

© 1983 ISIJ



大径高圧ガスパイプラインの実管破裂試験

大日方 達 一*

The Full Scale Burst Test of Large Diameter, High Pressure Gas Pipelines

Tatsuichi OBINATA

1. 緒 言

アラスカ、カナダ等北極海沿岸の極寒かつ遠隔の地での天然ガスの開発が進むと共に、天然ガスの輸送を目的としたパイプラインは、経済的な見地から大径高圧化の傾向を強めている。このような大径高圧パイプラインにおいて、ここ数年来注目されているのは不測の原因によりき裂が発生した場合延性破壊ではあるが、き裂が高速で数百メートルも伝播するいわゆる不安定延性破壊が発生する可能性がある点である。これは大径高圧パイプラインの安全性を確保する上に非常に重要な問題であつて、欧米では Battelle Memorial Institute, AISI, BGC 等が大規模なラインパイプのバースト試験を実施し、不安定延性破壊についてそれぞれ独自の知見を発表して来た。

我が国は高級ラインパイプの生産では世界のトップクラスにあり、この不安定延性破壊の解明に参加することが国際的に期待され、要請されて来た。このため、日本鉄鋼協会に高級ラインパイプ共同研究委員会を設置し、川崎製鉄(株)、(株)神戸製鋼所、日本鋼管(株)、新日本製鉄(株)及び住友金属工業(株)の鉄鋼5社の参加のもとに、国内において大規模なラインパイプの実管バースト試験を共同で推進した。この共同実験では、UOE プロセスで製造した外径 48", 肉厚 0.720" の API 5LX X70 のラインパイプを用い、昭和 53 年から昭和 56 年にかけて、空気圧のもとで 5 回バースト試験を実施した。これらの実管バースト試験の結果から、不安定延性破壊に対するラインパイプの停止性能がシャルピー吸収エネルギーにて評価出来ること、及び破面に認められるセパレーションが停止性能に影響しないことを確認している。

高級ラインパイプ共同研究委員会では、現在、上記知見を天然ガスを用いた実管バースト試験にて確認するため、British Gas Corporation に実験を委託しており、第 1 回バースト試験は昭和 57 年 10 月に予定されてい

る。いずれにしても、国内での実管バースト試験はすでに完了しているので、高級ラインパイプ共同研究委員会の活動状況を取りまとめ報告することにする。

2. 高級ラインパイプ共同研究委員会について

2-1 設置の背景

UOE プロセスにてラインパイプを生産している鉄鋼4社は、早くから高圧ガスパイプラインの不安定延性破壊の重要性に注目し、昭和 49 年にラインパイプ破壊機構共同研究会を設置して、共同で欧米における大規模な実管バーストの実施状況を調査すると共に、実験室的に不安定破壊をシミュレートし得る試験法につき討議を重ねて来た。

Battelle Memorial Institute 等の欧米研究機関は、相当数の実管バースト試験の成果をもとにき裂伝播停止条件式を導き出し、さらに、伝播停止に必要な限界エネルギー値を求めて来た。これらは当然ラインパイプの仕様に反映するように配慮されて来た。ラインパイプ破壊機構共同研究会の調査において問題となつたのは、上記のうち、米国での取りまとめ結果であつて、我が国で広く採用されている強度の制御圧延を行つた鋼板から製造したラインパイプについては彼らのき裂伝播停止条件式に合わないという点であつた。このような点を考慮すると共に、世界の主要ラインパイプ輸出国の立場から不安定延性破壊の現象を把握し、我が国のラインパイプに対して適正な評価を行うことの必要性を認め、国内で共同で実管バースト試験を実施することを決定した。

昭和 53 年初めより、大径鋼管メーカー4社は共同で国内試験場の選定作業を推進し、関係官庁の了解も得て、最終的に釜石鉱山(株)釜石鉱業所中の沢推積場での実施を決定した。この共同実管バースト試験は、諸般の事情からすべて自己資金によることとし、日本鉄鋼協会の中に、試験の計画、推進を目的として高級ラインパイプ共同研究委員会を設置した。この委員会は、大径鋼管メーカー、川崎製鉄(株)、日本鋼管(株)、新日本製鉄(株)

