

氷床深層掘削ドリルの開発 (III)

高橋昭好¹・藤井理行²・成田英器³・田中洋一⁴・本山秀明²・
新堀邦夫³・宮原盛厚¹・東 信彦⁵・中山芳樹⁶・渡辺興亜²

Development of the JARE Deep Ice Coring System (III)

Akiyoshi TAKAHASHI¹, Yoshiyuki FUJII², Hideki NARITA³, Yoichi TANAKA⁴,
Hideaki MOTOYAMA², Kunio SHINBORI³, Morihiko MIYAHARA¹,
Nobuhiko AZUMA⁵, Yoshiki NAKAYAMA⁶ and Okitsugu WATANABE²

Abstract : A deep ice coring system for Dome Fuji project has been developed under a project coordinated by the National Institute of Polar Research. Three reports have been issued already, mainly about the development of the drill system. We report here on the drilling site and equipment such as winch, drilling cable, mast, control panels, chip caching tools (filter) and so on as well as the drill. This paper includes an outline of drilling site and work, progress of machine design and final specifications of the above equipment.

要旨： 南極氷床の深層掘削を行うため、国立極地研究所は掘削装置開発小委員会等を設け、1988年以來開発研究を行ってきた。開発の経緯については、中間報告、深層掘削ドリルの最終仕様、その完成までの経過にわけて、それぞれ報告してある。本報告では開発した深層掘削システムとその周辺装置について、ドームふじ観測拠点の掘削場の配置、掘削作業の流れを説明したのち、各論において、ウインチ、ケーブル、マスト、操作盤、チップ回収器等の開発の経緯を設計基準、具体的設計、製作の流れに準じて説明した。

1. はじめに

南極のドームふじ観測拠点において、日本初の氷床深層掘削が第36次南極地域観測隊により開始されようとしている(1995年6月現在)。この掘削には、ドリル、ウインチ、液封液等多くの機材を必要とするが、いずれも未経験の分野であるため、国立極地研究所の気水圏専門

¹ (株)地球工学研究所。 Geo Tecc Co. Ltd., 4-29, Shirakabe, Higashi-ku, Nagoya 461.

² 国立極地研究所。 National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

³ 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.

⁴ (株)ジオシステムズ。 Geosystems Inc., Koraku Bldg, 22-3-401, Hongo 1-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113.

⁵ 長岡技術科学大学。 Nagaoka University of Technology and Science, 1603-1, Kamitomioka-cho, Nagaoka 940-21.

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.

委員会と日本雪氷学会極地雪水分科会は掘削装置開発、掘削技術、検層装置及びコア現場解析等の小委員会を設け、研究開発を行って来た。

1991年と1992年の夏には、Dome GRIP (Greenland Icecore Project) の深層掘削現場へ開発小委員会メンバーを派遣し、開発中のドリルの実験を行うとともにGRIPメンバーとして作業する中で技術の修得に努めた。また、アメリカの深層掘削、GISP2 (Greenland Ice Sheet Program 2) の現場を見学し、氷床深層掘削のノウハウを得た。1993年には、第4回国際氷掘削技術ワークショップを開催し、海外の掘削技術者との交流の中で情報を得て、開発の糧として来た。

このような体制を通して、1988年以来、掘削装置の試作、実験、改良を繰り返し実施してきた。その結果、1994年秋に現在考えられる最良の掘削システムが完成し、第36次南極地域観測隊で運用できる運びとなった。

開発の経緯については、中間報告を藤井ら (1990)、深層掘削ドリルの最終仕様を TANAKA *et al.* (1994)、その完成までの経過を成田ら (1995) でそれぞれ報告している。本報告では開発した深層掘削システムとその周辺装置について述べる。最初にドームふじ観測拠点の掘削場の配置、掘削作業の流れを説明し、各論では、ウインチ、ケーブル、マスト、操作盤、チップ回収器等の開発の経緯を設計基準、具体的設計、製作の流れに準じて説明する。

2. システム全体の概要

一般的に氷床掘削を実施するためには、多くの機材を必要とする。さらに深層掘削では、目標深度が1000 m以上である場合が一般的で、装置は大型化せざるを得ない。

しかし、掘削が行われるドームふじ観測拠点へのアプローチは、約1000 kmの雪上車輸送を必要とする。輸送距離が長く輸送力には限界があるため、実施可能な機材の小型、軽量化、省エネ化、省力化が求められた(藤井ら, 1990)。このような方針のもとに開発を進め完成した装置の仕様を表1に、ドリルの全体図を図1に示す。運用性の向上を念頭にして設置された掘削システムの全体配置を図2に示す。

掘削場は幅4 m、長さ22 m、高さ4 mの大きさで、雪面を掘り下げて地下式とした。断熱効果を増すため、天井と床は厚さ50 mm、壁は25 mmの断熱パネルで覆ってある。配置は末端から、ウインチ、マスト、掘削孔、マスト回転用ピット、電動ブロック、チップ分離槽、コア処理台、調液装置及びチップ搬出リフトの順である。

掘削を行うときは、マストを直立させ、ウインチによりドリルの下降、上昇等を行う。ウインチの動き、ケーブルの速度や張力、ドリルの作動状況は、すべて暖房されたコントロール室から操作とモニターが出来る。

掘削終了後、ドリルがマストの定位置まで上昇したら、電動ブロックを巻き上げ、マスト、ドリル共に水平になるまで回転した後、コアの抜き出しやドリル内に貯蔵されたチップの排

表1 氷床深層掘削装置の仕様
Table 1. Specifications of the deep ice drill system.

番号	名 称	仕 様
1	ウインチ	モーター: 11 kW, 荷重 max: 3.4 t 速度 (0-3000 m の平均): 51.6 m/min ケーブル巻量: 7.72 mm にて 3500 m 制御: ベクトルインバータ制御
2	ケーブル	ロチェスター製アーマードケーブル: 7H-314K, 外径: 7.72 mm, コンダクター数: 7, 破断強度: 37.4 kN. テフロン被覆
3	マ ス ト	回転式, 高さ: 10.5 m
4	斜めつり電動ブロック	モーター: 1.5 kW, 荷重: 1 t, 揚程: 12 m
5	ド リ ル	コア径×長: 94 mm×2.2 m, 孔径: 135 mm, 速度: ~ 30 cm/min 寸法: 径 122 mm×長 8.6 m, 重量: 190 kg, 耐圧: 300 kg/cm ² モーター: DC 0.6 kW. ブラシレス, 刃数: 3 チップ回収方式: アルキメディアンポンプ式 アンチトルク: リーフスプリング方式 (3枚バネ) 制御: 専用コンピュータによる
6	ウインチ操作盤	ベクトルインバータ制御 (東芝 VF-V3-11kW) 指示または制御: ケーブル速度・ケーブル長さ・張力
7	ドリル操作盤	DC 電源 (max 500 V) 指示または制御: 各部電圧・電流・モーター回転数・刃先荷重
8	モニター・記録	専用パソコンによる
9	検層ゾンデ	長さ: 3.46 m, 耐圧: 300 kg/cm ² 測定項目: 孔径・傾斜・方位・氷温・液温・液圧
10	チップ分離槽	ドリルから排出されたスライムを液とチップに分離する 径: 550 mm, 高さ: 300 mm
11	液注入ポンプ	液封液を掘削孔に注入する, 100 V・150 W
12	孔内チップ回収装置	掘削孔内に浮遊しているチップを捕捉する A 型: バタフライ式, ドリルのチップ室以下を取り去り駆動シャフトに取り付ける, 外径: 124 mm, 長さ: 2484 mm B 型: バタフライ式, コアバレルの代わりに挿入する
13	液 封 液	酢酸ブチル
14	発 電 機	いすゞ 28 kVA

