

LPG貯槽指針
 追補改訂 新旧対照表

ページ	LPG貯槽指針 <旧> 平成27年7月発行 (JGA指-106-15)	LPG貯槽指針 <新> 追補改訂 平成29年12月 (JGA指-106-17)
-----	--	--

P355	表1 LPG貯槽のきず評価におけるパラメーター一覧		
			入力する値
材料物性	材料の降伏応力・引張強さ		規定最小値
	割れの疲労進展特性を表す材料定数	C	BS7910の8.2.3による値又は標準値(表2)
		m	
破壊靱性(限界CTOD値)	δ_{mat}	最低使用温度における実測3本の最低値又は参考値(表3)	
操作条件・割れ寸法	LPG貯槽の最低使用温度		設置場所に応じた温度*1
	LPG貯蔵能力		運用上の最大値
	LPG貯槽の運転条件	内 圧	最高使用圧力(静液圧を含む。)
		内圧変動範囲	温度変化、液位変化、操作中等による圧力変動を加えた値
	板 厚		必要最小厚さ
	角変形量(弦長スパン: $2L=1m$)		当該LPG貯槽の実測値の最大値*2
きず寸法	長さ $2c_0$	本指針に則した直近2回のMT検査結果の最大寸法*2	
	深さ a_0		
<p>*1 設置場所に応じた温度とは、LPG貯槽の設置場所における日最低気温の月別平均値の最低値をいう。この場合、日最低気温の月別平均値の最低値が0℃を上回る場合は0℃とする。</p> <p>*2 角変形量及びきず寸法についての入力する値は、「11.3.2 個別評価 (2)超音波探傷試験による評価を行う場合」におけるJGA指-109-14「容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針」付表2-1の入力する値と設定内容が異なるので注意すること。</p>			
表2 きずの疲労進展特性を表す定数の標準値			
鋼種	C値	m値	備 考
HW490	1.58×10^{-12}	2.7	$da/dN = C(\Delta K_a)^m$ $dc/dN = C(\Delta K_c)^m$ ここで、 a : きず深さ(mm) c : きず長さの半長(mm) N : 繰り返し数(cycle) ΔK : 応力拡大係数範囲($N/mm^{3/2}$)

	表1 LPG貯槽のきず評価におけるパラメーター一覧		
			入力する値
材料物性	材料の降伏応力・引張強さ		規定最小値
	割れの疲労進展特性を表す材料定数	C	BS7910の8.2.3による値又は標準値(表2)
		m	
	破壊靱性	限界CTOD値	δ_{mat}
J積分による破壊靱性値		J_{mat}	最低使用温度における実測値又は参考値(表4)
操作条件・割れ寸法	LPG貯槽の最低使用温度		設置場所に応じた温度*1
	LPG貯蔵能力		運用上の最大値
	LPG貯槽の運転条件	内 圧	最高使用圧力(静液圧を含む。)
		内圧変動範囲	温度変化、液位変化、操作中等による圧力変動を加えた値
	板 厚		必要最小厚さ
	角変形量(弦長スパン: $2L=1m$)		当該LPG貯槽の実測値の最大値*2
きず寸法	長さ $2c_0$	本指針に則した直近2回のMT検査結果の最大寸法*2	
	深さ a_0		
<p>*1 設置場所に応じた温度とは、LPG貯槽の設置場所における日最低気温の月別平均値の最低値をいう。この場合、日最低気温の月別平均値の最低値が0℃を上回る場合は0℃とする。</p> <p>*2 角変形量及びきず寸法についての入力する値は、「11.3.2 個別評価 (2)超音波探傷試験による評価を行う場合」におけるJGA指-109-14「容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針」付表2-1の入力する値と設定内容が異なるので注意すること。</p>			
表2 きずの疲労進展特性を表す定数の標準値			
鋼種	C値	m値	備 考
HW490	1.58×10^{-12}	2.7	$da/dN = C(\Delta K_a)^m$ $dc/dN = C(\Delta K_c)^m$ ここで、 a : きず深さ(mm) c : きず長さの半長(mm) N : 繰り返し数(cycle) ΔK : 応力拡大係数範囲($N/mm^{3/2}$)

ページ	LPG貯槽指針 <旧> 平成27年7月発行 (JGA指-106-15)	LPG貯槽指針 <新> 追補改訂 平成29年12月 (JGA指-106-17)
-----	--	--

P356

表3 HW490 被覆アーク溶接で製作したLPG貯槽溶接部における限界CTOD値の参考値

鋼種	溶接材料	最大溶接入熱 (kJ/cm)	溶接後 熱処理 の有無	最低使用 温度(°C)	限界CTOD値*1 [δ_{mat} 値] (mm)
HW490	D5816*2 (0.7Ni系)	60	無	0	0.11
				-10	0.07
				-20	0.05
	D5816*2 (1.5Ni系)	45	無	-10	0.12
				-20	0.10
				-30	0.08

- *1 限界CTOD値の決定にあたっては、溶接材料の種類・溶接入熱等に十分留意すること。また、各温度の中間における限界CTOD値の標準値は、直線補間によって計算する。
- *2 被覆アーク溶接棒

4. 横置円筒形LPG貯槽における開放検査周期の計算例

開放検査周期の計算例として、表4に示す横置円筒形LPG貯槽Aについて検討を行った結果を示す。本書では、通常時（最高使用圧力時）における検査時期を算定するとともに、検査時期到達時に地震が発生した場合について評価した。その計算条件を表5から表7に示す。なお、地震時の評価はレベル1地震と必要に応じてレベル2地震の評価が必要となるが、今回は地震力の大きいレベル2のみとした。

評価対象とする初期きずは、図2に示すような長手継手に平行なきずとする（最も厳しくなる条件とする）。

なお、球形LPG貯槽の計算例は、JGA指-109-14「容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針」の付属書2「疲労割れの事例」を参考にすること。

表4 横置円筒形LPG貯槽の諸元

	諸元
貯槽名称	横置円筒形LPG貯槽A
LPGの種類	プロパン
貯蔵能力 W (t)	20
材料	HW490
内径 D (m)	2.8
最高使用圧力(静液圧を含む。) P_{max} (MPa)	1.77
必要最小厚さ t (mm)	13.8
最大角変形量 W_0 (mm/m)	15.0
最低使用温度(°C)	-10
限界CTOD値(標準値) δ_{max} (mm)	0.07*1

*1：限界CTOD値については、「日本ガス協会受託研究 LPG貯槽の開放検査

表3 HW490 被覆アーク溶接で製作したLPG貯槽溶接部における限界CTOD値の参考値

鋼種	溶接材料	最大溶接入熱 (kJ/cm)	溶接後 熱処理 の有無	最低使用 温度(°C)	限界CTOD値*1 [δ_{mat} 値] (mm)
HW490	D5816*2 (0.7Ni系)	60	無	0	0.11
				-10	0.07
				-20	0.05
	D5816*2 (1.5Ni系)	45	無	-10	0.12
				-20	0.10
				-30	0.08

- *1 限界CTOD値の決定にあたっては、溶接材料の種類・溶接入熱等に十分留意すること。また、各温度の中間における限界CTOD値の標準値は、直線補間によって計算する。
- *2 被覆アーク溶接棒

表4 SPV450Q-SR サブマージアーク溶接で製作した横置円筒形LPG貯槽溶接部におけるJ積分による破壊靱性値の参考値*1

鋼種	溶接材料	最大溶接入熱 (kJ/cm)	溶接後 熱処理 の有無	最低使用 温度(°C)	J積分による 破壊靱性値*2 [I_{mat} 値] (N/mm)
SPV450Q-SR	YS-M5*3	32	有	-10	105

