

## 蔵王地域の地熱調査井 ZO-1・ZO-3 の花崗岩類 —元素分布から見た花崗岩類の不連続性と破碎帯—

金谷 弘\* 笹田政克\*\*

KANAYA, H. and SASADA, M. (1990) Granitic rocks from the geothermal drillholes of ZO-1 and ZO-3 in the Zao area, northern Honshu—Fracture zones indicated by discontinuity of abundance of elements in rocks—. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 41 (6), p. 341-355.

**Abstract** : The fracture zones in the granitic rocks deeply seated in the geothermal area were evaluated chemically with reference to continuity of abundance of major and trace elements in rocks from drillholes. The analyzed samples are the cores recovered from the geothermal drillholes of ZO-1 and ZO-3, Zao area, northern Honshu. The pre-Tertiary granitic rocks of 604m core from ZO-1 consist of tonalite, granodiorite and granite, and those of the 50m core from ZO-3 granodiorite and granophyre. The several fracture zones are observed in the granitic rocks from both of the holes. The thirteen major elements were analyzed for 30 samples, and major elements Fe and K, and trace elements Rb, Sr, Zr, Th and U were analyzed for 94 samples. The magnetic susceptibility was also measured for the samples chemically analyzed. The abundance of K, Fe, Rb, and Sr changes remarkably at fracture zones between the different facies. The distribution of trace elements of Zr, Th and U may also change at fracture zones. Ca and Sr are considerably depleted in the altered granitic rocks. On the contrary, depletion or enrichment of K, Rb, Zr, Th and U are small in the alteration zone.

Those results indicate that the geochemical logging will be effective for determination of fracture zones in granitic rocks in geothermal drillholes.

### 1. はじめに

わが国のように熱水対流地熱資源の多くが、断層・破碎帯に支配されているような場合には、地下における断層系の発達状態を明らかにすることが、探査の目的の1つとなる。堆積岩が分布する地域では、両側の地層の変位等から、断層の規模が予測できるが、見かけのよく似た岩相が連続する花崗岩中では、破碎帯の規模を議論することは一般に困難とされている。

本報告では、数多くの破碎帯が存在する花崗岩体で、破碎帯の前後で元素の分布にどのような変化が認められるか、連続コアが得られた蔵王地域の地熱調査井の花崗岩類について検討を行った。結論を先に述べると当地域の花崗岩類では、破碎帯を境にして、あるいは破碎帯内において、元素の含有量が変化する場合が多く、破碎帯をはさんで同じ見かけを示す岩石中でも、元素の含有量

に明らかな差が認められる場合があった。このことから、逆にある特定の元素に着目して調査を行えば、花崗岩中でも断層系の予測に役立つものと考えられる。また本報告の結論は、地熱調査井で行われているナチュラル・ガンマスペクトロ・ログの解釈にも、1つの指針を与えるものとなるだろう。

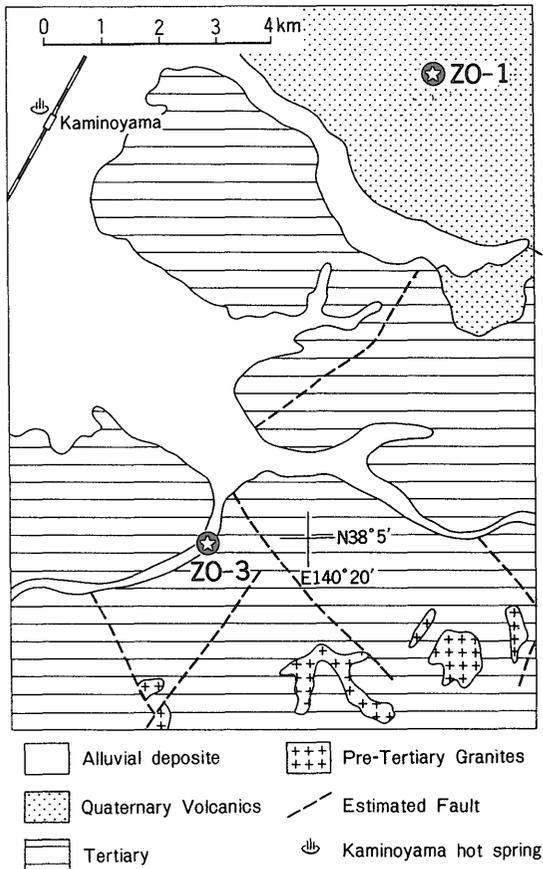
### 2. 地質の概要

ここに報告する ZO-1 坑井および ZO-3 坑井 (以下本文中では坑井を省略) は、昭和五十二年度に地熱開発精密調査の一環として掘削されたものである。掘削地点は山形県蔵王火山の西麓にあたる (日本地熱開発促進センター, 1978)。同地域では蔵王火山の噴出物が地表を覆い、その下位に中新世の火山岩類を主とする地層が分布し、基盤は白亜紀の花崗岩類からなる。

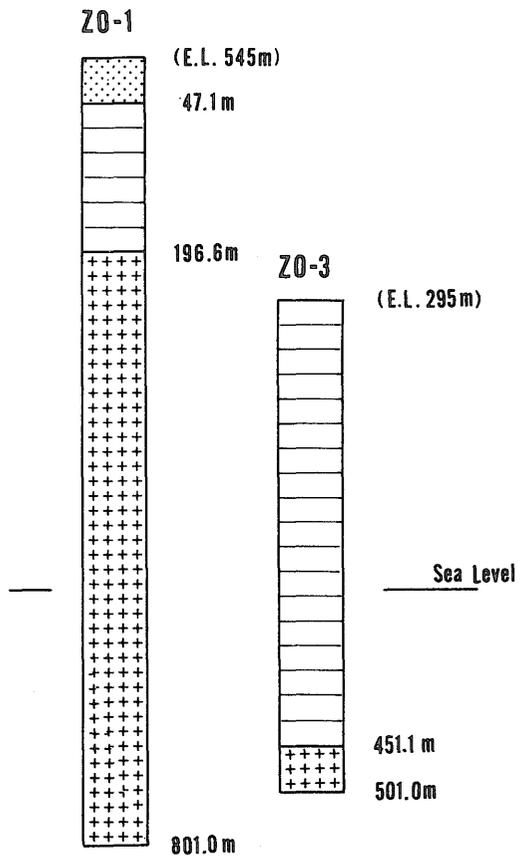
坑井の掘削された地域は、食塩泉を主とする上山温泉かみのやまと、強酸性の温泉が湧出する蔵王温泉の間に位置している (第 1 図)。上山温泉の源泉の分布は、南北に延びる尾

\* 地殻物理部

\*\* 地殻熱部



第 1 図 蔵王地域の地質概略図と ZO-1, ZO-3 坑井の位置  
Fig. 1 Generalized geologic map of Zao area and the location of ZO-1 and ZO-3 drillholes.



第 2 図 ZO-1, ZO-3 坑井の地質柱状 凡例は第 1 図に同じ。  
Fig. 2 Geologic column of ZO-1 and ZO-3 drillholes.  
Symbols are the same as those in Fig. 1.