昭和 57 年 9 月 8 日受付 (Received Sept. 8, 1982)

* 本会高級ラインパイプ共同研究委員会委員長
新日本製鉄(株) (Nippon Steel Corp., 2-6-3 Otemachi Chiyoda-ku 100)

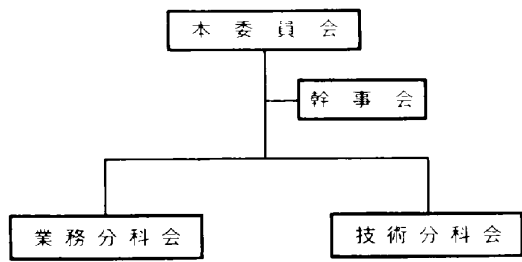


図 1 高級ラインパイプ共同研究委員会の組織

住友金属工業(株)の4社と特別参加の(株)神戸製鋼所をもつて構成されている。

2.2 組織及び活動状況

高級ラインパイプ共同研究委員会は、図1に示すように委員会内部に幹事会、技術分科会及び業務分科会を設置し、業務が円滑に推進できるようにしている。技術分科会は実験計画、実施具体案の作成及び推進、供試鋼管の仕様の検討、実験結果の解析を担当業務とし、業務分科会は実験場ならびに実験施設の検討及び設営、これらの実施に必要な業者との契約の締結、業者の監督等を担当業務としている。一方、幹事会は委員会業務の全般につき、調整、推進することになっている。また、実験にあたっては、技術分科会が中心になつて図2に示すような組織を作り、関係業者を指揮して実験を遂行した。

この共同実験の一番大きな特徴は、委員会を構成する各社より参加の研究者が、最初から共同で実験計画の作成、計測方法、起爆方法等の検討、実験後のデータ収集及び解析にあつたことにある。従つて、通常の研究において、研究者が研究計画の一部をそれぞれ分担して実験を進め、その成果を持ち寄つて共同研究の目的を

達成する行き方と大きく異なつている。高級ラインパイプ共同研究委員会は、昭和53年から昭和56年までの3年間に、予備試験2回、本試験5回を全くトラブルなく、無事故で遂行することができた。

3. 実験設備及び方法

実管バースト試験の実施に先立ち、試験ラインの設計、施工、き裂発生方法、き裂伝播中のき裂速度、内圧変化及び管体のひずみ変化の計測方法等について、十分な検討を行つた。以下簡単に紹介する。

3.1 試験ラインの設計、施工

試験ラインの概要は図3に示す。試験ラインは海外での実施例も参考にして全長150mとした。試験管は中央部70mに配置し、この両側にそれぞれ長さ40mのガスリザーバー管を配置した。リザーバー管は、き裂が伝播中に試験ライン端からの反射減圧波の影響を受けないようにすることを目的としており、40mの長さがあれば、き裂の平均速度120m/s(予想される最低値)でも問題ないことを確認している。

試験管はAPI 5LX X70、外径48"、肉厚0.720"のUOE鋼管を用いることとし、リザーバー管は同一グレードで外径48"、肉厚0.875"のUOE鋼管とした。なお、リザーバー管のうち試験管に隣接する部分には、厚さ0.875"、長さ2mの補強帯をクラックアレスターとして設置した。試験管及びリザーバー管の周溶接は低水素系溶接棒を用い、可能な限り内外面より入念な溶接を行い、次いで、X線検査、超音波検査及びカラーチェックにて溶接部の検査をした。このような溶接施工により、バースト試験の実施にあたり、溶接部にてトラ

