

UDC 669.148.4-462 : 678.674 : 669.056.96 : 620.193

技術報告

大口径ラインパイプのポリエチレン被覆技術*

田中満生**・大槻富有彦**・吉田 浩***・和田守弘****

Polyethylene Coating Techniques for Large Diameter Linepipes

Mansei TANAKA, Fuyuhiko OTSUKI, Hiroshi YOSHIDA, and Morihiro WADA

Synopsis:

A polyethylene coating process that uses a flat-die extrusion method has been developed by Nippon Steel Corporation and others to manufacture polyethylene coated large-diameter steel pipes.

They are used in pipelines for the long distant transportation of natural gas or oil.

In this process, the molten polyethylene sheet is wound around the pipes as they rotate and advance on the skew rolls. The new developed process is able to meet changes in pipe diameter and coating thickness with a single size of die. The properties of molten polyethylene give an important influence on the good appearance and uniformity of the polyethylene coating. Accordingly, it is necessary to use polyethylene with a high melt strength, a low melt index and a low shrinkage stress.

Furthermore, rapid cooling after the polyethylene coating is necessary to guarantee excellent impact resistance of the coated pipes at low temperatures.

1. 緒 言

ポリエチレン被覆鋼管は、地中埋設後の鋼管の腐食を防止するために、外面にポリエチレンを被覆した鋼管で、天然ガスや石油を長距離輸送する大口径高圧パイプライン用として、近年、著しく関心が高まってきた¹⁾。

アメリカでの埋設パイプライン事故調査によれば、外面からの腐食が 41.4% を占め最大の原因であったという²⁾。これらは、パイプラインの防食対策が不十分であった、古い時期に埋設されたものに生じた事故であるといわれているが、パイプラインの安全操業における防食対策の重要性を、よく示している事例である。

従来、埋設鋼管には、アスファルトやコールタールを主材料とした塗覆装が、数 10 年にわたって使用されてきたが、ミルから敷設現地までの遠距離輸送や寒冷地の厳しい自然環境下での敷設作業に耐え、さらに、操業時には 80°C まで温度が上昇する例がある大口径パイプライン用の防食被覆には、広い温度範囲での強度や化学的安定性の点ではるかにすぐれた性能を有している、この新しく開発されたポリエチレン被覆が最適であると考えられる³⁾。しかしながら、熱膨張係数だけをみても 10 倍

以上の差がある合成樹脂と鋼材との複合製品であるポリエチレン被覆鋼管は、ポリエチレンの性質をよく熟知し、その特徴を活かした使い方がされないと、十分な性能を発揮することができない。

本報では、パイプラインの幹線に用いられる大口径鋼管のポリエチレン被覆技術について紹介したい。

2. ポリエチレン被覆法

2.1 融着被覆法と押出被覆法

鋼管のポリエチレン被覆法には、大別して融着被覆法と押出被覆法がある⁴⁾。前者は流動浸漬法といわれているプラスチック・コーティング法と、原理的に同じであり、小ロットの場合やエルボなど異形管の被覆に適している。後者は粒状のポリエチレンをらせん溝のついたスクリー押出機で混練熔融し、ダイから押し出して被覆する方法で、ダイの形状から丸ダイ法とフラット・ダイ法に分けられる。丸ダイ法はダイの環状スリットから熔融ポリエチレンを筒状に押し出して被覆する方法で小口径の鋼管に適している。一方、フラット・ダイ法は大口径鋼管の被覆に適している方法で、直線状のスリットをもつダイから帯状に押し出した熔融ポリエチレンを、傾

* 昭和 54 年 10 月 18 日受付 (Received Oct. 18, 1979)

** 新日本製鉄(株)君津製鉄所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp., 1-1 Kimitsu Kimitsu 299-11)

*** 新日本製鉄(株)本社 (Nippon Steel Corp.)

**** 東京樹脂ライニング工業(株)君津工場 (Kimitsu Works, Tokyo Plastic Lining Co., Ltd.)

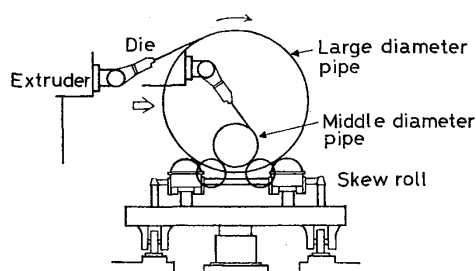


Fig. 1. Schematic explanation on the adjustment of die-angle with altering of the steel pipes diameter in the polyethylene coating process by a flat-die extrusion method.

