

ノーベルドリリング (その3)

特に地熱開発用岩石溶融方式

河内 英幸・加藤 完・後藤 進 (技術部 試験課)

1. ま え が き

ノーベルドリルの中には 表1に示すように機械応力式 熱応力式 溶融式および化学式などがあるが この中の機械応力式については 地質ニュース No. 183 (昭和44年11月号) と No. 188 (45年4月号) に概要を紹介している。 また化学式とはフッ素やハロゲンのような激しい化学反応を起こす薬品を用いて高能率の掘さくを行なわんとするもので 実験室においては砂岩・石灰岩および花崗岩のさく孔に成功を収めている。 しかしこの方法は 強烈な化学反応を起こす薬剤を多量に取扱うというむずかしさ さらにこれらの薬剤が高価であるということから実用面ではかなりの問題が残されている。

最近 世界的に地熱開発の促進が脚光を浴びようになってから 高温地層に対する大孔径・大深度ボーリングに関する技術開発が各方面で関心をもたれるようになった。 ここに浮かび上がってきたのがノーベルドリルであって 近い将来の現実性を推測すると 熱応力と機械力を併用した方式 または溶融式に重点が絞られるようである。 熱応力式とは岩体を何等かの方法で加熱し 岩体内部に熱応力を発生させ これにより

- (i) 岩体に熱剝離現象を起こさせるか。
- (ii) 熱応力のために強度の低下した岩体を機械的な方法 (例えば従来の回転式または衝撃式)。

で掘さくする方法である。 この方法もある範囲ではかなりの実現性があると思われるが 紙面の都合もあるので ここでは溶融式の中の電気ヒータ式と原子力式について 特に後者に重点をおいて最近の研究状況を紹介する。

2. 岩石溶融式の必要性

地殻には数 km にわたって 人類に必要な原材料の大半を含んでいるし 最も緊急な技術的問題およびエコロジーに関する問題の大半も解決してくれるであろう。 すなわち 地下資源としては天然鉱物 炭化水素系 新鮮な水および地熱エネルギーが含まれているし エコロジーに関する問題としては液体・ガス・工業廃棄物および危険物の貯蔵 または処理のためのシールドされた場所 および交通・運搬・情報網のためのトンネル・暗渠の掘さくによって多くの問題を解決してくれるであろうし さらに地殻には地球科学の発展に直接貢献し 終局的には地震や火山のコントロールにも関係するところの 岩石・地質構造も含まれている。

このような場所や資源を人類が探査・採掘することは地殻やマンツルの中に大きな 深い穴をあけるという技術的・経済的の困難さのために制限されてきた。 現在 岩盤中のさく井・さく孔 または立坑やトンネルの開さくおよび採鉱のための機械や技術は非常に発達してきているし そのような経過のもとではそれなりに十分な成果をあげてきた。 しかし それらの機械や技術は深度の増大につれて 岩石硬度の増加につれて さらに温度や盤圧の上昇につれて その効果は急速に薄れていくし コストは激増していくであろう。 現在 一般に使われている方法の

表1 孔径20cmとした場合の各種掘さく方式の性能比較表

掘さく方式	名 称	比エネルギー J/cm ³	最大掘進率 cm/min	伝 達 動 力 HP
機 械 応 力 式	ベレットドリル	200~400	4~14	10~20
	インプロージョンドリル	—	—	—
	スパークドリル	200~400	35~140	100~200
	爆発ドリル	200~400	26~70	75~100
	侵食ドリル	2,000~4,000	35~140	1,000~2,000
熱 応 力 式	超音波ドリル	20,000	0.04~0.07	5~10
	ジェットチドリル	1,500	9~18	100~200
	電気粉砕ドリル	1,500	9~14	100~150
	テラジェットドリル	—	—	—
	高周波ドリル	1,500	3~6	30~60
溶 融	マイクロウェーブドリル	1,500	1~2	10~20
	インダクションドリル	1,500	0.5~1.0	5~10
	電気ヒータドリル	5,000	1~3	50~100
	原子ドリル	5,000	1~3 (孔径100cm)	1,250~2,500
	電気アークドリル	5,000	1~3	45~90
	プラズマドリル	5,000	2~3	80~120
	電子ビームドリル	5,000	0.3~0.6	10~20
	レーザードリル	5,000	0.3~0.6	10~20

