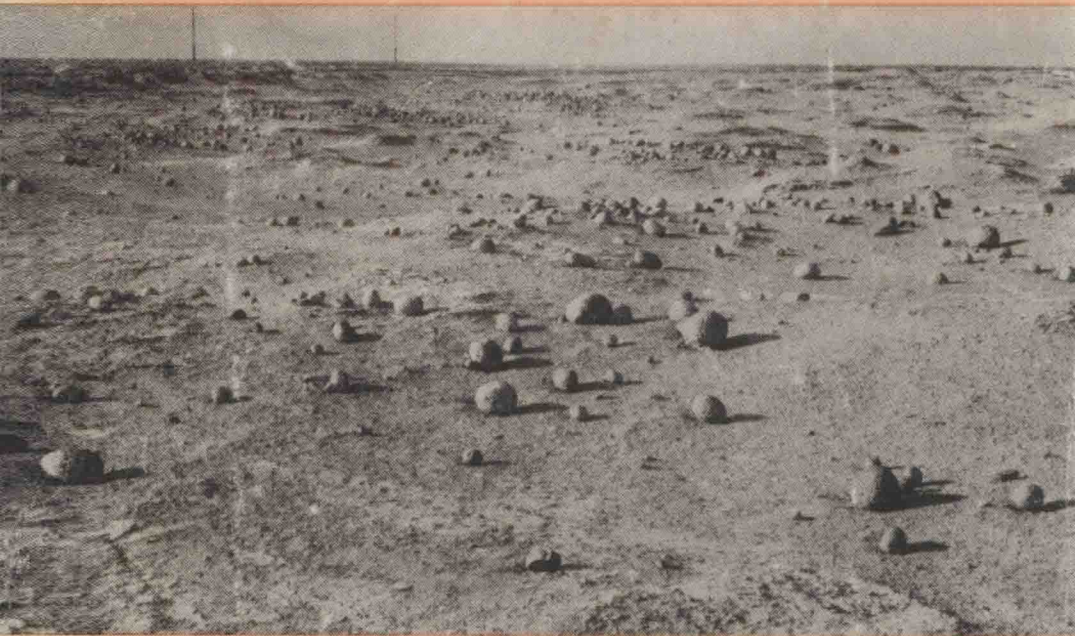


大專用書

地函之成分與岩石學

陳汝勤譯



國立編譯館出版

大 專 用 書

地 函 之 成 分 與 岩 石 學

陳 汝 勤 譯

國 立 編 譯 館 出 版

中華民國七十三年九月一日台初版

地函之成分與岩石學

版權所有
翻印必究

定價：精裝新台幣叁佰伍拾元
平裝新台幣叁佰壹拾元

譯者：陳汝勤

出版者：國立編譯館

印行者：國立編譯館

館址：台北市舟山路二四七號

電話：三二一六一七一

譯者序言

本書為國立澳洲大學倫屋（A E Ringwood）博士所著主要利用實驗岩石學、地球物理及地球化學之論證討論地函之成分與岩石學。原著對地殼、上部地函、及深部地函之成分、礦物相、岩石成因等均有詳盡之討論，並對過去二十年來實驗岩石學文獻詳加引用，本書第一部之重點在於岩石學與礦物學論據之闡釋，第二部則著重於地球物理、地球化學與結晶學。本書可供地球科學學者參考，亦可於研究所中作為岩石學或地球化學之教本。譯者不揣謏陋將原書譯出貢諸國人。翻譯時承林斐然、許群育、陳隆輝、賴燕尼、潘伯榕諸先生協助，又承顏滄波教授審閱，譯者在此謹致謝意。譯者才疏學淺，譯文中錯誤難免，尚希專家及讀者，加以匡正。

