

総論 進化の歴史

推進工法の歴史と発展 (生かされた技術と消え去った技術)



なかの まさあき
中野 正明

機動建設工業(株)
代表取締役社長
(本誌編集参与)

1 はじめに

我が国の推進技術は長距離、急曲線等の特異な施工を可能にしてきた結果、今後も国内外の社会資本整備に大きく貢献することは間違いのないことだと確

信します。推進技術は今まで60年以上の歴史がありますが、当然のことながら数世代の技術者がその時々ニーズに応えたり市場の拡大のための自発的な発想などを契機としたりで、順次進化継承してきました。その結果日本の推

進技術は世界に類をみない高度な技術となり、今後は国内のみならず海外からもその展開を要望されています。しかし、近年の推進技術の進化は以前ほどのドラスティックな変化ではないような気がします。今後の推進技術の発展や市場の拡大を見据えるならば、ここで再度の進化を考えなければならないと考えます。本稿ではこのような状況を踏まえ、推進技術の進化の歴史を振り返りながら今後の発展の可能性を探っていきたいと思います。

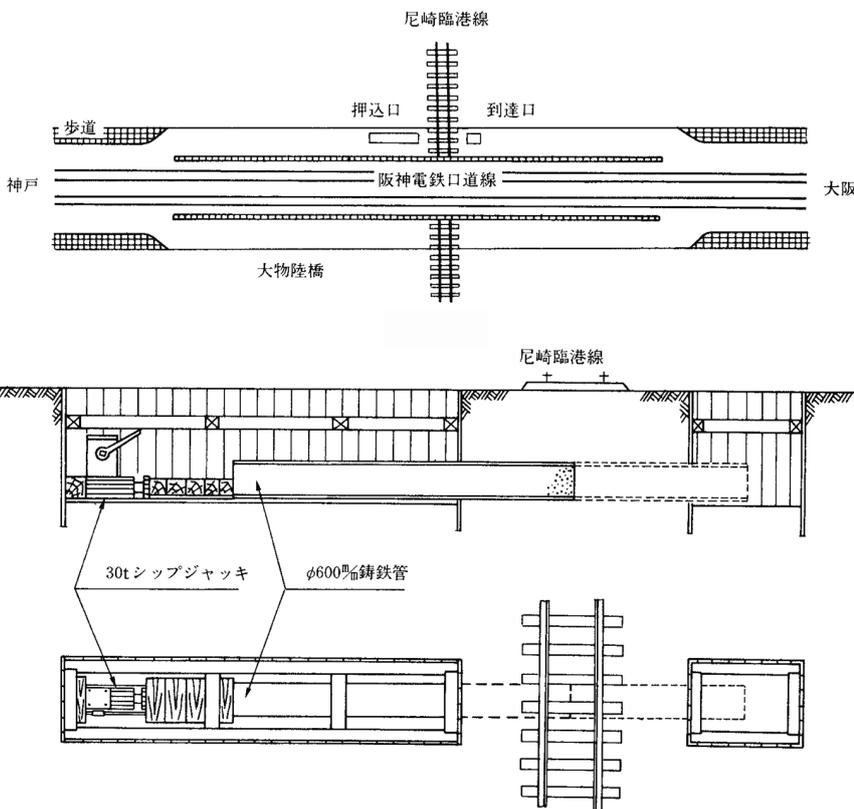


図-1 日本で最初の推進工事の施工縦断面と平面図

2 推進工法の歴史

2.1 草創期

我が国における推進工法の発祥は、今から60年以上前の1948年まで遡ります。施工場所は兵庫県尼崎市の国道2号線と国鉄尼崎港線の交差する箇所、ガスのさや管を国鉄の軌道下に押し込んだものです。それまでは国鉄の車両運行時間を避けて開削工法で行っていましたが、推進工法の採用によって軌道を掘り返すことなく、安全で確実な施工が可能になりました。今日では機械式密閉型の工法が一般的ですが、草創期の施工は当然のことながら切羽

開放型の刃口式推進工で、切羽の崩壊や出水と闘いながらの厳しい施工でした。当時の推進技術の根幹は切羽の土質判定、精度管理および切羽保持を考慮した掘削方法、日進量確保のための掘削量確保などです。いずれも施工管理技術者の技量は当然必要ですが、それにもまして切羽作業員（先やま）とその後ろで残土を撥ねる作業員（後やま）の技量が施工の成否や工程の確保を決定していました。

