

「新技術を活用した屋外貯蔵タンクの効果的な予防保全に関する調査検討報告書」の概要

消防庁危険物保安室

1 はじめに

消防法令上、特定屋外貯蔵タンク底板の溶接部検査は、磁粉探傷試験（以下「MT」という。）又は浸透探傷試験（以下「PT」という。）により行うことと定められており、検査を実施するには前後処理としてコーティングの剥離、再塗装を行う必要があります。一方、渦電流探傷試験（以下「ECT」という。）はコーティング上から検査を行うことが可能であることから、特定屋外貯蔵タンクの溶接部検査においてもECTの活用について、関係団体から望まれていました。

このことを踏まえ、消防庁では令和6年度に「新技術を活用した屋外貯蔵タンクの効果的な予防保全に関する調査検討会」を開催いたしましたので、その内容について紹介します。

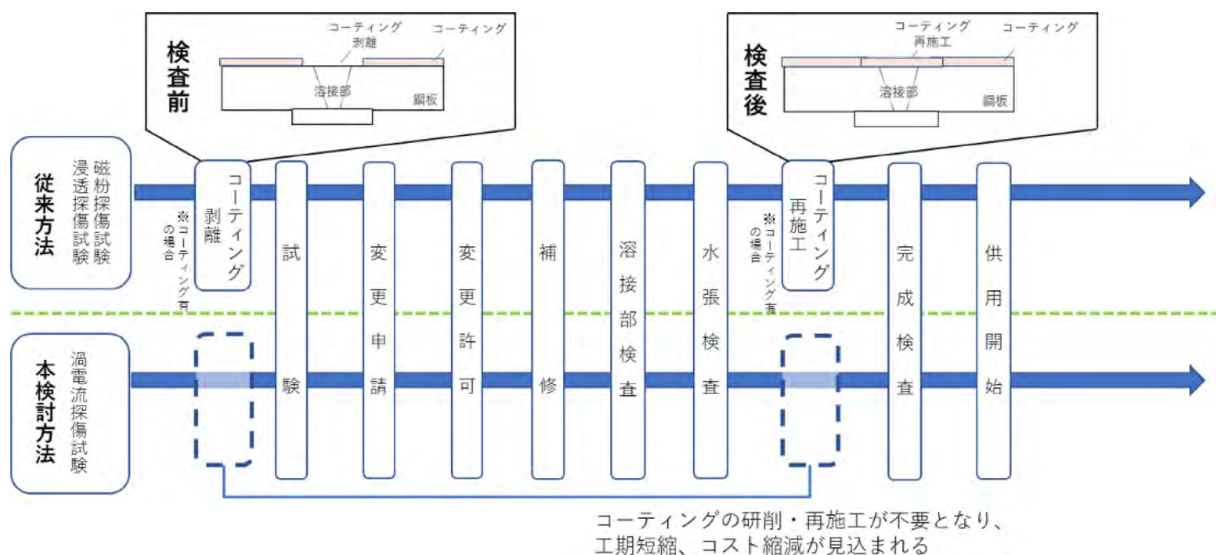


図1 溶接部検査に関する工程例

2 渦電流探傷試験の原理と特徴

はじめにECTについて説明します。ECTは非破壊試験の一つで、電磁誘導現象によって試験体に発生した渦電流がきず等によって乱れる変化を検出して探傷する試験で、表面開口きず及び表面直下のきずが検出可能です（図2）。

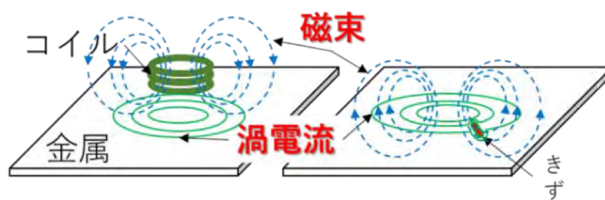


図2 ECTの原理

特徴

- ①コーティング上から探傷が可能である。
- ②MTなどと比べて探傷速度が速い。
- ③デジタルデータとしてアウトプットされる。

ただし、渦電流はきず以外の表面形状の変化でも乱れるために、きず信号とノイズ信号の比(SN比)が小さくなると、きずとノイズの区別が付きにくくなります(図3)。また、リフトオフと呼ばれる試験面とプローブ(探触子)とのギャップが大きいいほど、きずの検出性能が低くなるという課題がありました。しかしながら、近年の技術進歩により、ノイズの抑制性能やリフトオフに対する性能が向上したことに伴って、きずの検出性能が飛躍的に向上しています。