花沢-楯岡-東根-天童-山形-上山活構造線と関連している (皆川, 1970)。同構造線は、第四紀までその活動が継続しているもので、上山付近では基盤の落差が 300-600 m あり、全体としては東落ちとなっている。一方、蔵王温泉では源泉の分布からみると、温泉の湧出は、N 35°-40° W 方向に延びる断裂構造に支配されているように見える (山形県温泉協会, 1973)。

### 3. ZO-1 坑井

#### 3.1 坑井の概要

本坑井は山形県上市市棚木 (N 38°9.3', E 140° 21.6') でオール・コアで掘削された (第 1, 2 図)。地表から 47.1 m までは、酢川泥流に対比される蔵王火山の噴出物からなり、それ以下 196.6 m までが凝灰質砕屑岩、安山岩質泥流堆積物、変質安山岩および玄武岩質安山岩

からなり、中新世の萱平川層に対比されている。花崗岩類は 196.6 m 以深坑底までの約 600 m の区間にみられ、トータル岩、花崗閃緑岩、花崗岩の 3 岩相に大別される。なお、第三紀層と花崗岩との関係は、境界部分のコアの保存状態が悪いため明瞭でないが、第三紀層中に花崗岩レキが含まれることから不整合の可能性が強い。また坑底 801.0 m の温度は 77.8°C であった (日本地熱資源開発促進センター, 1978)。

#### 3.2 トータル岩

トータル岩は、196.6-430 m の区間で、10 m 前後あるいはそれ以下の厚さで、花崗岩にはさまれて存在するほか、434-507 m の区間でまとまって存在する。いずれの場合も、境界部は破砕帯になっており、花崗岩との貫入関係は確認できない。

主な構成鉱物は、斜長石、石英、黒雲母、角閃石であ

り、それに少量のカリ長石をとまなう。また副成分鉱物としては、褐れん石、アパタイト、ジルコン、モナズ石が認められる。斜長石は一般にコアがアンデシン、リムがオリゴクレスからなり、新鮮な岩石ではコアからリムにむかいアルバイト成分が増加する顕著な累帯構造が認められる。石英の多くは波動消光し、一部にサブグレイン化もみられる。カリ長石は間隙充填状に産し、しばしば斜長石・黒雲母・角閃石の小結晶を多数包有する。またカリ長石のリムには格子状構造がよく発達している。黒雲母は軸色Zが褐色のものが多く、ときおり帯緑褐色を呈する部分もある。角閃石は軸色Zが帯褐緑色の普通角閃石であるが、多くの場合変質して仮像として産する。新鮮な結晶が認められるのは、434-507 mのトータル岩がまとまって分布する区間の中心部にあたる468-488 mの区間のみである。なおトータル岩中には、数cmから10数cmの大きさの主として斜長石・黒雲母・角閃石からなる暗色包有物が認められる。暗色包有物中の角閃石も母岩の角閃石同様に上記の468-488 mの区間以外では仮像としてしか認められない。

### 3.3 花崗閃緑岩

花崗閃緑岩は、512-801 mの区間で認められ、途中610-617 m間に花崗岩をはさむが、他の岩相に比べ、まとまった分布をしている。

主な構成鉱物は、石英、カリ長石、斜長石、黒雲母、角閃石で、副成分として褐れん石、アパタイト、ジルコン、モナズ石を含む。石英は568 m付近でやや斑状を呈する部分があるほかは、斜長石と同じ程度の大きさとなっている。鏡下での特徴はトータル岩の場合と同様で、波動消光およびサブグレイン化が認められる。カリ長石の一部は、1-2 cmの斑晶状の結晶として産する。これはほぼ全区間にわたって認められ、斑晶状の結晶内には、斜長石、石英、黒雲母の小結晶が包有されている場合が多い。また結晶の大きさに関係なくほとんどのカリ長石中に顕著な格子状構造が認められる。斜長石の多くはオリゴクレスのコアおよびリムからなり、弱い累帯構造が認められる。コアにはときおりアンデシン組成の部分も認められる。また本岩相の斜長石ではリムにミルメカイトが発達しており、特に625 m、725 m付近では顕著である。黒雲母は軸色Zが褐色の結晶で、岩石によって細かなブレイクとして岩石全体に散在する場合と、斜長石どうしの間隙を埋めるような形で存在する場合とがある。角閃石はすべて仮像であるが、全区間にわたって認められる。

### 3.4 花崗岩

花崗岩は、240-290 m、296-334 m、340-411 mの区間でまとまった分布をもつほか、トータル岩、花崗閃緑岩

にはさまれて10 m以下の厚さで6ヶ所で認められる。花崗岩はZO-1に産する花崗岩類の中では最も粗粒で、しばしばカリ長石が斑晶状を呈している。

主な構成鉱物は石英、カリ長石、斜長石、黒雲母で、角閃石は仮像としてときおり含まれる。副成分鉱物は上記2岩相と同様で、褐れん石、アパタイト、ジルコン、モナズ石である。石英は、波動消光するものが多く、一部にはサブグレイン化もみられる。カリ長石には格子状構造がよく発達している。斑晶状の結晶中には、石英、斜長石、黒雲母の小結晶が含まれる。斜長石は、変質の著しい部分をのぞくと、ほとんどがオリゴクレスで、累帯構造は弱い。ミルメカイトはよく発達しており、とくに247.5 m、251 m、365 m付近で顕著に認められる。黒雲母は、軸色Zが褐色の小結晶として産する。

### 3.5 アプライト

アプライトは、705.9 mで花崗閃緑岩を貫く小岩脈として認められるきわめて優白質な岩石で、主に石英、カリ長石、斜長石からなり、少量の黒雲母、ザクロ石、電気石をとまなう。

### 3.6 花崗岩類の破砕

すでに述べたようにZO-1では、アプライトを除くと主要3岩相の間には貫入関係は観察されず、すべて破砕帯をはさんだ断層関係となっている。また同一岩相内にも破砕帯は存在しており、坑井コアのそれらの幅は数mから10 m程度の場合が多いが、なかには30 mにおよぶものもある。破砕帯は幅が広い場合、コアからその傾斜を求めるのが困難な場合もあるが、多くは60°以上の高角度の傾斜となっている。

破砕帯中の花崗岩類は、肉眼的に見ると数cmから10数cm大の角れきとそれらの間を埋める基質部からなり、基質部は様々な大きさの花崗岩類の破砕物からできている。また破砕作用が顕著なところでは、黒雲母の結晶が撓曲していることがある。

### 3.7 花崗岩類の変質

本坑井の岩石に認められる変質作用は、大なり小なり破砕帯と関係をもっているが、ここでは、かなり広い範囲にわたって見られる変質作用と局部的なものに分けて述べる。

広い範囲に認められるものとしては、まず苦鉄質鉱物の緑泥石化があげられる。角閃石は前述したように、468-488 mの区間を除いてすべて緑泥石と方解石の集合物へと変質しており、褐れん石もかなりの場所で緑泥石へと変質している。一方黒雲母は上述した2鉱物に比べて変質の程度が弱く、その一部に緑泥石化した部分が認められることがしばしばあるが、角閃石に比べると、き

わめて軽微である。つまり、本坑井の花崗岩類においては、Caを含む苦鉄質鉱物が選択的に変質しているといえる。また緑れん石が変質物としてまったく認められないことも大きな特徴である。

局部的な変質には、方解石脈、カオリン脈の形成およびモンモリロナイト化をともなう変質の3種類のものがありいずれも花崗岩類中の破砕帯に沿って認められることが多い。

方解石脈は花崗岩類中に発達する破砕帯の基質を充填するような形で形成されていることが多く、337m付近ではその発達が特に顕著である。方解石脈が頻りに認められる部分では、前述した苦鉄質鉱物の変質に加えて、長石類の変質が認められ、とくに斜長石のかかなりの部分がセリサイトとアルバイトに変質している。カリ長石は一般にへき開に沿って多少セリサイト化が認められる程度である。また方解石脈の近傍では黒雲母の結晶周縁部の軸色の変化が顕著にみられる。すなわち軸色Zが褐色から緑色へと急激に変化している。

カオリン脈は700-730m付近の花崗閃緑岩中に認められ、この付近の岩石はところどころで脱色している。またこの区間は岩石の破砕も進んでおり、カオリン脈はそのような破砕部に形成されている。なお、粉末X線回折の結果をみると、カオリンはこのほか209mと351mで少量検出されている(日本地熱資源開発促進センター, 1978)。これらのカオリンの検出部分は花崗岩と花崗閃緑岩を境する破砕帯に相当している。

モンモリロナイトは、第三系・第四系を特徴づける変質鉱物であり、花崗岩類中にはほとんど検出されていないが、509mと557mで少量認められる(日本地熱資源開発促進センター, 1978)。これらの部分も、花崗岩類中の破砕帯に相当している。

#### 4. ZO-3坑井

##### 4.1 坑井の概要

ZO-3は山形県上山市橋下(N 38°4.9', E 140°18.7')に掘削された(第1, 2図)。掘削地点はZO-1から約9km南南西に離れている。地表から451.1mまでは流紋岩質の溶岩および火砕岩で、それにデイサイトないし安山岩といった岩石が繰り返し出現しており、中新世の赤山層に対比される。451.1mから坑底の501.0mまでは花崗岩類であり、花崗岩類と第三紀層との境は断層関係となっている。花崗岩類は、花崗閃緑岩およびそれを貫くグラノファイアからなり、いずれも著しく変質している場合が多い。なお、坑底の温度は35.7°Cであった(日本地熱資源開発促進センター, 1978)。

