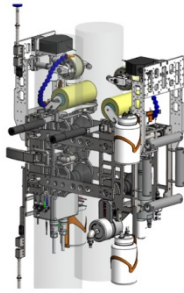


ロボットを活用した安全で効率的な配管検査サービス

Safe and Efficient Piping Inspection Service Utilizing Robots



林 恭平*¹
Kyohei Hayashi

久保田 雄貴*¹
Yuki Kubota

本田 雅幹*¹
Masaki Honda

上林 正和*²
Masakazu Kamibayashi

岩崎 修吾*³
Shugo Iwasaki

柴田 健吾*⁴
Kengo Shibata

プラント設備を始めとした三菱重工業株式会社(以下、当社)製品の稼働率向上、ならびに定期検査工期短縮の観点から、高効率な検査サービスの確立が望まれている。しかしながら、プラント設備における高所・閉所空間の設備を人力で検査する際、足場架設や関連設備の一時撤去などの付帯工事が必要となり、作業に関わるコスト・時間の削減と十分な安全確保が課題であった。当社は、人の代わりに配管の外側や中を自走して検査するロボットを開発した。本ロボットによりこれら設備を安全かつ短期間で検査し、プラント設備の状態診断・メンテナンス計画立案を行うサービスを提供する。

1. はじめに

化学プラント(アンモニア・メタノール)や火力・原子力発電プラントを始めとした当社製品は、過酷な環境で長期間に亘って運用されることが多く、経年劣化に伴う各設備の損傷が懸念される。プラント設備は全長数百 km に亘る多種多様な配管群にて構成されているものもあり、それら配管のうち一か所でも損傷が発生すると、プラント全体が数週間に亘って停止し、お客様ならびに最終顧客へ多大な影響が及ぶ。そのため、各配管設備に生じる損傷形態を十分に考慮したより信頼性の高い検査を定期的かつ網羅的に行い、プラント保全計画を策定する必要がある。加えて、近年では、アンモニア・メタノールならびに電力需要の高まりなどからプラント設備の更なる稼働率の向上が求められており、より短い期間で広範囲を検査することが必要とされている。

当社では、プラント設備の保全にロボットを活用することで、プラント配管設備を安全かつ短期間で検査し、設備の状態診断・メンテナンス計画立案を行うサービスを展開している。本報では化学プラント、ならびに石炭ガス化複合発電プラント(IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle)向けに開発した2つのサービスを紹介する。

2. 化学プラント/リフォーマ反応管向け検査ロボット(RIDe)

2.1 化学プラント/リフォーマ反応管の保守管理上の課題

当社は、メタン(天然ガス)等の多様な化学燃料を、よりクリーンで使いやすいアンモニアやメタノール等の化学製品へ改質・合成する技術を開発、蓄積し、それら化学製品を製造する化学プラントのエンジニアリングならびにアフターサービス事業をリードしてきた^{(1), (2)}。

図1に当社が建設した大型メタノールプラントの一例を示す。多くのメタノール・アンモニア製造プラントは、天然ガスを水蒸気改質した合成ガスを原料としている。水蒸気改質は吸熱反応であるため、原料ガスを加熱しながら触媒反応が行われる。加熱方法としては、例えば触媒を充填した耐熱鋳鋼製反応管を炉内に設置し、炉内をバーナで加熱する。この場合、反応管内は高温・

*1 総合研究所 サービス技術部

*2 総合研究所 サービス技術部 主席研究員 工博

*3 総合研究所 化学研究部 主席研究員

*4 エナジードメイン SPMI事業部 技術部

高圧となる。実機プラントにおける水蒸気改質器(スチームリフォーマ)では、これら高温・高圧環境に起因したリフォーマ反応管のクリープ破断が主な損傷形態として挙げられており、特にバーナ直火や管内閉塞等によって局所加熱部(ホットスポット)が生じ、プラント設備全体での最弱点部位になりえる。更にバーナ火炎性状や改質反応速度などのプラント運転状況によって反応管毎にホットスポット発生リスクとクリープ損傷進行速度が異なる。定期的な検査を実施せずにホットスポット発生を見逃した場合、クリープ破断に伴うプラントの計画外停止が発生し設備稼働率が大幅に低下するリスクが高まる。そのため、予防保全の観点から一定の時間間隔で管取替を行い、クリープ破断発生を未然防止するような予防保全(TBM:Time Based Maintenance)も考えられるが、そのためには取替え間隔を短くするしかなく、場合によっては過剰な保全に繋がるため、稼働率向上と運用コスト低減を両立させることが難しい。

