



「屋外貯蔵タンクの検査技術の高度化に係る調査検討会」報告書について

消防庁危険物保安室 パイプライン係 迫田 知明

消防庁では、シミュレーションや新しい非破壊検査手法の活用により屋外貯蔵タンクの検査技術の高度化を図り、もって工事等の際の検査方法の合理化を進めることを目的として、平成28年度から平成30年度にかけて「屋外貯蔵タンクの検査技術の高度化に係る調査検討会」を開催し、調査・検討を行いました。

この度、検討会報告書がとりまとめられましたので、その内容を紹介します。

1. 調査検討の概要

1.1 調査検討の目的

危険物を大量に貯蔵する屋外タンク貯蔵所は、過去の流出事故等の教訓を踏まえ、補修工事や保安検査等の際に各種検査を行い、その健全性を確認することとされています。

現在の検査方法の中には多くの時間や費用がかかるものもあり、この様な検査項目については、安全を確保しつつ、合理化を進めることが求められているところです。

他方、シミュレーションや非破壊検査の技術が進展しており、屋外貯蔵タンクの検査に活用できる可能性のあるものも見られるところです。

これらの状況を踏まえ、シミュレーションや非破壊検査の活用により検査技術の高度化を図り、もって工事等の際の検査方法の合理化を進めることを目的として調査検討を行いました。

1.2 調査検討事項

屋外貯蔵タンクに係る検査において、新技术による高度化・合理化が期待される次の事項について調査検討を行いました。

- (1) 屋外貯蔵タンクの底部の溶接部補修に係る水張検査の合理化に関する事項
- (2) 屋外貯蔵タンクのコーティング上からの底部溶接部検査に関する事項

2. 屋外貯蔵タンクの底部の溶接部補修に係る水張検査の合理化

2.1 調査検討の趣旨

水張検査は、消防法第11条の2に基づく完成検査前検査の一環として、タンクに水を張ることにより、実際の使用環境を模した状態で、漏れ及び変形の有無を確認するとともに、基礎・地盤の不等沈下を確認するものであり、タンクの健全性を包括的に評価する検査項目です。

しかしながら、水張検査は、大量の水や試験後の水処理、タンク清掃、検査期間の長期化等、事業者側の負担が大きいことから、検査水準を確保した上で合理化を図ることが期待されています。

このため、タンクの補修状況、水張試験における不具合事例等について調査のうえ、水張検査の代替要件やその具体的な確認の方法を検討しました。

2.2 調査検討事項

(1) 屋外貯蔵タンクの溶接補修の実態、過去の水張検査における不具合の発生状況等

屋外貯蔵タンクの溶接補修の実態、過去の水張検査における不具合の発生状況等のデータ収集を目的として、主な事業者等に対してアンケート調査を行いました。

(2) 溶接部欠陥の進展に関する破壊力学に基づくシミュレーション

タンクに液体の危険物を満たした場合、漏れや変形の主な原因として溶接部の欠陥があると考えられます。

溶接構造物の健全性を評価する方法として、日本溶接協会規格WES2805により、破壊力学に基づき割れ等の溶接欠陥が進展していくかどうか評価するための計算手法が示されており、低温貯槽、船舶、海洋構造物等において活用された実績を有しています。

検討会では、WES2805の方法を用いてシミュレーションを行い、タンク底部の溶接部補修の評価に適用することの妥当性や適用する際の条件設定等について検討しました。

(3) タンク底部の溶接部補修に係る水張検査の合理化

(1) 及び (2) で調査・検討した結果を踏まえ、水張検査の代替要件等について検討しました。

- ① 補修溶接に関する要件
- ② タンクに関する要件
- ③ 破壊力学に基づく欠陥評価 等

2. 3 屋外貯蔵タンクの溶接補修の実態、過去の水張検査における不具合の発生状況等

屋外貯蔵タンクの溶接補修の実態、過去の水張検査における不具合の発生状況等のデータ収集を目的として、石油連盟、石油化学工業協会、電気事業連合会、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構に対してアンケート調査を行いました。

主な調査結果は以下のとおりです。

(1) 回答件数

各団体に対し、タンクの容量区分（1千kl～10万kl超までを5つに区分）ごとに新法タンク及び旧法タンクについて各5基程度選定して、下記の事項について調査を依頼しました。その結果、次の回答数のデータを得ることができました。

- 屋外貯蔵タンクの補修状況等に関する調査：115基（365回分の開放点検データ）
- 水張検査時の不具合事例に関する調査：12事案
- 受払いに関する調査：157基
- 地震の被災に関する調査：157基

(2) 溶接補修に係る調査

① 補修溶接の理由・深さ・長さ

補修理由は、旧法タンクと新法タンクで同様の傾向を示しており、ブローホールが最も多く、ついで、その他（形状不良等）、アンダーカットの順となっていました。マイクロ割れや他の割れは出現率が低いものの、各部位で発生しています。

補修深さについては、底部溶接線検査に用いられる検査手法（目視、MT、PT）で検出できるのは表層（MTでは一般的に深さ3mm程度まで）のみであり、検出された欠陥を全て除去することから、補修される深さは3mm～5mmと推定されます。

補修長さについては、全体的に旧法タンクより新法タンクの短い傾向となっています。特に10万kl以上の新法タンクは、非常に短い傾向が見られます。

なお、最小補修長さについては、JIS B 8501（鋼製石油貯槽の構造（全溶接製））で、軟鋼で25mm以上、高張力鋼で50mm以上とされており、欠陥の発生しやすい短い溶接は避けるように規定されています。

② 溶接欠陥の状況

ア 継手形状

危険物保安技術協会が過去10年間に実施した保安検査及び完成検査前検査における溶接部検査の記録から、底部溶接線の割れによる不適合事案は23件あり、その内訳は補修溶接不良が14件、既設検査不備が9件でした。底部溶接線の割れによる不適合事案を溶接部位毎に見てみると、内タライ（側板×アニュラ板）16件、アニュラ板

相互1件、亀甲（アニュラ板×底板）2件、底板相互4件であり、そのうち亀甲及び底板相互の溶接継手形状については、全て重ね隅肉溶接継手でした。

重ね隅肉溶接継手に不具合が多い理由として、突合せ継ぎ手と比較して、施工から年月が経っているものが多い、溶接士の技量の影響が出やすい手溶接による施工などが考えられます。

イ 補修部位

補修部位による欠陥の種類や出現率の違いは見られませんでした。

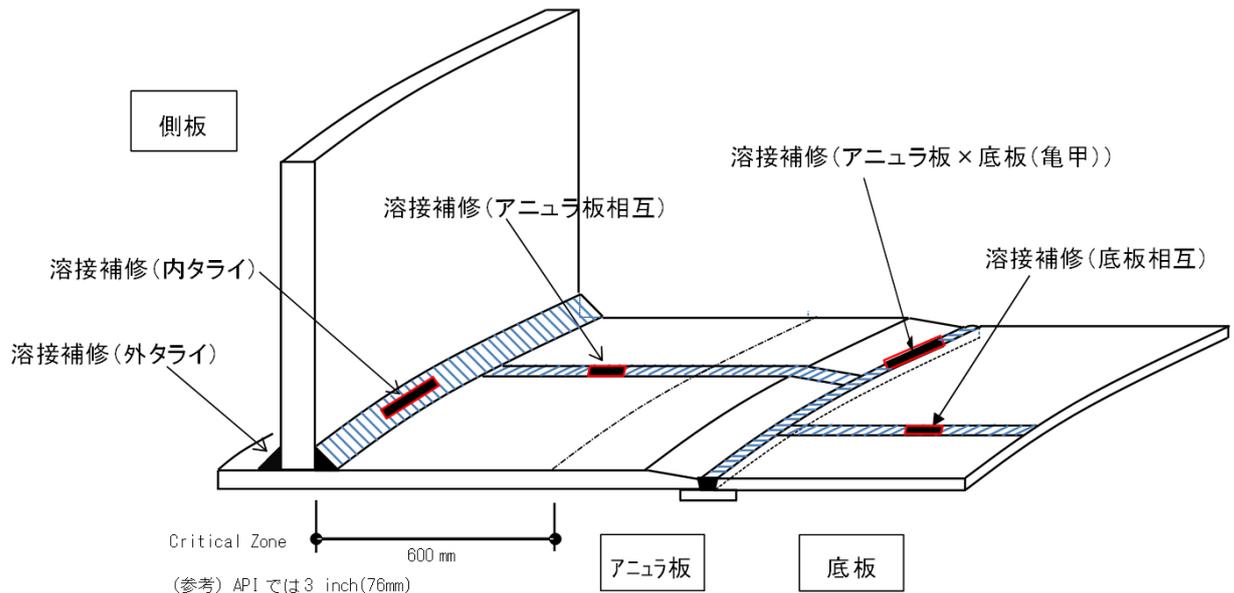
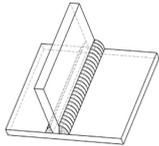
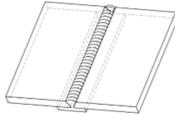
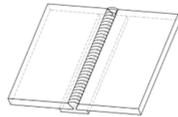


