

特別講演

UDC 669.14-462 : 669.14.018.295 : 669.14.018.41 : 669.14.018.8 : 665.6

最近の油井管及びラインパイプにおける冶金学的問題*

池 島 俊 雄**

Recent Metallurgical Aspect of Line Pipe and Oil Country Tubular Goods

Toshio IKESHIMA

1. 緒 言

今回、名誉ある西山賞を頂きまして、誠に光栄に存じます。従来、この賞を受賞された方々は、学術分野で立派な業績をあげられた研究者であるのに対しまして、私自身の研究業績は微々たるものであり、大変恐縮に存じております。私は、大学を卒業後、住友金属工業(株)に入社して40年になりますが、その間最初の10年は研究者として残りの大部分の期間は研究管理者として過しました。私が研究管理の仕事に従事してきた間に一番心にかけてきたことは、研究者に対して良い研究テーマを探してあげるといことでした。このことについて少し申し上げてみたいと存じます。

良い研究テーマの選定の第一の仕事は、図1に示しますように需要家のニーズまたは製造現場の要望を探しあてることです。そして、そのニーズの重要性とタイミングに対する適切な評価をすることです。さらに、需要家の直接の声ではなく、社会の長期的な動向からもニーズを予見することがあります。そしてそのニーズを解決するために必要な研究テーマが自分の企業の政策に合うかどうか、また所属の研究者の能力の範囲にあるかどうかをも判断します。研究者の能力を越える場合でも、そのテーマが重要であり長期的なものであれば、研究者の育成からはじめることとなります。このように、研究管理者のもつとも大切な任務は、良い研究テーマを見つけて研究者の能力を最大限に引き出していくにあると思えます。

次に申し上げたいことは、研究テーマの学問上の新規性ということです。良い研究テーマとは、従来の研究成果の単純な延長または組合せではなく、そのテーマの遂行のためには新しい研究分野の開拓を必要とするという

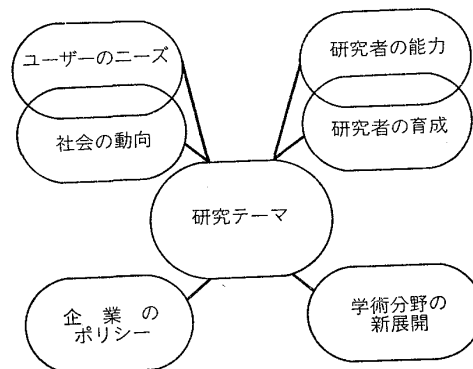


図1 研究管理者の仕事-良き研究テーマの発掘

種類のものでありたいと考えます。すなわち、研究者の能力は未知の世界に挑戦することによつて高められますし、それを望んでいます。したがって、良き研究管理者とは社会のニーズと学問の新しい展開を結びつけるコーディネーターであることができると思えます。

本日は、以上申し上げた趣旨から一つの例をお話します。すなわち、石油資源の開発というニーズが鋼管材料という金属学の分野にどのようなインパクトをもたらしたかという話です。最近エネルギー問題が盛んに論議されている折であり、鉄鋼と石油の結びつきの一端でも御理解下さればと存じまして申し上げる次第です。

2. 石油開発と鋼管への要求

2.1 石油井の開発と油井管への要求

天然ガスを含めて石油の開発はどのような傾向にあるかを考えますと、次のようになります。

- A 深層及び高圧油井の開発
- B 硫化水素及び炭酸ガス含有油井の開発

* 昭和53年4月4日 本会講演大会における西山賞受賞記念特別講演

** 住友金属工業(株) 工博 (Sumitomo Metal Industries, Ltd., 5-15 Kitahama Higashi-ku Osaka 541)

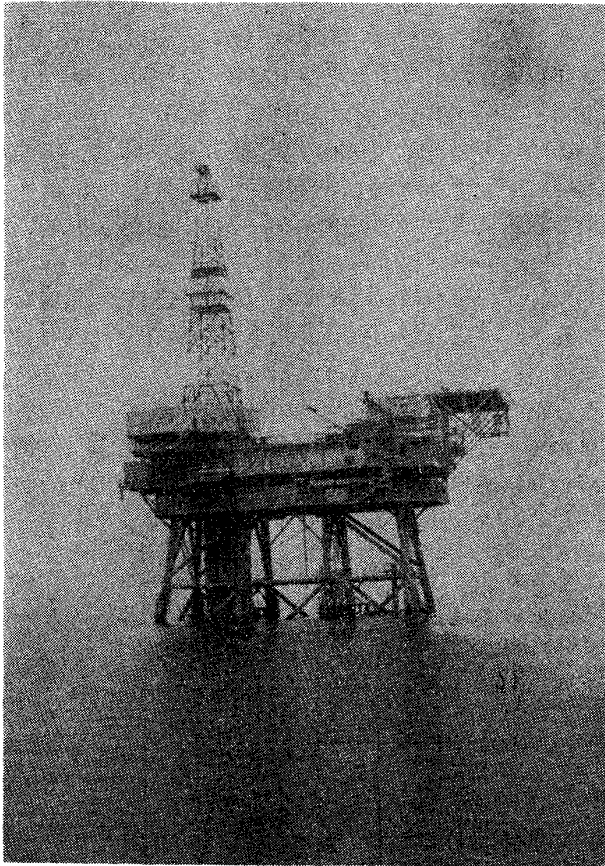


写真 1 油井管の使用される海底石油開発

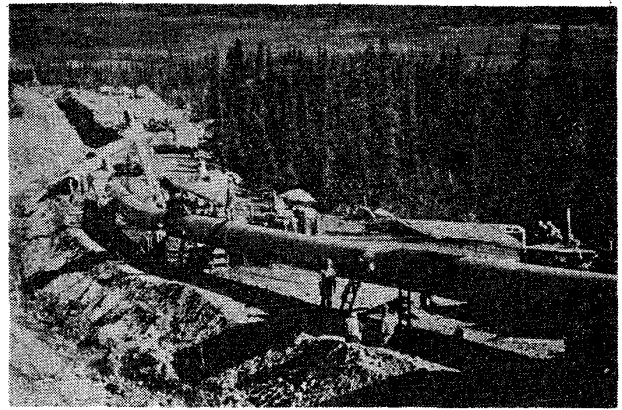


写真 2 アラスカの石油パイプラインの建設

C 海底油井の開発

D 寒冷地域油井の開発

最近では深井戸は 6000m 以上のものが増加して来ておりなかには 10000m 以上のものもあります。油井底部の圧力は 1000 気圧を越すものもあり、温度も 200°C 以上となります。さらに、硫化水素や炭酸ガスといった腐食性ガスを多量に含有する石油井や天然ガス井を掘らなくてはならないように最近はなつてきましたし、また北海のような海底やアラスカのような寒冷地域での開発が必要となつてきました。このような条件にあつた油井にはどのような性能が要求されるかをまとめると次のようになります。

