

湧水・地下水のトリチウム濃度の測定

— 姫川系浦川流域および新潟地区水溶性天然
ガス井からの天然水中のトリチウム濃度 —

橋本哲夫*・樋口靖*・酒井裕二*
佐藤修**・青木滋**・外林武*

Determination of tritium content in spring and underground water
— Tritium concentration in water collected from the Ura-river
basin area in Nagano Prefecture and in confined water from
the natural gas wells in Niigata Plain —

by

Tetsuo HASHIMOTO, Yasushi HIGUCHI, Yūji SAKAI, Osamu SATŌ,
Shigeru AOKI and Takeshi SOTOBAYASHI

(Abstract)

Some spring water (18 samples), collected from the landslide area in Kanayama valley belonging to the Ura-river area, were subjected to tests to determine the tritium content to obtain some information relating to the aquifer properties. The conventional measurements of low level tritium were carried out by using liquid scintillation counting and the tritium concentrations varied from 28 to 62 pCi/l, giving the highest value comparable with that of fresh precipitation. In order to classify the aquifers, six major ion constituents (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, SO_4^{2-} , HCO_3^- , and Cl^- ions) were used to specify each type of water into a pattern diagram (Fig. 6) and subsequently three constituents (Mg^{2+} , Ca^{2+} , and SO_4^{2-} ions) were utilized in the cluster analysis as shown in Fig.7.

The six aquifer groups were identified and the correlation between tritium and total cation concentrations was roughly recognized for each aquifer group; the higher concentrations of cation are corresponding to the lower tritium concentrations owing to the effects of radioactive decay and/or the mixing effects of old water with new precipitations. In the case of the confined waters, collected from the natural gas wells in Niigata Plain, the electrolytic tritium enhancement was applied to the tritium measurements using a Ni-multi-plate electrode because of their extremely low-level tritium concentrations. The resultant tritium concentrations are summarized in Table 1 as bracketed values in comparison with the values evaluated without enhancement in the last column. From these results, it was found that the confined water from

* 新潟大学理学部化学科

** 新潟大学積雪地域災害研究センター

aquifers more than 300m below the ground surface yielded a negligible low concentration of tritium and were basically suitable as background water for the environmental tritium measurements.

I ま え が き

土石流や地すべり災害において、地下水が大きなかわりを有しており、特に塩濃度の高い滞水年代の長いと思われる古い地下水の寄与が無視できないことが最近わかってきている（佐藤ら、1983、1984）。また水溶性天然ガスの採取や融雪への地下水の利用により県下ほぼ全域にわたって地盤沈下が依然として懸念されている。地下水自身半導体産業の命としての給水源ともなりうるなどの諸事情から、地下水の滞水量、滞水年代、滞水域とか供給源など水文学的研究手法の確立が必要となって来ている。地下水の動向をさぐる古くからの方法として、溶存化学成分の濃度やその変化による研究がなされているが、地下水盆と接触している砂礫層の化学的性質の差異が反映しており、普遍的な地下水に関する知見を得ることができない場合も多い。地下水に含まれる天然放射性元素としてのウランやトリウムおよびそれらの娘諸核種も化学成分と同様に滞水地層による含有量の差異は生ずるものの、放射性壊変事象にもとづく親娘関係を利用すれば、他の方法で得られない地下水の時間的情報を得ることが可能となる（Levinson et al.,1978, Hashimoto et al.,1985）。たとえば、東京都下の地下水について、U-234/U-238放射能比を娘のTh-234放射能強度と関連づけることにより、約600年の滞水年代が見積られるとKigoshi (1971) は報告している。しかしながら各核種の測定に困難が伴うことから一般的には利用されていない。

しかるに、宇宙線生成放射性核種のトリチウム（以下の文中でTと略記）は、その大部分は水そのものの構成元素として地球上に存在しており、地下水系などでの水素原子との分別は完全に無視できるため、全ての環境水に関する水理学的、水文学的知見を得るのに最も有力な核種の一つであると言える。

我々は近年天然水中の低レベルTの液体シンチレーション法による測定法の確立を行い、Tの地球科学的利用を目的とした研究を展開してきており、昨年度その一部を本年報において報告してきた（橋本ら、1984）。本報告では地下水の挙動を知るためのT濃度の利用を考え、まず初めに土石流多発地帯である浦川流域金山沢からいくつかの湧水を試料として得て、T濃度を測定した。また、各湧水に含まれる数種の代表的な溶存無機イオン成分濃度と、T濃度の比較から、湧水相互間の対比を行ってみた。次いで、水溶性天然ガス採取井（以下ガス井と略記）から深度別に得た4種の深層地下水のT濃度を、電解濃縮法を適用して測定した。その結果、ガス井戸からの地下水はいずれもほぼ検出限界以下であり、このような古い地下水は低レベルT濃度測定用のバックグラウンド水として適していることがわかった。

