

南極ドームふじ観測拠点における氷床深層コア掘削

藤井理行¹・東 信彦²・田中洋一³・高橋昭好⁴・新堀邦夫⁵・中山芳樹⁶・本山秀明¹・
片桐一夫²・藤田秀二⁷・宮原盛厚⁴・亀田貴雄⁸・斎藤隆志⁹・
斎藤 健⁵・庄子 仁⁸・白岩孝行⁵・成田英器⁵・神山孝吉¹・古川晶雄¹・
前野英生¹⁰・榎本浩之⁸・成瀬廉二⁵・横山宏太郎¹¹・本堂武夫⁵・
上田 豊¹²・川田邦夫¹³・渡辺興亜¹

Deep Ice Coring at Dome Fuji Station, Antarctica

Yoshiyuki FUJII¹, Nobuhiko AZUMA², Yoichi TANAKA³, Akiyoshi TAKAHASHI⁴,
Kunio SHINBORI⁵, Yoshiaki NAKAYAMA⁶, Hideaki MOTOYAMA¹, Kazuo KATAGIRI², Shuji FUJITA⁷,
Morihiro MIYAHARA⁴, Takao KAMEDA⁸, Takashi SAITO⁹,
Takeshi SAITO⁵, Hitoshi SHOJI⁸, Takayuki SHIRAIWA⁵, Hideki NARITA⁵,
Kokichi KAMIYAMA¹, Teruo FURUKAWA¹, Hideo MAENO¹⁰, Hiroyuki ENOMOTO⁸,
Renji NARUSE⁵, Kotaro YOKOYAMA¹¹, Takeo HONDO⁵, Yutaka AGETA¹²,
Kunio KAWADA¹³ and Okitsugu WATANABE¹

Abstract: Deep ice coring was carried out at Dome Fuji Station, Antarctica in 1995 and 1996 following a pilot borehole drilled and cased with FRP pipes in 1993, and reached 2503.52 m in December 1996. Total numbers of ice coring runs below the pilot borehole and chip collection were 1369 and 837 respectively. The mean coring depths per run and per day were 1.75 m and 8.21 m respectively. We report the outline of the coring operation, the system, coring method, and troubles encountered during the coring work.

¹ 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

² 長岡技術科学大学. Nagaoka University of Technology and Science, 1603-1, Kamitomioka-cho, Nagaoka 940-2137.

³ (株) ジオシステムズ. Geosystems Inc., SDC Nanyodo Bldg. 14-4, Hongo 1-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033.

⁴ (株) 地球工学研究所. Geo Tecs Co. Ltd., 4-29, Shirakabe, Higashi-ku, Nagoya 461-0011.

⁵ 北海道大学低温科学研究所. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Kita-19, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060-0819.

⁶ (株) 日本パブリックエンジニアリング. Nihon Public Engineering Co. Ltd., Sano Bldg. 45-19, Higashi Kasai 6-chome, Edogawa-ku, Tokyo 134-0084.

⁷ 北海道大学工学部. Faculty of Engineering, Hokkaido University, Sapporo 060-0013.

⁸ 北見工業大学. Kitami Institute of Technology, 165, Koenmachi, Kitami 090-0015.

⁹ 京都大学防災研究所. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho, Uji 611-0011.

¹⁰ 通信総合研究所. Communication Research Laboratory, Nukui-kitamachi 4-chome, Koganei-shi, Tokyo 184-0015.

¹¹ 北陸農業試験場. Hokuriku National Agricultural Experiment Station, 2-1, Inada 1-chome, Joetsu 943-0193.

¹² 名古屋大学大気水圏科学研究所. Institute for Hydrospheric-Atmospheric Sciences, Nagoya University, Furocho, Chikusa-ku, Nagoya 464-0814.

¹³ 富山大学理学部. Faculty of Science, Toyama University, 3190, Gofuku, Toyama 930-0887.

要旨: 南極ドームふじ観測拠点において、1993年パイロット孔の掘削とケーシングが行われたのに引き続き、1995年から2カ年にわたり本格的な深層コア掘削が進められ、1996年12月に2503.52 m深に達した。本掘削におけるコア掘削の総回数は1369回、チップ回収作業は837回に及んだ。1回の平均コア掘削長は1.75 m、1日の平均コア掘削長は8.21 mであった。本報告では、現地で使用された掘削システムの概要とともに、掘削の経過、および掘削の方法を述べるとともに、掘削中に生じたさまざまなトラブルについても取られたその対策とともに報告し、併せて今後の課題を示した。

1. はじめに

南極における氷床深層コア掘削は、地球環境の長期にわたる変動を解明するため、1989年3月測地学審議会が建議した「地球科学の推進について—地球科学の現状と将来—」の中で推進すべき地球科学的課題の一つとしてとり上げられた。1990年6月の南極統合推進本部総会では第IV期南極地域観測5か年計画の中で重点的に推進する研究計画の一つとして「氷床ドーム深層掘削計画」が決められた。

こうした背景のもと、国立極地研究所は気水圏専門委員会の中に「ボーリングに関する作業委員会」を1988年に設置した。この作業委員会の中に掘削機開発委員会を組織し、技術的課題を含めた掘削計画の検討に着手した。掘削機の開発は1988年に開始し、低温室や掘削実験塔での実験の他、南極(1989年、1990年)、グリーンランド(1991年、1992年)、北海道陸別町(1992年、1993年、1994年)でプロトタイプや試作機のテストを行った(藤井ら、1990; 成田ら、1995)。また、1993年には、第4回国際氷掘削技術ワークショップを東京で開催し、海外の掘削技術者との情報交換を行い開発の糧とした。南極におけるドーム計画の準備作業の始まりとともに、1994年に気水圏専門委員会は新たに「氷床ドーム計画作業委員会」を設置し、掘削機開発委員会は掘削技術委員会に改組された。掘削技術委員会は、掘削機の実用機の製作に関与するとともに、ドームふじ観測拠点での掘削における国内での技術支援組織として機能した。

ドームふじ観測拠点での掘削は、1991年からのルート開拓と物資の輸送、1993–94年の第34次隊による112 mまでのパイロット孔掘削とケーシング、1994–95年の第35次隊による基地建設を経て、1995年第36次越冬隊により本格的に開始され、1996年第37次越冬隊により当初目的の2500 mを超え終了した。目標深度達成後、掘削孔の収縮のためドリルはスタックしたが、高密度液注入によりその回収努力が続けられている。

氷床深層コア掘削機の開発については、これまで藤井ら(1990)、TANAKA *et al.* (1994)、成田ら(1995)、高橋ら(1996)などで報告されている。本報告は、ドームふじ観測拠点における掘削の経過とともに、実際に使用した掘削システム、採用した方法、遭遇したトラブルおよび今後の課題について述べるものである。

2. 掘削システムと掘削施設

2.1. ドリル

ドリルの型式としては、液封電動メカニカル型(図1)で、その仕様を表1に示す。ドリルのチップ室内部を1995年(第37次隊用)と1996年(第38次隊用)に改良したので、その経過も併せて図1に示した。掘削は、電動モーター⑮(文中の数字は図・表の中の番号に対応してい

表1 JARE 深層ドリルの仕様一覧表
Table 1. Specifications of JARE deep drill.

図中 No.	品 名	仕 様
ドリル形式：液封孔用電動メカニカルドリル		
ドリル寸法：長さ 8593mm 径 122mm 重量 180kg 耐圧 30MPa		
コア寸法：径 94mm 最大コア長 2200mm		
1	シュー	数3個 取替えにより高さ可変 切削ピッチ 2~6mm
2	刃(カッター)	数3個 すくい角 15,30,40度 材質 DC53 及び ATT
3	コアキャッチャー	ブロック型及びドッグレック型
4	カッターマウント	材質 JIS SKTM18 相当
5	ジャケット	長 2272mm 外径 122mm 厚 3.5mm 材質 SUS304TP
6	コアバレル	長 2321mm 外径 101.6mm 厚 2.1mm 材質 SUS304
7	アルキディアポンプ	数3本 幅 15mm 厚 6.2mm 材質 高密度ポリエチレン
8	ブースタースクリュー	径 112mm ピッチ 100mm 材質 SUS304
9	駆動シャフト	長 3220mm 外径 34mm 厚 3.4mm 材質 SUS304
10	チップ室	長 3260mm 外径 122mm 厚 3.5mm 材質 SUS304
11	フィルター	径 110mm 材質 ナイロン+ステンレス金網
12	液排出口	数4個 径 30mm
13	シャフトカプラー	ワンタッチにてシャフトを接続
14	減速器	遊星式 減速比 1/170 長 175mm 径 80mm
15	モーター	DC ブラシレスモーター 定格 270V 600W 12000rpm トルク 0.48Nm 長 206mm 径 80mm
16	コンピューター	モニター項目 10 モータードライバー 通信モデム
17	耐圧室	長 1412mm 外径 122mm 厚 11mm 耐圧 30MPa 材質 SCM435
18	リニア電気接点	極数 4 容量 5A ストローク 100mm
19	アンチトルク	リーフスプリング型 数 3 長 640mm 幅 25mm 厚 2.5mm
20	ローリ-電気接点	スリップリング 極数 4 容量 5A2極 0.3A2極
21	ケーブルグリップ	PMI 社製 エバーグリップ 7.8mm 用
22	ケーブル	表 2 参照
23	逆流防止弁	バタフライ型 径 110mm 材質 ナイロン+アルミニウム
24	増設液排出口	1個 径 25mm ステンレス金網
25	遊動型フィルター	径 110mm 材質 ナイロン+ステンレス金網
26	穴あきシャフト	長 3220mm 外径 34mm 穴 2mm 径 17280個
27	逆流防止弁	リフト型 径 114mm 材質 ナイロン+アルミニウム

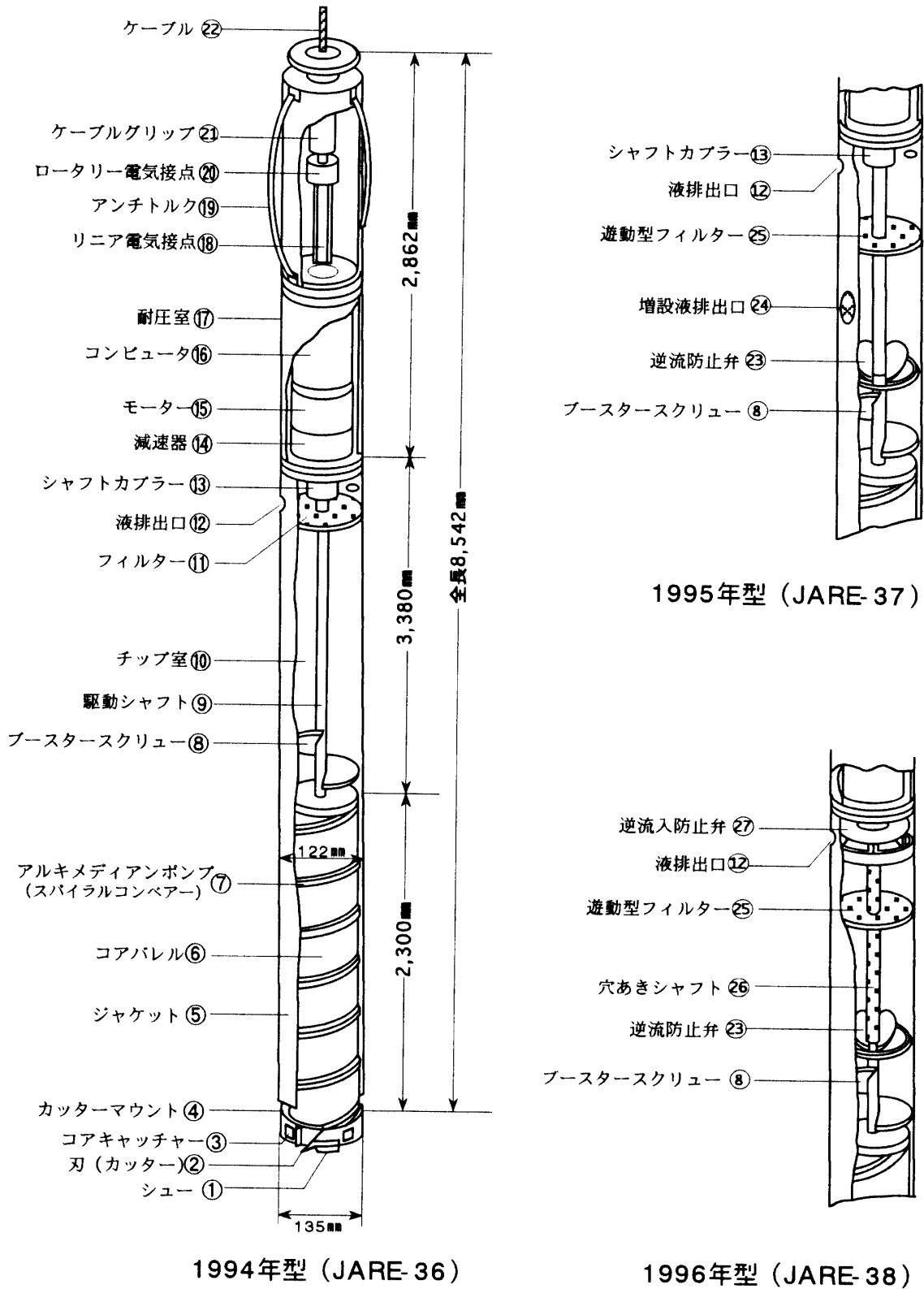


図1 ドリルの概観

Fig. 1. Schematic diagram of JARE deep ice coring drill.

る)によりコアバレル⑥を回転させ先端に取り付けた刃(カッター)②によりドーナツ状に氷を削って行く。1回のランで掘れる長さはコアバレルの長さで決まり本ドリルでは最長2.2 mである。削った氷くず(チップ)を放置しておくとう掘削孔が閉塞されてしまうので、コアバレル表面に巻きつけたアルキメディアンポンプ(スパイラルコンベアー)⑦で上方に運びチップ室⑩に貯蔵する。このチップの回収方式が各国・各プロジェクトで異なっておりドリルを特徴づけるポイントである。アルキメディアンポンプとブースタースクリュー⑧の組み合わせは、故鈴木義男北大名誉教授、北大低温研新堀邦夫技官により提唱され、凍土ボーリング用、湧水量の多いパタゴニア氷河等の液中用浅層ドリルに実用化されていたが、本格的な液中ドリルとして実用化したのは本機が最初である。切削の反動による本体の空転は上部に取付けたアンチトルクシステム⑨で防止する。リーフスプリングと言う放物線状に曲げた三枚の板ばねを孔の壁に押しつけることにより保持トルクを得る構造である。稼働中のドリルの状況を把握する事は、安全で良好な掘削を得るために非常に重要である。そのために刃先圧力・ドリル傾斜・バレル回転数など10項目についてセンサーを取付け、ドリルに搭載したコンピューター⑬と通信モデムにより地上へ送り制御室で常時モニター出来るようにした。

以下ドリル各部についてその概要を説明する。

- ① シュー: 刃の底に組み合わせると靴の形になるのでシューと呼ばれ、刃先の氷への食い込み量を決定する。通常バレル1回転で進む距離、即ちピッチで表し、2 mm から6 mm まで五種類を製作し氷の硬さや切削状況を見て選択した。
- ② 刃(カッター): 刃は -50°C 以下の低温にさらされるだけでなく、常に切削による衝撃を受けるので最も消耗が激しい部分である。そのため開発段階においても多くの実験を通じ十分検討を行った。その結果、頑丈なブロック型であること、ぐらつかないようにしっかり取り付ける事、すくい角・にげ角など刃の形状が適切である事、低温脆性に強い材料を使用する事、などが重要であるとわかり、図2に示すような刃を製作した。角度の異なる刃を製作したが、すくい角 $30\sim 40$ 度を標準とし 15 度の物は食い込み不良が起きた時の対策用とした。ドームふじの低温で硬い氷を削るため、本機の刃は全体的に小さなすくい角を持った刃になっている。材質は、JISで標準化されている材料は低温脆性の点で問題があったので、鋼メーカーのオリジナル鋼を採用した。表1のDC53は大同特殊鋼製、ATTは東洋刃物製を示す。ATTは少量のニッケルを含んでおり良好な結果を得た。刃はドリルの最も重要な部分であるため、使用後の刃を持ち帰り詳しく考察を行ったので別に独立して報告する予定である。
- ③ コアキャッチャー: 図3に示す様なブロック型とドッグレッグ型の二種類を製作した。ブロック型はコアに接触するすくい角がマイナスであることが特徴である。いずれのキャッチャーも硬い氷に対しては食い付きが悪く、コアをキャッチできなかったため現場で大幅に改造せざるを得なかった。
- ④ カッターマウント: 刃やキャッチャーを取付けるためのリング状の部分である。1996年に

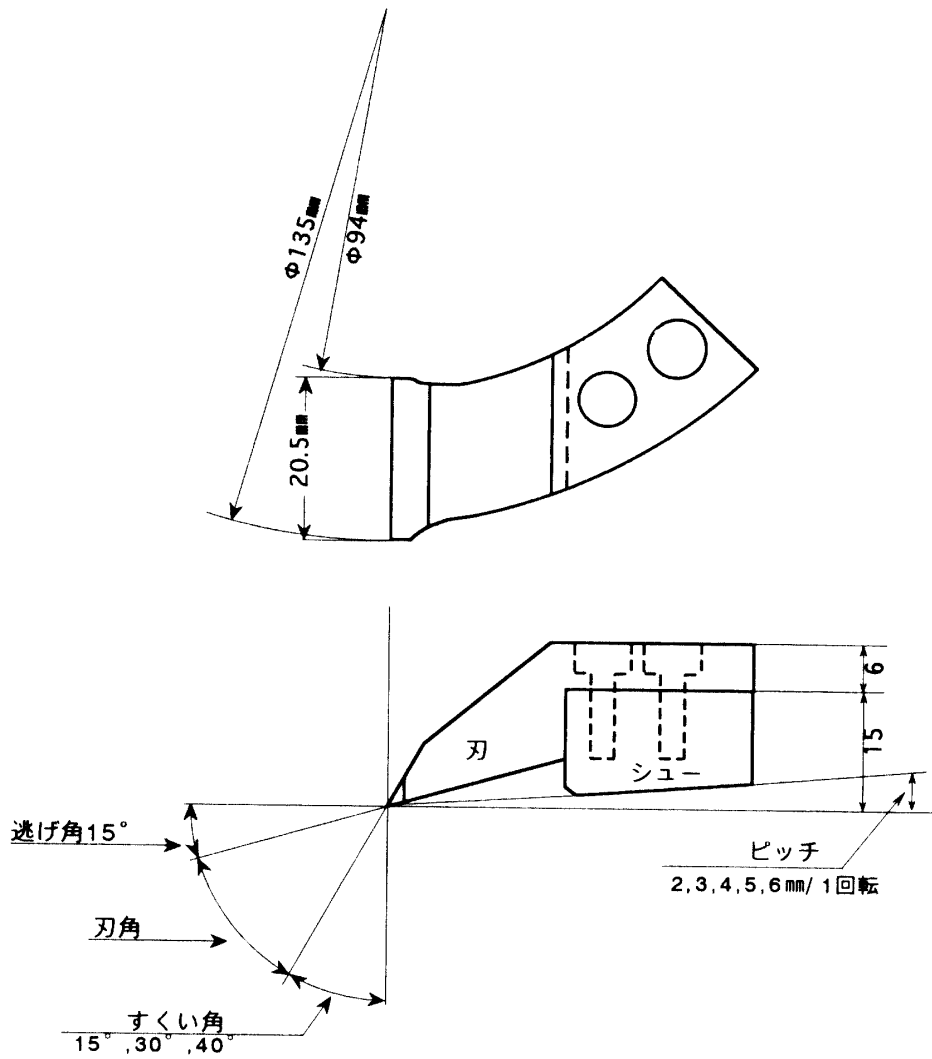


図2 切削刃の形状
Fig. 2. Cutter.