出を行う。1回で採れるコアの長さは2 mであるので、目標の2500 m掘るためには、最も順調な場合でも1250回この一連の作業を行わなければならない。

採れたコアは、長さの計測や番号付けなど、初期段階の処理を行い、コア貯蔵室に収納する。ドリルから排出されたチップは液封液を含んでいるためチップ分離槽にて分離され、液は樋を伝って掘削孔へ戻し、チップは一定量たまったら、リフトにより地上へ搬出される。

液の注入はドラムに取り付けたポンプにより積算流量計を経て行う。機器のメンテナンスが必要となったときは、暖房されている作業室に持ち込みメンテナンスを行う。ここには小型の旋盤やボール盤、工具及び予備品等が備えられている。

掘削に必要な電力は、専用の28 kVAディーゼル発電機から供給され、エンジンから発生す

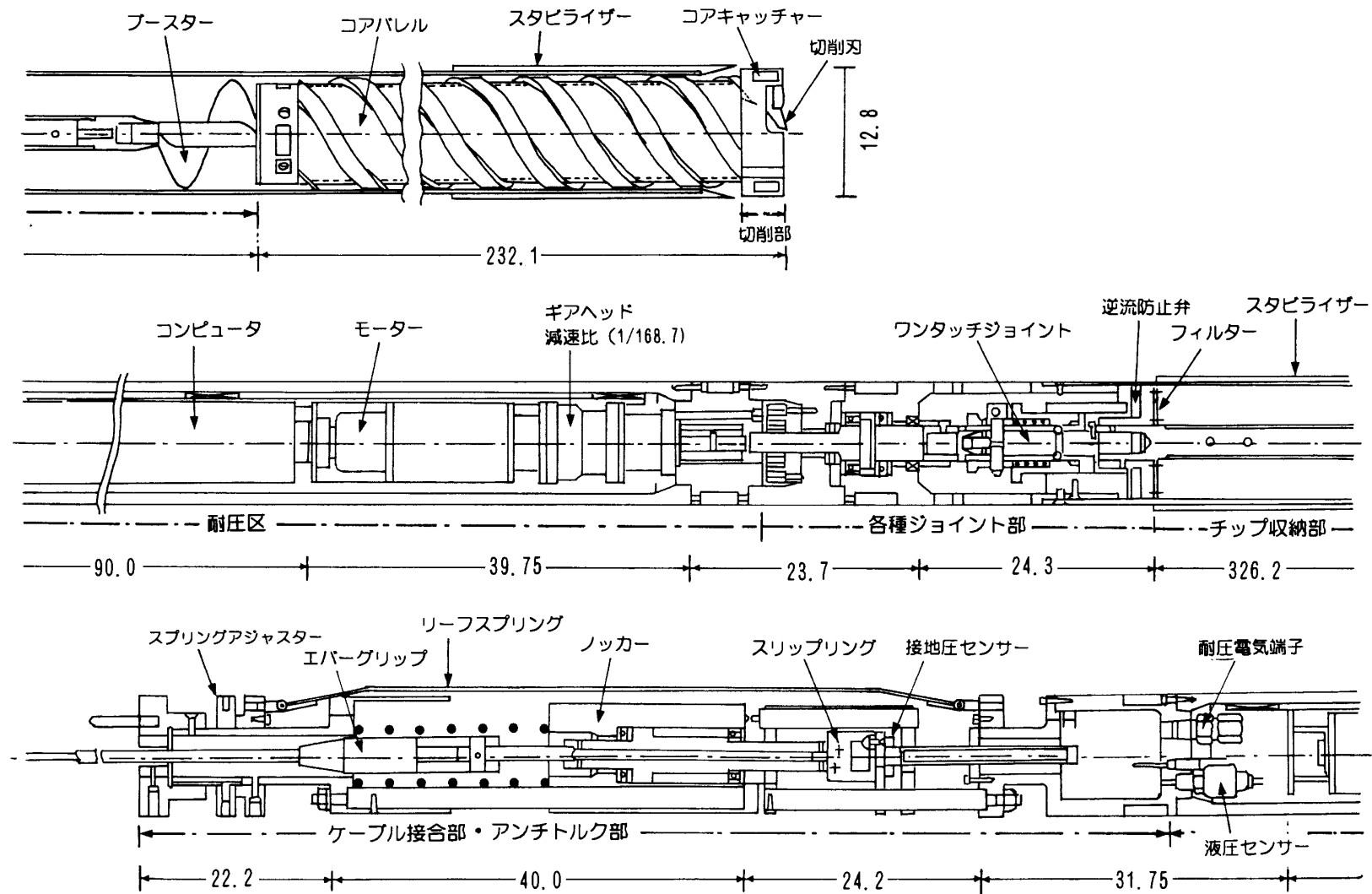


図1 ドリル全体図 (cm)

Fig. 1. Schematic drawing of the deep ice drill (cm).