したがって、プラント設備の稼働率向上と運用コスト低減のためには、設備の状態を診断し、その結果に応じた予防保全を行う状態保全(CBM:Condition Based Maintenance)が有効なケースが多い。具体的には、定期的かつ短期間で反応管の全数検査を実施するとともに、反応管毎にクリープ損傷度を考慮した余寿命診断を行い、合理的なプラント保守計画とすることが必要となる。

しかしながら、大型メタノールプラントのリフォーマは、長さ約14mの縦置き反応管が700本以上あるため、反応管の全数・全長を詳細検査することは多大な労力と時間を要する。特に高所部を人力で検査する場合、炉内に高さ10m以上の足場を架設する必要があり、その分の期間・コストが発生する。更に、14mの縦置き反応管における最大損傷位置を人力で網羅的に探索することは、作業時間・作業性の観点で現実的ではなく、抜き取り検査となることから劣化状態を網羅的に把握するには限界がある。以上のことから、リフォーマ反応管の保守管理上の問題は、足場架設に伴う検査期間の増加と、人力での抜き取り検査による信頼性の低下である。そこで当社は、高さ約14mの垂直配管の外側を自走しながら全数・全長を足場架設なしで人の代わりに検査できるロボットを開発した。



図1 大型メタノールプラント(納入先:Brunei Methanol Company)

2.2 ロボットの性能と検証試験結果

リフォーマ反応管の余寿命診断においては、後述するように反応管膨出率(内径)の高精度評価が必要であり、他社提供の類似サービスでは内径計測を所望の精度で計測できないことから、当社でロボットを独自開発することとした。図2に当社が開発したリフォーマ反応管向け検査ロボット(RIDe:Reformer Inspection Device)を示す。RIDeは、エアモータにより反応管の外側を自走・昇降する走行台車機構、レーザセンサによる外径計測機構、ならびにタイヤ型超音波センサによる肉厚計測機構を有する。走行台車は、管の両側から容易に着脱できる構造であり、約250mm/sの速度で反応管上を昇降できる。タイヤ型超音波センサには、超音波ビームを集束できるプローブを内蔵し、超音波難透過材である耐熱鋳鋼製リフォーマ反応管の肉厚を高い精度で測定できる。また、装置の制御・データ取得は、炉外に配置するPC上の専用ソフトウェアにて行い、管軸

方向における 1mm ピッチの連続計測データから外径と肉厚のプロファイルを確認することができる。それら機構の組合せによって、反応管全長 14m の外径と肉厚を5～10 分程度の短時間で計測し、それらから内径の導出が可能である。

図3にメタノールプラントのリフォーマにおいてホットスポットが認められたため抜管された反応管を対象とした RIDe による形状(外径・肉厚・内径)の計測結果の一例を示す。全長に亘って反応管形状を定量化し、ホットスポットによる膨出部を検出できた。RIDe による内径評価値で膨出率が大きかった位置は、運転中に観測されたホットスポット位置と一致したことから、RIDe が最大損傷部を検出できることが実証された。また、走行性や反応管の形状及び寸法の計測可否については実機プラントにおいても検証済である。

図4にリフォーマ反応管の膨出率とクリープ余寿命の相関図(イメージ)を示す。当社は、様々な金属材料のクリープ損傷挙動と評価手法に関する多くの知見を持っており、これらを活かしてリフォーマ反応管の膨出率からクリープ余寿命を評価する手法を構築した。これにより、RIDe で取得した反応管全長の内径膨出率からクリープ余寿命を定量的に推定できるようになった。



図2 リフォーマ反応管向け検査ロボット(RIDe)