中では ロータリードリルのみが 4～5 km の深度を経済的に掘進できるものと考えられるが しかしこれも孔径が 500mm 以下の場合である。 今後 材料や技術の実質的な改良があったとしても 現在の方法では 12～15 km 以上の深い井戸を掘ることはほとんど不可能であろう。 このような状況から 一層深くて より大きな穴をあけるための新しい 経済的な しかも迅速な方法が必要となってくるのである。 LASL (The Los Alamos Scientific Laboratory) は岩石溶融式のために研究している唯一の機関であり 今までに電気ヒーター式では多くの現場実験も経験しており さらに原子力式については詳細な構想を積み重ねてきている。

3. 電気ヒーター式溶融装置

電気ヒーター式ペネトレータは 1960～1962 年の間に最初の実験が行なわれ その基礎研究は 1970 年まで継続された。

1971 年には岩石溶融装置 (Subterrene) を製作する最初の開発計画が発足したが それには次のような内容が含まれていた。 すなわち

- (i) 電氣的に加熱して岩石を溶かすペネトレータの設計とテスト。
- (ii) 孔壁にガラス質ライニングを形成すること。
- (iii) 推進用ステムの設計。
- (iv) 研究室における各種の岩石や土質の溶融実験。
- (v) 計画の進行につれて排出物の処理。
- (vi) 現場リグの設計とテスト。
- (vii) 理論的解析
- (viii) 考えられる利用面など

である。

岩石溶融用ペネトレータには 次の 3 つの型が設計さ

れ 実際のテストも行なわれた (図 1)。

1) 地固め型 (Consolidation)

この型は孔隙性岩石および沖積層の溶融・さく孔に用いられる。 きわめて低比重の物質は あたかもペネトレータが高密度のガラス質ケーシングの中に溶融物を詰込むような形で溶かされていくのである。

2) 押し出し型 (Extrusion)

この型は玄武岩とか花崗岩のような稠密な岩石に対して 溶かしながら穴をあけていくものである。 溶融液はペネトレータの中心部を通して上方に押し出され 途中で冷却剤につかまるとカッティングの形 (ガラス球状棒状 岩綿状) で冷却され その姿で地表まで排出されるのである。 孔壁はガラス質ライニングでケーシングされる。

3) コアリング型 (Coring)

この型は各種の寸法・形態をもったシリーズもので作られているが 最近設計されたものは孔径 114mm コア径 65mm 用のものである。 この型は主として未固結地層用として設計されたもので まずガラス質ライニングを形成するために地層を分断し さらに形成されたコアをガラス質被膜で包み込むようにしている。 この装置は回転しないので コアは物理的な攪乱を受けるようなことはない。

以上のような構想のもとに各種の実験が行なわれてきたが その中のおもな技術的業績は次のとおりである。

- i) 孔径 75mm の地固め型が設計・製作され テストされた。 出力が 6.1kW 推力荷重が 2.5～7.5kN の場合に 0.15mm /sec までの推進率が得られた。 孔壁のガラス質ライニン

