

## 5. 山体地下水 (3)

### ⑤ 山体地下水の滞留時間

山体に供給された地中水は、位置的ポテンシャルを主な駆動力として流動し、その大半は山体を刻む水系を通して域外に排出されると考えて良い。その論拠については前回で例示したように、山体深部の新鮮岩中の地中水は、トンネル掘削などによる人為的な擾乱が及ばない限り、多くは停滞水(Stagnant water or Dead water)として存在していて、上層部の循環性の地中水と一体化し難い環境にあると考えられるからである。したがって、筆者は山体地下水の滞留時間を論議する場合には、このことや、山体地下水の排水系としての水系の規模を考慮して、評価するのが現実的であると考えている。

ところで、この水系の規模は谷次数で表わされる階層性によって区分されることが多いので、固結岩からなる山体の地下水流動域もこれを外挿して書き出すのがよい。これは堆積盆地のような“閉じた系”、つまり収斂の場にある地下水流動系の取り扱いと大きく異なる点である。

以上のように考えた山体地下水のエリア規模と地下水の滞留時間は、一般的には正の相関を示し、量的にはその逆の関係にあると考えられる。簡単ではないが、筆者はこれらの関係を定量化することができればとの狙いから関連資料を収集し、整理を始めたところである。

ここで、対象とする山体が独立峰のような場合は、問題は少ないが、このようなところが調査・研究対象となることは少なく、多くの場合、水系の多様性とともに対象エリアの設定にはある“Criteria”といったものが必要になってくるものと考えられる。

筆者はこの点に関して、まず上記の基本的概念に加えて、できるだけ客観性のある指標、たとえば“Local base level”、あるいは“Terminal base level”といった概念を導入して情報を整理しようと考えているが、この作業を進めるだけの事例はまだ不足である。したがって、今回は山体地下水のエリアが比較的明瞭に論議できる例だけに絞ることにした。その多くはこれまでに公表された文献・資料に依ったが、引用した内容や論点については、各著者の主旨を正確に踏まえたものとは限らない。その場合は何とぞご容赦賜りたい。

#### i. 六甲山地

六甲山地は図 25 に示したように、南北 8 キロメートル、東西 30 キロメートルで、東西に細長くのびた主として花崗岩からなる山地である。南北両斜面には顕著な数本の断層が走り、稜線部には前輪廻性の侵食面である平坦面が残る。

六甲山地に発して大阪湾に注ぐ諸河川は、いわゆる先行河川で、その直線的な河道形態と、山麓の複合扇状地群の配列は、この山地を形成した地殻変動(六甲変動)の激しさを物語っている。またこの変動によって山体をつくる花崗岩体は著しく破碎さ

れており、それに起因して進行したと考えられる深層風化によるマサ化も顕著である。

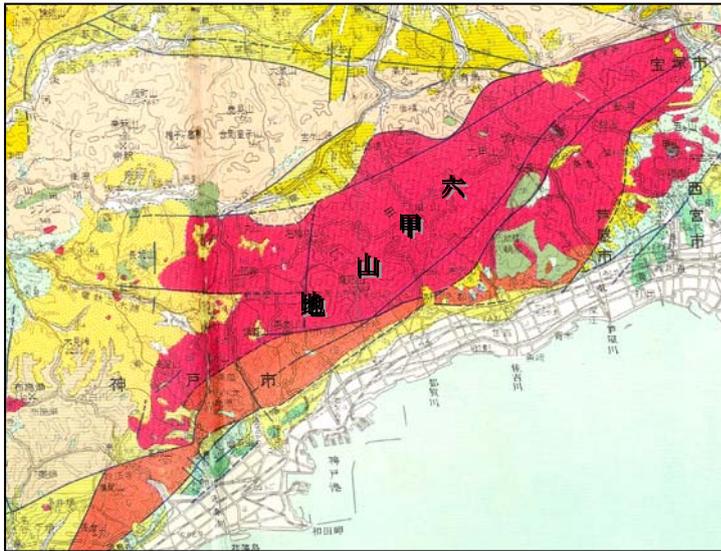


図 25 六甲山地と周辺の地質概要

出典：兵庫県地質図作成委員会(1958)

六甲山地は東六甲山(931m)を主峰とし、以下西方へ麻耶山(702m)、再度山(470m)、高取山(320m)、高倉山(291m)、鉄拐山(236m)、蜂伏山(246m)と高度を下げながら続いている。この山地の地下を貫いて建設された山陽新幹線「六甲トンネル」、六甲有料道路「六甲山トンネル」、新神戸トンネル有料道路などの工事に伴う湧水対策のための調査・研究例が多くなされている(図 26)。

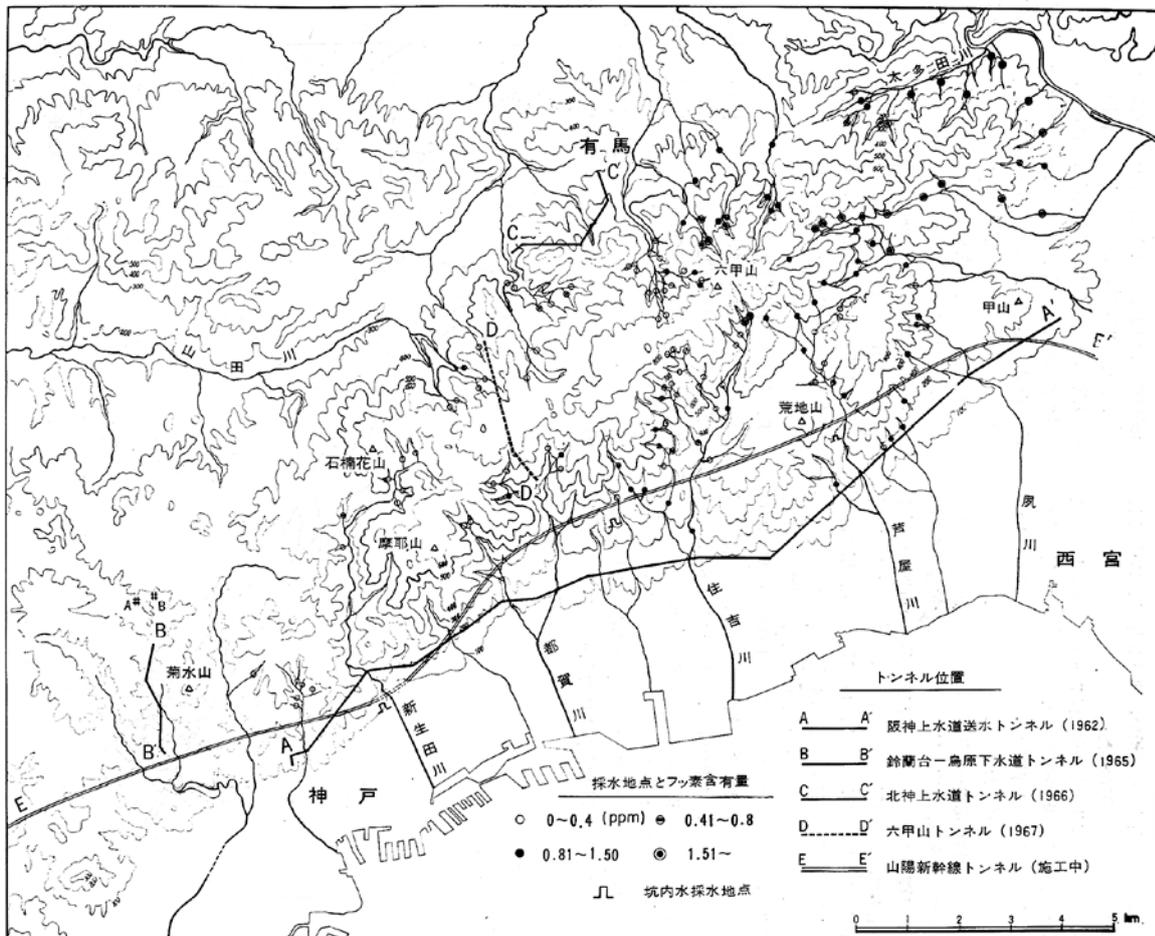


図 26 六甲山地の各トンネル位置と採水地点

出典：笠間太郎・鶴巻道二(1971)；六甲山地のトンネル湧水状況とその水質  
応用地質 Vol. 12, No. 1, p. 16-28.

[文献]

- a. 北岡豪一・吉岡竜馬 (1984) : 「トリチウム濃度から推定される六甲山系の水循環の速さについて」, 日本地下水学会誌, Vol. 26, No. 4, p. 131-145.