図2.1 溶接補修部位

表2.1 部位毎に規定される継手形状

部位	構造
側板×アニュラ板	部分溶込みグループ溶接又はこれと同等以上 
アニュラ板相互	裏当て材を用いた突合せ溶接又はこれと同等以上 
アニュラ板×底板 底板相互	板厚 9 mm を超える ⇒裏当て材を用いた突合せ溶接又はこれと同等以上  板厚 9 mm 以下 ⇒すみ肉溶接でも可 

(3) 水張検査時の不具合事例に関する調査

水張検査時の不具合事例のうち、底部の不具合に係るものは5件あり、そのうち2件が漏水に至った事例、3件が水張検査後の溶接部の非破壊検査における不具合発見事例でした。なお、漏水に至った事例2件は、いずれも底板相互の重ね隅肉溶接継手の破断でした。

表2.2 水張検査時の不具合事例に関する調査結果

No.	タンク容量 (KL)	貯蔵品名称	設置許可年月	発生年月	水張りの対象となる変更内容	不具合内容	その後の対応
1	154.642	原油	S46.5	H23.5	底端板部分取替え補修	水張検査の水張時に底端溶接線が破断し漏水が発生した。水抜き後の調査により、底板のすき込み溶接線に割れ(約1,000mm)を確認した。原因は、建設時の基礎の圧入不足による基礎の陥没により、局部的にタンク底板と基礎との間に許容以上の隙間が発生していたため、溶接線の一部に応力が集中し破断に至った。	底端溶接線全体のMTを実施し、溶接線割れ近傍に線状欠陥を検出した。また底板の形状測定及び間隙測定を実施し、割れ近傍の基礎が局部的に陥没し100mm以上の空隙を確認した。基礎を含む補修実施後、再度水張検査を実施し、異常がないことを確認した。
2	98.410	原油	S43.5	H20.8	・アニュウ板取替、底板当板、その他溶接線補修 ・側板内盛補修 ・基礎修正	保安検査合格後の水張り途中に、アニュウ板と基礎の間より漏水を認め、水張りを中止し、内部確認した結果、底板の3枚重積溶接線に割れ(120mm)を認めた。	不具合原因の調査ならびに、底板全溶接線の厚み測定とMTを実施。溶接線補修を実施後、再度保安検査を受検、水張り検査を実施した。
3	34.350	軽油	S44.2	H16.6	アニュウ板部分取替(1箇所)、内ライ全周、底板相互(30%)溶接線補修	水張検査の水抜き後に、内ライ溶接線のMTを実施したところ、アニュウ板取替部分側の溶接線補修部の底板側止端部に、線状指示(4箇所、最大長さ910mm)を検出した。	その他の溶接線については欠陥は検出されなかった。アニュウ板不具合部の2箇所取替、再度溶接線検査、水張り検査を実施し、異常がない事を確認した。
4	14.350	重油	S48.5	H29.1	底板部分取替え、内ライ全周溶接線補修、アニュウ板相互17m、アニュウ×底板全周補修、底板17m溶接補修	水張検査後にバキューム検査を実施したところ、底板治具跡の溶接線に溶接欠陥が見つかった。溶接欠陥は製作時の治具跡補修時にできたアローホールが経年使用によって貫通したものと推測する。(水張り検査後のタンク内部目視点検時に当該治具跡付近に付着物があつたことに着和意を覚え、バキューム検査を実施したところ、溶接欠陥であることが判明。)	欠陥を補修後、溶接線検査を受検、再度水張り検査を実施し、異常がないことを確認した。
5	2,000	メタクリル酸メチル	S55.2	H29.8	底板溶接線補修	水張り検査の水張中、側板より漏水があつた。位置：底板より17.41m。タンク内面、消防火設備ノズル直下の中間ステイアナー 上部管束による開孔 1c 1m×2cm (17.538m/30.000kl)	他治具跡についてPTを行い、異常がないことを確認した。当該溶接欠陥部は内盛補修後、PT及びバキューム検査にて異常がないことを確認した。
6	30,000	重油	S54.8	H28.9	内ライ、アニュウ相互、溶接線補修及び底板全面更新、側板最下段底板搬入用開口部設置	水張り検査の水張中、側板より漏水があつた。位置：底板より17.41m。タンク内面、消防火設備ノズル直下の中間ステイアナー 上部管束による開孔 1c 1m×2cm (17.538m/30.000kl)	類似箇所5箇所を目視及び肉目測定を実施したが、異常な減肉は無かつた。当該箇所を止め取補修し、先設検査前検査及び水張り検査にて異常がないことを確認した。
7	124,959	原油	S53.8	H19.7	側板ノズル出し、内ライ、アニュウ相互溶接線補修及び浮き量最低更新	側ノズル(16B)の補修板隅内溶接部に割れを検出した。	欠陥除去後、再溶接を行い、MT・PTを実施し、異常がないことを確認した。
8	510	有機液	S46.4	H27.11	側板下部500mm切断	当該タンクの改修工事を終え、消防検査(漏水検査)のため水張りを実施。タンク上部に繋げたホースからの水流出により漏水を確認後、水張りを停止したが、サイフォン現象によりオーバーフローし続けてタンク内が減圧となりタンク上部が変形した。	タンク上部更新。
9	400	ジメチルホルムアミド	S51.3	H29.9	側板内盛補修及び底板当板補修	水張りの検査前、変更許可申請以外の小口径ノズルは再塗装を実施していい。塗装の塗膜で水張りの検査時漏洩はなかったが、実液を漏り込んだ際、実液で塗膜が溶け、変更許可申請以外の小口径ノズルから、微漏洩した。	基本的に、全面ブラストし再塗装の際、許可申請以外の小口径ノズルも未塗装で水張り検査を受検する。(市の消防局と個別相談)
10	276	伸張油、老化防止剤等	H11.3	H11.8	屋外貯蔵タンクの施設(設置)	当該タンクは、5つの室に仕切った5分動タングであり、1室ずつ水張り検査を行っていたところ3室目に水を溜めた際、タンクが変形した。水張り検査を行う事でタンクの仕切板、側板等の強度不足が顕在化した。	タンクの仕切板、側板を補強後、再度水張り検査を行い漏れ変形がないことを確認した。
11	185	クエンチオイル(重質油)	S42.8	H18.1	天板全面および側板部分更新	溶接後のMT検査で不具合は見つからなかったが、水張り時に天板とトップアップノズルの溶接線から滲み漏れが発生した。	当該部の溶接線補修後、再度MT検査を実施、問題ないため水張り試験を行った。異常はなかった。
12	-	-	-	-	水張り検査全般	水張りによりCS製タンクで錆びが生じる、使った水(工業用水)によって泥が溜まるので、再洗浄が必要。	-

(4) 受払い回数

受払い回数は、タンクごとに1年間に行った内容物の受入れ・払出しの回数を調査しました。

業態別で見ると、製油所、油槽所、石油化学が多く、電力、備蓄基地が少ない傾向となっています。一方、同じ業態でも、個別のタンクごとのばらつきは大きく、例えば製油所、油槽所、石油化学の中にも受払い回数が少ないものもあります。

このように業態ごとの主なタンク運用（一時受け用、備蓄用等）の違い等によるものと考えられる受払い回数の傾向の違いも見られますが、同業態の中でも個別のタンクにより大きく異なっていることが分かります。

このため、危険物の受払いに伴うタンク部材の疲労を考える場合には、個別のタンクの実績をベースとすることが適当と考えられます。

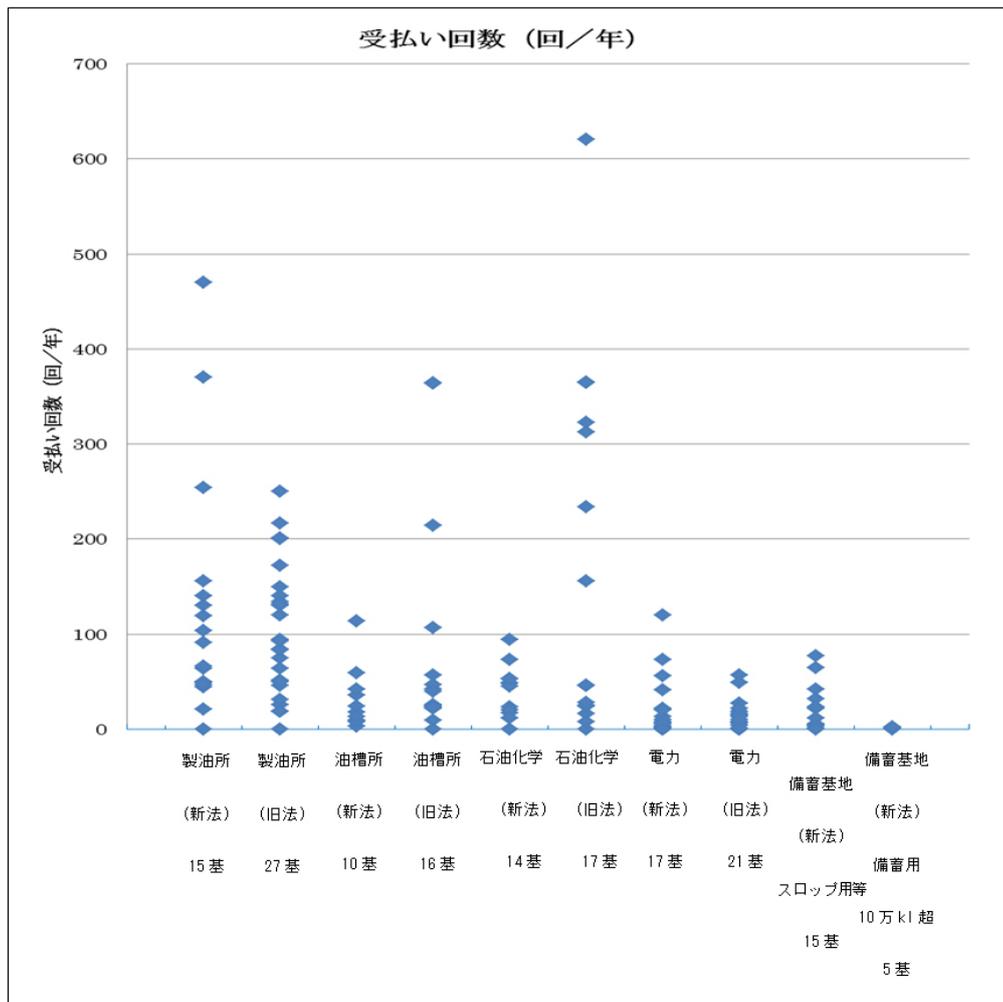


図2.2 業態別受払い回数 (回/年)