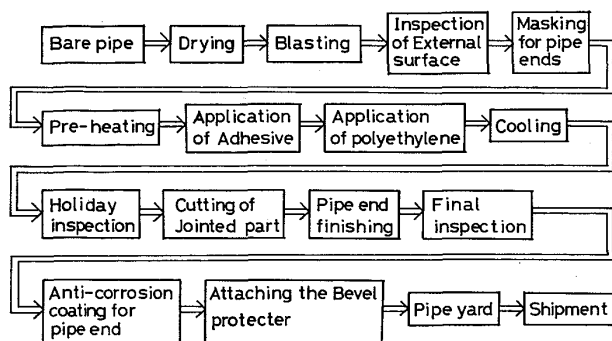


Fig. 2. Manufacturing process for polyethylene coated large diameter steel pipes.

斜ロールの上を回転しつつ走行する鋼管の外周に、らせん状に数回重ね合せて巻きつけ被覆する。この方法では、丸ダイ法のように鋼管の口径に応じてダイを変更する必要はなく、Fig. 1のようにダイの角度を変えるだけで対応できる。また、被覆の厚さは、ダイ・スリットの開度を変えることによつて、押出すポリエチレンの厚さを変えるか、ポリエチレンを鋼管に巻きつけるときの重ね合わせ回数の変更で、任意に設定できるという特徴がある。

本報では、このフラット・ダイ押出法によるポリエチレン被覆技術について述べる。

2.2 大口径鋼管のポリエチレン被覆工程

Fig. 2 に大口径ポリエチレン被覆鋼管の製造工程を示

す。まず、鋼管表面の水分を乾燥してから、ブラスティングでスケールや錆を除去し、次いで、鋼管を予熱する。予熱温度は、使用する接着剤の軟化温度によつて異なり、鋼管の表面に接着剤がよく濡れるようにする。加熱した鋼管に接着剤とポリエチレンを被覆するが、その方法に、Fig. 3 に示す4とおりがある⁵⁾。A, B, Cの方法は接着剤をポリエチレンと同じく、フラット・ダイで押し出して被覆する。A法では、接着剤とポリエチレン用の押し出し機を直列に配列し、図のような被覆構成になる。B法では、接着剤とポリエチレン用の押し出し機を並列に配置するか、あるいは、2層ダイで接着剤とポリエチレンを共押し出しする。被覆の構成は、図のように接着剤とポリエチレンの層が交互に折りなした形になる。このとき、巻きつける接着剤とポリエチレンの幅が異なつたり、端部の位置がずれると、被覆の上面か下面で接着剤層の過下足を生じる。また、ポリエチレン層の間に接着剤の層が存在するのはむだである。それを避けるために、C法では、ポリエチレンの幅を接着剤の幅の整数倍にして、その倍数をポリエチレンの巻き重ね数と同じにする。この場合も、接着剤とポリエチレンの端部の位置を片側だけ正確にそろえることが必要であり、さもないと、接着剤の過不足を生じる。D法では、ポリエチレン被覆に先だつて、粉末状の接着剤を塗布する。被覆の構成は図のようになり、薄くて均一な接着剤層が容易に得られる。

ポリエチレンは、熱可塑性樹脂であり、230°Cないし270°Cで押し出し被覆された直後は軟かい。それで、被覆後の鋼管が次の搬送ロールに達するときには、鋼管の重量で被覆にロールの圧痕がつかない硬さになるように、ポリエチレン被覆後ただちに冷却される。引き続き、検査や仕上げ工程を経て出荷を待つことになる。

2.3 被覆能力を制約する要因

フラット・ダイ押し出し被覆設備の中で、生産能力に影響する要因は、ブラストや加熱炉の能力など種々あるが、ポリエチレン被覆工程に直接関係がある。Fig. 4に

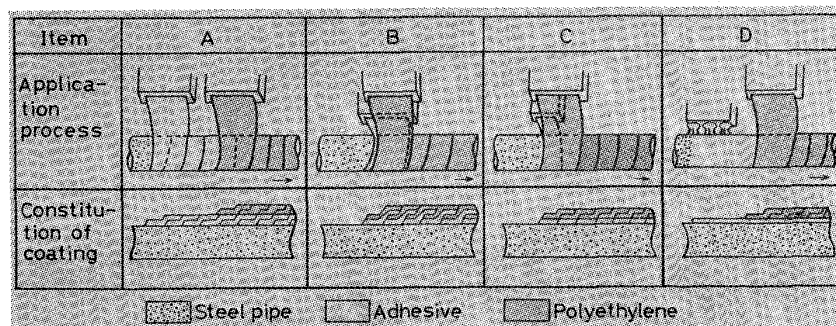


Fig. 3. Application process of adhesive and constitution of coated layer by a flat-die extrusion method.