六甲山地のトンネル湧水、水抜き用のボーリング湧水、自噴井、また表流水のトリチウム濃度から、以下の知見を得た。

- ・ 湧出場所によるトリチウム濃度の違いが顕著に認められ、山体内部で規模の大きい水の混合が生じていないことを示している。
- ・ 湧水場所が比較的近接している六甲山トンネル、鶴甲ボーリング孔、新幹線六甲トンネルに着目すると、標高の高い順にそれぞれ、約 15 年、15～30 年、約 40 年と順次滞留時間が長くなる傾向が認められる。
- ・ 本論文で提案したモデルによって求めた滞留時間は、それぞれ湧出に関する流動範囲内における通過時間の平均を意味するもので、湧出標高が低くなるほど湧出への流動範囲も広がり、系全体の滞留時間に近づくものと考えられる。
- ・ トンネル湧水の示す約 40 年の滞留時間には、破碎帯全系、すなわち岩盤内の地下水循環の速さがかなりの程度に反映されているものと推定される。
- ・ 通過時間の平均と湧出点の標高を用いて、平均通過速度の鉛直成分を概算してみると、六甲山トンネルでは、約 10m/year、鶴甲ボーリング孔では約 17m/year、新幹線六甲トンネルでは 14m/year 程度の値が得られる。
- ・ これらの知見をまとめると、図 27 のようになる。

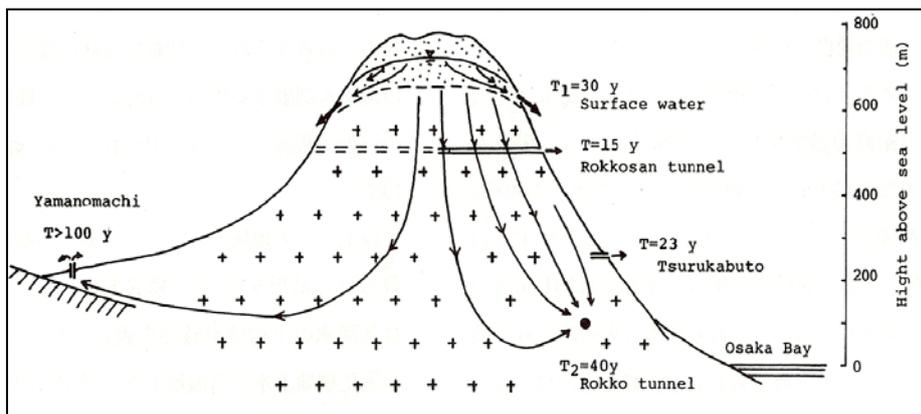


図 27 トリチウム濃度から推定された六甲山地の地下水循環  
 出典：北岡豪一 (1984) ; トリチウム濃度から推定される  
 六甲山系の水循環の速さについて, 地下水学会誌, Vol. 26, No. 4.

- b. 笠間太郎・鶴巻道二 (1971) : 「六甲山地のトンネル湧水状況とその水質」, 応用地質, Vol. 12, No. 1, p. 16-28.

六甲山域に施工されたトンネルの湧水状況について、詳細な記録を整理した。なおこれらの膨大な量の湧水は、いずれも断層破碎帯に伴うものであることを示した。

- ・ 阪神上水道送水トンネル西工区：全ルートにわたって坑内湧水がみられた。すなわち、トンネル掘削時で総計 9,300t/day、完了後で 6,000t/day であった
- ・ 鈴蘭台-島原下水道トンネル：トンネル湧水は 4 地点で認められ、最大 1,000t/day を記録した。この 4 地点以外は良好な岩盤
- ・ 北神上水道トンネル：大部分が流紋岩質凝灰岩を主体とする有馬層群。断層破碎帯で最大 6t/min という莫大な湧水に遭遇、トンネル完了後も 3,000t/day という状況が続いている。
- ・ 六甲山トンネル：南坑口における総排水量は最大 10,000t/day に達した。一方北坑口では最大 500t/day と少なかった。南坑口での掘削では湧水がついてまわり、最大 1.2~2.0t/min という莫大な湧水があり、土砂流出が発生。湧水は工事後減少、また停止するものがある一方、工事後も継続しているものもある。
- ・ 新幹線六甲トンネル：大月断層、五助橋断層と交差する鶴甲工区で膨大な湧水に遭遇(図 28 参照)。
- ・ 湧水は斜坑本坑で最大 4t/min、東側迂回坑で 900l/min、西側迂回坑で 2.5t/min あり、出水による崩壊が起こり、幅 6m の空洞が発生。
- ・ 鶴甲斜坑の大月断層突破後も各所で 1t/min に達する湧水をみている。これらの地点はいずれも断層粘土を挟む破碎帯で、大月断層の副断層に相当する。
- ・ 大月、土橋断層における大量湧水のトリチウム濃度は TU=65.5 という高い値を示したことから、表流水と交流をもつ最近の水であると判断された。

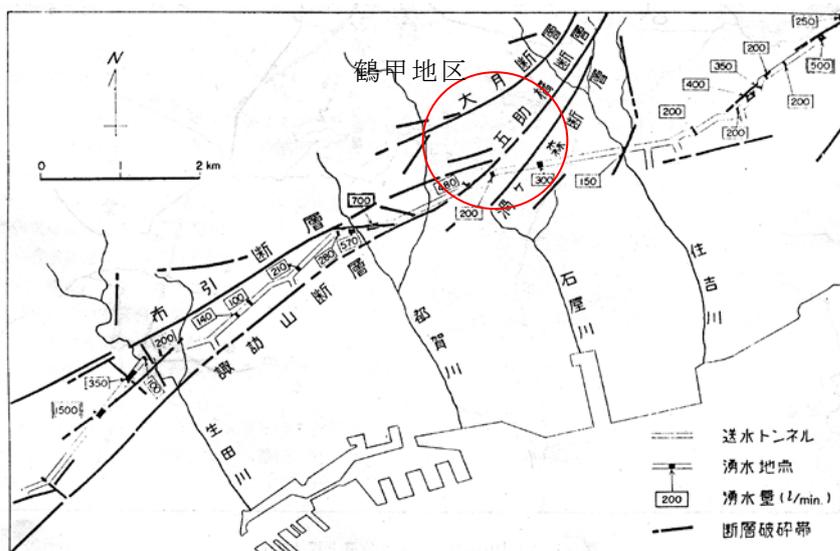


図 28 阪神上水道トンネル湧水地点と断層系湧水

出典：笠間太郎鶴巻道二 (1971) : 「六甲山地のトンネル湧水状況とその水質」, 応用地質, Vol. 12, No. 1, p. 16-28.

- c. 吉岡竜馬・沖村 孝 (1987): 「山体の不安定ポテンシャルの指標としての山体地下水の水質特性」、文部省科研費、「崩災の規模, 様式, 発生頻度ととれに関わる山体地下水の動態」 (研究代表者: 新藤静夫) P. 121-140.

六甲山地は、これまでにしばしば斜面崩壊、土石流に見舞われてきたことで知られている。それらの災害の危険度の状況・程度を“山体の不安定ポテンシャル”と称している。その指標の一つとしての岩石の劣化状態（風化度合い）は、河川水や湧水の水質特性とその変化として捉えることができるとの考えから研究が進められた。ここに引用したのは、そのうちの山体地下水の滞留時間に関する部分である。

- ・ 降水が地中に浸透してから流動・流出するまでの過程について、一定の厚さの地下水体において一様な供給がある場合、地下水体中の滞留時間の分布は指数関数型で表現されるとして、地下水の滞留時間を 5, 10, 20, 50, 100 年とした場合の表流水のトリチウム濃度変化を求め、図 29 を得た。(図中の破線は水爆実験の影響で降水のトリチウム濃度が立ち上がる直前の 1953 年の濃度を天然レベルの 10TU としたときの放射崩壊による減衰線を示す)

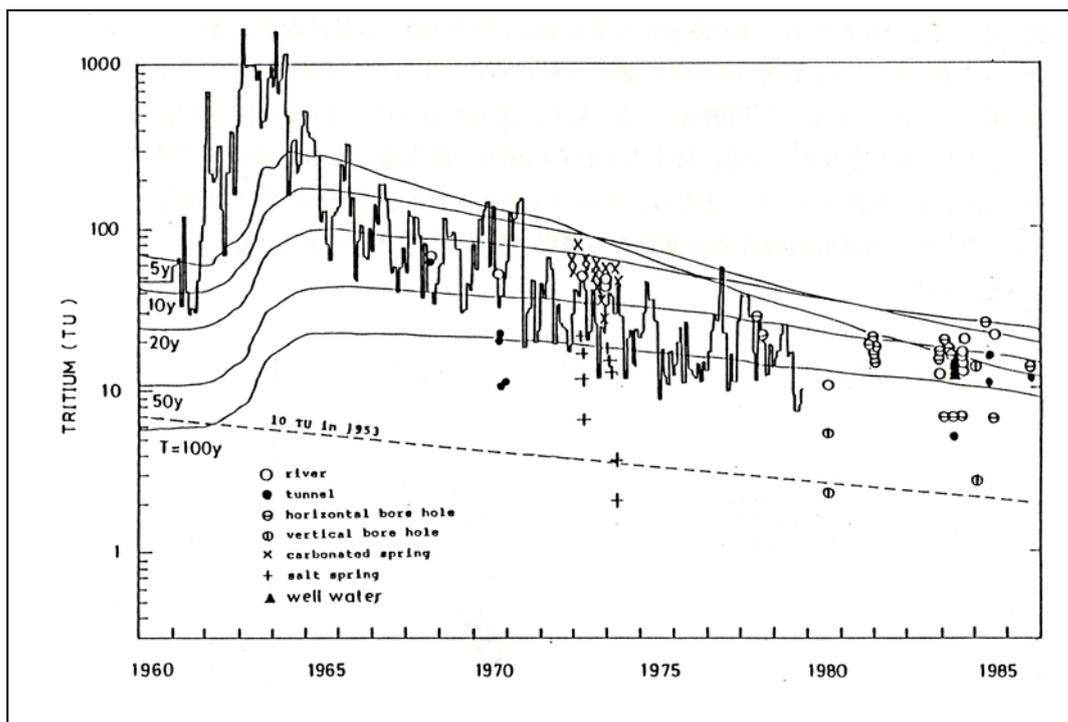


図 29 表流水のトリチウムの計算値と六甲山系の天然水の実測値との対比  
 出典：吉岡竜馬，沖村 孝(1987): 「山体の不安定ポテンシャルの指標としての山体地下水の水質特性」、文部省科研費、「崩災の規模, 様式, 発生頻度ととれに関わる山体地下水の動態」 (研究代表者: 新藤静夫) P.121-140.