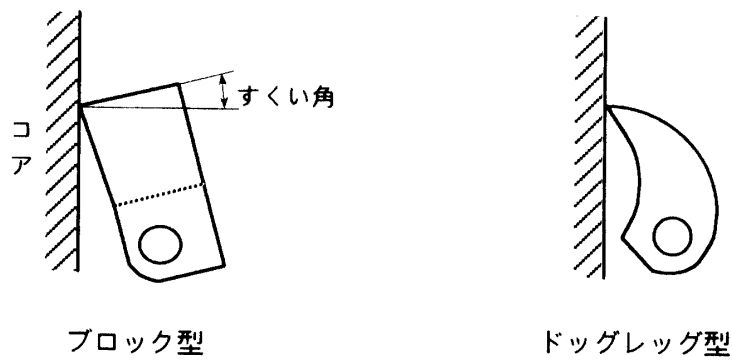


図3 コアキャッチャー
Fig. 3. Core catcher.

は3個製作した内2個に亀裂が発生した。低温脆性に耐えるため材質・形状・加工法などに改良が必要である。

⑤ ジャケット (外管): 既製のパイプでは適切な寸法の物がなかった上、内面にチップを持ち上げる縦方向のリブ (突起) を付ける必要があったため、住友金属工業に特注した。材質はSUS304で、内面に幅10 mm、高さ0.5 mmのリブが6本60度間隔で設けてある。

⑥ コアバレル: 1回の掘削で採れるコアが長ければ全体の掘削回数が減り、作業時間も大幅に短縮できる。ドームふじでの深層掘削は当初2年の越冬期間を予定していたこと、ヘリコプターでの輸送上長さの制限があったことから、バレル長 (コア長) を2 mとした。

⑦ アルキメディアンポンプ (スパイラルコンペアー): 厚さ6.2 mmの3本のポリエチレンベルトをコアバレル表面に螺旋状に巻き付けたものである。結果として大きな問題はなかったが、ポンプとしての基本的性能がよく分かっておらず、揚程・容量などを実験で確認する必要がある。この部分の改良によりチップ回収率の向上・回収したチップの圧密が期待できる。

⑧ ブースタースクリュー: 駆動シャフトに巻き付けたスクリューである。アルキメディアンポンプで運ばれてきたチップに更に上昇力を与え圧密を行う。本ドリルでは1巻のみであったが複数巻あるいは、2段型などの検討をする必要がある。

⑩ チップ室: 切削チップを貯蔵する事を目的とする。上部にはフィルターがあり、液のみドリル外へ排出する。しかし、1994年型ではチップの圧密不足でチップ室内は液状であったと思われる。ドリルを引き上げる時一旦貯蔵したチップの再流出に悩まされた。あり合わせの材料で対策を構じたが完全ではなく、ウインチの巻き上げ速度を極端に落とさざるを得なかった。

⑭ 減速器: バレルの回転数が速すぎると切削に滑りを生じ、遅すぎると時間を浪費する。今までの経験と実験をもとに標準回転数を70 rpmとした。モーターの定格回転数は12000 rpmなので減速比は1/170である。既製の減速器では性能・寸法両面で適合するものがなかったため、特別に製作した。遊星3段式の減速器である。

⑮ モーター: 小型・高出力でカーボンブラシの無い直流モーターが理想であるが、市販のものでは仕様を満足できるものはなかった。そのため高岳製作所に特注した。モーター制御回路はドリルコンピューターと合わせて設計し、同一のシャーシーに組み込んだ。

⑰ 耐圧室: コンピューター・モーター・減速器を収納する。3000 m級の掘削を念頭に置き、最高使用圧力30 MPaとして設計した。材料はSCM435の調質材を用い、設計は压力容器の構造規格JIS-B8243に従った。その結果、胴板とふた板の厚さは各々11 mmと32 mmになった。この耐圧室からは多くの電線やモーターシャフトを外へ出さなければならない。そのためのシールとして、コナックス社製の電線シール、シャンバン社製のシャフトシールを採用した。高圧のもとでシャフトが回転するためシャフトシールのみならず、シャフト自体にも摩耗が発生し、液漏れが見られた。

⑲ アンチトルク: スケート型と比較実験の結果、板ばね式のリーフスプリング型とした。寸

法は幅 25 mm、板厚 2.5 mm、取付長さ 640 mm で、 $Y=0.001X^2$ の放物線状に曲げたものを標準とし板厚・曲げ形状の異なったものも製作した。材質は、1994 型では、ばね鋼 (JIS SUP) であったが、低温脆性により折れた場合ばねが孔壁に突き刺さるとドリルが回収出来なくなる恐れがあるため、1995 年以後は低温脆性に強いステンレス系材料 (SUS-304CSP) で製作した。

②③~②⑦逆流防止弁など: 1994 年型の欠点を解消するために 1995 年型ではバタフライ式の逆流防止弁②③で流出を防止したり、駆動シャフト上を自由に動く遊動フィルタ②⑤でチップを圧密する事を考えた。又、液の排出をスムーズにし、チップの取り込みを良好にするためチップ室側面にもフィルタ②④を増設した。それでもまだ完全とは言えず、先端スタビライザーの短縮等現場での改良を行ったが深くなるにつれて自然にこの問題は解消した。表面では低温のためチップがパウダー状になっていたものが、深部では氷温も上がりチップの粒径が大きくなったためと思われる。1996 年改良型では、チップ室上端にリフト型逆止弁を設けウインチ巻き上げ時に液がチップ室内に流入するのを防止したり、駆動シャフトに無数の小穴をあけ、濾過面積の増大を図ったが、第 38 次隊は掘削を行っておらずこれらの対策の効果は不明である。

2.2. ウインチ, ケーブル, マスト

ウインチ、ケーブル、マストの最終仕様を表 2 及び図 4, 5, 6 に示す。

これらの機器の設計については高橋ら (1996) において詳しく述べた。ウインチは小型・頑丈・高効率の仕様で、マックスプル工業が製作した。2 年間の運転で故障は起こらず信頼性に優れていた。

①モーター・インバーター: 東芝製 11 kW のベクトルインバーター及び専用モーターを採用した。0 rpm から 1500 rpm までトルクが一定であること、変速範囲が 1:1000 と広い事が採用の主な理由である。メーカーが保証する保存温度を遥かに超えたが幸い問題も無く、操作性やウインチとの相性も良く掘削には最適のシステムであった。このシステムはドリルを下ろして行く場合のブレーキとして、モーターで発電しその電力を抵抗器で消費する型の回生発電制動方式を取っているが、2000 m を超えるような長い距離の連続制動は想定しておらず 1996 年には抵抗器が焼き切れてしまった。後述のように代用品で事無く運転を継続できたが、抵抗焼損の問題は設計時に検討すべき項目であった。

②ウインチ減速器: トルクや減速比など必要な仕様と、共通ベース上の配置を満足させるためには既製のものでは適当なものが無く特注品となったが、その結果、形状・効率・強度等に置いて十分満足出来るものとなった。内部の歯車の予備を準備したが全く摩耗は見られず取り替える必要もなかった。

⑧ケーブル: 掘削では非常に実績が多いロチェスター社製の外径 7.72 mm、長さ 3500 m のアーマードケーブルを予備も含め 2 本を用意した (図 5)。ドリル側端末の固定は PMI 社製端末保持装置 (エバーグリップ) を用いた。ケーブルの一点で固定することなく特殊な螺旋状ワイ

表2 JARE 深層掘削ウインチ、ケーブル、マストの仕様一覧表
 Table 2. Specifications of winch, cable and tower of the JARE deep coring system.

図中No.	品名	仕様
ウインチ：マックスブル工業製 巻上荷重 1100kg 液中平均速度 51.6m/min		
ケーブル巻量 3500m 寸法 長 2000mm 幅 1650mm 重量 2345kg		
巻取り方式 リーバス式 モーター11kW ベクトルインバータ制御		
マスト：トラス組鋼製マスト 高 10.5m 幅 0.4m×0.4m シーブ径 580mm 液受け用樋		
図中No.	品名	仕様
1	モーター インバータ	東芝製 3相 200V 11kW 1500rpm 7.1kgm インコダ付 東芝製 ベクトル制御 11kW 変速比 1:1000 0~1500rpmにて 定トルク 発電制動方式 保護機能 11項目
2	減速器	特製 平行ギヤ式 減速比 1:49
3	ケーブルドラム	リーバス溝切り式 外径 900mm 幅 804mm ケーブル巻量 3500m
4	手巻きウインチ	マックスブル工業製
5	トラバーサー	整列巻取り装置 リーバス式シフター
6	ロータリー電気接点	スリップリング 極数5 容量 5A
7	足踏みブレーキ	バンド式
8	ケーブル	ロチェスター社製 長 3500m 径 7.72mm 導線数 7 破断強度 37.4kN 空気中重量 246kg/km
	電磁ブレーキ	無励磁作動型 外径 190mm 保持トルク 147.1Nm
	予備モーター	シボ工業リグコン無断変速機付 3相 200V11kW 8.4~500rpm
	鳥居	電気ブロック用 高 3m 幅 3.7m
	電気ブロック	斜め吊り型 荷重 1t 揚程 12m 3相 200V1.5kW
	張力センサー	ケーブル張力検出 ロードセル式 荷重 5t
	ケーブル長さセンサー	ケーブル速度兼用 ロータリーエンコーダ式 応答パルス 30kHz

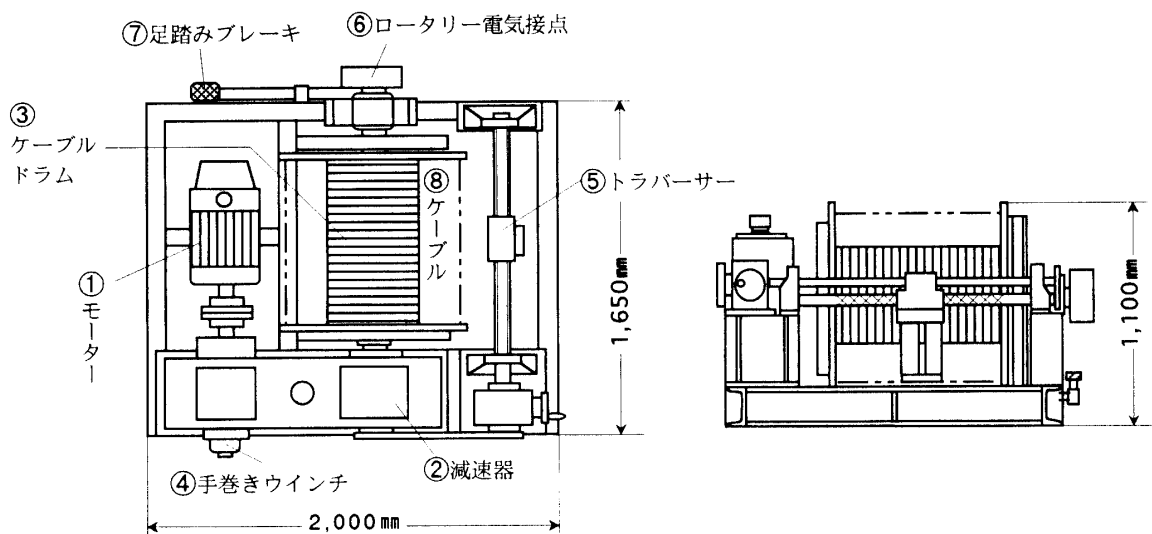


図4 ウインチの平面図(左)と側面図(右)

Fig. 4. Winch.

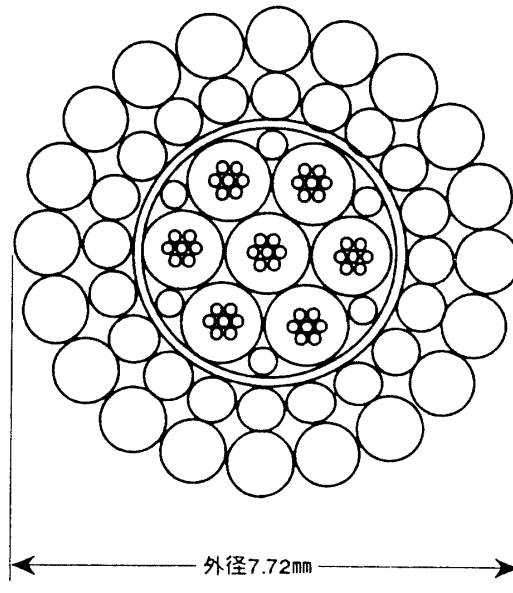


図5 アーマードケーブルの断面図. 円はピアノ線, 中央の7本は信号線.
Fig. 5. Cross section of a 7-conductor armored cable.

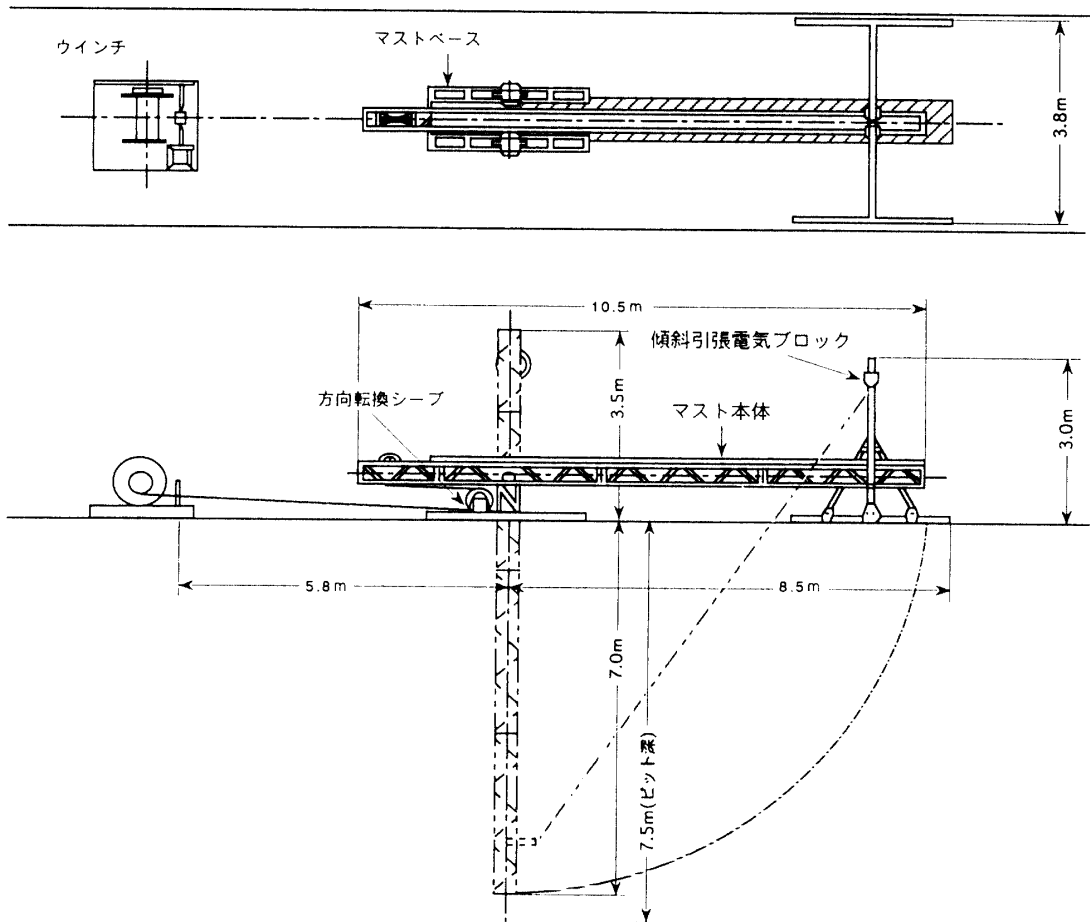


図6 起倒式マストの平面図(上)と側面図(下)
Fig. 6. Tower and winch.

ヤーを巻き付けて保持するためケーブル独自の強度を損なう事がない。繰り返しの使用のため、内部の導線やアーマー線の断線が発生し予備ケーブルに取り替える事態も生じた。

③⑤ケーブルドラムシステム：このケーブルドラムの特徴は使用するケーブルの径・長さ、荷重などに合わせてドラム上に溝をつけたもの(③)で、ケーブルを左右に送るトラバーサー(⑤、シフター)を併用することにより常時整列巻きが確保できた。

マスト(図6)：ドリルをつり下げるとともに、ドリルの組立点検台の役割も加えた起倒式である。断面40 cm角、長さ10.5 m高のトラス構造である。作業場の天井高さが4 mであるため、直立すると床上3.5 m床下7 mとなった。水平にするためには電動ブロックでマストの端末を巻き上げる。この電動チェーンブロックは揚程が12 mと大きいこと、斜め吊りでも使用出来ることが特徴である。マスト本体は構造も単純で故障もなく経過したが、基礎部分が重要であり、雪の中にかに不等沈下しないような強固な基礎を作るかが問題であった。頂上シーブの軸受けにドライメタルを用いたが寿命の点で問題があった。又、液を受ける樋の継ぎ目にも液漏れが見られた。頂上シーブにはロードセル型張力センサー、下部の方向転換シーブにはロータリーエンコーダ式長さセンサーを取り付けた。

2.3. 掘削モニター

切削時はもとより孔内の移動に際しても、ドリルの状態を常時モニターすることはシステムの安全な運用上必須である。深さ200 m程度の浅層掘削では、ケーブルの繰出し長や切削時の電圧、電流といった、地上で計測可能な数種類のデータを表示するだけで十分である。しかし、それ以上深い掘削では、地上で計測可能なデータだけでなく、ドリル自体に取り付けたセンサーで計測すべき多くのデータも、モニターする必要がある。ドリルと孔内の様子を把握するためには、できるだけ多くのデータをモニターする以外に方法はないからである。

また、これらモニターされるデータは(精度の問題はあるにしても)掘削孔から得られる最初の「その場データ」である。したがって、本システムでは後の解析の資料とするために、すべてのモニターデータを保存している。なお、本掘削システムのセンサーおよび電気系統についてはTANAKA *et al.* (1994)に記載されている。

表3にモニター要素を示す。この表の記号欄はモニター画面に表示される記号である。データは合計23箇所(うち16箇所はドリル本体内部)のセンサーから収集され、全部で30種類の情報に変換される。温度データ以外はすべて毎秒更新され、温度データは30秒ごとに更新される。

図7はドリルが孔内を移動しているときのモニター画面の例である。画面からこのデータは1996年5月16日、第689番目の掘削ランのもので、ドリルが深さ約1140 mの孔底付近に到達したことが読み取れる。数値の意味は表3の記号欄を参照されたい。ドリルの移動中は、液圧や液温、ドリルの傾斜、接地圧(下降中は液封液から受ける抵抗)、そしてケーブル張力など、安全運用にとって重要なデータが図のようにグラフ化して表示される。図の縦軸は深さ

表3 モニター要素

Table 3. Items monitored during winch and drill operation.

