

RIIS-TN-83-3

UDC 621. 574:621. 791. 01

産業安全研究所技術資料

TECHNICAL NOTE OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

1983

災害事例分析

——重油脱硫装置の炭素鋼製高圧配管の破裂——

田中正清

労働省産業安全研究所

災害事例分析

——重油脱硫装置の炭素鋼製高圧配管の破裂*——

田 中 正 清**

Accident Analysis

——Explosion of a High Pressure Carbon-Steel Pipe in a Fuel Oil
Desulfurization Plant*——

by Masazumi TANAKA**

In the evening of March 31st in 1982, a serious accident happened in the Kashima Petroleum Combinat in Ibaraki Prefecture. A 6 inch pipe made of carbon steel in a fuel oil desulfurization plant suddenly ruptured, and the contents blew off, then, exploded and fired. As the result, five of eight workers who had hastened to the spot were killed and three of them seriously burnt.

To clarify the cause of this accident, a wide range of investigation was carried out concerning 1) witness of survivors, 2) management conditions of safety and hygiene, 3) maintenance, 4) process operation, 5) damage state of plant, etc.

Main results obtained are as follows.

(1) The cause of this accident was recognized to be the rupture of 6 inch pipe, and not the other factor such as inadequacy of process operation.

(2) The cause of the rupture of pipe was "Hydrogen Attack" in pipe material. Because some its characteristics were found such as decarburization, intergranular microcrack and void formation, and the existense of methane and hydrogen gas in large blistrs formed in the damaged zone.

(3) Though a few probable reasons which might bring about the hydrogen attack were proposed and disscussed from various points of view, decisional reason couldn't be identified in this investigation.

Finally, to prevent the serious accident of this kind, some safety measures were proposed, and further it was stressed that some institutions should make active effort to solve the important problems remained in researches on hydrogen attack phenomenon.

* 概要を HPI 第 3 回フラクトグラフィと事故解析に関するシンポジウムにて講演(昭和 58 年 3 月 16 日), 予稿集 p.133~136.

** 機械研究部 (Mechanical Engineering Research Division)

1. はじめに

最近、産業の急速な発展に伴い、機械・設備・構造物が急速に大型化するとともに、それらの使用条件も一層厳しくなった。

そのため、これらに関連した災害も多様化・大型化している。例えば配管類が、高温・高圧のしかも厳しい腐食性環境の下で使用されているが、もしこれら機器・設備の構成材料が破壊すれば内部に蓄積されている大量の力学的・熱的・化学的エネルギーが一気に開放され非常に大きな災害を生じることになる。

昭和 57 年 3 月末、茨城県下の石油コンビナートで生じた重油脱硫装置の配管の破裂を発端とした爆発・火災事故は正にそのような大型・高性能設備のもつ潜在的危険性が表面化した典型的な事故例といえよう。

この種の事故を防止するためには、部材各部について、それらがさらされている力学条件だけでなく、重要な因子である環境の効果をも適確に把握しておく必要がある。ところで、環境の関与する破壊（環境破壊）は非常に複雑で解明の難しい現象であるため多くの未解決の問題が残されているが、特に近年、実際的な要求からこの方面の系統的研究に対する要望が強い。

上記の事故はそのような状況のもとで生じた重大災害である。従って、その事故解析は事故原因の究明という当面の目的だけでなく、今後の安全対策の検討やさらに高度の安全性を確保するための研究、ことに環境破壊の研究を促進するための貴重な参考資料となるものと思われる。

そのような認識から本報では筆者が茨城労働基準局労働災害調査団の一員として担当した「配管の破壊および損傷状況」の調査に関する部分を中心に同調査団報告書¹⁾から本件事故の状況および調査結果を紹介する。他の部分についての詳細は同報告書あるいは東京通商産業局の報告書²⁾を参照されたい。

2. 事故の状況

2.1 事故の概要

昭和 57 年 3 月末、茨城県下の石油コンビナートの某石油精製会社（以下 K 社と呼ぶ）において重油脱硫装置の 6 インチ配管が破裂して内容物が噴出し爆発・火災を起こし、現場で作業中の労働者 8 名が全員被災し、5 名

が死亡、3 名が重火傷を負ったほか、装置等を大破する重大災害が発生した。

2.2 事故装置および配管

重油脱硫装置：当製油所には液化石油ガス、自動車用ガソリン、ナフサ、灯油、軽油、重油、アスファルト、硫黄等を製造するための多くの装置があるが、事故はそのうちの 1 つ重油直接脱硫装置で発生した。この装置は硫黄分の多い常圧蒸留残渣油（原料油）を高温・高圧下（約 370℃、140 気圧）で触媒により水素と反応させ、原料油中の硫黄分を除去し低硫黄重油を製造するためのものである。その主要プロセスを図 1 に、またプロセス各部の温度・圧力条件を表 1 に示す。本装置の処理能力は日産 45000 バレルである。操業開始は昭和 45 年である。

破裂した配管：これは原料油系に異常圧が生じた場合にその圧力を反応塔を経ずに逃がすため、図 1 に示すように原料油ポンプ出口と高温分離槽入口の本流ラインを結び、その途中に安全弁を設けたバイパスラインである。破裂位置は高温分離槽入口側に設けたフランジ部から少し安全弁側に寄ったところである。この配管は高温配管用炭素鋼 STPT 38 製で、呼び径が 6 インチ（外径 165.2 mm）である。なお主流配管の呼び径は 20 インチで、これと上記 6 インチ配管とを結ぶフランジまでの配管の呼び径は 6 インチでありこれらはいずれも SUS 321 製である。

2.3 事故の発生状況

- ① 事故当日 20 時 23 分頃、現場巡廻中の作業員 2 名から 2 回にわたって装置内専用電話（ページング）で計器室に「バイパスラインの一個所から内容物が漏れている」むねの連絡があった。
- ② 当直班員 6 名が現場に駆けつけたところ、当該バイパスラインのフランジ部付近から白煙状のものが漏れ出しているのが認められた。
- ③ そこで緊急停止の必要があると判断して計器室に引返そうとした時、班長の目の前で急に同配管の当該破裂個所がふくらんで破裂し、内容物が噴出して大爆発し、火災を引起こした。その結果、冒頭に述べたような悲惨な人的被害を生ずると共に重油約 80 ton および水素約 6 万 Nm³ が焼失し、当脱硫装置は致命的の被害を受けた。

災 害 事 例 分 析

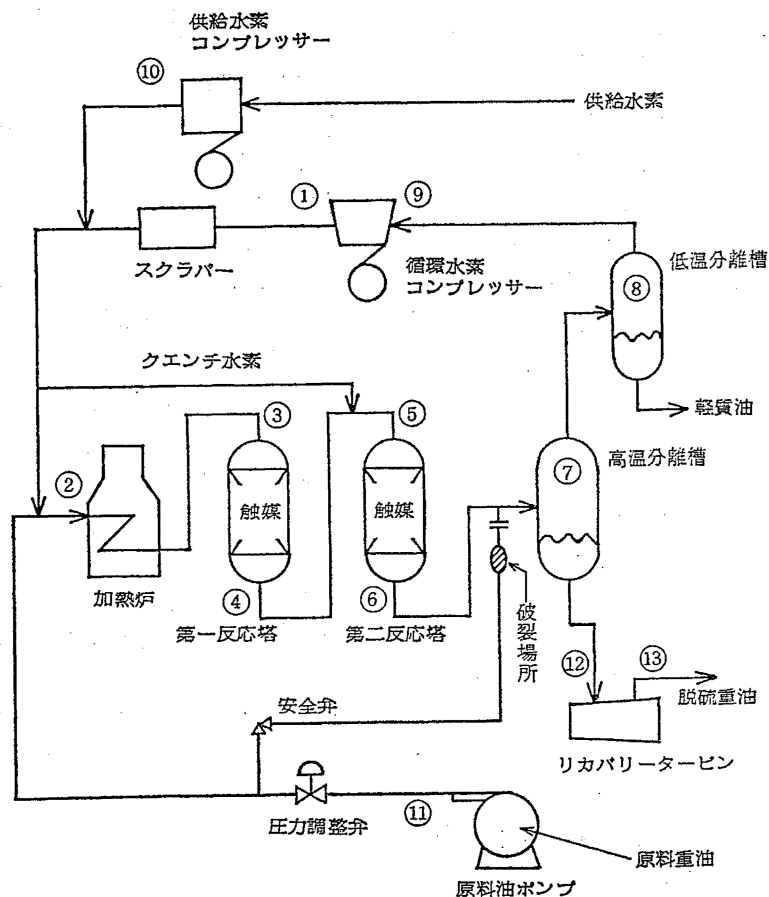


図 1 重油脱硫装置の高圧反応系フローシート概略（加熱炉および反応塔は2系列ある）

表 1 重油脱硫装置の高圧系各部の温度・圧力条件（運転時，カッコ内は推定値）

番 号	位 置	圧 力 (kgf/cm ² G)		温 度 (°C)	
		運 転	警 報	運 転	警 報
1	循環水素コンプレッサー出口	145	—	53	(H) 150
2	加 熱 炉 出 口	(143)	—	358	—
3	第 1 反 応 塔 入 口	(143)	—	358	(H) 430
4	同 出 口	(142)	(H) 143	367	(H) 430
5	第 2 反 応 塔 入 口	(142)	—	350	(H) 430
6	同 出 口	(141)	(H) 143	363	(H) 430
7	高 温 分 離 槽	(141)	—	335	—
8	低 温 分 離 槽	138	(H) 143	43	—
9	循環水素コンプレッサー入口	138	—	43	—
10	水素供給コンプレッサー出口	146	—	65	(H) 110
11	原 料 油 ポ ン プ 出 口	170	—	234	—
12	リカバリータービン入口	141	—	335	—
13	同 出 口	16	—	318	—

3. 調査結果

事故原因究明のため、(イ)装置の運転条件、保守管理体制について種々検討すると共に、(ロ)破裂した6インチ配管の建設時の健全性を評価し、損傷様式を把握するため同配管について、引張、衝撃および硬さ測定などの材料試験、化学成分分析、水素分析、金属組織試験、各種非破壊検査などを実施した。さらに、(ハ)破裂部配管の温度条件、損傷状態の比較のため別の会社（以下I社と呼ぶ）の同種の重油脱硫装置の類似配管について、稼動中に温度を測定するとともに上記（ロ）と同様の調査を実施した。

以下（ロ）と（ハ）については筆者の直接調査した損傷状態を中心に少し詳しく説明するが、（イ）については要点のみを記すこととする。

3.1 装置の運転条件および保守管理体制

3.1.1 運転条件

この事故で管の破裂は高圧部と低圧部の2ヶ所で生じ

ているが、発生現場の状況、破裂形態等から低圧部は二次破裂と推測することができる。従って、高圧部の6インチ配管の破裂が系内の圧力上昇によるものかどうかを明らかにするため運転条件が記録された関係チャートの解析を行った。その結果、本装置は事故発生直前まで全体として正常に運転されており、運転条件は事故の直接原因とはなり得なかったと結論された。

