

目 次 (Contents)

I . 溶接過程における欠陥

Defects in Welding Processes

I . 1 高温割れ (Hot Cracks)	2
概説 (Outline)	2
凝固割れ (Solidification Cracks)	
(1) 軟鋼の片面サブマージアーク溶接時に発生した終端割れの破面	6
(2) 軟鋼のシーム溶接開始時に発生した凝固割れの破面	10
(3) SS41 鋼の電子ビーム溶接時に発生した凝固割れの破面	12
(4) SM41 鋼の炭酸ガスアーク溶接時に発生した凝固割れの破面 (その 1)	14
(5) SM41 鋼の炭酸ガスアーク溶接時に発生した凝固割れの破面 (その 2)	16
(6) SM41 鋼の横向き炭酸ガスアーク溶接時に発生したなし形ビート割れの 破面	18
(7) SM41 鋼の片面サブマージアーク溶接時に発生した終端割れの破面	20
(8) HT50 鋼のサブマージアーク溶接時に発生したなし形ビート割れの 破面	24
(9) HT50 鋼のサブマージアーク溶接時に通電チップの溶落ちによって 発生した凝固割れの破面	26
(10) HT50 鋼の片面サブマージアーク溶接時に発生した終端割れの破面	30
(11) 圧力容器用炭素鋼のエレクトロスラグ溶接時に発生した凝固割れの 破面	34
(12) HT60 鋼のエレクトロガス溶接時に発生した凝固割れの破面	36
(13) HT80 鋼の電子ビーム溶接時に発生した凝固割れの破面	38
(14) 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼の電子ビーム溶接時に発生した凝固割れの破面	40
(15) 中炭素鋼の TIG 溶接時に発生した凝固割れの破面	42
(16) 高炭素鋼の TIG 溶接時に発生した凝固割れの破面	44
(17) マルテンサイト系ステンレス鋼の TIG 溶接時に発生した凝固割れの 破面	46

(18)	オーステナイト系ステンレス鋼の被覆アーク溶接時に発生した凝固割れの破面	50
(19)	オーステナイト系ステンレス鋼溶接棒による 3.5%Ni 鋼の被覆アーク溶接時に発生した凝固割れの破面	52
(20)	インコネル系溶接棒によるオーステナイト系ステンレス鋼管と 2¼Cr-1Mo 鋼管の被覆アーク溶接時に発生した凝固割れの破面	54
(21)	インコネル系ワイヤによるステンレスクラッド材の TIG 溶接時に発生した凝固割れの破面	56

液化割れ, その他 (Liquation and Other Cracks)

(22)	中炭素鋼の熱影響部に発生した液化割れの破面	58
(23)	中炭素鋼の再加熱を受けた溶接金属に発生した液化割れの破面	62
(24)	Fe-36%Ni 合金インバーの再加熱を受けた溶接金属に発生した延性低下割れの破面	66

I. 2 低温割れ (Cold Cracks) 70

概説 (Outline) 70

再現試験による割れ (Cracks in Synthetic Tests)

(25)	水素添加 HT80 鋼の三点曲げ試験における水素脆化擬へき開破面	76
(26)	水素脆化破面の結晶方位	80
(27)	HT80 鋼再現熱影響部の青熱脆化域での水素脆化破面	84

インプラント試験による割れ (Cracks in Implant Tests)

(28)	HT50 鋼の被覆アーク溶接部における低温割れ破面	88
(29)	HT50 鋼のインプラント試験による定荷重負荷と低歪速度負荷の場合における低温割れの破面の比較	92
(30)	HT50 および HT80 鋼の被覆アーク溶接部における低温割れ破面	94
(31)	HT80 鋼の被覆アーク溶接部における低温割れ破面	100

ルート割れ (Root Cracks)

(32)	HT50 鋼の被覆アーク溶接部におけるルート割れ破面 (その 1)	104
(33)	HT50 鋼の被覆アーク溶接部におけるルート割れ破面 (その 2)	108
(34)	HT50 鋼の TIG 溶接金属におけるルート割れ破面	110
(35)	HT50 鋼の水中での被覆アーク溶接部におけるルート割れ破面	112
(36)	HT60 鋼の被覆アーク溶接部におけるルート割れ破面	114
(37)	HT60 鋼の MAG 溶接部におけるルート割れ破面	118