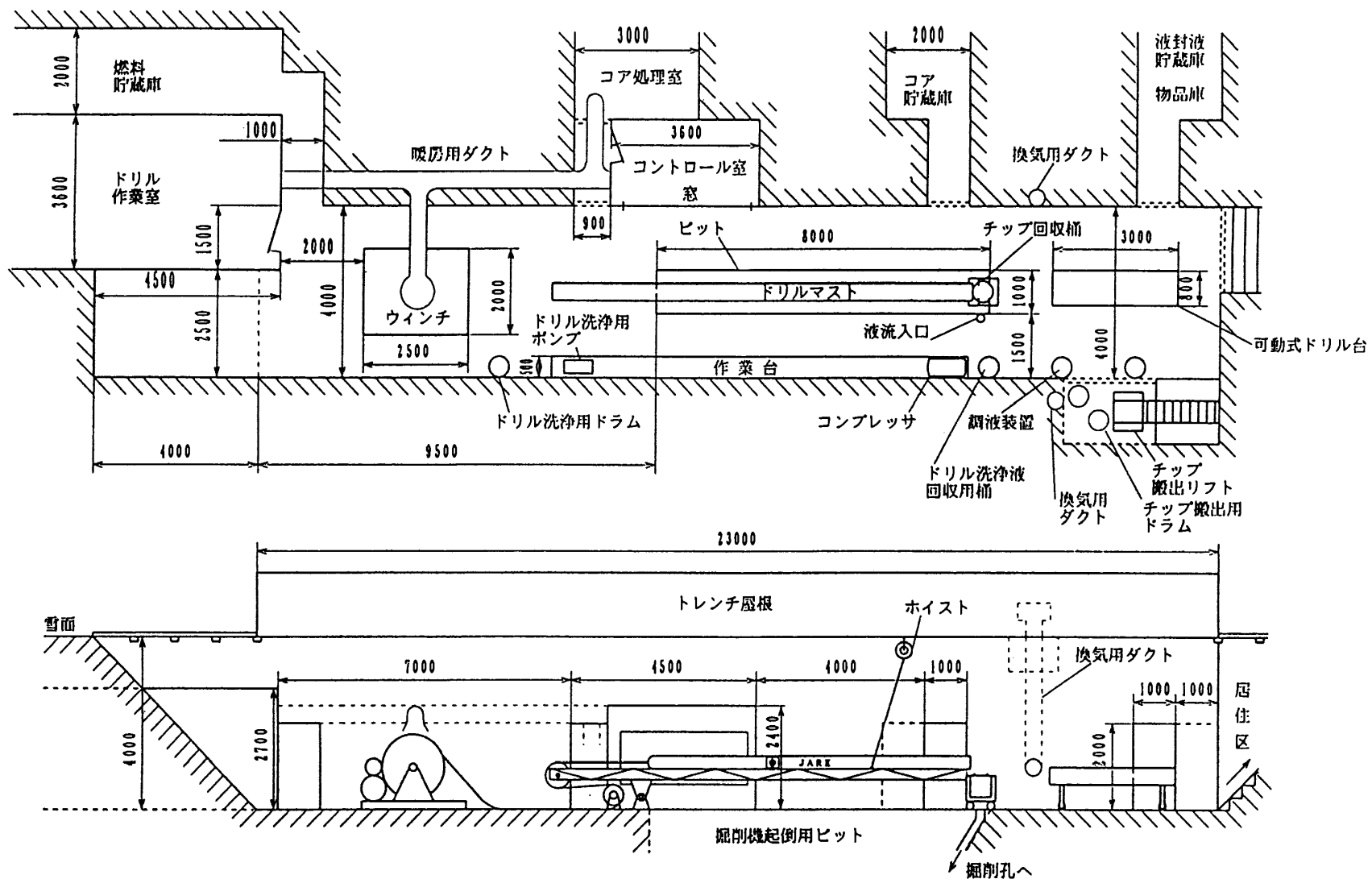


図2 掘削場全体配置図 (mm). 上が平面図, 下が側面図
 Fig. 2. Layout drawing of the drill site (mm).

る熱は、コントロール室、作業室、ウインチ及び掘削場等の暖房に用いられる。なお1995年5月末で、掘削場の室温は $-50 \sim -60^{\circ}\text{C}$ である。

以下、各装置の詳細を述べるが、仕様の決定や、設計に当たっては、掘削技術開発委員会より提出された要求仕様を優先させた。

3. ウィンチ

ウインチに求められる機能は、ドリルの昇降、掘削時の微速繰り出し、コアカットである。設計の基準となる諸元を表2にまとめた。

表2 ウィンチの設計基準
Table 2. Reference design of the winch.

番号	項目	条件・要望・在庫等
1	モーター	11 kW 以下, 3 相, 200 V, ベクトルインバータ制御
2	荷重	1100 kg 以上
3	速度	液中にて平均 2500 m/H (41.7 m/min) 以上 ドリルの掘削速度 (10-30cm/min) の微速繰出しが可能なこと
4	ケーブル	外径: 7.72 mm のアーマードケーブル
5	ケーブル巻量	3500 m
6	巻取り制御	リーバースプーリングシステム
7	ブレーキ	電磁式及びフット式併設
8	スリップリング	5A × 5 極
9	伝達駆動系	チェーン, ベルトを使用せず, ギヤー駆動とする
10	予備モーター	メカニカル変速装置付きモーター, 11 kW
11	重量	軽量化に努力すること
12	寸法	小型化に努力すること

ウインチにかかる荷重は、液中におけるドリルとケーブルの重量及びこれらの液中移動抵抗である。液中におけるドリル重量を 180 kg、長さ 3000 m のケーブル重量を 660 kg、液中移動抵抗を 60 m/min の巻き上げ速度において 260 kg と推計し、合計の 1100 kg を正常時の最大荷重とした。なおドリルの移動抵抗は実験 (成田ら, 1995) をもとに約 225 kg と計算することが出来、設計条件としての 260 kg あるいは 1100 kg は正しいものと確認できた。

ウインチの巻き上げ速度 V (m/min) は次式により計算される。

$$V = 6120 \times \mu \times P/W,$$

ただし、6120 は定数、 μ は機械効率、 P はモーター出力 (kW)、 W は負荷荷重 (kg) である。 μ を 0.8 (後述)、 P を 11 kW、 W を 3000 m 深では 1100 kg、表層付近ではケーブルの重量が減るため 500 kg とする。これにて速度 V を計算すると $V_{1100} = 48.9$ m/min、 $V_{500} = 107.7$ m/min となるが、60 m/min 以上の液中での移動は無理であるため (藤井ら, 1990)、 $V_{500} = 60$ m/min とすると、平均速度は $V_{av} = 54.4$ m/min となり十分に要望を満足する。

負荷トルクが最大となる 3000 m 深では、ウインチドラム径を 450 mm とすると、ドラムにかかるトルクは、 $T_{\max} = 0.45/2 \times 1100 \times 9.807 = 2427 \text{ N} \cdot \text{m}$ となる。一方、この深度の速度は 48.9 m/min であるので、ドラム回転数は $R = 48.9/0.45 \times \pi = 34.6 \text{ rpm}$ となり、1500 rpm のモーターとドラム間の減速比は $1500/34.6 = 43.3$ 、すなわち 1 : 43.3 と計算される。これより、モーターにかかる負荷トルクは $2427/43.3 = 56.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ であり、11 kW モーターの定格トルク 70.1 N・m を超えないと言う条件を満たすが、さらに安全率を高くするため、また減速機の設計上の都合により総合減速比を 1 : 49 と決定した。これによりモーターの持つトルクには 1.4 倍の余裕が生まれ、平均速度は 51.6 m/min となったが 41.7 m/min の要望に対しまだ余裕を残している。

モーターは使用する発電機の発電容量から 11 kW 以内と制限された。モーターには、油圧モーター駆動と電動モーター直結駆動が存在する。油圧モーター駆動は制御性やトルクの大きさにおいて優れており、掘削に要求される微速運転に適している。しかし、動力の伝達効率を計算した結果、油圧ポンプ、制御弁、油圧ライン、油圧モーター等におけるロスが大きく、モーター出力の 40 % 程度の動力しか利用出来ないこと、及び寒冷下での油の流動に不安があるため、油圧モーター駆動は不採用とした。

一方、電動モーターに対する回転制御装置の発達は目ざましく、インバータを用いて、例えば変速比 1 : 1000、定トルク (0–1500 rpm の範囲)、の制御も容易に出来るようになっている。1 分間に数 cm 程度の微速運転が可能で、さらに回転数 0 においてはブレーキの役割をするため、ウインチには最適の駆動装置である。数機種を検討の結果、東芝ベクトルインバータ・モーター VF-V3, 11 kW 型システムを採用した。

