岩盤地下水の水質・同位体組成調査* (1)

本島 勲**

Investigations on Water Quality and Isotopic Composition of Ground Water in Bedrock (I)

Isao MOTOZIMA

The Water Quality and isotopic composition on T, ^{222}Rn , D and ^{18}O of ground water discharge in the adit for power station were investigated.

Main obtained results are summarized as follows:

- 1) Investigation on the quality of ground water shows that the ground water is intermixed by comparable amount of surface water.
- 2) Investigation on the isotopic composition of ground water also shows the same result as inferred from water quality.
- 3) It is expected that the characteristics of origin and intermixed surface water are cleared by detailed investigations on T, ^{222}Rn , D and ^{18}O isotopic composition of ground water discharge.

I はじめに

地下水の挙動は気象、地形、地質要素など于一体化したもので、特に岩盤内の地下水は地質要素に大きく支配される。岩盤内の地下水問題を考える場合、こうした要素を考慮し流れの系全体としてその挙動をとらえることが重要である。

しかるに、従来、岩盤内の地下水調査に利用されてきたルジオン試験、地下水圧試験、またはトレー

サー試験などでは、地下水の流れの系内のほんの一部を点または線で知るに過ぎない。さらに、地下水の流れをダルシイ流として説明しているが、実際の岩盤内の地下水は岩盤の節理などに依存する透水性の相対的に大きな個所を流動し、特に岩盤の透水性が比較的小さい場合には近傍に高い水圧を有する地下水が存在していてもポテンシャルをもった地下水を確認できない場合があるなど、ダルシイ流のみでは説明が困難な場合が多い (Motozima, *et al.*, 1981)。このように自然という複雑さの中で、岩盤内の地下水の場合、従来の調査法のみでは地下水の賦存状態とその挙動を流れの系全体として把握するには不十分といわざるを得ない。深部岩盤内の地下

* 日本地下水学会昭和57年度秋季講演会および昭和58年度春季講演会に概要発表

** 電力中央研究所 Central Research Institute of Electric Power Industry

水については一層困難であろう。

一方、地下水の流れは一般に他の循環水に比べ極めておそく、地下での岩石や土壌との接触時間が非常に長い。このため、地下水の化学組成は地下水の存在している地質と密接な関係にあり、地下水の水質は地質と地下水環境を反映し、地下水の賦存状態や流動状態を知る重要な資料となる。さらに、地下水に含まれる放射性同位体と安定同位体に注目してみると、放射性同位体の崩壊現象は温度や圧力に関係なく時間のみの関数に依存するため、地下水の涵養源や年代などを定量的に求めることが期待できる。

本研究は、こうした地下水の水質および同位体を利用して岩盤内の地下水の賦存状態とその挙動の流れの系全体として把握し解明しようとするもので、本報告は、そのケーススタディとして地下発電所の調査坑における湧水を対象にした水質および同位体組成調査結果をまとめた第一報である。

II 調査概要

1 調査箇所と地質概要

調査箇所は、岐阜県下木曽川水系根尾川の上流に位置する揚水式発電所の予定地点である。当発電所は、地表面下350～400m、水平約1,000mの山体深部に計画されており、調査のための横坑が根尾川の左岸に全長約1,200m掘削されている。この調査坑に湧出している地下水を調査対象とした。

木曽川水系根尾川は、岐阜県と福井県との県境を東西に走る越美山脈に源を発する。

地下発電所の予定されている付近の根尾川周辺の地質は砂岩を主体とし、粘板岩を挟在する左門岳累層および流紋岩からなっており、地質年代的には、時代未詳中生代とされている。

地下発電所の予定されている位置に掘削されている調査坑の地質は、坑口より500m付近で左門岳累層の砂岩から流紋岩に変化している。流紋岩の中で

は大規模な破碎帯は認められず岩質は堅硬であるが、比較的節理が発達しており可成りの地下水をともなう。

岩盤の透水性は、全体としての単純平均は10.9Lugeon (標準偏差 $\sigma = 12.5$ Lugeon) であり、地表面下350～400mの岩盤としては可成り大きな値を示している。また、坑内に削孔されたボーリング孔での一部に30kg/cm²を超える高い水圧を有する地下水が存在するが、全体としては調査坑およびボーリング孔によるドレーン効果により比較的低い水圧(1～2kg/cm²)となっている。