(5) 地震動の影響

震度6弱相当以上の地震を経験したタンクは、回答のあった157基中15基でした。

全国的に大規模地震の発生が懸念されるところであり、地震動の影響に伴うタンク部材の疲労も考慮する必要があると考えられます。また、評価する上では、個々のタンクごとに過去の被災状況を含めて検証する必要があると考えられます。

表2.3 地震（震度6弱相当以上）被災を受けたタンク

No.	地震被災回数	タンク所在地	業態	適用法令	容量区分 (kl)	受払い回数 (回/年)	1回の受払い量 (最大数量に対する割合%)		
							10	～	70
1	1	大阪	石油化学	旧法	1万～5万	24	10	～	70
2	1	大阪	石油化学	新法	1万～5万	73	10	～	80
3	1	不明	電力	新法	1千～5千	0	0	～	0
4	1	不明	電力	新法	5万～10万	56	1	～	25
5	1	不明	電力	新法	5万～10万	20	6	～	20
6	1	茨城	製油所	新法	1千～5千	119	11	～	72
7	1	茨城	製油所	新法	5千～1万	64	3	～	46
8	1	茨城	製油所	新法	1万～5万	49	8	～	85
9	1	茨城	製油所	新法	5万～10万	156	1	～	59
10	1	茨城	製油所	旧法	1千～5千	83	16	～	49
11	1	茨城	製油所	旧法	5千～1万	217	2	～	81
12	1	茨城	製油所	旧法	1万～5万	134	3	～	69
13	1	茨城	製油所	旧法	5万～10万	93	10	～	34
14	1	茨城	製油所	旧法	10万KL超	201	2	～	74
15	1	不明	油槽所	新法	1千～5千	36	20	～	70

2. 4 溶接欠陥の進展に関する破壊力学に基づくシミュレーション

屋外貯蔵タンクの溶接補修後において漏れが発生する場合は、タンクを液体で満たした際に、溶接補修で生じた欠陥部に応力が集中して割れが進展し、開口部が生ずるに至るものと考えられます。

溶接構造物の健全性を評価する方法として WES2805 溶接継手のぜい性破壊発生及び疲労亀裂進展に対する欠陥の評価方法に基づく溶接欠陥評価の適用検討があり、低温貯槽、船舶、海洋構造物等において活用された実績を有しています。WES2805 では、溶接構造物一般を対象として、構造的に不連続となる部分（溶接継手の割れ等）が疲労によって進展し、ぜい性破壊に繋がるかについて評価する手法が規定されています。

検討会では、本規格を屋外貯蔵タンクの溶接補修部の評価に適用することが可能であると考え、適用の妥当性や適用する際の条件設定等について検討しました。

(1) WES2805 の概要

図 2.3 に、WES2805 に基づく溶接欠陥の評価フローを示します。

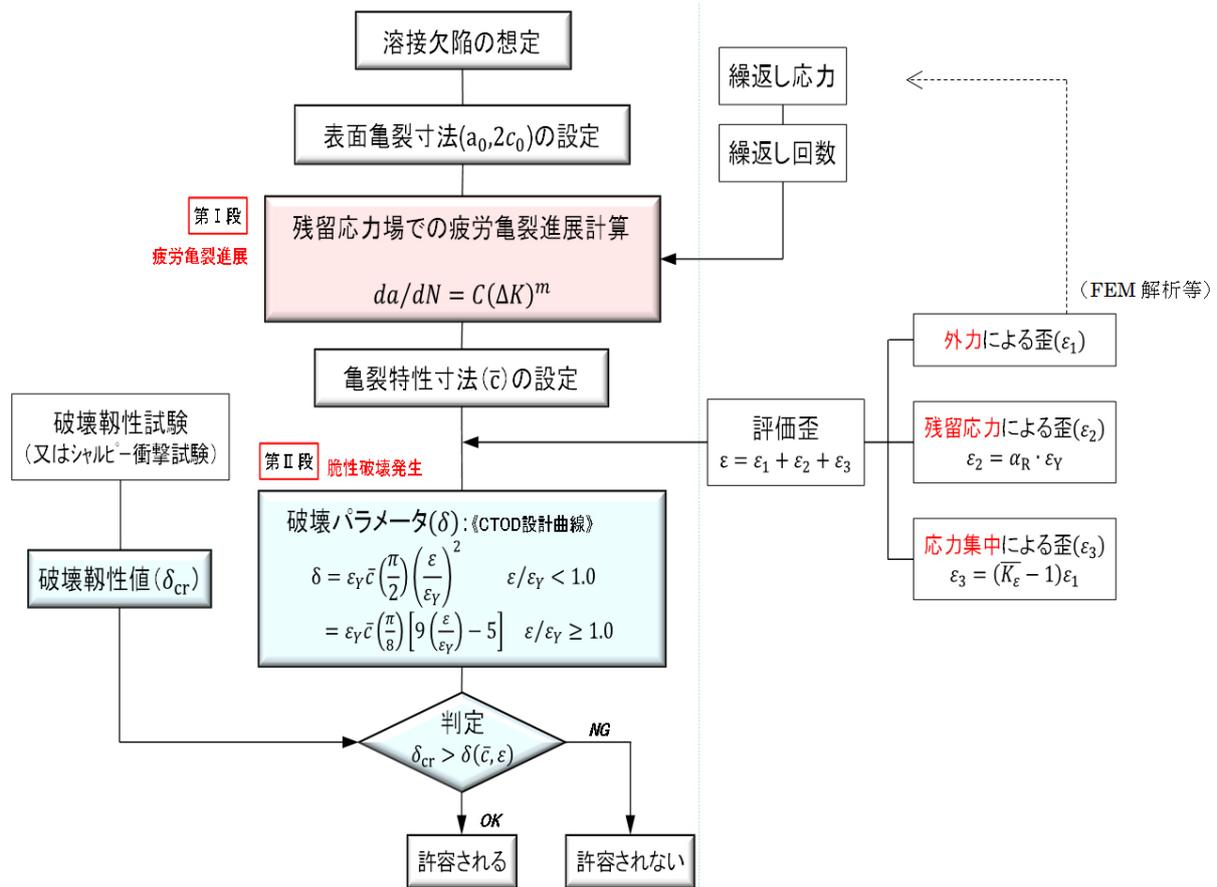


図2.3 WES2805に基づく溶接欠陥の評価フロー

WES2805 は溶接構造物一般の評価方法であり、屋外貯蔵タンクの評価に供するに当たり、タンクの設計・施工や運用に即した計算条件を設定することが必要となります（図 2.3 参照）。

検討会では、個別のタンクに固有の計算条件（板厚等）を除き、タンク全般に共通的な計算条件を検討しました。

なお、現時点において、重ね溶接継手については、WES2805 の評価に用いることのできる簡便かつ合理的な破壊力学的モデルが見当たらないことから、今回のシミュレーションの対象外としました。

(2) 判定

最終的には、亀裂の寸法や歪みから得られる破壊パラメータ $\delta(\bar{c}, \epsilon)$ （亀裂進展開口変位：CTOD）が、材料の破壊靱性値 δ_{cr} （限界 CTOD）より小さければ、その欠陥は許容されると判断されます。

$$\delta_{cr} > \delta(\bar{c}, \epsilon)$$

2.5 タンク底部の溶接部補修に係る水張検査の合理化

水張検査は、タンクの実際の使用環境を模して漏れ及び変形の有無を確認するものですが、水を張らないこととする場合でも、タンク全体として構造上の影響を与える有害な変形がなく、溶接補修が部分的なものであれば、溶接部検査により溶接の適切な実施が担保されていることを前提として、シミュレーション等による評価に代替することができると考えられます。これに当たり、上記 2.3 で調査した溶接補修の実態等や、シミュレーションの精度を考慮すると、仮に溶接に伴う欠陥があったとしても、その後の危険物の受払いや地震によって容易に当該欠陥が進展し、漏えいに至ることがないよう多角的に確認することが適当であると考えられます。