##### 4.2 花崗閃緑岩

花崗閃緑岩は、451.1-466m, 481-501mの区間に分布する。主な構成鉱物は、石英、カリ長石、斜長石、黒雲母、角閃石であるが、黒雲母および角閃石はすべて緑泥石等の2次鉱物へと変質しており、仮像として産する。カリ長石は、1-2cmの斑晶状を呈している。石英は鏡下でZO-1同様に波動消光が顕著であったり、一部がサブグレイン化している。斜長石は、ほとんどの部分で、主としてセリサイトに変質しており、とくに451.1-466mの区間で変質が顕著である。この岩相は変質作用の程度の差はあるものの、原岩の鉱物構成および組織からみて、ZO-1の花崗閃緑岩に対比される。

##### 4.3 グラノファイア

グラノファイアは、466-481mの区間で花崗閃緑岩を貫く岩脈として産する。斑晶鉱物の組合せは、石英-斜長石-黒雲母-角閃石である場合と石英-斜長石の場合がある。基質には石英と斜長石の連晶が認められるほか、斜長石からなる放射状組織も時折認められる。なお花崗閃緑岩に近い周縁部では基質が細粒化しており、一部に無斑晶質の部分も存在する。グラノファイアでは、斑晶の黒雲母と角閃石が緑泥石等の鉱物へと変質しているほか、長石類のセリサイト化も顕著である。

#### 5. 花崗岩類の主化学組成

ZO-1から26試料、ZO-3から4試料を選び、SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>を蛍光X線分析法(後藤・金谷, 1985)で、FeOを過マンガン酸カリ滴定法により定量し全岩の主化学組成を求めた。なお、H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>等の揮発性成分は強熱減量(1000°C, 2時間)としてそれらの含量を求め、FeOの酸化による増分を差引きLOIとした。これらの結果は第1表および第3, 4図にまとめた。粉末試料による蛍光X線の主元素分析はX線強度が試料の粒度分布に依存する。このため、変質した岩石は新鮮な岩石に比べ粉砕状態が異なり揮発成分の散逸も同じでないことから、分析値は正確な値を示さなくなる。ここでは総量が100±1.5%を外れるものが若干あるがそのまま表示した。

SiO<sub>2</sub>を横軸にとったハーカー図(第3図)で各酸化物の変化を見ると、変質したトータル岩・花崗閃緑岩・グラノファイア、それにZO-1の229.3mの岩石(SiO<sub>2</sub>=56.3%)を除くと、いずれもがある幅の中で、なめらかに変化している。しかしより詳細にみると、以下に述べるようないくつかの断続性も認められる。

TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>の各成分は、ハーカー図上でSiO<sub>2</sub>に対して、多少の変動はあるも

蔵王地域の地熱調査井ZO-1・ZO-3の花崗岩類（金谷 弘・笹田政克）

第1表 ZO-1, ZO-3 坑井の花崗岩類の主化学組成および微量元素, LOI は強熱減量を表す。  
Table 1 Major and trace element compositions of granitic rocks from ZO-1 and ZO-3 drillholes.  
LOI represents loss on ignition.

		ZO-1									
Depth		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		203.9 m	216.7 m	229.3 m	251.0 m	273.0 m	292.0 m	337.9 m	356.9 m	396.0 m	417.0 m
wt.%											
SiO <sub>2</sub>		62.07	61.92	56.27	69.98	71.96	62.41	59.16	71.46	70.55	71.03
TiO <sub>2</sub>		0.72	0.72	1.24	0.32	0.24	0.73	0.25	0.24	0.28	0.31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		15.29	16.17	13.69	14.58	14.24	16.87	12.73	14.77	14.37	14.90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		5.41	1.60	8.49	0.87	0.49	4.40	0.23	0.49	0.47	0.44
FeO		1.55	3.98	4.25	1.81	1.77	0.93	1.84	1.62	2.14	1.97
MnO		0.06	0.09	0.16	0.04	0.04	0.09	0.26	0.04	0.06	0.06
MgO		2.11	1.65	4.88	0.64	0.42	1.61	0.86	0.55	0.63	0.92
CaO		2.95	4.57	3.35	2.15	1.49	4.22	12.26	1.79	1.93	1.89
Na <sub>2</sub> O		2.83	3.36	2.41	3.44	3.42	3.66	2.57	3.48	3.19	3.25
K <sub>2</sub> O		3.67	2.66	2.68	3.74	4.17	2.54	1.72	4.31	3.92	4.16
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0.17	0.17	0.26	0.10	0.08	0.17	0.08	0.08	0.09	0.09
LOI		2.32	1.66	3.92	0.84	0.73	1.18	8.54	0.72	0.90	1.14
Total		99.15	98.55	101.60	98.51	99.05	98.81	100.50	99.55	98.53	100.16
ppm											
Rb		141	107	174	128	153	105	33	124	104	94
Sr		224	263	244	153	126	264	182	131	163	187
Zr		202	198	305	126	102	200	82	113	98	120
Th		7.6	8.3	10.5	14.5	15.1	8.2	7.9	14.1	11.0	9.5
U		1.1	1.0	2.0	1.3	1.9	2.7	1.8	2.4	2.5	1.6

		ZO-1									
Depth		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
		434.7 m	446.7 m	456.5 m	468.8 m	496.4 m	509.2 m	518.2 m	538.0 m	558.8 m	587.2 m
wt.%											
SiO <sub>2</sub>		63.72	64.62	64.90	62.81	63.13	71.66	67.50	67.61	66.34	68.78
TiO <sub>2</sub>		0.59	0.64	0.52	0.73	0.72	0.16	0.47	0.50	0.57	0.48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		16.36	16.42	16.61	15.65	15.85	14.52	15.07	15.66	15.25	14.99
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		1.29	1.21	0.79	1.44	1.54	0.22	1.18	1.01	1.35	1.06
FeO		3.08	3.02	2.46	4.40	3.96	1.35	3.00	2.74	2.96	2.69
MnO		0.15	0.08	0.05	0.12	0.11	0.06	0.08	0.06	0.06	0.05
MgO		1.99	1.80	1.15	2.10	2.03	0.82	1.70	1.23	1.44	1.15
CaO		3.55	3.73	4.14	4.34	4.07	2.12	2.93	2.72	2.85	2.83
Na <sub>2</sub> O		3.12	3.58	3.94	3.44	3.45	2.88	3.18	3.80	3.68	3.73
K <sub>2</sub> O		2.38	2.16	1.91	2.29	2.41	4.39	2.47	3.27	2.73	2.44
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0.13	0.15	0.12	0.18	0.17	0.07	0.12	0.13	0.14	0.13
LOI		3.62	1.99	1.43	1.16	1.36	1.88	2.95	1.00	1.28	1.12
Total		99.98	99.40	98.02	98.66	98.80	100.13	100.65	99.73	98.65	99.45
ppm											
Rb		80	68	58	70	83	87	73	91	—	70
Sr		228	278	302	277	283	212	208	243	—	213
Zr		186	174	130	176	184	127	163	160	—	167
Th		8.3	7.2	8.3	7.7	6.4	10.2	6.7	6.3	5.6	6.4
U		2.1	2.2	2.6	2.3	1.8	2.6	1.5	1.4	1.6	1.5