図-1に全湧水量の経時変化を示した。坑内湧水は、積雪期である11月から翌年2月に湧水量(Q: 50～60 l/s)となり、融雪、梅雨期から夏季にかけての4～7月に豊水量(Q: 100～110 l/s)となる。

cm)

2 採水時期、位置および分析項目

採水は次に示す時期に2回実施した。

第1回目：1981年11月5日

第2回目：1982年11月25日

この両採水時期は図-1に示すように、坑内湧水の湧水初期に当る。

採水位置は図-2に示す坑内湧水：9ヶ所、地表水(渓流水)：2ヶ所、計11ヶ所である。この内、No. 1は砂岩中、No. 2～9は流紋岩中の湧水である。また、No. 2は発電所予定位置よりは可成り坑口側に位置しており、坑内ボーリングによるドレーン効果の影響はほとんど受けていないものと考えられる。No. 10、11は渓流水である。

分析項目は以下のとおりである。

水質	水温、pH、電導度 Na ⁺ 、K ⁺ 、Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ 、 Cl ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 、HCO ₃ ⁻ 、 SiO ₂
同位体	²²² Rn、 ³ H(T)、D、 ¹⁸ O
その他	湧水量

図-1 湧水量の経時変化.

Fig. 1 Variations of the ground water discharge.

図-2 採水位置.

Fig. 2 Sampling points.

Ⅲ 地下水の水質

水質分析結果を表-1に示す。同表をもとに地下水の水質についてその特徴を以下に検討する。

1 化学組成

水質キー・ダイアグラムおよび水質パターン・ダイアグラムは図-3、4のとおりである。

坑内湧水は水質キー・ダイアグラムの第一領域に位置しその化学組成は $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (アルカリ土類重碳酸塩) 型であることを示している。全体として第一領域のほぼ中央に位置しているが、No. 1は $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ の優勢側に No. 2は $\text{K}^+ + \text{Mg}^{2+}$ の優勢側にそれぞれ位置することを特徴とし、両者の化学組成は他の湧水とや、異なることを示している。また、渓流水も同じ第一領域に位置するが、や、 $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$ の優勢側に位置している。

水質パターン・ダイアグラムでは坑内湧水の内 No. 1、2の化学組成が他と異なることがよく分る。しかし、各組成成分の濃度を見ると No. 1の陽イオンが $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ \gg \text{K}^+$ 、陰イオンが $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ である他は渓流水をも含めてすべて陽イオンは $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} \gg \text{K}^+$ 、陰イオンは $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ の関係にあり、陰イオンは No. 1を含めすべて同一の関係にある。

一方、総イオン濃度をみると、坑内湧水は全体として1.5～4.5epmである。No. 1、2およびNo. 6～9は3.0～4.5epm、No. 3～5は1.5～2.5epmであるが、前者の内 No. 1、2は相対的にや、高く、総イオン濃度は各湧水によりや、異った値を示している。また、渓流水の総イオン濃度は坑内湧水よりは低く1.0epm程度である。電気伝導度は坑内湧水が50～200 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 、渓流水は40 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 程度である。坑内湧水の電気伝導度についてみると、総イオン濃度と同様な関係を示している。

さらに、水温は坑内湧水全体として12℃前後であ

るが、No. 2は16℃程度でや、高い。渓流水は気温の影響を当然受けているとみられるが、気温よりは比較的高い値を示している。

また、pH 値は坑内湧水全体として7.0～7.4であるが、No. 2は相対的にや、高い。渓流水は6.9程度で坑内湧水よりはや、低い。

2 化学組成成分相関係数マトリックス

坑内湧水の各組成成分値間の相関係数を求め表-2に相関マトリックスをまとめた。同表の内、表-2-1は化学組成をや、異にする No. 1、2を除外したもの、表-2-2はすべての湧水を対象としたものである。