検討会では、その要件について、下記（1）～（3）のとおり整理しました。

(1) 補修溶接の要件

① 補修部位、継手形状

ア アニュラ板相互、底板相互、アニュラ板と底板との溶接継手：突合せ継手に限る。(重ね継手は対象外)

イ 側板とアニュラ板との溶接継手：T継手

② 補修内容

溶接線補修及び母材肉盛補修に限る(板の取替、当板等を除く)。

③ 補修長さ

補修溶接の層数は2層以上とし、最小長さは50mm以上とする(短ビード溶接は避ける)。

④ 溶接補修を行った箇所の検査

補修溶接部は表面検査(MT等)を行い、有害な欠陥が確認されないこと。

真空試験、加圧漏れ試験、浸透液漏れ試験等の試験によって漏れないものでなければならないこと。

連続板厚測定により、構造上必要な板厚を有していることが確認されていること。

(2) タンクの要件

① 有害な変形(基礎含む)

有害な変形については、「容量が1万キロリットル未満の特定屋外タンク貯蔵所の内部点検の時期等に関する運用について」(平成12年3月21日付け消防危第31号通知)別表「特定屋外貯蔵タンクに構造上の影響を与える有害な変形」において示されている有害な変形がないこと。

別表 特定屋外貯蔵タンクに構造上の影響を与える有害な変形

	沈下の状況	沈下の状況図	有害な変形
底板部	側板に接する底板(アニュラ板)のリング状沈下		設計時からの変位角度 θ が10度以上であること。(L=100mmの角度計を使用するものとする。また、 θ は初期設計角度からの変化角度とする。)
	底板全体の皿状沈下		設計時からの直径に対する最大沈下の割合が100分の1以上又は最大沈下量が300mm以上であること。
	底板内部の局部沈下		沈下部分の内接円の直径に対する最大沈下の割合が50分の1以上又は最大沈下量が200mm以上であること。
	底板(アニュラ板)内部の沈下		設計時からの変位角度 θ が5度以上であること。(L=100mmの角度計を使用するものとする。)
	底板内部の浮き上がり、歪み、変形		浮き上がり部分の内接円の直径に対する設計レベルからの浮き上がり高さの割合が10分の1以上であること。ただし、溶接線が浮き上がり部分にない場合は、当該割合は5分の1以上とすること。
	側板部	側板の変形(歪み)	

② 使用する材料等の制限

原則として、アニュラ板に降伏比が80%以上の鋼材（SPV490Q等）を採用していること。

(3) 破壊力学に基づく欠陥評価

日本溶接協会規格WES2805に基づく溶接欠陥評価を行い、底板一般及びタンク隅角部の破壊パラメータ（亀裂進展開口変位：CTOD）がそれぞれ破壊靱性値（限界CTOD）以下であること。この場合において、共通的な計算条件は以下によること。

① 板厚

連続板厚測定により得られた実板厚を用いる。

なお、屋外貯蔵タンクの底部の腐食管理の方法として、開放点検時の板厚測定方法が挙げられる。板厚測定方法について、以下の3通りの測定方法が示されており、事業者の判断により選択されている。

- 昭和52年3月30日付消防危第56号通知 定点測定
- 昭和54年12月25日付消防危第169号通知 定点測定
- 平成15年3月28日付消防危第27号通知 連続測定

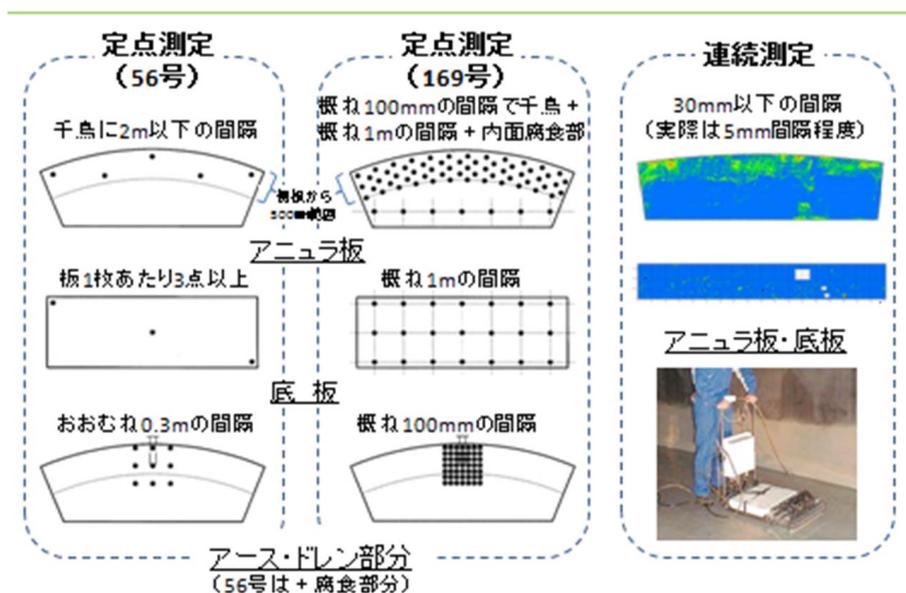


図2.4 板厚測定方法の比較

定点測定はサンプリング検査であるが、連続測定は全面を測定するため、板厚評価する上で最も信頼性が高い測定値を得ることが出来る。

② 想定亀裂

ア 底板一般

亀裂深さ3mm、亀裂長さ6mm程度の表面亀裂

イ タンク隅角部

亀裂深さ1.5mm、亀裂長さ4mm程度の表面亀裂

* 寸法に係る計算上の感度を確認し、総合的に評価する観点から、長さが2倍・3倍の欠陥を想定した計算も行うことが適当。

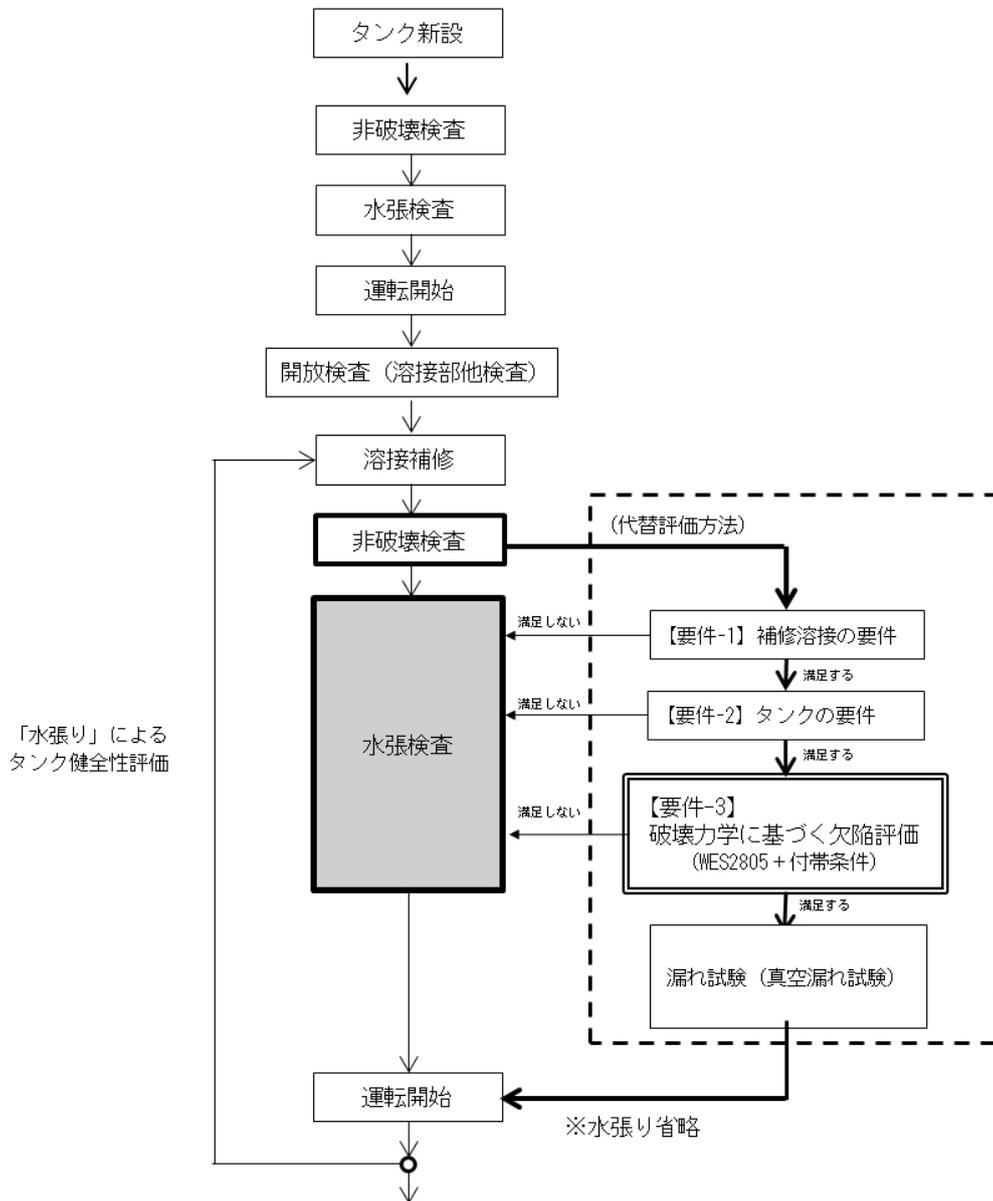
③ 照査荷重

ア 底板一般：API653に規定している底板局部沈下パターン（タイプA：帯状）を想定し、局部沈下範囲の半幅(R)は最大1,500mm程度とする。荷重繰返し回数として、供用期間中のタンクの実態に応じた受払回数を見込む。