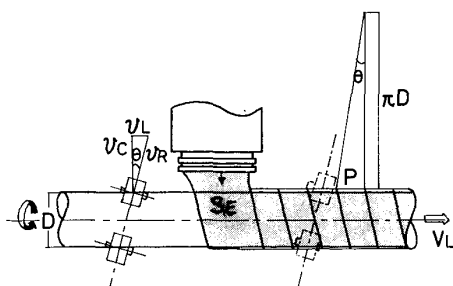


Fig. 4. Schematic explanation on the relation between the rotating speed of transport roll and the coating speed.

示す諸元について説明する。

生産能力を代表する鋼管の走行速度 V_L は、押し出し能力 G の押し出し機を使用して、密度 ρ のポリエチレンを口径 D の鋼管に厚さ t の被覆をするとき、次の式が得られる。

$$V_L = \frac{G}{\pi(D+t)t\rho} \quad (1)$$

押し出し機の能力が一定のとき、鋼管の口径が小さくなると鋼管の走行速度を大きくする。鋼管は傾斜角 θ のロール上で回転しつつ軸方向に走行するので、ロールの回転速度 v_R と鋼管の走行速度 V_L や回転速度 V_C とは、次の関係がある。（ η は回転伝達係数とする）

$$V_L = \eta \cdot v_R \sin \theta \quad (2)$$

$$V_C = \eta \cdot v_R \cos \theta \quad (3)$$

鋼管の走行速度を大きくするには、ロールの回転速度が傾斜角を大きくする必要がある。ところが、(4)式から鋼管の回転数 N_P はロールの回転速度 v_R に比例し、鋼管の口径 D に反比例して大きくなる。

$$N_P = \frac{V_C}{\pi D} = \frac{\eta \cdot v_R \cos \theta}{\pi D} \quad (4)$$

鋼管には溶接部の余盛があり、また、真円度や真直度の影響で、回転数が大きくなると走行中の鋼管は振動が激しくなる。その結果、鋼管に巻きつけるときの熔融ポリエチレンに加わる張力が、著しく変動して好ましくない。そこで、鋼管の回転数を上げないで走行速度を大きくするには、ロールの傾斜角 θ を大きくする。そうすれば、鋼管の走行ピッチ P が大きくなり、回転数 N_P は低下する。

$$P = \pi D \tan \theta \quad (5)$$

$$N_P = \frac{V_L}{P} \quad (6)$$

しかし、ロールの傾斜角が大きくなりすぎると、被覆後の圧下ロールへ加わる剪断力が増大して、圧下機構が難かしくなる。従つて、傾斜角を限度以上に大きくする

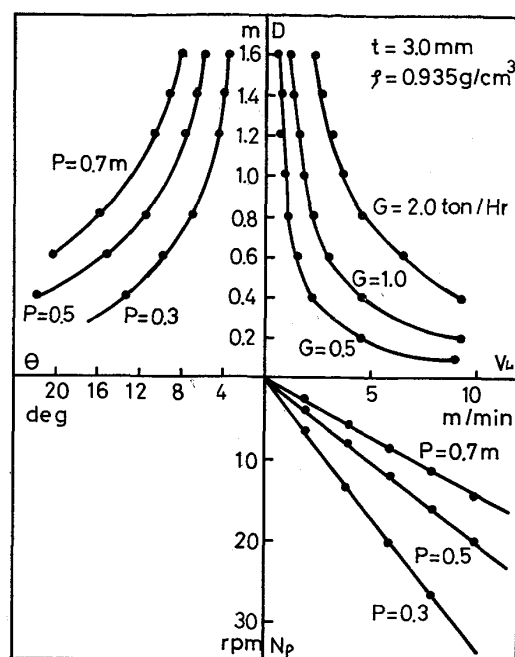


Fig. 5. Diagrams on the relations between the pipe diameter and the coating dimensions.