陳 汝 勤 謹識於

國 立 台 灣 大 學

引 言

0-1 一些透視

過去的 25 年見證了固態地球科學的重大進步。這些進步如海底擴散與板塊構造 (plate tectonics) 的假說已產生了驚人而迅即的衝擊。這衝擊乃由於假說的新奇性以及能為本來相當分歧的地球物理與地質的觀察提供一整體的可行解釋。在其它學科內，例如：地球內部的組成，也有重大進步，雖然其衝擊沒有如此地戲劇性；僅在翻閱 25 年前所發表的關於同一主題的論文及書本時，此學科內的最近進步之程度及意義才變得完全明顯。經常地，此進步並不由於基本上新觀念的引進，而是因為對許多相互競爭的假說挑選能力之改進。所以地心主要由鐵金屬組成的假說是源於古老的系統；然而，只有在新近才有可能提升此假說至一科學理論之地位，而使一些與其競爭的假說，如地心由橄欖石之高壓金屬形 (註 1) 或原始太陽系的物質 (註 2) 所組成之學說等被貶黜到可被忽視之地位。相似的，認為相轉變在地函 (mantle) 中扮演重要角色的提議形成於許多年前；然而，1950 年早期，此假說被認為還在爭論中，一些不以相轉變來解釋地函物理性質的替代假說被提出而只最後這 10 年內，相轉變的情況才被證明為無庸置疑。

早先於 25 年以前，大部分 (註 3) 討論固態地球的論文與書本主要為地質學者及地震學者所寫的，他們的訓練背景之間只有有限的意見交流。地質學者們通常專力於自然與地殼的演化 (註 4)，並且

除了少數例外，拒絕嚴謹地觀察地函的組成與演化。從上部地函的泛稱Sima（矽鎂層）與ultrasima（超矽鎂層）的廣泛使用即此心態的寫照。關於地殼下地球的知識卻來自於地震學，因隨深度而變化的P—波與S—波速度用來決定地球內部的主要分層，如Jeffreys（註5）與Gutenberg（註6）測定的這些速度加上地球平均密度與內部轉動慣量使Bullen（註7）能決定各深度的密度、壓力與彈性性質。這些資料經過Jeffreys（註8），Bullen（註9），Gutenberg（註10）及Birch（註11）的手中，能使與地球內部物質的性質與本質有關的作業假說遂以建立。

這些科學家特別強調從基本地震資料導出的許多推論畫之嘗試性的及不確定的本質。Birch的一個註腳在這方面被廣泛引用（註12）。關於地球物理資料與推論的不確定性，Gutenberg 有一更廣泛的討論（註13），值得注意。當不可能於實驗室中直接實驗以檢定有關地球深處內部的假說時，這些科學家們對於地球物理方法的結果與限制所做的謹慎評價可說是完全合理且正當的。然而地球科學最近的發展使我們得以對未來採取一較文後參考書目中隱含的態度更為樂觀的看法。

如此樂觀是基於兩項進步：一為高溫高壓實驗技術應用於可能存在於地球深處內部的岩石與礦物的性質及穩定範圍，以及地球內部深處之岩漿生成的物理化學作用的研究。如今在實驗室中可以穩定的仿製深約800公里處地函的溫壓情況且可能不久將來可發展到相當的深度範圍。結晶化學的應用，尤其是Germanate 模型系統的研究在可達到的實驗壓力範圍內，提供大量關於與地函在所有壓力範圍相當的矽化物可能穩定性與行為的資料。礦物之壓縮係數之測量可在約相當於800公里深的靜壓力下完成，而可應用於地函的所有壓力範圍的狀態方程式之建立所需的資料，都可由P—波與S—波對溫壓之導數的

準確測定得來。靜力高壓技術現在輔以動力（如震波）方法，能產生壓力超過地心（約 3.7 百萬巴）達數個微秒之久。這段時間內足以決定關鍵性的狀態方程式之度數及其它重要性質如電導度等，這些技術如在他們想像中，已經可以用來檢定基於地震資料的很多假說。目前階段是高壓研究所建議的假說，僅能由日增的地震技術所支持。這些學科間互相作用，已夠接近，必須在將來這幾年大為增進且能建立一廣泛自足的地球模型以解釋觀察所得達可理解範圍。

第二個樂觀的因素來自地球科學日益廣濶及交互訓練的現象。過去的 25 年中，來自不同的訓練背景運用個別技巧解決地球科學問題的科學人員之數量與範圍已見大量擴增。結果，有些範圍如海洋地質與地物，地球化學與宇宙化學，同位數地球化學，實驗岩石學，及地球物理的很多分支等，皆有驚人的進展。這些進展正在且將繼續產生一些地球科學的大部分基本問題的解答。從不同訓練背景的專家們之合作計劃引起一些進展，因此造成的智慧交流的結果成一重要角色。

