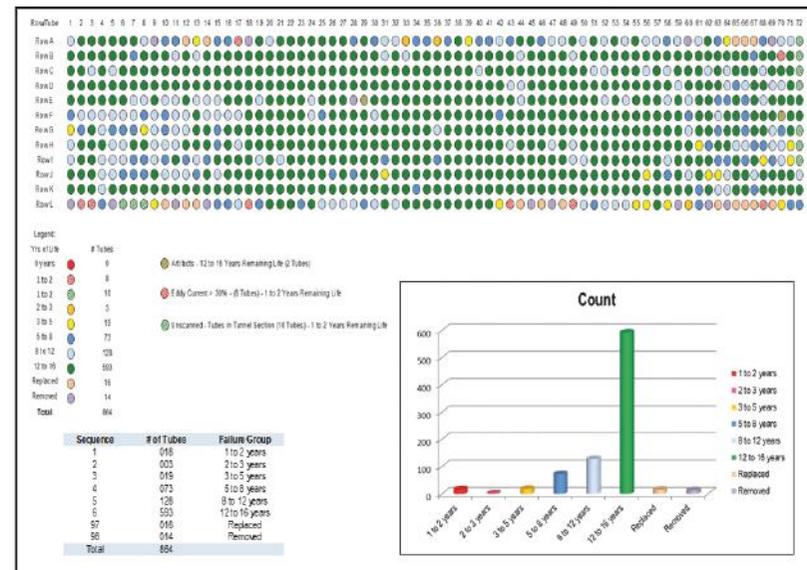


図5: 余寿命評価の典型的な出力例

## 渦電流による亀裂検査

### 渦電流法による非破壊検査

製造物責任に関わるリスクは言うまでもなく、品質に厳しい目が向けられる昨今、全数検査の必要性が高まっています。DIN EN ISO 15549に準拠した渦電流(EC)法は、非破壊・非接触の材料検査方法です。亀裂、細孔、空洞、アーティファクト(人為的ミスの結果)などの材料欠陥を明らかにし、カップリング液を必要とせずに、迅速・確実に、かつ経済的に検査を実施することができます。

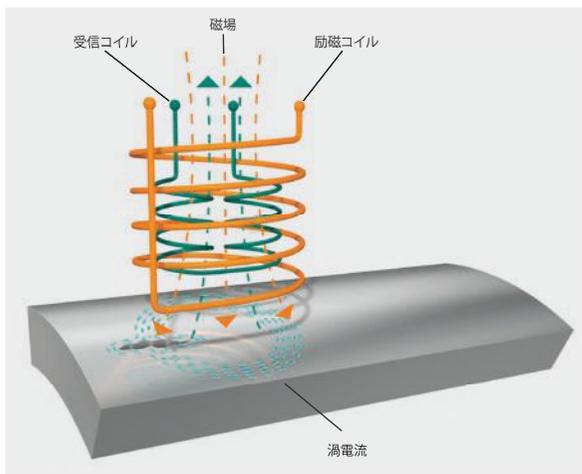


図6: 渦電流検査の原理

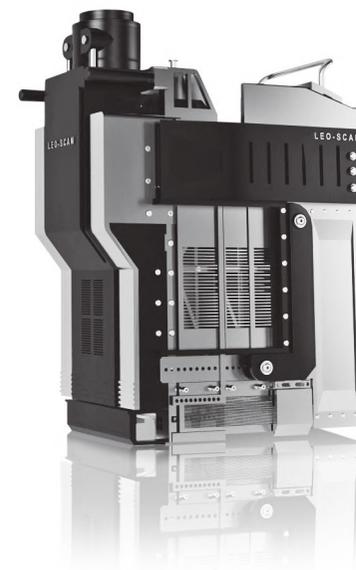
励磁コイルで磁場を発生させ、材料に高周波の渦電流を誘導します。その結果得られる信号は、通常、差動測定コイルで記録されます。この受信信号は、励磁信号に対する振幅と位相のずれを評価することによって、材料の微細な欠陥も明らかにします。