t : The thickness of coated layer
 ρ : The density of coated polyethylene
 G : The extrusion output
 V_L : Advancing speed of steel pipe
 P : Advancing pitch of steel pipe
 N_P : Rotational number of steel pipe
 θ : Inclination angle of skew roll

ことはできない。すなわち、生産能力を制約する要因として、鋼管の回転数とロールの傾斜角があり、それらの影響は鋼管の口径が小さくなるほど大きくなる。つまり、この被覆法は、大口径の鋼管ほど有利である。以上の関係を Fig. 5 にまとめて示す。

次に、ポリエチレンの物性による制約について述べる。スリットの幅と開度が、それぞれ W と T であるダイから、密度 ρ のポリエチレンを押し出すときの速度 S_E は (7) 式で示される。また、ダイ出口における熔融ポリエチレンの流れの速度勾配を示す剪断速度 γ は、(8) 式のように押し出し速度 S_E に比例し、ダイ・スリット T の開度に反比例する。

$$S_E = \frac{G}{TW\rho} \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{S_E}{T} \quad (8)$$

ポリエチレンの押し出し成形で、剪断速度がある値（臨界剪断速度）以上になると熔融ポリエチレンの内部応力が周期的に変動して、成形品の表面が粗面になるメルト・フラクチャー (Melt fracture) という現象が発生する⁶⁾。

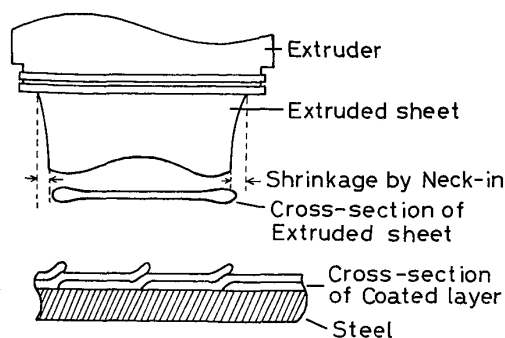


Fig. 6. Relation between the cross-section of extruded polyethylene sheet with neck-in and the appearance of coated polyethylene layer.

臨界剪断速度は、ポリエチレンの分子量とその分布、長鎖分岐の数、あるいはダイの構造による影響を受けるが、 10^3 s^{-1} ぐらいの大きさと考えられる。従つて、押し出し速度は臨界剪断速度を越えないように条件を選定する。

所定の被覆膜厚を得る場合、鋼管に巻きつけるときのポリエチレン・シートの厚さ t_c を薄くすれば、巻き重ね回数を多くしなければならない。 t_c を薄くするほど、被覆の膜厚均一性と表面外観はよくしやすい。しかし、 t_c を小さくするには、ダイ・スリットの開度 T を狭くする必要があり、そうすれば、(8)式から剪断速度は反比例して大きくなる。また、巻き重ね回数が増えることは、必然的に、鋼管の回転数が大きくなることであり、前述のように、鋼管の回転振動による問題がでてくる。従つて、後述のように t_c が厚くても被覆の膜厚均一性と表面外観をよくすることが可能であれば、 t_c を厚くして巻き重ね回数を少なくする方が好ましく、これは押し出し能力の大きな設備であるほど顕著に認められる。

2.4 被覆膜厚の均一性とエッジ・フラクチャー

フラット・ダイでポリエチレン・シートを押し出し成形すると、シート幅はダイ・スリットの有効幅よりも狭くなり、かつ、両端部が中央部よりも厚くなる現象がみられる。これをネック・イン (Neck in) という⁷⁾。ネック・インしたポリエチレンを鋼管に被覆すると、Fig. 6 のようにシートの端部に相当する個所の膜厚が著しく厚くなり、外観がよくない。また、ポリエチレンの使用原単位が増加して好ましくない。この問題の対策として、次の2つがある。1つは、鋼管に巻きつけるポリエチレン・シートを薄くして、巻き重ね回数を多くすることである。膜厚の差が小さく、かつ、全体に分散して目立たなくなる。もう1つは、押し出されたシートの両端部の厚さを中央部よりも薄くした形状 (エッジ・ドロップという) にする方法である。前述のように、能力の大きな

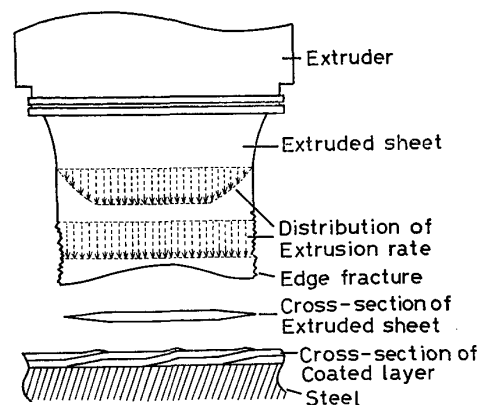


Fig. 7. The cross-section of extruded polyethylene sheet with edge-drop and the appearance of coated polyethylene layer. Also the occurrence of the edge fracture is simultaneously shown.

