

資 料

551.221 : 552.3 (512.22/.31) : 552.1 : 543+549+550.93

南嶺の諸広山花崗岩体の多期貫入活動と2・3の地球化学的特徴*

王聯魁 張玉泉 劉師先*

岸本文男**訳

プロレタリア文化大革命以来、偉大な指導者毛主席の「実践、認識、ふたたび実践、ふたたび認識」という教えを固く守り、南嶺を代表する性格を備えている諸広山花崗岩（バソリス）について詳しい研究を行ったが、その目的は南嶺のマグマ活動の特徴と花崗岩体の物理化学的生成条件を明らかにすることにあった。採用した主な研究手段は野外調査法である。そして、野外での大量の観察結果を基礎に、約70個の新鮮な大型岩石試料を採取し、同位体地質学的、岩石学的、岩石化学的な研究も行った。主要造岩鉱物、副成鉱物、微量元素とジルコニウム、ハフニウムなどについては化学分析、鉱物学的パラメータの測定に供し、すべて統計的に処理した。さらに、採取した試料による変動を避けるため、同じ一個の大型試料からはかり取った試料に対して各種の分析を行い、2、3のはみ出した絶対地質年代値の試料は除いて、残るすべての試料を本格的に分析・測定した。この花崗岩体は華南カレドニア褶曲帯の中部、すなわち湘桂粵褶曲帯北部の隆起区に位置し、露出面積は4,000 km²に達し、主な側岩は先デボン紀の弱変成砂岩・頁岩層系である。当該岩体は南京大学地質学部によってカレドニア期に区分されているが、われわれが調査した諸広山山脈南部の1,600 km²の範囲では地質部門が先に行った大規模な地域調査結果に照せば、この花崗岩はカレドニア期、インドシナ期(?)と燕山期第3期($\gamma_3^{(3)}$)・第4期($\gamma_3^{(4)}$)の計3地質時代・4貫入期に分けられ、その中でも燕山期の貫入が主体をなしている。われわれは広東省地質局に属する調査隊と合同調査し、すでに進められていた各種大縮尺の地質図幅調査を基礎に剝土・ピットおよび試錐の資料を詳しく研究し、さらに岩体を横ぎるルートを系統的に追跡して多くの貫入接触部分を発見した。このことの意義は非常に大きく、野外での直接観察によって古期から新期にいたる段階的な貫入の順序、すなわち、総合すれば少なくとも11回以上のマグマ活動が認められ、そのうちの10回については直接切る・切られるの関係が観察できた。その典型的な貫入現象と花崗岩体の特徴を以下簡単に述べる。

1. 片麻状花崗岩 (γ_3)。これは不規則な岩体として産出し、その産出面積は約 20 km²で、周縁相としてミグマタイトが発達する。3個の同位体地質年代値は平均 372×10^6 年で(第1表)、これは本地域に賦存する最古の古生代前期貫入岩であり、カレドニア期に属する。
2. 花崗閃緑岩 (γ_4)。これはレンズ状ないし塊状の小岩体を呈し、露出面積は80 km²前後で、諸広山バソリスの内接触帯・外接触帯付近に分布し、2個の絶対年代値の平均は 259×10^6 年であって、古生代後期の1回の貫入活動で生成し、ヘルシニア紀後期に属する。
3. 斑状黒雲母花崗岩 (γ_5)。これは規模の非常に大きな岩体で、露出面積は約500 km²、明瞭に γ_3 と γ_4 中に貫入し(第1図のIとII)、6個の絶対地質年代値の平均は 168×10^6 年で、ジュラ紀中一後期に相当する。
4. 小斑状両雲母花崗岩 (γ_6)。これは中程度の規模の2・3の岩体で、露出総面積は約 300 km²、多くの産状から γ_5 を切るものと解することができ(第1図のIII)、5個の絶対地質年代測定値の平均は 159×10^6 年で、ジュラ紀後期に相当している。
5. 細粒両雲母花崗岩 (γ_7)。これはほとんど定向構造をもっていない岩石で、分布が γ_5 ときわめて密接な小岩体ないしシルであり、数カ所で γ_5 、 γ_6 中に貫入しているのが認められる(第1図のIV)。

* 王聯魁、張玉泉、劉師先(1975)：南嶺諸広山花崗岩体の多次侵入活動と某些地球化学的特徴：地球化学、第3期、189—201頁

** 鉱床部

第 1 表 諸広山マグマ岩の区分と同位体地質年代

貫入期	貫入次数	マグマ岩	時代記号	同位体地質年代*							
				試料番号	岩石	鉱物	×10 ⁶ 年	変動範囲	平均		
中性・塩基性 小貫入岩		ランプロファイアー 輝緑岩 輝緑玢岩	β								
燕山花崗岩 Cr ₁ J ₂₋₃	第五期	副貫 2 次的入 1 中雲母花崗岩 細粒両雲母花崗岩	細粒両雲母花崗岩	γ_5^{5-2}	64-16/4	ペグマタイト	Mv***	140	122 153	142	
			両雲母花崗斑岩	γ_5^{5-1}	4-3	ペグマタイト	"	152			
		主貫入	中粒両雲母花崗岩	γ_5^5	4-4	細粒両雲母花崗岩	"	146			
			細粒花崗岩		"	122					
			中・細粒両雲母花崗岩		7-1017	中粒両雲母花崗岩	"	153			
	第四期	副貫 次的入	細粒黒雲母花崗岩 花崗斑岩	γ_5^{4-1}	7-540	花崗斑岩	Bi	150	150 155	153	
			主貫入			細粒黒雲母花崗岩 中粒黒雲母花崗岩 不等粒黒雲母花崗岩 粗粒黒雲母花崗岩	γ_5^4	7-1047			中粒黒雲母花崗岩
		副貫 次的入		細粒両雲母花崗岩	γ_5^{3-1}	7-533		細粒両雲母花崗岩			Mv
	第三期	小斑状両雲母花崗岩	主貫入	小斑状両雲母花崗岩	γ_5^3	7-531	小斑状両雲母花崗岩	"	169	153 169	159
				變成小斑状両雲母花崗岩		001	"	"	157		
			斑状両雲母花崗岩	13	"	"	153				
	第二期	斑状黒雲母花崗岩		斑状黒雲母花崗岩 斑状黒雲母モンゾナイト 巨斑状黒雲母花崗岩	γ_5^2	19	斑状黒雲母花崗岩	Bi	163	153 197	168
19						"	Zr	197			
005						"	Bi	153			
KTz24/1						"	"	160			
"						"	"	165			
4-1	"	"	172								
ヘルシニア花崗閃緑岩 (P)		花崗閃緑岩	γ_{δ_4}	25	混成花崗はんれい岩	Bi	281	238 281	259		
		混成花崗はんれい岩			011	花崗閃緑岩	"			238	
カレドニア片麻状花崗岩 (D)		片麻状黒雲母花崗岩	γ_3	10	眼球片麻岩	Zr	377	365 377	372		
		眼球片麻岩			10655	花崗岩	Bi			375**	
		縞状ミグマタイト			3-1	片麻状花崗岩	"			365	