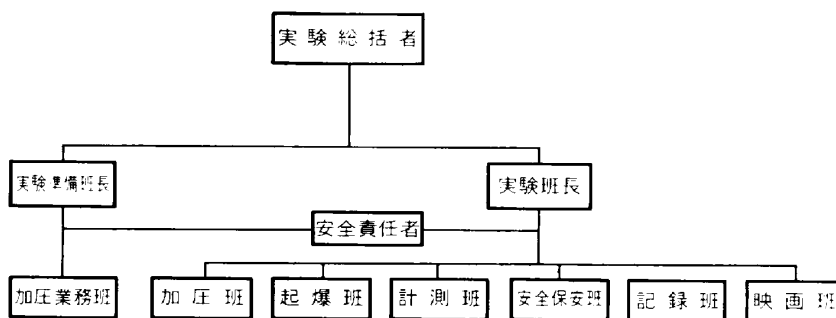


図 2 実管バースト試験の実行組織

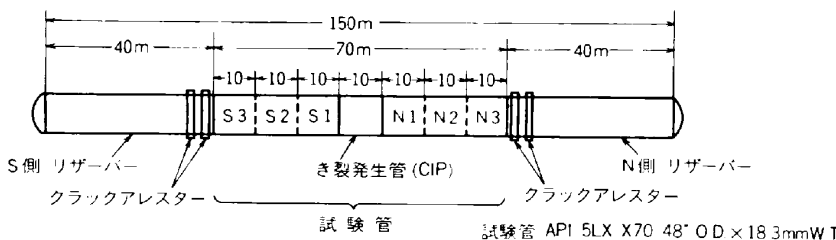


図 3 試験ラインの概要

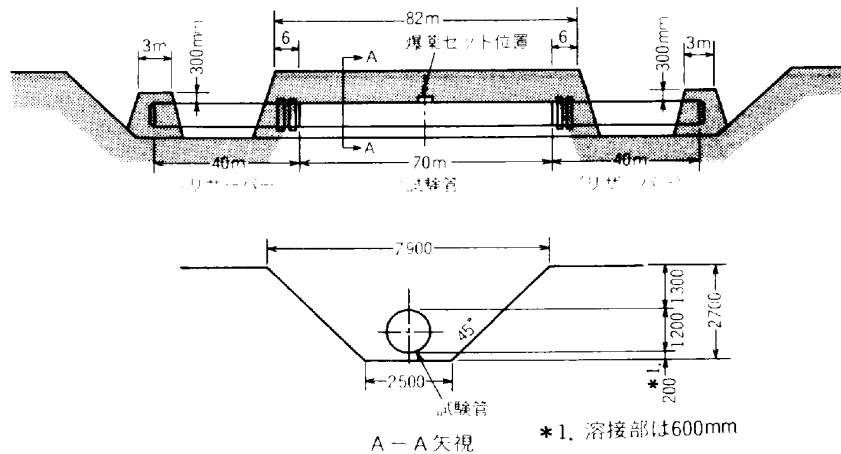


図4 試験ラインの埋設要領

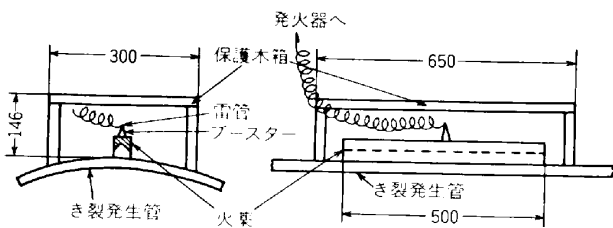


図5 き裂発生方法

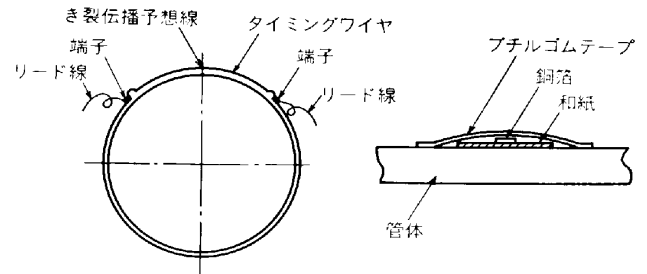


図6 き裂速度測定用タイミングワイヤの貼付方法

ブルを経験することは全くなかった。

バースト試験はガス組成を除き、できるだけ実際の埋設ガスパイプラインに近い状態で実施することを考え、試験管部分を地下1.3mの深さに埋設することにした。試験ラインの埋設要領は図4に示す。