表-2-1では、各化学組成成分値間の相関係数は Cl^- との相関を除くと他はすべて非常に高い正相関を示し、 Cl^- を除くいずれの組成成分が増加しても他の組成成分は一義的に増加することを示している。このことは、No. 1、2を除く坑内湧水は CO_2 に豊む地下水が岩石に作用し Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} などを溶出させ CO_2 は HCO_3^- に変化する岩石—水相互作用 (三木・吉沢、1979) による化学組成変化が支配的であり、短時間で浸透した地表水など比較的新しい地下水が可成りの量混入していることを示唆しているものと考えられる。この No. 1、2を除く湧水個所は、前述のように透水性が高く調査坑およびボウリング孔によるドレーン効果によって地下水圧は低下しており比較的新しい地下水が混入しやすい条件となっている。

一方、すべての湧水を対象とした表-2-2の相関係数は全体として表-2-1よりは小さい。しかし、 Cl^- との相関を除けば表-2-1と同様にすべて正相関である。このことは、No. 1、2についてもその化学組成は岩石—水相互作用による地下水中の化学組成変化が支配的であると考えてよいことを示しているものと思われる。

表-1-1 水質分析結果(1981. 11)

Table 1-1 Result of chemical analyses(1981. 11)

採 No	水 位 置 位 置	氣 溫 T	水 溫 Tw	pH	電導度 EC	湧水量 Q
		(℃)	(℃)		($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(ℓ/s)
1	TD 160 m	1 2. 9	1 2. 2	7. 2	1 3 0	0. 0 7 0
2	TD 585 m	1 2. 8	1 6. 2	7. 4	1 8 0	0. 3 0
3	TD 865 m	1 2. 4	1 1. 3	7. 1	6 0	0. 0 4 6
4	Na 13 孔 (水平)	1 2. 3	1 1. 9	7. 1	8 4	0. 4 7
5	Na 12 孔 (")	1 3. 6	1 3. 2	7. 0	8 4	2. 3 4
6	Na 16 孔 (")	1 2. 3	1 2. 8	7. 2	1 4 0	6. 6 4
7	Na 7 孔 (")	1 1. 8	1 2. 2	7. 2	1 2 8	0. 2 0
8	Na 2 孔 (下向)	1 2. 0	1 1. 9	7. 2	1 2 3	1. 2 0
9	Na 15 孔 (水平)	1 2. 2	1 1. 2	7. 2	1 0 5	6. 1 0
10	上 流 沢	8. 9	1 0. 9	6. 9	3 9	—
11	廻り谷沢	8. 6	1 0. 5	7. 1	3 0	—

表-1-2 水質分析結果(1982. 11)

Table 1-2 Result of chemical analyses(1982. 11)

採 No	水 位 置 位 置	氣 溫 T	水 溫 Tw	pH	電導度 EC	湧水量 Q
		(℃)	(℃)		($\mu\text{s}/\text{cm}$)	(ℓ/s)
1	TD 160 m	1 3. 6	1 2. 0	7. 2	1 3 8	0. 0 4 2
2	TD 585 m	1 2. 8	1 5. 8	7. 3	1 8 1	0. 2 8
3	TD 865 m	1 2. 4	1 0. 9	7. 1	5 8	0. 0 4 3
4	Na 13 孔 (水平)	1 2. 3	1 1. 7	7. 2	9 0	0. 6 4
5	Na 12 孔 (")	1 4. 1	1 2. 9	7. 2	8 6	2. 3 5
6	Na 16 孔 (")	1 1. 8	1 2. 6	7. 2	1 3 1	4. 5 0
7	Na 7 孔 (")	1 2. 5	1 1. 9	7. 2	1 3 0	0. 1 6
8	Na 2 孔 (下向)	1 3. 4	1 1. 6	7. 4	1 2 4	1. 2 7
9	Na 15 孔 (水平)	1 2. 6	1 0. 8	7. 2	1 0 7	5. 7 0
10	上 流 沢	3. 3	8. 9	6. 9	4 9	—
11	廻り谷沢	3. 4	8. 7	6. 9	3 9	—

表-1-3 水質分析結果(1981. 11)

Table-1-3 Result of chemical analyses(1981. 11)