在任一訓練背景內，能滿足某一群觀察現象之解釋往往並非唯一，此非唯一性日增妨碍研究進展。這情形在幾年前已被察覺，例如：對重力觀察所得的說明。這些說明除非與地震研究一致，否則其價值有限。推論之，由地面波或自由振盪來的資料所獲得之地球模型極少是唯一的，且常能以一些無分軒輊之模型來符合這些資料。爲了進一步縮小選擇之範圍，地震學者須考慮其它學科證據，例如：假定地函物質的狀態方程式之應用或岩石本質的限制。地球化學家與岩石學家亦處於相似的地位，並且如果他們想要提出具一般性的假說，須考慮評估其它學科導致的限制。所以，地球科學未來的進展愈有賴於個別理論的專家能意見交流及解釋相鄰訓練背景的工作者所得的結果。只有如此之科際研究才能規劃一地球內部模型，以較高的一致性解釋得自許多學科的觀察。而因此這模型才具有較高之可能性成爲正確性。

由方法來解決地球科學問題是一理想，被一些明顯的實際困難所困擾。近年出版的文獻數量之大量增加，使某學科的專家難於適當的熟悉相關學科的重大進展。應用於地球科學的基本知識與技術的範圍實在廣泛得使個人無法精通。因此，當一專家偶而涉獵他的領域之外而企圖引用別的學科之知識時，常易發生錯誤。經常的，專家發現其它理論範圍的結論與他自己範圍的相矛盾。如此若欲達成綜合，不得不權衡相矛盾的證據而作判斷，當然此判斷必然是部分主觀的。面對此情況，難免作綜合結論者視自己領域所得證據的份量重於其它他不熟悉的領域得來的矛盾證據。在本書內將可發現不少其例子。

不論地球科學的學者受了多廣泛的教育背景，此一基本問題是不易消失的。然而，不管此一先天限制，由不同訓練背景的科際研究法仍是求進步的主要的先決條件。

0-2 地球內部的主要區分

此乃根據由 Jeffreys (註 14) 與 Gutenberg (註 15) 及後人測定的地震波速度的深度分布 (圖 0~1)。雖然這些速度分布後來有明顯修改，大的特徵仍未改變。速度—深度剖面將地球分為一些特定區域，首先為 Bullen (註 16) 所命名為 A、B、C、D、E、F 及 G 區。但如今，我們喜用較具描述性的術語，如“地殼”定義為地表到莫合不連續面 (mohorovicic discontinuity)，此面在大陸區域底下約 30 ~ 50 公里深而在海洋區域底下約 10 ~ 12 公里深處。地殼以下直到 400 公里深處為“上部地函”，這地區以速度分布之區域變化及極低速度 (低速帶)，尤其是 S 一波及低速度梯度之普遍存在為其特徵。除了在低速帶的邊界外都如此。“過渡帶”在 400 ~ 1,000 公里，其特性為平均有高速度梯度。最近研究 (註 17, 18) 顯

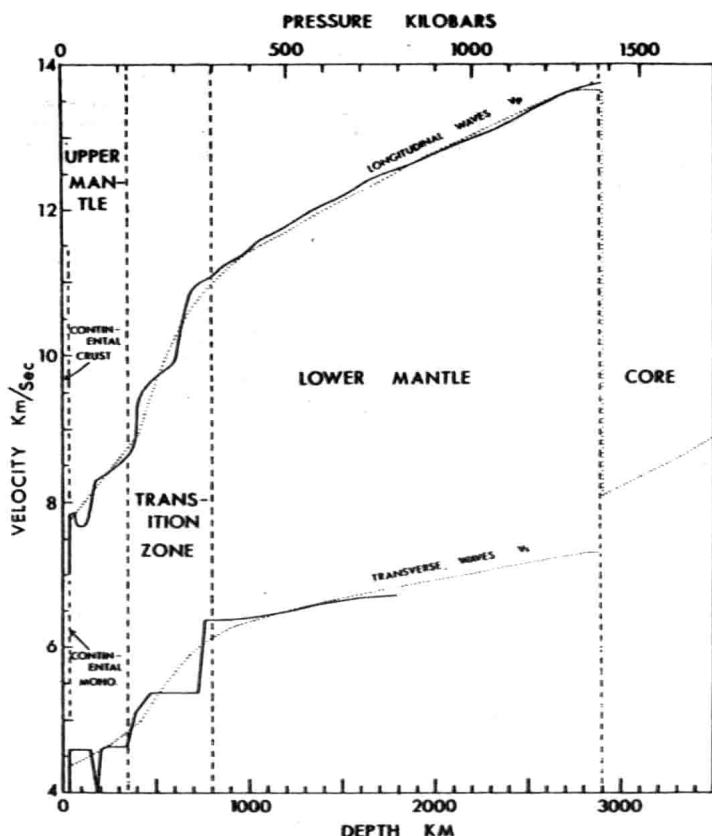


FIGURE 0-1

Seismic velocity distributions in the mantle. *P* waves—solid line: Johnson (1967, 1969); *S* waves—solid line: Nuttli (1969); broken lines—Jeffreys (1939).