- A 高強度性
- B 耐圧壊性
- C 耐食性
- D 継手部の気密性
- E 品質の信頼性

油井管は、ねじ継手により接続され、地上より地下の油層の方向に向つて吊り下げられていきますが、一番上にある油井管には下部に吊り下げられた全鋼管の重さがかかってくるのでそれだけの強度が必要となります。又、深井戸の油井底部付近では吊り下げられた油井管のまわりに大きな外圧がかかるため圧壊強度が必要となつ

てきます。次に、腐食性ガスを多く含有する井戸では耐食性鋼の使用が必要となります。この油井管を接続するねじ継手は、その下に吊り下げられた鋼管の重さに耐えるだけのねじの強度を必要とするとともに、鋼管内部を通過する石油や天然ガスの漏洩や外部からの流体の侵入を防止するため高度のシール性が要求されるようになってきました。もし、鋼管の強度不足や母材部やねじ部の庇により途中からストリングが切れる事故が発生すると、場合によっては数億円の費用をかけて開発してきた油井をすべて放棄せざるをえないこととなりますので、非破壊検査などの高度の検査方法を使つて油井管の品質を保証し、信頼性を高めることが強く要望されるようになってきました。

2.2 石油輸送の方向とラインパイプへの要求

先にお話したような石油井の変遷にともない、それから産出する石油や天然ガスの運搬方法も変つてくるようになりました。石油輸送の方向についてまとめると次のようになります。

- A 輸送量の増大
- B 寒冷地における輸送
- C 海底における輸送
- D 硫化水素、炭酸ガス含有石油の輸送

すなわち、石油および天然ガス開発の規模が大型化してきたことにより、それらの輸送量が増大してきました。又、開発地域より消費地域への輸送はパイプラインで寒冷地や海底を輸送するようになりました。腐食性ガスを含有する石油および天然ガスの輸送も必要となつてきました。そのようなことからラインパイプには次のような性能が要求されるようになりました。

- A 大径化、厚肉化
- B 高強度化
- C 高靱性
- D 耐食性
- E 溶接性

長距離パイプライン大型化により今まで最大外径が 48 in. (1219.2mm) までしか使つていなかったのが、

ソ連などで 56 in. (1422.4 m/m) のものを使用するようになりました。輸送圧力の高圧化にともない、最大肉厚も 1.000 in. (25.4 m/m) から 1.250 in. (31.8 m/m) へと増加するとともに高強度のラインパイプが要求され、今までは X-52 から X-60 程度のグレードが最高水準であつたものが最近では X-65 から X-70 のグレードの鋼管が要求されるようになりました。また、寒冷地で使用するため鋼の低温における靱性や、硫化水素、炭酸ガスに対する耐食性が重要となつてきました。かかる条件を満足させる鋼は往々にして溶接性の劣る材料になることがあります。ラインパイプの接続は溶接継手が主体でありますから、どうしても溶接性は欠くことはできないわけでありませぬ。

このように各種の要望に応じて油井管やラインパイプの研究開発はすすめられてきましたが、ここにそれらの代表的話題を二つ三つ拾つて述べてみたいと思ひます。

3. 高級油井管の研究開発

3.1 高張力油井管

米国における石油井の深さの推移について図 2 に示しますように、1930 年代は最高深さが 3000m 位でありましたが 1970 年代には 7000m を越す生産井が出てきました。試掘井の場合はもつと深く 10000m 近い井戸が掘られるようになってきました。このような深さの増加にともない、使用される油井管の性能も向上してきました。それとともに、油井管の規格として世界各国で利用されている米国石油協会規格 (API 規格) も多様化し、要求仕様も高度化してきております。表 1 に API 規格にある油井管のグレードとそれに使用される鋼種と熱処理方法を示しますが、昔は H-40 とか J-55 といった降伏点が 40000 psi (28.1 kg/mm²) か 55000 psi (38.7

kg/mm²) 以上程度の低グレードのものが多く使用されていましたが、最近では井戸が深くなるにともない P105 とか P110 といった降伏点が 105000 psi (73.8 kg/mm²) 以上もある高グレードのものが多く使われるようになってきました。それでも 5000m 以上の井戸ではもつと強度の高い油井管が要求される場合が出てきて、まだ API 規格に規格化されていませんが、降伏点が 150000 psi (105.4 kg/mm²) 以上の油井管も使用されるようになりました。この材料には Cr-Mo-V 鋼が使われ、熱処理として焼入れ焼戻しが行なわれますが、良好な高張力鋼を得るためにはその焼入性能が重要であり、化学成分の検討を行なうとともに熱処理技術の向上のため多大の努力を重ねてきました。特に高張力鋼の熱処理として焼割れの防止、低温衝撃性の向上と熱処理後の品質の均一性に

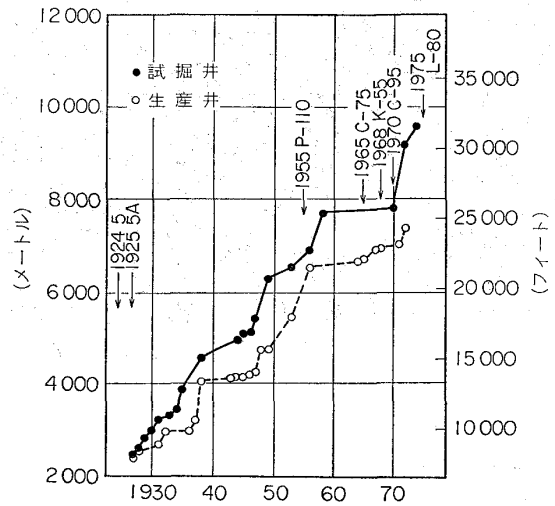


図 2 米国における試掘井及び生産井の最高深さの推移及び API の規格設定状況

表 1 油井管用 API Grade と使用鋼種・熱処理例

Spec.	Grade	Y · S kpsi (kg/mm ²)	使用鋼種例	熱処理例
5A	H-40	40 (28.1) ~	C-steel	As
	J-55	55 (38.6) ~ 80 (56.2)	"	"
	K-55	"	"	"
	N-80	80 (56.2) ~ 110 (77.3)	C-Mn	Q-T or N-T
5AX	(T/B) P-105	105 (73.8) ~ 135 (94.9)	C-Mn-Cr-(Mo)	Q-T
	(C/S) P-110	110 (77.3) ~ 140 (98.4)	"	"
5AC	C-75	75 (52.7) ~ 90 (63.3)	C-Mn	"
	L-80	80 (56.2) ~ 95 (66.8)	C-Mn-Mo	"
	C-95	95 (66.8) ~ 100 (77.3)	C-Mn-Cr-Mo	"