モニター要素	センサー	記号	センサーの位置	メモ
1. 液圧	圧力センサー	LIQUID(kg)	ドリル本体	
2. 液温	Pt100	LIQUID	ドリル本体	
3. モーター温度	Pt100	MOTOR	ドリルモーター	ドリル本体の耐圧室内
4. 減速機温度	Pt100	GEAR	減速機	ドリル本体の耐圧室内
5. ドリル CPU 温度	Pt100	D-CPU	CPU ボード	ドリル本体の耐圧室内
6. 中継器 CPU 温度	Pt100	R-CPU	CPU ボード	コントロール室の中継器内
7. ウインチ温度	Pt100	WINCH	ウインチボックス内	地上
8. 掘削場温度	Pt100	D-SITE	ドリルタワー	地上
9. 供給電圧(AC)	電圧計	AC-V	制御盤	コントロール室の制御盤
10. 供給電圧(DC)	電圧計	DC-V	中継器	コントロール室の中継器
11. ケーブル繰出し長	ロータリーエンコーダ	Cable length	ドリルタワー滑車	深さ
12. 孔底からの距離	—	Bottom to go	—	底からの高さまたは掘進長
13. ドリル傾斜(X成分)	傾斜計	INC-X	ドリルコンピュータ	ドリル本体の耐圧室内
14. ドリル傾斜(Y成分)	傾斜計	INC-Y	ドリルコンピュータ	ドリル本体の耐圧室内
15. 傾斜	—	INCLI	—	INC-X、INC-Yから算出
16. 傾斜(平均値)	—	INCLI	—	そのランの平均値
17. 傾斜(最大値)	—	INCLI	—	そのランの最大値
18. パレル回転数	ホールセンサー	BARREL r	ドリルモーター	耐圧室内、減速比から算出
19. ケーブル張力	ロードセル	C-TENS	ドリルタワー滑車	ケーブルを含む全荷重
20. ケーブル張力(最大値)	—	C-TENS	—	そのランの最大値
21. モーター電流	電流計	MOTOR A	ドリルコンピュータ	ドリル本体の耐圧室内
22. モーター電流(最大値)	—	MOTOR A	—	そのランの最大値
23. モーター電圧	電圧計	MOTOR V	ドリルコンピュータ	ドリル本体の耐圧室内
24. モーター回転数	ホールセンサー	MOTOR r	ドリルコンピュータ	ドリル本体の耐圧室内
25. 刃先荷重(%)	ポテンシオメーター	LOAD%	ドリル本体	ポテンシオメーターの出力
26. 刃先荷重(kg)	—	LOAD kg	—	ポテンシオメーターの出力から換算
27. 耐圧漏れ警報	液漏れセンサー	Pressure Chamber	減速機	警報の on または off の情報
28. ドリル CPU 結露警報	結露センサー	Drill CPU Dew	CPU ボード	警報の on または off の情報
29. ケーブルキンク警報	ポテンシオメーター	Cable kink	ドリル本体	警報の on または off の情報
30. アンチトルクエラー警報	加速度センサー	Antitorque	ドリルコンピュータ	警報の on または off の情報

であり、重要データのプロファイルがよく分かる。図の刃先圧やケーブル張力のプロファイルから、液封液のレベルが約 160 m であることがわかる。また、深さ 200 m から 700 m までの間の液温が -50°C 以下であることや、深さ 200 m 付近から下ではドリルの傾斜がほぼ 0.5 度であることなどが注目される。このような低温化におけるメカニカルドリルを用いた掘削は、世界でも前例のないことであった。その上、ドリルの傾斜がほぼ 0.5 度であることは、掘削孔がきわめて鉛直に近いことを示唆している。これはなによりもドリルの高性能と掘削技術の高さを示しており、今後予定されている検層装置による正確な測定が待たれる。

次に図 8 は切削中のモニター画面の例である。図の横軸は時間 (分単位) である。切削中のデータは時間変化や履歴が重要であるため、図のように時系列で表示される。切削中の重要なモニター要素は、ドリルモーター電圧や電流、回転数、傾斜などで、これらが時系列として表示される。図は切削初期の様子である。この図から次のことが読み取れる。すなわち、オペレーターはこの画面モードにしてから 2 分経過した時点で、モーターに電源を供給し刃先を

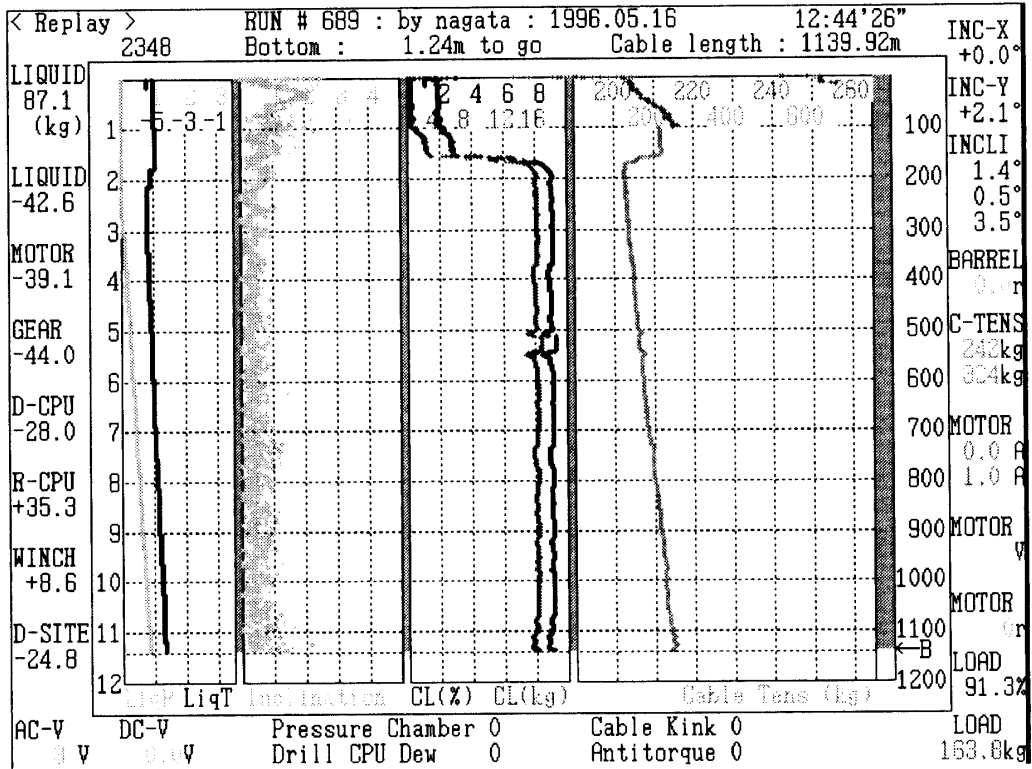


図7 ドリル降下中のモニター画面例
 Fig. 7. Monitor display during drill descent.

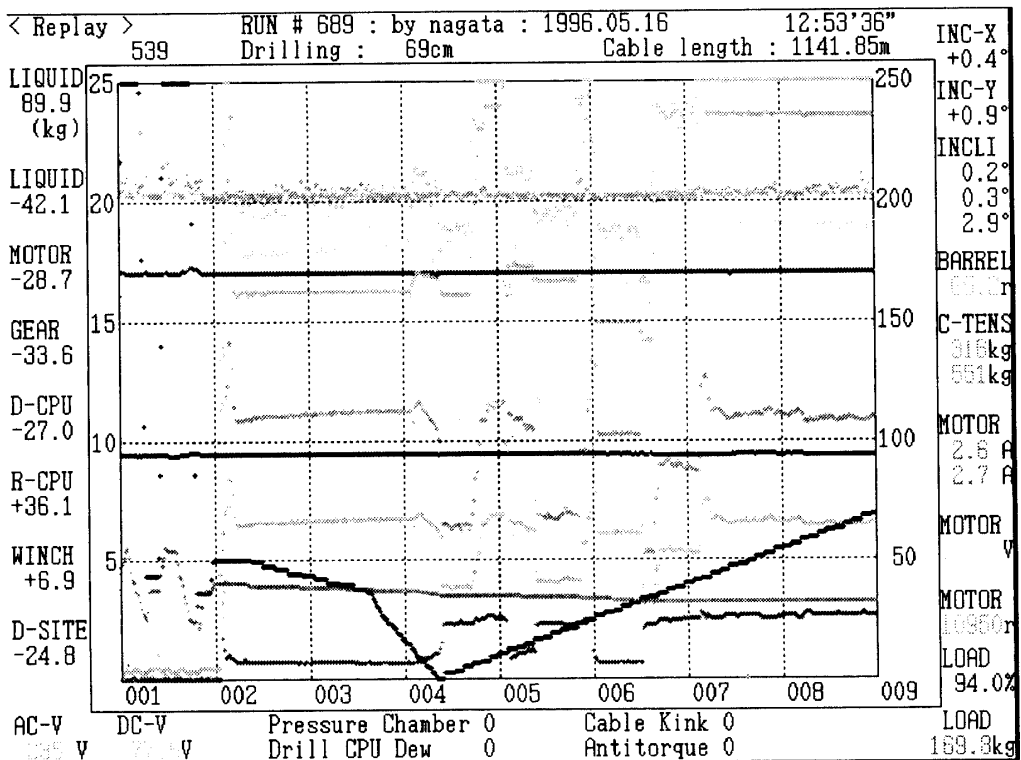


図8 掘削中のモニター画面例
 Fig. 8. Monitor display during core drilling.

回転し始めた。このときドリルは孔底から約 50 cm 上にあった(破線に注目)。そのまま刃先を回しながらゆっくりと下降し、4分25秒付近で着底、切削を開始した(破線がベースラインに反射している点)。その後毎分 15 cm 強の一定の速さで切削を続けた(破線の右上がりの直線性に注目)。約7分目からは、ドリル電圧 190 V、電流 2.6 A、刃先の回転数 65 回転と一定して掘り進んでいる。

以上のように後日再現しても現場の状況がつぶさに分かるようになっている。

2.4. 掘削周辺機器

1) チップ回収機(図9): 掘削孔内の液封液中に浮遊するチップを除去するため、図に示す A 型チップ回収機と、ドリルのコアバレルを取り去りジャケットの先端にバタフライ弁を取り付けた B 型チップ回収機の二種類を製作した。いずれも孔内を落下中は液の抵抗で下部の弁が開いてチップを取り込み、スクリーンで液だけ逃がす構造となっている。A 型の取り付けはドリルのジャケットを取り去り、駆動シャフト末端に接続する。ドリル上半部そのまま残し、その重量を利用して沈下速度を速めるようにした。B 型はジャケットをはずす手間がいらず、又チップ排出もシャフトを引き抜くだけで完了するところに利点がある。現地で比較実験の結果、B 型は回収効率が悪いことが分かり使用しなかった。落下中にチップがジャケット内に入らず、抵抗の少ないジャケットと孔壁の隙間を通ってしまったものと思われる。A 型の回収効率は良好で大いに役に立ったが、長さが 2.5 m と短く孔内のチップをすべて回収するためには何回も往復させなければならなかった。そこで第 38 次隊用として長さ 4.5 m の回収機を製作したが使用されていない。

2) チップ分離: 切削チップ中には貴重な液封液が含まれているので液とチップを分離して回収する必要がある。一次分離としてかご付のタンクを用いた(図10)。かごで濾過された液は樋を伝って再び掘削孔に戻り、かご上のチップは二次分離に回される。二次分離は第 36 次隊では融解分離方式、37 次隊では遠心分離脱水方式を採用した。

3) ケーブルテンション発生装置: ケーブルを初めてウインチドラムに巻き取る時、固く巻かないと後の運転中にケーブルのめり込みが起きる。そこでケーブルに張力を発生させるブレーキ装置と張力を検出するゲージを組み込んだテンション発生装置を用い 300 kg 以上の張力をかけつつ初期巻き取りを行った。

4) 落下物回収用の刃: 1993 年にケーシング設置後、外径約 25 mm のステンレス製ナットを孔内に落下させた。回収方法を検討したが磁石が利かないステンレスである上、孔底のチップの中に埋没していると思われた。そこで、ドリルの刃の形を変え溜まっているチップとともにコアバレル内にかき寄せせる様な方法を取ることにし、いわゆる中寄せ用の刃を用意した。異物を孔内に落下させる事は絶対あってはならないが、ビスや止め輪が緩んで落下することはいくら注意してもある程度は避けられなかった。こうした事の対策として、落下の可能性

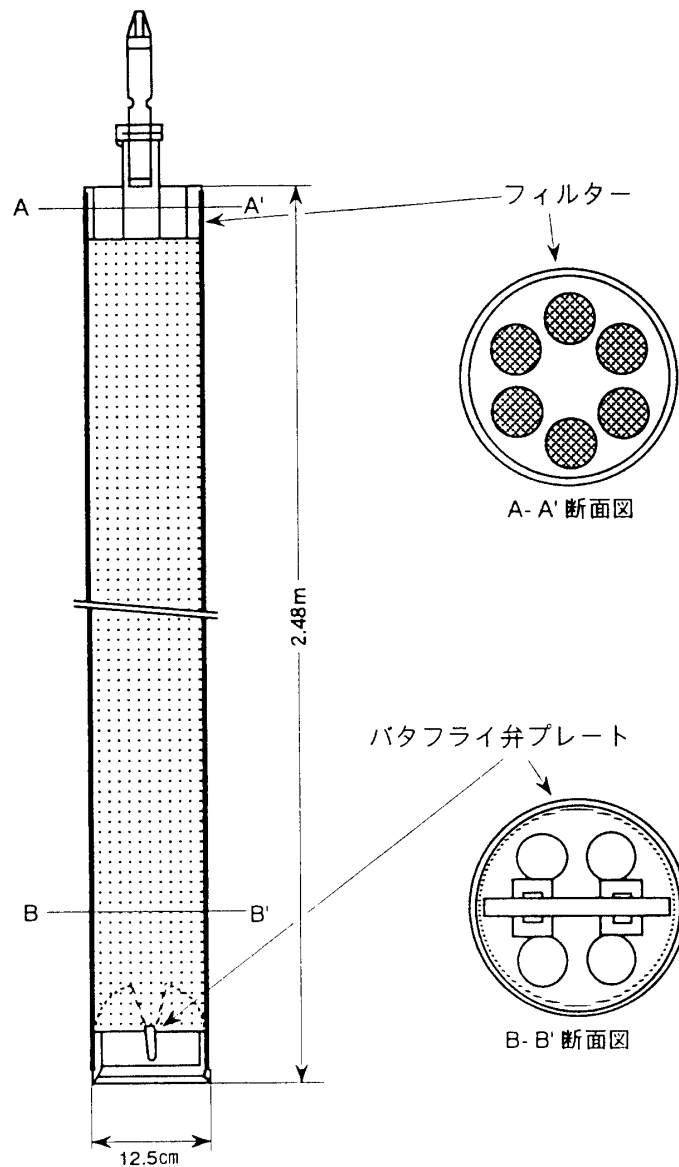


図9 チップ回収機
Fig. 9. Chip reclaimer.

のあるビスなどは磁石に着かないものは使うべきではないという教訓を得た。第38次隊では更に一歩進め、強力な磁性を持ったドリルの刃を準備した。

5) バレルホルダーなど: 孔から上がって来たドリルはチップと液のためすべりやすく作業効率が落ちる。そこで、内径をバレルに合わせ二つに割れるホルダーを準備した。バレルの取り外し、コアの抜き取りの時簡単にバレルが固定でき便利であった。この他に現場で機械工作が出来るようにボール盤・溶接器など一般的工具を豊富に準備したが、上記の様な専用工具は作業能率を高める上で重要である。



図10 チップ分離タンク
Fig. 10. Chip separator tank.

2.5. 掘削場

1) 掘削場: 掘削場の平面図を図11に示す。掘削場は幅4 m長さ22 m深さ4 mのトレンチにパイプ骨組とキャンバスで作った屋根を架けた。屋根はトレンチの縁に幅20 cm厚さ2 cmの足場板を敷きその上に荷重するように設置した。さらに掘削場床数箇所から単管パイプを立て屋根骨材と固定して補助支柱とした。床は雪面のレベルを出した後、ウィンチと掘削タワーの基礎設置工事を行った。基礎には12 cm角材を使用しレベルはレーザー水準器を使用した。その上にウィンチベースおよびタワーベースを固定した後、掘削場床の雪面上に角材(半角)を配置し、厚さ25 mmの断熱材とベニヤ板で張りつめた。掘削場の断熱のため天井から蚊帳状のシートを垂らし、側壁及び天井はそれを利用して厚さ25 mm(側壁用)と50 mm(天井用)の断熱材を張りつめた。また、ドリルや部品、工具などを置くための作業台(長さ12 m、幅0.5 m、高さ0.8 m)を角材とベニヤ板で作製し、コントロール室とは反対側の壁際に設置した。

2) 掘削ピット: ドリルタワー起倒のための掘削ピットは深さ8 m(半径8 m円の1/4扇状)とし、チェーンソーを用いて掘削した。ピットの幅は掘削場床レベルで約0.6 m、ピット最下部の孔口付近では作業性を考えて1.0 mと広くした。掘削ピット縁は9 cm角材を氷着けして固定した。ピットへの落下防止のため、床面にベニヤ板でふたを作り、タワーの起倒時にのみ開けるようにした。孔口への下降用に、ピットの斜面(円弧状)には階段状のステップを作り、

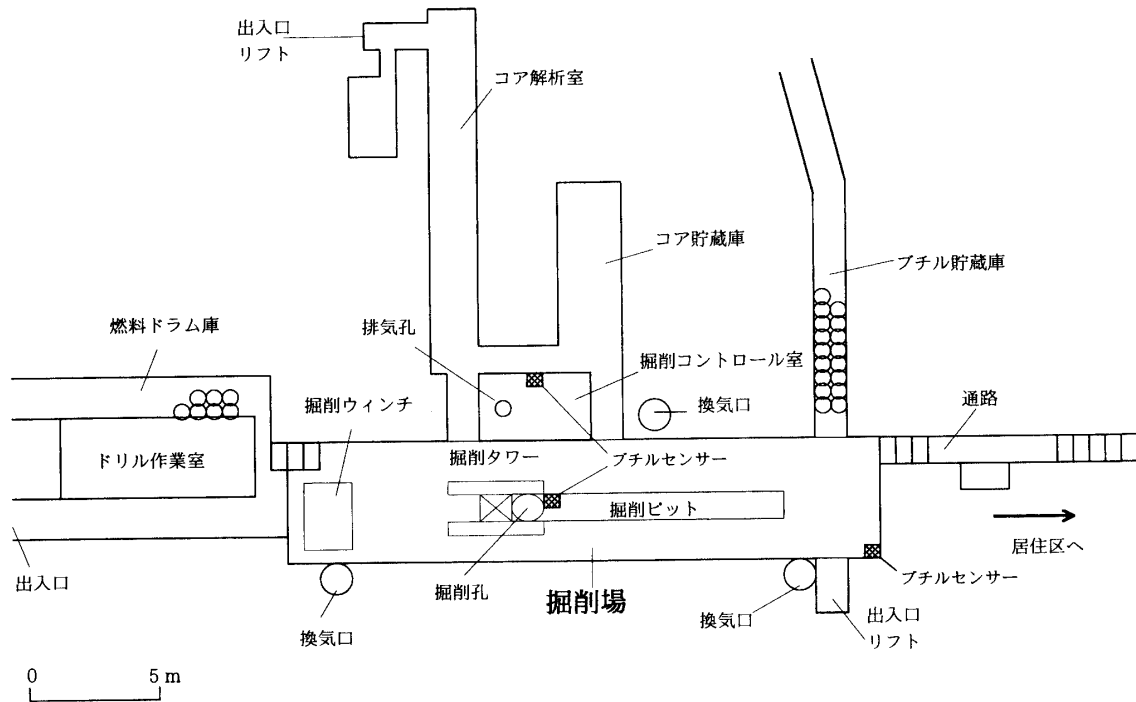


図 11 掘削場の概念図

Fig. 11. Layout of the drilling site.