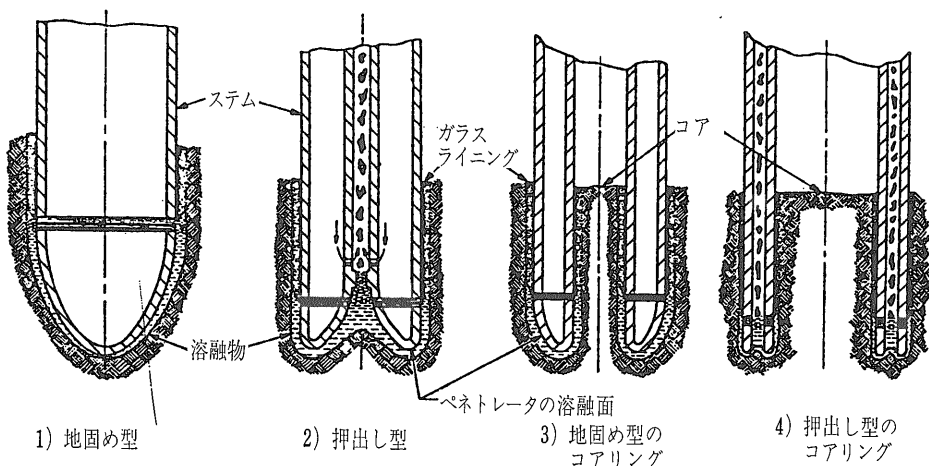


図 1
LASL で実験された各種ペネトレータの基本図

グは予定された厚さであり さらに推力荷重をかけると間隔率の低い滑らかな より強固なガラス質ライニングが形成された。

- ii) 孔径12mmの小型ペネトレータも設計され テストにも成功を取めている。
- iii) 改良型75mmのペネトレータシステムが設計され オリエンテーションの研究のため 一連の水平孔の実験が成功裏に行なわれた。
- iv) 方位掘さくの研究のため 孔径75mmのペネトレータを使って溶融中の凝灰岩を故意に傾ける実験も行なった。すなわち ステム操縦を行なう誘導式のシミュレーションを行なった結果 80mmの進行に対して1.5°の進路偏差 (曲率半径=4 m) を生ずる可能性が認められた。

電気ヒータ式ペネトレータはきわめて高能率で しかも普通のエネルギー消費で岩盤に穴をあけることはすでに立証されている。例えば 300HPのガソリンエンジンは直径25cmの穴を100m/日の能率で火成岩を溶融するのに必要な電気エネルギーを発生させると計算されている。このような基礎的な実験の後には この電気ヒータ式溶融装置は ペネトレータシステムと地層との間に生ずる各種の色々な問題を解決していくために使用さ

れるであろうし 特にペネトレータの寿命 掘進率 必要な力とエネルギー ガラス質ライニングのコントロールとか保全 静岩圧技術の効果性 未固結・断層破砕帯・帯水層および その他のむずかしい地質構造の中に穴をあけるための溶融技術の適応性の研究などに使われることであろう。

利用面の制約

おそらく2 m以上あると思われる電気ヒータ式溶融装置は ケーブルを通して供給される電力を使うことになる。このケーブルは ドリルの維持・修理・回収を容易にするためにも使われるが 電力伝送という手段は非常に大きな孔径の場合 非常に深い場合 異常な高温地帯の場合 あるいは遠隔地の場合には不経済であり 非能率であり 実用的でないことは容易に想像できることである。

このような場合のエネルギー供給源として注目されるのは コンパクトな原子力式岩石溶融装置であろう。

4. 原子力式岩石溶融装置

この装置に含まれる核反応器は非常に大きなペネトレータでも 高能率で推進するのに必要なエネルギーを供給できるし 地表からの遠隔操作による自己内蔵式ユニットの設計も十分に考えられることである。しかし核反応器の保護とか 孔壁に与える放射能の活性化という新しい問題が持上がってくる。核分裂によって作られる強烈な放射能が反応器に蓄積されてくるので 穴が仕上がるまでは放射能が逆流しないことが望ましい。そして非常に深いところで岩石を崩壊させ そこで永久に葬らせるようにしなければならない。

これまでの基礎実験の結果からみて 電気ヒータ式がこの計画を開始してから約3 年以内で製作・実験できるようになったことから 核反応器の大型の しかも融通性のある岩石溶融装置は10~15年以内に 地殻を通してマントル外周にまで到着できるようになると信じられている。この装置の中で 最も重要な部分はヒートパイプと高熱の発生源である。

1) ヒートパイプ (Heat pipe)

初期の実験段階で一番問題となったのは ペネトレータの溶融面に大きな熱流量を与えることができるかということであった。しかし 現在では非常に進歩したヒートパイプが完成し 熱発生源から先端の溶融面まで好効率でエネルギーを伝送できるようになった。図2に示したヒートパイプは KEMME (1969) によって報告されたもので 基本的には適当な液体と蒸気を内蔵した空