II 実 験 方 法

1 湧水の採取

T測定のための湧水の採取地域として、典型的な土石流多発地帯として知られる姫川水系浦川流域に属する金山沢を選んだ。図-1に示した全27の湧水地点の中から、丸印で囲んだ18点を当実験用を選んだ。各湧水につき無機イオン測定用に300ml、T濃度測定用に電解濃縮の場合も考え1,000mlをそれぞれ採水した。

今回報告する試料水は、T濃度測定用のものは昭和59年9月17日と18日に採水し、無機イオン測定用のものは同日の前後数日にわたり採水したものである。

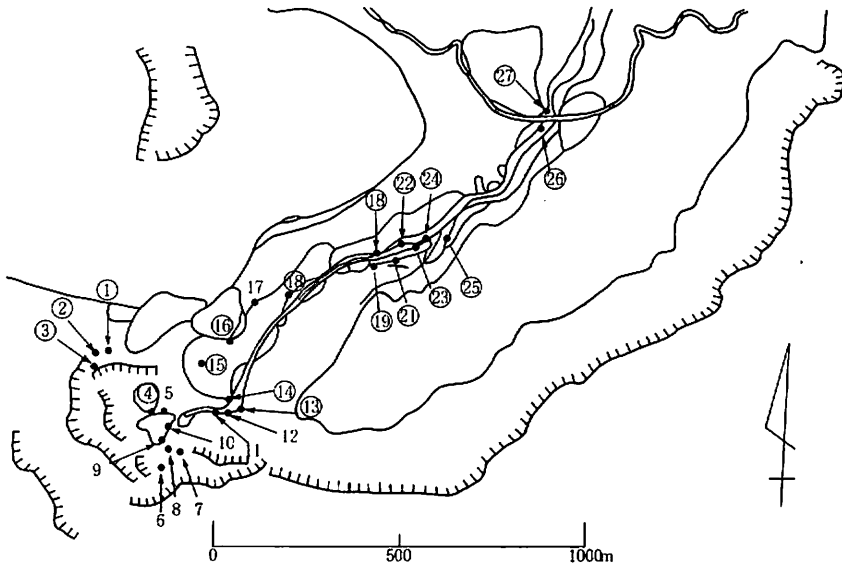


図-1 金山沢地下水採取地点

Fig.1 Sampling sites for chemical analyses of spring water in Kanayama Valley.

2. 水溶性天然ガス採取井よりの地下水

新潟平野西蒲原北部地区（黒埼町・西川町）において民間企業により水溶性天然ガスの採取が現在行われている。以前見られた著しい地盤沈下を防ぐために、現在は天然ガス分離ずみの地下水（いわゆる附随水）を全て再び地下水層に戻す地下水還元方式を取り入れている。今回の試料としてこのガス井からの深層地下水を用いて、地下水層の深度によるT濃度変化を知ろうとした。採水地点は、図-2に示す4ヶ所を選んだ。G₁+G₂層は、沖積層から洪積層への漸移帯に属しており、G₃、G_{4-b}、G₄₋₁層は共に洪積層に属していることが知られている。いずれの地下水層も礫層および粗粒砂層より成っていることがボーリング結果より判明している。

これら深層地下水の採取は、昭和59年10月24日に各20ℓずつ行い試料水とした。

3. 無機イオン濃度の分析

湧水中の主要無機イオン6種、Mg²⁺、Ca²⁺、Na⁺、K⁺、SO₄²⁻、HCO₃⁻、Cl⁻について化学分析により定量した。陽イオン4種については、原子吸光法により分析し、硫酸イオンは硫酸バリウム比濁法を、重炭酸イオンは、酸滴定により、更

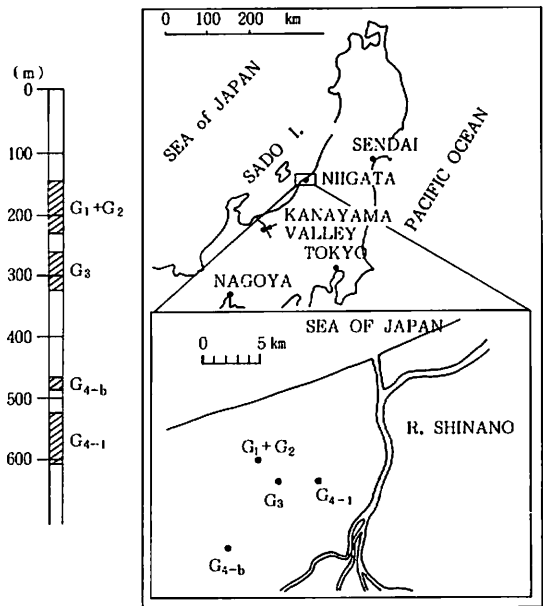


図-2 水溶性天然ガス採取井を利用した深層地下水の採取地点

Fig.2 Location of Niigata and low tritium water sampling sites.