*主として K-Ar 法, 若干の場合に U-Pb 法

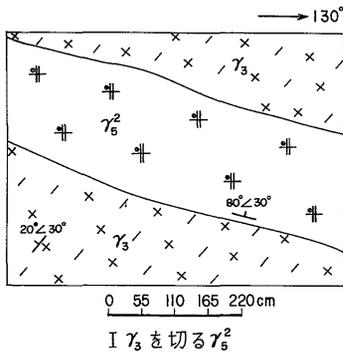
**試算値

***Mv—白雲母, Bi—黒雲母, Zr—ジルコン

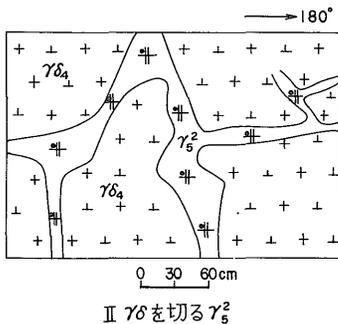
6. 黒雲母花崗岩 (γ_5^2). これは規模の大きい岩体で, 露出面積は約 500 km², 主として中粒ないし粗粒の黒雲母花崗岩からなり, 周縁は数 cm から数 100m の細粒および不等粒の黒雲母花崗岩相もしくは花崗斑岩相となり, この周縁相はきわめて鮮明に γ_5^2 と γ_5^{2-1} を切り, あるいは岩枝の形で貫入している (第 1 図の III 参照). 2 個の絶対地質年代値の平均は 153×10^6 年で, ジュラ紀後期に相当している.

7. 細粒黒雲母花崗岩もしくは花崗斑岩 (γ_5^{2-1}). これは構成の不規則な小岩体あるいはシルで, 空間的な分布が γ_5^2 と密接に結びついているが, γ_5^2 とは貫入接触関係にある (第 1 図の V).

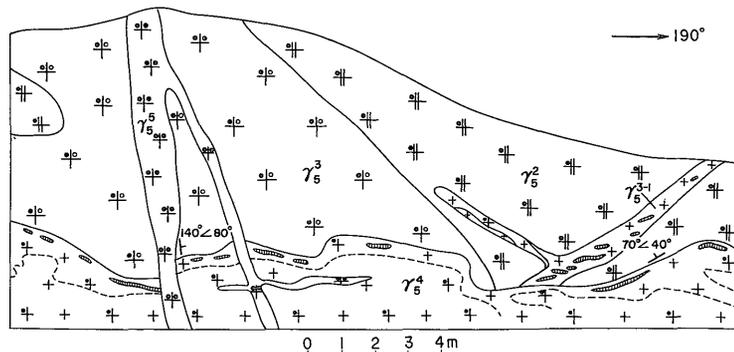
8. 中粒両雲母花崗岩 (γ_5^3). これは中・小型の少数の岩体を形成し, 露出平面の総面積は約 170 km², すべて γ_5^2 と γ_5^{2-1} 中に貫入し (第 1 図の VI), 内接触帯は急冷周縁相と黒雲母集中帯を伴う. 5 個の試料



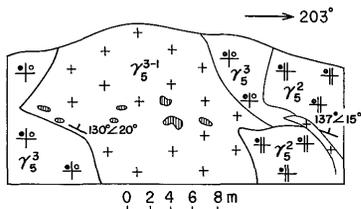
I γ_5 を切る γ_3^2



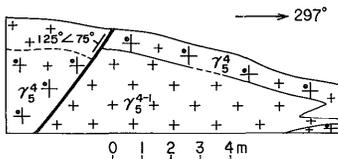
II γ_5 を切る γ_4^2



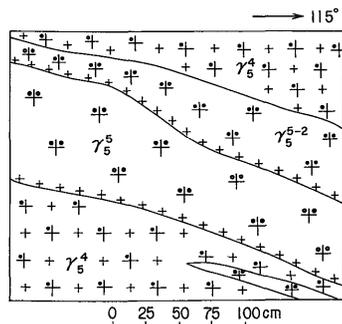
III γ_5^2 γ_3 γ_4 γ_5 の貫入・被貫入の関係



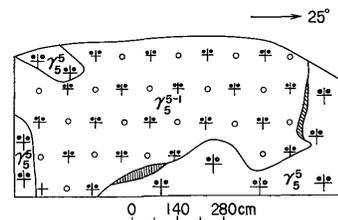
IV γ_5^2 γ_3 γ_5^3 γ_5^{3-1} の貫入・被貫入の関係



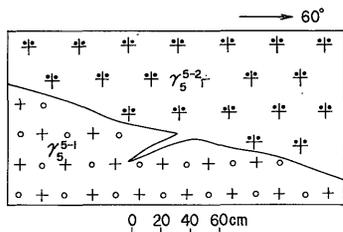
V γ_5^4 γ_5^{4-1} の貫入 被貫入の関係



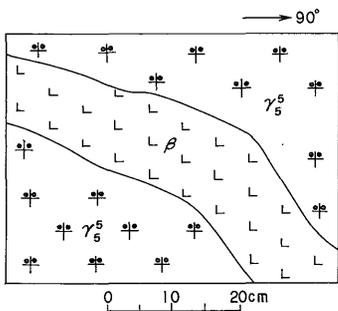
VI γ_5^4 γ_5^5 γ_5^{5-2} の貫入・被貫入の関係



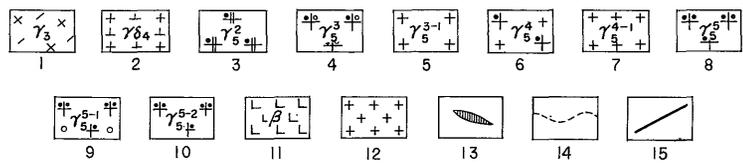
VII γ_5^5 γ_5^{5-1} の貫入・被貫入の関係



VIII γ_5^{5-1} と γ_5^{5-2} の関係



IX γ_5^5 を切る β



1. カレドニア片麻状花崗岩 (γ_3); 2. ヘルシニア後期花崗閃緑岩 (γ_4) 燕山期; 3. 第2期斑状黒雲母花崗岩 (γ_5^2); 4. 第3期主貫入小斑状両雲母花崗岩 (γ_5^3); 5. 第3期副貫入細粒両雲母花崗岩 (γ_5^{3-1}); 6. 第4期主貫入中-粗粒黒雲母花崗岩 (γ_5^4); 7. 第4期副貫入細粒黒雲母花崗岩 (γ_5^{4-1}); 8. 第5期主貫入中粒両雲母花崗岩 (γ_5^5); 9. 第5期第1副貫入両雲母花崗岩 (γ_5^{5-1}); 10. 第5期第2副貫入細粒両雲母花崗岩 (γ_5^{5-2}); 11. 中性・塩基性小貫入体 (β); 12. 急冷閃緑相; 13. ペグマタイト; 14. 推定境界線; 15. 確認境界線