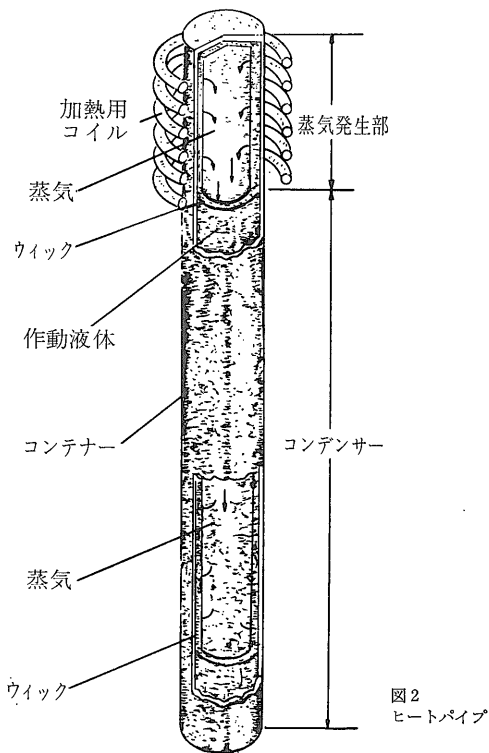


図2 ヒートパイプ

洞であって 細長く ガス漏れのしない構造になっている。

岩石熔融装置の場合 ヒートパイプの蒸気発生部の一端は電気式または核反応器の中に位置し 他端のコンデンサは岩石熔融面に位置する。 ヒートパイプの空洞部にはウイックが並べられているが このウイックは金網状の多層構造からできていて 空洞の約1/3を占めている。 また ヒートパイプの中には作動流体が満たされていて コンデンサと蒸気発生部の間を絶えず循環している。 すなわち 蒸気発生部で連続的に発生した蒸気はコンデンサの方に流れて熔融面に達し 熔融面でわずかに冷却された蒸気は液体の形となって 再び戻ってくるようになっている。 ウイックはこの循環の役目に大いに貢献しているのである。 ペネトレータの表面が1週間または1カ月の間 $1,227^{\circ}\text{C}$ を維持しなければならないし また熱発生源が表面から数 cm しか離れていないような場合 ヒートパイプのみが反応器のオーバーヒートを防止する役目をしているし しかもエネルギーを効率よく伝送しているのである。

$1,127\sim 1,527^{\circ}\text{C}$ の間で仕事をする場合 ヒートパイプのコンテナはガス漏れのしない 不溶性の金属製チューブで十分であろう。 作動液体としては リチウムが最適といわれている (KEMME 1966)。 ニオビウムとジルコニウム合金で作られたヒートパイプは数千時間も $1,327^{\circ}\text{C}$ 以上の温度で使われてきているし TZM モリブデン合金で作られているその他の部品は 同様の時間帯で $1,427^{\circ}\text{C}$ 以上で使われてきている。 さらにタンタルとタングステン合金のものは短い時間帯ではあるが $1,827^{\circ}\text{C}$ 以上でも使われている。 少なくとも1年というヒートパイプの寿命は 岩石熔融装置に必要な温度規準に対して十分に期待できるであろう。 $1,127^{\circ}\text{C}$ におけるリチウムの蒸気圧は 0.2bar であり $1,527^{\circ}\text{C}$ では 0.3bar である。 このようにヒートパイプのコンテナは 作動蒸気によってわずかの内部圧を受けるが しかし一方 地熱蒸気圧とか盤圧のような大きな外圧にも耐えられるように工夫しなければならない。 このような温度における内部蒸気圧が いわゆる 10kbar という外圧にバランスできるような作動液体は知られていない。 ヒートパイプを設置したペネトレータの概念図を図3に示した。

100m/日のトンネル掘進速度に対して ペネトレータの熔融面に供給される熱流量は約 $500\text{W}/\text{cm}^2$ 必要であろう。 $1,127^{\circ}\text{C}$ の場合 リチウムヒートパイプは蒸気通路の断面積に対して $10\text{kW}/\text{cm}^2$ のエネルギーを容易に伝送することができるし $1,527^{\circ}\text{C}$ になると その能力は5倍以上のファクターで増加するであろう。 cm^2 当