		単位: ppm ()内は当量: epm										
探 井 No	水 位 位 置	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	ΣCa	ΣAn	Σion
1	TD 160 m	(0.161)	(0.02)	(1.218)	(0.461)	(0.042)	(0.289)	(1.580)		(1.860)	(1.911)	(3.711)
		3.7	0.8	24.4	5.6	1.5	13.9	96.4	8.8			
		(0.726)	(0.02)	(1.597)	(0.115)	(0.056)	(0.187)	(2.032)		(2.458)	(2.275)	(4.733)
2	TD 585 m	16.7	0.8	32.0	1.4	2.0	9.0	124.0	26.1			
		(0.113)	(0.008)	(0.544)	(0.058)	(0.037)	(0.119)	(0.587)		(0.723)	(0.743)	(1.466)
		2.6	0.3	10.9	0.7	1.3	5.7	35.8	9.8			
3	TD 865 m	(0.17)	(0.01)	(0.873)	(0.066)	(0.039)	(0.142)	(0.96)		(1.119)	(1.141)	(2.260)
		3.9	0.4	17.5	0.8	1.4	6.8	58.6	11.1			
		(0.191)	(0.01)	(0.813)	(0.082)	(0.039)	(0.131)	(0.933)		(1.096)	(1.103)	(2.199)
5	No 12 孔 (〃)	4.4	0.4	16.3	1.0	1.4	6.3	56.9	11.6			
		(0.23)	(0.015)	(1.617)	(0.082)	(0.042)	(0.171)	(1.770)		(1.944)	(1.983)	(3.927)
		5.3	0.6	32.4	1.0	1.5	8.2	108.0	13.5			
6	No 16 孔 (〃)	(0.248)	(0.013)	(1.437)	(0.099)	(0.039)	(0.202)	(1.603)		(1.797)	(1.844)	(3.641)
		5.7	0.5	28.8	1.2	1.4	9.7	97.8	12.2			
		(0.217)	(0.013)	(1.432)	(0.09)	(0.042)	(0.162)	(1.591)		(1.752)	(1.795)	(3.547)
8	No 2 孔 (下向)	5.0	0.5	28.7	1.1	1.5	7.8	97.1	12.6			
		(0.178)	(0.013)	(1.228)	(0.074)	(0.045)	(0.117)	(1.339)		(0.493)	(1.501)	(2.994)
		4.1	0.5	24.6	0.9	1.6	5.6	81.7	11.6			
9	No 15 孔 (水平)	(0.087)	(0.008)	(0.384)	(0.049)	(0.039)	(0.110)	(0.385)		(0.528)	(0.534)	(1.062)
		2.1	0.3	7.7	0.6	1.4	5.3	23.5	8.8			
		(0.100)	(0.008)	(0.304)	(0.033)	(0.039)	(0.054)	(0.320)		(0.445)	(0.413)	(0.858)
11	廻り谷沢	2.3	0.3	6.1	0.4	1.4	2.6	19.5	9.0			

表-1-4 水質分析結果(1982. 11)

Table-1-4 Result of chemical analyses(1982. 11)