3.2 き裂発生方法

管軸方向にき裂を付加する方法として、き裂発生管に事前に人工切り欠きをつけた後火薬で貫通させる方法、あるいは貫通切り欠きを機械加工でつける方法もあるが、海外での実施例も調べて、事前に管軸方向の切り欠きをつけることなく、火薬だけで貫通き裂を付加する方式を採用した。

専門業者の協力により事前に起爆試験を行つた上でバースト試験に適用した。図5は起爆方法を示す。火薬は長さ500mmのもので、き裂発生管の12時の位置に管軸方向に合わせ、30mmのすき間を置いて設置した。起爆は試験ラインより約500m離れた位置で、発火器で点火することにより実施された。

3.3 計測方法

(1) き裂速度

き裂速度は管体に1500mm間隔にタイミングワイヤを貼付し、き裂がそれを破断する時間を測定してその間の平均速度を求めた。タイミングワイヤは和紙-銅箔-ブチルゴムテープから成っており、管体への貼付方法は図6に示すとおりである。タイミングワイヤは各測定点に

2本ずつ貼付され、それぞれ別の回路に組み込まれて、破断時間のダブルチェックが行われるようにした。

(2) 圧力変化

き裂伝播中の圧力変化はひずみゲージ式圧力変換器を用いて測定するようにした。第1回から第3回までのバースト試験では、各試験管に2本の圧力変換器を取り付けて、破裂時の圧力変化を測定したが、第4、5回のバースト試験では、さらに精密な圧力測定をするため、き裂発生管から2番及び3番の試験管における圧力変換器の数を増やした。

(3) ひずみ変化

き裂伝播予想線の上にひずみゲージを貼付して、管軸方向及び管周方向の塑性ひずみを測定するようにした。

4. 実験結果

4.1 供試鋼管

実管バースト試験は不安定延性破壊に対する停止性能の評価法と、停止性能に及ぼすセパレーションの影響を明らかにすることを目的としている。従つて、供試鋼管は、すでに述べたように、API 5LX X70 外径48", 肉厚0.720"のUOE鋼管であるが、セパレーションの程度を変えた制御圧延鋼板と焼入焼戻鋼板から製造するようにした。