に塩化物イオンはチオシアン酸水銀(Ⅱ)法でそれぞれ定量した(佐藤, 1981)。

4. トリチウムの電解濃縮

極低レベルのT濃度を、精度良く信頼性に足る計数誤差内で測定するためには、測定に先立ってTの電解濃縮が不可欠となる。簡便迅速でかつ再現性のすぐれた電解濃縮法として、従来の陽陰2枚の電極板から成る対電極方式に替って、何枚かの電極板を互いに重ね合わせた多重電極方式が、最近近藤ら(1984)によって報告された。そこで当実験でもこの多重電極方式を採用することにした。

電極板は、1mm厚さのNi板を加工することにより製作し、図-3の斜線部分で示すような形状にしてスタックを作りガラス製電解セル中に固定した。各スタックの陽・陰極板はそれぞれ3枚と2枚より構成されており、電極間隔は2mmに保ち、全有効電極表面積を100cm²になるようにしてポリカーボネートボルトで固定した。ガラスセルは1ℓ容量のものであり、多重電極方式を用いることにより一定電流密度、0.1A/cm²のもとで最終容積約60mlまで電解減容することができる。この電解電流密度の適用の場合、各セルにつき1日当りはほぼ80mlに相当する水を電気分解できることがわかる。このような電解セルを、冷却器(Taitec, CML-1)を用いて3℃に冷却された水槽に組み込み、図-4に示すように数本同時に電解濃縮操作を行うこととした。蒸留した各試料水をセルに一定量入れ、電解質としてNa₂O₂を添加することにより1%NaOH濃度になるよう初期濃度を調整した。各セルの電極間は直列に結合し、直流安定化電源(Metronics, MSV70A-10)により常時10Aの定電流をかけて電解を行った。

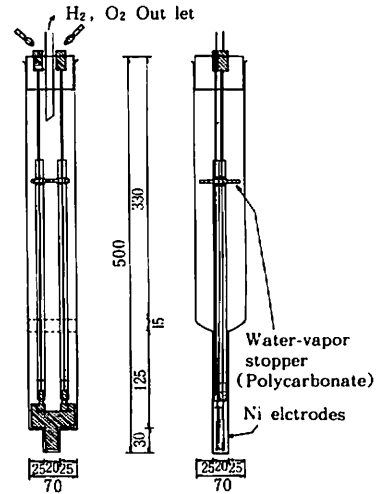


図-3 T電解濃縮用Ni製多重電極断面図
Fig. 3 Cross sectional views of Ni - multi - plate - electrode for electrolytic tritium enhancement.

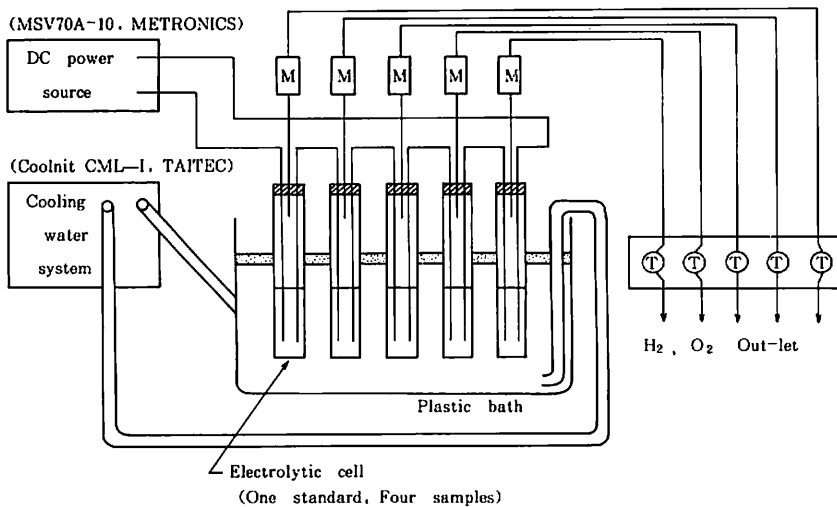


図-4 トリチウム水電解濃縮装置の概念図
Fig. 4 Conceptual diagram of tritium enhancement system by electrolysis.