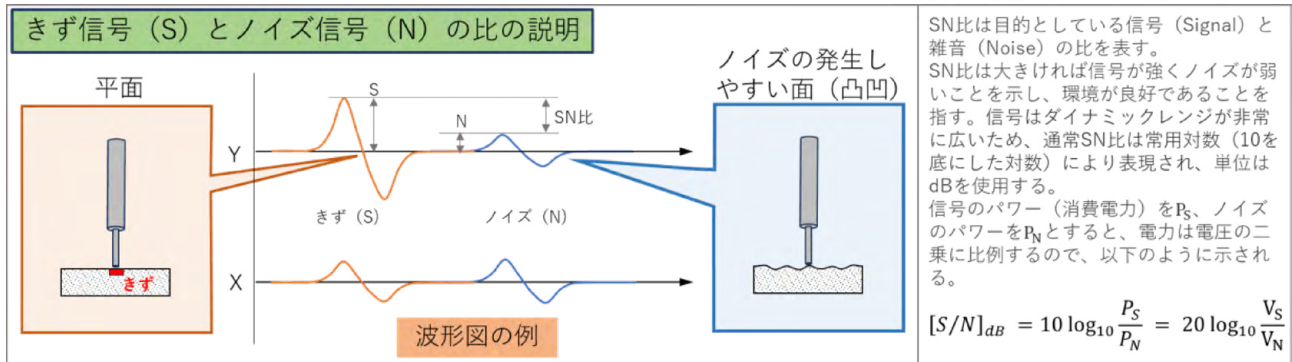


図3 きず信号 (S) とノイズ信号 (N) の説明

3 導入までの課題の整理

特定屋外貯蔵タンクの底部溶接部は、隅肉溶接による重ね継手、T継手、突合せ継手の3種類があり、現場にて手溶接や自動溶接などで施工されます。ECTを適用した場合に溶接部は、表面形状の凹凸などによるリフトオフやノイズの発生が想定されます。さらに、コーティングがある場合には、リフトオフが増加することが想定されます(図4,5)。このような条件下においても基準となるきずを適切に検出できるか、また、検出したきずを適切に評価できるかの確認を行いました。さらに、現場作業時の留意点を確認するため、実タンクを対象とした検証を実施しました。当検討会において行った室内試験、現地試験の検証試験項目と内容を表1に示します。

なお、検証には一般に販売されている探傷器及びプローブ(以下「探傷器等」という。)のきずの検出性能を確認するため、複数機種の探傷器等を用いて試験を行いました。

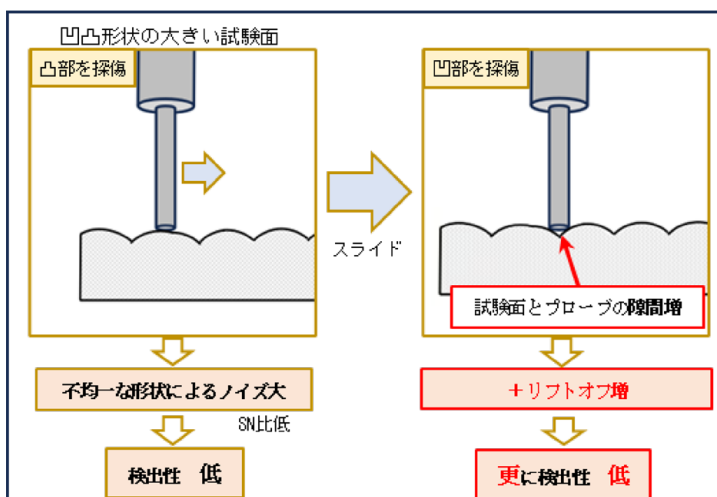


図4 表面の凹凸形状が大きい試験面での検出性

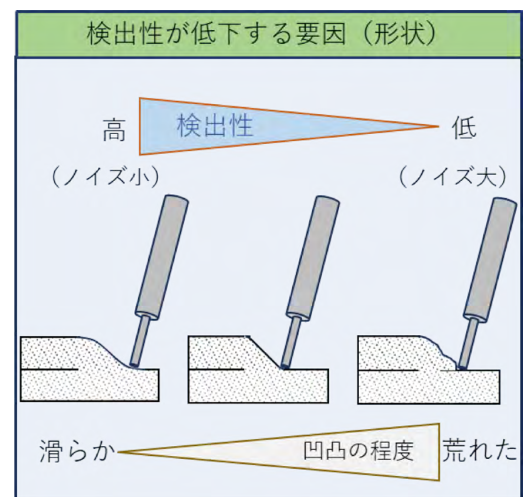


図5 隅肉溶接の断面形状の凹凸によるきずの検出性

表1 検証試験項目と内容

	項目	内 容
室内	①材質によるきずの検出性確認	【概要】 対比試験片に用いる材質（SM400）の検出性を確認する。 ・ECTの感度を設定する対比試験片について検証する。 （これまでに検証した材質SS400、SPV490Qと、SM400の検出性を比較し、対比試験片の材質として妥当であるか評価する。） ・試験片：きず番号S17～S25（材質SM400・平板）
	②きずの評価方法を検証	【概要】 きず長さの評価方法について検証する。 ・マルチアレイとシングルプローブ方式などによる長さ評価の方法について検証する。 ・試験片：きず番号S17～S25（振幅-応答長さ平面） S26・S27による判定
	③溶接部の形状及びきずの位置による検出性確認	【概要】 重ね継手溶接部のきずの検出性を確認する。 ・ECTプローブを走査し難い重ね継手溶接部におけるきずの位置毎による検出性を確認する。（3種類） ・試験片：きず番号S12～S14、S28～S36（材質SS400）
	④割れきずの検出性確認	【概要】 割れきずに対する検出性を確認する。 ・試験片：きず番号37（長さ7mm、深さ3mmの割れきず）
	⑤溶接部の形状変化による検出信号の低下に関する数値解析	【概要】 計測試験で得にくいデータを、三次元非線形有限要素法による数値解析（シミュレーション）にて確認する。 ・モデル：突合せ接手余盛部
現地	⑥現地試験による検証	【概要】 実タンク2基に対し現地試験を実施し検証する。 ・検証データの収集と併せて実運用時における問題点や注意事項などが無いか確認する。