第1図 諸広山パソリス (南部) の期・回を異にする花崗岩の貫入関係

の絶対地質年代平均値は 142×10^6 年で、ジュラ紀後期ないし白亜紀前期に相当している。

9. 両雲母花崗斑岩 (γ_5^{-1}). これは小岩体もしくは岩脈を呈して産出し、中粒両雲母花崗岩と鮮明な貫入接触面をもって接し、その接触帯に沿ってペグマタイトが存在する (第1図のVII)。

10. 細粒両雲母花崗岩 (γ_5^{-2}). これは不規則な小岩体ないし岩脈を作り、 $\gamma_5^{-1} \cdot \gamma_5^0$ と貫入接触関係を呈し、内接触帯にペグマタイト帯が発達し (第1図のVIII), γ_5^{-1} とともに γ_5^0 の内接触帯・外接触帯付近に分布している。

11. 中性・塩基性小貫入体 (β). これは主として輝緑岩、輝緑玢岩、ランプロファイアーで、急傾斜した岩脈あるいは不規則な岩体を形作り、幅は数10 cm から数10m, 延長は数10mから数100m, ときには数1,000mに達する場合もある。本地域には数1,000体を下らないこの種の岩脈が露出し、その多くは群をなして出現し、上述の各期の貫入岩体をきり、また上述の貫入岩の中ではもっとも後期の花崗斑岩岩脈と熱水石英脈などさえ切っており (第1図のIX), 本地域では最末期の割れ目充填塩基性マグマ活動の生成体に属する。以上の11回のマグマ活動は4時代、すなわち、古生代前期のカレドニア片麻状花崗岩 (γ_3), 古生代後期のヘルシニア後期花崗閃緑岩 ($\gamma\delta_4$), ジュラ紀中一後期から白亜紀前期の燕山花崗岩 ($\gamma_5^0 - \gamma_5^{-2}$), それに最末期の中性・塩基性小貫入体 (β) の計4時代に分けられる。このような頻繁なマグマ活動は本地域の地殻の不安定性と構造運動の多期・多段階性を反映している。そのうちでは、燕山マグマ活動の活動回数がもっとも多く、規模ももっとも大きい。

上記の4時代のマグマ岩の特徴はそれぞれ異なっている。カレドニア片麻状花崗岩は岩石学的特徴の変化がいちじるしく、片麻状花崗岩、縞状ミグマタイト、眼球ミグマタイトなどに互いに移り変る。化学組成上の特徴は TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , Fe_2O_3 に富むことであり、斜長石は中性長石 (An 34-37) に属し、多量のざくろ石とチタン鉄鉱を含有し、含有少量元素の種類には乏しいが、鉄属元素 V, Cr, Niの

第2表 各期の岩石の平均化学組成 (重量%)

順序	マグマ岩	試料数	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	H ₂ O	P ₂ O ₅	
4	中性・塩基性小貫入体 β	3	49.95	1.46	15.04	3.76	7.64	0.19	7.02	8.71	1.82	2.34	1.92	0.23	
3	燕山花崗岩	中粒両雲母花崗岩 γ_5^0	3	75.90	0.04	11.92	1.08	0.44	0.03	0.72	0.62	4.16	3.64	1.09	0.08
		黒雲母花崗岩 γ_5^4	10	72.46	0.16	13.00	1.43	0.65	0.05	1.21	1.00	5.14	2.98	0.53	0.07
		小斑状両雲母花崗岩 γ_5^3	4	70.89	0.24	13.90	1.08	0.95	0.02	0.51	0.69	6.13	2.48	0.83	0.19
		斑状黒雲母花崗岩 γ_5^2	7	69.70	0.43	14.08	1.43	1.97	0.04	1.32	1.49	5.12	2.80	0.81	0.23
2	ヘルシニア花崗閃緑岩 $\gamma\delta_4$	3	61.02	0.54	13.83	2.21	4.20	0.12	5.10	4.38	4.31	2.37	1.45	0.21	
1	カレドニア片麻状花崗岩 γ_3	2	69.21	0.60	14.23	2.21	2.64	0.03	1.32	1.94	4.14	2.82	0.57	0.20	

第3表 各期のマグマ岩の造岩鉱物含有率 (体積%)

順序	マグマ岩	試料数	斜長石	微斜長石	石英	黒雲母	白雲母	角閃石	輝石	斜長石記号 An	
4	中性・塩基性小貫入体 β	2	41.7	0.3	0.3	11.1	2.9 (チタン 磁鉄鉱)	25.8	14.2	56-58	
3	燕山花崗岩	中粒両雲母花崗岩 γ_5^0	3	20.8	28.8	45.5	1.1	3.8			8-13
		黒雲母花崗岩 γ_5^4	6	22.8	34.6	39.4	4.2				27-32
		小斑状両雲母花崗岩 γ_5^3	6	22.6	33.8	34.4	5.8	3.2			27-35
		斑状黒雲母花崗岩 γ_5^2	6	29.5	30.3	26.7	13.3				30-40
2	ヘルシニア花崗閃緑岩 $\gamma\delta_4$	2	30.3	28.7	19.0	2.8		19.1		40-44	
	カレドニア片麻状花崗岩 γ_3	6	26.0	17.4	9.1	10.1	0.7 (かんらん石)	13.9	22.9	44-56	
1		6	25.5	26.2	37.2	9.1				34-37	

第4表 各期のマグマ岩の副成鉱物 (g/t)