減速機など動力の伝達系で留意したことは、故障が少ないこと、チェーンやベルトを用いないこと、伝達効率が良いことの 3 点である。第 25 次観測隊がみずほ基地で 700 m 中層掘削中に、ウインチの駆動チェーンが突然切断したことが、今回のチェーン不採用の理由である。また、減速機とケーブルドラムを直結することにより伝達効率を大きく高めることが可能である。しかしチェーンなしでの、共通ベース上の配置に無理があるため、市販の減速機を利用することが出来なかった。

そこで、理想的な配置に合わせて減速機を特注することによって図 3 に示すようにモーターを減速機入力軸に直結し、出力軸にはケーブルドラムが軸受けを用いず直結していると言うシンプルな構造が実現できた。また、特注であるため刃の大きさ (モジュール) に余裕を持たせて強度を増し、故障の回避、耐久性の向上を図ることが出来た。

伝達ロスの発生する場所は、減速機自体と、ドラムの反対側軸受けの 2 カ所のみとなり、通常では 80% の伝達効率を得られると推定される。ドームふじ観測拠点においてはウインチを十分に暖房することが出来ず、低温下で運転した場合は、効率の低下は避けられないものの前述の如く速度、トルク等の余裕は十分である。

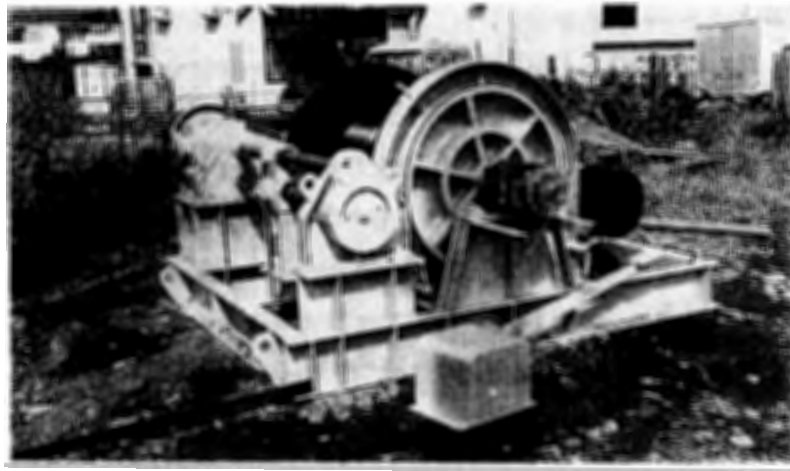


図3 ウインチ

Fig. 3. The deep drilling winch.

ケーブルドラムは、ケーブル巻量 3500 m、専用トラバーサ付きで、リーバス社製のドラムを採用した。この巻き取りシステムは、ドラム上に特殊形状の溝を切ったり、トラバーサの駆動に差動歯車を使うなどして、ケーブルの整列巻きに対しては最も優れているとの評価がある。

スリップリング電気接点は、既存のものは小型で強度面で不安があったため、大型のものを特注し、ドラムシャフトに取り付けた。

緊急ブレーキは足踏みのバンドブレーキとし、手巻き機構は減速機とメカニカルブレーキ内蔵の手巻きウインチを取り付けた。

緊急非常停止を必要とする場合を想定すると主に巻き上げ中、ドリルが引っかかったときである。このまま無理に巻き上げるとケーブルを切断しかねないので、瞬時にウインチモーターを停止しなければならない。この機能は電氣的に行うこととし、インバータのトルク制限装置 (0-200% の範囲で設定可) を利用することにした。仮に上記のリミッタが作動しない場合でもケーブルの破断強度はモータートルクによる張力より大であるので、ケーブルが切断する可能性は少ない。

インバータモーターシステムの予備一式を用意したが、さらに安全を考え電子回路を用いない機械式変速機付きモーター (シンポ工業製、リングコーン変速機付きモーター、NRX-11 kW 型) も併せて安全対策とした。

潤滑油は、南極観測隊専用製造されたギヤオイル (NK2K-01) とグリス (HIL-G-23827A) を用いた。

ウインチの全重量は 2345 kg であるが、ケーブルを巻いた状態では 3080 kg となる。ウインチの試験は 1993 年 10 月に立川の掘削試験塔を用いて行うとともに、1994 年 2 月に北海道陸別町において行った。先ず、定格負荷である 1100 kg の錘をつるし、昇降させたが十分な余裕

をもって稼動した。ただし塔の高さの制限と、インバータの加速時間の関係から最高速度には達しなかった。ブレーキを使用せずモーター0回転における停止も問題なく、カタログの保証範囲には含まれていないモーター回転数24 rpm以下の運転も可能とわかった。

次に実際に氷を掘削しつつ、微速繰り出しテストを行った。図4は掘削状況の記録である。掘削には刃先荷重の安定が非常に重要であり、一定に保つためには、ウインチを微速で繰り出しつつ、センサーの信号により、モーターをOn-Offさせる。ノコギリの刃状の谷底はウインチモーターのOn、山頂はOffを示す。結果はウインチの応答、繰り出しとも安定しており、このように狭い幅の中で刃先荷重を制御出来ることがわかった。グラフではこのようにノコギリの刃状となったが、ドリル頂部のスプリングの作用によりドリルは直線的に掘削を行っている。

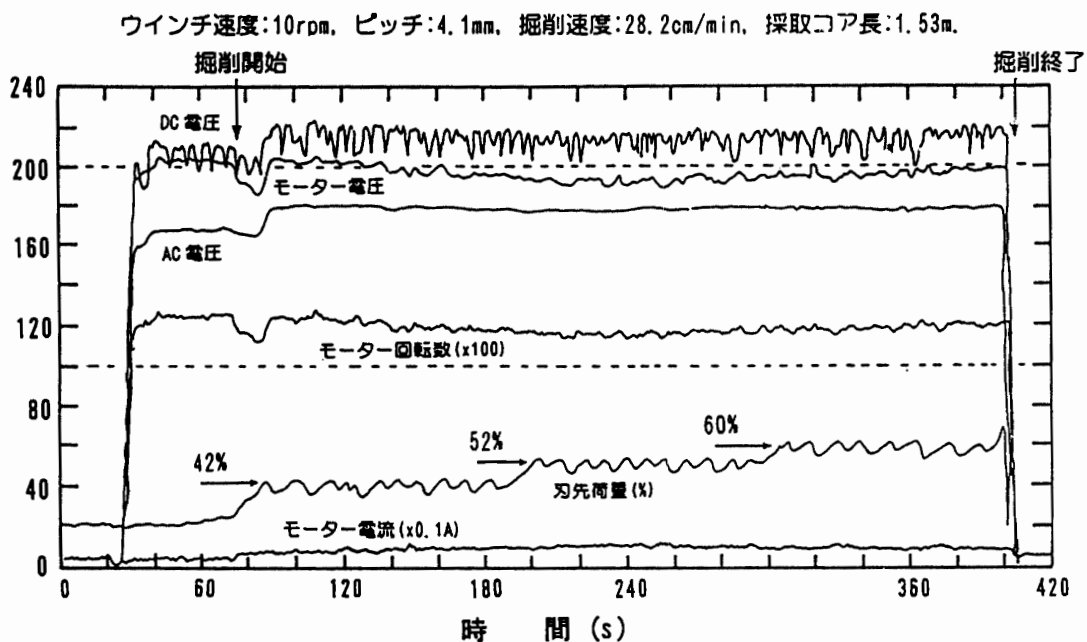


図4 ドリルの掘削状況 (成田ら, 1995, 図27cより引用)

Fig. 4. Record of machine of deep drill used at Dome Fuji Station, Antarctica.