注) As: 圧延のまま, G-T: 焼入れ焼戻し, N-T: 焼ならし焼戻し。

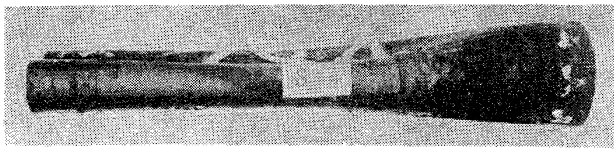


写真 3 油井管の圧壊試験結果

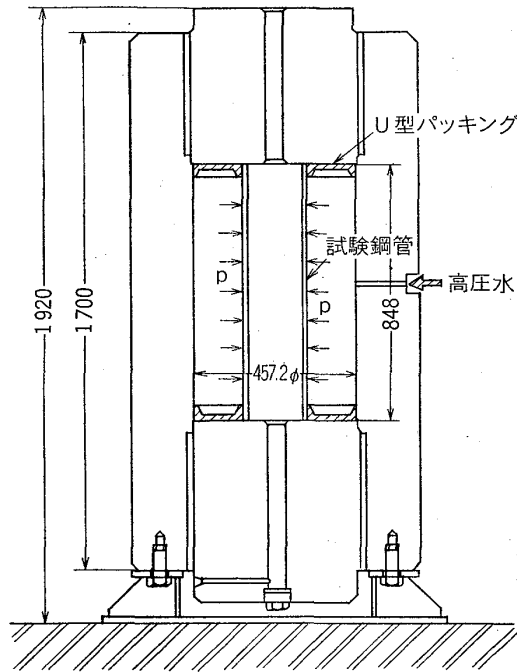


図 3 油井管の圧壊試験装置

ついて力を注ぎました。

3.2 高圧壊強度油井管

油井管の中でも、ケーシングといわれる外側に使われる油井管は、周囲の地盤から受ける外圧あるいは堀削された岩石や土砂を地中から地上に運ぶためのマッドによる外圧に対して十分な強度が必要であります。もし、この圧壊強度が不足していると写真3のように座屈を生じ、場合によってはねじ継手部分がこのためはずれて地上から吊り下げられていたストリングが途中から切れてしまうことになります。深井戸化が進むにつれて油井最深部で使用される油井管の受ける外圧はますます高くなる傾向にあり、それにともない高圧壊強度油井管の開発が行なわれるようになりました。圧壊強度を高くするには勿論油井管の材料強度の向上は必要ですが、偏肉度や橢円度といった管の形状を良くすることも必要です。また油井管の製造工程中に生じる残留応力を極力少なくする処置が必要となつてきます。このためには製管工場における品質管理をよりシビアにするとともに圧壊試験設備を設置してその影響因子の解析のため基礎的な研究を行ないました。

3.3 耐食性油井管

硫化水素ガスの含有量の高い油井の開発で問題になる

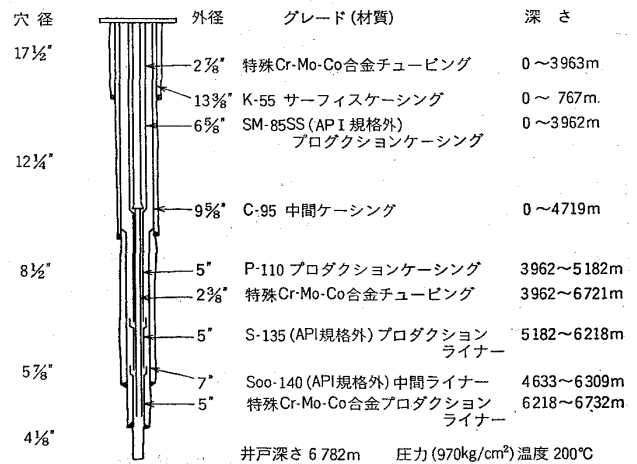


図 4 アメリカ・ミシシッピ州の超深度含硫化水素ガス井の井戸構成

のは、当然のことではありますが応力腐食割れによる材料の欠損であります。米国ミシシッピ河口地域は早くから硫化水素ガスを 30% 前後も含有する天然ガスを埋蔵していることで知られており、この油井に使用する油井管を需要家より開発するように私共はたのまれたので、長年にわたり研究を続けてきました。図4に示しますようにこの油井は深さ 22000 フィート (約 6700m) もあるため、本来は高強度油井管を使用したいところですが高強度鋼ほど応力腐食割れには不利な材料となるので、この油井管の材料設計は、ある適当な強度で肉厚を厚くすることによつてカバーすることが必要となつてきます。このため7インチ (177.8 mm) の外径で肉厚が 1 in. (25.4 mm) を越えるようなケーシングで降伏点が 90000 psi (63.3 kg/mm²) 程度の耐食性の良い材料を開発することになりました。この材料には Cr-Mo 鋼を使い、ほかの油井管と同様に熱処理を行ないませんが、硫化水素ガスによる応力腐食割れは鋼の硬度が高いと発生しやすく、反対に硬度を下げると鋼の強度が不足する結果となるため、硬度をある狭い範囲内に入れるように熱処理条件をコントロールする必要があります。そこで、熱処理方法については種々の工夫を行ない、厚肉にもかかわらず内質までなるべく均一な金属組織になるように考えました。

3.4 品質の信頼性

油井管の使用条件が苛酷になるにともない、その品質の信頼性がますます問われるようになりました。高強度油井管の材料底や焼われ等の検査のため、高度の非破壊検査設備が採用されるようになりました。図5にその検査システムを示しますが、高グレードの場合、製管された鋼管は自動磁気又は超音波探傷検査を受けたあと熱処理され、もう一度同じ検査を全数全長にわたり受ける仕組です。その検査設備の一つとして、私どもでは SAM と名づけておりますが、自動磁気探傷装置を開発しまし

た。図6はこの装置の原理を示したのですが、検査をする鋼管を磁化すると庇のある部分の磁束が漏洩することを応用した方法です。普通はこの部分に鉄粉をふりかけて肉眼で検査をするところをホール素子を使用して自動的に検査をする装置であります。この素子が小さくできればできるほど小さな庇が検査できるので、この素子の大きさがキーポイントになります。たまたまソニー株式会社が開発されたことを聞き、ソニーに使用を申し出てホール素子にこれを採用するようになったことがSAM開発のきっかけとなりました。この結果、大河内賞をいただいたことがあります。