- ・ 一部にこの破線の示す濃度よりも低い値を示し、1953年以前の降水を含むと考えられるものがあるが、大部分は破線より高濃度側に位置しているため、それ以降の新しい降水が混入していることは明らかである。
- ・ 実測値と計算曲線を対比して注目される点は、1968年から1978年にかけて測定された河川水、トンネル湧水、水平ボーリング孔水の多くが  $\tau = 30 \sim 50$  年の位置にあることである。当時の河川水等は 30~50 年の滞留時間を山体内で経たものと推定される。
- ・ 当時の流動系がそのまま保存されているとすれば、1984年から1986年にはこれら河川水、地下水などのトリチウム濃度は 20TU 前後になるはずであるが、大部分は 10~20TU となり、数年から7年程度の滞留時間となり、著しい減少がみられる。
- ・ 図 30 にみるように、大雨時の地下水流出量の応答や、その成分濃度の敏感な変動から、破碎帯が地下水の通路として大きく機能していることが類推される。

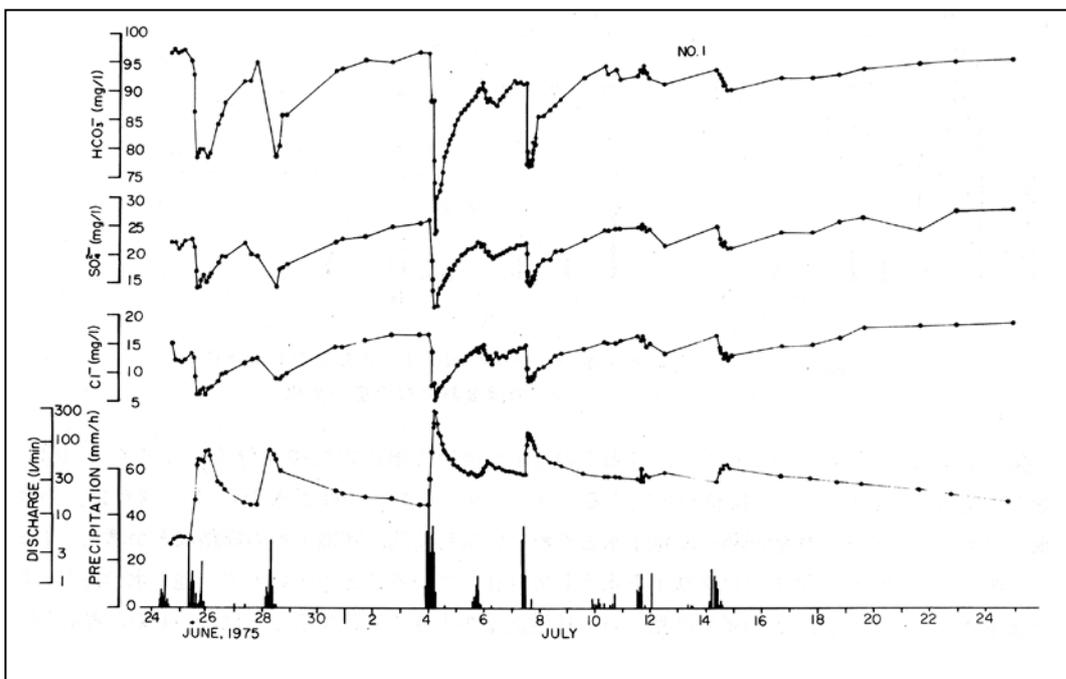


図 30 鶴甲地区の水平ボーリング孔 No. 1 湧水の  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  の濃度および流量の変化

出典：吉岡竜馬，沖村 孝(1987)：「山体の不安定ポテンシャルの指標としての山体地下水の水質特性」、文部省科研費、「崩災の規模，様式，発生頻度とこれに関わる山体地下水の動態」（研究代表者：新藤静夫）P. 121-140.

## ii. 松本トンネル

この地域の山体を構成する地層は新第三系の安山岩質凝灰角礫岩と一部の砂岩礫岩層からなる。表層部は標高 750~800m の台地状をなし、第四紀の初期に形成された侵食平坦面に相当するものと思われる。この台地上には集落が点在し、井戸、湧水、た

め池が利用されている。これらは上記の基盤岩を覆う基盤風化帯を含む未固結堆積物中に賦存している不圧地下水に相当する。

[文献]

- a. H. II・S. Misawa(1994) : Groundwater chemistry within a plateau neighboring Matsumoto city, Japan,」, Environmental geology, Vol.24, P.166-175.
- b. 井伊博行・三沢伸也(1994) : 「松本トンネルの湧水とその周辺地下水の水質について」、地下水学会誌、Vol.36, No.1, P.13-29.
  - ・ トンネル掘削とともに坑内湧水が発生したが、その量は、最大  $6.8\text{m}^3/\text{min}$  に達した。
  - ・ 調査地域の地下水は地理的位置や水質から、トンネル湧水、台地上の湧水と井戸、台地中腹の湧水、深井戸（100m）、台地周辺の井戸（20m 以内）、河川・池、の 6 つのグループに分けられる。
  - ・ トンネル湧水は  $\text{Ca}^{2+}$  と  $\text{HCO}_3^-$  が主成分で、全イオンの当量が  $6\text{meq}/\ell$  である。標高 700m 付近に見られる中腹部の湧水はトンネル湧水に近似しているのに対して台地上の井戸、湧水は溶存イオンが少なく、地下水は台地表層から台地内部に向けて、その溶存イオンが増加していることが示されている。台地縁に位置する深井戸の水質は  $\text{Na}^+$  と  $\text{HCO}_3^-$  に著しく富み、 $\text{Ca}_2^+$  は少ない。

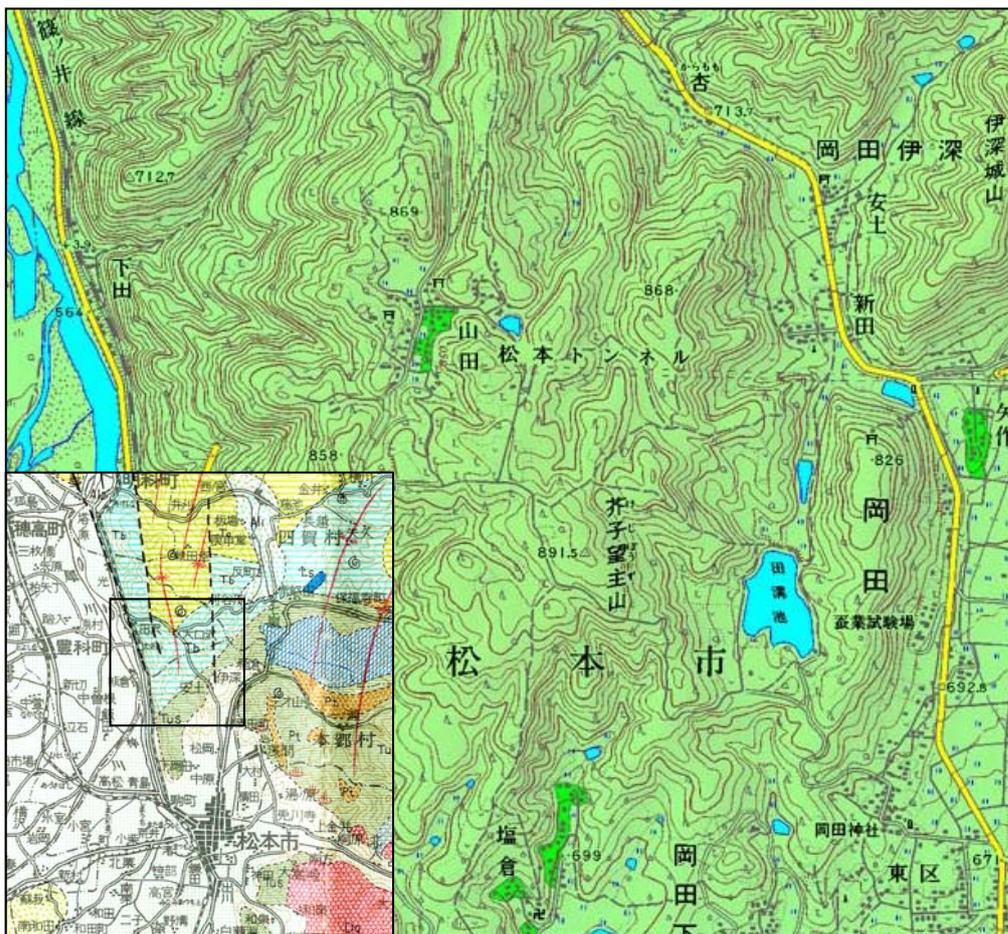


図 31 研究地域の地形・地質概要（地質図は長野県地質図(1962)による）

- $\delta D$  と  $\delta^{18}O$  の平均値は河川・池、周辺の井戸などの地表水→台地上部の湧水→トンネル湧水→深井戸の水へと、台地上の涵養域から離れるにしたがって小さくなっていく。トリチウム濃度による降水年の推定結果も涵養域から離れるにしたがって古くなる結果が得られた。
- $\delta D$  と  $\delta^{18}O$  にみる傾向は、調査地域の地形環境から高度効果によるものとは考えにくく、近年の温度上昇による影響を考慮する必要がある。
- 山体の各部位から採取された地下水の一般化学組成、環境同位体資料から、この地域の水循環過程を模式的に示すと図 32 のように整理される。

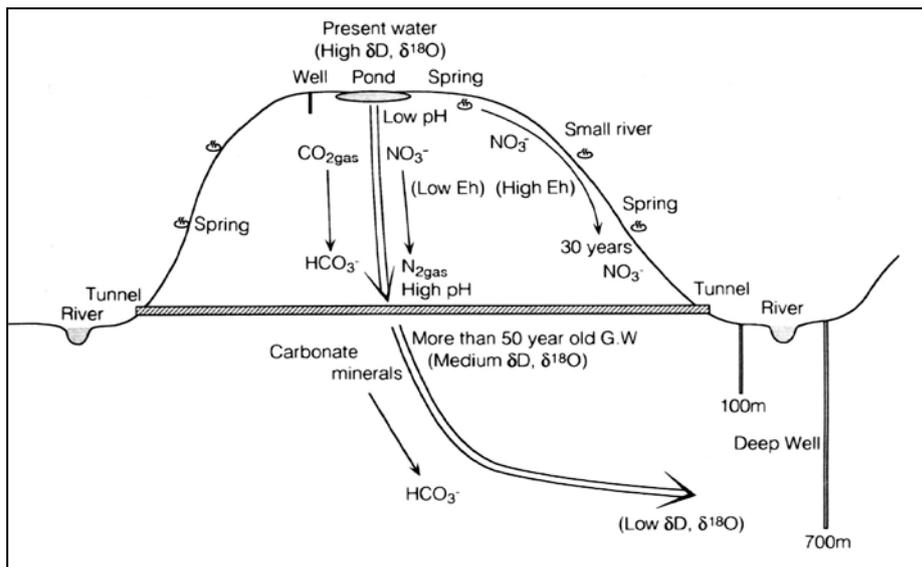


図 32 Changes in groundwater chemistry within the plateau

出典：H. II・S. Misawa(1994)：Groundwater Chemistry within a plateau neighboring Matsumoto city, Japan, Environmental Geology, 24 166-175.