5. トリチウムの測定

全ての試料水は、蒸留操作を注意深く行い不純物を除去のあと、低バックグランド仕様の100mlバイアル用液体シンチレーションカウンター（Aloka, LSC-LB1）を用いてTの壊変数を計測した。測定用試料の調製法並びに測定条件は、前報（橋本ら, 1984）と同様である。

III 結果と考察

1. 金山沢湧水中の塩濃度とT濃度

金山沢湧水に溶存する全陽イオン濃度^{*}とT濃度との関係を図-5に示す。T濃度につけた誤差バーは、計数誤差に基づくものである。この図においてT濃度は28~62pCi/ℓの範囲に亘っており、全て濃縮操作なしに測定したものである。今ここで単純取り扱い法として、これらの各湧水源が非常に大きく実際上閉鎖系とみなし、T濃度の変化はT自身の放射壊変現象（12.26年の半減期を有する）のみに由来すると仮定し、更に降雪・雨水中

の年平均T濃度を昭和58年度に新潟市で測定された値、76pCi/ℓ（橋本ら, 1984）を過去10数年間一定のままであったとするならば、ここで得たT濃度からの湧水源の滞水時間は、4~17年として見積られる。しかしながら金山沢のように狭くかつ多雨な地域での湧水源の閉鎖系は全く考えられない。また高濃度を示す湧水のT濃度は、試料水採取時と同時期に新潟市にて捕集した降雨水の月間平均T濃度 57.1 ± 10 pCi/ℓと良く一致していることから、むしろ非常に短い滞水時間を有する湧水源や比較的長い滞水時間（5~20年にも及ぶ）を有する湧水源がいくつか存在し混合していると考えた方が妥当

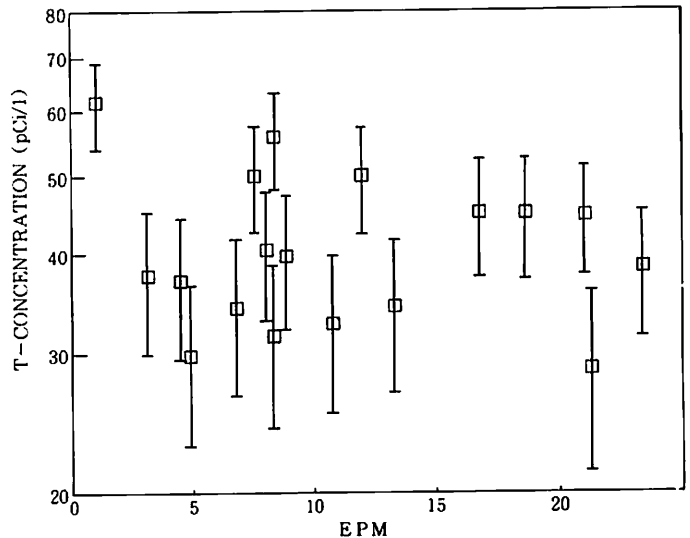


図-5 湧水の全陽イオン当量濃度とT濃度
Fig.5 Relationship between tritium and total cation concentrations of some spring waters.

であろう。事実図-5中の左上端の試料は、T濃度が最高値を示し、塩濃度が最小値を示すことから、採水時から余り遠くない時期の降雨そのものを直接反映していると考えられる。

一般的に同一条件下の滞水層において地下水中の溶存塩の濃度は、滞水時間とともに増加することが知られており、塩濃度自身を滞水時間の目安として利用できる場合もある。またT濃度も先述のように、滞水層が閉鎖系に近いならば、滞水時間とともに減少するはずである。しかしながら、図-5では溶存イオン濃度とT濃度には必ずしも明瞭な相関関係がみられず、数種の湧水源の存在が示唆される。

ここで、湧水源を、水質分析に基づいて区分けすることを考えた。化学分析による3種のそれぞれ陽イオン、陰イオン濃度をヘキサグラム（山本, 1983）にまとめたものを図-6に示す。垂直軸を中心に

* 図5で横軸は当量濃度（EPM—Equivalent per Million）で表わされており、ここでの値は、1ℓ中に含まれる各イオンのミリモル当量を合計したものである。