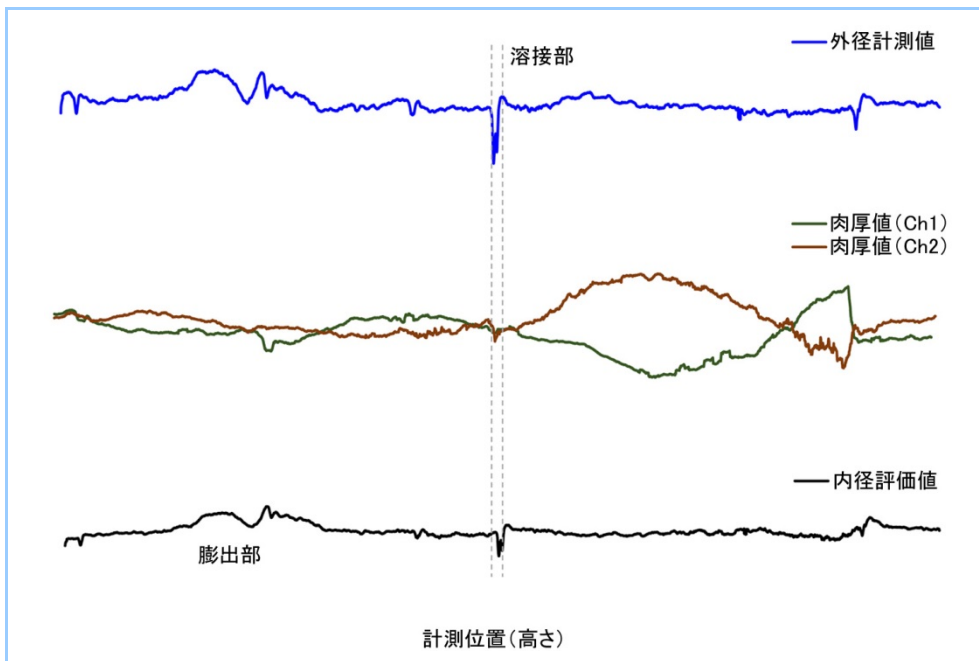


図3 モックアップ配管における計測結果

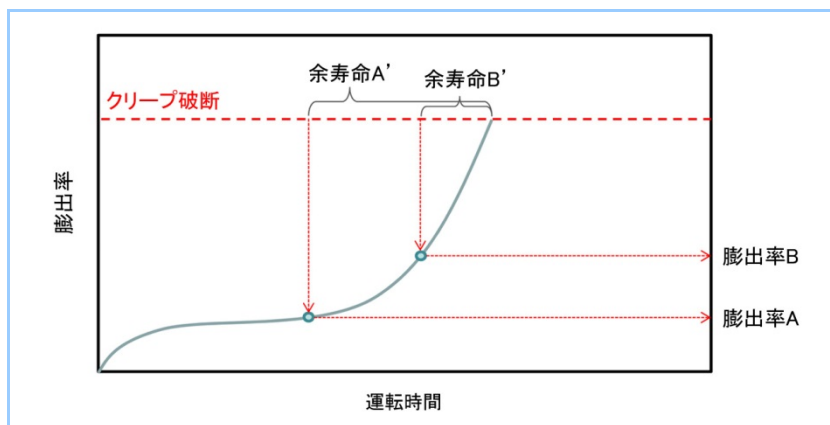


図4 膨出率とクリープ余寿命評価線図(イメージ)

2.3 ロボットを活用した当社サービスの提供価値

以上述べた通り、RiDe の適用によって足場架設なしでリフォーマ反応管全長の膨出率計測と余寿命評価が可能となった。すなわち、足場架設による検査期間の長期化と人力での抜き取り検査による信頼性の低下といった問題を解決可能にした。RiDe は、評価項目や現地状況によるが、1本あたり5～10分の短時間で反応管全長の膨出率を計測できることから、定検期間の大幅な短縮に貢献できる。