しかしそのような個人の技能（技量）に頼って切羽の崩壊や地下水の出水に対応するのは自ずと限界があり、物理的な対応が求められました。その結果地下水の出水による切羽崩壊を防止する手段として刃口の改良がなされたり、地下水の出水を防ぐための補助工法が併用されたりするようになりました。刃口の改良では切羽の土質の安息角に応じた柵を取り付けた柵式刃口や開口を絞るブラインド刃口（圧密刃口）などが考案され、軟弱地盤や地下水位以下でも土質や水圧によっては施工が可能になりました。補助工法の開発としては地盤に薬液を注入して止水や地盤強化を図る薬液注入工法と吸水ロッドを地盤に打設して地下水を排水することによって地下水位を低下させるウェルポイント工法が普及して、地下水位以下の地盤でも開放型の刃口式推進工法で施工可能になり、推進工法の適用範囲が広がっていきました。

また、推進距離は前記の推進工法発祥工事においては約6mで、初期の目的は軌道、道路、水路などの横断であったため数10mの施工距離で十分でした。しかし、推進工法が普及するにつれてもう少し長い距離を施工することが要求されるようになり、それに応じた技術開発がなされました。距離を伸ばすために解決しなければならない課題は、管外周摩擦の低減と大きな推進力の伝

達です。外周摩擦の低減には滑材の注入ですが、当初は油脂や黒鉛など種々の材料が試され、相応の成果を上げていました。推進力の伝達に関しては元押ジャッキ装備、支圧壁耐荷力、推進管軸方向耐荷力を超える推進力の伝達は、当然のことながら元押ジャッキだけでは不可能ですので、推進管路の管と管の間にジャッキ（中押ジャッキ）を挿入して、それより前の管列は中押ジャッキを伸長させることによって前進させ、中押から後ろの管列は元押ジャッキを伸長させる（中押ジャッキが短縮することによって前進させる「中押装置」が考案されました。

これらの技術開発によって推進工法の適用範囲が広がり、下水道をはじめとするライフラインの管路建設に多く用いられるようになりました。



写真-1 昭和50年ごろの施工現場

2.2 普及期

1960年代から1970年代の高度経済成長期にはいと、下水道をはじめとする管路建設が飛躍的に増加し、それまでは地上から開削できない道路や軌道の横断部に限られて採用されていた推進工法が、道路の縦断路線や複数の道路、軌道などの横断にも採用されるようになりました。それは、経済成長の影響によって道路交通が増加したため非開削による交通渋滞の軽減が必要になったり、市街地における建物（ビル、家屋など）が林立して、道路開削によるそれらへの影響が懸念されたりするよ

うになったからです。そのような状況の中で計画される管路は長距離化やことによれば曲線施工なども要求されるようになりました。

当時はまだ刃口式推進の時代ですから土質の変化にはある程度対応可能でしたが、やはり闘わなければならないのは地下水と推進抵抗でした。地下水との対応では前項で述べた薬液注入による地盤改良や地下水位低下工法などが行われていましたが、薬液注入はその効果への信頼性が最も高かった有機材料（尿素系）の使用が禁止されたため、注入効果が不足したり所用の効果をj得るために設計量以上の注入が必要になったりして、問題点が指摘されるようになりまし。地下水位低下工法も近接した井戸への影響や周辺地盤の沈下などの影響が懸念されるようになってきました。そのためこれらの補助工法が行われつつも、新しい地下水対策として圧気工法が採用されるようになりました。圧気工法は潜函（ケーソン）やシールドではすでに採用されていましたが、推進工法ではこの時期から採用例が増えて、一時期は地下水対策として一般的な工法になりいろいろな改良がなされました。ロックドアの改良、管外周のカバーロック注入、シールコンベヤなどを使用した残土搬出方法の工夫などです。

推進抵抗との戦いにおける管外周摩擦の低減は前項でも述べた滑材注入ですが、いろいろな材料が考案されましたが、減摩効果と環境への配慮からベントナイト、植物性油脂（マッドオイル）、植物性増粘材（CMC）などを配合するものが標準になりました。推進力伝達の中押装置は当初は1箇所だけの装備と使用でしたが、長距離化に伴って2箇所以上の装備で元押ジャッキを含めたそれぞれのジャッキを自動的に順次伸長させる「連動中押」が開発されました。これによって机上の理論で