第1表 つづき  
Table 1 continued

Depth	ZO-1						ZO-3			
	21 612.5 m	22 651.0 m	23 689.5 m	24 731.2 m	25 761.0 m	26 801.0 m	27 454.5 m	28 459.5 m	29 475.5 m	30 492.0 m
wt. %										
SiO <sub>2</sub>	74.19	67.66	67.75	70.10	70.44	69.50	63.24	63.50	65.60	66.31
TiO <sub>2</sub>	0.22	0.47	0.45	0.25	0.28	0.16	0.63	0.63	0.63	0.61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.02	15.08	15.85	15.31	15.59	15.52	18.27	17.28	15.87	16.24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.33	0.99	1.01	0.64	0.60	0.16	3.39	3.70	1.76	1.92
FeO	1.65	2.76	2.54	2.29	1.87	1.20	2.28	3.00	3.08	3.10
MnO	0.04	0.05	0.06	0.06	0.05	0.10	0.15	0.26	0.13	0.17
MgO	0.57	1.25	1.38	0.53	0.70	0.53	4.83	4.52	2.87	2.99
CaO	1.26	2.47	2.12	2.05	1.96	3.47	0.13	0.50	1.24	0.41
Na <sub>2</sub> O	2.99	3.44	3.63	3.47	3.99	4.00	0.00	0.89	3.41	3.44
K <sub>2</sub> O	4.15	3.30	3.01	3.32	2.92	3.29	4.25	4.16	2.85	3.20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.13	0.12	0.09	0.09	0.07	0.15	0.14	0.16	0.14
LOI	1.14	1.07	1.92	3.40	2.12	2.86	5.07	5.64	2.68	2.96
Total	100.64	98.67	99.84	101.51	100.61	100.86	102.39	104.22	100.28	101.49
ppm										
Rb	84	81	78	68	69	61	136	148	66	75
Sr	150	220	214	148	167	180	17	21	192	111
Zr	110	147	168	164	213	180	172	162	134	208
Th	6.8	6.8	6.9	5.5	6.7	—	7.7	5.4	5.6	7.3
U	1.3	1.7	1.5	1.2	1.5	—	2.1	1.4	1.5	1.2

LOI (loss on ignition, 1000°C, 2h)

の、トータル岩から花崗閃緑岩さらに花崗岩へと連続的に変化する。一方、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* (全鉄) はすべての岩相で、SiO<sub>2</sub>の増加に対して減少するという点では共通しているが、減少の仕方がそれぞれ独自の傾向をもっているように見える。MgOは花崗閃緑岩の3試料が花崗岩に重複し全体としてやや減少またはほぼ横ばいの傾向となっている。MgO-SiO<sub>2</sub>図上でSiO<sub>2</sub> 69%付近におけるMgO含有量の花崗閃緑岩中でのギャップは、深度からみると、700-720 mの破碎帯に対応し、同破碎帯より深所の花崗閃緑岩が花崗岩に近い化学組成のものとなっている。K<sub>2</sub>OはFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\*と同様に、トータル岩、花崗閃緑岩および花崗岩の3つのグループに分けられ、それぞれがSiO<sub>2</sub>に対してほぼ横ばいになっているが、トータル岩ではSiO<sub>2</sub>の増加に対してやや減少しているように見える。

ZO-3の変質した花崗閃緑岩は、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO、MgO、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>Oの各成分で、ZO-1のトレンドから明らかに外れている。これらのうちCaO、Na<sub>2</sub>Oが低いのは、斜長石のセリサイト化にともなうCa、Naの溶脱によるものと考えられる。また苦鉄質鉱物もほとんどが緑泥石等の二次鉱物へと変化しているので、変質作用による元素の移動が、主成分の違いに反映されている可能性がある。

これらは、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>Oの3成分図(第4図)で示されている多量の方解石により置換されたZO-1の変質トータル岩(337.9 m)、セリサイト化が顕著なZO-3の変質花崗閃緑岩(454.5 m、459.5 m、492.0 m)などの分布域でも明らかである。

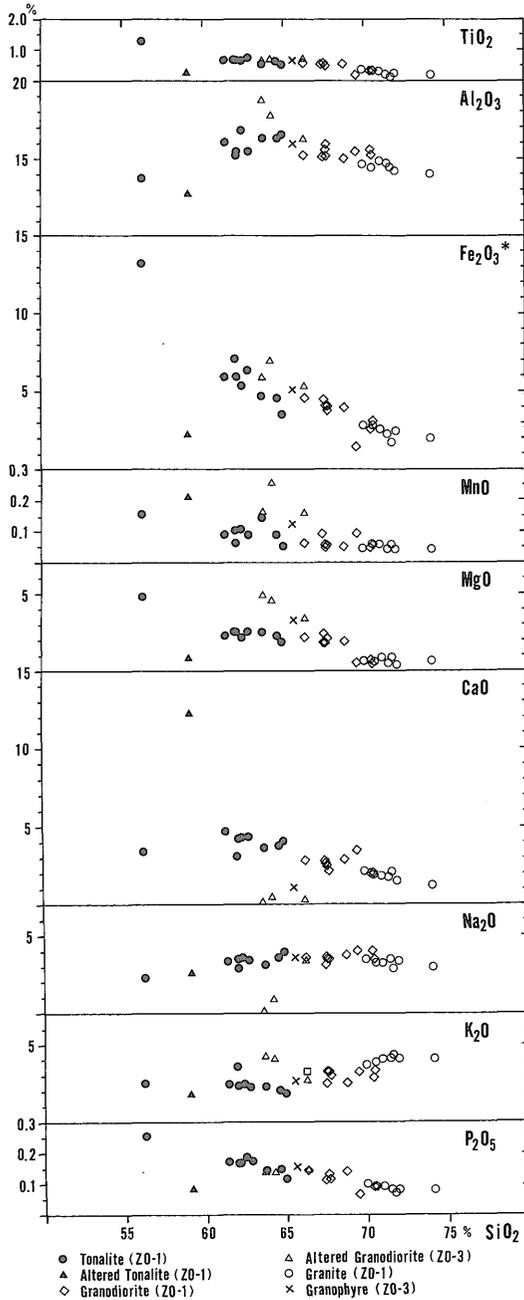
なお、TiO<sub>2</sub>とP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>はZO-1の変質トータル岩(337.9 m)以外、ZO-3の変質岩も含めてハーカー図上ではなめらかなトレンドとなっており、両成分については変質の影響がすくない。

## 6. 花崗岩類の微量元素

Rb・Sr・Zr・Th・Uの5元素の分析をZO-1から81試料、ZO-3から13試料を選び行った。Rb・Sr・Zrの定量は非分散型蛍光X線分析法(金谷・寺島, 1976)により、Th・Uをγ線スペクトロメトリー法(金谷, 1974)により行った。非分散型蛍光X線分析法によりFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* (全鉄)を、γ線スペクトロメトリー法によりKを微量元素と同時に定量を行っている。主化学組成を求めた試料については微量元素の値を第1表に示してある。

### 6.1 Rb, Sr

Rb, Srはそれぞれの含有量を対数軸にとって表示した



第3図 主化学元素変化図 (ハーカー図)  
 Fig. 3 Harker diagrams of granitic rocks from the drillholes of ZO-1 and ZO-3.  $Fe_2O_3^*$ : total Fe as  $Fe_2O_3$ .

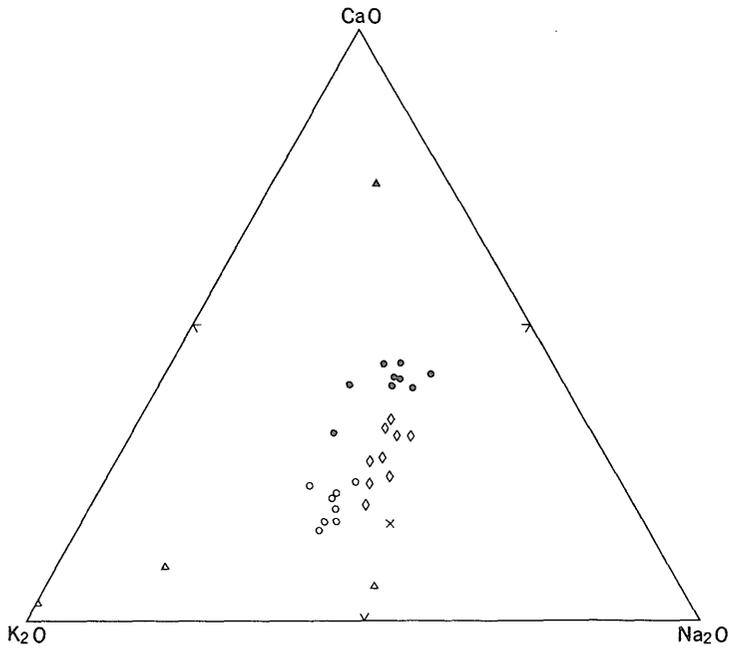
(第5図). ZO-1の試料では、トータル岩、花崗閃緑岩、花崗岩がそれぞれ異なる領域にプロットされる。これらのうちトータル岩は相対的にSr含有量が多く、また花崗閃緑岩と花崗岩との差異はRb含有量と多少のSr含有量の違いとして見られる。Rb, Sr含有量の変化は、一つの分化系列の岩石では、両対数表示をすると右下がりの直線となることが多いといわれる (McCARTHY and HASTY, 1976)。このことを考慮すると、花崗閃緑岩と花崗岩が1つのマグマ系列から、またトータル岩が別のマグマ系列からつくられたものであるようにも見える。また、ZO-3の花崗閃緑岩は、ZO-1の花崗閃緑岩と同じ領域から、Sr含有量が低い領域へと伸びた形でプロットされている。ZO-3の花崗閃緑岩に変質が顕著なものが多いことを考慮すると、これは斜長石のセリサイト化でCaが移動した際、Srも同様の挙動をとったことの反映であろう。