示此區域總速度增加集中於兩特定深度 400 與 650 公里附近間距。“下部地函”為 1,000 ~ 2,900 公里範圍，其中除 2,700 ~ 2,900 公里速度稍微減少外，深度越大速度均勻增加。有時將“過渡帶”與“下部地函”合稱為“深部地函”較方便，指 400 ~ 2,900 公里範圍。“地心”的邊緣約在 2,900 公里深處，特徵為主要的 *P* 波的第一階地震不連續及 *S* 一波傳播之停止。地心分為兩區域，“外心”與“內心”，如圖 0~2 所示。各區分的向度與質量如表 0~1。

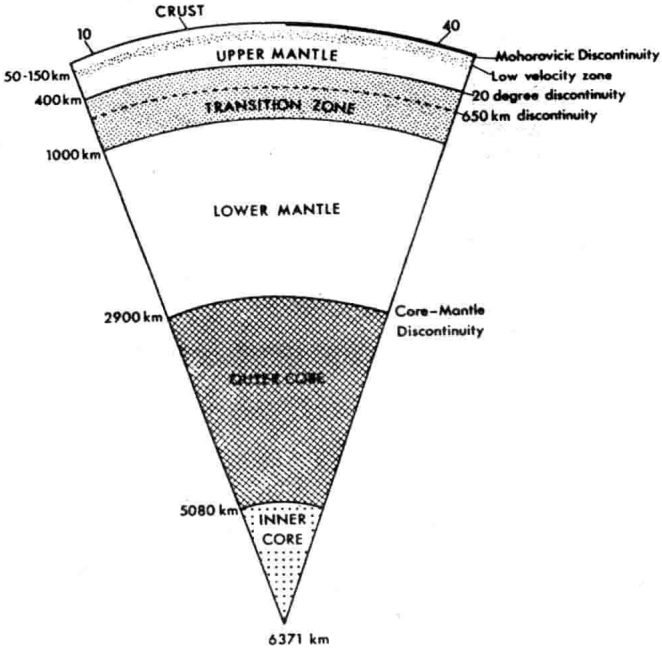


FIGURE 0-2
Principal subdivisions of the earth.

Table 0-1 DIMENSIONS AND MASSES OF THE INTERNAL LAYERS*

Region	Depth to boundaries (km)	Fraction of volume	Mass (10^{23} g)	Fraction of total mass	Fraction of mass of mantle
Crust †	0-Moho	0.008	2.4	0.004	0.006
Upper Mantle	Moho-400	0.16	62	0.10	0.15
Transition Zone	400-1000	0.22	100	0.17	0.24
Lower Mantle	1000-2900	0.44	245	0.41	0.6
Outer Core	2900-5100	0.154	189	0.32	
Inner Core	5100-6371	0.008			

*Based on Bullen (1947), Birch (1952).

†Based on Poldervaart (1955).

由地震標示的地殼定義已被普遍採用。然而有些學者採用流動學之性質來定義地殼而造成了混淆。依此用法，地殼指外在的，相對地，剛性的硬殼具長期實質強度而在一較弱的流動殼上。一般鎂鐵岩與超鎂鐵岩的流動學性質是依溫度而變，但對於相變化與化學成分變化較無反應，故莫合不連續面與一般流動學性質上之不連續面不相符合。根據Daly（註19），我們對外在剛性層稱“岩石圈”而其下較弱區域稱“軟流圈”，此即被認為是與低速帶相同者。