は半無限に長距離が施工できることにはなつたのですが、やはり施工効率などを考えると理想的には元押ジャッキのみで長距離施工を可能にするべきです。しかし、推進施工中には想定外の事象が数多くあるため、やはり中押装置は長距離施工には欠かせないものと位置づけられます。



写真-2 昭和35年(1960)最初のボックスカルバートの推進

曲線推進工の要望に対しては理論的な方向制御と推進管継手部の破損防止および管内測量器具の開発が必要でした。理論的な方向制御は、設計路線における曲線を描くための推進管一本当たりの折れ角に応じた先導体(刃口)の折れ角造成が必要ですから、中折れ式の方向制御(セミシールド刃口)が用いられました。推進管端面の破損防止については、当時はまだ推進力伝達材が開発されておらず鋼製カラーは分離型のTカラーであったため、管端面にクッション材(コンパネなど)を挿入するだけでしたが、推進力の低減などによってある程度は防止できていたように思われます。初期の推進管内の測量はトランシットによる角度測定と鋼巻き尺による距離測定で座標測量(開放トラバース測量)を行っていました。さすがにそのような測量だけでは不安があるため、路線上に地上からチェックボーリングを行ってパイプを立て込み、刃口がその場所に来たときに下げ振りを垂らして管内測量との誤差を直接チェックするようなこともありました。このような方

法でとりあえずの曲線施工を可能にしました。

刃口式推進工法は種々の補助工法を用いて切羽の自立を確保したり湧水を防止したりしても、開放型の宿命として推進中は常に切羽の崩壊の危険をはらみながらの施工であり、完全に安全が確保されているとは言い難い状況がありました。また、ある程度の土質には対応できると前に記述しましたが、高水圧下の砂礫層、砂層や硬質の岩盤層などに対しては、やはり適切な工法とは言い難いところがあります。そのため切羽を密閉して坑内の安全が確保されて、機械で掘削する「機械式密閉型」の推進工法の開発が望まれました。

2.3 進化期

1970年代になるとシールド工法などで使用されていた泥水式推進工法や泥土圧式推進工法などが推進の分野にも適用され、機械式密閉型推進工法の時代を迎えました。大中口径管推進だけでなく小口径管推進もこの時代に誕生し、その後様々な工法が提案されるようになりました。

泥水式推進工法も泥土圧式推進工法も導入初期は比較的短距離の直線施工がほとんどでしたが、機械と土質の不適合、機械操作の未熟、管理手法(基準)の未確定、障害物の出現などによって数多くのトラブルが発生しました。原因はそれぞれ事前調査不足、機械性能の理解不足、事前検討不足と掘進機オペレータと推進管理技術者の不慣れなどですが、その後多くのトラブルの経験、推進データの収集および分析、On the job training (OJT) などによって管理手法が確立され、推進管理者および掘進機オペの技量も向上し、事前の調査検討の重要性も認識されるようになりました。このような経過で機械式密閉型の推進技術が向上し、その本来の長所である作業の安全性、広範囲の土質へ

の適合、施工速度の向上、推進抵抗の低減などが遺憾なく発揮されるようになりました。

そのような流れと相まって社会のニーズによってさらなる長距離施工、急曲線施工が求められるようになりました。長距離施工の定義は推進管内径の250倍(ex. $\phi 1,000\text{mm} \times 250 = 250\text{m}$)以上あるいは500m以上で管内径の500倍を超えないことが望ましいとされていますが、ことによっては1スパン1,000mを超える超長距離施工が求められるようになってきました。急曲線施工の確実な定義はありませんが、一般的に推進管内径の100倍から50倍(ex. $\phi 1,000\text{mm} \times 50 = 50\text{mR}$)までと考えられていましたが、 $R < 15\text{m}$ の施工などが要求されるようになってきました。またこれらの特殊条件はそれぞれ別にあるのではなく、往々にして長距離施工でなおかつ急曲線を含むように、さらに問題が複雑化した施工があります。

長距離施工については推進施工中に管列の中の1本でも破損したり継手部の漏水が発生したりすれば施工不能に陥りますので、推進管は高品質なものを使用しなければなりません。その上で管外周摩擦のさらなる低減と高品質な推進管の使用および安全の確保が必要です。管外周摩擦の低減には滑材注入をさらに改良しなければなりません。注入材料としては前項で紹介した標準配合の材料よりポリマー系の材料が使用されるようになりました。それは長距離施工において減摩効果は勿論必要ですが、それに加えて拡幅掘削部(テールボイド)の充填性能、長期の残留性、地下水で希釈されないための品質安定性などが重要であり、さらに多量の材料を混練りするため取り扱いの容易さもポイントになるからです。注入方法は長距離、長時間にわたって管列が移動する長距離施工においては、