4. 寒冷地用ラインパイプの研究開発

4.1 ラインパイプ低温破壊の研究

次にラインパイプについてお話をしたいと思います。ラインパイプは、多量の石油、天然ガスを輸送するため、その外径寸法は1m前後と大きい肉厚はそれほど厚くありません。又、アラスカのTAPS石油パイプラインの場合のように総重量が約50万tと莫大な数量であるため、その製造工程は多量生産方式を採用する必要があり、熱処理方式のような生産量に制限の生じる方式は問題となります。それと同時に、そのパイプラインが寒冷地で施工されるとなると、低温におけるラインパイ

プの破壊について心配する必要があります。今までに鋼板の低温破壊については多くの経験もあり研究がなされてきましたが、鋼管については未知の現象も少なくありません。今回はその鋼管の破壊特性について述べてみたいと思います。

ラインパイプの破壊特性には脆性破壊のほかに鋼管特有の不安定延性破壊があります。石油ラインの場合は脆性破壊に注意する必要がありますが、天然ガスラインの場合は脆性破壊ばかりでなく長距離にわたって不安定延性破壊が伝播していくことに注意する必要があります。この場合は一度に天然ガスが噴出して大きな火災を起すことになるので、仮に破壊しても伝播長さをできるだけ短かくして止めるに越したことはありません。図7にラインパイプの割れ速度と減圧速度の比較を示しますが、輸送流体が石油の場合は非圧縮性流体の特性のためパイプラインが破壊すると急速に管内圧力は減少します。その減圧速度は1500m/secから2200m/secですが、パイプラインが脆性破壊により割れて行く速度は600m/secと遅いため石油の場合はパイプラインの破壊がいつまでも続くことはありません。このため石油パイプラインは破壊発生要因を究明していかにより破れにくいラインパイプを作るかが重要な話となつてきます。輸送流体がガスの場合には、その減圧速度は脆性破壊速度より遅いため、き裂は石油の場合より多く走ります。一例として、55%のガスがぬけ出した状態の減圧速度はラインパイプの延性破壊速度より遅い時があり、延性破壊が長距離にわたって割れが続いて行くことがあります。ガスの場合は、脆性破壊や不安定延性破壊を防止するにはどのような鋼を作るか、それにはいかなるクライテリアにより破壊特性を究明していくか考える必要があります。そこでたくさんのラインパイプを種々の条件で破壊する試験を行ないました。写真4は私どもの波崎研究センターの近くの空地で試験した例であります。

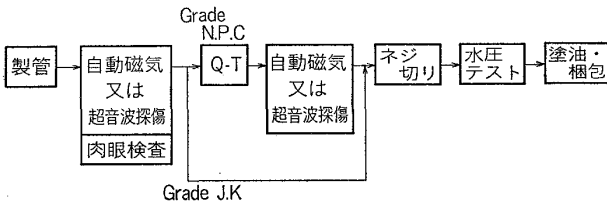


図5 油井管の検査システム例

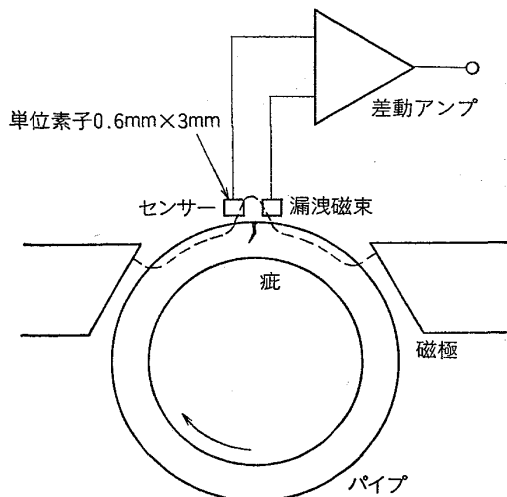


図6 非破壊検査 SAM の機構

4.1.1 脆性破壊の伝播停止

鋼管実物による低温破壊試験結果と実験室的靱性試験結果について研究したものをまとめると図8のようになります。鋼管の脆性破壊の伝播特性で、伝播停止したものは図中で白丸印で記入されています。点線で示した伝

	速度 (m/sec)				
	0	500	1000	1500	2000
石油 減圧波					■
脆性破壊速度			■		
ガス 減圧波		■			
延性破壊速度	■				
55%のガスがぬけ出した状態の進行速度	■				

図7 ラインパイプのワレ速度と減圧速度の比較

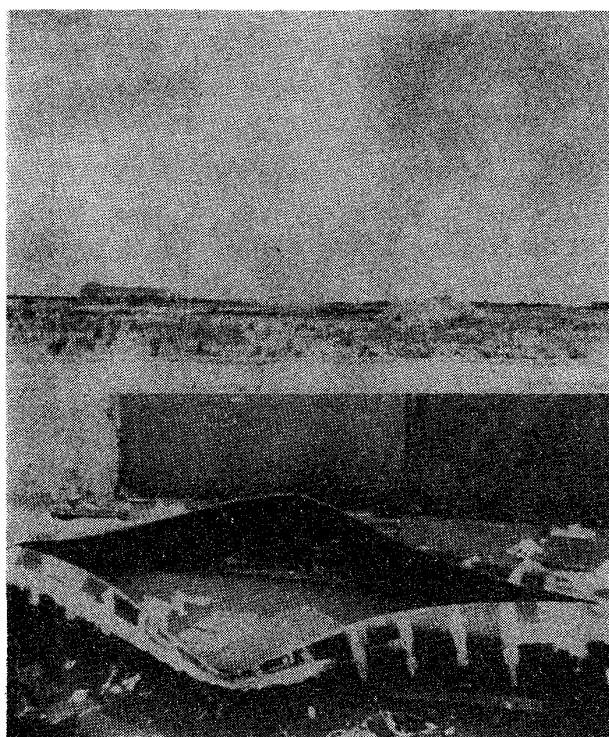


写真 4 単管による実管バーストテスト

播停止限界曲線は実験室で二重引張り試験で得た条件と非常に似ていることより、鋼管の低温における脆性破壊は二重引張り試験で予想がつけられることになります。このように脆性破壊の伝播に対するクライテリオンは十分に確立されていると申し上げてよいと思います。

4.1.2 不安定延性破壊の伝播停止

一方、不安定延性破壊は従来の鋼板の破壊には起こらなかった現象であり、このため最近世界各国で種々試験が行なわれるようになりました。日本国内では試験のできる適当な場所がなかつたため、私どもは米国のバテル・メモリアル研究所に依頼して実験をさせてもらった例があります。図9はオハイオ州 Athens の実験場の概略図ですが、この実験の場合長さが約 200m のパイプラインを設置して、その中間には試験用鋼管が入られます。近くを通っている天然ガスラインよりガスをもらつてコンプレッサーで昇圧して試験用パイプラインを一定の圧力の天然ガスで充満します。試験温度については冬の寒い時をねらつて実験を行ないました。この実験の様子は写真5にあります。