さらに、安全弁を介して常に高温流体が当バイパスラインを流れていたのではないかと、また同配管の安全弁下流位置の仕切弁から外部への漏れによる20インチ配管からの高温流体の逆流はなかったかとの疑問が生じたが、これらについてはそれぞれの部分について実施した耐圧試験結果から、その種の状態をもたらす異常はなかったものと判断された。

3.1.2 保守・管理体制等

保守点検は日常点検、6ヶ月以内ごとの保安検査、さらに一年以内ごとの定期自主検査を実施していたが、今回破裂した6インチ配管は検査対象にされておらず、運転開始以来12年間所定の耐圧およびもれ試験以外は何らの検査も行なわれていなかった。

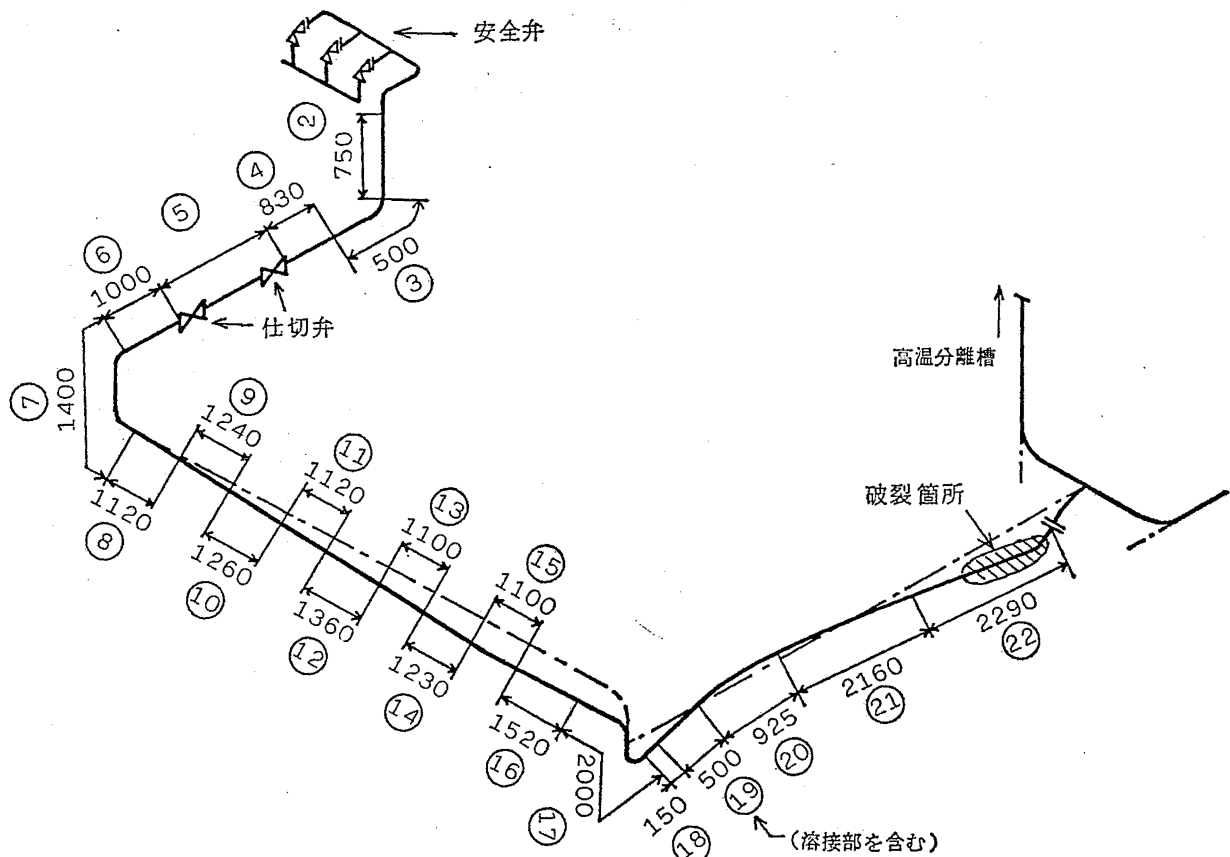


図2 破裂した6インチ配管の試料位置

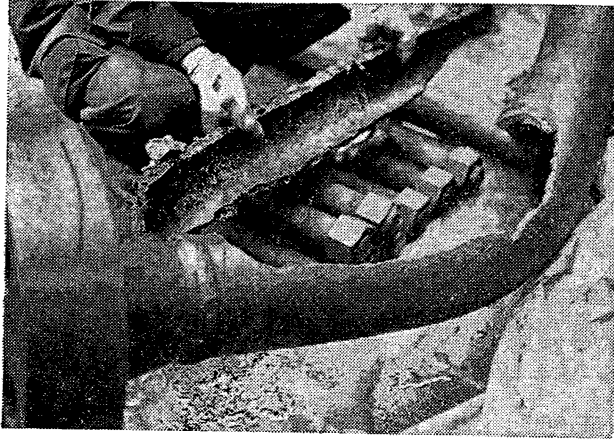


写真1 6インチ配管破裂状況

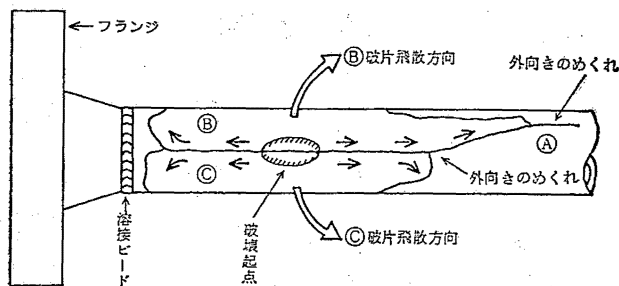


図3 6インチ配管の破裂状況の概略

なお、火災に至るまで相当量のガスが漏れていたのにガス検知器が作動しなかったが、これは検知器の設置位置と当時の風向きとの関係で破裂位置での漏れが検出されにくい状態にあったためと判断された。

3.2 6インチ配管

破裂した6インチ配管について本節の初めに述べた(ロ)の各種調査・試験を実施した。以下説明の都合上同配管のそれぞれの位置に図2のようにセクション②～⑩の番号を付ける。

(1) 外観

破裂状況：事故の発端となった本配管の破裂はセクション⑩で生じた。写真1はその破裂状況である。また図3には肉眼観察結果の要点を示した。

図3に示すように、本配管は本体Aから破片BおよびCが分離して飛散する状態で破裂し、写真1のように破裂部で大きく曲り変形していた。破裂により曝露された管内壁は事故時に噴出した内容物に洗われたこともあって清浄であり、特に問題となる減肉や腐食孔は認められなかった。しかし破裂部近傍には内壁から外壁に向い、しかも管軸方向に延びたき裂がかなり形成されてい

た。

破断面は、火災による損傷のため詳細は不明であるが、階段状の形態が主で、くびれ(板厚減少)もみられず脆性破壊の特徴を示している。

破片BおよびCをつなぎ合わせた場合、管がふくらむような変形が認められ破片フランジ側端部にシャーリップ*が形成されていたこと、本体Aの破断端が外向きにめくれていること、さらに階段状形態を中心とした破面の流れから、本配管の破壊起点、割れの進行方向および破片の飛散状況はおよそ図3のようであったと推測される。破壊起点は長さ方向ではフランジ溶接線から40～50 cm、円周方向にはフランジ側から見て時計廻りに上から約45°の位置である。この位置は爆発前のガス噴出方向についての証言と一致している。

こぶ状ふくれ：セクション⑩、⑪および⑫には外壁、内壁に大きなこぶ状ふくれ(以下ふくれと呼ぶ)が形成されていた。その例を写真2に、またそれらの形成位置を図4に示す。ふくれの大きさは直径20～60 mm、高さ1～8 mmでばらつきが大きい。

表面状況：外表面は⑩および⑪を除いて強度上問題となる腐食状態や割れは認められない。写真3に外観の例を示すが②、③および⑩の外表面が赤錆状であるのに対し、⑩、⑪および⑫の外表面は黒色の層で覆われている。後者のうち⑪と⑫は前者と同じ状態のものが火災により変化したものと思われるが、⑩についてはややそれらと異なった性状である(後述3.2の4, 6, 7および9項参照)。



写真2 6インチ配管に形成されたふくれ(セクション⑩の内壁面)

* 炭素鋼などある程度以上延性のある材料が破断するとき最後にせん断的に分離して形成された破面形態(shear-lips)

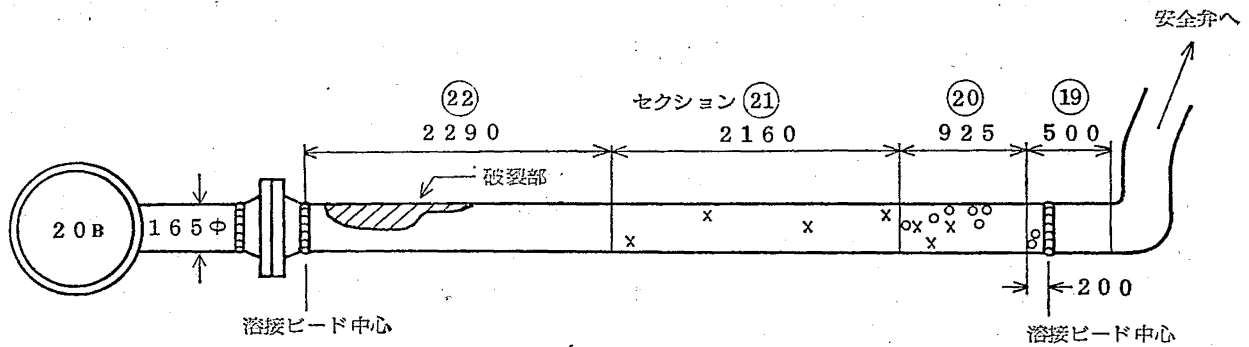
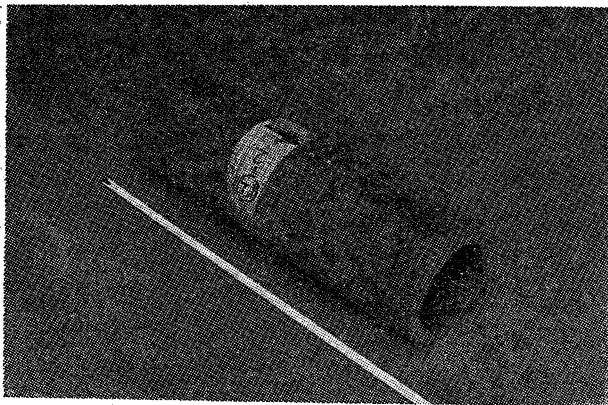
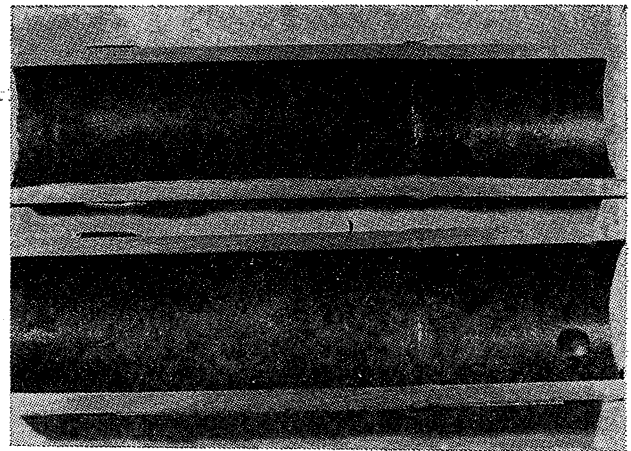