順序	マグマ岩	試料数	ジルコン	燐灰石	モナズ石	褐簾石	チタン石	チタン鉄鉱	磁鉄鉱	輝水鉛鉱	蛍石	ざくろ石	電気石	黄鉄鉱	硫砒鉄鉱	金紅石
4	中性・基性小貫入体β	2	×	×				+++	+++					+++		+
3	燕山花崗岩 中粒両雲母花崗岩 γ_5^5	3	17.72	5.14	5.26	0.53		10.82	4.59	11.89	84.81	1.04	1.61	130.23	×	
	黒雲母花崗岩 γ_5^4	6	70.63	49.25	4.48	17.94	1.22	38.64	646.20	0.06	6.09	0.75		23.40	×	
	小斑状両雲母花崗岩 γ_5^3	3	8.41	182.85		31.38		7.05	41.71	2.08	118.76	10.67	9.16	42.29		
	斑状黒雲母花崗岩 γ_5^2	3	132.48	606.73	93.40	157.41	154.26	145.02	73.73	×	×		12.16	226.92		
2	ヘルシニア花崗閃緑岩 γ_4	2	159.72	110.18		152.15	78.07	91.65	129.94	×		21.75	×	75.93		
1	カレドニア片麻状花崗岩 γ_3	2	227.50	92.71	26.87	14.34	62.14	273.36	100.01	×	9.84	61.02	×	94.39		

+++大量 +少量 ×数個の鉱粒

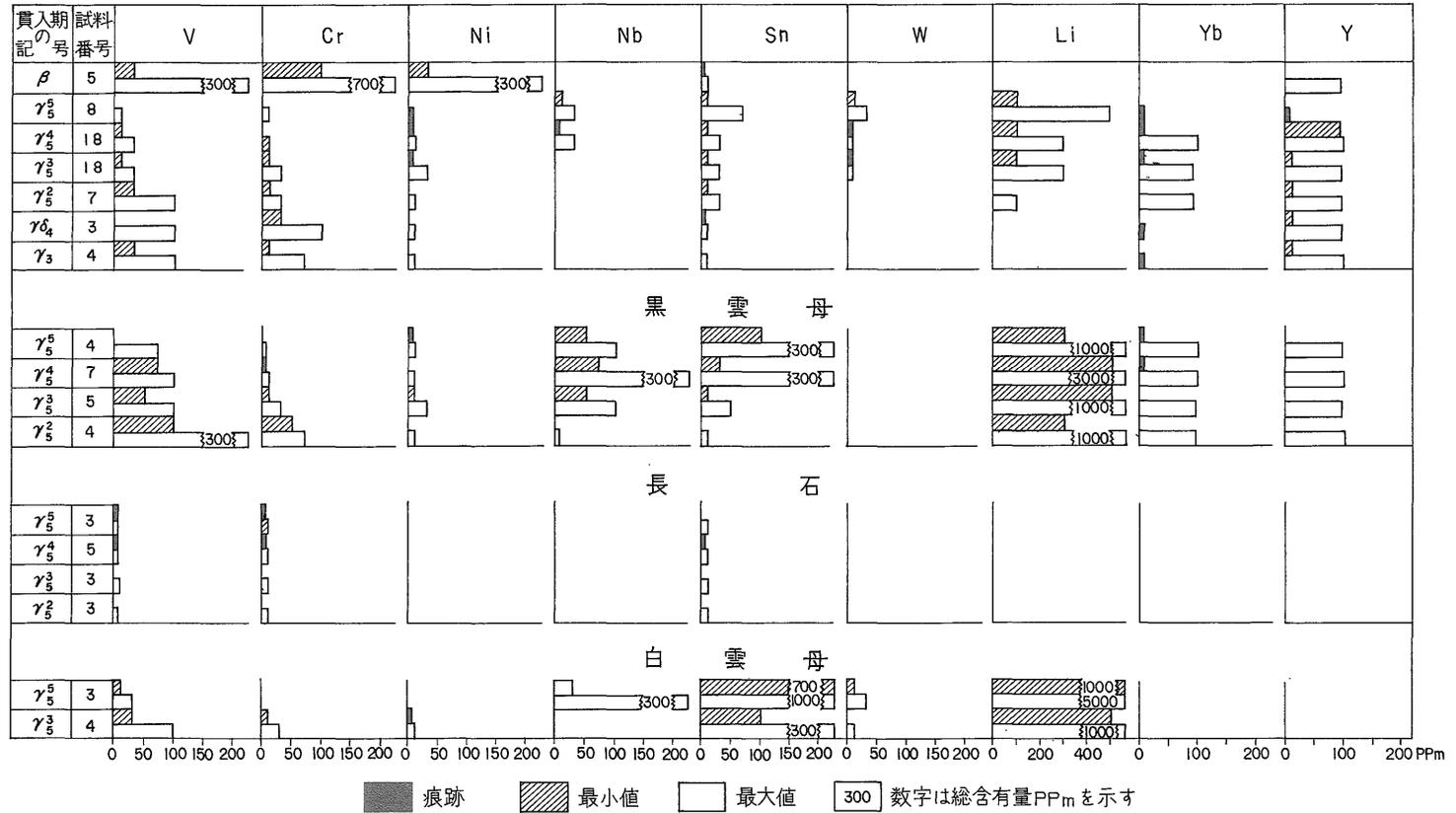
含有率は比較的高く、稀土類元素 Yt, Yb もかなり多い (第2・3・4表, 第2図)。ヘルシニア後期花崗閃緑岩は中性にかたよった岩石に属し、斜長石は An 40-44 であるが、変種である混生花崗はんれい岩は斜長石が An 44-56 であり、多量の単斜輝石と少量のかんらん石を含んでいる。この期の岩石の化学成分は MgO, CaO, FeO が多く (第2表)、微量元素と副成鉱物を花崗岩の場合に比較すると、いちじるしい差があり、種類も含有量も少なく、ジルコンがかなり特異で、とき色を呈し、その Zr/Hf 比が諸広山花崗岩体中最大の44.2 (第5表) となっている。燕山花崗岩は多期多次貫入作用の生成体に属し、岩石の種類が非常に多いが、すべて花崗岩類に入る。その共通した特徴点は SiO₂, K₂O, Na₂O の含有率が高く、CaO, MgO, FeO+Fe₂O₃ が少なく、造鉱元素、稀元素、稀土類元素などに富み、副成鉱物の量が多くて種類も多いことを反映しているが、Zr/Hf 比は比較的低い。最末期の中性・塩基性小貫入体は輝緑岩、輝緑玢岩、スペッカルタイト、オーディナイトなどを含み、その平均化学組成は輝緑岩に近く、TiO₂ 含有率は高くして1.46%に達し、MgO, CaO, FeO+Fe₂O₃ も比較的多く、造岩鉱物、副成鉱物、微量元素などは上記3時代のマグマ活動の場合とはっきり異なっている。磁鉄鉱、チタン鉄鉱を除くと、副成鉱物の種類・量ともきわめて少なく、それが微量元素にも反映して V, Ni, Cr が諸広山花崗岩体中最大の含有率となっている。以上のように、4時代のマグマ岩の岩石学的・地球化学的特徴は明らかに異なり、各期のマグマ岩の地質学的特徴と時間的要素を結びつけてみると、本地域のマグマ岩は起源を異にし、成因を異にする生成体群であると解することができる。