次に、他社が提供する類似の検査サービスと比較することによってRiDeならびに当社サービスの特長を考える。RiDeと同様に、反応管の外側を自走する検査ロボットがいくつか実用化されている。このうちレーザによる外径計測を行うものはRiDeと比較して検査時間が短いことが特長であり、初回計測データと定検毎の計測データの差分として外径の膨出率を求めている。しかし、耐熱鋳鋼製反応管は外面が鋳造状態のままであるため凹凸やうねりがあり、外径のばらつきが大きい。さらに、運転中に反応管外面は酸化減肉するため、外径のみから膨出率を計測するロボットでは正確な膨出率は求められない。一方、反応管の内面は、反応管の鋳造後に機械加工するため、長さ方向における初期の内径分布(ばらつき)が極めて小さい。また、運転中は還元雰囲気となるため酸化減肉も生じない。このため反応管の炉外非加熱部の内径を基準として膨出率を求めることができるRiDeは、内径の計測精度が高く、定検毎の差分から求められる膨出率の信頼性も高い。なお、内径を計測する手法には、反応管内にセンサを挿入するものもあるが、数年毎に行う触媒交換時しか計測できない。また、反応管内でセンサが回転することで周方向の計測位置がランダムとなり、定検毎の定点測定ができない。すなわち、触媒を抜かずに内径を計測できること、周方向位置再現性が高いこと、更に内径膨出率に基づいたクリープ余寿命評価ができることが、RiDeを用いた余寿命診断サービスの強みである。

ただし、図4に示したようにクリープ初期は膨出率が僅かであるため、初期の劣化挙動を正確に評価することは困難である。そのため、当社は、金属表面のレプリカ法によって冶金学的にクリープ余寿命を評価する手法を開発しており、それを用いることでクリープ初期から詳細な余寿命評価ができる。すなわち、RiDeによって反応管全数をスクリーニング評価し、寿命初期と判断された箇所やダブルチェックが必要と判断された箇所に対して、レプリカ法による冶金学的な寿命評価を行うことができる。したがって、クリープ初期から末期まで各フェーズに応じた余寿命を正確に診断でき、プラント設備全体の最適なメンテナンス及び運用計画をお客様に提案可能である。

以上のように、当社が提供するサービスは、検査ロボット RiDe を用いた効率的なリフォーマ反応管の全数・全長の計測に加え、レプリカ法による冶金学的な詳細評価、更にプラントメーカーとして長年蓄積してきたクリープ評価技術・知見などを活かした余寿命評価を併せて行うことができる。すなわち、お客様のニーズやプラントの状態に応じて多角的な観点で保守・運用に関する一気通貫サービスを提供できることが、本サービスの特長である。それらサービスの提供により、反

応管漏洩によるプラント計画外停止の未然防止に加え、定検期間の短縮ならびに反応管更新サイクルの最適化をご提案し、お客様のプラント保守コスト削減及び稼働率向上に貢献する。

3. IGCC プラント/生成ガス配管検査ロボット

3.1 IGCC プラント/生成ガス配管の保守管理上の課題

3章では IGCC プラントの生成ガス配管検査ロボットを活用したサービスについて述べる。図5に示すIGCCプラントの生成ガス配管では、ガスに含まれる未燃粒子(チャー)が管内を高速で通過するため、管内面のエロージョンが懸念され、定期的に管内面のライナの減肉状況を把握する必要がある。管内面減肉を把握する一般的な手法として、配管の外面から超音波を伝搬させ、肉厚ならびに内面減肉量を計測する超音波探傷法(UT法:Ultrasonic Testing法)が知られているが、生成ガス配管は図6に示すように管の内側に減肉対策用のライナを施工しているため、管の外側からUT法を適用することはできない。これに対し、管の内側から減肉状況を把握するためには、配管を部分的に取り外して開口部を作り、そこから人が配管内に入って検査する必要があるが、配管の取り外しや検査後の復旧などの付帯工事に多大な時間とコストを要する。そのため、開口部を極力少なくすることが望ましい。更に、垂直管を含む配管では、開口部からアクセスして検査できる範囲は限られ、無理にアクセスすることは安全面の問題もある。以上のことから、生成ガス配管の保守管理上の課題は、全範囲を網羅的に検査するうえでの時間とコストの低減と作業員の安全確保である。

そこで当社では、上記課題の解決を目的として、垂直管を含む配管の内部を自走し、最小限の付帯工事で配管の減肉状況を把握可能にする配管検査ロボット及びサービスを開発した。