図4 ふくれの形成位置 (○内壁, ×外壁)



(a) セクション⑫



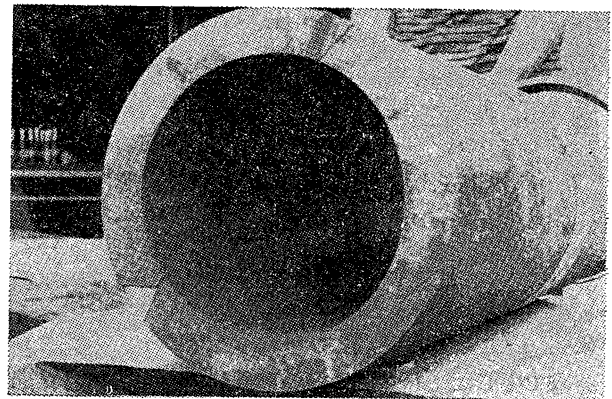
(a) セクション⑲



(b) セクション⑲

写真3 6インチ配管の外観

内表面：破裂部については破裂状況のところで既に述べたとおりであるが、②①、②②および①⑨においてはかなり広範囲に黒色のスケールが付着していた。そのスケールは②①～②②の切断面では2～3mm、①⑨では0.5mm程度である。写真4は①⑨のスケール付着状況である。このスケールの分布から推測すると、事故前の破裂部内表面にもかなりのスケールが付着していたと考えられる。



(b) セクション⑲

写真4 6インチ配管内壁面のスケール付着状況

一方、①⑨においては、表面からはがれそうなぼそぼその状態の茶色のスケールが付着していた。

しかし調査した範囲内では、②②以外に強度上問題となる欠陥は見出せなかった。

(2) 寸法

管の外径と肉厚の測定結果を表2に示す。ただしこれ

災 害 事 例 分 析

表 2 6 インチ配管各部の寸法 (mm)

セクション	外 径		厚 さ			
	上下方向	左右方向	上	左	下	右
②	164.8	164.95	19.4	17.7	17.5	19.5
⑫	164.90	165.20	20.5	20.30	20.65	20.95
⑪ weld より 上流	165.1	165.8	17.35	17.1	17.90	18.10
⑪ weld より 下流	165.0	165.5	17.25	17.95	17.70	17.15
⑳	165.7	165.85	17.25	16.45	16.75	17.25
㉔	166	—	16.50	17.40	18.5	17.40

表 3 6 インチ配管各部での化学成分 (wt%)

セクション	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
②	0.180	0.30	0.41	0.017	0.018	0.02	0.02	<0.01	0.03
" (内面)	0.195	—	—	—	—	—	—	—	—
⑫ 上部	0.189	0.266	0.419	0.0326	0.0144	0.015	0.027	0.004	0.024
" 下部	0.185	0.258	0.410	0.0320	0.0127	0.015	0.026	0.004	0.023
⑪ 上部	0.190	0.244	0.324	0.0111	0.0080	0.012	0.020	0.000	0.018
" (内面)	0.132	0.243	0.310	0.0083	0.0069	0.012	0.020	0.000	0.017
⑪ 下部	0.123	0.251	0.325	0.0105	0.0080	0.011	0.020	0.000	0.018
" (内面)	0.153	0.246	0.317	0.0089	0.0081	0.011	0.020	0.000	0.018
⑳	0.143	0.34	0.33	0.015	0.018	0.02	0.02	<0.01	—
" (内面)	0.064	—	—	—	—	—	—	—	—
JIS STPT38規格値	≤0.25	0.10~0.35	0.30~0.90	≤0.035	≤0.035	—	—	—	—

は各試料の代表的値である。測定結果によると、⑫の肉厚が他に比べかなり大きい以外は肉厚・外径いずれもほぼ同程度で、これらはいずれも JIS の寸法許容差（外径 $\pm 1\%$ ，最大値 2.0 mm，厚さ $\pm 12.5\%$ ，偏肉は厚さの 20%）の範囲内にあり，その意味での問題はないと思われる。

（３）化学組成

分光分析法および燃焼ガス容量法により⑬の溶接部の両側，②，⑫および⑳について化学分析を行った。分析結果および JIS 規格値を表 3 に示す。

（４）機械的性質

引張試験：セクション②，⑫，⑬および㉑について，軸方向および一部周方向から採取した試験片について引張試験を実施した。その結果を表 4 に示す。図 5 は⑬を例に引張試験片，顕微鏡組織観察用試片等の採取位置を展開図で示したものである。

引張試験結果によれば，⑬溶接部より上流部，②および㉑の軸方向試験片，さらに㉑の全板厚試験片はいずれも JIS 規格を満足し，伸びおよび絞りも十分である。

しかし，⑬については図 5 に示す位置から採った溶接部試験片は極端に強度が低く，また伸びおよび変形のほとんどない状態で破断している。とくにその 5 本の中の 1 本には写真 5 に示すように，試験片作成後に全断面におよびき裂が認められ，引張試験前の取扱い中に破断してしまった。写真 6 には溶接部と管母材部の引張試験片の破断状態を対比して示した。

さらに，㉑の中でも一部 JIS 規格値を満足しない低強度が認められた。

シャルピー V 切欠き衝撃試験：②および㉑の一部から採取した JIS 4 号試験片について衝撃試験を実施した。その結果，②では肉厚方向位置の違いによる切欠き靱性の差は認められなかったが，㉑では図 6 に示すように明

表 4 6 インチ配管各部の引張特性

セクション	上降伏点 [kgf /mm ²]	下降伏点 [kgf /mm ²]	引っぱり強さ [kgf /mm ²]	伸 び [%]	絞 り [%]	備 考
②	29.0	—	44.3	45	—	JIS12B
② 内 面	30.3	—	46.7	23	59	JIS14A
⑫ 上 部	26.4	24.9	44.8	36	63	〃
〃 下 部	27.7	26.4	45.0	36	62	〃
⑬	29.0	27.1	42.6	42	67	〃
〃 溶接部	—	—	0~24.1	≒ 0	≒ 0	〃
㉑	24.9	—	41.3	48	—	JIS12B
㉑ 内 面	27.3	—	42.3	38	70	JIS14A
〃	19.1	—	32.8	26	31	〃
㉒	31.1	—	43.8	40	70	〃
〃	21.8	—	37.9	32	44	〃
JIS STPT38	≥22	—	≥38	≥30	—	〃

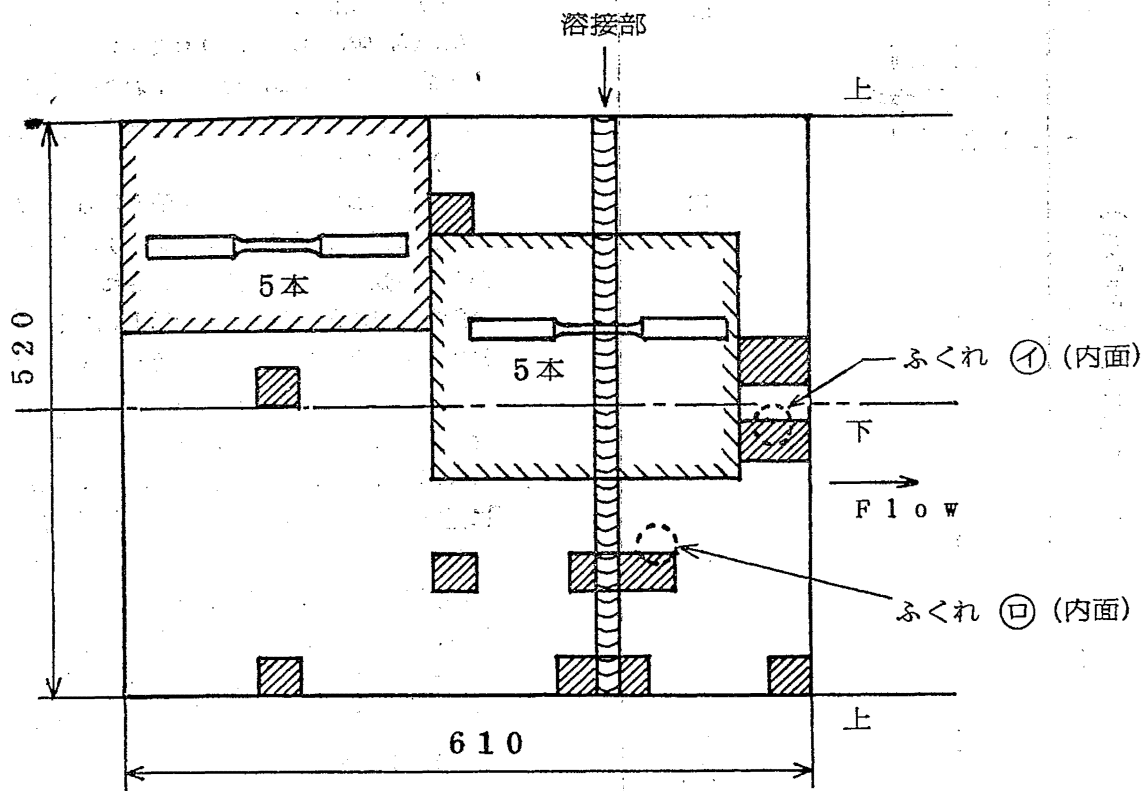


図 5 セクション⑱での試料採取位置 (外面から見た展開図)

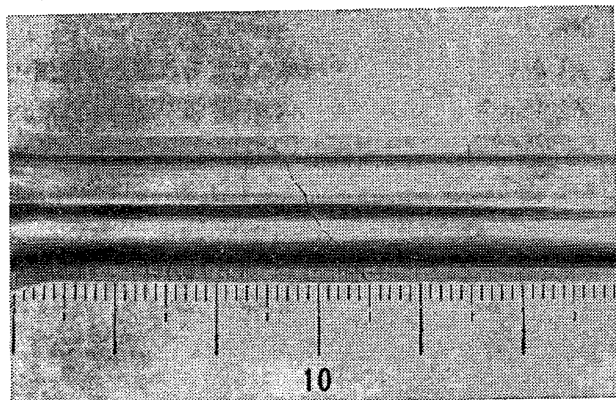


写真 5 セクション⑱の溶接部引張試験片にみられるマクロき裂 (加工直後、未破断)