カレドニア片麻状花崗岩の縁辺部にはミグマタイトが発達し、そのミグマタイトは縞状構造、眼球構造、腸詰構造を有し、側岩とは漸移関係を呈するが、部分的には貫入の特徴もみられる。この片麻状花崗岩の化学組成の特徴は鉄族元素に富み、一定量の稀土類元素を含み、そのほかの造鉱元素などに乏しいことである。したがって、このカレドニア期の花崗岩は再熔融・ミグマタイト化タイプに入れることができる。

ヘルシニア花崗閃緑岩は大バソリスとの関係があまり密接でない小岩体のようで、岩種は中性にかたより、化学組成の特徴は MgO 含有率 (5.1%) と Cr 含有率が高いこと、各種微量元素に乏しいことで、これはある2, 3の鉱物 (輝石・かんらん石) に関連した特徴と推定でき、塩基性マグマの分化と誘導分岐の結果に関係があるとするすることができる。

燕山花崗岩は多期・多次貫入生成体であり、弱変成堆積側岩は明らかに貫入を受けた貫入接触関係を示し、そして燕山花崗岩は各種の造鉱元素、稀元素、稀土類元素などの微量元素・微量元素に富み、同時に SiO₂ と K₂O+Na₂O にも富んだ岩石に属する。最近の内外の花崗岩に関係した実験データから考えると、この燕山花崗岩は地殻上部の深部熔融と分化でかなりよく説明できるようである。

岩石



第2図 微量元素の分析の結果

最末期の中性・塩基性小貫入体は本地域には多数みとめられ、花崗岩体中に群をなして分布し、急傾斜を示し、潜頭深部裂かに結びついたものと思われる。化学組成は塩基性岩(輝緑玄武岩)に近く、 TiO_2 (1.46%)と MgO (7.02%)に富み、鉄族元素を除くと各種の微量元素に乏しく、地質時代と結びつけて特徴を分析すると、その傾向はこれを独立した貫入生成体に入れるべきものであった。この小貫入体は上部マントルと地殻深部の物質が深部裂か帯に沿って上昇し、直接貫入した結果で、そのマグマが地殻を比較的浅い所で同化し、花崗岩化作用を与え、それによって複雑な岩石構成を生ずるにいたったという可能性が大きい。

燕山花崗岩内部の8回の貫入(γ_1^2 から γ_8^2)は、その規模の大小、空間的分布関係、岩石学的・地球化学的、絶対地質年代などからすれば、4期のマグマ活動に属するものである。すなわち、第2期が斑状黒雲母花崗岩(γ_2^2)、第3期は主貫入岩体が小斑状両雲母花崗岩(γ_3^2)で、副次的に細粒両雲母花崗岩(γ_3^{2-1})が貫入し、第4期は主貫入岩体が中粒両雲母花崗岩(γ_4^2)、副貫入岩体が細粒黒雲母花崗岩と花崗斑岩(γ_4^{2-1})であり、第5期は主貫入岩体が中粒両雲母花崗岩(γ_5^2)、第1副貫入岩体が両雲母花崗斑岩(γ_5^{2-1})、第2副貫入岩体が細粒両雲母花崗岩(γ_5^{2-2})である。副貫入岩をそれと同じ期の主貫入岩と比較してみると、岩体の規模が小さく、岩石組織が一般に細かいが、空間的分布位置と生成時期は主貫入岩に接近しており、さらに岩石学的・地球化学的特徴もよく似ている。以下、各主要貫入期の貫入岩の岩石学的・地球化学的特徴を簡単に述べ、比較検討してみよう。

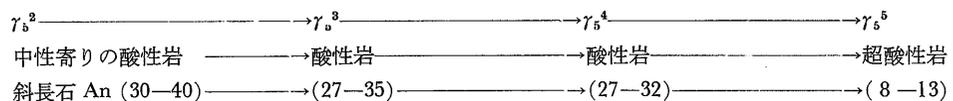
第2期の斑状黒雲母花崗岩は中性に寄った酸性岩(An 30-40)であり化学的な特徴点は P_2O_5 と TiO_2 に富むことで、そのことが副成鉱物の構成に反映して燐灰石とチタン鉄鉱の含有率がきわめて高く(第4表)、岩石そのものや黒雲母、長石の分析結果が一致して示しているようにV・Crの含有率が高いことも特徴的である。

第3期の小斑状両雲母花崗岩は最大の特徴点が一定方向に配列した小粒の狭長な微斜長石斑晶に富むことで、さらに岩石の化学組成では K_2O (6.13%)に富み、 CaO と MgO に乏しく、ジルコンの結晶形態では{131}の発達を特徴とし(第5表)、微量元素が比較的少なく、岩石・黒雲母・長石中にはいずれもV・Cr・Niがやや多い。

第4期中粒と粗粒の黒雲母花崗岩はノーマルな花崗岩に属し、斜長石はAn 27-32で、最大の特徴点は造岩鉱物が2世代のものからなることである。すなわち、第1世代の鉱物は粗粒、中粒、あるいは巨粒の斑晶、第2世代の鉱物は細粒・中粒の「石基」を構成するものであり、両世代の鉱物間の比率が変わるにしたがって構造・組織の異なる岩石を形作り、第1世代の鉱物が少ないときには花崗斑岩となり、圧倒的に多いときには粗粒ないし中粒の黒雲母花崗岩である。もう一つの特徴点は常に明瞭な微文象構造を備え、交代作用による曹長石化が発達することである。岩石の化学組成は SiO_2 に富み、 P_2O_5 (0.07%)と TiO_2 (0.16%)に乏しく、微量元素はYb, Yt, Li, Sn, Nbに富むことも特徴的で、副成鉱物の種類の多さを反映し、稀土類鉱物、モナズ石、磷酸イットリウム鉱なども生成している。

第5期中粒両雲母花崗岩は超酸性花崗岩に属し、斜長石がAn 8-13で、石英含有率が SiO_2 75.9%ときわめて高く、白雲母が鉄とリチウムに富んだ白雲母(Li_2O 0.59%)に相当し、多くは黄玉が認められる。上記の第4期の黒雲母花崗岩によく似ていて、同じく常に2世代の造岩鉱物(とくに副貫入岩体の場合に明瞭)があり、ナトリウム交代作用が発達し、岩石化学的な特徴点は SiO_2 と Na_2O の含有率ももっとも高く、 CaO , MgO , FeO , Al_2O_3 の含有率ももっとも低いことにある。岩石、長石、黒雲母の分析結果はいずれもNb, Li, Sn, Wに富むことを示し、副成鉱物の中では普遍的に螢石、輝水鉛鉱、黄鉄鉱、ざくろ石などが認められる。したがって、鉱物構成と元素組成はこの第5期中粒両雲母花崗岩がF, Hのような揮発成分と造岩元素に富むという特徴を示している。