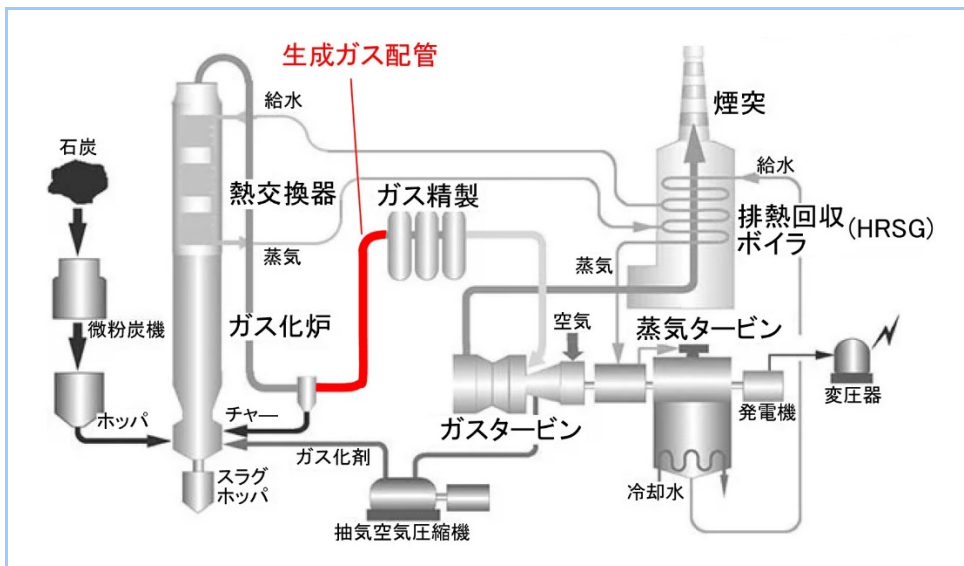


図5 空気吹きIGCCの概略系統における生成ガス配管

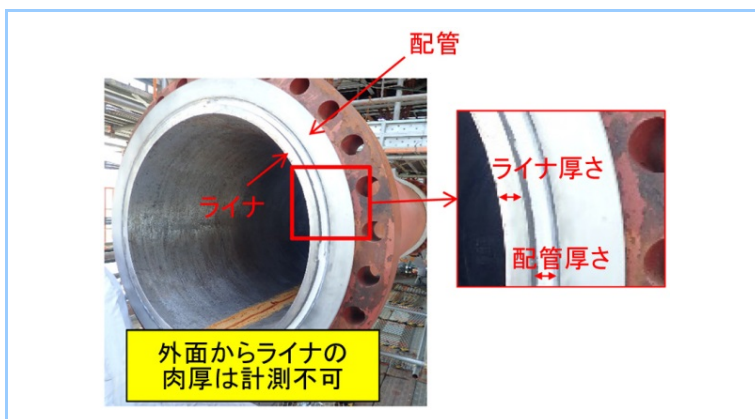


図6 生成ガス配管の外観状況(フランジ接続部を取り外した状態)

3.2 サービスを実現するためのロボットの性能と検証試験結果

3.2.1 ロボットの走行性能

ロボットの外観情報を図7に示す。本ロボットは3つの車両で構成され、第一車両と第二車両、第二車両と第三車両をそれぞれアームで接続し、ばねの力で配管内面にタイヤを押し付けて姿勢を保ちながら、各車両のタイヤをモータで回転させて走行する。また、タイヤの押し付け力を強めることで、水平部だけでなく垂直部や、ベンド部も走行可能である。さらに、走行用のモータとは別のモータにより、タイヤの向きを進行方向(管軸方向)から管周方向に回転させる機構(ステアリング機構)を備えており、周方向に移動することも可能である^(※1)。なお、生成ガス配管の水平部の一部やベンド部には図8に示すようなチャーが堆積しているが、これにより走行や減肉状況の確認が困難な場合は、図9に示すように吸引ホースを搭載して、チャーを除去できる。これにより、配管内面にチャーが堆積していても走行と検査が可能である。