iii. 恵那山トンネル

1967年に着工し、1975年に完成した、中央自動車道恵那山トンネルは岐阜県中津川市と長野県下伊那郡阿智村にまたがる延長 8,476m の長大トンネルである。

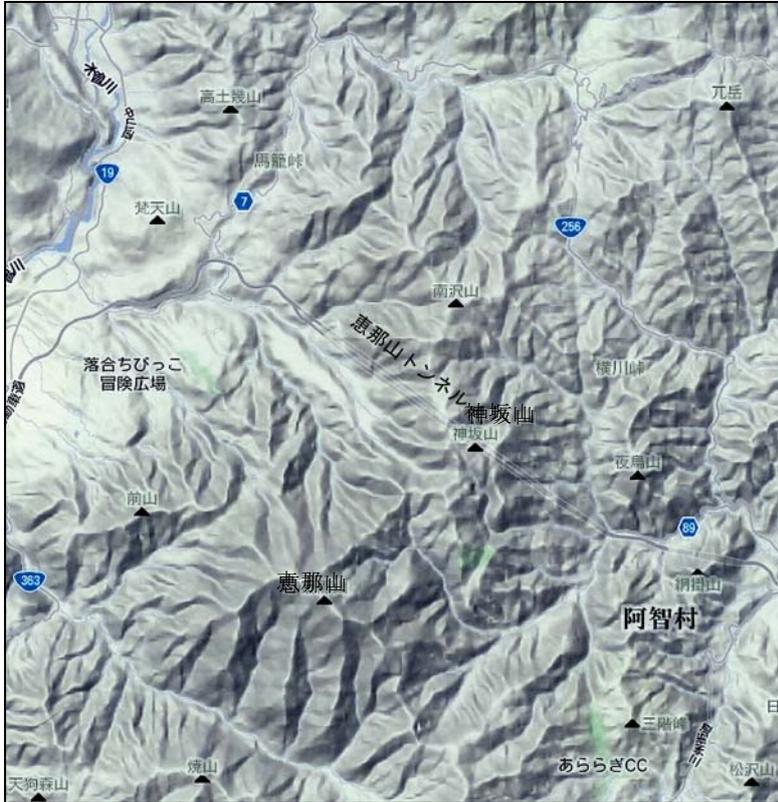


図 33 恵那山トンネル周辺のレリーフマップ

トンネル中央の直上にあたる富士見台には平坦面が残存しているが、全体としては満壮年期の急峻な地形をなす(図 33)。地質は富士見台から西は濃飛流紋岩からなり、各所で苗木花崗岩に貫かれている。一方、東側には伊那川花崗岩、清内路花崗岩が分布する(図 34)。

トンネルのほとんど全線にわたって多数の副断層を伴う断層破碎帯が存在し(図 35)、かつトンネルの土被りは中央部で 1,000m に達することから、各所で毎分 1 トン以上の高圧の湧水に遭遇し、難工事を強いられた。

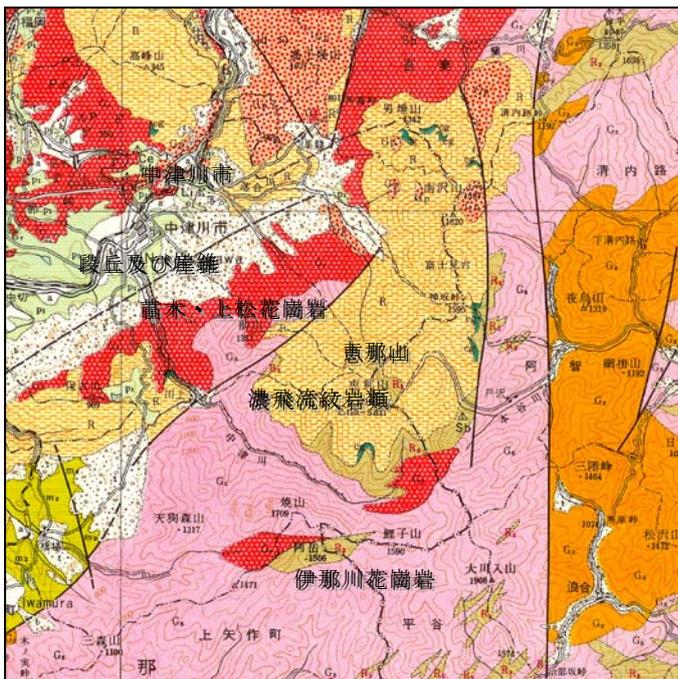


図 34 恵那山トンネル周辺の地質

出典：地質調査所(1961)：1/200,000 地質図「飯田」

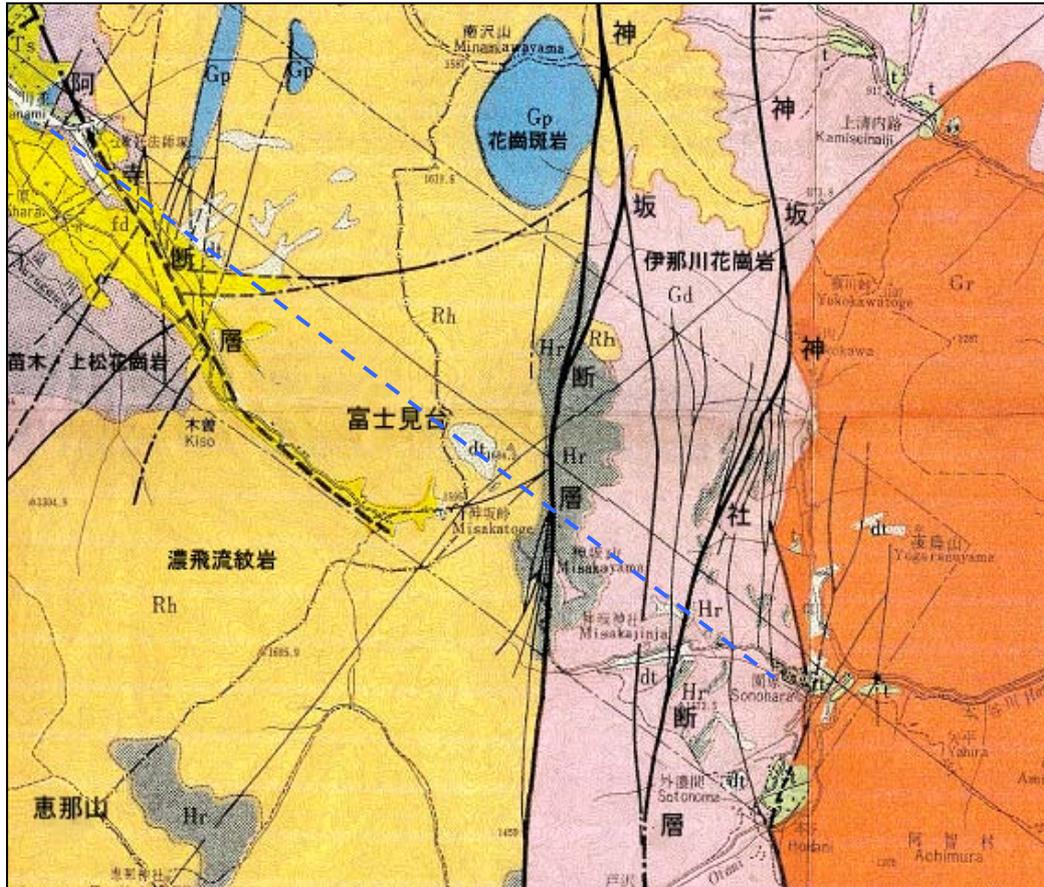


図 35 恵那山トンネル付近の地質

出典：日本道路公団 名古屋支社(1971)：「恵那山トンネル地質説明書」  
(青色破線は恵那山トンネル)

[文献]

- a. 日本道路公団 名古屋支社(1971)：「恵那山トンネル地質説明書」
- b. 日本トンネル技術協会(1980)：トンネル湧水調査法に関する調査研究報告書
  - ・ 図 36 にみる全体傾向として、坑口排水量の推移、及び区間最大湧水量の分布が山体のボリュームと顕著に対応を示している点が注目される。
  - ・ 湧水の水質において、その時間経過による変化は殆どなく、位置的な特徴が目立つ。中津川方 1.9km 付近、および飯田方 1.7km 付近のものは断層に沿った封入水的な特徴を示す。
  - ・ トンネル湧水は滞留時間の長い地下水であり、水質のパターンが上流域から下流域へと連続的に変化する傾向があることから、恵那山（富士見台）の山体地下水であることが推定される。
  - ・ 表 2、表 3 に示した、トンネル湧水のトリチウム濃度、及び  $^{14}\text{C}$  年代の測定結果、また図 36 に示した湧水状況からみて、この山体地下水は滞留時間の極めて長い、かつ断層によって流動が遮断された“ポケット水”的なものであると判断される。これは図 37 に示したように、湧水実績値が予測計算と大きくずれた原因と思われる。