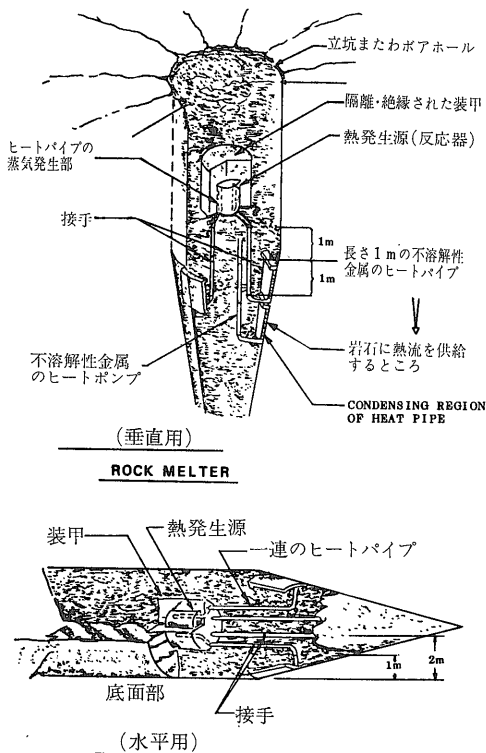


図3 ヒートパイプを設置したペネトレータの概念図

りの蒸気通路はペネトレータの表面に少なくとも 20cm^2 に対して熱を供給できるので ペネトレータは必要なヒートパイプを容易に収容できることになる。

2) ヒートソース (Reactor)

初期の岩石熔融装置の多くは電気ヒータ式が使われていた。 抵抗法または誘導法を用いた電気ヒータ式の設備や構造は簡単であり ヒートパイプに匹敵するような大きな問題は起こらなかった。 これに対して 原子力式熔融式の場合は 丈夫な装甲 シールド 絶縁 高速反応などの反応器特有の技術が必要であり おそらくこれらの技術はすでに確立されているように思われる。 また 高温燃料は SNAP-50のプログラムの段階で広範囲にわたって研究されてきたし その際に 同様の核反応技術も要求されていた。 コアがヒートパイプの容積の約40%も占め 熱出力が $100\text{kW}\sim 10\text{MW}$ の間では コアの大きさは大雑ばにみて 18cm 径 $\times 25\text{cm}$ 長から 1m 径 $\times 1\text{m}$ 長の範囲であろう (この範囲の外に 原子炉容器のシールド部 熱絶縁部および装甲などの必要条件を加えなければならない)。 この種の代表的な反応器コアの断面を図4に示したが この概念図は狭隘な場所での熱供給用として工夫されたものである (SALMI and

表2 直径7mのトンネルを100m/日の能率で掘さくするタイプ1のデータ表

Quantity	Approximate Magnitude
最大深度	< 3 km
最大岩盤温度	< 200°C
岩盤全採掘量	~10×10 ⁶ kg/day(4.0×10 ⁸ m ³ /日)≒10,000万/日
岩石の25%を溶解するために必要な動力	~50MW
Subterreneの速度	100m/日≒12呎/時
溶解掘さくピットに必要な力	~7×10 ⁶ kg≒15.4×10 ⁶ ポンド≒8,000万
ピット表面部に必要な熱流量	~500W/cm ²
岩塊を200°C以下に冷却するために必要な冷却水量	2gal/sec≒14ポンド/秒≒7kg/sec

GROVER 1970). またこの種の岩石溶解装置における原子炉設置概念は 図5に示すごとくで 原子炉の交換もできるような設計になっている。

3) 3段階の開発計画

最初の基礎研究段階を終えてからの技術開発は研究所でのテストや現場用ユニットでの経験から色々の利用面が考えられたが トンネルや立坑の機能とか環境問題に基礎をおくと 3つのカテゴリーに分けることができる。

このことは設計 材料の選択 構造 制御および岩石温度と盤圧などの困難性の増加率によって分けられる。3種類のタイプとは次のごとくである。

(i) タイプ1の溶解装置

低温・低圧で岩盤内を開さくしていくトンネル用の装置である。おそらく最初の段階では 電気式動力で行なわれるが 引続いて原子力が用いられるであろう。これは岩盤温度が 200°C以下で 深度が 3 km 以浅

しかも10キロバール以下の圧力のもとで岩盤内に大口徑の 長いトンネルを掘さくするものである。トンネル掘さくで一般に使われている通気システムであれば 特別の保安システムも必要ではない。溶解装置の維持修理 改装および直接のコントロールやガイダンスのためには 容易に人間が入っていけるし 補助的な電力冷却水および圧気はそれらのために直接使用することができる。

タイプ1のおもな内容は次のごとくである。

- ① 表面温度が1,150°Cで仕事をするための岩石溶解ペネレータ
- ② 約1,500°Cの温度を供給するための電氣的熱源 それは引続いて原子力熱源に替えられる。
- ③ 熱源からペネレータに熱エネルギーを伝送するためのヒートパイプ。
- ④ 岩盤に対して 全装置を前進させるための prime mover および thruster。
- ⑤ 制御 ガイダンスおよび service module
- ⑥ 少なくとも初期的には 碎石を排除するための材料処理システム。