従来のように先導体の直後でボイドを充填注入するだけでなく、後続の管列からも時間経過などによって減少した潤滑層を補足注入する必要があります。このように滑材の材料と注入方法を改良することによって、従来の推進抵抗の概念とは比べものにならない低推力で施工することが可能になり、前述のような1スパン1,000mを超えるような超長距離施工も可能になっています。

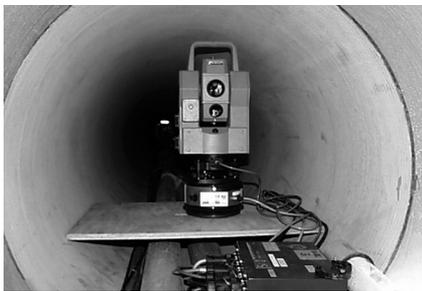


写真-3 トータルステーション方式の自動測量システムにより施工効率がアップ

急曲線施工についてはまず掘進機(先導体)による所定の折れ角の造成です。急曲線を施工する時点でもレベルの制御は必要ですし、掘進機と先頭管の継手の拘束や後続の管列の挙動などによって方向制御が思いようにならないケースがあるため、掘進機の折れ曲がり性能(中折れの角度)は所定の折れ角以上の余裕が必要です。掘進機で十分な折れ角が造成できれば、次の問題は後続管列の追随性ですので、適切な推進力伝達材の挿入が必要です。従来はクッション材を管継手部の全周に貼って管端面の破損を防止しましたが、この方法では曲線内側のクッション材のみが圧縮変形して、推進力の伝達が内側のみで行われるとともに曲線内側の端面で応力集中が発生して圧縮破壊します。そのため曲線を通る推進管の継手部には低発泡性のスチロールでできた推進力伝達材を上下に配置する工法が提案されました。この方法によって推進力は管の上下で伝達され

曲線内側での圧縮破壊が防止できるようになりました。急曲線施工においてはその通過中は頻りに測量管理する必要があります、それを行わなければあっという間に基線から離脱してしまいます。曲線施工開始当初は前述したようにトランシットと鋼巻き尺で管内測量を行いましたが、光波距離計が導入されて測量時間および手間が幾分軽減されました。しかし人が立って歩けないような比較的小さい径($\phi 2,000\text{mm}$ 以下)の曲線施工や長距離でなおかつ曲線を含む施工などにおいては、この測量時間によって日進量が大幅に減少して、非効率な施工になっていました。そのためこの普及期の後半では掘進機の姿勢は掘進機に搭載したジャイロコンパスによってリアルタイムで監視し、管内測量は自動追尾のトータルステーションを用いた自動測量で行うようになり、リアルタイムの監視と測量時間の短縮、自動化が図られました。これらの技術の開発普及によって長距離、急曲線施工も安全確実に行うことができるようになりました。

この進化期の技術進歩によって推進工法の適用範囲が飛躍的に拡大するとともに、長距離急曲線施工などの我が国独自の推進技術が確立され、下水道管路をはじめとする地下インフラ建設技術の主役として確固たる位置づけがなされました。

2.4 転換期

進化期において飛躍した我が国の推進技術ですが、長距離、急曲線、大深度(大土被り)などの特殊施工は2000年代初期にその頂点を極めた感があります。長距離においては1スパン1km超、急曲線においては $R < 15\text{m}$ 、大深度(大土被り)においては $D > 30\text{m}$ などの実績が記録され、行き着くところまで行き着いて次の目標は何かと考へたときに、この技術を開発し進化させた技術者の高齢化がにわかに問

題になってきました。草創期から普及期、進化期には多くの若い技術者が推進工法に関連する仕事に携わり、新しい技術の開発や改良に取り組みました。それは推進技術がまだまだ開発余地のある新しい技術であることが大きな要因ですが、目の前にある大きな市場(下水道普及etc.)の存在や、3Kなどのネガティブな印象が未だ少なく建設工事に対するイメージが今ほど悪くなかったからだと思われます。しかし最近では推進技術だけでなく公共事業や建設業一般の評価が低いため、若手技術者が決定的に不足しています。