イ タンク隅角部：大規模地震時の底板浮上り終局変位を想定する。保有水平耐力の評価に相当する地震荷重を想定し、大規模地震時のタンク隅角部の浮上り挙動による終局浮き上がり変位に対する評価を行い、荷重繰返し回数として、供用期間中の底板浮上り回数を100回と見込む。

(4) 留意事項

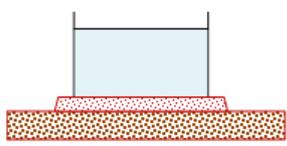
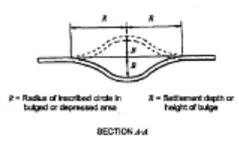
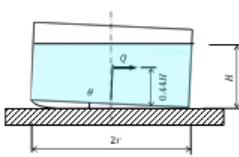
供用開始後24時間程度は、「漏れ、変形」に対し、特に注意を払うこと。



「水張り」による
タンク健全性評価

図2.5 水張検査の代替評価フロー

表2.4 評価方法の比較

確認項目	着眼点	「水張り」による健全性評価	「破壊力学」に基づく評価方法
前提条件		不要	【要件-1】補修溶接の要件を満足する。 【要件-2】タンクの要件を満足する。
【照査荷重】	外力の影響	水張り荷重（満水） 	【底板】受入払出時の局部沈下を想定する。  【隅角部】地震時底板浮上りによる終局変位を想定する。 
	残留応力の影響	実際の溶接線近傍に内在する残留応力を考慮している。	溶接線近傍で溶接線方向に材料の降伏応力レベルの残留応力を考慮する。
仮定条件	—	無し	「溶接欠陥」を想定する。 「荷重繰返し回数」を想定する。
変形・破壊	耐圧強度	目視で「変形」が無いことを確認	計算で耐圧強度を確認する。
	脆性破壊	目視で「破壊」が無いことを確認	計算で想定亀裂からの「脆性破壊発生」を判定する。
	疲労強度	(※確認出来ない。)	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板表面での亀裂成長
	終局強度	(※確認出来ない。)	【隅角部】計算で地震時底板浮上りによる終局変位を確認する。
漏れ	—	目視で「漏れ」が無いことを確認 ※底板からの漏れの確認は容易ではない	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板厚貫通の有無
タンク基礎の健全性	—	目視（計測）で「変形」が無いことを確認	【要件-2】タンクの要件を満足する。 ※有害な変形が無い

3. コーティング上からの溶接部検査

3.1 調査検討の趣旨

特定屋外タンク貯蔵所のタンク底部の溶接部検査は、磁粉探傷試験又は浸透探傷試験で確認することが定められており、コーティングを施工している場合には、これを剥離して試験を実施することが必要となっています。

コーティングの剥離及び再塗装は、開放期間の長期化、施工費の増加等を伴うものであり事業者にとって負担となっていることから、コーティング上から溶接部検査を行うことのできる技術が望まれており、平成10年度及び平成11年度の消防庁危険物技術基準委員会においては、当該用途に供することのできる可能性のある非破壊試験の方法を選定し、その実証試験等が行われました。

その結果、当時の技術開発の状況として実用化には至りませんでした。消防庁から「特定屋外貯蔵タンクの内部点検等の検査方法に関する運用について」（平成12年8月24日付け消防危第93号、改正：平成14年1月22日付け消防危第17号）が示されています。コーティング上からのタンク底部溶接部の検査については、技術的に実用に供し得る各種の探傷法が示されるとともに、当該探傷法に共通する試験要領、試験結果の評価（補修を要しない欠陥の大きさ）等が示されており、運用等の詳細は実用機が製作された段階で通知するとされています。

今般、上記通知において探傷法の1つとして示されている超音波探傷法を用いた装置として、フェーズドアレイ技術を用いた探傷装置（以下「PA試作機」という。）が、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（以下 JOGMEC）において製作されたことを踏まえ、その活用可能性等について検討するものです。

3.2 調査検討事項

- (1) PA試作機の検出原理等
- (2) 試験片及び実タンクにおけるPA試作機の性能確認
- (3) PA試作機を用いた溶接欠陥の評価手法

3.3 PA試作機の検出原理等の概要

金属片に割れ等の構造欠陥が存在している場合、次図のとおり探触子から発射された超音波は、欠陥の境界面で一部又は全部が反射されることとなります。超音波探傷機では、これらの反射波による受信（エコー）波形を観測することにより、欠陥を検知しています。フェーズドアレイ探触子とは、一筐体の中に複数の振動素子が多数入っているものをいい、振動素子はプログラム化されたパターンで個別に発信のタイミングが制御されています。このことにより、装置全体として、発する超音波を、平面波としたり、焦点付きの波面としたりすることが可能となります（図3.1）。

超音波フェーズドアレイ（Ultrasonic Phased Array）を用いた溶接部検査やクラック検出は、幅広い産業分野で使用されてきています。超音波フェーズドアレイ技術が従来型の超音波検査と比較し優れている点として、溶接部検査において、一つの探触子で溶接部を広視野角で検査できるため、欠陥検出確率を高めることができることがあげられます。また、スキャンしたデータをリアルタイムで映像として表示することが可能な装置として開発がなされており、検査や補修の効率的な実施が可能となります（図3.2）。

また、超音波を用いた計測であるため、表面にコーティングが施工されていても、それを通過して金属部分の欠陥を検出することが原理的に可能であることがあげられます。更に、磁粉探傷試験とPA試作機による溶接部検査の特徴を表3.1に示します。

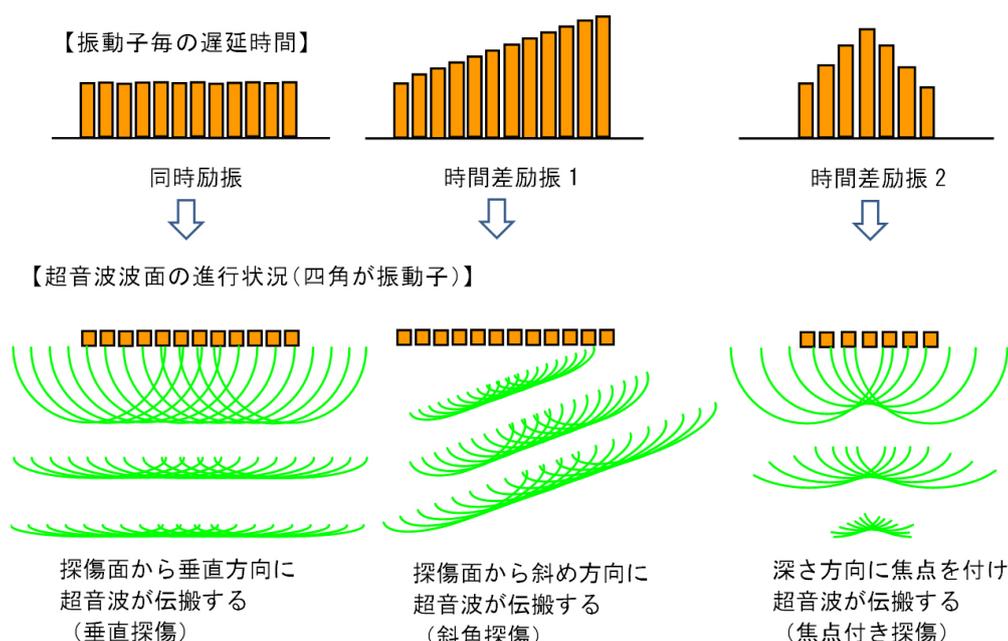


図3.1 フェーズドアレイ励振方法

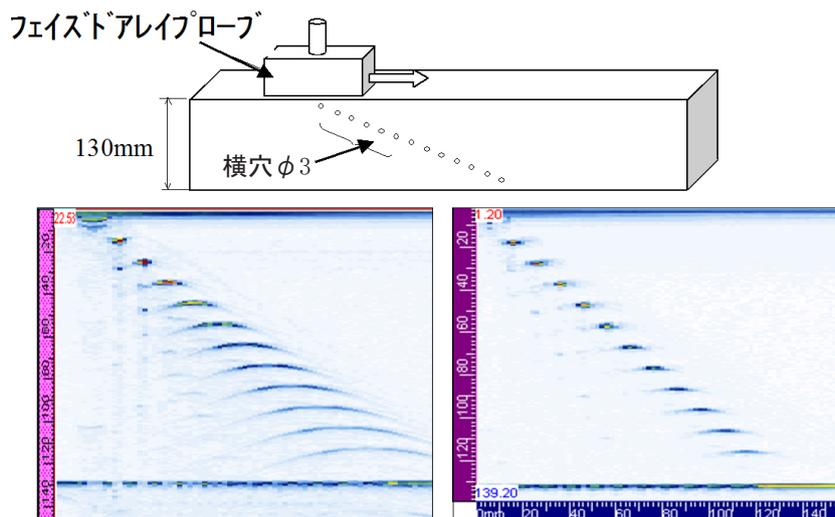


図3.2 フェーズアレイを用いた固定焦点とリアルタイム焦点のエコーの違い

表3.1 磁粉探傷試験とPA試作機による検査の特徴

	磁粉探傷試験 (MT)	PA 試作機
検出原理	・強磁性体を磁化した場合に、表層部に磁束を妨げる欠陥が存在するとき、外部空間に漏れ磁束を生ずる。この漏れ磁束によって吸着された磁粉模様から表層部の欠陥を検出する方法。	・個々の振動子が超音波を送受信するタイミングを独立に制御し、合成された超音波波面を形成することにより超音波ビームの制御を行う。超音波の入射方向や焦点距離を自由に変えて、多面的に欠陥を探傷する方法。
検出性能	・表面及び表層の微細な欠陥の検出が可能。	・表面及び内部の欠陥の検出が可能。
検査環境	・コーティング上から検査出来ない。	・コーティング上から検査出来る。
その他	・溶接線上のコーティングの剥離及び復旧が必要となり、復旧部分の重ね合わせ部が厚膜化する。	・コーティングの剥離作業、復旧工事が省略され、工期の短縮が見込まれる。

