

# 長距離・高水圧下の可燃性ガス・重金属を含む岩盤層でのシールド施工

## The Construction of Shield Method on the Bedrock Layer Which Includes Flammable Gas and Heavy Metal under Long Distance and High Water Pressure

鴫田睦雄\*1 河内浩二\*2 高崎 貢\*3

### 概 要

近年、シールド工事においては施工技術の進歩により施工延長 8.0km の長距離シールド工事実績もでき、長距離シールド工事が多く発注されるようになってきている、これに伴い新技術の採用・使用機器耐久性・施工性に対して各種検討が必要となってきている。現在、札幌市水道局発注の白川第3送水管新設工事(山岳部)において、長距離施工に加え、高水圧下での可燃性ガス・重金属を含む地層のトンネル掘削をφ2890 泥水式シールドで施工中である。本報は、この工事における各種設備計画と、実際の施工状況について報告するものである。

key words : 泥水式シールド、長距離、高水圧、可燃性ガス、重金属、防爆、破砕帯、寒冷地凍結防止

### 1. はじめに

白川第3送水管新設事業は、白川浄水場と基幹配水池を連絡する第3の送水管(内径φ1500~1800)を布設し、第1、第2送水管ルート地震等災害による破損時のバックアップ、および管内貯留水を災害時の応急給水に活用できるようにするなど、災害に強い送水システムの構築を目的とした事業である。当工事は、配管延長17kmの内最大土被り145mの山岳部区間4.24kmをφ2890 泥水シールド機で掘削後、耐震継手を有するφ1800の送水管布設を行う工事である。

当工事の設計時調査ボーリングで最大土被り部付近に大規模な破砕帯が確認されたことにより、シールド施工時に最大1.45Mpaの高水圧下での施工対応が求められた。また、掘進断面は発進から3,600m付近までは泥岩砂岩の互層、以降は安山岩層となっており、各地層とも重金属(砒素、セレン、フッ素、ホウ素、鉛)が含まれており、掘削土に対する重金属の含有・溶出量試験実施後の掘削土搬出が必要となっている。

工事着手に伴い、破砕帯の確認を含め2箇所の追加ボーリングを行い、事前調査では実施されていなかった可燃性ガスについての調査も同時に実施した結果、地下水に最大15.2~89.6V<sub>o</sub>1%の可燃性ガスが溶存していることが確認されたため、これに伴い製作中のシールド機と坑内設備に対し防爆対策を行う事とした。

工事概要を表-1に示す。

表-1 工事概要

主要工種	工事数量	摘要
(1)送水管設置工 うちシールド工	4,289m 4,247m	DUSP管φ1800 一次覆工セグメント (ST,RC:外形φ2750mm)
(2)弁室築造工	3箇所	空気、仕切、併用弁室
(3)仕切弁設置工	2箇所	φ1500、φ600
(4)空気弁設置工	4箇所	φ200

以下に本工事でのシールド掘進に関する各種対応と、施工状況について述べる。

### 2. 長距離施工対策

4,247mの長距離シールド施工に対して、以下に示す各種対策を実施した。

#### 2.1 シールド機(図-1、写真-1)

##### ①カッタビット交換

4回の通常ビット交換と、面板改造を含む2回のローラビット交換を予定、マシンチャンバー内からの交換が可能な構造とした。

②高水圧対応のためテールブラシは3段とし、最後尾ブラシは耐久性を考慮して、ワイヤ部にシールドグリスの代わりに発泡ウレタンを充填したウレコンシールド(写真-2)を採用した。