- *1 LPG貯槽用材料特性（破壊靱性値）調査報告書（平成29年2月）（（一社）日本ガス協会）
- *2 J積分による破壊靱性値の決定にあたっては、溶接材料の種類・溶接入熱等に十分留意すること。
- *3 サブマージアーク溶接ワイヤ

4. 横置円筒形LPG貯槽における開放検査周期の計算例

開放検査周期の計算例として、表5に示す横置円筒形LPG貯槽Aについて検討を行った結果を示す。本書では、通常時（最高使用圧力時）における検査時期を算定するとともに、検査時期到達時に地震が発生した場合について評価した。その計算条件を表6から表8に示す。なお、地震時の評価はレベル1地震と必要に応じてレベル2地震の評価が必要となるが、今回は地震力の大きいレベル2のみとした。

評価対象とする初期きずは、図2に示すような長手継手に平行なきずとする（最も厳しくなる条件とする）。

なお、球形LPG貯槽の計算例は、JGA指-109-14「容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針」の付属書2「疲労割れの事例」を参考にすること。

ページ	LPG貯槽指針 <旧> 平成27年7月発行 (JGA指-106-15)	LPG貯槽指針 <新> 追補改訂 平成29年12月 (JGA指-106-17)
-----	--	--

P357 周期に関する調査研究報告書(平成3年)で示されているHW490のサブマージドアーク溶接継手の破壊靱性試験結果を参考に、安全を見て0℃～-20℃の最低値0.075mmを丸めた0.07mmとした。

表5 検査周期の計算に用いたHW490の材料物性

	材料物性値
ヤング率 E (N/mm ²)	206,000
ポアソン比 ν	0.3
規定最小降伏応力 σ_y (N/mm ²)	490
規定最小引張強さ σ_u (N/mm ²)	610

表6 きずの疲労進展評価に用いた横置円筒形LPG貯槽Aの計算諸元

	計算諸元
最大圧力変動範囲 ΔP (MPa)	1.182～1.77
初期きず深さ a_0 (mm)	5.1
初期きず長さ $2c_0$ (mm)	21.3

表7 荷重ケース

条 件	温度 (°C)	破壊評価圧力 P_{max} (MPa)	限界CTOD値 δ_{max} (mm)
通常時	-10	1.77(最高使用圧力)	0.07
レベル2地震時	-10	0.243 (-10℃における飽和蒸気圧)	0.07

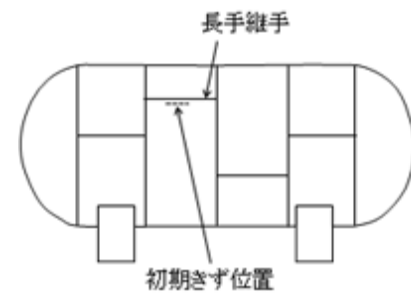


図2 評価対象とした初期きず位置

表5 横置円筒形LPG貯槽の諸元

	諸 元
貯槽名称	横置円筒形LPG貯槽A
LPGの種類	プロパン
貯蔵能力 W (t)	20
材料	HW490
内径 D (m)	2.8
最高使用圧力(静液圧を含む。) P_{max} (MPa)	1.77
必要最小厚さ t (mm)	13.8
最大角変形量 W_0 (mm/m)	15.0
最低使用温度(°C)	-10
限界CTOD値(標準値) δ_{max} (mm)	0.07* ¹

*1: 限界CTOD値については、「日本ガス協会受託研究 LPG貯槽の開放検査周期に関する調査研究報告書(平成3年)」で示されているHW490のサブマージドアーク溶接継手の破壊靱性試験結果を参考に、安全を見て0℃～-20℃の最低値0.075mmを丸めた0.07mmとした。

表6 検査周期の計算に用いたHW490の材料物性

	材料物性値
ヤング率 E (N/mm ²)	206,000
ポアソン比 ν	0.3
規定最小降伏応力 σ_y (N/mm ²)	490
規定最小引張強さ σ_u (N/mm ²)	610

表7 きずの疲労進展評価に用いた横置円筒形LPG貯槽Aの計算諸元

	計算諸元
最大圧力変動範囲 ΔP (MPa)	1.182～1.77
初期きず深さ a_0 (mm)	5.1
初期きず長さ $2c_0$ (mm)	21.3

表8 荷重ケース

条 件	温度 (°C)	破壊評価圧力 P_{max} (MPa)	限界CTOD値 δ_{max} (mm)
通常時	-10	1.77(最高使用圧力)	0.07
レベル2地震時	-10	0.243 (-10℃における飽和蒸気圧)	0.07