### 6.2 U, Th, Zr

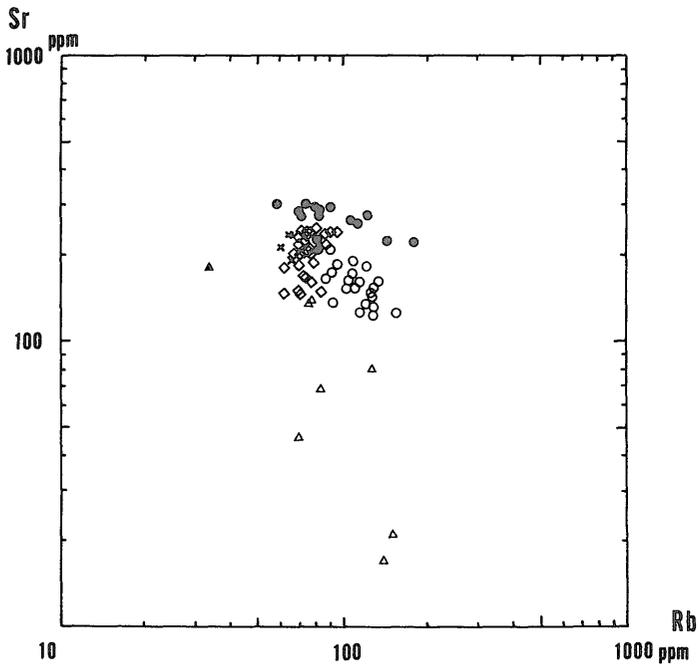
U, Th, Zrの分析結果について、U, ThおよびU, Zrの含有量を両対数軸のグラフに表示した (第6, 7図)。岩石中でUを含む造岩鉱物な何種類もあり、ジルコンもその一種であるがジルコンはZrを含む唯一の鉱物と考えられるのでこの点を考慮しておく必要がある。これらを見ると、ZO-1のトータル岩、花崗閃緑岩そして花崗岩はそれぞれあまり重複することなく、異なる領域にプロットされている。すなわちU, Thの関係は、トータル岩と花崗閃緑岩がThに乏しい領域に、花崗岩がThに富む領域にプロットされ、また前者ではそれぞれU含有量の変化域が異なっている。UとZrの関係は、トータル岩と花崗閃緑岩がZrに富む領域に、花崗岩がZrに乏しい領域にプロットされる。ZO-3のグラノファイアは、いずれもZO-1の花崗閃緑岩の領域にプロットされる。

マグマの分化とU含有量の関係は、Uが末期に晶出した岩相に濃集する傾向が、多くの岩体で認められるが (KANAYA and ISHIHARA, 1972)、ZO-1のトータル岩と花崗閃緑岩では、トータル岩の方がUに富んでおり、通常とは逆の関係となっている。Rb, Sr含有量の変化の様子から、花崗閃緑岩と花崗岩が1つのマグマ系列を、トータル岩が別のマグマ系列からできている可能性を述べたが、Uの変化はトータル岩と花崗閃緑岩が異なるマグマ系列からもたらされたとの考えを支持する。

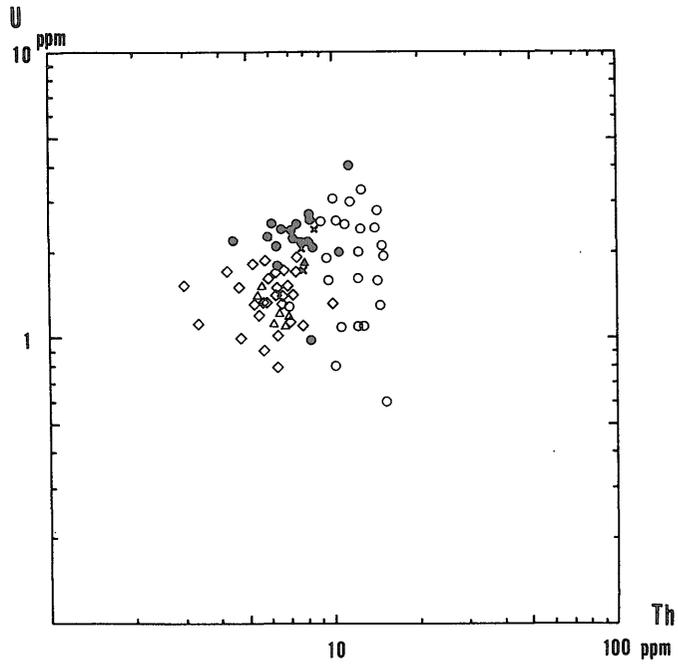
ZO-1, ZO-3にみられるU, Th, Zr間の関係は各岩相毎に、一部を除きある程度まとまった範囲にグルーピングされている。この事はこれら元素を含む鉱物が各岩相中で大幅な元素溶脱をとまなうような変質を蒙っていない事を意味しているものと考えられる。これはRb, Srの結果と非常に対照的である。



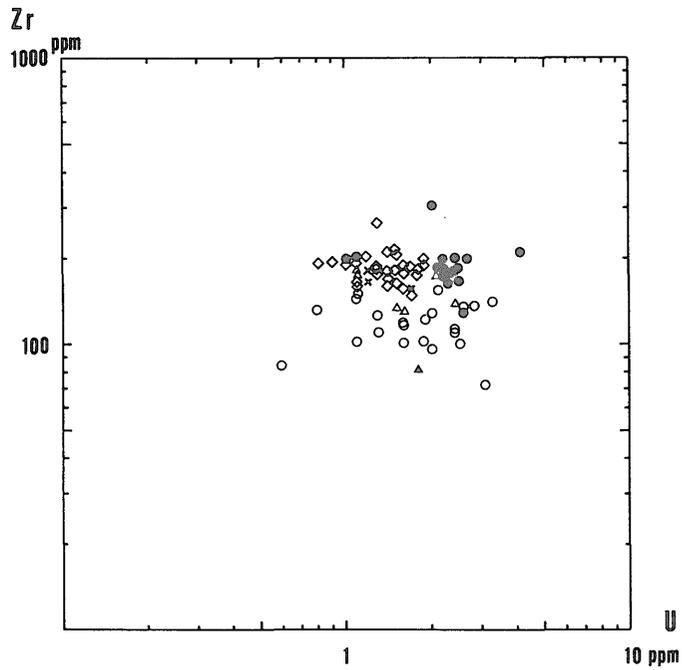
第4図 CaO-K<sub>2</sub>O-Na<sub>2</sub>O 変化図 表示記号は第3図に同じ。  
Fig. 4 CaO-K<sub>2</sub>O-Na<sub>2</sub>O diagram of granitic rocks. Symbols are the same as those in Fig. 3.



第5図 Sr含有量とRb含有量の関係 表示記号は第3図に同じ。  
Fig. 5 Relation between Sr and Rb contents. Symbols are the same as those in Fig. 3.