3.4 PA試作機の試験片による性能確認

本検討会においては、JOGMEC における自主研究結果を踏まえつつ、下記のとおり試験片及び実タンクにおけるPA試作機の性能確認を行いました。

(1) 実験概要

- ① 実験場所：株式会社 IHI 検査計測本社（神奈川県横浜市金沢区福浦 2-6-17）
- ② 実験日時：平成 29 年 12/19 ～

(2) 試験片の仕様

PA試作機に必要な性能を検討するため、溶接欠陥の影響や内部欠陥の亀裂進展に対する影響も併せて確認するため、溶接部に人工的に欠陥を導入した試験片を製作し、疲労破壊試験を実施しました。また、製作した試験片は、PA試作機の欠陥検出性能の確認に活用します。

製作した試験片の概要は、以下のとおりです。

- ① 鋼板の材料及び板厚等
 鋼板の材質：JIS G 3101 の SS400
 鋼板板厚：9mm、12mm 及び 20mm（JIS 公差）とする。

② 試験片の継手の種類

試験片の継手の種類は、突き合わせ継手及び重ね継手とする。

ア 板厚 12mm 裏当て付き突き合わせ溶接（試験片のサイズ：500mm×500mm）

イ 板厚 20mm 裏当て付き突き合わせ溶接（試験片のサイズ：500mm×500mm）

ウ 板厚9mm 重ね溶接（試験片のサイズ：500mm×500mm）

③ 試験片の溶接欠陥の種類

表面欠陥、内部欠陥等を含むものとし、表 3.2 に各試験片の詳細を示す。

また、欠陥の所在を確認するため、放射線透過試験（以下 RT）を、各試験片に対し行い、表面欠陥やブローホール等の確認においては、MT、浸透探傷試験（以下 PT）を実施した。

④ 塗膜種類及び厚さ

ア 塗膜の種類：ガラスフレークコーティング

イ 塗膜厚さ：1mm

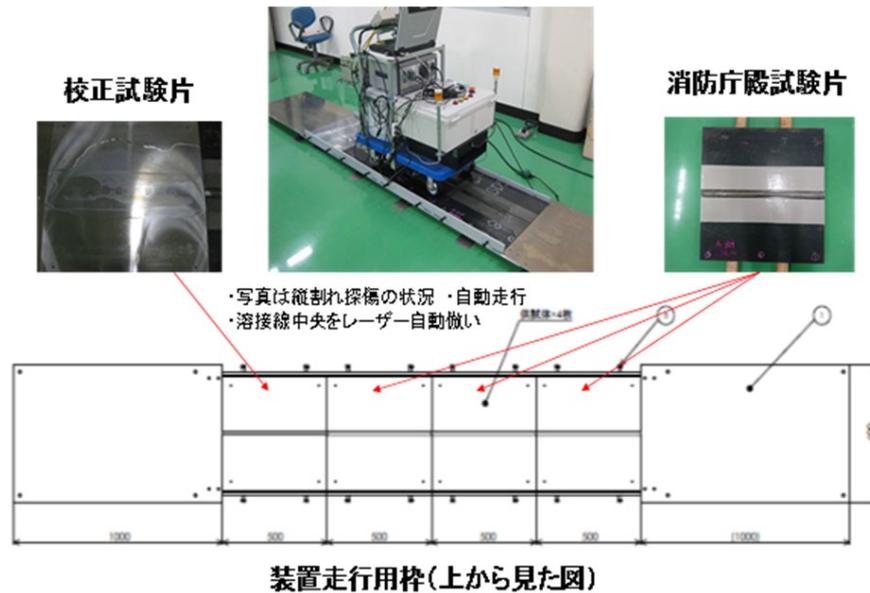


図3.3 PA試作機の試験片での探傷試験の様子

表3.2 溶接欠陥を有する試験片の一覧

A	板厚12mm 裏当付き 突合せ溶接	1	A-BH	ブローホール	初層 最終層	半自動	PT RT
		2	A-IP	溶込不良	初層	半自動	PT
		3	A-CLR	内部割れ	初層	半自動	RT
		4	A-CLF	表面割れ	最終層	半自動	MT RT
		5	A-UC	アンダーカット	最終層	半自動 被覆アーク	PT RT
		6	A-ND	無欠陥	—	半自動	RT
B	板厚20mm 裏当付き 突合せ溶接	7	B-BH	ブローホール	初層 最終層	半自動	PT RT
		8	B-IP	溶込不良	初層	半自動	RT
		9	B-CLR	内部割れ	初層	半自動	RT
		10	B-CLF	表面割れ	表層	半自動	MT RT
		11	B-UC	アンダーカット	表層	半自動 被覆アーク	PT RT
		12	B-LF	融合不良	中間層	半自動	RT
		13	B-ND	無欠陥	—	半自動	RT
C	板厚9mm 重ね溶接	14	C-BH	ブローホール	初層 最終層	半自動	PT RT
		15	C-IP	溶込不良	初層	半自動	RT
		16	C-CLR	内部割れ	初層	半自動	RT
		17	C-CLF	表面割れ	表層	半自動	MT RT
		18	C-UC	アンダカット	表層	半自動 被覆アーク	PT RT
		19	C-ND	無欠陥	—	半自動	RT

*1 RT：放射線透過試験，PT：浸透探傷試験，MT：磁粉探傷試験

*2 母材の板厚が薄い（2～3 mm 程度）場合は、一層での溶接で接合できるが、母材が厚い場合は、溶接層数やパス数を増やして溶接する必要があり、欠陥を有する溶接層の位置を示す。

(3) PA試作機の試験片の探傷結果

表 3.3 に、No.1～No.13 の試験片の溶接欠陥箇所 (RT、PT、MT) と、PA 試作機による各溶接欠陥の探傷判定及び、探傷結果を示します。

なお、探傷判定の「○」は、RT、MT、PT で確認された欠陥箇所において、PA 試作機でも、その箇所を探傷できたことを示し、「×」は、その逆となります。そして、不一致「-」は、RT、MT、PT で確認された欠陥箇所と PA 試作機との検出箇所が不一致の場合を示します。

その結果、ブローホール、内部割れ、表面割れ、アンダーカットの欠陥を有する、試験片の探傷は、検出可能となり、PA 試作機による検出性能は、概ね良好の結果となりました。

しかしながら、試験片 No.2、No.8 の「溶込不良」時の欠陥は、RT、MT、PT で確認された欠陥箇所と PA 試作機との検出箇所が不一致との結果となりました。そこで、再度試験片の断面観察を行った結果、裏当てまで溶け込んでいることから、溶け込み不良では無いことが判断できました。よって、検出箇所の不一致となった理由は、試験片側に起因するものと考えられます。

以上のことから、今回の溶接欠陥を有する試験片 (ブローホール、融合不良、溶込不良、表面割れ、内部割れ、アンダーカット) に対し、PA 試作機の探傷性能は、塗膜有りの場合においても、概ね良好であるといえます。

(4) PA試作機の探傷検出限界について

本検討では、試験片表面の長さ 6 mm 深さ 3 mm の欠陥を検出目標とし、試験片表面母材部に長さ 6 mm 深さ 3 mm の加工をして、このスリットを基準として装置の感度校正を行い、基準感度を 80% に調整しています。その基準感度に対し、どのような欠陥のサイズまで検出可能であるか、探傷検出限界の検討を行いました。図 3.4 に、PA 試作機の欠陥検出限界のシミュレーション結果を示します。各エコー高さに対する、試験片の欠陥の大きさを示しており、エコー高さ 20% の検出限界を赤の破線で示しています。その結果、試験片の欠陥の長さが 2 mm × 深さ 2 mm の欠陥までは、探傷可能であり、検出目標の欠陥である長さ 6 mm 深さ 3 mm は、確実に検出でき、かつ、探傷の裕度もあることがわかります。