\*1 Mutsuo TOKITA

北海道支店工事事務 作業所長

\*2 Koji KAWAUCHI

北海道支店工事事務

\*3 Mitsugu TAKASAKI

大阪支社土木部

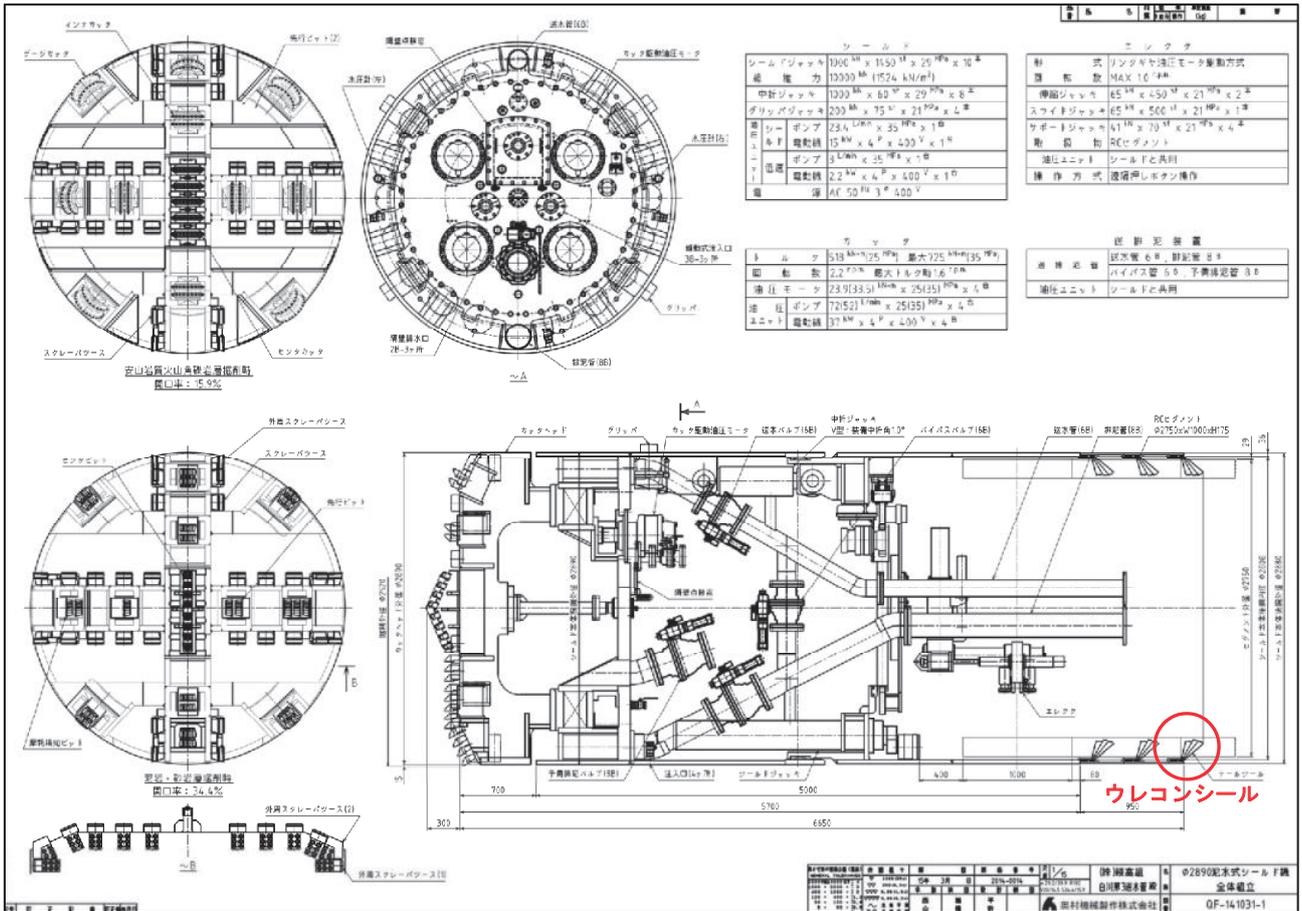


図-1 φ2890 泥水式シールド機概要

③後続台車増設

休憩台車(エアコン、トイレ装備)と、裏込め中継台車を増設した。

2.2 坑内設備

①4.5mm 厚肉 4B 排泥管の採用により長期耐久性を確保した。

②配管ジョイントカラーは摩耗を考慮し、肉厚の S-1 タイプを採用した。

③岩による排泥管の偏摩耗防止を目的に、流体中継ポンプ増設作業等の掘削停止時に排泥管を 45° ずつ定期的に回転した。

2.3 バッテリーロコ

施工サイクル検討の結果、標準のバッテリーロコを採用した場合、掘進 3,000m 以降で、掘進時間+組立時間<セグメント運搬時間となり手待ちが発生するため、2Ring 同時運搬により解消する計画としていた。しかし、マシン防爆改造により切羽荷卸しスペースが減少し、1Ring 運搬に限定されたため、バッテリーロコの最大速度を 5 km/h 仕様から 8 km/h 仕様に変更することで、10Ring/日の施工サイクルを確保した。