第6図 U含有量とTh含有量の関係 表示記号は第3図に同じ。  
Fig. 6 Relation between U and Th contents. Symbols are the same as those in Fig. 3.



第7図 Zr含有量とU含有量の関係 表示記号は第3図に同じ。  
Fig. 7 Relation between Zr and U contents. Symbols are the same as those in Fig. 3.

7. Kと微量元素

岩石の風化や熱水変質の場合、U、Thを含む鉱物の種類や変質の度合いにより含有量や量比に変化をきたす。Uを含む鉱物はカリ長石、黒雲母、アパタイトそしてジルコンなどがあり、Thを含む鉱物としてジルコン、モナズ石などが知られている。一方U、Thはその化学的性質の違いから風化、変質の際異なる挙動をとるため、岩石中のこれら元素の変化は風化、変質の1つの指数として利用することが可能と考えられる。これらの観点から主元素と微量元素の関係を見るため全試料について分析値のあるK<sup>U</sup>( $\gamma$ 線スペクトロメトリー法)と微量元素のU、ThおよびZrを対比させて検討を行った。

7.1 K-U

U含有量はすでにU-Th、U-Zrの関係でみたように花崗閃緑岩よりトーナル岩の平均含有量の方が多く、トーナル岩におけるU含有量は花崗岩に匹敵する。しかしZO-1のKの含有量は、トーナル岩で最も低く花崗閃緑岩として花崗岩の順に増加している。通常、K-Uの関係は正相関を示すことからトーナル岩が花崗閃緑岩・花崗岩とは別系列のものであることが第8図からも支持される。

1) 風化の著しい試料の粉末蛍光X線法による分析値はより大きな誤差を含むため、ここでは $\gamma$ 線スペクトロメトリー法によるK含有量を用いた。

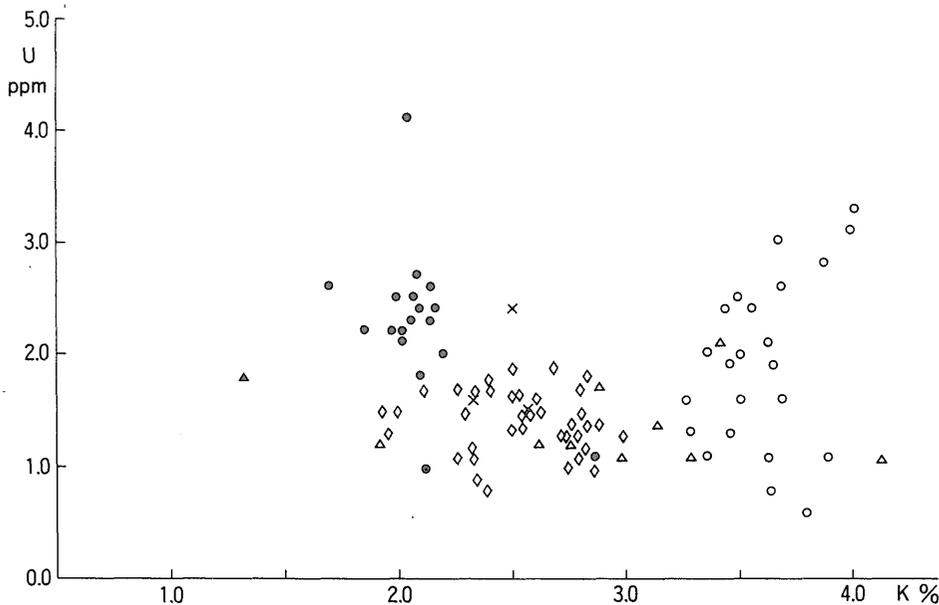
K-Uの対比結果からトーナル岩は比較的狭い範囲にプロットされる。しかしこの範囲からU含有量が大きく外れるものもいくつかあり(203.9 m; 1.1 ppm, 216.7 m; 1.0 ppm, 237.0 m; 4.1 ppm), また花崗岩にもK含有量3.5-4.0%に対し低いU含有量を示す試料またはそれに近いものもある(208.0 m; 0.8 ppm, 299.2 m; 0.6 ppm)。ZO-3の花崗閃緑岩のU含有量はZO-1の花崗閃緑岩の変化範囲に入っているものの、9試料中4試料のK含有量(454.5 m; 3.42%, 459.5 m; 3.15%, 464.5 m; 4.12%, 483.8 m; 3.30%)がこれから外れている。

7.2 K-Th

K-Thの結果は(第9図)K-Uの結果とほぼ類似の傾向がみられる。しかし、3岩相のうち花崗岩のTh含有量は前2者よりもはるかに多い。また、各岩相の主たる分布範囲を外れるものもいくつかありZO-1のトーナル岩でTh含有量の高い1試料(237.0 m; 11.4 ppm)、同様に花崗閃緑岩で1試料(799.0 m; 10.2 ppm)、低い含有量を示すものは花崗閃緑岩で2試料(715.8 m; 3.0 ppm, 723.1 m; 3.4 ppm)、花崗岩で1試料(612.5 m; 6.8 ppm)みられる。ZO-3の花崗閃緑岩はK含有量に幅はあるもののTh含有量はZO-1の花崗閃緑岩の変化範囲に入っている。

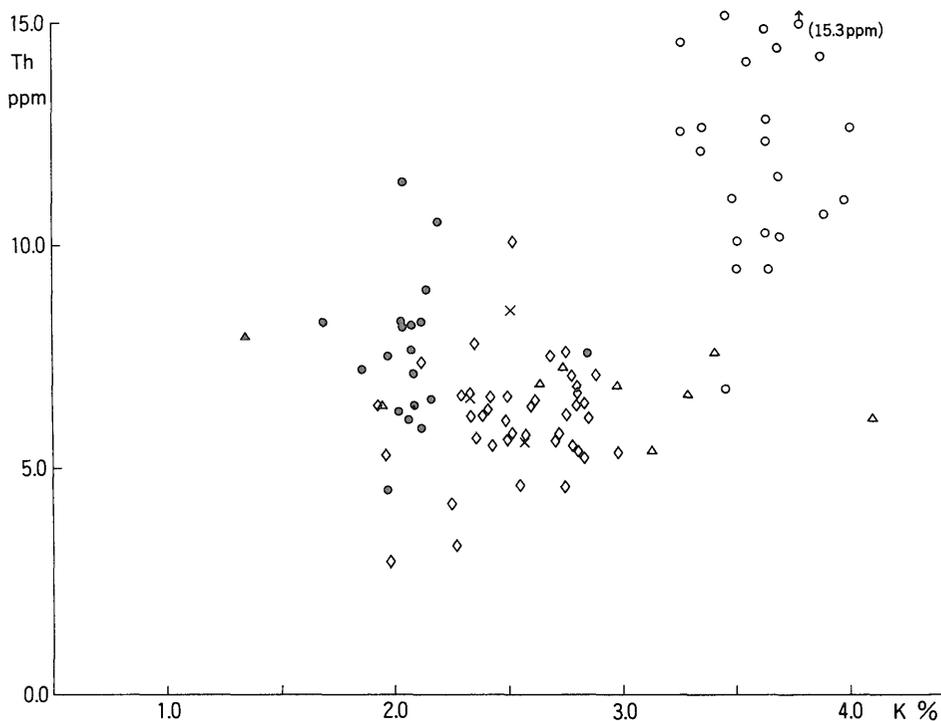
7.3 K-Zr

K-Zrの関係(第10図)をみると、ZO-1ではトーナル



第8図 U含有量とK含有量の関係 表示記号は第3図に同じ。

Fig. 8 Relation between U and K contents. Symbols are the same as those in Fig. 3.



第9図 Th含有量とK含有量の関係 表示記号は第3図に同じ。

Fig. 9 Relation between Th and K contents. Symbols are the same as those in Fig. 3.