この不安定延性破壊の伝播停止をするためのクライテリオンはなにかということも私どももいろいろと研究を重ねてきましたが、ラインパイプ破壊試験の試験温度におけるシャルピーのエネルギー値と不安定延性破壊の伝播停止とはかなりの相関関係がありそうだとということが各国の研究者によつて云われております。しかし、シャルピーの吸収エネルギー値を最少限いくらにすべきかといつた細かい点でラインパイプの破壊機構の解析の理論

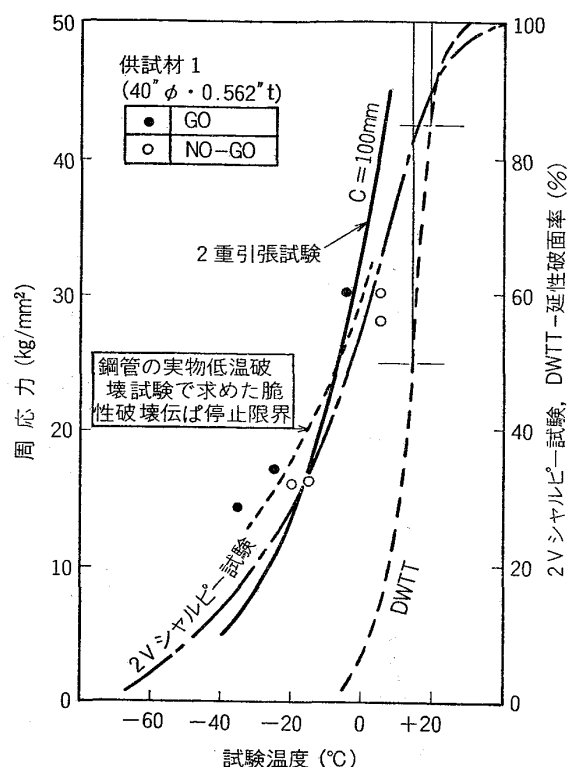


図 8 鋼管の実物低温破壊試験結果と実験室的靱性試験結果の比較 (供試材 1)

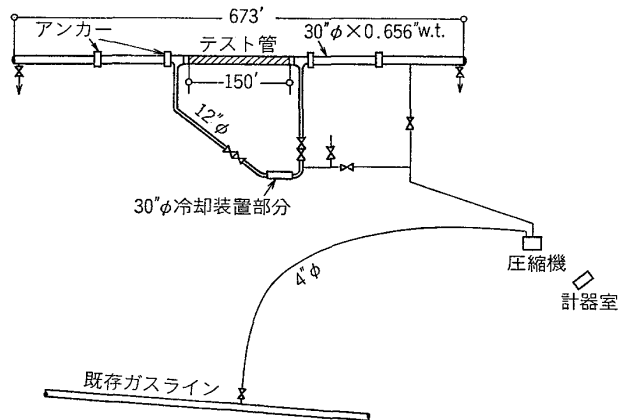


図 9 米国 Athens の不安定延性破壊テスト場

が確立されておらず、各国の研究者により今後さらに研究をすすめる必要があります。

4.2 高靱性ラインパイプの開発

いずれにしても寒冷地で使用されるラインパイプは低温靱性の高いものを作る必要があります。表2はどれだけの吸収エネルギー値がラインパイプに要求されてきているかを表わした例であります。この値は年とともに高い数字が要求されるようになっていきました。ラインパイプの低温靱性の向上をはかる主な対策に次の方法があります。

A 化学成分：低炭素、低硫黄、添加元素

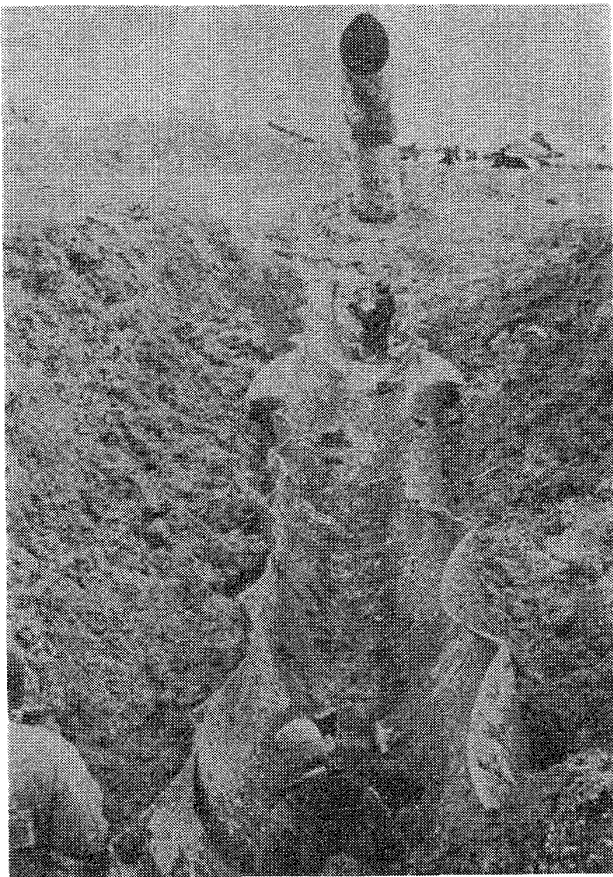


写真 5 不安定延性破壊テスト結果

表 2 大径管材の吸収エネルギー値の変化の一例

製造年	向 先	シャルピー吸収エネルギー保証値
1969~	TAPS (アラスカ)	-10°C, 30ft-lb (4.2kg·m)
1972~	BP (北海)	-10°C, 45ft-lb (6.2kg·m)
1973	AGL (オーストラリア)	0°C, 50ft-lb (6.9kg·m) 相当
計画中	GAGSL (北米大陸)	100%延性の最低温度, 80ft-lb (11.2kg·m)

- B 制御圧延：低温加熱，制御圧延
- C 溶接技術：溶接材料，溶接条件
- D 熱処理：焼入・焼戻技術

まず，化学成分では炭素量は低い方がよいし，硫黄分を下げるほど低温靱性は向上しますが，炭素量が低くなると強度が低下する傾向を示すのでこれを上げるために Nb や V といった添加元素が必要となつてきます。また，ラインパイプの素材である厚板の圧延に際しては，Controlled Rolling という低温加熱したスラブをシビアな温度制御をしながら圧延したり，溶接に際しては低温靱性の高い溶接材料をなるべく入熱の少ない溶接条件で溶接することが必要となつてきます。熱処理方式の採用は低温靱性向上の一つとして継目無鋼管のラインパイプに