らかに内面側の靱性値が低くなっている。

硬さ試験：②，⑱および㉔についてビッカース硬さ (Hv) を測定した。その結果，Hv は②では 114～169，⑱および㉔では 88～127 の範囲であった。管肉厚方向の硬さ分布は②では外面側が，㉔では内面側が小さいという結果が多かった。図 7 は後者についての測定例である。

(5) 探傷試験

超音波探傷：②と㉔について本試験を実施した。その

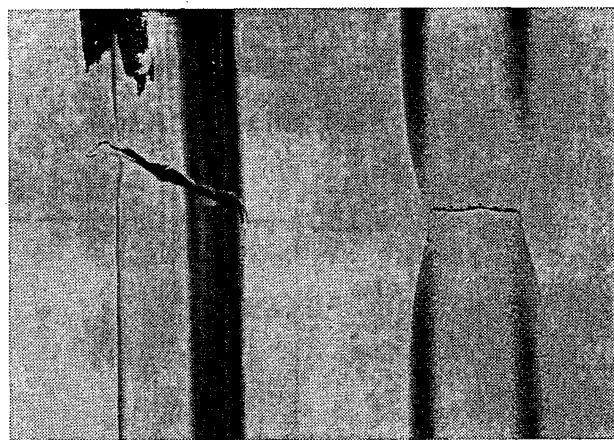


写真 6 セクション⑱の引張試験片破断状態 (左：溶接部，右：母材(溶接部より上流の健全部))

結果，②では欠陥エコーはなく，㉔においては図 8 に示すように肉厚中央部にかなり広い多数の欠陥が認められた。

放射線探傷：上記超音波探傷により欠陥の検出された㉔についてピーク電圧 300 KV の X 線装置で透過試験を行ったが透過写真に欠陥像は認められなかった。したがって図 7 で認められた欠陥はすべて管表面に平行あるい

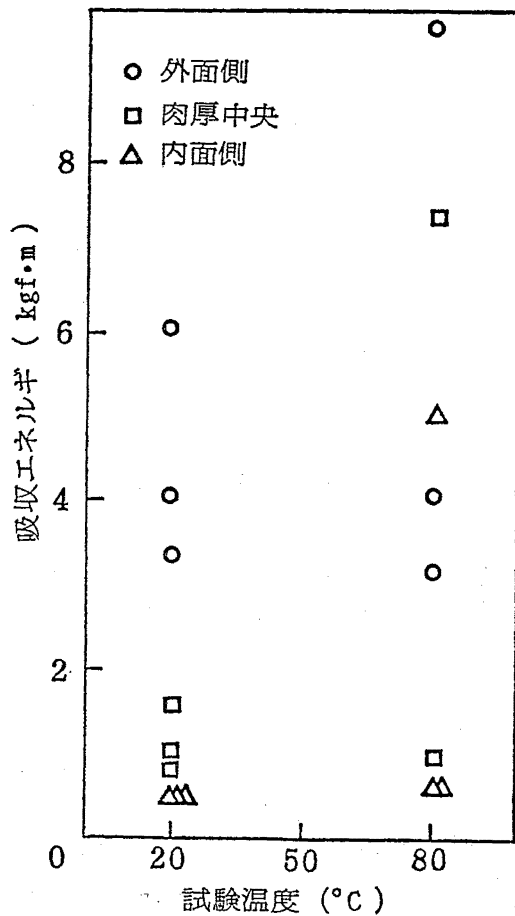


図6 シャルピーV切欠き衝撃試験結果の例

はそれに近い方向のき裂状欠陥と判断された。

(6) 金属組織

②, ⑧, ⑩, ⑫, ⑬, ⑮および⑯について多数箇所の縦・横断面を研磨し, そのままおよびエッチングした状態でマクロおよびミクロ両面からの観察を行った。

a) マクロ組織

②, ⑫においては何らの欠陥も認められなかったが, ⑮の溶接部より下流(フランジ側)および⑯の断面にはかなりの数のマクロき裂が形成されていた。写真7は⑮の縦断面でのき裂とふくれを示す。ふくれは同種の圧延層に沿ったき裂が, 近い方の管壁面(この場合内面)側にふくれて空洞を形成している。この種のマクロき裂の存在する厚さ方向範囲は, ⑮においては内表面から壁厚の0.2~0.5倍, ⑯の場合は0.2~0.8倍であり破裂部に近い方が広範囲である。マクロき裂の数も後者の方が多かった。

写真8は⑮の溶接部縦断面のマクロ組織である。この場合, 溶接ボンド部に沿って完全に外表面に通じ, 管厚の7~8割に達する深さのき裂が認められる。写真9はこのき裂をミクロ連続写真で示したものである。

b) ミクロ組織

⑮中の溶接部より上流側および②, ⑫, ⑬は板厚方向に特に差のない健全なフェライト・パーライトの圧延組織であり問題となる損傷は見当らない。この領域の代表的組織を写真10に示す。

しかし, ⑮の溶接部を境界としてそれより下流側(フランジ側)では, 内面からマクロき裂の形成された範囲にわたって, ミクロき裂あるいはそれらが膨らんだ形の

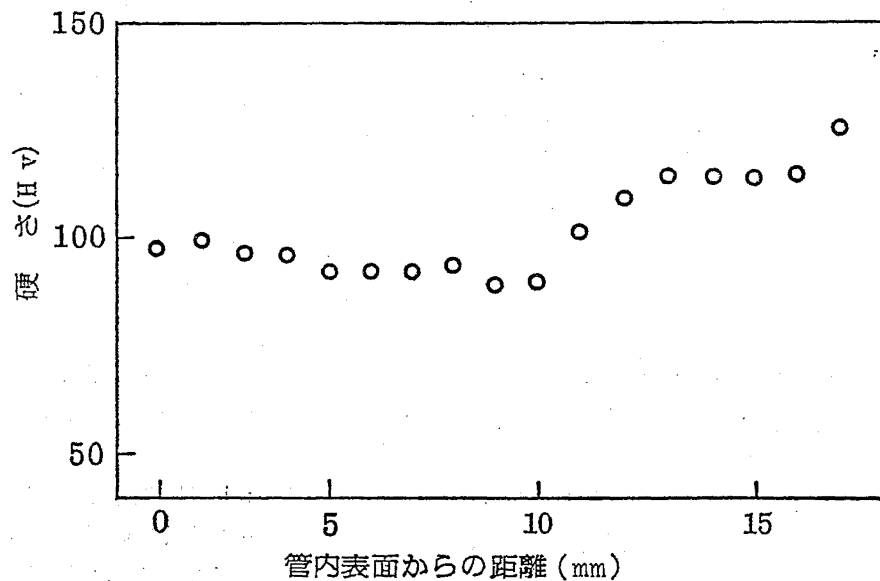


図7 6インチ配管厚さ方向の硬さ分布(セクション⑮)

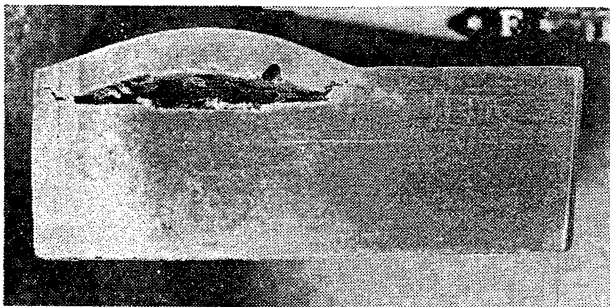
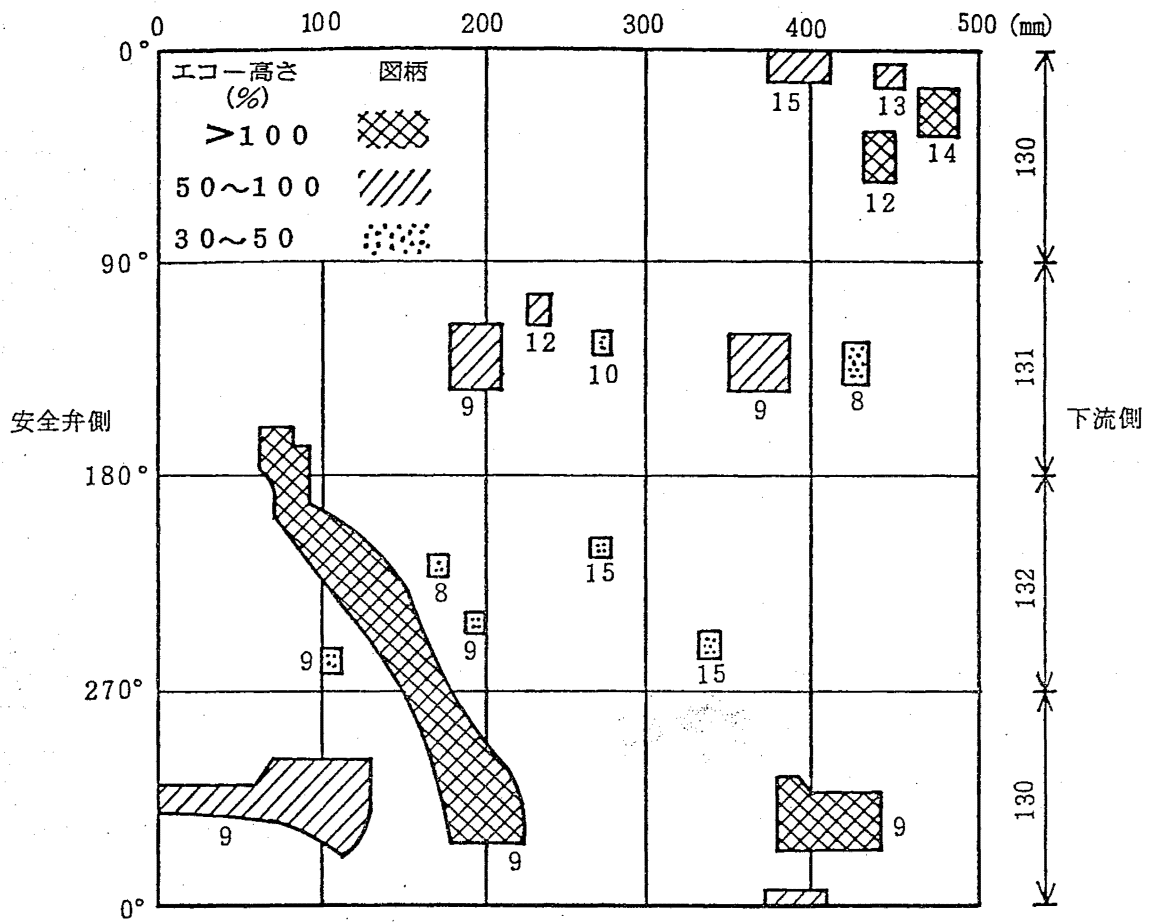