註1：Ramsey（1948，1949）。

註2：Kuhnl. Rittman（1941）。

註3：此敘述所說重要觀念中有Goldschmidt的地球化學論文及Vening Meinesz的地球重力場研究。

註4：E.g., Daly, Holmes。

註5：Jeffreys（1939）。

註6：Gutenberg（1951，1958，1958b）。

註7：Bullen（1939，1940）。

註8：Jeffreys（1939，1959）。

註9：Bullen（1940，1947）。

註10：Gutenberg（1951，1959a,b）。

註11：Birch（1952）。

註12：Birch（1952，p.234）：不謹慎的讀者應該注意當應用於地球內部時，一般用語往往轉變成誇張形式，例如：

誇張形式	通常意義
確定	可疑的
無疑的	也許
正面證明	模糊提議
無可回答的爭論	淺薄瑣碎的異議
純粹鐵	所有元素的不確定混合物

註13：Gutenberg（1959a,pp.1—7）。

註14：Jeffreys（1939）。

註15: Gutenberg (1951 , 1958 , 1959b) 。

註16: Bullen (1947) 。

註17: Niazi and Anderson (1965) 。

註18: Johnson (1967) 。

註19: Daly (1940) 。

参考文献

- BIRCH, F. (1939). The variation of seismic velocities within a simplified earth model in accordance with the theory of finite strain. *Bull. Seis. Soc. Am.* 29, 463-479.
- (1952). Elasticity and the constitution of the earth's interior. *J. Geophys. Res.* 57, 227-286.
- BULLEN, K.E. (1936). The variation of density and the ellipticities of strata of equal density inside the earth. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc., Geophys. Supp.* 3, 395-400.
- (1940). The problem of the earth's density variation. *Bull. Seis. Soc. Am.* 30, 235-250.
- (1947). *"An Introduction to the Theory of Seismology."* Cambridge, New York. 276 pp.
- DALY, R.A. (1940). *"Strength and Structure of the Earth."* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 434 pp.
- GUTENBERG, B. (1951). PDDP, $p'p'$ and the earth's core. *Trans. Am. Geophys. Union* 32, 373-390.
- (1958). Velocity of seismic waves in the earth's mantle. *Trans. Am. Geophys. Union* 39, 486-489.
- (1959a). *"Physics of the Earth's Interior."* [International Geophysics Series, vol. 1, J. V. Miegheem (ed.).] Academic, New York. 240 pp.
- (1959b). The asthenosphere low-velocity layer. *Ann. Geofis. Rome* 12, 439-460.
- JEFFREYS, H. (1939). The times of P, S and SKS and the velocities of P and S. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc., Geophys. Supp.* 4, 498-533.
- (1959). *"The Earth,"* 4th ed. Cambridge, New York. 420 pp.
- JOHNSON, L.R. (1967). Array measurements of P velocities in the upper mantle. *J. Geophys. Res.* 72, 6309-6325.
- (1969). Array measurements of P velocities in the lower mantle. *Bull. Seism. Soc. Am.* 59, 973-1008.
- KUHN, W., and A. RITTMAN (1941). Über den Zustand des Erdinnern und seine Entstehung aus einem homogenen Urzustand. *Geol. Rundschau* 32, 215-256.
- NIAZI, M., and D.L. ANDERSON (1965). Upper mantle structure of western North America from apparent velocities of P waves. *J. Geophys. Res.* 70, 4633-4640.
- NUTTLLI, O.W. (1969). Travel times and amplitudes of S waves from nuclear explosions in Nevada. *Bull. Seism. Soc. Am.* 59, 385-398.
- POLDERVAART, A. (1955). Chemistry of the earth's crust. In: A. Poldervaart (ed.), *"Crust of the Earth,"* pp. 119-144. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper* 62.
- RAMSEY, W.H. (1948). On the constitution of the terrestrial planets. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 108, 406-413.
- (1949). On the nature of the earth's core. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc., Geophys. Supp.* 5, 409-426.

目 錄

引 言

0-1 一些透視	1
0-2 地球內部的主要區分	4
參考文獻	8

第一部 地殼與上部地函

第一章 一些主要地殼岩型的礦物穩定區域	3
1-1 簡 介	3
1-2 輝長岩—榴輝岩轉變的實驗研究	4
1-3 岩石學上之應用	12
1-4 與轉化相關的物理性質的改變	22
1-5 酸性—中性岩石的穩定區域	24
參考文獻	29

第二章 地殼的成分	32
2-1 穩定的大陸區域之地殼	32
2-2 大陸造山區的地殼	45
2-3 海洋地殼	49
2-4 莫氏不連續的性質	58
參考文獻	69