壁には安全ロープを設置した。また、掘削孔への物の落下防止のために、孔口にランバコア製蓋を設置し、ドリル昇降時にのみ蓋を開けるようにした。ふたの開閉は掘削場の床（孔口より 8 m 上）からロープを操作して行えるようにした。

3) ブチル貯蔵庫及び液注入設備: 液封液（酢酸ブチル）貯蔵庫は掘削場に続くように幅 1.5 m 高さ 1.8 m 長さ約 15 m の雪洞（ドラム 24 本保管可能）を掘り、ブチル搬入坑は斜坑とした。床はベニヤ板を貼った。ブチル搬入方法は、搬入口までブチルドラム積載そりを雪上車でけん引し、そこから斜坑を利用してドラムを転がり落とした。掘削孔へのブチル注入用にパイプラインをブチル貯蔵庫から掘削孔まで敷設した。

4) コア貯蔵庫: 幅 2.5 m 高さ 2 m 奥行き約 8 m の雪洞で、掘削コントロール室横を出入口とし、コア解析室（雪洞）にコアがスムーズに搬入できるようにコントロール室裏の通路で繋がるようにした。コア保存用雪洞の温度上昇を最小限にするために、入り口を狭くし（幅 1.2 m、高さ 1.8 m）、ビニルカーテンで遮断した。コア貯蔵庫には単管パイプで組み上げたコア貯蔵棚を設置した（図 12）。

5) コア解析室: 幅 2 m 高さ 2 m 長さ 23 m の雪洞で図 11 のように掘削場およびコア貯蔵庫と繋がるようにした。解析室の片側はコア解析ライン用に幅 90 cm 高さ 90 cm 長さ 23 m の作業台を設置した（図 13）。コア現場解析が終わった後のコア保存用雪洞をコア解析室の端に設置した。コア搬出用縦坑を掘りリフトを設置した。



図12 コア貯蔵庫

Fig. 12. Core storage room.

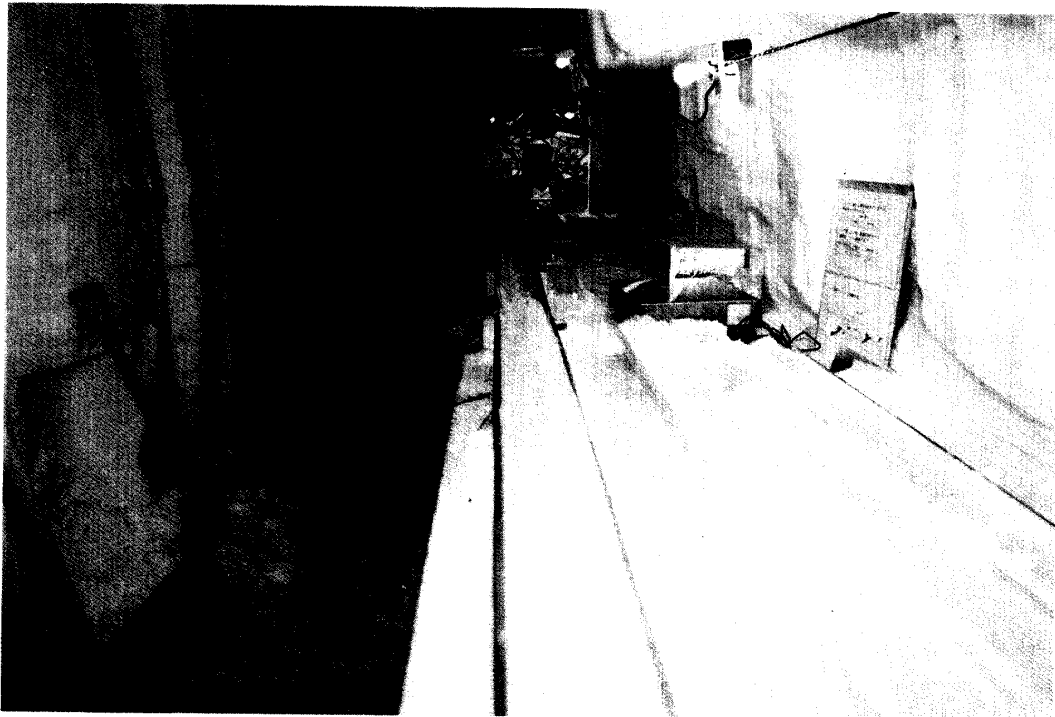


図13 コア解析室

Fig. 13. Core analysis room.

6) ドリル作業室: 掘削用発電機の設置されている部分と作業台スペース以外の床は、断熱材を敷いた上にベニヤ板を張りつめた。ドリルのメンテナンス作業のために、角材とランバコア板で作業台を製作した(長さ6 m, 幅0.7 m, 高さ0.9 m)。ボール盤、グラインダ及び旋盤を設置した。その他の工具やドリルの予備部品保管庫とした。ドリル作業棟は発電機の熱のために室温が高く($-5^{\circ}\text{C} \sim +25^{\circ}\text{C}$)、作業性は良好であった。

7) 掘削場の電気配線: 掘削関係の電源は、原則として掘削用発電機から取ることとした。36次隊においては掘削用発電機を停止する場合(夜間や休日など掘削していない時)は、生活用発電機から各種ヒーター用電源を確保することとした。このため、掘削場の単相100 V配線は掘削用発電機と生活用発電機の2系統を敷設した。電源コンセント毎に系統を明示し、使用する機器毎に電源を選択できるようにした。またコア解析室の電源も掘削場同様両方の発電機から取れるようにした。なお、掘削場、作業棟およびコントロール室の照明はすべて生活用発電機から取った。

8) 掘削場の暖房設備: 掘削場の暖房は掘削用発電機の排熱を利用して行った。ドリル作業室からウインチ、コントロール室および掘削場の3カ所にダクト(径250 mm)を引き送風ファンで作業室内の暖気を送った。36次隊では11月までは夜間は掘削用発電機を停止していたため、掘削場の温度はあまり上がらず、冬季は $-40 \sim -50^{\circ}\text{C}$ であった。37次隊では夜間に発電機をアイドリングしたこと、掘削場の排気をピット底のみにしたことにより掘削場は $-25 \sim -30^{\circ}\text{C}$ に保たれた。

9) 掘削場の換気設備及び酢酸ブチル濃度モニター: 掘削場の換気のため排気ダクトの吸入口を掘削場床、ウインチボックス及びピット底部の3カ所に取付けた。36次隊では掘削作業中は送風ファンを回して、掘削場とピット底部のダクトからは常時排気した。また、コントロール室には吸気ダクトを取付け、常に新鮮な外気を取り入れた。また酢酸ブチルセンサーをピット底部、掘削場そしてコントロール室の3カ所に設置し、ブチル濃度をコントロール室内のモニターで常時監視した。この監視システムは正常に稼動した。37次隊では、掘削場の室温をあげるため排気をピット底部のみとし、吸気は自然吸気に委ねた。また、地上では排気ダクトに箱をかぶせていたため排気効率が悪かったので、ケーシングパイプの煙突を立て改善した。

2.6. コントロール室

図14にコントロール室の平面概略を示す。コントロール室は幅3.6 m, 奥行き2.7 m, および高さ2.4 mで、掘削場が見渡せるように大きな2重窓が取り付けられている。内部には掘削機の制御関係の器材とその電子部品用の棚が配置されている。この制御機器を使って、マストの起倒からドリルの上下および切削にいたる一切の動作をコントロールできる。図15にコントロール室での掘削作業の様子を示す。

コントロール室内は2台のヒーター(1.5 kW)で暖房して居住性を高めた。コントロール室

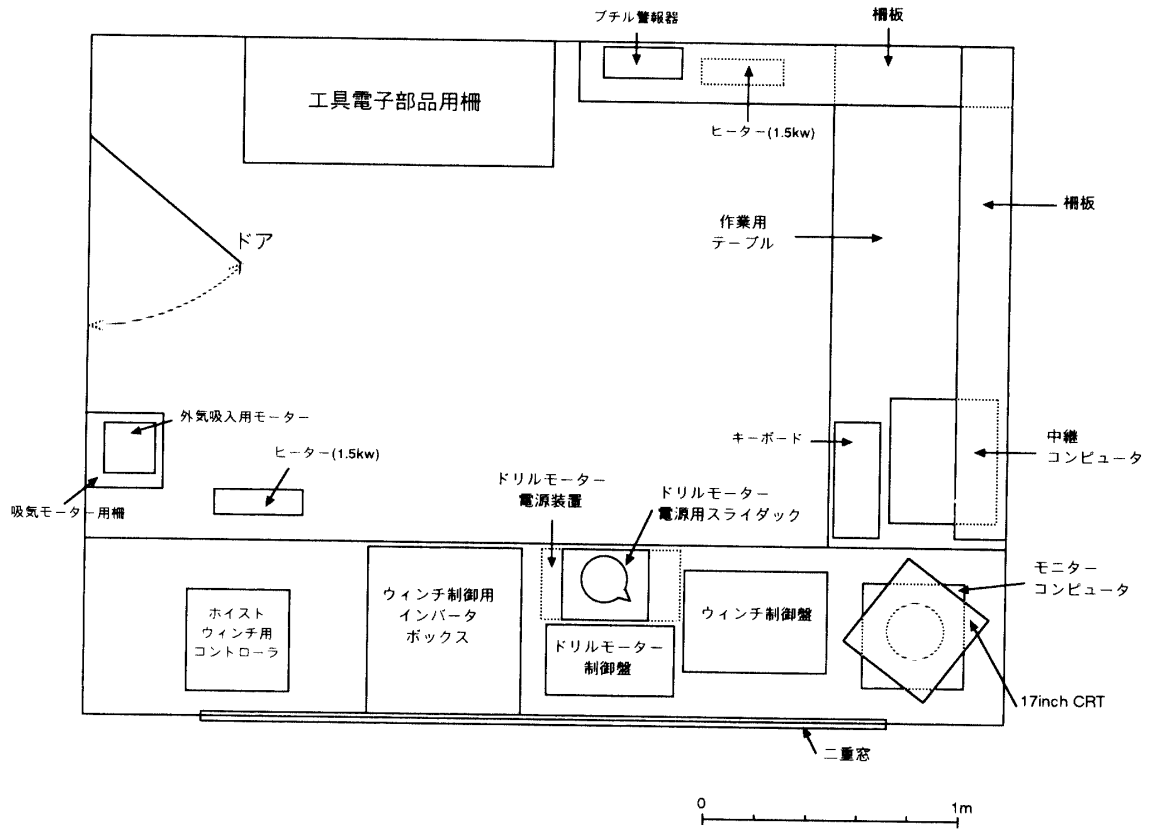


図 14 コントロール室平面図
 Fig. 14. Layout of the drill control room.



図 15 コントロール室での掘削作業
 Fig. 15. Drilling operation in the control room.

は夜間も 750 W のヒーターで暖房を続けたため、早朝でも 10°C 程度の室温であった。36 次隊の 11 月 13 日以降は 1 日の掘削時間が 6 時から 24 時と長くなったことと外気温の上昇のために、エンジンルームの気温が急上昇した。それにもかかわらずコントロール室の気温が上昇しなかったのは、外気を取り入れて室内の空気を交換したからである。これは、掘削作業時間の延長と気温の上昇のために、液封液のニオイが鼻につくようになったからである。そのためコントロール室の気温はそれまでよりもむしろ低くなった。37 次隊では外気をヒーターの取入れ口に直結し室温の上昇を計った結果、常時 +20 ~ +25°C 前後に保つことができた。

37 次隊では、4 月にコントロール室の天井から雨漏りが始まり、天井の上の除雪を行うとともに、雪の重みで垂れ下がってきたパネルを鋼材で吊り上げる作業を行った。

また、37 次隊ではコントロール室出入り口の向かいに半畳ほどの乾燥室を作った。この中に電気ストーブを入れて暖房をし室温を +10°C 程にし、掘削作業用の衣服や手袋の保温をした。

3. 経 過

3.1. 1993 年 (第 34 次隊)

深層コア掘削では、氷床氷の圧力で掘削孔が収縮し氷と同密度の不凍液 (液封液) を注入してその中を掘り進む。この液封液は氷床表面から注がれるので、氷床が氷になり液漏れしなくなる深さまでフィルン層をケーシングする必要がある。1993 年には、本格的な深層コア掘削に先立ってケーシング作業を行った (図 16)。詳細は、MOTOYAMA *et al.* (1995) を参照。

1) 掘削場設営: 掘削地点が標高 3810 m で夏期でも寒冷地なので、掘削環境を良くする上で掘削場をシートで覆い、ストーブで暖房した。大きさは 5 m のマストが入り、十分な作業スペースを得られるように、足場を 3 段に組み、内部を 0.5 m 掘り下げ、全体をシートで覆った。掘削開始時は -35°C の室温が暖房すると -20°C くらいまで上昇し、作業環境としては満足できた。

2) 浅層掘削: 深層掘削地点にて、氷化する深度までコア掘削を行った。コアの密度は、低温と低積雪涵養量のため圧密が進まず、深さ 90 m を越えてようやく密度が 800 kg/m³ となった。100 m を越えて、ほぼ通気性がなくなったので浅層掘削を終了した。切削速度は、掘削深度とともにフィルンの硬度が増大し、表層部の 20 cm/min から 100 m 深附近の 5-10 cm/min と小さくなった。採取した雪氷コア (直径 104 mm) は、コアのロギング・密度測定・通気度測定後、プラスチックチューブに入れ、段ボール梱包した。掘削作業に要した日数は、12 日間であった。

3) リーミング: ケーシング材の直径は 250 mm なので、浅層掘削によってできた直径 135 mm の掘削孔を拡張 (リーミング) した。切削トルクとリーミング機材の軽量化のため、3 段階 (元孔 135 mm → 180 mm → 221 mm → 254 mm) で掘削孔を広げた。リーミングを行ったリーマーを図 17 に示す。リーミング作業は順調であったが、切削チップの取りこぼしがあり、チップの一部が孔底に溜まった。このチップの回収が困難だったことと、深層掘削機の液中掘削のための直径 135 mm の孔が 10 m 以上必要なので、86 m までのリーミングで終了した。リ



図16 パイロット孔のリーミング作業
Fig. 16. Reaming work of a pilot borehole.

ーミング作業に要した日数は15日間であった。

4) ケーシング: ケーシング材として、外径250 mm、内径200 mm、長さ3 mで材質がFRPのパイプ (JOHNSEN *et al.*, 1994) を準備した。4 m 高の三脚を立て、その中央に下げたウインチで、ケーシング材を吊り、地上で新しいケーシング下端を埋設中のケーシング上端に1本ずつ、つなぎながら孔に降ろした。29本連結し、84 m 深までのケーシングをした。ケーシングを設置後の掘削孔の状況を図18に示す。ケーシング作業に要した日数は2日間であった。

3.2. 1995年(第36次隊)

2月: ウインチおよびマストベース等重器の掘削場への搬入を行った後、2月6日から掘削コントロール室の組立と掘削場屋根の補強整備作業を行った。これにより掘削場の外観は完成した。その後ウインチの組立が行われた。足場板と角材を井型に置いてウインチベース取付用基礎とした。その上にウインチベースをボルト止めした。他のパーツは、本来重機を用いて移動し設置しなければならないものであったが、現場では不可能であった。そこで、単管パイプと自在クランプを組み合わせて支柱を作り、支柱間に渡した2本の単管パイプにパーツをつり下げ、レバブロックを使って適切な位置まで移動させた。3人×2.5日(2月14日～16日)の作業でモーター及びケーブル以外の設置が完了した。マストベース取付用角材もウ

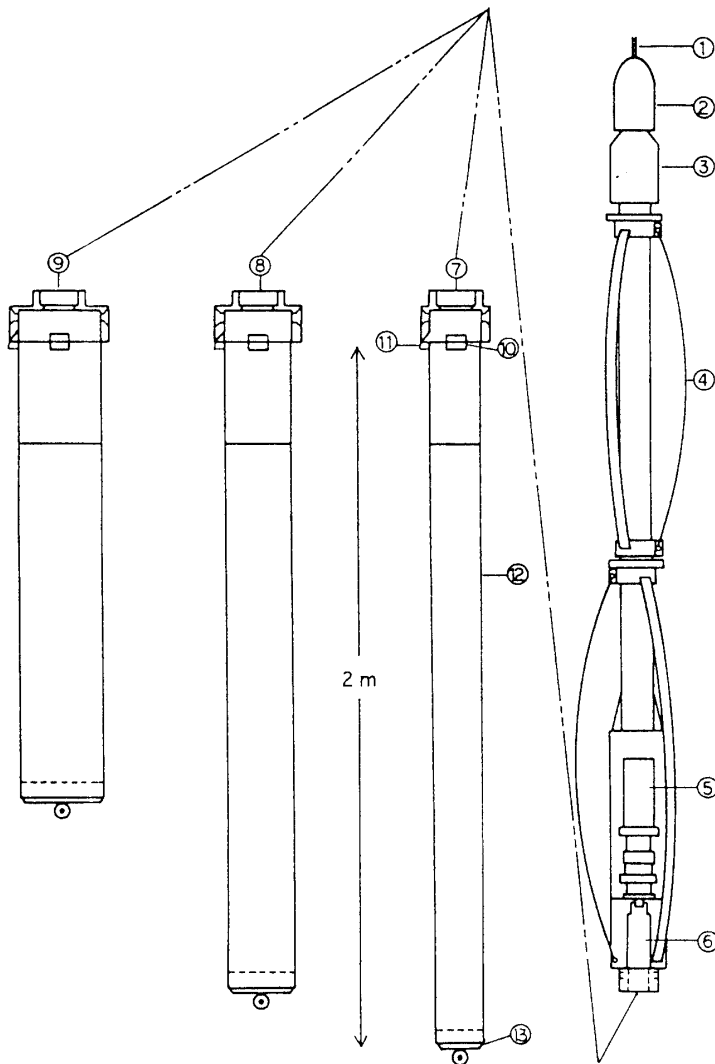


図 17 リーマーの概念図

Fig. 17. Cross-sectional drawing of the electro-mechanical reamer.

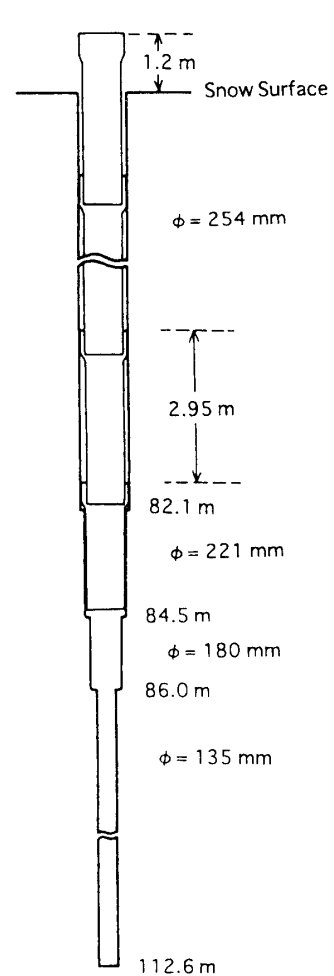


図 18 ケーシング後の掘削孔概念図

Fig. 18. Borehole figure after reaming operation and casing.