4 検証結果

室内試験及び現地試験において、表1の検証を行いました。詳細の検証内容及び検証結果については割愛させていただきますが、検証結果から以下のことがわかりました。

室内試験

【試験片の材質】

- 渦電流探傷試験は試験体の導電率、透磁率、形状等の影響を受けることから、試験片は実際のタンクの材質毎の部位から採取し製作することが望ましいが、3種の材質（SS400、SPV490Q、SM400A）においては、きずの検出性が同等であったことから、きずの検出性に影響がないことが確認された場合においては、同等とし扱うことが出来ると考えられる。ただし、試験片の材質としては、品質が一定な材質（SM400）が適している。

【必要な試験片】

- きずを適切に評価するため、きずの大きさを判別する性能を把握する必要があるため、基準きずを中心とし、異なる長さや深さのきずを施した試験片が必要である。
- 探傷時の検出感度を適切に設定するためには、タンクの試験面の表面形状及び断面形状を模擬した試験片を製作し、次の感度補正を組み合わせる必要がある。また、当該感度補正において、きずを判別可能なSN比であることを確認する必要がある。なお、試験片の試験面を型取りゲージ等で記録し、タンクの試験面と比較することも有効と考えられる。

【探傷時に考慮する感度補正の項目】

コーティングの厚さによる検出感度

- コーティングの厚さによるきずの検出性を考慮して感度を設定する必要がある。
- 適切にきずを検出するため、コーティングの厚さは事前に把握している必要がある。また、コーティングに膨れ、割れ、剥離等がある場合はきずの検出に影響がある可能性があるため、コーティングを除去して試験を行う必要がある。

溶接部の凹凸形状による検出感度

- 実際のタンクにおける溶接部の凹凸（断面形状及び表面形状）を模擬した試験片を準備し、その試験面によって生じる検出感度の低下レベルを評価し、適切な感度を設定する必要がある。試験片の溶接部の凹凸を目視等及び型取りゲージ等で確認、記録することが有効と考えられる。
- 試験を行う前には、対象の試験面が探傷器等として適用できる溶接部の凹凸形状より滑らかであることを確認すること。対象の試験面の凹凸を目視等及び型取りゲージ等で確認、記録し、試験片の記録と比較することが有効と考えられる。

きずとプローブの位置関係による検出感度

- きずと走査の角度によるきずの検出性（角度感度特性）や、きずとプローブの位置関係によるきずの検出性（オフセット感度特性）を考慮して感度を設定する必要がある。

その他

- きずの検出を目的とした試験、きず等の検出信号の評価を目的とした試験等、試験の目的に応じて適宜感度を調整すること。
- 試験対象となる試験面は一樣ではないため、試験面の状態やプローブの走査方法等に合わせて適宜感度を調整すること。

【適切なプローブの選定】

- 上述の試験片を用いて、探傷器等が有効に探傷可能な部位を把握し、部位に合わせて適切な探傷器等（プローブ等）を選定すること。

【きずの評価】

- きずの断面積と検出信号による正の相関を用いた評価をすること。
（JIS G 0583:2021 鋼管の自動渦電流試験検査方法）
- 他に、きずの検出信号の最大値より6dB低い応答領域から得られる応答長さに対する評価を用いることも可能である。
（JIS Z 2316-3:2014 プローブの特性及び検証 6.2.3.7応答領域、6.2.3.8応答長さ）
- その他に振幅-応答長さ平面による評価方法についても、有効な評価方法の一つとして考えられる。

現地試験

現地試験を実施したタンク内部の底部溶接線においては、凹凸が小さく滑らかで一定の形状に仕上げられた試験面であったことから、磁粉探傷試験により検出された1つの磁粉模様の長さが4mmを超えるきずを、多くのECTの探傷器等で検出することができた。磁粉模様又は浸透探傷試験により検出された指示模様の長さが4mm未満のきずも、少数の装置ではあるが検出することができた。コーティングを模擬してリフトオフ0.5mm、1.5mmを付与した試験条件においても、1つの磁粉模様の長さが4mmを超えるきずを検出することができた。

きずの長さを評価する検証をペン型のプローブを用いて実施したところ、概ね磁粉模様と同じ長さにて評価することができた。

タンク外部の底部溶接線においては、タンク内部と比べ腐食などにより表面の凹凸が大きく荒れた試験面であったことから、ノイズが大きく検出された。

【試験面と探傷器等の性能】

室内試験の結果と同様に、溶接継手の断面形状及び表面形状は、きずの検出性に大きく影響することから、試験面の凹凸は小さくかつ滑らかな形状であることが望ましいと考えられる。具体的にはきずとノイズの判別が行えるSN比6dB以上又は位相角10°以上となる滑らかな形状であることが必要であった。よって、探傷器等には、SN比6dB以上又は位相角10°以上によりきずとノイズを判別する性能を有することが必要である。

現状ではSN比6dB以上を確保出来ない部位等についても、今後探傷器等の性能が向上していくと考えられることから、適用可能な部位は広がると考えられる。

【対比試験片と高度な検査体制】

ECTを適切に運用していくためには、実タンクの試験面を模擬した試験片の提供、若しくは製作に係る情報提供等が事業者求められる。ECTの実施者においては、そのタンクの試験面を模擬した試験片に対し、探傷性能を十分に有することを事前に確認し、その上で現地試験においては基準きず以上の大きさのきずを見逃すことの無いよう感度補正を適切に行い、きず等の検出信号を適切に評価することが求められる。