4. ケーブル

ケーブルに求められる機能は、ドリルのつり下げと、電力の供給であるが、重量や直径が小さいほどウインチが小型となり、設計方針に一致する。そこで、従来から用いて来たアーマードケーブルに加えて、重量において有利なケブラーケーブルも検討の対象とした。

グリーンランドDye-3では、外径6.45 mm、破断強度24950 N、長さ3500 mのアーマードケーブルによって2037 mの掘削を成功した (GUNDESTRUP *et al.*, 1984)。ここでは、2.5～2.6倍の安全率を見ていると考えられる。

しかし、Dye-3 氷温は -32°C であるのに対し、ドームふじ観測拠点の氷温は表層部で -58°C と推定されるためアーマーの低温脆性も考慮に入れる必要がある。また、2.5 倍の安全率は低すぎると判断し、破壊強度が1 ランク上のケーブルを選定し低温下における強度試験を行うこととした。結果はいずれも3 t 以上の破断強度を示した(成田ら, 1995)。試験ではいずれもケーブルの固定部で破断しており、直線部の強度は更に強いと思われる。ドームふじ観測拠点用ケーブルは成田らによる実験のような一点で固定する方法をとらず、専用のケーブルグリップ(Dyna Grip No. 119)により50 cm ほど巻き付けた摩擦力で保持する構造であり、ケーブル本来の強度を低下させないよう配慮をした。図5は選定したアーマードケーブルの断面図である。7本の導線の外に40本のピアノ線を巻き、引っ張り強度を確保している。7本の導線のうち2本はドリルコンピュータの通信用とし、残り5本を並列に接続した。ドリルモーターへの電源の供給はこの5本とアーマーにより行う。

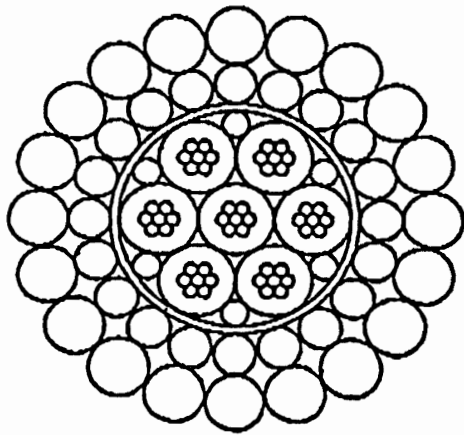


図5 アーマードケーブル

Fig. 5. Sectional drawing of the armored cable.

立川及び陸別町での実験で、ドリルモーターの電流は0.8–1.0 A と実測した。ドームふじ観測拠点の低温下、高圧下では、2 A 程度必要であると仮定して電力計算を行う。3000 m 繰り出し時における3500 m ケーブルの往復の電気抵抗は、 66.7Ω であり、2 A 通電時の電圧降下は、133.4 V となる。これより供給すべき電圧は、モーターの定格電圧270 V を加えて、403.4 V となる。また、電力の損失は、266.8 W として回路設計をし、発熱を見込む必要がある。

一方、ケブラーケーブルは導線数と破断強度を指定して、メーカーに検討を依頼した。試作品まで提供いただいたが、破断強度3 t のケーブルは外径が9.8 mm と太くなること及び耐低温性、耐液封液性等が不明のため不採用とした。

5. マ ス ト

マストの機能は、ドリルのつり下げ、昇って来たドリルを保持して水平まで回転すること、及びドリルのサービス台としての役割である。Dome GRIP のマストを参考にして図6に示す回転式マストを設計した。マストの断面は40 cm 角で、長手、トラスともアングル鋼(50 mm

×50 mm×4 mm (厚)) を使用している。

マストの全長は 10.5 m であるが、掘削場の天井高が 4 m であるため、床上部分を 3.5 m とし、残りの 7 m は地下式とした。

マストの回転は電動チェンブロックで行うこととし、マストの下端近くにチェーンのフックを固定した。このように回転軸と下端との 2 点で支持すればマストのたわみも小さくおさえることが出来、中央部における最大たわみは、計算上、3.8 mm である。

ドリルを載せる部分は全面ステンレスの樋を設け、この上でバレルの抜き出しや、チップの除去、洗浄等を行う。ドリルから流失した液封液はすべて、樋を伝ってチップ分離槽に回収出来るようにした。

掘削場の環境維持のため極力、液封液を床に落とさないよう配慮すべきである。頂部にはケーブルを支持する外径 580 mm のシーブが、ケーブル張力を検出するロードセルを介してつり上げられている。このケーブル張力の表示は、昇降中のひっかかり、液抵抗、ドリルの着