2.4 施工状況

現在、4,247m の施工距離のうち 3,700m 付近で安山岩層を掘進中である。通常ビット交換 2 回、ローラビット交換 1 回実施し、泥岩部での摩耗量は当初予想の 70%程度で

あった。テールブラシ部からの漏水は少なく、ウレコンシール対策による耐久性は有効と考えられる。



写真-1 φ2890 泥水式シールド機



写真-2 ウレコンシール(発泡ウレタン充填ブラシ)

### 3. 高水圧対策

高水圧下でのシールド工の国内施工実績は、0.8Mpa が最大であり、当工事で予想された 1.45Mpa の高水圧のままでは施工は不可能と判断した。また想定湧水量も 400L/分程度と予想されたため、掘進は排泥水量を制御することで切羽水圧 0.4Mpa 以下で施工、掘進停止時のみ最大水圧がかかる前提で対策を行った。

#### 3.1 シールド機

①シールド機の各部件は、最大水圧 1.5Mpa が作用するものとして設計した。カッターベアリング部のシールはグリス封入圧を高め、水圧に対抗する 1.5Mpa 対応品（4 段リップシール）を採用した。

②マシン内送排泥バルブ他、各種バルブは全て 2.0Mpa 対応品を採用した。

③マシン隔壁・前同外周部に 3B×3、2B×4 の予備水抜きバルブを設置した。

④テールブラシは、ブラシワイヤ本数を増した高水圧タイプを採用した。

⑤シールドジャッキは、設計推力は 8,000kN であるが、水圧 1.45Mpa 時の反力 9,500kN に対する破損防止対策として装備推力を 11,000kN に増強した。

#### 3.2 流体ポンプ、泥水処理プラント

①流体輸送ポンプとしての流通品は 0.7Mpa 対応品が最大となるため、2.0Mpa 対応品を新規製作した。

②送排泥流体設備管路に使用するフレキシブルホースは、全て 2.0Mpa 対応品を採用した。

③切羽水抜きでの排泥水増加による調整槽のあふれ防止として、泥水プラントに 40m<sup>3</sup> 排泥水槽を追加した。

#### 3.3 セグメントおよび止水シール

①低土被り部 40m 以下については鋼製セグメント（桁高 154mm）、高土被り部については RC セグメント（桁高 175mm）を使用した。

②セグメントシールは、RC 用（W27×H5）は、水膨潤タイプでセグメント形状に合わせエンドレス加工を行なった製品を採用し、実際の水圧を想定した水圧試験を実施し、止水性能を確認した（写真-3）。



写真-3 セグメントシール加圧試験

### 3.4 施工状況

現在までの切羽最大被水圧は 0.8Mpa、湧水量 6L/分であり、切羽水圧は 0.3Mpa に設定し安定して掘進している。

マシン・流体設備に関して高水圧に起因する破損、漏水等は発生していない。フレキシブルホースについては、掘削岩による摩耗のため 500m 程度で交換が必要であった。

切羽水抜きによる排泥水量増加は少量(6L/分×50分=300L程度)であり、排泥水槽は使用していない。

シールド材が原因でのセグメントピース間漏水は現在発生していない。

### 4. 可燃性ガス対策

施工前に実施した追加調査ボーリングで可燃性ガスが確認されたことから、ガス調査ボーリングを 3 箇所追加実施したところ、全箇所可燃性ガスの溶存を確認した。うち 2 箇所では爆発下限限界値 5Vol% を超える濃度 (15.2Vol%、81.7Vol%) を観測した (表-2)。

表-2 可燃性ガス調査結果

地点No.		H26B-1	H26B-2	H26B-3	H26B-4	H26B-5	
試験区間(上端)		GL-m	72.0	130.0	19.0	64.5	44.0
試験区間(下端)		GL-m	75.0	133.0	22.0	67.5	47.0
ガス種類	状況	概要					
孔口ガス	噴出ガスの有無	-	無	無	無	無	無
	メタンガス濃度	VOL%	0.0016	0.0003	0.0003	49.2	0.0033
溶存ガス	溶存ガス分圧	atm	0.151	0.00303	9.15E-06	0.376	0.00222
	空気補正ガス濃度	VOL%	15.2	0.189	0.0009	81.7	1.02
気液分離ガス	分離ガス発生状況	mL/L	**	**	**	12.7	**
	空気補正ガス濃度	VOL%	**	**	**	89.6	**
コアガス	メタン発生量	mL/kg土	**	**	**	0.019	**
	メタンガス濃度	%	**	**	**	0.004	**
飽和度	全圧H(水頭圧+大気圧)	atm	7.76	13.59	2.32	7.08	5.06
	飽和度(P/H)	-	0.0195	0.0002	0.0367	0.0537	0.0899