インチ取付用基礎角材と繋げて設置した。ウィンチ設置後掘削場の床張りと電気配線が行われ、2月23日には一面ベニヤ貼りの床が完成した。また2月半ばからマスト起倒用8 mピットの手掘り作業が始まった。

3月: ドリル作業室内の床張りと通路部分の整備が行われた。また初旬には掘削コントロール室内の机や棚が製作されドリル制御盤等の機材が設置された。中旬から下旬にかけては各種工作機材の設置、排気設備の設置、掘削場およびコントロール室の電気配線が行われた。8 mピットの掘削は着々と続けられ3月末に5 mの深さに達したところでマストの組立が行われた。屋外気温は-60度台、掘削場内は-50度台に低下してきたが3月31日には3000 mのウ

インチケーブル巻き取り作業が行われた。ブレーキ用シーブと油圧ポンプで約 200 kg の張力を掛けながら巻き取った。人員配置は屋外ケーブルドラム 1 人、屋外掘削場間のケーブル保持に 1 人、ウィンチ監視に 1 人、マスト (張力調整) に 1 人、コントロール室 (ウィンチ制御) に 1 人の計 5 人で 10 時間ほどで無事完了した。

4 月: 酢酸ブチル貯蔵用の雪洞 (ブチル庫) 掘削と 8 m ピットの掘削を並行して行った。4 月 10 日にはブチル庫は完成した。また掘削場温度の低下に備えてウィンチやリフトの保温設備を製作した。4 月 10 日から掘削用発電機の排気系が不調になり、調査の結果、排気熱交換機に詰まりが生じていることが判明。構造的に修理不能であったので取りはずして 14 日から運転した。このためドリル作業室内の温度はかなり低下した。4 月 17 日には排気ダクトの取り付けを行い換気系の設備工事は一応完了した。

5 月: ドリル組立てとドリルコンピューターおよびモーター等電気系のテストをドリル作業室内で行った。5 月 17 日に 8 m ピットが完成し、マストの最終部分が組立てられた。5 月 24 日には電気系統のテストが終了したドリル 1 号機が掘削場に搬入された。

6 月: ドリル 1 号機の全体組立てとバレル回転テストが行われた。またドリル内部センサー (温度、傾斜計、ポテンシオメーター) のチェックと検定が行われた。次に人工氷を用いて地上で掘削テストを行い諸性能が確認された。また、このテストを通じて掘削システム全体の点検・整備項目を細かく抽出するとともに、掘削手順に即したドリル操作マニュアルを作成した。これら一連のテストの詳細を以下に述べる。

1) 分解、組立て及び整備: ドリル本体を一度全部分解し、点検した。とくに可動部分 (減速機、ベアリングなど) と力の加わる部分 (パイプやシャフトの接続部) については入念に整備点検した。なお、作業はすべてドリル作業棟内の暖かいところで行った。そのため、棟内では問題なく動作しても、低温下の掘削場に出すと動きの悪い部分があった。

2) 回転テスト: ドリル本体と制御系の動作テストとして、負荷をかけずに空まわしした。

3) センサーの動作テスト: すべてのセンサーの動作についてチェックした。なお、接地圧センサー (ポテンシオメーター) については、2 個の体重計をドリル直下の孔口にセットして荷重実験を行い、接地圧センサーの指示値 (パーセント表示) と実際の荷重 (kg) との変換式を得た。また、傾斜センサーはドリルを傾けてその値をチェックした。ドリル軸に垂直な X、Y 軸方向の傾斜センサーの表示値から傾斜の真値を得る変換式を作成した。

4) 人工氷による切削テスト: 高さ 60 cm の人工氷を作り、ドライの条件下 (液封液のない状態) で切削を行った。その結果、国内実験と同様の性能が確認できた。

5) 制御コンピューターの動作テスト: ドリルコンピューターと中継コンピューターの動作を確認した。その結果、ドリルコンピューター 1 台は通信不可、中継コンピューター 1 台はケーブル長さの表示不可であることがわかった。日程と技術的制約から、これらをすぐには修理せず、正常な箇所を予備パーツとして用いることにした。したがって本掘削開始時には、

3セットのうち2セットのコンピューターが健全であった。

6) 上記テストの他に掘削周辺機器(ドリル洗浄用設備, コア取り出し用設備, 液封液回収用装置)の製作を行った。

7月: 掘削場では掘削周辺機器の設置および整備が完了した(図19)。さらに8mピットの樋の設置と孔口の仕上げ工事が行われ液封掘削の準備が整った。またこれらと並行してコア貯蔵用雪洞とコア解析用雪洞の掘削工事が7月3日から始まった。7月14日にはいよいよドリル1号機を掘削孔に降ろしたが、ドリル傾斜計からパイロット孔ケーシングが最大 2.5° 曲がっていることが判明した。さらにドリル下端がケーシング末端を通過する深さまで降ろし、再び引き上げたところ、ドリルがスタックされた。状況からドリルスタビライザーがケーシング末端に引っ掛かったと判断した。種々の脱出方法を試みて2時間後にドリル回収に成功

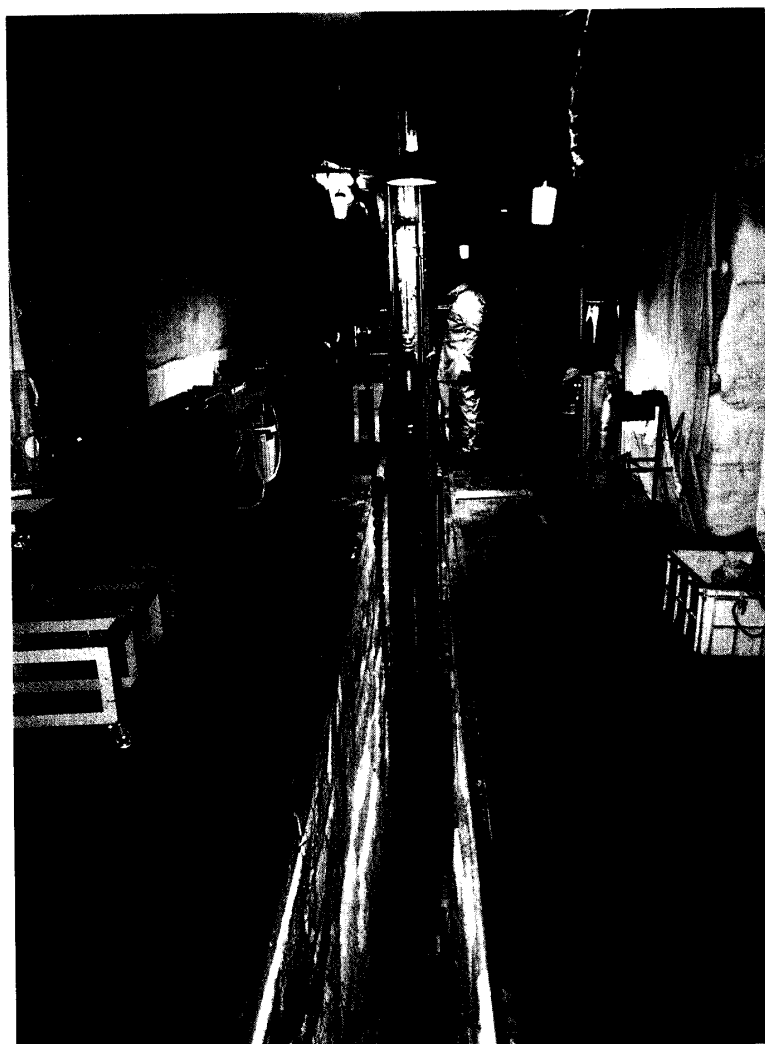


図19 完成した掘削場

Fig. 19. Drilling site.

した。34次隊からの情報を検討した結果、ケーシング末端が孔壁から浮いていると判断した。さらにパイロット孔の孔径の変わり目の深さを精査するために、再度ドリルを降ろして検層した。この検層結果からパイロット孔の状況(ケーシング末端深度、孔径変化深度)が図20のようになっていることが確認された。その結果、先ずナット回収(34次隊がケーシングパイプ設置終了後M24のナットを孔内に落としたもの)を行い、その後ケーシング末端でのスタックを防ぐために、ケーシング底までチップで埋め戻し、ケーシング末端まで氷で固めることにした。7月18日にナット回収用刃を付けて掘削開始し、7月19日に深度87.94 mでナット回収に成功した。7月20日、パイロット孔の整備作業を開始した。135φより上の孔をすべて氷化させるため、チップと水(ポリ袋に入れ底までロープで降ろして破裂させる)を交互

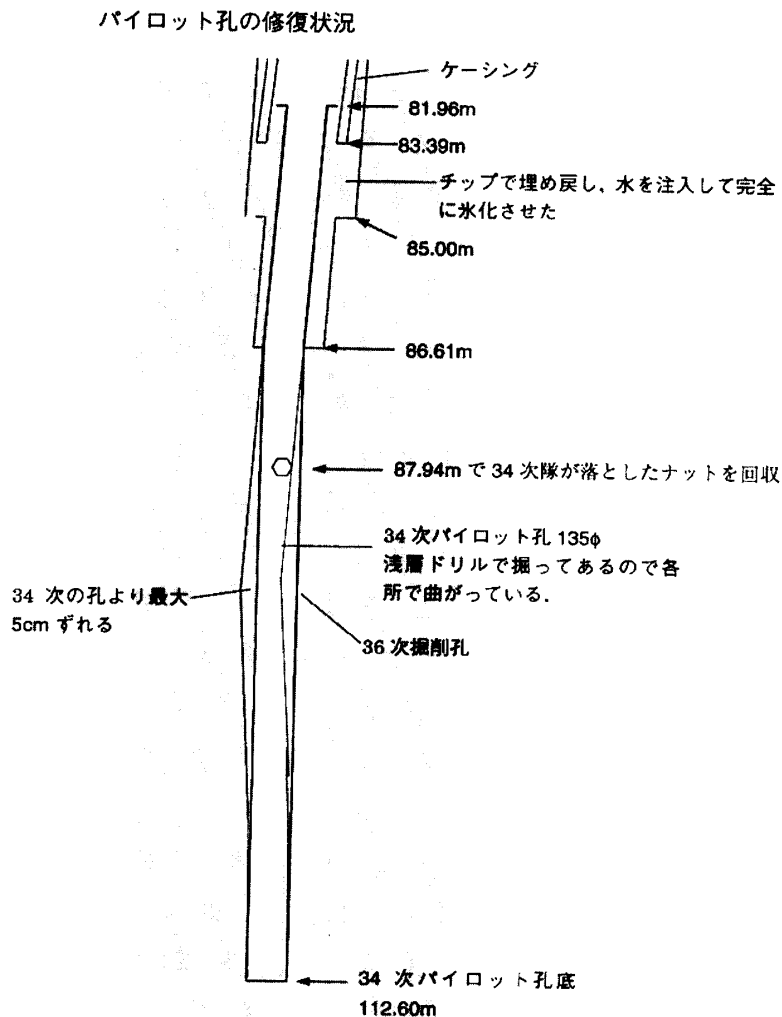


図20 パイロット孔の修復状況図

Fig. 20. Borehole figure after restoring the bumpy wall.

に投入した。ある程度埋め戻した後、深度調査と試掘を行い完全に氷化していない場合(スタックの危険があるので)再度やり直した。ケーシング下端の上部 1.35 m から 6.08 m の間を埋め戻し、ケーシング下端の固定を図った。この作業は 8 月 3 日まで続いた。

8 月: 8 月 4 日より 34 次の $\phi 135$ mm の孔に入り、深層ドリルでチップ回収を続ける。34 次の孔は浅層ドリルで掘削しているので各所で曲がっており、長い深層ドリルでその跡を忠実に追って行くことは難しく、各所でズレが生じ、最大で孔の中心が 5 cm ほどずれた。アンチトルクが効かなくなった場合、孔を埋め戻して氷化させる必要があるため、液を入れないで掘削を続けた。一回の掘削長は約 40 cm で、孔がずれているので掘削は不安定であった。チップ回収掘削は難航したが、8 月 24 日には 34 次隊の孔底(深度 112.60 m)に到達した。7 月 14 日から 8 月 24 日までわずか 29.46 m を修復、突破するのに 41 日間 84 ランを費やした。8 月 28 日、酢酸ブチルを注入して液封掘削を開始した。

9 月: 液封掘削の開始とともに様々な問題が明らかとなった。液封液(酢酸ブチル)蒸気の掘削場内での濃度は許容濃度(200 ppm)以下であったが、その特有な臭いのため不調者が続出した。このため 9 月に入り掘削場の換気を強化する工事を行った。作業中の防毒マスクの使用やゴーグルの使用を励行した。これにより掘削場温度は幾分低下したが作業環境は改善された。掘削に関しては次の問題が判明した。1) ドリル引き上げ時にチップがチップチャンバーから流れ出て孔内に落としてしまう。2) コアキャッチャーが効かないで、コアを取り残してしまう。3) 掘削長が 1 m を超すとモーター電流が上昇し掘削が安定しなくなる。これらの問題の解決策を試行錯誤しつつ掘削を続行した。また、低温のため電気系統の故障が相次ぎ、その修理に時間を費やした。9 月中旬には結局ドリルをオーバーホールした。掘削の本格開始に伴いドリル洗浄用設備等の改良を行った。コア貯蔵庫は 9 月 4 日に完成した。

10 月: 10 月に入っても掘削は安定条件が見出せなかった。チップ脱落に関してはチップチャンバー内に試作したチップ逆流防止弁を付けることによって改善された。掘削機の故障や体調不調者が相次いだので上旬から中旬にかけて休養期間を設け、掘削は一時中断してドリルの整備に専念した。この間コア解析室の整備が進み 10 月 23 日に完成した。10 月下旬からは再び掘削が再開され、コアキャッチャーの問題は、ブロック型を加工して、すくい角を 45 度にすることで解決した。

11 月: 11 月 3 日には昭和基地から補給隊が到着した。体制を立て直し、11 月 13 日から二交代制(早番: 6 時から 15 時半、遅番: 14 時半から 24 時)で掘削を行った。掘削担当者 1 人に助手 1 人を付けて 2 人 1 チームとした。また 13 日からコア現場解析を開始した。解析用人員は 3 人とした。1 回の掘削でのチップ回収率は平均して約 50% 程度であり、残りのチップは掘削孔に残った。そこで掘削ランとは別に、チップ回収機をドリルに取り付けて、チップ回収ラン(すなわち「孔掃除」)を実施した。これは休日の翌日(おおむね月曜)に行った。場合によっては 2 日間を要することもあった。チップ回収 1 ランに要する時間は、掘削 1 ランと同様かそ

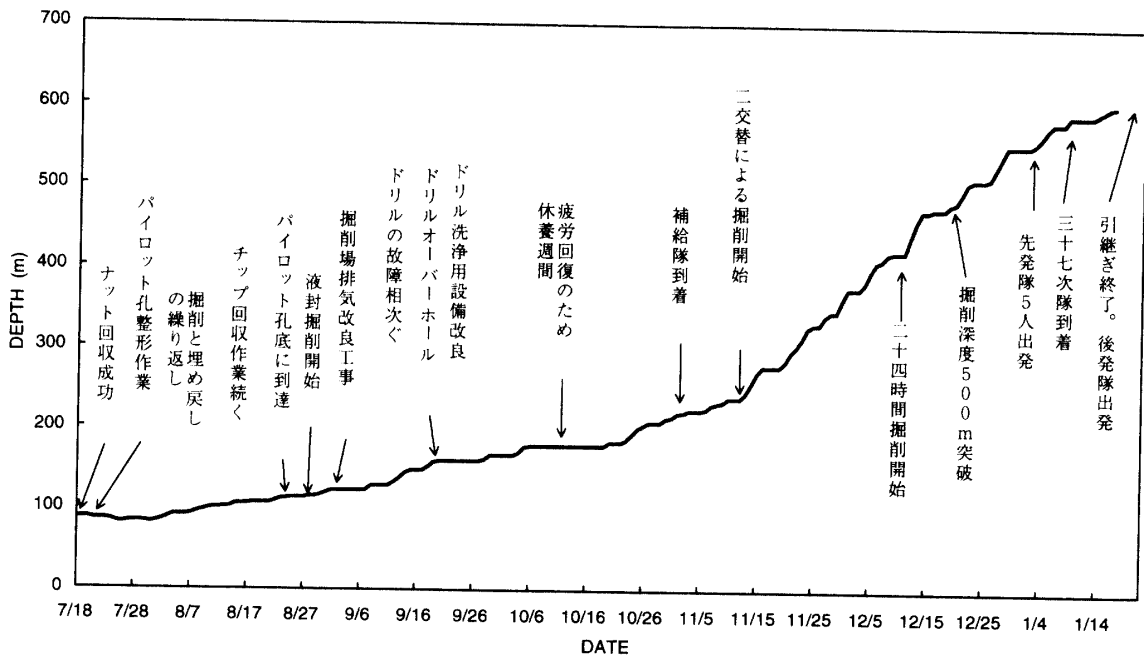


図 21 第 36 次隊 (1995 年) による掘削進捗

Fig. 21. Drill hole depth versus date in 1995.

れ以上であった。36 次掘削期間中のチップ回収は合計 127 ランであった。このラン数は掘削全体の 29% に当たり、5 回掘削しては 2 回チップ回収するという頻度であった。

12 月: 12 月 11 日からは 24 時間連続掘削を実施した。掘削担当者は 2 交代 (0800 から 2000 と 2000 から 0800 の 12 時間制)、ヘルパーも 2 交代 (0800 から 1800 と 0000 から 0800) とした。また、1800 から 2400 までは、基地長がもう一人の掘削担当者として参加した。ドリルの故障の修理やチップ回収で掘削深度が伸びない日もあったが、12 月 22 日には深度 500 m を突破した。深さ 300 m 付近から破碎帯を予想していたが、割れのない良質のコアを採取し続けることができた。

1996 年 1 月: 1 月 4 日には先発隊 5 人がコア輸送のため出発した。残りの 4 人が二交代体制で掘削を続行した。1 月 12 日には 37 次隊が到着し、引き継ぎを兼ねて合同で掘削を続けた。1 月 16 日には深度 600 m を突破し、17 日には深度 612.59 m で 37 次隊に引き継いだ。36 次隊の液封掘削は 315 ラン、掘削長は 501.43 m、平均コア長 1.59 m であった。図 21 に掘削進捗曲線を示す。

3.3. 1996 年 (第 37 次隊)

1 月: 14 日から 36 次隊との引き継ぎを開始した。17 日までに 36 次隊の掘削ノウハウの引き継ぎを行い、18 日には 36 次隊の方法による掘削を 37 次隊員のみで実地した。19 日からは、37 次隊持ち込み改良品による掘削実験を 36 次隊とともに繰り返し行い、改良点がほぼ満足できることを確認した。22 日には、掘削作業の習熟訓練を終了し引き継ぎを終えた。

2月: 14日から4日間、本格掘削作業を前にチップ回収作業を行った。全員参加による掘削作業に向けて作業手順の練り直しを行い、掘削作業マニュアルを作った。

3月: 1日よりサポート隊員に習熟訓練を行い、11日から2交代体制による本掘削を開始した。平日と土曜日は0630から1430の日勤と1430から2230の準夜、各8時間制の2交代制、また日曜日は8時からの8時間の掘削体制をとった。本掘削開始当初は、切削時の電流オーバーを回避するため、ウインチ操作盤のドリル昇降用スティックを電流計を見ながら頻繁に操作し、刃先荷重を低めに調整しなければならなかった。また、チップ回収率が悪かったため、これを改善して掘削効率を上げるため逆止弁並びにフィルターの改良を重ねた。掘削深度は、14日にはみずほ中層掘削の700 mを越えた。

4月: 上旬はドリルの空転、刃の食い付きの悪化、ドリルコンピューターの不調などさまざまトラブルに見舞われたが、下旬には掘削方法の改善により1日の掘削深度をそれまでの10 m程から15 m程度に伸ばすことができた。これまで、切削中の電流を小さくするため(ドリルコンピューターの電流リミットが3.8 Aでこれを越えるとコンピューターの素子が壊れる。チップが詰まってくると電流が上昇するので、余裕を持たせるため低めにおさえていた)、刃の切込量を小さくし、ケーブル繰り出しスピードも低めに押さえていた。しかし、この方法では30–60分ほどの長時間切削となり、減速器への負担が大きくなっていった。減速器は、4月の第2週に温度が上昇する症状が出、第3週の最初のランでは稼働しない故障が発生した。ギアの変形が起きたことが原因であった。減速器の予備も少なくなったので、減速機への負荷を小さくする方法を検討し、刃の切込量をやや大きくし、接地圧が一定で連続切削となるようケーブル繰り出し速度を調整する切削方法に切り替えた。これまでは、ケーブル繰り出し速度を8 cm/分と固定して、これに調和するようモーター回転数を調整していた。この結果、切削速度は、これまでの8 cm/分程度から10–15 cm/分と早くなり、1回の掘削所要時間は、2時間程度から1時間30–40分程度に早まり、1日の掘削回数も増えた。掘削深度は、16日に900 m、28日に1000 mを越えた。ドリルの昇降速度を少しづつ早くし、液中での降下は45 cm/s、上昇は40 cm/sとした。

5月: 大きなトラブルもなく順調に推移し、10日に1100 m深、23日に1200 m深、31日に1300 m深を越え、月間の掘削深度は296 mを記録した。コア中の気泡はすべてクラスレートに転化して透明で硬度の高い氷となった。

6月: 1500 m 目前の19日には、バレルが脱落するという事故に見舞われたが、ミッドウインターの休日後これを無事回収することができた。

7月: 順調に経過し、月間掘削深度は293 m、到達深度は1849 mとなった。12日から、ドリルの昇降速度を上げた。降下時は液抵抗による接地圧が85–90%となるようにウインチ速度を制御するようにし、液中上昇時は85 cm/sとした。また、掘削方法として接地圧制御による自動掘削方式を用いることとした。切削後半にはバレル内にチップが詰まってくると設定し

た接地圧では刃が滑るようになるので、手動に切り替える必要がある。深度が深くなり1日8回の掘削を維持するのが難しくなってきた。コントロール室の出入り口正面に掘削作業用衣類の乾燥室を設置した。図22に掘削作業の様子を示す。

8月: トラブルが後半に続発した。掘削時の刃の空転を防ぐためアンチトルクを2段にしたが、ドリルを上下する時に発生する微振動によりビスが6本脱落した。また、この振動によりドリルスリップリング内のショートも起き交換することとなった。孔底に落下したビスは磁石で回収することができた。30日にはケーブルの7芯線の内3本が断線したが、掘削方法の若干の手直しで4芯での掘削を可能とした。24日には2000 mを超えたが、液封液の残量がゼロとなった。

9月: 第一週には、週間掘削深度 65.77 m に達し、1回の平均コア長は 1.93 m で、チップ回収



図22 掘削作業

Fig. 22. Drilling operation.