以上第2期から第5期に向かって上記岩石の岩石学的性質、岩石化学的性質、副成鉱物、微量元素、Zr/Hf比は次のような変化傾向を有する。



石英含有率(%) 26.7 → 34.4 → 39.4 → 45.5
 黒雲母含有率(%) 13.3 → 5.8 → 4.2 → 1.3
 燐灰石含有量 (g/t) 606.7 → 182.9 → 49.3 → 5.1
 褐簾石含有量 (g/t) 157.3 → 31.4 → 17.9 → 0.53
 ZrO₂ 含有率(%) 63.2 → 62.7 → 60.4 → 58.8

岩石化学: SiO₂, アルカリ係数 (第 3 図) が漸増, TiO₂, Al₂O₃, FeO が漸減

微量元素: Nb, W, Li が漸増, V, Cr, Ni が漸減 (第 2 図)

曹長石化作用: 次第に強くなる

したがって, 第 2 期から第 5 期に向かって, 珪素, 稀元素, 稀土類元素などと揮発成分が漸増し, FeO, P₂O₅, TiO₂, V, Cr, Ni, Zr などの元素が漸減するが, これはマグマの進化の方向性と分化の特徴を, すなわち Fe, Mg, Ca とさらに V, Cr, Ni などの元素がマグマの早期貫入体の固結段階で中性長石, 黒雲母と一部の副成鉱物の結晶中に加わり, それから後期貫入体を作る残漿中に集まり, 相対的に Si, K+Na と揮発成分が濃集し, 造岩鉱物中に存在する分散し難い Nb, W, Li, Sn などの元素も相対的に濃集した。

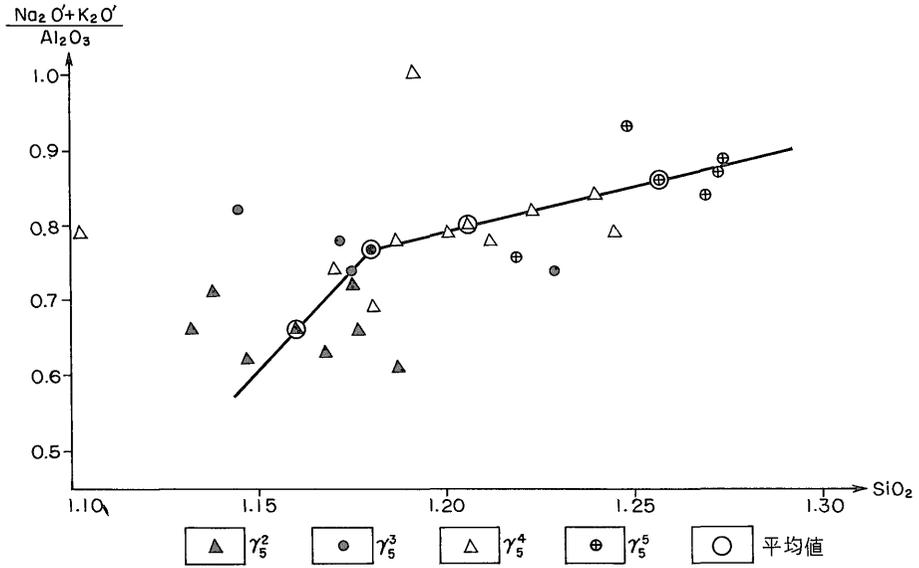
このことが南嶺地域と燕山花崗岩の関連金属鉱床の豊富な主要原因の一つとなり得る。

燕山花崗岩は, 上述の多期マグマ分化作用の進化の全体的な傾向を除いて, 第 2 期・第 3 期のものと第 4 期・第 5 期のものを比較すると, 生成環境が完全には一つでないように思われる。

第 4 期の黒雲母花崗岩 (γ_4^1) は岩相の変化が大きく, 造岩鉱物に 2 世代のものがあリ, 斜長石と微斜長石がすべて累帯組織を備え, この期のマグマ岩が不安定な地質条件下で形成されたことを物語っている。とくにその周縁相として細粒黒雲母花崗岩と花崗斑岩が現われ, さらに常に急冷周縁相などを有し,

第 5 表 ジルコンの

順序	マ グ マ 岩	試料数	結 晶 形 態	長さ:幅	色
4	中性・塩基性貫入体 β	2	柱面(100)と(100)(110) 錐面(111)発達	2.5:1~2:1	淡 褐 色
3	燕 山 花 崗 岩	中粒両雲母花崗岩 γ_5^5	(100)(111)(100)(111)やや発達, さらに(110)(100)と(111)集合体あり	1:1.5~2:1	淡 褐 色 乳 白 色
		黒雲母花崗岩 γ_5^4	(110), (100) どちらかが発達, 錐面(111)	1:1.5~2:1	淡 褐 色 幾つかが灰色
		小斑状両雲母花崗岩 γ_5^3	(100), (110), (131)ときには(111)を欠くことがある	1.5:1~2:1	淡 褐 色 無 色
		斑状黒雲母花崗岩 γ_5^2	(110)(100), (201)(111), 多くの(110)と(100)は同等に発達	2:1~1.5:1	褐色, 淡褐色, 多くは無色
2	ヘルシニア後期花崗閃緑岩 γ_4^1	2	柱面(110), (100), 錐面(111), ときには(100)(131)(311)(111)が同等に発達	2:1~1.5:1	褐色, 淡褐色, 少数のものが無色
1	カレドニア片麻状花崗岩 γ_3	2	柱面(100)(110) 偏錐面(311)(131)	3.4:1~2:1	褐 色 鳶 色



第3図 アルカリ係数と珪酸の関係

特 徴 と Zr/Hf 比

包 有 物	試料番号	ZrO ₂ (%)	平 均	HfO ₂ (%)	平 均	Zr/Hf	平 均
少ない							
なし	20	58.8	58.8	2.15	2.15	22.9	22.9
少数の黒色包有物	6	60.5	60.4	1.50	1.60	34.50	32.06
	7-815	60.5		1.70		29.90	
	7	60.3		1.60		31.81	
ごく少数の黒色包有物	7-531	62.7	62.7	1.50	1.50	35.7	35.7
結晶内に気泡が多い 少数の黒色包有物	7-1057	59.5	63.2	1.60	1.69	31.4	32.65
	19	65.0		1.70		32.1	
	15	62.0		1.40		38.2	
	9	65.4		1.80		31.3	
	12	64.4		1.90		29.8	
	23	63.0		1.78		33.1	
結晶内に気泡が多い 少数の黒色包有物	2	56.3	53.4	1.2	1.0	41.6	44.2
	25	50.5		0.58		46.8	
黒色包有物がある 個々の結晶はなめらかに丸い	27	63.1	62.9	1.70	1.70	31.1	31.7
	10	61.4		1.70		30.3	
	3	64.2		1.60		33.9	