- ・ 区間での最大湧水量の分布から類推されるように、西方は先へ先へと湧水地点が移る突発型であり、東方は遮水層以奥の 2,600m~3,000m 付近に長期にわたり、湧水は持続し、減水の遅い型であり、これは地質の差を表すものと考えられる。
- ・ 恵那山トンネル周辺の水質は概ね 20~40l /sec/km<sup>2</sup> 程度であり、平均 27l /sec/km<sup>2</sup> 程度である。これを流域への地下水の流出速さを表すと考えてみれば、21mm/日、すなわち 1m/年の早さとなり、非常にゆっくりした早さになる。

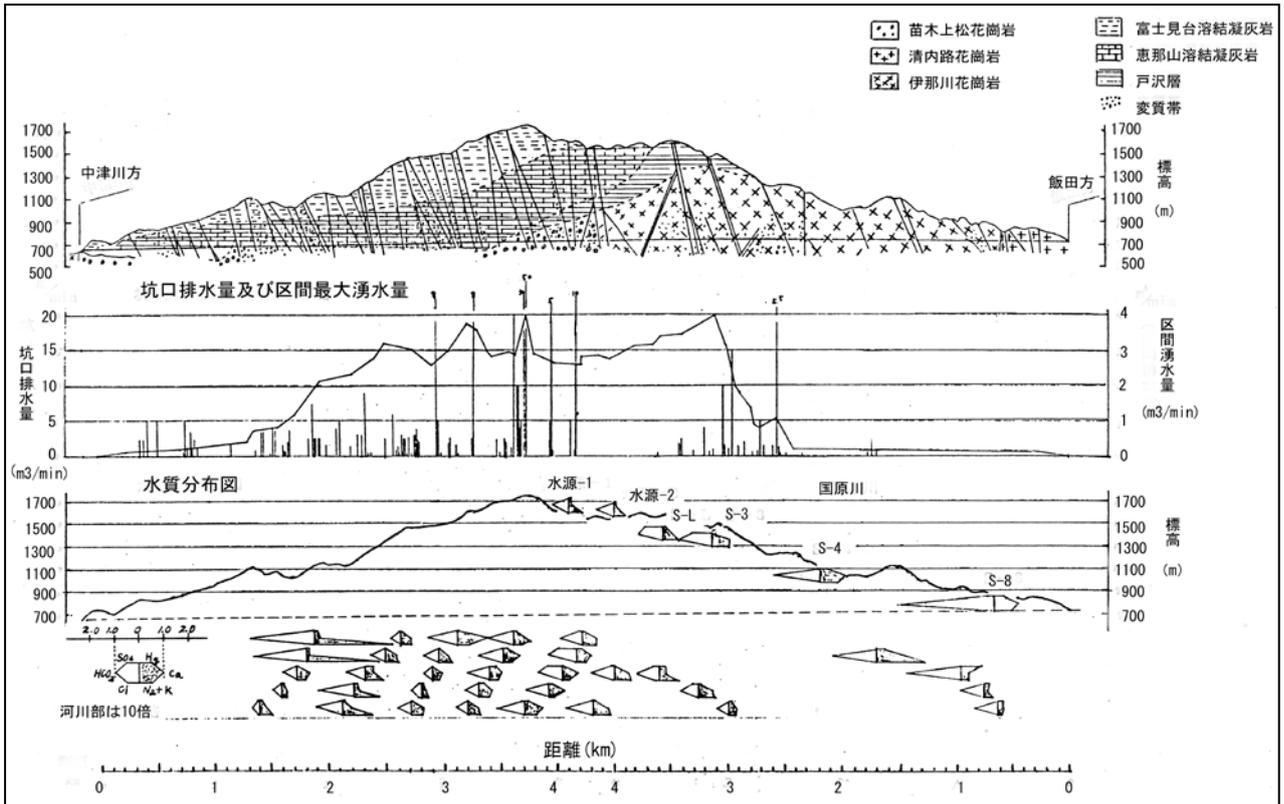


図 36 恵那山トンネル地質断面図及び湧水調査総合図

出典：日本トンネル技術協会(1980)：トンネル湧水調査法に関する調査研究報告

表 2 恵那山トンネル湧水のトリチウム測定結果

採水位置	トリチウム濃度(トリチウムユニット)
地表河川	17 ~ 73
富士見台山頂池	15 ~ 40
中津川方坑口	18
飯田方坑口	1.0
飯田方斜坑	8.5
中津川方主坑	4.0
トンネル中央	0 ~ 0.07 (5.4)

表 3 恵那山トンネル湧水の  $^{14}\text{C}$  年代

採水位置	C - 14 年代
トンネル中央 A	6,720±170YBP (6,530±160YBP)
” C	4,210±95 ” (4,090±95 ”)

表 2, 表 3 出典：日本トンネル技術協会(1980)：トンネル湧水調査法に関する調査研究報告

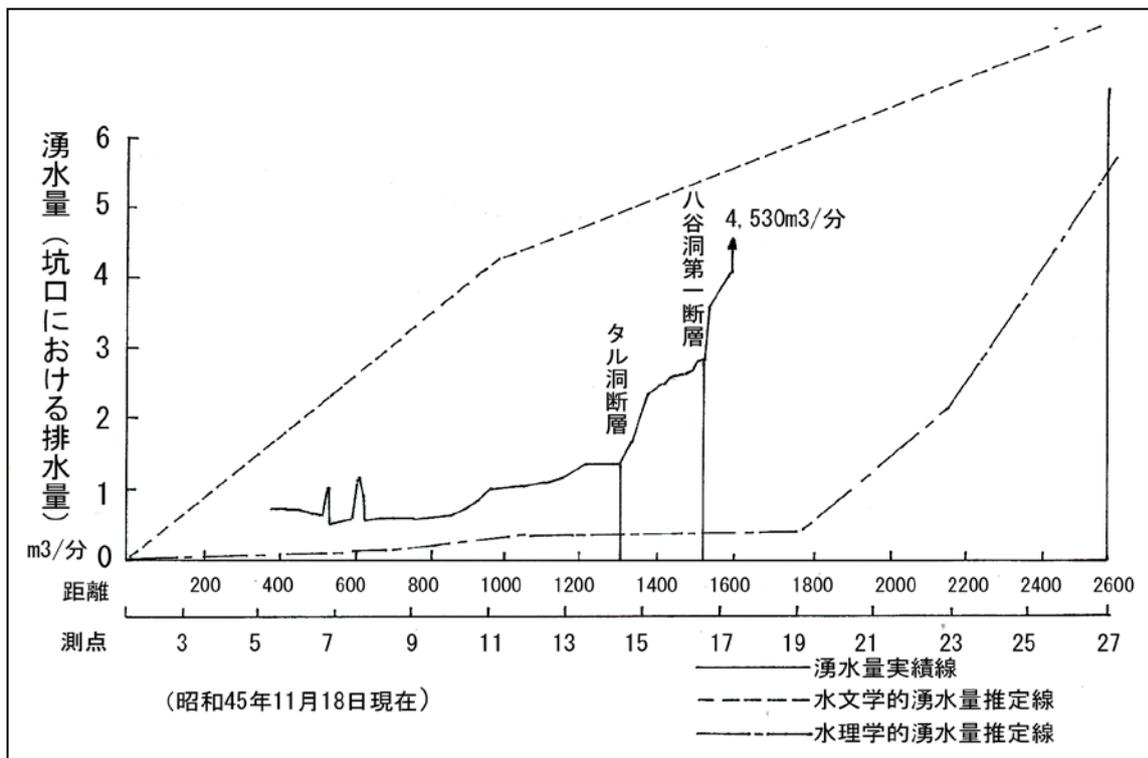


図 37 中津川坑口を起点とした湧水量の予測計算値と実際値

出典：日本道路公団 名古屋支社(1971)：「恵那山トンネル地質説明書」

iv. 瀬戸内海井島

瀬戸内海東部の直島諸島北端に位置する東西 1km 南北 3km ほどの小島(図 38)で、最高点は 156.7m、全島白亜紀の広島型花崗岩からなる。北北東-南南西の断裂系が卓越し、これに沿った方向にアプライトなどの岩脈の貫入をみる(図 39)。

ここに引用した事例は、水封式石油備蓄を前提とした地下岩盤特性の調査・研究を目的として行われたもので、当時としては先進的、かつ画期的な内容が紹介されている。ここではその中から本題に関する部分のみを抜粋した。

[文献]

J. Shimada, H. H. Momota and Y. Ono(1980) ; Role of groundwater in the bedrock for underground oil storage A hydrological case study of small granite island, Subsurface Space Environment Protection Low Cost Storage Energy Savings, 393-400.



図 38 研究対象地の地形

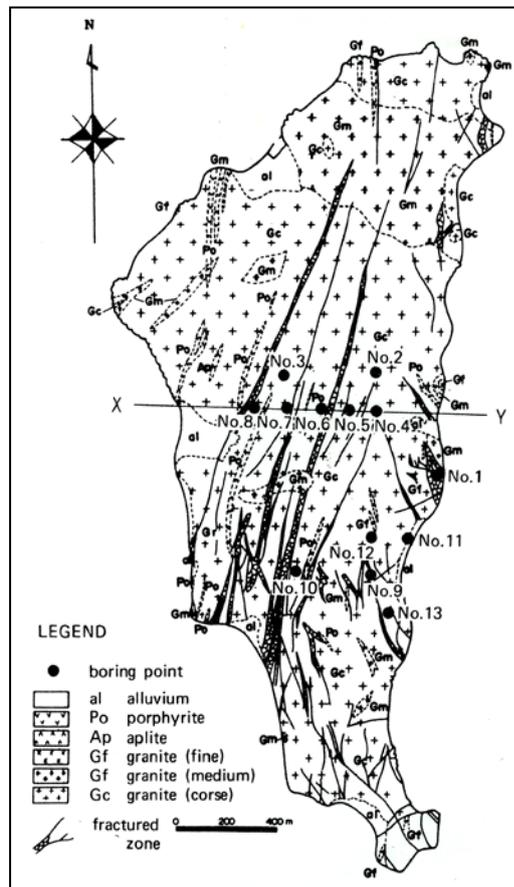


図 39 研究対象地の地質

出典 : J. Shimada, H. H. Momota and Y. Ono(1980) ; Role of groundwater in the bedrock for underground oil storage A hydrological case study of small granite island, Subsurface Space Environment Protection Low Cost Storage Energy Savings, 393-400.