写真 7 ふくれを含む 6 インチ配管縦断面のマクロ組織 (セクション⑱)

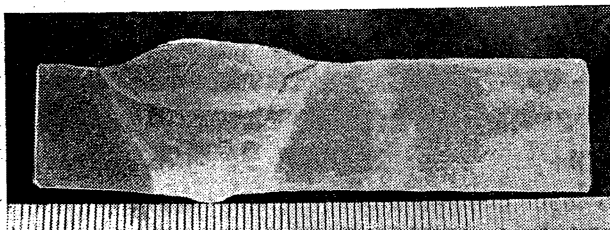


写真 8 溶接部の縦断面マクロ組織 (セクション⑱)

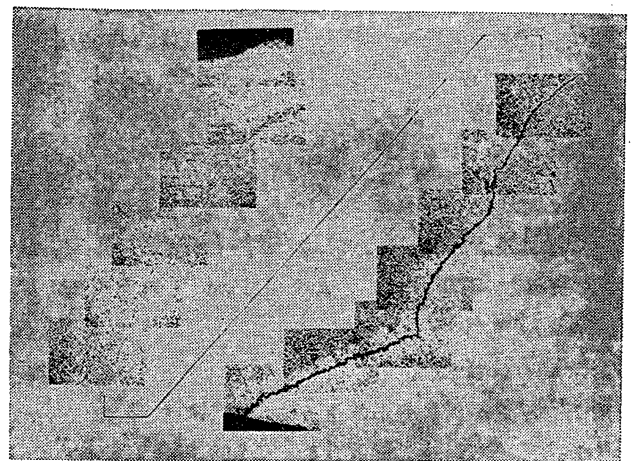
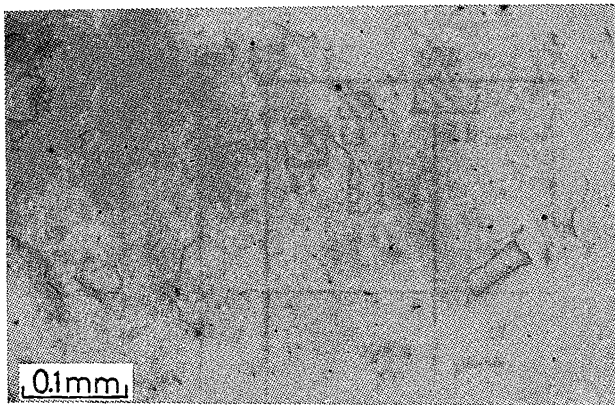
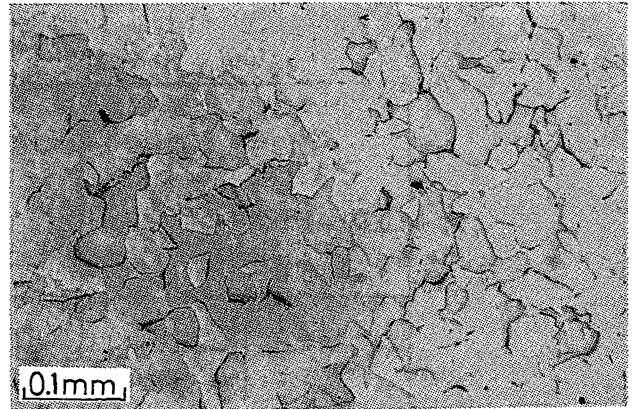


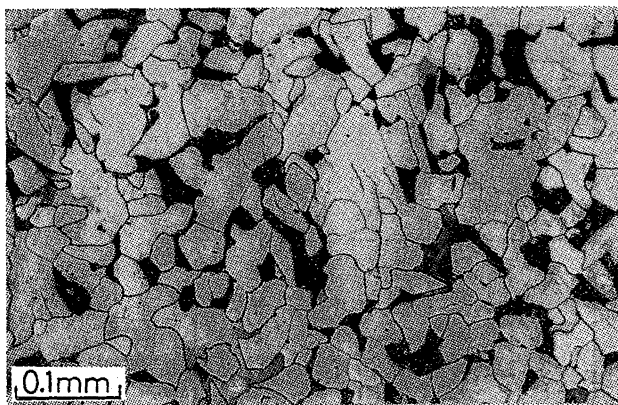
写真 9 溶接ボンド部のマクロき裂の詳細 (写真 8 中のき裂の拡大)



(a) 未 腐 食

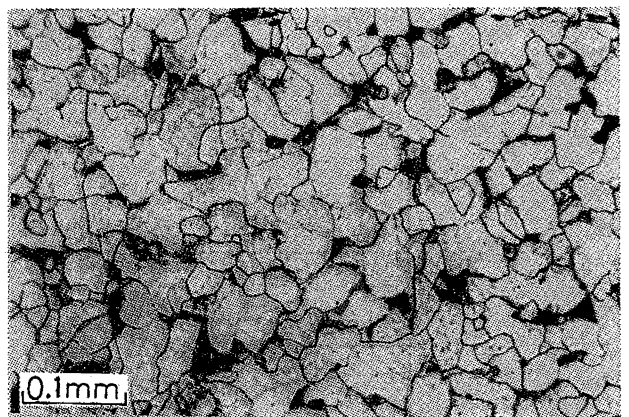


(a) 未 腐 食



(b) 腐 食 後

写真 10 6 インチ配管健全部のマイクロ組織 (セクション⑩)



(b) 腐 食 後

写真 11 6 インチ配管損傷部のマイクロ組織 (セクション⑪)

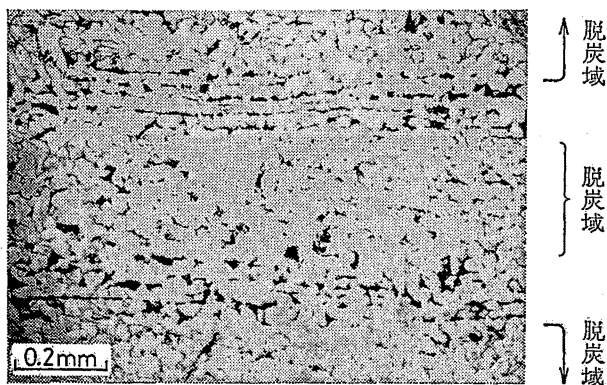


写真 12 圧延方向に形成された帯状脱炭域 (セクション⑨)

ポイド(空洞)が形成されている。写真 11 にその例を示す。写真からも分かるようにこれらの欠陥は、フェライト結晶粒に沿って形成され、これらの多いところではパーライトが消失ないし減少して脱炭状態となっている。当 6 インチ配管の全体的脱炭状態は、破裂部⑫において

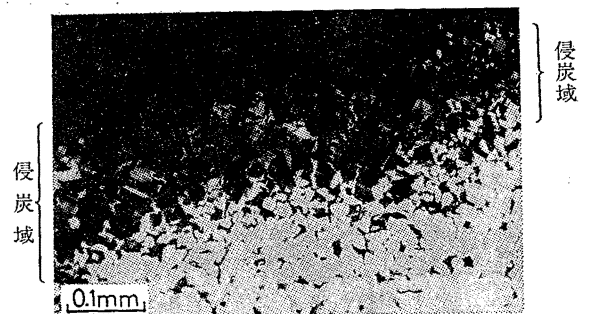


写真 13 マクロき裂の縁に形成された脱炭層 (セクション⑫)

最も激しく、それから遠ざかるにつれて軽度となっている。⑩中の溶接部以遠(上流側)では、⑬のベンド部での極く軽微な粒界き裂を除いてこの種の損傷は認められなかった。ただし、脱炭領域の分布には管軸方向および周方向にはもちろん、厚さ方向にもむらが存在する。写真 12 は厚さ方向のむらの例である。圧延方向に平行な帯状の脱炭域が認められるが、マクロき裂はこれに沿っ

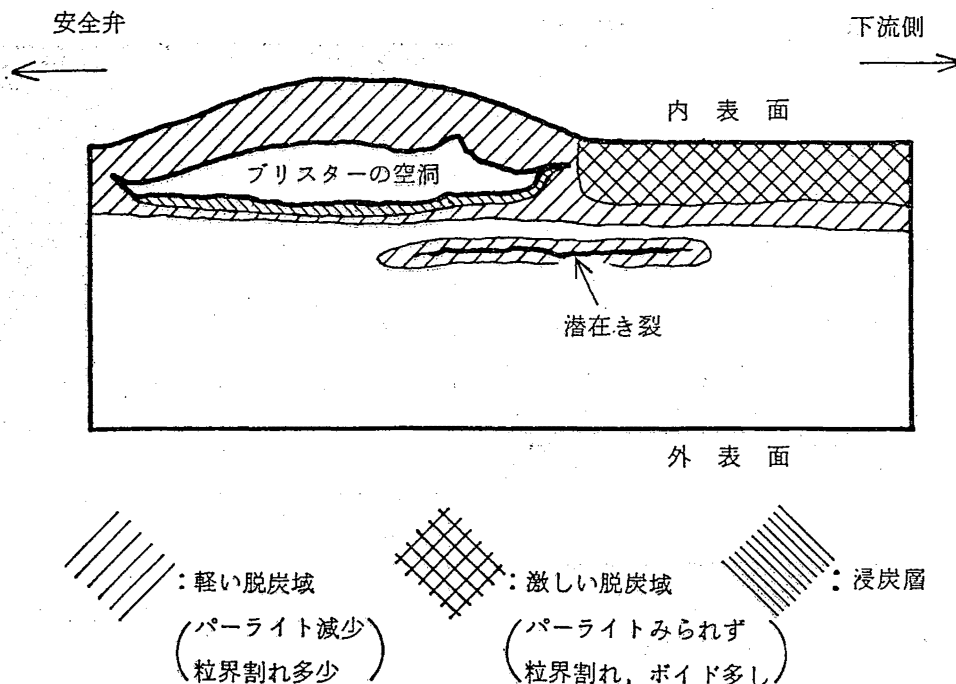


図 9 ふくれを含む 6 インチ配管縦断面の損傷状況 (セクション⑨)

て形成されていることが多い。

またマクロき裂のなかには写真 13 に示すようにき裂内壁直下だけがパーライトの多い浸炭層となっているものも見られ、脱炭損傷の状態は一樣ではない。脱炭域の分布の 1 例として、ふくれを含む断面 (写真 7 と同じ) の損傷状態の調査結果を図 9 に示す。

その他、⑨の外表面近傍にフェライト結晶粒の大きい領域や、逆にそれがかなり小さい領域が存在していた。この粒径の差や上記の浸炭層の形成などは事故時の火災による加熱が原因と思われる。