表3.3 PA試作機の試験片探傷結果及び判定結果

試験片種類	UT実用機 探傷結果	探傷判定
No. 1 (ブローホール)	縦割れきず探傷では、ビード中央部で数多くの表面指示が得られた事から表面に密集したブローホールが検出されたと考えられる。探傷側と反対の溶接止端部で指示が確認されたが溶接形状の影響であり評価対象外とする。特に角度付き探傷法でブローホールが明瞭に検出された。	○
No. 2 (溶込不良)	縦割れきず探傷では、ビード中央部の表面からの指示が得られたが、RT結果が示す溶込不良の部位からは反射指示が得られなかった。また、横割れきず探傷、角度付き探傷においても指示は確認できなかった。溶込不良試験片の断面観察の結果、裏当てまでの溶け込みを確認した。断面観察の結果は別途言及する。	— * 1
No. 3 (内部割れ)	縦割れきず探傷では、ビード中央部で表面と内部からの複数の指示が得られた。また、横割れきず探傷で、ビード中央部で内部からの指示が確認されたが、この指示は試験片内を2回反射した後の指示のため評価対象外とする。	○
No. 4 (表面割れ)	縦割れきず探傷では、探傷側止端部で指示を検出した。表面割れがビード止端部まで進展していることが考えられる。角度付き探傷にてビード中央部で表面からの指示が多く検出された。また、RT指示部以外の指示があり今後調査する必要がある。	○
No. 5 (アンダーカット)	縦割れきず探傷において、ビード止端部表面からの強い指示を検出した。探傷側のビード止端部で指示が検出されていることからアンダーカットなどのきず指示であると考えられる。また、角度付き探傷では、ビード止端部で表面から高い指示が数か所確認され、ビード形状からの反射と評価する。	○
No. 6 (無欠陥)	縦割れきず探傷において、ビード止端部で表面および余盛部からの指示が得られた。溶接形状の影響による指示が考えられるが、試験片表面を確認し最終評価とする。RTでは指示が無く、UTで指示が得られた箇所については今後調査を行う。また、横割れきず探傷、角度付き探傷では、特に指示は確認されなかった。	—
No. 7 (ブローホール)	縦割れきず探傷では、ビード中央部で数多くの表面指示が得られた事から、表面に密集したブローホールが検出されたと考えられる。探傷側と反対の溶接止端部で指示が確認されたが、溶接形状の影響であり評価対象外とする。特に角度付き探傷法でブローホールが明瞭に検出された。	○
No. 8 (溶込不良)	縦割れきず探傷では、表面からの指示は得られたが、RT結果が示す溶け込み不良の部位からは反射指示が得られなかった。また、角度付き探傷においても表面からの指示を確認した。	—
No. 9 (内部割れ)	縦割れきず探傷では、ビード中央部・止端部で表面と内部からの複数の指示が得られた。また、角度付き探傷で、ビード止端部内部からの指示を確認した。	○
No. 10 (表面割れ)	縦割れきず探傷では、ビード中央部で表面から連続的な指示が得られた。角度付き探傷もビード中央部から止端部にかけて表面からの指示が多く検出された。これは、複数のきずからの反射が重なり広い範囲で指示が検出されたためと考えられる。RT指示部以外の指示があり、調査の必要性がある。	○
No. 11 (アンダーカット)	縦割れきず探傷において、ビード止端部で表面からの指示が得られた。探傷側の止端部で検出されていることからアンダーカットなどのきず指示と考えられる。また、角度付き探傷では、ビード止端部で表面から高い指示が数ヶ所確認され、ビード形状からの反射と評価する。	○
No. 12 (融合不良)	縦割れきず探傷では、試験体の内部から裏面にかけて複数の指示を確認した。UTで検出された指示はRTと同様の結果を示している。	○
No. 13 (無欠陥)	縦割れきず探傷において、ビード止端部で表面および余盛部からの指示が得られた。溶接形状およびアンダーカットなどが考えられるが、試験体表面を確認し最終評価とする。RTでは指示が無く、UTで指示が得られた箇所についても、調査を行う必要あり。	—

※1：断面観察の結果、裏当てまでの溶込を確認

RT,MT,PT 指示部でPA 指示あり：○， RT,MT,PT 指示部でPA 指示なし：×， 不一致：—

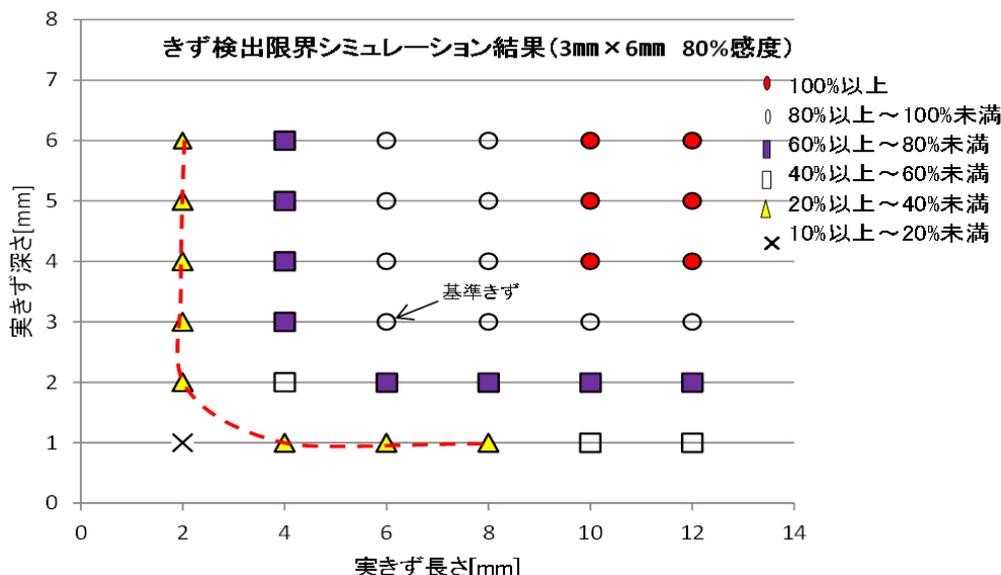


図3.4 PA試作機の欠陥検出限界シミュレーション結果

3.5 PA試作機の実タンクによる性能確認

(1) 実験概要

開放検査中のタンクにおいて、タンククリーニング後と溶接線コーティング剥離前の間の期間にて実証試験を下記の期間で実施しました。

- ① むつ小川原国家石油備蓄基地：平成 30 年 5/17～19、5/21～22
- ② 福井国家石油備蓄基地：平成 30 年 9/6～9/8、9/10～11

(2) PA試作機の探傷方法

PA試作機は、縦割れ欠陥検出用のAパターン、横割れ欠陥検出用のB-2パターン、斜め欠陥検出用のB'-2パターンとして、実タンクの探傷を実施しました。また、超音波フェーズドアレイの設定条件は、以下の条件で実施し、探傷箇所は当該装置にて探傷可能であるタンク底板突合せ溶接部を対象としました。

① 探傷条件

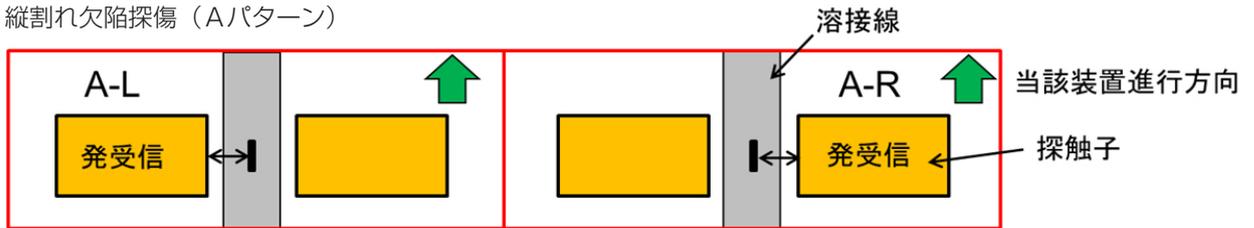
- ア 探傷（走行）速度：20mm/s
- イ データ採取ピッチ：探傷部位が不連続とならないように実施し、2mmピッチで記録
- ウ 超音波探触子：5MHz、32chリニア配列のフェーズドアレイ探触子
- エ 接触媒質：水道水または工業用水
- オ 基準感度：深さ3mm×長さ6mm、幅1mmの表面開口スリットのエコー高さ80%
- カ 探傷感度*：Aパターン：基準感度+9dB、Bパターン：基準感度+21dB（塗膜補正）
- キ 探傷長さ：約15m

- 1) 始点を横断する溶接線の中心から、溶接線終点を横断する溶接線の中心までの距離
- 2) 途中に障害物があり走行できない場合は、一旦検査を中断し障害物を迂回した後に再探傷を実施。（一部、検査を続行しながら障害物の迂回を試行したデータあり）