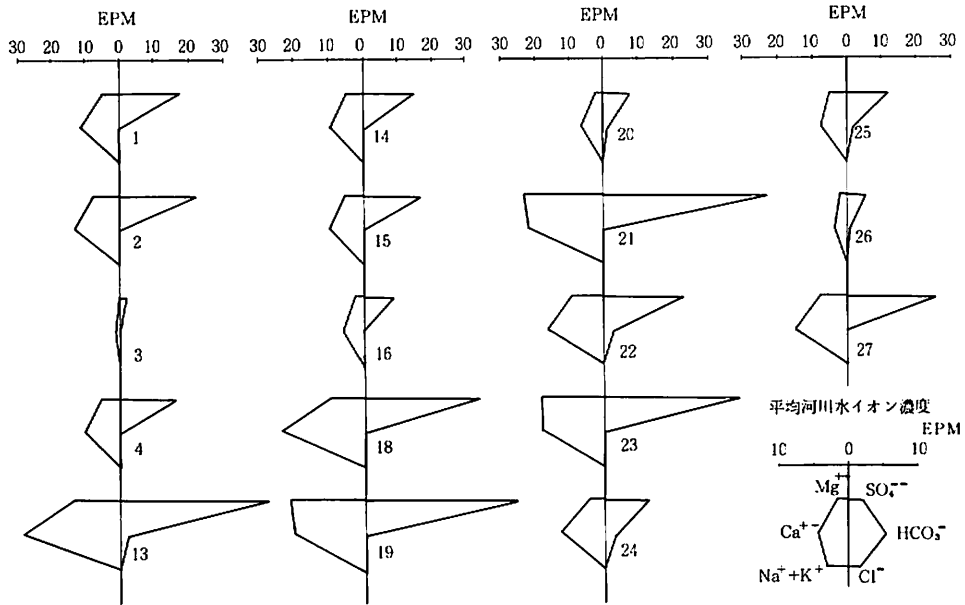


図-6 各イオン当量濃度による水質ヘキサダイアグラム
 Fig. 6 Hexadiagram expression of major ion constituents of spring water samples.

左側に陽イオンを、右側に陰イオンを、図上では当量濃度でプロットし各点を結んである。この図より次のような特徴がみられよう。①平均河川水のイオン濃度と比較し、金山沢の湧水は、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} の濃度が非常に高く、これはこの地域が硫酸型の風化を受けている結果として解釈できる。② HCO_3^- は、含有するものと含有しないものとに大別でき、これは採水場所を大きく特徴づけている。特に右岸（下流に向って）の崖錐堆積物から供給されている湧水には濃度が高くなっている。③ Cl^- は各試料水ともほぼ0.03EPMを示し、通常の雨水中の濃度に相当し、滞水層の影響を受けていないと考えられる。以上のようにヘキサダイアグラムは各水質組成の差異を一目で判断できる利点を有しているが、湧水相互間の関係を知ることは困難である。そこでこれらのイオン濃度のうち、この地域を特徴づける Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} イオン3種を選び、 Mg^{2+} を10EPMに規格化した値をもとに、ユークリッド2乗距離による群平均法を用いたクラスター分析法（田中ら、1984）を、パーソナルコンピュータを用いて適用してみた。図-7に、得られた結果から作製したデンドログラム（樹形図）を示す。このクラスター分析結果と HCO_3^- イオンの有無（図-7の試料のうち丸印付きのものが HCO_3^- を含む試料水である）をもとに、以下の6群に湧水进行分类することができた。I群（19・21・23）、II群（20・24）、III群（1・3・16・18）、IV群（22・26）、V群（13・14）、VI群（2・4・15）である。湧水25はI群とIV群両方に関連しており、27はいずれの分類にも当てはめることができないものであった。

図-5のプロットから誤差に関する表示を除去し、クラスター分析からの6群それぞれを、大まかに直線で関係づけた結果を図-8に示す。図上で各群に属するもの間では、大むねT濃度の低い湧水ほど、溶存陽イオン濃度が高い値を示しており、このことから古い水ほど塩濃度が高いという相関関係をあらためて確認できた。IV群を除いて、各群とも試料水3と結ぶ直線として図示できることから、各群中での最も古い湧水、すなわち13、20、21のようなものと、降雨水の流入混合が生じた結果として直線

関係が成立すると解釈することができた。実際には各群のより古い滞水層が、湧水流出の水位レベル以下に存在する可能性も充分考えられる。また相関直線の勾配について大きな差異を示すⅠ群とⅢ群では、前者が関係している滞水層は、比較的溶解しやすい地層より構成されているのに比して、後者は溶解しがたい地層を滞水層に持つと予想することができる。これらの事項を地形図として図-1に戻って考察してみると、Ⅰ群は右岸に、Ⅲ群は左岸に(ともに下流に向かって)属しており、ここでの予想結果と矛盾しない。T濃度そのものは、滞水層の滞水時間の尺度を与えるのみならず、滞水層の流れの方向や速度に関した尺度にもなり得るため、誤差の少ないより精度の良い測定が望まれる。今回は一回の採水によるデータのみを使用して結果を論じて来たが、T濃度、イオン濃度とも季節および経年変化を起すものがこれら湧水間にも存在するはずであり、今後それらのデータを加味した解釈の方がより信頼性が増加することは言うまでもない。