		単位: ppm ()内は当量: epm										
探 井 No	水 位 位 置	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	ΣCa	ΣAn	Σion
1	TD160 m	(0.139)	(0.015)	(1.168)	(0.650)	(0.042)	(0.281)	(1.537)		(1.972)	(1.860)	(3.832)
		3.2	0.6	23.4	7.9	1.5	13.5	93.8	8.4			
		(0.678)	(0.013)	(1.362)	(0.148)	(0.059)	(0.190)	(1.980)		(2.201)	(2.229)	(4.430)
2	TD585 m	15.6	0.5	27.3	1.8	2.1	9.1	120.8	25.3			
		(0.109)	(0.008)	(0.574)	(0.066)	(0.045)	(0.127)	(0.593)		(0.757)	(0.765)	(1.522)
		2.5	0.3	11.5	0.8	1.6	6.1	36.2	9.9			
3	TD865 m	(0.174)	(0.01)	(0.928)	(0.082)	(0.039)	(0.160)	(1.026)		(1.194)	(1.225)	(2.419)
		4.0	0.4	18.6	1.0	1.4	0.7	62.6	11.4			
		(0.191)	(0.01)	(0.988)	(0.099)	(0.039)	(0.135)	(0.933)		(1.088)	(1.078)	(2.166)
5	No 12 孔 (〃)	4.4	0.4	15.8	1.2	1.4	6.5	56.9	11.4			
		(0.23)	(0.013)	(1.667)	(0.082)	(0.045)	(0.183)	(1.747)		(1.992)	(1.975)	(3.967)
		5.3	0.5	33.4	1.0	1.8	8.8	106.6	13.5			
6	No 16 孔 (〃)	(0.252)	(0.013)	(1.447)	(0.123)	(0.042)	(0.237)	(1.600)		(1.835)	(1.879)	(3.714)
		5.8	0.5	29.0	1.5	1.5	11.4	97.6	12.2			
		(0.204)	(0.013)	(1.447)	(0.09)	(0.042)	(0.171)	(1.537)		(1.754)	(1.750)	(3.504)
8	No 2 孔 (下向)	4.7	0.5	29.0	1.1	1.5	8.2	93.8	13.1			
		(0.178)	(0.013)	(1.263)	(0.074)	(0.045)	(0.140)	(1.329)		(1.528)	(1.514)	(3.042)
		4.1	0.5	25.3	0.9	1.8	6.7	81.1	-			
9	No 15 孔 (水平)	(0.100)	(0.013)	(0.449)	(0.066)	(0.076)	(0.117)	(0.426)		(0.628)	(0.619)	(1.247)
		2.3	0.5	9.0	0.8	2.7	5.6	26.0	-			
		(0.122)	(0.009)	(0.309)	(0.041)	(0.065)	(0.079)	(0.351)		(0.482)	(0.495)	(0.977)
11	廻り谷沢	2.8	0.4	6.2	0.5	2.3	3.8	21.4	-

図-3 水質キー・ダイヤグラム。

Fig. 3 Key diagrams for water quality.

図-4 水質パターン・ダイヤグラム。

Fig. 4 Pattern diagrams for water quality.

表-2-1 化学組成成分相関係数マトリックス(除 No. 1、2)

Table-2-1 The correlation coefficient matrix on chemical composition of the groundwater discharge. (Except No. 1, 2 of discharge)

	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	SiO_2	EC
Na^+	1.000	0.731	0.916	0.855	-0.340	0.850	0.939	0.883	0.810
K^+		1.000	0.822	0.598	0.221	0.621	0.811	0.579	0.949
Ca^{2+}			1.000	0.749	-0.303	0.847	0.997	0.921	0.989
Mg^{2+}				1.000	0.263	0.902	0.773	0.719	0.817
Cl^-					1.000	-0.274	-0.330	-0.602	-0.321
SO_4^{2-}						1.000	0.829	0.742	0.857
HCO_3^-							1.000	0.930	0.889
SiO_2								1.000	0.859

注) 除 No 1, 2

表-2-2 化学組成成分相関係数マトリックス (全資料)

Table-2-2 The correlation coefficient matrix on chemical composition of the groundwater discharge. (All samples)

	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	EC
Na ⁺	1.000	0.522	0.551	0.069	0.287	0.297	0.677	0.978	0.758
K ⁺		1.000	0.401	0.533	0.233	0.722	0.763	0.437	0.771
Ca ²⁺			1.000	0.232	-0.388	0.669	0.971	0.585	0.921
Mg ²⁺				1.000	-0.093	0.782	0.349	-0.095	0.391
Cl ⁻					1.000	-0.153	-0.084	0.172	-0.008
SO ₄ ²⁻						1.000	0.734	0.227	0.745
HCO ₃ ⁻							1.000	0.684	0.985
SiO ₂								1.000	0.621

Ⅳ 地下水の同位体組成

同位体分析結果を表3に示す。同表をもとに地下水の同位体組成の特徴を以下に検討する。

1 ラドン (²²²Rn)

坑内湧水の²²²Rn濃度は全体として(1~25)×10⁻¹⁰Ci/lの値を示すが、大半は(20~25)×10⁻¹⁰Ci/lでNo. 1, 5が相対的に小さい。溪流水の²²²Rn濃度は極めて小さい。