第6表 2種の花崗岩の2・3の元素,

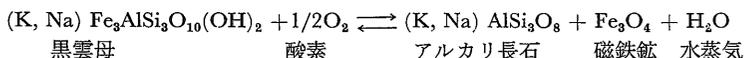
第四期の 黒雲母花崗岩 (7 ₅ ⁴)	試料 番号	岩石の化学組成 (%)							岩石中の副成鉱物 (g/t)		
		FeO	Fe ₂ O ₃	FeO + Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	$\frac{Fe_2O_3}{FeO + Fe_2O_3}$	磁鉄鉱	チタン 鉄	チタン石
	7-815	0.63	1.54	2.17	0.16	12.47	4.56	0.71	1701.54	35.00	7.31
	7-940	0.44	1.86	2.30	0.16	11.96	4.71	0.81	343.83	4.4	—
	7-1047	0.40	2.06	2.46	0.12	12.40	4.65	0.83	231.65	81.13	×
	平均	0.49	1.82	2.31	0.15	12.24	4.64	0.78	759.00	40.18	0-7.31
第斑母 二状花崗 期黒雲 母花崗 (7 ₅ ²)	7-1057	1.24	1.64	2.88	0.32	14.09	5.00	0.56	10.55	53.17	—
	7-987	1.04	1.62	2.66	0.40	13.61	4.71	0.60	11.94	90.32	—
	平均	1.14	1.63	2.77	0.36	13.85	4.85	0.58	11.24	71.74	—

この黒雲母花崗岩の晶出条件が比較的浅い所であったことを示して、浅い深成岩に属する。

第2期の斑状黒雲母花崗岩 (7₅²) は岩相の分布が一定し、造岩鉱物は1世代のもので、結晶粒度は粗大であり、微斜長石斑晶と捕獲岩は一定方向に配列し、周縁相の岩石が発達せず、局部的に同化・混生現象がみられる。これはすべて、晶出環境が第4期の黒雲母花崗岩の場合と異なることを物語っており、比較的深い、安定した、加圧構造的な地質条件下で生じたことを物語っている。

第4期の黒雲母花崗岩は鉄(酸化物)を2.31%含有し、第2期の斑状黒雲母花崗岩は同じく2.77%含有してその差がいちじるしく小さいが、主な含鉄鉱物である黒雲母、磁鉄鉱、チタン鉄鉱の場合は含有量とその特徴の面で全く異なり(第6表)、黒雲母花崗岩は磁鉄鉱759 g/t、チタン鉄鉱40.2 g/t、黒雲母5.7 g/tを含有し、また黒雲母はFeO+Fe₂O₃を27.61%含んでいる。そして、斑状黒雲母花崗岩は磁鉄鉱11.2 g/t、チタン鉄鉱71.7 g/t、黒雲母14.2%を含有し、この黒雲母はFeO+Fe₂O₃を23.92%含んでいる。明らかに、黒雲母花崗岩は斑状黒雲母花崗岩に比較して磁鉄鉱が約75倍、チタン鉄鉱がほぼ1/2、黒雲母がほぼ1/3、黒雲母中の総FeO+Fe₂O₃含有率が3.7%高い。このため、花崗岩中のほとんど大部分のFeを占める磁鉄鉱と黒雲母の生成量の多少および黒雲母成分の特徴はマグマ中のFe総含有量に規制されるだけでなく、マグマ晶出過程での地質条件とも物理化学条件とも関係がある。すなわち、

1. 実験研究の資料 [8, 9, 10] が明らかにしているように、黒雲母-アルカリ長石-磁鉄鉱組合せでは次のような反応式が成り立ち得る。



この式から、水蒸気の逸散(水の分圧の低下)につれて酸素(上記反応式中の1/2O₂)の分圧が相対的に高くなり、酸素の逸散度fo₂(ある酸素分圧)が上昇すればするほど磁鉄鉱とアルカリ長石の側への反応が進みやすくなり、それによって黒雲母花崗岩中には大量の磁鉄鉱が生じ、相対的に黒雲母の含有量が少なくなっているわけで、このことは黒雲母花崗岩が斑状黒雲母花崗岩に比べてマグマ晶出時の酸素逸散度(fo₂)が高かったことを示している。

2. 黒雲母の成分の変化は酸素逸散度、温度、総圧力のある程度いちじるしく変化する3変数 [11] によって決まり、たとえば温度と圧力が一定か、あるいは変動の小さい条件下では黒雲母のFe₂O₃含有量の多少は酸素の逸散度の変化に規制される。このために、黒雲母花崗岩の黒雲母はFe₂O₃を6.62%含み、斑状黒雲母花崗岩の黒雲母のFe₂O₃5.32%よりも1.3%多いのである。これは黒雲母花崗岩のfo₂が斑状黒雲母花崗岩のfo₂よりも高いと言いあらわすことができる。

3. 鉄の酸化係数(Fe₂O₃/(FeO+Fe₂O₃))は上記2種の花崗岩で異なり、黒雲母花崗岩の鉄の酸化係数は0.78、斑状黒雲母花崗岩の場合は0.58で、前者の黒雲母の鉄の酸化係数は0.24、後者の黒雲母では0.22であり、したがって岩石と黒雲母の鉄の酸化係数は黒雲母花崗岩の晶出時の化学的酸化力が斑状黒雲母花崗岩の場合よりも高い。すなわちfo₂が高いことをはっきりと示している。以上の事実は、相

副成鉱物，黒雲母の特徴の比較

岩石中の含有量 (%)	黒雲母の特徴								
	黒雲母	Fe ₂ O ₃	FeO	FeO + Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	$\frac{Fe_2O_3}{FeO + Fe_2O_3}$
4.1	6.56	23.53	30.10	7.36	3.36	14.37	4.76	0.22	1.652
6.2	6.77	21.43	28.20	5.69	3.12	14.02	9.66	0.24	1.647
7.2	6.51	18.02	24.53	4.66	2.60	17.17	7.71	0.26	1.645
5.7	6.62	21.00	27.61	5.30	3.02	15.15	7.38	0.24	1.648
12.4	5.18	19.58	24.76	5.20	2.86	17.00	9.06	0.21	1.634
16.0	5.50	17.63	23.13	7.27	3.28	15.60	8.75	0.23	1.632
14.2	5.32	18.61	23.92	6.24	3.70	16.30	8.91	0.22	1.633