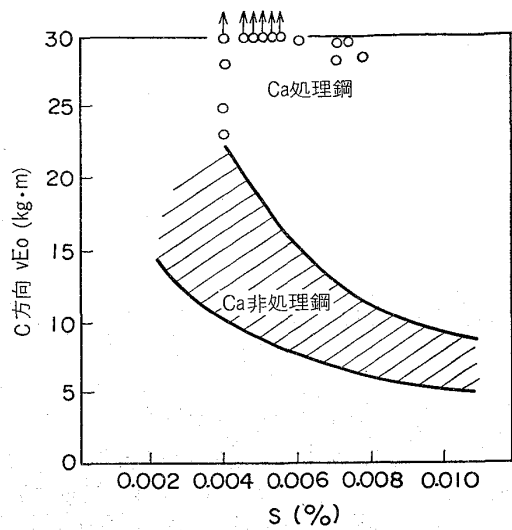


図 10 ラインパイプ材の管周方向 shelf energy におよぼす Ca 処理の影響

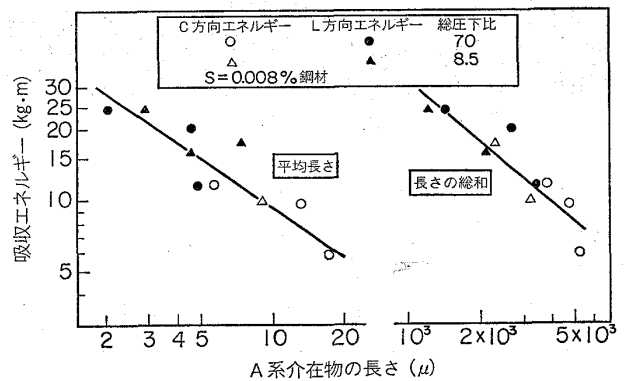


図 11 介在物長さ，L，C 方向吸収エネルギーの関係 (測定面積 5 mm²)

は採用されることがありますが，大径溶接鋼管の場合は未だ試験段階にあります。次にこのような低温靱性向上の研究開発について二，三の例を申し上げてみたいと思います。

4.2.1 化学成分の検討

図 10 はラインパイプ材の硫黄分と試験片の衝撃値の関係を示すもので，硫黄分を下げると非常に衝撃値は上つてきますが，それにカルシウム処理を加えるとさらに上つてくるということをあらわしています。このように硫黄分を下げたりカルシウム処理をするのは鋼中の介在物が衝撃値に大きな影響があるからであります。図 11 に示すように，A系介在物の長さが短いほど衝撃値は高くなるし，A系介在物の総和を減らすことにより衝撃値は高くなります。鋼中の硫黄分の低下は介在物の個数を減らし，カルシウム処理は介在物の形を球状化するので圧延しても介在物長さが伸びないようにすることとなります。

4.2.2 制御圧延の検討

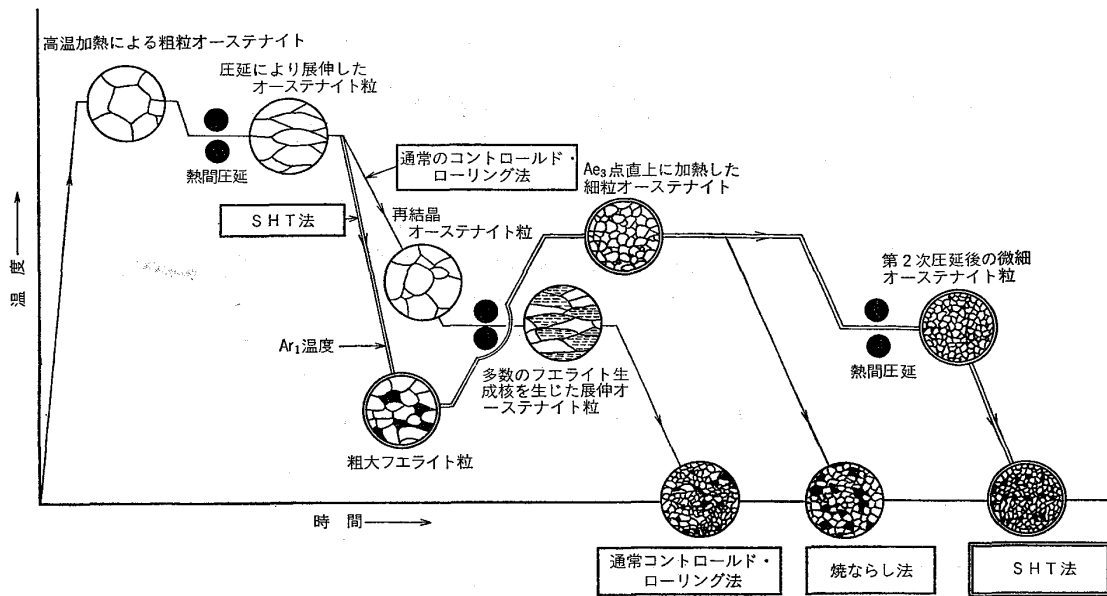


図 12 SHT 法とコントロール・ローリング法および焼ならし法との各製造プロセスでのマイクロ組織変化の模式図

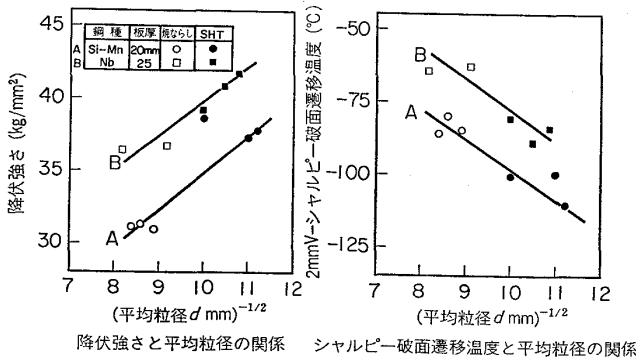


図 13 SHT 法と焼ならし法での代表機械的性質の比較

つぎに、制御圧延による低温靱性の向上について図12によつて申し上げたいと思います。普通圧延方式では加熱炉で鋼材を加熱すると鋼組織はオーステナイト状態であり、これを圧延機で圧延するとオーステナイトが加工を受けて変形をします。普通の Controlled Rolling 方法ではこの変形を受けたオーステナイト粒を再結晶させてからもう一度変態点附近で圧延をし、多数のフェライト生成核を生じた展伸オーステナイト粒にしてから冷却することにより鋼組織を細粒化します。これをさらに完全なものにするために、私どもは一回圧延された鋼材を変態点以下の温度に下げて、いつたんフェライト粒を作つてからもう一度加熱することとしました。その結果、鋼組織は細粒化したオーステナイトとなるので、これを変態点附近で圧延するとさらに細粒化することができました。私どもはこの開発した方式を SHT という名前をつけていますが、変態点附近の鋼組織の変化と機械的性質の関係を応用した新しい熱間加工の分野と思つて