図-5は1981年と82年との関係を示すものであるが、82年は81年に比べその濃度は減少傾向にあることが分る。

一般に、²²²Rnの基本的親核種である²³⁸Uは地層ごとに固有な含有量を持ち、その娘核種である²²⁶Raは地層の構成粒子とその表面への吸着沈澱物の中に含まれている。²²²Rnはこの²²⁶Raの放射性崩壊により生ずるものであるが、²²²Rnの一部は周辺の地下水へ移行する(建設産業調査会、1979)。この場合、地下水の流速が一定ならば、この移行量と放射性崩壊量とは平衡し²²²Rn濃度は一定になるで

あろうが、流速が変化すると²²²Rnの半減期(3,829日)が非常に小さいことを反映し変化するものと考えられる。²²²Rn濃度の異なる地下水の混入などがなく地下水の流速のみが速くなれば、²²²Rn濃度は大きくなるであろう。

図-6は²²²Rn濃度と坑内の湧水量との変化の関係をまとめたものであるが、横軸に湧水量の1981年と82年との比、縦軸に²²²Rn濃度の1981年と82年との比を示してある。資料数が少なく信頼性にや、疑問はあるが、両者は比較的高い負相関(-0.634)を示している。湧水量の増加は地下水流速の増大を伴い、²²²Rn濃度と湧水量との関係は正相関を示すものと思われたが、図-6は逆傾向を示している。このことは、坑内湧水には比較的短時間で、浸透した地表水など²²²Rn濃度の小さな地下水の混入があること、また、1981年と82年とではその混入の割合が変化していることを示唆しているものと考えられる。

2 トリチウム(T)

坑内湧水のT濃度はNo. 2を除いて10~20 T. Uの値を示す。No. 2は1981年:1.8 T. U、82年:5.4

表-3-1 同位体組成分析結果(1981. 11)

Table-3-1 Result of isotopic composition analyses (1981. 11)

採 No	水 位 置 位 置	ラドン R n	水 素 δD	酸 素 $\delta^{18}O$	トリチウム T
		($\times 10 \text{ Ci}/\ell$)	(‰)	(‰)	(TU)
1	TD 160 m	0.8	- 5 1.7	- 8.4	1 4.9 $\pm$ 1.8
2	TD 585 m	1 9.5	- 5 4.4	- 8.7	1.8 $\pm$ 0.3
3	TD 865 m	6.4	- 5 4.3	- 8.8	1 2.6 $\pm$ 1.6
4	Na 13 孔 (水平)	2 4.8	- 5 5.5	- 8.7	1 4.4 $\pm$ 1.8
5	Na 12 孔 (")	1 3.6	- 5 6.8	- 9.0	1 4.2 $\pm$ 1.8
6	Na 16 孔 (")	2 1.7	- 5 4.1	- 8.4	1 6.1 $\pm$ 2.0
7	Na 7 孔 (")	2 5.4	- 5 3.9	- 8.7	1 3.4 $\pm$ 1.7
8	Na 2 孔 (下向)	2 3.6	- 5 4.3	- 8.6	1 5.7 $\pm$ 1.9
9	Na 15 孔 (水平)	2 3.0	- 5 3.8	- 8.7	1 7.9 $\pm$ 2.2
10	上 流 沢	0.2	- 5 3.0	- 8.2	1 5.2 $\pm$ 1.9
11	廻り谷沢	0.3	- 5 5.1	- 8.8	1 1.4 $\pm$ 1.5

表-3-2 同位体組成分析結果(1982. 11)

Table-3-2 Result of isotopic composition analyses (1982. 11)