効率は61%と順調な掘削状況となってきた。1700 m付近から掘削孔が曲がりはじめたので、接地圧を小さくして、曲がりの矯正を試みながらの掘削が続いた。2000 mを超えるあたりから、液封液の不足による液面低下で、掘削孔の収縮速度が速まった。このため降下時孔壁にドリルが引っかかる場所をリーミング(孔壁を削りながら降下)するようにした。全般にトラブルの多い月であったが、19日にはアメリカ隊がバード基地で1968年に掘削した2164 mの深度を超え、南極ではボストーク基地に次ぐ深さに入った。

10月: ウィンチインバータのトラブルで2日から4日まで掘削を中断した。9～10日に懸案であったケーブル巻き換え作業を終えた(図23)。その後、掘削を試みるも不調な状況が続いたため、原因を取り残しチップによる掘削の妨害と判断し合計70回のチップ回収作業を行った。この作業中、18日に790 m付近でケーブルにキンクを起し、キンクの解消が不能と

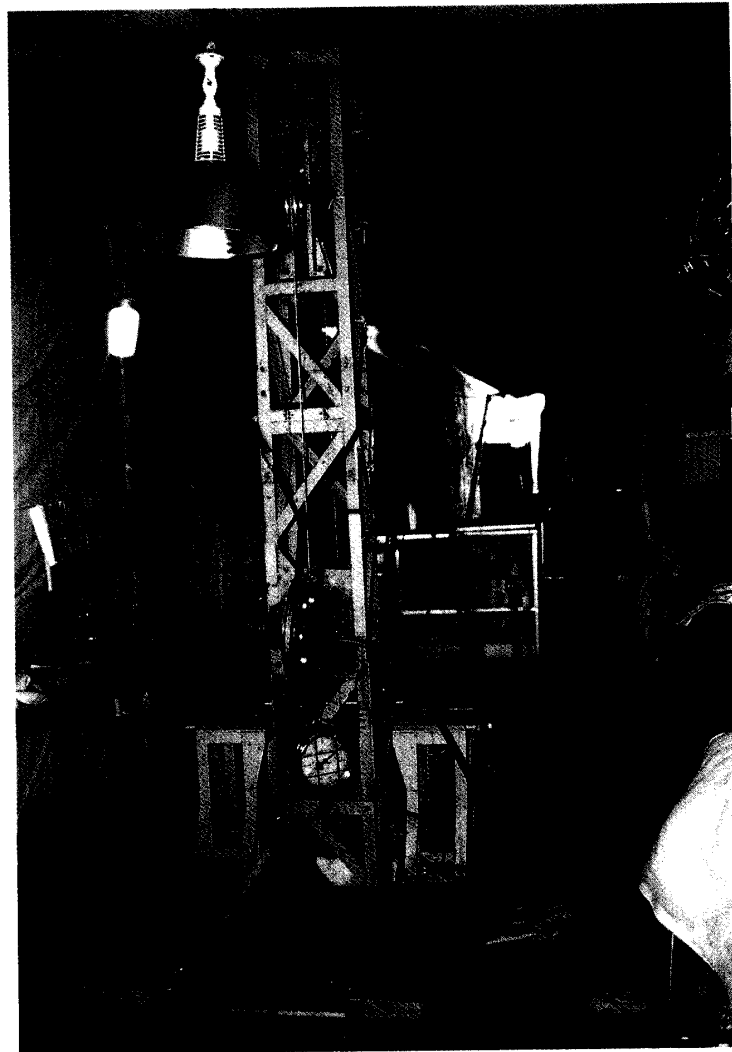


図23 ケーブル巻替え作業

Fig. 23. Replacement of a cable.

なったためケーブルを切断した。その後19日に掘削を再開したが、1850 m付近でドリルが降下しなくなった。すぐに引き上げにかかったが、一時的にケーブル張力が大きくなったので、孔径が収縮していると判断した。22日孔径を拡張すべくリーミング作業を開始したが不調に終わった。23日、2回目のリーミング時にスタビライザーをすべて取り外して行ったところ、その日のうちに $\phi 139$ mm用幅広刃で孔低までリーミングに成功した。しかし、この最終ランでリーミング時の振動により刃とシューが脱落したが、磁石による回収に成功し事なきを得た。その後は、掘削孔が収縮してドリルが引っかかるところを、リーミングしながら昇降するようにした。ジャケットのスタビライザーを撤去してから掘削は順調に推移し、9月からの長い不調から脱却した。

11月: 大きなトラブルもなく順調に推移した。中旬頃からウィンチの乱巻きが起こるようになり、ケーブル同士の摩擦でケーブル被覆のアーマー線が2本切れた。このため、ドリル引き上げ時、ケーブル張力を低めに押さえるようにした。また、耐圧室への液封液侵入に伴う電気システムのトラブルや、ポテンシオメーター内のチップ詰まりによるトラブルが多発するようになった。22日には2400 m深を越えた。

12月: 8日、ドーム計画の目標深度を超え2503.52 m深(コア累積深度; ケーブル深度は2505.73 m)に達して掘削を終了した。9日からは掘削孔維持のために孔底までのリーミング作業を1日1回9時間程かけて続けた。しかし、29日に2332 m深でリーミング作業中、ドリルが引っかかって、ウィンチの巻き上げができなくなった。しかし、このまま放置すると掘削

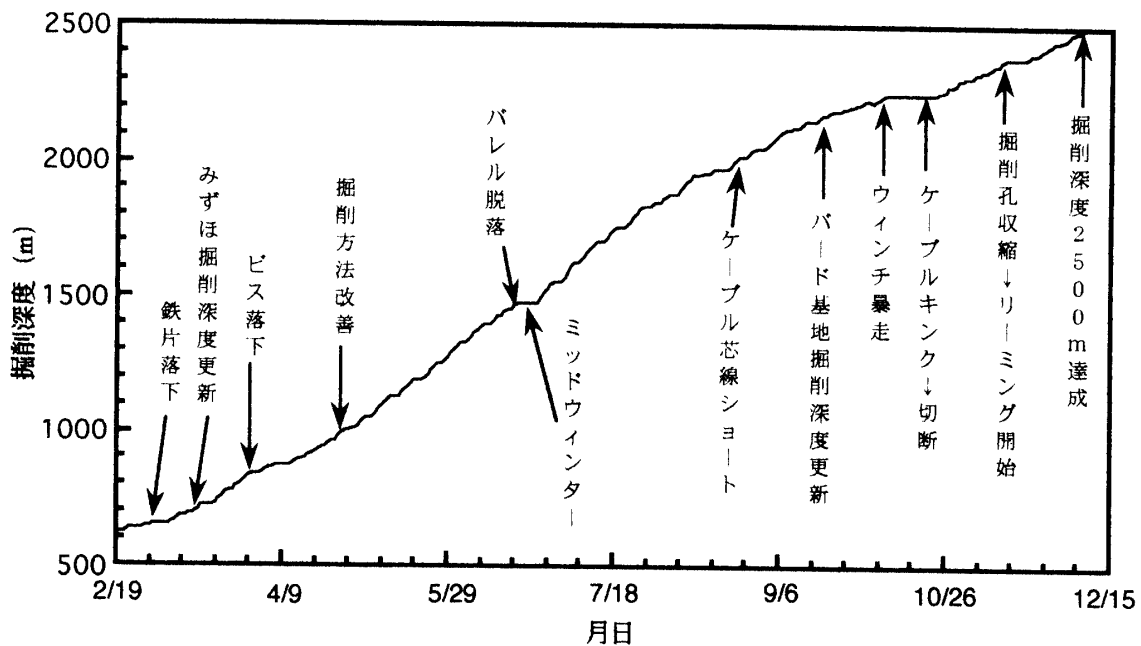


図 24 第37次隊(1996年)による掘削進捗
Fig. 24. Drill hole depth versus date in 1996.

孔が収縮しドリルがさらに拘束されてしまうため、30日には38次旅行隊が輸送途中の液封液を受け取るため、ドーム基地を急遽出発した。これを、みずほ基地で受け取り、1月6日早朝には液を注入し掘削孔の収縮を最小限に食い止める事ができた。以降、収縮した掘削孔の拡大を見守りドリルの上がってくるのを待つことになった。図24に掘削進捗曲線を示す。

3.4. 掘削統計

1995年8月23日の本掘削開始から1996年12月8日までの掘削終了までの各種掘削統計を表4、5、6に示す。コア掘削の総回数は1369回、掘削実日数は291日であったが、掘削孔の液中にたまった切削チップの回収に837回、液封液の不足から収縮した掘削孔の拡幅(リーミング)に12回、落下した異物の回収など掘削はしなかったがドリルを降下させた回数が32回あった。一日の掘削長は平均で8.2m、最大で20.0mであった。

また、掘削進捗は図25に示すように、36次隊が本格的な掘削を開始した当初はさまざまな課題の克服と方法の確立のため一日に5m程のスピードであったが、一日2交代で掘削をするようになってから10m/日前後にスピードが上がった。本掘削開始後150日前後は、36次隊と37次隊の引き継ぎ期間と37次隊の越冬諸準備のため掘削は行われなかった。その後、37次隊は掘削方法の確立やトラブルのためスピードが上がらなかったが、250日頃から15m/日

表4 月間掘削記録

Table 4. Monthly coring statistics in 1995 and 1996.

年月	月末 最終深度 (m)	月間 掘削深度 (m)	月間 掘削回数	1回あたりの 平均掘削深度 (m)
1995年7月	112.59	—	—	—
8月	120.01	7.42	11	0.67
9月	166.41	46.40	32	1.45
10月	213.94	47.53	29	1.64
11月	360.93	146.99	91	1.61
12月	552.35	191.42	119	1.61
1996年1月	614.95	62.60	41	1.53
2月	650.80	35.85	22	1.63
3月	843.08	192.28	136	1.42
4月	1008.18	165.10	117	1.41
5月	1305.12	296.94	163	1.82
6月	1556.14	251.02	126	1.99
7月	1848.52	292.38	148	1.98
8月	2052.91	204.39	105	1.95
9月	2212.04	159.13	86	1.85
10月	2302.93	90.89	49	1.85
11月	2454.16	151.23	77	1.96
12月	2503.41	49.25	27	1.82

表5 100m 深ごとの掘削記録

Table 5. Drilling record at every 100m progress.

到達深度 (m)	到達年月日	日数	液面深度 (m)
200	1995.10.24	—	106
300	11.21	28	109
400	12. 5	14	191
500	12.22	17	157
600	1996. 1.16	25	160
700	3.14	58	190
800	3.27	13	173
900	4.16	20	175
1000	4.28	12	172
1100	5.10	12	173
1200	5.23	13	166
1300	5.31	8	156
1400	6. 9	9	174
1500	6.26	9	178
1600	7. 5	9	170
1700	7.14	9	175
1800	7.26	12	256
1900	8. 8	13	269
2000	8.24	16	190
2100	9. 6	13	317
2200	9.27	21	385
2300	10.30	33	575
2400	11.22	23	666
2500	12. 7	15	722

1995年8月23日の本掘削開始からの100m 深ごとの到達日と、その100m 掘削にかかった日数を示す。また、液面深度も示す。

表6 掘削統計

Table 6. Statistics of deep ice coring in 1995 and 1996.

項目	全期間	36次隊	37次隊
a. コア掘削 RUN 統計	1369回	315回	1054回
b. コア掘削キャンセル RUN 統計	67回	9回	58回
c. チップ回収 RUN 統計	837回	127回	710回
d. リーミング RUN 統計	12回	0回	12回
e. サービス RUN 統計	32回	0回	32回
f. コア掘削総日数	291回	81回	210回
g. 掘削コア総長	2390.82 m	501.43 m	1889.39 m
h. 日掘削平均コア長	8.21 m	6.18 m	9.00 m
i. 日掘削最大コア長	20.04 m	19.40 m	20.04 m
j. 1回の平均掘削コア長	1.75 m	1.59 m	1.79 m

本掘削を開始した1995.8.23から1996.12.8までの掘削諸統計を示す。36次隊(1995.8.23-1996.1.22)と37次隊(1996.1.23-12.8)の実績を示す。なお、aは、b-eを含まず。eは、ビス回収などのランである。fは、コア掘削を行った日数で、チップ回収の後に続いてコア掘削をした日を含む。jは、g/fを示す。従って、コア掘削のみを行った日の統計ではない。

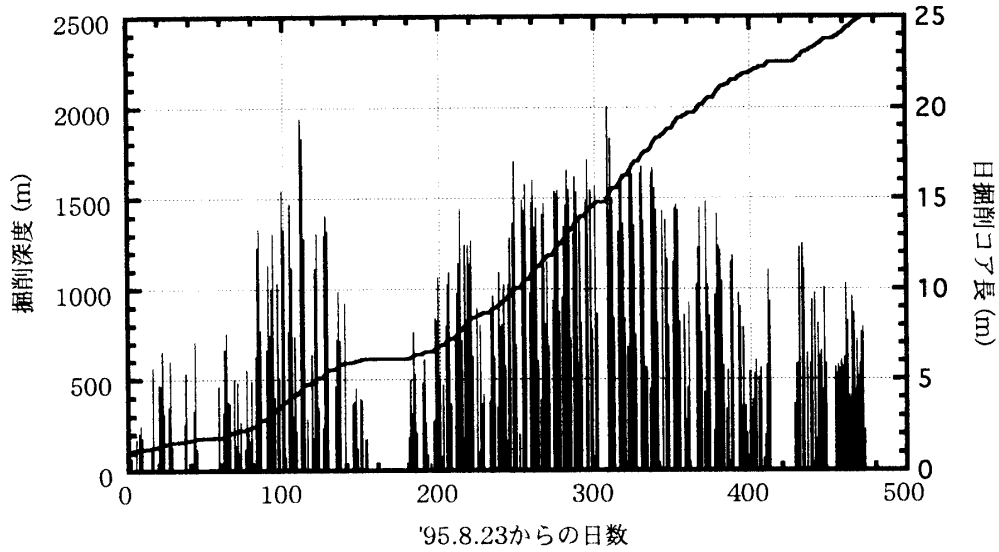


図25 第36, 37次隊(1995-96年)における掘削深度と日掘削コア長の推移
 Fig. 25. Drill hole depth and daily coring depth versus date in 1995-96.

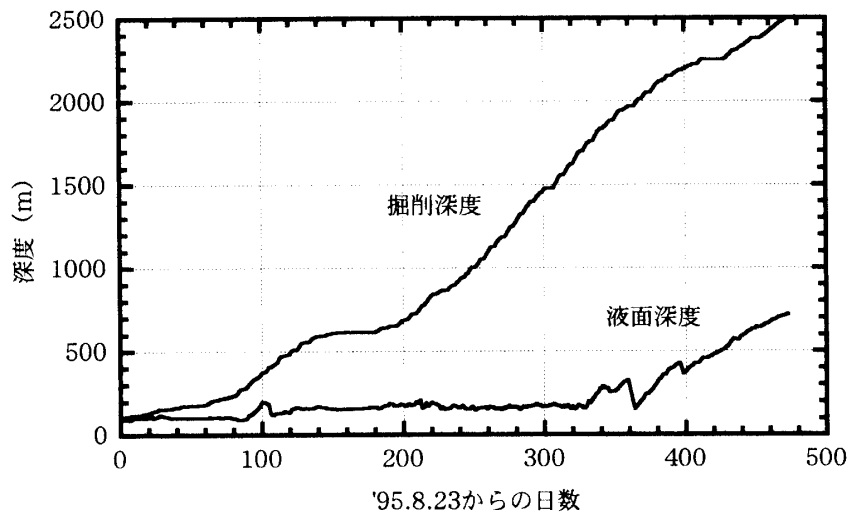


図26 第36, 37次隊(1995-96年)における掘削深度と液面深度の推移
 Fig. 26. Drill hole and borehole liquid depth versus date in 1995-96.