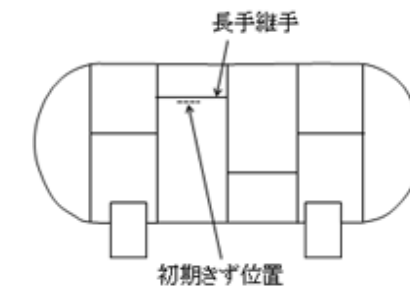


図2 評価対象とした初期きず位置

ページ	LPG貯槽指針 <旧> 平成27年7月発行 (JGA指-106-15)	LPG貯槽指針 <新> 追補改訂 平成29年12月 (JGA指-106-17)																				
P366	<p>ここで、</p> <p>σ_{ref} : 参照応力(N/mm²)</p> <p>σ_y : 降伏点(N/mm²)</p> <p>(3) きずの判定</p> <p>前節までの手順により求めた L_r 及び K_r をFAD線図上にプロットし、評価きずが許容できるか否かを判定する。BS7910 のオプション1 評価に用いるFADは、次式で与えられている。</p> <p>$L_r \leq 1$ のとき、</p> $K_r = f(L_r) = (1 + (1/2)L_r^2)^{-1/2} [0.3 + 0.7 \exp(-\mu L_r^6)] \quad (4.3.7)$ <p>$1 < L_r < L_{r,max}$ のとき、</p> $K_r = f(L_r) = f(1) L_r^{(N-1)/(2N)} \quad (4.3.8)$ <p>$L_r \geq L_{r,max}$ のとき、</p> $K_r = f(L_r) = 0 \quad (4.3.9)$ <p>ここで、</p> $\mu = \min(0.001(E/\sigma_y), 0.6) \quad (4.3.10)$ $N = 0.3(1 - (\sigma_y/\sigma_u)) \quad (4.3.11)$ <p>ここで、$L_{r,max}$ はFAD線図の cut-off 線に相当し、評価を行う材料毎に決定され、次式で定義される。</p> $L_{r,max} = (\sigma_y + \sigma_u) / 2\sigma_y \quad (4.3.12)$ $= 1.12$ <p>式(4.3.7)、式(4.3.8)及び式(4.3.9)のFADによって判断される限界きず寸法に至るときのサイクル数並びに疲労進展後のきず寸法を表8に示す。また、図5はきずの疲労進展に伴う荷重比・靱性比の変化をFAD上にプロットしたものである。</p> <p style="text-align: center;">表8 疲労進展後のきずに対するFAD評価結果</p> <table border="1" data-bbox="480 1535 1308 1686"> <thead> <tr> <th></th> <th>サイクル数 N (cycles)</th> <th>きず深さ a (mm)</th> <th>きず長さ 2c (mm)</th> <th>検査周期 (1cycle/日)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>通常時</td> <td>7,656</td> <td>5.15</td> <td>21.36</td> <td>21年</td> </tr> </tbody> </table> <p>(4) 地震発生時の評価</p> <p>検査時期 21年到達時 (きず深さ 5.15mm、きず長さ 21.36mm) にレベル2地震が発生した場合について評価を行う。評価結果を、表9に示すとともに下記図5にプロットする。</p>		サイクル数 N (cycles)	きず深さ a (mm)	きず長さ 2c (mm)	検査周期 (1cycle/日)	通常時	7,656	5.15	21.36	21年	<p>ここで、</p> <p>σ_{ref} : 参照応力(N/mm²)</p> <p>σ_y : 降伏点(N/mm²)</p> <p>(3) きずの判定</p> <p>前節までの手順により求めた L_r 及び K_r をFAD線図上にプロットし、評価きずが許容できるか否かを判定する。BS7910 のオプション1 評価に用いるFADは、次式で与えられている。</p> <p>$L_r \leq 1$ のとき、</p> $K_r = f(L_r) = (1 + (1/2)L_r^2)^{-1/2} [0.3 + 0.7 \exp(-\mu L_r^6)] \quad (4.3.7)$ <p>$1 < L_r < L_{r,max}$ のとき、</p> $K_r = f(L_r) = f(1) L_r^{(N-1)/(2N)} \quad (4.3.8)$ <p>$L_r \geq L_{r,max}$ のとき、</p> $K_r = f(L_r) = 0 \quad (4.3.9)$ <p>ここで、</p> $\mu = \min(0.001(E/\sigma_y), 0.6) \quad (4.3.10)$ $N = 0.3(1 - (\sigma_y/\sigma_u)) \quad (4.3.11)$ <p>ここで、$L_{r,max}$ はFAD線図の cut-off 線に相当し、評価を行う材料毎に決定され、次式で定義される。</p> $L_{r,max} = (\sigma_y + \sigma_u) / 2\sigma_y \quad (4.3.12)$ $= 1.12$ <p>式(4.3.7)、式(4.3.8)及び式(4.3.9)のFADによって判断される限界きず寸法に至るときのサイクル数並びに疲労進展後のきず寸法を表9に示す。また、図5はきずの疲労進展に伴う荷重比・靱性比の変化をFAD上にプロットしたものである。</p> <p style="text-align: center;">表9 疲労進展後のきずに対するFAD評価結果</p> <table border="1" data-bbox="1783 1535 2611 1686"> <thead> <tr> <th></th> <th>サイクル数 N (cycles)</th> <th>きず深さ a (mm)</th> <th>きず長さ 2c (mm)</th> <th>検査周期 (1cycle/日)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>通常時</td> <td>7,656</td> <td>5.15</td> <td>21.36</td> <td>21年</td> </tr> </tbody> </table> <p>(4) 地震発生時の評価</p> <p>検査時期 21年到達時 (きず深さ 5.15mm、きず長さ 21.36mm) にレベル2地震が発生した場合について評価を行う。評価結果を、表10に示すとともに下記図5にプロットする。</p>		サイクル数 N (cycles)	きず深さ a (mm)	きず長さ 2c (mm)	検査周期 (1cycle/日)	通常時	7,656	5.15	21.36	21年
	サイクル数 N (cycles)	きず深さ a (mm)	きず長さ 2c (mm)	検査周期 (1cycle/日)																		
通常時	7,656	5.15	21.36	21年																		
	サイクル数 N (cycles)	きず深さ a (mm)	きず長さ 2c (mm)	検査周期 (1cycle/日)																		
通常時	7,656	5.15	21.36	21年																		

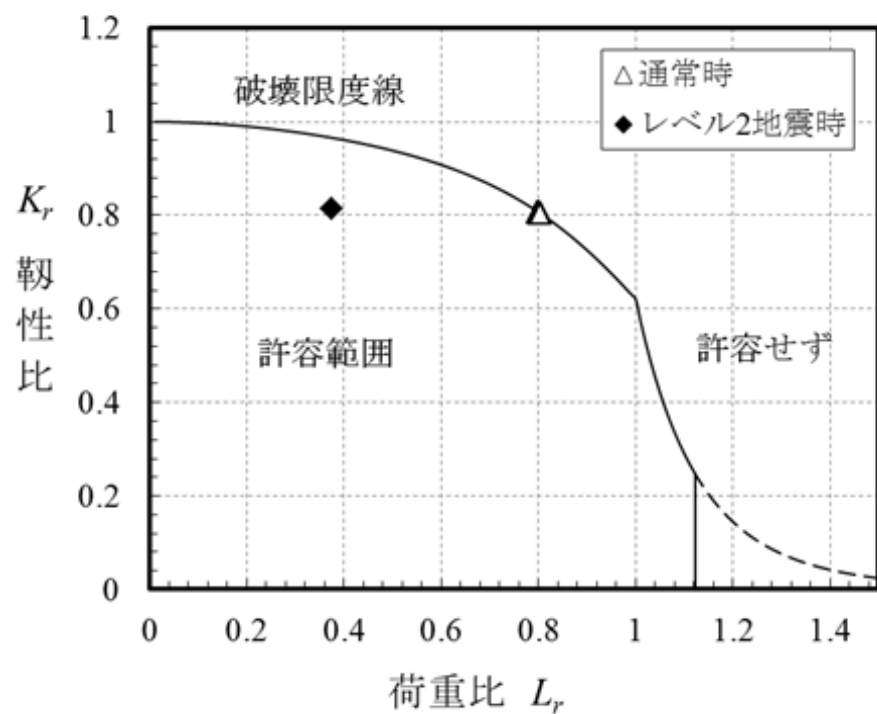
ページ	LPG貯槽指針 <旧> 平成27年7月発行 (JGA指-106-15)	LPG貯槽指針 <新> 追補改訂 平成29年12月 (JGA指-106-17)
-----	--	--

P367

表9 地震発生時の評価結果

	荷重比 L_r	靱性比 K_r
レベル2地震時	0.38	0.82

検査時期 21 年到達時時に地震が発生しても評価上合格であるが、本体フランジ接続部、バルブ、液面計等付属品の性能確保を考慮して、次回開放検査時期は 15 年目とする。



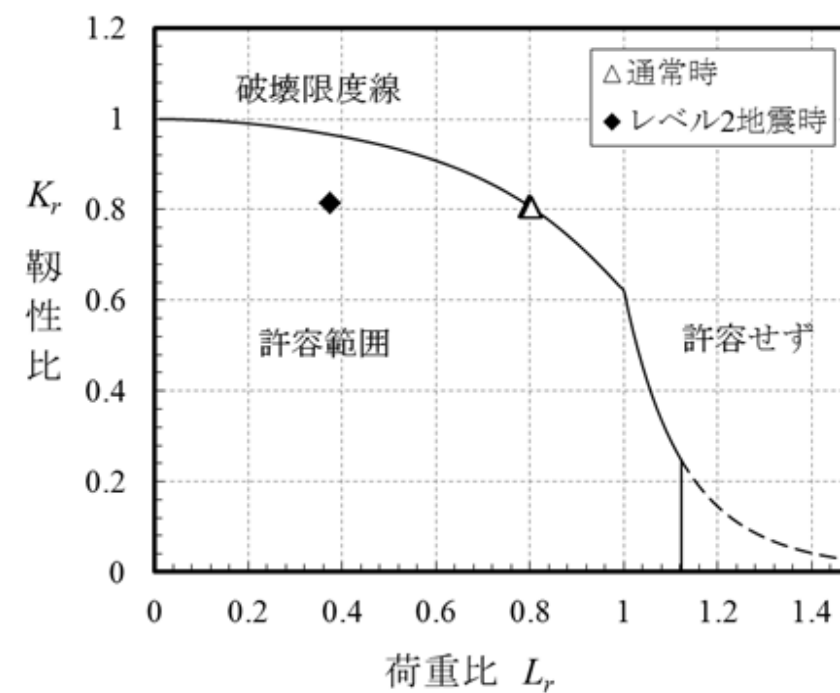
備考 プロットはきず疲労進展に伴う靱性比・荷重比の変化を示す。実線の内側にある間は、そのきずは許容される。