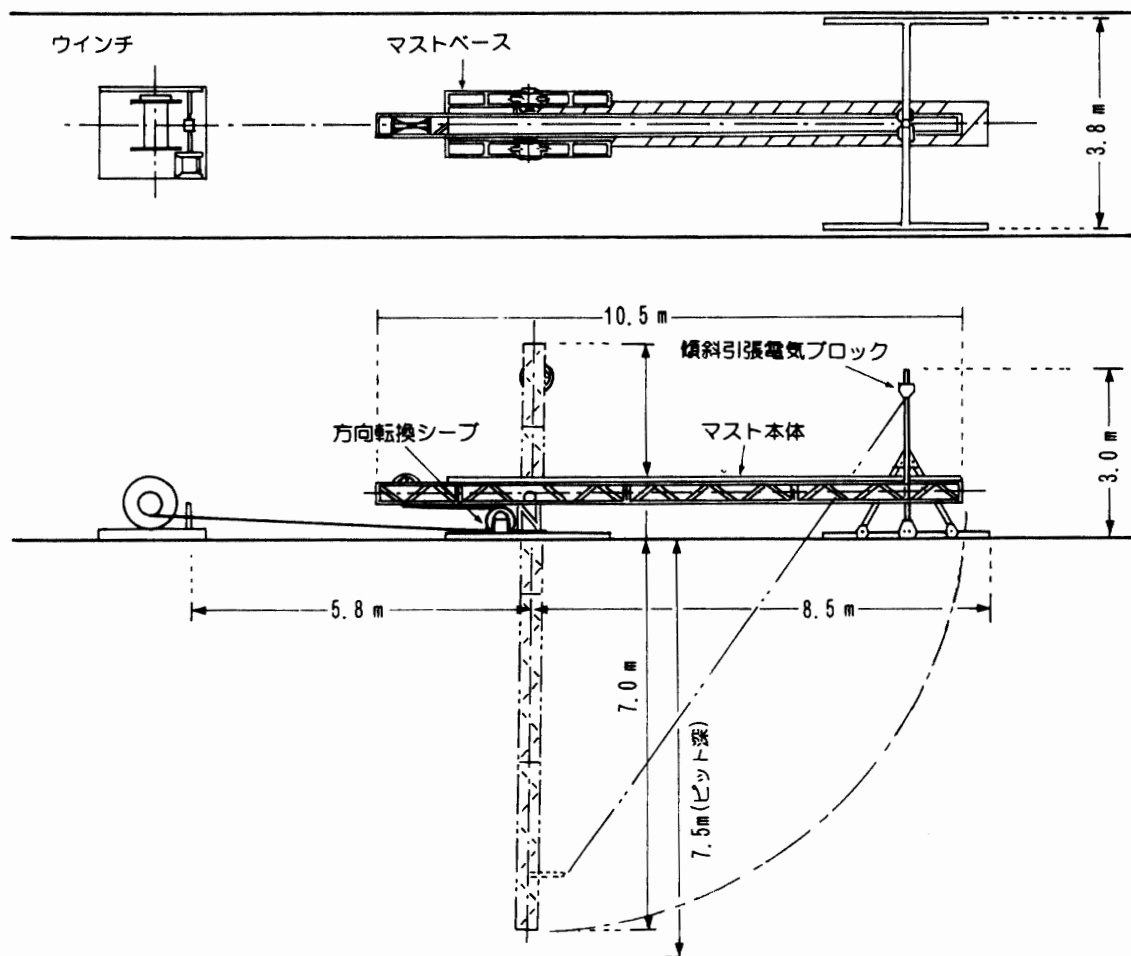


図 6 回転式マスト

Fig. 6. System of mast and winch at Dome Fuji Station.

底や刃先圧の目安をつけることなどに利用価値は大きい。

過昇防止用のリミットスイッチを2段に設け安全を確保した。マストは、押しボルトによりチルト角を調節出来るので、昇降時にドリルが当たらないよう掘削孔方向へ2～3°チルトさせる。

マスト基部にはウインチ方向へケーブルをリードするためのシーブを設け、ケーブル長さを検出するためのエンコーダ及びエンコーダ不調の場合の機械式深度カウンタを取り付けた。エンコーダによる深度の表示はウインチ操作にとって非常に重要であるため、異なった2方式の表示計を採用した。

製作後8 mの建設足場を組み、この上にマストを据え付けて、検査と試験を行い異常のないことを確認した。

6. 操 作 盤

操作盤とモニター装置は重複部分が多いため、統一して設計を行った。図7は掘削システム全体の電気系統図である。モニター装置は各種センサー、ドリルコンピュータ、中継コンピュータ及びパソコンから構成されるが、詳しくはTANAKA *et al.* (1994), 成田ら (1995) を参照されたい。

ドリル操作盤の機能は、ドリルモーターへ直流電流を供給することである。モーターの回転数を変えるための変圧は、最も故障が少ないと思われるスライドトランス(スライダック)とした。電力は変圧後ブリッジ整流回路、平滑回路、ケーブルを経てドリルへ供給する。最大電圧を500 V、電流容量を最大10 Aとした。

ドリルモーター保護のため瞬時に電流を遮断出来るリレー付き電流計を取り付けた。遮断電流は任意に設定出来る。図8のドリル操作盤に示すように、モーター操作回路のほか、回転数計や刃先圧計など多くの指示計を配置した。パソコンのディスプレイにおいて、すべてモニター出来るが、オペレーターの作業をより容易にするためである。

ウインチ操作盤はウインチモーターに電力を供給し、回転を制御する。ウインチモーターの項で述べたように、大変使い勝手が良いベクトルインバータを採用した。主な特徴は、回転数制御範囲は2.4～2400 rpm、トルク特性は0～1500 rpmの間では定トルク、1500～2400 rpmではゆるい減少傾向を示し、また保護機能としては過電流、過電圧、過負荷、過熱など11項目、寸法のコンパクト化に努めた。さらにコンピュータ等電子機器のノイズの影響によるインバータの誤作動を防止するため、操作盤の入力部にノイズカットフィルターを設けた。逆にインバータから発生する高周波による発電機のコイル焼損防止対策としては、発電機を1ランク大型のものを選定することで対応した。

ウインチ操作盤(図8)においても、ケーブル張力、長さ、速度、たるみ等の表示を設け、さらに異常時にはウインチモーターを自動停止するインターロック回路を設けた。操作盤では

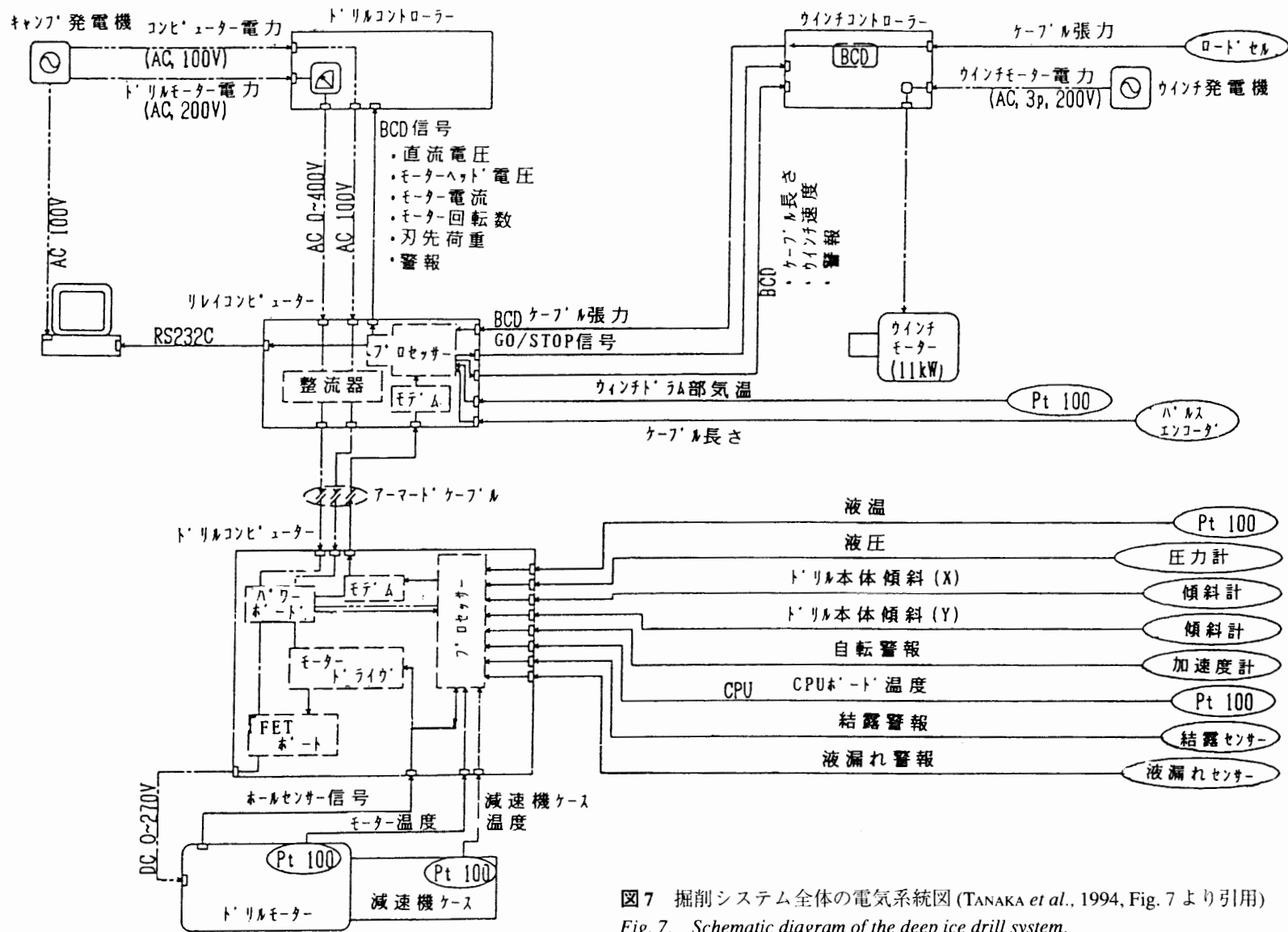


図7 掘削システム全体の電気系統図 (TANAKA et al., 1994, Fig. 7 より引用)
 Fig. 7. Schematic diagram of the deep ice drill system.