事業者とECT実施者との間に従来のMT、PTよりも高度な検査体制が求められる。

5 ECT導入に関する検討

検証結果に基づき、ECT導入に関する諸条件や留意事項について検討を行いました。詳細な内容等については割愛させていただきますが、以下に要点のみ記載します。

5-1. 試験対象

屋外貯蔵タンクの底部の溶接継手はT継手、突合せ継手、重ね継手の3種類があり、各継手に対し適切なプローブを用いることで適切にきずを検出できることが室内試験及び現地試験において確認された。よって、ECTの試験対象は全ての底部溶接部とすることが適当である。一方で、ECTでは検出信号からきずの種類を判別できないことから事前に試験で確認されていることが望ましい。その具体的な条件としては、過去にMT又はPTによる溶接部検査で合格基準に適合していることが確認された箇所(以下「適合済みの溶接部」という。)であることが適当である。

ECTの試験対象を適合済みの溶接部とした場合における運用フローの例を図6、図7に示す。

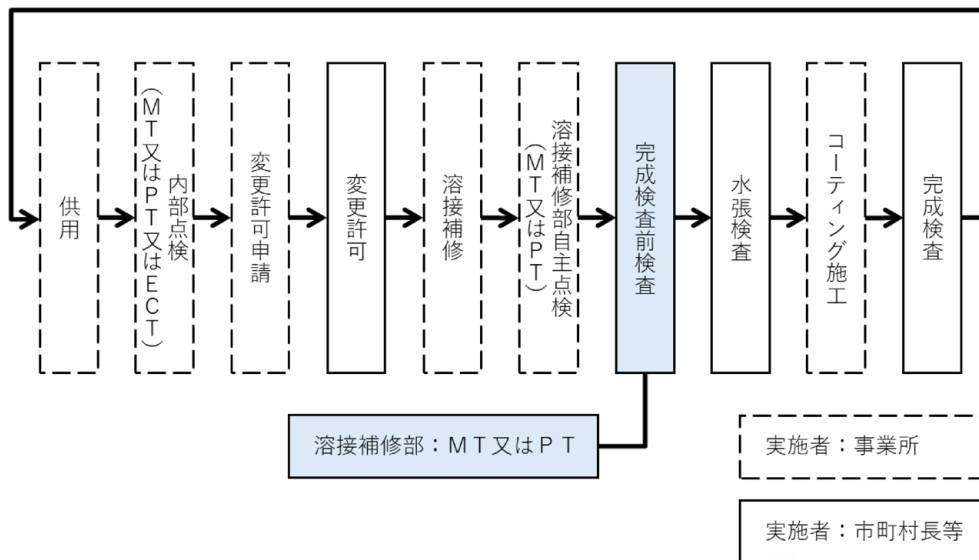


図6 溶接部検査に係る運用フロー例（完成検査前検査）

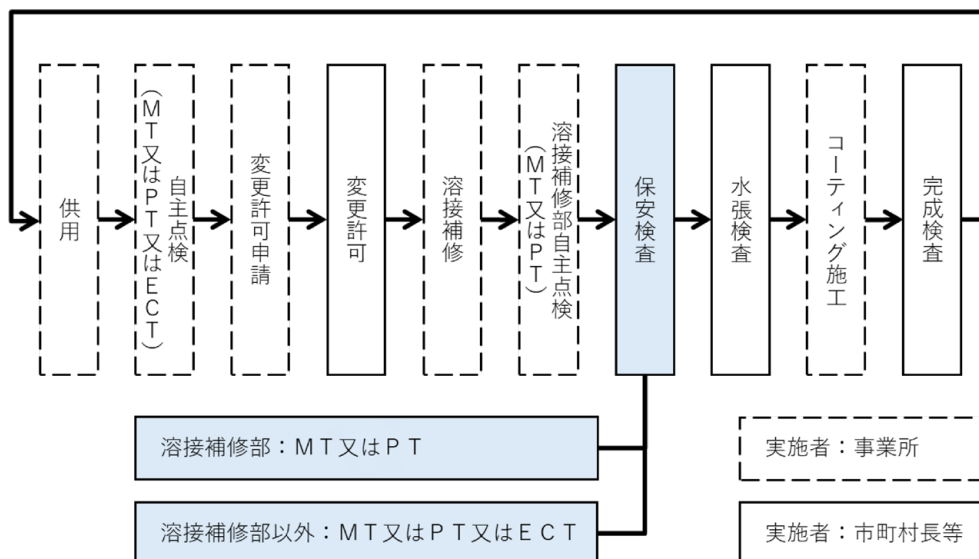


図7 溶接部検査に係る運用フロー例（保安検査）

5-2. 基準きずと合格基準

現行の合格基準の指標となる磁粉模様の長さは表面に開口しているきずの長さと同程度であるため、ECTで感度調整に用いる基準きずの長さは現行の合格基準の4mmが適当である。きずの深さについては、平成12年消防危第93号を参考に1.5mmとし、きずの幅については、幅0.5mm以下では検出信号に影響がないことから、0.5mm以下であることが適当である。また、長さ4mm、深さ1.5mm、幅0.5mmの矩形スリットと円弧スリットの検出性は同等であり、基準きずは画一であることが望ましいため、ECTの基準きずは長さ4mm、深さ1.5mm、幅0.5mm以下の矩形スリットとすることが適当である(図8)。なお、基準きずの幅については、多くのタンクで利用されているSS400を対象としたシミュレーション結果と3種類(SS400、SM400A、SPV490Q)の材質で基準きずの検出信号に差が見られなかったことを考慮して一様の寸法を例示したものであり、タンクの材質がアルミニウム合金又はステンレス鋼である場合は別途試験等により確認することが望ましい。