図5 オプション1破壊評価線図

表10 地震発生時の評価結果

	荷重比 L_r	靱性比 K_r
レベル2地震時	0.38	0.82

検査時期 21 年到達時時に地震が発生しても評価上合格であるが、本体フランジ接続部、バルブ、液面計等付属品の性能確保を考慮して、次回開放検査時期は 15 年目とする。



備考 プロットはきず疲労進展に伴う靱性比・荷重比の変化を示す。実線の内側にある間は、そのきずは許容される。

図5 オプション1破壊評価線図

L P G 貯槽指針

(追補 1)

JGA 指-106-17

一般社団法人 日 本 ガ ス 協 会
ガス工作物等技術基準調査委員会

免責条項

この指針の利用者は、自らの責任においてこの指針を利用するものとします。この指針に基づいて機器・設備の建設、維持、廃止等を行った際に、利用者または第三者に発生した損害について、日本ガス協会はいかなる責任を負うものではありません。

また、この指針の利用者が、日本ガス協会の承諾なしにこの指針を違法に転載したこと等に起因する損害や、第三者の知的財産権について権利者の承諾を得ることなく侵害し、損害賠償請求等を受けた場合についても、日本ガス協会は一切の責任を負いません。

L P G 貯槽指針 (追補 1)

L P G 貯槽指針 (JGA指-106-15) の「付属書 6. 疲労進展の可能性のあるきずの個別評価手法」を次のように改訂する。本指針の付属書 6 以外の部分は、L P G 貯槽指針 (JGA指-106-15) の通りとする。

付属書 6. 疲労進展の可能性のあるきずの個別評価手法

1. 適 用

本付属書は、「11.3.2 個別評価 (1)磁粉探傷試験による評価を行う場合」を適用する場合に、L P G 貯槽の開放検査時に、磁粉探傷試験等で検出された内圧変動による疲労進展が懸念される溶接部のきずについて、L P G 貯槽毎の個別評価を行うことによって開放検査周期を決定する手法について記すものである。^{*1}

* 1 「11.3.2 個別評価 (2)超音波探傷試験による評価を行う場合」を適用する場合の評価方法は JGA 指-109-14「容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針」の 3.3「疲労割れの評価方法」によること。

2. 最大開放検査周期

本付属書に示す個別評価を行った場合においても、本体フランジ接続部、バルブ、液面計等付属品の性能確保を考慮して最長の開放検査周期を定める。ただし、開放検査周期は 15 年を超えるものであってはならない。

3. 個別評価の方法

L P G 貯槽の個別評価には、破壊評価線図 (Failure Assessment Diagram、以下 F A D という。) を用いた手法を適用し、英国規格 BS 7910(2013)「Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures」(以下、「BS 7910」という。) 又は同等の手法で行うこと。F A D を用いた開放検査周期の検討手順を図 1 に示す。個別評価に用いる諸元は、表 1 に従って決定するものとする。

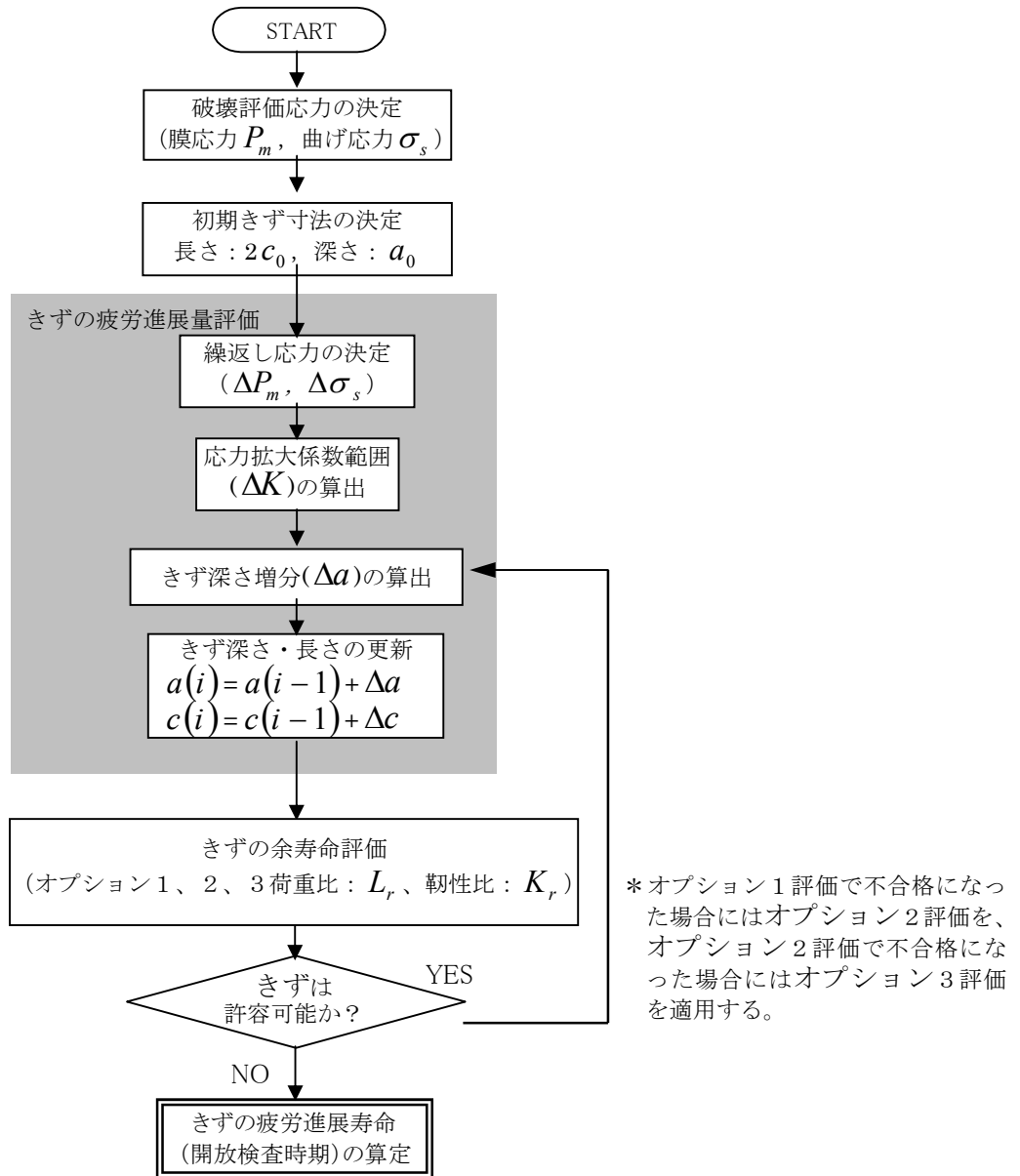


図 1 BS7910 を用いた開放検査周期の検討手順

表 1 LPG貯槽のきず評価におけるパラメータ一覧

			入力する値
材料物性	材料の降伏応力・引張強さ		規定最小値
	割れの疲労進展特性を表す材料定数	C	BS7910 の 8.2.3 による値又は標準値 (表 2)
		m	
	破壊靱性	限界 CTOD 値	δ_{mat}
J 積分による破壊靱性値		J_{mat}	最低使用温度における実測値又は参考値 (表 4)
操業条件・割れ寸法	LPG貯槽の最低使用温度		設置場所に応じた温度*1
	LPG貯蔵能力		運用上の最大値
	LPG貯槽の運転条件	内 圧	最高使用圧力 (静液圧を含む。)
		内圧変動範囲	温度変化、液位変化、操作中等による圧力変動を加えた値
	板 厚		必要最小厚さ
	角変形量 (弦長スパン : $2L=1\text{m}$)		当該 LPG貯槽の実測値の最大値*2
	きず寸法	長さ $2c_0$	本指針に則した直近 2 回の MT 検査結果の最大寸法*2
深さ a_0			