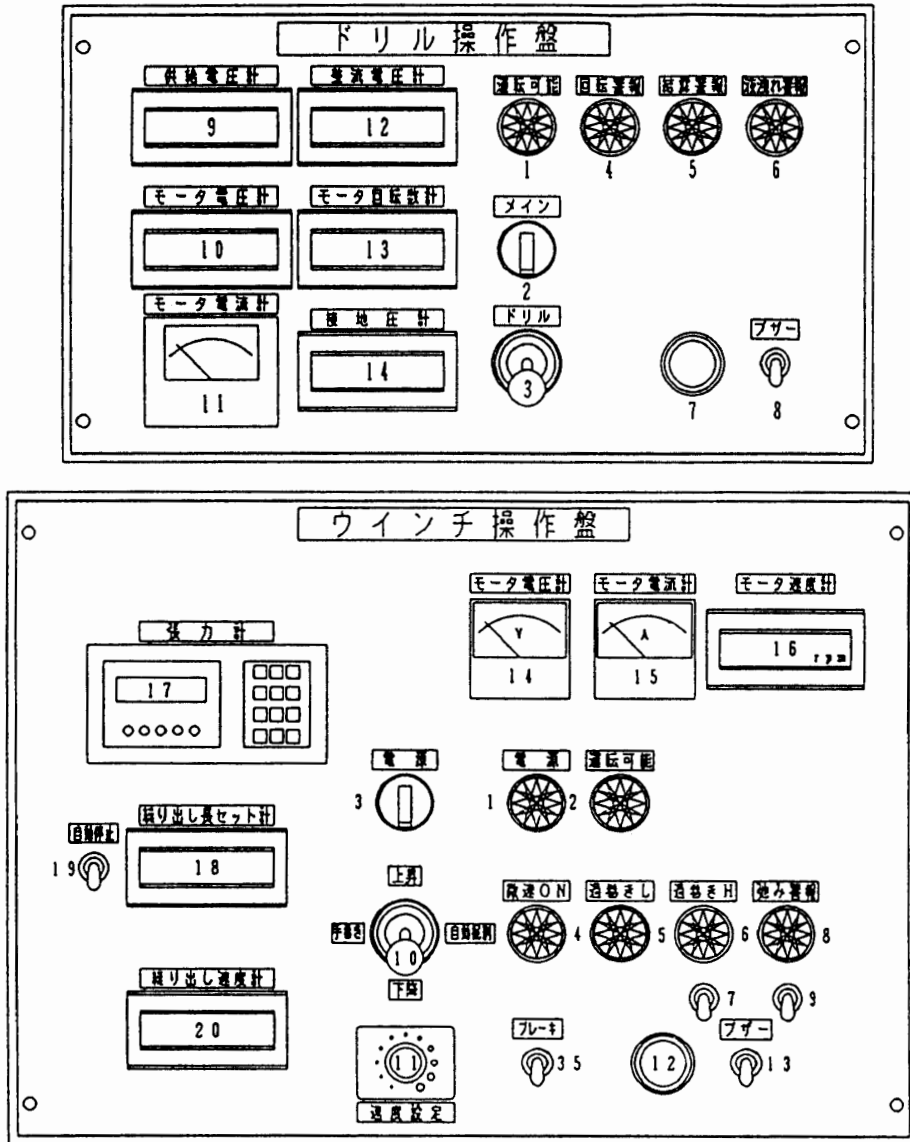


図8 ドリル・ウインチ操作盤
Fig. 8. Drill and winch control panels.

共通に、電源部やインバータ等かさばるものは別置きとし、卓上へは小型の操作部のみ集中させて、オペレーターの便宜を図った。

配線用の配線については、汎用品では硬化して使用できないことが知られている。化学合成素材のなかでは最も低温に強いと言われている耐寒ビニール電線と、天然ゴム電線を -60°C で冷却し柔軟性を比較した結果、明らかに天然ゴム電線が優れていることが判った。そこでロードセルやエンコーダの専用特殊線を除き、すべて天然ゴムキャブタイヤで配線を行うこととした。尚ドリルの頭部など、液封液と接する電線はすべてテフロン被覆線とした。

7. チップ回収器

液封式掘削では、切削チップの回収もれ、あるいは一旦回収したチップの一部流出があり、液封液中に浮遊するチップの捕捉回収が必要である。浮遊チップの存在は、ドリルの昇降に支障を来し、大量に溜まったときは孔の閉塞も考えられる。回収装置として図9に示すA、B二種類の回収器を製作した。いずれも1989年に試作しており(藤井ら, 1990)、先端にバタフライ弁を備えて、取り込んだチップをスクリーンで濾過する方式である。回収器はドリルの下部に取り付けて運用し、ドリルの重量により沈下速度をはやめた。

チップ回収器A型は、ドリルのバレルとチップチャンバーを取り去り、ドライブシャフトを利用して接続する。孔径135 mmに対し、チップ入口の有効径が125 mmであるため回収効率が良いと予想される。

B型は、5.7 mもあるチップチャンバーを取り外す手間を省略したもので、単に掘削バレルの代わりに、チップチャンバー内へ挿入し、ワンタッチで取り付けを終わる。また、捕捉したチップの排出も、バレルと同じで、シャフト先端のスクリーンにより引き抜き時に自動的に

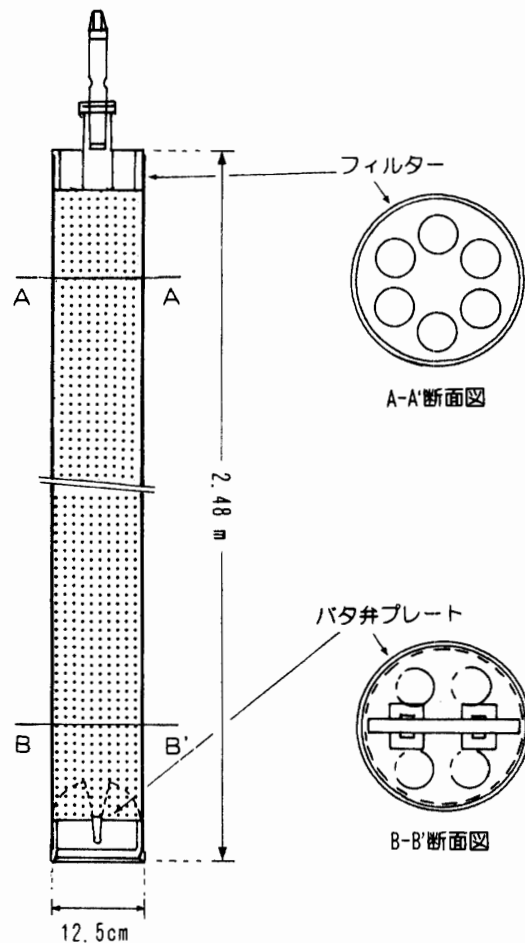


図9 チップ回収器

Fig. 9. Reclaimer for floating tip in borehole.