本装置を使って直径7mのトンネルを掘さくする場合の概念設計は表2のとおりである。

この場合 このユニットはリソ・フラクチャリングを行うのではなく むしろ最小限のエネルギーの消耗と最大限の掘進率を得ようとするもので トンネルの約20~25%を溶解し 残りの75~80%を未溶解のコアとし それをガラスコーティングしながらオープニングを通して後方に押し出させるのである。コアの取扱いを容易にするため コアは螺旋状コンベヤの前端部に設けられたコアプレーカーによってショートカットされるのである。図6に示した thruster は トンネル壁に対して2重圧力

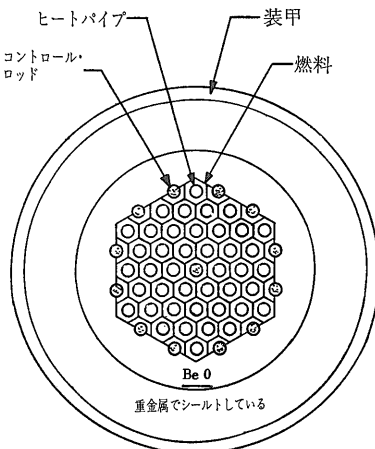


図4 原子力装置に用いられる代表的な反応器コアの概念図

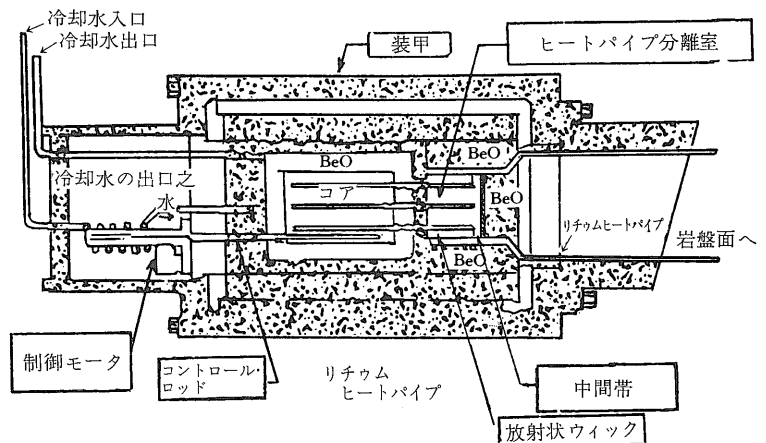


図5 交換性コアを挿入したヒートパイプの概念図

式の輪止めを使って連続的な推力と前進運動を繰返すようになっている。このため 中には約 $7 \times 10^6 \text{kg}$ の制御力を与えるために必要な水圧式 thruster が組入れられている。図に示すスライム排出構想は螺旋状の内部自動給進装置によって行なわれるが 螺旋機構の比較的低速回転は 岩石溶融装置の推進速度に対してこの比較的高能率でスライムを移動することができる。この種の材料システムを使うと 混在岩石を冷却するために水散布が必要となってくる。

もしも岩石の25%が $1,200^\circ\text{C}$ の温度で溶融され その他の75%の岩石 (200°C) と混在すると その平均温度はなお 500°C 以上にもなるであろう。直径7mのトンネルから採掘される岩石の塊を 200°C まで冷却するには 約 $400\text{l}/\text{min}$ の水量が必要である。このようなことから 溶岩中に残留しているエネルギーを再利用するような漸新的な構想が必要であり 岩石溶融装置の場合にはそのような利用法も十分考えられることである。

(ii) タイプ2の溶融装置

タイプ1と同じような深度・盤圧のところでも 大口徑の長いトンネルを掘さくするための装置であるが 温度は 500°C 以上を想定している。図7は高温岩帯を掘さくするばかりでなく リソ・フラクチャリングも考えに入れた概念設計図である。スライム処理機構は省略されているが prime mover thruster およびペネトレータは同様に必要であるし 材料類のほとんどは 500°C と