(38)	HT60 鋼の被覆アーク溶接金属におけるルート割れ破面	122
(39)	ラインパイプ用鋼の被覆アーク溶接部におけるルート割れ破面	124
(40)	圧力容器用炭素鋼の被覆アーク溶接部におけるルート割れ破面	126
(41)	HT80 鋼の被覆アーク溶接部におけるルート割れ破面	128
(42)	HT80 鋼の炭酸ガスアーク溶接部におけるルート割れ破面	130
(43)	HT80 鋼の水中での被覆アーク溶接部におけるルート割れ破面	134
(44)	HT100 鋼の被覆アーク溶接部におけるルート割れ破面	136
(45)	HT100 鋼の MIG 溶接部におけるルート割れ破面	140
(46)	HY130 鋼の溶接金属におけるルート割れ破面 (その 1)	142
(47)	HY130 鋼の溶接金属におけるルート割れ破面 (その 2)	144
(48)	HY130 鋼の溶接金属におけるルート割れ破面 (その 3)	148
止端割れ, その他 (Toe Crack and Others)		
(49)	圧力容器用炭素鋼の被覆アーク溶接部における止端割れ破面	150
(50)	HT50 鋼の被覆アーク溶接部におけるヒール割れ破面	154
(51)	HT50 鋼の消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接金属における低温 割れ破面	156
(52)	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼の多層サブマージアーク溶接金属における横割れ 破面	158
(53)	9%Ni 鋼の共金サブマージアーク溶接金属における低温割れ破面	162
I . 3	ラメラテア (Lamellar Tearing)	166
概説 (Outline)		166
(54)	HT60 鋼のガス切断部端面割れの破面	170
(55)	SM41 鋼の完全拘束割れ試験による MAG 溶接部の破面	172
(56)	HT50 鋼の板厚方向インプラント試験片の破面	176
(57)	HT60 鋼のインプラント試験片の破面	180
(58)	HT60 鋼の MAG 溶接部の板厚方向インプラント試験片の破面	184
(59)	HT80 鋼 (0.023%S) の板厚方向インプラント試験片の破面	188
(60)	HT80 鋼 (0.004%S) の板厚方向インプラント試験片の破面	192
(61)	HT80 鋼 (0.023%S) の 45° 方向インプラント試験片の破面	194
I . 4	後熱処理割れ (SR 割れ) (Stress-Relief Cracks)	198
概説 (Outline)		198
(62)	HT80 鋼の被覆アーク溶接熱影響部の SR 割れの破面	202
(63)	HT80 鋼の電子ビーム溶接熱影響部の SR 割れの破面	204

(64)	圧力容器用低合金鋼の被覆アーク溶接熱影響部の SR 割れの破面	206
(65)	1Cr-0.5Mo 鋼の被覆アーク溶接熱影響部の SR 割れの破面	208
(66)	2¼Cr-1Mo 鋼の被覆アーク溶接熱影響部の SR 割れの破面	210
(67)	2¼Cr-1Mo 鋼のエレクトロスラグ溶接金属の SR 割れの破面	212
(68)	2¼Cr-1Mo 鋼の TIG 溶接金属の SR 割れの破面	214
(69)	圧力容器用低合金鋼の肉盛溶接部のアンダークラッド・クラッキングの破面	216
(70)	HT100 鋼の肉盛溶接部のアンダークラッド・クラッキングの破面	220
I . 5	その他の割れ (Other Cracks)	224
	概説 (Outline)	224
(71)	鋳鉄上に純鉄系の被覆アーク溶接棒で単相ビートをおいた場合に発生した割れの破面	226
(72)	被覆アーク溶接による 13Mn 系硬化肉盛部の 1 層目に発生した割れの破面	228
(73)	サブマージアーク溶接による Cr-Mo 系硬化肉盛部に発生した横割れの破面	232
(74)	被覆アーク溶接による 30Cr 鋳鉄系硬化肉盛部に発生した割れの破面	234
I . 6	ブローホール, スラグ巻込みなど (Blowholes, Slag, Inclusions and Others)	236
	概説 (Outline)	236
(75)	SS41 鋼の被覆アーク溶接時に発生したブローホール	238
(76)	SM41 鋼の被覆アーク溶接時に発生したブローホール	240
(77)	軟鋼の電子ビーム溶接時に発生したブローホール	242
(78)	SM41 鋼とニッケルクロムモリブデン鋼の異材継手の MIG 溶接時に発生したブローホール	244
(79)	軟鋼管のサブマージアーク溶接時に発生したウォームホール	246
(80)	SS41 鋼の被覆アーク溶接時に発生した融合不良	248
(81)	SM41 鋼の被覆アーク溶接時に発生したスラブ巻込み	250
(82)	HT50 鋼のサブマージアーク溶接時に発生したスラブ巻込み	252