- ・ 図 39 の●印の地点において観測孔を設置し、それぞれについてダブルパッカー方式により、3m 間隔で水圧を測定して、図 40 の水理水頭分布図を画いた。
- ・ 島の中央部において、高水頭部分が認められ、破碎帯のような弱線に沿う 3 次元のな流れが推定された。
- ・ 全体として、島の中心部から周辺に向かう、岩盤中の連続的な流れが示唆された。
- ・ 図 41 に示したトリチウム濃度の分布は図 40 の水頭分布図と、極めてよく対応していることが認められ、これによって得た地下水の流速は  $1.7 \sim 4.2 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$  ( $5.3 \sim 13.2 \text{m/year}$ ) と計算された。(筆者注：この値は北岡豪一(1984)が示した六甲山地の場合とほぼ同じ値である)

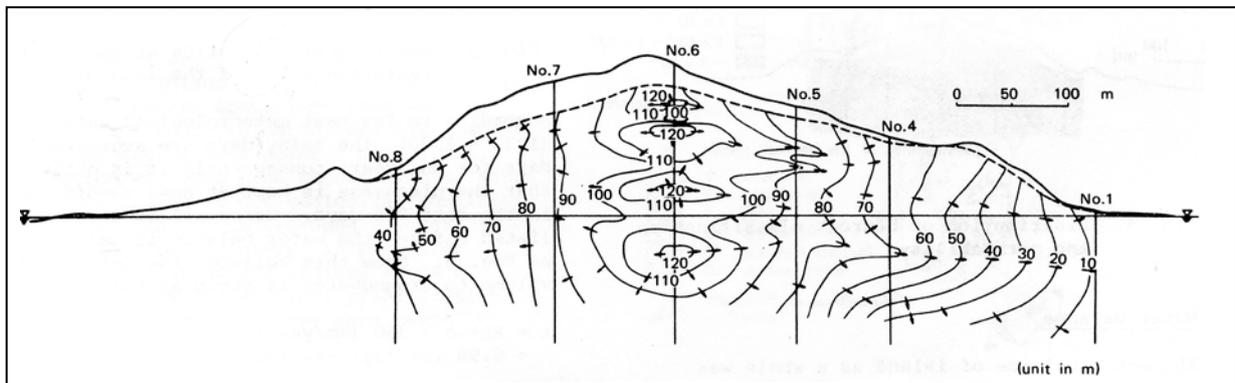


図 40 Potential distribution of groundwater in the bedrock

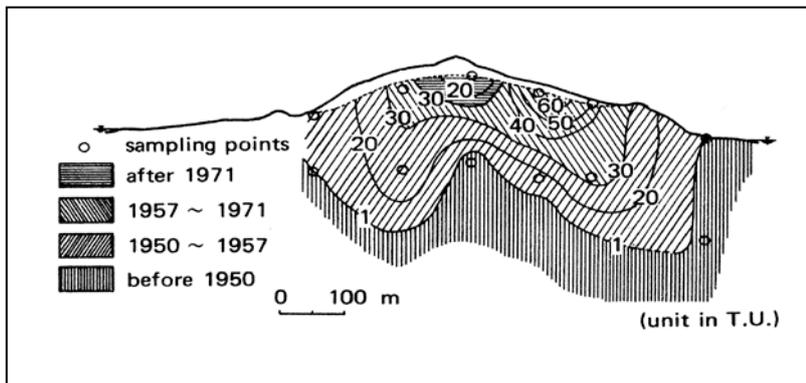


図 41 Distribution of tritium concentration in groundwater of the bedrock

図 40, 41 出典 : J.Shimada, H. H.Momota and Y.Ono(1980) ; Role of groundwater in the bedrock for underground oil storage A hydrological case study of small granite island, Subsurface Space Environment Protection Low Cost Storage Energy Savings, 393-400.



図 43 は釜石鉱山周辺の地質図で、鉱山の位置は栗橋岩体の中心部から南に張り出した部分にあたる。また図 44 は主な坑道の配置と、地下水研究が集中的に実施された 550m 坑道 (NW/NE 坑道) の拡大図である。

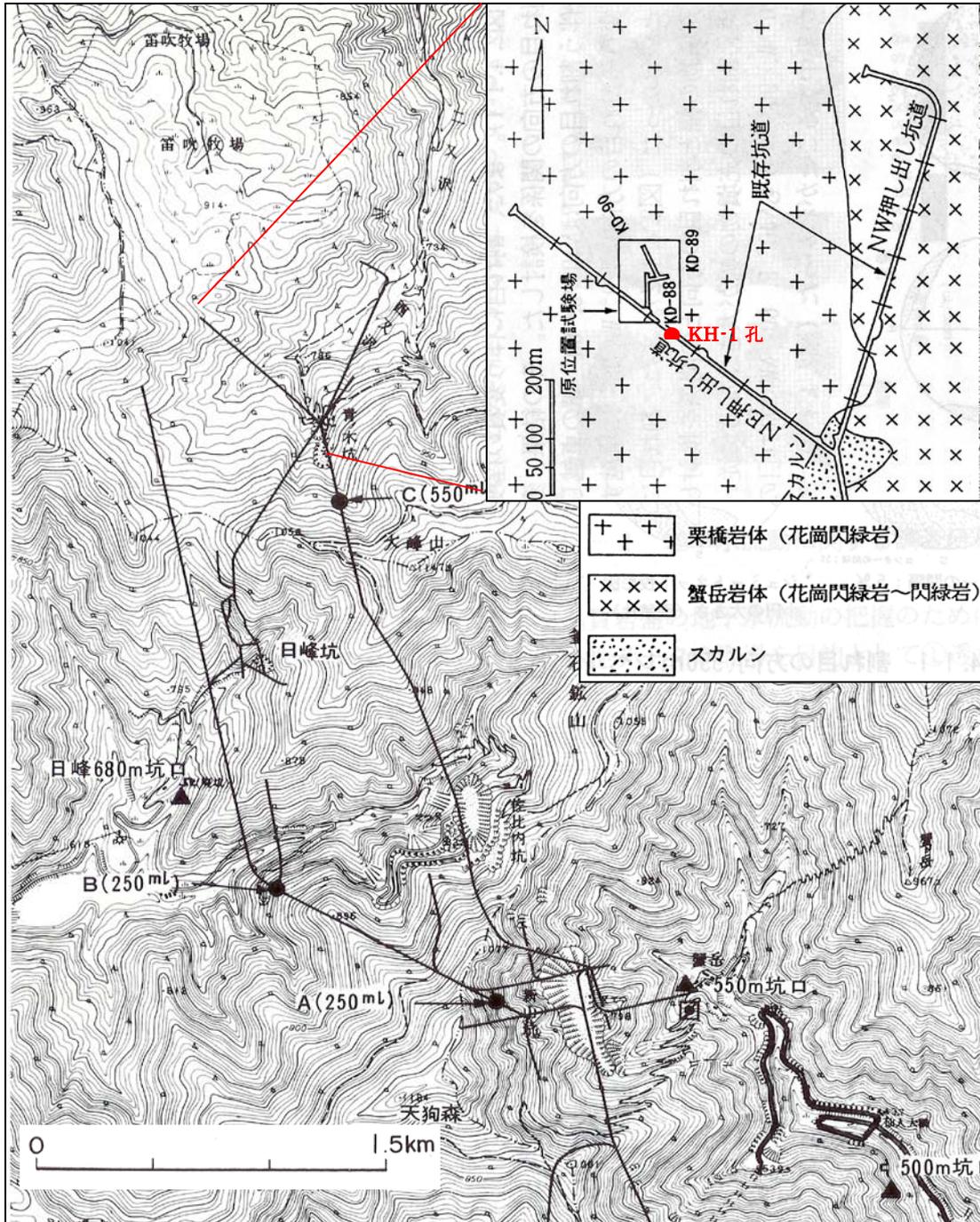


図 44 釜石鉱山の坑道配置

出典：釜石鉱山株式会社「ニューマイン釜石」パンフレット

(青木坑の地質図は動力炉・核燃料開発事業団(1994)：「地層処分研究開発の現状」(平成5年度)釜石鉱山における地質環境特性の研究 P.222-242.による)

[文献]

動力炉・核燃料開発事業団（1994）：「地層処分研究開発の現状」，（平成5年度）

- 550m坑道（図44参照）の各所で地下水が湧出している。それらの水質は表4のように、6タイプに分けられる（大きくは $\text{HCO}_3^-$ 型、 $\text{SO}_4^{2-}$ 型、その中間型の3つに区分される）。

表4 地下水の水質区分（550m坑道湧水）

①型	$\text{HCO}_3^-$ 型	栗橋花崗閃緑岩の比較的高透水性ゾーンに分布する浅層タイプの地下水
②型		栗橋花崗閃緑岩中の低透水性ゾーンに分布するやや深層タイプの地下水
③型		①型と④型が混合したと考えられる地下水
④型		スカルン中に分布し硫化物から $\text{SO}_4^{2-}$ の供給を受けたと考えられる地下水
⑤型	$\text{SO}_4^{2-}$ 型	蟹岳閃緑岩に特徴的な水質。蟹岳閃緑岩体から硫化物の供給を受けたと考えられる深層タイプの地下水
⑥型	$\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 中間型	①型、②型、⑤型が混合したと考えられる地下水

出典：動力炉・核燃料開発事業団（1994）：「地層処分研究開発の現状」（平成5年度）、釜石鉱山における地質環境特性の研究 P. 222-242.