被覆設備の場合は、鋼管に被覆するときのポリエチレン・シートの厚さ t_c が厚いほど有利になるので、このエッジ・ドロップにする技術は重要になる。その成形法⁸⁾として、ダイ・スリットの開度を両端部にいくほど狭くする方法やダイ・ランド部の幅をスリット出口から奥にいくほど狭くする方法がある。いずれも、ダイ内部の熔融ポリエチレンの流れに対して、両端部の抵抗を大きくして流速を抑えている。ここで、Fig. 7 のように押し出されたシートの幅方向に均等に張力を与えると、両端部ほど延伸されて膜厚が薄くなる。これを被覆すると平坦な表面が得られる。

ところが、シートを延伸するとき、条件によつては両端部が十分に薄くならないうちにのこぎり刃状に切断する現象がみられる。これをエッジ・フラクチャー (Edge fracture) という⁹⁾。エッジ・フラクチャーの発生には、ダイの構造とポリエチレンの溶融物性の影響が大きい。ここでは、後者について述べる。溶融ポリエチレンのレオロジー的性質を示す指標に、溶融延伸性と溶融張力がある¹⁰⁾。それらは、所定のオリフィスから一定速度で溶融ポリエチレンを押し出し、そのストランドを引き取りスプールによつて高速度で引張るとき、ストランドが延伸して切断する際の引取速度と張力で表される。

ポリエチレンの溶融物性とエッジ・フラクチャー発生率との関係を Fig. 8 に示す。溶融延伸性がよいポリエチレン、あるいは、溶融延伸性は悪くても溶融張力が高いポリエチレンはエッジ・フラクチャーの発生は少ないことがわかる。ポリエチレンの分子構造と溶融物性との関係をみると、同一分子量での比較では、分岐が多い低密度のポリエチレンほど溶融延伸性は悪く、溶融張力が高い傾向にある。また、分子量分布が広いほど同様

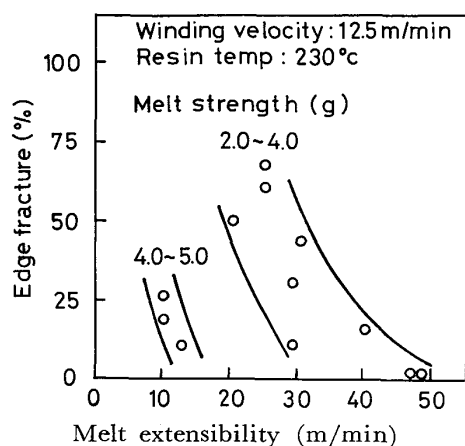


Fig. 8. The properties of molten polyethylene and the ratio of edge fracture.

Cooling direction after Coating	Polyethylene		Rate of Decrease in Thickness
	M.I. g/10min (at 130°C)	Shrinkage stress kg/cm ² (at 30°C)	
Outer side	0.02	12.3	10
	0.22	40.8	20
Inner side	0.02	12.3	10
	0.22	40.8	20

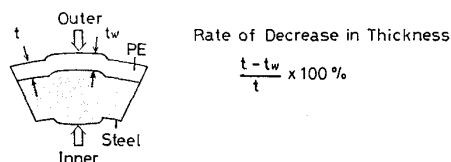


Fig. 9. Effect of the cooling direction on the decrease rate of coated thickness on the welded line.