さらに、⑨溶接部にはボンド部に沿って炭素の少ない帯状域が存在し、写真 14 に示すように、その中央を通してマクロき裂が形成されていた。

(7) フラクトグラフィ (破面解析)

⑨中のふくれの内表面 (破面) および溶接部引張試験片破面を走査型電子顕微鏡 JSM-35 により観察した。

ふくれの破面：図 5 に示したふくれ (イ) の破面は清浄な銀白色で、微視的には写真 15 に示すように粒界破壊が基本である。しかし立体観察を含めた詳細な観察によると、き裂やボイドが多数認められ、それらがマクロき裂として連結する際に形成されたディンプル (くぼみ形態、この場合結晶粒規模が多い) やティヤリッジ (引裂き稜) など局所的・微視的意味でのかなりの塑性変形の跡がみられた。ふくれ (ロ) の内表面は肉眼的には真

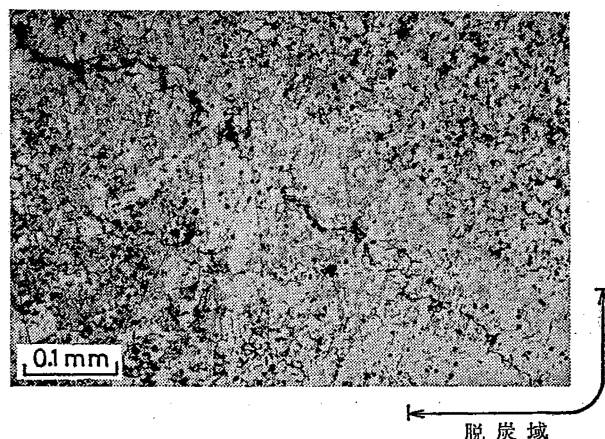
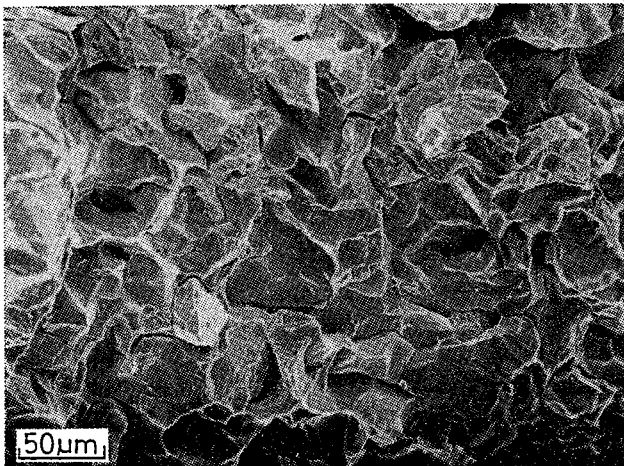


写真 14 溶接ボンド部の脱炭とき裂 (割れ) (右上：溶接金属、左下：母材、セクション⑨)

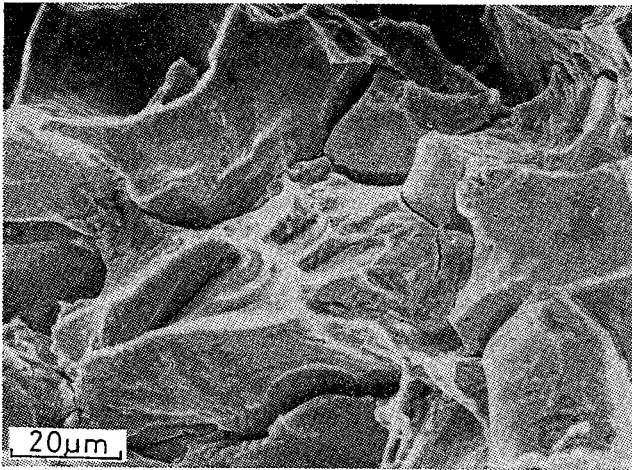
黒であったが微視的破面形態は上記 (イ) の場合と全く同じであった。

溶接部引張試験片破面：この破面は肉眼的には写真 16 に示すように銀白色のものと黒く変色したものとがあるが、微視的にはいずれも上記ふくれの破面と同様であった。しかし、ボンド部で破壊しているため結晶粒径は写真 17 のようになんて小さい。前述の引張試験片はこの種の破壊様式によって形成されたマクロき裂を含んでいたため極端に強度が低かったものと考えられる。

なお、写真 5 に示したき裂は、写真 16 に示すように



(a)



(b) 写真(a)の近くの拡大
写真 15 ふくれ内表面(破面)の形態(セクション⑨)

全破面が黒色のすずみで覆われていることと、管厚さ方向の試験片採取位置とから判断して、管外表面に通じしかも内表面の極く近く(1mm以内)に達していたことは確実で、試験片に加工したため証拠はないが内表面に貫通していた可能性も考えられる。

(8) ふくれ内部のガス分析

⑨にあるふくれに水中でドリルによって穴を明け、捕集したガスについて分析した。その結果を表5に示す。注目すべきは水素とメタンの存在である。

(9) 管壁面付着物の化学分析

写真4に示した管内壁面の付着物を分析した結果を表11の下部に示す。硫黄は⑨では硫化鉄として、⑩では単体の形で存在している。

⑨の管外壁面の付着物は Fe_3O_4 が多く、それに Fe_2

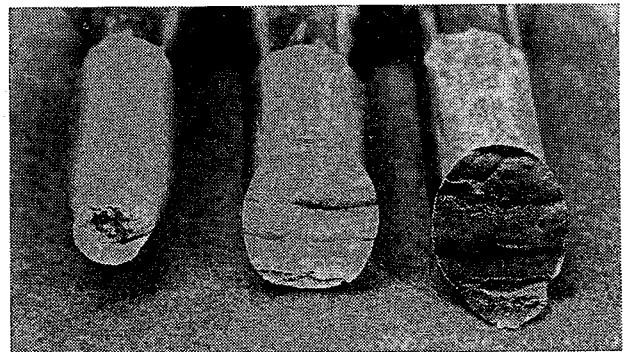


写真 16 セクション⑨の引張試験片のマクロ破面状態(左:母材, 中と右:溶接部)

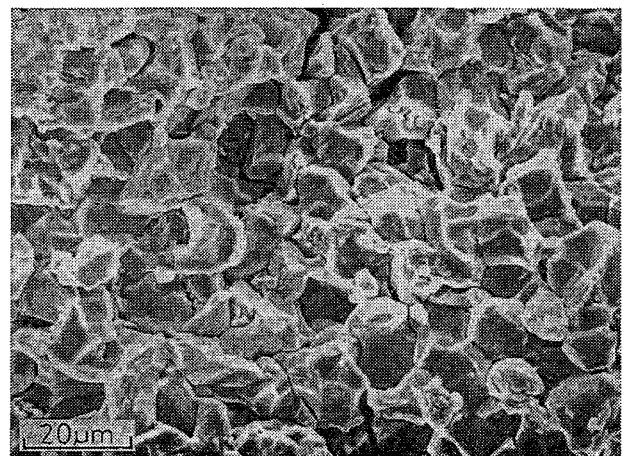


写真 17 溶接ボンド部のマクロき裂の破面(セクション⑨, 写真16の黒色破面)

表 5 セクション⑨中のふくれ内部のガス成分(vol%)

H_2	CH_4	O_2	N_2
18.4	4.6	2.7	74.3

O_2 また FeS もわずかながら検出された。

(10) 6インチ配管調査結果のまとめ

素材の健全性: 以上(1)～(8)の調査結果を総合的に考察すれば、本配管の建設当初の状態は全般的には健全なものであったと推測される。しかし、後述するように、顕著な割れが発見された⑨溶接部には問題があったとも考えられる。

損傷様式: 管の破裂部から⑨の溶接部までの広い範囲に、パーライトが消失ないしは減少した脱炭領域が存在し、その領域内にはフェライト粒界に沿ったマイクロき裂が形成されて、それらが連結して形成されたマクロき裂の破面が粒界型であること、ふくれ内部のガスからメタ

ンが検出されたこと、さらに本配管が置かれている環境を考慮すれば、本件配管の損傷様式は水素侵食と判断するのが最も妥当である。

なお、これらの基本的な特徴に加え、破裂部のマクロ破面形態が脆性的であること、管内壁側で硬さおよび衝撃靱性値が低いことなどの事実も間接的ながら上述の考察の裏付けとなろう。

3.3 類似6インチ配管の調査

事故原因の究明のための比較資料を得ることを目的に、同配管と機能・使用条件の類似したI社の6インチ配管について、操業中および定期修理中に種々の調査を行った。

図10はI社配管の概略と試料採取位置を示す。表6および表7はそれぞれ同配管の仕様と同配管まわりの運

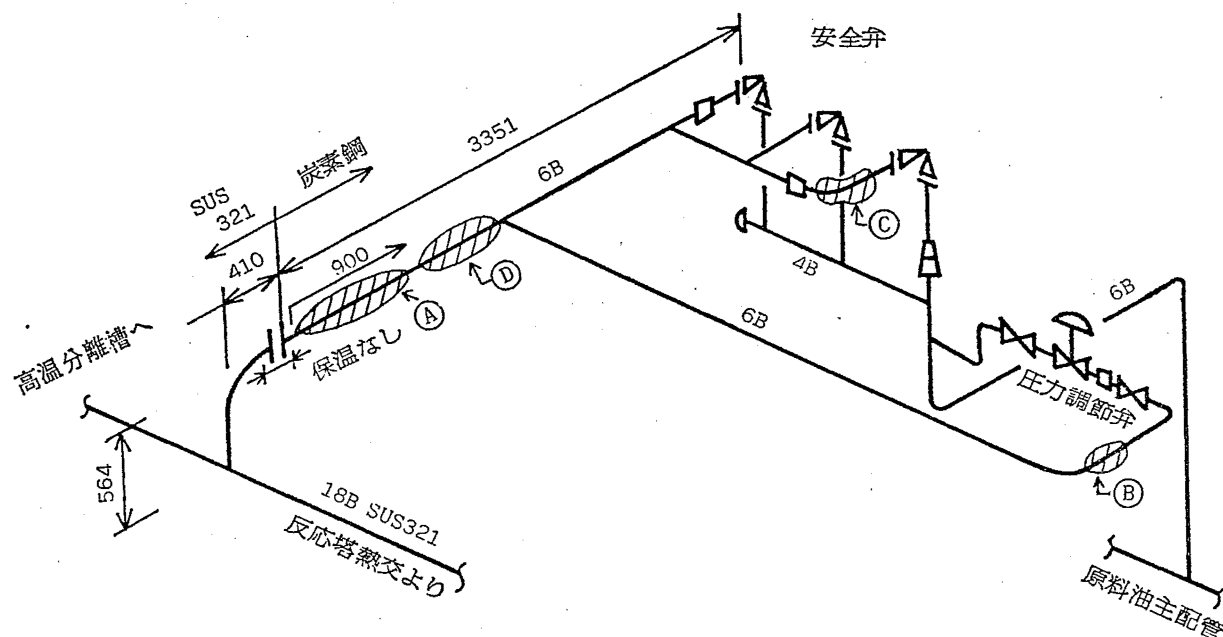


図10 I社の6インチ配管の概要

表6 I社6インチ配管の仕様

材 質	設計圧力 (kgf/cm ²)	設計温度 (°C)	管 外 径 (mm)	腐 れ 代 (mm)	必要最小肉厚 (mm)	管公称肉厚 (mm)
STS-38	152.0	260	165.2	1.6	14.14	21.9