- KH-1孔（図44参照）をパッカーにより、5区間（1区間約100m）に区切り、孔内地下水の経時的な水質変化をみると、最深部を除いて、 $\text{Na-HCO}_3$ タイプの深層被圧地下水タイプから $\text{Na-SO}_4$ タイプの化石地下水的な水質へと変化しているのが指摘される。このような変化は、KH-1孔の開放により、蟹岳閃緑岩からの $\text{SO}_4^{2-}$ に富む地下水を引き込むかたちになったためと考えられる。
- 環境同位体によれば、KH-1孔内の5区間の地下水は降水ラインにのることから、地下水の起源は降水であるといえる。
- 採水深度が増大するにつれて、 $\delta D$  および  $\delta^{18}\text{O}$  が小さくなる傾向が認められることから、KH-1孔内の地下水は深度が深くなるほど、より高い標高から涵養されたものと判断される（図45）。
- KH-1孔最上部の区間では6TUと、550mレベル坑道の湧水とほぼ同じ値を示し、この区間では坑道の影響を受けていること、またその他の区間では、2TU以下であり、涵養後40年以上を経過した比較的古い地下水であることが推定された。

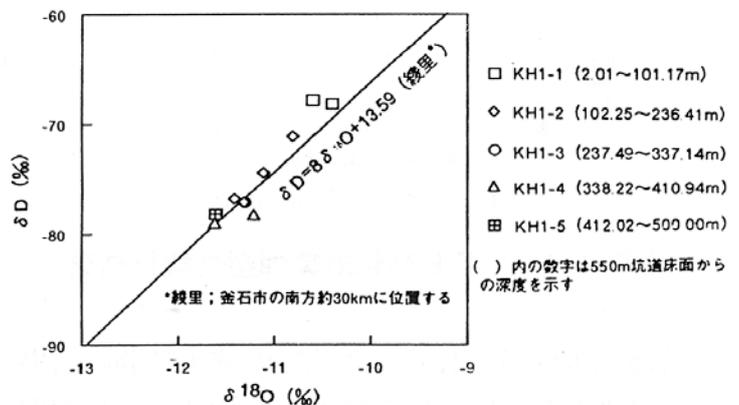


図45 KH-1孔内地下水の $\delta D - \delta^{18}\text{O}$ 関係図

出典：動力炉・核燃料開発事業団（1994）：「地層処分研究開発の現状」（平成5年度）、釜石鉱山における地質環境特性の研究 P. 222-242.

vi. 熊本県宇土半島小流域

宇土半島の基部をなす岩体は、大岳(477.6m)を中心とする火山体で、安山岩質溶岩(主として輝石安山岩、角閃石安山岩)および、火砕流堆積物や土石流堆積物からなり、形成時代は後期鮮新世～前期更新世とされている(図46)。

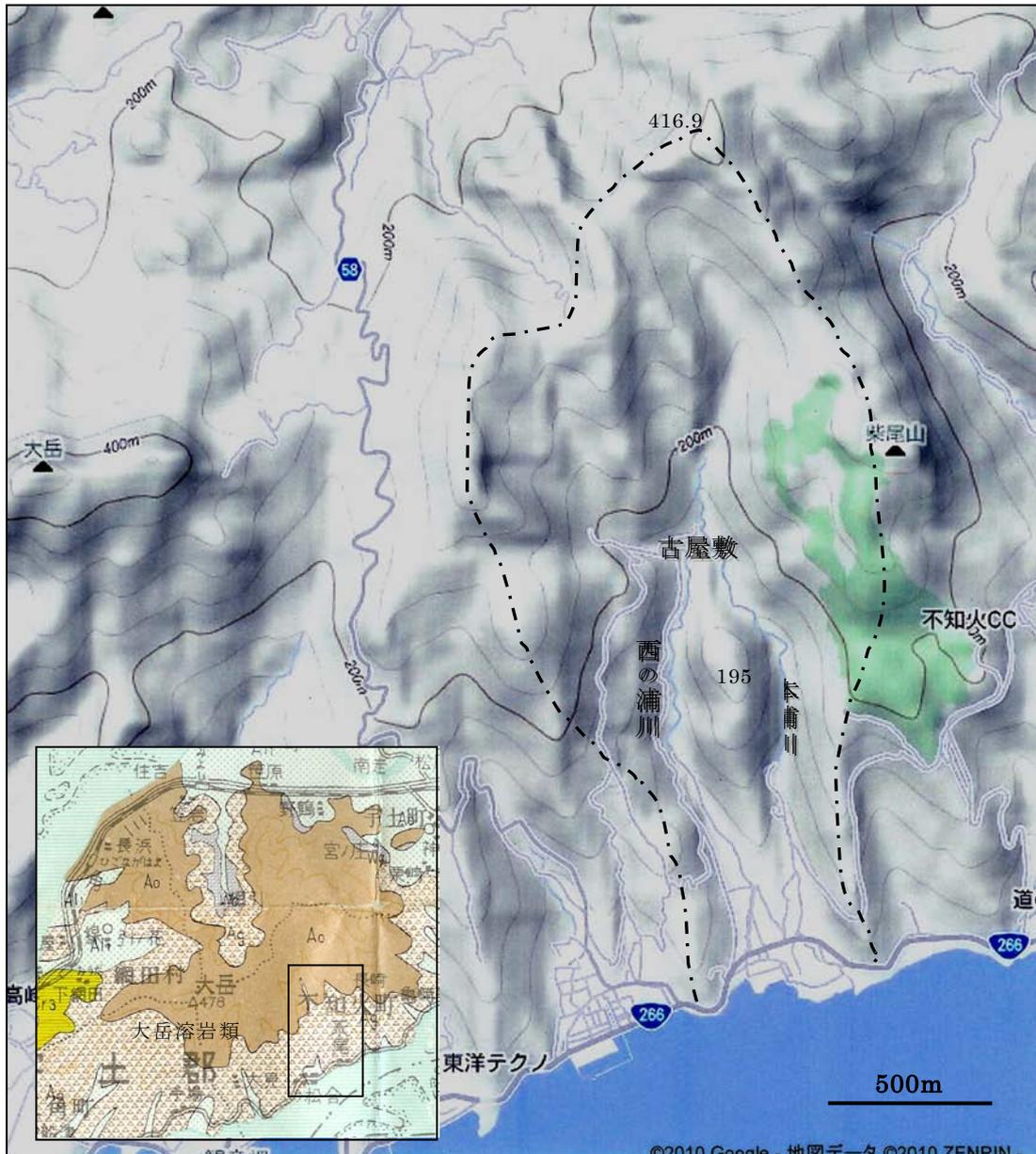


図46 研究対象地域の地形と地質概要

宇土半島は一般に北側の有明海に面して急、南側の不知火海に面して緩やかな非対照な地貌を呈し、このような特徴は半島の基盤をなす地層群の構造を反映したものと考えられている。

研究流域の最高点は416.9m、延長距離は約2,800mで平均勾配はおよそ14%である。

ここに山体を削る2条の河川、本浦川と西浦川が近接して不知火海に向かって流れ、それらを分かちように、流域の中央部に標高195mの“かまだ山”が位置する(図46)。これを構成するのは、柱状節理が発達した輝石安山岩溶岩で、その上部に凝灰角礫岩を載せている。これは大岳火山の初期の活動によるものとされている。

[文献]

嶋田 純他(2006):「岩盤ボーリング・物理探査等を用いた広域地下水流動の解明」、文部省科研費、「山体基盤岩地下水流動の実態解明とその水資源的評価」(代表:嶋田 純)

- 図47は流域各地点の水質をヘキサダイアグラムで表示したものである。これによると、殆どすべての試料はカルシウム重炭酸型に属し、また源流域から海岸部にかけて、溶存成分が増加する傾向が認められる。溶存分量が滞留時間によって増加すると考えると、海岸付近の地下水の滞留時間が最も長く、中流域から上流域にかけて短くなっていることが分かる。なお海面下50mまで掘削したSB4のみはNa(Ca)-Cl型で他の地下水とは明らかに異なる水質を示す
- トリチウムの分析結果によれば、最大で $3.1 \pm 0.6$  T.U.、最小で検出限界を下回る。地下水のピストン流を前提として、トリチウムの放射壊変による減衰(半減期12.43年)を考慮すると現時点で1 T.U.以下であれば、滞留時間はおよそ50年以上であり、それ以上であれば、50年以下の滞留時間と考えることができる。

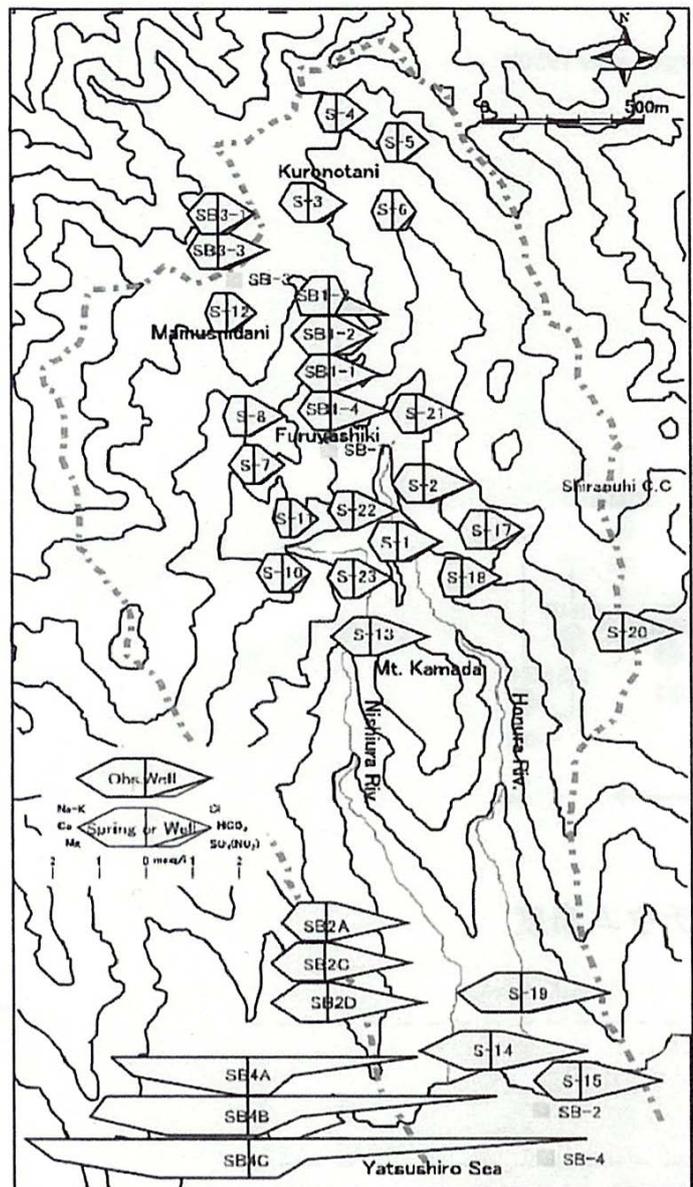


図47 研究地域の水質分布特性

嶋田 純他(2006):「岩盤ボーリング・物理探査等を用いた広域地下水流動の解明」、文部省科研費、「山体基盤岩地下水流動の実態解明とその水資源的評価」(代表:嶋田 純)