Ⅱ．溶接継手における破壊および腐食 Failures in Welded Joints

Ⅱ． 1 静的破壊 (Fractures in Static Tests)	256
概説 (Outline)	256
引張試験 (Tension Tests)	
(83) HT50 鋼の板厚方向引張破面	258
(84) 低硫 HT50 鋼の板厚方向引張破面	262
(85) P 添加 40 キロ級鋼の点溶接継手の引張破面	266
(86) HT50 鋼の溶接継手引張試験における止端割れの破面	268
(87) 伸び異常低下を示した HT50 鋼サブマージアーク溶接金属の 引張破面	272
(88) HT60 鋼の溶接継手引張試験において溶接欠陥及び水素割れから 発生した脆性破壊の破面	276
(89) オーステナイト系ステンレス鋼用被覆アーク溶接棒の全溶着金属の 引張破面	280
曲げ試験 (Bending Tests)	
(90) 部分熔融域にまで加熱された中炭素鋼の曲げ破面	282
(91) 2¼Cr-1Mo 鋼に肉盛したオーステナイト系ステンレス鋼溶接金属の PWHT 後の σ 脆化による曲げ破面	284
SR 割れ再現試験 (Synthetic Tests of SR Cracks)	
(92) SR 割れ再現試験における HT60, HT80 及び HT100 鋼の破面	286
(93) SR 割れ再現試験における HT80 鋼の破面	292
(94) SR 割れ再現試験における 1Cr-0.5Mo 鋼の破面	294
(95) SR 割れ再現試験における 2¼Cr-1Mo 鋼熱影響部の破面	296
(96) SR 割れ再現試験における圧力容器用低合金鋼の破面 (その 1)	300
(97) SR 割れ再現試験における圧力容器用低合金鋼の破面 (その 2)	302
高温延性試験 (Hot Ductility Tests)	
(98) 1350℃におけるオーステナイト系ステンレス鋼熱影響部の引張破面	304
(99) 1350℃における Nb 入りオーステナイト系ステンレス鋼熱影響部の 引張破面	306
(100) 高温延性試験における完全オーステナイト系ステンレス鋼の破面	308

Ⅱ． 2 衝撃破壊 (Fractures in Impact Tests)	314
概説 (Outline)	314
熱影響部 (Heat-Affected Zone)	
(101) HT80 鋼再現 HAZ 材の衝撃破面	320
(102) 低温用アルミキルド鋼の片面サブマージアーク溶接におけるボンド 部の衝撃破面	322
(103) HT70 鋼のサブマージアーク溶接におけるボンド部の衝撃破面	326
溶接金属 (Weld Metal)	
(104) 低温圧力容器用炭素鋼の大電流 MIG 溶接における酸素含有量の 異なる Ti-B 系溶接金属の衝撃破面	328
(105) HT50 鋼のサブマージアーク溶接における溶接金属の衝撃破面 (その 1)	330
(106) HT50 鋼のサブマージアーク溶接における溶接金属の衝撃破面 (その 2)	332
(107) 圧力容器用炭素鋼の電子ビーム溶接における溶接金属の衝撃破面	334
(108) ラインパイプ用鋼のサブマージアーク溶接における酸素含有量の 異なる溶接金属の衝撃破面	336
(109) ラインパイプ用制御圧延鋼の大電流 MIG 溶接金属における後熱処理 前後の衝撃破面	340
(110) 制御圧延鋼の大電流 MIG 溶接金属における後熱処理前後の衝撃 破面	344
(111) HT80 鋼の被覆アーク溶接における溶接金属の衝撃破面	346
(112) HT80 鋼の MIG 溶接における溶接金属の衝撃破面	350
(113) HT80 鋼のサブマージアーク溶接における溶接金属の衝撃破面	352
(114) 0.5Mo 鋼の電子ビーム溶接における溶接金属の衝撃破面	354
(115) 2¼Cr-1Mo 鋼のサブマージアーク溶接における溶接金属の衝撃破面 (その 1)	356
(116) 2¼Cr-1Mo 鋼のサブマージアーク溶接における溶接金属の衝撃破面 (その 2)	360
(117) 3.5%Ni 鋼の被覆アーク溶接における溶接金属の衝撃破面	362
(118) 3.5%Ni 鋼のサブマージアーク溶接における溶接金属の破面に対する 凝固組織方位の影響	366
(119) 9%Ni 鋼の被覆アーク溶接における共金系溶接金属の衝撃破面	372
(120) 9%Ni 鋼の被覆アーク溶接におけるインコネル系溶接金属の衝撃 破面	376