調査結果を基に、施主と協議を行い東京都水道局の可燃性ガス対策指針に準じた対応を行う事とし設計変更を行った。シールドマシンから 10m 区間の電気機器は防爆構造器具を使用する第 1 類危険場所<sup>\*</sup>、それ以外は非危険場所（避難設備のみを防爆化）とする限定防爆で対応する事とした。

※第 1 類危険場所…爆発性雰囲気、正常状態で生成することがある場所。類別に使用できる防爆構造が決められている。

#### 4.1 防爆構造器具

防爆構造器具とは、労働者の安全を確保するため、労働安全衛生法が適用される「危険場所」で使用できる電気機械器具防爆構造規格に適合し、検定に合格した型式検定合格標章を表示している防爆構造機械器具である。

防爆構造機械器具は、構造的違いで種類が分かれるが、今回は第 1 類危険場所で使用できる 2 種類の構造器具を採用した。

##### ① 耐圧防爆構造

全閉構造で、容器内部で爆発性ガスの爆発が起こった場合に容器がその圧力に耐え、かつ、外部の爆発性ガスに引火するおそれのないようにした構造。

②本質安全防爆構造

正常時および事故時に発生する火花、または、高温部により爆発性ガスに点火しないことが、公的機関において試験その他によって確認された構造。

4.2 シールド機および切羽 10m 区間(第 1 類危険箇所)

①シールド機改造

シールド機が製作途中であったため、防爆機器への換装は改造で対応する事となり、防爆化により機内に収まらない補機類は後続台車(非危険場所)を追加製作し移動設置した。

②エアーカーテンの設置

危険場所で可燃性ガスが発生した際の非危険場所へのガス漏出防止のため、切羽より 10m の位置にあるNo.1 後続台車にエアーカーテンを設置した。

③当該区間のリレー、各種センサー、照明器具、セグメント荷卸し用 1.0t 電動チェーンブロック、機内ジャイロ等の電気機器類は全て防爆機器を使用し、防爆機器以外の電気機器の持込みを禁止した。

4.3 ガス検知器

①ガス検知種別は、可燃性ガス、酸素濃度、一酸化炭素、硫化水素の 4 種類とし、機器は全て防爆構造とした。

②設置箇所は、切羽、後続台車、坑内 300m 毎、および泥水プラントの 17 箇所とし、一酸化炭素と硫化水素は 1 箇所おきに、切羽と泥水プラント部の 2 箇所に高感度可燃性ガスセンサー\* (写真-4) を追加した。

※通常型は、爆発上限の 5VOL% を 0-100%LEL 測定表示で測定するが、高感度型は 1Vo1% を 0-20%LEL 測定表示。



写真-4 ガスセンサー (本質防爆、シールド機内)

③各測定箇所には、検知器と連動する防爆仕様の回転灯、ゴング、スピーカー、非常バルを設置し検知器の一次管理値、二次管理値と連動し自動警報が作動する仕様とした。

④ガス濃度モニターおよび警報器 (写真-5、写真-6) は、中央監視室、事務所、立坑入口に設け、管理値超過時は警報およびモニター画面表示、関係者に警報・復帰メールを送信する仕様とした。



写真-5 ガス検知警報器 (耐圧防爆、立坑)



写真-6 ガス濃度モニター (立坑入口)

⑤防爆場所内で二次管理値(1.0Vol%)を超える可燃性ガスが発生した際は、検知器連動で坑内動力・照明幹線の電源を自動遮断し、着火源を遮断する仕様とした。

4.4 坑内換気

通常シールド坑内の換気設備にはビニール風管を用いた送気方式が用いられるが、限定防爆方式での換気設備は、マシンテール部で発生した可燃性ガスによる坑内汚染防止を図るために、地上部に設置した大容量吸気ファン(最大換気量 300m<sup>3</sup>/分)による吸気換気となる。