また、高度に進化した推進技術を展開すべき市場は従来下水道管路をはじめとする管理設工事でしたが、下水道普及をはじめとするインフラの完備とともにその市場が縮小する傾向になりつつあります。推進工法をさらに発展進化させるためには適用範囲のさらなる拡大と、新たな市場の開拓が喫緊の課題になり、そのための技術開発や市場開拓が開始されています。国内市場においては下水道、上水道、電力、ガスなどの管路(パイプライン)としての使用用途が主流でしたが、最近ではこれらの用途以外でも推進工法の適用事例が増加しています。鋼管を用いたパイプルーフやボックスカルバートを用いた地下通路の建設などには古くから行われていましたが、最近では道路の地下交差(アンダーパス)や合流部の建設のための支保工などにも適用されています。また、都市部における推進工事の弱点であった障害物対策として、その探査、切削、周辺地盤改良などの技術が開発されたり、作業環境改善のための測量、滑材注入、方向制御などの自動化施工が開発されたりしています。

新たな市場の開拓でさけて通れないのは海外市場です。日本の推進技術の

海外展開の先駆けは30年以上前の台湾やシンガポールです。この時期の海外工事は単発で、工事そのものはいろいろな苦労はあっても完成はさせるものの、企業単独の進出であったため工事代金の回収やそれ以外のトラブルの発生などで戻すばみになってしまいました。その後、国内のインフラ整備の本格化にともなう国内事市場の拡大によって、掘進機メーカーなどを除いては海外展開に消極的な時代が継続しました。しかし、ここ数年は国内市場の縮小などで、海外に再度チャレンジする気運が高まっています。

海外とりわけ東南アジアの多くの国ではこれからインフラ整備が始まりますが、計画的な道路整備が行われていないため、道路交通の渋滞が深刻な状態になっています。都市部におけるインフラ整備には非開削による施工が不可欠であり、とりわけ我が国の推進技術は世界に類をみない高度な技術に進化していますので、相手国からも大いに期待されています。今後は過去の苦い経験を繰り返すことのないように安全確実な施工とその前提となる適切な計画設計が望まれます。

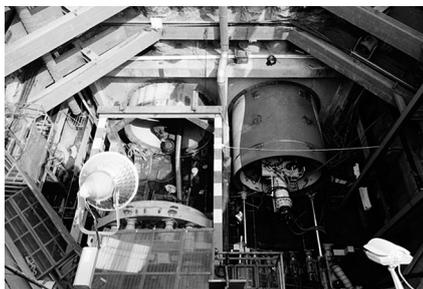


写真-4 インドネシア・ジャカルタのチラウン川放水路プロジェクト

3 生かされた技術と消え去った技術

上記のような歴史をたどって推進工法は世界に冠たる技術に発展しましたが、その草創期から現在に至るまでの

間にはいろいろな技術が提案されて進歩したり消え去ったりしてきました。消え去った原因にはいろいろなことがあると思われます。適用範囲が狭く広がりを持った普及ができなかったり、時期尚早で時代に合わなかったり、オーバースペックでコスト競争に勝てなかったり等々ですが、その原因を思い返して今後の開発に生かすことはこれからの推進技術の発展のために欠かせないのではないかと思います。

そこでこれらのケースについて大まかに整理してみたいと思いますが、筆者の主観が多く入り込むため当て外れで失礼な表現が含まれるかもしれませんがお許しいただきます。またほとんどのケースは一つの要因だけで進化しなかったわけではなく、複数の要因によって淘汰されていったことも事実ですので、そのことも言い添えておきます。

3.1 事例1 適用範囲

適用範囲が狭くて淘汰された技術としては、適用土質の制限の問題として無排土による推進工を前提とした技術開発があります。無排土推進は環境保全や作業効率から理想の推進工法と呼ぶべきものですが、対象土質は軟弱な粘性土や砂質土に限られ、またリバウンドによる推進抵抗の増大などの問題もあるため小口径管推進工の一部に限れます。しかし、この考えは推進残土や添加材のリサイクル技術を生み、今後も残土の減量化やリサイクル技術の開発がなされるものと期待されます。

ブラインド刃口をはじめとする圧密型の実体は無排土ではありませんが、補助工法や密閉型の機械を使わず地下水位以下の地盤を掘進する工法として開発されましたが、これも適用範囲が狭くごく一部の泥土圧式推進工や泥濃式推進工にその変容が見受けられる程度です。