表7 I社6インチ配管まわりの運転条件

原 料 油		反 応 塔 留 出 油						
圧 力 (kgf/cm ²)	温 度 (°C)	圧 力 (kgf/cm ²)	水素分圧 (kgf/cm ²)	温 度 (°C)	フ ロ ー パターン	気/液 比		
						mol %	vol %	wt %
160	225	145	114	320	噴霧流	94.4/5.6	92.6/7.4	33.0/67.0

表8 反応生成物の化学組成の比較
反応槽出口における反応生成物の組成 (mol %)

区 分	H ₂	炭化水素類	H ₂ O	H ₂ S	計
K 社	79	14.8	4.7	1.5	100.0
I 社	75.7	22.1	0.1	2.0	99.9

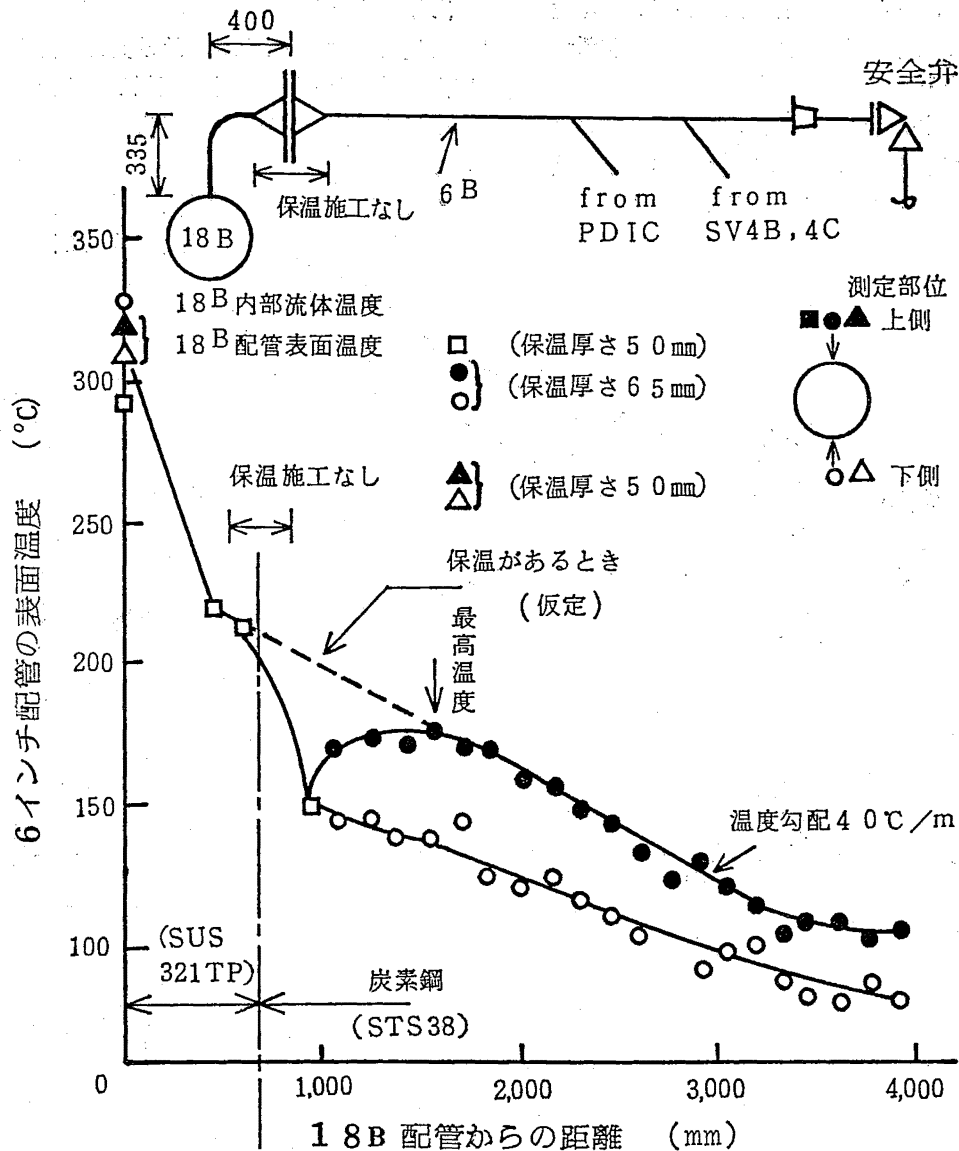


図 11 I 社 6 インチ配管の操作中の温度分布

転条件を示した。また表 8 には反応生成物の化学組成を事故装置と合わせて示した。操作中の配管の表面温度測定結果は図 11 のとおりである。

非破壊的な肉眼観察、磁粉および超音探傷試験では問題となる欠陥は認められなかった。また図 10 に示す A～D の 4 個所の試料について化学組成の分析および引張試験を行った結果をそれぞれ表 9 および表 10 に示すが、これらは共に JIS 規格を満している。ミクロ組織に異常はなく、衝撃靱性および硬さについても損傷の形跡は認められなかった。また管内付着物の分析結果を表 11 の最下欄に示すが硫黄は単体の形で存在している。

以上の調査から、I 社の 6 インチ配管は水素侵食はも

ろん、他の様式の損傷も受けていないことが明らかとなった。なおこの装置は昭和 42 年 10 月から使用された。

4. 6 インチ配管の破裂原因の推定

上記 (3 節) の調査結果を総合的に判断すると本件の爆発・火災事故は 6 インチ配管が「水素侵食」と呼ばれる損傷を受け材質が劣化して破裂したことによることは明らかである。しかし、この損傷様式については、未だ一般には十分な認識がないと思われる。従って、以下ではまずこの水素侵食について概説した後、本配管にこの

表 9 I 社 6 インチ配管の化学成分 (wt %)

セクション	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
A	0.14	0.32	0.46	0.022	0.014	—	—	—	0.042
B	0.15	0.33	0.47	0.013	0.025	—	—	—	0.039
C	0.17	0.32	0.46	0.032	0.018	—	—	—	0.038
D (上部)	0.154	0.293	0.467	0.0236	0.0083	0.010	0.026	0.004	0.037
〃 (下部)	0.158	0.290	0.465	0.0242	0.0084	0.010	0.025	0.003	0.037
STS 38 JIS規格値	≤0.25	0.10 ~0.35	0.30 ~0.90	≤0.035	≤0.035	—	—	—	≤0.20

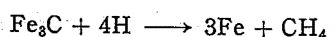
表 10 I 社 6 配管各部の引張特性
I 社配管の引張試験結果

セクション	上昇伏点 [kgf/mm ²]	下降伏点 [kgf/mm ²]	張っぱり強さ [kgf/mm ²]	伸 び [%]	絞 り [%]	備 考
A	25.0	—	43.0	48	—	—
B	25.0	—	43.0	45	—	—
D 上部	23.5	22.8	42.4	41	66	—
D 下部	24.3	23.9	42.4	40	66	—
STS 38 JIS 規格	≥22	—	≥38	≥30	—	—

損傷が生じた原因を考察する。

4.1 水素侵食について

この損傷は高温・高圧水素環境下で使用される鋼材においてみられるもので、その本質は、鋼材に侵入した原子状水素が、例えば



のように鋼中の炭化物と反応し、その結果粒界や非金属介在物の表面でメタンの気泡を生じることにより粒界割れを生ずる不可逆現象とされている³⁾。その結果、炭素

鋼では脱炭してパーライトが消失し、材料の強度、靱性が著しく低下する。またこの現象では、ある潜伏期間を経た後、急に強度が低下するのも特徴の1つとされている。

現在、鋼材の水素侵食防止の限界条件は、実装置の事故例、使用実績およびプラント内実験などに基づいて作成されたネルソン曲線によって規定されている。これは特定の鋼材に水素侵食をもたらす限界の温度-水素分圧をプロットしたもので、一般にその信頼性は極めて高いものと受取られているようである。この曲線は、発表以

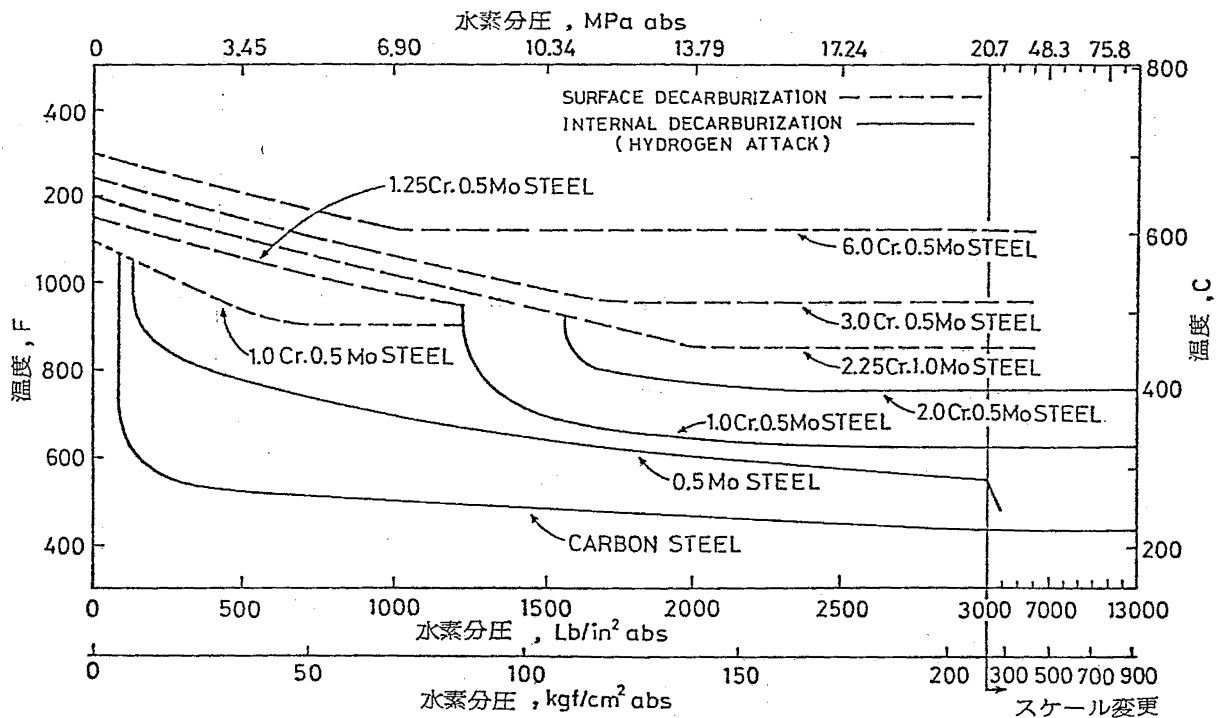


図 12 ネルソン曲線 (1977 年改訂) の基本図
(Mo 鋼への微量成分の影響および 0.5 Mo 鋼の時間寿命についての付図は省略)