ここで風管には吸気による負圧がかかるためスパイラル鋼管(φ 600、t=0.8~1.2)を採用した。図-2 にシールド坑内換気設備図を、写真-7 に φ 600 坑内吸気配管を示す。

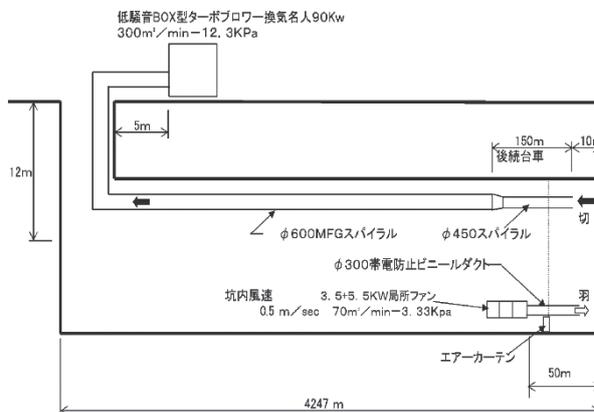


図-2 シールド坑内換気設備図



写真-7 φ600 坑内吸気配管

#### 4.5 その他

①非防爆部における、坑内電源遮断停電時の避難対策として、非常灯(50m 毎)、ガス検知器・坑内インターホン(300m 毎)を防爆構造・別電源とし設置した。

②バッテリーロコ前方監視カメラはマグネット固定の無線式を採用し、危険場所立入時に取り外せる仕様とした。

③第1類危険場所で作業する人員は、着火源となりえる静電気の防止のため、職員を含め全員が帯電防止作業服着用を義務づけた。

④坑内で使用するハンディライト、ヘッドライトは、LED 防爆型を採用した。

⑤テールシールグリス用注入ポンプは、防爆仕様品を製作した。

#### 4.6 施工状況

・可燃性ガスは、シールド掘進時で60回(最大7%LEL)検知された。いずれも高感度センサーによるもので通常センサーでは検知されていない。通常センサーは、誤作動防止のため低濃度では感度調整<sup>\*</sup>を行っていることが原因であった。

※センサーは、ガスと触媒接触時の熱反応で濃度検知するため、急な温度変化で誤作動を起こすことがあるため。

・ピット交換時のチャンバー内水抜き作業時は、携帯ガス測定器で6回(Max38%LEL)確認されている。

・可燃性ガスはすべてテール部からの漏水や、水抜きに伴う加圧状態からの大気圧解放により発生した。濃度は事前ガス調査に準じた結果となっている。

・ガス発生時は、状況により換気量増大、ガス拡散用局所ファン吐出位置変更、局所ファン追加の組み合わせで拡散排気にて対応した。

### 5. 重金属含有土砂の処分

シールド施工断面の掘削土砂には、事前調査で重金属が含まれていることが確認されている。

シールド掘削土は、泥水処理プラントから一次処理土(粒径0.74mm 以上、残土)と、汚泥である二次処理土(粒径

0.74mm 未満、脱水処理汚泥)に分別排出する。場内に設けた200m<sup>3</sup>×14ピット=2,800m<sup>3</sup>の土砂ピットに仮置きし、含有・溶出量試験を実施後、試験結果に応じて、2(一次・二次)×2(基準値超過・以下)=4箇所の処分先に振り分ける。なお、重金属試験に関しては、土砂ピット搬入開始から結果が判明するまでに最短で10日間程度必要となる。

#### 5.1 重金属基準値超過土砂(一次・二次処理土)

重金属基準値超過土は、土砂ピットで土砂専用コンテナ積載車両(写真-8)へ積込・運搬→JR札幌貨物ターミナルで貨物列車へ積換(写真-9)・運搬→函館貨物ターミナルでコンテナ運搬車両へ積換・運搬→太平洋セメント上磯工場(北海道北斗市、運搬距離約350km)で石灰石とともに焼成されセメントとして再利用される。