試験ラインにはき裂発生管(CIP)を中心に置き、そ

表 1 試験鋼管の配列と機械試験値

試験番号	試験温度 (°C)	試験管配置 機械試験値	S3	S2	S1	CIP		N1	N2	N3
						S	N			
No. 1	+12		CR20	CR14	CR8	CIP5		QT9	QT19	QT29
		YS (kgf/mm ²)	53.8	51.0	53.9	56.5		53.6	49.2	—
		TS (kgf/mm ²)	62.4	63.4	67.3	66.6		68.9	61.4	—
		Cv (kg·f·m)	20.6	14.3	8.5	5.2		9.4	19.2	—
		vSI _r (mm ⁻¹)	0.13	0.12	0.31	0.24		0	0	—
		D _{PN} (kg·f·m)	719	808	534	270		460	900	—
		D _{PC} (kg·f·m)	430	522	366	211		322	470	—
No. 2	+3		CR20	CR14	CR12	CIP5		CR11	CR17	CR27
		YS (kgf/mm ²)	50.7	52.0	51.5	55.6		51.0	50.0	49.6
		TS (kgf/mm ²)	61.4	67.6	66.9	66.2		63.0	62.4	61.3
		Cv (kg·f·m)	20.0	14.2	12.1	4.6		11.0	17.2	28.1
		vSI _r (mm ⁻¹)	0.11	0.29	0.30	0.21		0.09	0.12	0.03
		D _{PN} (kg·f·m)	600	630	610	282		638	928	1099
		D _{PC} (kg·f·m)	430	393	387	232		429	467	594
No. 3	+8		CR19	CR11	CR13	CIP5		QT13	QT15	CR20
		YS (kgf/mm ²)	58.6	57.5	50.2	53.8		50.8	55.9	52.3
		TS (kgf/mm ²)	68.3	68.3	62.3	66.0		63.7	70.5	64.2
		Cv (kg·f·m)	21.3	10.5	13.0	5.2		12.4	15.6	20.6
		vSI _r (mm ⁻¹)	0.18	0.46	0.10	0.16		0	0	0.10
		D _{PN} (kg·f·m)	522	452	640	258		433	773	900
		D _{PC} (kg·f·m)	372	317	423	198		338	458	475
No. 4	+6		CR17	CR13	CR13	CIP8	CIP8	CR16	CR16	CR17
		YS (kgf/mm ²)	—	59.9	53.2	55.9	54.9	51.1	52.4	—
		TS (kgf/mm ²)	—	68.4	64.8	68.4	68.9	62.2	62.9	—
		Cv (kg·f·m)	—	12.9	12.7	7.8	8.2	15.8	15.9	—
		vSI _r (mm ⁻¹)	—	0.22	0.17	0.25	0.22	0.16	0.16	—
		D _{PN} (kg·f·m)	—	528	616	416	429	750	761	—
		D _{PC} (kg·f·m)	—	434	432	309	324	452	456	—
No. 5	+12		CR14	CR14	CR12	CIP10	CIP10	QT13	QT13	QT14
		YS (kgf/mm ²)	—	50.2	57.9	51.5	54.7	54.1	54.0	—
		TS (kgf/mm ²)	—	61.6	67.8	62.9	68.5	66.0	66.2	—
		Cv (kg·f·m)	—	14.8	12.0	9.5	10.1	12.8	13.2	—
		vSI _r (mm ⁻¹)	—	0.14	0.28	0.15	0.24	0.06	0.07	—
		D _{PN} (kg·f·m)	—	750	494	545	490	567	577	—
		D _{PC} (kg·f·m)	—	436	346	350	339	429	410	—

Cv: シャルビー吸収エネルギー
 D_{PN}: プレスノッチ DWTT の吸収エネルギー
 vSI_r: シャルビー試験の SI 値
 D_{PC}: ブラック DWTT の吸収エネルギー