採 No	水 位 置 位 置	ラドン R n	水 素 δD	酸 素 $\delta^{18}O$	トリチウム T
		($\times 10 \text{ Ci}/\ell$)	(‰)	(‰)	(TU)
1	TD 160 m	0.7	- 5 2.0	- 8.4	1 8.3 $\pm$ 2.1
2	TD 585 m	1 8.6	-	-	5.4 $\pm$ 0.7
3	TD 865 m	5.1	- 5 7.2	- 8.9	1 6.3 $\pm$ 1.9
4	Na 13 孔 (水平)	2 2.0	-	-	1 6.5 $\pm$ 1.9
5	Na 12 孔 (")	1 1.3	- 5 8.0	- 9.2	1 6.2 $\pm$ 1.9
6	Na 16 孔 (")	1 8.0	- 5 3.9	- 8.6	1 4.7 $\pm$ 1.8
7	Na 7 孔 (")	2 5.7	-	-	1 5.1 $\pm$ 1.8
8	Na 2 孔 (下向)	2 3.6	-	-	1 7.2 $\pm$ 2.0
9	Na 15 孔 (水平)	2 2.3	- 5 6.2	- 8.7	2 0.2 $\pm$ 2.4
10	上 流 沢	0.0 2	- 4 9.8	- 7.8	1 2.8 $\pm$ 1.5
11	廻り谷沢	0	- 5 3.7	- 8.3	1 5.9 $\pm$ 1.9

図-5 ラドン (^{222}Rn) の変化。

Fig. 5 Variation of ^{222}Rn composition.

図-6 ラドン (^{222}Rn) と湧水量との関係。

Fig. 6 Relation between ^{222}Rn composition and the ground water discharge.

T. U で他の湧水に比べ著しく小さい。渓流水を T 濃度も 10~20 T. U の値を示し、No. 2 を除く坑内湧水と同程度で顕著な差は認められない。

一般に、降水中の T 濃度は 1953 年までは約 10 T. U の天然レベルに保たれていたが、1953 年以降、大気で行なわれた熱核爆発実験によって大量の人工トリチウムが、とくに成層圏において大気中に放出され、その濃度は急増した。その後、降水中の T

濃度は 1963 年にピークに達し以後は指数関数的に減少し現在ほぼ天然レベルに戻っている (榎根・田中・嶋田、1980)。

前述したように No. 2 を除く坑内湧水と渓流水の T 濃度がほぼ同程度の 10~20 T. U の値を示しているが、前者は降水中の T 濃度が天然レベルより増大していた時期 (1953 年以降) の降水を起源とし地下水としての流動に伴い放射性崩壊によりその濃度が減少し現在に至っていること、後者はほぼ天然のレベルに戻った最近の降水であることをそれぞれ示しているものと考えられる。

図-7 は 1981 年と 82 年との関係を示すものであるが、82 年は 81 年に比べその濃度は増加傾向にあることが分る。

図-7 トリチウム (T) の変化。

Fig. 7 Variation of T composition.

図-8 は T 濃度と坑内の湧水量との変化の関係をまとめたものであり、横軸に湧水量の 1981 年と 82 年との比、縦軸に T 濃度の 1981 年と 82 年との比を示してある。同図は坑内湧水の大半の T 濃度は湧水量に関係なく 10~20% 増加していることを示している。ことことは坑内湧水の大半は降水中の T 濃度が増加しつつあった時期 (1953~1963) の降水を起源としていることを示唆するものと考えられる。この

場合、比較的短時間で浸透した地表水などの混入を受けてもその T 濃度が湧水とはほぼ同程度であるならば坑内湧水の T 濃度はほとんど影響を受けないであろう。

図-8 トリチウム(T)と湧水量との関係。

Fig. 8 Relation between T composition and the ground water discharge.

3 水素・酸素同位体(δD 、 $\delta^{18}O$)

坑内湧水の δD 値は $-50 \sim -60\text{‰}$ 、 $\delta^{18}O$ 値は $-8.5 \sim -9.5\text{‰}$ の値を示す。溪流水も同程度で顕著な差は認められない。

図-9は δD と $\delta^{18}O$ との関係をまとめたものであるが、同図には1981年(○)、82年(△)両年の値が示してある。同図中の直線 A は Craig(1961)の示した直線($d: \delta D - 8\delta^{18}O = 10.0$)であるが、坑内湧水は1981年、82年ともや、異った直線(破線、 $d: 14.9$)上に位置している。図-9によると坑内湧水の δD 、 $\delta^{18}O$ 値は、1981年に対し82年は減少傾向にあり、溪流水は増大傾向にあること、No. 1と No. 5とでは δD 値で $5 \sim 6\text{‰}$ 、 $\delta^{18}O$ 値で $0.6 \sim 0.8\text{‰}$ の差のあること、また、坑内湧水と溪流水とでは d 値に差がみられることなどが分る。このような要因として、坑内湧水、溪流水の起源である降水の水素・酸素同位体組成に対する温度、雨量、高度効果(早稲田・

図-9 酸素(^{18}O)と水素(D)同位体組成。

Fig. 9 Oxygen-18 and Deuterium isotopic composition of the ground water discharge.