我々は、金山沢が土石流頻発地帯であることから、土石流発生前後におけるT濃度およびイオン濃度の変化に注目しており、土石流発生予知と関連づけることを目標の一つと考えている。

2. 電解濃縮による深層地下水のT濃度測定

前章のように、地表面に近い浅層地

下水は降雨降雪や河川水などの表面水の影響を受けており、T濃度が高いことから、低レベル液体シンチレーションカウンターにより直接T濃度測定が可能である。しかしながらより測定精度をあげようとして、表面水の影響の殆んど見られない深層地下水の場合には、直接のT濃度測定は適しておらず、電解濃縮法による濃縮が必須となる。水の電気分解の際の H_2O と HTO の電極表面での挙動の差異により残

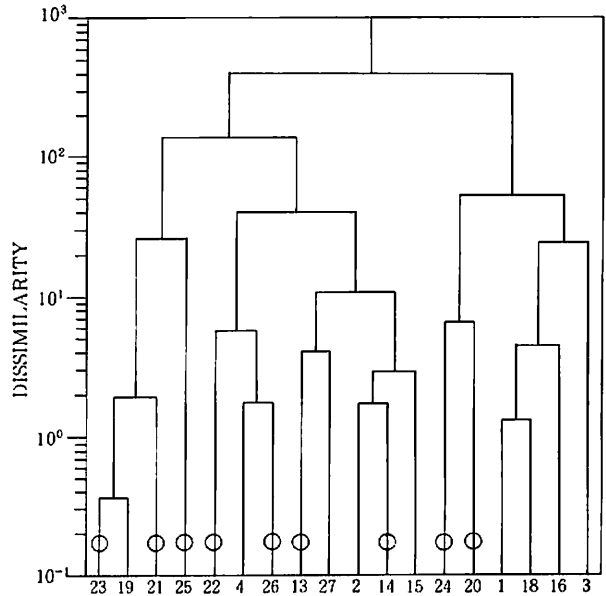


図-7 湧水の各イオン濃度によるクラスター分析法による樹形図

Fig. 7 Dendrogram expression from cluster analysis of spring water based on three kinds of ion-concentrations.

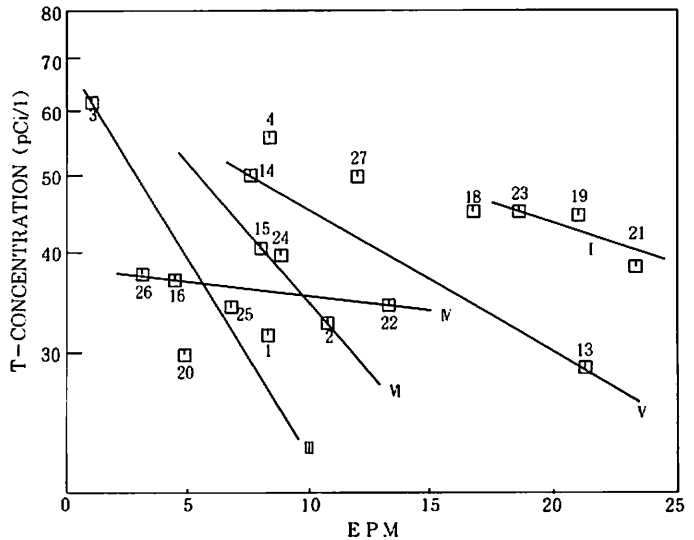
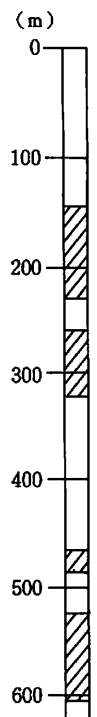


図-8 湧水の全陽イオン当量濃度とT濃度

Fig. 8 Correlation between tritium and total cationic concentrations in some spring water.