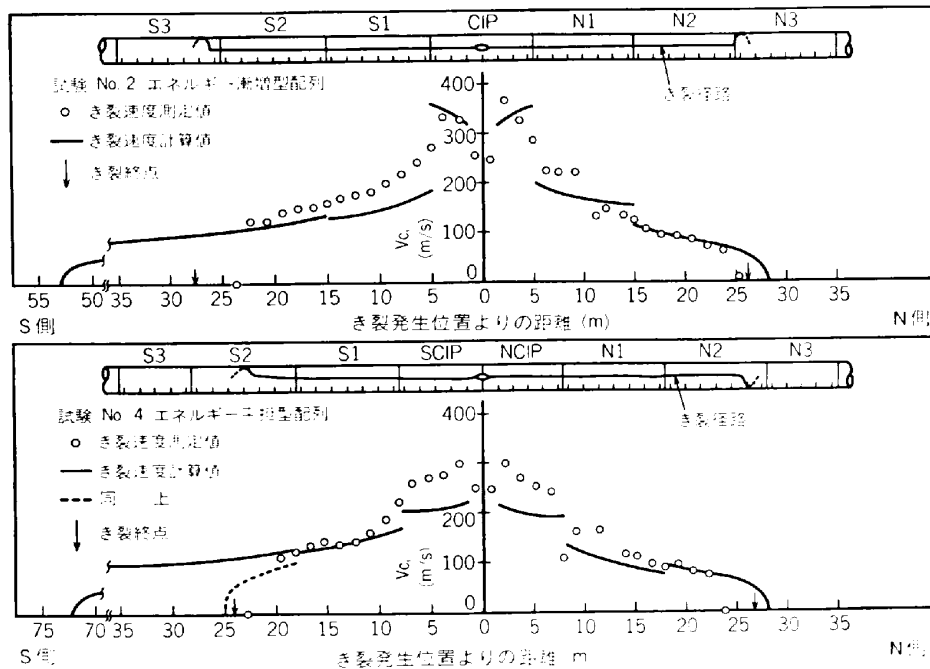


図 7 き裂経路及びき裂速度の変化

の両側にそれぞれ3本の供試鋼管を配置した。表1は5回にわたる実管バースト試験における供試鋼管の組み合わせを示す。いずれの場合にも、3本の供試鋼管の中で破壊を停止させるように計画している。第1回～第3回(No. 1～3)の試験では、き裂発生管からはなれる程、高い吸収エネルギーを持つエネルギー漸増型の配列を、第4、5回(No. 4, 5)の試験では、吸収エネルギーがほぼ等しい供試鋼管を2本及び3本配置したエネルギー平坦型の配列を採用した。

4.2 実験要領

供試鋼管はき裂発生管と共に試験ライン内に配置し、お互いを溶接により接続した後、地下1.3mに埋設す

る。試験は空気により118 kgf/cm²に加圧し、管体に規格降伏強さの80%に相当する周方向応力を与えた状態にて、き裂発生管に設置した火薬によりき裂を発生させる。破壊の伝播中には、き裂速度、内圧変化、管体のひずみ変化等を計測する。試験後は破裂部分の供試鋼管の形状の観察、破面の観察、破面近傍の肉厚変化の観察等を行う。

4.3 実験結果

内圧118 kgf/cm²、管体温度+3～+12°Cの条件のもとで、試験はすべて失敗なく実施できた。き裂が通過した径路を見ると、すべての試験において供試鋼管の上部をほぼ直線状に伝播し、最後周方向に急に方向を変えて停止している。き裂径路の概略とき裂速度(V_c)の変化を図7に示す。写真1には、破壊後の供試鋼管の外観を示す。き裂速度は供試鋼管内にて徐々に減少している。隣接する供試鋼管へき裂が突入する際のき裂速度の減少の程度は、エネルギー漸増型とエネルギー平坦型とを比較した場合、前者の方がやや顕著である。



写真1 バースト試験後の試験管の外観

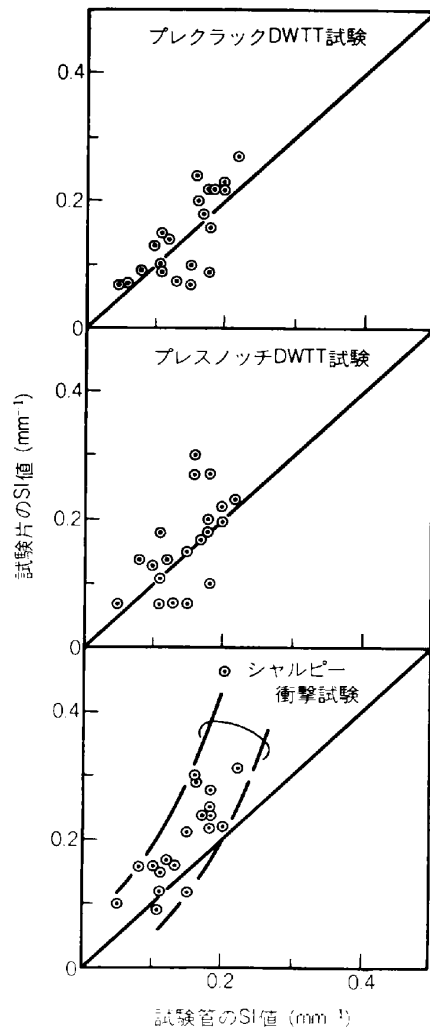


図8 試験管と各種試験片でのセパレーション指数の比較

	試験片の破面		セパレーション	
			分類	形状
シャルピー 衝撃試験			主として Type A	
DWTT 試験			Type A + Type B	
実管試験			Type A + Type B	