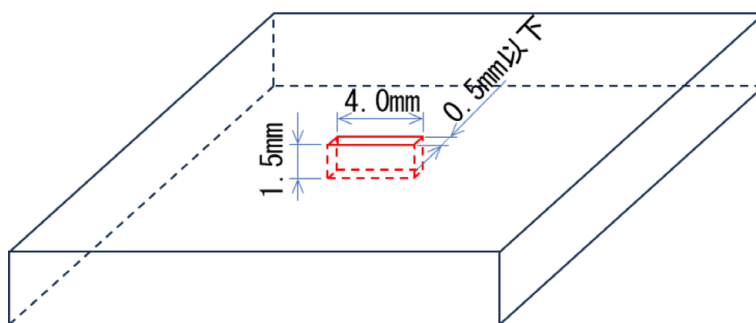


図8 基準きずの寸法例

5-3. 実タンクでの適用時に関する諸条件等

実タンクで漏れなく試験を行うためには、実際のタンクが性能確認された試験面の条件内であることを事前に確認する必要がある。

タンク底部の設計図書や既往の点検結果から試験面の基本的な情報（溶接継手の形状、表面処理状況、コーティングを有する場合はコーティングの状況、きずの残置状況、表面の腐食状況等）を把握していることを前提として、その確認方法としては、試験面を目視等で確認する方法と試験面を採傷したデータから確認する方法がある。

(1) 目視等で確認する方法

1. 試験面にコーティングがない場合

図9、図10に示したように、試験面が性能確認された試験面の条件内にあることを目視等で確認し、試験面が荒れている箇所等は型取りゲージ等により形状を記録し、模擬した試験片と比較する。試験面の状況によっては、他の試験方法で行うことや試験面を調整すること等が想定される。なお、試験面を滑らかな形状に調整する場合、溶接余盛の範囲内（設計図面のとおりで）行う必要がある。過去の事例として、必要以上に溶接部を研削したことにより、のど厚不足により漏洩事故が発生している（図11）。

2. 試験面にコーティングがある場合

コーティングの厚さを事前に確認する必要がある。実際のタンクのコーティングでは、T継手の溶接止端部等ではコーティングの施工時に塗料が溜まりやすく、コーティングが厚くなる傾向がある。また、コーティングを刷毛塗りの凹凸部でもコーティングが厚い傾向があるため、コーティングの厚さの測定点を選択する際には留意すること。

試験面が性能確認された試験面の条件内にあることを目視等で確認し、試験面の形状が荒れている箇所等は型取りゲージ等により形状を記録し、模擬した試験片の形状と比較する。試験面の状況によっては、他の試験方法で行うことや試験面を調整すること等が想定される。

3. 後述の(2)のデータから確認する方法例において、仮に低感度で実施した場合にはベースの検出信号が小さくなり、データからは判断できなくなるため、目視等とコーティングの厚さを確認したうえで実施することが効果的である。

(2) データから確認する方法例

SN比から判断する方法ときずとノイズの位相角から判断する方法の2つの方法を以て総合的に判断する。具体的には、ECTを適用するタンクの試験面を模擬した試験片を用いて感度設定した後に、実タンクの試験面を連続的に採傷して得られた検出信号からSN比（試験片から得た基準きずの信号と試験面から得たノイズの信号）を確認（図12）し、実タンクの試験面から得たノイズ信号の一部に振幅が大きいものがある場合には、基準きずとノイズの信号の位相角を比較し、判別性があるか確認する（図13）。