写真-8 土砂専用コンテナ積載車両



写真-9 JR貨物列車コンテナ積載状況

①一次処理土(残土)は、(一社)土壤環境センター発行の管理票(有害物質種別、試験結果等を記載)交付による管理処分となる。

②二次処理土(産廃:脱水汚泥)は、電子マニフェストによる管理処分となる。

#### 5.2 重金属基準値以下土砂(一次・二次処理土)

①一次処理土(残土)は、通常土砂として処分。

②二次処理土(産廃:脱水汚泥)は、電子マニフェストによる管理処分となる。

#### 5.3 施工状況

・JR貨物は、北海道への物流量の半分を担っているため事故・災害による運休、年末・年度末の貨物量増大等の発生時に物資の優先順位があり、土砂コンテナ運搬に台数制限が発生する。

・2016年12月の大雪では、台数制限が発生し急遽場内に2,000m<sup>3</sup>の土砂仮置場を設け対応した。

## 6. 破砕帯対策

計画時調査ボーリングにより、1,430m付近の最大土被り部に大規模な破砕帯があることが予想され高水圧対応が必要とされたが、併せて破砕帯によるシールド機締付けによる掘進不能が予想され以下の対策を行った。

### 6.1 マシン後胴部の縮径

今回のシールド機は、マシンピット交換時に、カッター地山噛み込みを解除するために中折装置を装備しており、マシン本体は前胴と後胴に分割されている。そこで後胴部は前胴に対し、10mm縮径し、前胴通過後の締付け軽減対策とした。

### 6.2 シールドジャッキ推力の増強

高水圧対策としてシールドジャッキは10,000kNを装備推力としたが、ジャッキ自体は1,100kN×10本とし、1,000kNの余力を持たせた。

### 6.3 施工状況

・当初予想された大規模な破砕帯は、追加調査ボーリングの結果掘削断面付近には発見されなかったが、1,475m付近で小規模破砕帯によるシールド機締付けが発生、推力3,200kN→76,000kNに上昇、速度も20mm/分→3mm/分迄低下した。

・前胴部通過後は、推力が徐々に低下しマシン縮径による効果を確認できた。

## 7. 寒冷地凍結防止対策

施工場所は、札幌市南区内にあり年間降雪量平均6m、最低気温が-18℃まで下がることもあり凍結防止対策を必要とした。

### 7.1 防音ハウス

立坑ヤードは、防音壁で設計されていたが降雪時の作業性を考慮し屋根を増設し、防音ハウス仕様とした。

### 7.2 各種配管凍結防止

泥水プラントと発進立坑は250m程度離れており、工事

用道路脇に送泥管6B、排泥管4B、排水管4Bを設置した。泥水プラント各種設備(写真-10)は屋外に設置しており、計算上8時間程度で各配管が完全凍結するため、全ての配管(延長約1,600m)にヒーター線と発泡ポリスチレン配管カバー・ポリエチレンシートにより保温養生を行った(写真-11)。

### 7.3 泥水プラント

①各種タンク類は、攪拌機付タンクを除き各タンクに水中ポンプ2台を投入し、冬期間中はタンク内を水流により攪拌し、対流による凍結防止を行った。

②フィルタープレスは、シート囲いとジェットヒーターによる24時間保温、凍結解除用として温水ワッシャーを使用した。

③週末等の現場休止時においては、給水ポンプの循環作動、立坑部配管は水抜きを実施した。

### 7.4 施工状況

・初年度の冬期作業においては、バルブ等の凍結膨張割れ、立坑縦配管や裏込め用ケイ酸の凍結、フィルタープレスの濾布凍結による作動不能、冬季休業明けの坑内80m区間の配管凍結等が発生した。

・屋外配管ヒーター、各タンクのポンプによる水流攪拌は、十分な効果を発揮し、冬季休業期間中でも凍結被害は発生しなかった。

・シールド工事においては、裏込め注入、機器類の冷却・清掃等に多くの水を使用する。特に泥水式の場合は工法的にも多量の水を使うため、寒冷地での施工は凍結防止については計画段階からの十分な配慮が必要となる。

## 8. おわりに

本工事は、長距離施工、高水圧、可燃性ガス、重金属含有土、破砕帯、寒冷地凍結防止等の様々な要素を含んだシールド工事であり現在施工中である、対策の有効性については当初計画と条件が変わったものもあり全てが有効であったと判断できないが、実際の施工で確認された課題を、今後のシールド工事で有効活用できるよう改善を行っていく。



写真-10 泥水プラント(2017年1月21日撮影)



写真-11 送排泥管凍結養生