岩と花崗閃緑岩のZr含有量は非常に類似している。これらのうちトータル岩の主たる変化範囲を外れ、高い値(229.3 m; 305 ppm)を示す試料, 低い値(429.2 m; 135 ppm, 456.5 m; 130 ppm)を示す試料がいくつかあり, 花崗閃緑岩でも高い値(799.0 m; 267 ppm)の試料がある。花崗岩の含有量は前2者に比べ低く, また大きく外れるものは見当たらない。ZO-3の花崗閃緑岩のZr含有量はZO-1の同質岩の変化範囲内にある。

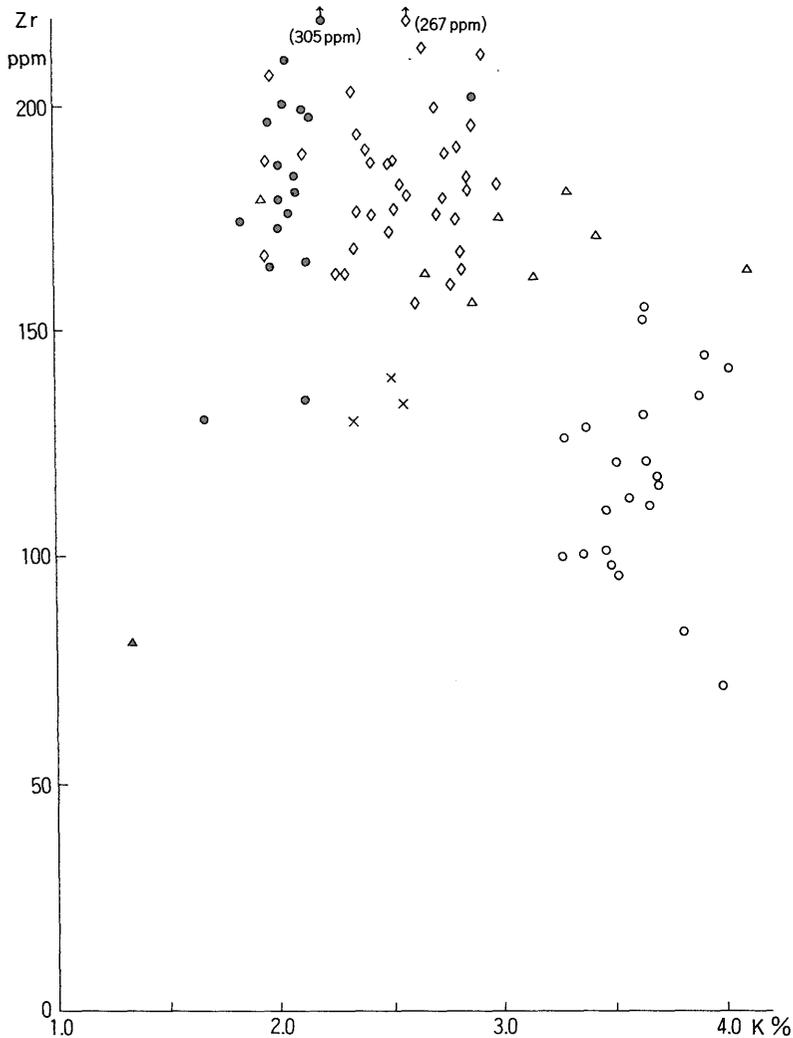
K-U, K-ThそしてK-Zr図中にみられるZO-1のトータル岩にK含有量の多い試料(深度203.9 m, K; 2.9%)がみられる。この試料を鏡下で観察すると, 黒雲母トータル岩-黒雲母花崗閃緑岩に分類される岩石であるが, トータル岩の中では黒雲母の量が多くカリ長石も多少多めのものでありK含有量の多さもこれらに起因するものと思われる。ついでに全体のK含有量についてみると, ZO-1のトータル岩と花崗閃緑岩は一部重複するが花崗閃緑岩と花崗岩は重複部分がなく0.3%前後のギャップが見られる。

## 8. 花崗岩類の帯磁率

花崗岩類の帯磁率は, 粉末試料を用いてBISON 3101型帯磁率計で測定した。測定結果(第11図)は $\chi$ 値が $10-30 \times 10^{-6}$ (emu/g)と低く, 常磁性的な性質を示す。岩相別に見ると, トータル岩の $\chi$ 値は $15-30 \times 10^{-6}$ (emu/g)で, 花崗岩の $\chi$ 値 $10-14 \times 10^{-6}$ (emu/g)よりやや高めになっている。これは両岩相に含まれる常磁性的鉄鉱物の量比の違いを反映しているものと思われる。これらの値からみて強磁性鉱物の寄与はほとんど無いものと考えられる。

## 9. 元素分布の深度変化と破碎帯

花崗岩類の化学組成の深度方向の変化をみるため, 微量元素(試料94個)およびこれと同一試料の主成分元素 $K_2O$ および $Fe_2O_3^*$ (全鉄)についても考察した。これらの定量はすでに述べたようにK, Th, Uは $\gamma$ 線スペクトロメトリー法,  $Fe_2O_3^*$ , Rb, Sr, は非分散型蛍光X線法を用いた。これに帯磁率と一部 $SiO_2$ を加え深度変化を表示



第10図 Zr含有量とK含有量の関係 表示記号は第3図に同じ。  
 Fig. 10 Relation between Zr and K contents. Symbols are the same as those in Fig. 3.

した(第11図)。

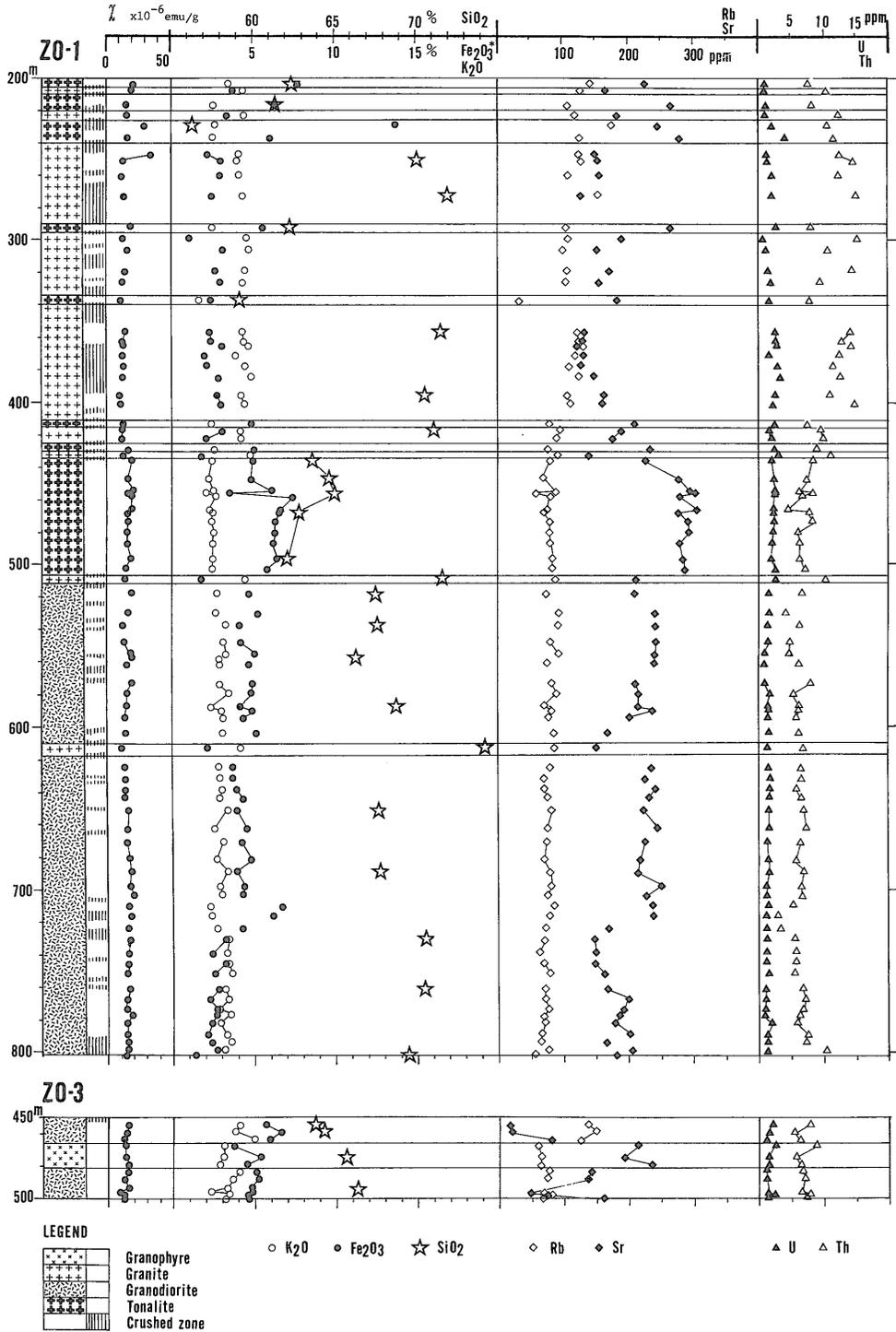
まず、 $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ の主成分について、その変化を考察すると、破碎帯から次の破碎帯までの間では、いずれの成分もあまり大きく変化していない。ただ、ZO-1坑井の456m-507mの区間では、 $\text{K}_2\text{O}$ に系統的な変化はほとんど認められないが、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ は460m付近でやや増加する傾向がみられる。