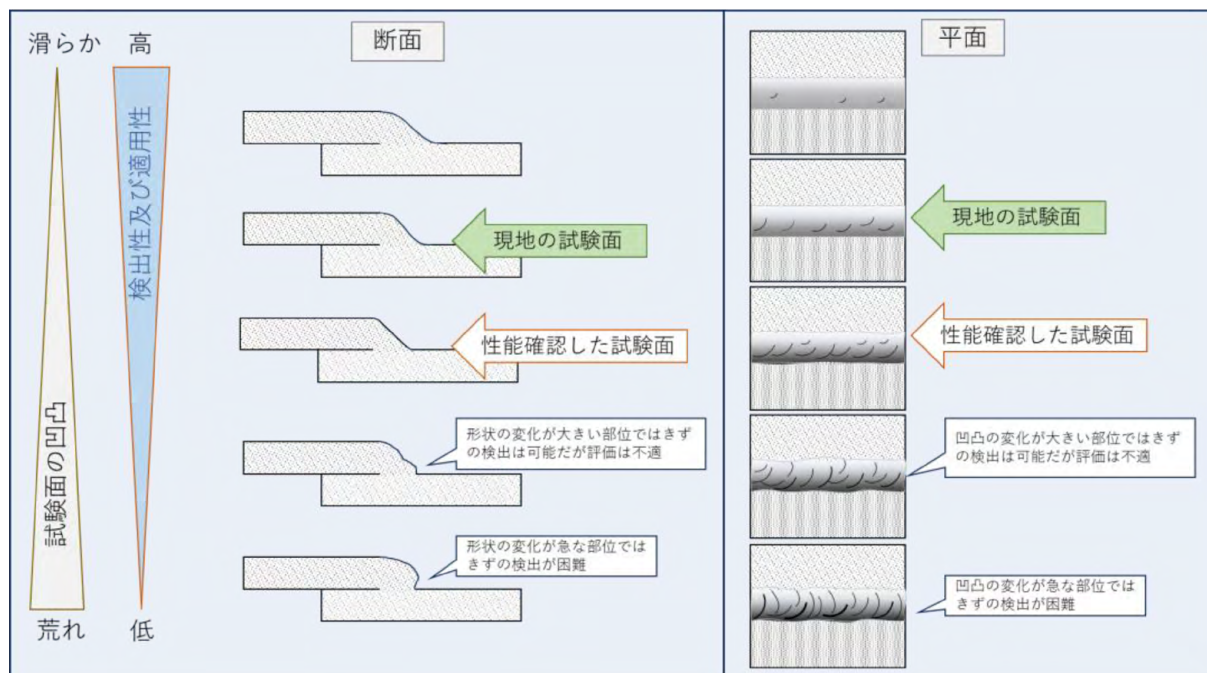


図9 重ね継手の形状によるECTの適用性に関する概念図

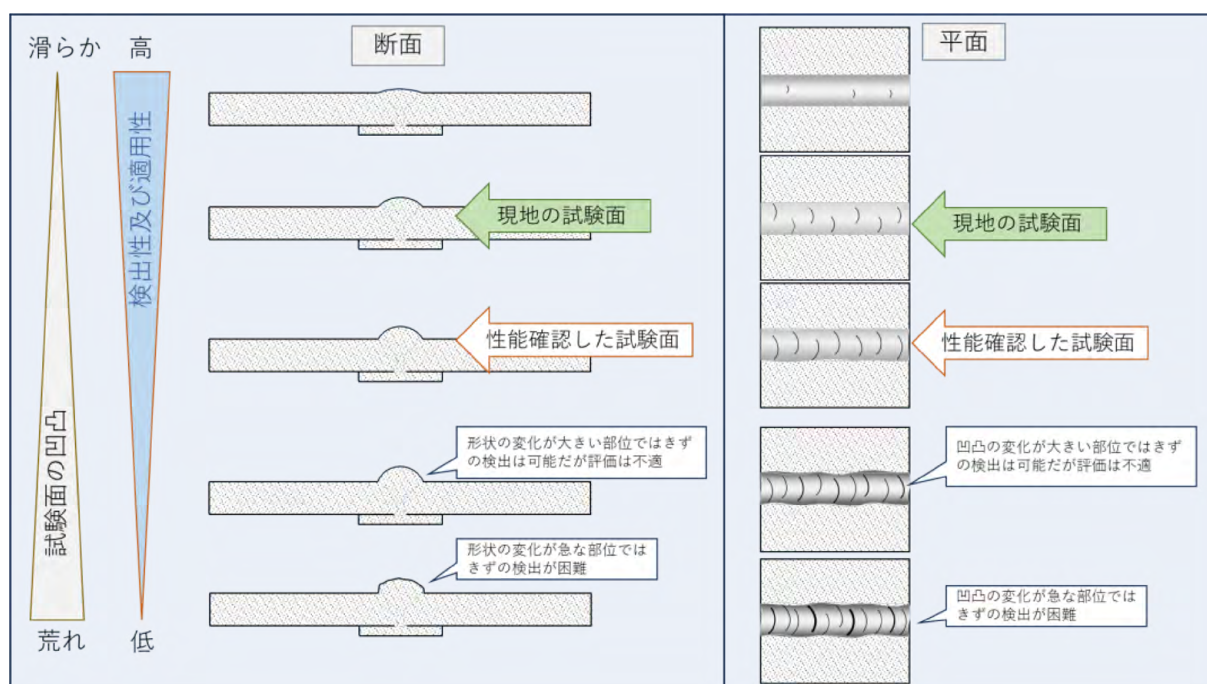


図10 突合せ継手の形状によるECTの適用性に関する概念図

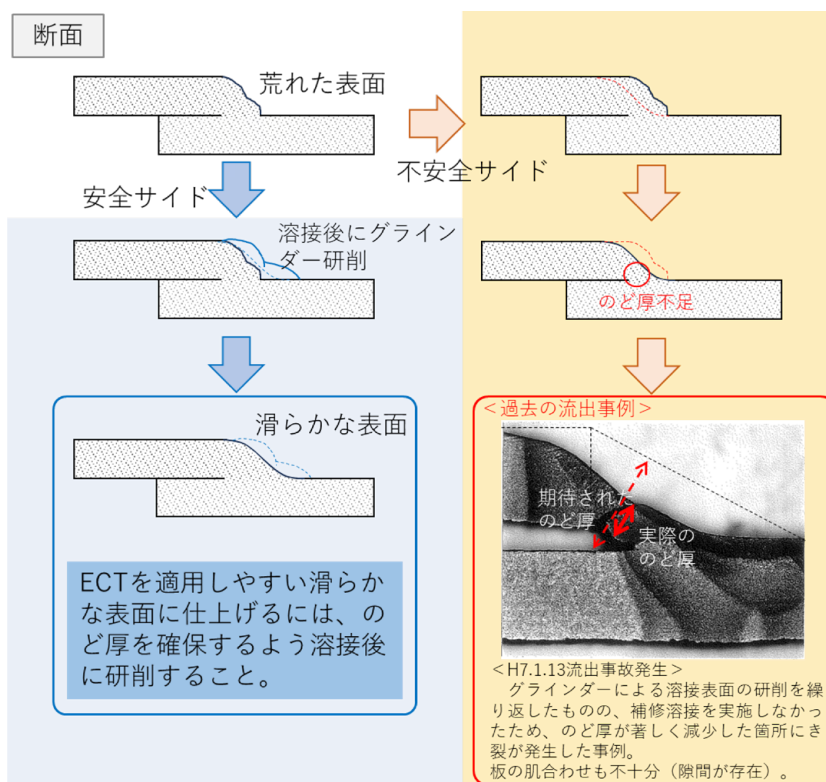


図11 試験面を滑らかに調整する際の注意点（隅肉溶接の例）

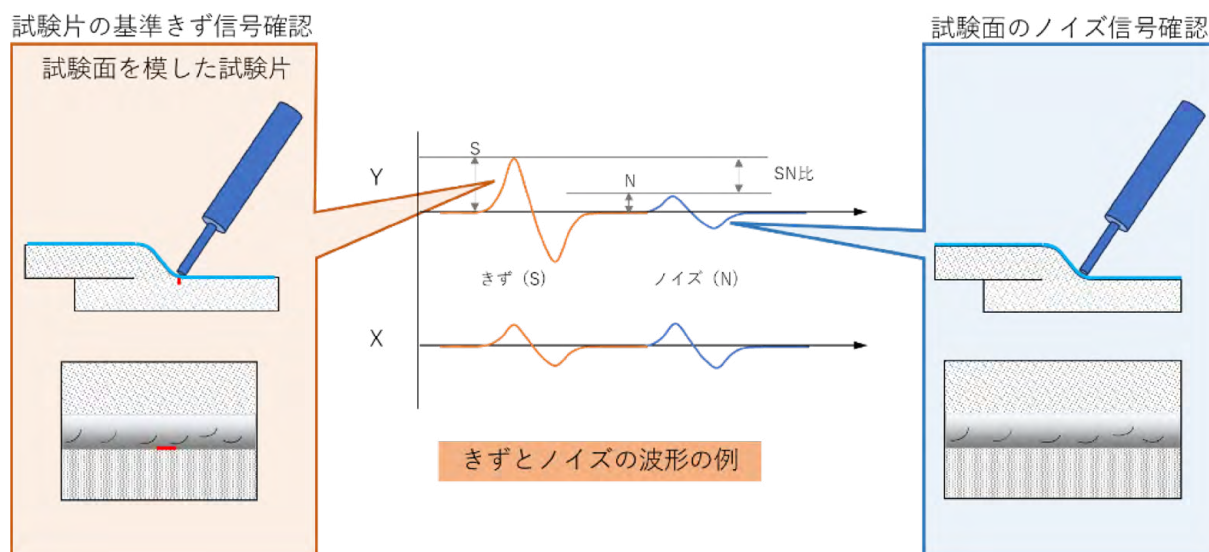


図12 SN比による確認の概念図

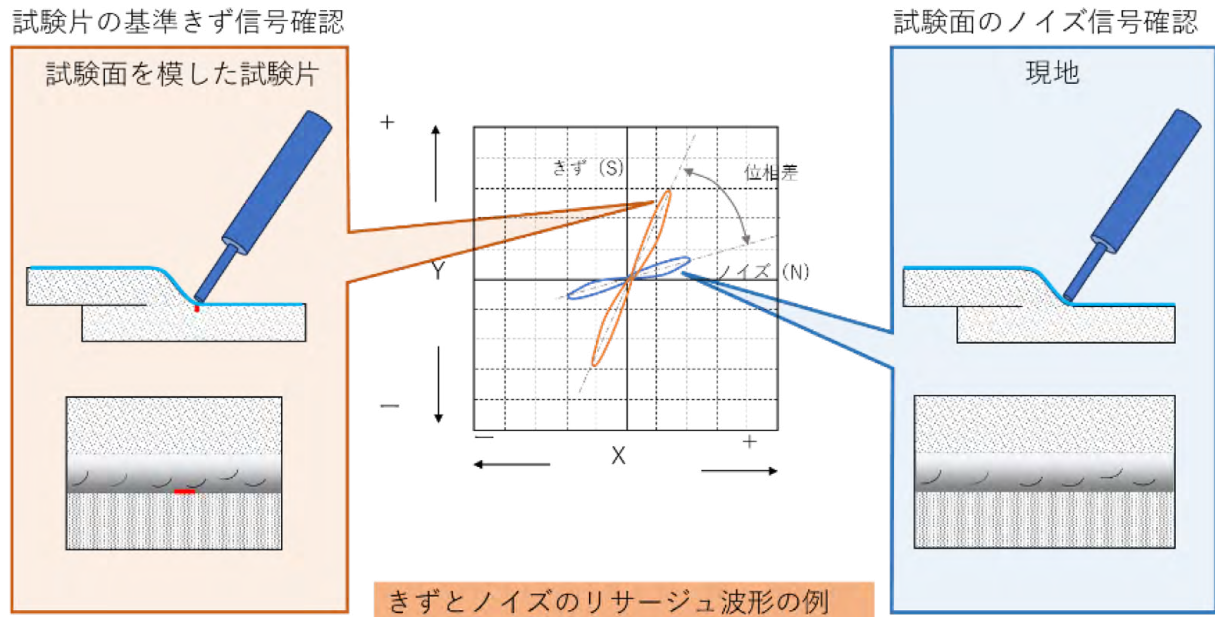


図13 基準きずとノイズの信号の位相角比較による判別の概念図

5-4. 探傷及び判定時の留意事項

- (1) 溶接部の部位等に合わせて適切なプローブを用いて網羅的に試験することが必要である。なお、連続的に探傷する場合には、感度を高めに設定する等の検出漏れ防止策を行うことが望ましい。
- (2) ガタ信号、リフトオフ効果、端末効果等により探傷又は判定ができない場合は再試験又は別の探傷試験を行うこと。なお、再試験前に試験面を調整すること等も想定される。
- (3) きず等を検出した場合、当該部の試験面の性状に合わせて適宜感度補正を行い、最大の検出信号となるように当該きず等を再度探傷し、適切にきず等を評価すること。なお、図14のような試験片を以て、きずの大きさによる検出信号の傾向を参考に判定することが望ましい。