* 1 設置場所に応じた温度とは、LPG貯槽の設置場所における日最低気温の月別平均値の最低値をいう。この場合、日最低気温の月別平均値の最低値が 0°C を上回る場合は 0°C とする。

* 2 角変形量及びきず寸法についての入力する値は、「11.3.2 個別評価 (2)超音波探傷試験による評価を行う場合」における JGA 指-109-14「容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針」付表 2-1 の入力する値と設定内容が異なるので注意すること。

表 2 きずの疲労進展特性を表す定数の標準値

鋼種	C 値	m 値	備 考
HW490	1.58×10^{-12}	2.7	$da/dN = C(\Delta K_a)^m$ $dc/dN = C(\Delta K_c)^m$ ここで、 a : きず深さ (mm) c : きず長さの半長 (mm) N : 繰り返し数 (cycle) ΔK : 応力拡大係数範囲 ($\text{N}/\text{mm}^{3/2}$)

表 3 HW490 被覆アーク溶接で製作した LPG 貯槽溶接部における限界 CTOD 値の参考値

鋼種	溶接材料	最大溶接入熱 (kJ/cm)		溶接後 熱処理 の有無	最低使用 温度(°C)	限界CTOD値* ¹ [δ_{mat} 値] (mm)
HW490	D5816* ² (0.7Ni 系)	縦 継 手	60	無	0	0.11
					-10	0.07
					-20	0.05
	D5816* ² (1.5Ni 系)	45	無	-10	0.12	
				-20	0.10	
				-30	0.08	

* 1 限界CTOD値の決定にあたっては、溶接材料の種類・溶接入熱等に十分留意すること。
 また、各温度の間における限界CTOD値の標準値は、直線補間によって計算する。

* 2 被覆アーク溶接棒

表 4 SPV450Q-SR サブマージアーク溶接で製作した横置円筒形 LPG 貯槽
 溶接部における J 積分による破壊靱性値の参考値*¹

鋼種	溶接材料	最大溶接入熱 (kJ/cm)	溶接後 熱処理 の有無	最低使用 温度(°C)	J 積分による 破壊靱性値* ² [J_{max} 値] (N/mm)
SPV450Q-SR	YS-M5* ³	32	有	-10	105

* 1 LPG 貯槽用材料特性 (破壊靱性値) 調査報告書 (平成 29 年 2 月) ((一社) 日本ガス協会)

* 2 J 積分による破壊靱性値の決定にあたっては、溶接材料の種類・溶接入熱等に十分留意すること。

* 3 サブマージアーク溶接ワイヤ

4. 横置円筒形 LPG 貯槽における開放検査周期の計算例

開放検査周期の計算例として、表 5 に示す横置円筒形 LPG 貯槽 A について検討を行った結果を示す。本書では、通常時 (最高使用圧力時) における検査時期を算定するとともに、検査時期到達時に地震が発生した場合について評価した。その計算条件を表 6 から表 8 に示す。なお、地震時の評価はレベル 1 地震と必要に応じてレベル 2 地震の評価が必要となるが、今回は地震力の大きいレベル 2 のみとした。

評価対象とする初期きずは、図 2 に示すような長手継手に平行なきずとする (最も厳しくなる条件とする)。

なお、球形 LPG 貯槽の計算例は、JGA 指-109-14 「容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針」の付属書 2 「疲労割れの事例」を参考にすること。

表 5 横置円筒形 LPG 貯槽の諸元

	諸元
貯槽名称	横置円筒形 LPG 貯槽 A
LPG の種類	プロパン
貯蔵能力 W (t)	20
材料	HW490

内径 D (m)	2.8
最高使用圧力(静液圧を含む。) P_{max} (MPa)	1.77
必要最小厚さ t (mm)	13.8
最大角変形量 W_0 (mm/m)	15.0
最低使用温度(°C)	-10
限界CTOD値(標準値) δ_{max} (mm)	0.07* ¹

* 1 : 限界CTOD値については、「日本ガス協会受託研究 LPG貯槽の開放検査周期に関する調査研究報告書(平成3年)」で示されているHW490のサブマージドアーク溶接継手の破壊靱性試験結果を参考に、安全を見て0°C~-20°Cの最低値0.075mmを丸めた0.07mmとした。

表6 検査周期の計算に用いたHW490の材料物性

	材料物性値
ヤング率 E (N/mm ²)	206,000
ポアソン比 ν	0.3
規定最小降伏応力 σ_y (N/mm ²)	490
規定最小引張強さ σ_u (N/mm ²)	610

表7 きずの疲労進展評価に用いた横置円筒形LPG貯槽Aの計算諸元

	計算諸元
最大圧力変動範囲 ΔP (MPa)	1.182~1.77
初期きず深さ a_0 (mm)	5.1
初期きず長さ $2c_0$ (mm)	21.3

表8 荷重ケース

条 件	温度(°C)	破壊評価圧力 P_{max} (MPa)	限界CTOD値 δ_{max} (mm)
通常時	-10	1.77(最高使用圧力)	0.07
レベル2地震時	-10	0.243 (-10°Cにおける飽和蒸気圧)	0.07

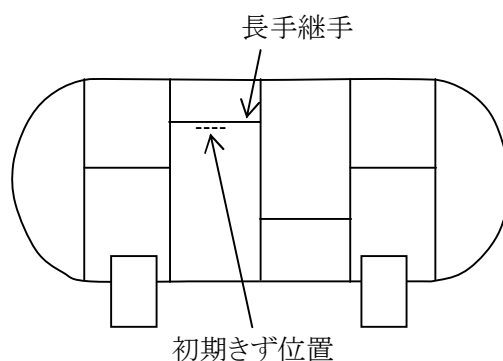


図2 評価対象とした初期きず位置

4. 1 破壊評価応力の決定

4. 1. 1 1次応力の計算

横置円筒形LPG貯槽に作用する1次応力としては、内圧（静液圧を含む。）による膜応力（ P_m ）と溶接部の角変形によって生じる曲げ応力（ σ_{s1} ）が考えられる。

(1) 内圧による膜応力（ P_m ）

横置円筒形LPG貯槽の場合、図3に示すように膜応力は方向により異なり、長手方向膜応力（ P_{m1} ）と周方向膜応力（ P_{m2} ）は次式で表される。

$$P_{m1} = \frac{P_{max}D}{4t} \quad (4.1.1a)$$

$$P_{m2} = \frac{P_{max}D}{2t} \quad (4.1.1b)$$

ここで、

P_{max} : 最高使用圧力 (MPa)