主成分は破碎帯を境に岩相が異なる場合は、勿論大きな変化が認められるが、同じ岩相が連続する場合も、破碎帯を境に含有量の変化が認められることがある。ZO-1の花崗閃緑岩では、720m付近の破碎帯を境にして、上

側のブロックと下側のブロックで、上記2成分に系統的な変化が認められる。すなわち、 $\text{SiO}_2$ は下側のブロックでやや高い値をとり、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ は下側のブロックで明らかに低い値となっている。

また、明らかに全体の傾向から外れるいくつかの試料がある。このような岩石はハーカー図(第3図)においても全体の傾向から外れている。ZO-1の229.3mのトータル岩は、他のトータル岩と比べ $\text{SiO}_2$ の値が5%以上低い。この岩石には黒雲母が容量比で約40%含まれ、全鉄、 $\text{MgO}$ 含有量が多いなどの主化学組成の特異さは、このような構成鉱物の量比を反映している。同じZO-1の337.9

蔵王地域の地熱調査井ZO-1・ZO-3の花崗岩類 (金谷 弘・笹田政克)



第 11 図 ZO-1, ZO-3 坑井内の花崗岩類の主元素, 微量元素および帯磁率の垂直変化  
 Fig. 11 Vertical variation of the major and trace elements and magnetic susceptibility of granitic rocks from ZO-1 and ZO-3.

mのトータル岩は、アルカリ以外のすべての成分で、全体の傾向から大きく外れている。この岩石は破砕帯中で方解石脈がよく発達している部分にあたり、CaOが異常に高く、強熱減量が8%を超えることは、方解石を多量に含むことを意味するものである。

微量成分のRb, Srについて深度変化をみると、主成分のところでも論じたZO-1で破砕帯をはさんで岩相が異なる場合の変化および同じ花崗閃緑岩でも608 m-613 mの花崗岩をはさんだ上下のRb含有量の違い、同じく720 m付近の破砕帯をはさんでみられるSr含有量の変化でも明瞭にみられる。さらに、花崗岩とトータル岩が破砕帯をはさんで何回も繰り返し出現する200 m-512 mの区間のそれぞれの岩相のブロック毎の違いが、両元素含有量に反映している。

U, Th, Zrはカリ長石やジルコン・アパタイト等の鉱物にとまわれる。本坑井のこれら元素含有量の違い(第8, 9, 10図)は岩相毎に固有の値を持ち副成分鉱物の容量比の違いを表しているものと考えられる。

しかしKと微量元素のところでも指摘したように微量元素が単独で、また複数でそれぞれの岩相の変化範囲を超える異常は詳細に見るといくつかあり、これらはいずれも破砕帯・変質帯・岩相ブロック間の境界等にみられる。

同一岩相ブロック内の変質によるとみられる微量元素の変化はRb, U, Th, Zrに比べSrがより顕著である。このことはこれら元素を含む造岩鉱物からの溶脱の差と考えられる。当坑井試料の鏡下観察結果は斜長石と角閃石の変質がカリ長石や黒雲母等をはるかにうまわっていることと符号するものであろう。またこの変質に関与したとみられる要因は熱水の温度およびその性質に大きく依存していると考えられるが、変質鉱物の種類と移動元素からみて強酸性の熱水ではない(森・陶山, 1980)と思われる。

これまで述べてきた破砕帯と元素分布の関係をまとめると、坑井花崗岩類の地質柱状における元素の比較的均質な単位は、数mから100m程度のコラムに相当する。それらは破砕帯により上下ブロックに区切られる。また逆に破砕帯が元素からみた均質なブロックの境になっていないこともある。これらの事実は各元素が種々の主成分鉱物あるいは副成分鉱物に含まれるが、破砕の規模や変質の種類に応じ鉱物の一部または全部が変質に含まれる元素が移動し、各岩相がもつそれぞれの変化範囲を越え異常を示しているものと思われる。換言すれば異常を示す元素により各岩相が被った破砕の規模の差や変質の種類を推測する事が可能であり、斜長石のセリサイト化

によるCaやSrの異常はその典型的な一例であろう。しかし定性的にはともかく、定量的な判断を行うには今後の研究に負うところが多い。

## 10. まとめと結論

深部に賦存する地熱資源を探索するのに、多くの場合避けて通ることの出来ない花崗岩類中に発達する断裂系について、元素分布の変化から予測を試みた結果次のような成果が得られた。

1. 断裂により岩相が明らかに変化する場合、それが元素分布に反映される事は勿論、見かけのよく似た岩相でも、断裂をはさんで組成変化が系統的に認められる場合がある。

2. また、破砕帯をはさんで元素分布に顕著な差異が認められない事もある。この違いは、断裂の規模の差や種類に関係するものと考えられる。

3. ZO-1, ZO-3にみられる変質のパターンはCa, Srにおいて顕著でありK, Rb, U, ThそしてZrで軽微である。鏡下で観察される造岩鉱物の結果と合わせ、変質に寄与した熱水は強酸性ではないことは確かであろう。

4. 今回検討した主成分元素および微量元素のなかで断裂を境としてそれぞれのブロックの違いを一番よく反映しているのは岩相の差も含めK, Fe, Rb, Srであるが、その他にもU, Th, Zrも詳細にみれば各種の変化を反映している。主成分鉱物または副成分鉱物の変質の規模や種類により含まれる鉱物から単一または複数の元素の移動が考えられる。従って、断裂探索を目的とした掘削時の地化学検層の元素分析は花崗岩類の場合、有効な手段の1つと考えられる。

なお、 $K_2O$ ,  $Fe_2O_3$ 以外の主成分元素は分析した試料数が少ないため、ここでは結論を出すに到っていない。

## 文 献

後藤準次・金谷 弘(1985) 粉末法による岩石および鉱物中の諸成分のけい光X線分析 第2報—主成分元素の定量法—。地調月報, vol. 36, p. 453-461.

KANAYA, H. and ISHIHARA, S. (1972) Contents of uranium, thorium, and potassium of the Japanese granitic rocks: A summary up to 1972. The Natural Radiation Environment II Symposium. Atomic Energy Comm., U.S.A., p. 517-533.

金谷 弘(1974) 北上山地の白亜紀花崗岩類 V. カリウム・トリウム・ウランおよび帯磁率。

- 地調報告, no. 251., p. 91-103.
- 金谷 弘・寺島 滋 (1976) 非分散型蛍光X線分析装置による岩石試料の定量分析について (その1). 地調月報, vol. 27, p. 579-593.
- MCCARTHY T. S. and HASTY R. A. (1976) Trace element distribution patterns and their relationship to the crystallization of granitic melts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 40, p. 1351-1358.
- 森 康夫・陶山淳治 (1975) 地熱エネルギー読本. オーム社, p. 85-94.
- 皆川信弥 (1970) 山形盆地における活構造の研究 (I). 山形大学紀要 (自然科学), vol. 7, p. 347-361.
- 日本地熱資源開発促進センター (1978) 昭和52年度地熱開発精密調査報告書 no. 2, 「蔵王」. 356 p.
- 山形県温泉協会 (1973) 山形県温泉誌.
- (受付: 1989年12月5日; 受理: 1990年2月17日)