な傾向がみられる。溶融延伸性と溶融張力を双方ともよくすることは困難で、いずれかの物性を優先してポリエチレンを選定する。このエッジ・フラクチャーと後述の偏肉を同時に解決するには、溶融張力の大きいポリエチレンの使用が望ましい。

2.5 被覆膜厚の均一性と偏肉

大口径鋼管はサブマージアーク溶接で造管され、その溶接部には突起状の余盛が生じている。ポリエチレンを被覆すると、溶接部の上で膜厚が薄くなることがあり、これを偏肉という。偏肉を生じると、その分をあらかじめ見込んで全体の膜厚を厚くして所定の膜厚を確保する必要があるため、樹脂の使用原単位が増加して好ましくない。

偏肉の生成には、余盛の高さや勾配など形状の影響が大きく、また、次のような要因の影響がある。まず第1に、ポリエチレン被覆が外側から急速に冷却されると、

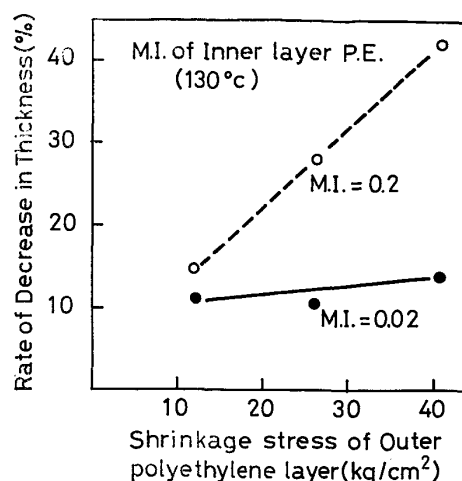


Fig. 10. Relation between the decrease rate of coated thickness on the welded line and the fluidity of polyethylene at molten state or the shrinkage stress.

偏肉が生じる。Fig. 9に示すように、ポリエチレン被覆後、外側から冷却すると偏肉が大きくなり、また、ポリエチレンの物性の影響を大きく受ける。しかし、鋼管の内側から冷却すると、ポリエチレンの物性に関係なく偏肉は小さい。第2に、ポリエチレンの溶融状態での流動性を示すメルト・インデックス (Melt index, 略して M. I.) と固化過程での収縮応力が大きいポリエチレンは偏肉が大きくなる。被覆を2層に分けて、鋼管に接する下層には M. I. が異なるポリエチレン、外側になる上層には収縮応力が異なるポリエチレンを、それぞれ組み合わせて被覆した試験片で偏肉への影響を検討した。その結果を Fig. 10に示す。下層のポリエチレンの溶融流動性が高い場合は、上層のポリエチレン層の収縮応力の影響を著しく受けて、収縮応力が大きいほど偏肉は大きくなる。しかし、溶融流動性が低いポリエチレンを下層に使用すると、上層の収縮応力の大きさにかかわらず偏肉は小さい。

以上の結果から、偏肉生成機構をまとめると次のようになる。ポリエチレン被覆は外側から冷却されると、外側の方から固化して収縮しようとする。溶接部の余盛の上にあるポリエチレン層は、収縮力によって内側へ引張られて最短距離をとろうとする。ところで、ポリエチレン被覆の内部は、まだ未固化で流動状態にあるから、外側からの収縮力によって余盛の上にあるポリエチレンは両側へ流れる。その結果、余盛の上で被覆は薄くなる。

偏肉生成を防止するために¹¹⁾、溶融ポリエチレンを鋼管に被覆するとき、短時間だけシートに加える張力を減らして余盛部に対応する個所の厚さを、局部的に厚くする方法が提案されている。また、本論で述べたように、

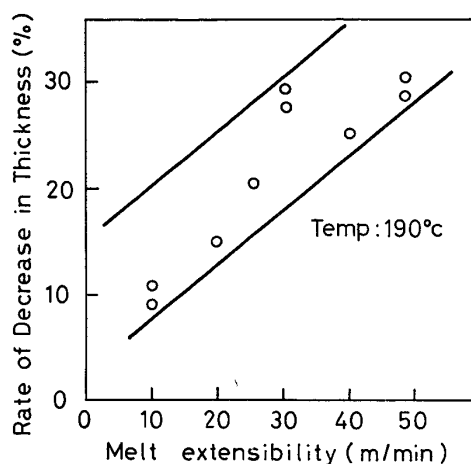


Fig. 11. Relation between the decrease rate of coated thickness on the welded line and the melt extensibility of polyethylene.