前後と安定した掘削が経過した。1000 m 深を超える辺りで切削刃の切り込み量を少々大きくするなど切削方法を変えた結果、掘削速度が改善されたためである。340 日頃から掘削速度が低下したのは、ケーブルくり出し量が増加し、ドリルの上げ下ろしに時間がかかるようになったためである。棒グラフの間隙は、チップ回収やトラブルなどにより掘削ができなかったことを示している。図26は、液面深度の変化である。液面は深度150 m 前後を保つように、一日の掘削後に液封液の注入をしたが、本掘削開始後360 日頃、掘削深度で2000 m に到達した頃に液をすべて使用し尽くした。その後、掘削により掘削深度が深くなるに伴い液面は低下

し、10月半ば掘削深度が2250 mに達した頃から掘削孔の収縮が起こり始め、リーミングを余儀なくされ掘削速度も大きくダウンした。

4. 方 法

4.1. 掘削

1) ドリル昇降: ドリルの昇降に最も気を使ったのは、最大2.5°に傾斜しているケーシングパイプの中でのドリルの移動と、下降時でのパイロット孔下部と上昇時のケーシングパイプ末端でのドリルの引っ掛かりであった。このため、1995年の掘削では深さ120 m以浅でのドリル昇降速度を最大14 cm/sとし慎重を期した。また、液中では、マストの滑車やベースの耐久性を考慮して、昇降速度を30–60 cm/sに押さえた。

1996年の掘削では、3月始めの掘削初期には、ドリル下降時はパイロット孔末端の115 m深まで20 cm/s、115 m深から液面まで40 cm/s、液中で65 cm/sで、また上昇時にはケーシングパイプ末端の85 mまで65 cm/s、ケーシングパイプ内で25 cm/sのスピードを採用した。その後掘削時間の短縮を図るため、パイロット孔末端やケーシングパイプ末端でのドリルのひっかかりの兆候が認められなかったため、ケーシングパイプ中でのドリルの昇降速度も徐々に上げた。ドリル昇降速度の変更は13回であった。4月19日には液中でのドリル降下中のケーブルのたるみを警戒し、速度制御の基準をウィンチのケーブルくり出し速度ではなくドリル接地圧(液抵抗)で行うことにした。ドリル接地圧を85–90%に保つようにケーブルを繰り出すと60 cm/s前後のスピードが確保できた。また、9月3日にはドリル上昇時のケーブル巻き上げ速度の制御を、ケーブル張力を基準とするよう変更した。これは8月30日にケーブル芯線7本のうち4本が導通不良となり、ケーブルへのダメージを考慮しての処置であった。最終的には、ドリル降下時はケーシングパイプ内液面までは60 cm/sで降ろし、液面からは接地圧90%前後(88–93%)のスピードで降ろした。ドリル引き上げ時は、ケーシングパイプ末端まで速度110 cm/sあるいはケーブル張力800 kgを上限とし引き上げた。ケーシングパイプ内では60 cm/s、深度20 m辺りから徐々に低下するようにした。引き上げ速度は、深度が浅くなるにつれケーブルを含むウィンチドラムの径が大きくなるためスピードが上がる。ちなみに2000 mを超える深度では、85 cm/sで引き上げ始めても浅層部では110 cm/sを上回るほどスピードが上がった。

2) 切削: ドリルコンピューターの電流値のリミットをテストの結果3.8 Aにセットした。これ以上電流を上げるとコンピューターの素子(FET)が壊れるからであった。この設定値内で掘削作業を行うには、刃の設定は食いつき時の電流値を1.8 A–2.2 Aになるようにスパーサーを刃とシューの間に挟めセット(チップが詰まってきてチップを圧密する時は電流値が2.8 A–3.2 Aに上昇)するとよい事がわかった。刃の出を少なくして初期電流値が1.8 A–2.2 Aより小さいと、滑り現象が発生し切削時間が長くなり、刃の出を多くして初期電流値がこれよ

り大きいと、電流値がすぐに設定値に達してしまい掘削不能になってしまった。当初、ケーブル繰り出し速度は8 cm/minと固定し、これに調和(電流値の上昇を見ながら)するようにモーター回転数を調整していた。速度を低めに押さえていたので、順調な場合でも30-40分、70-80分かかる時もあった。1996年4月、掘削効率の向上と減速機にかかる負担を少なくするため短時間切削を試み、モーター回転数を12000回転に保ち、接地圧が一定で連続掘削になるように繰り出し速度を調整する切削方法に切り替えた。その結果、14-15 cm/minとケーブル繰り出しスピードが早くなり、20分程度の切削時間で2 mの連続掘削ができるようになった。これにより、1回の掘削所要時間は2時間程度から1時間30分-40分程度に早まり、1日の掘削回数も増えた。

深度1800 mを越える辺りからは、降下に45分-50分、切削に20-40分、引き上げに35分-40分、地上作業に10分の内訳で、1ランあたり1時間50分かかった。掘削効率を考えるとコア長は190 cm以上を維持しなければならないが、1回の切削では達成できずコアカット後再度切削を行った場合には、2時間20分程度かかった。一日の始業作業に15分、終業作業に20分かかっており、朝6時30分から夜10時30分までの16時間では8ランは無理となってきたので、夜8時30分以降には新しいランに入らない事にした。

3) 接地圧: 40%前後で食いつき、自動掘削の接地圧の調整を60%前後に設定した。コア長が190 cmに満たなく滑り出すときは、掘削作業効率を考え、接地圧を80%位まで上げた。

4) 回転数: モーター回転数を、12000回転(負荷が増すと回転数が落ちる)になるように、スライダックで調整した。

5) 刃の切り込み量: ピッチ2のシューを使用し刃先とシューの一番高いところの差を0.13-0.14 mm、(計算上のピッチ2.04-2.19 mm)にセットした。深度1900 m付近より液温が-29°Cと上昇してきたため、すくい角40度の刃を使用した。液温の上昇に伴いピッチ3のシューを使用し、刃とシューの一番高いところの差を0.16-0.18 mm(計算上のピッチ2.51-2.89 mm)にセットした。

6) チップ取込: 1996年の掘削開始前、外管先端部をスパイラルのリード角と同じ40°で3カ所、高さ150 mm程切り欠きを入れ、スパイラルでチップを押し上げる時に先端部に固まらないでスムーズに流れるようにした。また、ドリル下降時はチップチャンバー内を液がスムーズに流れ所定のドリル下降スピードを維持し、掘削時にはチップチャンバー内に貯まったチップをドリル上昇時に流れ出ないようにブスター上部で適度な堅さにバックさせ、上昇時にチップチャンバー内の液流を止めてチップの流失を防ぐ数種類の弁が必要であった。弁の形状、数等については試行錯誤を続け回収率の向上を計ったが、良い方式を確立できなかった。

4.2. チップ回収

チップ回収機からチップを取り出す作業は液封液の飛沫が飛び散るため困難な作業であった。このため1996年には、チップ回収機にポリチューブを被せた後、門柱型ホイスト梁に取り付けた小型ウインチで上下逆にしてつり下げ木製ハンマーで回りをたたき、大型ポリバケツにナイロンネット製袋を被せチップを排出した。

低温のため氷が固く刃の切り込み量を大きくできなかつたため、チップは極めて微粒となりドリル引き上げ時に大部分が抜けた。このため、掘削ランとは別にチップ回収機による作業を余儀なくされた。表6の掘削統計に示したように、1995年では掘削3回に対してチップ回収1回、1996年では掘削1.5回に対して1回の割合であった。チップ回収1回で回収できる量は20–25kg(液封液湿潤重量)であった。毎週月曜日をチップ回収に当てた。また、チップの生産量を100 cmのコア切削で13.5 kgとし、各掘削ごとの切削深度と地上での回収量の差を求め、孔内チップ残量を算出し孔内チップ残量を管理した。取り残し量が200 kgを越えたら月曜日を待たずにチップの回収を実施した。しかし、1500 mを超えたあたりから月曜日だけではチップ回収が充分ではなく火曜日もチップ回収に当てた。また、掘削深度が2200 m附近から液温が -21°C となり、液とチップ(氷)の密度が接近してきたため、チップが孔底附近に溜まり始めた可能性がでてきた。長い掘削の不調もチップに起因していると考えられたので、10月半ばには9日間をかけてチップの全量回収を行った。

掘削時のチップ回収率を上げるため試行錯誤を繰り返した。深度2000 m 辺りから、氷が柔らかくなりチップの粒径が1 mm 以上と大きくなったため、チップの回収効率が格段と良くなった。チップ回収率は、8月の月間平均は38%であったが、9月第一週には61%、10月最後の週には65%、11月第1週には76%と徐々にではあるが改善された。チップ回収率が向上するに伴い、チップチャンバーやバレルに固く詰まりバレル引き抜きに30分以上かかる問題がでてきた。

4.3. 液封液の注入とチップからの液封液の回収

1) 酢酸ブチル注入: 液面レベルを150 m~160 m に保つように、屋外に貯蔵したドラム缶から、ホースでケーシングパイプの中に直接注入した。第36次隊では、ホースの先端から勢い良く出た液がケーシングパイプ外に飛散しドラム缶1本で5 m 程度しか液面が上昇しなかった。そこで、ケーシングパイプの横に穴を開けホースの先端を差し込み全量が孔内に入るようにした。ドラム缶1本の注入で損失が無ければ10 m 強の液面上昇になるので、ほぼ1日に1本のペースで使用した。また、ドリルの洗浄時に使用しブチル桶に貯まった液もホースで直接孔内に注入した。

2) 酢酸ブチル回収: 回収されたチップは多量の液封液を含んでいる。1995年の掘削では、

当初チップ中の液を未分離のままドラム缶に貯めていたが、融解法によりブチルを効率良く回収した。しかし、この方法は酢酸ブチルの臭気がひどく極めて不評であった。1996年には、本格掘削再開前に、未分離のままドラム缶に貯めていたチップから液封液をドラム缶で12.5本回収するとともに、脱水機の電気系統を改善し使用できるようにした。1回の掘削ごとに回収したチップに含まれる酢酸ブチルは、脱水機にナイロンネット製袋ごとに入れ分離し回収した。脱水機法は、融解法と比べ回収効率は若干落ちるものの悪臭の問題がなく最後まで採用された。

4.4. コア貯蔵

コア貯蔵用雪洞の温度上昇を最小限にするため、入り口を狭くし透明ビニールカーテンで遮断し、内部を幅2.5 m、奥行き7 m、高さ2 mと広くした。このため貯蔵庫の温度は最高でも -30°C 以下に保つことができた。貯蔵庫内には、単管パイプで棚を造り、コア運搬用樋(長さ2.3 m)を合計210個収納できた。1996年3月、掘削場やコア解析室の温度が -25°C 程まで上昇するようになり、隣接するコア貯蔵庫の温度も上昇してきたため、木製のドアを掘削場およびコア解析室との出入り口に取り付け効果を上げた。掘削が順調に進展し、コア処理がブリトル帯に入り遅くなるに従い貯蔵コア量は増え始め、ピーク時は満杯になったが、その後の掘削深度の鈍化とコア処理速度の迅速化により、コアの収納に困ることはなかった。ピーク時にはコア運搬用樋が不足し、ベニア板とスタイロフォームで急遽作成し急場をしのいだ。

4.5. ドリル点検

安全作業を確保し掘削のトラブルを未然に防ぐため、さまざまな点検を実施し、最終的に以下の特に留意すべき事項に整理した。

- 1) 始業点検: その日の掘削作業開始前の点検項目である。ドリル各部点検・増し締め、ポテンシオメーター調整、シーブ軸潤滑油給油、インバーターに欠けた保温用毛布の撤去、ウインチケーブル周辺的安全ロープの点検である。
- 2) 終業点検: その日の掘削作業終了後の点検項目である。ポテンシオメーター交換、洗浄用ブチル量(ドラム缶に満杯)、インバーターに保温用毛布をドリル耐圧室に電気毛布をかけること、電灯や各種機器の電源OFFである。
- 3) 各ラン点検: 各掘削ごとに行う点検である。ドリル台異物の有無の点検、刃やコアキャッチャーの緩みの点検、バレル取付け、シャフト取付け、ポテンシオメーター内クリーニング、ポテンシオメーター緩みの点検である。
- 4) 3週間点検: 掘削機用発電機の500時間点検に併せて、以下の各種点検を実施した。ドリル耐圧室交換、ドリルヘッド部分解点検とスリップリングの交換、ピット内チップ除去である。
- 5) その他(数カ月点検): マスト増し締め、ホイスト増し締め、ウインチオイル量の点検、掘削場の総合点検である。

5. 主要トラブルとその対策

5.1. ドリル

1) 電気系統: 表7にまとめたように、接触不良やコネクター部での断線が頻発した。このために講じた対策も表に示してある。液風掘削初期の段階では、リニア接点での接触不良が多発した。掘削深度が増すと、ポテンシオメーターやスリップリング内部へのチップ詰りが起きた。配線コネクター部の接触不良は掘削全般を通じて起こった。また、予備の耐压室ユニットを常備し電気系統のトラブルが起きた場合、これと交換して掘削作業が滞らないようにした。

2) 空転: 空転センサーがほとんど機能しなかったため、アンチトルクの滑りを検出することができなかった。また、スタビライザーが孔壁に引っかかりドリルの動きを妨げ1カ月以上にわたり掘削が順調に行かないことがあった。(表8参照)

3) 刃及びキャッチャー: 氷の温度が低いいためか、刃先のわずかな消耗が刃の滑りという現象に繋がった。国内の実験結果から1組の掘削刃で40 mは確実に使用可能と判断して刃を用意したが、予想以上に消耗が激しく、掘削後半では刃を再研磨して使用することになった。コ

表7 電気系統の主なトラブルとその対策

Table 7. Troubles of electronics of the coring system in 1996.

項目	現象	トラブルの内容	対策
配線コネクター	通信不良	接触不良や線とコネクターの断線が頻発した。コネクターによる接続箇所が多く原因究明に長時間を要した。また、分解時良くてもユニットを組み立てると不良になることが頻発した。	コネクタ接続部を最小限に残し、残りの箇所は半田付けで行った。
	モーター回転不良	当初機械的な故障と考えモーター部から分解を行った。しかし、ほとんどの場合接触不良によるものであった。	通信不良個所のチェックを行った。
スリップリング	通信不良	スリップリングの底板は薄いアルミ製で、これを横から3カ所、3 mmのセットボルトで固定する構造である。この底板に接地圧測定用ポテンシオメーター作動用のリン青銅製の厚さ10 mmの板が取り付けられていた。長時間の使用で3 mmの押しネジで止めてある部分が変形して底板(軸受け)が緩み接点どうしが接触する事故になった。また、チップ詰まりによる同様の事故が多発した。	毎朝の始業時にネジの点検を行った。しかし、緩み等を発見し増し締めを行う時セットビスの位置が六角レンチの入りにくい位置だったため大変な作業になってしまった。またチップ詰まり対策として、500時間ごとに交換した。
	モーター回転不良		
リニア接点	通信不良 モーター回転不良	接触不良、ショート等が頻発した。修理終了後の作動チェックも困難だった。	この接点を取り外し、線を螺旋状に巻いて取り付け、100 mmの動きに対応した。
ポテンシオメーター	動作不良	チップ詰まりにより動作不良が多発した。	ポテンシオメーターの両側面と下部に穴を開け進入したチップが固まらないようにした。また耐压室上部に取り付けてある配線収納部の上部蓋に、配線が通る穴を開け、ポテンシオメーターの交換がスムーズに行えるようにし、準夜終了時に手際よく交換できるようにした。
	接地圧が一定にならない(数値異常)	摺動面の磨耗による抵抗値の変化のため表示値が変化した。	当初より1 k Ω と2 k Ω の併用で不便だった。また、磨耗により表示値が変化し掘削作業に支障をきたしたので、ドリルコンピュータの配線をかえて対応した。

表8 ドリルの空転に関する主なトラブルとその対策

Table 8. Troubles of drill slip.

項目	現象	トラブルの内容	対策
空転センサー	警報ランプ常時ON 滑りで掘削不能	ほとんど機能しなかったため、掘削不能（食いつかない）状態のとき、刃先で何が起きているのか判断に苦慮した。	傾斜計の振れから空転状態を判断し、アンチトルクの張りを強めたり、刃を交換した。
アンチトルク	滑り（空転）	掘削トルクとのバランスが悪かった。調整用ネジで調整したが、締めすぎるとM型に変形してしまった。	首振り、バネの軸間調整、孔壁に接触する面積が広くなるように形状を調整等を行った。保持力を上げるためには板厚を厚くするしかないと思われる。
	ビス落下	リーフスプリングの取り付けビスが外れた。ドリル振動のためかもしれない。	ロックタイトを塗って対処した。
	ビス落下	首振り状態をやめた時の保持力を増すため、アンチトルク部を2段にしたが振動が激しく取り付けビスが緩んだり外れたりしたため取り外した。	予備のアンチトルク部を取り付け2段式とした。しかしビス落下等の支障が発生したので取り外した。
	ワイヤーの振動	締めすぎてM型になったまま下降していたため起こった。	調整ネジを徐々に緩めて調整した。
	リーフスプリング パー取り付け金具、 ネジ部破損	掘削後半になって多くなった。鉄とステンレス製の両方に発生した。従って低温脆性とは考えにくい。振動による疲労破壊かネジの太さが足りないことに原因があると思われる。たまたま、下部のみの破損だったので大事にいらなかったと考える。	交換した。
スタビライザー	ドリルが孔低まで 降りない	ドリルが孔壁に引っかかって、孔底に達しなくなったのでスタビライザーを外したところ、掘削もスムーズに進むようになった。この結果、スタビライザーが孔壁に当たり掘削の邪魔をしていたのがわかった。	スタビライザーを外した。

アキャッチャーには、コア切断の不良のためコアの取り残し、コアのパレル外への飛び出しなどの問題があった。また、掘削後半にはコアキャッチャーの軸が曲がるという問題が起きた。(表9参照)

4) 耐圧室液漏れ: 微量の液漏れがいつも発生していたため、液漏れセンサーがいつもONの状態だった。そのため多量の液漏れが発生しても地上のモニターでドリルコンピューターの異常が発生するまで発見する事ができなかった。このため、整備済みの耐圧室ユニットを常備しておき、耐圧室に問題が生じた場合、交換をスムーズに行った(表10参照)。

5) ギア: 高速部分の潤滑油切れによるトラブルが起きた。また、予想を超える掘削トルクのため、電流値が上昇しドリルコンピューター回路の電気素子が故障した(表11参照)。

5.2. ウインチ

ウインチのトラブルはウインチ本体に関することは皆無で、いくつか起こったトラブルはすべてインバーターに関連するものであった。ドリル引き上げ時に、インバーターの過熱により自動停止することがあった。インバーターが収納されている箱の換気孔の数を増やすとともに、コントロール室から掘削場に設置場所を変えた。掘削後半には、ドリル降下時にウイン

表9 刃及びコアキャッチャーに関する主なトラブルとその対策

Table 9. Troubles of cutter and core catcher.

項目	現象	トラブルの内容	対策
掘削刃	食いつかない（滑り）	予想していたより氷が硬いためか、食いつかない（滑り）という現象がおきた。アンチトルクが滑っていても同じ現象になるため見極めが難しかった。	刃先を1.5 程に研ぎ直した。
	電流オーバー	掘削トルクが予想以上に高く、電流値を見ながらドリルの下降、停止を断続的に繰り返す作業を強いられた。減速比を上げれば簡単に解決できる事だったが、ギヤを用意していなかった。	刃の出を調節した。
コアキャッチャー	掘削不能	カットされた100mm程の取り残りコアがベアリングのように作用し、掘削の邪魔をするために起きた。これは、孔底部とキャッチャーの刃の部分で同時にコアカットがおき、キャッチャーから下の部分をおいてくるためにおきるものと思われる。	
	スタック	温度が上昇して氷の粘性が高くなったため、キャッチャーを3個使用すると横への圧力が均衡しコアにクラックが入りづらく、食いつくが折れない状態になりスタックしかけた。	キャッチャーの数を2本にした。
	動きが悪い	コアカットに予想以上の力が必要になりキャッチャーの軸が曲がって動きが悪くなった。ひどくなると軸が抜けなくなるまで曲がった。	100m掘削ごとに、軸の点検を行い悪い物は早めに交換をした。
	でべそ	刃が滑ってコアがバレルから出て上がってくる事があった。	100m掘削ごとに交換した。
刃の取り付け台	破損	リーミング時の振動により、リード部に疲労破壊による亀裂が入り使用不能になった。ここは一番エッジがきつい部分だった。R面を大きく取る必要がある。	コアバレルとの取り付けリベットの数を増やした。

表10 耐圧室の液漏れに関する主なトラブルとその対策

Table 10. Troubles of pressure tight section.