行われる。ただ、先端の有効径が、112 mm と小さくなるため、回収効率は低下すると思われる。

国内では比較実験が出来なかったため、現地でテストを行い、掘削孔のクリーニング作業計画を立てることになっている。

8. その他

ここまで主要な装置について述べて来たが、深層液封掘削では他にも必要な機材が多い。以下にそれらの概要を示す。

ケーブルテンション発生装置: ウインチドラムに始めてケーブルを巻くとき、張力をかけずに巻くと、後の大きな荷重によりケーブルのめり込みが起きる。それを防ぐためには、掘削時と同じ荷重をかけつつ巻き取ってゆくことが理想的であるが、1100 kg の張力をかけて巻くことは容易ではない。一般には 1/3 程度の荷重でも良いとされている。そこで、ウインチドラムとケーブルリールの間に空転するシーブを置き、これに 3~4 回ケーブルを巻き付け、このシーブに取り付けた自動車用のディスクブレーキを調節することによって、張力をコントロールすることにした。シーブはレールの上を自由に移動し、一端を 500 kg 目盛りのつりばかりに接続してあるので、ケーブルにかかる張力を読むことが出来る。立川の実験において、ケーブルリールに少々の抵抗を与えてやれば、容易に 300~350 kg の張力が発生することを確認した。

液封液: 液封液は掘削孔の収縮を回避するために注入する。外国の例を見ると、灯油系、アルコール系、酢酸ブチル系と色々あり、これが最良というものはない。掘削現場の環境条件、人間や環境に対する安全性、粘度特性、コアに対する汚染性、価格など検討項目は多い。今回は、灯油系、酢酸ブチル系、シリコンオイル系を候補として、実験を行いつつ検討した結果、酢酸ブチルの使用を決定した。検討の経緯は FUJITA *et al.* (1994) に詳しく報告した。

チップ分離槽: ドリルから排出されたチップと含まれている液封液を分離することを目的とする。開放された槽の上に取り外し容易な金網を載せただけのものであり、網から落とした液は再び掘削孔へ戻し、チップは遠心分離器(洗濯用の脱水器)で更に液分を分離した後、ドラム缶に詰め地上へ搬出する。

液注入洗浄装置: 電動ドラムポンプ、積算式流量計とホースで構成される。液の注入量は流量計で管理する。ドリルの内外に付着したチップの除去は、液封液の噴流で洗浄、除去することとし、銅管のノズルを製作した。全体は極めて単純なものばかりであるが、ホースには、低温硬化しないこと及び酢酸ブチルに侵されないことの 2 条件を満たす必要がある。横浜ゴム(株)より適当と思われる候補、3 サンプルの提供を受け試験した中で、最も成績の良かった編み上げ耐熱ホース 19×1 を採用した。

液封液蒸気除去装置: 液封液として選定した酢酸ブチルには特有の臭気があり、この拡散

を防止するためドリルからのチップ除去時にアクリル製の箱をドリルにかぶせることにした。酢酸ブチルの蒸気はチャンバーに接続されたフレキシブルダクトと小型ファンにより、屋外へ排出する。また、掘削場の臭気除去のための装置(ダイキン工業, RPG-152N)も使用することとした。

工具・予備品: ほとんどの機械的修理は現地に対応出来るよう、小型旋盤, ボール盤, 電気溶接器, 工具等を準備した。予備品については各パーツのほか完全に互換性のある同じドリルを1台製作し, 予備機としても, 交換用アッセンブリとしても利用出来るようにした。

検層ゾンデ: 掘削孔の検層は氷床の構造や流動の研究に必要であるばかりでなく, 掘削中においても, 孔径, 孔の傾斜, 氷温など掘削管理情報を得るために重要である。そこで, 検層装置開発小委員会により開発された検層ゾンデを準備した。計測項目は, 孔径, 孔傾斜, 方位, 氷温, 液圧, 液温である。詳しくは, NARUSE *et al.* (1994) に報告されている。

9. ま と め

装置の開発とは, 無数に存在する不明な点を一つずつ, 根気良く, 明らかにして行くことにほかならない。このような項目を何パーセント消化したかが, 即完成度と言い換えることも出来る。完成度を高いものにするため, 掘削機開発小委員会においてすべて対処したにもかかわらず, ドームふじ観測拠点の環境は想像を絶するほど厳しく, 不安は払拭しきれない。

間もなく本掘削が開始されて, 1995年の7月~8月には開発した装置の状況がはっきりするであろう。まだまだ多くの問題が提起されるに違いない。それらの問題は第37次観測隊の準備に反映され, 解消して行く予定である。

そして, 長期的にはこのドームふじプロジェクトが日本の深層掘削の始まりであり, 次に続くであろう第2, 第3のプロジェクトのために, さらに装置の完成度を高めるよう努力を継続していく必要がある。

ここに述べて来た装置の開発に当たっては, 製作面では, オリンピア工業(株), 九州オリンピア工業(株), マックスプル工業(株) 始め多くの民間企業の方々の協力をいただいた。また, 実験では, 北海道陸別町及び同町のしばれ技術開発研究所の方々にお世話になり, グリーンランドではGRIPのメンバーに, 掘削技術の修得と実験の支援について多大な協力をいただいた。心から感謝申し上げます。

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・渡辺興垂 (1990): 氷床深層ドリルの開発. 南極資料, **34**, 303-345.
- FUJITA, S., YAMADA, T., NARUSE, R., MAE, S., AZUMA, N. and FUJII, Y. (1994): Drilling fluid for Dome F Project in Antarctica. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **49**, 347-357.
- GUDESTRUP, N. S., JOHNSEN, S. J. and REEH, N. (1984): ISTUK: A deep ice core drill system. CRREL Spec. Rep., **84-34**, 7-19.

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): 氷床深層掘削ドリルの開発 (II). 南極資料, **39**, 99–146.

NARUSE, R., SHINBORI, K., AZUMA, N., SAITO, H. and NAGATUKA, M. (1994): Borehole logging device at Dome F, Antarctica. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **49**, 241–246.

TANAKA, Y., TAKAHASHI, A., FUJII, Y., NARITA, H., SHINBORI, K., AZUMA, N. and WATANABE, O. (1994): Development of a JARE deep ice drill system. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **49**, 113–123.

(1995年9月27日受付; 1995年11月21日改訂稿受理)