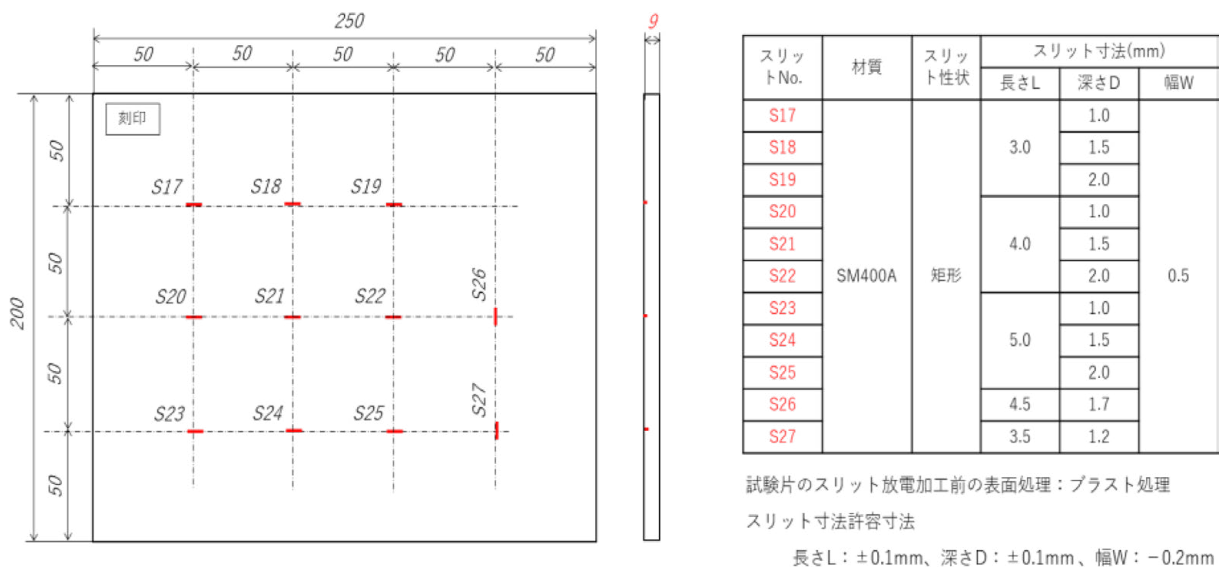


図14 きずの大きさの異なる試験片の仕様例

5-5. きずの評価方法

探傷器等に適した方法を選択し、適切にきずの評価を行うことが適当である。

例：基準きずの最大振幅をもとに、振幅の出力信号を比較する方法（JIS G 0583 9.1）

応答領域、応答長さにより評価する方法（JIS Z 2316-3 6.2.3.7 及び 6.2.3.8）

振幅 - 応答長さ平面による方法等

5-6. 試験技術者に求められる資格

試験技術者に求められる技能としては、探傷器等を調整して、その調整について検証すること、探傷器等の特性を把握して試験面がその特性に適しているかを判断すること、大きなタンクでは複数の試験技術者で実施することから他の試験技術者を指導、監督することなど、多岐にわたる。一方、上記のような技能は、非破壊試験技術者が試験対象物に合わせて適切な試験を実施するために必要な技能として、JIS Z 2305:2013「非破壊試験技術者の資格及び認証」では共通要求事項の技能として、位置づけられているものである。

よって、ECT試験技術者に求められる資格としては、JIS Z 2305「非破壊試験技術者の資格及び認証」又は、これと同等の規格に記載された適切なレベルの資格が適当である。

5-7. 試験結果の記録について

ECTに関するJISにおいて、試験報告書に記載すべき項目に合格基準に基づいた判定結果については項目として挙がっていないため、試験報告書には判定結果を含める必要がある。その他に、タンクと試験片の試験面の形状を型取りゲージ等により比較した結果を記録することが望ましい。

6 まとめ

特定屋外貯蔵タンク底部溶接部の点検・検査にECTを適用するための留意事項等について、室内試験及び現地試験を通して、調査検討を実施しました。本検討会では、それらの結果を踏まえ、「渦電流探傷試験を活用した屋外貯蔵タンクの底部の検査等に係るガイドライン(案)」をとりまとめています。また、以下の課題が示されました。

- (1) 本調査検討では屋外貯蔵タンクの底部溶接部の点検・検査にECTを適用するにあたり、一般に市場で販売されている探傷器等を用いた検証の結果に基づいて、合格基準や試験時の諸条件等を取りまとめた。今後、屋外貯蔵タンクの点検・検査業務により適したECTが開発された場合には、試験時の諸条件等は変わることも考えられるため、ECTの開発状況等を注視していくことが必要である。
- (2) 作業効率化の観点からECTにおいても自動探傷装置が開発される場合には、試験の対象物としては同一であるため、ガイドラインに示した留意事項等は参考とされたい。
- (3) 10万KL級の屋外貯蔵タンクの底部溶接部は総延長が数kmとなるため、大量のデータを解析することとなり、解析業務の自動化(AI化)について検討が進められていくと考えられるが、自動化においてきずの検出漏れや探傷漏れが無いようにする仕組みが必要である。

7 その他

今回紹介した内容は報告書の内容を要約したものです。詳細な内容及び実験結果、ガイドライン等は消防庁のホームページから観覧可能です。

「消防庁トップページ」→「審議会・検討会」→「検討会等」→「令和6年度開催の検討会等」→「新技術を活用した屋外貯蔵タンクの効果的な予防保全に関する調査検討会」

https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/post-162.html