D : 内径 (mm)

t : 必要最小厚さ (mm)

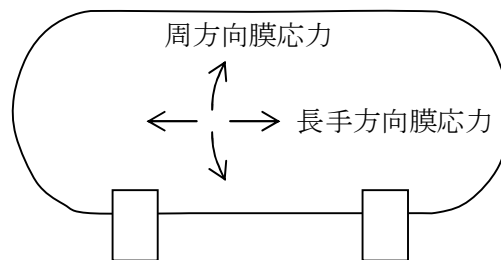


図3 横置円筒形LPG貯槽に生じる内圧による膜応力

今回、図2に示すように長手継手に平行な割れを評価対象としているので、割れを開口させる方向である周方向膜応力（ P_{m2} ）を内圧による膜応力として用いる。

(i) 通常時

$$\begin{aligned} P_m = P_{m2} &= \frac{P_{max}D}{2t} \\ &= 179.6 \text{ (N/mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

(ii) レベル2地震時

$$\begin{aligned} P_m = P_{m2} &= \frac{P_{max}D}{2t} \\ &= 24.7 \text{ (N/mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

(2) 角変形によって生じる曲げ応力 (σ_{S1})

横置円筒形 LPG 貯槽の場合、図 4 に示すように角変形によって生じる曲げ応力は、周継手と長手継手で生じ、それぞれ次式で表される。

(a) 周継手に作用する角変形による曲げ応力 ($\sigma_{S1,C}$)

$$\sigma_{S1,C} = \frac{6P_{m1}W_0K_\phi}{t} \quad (4.1.2)$$

ここで、

$$K_\phi = \frac{1}{\cosh \alpha + \cos \beta} \left[\frac{\sinh \alpha}{\alpha} + \frac{\sin \beta}{\beta} \right] \quad (4.1.3)$$

$$\alpha^2 = m^2 + n^2 \quad (4.1.4)$$

$$\beta^2 = -m^2 + n^2 \quad (4.1.5)$$

$$m^2 = 12(1-\nu^2) \frac{P_m}{E} \left(\frac{L}{t} \right)^2 \quad (4.1.6)$$

$$n^2 = 2\sqrt{12(1-\nu^2)} \frac{L^2}{rt} \quad (4.1.7)$$

ただし、

E : ヤング率 (N/mm²)

W_0 : 最大角変形量 (mm)

ν : ポアソン比

$2L$: 変形が生じている範囲の長さ (1 m とする) (mm)

r : 貯槽の半径 (mm)

なお、式(4.1.5)において $\beta^2 = -m^2 + n^2 < 0$ となる時は、

$$(\beta')^2 = m^2 - n^2 \quad (4.1.8)$$

とおき、式(4.1.3)の β 、 $\cos \beta$ 、 $\sin \beta$ を

$$\beta = \beta' \quad (4.1.9)$$

$$\cos \beta = \cosh \beta' \quad (4.1.10)$$

$$\sin \beta = \sinh \beta' \quad (4.1.11)$$

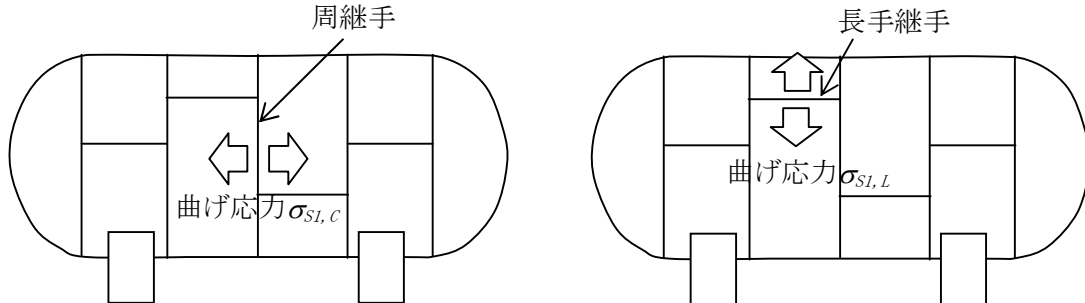
で置換することにより K_ϕ を求める。

(b) 長手継手に作用する角変形による曲げ応力 ($\sigma_{S1,L}$)

$$\sigma_{S1,L} = \frac{6P_{m2}W_0K_m}{t} \quad (4.1.12)$$

$$K_m = \frac{\tanh m}{m} \cdot \frac{\tanh \frac{m}{2}}{\frac{m}{2}} \quad (4.1.13)$$

$$m^2 = 12(1-\nu^2) \frac{P_{m2}}{E} \left(\frac{L}{t} \right)^2 \quad (4.1.14)$$



(a) 周継手

(b) 長手継手

図4 横置円筒形LPG貯槽に生じる角変形による曲げ応力

今回、図2に示すように長手継手に平行なきずを評価対象としているので、長手継手に作用する角変形による曲げ応力 ($\sigma_{SL,L}$) を角変形によって生じる曲げ応力として用いる。

(i) 通常時

$$\sigma_{S1} = \sigma_{SL,L} = \frac{6P_{m2}W_0K_m}{t}$$

$$= 176.5 (\text{N/mm}^2)$$

ここで、

$$K_m = \frac{\tanh m}{m} \cdot \frac{\tanh \frac{m}{2}}{\frac{m}{2}}$$

$$= 0.15$$

$$m^2 = 12(1-\nu^2) \frac{P_{m2}}{E} \left(\frac{L}{t} \right)^2$$

$$= 3.53$$

(ii) レベル2地震時

$$\text{式(4.1.12) から式(4.1.14)より、} \sigma_{S1} = 93.1 (\text{N/mm}^2)$$

4. 1. 2 2次応力の計算

横置円筒形LPG貯槽に作用する2次応力としては、構造的な不連続により生じる局部応力と溶接による残留応力が考えられる。

(1) 構造的な不連続により生じる局部応力 (σ_{S2})

構造的な不連続により生じる局部応力は、有限要素法等の構造解析により求めた値とす

るか、または、式 (4.1.1) により得られた値の 15 %が曲げ応力成分として作用するものとする。

本書では、後者の値を用いる。

(i) 通常時

$$\sigma_{S2} = P_m \times 0.15 = 26.9 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

(ii) レベル 2 地震時

$$\sigma_{S2} = P_m \times 0.15 = 3.7 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

(2) 溶接残留応力 (Q_m)

残留応力分布が不明確な場合の残留応力は断面一様分布とし、次の 2 式のうち小さい値を採用する。

$$Q_m = \sigma_y \tag{4.1.15a}$$

$$Q_m = (1.4 - \sigma_{ref} / \sigma_f) \sigma_y \tag{4.1.15b}$$

(i) 通常時

$$Q_m = \sigma_y$$

$$= 490 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$Q_m = (1.4 - \sigma_{ref} / \sigma_f) \sigma_y$$

$$= 337.0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

よって、 $Q_m = 337.0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

ここで、

σ_{ref} : 参照応力であって、半楕円表面割れは次式で得られる値とする。

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + (K_m - 1)P_m + 3P_m a'' + \sqrt{(P_b + (K_m - 1)P_m + 3P_m a'')^2 + 9P_m^2(1 - a'')^2}}{3(1 - a'')} \tag{4.1.16}$$

$$= 391.7 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

ただし、

P_b : 境界力により発生する曲げ応力成分 (通常時評価では「ゼロ」とし、地震時評価では地震時発生曲げ応力を用いる。)