図7: クリープ割れの高倍率顕微鏡写真

## 亀裂の検査

亀裂検出では、静止した試料の長さ方向に渦電流プローブを移動させます。材料に損傷がない限り、電気抵抗が均一であるため、渦電流は均一に流れます。しかし亀裂があると、渦電流の密度が損傷のない部分とは異なる様子を示します。この変化は記録され、欠陥信号として表示されます。浸透性は使用する周波数によって異なり、高い周波数は材料の表面近くに集中し、低い周波数は内部に深くまで浸透します。プローブの種類、サイズ、および検査周波数は、必要な検査の種類と検査対象の材料に基づいて選択されます。



LEO-Scan



### FOERSTER検査タワー

#### 検査機器を実際に使用・検証する、現実に近い検査施設

新たに設置された検査タワーは、数本の管が本来の垂直方向に立てられた状態(上部フランジを含む)で設置されており、水蒸気メタン改質装置の触媒管の列を完全に再現しています。この構成では、新規開発品の試用や試作品・改良品の最適化のために、現実と同等のスキヤニング条件を設定することができ、外径(OD)および内径(ID)自動スキヤニングシステムによる実験が可能になりました。さらに、先進のECポータブル機器を使って、制御プログラムやデータ収集プログラムをリアルタイムに適用するなど、ソフトウェアの検証にも最適です。

世界中に

世界中に拠点を持つ  
ドイツのロイトリングエンに根ざして



**世界中に事業展開 - いつでも、どこでも。**

FOERSTERグループは設立当初から、グローバル市場で効率的かつ慎重に事業を展開するために、専門家の世界的ネットワークの構築に努めてきました。世界のどこで改質管検査の必要性が生じて、弊社の検査ビジネスユニットは、お客様のニーズと要件に対応いたします。

**本社**

- Institut Dr. Foerster GmbH & Co. KG, Germany

**子会社**

- FOERSTER Instruments Inc., Americas
- FOERSTER (LOTIS & MANTIS), Americas
- US Thermal Technology Inc. (USTT), Americas
- FOERSTER (Shanghai) NDT Instruments Co., Ltd., China
- FOERSTER Japan Ltd., Japan
- FOERSTER France SAS

**代理店**

- Hydro Kleen Systems do Brasil Limpeza Industrial Ltda, Brazil, Argentina
- Middle East Star (MES) – Tragency Middle East, Egypt
- Pipeline Supply Company LLC. (India), India
- PT. Profluid, Indonesia
- NDT Corrosion Control Services Co. (NDTCCS), Kingdom of Saudi Arabia, Bahrain
- Calibre Petrochem SDN. BHD., Malaysia
- Leap Engineering Solutions, Pakistan
- Marant Polska SP z o.o., Poland
- Arsenal Group Co. Ltd, Russia
- Safetech Co., Ltd., South Korea
- Pipeline Supply Company LLC. (PSC), Sultanate of Oman



**FOERSTER**

Parent Company of MP and USTT  
Owner of LOTIS and MANTIS Technology

**Institut Dr. Foerster GmbH & Co. KG**

In Laisen 70 | 72766 Reutlingen | Germany

+49 7121 140 0 | m +49 160 9461 7857

inspection@foerstergroup.com

[foerstergroup.com](http://foerstergroup.com)

**U.S. Thermal Technology Inc.**

**A FOERSTER Group Company**

140 Industry Drive | Pittsburgh, PA 15275

+1 412 788 8976 | m +1 713 806 6561

inspection@foerstergroup.com

Kara Ellis

**FOERSTER INSTRUMENTS INC.**

**(LOTIS & MANTIS)**

906 Geneva Street, Shorewood, IL 60404

C: 815-979-3238

[kara.ellis@foerstergroup.com](mailto:kara.ellis@foerstergroup.com)