Ⅱ． 3 疲労破壊 (Fractures in Fatigue Tests)	378
概説 (Outline)	378
(121) S35C 鋼の高周波焼入れ領域近傍での疲労破面	382
(122) SM41 鋼と HT80 鋼との電子ビーム異材溶接部での疲労破面	386
(123) 軟鋼の管円周継手の繰返し载荷試験時に止端部に発生した疲労破面	390
(124) 圧力容器用炭素鋼の被覆アーク溶接における溶接金属の疲労破面	392
(125) 圧力容器用炭素鋼の溶接継手を直角に横切って伝ばした疲労き裂の 破面	396
(126) HT50 鋼の被覆アーク溶接における溶接金属の疲労破面	398
(127) HT50 鋼の溶接継手を直角に横切って伝ばした疲労き裂の破面	400
(128) HT60 鋼の被覆アーク溶接における熱影響部の疲労破面	402
(129) HT60 鋼の被覆アーク溶接における溶接金属の疲労破面	404
(130) 圧力容器用低合金鋼のサブマージアーク溶接における熱影響部の 疲労破面	406
(131) 圧力容器用低合金鋼のサブマージアーク溶接における溶接金属の 疲労破面	408
(132) HT80 鋼の被覆アーク溶接継手人工欠陥材の疲労破面	410
(133) HT80 鋼の水圧タンク・マンホール部の疲労破面	412
(134) HT80 鋼のサブマージアーク溶接における多層盛溶接部での 疲労破面	414
(135) オーステナイト系ステンレス鋼の TIG 溶接における熱影響部の 疲労破面	418
(136) オーステナイト系ステンレス鋼の TIG 溶接における溶接金属の 疲労破面	420
(137) 二相ステンレス鋼の TIG 溶接における溶接金属の疲労破面	422
(138) オーステナイト系ステンレス鋳鋼の管溶接部の疲労破面	426
(139) オーステナイト系ステンレス鋼の管内面溶接部のパルセーティング・ ストレス・クリープ破面	430
(140) オーステナイト系ステンレス鋼の被覆アーク溶接における溶接金属 の熱疲労破面	434
Ⅱ． 4 腐食 (Corrosion Failures)	438
概説 (Outline)	438
(141) フェライト系ステンレス鋼における熱影響部の粒界腐食	442

(142) オーステナイト系ステンレス鋼における熱影響部のウェルド・ ディケイ	444
(143) 安定形オーステナイト系ステンレス鋼における熱影響部のナイフ ライン・アタック	448
(144) オーステナイト系ステンレス鋼溶接部のキャビテーション壊食面	452
II. 5 応力腐食割れ (SCC) (Stress-Corrosion Cracks)	456
概説 (Outline)	456
(145) HT80 鋼の焼入材の SCC 破面	462
(146) ラインパイプ用鋼の熱影響部の水素誘起割れの破面	464
(147) 鋭敏化処理を受けたオーステナイト系ステンレス鋼の高温高压水中 における粒界形 SCC 破面	466
(148) オーステナイト系ステンレス鋼の熱影響部の粒界形 SCC 破面	468
(149) 高温純水中でオーステナイト系ステンレス鋼溶着部に発生した SCC 破面	470
(150) オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属部の塩化物水溶液中での SCC 破面	472
II. 6 水素侵食 (水素アタック) (Hydrogen-Attacked Failures)	474
概説 (Outline)	474
(151) 圧力容器用炭素鋼の熱影響部の水素侵食割れ破面	478
(152) 高温高压水素環境下に曝された HT50 鋼および 2¼Cr-1Mo 鋼の再現 HAZ 衝撃破面	480
(153) 2¼Cr-1Mo 鋼の溶接金属の水素侵食割れ破面	482

III. 溶接構造物における欠陥および破壊の事例 Failures in Welded Components and Assemblies

概説 (Outline)	486
(154) SS41 鋼の反応容器仕切板の溶接部で発生した破壊の破面	488
(155) タンカーにおいて溶接欠陥から発生した脆性破壊の破面	492
(156) アンモニア受液器の鏡板・胴板仮付溶接部に発生した割れの破面	498
(157) HT50 鋼の回転ドラム溶接部に発生した疲労き裂の破面	502

(158) HT60 鋼のフラッシュ溶接継手のフランジ加工時に見られた割れの 破面	504
(159) HT80 鋼の低温貯蔵タンクで発見されたスラブ巻込み	506
(160) 1Cr-0.5Mo 遠心力鋳鋼管製のボイラ蒸気管の熱影響部で発見された 割れの破面	508
(161) 2¼Cr-1Mo 鋼溶接部の焼ならし後の塑性加工時に発生した脆性破壊 の破面	512
(162) 圧延ロールの肉盛溶接部にて使用中に発生した割れの破面	516
(163) 耐摩耗鋼のすみ肉溶接部に発生した割れの破面	518
(164) 低マンガン鋼鋳鋼製の揺り腕軸受に発生した疲労破壊の破面	522
(165) オーステナイト系ステンレス鋼パイプ製のはしご支柱の溶接部の 破断部の破面	526

材料別索引 (Material Index)	528
------------------------------	-----