※1 車体とアームの角度が周方向で変化するベンド部は、車体の姿勢を保てなくなるため周方向への回転はできない。

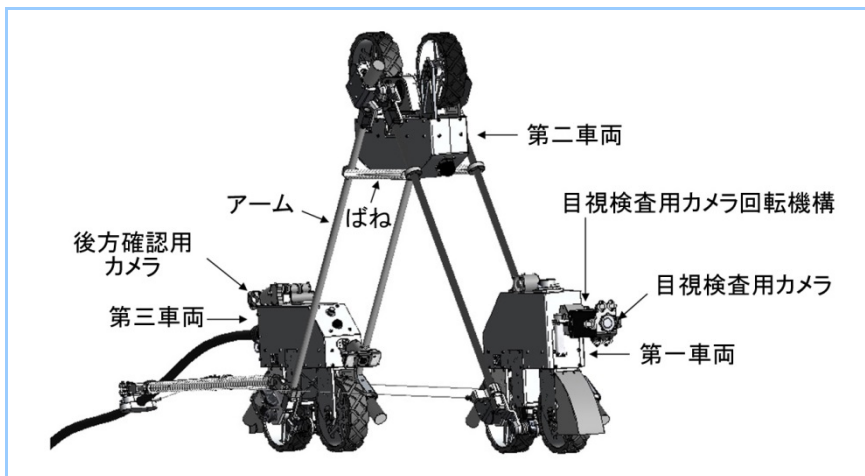


図7 生成ガス配管検査ロボットの外観情報

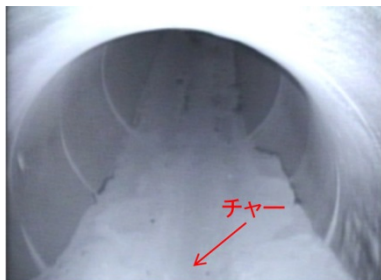


図8 ベンド部におけるチャーの堆積状況



図9 チャーの吸引状況

3.2.2 ロボットの検査性能

目視検査は、図7に示した第一車両に搭載した目視検査用カメラで行う。本カメラは、モータにより管周方向に回転可能であり、周方向に車体を回転できないベンド部でも管全周を目視検査できる。本ロボットはカメラによる目視検査以外にも、レーザ及びUTを活用して、管内面形状を定量的に評価できる機能を有する。目視検査用カメラを外し、レーザ装置をロボットの第一車両に搭載した状況を図10に示す。本装置では、アクリル鏡筒の先端から管の半径方向にリング状のレーザを照射し、それを鏡筒根元のレーザ観察用カメラで撮影する。更に、撮影した写真を画像処理することで管内面の形状を 0.1mm 単位で定量化できる。本手法を用いることで、1回の計測で

管全周の形状を定量的に把握できるため、減肉部のスクリーニング検査に有効である^(※2)。次に、UT装置をロボットに搭載した状況を図11に示す。第二車両に取り付けたUT装置では、エアシリンダの先端に設置した UT 探触子を、エアシリンダを伸縮させることで管内面に押し付け、超音波により肉厚を計測する。なお、UT 探触子にはノンカプラント探触子を採用しており、接触媒質を用いずに肉厚計測が可能である。