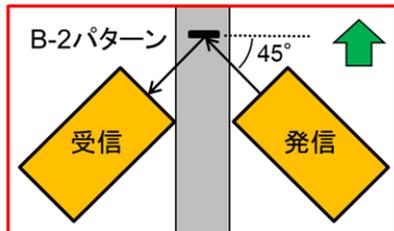
② 探触子の配置と探傷パターン探傷条件

PA試作機の検証の結果、あらゆる角度の欠陥を検出するために、3通りの探触子の配置パターンで実タンクの探傷を実施しました。

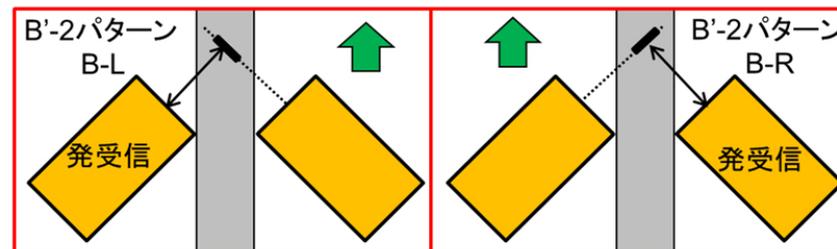
ア 縦割れ欠陥探傷（Aパターン）



イ 横割れ欠陥探傷（B-2パターン）



ウ 角度付欠陥探傷（B'-2パターン）



(3) PA試作機の実タンクの探傷結果

① 実タンクの探傷結果

実タンクの探傷結果の詳細は、以下のとおりとなりました。なお、探傷の際、エコー高さが20%以上となる箇所を、溶接欠陥箇所として扱いました。今回、試験を実施した国家備蓄基地のタンクは、溶接欠陥がほぼ無いタンクであり、また欠陥の種類もブローホールのみでした。その結果、

ア むつ小川原国家石油備蓄基地：39ヶ所

イ 福井国家石油備蓄基地：39ヶ所

の欠陥箇所が検出されました。

② 溶接線表面の欠陥について

今回、実タンクの実証試験を実施したPA試作機は、表面への開口の有無を判定することが難しいため、PA試作機で欠陥が検出された箇所について、MT、PTを実施した結果、溶接線表面の開口欠陥等は、認められませんでした。よって、今回検出された欠陥は溶接線内部に存在するブローホールや割れ等の内部欠陥であり、表層での欠陥ではなかったと考えられます。

3.6 PA試作機を用いた溶接欠陥の評価手法

PA試作機の運用等に係る前提条件

PA試作機の特性を踏まえ、その運用等による前提条件を整理しました。

(1) 底部の溶接部全線において、過去にMTを実施し、その記録が確認できる(図3.5)。

(2) 検査する溶接部は、底板相互及びアニュラ板相互の溶接継手のうち、突き合わせ溶接部で、かつ、溶接施工法確認試験(危険物の規制に関する規則第20条の4第3項)で確認された溶接方法で施工されているものとする。

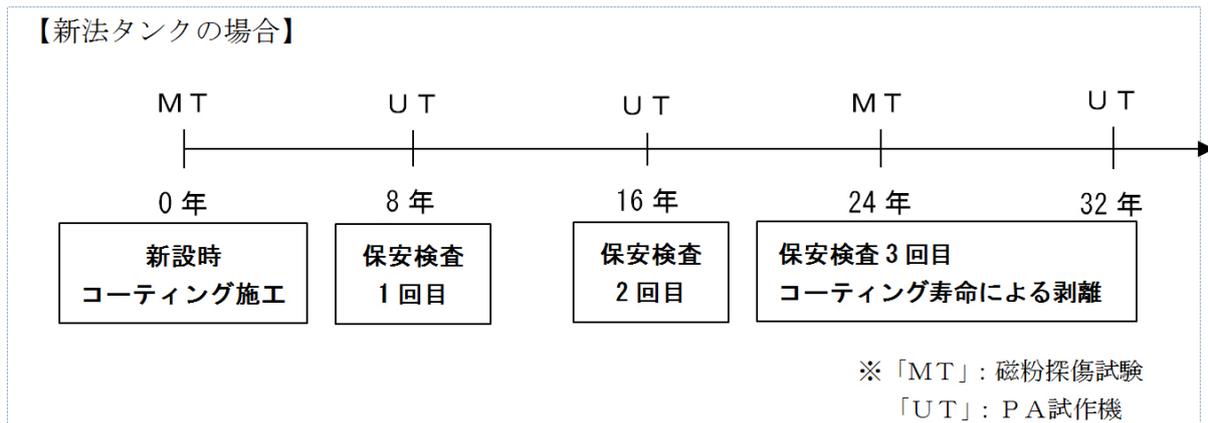


図3.5 本検討における溶接部検査の実施時期のイメージ

3.7 PA試作機の運用イメージ

「特定屋外貯蔵タンクの内部点検等の検査方法に関する運用について」（平成12年8月24日付け消防危第93号）において示されている溶接欠陥の標準的な評価手法に、PA試作機を当てはめると下記のとおりとなります。

(1) 試験要領

溶接部試験の標準的な試験要領を以下に示す。

① 準備

溶接部試験を行うに際しては、以下の準備及び確認を行うこと。

ア 溶接部及びコーティングの把握

- (ア) タンク底部の溶接部近傍及び溶接部の検査並びに補修履歴を確認すること。
- (イ) コーティングの種類及び厚さを確認すること。

イ PA試作機の試験性能の確認

- (ア) PA試作機の試験性能の確認（試験現場において、PA試作機が仕様書に記載されている性能等を維持していることを底部溶接部試験用対比試験片を用いて確認することをいう。以下同じ。）を、溶接部試験実施の直前に行うこと。

なお、底部溶接部試験用対比試験片は、溶接部試験を行うタンクの底部溶接継手のサイズ及びビードの形状、タンク底板又は側板の材質及び板厚並びにコーティングの種類及び厚さを勘案して作成されたものであること。

- (イ) 試験性能の確認は2回以上行い、PA試作機の検出データの再現性を確認すること。

ウ 溶接部試験を実施する溶接継手の前処理

溶接部試験を実施する溶接継手に油分等が存在し、試験に支障がある場合はクリーニング等により除去すること。

② 試験

ア 試験範囲の確定

- (ア) PA試作機の構造面又は機能面から、溶接部試験が可能な範囲を確定し、不可能な部位については、コーティングを剥離し磁粉探傷試験を行うこと。
- (イ) 溶接部試験の対象範囲は、試験作業や試験記録の管理を明確化するため、試験基準（開始）点及び試験（測定器の操作）方向などの条件を確認すること。

イ 試験方法の確認

溶接部試験の方法については、PA試作機により操作方法が異なるので仕様書等から、確認すること。

③ 試験中又は試験後の試験性能の確認

- ア 溶接部試験の作業中でも必要に応じて試験性能の確認を実施すること。
- イ 全てのタンク溶接部試験が終了した後、試験性能の確認を速やかに実施すること。
- ウ PA試作機の試験性能の確認の結果、異常があり、試験データへの影響が認められる場合には、影響の認められた範囲について再度測定を行うこと。

④ 試験記録

以下に示す溶接部試験の記録を作成して、保存すること。

- ア 試験タンクを特定する事項
- イ 試験実施者及び試験年月日
- ウ 底部溶接部試験用対比試験片による試験性能の確認データ
- エ P A 試作機、試験条件及び試験範囲に関する資料
- オ 溶接部試験の結果
 - ア) 溶接部試験データ
 - イ) P A 試作機から出力された試験記録類
- カ その他必要と認められる事項

(2) 試験結果の評価

P A 試作機によりコーティング上から溶接部試験をした場合の欠陥の大きさが以下に示す場合については、火災予防上支障がないと認め、政令第 23 条の規定を適用して、補修を行わなくても差し支えないものであること。側板とアニュラ板の溶接継手以外の溶接継手については、深さが 3.0mm を、長さが 6.0mm をそれぞれ超えないものであること。

3. 8 P A 試作機におけるまとめと今後の課題

本検討においては、P A 試作機が J O G M E C で製作されたことを踏まえ、その活用可能性や探傷性能等について検討を行いました。その結果として、原理的には、溶接欠陥の探傷ができることが明らかとなりましたが、実運用に供するに当たっては、①実タンクにおける検証データの不足、②底板の裏面腐食に対する探傷性能の検討、③傾き欠陥の検討、④実用機としての製作やその客観的な性能確認（第三者機関の評価等）、⑤ P A 試作機を用いた溶接部探傷実施者の技能レベルの確保等の課題があると考えられます。

今後、これらの課題がクリアされた段階で、実運用に供することが適当と考えられます。

4 おわりに

水張検査は実際の使用環境を模することで、溶接欠陥からの漏洩、基礎の沈下、タンクの変形といった好ましくないことが顕在化してこないことを確認するものですが、今回の破壊力学に基づくシミュレーションは水張検査に対して力学的に等価というわけではありません。定期開放時に適切な検査が実施され、2.5 (1) ~ (3) に示した要件を満足しているようなタンクは十分安全であり、水張検査を実施したとしても、漏洩、沈下、変形といった問題は発生しないであろうという考えに基づいているものです。

コーティング上からの溶接部検査については、即実運用に供するとはならなかったものの、決して否定されたわけではなく、有効性についてはある程度認められており、課題がクリアされれば十分実用に耐えるものと評価されています。

現在消防庁では、本検討会の結果を受けて、省令改正を実施するとともに（2019 年 7 月現在意見公募中）、具体的な運用方法について、8 月中に通知を発出する予定となっています。

なお、「屋外貯蔵タンクの検査技術の高度化に係る調査検討報告書」については、消防庁ホームページから閲覧できます。

「消防庁トップページ」→「消防庁について」→「審議会・検討会等」→「検討会」→「平成 30 年度開催の検討会等」→「屋外貯蔵タンクの検査技術の高度化に係る調査検討会」

https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/post-30.html