項目	現象	トラブルの内容	対策
液漏れセンサー	液漏れ警報のランプがいつも点灯	警報ランプはいつも点灯していた。掘削作業に支障のない程度の少量の液漏れがあったからと思われる。しかし、コンピュータが故障するような大量の液漏れが発生してもわからない結果となった。	500時間ごとに耐圧室ごと交換整備を行った。
耐圧室	液漏れ	少量の液漏れがいつもあるようで、分解するたびにドリルコンピュータが濡れていた。シール面に傷が多数確認できた。	500時間ごとにシール、ギヤオイル、ドリルコンピュータを交換し、対応した。
	大量の液漏れ	3回、大量の液漏れでドリルコンピュータが水没した。	回転軸のシール面の焼き入れ硬度が低く、軸の磨耗により発生したと考え回転軸を交換した。

表11 ギヤに関する主なトラブルとその対策

Table 11. Troubles of drill gear section.

項目	現象	トラブルの内容	対策
ギヤ	ギヤ温度上昇	グリース切れによる軸の摩擦が起きた。	グリース潤滑を止め、南極オイルを使用した。オイルが硬く初期電流値が高い場合は、数分間の暖気運転を行い対処した。少量のオイル漏れが起きるため500時間ごとに分解点検を実地した。

チが暴走するトラブルが発生した。ドリル降下時に発生する回生電流を熱として放出する回生抵抗器の断線によるもので、この抵抗器と同一の電気特性を持つ投げ込み式ヒーターを代替として取り付け解決した。

5.3. ケーブル

いくつかのトラブルが発生した。その第一は、ケーブル芯線の断線であった。7本の芯線のうち3本が断線し、外側のアーマ線とショートした。モーター駆動用電源供給が5芯から2芯に減り、導線の抵抗値が大きくなったため、ドリルモーター供給電圧を450 Vに上げなければならなくなったが、中継コンピューターの整流用電解コンデンサーの許容電圧との関係で、最大400 Vの供給電圧で対処した。ケーブル両端からの導通テストにより、この3本はドリル側から1750 m附近、すなわちその時点での液面位置附近で断線していたことが分かった。芯線の被覆は芯線より熱膨張率の高いテフロンのため、ウインチに巻取られて $+5 \sim +10^{\circ}\text{C}$ で保温されていたケーブルが -50°C 程の液中に入り、急激に収縮しテフロン被覆が破損したと結論付けた。このため、ウインチのケーブル部の保温を止め掘削場の温度(-25°C 前後)にさらすこととし、ウインチをケーブルドラムから分割保温する工事をした。

第二はチップ回収機を降下中でのケーブルのキンクである。これはチップ回収機の降下速度を上回る早さでケーブルを繰り出したために起こった。キンクしたケーブルはケーブル引



図 27 キンクしたケーブル

Fig. 27. Kink in a cable.

き上げ時には1 m程度であったが、キックをもどす作業をしている内にキックがさらに増え(図27)、結局はケーブルを切断せざるを得なかった。第三はアーマ線の破断である。掘削後半に最外側のアーマ線が3本破断した。ウインチへの乱巻きに起因する金属疲労によるものと思われるが、ほつれないように工夫し、この部分がドラムに巻取られるまではケーブル張力を一定値以上にならないように注意し、このケーブルを使用した。

5.4. モニター

最も重要なモニター要素である深度に表12のような表示エラーが生じた。

当初の対策として、モニターソフトウェアで対応した。すなわち、誤った値と正常な値との差を補正して表示するように、モニターソフトウェアを変更した。したがって、保存される深度データはすべて正しい値として再現可能となった。しかし、深度が2200 mを越えてからは誤った深度すら得ることができなくなった。保存された深度データから正しい深度を再現する手段がなくなったわけである。本格的に原因を調べた結果、中継コンピューターに深度データを送信している22本の信号線の内、2本の接続が誤っていることが分かった。中継コンピューターは深度計から深度データをBCD形式で受け取るのであるが、100の桁の4ビット目(最上位ビット)の信号線と1000の桁の2ビット目の信号線が入れ替わって接続されていたのである。そこで、信号線を正しく接続しなおして正常な深度表示を回復した。これで深度の表示エラーは根本的に修復できた。

表12 深度表示エラー

Table 12. Error of depth display.

正しい深度	表示深度	メモ
0 ~ 799.99 m	0 ~ 800 m	正常
800.00 ~ 999.99 m	2000.0 ~ 2199.99 m	誤り (1200 m 加算される)
1000.00 ~ 1799.99 m	1000.00 ~ 1799.99 m	正常
1800.00 ~ 1999.99 m	3000.00 ~ 3199.99 m	誤り (1200 m 加算される)
2000.00 ~ 2199.99 m	800.00 ~ 999.99 m	誤り (1200 m 加算される)
2200.00 ~	0	誤り (数値として認識不可)

5.5. 異物落下

ドリルからのビスの落下は何度か起こった。これにより掘削が不調になることがあったが、掘削不能になることはなかった。この対策として、始業前のドリル各部のビスの増し締め、励行、ドリル降下前での刃やコアキャッチャーの弛みの点検を実施した。また、500時間ごとのドリルヘッド部の分解点検時に、すべてのビスに緩み防止液(ロックタイト)を付けて弛みを防止するようにした。しかし、掘削後半で収縮した孔のリーミングを行っている時に、刃とそのシューがすべて脱落した。リーミングによる微振動のため刃を取り付けているビスが弛

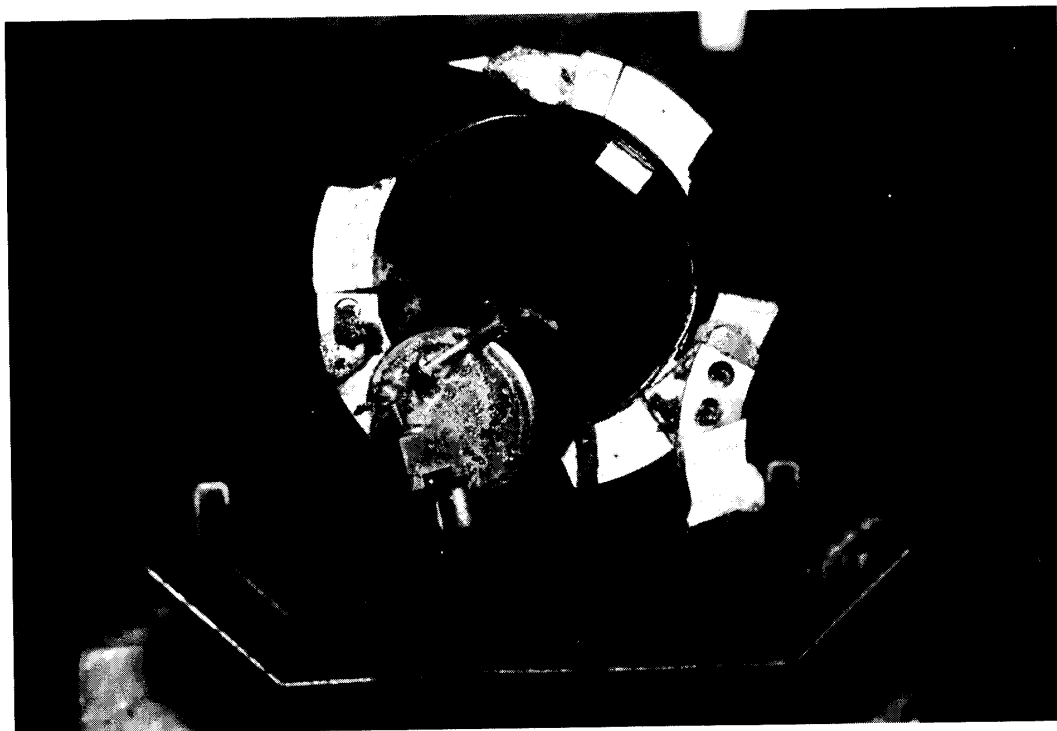


図 28 脱落した刃、ビスの回収

Fig. 28. Recovery of a cutter and screws by using a magnet.

んだことによる。

最大の落下物は、バレルであった。これは、バレルジョイント部の逆転防止用ボルトのセット忘れにより、切削終了時にアンチトルクが滑り逆転して、ジョイント部がはずれバレルが抜けたものと思われる。孔底のバレルの回収は、ミッドウインターの休日をはさんで4日間の作業となった。外管の内側に毛布の短冊を垂らしてバレルを押し込み摩擦で引き上げる方法、バネばかりのフック部分を付けてバレルの上部に引っかけて引き上げる方法などを試みた末ドリル本体にバレルをはめ込む方法で回収に成功した。

掘削孔底に落下した異物の回収に磁石が威力を発揮したこともあった(図28)が、コアのつなぎ部分やチップに混じって上がってくることもあった。長期にわたる掘削作業では、異物の落下は完全に防ぎうるものではなく、磁石での回収方法の確立、磁性体のビス等の使用、ビスなどの弛み防止、点検の励行などで対処する必要がある。

5.6. 掘削孔収縮

1995年の掘削では、液封液を孔に注入する際その半分程度が飛散し孔に入らなかったため、掘削深度が2000 m附近に達した時点で液封液が無くなった。このため、これ以深の掘削では掘削分だけ液面の低下が起こり、結果として掘削孔の収縮につながった。ドリルのひっかか

りの兆候は掘削深度が2250 mに達する頃から現れるようになった。このため、深度1900 m附近からドリルを回転させながら降下するようにした。リーミングの結果生じるチップの回収などの作業も附随してせざるを得なくなり掘削効率は低下した。1996年12月8日の2503 mの掘削達成後、新たな掘削は行わず毎日リーミングに専念したが、同29日、深度2332 mでドリルがスタックした。この附近は、掘削孔の傾斜が4.5度と最大になるところで、掘削最後の段階ではドリルの引っ掛かりが頻発していた。

5.7. トラブル集計

37次隊で起きたトラブルの発生回数を掘削システムの部位別に表13に示す。ポテンシオメーター、アンチトルク、チップチャンバー内の弁については、年間を通じて交換、調整等が必要で、その回数はそれぞれ100回を越えた。システムの部品として確立していなかったことを端的に示すトラブル回数といえる。

表13 1996年の掘削トラブルの集計
Table 13. Trobles occurred during drilling in 1996.

トラブル発生場所	主要トラブル	回数
ロータリーエンコーダ	速度計のバラツキ他	4
ボルト	弛み、落下他	26
ポテンシオメーター	誤動作	131
外管	弛み、スタビライザー他	14
ドリルサイト	ビットのふた修理他	22
チップ回収器	溶接部破損 他	6
スリップリング	誤動作(ショート)	12
コンピューター	表示, FET 他	10
キャッチャー	軸曲がり, バネ破損 他	49
アンチトルク	調整, 取り付け金具破損 他	110
弁	改良, 調整地	134
ウィンチ	アーマードケーブル破損, キンク他	30
	計	548

6. 今後の課題

6.1. 掘削システムの改良

これまで述べてきた掘削経過、主要トラブルなどから、以下の諸点の改良が必要である。

1) 止めネジ: 注意をしても止めネジの落下は防止できない。今回は磁石による回収が有効だったので、止めネジをすべて磁石の付く材質にする。また、磁石の形状も刃の取り付け台に取り付けやすいものが望まれる。

2) コネクター: 接触不良によるトラブルが多発した。コネクターによる接続箇所を最小限にし、コネクターの材質も接触不良事故の起きにくい金メッキ等の処理を施したものに

のが望ましい。

3) 耐圧室: 駆動軸シール部からの微量の液漏れは避けられないので、駆動軸上部に予備タンク(シールを2段にする等)を設け、ドリルコンピューターが漏れた液に直接侵されない工夫が必要と考える。耐圧室蓋のシール面に取り外し時にできたと思われる多数の傷が発生したが、このシール面は重要な所なので焼き入れ研磨が必要である。

4) 減速器: 予想を越える掘削トルクで電流値が上がり、掘削作業が困難を究めた。減速比の違う組み合わせが、現場でできる用意が必要と考える。

5) 刃の取り付け台: エッジのきつい部分に亀裂が入り使用不能になった。エッジ部のアール面取りを大きくするとともに材質の再考が必要と考える。

6) 接地圧: 掘削作業において接地圧の値は、非常に重要な情報を提供する。これを計るのにポテンシオメーターを使用した。抵抗値の経時変化があり調整が必要であった。また、内部にチップが進入しそれが圧密され、ポテンシオメーターが破損する事故が多発し掘削作業を困難なものにした。液封型(内部に絶縁体を詰めたもの)等の信頼できるセンサーの開発が望まれる。

7) スリップリング: 取り付け方法に問題があり、蓋(軸受け部)が抜けて接点がショートした。取り付け方法の再考が必要と考える。また、内部にチップが進入し、ショートを起こしたので、液封型等のスリップリングの開発が必要である。

8) アンチトルク: アンチトルクの滑りを閏知するセンサーがうまく作動せず、判断が難しかった。確実なドリル空転の判断が可能なセンサーの使用が望まれる。また、アンチトルクの保持力が切削トルクぎりぎりだったため、刃の切れ味が落ちるなど切削トルクが増すと、アンチトルクが効かず空転した可能性がある。バネの保持力を増すために板バネの厚いものも必要と思われる。

9) アーマドケーブル: 断線が2回起きた。芯線被覆の改良などを検討する必要がある。

10) ドリル電気系統: モーター電流5A程度まで耐えられる電気系統の改良が必要である。

6.2. 掘削周辺システムの改良

1) チップ回収機: 使用したチップ回収機は全長が2.5 mと短く湿潤状態で最大25 kgのチップしか回収できなかった。全長4 m程の回収機と、これを吊るすための小型ウインチ、回収用の容器等の整備が必要である。

2) チップ分離器: 洗濯機の脱水機能を利用したが苛酷な使用には無理があった。50 kg程度のチップでも使用可能な工業用の脱水機の導入が必要である。

3) コア取り出し用機器: バレルからのコア取り出しに30分以上かかることがあった。引き抜き方式か押し出し方式かを検討し、新たにコア取り出し機器を作ることが必要である。

4) 補修用機材: 旋盤では、補修部品をくわえる治具、穴を開けるときに使うセンタードリル

等準備不足だった。また、補修に銀ろうがあると便利だが用意していなかった。溶接機は、初期のアークの飛びが悪く使いづらかった。工具では、使用頻度が高かった六角レンチの角が丸くなり使用不能になる物が多数出た。また、外管取付け用のビスなどが不足した。

6.3. 深度 2500 m 以深の掘削への対応

深度 2500 m を超える掘削では、これまでのシステム、方法では対処できない以下のような問題が出てくる可能性がある。

1) チップの回収: 液温の上昇に伴いチップの比重と液封液の比重が逆転し、チップが孔底に沈積することが予想される。これまでのチップ回収機では孔底のチップの効率良い回収は難しく、水中ポンプなどを組み込んだ別の方式による回収機の開発が必要である。

2) 高密度液注入による掘削孔の拡大: スタックされたドリルの回収のため高密度液を注入した。このため、掘削孔は拡大する傾向があり、ドリルの空転を防ぐためにアンチトルクの調整範囲を大きくするような改良が必要となろう。高密度液注入によりチップの孔底への沈積は低減される効果もある。

3) 耐圧室のシール: 液圧の上昇により耐圧室への液侵入がこれまで以上に増える。シール性を高くする工夫や先に述べたような液が侵入してもダメージを最小限にする工夫などが要求される。

4) 刃, コアキャッチャー: 氷温の上昇とともに氷が柔らかくなり、チップの粒径も大きくなった。この傾向はさらに進むものと考えられ、切り出し量の大きな刃、食い込み量の大きなコアキャッチャーの準備が必要である。また、岩盤近くではシルトを多量に含んだ氷になると考えられるので、こうした氷に適した刃の準備も必要である。

7. おわりに

構想から 10 年、ドリルの開発に 6 年、南極でのルートづくりや物資輸送の開始から 5 年、ドームふじ観測拠点での氷床深層コア掘削は、当初の目標である 2500 m を超える深さに達し、このプロジェクトはひとまず終了した。得られたコアはこれまでにない良質なもので、共同研究としてさまざまな大学や研究機関で解析が進んでいる。ここに至るまで、数多くの人々の協力と支援、助言を得た。

掘削システムの内、ドリル、ウインチ、操作盤、マスト、液注入装置等の製作は株式会社地球工学研究所が担当し、コンピューターおよび通信については株式会社ジオシステムズが担当した。各部品については、その分野で最も信頼出来る以下のメーカーに発注し製作を依頼した。オリンピア工業 (株): 掘削試験場の提供、九州オリンピア工業 (株): ドリル、マスト、操作盤、全体の組立、マックスプル工業 (株): ウインチ、(株) 東芝 (三重工場): ウインチモーター、インバータ、住友金属工業 (株): ジャケット用パイプ、大同特殊鋼 (株): 刃の材料、東洋刃

物(株): 刃の材料及び製作, (株) 高岳製作所: ドリルモーター, 札幌研削: カッターマウント, 松本興産(株): ケーブル, (株) フジピーエム: ドリル減速機, コンピューターおよび通信系統: (株) シモレックス. こうしたメーカーは仕様の難しさ, 製作数の少なさ, にもかかわらず深層掘削の意義を理解して心から協力していただいた. ここに社名と担当部分を記してお礼を申しあげます.

また, ドリルの野外実験に際しては, 陸別町および同しばれ技術開発研究所, GRIP メンバ-の多大な協力と助言があった. また, 低温室での実験では北海道大学低温科学研究所, 北見工業大学, 国立極地研究所の施設を利用した. 南極では, 第 32 次隊以降第 38 次隊に至る南極観測隊の多大な支援があった. ルート開拓, 物資輸送, 基地建設, そして掘削, コア現場解析, コア輸送など酷寒の中での単調な作業では実に多くの人々の支援があり, 忘れることはできない. また, 文部省, 国立極地研究所, (社) 日本雪氷学会の関係者の理解と支援もこの計画の実現と成功に不可欠であった.

こうした人々, 機関に対し深甚なる感謝を申し上げるとともに, 今後の全層コア掘削に向けて新たな御理解と御支援をお願いしたい.

文 献

- 藤井理行・本山秀明・成田英器・新堀邦夫・東 信彦・田中洋一・宮原盛厚・高橋昭好・渡辺興
 亜 (1990): 氷床深層ドリルの開発. 南極資料, **34**, 303-345.
- JOHNSEN, J.S., GUNDESTRUP, N.S., HANSEN, S.B., SCHWANDER, J. and RUFLI, H. (1994): The new improved ver-
 sion of the ISTUK ice core drill. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **49**, 9-23.
- MOTOYAMA, H., ENOMOTO, H., MIYAHARA, M. and WATANABE, O. (1995): Shallow ice coring and borehole cas-
 ing at Dome Fuji, East Antarctica. Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.), **39**, 189-197.
- 成田英器・藤井理行・高橋昭好・田中洋一・本山秀明・新堀邦夫・宮原盛厚・東 信彦・中山芳
 樹・渡辺興亜 (1995): 氷床深層ドリルの開発 (II). 南極資料, **39**, 99-146.
- 高橋昭好・藤井理行・成田英器・田中洋一・本山秀明・新堀邦夫・宮原盛厚・東 信彦・中山芳
 樹・渡辺興亜 (1996): 氷床深層ドリルの開発 (III). 南極資料, **40**, 25-42.
- TANAKA, Y., TAKAHASHI, A., FUJII, Y., NARITA, H., SHINBORI, K., AZUMA, N. and WATANABE, O. (1994): Devel-
 opment of a JARE ice core drill system. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **49**, 113-123.

(1998 年 12 月 28 日受付; 1999 年 1 月 22 日改訂稿受理)