表3 直径2mのトンネルを100m/日の能率で溶解し さらに溶解物処理用リソ・フラクチャリング技術を使用するタイプ2のデータ表

Quantity	Approximate Magnitude
最大深度	< 3 km
最大岩盤温度	< 600°C
岩盤採掘量	$8 \times 10^6 \text{kg}/\text{日}$ ($314 \text{m}^3/\text{日}$) = $800 \text{t}/\text{日}$
必要出力*	~15MW
ペネトレータの力	~ $18 \times 10^6 \text{lb} = 9,000 \text{ton} = 8.2 \times 10^6 \text{kg}$
尖端部における岩盤破砕圧	~1kbar = $15,000 \text{lb}/\text{in}^2$
ペネトレータ表面部の熱流量	~ $50 \text{W}/\text{cm}^2$

* 溶解されたすべての岩石の集計である。

いう温度でも 冷却されないまま 操作されなければならない。制御およびガイダンスシステムは自己内蔵式であり 遠隔操作式であり それに対応する無線情報が必要であろう。

表3は熱い岩盤内で直径2mのトンネルを100m/日の能率で掘さくする場合のデータを示したものである。

この利用法は 浅所の地熱エネルギー貯留層の手前まではタイプ1の溶融装置で出入口を掘さくし タイプ1が引抜かれた後に 自己内蔵式のタイプ2が指令に従って高温岩帯を推進していくのである。トンネルが完成しタイプ2が引抜かれた後 高圧水を使ってフラクチャリングを行ない 熱伝導面の拡大をはかるようにしている。もしそうするならば すでにリソ・フラクチャリングで創作された亀裂帯の存在があるので 水圧式フ

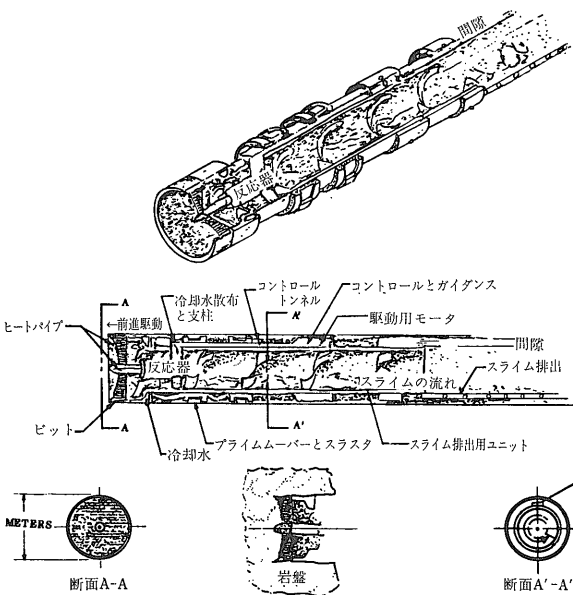


図6 連続スライム排出機構をもったタイプ1の概念図

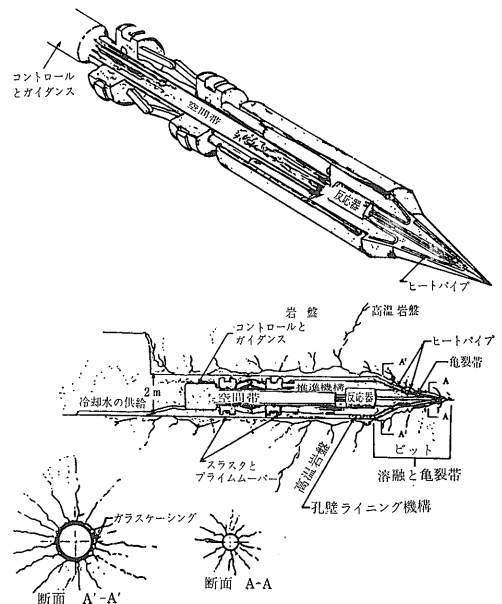


図7 高温岩帯の掘さくおよびリソ・フラクチャリング用に考案されたタイプ2の概念図

ラクチャリングが非常に容易になるのである。

(iii) タイプ 3 の 溶 融 装 置

終局的には地温勾配が平均な地域における地熱エネルギーの開発のため あるいは大陸下の上部マントルを地質学的および地球物理学的に直接研究するため 地殻内部の非常に深いところまで溶融装置でさぐりながら精査することはおそらく可能であろう。コロラド・プラトウ下のモホロビッチ不連続線は約 30km という非常に深い深度であっても タイプ 3 にとってはそれほどむずかしい目標ではないであろう。