写真 2 試験管及び試験片破面のセパレーション

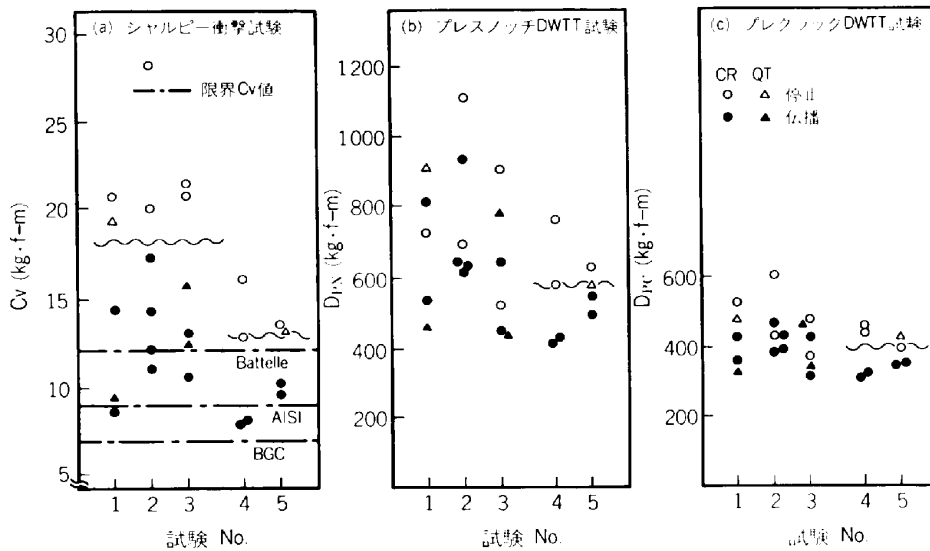


図 9 シャルピー衝撃試験及び DWTT 試験の吸収エネルギー
とき裂停止に必要な限界エネルギー値

制御圧延鋼板から製造された供試鋼管の破面には、セパレーションが明瞭に認められる。このセパレーションを詳細に観察すると、管厚にほぼ平行なへき開と思われる破面から成るもの（タイプAと呼ぶ）と、管厚にほぼ平行な破面とこれに対して約45°の角度をもつた延性破面から成るもの（タイプBと呼ぶ）の2種類に分類できる。写真2に示すとおりである。これを同一供試鋼管から採取したシャルピー衝撃試験片及びDWTT試験片の破面と比較すると、前者ではタイプAが主であり、後者ではタイプA及びBの2種類が認められる。これらの破面につきセパレーション指数 (SI=全セパレーション長さ/被検面積) で比較すると、図8に示す通りである。シャルピー衝撃試験片の場合、破面のSI値は実管の場合より比較的大きな値になる。一方、DWTT試験片の場合、プレスノッチ、プレクラックのいずれも実管の場合と同程度のSI値を示している。

次に、各試験の結果を整理して、き裂停止に必要な限界エネルギー値を求めることにする。き裂が貫通した鋼管のエネルギー値と、き裂が停止した鋼管のエネルギー値を図中でわかるようにすると、図9に示すように、限界エネルギー値を求めることができる。シャルピー衝撃試験の場合限界値は明瞭に認められ、エネルギー漸増型配列にて約18 kg·m、エネルギー平坦型配列にて約13 kg·mである。一方、DWTT試験の場合には限界エネルギー値をはつきりと求めることができなかった。これは供試鋼管の仕様設定に際し、製造上の問題からDWTT試験よりもシャルピー衝撃試験を重視したことにも起因すると考えられる。次に、制御圧延鋼板による供試鋼板と焼入れ焼もどしによる供試鋼板との間における停止性能を比較すると、図からわかるように、両者の間には全く差がないことが確認できた。これは材料の停止性能がセパレーションの有無に影響されないことを意味し