液にHTOが濃縮してくる現象を利用し、測定限界以内にまでTを富化させ測定するのが一般的である。電解濃縮の基礎条件の検討を行って来たが、これらについては別に報告する予定にしている。これら予備的な検討をもとに、Ni板よりなる多重電極を使用して、天然ガス井からの深層地下水4種につき電解濃縮法を適用した。蒸留ずみの地下水試料600ml入りの4本のセルと既知T量(1300pCi/l)を含む標準T水600ml入り1本の電解セルを、直列につなぎ、ほぼ6・7日間電解を継続した。この結果、容積比にして約1/10に減容し、標準T水の電解処理前後の計数率変化から、9.18倍にTが濃縮されたことがわかった。

表-1 水溶性天然ガス井より得た深層地下水中のトリチウム濃度
 Table 1 Determination of extremely low level T in water samples collected from underground water in Niigata Area.



Low Tritium Water	Counting rate (cpm)	Counting efficiency (%)	Corrected counting rate (dpm)	Tritium ** concentration (pCi/l)
G ₁ + G ₂	1.97 ± 0.05 (1.99 ± 0.06)	13.7 (13.9)	14.38 ± 0.36 (14.32 ± 0.45)	12.05 ± 5.73 (1.26 ± 0.77)
G ₃	1.95 ± 0.05 (1.94 ± 0.06)	13.8 (14.0)	14.13 ± 0.36 (13.83 ± 0.44)	9.23 ± 5.73 (0.67 ± 0.76)
G _{4-b}	1.87 ± 0.05 (1.86 ± 0.06)	13.9 (14.0)	13.45 ± 0.36 (13.31 ± 0.44)	1.58 ± 5.73 (0.03 ± 0.76)
G ₄₋₁	1.85 ± 0.05 (1.86 ± 0.06)	13.9 (14.0)	13.31 ± 0.3 (13.29 ± 0.44)	0 (0)
Takahagi mineral spring	1.95 ± 0.06	13.5	14.44 ± 0.37	12.73 ± 5.81 (2.4 ± 1.0) ***

* Bracketed values are evaluated after electrolytic enhancement with a factor of about nine.
 ** These values are normalized to that for G₄₋₁ sample as a background water.
 *** This value was obtained by the National Institute of Radiological Sciences.

表-1にここで得た結果をまとめておく。G₁+G₂からG₄₋₁までの深層地下水のデータは、いずれも上の列のものは電解処理なしの試料水からの結果であり、括弧でくくった下の列のデータは電解濃縮を施した試料水からの結果である。第4欄に示した値は、計数効率(第3欄)を計数值(第2欄)に対して補正して得た見掛け上の絶対計数率を示している。低レベル仕様の液体シンチレーション計数にも必ずバックグランド計数が含まれる。従って、試料水自身の真の壊変率は、正味のバックグランド計数率を、第4欄の値からさし引いてから評価できることになる。バックグランド計数率を求めるには、全くTを含まない水(これをバックグランド水と言う)を使用して、試料水と同一条件のもとで計数して求まるものである。我々はこれまで表-1に示した茨城県高萩市より得た鉱泉水(600mの地下より採水)をこのバックグランド水として使用してきた。しかしながら表-1第4欄に見るようにこの鉱泉水は、他の深層地下水のいずれよりも高い見掛けの絶対壊変率を与えており、必ずしも低レベルトリチ

ウム測定用のバックグラウンド水として適していないことがわかった。従ってここでは、一番低い計数率を示し事実上一番深い地層より得た（約600 m）深層地下水G₄₋₁の計数率を、T含有零の時の計数率、すなわちバックグラウンド計数率と見なし、各試料につきT濃度を計算したものを最後の欄に示した。電解濃縮処理を行ったものについても同様にG₄₋₁をバックグラウンド水と考え、濃縮比を考慮した値を、括弧でくくって示してある。電解処理なしの結果では、計数值自身大変小さい（第2欄に示すように実測の計数值は、バックグラウンド値と見なされる 1.85 ± 0.05 cpmに比較して 0.12 cpmしか最高値が上回っていない）ため最終的に得られるT濃度に含まれる不確かさは非常に大きくなる（ここで示した誤差は単なる計数值からの統計誤差のみを示している）。一方、電解濃縮した試料水からの方が一般的には計数率の増大をもたらし得られた結果の信頼性は増大するが、ここで用いた深層地下水のような極低レベル水では、ほとんどその有効性が発揮されていない結果となっている。すなわち濃縮処理後もT計数值は、計数誤差以上の有為の差を示しておらず、濃縮の有無にかかわらず、同じ見掛け上の絶対壊変率を示すことから、これら深層地下水は全くTを含んでいないと考えた方が合理的である。このことは、これら深層地下水の滞水時間がTの半減期の10倍以上であることを示唆しており、300 m以下の滞水層では150年以上に亘って閉鎖系であった古い地下水であると結論づけることが可能である。またこの結果からは、地下注水還元方式による滞水層の影響を確認することはできなかった。G₁+G₂滞水層からの濃縮により求めたT濃度、 1.26 ± 0.77 pCi/lも、誤差が60%と大きいのが、あえてこの結果が真の濃度を示しているとみなすと、簡単な見積りにより、降雨水は約2~3 m/年の速度で地中を垂直に移動して行く結果が導かれ、この値は一般的な表面水の地下浸透速度値と矛盾しない。しかしながらより信頼性の高い値を得るためには、より高度に濃縮した上でのT測定が必要である。