また、小口径管推進工などに見られ

る地上からの探査による位置計測システムも、その深度（土被り）や既設埋設物の存在などによって適用範囲が制限されています。近年では管内からの計測によって先導体位置を計測する方法が増加しているようですが、先導体位置を直接確認する手段としてはまだまだ有用なケースがあると思われます。

3.2 事例2 時期尚早

時期尚早で単発に近い施工件数で途切れているケースとしては、地上から斜め下に向かって推進する「斜坑推進」があります。また、その反対で地下導坑から地上に向かって推進する工法もあります。これらは非常に特殊な施工で、地下貯留管のエア抜き管やエレベータの縦坑などにて採用されましたが、そのような需要がまだまだ多くはないため第2弾、第3弾の案件の出現を待っている状況です。

また一時期は多く施工されましたが最近あまり見受けられない技術として、小口径管曲線推進工のジャイロ台車などを用いて位置計測するシステムがあります。管内を距離測定しながらジャイロを走行させ、その方位角を距離で積分することによって位置計測するもので理論的には完成され今後に期待される技術ですが、蛇行走行による誤差など解決すべき課題も多くあるようです。しかし、大深度（大土被り）の長距離曲線施工などの場合はぜひ使いたい技術なので今後の改良が望まれます。

また少し観点を変えると過去にあった「自動連動中押」技術なども時期尚早であったような気がします。刃口式推進工の時代には中押は必要でしたが、その日進量を考えても「自動連動中押」は必要なかったと思われますが、現在の機械推進における超長距離化の中では再度、新たな中押管の開発とともに「自動連動中押」が必要になってきているのではないのでしょうか。

3.3 事例3

オーバスペックおよびコスト

新しい技術が市場に適応せず淘汰されていく原因としてはこのオーバスペック（コスト）の問題が一番多いと思われます。より良い技術であることは理解するが金が高いのはダメという理由で、採用件数が減りやがて淘汰されるケースです。

例えば小口径管長距離推進における二工程方式で、施工の確実性と精度の確保のために仮管を採用する方式ですが、二工程であるため一工程よりはコストアップになり、また曲線施工に適用しづらいということもあって採用されることが少なくなりました。しかし今後ガス、水道などのさらなる長距離施工で本管を直接埋設するなどのケースには形を変えて再登場が望まれるかもしれません。

また、長距離施工などにおいて管外周に被膜や鋼管などの縁切り材を配置する工法は、理論的には完全ですが、オーバスペックとみなされる場合が多くコスト比較で採用されないケースがほとんどです。推進工法は通常は到達して

貫通するまで管列全体が移動するため、貫通まで裏込め注入などのゆるみ充填措置を講じることができません。しかしこの縁切り材（被膜）の内側には定量の充填材（滑材）を保持することができ、鋼管の場合はそれ自体が周辺土圧を受け持つため、施工中の地盤変異などの心配はなく安心して長距離施工が可能です。このような利点が再認識されてこれからの長距離施工に生かされることが期待されます。

3.4 事例 法規制、環境規制

数十年前までは全盛であった圧気工法や有機系薬剤による地盤改良は現在ほとんど行われていません。それは、法規制や環境規制によるもので、これは時代の流れとともに受容しなければならぬものですし、それらを受けて法を遵守して環境にやさしい技術をさらに開発していかなければなりません。圧気工法に代わっては機械式密閉型の推進技術が飛躍的に進化し、有機溶剤に代わっては噴射式攪拌杭などの確実な地盤改良工法は発展しました。今後も社会のニーズに沿って技術は進化して

いくべきだと考えます。

また、法規制といえばφ800mm以下の刃口式推進も昭和56年ころを境に行われなくなり、小口径管推進の発展の一因になりました。現状では従事する作業員の体格の向上とともにφ800mmあるいはφ1,000mmくらいまで小口径の範疇として、坑内作業のない遠隔操作に規定すべきかもしれません。

4 おわりに

以上、推進技術の進化の歴史を振り返りながらその中で進化した技術や淘汰された技術などを振り返ってみました。確実に言えることは無駄な技術開発は一つもないということです。たとえ淘汰されて現状では原型はなくとも形を変えたり改善を重ねて変質したりの変遷はあっても、よく見れば現状の技術に貢献しています。今後の推進技術の発展の可能性を探るならば、過去を振り返りその背景を学ぶことによってこそ新しい発想が出てくるのではないのでしょうか。