対的に早期に貫入した斑状黒雲母花崗岩に比較すれば、相対的に後期の黒雲母花崗岩の晶出条件が相対的に高い酸素逸散度 (fo₂) を備えていたことを物語っている。このような状況と後期のノーマルな花崗岩質マグマ分化生成体の多くが比較的低い fo₂ しかもっていない [12, 13] という事は矛盾しているが、それは以下に述べる状況、すなわち本地域の後期マグマ貫入体（黒雲母花崗岩 γ₂）は地殻の比較的上部レベルで、しかも相対的な開口構造条件（断裂）の所で固結し、そのため一部の大気酸素が反応に加わることができ、あるいはまたマグマ中の水蒸気が当該断裂に沿って部分的に逸散する結果（上記の式参照）となり、したがって fo₂ が上昇してくることに結びつけることができる。この黒雲母花崗岩とノールウェー・スコットランド [14] の花崗岩の晶出条件はある程度似たところがある。以上のように、地質と岩石の資料および地球化学的な資料を分析した結果は、すべて黒雲母花崗岩が浅所地質環境で生成され、斑状黒雲母花崗岩が比較的深度の地質条件の中で形成されたことを物語っている。

2種の両雲母花崗岩 (γ₂, γ₃) を比較すると、生成条件の面ではよく似た傾向をもっているが、どちらかといえば小斑状両雲母花崗岩 (γ₃) は斑状黒雲母花崗岩に、中粒両雲母花崗岩 (γ₂) は黒雲母花崗岩に似ている。すなわち、第2期の斑状黒雲母花崗岩と第3期の小斑状両雲母花崗岩は比較的深度の、しかも比較的稳定した地質環境で形成され、第4期の黒雲母花崗岩と第5期中粒両雲母花崗岩は比較浅所の、しかも比較的不安定な地質環境の中で形成されている。

結 論

- 1つのバソリス内で花崗岩の多期貫入による接触関係と貫入順序を直接観察し、同位地質年代の資料によってその貫入順序の可否を概略証明することができる。そのようにして、諸広山地域に11回以上のマグマ活動があったことが識別できたが、それは当該地域一帯の地殻の不安定性と構造運動の多期多段階性を反映しており、なかでも燕山期のマグマ活動の強度と頻度をもっとも高いピークを示している。
2. 上記4時代のマグマ岩の特徴はそれぞれ異なり、起源を異にし、成因を異にする生成体の可能性が強い。
3. 多数の岩石と鉱物を分析した結果は古期から新时期に向かって燕山各期の花崗岩の組成が次第に変化する傾向のあることを示しており、珪素，稀元素，稀土類元素およびその他の造鉄元素や揮発成分などが次第に増し、FeO, TiO₂, P₂O₅, V, Cr, Ni, Zrなどが次第に減って、明らかに燕山各期の花崗岩が分化の特徴を備えていることを物語り、これが正に南嶺地方の、とくに燕山全期の金属鉄床の豊富な、主な原因であることを物語っている。
4. 燕山第4期と同第5期の花崗岩の鉱物組み合わせと鉱物含有量の特徴は酸素の逸散度が高いという証跡を有すると同時に、第4期の黒雲母花崗岩の黒雲母が相対的に高い Fe₂O₃ 含有率 (6.6%) を備えていることで、さらにその岩石と黒雲母が相対的に高い酸化係数を有すること (それぞれ0.78, 0.24) な

どは当該期の花崗岩が高い酸素逸散度を備え、再結合して岩相の変化が大きく、急冷周縁相の生成と 2, 3 の鉱物が特徴的であることをすべて説明しており、燕山期第 4 期と第 5 期の花崗岩は浅所・不安定地質環境下の生成体に属するものと解されるが、第 2 期と第 3 期の花崗岩の地球化学的性質、鉱物組合せ、鉱物の特徴、岩相の変化などは第 4 期・第 5 期の場合と全く相反している。したがって、第 2 期と第 3 期の花崗岩は比較的深所の安定した地質条件下で生成した可能性が強い。

調査・研究・執筆・出版などに当たって、広東省地質局所属地質調査隊の絶大な支援を受け、地球科学研究所中央分析研究室、同位体地質研究室、写真班、出版班、図書館など各組織の積極的な協力と塗光熾・覃慕陶両同志の具体的な援助・指導を受け、付図を劉鴻珍同志が製図された。末筆ながら、ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 徐克勤ほか(1963) 華南多旋廻の花崗岩類の侵入時代、岩性特徴、分布規律及其成砒專屬性的探討。地質学報, 43巻, 第 1 期。
- 2) 南京大学地質系(1974) 中国南部不同時代花崗岩類及其与某些金属砒床的成砒關係。中国科学, 第 1 期, 52—62頁。
- 3) PETROV V. P. (1972) Magma and genesis of magmatic rocks. p. 17—28 (in Russian).
- 4) KISTLER R. W. (1971) Sierra Nevada plutonic cycle. part I, Origin of composite granitic batholith. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 82, pp. 853—868.
- 5) TUTTLE O. F. (1958) Origin of granite in the light of experimental studies in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-KAlSi}_3\text{O}_8\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, 74, p. 153, pp. 54—80.
- 6) BATEMAN P. C. (1967) Sierra Nevada batholith. *Science*, vol. 158, pp. 1407—1417.
- 7) SHIPULIN F. K. (1957) Intrusive rocks of South-Eastern Primor'ye and the relation with their ore mineralization. Press of USSR Academy of Science, Moskwa, p. 268—277 (in Russian).
- 8) RUTHERFORD M. J. (1969) An experimental determination of iron biotite-alkali feldspar equilibria. *J. Petrology*, vol. 10, pp. 381—408.
- 9) WONES P. R. (1965) Stability of biotite. experiment, theory and application. *Am. Mineral.*, 42, pp. 1228—1272.
- 10) OSTROVSKII I. A. (1958) Experiments in some silicate systems with volatile components. Tr. gotovogo soveshchaniya po eksperimental'noi i tekhnicheskoi mineralogii i petrografii 1956, Moskwa, p. 214—219 (in Russian).
- 11) EUGSTER H. P. (1962) Stability relations of the ferrugious biotite, annite. *J. Petrology*, vol. 3, pp. 82—125.
- 12) BEST M. G. (1967) Composition and crystallization of mafic mineral in the Guadalupe igneous Complex, California. *Am. Mineral.*, vol. 52, pp. 436—474.
- 13) DODGE F. C. W. (1969) Biotite from granite rocks of the Central Sierra Nevada batholith, California. *J. Petrology*, vol. 10, pp. 250—271.
- 14) HASLAM H. W. (1968) The crystallization of intermediate and acid magmas at Ben Nevis, Scotland. *J. Petrology*, vol. 9, pp. 84—103.