※2 ベンド部の腹側の一部はカメラの画角の範囲外となり、検査適用外となる。

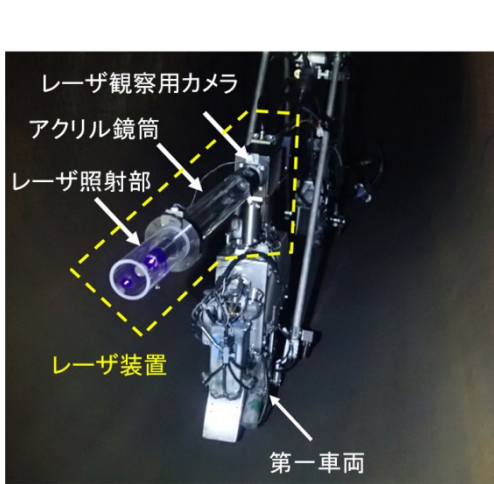


図 10 レーザ装置の搭載状況

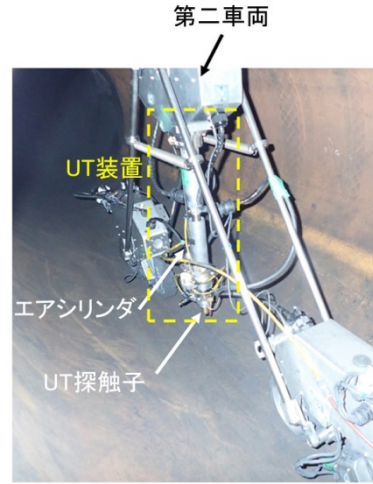


図 11 UT 装置の搭載状況

3.2.3 性能確認試験

図12に示す実機の生成ガス配管や、実機を模擬したモックアップ配管を用いてロボットの走行性を検証した。その結果、図12に示した開口部からロボットを上方側と下方側に挿入し、実機生成ガス配管の全長(約90m)を走破することができた。



図 12 実機検証に用いた生成ガス配管

また、実機の生成ガス配管において、第一車両に搭載した目視検査用カメラによる減肉部の検出可否を検証した。図13にカメラで撮影した減肉部の一例を示す。これからわかるように、目視検査用カメラで減肉部を検出可能なことを確認した。

レーザ装置については、モックアップ配管で検証試験を行い、本装置で計測した半径と内側マイクロメータで計測した半径の差を比較した。その結果、図14に示すように、各計測値の差は±1.4mm以下であった。UT装置についてもモックアップ配管を用いて、本装置で計測した肉厚と一

一般的なUT装置を用いて手動で計測した肉厚の差を比較した。その結果、**図 15**に示すように、各計測値の差は±0.2mm 以下であり、高い精度で肉厚を計測できることを確認した。なお、ロボットのタイヤにはエンコーダを搭載しており、カメラ、レーザ装置、UT 装置で計測した減肉箇所の位置情報を記録することができ、定点検査による経年変化を把握することができる。