中井、1983)などがあげられるが、今後、詳細な検討が必要である。

V まとめ

調査箇所における地下水の水質、同位体組成の特徴を以下にまとめる。

1. 坑内湧水および溪流水の水質は $Ca(HCO_3)_2$ 型、各組成成分の濃度パターンは $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} \gg K^+$ 、 $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$ の関係を示し、全体としてはほぼ同一の化学組成を有している。しかし、No. 1、2湧水、および溪流水はや、その化学組成を異にする。
2. 坑内湧水の総イオン濃度および電気伝導度はそれぞれ $1.5 \sim 4.5\text{epm}$ 、 $50 \sim 200 \mu\text{s/cm}$ であるが、各湧水によりや、異った値を示しその値は $No. 1, 2 > No. 6 \sim 9 > No. 3 \sim 5$ の関係にある。溪流水は坑内湧水よりは小さく、それぞれ 1.0epm 、 $40 \mu\text{s/cm}$ 程度である。
3. 坑内湧水の水温は全体として 12°C 程度であるが、No. 2はや、高い。溪流水は気温の影響を受けているものとみられるが、気温よりは比較的高い。

4. 坑内湧水の pH は7.0~7.4であるが、No. 2が相対的にやゝ高い。溪流水は坑内湧水よりは小さく6.9程度である。
 5. 坑内湧水の各組成成分値間の相関係数は Cl^- との相関を除いて高い正相関を示し、坑内湧水は岩石・水相互作用による化学組成変化が支配的で短時間で浸透した地表水など比較的新しい地下水が可成り混入していることを示唆しているものと考えられる。
 6. 坑内湧水の ^{222}Rn 濃度は $(1\sim 25) \times 10^{-10} \text{Ci/l}$ で、湧水量の変化に対し負相関を示し、比較的短時間で浸透した地表水などの混入を示唆しているものと考えられる。溪流水の ^{222}Rn 濃度は極めて小さい。
 7. T 濃度は坑内湧水、溪流水とも10~20 T. U の値を示し両者には顕著な差は認められない。坑内湧水の T 濃度は湧水量に関係なく1981年と82年の両年で10~15%の増加を示し、降水の T 濃度が増加しつつあった時期(1953~1963)の降水を起源としていることを示唆しているものと考えられる。
 8. δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 値は降水の温度、雨量、高度効果などを示唆していると考えられるが、今後、詳細な検討を必要としている。
- 以上、調査個所の湧水は降水の T 濃度が増加し

つつあった時期(1953~1963)の降水を起源とし比較的短時間で浸透したと思われる地表水の混入が可成り多いことを示唆されている。今後、引き続き実施した水質、同位体調査結果をも含め詳細な検討により地下水の涵養源、地表水の混入特性などの地下水モデルの解明を試み報告する予定である。

謝 辞

本研究に当っては、名古屋大学理学部 中井信之博士の協力と有益な助言を得たことを記し深く感謝します。

参考文献

- 建設産業調査会(1979)『地下水ハンドブック』、p. 223-387.
梶根 勇・田中 正・嶋田 純(1980)：環境トリチウムで追跡した関東ロー層中の土壌水の移動、地理学評論、53-4、p. 225-237.
三木一美・吉沢 甫(1979)：トンネル湧水の発生形態と水質変動について、土木学会論文報告集、第282号、p. 31-43.
早稲田 周・中井信之(1983)：中部日本・東日本における天然水の同位体組成、地球化学、17、p. 83-91.
Craig, H. (1961): Isotopic variation in meteoric waters. Science, 133, p. 1702.
Motozima, I., Sismada, J., Fujiwara, S., Ohta, K. (1981): Proposal for the groundwater pressure measurement to investigate the groundwater movement in the bedrock, Proceedings of the international Symposium on weak rock. p. 491-496.

(受付：1984年6月14日、受理：1985年4月27日)