K_m : 角変形及び構造不連続により生ずる曲げ応力成分用のファクターで、次式によって計算する。

$$K_m = 1 + (\sigma_{S1} + \sigma_{S2}) / P_m \tag{4.1.17}$$

$$= 2.133$$

ここで、

σ_{S1} : 角変形により生ずる曲げ応力成分 (N/mm²)

σ_{S2} : 構造不連続により生ずる曲げ応力成分 (N/mm²)

P_m : 境界力により発生する膜応力成分 (N/mm²)

a'' : 次のように求める。

$$a'' = (a/t) / \{1 + (t/c)\} \quad \text{ただし、} W \geq 2(c+t)$$

$$a'' = (2a/t)(c/W) \quad \text{ただし、} W < 2(c+t)$$

$W \geq 2(c+t)$ のため、

$$\begin{aligned} a'' &= (a/t) / \{1 + (t/c)\} \\ &= 0.161 \end{aligned}$$

ここで、

a : きず深さ (mm)

c : きず長さの半長 (mm)

W : 板幅 (mm)

σ_f : 流動応力であって、次の式で得られる値とする。

$$\sigma_f = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2} \quad (4.1.18)$$

$$= 550 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

ここで、

σ_y : 降伏応力 (N/mm²)

σ_u : 引張強さ (N/mm²)

(ii) レベル 2 地震時

式(4.1.15a)から式(4.1.18)より、 $Q_m = 490 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

4.1.3 地震時発生応力の算出

横置円筒形 LPG 貯槽に作用する地震時発生曲げ応力 (σ_{S3}) は、有限要素法等の構造解析等により求める。本書では、有限要素法で求めた値を用いる。

$$\text{レベル 2 地震時 } \sigma_{S3} = 85.5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

4.2 きずの疲労進展解析

まず、横置円筒形 LPG 貯槽における膜応力範囲 (ΔP_m) 及び曲げ応力範囲 ($\Delta \sigma_s$) を、式(4.1.1)、式(4.1.2)等を用いて最大圧力変動範囲 (ΔP) から求め、きずの疲労進展則が式(4.2.1)に示す Paris 則に従うとして、1 サイクル毎にきずの疲労進展長さの計算を行う。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_a)^m \quad : \text{きず底} \quad (4.2.1.a)$$

$$\frac{dc}{dN} = C(\Delta K_c)^m \quad : \text{きず表面} \quad (4.2.1.b)$$

ここで、

$\frac{da}{dN}$: きず底における 1 サイクルあたりのきず進展量

$\frac{dc}{dN}$: きず表面における 1 サイクルあたりのきず進展量

ΔK_a : きず底における応力拡大係数範囲

ΔK_c : きず表面における応力拡大係数範囲

C 、 m : 定数

4.1.1 (1) で述べたように膜応力範囲 (ΔP_m) もきず方向により異なり、長手方向膜応力範囲 (ΔP_{m1}) と周方向膜応力範囲 (ΔP_{m2}) はそれぞれ次式で表される。

$$\Delta P_{m1} = \Delta P_{m1,\max} - P_{m1,\min} \quad (4.2.2a)$$

$$\Delta P_{m2} = \Delta P_{m2,\max} - P_{m2,\min} \quad (4.2.2b)$$

ここで、

$P_{m1,\max}$: 長手方向最大膜応力 (N/mm^2)
 (式 (4.1.1a) を用いて計算する)

$P_{m1,\min}$: 長手方向最小膜応力 (N/mm^2)
 (式 (4.1.1a) を用いて計算する)

$P_{m2,\max}$: 周方向最大膜応力 (N/mm^2)
 (式 (4.1.1b) を用いて計算する)

$P_{m2,\min}$: 周方向最小膜応力 (N/mm^2)
 (式 (4.1.1b) を用いて計算する)

今回、図 2 に示すように長手継手に平行なきずを評価対象としているので、きずを開口させる方向である周方向膜応力範囲 (ΔP_{m2}) を用いる。

$$\begin{aligned} \Delta P_m &= \Delta P_{m2} = \Delta P_{m2,\max} - P_{m2,\min} \\ &= 59.7 (\text{N}/\text{mm}^2) \end{aligned}$$

また、曲げ応力範囲 ($\Delta \sigma_s$) についても 4.1.1 (2) で述べたように周継手と長手継手で異

なり、周継手に関する曲げ応力範囲 ($\Delta\sigma_{S,C}$) と長手継手に関する曲げ応力範囲 ($\Delta\sigma_{S,L}$) はそれぞれ次式で表される。

$$\Delta\sigma_{S,C} = (\sigma_{S1,C,\max} + \sigma_{S2,\max}) - (\sigma_{S1,C,\min} + \sigma_{S2,\min}) \quad (4.2.3a)$$

$$\Delta\sigma_{S,L} = (\sigma_{S1,L,\max} + \sigma_{S2,\max}) - (\sigma_{S1,L,\min} + \sigma_{S2,\min}) \quad (4.2.3b)$$

ここで、

$\sigma_{S1,C,\max}$: 周継手に作用する角変形による最大曲げ応力 (N/mm²)
 (式 (4.1.2) を用いて計算する)

$\sigma_{S1,C,\min}$: 周継手に作用する角変形による最小曲げ応力 (N/mm²)
 (式 (4.1.2) を用いて計算する)

$\sigma_{S1,L,\max}$: 長手継手に作用する角変形による最大曲げ応力 (N/mm²)
 (式 (4.1.12) を用いて計算する)

$\sigma_{S1,L,\min}$: 長手継手に作用する角変形による最小曲げ応力 (N/mm²)
 (式 (4.1.12) を用いて計算する)

$\sigma_{S2,\max}$: 構造的な不連続により生じる最大局部応力 (N/mm²)

$\sigma_{S2,\min}$: 構造的な不連続により生じる最小局部応力 (N/mm²)

今回、図 2 に示すように長手継手に平行なきずを評価対象としているので、きずを開口させる方向である長手継手に関する曲げ応力範囲 ($\Delta\sigma_{S,L}$) を用いる。

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_S = \Delta\sigma_{S,L} &= (\sigma_{S1,L,\max} + \sigma_{S2,\max}) - (\sigma_{S1,L,\min} + \sigma_{S2,\min}) \\ &= 18.8 \text{ (N/mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

4. 3 FAD を用いた許容きずの評価

前項で 1 サイクル毎に計算された疲労進展後のきずについて、BS7910 の FAD を用いた評価を行うことによって、きずが許容可能かどうかを判定する。なお、本評価においては、破壊評価圧力が作用した時に破壊が生じるものとする。

4.3.1 オプション 1 評価

通常時について、評価を行う。

(1) 靱性比 K_r の計算

靱性比 K_r は、破壊靱性値 (K_{mat}) に対する作用応力拡大係数 K_I^P および K_I^S から次式で定義される。

$$K_r = \frac{K_I^P + K_I^S}{K_{mat}} + \rho \quad (4.3.1)$$

$$= 0.806$$

ここで、破壊靱性値 K_{mat} は、限界 CTOD δ_{mat} を用いて次式で求める。

$$K_{mat} = \sqrt{m\sigma_y\delta_{mat}E/(1-\nu^2)} \quad (4.3.2)$$

$$= 3,554 (\text{N}/\text{mm}^{3/2})$$

ここで、 $0.3 < \sigma_y/\sigma_u < 0.98$ なので、

$$m = 1.517(\sigma_y/\sigma_u)^{-0.3188}$$

$$= 1.627$$

ここで、作用応力拡大係数 K_I^P および K_I^S は、

$$K_I^P : 1 \text{ 次応力による応力拡大係数 } (= (Y\sigma)_P \sqrt{\pi a})$$

$$K_I^S : 2 \text{ 次応力による応力拡大係数 } (= (Y\sigma)_S \sqrt{\pi a})$$

それぞれの K 値の計算方法は、BS 7910 の Annex M を参照のこと。ただし、半楕円表面きずでは、きず前縁において K 値が変化し、通常の場合、 K 値は最深部で最大値をとる。しかし、次のような要因により K の最大値の位置が変化するため、きず前縁の表面部についても K 値を計算する必要がある。