以上の結果から300 m以上の深層地下水は実質的にはTを全く含んでおらず、低レベルT濃度測定の際のバックグラウンド水として適していることが確認できた。水溶性天然ガス井からのこれら深層地下水の採水は容易であり、多量に取得も可能であるので、今後環境水のT濃度測定用バックグラウンド水の供給源としても有用であると考えられる。

IV お わ り に

宇宙線と空気成分との相互作用で生成する天然トリチウムは、そのほとんどが水として存在している。近年低レベルT測定用の機器が進歩したので、これまで関心の薄かった地下水関係の研究分野にも、T濃度を使用した水理学的、水文学的解釈が見られるようになって来た。T濃度を定常的な研究手法として用いるには、まだ相当期間の基礎研究の積み重ねが必要だと思われるが、そう遠い日でない予感もする。Tを使用した地球科学的研究が多方面で行われれば、原子力施設などからの人工トリチウムの漏洩に対する生活環境のモニターとしての役目も果たすこととなり、できるだけ多くの研究者の天然トリチウムを使用した研究への関心と参加を希望したい。

謝 辞

この研究を遂行するに当って、金山沢の試料水の採取および無機イオンの分析定量を手伝って頂いた新潟大学農学部学生、白田卓広氏と菅原 修氏に、また天然ガス井からの地下水採取に際しては、東邦天

然ガスK Kの池田一夫部長に大変御世話になり感謝する次第である。またT測定に当って特別の配慮を頂いた新潟県公害研究所放射線監視センターの殿内重政氏ならびに研究員の方々にも、深く感謝の意を表す。更にTの電解濃縮法に関しては、大阪薬科大学の木村捷二郎助教授および放射線医学研究所の井上義和氏に教えて頂くところが多くあった。ここに深謝の意を表する次第である。

なお本研究の研究費は、文部省科学研究費、エネルギー特別研究（核融合）(1)“時間的・局地的にみたトリチウムの動態と化学形の研究（分担者として58～60年度参加）”（研究代表者・阪上正信）および自然災害特別研究(2)（昭和60年度）“トリチウム循環による地すべり地の危険度の研究”（研究代表者・青木 滋）に依った。

関係者の御厚意に謝意を表する次第である。

文 献

- 橋本哲夫・樋口 靖・佐藤 修・青木 滋・殿内重政・外林 武（1984）：液体シンチレーション法による大気中および降水中のトリチウム濃度測定。新潟大災害研年報，6，73-82。
- HASHIMOTO, T.・SATO, K.・AOYAGI, M.（1985）：Simple collection and direct alpha-spectrometric determination of Pb-214 and Bi-214 in natural water. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 92, 407-414.
- KIGOSHI, K.（1971）：Alpha-recoil thorium-234: Dissolution into water and the U-234/U-238 disequilibrium in nature. *Science*, 173, 47-48.
- 近藤裕一・佐々木将博・木村捷二郎（1984）：多重電極セルによるトリチウムの濃縮と環境水中トリチウムの定量への適用。 *Radioisotopes*, 33, 357-362.
- LEVINSON, A. A.・COETZEE, G. L.（1978）：Implications of disequilibrium in exploration for uranium ores in the surficial environment using radiometric techniques—A Review. *Minerals Sci. Engng.*, 10, 18-27.
- 佐藤 修（1981）：地すべり地の陸水の水質1，虫亀，高倉地すべり。新潟大災害研年報，3，47-58。
- ・青木 滋・鈴木幸治（1983）：虫亀地すべり地の地下水のアニオン起源。同上，5，33-42。
- ・青木 滋・矢沢茂伸・鈴木幸治（1984）：虫亀地すべり地周辺の湧水の水質—地すべり地の陸水の水質4—。同上，6，63-72。
- 田中 豊・垂水共之・脳本和昌（1984）：パソコン統計解析ハンドブックⅡ多変量解析編。共立出版。
- 山本荘毅（1983）：地下水調査法。古今書院。