平均温度勾配 (20°C/km) からみて深度 30km における岩盤温度は約 600°C となり 被圧力はほぼ 10kbar となるであろう。このような極端な条件下で操作する溶融装置はタイプ 1 とかタイプ 2 に比べて 詳細なデザインを考える必要もないであろう。Prime mover のような機械的なスラストの考え方をすて 地表から制御する流体圧 あるいはペネトレータ上部にドリルカラーを使ってリソ・フラクチャリングに必要な推力を考えればよい。また流体の循環システムは非常に深いところの孔壁崩壊防止にも役立つし ガラスライニングされた孔壁の冷却や岩石試料の採取にも必要であろう。

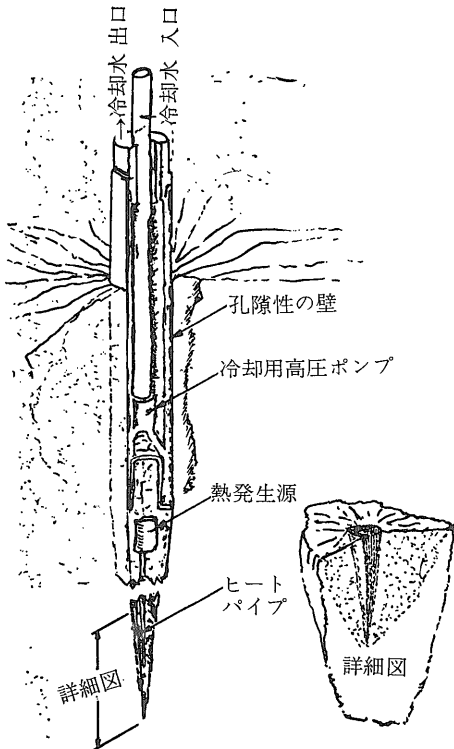


図 8 タイプ 3 の 概 念 図

図 8 はタイプ 3 の図解を示したものであるが この装置の機械的構造 制御およびガイダンスは大きな技術的問題点となっている。図示したユニットはリソ・フラクチャリングを容易にするために約 1/10 の勾配をもたせている。しかし連続的な地球物理学的のデータを採取する必要がある場合には ペネトレータの口を開放し コア摘出器を用いることになる。幾多の経験を経た暁には ヒーターシステムをペネトレータシエルから引抜くことができるように設計することが望ましいし その間 泥水圧が孔壁を保持してくれることになる。

4) ま と め

- ① ペネトレータの溶融面における高い熱流量はヒートパイプによって与えられるので 高温の不溶解性金属からできているヒートパイプはこの目的に合致されなければならない。
- ② 小型の高温 高エネルギーを出す核反応器が必要であり それは迅速な neutron spectra をもちヒートパイプの冷却設備も持たなければならない。このような反応器は現在別の目的で開発されつつあるが 岩石溶融装置用には別の新しいデザインも必要であろう。
- ③ きわめて雑ばくな不溶解性の構造および部品は 非常な高温下での長期間操作にも耐えていかなければならず それらのデザインや構造はその限界点まで 現在の技術を延ばしていかなければならない。
- ④ 自己内臓式の岩石溶融装置に対する制御 ガイダンスおよび情報システムは非常にむずかしい問題とされている。
- ⑤ リソ・フラクチャリングを使用しない岩石溶融装置の場合には スライムの溶融部に蓄積されたエネルギーをできるだけ再利用する機構が必要である。リソ・フラクチャリングの場合でさえも ガラスライニングの冷却は必要であり 再びこの余剰熱の回収と利用とはボーリング作業の能率向上に一層役立つことであろう。

引用 文 献

E. S. ROBINSON, J. C. ROWLEY, R. M. POTTER, D. E. ARMSTRONG, B. B. MCINTYRE, R. L. MILLS, : "A Preliminary Study of the Nuclear Subterrene", Los alamos scientific laboratory of the University of California. April 1971.

Appendixes

- A. Existing and Proposed Rock-Penetration Systems.
- B. Initial Development of the LASL Rock-Melting Drill.
- C. Nuclear Subterrene Concepts, Designs, and Problems.