来数度改訂され、最近では図 12 に示す 1977 年版⁴⁾が公表されている。

ところで、水素侵食の進行は、①材質、②温度および③水素分圧により支配されるが、そのほか④応力、⑤水や硫化水素などの共存物質、および⑥時間などの因子の影響を考慮する必要がある⁵⁾。しかし、④～⑥の影響に間する文献は未だ少なく、定説化されているとはいえない。

4.2 事故配管と類似配管との比較

上記の因子①～⑥に関する前節での調査結果の両配管についての比較により以下の点が明らかとなった。

(1) 材質、水素分圧、応力およびプラント建設後の経過時間の 4 因子は両者でほぼ同じである。

(2) I 社配管の実測最高温度は 178°C であり、炭素鋼に関するネルソン曲線の安全側にある。これに対し破裂配管の温度は実測データがなく不明である。

(3) 水については、K 社では脱硫効果をあげるため添加しているが、I 社では添加していない。

(4) 管内付着物を構成する化学物質については、操業開始後 10 数年を経て明瞭な差異が認められた。

(5) 炭素鋼 6 インチ配管と主配管を結ぶ SUS 6 イ

ンチ配管の主配管への接続は、K 社が水平であるのに対し I 社では垂直であった。

(6) 水素侵食は K 社の配管のみに生じ、I 社配管は健全であった。

表 11 は両者で差異のある項目を主にした比較表である。

4.3 水素侵食の原因の検討

前項の諸事実を総合すると、破裂した 6 インチ配管の水素侵食の原因は温度条件、あるいは水添加の効果と推察される。すなわち、ネルソン曲線を基準にすると、次のいずれかであると考えられる。

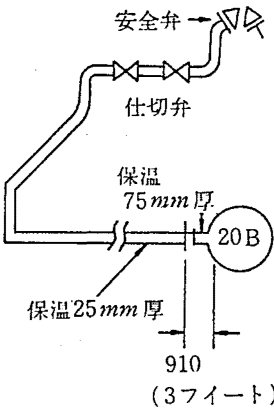
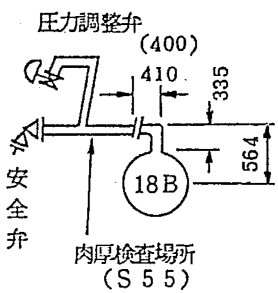
(a) 破裂部の温度がネルソン曲線の示す限界値あるいはそれより上であった。

(b) 水素侵食を生じる限界温度が水分の存在のためネルソン曲線より低かった。

(a) について：これは明確な水素侵食損傷状態からまず初めに予想される事態である。現行のネルソン曲線が本件の諸条件下でも適用できるなら、破裂部を含む水素侵食損傷部の温度は事故前に 230°C 以上となっていたはずである。そのような状態を生じる比較的现实味のある因子として

災 害 事 例 分 析

表 11 K社とI社の6インチ配管に関する比較

		K 社		I 社
配 置 etc				保温 50 mm 厚 (社内基準 170 °C 以上保温) 
SUSパイプ内の状態		335 °C , 137 kg/cm ² 気液比率 95 : 5 (vol %) H ₂ O 5 mol % 噴霧流 8.9 m/s		327 °C , 143 kg/cm ² 気液比率 92.6 : 7.4 (vol %) H ₂ O なし 噴霧流 20 m/s
6 吋 配 管 温 度	設計時予測	最高 200 °F (93.3 °C) と推定		?
	実 測 値	?		最高 178 °C 外壁上下で差あり 保温 65 mm 厚 気温 17 ~ 21 °C
原 料 温 度		240 °C		231 °C (安全弁近く)
検 査 結 果		フランジを含む水平部 セクション①⑦ ~ ②②	同左から安全弁まで セクション② ~ ①⑥	正 常
	組 織	脱炭, 粒界割れ (ふくれ 溶接ボント部割れ)	正 常	
	強 度 (靱 性)	低 下	正 常	
	管内付着物を構成する 主 な 物 質	Fe S Fe ₃ O ₄	Fe ₃ O ₄ S Fe ₂ O (OH)	S Fe O (OH)

- イ) 水蒸気等の存在による高温流体の流入促進効果
- ロ) 仕切片でのリークによる同上の効果
- ハ) セクション⑨溶接部でのリークによる同上の効果

の3つに検討した。

イ) の効果は水蒸気等の凝縮・還流および再蒸発に伴ういわゆるヒートパイプの現象によって、予想以上の大量の熱が遠くまで輸送されたという推論によるものである。しかしこの効果についての定量的評価をくだすには至らなかった。

ロ) の効果については、調査の後期にその可能性が考えられた。しかし仕切片からのもれ試験では、問題としているような温度上昇をもたらすリークは認められなかった(3.1.1に既述)。

また ハ) は、3.2で述べたように⑨中の溶接ボンド部に、管内を貫通していた可能性を考えるべきほどの大きなマクロき裂が存在していたこと、および管外壁に内容物と触れて生じるはずの化合物が検出されたことなどから推測される事態である。しかし、それらのき裂が管肉を貫通していたか否かの直接的証拠をとらえることができなかった。

(b) について：4.1で述べたように水素侵食に対する限界条件としてネルソン曲線を用いることには疑念が残されていない訳ではない。本件の場合、水素侵食の程度と、硫化鉄を主とする管内付着物の厚さとの管軸方向分布が対応し、いずれも②の破裂部で最大で、上流に向かって徐々に減少し、⑨の溶接部で消失していること、I社配管の温度分布から類推すると本件配管破裂部の温度はちょうど水分の凝縮する温度(露点)に相当していることなどから判断すると、硫化水素の共存により管壁から管材中への水素の侵入が促進され⁶⁾⁷⁾、ネルソン曲線の安全側(低温度域)で水素侵食が生じ得たとも考えられる。しかし、低温側でもメタン生成による脱炭が起るかどうかは今後の実証を必要とする。

以上、比較的现实味のある可能性について本件水素侵食の原因を検討したが、結局そのいずれかを断定するに足る証拠をつかむことはできなかった。

5. 今後の事故防止対策

以上に述べた事故状況および原因の検討結果から判断して、今後同種災害を防止するためには以下にのべるような対策を検討ないし実施することが望ましい。

(1) 水素侵食の発生する恐れのある設備の材質については、水素分圧、温度のみではなく、水、硫化水素などとの複合的な要因による影響を考慮し、水素侵食を受けにくい鋼種を選定すること。

(2) 実際に材料がさらされている条件を正確に把握するため、予測の困難な部分については実作業に先だって、あるいはその初期に実測により確認すること(温度、応力、環境条件など)。

(3) 配管等の溶接箇所は、環境条件によって水素侵食を受けやすいという指摘もあるので、溶接施工を慎重に行なうとともに、保守・管理にも留意すること。

(4) 本配管を短縮あるいは撤去する(本配管に与えられた役割は他のより危険性の少ない方法で代替できる)。

(5) 異常時の労働者の行動基準あるいは判断基準を具体化させる(今回の事故では大勢が一度に危険域に急行したため被災者が多かった)。

6. お わ り に

以上、本件事故について、破裂配管の損傷状態の調査を中心に事故調査結果を報告した。これらの調査から得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 本件の爆発・火災は、バイパスラインである安全弁下流の6インチ配管が顕著な水素侵食を受けて強度が低下し、ついに内圧に耐えきれずに破裂し、内容物が噴出したために生じた。

(2) その水素侵食の原因として、破裂部を含む損傷域の温度がネルソン曲線の示す値以上の場合と、それより低い場合について、それぞれ現実味ある推論を挙げ種々検討した。原因はこれらの推論の中のいずれかと考えられるがそれを確定することはできなかった。

(3) その原因の究明のためには、ネルソン曲線の再評価、水素侵食への種々の因子の単独のあるいは複合的な影響度の把握がぜひとも必要である。

(4) 同種災害を防止するため講ずべき当面の具体策の幾つかを列挙した。

本災害は、大勢の労働者の尊い犠牲によって得られた1つの貴重な経験である。それを無駄にしないためにも、今後、より一層高い安全性を求めて、学術的にあるいは設計・保守・管理などの関連分野において、残された問題の解決のための積極的努力がなされることを切望する。

災 害 事 例 分 析

参考文献

- 1) 労働省茨城労働基準局事故調査報告書, 1982 年 12 月。
- 2) 通産省 東京通商産業局 事故調査報告書, 1982 年 9 月。
- 3) 渡辺ら, 高圧ガス, 13-11 (1976), 564。

- 4) API Publication 941, Second Edition, June (1977)。
- 5) 正岡ら, 溶接学会誌, 46 (1977), 818。
- 6) 下平, 金属学会誌, 24 (1960), 233。
- 7) 谷村ら, 金属学会会報, 8(1969), 673。

昭和 58 年 4 月 7 日受付

産業安全研究所研究報告 RIIS-TN-83-3

昭和58年12月20日 発行

発行所 労働省産業安全研究所

〒108 東京都港区芝5丁目35番1号

電話 (03) 453-8441 (代)

印刷所 新日本印刷株式会社

CDU 614.8-02 : 614.84 : 665.6 : 621.643.23 : 620.1

災害事例分析

——重油脱硫装置の炭素鋼製高圧配管の破裂——

田中正清

労働省産業安全研究所技術資料 RIIS-TN-83-3

昭和 57 年 3 月茨城県の石油コンビナートで生じた重油脱硫装置の高圧配管の破裂による爆発・火災事故（死亡 5 名，重傷 3 名）の原因を検討した。広範な調査の結果，本災害の原因は同配管が水素侵食を受け強度が低下して破裂したためであることを確認した。その水素侵食の原因について 2, 3 の現実味ある推論を挙げその可能性を検討した。

CDU 614.8-02 : 614.84 : 665.6 : 621.643.23 : 620.1

Accident Analysis

—Explosion of a High Pressure Carbon-Steel Pipe in a Fuel Oil Desulfurization Plant—

by Masazumi Tanaka

On March 1982, a serious explosion accident of a high pressure pipe in a fuel oil desulfurization plant happened, and five of eight workers were killed and three of them seriously burnt.

To clarify the cause of this accident, various investigations were carried out.

The direct cause was confirmed to be 'hydrogen attack', and some probable reasons for this damage were proposed and discussed.