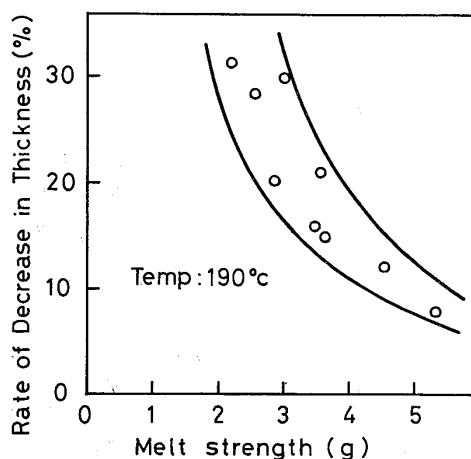


Fig. 12. The decrease rate of coated thickness on the welded line and the melt strength of polyethylene.

鋼管の内側からの冷却や溶融流動性と収縮応力が小さいポリエチレンの使用が効果的である。あるいは、Fig. 11と Fig. 12 に示すように、溶融延伸性は低く溶融張力の大きなポリエチレンを使用すれば偏肉は小さい。これも、溶融状態での流動性による影響と同一と考えられる。

2.6 ポリエチレン被覆の冷却

ポリエチレンを被覆した後の冷却工程には、次のような重要な役割がある。

(1) 被覆後の鋼管が搬送ロールに達したとき、ポリエチレンが十分に冷却固化していないと、被覆にロールによる圧痕を生じるので、ポリエチレンが未固化の区間にはロールを置けない。しかし、鋼管の長さに対して搬送ロール間の距離がある程度以上になると、鋼管の安定な搬送ができない。従つて、許される搬送ロール間距離でポリエチレンが固化しないときは、鋼管の走行速度を低下して、冷却に要する時間をとらねばならない。すな

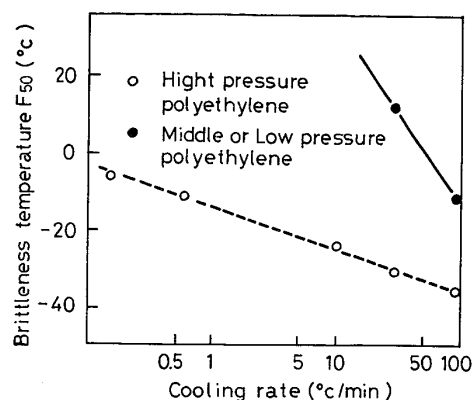


Fig. 13. Effect of cooling rate at solidifying process on the impact resistance of polyethylene at low temperature.

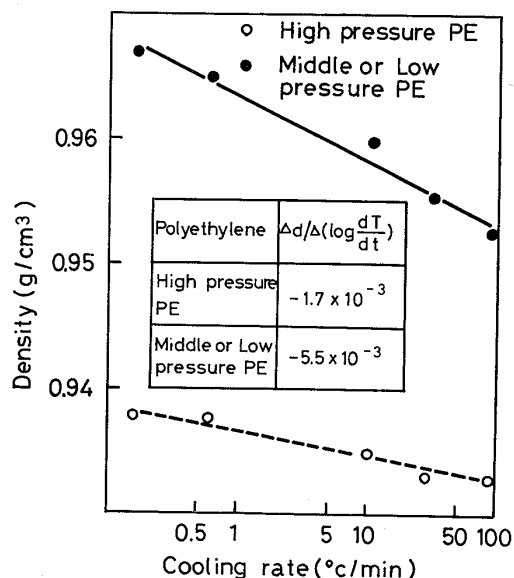


Fig. 14. Change of density (including additives) with the cooling rate of polyethylene at solidifying process.

わち、被覆の冷却速度は生産能力に影響を与える。

(2) 前述のように、被覆の冷却が外側から行われるか、内側から行われるかによつて偏肉の生成は影響を受ける。

(3) 結晶性高分子であるポリエチレンは、融点以下の温度での冷却速度によつて、被覆の機械的性質は影響を受ける。

ここでは、ポリエチレン被覆の機械的性質に及ぼす冷却速度の影響について述べる。ポリエチレンは、製造プロセスの違いから高圧法ポリエチレンと中低圧法ポリエチレンに分類できる。また、分子構造的にみれば、前者はエチレン-CH₂-の繰り返しの中に-CH₃、-C₂H₅、-C₃H₇のような短鎖分岐や-(CH₂)_nの形で示される長鎖分岐が多く存在し、そのために結晶化が阻害されて密度は低

くなる。それで、分岐ポリエチレンとも、低密度ポリエチレンともいわれる。それに対して、後者は分岐の数が少なく密度が高いので、直鎖ポリエチレンまたは高密度ポリエチレンともいわれる。これらのホモポリマーの他に、高圧法ポリエチレンには酢酸ビニルと、中低圧法ポリエチレンには1-ブテン、1-ヘキセンなどとのコポリマーが種々、製造されている。