- ① 初期きずの深さ a と半長 c のアスペクト比 (a/c)
- ② 角変形等による曲げ応力成分
- ③ 残留応力分布

ρ : 1 次応力と 2 次応力の相互作用を考慮に入れるための補正係数であって、次のように求める (BS 7910 の Annex R を参照のこと)。

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_1 & L_r &\leq 0.8 \\ \rho &= 4\rho_1(1.05 - L_r) & 0.8 < L_r < 1.05 \\ \rho &= 0 & L_r &\geq 1.05 \end{aligned} \quad (4.3.3)$$

ここで、

$$K_I^S(L_r/K_I^P) < 5.2 \text{ のとき}$$

$$\rho_1 = 0.1[K_I^S(L_r/K_I^P)]^{0.714} - 0.007[K_I^S(L_r/K_I^P)]^2 + 0.00003[K_I^S(L_r/K_I^P)]^3 \quad (4.3.4)$$

$$K_I^S(L_r/K_I^P) > 5.2 \text{ のとき}$$

$$\rho_1 = 0.25 \quad (4.3.5)$$

(2) 荷重比 L_r の算定

荷重比 L_r は、次式で定義される。

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} \quad (4.3.6)$$

$$= 0.799$$

ここで、

σ_{ref} : 参照応力(N/mm²)

σ_y : 降伏点(N/mm²)

(3) きずの判定

前節までの手順により求めた L_r 及び K_r を FAD 線図上にプロットし、評価きずが許容できるか否かを判定する。BS7910 のオプション 1 評価に用いる FAD は、次式で与えられている。

$L_r \leq 1$ のとき、

$$K_r = f(L_r) = (1 + (1/2)L_r^2)^{-1/2} [0.3 + 0.7 \exp(-\mu L_r^6)] \quad (4.3.7)$$

$1 < L_r < L_{r,max}$ のとき、

$$K_r = f(L_r) = f(1) L_r^{(N-1)/(2N)} \quad (4.3.8)$$

$L_r \geq L_{r,max}$ のとき、

$$K_r = f(L_r) = 0 \quad (4.3.9)$$

ここで、

$$\mu = \min(0.001(E/\sigma_y), 0.6) \quad (4.3.10)$$

$$N = 0.3(1 - (\sigma_y/\sigma_u)) \quad (4.3.11)$$

ここで、 $L_{r,max}$ は FAD 線図の cut-off 線に相当し、評価を行う材料毎に決定され、次式で定義される。

$$\begin{aligned} L_{r,max} &= (\sigma_y + \sigma_u) / 2\sigma_y \\ &= 1.12 \end{aligned} \quad (4.3.12)$$

式(4.3.7)、式(4.3.8)及び式(4.3.9)の FAD によって判断される限界きず寸法に至るときのサイクル数並びに疲労進展後のきず寸法を表 9 に示す。また、図 5 はきずの疲労進展に伴う荷重比・靱性比の変化を FAD 上にプロットしたものである。

表 9 疲労進展後のきずに対する FAD 評価結果

	サイクル数 N (cycles)	きず深さ a (mm)	きず長さ $2c$ (mm)	検査周期 (1cycle/日)
通常時	7,656	5.15	21.36	21 年

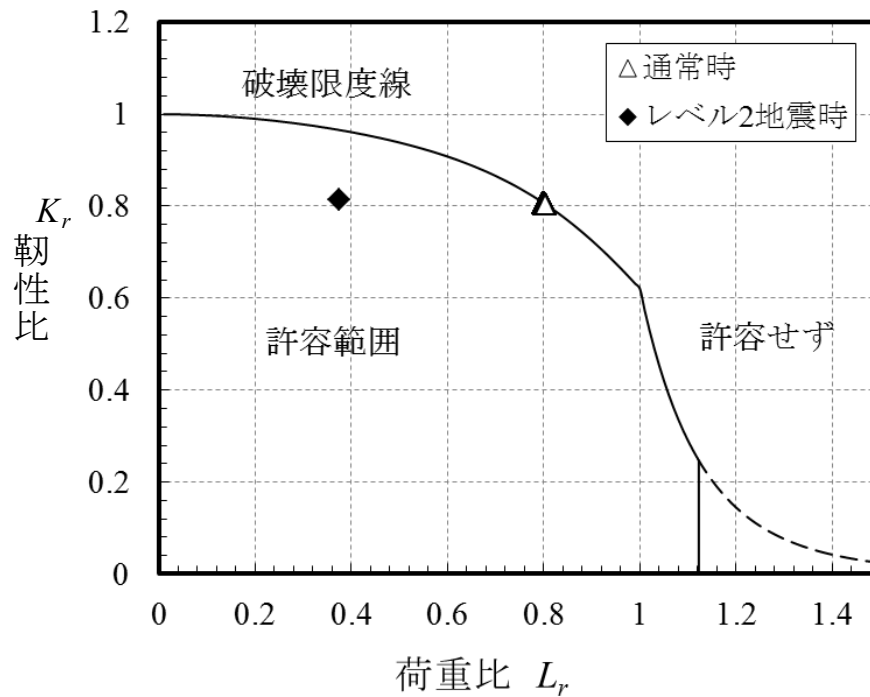
(4) 地震発生時の評価

検査時期 21 年到達時 (きず深さ 5.15mm、きず長さ 21.36mm) にレベル 2 地震が発生した場合について評価を行う。評価結果を、表 10 に示すとともに下記図 5 にプロットする。

表 10 地震発生時の評価結果

	荷重比 L_r	靱性比 K_r
レベル 2 地震時	0.38	0.82

検査時期 21 年到達時時に地震が発生しても評価上合格であるが、本体フランジ接続部、バルブ、液面計等付属品の性能確保を考慮して、次回開放検査時期は 15 年目とする。



備考 プロットはきず疲労進展に伴う靱性比・荷重比の変化を示す。
 実線の内側にある間は、そのきずは許容される。

図5 オプション1 破壊評価線図

履歴

1992年(平成 4年) 6月 発行
2005年(平成17年)10月 改訂
2015年(平成27年) 6月 改訂
2017年(平成29年) 4月 改訂(追補)

日本ガス協会では、指針の内容を精査し、①「改訂」、②「廃止」、③「確認」^{※1}のいずれかの判断を行う「定期見直し」の仕組みを取り入れております。

※1「確認」とは、精査の結果、指針の内容に問題がない場合に、改訂せずに継続使用することです。

L P G 貯槽指針

発行年月日	1992年 6月 初版発行 2005年10月 改訂 1 版発行 2015年 7月 改訂 2 版発行 2017年12月 追補 1 発行
発行所	一般社団法人 日本ガス協会 〒105-0001 東京都港区虎ノ門 1 丁目15番12号 TEL 03(3502)0111 (代)
印刷所	株式会社ケーエスアイ