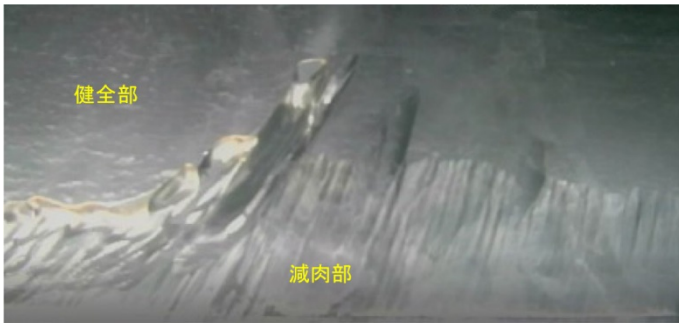


図 13 生成ガス配管検査ロボットで検出した減肉部

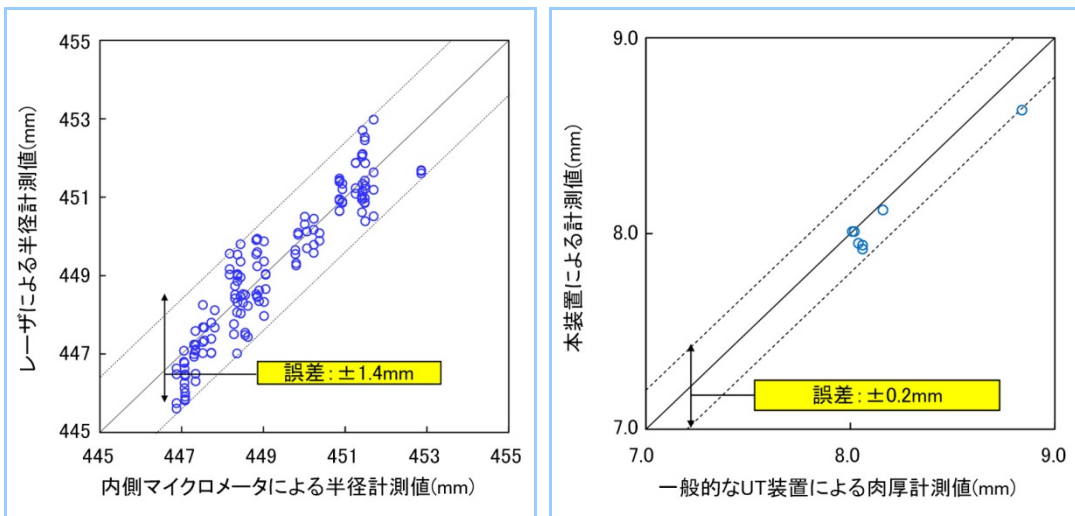


図 14 レーザによる計測精度の検証試験結果 図 15 UT による計測精度の検証試験結果

3.3 ロボットを活用したサービス

開発したロボットを活用した、IGCC の生成ガス配管向け検査手順を以下に示す。

- (1) 吸引ホースによるチャークの除去
- (2) 目視検査用カメラとレーザ装置による減肉部のスクリーニング
- (3) UT 装置による肉厚計測

上記により、人が配管内に入ることなく、減肉部を網羅的にスクリーニングし、ライナの肉厚を安全に把握することが可能となる。本ロボットは、一般的な目視検査に加え、レーザ計測により減肉部を定量的かつ網羅的に検出することが可能であるため、生成ガス配管のトラブル防止に貢献できる。また、配管の肉厚を定点検査することにより、減肉速度を予測することが可能となる。これにより、次回の検査時期やライナの交換時期を予測することができ、計画的な設備保守が可能となる。

さらに、ロボットを適用した際の検査期間短縮効果を試算した(**図 16**)。その結果、ロボットを適用することで開口部を設けるための付帯作業に係る時間を短縮することが可能となり、付帯工事を含む全体の検査期間を 10 日間短縮可能な目途を得た。これにより、プラントの稼働率向上にも貢献できる。

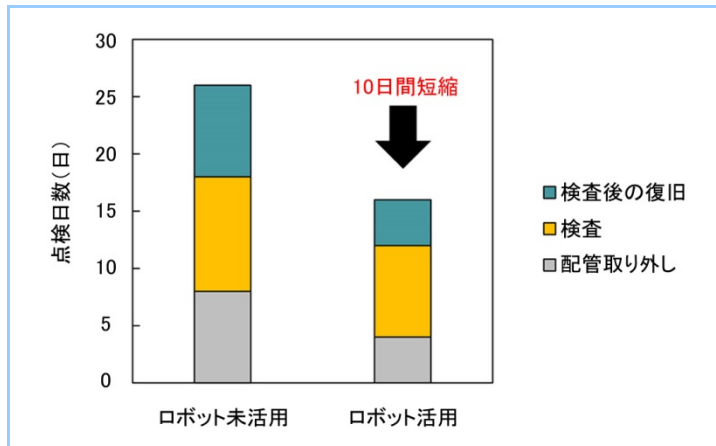


図 16 生成ガス配管検査ロボットの適用効果

4. まとめ

本報では、当社が開発した化学プラント向けリフォーマ反応管検査ロボット(RIDe)、ならびにIGCC向け配管検査ロボットによるサービスの2例を紹介した。それぞれ、配管の外側と内側とを自走しながら検査できる行う当社オリジナルロボットであり、超音波センサを備え、配管の肉厚や内径等を評価・評価して設備の状態を診断できる。いずれも足場架設等の大掛かりな付帯工事の削減に寄与し、プラント設備の高所・閉所空間を安全かつ短期間で検査可能となった。また、人の手では困難であった全長・全数検査を実現し、信頼性の高い寿命診断とメンテナンス計画の立案を可能とした。これらは、当社が保有するロボティクス技術及び超音波探傷技術、更にはプラントメーカーとして長年蓄積してきた材料寿命評価技術や知見などを活かした配管設備の状態診断・メンテナンスサービスである。これらのサービスについては、今後も実機での適用実績を重ねながら、更なる高度化と適用範囲の拡大を図り、定検期間の短縮、プラント保守コストの削減、及び稼働率向上などの価値をお客様に提供していく。

参考文献

- (1) 唐崎ほか, 大型化学プラントのプロセスエンジニアリング, 三菱重工技報, Vol.33 No.5 (1996) p.310~313
- (2) 松本ほか, 大型メタノールプラントへの新技術適用, 三菱重工技報, Vol.33 No.5 (1996) p.318~321