おります。図 13 にはこの SHT 法による機械的性質を示しますが、SHT 法の方が焼ならし法よりも平均粒径を小さくすることが出来、同一の鋼種でも高強度でシャルピー破面遷移温度も低くなります。図 14 は SHT 法を採用した厚板工場のレイアウトであります。

5. 耐食性ラインパイプの研究開発

5.1 ラインパイプ耐食性の研究

もう一つ、ラインパイプの課題として耐食性の問題が最近非常に大きく取り上げられるようになってきました。ある海底パイプラインで、運転開始後、間もなくして漏洩事故が発生したので、その部分のラインパイプを調査してみるとパイプの肉厚方向にステップ状の割れが入っていたのが漏洩の原因であることがわかりました。この割れ原因はなにかということ、にわかに耐食性に関する研究が盛んとなり、次のような方向に進んで行きました。

- A 腐食事故原因の究明：水素誘起割れの解明
- B 腐食テスト方法の開発
- C 耐食性鋼の開発

先ほど述べましたように、硫化水素が石油や天然ガスに昨今は多量に含まれるようになってきましたが、その硫化水素がラインパイプ内表面である鋼との境界面で反応を起して水素イオンが出来、水素原子が鋼中に浸入して介在物のまわりに集ります。介在物のまわりでは水素圧力が大きく上昇するためにその介在物先端より割れが発生することがわかってきました。これを水素誘起割れといい、図 15 にその現象を模型で示します。また、図 16 には割れの発達状況を示しますが、介在物先端が水素圧力の増加で塑性変形を起しますが、その領域が増加す

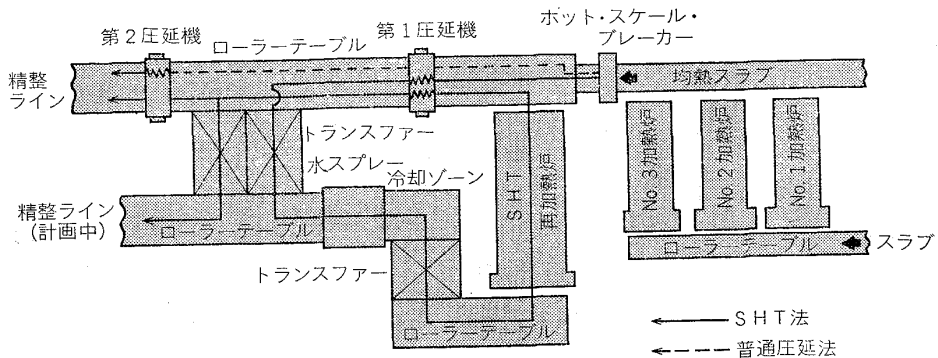


図 14 SHT 法のための工場レイアウト

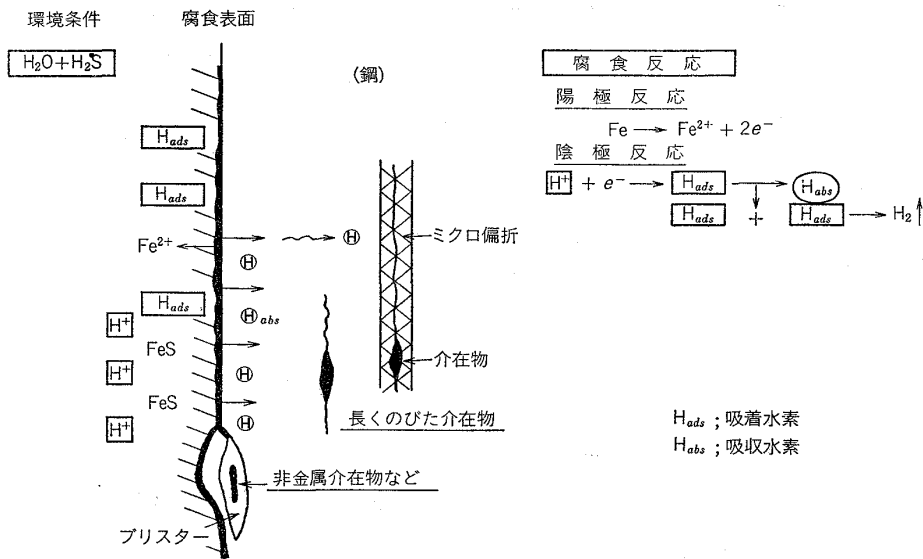


図 15 水素誘起割れの機構

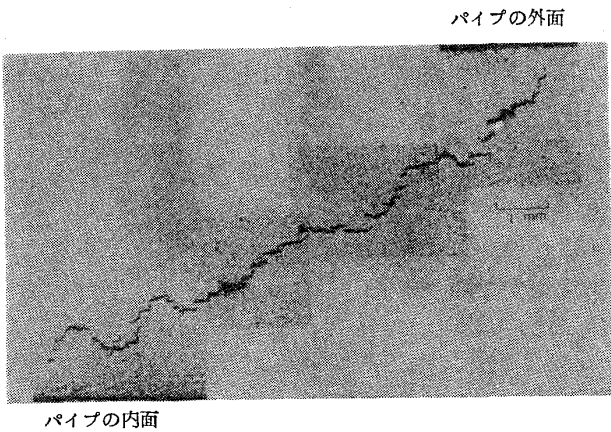


写真 6 水素誘起割れの实例

ることにより他の割れ部分と次第につらなっていくこと
になります。

つぎにこの水素誘起割れを防止できる鋼を開発するに
は実際のパイプラインの割れ発生とその環境条件との関
係を実験室内で再現できるか、あるいはこの割れ現象に

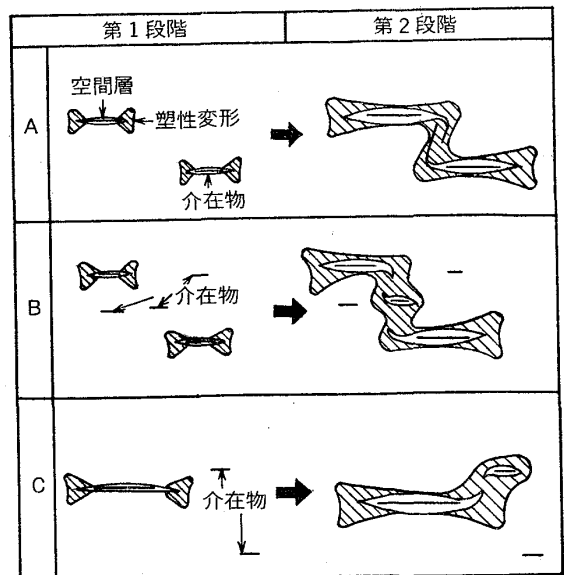


図 16 水素誘起割れ発達状況

相関関係のあるテスト方法を探ることがその後の研究に大変に便利なこととなります。そこで私どもの重要客先の一つであるある石油会社と共同で研究をしまして、人工海水内に硫化水素を飽和させた水溶液内でラインパイプ材に水素誘起割れを発生させ、その割れ発生率をもつて鋼の耐食性能を判定する方法を確立しました。