第三章	上部地函的成分	77
3-1	簡 介	77
3-2	具特徵性的物理標準	78
3-3	阿爾卑斯型橄欖岩與蛇綠岩複合體的意義	83
3-4	源自地函的捕虜岩	103
參考文獻		118
第四章	玄武岩質岩漿的來源	127
4-1	簡 介	127
4-2	高溫高壓下矽質玄武岩與鹼性橄欖石玄武岩中結晶平衡	134
4-3	鹼性橄欖石玄武岩，碧玄岩與霞石岩之間關係的實驗資 料	147
4-4	高壓含鋁輝石分化在鹼性玄武岩岩源中所扮演角色的直 接證據	150
4-5	地函中部分熔融所形成的玄武岩漿	152
4-6	涉及玄武岩岩源的部分熔融與分體結晶	163
4-7	M. J. O'Hara 的岩源假說	173
參考文獻		180
第五章	玄武橄欖岩模型	185
5-1	簡 介	185
5-2	玄武橄欖岩的成分	188
5-3	玄武橄欖岩地函與球粒隕石的地球模型	198
5-4	海洋矽質玄武岩與玄武橄欖岩模型	204
5-5	地球的熱變史	207

參考文獻	209
第六章 上部地函的組成	215
6-1 震波結構	215
6-2 岩石分帶	220
6-3 低速帶	233
參考文獻	238
第七章 造山火成岩類	243
7-1 簡 介	243
7-2 造山火成岩系之礦物學及化學	244
7-3 空間—時間關係	252
7-4 在大氣壓力下的結晶作用	255
7-5 造山火成岩系成因的早期理論	257
7-6 在高水壓下經由地函部分熔融而產生的造山火成岩系 ..	261
7-7 水在造山岩漿之形成上所扮演的角色：角閃石分體作用	267
7-8 榴輝岩分體作用所扮演的角色	280
7-9 深成的造山岩系	289
參考文獻	291
第八章 地殼及上部地函之岩石演化	299
8-1 簡 介	299
8-2 隱沒帶之一些地球物理特性	301
8-3 島弧環境中之岩漿成岩作用	306
8-4 地殼演化	313

8-5	上部地函之分化作用	319
8-6	莫氏不連續之起源	325
8-7	板塊構造和深部地函	326
	參考文獻	335

第二部 深部地函

第九章	由地球物理得到的一些推論	341
9-1	簡 介	341
9-2	深部地函之密度分布和不均勻性質	343
9-3	彈 性	346
9-4	經驗的速度—密度關係	356
9-5	地函的導電性	366
	參考文獻	369

第十章	研究地函相的轉化之實驗方法	373
10-1	簡 介	373
10-2	間接的方法	374
10-3	用間接方法所得結果之摘要：1952 — 1965	385
10-4	研究地函相的轉化之直接方法	387
	參考文獻	407

第十一章	A_2BO_4 化合物中之高壓轉化作用	413
11-1	橄欖石—尖晶石— β 相之轉化	413
11-2	$Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4$ 系統	424
11-3	地函中橄欖石之轉化作用	429
11-4	尖晶石和 β 相轉化成鉛酸鋁構想	431

11-5	高壓下 $A_2^{++}B_4^{++}O_4$ 尖晶石之不均衡	434
11-6	$A^{++}B^{3+}O_4$ 尖晶石之轉化	437
11-7	橄欖石中更進一步的轉化作用	443
11-8	Mg_2SiO_4 變為較 $MgO + SiO_2$ 之同化學性混合物要 緻密的構造之可能轉化作用	441
11-9	A_2BO_4 構造型式間的密度關係	447
參考文獻		450

第十二章	ABO_3 型化合物之高壓轉化作用	455
12-1	輝石變成尖晶石+金紅石結構的不均衡	455
12-2	輝石-鈦鐵礦轉化作用	458
12-3	輝石-石榴子石之轉化作用	461
12-4	石榴子石-鈦鐵礦轉化作用	473
12-5	石榴子石及鈦鐵礦轉化為鈣鈦礦型結構	477
12-6	ABO_3 結構的相對體積	482
12-7	雲母橄欖岩捕房體中輝石-鈦鐵礦交錯生長的意義	484
參考文獻		490

第十三章	各種物質之轉化作用	495
13-1	鹼性鋁矽酸塩及鋁鎢酸塩之轉化作用	495
13-2	高壓之水合鎂矽酸塩類	501
13-3	Al, Sc, In, Zr 以及 Hf 矽酸塩類之轉化作用	503
13-4	一些簡單的氧化物之轉化作用	506
參考文獻		512

第十四章	深部地函之組成	515
------	---------------	-----