- ・ この考えに基づけば、流域中・上流部（涵養域）で滞留時間は 50 年以下、下流域および海域（流出域）で 50 年以上の滞留時間を示し、流域の地下水流動系と整合している。
- ・ トリチウム濃度で滞留時間が 50 年以上と判断されたものについて、 $^{14}\text{C}$  年代を求め、これを流域の 2 次元断面に示したのが図 48 である。海底観測井 SB4 の B 区間以深は 2,000 年以上の  $^{14}\text{C}$  年代を示し、潮間帯の SB2 より陸側の地下水と、それより沖側の地下水が異なるものであることを示している<sup>注)</sup>。

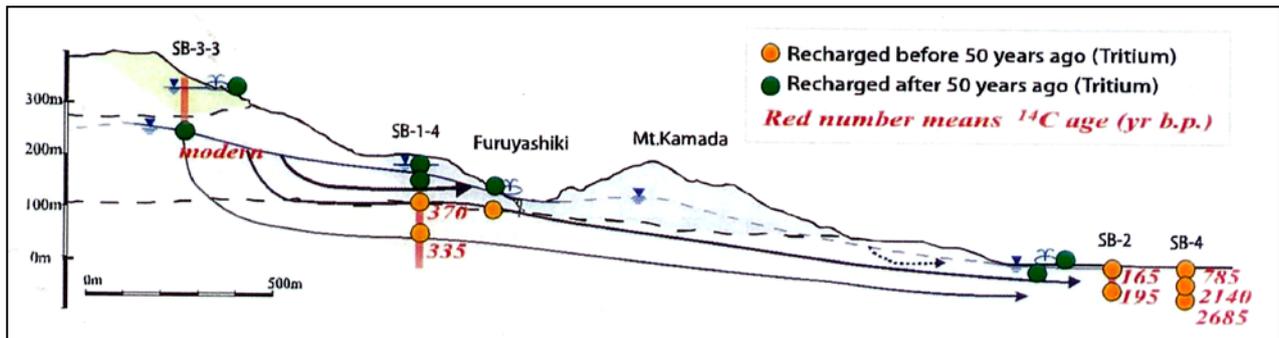


図 48 トリチウム濃度及び炭素 14 濃度を基にした研究地域地下水の年齢分布概念図  
 出典：嶋田 純他(2006)：「岩盤ボーリング・物理探査等を用いた広域地下水流動の解明」、文部省科研費、「山体基盤岩地下水流動の実態解明とその水資源的評価」（代表：嶋田 純），p. 82-113.

注)：原著論文では深くは論じていないが、私は Mazor, E(2004)が主張する“Stagnant Aquifers (Groundwater Traps)”の存在を示唆しているものと思われる)

#### vii. アルプス山脈 モンブラントンネル

モンブラントンネルはフランスのシャモニー・モンブランとイタリアのアオスタを結ぶ 11,600m の長さを有する道路トンネルで、フランスとイタリアの国境であるモンブラン山系の下を貫いている。1978 年にオーストリア西部のアールベルク道路トンネル (13,971m) が開通するまでは世界最長の道路トンネルであった。現在でも世界第 5 位の長さを誇る。

トンネルの主部は花崗岩質からなるが、イタリア側の開口部に炭酸塩岩、フランス側に片岩が分布する。なおトンネルの土被りは中心部で 1,900m に達し、直上の圏谷は氷床に覆われている(図 49)。



図 49 モンブラントンネルの位置と周辺の地形

[文献]

Fontes, J.Ch., Bortolami, G.C., and Zuppi, G.M. (1979) Isotope hydrology of the Mont Blanc Massif. In: Isotope Hydrology 1978. IAEA. Vienna, 411-436.

- ・ 岩質とトンネル湧水の水質の間には、図 50 のように密接な関係が認められる。すなわち、
- ・ 炭酸塩岩地区では、 $\text{HCO}_3$ 、pH が高く、Cl が低い傾向が認められる。後者にあつては、地下水中の Ca, Na,  $\text{SO}_4$  濃度が高いことから、片岩中の蒸発岩の存在が関係している可能性がある。
- ・ 花崗岩質部分では Cl 濃度が低い。片岩部分では  $\text{HCO}_3$  濃度が低く、Cl 濃度が高い傾向が認められる。
- ・ このように地下水の水質が岩質とよく対応していることから、その殆どは垂直方向に発達する亀裂を通して浸透したもので、横方向の流れは極く限られたものであることを示している。
- ・ トリチウムについては図 51 に示されているように、1961 年の水爆実験以降に涵養された比較的若い年代の地下水であることを示している。トンネル断面から判断されるように、涵養域は標高 3,200m と推定され、上述のように、これが垂直方向に浸透したとして、その速度は 150m/year という速さになる。
- ・ またトリチウム濃度の場所による違いが顕著なことから、浸透経路は裂隙構造の多様性を示唆している。

- $\delta D$  と  $\delta^{18}O$  の値と地形はきわめてよく対応しており、特にトンネル中央部で低い値となっており、高度効果が明瞭に示されている。

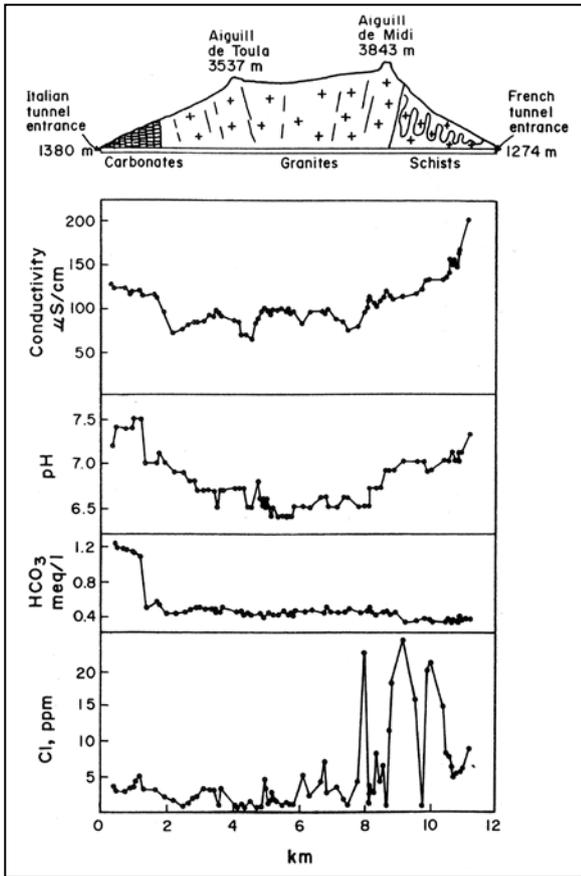


図 50 A geological cross section and composition of waters sampled along the Mont blanc tunnel.  
(From Fontes et al., 1979)

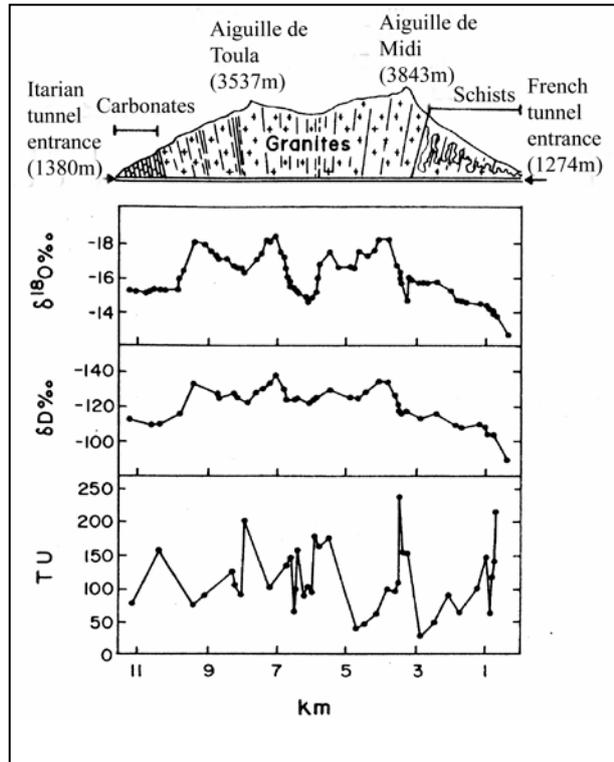


図 51 Tritium,  $\delta D$ , and  $\delta^{18}O$  in waters collected along the Mont Blanc tunnel during its construction in 1974. The  $\delta D$ , and  $\delta^{18}O$  axis have been plotted in a reverse mode to facilitate comparison with the topographic profile. The high tritium values indicate post-bomb recharge, and in the cases of over 200TU one may even conclude post 1961 recharge. (From Fontes et al., 1979)