このように多様なポリエチレンの中から、高圧法ポリエチレンと中低圧法ポリエチレン(いずれもコポリマー)の1種ずつを選んで低温衝撃試験を行った。表面にノッチをつけた試験片の50%が破壊する温度を脆化温度(F_{50})と定義し、熱間プレス成形後の冷却速度を変えて、脆化温度に及ぼす影響をみた。その結果を、Fig. 13に示す。ポリエチレンは徐冷されるほど、脆化温度が上昇して破壊しやすくなる。この傾向は、中低圧法ポリエチレンほど顕著に認められる。これは、徐冷によつて結晶化ですすむためである。Fig. 14に示すように、中低圧法ポリエチレンの冷却速度に対する密度の変化は、高圧法ポリエチレンのその3倍以上も大きく、結晶化度が著しく増大したことがうかがえる。

以上の結果から、ポリエチレン被覆の耐衝撃性を向上させるには、被覆後できるだけ速く冷却することが必要であり、また、冷却速度による品質への影響が少ないポリエチレンを使用することが望ましいといえる。

3. 結 言

パイプラインの幹線に用いられる大口径鋼管の防食を目的とした、外面のポリエチレン被覆が広く実用化されてきた。ポリエチレン被覆法の中で、フラット・ダイ押出被覆法は、管径や被覆膜厚の変更に容易に対応できて、大口径鋼管の被覆に最適な方法である。生産能力を上げるとき、鋼管の回転数やポリエチレンの剪断速度による限界があるので、適切な被覆条件の選定が必要である。被覆の品質や膜厚均一性には、ポリエチレンの冷却条件や溶融物性の影響が大きい。

本報では、主としてポリエチレン被覆プロセスの問題について論じ、ポリエチレン被覆鋼管の性能に関しては割愛したので、その点は他の報文^{3), 12)}で補つて、ポリエ

チレン被覆鋼管への御理解を深めていただければ幸いである。

なお、本報の作成にあつて、ポリエチレン物性に関する御指導と御助言をいただいた、宇部興産株式会社常務取締役山口興治氏と同社枚方樹脂研究所工学博士長沢俊夫氏に深く感謝する。

文 献

- 1) G. BONFIGLIOLI: Oil Gas J., Sep 25 (1978), p. 108
- 2) 中村典道: 鉄と鋼, 62 (1976) 10, p. 106
- 3) N. SCHMITZ-PRANGHE and W. von BAECKMANN: Mat. Perform., Aug. (1978) p. 22
M. TANAKA, F. OTSUKI, and S. SUGIMURA: NACE Corrosion' 79, March (1979), p. 260-1
田中満生, 大槻富彦, 吉田 浩, 鮎沢三郎, 杉村重幸: 製鉄研究, 297 (1979) 5, p. 131
- 4) 田中満生: 化学と工業, 29 (1976) 10, p. 82
- 5) R. HIELEMA: USP 3823045, (July, 1974)
永井晃一, 斎藤良次: 特開昭 50-148488, (Oct, 1975)
H. LANDGRAF and W. QUITMANN: USP 3616006, (Oct, 1971)
P. KOCH, S. MENNENÖH, and H. MIKULLA: Ist International Conference on the Internal and External Protection of Pipes, (Sep. 1975), p. A2-11 [BHRA]
- 6) A. L. GRIFF: Plastics Extrusion Technology, (1968), p. 260 [Reinhold Book Corp.,]
- 7) 岡叡太郎, 山形 京: ポリエチレン樹脂, (1971) p. 154 [日刊工業新聞社]
- 8) 阪田力太, 榊田好平, 内垣 卓: 特許昭 47-12861 (April 1972)
- 9) M. TANAKA, F. OTSUKI, J. KINUGASA, T. NAGASAWA, and I. TSURUTANI: SPE 37th Annual Technical Conference, (May 1979), p. 483
- 10) 堀 泰明, 星 勝正: プラスチックス, 20 (1969) 4, p. 41
- 11) ヘルムット・ラントグラフ, ヴァルター・クウイットマン: 特開昭 50-110472 (Aug, 1975)
- 12) M. TANAKA, F. OTSUKI, F. HIRANO, and T. SATO: 3rd International Conference on the Internal Conference on the Internal and External Protection of Pipes, (Sep. 1979), p. 107 [BHRA]