ている。

4.4 要約

以上は5回にわたる実管バースト試験の結果の紹介である。高級ラインパイプ共同研究委員会では、これらの試験結果について綿密な解析を進めている。従つて、ここでは得られた結果を要約するだけに留める。

(1) き裂伝播停止性能には、セパレーションは影響を及ぼさない。

(2) き裂伝播停止性能の評価には、シャルピー吸収エネルギーの方がDWTT試験(プレスノッチ、フレクラック共に)による吸収エネルギーより優れている。

(3) き裂を停止させるに必要な限界エネルギー値は、シャルピー衝撃試験の場合、1本の鋼管で停止させるには約18 kg-m、2本以上の鋼管で停止させるには

約13 kg-mである。このように限界エネルギー値に差があることが確認できたことは、パイプラインの設計に対し、今後大きな影響を及ぼすものと予想される。

5. 結 言

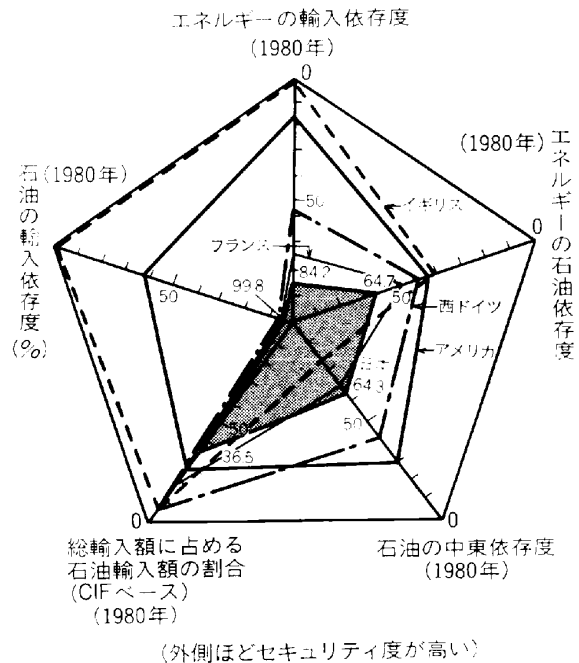
高級ラインパイプ共同研究委員会は国内に実験場を求め、5回にわたる実管長尺バースト試験を実施した。前述の実験結果の要約からわかるように、所期の目的は十分に達成できたと言える。委員会内部にて進めて来た実験結果の解析はすでに終了しており、近くあらためて報告されることになろう。最後に、この共同研究の推進にあつた委員及び研究参加者の努力に、また試験場の提供等での釜石鉱山(株)釜石鉱業所の御協力に心から感謝します。

統 計

我が国のエネルギーセキュリティ度

ここ最近、不況の影響もあり、エネルギー、特に石油に対する緊迫感が薄らいできている。しかし第3次、第4次のエネルギーショックがいつまた起こるかわからない。

そこで我が国でのエネルギーのセキュリティ度を他の先進国と比較して認識しておくのも無駄ではないだろう。1980年度でのその度合を諸外国との比較において示したのが図1である。この図から明らかなように我が国のセキュリティ度は他の先進国に比較して最も低く、フランスと比較的によく似た状況にあることがわかる。その点アメリカはバランスよく、しかもその度合が非常に高く、その力強さがこの図からも明らかである。



注) 石油の中東依存度は、統計の制約上中東としてサウジアラビア、クウェート、イラン、イラク、アラブ首長国連邦、カタールのみを計上しており、我が国の場合、中立地帯からの輸入も多いため、それを含めると、中東依存度はもつと高くなる。

出所) OECD ENERGY BALANCES, OECD Quarterly Statistics 国連 Yearbook of International Trade Statistics 57 年省エネルギー便覧 [省エネルギーセンター]

我が国のエネルギーセキュリティ度の諸外国との比較