5.2 耐食性ラインパイプの開発

水素誘起割れに強い鋼の開発をすすめてきますと、先ほどの低温靱性の高い鋼の開発と大変似かよつた次の対策が良いことがわかつてきました。

- A 低硫黄化
- B 銅の添加
- C 介在物の球状化
- D 異常組織の防止

図 17 にありますように、鋼中の硫黄分を下げると水素誘起割れの発生率が少なくなつてきて、硫黄含有量のオーダーが 0.005% 以下になると低温靱性向上の時と同じように極端に割れ発生率が減少します。これは硫黄分の低下が介在物の数を減少させるため、硫黄含有量が低くければ低いほど割れ感受性の少ない良い鋼となるわけです。近い将来は硫黄分が 0.001% 以下というのが要求され、又そのような鋼が製造できるようになると思います。

次の対策としては鋼に銅を添加することが考えられます。銅の添加された鋼の表面は硫化水素が反応すると銅の硫化物による被膜が形成されて、鋼の表面を覆うことから水素の侵入を防止することができます。銅を 0.30% 前後入れますと侵入水素量が減少してくることがわかります。しかし、この銅の効果も腐食環境の重要要素である酸性の比較的弱い時で、具体的には pH が 4.5 以上には良好ですが pH が下つてくると鋼表面の銅硫化物も溶解してしまい効果がなくなつてきます。このようになると介在物の球状化を行なう必要があり、高靱性鋼の開発の時に述べましたようにカルシウム処理をすることと

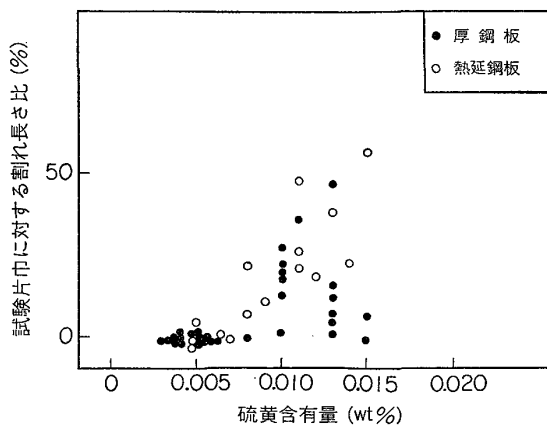


図 17 ラインパイプ・水素誘起割れに対する硫黄分の影響

なります。図 18 には Ca と S の比と割れ発生率の関係をあらかわしてありますが、Ca と S の比をある程度の値にもつていくと割れが減つてくるのがわかります。

6. 結 言

以上のように、石油開発が進むにつれて鋼管に対する種々の要望が出され、われわれはその要望に応じるべく努力をかさねてまいりました。中でも石油開発が鋼管の冶金学的分野へおよぼしたインパクトの大きいものを集約してみますと次のようになります。

- A 極低 S 鋼製造技術
- B A系介在物の少ない鋼の製造技術
- C 介在物の定量的取り上げ方
- D 加工熱処理
- E マイクロアロイ鋼
- F 水素誘起割れ及び応力腐食割れ
- G 高圧湿潤炭酸ガス腐食

今まで考えられないような硫黄分の低い鋼を作る技術が生れてきましたし、A系介在物の少い鋼を製造するばかりでなく、その介在物を球状化して圧延されても長く延びないようにする技術も生れてきました。少し大げさないい方かもしれませんが、介在物と機械的性質の関係の定量化とでもいう考えが必要となつてきました。若い者にはよく“金属学というのはまだ本当の意味の学問の体系をなしていない。”といつているのですが、“どうも定性的な表現が多過ぎる。もし金属の性質とその成分なり、金属組織なりというものとの間を簡単にコンピューターで計算できるようになれば、学問らしい学問になる”。と申しております。そういう意味で、介在物の少ない鋼ができてきますと、機械的性質とその他の性質を定量的な方法で取り上げられるなにかのきつかけになるのではないかと思いますし、又将来そのような方向にいつてほしいと思つております。

もう一つは加工熱処理の問題ですが、変態点附近で加工をするといつた新しい学問的領域が現われてきましたが、この制御圧延をマイクロアロイ鋼 (0.1% 以下の微

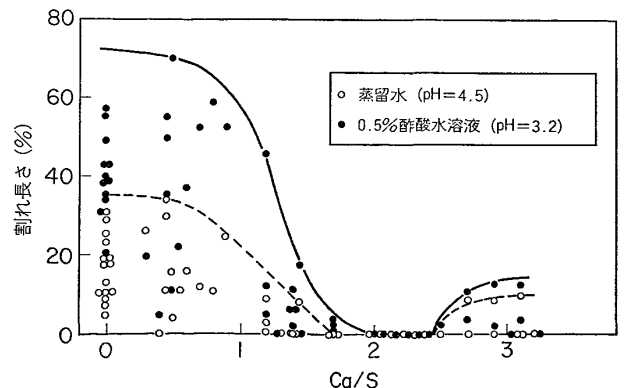


図 18 Ca/S と割れ長さの関係

量の Nb, V や Ti を添加した鋼) に適用すると鋼の性質を大きく変えることができるという問題も出てきました。又、先ほどの水素誘起割れ以外に本日はお話をしませんでした。炭酸ガスに富んだガス田のための開発もあります。特に油井深さが 10 000 m 以上で圧力が 1 000 気圧以上といった高温高圧で起こる腐食問題というものが新しい分野であろうと思われま

す。少し早口で話をしまして恐縮ですが、私のいわんとするところは、かかる世の中のニーズというものと研究に従事している者といかに結びつくか、ひいては学問の発

展にどのように結びついていくかを考えて行く必要があるということとして、この辺をできるだけ広い範囲で見通して良い方向にコーディネートして行くのが研究管理者の役目であろうと思います。私はこれが十分に出来たと申し上げているのではなく、むしろ満足にできなかったことを反省しております。以上、はなはだ拙いお話をしまして恐縮ですが、これで私の西山賞の受賞の責めを果たさせていただきたいと存じます。どうもありがとうございました。